



Академія наук вищої школи України

**Розвиток фізичних теорій
(історія фізики в постатях, ідеях та подіях)**

Навчальний посібник

Максим Стріха, д.ф.-м.н., професор

**Рецензенти: І.О. Анісімов, д.ф.-м.н., проф.
А.М. Веклич, д.ф.-м.н., проф.**

Київ

2025

Навчальний посібник до курсу «Розвиток фізичних теорій» для студентів факультету радіофізики, електроніки і комп'ютерних систем / М.В.Стріха, д.ф.м.н., проф.. – К.: ВЦ «Київський університет», 2025. - 474 с.

Затверджено Вченою радою
факультету радіофізики,
електроніки та
комп'ютерних систем,
протокол №8
від 26 січня 2021 року

Світлій пам'яті мого Батька,
професора Віталія Іларіоновича Стріхи,
який зробив мене фізиком, присвячую.
Автор

ВСТУП

Фізику іноді називають «головною наукою» сучасності (саме їй людство переважно завдячує ті тектонічні зміни, які відбулися в його способі життя впродовж другої половини ХХ століття). Разом із тим, ця наука — вже й один із найважливіших компонентів загальнолюдської культури. І стеження за головними віхами становлення чотирьох найголовніших фізичних теорій (механіки, теорії теплоти, теорії електромагнітних явищ, квантової фізики) може не лише допомогти читачеві виробити науково-теоретичний спосіб мислення, але й принести насолоду від справжнього захопливого інтелектуального детективу.

Є чимало надзвичайно цікавих науково-популярних книг 1960-80 років з історії фізики, авторами яких, зокрема, є видатні науковці сучасності (деякі назви наведено наприкінці посібника, в списку рекомендованої літератури) — на них виростало середнє й старше покоління активних нині українських науковців. Але видання тих років уже малодоступні для сьогоденних українських читачів — студентів та дослідників.

А нових якісних видань, рівня нещодавно перекладеного українською мовою бестселера нобелівського лауреата Стівена Вайнберга «Пояснюючи світ. Історія сучасної науки», чи книжок відомої оксфордської серії «Дуже короткий вступ», що їх почало друкувати видавництво «Навчальна книга — Богдан», маємо обмаль, хоч у деяких

загальнофізичних підручниках (як-от, «Квантова механіка» Івана Вакарчука, «Математичні методи теоретичної фізики» Анатолія Свідзинського) зроблено докладні екскурси в історію еволюції фізичних уявлень.

Нарешті, фактично недоступним сьогодні є вже й посібник «Фізичні теорії: люди, ідеї, події» (2012), написаний автором разом із Валерієм Ільченком та Олександром Проказою, що мав на меті заповнити лакуну загальнодоступного й цікавого провідника сторінками історії розвитку фізичних знань.

У цьому новому посібнику автор спробує простежити, як упродовж століть змінювалася специфіка наукового пізнання, як відбувалося становлення й розвиток чотирьох вищезгаданих найголовніших фізичних теорій, як проходила еволюція (а часом — і революційні зміни) уявлень людей про фізичну картину світу.

З метою «олюднення» фізики багато уваги приділено видатним ученим, причетним до створення її основних розділів. Авторіві залежало на тому, щоб показати їх живими людьми, з їхніми пошуками, сумнівами і навіть слабкостями. Адже історія фізики — то не лише хронологічна послідовність відкриттів. Це насамперед — захоплива розповідь про шляхи, яким рухалася до них людська думка, про події (наукові, політичні, культурні), на тлі яких ці відкриття відбулися. Обізнаність із викладеними фактами автор вважає показником загальної освіченості молодого фізика, його науково-історичної ерудиції, врешті-решт — долученості до загальнолюдської культури.

Розповідати про історію науки — складно. Не випадково визначний український філософ і культуролог Мирослав Попович (1930 – 2018) наголошував: «Як, наприклад, сьогодні слід писати про Ньютона? Викладати біографію й аналізувати особистість сера Ісаака чи розповідати про основи Ньютонової фізики? Мабуть, можливі обидва шляхи. Адже науки як чогось, що існує поза людськими головами, не можна собі уявити: книги самі по собі, поки їх не читають, є лише папір і друкарська фарба. Фізика, як кажуть, є те, що роблять фізики. Для яснішого розуміння підставових ідей Ньютонової механіки слід простежити, як, під яким впливом, з огляду на які традиції вона реально складалася в її засновника. Із другого боку, можливий і інший виклад, виклад ідей і методів, що не пов'язані безпосередньо з інтелектуальною біографією їх творця, а є радше сучасними формулюваннями, котрі виявились би незрозумілими й навіть, можливо, неприйнятними фундаторові цієї сфери знань, але які по суті залишаються його дітищем».

Відмінного від описаних Мирославом Поповичем двох шляхів підходу дотримувався у своїй фундаментальній, написаній спершу російською мовою, «Історії фізики» (2006, 2-ге вид. 2015) сучасний український історик науки Юрій Храмов. Свою розповідь він супроводив біографічним словником тих діячів фізики, яких було добрано за строго формалізованими критеріями (для сучасних українських фізиків

«перепусткою» до словника стало, наприклад, членство в АН УРСР та НАН України — і тому поза цим словником виявилися згадані вище Іван Вакарчук, Анатолій Свідзинський та багато інших яскравих університетських професорів). Усі біографічні довідки про вчених складено за однаковою схемою: навчався, працював, створив (мабуть, єдино прийнятною для енциклопедичного довідника — але дуже небагатьох людей здатне захопити читання статей з енциклопедій).

Автор цього посібника лише підхід Юрія Храмова для стандартних наукових монографій та енциклопедичних видань, а натомість зосереджується на першому варіанті, запропонованому в повищій цитаті Мирославом Поповичем, намагаючись подати історію розвитку головних фізичних теорій на широкому історико-культурному тлі. Причому показати, як відкриття і закони виникали в їхньому первісному формулюванні, яке часом доволі істотно відрізняється від сучасного.

Водночас автор не намагатиметься дати наскрізної картини розвитку фізики «від Арістотеля до наших днів», а зупинятиметься окремо на кожній із чотирьох головних фізичних теорій. На цьому шляху будуть неминучі «повернення», хронологічні й персональні перетини, адже великі уми минулого часто виявляли себе відразу в кількох царинах. Але саме так ми зможемо простежити хід розвитку наукової думки — в усьому драматизмі, притаманному історії кожної з теорій.

Будуть також екскурси в «сусідні» науки, і навіть у філософію. Адже саме філософія допомагає фізику шукати відповіді на питання, з якими не впорасешся лише за допомоги традиційних формул і вимірювань. І в основі не лише фізики, але й усіх природничих наук лежать ряд філософських принципів, які були вироблені впродовж століть розвитком людської думки і верифіковані величезною кількістю спостережень для найрізноманітніших ситуацій.

Перший принцип стосується засадничої пізнаваності світу. Давні люди схильні були вбачати в усіх подіях непередбачувану волю богів, яку годі намагатися зрозуміти чи пояснити. Але, спостерігаючи впродовж віків закономірності й повторюваності різних природних явищ, іще в сиву давнину мислителі прийшли до приголомшливого висновку: *природу можна осягнути розумом*.

Другий важливий філософський принцип, який ми за умовчанням використовуємо й досі, проголошує: *причини породжують наслідки*. Фізика сьогодні зазвичай дотримується правил причинно-наслідкового зв'язку, сформульованих у 1738 р. шотландським філософом Девідом Юмом (1711 – 1776): «причина й наслідок повинні сусідити в просторі й часі... причина повинна передувати наслідку... Однакова причина повинна завжди призводити до того ж самого наслідку, і той самий наслідок виникає лише з певної однакової причини».

Третій принцип корисний для вибору між теоріями. «Лезо Оккама» (назва походить від імені англійського філософа й теолога 13-14 століть

Вільяма Оккама) вимагає обрати між кількох конкурентних гіпотез найпростішу, засновану на найменшій кількості припущень.

Четвертим основоположним засновком сучасної природничої науки є віра в те, що американський фізик нобелівський лауреат Юджин Вігнер (1902 – 1995) назвав *«незбагненою ефективністю математики»*. Від простих ранніх застосувань арифметики до обчислення площ і до сьогоднішніх ускладнених математичних теорій ми виявляємо, що на позір абстрактна дисципліна математика якимось чином лягає на реальний світ, надійно його описуючи й передбачаючи його поведінку, і часто - навіть для явищ, які лежать поза первісним призначенням цього математичного опису. Вігнер писав, що «величезна користь від математики для природничих наук межує з таємницею», але ця безсумнівна користь є надзвичайно важливою для фізики.

Саме до філософських принципів учені звертаються у найбільш нестандартних ситуаціях. Ще раз надамо слово філософові Мирославі Поповичу: «...уявімо на хвилину, що Всесвіт розширюється, а разом із ним розширюються і лінійки та інші способи вимірювання простору, і люди. Встановити факт зміни просторового положення неможливо. Спростувати гіпотезу теж неможливо. Чи не варто її прийняти? Відповідь ньютоніанців звучала так: *hypotheses non fingo*, зайвих гіпотез не вигадую. “Бритвою Оккама” такі припущення просто обрізають. Ляйбніціанці (прихильники Ньютонового сучасника, німецького філософа й математика Ляйбніца¹, про якого йтиметься далі, — *авт.*) натомість за відправну точку брали те, що коли двох припущень уживають із тими самими наслідками в спостереженні, то вони мають однаковий сенс. Але ж «розширюватися» — це не те ж саме, що не змінюватися в обсязі, скажете ви! Ляйбніціанець відповів би: з людського погляду — так. Але з погляду Бога — ні. Для Бога безконечний Всесвіт, що розширюється, і незмінний Всесвіт нерозрізнувані».

Звичайно, саме постановка такого питання здається прагматикові дивним чи й таким, що виходить за межі здорового глузду. Втім, лишається нагадати, що так само «за межами повсякденного здорового глузду» були колись теорія відносності й квантова механіка. І нині такою багатьом здається ідея десятивимірного простору, що базується на теорії струн, чи уявлення про вакуум як про надщільне середовище, а про звичайну матерію — як про його «розрідження» тощо. А тому вміння зазирнути часом за поріг усталених уявлень аж ніяк не зайве для того, хто присвятив життя вивченню загадок Природи, або того, хто хоче настановити на шлях дослідника інших.

¹ У цій книзі автор дотримується чинного Українського правопису, затвердженого Урядом України в 2019 р. Тому скрізь пишемо: Ляйбніц, Айнштайн, Гайзенберг, Голл, Ватт тощо (а не як колись, за російським зразком, Лейбніц, Ейнштейн, Гейзенберг, Холл, Уатт), що, врешті-решт, значно краще передає звучання цих імен та прізвищ у мовах-джерелах.

Адже знання як результат процесу пізнання світу є суперечливим за своєю суттю. Справді, з одного боку знання є продуктом ідеальним — але з другого боку воно є могутньою матеріальною силою, а надто в нашу інформаційну добу.

Розуміння цілей пізнання, завдань науки, суті знання та його ролі в суспільстві весь час зазнавало змін протягом людської історії. Античні мислителі розглядали знання перш за все як результат споглядання зовнішнього світу, наслідок дискусій на «високі» теми, один із виявів мудрості людини, елемент її духовної, внутрішньої досконалості.

Типовим представником такого ставлення до знання був грецький філософ Платон. Він пов'язував знання зі спроможністю людини до правильного, доцільного, етичного життя. За Платоном, знання — джерело мудрості й високої моральності окремої людини та суспільства.

У новий час ставлення до знання істотно змінилося. Англійський філософ XVII століття Френсіс Бекон проголосив: «Знання — сила!». За визначенням Бекона, «людина — це слуга й тлумач Природи. Знання і могутність людини тотожні». Справжнє завдання науки «не може бути інакшим, аніж наділяти людське життя новими відкриттями й благами». Ці слова написано 1620 року. З твердження Бекона впливало, що знання можна і треба втілити в матеріальну потугу. Така думка стала панівною спершу в Європі, а потім і в цілому світі. Розвиток техніки й виробництва в подальші століття послужив прекрасною ілюстрацією цієї ідеї Бекона.

Нині, коли стає очевидним, що ресурси планети Земля обмежені, і з цим потрібно рахуватися й урядам при визначенні стратегічних рішень, і окремим громадянам у своїй повсякденній поведінці, на порядку денному постає питання про синтетичне платонівсько-беконівське ставлення до знання як до поєднання моральності й матеріальної сили.

Надамо ще раз слово сучасному українському фізиківі-теоретикові Іванові Вакарчуку, котрий завершує свій підручник «Квантова механіка» словами: «Автор далекий від тієї думки, ніби вичерпно пізнавати навколишній світ можна лише послідовним нарощуванням логічних зв'язків у вигляді тверджень і рівнянь. Є інші підходи, які не потребують мови рівнянь, а використовують, наприклад, засоби мистецтва. Ці різні шляхи взаємодоповнювальні. Саме тому ми намагались проводити порівняння різних явищ, що описуються квантово-механічними законами та законами класичної фізики, наводили аналогії з історії, музики, мистецтва... Тут ми стикаємось з відомою проблемою двох культур, із взаємодією образного і логічного мислення».

Важливо й пам'ятати: попри заклик Френсіса Бекона до пошуку утилітарної користі, багатьох дослідників Природи приваблювала насамперед її краса. Великий французький математик Анрі Пуанкаре на початку XX ст. писав: «Учений досліджує природу не тому, що це приносить користь; він досліджує її, бо вона приносить йому радість, а радість вона приносить, бо вона прекрасна. Якби природа не була прекрасною, її не варто було б досліджувати, а якби її не варто було

досліджувати, то не варто було б і жити. Звісно, я не говорю про красу, яка вражає чуття, яка виявляється в речах зовнішніх; я зовсім не применшую значення такої краси, але науці немає діла до неї; мені йдеться про глибшу красу гармонійшого ладу складових, яку здатний ухопити лише чистий розум».

Показати, як відбувалося це переплетення користі й краси в інтелектуальних пошуках визначних фізиків минулого — ще одна мета цієї книги.

Про поетику пізнання і красу наукових законів

Позитивні емоції, що виникають у процесі пізнання, поетизують цей процес, роблять його радісним. Велика інформаційна місткість наукових понять, законів і теорій дозволяє досягати суті фізичних явищ простіше, витонченіше, красивіше.

Принцип простоти в пізнанні має тривалу історико-філософську й історико-наукову традицію. Його коріння сягає далекого середньовіччя. Вже згадуваний англійський філософ і теолог Вільям Оккам (бл. 1285–1347), котрий викладав у Оксфордському університеті, а пізніше через звинувачення в ересі був змушений тікати в континентальну Європу, сповідував такий принцип пізнання: не множити сутностей без необхідності. Цей принцип відомий ще як «брита Оккама» (саме цю назву вжито в наведеній вище цитаті з українського філософа Мирослава Поповича), і згідно з ним наукова теорія має будуватися на мінімальній кількості вихідних посилок.

Красу природи вбачали в її простоті багато мислителів: Джордано Бруно (1548–1600), Рене Декарт (1596–1650), Бенедикт Спіноза (1632–1677), Готфрід Ляйбніц (1646–1716), французькі просвітителі XVIII століття, класики німецької філософії Іммануїл Кант (1724–1804) і Георг Гегель (1770–1831). Ідея простоти природи проходить червоною ниткою через історію природознавства. Віра в простоту служила найбільш дієвим стимулом наукового дослідження природи.

Саме таку пізнавальну позицію поділяли Коперник, Галілей, Ньютон, Френель, Максвелл та інші. На підтвердження цього можна навести чимало прикладів з історії науки. Упорядкованість (той «лад складових», про який писав Пуанкаре) у природі насправді поєднується з хаосом, гармонія з дисгармонією, одноманітність із різноманіттям. Тому треба говорити не про якусь універсальну красу природи, не про простоту дійсності, яка насправді складна й багатоманітна, — а про простоту вираження знань про цю складну дійсність, про таку простоту, яка має евристичне значення в процесі пізнання (тобто через сукупність прийомів дослідження і навчання з допомогою навідних питань). Саме ця простота поетично красива.

Сучасна наука відкинула твердження про простоту як нібито фундаментальну властивість природи й по-новому поставила питання про простоту як принцип пізнання, тобто про евристичну простоту. Але це вже «складна простота».

Загальновідомо, що пізнання природи завжди починається з фактів. Проте знання фактів не є справжнім знанням. Американський фізик-теоретик, один із творців теорії надпровідності, нобелівський лауреат Леон Купер зазначав, що «просте збирання фактів без будь-якої системи нагадує бібліографічний кабінет, словник випадкових слів, або той нудний і непотрібний каталог, який інколи плутають з наукою. Наука нічого не могла б зробити, якби знання було просто клубком заплутаних фактів або випадкових спостережень».

Наука не може обмежитися констатацією фактів. Учений шукає сутнісні зв'язки, що ховаються за цими фактами, тобто наукові закони. Ці закони розкривають суть явищ, установлюють єдність у різноманітті, що дає можливість не лише пояснювати, але й передбачати фізичні явища. Цінність, простота й краса закону в тому й полягає, що він розкриває загальне, тобто пояснює «лінію поведінки» фізичного об'єкта в певних умовах. Закон, розкриваючи загальне в явищах дійсності, обов'язково містить у собі й одиничне.

Те, що на описовому рівні наукового пошуку виражається в «морі фактів», у законі фіксується в короткій, простій і красивій фразі, а в природничих науках, зокрема у фізиці, часто в красивій знаково-символічній математичній формі (згадаймо про вігнерівську «незбагненну ефективність математики»). У цьому сенсі закон завжди простіший від того неосяжного й різноманітного — а тому складного — емпіричного матеріалу, який він замінює, вбирає в себе й ніби концентрує у собі.

Загальні закони є інформативно місткішими, але водночас і простішими. Багатий науковий зміст передбачає мінімум знакових засобів для свого вираження. Численні досліди Фарадея, викладені знаменитим експериментатором на понад тисячі сторінках його лабораторних зошитів, стисло й красиво описано вишуканими рівняннями Максвелла.

Закони науки є структурними елементами наукових теорій, які відображають ширшу царину об'єктивних зв'язків, аніж окремих наукових законів. Кожна загальніша теорія на основі принципу відповідності ніби вбирає в себе менш загальну теорію, вказуючи для неї межі застосовності. Наукова теорія тим досконаліша, чим більше фактів вона пояснює за мінімальної кількості початкових положень.

Проте математичний апарат «простої» теорії часто виявляється досить складним. Через складність вираження суті досягається простота теорії. Так слід розуміти вислів «складна простота».

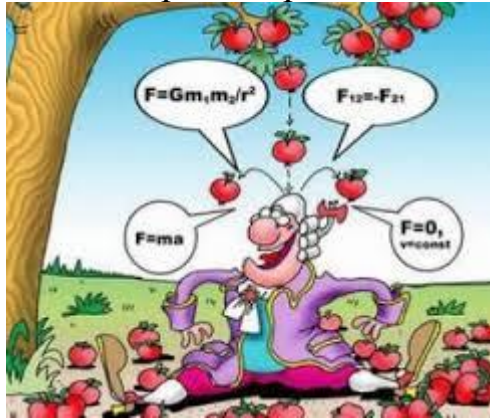
Про витонченість і красу рівнянь Максвелла Гайнріх Герц захоплено й натхненно написав: «Вивчаючи цю дивовижну теорію, не можна не відчувати, що її математичним формулам властиве самотійне життя і власна

свідомість, що вони розумніші за нас, розумніші навіть за свого творця, що вони дають нам більше, ніж у них було закладено спочатку».

Наукове пізнання — це відкриття невідомого й одержання вірогідних знань про світ. Важливо мати правильне уявлення про те, як відбувається пізнавальний процес і які його закономірності. Ці питання належать до теорії пізнання (гносеології). «Теорія пізнання поза взаємодією з наукою стає порожньою схемою. Наука без теорії пізнання примітивна і безладна» (Альберт Айнштейн).

Вихідним началом гносеології є вже згаданий принцип пізнаваності світу. Справді, перш ніж ставити перед собою завдання пізнати щось, відкрити закономірність, суб'єкт пізнання має бути переконаний, що він береться до справи хоча й важкої, але в принципі здійсненної. Важливо також, що суб'єкт пізнання використовує знання, вже наявні на цьому етапі розвитку людства.

Правда, дехто вважає, що багато великих відкриттів і винаходів зроблено завдяки щасливому випадку на основі натхнення й творчого осяяння. Як яскравий приклад називають знамените «яблуко Ньютона».



Ньютон і яблука, які «народили» в його голові чотири закони (сучасний шарж)

Цей випадок описав дотепний французький мислитель XVIII ст. Вольтер, а почув він про нього нібито від племінниці самого Ньютона. Історія потрапила на сторінки багатьох книг, хоча в «Математичних принципах натуральної філософії» Ньютона, в його листах і численних рукописах немає жодної згадки про яблуко. Сам Ньютон писав, що не він здогадався першим про існування всесвітнього тяжіння і що ця заслуга належить, швидше за все, Кеплеру або Гуку, а, може, й іншим ученим. Найбільша заслуга Ньютона полягала в тому, що він уперше сформулював закон усесвітнього тяжіння, спираючись на закони вільного падіння тіл Галілея й закони руху планет Кеплера. А розмірковував про рух небесних тіл Ньютон практично все своє життя.

«Історію з яблуком» не без іронії прокоментував знаменитий німецький учений XIX століття Карл Гаусс: «Не розумію, як можна припускати, що цей випадок міг уповільнити або прискорити таке відкриття. Ймовірно, було так: причепилася до Ньютона недалеко й

нав'язлива людина з питанням про те, яким чином він міг прийти до свого великого відкриття. Ньютон побачив, з ким має справу, і, щоб відкараскатися, відповів, що йому впало на ніс яблуко. Таке пояснення цілком задовольнило цікавість того пана».

Реальний фізичний світ різноманітний, а тому — складний. Пізнати його «кавалерійською атакою» неможливо. Тому в процесі пізнання створюються ідеальні фізико-математичні світи, що тією чи іншою мірою відображають окремі сторони реального світу. Ці ідеальні фізико-математичні світи називаються теоретичними моделями реального світу. А в реальному світі можна виділити ще й «рукотворний» світ, світ сучасної техніки, без якої важко уявити собі сьогоденне життя.

Хитросплетіння й закономірності пізнавальних процесів щодо одиничних фізико-математичних об'єктів простежмо на конкретному прикладі.

Томаса Алву Едісона, автора тисячі дев'яноста дев'яти технічних винаходів, вважають творцем електричної лампочки розжарювання. Після його смерті, щоб увічнити пам'ять про науковця, було спроектовано величезний обеліск-хмарочос. На вершині запропонували поставити електричну лампу з прозорого скла завбільшки в церковну баню. Ночами вона мала світити яскравим світлом, ніби маяк. Чи заслужив Едісон на такий пам'ятник?



Перша успішна модель лампочки Едісона (1879 р.)

Дати й факти свідчать:

не Едісон першим навчився розжарювати дріт електричним струмом;
не Едісон першим додумався до головної «хитрості» — розжарювати нитку без доступу кисню, щоб вона світила, не згораючи;

не Едісон першим здогадався запаяти волосок у порожню скляну колбу;

не Едісон першим використовував тугоплавке вугілля, що витримує температуру сліпучого розжарювання.

Назвімо науковців та інженерів, причетних до винаходу лампи розжарювання: Грове (1840), де Молейн (1841), Стет (1848), Гебель (1854),

де Шанжі (1858), Адамс (1867), Лодигін (1873), Дідріхсон (1875), Кон (1877), Булігін (1877), Яблочков (1878), Фокс (1878), Сван (1879), Едісон (1879).

Тож чому саме Едісона вшановують як винахідника лампи розжарювання? А тому, що саме Едісону випало зробити останній, але надзвичайно важливий крок. Едісон зміцнив вугільну нитку, зробив її більш зносостійкою. Нитки попередніх ламп були слабкі й крихкі, вони розсипалися від поштовхів і легко перегорали. А Едісон виготовив гнучку, міцну, пружну вугільну нитку, яка не боялася струсів і могла горіти тисячу годин поспіль. Саме після цього розпочалося широке практичне застосування лампочок розжарювання.

Аналогічний процес виникнення дуже багатьох інших відкриттів, — не лише технічних пристроїв, але й фундаментальних фізичних явищ, і читач у цьому неодноразово переконається, гортаючи сторінки цієї книжки.

Світ фізичних явищ багатий і різноманітний. Попри це, більшість із цих явищ можна віднести до однієї з чотирьох взаємозв'язаних і взаємопроникних областей: механіки (або ж класичної механіки), термодинаміки, електродинаміки й квантової механіки. Суть перебігу цих явищ подається у вигляді своєрідної системи знань. Ця система знань називається фізичною теорією.

Як створюють теорії? Великий німецький поет, і водночас дослідник природи, автор наукових праць Йоганн Вольфганг фон Гете бачив це так: «Кожне споглядання переходить у спостереження, кожне спостереження — в міркування, кожне міркування — у виявлення важливого зв'язку; і можна сказати, що кожного разу, коли ми уважно вдивляємося у світ, ми створюємо теорію». Отже, досліди й спостереження — джерело знань. Проте теоретичні міркування можуть виявитися тільки цікавим, але безплідним мудруванням, якщо їх не буде підтверджено практикою. Тож дослід — не лише джерело знань, але й критерій істини.

Фізична теорія, яка історично першою набула високого рівня завершеності — це класична механіка. Її творцем по праву вважають англійського вченого Ісаака Ньютона, котрий 1687 року опублікував свою фундаментальну працю «*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*» — «Математичні принципи натуральної філософії». А основи для цієї теорії заклав італійський учений Галілео Галілей, котрого вважають батьком сучасної експериментальної фізики (її попередниця — Арістототелева фізика — базувалася не на досліді, а на розмірковуваннях).

Але до Галілея та Ньютона наука вже пройшла багатовіковий шлях, осмислюючи явища природи і пропонуючи моделі для їхнього опису. Тому у вступній частині нашого посібника ми здійснимо короткий огляд розвитку фізики від часів античності й до XVII століття й зупинимось, бодай побіжно, на постатях попередників Галілея та Ньютона, чий досягнення так само лягли в підмурівок сучасної науки. Зразу ж зауважимо, що фізика «до Ньютона» була тотожна насамперед механіці (і

часто — механіці небесній, яка є частиною астрономії). Помітну увагу вчених давнини привертала й питання оптики. І лише в зародковому стані перебували тоді електрика та вчення про теплоту, які щойно почали накопичувати окремі емпіричні факти.

«ДИТИНСТВО» ФІЗИКИ

Епоха Античності

(VI ст. до н.е. — V ст. н.е.)

Що відбулося:

585 р. до н.е. Фалес Мілетський передбачив сонячне затемнення — перша достеменно відома дата в хронології науки.

IV століття до н.е. Зародження елементів механіки. Розгляд прямолінійних і криволінійних рухів. Установлення правила додавання переміщень, перпендикулярних одне до одного, правила рівноваги важеля (Арістотель).

Правильне уявлення про поширення звуку в повітрі (тіло, що звучить, спричиняє стискання й розрідження повітря).

IV–II ст. до н.е. Виникнення першої моделі Всесвіту — геоцентричної системи світу (Евдокс, Арістотель, Гіппарх).

III–II ст. до н.е. Виникнення ідеї геліоцентричної системи світу (Арістарх Самоський).

Перші спроби визначення відстані до Місяця й до Сонця (Арістарх Самоський).

Архімед розробив наукові основи статички, ввів поняття про центр ваги й момент сил відносно прямої й площини, визначив центр ваги трикутника, дав строгу теорію важеля, сформулював правило додавання паралельних сил, відкрив основний закон гідростатики (закон Архімеда), визначив умови плавання тіл.

Ератосфен з високою точністю виміряв окружність Землі.

I–II ст. н.е. Герон Александрійський дав детальний опис важеля, корби, клина, гвинта й блока, встановив правило для важеля й блока, описав прилад, що є прообразом сучасної парової турбіни.

Клавдій Птоломей надав завершену форму геоцентричній теорії Всесвіту (система світу Птолемея).

Люди спостерігають природу

Люди давніх епох значно більшою мірою відчували себе частиною природи, аніж ми. Довгими ночами вони мали значно більше часу й можливостей спостерігати за зоряним небом. Найпершим результатом спостережень стало розуміння того, що весь усипаний зірками небосхил (їх ще в давнину поділили на сузір'я, назви яких пов'язали з різними

міфологічними сюжетами) обертається навколо спостерігача впродовж доби в напрямку від сходу до заходу. Водночас такі найяскравіші об'єкти небосхилу, як Сонце й Місяць, рухаються на тлі «нерухомих» зірок в напрямку із заходу на схід, проходячи повне коло за рік і за 29,5 діб відповідно. Під час свого річного руху Сонце послідовно проходить дванадцять сузір'їв, пізніше названих сузір'ями Зодіаку.

Уважніші спостереження, здійснювані багатьма людськими поколіннями, показали, що між нерухомими зірками є п'ять зірок, які насправді теж переміщуються. Пізніше їх було названо «планетами», і сьогодні ми знаємо їх під іменами римських богів і богинь: Меркурій, Венера, Марс, Юпітер і Сатурн. Час, упродовж якого вони повертаються у вихідну точку небосхилу, дуже різний: три місяці для Меркурія, дев'ять місяців для Венери, два роки для Марса, дванадцять — для Юпітера й тридцять — для Сатурна.

Рух цих планет має складний характер. Меркурій і Венеру можна спостерігати тільки вранці й увечері — вони здійснюють своє переміщення серед зірок, не відходячи далеко від Сонця. Натомість решту планет можна бачити як у з'єднанні (поруч із Сонцем), так і в протистоянні (у протилежній до Сонця точці небосхилу). До того ж, рухаючись від заходу до сходу, Марс, Юпітер і Сатурн часом «гальмують»: рухаються певний час назад, а тоді знову «лягають на попередній курс». Причиною такого видимого петлеподібного руху планети є відносний рух Землі й цієї планети по орбітах навколо Сонця, але в давні епохи люди цього ще не знали, і це явище, як ми побачимо, неабияк хвилювало грецьких астрономів, які придумували для його пояснення складні й вишукані побудови.



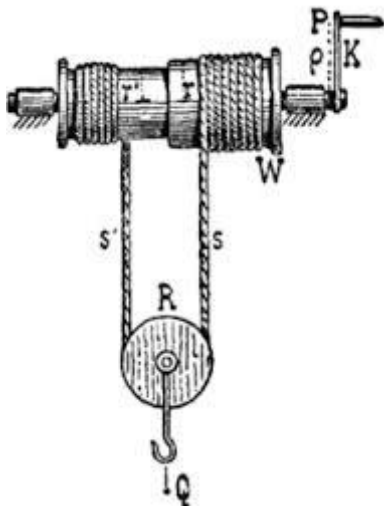
*Видимий рух планети на небосхилі
(зі шкільного підручника астрономії)*

Ще в давнину помітили зв'язок між розташуванням зірок на небосхилі і певними важливими подіями на землі. Так, добробут Єгипту критично залежав від розливу Нілу, причиною якого був сезон дощів на Абісінському нагір'ї в серпні. Напоївши поля й лишивши на них родючий намул, Ніл гарантував землеробам щедрий урожай. Давньоєгипетські жерці помітили, що тоді ж на сході перед світанком на небосхилі починає з'являтися яскрава зірка Сіріус — тож саме їй було «приписано» головну роль у тому, що Ніл починає прибувати. Зіркам і планетам стали

приписувати вплив не лише на природні явища, а й на долі людей: так з'явилася «наука» астрологія, що, попри всю свою ненауковість, відіграла важливу роль у розвитку астрономії, бо ж потребувала точного знання розташування світил на небосхилі одне щодо одного в певний момент часу.

У найдавніші часи під впливом практичних потреб відбувається й зародження математики. Давні єгиптяни, вавилоняни, індуси винайшли свої системи числення. У єгипетському «папірусі Ахмеса», написаному 4 тисячоліття тому, чотири арифметичні дії виконуються не лише над натуральними числами, а й над дробами типу $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$ тощо. Давні єгиптяни вміли обчислювати площу трикутника, а властивості прямокутного трикутника зі співвідношенням сторін 3:4:5 використовували для нанесення прямого кута на поверхню (така потреба часто виникало при вимірюванні земельних ділянок).

Здійснюючи масштабне будівництво (храмів, фортець, палаців, гробниць тощо), давні рано навчилися використовувати похилі площини, клини й важелі, що дозволяли отримувати великий вииграш сили на короткому плечі. Вже єгиптяни знали, що при змочуванні поверхні сила тертя зменшується — і лили олію під полози дерев'яних саней, на яких перевозили кам'яні блоки при будівництві. Трохи пізніше, але теж дуже давно, стали застосовувати блок, гвинт і корбу. Греки, які дуже любили театр, використовували пристрої з блоків для того, щоб піднімати та опускати на сцену героїв та богів. Такі пристрої вони називали «механе» — звідси й походить і термін «механіка», і сучасне українське слово «машина».



Система корби W з ручкою K і блока R (зі старовинної гравюри)

Хоч великі запаси інформації про астрономічні явища та суттєві інженерні досягнення накопичили всі давні цивілізації (Єгипет, Месопотамія, Індія, Китай), теоретично осмислювати їх і намагатися встановлювати між явищами причинно-наслідкові зв'язки почали саме греки. Можливо, це пов'язано з тим, що все життя вільних громадян невеличких грецьких держав-полісів було пронизано духом свободи й

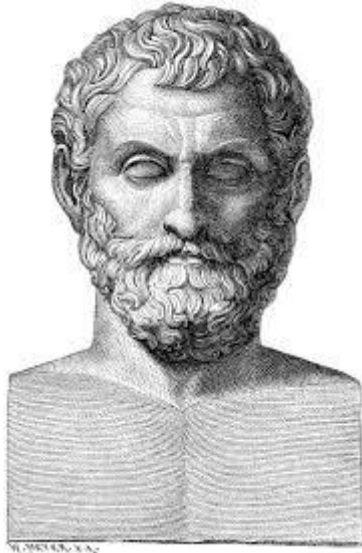
творчості. Саме греки залишили нам у спадок поетичні міфи, високу літературу, неперевершену архітектуру й скульптуру. І водночас саме давню Грецію можемо вважати колискою не лише демократії, а й науки про природу.

Метод дослідження у давніх греків був ще зовсім іншим, аніж у нас сьогодні. Розмірковуючи про різні фізичні явища, греки майже ніколи не вважали за необхідне перевірити свої міркування дослідом. Але їхньою безумовною заслугою було те, що вони намагалися побачити причину явищ у певних природних закономірностях, а не у ніяк не передбачуваній «волі богів». Греки охоче придумували найрізноманітніші гіпотези для пояснення того або іншого явища. Вони ж першими зрозуміли зв'язок природних явищ із математикою. Вже в античні часи в Греції математика не лише першою відкокремилася в окрему науку з тіла єдиної колись філософії — «любові до мудрості», але й почала шукати собі практичних застосувань, зокрема і у фізиці.

Нижче спробуємо простежити за ходом і досягненнями давньогрецької наукової думки в портретах найбільших її представників.

Фалес Мілетський (бл. 640–550 рр. до н.е.)

Цього засновника іонійської філософської школи, якого самі давні греки визнавали одним із своїх «семи мудреців», можемо вважати й найпершим фізиком. Уже зрілою людиною він подався до Єгипту для вивчення мудрості тамтешніх жерців, а, повернувшись, помер у дуже похилому віці, прибувши глядачем на Олімпійські ігри. Фалесові приписують фразу: «Першооснова всіх речей — вода, з води все походить, і у воду все повертається». Пізніші дослідники пов'язують цю думку Фалеса з його перебуванням в Єгипті, який справді критично залежав від розливу Нілу. Але, схоже, тут насамперед виявилось притаманне грекам прагнення звести все різноманіття явищ і речей до певної єдиної першооснови.



Таким уявляли Фалеса Мілетського (його прижиттєві зображення не збереглися)

Пізніше Арістотель оповідав, що Фалесові була відома притягальна сила магніту. Відомий переказ, який повторює багато давніх авторів, робить саме Фалесову дочку першовідкривачкою того, що натертий клаптем вовни бурштин починає притягати дрібні клаптики й порошинки. Приписують Фалесу й доведення теореми про те, що кут, вписаний у півколо, є прямим. Так само, за переказами, Фалес зрозумів, що в момент, коли Сонце піднімається на 45 градусів над обрієм, довжина тіні всіх предметів дорівнює їхній висоті. Пов'язують з Фалесом і певні інженерні рішення: саме він начебто порадив перському царю Крезу розділити стрімку річку на два потоки і так перевести через неї військо.

Значно більші заслуги Фалеса в царині астрономії. Саме він разом із учнями постулював кулястість Землі (греки, усім життям пов'язані з морем, добре знали, що за обрієм спершу зникає корпус корабля, а тільки потім — щогла, і правильно пов'язали це з опуклістю земної поверхні), вмістив нерухому Землю в центр Всесвіту, визначив кут нахилу екліптики (площини, в якій рухається впродовж року по небосхилу сонячний диск) до екватора, виміряв кутовий розмір Місяця на небосхилі в 0,5 кутового градуса (що дуже близько до справжнього значення). Достеменно відомо, що Фалес передбачив сонячне затемнення 585 р. до н.е. — і цю дату ми можемо вважати першою датою в хронології науки. При цьому він скористався з періоду затемнень у 6585 $\frac{1}{2}$ днів, визначеного внаслідок тривалих спостережень ще вавилонянами.

Піфагор Самоський (бл. 570–бл.500 рр. до н.е.)

Піфагор, як вважають, був замолоду учнем Фалеса. Вже в зрілому віці він теж здійснив подорож до Єгипту в пошуках тамтешньої мудрості, а звідти ще й поза власною волею потрапив як бранець до Вавилону —

Єгипет саме тоді завоював перський цар Камбіс. Але й цю вимушену подорож філософ використав як можливість примножити свої знання від жерців-халдеїв. Повернувшись на батьківщину, Піфагор оселився в грецькій колонії Кротон у південній Італії. Там він заснував школу, а разом із нею гетерію — таємне товариство учнів і прихильників. Для вступу в товариство потрібно було пройти суворі випробування, зокрема впродовж цілих п'яти років зберігати мовчання. Це таємне товариство набуло й великого політичного впливу — що спричинило, врешті-решт, до збройних сутичок, під час яких і сам філософ, і більшість його учнів загинули.

Сьогодні ім'я Піфагора насамперед пам'ятають завдяки знаменитій теоремі про те, що сума квадратів катетів прямокутного трикутника дорівнює квадратові його гіпотенузи (хоч достеменно невідомо, чи саме Піфагор сформулював і довів цю теорему). Але безсумнівним досягненням Піфагора в царині фізики є встановлення зв'язку гармонійних музичних інтервалів із числами.

За переказами, проходячи повз кузню, філософ помітив, що молоти трьох ковалів лунали трьома гармонійними тонами щодо четвертого, найважчого молота: октавою, квінтою і квартою. Вимірявши вагу кожного з трьох молотів, Піфагор переконався, що їхні ваги відносяться до ваги найважчого, як $\frac{1}{2}$, $\frac{2}{3}$ і $\frac{3}{4}$. Прийшовши додому, філософ узяв чотири струни однакової товщини і до їхніх кінців прив'язав гирі, ваги яких співвідносилися поміж собою так само, як і ваги молотів. При збудженні коливань ці струни давали ті ж музичні інтервали, що й молоти.

Переказ цей очевидно хибний: насправді ці музичні інтервали даватимуть однаково натягнуті струни, довжини яких перебуватимуть у вказаних вище співвідношеннях. Проте помічений Піфагором зв'язок гармонійних інтервалів із числами — безсумнівний. Більше того, Піфагор пов'язував із числами всі речі Всесвіту (який саме він уперше назвав Космосом, підкреслюючи тим його впорядкованість і протиставляючи Хаосу — безладу). Піфагору приписують фразу: «Всі речі суть числа».

Учні Піфагора створили на основі цього його переконання свою систему Всесвіту, в центрі якого помістили найбільш досконалу, на їхню думку, субстанцію: вогонь. Навколо центрального Вогню вони змусили обертатися на гармонійних відстанях Землю й Антиземлю, Місяць, Сонце, п'ять планет і сферу нерухомих зірок. Антиземля знадобилася для того, щоб загальна кількість сфер дорівнювала «досконалій» десятці.



Піфагор із астрономічним приладом (зі старовинної гравюри)

При обертанні по орбіті куляста Земля (куля — теж найдосконаліша форма) обернена населеною своєю половиною весь час у бік від центрального Вогню, тому ні його, ні розташованої по протилежний бік від нього Антиземлі земляни не бачать. Зате Сонце й Місяць світять на Землю відбитим світлом центрального Вогню. Така побудова є вочевидь штучною і не пояснює того, що видно на небосхилі, але гармонійні співвідношення між сферами призводять до того, що Космос сповнявся для піфагорейців високою музикою...

**Емпедокл із Агрігента
(бл. 490– бл.430 рр. до н.е.)**

Як уже говорилося, грекам було притаманне бажання звести всі навколишні речі до певної першооснови. Для Фалеса такою першоосновою була вода. Емпедокл натомість виокремив чотири першооснови (елементи, чи «стихії»): землю, воду, повітря та вогонь. Ці чотири «стихії», за Емпедоклом, незмінні й нездатні переходити одна в одну, але, сполучаючись одна з одною в певних пропорціях, породжують усі речовини на землі.

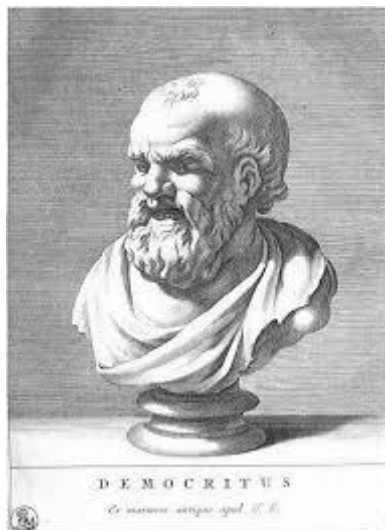


Емпедокл (старовинна гравюра)

Таке вчення про чотири першооснови проіснувало близько двох тисяч років, аж до утвердження вже у XVIII столітті сучасних уявлень про різні хімічні елементи. Це ж учення було й «теоретичною основою» для популярної в Середньовіччі алхімії. Алхіміки намагалися різними маніпуляціями перетворити «неблагородні» метали на срібло й золото. При цьому, нагріваючи ці «прості» метали й піддаючи їх різним хімічним діям, вони вірили, що можна змінити співвідношення в них чотирьох «стихій» так, щоб отримати жаданий коштовний метал. Звісно, ніякого золота алхіміки не отримали (й отримати не могли) — зате зробили багато відкриттів, важливих для становлення справжньої науки хімії.

Демокріт (прибл. 460–370 рр. до н. е.)

Цей старогрецький філософ обезсмертив своє ім'я тим, що розробив атомістичну теорію будови матерії. А якщо бути цілком точним, то завершив те, про що почали думати його попередники Анаксагор та Лейкіпп. Атоми, за Демокрітом, — матеріальні неподільні частинки, які рухаються в порожнечі. Атоми вічні й вічно рухаються. Зчіплюючись між собою за допомогою своєрідних гачків, атоми утворюють різні тіла, які ми осягаємо за допомогою органів чуття. Все, що відбувається у світі, має природну причину й відбувається з природної необхідності без втручання богів.



Демокріт (старовинне зображення)

На доведення своїх тверджень Демокріт наводив іноді аргументовані фізичні міркування. Так, дехто з грецьких філософів заперечував можливість порожнечі, де зовсім нічого немає. Демокріт натомість обґрунтовував можливість порожнечі такими доказами: без порожнечі не було б руху в просторі, без неї не відбувалося б розрідження й згущення тіл; нарешті, живі організми ростуть, бо їжа проникає в наявні в них порожнини.

За переказом, Демокріт багато подорожував і розтратив багатий спадок, отриманий від батька. За це його судили, але судді ухвалили виправдальний вирок після того, як Демокріт прочитав їм свою книгу «Велика світобудова». Судді дійшли висновку, що розтрату багатства виправдано багатством знань, які Демокріт здобув для себе й для своїх співгромадян, вивчаючи науки в інших державах.

Платон
(427–347 рр. до н.е.)

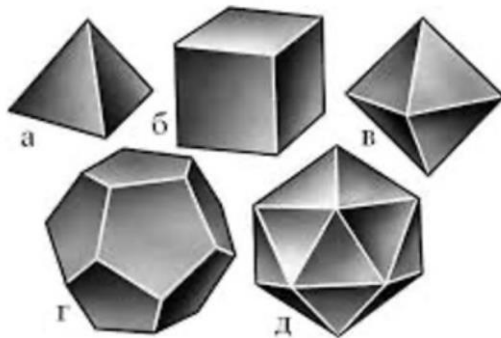
У вченні Демокріта знайшов довершений вияв суто механістичний погляд на світ, якому не потрібні були вже ані боги, ані різні містичні субстанції. Цим уявленням суперечили погляди славетного старогрецького філософа Платона (справжнє ім'я — Арістокл, прізвисько «Платон», грецькою «широкий», йому дали, скоріш за все, за широкі борцівські груди), який вважав, що світ реальних речей є лише віддзеркаленням світу ідей. Ідеї вічні, незмінні й досконалі. Речі з часом руйнуються і зникають, а ідеї (поняття), яким відповідають ці речі, залишаються. Тому будь-яка конкретна річ, стверджував Платон, є лише приблизна копія ідеї. Платон уперше поставив і спробував розв'язати надзвичайно важливу філософську проблему про зміст наших понять і віддзеркалення в них законів буття.



Платон (з картини Рафаеля «Афінська школа»)

Залишивши нащадкам глибокі думки в царині теорії пізнання та етики, Платон у своїх розмірковуваннях торкався й області фізики. Він, як і піфагорейці, вірив у музику небесних сфер із їхніми гармонійними інтервалами, але в центр Всесвіту вмістив уже не якийсь центральний Вогонь, а кулясту нерухому Землю. Він услід за Емпедоклом вірив у чотири першооснови (елементи, чи «стихії»), але несподівано спробував дати їм суто матеріалістичне витлумачення: елементи вогню, за Платоном, є тетраедрами, повітря — октаедрами, води — ікосаедрами, а землі — кубами. Цим елементам відповідають чотири області: найнижче лежить найважча земля, потім послідовно вода, повітря й вогонь. Кожна «стихія»

прагне «зайняти своє місце», і саме тому камені падають униз, а пара здіймається вгору. До відкриття закону всесвітнього тяжіння в європейських університетах викладали причину падіння важких речей униз саме за Платоном...

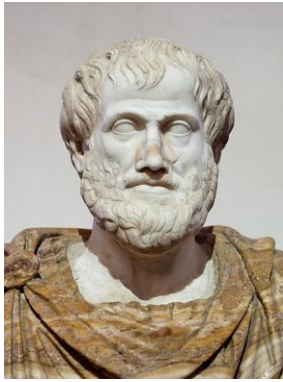


«Платонові багатогранники»: тетраедр — 4 грані (а), куб — 6 граней (б), октаедр — 8 граней (в), додекаедр — 12 граней (г), ікосаедр — 20 граней (д).

Повернувшись із мандрів країнами Сходу (подорожувати в пошуках мудрості стало для грецьких філософів традицією), Платон заснував під Афінами в гаї, присвяченому героєві Академу, школу. При цьому філософ намагався дотримуватися «золотої середини»: він відмовився від звички свого вчителя Сократа вступати в філософські дискусії зі стрічними на вулиці, і водночас не пішов за Піфагором, який допускав у свою таємну гетерію тільки після тривалих випробувань. До Платонові Академії міг прийти кожен, навчалися тут навіть жінки (щоправда, перевдягнені в чоловічий одяг). Найвідомішим учнем Платона став славетний Арістотель. А саме слово «Академія» стало пізніше означати елітне наукове співтовариство або навчальний заклад високого рівня.

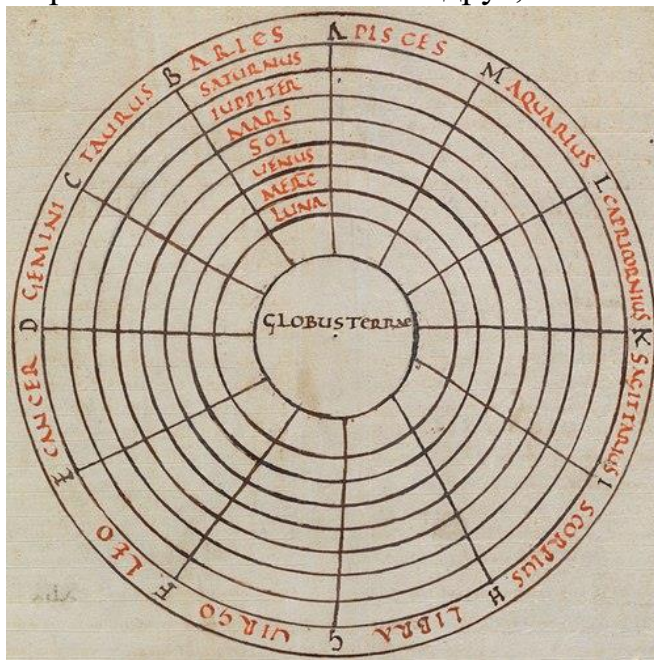
Арістотель (384–322 рр. до н.е.)

Цей найбільший філософ давнини народився в північній Греції і в дитинстві разом із батьком, лікарем Нікомахом, жив при дворі македонського володаря, де близько зійшовся з майбутнім царем Філіпом. У 17 років Арістотель вступив до Платонові Академії і близько 20 років, аж до смерті Платона, набирався там мудрості. Арістотель розробляв питання логіки, психології, політики, політичної економії, теорії пізнання, космології, фізики, зоології, педагогіки, риторики, естетики. Це був найбільший енциклопедичний розум стародавнього світу, що систематизував величезний обсяг різноманітних знань.



Римська мармурова копія прижиттєвого бронзового бюсту Арістотеля роботи скульптора Лісіппа (бл. 330 р. до н.е.)

Першопричиною світу, за Арістотелем, є Вищий розум або Бог. Центр цього світу — нерухома куляста Земля, навколо якої обертаються Сонце, Місяць, планети й зірки. Всупереч Платонові, котрий вважав, що світ речей є лише віддзеркаленням світу ідей, Арістотель стверджував, що істина належить самому світові речей. Світ речей відкривається нам через наші органи відчуття. Відтак існують два світи: один — видимий, і другий — той, що існує в наших думках. Але наші думки лише відображають дійсний світ. Таким чином, погляди Платона й Арістотеля на співвідношення світу речей і світу ідей не збігаються. Звідси знаменитий вислів Арістотеля: «Платон мені друг, але істина дорожча».



Послідовність сфер у системі світу за Арістотелем: навколо нерухомої Землі обертаються Місяць, Меркурій, Венера, Сонце, Марс, Юпітер, Сатурн; над ними розташовано сферу нерухомих зірок, де позначено 12 сузір'їв Зодіака (з рукопису IX століття)

Коли Філіп став царем Македонії, Арістотель отримав запрошення стати вихователем його 14-річного сина Александра, який увійшов в історію як Александр Македонський. Пізніше цей великий завойовник

казав: «Я шаную Арістотеля нарівні з власним батьком. Адже батько дав мені життя, а Арістотель — усе, що дає цьому життю ціну». Потому, як Александр вирушив у свій похід проти Персії, Арістотель повернувся до Афін, де заснував власну філософську школу. Пізніше Арістотелевих учнів назвали «періпатетиками» (від грецького слова *περίπατος* — прогулюватись), бо їхній учитель мав звичку викладати свої думки, прогулюючись алеями тінистого гаю. Але коли Александр помер 33-річним на Сході, не витримавши врешті-решт випробування необмеженою владою, антимакедонська партія в Афінах вирішила помститися його колишньому вчителю. Арістотель поспішив залишити місто, сказавши, що хоче уберегти співгромадян від повторного злочину проти філософії. Тут він натякав на долю Платонового вчителя Сократа, якого афіняни змусили випити келих з отрутою. Дуже скоро потому великий філософ помер у вигнанні на острові Евбея.

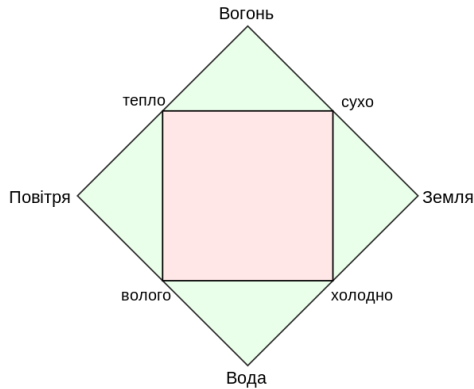
Але помертню Арістотелю пощастило. Адже праці більшості інших філософів античності дійшли до нас тільки в уривках та в чужих переказах. Натомість основні праці Арістотеля: «Органон», «Метафізика», «Фізика», «Про частини тварин», «Політика», «Аналітика» — збереглися й були багато разів перевидані (вперше — в Давньому Римі, де ще не знали книгодрукування, але де копії книжок на сувоях папірусу виготовляли на замовлення спеціальні переписувачі). Тому про його погляди ми можемо судити з його власного голосу. Збереглися й вірогідні скульптурні зображення Арістотеля, і навіть опис його зовнішності: він був невисокого зросту, худорлявий, одягався вишукано, в його словах часто звучав сарказм.



Видання праць Арістотеля в грецькому оригіналі і в перекладі латиною (1566)

На відміну від Демокріта, Арістотель заперечував порожнечу і вважав, що простір повністю заповнено матерією. Заперечував він і найменші неподільні часточки матерії — атоми. На користь цього він (як це загалом було для нього властиво) наводив суто умоглядний доказ: у порожнечі як запереченні матерії неможливе розрізнення місця, а рух передбачає саме розрізнення місця; отже, в порожнечі рух неможливий.

Початковими якостями матерії Арістотель уважав холод і тепло та вологість і сухість — адже саме ці дві пари якостей можна розрізняти нашими відчуттями. Відтак чотири першооснови Емпедокла Арістотель пов'язав із цими чотирма першоякостями: вогонь — теплий і сухий, повітря — тепле й вологе, вода — холодна й волога, земля — холодна й суха.



Система першооснов та першоякостей за Арістотелем

Ці чотири першооснови, згідно з Арістотелем, за своєю природою легкі або важкі. Земля є абсолютно важкою, вогонь є абсолютно легким, вода й повітря є відносно важкими чи легкими, залежно від поєднання їх із іншими першоосновами. Тому всім земним тілам, залежно від того, із яких першооснов вони складаються, властива вага або легкість. Важкі тіла прагнуть униз, до центру Землі, який є водночас і центром усього Всесвіту, а легкі тіла прагнуть угору. Цей їхній природний рух триватиме доти, доки їх не зупинить опір інших тіл. Отже, рух угору чи вниз є природним і триває аж до примусового припинення. Натомість усі інші рухи на землі є вимушеними, зумовленими поштовхом або тиском, і припиняються самі собою, коли зникає їхня причина. Це означає, що Арістотель ще не здогадувався про поняття інерції.

Але й природні рухи важких і легких тіл вниз і вгору для Арістотеля недосконалі, бо вони обмежені в часі й просторі. Досконалим є тільки коловий рух небесних сфер, який триває вічно. Носієм такого досконалого колового руху є «п'ята першооснова» (латиною — *quinta essentia*, звідки й походить слово «квінтесенція»), з якої всуціль складається найвища сфера нерухомих зірок. Сфери планет, розташовані під нею, містять уже домішки інших чотирьох першооснов — і тому їхні рухи вже дещо нерівномірні.

Земля складається з важкої першооснови — а тому й не може рухатися, і розташована в самому центрі Всесвіту. Вона куляста через природні причини: адже всі важкі субстанції повинні рівномірно прагнути до цього центру. Арістотель наводить і окружність Землі у 400 000 стадій (1 грецький стадій — 178 метрів, отже, цифра Арістотеля вдвічі більша за справжню). Але звідки і як узяв Арістотель цю цифру — невідомо.

Арістотель ще не знає закону прискорення вільного падіння і вважає, що швидкість падіння тіла пропорційна його вазі: вдвічі важче тіло падає вдвічі швидше. З великими проблемами стикається Арістотель і тоді, коли

пояснює різні «вимушені» рухи. Як ми вже говорили, він ще не знає про інерцію, і тому для нього є загадкою, чому камінь летить, відірвавшись від руки, яка його кинула. Тому Арістотель придумує абсолютно штучне пояснення: летячи, камінь залишає за собою порожнечу, куди «кидається» повітря, що надає йому нового поштовху. Таке «пояснення» суперечило повсякденному досвідові (тонка стріла мчить швидше за масивну каменюку, яку повітря, за Арістотелем, повинне «підштовхувати» сильніше), і з нього було незрозуміло: а що врешті-решт призводить до припинення вимушеного руху?

Більш фізично Арістотель пояснив принцип дії важеля: «Сила, прикладена на великій відстані від точки опори, легше рухає вантаж, бо вона описує більше коло». У такому визначенні він фактично оперує поняттям моменту сили. Реалістично пояснював Арістотель і звук як зміну густини повітря. Він наголошував: саме по собі повітря беззвучне, для збудження звуку потрібен удар двох твердин тіл одне об одне або ж об повітря.

Цілком реалістично заперечує він і проти теорії «зорових променів» Демокріта і Платона, які начебто виходять з очей і з допомогою яких ми бачимо. Арістотель слушно зауважує: якщо це справді так, то тоді чому ми не бачимо в темряві? Хоч зрозумілого пояснення зору, виходячи зі стану тодішніх знань, він дати не зміг, обмежившись міркуваннями про воду як першооснову для органу зору.

Арістотель зміг би уникнути багатьох своїх помилок, якби скористався з досліду як способу перевірки своїх умоглядних побудов. Тоді він напевно побачив би, що два достатньо важкі тіла різної ваги, для яких опір повітря вже неістотний, впадуть одночасно. Але він не був фізиком у сьогоdnішньому розумінні цього слова, і його філософія потребувала насамперед розмірковувань і логічних побудов, а не дослідів. До того ж, він намагався не запропонувати пояснення окремим фізичним явищам, а «широкими мазками» намалювати всю картину природи.

У середні віки праці великого філософа (які збереглися й були перекладені латиною) вивчали в усіх середньовічних університетах. Навіть умоглядні, не підтверджені дослідом природничонаукові твердження Арістотеля не брали під сумнів — його авторитет був непорушним. Майже дві тисячі років слова Арістотеля беззастережно вважали істиною. І першим, хто в них засумнівався, був Галілео Галілей.

Евклід

(бл. 365–270 рр. до н.е.)

Після смерті Арістотеля Афіни втрачають значення інтелектуального центру грецького (про той час говорять — елліністичного) світу. А самі межі цього грецького світу завдяки завоюванням Александра Македонського надзвичайно розширюються. Новим центром наук і мистецтв робиться столиця Єгипту Александрія (названа так на честь

великого завойовника, який її заснував на березі Середземного моря), де після його смерті править грецька династія Птоломеїв (чи Птолемеїв). Уже перший цар цієї династії Птоломей Сотер (321–283), колишній полководець Александра Македонського, запросив до свого двору найкращих грецьких учених.

Його наступник Птоломей Філадельф (283–247) приблизно в 250 р. до н.е. заснував знаменитий Музей — який спершу став притулком для учених, а потім набув і функцій вищої школи. Царі Птолемеї щедро підтримували Музей, члени якого отримували щорічну платню (мабуть, найперший в історії приклад державної підтримки науково-освітньої установи). При Музеї створили ботанічний та зоологічний сади, анатомічний театр, астрономічну обсерваторію і найбільшу в тодішньому світі бібліотеку, яка в найкращі часи налічувала 700 000 книг. За наказом Птолемея Філадельфа для цієї бібліотеки по всій Греції реквізували найцінніші сувої, залишаючи власникам копії.

Ця бібліотека залишалася найбільшою книгозбірнею античного світу, хоч і сильно постраждала від пожежі під час облоги Александрії Юлієм Цезарем у 47 р. до н.е. Але в 390 р. н.е., коли християнство було проголошено єдиною релігією в Римській імперії, а культу старих «язичницьких» богів заборонено, фанатичні християни зруйнували храм єгипетського бога Серапіса, де зберігалися безцінні сувої. А рештки бібліотеки загинули під час завоювання Александрії арабами в 640 р. За переказом, каліф Омар тоді заявив, що коли ці книги містять те, про що йдеться і в Корані, то вони непотрібні, а коли в них є те, чого в Корані немає, то вони шкідливі...

Але Евклід, який народився в Афінах, потрапив до Александрії в той час, коли наукова слава цієї нової столиці тільки утверджувалася. Найбільшу славу він здобув своїми геометричними трактатами, що містили справжній компендіум усіх тодішніх знань і досі не перестали бути науковими. Недаремно ми дотепер використовуємо термін «евклідова геометрія».



Один із найдавніших збережених фрагментів найголовнішої геометричної праці Евкліда — «Елементи» (або «Начала», папірус, бл. 100 р. н.е.)

У фізиці Евклід став автором учення про прямолінійне розповсюдження світла та про його відбиття від різних дзеркал. Завдяки Евклідові оптика стала першим розділом фізики, який зробився математичною (точніше — геометричною) наукою. І, спираючись на

авторитет Евкліда, оптика залишалася точною наукою навіть у середні віки, коли наукова думка спала летаргічним сном. Але для самого вченого це була наука насамперед про геометричні побудови: дискусія про те, чи йде промінь від предмета до ока, чи навпаки, його не цікавила...

Арістарх Самоський
(бл. 310–230 рр. до н.е.)

Арістарх народився на острові Самос, але його наукова діяльність пов'язана з Александрією. Як і піфагорейці, від дотримувався погляду про рухомість Землі — але в центр світобудови вміщував уже не вигаданий «центральный Вогонь», а реальне Сонце. Він уважав, що Сонце і сфера нерухомих зірок перебувають у спокої, а Земля обертається навколо Сонця. На зауваження, що в такому випадку взаємне розташування нерухомих зірок на небосхилі впродовж року повинне змінюватися, Арістарх цілком слушно відповідав: відстань до сфери нерухомих зірок значно більша за розміри орбіти Землі, й тому такі зміни дуже малі й непомітні для людського ока.

В єдиному своєму трактаті, який дійшов до нас у візантійській копії Х століття, «Про розміри й відстані Сонця і Місяця», вчений уперше зробив безуспішну спробу визначити відносні відстані до цих небесних тіл. Він виходив із правильного припущення про те, що в момент, коли диск Місяця в небі освітлений рівно наполовину, Земля, Місяць і Сонце утворюють прямокутний трикутник, два катети якого сходяться саме на Місяці. Кут між напрямками від Землі до Місяця й до Сонця Арістарх визначив у 87° і звідси отримав співвідношення відстаней до Місяця і до Сонця як приблизно 1 до 19.

Насправді вчений занижив при цьому відстань до Сонця приблизно в 20 разів, що було пов'язано як зі складнощами визначення точного моменту часу, коли Місяць освітлено рівно наполовину, так і з примітивністю тодішніх кутовимірювальних приладів. Але вперше відстані між небесними тілами стали предметом вимірювань.

Виходячи з того, що під час місячного затемнення тінь від Землі повністю закриває Місяць, Арістарх, опираючись на отримані ним відношення відстаней, оцінив і співвідношення розмірів Сонця, Землі та Місяця. Він отримав доволі точне відношення розмірів Місяця й Землі, але прогнозовано занижив розміри Сонця, визначивши, що вони лишедесь у шість-сім разів більші за розміри Землі. Але на той час це було великим досягненням, бо більшість сучасників Арістарха вважали, що Сонце приблизно таке ж завбільшки, як людська стопа, а вчені здогадувалися, що воно може мати розміри півострова Пелопоннес.

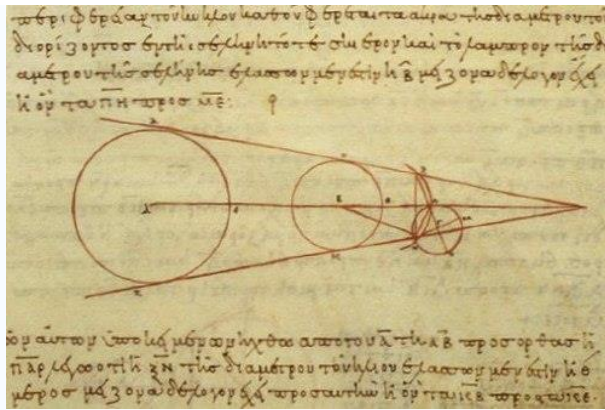


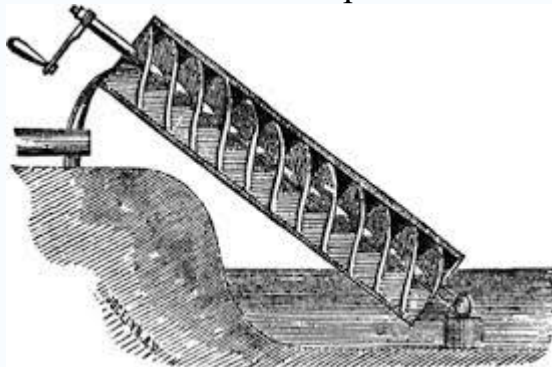
Схема визначення Арістархом відносних розмірів Сонця, Землі й Місяця під час місячного затемнення (візантійський рукопис X ст.)

Отже, Арістарх не тільки першим почав застосовувати математичні методи до астрономії, а й став основоположником геліоцентричної системи світу, що утвердиться лише через 18 століть у знаменитому трактаті Миколая Коперника «Про обертання небесних сфер». Але проблема полягала в тому, що наявні за часів Арістарха астрономічні факти цілком можна було описати і в рамках звичної геоцентричної системи (яка, до того ж, краще узгоджувалася з повсякденним досвідом), тож про геніальну здогадку грецького вченого швидко забули. Навіть основоположник сучасного геліоцентризму Коперник, як виглядає, нічого не чув про роботи свого попередника.

Сьогодні на честь Арістарха названо астероїд і великий кратер на Місяці.

Архімед (287–212 рр. до н.е.)

Цей найзнаменитіший фізик та інженер античності до Александрійської школи не належав і майже все життя працював у Сиракузах — тодішній грецькій колонії на східному узбережжі Сицилії. Він теж здійснив обов'язкову для тодішнього вченого подорож до Єгипту і навіть винайшов там «архімедів гвинт» — пристрій для підйому нільської води до зрошувальних рівчаків. Але переважна більшість його праць і винаходів пов'язані саме з рідним містом.



«Архімедів гвинт» (старовинна гравюра)

Архімед був родичем і другом царя Гієрона, який правив Сиракузами з 269 р. до 215 р. до н.е. — і деякі з його відкриттів були зроблені на царське замовлення. До нас дійшов відомий переказ про те, як Архімедові було доручено визначити, чи насправді майстер використав усе дане йому для роботи золото на царський вінець. Вага виробу дорівнювала вазі отриманого ним від царя золота, але виник сумнів: чи не було під час роботи підмішано до металу дешевшого срібла?

Розв'язок задачі прийшов до вченого в лазні — і він вискочив з басейну й неодягнений побіг вулицями міста, вигукуючи: «Еврика!» («Знайшов!»). За однією з версій, Архімед опустив у наліту по вінця посудину з водою спершу вінець — і виміряв вагу води, що вилилася. Потім він опустив щире золото такої самої ваги — і переконався, що воно витіснило менше води, ніж вінець; а потім — однаковий за вагою зливки срібла, й води вилилося більше. Так учений не лише визначив, що матеріал вінця насправді є сплавом, але й установив пропорцію золота й срібла в ньому.

Насправді ще Галілей відзначив, що Архімед навряд чи діяв би так примітивно з погляду теоретичної бази та експериментальної техніки: скоріше він просто зважив би вінець та обидва зливки, зануреними у воду, й значно простіше отримав би той самий результат.

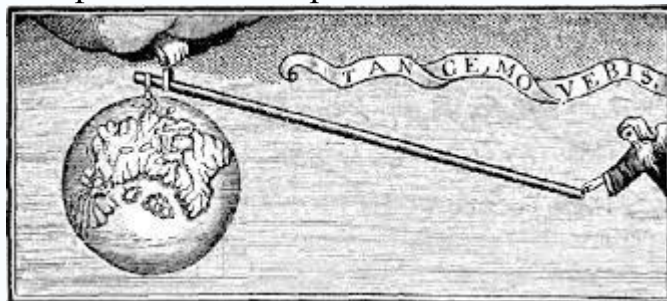
На доручення царя Гієрона Архімед створив і численні військові машини, про які історики, ще починаючи від Плутарха, який жив через понад триста років, оповідають цілком фантастичні подробиці. Навряд чи Архімед міг створити дзеркало, яке спалило б римський флот (хоч сучасні дослідники припускають, що він насправді міг використати систему багатьох дзеркал, що фокусували промені в одній точці), і навряд чи його механізми могли підняти великий корабель з води й перекинути його (хоч випробування, проведені вже ХХІ столітті, показали, що за певних умов «пазур Архімеда» міг бути й ефективним). Але без сумніву інженерний геній Архімеда вмів використати всі переваги важеля (традиція приписує вченому фразу: «Дайте мені точку опертя, і я перекину Землю!»), і його катапульти напевно завдали великих утрат римлянам, які штурмували місто, що мало нещастя виступити союзником Карфагену в його війні з Римом. Але сили були надто нерівні, й Сиракузи було здобуто, а старого вченого, що як завжди креслив на піску якісь геометричні фігури, вбив нікому не відомий римський воїн. За легендою, останніми Архімедовими словами були: «Не чіпай мої кола!».



Архімед спалює римський флот дзеркалом (картина 1599 р.)

Але до нас дійшли (більшість — у грецьких оригіналах, по одному — в латинському і в арабському перекладах) усі дев'ять основних наукових трактатів Архімеда. Більшість із них («Про кулю й циліндр», «Про вимірювання круга», «Про коноїди та сфероїди», «Про спіральні лінії», «Про квадратуру параболи») стосуються різних питань площі та об'єму геометричних фігур.

У трактаті «Про рівновагу площин» Архімед заклав основи статики — науки про рівновагу. У ньому він формулює важливе положення: якщо дві рівні за вагою величини не мають спільного центру ваги, то центр ваги величини, отриманої від їхнього додавання, перебуватиме посередині відрізка, що сполучає центри ваги обох величин. За допомогою цього Архімед доводить правило важеля: якщо важіль перебуває в рівновазі, коли до нього підвішено якісь дві ваги, то кожна з цих ваг можна розділити на 2, 4, 8 рівних частин і підвісити попарно на рівних відстанях від початкових точок підвісу. Оскільки початкові дві ваги було підвішено на відстанях, обернено пропорційних їхнім вагою, то таким поділом можна досягнути того, що на кожному плечі важеля буде по рівному числу ваг на попарно рівних відстанях. Отже, система від початку повинна була перебувати в рівновазі. У тому ж трактаті Архімед математично визначає точку центру ваги в паралелограмах, трикутниках, трапеціях та відтинах парабол. На жаль, зробивши такий важливий внесок у статику, вчений водночас фактично не торкався питань динаміки.



Архімед підіймає важелем Землю (старовинна гравюра)

У трактаті «Про плавання тіл» Архімед спирається на положення про те, що рідина скрізь однорідна й неперервна, і що менш стиснута її частина зміщується більш стиснутою, і нарешті, всяка частина рідини зазнає тиску

від частини, розміщеної вертикально над нею. Звідси вчений доходить висновку, що поверхня будь-якої рідини, яка перебуває в рівновазі, повинна мати форму сфери, концентричної з Земною кулею; що легше від води тіло занурюється в неї доти, доки вага тіла не зрівняється з вагою витісненої тілом води, а важче за воду тіло занурюється в неї цілком, втрачаючи у вазі стільки, скільки важить витіснена ним вода (звідси очевидно, що Архімед у задачі з матеріалом царського вінця мусив-таки піти саме шляхом зважування у воді!).

Нарешті, трактат «Про число піщинок» має на перший погляд дивну мету: показати, що це число дуже велике, але не нескінченне. Спираючись на дані попередників, зокрема й Арістарха, щодо розмірів небесних сфер, Архімед одержує число, яке ми записали б як 10^{63} .

Архімед одним із перших удався до аналізу малих величин, що можна розглядати як певний прообраз інтегрального числення. У праці «Вимірювання кола» він оцінив межі, в яких лежить число π , описавши більший правильний шестикутник поза колом, а потім вписавши менший правильний шестикутник всередину кола. Поступово подвоюючи кількість сторін кожного правильного багатокутника, він обчислював довжину сторони цього багатокутника на кожному кроці. Зі збільшенням числа сторін багатокутники стають дедалі точнішим наближенням кола. Після чотирьох таких кроків, коли багатокутники мали вже по 96 сторін, Архімед зумів визначити, що значення π лежить між 3 та $1/7$ (приблизно 3,1429) і між 3 та $10/71$ (приблизно 3,1408), що є доволі близьким до реального значення числа π (приблизно 3,1416).

Давні історики говорять про вченого наче про якесь божество. Славний історик Плутарх (46 — бл. 120 рр. н.е.) писав про нього: «В усій геометрії не можна знайти складніших і глибших теорем від тих, які Архімед розв'язує найпростішим та найнаочнішим способом. Одні приписують цю простоту його геніальному розумові, інші — впертій роботі, яка навіть важкі речі перетворює на легкі. На перший погляд видається неможливим придумати пояснення хоч для якоїсь із теорем Архімеда, але, коли прочитаєш його розв'язання, то здається, начебто знайти його не потребувало ніякої праці, таке воно легке й просте».

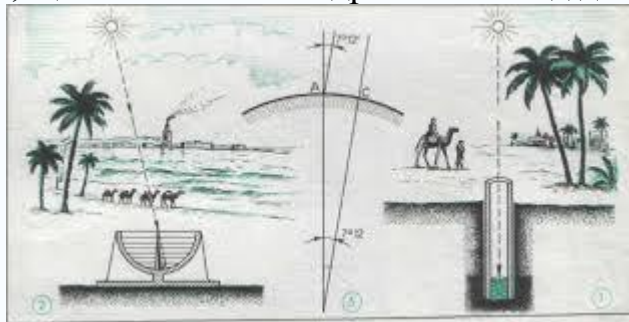
Але шлях, яким Архімед доходив до такого простого розв'язку, насправді часто був дуже складним. Саме тому вчений не лишив по собі школи учнів. А з усіх його численних винаходів дійшов до нас тільки «архімедів гвинт» — принципи дії інших пристроїв, про які згадують історики, так і залишилися таємницею.

Ератосфен (276–195 рр. до н.е.)

Ератосфен був Архімедовим сучасником і, як вважають дослідники, особисто познайомився з ним під час подорожі великого фізика й інженера до Єгипту. Сам Ератосфен на той час посідав місце бібліотекаря при

Александрійському музеї. Він прожив довге життя й добровільно пішов з нього, переставши приймати їжу, в дуже похилому віці. Це — ще один вияв грецької волелюбності: вони вважали, що варто самохіть піти з життя, коли воно вже перестає приносити втіху...

Найголовнішою працею Ератосфена є «Географія» в трьох книгах. У третій учений описує те, як він визначив окружність Землі. Здавна було відомо, що на початку літа в Сієні на півдні Єгипту сонце освітлює опівдні дно навіть дуже глибокої криниці, отже, воно перебуває там у цю пору в зеніті. В той самий час в Александрії воно відхиляється від вертикалі на $1/50$ повного кута (приблизно на 7°). Ератосфен уважав, що Александрія розташована строго на північ від Сієни, а відстань між двома містами становить 5000 стадій. Звідси окружність Землі він визначив у 250 000 стадій, що лише на 15% відрізняється від дійсного значення.



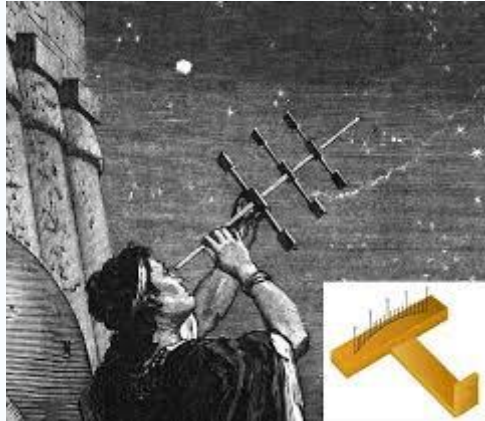
Визначення окружності Землі: сонце над Александрією відхилене від зеніту, а над Сієною воно в зеніті

Звісно, грецькому вченому пощастило: насправді Александрія стоїть не строго на північ від Сієни, і відстань між містами не дорівнює точно 5000 стадій. Але обидві похибки наклалися в нього одна на одну так, що взаємно компенсувалися. Оцінки його наступників виявилися суттєво менш точними, і в середньовіччі земну кулю вважали вдвічі меншою, ніж насправді. Саме тому Колумб і намагався досягнути Індії, пливучи на захід через Атлантику — і відкрив Америку.

Гіппарх (бл. 190 р. — після 126 р. до н.е.)

Цей астроном, який прожив молодість на острові Родос, а після 160 р. до н.е. керував знаменитою Александрійською школою, знову «повернув» Землю в центр світобудови — і з цього погляду зробив крок назад порівняно з його попередником Арістархом. Але насправді не варто його за це звинувачувати: геоцентрична система давала тоді змогу цілком задовільно пояснити всі явища, які спостерігали на небосхилі. А в області спостережень Гіппарх не мав собі рівних. З допомогою достатньо точних кутовимірних пристроїв він визначив координати 1080 нерухомих зірок і склав їхній каталог. При цьому саме Гіппарх запровадив поняття широти й

довготи, які стали використовувати не лише для небесних, а й для земних вимірювань.

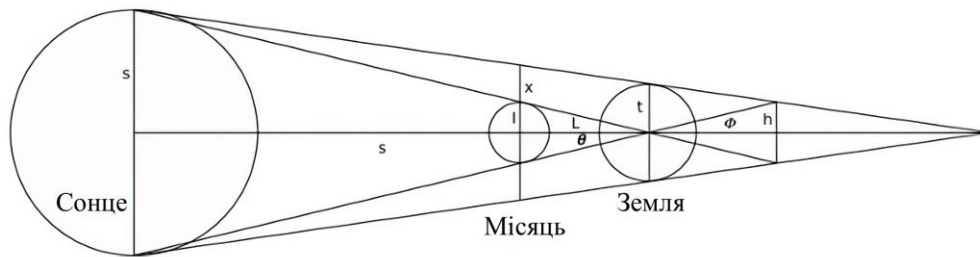


Гіппарх з кутовимірювальним приладом

Саме Гіппарх розподілив видимі зірки на шість величин за їхнім блиском: від найяскравішої першої до ледве помітної шостої. Цим поділом ми користуємося досі. Саме Гіппарх першим зрозумів, що справжня тривалість астрономічного року (часу, впродовж якого Сонце повертається в ту саму точку серед сузір'їв Зодіаку) не $365 \frac{1}{2}$ днів, як уважали до того, а менша, і виміряна ним величина в 365 днів, 5 годин і 55 хвилин тільки менш ніж на 7 хвилин перевищує справжню.

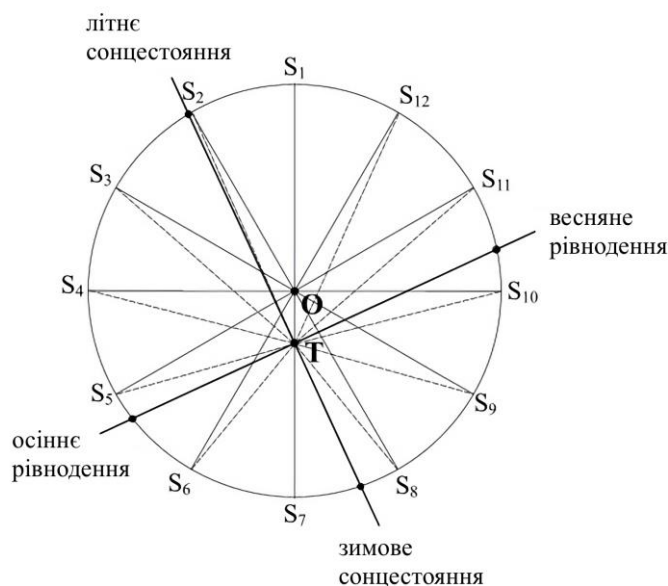
Саме цю виміряну Гіппархом тривалість року, округлену до $365 \frac{1}{4}$ днів, александрійський астроном Созіген поклав через 100 років в основу календарної реформи Юлія Цезаря. Звичайний рік (тривалість якого доти визначали хаотично) прирівняли до 365 днів, а для компенсації різниці кожен четвертий рік зробили на день довшим, «високосним». Але цей «юліанський» календар давав похибку в 1 добу впродовж 128 років — тож уже в середньовіччі гостро постала необхідність його вдосконалення. Таку реформу здійснив на основі висновків комісії астрономів папа Григорій XIII у 1582 р. — і цим «григоріанським» календарем ми користуємося досі. (Хоч українська та ще чотири помісні православні церкви, а також українські греко-католики ще довго використовували юліанський календар для визначення дат церковних свят. Тільки в починаючи з 1 вересня 2023 р. українські церкви перейшли при визначенні дат майже всіх свят на т.зв. новоюліанський календар, який упродовж ближчих сотень років цілком збігатиметься з григоріанським; при цьому лише дату Великодня та пов'язаних із ним свят далі визначають за юліанським календарем з міркувань церковної догматики).

Гіппарх першим виміряв паралакси Сонця й Місяця (кути, під якими видно земний радіус із цих світил) і за ними визначив, що ці світила віддалені від Землі на 1200 і 59 земних радіусів відповідно. Друге з цих значень (для Місяця) є доволі точним, перше (для Сонця) занижене приблизно у 20 разів, що зумовлене помилкою вимірювання сонячного паралакса.



Геометричні побудови, які Гіппарх використав для визначення відносних розмірів Сонця, Місяця та Землі

Гіппарх остаточно встановив, що тривалість пір року неоднакова (від весняного рівнодення до літнього сонцестояння проминає 94,5 дні, а від літнього сонцестояння й до осіннього рівнодення — на дві доби менше). Більше того, він дав дотепне теоретичне пояснення цього явища: Земля перебуває не точно в центрі кола, по якому рухається Сонце. Ця думка з погляду Арістотелевої фізики вже була доволі «єретичною» — адже «досконалими» й «вічними» визнавалися лише строго колові рухи без жодних «відхилень»! А справжнє пояснення причин такої нерівномірності дав через 18 століть Йоган Кеплер, сформулювавши свої закони руху планет по еліпсах.



Пояснення Гіппархом нерівномірності пір року рухом Сонця S навколо Землі T по ексцентричному колу, центр якого O зміщений убік від Землі

Нарешті, порівнюючи свої дані з вимірюваннями попередників, Гіппарх побачив, що за 150 років нерухомі зірки змінили свою довготу приблизно на 2° — і пояснив це обертанням полюса земного екватора

навколо полюса екліптики. Тому недарма історики науки стверджують, що саме Гіппарх надав завершеності геоцентричній системі світу, яка служила людству в його практичних потребах аж до нового часу, а Клавдій Птоломей у своєму «Альмагесті» лише додав до неї декілька остаточних штрихів.

Тіт Лукрецій Кар (бл. 99–55 рр. до н. е.)

У час Пунічних війн на світову арену виходить новий потужний гравець — Рим. У II ст. до н.е. Рим остаточно долає свого супротивника в довгій і кривавій боротьбі за домінування на Середземномор'ї — Карфаген, і без серйозного опору завойовує Грецію. Але при цьому дозволяє грекам «завоювати» себе культурно й науково: самі римляни порівняно мало що додали до наукових знань, накопичених греками. Частіше вони виступали лише «ретрансляторами», чи популяризаторами їхньої мудрості.

Через те у цій частині нашого посібника з римлян ми зустрінемо тільки Тіта Лукреція Кара, якого частіше називають просто родовим іменем Лукрецій. Достеменних біографічних відомостей про Лукреція майже не збереглося (повідомлення Ієроніма й Светонія датовано IV ст. н. е., і вони є маловірогідними). Цілком імовірно, що Лукрецій отримав філософську освіту в популярній на той час неаполітанській епікурейській школі, яку очолював Філодем.

Збереглася одна філософська поема Лукреція, не опублікована за його життя й, очевидно, незакінчена. За свідченням Светонія, її відредагував і опублікував Цицерон (імовірно, не знаменитий оратор, письменник та політичний діяч Марк Туллій Цицерон, а його брат Квінт). Пізніше вона отримала назву «Про природу речей» («*De rerum natura*»). Назва цілком відображає зміст. Цей твір Лукреція — єдина цілком збережена пам'ятка матеріалістичної думки античності; у ній систематично й аргументовано викладено античний матеріалізм, і особливо повно — найвище його досягнення, атомістичне вчення Демокріта і його послідовника Епікура.

Твір Лукреція — дидактична поема, що популяризує філософські ідеї, жанр, досить поширений у ті часи. Вкладаючи філософський зміст у плинні гомерівські гекзаметри, Лукрецій сам пояснив, чому він пише віршами: оскільки наукове знання важко сприймається, треба за допомогою поезії полегшити оволодіння ним; Лукрецій уважав поезію одним зі способів поширення знання. Кожній книзі передують поетичний вступ, за яким іде виклад відповідної частини атомістичної філософії.

Із назв підрозділів книги легко можна уявити собі зміст: «З нічого ніщо не родиться», «У природі ніщо не гине до краю. Вічність матерії», «У всесвіті є порожнеча», «Усе, що існує, є тіло або порожнеча. Третього між ними нема нічого».

Про речовину й про атоми («первісні тільця») філософ пише:

*Далі, в матерії ми розрізняємо первісні тільця
І складові, із тих первісних тілець сформовані речі.
Первісних тілець подужати сила не може ніяка:
Все переможуть вони невідпорною міццю своєю.
(Тут і далі — переклад Миколи Зерова).*

Далі філософ пише про незліченну кількість атомів і вічність їхнього руху та про неосяжність Всесвіту. За Лукрецієм, творчий процес у природі не залежить від волі богів. А аргумент, який наводить філософ, парадоксальний:

*Я би наважився твердити, за горішнім стежачи небом,
Спостерігаючи інші ділянки, що світу будова
В жадному разі не є і не може вважатися твором
Божеських рук, бо в споруді отій недоладностей повно.*

Як приклад наведено тут пояснення Лукрецієм дії магніту. З усіх тіл неперервно виходять потоки атомів, через які тіла й приходять у взаємодію. Потоки атомів з магніту настільки потужні, що навколо нього утворюється безповітряний простір, куди й «втягується» залізо. Причому такою властивістю «втягуватися» наділене тільки залізо: важчі тіла протистоять таким потокам, а легші містять порожнини, крізь які ці потоки безперешкодно проходять. Звідси видно, що й «атомісти» давнини любили будувати нічим не обґрунтовані гіпотези і зовсім не переймалися бажанням перевірити їх на досліді.

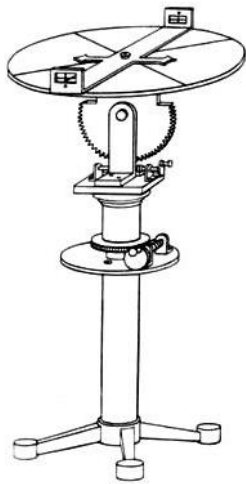
Герон Александрійський (бл. 10–70 рр. н.е.)

Про життя цього видатного математика, фізика й інженера-винахідника, який жив і працював в Александрії вже за римської доби, майже нічого не відомо. Лише на початку XX століття було відкрито й опубліковано арабські переклади його праць, які дозволили по-новому поглянути на масштаб цієї визначної особистості. Саме Герону належать наведені в праці «Метрика» формули для визначення площ кількох геометричних фігур, зокрема й елегантна формула Герона, що пов'язує площу довільного трикутника S із довжинами його сторін a , b , c і півдовжиною периметра p :

$$S = \sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)}.$$

Але більш відомі його інженерні роботи й винаходи. Саме він у тій-таки «Метриці» першим ретельно описав «п'ять головних пристроїв механіки»: важіль, корбу, клин, гвинт і блок. Саме він на підставі закону важеля першим дослідив принцип дії домкрата. Саме він сконструював

зручний кутовимірний прилад діоптр, який став прообразом пізнішого теодоліта.



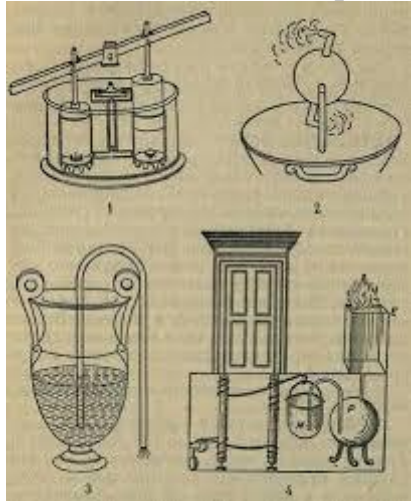
Діоптр Герона

Головною частиною діоптра була лінійка з закріпленими на її кінцях візирами. Ця лінійка оберталася по колу, що могло бути розташоване горизонтально чи вертикально. Для правильного встановлення приладу використовували прямовис і рівень. За допомогою приладу і прямокутних координат, Герон міг розв'язувати на місцевості різні задачі: вимірювати відстань між двома точками, коли одна з них або обидві вони недоступні спостерігачеві; провести пряму, перпендикулярну до недоступної прямої лінії; знайти різницю рівнів між двома пунктами; виміряти площу найпростішої фігури. На жаль, працю Герона «Про діоптр», де було описано і сам прилад, і методи геодезичних робіт із ним, було на багато століть забуто і знову віднайдено лише в 1814 році.

Сконструював учений і прилад для визначення великих відстаней на місцевості — одометр. Цей прилад був невеличким візком, установленим на двох колесах спеціально добраного діаметра. Колеса поверталися рівно 400 разів на міліатрій (стародавня міра довжини, що дорівнює 1598 м, — саме вона стала прообразом пізнішої милі). За допомогою зубчастої передачі в обертання приводилися численні колеса й коліщатка, а індикатором пройденої відстані були камінчики, що випадали в спеціальний лоток. Для того, щоб дізнатися, яка відстань була пройдена, потрібно було лише підрахувати кількість камінчиків у лотку.

Нарешті, саме Герон заклав основи автоматики, сконструювавши численні пристрої, описані в трактаті «Пневматика». Серед них був, наприклад, прилад, який відчиняв двері храму потону, як на жертovníку розпалювали вогонь (і розігріте повітря в герметичному просторі під жертovníком виштовхувало воду, що наповнювала відро, яке, опускаючись, і відчиняло двері через блок). Але деталі цього механізму залишалися невидимими для непосвячених, і вони сприймали побачене як божественне чудо.

Нарешті, саме Герон винагадав пристрій, де куля з двома патрубками починала обертатися, коли вода в закритому казані під кулею, осі якої були водночас і «підводами» пари, починала кипіти.



Винаходи Герона з його «Пневматики»: праворуч вгорі — «еоліпіл», внизу — пристрій, який відкривав двері храму

Цей «еоліпіл» Герона сам винахідник, напевно, сприймав лише як дотепну іграшку, але насправді в ньому вперше в історії було реалізовано принцип реактивного руху.

Клавдій Птоломей (бл. 100–170 рр. н.е.)

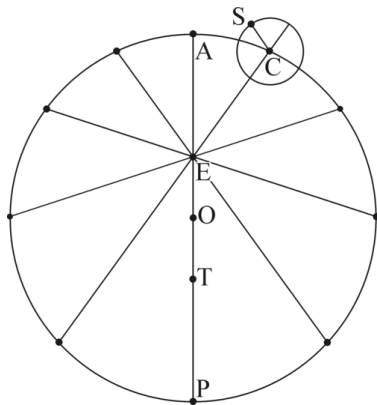
Клавдій Птоломей (або Птолеме́й), який народився в єгипетській Птоломеїді й працював в Александрії, став останньою великою науковою постаттю Античності. Авторитет Птолемея був надзвичайно високий: у Середньовіччі його однаково високо шанували магометани та християни, а коли його геоцентрична система світу в Новий час захиталася після появи праць Коперника та Галілея, рятувати її взялася католицька церква. Цю славу Птоломей завдячує головним чином астрономічній праці «Великий трактат» у тринадцяти книгах, яка стала підсумком усіх досягнень античної астрономії. Цю працю було перекладено в Європі в XIII ст. латиною з арабського перекладу. Пізніше було знайдено і список її грецького оригіналу, але вона так і ввійшла в історію науки під арабською назвою «Альмагест».



Клавдій Птоломей (старовинна гравюра)

Птоломей цілком стоїть на позиціях фізики Арістотеля. Згідно з «Альмагестом», нерухома Земля перебуває в центрі Всесвіту. Якщо Земля рухалася б, то нерухомі зірки на небосхилі змінювали б своє розташування, кинуті вгору предмети не падали б на те саме місце, а сама маса Землі врешті-решт розсіялася б від швидкого руху. Отже, з цих аргументів видно, що Птолемеєві насправді доводилося полемізувати з прихильниками обертання Землі. І для тодішніх учених, вихованих на працях Арістотеля, ці його аргументи здавалися неспростовними.

Найближче до Землі за ексцентричним Гіппарховим колом рухається Місяць. Але Птоломей виявив, що й посунувши Землю трохи вбік від центру цього кола, всіх нерівномірностей руху Місяця пояснити неможливо. Тож він мусив припустити, що Місяць рухається по малому колу — епіциклу, центр якого рухається по великому ексцентричному колу — деференту — навколо нерухомої Землі. Такі ж самі епіцикли Птоломей мусив запровадити й для наступних сфер — Меркурія, Венери, Сонця, Марса, Юпітера, Сатурна. Система виявилася настільки складною, що сам її автор писав: «Легше, здається, рухати планети самому, аніж збагнути їхній рух». Ця складність системи Птолемея і пришвидшила її падіння, коли після появи законів Кеплера, що описували нерівномірний рух планет, потреба в громіздких епіциклах відпала.



Рух планети S у системі Птолемея: T — нерухома Земля, O — центр деферента, E — точка екванта (точка, з якої рух планети виглядає рівномірним), A — апогей деферента, P — перигей деферента, C — центр епіцикла

Не обійшов Птоломей увагою і астрології, якій присвятив окреме «Чотирикнижжя». Його складні астрономічні побудови дозволили йому достатньо точно визначити взаємне розташування світил у потрібний момент часу — а на цьому й ґрунтувалися астрологічні «передбачення». Ця його праця мала в Середньовіччі величезну популярність — адже у владу світил над людською долею тоді вірили майже всі.

Птоломей лишив ще один трактат загального характеру, який став сумою всіх античних знань з оптики. Щоправда, він так і не зумів зрозуміти закону заломлення променя на межі середовищ (хоч і ставив відповідні досліди), вважаючи, що кут заломлення просто пропорційний до кута падіння (що наспраді має місце лише для малих кутів, де синус кута можна замінити самим кутом). А задача про заломлення цікавила його ще і як астронома: він розумів, що промені, які йдуть від зірок, заломлюються в повітрі, і тому кола, які описують зірки навколо полюса, дещо «сплюснені». Ще один трактат у трьох книгах «Про гармонію» Птоломей присвятив проблемам музики.

Нарешті, Птоломей написав і фундаментальну «Географію» у восьми книгах, до якої було прикладено 27 географічних карт.



Виконана в XV ст. копія карти світу Птолемея

Клавдій Птоломей описав у ній увесь відомий на той час світ: від Геркулесових стовпів (Гібралтарської протоки) на заході й до Синіки (Китаю) на сході. З виконаної в XV ст. копії карти світу Птолемея видно, що Середземномор'я і прилеглі землі Європи, північної Африки та передньої Азії вже зображено на ній достатньо правильно. На місці теперішньої України Птоломей позначає течію Бористена (Дніпра) та декілька міст на цій річці (в одному з них дехто з сучасних дослідників бачить Київ — але доказів на підтвердження такої думки немає). Але далі на схід контури континентів робляться дедалі фантастичнішими. Африка в нього зникається на півдні з Азією, перетворюючи Індійський океан на замкнене озеро.

Час життя Клавдія Птолемея був водночас часом найвищої могутності Римської імперії. Пізніше вона починає хилитися до занепаду. Західна Римська імперія припиняє існування в кінці V ст., не витримавши навали «варварських» племен. Східна Римська імперія (пізніші історики назвуть її «Візантійською», хоч самі візантійці завжди називали себе «ромеями», тобто римлянами) проіснує на тисячоліття довше і впаде 1453 року, коли турки захоплять її столицю Константинополь (тепер Стамбул). Над Європою і світом на довгі століття опуститься період, який згодом отримає назву Середньовіччя.

Епоха Середньовіччя (VI–XIV ст.)

Що відбулося:

VI ст. — Перша згадка про механічний годинник.

XI ст. — Розкладання швидкості кинутого тіла на дві складові — паралельну й перпендикулярну до площини (Альгазен).

— Омар Хаям удосконалив способи зважування й визначення питомої ваги (трактат «Терези мудроців, або Про абсолютні водяні терези»).

1121 рік — Альгацині написав трактат «Книга про терези мудрості» — своєрідний курс середньовічної фізики. Він містив таблиці питомої ваги твердих і рідких тіл (50 речовин), а також констатації, що закон Архімеда працює і для повітря, що питома вага води залежить від температури, що швидкість вимірюється відношенням пройденого шляху до часу.

XIV ст. (початок) — Гейтсбері запровадив поняття миттєвої швидкості й прискорення. Він-таки вперше розглянув питання про прискорений і сповільнений рухи і про шлях, пройдений за рівноприскореного руху.

XIV ст. — Дослідження відносного переміщення, розвиток теорії «рушійної сили» (Жан Бурідан, Ніколя Орем), використовується поняття «кількість матерії» (Жан Бурідан).

— запроваджено розрізнення поступального й обертального рухів;

— введено поняття кутової швидкості;

— Ніколя Орем дав графічне зображення руху й запровадив метод двовимірних координат. Відтоді в наукових працях з'являються графіки швидкості руху, й кінематичні докази набувають геометричного характеру.

Наука западає в сон і знову прокидається

Остаточна перемога християнства в Римській імперії наприкінці IV ст. завдала тяжкого удару мистецтву й науці, які юрби фанатичних ново навернених християн уважали «язичницькими». Вище вже згадувалося, як за намовою місцевого християнського єпископа було спалено безцінну Александрійську бібліотеку. У 415 р. юрма розлючених християн замордувала в тій-таки Александрії одну з останніх дослідниць доби Античності — різнобічно освічену й талановиту Гіпатію. Давні книжки гинули в численних пожежах тодішніх військових навал — разом із тими, хто їх переписував і здатен був прочитати.

На кілька століть інтелектуальне життя Європи занурилося в глибокий сон. Тутешні «вчені» займалися хіба що релігійною схоластиком, дискутуючи про те, скільки ангелів може розміститися на вістрі голки. Єдиними «науками», що мали пряме відношення до природи і якимось розвивалися в середньовічній Європі, були астрологія і алхімія. До них завжди була особлива увага, адже неписьменні забобонні володарі хотіли довідатися про свою майбутню долю й швидко збагатитися, а тому підтримували ченців, що намагалися відтворити хоч якісь уривки знань доби Античності, керуючись уцілілими давніми рукописами (клірики часто були єдиними, хто вміли тоді читати й писати незрозумілою для більшості латиною, єдиною тоді мовою науки, бо розмовними народними мовами наукові тексти почали писати тільки в XVII–XVIII ст.).



Прилади з лабораторії середньовічного алхіміка (Німецький національний музей у Нюрнберзі)

У 632 р. помер засновник нової релігії ісламу Магомет, і впродовж подальших 100 років його наступники створюють величезний арабський халіфат, який контролював Іспанію, північну Африку, майже всю передню Азію, Аравійський півострів і Персію. Саме цей халіфат зробився новим центром розвитку науки, а при дворі багдадських халіфів було зібрано найкращих учених свого часу. Легендарний Гарун аль-Рашид (786–809) розіслав триста спеціальних посланців усіма землями своєї неозорої держави з наказом розшукувати й звозити до Багдада давні рукописи.

Адже на завойованих арабами землях опинилося багато осередків колишньої грецької мудрості — і завойовники почали активно перекладати вцілілі від вогню книги. Араби швидко захопилися філософією і стали з найглибшою повагою ставитися до постаті Арістотеля. Так само величезне враження справила на них і астрономія Птолемея. Але вже в IX столітті вони почали давати й власних оригінальних мислителів та дослідників: філософів, астрономів, лікарів. І на цей процес не вплинуло спершу негативно навіть те, що величезний халіфат став розпадатися і на його околицях (в Іспанії, в Марокко тощо) почали виникати незалежні мусульманські держави.

Центрами арабської науки стали Багдад (VIII–IX ст.) і Кордова в Іспанії (X ст.). Її характерною рисою була практична спрямованість знань й інтерес до різноманітних дослідів (якими, як ми пам'ятаємо, греки майже не цікавилися). Паралельно арабські вчені перекладали й коментували твори античних авторів. Їхні досягнення істотно збагатили скарбницю людських знань у царинах медицини, математики, астрономії, географії, філології, історії, хімії, мінералогії.

Арабські вчені досліджували речовини та їхні перетворення. Перший арабський хімік (і водночас — алхімік) абу-Муза Джабір (європейці пізніше називатимуть його Габер) працював за часів Гаруна аль-Рашида. Він цікавився складом металів і теорією горіння. Ним та його наступниками було детально описано процес кристалізації, перегонки, сублімації, розчинення, випалу тощо. У їхніх творах є рецепти забарвлення

тканин, очищення речовин, виготовлення лаків. Тоді було вперше отримано азотну кислоту, хлорну ртуть, нашатир.

Дещо пізніше народжений у Бухарському еміраті Ібн-Сіна (980–1037, європейці переінакшать його ім'я на Авіценна) створить «Канон медицини», за яким ще цілі століття навчатимуть у європейських університетах лікарів. Йому ж належить і «Книга спасіння», в трьох частинах якої («Логіка», «Фізика», «Метафізика») дано короткий виклад учення Арістотеля. Нещодавно з'явився й український переклад цього важливого для середньовіччя наукового трактату.

Астроном аль-Баттані (858–929), який посідав і високу посаду намісника халіфа в Антіохії, уточнив багато висновків самого Птолемея. Арабські астрономи переклали основну працю Птолемея «Велика побудова» і назвали її «Альмагест», тим самим зберігши її для науки. А здійснене тоді ж за наказом халіфа аль-Мамуна, сина аль-Рашида, вимірювання окружності Землі дало результат, точніший за число Ератосфена. У IX ст. в Багдаді і Дамаску були споруджені дві астрономічні обсерваторії, в яких систематично спостерігали за Сонцем, Місяцем і планетами. В окремих випадках точність спостережень арабських астрономів суттєво перевершувала досягнення греків.

Арабські математики теж пішли далі від греків. Вони дали алгоритм розв'язування квадратних рівнянь і почали розглядати задачі, що призводять до рівнянь третього, четвертого і п'ятого ступенів. У зв'язку з астрономічними спостереженнями араби стали інтенсивно розвивати тригонометрію.

Тим часом і в Європі з початку IX століття починається певне інтелектуальне пожвавлення. Карл Великий, який на Різдво 800 року коронував себе в Римі імператорською короною, при своєму дворі в Аахені зібрав гурток учених кліриків на чолі з англосаксом Алкуїном, які теж почали розшукувати, переписувати й тлумачити давні наукові трактати. Сам володар охоче вів із ними учені диспути — хоч до кінця життя так і не навчився писати й читати. Після смерті Карла цей гурток швидко розпався, але нові осередки знань уже почали виникати по різних монастирях. Папа Сильвестр II (999–1003) був першим, хто почав цілеспрямовано «імпортувати» арабську вченість до Європи. Після його смерті забобонні клірики оповідали, що він продав душу дияволу й тримав при собі в чалмі чортеня...

Після початку доби хрестових походів (кінець XI ст.) контакти між християнським і мусульманським світами значно інтенсифікуються. А з початку XII століття в Європі починають уже масово перекладати латиною з арабської ті класичні наукові праці давнини, які самі араби встигли перед тим перекласти з грецької. Водночас починають розшукувати й окремі грецькі оригінали (які пролежали без руху по монастирських бібліотечних полицях усе раннє середньовіччя — грецької мови тоді в Західній Європі майже ніхто не знав). Так Європа повертає собі давню мудрість, і на її

основі береться (спершу дуже несміливо й непослідовно) накопичувати нові знання.

**Абу Алі аль-Хасан Ібн Аль-Хайсам аль-Басра
(965 — бл. 1040)**

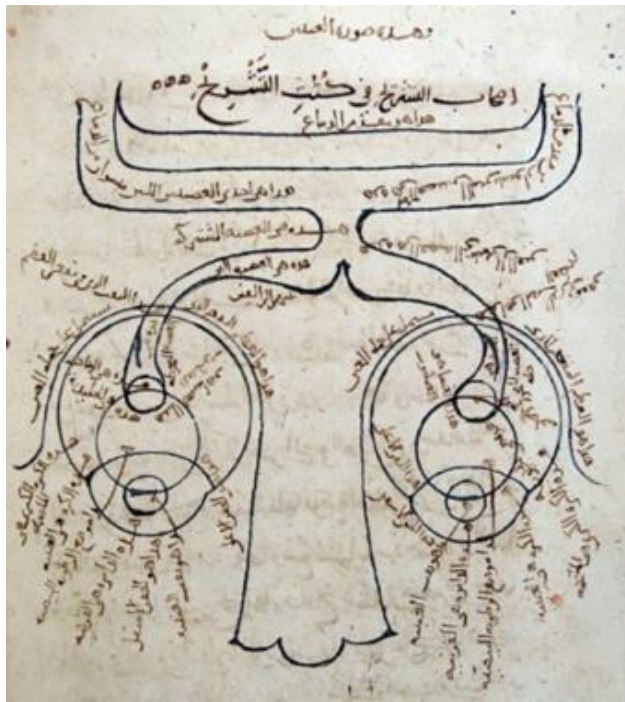
Цей учений, якого європейці називали латинізованим іменем Альгазен, був справжнім універсалом.

У рідній Басрі, що в Малій Азії, він посідав високу посаду, проте зрікся її задля науки. Серед його проєктів було й регулювання течії Нілу шляхом спорудження греблі нижче від Асуана (такий проєкт здійснили лише в другій половині XX ст.). Почувши про цей план, єгипетський халіф запросив ученого до себе. Але коли Аль-Хайсам зрозумів, що наявними тоді технічними засобами здійснити цей проєкт неможливо, халіф піддав його гонінням і, щоб урятуватися, вчений змушений був удавати божевілья. Лише за наступників халіфа він отримав свободу і жив у пошані в Каїрі до самої смерті.

З 92 творів Аль-Хайсама 89 присвячені математиці, астрономії, оптиці та механіці. При цьому вчений поєднував у своїх наукових заняттях ретельні експерименти зі строгими математичними доказами. Часто його називають «батьком оптики».

Аль-Хайсам цікавився анатомією людського ока. Він помилково вважав, що зображення виникає в кришталіку (насправді — на сітківці), але правильно припустив, що два зображення, що виникають окремо в кожному оці, зоровий нерв поєднує в одне. Він остаточно поховав ідею «зорових променів» Демокріта, натомість вважаючи, що з кожної точки предмета багато променів приходять до ока. Крім того, він першим висловив припущення про те, що світлові промені розповсюджуються з великою, але скінченною швидкістю (його сучасники вважали, що це відбувається миттєво).

Щоб перевірити свої думки про світло, учений ставив переконливі досліди. Так, він повісив на різній висоті два ліхтарі за межами темної кімнати з отвором у стіні. Відкриваючи і затуляючи ліхтарі, Аль-Хайсам побачив, як на стіні кімнати з'являються й зникають світляні плями, причому пляма від кожного з ліхтарів розташована на одній прямій із самим ліхтарем та отвором. Цей дослід доводив, що світло випромінюється його джерелами, а не людськими очима, й поширюється по прямій лінії.



Структура людського ока за Аль-Хайсамом (із середньовічного рукопису)

Аль-Хайсам лишив нам багато вишуканих задач на відбиття світла від дзеркал різної форми. Щоправда, він не зумів покращити уявлень Птолемея про закон заломлення. Зате він уже знає про збільшувальну спроможність скляної лінзи напівсферичної форми.

Саме Аль-Хайсаму багато століть приписували й перше вимірювання висоти земної атмосфери. І лише зовсім нещодавно встановлено, що насправді ця праця належить його сучаснику Ібн Муджаду (989 – 1079), який жив і працював у завойованій тоді арабами Іспанії. До нього вважали, що вона сягає дуже далеко, аж до сфери Місяця. Натомість учений припустив, що наявність періоду сутінок після заходу сонця обумовлена відбиттям сонячного променя від верхнього краю атмосфери. Вважаючи, що сутінки закінчуються тоді, коли Сонце проходить після заходження за обрій 18° , учений отримав висоту атмосфери в 52 000 кроків. Цей результат покращив тільки Йоганн Кеплер, урахувавши, що промінь насправді зазнає в атмосфері не одноразового відбиття, а поступового заломлення.

Абуль-Фатх Абдуррахман аль-Мансур аль-Газіні (1077–1155)

Цього математика, фізика, хіміка й астронома європейці знали під латинізованим іменем Альгацині. Вважають, що він був за походженням ісламізованим греком і народився рабом. Але його господар, що був скарбником у місті Мерв (теперішня Туркменія), не лише звільнив його, а й допоміг отримати освіту. Учителем Аль-Газіні був славетний поет і вчений Омар Хаям. Вони разом працювали і над удосконаленням сонячного годинника, і над реформою перського календаря.

Аль-Газіні мав надзвичайно смиренну вдачу. Хоч він був високопосадовцем при султані Санджарі, володарі імперії Сельджуків, але все його господарство складалося, за його словами, з його kota і з нього самого. Вчений відмовився від щедрої винагороди за свої твори, говорячи, що гроші йому не потрібні.

Хоч його твори ще в XIV ст. потрапили до візантійців, пізніше про них на довгий час забули. Лише в середині XIX ст. знову віднайшли й надрукували в англійському перекладі його головний трактат «Книгу про терези мудрості», що був своєрідною енциклопедією тодішньої фізики.

Цю назву можна сприймати як поетичну метафору. Але в книзі йшлося про реальні сконструйовані вченим терези, які дозволяли визначати питому вагу різних речовин. Їхня дія була побудована на двох Архімедових законах: рівноваги важеля й втрати ваги тіл у рідині. На коромислі цих терезів з рівними плечами містилися не дві, а п'ять шальок, три з яких можна було переміщувати. Тільки одна рухома шалька дозволяла напряму, без гирьок визначати вагове співвідношення двох тіл. Друга давала змогу зважувати предмет, занурений у воду, а третя слугувала для врівноваження другої шальки. Такі терези давали, зокрема, змогу легко розв'язати завдання про склад матеріалу вінця, поставлене перед Архімедом царем Гієроном.

З допомогою цих терезів учений із дивовижною точністю визначив питому вагу різних субстанцій (у дужках для порівняння дається в г/см³ сучасне значення): золото 19,05 (19,26); ртуть 13,56 (13,557); срібло 1,43–1,45 (10,36); коване залізо 7,74 (7,6–7,79); перли 2,60 (2,68); слонова кістка 1,64 (1,83–1,92); вода в стані кипіння 0,958 (0,9597); вино 1,022 (0,992–1,038); коров'яче молоко 1,110 (1,04–1,42). Цікаво, що вчений виявив різницю в питомій вазі води при кімнатній температурі влітку і взимку, — від чого лишався тільки крок до розуміння температурного розширення тіл і винаходу водяного термометра.

Далі Аль-Газіні описує винайдену ним посудину для визначення об'єму тіл. Ця посудина була устаткована трубкою, якою просто в шальку терезів стікала витіснена тілом вода, і за її зважуванням зразу визначався об'єм. Ці свої терези вчений використовує для найрізноманітніших потреб, аж до вимірювання часу. Для цього він брав резервуар, із якого вода витікала впродовж 24 годин, урівноважував його гирями, і у міру витікання води резервуар піднімався вгору й показував точний час.

Як відзначив німецький історик науки Фердінанд Розенбергер, книга Аль-Газіні дає вичерпне уявлення про сильні й слабкі сторони середньовічної східної фізики: вона виявляла надзвичайну вигадливість у створенні експериментальних пристроїв, але в теоретичному плані повністю спиралася на роботи греків (у цьому випадку — Архімеда).

На жаль, невдовзі після смерті Аль-Газіні розпочався занепад науки в мусульманському світі. Єдиний арабський халіфат перестав існувати. Різні мусульманські держави, що виникли на його території, вели затяті

війни між собою та з сусідами-християнами (в Іспанії — з діячами Реконквісти, в Палестині — з хрестоносцями, в Малій Азії — з візантійцями). В цих державах урешті-решт переміг релігійний фанатизм, ім'я Арістотеля зробилося оганьбленим, філософів стали зневажати, а їхні твори знищувати.

Траплялися, звісно, й потому короткі спалахи пробудження інтересу до науки. Так, онук славетного завойовника Тимура, володар Самарканда Улугбек (1394–1449) побудував унікальну астрономічну обсерваторію і заснував медресе — своєрідний університет. Під керівництвом Улугбека було створено незрівнянні за точністю астрономічні таблиці. Але врешті-решт володаря було вбито, а його обсерваторію зруйновано. На багато століть світська наука в мусульманських країнах припинила існування.

Альберт Великий (бл. 1193 — 1280)

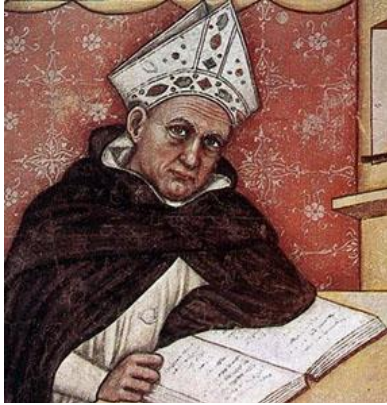
Зі сходу центр наукової діяльності знову переміщується в Європу. До XII століття вся «наука» залишалася тут суто схоластичною, побудованою виключно на тлумаченні давніх текстів — насамперед Біблії та творів Отців Церкви. Але поволі свіжі віяння починають проникати навіть за товсті монастирські мури.

Навіть догмати віри починають піддаватись логічним доказам. Прикладом таких схоластичних вправ може бути знаменитий доказ існування Божого, придуманий відомим теологом Ансельмом (1033–1109), який став архієпископом Кентерберійським: Бог, як найдосконаліша істота, з необхідністю мусить існувати, бо інакше він не був би досконалим!

У XII–XIII столітті в Європі, крім монастирів, з'являються й нові осередки наукової думки: в Болоньї, Салерно, Падуї, Парижі, Оксфорді, Кембриджі виникають перші університети. Класичний середньовічний університет був замкнутою самоврядною корпорацією (в її внутрішню діяльність королівська влада не втручалася), і складався з чотирьох факультетів: теологічного, правничого, медичного і філософського. На останньому викладали всі «вільні науки», керуючись працями стародавніх мудреців. Той, хто пройшов повний курс і витримав складний іспит, діставав ступінь доктора (сучасний ступінь «доктора філософії» нагадує про часи, коли всі природничі науки були зосереджені в стінах єдиного філософського факультету; окремо присуджувалися ступені доктора теології, медицини й права).

Процес відродження фізики навіть у таких скромних обсягах відбувався непросто. На соборах 1209 і 1215 років католицька церква засудила фізику Арістотеля як таку, що може породжувати єресі. Але вже в 1254 році Паризький університет видав усі твори Арістотеля без винятку, а пізніше знання їх зробилося необхідним для одержання докторського ступеня. Витлумачений у схоластичному дусі Арістотель став основою пізньосередньовічної освіченості.

Тоді ж починають проводити межу між методом пізнання в богослов'ї та у філософії. Визначний учений середньовіччя Альберт Великий, якого називали «*doctor universalis*» — тобто універсальний доктор, і теології, і філософії, і права, і медицини, — вважає, що положення «з нічого не виникає нічого» не застосовне до богослов'я (бо воно суперечить біблійній оповіді про створення світу), але має застосовуватись у фізиці!



Альберт Великий (фреска 1352 р.)

Альберт народився в Швабії в родині графа, але, знехтувавши війни та лицарські турніри, зробився не лише видатним богословом (у 1931 р. канонізованим католицькою церквою), але й знаменитим фізиком, математиком та астрономом. Він вивчав діалектику в Парижі, математику й медицину — в Падуї, а згодом, зробившись у 1223 р. ченцем-домініканцем, слухав лекції з богослов'я в Болоньї. З 1229 р. він сам професорував у Кельні та в Парижі й посідав високі церковні посади. Під старість, зрікшись сану єпископа Регенсбурзького, він знову повернувся на свою колишню кафедру в Кельні, де й викладав до глибокої старості.

Альберт бездоганно знав усього Арістотеля — причому не лише в латинських перекладах, а й за творами арабських коментаторів (давньогрецькою мовою він не володів). Тому він разом зі своїм знаменитим учнем Томою Аквінським (1225–1274), піднесеним до чину святих ще в XIV ст., робив усе, щоб узгодити основи католицького віровчення з Арістотелевою філософією.

Водночас він був вправним механіком та винахідником. Про його винаходи ходили легенди. Переказували, що він умів перетворити зиму на літо, щоб улаштувати бенкет у монастирському саду (основою для легенди послужив, очевидно, розбитий ним «зимовий садок» в оранжереї, яка була тоді в Німеччині дивовижею), а одного разу створив мідну людину, яка так доладно відповідала на запитання, що учень Тома, злякавшись підступів диявола, розбив її. У працях Альберта Великого згадано й два такі ще майже невідомі тодішній Європі винаходи, як компас і порох, які за якихось двісті років революціонізують мореплавання (за часів самого Альберта кораблі намагалися не віддалятися від берега) та способи ведення війни.

При цьому оригінальним дослідником у сучасному розумінні Альберт Великий не був. Його головна заслуга полягала в тому, що він широко розчинив двері для античної мудрості в християнську Європу і заклав тим основу для піднесення науки в наступних сторіччях.

Роджер Бекон (1214–1292)

Цей чернець-францісканець поза сумнівом був найталановитішим дослідником природи свого часу. Водночас він став першим помітним європейським науковцем — жертвою церковних гонінь, відкривши той трагічний список, який потім прикрасять імена Джордано Бруно і Галілео Галілея.

Учений народився в Англії, у графстві Сомерсетшир. Після навчання в університетах Оксфорда й Парижа він у 1250 р. вступив до чернечого ордену, адже лише статус клірика давав тоді змогу спокійно займатися ученими дослідженнями. А вже на той час Бекон мав напрацювання в математиці, механіці, оптиці, астрономії та хімії. Проте надії не справилися. Брати-францісканці не змогли вибачити вченому його очевидної інтелектуальної вищості й звинуватили його в ересі та чаклунстві. Це було дуже небезпечне звинувачення — адже з 1252 р. інквізиції дозволено було добувати зізнання тортурами. Бекон позбавляють кафедри в Оксфорді й кидають до в'язниці.

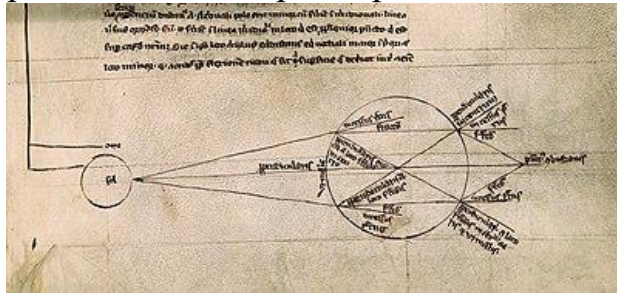
Тодішній папа Климент IV був особистим другом Бекон, саме йому вчений присвятив свій «Opus maius» — «Великий твір», що був коротким викладом усіх тодішніх знань (1268). Завдяки заступництву папи Бекон виходить із в'язниці, але після смерті Климента потрапляє до неї знову — його схопили у Франції, де він намагався переховуватися. Нове ув'язнення тривало понад 10 років. Вийшов з тюрми Бекон у 1288 році вже старою і хворою людиною. Всі його наукові праці було написано до другого ув'язнення.

На відміну від усіх учених сучасників, Бекон не цікавили схоластичні суперечки на теми релігії. Натомість він охоче займався математичними викладками, астрономічними спостереженнями, хімічними дослідженнями, конструюванням механічних пристроїв. «Математика — ключ і двері до вченості» — стверджував він у своєму «Великому творі».

Роджер Бекон палко обстоює експериментальний метод: «У кожній науці необхідно дотримуватися найкращого методу, тобто досліджувати річ у належному порядку, ставити легке перед важким, загальне перед частковим і просте перед складним. Виклад має бути доказовим. А це неможливо без досліду».

У фізиці Бекон найбільше уваги приділяв оптиці, де спирався на праці Птолемея і Аль-Хайсама, які, напевно, читав в оригіналі: вважають, що він знав грецьку й арабську мови. Бекон описує новий спосіб виготовлення дзеркал, за якого скло покривається з одного боку свинцем

(раннє Середньовіччя знало переважно шліфовані металеві дзеркала, які давали тьмяне й нечітке зображення). Велику увагу Бекон приділяє запалювальним дзеркалам і законам заломлення. Він досліджує напівсферичні лінзи й показує, що вони здатні збільшувати предмети. Хоча він ще не додумався до того, що таку лінзу значно краще тримати безпосередньо біля очей (перші окуляри почнуть виготовляти в Італії лише на початку XIV ст.), і рекомендує, слідом за Аль-Хайсамом, просто класти її на предмет, який потрібно роздивитися.



Заломлення світла сферичною посудиною з водою (рисунок Бекона)

Бекон був дитиною свого часу і, попри власну декларацію про відданість дослідів, любив будувати сміливі гіпотези, які ніяким дослідом підтверджені бути не можуть. Він пише, зокрема, що «завдяки дзеркалам можна буде виявляти найпотаємніші дії у найвіддаленіших місцях, фортецях та арміях» — хоч на той час це було не більше, аніж фантастичною мрією.

Жан Бурідан (бл. 1301 — бл.1358)

Життя цього французького філософа, учня Вільяма Оккама й професора Паризького університету, оточене різними переказами. Навіть обставини його смерті не є достеменно відомими. Існує легенда, що король Франції Філіпп IV Красивий, довідавшись про зв'язок ученого зі своєю дружиною, освіченою покровителькою наук Жанною Наварською, наказав захистити його в міх і втопити в Сені. Принаймні, через сто років після описуваних подій у «Баладі про пань минулих часів» знаменитий поет Франсуа Війон допитується: де

*...красуня невблаганна,
Та, що зашить звеліла в міх
І в Сену вкинуть Бурідана?
А де ж тепер торішній сніг?*

(Переклад Григорія Кочура)

Жан Бурідан був філософом і увійшов в історію сюжетом про «буріданового віслюка», який перебуває на рівній відстані між двома оберемками сіна і ризикує загинути від голоду, бо через свою нерішучість не може віддати переваги жодному з них. Але принаймні одна його думка мала й важливе значення для фізики.

Вище ми бачили, з якими проблемами зіткнувся Арістотель, намагаючись пояснити продовження руху тіла, на яке вже перестала діяти сила. Причиною було те, що він ще не здогадувався про існування інерції. Натомість Бурідан припустив, що дія сили надає тілу певної якості, яку він назвав *impetus* (латиною: натиск, розгін), і тіло рухається доти, доки ця якість не вичерпується. Пізніші дослідники вбачали в цьому понятті предтечу і Галілеєвої інерції, і Декартової кількості руху (імпульсу). Сам Бурідан, напевно, сприймав свій *impetus* по-інакшому, в дусі середньовічної філософії, — але було видно, що людській думці вже тісно в рамках давніх схоластичних схем. І паростки нового вже неможливо було стримати.

У цьому ж XIV ст. думка про кулястість землі знову стала панівною — принаймні серед освічених людей, вихованих на творах грецьких учених та арабських мудреців. Нагадаємо: в ранньому Середньовіччі більшість європейців уявляла Землю як плоский диск чи прямокутник, на краях якого небосхил змикається з водою океану, що омиває з усіх боків населену Ойкумену. Проте велика поема Данте Аліг'єрі «Божественна Комедія», написана на початку XIV ст., вже малює устрій Всесвіту саме за Арістотелем: у центрі світобудови розташована нерухома куляста Земля (під поверхнею якої влаштоване Пекло, де караються грішні душі). Землю оперізують концентричні кришталеві сфери, які обертають Місяць, Сонце і планети. За сферою нерухомих зірок розташовані небо першодвигуна, який обертає всі сфери, розташовані під ним, і емпірейне небо, де блаженні душі можуть бачити сяйво самого Творця. У безсмертному творі Данте досягнення тодішньої науки (поет багато і докладно говорить про рухи світил, цитує праці з геометрії, механіки та оптики і навіть знає, що тодішній календар дає похибку приблизно в один день на 128 років) органічно поєднуються з релігійними видіннями.

Наука і техніка починають поволі змінювати й повсякденне життя людей (яке кілька століть до того текло звичним трибом з покоління в покоління, майже не змінюючись і не зазнаючи ніяких удосконалень). У XIV ст., як уже говорилося, спершу італійці, а потім і мешканці інших країв Європи починають носити окуляри зі спеціально шліфованими лінзами, що дозволяють компенсувати короткозорість і далекозорість. Тоді ж європейські міста починають прикрашати годинники на вежах, і це здійснило справжню революцію в облікові часу.



24-годинний циферблат старовинного годинника у Флоренції з однією стрілкою

Адже до того впродовж багатьох століть людство знало тільки сонячні чи водяні годинники, застосування яких було дуже обмежене. Години в ранньому середньовіччі відраховували від сходу (денні) й від заходу Сонця (нічні), причому тих й інших було по 12, і денні години навесні і влітку виявлялися довшими від нічних, а восени і взимку — навпаки. Перші годинники з гирями й коліщатками з'явилися в Італії у XIII ст. Тоді ще не знали маятників, і рівномірність ходу забезпечувало обертальне коливання важкого хрестоподібного елемента навколо осі вертикального підвісу (пізніше подібні за принципом дії коліщатка-балансири було використано в кишенькових годинниках, які почали набувати поширення з XVII ст.). Механічний годинник з гирями на міській вежі мав спершу одну-єдину стрілку, і його циферблат ділився на 24 години. З Італії такі годинники почали завойовувати інші країни Європи (годинник над паризьким парламентом установили у 1364 р., перші «зегарі» на ратушах українських міст з'явилися в XVI ст.).

З усіма цими змінами Європа вступала в нову добу Відродження, коли перед наукою відкрилися нові обрії.

I. МЕХАНІКА

Епоха Відродження (XV–XVI ст.)

Що сталося:

XV ст. Дослідження вільного падіння й руху тіла, кинутого горизонтально, вивчення зіткнення тіл, розширення поняття моменту сили, винахід механізмів для передачі й перетворення рухів — кулькопідшипника, ланцюгових і ремінних передач тощо (Леонардо да Вінчі).

1475 р. Леонардо да Вінчі висловив ідею про неможливість вічного двигуна.

XV ст. Нікола Кузанський розвиває думку про те, що рух є основою всього сутнього, а нерухомого центру Всесвіту не існує (ідея відносного руху). Всесвіт нескінченний, Земля й усі небесні тіла створено з однієї й тієї ж першоматерії.

1543 р. Вийшла в світ праця Миколая Коперника «Про обертання небесних сфер» з викладом геліоцентричної системи світу. Вона привела до революційних перетворень у світогляді й природознавстві.

1583 р. Галілео Галілей відкриває ізохронність коливань маятника.

1584 р. Опубліковано діалог Джордано Бруно «Про нескінченність, Всесвіт і світи», де висловлено ідею про нескінченність Всесвіту, про існування в ньому, крім Сонячної, інших планетних систем, про можливість відкриття нових планет у нашій Сонячній системі, про обертання Сонця й зірок навколо осі, а також ідею про єдність законів природи.

1585 р. Опубліковано трактат Джованні Бенедетті «Різні математичні й фізичні міркування», де викладено зокрема принцип інерції, вжитий для пояснення прискорення руху тіла, а також здогад про відцентрову силу й доведення гідростатичного парадоксу.

1586 р. Вийшов у світ трактат Сімона ван Стевіна «Принципи статички», в якому викладено принцип неможливості вічного двигуна, запропоновано оригінальне доведення умови рівноваги тіл на похилій площині, відкрито закон додавання сил (паралелограм сил) і розкладання сили на дві складові, сформульовано для окремого випадку принцип можливих переміщень.

Пізнання скидає пута схоластики

Доба Відродження, яка розпочалася в Італії в XIV ст., приходила звідти у всі інші країни Європи — кудись швидше, кудись із запізненням (в українські землі, що перебували в складі Польської корони та Великого князівства Литовського, вона прийшла на двісті років пізніше). Але скрізь вона знаменувала появу нових яскравих творів архітектури, мистецтва,

літератури (звідки «мертву» латину починають витісняти живі народні мови). Повсюди людська думка починає звільнятися від пут середньовічної схоластики. На зміну їй приходить гуманізм, який у центр своїх зусиль ставить не безплідне повторювання давніх текстів, а сучасну Людину з її прагненнями і переживаннями.

Гуманісти розпочинають непримиренну боротьбу зі схоластикою. Хтось веде її в гумористичному ключі, як-от, французький письменник і лікар Франсуа Рабле (1494–1553), який у своєму романі «Гаргантюа і Пантагрюель» дошкульно висміює всі вади схоластичної освіти. А хтось, як іспанський філософ-гуманіст Хуан Луїс Вівес (1492–1540), серйозно доводить, що бути справжнім послідовником Арістотеля — це означає піти далі від нього, і звертатися не до багато разів перечитаних давніх сторінок, а безпосередньо до природи (як це й робили давні мислителі). Нарешті, славетний мислитель Еразм Роттердамський (1466–1536) успішно поєднував ці обидва підходи, пишучи просякнуті духом гуманізму коментарі до грецької Біблії і водночас — сповнену ядучого сарказму «Похвалу глупоті». Й одночасно аж до кінця життя (що припав уже на початок доби Реформації) Еразм залишався вірним сином католицької церкви.

Колосальний вплив на розвиток і поширення знань справило книгодрукування. Адже до половини XV ст. книги залишалися рукописними, а тому дуже дорогими й рідкісними. Щоправда, друкування відбитків із різьблених цільних дерев'яних дощок знали ще китайці 2000 років тому. Практикували його і в середньовічній Європі — але в дуже обмежених обсягах: за витратою зусиль воно не набагато випереджало рукописну книгу, а за якістю їй значно поступалося. Потрібен був геній ювеліра й механіка з Майнца (Німеччина) Йоганна Гутенберга (бл.1400–1468), який у 1440-і рр. винайшов спосіб друкування відбитків з матриці, складеної з окремих пересувних літер. Виготовивши п'ять наборів різних шрифтів, Гутенберг на початку 1450-х надрукував два перші видання Біблії. А вже з 1470 по 1500 рр. в Європі було надруковано понад 10000 різних видань книжок (з них майже 3000 — у Венеції, яка зробилася центром світового книговидання). Знання стали доступними не тільки обраним «мудрецам» у монастирських чи університетських стінах, а широкому колу освічених людей.

Тоді ж розпочалася доба великих географічних відкриттів. Європа потребувала східних товарів, і насамперед прянощів, без них люди вже не уявляли своєї кухні (використання прянощів мало й «утилітарне» призначення: за відсутності холодильників харчі влітку швидко псувалися, а щедро посипані прянощі зберігали їхній придатний стан трохи довше). Але традиційні «прямі» шляхи підвезення цих прянощів зі Сходу виявилися перекритими після захоплення Константинополя турками (1453).

У 1492 р. генуезький мореплавець на службі Іспанської корони Христофор Колумб, намагаючись прокласти новий «західний» шлях до

багатих прянощами Китаю та Індії (і базуючись при цьому на хибних оцінках окружності Землі, які робили її вдвічі меншою, ніж насправді), уперше досягнув островів біля узбережжя Америки. Цікаво, що рада університету Саламанки, яка складалася з теологів і розглядала цей його проєкт, застерігала: якщо Земля насправді кулеподібна, то Колумб може й не зуміти повернутися назад із її похилого краю на вершину! На щастя, королева Ізабелла, схвалюючи експедицію Колумба, не прислухалася до цих «учених» доказів.

У наступні роки Колумб здійснив ще три подорожі в Новий Світ, але помер розореним і забутим. Відкритий ним континент отримав назву Америка від імені іншого італійця, Америк Vesputchi, який у 1499–1502 рр. здійснив дві подорожі до невідомого ще перед тим узбережжя Бразилії. Але потому, як іспанці завоювали в наступні десятиліття багаті на золото імперії ацтеків (Мексика) та інків (Перу), й Іспанія зробилася наймогутнішою державою Європи, Колумб посмертно одержав статус її національного героя.

Паралельно у 1497–1499 рр. португалець Васко да Гама відкриває шлях до Індії навколо Африки і показує, що Індійський океан сполучається на півдні з Атлантичним (а не є замкненим озером, як на давній карті Птолемея).

У 1519 р. ескадра під проводом португальського мореплавця на іспанській службі Фернандо Магеллана вирушила в першу навколосвітню подорож. Сам Магеллан загинув у 1521 р. у військовій сутичці на Філіппінських островах. У 1523 р. єдиний уцілілий з п'яти кораблів експедиції корабель повернувся до Іспанії; на його борту залишалися 18 украй знесилених моряків з 270, які вирушали в подорож. Але ціною цих зусиль і жертв межі відомого європейцям світу безмежно розсунулися. Коли ще в кінці XV ст. європейці, за браком кращих, використовували давні карти Птолемея, то в середині XVI ст. континенти на нових картах набули вже обрисів, схожих на сучасні. Хоча ближче до полюсів на них лишається ще чимало фантастичного, але землі в «середній смузі» зображено скрізь уже цілком реалістично.



Карта світу Абрагама Ортелія (1570)

Розвиток мореплавства поставив перед наукою і технікою декілька важливих завдань, пов'язаних із точним визначенням географічних координат. Для цього потрібні були точні й компактні кутовимірні прилади, точні годинники, точні таблиці розташування планет у різні моменти часу (які заміняли відсутні годинники).

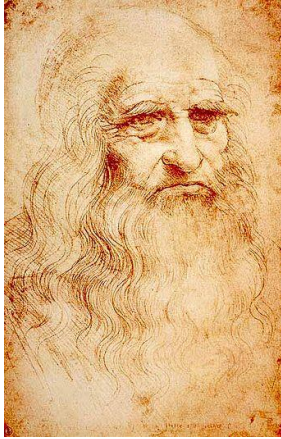
Нарешті, гострою зробилася й проблема календаря: у XVI ст. «набігла» різниця вже в 10 днів між днем весняного рівнодення 21 березня, обчисленим за юліанським календарем, і реальним астрономічним днем весняного рівнодення. Тому традиційно зимові церковні свята повільно, але невблаганно наближалися до астрономічної весни, а весняні — до літа. А реформа календаря потребувала солідної «теоретичної бази».

Дедалі швидше змінювався й повсякденний спосіб життя. Найбільші зміни торкнулися поширеного тоді ремесла воїна. Поява вогнепальної зброї і дедалі ширше використання гармат зробило актуальними задачі балістики: адже необізнані з «Фізикою» Арістотеля гармаші збагнули, що при обстрілі далекого об'єкта ствола (дула) гармати потрібно наводити не безпосередньо на нього, а значновище. Дивним здалося б таким прагматичним гармашам і пояснення Арістотелем причини польоту ядра, наче підштовхуваного ззаду повітрям, що заповнює утворену позаду від ядра порожнечу...

Усе це разом створювало передумови для нового ривка в розвитку механіки (зокрема й небесної). А сам дух доби Відродження сприяв появі людей, здатних такий ривок зробити.

Леонардо да Вінчі
(1452–1519)

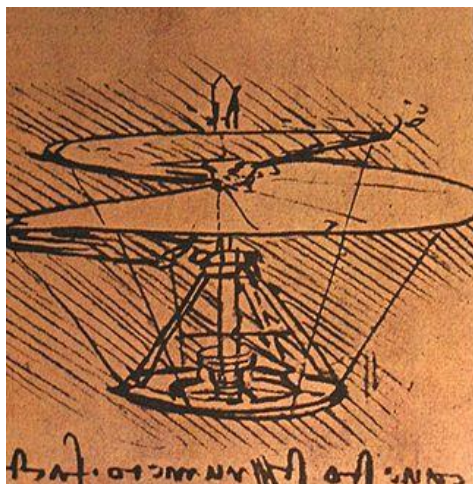
Подібно до Роджера Бекона, Леонардо да Вінчі інтелектуально випередив сучасників настільки далеко, що вони були часом просто не здатні оцінити його ідеї. Цей італієць був унікальною особистістю. Красень атлетичної статури, учасник змагань і турнірів, прекрасний плавець і фехтувальник, майстерний вершник, жартівник, дотепний і блискучий оповідач, ерудит-промовець, люб'язний кавалер, танцюрист, співак, поет, музикант і конструктор музичних інструментів, геніальний художник і теоретик мистецтва, математик, механік, астроном, геолог, ботанік, анатом, фізіолог, військовий інженер — увесь цей спектр талантів виявився сконцентрованим в одній людині.



Автопортрет Леонардо да Вінчі (бл. 1510)

Леонардо народився під Флоренцією і був позашлюбним сином нотаря. Однак він відмовився від батькового ремесла і взявся вчитися живопису. Його першим учителем, як вважають, був знаменитий Вероккіо. Уже 1490 р. Леонардо створив свою «вітрувіанську людину» — канонічний взірєць правильних пропорцій людського тіла. Наприкінці століття він пише в Мілані свою знамениту «Таємну вечерю», а в 1502 р. вступає на службу до одного з найнеоднозначніших італійських державців того часу Цезаре Борджіа і на його завдання вивчає способи побудови фортець. Пізніше він будує канали й водоводи і паралельно створює «Монну Лізу» («Джоконду») — можливо, найзнаменитішу картину в історії живопису, яка сьогодні є окрасою паризького Лувру. Останні роки життя Леонардо проводить у Франції в статусі придворного художника короля Франциска I.

Усе життя Леонардо робить різноманітні нотатки. Вже в наш час інженери взяли креслення деяких його конструкцій — і побачили, що він першим запропонував гвинтокрил, планер, саморушний екіпаж із пружинним механізмом, парашут, висувні пожежні сходи.



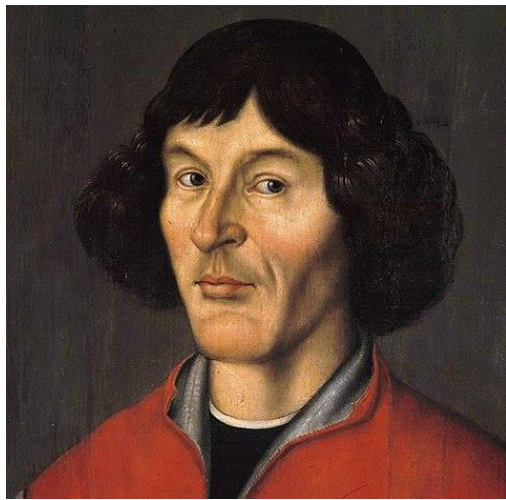
Гвинтокрил за проектом Леонардо да Вінчі

У царині механіки Леонардо да Вінчі досліджував рухи тіла на похилій площині, вивчаючи те, що ми тепер називаємо тертям ковзання. На основі експериментів він першим дійшов висновку, що сила тертя ковзання не залежить від площі поверхні зіткнення тіл, що труться. Водночас він показав, що прискорення тіл, що ковзають по похилій площині, тим менше, чим більше відношення довжини площини до її висоти. Він навів (щоправда, без доказу) твердження, що тіло зісковзує по дузі швидше, аніж по хорді, що її з'єднує. Леонардо правильно вважав, що при вільному падінні швидкість тіла зростає пропорційно з часом.

Досліджуючи рівновагу сил, прикладених до блока, він запровадив у механіку поняття моменту сили. Задачу косого важеля він замінив розглядом «теоретичного важеля», плечі якого перпендикулярні до напрямків сил. В оптиці він добре уявляв принцип дії камери-обскури й розумів, що людське око є своєрідною камерою-обскурою. Але, на жаль, Леонардо не лишив по собі системних наукових праць, більшість його геніальних здогадів було записано на розрізнених аркушиках, і тому його революційний висновок про лінійне зростання швидкості падаючого тіла з часом довелося «перевідкривати» через майже сто років Галілеєві.

Миколай Коперник (1473–1543)

Коперник — автор книги «Про обертання небесних сфер», яку було видано в останній рік його життя. У передмові до неї він писав: «Багато інших учених і видатних людей стверджували, що страх не повинен утримувати мене від видання книги на поживу всім математикам. Чим безглуздішим здається більшості моє вчення про рух Землі наразі, тим дужчими будуть подив та вдячність, коли внаслідок видання моєї книги вони побачать, як враження безглуздості відступає перед найочевиднішими доказами. Отже, я піддався цим намовлянням і дозволив своїм друзям узятися до видання книги, чого вони так довго домагалися».



Портрет Миколая Коперника з ратуші в Торуні

Миколай Коперник, з молодих років і до глибокої старості носячи духовний сан, виявився найнебезпечнішим супротивником усталених і освячених церквою канонів світобудови, згідно з якими нерухома Земля перебувала в центрі Всесвіту, а навколо неї оберталися Місяць, Сонце й планети. Через 73 роки після виходу його книги, коли геліоцентрична система неймовірно поширилася й міцно оволоділа умами освічених людей, інквізиція внесла книгу в список заборонених.

Учений народився в ганзейській (Ганза — союз вільних торговельних міст навколо Балтійського моря) Торуні в напівавтономній на той час церковній області Вармії на півночі Польщі, поблизу кордону з Тевтонським орденом. Його батько, заможний купець, член міського суду Торуні, рано помер і залишив десятилітнього сина на опіку дядька. Лукас Ватценроде, брат Миколаєвої матері, був освіченою, по-справжньому ренесансною людиною. Пізніше він став єпископом — правителем Вармії, й успішно захищався і від військової загрози тевтонців, і від зазіхань Краківського королівського двору на ганзейські свободи й привілеї.

Завдяки дядькові Миколай здобув освіту в школі святого Яна у Влоцлавську, потім — Ягеллонський університет у Кракові й, нарешті, поїхав учитися далі до Італії. Він вивчав канонічне право, а окрім того студіював математику, астрономію, філософію, грецьку мову, живопис. Коперник повернувся до Польщі широко освіченою людиною. Після отримання сану каноніка він, як і його дядько-єпископ, працює на багатьох нивах. Зокрема, йому також довелося організовувати військову відсіч лицарям-тевтонцям. Є в доробку Коперника й економічні праці. Коли йому було доручено боротися з засиллям фальшивої монети (через двісті років те саме робитиме Ньютон!), він підійшов до справи вельми ґрунтовно. І навіть відкрив важливий економічний закон: фальшива монета витісняє з обігу повновартісну, яку починають приховувати.

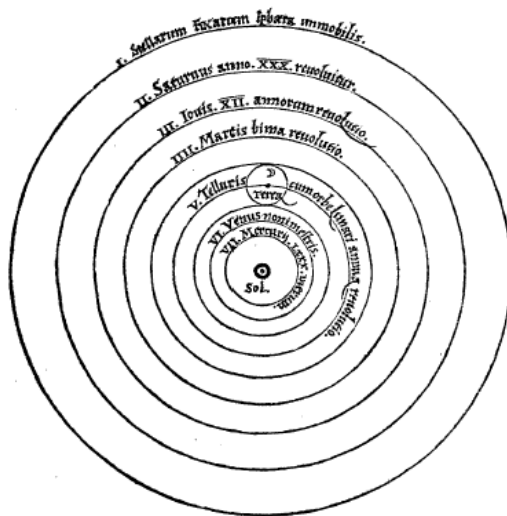
По смерті Лукаса Ватценроде 1512 року Коперник оселився в Фромборку й решту тридцять років віддав головній праці свого життя (хоч і до громадських справ раз у раз повертався), намагаючись спростити

вочевидь громіздку й штучну систему епіциклів Птолемея. Ідея про нерухомість Сонця й рух Землі навколо нього не була його власним здогадом. Такі думки висловлювали й значно раніше астрономи Греції, — ми вже згадували Арістарха Самоського. Але його праць Коперник, скоріш за все, не знав, — і мусив заново долати шлях першопрохідця.

До публікації своїх висновків Коперник підходив вельми обережно. Ще близько 1515 року він написав «Малий коментар», де виклав основні тези своєї системи. 1533 року доповідь про геоцентричну систему пролунала в Римі, й папа Климент VII залишився вельми задоволений. Один із папських сановників кардинал Шонберг листовно попросив ученого надіслати копію його праці.

Річ у тому, що Коперника запросили до участі в роботі над удосконаленням календаря і до його праці ставилися насамперед як до цінної математичної побудови, яка могла полегшити долю календарної реформи. Цю реформу врешті-решт запровадить уже після смерті Коперника папа Григорій XIII, поклавши наступним днем після 4 жовтня 1582 року вважати зразу 15 жовтня (чим компенсувалася утворена на той час різниця в 10 днів), а надалі три з кожних чотирьох років, кратних 100, — як-от, 1700, 1800 і 1900, — не вважати високосними і майже компенсувати тим набігання однієї зайвої доби впродовж 128 років.

Але Коперника цікавить насамперед те, як улаштовано світ. Тому він цілком усвідомлено, вірячи у фізичну реальність того, про що пише, замінив добове обертання небосхилу обертанням Землі навколо своєї осі, рух Сонця в площині екліптики — обертанням Землі навколо Сонця, планети змусив значно повільніше обертатися лише навколо Сонця, а сферу зірок залишив по-справжньому нерухомою (у геоцентричній системі вона змушена була, попри назву, обертатися із запаморочливою лінійною швидкістю, з огляду на її найбільший радіус). Водночас Коперник намагається відповісти на всі потенційні заперечення проти руху Землі.



Система світу за Коперником (з його книги «Про обертання небесних сфер»): у центрі Сонце, далі йдуть орбіти Меркурія, Венери, Землі (із супутником Місяцем), Марса, Юпітера, Сатурна, і сфера нерухомих зірок

Ми вже згадували: Клавдій Птоломей уважав, що рух у просторі такого гігантського тіла, як Земля, неминуче призвів би до катастрофічних наслідків. Люди, тварини, будинки — все злетіло б із поверхні планети. Нині нам зрозуміло, що цього не відбувається завдяки дії сил (чи явищ), передбачених законами Ньютона. Проте Коперник цих законів ще не знав. І він просто поширив принцип «природності» обертального руху, запроваджений у «Фізиці» Арістотеля для небесних сфер, на Землю й усе, що на ній перебуває. Отже, ми обертаємося разом із Землею, бо такий рух є «природним». І тут-таки Коперник ущипливо зауважує: не руйнується ж у Птолемея «сфера нерухомих зірок», яка здійснює оберт навколо Землі запаморочливо швидко — за добу.

На доказ свого вчення наводив Коперник і цілком неспростовні фізичні аргументи. Так, Марс і Юпітер у протистоянні з Сонцем світять значно яскравіше, ніж у з'єднанні. Геліоцентрична система це легко пояснює — відстань від цих планет до Землі у протистоянні значно менша. А з погляду геоцентричної системи цей факт пояснити неможливо — адже в ній відстань від Землі до кожної планети завжди приблизно однакова.

І однак Коперник наважився надрукувати свою головну працю тільки на схилі життя, й то великою мірою завдяки наполегливості друзів та учнів — єпископа Тідемана Гізе й професора математики віттенберзького університету Іоахіма фон Лаухена (Ретіка). Віддрукований у Нюрнбергу том із присвятою папі Павлу III (і зі сфальсифікованою видавцем передмовою, де увесь зміст трактату фактично оголошено не більш ніж математичними вправами — справжню передмову буде вперше надруковано лише в середині XIX ст.) учений отримав, уже лежачи на смертному ложі.

Книга Коперника за викладом матеріалу залишалася ще дуже громіздкою. Річ у тім, що фромборкський канонік (як і Арістотель, авторитет котрого був непохитним понад півтори тисячі років) вірив лише в рівномірні колові рухи небесних сфер. Для того, щоб описати реальне, нерівномірне переміщення планет по небосхилу (насправді ж бо планети рухаються не по колу, а по еліпсу, й швидкість їхнього руху зростає, коли вони наближаються до Сонця), Коперникові довелося вслід за Птолемеєм запровадити епіцикли, які йому самому здавалися найбільш штучною і суперечливою частиною Птолемеєвої системи.

Більше того, десь Копернику довелося навіть «ускладнити» Птолемея: він розумів, що для пояснення змін пір року на Землі напрям земної осі повинен залишатися весь час сталим у просторі. Але Арістотелева фізика, яка не знала ще інерції, вимагала, аби земна вісь зберігала сталий нахил до площини екліптики, а отже, описувала впродовж року в просторі конус навколо осі екліптики. Тому Коперник мусив, окрім обертання навколо власної осі і навколо Сонця, приписати Землі ще й третій рух, який забезпечував би її осі постійну орієнтацію в просторі.

З огляду на всі ці причини для практичних потреб обчислення розташування світил на небосхилі таблиці Птолемея ще певний час

служували краще, бо були вельми ретельно розроблені. Однак навіть у такому вигляді система Коперника здобувала дедалі більше прихильників.

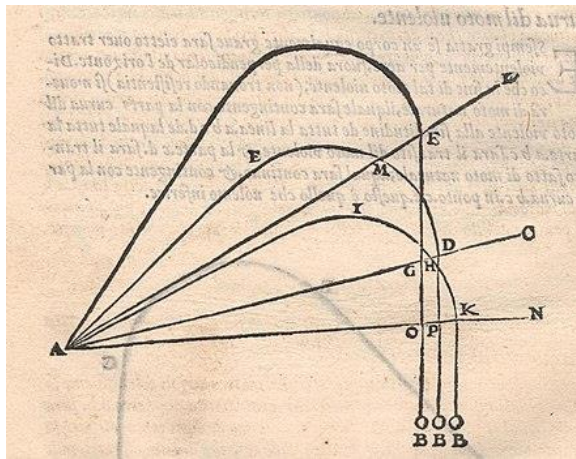
Потрібен був поштовх, який зруйнував би догми Арістотелевої фізики, що стримувала розвиток геліоцентричної системи. Адже сам Коперник, напевно, добре відчував недоладності цих догм, а деякі твердження його книги можна сприймати як інтуїтивне передбачення закону всесвітнього тяжіння: «Мені здається, що вага — це ні що інше, як природне прагнення, надане божественною волею всім тілам світу, поєднуватися в єдине й цілісне, що має форму кулі. Це прагнення до поєднання притаманне, можливо, й Сонцю, Місяцю та іншим світилам і є ймовірною причиною їхньої кулеподібності».

А на аргумент щодо очевидності руху небозводу, який ми бачимо, Коперник відповідає, що за тихої погоди з корабля так само здається, що то берег відпливає від нього. І цим він так само на інтуїтивному рівні передбачає поняття галілеєвої інерції.

Нікколо Тарталья (1499–1557)

Цей талановитий італійський математик походив із родини бідарів і, хоч інколи знаходив впливових покровителів, усе життя прожив у злиднях. Не маючи змоги отримати освіту, він навіть читати навчився лише в 14 років. Але завдяки блискучим природним здібностям першим придумав алгоритм розв'язання кубічного рівняння. Хоч і тут йому не пощастило: свій результат він необережно повідомив професору математики Джироламо Кардано і той, трохи доопрацювавши, оприлюднив його під своїм іменем (хоч і згадав у тексті своєї книги про заслугу Тартальї). Тарталья образився і намагався захистити свій пріоритет, викликав Кардано на математичне змагання й переміг на ньому. Але учні Кардано змусили Тарталью залишити Мілан, і формула для розв'язків кубічного рівняння так і називається досі «формулою Кардано».

Для розвитку динаміки велике значення має трактат Тартальї «Нова наука» (1537). У ньому він досліджує рух тіла, кинутого під довільним кутом до горизонту, і доходить висновку, що від початку й до кінця він відбувається по кривій. Для нас цей висновок очевидний, але арістотелівці вважали, що випущений паралельно до земної поверхні снаряд летить спершу горизонтально, потім мірою «згасання» «вимушеного» руху його траєкторія починає закруглятися, і врешті-решт він падає на землю цілком вертикально.



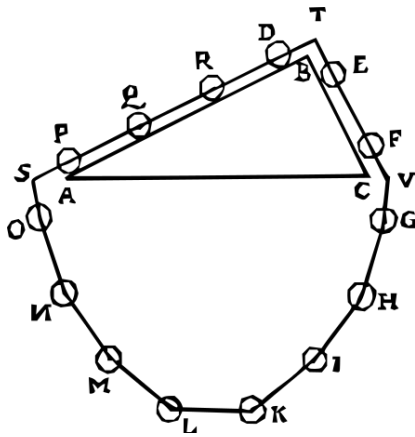
Різні форми траєкторії ядра (з «Нової науки» Тартальї, 1537). Найвища дальність пострілу досягається при куті націлювання в 45°

Натомість Тарталья вважає, що «вимушений» рух по горизонталі від самого початку починає змішуватися з «природним» рухом по вертикалі, хоч, боячись звинувачень у «ересі», застерігає, що спочатку таке «підмішування» «природнього» руху у «вимушений» майже непомітне. Математик доходить шляхом порівняння різних намальованих ним траєкторій висновку, що дальність польоту ядра є найбільшою, коли гармата стріляє під кутом 45° до горизонту.

Слід відзначити: Тарталья не розв'язував тут простого рівняння для рівномірного руху по горизонталі й рівноприскореного по вертикалі просто тому, що, на відміну від Леонардо, не мав уявлення про рівноприскорений рух. По суті, він просто «вгадав» правильний результат щодо кута прицілювання, навіть не розуміючи, що насправді траєкторія польоту ядра матиме форму параболи. Але цей його висновок підтверджувався емпіричним досвідом і мав велике значення для практичної балістики. У 1641 р. учень Галілея Торрічеллі підтвердив здогадку Тарталья, вже розв'язавши правильні рівняння руху для випущеного з певною швидкістю й під певним кутом ядра й показавши заодно, що насправді це ядро летітиме по параболі.

Сімон ван Стевін (1548–1620)

Цей математик, фізик та інженер народився у Брюгге. Він був спершу збирачем податків, потім комерсантом, потім інспектором різних споруд і, нарешті, професором у Лейденському університеті, де свій курс математики читав не латиною, а живою голландською мовою. Саме він запровадив у математику дробові показники степеня типу $3/2$. Мова наукових творів Стевіна з механіки чітка й зрозуміла, його докази ясні. Водночас як учений він іще не виходить за рамки традиційної статички Архімеда.



Рівновага ланцюга на двох похилих площинах (т.зв. «епітафія Стевіна»)

Учений отримав декілька важливих результатів у гідростатиці. Зокрема, він показав, що тиск рідини на дно залежить тільки від висоти стовпа цієї рідини й не залежить від форми викривлень стінок посудини тощо. Однак найвідоміший отриманий ним результат стосується рівноваги на похилих площинах. Стевін уявив собі розташовану у вертикальній площині трикутну призму з горизонтальною основою і накинута на неї ланцюг із ланками однакової ваги, здатний ковзати без тертя. Якби в такій системі почався рух, то він мусив би тривати нескінченно через її однорідність і відсутність тертя. Але вічний рух створених людиною систем за фізикою Арістотеля неможливий. Отже, система перебуває в рівновазі.

Далі Стевін приходить до висновку, що така рівновага матиме місце, навіть якщо жодна з граней трикутника не буде паралельна до горизонту. Оскільки на кожну з ланок при цьому діють три сили: дві сили натягу й сила реакції опори, то Стевін доходить наступного висновку: кожний предмет на похилій площині перебуватиме в рівновазі, якщо прикладені до нього три сили будуть співвідноситися як сторони будь-якого трикутника й будуть паралельні до цих сторін. Останнє твердження фактично тотожне закону паралелограма сил, тільки в іншій формі.

Оскільки нижня, підвішена частина ланцюга сама по собі перебуває в рівновазі, то перебуває в рівновазі й верхня частина. Звідси ще один висновок Стевіна: два вантажі, розташовані на двох похилих гранях трикутної призми, перебуватимуть у рівновазі, якщо їхні ваги співвідноситимуться так, як довжини цих граней. Якщо ж одна з граней буде при цьому вертикальна, то звідси наступний висновок: для утримання вантажу на похилій площині потрібна вага, яка співвідноситься до вантажу так, як висота цієї площини до її довжини.

Ланцюг на трикутнику, що ілюструє наведені вище міркування, було зображено на надгробку Стевіна разом з латинським написом: «Диво — і не диво». Але на міркуваннях голландського вченого антична фізика вже фактично дійшла своєї вичерпаності. Мусила початися нова сучасна фізика, базована на інших принципах дослідження.

Джордано Бруно (1548–1600)

Цього монаха-домініканця, поета й богослова не можна назвати фізиком. Він скоріше був чистим філософом. Але своєю боротьбою проти Арістотелевої схоластики й обстоюванням геліоцентричної системи Коперніка він прислужився остаточному переходові до сучасної фізики, базованої на досліді. А його смерть на вогнищі зробила його одним із найвідоміших мучеників науки.



Пам'ятник Джордано Бруно на Площі квітів у Римі, де його було спалено

Джордано Бруно виріс у релігійній сім'ї, в юності став ченцем, кілька років прожив у монастирі. Жвавий і поетичний розум Джордано швидко сприймав нові віяння й філософські ідеї. Під їхнім впливом у нього склався оригінальний пантеїстичний світогляд (тобто світогляд, що сприймає усю природу як божественність). Філософ стверджував, що дух і матерія існують споконвіку як єдина субстанція. Бог і світ для Бруно були одним і тим самим. Наш Усесвіт Бруно вважав нескінченною множиною світів. Для нього Всесвіт не мав центру, інші світи були так само населені, як і Земля. Нескінченний Усесвіт було створено нескінченною божественною могутністю.

Бруно горів бажанням поширити своє вчення. Він утік із монастиря за кордон, багато мандрував по столицях різних держав, зокрема й ворожих до Риму. Жив в англіканському Лондоні, у кальвіністській Женеві, в Парижі, поневірявся по італійських республіках Венеції та Генуї — і всюди з надзвичайним ентузіазмом виступав із проповідями, організовував диспути, зав'язував суперечки.

Не скупився він і на різкі закиди проти системи Арістотеля — і тільки протекція Генріха III та Єлизавети I кілька разів рятувала його від неприємностей у Франції та в Англії. Але в тодішній Європі так не могло тривати довго. У Венеції філософа звинуватили у сповідуванні псевдовчення, схопили й віддали до суду. Венеційська республіка після певних вагань зрештою передала його в руки Риму.

Бруно залишався католиком (Женеvu він покинув тому, що відмовився приймати кальвінізм), не вважав себе за єретика, його бачення пантеїзму не було офіційно заборонено, — і на цьому він стояв перед судом інквізиції. На процесі Бруно наголошував, що його релігійно-філософська система не суперечать церковному віровченню. У протоколі судового процесу записано його слова: «Я завжди тримався погляду, якого тримається свята мати Католицька Церква». Але суд на це не зважив. І «небезпечного порушника спокою, друга єретиків і проповідника псевдовчень» передали до рук світського губернатора Риму з лицемірним проханням призначити «наймилостивіше покарання без пролиття крові».

Реально така формула означала спалення на вогнищі. Розправа відбулася — Бруно стратили 14 лютого 1600 року. Перед цим йому обіцяли свободу й життя за зречення від учення про множинність світів. Він відмовився, стверджуючи, що життя дано людині для того, щоб вона шукала істину. Людина осягає істину не для того, щоб торгувати нею. Смерть за істину в одному столітті дає життя у всіх подальших віках...

Бруно не помилився. За 300 років на тій самій площі в Римі, де його стратили, було споруджено пам'ятник на кошти, зібрані по цілому світі. На п'єдесталі викарбувано слова: «Джордано Бруно — від століття, яке він передбачав».

Епоха становлення сучасної фізики

(Поч. XVII ст. — 80-ті pp. XVII ст.)

Що відбулося:

1604 р. Галілео Галілей установив закони руху тіла, кинутого під кутом до горизонту, і показав, що рух тіла по похилій площині є рівноприскореним.

1609 р. Вийшла у світ праця Йоганна Кеплера «Нова астрономія», де вміщено перші два закони руху планет і висловлена думка, що тяжіння — властивість, притаманна всім небесним тілам.

1619 р. Оpubлікований трактат Йоганна Кеплера «Гармонія світу», що містить третій закон руху планет.

1628 р. Бенедетто Кастеллі встановив закон оберненої пропорційності швидкості протікання рідини в трубці до площі її поперечного перерізу.

1632 р. Вийшла праця Галілео Галілея «Діалог про дві основні системи світу» — Птоломееву й Коперникову, де викладено принципи інерції й відносності.

1638 р. Вийшла у світ праця Галілео Галілея «Бесіди й математичні докази, що стосуються двох нових галузей науки...», в якій викладено закони вільного падіння, закон додавання переміщень, вчення про опір матеріалів.

1641 р. П'єр Гассенді провів дослід на підтвердження принципу відносності Галілея.

Опубліковано працю Еванджелісти Торрічеллі «Трактат про рух», де викладено закони рівноваги тіла на похилій площині й принцип руху центру тяжіння, розглянуто рух тіла під кутом до горизонту й визначено параболічну форму його траєкторії, встановлено інші траєкторії балістики.

1644 р. Вийшла у світ праця Рене Декарта «Принципи філософії», в якій уперше чітко сформульовано закон інерції й викладено першу наукову космогонічну гіпотезу — про походження Сонячної системи й планет із вихору. Тут же викладено закон збереження кількості руху. Вперше цей закон Декарт сформулював у 1639 р.

1653 р. Блез Паскаль формулює закон розподілу тиску в рідині (закон Паскаля, вперше опубліковано 1663 р. в трактаті «Про рівновагу рідин»).

1657 р. Християн Гюйгенс сконструював маятниковий годинник зі спусковим механізмом, що став основою точної експериментальної техніки (використання маятника в годиннику запропонував 1636 р. Галілей).

1660 р. Роберт Гук відкрив закон пружності (закон Гука, вперше опубліковано 1676 р.).

1665–66 рр. Ісаак Ньютон вивів обернену пропорційну залежність сили тяжіння від квадрата відстані між тілами, що притягуються.

1669 р. Християн Гюйгенс у мемуарі «Про рух тіл під впливом зіткнення» виклав теорію центрального зіткнення пружних тіл, сформулював закон збереження кількості руху й закон «живих сил». Поняття «живої сили» (кінетичної енергії) як міри механічного руху запровадив 1686 р. Ляйбніц, він-таки сформулював закон збереження «живих сил».

1673 р. Вийшла у світ праця Гюйгенса «Маятниковий годинник», у якій викладено теорію фізичного маятника, поняття моменту інерції й закон відцентрової сили.

1678 р. Християн Гюйгенс уперше виміряв дослідним шляхом величину прискорення сили тяжіння для Парижа ($g = 979,9 \text{ см/с}^2$).

Починається наукова революція

Те, що відбулося на початку XVII ст., можна сміливо назвати «науковою революцією», і водночас — науковим проривом у нові сфери, яких доти просто не існувало. Галілео Галілей не просто дощенту зруйнував споруду Арістотелевої фізики. Натомість він побудував основи нової науки — динаміки, якої до нього ще не було. Адже, як ми бачили, навіть такий найталановитіший, наділений найкращою математичною підготовкою, найбільше схильний до експериментування вчений Античності, як Архімед, на поле динаміки навіть не зважувався ступити, цілком обмежившись у «механічній» частині свого доробку задачами статyki.

Прорив відбувався не лише в механіці. В математиці саме тоді ввійшли в обіг десяткові дробы, які дуже спростили практичні обчислення. Шотландський математик Джон Непер (1550–1617) запровадив у 1614 р. логарифми — що мало революційне значення для багатьох задач. Учені стали використовувати ірраціональні числа. Фламандець Андреас Везалій (1514–1564), який працював у Падуї, на основі розтинів багатьох трупів видав фундаментальний трактат «Про будову людського тіла», де заклав основи сучасної анатомії. Англійський лікар Вільям Гарвей (1578–1657) у своїй книзі «Про рух крові» (1628) описав кровообіг — що вчинило революцію у фізіології та в медицині. Учений єзуїт німець Атанасій Кірхер (1602–1680), який займався багатьма науками, від фізики і до єгиптології, заклав основи сучасного вчення про внутрішню будову Землі. Придворний лікар Єлизавети I Вільям Гілберт (1544–1603), з яким ми докладніше зустрінемося в наступній частині нашої книги, збагнув, що Земля є велетенським магнітом. Хімія, нарешті, стала звільнятися з пут алхімії і набувати суто «технологічного» спрямування.

Саме в цей час починають виникати перші наукові товариства. У 1603 році в Римі молодий аристократ Федеріко Чезі разом із трьома друзями заснував Академію деї Лінчеї (дослівно — академію рисей, натякаючи назвою на те, що вчені, як і рисі, наділені надзвичайно гострим зором). Одним із перших членів академії став Галілео Галілей. У середині XVII ст. в Італії нараховувалися вже десятки учених товариств. Тоді ж їх почали засновувати на північ від Альп. Першу академію в Німеччині було створено в 1652 році. В 1660 р. постало Лондонське королівське товариство, яке існує досі і (на відміну від Академії деї Лінчеї) ніколи не переривало своєї діяльності. Це товариство виникло за ініціативою «знизу» і лише в 1662 році дістало хартію від короля Карла II на підтвердження свого статусу. Натомість Французьку академію в складі двадцяти академіків на чолі з Християном Гюйгенсом було засновано в 1666 році особисто «королем-сонцем» Людовіком XIV за ініціативою впливового міністра фінансів Кольбера.

Революція відбулася і в методі наукового пізнання. У своєму трактаті «Новий органон» (1620), покликаному викласти нову систему наук, зі схоластикою розправився англійський філософ і дослідник природи Френсіс Бекон (1561–1626). Він стверджував: «...істинна мета науки полягає в тому, щоб не займатися нею ні задля своєї втіхи, ні задля вчених дискусій, ні задля приниження інших, ні задля корисливості та слави, ні задля влади, а лише задля того, щоб мати від неї користь та покращувати життя людської спільноти».

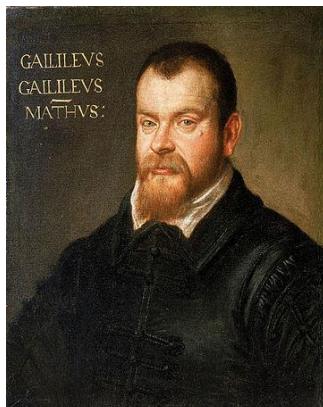
Сам Френсіс Бекон був людиною надзвичайно суперечливою. У 1617–1621 рр. він посідав посаду хранителя печатки й лорда-канцлера Англії (фактично другої особи в країні після короля). Звинувачений парламентом у хабарництві, він визнав провину й був засуджений до величезного штрафу та до тюремного ув'язнення (щоправда, завдяки заступництву короля Якова I провів у тюрмі лише 4 дні). Не менш

суперечливим був він і як дослідник. Не володіючи достатньою математичною підготовкою і теоретичними знаннями, він, наприклад, зневажливо ставився до системи Коперника як до теоретичного розумування, яке не має нічого спільного з емпіричним досвідом (що був для Бекона альфою та омегою наукового пізнання). Адже він щодня бачив на власні очі, як Сонце обертається навколо Землі, і через обмеженість своїх знань не міг зрозуміти, що цю ілюзію створює обертання самої Землі.

Але у своїх принципах пізнання Бекон був безкомпромісний. Він помер, бо застудився, набиваючи холодної зими курячі тушки снігом, щоб перевірити, як вони зберігатимуться в замороженому стані. Переказують, що його останніми словами були: «А все ж таки цей дослід цілком удався». Тож у певному сенсі Фресіс Бекон став таким самим мучеником наукового поступу, як і Джордано Бруно та Галілео Галілей.

Галілео Галілей (1564–1642)

Через 21 рік після виходу книги Коперника в італійському місті Піза в старовинній, заможній і багатодітній родині народився хлопчик, якому судилося остаточно утвердити в очах наукового світу геліоцентричну систему польського каноніка-астронома. Батько майбутнього вченого Вінченцо Галілей, відомий флорентійський композитор і чудовий лютніст, хотів, щоб Галілео став медиком. Але хлопчик ще в дитинстві ознайомився з книгами Евкліда й Архімеда і покинув схоластичні студії медицини. По чотирьох роках самостійного вивчення математики, 1589-го Галілей обійняв посаду професора Пізанського університету. З 1592-го по 1610-й він був професором університету в Падуї, що підлягала тоді Венеційській республіці, а згодом став придворним філософом і астрономом тосканського герцога Козімо II Медичі, відомого покровителя мистецтв і наук.

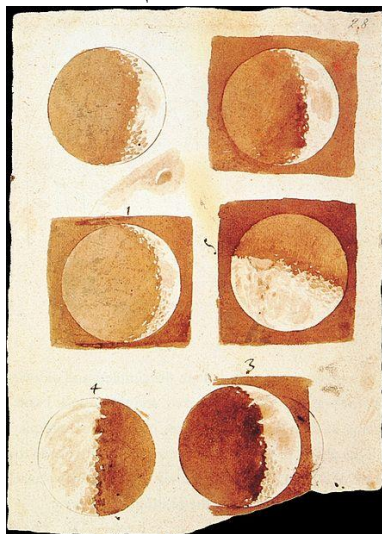


Галілео Галілей (прижиттєвий портрет пензля Доменіко Тінторетто)

У червні 1609 р. Галілей сконструював перший телескоп (зорову трубу винайшли трохи раніше голландці — але навести оптичний пристрій на небо чомусь ніхто не додумувався). До Галілея астрономи спостерігали

небо неозброєним оком, і найбільше, що вони могли — це за допомогою кутомірних пристроїв визначити координати зірки чи планети на небосхилі. Миколай Коперник сформулював свою геліоцентричну теорію, спираючись виключно на такі кутові вимірювання.

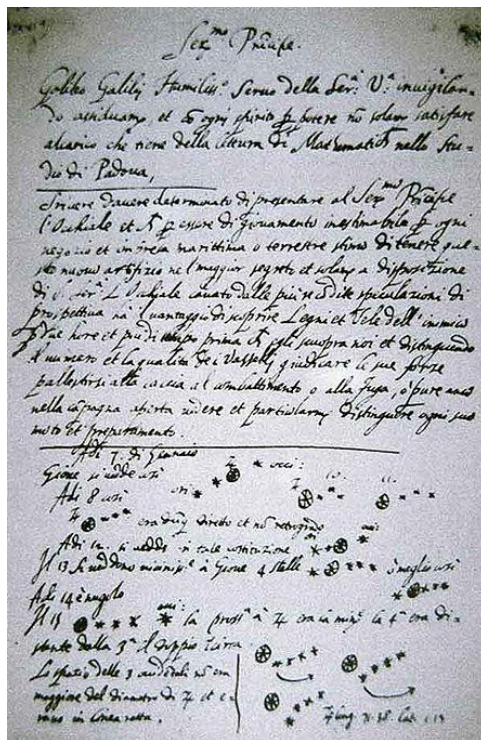
Отже, Галілей був першим, хто наблизив небесні об'єкти до спостерігача-астронома, використовуючи систему двох лінз. Попри невисоку якість і мале збільшення першого телескопа (за оптичними характеристиками він був десь як нинішній театральний бінокль), відкриття посипалися як з рогу достатку. Галілей розгледів гори на Місяці й побачив, що Молочний Шлях складається з незліченної кількості зірок, відкрив плями на Сонці, фази Венери, кільця Сатурна й чотири найбільші супутники Юпітера. На честь свого благодійника — тосканського герцога — він назвав ці нові об'єкти на небосхилі «зірками Медичі».



Поверхня Місяця з горами й кратерами при різному освітленні. Рисунок Галілея, 1616

Останнє відкриття виявилось особливо важливим: адже було неспростовно показано, що в небі існують світила, які обертаються не навколо Землі. А отже, система Арістотеля–Птолемея, яка робить Землю центром усіх без винятку рухів, неспроможна описати те, що насправді відбувається в небесах. Спостерігаючи за обертанням супутників навколо Юпітера, Галілей дійшов остаточного переконання: Коперник — правий. Його система є не просто дотепною математичною моделлю, а справді описує фізичну реальність.

Ще один аргумент на користь системи Коперника дали фази Венери. Сама наявність цих фаз не суперечила й системі Птолемея, але в ній Венера завжди перебувала ближче до Землі, ніж Сонце, а отже, могла мати лише вигляд «серпика». Натомість реально фази, які спостерігав Галілей, змінювалися в усьому діапазоні від «молодика» й до «повні», оскільки згідно з системою Коперника Венера могла перебувати й далі від Землі, ніж Сонце.



Сторінка записів Галілея, де йдеться про відкриття супутників Юпітера та зображено різні їхні розташування навколо Юпітера

Але й церква, поблажливо поставившись до праці Коперника на самому початку, врешті-решт усвідомила небезпеку для усталених догм, яка від неї походить. У 1616 р. папа Павло V вносить трактат польського астронома до «Індексу заборонених книг». На всі книги про обертання Землі навколо Сонця накладено цензурну заборону «аж до їхнього виправлення», а саму думку про таке обертання проголошено «безглуздою й хибною з філософської та гріховною з релігійної точки зору». Проти Галілея інквізиція починає розслідування.

Однак новий папа Урбан VIII, який зійшов на престол у 1623 р. і мав славу покровителя митців та учених, високо цінував Галілея і навіть колись, будучи ще кардиналом, присвячував йому латинські вірші. Тож Галілей, який здобув уже статус визначного астронома й фізика, вирішує продовжити боротьбу.



Титульна сторінка книги «Діалог про дві найголовніші системи світу» (1632)

Фактично обманувши пильність папської цензури, 1632 року 68-річний учений видав поза межами Італії, в Лейдені, головну книгу свого життя «Діалог про дві найголовніші системи світу». У розмові в ній беруть участь троє: коперниканець Сальвіаті, безсторонній Сагредо та захисник системи Птолемея Сімплічіо. Формально в цій розмові перемагає прибічник традиційного геоцентризму — але аргументи на захист геліоцентризму звучали для читачів значно переконливіше й відчувалося, що симпатії автора — на цьому боці. Зберігся переказ, що в недолугому захисникові Птолемея на ім'я Сімплічіо (по-італійськи — «простак») папа впізнав самого себе. До того ж, книгу було написано не «вченою» латиною, а «народною» італійською — а отже, вона мала численних читачів.

У лютому 1633 року Галілея викликали до Рима — попри його вік, хворобу й те, що тоді лютувала пошесть чуми. Папа повівся «ліберально» і дозволив Галілею жити в будинку тосканського посланця, а не у в'язниці суду інквізиції. Він із жалем каже про Галілея: «Господь нехай пробачить йому те, що він узявся міркувати про речі, які стосуються нових учень і Святого Письма, бо завжди краще йти за загальноприйнятим ученням... Мені прикро робити йому неприємності, але справа стосується віри й віросповідання».

Суд над Галілеєм тривав понад два місяці. Учений мужньо оборонявся. Він стверджував: «Професори-богослови не мусять привласнювати собі право регулювати своїми декретами ті галузі, що не належать до їхнього відання. Не можна нав'язувати природодослідникові думки про закони природи. Ми проповідуємо нове вчення не для того, щоб посіяти вагання в умах — а для того, щоб їх просвітити, не для того, щоб зруйнувати науку — а щоб добре її обґрунтувати. Наші супротивники називають хибним і єретичним те, чого вони не можуть спростувати. Ці святенники роблять собі щит із лицемірно витлумаченої релігійної

заповзятливості й принижують Святе письмо, використовуючи його для досягнення своєї особистої мети».

Проте спалення Джордано Бруно — в Римі, на Площі квітів, за третину століття перед тим — усі ще пам'ятали дуже добре. Учений, якому почали погрожувати тортурами, розуміє: подальша боротьба — прямий шлях на вогнище. 22 червня 1633 року в церкві монастиря святої Мінерви, підкоряючись вироку суду, Галілей прочитав зречення: «Я, Галілео, перебуваючи на сімдесятому році життя, будучи в'язнем і стоячи на колінах перед особами ваших превелебностей, маючи перед очима святе Євангеліє і торкаючись його руками, зрікаюся, проклинаю і засуджую помилкову та єретичну думку про рух Землі». Досі переповідають притчу про те, як старий учений, підвівшись після зречення з колін, вимовив: «*E pur si muovo!*» — «А все-таки вона рухається!».



Галілей перед судом інквізиції (картина Жозефа Робера Флорі, 1847)

Учений постійно працював — аж до останніх своїх днів: і коли перебував під домашнім арештом, не маючи права спілкуватися з друзями, і коли поховав кохану дочку Віржинію, і коли 1637 року остаточно втратив зір. Він устиг завершити книгу «Бесіди й математичні доведення, дотичні до двох нових галузей науки», що підбивала підсумок його праці як фізика. Біля ліжка вмирущого Галілея перебували двоє його учнів — Вінченцо Вівіані (1622–1703) та Еванджеліста Торрічеллі (1608–1647), котрим належить честь відкриття атмосферного тиску, а ще — двоє агентів інквізиції.

За кілька років потому онук ученого, чернець, спалив безцінні рукописи свого діда як єретичні. На тому урвався рід Галілео Галілея.

У 1758 році папа Бенедикт XIV ухвалив викреслити праці Галілея з «Індексу заборонених книг». І лише 31 жовтня 1992 року папа Іван Павло II офіційно визнав, що церква 1633 року помилялася, силоміць змушуючи Галілея зректися вчення Коперника.

Альберт Айнштейн, уже у XX столітті, писав про Галілея: «Перед нами постає людина неабиякої волі, розуму й мужності, здатна як

представник раціонального мислення вистояти проти тих, хто, спираючись на неучтво народу й лінощі вчителів у церковних шатах та університетських мантиях, намагається зміцнити й захистити своє становище».

А ще на початку XVIII століття тодішній ректор Києво-Могилянської Академії Теофан Прокопович (1677–1736) написав латиною вірш «На папський вирок Галілеєві». У перекладі Володимира Литвинова сучасною українською мовою вірш звучить так:

*Чом ти ганьбиш безсоромно ім'я Галілеєве, папо?
Чим же тобі завинив старець учений, скажи?
Можє, злочинний, хотів він одняти у тебе престол твій,
Чи, що тим гірш, намовляв віри у Бога не йнять?
Ні, до святих володінь йому діла немає так само,
Як і до Стіксових вод і до античних богів.
Справжня у нього земля, а твоя від початку фальшива.
Бог його зорі створив, ваші ж — лукавого плід.*

Цікаво, що Прокопович, «архітектор» церковних реформ Петра I, котрий помер у сані Новгородського архієпископа й віце-президента «святішого синоду», був палким оборонцем системи Коперника. Він доводив: вона не суперечить Святому письму.

Самого «Діалогу про дві найголовніші системи світу» було б досить, щоб людство із вдячністю пам'ятало ім'я Галілео Галілея. Проте для історії фізики не менш важливим є інше: він заклав основи сучасної динаміки. Він першим установив закон інерції й закон руху тіла по похилій площині, відкрив закон додавання рухів (з «перетвореннями Галілея» ми зустрінемося, коли говоритимемо про появу теорії відносності) і закон коливання маятника. Окрім телескопа, він сконструював мікроскоп і термоскоп (прообраз термометра).

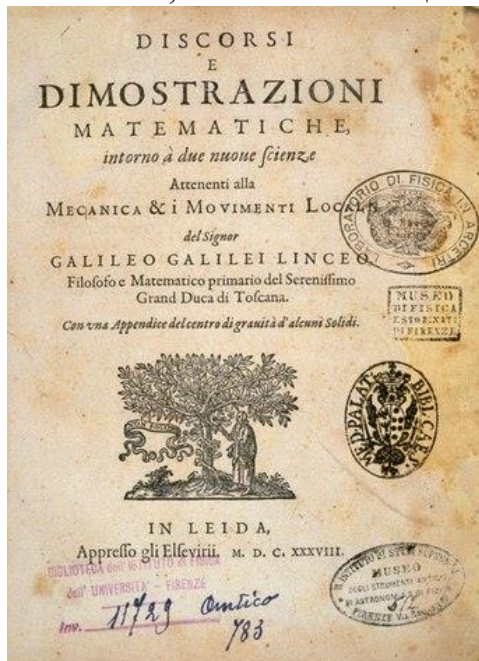
І все ж найзнаменитішим його відкриттям було, напевно, відкриття закону вільного падіння тіл, який став однією з підвалин класичної механіки. Молодий професор університету Галілей піднявся на знамениту Пізанську похилу вежу, щоб кинути з неї чавунне гарматне ядро і свинцеву кулю від мушкета. Легка куля вагою у півфунта і важке ядро вагою у 200 фунтів торкнулися землі одночасно.

Майже дві тисячі років ніхто не ставив під сумнів твердження Арістотеля про те, що швидкість падіння тіл пропорційна їхній вазі. Це начебто не суперечило повсякденним спостереженням. Листок із дерева справді падав повільніше, ніж стиглий плід, що зірвався з гілки.

Але Галілей поставив уявний експеримент: за Арістотелем, важче тіло падає швидше, легше — повільніше. А якщо їх з'єднати разом, то легке тіло уповільнюватиме рух важкого, а важче прискорюватиме рух легшого. Отже, третє тіло (важке й легке, сполучені разом) падатиме швидше за легке, але повільніше від важкого. Разом із тим, третє тіло

виявиться найважчим, а тому воно повинне падати швидше і від першого, і від другого. Міркування привели до суперечності, розв'язати яку міг тільки дослід. І Галілей поставив такий реальний дослід, скинувши кулю і ядро з висоти Пізанської вежі.

Проводячи різні досліди, Галілей виявив водночас хист до теоретичних узагальнень. Він сформулював поняття інерції, про яке не здогадувався Арістотель. Галілей зрозумів: важливий не рух сам по собі, а зміни цього руху. Пасажири корабля, перебуваючи в закритій каюті без вікон, не можуть визначити, стоїть корабель, а чи дуже плавно рухається за вітром і течією. Відтак кинутий камінь летить по горизонталі за інерцією, аж поки не торкнеться землі, здійснюючи рівноприскорений рух по вертикалі. Пам'ятаймо: перший із чотирьох законів Ньютона є, власне, законом Галілея, і сам Ньютон це визнавав.

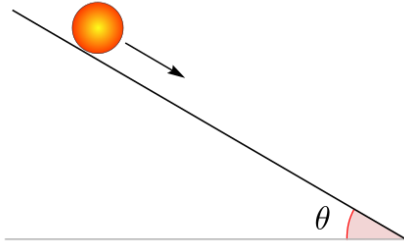


Підсумкова праця Галілея з питань механіки, видана в Лейдені (1638)

Не менша заслуга Галілея і як батька сучасної експериментальної фізики. Адже більшості вимірювальних приладів, до яких ми звикли сьогодні, тоді ще просто не існувало. Закон ізохронності коливань маятника Галілей, згідно з переказом, відкрив ще юнаком, спостерігаючи за похитуванням великої люстри зі свічками під церковним склепінням і використовуючи замість годинника власний пульс (і саме цей закон дозволив Гюйгенсові сконструювати у другій половині XVII ст. точний маятниковий годинник, — цю власну ідею сам Галілей уже не встиг реалізувати).

Багато винахідливості виявив учений, вивчаючи рух тіла в стані вільного падіння. Він одразу припустив, що таке тіло рухається рівноприскорено. Але довести цього не міг — надто малі проміжки часу виміряти було на той час неможливо. Тоді він вирішив сповільнити рух тіла, використовуючи похилий жолоб, розташований під невеликим кутом до горизонталі θ . Адже в такому разі на множник $\sin\theta$ змінювався лише

масштаб руху, а не його закономірності (якщо не брати до уваги того, що частина енергії кульки, що скочується, при цьому перетворюється в енергію обертального руху навколо осі — сам Галілей цього ефекту ще не розглядав). Учений наголошував: якщо жолоб поставити під кутом у 90 градусів, рух кульки по ньому прямо перетвориться на вільне падіння.

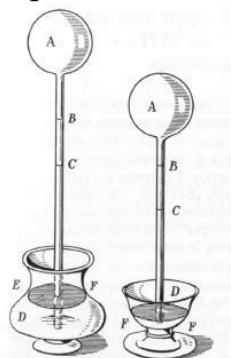


Кулька в похилому жолобі

Галілей скочував униз по похилому жолобу завдовжки в 12 ліктів, піднятому з одного краю на лікоть і встеленому пергаментом для зменшення тертя, бронзову кулю й вимірював час, за який вона проходить рівні відрізки. За браком точного годинника робив він це, випускаючи воду крізь тонку рурку й зважуючи кількість води, яка витікала протягом часу, що його треба було визначити. Так учений побачив, що час точно пропорційний до квадратного кореня пройденої відстані — і це відповідало припущенню про рух зі сталим прискоренням a , коли пройдена відстань s пов'язана з часом t простим співвідношенням:

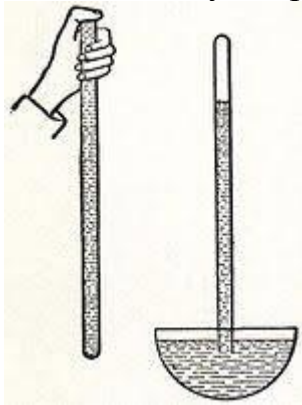
$$s = \frac{at^2}{2}.$$

Галілею належить честь винайдення термоскопа — першого приладу для вимірювання температури. Скляну рурку завдовжки приблизно з лікоть із порожньою скляною-таки кулею вгорі вчений опускав відкритим кінцем у воду. Вода піднімалася на певну висоту вгору по рурці й зупинялася, стримувана тиском повітря. Коли повітря в скляній кулі нагрівали — воно розширювалося, й рівень води в рурці опускався. Охолоджувалося — рівень підіймався. За зміною рівня можна було визначати відносну зміну температури (хоч звичну для нас градусну шкалу буде запроваджено лише через понад сто років).



Термоскоп Галілея

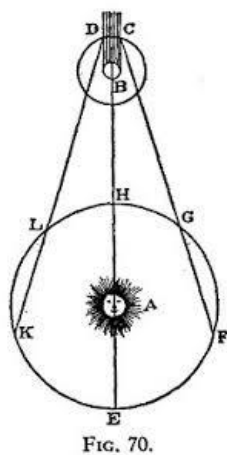
Люди здавна використовували водяні помпи, в яких вода піднімалася за поршнем. Уважалося, що підніматися змушує її те, що «природа боїться порожнечі» (Арістотель, як пам'ятаємо, стверджував, що порожнечі не існує). Вивчаючи роботу водяних pomp, Галілей поставив питання: а чому цей «страх порожнечі» діє лише до певної висоти — приблизно 32 фути (9,6 м) — і вище поршень таки відірветься від рівня води, і за жодних зусиль проста помпа води не підніме? На основі цього запитання Торрічеллі й Вівіані, учні Галілея, відкрили атмосферний тиск. Мало того, використовуючи стовп значно важчої ртуті, яка за нормальних умов підіймається лише на 76 см, вони вперше отримали над стовпом ртуті вакуум — так звану «торрічеллієву порожнечу».



Виникнення «торрічеллієвої порожнечі»

Галілей першим зробив спробу визначити швидкість світла. Для цього він і його слуга стали на вершинах пагорбів на великій відстані один від одного, озброєні ліхтарями з засувками. Задум був такий: Галілей відкриває засувку, слуга, щойно бачачи спалах, відразу відкриває свою, і за затримкою його сигналу учений визначає швидкість. Проте обидва спалахи були фактично одномоментними — надто велика швидкість світла ($c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$) не дала змоги реалізувати цю в принципі правильну ідею.

Тож швидкість світла вперше було визначено тільки 1667 року, вже після смерті Галілея. Це зробив молодий данський астроном Олаф Рьомер (1644–1710), спостерігаючи за затемненнями супутника Юпітера Іо (одного з чотирьох, які відкрив Галілей). Період обертання Іо по орбіті становить 42 год. 27 хв. 33 с. Рьомер помітив певну аперіодичність затемнень супутників (їхнє входження в тінь від планети) і правильно пов'язав її з різницею в часі, який потрібен світлу, щоб подолати відстань від Юпітера до Землі, за різного взаємного розташування цих двох планет і, відповідно, різної відстані між ними.



Визначення швидкості світла Рьомером: спостережуваний час входження супутника Іо у тінь DC тінь Юпітера В залежить від місця Землі на орбіті HGFEKL

Справді, коли Земля розташована в точці орбіти Е, світлу від Юпітера потрібно пройти відстань, довшу на діаметр земної орбіти HE. Відтак заходження в тінь супутника Іо для земного астронома відбуватиметься з певним запізненням порівняно з точкою Н. Рьомер спостерігав за півроку понад 40 затемнень Іо, і виміряне запізнення в точці Е склало 22 хвилини. Звідси Рьомер отримав значення $c = 215000$ км/с, що майже на третину менше від справжнього значення (299792,458 км/с). Похибку було зумовлено неточністю визначення часу запізнення (насправді він складає 16,5 хв.) та неправильністю використаної відстані до Юпітера. Адже значення відносних розмірів орбіт планет давав третій закон Кеплера. А ось абсолютну величину відстані до Марса було виміряно незадовго перед тим методом тріангуляції, шляхом одночасного спостереження через телескоп паралаксу — зміни видимого розташування на небосхилі — Марса з двох віддалених точок на поверхні Землі, з Парижа, що знаходиться в Європі та з Каєнни, що на північному узбережжі Південної Америки. Зрозуміло, що такий метод потребував дуже точного визначення кутів у синхронізований момент часу — чого за тодішнього рівня вимірювальної техніки досягнути було складно.

Очевидно, навіть частини з перелічених вище здобутків досить, аби ім'я Галілео Галілея вкарбувати золотими літерами в історію науки. Проте трагедія людини, змушеної під тиском публічно зректися своїх переконань, уже багато століть привертає до вченого увагу письменників і поетів.

Німецькому письменникові Бертольду Брехту (1898–1956) належить драма «Життя Галілея» (1939), написана в час, коли при владі в Німеччині перебував Гітлер. У ній Галілея за зречення не засуджують — такий крок є логічним для людини, котра змушена жити в умовах тоталітарної влади й прагне зробити бодай щось корисне для справи, якій вона служить.

Очевидно, під впливом Брехтової драми аналогічні мотиви зазвучали й у вірші «Монолог Галілея» відомого українського поета Леоніда

Кисельова (1946–1968), котрому тяжка хвороба відміряла лише 22 роки життя:

*А все ж таки Земля стоїть на місці!
На трьох китах, кити на черепаші,
А щодо черепахи... Черепаха
На ваших спинах, бовдури, стоїть.*

*Неправда, що потрібні вам герої,
Живих цькуєте, вам потрібен труп.
Великою захланною юрмою
Дивитиметесь, як в огні умру.*

*Але мудріший я за жереб цей,
Вам не побачити моєї страти!
Гукайте, що продався Галілей.
Є речі важливіші, їх багато.*

Про ці речі треба пам'ятати, даючи моральну оцінку вчинкам давно померлого вченого, котрий і нині для декого є уособленням «конформізму» — на відміну від Джордано Бруно, який таки загинув на вогнищі інквізиції за свої наукові переконання. Хоч, напевно, жодних наших виправдань Галілео Галілей давно вже не потребує.

Йоганн Кеплер (1571–1630)

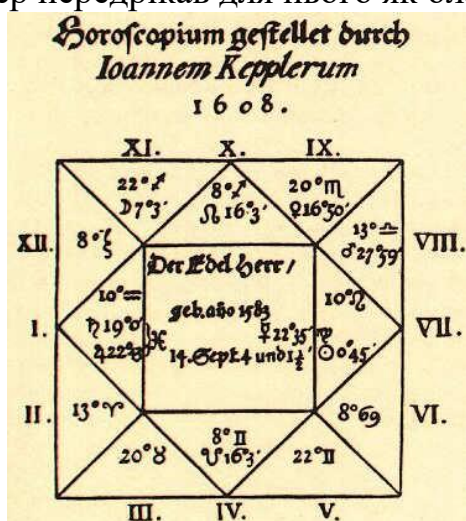
Сучасником Галілея був Йоганн Кеплер — геніальний астроном і водночас забобонний християнин-протестант, котрий зумів розгадати закони руху планет і водночас вірив у прикмети й небесні знамення. Життя не стелилося перед Кеплером квітами. Народився він дуже хворобливим сином солдата-найманця, який рідко навідувався додому і врешті-решт пропав безвісті, коли хлопцеві виповнилося 18 років. Натомість Кеплерова мати Катаріна, яка утримувала шинок і підробляла ворожінням та збиранням лікарських трав, підживлювала допитливий жвавий розум Йоганна, ще в дитинстві показавши йому комету й місячне затемнення.



Йоганн Кеплер (портрет 1610 р.)

Закінчивши Тьубінгенський університет і збираючись спершу стати протестантським пастором, Кеплер став натомість великим ученим і написав безліч робіт, у яких містика сусідила з незбагненними осяяннями генія. Він угледів у шеренгах зафіксованих небесних координат велику закономірність руху планет, але разом із тим цілком серйозно складав астрологічні гороскопи і вважав, що «Бог може повеліти з'явитися новому світилу у будь-якому місці і повсякчас».

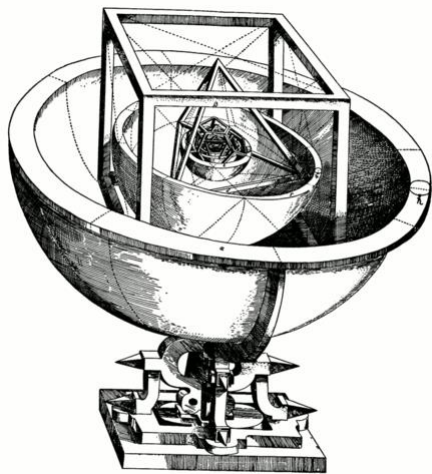
Під час його перебування в Празі Кеплера вважали модним астрологом, але гороскоп, складений ним власному синові, не справдився, — той помер ще немовлям. Не справдився й гороскоп, складений для знаменитого тоді Валленштайна: полководця було вбито в рік, який Кеплер передрікав для нього як благополучний.



Гороскоп, який Кеплер склав полководцю Валленштайну

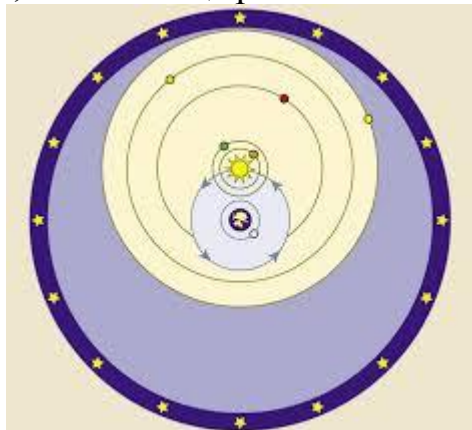
Кеплер як астроном сформувався ще в «до-телескопну» епоху, працюючи професором математики в університеті Граца. Його перша книга, «Таємниця світу» (1596), прагнула поєднати коперніківську систему (нею Кеплер захопився ще студентом) та піфагорейську ідею «гармонії сфер». Для цього він використав платонівські багатогранники. Орбіту Сатурна він уявив як коло на поверхні сфери, описаної навколо куба. В цей куб

вписано сферу з орбітою Юпітера, а в неї — тетраедр, в який, у свою чергу, вписано сферу з орбітою Марса і т.д. Свою книгу Кеплер надіслав Галілею — і той схвалив її геліоцентризм, але виявився байдужим до пошуків досконалих цифрових співвідношень, які змусили б небеса звучати «музикою сфер». Але цікаво, що сам Кеплер так і не зрікся до кінця життя цих пошуків. Навіть відкривши три свої знамениті закони й розуміючи, що орбіти планет — це не сфери, а еліпси, він ще раз перевидавав свою улюблену працю з багатьма змінами й доповненнями (1621). Адже зв'язок розмірів орбіт з платонівськими багатогранниками дозволяв йому (так він уважав) зрозуміти, чому планет є шість і тільки шість (до відкриття сьомої планети, Урана, Кеплер не дожив півтора століття).



Космографія молодого Кеплера (з книги «Таємниця світу»). Зовнішня півсфера включає орбіту Сатурна, всередині неї — орбіти Юпітера, Марса, Землі, Венери та Меркурія

У Граці Кеплер одружується, але двоє його дітей помирають у ранньому дитинстві, а в дружини розвивається епілепсія. До того ж, у католицькому Граці починають переслідувати протестантів. Тому 1600 р. Кеплер приїздить до Праги на запрошення знаменитого данського астронома Тіхо Браге (1546–1601), котрий знайшов тут притулок при дворі імператора Рудольфа II. Браге належала ідея космічної системи, яка мала на меті примирити Коперника з Птолемеєм: планети обертаються навколо Сонця, а вже Сонце разом із планетами — навколо Землі.



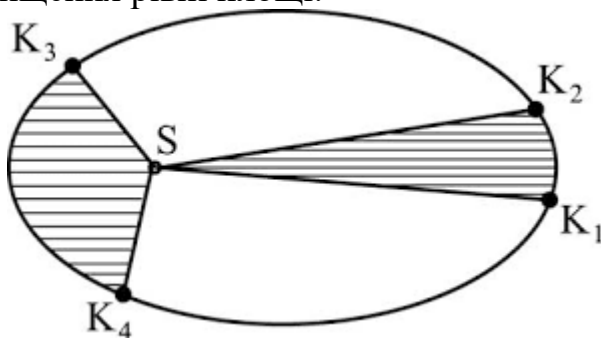
Система світу за Тіхо Браге: Місяць і Сонце обертаються безпосередньо навколо нерухомої Землі, а планети — навколо Сонця

Проте справжньою заслугою данського астронома було неймовірно точне як на той час визначення координат планет на земному небосхилі. Ці спостереження Браге вів день у день упродовж багатьох років, у спеціально споруджених і устаткованих найкращими на той час інструментами обсерваторії на острові в Зундській протоці між Данією та Швецією. На обладнання він витрачав величезні статки, й коли втратив підтримку короля, мусив виїхати з Данії.

Сподівання Браге на щедрість імператора «Священної Римської імперії» (так тоді називали аморфне об'єднання численних держав і державок на території сучасних Німеччини, Австрії та Чехії) не справилися — Рудольф II сам постійно потребував грошей. За рік астроном помирає від запалення сечового міхура (придворний етикет не дозволив йому вчасно вийти за потребою під час монаршого прийняття). Кеплер, після смерті Браге, успадкував не лише титул придворного математика, але й результати багаторічних вимірювань данського астронома, котрий день за днем із безпрецедентною на той час точністю визначав координати планет (зокрема Марса) на небосхилі.

Саме з допомогою цих результатів Кеплер установив три закони, які названо його іменем. Перші два закони було відкрито ще в Празі й описано у виданій 1609 р. книзі «Нова Астрономія», а третій — у 1618 р., вже в Лінці, куди Кеплер перебрався після смерті першої дружини Барбари й зречення імператора Рудольфа II, від якого корона перейшла до його брата Матіаса. При ньому Кеплер зберіг статус придворного математика й астронома, але платню й далі виплачували йому вкрай нерегулярно.

Перший закон Кеплера проголошує: планети рухаються не по колах, а по еліпсах, в одному з фокусів яких знаходиться Сонце. Другий уточнює: радіус-вектор руху планети за рівні проміжки часу покриває під час свого переміщення рівні площі.



Перший і другий закони Кеплера (заштриховані площі рівні)

Отже, ці два закони остаточно поклали край ідеї досконалих рівномірних колових обертань небесних сфер, уводячи в небеса нерівномірність. Але та нерівна тривалість пір року, яка змусила Гіппарха запровадити рух Сонця навколо Землі по ексцентричному колу, знайшла

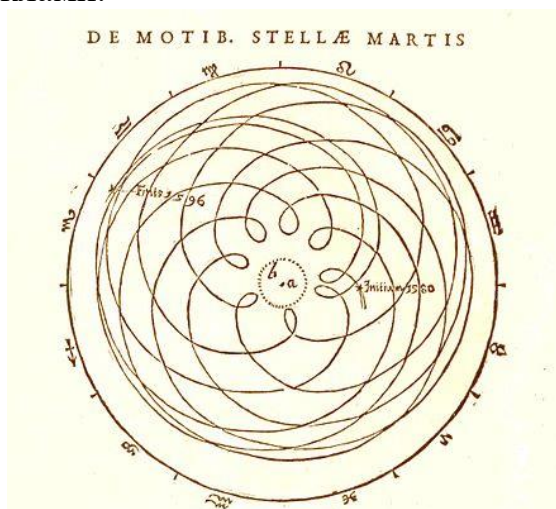
тепер просте й природне пояснення через підлеглість орбіти Землі дії двох перших законів Кеплера.

Третій закон Кеплера проголошував: квадрати часу обертання двох планет навколо Сонця співвідносяться як куби великих півосей їхніх орбіт. І цьому законові судилося трохи згодом відіграти велику роль у міркуваннях Ньютона, коли він виводив свій закон універсального тяжіння із залежністю сили тяжіння від оберненого квадрата відстані між тілами, що притягуються.

Сьогодні можна лише дивуватися з наукової скрупульозності Кеплера. Адже він міг використовувати тільки таблиці цифр кутових координат планет, що їх уклав за багато років спостережень Тіхо Браге, і лінійку, циркуль та транспортир для вимірювання кутів — оце й усе. Але його творчий геній дозволив вирахувати за допомогою цих цифр і простих приладів форму орбіт планет.

Простежмо перебіг міркувань Кеплера. Він мав дані спостережень за кутовими координатами планет на небосхилі. Щоб визначити за їхньою допомогою форму орбіти Землі, треба було мати дві нерухомі точки відліку. Однією з них логічно є Сонце. Другою точкою Кеплер вибрав Марс. Знаючи період обертання Марса навколо Сонця, Кеплер слушно припустив, що в кінці кожного «марсіанського року» Марс перебуває в тій самій точці планетного простору. Використовуючи ці дві точки як відправні, Кеплер методом триангуляції (побудови трикутників) визначив розташування Землі. А потім реконструював і орбіти всіх інших планет. Треба зазначити, що він, звісно, не знав значень справжніх відстаней між Сонцем і планетами. Але відношення цих відстаней визначив вельми точно.

Для порівняння з одержаними простими еліптичними орбітами Кеплер реконструював також і траєкторію Марса з погляду геоцентричної моделі. Складність і неприродність цієї траєкторії наочно демонструвала штучність самої системи Птолемея з її ексцентами, деферентами та епіциклами.



Геоцентрична траєкторія Марса за період 1580–1596 рр., реконструйована Кеплером (з книги «Нова астрономія», 1609)

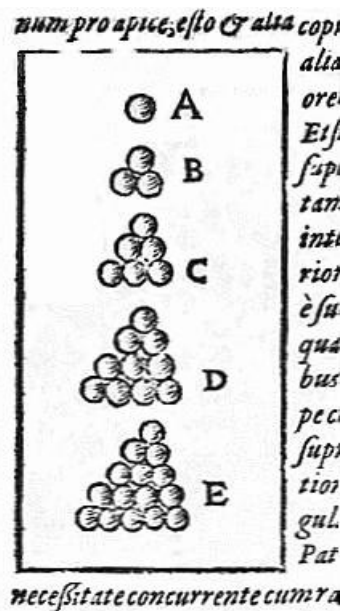
Нині, через кілька століть, усе це здається досить простим та очевидним. Але, як слушно зауважив Айнштейн, «ніхто не зможе оцінити повністю, скільки винахідливості, скільки важкої праці й терпіння знадобилося, щоб відкрити ці закони й так точно їх сформулювати».

Ще Кеплер зрозумів: закони, які він відкрив, мають універсальний характер. Вони описують не лише рух планет відносно Сонця, але й рух Місяця відносно Землі й «зірок Медичі» відносно Юпітера. Пізніше було доведено — ці закони визначають рух усіх без винятку небесних тіл. І це прямо впливає з ньютонівської механіки, що описує рух тіла в полі сили тяжіння, яка спадає обернено пропорційно до квадрата відстані.

Працю Кеплера «Скорочений виклад коперниківської астрономії» було заборонено інквізицією. 1627 року вчений закінчив свою останню працю — «Рудольфові таблиці», з допомогою яких можна було обчислювати рух планет для будь-якого моменту часу. Ці таблиці використовували ще багато поколінь астрономів.

Крім того, Кеплер цікавився оптикою — і суттєво вдосконалив телескоп Галілея. Він сформулював геніальні здогади про наявність світлового тиску (те, що хвости комет скеровані завше в бік, протилежний від Сонця, він правильно пояснив саме цим тиском) й про пов'язаність припливів і відпливів із Місяцем. Фактично, він уже розумів, що небесні тіла притягують одне одне. Мало того, він уважав, що сила такого тяжіння обернено пропорційна до квадрата відстані.

Є в науковому доробку Кеплера й результат, який уже в ХХ ст. було використано у фізиці конденсованого середовища. У трактаті «Про шестикутні сніжинки» (1627) Кеплер висловив припущення, що найщільніше пакування однакових сфер утворює структури, які пізніше назвуть гранецентрованою кубічною та гексагональною. Доведення цього припущення для регулярних систем дав через понад 200 років Карл Фрідріх Гаусс, а доведення для нерегулярних систем (т.зв. 18-а задача Гілберта) було одержане тільки в наш час (1998) комп'ютерними методами.



Пакування сфер на поверхні (з книги Кеплера, 1611)

Життя Кеплера було складне. Він змушений був декілька років рятувати матір від страшного тоді звинувачення в чаклунстві, яке цілком могло привести її на вогнище. Зі сімох його дітей від другого шлюбу троє померли ще в дитинстві. Лінц, де він знайшов притулок після Праги, спустошено під час Тридцятирічної війни, й учений перебирається до Ульма і вступає на службу до полководця Валленштайна (ми вже згадували, що складений для нього раніше гороскоп не справдився).

Останні роки Кеплер прожив у злиднях. Він вирушає в Регенсбург до імператора, який заборгував йому 29000 флоринів платні. Там він помирає, маючи 58 років і залишивши по собі 22 флорини, 2 сорочки й наукові праці, в яких сформульовано закони, що їх вивчають тепер у всіх школах та університетах світу.

Альберт Айнштейн висловився про цю геніальну й суперечливу людину так: «Він жив у добу, коли ще не було впевненості в існуванні певної загальної закономірності для всіх явищ природи. Якою глибокою була його віра в таку закономірність, якщо, працюючи сам, без жодної підтримки чи навіть розуміння, він упродовж багатьох десятків років черпав у ній сили для важкого й кропіткого емпіричного дослідження руху планет і математичних законів цього руху!».

Йоганн Кеплер був на сім років молодший від Галілея, проте з життя пішов на 12 років раніше. Ньютон говорив про себе, що коли він і бачив далі за інших, то тільки тому, що стояв на плечах гігантів. Справді, закони вільного падіння Галілея й закони руху планет Кеплера створили ту експериментальну основу, на яку спиралася перша фізична теорія — класична механіка Ньютона.

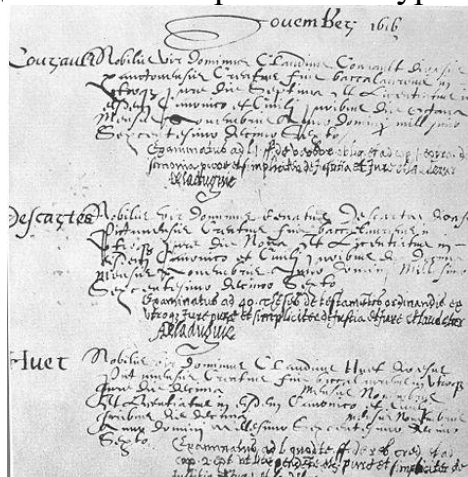
Рене Декарт
(1596–1650)

Француз Рене Декарт увійшов в історію насамперед як філософ. Але то була ще доба універсальних умів, то ж не менше уславився він і як математик, суттєвим є і його внесок у фізику й фізіологію. Освіту майбутній учений здобув в єзуїтському колегіумі, де отримав добрі знання не лише з богослов'я, а й з математики. Через слабе здоров'я він дістав дозвіл не відвідувати обов'язкового ранкового богослужіння і тому залишався в ліжку аж до полудня. Ці години на все життя залишилися для нього найбільш творчими. Закінчивши колегіум, Декарт вступив до університету в Пуатьє, де отримав диплом правника.



Рене Декарт (портрет пензля Франса Гальса)

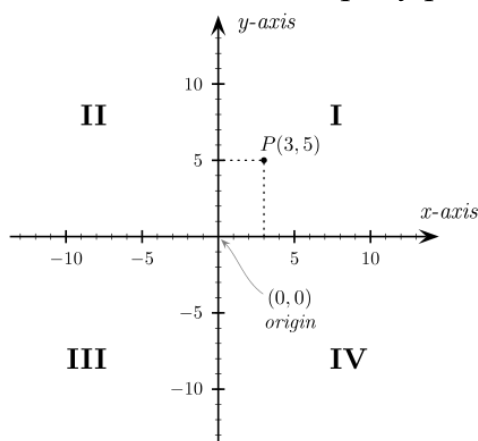
У цей час важко було передбачити, що він згодом стане всесвітньо відомим ученим. Після закінчення університету молодий Декарт вирушив до Парижа, де потрапив у товариство «золотої молоді», жив безтурботним життям, захоплювався грою в карти (вигравати допомагав йому математичний хист). Але вже за півтора року таке невпорядковане життя йому набридло. Рене винайняв окремий будиночок у паризькому передмісті Сен-Жермен та занурився у математичні справи.



Запис про закінчення Рене Декартом університету в Пуатьє (посередині аркуша)

Маючи 21 рік від народження, Декарт запрог, за його власними словами, «у великій книзі світу побачити палаци й армії, зіткнутися з людьми різної вдачі й стану, зібрати різні спостереження, випробувати себе в зустрічах, суджених долею, і всюди розміркувати про побачене і зустрінуте». Він за власним бажанням одягає мундир волонтера нідерландської армії, потому служить у Баварії та в Угорщині, у 1620 р. бере участь у битві при Білій Горі під Прагою, після якої Чехія втратила незалежність і ввійшла до складу Австрії.

Але і у війську його далі тягне до математики. Декарт працює над поєднанням алгебри та геометрії і створює нову науку — аналітичну геометрію. Загальновживана й усім відома прямокутна система координат — це Декартова система. Він робить дивне, за його словами, відкриття: кожную криву можна виразити рівнянням, у якому є дві змінні величини. І навпаки: кожне рівняння з двома змінними можна поставити у відповідність до певної кривої. Зазначмо, що це має надзвичайно важливе значення в механіці, якщо криву розглядати як траєкторію руху.



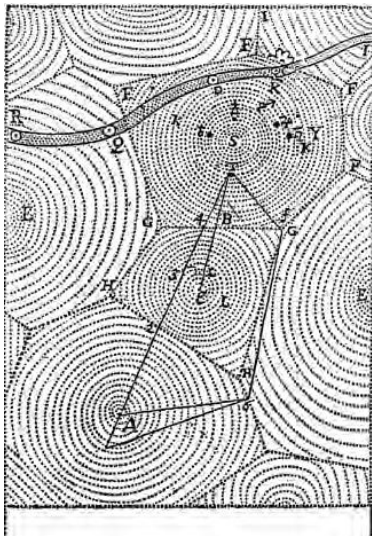
Система прямокутних координат, яку запровадив Рене Декарт

Саме в цей час Декарт розробив ту математичну символіку, яку ми використовуємо досі: змінні він позначав x , y , z , ..., а коефіцієнти при змінних — a , b , c , ... Він став записувати в сучасному вигляді показники степеня й кореня, а рівняння привів до канонічного вигляду, лишаючи в правій частині нуль. Декарт сформулював (хоч і не довів строго) основну теорему алгебри: загальна кількість коренів (дійсних і комплексних) алгебричного рівняння дорівнює його степеню.

Учений не раз повертається до Парижа, але переважно живе в Голландії, що була на той час не лише могутньою, але й волелюбною країною. Декарту подобався сам спосіб життя цього діяльного народу, зануреного у свої справи й не надто цікавого до справ чужинців, які опинилися серед них. А сам учений прагне від певного часу усамітнення й часто змінює оселі, щоб не ставати предметом чийсь уваги.

48-річний Рене Декарт завершує масштабний твір «Принципи філософії», де викладає грандіозну програму створення теорії природи, керуючись своєю методологічною настановою брати за основу найбільш прості та зрозумілі положення. У «Принципах філософії» Декарт обговорює проблему існування Бога й зовнішнього світу, створеного Богом. Частинки матерії, за Декартом, перебувають у безперервному русі, взаємодіють одна з одною тільки в зіткненнях — і тут учений принципово відрізняється від Ньютона, бо його система світу не визнає дії на відстані, зокрема й усесвітнього тяжіння.

Тому, щоб пояснити рух планет по орбітах, Декарт змушений був запровадити «ефірні вихори», які, обертаючись, підхоплюють і планети.



Всесвіт Декарта пронизаний вихорами, деякі з них обертають планети. Сонячна система, що оточує Сонце S, обмежена контуром FFFFFGG. Інші системи мають зірки-сонця в інших своїх центрах

Взаємодія матеріальних частинок, за Декартом, підпорядковується основним законам або правилам, які сам учений викладає так:

«Перше правило полягає в тому, що кожна частина матерії окремо завжди залишається в одному й тому самому стані доти, доки зустріч із іншими частинами не спричинить зміни цього стану».

«Друге правило, яке я передбачаю, полягає в наступному: коли одне тіло стикається з іншим, воно може передати йому лише стільки руху, скільки саме водночас втратить, і забрати у нього лише стільки, на скільки воно збільшить свій власний рух».

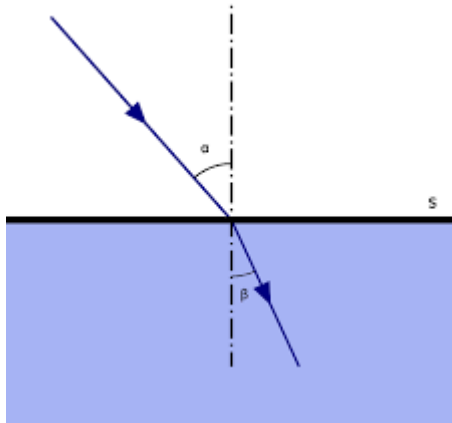
«Як третє правило я додам, що хоча шлях тіла, яке рухається, найчастіше має вигляд кривої лінії, й неможливо навести жодного руху, який не був би певним чином коловим, проте кожна з частинок тіла окремо прагне продовжувати рух по прямій лінії».

Як бачимо, першим правилом Декарт чітко сформулював закон інерції. Декартова кількість руху (mv , добуток маси тіла та його швидкості) — це згідно з сучасною термінологією імпульс тіла. (Якщо бути цілком точним, то поняття маси Декарт ще не знав. Важливим поняттям для нього

був лінійний розмір та об'єм, тож він оперував добутком об'єму тіла та його швидкості. Однак для тіл із однорідною густиною об'єм пропорційний масі). Закон збереження кількості руху для замкнутих систем, що його сформулював Декарт у своєму другому правилі, вивчають у школах та університетах як закон збереження імпульсу. Суть законів Ньютона цілком відповідає наведеним вище правилам Декарта.

У листах Рене Декарта натрапляємо на таке: «Вважаю, що природа руху така, що, коли тіло почало рухатися, то цього вже досить, щоб воно продовжувало рухатися з тією самою швидкістю й по тій самій прямій лінії, поки його не зупинить або ж не відхилить яка-небудь інша причина». Це — ще одне формулювання принципу інерції Галілея й першого закону Ньютона.

Крім динаміки, Декарт глибоко цікавився й оптикою. Він незалежно від голландця Вілеброрда Снеліуса (1580–1626) вивів закон заломлення променя на межі двох середовищ.



Заломлення променя світла на межі двох середовищ

При цьому вчений провів аналогію між променем світла і маленьким м'ячиком, який пробиває аркуш паперу. Декарт припустив, що при цьому компонента швидкості м'ячика, перпендикулярна до площини заломлення S , зменшиться, але компонента швидкості в самій цій площині залишиться сталою. Сумарна швидкість м'ячика при цьому очевидно зменшиться: $v_2 < v_1$.

Вимога сталості компоненти швидкості в площині заломлення S приводить до очевидного співвідношення:

$$v_1 \sin \alpha = v_2 \sin \beta ,$$

де α і β — кут падіння і кут заломлення. Звідси відразу випливає закон Снеліуса:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n ,$$

де показник заломлення записується через швидкості в двох оптичних середовищах:

$$n = \frac{v_2}{v_1} .$$

Звідси видно: отримавши правильний закон заломлення, Декарт, у припущенні корпускулярної природи світла, отримав водночас нефізичний вираз для показника заломлення. Адже логічно було припустити, що при переході променя з повітря у більш оптично щільне середовище (воду чи скло) швидкість його корпускул повинна зменшуватися, і отже, з одержаної формули випливає, що показник заломлення $n < 1$. Натомість добре відомо, що для таких випадків $n > 1$. У рамках корпускулярних уявлень цю суперечність пояснити так і не вдалося.

Однак у 1637 р. учений, використавши цей закон заломлення, отримав ще один важливий і правильний результат. Він побудував траєкторію променя світла: від сонця — через краплю води — до ока спостерігача. Його обчислення допомогли зрозуміти, що крапля, рівномірно освітлена сонцем, для нас виглядатиме по-різному в залежності від кута, під яким ми її спостерігаємо. Таким чином, він дав ключ до правильного пояснення явища райдуги, над яким люди билися багато століть. Запровадивши ефірні вихори, саме Декарт зробив гіпотетичний «тонкий ефір» матеріальним середовищем поширення світла — ця ідея залишалася в науці панівною аж до кінця XIX ст.

Після створення «Принципів філософії» Декарт домагається офіційного визнання свого вчення, ставить питання про викладання його в усіх школах, доводячи, що в його вченні немає нічого такого, що суперечить католицькій доктрині.

52-річного Декарта запрошують на батьківщину, де йому призначено велику пенсію. Декарт задоволений і їде з Голландії до Парижа, на вулицях якого вже будують барикади. У Франції — Фронда, описана у відомому романі Дюма-батька про пригоди чотирьох мушкетерів «Двадцять років потому». Стривожений такими подіями Рене Декарт поспішає повернутися до Голландії.

Невдовзі яскрава й примхлива королева Христина, яка одноосібно правила в 1644–1654 рр. могутньою Швецією, запрошує Декарта до свого двору, аби він займався з нею науками. Людина багата й незалежна, але доволі честолюбна, учений приймає це запрошення та їде в «країну ведмедів між скель і криги» (за його власним висловлюванням).



Королева Швеції Христина (портрет пензля Себастьяна Бурдона)

У Стокгольмі змінюється весь триб життя Декарта. Королева любила працювати з 5-ї години ранку, і до цього часу Декарт повинен був з'являтися в палац. За ці незручності королева Швеції дарувала йому звання дворянина Шведського королівства й великий маєток у Померанії. Скористатися цими милостями ученому так і не судилося. В одну з уранішніх поїздок у палац під пронизливим північним вітром Декарт застудився, захворів на запалення легень — й 11 лютого 1650 року великого француза не стало. Його поховали з належними почестями в Стокгольмі, а потім прах перевезли до Франції, оскільки Декарт став її національною гордістю.

Як людина Декарт був простий і сухуватий. Він здебільшого мовчав у великому товаристві, адже звук до роздумів на самоті. Але в колі близьких та друзів він був жвавим і веселим співрозмовником, навколо нього завжди утворювалося коло захоплених і відданих прихильників.

Як філософ Декарт створив систему, згідно з якою видимий нам Усесвіт творять матерія та її рух. «Дайте мені матерію й рух — і я побудую світ!» — таким було гасло великого вченого. Декарта, автора знаменитих слів «Я мислю, отже, я існую», небезпідставно вважають одним із засновників сучасної філософії.

У гносеології (теорії пізнання) Рене Декарт є родоначальником сучасного раціоналізму. На думку Декарта, основним знаряддям отримання і перевірки наукових знань є діяльність розуму. Це стає можливим тому, що розуму від народження дано певні поняття, так звані природжені ідеї. На цій основі людина, вважав Декарт, і впорядковує дані свого досвіду, що їх досягає за допомогою органів чуття. Ідея Бога — теж природжена ідея.

Декарт стверджував, що для істинного філософа існувати — означає мислити, мислити — означає сумніватися; лише таким шляхом можна прийти до істини. Щоб стати філософом, необхідно, наскільки це можливо, поставити все під сумнів, навіть власне існування.

Християн Гюйгенс (1629–1695)

Син голландського дворянина Християн Гюйгенс фон Цюйліхен був на 14 років старший за Ісаака Ньютона. Батько вченого був радником принців Оранських, тодішніх правителів Нідерландських Сполучених провінцій, і талановитим літератором.

Ще в дитинстві майбутній учений виявив різнобічний хист. Його вчитель писав про нього: «Я признаюся, що Християна треба назвати дивом серед хлопчиків. Він розвиває свої здібності в царині механіки й конструкцій, робить машини дивовижні, але навряд чи потрібні». Вчитель

помилявся у своїх останніх словах, бо хлопчик увесь час прагнув до користі від своїх занять і винаходів.

Християн Гюйгенс був безпосереднім продовжувачем справи Галілея в науці. Зазначмо, що саме у вільній Голландії Галілео Галілей видав свої «Діалоги». Християну тоді було три роки. За словами Лагранжа, Гюйгенсу «судилося вдосконалити й розвинути найважливіші відкриття Галілея».



Християн Гюйгенс (портрет пензля Каспара Нетшера)

Закінчивши курс математики й права в Лейденському університеті, 21-річний Християн Гюйгенс мріє потрапити до Стокгольма, аби побачити Декарта (якого все життя вважав своїм учителем) і поговорити з ним. Але цим задумам не судилося здійснитися через передчасну смерть Декарта.

У 22 роки Гюйгенс публікує цікаву математичну роботу «Роздуми про квадрат гіперболи, еліпса й круга», що свідчить про його неабиякі математичні здібності.

Тоді ж Гюйгенс виявив себе талановитим винахідником. У той час гостро стояла навігаційна проблема визначення географічної довготи. Для цього потрібні були точні годинники, що місяцями без похибки йшли б за часом певного обраного «нульового» меридіану (таким нині вважають меридіан Гринвіцької обсерваторії — а тоді кожна країна мала власну «точку відліку»). Різниця в часі між таким годинником і місцевим полуднем (його момент точно визначається за найкоротшою тінню) дає змогу легко визначити довготу — адже кожним 15 градусам довготи відповідає 1 година різниці часу. Саме так визначили довготу свого острівця в Тихому океані, куди їх випадково занесло на повітряній кулі, герої роману Жуля Верна «Таємничий острів», у яких зберігся кишеньковий годинник, виставлений за часом східного узбережжя США.

У 22 роки Гюйгенс отримує патент на винахід простого й надійного годинника з маятником. Ідея цього годинника належала ще Галілеєві, але він не зміг реалізувати її через прогресуючу сліпоту. Головним елементом винаходу Гюйгенса став саме анкерний механізм, який забезпечував водночас і точність ходу, і підтримання коливань маятника. Потім упродовж 40 років учений удосконалював свій винахід. Годинник із анкерним механізмом і гирями («ходики») ще півстоліття тому був у

кожній сільській хаті в Україні. А «точні» модифікації такого годинника обсерваторії використовували як еталонні аж до кінця XIX століття. Щоправда, застосування в мореплаванні такий годинник так і не отримав (надійний морський хронометр створять у Великій Британії в 1735 р., використавши іншу ідею Гюйгенса про коліщатко-балансир із годинниковою спіраллю для кишенькового годинника, запатентовану ним у 27 років — аналогічну ідею в Англії одночасно висловив і Роберт Гук).

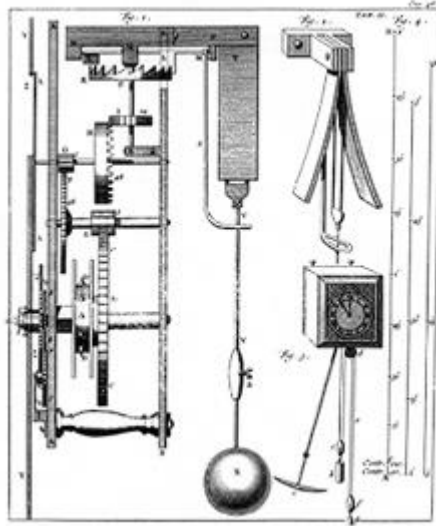


Рисунок Гюйгенса годинника з маятником та анкерним механізмом (1658 р.)

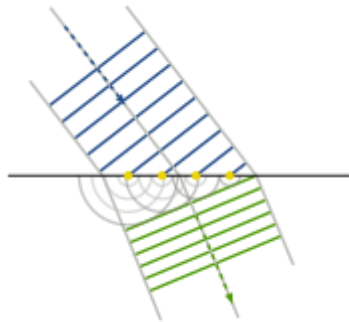
Високе походження відкривало Гюйгенсові двері всіх палаців Європи, але він не надто любив «з'являтися у світі». У 34 роки він — член нещодавно створеного Лондонського Королівського товариства (англійської академії), а ще за три роки стає членом щойно створеної Паризької Академії наук і її першим президентом. 15 років пропрацював Гюйгенс при дворі французького короля Людовика XIV і зробив за цей час блискучі математичні й фізичні дослідження, за які сам Ньютон назвав його «великим». У 1681 р. Гюйгенс залишив деспотичну Францію, де вже йшлося до скасування дарованої за кілька десятиліть перед тим свободи віросповідання для протестантів. Не бажаючи переходити в католики, він повернувся до рідної вільної Голландії, де й працював аж до смерті.

«Трактат про світло» (1678) — перший науковий текст із хвильової оптики, який сприяв тому, що ім'я Гюйгенса не можна оминати, вивчаючи хвильову теорію світла. Гюйгенс добре знав, як хвилі на воді без перешкод проходять одна крізь одну. Відтак він наводить вагомий аргумент на користь хвильової природи світла: «...якщо взяти до уваги, що промені проходять один крізь одного, не перешкоджаючи один одному, то стане цілком зрозуміло, що коли ми бачимо предмет, який світиться, то це не може відбуватися внаслідок перенесення матерії до нас від цього предмета, як це буває, коли куля чи стріла перетинають повітря».

З погляду хвильової оптики Гюйгенс легко пояснив закон заломлення світла Снеліуса. Для цього він сформулював принцип, який

стверджує: кожна точка хвильової поверхні є джерелом вторинних хвиль. Тому, якщо хвиля падає на межу двох середовищ, кожне з яких характеризується різною швидкістю поширення хвилі, то промінь світла заломлюється, і, як видно з простих геометричних міркувань, співвідношення синусів кутів падіння і заломлення визначається просто прямим відношенням швидкостей світла у відповідних середовищах:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = n.$$



Заломлення світла згідно з Гюйгенсом

Таким чином, Гюйгенс не лише отримав правильний закон заломлення, але і дав фізично несуперечливий вираз для показника заломлення, помінявши у формулі, одержаній Декартом, швидкості v_2, v_1 місцями. Це стало величезним козирем на користь саме хвильової моделі.

Проте, виходячи з цього принципу Гюйгенса, неочевидним залишалося те, чому світло не заходить за край певної перешкоди. Прямолінійність поширення світла краще пояснювала корпускулярна модель, прихильником якої був Декарт, і яка завдяки авторитету Ньютона залишалася панівною впродовж усього XVIII століття. Тільки на початку XIX ст. Огюстен Френель, розглянувши інтерференцію вторинних хвиль, збуджених сусідніми точками хвильового фронту, продемонстрував, що геометрична оптика так само не суперечить хвильовій природі світла.

Водночас Гюйгенс досліджував криволінійний рух. Хід його міркувань був приблизно такий: коли вантаж висить на нитці, то властивість вантажу падати створює натяг. Але ця властивість визначається прискоренням вільного падіння, тому і натяг нитки буде визначатися прискоренням вантажу. Якщо вантаж, що прив'язаний до нитки і натягує її, стане рухатися, відірвавшись від неї, з іншим прискоренням, то й натяг нитки до розриву має бути іншим. Таким чином, між натягом нитки і прискоренням вантажу, що відірвався від нитки, існує залежність. Однак вантаж, відірвавшись від нитки, зовсім не зобов'язаний рухатися так, як рухається тіло при вільному падінні (приклад — камінь, випущений із праці). Проте натяг нитки безумовно пов'язаний із прискоренням.

Виходячи з цих міркувань, саме Гюйгенс уперше (шляхом геометричних побудов) показав, що доцентрова сила в русі по колу

пропорційна квадрату швидкості й обернено пропорційна радіусу кола. Це означає, що формула для доцентрового прискорення $a = \frac{v^2}{R}$ — це формула Гюйгенса (хоча сам Гюйгенс у своїх працях наводить її в описовій словесній формі). Саме Гюйгенс записав (теж у словесній формі) і вираз для доцентрової сили $F = mv^2/R$, що став передумовою побудови Ньютонової теорії руху тіл під дією центральних сил. Як уже говорилося, Ньютон високо цінував наукові досягнення Гюйгенса.

Крім того, саме Гюйгенс на основі своїх досліджень створює теорію коливань маятника. Формула, що пов'язує період коливань T математичного маятника з його довжиною l і прискоренням земного тяжіння g — це ще одна формула Гюйгенса: $T = 2\pi\sqrt{l/g}$.

Учений дослідив теорію зіткнення пружних куль із використанням закону збереження кількості руху Декарта, закону збереження «живих сил» (за сучасною термінологією — енергії) й принципу відносності Галілея. Висновок, який зробив Гюйгенс на основі уявного досліду, такий: якщо в кулю, що перебуває у спокої, пружно вдаряє така сама куля, то друга куля зупиняється, а перша — набуває її швидкості.

Хід міркувань ученого в дещо спрощеному вигляді був приблизно такий: нехай дві однакові кулі котяться з однаковою швидкістю назустріч одна одній на палубі човна вздовж лінії, що поєднує ніс і корму. І нехай швидкості куль відносно палуби такі самі, як швидкість самого човна відносно берега. Зрозуміло, що після удару кулі «в системі човна» розлетяться з тими швидкостями в різні боки. Але для спостерігача на березі спершу одна з куль рухалася з подвійною швидкістю, а друга — перебувала в спокої, а після удару — вони помінялися ролями. Оскільки система, пов'язана з човном, і система, пов'язана з берегом, за принципом інерції Галілея рівноцінні, то доведення завершено.



Розгляд Гюйгенсом задачі про зіткнення двох куль

Якщо ж маси тіл різні, то швидкості після удару залежатимуть від співвідношення цих мас. Якщо маса кулі, яка налітає, більша, ніж у тієї,

яка перебуває в спокої, то вона після удару не зупиниться, а рухатиметься в тому ж напрямку, хоча й із меншою швидкістю. Якщо ж її маса менша, то вона рухатиметься в протилежному напрямку. А тіло, що початково перебувало в спокої, в обох випадках рухатиметься в напрямку початкового руху кулі, яка налітає. У загальному випадку вчений довів теорему: «Якщо стикаються два тіла, що рухаються назустріч одне одному зі швидкостями, обернено пропорційними їхнім величинам (Гюйгенс, як і Декарт, іще не вживає поняття «маса»), то кожне тіло відскочить з тією ж швидкістю, з якою вдарилося».

Нарешті, саме Гюйгенс на основі вивчення зіткнень пружних куль показав, що у зіткненні зберігаються суми добутків мас куль на квадрати їхніх швидкостей; відповідні вирази, поділені на 2, ми називаємо тепер кінетичною енергією (остаточно проблему множника $\frac{1}{2}$ було вирішено лише в середині XVIII століття).

Учений довів, що тіло, падаючи з певної висоти по різних траєкторіях, набуває кінцевої вертикальної швидкості, яка не залежить від форми траєкторії, а тільки від висоти, з якої рух почався (таке твердження висловив ще Галілей, але доведення запропонувати не зміг). Гюйгенс поставив уявний експеримент: він приставив дві похилі площини різної форми, але однакової висоти, одна до одної нижніми кінцями. Якщо тіло, спущене по одній з них, набуло б унизу більшої швидкості, аніж спущене по другій, тоді для зрівняння швидкостей його можна було б спустити по цій першій площині з дещо нижчої точки. Але тоді по другій площині воно могло б без втрат на тертя піднятися на вищу висоту від тієї, з якої впало, що неможливо. На основі цих міркувань Гюйгенс сформулював важливий принцип: «Якщо будь-яка кількість тіл із вагою приходить у рух завдяки цій вазі, то загальний центр ваги цих тіл не може піднятися вище, ніж він був на початку руху».

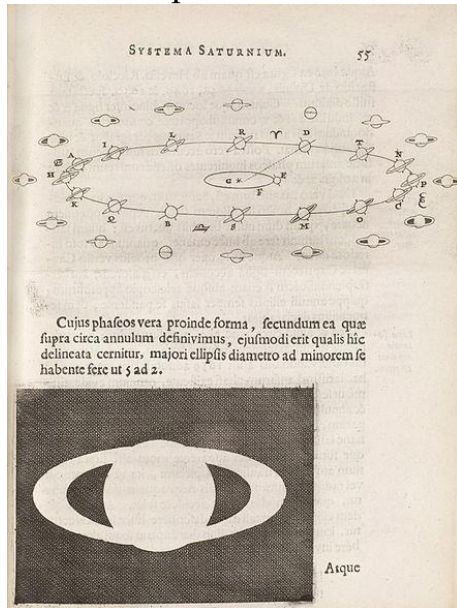
У граничному випадку одного тіла й ідеально пружного відбиття від поверхні вчений показав, що пружна куля, падаючи з висоти на горизонтальну площину, відскакує вгору на ту саму висоту. Таким чином, Гюйгенс упритул наблизився до понять кінетичної й потенціальної енергій та їхньої взаємоперетворюваності за законом:

$$\frac{mv^2}{2} + mgh = \text{const}.$$

Проте першим назву «живої сили» для міри руху тіла mv^2 (у нинішніх термінах — подвійної кінетичної енергії) запровадив ще за життя Гюйгенса (у 1686 р.) Готфрід Ляйбніц. Натомість поняття потенціальної енергії («енергії місцезнаходження») визначив Герман фон Гельмгольц аж 1847 року.

Гюйгенс залишив свій слід не тільки в оптиці та в механіці. У невеличкій роботі «Про рахунки в азартній грі» він (незалежно від французів Ферма й Паскаля) заклав основи сучасної теорії ймовірностей. В астрономії Гюйгенс, удосконаливши телескоп Галілея, відкрив смуги на Юпітері, білі полярні шапки Марса, найбільший супутник Сатурна Титан,

туманність Оріона. Він перший визначив період обертання Марса навколо осі й остаточно зрозумів природу кілець Сатурна (їх побачив ще Галілей, але через низьку якість свого телескопа спершу вважав, що Сатурн є особливою «потрійною» планетою).



Кільце Сатурна (з книги Гюйгенса, 1659)

Нарешті, саме Гюйгенс є винахідником телескопа без труби (лише з рознесеними об'єктивом та окуляром) з дуже довгою фокусною відстанню (до 64 м). Він же першим сконструював «чарівний ліхтар» — попередник сучасного діаскопічного проектора.

У геодезії Гюйгенс першим теоретично передбачив сплюснутість земної кулі біля полюсів унаслідок її обертання. Він же першим запропонував ідею про єдину всесвітню міру довжини, яка не залежала б від різних недосконалих еталонів. Такою мірою Гюйгенс запропонував обрати $1/3$ довжини математичного маятника з періодом коливання 1 с (це приблизно 8 см). Цю ідею Гюйгенса було реалізовано через століття по-інакшому: у 1791 р. Французька академія визначила метр як одну десятимільйонну довжини меридіану, що проходить через Париж, від північного полюсу й до екватора. А з 1983 р. метр дорівнює довжині шляху, який проходить світло у вакуумі за $1/299792458$ частину секунд — тобто людство знову повернулося до ідеї Гюйгенса пов'язати міру довжини з певним фізичним процесом, що відбувається впродовж 1 с.

Роберт Гук (1635–1703)

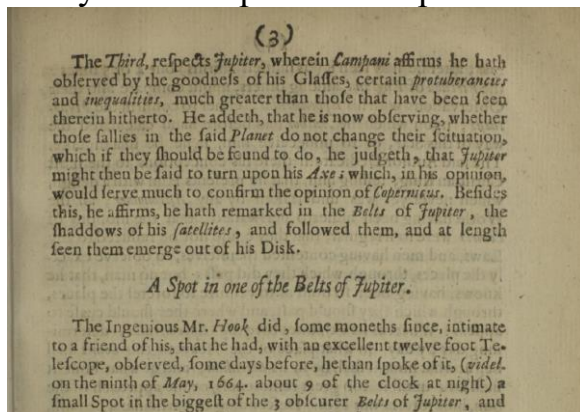
Цей співвітчизник Ньютона був на 8 років старший за нього. Блискучий природодослідник-універсал та фізик-експериментатор Роберт Гук зробив великий внесок у становлення механіки, оптики, теорії теплових явищ, астрономії, фізіології, зоології та ботаніки. Крім того, він був талановитим архітектором. І водночас через причини, про які

йтиметься далі, постать його зробилася вельми суперечливою, і від нього навіть не залишилося жодного достовірного портрета.

Батько Роберта Гука був священником і прагнув такої ж кар'єри для свого сина. Але, пересвідчившись у слабкому здоров'ї хлопчика і в його хисті до виготовлення різних пристроїв, він почав учити його на годинникового майстра. А в старовинній Вестмінстерській школі (яку закінчили багато інших славетних британців, починаючи від основоположника англійської літератури Джеффрі Чосера) Роберт Гук отримав глибоке знання не лише давніх мов (латини, грецької та старосврейської), але й математики. Після закінчення школи Гук у 1653 р. вступає до Оксфордського університету і стає помічником Роберта Бойля (з ним зустрінемося в наступній частині нашої книги, присвяченій розвитку уявлень про теплоту), допомагаючи йому ставити його численні досліди. Вважають, що саме Гуку належить важлива роль у встановленні закону, який пов'язує об'єм газу при сталій температурі з його тиском і який тепер має назву закону Бойля-Маріотта.

Стрімкий розвиток науки призвів до того, що в 1660 р. постало Лондонське «Королівське товариство задля вдосконалення знань про природу». Це товариство, яке відіграє роль національної академії наук Великої Британії згідно з королівською хартією від 1662 р., існує й досі і є однією з найавторитетніших наукових спільнот світу. У 28 років Роберт Гук став членом Лондонського Королівського товариства і куратором усіх його наукових експериментів.

У 1665 р. Королівське товариство почало видавати перший у світі науковий журнал — «Філософські праці» (англійською — “*Phylosophical Transactions*”). До того учених було настільки небагато, що вони обмінювалися один з одним листами про свої відкриття, й час від часу друкували книжки, в яких їх підсумовували. Але стрімкий розвиток науки і збільшення кількості дослідників викликали необхідність появи саме періодичного видання, з якого вчені могли б регулярно довідуватися про поточний стан досліджень своїх колег. У найпершому томі «Філософських праць» (цей журнал видається й досі) на 3-й сторінці вміщено повідомлення про те, що Роберт Гук спостерігав пляму на тлі однієї з трьох темних смуг на поверхні Юпітера.

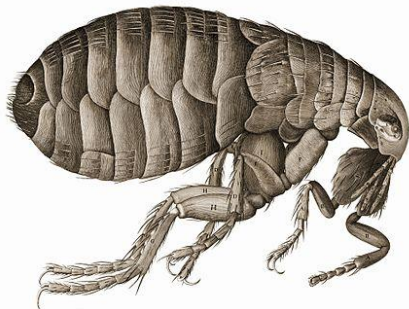


Повідомлення про спостереження Робертом Гуком плями на поверхні Юпітера в першому томі першого у світі наукового журналу «Філософські праці» (1665)

У 1664 р. Гук стає професором геометрії Грешем-коледжу Лондонського університету. У 1666 р. у Лондоні стається нищівна пожежа, яка знищує більшу частину міста, і молодий університетський професор Гук робиться найдіяльнішим помічником знаменитого архітектора Крістофера Рена (1632–1723) у відновленні столиці. Величну баню собору святого Павла побудовано з використанням методу, придуманого саме Гуком. Гук запропонував і нові методи правильного планування вулиць, і навіть сам склав креслення багатьох споруд (зокрема, Гринвіцької обсерваторії). У 1677–83 рр. Гук виконував відповідальні обов'язки секретаря Королівського товариства.

Основні наукові досягнення Гука лежать у галузі пружності матеріалів, небесної механіки, теплоти, оптики. Як асистент Роберта Бойля, він разом із ним удосконалив повітряну помпу, що її винайшов незадовго до того німецький аматор науки Отто фон Геріке (з ним ми теж зустрінемося в наступній частині книги), й разом із Гюйгенсом установив постійні точки танення льоду й кипіння води. У свої тридцять Гук сформулював гіпотезу про теплоту як різновид руху часток тіла (схожі думки висловлювали до нього й інші мислителі).

У цей самий час він удосконалив мікроскоп і відкрив клітинну будову організмів рослин. У своїй роботі «Мікрографія» (1665) він уперше описує клітини бузини, кропу, моркви тощо, наводить зображення ока мухи й комара, детально описує клітинну будову крила бджоли.



Блоха (з «Мікрографії» Гука, 1665)

Гук був активним противником корпускулярної теорії світла Ньютона. Він заперечував проти відкритого Ньютоном складного спектру білого світла — й помилявся. Він дотримувався хвильової теорії світла й висловив гіпотезу про поперечний характер світлових хвиль. Розвиток науки підтвердив це припущення. Він описав кольори тонких плівок, зумовлені явищем інтерференції хвиль.

Що стосується механіки, то Гук написав трактат «Спроба доказу руху Землі» (1674), де висловив ідею всесвітнього тяжіння. В листі до Ньютона від 6 січня 1680 р. він висловив припущення, що сила тяжіння

обернено пропорційна квадрату відстані між взаємодіючими тілами, і запропонував Ньютону математично пов'язати це з законами Кеплера про рух планет по еліптичних орбітах. Сам Гук цього зробити не зумів, а Ньютон пізніше подав потрібне доведення. Але саме Гук першим запропонував розглядати рух Землі по орбіті як суперпозицію руху по інерції (по дотичній до орбіти) та її «падіння» на Сонце, зумовленого доцентровим прискоренням. Така ідея справила серйозний вплив на хід міркувань Ньютона.

Коли 1686 року Ньютон подав у Лондонське Королівське товариство рукопис трактату «Математичні принципи натуральної філософії», Роберт Гук наполягав на власному пріоритеті у відкритті закону всесвітнього тяжіння. Ньютон заявив, що значно раніше повідомляв про ідею тяжіння й про силу, обернено пропорційну квадрату відстані, в листі до Гюйгенса (та однак у передмові до другого видання «Принципів» визнав, що Гук до нього висловлював ідею про силу, яка змінюється за законом $\sim 1/r^2$).

Роберт Гук — автор численних винаходів і вдосконалень. Зокрема, він (незалежно від Гюйгенса) винайшов спіральну пружину для регулювання ходу годинника (1658), яка досі використовується в усіх механічних годинниках і яка дала змогу сконструювати нарешті точний морський хронометр, розв'язавши давню проблему визначення довготи. Він суттєво вдосконалив телескоп, мікроскоп, барометр, гігрометр та анемометр. У 1684 р. він запропонував першу систему оптичного телеграфу, який дозволяв передавати повідомлення набагато швидше, ніж їх доставив би кінний гонець.



Мікроскоп Гука

Проте на сторінках підручників Гука найчастіше згадують як автора закону пружності (закону Гука), який було виявлено ним у 1660 р. і

докладно описано на 18 років пізніше. Справді, Гук експериментально встановив:

1) видовження тіла за його деформації прямо пропорційне до сили, тобто $\delta l \sim F$;

2) видовження тіла тим більше, чим більша його початкова довжина, тобто $\delta l \sim l_0$;

3) видовження обернено пропорційне до площі поперечного перерізу деформованого тіла, тобто $\delta l \sim \frac{1}{S}$;

4) видовження (абсолютна деформація) залежить від пружних властивостей тіла, що деформується.

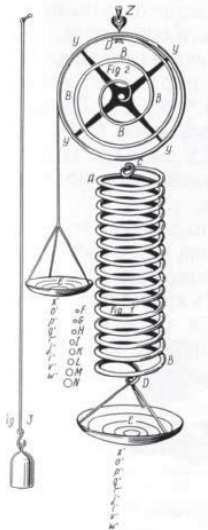
Фізичну величину, що характеризує пружні властивості тіла, стали надалі називати модулем пружності, або модулем Юнга E , на честь англійського вченого Томаса Юнга (1773-1829), котрий досліджував деформації й запропонував кількісну характеристику пружності; тоді $\delta l \sim \frac{1}{E}$.

Отже, експериментальний закон Гука має такий вигляд: $\delta l = \frac{F \cdot l_0}{E \cdot S}$.

У стані рівноваги докладена зовнішня сила F за модулем дорівнює внутрішній силі пружності F_{np} , а величина $\frac{E \cdot S}{l_0} = k$ називається

коефіцієнтом жорсткості деформованого тіла. Якщо абсолютне видовження вздовж осі OX позначити як $\delta l = x$, то закон Гука матиме вигляд: $F = kx$, а проекція сили пружності на вісь OX дорівнюватиме:

$$(F_{np})_x = -kx$$



Дослід Гука з пружиною

Але при всьому цьому багатому доробкові від ученого не залишилося навіть вірогідного прижиттєвого зображення. Дійшов до нас тільки опис його зовнішності: він був середнього зросту, сутулий, блідий, сіроокий, дуже худий (під старість про нього писали — «самі шкіра та

кістки»). У знищенні портрета Гука, який ще 1710 р. висів серед інших портретів членів Королівського товариства, поголоска звинувачувала тодішнього президента товариства Ньютона, який начебто мстився Гуку за суперечку про пріоритет. Насправді, як вважають сучасні дослідники, Ньютон тут ні в чому не винен: просто Королівське товариство саме тоді переїхало з Грешем-коледжу, де воно засідало в перші десятиліття своєї діяльності, до нового приміщення, і при переїзді якісь речі загубилися.



Картина «Портрет математика» пензля Мері Білл (бл. 1680)

І все ж, можливо, одне прижиттєве зображення Роберта Гука таки дійшло до нас. За аргументованою версією сучасного дослідника Лоуренса Гріффіна, саме Гука зображено на картині Мері Білл «Портрет математика», написаній близько 1680 року. На користь цього припущення говорить те, що художниця була добре знайома з ученим, обличчя на портреті відповідає описам його зовнішності, на картині зображено наукові інструменти, які він використовував, та споруди, які він відбудував як архітектор.

Не збереглася й могила вченого при церкві святої Гелени. Меморіальну табличку з його іменем у Вестмінстерському абатстві, де поховано найславетніших британців, було встановлено вже пізніше. Проте сьогодні пам'ять ученого увічнено в назвах астероїда, кратерів на Місяці й на Марсі, в медалі, яку присуджує Британське товариство клітинної біології, а головне — в одному з найбільш широко застосовуваних фізичних законів.

Доба класичної механіки (кінець XVII ст. — початок XX ст.)

Що відбулося:

1687 р. Вийшла у світ праця Ісаака Ньютона «Математичні принципи натуральної філософії», що містить основні поняття й аксіоматику механіки, зокрема три основні її закони руху (закони Ньютона) та закон усесвітнього тяжіння. Вихід у світ «Принципів» відкрив нову добу в історії фізики, оскільки в них уперше було викладено завершену систему механіки.

1699 р. Гільом Амонтон відкрив закон зовнішнього тертя твердих тіл.

1703 р. Вийшла в світ праця Християна Гюйгенса «Про відцентрову силу».

1746 р. Сформульовано закон збереження моменту кількості руху (Леонард Ойлер, Даниїл Бернуллі).

1760 р. Янош Сегнер винайшов одну з перших реактивних гідравлічних турбін («Сегнерове колесо»).

1766 р. У мемуарах «Загальні принципи руху рідин» і «Загальні принципи стану рівноваги рідин» Леонард Ойлер розробив аналітичну механіку рідин, вивів основні рівняння руху ідеальної рідини. Спільно з Даниїлом Бернуллі є творцем теоретичної гідродинаміки.

1796 р. Вийшла в світ праця П'єра-Симона Лапласа «Виклад системи світу», в якому міститься його гіпотеза утворення Сонячної системи з пилової туманності.

Ернст Хладні виміряв швидкість звуку у твердих тілах.

1798 р. Генрі Кавендіш за допомогою крутильних терезів виміряв силу притягання двох тіл і цим підтвердив закон усесвітнього тяжіння Ньютона, а також обчислив густину Землі — $5,448 \text{ г/см}^3$, за його даними.

1807 р. Томас Юнг запроваджує модуль пружності (модуль Юнга).

1810 р. Сімеон-Дені Пуассон запровадив характеристику пружності — відношення поздовжнього розтягу до поперечного стискування (коефіцієнт Пуассона).

1826 р. Гаспар-Гюстав Коріоліс (й незалежно, на три роки пізніше, Жан-Віктор Понселе) запровадили поняття роботи як добутку сили на пройдений шлях.

1827 р. Жан-Даніель Колладон і Жак Шарль Франсуа Штурм провели дослід на Женевському озері, щоб визначити швидкість звуку у воді, і отримали значення 1435 м/с .

1829 р. Гаспар-Гюстав Коріоліс запровадив поняття про додаткове прискорення (прискорення Коріоліса), що виникає за складного руху.

1832 р. Карл-Фрідріх Гаусс запропонував абсолютну систему мір, у якій за одиницю довжини прийняв міліметр, за одиницю маси — міліграм, за одиницю часу — секунду.

1834 р. Вільям Ровен Гамільтон виявив аналогію між класичною механікою і геометричною оптикою й надав рівнянням механіки узагальнену форму.

1835 р. Гаспар–Гюстав Коріоліс розробив теорію відносного руху.

1845 р. Жан Дюамель у своєму «Курсі механіки» запропонував визначати масу тіла як відношення прикладеної до тіла сили до прискорення, якого внаслідок цього набуває тіло.

1846 р. Йоганн Галле на основі теоретичних передбачень Урбена Левер'є, базованих на законах Ньютона, відкриває нову планету Сонячної системи — Нептун. Механіка Ньютона остаточно стає доведеною теорією.

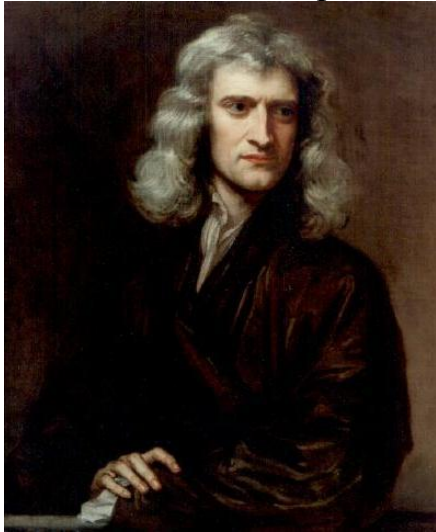
1883 р. Осборн Рейнольдс установив, що ламінарна течія переходить у турбулентну, коли введене ним число Рейнольдса, базоване на відношенні інертності руху течії потоку до його в'язкості, перевищує критичне значення.

1905 р. Альберт Айнштайн створює спеціальну теорію відносності і визначає тим межі застосовності для класичної механіки Ньютона.

Ісаак Ньютон (1643¹–1727)

Попри те, що до становлення класичної механіки причетні багато вчених, її називають ньютонівською. Адже саме Ньютон є автором «Математичних принципів натуральної філософії» — праці, в якій сформульовано основні закони механіки, викладено закон усесвітнього тяжіння й пояснено на цій основі рух небесних тіл.

Крім того, Ньютон відкрив складну структуру білого світла, розкладаючи його промінь за допомоги призми в спектр, обґрунтовував наукову гіпотезу про корпускулярну природу світла (завдяки авторитету вченого вона аж до початку XIX століття домінувала над хвильовою), відкрив закон охолодження нагрітого тіла, сконструював один із перших термометрів, відкрив закон опору руху у в'язкій рідині, вперше побудував відбивний телескоп (рефлектор), незалежно від Ляйбніца розробив основи диференціального й інтегрального числення.



Ісаак Ньютон у час, коли його було обрано до парламенту (портрет пензля Годфрі Неллера, 1689).

Уже на початку XX століття, пишучи передмову до німецького видання Ньютонівської «Оптики», великий Альберт Айнштейн розпочав її так: «Щасливий Ньютон, щасливе дитинство науки! Той, хто має час і дозвілля, зможе, перечитуючи цю книгу, пережити ті дивовижні осяяння, яких великий Ньютон зазнав у дні своєї молодості. Природа була для нього розгорнутою книгою, яку він читав без зусиль. Нам здається, що концепції, які він використовував для впорядкування даних досвіду, впливають спонтанно зі самого досвіду, з чудових дослідів, які він ретельно описує в численних деталях і вишиковує в чергу, наче іграшки. В одній особі він

¹ З датою народження Ісаака Ньютона іноді виникає плутанина. Річ у тім, що народився він на Різдво, 25 грудня 1642 року за юліанським календарем, яким тоді послуговувалися в протестантській Англії. За григоріанським календарем, за яким жили католицькі країни (і за яким тепер живе більшість світу), то було вже 4 січня 1643 року.

поєднував експериментатора, теоретика, майстра й — не менше — художника викладу. Він постав перед нами сильним, упевненим і самотнім; його радість творення і ювелірна точність виявляються у кожному слові й кожному малюнку».

Історична епоха Ньютона

Англія, в якій народився Ньютон, ще не була тією великою потугою, якою стала в XIX столітті. Країна з населенням близько 4 млн була переважно аграрною, близько 85% її мешканців жили на селі. Проте значна частина особисто вільних селян були письменні, а деякі фермери мали навіть непогану освіту. До того ж, уже майже чотири століття Англія була парламентською державою.

Наймогутнішою європейською державою з близько 15 млн населення на той час була Франція. Вона мала найбільшу в Європі армію, потужний флот і розкішний королівський двір, звичай якого прагнули наслідувати майже всі монархи інших країн. Проте покріпачене французьке селянство ледве животіло, а самовладдя короля було нічим не обмежене.

Ще гіршою була ситуація в Іспанії та Португалії, які, створивши за століття перед тим перші колоніальні імперії, вже переживали період стагнації.

Найдинамічнішою й найдемократичнішою країною Європи була тоді Голландія, що звільнилася від влади деспотичної католицької Іспанії, яка дедалі більше западала в стагнацію. Нідерландські Сполучені провінції багатіли завдяки розвиненій торгівлі, ремеслам і освіченості своїх громадян.

Ішла до завершення Тридцятирічна війна (1618–1648), після якої Німеччина залишилася вщент розореною й розділеною на десятки й сотні більших і зовсім маленьких держав і державок.



Будинок у Вулсторпі, в якому народився Ньютон

У рік, коли дочасно народився кволий і слабкий хлопчик Ісаак (таке написання імені ми використовуємо за традицією, фонетично правильніше

було б: Айзек), у Англії вирувала революція. Конфлікт парламенту й короля завершився тим, що влада перейшла до парламенту. Король Карл (так саме правильніше було б: Чарлз) I утік із Лондона на північ країни й почав збирати війська. Парламент готувався до відсічі. Англія розпалася на два табори, спалахнула громадянська війна, яку врешті виграла армія парламенту під проводом Олівера Кромвеля. Коли Ньютону було 6 років, короля стратили, а в десятирічному віці Ньютон довідався, що Кромвель зі своїми солдатами прийшов до парламенту й розігнав його. Протекторат Кромвеля тривав п'ять років — аж до смерті диктатора. Для нас, українців, цікаво, що Кромвель шукав політичного і військового союзу з іншим великим бунтарем того часу — Богданом Хмельницьким.

1660 року відбулася реставрація королівської влади. Один із генералів армії Кромвеля захопив Лондон, зібрав рештки розігнаного парламенту, який і посадив на трон Карла II, сина страченого короля, котрий жив на вигнанні у Франції. Упродовж наступних років тривала запекла боротьба в парламенті між прихильниками влади короля (торі) й парламентаризму (вігі). 1688 року вігі перемогли. Якова (Джеймса) II Стюарта було скинуто — й на трон запрошено з Голландії Вільгельма III Оранського, котрий уже не намагався зазіхати на права народного представництва.

Протягом 84 років життя Ньютона політичні терези в Англії весь час гоїдалися: революції, змови, війни. Разом із тим, починалася капітальна модернізація економіки, панувало прагнення наздогнати Голландію. Один із тодішніх проєктів починався так: «Розвиток Англії на суші й морі, або спосіб перемогти голландців, не воюючи з ними...».

У цій Англії, країні, що готувалася до великого прориву, й народився Ньютон. Незабаром почалися війни, які Англія й Голландія в союзі з іншими країнами Європи вели з Францією. Ще за життя Ньютона французьке переважання в Європі було суттєво підірвано, але остаточно Франція зазнала поразки тільки через 87 років після смерті Ньютона, на полі Ватерлоо, де закотилася зірка Наполеона Бонапарта.

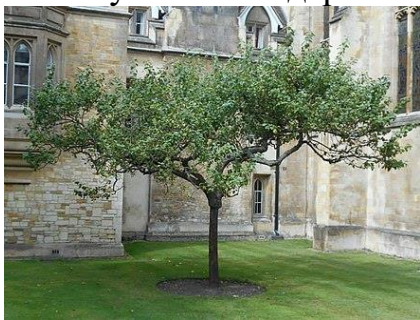
Дитинство і юність ученого

Ісаак Ньютон за народженням належав до верстви йоменів — так в Англії називався середньовічний стан вільних селян. Ферма в селі Вулсторп у Лінкольнширі, де він з'явився на світ, була порівняно заможна (двоповерховий будинок із сірого каменю зберігся досі). Ісаак ніколи не бачив свого батька, бо той помер ще до його народження. Коли хлопчикові було три роки, вітчим із матір'ю виїхали в місто, а Ісаака залишили під опіку бабусі. Хлопчик закінчив сільську школу, потому батьки відправили його вчитися в «королівську школу», розташовану в невеликому містечку Грентем за десять кілометрів від рідної домівки. Вже в дитинстві майбутній учений любив читати й майструвати різні технічні іграшки: сонячний і водяний годинники, млин тощо.

У п'ятнадцять Ісаак з великою нехиттю залишив школу, поступаючись наполегливості матері, котра хотіла, щоб він допомагав на фермі. Збереглися рахунки, написані рукою Ньютона, — майбутній математик збирав орендну плату з селян. Фермерськими справами Ньютон займався з примусу. Коли його посилали зі слугою в місто продавати зерно на ринку, він доручав торгівлю слугі, а сам ішов до бібліотеки свого шкільного вчителя Стокса.

На щастя для хлопця (й усього людства!), вдома досить швидко зрозуміли, що фермера з нього не вийде, й відправили його назад до школи. Ньютон знову долав премудрості арифметики, вивчав латину, старогрецьку й староеврейську мови. У школі він зазнав першого (й, схоже, єдиного) кохання. Дівчина була дуже гарна, проте на його почуття не відповіла. У школі Ньютон поставив і свій перший фізичний експеримент: помітивши під час змагання з товаришами, що стрибати за вітром легше, ніж проти вітру, він потім сам ретельно перевірів і записав, як далеко він зумів стрибнути, коли вітер дув у спину, в обличчя, й тоді, коли вітру не було зовсім.

Триніті-коледж (Коледж Святої Трійці) у Кембриджі, куди вступив Ньютон після закінчення школи в 1661 р., успішно склавши вступний іспит з латинської мови, мало чим відрізнявся від решти тодішніх університетів. Це була закрита корпорація приблизно 400 студентів і викладачів, де більшість студентів готувалася стати кліриками, аби потім отримати місце в ієрархії англіканської церкви. Решта — молоді люди з дворянських родин — прагнули здобути освіту як додатковий козир, щоб добре влаштуватися на державну службу.



«Ньютонова яблуня» під стінами Триніті-коледжу (не пов'язана з відкриттям усесвітнього тяжіння!)

У Триніті-коледжі Ньютон уникає веселих студентських вечірок, не п'є. Він справляє враження дуже серйозної людини. Це видно навіть із листа, якого він написав своєму другові: «Мені всі кажуть, що Ви хворі. Я щиро жалкую, але ще більше я сприкрений тим, що, як мені сказали, Ви захворіли через пияцтво. Я щиро бажаю, щоб Ви покинули пиячити й узялися за відновлення свого здоров'я. І якщо Бог пошле Вам одужання, то спробуйте вести надалі здоровий і тверезий спосіб життя».

Попри те, що наука зробила величезний поступ, фізику в Кембриджі в ті роки далі викладали за Арістотелем. З працями Коперника, Галілея, Кеплера, Декарта студентові Ньютону доводиться знайомитися самотужки.

Тому з появою в університеті в 1663 р. талановитого викладача математики Ісаака Барроу (1630–1677) Ньютон захоплюється насамперед його дисципліною. Барроу, лише на 12 років старший за Ньютона, був людиною жвавою, дотепною, різнобічно талановитою. Освічений філолог, він також займався фізикою, написав кілька важливих математичних робіт.

Маючи трохи більше двадцяти років, Ньютон за підтримки Барроу приходить до першого свого великого відкриття: виводить формулу біноміального розкладу для будь-якого раціонального показника степеня (включно з від'ємними), а потім розвиває надзвичайно плідну ідею розкладу функції в нескінченний ряд. У тому ж 1663 р. Ньютон одержує ступінь бакалавра.

Відкриття закону всесвітнього тяжіння

У 1665 р. Ньютону довелося майже на два роки покинути Кембридж. Рятуючись від пошесті чуми (в самому тільки Лондоні у 1666 році померли 31 тисяча з 200 тисяч мешканців), Ньютон виїжджає в рідне село Вулсторп. У будинку, де він з'явився на світ, у ті роки народилися диференціальне та інтегральне числення. Тут за допомогою призми вчений розкладає сонячний промінь, що проник крізь щілини віконниць його кімнати, і пізнає таємницю спектра. Нарешті — хоч як скептично потрібно ставитися до переказу про падіння яблука, — саме тут Ньютона спіткало осяяння, і він відкрив закон усесвітнього тяжіння.

У паперах Ньютона знаходимо записи: «На початку 1665 року я знайшов метод наближених рядів і правило перетворення будь-якого степеня двочлена в такий ряд... у листопаді одержав прямий метод флюксій [так Ньютон називав диференціальне числення]; у січні наступного року я одержав теорію кольорів, а в травні взявся до зворотного методу флюксій [тобто до інтегрального числення]... У цей час я переживав найкращу пору своєї юності й цікавився математикою і філософією, як нічим досі...

Того ж [1666] року я почав думати про тяжіння, що сягає аж до орбіти Місяця, й знайшов, як оцінити силу, з якою куля, що обертається всередині сфери, тисне на поверхню цієї сфери. З правил Кеплера я вивів, що сила, яка утримує планети на їхніх орбітах, має бути обернено пропорційна до квадратів їхніх відстаней від центрів, навколо яких вони обертаються».

Це виведення легко повторити для колових орбіт (реально еліпси, що є траєкторією обертання планет, не дуже відрізняються від кіл). Між періодом T , радіусом R і лінійною швидкістю v обертання планети існує простий зв'язок:

$$T = \frac{2\pi R}{v}.$$

Звідси для двох різних планет отримуємо:

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{R_1^2}{v_1^2} \cdot \frac{R_2^2}{v_2^2}.$$

Водночас, за третім законом Кеплера

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{R_1^3}{R_2^3}.$$

Прирівнюємо праві частини двох попередніх співвідношень і після нескладних перетворень отримуємо:

$$\frac{v_2^2}{R_2} \div \frac{v_1^2}{R_1} = \frac{R_1^2}{R_2^2}.$$

Але, згідно з формулою для доцентрового прискорення, $\frac{v^2}{R} = a$ і є прискоренням планети на орбіті. Тому

$$\frac{a_2}{a_1} = \frac{R_1^2}{R_2^2}.$$

А це означає, що сили, які діють на планети, змінюються обернено пропорційно до квадратів їхніх відстаней від Сонця. Зауважмо, що сам Ньютон провів значно складніше доведення, використовуючи методи диференціального числення, які сам же й розвинув у геометричній формі — пізніше ми продемонструємо їхнє застосування для доведення другого закону Кеплера в «Математичних принципах».

Відтоді Ньютон уже знає, які сили утримують на орбіті Місяць і планети Сонячної системи. Але світ дізнається про це тільки за 20 років — після публікації його «Principia» — «Математичних принципів».

Бо, щоб перевірити отриманий результат, Ньютон відразу ж порахував доцентрове прискорення Місяця в напрямку до Землі. Якщо це прискорення справді спричинено силою тяжіння Місяця до Землі, то воно мало би точно дорівнювати прискоренню сили тяжіння на відстані орбіти Місяця. Але ці дві цифри розбіглися в Ньютона приблизно на 1/8 їхньої величини. Причиною похибки стало те, що він узяв значення радіуса Землі й прискорення земного тяжіння з книги Галілея, де їх визначено було дуже неточно.

Навіть багато хто з пізніших теоретиків уважав би таку незначну розбіжність ознакою свого тріумфу й негайно опублікував би результат. Та скрупульозний Ньютон надовго відкладає задачі небесної механіки й зосереджується на оптиці. Лише 1679 року він дізнається про нове, точніше визначення радіуса Землі, яке зробив французький астроном Жан Пікар (1620–1682).

Коли Ньютон підставив у формули це уточнене значення, він отримав майже цілковитий збіг двох цифр. Отже, рух Місяця по орбіті справді зумовлено силою тяжіння. І є всі підстави вважати, що й планети підкоряються тому самому закону. А це значить, що небесну динаміку в основному побудовано.

Ньютон — член Триніті-коледжу і державний діяч

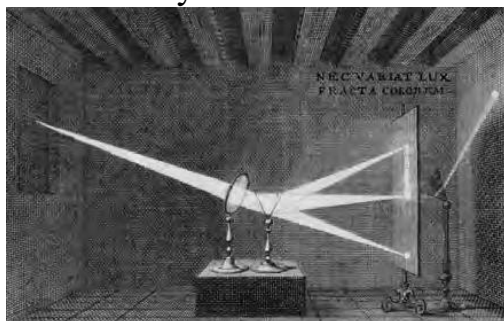
У 1667 р., коли пошесть чуми вляглася, Ньютон повернувся до Кембриджа й став членом корпорації коледжу. Цьому сприяв його

професор математики Ісаак Барроу. Завдяки цьому статусу й дипломові магістра, здобутому наступного року, Ньютон отримав кімнату, непогану платню й групу студентів, якій викладав стандартні навчальні дисципліни. Однак, за свідченням сучасників, викладач з нього був абиякий, і на його лекції ходили погано.

Проте науковий авторитет Ньютон починає зростати. За наполяганням Барроу він пише працю «Аналіз за допомогою рівнянь із нескінченним числом членів» про метод розкладу в нескінченні ряди (1669). Хоч сам Ньютон просив опублікувати її анонімно (він до кінця життя лишався непримиренним до будь-яких наукових неточностей, але водночас цілком байдужим до всіх виявів публічного визнання), однак Барроу відкрив ім'я автора, і воно зробилося відомим серед фахівців.

Як і більшість тодішніх професорів, Барроу мав сан священника. Того ж 1669 року він отримав запрошення на місце придворного священника при королівському дворі Карла II, а на завідувача кафедри рекомендував Ньютон, котрому на той час виповнилося 27 років.

Маючи 30 років, Ньютон став членом Королівського товариства й представив дві роботи: математичну й фізичну. Фізична робота «Нова теорія світла й кольорів» і тепер вражає своєю логікою й експериментальною майстерністю. Ньютон за допомогою призми ще в 1666 р. розклав біле світло на сім кольорів, показавши його складність, відкрив явище дисперсії, хроматичну аберацію, кільця в тонких плівках (пізніше названі кільцями Ньютон). Для вирішального експерименту він узяв дві дошки, обидві з дуже маленькими отворами, поставивши одну поруч з вікном (де була розміщена перша призма), а другу — на відстані 12 футів від вікна. Повертаючи першу дошку навколо осі, він давав змогу променям різного кольору проходити крізь отвір у другій дошці і падати на другу призму, розміщену поруч з іншого боку. Експеримент мав показати, що хоча всі промені мали однаковий кут падіння на другу призму, проте кожен окремий колір зазнавав такого самого заломлення у другій призмі, що й у першій. Таким чином Ньютон довів, що кожному кольору властивий свій кут заломлення.



Експеримент Ньютон з розкладу білого світла призмою (з видання його «Оптики» 1722 року)

Світло Ньютон уважав потоком частинок (корпускул), хоч протягом певного часу намагався побудувати й «компромісну» корпускулярно-хвильову модель. Ці частинки випромінюються всіма світляними тілами і,

потрапляючи в око, викликають відчуття світла. Теорія Ньютона легко пояснила закон відбиття світла (світлові корпускули, падаючи на поверхню під певним кутом, подібно до гумових м'ячиків, відбиваються від неї під тим самим кутом), а також (дещо гірше, з певними штучними припущеннями) явища заломлення, аберації та дисперсії. Зокрема, як ми бачили вище в нарисі про Декарта, корпускулярні уявлення приводили до фізично суперечливого виразу для показника заломлення, що «змушував» світляні корпускули рухатися в більш щільному оптичному середовищі швидше. Проте корпускулярна модель зовсім не зуміла пояснити інтерференції, дифракції та поляризації світла.

Особливо безпорадною корпускулярна модель виявилася щодо інтерференції світла — перерозподілу інтенсивності світла в результаті накладення декількох когерентних світлових хвиль. Це явище, що супроводжується чергуванням у просторі максимумів і мінімумів інтенсивності (або ж інтерференційною картиною), було виявлено Робертом Бойлем та Робертом Гуком незалежно один від одного. Пояснив його Томас Юнг значно пізніше, лише в 1801 році, на основі хвильових уявлень, запровадивши поняття «принципу суперпозиції».

Тому сучасників Ньютонова теорія світла не переконала. Гук і Гюйгенс піддали корпускулярні погляди Ньютона критиці, наголошуючи, що вони суперечать загальноприйнятим хвильовим підходам. Не маючи часу і змоги відповідати на всі критичні листи (частина з яких була дуже гострою), Ньютон навіть оголосив у 1673 р., що виходить з Королівського товариства, і вчений секретар товариства Генрі Ольденбург (саме йому ми завдячуємо появу процедури анонімного рецензування наукових робіт перед друком) насилу вмовив його залишитися.

Паралельно, щоб зменшити негативний вплив сферичної та хроматичної аберацій, які погіршували характеристики телескопів-рефракторів з двома лінзами (окуляром та об'єктивом), Ньютон побудував телескоп-рефлектор лише з однією лінзою-окуляром та з відбивним дзеркалом. Він сам виготовляв і полірував дзеркала, і врешті-решт добився чудової якості зображення при 40-разовому збільшенні.



Телескоп-рефлектор Ньютона, представлений Королівському товариству в 1672 р.

Наприкінці 1670-х Ньютон зазнає тяжких особистих утрат. Раптово помирає його друг Барроу, а трохи згодом після хвороби відходить і його матір Анна — єдині по-справжньому близькі для нього люди. Умирає прихильний до Ньютон Ольденбург, і секретарем Королівського товариства стає натомість його критик Гук. На додачу, пожежа в будинку нищить значну частину наукових рукописів Ньютон.

1684 року до Ньютон в Кембридж приїхав молодий астроном Едмунд Галлей (1656–1742 — його ім'я носить тепер одна з найяскравіших комет, рух якої він описав) і попросив пояснити, чому планети рухаються не по колах, а по кеплерівських еліпсах. Сам Галлей зумів відтворити наведене вище доведення для колових орбіт, але впоратися з проблемою еліпсів йому не вдалося. Ця наукова проблема надзвичайно зацікавила Ньютон, і лише за півтора року було написано капітальну працю — «Математичні принципи натуральної філософії». Як згадував родич і помічник ученого Гемфрі Ньютон, ця робота відбувалася спершу в проміжках між дослідями з алхімії, якою вчений тоді дуже цікавився, але потім захопила його цілковито.

Про завершення цієї роботи свідчить запис у протоколах засідань Королівського товариства: *«28 квітня 1686 р. д-р Вінцент передав манускрипт Ньютон під заголовком “Principia mathematica philosophiae naturalis”, де дається математичне доведення гіпотези Коперника в тому вигляді, як вона була викладена Кеплером, і всі небесні рухи пояснюються на підставі єдиного припущення про тяжіння до центру Сонця, обернено пропорційного квадрату відстані»*. Книга вийшла друком 1687 року — і докладно про неї йтиметься далі.

У цьому ж році Ньютон виявився втягненим у конфлікт, що виник на ґрунті переплетення політичних і релігійних мотивів. Король Яків II, який не лише правив як тиран, але й намагався зробити протестантську Англію знов католицькою, наказав Кембриджському університету надати ченцеві-католикові звання магістра. Університет жив за протестантськими законами, тож відмовився виконати волю короля. Тоді найвідоміших учених університету викликали до Лондона на розслідування. Позицію Ньютон видно з його листа: «Всі чесні люди, йдучи за Божим і людським законом, повинні коритися законним велінням короля. Але якщо королю порадили зажадати того, чого згідно з законом зробити не можна, ніхто не може бути покараний, якщо він відмовляється це робити». Насправді, пишучи так, учений дуже ризикував — король не гребував репресіями проти незгідних.

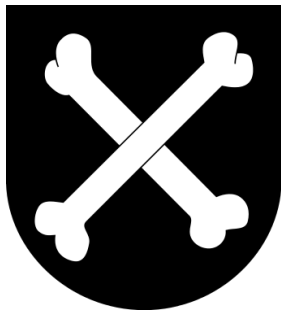
Зіткнення закінчилося внічию, а через рік після «славної революції» 1688 р., коли Якова II було скинуто з престолу і він опинився на вигнанні у Франції, Ньютон було обрано від корпорації Кембриджського університету членом палати громад парламенту, законодавчі акти якого сформували лад нової Англії. Попри відомий анекдот, начебто під час своєї каденції Ньютон виступив один-єдиний раз, попросивши зачинити вікно, з якого дме, насправді до виконання депутатських обов'язків він

ставився, як і до всього в житті, дуже сумлінно й відповідально. Але мусив за рік відійти від справ через тяжку хворобу, що спричинила тимчасовий психічний розлад (пов'язану, можливо, чи то з надмірною працею, чи то з отруєнням під час чергового хімічного досліду).

Невдовзі розпочалася війна Англії з Францією, що викликала розлад грошової системи (зараз це називають інфляцією). З'явилося багато фальшивих грошей. Здоров'я Ньютона наприкінці 1693 р. відновлюється — і його запрошують до групи, яка готує проєкт грошової реформи. 1696 р. Ньютон виїхав із Кембриджа і став управителем, а потім і директором Лондонського монетного двору. Його друг, астроном Галлей, став директором іншого монетного двору в провінції. Вони швидко налагодили карбування повноцінної монети. Зокрема, саме тоді було запропоновано карбувати напис на крайчику монети, що не дозволяло зрізати й красти коштовний метал. Протягом двох років удалося замінити майже всю готівку в обігу на повноцінну. До обов'язків директора монетного двору належало вести розшук і слідство у справах про фальшивомонетників. Ньютон особисто передав до суду справи, за якими було страчено близько двадцяти найзлісніших порушників закону, а вдсятеро більше вислано до північноамериканських колоній.

Ньютона приймали при дворі, він бував у найреспектабельніших салонах. У 1701–02 рр. Ньютон знову був обраний депутатом від Кембриджа, а 1703 року вчений став на чолі англійської науки — його вибрали президентом Королівського товариства (хоч і незначною більшістю голосів). Його попередник лорд Сомерс за п'ять років побував на засіданнях лише двічі, натомість Ньютон сумлінно брав участь у всіх заходах товариства. Втім, з посади директора лондонського монетного двору вчений не пішов, бо саме вона давала йому основний дохід. Ці гроші дали Ньютонові змогу власним коштом переселити Королівське товариство до нового приміщення на Фліт–Стріт (доти воно збиралося «в приймах» у Грешем-коледжі) і почати сплачувати регулярну платню його працівникам.

1705 року королева Анна ввела вченого в лицарський стан — перший випадок в історії, коли в такий спосіб було вшановано людину саме за наукові, а не придворні чи військові заслуги. З ученим любила вести тривалі розмови принцеса Кароліна, пізніше королева Великої Британії, дружина короля Георга (Джорджа) I. Сам Ньютон обзавівся гербом і родоводом (доволі фантастичним, бо його справжнє походження було далеким від аристократичного; пізніші дослідники встановили, що 1524 року його предки були простими селянами).



Дворянський герб, який використовував Ньютон

На межі століть Ньютон здобуває офіційне наукове визнання: його фізику починають офіційно викладати спершу в Кембриджі, а потім — в Оксфорді, а Французька академія, де прихильники Декарта були більшістю, обрала його в 1699 р. своїм іноземним членом.

Світогляд Ньютона

Більшість членів Королівського товариства за часів Ньютона вважали себе прихильниками нової філософії, основоположником якої був Френсіс Бекон. Його філософія постала на твердженні, що знання мають ґрунтуватися не на традиції, не на умоглядному мудруванні, а на досліді. У середньовіччі носіями подібної ідеї були алхіміки. Шукаючи «філософський камінь», який давав би змогу перетворювати різні речовини на золото, вони зробили багато відкриттів і заклали основи сучасної хімії. Достеменно відомо, що Ньютон тривалий час теж займався алхімією, яка в той час ще не втратила остаточно свого «наукового підґрунтя» — адже нове вчення про хімічні елементи ще тільки зароджувалося.

Дослідників, сучасників Ньютона, дедалі більше приваблює застосування точних методів, науково поставленого експерименту. Тодішнє бачення перспектив науки викладено в книзі одного з перших членів Королівського товариства Гленвілла «Про суєтність догм», де стверджувалося: «Поза сумнівом, розвиток наук надзвичайно збільшить можливості людства. Нам стануть доступними Південні моря. Можливо, Місяць стане так само досяжним, як Америка. Для наших нащадків купити пару крил буде, як для нас купити пару черевиків. Стане можливим розмовляти з людиною, що перебуває в Індії, неначе вона стоїть поряд у кімнаті; перетворювати пустелі на родючі землі й, нарешті, відновлювати волосся». Цю книгу, напевно, читав і Ньютон.

Водночас учений був і знавцем теології, у зібранні його творів є чимало розлогих богословських трактатів. Систематично займатися теологією Ньютон почав у свої 30. У листі секретареві Королівського товариства Генрі Ольденбургу від 4 грудня 1674 року Ньютон навіть повідомляє про свій намір припинити заняття математикою та оптикою та цілком присвятити себе питанням релігії.

Річ у тім, що 1675 року закінчувався граничний термін перебування Ньютона як магістра мистецтв у Триніті-коледжі Кембриджа. Згідно з

усталеним тоді порядком, якщо хтось хотів і надалі залишатися членом коледжу, то мусив прийняти сан священника.

В основі офіційного англіканства, як і в основі католицького та православного віровчень, лежить догмат святої Трійці (єдиного Бога в трьох особах: Отця, Сина і Святого Духа). Ньютон розумів, що не зможе прийняти сан священника, оскільки за релігійними переконаннями був антитринітарієм — не вірив у догмат Трійці і в божественність Ісуса Христа (якого вважав тільки сином Божим, здатним творити чудеса тільки силою свого Отця). А лицемірити й прикидатися вчений не вмів, — він по-своєму гаряче вірував у Бога і викривляти цю віру вважав гріхом. Але поклонятися наче Богові розп'ятій людині Христу було для нього ідолопоклонством. Тому він уже готувався покинути Кембриджський університет. Проте, завдяки клопотанню свого вчителя Ісаака Барроу, Ньютон отримав спеціальний дозвіл короля, що дав йому змогу стати членом Триніті-коледжу, не приймаючи духовного сану.

Водночас Ньютон був переконаний, що без знання священних текстів Старого й Нового заповітів будь-яке заняття наукою безглузде. Тому він ретельно вивчав Священне писання, глибоко цікавився біблійною хронологією і навіть скрупульозно реконструював за ним дату Христового розп'яття: 4 квітня 33 р. н.е. Разом із тим, Ньютон уважав, що немає іншого способу пізнати Бога, крім шляху через пізнання системи природи. Тому всяке спотворення віри для нього пов'язане з неправильним розумінням природи. Святе Письмо уявлялося Ньютону не книгою таїнств, недоступних людському розумінню, але історичним свідомством всемогутності Бога, яке можна не лише сприйняти відчуттями, але й осягнути розумом.

За своїм світоглядом Ньютон був абсолютним раціоналістом — і волів мати справу з абсолютними поняттями, які не залежать від людського втручання. У «Математичних принципах натуральної філософії» він дає знамените визначення абсолютних простору й часу:

I. Абсолютний, істинний математичний час сам по собі за своєю сутністю, без будь-якого стосунку до чогось зовнішнього, проходить рівномірно, й інакше називається тривалістю.

II. Абсолютний простір за самою своєю сутністю, безвідносно до чогось зовнішнього, залишається завжди однаковим і нерухомим.

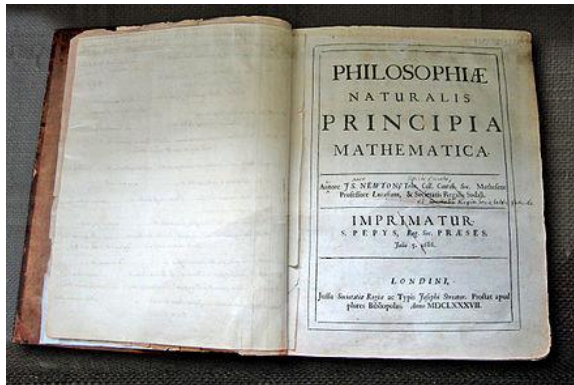
Давши ці визначення, Ньютон говорить і про відносні простір та час, але ця відносність для нього зумовлена виключно нашим невмінням точно визначати часові та просторові інтервали. Потрібен був геній Айнштейна, щоб зрозуміти залежність часу й простору від системи, в якій перебуває спостерігач.

При всьому тому Ньютон залишався людиною XVII століття, і розмірковуючи, наприклад, про живі організми, користувався поняттям спеціальної «бродильної сили», далеким від сьогоденної науковості. А його ретельні студії «Об'явлення Івана Богослова» (чи «Апокаліпсису») із намаганням співвіднести темні віщування цієї заключної книги «Нового

Заповіту» з реальними подіями історії та визначити (бодай приблизно) час майбутнього кінця світу погано поєднуються для сьогоденної людини із його ж чіткими доказами з «Математичних принципів».

Механіка Ньютона і закон усесвітнього тяжіння

На момент виходу у світ праці «Математичні принципи натуральної філософії», в якій Ньютон виклав першу фізичну теорію (механіку), вчені вже знали закон інерції (Галілей), закон збереження кількості руху (Декарт), уміли обчислювати доцентрове прискорення й доцентрову силу (Гюйгенс). У перших реченнях передмови до першого видання 1687 р. (за його життя вийшли ще два видання) Ньютон писав: «Оскільки давні... надавали великого значення математиці при вивченні природи, то найновіші автори, відкинувши субстанції та приховані властивості, намагаються підпорядкувати явища природи законам математики. В цьому творі я маю на меті ретельно розвинути застосування математики до механіки».



Примірник першого видання «Математичних принципів», що належав Ньютону, з його позначками (зберігається в бібліотеці Триніті-коледжу)

Свій написаний дзвінкою латиною трактат Ньютон починає формулюванням трьох законів механіки:

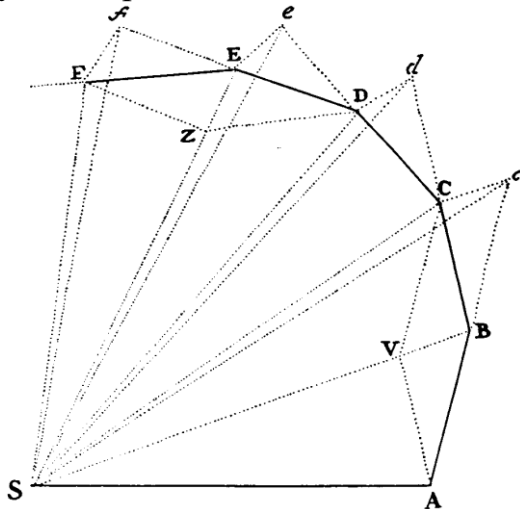
Закон I. Кожне тіло зберігає свій стан спокою або рівномірного й прямолінійного руху, поки та оскільки прикладені сили не змушують його змінити цей стан. (Прислухайтесь до урочистого звучання цих рядків в оригіналі: *Corpus omne perseverare in statu suo...*).

Закон II. Зміна кількості руху пропорційна прикладеній рушійній силі й відбувається в напрямку тієї прямої, вздовж якої ця сила діє.

Закон III. До дії завжди є рівна й протилежна протидія, інакше — дії двох тіл одне на одне рівні поміж собою і скеровані в протилежні напрямки.

Пізніше Ньютон нагадає своїм читачам: два перші закони механіки відкрив Галілей, а третій сам він пов'язував з іменами Рена, Воллеса й Гюйгенса. Отже, самі закони не були новими. Новим у «Принципах» було розв'язання складних задач небесної механіки на основі цих законів і пояснення (саме пояснення, а не математичний опис) законів Кеплера та інших складніших явищ. Окрім еліптичних орбіт, Ньютон показав також

Щоб продемонструвати особливості його наукового викладу, надамо слово самому Ньютону, повністю повторивши хід доведення другого закону Кеплера, як його подано в «Математичних принципах».



Учений спершу стверджує: можна вважати, що планета, яка рухається шляхом $ABCDEF$ і притягується доцентровою силою у напрямку

до Сонця S , зазнає від нього за рівні проміжки часу «дискретних, але істотних імпульсів» (вираз Ньютона) — послідовно в точках A, B, C, D тощо. Відстань між цими точками може бути як завгодно малою, і тоді орбіта стає плавною кривою лінією.

Рух планети на ділянках AB, BC тощо вважатимемо рівномірним, а буквою s позначимо уявне положення планети в тому разі, якби вона в точці B не зазнала від Сонця S «поштовху», внаслідок якого змінила напрям руху, а рухалась далі по прямій упродовж того самого часу і з тією самою швидкістю; тому $Bs = AB$. Насправді ж положення C планети є результатом двох переміщень: Bs по прямій за інерцією і BV у напрямку до сонця S , а тому $BsCV$ — паралелограм. Оскільки SB — медіана у трикутнику SAC , то площі трикутників SAB і SBs — рівні; оскільки Cs паралельна до SB , то трикутники SBs і SBC мають рівні площі (їхні вершини s і C рівновіддалені від спільної основи SB). Отже, трикутники SAB і SBC — рівновеликі. Таким чином, другий закон Кеплера доведено: обертаючись навколо Сонця, планета за рівні проміжки часу покриває радіусом-вектором однакові площі. Аналогічними геометричними побудовами Ньютон доводить те, що з закону обернених квадратів випливає перший закон Кеплера.

На особливу увагу заслуговує закон унесвітнього тяжіння Ньютона. Зупинімося на ньому детальніше.

На початку XVII століття ідея всесвітнього тяжіння була поширена і популярна. Одним із перших писав про тяжіння французький математик Жіль Роберваль, котрий трохи не дожив до появи «Принципів» Ньютона. Коли Ісааку Ньютону було 2 роки, Роберваль видав книгу, в якій розвивав ідею всесвітнього тяжіння і намагався пояснити устрій Сонячної системи. Але він ще не знав про існування зв'язку між прискоренням і силою, а тому особливих успіхів не досяг.

Багато вчених «вгадували» пропорційність сили тяжіння до величини $1/r^2$, але строгого доведення подати не могли через математичну складність. На час, коли народився Ньютон, перед науковцями постало чітко окреслене завдання: створити динаміку, яка пояснювала б рух тіл під дією тяжіння. Але вийшло так, що пошуки пішли іншим шляхом, який указав Декарт. Декарт відкидав середньовічні теорії тяжіння, оскільки вважав, що сили не можуть діяти на відстані. За Декартом, взаємодія можлива тільки внаслідок контакту, через зіткнення. Виходячи з цієї ідеї, Декарт побудував свою теорію Всесвіту. За цією теорією, Сонячна система виникла з ефірного вихору. Важчі елементи утворили Сонце й планети, а решта ефірного вихору досі обертається й несе за собою планети. Декартові «Основи філософії» вперше було видано того самого року, що й книгу Роберваля — 1644-го, та викладені в них теорії тяжіння абсолютно різні.

Погляди Декарта справили дуже сильний вплив на учених того часу. Певну данину вченню Декарта віддавав замолоду і Ньютон, хоча свою теорію тяжіння він побудував на основі ідеї далекодії. У другому виданні

«Математичних принципів» він додав спеціальне «Повчання», де показав неспроможність опису руху планет на основі Декартових вихорів. Пізніше, у ХІХ столітті, теорія далекодії (миттєвої дії на відстані без участі матеріальних посередників) здобула загальне визнання саме завдяки Ньютонові. Але сам великий учений ставився до неї з певною осторогою. Зокрема, він писав: «Незрозуміло, яким чином бездушна інертна матерія, без посередництва чогось іншого, нематеріального, могла б діяти на інше тіло без взаємного доторкання».

Але зрозуміти фізичну природу тяжіння Ньютон не зміг (як, врешті-решт, не розуміли її впродовж століть після нього), а відтак керувався знаменитим принципом «гіпотез не вигадую!». Переконавшись, що він знає правильну формулу для сили тяжіння, на фізичній причині такої сили він не зосереджувався. Ще раз нагадаємо слова з передмови до першого видання «Математичних принципів»: «...найновіші автори, відкинувши субстанції та приховані властивості, намагаються підпорядкувати явища природи законам математики».

Ми вже знаємо, що на пріоритет у відкритті закону всесвітнього тяжіння претендував і Роберт Гук. За власними словами Ньютона, саме листування з Гуком спонукало його повернутися до задачі про рух тіл під дією сили $\sim 1/r^2$, і вже тоді Ньютон отримав результат, згідно з яким у полі такої сили тіло має рухатися по еліпсу. Але повідомлення про це він тоді не опублікував.

Наступний поштовх у дослідженні теорії тяжіння Ньютон завдячує уже згадуваному вище Едмунду Галлею. У 1680-х роках Галлей брав активну участь у дискусіях про тяжіння. Він виявив зв'язок між «законом $1/r^2$ » і третім законом Кеплера для колових орбіт, але математично довести рух планет по еліптичній траєкторії не зміг. У розмові з Крістофером Реном, визначним архітектором і аматором-математиком, Галлей дізнається, що той теж намагався довести цей зв'язок, і так само безуспішно. Рен обіцяв премію тому, хто зможе це зробити. Гук заявив, що він знає доведення, але так його і не показав. Галлей дійшов висновку, що «містер Гук не такий добрий, як його слова». Насправді, скоріш за все, Гук просто не зумів розробити правильного доведення. Тоді Галлей вирішив звернутися до Ньютона. Ньютон йому повідомив, що він уже давно знає доведення, і справді виклав його в «Математичних принципах» мовою наведених вище геометричних побудов.

У трактаті Ньютона було пояснено не лише рух планет, але і явище припливів та відпливів. Річ у тім, що спрощений опис цього явища тяжінням океанічних вод до Місяця, а відтак утворенням спрямованого в бік супутника водяного «горба» виявився неспроможним. Адже, за логікою цього пояснення, припливи мали б відбуватися раз на добу, а не двічі.

Справжня причина припливів і відпливів полягає в тому, що система Земля–Місяць обертається навколо спільного центру мас (оскільки маса Землі у 83 рази більша за масу її супутника, центр розташований усередині Земної кулі, хоч і зміщений відносно її центру). Дуже спрощено це явище

можна уявити так: вода океанів на боці Земної кулі, зверненому до Місяця, більше зазнає тяжіння Місяця, ніж вода, зосереджена на протилежному боці Земної кулі; водночас вода океанів на відверненому від Місяця боці Землі менше зазнає тяжіння Місяця, аніж вода, зосереджена в «проміжній» смузі земної поверхні. Тому водяні «горби» виникають з обох боків Земної кулі, й припливи з відпливами змінюються кожні 12 годин.

Ставлення вченого світу до механіки Ньютона

У журналі французької Академії наук з'явилася рецензія, автор якої зазначав, що систему механіки розвинено винятково повно і блискуче, але Ньютон розглядає планетний рух не як фізик, а як математик, не дбаючи про справжню причину тих рухів, які він вивчає. «Було б дуже добре, якби він дав нам фізику, таку ж блискучу, як і його математика».

З листування Гюйгенса (він, як ми пам'ятаємо, був послідовником Декарта) видно, що сумнівів щодо математичної спроможності праці Ньютона він не мав, але хотів з'ясувати походження руху планет.

Відгомоном ученої полеміки того часу є запис дотепника Вольтера, котрий відвідав Лондон 1727 року: «У Парижі Всесвіт бачать наповненим ефірними вихорами; а тут у тому ж таки світовому просторі ведуть свою гру невидимі сили. У Парижі припливи й відпливи морів зумовлено тиском Місяця, в Англії моря, навпаки, тяжіють до Місяця; тож у той самий час, коли парижани чекають від Місяця високого стояння води, мешканці Лондона чекають відпливу».

Картезіанці — прихильники вчення Декарта про Всесвіт, де є лише матерія і рух, і взаємодія не передається через простір без участі матеріальних посередників — відразу ж почали шукати матеріальних причин усесвітнього тяжіння. Дотепну механістичну гіпотезу запропонував французький фізик Жорж Луї Лесаж (1724–1803). Згідно з нею, Всесвіт заповнено атомами, які мчать у всіх напрямках і тиснуть на тіла, які трапляються їм на шляху. Тиск на тіло з усіх боків урівноважується. Коли ж у просторі є два тіла, і кожне з них почасти затуляє друге від потоку атомів, тиск на боки цих тіл, скеровані одна до одної, буде меншим, тож тіла притягатимуться за законом обернених квадратів відстаней.

Проте ця гіпотеза мусила б привести до суттєвого гальмування руху планет по орбітах (з тієї ж причини, з якої краплі дощу значно інтенсивніше падають на лобове скло рухомого автомобіля, ніж на заднє). Однак нічого схожого не відбувається. Відтак наступний крок у поясненні фізичної природи тяжіння (цього разу — викривленням простору) зробив лише Альберт Айнштайн у своїй загальній теорії відносності.

Англіїці вважали зміст «Принципів» найбільшим досягненням, а Ньютона — гордістю англійської науки й усієї Англії, оскільки саме в Англії відкрито справжню «систему світу». Ньютон довів до межі досконалості геометричні методи в механіці. Весь виклад і пояснення було зроблено на рисунках. У той час аналітичні методи викладу в координатній

формі ще не було розроблено, і Ньютон користувався геометричними методами не лише тому, що це було зрозуміліше для тодішніх читачів, а й тому, що часто в нього просто не було іншого вибору. І якщо фізика «Принципів» відкривала великі можливості для подальших досліджень, то математичний апарат призводив до суттєвих ускладнень.

Для того, щоб відкрити перспективи подальшого розвитку механіки, її треба було наново сформулювати в аналітичній формі. Першим цю роботу розпочав Готфрід Вільгельм Ляйбніц (1646–1716). На жаль, між ним і Ньютоном 1699 року розпочалася затята суперечка щодо пріоритету в цій царині, і в цю суперечку поступово втягнувся не лише тодішній учений світ, а навіть монарші особи. Як це часто буває, публічна сварка мала негативні наслідки для всіх її учасників. Після неї англійська математика впродовж століття перебувала в стагнації, а континентальна Європа проігнорувала кілька блискучих ідей Ньютона й «перевідкрила» їх значно пізніше. Крім того, Ньютона звинувачували в плагіаті щодо Ляйбніца й Гука — і це було геть несправедливо.

Відтак рішучий крок уперед зробив Леонард Ойлер (1707–1783), котрий 1736 року написав книгу «Механіка, аналітично викладена». Ойлер писав, що не може розв'язати нових задач механіки геометричними методами Ньютона: «Хоча мені здавалося, що я достатньо ясно зрозумів розв'язок багатьох задач, проте задач, трохи відмінних від них, я вже розв'язати не зміг». Це й сприяло тому, що Ойлер переформулював механіку аналітично. У книзі Ойлера задачі розв'язано майже сучасними математичними методами. З цього й починається стрімкий розвиток математичних методів розв'язання задач механіки, фізичні основи якої заклав Ньютон, і вони залишилися незмінними до наших днів.

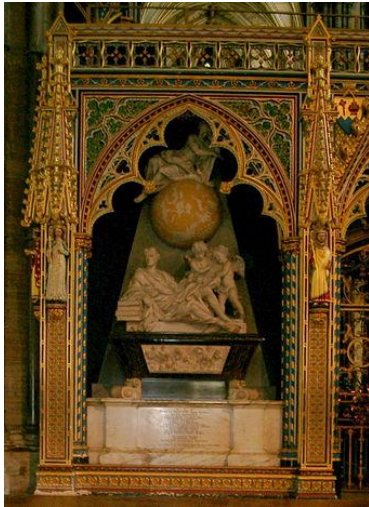
Тож аналітичну механіку було створено вже після Ньютона. Серед її творців, крім Ойлера, слід назвати французів Алексі Клода Клеро (1713–1765), Жана Лерона д'Аламбера (1717–1783), Жозефа-Луї Лагранжа (1736–1813), П'єра-Симона Лапласа (1749–1827), а також ірландця Вільяма Ровена Гамільтона (1805–1863).

1727 року Ісаак Ньютон відійшов у вічність, маючи 84 роки; Ойлерові тоді було 20, Клеро — 14, д'Аламберу — 10 років, а Лагранж, Лаплас і Гамільтон ще й не народилися. Таким чином, після Ньютона наукове лідерство перейшло до Франції — аж до часів Фарадея і Максвелла, котрі повернули Англії першість у науці.

На могилі творця класичної механіки викарбовано слова:

Тут спочиває сер Ісаак Ньютон, дворянин, котрий майже божественною силою свого розуму вперше пояснив зі світличем математики рухи планет, шляхи комет, припливи і відпливи океану. Він дослідив різноманітність світлових променів і особливості кольорів, які з того виникають і про які доти ніхто навіть не здогадувався. Старанний, проникливий і вірний тлумач Природи, Старовини й Святого Письма, він прославив у своєму вченні Всемогутнього Творця. Визначену Євангелієм

простоту він довів своїм життям. Хай смертні радіють, що серед них жила така окраса людського роду. Народився 25 грудня 1642 року. Помер 20 березня 1727 року.

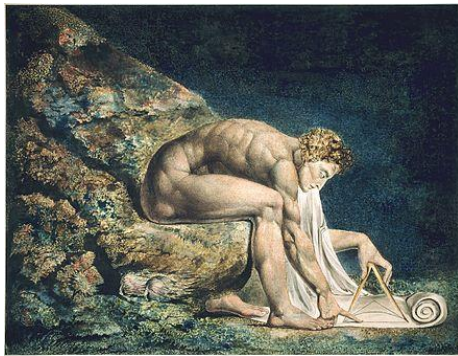


Надгробок Ньютона у Вестмінстерському абатстві

Молодший Ньютонів сучасник, великий англійський поет XVIII ст. Александер Поуп (1688–1744) ушанував співвітчизника епітафією:

*Закони Всесвіту в північній ховалися від нас.
«Хай буде Ньютон!» — мовив Бог; і світло стало враз.*

А знаменитий англійський поет і митець Вільям Блейк (1757–1827) зобразив Ньютона «божественним геометром». Масивне скульптурне зображення за цією картиною прикрашає сьогодні вхід до Британського музею.



Ньютон як «божественний геометр» (картина Вільяма Блейка)

Велична і цілісна картина світу, яку створив Ньютон, і досі захоплює нові покоління, хоча багато що з цієї картини світу довелося уточнювати, розширювати, поглиблювати, наповнювати новим змістом відповідно до нових наукових досягнень.

Рух і взаємодія: межі Ньютонової механіки

Як ми пам'ятаємо, великий учений античності Арістотель у своїх наукових трактатах виклав погляди на суть механічного руху. На підставі спостережень, систематизації й критичної оцінки природничо-наукових знань він сформулював положення, загальний сенс яких такий: а) без сили немає руху; б) чим більша сила, що діє на тіло, тим більша швидкість його руху.

Постать Арістотеля було канонізовано середньовічною наукою, і в цих його твердженнях упродовж майже двох тисяч років ніхто й не думав сумніватися. Адже повсякденний досвід начебто щодня підтверджував висновки великого філософа античності.

Першим, хто засумнівався в правоті Арістотеля, був Галілео Галілей, один із тих велетів, «на чий плечі стояв Ньютон». Галілей на основі фізичних дослідів і висновків із них відкрив інертність як властивість фізичних тіл, завдяки якій тіла здатні зберігати стан спокою (інерція спокою) або рівномірного руху (інерція руху) без дії на них зовнішніх сил.

Зазначмо, що твердження Арістотеля не суперечать істині, якщо пам'ятати, що Арістотель урахував дію на тіло тільки рушійних сил і не враховував сил опору рухові тіла. Галілей вивчав рухи тіл за умови, що сили опору в порівнянні з рушійними силами зникло малі. Першим, хто поставив і розв'язав задачу про рух тіла під дією всіх сил, був Ісаак Ньютон.

Сер Ісаак Ньютон «майже божественною силою свого розуму» сформулював систему трьох основних законів механіки: закон інерції, закон пропорційності сили і прискорення, закон рівності дії й протидії.

У такій послідовності ці закони й вивчають у шкільному курсі фізики. Якщо глибоко й усебічно проаналізувати фізичну ситуацію, осмислити зміст кожного з трьох законів, то можна дійти висновку про їхню нероздільність.

Справді, другий закон (у сучасному записі $\vec{F} = m\vec{a}$, сила дорівнює добуткові маси на прискорення) виконується щодо інерційних систем відліку (систем, які перебувають у спокої або рухаються без прискорення), існування яких визначає перший закон (закон інерції). Без знання й розуміння третього закону неможливо отримати рівнодійну всіх сил, оскільки вона є геометричною сумою всіх сил, що діють на тіло, а кожна з цих сил визначається з третього закону (закону взаємодії).

За висловом Альберта Айнштейна, закони Ньютона — «це фундамент усієї механіки і, мабуть, усієї теоретичної фізики».

З часу створення першої наукової теорії (це була фізична теорія — класична механіка) минуло вже понад три століття. За цей час закони класичної механіки багато разів перевіряли в різних умовах, і кожного разу отримані результати підтверджували їхню істинність.

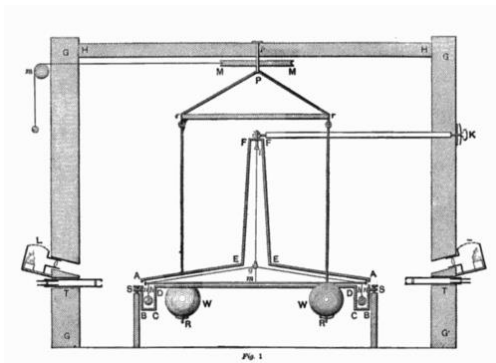


Генрі Кавендіш

У 1797–98 рр. великий англійський хімік та фізик Генрі Кавендіш (1731–1810) за допомогою точних крутильних терезів з дерев'яним коромислом довжиною 1,8 м безпосередньо виміряв силу притягання двох пар свинцевих куль: підвішених до коромисла малих (із масою по 0,78 кг) і нерухомих великих (із масою по 158 кг). Цю силу притягання вчений визначав за кутом повороту коромисла, при якому сила скручування дроту підвісу врівноважувала силу притягання.

Для того, щоб обчислити величину моменту сили скручування, прикладеного до дроту для даного кута повороту, Кавендіш обчислив жорсткість при скручуванні через визначення періоду власних коливань крутильного маятника, виведеного зі стану рівноваги. Період таких коливань становив близько 20 хвилин. Знаючи розмір і кут повертання коромисла, можна обчислити значення моменту сили. Слід наголосити: насправді коромисло ніколи не перебувало у стані спокою — Кавендіш змушений був вимірювати кут відхилення в умовах коливань.

Щоб зменшити похибки вимірювань, спричинені повітряними потоками і зміною температури, Кавендіш помістив пристрій у дерев'яний корпус з товщиною стінки 0,61 м, висотою 3 м і шириною 3 м, розташований у закритому приміщенні. Спостереження коливань Кавендіш проводив через два отвори у стінах приміщення за допомогою телескопа. Амплітуда коливань коромисла становила менше 0,16 дюйма (4,1 мм).



Крутильні терези, використані в досліді Кавендіша

Силу, яка діє на меншу кулю з боку Землі, вчений вимірював безпосереднім зважуванням. Знаючи співвідношення двох сил і використовуючи закон унесвітнього тяжіння, Кавендіш обчислив густину Землі — $5,448 \text{ г/см}^3$, за його даними. Вона виявилася у п'ять з половиною разів більшою за густину води у звичайних умовах.

Наступним кроком можна було б легко отримати гравітаційну сталу G , що входить у закон унесвітнього тяжіння Ньютона в його сучасному записі, підставивши одержані значення маси M і густини ρ , а також радіуса R Землі та прискорення земного тяжіння g в просту формулу:

$$G = g \frac{R^2}{M} = \frac{3g}{4\pi R\rho} = 6,74 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \text{ кг}^{-1} \text{ с}^{-2}.$$

Це значення менше ніж на 1% відрізняється від прийнятого сьогодні. Проте цього кроку сам Кавендіш уже не зробив. У 1798 р. у «Філософських працях Королівського товариства» він опублікував саме результат «зважування» Землі, зазначивши, що довів до завершення задум свого земляка, геолога і натураліста Джона Мітчела (1724–1793).

Найбільший тріумф система Ньютона в XIX ст. здобула в небесах, продемонструвавши, що вона не лише здатна пояснювати рух відомих планет, але й передбачати існування ще невідомих. У 1781 р. англійський астроном Вільям Гершель з допомогою сконструйованого ним телескопа-рефлектора відкрив сьому планету Сонячної системи — Уран. Спостереження за рухом цієї планети впродовж наступних десятиліть показали, що він помітно відхиляється від розрахунків за законами Кеплера. Британський астроном Джордж Ейрі в 1832 р. визнав, що за одинадцять років ця розбіжність сягнула половину кутової мінуті. Молодий талановитий студент Джон Адамс (1819–1892) зробив припущення, що це викликано гравітаційним впливом ще однієї, невідомої досі планети. Більше того, він провів розрахунки, визначивши, де саме цю планету потрібно шукати на небосхилі, і надіслав ці розрахунки Ейрі. Але той чомусь ними не зацікавився.

До аналогічної здогадки незалежно від Адамса дійшов і француз Урбен Левер'є (1811–1877). Він теж провів аналогічні розрахунки, і за ними в перший же вечір спостережень німецький астроном Йоганн Галле виявив 23 вересня 1846 р. нову планету — зовсім близько до передбаченої

точки на небосхилі. Таким чином, Нептун став першою планетою, відкритою «на кінчику пера», а система Ньютона остаточно перетворилася з дуже правдоподібної гіпотези на твердо доведену теорію.

Однак трохи пізніше, в тому ж XIX ст., англійці Майкл Фарадей і Джеймс Максвелл показали, що Ньютонівська механіка, базована на миттєвій далекодії на віддалі, не може бути застосована до електродинаміки, де головний агент дії — світлові коливання — розповсюджуються з дуже великою, але скінченною швидкістю світла c . Вже дослід Ерстеда у 1820 р. приніс велику несподіванку: магнітна «протидія» (напрямок розташування стрілки компаса) виявилася скерованою перпендикулярно до електричної «дії» (напрямку струму). Наприкінці XIX ст. стало зрозуміло, що третій закон Ньютона не виконується для сили Лоренца (однак ця суперечність знімається, якщо переписати третій закон Ньютона як закон збереження імпульсу в замкненій системі із заряджених частинок і електромагнітного поля). Отже, царина застосовності законів Ньютона, які звикли розглядати як цілком універсальні, має свої межі.

На початку XX століття Альберт Айнштайн, котрий так високо цінував закони руху Ньютона, своєю геніальною думкою «доторкнувся» до формули $\vec{F} = m\vec{a}$ (майже одночасно з Айнштайном це зробив видатний французький математик, фізик і філософ Анрі Пуанкаре (1854–1912)). У результаті цього «доторку» з'ясувалося, що маса тіла, котра є мірою його інертності (тобто маса, яка входить до другого закону Ньютона, — на відміну від «гравітаційної» маси, що входить до закону всесвітнього тяжіння), не є сталою, а зростає зі зростанням швидкості. Правда, ця зміна маси стає суттєвою за дуже великої швидкості руху, що наближається до швидкості світла. Це означає, що одна й та сама сила одному й тому ж тілу надає різного прискорення залежно від того, з якою швидкістю це тіло рухається. У прискорювачах елементарні частинки розганяються до таких швидкостей, що зростання їхньої маси не можна не враховувати. Докладніше про усвідомлення тих обмежень, які накладає на класичну механіку спеціальна теорія відносності, ми розглянемо в розділі, присвяченому електродинаміці.

Та все ж царина застосовності законів Ньютона величезна. Це стає очевидним, якщо врахувати, що навіть друга космічна швидкість (11200 м/с) є «малою» порівняно зі швидкістю світла c , й зростання маси за такої швидкості є таким малим, що в розрахунках руху космічних об'єктів його практично не враховують.

Енергія. Робота. Потужність

Нині в Міжнародній системі одиниць СІ, що її запровадила 1960 року XI Генеральна асамблея з мір і ваги, одиницею сили є ньютон, одиницею енергії, роботи й теплоти — джоуль, одиницею потужності — ват. 1 ньютон (символьне позначення Н) дорівнює силі, яка надає тілу з масою 1 кг прискорення 1 м/с^2 в напрямку дії сили. $1 \text{ Н} = 10^5 \text{ дин}$ (одиниця

в системі СГС) = 0,101972 кілограм-сили (позасистемна одиниця, вживана раніше). 1 джоуль (Дж) дорівнює роботі, яку виконує сила 1 Н, щоб перемістити тіло на відстань 1 м у напрямку сили. Нарешті, потужність 1 Вт відповідає роботі 1 Дж, здійсненій протягом 1 с.

Поняття «сила» знав іще Арістотель, а в сучасному розумінні його запровадив Галілей. Натомість еволюція поняття «енергія» (й похідного від нього поняття «робота», яке характеризує перетворення енергії з одного виду на інший) значно складніша, і про неї треба сказати окремо, як і про вченого, причетного до цієї еволюції.

Як ми вже говорили, термін «жива сила» (маса, помножена на квадрат швидкості) для механічних явищ уперше (1686 р.) запровадив німецький фізик, математик і філософ Готфрід Вільгельм Ляйбніц (1646–1716). При цьому сам закон збереження «живої сили» для механічних систем першим сформулював дещо раніше Гюйгенс, беручи участь у конкурсі, оголошеному Королівським товариством у Лондоні.



Йоганн Ляйбніц (портрет пензля Крістофа Бернарда Франке)

Блискучий математик, один із творців диференціального й інтегрального числень (другим був Ньютон), Ляйбніц увів в обіг у 1675 р. символ інтеграла від функції $f(x)$, який ми використовуємо досі: $\int f(x)dx$. Водночас учений займався й фізичними дослідженнями в царині механіки, теорії пружності, теорії коливань. Крім того, Ляйбніц (незалежно від фон Геріке) вказав на зв'язок між показниками барометра й погодою, запропонував ідею створення барометра-анероїда. Як філософ, Ляйбніц розвинув вчення про відносність простору, часу й руху, заперечував проти абсолютного простору й часу Ньютона (на відмінності поглядів ньютоніанців і ляйбніціанців наголошував Мирослав Попович у цитаті, наведеній у вступному розділі цієї книги). Йому належить відома фраза: «у розумі немає нічого, чого не було б у відчуттях — окрім самого розуму».

Майбутній учений народився в Лейпцигу. Дитиною Готфрід цілими днями просиджував у бібліотеці батька, професора етики, читав твори Платона, Арістотеля, Декарта. Вже в 15 років Ляйбніц стає студентом Лейпцизького університету. Ступінь доктора права він здобув 1666 року в Нюрнберзі. Потім удосконалював свої знання в Парижі, де перебував на дипломатичній службі. Тут його праця була найбільш плідною. Він дружив

із Християном Гюйгенсом, котрий забезпечував його книгами Декарта, Торрічеллі, Паскаля.

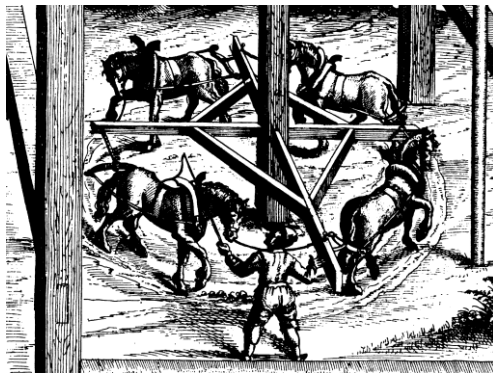
Під час поїздки до Лондона Ляйбніц знайомиться з англійськими математиками, зокрема з Ньютоном (відносини двох учених скоро затьмарила голосна суперечка про пріоритет). Обраний членом Паризької академії наук, Ляйбніц складає проєкт створення Берлінської академії й тривалий час спілкується з Петром I на тему створення академії наук в Росії. З 1676 року учений отримав прибуткову посаду бібліотекаря ганноверських герцогів — в обмін на зобов'язання працювати над історією династії, що після смерті королеви Анни зайняла в особі Георга I й англійський престол. З 1700 по 1712 рік Ляйбніц був президентом Берлінської академії наук.

У житті Готфрід Ляйбніц був надзвичайно суперечливою особистістю. Він був ухожий до королів та герцогів, але водночас товаришував з простими ремісниками; любив гроші, але не був скнарою; був переконаним старим парубком, але любив товариство жінок; мав міцне здоров'я, але помер через отруєння ліками. Водночас він був людиною, відкритою світові: в добу, коли ще й передбачити не могли існування соціальних мереж, він написав за життя понад 20000 листів до 1100 адресатів.

Термін «жива сила», що його запровадив Ляйбніц, побутував у науці впродовж цілого XVIII століття (і тільки в 1741 р. завдяки Даниїлу Бернуллі під ним остаточно постановили розуміти $\frac{1}{2}$ добутку маси на квадрат швидкості). Натомість термін «енергія» запровадив в обіг англійський учений Томас Юнг тільки 1807 року. Поняття «робота» (як добуток сили на шлях) увів у механіку 1829 року французький механік Жан Понселе (1788–1867) і, незалежно від нього, трьома роками раніше, — Гюстав Коріоліс (1792–1843).

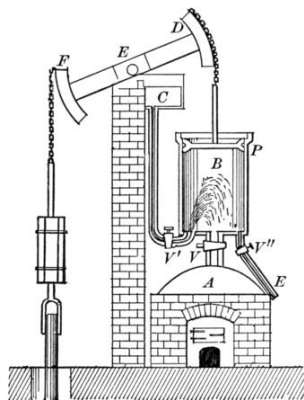
Якщо тіло має енергію (за сучасною термінологією — кінетичну й (або) потенціальну), то воно здатне здійснювати роботу. Відношення роботи до проміжку часу, протягом якого роботу здійснено, називається потужністю. Одиниця виміру потужності — ват.

Джеймс Ватт (1736–1819), на честь якого названо одиницю виміру потужності, народився в Шотландії. У той час в Англії на паливо вирубано було вже більшість лісів. Тому розпочався інтенсивний видобуток вугілля. Копальні робили дедалі глибшими — але їх заливала вода. З допомогою коней, що крутили відповідні пристрої, які називали «млинами», вичерпувати її стало складно. З'явилася ідея використати для цього силу пари.



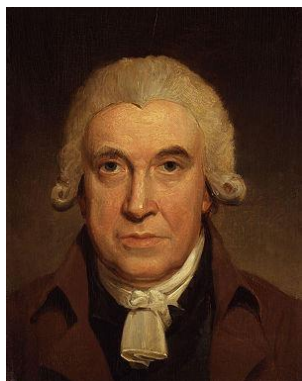
Вичерпування води кінним «млином» (зі старовинної гравюри)

Англійський механік Томас Ньюкомен (1663–1729) спорудив 1705 року парову помпу (можливо, використавши при цьому ідеї, одержані під час листування з Робертом Гуком). Пара з казана наповнювала циліндр і рухала вгору поршень, який задіявав механізм, що підіймав угору воду. Назад поршень у циліндрі опускався під дією власної ваги й сили атмосферного тиску, потому як пара в циліндрі конденсувалася впорскуванням у циліндр піднятої з копальні води. Спершу це робили вручну, згодом — за допомогою нескладного механічного пристрою. Потім циліндр знову наповнювала пара з казана — і процес повторювався.



Парова машина Ньюкомена: через патрубок V' впорскується вода для конденсації пари в циліндрі B, конденсована рідина виводиться через патрубок V'' і поршень P опускається, приводячи в дію через коромисло DEF поршень водяної помпи. Потому відкривається засувка V, циліндр знову наповнюється паром з казана A і поршень P іде вгору

Машина Ньюкомена виконувала роботу, для якої знадобилося б 50 коней і в 6 разів більше коштів. Але однак це була тільки помпа, а не універсальний двигун. Для створення двигуна, який можна було б установити на локомотиви й кораблі, який би виконував різноманітну роботу на фабриках, потрібен був геній Джеймса Ватта.



Портрет Ватта пензля Генрі Говарда

Батько Джеймса Ватта був талановитою людиною з хистом до технічних винаходів. З корабельного телі він зробився судновласником і комерсантом, спорудив у місцевому порту перший підймальний кран. Мати майбутнього винахідника належала до аристократичної родини й мала добру освіту. Через проблеми зі здоров'ям Джеймс ходив до школи нерегулярно, хоч і захоплювався математикою та механікою. Тому ніякої формальної освіти Ватт не здобув, натомість усе життя займався самоосвітою, дослідженнями і винахідництвом. Працюючи механіком в університеті міста Глазго, він досліджував властивості водяної пари, встановив залежність температури насиченої пари від тиску.

Походження й освіченість не дозволяли Ватту стати простим майстром, брак ділового хисту заважав зайнятися торгівлею чи підприємництвом, обмежені прибутки не дозволяли стати великим промисловцем, скромність і хворобливість не давали можливості шукати щастя в заморських подорожах.

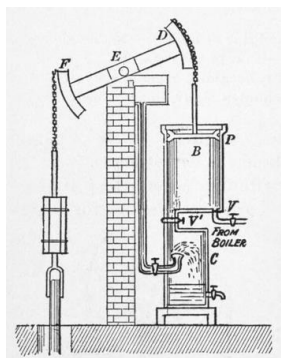
Після смерті матері, коли справи батька похитнулися, 19-річним хлопцем верхи на коні Ватт дванадцять днів добирався до Лондона й найнявся там у майстерню навігаційних приладів. Дуже багато працював і за цілий рік життя в новому для себе місті — столиці Англії — лише двічі пройшовся вулицями. Через рік повернувся в Глазго й намагався заснувати там механічну майстерню, потім був майстром-інструментальником при університеті.

Майже всі студенти університету були знайомі з Ваттом, його помешкання правило за постійне місце зборів, куди приходили з питаннями з механіки, мовознавства, літератури. Все це свідчить про те, що Джеймс, не маючи жодної формальної освіти, був водночас дуже освіченою людиною.

Один із професорів університету доручив Ваттові відремонтувати модель парової помпи Ньюкомена. Джеймс почав ремонт, і коли зрозумів суть дії моделі, вельми зацікавився роботою парової машини взагалі. Він збагнув, що головним недоліком машини Ньюкомена є те, що в кожному циклі потрібно поперемінно охолодити й нагріти циліндр. Отже, більша частина енергії пари йде на це нагрівання і не перетворюється на

механічну енергію ходу поршня. Зрозумівши це, Ватт прийшов до технічного вирішення, яке дозволило виправити цей недолік.

Сам учений розповідав про своє осяяння так: «Суботній день випав прегарний, і я вирушив на прогулянку. Всі мої думки були зосереджені на вирішенні проблеми, що мене захопила. Підійшов до будинку пастуха, й у цей момент у голові промайнула думка: оскільки пара є пружним тілом, вона прагнучим заповнити вакуум. Якщо між циліндром і вихлопним пристроєм буде сполучення, то пара потрапить туди. Саме там її можна буде конденсувати, не охолоджуючи циліндра. Коли я дійшов до Гольдхауза, в моїй голові склалося повне уявлення про те, що треба буде зробити».



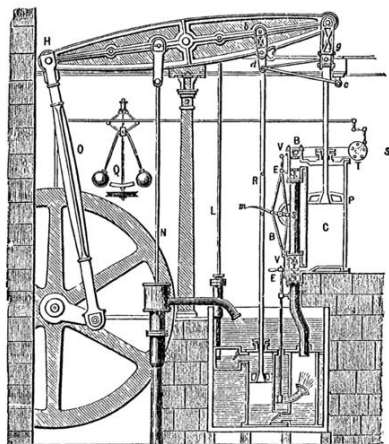
Удосконалена Ваттом парова машина: пара конденсується не в циліндрі В, а в спеціальному конденсаторі С під ним

Джеймс Ватт сконструював нову модель парової машини, яку й нині можна побачити в Лондонському науковому музеї. 5 січня 1769 року Ватт одержав патент № 913 на «способи зменшення споживання пари і внаслідок цього — палива у вогняних машинах», але побудувати діючу парову машину йому довго не вдавалося. На перешкоді стояли різні суто технічні труднощі, переважно пов'язані з недосконалістю відлитих циліндрів та поршнів. Ватт шукав компаньйонів, які змогли б вкласти в справу кошти, а коли не знаходив їх, то змушений був сам працювати геодезистом на спорудженні каналу. Але в 1776 р. машина з циліндром із діаметром 18 дюймів (457 мм) і ходом поршня 5 футів (1,5 м) була нарешті побудована і виявилася значно ефективнішою за машину Ньюкомена, споживаючи втричі менше вугілля.

До 1780 року Ватт побудував 40 парових двигунів, половину з яких було встановлено на мідних копальнях у Корнуолі. Паралельно за ці роки винахідник зробив ескіз пароплавного гвинта, вигадав мікромір, винайшов відцентровий регулятор і механізм, який назвали згодом «паралелограмом Ватта».

1784 року Ватт разом із компаньйоном, підприємцем Болтоном, отримав патент на універсальний паровий двигун. Пара тепер по черзі скеровувалася то в праву, то в ліву частину циліндра, штовхаючи поршень, який рухав колесо. А з протилежного боку циліндра пара випускалася в конденсатор через спеціальний патрубок. Замість пароатмосферної помпи, придатної лишень до викачування води, з'явилася універсальна парова

машина — бо обертання колеса здатне рухати найрізноманітніші механізми й пристрої. Одна з перших машин Ватта була встановлена в 1785 р. на броварні в Лондоні, де вона приводила в дію пристрій, що розмелював солод. Вона замінювала роботу 24 коней.



Універсальний паровий двигун Болтона і Ватта (1784)

Парові машини купують господарі шахт, власники копалень, директори заводів. Болтон, компаньйон Ватта, організовує експериментальні майстерні й бере на роботу висококласних майстрів та робітників «із золотими руками». Завдяки Болтону й таким як він промисловцям Англія невдовзі перетворилася на «світову майстерню». На цьому шляху Болтону з Ваттом довелося пройти справжні «патентні війни» й боротися з низькоякісними підробками, що заповнили ринок, руйнуючи довіру до парових двигунів як таких.

Нарешті Джеймс Ватт — член Единбурзького та Лондонського Королівських товариств і Паризької академії. Він, компаньйон Болтона, купує собі масток і вже не думає «про шматок хліба». Наприкінці життя він багато подорожував, допомагав молодим винахідникам порадами й грошми. Його винахід — паровий двигун — зробив XIX століття «добою пари й електрики», часом небаченого раніше технічного поступу й пов'язаних із ним соціальних змін.

Це добре усвідомлювали сучасники. Подорожуючи пароплавом із Астрахані до Нижнього Новгорода після 10-річного заслання, Тарас Шевченко запише до свого щоденника 27 серпня 1857 року екзальтоване звернення до конструктора пароплава й винахідника парового двигуна: «Великий Фултоні й великий Ватте! Ваше молоде дитя, що росте не щодня, а щогодини, невдовзі пожере батоги, престולי й корони, а дипломатами й поміщиками тільки закусить, побавиться, неначе школяр льодяником. Те, що розпочали у Франції енциклопедисти, те завершить по всій нашій планеті ваше колосальне геніальне дитя. Моє пророцтво безсумнівне».

На честь Джеймса Ватта названо одиницю вимірювання потужності в системі СІ — один ват (один джоуль за одну секунду).

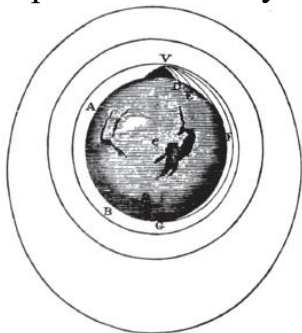
Англієць Джеймс Прескотт Джоуль (1818–1889), власник броварень, прекрасний фізик-експериментатор, був одним із першовідкривачів закону збереження й перетворення енергії. Значення цього закону в науці важко переоцінити.

Від 1843-го протягом близько десяти років Джоуль проводив свої експериментальні дослідження й довів, що теплоту можна отримати за рахунок механічної роботи. Він обчислив так званий механічний еквівалент теплоти. Докладніше ми зустрінемося з ним на сторінках другої частини нашого посібника, присвяченої розвитку теорії теплових явищ.

Його ім'я носить одиниця вимірювання енергії у системі СІ — джоуль (один ньютон, помножений на один метр).

Космічне застосування механіки: український внесок

На основі використання законів класичної механіки людство у ХХ столітті зуміло вийти в космос. Втім, мріяти про космічні подорожі почали значно раніше. Ще Ньютон поставив уявний експеримент: на вершині дуже високої гори (де опір повітря вже не відчувається) встановлено велетенську гармату, яка стріляє паралельно до земної поверхні. Зі збільшенням сили заряду ядро летітиме щоразу далі — аж поки за певної початкової сили пострілу облетить Землю й повернеться до гори з гарматою з протилежного боку. Говорячи сучасною мовою, ядро перетворюється на штучний супутник Землі.



Перетворення ядра на супутник Землі (рисунок Ньютона)

Необхідну для цього швидкість розрахувати просто: прискорення ядра на навколоразомній орбіті забезпечується тяжінням Землі й, отже, дорівнює прискоренню земного тяжіння. З іншого боку, воно дорівнює доцентровому прискоренню для руху по колу з радіусом Землі (висоту орбіти вважаємо малою порівняно з цим радіусом). Звідси маємо:

$$g = \frac{v_c^2}{R_z}.$$

Підставляючи в цю просту формулу значення прискорення земного тяжіння $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ й радіуса Землі $R_z = 6370 \text{ км}$, отримуємо значення першої космічної швидкості $v_c = 7,9 \text{ км/с}$. Знаючи цю швидкість, легко вирахувати й період обертання ядра навколо Землі. Він становитиме приблизно 84 хвилини (саме впродовж цього часу здійснював один оберт

перший навколоземний супутник, що його запустили 1957 року, й саме за такий час облетів Землю 12 квітня 1961 року перший космонавт Юрій Гагарін). Якщо ж вистрілити зі ще більшою швидкістю, ядро вийде на вищу орбіту й урешті-решт може досягнути Місяця та інших небесних тіл.



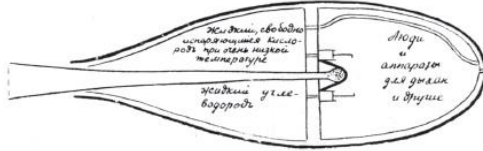
Макет першого штучного супутника Землі

Письменники-фантасти минулого «використовували» порожні гарматні ядра як перші засоби міжпланетного сполучення. Саме в ядрі, випущеному зі спеціально відлітої велетенської гармати, подорожували відважні герої роману Жуля Верна «Із Землі на Місяць» (1865). У романі Герберта Веллса «Війна світів» (1898) марсіяни прилетіли на Землю зі своєю завойовницькою місією теж у ядрі. Втім, у реальному житті доля сміливців була б сумною: попри всі водяні подушки та інші застережні засоби, які вигадав Жюль Верн, таких «космонавтів» водномить розчавило б силою пострілу. Не кажучи вже про те, що й найбільша швидкість витікання порохових газів (а отже, й початкова швидкість ядра) в кілька разів менша від першої космічної швидкості, тож ядро Жуля Верна ніколи не вийшло б за межі земної атмосфери.

Відтак дальші сподівання людства на міжпланетні подорожі були пов'язані з ракетами, які дозволяють досягнути космічних швидкостей, залишаючись у рамках перевантажень, що їх може витримати тренувана людина (до 10g). Одним із перших пропонував використати ракети зі спеціальною горючою сумішшю для польотів людини українець Микола Кибальчич (1853–1881), син священника з містечка Короп на Чернігівщині. Талановитий інженер, випускник Петербурзького інституту шляхів сполучення й слухач Медико-хірургічної академії, він пристав до революційно-терористичної групи народовольців, яка здійснила шість замахів на російського імператора Олександра II. Останній замах досягнув мети саме завдяки величезній силі бомби, яку сконструював Кибальчич. Свої розрахунки реактивного літального апарата винахідник робив у фортеці-тюрмі, чекаючи страти. Відтак про них стало відомо лише через кілька десятиліть, коли після повалення царату відкрили жандармські архіви. На честь Кибальчича названо кратер на зворотному боці Місяця.

Задачу про рух ракети з початковою масою m_0 , яка стартує зі стану спокою за швидкості витікання палива v_0 відносно ракети, легко розв'язати

з використанням закону збереження імпульсу. Це вперше зробив російський учений-самоук, талановитий письменник-фантаст, аматор космічних польотів, котрий усе життя пропрацював провінційним учителем, Костянтин Ціолковський (1857–1935). Цікаво, що є в родоводі вченого й український слід — його далекі предки були вихідцями з Волині, родичами Северина Наливайка, і Костянтин Ціолковський цим пишався.



Космічна ракета (рисунок Ціолковського)

Тож простежмо хід міркувань ученого. Позначмо через m масу використаного палива. Тоді під час старту зі стану спокою значенню $m = 0$ відповідає швидкість ракети $v = 0$. За короткий момент часу, коли викинуто dm палива, відбулося прирощення швидкості ракети на dv . Імпульс ракети збільшився на $(m_0 - m)dv$, натомість імпульс палива зменшився на dmv_0 . Коли прирівняємо ці дві величини, отримаємо:

$$dv = \frac{v_0 dm}{m_0 - m}.$$

Проінтегрувавши обидві частини цього співвідношення, маємо:

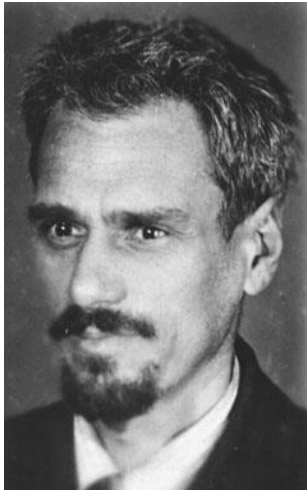
$$v = v_0 \int_0^{\infty} \frac{dm}{m_0 - m} = v_0 \ln \frac{m_0}{m_0 - m}.$$

Найбільша швидкість v досягається в момент часу, коли ракета використала все паливо. Максимальне співвідношення $\frac{m_0}{m_0 - m}$ може бути

порядку 10 — адже, крім палива, «важать» ще й корпус, двигун, механізми, прилади, пасажери, запаси їжі й води тощо. А це означає, що ракета, коли «спалить» усе пальне, забезпечить собі швидкість $v = 2,3v_0$. Цього може виявитися замало.

І тому вже в найперших реальних космічних апаратах використовували багатоступінчаті ракети. Конструктором цих перших ракет, які 4 жовтня 1957 року вивели на орбіту перший штучний супутник, а 12 квітня 1961 року — першого космонавта Юрія Гагаріна, був народжений у Житомирі Сергій Корольов (1906–1966). У своїй анкеті студента механічного факультету Київського політехнічного інституту він записав «українець» у графі «національність», хоч у пізніших документах в'язня ГУЛАГу (конструктора було заарештовано 1938 року) і творця перших радянських балістичних ракет, націлених на держави Заходу, в цій графі вже значилося «росіянин»...

У липні 1969 року командир корабля «Аполлон-11» Ніл Армстронг першим із землян ступив на поверхню Місяця. Аби дістатися туди, астронавти використали «Kondratiuk's route» — «трасу Кондратюка». Задля мінімізації витрат палива, корабель залишився на навколomisячній орбіті, а на поверхню супутника спустився спеціальний невеликий модуль.



Олександр Шаргей (Юрій Кондратюк)

Цю трасу названо на честь нашого земляка, полтавчанина Олександра Шаргея (1897–1942), котрий уперше розрахував її, ще коли навчався у полтавській гімназії. Доля геніального полтавця склалася драматично, як і доля всієї України в XX столітті. Навіть до історії він увійшов із вимушено прибраним, чужим ім'ям.

У роду Олександра Шаргея були литовські євреї, українські козаки й навіть шведські графи Шліппенбахи. Хлопчик рано залишився сиротою, ним опікувалася друга дружина померлого батька, котра, на щастя, ставилася до Сашка дуже тепло.

Олександр Шаргей рано зацікавився проблемою космічних перельотів (тоді вони належали до царини фантастики). Ще навчаючись у старших класах полтавської гімназії, він у 1914–15 роках укладає рукописну книгу «Для тих, хто читатиме, щоб будувати». У ній гімназист незалежно від Ціолковського вивів наведене вище рівняння руху космічної ракети, розробив схему чотириступінчастої ракети на киснево-водневому паливі, запропонував кілька принципово важливих рішень для ракетних двигунів і системи управління й, нарешті, розрахував уже згадану трасу для польотів на Місяць і планети.

По закінченні гімназії зі срібною медаллю Олександр Шаргей вступає 1916 року до механічного відділення Петроградського політехнічного інституту. Але молодого студента мобілізують до російської армії й посилають на кавказький фронт Першої світової.

Після вибуху революції Олександр Шаргей намагається повернутися в Україну, яку проголошено незалежною. Але його мобілізують «білі». Маючи значно більше симпатій до УНР, Шаргей утікає й переходується. Приходять червоні — і колишній «білий» офіцер (дарма що офіцер не з власної волі!) чудом уникає розстрілу. Рятуючи його, мачуха роздобуває документи померлого незадовго перед тим від сухот Георгія (Юрія) Кондратюка. Справжній Кондратюк народився 1900 року в Луцьку. Так Олександр Шаргей став на три роки «молодшим» і уник звинувачення в належності до «білих» і «петлюрівців». А Луцьк за Ризьким договором

1921 року залишився в складі Польщі — тож перевірити правдивість документів було складно.

Однак життя під чужим прізвищем виявилося таким нестерпним, що Кондратюк–Шаргей робить спробу перейти кордон. Його ловлять. Цього разу від розстрілу рятує симуляція божевілля.

Останні півтора десятиліття його життя — суцільні блукання. Кубань, Північна Осетія, Сибір — і скрізь постійна загроза викриття й арешту. За «шкідництво» геніальний учений потрапляє на три роки до «шараги» — її описав визначний російський письменник, теж в'язень сталінських концтаборів Олександр Солженіцин, — де ув'язнені інженери проєктували для «соціалістичної батьківщини» потрібні їй споруди. У цей час Олександр Шаргей зводить найбільший у світі дерев'яний елеватор на 10000 тонн зерна, проєктує найпотужнішу на той час вітроелектростанцію в Криму на Ай–Петрі (пізніше проєкт буде використано в будівництві Останкінської телевежі в Москві).

А найголовніше — він видає 1929 року в Новосибірську власним коштом, маленьким накладом (2000 примірників) книжку «Завоювання міжпланетних просторів», де розвиває свої давні, ще гімназійні ідеї. Він починає з загального опису реактивного руху ракети та її основних характеристик, розглядає різні хімічні сполуки з великою швидкістю продуктів витікання, пропонує можливі конструкції камери згоряння й сопла, будує теорію багатоступінчастих ракет, обчислює необхідні швидкості для різного типу космічних траєкторій, вивчає гальмування ракети атмосферою під час її пуску та під час повернення, розглядає можливість створення міжпланетної бази для далеких польотів, описує способи керування ракетою під час польоту.

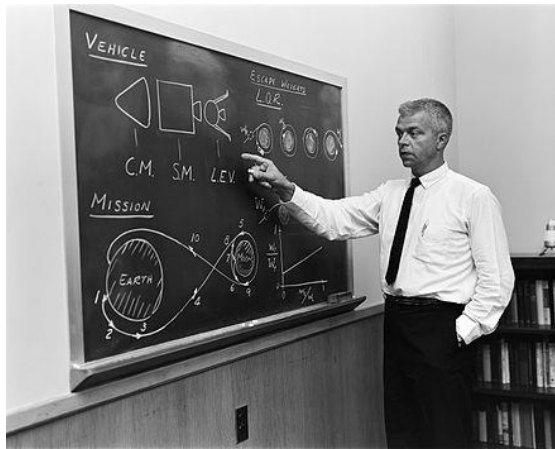
Вивчаючи найбільш енергетично вигідні космічні траєкторії, які потребують найменших витрат палива, Олександр Шаргей докладно викладає той варіант польоту на Місяць, який буде пізніше названо «трасою Кондратюка». За щасливою випадковістю, примірник книжки потрапив до Бібліотеки Конгресу США — і на нього звернули увагу, коли в 1960-ті готували американську «місячну програму».



Обкладинка книги «Завоювання міжпланетних просторів»

«Коли одного березневого світанку 1968 року я схвилювано спостерігав на мисі Кеннеді за стартом ракети, що мала понести корабель

«Аполлон-9» до Місяця, я думав про українця Юрія Кондратюка, котрий розрахував цю трасу, якою мали летіти троє наших астронавтів» — згадував Джон Губолт (1919–2014), один із авторів програми перших пілотованих польотів на Місяць.



Джон Губолт креслить на дошці «Трасу Кондратюка» (внизу зображено старт із Землі, рух космічного корабля до Місяця по траєкторії 1–2–3–4, обліт Місяця з відокремленням спускового модуля, повернення до Землі по траєкторії 9–10).

Напевно, читав цю книжку й Сергій Корольов. Є свідчення, що він намагався ще до свого арешту в 1938-му запросити Кондратюка–Шаргея до співпраці в Реактивному науково-дослідному інституті. Але працівники інституту мусили пройти сувору перевірку — і Олександр Шаргей, напевно, злякався, що його таємницю буде розкрито. Важко навіть уявити, наскільки успішнішим був би розвиток космонавтики, якби ці двоє геніїв змогли плідно співпрацювати ще тоді, в 1930-ті...

Після початку радянсько-німецької війни Кондратюк–Шаргей вступає добровольцем до народного ополчення. Останній лист від нього цивільній дружині Галині Плетньовій датовано січнем 1942-го. Про місце й обставини загибелі вченого нічого невідомо. Втім, такою тоді була доля сотень тисяч солдат.

До сторіччя вченого за рішенням 28-ї сесії ЮНЕСКО 1997-й рік було проголошено його роком. Його ім'я викарбувано золотими літерами серед імен 78 інших видатних учених у Музеї космічної історії в Аламогордо (США). Пам'ятник йому споруджено на мисі Канаверал у Флориді, звідки стартують американські космічні кораблі. На його честь названо трасу польоту на Місяць, кратер на зворотному боці Місяця, астероїд №3084, політехнічний університет у рідній Полтаві.

Та всюди наш геніальний співвітчизник, який використав закони ньютонівської механіки, аби прокласти людству шлях у космос, фігурує під іменем «Юрій Кондратюк». Під іменем, яке його врятувало, а потім стало для нього нестерпним тягарем.

Становлення класичної механіки: резюме

1. Якщо сила, що діє на тіло з масою m , відома, то за допомоги законів Ньютона можна визначити прискорення тіла й передбачити його координати в кожен наступний момент часу.

Перший закон:

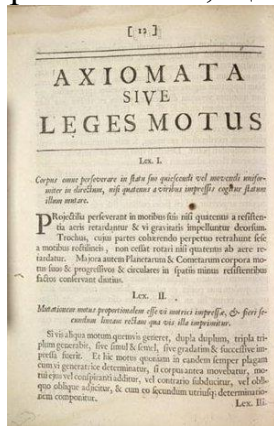
Якщо $F_{\text{рез}} = 0$, то $a = 0$.

Другий закон:

$\vec{F}_{\text{рез}} = \frac{d\vec{P}}{dt} = m\vec{a}$, де $\vec{P} = m\vec{v}$ - імпульс тіла (або ж кількість руху).

Третій закон:

Сила, що діє на тіло A з боку тіла B , рівна за величиною і протилежна за напрямком силі, що діє на тіло B з боку тіла A .



Перші два закони Ньютона (латиною) в «Математичних принципах натуральної філософії» (1687)

Ідею двох перших законів (в описовій формі, остаточно в трактаті «Бесіди й математичні докази...», 1638) висловив Галілео Галілей: для того, щоб змінити прискорення тіла, потрібна сила, натомість рух тіла з постійною швидкістю відбувається без прикладання сили, за інерцією. Перший закон (у варіанті, що виключав далекодію і передбачав лише взаємодію при зіткненні) сформулював у «Принципах філософії» (1644) Рене Декарт. Ідея третього закону містилася в працях Джона Воллеса (1616–1703), надісланих на розгляд Королівського товариства у 1668 р. Всі три закони (в описовій формі, без формул) виклав Ісаак Ньютон у «Математичних принципах натуральної філософії» (1687). Запис у сучасному формульному вигляді усталився після появи праці Леонарда Ойлера «Механіка, аналітично викладена» (1736).

2. Імпульс (кількість руху) замкнутої системи зберігається, суми початкових і кінцевих імпульсів складників такої системи однакові:

$$\sum m_j \vec{v}_j = \sum m_j \vec{V}_j;$$

$$\vec{P}_{\text{повн}} = \text{const.}$$

Закон збереження імпульсу для часткового випадку пружного зіткнення двох тіл сформулював Рене Декарт у «Принципах філософії»

(1644). Формулювання Декарта уточнили Християн Гюйгенс і Джон Воллес. Останній замість терміна «кількість руху», який використовував Декарт, запровадив термін *momentum*, який досі використовується в англomовній літературі.

3. Закон унесвітнього тяжіння (четвертий закон Ньютона):

$$F = G \frac{mM}{r^2}.$$

Він спрацьовує для будь-яких тіл. Якщо m — маса Землі, а M — маса Сонця, то прискорення Землі в русі по орбіті, з другого закону Ньютона, дорівнює $a_c = G \frac{M}{r^2}$. З другого боку, з формули Гюйгенса для доцентрового

прискорення маємо: $a_c = \frac{4\pi^2 r}{T^2}$, де r — радіус орбіти Землі, T — період її обертання по орбіті. Знаючи гравітаційну сталу G (шлях до її визначення вказав у своєму експерименті Генрі Кавендіш, 1797–98 рр.), можемо «зважити» Сонце. Аналогічним чином можна знайти масу Землі й усіх планет, які мають супутники.

Три закони руху планет Кеплера є наслідком справедливості законів Ньютона і можуть бути з них виведені.

Ідею про тяжіння, яке спадає як обернений квадрат відстані, висловлювали впродовж XVII ст. декілька вчених: Йоганн Кеплер, Роберт Гук, Едмунд Галлей та ін. Проте тільки Ісаак Ньютон у «Математичних принципах натуральної філософії» (1687) зумів строго пов'язати закон тяжіння, що спадає як $\frac{1}{r^2}$, і закони Кеплера для руху планет по еліптичних орбітах навколо Сонця.

4. Робота, яку виконує сила F , переміщуючи об'єкт із точки A в точку B , дорівнює:

$$W = \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{s};$$

$$\vec{F} \cdot d\vec{s} = |F| \cdot |ds| \cos \alpha.$$

У системі СІ її вимірюють у ньютон-метрах, або в джоулях.

Поняття «робота» запровадили в механіку Гаспар–Гюстав Коріоліс (1826) і Жан–Віктор Понселе (1829). У першому випадку робота визначалася як «вага, піднята на певну висоту», оскільки розглядалася парова помпа для підйому води.

5. Потужність — це швидкість, із якою виконується робота або передається енергія:

$$P = \frac{dW}{dt}.$$

До початку XX ст. в англomовній літературі замість сучасного терміну *power* уживали термін *activity*.

6. Кінетична енергія:

$$K \equiv \frac{mv^2}{2}.$$

Поняття «живої сили» (лат. *Vis viva*) для величини, пропорційної до mv^2 , що зберігається в ряді механічних систем ($\sum_i m_i v_i^2 = \text{const}$), запровадив у 1686 р. Готфрід Ляйбніц як альтернативне до Декартової «кількості руху» (mv). Множник $\frac{1}{2}$ у Ляйбніцове визначення «живої сили» вперше ввів Даниїл Бернуллі (1741).

principia inter se admodum similia; scis enim quantitatem virium quarum corpori insitarum designari per $\frac{1}{2}mv^2$ et esse $\frac{1}{2}mv^2 = \int p dx$ (designato per dx elemento spatii, quod tempusculo dt percurritur), id est, =

Уривок зі статті Даниїла Бернуллі (1741), де «живу силу» (кінетичну енергію) вперше записано з множником $\frac{1}{2}$

Термін «енергія» (замість «живої сили») запровадив у 1807 р. у «Курсі лекцій з натуральної філософії та механічних мистецтв» Томас Юнг.

7. Якщо на тіло не діють зовнішні сили чи сила тертя, то незалежно від розташування тіла його повна енергія (сума кінетичної й потенціальної енергій) зберігається:

$$K + U = \text{const.}$$

Те саме можна сказати про замкнуту систему N тіл. І тоді

$$K = \sum_{j=1}^N K_j.$$

За наявності зовнішньої сили здійснена цією силою робота над тілом іде на прирощення його кінетичної, потенціальної й внутрішньої теплової енергій:

$$\int_A^B \vec{F}_{\text{зовн}} \cdot d\vec{s} = \Delta K + \Delta U + \Delta U_{\text{внутр}}.$$

До відкриття закону збереження повної енергії окремого тіла близько підійшов у 2-й пол. XVII ст. Християн Гюйгенс. Збереження енергії в різних системах експериментально вивчали в 1-й пол. XIX ст. Жозеф-Луї Гей-Люссак, Саді Карно, Джеймс Джоуль, Роберт фон Маєр. Поняття повної енергії як суми потенціальної та кінетичної енергій увів Герман фон Гельмгольц у роботі «Про збереження сили» (1847), при цьому він ще уникав терміна «енергія» (кінетична і потенціальна) і використовував натомість терміни «жива сила» та «сила напруження». Перше строге визначення енергії дав Вільям Томсон (пізніше — лорд Кельвін) у роботі «Механічна теорія тепла» (1852): «Під енергією матеріальної системи у певному стані ми розуміємо виміряну у механічних одиницях роботи суму

усіх дій, які відбуваються поза системою, коли вона переходить з цього стану будь-яким способом у довільно обраний нульовий стан».

8. Рівняння руху частинки в класичній механіці можна отримати з принципу найменшої дії, який стверджує, що з усіх можливих траєкторій у конфігураційному просторі реалізовується та, для якої дія мінімальна. Цей принцип записується як

$$\frac{\delta S}{\delta \varphi_i} = 0.$$

Тут S — дія, функціонал, який виражається через функцію Лагранжа $L(\varphi_i)$ як

$$S(\varphi_i) = \int L(\varphi_i(s)) d^n s,$$

а φ_i - узагальнені координати (координати частинок або польові змінні), s — множина параметрів системи (для механіки — три незалежні декартові координати й час). Для матеріальної частинки в тривимірному просторі з радіусом-вектором $\vec{x}$ функція L може бути записана як різниця її кінетичної та потенціальної енергій:

$$L = \frac{1}{2} m \left(\frac{d\vec{x}}{dt} \right)^2 - V(\vec{x}).$$

Такий підхід є тотожним до розгляду рівнянь руху Ньютона і застосовується в теоретичній механіці.

Першим в історії варіаційний принцип у фізиці застосував П'єр Ферма (1662), який показав: заломлення променя на межі двох середовищ відбувається таким чином, щоб час проходження між двома визначеними точками A та B у різних середовищах виявився мінімальним. У сучасних позначеннях це означає, що

$$T = \int_A^B \frac{ds}{v} = \min.$$

Математичне дослідження принципу Ферма здійснив з погляду хвильової оптики Християн Гюйгенс. У 1669 р. Готтфрід Ляйбніц запровадив поняття «дії руху» як добутку маси, довжини, на яку вона переміщується, й швидкості. У 1744 р. П'єр-Луї де Мопертюї видає трактат: «Узгодження різних законів природи, які досі видавалися неузгоджуваними». У ньому він стверджує, що шлях, за яким рухається промінь світла, відповідає найменшій дії. У тому ж році Леонард Ойлер розповсюдив принцип найменшої дії на всі вільні матеріальні точки, записавши його як вимогу мінімуму для тієї траєкторії, що реалізується, інтегралу

$$\int_A^B m v ds = \min.$$

У 1746 р. Мопертюї дав загальне формулювання принципу найменшої дії: «Коли в природі відбувається певна зміна, то кількість дії, необхідна

для цієї зміни, є найменшою з усіх можливих. Кількість дії є добутком маси тіл на їхню швидкість і на відстань, яку вони проходять».

Надавши варіаційному численню сучасного вигляду, Жозеф–Луї Лагранж у 1760–61 рр. розповсюдив принцип найменшої дії на будь-які механічні системи. У 1834–35 рр. Вільям Ровен Гамільтон сформулював найбільш загальний варіаційний принцип, і записав розв’язок варіаційної задачі як «канонічна» система.

II. ТЕПЛОВІ ЯВИЩА

Про специфіку теплових явищ

Багато тисячоліть минуло відтоді, як люди навчилися отримувати вогонь і пов'язане з ним тепло. Однак про те, що таке тепло, споконвіку існували різні думки. У часи наукової революції початку XVII ст. природу теплоти стали пояснювати очевидним, як здавалося, фактом: коли тіло нагрівається, його температура підвищується, — отже, тіло «щось» отримує; коли охолоджується — «щось» віддає. Це «щось» і називали теплотою.

Таке розуміння теплоти ґрунтувалося на гіпотезі: теплота — це особлива речовина, здатна проникати в будь-яке тіло й виходити з нього. Цю особливу речовину називали «теплецем» і вважали, що він не виникає й не зникає, а тільки перерозподіляється між тілами. Такої гіпотези дотримувався спершу Галілео Галілей (про це він писав 1613 року). Багато вчених поділяли його точку зору ще понад два з половиною століття.

Наукове визначення «теплецю» як особливої невагомої субстанції — носія тепла — дав у 1783 р. визначний французький хімік Антуан Лоран де Лавуазьє (1743–1794), що створив сучасну кисневу теорію горіння (термін «оксиген» належить саме йому), і пізніше загинув на гільйотині під час революційного терору. За Лавуазьє, загальна кількість теплецю в замкненій системі стала, і він здатен перетікати від більш до менш нагрітих тіл, вирівнюючи тим їхню температуру. Назву «теплец» (фр. *Calorique*) Лавуазьє спеціально запровадив для того, щоб відрізнити цю субстанцію від теж гіпотетичного «флогістону», яким до нього хіміки намагалися пояснити горіння (такого флогістону Лавуазьє, який зрозумів природу горіння як інтенсивної екзотермічної реакції окислення, вже не потребував). Проте за інерцією назву «флогістон» часом переносили і на теплец теж.

Гіпотеза теплецю-флогістону прекрасно пояснювала нагрівання й охолодження тіл при контакті і дозволяла визначити температуру суміші різних речовин з різними початковими температурами й різними теплоємностями. «Пам'ять» про теплец Лавуазьє досі збереглася в назві старовинної одиниці теплоємності — калорії (1 калорія — кількість тепла, яка потрібна для того, щоб підвищити температуру 1 г води на 1 градус за шкалою Цельсія).

Другу гіпотезу про природу теплоти вперше висловив 1620 року Френсіс Бекон; він звернув увагу на те, що під сильними ударами молота шматок металу ставав гарячим. Бекон стверджував, що теплота — це внутрішній рух найдрібніших частинок тіла, й температура тіла визначається швидкістю руху частинок у ньому.

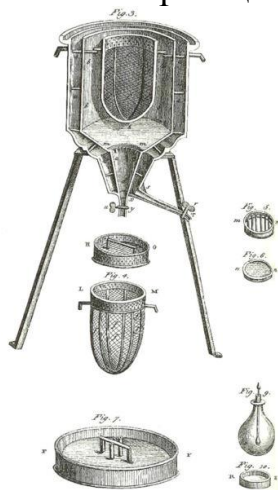
Цю гіпотезу розвинув уже із застосуванням математичного апарату геніальний швейцарський учений Даниїл Бернуллі (1700–1782), який певний час працював у Петербурзі. У своїй класичній праці «Гідродинаміка» (1738) він запропонував уважати теплоту рухом частинок, а тиск газу на стінки розглядати як результат сукупної дії цих частинок. Він навіть виконав

теоретичний розрахунок тиску газу й теоретично вивів закон Бойля-Маріотта. Але ця його робота набагато випередила свій час і залишилася майже непомітною науковцями.

У праці «Роздуми про причину теплоти й холоду» (1749) російський учений Михайло Ломоносов (1711–1765) виклав ті ж уявлення не лише щодо рідин та газів, але й твердих тіл. Ломоносов писав: «Дуже добре відомо, що теплота збуджується рухом: від взаємного тертя руки зігріваються, дерево загоряється полум'ям; при ударі кременя в огниво з'являються іскри; залізо нагрівається від кування частими й сильними ударами, а якщо їх припинити, то теплота зменшується й створений вогонь урешті-решт гасне». Цікаво, що цей фізик, хімік, астроном, винахідник, митець і філолог у жовтні–грудні 1734 року вдосконалював свої знання в Києво-Могилянській академії.

Однак ще довго зрозумілішою й наочнішою здавалася модель теплецю-флогістону, згідно з якою теплота подібно до рідини перетікає з одного тіла в інше. Теорія теплового двигуна, яку створив у 1824 р. Саді Карно, ґрунтувалася саме на моделі теплецю.

Але модель теплецю-флогістону не витримала випробування часом. Перший серйозний експериментальний факт, якого вона не могла пояснити, було встановлено ще 1761 р, до того, як Лавуазьє запровадив сам термін «теплець». Тоді шотландський фізик Джозеф Блек (1728–1799) відкрив приховану теплоту плавлення льоду. Тепло, підведене до льоду за 0 градусів Цельсія, не призводить до підвищення температури. Лід просто тане. Виявилося, що для перетворення 1 г льоду на воду без зміни температури потрібно 80 калорій. Зате знання цієї прихованої теплоти дозволило Лавуазьє і Лапласу сконструювати льодовий калориметр, який за кількістю розтопленого льоду давав змогу точно визначити тепло, що виділялося в ході певної хімічної реакції.



Льодовий калориметр Лавуазьє-Лапласа (1782)

Інші суттєві факти, що суперечили моделі теплецю-флогістону виявив талановитий фізик, хімік та інженер Бенджамін Томсон (1753–1814), котрий служив кільком країнам і за свої заслуги отримав від короля Баварії титул графа Румфорда. Томсон–Румфорд звернув увагу на те, як нагрівається ствол

гармати під час свердління в ньому отвору. Чому тупі свердла породжували більше тепла, ніж добре загострені? Чому свердлінням можна було добути практично необмежену кількість тепла? Все це ніяк не вкладалося в просту модель перетікання гіпотетичного теплецю. Румфорд схилився до того, щоб пов'язати природу теплоти з рухом. Фактично при цьому він перший пов'язав тепло з механічною роботою і визначив, хоч дуже наближено, механічний еквівалент теплоти. Його підтримали Деві та Юнг, вони посилалися на коливання й обертання молекул у будь-яких речовинах і теплоту пов'язували з інтенсивністю цих рухів.

Особливо вишуканий дослід поставив Гамфрі Деві (1778–1829), відомий роботами в багатьох галузях хімії та фізики (зокрема, відкриттям дуги електричного розряду). Він умістив два шматки льоду, температура яких була нижча від 0 за Цельсієм, під ковпак, з-під якого було ретельно викачано повітря. За допомогою спеціального механізму ці шматки льоду можна було терти один об інший. Лід танув, а температура отриманої води виявилася на кілька градусів вищою за 0 Цельсія. Повітря під ковпаком не було, зовнішніх предметів шматки льоду не торкалися. Отже, теплець через контакт двох тіл до них надійти не міг. Відтак джерелом тепла міг бути тільки рух.

Кількісний зв'язок між рухом і теплотою було виявлено в експериментах Джеймса Джоуля 1873 року. Цей зв'язок виразився в співвідношенні між роботою та кількістю теплоти. 424 кілограметри виявилися рівними 1000 калорій (нині встановлене співвідношення: 1 калорія = 4,1868 джоуля). Трохи раніше цей кількісний зв'язок, але з меншою точністю (365 ктм/ккал), обчислив Роберт фон Маєр, використавши для цього результат дослідів Гей-Люссака з розширення газів у порожнечі.

Тільки після цього модель теплецю-флогістону остаточно стала гальмом для розвитку теорії теплових явищ, і досить швидко її відкинули. Все це прискорило розвиток кінетичної теорії тепла.

Дати й факти розвитку теорії теплових явищ

Що відбулося:

1121 р. Альгацині написав трактат «Книга про терези мудрості», в якому зокрема сказано про залежність питомої ваги води від температури.

1440 р. Нікола Кузанський винайшов перший гігrometer (із шерсті).

Бл. 1490 р. Леонардо да Вінчі відкриває явище капілярності, спостерігаючи піднімання рідини у вузьких трубках.

1592 р. Галілео Галілей винайшов термоскоп, що є прообразом термометра.

1604 р. Корнелій Дреббель виконав дослід із розширення тіл від теплоти.

1609 р. Винайдено термостат.

1620 р. Оpubліковано трактат Френсіса Бекона «Новий органон», у якому вперше висловлено ідею, що тепло є рухом.

Уперше описано термометр (Френсіс Бекон).

1631 р. Жан Ре винайшов рідинний термометр.

1641 р. Створено спиртовий термометр.

1643 р. Відкриття атмосферного тиску (Еванджеліста Торрічеллі).

1644 р. Отримання вакууму («торрічеллієвої порожнечі») й створення барометра (Еванджеліста Торрічеллі).

1646 р. Еванджеліста Торрічеллі продемонстрував спиртовий термометр.

1648 р. Експериментально виявлено зменшення атмосферного тиску з висотою (Франсуа Пер'є, згідно з ідеєю Блеза Паскаля).

1654 р. Отто фон Геріке виконав дослід із «магдебурзькими півкулями» (після того, як з прикладеної одна до одної мідних півкуль відпompували повітря, їх насилу змогли роз'єднати коні). Це довело існування атмосферного тиску.

1655 р. Винахід ртутного термометра.

1661 р. Роберт Бойль, Річард Тоунлі і Генрі Павер установили обернено пропорційну залежність між об'ємом газу та його тиском; окремо від них цю залежність установив Едм Маріотт 1676 р.

Роберт Бойль сформулював поняття про хімічний елемент як просту складову частину тіла.

1663 р. Едвард Сомерсет винайшов парову машину (її збудовано 1667 р. в Лондоні; вона піднімала воду на висоту 40 футів). 1705 р. парову атмосферну машину створив Томас Ньюкомен.

1665 р. Християн Гюйгенс і Роберт Гук запропонували як основні точки термометра точки плавлення льоду й кипіння води. 1694 року це саме зробив Карло Ренальдіні.

1668 р. Роберт Гук показав, що для всіх тіл за однакових умов температури кипіння й плавлення є сталими.

1674 р. Відкриття залежності точки кипіння води від тиску.

1680 р. Дені Папен винайшов паровий котел. 1681 року він же устаткував його запобіжним клапаном.

1710 чи 1724 р. З'явився термометр Данієля Габрієля Фаренгейта.

1730 р. Рене-Антуан Реомюр запропонував застосовувати в термометрах шкалу від 0 (точка замерзання) до 80 градусів (точка кипіння води).

1738 р. Даниїл Бернуллі запропонував уважати теплоту рухом частинок, а тиск газу на стінки розглядати як результат сукупної дії цих частинок.

1742 р. Андерс Цельсій запропонував стандартну шкалу термометра.

1750 р. Оpubліковано роботу Михайла Ломоносова «Роздуми про причину тепла й холоду».

1755 р. Жан-Андре Делюк уперше встановив, що недостатньо нагріти лід до температури плавлення, щоб він розплавився, — знадобиться ще додаткова кількість теплоти (прихована теплота плавлення).

1761 р. Уперше виміряно питому теплоту плавлення льоду й питому теплоту пароутворення (Джозеф Блек).

1770 р. Джозеф Блек запровадив поняття теплоємності.

1772 р. Йоган Вільке виконав перші вимірювання теплоємності твердих тіл.

1784 р. Джеймс Ватт створив універсальну парову машину.

1787 р. Жак Шарль установив один із газових законів.

1798 р. Бенджамін Томсон-Румфорд здійснив дослід, які підтверджували механічну теорію теплоти.

1799 р. Гамфрі Деві здійснив дослід з перетворення льоду на воду (тертям).

1802 р. Закон Гей-Люссака про залежність об'єму газу від температури за сталого тиску.

1807 р. Установлено пониження температури за адіабатичного розширення газу (Жозеф Луї Гей-Люссак).

1811 р. Амедео Авогадро розробляє молекулярну гіпотезу будови речовини, відкриває закон пропорцій, згідно з яким молекули утворюють хімічні сполуки, та висловлює припущення, що в однакових об'ємах різних газів за однакової температури й тиску міститься однакове число молекул («гіпотеза Авогадро»).

1813 р. Франсуа Деларош і Жак Берар виконали перші дослідні вимірювання питомих теплоємностей газу.

1822 р. Вийшла у світ праця Жана Фур'є «Аналітична теорія теплоти».

1823 р. Сімеон-Дені Пуассон вивів рівняння адіабати.

1824 р. Вийшла у світ праця Саді Карно «Роздуми про рушійну силу вогню і про машини, здатні розвивати цю силу».

1827 р. Роберт Браун відкрив хаотичний рух дрібних частинок.

1834 р. Бенуа Клапейрон вивів на основі трьох газових законів рівняння стану ідеального газу, яке узагальнив 1874 р. Дмитро Менделєєв.

1842 р. Роберт Маєр відкрив закон збереження енергії й визначив механічний еквівалент теплоти (незалежно від нього це зробили Джеймс Джоуль — 1843 р., та Герман Гельмгольц — 1847 р.).

1848 р. Вільям Томсон (лорд Кельвін) запроваджує поняття абсолютної температури й абсолютну шкалу температур.

Джеймс Джоуль оцінив середню швидкість руху молекул газу (водню); розрахунки опубліковано 1851 р.

1849 р. Вільям Ранкін і Рудольф Клаузіус незалежно сформулювали перший закон термодинаміки.

1850 р. Рудольф Клаузіус сформулював другий закон термодинаміки.

1854 р. Рудольф Клаузіус дав математичний вираз для другого закону термодинаміки у випадку оборотних процесів.

1856 р. Рудольф Клаузіус вивів формулу для коефіцієнта корисної дії парової машини (незалежно це зробили також Вільям Ранкін і Вільям Томсон).

1857 р. Рудольф Клаузіус розробив основи кінетичної теорії газів (незалежно це зробили також Даниїл Бернуллі 1738 р., Джон Герапат 1847 р., Джеймс Джоуль 1848 р., Август-Карл Кроніг 1856 р., Джеймс Клерк Максвелл 1859–1866 рр.).

1859 р. Густав Роберт Кірхгоф установив один із законів теплового випромінювання.

Джеймс Клерк Максвелл установив статистичний закон розподілу молекул газу за швидкостями.

Рудольф Клаузіус запровадив поняття про сферу дії молекул і обчислив середню довжину вільного пробігу.

1865 р. Рудольф Клаузіус запровадив поняття ентропії.

Йоганн Йозеф Лошмідт розрахував діаметр молекул і визначив кількість молекул у 1 см^3 газу (число Лошмідта).

1866 р. Людвіг Больцман узагальнив Максвеллів закон розподілу молекул за швидкостями.

1867 р. Джеймс Клерк Максвелл установив статистичну природу другого закону термодинаміки.

1872 р. Людвіг Больцман вивів основне кінетичне рівняння для ідеального газу.

Людвіг Больцман установив зв'язок ентропії фізичної системи з імовірністю її стану й довів статистичний характер другого закону термодинаміки.

1873 р. Ван дер Ваальс вивів рівняння стану реального газу.

Джозая Віллард Гіббс заклав основи загальної теорії термодинамічної рівноваги.

1879 р. Установлення закону Стефана-Больцмана.

1883 р. Вільгельм Він установив закон теплового випромінювання чорного тіла (закон зміщення Віна).

1900 р. Макс Планк сформулював квантову гіпотезу й запровадив фундаментальну сталу з вимірністю дії, запропонував нову формулу для розподілу за енергіями спектра випромінювання абсолютно чорного тіла.

1905 р. Альберт Айнштайн створив теорію браунівського руху, розвиваючи теорію флуктуацій.

1906 р. Мар'ян Смолуховський (незалежно від Айнштейна) дав послідовне пояснення браунівського руху на основі молекулярно-кінетичної теорії.

1908 р. Жан Батист Перрен здійснив експерименти з дослідження браунівського руху, що остаточно довели реальність існування молекул та підтвердили атомно-молекулярну теорію будови речовини й кінетичну теорію теплоти.

«Місток між механікою і теплотою»

Ще два століття тому вченим здавалося, що, вивчаючи теплові явища, вони досліджують абсолютно нову й досить «чужу» для механіки область. Але в сучасному розумінні слово «теплота» має подвійний зміст. З одного боку, воно означає тепловий стан тіла й указує на те, яке з тіл більш нагріте, а яке — холодніше. З іншого боку, теплота пов'язана з кількістю енергії, яку отримує або віддає тіло в теплообміні з іншими тілами. Практично доцільно в першому випадку користуватися поняттям температури (тепла), а в другому — кількості теплоти. Але довгий час обидва ці поняття залишалися для вчених загадковими.

Початок розкриття їхньої «таємниці» пов'язаний із дослідями англійського ботаніка Роберта Брауна (колись у нас писали — Броуна, 1773–1858), котрий уперше влітку 1827 року спостерігав у мікроскоп, як крихітні частинки рослинного пилку безперервно й хаотично рухалися по поверхні рідини. За вищої температури рух частинок ставав інтенсивнішим, а за зниження температури частинки починали «заспокоюватися». Таким чином, Браун наочно спостеріг «місток» між механікою й теплотою. Рух дрібних частинок взаємозв'язаний із температурою, і тепла енергія — це не що інше, як сукупність кінетичних енергій усіх частинок.

Проте остаточно утвердив молекулярно-кінетичну теорію теплоти лише австрійський фізик Людвіг Больцман (1844–1906). Ще наприкінці XIX століття йому довелося вести запеклі дискусії з маститими вченими, котрі не визнавали атомно-молекулярної гіпотези будови речовини. Одне зі своїх наукових повідомлень Больцман закінчив перефразованими словами Галілея: «І все-таки вони рухаються», маючи на увазі молекули. Опоненти відкидали очевидне? Ні: в мікроскопі можна було роздивитися тільки досить великі «браунівські частинки», молекули залишалися невидимими, а тому — гіпотетичними.

Підґрунтя для робіт Больцмана закладали впродовж принаймні трьох століть багато дослідників. І найпершим великим кроком уперед тут стало відкриття так званих «газових законів» та встановлення пропорцій, за якими різні гази утворюють хімічні сполуки. До цього були безпосередньо причетні німець Отто фон Геріке, англієць Роберт Бойль, французи Едм Маріотт, Жозеф Гей-Люссак, Жак Шарль, Бенуа Клапейрон, італієць Амедео Авогадро.

Отто фон Геріке (1602–1686)

Цей німецький військовий і державний діяч, палкий аматор науки, інженер-винахідник і філософ заклав основи сучасної вакуумної техніки, що уможливило подальший поступ у багатьох галузях знань. Але цим його

доробок аж ніяк не обмежується: він також конструював перші барометри, термометри й електростатичні генератори.



Отто фон Геріке (зі старовинної гравюри)

Отто фон Геріке народився в сім'ї заможних містян у Магдебурзі. В університет у Лейпцигу він вступив 15-річним, але через початок спустошливої Тридцятирічної війни мусив декілька разів змінювати місце навчання. Він учився в університетах Гельнштедта, Єни, Лейдена, завершував освіту в Англії та Франції. Повернувшись на батьківщину, фон Геріке опиняється у вирі воєнних дій, потрапляє в полон, його рідне місто вщент зруйноване. Викуплений з полону, війну він завершує інженером на службі шведського короля Густава II Адольфа.

З 1632 р. він знову в Магдебурзі — й на посаді радника відбудовує знищене місто. У 1646 р. його обирають бургомістром, і цю посаду він обіймає впродовж 30 років. Отто фон Геріке бере участь в укладанні Вестфальського миру, який завершив нарешті Тридцятирічну війну, намагається при цьому одержати для Магдебурга статус вільного міста «Священної Римської імперії». Це йому не вдалося. Магдебург увійшов до складу Бранденбурга, але курфюрст Бранденбурга і герцог Пруссії Фрідріх Вільгельм I ставився до вченого бургомистра фон Геріке з повагою і не обтяжував його міста. Коли фон Геріке попросився на пенсію за віком, магістрат ще два роки не погоджувався задовольнити це прохання. Помер учений у Гамбурзі, куди перебрався до сина під час пошесті чуми. Поховано його було в рідному місті. Його могилу, знищену наполеонівськими солдатами, вже в наш час було віднайдено і відновлено.

Дослідами з помпами Отто фон Геріке захопився близько 1645 р., ще нічого не знаючи про роботи Торрічеллі й про атмосферний тиск. Спочатку він намагався отримати порожнечу, видаливши з закупореної бочки воду. При цьому поршень він розташовував знизу, бо вважав, що вода здатна вийти з бочки лише під дією власної ваги. Але цей дослід не вдався, бо дерев'яна бочка не могла забезпечити потрібної герметичності: в її шпарини зразу проникало повітря. Тоді він став відпомповувати повітря з мідної

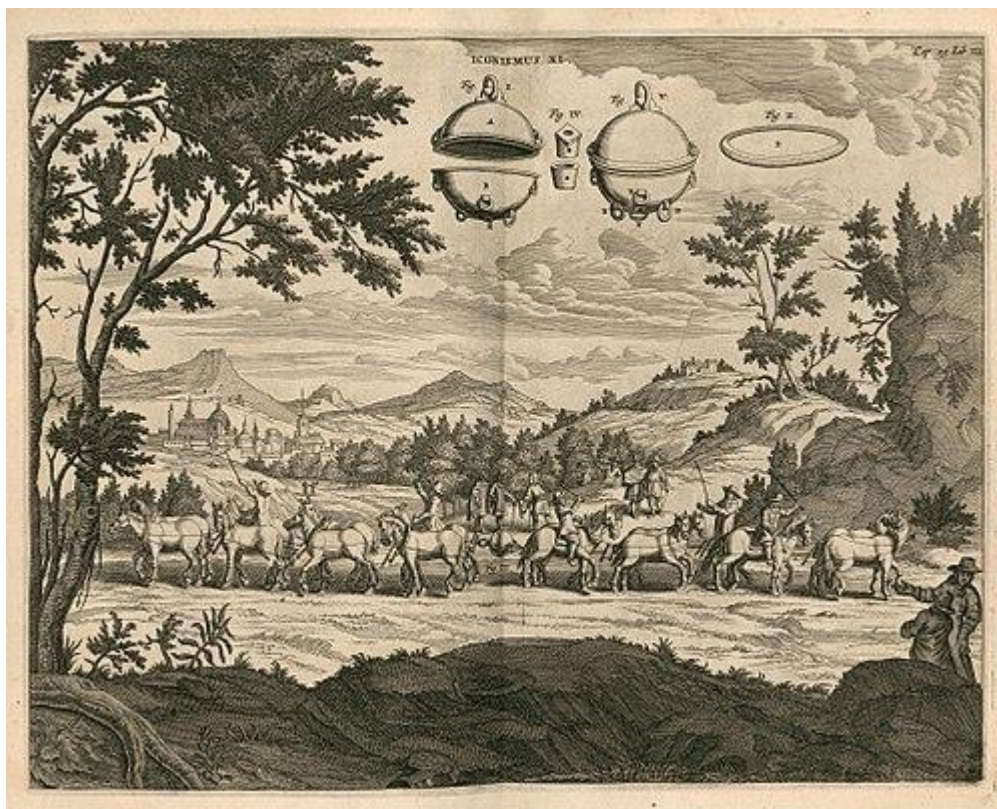
порожньої кулі (так само помилково вважаючи, що повітря здатне переходити в розташований знизу клапан лише під дією власної ваги).



Мідні півкулі та помпа Отто фон Геріке (Німецький музей у Мюнхені)

При цьому його помпа залишалася громіздкою. Її циліндр містив важіль, яким рухали поршень, і два крани: з боку мідної кулі, з якої відпомпували повітря, і з протилежного боку, для випускання цього повітря; ці крани треба було по черговою перекривати вручну, тому загалом помпа потребувала трьох осіб, щоб приводити її в дію. Але результат перевищив усі сподівання: в певний момент атмосферний тиск ззовні сплющив мідну кулю.

Використовуючи міцні шліфовані мідні півкулі, Отто фон Геріке провів у 1654 р. відомий дослід перед членами імперського сейму в Регенсбурзі: після відпомпсування повітря півкулі не змогли роз'єднати два кінні запряги по 8 коней у кожному. Цей дослід справив величезне враження на очевидців і сучасників.



Дослід фон Геріке з мідними півкулями в Регенсбурзі (рисунок сучасника)

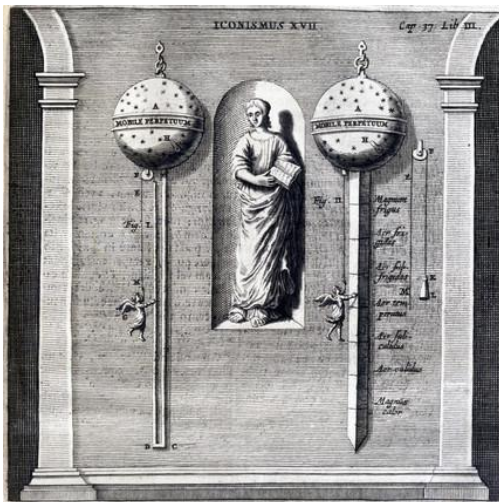
Пізніше вчений продовжив дослід з атмосферним тиском. В одному з них він сполучив трубкою кулю, наповнену повітрям, з кулею, з якої повітря попередньо викачано. Повітря з першої кулі вривалося в другу з великою швидкістю, і це явище експериментатор асоціював із земними бурями. Дослід із щільно зав'язаним бичачим міхуром, який розбухає та нарешті розривається під ковпаком пневматичної машини, де викачано повітря, показав, що повітря має пружність.

Невдовзі Геріке припустив: оскільки повітря має вагу, то атмосфера тисне сама на себе і нижні її шари під дією цього тиску мають бути найгустіші. Це припущення він підтвердив експериментально — на поверхні землі наповнив кулю повітрям, загерметизував її, зійшов на високу вежу й відкрив кран. Частина повітря вийшла з кулі назовні. Тоді вчений закрив кран, зійшов на землю, відкрив його, й повітря пішло всередину кулі (звісно, для того, щоб такий дослід удався, потрібно було, щоб температура на поверхні землі й на вершині вежі була однаковою).

Геріке дійшов висновку, що вага повітря залежить від висоти над поверхнею землі. На основі дії закону Архімеда він винайшов пристрій, який назвав манометром, призначений для вимірювання різниці в густині повітря в різних умовах. Нині цей термін позначає прилад для вимірювання пружності (або тиску) газів.

Під час проведення дослідів з півкулями винахідник довідався від одного з глядачів про дослід Торрічеллі — і, повернувшись додому, спорудив водяний барометр. Він являв скляну прозору рурку заввишки близько 11 м, у верхньому кінці якої містився кран, що дозволяв

відпомповувати повітря. Після утворення над рівнем води «торрічеллієвої порожнечі» фон Геріке почав слідкувати за поведінкою цього рівня — й виявив зв'язок між його коливаннями та зміною погоди. Тоді він поставив на воду фігурку, яка вказувала рукою на написи, що відповідали стану погоди. В 1660 р. учений бургомістр здивував своїх співгромадян, передбачивши сильну бурю за дві години до її початку, коли жодні інші ознаки на неї ще не вказували.



Повітряно-рідинний термометр (гравюра з книги Отто фон Геріке)

Отто фон Геріке спорудив так само й повітряно-рідинний термометр, фактично удосконаливши термоскоп Галілея. Замість води, яка замерзала при настанні перших заморозків, він використав спирт, що дозволяло використовувати цей термометр і взимку. На спирт учений поклав поплавця, а до нього через нитку й блок була прикріплена дерев'яна фігурка, яка вказувала на написи на шкалі. Цей термометр був недосконалий: адже рівень спирту в трубці залежав не лише від зміни температури, але й від зміни атмосферного тиску. А на шкалі були ще не градуси, а слова: від «великий холод» до «велика спека». Через це фон Геріке (незалежно від італійських учених) дійшов висновку про необхідність запровадження нуля температур, і пов'язав його з температурою перших заморозків.

Учений провів ще низку цікавих експериментів з вакуумом. Він перший показав, що свічка під ковпаком, з якого видаляється повітря, гасне, і за зміною рівня води під дзвоном, у якому горіла свічка, визначив, що об'єм повітря під час горіння зменшується. Звідси Отто фон Геріке дійшов правильного висновку про роль повітря при горінні. Для нас цей висновок здається очевидним, проте авторитетний Рене Декарт у «Принципах філософії» (1644) стверджував, що свічка горітиме і в абсолютній порожнечі.

В іншому досліді Отто фон Геріке показав, що за зменшення тиску повітря вода може кипіти за значно нижчої температури (аналогічний результат отримав трохи згодом незалежно від нього і Роберт Бойль). Викачуючи повітря з бочки з водою, учений побачив, що вода раптом сама собою закипіла вже за кімнатної температури.

Отто фон Геріке сконструював і пристрій для добування статичної електрики — велику сірчану кулю, посаджену на вісь, яку крутили й натирали сухими руками. Цим пристроєм активно користувалися впродовж усього XVIII ст. — але про цю частину доробку вченого йтиметься в наступній частині нашого посібника, присвяченій розвитку уявлень про електрику й магнетизм.

Цікавився він і питаннями астрономії — де ще до появи книги Ньютона був прибічником ідеї всесвітнього тяжіння. Подібно до Джорджано Бруно, він вірив у множинність світів і вважав нашу Сонячну систему лише одним із них. Ще до Едмунда Галлея він висловив правильну здогадку про періодичність появи комет. Нарешті, він перший акцентував на тому, що космічний простір заповнено вакуумом.

Роберт Бойль **(1627–1691)**

Роберт Бойль був тринадцятою (передостанньою) дитиною, що з'явилася на світ в одному з ірландських маєтків свого батька лорда Корка. Хлопчик здобув прекрасну домашню освіту й, маючи вісім років, вступив до Ітонського коледжу. Після закінчення коледжу дванадцятирічний Роберт разом із братом вирушив у подорож Європою, де протягом шести років продовжував освіту у Швейцарії та в Італії. Вісімнадцятирічний Роберт Бойль повернувся до Ірландії вже після смерті батька, котрий залишив йому велику спадщину.

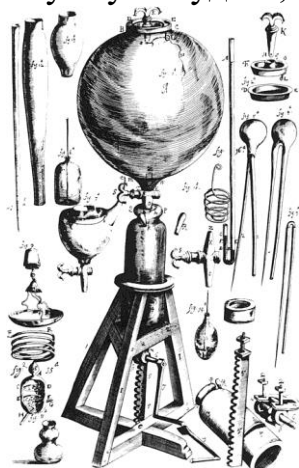


Роберт Бойль (з т.зв. «шеннонського портрета»)

Деякі приміщення батьківського маєтку за вказівкою молодого Роберта Бойля переобладнали під наукові лабораторії. У них він починає проводити власні експериментальні дослідження з фізики, хімії й алхімії. Бойль любив працювати одночасно над кількома проблемами. Зазвичай, він дуже детально й докладно роз'яснював своїм помічникам, що і як вони мають дослідити за цей день, а сам ішов до кабінету надиктовувати секретареві філософські трактати.

Бойль став ученим-енциклопедистом. Він цікавився біологією, хімією, фізикою й медициною, але не меншу цікавість виявляв до філософії, теології та мовознавства. Головного значення він надавав лабораторним дослідженням, особливо в галузі хімії. Зокрема він детально вивчив умови виготовлення чорнила й склав рецепти, що їх протягом століть використовували для виробництва високоякісного чорнила. У 1654 р. Роберт Бойль перебрався до Оксфорда і там продовжив свої дослідження, мета яких полягала в систематизації речовин відповідно до їхніх властивостей.

Разом з асистентами Робертом Гуком та Річардом Таунлі, Роберт Бойль експериментально досліджував властивості газів. Бойль удосконалив помпу фон Геріке, перший зразок якої було збудовано з допомогою Гука. Видаляючи повітря з посудини за допомогою своєї помпи, дослідники намагалися довести наявність ефіру в «порожній» посудині. «Ніякого ефіру не існує», — зробив висновок Бойль. «Порожній» простір він назвав вакуумом, що латиною й означає «порожній». Частина його дослідів з вакуумом за сьогоднішніми мірками є безумовно жорстокими — учений, зокрема, ретельно досліджував, протягом якого часу різні тваринки гинуть у посудині, з якої видалено повітря.



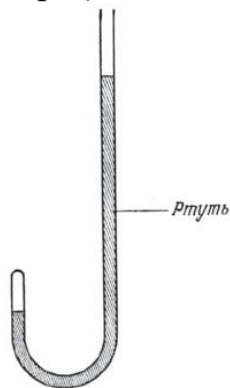
Повітряна помпа фон Геріке, вдосконалена Робертом Бойлем

Політична криза в Англії, пов'язана з жорстокою диктатурою Олівера Кромвеля, котрому активно протистояли прихильники монархії, наклала відбиток на все життя країни. Роберт Бойль повертається з Оксфорда у свій ірландський маєток і підбиває підсумки своїх досліджень за десять років. За кілька місяців напруженої роботи учений разом із двома помічниками-секретарями закінчує й видає першу книгу «Нові фізико-механічні експерименти щодо ваги повітря та її проявів» (1660).

У наступному році він видає працю «Скептичний хімік», де закладає основи сучасного хімічного аналізу. Він відкидає вчення Арістотеля про чотири першооснови (землю, воду, повітря та вогонь) і натомість перший уводить поняття про хімічні елементи — найпростіші складники, які творять усі складні сполуки.

Після відновлення королівської влади Роберт Бойль повернувся до Оксфорда. Він досить часто відвідував Лондон, де спілкувався з колегами-

ученими. З допомогою Таунлі та Гука Бойль робить своє найголовніше відкриття: він експериментально встановлює, що об'єм газу обернено пропорційний його тиску за постійної температури (1661). Для цього він використав U-подібний барометр, коротший відросток якого було запаяно, а довший лишався відкритим. Бойль наливав у барометр ртуть так, щоб її рівень в обох колінах спершу був однаковий. Потім він доливав ртуть у відкрите коліно — і стежив, як зі збільшенням ваги цієї ртуті (а отже, й тиску на повітря!) повільно зменшується об'єм повітря в запаяному відростку.



Пристрій, з допомогою якого Бойль установив взаємозв'язок між об'ємом і тиском газу

Окрім того, Бойль установив, що за зміни тиску можуть випаровуватися навіть ті речовини, які у звичайних умовах не випаровуються (лід); уперше описав розширення тіл за зміни температури (розрив залізної труби, наповненої водою, коли ця вода замерзає); незалежно від фон Геріке показав, що за зменшення тиску повітря вода може кипіти за значно нижчої температури.

Ще до вимушеного повернення з Оксфорда до Ірландії Роберт Бойль у 1654 р. приєднався до гуртка вчених під назвою «Невидима колегія» («Invisible College»), який уже діяв з 1645 р. Саме Бойль після відновлення королівської влади став ініціатором перетворення цього гуртка на Лондонське Королівське товариство. У 1680 р. Бойля обирають президентом Товариства, але він відмовляється від цієї честі, щоб не складати обов'язкової присяги, яка суперечила його релігійним переконанням, і обов'язки президента перебрав уже згадуваний в попередній частині нашого посібника Крістофер Рен.

Роберт Бойль перебуває в zenіті слави. Його запрошують у королівський палац, «сильні світу цього» мають за честь поговорити зі світилом англійської науки. Його наділяють усілякими почесними й матеріальними винагородами, які він скеровує на розвиток досліджень. Він навіть стає одним із директорів впливової і надзвичайно багатой Ост-Індської компанії, яка керує всіма англійськими володіннями в Індії. Інколи Бойль приїздить до Кембриджа, щоб поспілкуватися з Ньютоном.

Наприкінці життя ученого цікавили переважно філософські проблеми. Бойля було визнано найбільшим теологом свого часу. Щоб читати біблійні тексти в оригіналах, Бойль вивчив грецьку та старовірську мови. Маючи

незаперечний літературний хист, він сам написав кілька віршів і трактат на теми моралі й моральності.

Автора фундаментальних відкриттів і одного з перших у світі організаторів науки поховано у Вестмінстерському абатстві поруч із видатними людьми Англії. Роберт Бойль заповів увесь свій капітал на розвиток науки в Англії й на продовження діяльності Королівського товариства. Спеціальні кошти він виділив для проведення щорічних читань з фізики та теології, які відбувалися аж до початку XX століття

Через п'ятнадцять років після встановлення закону Бойля ($PV = \text{const}$ при $T = \text{const}$) цей самий закон незалежно відкрив у Франції священник Едм Маріотт (1620–1684), тому тепер його називають законом Бойля-Маріотта.

Температура

Перші термометри було винайдено й сконструйовано тоді, коли учені ще не знали до ладу, що ж саме вони вимірюють. Річ у тому, що температура була для них пов'язана з визначеними на інтуїтивному рівні поняттями тепла й холоду. Різні за ступенем нагрітості тіла можна розрізнити на дотик, розташувати в певному порядку й сказати, які тіла мають вищу температуру, а які — меншу.

У давнину лікарі були першими, кому знадобилася порівняльна шкала теплоти тіла, оскільки з цим було пов'язане самопочуття й здоров'я людини. Ліки здатні були справляти охолоджувальну або зігрівальну дію, й суміші цих ліків позначали певними «градусами». Але справжня історія визначення температури почалася тільки з Галілея та його термоскопа і з фон Геріке з його рідинним термометром. Цікаво, що й Ньютон не залишив без уваги проблеми вимірювання температури. 1701 року він опублікував роботу «Про шкалу ступенів тепла й холоду», в якій описав 12-градусну шкалу, аналогічну шкалі давніх медиків. Нуль він помістив у точці замерзання води, а 12 градусів відповідали температурі здорової людини.

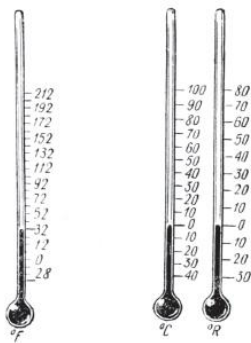
Перший сучасний термометр описав 1724 року Данієль Фаренгайт (1686–1736), складув із Голландії. Це був спиртовий термометр. Найнижчу температуру зими Фаренгайт імітував сумішшю льоду, кухонної солі й нашатирю (температур «нижче нуля» винахідник узагалі прагнув уникнути). Другу точку він отримав, занурюючи термометр у суміш льоду й води. Відстань між цими двома точками Фаренгайт розділив на 32 частини. За отриманою шкалою, температура його власного тіла була 96 градусів, а точка кипіння води — 212 градусів. Такою шкалою досі користуються в США (пригадаймо повісті й оповідання Джека Лондона та Рея Бредбері, де температуру наведено саме в градусах Фаренгайта). Існує просте співвідношення для перетворення градусів Фаренгайта (t_F) на градуси Цельсія (t_C):

$$t_C = \frac{5}{9}(t_F - 32).$$

Цікаво, що з нього випливає: $(-40)_C = (-40)_F$.

У Франції з 1730 року набула поширення температурна шкала, запропонована Рене Антуаном Реомюром (1683–1757) (т. зв. шкала Реомюра), опорними точками якої є точка замерзання води (0 градусів) і точка її кипіння (80 градусів). Саме цією шкалою часто користуються герої пригодницьких романів французького письменника-фантаста XIX століття Жуль Верна.

Сучасну шкалу Цельсія було запропоновано 1742 року. Її автор, шведський астроном і фізик Андерс Цельсій (1701–1744), спершу позначив нулем точку кипіння води, а цифрою 100 — точку її замерзання. Така «перевернута» шкала виявилася незручною й незвичною. За пропозицією інших шведських учених, шкалу «перевернули» назад, і вона набула звичного для нас вигляду.



Термометри Фаренгейта, Цельсія і Реомюра

Термометр швидко став досить поширеним вимірювальним приладом. Але єдиної думки про те, що саме вимірює термометр, не було через відсутність чіткого поділу між поняттями температури й теплоти. За допомогою термометра можна було легко порівнювати температуру різних тіл, але неможливо було порівняти величини градуса в різних частинах шкали.

Адже залишалося недоведеним, що один градус поблизу нуля має той самий тепловий еквівалент, що й поблизу 100 градусів. Якби теплоємність речовини, якою заповнений термометр, не залежала від температури, то сумнівів щодо рівноцінності градусів у різних частинах шкали не було б. Величина градуса була б пропорційна кількості тепла, підведеного до тіла за постійного об'єму. Проте цю умову виконує тільки ідеальний газ, а тому реально сконструювати такий термометр неможливо.

Жозеф Луї Гей-Люссак (1778–1850)

Найважливішою властивістю всіх газів є значна зміна їхнього об'єму зі зміною температури. За зміни температури на 1 градус об'єм будь-якого газу змінюється на одну й ту саму величину, приблизно на $1/273$ частину об'єму, що його займає газ за 0 градусів за Цельсієм, відповідно до закону

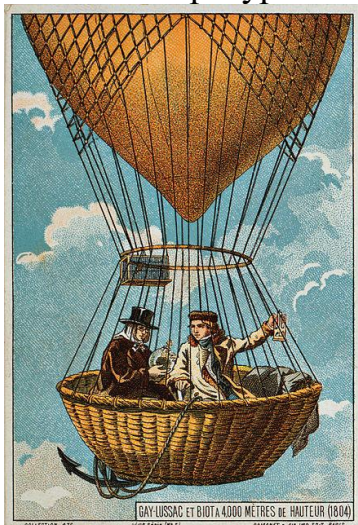
$$V = \frac{V_0}{273}(273+t).$$

Тут t — температура за Цельсієм. Відповідно до цієї формули, якщо зменшення температури на 1 градус, починаючи від 0 за шкалою Цельсія, станеться 273 рази, то від первинного об'єму газу «нічого не залишиться». Насправді цього, звичайно ж, не відбувається, оскільки лише для моделі ідеального газу як системи матеріальних точок, що не мають власних розмірів, теоретично допустиме охолодження до так званого абсолютного нуля.

Закон, згідно з яким об'єм ідеального газу строго пропорційний його температурі за постійного тиску, відкрив французький учений Жозеф Гей-Люссак 1802 року (незалежно від англійського вченого Джона Дальтона (1766–1844), котрий дійшов того самого висновку).

Юні роки вченого склалися драматично: його батька під час революції було заарештовано і йому загрожувала гільйотина, а самого Жозефа Луї було мобілізовано до війська, яке вирушало придушувати повстання у Вандеї. Проте за щасливим збігом обставин і батькові, й синові пощастило пережити революційний терор. У 22 роки Гей-Люссак закінчив знамениту Політехнічну школу, а у 24 він уже викладав у цій школі. Згодом ученого обрано членом Паризької Академії наук, він працював професором фізики Паризького університету.

1804 року Гей-Люссак двічі здійснив польоти на повітряних кулях, які було винайдено лише за 21 рік перед тим. Під час польотів учений робив наукові дослідження, вимірюючи температуру, вологість повітря і напруженість магнітного поля Землі. Так він уперше з'ясував, що на висоті 7000 м температура становить $-9,5$ за Цельсієм (тоді як у Парижі термометр показував $+27,5$ у затінку!). Отже, сніг на вершинах високих гір улітку обумовлений не наявністю цих гір (як уважали до того), а загальним зниженням температури повітря з висотою.



Гей-Люссак та астроном Бріо на висоті 4000 м (рисунок XIX ст.)

Водночас учений пересвідчився: хімічний склад повітря на висоті такий самий, як і при поверхні землі (доти вважали, що там може бути багато

легкого водню, й саме його спалахи зумовлюють блискавки). За відхиленням магнітної стрілки компаса пересвідчився він і в тому, що величина магнітного поля Землі з висотою суттєво не змінюється.

1807 року Гей–Люссак установив, що температура повітря знижується за адіабатичного розширення й підвищується за адіабатичного стиснення (без теплообміну з навколишнім середовищем). Він винайшов та удосконалив низку приладів, зокрема гідрометр, спиртометр, барометр, помпу, різні термометри.

Пристрій, яким користувався Гей–Люссак для встановлення свого основного «іменного» закону теплового розширення газів, був доволі простий. Балон з попередньо осушеним газом був занурений у посудину з водою, температура якої змінювалася за допомогою нагрівача і вимірювалася двома термометрами. У трубці, що вела до балона з газом, містилася крапля ртуті, яка наче корок замикала в місткості деяку постійну масу газу. При розширенні газу крапля зміщувалася вправо. Змінюючи температуру газу від точки замерзання води до точки її кипіння, Гей–Люссак послідовно визначав зміну об'єму газу, що містився в балоні. Досліди проводилися при постійному атмосферному тиску.

Під час експерименту було враховано, що при нагріванні розширюється не тільки газ, а й трубка, по якій переміщувалася крапля ртуті. З цією метою Гей–Люссак вводив спеціальної поправки.

Учений не обмежився дослідженням тільки одного газу. Спочатку він вивчав поведінку повітря і парів ефіру й не виявив у них суттєвої різниці. Пізніше він досліджував оксид азоту, водень, ціан і переконався, що різні гази в усіх дослідах вели себе практично однаково.

Нині закон Гей–Люссака найчастіше записують для абсолютної температури $T = t + 273,15$ так:

$$\frac{V}{T} = \text{const}, \text{ при } P = \text{const}.$$

Закони Бойля–Маріотта й Гей–Люссака було експериментально встановлено на основі простих спостережень і вимірів. Аналогічно було відкрито 1787 року закон Шарля: закон зміни тиску даної маси газу зі зміною температури за постійного об'єму. Його відкривач Жак Шарль (1746–1823) — французький учений, член Паризької Академії наук, професор експериментальної фізики в Консерваторії мистецтв і ремесел у Парижі, сам не опублікував вчасно свого результату — і за нього це зробив пізніше Гей–Люссак, увічнивши ім'я свого колеги.

Англієць Бойль (і його співробітники), французи Маріотт, Гей–Люссак і Шарль вивчали фізичні явища лише ззовні, вимірюючи тиск, об'єм і температуру досить простими приладами, не вдаючись до понять атомів та молекул. Таким чином, учення про теплоту, як і вчення про механічні явища, спочатку виникло з емпіричного досвіду. Цей досвід був строкатою сумішшю спостережень, експериментів і повсякденного сприйняття явищ природи.

Математичне узагальнення всіх трьох експериментальних газових законів уперше 1834 року виконав французький фізик та інженер, професор Інституту інженерів шляхів сполучення в Петербурзі, професор Школи мостів і доріг у Парижі, академік Бенуа Клапейрон (1799–1864). Рівняння, яке він отримав, називається рівнянням Клапейрона й має такий вигляд:

$$PV/T = \text{const}.$$

Амедео Авогадро (1776–1856)

Відкриття газових законів спонукало італійського вченого Амедео Авогадро до дослідів, які заклали основи сучасної молекулярної теорії. Його ім'я увічнив закон Авогадро (або гіпотеза Авогадро, адже сам учений постулював її в 1811 р. без доведення): однакові об'єми двох різних газів за однакової температури й тиску містять однакове число молекул.



Амедео Авогадро

Учений народився в Турині, тодішній столиці королівства П'ємонт (саме П'ємонт зробиться вже в 1860-і центром для національного об'єднання італійців) в родині, що мала іспанське коріння. Додержуючись родинної традиції, він здобув у місцевому університеті ступінь доктора права, і математику та фізику почав вивчати самостійно у 25-річному віці. Ще через два роки він разом із братом Феліче подає в Туринську академію першу наукову роботу з модної тоді електрики. У 1819-му його обирають членом Туринської академії, а ще через рік король призначає його професором спеціально створеної для нього кафедри вищої фізики Туринського університету. Цю кафедру Авогадро очолював (з перервами) до старості.

У 1811 р. Авогадро друкує статтю «Нарис методу визначення відносних мас елементарних молекул речовин та пропорцій, згідно з якими вони утворюють сполуки». Формулюючи у ній свою гіпотезу, вчений спирався на експериментально одержані співвідношення об'ємів різних газів до і після хімічної реакції. Він уже знав про газові закони, що знайшли на той час завершення в роботах Гей-Люссака, й показує, що його гіпотеза узгоджується з цими законами й узагальнює їх.

За часів Авогадро його гіпотезу неможливо було довести теоретично. Проте вона давала просту можливість експериментально встановлювати склад молекул газоподібних сполук і визначати їхню відносну масу. Наприклад, експеримент показує, що об'єми водню, кисню та водяної пари, яка з них утворюється, співвідносяться як 2 : 1 : 2. Цей експериментальний факт можна пояснити, використавши два різні припущення.

Перше: молекули водню і кисню складаються з двох атомів (H_2 і O_2), а молекула води — з трьох, і тоді справедливе рівняння $2H_2 + O_2 = 2H_2O$. І друге: молекули водню одноатомні, а молекули кисню і води — двоатомні, і тоді справедливе рівняння $2H + O_2 = 2HO$ з тим самим співвідношенням об'ємів 2:1:2.

З експерименту розкладу води на водень і кисень при пропусканні електричного струму, вперше поставленого Вільямом Нікольсоном та Ентоні Карлейлем в 1800 р. після винайдення Алессандро Вольта джерела постійного електричного струму, вже було відомо, що співвідношення мас водню і кисню у воді — це 1 : 8. Звідси випливало, що в першому випадку відносна атомна маса кисню (якщо за 1 взяти масу водню) дорівнює 16, а в другому — вона дорівнює 8. Спираючись лише на названі вище експерименти, віддати перевагу одній чи другій гіпотезі неможливо. Навіть у середині XIX ст. деякі вчені вважали, що правильна формула для води саме HO , а не H_2O , і атомну масу кисню брали рівною 8.

Правильну відповідь можна отримати лише в зіставленні з аналізом інших аналогічних експериментів. Із них випливало, що рівні об'єми водню і хлору дають подвоєний об'єм хлороводню. Цей факт відразу заперечував можливість одноатомності водню: жодна з реакцій типу $H + Cl = HCl$, $H + Cl_2 = HCl_2$ тощо не дає подвоєного об'єму HCl . Отже, молекули водню (а також хлору) складаються з двох атомів. Але якщо молекули водню двоатомні, то двоатомні й молекули кисню, а в молекулах води — три атоми, і її формула — H_2O .

Але ця формула однак утверджувалася в головах хіміків складно, і причиною була неможливість зрозуміти фізичну природу зв'язку, який поєднує по два атоми водню й по два атоми кисню в одній молекулі. Знаменитий шведський хімік Єнс Якоб Берцеліус (1779–1848), що мав незаперечний авторитет серед хіміків усього світу, вважав, що всі атоми мають електричні заряди, а молекули утворюються атомами з протилежними зарядами, які притягуються один до одного. Базуючись на експерименті Нікольсона й Карлейля з розкладу води, під час якого кисень виділявся на позитивному електроді, а водень — на негативному, Берцеліус уважав, що атоми кисню мають сильний негативний заряд, а атоми водню — позитивний. З точки зору прийнятої більшістю тодішніх хіміків теорії Берцеліуса неможливо було уявити молекулу кисню, що складається з двох однаково заряджених атомів.

Проте і щодо теорії Берцеліуса з'явилося неспростовне заперечення: адже якщо молекули кисню одноатомні, то в реакції кисню з азотом: $N + O = NO$ співвідношення об'ємів повинне бути 1:1:1. А це суперечило

експерименту: 1 л. азоту і 1 л. кисню давали 2 л. NO. Лише побудова в XX ст. квантової механіки дозволила зрозуміти фізичну природу зв'язку, який забезпечує існування молекул типу H_2 і O_2 , і пояснила хімічні формули багатьох речовин, які на основі численних вимірювань з використанням гіпотези Авогадро зробилися вже на той час загальноприйнятими.

Спираючись на гіпотезу Авогадро, російський учений Дмитро Менделєєв (1834–1907) у 1874 р. переписав рівняння Клапейрона у вигляді:

$$PV = \left(\frac{m}{M}\right)RT,$$

де m — маса газу, M — молярна маса газу, R — універсальна газова стала. Це рівняння Менделєєва-Клапейрона записують також як

$$PV = NkT,$$

де N — число частинок газу, k — стала Больцмана. Якщо йдеться про 1 моль (колишня назва — грам-молекула) газу, то N дорівнює числу Авогадро $N_A = 6.02214129 \times 10^{23}$ моль $^{-1}$. Нині значення числа Авогадро прив'язують до кількості атомів вуглецю, які містяться в його 12 г.

Однак математичне узагальнення експериментальних законів не можна було вважати за їхнє теоретичне обґрунтування. Ці закони породжували в XIX ст. багато запитань, наприклад: чому вони працюють для всіх газів, незалежно від їхнього хімічного складу? Яка фізична природа тиску газу та його температури? Усі ці запитання виникали на тлі браку прямих експериментальних доказів реальності існування атомів.

Теорія газів, створена на основі атомістичної гіпотези, отримала назву молекулярно-кінетичної теорії. В основі цієї теорії насправді лежить те, що в газах відстані між молекулами дуже великі порівняно з розмірами самих молекул, і час, на який молекули зближуються, щоб вплинути одна на одну, також малий. Відтак властивості газів (на відміну від твердих тіл і рідин) майже не залежать від особливостей сил, із якими молекули діють одна на одну. Тому всі гази описуються універсальними газовими законами (а для рідин і твердих тіл таких універсальних законів немає).

До побудови молекулярно-кінетичної теорії доклалися багато вчених, але найсуттєвіший внесок зробили німець Рудольф Клаузіус, шотландець Джеймс Максвелл та австрієць Людвіг Больцман. Проте історично ще до появи їхніх робіт Саді Карно заклав основи теоретичної термодинаміки, Роберт Маєр, Герман Гельмгольц та Джеймс Прескотт Джоуль глибоко вивчили взаємне перетворення різних видів енергії, а Вільям Томсон (лорд Кельвін) дав універсальне визначення енергії й запропонував шкалу температур, базовану на циклі Карно.

Саді Карно
(1796–1832)

Теорія теплоти має свій рік народження — 1824. Саме цього року в Парижі вийшла книга 28-річного військового інженера Саді Карно «Роздуми про рушійну силу вогню й про машини, здатні розвивати цю силу».

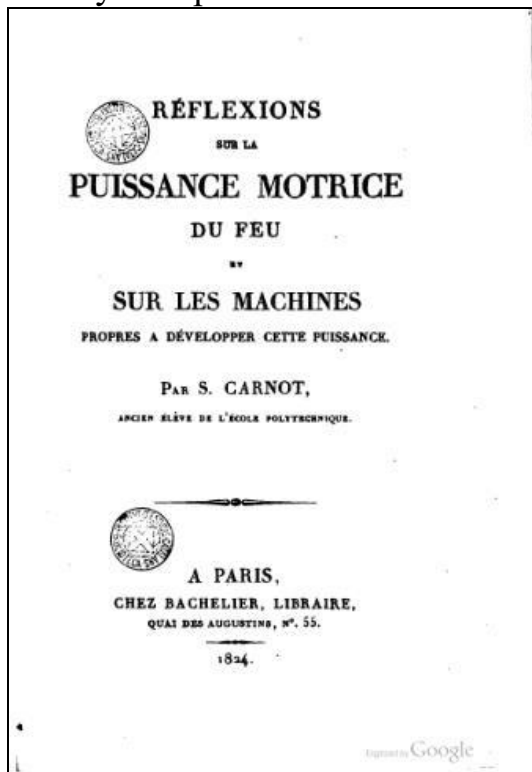
Син Лазаря Карно, ученого, державного діяча, учасника Великої французької революції і військового міністра часів першої республіки, і дядько майбутнього президента Франції Марі-Франсуа Саді Карно, Нікола Леонар Саді Карно закінчив у Парижі Політехнічну школу, найкращий на той час вищий навчальний заклад Франції, після чого служив в інженерних військах. То був час монархічної реставрації, тож батько-вигнанець став перешкодою на шляху успішної кар'єри сина — молодого військового інженера. Однак, не роблячи особливих успіхів на військовій службі, Саді Карно натомість зацікавився паровими машинами, які на той час уже почали свою тріумфальну ходу Європою, але коефіцієнт корисної дії яких не перевищував тоді мізерних 2% — майже вся енергія спаленого вугілля просто «гріла» повітря. Повернувшись із провінції до Парижа, Карно продовжує освіту в Сорбонні й Колеж де Франс і створює книгу про парові машини, яка обезсмертить його ім'я. Вона розпочинається словами: «Ніхто не сумнівається, що теплота може бути причиною руху, що вона має велику рушійну силу: парові машини, нині дуже розповсюджені, є цьому очевидним доказом».



Саді Карно в мундирі Політехнічної школи (портрет пензля Луї Леопольда Буаї)

У цій книзі на основі аналізу створених на той час парових двигунів Карно визначив умови, за яких їхній ККД може досягати максимального значення. Він уперше запровадив такі поняття, як ідеальна теплова машина, ідеальний цикл, оборотні (коли зворотний процес переходу від кінцевого термодинамічного стану до початкового можна здійснити без будь-якої зміни в навколишніх тілах) й необоротні процеси. Він уперше показав, що корисну роботу можна отримати лише в тому випадку, коли тепло переходить від нагрітого тіла до холоднішого. У цій книзі Карно фактично закладає основи термодинаміки, стверджуючи: «...щоб розглянути принцип отримання руху з тепла в усій повноті, треба здійснити міркування, застосовні не лише до

парових машин, але й до всіх мислимих теплових машин, якою б не була використовувана речовина і яким би чином на неї не чинилася дія».



Титульна сторінка книги Карно «Роздуми про рушійну силу вогню й про машини, здатні розвивати цю силу»

Карно розглянув термодинамічний цикл для робочого тіла — газу, який поперемінно перебуває в контакті з нагрівачем і холодильником. Цикл Карно складається з чотирьох стадій:

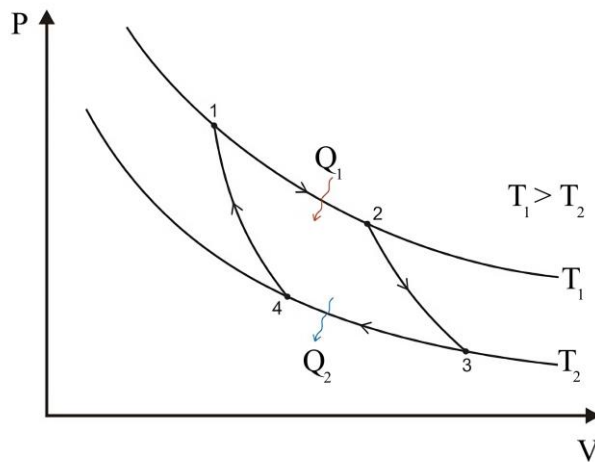
Стадія 1. Тепло оборотним чином передається від нагрівача до газу з температурою T_1 , який починає розширюватися. Тиск газу при цьому падає, а його температура T_1 залишається сталою. Впродовж цієї стадії газ одержує від нагрівача тепло Q_1 . Під час цієї «ізотермічної» стадії ентропія газу збільшується. Але поняття ентропії Карно ще не знав — його запровадить пізніше Рудольф Клаузіус саме на основі аналізу циклу Карно.

Стадія 2. Газ оборотно (тертя в системі відсутнє) розширюється далі, але вже в термічній ізоляції від нагрівача й холодильника, тепло до нього не передається. Через розширення температура газу знижується до температури T_2 холодильника. Ця «адіабатична» (цей термін означає відсутність теплообміну з навколишнім середовищем) стадія відбувається за сталої ентропії газу. При цьому газ усе ще здійснює корисну роботу, пересуваючи поршень угору.

Стадія 3. Газ ізотермічно стискається при температурі T_2 холодильника. При цьому поршень опускається, а тепло Q_2 передається холодильнику. Впродовж цієї стадії ентропія газу знижується.

Стадія 4. Газ стискається термічно ізолювано від нагрівача й холодильника. Його тиск збільшується, температура підвищується до температури T_1 нагрівача, і цикл замикається. Впродовж цієї стадії

температура газу залишається сталою. При цьому над газом далі здійснюється зовнішня робота (поршень опускається).



Термодинамічний цикл Карно в координатах об'єм-тиск

Так цикл Карно описують у сучасних довідниках і підручниках — формалізовано й без прив'язки до конкретної парової машини. У самій книзі Карно виклад дещо інакший.

Почнімо дослід з того, що з'єднаємо циліндр з паровим казаном і вивільнимо поршень. Тоді вода в казані почне випаровуватися і піднімати поршень, і необхідна для цього теплота буде надходити з парового казана. За деякий час роз'єднаємо циліндр з казаном. Через пружність водяної пари поршень ще певний час підійматиметься, але температура пари буде при цьому знижуватися. Коли температура циліндра знизиться до температури конденсатора, з'єднаємо циліндр із ним і, натискаючи на поршень, змусимо його рухатися вниз. При цьому розвинеться теплота, що перейде в конденсатор. Знизивши поршень на певну відстань, роз'єднаємо його з конденсатором. Після цього далі натискатимемо на поршень, аж поки він не опуститься до початкового рівня, а температура циліндра не підніметься до температури парового казана.

Карно наголошує: під час чотирьох стадій цього циклічного процесу циліндр на першій стадії приймав теплоту від парового казана, а на третій віддавав її конденсатору; крім того, на перших двох стадіях циліндр здійснив роботу шляхом підняття поршня, а на третій і четвертій стадіях сам перебував під дією зовнішньої сили і робота здійснювалася над ним. Але ця робота зовнішніх сил менша від роботи самого циліндра, бо вона здійснювалася за нижчої температури. Отже, внаслідок цього циклічного процесу здійснено корисну роботу, а паровий казан утратив тепло, передавши його через циліндр конденсатору.

Карно вважає тепло, втрачене казаном, і тепло, набуте конденсатором, цілком рівними. Тут він ще не брав до уваги можливості перетворення

частини теплоти на внутрішню енергію, бо взагалі ще не знав поняття внутрішньої енергії. У цій точці Карно поправлять пізніше Джоуль і Томсон, а узагальнить їх Клаузіус, увівши поняття ентропії, яка зберігається в оборотному процесі й зростає в необоротному.

Для самого Карно його припущення про рівність тепла, відданого казаном і набутого конденсатором, означає, що корисна робота може здійснюватися лише при переході тепла від тіла з вищою температурою до тіла з нижчою. Такий тепловий потік здійснює роботу так само, як здійснює її водоспад. Звідси Карно доходить і оберненого висновку: для переходу тепла від менш нагрітого тіла до більш нагрітого потрібно здійснити механічну роботу. Причому ця робота повинна бути не меншою від роботи, яку циліндр здійснює при «прямому» процесі.

Це твердження Карно довів так: якби можна було переносити тепло з холодного тіла на гаряче, не здійснюючи роботи, чи здійснюючи роботу, меншу від тієї, яку циліндр здійснює в «прямому» циклі, то, використовуючи роботу, яку здійснює машина, що працює в прямому циклі, можна було б переносити тепло з холодного тіла знов на гаряче, одержуючи надлишок роботи. Це означало б появу «вічного двигуна» — що неможливо.

Звідси заключний висновок Карно: між механічною роботою, кількістю тепла й різницею температур існує певне співвідношення, яке не залежить від інших величин, наприклад, від природи робочого тіла. Отже, Карно зрозумів і довів у вигляді теореми, що максимальна ефективність теплової машини залежить тільки від двох величин — температури нагрівача й температури холодильника: «Рушійна сила тепла не залежить від агентів, узятих для її розвитку, її кількість визначається виключно температурами тіл, між якими, врешті-решт, здійснюється перенесення теплоти».

З цієї цитати випливає: Карно дотримувався гіпотези про те, що тепло — це особлива матерія (теплець-флогістон). Проте модель теплоти не перешкодила вченому отримати абсолютно правильні кінцеві висновки.

Як з'ясувалося після смерті Карно, він згодом змінив свої погляди на природу теплоти й висловив думку, що теплота є рухом, а також що робота й теплота еквівалентні; це, власне, було вираженням закону збереження й перетворення енергії в механічних і теплових процесах.

Ось уривок із його щоденникових записів: «Тепло — не що інше, як рушійна сила або, точніше, рух, що змінив свій вигляд; це рух частинок тіла; всюди, де відбувається знищення рушійної сили, виникає одночасно теплота в кількості, точно пропорційній кількості зниклої рушійної сили. Обернене: завжди зі зникненням тепла виникає рушійна сила. Таким чином, можна висловити загальне положення: рушійна сила існує в природі в незмінній кількості; вона, власне кажучи, ніколи не створюється, ніколи не знищується; насправді вона має форму, тобто спричиняє то один різновид руху, то інший, але ніколи не зникає».

Свою книгу Карно прагнув зробити якомога доступнішою і відтак уникав формул. Тому в математичні формули більшість тверджень Карно було переведено вже іншими вченими. Але незбагненим чином і така

«проста» книга була фактично проігнорована сучасниками, і слава основоположника термодинаміки прийшла до вченого тільки по смерті.

У 28 років Саді Карно залишає військову службу й цілком зосереджується на науковій роботі. Ще через чотири роки він передчасно гине під час пошесті холери (хвороба вбила його впродовж якихось кількох годин). За тодішніми санітарними правилами, разом із його речами спалили й усі папери. Зацілів тільки маленький записник, який містив формулювання першого закону термодинаміки (який довелося «перевідкривати» вже іншим ученим — про це ми говоритимемо далі).

Тільки через 10 років від часу публікації, вже після смерті Карно його наукова праця здобула широку популярність завдяки французькому фізику й інженерові Бенуа Клапейрону, котрий був на три роки молодший від Карно й у свій час навчався в тій-таки Політехнічній школі. 1834 року Бенуа Клапейрон надав ідеям Карно чітку математичну форму. Він першим оцінив велике наукове значення праці Карно, що фактично містила формулювання другого закону термодинаміки (теплота сама собою не може переходити від менш нагрітого тіла до більш нагрітого). Розвиваючи ідеї Карно, Клапейрон вивів рівняння стану ідеального газу й уперше запровадив у термодинаміку графічний метод зображення термодинамічних процесів.

Роберт фон Маєр (1814–1878)

Часткові випадки закону збереження й перетворення енергії розглядали багато вчених, починаючи з Християна Гюйгенса. Однак лише в середині XIX ст. було відкрито закон збереження й перетворення енергії, що працює для всіх фізичних явищ, а не тільки для механічних. До відкриття цього закону причетні чимало дослідників, проте найбільші заслуги в цьому фундаментальному відкритті належать трьом видатним ученим — Роберту фон Маєру, Герману фон Гельмгольцу та Джеймсу Прескотту Джоулю.



Роберт фон Маєр

Юліус Роберт фон Маєр — німецький лікар, що вивчав медицину в Мюнхені, Парижі та Тюбінгені. В 1840–41 роках він як корабельний медик узяв участь у подорожі на острів Ява. Під час плавання, роблячи поширене

тоді лікувальне кровопускання, Маєр помітив, що колір венозної крові матросів у тропіках стає значно світлішим, ніж у північних широтах. Побачивши таку світлу кров, він навіть подумав був, що помилково розрізав артерію замість вени. Ця зміна кольору крові привела його до думки, що існує зв'язок між споживанням речовини й утворенням тепла. Він писав: «...температурна різниця між власним теплом організму і теплом довкілля повинна знаходитися в кількісному співвідношенні з різницею в кольорі обох видів крові, тобто артеріальної і венозної... Ця різниця в кольорі є вираженням обсягу споживання кисню або інтенсивності процесу згоряння, що відбувається в організмі». Отже, насправді Маєр установив, що кількість окислюваних продуктів в організмі людини зростає зі збільшенням виконуваної роботи. Все це сприяло виникненню припущення, що теплота й механічна робота здатні взаємно перетворюватися.

Від розгляду енергетичних процесів у живому організмі Роберт фон Маєр перейшов до фізичних процесів, у кожному випадку встановлюючи факт збереження енергії за її перетворення. Ось одне з його міркувань: «Один кубічний сантиметр (1 см^3) атмосферного повітря за 0°C і тиску $0,76 \text{ м}$ (ртутного стовпчика) важить $0,001322 \text{ г}$; після нагрівання за постійного тиску на 1°C він розширюється на $\frac{1}{273}$ частину свого об'єму. Водночас він піднімає стовпчик ртуті заввишки 76 см з основою 1 см^2 на висоту $\frac{1}{273} \text{ см}$. Вага такого стовпчика — 1033 г . Питома теплоємність атмосферного повітря за постійного тиску дорівнює $0,267 \text{ ккал/кг}\cdot\text{град}$. Отже, кількість тепла, що його приймає наш 1 см^3 повітря для підвищення температури на 1 C , — $0,0013 \times 0,267 = 0,000347 \text{ ккал}$. Кількості теплоти, яке повітря приймає за постійного об'єму й постійного тиску, співвідносяться як $\frac{1}{1,421}$. Таким чином, для нагрівання 1 см^3 повітря за постійного об'єму потрібна кількість теплоти $\frac{0,000347}{1,421} = 0,000244 \text{ ккал}$. Різниця $0,000347 - 0,000244 = 0,000103 \text{ ккал}$ — це кількість теплоти, потрібна для підняття вантажу з вагою 1033 г на висоту $h = \frac{1}{273} \text{ см}$ ».

Проте видатне відкриття Роберта фон Маєра не здобуло загального визнання. Свою роботу «Органічний рух у його зв'язку з обміном речовин» він опублікував 1845 року окремою брошурою на власні гроші (фаховий науковий журнал друкувати її відмовився), і тривалий час вона залишалася майже невідомою. Тим часом вийшли роботи Джеймса Джоуля й Германа фон Гельмгольца, і саме їх стали вважати першовідкривачами закону збереження енергії. Безуспішні спроби Маєра привернути увагу наукової спільноти до своєї праці призвели його до психічного розладу й спроби самогубства. Лише в 1850–60-х роках пріоритет Маєра у відкритті закону збереження й перетворення енергії було визнано.

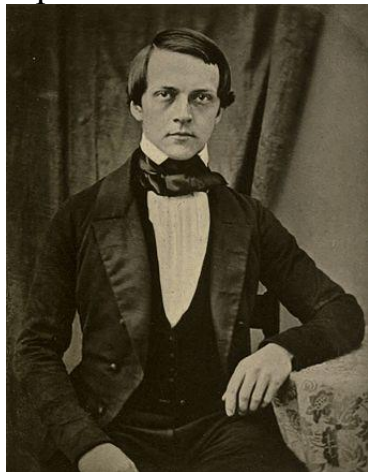
Маєр розглядав шість форм енергії, що перетворюються одна на одну: енергію падіння тіл (потенціальну енергію), кінетичну енергію, теплоту,

магнетизм, електрику, хімічну енергію. Закон збереження енергії він поширив і на органічну природу, розвиваючи думку про значення процесу асиміляції в рослинах для підтримання всього тваринного життя.

Слід наголосити, що саме Роберт фон Маєр першим сформулював закон збереження й взаємоперетворення енергії в найзагальнішій формі та вказав на його значущість в усіх явищах природи.

Герман фон Гельмгольц (1821–1894)

Герман Людвіг Фердинанд фон Гельмгольц — один із найбільших учених XIX століття. Фізика, фізіологія, анатомія, психологія, математика, — у кожній із цих наук він зробив блискучі відкриття, що принесли йому світову славу. Він народився в сім'ї вчителя гімназії в Потсдамі під Берліном. За наполяганням батька, Герман вступив до військово-медичного інституту, і з 1843 року почався службовий шлях Гельмгольца як ескадронного хірурга гусарського полку. За два роки він прощається з військовою службою, переїздить до Берліна й старанно працює в домашній фізичній лабораторії відомого фізика й хіміка Гайнріха Густава Магнуса (1802–1870). Згодом Герман фон Гельмгольц переносить усе устаткування цієї фізичної лабораторії в Берлінський університет, де фізична лабораторія перетворюється на світовий науковий центр.



Герман фон Гельмгольц (світлина 1848 р.)

Науковий розвиток Гельмгольца відбувався в сприятливій обстановці підвищеного інтересу до природознавства. 1847 року Гельмгольц зробив доповідь «Про збереження сили» на засіданні Берлінського фізичного товариства. Цю доповідь було опубліковано окремою брошурою.

У ній учений довів: у системі, де діють лише центральні сили, кількість механічної енергії залишається сталою. Гельмгольц стверджував: енергію не можна розглядати як щось самостійне, відірване від матеріальних тіл. Відтак його доведення збереження енергії полягало в наступному: величини центральних сил залежать тільки від відстаней між тілами. Під час

переміщення тіл ці сили здійснюють роботу, в результаті якої кожне тіло набуває певної швидкості. Щоб повернути переміщені тіла у початкові точки, треба здійснити таку саму роботу. Якби це можна було робити, здійснюючи меншу роботу, то можна було б реалізувати «вічний двигун». А неможливість «вічного двигуна» вважали на той час уже безсумнівною — адже Паризька академія ще 1755 року ухвалила відхиляти проекти «вічних двигунів» без розгляду.

Далі Гельмгольц запровадив поняття «потенціальної енергії», або ж «енергії місцезнаходження» (сам він для неї використовував термін «сила напруження», зберігаючи для кінетичної енергії архаїчний уже на той час термін «жива сила»). Рівність робіт центральних сил при переміщенні тіл із однієї точки в іншу й назад він пояснив незмінністю суми потенціальної й кінетичних енергій у системі, на яку не діють зовнішні сили. У такій загальній формі Гельмгольц сформулював принцип «збереження сили», або, в сучасних термінах, закон збереження енергії.

1871 року Гельмгольц створює фізичний інститут, у який приїздили вчитися й працювати фізики всього світу. 1883 року німецький імператор дарує Гельмгольцу дворянство за наукові заслуги, а 1888 року його призначають директором щойно заснованого урядового фізико-технічного інституту.

Коли йдеться про ставлення Гельмгольца до робіт попередників у царині законів збереження, то слід зазначити: він не раз визнавав пріоритет Маєра й Джоуля, але наголошував, що з роботою Маєра не був знайомий, а роботи Джоуля знав недостатньо. Принцип Маєра «ні з чого нічого не виникає» Герман Гельмгольц конкретизує: «Неможливо за існування будь-якої довільної комбінації тіл отримувати безперервно ні з чого рушійну силу».

Цікаво відзначити, що учений з його освітою медика став піонером біофізики; а його праці поєднували фізіологію, фізику й математику, що відповідає глибоко інтердисциплінарному характеру цієї науки. Його основоположна робота про збереження енергії постала з вивчення м'язового руху; він також досліджував різницю між об'єктивними показниками таких зовнішніх стимулів, як звукові хвилі, і тим, як людина їх сприймає; він виміряв швидкість, з якою передаються нервові імпульси; а в 1851 р. він винайшов офтальмоскоп, - цей інструмент досі використовують для обстеження людського ока.

Джеймс Прескотт Джоуль (1818–1889)

Видатний англійський учений Джеймс Прескотт Джоуль, про якого ми вже згадували в першій частині нашої книги, народився поблизу Манчестера в родині багатого власника browарні. Він здобув домашню освіту. Протягом

трьох років його наставником був видатний хімік і фізик Джон Дальтон (1766–1844). Саме Дальтон прищепив Джоулю любов до науки й пристрасть до накопичення й осмислення числових даних, на яких базуються наукові теорії та закони. На жаль, математична підготовка Джоуля обмежувалася алгеброю, вищою математикою він так і не оволодів, і це надалі перешкоджало йому в дослідженнях.

Замолоду Джоуль не знав ніякої іншої роботи, крім допомагати в управлінні батьковою броварнею. Удень він був зайнятий там, і тільки ночами міг братися до своїх дослідів. Лише після продажу броварні 1854 року в Джоуля з'явилися й час, і кошти, щоб обладнати у власному будинку фізичну лабораторію й повністю присвятити себе експериментальній фізиці. Пізніше Джоуль зіткнувся з матеріальними труднощами й, аби мати можливість продовжувати дослідження, звернувся по фінансову допомогу до королеви Вікторії.



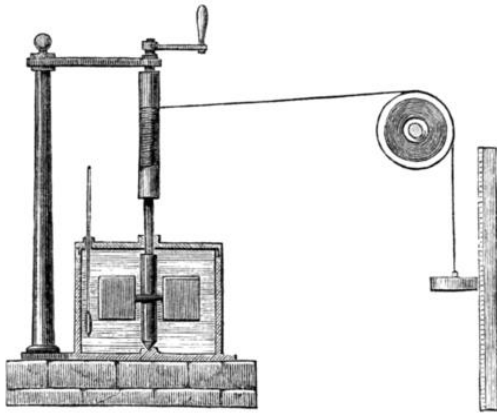
Джеймс Прескотт Джоуль

Протягом 1837–1847 років Джоуль увесь вільний час присвячував різноманітним експериментам із перетворення різних форм енергії — механічної, електричної, хімічної — на теплову. Він розробив термометри, що вимірювали температуру з точністю до однієї сотієї градуса Фаренгейта, і це дозволило йому проводити вимірювання з найвищою для того часу точністю.

1840 року Джоуль формулює закон, що визначає кількість теплоти, яка виділяється в провіднику при проходженні струму (відомий нині як закон Джоуля–Ленца), — «тепло, яке виділяється належною дією будь-якого вольтаїчного струму, пропорційне квадрату інтенсивності цього струму, помноженому на опір провідності, який він відчуває». Цікаво, що результат цей було отримано при дослідженні того, чи не вигідніше замінити у броварні традиційний паровий двигун на щойно винайдений електричний. Результат виявився негативний: купувати вугілля виявилось тоді дешевше, аніж цинкові батареї.

Ще через два роки вчений неспростовно довів: тепло при проходженні струму генерується в самому провіднику, а не передається ззовні. Це різко суперечило теорії теплецю, згідно з якою тепло могло лише перерозподілятися. Паралельно учений отримує ще два важливі результати в

царині магнетизму: відкриває явище магнітного насичення та явище магнітострикції.



Установка Джоуля для визначення механічного еквіваленту теплоти: вантаж, опускаючись, приводив у рух лопаті, від обертання яких нагрівалася вода

Ще в 1843 році Джоуль дійшов до висновку: «Скрізь, де витрачається механічна сила, завжди отримується точний еквівалент тепла», і категорично порвав з поглядами Карно й Клапейрона, базованими на теорії теплецю. У червні 1847 року він зробив доповідь на зборах Британської асоціації вчених, у якій повідомив про найточніші виміри механічного еквіваленту теплоти. Він неспростовно показав: кількість теплоти, яка в стані нагріти 1 фунт води на 1 градус Фаренгайта, може бути перетворена у механічну силу, яка в стані підняти 838 фунтів на висоту по вертикалі в 1 фут (у сучасних одиницях це означає, що 1 калорія дорівнює 4,5 джоуля — прийняте сьогодні значення дещо нижче від 4,2 джоуля).

На напівсонних слухачів доповідь не справила жодного враження, і лише молодий Вільям Томсон (майбутній лорд Кельвін) пояснив своїм старшим колегам значення роботи Джоуля. Доповідь стала поворотним пунктом у кар'єрі вченого, який тісно співпрацював із Томсоном упродовж наступного десятиліття (наслідком такої співпраці стало відкриття ефекту Джоуля–Томсона — зміни температури газу при його адіабатичному розширенні). 1850 року Джоуля обрано членом Лондонського Королівського товариства. Він став одним із авторитетних учених свого часу, володарем багатьох титулів і нагород. Королева Вікторія дарувала йому лицарство. Ім'ям Джоуля пізніше названо одиницю енергії в системі СІ — 1 джоуль.

Джоуль мав видатні здібності фізика-експериментатора. Його пристрасть до науки була безмежною. Навіть під час медового місяця він знаходив час для вимірювань температури води біля вершини й підніжжя мальовничого водоспаду, біля якого вони з молодого дружиною жили, щоб переконатися: різниця значень температури води відповідає закону збереження енергії.

Джоуль вірив, що природа влаштована просто, і прагнув знайти прості співвідношення між важливими фізичними величинами. Особливо вражають уже згадані досліди Джоуля з визначення співвідношення між роботою й

теплотою, які сприяли встановленню фундаментального закону природи — закону збереження й перетворення енергії.

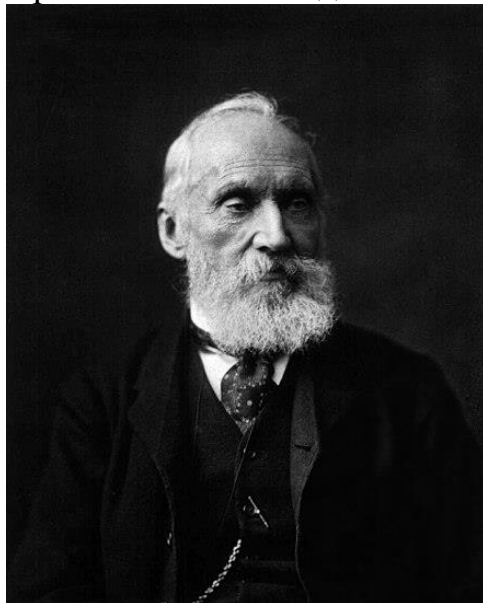
Досліди ці Джоуль почав 1839 року й провадив їх протягом одинадцяти років. Потім повернувся до них 1878 року. І в кожному досліді вчений ставив одне і те саме запитання: «Чи кожна одиниця роботи дає ту саму кількість теплоти? Чи не залежить кількість теплоти, отриманої за рахунок споживання одиниці механічної енергії, від методу вимірювання й від матеріалу, який нагрівається в досліді за рахунок роботи?».

Джоуль нагрівав тертям воду, ртуть, китовий жир, залізні плитки, експериментував із електричним струмом, отримуваним за рахунок падіння вантажів, що нагрівав котушку, експериментував із повітрям, що нагрівається за рахунок роботи стискання. Такі досліди, але не аж так ретельно, ставили й інші вчені: Вебер у 1857–59 роках, Гірн у 1857–61 рр., Роуланд у 1879 р., Маєр у 1842 р., Румфорд у 1798 р., Деві в 1799 р.

Усі ці досліди разом із фундаментальними дослідженнями Джоуля дали Рудольфу Клаузіусу необхідні підстави для узагальнення, що отримало назву першого закону термодинаміки.

Вільям Томсон (лорд Кельвін) (1824–1907)

Народився Вільям Томсон в Белфасті (Північна Ірландія), того самого року, коли Саді Карно опублікував свою знамениту роботу «Роздуми про рушійну силу вогню й про машини, здатні розвивати цю силу». Його батьки були вихідцями з Шотландії й незабаром повернулися в рідні місця, влаштувавшись у Глазго. Батько — професор математики в університеті — був добрим наставником для Вільяма.



Сер Вільям Томсон (лорд Кельвін)

У Шотландії існувала традиція вступати до університету в шістнадцятилітньому віці, але для Вільяма Томсона зробили виняток — його прийняли, коли йому виповнилося десять років. За деякий час молодий студент дістав можливість перейти в Кембриджський університет, що був провідним науковим центром Англії. Заняття науками він поєднував із спортивними захопленнями, ставши першокласним веслярем.

Різнобічно обдарований Томсон став також одним із засновників Кембриджського музичного товариства. Надалі його гра на ріжку завжди викликала бурю захоплених оплесків, коли в університеті Глазго він демонстрував своїм студентам акустичні ефекти.

Молодому професорові Вільяму Томсону лише двадцять два роки, а його вже обирають завідувачем кафедри фізики в університеті Глазго. Діяльність професора фізики Вільяма Томсона на одній кафедрі тривала протягом п'ятдесяти трьох років. Університет віддав належне заслугам професора — обрав його своїм президентом, а королева Вікторія спершу в 1866 р. надала вченому дворянство, а в 1892 р. зробила його «бароном Кельвіном» (назва титулу походить від річки Кельвін, що протікає повз університет Глазго). У 1890–95 рр. сер Вільям Томсон, лорд Кельвін був президентом Королівського товариства.



Річка Кельвін і університет Глазго наприкінці XIX ст.

Учений володів рідкісним даром добиватися успіху в усьому, за що він брався. У ранньому юнацькому віці Вільям зацікавився проблемою перенесення тепла. Коли йому було п'ятнадцять років, він опублікував свою першу наукову статтю, присвячену математичному аналізу процесу поширення тепла з використанням ряду Фур'є, і цю статтю було опубліковано в «Працях Кембриджського математичного товариства». Роботи Томсона з теплоперенесення стали класичними й мають важливе значення для багатьох галузей науки.

Після закінчення Кембриджського університету Вільям Томсон протягом кількох місяців проходив наукове стажування в Колеж де Франс у лабораторії Віктора Реньйо (1810–1878), котрий намагався створити універсальну, абсолютну шкалу температур. А в 1847 р. Томсон був серед слухачів знаменитої доповіді Джоуля, і захоплюється проблемою механічного еквіваленту тепла. Таким чином, учений зацікавився одночасно двома фундаментальними проблемами: термодинаміки й молекулярно-кінетичної теорії.

Вільям Томсон дійшов логічного висновку: має існувати нижня межа ступеня охолодження тіл, тобто універсальний і природний нуль температури. Якщо тіло гаряче, то його молекули (атоми) мають досить високу енергію. Не існує верхньої межі цієї енергії, а тому не може бути й універсальної верхньої межі температури. Але в міру охолодження тіла енергія рухомих молекул (атомів) стає дедалі меншою. Отже, стає можливим досягнення абсолютного нуля температури, коли енергія нерухомих атомів дорівнює нулеві (0 K). За шкалою Цельсія значення цього нуля підказує газовий закон Гей-Люссака: природний, абсолютний нуль температури відповідає $-273,15^{\circ}\text{C}$. Відповідно, температура плавлення (танення) льоду за нормальних фізичних умов становитиме $273,15$ градусів Кельвіна (0°C).

Спосіб визначення температури за допомогою термометра, покази якого не залежали б від термометричної речовини, запропонував 1848 р. Рудольф Клаузіус, ґрунтуючись на роботі Саді Карно. Цього ж року Томсон звернув увагу на те, що в теорії Карно ефективність теплової машини ніяк не залежить від властивостей робочого тіла, а визначається тільки температурою нагрівача й холодильника. Отже, в циклі Карно й температура не повинна залежати від властивостей робочої речовини.

Для циклу Карно справедливий вираз:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_1}{T_2},$$

де Q_1 і Q_2 — кількість теплоти, яку робоче тіло отримує від нагрівача, і тепло, яке передає холодильнику, T_1 і T_2 — температури нагрівача й холодильника. Ця формула дозволяла визначати відношення температур через відношення цілком вимірюваних експериментально кількостей теплоти. Температурну шкалу, засновану на циклі Карно, й запропонував 1851 року Вільям Томсон.

Так замість температурної шкали з двома — власне, довільними — опорними точками, відстань між якими ділилася на довільну кількість рівних частин, у фізиці з'явилася шкала, побудована на основі відношень температур. Цю термодинамічну шкалу прив'язали до газової, а за еталонну вибрали так звану «потрійну» точку води. Лід починає плавитися, коли температура за шкалою Цельсія становить $0,01^{\circ}\text{C}$, а всі три фази (пара — лід — вода) перебувають у рівновазі. Точку $0,01^{\circ}\text{C}$ (легко відтворювану в лабораторних умовах) беруть за еталонну, а за термодинамічною шкалою вона виявляється рівною $273,16\text{ K}$ (градусів Кельвіна). Тоді звичайний нуль Цельсія відповідає температурі $273,15\text{ K}$.

Учений наголошував: перевага його шкали в тому, що кількість тепла, передана від тіла А з температурою $T\text{ K}$ тілу В з температурою $T - 1\text{ K}$, може здійснити однакову механічну роботу для будь-якої температури T . Він же дав у роботі «Механічна теорія тепла» (1852) важливе визначення: «Під енергією матеріальної системи у певному стані ми розуміємо вимірювану у механічних одиницях роботи суму всіх дій, які відбуваються поза системою, коли вона переходить з цього стану будь-яким способом у довільно обраний нульовий стан».

Визначення Томсоном поняття внутрішньої енергії системи U (1851) після робіт Маєра, Джоуля і Гельмгольца дозволило Рудольфу Клаузіусу сформулювати перший закон термодинаміки як спеціальний випадок закону збереження енергії:

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta W.$$

Цей запис означає, що тепло ΔQ , яке надходить у систему, витрачається на збільшення внутрішньої енергії системи ΔU й на роботу, яку здійснює ця система ΔW . Для газу, який приводить у рух поршень, робота дорівнює

$$dW = PdV.$$

Водночас Томсон дає власне формулювання другого закону термодинаміки: «Неможливо засобами неживого матеріального агента отримати механічну дію від будь-якого матеріального тіла, охолодженого нижче від температури будь-якого з навколишніх матеріальних тіл».

Вільям Томсон був універсальним ученим. Ще в 1845 р. він виконав декілька важливих робіт з електростатики. У 1854 р. він же заклав основи сучасної термоелектрики, яка має, зокрема, важливе практичне застосування. У 1856 р. Томсон відкрив ефект магнітоопору.



Найбільший тогочасний пароплав «Грейт Істерн» після завершення прокладання першого трансатлантичного кабелю (1866)

Величезні заслуги Томсона, пов'язані з успішним прокладенням трансатлантичного телеграфного кабелю, який у 1866 р. вперше з'єднав Європу з Америкою. Історія прокладання цього кабелю була сповнена драматизму. У липні 1865 р. Вільям Томсон сам плів на пароплаві «Грейт Істерн», коли стався фатальний обрив кабелю тому, як 1900 км його було вже покладено на дно. Але через рік протягом двотижневого плавання вдалося не тільки прокласти весь кабель між Європою та Америкою, а й відновити раніше втрачений. Перше повідомлення, яке передали кабелем між континентами, було: «Слава Богу на небесах і мир на землі, й добрі побажання всім людям!». Під час прокладання трансатлантичного кабелю вчений досліджував поширення електричних імпульсів, що мало велике значення для розвитку телеграфії.

Сумарно вчений опублікував понад 650 робіт і подав заявки на 70 патентів.

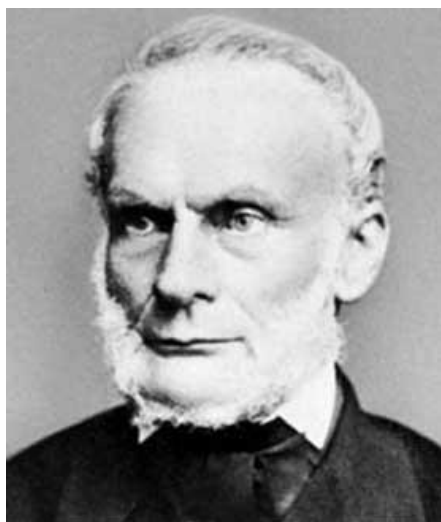
Лорд Кельвін дожив до доби нової фізики — але не прийняв її. Він до кінця стояв на механістичних позиціях і вважав: «Справжній зміст питання про те, чи розуміємо ми певну фізичну проблему, зводиться до наступного: чи можемо ми сконструювати відповідну механічну модель». Однак уже його молодший сучасник Максвелл, вибудовуючи класичну електродинаміку, пішов принципово іншим шляхом.

Був лорд Кельвін і переконаним опонентом учення Чарлза Дарвіна про еволюцію видів. Уважаючи, що тепло Сонця зумовлено хімічним горінням, матеріали для якого повинні достатньо швидко вичерпатися, він оцінив максимальний вік Землі у 20–40 млн років. Цього часу недостатньо для того, щоб розмаїття земних видів могло виникнути шляхом еволюції. Лорд Кельвін ще нічого не знав про термоядерні реакції на Сонці. Однак ще за життя вченого з'ясувалося, що тепло може виділятися під час радіоактивного розпаду. Проте своєї думки про порівняно «короткий» вік Землі лорд Кельвін так і не змінив.

Вільям Томсон (лорд Кельвін), як і його великий співвітчизник Ісаак Ньютон, був людиною глибоко віруючою і вважав, що тільки через пізнання природи можна прийти до віри в Бога. Водночас він глибоко замислювався над проблемою неминучої теплової смерті Всесвіту. Ще до того, як Клаузіус сформулював закон зростання ентропії, Томсон писав: «...я вірю, що жодна фізична дія не може відновити тепла, випроміненого Сонцем, і в те, що це джерело тепла не є невичерпним; а також у те, що Земля та інші планети під час руху втрачають «живу силу», яка перетворюється на тепло; і хоча певна частина втраченої «живої сили» може бути заміщена для Землі теплом, одержаним від Сонця, чи на інший спосіб, але загальні втрати її не може бути повністю компенсовано».

Рудольф Клаузіус (1822–1888)

Життя цього німецького вченого було бідне на зовнішні події. Він викладав фізику послідовно в Берліні, Цюриху, Вюрцбургу та в Бонні. Але саме йому судилося сформулювати перший (разом з іншими ученими) та другий закони термодинаміки, запровадити важливе поняття ентропії, зробити справжній прорив у побудові молекулярно-кінетичної теорії тепла.



Рудольф Клаузіус

Слід нагадати, що першим ученим, котрий застосував атомістичні уявлення до розрахунку властивостей газів, був геніальний швейцарський учений Даниїл Бернуллі. 1738 року він виконав теоретичний розрахунок тиску газу й теоретично вивів закон Бойля-Маріотта. Однак у той час атомістичні уявлення були не дуже популярні, й про чудові результати теоретичних досліджень Бернуллі невдовзі забули.

Наступний важливий крок зробив італійський фізик і хімік Амедео Авогадро. У 1811 р. він постулював гіпотезу, згідно з якою в рівних об'ємах різних газів за однакового тиску й температури міститься однакова кількість молекул.

Більш ніж через століття після Бернуллі, у 1843 р., спробу використати молекулярно-кінетичні уявлення для розрахунку параметрів газу зробив шотландський учений Джон Вотерстон (1811–1883). Він був пристрасним гравцем у більярд — і саме ця гра наштовхнула його на ідею порівняти молекули газу з твердими кульками, які зіштовхуються. З розрахунків Вотерстона як наслідки випливали закони Бойля-Маріотта й Гей-Люссака. Доля цієї теоретичної роботи дуже сумна. Сучасники зазвичай про неї відгукувалися як про «порожню, якщо не безглузду, засновану на суто гіпотетичних принципах». Така дивна логіка розвитку теорії газів зумовлена, перш за все, недовірою до атомістичної гіпотези («Атомів ніхто й ніколи не бачив!»).

Скептиків поменшало (але затяті супротивники залишилися), коли 1857 року Рудольф Клаузіус опублікував велику роботу з кінетичної теорії газів. Він теоретично вивів рівняння, нині відоме як основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії. При цьому він виходив з двох припущень: усі молекули рухаються з однією тепловою швидкістю v , і зіткнення молекул з іншими молекулами неістотні.

Ось короткий виклад роботи вченого (зі збереженням його власних позначень). Нехай відстань між двома стінками кубічної посудини становить h , а молекула летить під кутом θ до нормалі до цієї стінки й відбивається від неї під тим самим кутом. Тоді кількість ударів цієї молекули об певну стінку

на 1 с дорівнюватиме $v \cos \theta / 2h$. Далі Клаузіус зробив припущення про те, що молекули можуть підлітати до стінки під будь-якими кутами з однаковою ймовірністю. Звідси, якщо загальне число молекул у посудині становить N , то в кутовому проміжку від θ до $\theta + d\theta$ виявиться $N \sin \theta d\theta$ молекул, які завдаватимуть стінці протягом 1 с $\frac{Nv}{2h} \sin \theta \cos \theta d\theta$ ударів. Кількість руху, яку передає стінка молекулі з масою m під час одного удару, дорівнює $2mv \cos \theta$, а кількість руху, передана всім молекулам у кутовому проміжку від θ до $\theta + d\theta$ за 1 с, дорівнюватиме $\frac{Nm v^2}{h} \sin \theta \cos^2 \theta d\theta$. Проінтегрувавши цей вираз за θ від 0 до $\pi/2$, Клаузіус отримав кількість руху, надану стінкою всьому газові молекул за 1 с: $\frac{Nm v^2}{3h}$. Оскільки кількість руху (сучасною мовою — імпульс), передана за секунду, дорівнює силі, з якою стінка тисне на газ, і оскільки за третім законом Ньютона сила дії дорівнює силі протидії, то тиск газу на стінку з площею h^2 дорівнюватиме:

$$P = \frac{Nm v^2}{3h^3} = \frac{Nm v^2}{3V}.$$

Відзначмо: аналогічний розгляд провели раніше Бернуллі, а потім — Вотерсон, але Клаузіус про їхні роботи не знав. Згідно з прийнятим сьогодні записом, з урахуванням того, що насправді швидкості молекул різні, ідеальний газ, що складається з N твердих маленьких кульок із масою m кожна, вміщений у посудину з об'ємом V , чинить на стінки тиск P , який можна знайти за співвідношенням:

$$PV = \frac{Nm \langle v^2 \rangle}{3}.$$

Тут дужки $\langle \dots \rangle$ символізують середнє значення величини за всім ансамблем частинок.

Оскільки добуток Nm у цьому виразі означає масу всього газу в об'ємі, яку можна визначити простим зважуванням, Клаузіус уперше обчислив за одержаною ним формулою середні швидкості молекул газу. Наприклад, для швидкості молекул кисню за нормальних умов він отримав $v = 461$ м/с, а для молекул водню $v_g = 1844$ м/с. Ці результати викликали дуже великі сумніви, оскільки вони суперечили відомим фактам повільного поширення запахів. Клаузіус розгадав гадану суперечність і пояснив її численними зіткненнями молекул, через які вони постійно змінюють напрямок свого руху. Він уперше ввів у фізику газів надзвичайно важливе поняття довжини вільного пробігу як шляху, що його молекула газу проходить між двома послідовними зіткненнями.

Згодом Клаузіус уточнив уявлення про молекулу як про пружну кульку й доповнив картину руху молекули припущенням, що за поступального переміщення молекула володіє також «внутрішнім» рухом. Атоми в складі молекули можуть коливатися біля своїх положень рівноваги, а молекула в цілому може обертатися. Клаузіус передбачив, що енергія між різними

рухами розподіляється порівну. Зараз це — загальноприйняте положення про рівномірний розподіл енергії між різними ступенями свободи. Кількість ступенів свободи — кількість незалежних один від одного можливих рухів.

Роботи Клаузіуса мали найважливіше пряме значення для подальших теоретичних досліджень. Так, на основі теорії Клаузіуса й кількісних експериментів Джеймс Максвелл незабаром визначив, що в повітрі за нормальних умов кожна молекула газу стикається з іншими 5 тисяч мільйонів разів за секунду, і що довжина вільного пробігу дорівнює приблизно десятитисячній частці міліметра. Справді, для повітря за атмосферного тиску ця величина складає приблизно 0,0001 мм. Проте за зниження тиску довжина вільного пробігу зростає. І за тиску в одну десятитисячну атмосферного вона становить уже близько 1 мм.

Використовуючи ці дані, австрійський учений Йоганн Лосмідт (1821–1895) 1865 року вперше обчислив розміри молекул повітря і їхню кількість у кубічному метрі за нормальних умов. У своїх обчисленнях він виходив із того, що довжина вільного пробігу визначається концентрацією молекул і найменшою відстанню між центрами молекул за їхнього зіткнення.

Неймовірно малі й неймовірно великі числа стали конкретними і цілком визначеними. Дивовижні наслідки випливали з факту величини числа Лосмідта ($2,7 \cdot 10^{25}$ молекул/м³). Перед наукою постала нова серйозна проблема. Адже наукова картина світу й світогляд ґрунтувалися на теорії Ньютона. А це означає, що необхідно складати і одночасно розв'язувати 10^{25} рівнянь рухів молекул одного кубометра газу. Задача розрахунку траєкторій молекул газу набуває неймовірної математичної складності, її розв'язати не здатні навіть найсучасніші комп'ютери. До того ж і поставити таке завдання неможливо, оскільки неможливо врахувати всі початкові умови для всіх молекул. Висновок — «розчарування»: класичну механіку Ньютона не можна застосувати до теоретичних досліджень властивостей газів.

Припущення Клаузіуса про однакову для всіх молекул середню швидкість жодним чином не відповідає справжній картині зіткнень молекул, а отже, і обміну енергіями. Але введення однієї середньої швидкості «приховує» принципову відмінність між класичною механікою, що описує рухи окремих частинок, і механікою ансамблів цих частинок. Для подальшого розвитку молекулярно-кінетичної теорії «потрібен був» Максвелл.

Клаузіус не лише сприяв становленню кінетичної теорії газів тим, що подав 1857 року систематичний виклад основ цієї теорії. Він точно сформулював принцип еквівалентності теплоти й роботи. Незалежно від Джоуля й Ранкіна він отримав загальні співвідношення між теплотою і механічною роботою (перший закон термодинаміки), а також дав математичне вираження другого закону термодинаміки для оборотних і необоротних процесів.

Окремо зазначимо, що, розвиваючи свої термодинамічні ідеї, Клаузіус увів нове фундаментальне поняття — ентропію (1865). Він прийшов до цього

поняття, вивчаючи цикл Карно. Спробуємо простежити за ходом міркувань Клаузіуса.

Відповідно до моделі теплецю-флогістону, якої дотримувався Карно, для тепла, отриманого від нагрівача, і тепла, відданого холодильнику, можна записати:

$$Q_1 + Q_2 = 0$$

(тут ми приписали кількостям тепла знаки «плюс» і «мінус» у разі теплоприйняття й тепловіддачі робочим тілом відповідно).

Це означало б, що кількість теплоти зберігається, а робота виконується, що суперечило б уже записаному на той час першому закону термодинаміки. У 1854 р. Клаузіус припустив, що насправді в оборотному термодинамічному циклі зберігається не кількість теплецю-флогістону, а зовсім інша величина S :

$$S = \frac{Q}{T},$$

тобто під час повного оборотного циклу Карно $\int \frac{dQ}{T} = 0$.

Тому співвідношення

$$Q_1 : Q_2 = T_1 : T_2,$$

яке сьогодні називають «теоремою Карно», повинне діяти для будь-якої ідеальної теплової машини, яку можна змусити працювати й «в оберненому напрямі»: з відбиранням теплоти від холодильника й передаванням її нагрівачеві (саме так діють холодильні пристрої й теплові насоси). Зрозуміло, що тут уже тепла машина не виконує роботу, а сама є об'єктом виконуваної роботи.

Цю величину S Клаузіус назвав «ентропією». Зміна цієї величини пов'язана з температурою і зміною теплоти співвідношенням

$$\Delta S = \frac{\delta Q}{T}.$$

Сам Клаузіус писав, що ΔS «є диференціалом певної пов'язаної зі станом тіла величини, причому такої, яка повністю визначена, якщо відомо стан тіла у конкретний момент, хоча нічого не відомо про шлях, по якому тіло дійшло до такого стану». Слово «ентропія» було скомпоновано з грецького «тропе» — «перетворення» й префікса «ен», яким Клаузіус хотів наголосити на спорідненості поняття, яке він запроваджував у науку, з уже загальновизнаним на той час поняттям енергії.

Своє доведення для оборотного процесу Клаузіус провів у спрощеному вигляді, розглядаючи лише два тіла, які втрачають чи набувають теплоту. За таких умов енергія, здатна до перетворення на механічну роботу, не втрачається ні на що інше. 1862 р. Клаузіус розширив розгляд на необоротні процеси, для яких це співвідношення вже не виконується, й частина теплоти витрачається на підвищення внутрішньої енергії системи.

Для ідеального циклу Карно легко показати (і Клаузіус це вже знав), що ККД ідеальної (оборотної) теплової машини можна виразити через абсолютні температури нагрівача й холодильника, тобто $\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$.

Для будь-якої теплової машини натомість $\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$. Термодинамічні процеси будь-яких реальних теплових машин є необоротними, і для них ККД є завжди меншим від того, що має місце в ідеальній машині за такої ж температури нагрівача й холодильника:

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} < \frac{T_1 - T_2}{T_1} \Rightarrow 1 - \frac{Q_2}{Q_1} < 1 - \frac{T_2}{T_1} \Rightarrow \frac{Q_2}{Q_1} > \frac{T_2}{T_1} \Rightarrow \frac{Q_2}{T_2} > \frac{Q_1}{T_1},$$

тобто $S_2 > S_1$.

Таким чином, Клаузіус показав, що для реальних (а вони завжди необоротні) термодинамічних процесів ентропія термодинамічної системи завжди зростає.

Сам Клаузіус сформулював перший і другий закони термодинаміки таким чином: 1) енергія Всесвіту стала; 2) ентропія Всесвіту прямує до максимуму. Цей висновок ученого став по-справжньому революційним: адже до того в рівняннях механіки час виступав просто як параметр, знак якого можна було міняти на зворотний, і в такий спосіб повернутися до первісного стану системи. Нічого подібного немає в термодинамічних процесах, які є необоротними за своєю природою. Чим вища ентропія системи, тим більший часовий проміжок пройшла система у своїй еволюції.

Ми бачимо, що в термодинаміці ентропію було введено формально — як величину, що зберігається в оборотному процесі. Клаузіус показав, що в замкненій системі ентропія або незмінна (оборотні процеси), або зростає (необоротні процеси). Вважаючи Всесвіт замкненою системою, Клаузіус дійшов висновку про його майбутню «теплову смерть», коли температура всіх тіл зрівняється й будь-які процеси стануть неможливі.

Адже всі природні довільні процеси призводять до рівномірного розподілу тепла і вирівнювання температури. Отже, Сонце, віддаючи тепло в навколишній простір, врешті-решт перестане світити й гріти. Інші небесні світила спіткає така ж доля. Настане «кінець світу», що й відповідає релігійним ученням. «Закон ентропії, відкритий Клаузіусом, — стверджував, наприклад, Пій XII, римський папа в 1939–1958 роках, — привів нас до пізнання того, що стихійні процеси природи завжди пов'язані із зменшенням вільної і корисної енергії. Ця фатальна доля настійливо вимагає буття необхідної сутності... Іншими словами, буття Бога».

Висновок про неминуче збільшення хаосу в природних системах відразу ж отримав і супротивників. Він, зокрема, видимо суперечив еволюційній теорії Дарвіна, яка була сформульована в знаменитій праці «Походження видів шляхом природного добору, або Збереження обраних порід у боротьбі за життя» (1859) майже одночасно із запровадженням поняття ентропії. У цій теорії еволюція була спрямована на виживання

найбільш пристосованих організмів і, отже, на ускладнення їхньої організації. Натомість у термодинаміці еволюція однозначно пов'язувалася з дезорганізацією систем, з їхнім кінцевим приходом до найбільш хаотичного стану. Ця суперечність залишалася нерозв'язаною аж до 1960-х років, коли з'явилися праці Іллі Пригожина, про які йтиметься далі.

Інтенсивні дискусії точаться аж до нашого часу і щодо термодинаміки цілого Всесвіту. Геніальний австрійський фізик Людвіг Больцман, який не прийняв ідеї «теплової смерті», сформулював у 1872 році флуктуаційну гіпотезу, відповідно до якої Всесвіт одвічно перебуває в рівноважному ізотермічному стані, але за законом випадку то в одному, то в іншому його місці інколи відбуваються відхилення від цього стану; вони відбуваються тим рідше, чим більшу область захоплюють і чим значнішим є ступінь відхилення. Тоді ж ідею «теплової смерті» піддав різкій критиці з філософських позицій Фрідріх Енгельс (1820–1895), а за ним її спростовували як «теологічну» і «реакційну» різні пізніші філософи-марксисты в колишньому СРСР і поза ним.

В XX столітті наукова критика ідеї «теплової смерті» замкнутого Всесвіту одержала продовження. Наприклад, основну мету підходу, заснованого на статистичній теорії нерівноважних процесів, І. Пригожин сформулював так: «...ми відходимо від ідеї замкнутого Всесвіту, щоб прийти до нового Всесвіту, відкритого до флуктуацій, здатного народжувати нове». Теорія І. Пригожина цілком по-новому ставить проблему законів і початкових умов у космології, знімає протистояння між динамікою і термодинамікою. З погляду цієї теорії виявляється, що Всесвіт може підпорядковуватися законам, асиметричним стосовно минулого і майбутнього — і це анітрохи не суперечить фундаментальності принципу зростання ентропії.

Дискусії на цю тему тривають і досі — а сама описувана система дуже ускладнилася, коли стала зрозумілою роль, яку відіграють у нашому Всесвіті «темна матерія» і «темна енергія». Розгляд цих надзвичайно цікавих дискусій виходить за межі нашої книги.

Повернувшись до ходу нашої розповіді, наголосимо: другий закон термодинаміки вже в другій половині XIX століття почали тлумачити як закон зростання ентропії для замкнутих систем. Тим самим було відкинуто можливість створення вічних двигунів другого роду, що здійснюють роботу тільки за рахунок циркуляції в них тепла. Закон зростання ентропії стверджував, що тепло не може циркулювати вічно. Машина здійснюватиме роботу, поки між нагрітим тілом (джерелом) і «холодним тілом» (холодильником) є різниця температур. Коли машина працює, різниця температур зменшується, і ефективність машини падає. Закон зростання ентропії «забороняє» теплу самотійно «перетікати у зворотний бік».

Перший і другий закони термодинаміки стали не лише фізичними, але і юридичними законами, оскільки на їхній основі в усіх патентних бюро світу було оголошено заборону на розгляд проєктів із винаходу вічних двигунів.

У кінетичній теорії газів ентропія набула нового значення, пов'язаного з імовірністю. Цей крок випало зробити Людвігу Больцману. Формула Больцмана, про яку ми поговоримо нижче, описує зв'язок між термодинамічною величиною (ентропією) та ймовірністю термодинамічного стану системи, яка обчислюється за статистичними законами.

Джеймс Клерк Максвелл (1831–1879)

Джеймс Максвелл народився в столиці незалежної колись Шотландії Единбурзі, в родині шотландського лендлорда. Його батько-адвокат цікавився багатьма речами: подорожував, займався спортом, майстрував, конструював машини, ставив фізичні досліди, захоплювався технікою, писав наукові статті.



Джеймс Клерк Максвелл

Джеймс Максвелл народився в період промислового розквіту Британії, коли винахідництво й наукові знання почали високо цінувати. Втім, у школі надзвичайно допитливому хлопчикові не сподобалося. Він часто отримував посередні оцінки, особливо з арифметики. Так було до зустрічі з геометрією, яка «розбудила» Джеймса. Він починає вчитися з небаченим захопленням і незабаром стає найкращим учнем.

Після школи Джеймс вступає в Единбурзький університет. Тут він швидко засвоїв усі програми й вирушив до Кембриджа, в Триніті-коледж, де колись учився Ньютон і де математику викладали на високому рівні. Однак до фізики в тодішньому Кембриджі ставилися прохолодно — вона здавалася вичерпаною. Попри те, Максвелл вирішив присвятити себе саме фізиці, й саме завдяки цьому увічнив своє ім'я (за репрезентативним опитуванням експертів, він був визнаний третім найвизначнішим фізиком усіх часів, поступившись тільки Ньютону та Айнштайну). Особливо значущими є заслуги Максвелла у створенні теорії електромагнітного поля, і тому основну частину розповіді про особистість цього визначного вченого ми відкладемо до наступної частини нашого посібника, присвяченої розвитку уявлень про електрику.

Але Максвелл зробив суттєвий внесок і в побудову молекулярно-кінетичної теорії. Він обґрунтував принципово новий підхід для розрахунку середніх величин, що характеризують стан газу. Замість нездійсненого завдання — розрахунку швидкості для кожної молекули — Максвелл запропонував розподіляти всі молекули «у групи» за швидкостями й енергіями й запропонував метод розрахунку кількості молекул у кожній такій групі. Зіткнення молекул приводять до зміни кількості молекул у групах, проте через велику кількість зіткнень середня кількість молекул у групі за певних стаціонарних умов залишається незмінною.

У 1859 р. Максвелл зробив доповідь на засіданні Британської асоціації вчених під назвою «Про динамічну теорію газів», де висловив своє головне й водночас дуже просте припущення: «молекули розподіляються за швидкостями за таким самим законом, як і похибки спостережень у теорії методу найменших квадратів», тобто відповідно до статистики Гаусса.

Сьогодні формулу для розподілу Максвелла ми записуємо так: кількість молекул, швидкості яких лежать в інтервалі між v і $v+dv$, залежить від кількості молекул в одиниці об'єму N/V , їхньої маси m й температури T :

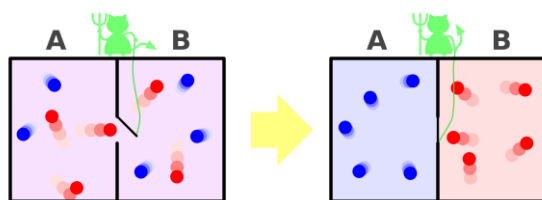
$$dn_v = \frac{N}{V} \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} e^{-mv^2/2kT} dv_x dv_y dv_z.$$

Звідси видно: шанси знайти молекулу з дуже великою швидкістю, що суттєво перевищує добуток сталої Больцмана k на температуру T , малі (сам Максвелл сталої Больцмана ще не знав, її запровадив Макс фон Планк уже після його смерті). Аналогічну формулу, але записану не через швидкості, а через імпульси, незалежно отримав Людвіг Больцман, тому нині часто говорять про «розподіл Максвелла–Больцмана».

Значення ідей Максвелла було надзвичайно велике. Розподіл молекул за швидкостями виявив відмінність між механікою окремих тіл і механікою сукупності молекул. Статистична механіка Максвелла дозволяла глибше бачити закономірності молекулярного руху. У теоретичні методи дослідження входила теорія ймовірностей.

У 1867 р. вчений звернув увагу на статистичну природу другого закону термодинаміки. Він пропонує уявний експеримент із так званим «демоном Максвелла». В його власному описі цей дослід виглядає так: «якщо ми припустимо існування істоти, відчуття якої настільки гострі, що вона здатна розрізняти кожную молекулу в себе на шляху, то така істота, розміри якої скінченні, як і наші, буде здатна зробити те, що є неможливим для нас. Ми вже бачили, що молекули в заповненій повітрям посудині, температура в якій скрізь однакова, рухаються із зовсім неоднаковими швидкостями, хоч середня швидкість будь-якої довільно обраної великої кількості їх майже ідеально однакова. А тепер припустимо, що таку посудину розділено на дві частини, А та В, і в перегородці є отвір, а істота, наділена здатністю розрізняти окремі молекули, може відкривати отвір і пропускати лише швидкі молекули з А в В, і лише повільні молекули з В в А. Вона зможе у

такий спосіб без витрати роботи підвищити температуру в В і знизити її в А, що суперечить другому закону термодинаміки».



«Демон Максвелла»

Відповідь на поставлене Максвеллом запитання дали у 1929 р. угорець Лео Сілард (1898–1964) і француз Леон Бріллюєн (1889–1969), які зробили великий внесок у розвиток уже квантової фізики. Відповідь полягає в тому, що реальний «демон Максвелла» потребуватиме якогось пристрою для визначення швидкості молекул (і для відкривання-закривання отвору теж!), і на це повинно бути витрачено певну енергію. Оскільки «демон» взаємодіє з газом, ми мусимо розглядати загальну ентропію системи «демон» + газ. І зниження ентропії газу виявиться меншим від підвищення ентропії «демона», зумовлене витраченою ним енергією.

Те, що відповідь прозвучала через 62 роки потому, як було сформульовано проблему, показує: нові методи не просто торували свій шлях у фізиці. Ідею задіяти теорію ймовірностей у фізиці більшість учених того часу не підтримали. Багато хто думав, що ймовірнісні методи, що допускають неоднозначність, узагалі не можна застосовувати в науці про явища природи. Світогляд більшості фізиків середини ХІХ століття цілком ґрунтувався на ньютонівській механіці, що дає строгі, цілком однозначні розв'язки. Розподіл Максвелла, що дає інше трактування фізичних явищ, потребував строгого теоретичного обґрунтування й експериментальної перевірки.

Перед теоретичною фізикою відкрилося поле діяльності зі створення фізично строгої кінетичної теорії газів. Саме в цій царині яскраво виявив свій талант австрійський фізик Людвіг Едуард Больцман.

Людвіг Больцман (1844–1906)

Народився Людвіг Больцман у Відні, столиці могутньої тоді Австрійської імперії (до складу якої входили й нинішні українські землі Галичини, Закарпаття та Буковини) в забезпеченій родині. Проте ще з дитинства на його долю випадають тяжкі випробування. Від хвороби вмирає брат Людвіга, потім — сестра. Коли Людвігу було 15 років, помирає його батько. Всі турботи лягли на матір, котра не жаліла ні сил, ні коштів для освіти сина.

Людвіг виправдав працю й надії матері. У нього була прекрасна пам'ять, він добре вчився. Міг напам'ять цитувати великі уривки з творів Гомера, Гете й особливо з неспокійного романтика Шіллера: «Я високо ціную твір Гете «Фауст», який, можливо, є найбільшим зі всіх витворів мистецтва; Шекспіра й інших я ціную за велич духу; але Шіллера — за щось інше. Тим, чим я став, я завдячую Шіллеру», — зізнавався сам Людвіг Больцман.



Людвіг Больцман

У Віденському університеті, студентом якого став дев'ятнадцятилітній Людвіг, його інтереси в основному зосереджувалися на поглибленому вивченні фізики й математики. В той час фізику в університеті викладали відомі вчені Йозеф Стефан (1835–1893) та Йоганн Йозеф Лошмідт (1821–1895). Нагадаймо, що до фундаментальної фізики увійшли «закон Стефана-Больцмана» та «число Лошмідта». Больцман зауважує загострене «почуття нового» в Стефана та «велич душі» в Лошмідта, під впливом яких і відбувалося його наукове становлення. Починаючи з 1865 року, наукові роботи Больцмана з кінетичної теорії газів, термодинаміки, теорії випромінювання, а також із деяких питань капілярних явищ, оптики, математики, механіки, теорії пружності тощо, що з'являлися одна за одною, були такими вагомими, що без них годі уявити розвиток фізики.

У родинному житті Больцман був щасливий. Одружився він зі студенткою математичного факультету, котра подарувала йому трьох дочок. Коло його інтересів було достатньо широке, і скрізь він перебував у центрі уваги. Зі своєю родиною він відвідував оперні й драматичні спектаклі, й у театрах йому відводили спеціальні місця.

Коли Рудольф Клаузіус, розвиваючи наукові ідеї Карно, запровадив поняття ентропії, він водночас приніс у фізику певну наукову таємницю, пов'язану з цим поняттям. Людвіг Больцман був першим, хто спробував підняти завісу над цією таємницею. Він запропонував формулу, що розкриває глибокий фізичний зміст ентропії на основі поняття ймовірності. Спробуємо простежити хід роздумів Больцмана. Для цього ми повинні почати від такого складного фізичного поняття, як температура.

Після робіт Томсона температура втратила однозначність. З одного боку, це була величина, що її можна точно визначити через відношення температур, одну з яких можна взяти за еталон. З другого боку, вона входила

в рівняння стану ідеального газу, й Клаузіус пояснив, чому добуток тиску газу на його об'єм пропорційний температурі.

З порівняння формули для тиску ідеального газу, виведеної Клаузіусом, і рівняння Менделєєва-Клапейрона було отримано просту формулу для середньої енергії однієї молекули, що має глибокий фізичний зміст:

$$E = \frac{3R}{2N_A} T.$$

Відношення газової сталої R до числа Авогадро N_A «батько квантової фізики» Макс фон Планк назвав сталою Больцмана $k = 1,380649 \times 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1}$. Стала Больцмана переводить градуси Кельвіна в джоулі, тобто встановлює відповідність між температурними й енергетичними одиницями. З вигляду формули можна зробити висновок про розподіл енергії за кожною з трьох декартових координат. На кожен просторовий напрям у середньому припадає енергія $kT/2$ на кожну молекулу. Це частковий випадок загального закону рівнорозподілу за енергіями.

Ця формула відразу ж дала змогу одержати вираз і для теплоємності ідеального газу за сталою об'єму:

$$C_v = \left. \frac{dQ}{dT} \right|_{V=\text{const}} = \frac{3N_0 k}{2} = \frac{3R}{2}.$$

Теплоємність одноатомного твердого тіла, описана експериментально встановленим на початку XIX ст. законом Дюлонга-Пті, вдвічі вища, оскільки атоми, коливаючись навколо точок рівноваги, мають не лише кінетичну, але й рівну їй середню потенціальну енергію. Квантова фізика пізніше показала, що пояснений Больцманом закон Дюлонга-Пті діє лише для досить високих температур, а за прямування температури до абсолютного нуля теплоємність теж прямує до нуля, — про це йтиметься в заключній частині нашої книги.

Задачу про те, скільки молекул має ту чи іншу енергію й від чого це залежить, розв'язав Максвелл. Водночас він показав: фізичні задачі про рух матеріальних точок можна розв'язувати не лише на основі законів Ньютона, але й на основі поняття ймовірності щодо систем із великою кількістю ступенів свободи. Саме ці системи «забувають» про своє минуле, й розподіл молекул за енергіями в кінцевому підсумку перетворюється на розподіл Максвелла-Больцмана. І для будь-якої температури цей розподіл строго визначений.

Глибше розуміння суті другого закону термодинаміки та проблеми «теплової смерті» Всесвіту поставало в міру повнішого осмислення поняття ентропії та теплоти й подальшого розвитку молекулярно-кінетичної теорії. Це — заслуга Людвіга Больцмана. У 1872–77 рр. він дійшов висновку: ентропія системи пропорційна логарифму термодинамічної ймовірності стану даної системи:

$$S = k \ln W.$$

Саму ймовірність розподілу N частинок за N_i можливих станів (Больцман ще не знав квантових станів, частинки в нього різнилися за координатою й імпульсом) учений визначав із формули перестановок:

$$W = N! \prod_i \frac{1}{N_i!}.$$

Це означає: наближення газу до стану з максимальною ентропією є ні що інше, як перехід у найбільш імовірний стан.

Ось висновок самого Больцмана: «другий закон термодинаміки виявляється, таким чином, імовірнісним законом. У більшості явищ природи, які охоплюють величезну кількість матеріальних точок, будь-яка зміна системи, що може статися сама собою (без компенсацій), є переходом від менш імовірного стану до більш імовірного». Це означає: за всіх спонтанних процесів ентропія зростає і прямує до максимального значення, оскільки термодинамічна ймовірність також прямує до максимального значення.

Закон Больцмана розкриває найглибший зміст поняття ентропії. Усі фізичні процеси протікають у напрямі поступового переходу від упорядкованого стану до неупорядкованого, від станів із меншою ймовірністю до станів із більшою ймовірністю. Макс фон Планк із цього приводу зазначив, що «принцип зростання ентропії як добре обґрунтований факт включається у фізичну картину світу».

Принцип зростання ентропії має такий самий загальний характер, як і закон збереження енергії. Проте як у фізичних мікросистемах втрачають сенс поняття температури й тиску, так само втрачає сенс й поняття ентропії. Водночас наші сучасні уявлення про прямування ентропії до максимального значення справедливі для обмежених систем. Існують серйозні сумніви в застосовності закону збільшення ентропії до мегасистем, наприклад, — до нескінченного Всесвіту. Сам Больцман був принциповим супротивником ідеї його «теплової смерті».

Світогляд фізиків XIX століття виховувався на строгих динамічних законах ньютонівської механіки, що приводять до однозначного результату. Цінність роботи Больцмана «Про відношення другого закону механічної теорії теплоти до обчислення ймовірності відповідно до теорем про теплову рівновагу» (1877) полягає в тому, що закон зростання ентропії перестав бути однозначним і став пов'язаний із ймовірністю.

Акцентуємо увагу на суттєвій відмінності між висновками, які ми отримуємо на основі однозначних динамічних законів і ймовірнісних статистичних. Перші — пов'язані зі збереженням (енергії, маси, імпульсу тощо), другі — з'являються тоді, коли йдеться про дослідження змін, і тут ми мусимо (скоряючись природі) звертатися до ймовірнісного опису. Процеси змін мають імовірнісний характер, а тому статистичні закони не дають однозначних передбачень, але набувають нової надзвичайної важливої якості: вказують на напрям перебігу процесів.

Учені далеко не відразу визнали об'єктивну необхідність існування статистичних законів. Вони вважали, що статистичні закони — це синтез окремих динамічних законів, які через безліч об'єктів не здатна охопити

наша свідомість. Більшість фізиків прагнули звести статистичні закони до динамічних і, таким чином, повернутися до строгої динамічної визначеності (пригадаймо слова Томсона-Кельвіна про те, що фізичну проблему вичерпує лише створення адекватної механічної моделі!). Ймовірність вони намагалися розглядати лише як міру нашого незнання дійсного стану речей.

Тепер уже очевидно, що означало б зведення статистичних закономірностей до динамічних. Строга однозначність і зумовленість тягне чітку й жорстку повторюваність, незмінність одних і тих самих видів руху, форм життя. Натомість випадковості, що мають місце в природі, забезпечують еволюцію, розвиток.

Больцман наполегливо й сміливо обстоював свою точку зору, б'ючись практично наодинці. Йому було 33 роки, коли він оприлюднив відкритий ним зв'язок між ентропією та ймовірністю, і майже всю решту життя йому довелося захищати, обстоювати й пояснювати результати своїх відкриттів. Больцман випередив свій час. Проте сам він із властивою йому скромністю писав, що «ніхто, звичайно, не буде вважати такі умоглядні висновки ні за важливі відкриття, ні тим паче — як це робили древні філософи — за вищу мету науки». Разом із тим, непохитна переконаність у власній правоті дозволяла йому вважати свої наукові результати «чарівністю фантазії про Всесвіт, що може не вдаватися до гіпотези про теплову смерть».

Ідеї Больцмана були такими незвичайними й новими, що полеміка навколо них тривала протягом багатьох років. Брили під сумнів і нещадно критикували й математичні методи його досліджень, і фізичний сенс, і — перш за все — атомістичну гіпотезу. Нині здається неймовірним, що навіть напередодні ХХ століття багато вчених скептично сприйняли визнання існування атомів. Навіть молодий Макс фон Планк у своїй дисертації 1879 р. стверджував, що атомістичні уявлення про природу матерії призводять до суперечностей.

А після лекції Больцмана з кінетичної теорії газів студенти переходили в іншу аудиторію Віденського університету, де в своїх лекціях професор Ернст Мах (1838–1916) категорично заперечував атомістику. Мах був переконаний: «вільний розум використовує тільки такі правила мислення, в яких узагальнено повсякденне тілесне сприйняття». Таким чином, він уважав, що цінність має лише те, що надається до безпосереднього спостереження. Коли в його присутності хто-небудь починав говорити про атоми, він завжди войовничо запитував: «А ви бачили цей атом?».

Ще навіть 1898 року Больцману довелося з боєм написати: «На мою думку, науці було б завдано великої шкоди, якби через панівні нині ворожі настрої теорію газів піддали б тимчасовому забуттю, як це сталося з хвильовою теорією світла через авторитет Ньютона».

Однак зусилля Больцмана не минулися марно. Його ідеї поступово здобувають дедалі більше визнання. На основі прямої «підказки» Больцмана 1900 р. Макс фон Планк заклав ідею квантованості випромінювання абсолютного чорного тіла, а 1905 р. Альберт Айнштейн на основі молекулярно-кінетичних уявлень створив теорію браунівського руху.

Статистичні ідеї Больцмана розвиває в красиву й струнку теорію американський фізик-теоретик Джозая Гіббс (1839–1903). Больцмана обирають своїм членом академії в Геттінгені, Берліні, Стокгольмі, Турині, Римі, Амстердамі, Петербурзі, Нью-Йорку, Лондоні, Парижі, Вашингтоні, його обирає почесним доктором університет в Оксфорді.

Больцман читав різноманітні курси в різних університетах. Серед них: аналітична механіка, теорія газів, теорія електрики й магнетизму, оптика, акустика, термодинаміка. Збереглися захоплені відгуки учнів про манеру та стиль його викладання. Лізе Майтнер (1878–1968), котра вславилася згодом роботами в галузі ядерної фізики, згадувала: Больцман «такою мірою сам надихався всім тим, чого нас навчав, що після кожної лекції ми виходили з аудиторії, відчувуючи, що нам відкрився новий і дивовижний світ».

Але здоров'я Больцмана різко погіршується. Тяжка форма астми завдає йому сильних страждань. Довгі роки жорстокої полеміки позначилися й на стані його нервової системи, він часто потерпає від депресії. Загальне визнання наукових заслуг прийшло до вченого за життя, але надто пізно. Його вже майже не тішить виданий на честь його 60-ліття ювілейний збірник, в укладанні якого взяли участь 117 найвідоміших науковців того часу. Під час відпочинку на Андріатиці 5 вересня 1906 року вчений наклав на себе руки.

Лише два роки не дожив Больцман до прямого експериментального підтвердження існування молекул — його зробив французький учений Перрен 1908 року. Після дослідів Перрена настає не просто загальне визнання, а тріумф атомно-молекулярного вчення, а праці Больцмана оголошено класичними.

Закінчімо словами Гендріка Антона Лоренца, які він виголосив на засіданні Німецького фізичного товариства, присвяченому пам'яті великого вченого (17 травня 1907 року): «Больцман був вождем нашої науки, новатором у багатьох напрямках, дослідником, що надовго залишив сліди своєї діяльності в тих царинах, до яких він звертався. У багатьох своїх працях він говорив із нами так, як, мабуть, рідко говорить фізик; він увесь свій спосіб мислення й сприйняття відкриває нам у словах, що роблять його ще ближчим до нашого серця. У фізичній картині, яку він намалював, не бракує суперечностей, які він не боїться висловити відкрито, інколи навіть різко; проте ми відчували, що вони зовсім не є непереможними, що всі вони коріняться в його внутрішній сутності й таким чином дають можливість глибше проникнути в ту царину його духовного світу, куди він дозволяє нам зазирнути».

І, нарешті, рішучому опоненту Больцмана Вільгельмові Оствальду (1853–1932) довелося визнати, що «Больцман — людина, яка у своїй галузі перевершила всіх нас проникливістю та ясністю розуму». Після Людвіга Больцмана у фізиці почала «обживатися» закономірність випадкового. А це вимагало нового стилю мислення.

З роками усвідомлення вагомості вкладу вченого в розвиток науки тільки зростало. У центрі Відня підноситься біломармуровий бюст

Больцмана, на постаменті якого викарбовано формулу, що є найвищим творчим досягненням ученого: $S = k \ln W$.

**Альберт Айнштайн
(1879–1955)**

2005 року людство за рішенням ЮНЕСКО відзначало Рік фізики. Його було приурочено до сторіччя від дня публікації п'ятих статей Альберта Айнштайна в журналі «Annalen der Physik» (найкращий на той час журнал з фізики, що виходив невеликими жовтими книжечками раз на місяць). Ці статті, присвячені новому визначенню розмірів молекул, броунівському рухові, поясненню «червоної межі фотоефекту», спеціальній теорії відносності та (остання з п'яти, зовсім маленька, але дуже елегантна стаття) формулі $E = mc^2$, поклали початок великим розділам сучасної фізики. Тому внесок Айнштайна в розвиток науки й — ширше — людської цивілізації, без перебільшення, унікальний. І нам доведеться ще не раз повертатися до його постаті в наступних частинах нашого посібника.

Учений прожив велике й складне життя. Його дитинство проминуло в Німеччині «залізного канцлера» Бісмарка. Він пережив дві світові війни, фашизм, кризу класичної фізики — й став одним із фундаторів нової.

Альберт Айнштайн народився в старовинному місті Ульмі в родині дрібного підприємця, котрий насилу зводив кінці з кінцями. Він ріс тихою дитиною з повільною мовою — і це дратувало вчителів. П'ятирічний Альберт уперше побачив магнітний компас — і сповнився подивом й бажанням зрозуміти «поведінку» стрілки. Коли він дванадцятирічним хлопцем уперше розгорнув «Елементи» славетного грека Евкліда, то відчув такий самий захоплений подив і прагнення досягнути побачене.



Альберт Айнштайн у віці 14 років

У пошуках заробітку батьки міняють міста: Ульм — Мюнхен — Мілан — Цюрих... Альберт Айнштайн закінчив лише шість класів гімназії (хлопця просто попросили піти за надто незалежну й гостру вдачу) і в Мілані вчився самотужки. Маючи шістнадцять, він вирішує вступити на навчання у Вище технічне училище Цюриха (коротка назва — політехнікум). Знання Альберта з історико-філологічних дисциплін були далеко не найкращими, а іспити з ботаніки та французької мови він просто провалив. Проте директор політехнікуму зумів усе-таки вгледіти в цьому самоукові «іскру Божу» й порадив спершу податися в останній клас школи, щоб отримати атестат зрілості. Проникливий директор свою пораду підкріпив підбадьорливими словами: «Не переживайте — Джузеппе Верді теж не відразу прийняли в Міланську консерваторію. У вас велике майбутнє, я в цьому впевнений».

За рік Альберт Айнштайн успішно отримав атестат у кантональній школі в Аарау (неподоланою лишилася тільки французька мова), вступив-таки в політехнікум на вчительський факультет і, вирішивши стати викладачем фізики, почав старанно працювати у фізичній лабораторії. У студентські роки Айнштайн виявляє підвищену цікавість до теоретичної фізики, але цікавиться також геологією, історією культури, економікою, літературознавством. Разом із тим, на лекції (навіть такого корифея, як Герман Мінковський) він ходить нерегулярно, натомість інтенсивно вивчає наукові праці Гельмгольца, Герца, Дарвіна.

1900 року Альберт Айнштайн отримав диплом учителя фізики й математики, але тривалий час не міг знайти постійної роботи, лише тимчасово замінюючи на уроках інших учителів. Матеріальне становище Айнштайна було кепське, і якимось він сказав, що на шматок хліба йому скоро доведеться заробляти, граючи на скрипці для перехожих.

Влітку 1902 року, завдяки рекомендації друга, Альберта Айнштайна прийняли на роботу у федеральне бюро патентів у Берні на посаду експерта третього класу. Необтяжлива робота в патентному бюро сприяла тому, що саме в ці роки (1902–1909) Айнштайн значно виріс як науковець і став видатним фізиком-теоретиком, попри те, що, за його власними спогадами, жодного справжнього фізика він наживо не бачив до 30 років.

Правда, спілкування з маститими фізиками в ті роки заміняв Айнштайнові гурток друзів. Молоді люди збиралися найчастіше втріох — Айнштайн, Габіхт і Соловін, вечеряли разом, читали фізиків і філософів (Спінозу, Канта, Юма), або ж романи чи вірші, слухали гру Альберта на скрипці. Найчастіше Айнштайн виконував Баха, Гайдна, Шуберта й Моцарта. А напередодні вихідних друзі влаштовували нічні прогулянки в гори.



Мільова Маріч та Альберт Айнштайн, 1907

На початку 1903 р. 23-річний Айнштайн одружився з 27-річною Мільовою Маріч, яка була дипломованим математиком. Їхній шлюб був насамперед інтелектуальним союзом, і сам Альберт Айнштайн називав свою дружину «творінням, рівним мені, настільки ж сильним і незалежним, як і я сам». Між подружжям завжди існувала певна віддаленість, бо великий учений часто усамітнювався, працюючи над науковими проблемами. У 1914 р. Мільова та Альберт роз'їхалися, а в 1919 р. оформили своє розлучення.

1905 року Альберт Айнштайн запропонував журналу «Аннали фізики» свої статті, одну з яких було присвячено питанням статистичної механіки та молекулярної теорії теплоти. Майже відразу ці статті було надруковано. За висловом визначного французького фізика Луї де Бройля, ці теоретичні дослідження були немов сліпучі ракети, що освітили безмісячні ночі. Про спеціальну теорію відносності ми ще говоритимемо в розділі, присвяченому електродинаміці, а про роботи з фотоефекту — в частині, присвяченій квантовій фізиці.

Там-таки ми поговоримо й про життя Айнштайна потому, як 1909 року він нарешті перебрався з патентного бюро на посаду екстраординарного професора Цюріхського університету.

А в цьому розділі для нас важливо те, що Альберт Айнштайн з позицій молекулярної кінетичної теорії пояснив браунівський рух частинок, і це саме незалежно від нього зробив польський фізик, львів'янин за місцем появи основних своїх праць, Маріан Смолуховський. Його праці побачили світ за кілька місяців після виходу 18 липня 1905 р. статті Айнштайна «Про рух маленьких частинок, завислих у стаціонарній рідині, з погляду вимог молекулярно-кінетичної теорії тепла».

У своїй статті Айнштайн промодельював рух частинки під впливом ударів окремих молекул води. Стаття складається з двох частин: у першій автор формулює рівняння дифузії для браунівських частинок, де коефіцієнт дифузії виявляється пов'язаним із середньоквадратичним відхиленням браунівської частинки, а в другій показав, яким чином цей коефіцієнт дифузії можна оцінити за вимірюваними фізичними характеристиками. У такий спосіб удалося визначити розмір молекул та кількість молекул в одному молі рідини.

Спочатку Айнштайн поставив перед собою питання: як далеко здатна зсунутися браунівська частинка протягом визначеного інтервалу часу? Традиційна ньютонівська механіка нездатна відповісти на нього, оскільки

браунівська частинка зазнає протягом секунди порядку 10^{14} зіткнень. Тому Айнштейн перейшов до колективного опису частинок і показав, що еволюція густини ρ браунівських частинок у точці x з часом t описується рівнянням дифузії з коефіцієнтом дифузії D :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2}.$$

Якщо в момент часу $t = 0$ кількість частинок у точці $x = 0$ становила N , розв'язок рівняння можна записати як:

$$\rho(x, t) = \frac{N}{\sqrt{4\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right).$$

А це означає, що середньоквадратичне відхилення частинки в момент часу t дорівнює:

$$\bar{x}^2 = 2Dt.$$

Ще класик гідродинаміки сер Джордж Стокс (1819 — 1903) показав, що кулька з радіусом r і з масою m опускається у в'язкій рідині зі сталою швидкістю $v = g\mu$, де g — прискорення вільного падіння, а рухливість μ пов'язана з в'язкістю η співвідношенням:

$$\mu = \frac{1}{6\pi\eta r}.$$

Коли браунівські частинки під дією сили тяжіння опускаються вниз, це призводить, врешті-решт, до встановлення барометричного розподілу їхньої густини з висотою h :

$$\rho = \rho_0 \exp\left(-\frac{mgh}{kT}\right).$$

Динамічна рівновага, описувана таким розподілом, утворюється тому, що з появою градієнта концентрацій браунівських частинок з'являється й «компенсаційний» потік угору, описуваний законом Фіка:

$$J = \rho v = -D \frac{d\rho}{dh}.$$

Звідси можна, з урахуванням виразу для барометричного розподілу, отримати зв'язок швидкості частинки (у цьому випадку — угору) з коефіцієнтом дифузії:

$$v = \frac{Dmg}{kT}.$$

У стані динамічної рівноваги ця швидкість угору і швидкість униз $v = g\mu$ за модулем рівні. Звідси коефіцієнт дифузії можна виразити, з одного боку, через експериментально виміряне середньоквадратичне відхилення, а з другого, — через рухливість μ , яка у свою чергу залежить від розміру r браунівських частинок і в'язкості η рідини. Прирівняння цих виразів з урахуванням відомої газової сталої R дає змогу визначити й число Авогадро N_A :

$$\frac{\bar{x}^2}{2t} = D = \mu kT = \frac{\mu RT}{N_A} = \frac{RT}{6\pi\eta r N_A}.$$

Таким чином, Айнштайн своєю статтею відкрив шлях для майбутнього остаточного підтвердження молекулярно-кінетичної теорії.

Маріан Смолуховський (1872–1917)

Маріан Смолуховський — польський фізик; він навчався у Віденському університеті, вдосконалював свої знання в кількох фізичних лабораторіях, зокрема й у лабораторії Вільяма Томсона (лорда Кельвіна). Протягом чотирнадцяти років (1898–1913) викладав фізику в Львівському університеті, де кафедру української історії тоді ж очолював Михайло Грушевський (отже, вчені не могли не зустрічатися в його стінах). Ученем Маріана Смолуховського був, зокрема, один із перших українських фізиків-теоретиків, що працювали в царині квантової фізики, дійсний член Наукового товариства імені Шевченка у Львові Володимир Кучер (1885–1959).



Маріан Смолуховський

В останні роки життя Смолуховський працював професором Ягеллонського університету в Кракові, був його ректором. Лише року не дожив учений до відродження рідної Польщі, яку ще 1795 року було поділено між трьома загарбниками — Австрією, Прусією і Росією. Він, прекрасний альпініст, помер молодим від пошесті дизентерії, яка лютувала в час Першої світової війни.

Основні дослідження Маріана Смолуховського присвячені молекулярній фізиці, термодинаміці, статистичній механіці, зокрема кінетичній теорії газів і рідин, теорії браунівського руху, молекулярній статистиці. Теоретичні дослідження Смолуховського з браунівського руху та з питань про межі застосовності другого закону термодинаміки обґрунтовували й розвивали ідеї Людвіга Больцмана. Смолуховський у 1905–1906 роках незалежно від Альберта Айнштайна створив теорію браунівського руху, яка довела справедливості кінетичної теорії теплоти й сприяла її остаточному утвердженню.

Про ці роботи Альберт Ейнштейн писав: «Смолуховський створив особливо витончену й наочну теорію браунівського руху, спираючись на кінетичний закон рівномірного розподілу енергії. Виходячи з цього закону, частинка з діаметром 1 мкм (за густини води) має рухатися з миттєвою швидкістю в середньому близько 3 мм/сек. Смолуховський показав, що внутрішнє тертя постійно зводить цю швидкість нанівець, а неупорядковані зіткнення відновлюють її, — і таким чином йому вдалося дати кількісне пояснення явища.

Пізнання сутності браунівського руху привело до раптового зникнення будь-яких сумнівів у вірогідності бальцманівського розуміння термодинамічних законів. Стало зрозуміло, що термодинамічної рівноваги в точному сенсі слова взагалі не існує, що радше кожна полишена на саму себе система здійснює неупорядковані коливання навколо стану ідеальної термодинамічної рівноваги».

Крім того, Смолуховський запропонував власне формулювання другого закону термодинаміки: «Неможливо реалізувати жодного автоматичного пристрою, який би тривалий час продукував корисну роботу за рахунок теплоти більш низької температури». Учений був переконаний: «усі явища, які здаються необоротними, насправді є оборотними. Для цього не потрібен жоден спеціальний пристрій, треба лиш тільки зачекати, поки це станеться саме собою відповідно до законів випадку, тобто поки не настане порівняно велике відхилення від нормального стану. Будь-якого стану з часом буде досягнуто, хоч би яким «неймовірним» він був, і буде отримано будь-яке значення роботи A за рахунок навколишньої теплоти. І тільки у випадку, коли ми значно виходимо з області середньої флуктуації, час T , в середньому необхідний для цього, так сильно зростає, що межа відношення A/T дорівнюватиме нулю, тобто

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{A}{T} = 0.$$

Таким самим чином у чесній азартній грі можна виграти будь-яку бажану суму, якщо тільки гра триватиме достатньо довго, тобто якщо ми матимемо в розпорядженні достатньо часу й капіталу, щоб не довелося дочасно припинити гру. Однак, незважаючи на це, така гра не може бути постійним джерелом заробітку, оскільки час, необхідний для виграшу певної суми, зростає в квадратичному відношенні щодо її величини».

У випадку з браунівським рухом флуктуації дуже малі й спостерігати їх складно. Однак 1908 року Смолуховський окреслив іншу групу спостережуваних явищ, у яких флуктуації виявляються безпосередньо. Це — критична опалесценція газів і рідин. У своїй теорії Смолуховський показав, що чим більша стисливість речовини або її окремої складової, тим більшими є неперервні просторово-часові флуктуації, яких зазнає речовина внаслідок хаотичного теплового руху. Такі флуктуації на всіх оптичних довжинах хвилі поблизу критичної точки й призводять до оптичного помутніння речовини.

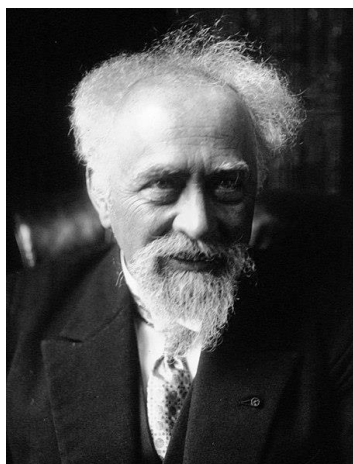
Свою статтю-спогад, написану по смерті польського вченого, Альберт Ейнштейн закінчує так: «Кожен, хто близько знав Смолуховського, любив у

ньому не лише глибокого вченого, але й шляхетну, тонку й доброзичливу людину. Світова катастрофа останніх років збудила в ньому почуття невимовного болю за людську жорстокість і за втрати, завдані нашому культурному розвитку».

Значення робіт Айнштейна й Смолуховського з теорії браунівського руху — величезне. Проте насправді больцманівська кінетична теорія остаточно й безповоротно утвердилася в умах учених тільки після експериментального підтвердження передбачень цих робіт, що його здійснив французький учений Жан Перрен.

Жан Перрен **(1870–1942)**

Жан Батіст Перрен — французький фізик і фізико-хімік, з 1936 року був президентом Паризької Академії наук. 1908 року він здійснив цикл експериментальних досліджень браунівського руху, що підтвердили молекулярно-статистичну теорію Айнштейна-Смолуховського й остаточно переконали в тому, що браунівський рух є наслідком теплового руху молекул середовища, а отже — переконали в реальності самих молекул. Це означає, що тільки 1908 року молекулярна гіпотеза стала вірогідним науковим фактом.

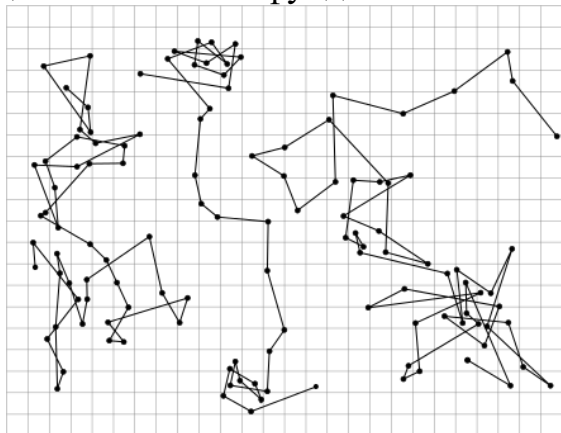


Жан Перрен

Досліди Перрена переконливо засвідчили, що середній квадрат зсуву браунівської частинки прямо пропорційний абсолютній температурі газу або рідини та часові, за який відбувається цей зсув.

За нормальних умов молекула газу долає за одну секунду шлях, довжина якого приблизно 500 м, але через хаотичні зміни напрямку руху внаслідок великої кількості зіткнень з іншими молекулами вона зміщується від свого початкового положення в середньому лише приблизно на 0,5 см. Спостереження за допомогою мікроскопа за зсувами браунівських частинок з радіусом 0,53 мкм (мінімальним радіусом, який можна спостерігати в оптичний мікроскоп), вимірювання цих зсувів та зіставлення з теоретичними

результатами й виконав Жан Перрен. Праця вченого справді титанічна, а досліді його визнано фундаментальними.



Сторінка з лабораторного зошита Перрена: траєкторії трьох браунівських частинок. Крапками позначено їхнє розташування через кожні 30 с. Відстань між лініями розмітки — 3,2 мкм

Після цих дослідів ніхто вже не сумнівався в реальності молекул. Один із найпринциповіших опонентів атомізму, німецький фізико-хімік та філософ Вільгельм Оствальд мав мужність визнати: «Я переконався, що ми нещодавно отримали експериментальний доказ переривчастої, або зернистої структури речовини, якого атомістична гіпотеза марно шукала впродовж століть і навіть тисячоліть. Ідентифікація та підрахунок кількості іонів у газах, увінчані цілковитим успіхом тривалі й чудові роботи Дж. Дж. Томсона (про них ми говоритимемо в наступній частині посібника, — МС), а також збіг законів браунівського руху з вимогами кінетичної теорії, що його виявили низка дослідників, і найповніше Ж. Перрен, дають право говорити про експериментальне доведення атомістичної будови речовин, які заповнюють простір».

1926 року за ці роботи Перрена було вдостоєно Нобелівської премії з фізики з формулюванням: «за відкриття дискретної структури матерії».

Окрім цього, Перрен вивчав розподіл браунівських частинок у полі земного тяжіння. У цих дослідях було встановлено, що розподіл частинок по висоті повністю узгоджується з теоретично отриманою барометричною формулою. На підставі всіх дослідів Перрена було визначено сталу Авогадро (1909), значення якої збігалось зі значеннями, отриманими раніше іншими методами.

Ще на початку своєї наукової кар'єри, 1895 року, вчений показав, що катодні промені мають корпускулярну природу. Отже, Перрен був дуже близький до відкриття електрона, яке здійснив два роки потому англієць Дж. Дж. Томпсон. А 1908 року Перрен запропонував планетарну модель атома — за три роки до оприлюднення результатів дослідів Резерфорда. Тоді цей геніальний здогад проігнорували — через його суперечність із класичною електродинамікою...

Жан Перрен був визначним організатором науки. Саме йому належить ідея створення Національного центру наукових досліджень (CNRS) —

головної наукової установи сьогодношньої Франції. У 1937 році він став ініціатором створення Палацу відкриттів, що популяризував наукові досягнення для молоді, а в 1938 році очолив Французьку Академію наук.

1940 року, після того як Францію окупували нацисти, вчений виїхав до США, де й прожив решту життя. 1948 року його прах повернули на батьківщину й поховали в паризькому Пантеоні — поруч із іншими видатними французами.

Розвиток уявлень про ентропію

Упродовж наступних десятиліть було запропоновано багато формулювань поняття ентропії:

Ентропія — це особлива функція стану термодинамічної системи. Ентропія ізольованої системи може тільки зростати (якщо в системі відбувається необоротний процес), або залишатися сталою (якщо в системі протікає оборотний процес).

Ентропія — це міра, ступінь невизначеності (хаотичності) ймовірнісних (стохастичних) систем і процесів.

Ентропія — фізична величина, зміну якої в замкнутій системі можна розглядати як міру необоротності процесу, що в ній відбувається.

Ентропія — міра безладу в системі.

Ентропія — ця така функція стану, яка за квазістатичних адіабатних ідеалізованих процесів не змінює свого значення.

Усі ці визначення правильні, але сьогодні саме поняття ентропії пов'язують уже не лише з хаотичним рухом молекул газу. Це поняття застосовують і до мутації генів, що породжують новий біологічний вид, і до творчого пошуку методом проб і помилок, і шумових сигналів, що їх спеціально «підмішують» в евристичні програми комп'ютерів. Якщо ці процеси позбавити (якимсь гіпотетичним чином) ентропії, що є їхньою складовою, то вони не породять нічого несподіваного, нічого нового. Цей висновок можна поширити на всі процеси розвитку, що відбуваються в навоколишньому світі.

Якби світ удалося позбавити від усіляких випадковостей (від ентропійності), то він перетворився б на «механізм», приречений на повторення одних і тих самих рухів, і кожен день життя був би точною копією, точним повторенням попереднього дня. Від цієї сумної долі рятує нас ентропія. Повторюваність пов'язана з закономірністю, з інформацією про минуле, тобто — з пам'яттю. Зміна, розвиток, оновлення пов'язані з випадковістю, із закономірністю випадкового, з ентропією.

Цей взаємозв'язок між інформацією та ентропією вперше виявив американський науковець, фахівець з теорії інформації Клод Шеннон (1916–2001). Він у статті «Математична теорія інформації» (1948) запропонував використовувати для кількісного вимірювання інформації логарифмічну формулу, аналогічну формулі взаємозв'язку ентропії з імовірністю, яку ввів у

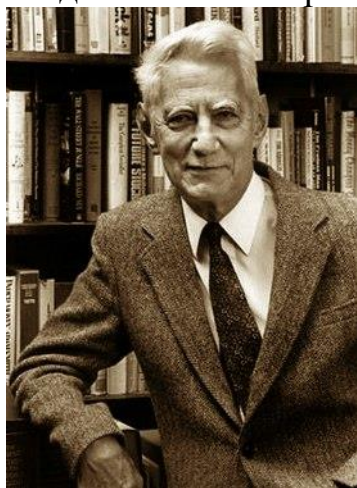
науку Людвіг Больцман. Для Шеннона ентропія була еквівалентна невизначеності в повідомленні, що передається.

Базова модель системи передавання даних складається з трьох елементів: джерела даних, каналу зв'язку та приймача, і, за висловом Шеннона, «фундаментальним завданням зв'язку» є те, щоби отримувач був здатен установлювати, які саме дані було породжено джерелом, на основі сигналу, що він отримує каналом. Ентропія забезпечує абсолютну межу найкоротшої можливої усередненої довжини безвтратного стиснювального кодування даних, продуктованих джерелом, і якщо ентропія джерела є меншою за пропускну спроможність каналу зв'язку, то дані, породжувані цим джерелом, можна надійно передавати приймачеві.

Інформаційну ентропію зазвичай вимірюють у бітах (що також називають «шеннонами») або іноді в «натуральних одиницях» (натах), або в десяткових цифрах (що називають «дитами», «банами» або «гартлі»). Одиниця вимірювання залежить від основи логарифма, що використовують для визначення ентропії.

Роботи Шеннона стали основоположними для інформатики та криптографії. Невдовзі формула Шеннона почала з'являтися не лише в технічних і математичних журналах, але і в працях біологів, психологів, лінгвістів, фізиків, мистецтвознавців, геологів, філософів.

Близько сотні років ентропію (невизначеність) вважали за якийсь фатум, причину майбутньої неминучої теплової смерті Всесвіту. Проте вона увесь цей час (як і до того, і потому) провадила свою творчу роботу з оновлення й омолодження всього світу — і людини зокрема. Розуміння «творчої діяльності» ентропії стало можливим завдяки роботам Шеннона.



Клод Шеннон

У 1961 р. американський фізик Рольф Ландауер (1927–1999) довів, що, виходячи з принципу невизначеностей, стирання або записування одного біта інформації потребує мінімальної енергії $kT \ln 2$ (цю ж саму величину можна одержати, і просто розглядаючи мінімальну величину потенціального бар'єра в каналі польового транзистора, що є основним пристроєм сучасної електроніки). Французький фізик Леон Бріллюєн (1889–1969), який, як і Ландауер, по Другій світовій війні працював у США, показав, що кількість

накопиченої інформації, яка зберігається в структурі систем, точно дорівнює зменшенню їхньої ентропії. Таким чином, ідеться про двоєдині інформаційно-ентропійні процеси, в яких за репродукцію, повторюваність «відповідає» інформація, а за творче оновлення — ентропія.

Для нормального функціонування в будь-якій системі (зокрема й суспільній) мусить мати місце певне оптимальне співвідношення між інформацією та ентропією, між закономірністю та випадковістю. Дотримуючись закону цього співвідношення на всіх рівнях організації, природа поширила цей самий закон і на людину.

Сьогодні серед учених усталився погляд: якби в світі «панувала» лише ентропія, то ми неминуче прийшли б до «теплової смерті». Проте якщо «віддати владу» тільки й виключно інформації, повністю підпорядкуватися однозначним закономірностям — нас неминуче спіткає тепер уже «механічна смерть».

Спільність законів розвитку матеріального світу, що діють у царині органічної й неорганічної природи, отримує нове підтвердження в дослідженнях ентропійно-інформаційних співвідношень на всіх структурних рівнях організації систем, починаючи від взаємодії елементарних частинок, атомів і молекул, — і закінчуючи утворенням складних біологічних, інтелектуальних та комп'ютерних систем.

Сучасна наука знаходить нові й нові підтвердження тому, що випадковості неминучі, що всі явища у світі за суттю своєю ймовірнісні та що їхній статистичний опис відповідає ймовірнісній природі, і ніякими іншими методами дослідити й описати їх неможливо.

Ентропія необхідна природі, але якщо її «передозувати», вона почне нищити той лад, який мільярди років накопичував і зберігав наш світ. Щоб «приборкати» ентропію, природа «навчилася» накопичувати інформацію, виробляти правила формування структур різноманітних систем.

Таким чином, в основі формування й існування всіх самоорганізованих систем (байдуже, людина то чи кристалічна речовина, соціальна група чи популяція тварин) лежать єдині інформаційно-ентропійні принципи, що відповідають на всі «що?», «як?» і «чому?». Досягнута світом гармонія зберігається в накопиченій ним інформації, а за вічну молодість, мінливість, непередбачуваність нашого світу ми маємо бути вдячні ентропії.

Значний внесок у розвиток сучасних уявлень про ентропію зробив Ілля Пригожин (1917–2003). Цей видатний фізик і фізико-хімік сучасності народився в Москві в єврейській родині, яка емігрувала через Литву до Бельгії після більшовицького перевороту. Основні роботи й наукові досягнення Пригожина лежать у царині нерівноважної термодинаміки й фізичної хімії. Пригожин зробив суттєвий внесок у феноменологічну теорію й термодинаміку нелінійних необоротних процесів. Він уперше 1947 року запровадив поняття вироблення ентропії та потоку ентропії, дав локальне формулювання другого закону термодинаміки й запропонував принцип локальної рівноваги. Згідно з цим принципом, у нерівноважній системі можуть існувати області, які перебувають у квазірівноважному стані.



Ілля Пригожин

Ілля Пригожин показав, що в стаціонарному стані за фіксованих зовнішніх параметрів швидкість вироблення ентропії в термодинамічній системі мінімальна і вироблення ентропії для необоротних процесів у відкритій системі прямує до мінімуму. Цей висновок надзвичайно важливий для біології — бо розв'язує виявлену ще в середині XIX ст. суперечність між принципом зростання ентропії та еволюцією біологічних систем, що призводить до їхнього ускладнення. За роботи з термодинаміки необоротних процесів і їхнє використання в хімії та біології ученого вшановано 1977 р. Нобелівською премією. За свій внесок у науку Пригожин отримав у 1989 р. аристократичний титул віконта від бельгійського короля.

Наукова проблема співвідношення порядку і хаосу залишається і в наш час надзвичайно актуальною. Фундаментальний закон зростання ентропії описує світ, що еволюціонує від порядку до хаосу. Проте біологічна й соціальна еволюції переконливо свідчать про те, що складне виникає з простого (порядок структурується з хаосу). Ілля Пригожин установив, що нерівноважність може бути джерелом порядку. Наукові ідеї Пригожина зачіпають проблеми багатьох наук — і природничих, і гуманітарних.

Фундаментальні фізичні поняття та принципи стають міждисциплінарними, загальнонауковими, а тому й загальнозначущими. Нині стало можливим досліджувати процеси народження структур із хаосу, а це означає, що ентропія в таких випадках прямує до мінімуму. Водночас слід наголосити: маємо нову поведінку ентропії в специфічних системах, а не нове поняття ентропії.

Теплові явища: резюме

1. Ідеальний газ, що складається з N твердих маленьких кульок із масою m кожна, вміщений у посудину з об'ємом V , чинить на стінки тиск P , який можна знайти зі співвідношення:

$$PV = \frac{Nm \langle v^2 \rangle}{3}.$$

Тут дужки $\langle \dots \rangle$ символізують середнє значення величини за всім ансамблем частинок.

Кінетична теорія дає таке визначення абсолютної температури ідеального газу:

$$T \equiv \left(\frac{2}{3k} \right) \cdot \left(\frac{m \langle v^2 \rangle}{2} \right).$$

Тут k — стала Больцмана. Із цих двох рівнянь отримуємо рівняння стану ідеального газу (рівняння Менделєєва — Клапейрона):

$$PV = NkT.$$

Температуру можна вимірювати висотою стовпа ідеального газу за сталого тиску або ж тиском за сталого об'єму ідеального газу.

Першу з наведених вище формул незалежно один від одного вивели троє вчених: швейцарець Даниїл Бернуллі (1738), шотландець Джон Вотерсон (1843) і німець Рудольф Клаузіус (1857). Але тільки після появи роботи Клаузіуса формулу було нарешті «помічено» і вона набула «прав громадянства» в науці. Друга й третя формули стали наслідком експериментального відкриття трьох газових законів (Бойля–Маріотта, 1662 р., Шарля, 1787 р., Гей–Люссака, 1802 р.); формулювання Амедео Авогадро своєї гіпотези про рівну кількість молекул у рівних об'ємах двох газів (1811), узагальнення газових законів Бенуа Клапейроном (1834) та перезапису його формули Дмитром Менделєєвим з урахуванням гіпотези Авогадро. Цей запис формул набув сучасного вигляду після запровадження Максом фон Планком сталої Больцмана (1901).

2. Температури двох тіл, що достатньо довго контактують одне з одним, однакові («нульовий» закон термодинаміки). У стані теплової рівноваги на один степінь вільності припадає та сама кількість енергії.

На інтуїтивному рівні факт вирівнювання температур при контакті був відомий здавна. Вважати його «нульовим» законом термодинаміки запропонували у 1930-і рр. кілька вчених, серед них англійський фізик Ральф Фаулер (1889–1944).

3. Перший закон термодинаміки — спеціальний випадок закону збереження енергії:

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta W.$$

Тобто, тепло, яке надходить у систему, витрачається на збільшення внутрішньої енергії системи й на роботу, яку здійснює ця система. Для газу, який приводить у рух поршень,

$$dW = PdV.$$

Перший закон термодинаміки було сформульовано на основі робіт Роберта фон Маєра, який розповсюдив закон збереження механічної енергії на термічні явища (1842), а потім — на всі немеханічні явища взагалі (1845); Джеймса Джоуля, який експериментально вивчав перетворення механічної енергії на теплову і визначив механічний еквівалент тепла (1843); Германа фон Гельмгольца (1847), який незалежно від фон Маєра розповсюдив закон збереження енергії на всі види явищ. Поняття внутрішньої енергії

термодинамічної системи запровадив Вільям Томсон (у майбутньому — лорд Кельвін, 1851). Уперше формулювання першого закону термодинаміки для циклічних термодинамічних процесів дав Рудольф Клаузіус (1850). Формула для роботи газу, що приводить у рух поршень, є прямим наслідком визначення роботи як сили, помноженої на переміщення, яке запровадили в механіку Гюстав Коріоліс (1826) і Жан Понселе (1829).

4. Один моль будь-якої хімічної речовини (молекулярна маса, виражена в грамах) містить $N = 6,02214076 \times 10^{23}$ молекул (число Авогадро).

Гіпотезу про те, що однакові об'єми двох різних газів за однакової температури й тиску містять однакове число молекул, сформулював Амедео Авогадро (1811). Значення числа Авогадро як кількості молекул в одному молі газу вперше оцінив Йоганн Йозеф Лошмідт (1865). Пізніше воно уточнювалося багато разів різними методами, зокрема в експериментах Жана Перрена (1908). Значення числа Авогадро, записане вище, визначено на 26-й Генеральній конференції з мір та ваг у листопаді 2018 р. як число атомів у 12 г ізотопу вуглецю C^{12} .

5. Для будь-якого ідеального одноатомного газу теплоємність за сталого об'єму дорівнює:

$$C_v = \left. \frac{dQ}{dT} \right|_{V=\text{const}} = \frac{3N_o k}{2} = \frac{3R}{2}.$$

Це є прямим результатом справедливості молекулярно-кінетичної теорії та рівномірного розподілу енергії за степенями вільності. Наведений вище вираз став очевидним після появи робіт Людвіга Больцмана наприкінці 1860-х. Теплоємність одноатомного твердого тіла, описана законом Дюлонга–Пті, вдвічі вища, оскільки атоми, коливаючись навколо точок рівноваги, мають не лише кінетичну, але й рівну їй середню потенціальну енергію. Квантова фізика (Альберт Айнштайн, 1907; Петер Дебай, 1912) показала, що закон Дюлонга–Пті діє лише для досить високих температур, при прямуванні температури до абсолютного нуля теплоємність теж прямує до нуля.

6. Машина Карно працює з двома тепловими резервуарами: нагрівачем із температурою T_1 та холодильником із температурою T_2 . За роботи в прямому напрямку за один цикл вона відбирає тепло Q_1 від нагрівача й передає тепло Q_2 холодильнику. Під час цього здійснюється робота $W = Q_1 - Q_2$.

Коефіцієнт корисної дії (ККД) ідеальної теплової машини становить:

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

Крім того, має місце співвідношення:

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{Q_2}{Q_1}.$$

Це співвідношення можна покласти в основу методу вимірювання температур (термодинамічна шкала температур).

Таку теплову машину описав (з мінімальним використанням формул) Саді Карно (1824). Математичний апарат для опису машини Карно застосував Бенуа Клапейрон (1834).

7. Другий закон термодинаміки можна вивести, застосовуючи методи математичної статистики до рівнянь класичної механіки. Результат полягає в тому, що тепло не може саме собою переходити від холодного тіла до гарячого. Еквівалентне твердження: жодна теплова машина не може мати ККД вищий, ніж у машини Карно. Ще одне еквівалентне твердження: повна ентропія замкнутої системи не може зменшуватися.

Ентропія визначається як

$$S \equiv k \ln W,$$

де W — ймовірність виявити систему в певному стані. Ще одне еквівалентне співвідношення:

$$\Delta S = \frac{\delta Q}{T}.$$

Тут ΔQ — тепло, яке підводиться в систему оборотним шляхом.

За зростання ентропії системи корисна механічна енергія втрачається:

$$\Delta W = T_{\min} \Delta S, \quad T_{\min} \text{ — найнижча температура в системі.}$$

Ймовірнісне тлумачення ентропії дав Людвіг Больцман (1872, 1877). Поняття ентропії запровадив Рудольф Клаузіус (1865) на основі аналізу поведінки величини $\int \frac{dQ}{T}$ в циклічних оборотних (1854) та необоротних (1862) процесах.

III. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ЯВИЩА

Розвиток уявлень про електромагнітні явища: від Фалеса до Айнштейна.

Про існування електричних і магнітних явищ люди знали ще в глибоку давнину.

Згідно з переказом, у дочки філософа Фалеса з Мілета, котрий жив у шостому столітті до нашої ери і про якого йшлося на початку нашої книжки, було бурштинове веретено. Ця дочка нібито й помітила явище електризації бурштину — коли його потерти об вовну, він набував властивості притягувати порошок, нитки, шматочки папірусу. Можливо, це й вигадана подія, але історики науки свідчать, що бурштин уживали тоді дуже широко, тож на таку незвичайну властивість відразу звернули увагу. Не виключено, що саме історія з бурштиновим веретеном через багато століть подарувала світу нове слово — «електрика». Адже бурштин по-грецьки — електрон.

Не менш давню історію має й магніт. Три тисячі років тому в Китаї вже користувалися простим компасом. Як стверджують китайські історики, двадцять два століття тому браму перед палацом правителя було зроблено з магнітного заліза, а тому жоден зловмисник не міг пронести крізь цю браму заховану зброю. «Невидима сила» витягувала ніж або меч з-під одягу, і варта відразу ж хапала зухвальця.

За твердженням Платона, назву «магніт» вигадав Евріпід. За версією Плінія, свою назву магніт отримав на честь казкового пастуха Магніса, до чиїх сандалів і до палиці прилипали дивні камені. У сандалях були залізні цвяхи, а в палиці — залізний наконечник. Тит Лукрецій Кар у своїй поемі «Про природу речей» стверджує, що слово «магніт» походить від назви провінції Магnezія (Манісса) в Малій Азії. Є там гора, де й досі трапляються магнітні камені.

Уперше зв'язок між електрикою та магнетизмом виявив Ганс Крістіан Ерстед — професор Копенгагенського університету. Це сталося 15 лютого 1820 року на лекції, під час якої Ерстед демонстрував явище нагрівання дроту електричним струмом. Один зі студентів помітив, що стрілка компаса, який випадково опинився поруч із дротом, відхилялася, коли вмикали й вимикали електричний струм. За кілька років перед тим Ерстед писав: «Слід випробувати, чи не справляє електрика якоїсь дії на магніт».

Обернений зв'язок магнетизму з електрикою відкрив Майкл Фарадей. За переказом (можливо, що й апокрифічним), коли він продемонстрував англійському королю Вільяму IV свій дослід, той спохмурнів і запитав: «Чому ваш винахід не приносить практичної користі?». На це запитання вчений відповів: «Ваша величносте, а яку користь приносять діти, які щойно з'явилися на світ?». Мине три десятиліття — й німецький інженер Сіменс запатентує сучасний електричний двигун, в основу роботи якого покладено явище електромагнітної індукції.

Уже тоді у Фарадея виникла думка про електричну й магнітну хвилі. Але ця думка тоді здавалася такою незвичайною, навіть єретичною, що Фарадей не

наважився її опублікувати. 12 березня 1832 року він передав для зберігання запечатаний конверт із написом «Нові погляди, які належить до часу зберігати в архівах Королівського товариства». Конверт було розпечатано аж через 106 років — 1938-го. Проникливий учений залишив у цьому листі нащадкам рядки, в яких виклав геніальний здогад про існування електромагнітних хвиль. Майклу Фарадею залишалося жити два роки, коли Максвелл теоретично передбачив (природно, не знаючи змісту листа Фарадея), що електромагнітне поле поширюється у вакуумі у вигляді електромагнітних хвиль зі швидкістю світла (1865). За 23 роки цей теоретичний висновок підтвердив експериментально Гайнріх Герц (1888).

Видиме світло, про природу якого впродовж століть завзято сперечалися, (лише в 1818 р. Огюстен Френель остаточно довів науковому світові його хвильову природу), так само виявилось електромагнітною хвилею з довжиною від 0,4 (фіолетовий край) до 0,7 (червоний край) мікрона. Але питання про матеріального носія цих коливань залишалося відкритим. Аж до кінця XIX століття вважали, що вони відбуваються в особливому середовищі — «тонкому світловому ефірі», і тільки негативний результат досліду Майкельсона–Морлі (1887) поставив загальну віру вчених в ефір під сумнів.

Остаточно поховала цю віру спеціальна теорія відносності Айнштейна (1905), яка принципово вказує на рівноправність усіх інерційних систем відліку і однаковість швидкості світла c в усіх цих системах; адже поширення світла в якомусь певному середовищі — ефірі — відразу ж робило б пов'язану з ефіром систему відліку особливою.

Метою цього розділу книги й буде коротко простежити розвиток людської думки про теорію електрики й магнетизму від найперших несміливих дослідних спроб і до появи спеціальної теорії відносності.

Дати і факти розвитку теорії електромагнітних явищ

Що відбулося:

VI ст. до н.е. Перші дослідження електризації та природних магнітів. Відкриття властивості натертого бурштину притягувати легкі предмети, а магніту — залізни (Фалес Мілетський).

XI ст. Араби наново відкривають властивості орієнтації магнітної стрілки, про які китайці знали ще в 2700 р. до н.е.

1269 р. У трактаті «Послання про магніт» Петра Перегріна описано дію магнітних полюсів і показано неможливість одержання однополюсного магніта.

1600 р. Вийшов у світ трактат Вільяма Гільберта «Про магніт, магнітні тіла й великий магніт Землі», в якому закладено основи електро- й магнітостатики.

1663 р. Отто фон Геріке конструює електричну машину — прилад для одержання статичної електрики.

1706 р. Сконструйовано першу скляну електричну машинку й почато дослідження розрядів у газах (Френсіс Гоксбі).

- 1710 р. Відкрито свічення газу в трубці при електричному розряді.
- 1729 р. Відкрито явище електропровідності (Стефан Грей).
- 1733 р. Відкриття двох видів електрики, встановлення факту притягування (відштовхування) різнойменних (однойменних) зарядів (Шарль Франсуа Дюфе).
- 1742 р. Запроваджено поняття «провідник» і «непровідник» електрики (Жан Теофіл Дезаюльє).
- 1745 р. Винайдено електрометрію (Георг Вільгельм Ріхман).
- 1745-1746 рр. Винайдено «лейденську банку» (Евальд Юрген фон Кляйст, Пітер ван Мушенбрук).
- 1747 р. Дослідження атмосферної електрики; Бенджамін Франклін доводить електричну природу блискавки.
- 1750 р. Винахід блискавковідводу. Вперше сформульовано закон збереження заряду (Бенджамен Франклін).
- 1752-1753 рр. Досліди з вивчення атмосферної електрики (Михайло Ломоносов, Георг Вільгельм Ріхман).
- 1754 р. Побудовано перший блискавковідвід (Прокоп Дівіш).
- 1756 р. Відкриття явища піроелектрики (Франц Епінус).
- 1757 р. Винахід електрофора (Франц Епінус).
- 1759 р. Розроблено першу математичну теорію електричних і магнітних явищ (Франц Епінус).
- 1781 р. Винайдено чутливий електроскоп із соломинками (Алессандро Вольта).
- 1785 р. Відкрито закон взаємодії точкових зарядів (Шарль Огюстен Кулон).
- 1791 р. Опубліковано «Трактат про сили електрики у м'язовому русі» Луїджі Гальвані.
- 1799 р. Створено гальванічний елемент Вольта.
- 1800 р. Відкриття електролізу (Вільям Нікольсон, Ентоні Карлейль).
- 1802 р. Відкриття електричної дуги (Василь Петров).
- 1811 р. Розповсюдження Сімеоном-Дені Пуассоном теорії потенціалів на явища електро- та магнітостатики.
- 1820 р. Відкриття магнітної дії струму (Ганс Крістіан Ерстед).
- 1820 р. Сформульовано правило Ампера.
- 1820 р. Відкриття закону взаємодії струмів (закон Ампера).
- 1820 р. Андре-Марі Ампер висловив гіпотезу молекулярних струмів.
- 1820 р. Виявлено намагнічування металевих опурків електричним струмом (Франсуа-Жан-Домінік Араго).
- 1820 р. Винайдено гальванометр (Йоган Швайгер).
- 1820 р. Відкриття магнітного ефекту соленоїда (Андре-Марі Ампер).
- 1820 р. Відкрито закон, що визначає напруженість магнітного поля постійного струму (закон Біо-Савара).
- 1821 р. Установлено залежність опору провідника від його довжини, поперечного перерізу і температури (Гамфрі Деві).

1821 р. Отримано обертання провідника в магнітному полі (Майкл Фарадей).

1822 р. Відкриття термоелектрики (Томас Йоганн Зеєбек).

1823 р. Створення термобатареї (Жан Фур'є, Ганс Ерстед).

1823 р. Опубліковано працю Ампера «Теорія електродинамічних явищ, виведена виключно з дослідів».

1827 р. Відкрито закон Ома, введено поняття електрорушійної сили та електропровідності.

1831 р. Відкрито закон електромагнітної індукції (Майкл Фарадей).

1831 р. Побудовано перший електродвигун (Джозеф Генрі, Сальваторе даль Negro).

1832 р. Побудовано генератор змінного струму (Іпполит Піксі).

1832 р. Створення єдиної системи електричних і магнітних одиниць. (Вільгельм Вебер, Карл Фрідріх Гаусс).

1832 р. Перший електричний телеграф (Павло Шиллінг).

1832 р. Відкриття самоіндукції (Джозеф Генрі).

1832-1833 рр. Відкриття законів електролізу (Майкл Фарадей).

1834 р. Відкриття ефекту Пельтьє.

1834 р. Постульоване існування іонів (Майкл Фарадей).

1834 р. Уведено поняття силових ліній (Майкл Фарадей).

1835 р. Доведено існування екстраструмів замикання/розмикання (Майкл Фарадей).

1839 р. Створення теорії потенціалів (Карл Фрідріх Гаусс).

1840 р. Винайдено місток Вітстона.

1840 р. Відкриття явища магнітного насичення (Джеймс Прескотт Джоуль).

1841–1842 рр. Відкриття закону теплової дії струму (Джеймс Джоуль та Емілій Ленц).

1843 р. Експериментальне доведення закону збереження електричного заряду (Майкл Фарадей).

1843 р. Відкриття закону взаємодії двох рухомих зарядів (Вільгельм Вебер).

1844 р. Висловлено гіпотезу існування електромагнітного поля (Майкл Фарадей).

1845 р. Відкриття діа- та парамагнетизму (Майкл Фарадей).

1845 р. Сформульовано правила Кірхгофа.

1851 р. Відкриття ефекту Вільяма Томсона.

1851 р. Винахід індукційної котушки (Гайнріх Румкорф).

1853 р. Виведено формулу періоду електричних коливань (Вільям Томсон).

1854 р. Математична теорія диполів (Вільгельм Вебер).

1856 р. Отримано співвідношення електромагнітних і електростатичних одиниць (Вільгельм Вебер).

1857 р. Створено першу газорозрядну трубку (Гайнріх Гайслер).

1855–1865 *рр.* Створення теорії електромагнітного випромінювання (Джеймс Клерк Максвелл).

1860 *р.* Побудовано електродвигун постійного струму.

1861 *р.* Уведено поняття струмів зсуву (Джеймс Клерк Максвелл).

1865 *р.* Постульовано існування електромагнітних хвиль. Електромагнітна теорія світла (Джеймс Клерк Максвелл).

1867 *р.* Створено генератор постійного струму з самозбудженням (динамо-машину) (Вернер фон Сіменс).

1869–75 *рр.* Вільям Крукс працює над створенням різних модифікацій газорозрядних трубок, з допомогою яких спостерігає катоді промені (названі ним «променистою матерією»).

1872 *р.* Винайдено електричний лічильник (Вільям Томсон).

1873 *р.* Відкриття фотопровідності селену (Вілловбі Сміт).

1874 *р.* Уведено поняття про напрям розповсюдження електромагнітної енергії (Джон Генрі).

1874–1881 *рр.* Припущення про дискретність заряду (Джеймс Клерк Максвелл та інші).

1879 *р.* Відкрито ефект Голла (Едвін Голл).

1880 *р.* Відкриття п'єзоелектричного ефекту (П'єр Кюрі).

1882 *р.* Створено найефективнішу на той час розрядну трубку — джерело катодних променів (Іван Пулюй).

1888 *р.* Досліди Герца, доведено існування електромагнітних хвиль.

1888 *р.* Відкриті закони зовнішнього фотоефекту (Олександр Столетов).

1891 *р.* Перша передача трифазного струму (Михайло Доливо-Добровольський).

1893 *р.* Винайдено електронний осцилограф.

1895–96 *р.* Винахід радіо (Нікола Тесла, Гульєльмо Марконі).

1895–1902 *рр.* Створення електродинаміки рухомого середовища (Гендрік Антон Лоренц).

1895 *р.* Відкриття електрона (Джозеф Джон Томсон).

1905 *р.* Спеціальна теорія відносності (Альберт Айнштайн).

1905 *р.* Розроблена теорія діа- та парамагнетизму (Поль Ланжевен).

1907 *р.* Теоретично розроблено принцип отримання телезображення (Борис Розінг).

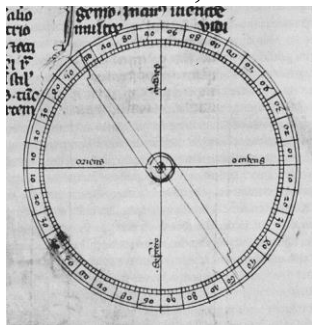
1928 *р.* Борис Грабовський (син відомого українського поета Павла Грабовського) вперше продемонстрував систему електронного телебачення й реалізував передачу на відстань рухомого зображення.

«Дитинство» науки про електрику й магнетизм

Як ми вже зазначали, початок дослідження електричних і магнітних властивостей речовини пов'язаний із ім'ям одного з семи мудреців Давньої Греції Фалеса Мілетського, котрий жив понад дві з половиною тисячі років тому. Брак точних відомостей про життя та наукові відкриття великого вченого старовини дещо компенсує велика кількість легенд, пов'язаних із його іменем. В одній із них автором відкриття електричних явищ виступає навіть не сам Фалес, а його дочка. Протираючи одного дня вовняним клептом бурштинове веретено, вона помітила, що ворсинки тканини утримуються на ньому, а потім через деякий час без видимих причин відпадають. Здивована побаченням, дочка звернулася до батька, щоб той пояснив дивну поведінку ворсинок. Фалес зацікавився цим явищем і власноруч виконав дослід із бурштином, щоб переконатися в правоті дочки.

Ті самі старогрецькі автори, котрі згадують Фалеса як відкривача електричних явищ, називають його піонером і у вивченні магнетизму. Погляди Фалеса були вельми характерними для того часу. Він запропонував для пояснення електричних і магнітних властивостей речовини вважати, що і бурштин, і магніт мають душу, яка й виявляє себе певним чином. Нічого ґрунтовнішого за тодішнього рівня знань Фалес запропонувати не міг.

Наступні дослідники електрики й магнетизму далі за повторення дослідів Фалеса Мілетського не йшли. Жодних спроб пояснити спостережувані явища не було. Густий туман містики надійно огорнув наявні мізерні відомості про електричні та магнітні явища. З праць того часу вирізняється хіба що датований 1269 р. манускрипт «Послання про магніт» француза Петра Перегріна (за тим латинізованим іменем ховався П'єр де Марікур, про життя якого майже нічого не відомо). У цьому творі, справді написаному як послання до приятеля, вказано, що кожен магніт має два місця, де магнітна дія особливо велика. Один із цих полюсів показує на північ, другий — на південь, а тому магніт можна використовувати як стрілку компаса. Перегрін з'ясував, що однойменні полюси магнітів відштовхуються, а різнойменні — притягуються. Якщо магніт розломити навпіл, то кожен із уламків також матиме два полюси.



Компас із трактату Перегріна «Послання про магніт» (1269)

«Передісторія» розвитку знань про електрику та магнетизм затяглася майже на два тисячоліття й завершилася тільки в 1600 році. «Винуватцем» становлення електрики та магнетизму як науки був англійський дослідник,

придворний лікар англійської королеви Єлизавети I Вільям Гільберт (1544–1603).



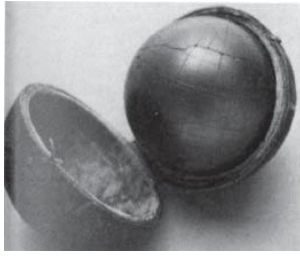
Вільям Гільберт показує дослід королеві Єлизаветі I

Товчений магніт середньовічні лікарі вважали за сильне проносне й використовували з цією метою — напевне, це й зумовило цікавість медика до явищ магнетизму. Сам Вільям Гільберт писав, що магнітне залізо «повертає красу й здоров'я дівчатам, котрі страждають через блідість і поганий колір обличчя, бо воно сильно сушить і стягує, не завдаючи шкоди». Але, на відміну від досліджень попередників, які пізнання природи зводили до інтуїтивних висновків, часто — із залученням потойбічних, надприродних сил, дослідження Гільберта були строго експериментальними.

Вільям Гільберт зацікавився дослідом Фалеса з електризації у викладі Арістотеля, повторив їх і, коли вже переконався, що давній філософ мав слушність, значно розширив область експериментів. Маючи неабияку винахідливість, він придумував нові й нові досліди, виконував їх, а потім аналізував результати спостережень. Підсумком багатолітніх досліджень Гільберта стала праця, опублікована в Лондоні 1600 року. Книга називалася: «Про магніт, магнітні тіла й про великий магніт Землі. Нова фізіологія, доведена безліччю аргументів і дослідів».

З величезної кількості описаних дослідів вирізняються експерименти в царині електричних явищ. Для своїх досліджень Гільберт винайшов спеціальний прилад, за допомогою якого з'ясував, що «не лише бурштин притягує до себе тіла, те саме роблять і алмаз, сапфір, карбункул, камінь, опал, аметист, берил і кришталь... Притягують також сірка, мастика й сургуч, зроблений із лаку, забарвленого в різні кольори. Всі вони притягують не лише соломинки та полову, але й усі метали, дерево, листя, камені, землі, навіть воду, рослинну олію й усе, що підвладне нашим відчуттям». До речовин, які не піддаються електризації, Гільберт відносить мармур, перли, кістки й метали.

У цій же роботі Гільберт робить чітке розрізнення електричних і магнітних явищ. «Магніт без натирання (сухий або облитий рідиною) і на повітрі, й у воді тягне до себе магнітні тіла, навіть якщо виставити перешкоду з дуже твердих тіл, дерев'яних дощочок або грубих кам'яних плит. Магніт збуджує тільки магнітні тіла, а до електричних тіл тяжіє все. Магніт піднімає великі вантажі; електричні сили притягують лише тіла дуже малої ваги».



Виготовлена Гільбертом модель Землі з магнітного заліза

Гільберт виготовив велику кулю з магнітної руди й дослідив, як біля неї поводитиметься маленька залізна стрілка. Він виявив дивовижну подібність поведінки цієї стрілки до поведінки компасної стрілки поблизу Землі — і дійшов висновку, що Земля являє собою велетенський магніт. Водночас він зробив революційне відкриття: магнітна стрілка компаса притягується не до небесного північного полюса (як уважали до того), а до північного магнітного полюса Землі.

Гільберт уважав, що магнітна «душа» (тут він ішов за давніми греками) Землі не тільки повертає стрілку компаса на північ, але й змушує саму Землю обертатися навколо власної осі. Всесвіт для Гільберта пронизаний магнітними силами. Саме вони притягують часточки Землі до Землі, а часточки Місяця — до Місяця. Цей прообраз ідеї всесвітнього тяжіння вплинув на певному етапі спершу на Кеплера, а потім — на Ньютона, які читали трактат Гільберта.

На основі вчення Гільберта електрику та магнетизм протягом тривалого часу (аж до початку XIX століття) розглядатимуть як два явища, абсолютно не пов'язані між собою. Але те, чого він досяг, дає підстави вважати його за першопрохідця в дослідженні електричних і магнітних явищ.

Ось оцінка заслуг Вільяма Гільберта, яку дав Галілео Галілей: «Я віддаю найбільшу хвалу й заздрю цьому авторові, бо йому спало на думку таке дивовижне уявлення про річ, яка побувала в руках у незліченних людей піднесеного розуму, але лишилася непоміченою; він здається мені гідним найбільшої похвали також і за багато нових і вірогідних спостережень, які він зробив. І я не сумніваюся, що з часом ця нова наука вдосконалюватиметься шляхом нових спостережень, а особливо шляхом правильних і необхідних доказів. Але від цього не має зменшитися слава першого спостерігача».

Написати в той час книгу про електрику й магнетизм, та ще й стверджувати, що Земля — великий магніт, перевіряти дослідями всі мислимі припущення, а також будувати нові припущення, виходячи з дослідів, — це був справді новий крок у науковому пізнанні навикишньої дійсності. Сам Гільберт свої заслуги дуже цінував. Уперше в практиці книгодрукування він поставив своє ім'я перед назвою книги, і ніхто його за це не засудив. Книгу Гільберта було написано ще латиною, і сам він уживав термін *electricus* — «подібний до бурштину». Але саме під впливом його книги у 1646 р. в англійській мові з'явилося слово *electricity* — «електрика», яке перейшло потім в інші європейські мови.

За рік після виходу у світ книги Вільяма Гільберта «Про магніт» його сучасник Вільям Шекспір, з яким вони не могли не зустрічатися, створює

«Гамлета». Обом книгам судилося довге життя. На жаль, у 1603 р. сам Гільберт помирає від пощесті бубонної чуми, яка лютувала тоді в Лондоні.

Заслуги Вільяма Гільберта справді великі. Він чи не вперше в історії пізнання, ще за два десятиліття до виходу у світ «Нового органона» Френсіса Бекона, основоположника індуктивного методу в науці, проголосив досвід критерієм істини й усі положення перевіряв у процесі спеціально поставлених експериментів.

Гільберт багато що відкрив. Але він майже нічого не зміг пояснити. Його туманні уявлення про природу магнетизму, згідно з якими причиною всього є «душа магніту» та існує «середовище дії душі», не можуть применшувати його заслуг хоч би тому, що справжню природу магнетизму заліза було з'ясовано тільки в 30-х роках XX століття.

Після Гільберта дослідження в царині електричних і магнітних явищ проводили багато допитливих людей. Пояснення, які вони пропонували, були, безумовно, наївними, проте важливим є сам факт, що вчені почали замислюватися про причини цих «таємничих» явищ. Так, наприклад, італійський дослідник Нікола Кабео 1629 року випустив трактат «Філософія магнетизму», в якому зробив спробу пояснити причину притягання наелектризованих тіл. Електризуючи одне й те саме тіло тисячі (!) разів, Кабео не виявив анінайменшої зміни у вазі, що наводило на думку про «невагому електричну рідину».

Помітною віхою на шляху розвитку вчення про електрику були дослідження магдебурзького бургомістра Отто фон Геріке, про якого ми вже говорили в попередній частині нашої книги. Геріке зацікавився електричними явищами й вивчив трактат Гільберта, а щоб отримати сильніші електричні ефекти, сконструював спеціальний пристрій для створення великих зарядів. Цей допитливий аматор наук вигадав машину, що обертала кулю з сірки. Якщо розкручену кулю притримувати долонями, то вона накопичує електричний заряд. Це дозволяло виконувати багато «дивних» і незвичайних дослідів.

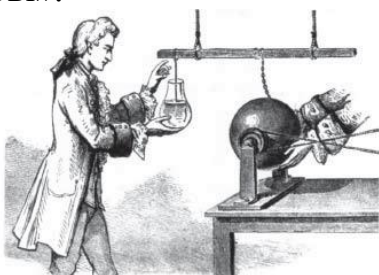


Досліди Отто фон Геріке з електризації тіл

Використовуючи відкриття Геріке, інші дослідники змогли виявити нові, невідомі раніше властивості електрики. Так, лейденський професор Пітер ван Мушенбрук (1692–1761) спробував 1746 року наелектризувати воду, налиту в скляну посудину, сполучивши її за допомогою металевого дроту з натертою скляною трубкою. Тримавши в руці посудину, він випадково торкнувся рукою трубки — й отримав сильний удар. Про свої відчуття він писав: «Хочу повідомити вам про новий і дивний дослід, який ніяк не раджу повторювати.

Мою правицю було вражено так сильно, що все тіло здригнулося, як від удару блискавки — одним словом, я думав, що мені прийшов кінець».

З'ясувалося, що в посудинах такого типу, який використовував Мушенбрук для зарядки від машини Геріке, електрика може накопичуватися у вельми значній кількості. Так було відкрито уславлену згодом «лейденську банку» — простий конденсатор. Новина про «лейденську банку» швидко поширилася Європою. Популярність професора Мушенбрука досягла рівня слави. Він увійшов у історію не як великий фізик, а як людина, котра однією з перших випробувала на собі електричний удар. Учений писав: навіть «...заради французької корони я не погодився б ще раз піддатися такому страшному струсові».



Дослід з «лейденською банкою»

«Лейденська банка» (конденсатор) стала неодмінним «учасником» електричних дослідів. За її допомоги отримували рясні електричні іскри. Досліди набули надзвичайної популярності, вони стали однією з найвишуканіших розваг — коли, наприклад, від іскри, що проскакувала від вістря шпаги, яку тримав дворянин, торкаючись другою рукою електричної машини, спалахував пунш у келиху, який тримала гарненька служниця. Такі досліди зображено на численних гравюрах середини XVIII століття.

У лабораторіях, в аристократичних салонах, на ярмарках освіченої Європи і не надто освіченої тоді Америки ставили дивовижні досліди: часом неприємні, часом кумедні, такі, що водночас хвилювали й інтригували.

Париж, природно, не міг залишитися осторонь цієї «лейденської пошесті». Експерименти проводив «придворний учений короля, електрик», котрий спеціально відав різними електричними розвагами, абат Жан Антуан Нолле (1700–1770).

Попри неприємні відчуття, тисячі й тисячі людей зголошувалися брати участь в експериментах. Сімсот французьких ченців, узявшись за руки, провели «лейденський експеримент». У той момент, коли перший із вервечки доторкнувся до голівки банки, всі сімсот ченців, скуті судою, скрикнули з жахом на обличчях.

Сто вісімдесят королівських мушкетерів за наказом брали участь у схожому експерименті: «Перший тримав у вільній руці банку, а останній видобував іскру; удар відчули всі водночас. Було дуже курйозно бачити розмаїття жестів і чути раптовий скрик заскочених і приголомшених ударом». Навіть гвардійська дисципліна виявилася безсилою перед розрядом «лейденської банки». Цілі вистави, цікаві й схожі на театральні видовища, розігрувалися перед захопленими глядачами. А якийсь француз Бозе висловив

навіть бажання бути вбитим під час досліду електрикою задля поступу науки — аби лиш про це написали в працях Паризької академії.

Водночас тривало й наукове вивчення електрики. 1729 року англійський фізик Стівен Ґрей (1679–1736) відкрив явище електропровідності. Він узяв скляну пляшку й закрив її корком, у який увіткнув металевий стержень із кулькою зі слонової кістки на кінці. Потім він наелектризував пляшку клаптем сукна. Виявилося, що електрика перейшла з пляшки на кульку — це можна було визначити з притягування до неї дрібних порошин, клаптів паперу тощо.

Продовжуючи досліди, Ґрей з'ясував, що електрику добре проводять не лише металеві дроти, але й вугільні стержні, м'язи людини та тварин. Не проводять її каучук, віск, шовкові нитки й порцеляна, тож вони можуть слугувати ізоляторами, що перешкоджають витокові електрики.

Француз Шарль Дюфе (1698–1739) першим помітив, що в одних випадках наелектризовані тіла взаємно притягуються, а в інших — відштовхуються. Наприклад, натерта скляна паличка відштовхується від такої ж палички, але притягується до натертої палички зі смоли. Дюфе пояснив це наявністю двох різновидів електрики — «скляної» і «смоляної». Однойменно заряджені тіла відштовхуються, а різнойменні — притягуються. За легендою, спонукала Дюфе взятися до вивчення електрики... улюблена кішка. Поглажуючи її, вчений помітив ледь чутне потріскування й іскорки від електризації шерсті.

Справжній прорив у вивченні електрики стався, однак, не в старій, багатій традиціями Європі, а в далекій Америці, яка щойно вирушила в гонитву за Європою.

Йшов 1747 рік. На лекцію з електрики в Бостоні, столиці тодішньої англійської колонії Массачусетс на узбережжі Північної Америки, потрапив джентльмен у розквіті сил. Цією людиною був Бенджамін Франклін (1716–1790) — видатна й популярна в тодішній Америці особа, чиє обличчя сьогодні знає весь світ завдяки портрету на стодоларових купюрах.



Портрет Франкліна на стодоларовій купюрі зразка 2009 р.

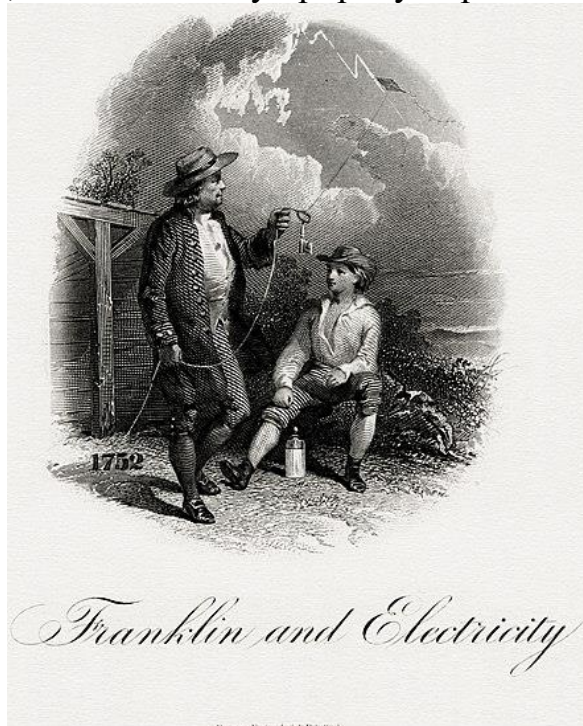
Франклін народився в Бостоні — одному з найдавніших міст тодішніх американських колоній. Він не закінчив школи і з 12 років працював у друкарні. Маючи завдяки цьому змогу багато читати, він компенсував брак формальної освіти самоосвітою. Пізніше поринув у літературну, а згодом — у громадську діяльність.

Його заслуги на цій ниві вражають. Маючи 20 років, він заснував власну друкарню, а в 23 — «Пенсильванську газету», яку видавав два десятиріччя. 1731-го року він заснував першу на теренах Америки публічну бібліотеку, 1743

— Американське філософське товариство, 1751 — Пенсильванський університет. 1737-го року громадяни Філадельфії обрали його керівником пошти Пенсильванії, а з 1753 по 1774-й він очолював поштову службу всіх майбутніх Сполучених Штатів. Веселий і життєрадісний, він завжди опинявся в оточенні цікавих і впливових людей — дипломатів, аристократів, учених і чарівних жінок.

1747-го року він узявся до фізики — і займався нею лише сім років. Але за цей час Франклін зробив дуже багато. Він запровадив у науку поняття позитивної й негативної електрики, не знаючи, що ще раніше це зробив французький учений Шарль Дюфе. «Скляну» електрику (термін Дюфе) Франклін назвав «позитивною», а «смоляну» — «негативною», оскільки в контакті вони взаємознищуються, наче «плюс» та «мінус» у математиці. Вживаючи слова *батарея, конденсатор, провідник, заряд, розряд, обмотка*, мало хто знає, що Франклін був першим, хто скористався цими назвами. Причому саме Франклін збагнув, що головну роль у накопиченні електрики «лейденською банкою» відіграє діелектрик — вода, якою її наповнено.

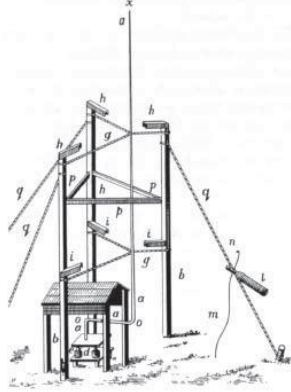
Сім «електричних» років із життя Франкліна були пов'язані з доведенням електричної природи блискавки. Саме з доведенням, тому що вперше припущення про електричну природу грому й блискавки висловив той-таки Дюфе. Саме Дюфе писав: «Можливо, врешті-решт пощастить знайти кошти для отримання електрики у великих кількостях і, отже, підсилити потужність електричного вогню, який у багатьох із цих дослідів видається таким, що має спільну природу з громом і блискавкою».



Дослід Франкліна з атмосферою електрикою

Своїми дослідженнями Бенджамін Франклін «викреслив» із наведеної цитати слова «можливо» і «видається» — він перетворив припущення Дюфе на доведені наукові факти. Він показав, що блискавка й електрика, добута тертям,

мають тотожну природу. Для цього Франклін запускав під грозову хмару паперового повітряного змія з металевим вістрям, від якого звисала конопляна мотузка (ще Грей виявив її провідність!) із металевим ключем на кінці. З ключа Франклін видобував під час грози великі електричні іскри — дарма, що кожен такий дослід чаїв смертельну небезпеку. Коли стала очевидною електрична природа блискавки, Франклін зміг здійснити головний винахід свого життя — блискавковідвід, високе металеве вістря, ізольоване від будинку й поєднане провідником із землею. (Франклінові щастило; аналогічні досліди проводили в Петербурзі Михайло Ломоносов і Георг Ріхман (1711–1753), і під час одного з них Ріхман загинув від кульової блискавки). Паралельно Франклін показав, що заземлене металеве вістря здатне на достатньо близькій відстані знімати заряд з будь-якого предмета, навіть його не торкаючись.



Блискавковідвід Франкліна

Перший блискавковідвід було встановлено 1760 року у Філадельфії. За 22 роки їх було вже понад 400, зокрема на всіх громадських будинках, окрім французького посольства (Франція офіційно блискавковідводи не визнавала). Під час сильної грози саме туди вцілила блискавка, і вбила французького офіцера. Це стало остаточним доказом необхідності блискавковідводів. Їх почали ставити навіть на церквах (за висловом Едісона, це обов'язково слід робити, бо «часом Провидіння буває неуважне»).

Франклінові належить і один із фундаментальних фізичних законів — закон збереження заряду. Згідно з цим законом, повний заряд (тобто різниця позитивного й негативного заряду) замкнутої системи зберігається. Цей закон не порушується навіть за анігіляції заряджених частинок.

Щодо фізичної природи електрики, то Франклін уважав її особливою невагомою рідиною, рівень якої у природі назагал сталий. Можна лишень викликати в певних місцях надлишок або брак цієї рідини — і це, власне, є створенням позитивного чи негативного заряду. Таке припущення, попри його умоглядність, дивовижним чином корелює з сучасними уявленнями (лишень надлишок електронів дає «мінус», а їхній брак — «плюс»).

Запровадив Франклін і поняття «напряму струму». За пропозицією Франкліна, яка впливала з його уявлення про електрику як про особливу рідину, заведено було вважати, що струм, який тече до пластини конденсатора, надає їй позитивного заряду. Питання про матеріальні носії струму лишалося нез'ясованим аж до кінця XIX століття. Тепер нам зрозуміло, що пластина

конденсатора набуває позитивного заряду, бо її залишають електрони провідності. Отже, реальні носії струму в металі рухаються в напрямку, протилежному до напрямку струму, визначеного «за Франкліном». Однак традиційне позначення, яке запровадив Франклін, — що струм тече від «плюса» до «мінуса», — застосовують і сьогодні.

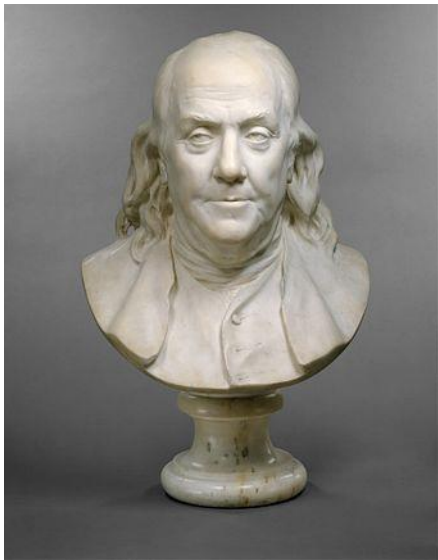
Наукові заслуги Франкліна цим не вичерпуються. Він брав участь в експедиції, під час якої на мапу було нанесено течію Гольфстрім (1770), що визначає погоду по обидва боки Атлантики — і запропонував назву цієї течії. Він досліджував штормові північно-східні вітри на східному узбережжі Штатів і запропонував теорію їхнього виникнення. Він став автором багатьох технічних винаходів та удосконалень: скляної гармонії, крісла-качалки, біфокальних окулярів. Він перший запропонував запроваджувати спеціальний літній час зі зсувом стрілки на годину і перший використав електричну іскру для детонації пороху.

Пізніше Франклін став однією з видатних фігур політичного життя Америки, активним борцем за звільнення американських колоній від панування Англії. 1775-го року Франклін бере участь у створенні Декларації незалежності.

Завдяки дипломатичному хисту Франкліна Америці вдається в боротьбі проти Англії залучити на свою бік Францію і паралельно спонукати низку європейських держав оголосити «озброєний нейтралітет», що сприяло підписанню мирного договору, в якому Англія визнавала повну незалежність американських колоній.

Історики наголошують: саме Франклін найбільше прислужився формуванню ідеї нової американської нації, що об'єднала мешканців 13 відокремлених одна від одної колоній у нову спільноту. Він єдиний з «батьків-засновників» США підписав усі три основоположні для нової держави документи: Декларацію незалежності, Версальський мирний договір і Конституцію США.

Природно, що бурхливі політичні події відірвали Франкліна від його електричних експериментів. Та все ж епоху статичної електрики своїми відкриттями увінчав і Франклін, який «відняв блискавку в небес і владу в тиранів». Саме ці слова латиною: «Eripit Coelo fulmen, scemprumque tygannis» — вирізьблено на відомому бюсті Франкліна роботи скульптора Гудона.



Бенджамін Франклін (бюст роботи Жана-Антуана Гудона, 1778)

Ще за Франклінового життя електрику навчилися вимірювати. Англієць Джон Кантон (1718–1772) сконструював електроскоп. В основі приладу був металевий стержень із підвішеними до нього ягодами бузини, які розходилися, коли виникав електричний заряд. Отже, можна було з'ясувати, заряджене тіло — або ні, не придивляючись, чи притягує воно дрібні порошинки.

Удосконалюючи електроскоп, Абрагам Беннет замінив ягоди бузини двома листочками тонкої золотої фольги. За наявності заряду листочки розходилися, до того ж за кутом їхнього розходження можна було робити висновки про величину заряду.



Чутливий електроскоп із соломинками, який використовував у своїх дослідках Алессандро Вольта (1781)

«Дитинство» науки про електрику можна вважати завершеним з виведенням кількісного закону взаємодії зарядів — закону Кулона.

Шарль Огюстен Кулон (1736–1806)

Народився майбутній учений в Ангулемі на південному заході Франції, але незабаром сім'я переїхала до Парижа. У хлопчика дуже рано з'явився інтерес до математики, і він оголосив, що хоче стати вченим. Двоюрідний брат

батька незабаром представив свого племінника Шарля Королівському науковому товариству.

У лютому 1757 року на засіданні цього товариства молодий аматор математики Шарль Огюстен Кулон прочитав свою першу наукову роботу «Геометричний нарис середньопорційних кривих». Робота дістала схвалення, і дослідника-початківця обрали ад'юнктом по класу математики.



Шарль Огюстен Кулон

1760 року Шарль вступив до школи військових інженерів. У цій школі лекції з експериментальної фізики читав відомий французький природодослідник абат Нолле (ми вже згадували про нього у зв'язку з дослідженнями з використанням «лейденської банки»).

Після закінчення школи Кулон брав участь у будівництві військових фортифікаційних споруд на острові Мартініка у Вест-Індії і незабаром отримав чин капітана. У 1772 р. після дев'ятирічної служби в заморських колоніях Кулон повернувся до Франції, а навесні 1773 р. подав свій науковий мемуар з теорії пружності й опору матеріалів у Паризьку академію наук і зачитав його на двох засіданнях. Академік Боссю так оцінив його роботу: «Під цією скромною назвою пан Кулон охопив, так би мовити, всю архітектурну статику. Всюди в його дослідженні ми бачили глибоке знання аналізу нескінченно малих і мудрість у виборі фізичних гіпотез, а також у їхньому застосуванні. Тому ми вважаємо, що ця робота цілком заслуговує на схвалення Академії й гідна публікації».

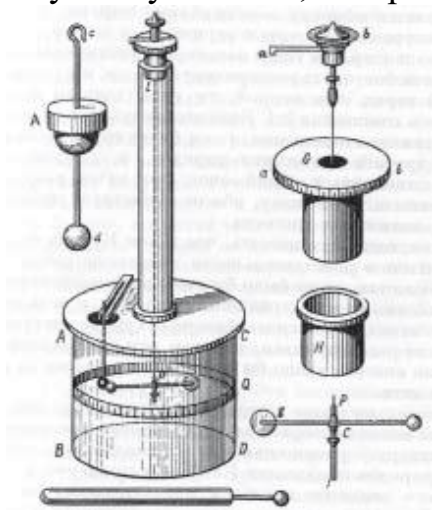
Молодий учений розширює коло своїх досліджень. Він узявся розробляти оптимальний метод виготовлення магнітних стрілок для точних вимірів магнітного поля Землі. Цю тему було визначено в конкурсі, який оголосила Паризька академія наук.

Кулон став переможцем конкурсу. Для історії науки найбільш цікавим є розділ мемуару, де проаналізовано механічні властивості ниток, на яких підвішують магнітні стрілки. Учений провів цикл експериментів і виявив загальний порядок залежності моменту сили деформації кручення від кута закручування нитки та від її геометричних параметрів: довжини й діаметра.

Подальші результати дослідів було узагальнено в роботі «Теоретичне й експериментальне дослідження сили кручення й пружності металевих дротів». Глибину ідей Кулона про природу деформацій відзначали багато вчених XIX століття, зокрема англієць Томас Юнг (нагадаємо: модуль пружності — модуль Юнга).

Кулон продовжує працювати над інженерними проблемами, і військовий міністр переводить його на будівництво фортеці-в'язниці Бастилії. За інженерні розробки Кулона нагороджено Хрестом Святого Людовіка. 1781 року Кулона обрано членом Паризької академії наук по класу механіки.

Дослідження кручення тонких металевих ниток мало важливий практичний наслідок — створення «крутильних терезів». Цей прилад можна було використовувати для вимірювання дуже малих сил різної природи, і він забезпечував чутливість, безпрецедентну для того часу.



Крутильні терези Кулона

Розробивши такий чутливий фізичний прилад, Кулон узявся шукати йому гідне застосування. Учений починає досліджувати проблеми електрики й магнетизму. Ця широка програма досліджень закінчується написанням семи мемуарів. Найважливішим результатом, що його Кулон отримав у царині електрики, було встановлення основного закону електростатики — закону взаємодії нерухомих точкових зарядів. Експериментальне обґрунтування знаменитого «закону Кулона» і його формулювання подано в першому й другому мемуарах. Підсумок: «Сила відштовхування двох маленьких кульок, наелектризованих електрикою однієї природи, обернено пропорційна квадрату відстані між центрами кульок».

У третьому мемуарі Кулон звернув увагу на явище витоку електричного заряду. У наступному, одному з найкоротших із серії мемуарів, Кулон розглянув питання про характер розподілу електрики між тілами. Він довів, що «електричний флюїд поширюється в усіх тілах відповідно до їхньої форми».

П'ятий і шостий мемуари присвячено кількісному аналізу розподілу заряду між тілами провідників електрики, що дотикаються, й визначенню густини заряду на різних ділянках поверхні цих тіл. Кулон з'ясував: за доторку

двох однакових кульок із провідника — зарядженої і незарядженої — заряд першої ділиться між двома порівну.

Досліджуючи розподіл електрики на поверхні мідної кулі, Кулон брав «проби», прикладаючи до неї в різних місцях невелику металеву пластинку на ручці-ізоляторі. Виявилося, що кількість електрики, яка переходила на пластинку, скрізь була однаковою. Але досліджуючи тіла іншої форми, вчений переконався: що вигнутіша поверхня, то сильніше заряджається пластинка. Найсильніше вона заряджається біля вістря.

Кулон уперше довів, що електрика розподіляється лише на поверхні провідників. Він зарядив масивну латунну кулю й доторкнувся до неї ізольованою порожнистою кулею такого ж діаметра. Вимірювання показали, що на порожнисту кулю перейшла рівно половина електрики з масивної кулі. Отже, у розподілі електрики мала значення не маса куль, а лише площа їхніх поверхонь.

Таким чином, досліди Кулона зумовили появу понять «кількість електрики» й «густина заряду».

Стосовно магнетизму Кулон намагався вирішити ті самі завдання, що й для електрики. Ученому пощастило встановити деякі своєрідні риси магнетизму. В цілому ж кількість отриманих Кулоном результатів у царині магнетизму менша, ніж кількість відкритих електростатичних закономірностей.

Таким чином, Кулон заклав основи електростатики (і магнітостатики). Його результати мають фундаментальне й прикладне значення. «Крутильні терези» мали найважливіше значення ще й тому, що вони дали в руки фізиків метод визначення одиниці електричного заряду через величини, використовувані в механіці: силу й відстань, а це дозволило проводити кількісні дослідження електричних явищ.

Використано було «крутильні терези» й у інших галузях фізики: як ми вже згадували, саме за їхньої допомоги видатний англієць Генрі Кавендіш не лише виміряв гравітаційну взаємодію між двома масивними свинцевими кулями, але й установив закон Кулона... на 18 років раніше від самого Кулона. Проте, вважаючи себе насамперед хіміком і назагал будучи людиною дивакуватою й відлюдькуватою (учений жив самотником, панічно боявся жінок і навіть зі слугами спілкувався за допомоги записочок), Кавендіш не друкував більшості своїх робіт із фізики, і людство довідалося про його відкриття лише 1879 року, коли архів ученого опублікував Джеймс Клерк Максвелл.

Але повернімося до долі Кулона. 1793 року політична ситуація в Парижі дуже загострюється, починається яacobinський терор, радикальні республіканці сотнями страчують на гільйотині опонентів, пов'язаних зі «старим режимом» (жертвою стає й великий хімік Лавуазьє). Тому Кулон із родиною переїздить у свій маєток — далі від політичних бур. Наприкінці 1795 року він повертається до Парижа — його обрано постійним членом відділення експериментальної фізики Інституту Франції, нової національної академії.

Останні роки свого життя Кулон присвячує організації нової системи освіти у Франції. Поїздки по країні підірвали здоров'я вченого. Влітку 1806 року він захворів на лихоманку й помер. Кулон залишив досить значну

спадщину дружині й синам, крім того, на знак пошани до його пам'яті, обох синів Кулона було зараховано за державний кошт у привілейований навчальний заклад.

Шарль Огюстен Кулон залишив людству величезний науковий спадок. Закономірності зовнішнього тертя, закон кручення пружних ниток, основний закон електростатики, закон взаємодії магнітних полюсів і, звичайно ж, «крутильні терези» — все це увійшло до золотого фонду науки. «Кулонівське поле», «кулонівський потенціал», одиниця електричного заряду «кулон» — усе це міцно закріпилося у фізичній термінології. Остання фізична одиниця (1 Кл = 1 А • 1 с) була введена Міжнародним з'їздом електриків у Парижі 1881 р.

Відкритий 1785 р. закон Кулона дає такий вираз для сили взаємодії двох зарядів q_1 і q_2 , розташованих на відстані r один від одного:

$$F = k_o \frac{q_1 q_2}{r^2}.$$

Коефіцієнт пропорційності k_o залежить від вибору системи одиниць. У системі СГС, запровадженій Британською асоціацією розвитку науки в 1873 р. на основі Гауссової системи, названої так на честь визначного німецького математика й фізика Карла Фрідріха Гаусса (1777–1856), що запропонував її ще 1832 р. разом із Вільгельмом Вебером, цей коефіцієнт вважають рівним одиниці, а закон Кулона у вигляді $F = \frac{q_1 q_2}{r^2}$ використовують для визначення величини одиничного заряду (такого заряду, що взаємодіє з однаковим за величиною розміщеним на відстані 1 см зарядом із силою в 1 дину).

Натомість у системі СІ, затвердженій 1960 р. Генеральною конференцією мір та ваг, заряд довго визначали через магнітну силу, яка діє між двома однаковими елементами струмів. Це зумовлює значно більшу величину одиничного заряду в 1 кулон, що пов'язана з одиницею заряду СГС через швидкість світла c :

$$1 \text{ Кл} = 2,998 \cdot 10^9 \text{ од. СГС}.$$

Коефіцієнт переходу точно дорівнює швидкості світла в системі СІ, помножений на 10. Про відкриття причин цього ми поговоримо дещо згодом. У системі СІ коефіцієнт пропорційності, що входить до закону Кулона, дорівнює:

$$k_o = \frac{1}{4\pi\epsilon_o} = 8,988 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{Кл}^2},$$

де ϵ_o — т.зв. універсальна діелектрична стала. Громіздкість такого запису призводить до того, що попри нормативний характер системи СІ для більшості країн світу, у т.ч. для США, де паралельно дотепер використовують стару британську систему, науковці (особливо теоретики) для своїх практичних потреб досі часто вживають систему СГС.

У 2019 р. традиційне визначення (1 Кл = 1 А • 1 с) в системі СІ було замінено на 1 Кл = 6241509074460762607,776 величин елементарного заряду (це дає визначення заряду одного електрона як $1,602176634 \times 10^{-19}$ Кл). Таким чином, 1 Кл став основною одиницею системи СІ, а 1 А — похідною від нього.

Говорячи про рух зарядів в електричному й магнітному полях, ми повинні пам'ятати: прискорення зарядженої частинки залежить не лише від її заряду, але і від маси:

$$m\vec{a} = q\vec{E} - \text{для електричного поля};$$

$$m\vec{a} = \frac{q}{c}[\vec{v} \times \vec{B}] - \text{для магнітного поля}.$$

(Другий з виразів записаний у системі СГС). В обох випадках $a \approx \frac{q}{m}$. У першому з цих співвідношень уведено напруженість електричного поля E , яка характеризує інтенсивність цього поля в певній точці простору (поняття електричного й магнітного полів запровадив у фізику Майкл Фарадей, про якого ми говоритимемо далі). Її визначають як відношення електричної сили, що діє на пробний заряд, до величини цього заряду:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}.$$

Звернімо увагу на те, що ця напруженість — величина векторна: вона має абсолютне значення і напрям. Тому ще фізики XIX ст. услід за Фарадеем стали схематично зображувати електричне поле стрілками, де напрями стрілок відповідають напрямові напруженості, а густина стрілок — її абсолютній величині. Для поля, створюваного точковим зарядом Q , з закону Кулона легко отримати:

$$\vec{E} = k_o \frac{Q\vec{r}}{r^3}.$$

Далеко не очевидно, що закон, установлений на основі експериментів із макротілами, буде чинним і для взаємодії заряджених мікрочасток. За часів Кулона учені виходили з припущення, що закони мікросвіту й макросвіту тотожні. Це припущення виявилось не завжди правильним — як показав розвиток квантової та релятивістської механіки у XX столітті. Проте закон Кулона виявився чинним і для мікросвіту. 1910 року Резерфорд створив теорію взаємодії заражених α -частинок із ядрами атомів. Він виходив із припущення, що закон Кулона працює на відстанях порядку діаметра атома. Ця теорія підтвердилася дослідями, які розкрили «загадки» структури атомів.

Сучасна фізика вважає, що закон Кулон «відмовляється працювати» лише на відстанях порядку діаметра атомних ядер, тобто в царині дії ядерних сил, і лише тому, що ядерні сили значно більші за кулонівські.

Алессандро Вольта (1745–1827)

Народився майбутній учений на півночі Італії, в Комо, родовому маєтку, де його предки жили протягом багатьох століть. Він став дитиною таємного шлюбу падре Філіппо Вольта та Маддалени, дочки графа Інзагі. Малого Алессандро віддали на виховання в село і не надто ним переймалися, тому в ранньому дитинстві він сильно відставав від однолітків — навіть говорити

навчився швидко в чотирирічному віці. Але згодом Вольт швидко надолужив загаяне. У десятирічному віці його вразили вісті про землетрус, який зруйнував Ліссабон, і він пройнявся бажанням збагнути причину таких явищ природи.



Алессандро Вольт

Вольт навчався в школі ордену єзуїтів і, коли мав 18 років, інтенсивно листувався з одним із найвідоміших тогочасних фізиків — преподобним абатом Нолле (тим самим, котрий показав королеві Франції дослід із «лейденською банкою», що вражає електрикою загін мушкетерів). А в 23 роки, довідавшись про роботи Франкліна, він будує в себе на батьківщині перший блискавковідвід. У 29 років Вольт стає викладачем фізики в гімназії в Комо, а в 34 — професором університету в Павії. Свої лекції він читав італійською, відмовившись від традиційної латини, мало зрозумілої для більшості студентів.

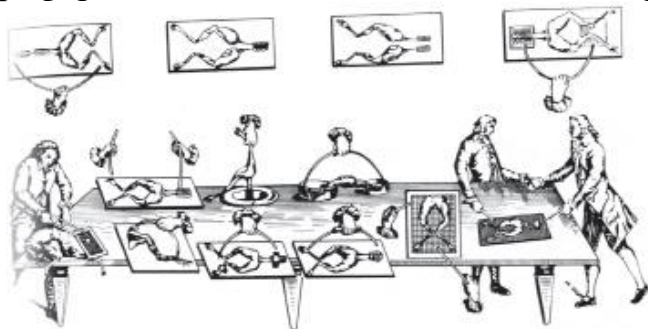


Електрофор Вольт

У 30 років Вольт вже знаменитий, оскільки винайшов електрофор — прилад для дослідів зі статичною електрикою. Він складається зі смоляного диска й металеві кришки трохи меншого діаметра. Кришка має скляну ручку, за яку її можна брати, щоб покласти кришку на диск або зняти з нього. Диск треба було натерти шерстю (це надавало йому негативного заряду) і після цього покласти на нього кришку. Під впливом негативного заряду диска нижня частина її заряджалася позитивно, а верхня — негативно. Доторкнувшись на мить до кришки заземленим провідником, із неї видаляли негативний заряд. Знявши кришку, експериментатор отримував вільний позитивний заряд. Доторкнувшись пальцем, можна було видобути іскру. Головне, що цю операцію можна було проробити багато разів, не заряджаючи більше смоляний диск. Електрофор Вольт — безвідмовний прилад для отримання потужних розрядів електрики.

На вченого сиплються почесні від багатьох академій. Він отримує вищу нагороду Лондонського королівського товариства — медаль Коплі. Ця медаль, установлена на пожертвуванні сером Годфрі Коплі 100 фунтів (виплачуються відсотки від цієї астрономічної для XVIII ст. суми) присуджується й досі, а її першим лауреатом став 1731 р. першовідкривач електропровідності Стівен Грей. Вольта багато подорожує: Брюссель, Амстердам, Париж, Лондон, Берлін. Серед його друзів — Бенджамін Франклін, у той час представник англійських колоній у Північній Америці в Парижі.

Але його головне відкриття — ще попереду. Професорові Вольта 1791 року потрапив на очі щойно виданий трактат його знайомого, лікаря Луїджі Гальвані (1737–1798) «Про електричні сили в м'язах». За переказом, Гальвані виявив дію електрики на м'язи жаби, коли препарував плазуна для приготування «лікувального» (за уявленнями XVIII століття) супу поблизу електрофора, який випадково виявився в лабораторії.



Досліди Гальвані з жабами

Гальвані зауважив здригання лапок обезголовленого плазуна і спробував повторити ефект — але безуспішно. І тільки після безлічі спроб він зрозумів: м'язи скорочуються тільки тоді, коли до них одночасно доторкнутися двома різними металами, що перебувають у контакті між собою (наприклад — залізом і латунню).

Відкриття Гальвані зумовило виникнення терміна «гальванічна електрика», а також започаткувало нову науку — електрофізіологію. По всій Європі ставлять досліди з трупами людей (смертну кару тоді застосовували часто, і «свіжих» шибеників не бракувало). Від прикладання металевих контактів у трупів здригаються м'язи, розплющуються очі. Пішов поголос, що «гальванічною електрикою» можна воскрешати мертвих!

Прочитавши трактат, Вольта доходить висновку: головне — не ефемерна «гальванічна електрика» м'язів, а те, що ефект спостерігався лише тоді, коли лапок торкалися двома різними металами, що перебувають у контакті. Вольта вирішує поставити видозмінений дослід на самому собі.

«Зізнаюся, я з невірою і дуже малою надією на успіх узявся до перших дослідів: таким неймовірними здавалися вони мені, такими далекими від усього, що нам досі відомо було про електрику. Нині я навернувся на віру, сам був очевидцем, сам чинив дивовижну дію, і від невіри перейшов, можливо, до фанатизму!». Вольта брав дві монети з різних металів і клав їх собі до рота: одну на язик, другу — під язик. Якщо ці монети Вольта сполучав дротинкою, то

відчував солонуватий смак. З дослідів, проведених раніше з машиною Отто фон Геріке й власним електрофором, Вольта знав, що такий смак викликає електрика.

Вольта зрозумів, що головне — це контакт між металами, розділеними якимось слабким провідником (на кшталт рідини у власному язичку чи в кінцівках препарованої жаби). Тому він поставив одне на одне понад сто металевих (цинк і срібло) кружалець, розділених змоченим солоною водою папером, а у вдосконаленому варіанті — сукном, змоченим розчином сірчаної кислоти, й отримав досить потужне джерело електрики — «вольтів стовп». На противагу машині Геріке й електрофору, «вольтів стовп» діяв не одну мить розряду, а постійно.



Перший гальванічний елемент Вольта

Принцип дії гальванічного елемента Вольта простий: електроліт (сірчана кислота) дисоціює на 2H^+ і SO_4^{2-} . Електродний потенціал цинку вищий, аніж у міді. Атоми цинку у присутності іонів водню гідратуються, їхній зв'язок із ґраткою послаблюється, і деяка кількість, відриваючись від металу, перейде в розчин, народивши еквівалентну кількість електронів: $\text{Zn} = \text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^-$. Електрони перейдуть на мідь, електронний потенціал якої нижчий від цинку. Позитивно заряджені іони водню будуть захоплювати ці електрони з міді, і поблизу мідного електроду стовпа почнуть утворюватися бульбашки молекул водню H_2 . Таким чином, мідь перетворюється на позитивний електрод батареї, а цинк — на негативний. Якщо їх з'єднати провідником, по ньому тектиме струм.

20 березня 1800 року Вольта повідомив про свої дослідження Лондонському королівському товариству (звісно, деталей викладеної вище електрохімії він іще не знав). Учені добре зрозуміли значущість цього відкриття для дальшого поступу науки й техніки: буквально відразу після цього повідомлення англійці Вільям Ніколсон і Ентоні Карлейль розклали з допомогою «вольтового стовпа» воду на водень і кисень. Збільшенню популярності й розширенню дослідів із електрикою сприяло запрошення Вольта до Парижа — читати лекції відомим фізикам Франції.

Дорогою до Парижа в різних містах на честь Вольта було організовано почесні зустрічі й бенкети. У Парижі всі академіки, названі «безсмертними» (бо на місце померлого відразу ж обирали нового), змагалися один із одним виявами уваги. Вольта вітали фізики Лаплас, Кулон, Біо, хімік Бертолле, палеонтолог Кюв'є та інші тогочасні «світила».

Його прийняв сам Перший консул Франції, майбутній імператор Наполеон Бонапарт. Він дуже цікавився науками, слушно вважаючи, що сила держави в новому, XIX столітті буде немислимою без процвітання наук. Наполеонові, котрий узяв в єгипетський похід цілу команду вчених для дослідження цієї тоді ще мало відомої європейцям країни, належить крилата фраза: «учених і віслюків у середину колон!». За будь-яких військових сутичок ні вчені, ні єдина тоді тяглова сила не мусили постраждати...

Завдяки прихильності Наполеона Вольта став лицарем орденів Почесного легіону, Залізного Хреста, отримав звання сенатора й графа.



Вольта демонструє дію гальванічного елемента Наполеону Бонапарту, 1801

Наполеон досить часто відвідував засідання Французької академії наук, тим паче, що він сам був академіком по класу геометрії. Одного дня імператор побачив у бібліотеці академії лавровий вінок із написом «Великому Вольтеру» і закреслив останні літери — вийшло: «Великому Вольту».

Слід пам'ятати: у наполеонівській Франції на початку XIX ст. відбувалося справжнє піднесення науки. Саме в цей час у Франції вперше у світі з'явилися вчені-професіонали, для яких головним заняттям було не викладання і не якісь інші види діяльності, як-от, керування будівництвом фортець чи завідування монетним двором, а власне дослідження. Наполеон запровадив у практику широку підтримку (зокрема й матеріальну) вчених із боку держави.

Імператор сприяв створенню в селі Аркюель під Парижем наукового товариства, до якого ввійшло рідкісне сузір'я наукових талантів — Гей-Люссак, Араго, Лаплас, Гумбольдт та інші. У дерев'яних будинках цього «академістечка» відбувалися гарячі наукові суперечки між ученими. Будь-яка талановита людина могла знайти там не лише моральну підтримку, але й можливість попрацювати в спеціально створеній лабораторії.

Прихильне ставлення Наполеона до наук пояснюють тим, що одним із викладачів у Військовій школі, де вчився Наполеон, був знаменитий французький математик, астроном і фізик П'єр-Симон Лаплас (1749–1827). Блискучий учений, автор першої гіпотези походження Сонячної системи з пилової туманності, справив на майбутнього імператора незабутнє враження. Згодом Лаплас став технічним експертом, членом сенату і другом Наполеона.

Імператор Франції особисто відвідав лекції Вольта в Парижі і заснував щорічну золоту медаль і премію в 3 тисячі франків за найкращі роботи в галузі

«вольтаїчної» електрики. Крім того, він заснував і разову премію: «Я бажаю для заохочення дослідників заснувати премію в 60 тисяч франків тому, хто своїми експериментами й відкриттями просуне електрику та гальванізм до рівня, який можна буде порівняти з рівнем досліджень Вольта і Франкліна. Іноземців також належить допускати до конкурсу на рівних підставах».

Старість свою Алессандро Вольта провів у рідному місті Комо на півночі Італії, де колись викладав фізику в гімназії й займався електричними дослідженнями.

Про професора фізики Павійського університету Алессандро Вольта знаменитий французький фізик, один із представників «Аркюельського сузір'я» Доменік Франсуа Араго говорив так: «Сміливий і швидкий розум, великі й правильні думки, м'який і щирий характер — такі були основні якості знаменитого професора. Ніколи честолобство, жадоба до грошей, дух суперництва не керували його діями. Єдина пристрасть, якої він зазнавав, була любов до досліджень». Його біограф Монті писав: «Ніхто не міг би відволікти його від роздумів, у які він занурювався так глибоко, що всі інші думки, здавалося, в ньому згасали». Гучна слава, що досягла вершини після винаходу «вольтового стовпа», мало хвилювала вченого.

Вольта прожив довге й щасливе життя. Він був відданим сином, люблячим чоловіком і батьком трьох синів. На жаль, майже всі його особисті речі, прилади, а також одинадцять величезних тек його праць згоріли під час пожежі.

Проте пам'ять про Вольта живе в назві одиниці напруги в 1 вольт, яку було запроваджено в 1873 р. Британською асоціацією розвитку науки. Спершу її було визначено як різницю потенціалів (тепер уживають термін «напруга») на провіднику, де при проходженні струму в 1 А генерується потужність в 1 Вт. Тепер 1 В у системі СІ визначають як різницю потенціалу на провіднику, де при проходженні заряду в 1 Кл розсіюється енергія в 1 Дж.

У музеї міста Комо є запис професора Берцоларі: Вольта «був найбільшим фізиком, котрий жив в Італії після Галілея».

Ганс Крістіан Ерстед (1777–1851)

Народився майбутній фізик (його прізвище точніше було б відтворювати як Орстед) у маленькому містечку на данському острові Лангеланн у сім'ї бідного аптекаря. Початкову освіту він здобував «принагідно»: міський перукар навчав його німецької мови, його дружина — данської, пастор маленької церкви навчив його правил граматики, ознайомив з історією та літературою, землемір навчив математичних дій — додавання й віднімання, а заїжджий студент розповів Гансові дивовижні речі про властивості мінералів і привчив любити «аромат» таємниці.



Ганс Крістіан Ерстед

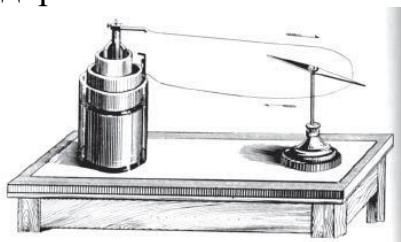
За стійкою батьківської аптеки Ганс долучається до медицини, потім він вступає до Копенгагенського університету й береться за вивчення всього — медицини, фізики, астрономії, філософії, поезії. Золоту медаль університету йому присудили за літературну роботу «Межі поезії й прози». Високо оцінено й роботу з хімії про властивості лугів, а дисертацію, за яку він отримав у 1798 р. ступінь доктора філософії, було присвячено медицині.

Після захисту Ерстед поїхав на стажування до Франції, Німеччини, Голландії. Він слухає лекції видатних філософів, не завжди погоджуючись із ними, особливо коли йдеться про проблему значення експериментальних досліджень фізичних явищ. Водночас він у захваті від праць німецького філософа-ідеаліста Фрідріха Шеллінга, — особливо вразила його шеллінгівська ідея про загальний зв'язок усіх фізичних явищ поміж собою. Ерстед побачив у ній виправдання власної різнобічності, «розкиданості».

1806 року Ерстед став професором Копенгагенського університету. Перейнятий вірою у філософію Шеллінга, він багато роздумував про зв'язки між теплотою, світлом, електрикою й магнетизмом. 1813 року у Франції виходить його робота «Дослідження ідентичності хімічних і електричних сил». У цій роботі Ерстед уперше висловлює ідею про зв'язок електрики й магнетизму. Він писав: «Слід перевірити, чи не справляє електрика якої-небудь дії на магніт». Його міркування були достатньо логічними: електрика породжує іскру-світло, тріск-звук, нарешті, вона може проводити тепло — дріт, що замикає клема джерела струму, нагрівається. Чи не може електрика чинити магнітної дії? Ідея зв'язку електрики й магнетизму витала в повітрі.

У лютому 1820 року Ерстед читав лекцію студентам, демонструючи теплову дію електричного струму. Поряд із дротом, що замикає електричне коло, випадково опинився компас із магнітною стрілкою на вістрі. Ця стрілка «чомусь» відхилялася, коли замикалося коло, й поверталася в початкове положення, коли воно розмикалося. Студенти потім розповідали, що то один із них звернув увагу на «дивну» поведінку магнітної стрілки. Натомість сам Ерстед у своїх подальших роботах писав: «Всі присутні в аудиторії були свідками того, що я заздалегідь оголосив про результат експерименту. Відкриття, таким чином, не було випадковістю, як хотів би подати це професор

Гільберт, виходячи з тих виразів, які я використовував, коли вперше сповістив про відкриття».



Дослід Ерстеда

Хоч би як там було насправді, але в цьому разі випадковість виявилася закономірною: Ерстед був у числі тоді ще небагатьох дослідників, що вивчали зв'язок між явищами електрики й магнетизму. У кожному разі, данський професор відразу ж поставив простий і переконливий дослід для перевірки виявленого ефекту. Ерстед з'єднав довгим дротом полюси «вольтового стовпа» й протягнув цей дріт горизонтально й паралельно до вільно підвішеної магнітної стрілки. Щойно вмикали струм, стрілка прагнула стати перпендикулярно до дроту. За зміни полярності струму стрілка відхилялася в протилежний бік, а за його вимкнення поверталася в початковий стан.

Результат досліду Ерстеда вразив уми сучасників ще й тому, що прямо порушував третій закон Ньютона: напрями електричної та магнітної дій виявилися перпендикулярними один до одного (цю суперечність вдалося зняти лише в ХХ ст., розглянувши сумарний імпульс замкнутої системи рухомих електронів, які створюють струм, та електромагнітного поля).

Чотиристорінковий мемуар Ерстеда з описом досліду вийшов у світ у липні 1820 року. Подальші події розвивалися дуже стрімко — такий темп ще був незвичним для неквапної тодішньої науки. Через декілька днів мемуар потрапив до Женеви, де в цей час перебував Домінік Франсуа Араго. Він відразу зрозумів, що знайдено вирішення проблеми, над якою він та інші вчені працювали дуже довго. Враження від демонстрованого досвіду було настільки велике, що один з присутніх із хвилюванням вимовив: «Панове, відбувається революція!».

Окрім видатного відкриття зв'язку електрики з магнетизмом професор Копенгагенського університету й водночас директор політехнічної школи Ерстед одним із перших висловив думку (1821) про те, що світло є електромагнітним явищем. У 1822–23 роках він ще раз виявив термоелектричний ефект — його незалежно відкрив німецький фізик Томас Зеєбек (1779–1831) у 1822 році — і побудував перший термоелемент. Елемент складався з двох вісмутових пластинок, з'єднаних мідним дротом. Після того, як одну з пластинок занурювали в гарячу, а другу — в холодну воду, в колі виникав струм (який виявляли за відхиленням магнітної стрілки), величина якого була пропорційною до різниці температур контактів. Ерстед проводив дослідження з акустики, намагався виявити виникнення електричних явищ під дією звуку.

Ганс Крістіан Ерстед був блискучим лектором і популяризатором науки. 1824 року він організував Товариство з поширення природничо-наукових знань, створив першу в Данії фізичну лабораторію, сприяв поліпшенню викладання фізики в навчальних закладах. Він — почесний член багатьох іноземних академій наук. Водночас учений був і талановитим поетом та письменником. У 1854 р. видали збірку есеїв «Дух у Природі», що стали посмертним підсумком його тривалих спостережень та роздумів.



Пам'ятник Ерстеду в Копенгагені, споруджений 1880 р.

Ще за життя Ерстед став національним героєм Данії. В останню дорогу його проводжали вчені, урядовці, члени королівської родини, дипломати багатьох країн, студенти й прості данці — загалом понад двісті тисяч чоловік.

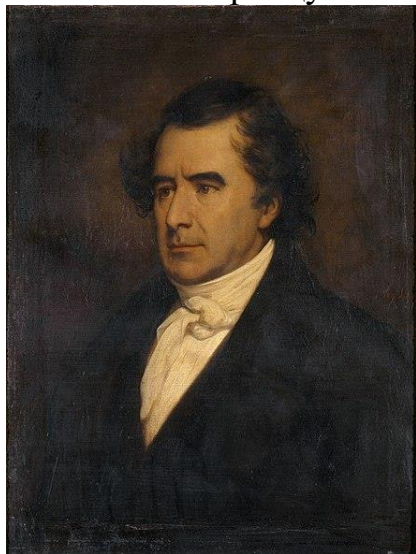
Визначний французький учений Андре Марі Ампер писав про данського колегу Ганса Крістіана Ерстеда так: «Учений данський професор-фізик своїм великим відкриттям проклав фізикам новий шлях досліджень. Ці дослідження не залишилися безплідними; вони зумовили відкриття безлічі фактів, гідних уваги всіх, хто цікавиться поступом».

На честь ученого Міжнародна електротехнічна комісія запровадила в 1930 р. одиницю напруженості магнітного поля в системі СГС в 1 ерстед, що дорівнює напруженості поля на відстані 2 см від нескінченно довгого провідника, в якому протікає струм у 10 А.

Франсуа-Жан-Домінік Араго (1786–1853)

Араго, котрий одним із перших оцінив значення відкриття Ерстеда, народився в південній Франції і в 1803–1805 рр. навчався в Політехнічній школі в Парижі. Як член «Аркюельського гуртка» він брав участь у вимірюванні дуги паризького меридіана, потому як було запроваджено нову одиницю довжини —

метр. Коли наполеонівські війська вторглися в Іспанію, іспанці ув'язнили французького вченого. Араго вдалося втекти й заховатися в трюмі вітрильника, що прямував до Алжиру. Але коли він повертався з Африки на батьківщину, його знову взяв у полон іспанський крейсер. Тільки 1809 року, після безлічі небезпечних пригод, учений повертається до Парижа, де за кілька днів його обирають членом Французької академії.



Франсуа Араго (портрет пензля Анрі Шеффера, 1842)

З 1809 року Араго — професор Політехнічної школи, паралельно з 1813 року працює в Паризькій обсерваторії. З 1830 року й до кінця життя він — неодмінний секретар Французької академії наук. У 1830–1848 роках (це часи ліберальної монархії Луї-Філіпа) вченого кілька разів обирають членом палати депутатів, а після встановлення республіки він короткий час навіть очолює її виконавчий комітет.

Роботи Араго надзвичайно різнопланові. Вони належать до астрономії, фізики, математики, метеорології. Він обстоював хвильову природу світла (всупереч панівним тоді корпускулярним уявленням), сприяючи прояві класичних робіт Огюстена Френеля. Саме на пропозицію Араго Іпполіт Жан Фізо (1819–1896) і Жан Фуко (1819–1868) поставили свої класичні дослідження з визначення швидкості світла, а Урбан Левер'є теоретично передбачив за збуреннями орбіти Урана наявність ще однієї планети Сонячної системи — Нептуна, яку 1846 року німецький астроном Галле й виявив у передбаченому місці на небосхилі.

Із впливом електрики на магнетизм Араго зустрівся ще замолоду, під час іспанської експедиції. Він сам став свідком розмагнічування компаса корабля, спричиненого ударом блискавки, тобто електричним розрядом. Тому, щойно дізнавшись про відкриття Ерстеда, Араго негайно розпочав серію цікавих дослідів. Він обвинув мідним дротом скляну рурку, в яку ввів залізний стержень. Щойно дріт увімкнули в електричне коло, стержень сильно намагнітився й до його кінця міцно прилипли залізні ключі. Але коли струм вимкнули, ключі відпали.

Араго вважав, що провідник, по якому йде струм, стає магнітом. Але правильне пояснення цього явища дав Ампер.

**Андре-Марі Ампер
(1775–1836)**

Ампер в історії науки відомий насамперед як основоположник електродинаміки. Проте він був універсальним ученим, котрий мав заслуги в царинах математики, хімії, біології, філософії, лінгвістики. Ампер висловив думку про те, що в майбутньому, ймовірно, виникне нова наука про загальні закономірності процесів керування й запропонував назвати цю нову науку кібернетикою. Це був блискучий розум, що приголомшував своїми енциклопедичними знаннями. Водночас він був дивовижно забудькуватою людиною, про яку складали анекдоти. Якщо вірити одному з них, якимсь він кілька хвилин варив власний годинник, тримаючи в руці яйце.



Андре Марі Ампер

Народився майбутній учений у сім'ї ліонських торговців, його дитинство минуло в невеликому маєтку, який його батько купив в околицях Ліона. Андре ніколи не вчився в школі, але читанню й арифметиці навчився дуже рано й швидко. Читав Андре усе, що знаходив у батьківській бібліотеці. У 14-річному віці він прочитав усі двадцять вісім томів знаменитої французької «Енциклопедії», яку видали Дідро й д'Аламбер.

Особливу цікавість виявляв Андре Ампер до фізики й математики, але саме таких книг у батьківській бібліотеці було обмаль. Тому батько запросив до сина вчителя математики. Незабаром учитель відмовився від уроків, оскільки його знань явно не вистачало для учня, котрий уже вмів інтегрувати. Батькові довелося купити чимало книг та геометричних приладів, без яких, як він писав, «мій син не міг обійтися».

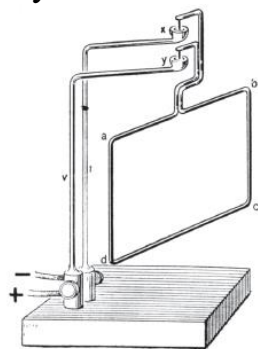
Захоплюючись математикою, Андре Ампер у 13-річному віці подав до Ліонської академії наук своє розв'язання задачі про квадратуру круга. Відомо, що ця задача принципово нерозв'язна.

1789 року почалася Велика французька революція, яка стала трагедією для родини Амперів. Батька Андре, мирового суддю в Ліоні, стратили на гільйотині. Після загибелі батька й конфіскації майна Амперу, котрий дуже тяжко пережив ці події, довелося заробляти на прожиття. Спочатку він давав приватні уроки математики, а 1802 року його запросили викладати фізику й хімію в Центральну школу (університет) Ліона. Почалася постійна викладацька діяльність Ампера, якою він займався до кінця життя.

Наприкінці 1804 року Ампер отримав посаду викладача в знаменитій Політехнічній школі Парижа. Ця школа функціонувала на той час уже 10 років і стала національною гордістю Франції: тут готували високоосвічених технічних фахівців з глибокими знаннями фізико-математичних наук.

Час розквіту наукової діяльності Ампера припадає на період із 1814 по 1826 рік; за перші шість років було отримано значні математичні результати, а за другі шість років — видатні результати в царині фізичних досліджень. Завдяки досягненням у царині математики 39-річний Ампер стає академіком по секції геометрії. Так він став рівним у колі «безсмертних», до якого тоді належали Лаплас, Пуассон, Фур'є, Коші, Араго, Монж, Біо, Френель, Гей-Люссак, Савар.

Спалах генія Ампера стався у вересні 1820 року, коли Домінік Араго продемонстрував на засіданні Французької академії досліди данського професора Ерстеда. Весь накопичений науковий потенціал Ампера з проблеми взаємозв'язку електрики й магнетизму було актуалізовано практично за два тижні. Наприкінці першого тижня Ампер зробив дуже важливе відкриття — виявив взаємодію паралельних струмів. Використовуючи чутливу вертикальну чотирикутну рамку зі струмом, яка могла обертатися навколо вертикальної осі на підвісі, й підносячи по черзі до її бічних сторін інший провідник, він установив, що два паралельні дроти, по яких тече струм в однаковому напрямі, притягуються один до одного, а якщо напрями струмів протилежні, дроти відштовхуються.



Прилад Ампера

Після цього Ампер замінив рамку вільно підвішеним спіральним дротом. Цей дріт (учений назвав його «соленоїдом»), коли по ньому пропускали струм, набував властивостей магніту. Ампер пояснив виявлене явище тим, що коловий

струм створює сильне магнітне поле, й запропонував розглядати магнетизм узагалі як явище, створюване коловими струмами. Кожна молекула, за Ампером, є маленьким магнітиком із коловим струмом, і зовнішнє поле може вишикувати ці магнітики однойменними полюсами в один бік — саме це й відбулося в досліді Араго. Введений у рурку залізний стержень став магнітом тому, що навколо йшов струм. Араго створив перший електромагніт.

Сьогодні вся електротехніка «пронизана» законом Ампера. У 1827 році вчений опублікував свою підсумкову працю «Мемуар про математичну теорію електродинамічних явищ», що дала назву новій науці. Електродинаміка, яку створив Ампер, зіграла величезну роль не лише в історії розвитку фізики, але й в історії людської цивілізації.

На його честь названо місто, залізничну станцію, науково-дослідний центр; є музей Ампера й «Товариство друзів Ампера». Одиницю виміру сили електричного струму в системі СІ — один ампер — прирівняли до сили такого постійного струму, який, біжучи по двох прямих паралельних нескінченних провідниках із незначним поперечним перетином, розташованих на відстані 1 метр один від одного у вакуумі, створював би між цими провідниками силу $2 \cdot 10^{-7}$ ньютонів на метр довжини. Таке визначення з'явилося історично, щоб зберегти одиницю в 1 А, запроваджену ще в 1881 р. у системі СГС для струмів, що змушують два нескінченно довгі провідники, розташовані на відстані 1 см один від одного, взаємодіяти з силою 2 дини на 1 см довжини. З 2019 р. ампер є вже похідною одиницею системи СІ, що визначається як $1\text{А} = 1\text{Кл} / 1\text{с}$.

Із дослідних закономірностей було запроваджено величину магнітної індукції B , яка характеризує інтенсивність магнітного поля. Вирази для магнітної індукції, що її створює струм I , протікаючи по провіднику, на відстані R від цього провідника, дає закон Біо-Савара — його відкрили Жан-Батіст Біо (1774–1862) та Фелікс Савар (1791–1841) того-таки 1820 року, такого багатого на події в історії електродинаміки:

$$\frac{k \cdot I_1}{R} = B_1,$$

$$\frac{k \cdot I_2}{R} = B_2,$$

де k — коефіцієнт пропорційності, вигляд якого залежить від вибору системи одиниць.

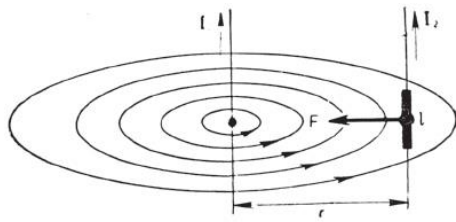
Силкові лінії магнітної індукції навколо провідників мають форму кіл. Звідси, виходячи з узагальненого закону Ампера, який описує силу, що діє на елемент провідника завдовжки δl , по якому протікає струм I , з боку магнітного поля з індукцією B , спрямованого під кутом α до провідника:

$$\delta F_A = k \cdot B \cdot I \cdot \delta l \cdot \sin \alpha,$$

де сила Ампера F_A спрямована в напрямку, перпендикулярному й до напрямку струму, й до напрямку магнітного поля (напрямок її визначається правилом лівої руки), легко отримати вираз для сили взаємодії двох паралельних провідників:

$$F = B_1 \cdot I_2 \cdot l,$$

$$F = B_2 \cdot I_1 \cdot l.$$



Взаємодія паралельних струмів

Якщо підставити у перший вираз B_1 із закону Біо–Савара (або ж у другий вираз — B_2), легко записати закон Ампера для сили взаємодії паралельних провідників:

$$F = K \frac{2I_1 I_2}{R} l.$$

У системі СІ коефіцієнт пропорційності K дорівнює $\mu_0/4\pi$, де універсальна магнітна стала $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Н/А}^2$.

Георг Симон Ом (1787–1854)

Головне наукове досягнення Георга Ома — два закони його імені: закон Ома для ділянки кола з опором R (U — падіння напруги на цій ділянці, I — сила струму):

$$I = \frac{U}{R};$$

та закон Ома для повного кола, де E — електрорушійна сила, r — внутрішній опір джерела ЕРС, R — зовнішній опір, I — струм у колі.

$$I = \frac{E}{R + r}$$

Перший із цих законів було сформульовано в 1826-у, другий — у 1827-у році.

На відміну від відкриттів Вольта, Ерстеда, Ампера, Фарадея, відкриття цих законів не зумовило революційних змін у науковому світогляді. До Ома в цьому напрямку працювали й інші дослідники, зокрема визначний англійський фізико-хімік Гамфрі Деві, якого ми вже згадували в другій частині нашої книжки. Але без формулювання Омом його простих законів неможливий був би подальший розвиток електротехніки, конструювання електричних машин, які досі є основними в промисловості й на транспорті. Значення закону Ома для розрахунку електричних кіл і радіосхем неможливо переоцінити.



Георг Ом

Георг народився в баварському місті Ерлянгені неподалік від Нюрнберга в родині слюсаря, котрий успадкував ремесло своїх предків. Його мати померла, коли Георгу виповнилося сім років. Батько присвятив усе своє життя освіті дітей. Насилу зводячи кінці з кінцями, він ніколи не шкодував грошей на книги, привчаючи дітей до самостійного навчання.

Георг успішно закінчив гімназію та вступив на філософський факультет Ерлянгенського університету, де вивчав математику, фізику й філософію. Неабиякі здібності й солідна попередня підготовка зробили навчання Ома в університеті легким та успішним. У бурхливому студентському житті він завжди був на становищі першого: найкращий більярдист серед студентів університету, найкращий ковзаняр, прекрасний танцюрист на студентських вечорах.

Проте матеріальна скрута не дозволяє продовжити навчання. Після трьох семестрів Георг Ом стає вчителем математики у приватній школі в Швейцарії. Потім, повернувшись до Ерлянгена, він протягом одного року закінчує університет, захищає дисертацію та отримує ступінь доктора філософії.

Викладацька робота цілком відповідала бажанням і здібностям Ома. Незабаром учений отримує запрошення на місце вчителя математики й фізики в Кельні, де він «перетворюється» з математика на фізика і відкриває закони, які обезмертили його ім'я. Попри позірну простоту законів, перед Омом постало зовсім непросте завдання. Такі поняття, як напруга, падіння напруги, опір провідників ще не увійшли до наукового обігу й не стали звичними характеристиками електричного струму.

Не було електровимірювальних приладів — їх ще треба було створити. Невідомим був і механізм роботи гальванічних і термоелектричних джерел, хоча самі елементи було вже створено. Різні струми по-різному нагрівали провідники, це позначалося на їхніх опорах. Експериментатори намагалися знайти співвідношення між величинами, що характеризують електричний струм, але це їм не вдавалося.

На шляху до встановлення основного закону електричних кіл (1826) ученому довелося здолати кілька суттєвих перешкод.

По-перше, за браком приладів для вимірювання сили струму, Омові довелося скористатися крутильними терезами, до яких замість кульок (як у дослідах Кулона й Кавендіша) підвішено були рамки зі струмами, подібні до тих, що їх використав у своєму першому досліді Ампер. Взаємодія між струмами була пропорційна їхній силі — її й вимірювали крутильні терези.

По-друге, на той час ще не існувало стабільних джерел напруги. Електрорушійна сила «вольтового стовпа» після ввімкнення досить швидко зменшувалася. Тому Ом використав термоелемент, що його сконструювали незалежно Зеебек та Ерстед (у своїх дослідках він працював із термопарою вісмут-мідь, один із кінців якої було занурено в лід, другий — в окріп).

Учений виміряв у 1825 р. залежність кута закручування від довжини однорідного провідника (тепер ми розуміємо, що опір пропорційний довжині), й отримав криву, яку записав виразом

$$X = \frac{a}{x + b},$$

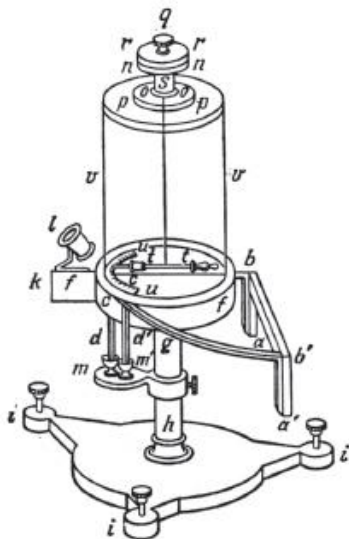
де X — сила магнітної дії провідника (яка визначалася кутом закручування), a — стала, яка визначала електрорушійну силу (е.р.с.) термопари, x — довжина провідника, b — константа, яка визначала провідність усього кола.

Тут ще немає звичних для нас понять сили струму, е.р.с., зовнішнього та внутрішнього опору. Вони з'являться дещо пізніше.

У наступній праці (1826 рік) Ом уводить поняття «електроскопічної сили», користується поняттям сили струму та записує закон для ділянки кола вже у формі, дуже близькій до сучасної:

$$X = \frac{kwa}{l},$$

де X тепер уже — сила струму, k — провідність, w — поперечний переріз провідника, a — електроскопічна сила (сучасною мовою — напруга), l — довжина провідника. Фактично тут записано перший закон Ома, а через рік, з урахуванням кривої, отриманої ще в дослідках 1825 року, було одержано ще й другий закон.



Прилад Ома для визначення залежності струму від опору

За результатами цих дослідів у 1827 році було опубліковано монографію «Теоретичні дослідження електричних кіл», у якій Ом запропонував характеризувати електричні властивості провідника його опором, сформулював закони для ділянки кола й для повного кола.

Хоч як це дивно, але абсолютно логічна й переконлива робота Ома викликала в сучасників недовіру — можливо, саме через свою простоту. А поза межами Німеччини про неї довго просто не знали: Фарадей на початку 1830-х фактично «перевідкривав» речі, які з погляду законів Ома мали бути очевидними. Провінційний учитель Ом зазнав від колег у Німеччині справжнього цькування, звинувачень у шарлатанстві, його кар'єру на певний час було зруйновано. Вчений був на межі розпачу й зневіри. Тільки 1841 року роботу Ома було перекладено англійською мовою, 1847 року — італійською, 1860 року — французькою. Остаточним актом визнання стало те, що Лондонське королівське товариство нагородило Ома золотою медаллю Коплі й обрало своїм членом.

Дуже емоційно відгукнувся про заслуги німецького вченого його сучасник, американський фізик Джозеф Генрі: «Коли я вперше прочитав теорію Ома, то вона мені здалася блискавкою, що раптом освітила кімнату, занурену в морок». 1852 року Ом нарешті отримав посаду ординарного професора в Мюнхені, столиці Баварії, про яку мріяв усе своє життя. Через рік він одним із перших отримав щойно заснований орден «За видатні досягнення в царині науки», а ще через рік учений помер.

Працював Георг Ом не лише в галузі електрики. Йому належить і низка важливих результатів з акустики. У 1843 році він установив закон (який також називають «законом Ома»), згідно з яким людське вухо пізнає лише прості гармонічні коливання; кожен складний звук розкладається вухом на складові (за законом Фур'є) і пізнається лише як їхня сума. За лихою іронією долі, цей закон теж не був сприйнятий сучасниками Ома, і лише Гельмгольц через вісім років після смерті Ома довів його повну справедливість.

Дослідження Ома викликали до життя нові ідеї, розвиток яких сприяв поступу вчення про електрику. 1881 року на електротехнічному з'їзді в Парижі вчені одноголосно затвердили назву одиниці опору — один ом. За такого опору струм в один ампер спричиняє падіння напруги на один вольт.

Огюстен Френель (1788–1827)

Ми вже згадували про те, що 1821 р. Ганс Крістіан Ерстед уперше висловив здогад про те, що світло є електромагнітним явищем. Це сталося після публікацій основоположних праць француза Огюстена Френеля, які остаточно довели науковому світові хвильову природу світла (майже впродовж століття перед тим під впливом авторитету Ньютона світло схильні були вважати потоком особливих корпускул).



Огюстен Френель

Майбутній учений був сином архітектора і народився в Броглі в Нормандії — назва цього замку присутня в титулі герцогів де Бройлів, з одним із яких, Луї де Бройлем, ми зустрінемося в наступній частині нашої книжки, присвяченій формуванню квантових уявлень. Вивчаючи явища дифракції, ньютонівих кілець, поляризації та подвійного променезаломлення світла, Огюстен Френель переконливо довів: їх можна пояснити, лише вважаючи світло хвилею, а не потоком корпускул. Отже, правий був Гюйгенс, а не Ньютон! Свої погляди Френель виклав у дисертації, поданій 1818 р. на розгляд Французької академії.

Френелеві пощастило розв'язати складну математичну задачу, яка виявилася не до снаги Гюйгенсові, і відсутність розв'язку якої залишалася впродовж довгого часу основним запереченням проти хвильової теорії. Розглянувши інтерференцію елементарних хвиль, які збуджуються кожною точкою хвильового фронту, Френель довів, що немає ніякої суперечності між прямолінійним поширенням світла та його відхиленням. Елементарні хвилі заходять і в тінь від предмета, але тут вони гасять одна одну, лишаючи тільки кілька світлих смуг біля межі тіні.

Тоді ж Френель запровадив поняття довжини хвилі, яке ми широко використовуємо сьогодні. Вивчаючи в 1821 р. поляризацію світла, він показав, що сукупність експериментальних даних можна пояснити, тільки виходячи з того, що світло є поперечними коливаннями (його попередник Томас Юнг схильний був у 1817 р. припустити й існування невеликої поздовжньої компоненти). Середовищем для поширення світлових хвиль Френель уважав особливу субстанцію — тонкий світловий ефір.

На жаль, плідну роботу вченого перервала рання смерть від поширених тоді сухот. Але Френель увійшов до історії науки як основоположник сучасної хвильової теорії світла, а саме світло після появи робіт Максвелла і дослідів Герца стали розглядати як один із численних проявів електромагнетизму.

На світоглядному рівні Френель знову повернувся до давнього, забутого вже на той час картезіанства, пояснивши численні оптичні явища не особливими властивостями матерії (ньютонівих корпускул), а особливими коливаннями цієї матерії (для нього — світлового ефіру).

Майкл Фарадей

(1791–1867)

Цей англійський учений зробив за своє 76-річне життя стільки відкриттів, що їх вистачило б доброму десятку дослідників, щоб обезсмертити своє ім'я. За п'ять років до своєї смерті він записав у лабораторний журнал свій останній фізичний дослід під номером 16041. А п'ять фундаментальних дослідів, поставлених восени 1831 року, розкрили таємницю електромагнітної індукції та зробили 40-річного вченого всесвітньо відомим. По суті, Майкл Фарадей вивів науку про електрику й магнетизм із лабораторій дослідників у корпуси заводів і в повсякденне життя мільйонів людей.



Майкл Фарадей (портрет пензля Томаса Філіпса, 1842)

Народився Майкл в одному з бідних районів Лондона в родині коваля. У початковій школі він навчився читати, писати й лічити. Після школи 13-річний Майкл улаштувався на роботу помічником палітурника в книгарню, де читав усе, що потрапляло під руку. Деякі із замовників його господаря, котрі належали до наукового світу, зацікавилися охочим до знань учнем палітурника й посприяли тому, щоб Майкл мав доступ на лекції, що їх учені читали для публіки. Так Фарадей потрапив на лекції великого англійського фізика й хіміка, першовідкривача низки хімічних елементів (калію, кальцію, натрію, барію, бору), фундатора електрохімії Гамфрі Деві. Свої докладні записи лекцій Майкл акуратно опрацював у палітурку й надіслав ученому з проханням знайти для нього будь-яку роботу, пов'язану з дослідженнями. Той був приємно здивований і запропонував Фарадею працювати в нього секретарем. На старості Деві з гордістю говорив, що найбільшим його відкриттям був саме Фарадей.

Незабаром учений вирушив у подорож Європою й узяв із собою Фарадея. Протягом двох років (1813–1815) вони відвідали найбільші європейські університети. Цікаво, що подорож ця розпочалася тоді, коли Велика Британія й Франція, яка ще контролювала Європу, перебували в стані війни — це почасти свідчить про те, що в Лондоні ставилися до своїх учених без надмірної уваги, дозволяючи їм вільно вирушати до ворожої країни.

Деві був світською людиною, і юний лаборант Майкл убирає досвід спілкування знаменитого вченого. Париж, Флоренція, інші великі міста, зустрічі з Ампером, Гей-Люссаком, іншими вченими — все було для Фарадея школою життя і заміном університетської науки. Але вищої математики він так ніколи як слід не опанував — і це перешкоджало йому в теоретичному узагальненні одержаних результатів.

Фарадей повернувся до Англії 1815 року й почав працювати асистентом в одній із лабораторій Королівського інституту в Лондоні. Завдяки Деві він віддає данину хімії: зріджує хлор та низку інших газів (1823), одержує бензол (1825). Але дуже швидко молодого вченого починає цікавити зв'язок хімічних і фізичних явищ. Він вивчає явище електролізу: осідання на електродах (позитивному — аноді, негативному — катоді) речовини під час проходження струму через розчин електроліту. Позитивно заряджені іони — катіони — рухаються до катода, негативно заряджені аніони — до анода. Фарадей експериментально встановлює (1832) два закони електролізу.

Свій перший закон сам Фарадей сформулював так: за рівної кількості електрики розкладаються рівні кількості різних електролітів. Сьогодні його записують дещо по-інакшому: маса речовини, що виділилася на електроді, прямо пропорційна електричному зарядові, що пройшов через електроліт:

$$M = kQ = kIt.$$

Тут k — електрохімічний еквівалент речовини.

Роботу, яку здійснив Фарадей для відкриття цього закону, можна зрозуміти з такого його запису: кількості електрики, необхідної для розкладу 1 грану (64,8 мг) води, було б досить, щоб зарядити велику «лейденську банку» 800000 разів; її миттєвий розряд відповідав би дії сильної блискавки. Сам Фарадей очевидно боявся цих великих цифр і навіть не спішив їх оприлюднювати (відповідну роботу було надруковано тільки в 1836 р.) — але інші дослідники їх підтвердили.

Другий закон у сьогоднішньому записі звучить: електрохімічні еквіваленти різних речовин співвідносяться між собою так само, як їхні хімічні еквіваленти. Хімічним еквівалентом речовини називається співвідношення молярної маси іона A до його валентності z . Звідси маємо:

$$k = \frac{1}{F} \cdot \frac{A}{z}.$$

Тут F — стала Фарадея. Вона фактично дає величину елементарного заряду (заряду електрона — хоча від встановлення законів електролізу до експериментального відкриття електронів проминуло понад 65 років) зі співвідношення $F = N_A \cdot e$. Отже, знаючи число Авогадро N_A й експериментально вимірявши електрохімічний еквівалент із першого закону електролізу, можемо вирахувати заряд електрона. Таким чином, було перекинуто місток між фізико-хімічним експериментом — і характеристиками елементарної частинки.

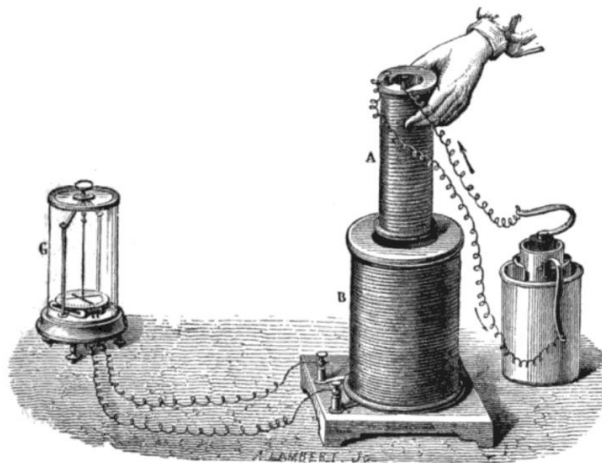
Пізніше Максвелл писав: «З усіх електричних явищ, як видається, електроліз найбільшою мірою може дати нам справжнє заглиблення в істинну природу електричного струму, оскільки в цьому випадку перенесення звичайної

матерії та перенесення струму є двома сторонами того самого процесу». Далі на підставі законів Фарадея Максвелл запроваджує поняття «молекули електрики» — власне, тотожне сучасному поняттю «заряд електрона». Проте довести своє припущення Максвелл ще не міг — це зробив наприкінці XIX століття Джозеф Джон Томсон.

Закони електролізу Фарадея вже могли б обезсмертити ім'я свого автора. Але найважливішими з наукових робіт Фарадея є його дослідження в царині електромагнетизму, зокрема електромагнітної індукції. Ще 1821 року він поставив перед собою в щоденнику завдання: «перетворити магнетизм на електрику» (адже обернене завдання — «перетворити електрику на магнетизм» — Ампер уже щойно вирішив). Власне, вчення про індукційну електрику, що має величезне значення для техніки, Фарадей створює «з нуля».

Один із дослідів Фарадея виглядав так: він то наближав, то віддаляв від замкнутого провідника, поєднаного з гальванометром, котушку, в якій тік струм від «вольтового стовпа». І в першому, і в другому випадках гальванометр фіксував струм. Але щойно котушку зупиняли — струм зникав.

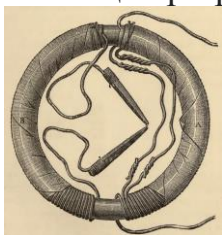
Сам учений записав звіт про дослід 17 жовтня 1831 р. до свого журналу так: «Я взяв циліндровий магнітний брусок (3/4 дюйма в діаметрі і 8 1/4 дюйма завдовжки) і ввів один його кінець всередину спіралі з мідного дроту (220 футів завдовжки), з'єднаної з гальванометром. Потім я швидким рухом заштовхнув магніт усередину спіралі на всю його довжину, і стрілка гальванометра зазнала відхилення. Потім я так само швидко витягнув магніт зі спіралі, і стрілка знову хитнулася, але в протилежний бік. Ці відхилення стрілки повторювалися щоразу, як магніт заштовхували або виштовхували».



Виникнення струму в котушці, з'єднаній з гальванометром, при внесенні до неї іншої котушки, з'єднаної з батареєю

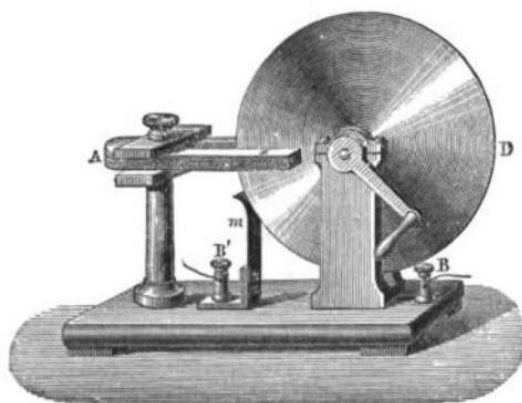
Другий дослід виглядав так: учений узяв мідне кільце й обмотав його двома заізолюваними один від одного мідними дротами. У момент, коли він пропускав струм по одному з дротів, у другому також з'являвся струм. Таким чином він сконструював перший в історії трансформатор. У лабораторному журналі 29 серпня 1831 р. про це з'явився такий запис: «Двісті три фути мідного дроту в одному шматку були намотані на великий дерев'яний барабан;

інші двісті три фути такого ж дроту були прокладені у вигляді спіралі між витками першої обмотки, причому металевий контакт був скрізь усунений за допомогою шнурка. Одна з цих спіралей була сполучена з гальванометром, а інша — з добре зарядженою батареєю зі ста пар пластин в чотири квадратні дюйми з подвійними мідними пластинками. При замиканні контакту спостерігалася раптова, але дуже слабка дія на гальванометр, і подібна ж слабка дія мала місце при розмиканні контакту з батареєю».



Трансформатор Фарадея

Нарешті, Фарадей поставив третій вирішальний дослід: він розташував між полюсами сильного магніту мідний диск, який можна було обертати від руки. У диску виникав струм, який ішов від центру до периферії. Металевими щітками, що ковзали по диску в центрі й на краю, цей струм можна було зняти й виміряти.



«Диск Фарадея» — перший генератор електричного струму

Висновок із цих дослідів міг бути тільки один: струм у замкнутому провіднику виникав за зміни магнітного поля, в якому цей провідник перебував. Так Фарадей на додачу до двох відомих тоді видів електрики: статичної та гальванічної, відкрив третій вид електрики — індукційну.

Закон електромагнітної індукції звучить так: у контурі, вміщеному в змінне магнітне поле, виникає електрорушійна сила, пропорційна зміні потоку магнітної індукції через цей контур. У математичній формі це можна записати (в системі СІ):

$$E_{\text{ЕРС}} = -\frac{d\Phi_B}{dt}; \Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}.$$

Але це математичне формулювання дав тільки Джеймс Клерк Максвелл у 1861 р., через 30 років після дослідів Фарадея, який сам, як ми пам'ятаємо, недостатньо володів апаратом диференціального та інтегрального числень. Проте саме після досліджень Фарадея в царині електромагнетизму стали

можливими ті «чудеса техніки», яке зробили ХІХ століття «віком електрики й пари». Першим в історії генератором струму став описаний вище мідний диск, який перетворював енергію механічного обертання на струм. У ньому ротором є диск, статором — постійний магніт.

Дуже швидко як статори стали використовувати електромагніти, що живилися від струму, який виробляв ротор. Проблема полягала лиш у тому, що, аби знову запустити генератор після зупинки, треба було попередньо ввімкнути електромагніт у якесь незалежне джерело живлення. Німецький інженер Вернер фон Сіменс (1816–1892) вирішив цю проблему й створив механізм, який переважно застосовують і сьогодні на всіх електрогенераційних станціях, незалежно від способу обертання ротора (від енергії спалювання нафти, вугілля чи газу, атомної енергії, гідроенергії, вітроенергії тощо). Фон Сіменс звернув увагу на те, що залізо серцевини електромагніта зберігає сліди намагніченості й тому, як струм вимкнено. Отже, коли ротор починає обертання, цей залишковий магнетизм відразу забезпечує початок генерації динамо-машини без додаткового незалежного кола живлення електромагніта. Цікаво, що в 1887 р. фон Сіменс заснував Імперський фізико-технологічний інститут для проведення досліджень в інтересах промисловості; - згодом цей інститут узяв під опіку німецький уряд.

Ще одним відкриттям Фарадея, яке мало величезне значення для подальшого розвитку науки й техніки, стало відкриття діа- та парамагнетизму. Фарадей знав: більшість магнітних речовин (парамагнетиків) у полі магніту притягуються полюсами до його протилежних полюсів. Проте вчений виявив речовини, які поводитися цілком інакше. Стрілка зі свинцевого скла (силікатного скла з домішкою борату свинцю) між полюсами магніту розташувалася перпендикулярно щодо того, як розташувалася б стрілка з магнітного заліза. Фарадей дійшов висновку, що йдеться про нову властивість речовин, яку він назвав діамагнетизмом. Теорію пара- й діамагнетизму побудував на початку ХХ столітті Поль Ланжевєн (1872–1946).



Майкл Фарадей в лабораторії (1850 р.)

На час відкриття електромагнітної індукції роботу Фарадея вже добре винагороджували, а всі життєві турботи зняла з нього дружина Сара, його справжній «ангел-охоронець». Фарадей писав про себе в третій особі: «12 червня 1821 року він одружився; ця обставина понад усе інше сприяла його

земному щастю й здоров'ю його розуму. Союз цей тривав 28 років, ні в чому не змінившись, хіба тільки взаємна прихильність із часом стала глибшою й сильнішою».

Одним із останніх відкриттів Фарадея було «намагнічування світла», як писав Фарадей, або «магнітне обертання площини поляризації світла», як заведено говорити в сучасній фізиці. Це відкриття було «пусковим механізмом» цілої низки досліджень у цій царині.

Наприкінці свого життя Майкл Фарадей, як і багато вчених, звертається до питань суто філософського характеру. Він прагне з'ясувати природу речовини, визначити стосунки між атомом і простором, між простором і силами тощо. Саме Фарадей запровадив поняття про «поле» як середовище, крізь яке передається електрична й магнітна дії. Поле Фарадея було пронизане силовими лініями, які можна було побачити: магнітні — якщо насипати магнітні ошурки на папір і помістити їх у поле, електричні — якщо розколоти довгасті кристалики якогось діелектрика (наприклад, хініну) в достатньо в'язкій рідині (наприклад, у касторовій олії — рицині) і теж умістити в поле. І залізні ошурки, й діелектричні кристалики вишиковуються за лініями поля, роблячи його видимим, а отже — матеріальним.

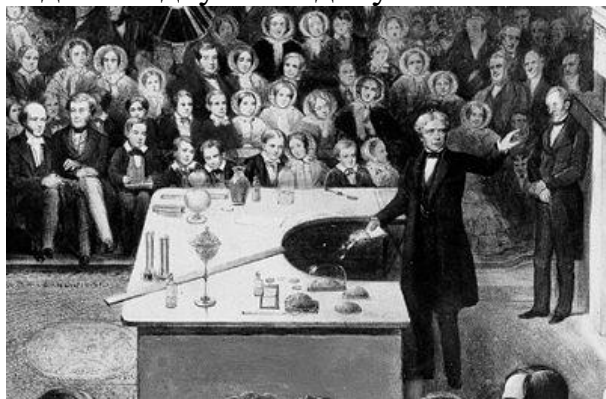
Фарадей уславився не лише своїми численними дослідженнями (пригадаймо 16041 дослід!) та відкриттями. Окремої згадки варта педагогічна діяльність ученого. За рік після обрання Фарадея в Лондонське королівське товариство (1824) він став директором лабораторії в Королівському інституті, а 1833 року отримав посаду професора. Всі ці роки, попри величезну науково-дослідну роботу, Фарадей багато уваги приділяє організації й читанню лекцій.

Про свій стиль читання лекцій Фарадей писав, як завжди, говорячи про себе в третій особі: «мій лектор жодним чином не має бути «приклеєним» до столу або «пригвинченим» до підлоги. Він має бути невимушеним і зібраним, безстрашним і безтурботним, а його думки й свідомість — ясними й вільними, коли він міркує про предмет і розповідає про нього. Вся його поведінка має вселяти пошану в аудиторію, і він ніколи не повинен забувати про присутність цієї аудиторії. Я не схвалюю лектора, котрий диктує свій предмет, — за винятком випадків, коли він наводить цитату або витяг. Лектор зобов'язаний подавати предмет легко й вільно, звертаючись до книги тільки тоді, коли йому треба уточнити свої записи. Він не повинен обмежувати свою мову визначеним напрямом, але має відхилятися від нього, якщо того вимагають обставини або дозволяють виниклі умови. З тієї ж причини (а саме — щоб аудиторія не втомлювалася) я не схвалюю довгих лекцій; однієї години достатньо для будь-якого лектора, нікому не можна дозволити перевершувати цей час». Фарадею на той час, коли він писав це, був лише двадцять один рік!

По двох-трьох роках Фарадей із властивою йому скромністю писав: «Судячи з моїх нотаток про лекції, я, мабуть, є просто новачком у цьому мистецтві». Насправді, як зазначали багато його слухачів, Фарадей був одним із найбільш вправних і талановитих лекторів. Вже ставши директором Королівської лабораторії, Фарадей організував щотижневі творчі зустрічі

членів Королівського інституту. Вечірні «лекції по п'ятницях» поступово перетворилися на регулярні.

1826 року було розпочато різдвяні читання, або — як їх називали — «лекції, призначені для юнацької аудиторії». На цих «юнацьких» лекціях можна було зустріти слухачів «від 8 до 80». Фарадей уважав, що діти з цікавістю сприймають усе, що їх оточує, й прагнуть усе знати. Найнебезпечніше — це вбити в дітей відчуття подиву й захоплення.



Майкл Фарадей на «різдвяних читаннях», 1856 р.

Своїх популярних лекцій Фарадей, на жаль, не записував. Але, на щастя, серед його слухачів був юнак на ім'я Вільям Крукс (пізніше – відомий фізик та хімік), котрий занотував два цикли таких лекцій: «Про різні сили в природі» (1860) та «Хімічна історія свічки» (1861) й надрукував їх. Лекції переклали багатьма мовами й досі мають за взірці науково-популярного стилю.

Учений прожив довге життя — і в цьому сенсі йому пощастило. Праця Фарадея була вельми ризикованою й жертвною. У його руках безліч разів вибухали різні колби. Ось уривок із листа вченого: «...минулої суботи в мене стався ще один вибух, який знову поранив мені очі. Одна з моїх колб розлетілася з такою силою, що уламком, наче кулею з рушниці, пробило віконне скло. Мені тепер краще, і я сподіваюся за кілька днів бачити так само добре, як і раніше. Але в першу мить після вибуху очі було буквально напхано скалками. З них вийняли тринадцять скалок...».

Сюди варто додати й отруйні випари ртуті, яку часто розливали в лабораторії — вони теж руйнували здоров'я вченого.

Фарадей помер у кріслі за робочим столом — хоча через брак сил уже чотири роки як перестав працювати. Його поховано на Гайгейтському цвинтарі в Лондоні, у Вестмінстерському абатстві на його честь встановлено меморіальну таблицю.

Про геніальну наукову інтуїцію й проникливість філософського розуму Фарадея можна судити зі змісту листа, який він у запечатаному конверті залишив у Королівському товаристві ще 1832 року. Конверт було надписано так: «Нові погляди, що їх належить до часу зберігати в архівах Королівського товариства».

Через понад століття потому (1938 року) конверт було розкрито в присутності англійських учених. Виявилося, що Фарадей ясно уявляв собі, що

індукційні явища поширюються в просторі з певною (великою) швидкістю, і то у вигляді хвиль.

Ось фрагмент цих записів: «Я дійшов висновку, що на поширення магнітної дії потрібен час, який, очевидно, виявиться вельми незначним. Я вважаю також, що електрична індукція поширюється таким самим чином. Я вважаю, що поширення магнітних сил від магнітного полюса схоже на коливання схвильованої водної поверхні. Аналогічно я вважаю за можливе застосувати теорію коливань до поширення електричної індукції. Зараз, наскільки мені відомо, ніхто з учених, окрім мене, не дотримується схожих поглядів».

Девіз Лондонського королівського товариства («Не бери нічийх слів на віру!») ясно виявляв намір заохочувати й підтримувати критичний підхід до досягнень науки, підхід, що завжди міцно спирається на експериментальні факти, підхід, незалежний від авторитетів і догм. Але думки Фарадея, що випередили час на півстоліття, блискуче підтвердилися подальшими теоретичними дослідженнями Максвелла й експериментами Герца.

Зараз ми навіть не можемо уявити собі сучасного світу без індукційних генераторів, електродвигунів, трансформаторів, без радіо й телебачення. Саме роботи Майкла Фарадея стали найважливішою ланкою в ланцюзі подій, що зробили нашим надбанням усі ці фізико-технічні досягнення.

Майкл Фарадей ще молодим узагальнив свої думки про те, яким, на його думку, має бути вчений. Ці слова цілком пасують до його власної наукової діяльності: «Учений має бути людиною, котра прагне вислухати будь-яку пропозицію, але сама визначає, чи слухна вона. Зовнішні ознаки явищ не повинні зв'язувати думок ученого, у нього не має бути улюбленої гіпотези, він зобов'язаний бути поза школами й не мати авторитетів. Він повинен ставитися шанобливо не до осіб, а до предметів. Істина має бути головною метою його досліджень. Якщо до цих якостей додати ще й працьовитість, то він може сподіватися підняти завісу в храмі природи». Ці слова вчений підтвердив власним життям.

З ім'ям Фарадея пов'язано дві фізичні величини: число Фарадея, що є добутком двох інших фізичних сталих — числа Авогардо N_A й заряду електрона e :

$$F = N_A e = 96\,485,3399(24) \text{ Кл/моль};$$

і електроємність, яка вимірюється фарадами (1 фарад — ємність, на якій за заряду в 1 Кл утворюється потенціал в 1 В). Цікаво, що ще в 1861 р. колеги на визнання заслуг великого вченого запропонували називати фарадом одиницю заряду, але в 1881 р. Міжнародний конгрес електротехніків у Парижі закріпив цю назву саме за ємністю.

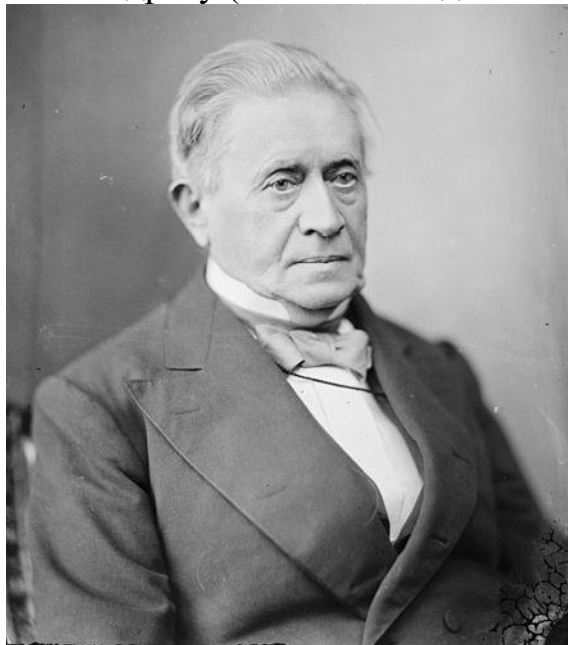
У записах Фарадея було знайдено «шкалу наукових заслуг», яку він для себе вибудував. Послідовно це:

- відкриття нового факту;
- зведення цього факту до відомих принципів;
- відкриття факту, який не зводиться до відомих принципів;
- зведення всіх фактів до ще загальніших принципів.

Поза сумнівом, діяльність Фарадея належить до четвертого, найвищого щабля такої шкали.

Джозеф Генрі (1797–1878)

Джозеф Генрі — американський фізик, член Національної академії наук США, протягом останніх дванадцяти років життя її президент. Його наукові роботи присвячено електромагнетизму. Генрі вперше сконструював потужний підковоподібний електромагніт, застосовуючи багат шарові обмотки з ізолюваного дроту (вантажність досягла однієї тонни).



Джозеф Генрі в останні роки життя

1831 року він теж відкрив явище електромагнітної індукції (незалежно від Фарадея). Проте на час, коли стало відомо про відкриття Фарадея, Генрі ще не опублікував своїх результатів. Цього самого року Генрі сконструював електричний двигун, а ще за рік виявив явище самоіндукції (під час вмикання й вимикання струму через котушку в самій котушці виникає електрорушійна сила) та струми, що виникають за розмикання електричного кола.

Крім того, Генрі винайшов електромагнітне реле, побудував телеграф, що діяв на території Прінстонського коледжу. Він же встановив 1842 року коливальний характер розряду конденсатора на котушку — це дало змогу отримувати коливання з частотами, які на багато порядків перевищували максимально досяжні доти частоти коливань камертона, й урешті-решт мало величезне значення для розвитку радіотехніки.

Історія цього відкриття вельми повчальна й прекрасно демонструє силу людської винахідливості, що виявлялася тоді, коли сучасних електровимірювальних приладів ще не існувало. Генрі розряджав «лейденську банку» через спіральну обмотку. В середину обмотки він увів цвяхи — і ці цвяхи намагнітилися. В цьому не було нічого дивного — схожий дослід уже

ставив Араго, а про властивість заліза (на відміну від звичайних парамагнетиків) зберігати залишковий заряд уже добре знали.

Несподіванка полягала в іншому. Коли це були масивні цвяхи, всі вони намагнічувалися в одному напрямку, який відповідав напрямку струму розряду «лейденської банки» від її плюса до мінуса. Але коли вчений замість великих цвяхів вклав у обмотку дуже маленькі цвяхи, вони виявилися намагніченими в різних напрямках!

Генрі дав правильне пояснення ефекту. Розряд «лейденської банки» не відбувається в одному напрямку, наче виливання води з глека. Завдяки котушці та індукованим у ній струмам конденсатор багато разів перезаряджається, аж поки коливання не загасають. Масивні цвяхи намагнічує перший найпотужніший імпульс розряду — й подальші слабші імпульси перемагнітити їх уже не можуть. А от дрібні цвяхи перемагнічуються багато разів — аж поки межа чутливості настає для одних за намагніченості в одному напрямку, для інших — в іншому.

Відкриття Джозефа Генрі анітрохи не применшують наукових заслуг Майкла Фарадея, а історична справедливість вимагає, щоб ім'я Генрі теж зберігалось у вдячній пам'яті нащадків. Одиницю індуктивності в системі СІ «генрі» названо на честь ученого-фізика Джозефа Генрі. 1 генрі — індуктивність контуру, в якому при рівномірній зміні струму в колі зі швидкістю 1 ампер на секунду виникає електрорушійна сила в 1 вольт.

Карл Фрідріх Гаусс (1777–1855)

Цей великий німецький учений, лауреат медалі Коплі, член кількох іноземних академій та Лондонського королівського товариства головний слід лишив у математиці. Однак його доробок у царині небесної механіки давав би підстави говорити про нього ще в першій частині нашої книги, а в цій, третій, ми вже неодноразово про нього згадували у зв'язку з запропонованою ним системою одиниць, базованою на одиницях відстані, маси й часу. Належать Гауссові й декілька фундаментальних результатів саме в царині електромагнетизму.

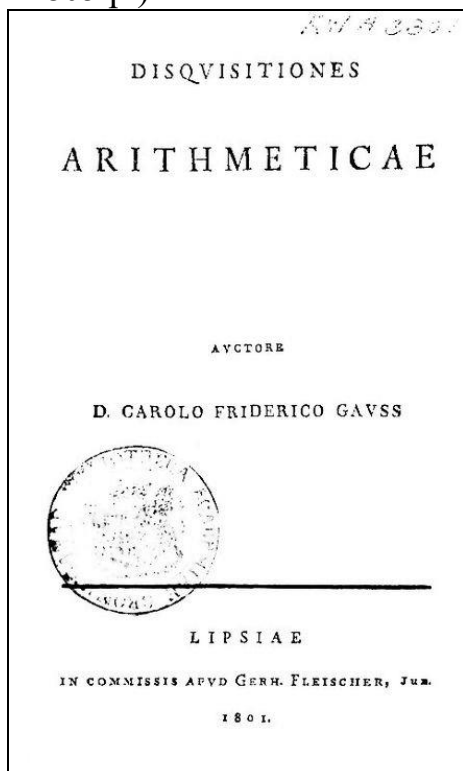


Карл Фрідріх Гаусс (портрет пензля Крістіана Альбрехта Єнсена)

Майбутній учений народився в німецькому князівстві Брауншвайг у родині простого робітника. Схильність до математики прокинулася в нього ще в ранньому дитинстві: є переказ, як він поправив батька, що помилився в грошових розрахунках. Цю схильність розвинула гімназія. Талановитого юнака представили герцогу Брауншвайзькому, який узяв над ним особисту опіку. У 18 років Гаусс вступає до старовинного Геттінгенського університету, де відразу ж винаходить метод найменших квадратів, а в 1796 р. розв'язує задачу про поділ кола, яка хвилювала ще давніх геометрів, і, зокрема, доводить можливість побудови з допомогою циркуля й лінійки правильного 17-кутника. Цим результатом сам учений дуже пишався і заповів зобразити такий 17-кутник у себе на надгробку.

У 1801 р. Гаусс друкує (ще латинською мовою) трактат «Арифметичні дослідження», присвячений теорії рівнянь. Водночас багато його першорядних ідей щодо еліптичних функцій, неевклідової геометрії тощо так і залишилися в рукописах — він, подібно до Ньютона, не спішив з публікацією і оприлюднював тільки те, що вважав цілком доведеним і перевіреним. У ці ж студентські роки він починає працювати над проблемою статистичного розподілу похибок, наслідком чого стає поява знаменитого нормального розподілу Гаусса (запізніла публікація результату призвела до

дискусії про пріоритет із Адрієном–Марі Лежандром, який надрукував свою працю 1805 р.).



Титульна сторінка «Арифметичних досліджень» (1801 р.)

У 1799 р. в дисертації, надрукованій коштом герцога, Гаусс доводить основну теорему алгебри про число коренів алгебричного рівняння. Він показує: цих коренів, дійсних і комплексних, стільки, скільки одиниць у показнику степеня рівняння.

Але справжня європейська слава прийшла до вченого в 1801 р. Цього року італійський астроном Джузеппе Піацці (1746–1826) відкриває перший астероїд — малу планету Цереру між орбітами Марса та Юпітера. Піацці спостерігав планетку впродовж 40 днів, але потому вона ввійшла в سایво Сонця, і її вже не зуміли виявити знову. За даними спостережень, розв'язавши складні рівняння, Гаусс визначив місце, де шукати планету-«втікачку», і її знову побачили в телескопи.

Але далі настають скрутні часи. Солдати Наполеона вдираються в Німеччину, герцога-покровителя Гаусса вбито на війні. На професора Геттінгенського університету Гаусса завойовники-французи накладають величезну контрибуцію в 2000 франків. Йому намагається допомогти сам друг Наполеона Лаплас, але німець Гаусс гордо відкидає пропозицію. Врешті-решт ученого рятує анонімним грошовим переказом покровитель великого поета Гете курфюрст Майнцький.

У 1809 р. Гаусс друкує фундаментальну працю «Теорія руху небесних тіл», а дещо пізніше доводить теорему про те, що інтеграл від аналітичної функції по замкнутому контуру дорівнює нулеві. Але, вірний своєму принципіві, не друкує результату — і теорема ця відома нині як «інтегральна теорема Коші». Водночас у 1811 р. він публікує розрахунки траєкторії нової

комети, якій у часи воєн приписували містичний вплив на земні події. У наступні роки учений будує основи диференціальної геометрії і досліджує теорію комплексних чисел, застосовуючи її до розв'язання рівнянь високих степенів.

До нього повертається слава, з'являються різноманітні нагороди. Але водночас приходять нові випробування: 1831 р. помирає друга дружина (першу він поховав ще в часи наполеонівських воєн), у вченого починається безсоння.

Цього ж року до Геттінгена приїздить 27-річний Вільгельм Вебер, який, попри велику різницю у віці, робиться великим другом Гаусса, і з ним вони разом починають працювати над проблемами електромагнетизму. У ці роки закладено основи теорії потенціалу, знайдено зв'язок між густиною заряду, потенціалом і напруженістю електричного поля. Перше з чотирьох канонічних рівнянь Максвелла в сьогоденному записі є саме теоремою Гаусса.

У 1832 р. опубліковано важливу статтю «Про абсолютне вимірювання магнітних величин». Гаусс із Вебером конструюють прилад для вимірювання магнітних величин (магнітометр), виконують перше обчислення положення південного магнітного полюса Землі, яке дало дуже мале відхилення від його справжнього розташування.

У тому ж році Гаусс за співпраці з Вебером для впорядкування запису електромагнітних задач пропонує свою універсальну систему одиниць, яку (як систему СГС) досі широко використовують фізики-теоретики. У 1833 р. Гаусс із Вебером винаходять перший електричний телеграф і будують його діючу модель. У 1838 р. американець Семюел Морзе (1791–1872) придумав для електричного телеграфу простий код, де кожна літера записувалася як набір довгих і коротких імпульсів, і дуже скоро цей винахід зв'язав не лише міста на суходолі, але й різні континенти (у розділі про Вільяма Томсона ми розповідали про прокладання першого трансатлантичного кабеля).

Але в 1837 р. Вебер з політичних причин змушений залишити Ганновер, відмовившись скласти присягу новому королю, і його тісне співробітництво з Гауссом уривається. В останні роки життя Гаусс знову зосереджується на проблемах математики.

На честь ученого у 1936 р. було названо одиницю магнітної індукції в системі СГС (гаус), де вона дорівнює: $1 \text{ Гс} = 1 \text{ г}^{1/2} \cdot \text{см}^{-1/2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Вільгельм Вебер (1804–1891)

Співавтор Гаусса Вільгельм Вебер народився у Віттенберзі й закінчив університет у Галле. До Геттінгена він прибув уже сформованим дослідником у царині акустики (саме йому належить ідея про можливість запису звуку), а залишив його в 1837 р., вже маючи основоположні спільні роботи з Гауссом з електромагнетизму. Знову повернувся Вебер до

Геттінгену в 1849 р, коли Гаусс ще був живий, але здоров'я його вже дуже похитнулося. Тож у цей час Вебер співпрацює з фізиком Рудольфом Кольраушем (1809–1858).



Вільгельм Вебер

Вебер у 1846 р. вперше вказав на зв'язок сили струму з густиною електричних зарядів і швидкістю їхнього переміщення. Він є автором гіпотези про дискретність електричного заряду (1848) та теорії елементарних магнітів — магнітних диполів (1854). Ще 1871 року Вільгельм Вебер запропонував першу електронну модель атома й обґрунтував його планетарну структуру.

Паралельно Вебер конструював вимірювальні прилади, зокрема винайшов так званий тангенс-гальванометр. Він являв собою круглу рамку з обмоткою з декількох витків. У центрі рамки на осі кола з поділками було розташовано магнітну стрілку. Коли в обмотці протікає струм, то в її центрі з'являється магнітне поле, величину якого легко розрахувати. Рівновага стрілки визначатиметься магнітним полем струму та магнітним полем Землі. Тому за кутом повороту стрілки можна розрахувати магнітне поле струму, а, як наслідок, і сам струм.



Тангенс-гальванометр

Взаємодія рухомих зарядів, за Вебером, описується формулою модифікованого (з урахуванням зміни відстані між зарядами) закону Кулона:

$$F = \frac{q_1 q_2}{r^2} \left(1 - \frac{(dr/dt)^2}{c_w^2} + \frac{2r}{c_w^2} \frac{d^2 r}{dt^2} \right).$$

Тут c_w — запроваджена Вебером стала з вимірністю швидкості. При виведенні цієї формули Вебер відштовхувався від закону Ампера для взаємодії струмів, перейшовши від струмів до окремих зарядів (сам він уживав термін: «електричних мас»). Як видно з цієї формули, для $dr/dt = \text{const}$ останній доданок у дужках перетворюється на нуль, а в частковому випадку $dr/dt = c_w$; нульовою є й сила взаємодії рухомих електричних зарядів узагалі.

Експерименти Вебера, виконані спільно з Кольраушем (1856), мають доволі просту ідею: «лейденську банку» заряджали певною кількістю електрики, а потім розряджали через тангенс-гальванометр упродовж певного періоду часу. За кутом відхилення магнітної стрілки гальванометра визначали силу струму в так званих «магнітних одиницях». А розділивши заряд банки на час її розрядження, визначали силу струму в так званих «механічних одиницях». Провівши серію вимірювань, Вебер і Кольрауш отримали значення співвідношення «механічної» та «магнітної» одиниць, що наближено дорівнювало швидкості світла у вакуумі в міліметрах на секунду, поділений на два (Гаусс спершу пропонував як базову довжину у своїй системі саме міліметр). Такий експеримент з урахуванням формульного запису закону Вебера дозволив визначити значення c_w , яке з великою точністю виявилось рівним $\sqrt{2}c$.

Через декілька років німецький фізик Густав Кірхгоф (1824–1887) записав диференціальні так звані «телеграфні рівняння», які описують розповсюдження коливань сили струму вздовж ідеального дроту. З них випливало, що швидкість розповсюдження коливань струму вздовж дроту ідеальної провідності в $\sqrt{2}$ разів менша від константи c_w , а отже, збігається зі швидкістю світла у вакуумі. Паралельно цей результат отримав і Вебер.

Отже, досліди Вебера-Кольрауша привели до встановлення фундаментального співвідношення — між абсолютною одиницею сили струму на основі її визначення через заряд і час (струм — це кількість заряду, що проходить через переріз провідника в одиницю часу) та абсолютною одиницею сили струму, встановленою з магнітної взаємодії струмів на основі закону Ампера, і дали дивовижний результат: це відношення містить величину $3 \cdot 10^8$ м/с, що збігається зі швидкістю світла. (Саме внаслідок цього виникає те співвідношення між одиницями заряду в системах СІ та СГС, про яке ми вже говорили вище).

Цей збіг не привернув особливої уваги Вебера. Проте приблизно через десять років Джеймс Максвелл побачив у ньому одну з експериментальних підстав для електромагнітної теорії світла. Він писав: «Збіг результатів, очевидно, показує, що світло й магнетизм є проявами властивостей тієї ж самої субстанції і що світло є електромагнітним збуренням, яке розповсюджується через поле у відповідності до законів електромагнетизму».

Справді, відношення величин, що мають електромагнітну природу, дає за чисельним значенням і вимірністю швидкість світла у вакуумі. Це не могло бути випадковістю. І подальший розвиток фізики підтвердив проникливість Максвелла.

На честь Вебера названо одиницю магнітного потоку в системі СІ: один вебер дорівнює магнітному потоку, при зменшенні якого до нуля в зчепленому з ним електричному колі з опором один ом через поперечний переріз провідника протікає електричний заряд один кулон. Так само $1 \text{ Вб} = 1 \text{ В} \cdot \text{с} = 1 \text{ Кл} \cdot \text{Ом} = 1 \text{ Тл} \cdot \text{м}^2 = \text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{А}^{-1}$. Вперше пропозицію про увічнення в такий спосіб пам'яті німецького вченого вніс у 1902 р. Олівер Гевісайд, про якого в нашій книзі йтиметься далі.

Михайло Остроградський (1801–1862)

Серед учених, котрі формували математичний апарат фізики й сприяли таким чином завершенню стрункої будови класичної електродинаміки, почесне місце належить нашому землякові Михайлові Васильовичу Остроградському.



Михайло Остроградський

Народився майбутній геній математики в селі Пашенівка на Полтавщині, в одній із тих родин небагатої козацької старшини, які тоді, після ліквідації Гетьманщини, намагалися обстоювати права дворянства. Дитинство його проминуло між селянських дітей, і відтоді він знав безліч народних пісень та переказів. Потяг до науки прокинувся ще змалку — хлопчиком Михайло над усе любив вимірювати глибини криниць, яруг і просто ям (і тим часто завдавав батькам чимало клопотів).

Волелюбна вдача не дозволила Михайлові бути зразковим учнем Полтавської гімназії, де тоді панували муштра й начотництво. Саме через свій характер він після доносу реакційного професора філософії Дудровича

не отримав і формального ступеня кандидата в Харківському університеті за невідвідування лекцій з богослов'я — хоч блискуче закінчив курс фізичних та математичних наук і тричі (!) склав усі необхідні іспити.

Але впертий юнак вирішує продовжити освіту за кордоном. Він пішки вирушає до Парижа, і, попри пригоди на шляху (вже у Чернігові його обікрали до нитки), таки дістався до мети. Тут Остроградський потрапляє в блискуче інтелектуальне середовище (Лаплас, Лежандр, Ампер, Пуансо) і швидко привертає до себе увагу знаменитих Коші, Фур'є й Пуассона. Вже 1825 року великий математик Огюстен Луї Коші (1789–1857) писав: «Остроградський, наділений великою проникливістю й дуже обізнаний у численні нескінченно малих, дав нове доведення формул, які я вмістив у 19 зошиті...».

Остроградському, втім, велося в Парижі не солодко. Батькової допомоги не вистачало, й одного разу господар помешкання навіть запроторив був молодого вченого до боргової в'язниці, звідки його визволив, сплативши штраф, той-таки Коші.

За рекомендацією вчителя Остроградський отримує кафедру математики в престижному Коледжі Генріха IV. Тут він виступає з самостійними зрілими працями, найперша з них — «Мемуар про поширення хвиль у циліндричному басейні», де досліджено поширення хвиль на поверхні рідини в резервуарі скінченної глибини.

Але вченого непереборно тягне на батьківщину, й 1828 року він вирушає туди через столичний Петербург, де розраховує знайти працю в Академії наук. На той час математика в Петербурзькій академії помітно занепала порівняно з легендарними часами Ойлера — тож талановитого Остроградського приймають радо, йому дозволяють викладати в Морському корпусі.

Учений з головою поринає в роботу й замислює фундаментальний трактат з математичної фізики. Але, гостро відчуючи брак професійного середовища, знову проситься до Парижа, щоб ознайомитися з новими працями д'Аламбера, Клеро і Лагранжа. Тут улітку 1830 року він потрапляє у вир революційних подій, описаних у романі Віктора Гюго «Знедолені». На революційних барикадах дістає тяжке поранення — сліпота на праве око й головний біль залишаються з ним до кінця життя. Ще недужий, на особистий наказ імператора Миколи I повертається учений до Росії.

Подорож узимку через усю Європу мало не вбила його. Тільки двомісячне лікування в Ризі рятує Остроградського від повної сліпоти, але до занять наукою він знаходить сили повернутися лише за рік.

Урешті-решт життя вченого входить у нормальну колію. 1830 року його заочно обрано екстраординарним, а ще за півтора року — ординарним (повноправним) академіком Петербурзької академії. Він очолює кафедру аналітичної механіки та астрономії Інституту шляхів сполучення.

Більшість математичних робіт Остроградського виникли з практичної потреби розв'язати ті чи інші прикладні задачі в царинах гідромеханіки,

теорії потенціалу, теплоти, теорії пружності, балістики. Він, зокрема, розв'язав задачу про рух сферичного снаряда в середовищі з опором.

Але найзнаменитіший свій результат, що обезсмертив його ім'я, Остроградський отримав 1828 року, розв'язуючи задачу з теорії теплопровідності. У «Замітці з теорії теплоти» (опублікована 1831 р.) він вивів знамениту формулу, що пов'язує інтеграл, узятий за об'ємом, з інтегралом за поверхнею, що цей об'єм обмежує:

$$\iiint \left(\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} + \frac{\partial R}{\partial z} \right) dx dy dz = \iint P dy dz + Q dz dx + R dx dy.$$

Ця формула має фундаментальне значення в математичній фізиці, зокрема в електродинамічній теорії. Якщо під P , Q , R розуміти компоненти вектора напруженості електричного поля E_x , E_y , E_z , це рівняння в Гауссовій системі одиниць набуде вигляду фундаментального рівняння електродинаміки, першого з чотирьох рівнянь Максвелла:

$$\oiint \vec{E} \cdot d\vec{A} = 4\pi \int \rho dV.$$

Фізично це співвідношення означає: потік електричного поля через замкнуту поверхню дорівнює повному зарядові, що міститься всередині цієї поверхні, помноженому на 4π (ρ — густина заряду). Таке твердження отримало назву теореми Гаусса, на честь Карла Фрідріха Гаусса, котрий вивів другу з формул, виходячи з закону Кулона.

Через те й перше, більш загальне з двох рівнянь, що пов'язує інтеграли за об'ємом і за поверхнею, називають формулою Гаусса–Остроградського, хоча наш земляк вивів її значно раніше від німецького вченого й зробив це, виходячи з загальніших припущень (його формула стосується не лише електродинаміки, а значно ширшого кола фізичних процесів).

Михайло Остроградський не лише щоліта навідувався до Полтавщини, але й у Петербурзі був душею численної тоді української громади. Через це вчений мав в очах влади ярлик «неблагонадійного». Особливо посилювалися підозри, коли в повторно заарештованого 1850 року в Оренбурзі Тараса Шевченка знайшли лист від петербурзького приятеля Левицького, де той писав, що серед друзів Остроградського є магістр математичних наук із Харкова Микола Головка, котрий, начебто, заявляв: «Вас (тобто Шевченка, — *авт.*) не стало, а на місце того стало більш людей аж 1000, готових стояти за все, що Ви казали». Історія мала трагічне завершення: коли Головка, автора талановитої магістерської дисертації про метеори, прийшли заарештовувати, той вистрелив у жандармського полковника, а потім застрелився сам. Академіка Остроградського, блискучого педагога, потому довго не допускали до читання лекцій у Петербурзькому університеті...

Остроградського єднала з Шевченком тривала дружба, яка розпочалася, очевидно, ще в часи поетового навчання в Академії мистецтв. У написаній на заслання автобіографічній повісті «Художник» Шевченко згадує: «Я особисто й добре знав геніального математика нашого О. (а математики взагалі люди, які не захоплюються); з ним мені траплялося кілька разів обідати. Він, окрім води, нічого не пив за столом. Я й запитав його

одного разу: «Невже ви ніколи вина не п'єте?» — «В Харкові ще колись я випив два погрібці, та й забастував», — відповів він мені простодушно».

Після повернення з заслання Шевченко разом із другом, співаком і композитором Семеном Гулаком-Артемовським спішить до Остроградського — й записує в щоденнику: «...великий математик прийняв нас із розкритими обіймами, як земляка й члена родини, що надовго кудись відлучився. Спасибі йому!».

Михайло Остроградський дуже ненадовго пережив свого друга Тараса Шевченка. Під час літньої подорожі 1861 року на Полтавщину він застудився — і вже не зміг одужати. У перший день нового 1862 року вчений згас у рідній Полтаві.

За життя вченого було обрано академіком Російської (1830), Американської (1834), Туринської (1841) та Римської (1853) академій наук, а в 1859 році він став почесним членом рідного Харківського університету (того ж року помер професор Дудрович, за чиїм доносом Остроградський не отримав у цьому університеті наукового ступеня та диплому).

Але, на жаль, і нині в довідниках, виданих уже в незалежній Україні, вченого часом називають «російським математиком», хоча нащадок козацького роду Михайло Остроградський жодної своєї наукової праці не написав російською мовою, принципово віддаючи перевагу французькій.

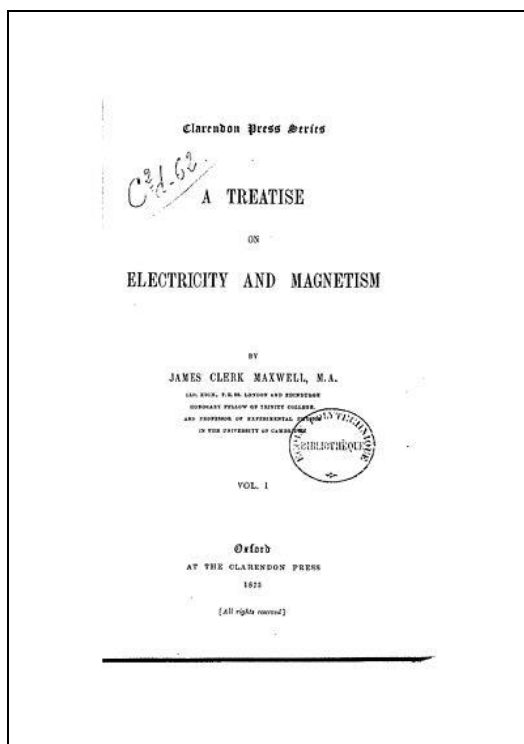
Сьогодні ім'я Остроградського носить унiверситет у Кременчуці.

Джеймс Клерк Максвелл (1831–1879)

Лише кілька місяців розділяють два дні народження: 4 жовтня 1831 року — «день народження» геніального відкриття Фарадея, його закону електромагнітної індукції, і 13 червня 1831 року — день народження Джеймса Максвелла, з яким ми вже зустрічалися в попередній частині книги, говорячи про його праці з молекулярно-кінетичної теорії газів.

На основі відкриття Фарадея спадкоємець знаменитого старовинного шотландського роду згодом сформулює великі рівняння — рівняння Максвелла.

«Трактат з електрики та магнетизму» (1873) — так називається головна праця Максвелла й вершина його наукової творчості. У ній він підбив підсумки майже двох десятиліть досліджень з електромагнетизму.



Титульний аркуш «Трактату з електрики та магнетизму»

Максвелл виклав усю суму знань з електрики й магнетизму свого часу, починаючи з основних фактів електростатики й закінчуючи електромагнітною теорією світла, яку сам і створив. Він підбив підсумки боротьби теорій далекодії й близькодії, що почалася ще за життя Ньютона.

Максвелл не висловився відкрито проти теорій електрики, що існували до нього. Адже авторитет Ньютона стверджував: взаємодія на відстані шириться миттєво. А отже, сама думка про скінченне значення швидкості поширення взаємодії багатьом здавалася єретичною. Тож Максвелл виклав фарадеївську концепцію як рівноправну з панівними теоріями, але весь дух його книги, його підхід до аналізу електромагнітних явищ були такими новими й незвичайними, що сучасники відмовлялися (або не могли) зрозуміти його вчення.

«Експериментальні дослідження з електрики» Фарадея справили на молодого Максвелла незабутнє враження. «Я вирішив не читати жодної математичної праці в цій галузі, доки не вивчу достатньо ґрунтовно «Експериментальні дослідження з електрики»» — писав він. І продовжував згодом: «Можливо, для науки щасливою обставиною є те, що Фарадей не був власне математиком, хоча він був досконало знайомий із поняттями простору, часу й сили. Тому він не намагався заглиблюватися в цікаві, але суто математичні дослідження, яких вимагали його відкриття. Він був далекий від того, щоб удягти свої результати в математичні формули, — або в ті, що їх схвалювали сучасні йому математики, або в ті, які могли б дати початок новим уявленням. Завдяки цьому він отримав час, необхідний для роботи, що відповідала його духовному спрямуванню, зміг погодити ідеї з

фактами, які відкривав, і створити якщо не технічну, то природну мову для вираження своїх результатів».

Фарадей, котрий докопувався до найглибінніших основ, перевіряючи все і всіх, органічно не міг примиритися з теоріями великих французів і не менш великих німців (Вебер), які сповідували ідею миттєвої передачі дії на відстані від одного тіла до іншого без проміжного середовища. Фарадей був абсолютно переконаний в тому, що «матерія не може діяти там, де її немає». Матеріальне середовище, яке заповнює «порожній» простір і передає від точки до точки електричну й магнітну дії, Фарадей назвав полем. Теорію цього фарадєївського електромагнітного поля створив Максвелл, котрий «за щасливою закономірністю» був блискучим математиком.

Учитуючись у сторінки «Експериментальних досліджень» Фарадея, Максвелл усвідомив, що закиди в «нематематичності» переконань Фарадея були невиправданими. Максвелл писав: «Коли я почав заглиблюватися у вивчення робіт Фарадея, я зазначив, що метод його розуміння теж математичний, хоча й не представлений в умовній формі математичних символів. Я також виявив, що цей метод можна виразити у звичайній математичній формі й таким чином уможливити його зіставлення з методами визнаних математиків».

Чотири рядки основних рівнянь електродинаміки дістали назву «рівняння Максвелла», а система поглядів, яка лягла в основу цих «великих рівнянь», отримала назву «Максвеллової теорії електромагнітного поля». В інтегральному вигляді в Гауссовій системі (системі СГС) рівняння Максвелла для неполяризованого немагнітного середовища нині записують так:

I. Теорема Гаусса для електричного поля:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = 4\pi \int \rho dV.$$

II. Закон електромагнітної індукції Фарадея:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{1}{c} \int \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{A}.$$

III. Відсутність магнітних зарядів:

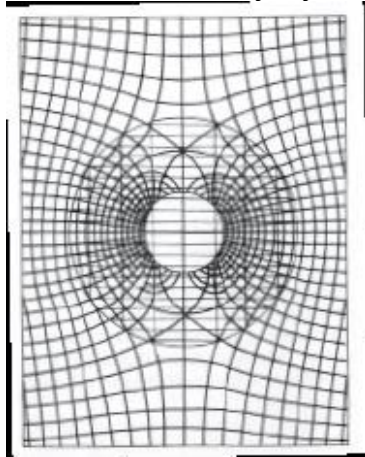
$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0.$$

IV. Модифікований закон Ампера:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \frac{4\pi}{c} \int \vec{j} \cdot d\vec{A} + \frac{1}{c} \int \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \cdot d\vec{A}.$$

Другий доданок в останньому з рівнянь виникає завдяки струму зміщення Максвелла, запровадженому, щоб зробити запис рівняння для закону Ампера несуперечливим. Максвелл увів це поняття у статті «Про фізичні лінії сили» (1861), щоб описати проходження змінного струму через розімкнене коло з конденсатором, де струм провідності, обумовлений переміщенням зарядів, що входить у перший доданок правої частини, дорівнює нулеві. А тим не менше, струм у такому колі існує і, за великої ємності конденсатора, від нього може горіти ввімкнена паралельно до конденсатора лампочка. У загальному випадку струм є поєднанням струму провідності та струму зміщення.

Гайнріх Герц, знаменитий німецький фізик, котрий надав цим рівнянням їхнього «канонічного вигляду», звівши 20 записаних самим Максвеллом рівнянь до 4-х незалежних (або 8-и в покоординатному записі, якого дотримувався сам великий шотландець), так писав про невичерпність теорії Максвелла: «Не можна вивчати цю дивовижну теорію, не переживаючи іноді такого відчуття, ніби математичні формули живуть власним життям, володіють власним розумом — здається, що ці формули розумніші за нас, розумніші навіть за самого автора, бо вони дають нам більше, ніж свого часу було в них закладено».



Картина силових ліній електромагнітного поля (з «Трактату з електрики і магнетизму»)

Теорія електромагнітного поля Максвелла — триумф ідей Фарадея. Максвелл, за висловом американського фізика Роберта Міллікена (1868–1953), котрий, працюючи з катодними променями, визначив заряд електрона, «вдягнув по-плебейському голі уявлення Фарадея в аристократичні шати математики». У рівняннях Максвелла «фігурувала» електродинамічна стала «с». Застосовуючи свої рівняння до розв'язання конкретної задачі, Максвелл виявив, що «таємничий» коефіцієнт «с» виявився рівним швидкості світла.

Електромагнітне поле, як зрозумів Максвелл, шириться у вигляді хвилі, до того ж хвилі незгасаючої (у вакуумі) — енергія магнітного поля повністю переходить в енергію електричного поля, й навпаки. Адже наслідком записаних вище рівнянь Максвелла для вакууму, переписаних без струмів і зарядів, стануть два хвильові рівняння для напруженості електричного і магнітного полів:

$$c^2 \left(\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad \text{і} \quad c^2 \left(\frac{\partial^2 B}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 B}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 B}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial^2 B}{\partial t^2}.$$

З вигляду цих двох хвильових рівнянь Максвелл робить відразу два фундаментальних і далекосяжних висновки:

- Електромагнітне поле шириться в просторі у вигляді поперечних хвиль зі швидкістю c .
- Світло є електромагнітним збуренням.

Було це 1865 року. Максвелл стверджує, що хвилі світла мають ту саму електромагнітну природу, що й хвилі, які виникають навколо дроту, в якому

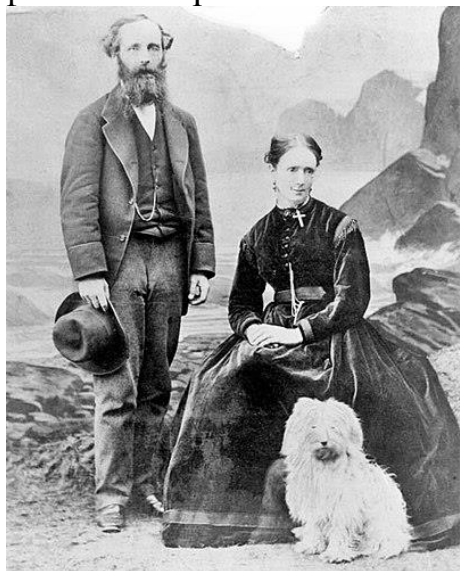
існує змінний електричний струм (заряджені частинки, що рухаються з прискоренням). Відмінність лише в довжині хвилі. Дуже короткі електромагнітні хвилі з довжиною хвилі від 400 нм до 700 нм — це і є видиме світло.

Максвелл, справді видатний фізик-теоретик, був першим професором експериментальної фізики в Кембриджі. Під його керівництвом було створено відому всьому світу Кавендішську лабораторію, яку він очолював до кінця свого життя. 1868 року він поставив вишуканий дослід, яким перевіряв дані Вебера про співвідношення між абсолютною одиницею сили струму, встановленою через заряд і час, та абсолютною одиницею сили струму, встановленою через магнітну взаємодію струмів на основі закону Ампера. Дослід базувався на урівноваженні сили притягання між двома пластинами, до яких прикладено високу напругу (тут діє чиста електростатика), і сили відштовхування між двома котушками, по яких проходив струм у різних напрямках (дія закону Ампера). Він дав переконливий результат: співвідношення виявилось рівним $3 \cdot 10^8$ м/с.

Природно, що Максвелл брав активну участь у роботі «комісії з одиниць» Британської асоціації вчених, яка у 1873 р. зробила першу успішну спробу кодифікувати одиниці Гауссової та традиційної британської систем.

Вивчаючи наукову спадщину Генрі Кавендіша, Максвелл з'ясував, що Кавендіш значно раніше за Фарадея відкрив вплив діелектрика на величину електроємності конденсатора й за 18 років до Кулона відкрив закон взаємодії електричних зарядів.

Після виходу у світ «Трактату з електрики та магнетизму» Максвелл вирішує задля роз'яснення, популяризації та поширення своїх наукових ідей і поглядів написати книгу «Електрика в елементарному викладі». Книга залишилася незакінченою, бо після тяжкої хвороби 48-річний геній згас і тріумфального торжества своєї теорії не дочекався.



Джеймс Клерк Максвелл з дружиною

Очевидно, й підкосила здоров'я вченого неймовірна за інтенсивністю праця. Режим дня Максвелла був незбагненний: сон від 17-ї до 22-ї, потім —

наукова праця до 2-ї ночі, потім — фізичні вправи до 3.30 (біг угору й униз сходами викладацького гуртожитку). Потім — сон до 7-ї ранку, і знову — наукова праця.

Максвелл був чудовим лектором — він з однаковим запалом читав лекції і для трьох студентів, і для великої аудиторії. Він був талановитим поетом — автором і жартівливих од, і ліричних віршів у стилі Роберта Бернса, в яких бриніло справжнє почуття. Звістку про фатальний діагноз (рак в останній стадії) і про те, що жити йому залишилося не більше як місяць, він зустрів з незворушним спокоєм і турбувався лише за свою дружину, котра перед тим тяжко хворіла.

Геній Максвелла залишив свої «відбитки» на багатьох фізичних проблемах — численні його захоплення були вельми плідні. Він винайшов дзигу, поверхня якої, забарвлена в різні кольори, під час обертання утворювала найрізноманітніші кольорові поєднання. «Диск Максвелла», «демон Максвелла», «розподіл Максвелла», «статистика Максвелла-Больцмана», «число Максвелла» — такі «сліди» в науці «визнаного лідера математичних фізиків». Він створив ще безліч шедеврів у найрізноманітніших галузях — від першої у світі кольорової фотографії до розробки способу радикального виведення з одягу жирових плям.

Але головна заслуга Джеймса Клерка Максвелла — можливо, єдиної в історії науки людини, з імені якої постало стільки наукових назв, — це «рівняння Максвелла», «електродинаміка Максвелла», «струм зміщення Максвелла». Пам'ять про нього зберігає й назва одиниці магнітного потоку в Гауссовій системі — максвелл ($1 \text{ максвелл} = 1 \text{ см}^{3/2} \cdot \text{г}^{1/2} \cdot \text{с}^{-1}$), запропонована на Міжнародному електротехнічному конгресі в Парижі 1900 р.

Експериментально підтвердив існування електромагнітних хвиль, що їх теоретично передбачив Максвелл, німецький фізик Гайнріх Герц через дев'ять років після смерті геніального вченого — 1888 року.

Гайнріх Герц (1857–1894)

Гайнріх Герц народився в Гамбурзі в родині юриста, котрий пізніше став сенатором. У реальному училищі він мав намір вивчати юриспруденцію, але після того, як почалися лекції з фізики, інтереси Гайнріха суттєво змінилися. Батьки не заважали хлопчикові шукати своє покликання й дозволили йому перейти в гімназію, після закінчення якої він набував права вступу до університету.



Гайнріх Герц

Гайнріх Герц отримав атестат зрілості та вступив у вище технічне училище, але незабаром зрозумів, що професійна діяльність інженера не для нього. Із цього приводу він писав так: «Раніше я часто говорив собі, що бути посереднім інженером для мене краще, ніж посереднім ученим. А зараз думаю, що Шіллер має рацію, кажучи: «Хто за життя тремтить земне — нічого в нім не досягне!». І така надмірна обережність була б з мого боку безумством».

Дедалі більший потяг до фізики сприяв тому, що Герц переходить на фізико-математичний факультет Берлінського університету.

Найбільший німецький фізик того часу Герман Гельмгольц помітив талановитого хлопця. Між ними встановилися добрі стосунки, які згодом перейшли в тісну наукову співпрацю. Герц із найглибшою повагою ставився до свого наукового керівника і звертався до Гельмгольца не інакше, як «Ваша екселенціє!».

Ученого-початківця Гайнріха Герца повністю захопила обов'язкова для випускника робота над докторською дисертацією. Незабаром дисертацію було блискуче захищено, а її авторів присуджено ступінь доктора наук із рідкісним в історії Берлінського університету предикатом — «з відзнакою». І це у таких строгих і вимогливих професорів, якими були Гельмгольц та Кірхгоф.

Робота Герца «Про індукцію в кулі, що обертається» була суто теоретичною, що свідчило про його блискучу математичну підготовку, таку важливу для занять теоретичною фізикою. Попри те, що Генріха Герца дедалі більше почали приваблювати фізичні експериментальні дослідження, він у певному сенсі вимушено лишався теоретиком. Річ у тім, що на рекомендацію свого наукового наставника він переїхав зі столиці в провінційний Кіль, щоб із асистента швидко стати доцентом. У Кілі, на відміну від Берліна з його чудово обладнаною лабораторією, фізичної лабораторії не було зовсім, а експерименти ставили тільки після придбання необхідного устаткування за

рахунок дослідника. Тому тут значно плідніше можна було займатися теорією.

Генріх Герц зробив спробу доповнити електродинаміку Франца Ноймана (1798–1895) — одного з яскравих прихильників ідеї далекодії. Електродинамічні рівняння Ноймана були «несиметричні», і на це звернув увагу проникливий Герц. У цих рівняннях електричні та магнітні величини перебували в нерівному становищі. До того ж, за використання цієї системи рівнянь не у всіх випадках було дотримано закону збереження енергії. Відсутність «математичної краси» та недотримання закону збереження енергії не подобалися Герцу. Він зробив у системі рівнянь Ноймана поправку, щоб закону збереження енергії було дотримано в будь-якому випадку, й отримав свою власну систему рівнянь, що, як з'ясувалося, цілком відповідала системі рівнянь Максвелла. Це і втішило, й засмутило Герца, оскільки підтвердило правильність теоретичних досліджень, але свідчило про те, що в цих дослідженнях немає нічого принципово нового.

Після шести років роботи на посаді доцента в Кілі Герц отримав посаду професора фізики у Вищій школі в Карлсруе. Тут була фізична лабораторія, яка забезпечила Герцу свободу творчого експериментування, можливість займатися тим, до чого він відчував інтерес і покликання. Саме тут, в Карлсруе, почався плідний період його наукової діяльності.

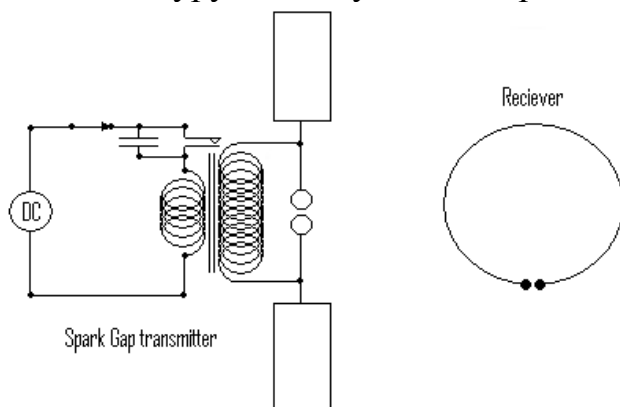
Оскільки Герц ще в лабораторії Гельмгольца отримав блискучий експериментальний і теоретичний вишкіл, тематика його наукових інтересів була досить різноманітною. Вирішальним для вибору основного напрямку був оголошений Берлінською академією наук за ініціативою Гельмгольца конкурс із наукової проблеми: «Довести експериментально наявність зв'язку між електродинамічними силами й діелектричною поляризацією ізоляторів». Протягом семи років Генріх Герц шукав шляхи вирішення задачі, яку поставив Гельмгольц.

Численні експерименти сприяли «щасливому випадку» (за висловом самого Герца), коли він відкрив можливість отримувати регулярні коливання з високою частотою та помітною інтенсивністю в коротких металевих провідниках. Про це Герц написав у статті «Про досить швидкі електричні коливання».

Учений здійснив перехід до відкритого коливального контуру. Герц конструює вібратор (генератор) — він складався з 2-х прямокутних цинкових пластин 40 см на 40 см завбільшки, розділених дротиною провідника з проміжком 2 мм між маленькими кульками для проскакування іскри, що давав змогу генерувати хвилі півметра завдовжки (тобто — в мільйони разів довші за світлові). Резонатором (детектором) для дослідження поля випромінювання був замкнутий контур із дроту, теж із маленьким «іскровим» проміжком. За їхньої допомоги вчений установлює три найважливіші наукові факти:

- коливання можна збудити в лінійному провіднику;
- електрична іскра є джерелом (генератором) електромагнітних коливань;

- коливання можна вловити на значній відстані від генератора за допомогою контуру, в якому індикатором коливань також є електрична іскра.



Експериментальна установка Герца (1887): ліворуч — іскровий передавач, праворуч — приймач

З приводу останнього пункту Герц писав: «Особливо дивували мене великі відстані, на яких я міг виявити дію. Доти звикли вважати, що електричні сили спадають за законом Ньютона і, отже, зі збільшенням відстані швидко стають зникомо малими».

Пояснимо «подив» Герца. Електромагнітне поле поблизу лінійного вібратора (у так званій ближній зоні) визначається миттєвими значеннями сили струму та заряду у вібраторі. У точці на відстані r від вібратора магнітний вектор визначається за законом Біо-Савара, а електричний вектор — за законом Кулона. Отже, електричний вектор спадає обернено пропорційно до квадрата відстані від даної точки до вібратора.

У ближній зоні, крім цього квазістаціонарного електромагнітного поля, пов'язаного з зарядами й струмами у вібраторі, згідно з теорією Максвелла, виникає ще й індукційне поле. Його породжують коливання електричного й магнітного векторів квазістаціонарного поля поблизу вібратора. Таким чином, поблизу вібратора поле має складний характер і є суперпозицією квазістаціонарного поля, що сильно спадає з відстанню, та індукційного поля, що спадає значно повільніше за законом обернено пропорційної залежності.

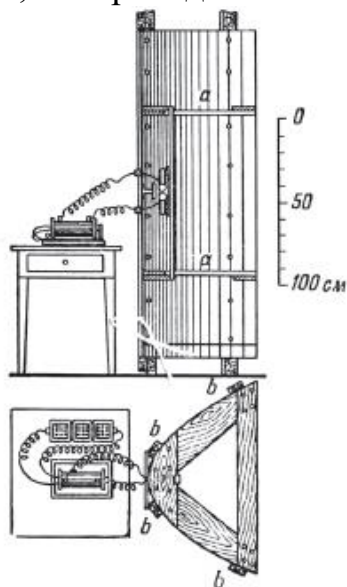
За малих r переважає перше поле, а за великих r — друге. У проміжній області в результаті суперпозиції цих полів електричний і магнітний вектори стають синфазними, і ця синфазність надалі зберігається в так званій хвильовій зоні. Тут уже квазістаціонарні поля стають практично непомітними, а індукційне поле — залишається та стає вільним від зв'язку з джерелом (вібратором). Це вільне поле і є електромагнітною хвилею. Змінні електрична та магнітна складові хвилі забезпечують тим самим, відповідно до теорії Максвелла, існування електромагнітного поля, що шириться в просторі.

Щоб не збитися зі шляху під час експериментування, треба було вирішити й теоретичні проблеми. На початку 1888 року Герц доводить, що «індукційна дія шириться в повітрі зі скінченною швидкістю», а потім

публікує свою знамениту статтю «Про електродинамічні хвилі в повітрі та про їхнє відбиття». Саме в цьому дослідженні в «майже безпосередньо відчутній формі» було отримано електромагнітні хвилі. Досліди Герца дали переконливі результати: коловим контуром із розрядником як детектором можна було буквально «промацати» структуру хвилі, знайти її вузли й видуги.

Гайнріх Герц на основі теоретичного аналізу позначає шляхи подальших експериментальних досліджень електромагнітних хвиль. Теорія диктувала умови, за яких можна було з'ясувати всі властивості хвиль, якщо підвищити потужність випромінювання. Цього можна було досягти, з одного боку, зменшенням довжини хвилі (підвищенням частоти), а з іншого — фокусуванням «променів електричної сили» (за термінологією того часу).

Досліди Герца й цього разу були успішними. Він отримав вільну електромагнітну хвилю, інтенсивність якої була достатньою для проведення вирішальних експериментів; їхні результати опубліковані в його роботі «Про промені електричної сили» (1889). «Мені пощастило отримати виразні промені електричної сили й провести за їхньої допомоги всі елементарні досліди, які проводять зі світловими й тепловими променями».



Прилад Герца для дослідження властивостей електромагнітних хвиль

Досліди вражали простотою й переконливістю. Вони найкоротшим шляхом привели до фундаментального висновку: «Видається вельми вірогідним, що описані досліди доводять ідентичність світла, теплових променів і електродинамічного хвильового руху».

Мало того — Герц довів прямолінійне ширення хвиль: він показав, що металічний екран на їхньому шляху припиняє іскріння в детекторі, тоді як ізолятор (наприклад, дерево) хвилям не перешкоджає. За допомоги великих цинкових дзеркал учений показав, що хвилі можуть відбиватися й поляризуватися, коли два дзеркала повернуто на 90 градусів одне щодо одного (а отже, хвилі поперечні, як і передбачала теорія Максвелла). Потім

він виготовив двотонну асфальтову лінзу й показав, що ці хвилі заломлюються.

Гайнріх Герц представив електромагнітне поле як фізичну реальність, доступну експериментальному дослідженню. Його досліди «освітили» шлях практичного використання теорії електромагнітного поля, і цим скористалися інші вчені.

На 62-му з'їзді німецьких природодослідників і лікарів 32-річний Герц виступив із доповіддю «Про співвідношення між світлом і електрикою». Він підбив підсумки своїх дослідів таким повідомленням: «Усі ці досліди дуже прості в принципі, а проте вони тягнуть за собою найважливіші наслідки. Вони руйнують кожную теорію, яка припускає, що електричні сили перестрибують простір миттєво. Вони означають блискучу перемогу теорії Максвелла. Наскільки маловірогідними здавалися раніше його уявлення щодо суті світла, настільки важко тепер відкинути ці уявлення».



Прилад Герца для генерації електромагнітних хвиль

На превеликий жаль, Герц дуже рано (у 37 років) пішов з життя. Його здоров'я підірвала напружена робота. Відмовили очі — адже вчений роками мусив у цілковитій темряві розглядати ледь помітні іскорки. Потім настало загальне зараження крові в ослабленому роботою з радіовипромінюванням організмі. Проте до самого кінця вчений не шкодував, що прожив своє життя саме так.

Ще за життя Герц удостоївся великих почестей — отримав багато нагород, премій і медалей. А після його смерті у 1930 р. ім'ям Герца названа одиниця частоти коливань: один герц — один повний цикл коливання в секунду.

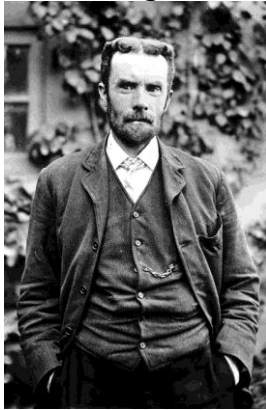
Досліди Герца були фундаментальні не лише з фізичної, але і з філософської точки зору. У статті «Дослідження щодо поширення електричної сили» Герц так оцінив значущість своїх робіт: «Сукупністю описаних дослідів уперше було доведено ширення зі скінченною швидкістю сили, яку досі вважали такою, що діє на відстані миттєво. Цей факт є філософським, і zarazом, у певному сенсі, найважливішим досягненням дослідів. У цьому доведенні містилося пізнання того, що електричні сили можуть відділятися від тіл із вагою й існувати далі самостійно, як стани або зміни простору».

Гайнріх Герц завершив працю, яку розпочав Фарадей. Якщо Максвелл перевів уявлення Фарадея в образи високої математики, то Герц перетворив

ці образи на відчутні, видимі коливання — на реальні електромагнітні хвилі, які можна описати тими ж таки рівняннями Максвелла.

Олівер Гевісайд (1850–1925)

Слід зробити важливе уточнення: рівняння Максвелла в тому вигляді, в якому їх нині бачимо в усіх підручниках фізики для вищої школи, записав не Максвелл; це зробили Гайнріх Герц та Олівер Гевісайд.



Олівер Гевісайд (бл. 1900 р.)

«Трактат із електрики та магнетизму» Максвелла — величезна праця. У ній понад тисяча сторінок, на яких обґрунтовано й пояснено сенс максвеллівських рівнянь. Вивчаючи цю фундаментальну працю Максвелла, Герц і Гевісайд (незалежно один від одного) показали, що більшість із 20 записаних Максвеллом у покоординатній формі рівнянь з 12 змінними виводяться одне з одного, тобто не є незалежними. Тому в цих рівняннях треба було виділити основні й подати у вигляді лаконічної системи.

Гайнріх Герц, працюючи в Кілі, де не було фізичної лабораторії, займався, як ми вже зазначали, теорією. Як частковий випадок своєї електродинамічної теорії він отримав рівняння Максвелла. Саме зусиллями Герца рівняння Максвелла було представлені в прийнятнішому системному вигляді. Разом із тим Гайнріх Герц, як справжній німець, використовував символіку старонімецького готичного шрифту.

Теорія Максвелла захопила ще одного вченого, англійського фізика й математика Олівера Гевісайда. Він ретельно опрацював «Трактат» Максвелла і, так само, як Герц, прийшов до необхідності гармонізувати систему рівнянь теорії електромагнітного поля. Таким чином, завдяки зусиллям Герца і Гевісайда, «розкидані формули» Максвелла було зв'язано в струнку систему рівнянь, яка залишається незмінною досі.

Гевісайд, безумовно, був генієм — це розуміли його сучасники, і тим паче очевидним це виглядає з точки зору сьогодення. Адже, розвиваючи свою ідею про «електромагнітну масу», він отримав формулу $E = mc^2$ раніше від Айнштейна на півтора десятки років.

Майбутній учений народився в Кемдені в родині гравера. Ще в дитинстві він перехворів на скарлатину і майже оглух. Це наклало відбиток на все його подальше життя. Він добре вчився в школі, але покинув її в 16 років. Відтоді він здобував знання виключно самоосвітою. У свої 18 Олівер Гевісайд поїхав із Англії в Данію працювати телеграфістом. Між Англією та Данією було прокладено підводний телеграфний кабель. Хлопець зі здивуванням виявив, що з Англії в Данію сигнали йдуть із удвічі більшою швидкістю, ніж у зворотному напрямку. Рівняння Максвелла допомогли Оліверу знайти розгадку цього явища. Виявилося, що кабелі Англії й кабелі Данії мали різні перерізи. До речі, ці роботи молодого телеграфіста помітив сам Джеймс Клерк Максвелл і згадав про них у своєму «Трактаті з електрики й магнетизму».

Залишивши в 1874 р. службу на телеграфі, Гевісайд оселився в батьківському домі й цілком зосередився на науці. Вважаючи математику за служницю техніки, Гевісайд запропонував безліч дуже корисних математичних формул. Схоже, що ці формули він не виводив і не обґрунтовував — він їх просто «вгадував». Його наукова інтуїція «працювала» бездоганно. Усе життя вчений цікавився технічними вдосконаленнями — і робив це без жодної користі для себе. «Лінія без спотворення», яку запропонував Гевісайд, збагатила не одного підприємця, а він сам — учений, відлюдник і дивак за вдачею, — жив досить бідно.

У 1891 р. Гевісайда вибрали членом Лондонського королівського товариства, але він ніколи не брав участі в засіданнях, оскільки був байдужим до цієї високої наукової почесності.

Після відкриттів Герца Гевісайд зацікавився проблемою поширення електромагнітних хвиль і визначив, що у верхніх шарах атмосфери має бути іонізований шар, що відбиває радіохвилі. Нині цей шар називається шаром Гевісайда-Кеннеллі. Саме він дозволяє нам чути передачі на хвилях з довжиною в десятки й сотні метрів за тисячі кілометрів, а не в межах прямої видимості ретрансляторів, як передачі FM-станцій.

Протягом двадцяти років Гевісайд не опублікував жодної роботи — адже, знаючи про непросту вдачу вченого, редактори шанованих наукових журналів ставилися до його праць із пересторогою. В останні роки дивакуватість ученого дійшла краю: він став фарбувати нігті, а замість меблів використовувати вдома кам'яні брили. Нині ми не можемо вповні оцінити, що сумарно створив у науці й техніці цей ексцентричний, але, безумовно, геніальний англієць. Коли 75-річний Гевісайд пішов із життя, його рукописи хтось викрав. Проте п'ятитомна монографія Гевісайда «Електромагнітна теорія», на щастя, все-таки залишилася.

Сьогодні про нього дослідникам нагадує східчаста функція Гевісайда, запроваджена вченим при розгляді електротехнічних задач.

Винайдення радіо

Фізик і електротехнік Олександр Попов (1859–1906), якого вважали в колишньому СРСР винахідником радіо, народився на Уралі, в сім'ї священника. Закінчивши загальноосвітній цикл пермської духовної семінарії, він почав самотужки готуватися до вступних іспитів у Петербурзький університет на фізико-математичний факультет. Уже студентом, шукаючи підзаробітку, Попов приходить в артіль «Електротехнік», бере участь у налагодженні електричного освітлення й набуває багатьох цінних практичних знань.

По закінченні університету він продовжує освіту в аспірантурі й готується до отримання професорського звання. Але Попов не закінчив аспірантури — він приймає запрошення Мінних офіцерських класів і стає викладачем, паралельно працюючи в Технічному училищі Морського відомства. Так він пропрацював 17 років, аж поки 1900 року його не вибрали професором кафедри фізики Електротехнічного інституту. За рік до смерті вчений стає ректором цього інституту. Помер учений ще не старим від крововиливу в мозок, повернувшись додому після напруженої розмови в міністерстві.



Олександр Попов

Після того, як Герц 1888 року експериментально відкрив електромагнітні хвилі, Попов почав читати в Мінних класах цикл лекцій «Новітні дослідження про співвідношення між світловими й електричними явищами», супроводжуючи лекції демонстраціями. Лекції мали величезний успіх, і Попову пропонують повторити цикл у Морському музеї. Вже в цьому циклі Попов висловлював думку, що досліди й роботи Герца є дуже цікавими не лише в суто науковому плані, але й із погляду можливості їхнього застосування для бездротової передачі сигналів.

7 травня 1895 року на засіданні Російського фізико-хімічного товариства Олександр Попов демонструє прилад для прийому та реєстрації електромагнітних коливань від сильних розрядів блискавок, який він сам сконструював і назвав «грозівідмітником». Головним елементом приладу став т.зв. когерер: скляна ампула, в якій було запаяно металеві ошурки. До кінців ампули було приєднано електроди, але за звичайних умов вона струму не проводила. Під час потужного електричного розряду наведені між ошурками іскорки робили ампулу провідником, і вона замикала електричне

коло, в якому був під'єднаний дзвінок. Удари била дзвінка в ампулу струшували її і знову робили непровідною.

Сконструйований ученим прилад міг реєструвати грози на відстані до 30 км. Учений закінчив доповідь такими словами: «...можу висловити сподівання, що мій прилад за подальшого вдосконалення можна буде застосовувати для передавання сигналів на відстань за допомогою швидких електромагнітних коливань, що мають достатню енергію».



«Грозовідмітник» Олександра Попова

Наступного 1896 р. «грозовідмітник» знайшов практичне застосування: він автоматично вимикав електростанцію Нижегородського ярмарку при наближенні грози. Але до втілення ідеї бездротного телеграфу винахідник прийшов лише наступного року; він напружено працював над нею у своїй лабораторії на острові Кронштадт під Петербургом, де була головна база російського військового флоту. Наприкінці жовтня 1897 р. Попов виголосив доповідь про досягнуті результати в Петербурзькому електротехнічному інституті, а 30 грудня того ж року разом з асистентом Петром Рибкіним здійснив перший у Росії радіотелеграфний зв'язок, передавши на відстань 250 м азбукою Морзе радіограму, яка складалася зі слова: «Герц». Публічної демонстрації експерименту не було: про нього сповістила газета «Кронштадтський вісник».

Учений посилено працює над удосконаленням свого винаходу й передає сигнали на 5 км, і, нарешті, 1899 року — на 50 км. Потому морське відомство доручає Попову почати широку роботу з упровадження бездротового телеграфу на суднах російського флоту. У 1899 р. після переданого з маяка радіосигналу криголамом «Єрмак» було врятовано 50 рибалок, яких на крижині віднесло у відкрите море. З літа 1900 р. радіо стало штатним засобом зв'язку російських військових кораблів.

Але свого винаходу Попов за життя й не намагався патентувати — можливо, тому, що всі його окремі елементи було винайдено й сконструйовано раніше іншими дослідниками. Зокрема, прилад для фіксації

розрядів з когерером першим запропонував англійський фізик та інженер Олівер Лодж (1851–1940).

Натомість 1896 року італійський інженер Гульєльмо Марконі (1874–1937) подав заявку на патент на винайдення радіо. 1897 року він отримав англійський патент, що закріпив його юридичне право на цей винахід. Цей син великого землевласника зацікавився роботами Гайнріха Герца та Ніколи Тесли, про якого йтиметься далі, і став експериментувати з передаванням радіосигналів. Як збуджувач хвиль він використовував генератор Герца, а як приймач — прилад з когерером Лоджа. Технічним удосконаленням Марконі є те, що він здогадався відпомповувати з когерера повітря і зробив його чутливішим для детекції слабких і віддалених розрядів. Своїми пристроями Марконі ще в 1895 р. забезпечив радіозв'язок на відстань у 3 км в Італії, а через рік у присутності публіки повторив цей результат в Англії тому, як італійська влада не зацікавилася його винаходом.



Гульєльмо Марконі демонструє свій приймач і передавач (кінець 1890-х)

Навіть із застосуванням ще примітивних приймачів із когерером 1901 року вперше було вловлено сигнал через Атлантичний океан — хоч містила ця радіограма одну-єдину літеру «S». Цікаво, що самі ці спроби почалися через те, що Марконі (який не мав системної освіти фізика) помилково вірив у можливість радіосигналів розповсюджуватися в ґрунті й у воді. Тільки так він припускав можливість детекції сигналів поза зоною прямої видимості. Можливості відбиття сигналів з відповідною довжиною хвилі від іонізованого шару атмосфери він ще не передбачав.

Італійський винахідник дуже багато зробив для технічного вдосконалення передавачів і приймачів. Він працював разом із професором фізики Страсбурзького університету Карлом Фердинандом Брауном (1850–1918), котрий 1898 року сконструював коливальний контур із великою ємністю та малим загасанням. А на основі виявленого ним ще в 1874 р. фізичного явища Браун винайшов перші кристалічні детектори: кристали напівпровідника (тоді найчастіше використовували сульфід кадмію) з притиснутим металічним вістрям, що мали різко асиметричну вольт-амперну характеристику для двох напрямків струму. Такі контури й детектори дозволили створити перші детекторні приймачі.

Ці приймачі відкривали можливість уже не просто приймати короткі й довгі імпульси, а й відокремлювати низькочастотний сигнал звукового діапазону, яким було модульовано за амплітудою високочастотний радіосигнал. Перше звукове мовлення продемонстрували в Каліфорнії в 1909

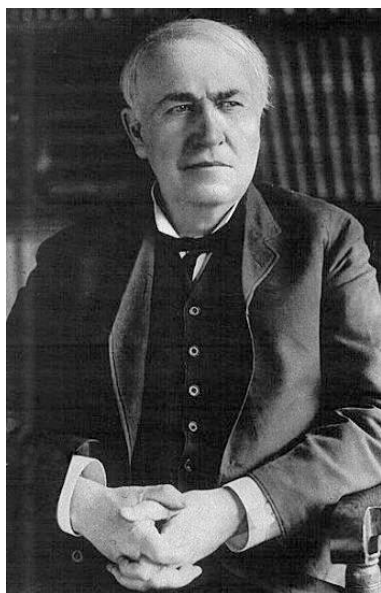
р. Детекторні приймачі були популярні в українських селах ще в 1950-ті роки, адже їх можна було легко виготовити власноруч (потрібні були лише антена, коливальний контур, навушники, конденсатор і детектор) і вони не потребували зовнішнього живлення (електрика в більшості сіл з'явилася тільки в 1960-х). Проте, ловлячи передачі, треба було весь час водити металічним вістрям по кристалу, шукаючи точку з найкращою чутністю.

Але навіть ще таке технічно недосконале радіо швидко стало реальністю життя мільйонів людей. 1909 року Марконі й Браун отримали Нобелівську премію з фізики. У квітні 1912 р. завдяки радіосигналу вдалося врятувати 706 пасажирів лайнера «Титанік», який ударився в підводну частину айсберга в Атлантичному океані (1517 пасажирів при цьому загинули). В останні роки життя Марконі був членом великої ради фашистської партії Італії та сенатором.

Дальший розвиток радіотехніки пов'язаний із винайденням електронних ламп — діодів. Першу таку лампу виготовив 1901 року співробітник Джозефа Джона Томсона (про цього визначного вченого ми поговоримо трохи згодом) англійський фізик Оуен Вілланс Річардсон (1879–1959). Лампи були громіздкі, часто виходили з ладу, потребували живлення, але, на відміну від кристалічних детекторів, забезпечували якісний і стабільний прийом сигналу. Вже у 1920-ті роки по радіо стали масово передавати театральні вистави й музичні концерти, а радіоприймачі стали частиною обстановки мільйонів осель. За роботи, покладені в основу принципу дії електронних ламп і (пізніше) кінескопів, Річардсон став лауреатом Нобелівської премії 1928 року.

Томас Алва Едісон (1847–1931)

Як уже говорилося, після відкриттів Фарадея явища електромагнетизму стали предметом інтересу не лише дослідників, а й винахідників. У вступі до нашої книги ми вже згадували Томаса Едісона — напевно, найвідомішого винахідника в історії людства, — у зв'язку з повчальним розвитком подій під час винайдення сучасної лампочки розжарювання. Як ми пам'ятаємо, цим займалися багато дослідників й до Едісона, але саме Едісонові випало зробити останній, але вирішальний крок на шляху до появи порівняно надійного й довговічного пристрою.



Томас Едісон (1915 р.)

Майбутній винахідник народився в Огайо, куди його батьки, нащадки переселенців з Нідерландів, перебралися з Канади. У дитинстві Томас теж перехворів на скарлатину, через що втратив слух і дуже швидко перестав ходити до школи. Але брак шкільної освіти він надолужив домашнім читанням. Пізніше Едісон писав: «Я зміг стати винахідником тому, що в дитинстві не ходив до школи».

З 12 років він заробляє, продаючи газети, солодощі та фрукти в потязі, що курсував від Порт-Гурона до Детройта. При цьому він починає складати й друкувати власну газету під гучною назвою «Великий залізничний вісник». У 15 років Едісон починає працювати телеграфістом. А в 22 — отримує свій перший патент на автоматичний пристрій для підрахунку голосів при балотуванні.

Уже другий виданий того ж 1869 року патент приносить Едісону казкові на той час роялті в 40 тисяч доларів, — адже він винаходить пристрій для автоматичного запису й передачі на відстань біржових курсів. На зароблені гроші Едісон відкрив власну майстерню, в якій уже наступного року працювали 150 співробітників. Наступні роки Едісон працював над різними важливими для бізнесу вдосконаленнями на телеграфі. Зокрема, він запатентував спосіб передачі по однодротовій лінії двох пар депеш у зустрічних напрямках.

У 1876 р. Едісон будує прекрасну лабораторію з першокласною науково-технічною бібліотекою в Менло-Парк за 38 км від Нью-Йорка. Протягом двох наступних років він удосконалив винайдений Александером Беллом (1847–1922) телефон, запропонувавши чутливий вугільний мікрофон і вмонтувавши в мікрофонне коло індукційну котушку, що збільшило силу струму і дозволило забезпечити зв'язок на великих відстанях.

Ще одним винаходом Едісона того ж часу (1877) став фонограф, перший в історії людства прилад для запису звуку на восковий валик, що обертався. Цей винахід зчинив справжню революцію. Вже тоді проникливо

побоювалися, що він створить у майбутньому проблеми для дипломатів і політиків, які звикли вести потаємні розмови. Канцлеру об'єднаної Німеччини Отто фон Бісмарку належать слова: «Фонограф — небезпечна річ для дипломатів, але він стане надзвичайно доброю річчю, коли дипломати почнуть говорити правду». Саме фонографи Едісона зберегли для нас, українців, живі голоси Марка Кропивницького й Лесі Українки.



Фонограф Едісона, що належав йому особисто (1906 р.)

Ще через два роки Едісон запатентував лампочку розжарювання, про яку ми вже говорили. Для її нитки він перепробував 6000 різних матеріалів, аж поки не зупинився на вугільному волокні, яке горіло спершу 13,5 годин, але потім його термін служби вдалося збільшити в 100 разів. Цей винахід Едісона надзвичайно швидко розійшовся по всій Земній кулі, докорінно змінивши життя всіх людей, до яких він дістався. Навіть у мистецтві лампочка розжарювання внесла свої корективи: перестали писати драми й опери на 5 дій (адже раніше максимальна тривалість дії між антрактами не могла перевищувати 30–40 хвилин, — часу, за який вигорали свічки в залі й на сцені, які потрібно було замінити в антракті; а тепер дія могла тривати значно довше, а саму виставу можна було вкласти у 2–3 дії). Навіть пересічний сон кожної окремої людини після винайдення лампочки розжарювання зробився суттєво коротшим.

На початку 1880-х Едісон одночасно починає електрифікацію залізниць й будівництво потужних теплових електростанцій (спершу в Лондоні і в Нью-Йорку). Для живлення міських мереж він пропонує постійний струм — але програє прихильникам змінного струму, компанії Вестінгауза й своєму колишньому співробітникові Ніколі Теслі, про якого йтиметься далі.

У житті винахідник відзначався надзвичайною працездатністю, він міг працювати по 20 годин на добу. Водночас він любив художню літературу, де над усе ставив Вільяма Шекспіра й Віктора Гюго. Його особиста бібліотека складалася з 60 тисяч книжок та часописів англійською, французькою, німецькою та італійською мовами, якими він читав вільно.

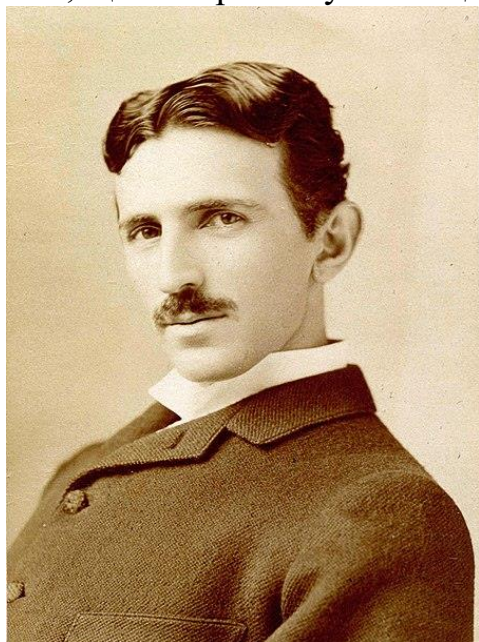
У 1927 р. Едісона (який навіть не мав формальної освіти) було обрано членом Національної академії наук США. Він став лауреатом багатьох почесних відзнак, проте на Нобелівську премію з фізики його (всупереч поширеній думці) ніколи не номінували. Вплив Едісона з його понад 1000

винаходів на життя людства досі залишається надзвичайно великим: адже навіть слово «hello» для початку телефонної розмови вигадав саме він.

Є відомі слова Едісона, що характеризують його кредо винахідника: «Я не досліджую законів природи і не зробив великих відкриттів. Я не вивчав їх так, як вивчали їх Ньютон, Кеплер, Фарадей і Генрі для того, щоб дізнатися істину. Я тільки професійний винахідник. Усі мої пошуки і досліді проводилися виключно з метою відшукати що-небудь, що має практичну цінність». Остання частина цього вислову стала його девізом: «Ніколи не винаходь того, на що немає попиту».

Нікола Тесла (1856–1943)

Цей народжений у сьогоднішній Хорватії серб, який працював у США, став однією з найбільш овіяних легендами постатей історії науки. Охочі до сенсацій газети приписували Теслі неймовірні винаходи. Проте й перелік реально зробленого ним вражає: йому належить винахід змінного струму та поліфазової системи, які лежать в основі всієї сучасної електротехніки. Він побудував перший електродвигун на змінному струмі. Він став ключовою фігурою при побудові першої електростанції на Ніагарському водоспаді. Нарешті, Теслі належать ідея лікування надвисокочастотними (НВЧ) струмами, що використовується й досі.

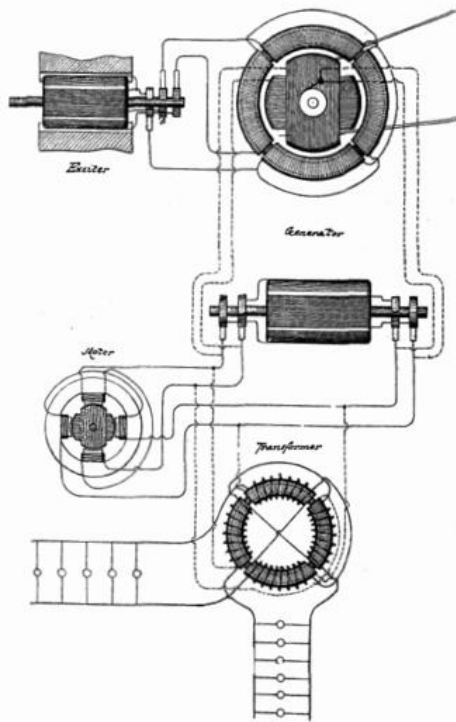


Нікола Тесла (1890 р.)

Майбутній учений народився в родині православного священника в селі поблизу міста Госпич у тодішній Австрійській імперії. За переказом, це сталося серед ночі, коли лютувала страшна гроза (отже, від самісінького початку життя хлопчика виявилось пов'язаним з потужними електричними розрядами). Хоча його мати була неписьменна, сам Нікола після гімназії вивчав електротехніку спершу в університеті Граца, а потім у Карловому

університеті в Празі. Однак системного курсу він так і не прослухав, натомість із 1882 р. почав працювати в Парижі в європейській філії компанії Едісона. У 1884 р. він переїздить до центрального офісу компанії в Америку, але за рік покидає роботу на Едісона після конфлікту через невиплачену платню. У цей же час між Теслою й Едісоном виникла й інженерна суперечка: Едісон був прихильником постійного струму, Тесла вважав перспективнішим змінний, причому спирався на закони фізики, вказуючи на великі втрати при передачі постійного струму на відстані; майбутнє підтвердило саме його правоту.

У 1885 р. починається робота Тесли на компанію «Вестінгауз електрик». У 1888 р. він запропонував спосіб за допомогою двох полярних котушок, що рухаються з 90-градусною фазою, отримувати магнітне поле, сталий за модулем вектор якого обертається навколо осі (вперше таке магнітне поле за допомогою обертового мідного диска та голки отримав у 1824 р. Франсуа Араго). На основі цього Тесла побудував електрогенератори надвисокої тоді частоти в 10000 Гц. 1894 р. було запущено Ніагарську ГЕС із потужними генераторами Тесли.



Генератор змінного струму Тесли (патент США, 1888)

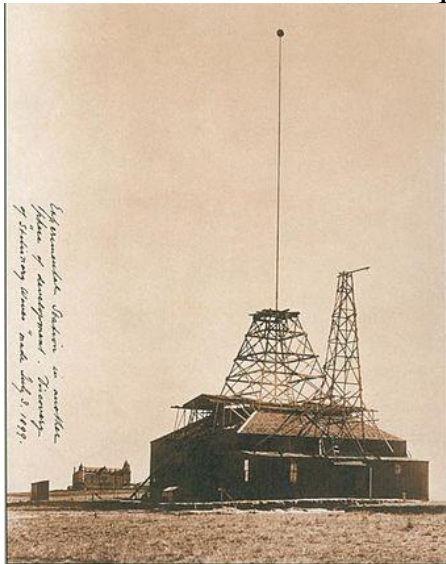
Протягом життя Тесла отримав багато наукових результатів, частину яких можна вважати фундаментальними. Зокрема, експериментуючи над собою, він установив, що струм із частотою понад 700 Гц розтікається по поверхні тіла, не завдаючи шкоди внутрішнім тканинам. На цій основі вчений запропонував методику лікування різних висипів та дезинфекції шкіри, яка використовується досі.

Паралельно з Марконі Тесла працює над створенням радіопередавачів (перший з яких він патентує 1893 р.) і приймачів — у 1896 р. йому вдається

передати сигнал на рекордні тоді 48 км. У 1943 р. суд визнає пріоритет Тесли на створення радіо.

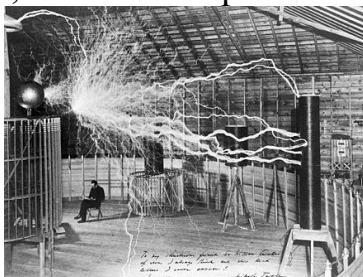
У 1899 р. вчений створює лабораторію в Колорадо-Спрінгс із вивчення електростатичного поля Землі. Основний її пристрій був трансформатором, один кінець первинної обмотки якого заземлювався, а другий висувався вгору на спеціальному стержні. До вторинної обмотки під'єднувався чутливий записувальний пристрій. Цей пристрій давав змогу виявити ефект стоячих електромагнітних хвиль у земній атмосфері, викликаних далекими грозовими розрядами. Це навело Теслу на думку про можливість бездротової передачі енергії на відстані.

На наступному етапі Тесла навчився генерувати такі хвилі самостійно. Первинна обмотка була намотана на основу масивного трансформатора. Вторинна обмотка поєднувалася з метровою кулею на вершечку 60-метрової щогли. При пропусканні через первинну обмотку змінного струму під напругою в кілька тисяч вольт у вторинній обмотці генерувався змінний струм з частотою до 150 тисяч герц і напругою в кілька мільйонів вольт.



Лабораторія Тесли в Колорадо-Спрінгс

При цьому від мідної кулі відходили подібні до блискавок розряди, грім від яких розлягався на 24 км. Тесла вирішив, що йому вдалося генерувати стоячі електромагнітні хвилі, які сферично розходилися навколо всієї Земної кулі, а потім концентрувалися в її діаметрально протилежній точці в південній частині Індійського океану. Того ж року винахідник демонструє діючі газорозрядні лампи й дроти, які працюють без під'єднаних дротів, на НВЧ-випромінюванні.



У 1900 р. Тесла починає проєкт «Ворденкліф» на Лонг-Айленді зі спорудження вежі для бездротової передачі енергії. Саме цей мегапроєкт і породив найбільше легенд про мало не надприродні можливості Тесли, аж до того, що саме він спричинив явище, відоме як «Тунгуський метеорит» (хоч на момент падіння метеориту в 1908 р. насправді проєкт було вже давно зупинено). Назва «скеля Вордена» походить від імені власника сусідньої із купленої Теслою земельної ділянки за 60 км від Нью-Йорка. На своїй відлюдній ділянці винахідник побудував 47-метрову вежу з мідною півкулею вгорі. З її допомогою шляхом генерації імпульсів він сподівався забезпечити всіх людей Землі безкоштовною електрикою, яку ті могли б отримувати пристроями, аналогічними до спорудженого раніше Теслою в Колорадо-Спрінгс (насправді ідея була утопічною, бо закон збереження енергії ніхто не скасовував, і на всіх землях разом припало б не більше енергії, ніж її було генеровано в одному імпульсі).



Вежа «Ворденкліф» (1904)

Дерев'яну вежу, попри величезні технічні труднощі, добудували в 1902 р., однак виготовлення обладнання затягнулося. Довідавшись про те, що реально йдеться не про експерименти з міським освітленням, а про філантропічний проєкт забезпечення всіх доступною електрикою, мільярдер Джон Морган відмовився фінансувати роботи далі. Дізнавшись про його рішення, від Тесли пішли й інші інвестори. В 1917 р. закинуту вежу Тесли підірвали, бо боялися, що її буде використано проти Штатів німецькими шпигунами.

Помер великий винахідник відлюдником і в боргах.

Нікола Тесла залишив спогади, перекладені багатьма мовами, зокрема й українською. У них він відхилив завісу над секретами свого пошуку. Він, зокрема, стверджував: «Інтуїція — це щось таке, що випереджає точне знання. Наш мозок має, без сумніву, дуже чутливі нервові клітини, що володіють здатністю відчувати істину, навіть коли вона недоступна для логічних висновків або інших розумових зусиль». Першою ідеєю, в яку він повірив ще в студентські роки, було застосування змінного струму. Багато хто відмовляв Теслу від «нездійсненої фантазії». І він навіть майже з ними погодився: «Під впливом авторитету професора я на деякий час відмовився від своєї ідеї», «але швидко прийшов до висновку, що я правий. І я взявся за

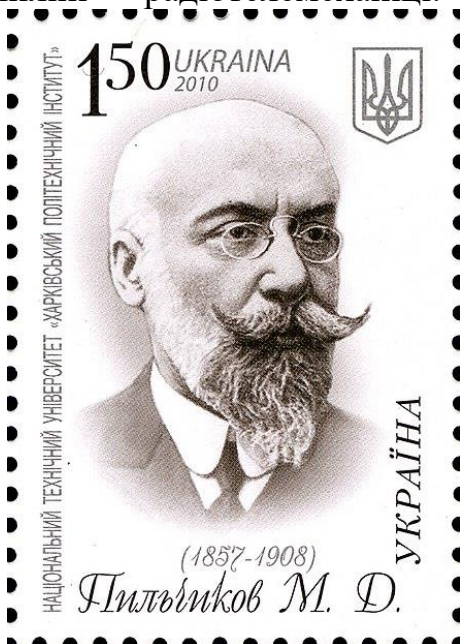
роботу з усім запалом і безмежною вірою юності». А в 1888 році Нікола Тесла запатентував асинхронний двигун. Слідом потягнувся ланцюг вражаючих ідей, які принесли Теслі славу «чорнокнижника від науки».

Відчувши «щось таке, що випереджає точне знання», Тесла вже не міг зупинитися і з властивою йому високою працездатністю глибоко і всебічно це обдумував. Блискуче володіючи математичним апаратом, він розробляв теоретичні аспекти та вибирав питання, які потребують експериментальної перевірки. І після цього «йшов на результат», увесь час роблячи ставку на вдосконалення своєї інтуїції. У цьому можна побачити пояснення його приголомшливих проникнень у можливості електрики й так само відвертої нездійсненності окремих його ідей.

На честь Ніколи Тесли названо кратер на Місяці й астероїд, сучасні електромобілі та одиницю магнітної індукції (тесла) в системі СІ: 1 Тл дорівнює такій індукції магнітного поля, за якої на елемент провідника, розташованого перпендикулярно до силових ліній магнітного поля, завдовжки в 1 м і зі струмом в 1 А діє сила в 1 Н.

Микола Пильчиков (1857–1908)

5 квітня (за старим стилем — 25 березня) 1898 року в переповненій залі одеської біржі професор Новоросійського університету (тепер — Одеський національний університет ім. Іллі Мечникова) Микола Пильчиков продемонстрував низку дивовижних дослідів: за командою, переданою радіосигналом, спрацьовували моделі семафора й маяка, стріляла маленька гарматка, вибухала модель яхти в басейні. Так було покладено початок новій дисципліні — радіотелемеханіці.



Микола Пильчиков на українській поштовій марці (2010)

Народився майбутній учений у Полтаві. Його батько Дмитро Пильчиков був педагогом і активним діячем українського руху, учасником Кирило-Мефодіївського братства та Полтавської «Громади». Любов до України Микола успадкував саме від батька, а любов до фізики прокинулася під час навчання в Полтавській гімназії й, згодом, у Харківському університеті. Ще студентом Микола Пильчиков винайшов електричний фонограф (пізніший фонограф Едісона був лише механічним).

Залишений після навчання для підготовки до отримання професорського звання, молодий дослідник конструює в 1881 р. новий досконалий рефрактометр, де для визначення показника заломлення потрібно було лише 2-3 краплі рідини. Пізніше він створює нові точні електричні вимірювальні прилади, за допомоги яких стає одним із піонерів вивчення Курської магнітної аномалії, де прогнозує наявність «щонайбагатших покладів залізної руди». У 1888–89 роках Пильчиков стажується в Парижі в Габрієля Ліппмана (1845–1921), у майбутньому — винахідника кольорової фотографії та Нобелівського лауреата з фізики за перший кольоровий знімок сонячного спектра (1908).

Після повернення молодий учений стає екстраординарним професором Харківського університету (1891), а з 1894 року — ординарним професором Новоросійського університету в Одесі. Тут на основі оптико-гальванічного методу дослідження електролізу Пильчиков виявив можливість фіксувати зображення різних предметів і об'єктів нарощуванням рельєфу на металевих пластинах за допомогою внутрішнього фотоефекту. Він проєктував зображення на катод, гальванований у той час, коли на ньому нарощувався шар металу. В результаті виходив рельєф, з якого можна було друкувати. Так було відкрито явище електрофотографування (сам учений назвав його фотогальванографією).

Паралельно вчений працює над вивченням щойно відкритих Х-променів і радіоактивності. Він удосконалив трубку Пулюя, використавши ввігнутий антикатод, і зумів одержати рекордно коротку на той час тривалість експозиції (близько 2 секунд). Ці його роботи помітив сам Рентген, який листувався з одеським професором.

Учений також захоплюється роботами з радіозв'язку (у вересні 1897-го Пильчиков навіть асистував Олександру Попову під час його доповіді в Одесі). Саме він стає ініціатором створення Фізичного інституту при Новоросійському університеті й комплектує тут першокласну вимірювальну лабораторію. У ній він конструює перші «радіопротектори» — пристрої, які «відсіюють» сторонні радіосигнали і пропускають тільки ті, які мають спричинити потрібну дію.

12 грудня 1898 року учений звернувся до військового міністра Російської імперії з пропозицією запровадити радіокерування у військово-морській сфері. У зверненні було запропоновано: «...1. Влаштувати бездротовий телеграфний зв'язок, який не зможе читати супротивник чи завадити цьому. 2. Влаштувати бездротовий вибух міни на значній відстані, чому ніяк не зможе завадити супротивник. 3. Створити такі мінні

човни, що без екіпажу зможуть рухатися, керуватися, досягати ворожих броненосців і топити їх. 4. Побудувати такі сухопутні міноносці без екіпажу, які рухаються попереду атакуючих військ та знищують укріплення».

26 січня 1899 року на запит керівника інженерів Військово-морського міністерства Пильчиков відповів, що «... на той час, коли Марконі та Попов прагнули збільшення відстані передачі повідомлень, а Тесла займався передаванням енергії, я розробив питання про те, яким чином бездротове повідомлення відокремити від пертурбацій, заподіяних дією сторонніх електричних хвиль». І далі: «...Після досить тривалих наукових та дослідних пошуків я зупинився на думці, що прилад, який сприймає дію електричних хвиль, повинний бути неодмінно обладнаний особливим охоронним пристроєм — протектором, який фільтрує електричні хвилі та дає доступ до діючих механізмів тільки хвилям, посланим нами. Таких протекторів створено мною декілька, в залежності від їхнього призначення».

Після довготривалих роз'яснень та листування міністерство в кінці літа 1902 року виділило 5000 рублів, акумулятори та військовий корабель «Дністер» для проведення морських випробувань розроблених радіопротекторів. Для цього Пильчиков 1903 року на Херсонському маяку облаштував радіопередавач, а радіоприймач із досліджуваними радіопротекторами встановив на кораблі. Надійна робота забезпечувалася на відстані понад 100 км. Подальше застосування радіопротекторів не висвітлювалося в пресі. Відомо тільки, що в розпал російсько-японської війни, 1 вересня 1904 р. за роботи з бездротової телеграфії та протимінного захисту суден, командувач Тихоокеанського флоту виголосив подяку професору Пильчикову.

Після повернення 1902 року до Харкова Пильчиков очолює кафедру фізики й фізичну лабораторію Технологічного інституту (тепер — Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»). Тут він здійснює піонерські роботи з поляризації атмосфери та іонізації повітря, радіофізики та кріогенної фізики.

Водночас учений переймається проблемами українського руху, стежить за програмами нововиниклих партій. А в публічних лекціях виступає проти мілітаризму й воєнного застосування наукових відкриттів. Будучи надзвичайно різнобічною людиною, професор Пильчиков чудово грав на скрипці, захоплювався живописом, писав вірші, переклав українською мовою декілька поем різних авторів, видати які в Російській імперії не було можливості через Емський указ 1876 року, що діяв аж до 1905 року.

Після короткої відлиги часів революції 1905–06 років у Російській імперії починається жорстока політична реакція. Знову нарастають гоніння на все українське. Микола Пильчиков не витримав цькування чорносотенних колег-професорів та ректора Шіллера і 19 травня 1908 року пустив собі кулю в серце...

Кажучи, що доля цього українського генія склалася трагічно, маємо на увазі не тільки передчасну смерть. У численних енциклопедичних виданнях він досі фігурує як «російський учений». А основоположником

радіотелемеханіки у світі вважають Ніколу Теслу, хоча той подав патентну заявку на винахід радіокерованого судна 1 липня 1898 року, а роботу моделі продемонстрував лише у вересні. Микола Пильчиков зробив це на півроку раніше.

Іван Пулюй (1845–1918)

На відміну від Миколи Пильчикова, людська доля Івана Пулюя була відносно благополучною. Прожив учений тривале (як на той час) і насичене життя. Проте єднає його з Миколою Пильчиковим те, що обидва були свідомими українцями й обидва мали шанс потрапити до шкільних підручників фізики. Але через не залежні від них обставини не реалізували цього шансу — і аж ніяк не мализна їхнього наукового доробку стала на заваді.



Фотокартка Івана Пулюя з особистим автографом

Іван Пулюй народився в містечку Гримайлів (тепер це Тернопільська область) у родині заможного й шанованого землероба, котрий певний час обіймав був навіть посаду місцевого бургомістра. По закінченні Тернопільської гімназії батько у 1865 році вирядив сина до столиці імперії, Відня, сподіваючись, що він там у Греко-католицькій духовній семінарії отримає першокласну теологічну освіту й повернеться в рідне містечко священником.

Проте математика, фізика й астрономія переважили — й після закінчення в 1869 році семінарії Іван усупереч батьковій волі продовжує навчання на філософському факультеті Віденського університету, на якому викладали тоді й математику та природничі науки. Після закінчення університету молодий учений отримує престижне призначення у Військово-морську академію в місто Фіуме (тепер — Рієка в Хорватії). Там він сконструював прилад для вимірювання механічного еквівалента теплоти новим методом; цей прилад у 1878 році був відзначений медаллю на всесвітній виставці у Парижі. У 1875–1876 роках учений стажувався і

працював у Страсбурзькому університеті, у фізичному інституті професора Августа Кундта, де захистив дисертацію і здобув ступінь доктора філософії з фізики. Там він зустрічається зі своїм однолітком Вільгельмом Рентгеном. У 1876–83 роках доктор Пулюй працює у Віденському університеті як асистент і приват-доцент.

Потому на запрошення підприємця Йозефа Верндля, власника відомої фірми, вчений вирушає до австрійського міста Штейр, де стає директором фірми електроосвітлювальних ламп власної конструкції. Його праця забезпечила великий успіх електротехнічної виставки влітку 1884 року, яку широко висвітлювала австрійська преса. Те, що саму виставку й прилеглі вулиці освітлювали тисячі «пулюївських» лампочок, стало сенсацією. Наслідком цього стало запрошення міністерства освіти зайняти посаду професора експериментальної і технічної фізики у Вищій німецькій технічній школі в Празі. Для вченого то не був закордон — адже й Прага, й рідний Гримайлів лежали тоді в межах однієї імперії — Австро-Угорської.

У 1885 році Пулюй започаткував у цьому виші окремий курс лекцій з електротехніки та практичні заняття. В 1888 році його обирають ректором Празької політехніки. У 1902 році він організував там окрему кафедру електротехніки, яку очолював до виходу на пенсію. Про його високий авторитет свідчить те, що в 1916 році вчений одержав пропозицію зайняти посаду міністра освіти Австро-Угорщини (однак відмовився за станом здоров'я). У Празі відбулося знайомство Івана Пулюя з Альбертом Айнштайном, який у 1911–1912 роках був там-таки професором Німецького університету.

Перший великий цикл Пулюєвих робіт був пов'язаний із молекулярно-кінетичною теорією газів. Він отримав неперевершено точні на той час значення коефіцієнтів внутрішнього тертя та дифузії газів і пари, які є вихідними в обчисленні таких величин, як довжина вільного пробігу молекули, кількість молекул у одному молі тощо. Відтак числові значення, що їх отримали попередники (зокрема й славетний Максвелл), було суттєво уточнено.

У 1880–1882 роках Пулюй виконав фундаментальні дослідження катодних променів, які описав у чотирьох статтях під загальною назвою «Промениста електродна матерія», перевиданих 1883 року як окрема монографія німецькою мовою. Такі дослідження розпочав ще 1869 р. англійський учений Вільям Крукс (1832 – 1919), - той самий, який записав для майбутніх поколінь два цикли лекцій Фарадея; - але його висновки містили чимало суперечливого. Про першорядність досліджень Пулюя у цій галузі свідчить те, що згадану монографію Пулюя Лондонське фізичне товариство видало 1889 року в перекладі англійською мовою як окремий том серії «Physical Memoirs», в якій підсумовувались найважливіші здобутки у фізиці того часу. Ще у 1880 році американський журнал «Science» опублікував статтю, де було викладено результати досліджень Пулюя, що спростовували хибну інтерпретацію процесів у середовищах розріджених газів, якої дотримувався Вільям Крукс.

Пулюй проаналізував вплив магнітного поля на катодні промені як потік заряджених частинок й констатував, що кожна частинка є «елементарним струмом», а відхилення катодних променів магнітом — це результат дії магнітного поля на окремі рухомі частинки. По суті це була ідея «сили Лоренца», але сформульована якісно, без формули.

Ці дослідження Пулюя процесів у катодно-променевих трубках мали першорядне значення, оскільки прокладали шлях до двох етапних відкриттів у фізиці кінця XIX століття — X-променів (1895) та електрона (1897). Нарешті, він ще 1881 року сконструював газорозрядну трубку, за допомоги якої було одержано найважливіші результати щодо фізики X-променів. Але тут дослідникові-українцеві фатально не пощастило.



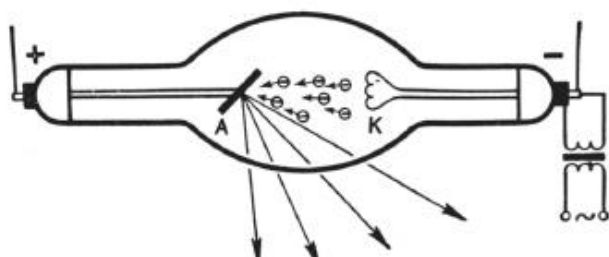
Знімок руки в X-променях, зроблений Рентгеном

Невідомі раніше промені, під впливом яких світився флюоресцентним світлом екран, і за допомогою яких невдовзі навчилися бачити крізь непрозорі стінки, фотографувати внутрішні органи чи кістки, Вільгельм Конрад Рентген (1845–1923) виявив (за його власними словами — випадково) 8 листопада 1895 року. Він назвав їх «X-променями» і подав статтю-повідомлення про своє спостереження до провінційного наукового видання «Праці Вюрцбурзького фізично-медичного товариства» 28 грудня того самого року. На початку повідомлення Рентген зазначив, що дію цих променів можна спостерігати, якщо під'єднати до джерела напруги катодну лампу однієї з конструкцій, розроблених різними дослідниками, і вказав їхні прізвища. Однак серед них він не згадав Пулюя, з яким був знайомий ще з часу їхнього спільного перебування у Страсбурзі. Сам Рентген таких ламп не виготовляв, а з якою саме лампою працював, не вказав.

Водночас дуже скоро виявилось, що саме лампа, сконструйована Пулюєм ще 1881 року, була найдосконалішою для проведення дослідів з X-променями. У перші тижні 1896 року Пулюй виконав ґрунтовні дослідження цих променів, результати яких виклав у двох статтях, які було надіслано 13 лютого і 5 березня 1896 року до престижного журналу «Повідомлення Імператорської академії наук» у Відні. Прикметно, що дві статті, які Рентген опублікував після свого першого повідомлення (знов-таки без згадки про Пулюя), подані до друку пізніше, ніж статті Пулюя. Тож зіставлення змісту згаданих статей Рентгена і Пулюя дає змогу встановити, у чому полягав

пріоритет результатів Пулюя. Це — пояснення природи нововідкритих променів і механізму їхнього утворення, відкриття їхньої здатності іонізувати атоми й молекули, отримання знімків найвищої якості з використанням трубки власної конструкції, що відкрило шлях широкому застосуванню Х-променів у медицині.

Природу нововідкритих променів Пулюй пояснював так: «За високої напруги з катода вириваються матеріальні частинки (електродні й газові частинки) і поширюються перпендикулярно до поверхні катода. Ці частинки, заряджені негативною статичною електрикою, підтримують протікання струму між двома електродами й скляними стінками. Коли ці матеріальні негативно заряджені частинки стикаються зі скляними стінками чи іншими твердими тілами, то крім збудження молекул тіла відбувається також вирівнювання, компенсація їхніх електричних зарядів, а це вирівнювання не може відбуватися без збудження ефірної оболонки молекули. Кожне вражене місце скляної стінки чи екрана буде вихідним пунктом ефірних хвиль. Під впливом ефірних хвиль, що поширюються в просторі, пофарбований сіркокальцієм екран світиться власним світлом цієї речовини. Крім видимих променів фосфоресценції, виникають ще невидимі промені з іншим періодом коливань».



Бомбардований катодними променями (електронами) анод А випромінює Х-промені

На той час іще широко застосовували поняття про ефір як про середовище виникнення і поширення електромагнітних коливань, а про фізичний механізм формування атомних і молекулярних спектрів не мали уявлення взагалі (він стане зрозумілим лише з розвитком квантової механіки). З урахуванням цього пояснення Пулюя вельми близьке до істини.

Натомість Рентген спочатку помилково припустив, що новим променям, на відміну від видимого світла, властиві повздовжні коливання, а пізніше схилився до хибної думки, що ці промені є лише певним різновидом катодних променів. У цьому контексті цікаво, що і відомий німецький фізик Філіпп Ленард (нобелівський лауреат 1905 року, що здобув пізніше сумну славу як поборник «арійської фізики» на противагу «єврейській фізиці» Айштайна) у середині 1896 року висунув помилкове припущення, що Х-промені є катодними променями з нескінченно великою швидкістю поширення.

Відзначмо й те, що найкращі результати у дослідах з Х-променями давало саме застосування Пулюєвої лампи, премійованої на Міжнародній

виставці в Парижі в 1881 р., тобто створеної за 14 років до відкриття самих променів. Важливим конструктивним елементом лампи Пулюя була наявність у ній антикатада (вперше у світовій практиці), що дозволяло формувати найбільш інтенсивні і найменш розбіжні промені. Тож закономірно, що саме Пулюй отримав найякісніші Х-променеві знімки, у тому числі вперше — всього скелету дитячого організму. Його знімки подавали популярні британські та французькі журнали для ілюстрації можливостей застосування нових променів у медицині.

Одна з Пулюєвих ламп, які виготовлялися промислово на фабриці у Лейпцігу, виявилась у колекції електровакуумних трубок фізичної лабораторії Дартмутського коледжу в США. Вона увійшла в історію застосування Х-променів у медицині завдяки тому, що за її допомогою було зроблено першу на американському континенті (і, мабуть, у світі) Х-променеву фотографію зламаної руки.

Важливим свідченням визнання видатного внеску Івана Пулюя у фізику став вихід у світ фундаментальної англomовної монографії Міхаела Ланнуціати «Радіоактивність: вступ та історія. Від квантів до кварків» (2016), у якій ім'я Пулюя подано поряд з іменами найвідоміших фізиків у розділі з промовистою назвою «Зала Слави». Водночас автор монографії наголосив на тому, що вчений був палким українським патріотом. Але, на жаль, факт залишається фактом: невелика перевага в часі публікації першої статті зробила одноосібним нобелівським лауреатом з фізики саме Рентгена, а Пулюєве ім'я багато десятиліть перебувало начебто в затінку його слави (тим більше, що до самого імені Івана Пулюя в «радянській Україні» ставилися з пересторогою — адже вчений не крився зі своїми патріотичними поглядами і палкою вірою в Бога).

Надзвичайно плідною була діяльність Пулюя у галузях практичної і теоретичної електротехніки, а також промислової електроенергетики. Він суттєво вдосконалив технологію виготовлення ниток для ламп розжарювання, його лампи значно перевершували за характеристиками лампи Едісона. Пулюй розробив нову конструкцію телефонних станцій із застосуванням розподільчого трансформатора — й отримав на це кілька патентів різних країн. Зрештою, він отримав титул державного радника — і суттєво впливав на формування «електротехнічної політики» Австро-Угорщини, керував спорудженням багатьох електростанцій. Ученого обрали почесним членом Віденського електротехнічного товариства. А одна зі споруджених ним електростанцій досі забезпечує електроенергією Прагу.

Серед важливих винаходів Пулюя є телетермометр, що дав змогу вимірювати температуру на великій віддалі від спостерігача; трубка-вентиль, яка забезпечувала протікання струму лише в одному напрямі; безпечна електрична лампа для гірників; радіометри для вивчення процесів у розріджених газах. Він відкрив перші принципи дегазації вакуумних приладів, тобто розробив методи зниження у них тиску газу.



Лабораторія Івана Пулюя в Празькій політехніці

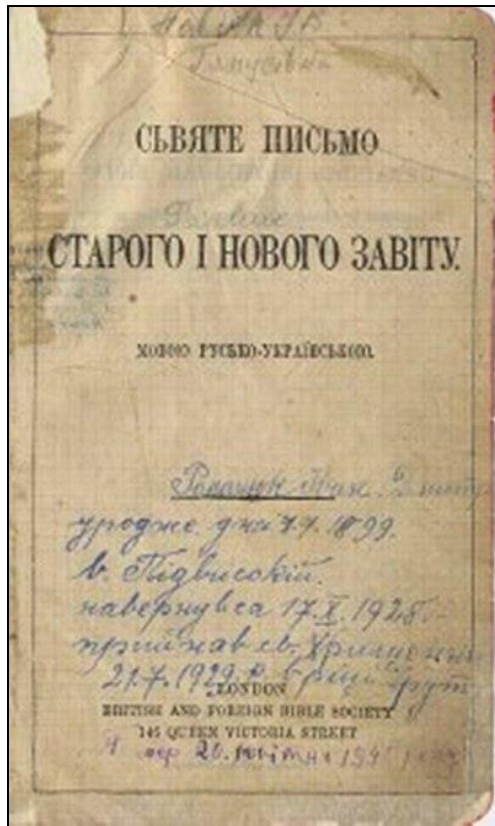
Окремої згадки варта літературна, перекладацька й просвітницька діяльність Пулюя. Особливе місце в ній посідає перший повний український переклад Біблії, який міг з'явитися лише поза межами Російської імперії (де над українською мовою тяжіла царська заборона). Пулюй ще 1869 року видав у Відні на власний ризик «Молитвослов» із українськими перекладами головних молитов та кількох псалмів. Паралельно наприкінці 1860-х до свого перекладу Святого Письма (зі старослов'янської) береться й визначний письменник Пантелеймон Куліш.

Обидва перекладачі — Куліш і на 26 років молодший від нього Пулюй — зустрілися навесні 1869 року у Відні й вирішили об'єднати свої зусилля. Адже Пулюй добре знав грецьку, якою написано Євангеліє. Про ретельність їхньої роботи свідчать спогади Пулюя: «Куліш наперед списував усе, що я перекладав із грецької мови, дбаючи більше про докладність, як про красу слова. Навпослі порівнювали ми цей переклад із церковно-слов'янським, російським, польським, сербським, німецьким, латинським, англійським і французьким. Упевнивши себе таким чином у правильності нашого перекладу, робили ми послідню редакцію красномовну».

Протягом 1872 року в основному було завершено переклад усього Святого Письма — але видати його завадив брак коштів. Удалося кілька разів видати (за допомоги Британського біблійного товариства) лише «Новий заповіт». А 6 листопада 1885 року під час нищівної пожежі на хуторі Мотронівка на Чернігівщині, де жив Куліш, згорів єдиний примірник рукопису «Старого Завіту».

Але вже немолодий Куліш, піддаючись заохоченням Пулюя, взявся до справи наново. Над перекладом Біблії Куліш трудився впродовж останніх 12 років життя, але смерть перервала його працю, коли та вже наближалася до

завершення. Куліш особисто переклав із гебрійської 32 книги Старого Заповіту. Решту 8 книг переклали Пулюй (Псалтир) та Іван Нечуй-Левицький. Повне видання Біблії українською вперше вийшло у Відні 1903 року.



Біблія в перекладі Куліша, Пулюя та Нечуя-Левицького

Після виходу української Біблії Пулюй уживав заходів, щоб домогтися легального допущення її в Російську імперію (певна кількість примірників таки перетинала кордон, але контрабандою). Та дістав рішучу відмову за підписом сумнозвісного обер-прокурора Синоду Побєдоносцева, який тоді керував Російською православною церквою. Мало того — примірники, що їх Пулюй надіслав 1904 року, не було прийнято навіть до університетських бібліотек Петербурга, Києва й Харкова. Зате українську Біблію погодився прийняти на початку 1905 року японський генерал Ногі для російських військовополонених родом із України.

Текст Святого Письма в перекладі Куліша, Пулюя й Нечуя-Левицького не раз перевидано — востаннє 2003 й 2008 року.

Іван Пулюй був справжнім ученим-патріотом, просвітником свого народу. Він надрукував кілька десятків своїх праць у найпрестижніших тогочасних наукових журналах Європи. Водночас саме йому належить перша в історії стаття з фізики українською мовою, надрукована в львівському часописі «Правда» в 1877 р. Присвячено її сконструйованому лише за 3 роки перед тим радіометру (чи «млинку») Крукса, природа обертання зафарбованих у біле й чорне лопатів якого в розрідженому повітрі під дією освітлення ще була тоді предметом обговорення. Пізніше учений

опублікував також чотири наукові статті з фізики українською мовою у виданнях Наукового товариства імені Шевченка у Львові (НТШ).



Радіометр Крукса у книжці Івана Пулюя «Непропаща сила» (1901 р.)

Іван Пулюй добре усвідомлював значення своєї праці з творення основ української наукової термінології. Це підтверджує лист, який він написав 6 серпня 1893 р. тодішньому голові НТШ Олександру Барвінському: «Не легка бо робота прорублювати стежку там, де нога людська споконвіку не ступала. Науки природні мусять мати свою мову, утворену на підставі народної мови /.../. Народ без науки вищої між народами – те, що людина-неука між людьми ученими».

Тому кількома виданнями вийшли українською мовою (у Відні та у Львові) науково-популярні книжки Івана Пулюя «Непропаща сила» (про закон збереження енергії) та «Нові і перемінні звізди» (про досягнення астрономії). Мова цих книжок здаватиметься сучасному читачеві подекуди малозрозумілою, але треба пам'ятати: в умовах бездержавного існування України наша наукова термінологія тоді лишень створювалася зусиллями таких ентузіастів, як Іван Пулюй.

А про настрій автора цих книжок можна робити висновок із присвяти Пантелеймонові Кулішу: «Чим хата багата, тим і рада, тож прийміть, добродію, на спомин моє оповідання про звізди. Се те оповідання, котрого Ви слухали зоряної ночі на Україні, у Мотронівському саду, коли ми, знуджені журбою над сумною долею України, літали думкою аж за небо, шукаючи для душі одради, а знайшовши її в законі непропащої сили, мужались на нове діло. Коли доведеться сьому невеличкому писанню побачити світ під українським небом, то, може, буде воно маленькою одрадою тим нашим землякам, що не шукають опіки в чужих, а знають, що

сила і спасіння лежать у нас самих: у праці над освітою і добробутом народу».

Широка заангажованість Пулюя у процеси національного відродження яскраво виявилась у його спілкуванні з відомими діячами Наддніпрянської України — уже згаданим Пантелеймоном Кулішем і його дружиною Ганною Барвінок, Христиною Алчевською, Володимиром Александровим, коли він улітку 1880 року побував у Києві, на Чернігівщині та в Харкові. Обговорювали, зокрема, можливості друкування творів українських письменників у Галичині, оскільки в Російській імперії це було практично неможливо через жорсткі заборони на використання української мови.

Сам Іван Пулюй був блискучим публіцистом. У львівській газеті «Діло» він опублікував понад 10 статей, у яких викривав ганебну політику російської влади щодо українців, а також наполегливо обстоював ідею відкриття у Львові окремого українського університету (у тодішньому Львівському університеті домінували поляки). Врешті у співпраці з депутатами-українцями у парламенті Відня вчений домогся того, що 29 листопада 1912 року австрійський уряд оголосив: український університет у Львові постане на початку 1916 року. На жаль, цьому завадила Перша світова війна.

Нарешті, варто згадати й про те, що в 1915 році Пулюй опублікував німецькою мовою у Празі брошуру «Україна та її міжнародне політичне значення» і поширив її в середовищі політиків. У ній, зокрема, учений переконливо аргументував тезу: «Вільна Україна означатиме bastion, безпеку середньоєвропейських держав, тому її визволення лежить не тільки в інтересах цих держав, але і цілої Європи».

Сьогодні ім'я Івана Пулюя носить Тернопільський національний технічний університет. На його честь названо премію за наукові досягнення, яку встановила президія НАН України. За універсальністю таланту, масштабністю звершень у різноманітних галузях діяльності Іван Пулюй є унікальною постаттю в історії світової науки та культури.

Джозеф Джон Томсон (1856–1940)

Джозеф Джон Томсон народився поблизу Манчестера в Англії, в родині власника антикварної книгарні. Вчився в Оуенс-коледжі, а потім у знаменитому Коледжі святої Трійці, або Триніті-коледжі Кембриджського університету. Після закінчення університету почав працювати в не менш знаменитій Кавендішській фізичній лабораторії.



Джозеф Джон Томсон

Маючи 24 роки, Томсон публікує свою першу наукову статтю про електромагнітну теорію світла, де виступає як відданий прибічник та оборонець поглядів Джеймса Клерка Максвелла.

Томсон був одержимий експериментальною фізикою. Він так звик самотужки досягати поставленої мети, що говорили про його зневагу до думки авторитетів. Директор лабораторії Джон Вільям Стретт (у майбутньому — лорд Релей), який перебрав цю посаду від Максвелла, так високо цінував наукові досягнення молодого вченого, що, йдучи в 1884 році з посади, порекомендував кандидатуру свого наступника — 28-річного Томсона. Таким чином, Томсон став третім керівником в історії Кавендішської лабораторії.

Один із американських фізиків, котрий проходив наукове стажування в Кавендішській лабораторії, коли довідався про призначення нового директора, вирішив залишити лабораторію. «Безглуздо працювати під керівництвом професора, який лише на два роки старший за тебе», — заявив він. Напевно, згодом стажер пошкодував про своє покvapливе рішення.

Усі, хто близько знав Джозефа Джона Томсона, одноставно відгукувалися про його незмінну доброзичливість і приємну манеру спілкування, що поєднувалися з принциповістю. Пізніше його учні згадували, що керівник любив повторювати слова творця Кавендішської лабораторії Джеймса Максвелла про те, що ніколи не слід відмовляти людини в праві поставити задуманий експеримент. Навіть якщо дослідник не знайде того, чого шукає, він може відкрити щось інше й винести для себе більше користі, ніж із тисячі дискусій. Незабаром у цій лабораторії, під керівництвом Томсона, зібралася група молодих учених із різних країн, котрі горіли ентузіазмом і були ладні на будь-які жертви заради науки.

35 років (!) керував Томсон цією науковою лабораторією, передавши її в 1919 році Ернесту Резерфорду. За цей час вона перетворилася на великий центр світової науки й стала міжнародною школою фізиків. З неї вийшли 27 членів Королівського товариства й 80 професорів, котрі успішно працювали в тринадцяти країнах.

Програма наукових досліджень була масштабною. На порядку денному стояли такі наукові проблеми: проходження електричного струму через гази, електронна теорія металів, дослідження фізичної природи різних променів тощо.

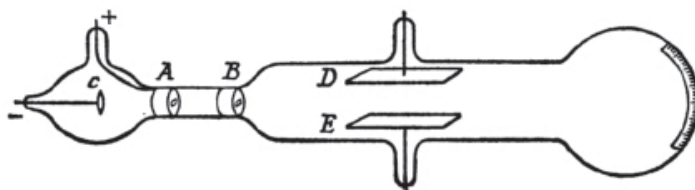
Удосконалення газорозрядних трубок зумовило актуалізацію питання про фізичну природу так званих «катодних променів», джерелом яких є катод (негативний електрод) трубки. Коли з трубки відпompували повітря й газових спектрів уже не спостерігалось, вона заповнювалася однорідним світінням. Природа катодних променів довгий час залишалася незрозумілою. Виявили, що вони легко відхиляються під дією магнітного поля, але практично не відхиляються під дією електричного.

Натхненні результатами дослідів Герца, більшість учених уважали їх хвилями. Проте ще Вільям Крукс пов'язав у 1874 р. обертання лопатів свого радіометра із наявністю у цих променів імпульсу й висловив припущення про їхню корпускулярну природу. Його підтримав «старійшина» німецьких фізиків Гельмгольц. (Насправді Крукс помилявся. Теорію обертання «млинки Крукса», виходячи з молекулярно-кінетичних позицій, з урахуванням того, що молекули розрідженого газу мають більший імпульс біля «гарячішого» чорного боку лопаті і менший – біля холоднішого білого, побудував у своїй останній опублікованій за життя роботі Максвелл)

Досліджуючи катодні промені (й використовуючи для цього трубку, аналогічну до Пулюєвої, — працю Пулюя на цю тему було видано в англійському перекладі ще 1889 року), Томсон дійшов геніального здогаду: якщо катодні промені — справді заряджені частинки, то їхній потік навіть у розрідженому повітрі є провідником, у який електричне поле не проникає, а отже — і не відхиляє його.

Відтак треба перейти в область високого вакууму, щоб катодні промені залишилися ледь видимими. І справді, за таких умов промені відхилялися під дією електричного поля, і то в напрямку, що відповідав їхньому негативному заряду.

Наступний етап: Томсон конструює прилад, у якому відхилення заряджених корпускул в електричному полі (сила його не залежить від швидкості корпускул) компенсувалося відхиленням у магнітному полі (сила якого пропорційна швидкості). Звичайно, тут відхилення частинки в електричному полі від швидкості вже залежить — адже саме швидкість визначає, скільки часу частинка летітиме між електродами, які її відхиляють.



Прилад Томсона для визначення співвідношення заряду до маси частинок катодних променів. На рисунку с - катод, А і В – електроди, що прискорюють електрони, D і E – електроди, що відхиляють їх траєкторію.

Відтак учений отримав два несподівані результати: виявилося, що частинки рухаються з величезними швидкостями порядку $1/10$ с (доти таких швидкостей в експериментах не спостерігали), і що вони мають гігантський питомий заряд $\frac{q}{m} \approx 10^7$ електромагнітних одиниць на грам. Жодна відома речовина такого велетенського заряду не мала. Тому з'явилася думка, що ці частинки і є «сама електрика».

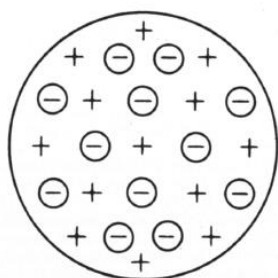
Трохи пізніше, 1893 року, німецький науковець Філіпп Ленард (1862–1947) зумів «випустити» катодні промені з трубки через тонке алюмінієве віконце в повітря — і вони спричинили інтенсивне світіння на відстані в кілька міліметрів. Але ж було відомо, що середній пробіг молекули в повітрі має порядок 10^{-5} см. Частинки з такими величезними вільними пробігами musiли бути надзвичайно малими!

Томсон виявив: відношення заряду корпускул, із яких складаються промені, до їхньої маси є сталою величиною, що не залежить ні від швидкості частинок, ні від матеріалу катода, ні від природи газу, в якому відбувається розряд. Схоже, що корпускули були якимись універсальними частинками речовини, складовими «неподільних» атомів.

Проте окремо заряду частинки учений визначити не зумів. Це вперше зробив у 1910 р. американський фізик Роберт Ендрюс Міллікен (1868–1953) у дослідах з найдрібнішими зарядженими крапельками олії, «підвішеними» між двома електродами. Отримане ним значення ($1,592 \cdot 10^{-19}$ Кл) виявилося дуже близьким до реального. Оскільки відношення заряду до маси частинки виміряв ще Томсон, стало зрозуміло, що частинка надзвичайно легка, приблизно в 1800 разів легша від найлегшого атома водню.

Теоретично електрони вже були відомі, навіть мали власну назву (отримали її 1891 року від ірландського фізика Джорджа Стоні (1826–1911)), але тільки Томсону вдалося відкрити їх, і тим самим остаточно підтвердити їхнє існування. 29 квітня 1897 року відбулася доповідь із демонстрацією в приміщенні, де вже понад двісті років проводило засідання Лондонське королівське товариство. На ній було неспростовно доведено: електрони існують, а, отже, «неподільний» атом — це складна структура.

В історію науки Джей-джей (як «позаочі» приязно називали його учні й колеги) увійшов як відкривач електрона. За це відкриття 1906 року Томсон став одним із перших Нобелівських лауреатів з фізики (через 31 рік Нобелівську премію за дослідження хвильових властивостей електронів отримав і його син Джордж Пейджет Томсон).



Модель атома, запропонована Джозефом Томсоном

Він-таки запропонував на початку XX століття електронну модель атома: так званий «пудинг із родзинками». У цій моделі атом являв собою «хмару» позитивного заряду, наділену масою, в якій «плавали» негативні електрони, здійснюючи різні коливальні рухи (що й були причиною атомних спектрів). Ця модель, проте, задовільно передбачила лише основну частоту коливань атома водню, а для складніших атомів працювати відмовилася, хоч як намагався Томсон її вдосконалювати. А за кілька років Ернест Резерфорд обґрунтував своїми дослідженнями з розсіювання α -частинок «планетарну» модель атома, в якому позитивний заряд зосереджено в центральному важкому ядрі.

1936 р. Томсон видав цікаву книгу «Спогади й роздуми», де докладно розповів про історію відкриття електрона. Імен своїх тодішніх критиків-ретроградів він навіть не згадав. Можливо, тому, що наприкінці життя сам перетворився, за висловом Резерфорда, на «наукову скам'янілість», яка давно втратила зв'язок із актуальною сучасною фізикою. «Він поставив себе поза фізикою», — так, ще нещадніше, згадував про нього Бор, чий талант у Кембриджі Томсон «прогледів» на початку 1910-х. Але замолоду «Джей-джей» устиг зробити стільки, що забезпечив собі без сумніву почесне місце в історії науки — і поховання у Вестмінстерському абатстві поруч із найславнішими англійцями.

Пауль Карл Людвіг Друде (1863–1906)

Після відкриття електрона Джозеф Джон Томсон узявся до побудови електронної теорії провідності металів. Паралельно цю саму проблему досліджував німецький учений Пауль Друде.



Пауль Друде

Народився майбутній фізик у Брауншвайгу, навчався в Геттінгенському університеті. Ще в молодому віці, у 1894 р. саме Друде остаточно закріпив за швидкістю світла загальноприйняте нині позначення «с». На жаль, ученому, який працював професором Лейпцигського й Берлінського університетів, було відпущено неповні 43 роки життя. На вершині кар'єри, після обрання до Пруської академії наук, він з незрозумілих причин наклав на себе руки, залишивши дружину й чотирьох дітей.

З 1900 року Друде редагував найкращий на той час науковий журнал у галузі фізики «Аннали фізики», що виходив німецькою мовою. Знамениті статті Айнштейна, які 1905 року пояснили браунівський рух і червону межу фотоефекту, а також започаткували спеціальну теорію відносності, підписав до друку саме Друде. Навряд чи він в усьому поділяв «ересі» нікому в науковому світі ще не відомого швейцарського патентного службовця. Але ми маємо бути вдячні вченому за те, що він усвідомив їхню значущість — і виніс їх на обговорення широкого наукового загалу.

Класичну теорію електронної провідності металів, що увічнила його ім'я, Друде побудував 1900 року. Згідно з нею, струм у металі переносять електрони, що поводяться як класичний ідеальний газ. Під дією електричного поля з напруженістю E електрони з зарядом e і масою m починають рухатися з прискоренням

$$a = \frac{e}{m} E.$$

Цей газ електронів (як і звичайний газ) характеризують середня довжина вільного пробігу й середній час τ вільного пробігу між двома зіткненнями. Єдина відмінність полягає в тому, що молекули в газі розсіюються під час зіткнень одна з одною, а в металі електрони розсіюються переважно на коливаннях атомів кристала. Тому середня швидкість електронів, які переносять струм у полі, дорівнюватиме приблизно половині тієї швидкості, якої електрон набуде перед черговим зіткненням:

$$v = \frac{a\tau}{2}.$$

А густину струму з його визначення (струм — це заряд, що проходить через одиницю перерізу за одиницю часу) легко записати як:

$$j = env.$$

Тут n — концентрація електронів (їхня кількість у одиниці об'єму). Підставляючи в цей вираз середню швидкість електронів, отримаємо:

$$j = \frac{e^2 n \tau}{2m} E.$$

Але ж цей вираз збігається з записом закону Ома для ділянки кола в диференціальній формі: $j = \sigma E$. Мало того — теорія не лише пояснила закон Ома, але й дала вираз для питомої електропровідності (величини, оберненої до питомого опору):

$$\sigma = \frac{e^2 n \tau}{2m}.$$

Оскільки концентрація електронів у всіх металах приблизно однакова, залежність провідності від температури й характеристик металу визначається середнім часом вільного пробігу. Зі зростанням температури цей час зменшується — отже, питомий опір збільшується, що спостерігали багато дослідників, починаючи з Гамфрі Деві.

Проте на цьому успіхи теорії Друде й закінчилися. Газ класичних електронів не лише проводить струм. Із ним мають бути пов'язані й інші явища — наприклад, теплоємність. Якщо припускати, що на кожен атом кристала припадає один електрон провідності (це впливає з вимог електронейтральності), молярна теплоємність металу має бути в півтора рази більшою за теплоємність діелектрика (коливаючись навколо положень рівноваги, атоми мають потенціальну й кінетичну енергії, а вільні електрони — лише кінетичну енергію).

Але експерименти показували: теплоємність одного моля металу й одного моля діелектрика майже однакова. Цього класична фізика пояснити не могла — і це означало, що вона стоїть на порозі великих змін.

Гендрік Антон Лоренц (1853–1928)

Цей видатний учений увійшов до історії фізики як творець електронної теорії, в якій синтезовано наукові ідеї теорії поля й атомістики.

Народився Гендрік у голландському місті Арнемі. Шестирічним хлопчиком пішов до школи — і закінчив її як найкращий учень. Потім у вищій цивільній школі його улюбленими предметами стали фізика, математика, іноземні мови. Щоб вивчити французьку та німецьку мови, Лоренц відвідував церкву й слухав проповіді священників цими мовами.



Гендрік Лоренц (портрет роботи Яна Вета)

У Лейденському університеті Гендрік із великим інтересом слухав лекції професорів фізики й математики, вивчав наукові праці Максвелла. Ці праці були дуже складними, тому Лоренц назвав їх «інтелектуальними

джунглями». Добрати ключі до розуміння теорії електромагнітного поля Максвелла, за словами самого Лоренца, йому допомогли наукові статті Гельмгольца, Фарадея та Френеля.

21-річний Гендрік із відзнакою складає іспити на ступінь магістра й починає самостійно готуватися до докторських іспитів, працюючи вчителем вечірньої школи. Робота йому подобається, і незабаром Лоренц стає відмінним педагогом. Удома він створює невелику фізичну лабораторію й продовжує вивчати праці Максвелла та видатного французького оптика Огюстена Френеля. Про цей час Лоренц згадував: «Моє захоплення й пошана переплелися з любов'ю та прихильністю; такою великою була радість, коли я зміг прочитати самого Френеля». Допомогло молодому вченому в цьому здобуте під час слухання церковних проповідей знання французької мови.

Лоренц стає активним прихильником електронної теорії Максвелла: «Його «Трактат з електрики та магнетизму» справив на мене, мабуть, одне з найсильніших вражень у житті; тлумачення світла як електромагнітного явища за своєю сміливістю перевершило все, що я доти знав» — таким було ставлення Лоренца до «інтелектуальних джунглів» Максвелла.

Лоренц блискуче захищає докторську дисертацію, і у свої 25 стає професором спеціально для нього заснованої кафедри теоретичної фізики (однієї з перших у світі!) Лейденського університету. 28-річний професор стає членом Королівської академії наук в Амстердамі.

Récapitulation des formules les plus importantes.

§ 90. Je suis bien éloigné de vouloir attacher trop d'importance aux considérations précédentes. Elles n'avaient d'autre but que de rendre plus acceptable l'hypothèse que voici, dont je me servirai dans tout ce qui suit:

Les particules chargées dont le déplacement donne lieu aux phénomènes électriques ne peuvent pas tourner autour de leur centre et, pour en déterminer le mouvement de translation, il suffit d'employer les équations (61), qui peuvent être mises sous la forme suivante:

$$\left. \begin{aligned} X &= 4\pi V^2 \int e f d\tau + \eta \int e \gamma d\tau - \zeta \int e \beta d\tau, \\ Y &= 4\pi V^2 \int e g d\tau + \zeta \int e \alpha d\tau - \xi \int e \gamma d\tau, \\ Z &= 4\pi V^2 \int e h d\tau + \xi \int e \beta d\tau - \eta \int e \alpha d\tau. \end{aligned} \right\} \dots (I)$$

A ces formules il faut joindre les équations qui déterminent l'état de l'éther et qu'il sera utile de récapituler ici:

$$\frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial g}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial z} = e, \dots \dots \dots (II)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial x} + \frac{\partial \beta}{\partial y} + \frac{\partial \gamma}{\partial z} = 0, \dots \dots \dots (III)$$

Сторінка зі статті «Теорія електромагнетизму Максвелла в застосуванні до рухомих тіл» (1892), де вперше записано покоординатні вирази для сили Лоренца (I), а нижче — рівняння Максвелла для дивергенції електричного (II) і магнітного (III) полів

У 1892 р. вийшла (французькою мовою — уроки священника знову стали в пригоді) стаття Лоренца «Теорія електромагнетизму Максвелла в застосуванні до рухомих тіл», а в 1895 р. — фундаментальна робота Лоренца «Спроба теорії електричних і оптичних явищ у рухомих тілах», яка дає системний виклад електронної теорії. Слово «електрон» у них ще не використано, хоча елементарна кількість електрики вже називалася саме так (Томсон експериментально відкрив електрон через два роки). Лоренц використовує власні терміни й говорить про заряджені позитивно або негативно частинки матерії.

Саме Лоренц доповнив записані для неперервного середовища рівняння Максвелла рівнянням для сили, яка діє (для системи СГС) в електричному полі E й магнітному полі B на частинку з зарядом q і масою m , яка рухається зі швидкістю v :

$$\vec{F} = q\vec{E} + \frac{q}{c}[\vec{v} \times \vec{B}].$$

Ця сила отримала назву «сили Лоренца». Цікаво, що сам Лоренц уживав для неї спершу виключно громіздкий покоординатний запис (як це робив для запису своїх рівнянь і сам Максвелл).

1900 року на Міжнародному конгресі фізиків у Парижі Гендрік Антон Лоренц виступив із доповіддю про магнітооптичні явища. Доповідь здобула загальне схвалення й визнання. Його друзями стали Больцман, Він, Пуанкаре, Рентген, Планк та інші знамениті фізики.

1902 року Лоренц (разом зі своїм учнем Пітером Зеєманом) став другим (після Рентгена) лауреатом Нобелівської премії з фізики за теоретичне пояснення виявленого на шість років раніше явища розщеплення спектральних ліній у магнітному полі. Це було ще до появи квантової теорії атома Бора, тож Лоренц розглядав електрон в атомі як класичний осцилятор, у рівняння для якого додано магнітну складову сили Лоренца:

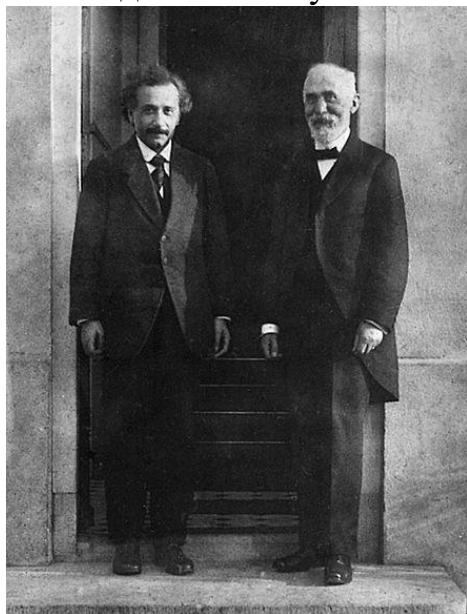
$$m \frac{d\vec{v}}{dt} + m\omega_o^2 \vec{r} + \frac{q}{c}[\vec{v} \times \vec{B}] = 0.$$

У цьому рівнянні ω_o — резонансна частота дипольного електронного переходу. Якщо ввести ларморівську частоту $\Omega_L = \frac{eB}{2mc}$, то резонансна частота дипольного переходу в присутності магнітного поля розщепиться на т.зв. Лоренців (або простий Зеєманів) триплет: $\omega = \omega_o \pm \Omega_L$. Проте такий простий класичний опис не пояснював ряду ситуацій, що спостерігалися в експерименті, і повне пояснення ефекту Зеємана було дано тільки після створення квантової механіки.

1904 року Лоренц опублікував основоположну статтю «Електромагнітні явища в системі, що рухається зі швидкістю, меншою від

швидкості світла». Він вивів формули, що пов'язують між собою просторові координати та моменти часу у двох різних інерційних системах відліку (перетворення Лоренца — про них ми докладніше поговоримо трохи згодом). Йому вдалося отримати формулу залежності маси від швидкості. Ці результати стали складовою спеціальної теорії відносності, яку рік потому створив Айнштейн.

На початку XX століття у фізиці сталися тектонічні зміни, яким буде присвячено наступну частину нашого посібника. Споруда класичної фізики (яку Лоренц будував і в яку вірив) почала руйнуватися. 1911 року на I Міжнародному Сольвеївському конгресі фізиків (ці конгреси скликали з ініціативи закоханого в науку бельгійського фабриканта-філантропа Ернеста Сольвея) у Брюсселі обговорювали проблему «Випромінювання й кванти». У роботі цього конгресу брали участь двадцять три знаменитості тогочасної фізики. Головував Гендрік Антон Лоренц. Ось його вступне слово: «Нас не покидає відчуття, що ми перебуваємо в глухому куті; старі теорії виявляються дедалі менш здатними проникнути в пільму, що оточує нас з усіх боків. Ми будемо дуже щасливі, якщо нам вдасться хоч трохи наблизитися до тієї майбутньої механіки, про яку всі говорять».



Айнштейн та Лоренц перед будинком Лоренца в Лейдені (1921 р.)

Драму класичної фізики вчений сприйняв як особисту. Наприкінці життя він із болем казав: «Сьогодні, викладаючи електромагнітну теорію, я стверджую, що, рухаючись по криволінійній орбіті, електрон випромінює енергію. А завтра в тій самій аудиторії я кажу, що електрон, обертаючись навколо ядра, не втрачає енергії. Де ж істина, коли про неї можна говорити взаємовиключні речі? Чи здатні ми взагалі пізнати істину, і чи є сенс у тому, щоб займатися наукою?».

Лоренц був членом багатьох академій наук і наукових товариств. У день 50-ліття його наукової діяльності Голландська академія наук заснувала велику наукову нагороду «Золота медаль Лоренца». Торжества на честь Лоренца перетворилися на міжнародний з'їзд учених. Лоренца було визнано

старійшиною фізичної науки, великим класиком теоретичної фізики та її духовним батьком.

1927 року на Сольвеївському конгресі з проблеми «Електрони, фотони і квантова механіка», як і на всіх попередніх конгресах, головував Лоренц. А 4 лютого 1928 року вченого не стало. У Голландії було оголошено національну жалобу. На похорон великого фізика прибули вчені зі всього світу. Від Голландської академії наук на траурному мітингу виступав Пауль Еренфест, від англійських учених — Ернст Резерфорд, від французьких — Поль Ланжевен, від німецьких — Альберт Айнштайн.

Над прахом Лоренца Айнштайн сказав: «Його блискучий розум указав нам шлях від теорії Максвелла до досягнень фізики наших днів. Саме він заклав наріжні камені цієї фізики, створив її методи. Образ і праця його служитимуть задля блага й освіти ще багатьох поколінь».

Стиль роботи Лоренца — «брати глибоко й прагнути до повної завершеності» — послужить, за словами Макса Планка, зразком і для майбутніх дослідників.

«Його праці завше були захопливо цікаві. Він залишив після себе величезну спадщину — справжнє завершення класичної фізики», — так заслуги Лоренца оцінював Луї де Бройль.

Таким титаном науки був і таким залишається в пам'яті нащадків Гендрік Антон Лоренц — цей «великий класик теоретичної фізики» і великий патріот своєї невеликої країни, про яку він говорив: «я щасливий тим, що належу до нації, надто малої для того, щоб робити великі дурниці». Нагадаємо: ці слова було промовлено тоді, коли «великі» нації розв'язували світові війни або ж влаштовували світові революції, які коштували десятки мільйонів людських життів.

І знову Альберт Айнштайн (1879–1955)

Про цього видатного ученого ми вже говорили в попередній частині нашої книги — у зв'язку з його теорією браунівського руху. Проте в масовій свідомості Айнштайн насамперед є автором теорії відносності.

Принцип відносності (існування цілком еквівалентних інерційних систем), що його сформулював для механічних явищ Галілей, французький математик, фізик, астроном і філософ Анрі Пуанкаре (1854-1912) 1904 року запропонував розглядати в числі основних принципів фізики. Пуанкаре стверджував, що «закони фізичних явищ будуть однаковими й для спостерігача, що перебуває в спокої, і для спостерігача, що перебуває в стані рівномірного прямолінійного руху, тож ми не маємо і не можемо мати ніяких засобів, щоб розрізнити, перебуваємо ми в такому русі чи ні».



Анрі Пуанкаре

Наступного, 1905 року вийшла стаття Айнштейна «До електродинаміки рухомих тіл». Ця основоположна робота надійшла до редакції журналу «Аннали фізики» 30 червня 1905 року й складалася з двох частин. У першій частині було викладено основи нової теорії простору й часу, в другій — застосування цієї теорії до електродинаміки рухомого середовища.

У цьому-таки році, вслід за першою статтею, було опубліковано невелику статтю Айнштейна, в якій він формулює зв'язок між масою й енергією, який йому вдалося виявити. Маса тіла є міра енергії, що міститься в ньому, — робить висновок Айнштайн.

У статті «Теорія відносності» Айнштайн пише: «Проте найважливіший результат, якого наразі досягла теорія відносності, — це виведення співвідношення між інертною масою фізичної системи та вмістом енергії в ній. Нехай тіло має в певному стані інертну масу M . Якщо цьому тілу передається якимсь чином енергія E , то, згідно з теорією відносності, його інертна маса зростає внаслідок цього до значення $M + \frac{E}{c^2}$, де c — швидкість світла у вакуумі. Тому закон збереження маси, що вважався досі справедливим, видозмінюється й об'єднується в один закон із законом збереження енергії. Цей результат свідчить про те, що інертну масу M тіла слід розуміти як вміст енергії Mc^2 ».

Як ми вже згадували, 1909 року «патентний експерт третього класу» Айнштайн зумів нарешті отримати посаду екстраординарного професора в Цюриху. Невдовзі потому він переїздить до Праги — де стає вже повним (ординарним) професором. 1912 року він знову повертається до Цюриха. А 1914 року Пруська академія, яку на той час очолював Макс фон Планк, обирає Айнштейна своїм членом — і це знімає турботи про хліб щоденний. «Дозвольте, перш за все, висловити вам найглибшу подяку за послугу, найціннішу з усіх, які можна зробити такій людині, як я. Обранням до вашої Академії ви увільнили мене від турбот і клопотів служби й дозволили мені

цілком присвятити себе науковій праці», — так розпочав Айнштайн лекцію перед академіками, присвячену принципам теоретичної фізики.

1916 року розроблено загальну теорію відносності. 1922 року вченому присуджено Нобелівську премію — щоправда, не за праці з теорії відносності, а за роботи з квантової теорії фотоефекту, про які йтиметься в наступній частині нашої книги. Вчений у zenіті слави. Пошта до нього приходить з усіх кінців світу — не лишень від учених, а й від просто охочих отримати автограф генія. Врешті, вчений починає бачити поштаря з торбою листів у жахливих снах.



Альберт Айнштайн у своєму кабінеті в Берлінському університеті (1920)

У повоєнні роки міцніє дружба Айнштана з Максом фон Планком. Цих дуже несхожих за характерами науковців єднає любов до фізики й до музики. Вони можуть годинами обговорювати формули — або ж грати (часом Айнштайн брав скрипку, часом теж сідав за рояль поруч з Планком) Брамса, Бетховена, Скрябіна — чи просто імпровізувати.

Але наприкінці двадцятих відносно спокійні часи закінчуються. Гітлерівці, що обіцяють переможений у Першій світовій війні Німеччині повернути її «світову велич», покарати «чужинців» (насамперед — євреїв), начебто винних у злиднях простих німців, стають дедалі активнішими. Об'єктом їхнього цькування стає й геніальний фізик із його «неарійським походженням». Лунають гасла: «теорія відносності — не німецька теорія!». До цькувань приєднується Філіпп Ленард — нобелівський лауреат 1905 року за роботи в царині катодних променів. Він прагне, на противагу Айнштайну, створити «расово чисту німецьку фізику».

У 1936 році вийшов підручник Ленарда «Німецька фізика в чотирьох томах». Він описував тільки області класичної фізики і не торкався ні квантової механіки, ні теорії відносності. Відкриття сучасної фізики пояснювалися за допомогою теорії ефіру й атомної моделі Йоганна Штарка — ще одного нобелівського лауреата, що став переконаним нацистом. Ленард писав: «В дійсності наука, як і все, що створюють люди, залежить від раси, від крові». На його думку, тільки «арійська» фізика може вважатися справжньою наукою. А все, що суперечить їй, — помилкове за визначенням.

1933 року Гітлер прийшов до влади. Спробу фон Планка виступити на захист Айнштейна різко обриває сам фюрер. Оселю Айнштейна розгромлено, архів спалено. І вчений вирішив залишитися в США, де читав на той час лекції. Він обійняв запропоновану йому посаду професора Прінстонського інституту перспективних досліджень.



Айнштейн з другою дружиною Ельзою на шляху до Америки

Автор формули, що пов'язала енергію з масою, Айнштейн краще за інших розумів небезпеку створення гітлерівським Райхом атомної бомби. Тому 2 серпня 1939 року від надсилає листа президентові Рузвельту. Лист, що виник з ініціативи кількох видатних учених-утікачів із Європи, став поштовхом до розгортання американського атомного проєкту.

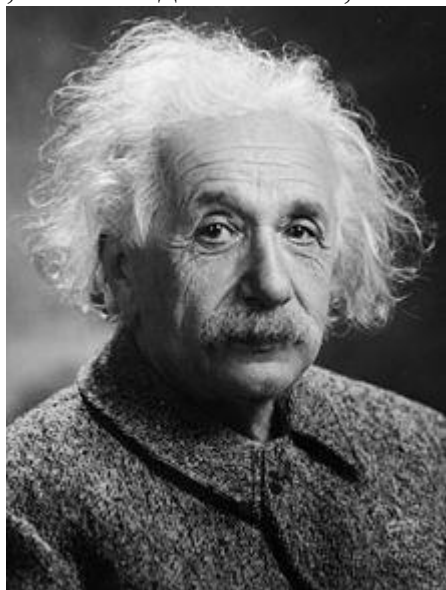


Головний будинок Інституту перспективних досліджень у Прінстоні

По війні Айнштейн заявляє: «Війну виграно, але мир не виграно!» Він стає одним із ініціаторів відозви найбільших учених світу, зверненої до урядів усіх країн, із попередженням про небезпеку використання наукових досягнень з воєнною метою, зокрема про небезпеку застосування водневої бомби. Ця відозва стала початком руху вчених за мир, який отримав назву Пагуошського.

Останні роки свого життя вчений був захоплений створенням єдиної теорії поля, яка об'єднала б усі види взаємодій в єдину теорію. Ще 1948 року лікарі попередили: його розширена аорта може розірватися будь-якої хвилини. Айнштейн не боявся смерті, але прагнув використати решту життя для завершення своєї праці якнайповніше. Для цього він відмовився від багатьох речей. Відростив довге волосся, аби не витрачати часу на перукарні,

обходився лиш одним гатунком мила, щоб не перейматися, яке мило для миття, а яке — для гоління, лише в холодну пору надівав шкарпетки...



Айнштайн у 1947 р.

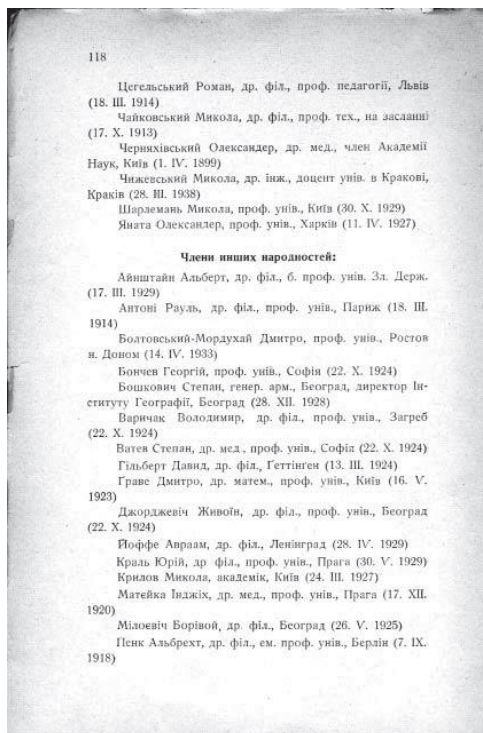
Коли письменник Ептон Сінклер, котрий перебував у зеніті слави, надіслав йому свій новий роман, учений чемно подякував, але зізнався: він навряд чи буде його читати. Головне для нього — єдина теорія поля. В останні роки життя Айнштайн, котрий замолоду любив читати поетів і філософів, міг хіба що дозволити собі перечитати перед сном кілька сторінок із улюбленого «Дон-Кіхота» Сервантеса, з яким не розлучався все життя.

Помер Айнштайн легко: заснув і не прокинувся. Це сталося 18 квітня 1955 року, в ніч проти понеділка. Єдиної теорії поля він так і не завершив. Не побудовано її ще й досі.

У своєму передсмертному заповіті науковець, котрий усе життя ненавидів культ особи, категорично заборонив усілякі масштабні похоронні церемонії. Його заповіт виконали точно й цілком: за труною до крематорію йшло лише 12 людей, тіло віддали вогню, а попіл розвіяли за вітром. Тому Айнштайн, без перебільшення, належить цілому світу.

У цьому сенсі належить Айнштайн і Україні. Цікаво, що поміж десятків наукових товариств, що обрали науковця до свого складу, була й перша українська національна академія наук — Наукове товариство імені Шевченка у Львові (діяло в академічному статусі з 1892 року). До складу НТШ в різні роки було обрано низку всесвітньо відомих учених-фізиків із різних країн світу. Серед них — Макс фон Планк, Микола Крилов, Степан Тимошенко, Абрам Йоффе.

Альберта Айнштайна було обрано до НТШ 17 березня 1929 року. А вже 4 квітня учений пише листа до Львова: «Вельмишановні панове! Я вам сердечно дякую, що ви обрали мене членом вашого шанованого товариства».



Сторінка «Хроніки НТШ» за 1938 р. з переліком іноземних членів НТШ: Айнштайн серед них перший

Серед фізиків колишнього Радянського Союзу існував переказ: коли, за наполяганням керівництва компартії, АН СРСР у 1970-их обговорювала питання про виключення зі свого складу визначного фізика й борця проти тоталітарної системи Андрія Сахарова, академіки намагалися кволо оборонятися тим, що, начебто, не існує прецедентів позбавлення академічного звання. Тоді визначний фізик-експериментатор, відкривач явища надплинності, пізніший Нобелівський лауреат Петро Капиця досить гучно промовив із місця: «Ви помиляєтеся, прецедент був. Адольф Гітлер виключив із Пруської академії Альберта Айнштейна». І питання про виключення Сахарова було знято з порядку денного.

«Я не знав величнішої людини» — сказав про Айнштейна великий філософ і громадський діяч Бертран Рассел. А один далекий від науки літній чоловік із Принстона в останні роки життя вченого зізнався: «...коли я думаю про професора Айнштейна, у мене з'являється таке відчуття, що я вже не самотній».

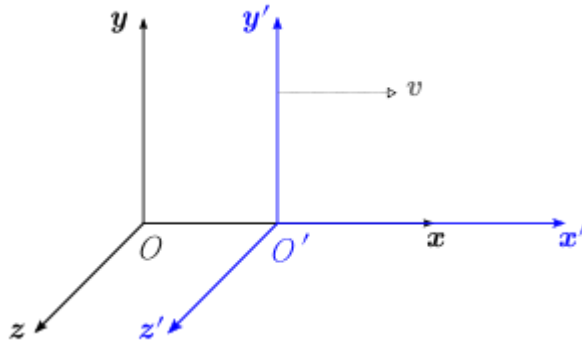
Класична електродинаміка й теорія відносності

Ще від робіт Огюстена Френеля (1810–20-ті роки), котрий на підставі хвильової гіпотези Гюйгенса пояснив досліди з дифракції та інтерференції світла, а також довів прямолінійність поширення світла-хвилі в однорідних середовищах (це здавалося вченим-попередникам зовсім не очевидним), хвильова оптика здобула загальне визнання, а корпускулярна теорія Ньютона, хоча її й підтримували кілька першорядних учених (як-от, Лаплас),

швидко втрачала прихильників. Мало того, геометрична оптика ввійшла до хвильової як частковий випадок. Було показано, що вона «діє», якщо показник заломлення середовища мало змінюється на відстанях порядку довжини хвилі світлових коливань.

Проте виникало питання: а що ж, власне, коливається? Френелеве уявлення про світло тягнуло за собою існування особливої субстанції, яка заповнила порожнечу й пронизала всі матеріальні тіла — так званого тонкого світлового ефіру. Але спроби послідовників Френеля пояснити механічні властивості ефіру зайшли в глухий кут. З одного боку — це середовище, в якому ширяться з величезною швидкістю поперечні хвилі, мало б бути надзвичайно жорстким — значно жорсткішим від сталі! З іншого боку — ефір ніяк не впливав на рух матеріальних тіл... Жодна теорія не могла пояснити існування середовища з такими парадоксальними властивостями.

Потому, як усі спроби виробити механічну інтерпретацію законів електродинаміки зазнали краху, поля, описувані рівняннями Максвелла, врешті-решт погодилися розглядати як вихідні поняття, що їх годі намагатися витлумачити мовою механіки. Потреба в ефірі начебто відпала — але не остаточно. Річ у тому, що рівняння Максвелла суперечили принципу відносності класичної механіки, згідно з яким фізичні процеси в усіх інерційних (тобто таких, що перебувають у спокої або ж рухаються зі сталою швидкістю одна щодо одної) системах координат відбуваються однаково.



Дві системи координат, що рухаються одна відносно одної

Справді, в класичній механіці є прості формули для взаємного перетворення координат в інерційних системах (так звані перетворення Галілея), згідно з якими відстань між двома точками є інваріантною й не залежить від вибору інерційної системи. Нехай система координат K' рухається щодо системи K праворуч уздовж осі x зі швидкістю v . Тоді координати в обох системах пов'язані перетвореннями Галілея:

$$x' = x - vt,$$

$$y' = y,$$

$$z' = z,$$

$$t' = t.$$

(Час у класичній механіці абсолютний, і дві події, одночасні в одній інерційній системі, будуть одночасними й у всіх інших). Використовуючи перетворення Галілея, легко переконатися, що закони Ньютона виконуються для всіх інерційних систем. Адже прискорення (яке входить у другий закон

Ньютона) і відстань між двома точками (яка входить у закон унесвітнього тяжіння) від швидкості v однієї системи щодо другої ніяк не залежать.

Для рівнянь Максвелла це не так. Вони щодо перетворень Галілея не інваріантні. А відтак — якщо вони чинні для системи, що перебуває в абсолютному спокої, то в інших інерційних системах, які рухаються прямолінійно й рівномірно щодо нерухомої системи, вони вже не працюють. Цю суперечність вельми гостро сформулював для себе 16-річний Айнштейн. Через понад півстоліття він згадував:

«Парадокс полягав у наступному. Якби я став рухатися вслід за променем світла зі швидкістю c (швидкість світла у вакуумі), то я мав би сприймати такий промінь як змінне електромагнітне поле, що в просторі перебуває у спокої. Але ж насправді цього не буде; це видно і з досліду, і з рівнянь Максвелла. Інтуїтивно я мав за очевидне від самого початку, що з точки зору такого спостерігача все має відбуватися за тими самими законами, що й для спостерігача, нерухомого щодо Землі. Справді, як цей перший спостерігач може знати чи визначити, що він перебуває в стані швидкого рівномірного руху?».

Тому світловий ефір для фізиків кінця XIX століття був уже не так механічним середовищем, де можуть ширитися світлові коливання, як абсолютною нерухомою системою, в якій рівняння Максвелла працюють і справді описують електромагнітне поле, яке шириться в порожнечі саме зі швидкістю світла c .

А відтак постало питання про можливість виміряти швидкість руху Землі в просторі щодо такої абсолютної системи відліку. І якби внаслідок якоїсь неймовірної випадковості Земля в певний момент перебувала щодо ефіру в спокої, то через рух планети по майже коловій орбіті швидкість Землі щодо ефіру за півроку була б уже максимальною.



Альберт Майкельсон

1881 року американський фізик Альберт Майкельсон (1852–1931) придумав витончений дослід, що мав за мету виміряти швидкість Землі щодо ефіру. Ідея досліду була геніально проста: промінь світла було розділено напівпрозорою пластиною на два перпендикулярні когерентні промені, які відбивалися від строго рівновіддалених дзеркал і поверталися на ту саму пластину. На перпендикулярних променях різний відносний рух щодо ефіру

мав би позначитися по-різному, а найменшу десинхронізацію променів можна було б виявити завдяки появі інтерференційної картини. До того ж, експериментатор передбачив таке: через рух Землі по орбіті півроку показ інтерферометра відхилятиметься в один бік, а півроку — в другий.

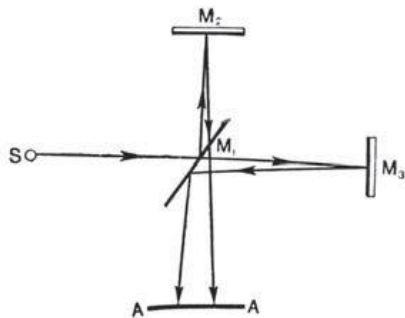


Схема досліджу Майкельсона. M_1 — напівпрозора пластина, M_2 і M_3 — дзеркала, AA — інтерферометр.

Альберт Майкельсон спершу здійснив цей дослід сам, а 1887 року, в удосконаленому варіанті, — разом із Едвардом Морлі (1838–1923). Обидва рази дослід дав негативний результат. Руху Землі щодо ефіру виявлено не було. 1907 року Майкельсон став за ці дослід першим американцем — лауреатом Нобелівської премії з фізики.

Результати дослідів Майкельсона-Морлі відразу ж почали сприймати як «хмарину на ясному небі класичної фізики» — вони суперечили тодішнім базовим уявленням і потребували тлумачення. На їхнє пояснення спершу 1891 року ірландський фізик Джордж Френсіс Фіцджеральд (1851–1901), а за чотири роки — Гендрік Лоренц висунули гіпотезу про скорочення розмірів матеріальних тіл за їхнього руху відносно ефіру. Згідно з гіпотезою, поперечні розміри залишалися незмінними, а поздовжні, зменшуючись, точно компенсували вплив відносного руху на швидкість поширення світла.

Згодом Лоренц показав: рівняння Максвелла, які неінваріантні щодо перетворень Галілея, водночас є інваріантними щодо інших, трохи складніших перетворень, які дістали назву перетворень Лоренца:

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}},$$

$$y' = y,$$

$$z' = z,$$

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}.$$

Спершу цей факт було сприйнято як математичний курйоз, що не має жодного фізичного сенсу. Але Айнштайн виходив із протилежного. Він припустив: перетворення Лоренца відображають справжню фізичну

реальність і справді пов'язують координати, що їх виміряли два спостерігачі, які рухаються один щодо одного прямолінійно й рівномірно зі швидкістю v .

З інваріантності рівнянь Максвелла щодо перетворень Лоренца випливає, що всі електродинамічні й оптичні явища відбуватимуться абсолютно однаково в усіх інерційних системах координат. А це означає, що визначити, виходячи з цих явищ (зокрема з досліду Майкельсона-Морлі), рух Землі щодо уявного ефіру (абсолютної нерухомої системи координат) принципово неможливо, бо всі інерційні системи — рівноправні.

Але самі перетворення Лоренца потягнули за собою величезні фізичні наслідки, які Айнштайн досягнув в одній зі своїх основоположних робіт, виданих 1905 року. Висновки Айнштайна здалися попервах цілком парадоксальними. Вони зводилися до відсутності абсолютного часу й абсолютної відстані. Спостерігачі, перебуваючи в різних системах, користуються різними «годинниками» й вимірюють різну відстань. Простір і час виявилися з'єднаними в один чотиривимірний континуум. Заразом, Айнштайн прийняв як базовий постулат, що жоден матеріальний об'єкт, жодна енергія, жоден сигнал не можуть ширитися зі швидкістю, більшою за швидкість світла у вакуумі. Ця швидкість, позначувана на пропозицію Друде « c », стала й ізотропна (не залежить від напрямку). Саме цей постулат дозволив надати фізичного змісту перетворенням Лоренца.

Спеціальна теорія відносності Айнштайна передбачала: якщо маємо дві інерційні системи A і B , що рухаються одна відносно одної, і якщо нам удасться певним методом (наприклад, посиленням сигналу — колись із цією метою в місті стріляли опівдні з гармати) синхронізувати годинники в кожній із цих систем, то події, які є синхронними з точки зору спостерігача в системі A , з точки зору спостерігача в системі B відбуватимуться вже не одночасно. Цей на перший погляд неймовірний висновок насправді зумовлено тим, що синхронізувати годинники можна лише з точністю до швидкості поширення сигналу, який не може перевищувати швидкості світла у вакуумі c .

Далі, на основі перетворень Лоренца, Айнштайн показав, що будь-яке матеріальне тіло, яке рухається щодо спостерігача, здаватиметься йому коротшим на множник $\sqrt{1-(v/c)^2}$, аніж спостерігачеві, щодо якого це тіло перебуває в спокої. І скорочення виявиться тим більшим, чим більша швидкість руху. За $v = c$ лінійні розміри за координатою в напрямку руху взагалі скоротяться до нуля, а для гіпотетичних швидкостей $v > c$ корінь стає уявним, що демонструє неможливість досягти в межах спеціальної теорії відносності швидкостей, більших за швидкість світла. Хоча помітним для ока скорочення стає тільки за швидкості порядку швидкості світла, передбачених формулами величин виявилось цілком досить, аби пояснити негативний результат досліду Майкельсона-Морлі скороченням відстаней у напрямку руху (що, власне, й спричинило здогад Фіцджеральда й Лоренца).

Проте між скороченням Фіцджеральда-Лоренца та скороченням Айнштайна існує принципова відмінність. Перші розглядали його як абсолютне скорочення тіл, що перебувають у русі відносно нерухомого

ефіру. А другий — лише як уявне для рухомого спостерігача скорочення, зумовлене процесами вимірювань, що їх здійснюють різні спостерігачі для визначення часу й координат.

Уявне скорочення розмірів супроводжує уявне сповільнення часу. Спостерігач у системі A виявить, що годинник у системі B , який рухається разом із цією системою, відставатиме від його власного на множник $1/\sqrt{1-(v/c)^2}$. Це однозначно впливає з нових визначень простору й часу, які входять у перетворення Лоренца. До того ж, скорочення й відставання годинників є взаємним: спостерігачеві в системі B розміри в системі A так само здаватимуться коротшими, а час — повільнішим. У цьому полягає принцип відносності Айнштейна.

А відтак існує відомий «парадокс близнюків»: один близнюк залишається на Землі, а другий — подорожує в космічній ракеті зі швидкістю, близькою до швидкості світла. Виходячи з принципу відносності, можна припустити, що після повернення блукальця близнюки виявляться таки одного віку (адже з погляду системи координат, пов'язаної з ракетою, час на Землі начебто сповільнюватиметься такою ж мірою!). Проте «старшим» виявиться таки землянин. Адже ракета, що вилетіла з Землі й повернулася на Землю, неминуче рухатиметься (принаймні частину свого шляху) прискорено, а відтак система, пов'язана з нею, вже не буде інерційною, й принцип відносності щодо неї не діятиме.

Нарешті, в класичній фізиці швидкості систем, які рухаються щодо третьої системи зі швидкостями v та u , додаються, так що їхня відносна швидкість становитиме:

$$W = v + u.$$

Це співвідношення можна проілюструвати очевидним, хоча й сумним прикладом: два автомобілі, кожен із яких рухається з дозволеною швидкістю 90 км/год, у випадку лобового зіткнення зазнають такого удару, якого кожен із них зазнав би, якби «в'їхав» у нерухому перешкоду зі швидкістю 180 км/год (це лишає пасажирів і водієві вкрай мало шансів на порятунок).

Виходячи з перетворень Лоренца, діє інша формула додавання швидкостей:

$$W = \frac{u + v}{1 + \frac{uv}{c^2}}.$$

З цього видно, що відносна швидкість так само не може перевищувати швидкості світла.

Містить спеціальна теорія відносності й очевидний граничний перехід до класичної механіки. Для швидкості, набагато меншої за швидкість світла $v \ll c$, перетворення Лоренца переходять у звичні перетворення Галілея.

Слово «спеціальна» в назві спеціальної теорії відносності відображає ту обставину, що вона описує саме інерційні системи. Для неінерційних систем, які рухаються з прискоренням, навіть механічні явища відбуваються з особливостями. Зокрема, для таких систем уводять так звану силу Коріоліса, яка виявляється, наприклад, в обертанні площини коливань маятника Фуко.

(«Автором» цього поняття є французький фізик Гюстав Коріоліс (1792–1843), хоча ще Ньютон наводив приклад із відром, яке обертається на скрученій мотузці навколо осі, й рівень води у якому підвищується біля країв). Крім того, через обертання Землі в північній півкулі сила Коріоліса, докладена до матеріального тіла, спрямовується вправо від його руху, тому праві береги річок у північній півкулі крутіші — їх підмиває вода під дією цієї сили. У південній півкулі все відбувається навпаки. Сила Коріоліса «відповідальна» також і за виникнення циклонів і антициклонів, коли навколо зон підвищеного або зниженого атмосферного тиску «закручуються» величезні маси повітря. Це добре видно на супутникових знімках Землі, що їх демонструють під час телевізійних прогнозів погоди.

Але коли йдеться про неінерційні механічні системи, можна все ж таки зберегти принцип відносності в його найзагальнішій формі. Тоді фізичні закони переписують у вигляді тензорних співвідношень у чотиривимірному просторі, а вплив неінерційності враховують запровадженням системи координат, яка рухається з прискоренням. Зокрема, таким чином можна отримати відцентрові сили, силу Коріоліса тощо.

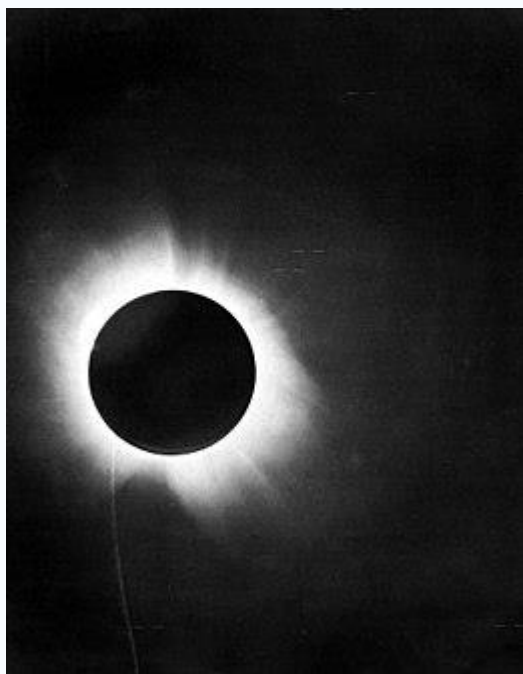
Саме ця обставина підштовхнула Айнштейна до побудови надзвичайно вишуканої й математично красивої теорії гравітації (1916). Крім того, він спирався на ту відому з високою точністю експериментальну обставину, що гравітаційні сили завжди пропорційні масі тіла, на яке вони діють. Отже, траєкторія цього тіла залежить лише від властивостей гравітаційного поля й не залежить від властивостей самого тіла.

У спеціальній теорії відносності в чотиривимірний просторо-часу входить звичайний евклідів простір. Натомість у загальній теорії відносності Айнштейн описав дію гравітаційних полів у певній точці чотиривимірного просторо-часу запровадженням локальної кривизни цього просторо-часу. У загальній теорії відносності велика маса, як-от зірка, викривляє часопростір, перетворюючи пряму лінію, вздовж якої тіло рухалося б у порожньому просторі, на орбітальний рух планети та всі інші гравітаційні ефекти. Американський теоретик Джон Вілер підсумував це в енергійній епіграмі: «Часопростір каже матерії, куди прямувати, Матерія ж часопростору – як себе викривляти».

Спостерігач, що перебуває в неевклідовому просторі, мусить користуватися криволінійною системою координат. Як у класичній механіці відцентрові сили й силу Коріоліса можна математично отримати, запроваджуючи евклідів чотиривимірний тензор, так у загальній теорії відносності чотиривимірний викривлений неевклідів простіро-час математично описує появу гравітаційних сил. Саме з загальної теорії відносності логічно випливає рівність інерційної (тієї, що входить до другого закону Ньютона) й гравітаційної (тієї, що входить до закону всесвітнього тяжіння) мас — яка в класичній механіці залишається неочевидною.

Перевірку висновків загальної теорії відносності щодо викривлення просторо-часу наявністю великої маси здійснив англійський астроном Артур Еддінгтон (1882–1944), який з острова біля західного узбережжя

екваторіальної Африки спостерігав сонячне затемнення 29 травня 1919 р. Метою його спостережень було встановити: чи справді викривляються промені від далеких зірок, проходячи повз Сонце. А моменту затемнення потрібно було дочекатися тому, що за звичайних умов ці зірки неможливо було б побачити в сонячному сяйві. Зроблені Еддінгтоном фотографії підтвердили передбачення Айнштейна.



Одна з фотографій «викривлених» біля сонячного диску траєкторій зірок на небосхилі під час сонячного затемнення 1919 р., яка підтвердила загальну теорію відносності

Спеціальна, а потім загальна теорія відносності мали величезний вплив на уми не лише фізиків. Вона здавалася такою парадоксальною й незрозумілою, що англійський поет Джон Коллінг Сквайр доточив до написаної на початку XVIII ст. епітафії Александера Поупа, що уславляє Ньютона, який зробив світобудову ясною й зрозумілою, ще два рядки:

*Закони Всесвіту в пітьмі ховалися від нас.
«Хай буде Ньютон!» — мовив Бог; і світло стало враз.*

*Але тривати без кінця воно так не могло:
«З'явись, Айнштейне!» — чорт велів; і стало, як було.
(переклад автора)*

Проте передбачення спеціальної теорії відносності блискуче підтвердилися експериментально. Спочатку досліди Шарля Гює (1866–1942) зі слідами частинок у камері Вільсона показали помітне зростання мас електронів за наближення їхніх швидкостей до швидкості світла. Зв'язок енергії з масою отримав страхітливе підтвердження у створенні атомної

бомби. Висновки загальної теорії відносності підтверджено спостереженнями астрономів — вони виявили мале зміщення перигелія Меркурія й уже згадуване дуже слабе відхилення променів, які проходять поблизу Сонця, що має гігантську масу.

Сьогодні ефекти, передбачені Айнштайном, практично необхідно враховувати вже в багатьох царинах. Більшість читачів цієї книги щоденно використовують систему навігації GPS. Супутники GPS — це фактично дуже точні атомні годинники (хронометри), що випромінюють сигнали точного часу. На основі сигналів від кількох (мінімум чотирьох) супутників чіп GPS у телефоні розраховує, де саме в просторі та часі він перебуває.

Однак гравітація впливає на те, як швидко тече час. Ми знаходимося на поверхні планети, де гравітаційне поле сильніше, ніж на висоті орбіти, по якій рухаються GPS-супутники. З цієї причини для нас час плине повільніше, ніж для них. Тому щодоби годинник супутника поспішає на 37 мікросекунд щодо наземних годинників. Це, здавалося б, мізерна різниця, але її треба враховувати, бо інакше визначити точне місцезнаходження буде неможливо.

Відтак теорія відносності стала не лише науковою класикою, але й важливою складовою повсякденного життя сучасної людини.

Резюме класичної електродинаміки

1. Завдяки скінченній швидкості поширення взаємодії, електромагнітне поле стає самостійною фізичною сутністю. На відміну від цього, в класичній механіці, де визнається принцип далекодії, поле було лише певним формально-математичним способом опису взаємодії. Висновки про властивості поля ми робимо за тим впливом, який воно справляє на частинки, які в ньому перебувають. У випадку електромагнітного поля цей вплив визначається наявністю в частинок певного електричного заряду та швидкості. Просторові компоненти поля утворюють тривимірний векторний потенціал, а часова компонента — скалярний потенціал поля. Для характеристики поля можна було б обмежитися лише потенціалами. Проте зазвичай для зручності вводять додатково напруженості електричного й магнітного полів, пов'язані з потенціалами. Джерелом електричного поля є заряди. Існує й вихрове електричне поле, породжуване змінним магнітним полем. «Магнітних зарядів» у природі не існує. Вихрове магнітне поле створюють рухомі заряди й змінне електричне поле.

Закон для сили взаємодії двох зарядів q_1 і q_2 , розташованих на відстані r один від одного, встановив у 1785 р. Шарль Кулон:

$$F = k_0 \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

(коефіцієнт пропорційності k_0 залежить від вибору системи одиниць).

Закон, який описує силу, що діє на елемент провідника завдовжки δl , по якому протікає струм I , з боку магнітного поля з індукцією B , спрямованого під кутом α до провідника,

$$\delta F_A = B \cdot I \cdot \delta l \cdot \sin \alpha$$

(де сила Ампера спрямована в напрямку, перпендикулярному й до напрямку струму, й до напрямку магнітного поля), встановив на основі експериментальних спостережень Андре Марі Ампер у 1820 р.

Поняття потенціалу ввів у науку П'єр Симон Лаплас у 1784 р. При цьому сам термін «потенціал» застосував до цього поняття англійський математик Джордж Грін у 1828 р. Однак запроваджене поняття було для Лапласа лише математичною абстракцією. Це поняття потенціалу розповсюдив на явища електро- й магнітостатики Симеон-Дені Пуассон (1811 р.). Поняття поля та його силових ліній (спершу щодо магнітного поля) запровадив Майкл Фарадей у 1834–45 рр. Він же запропонував спосіб його візуалізації та сформулював здогад про скінченну швидкість поширення електромагнітного збурення (1832), що суперечив панівним після Ньютона поглядам на миттєве поширення взаємодії в просторі.

2. Дія поля на рухомий заряд описується формулою Лоренца. Сила, яка (для системи СГС) діє в електричному полі E й магнітному полі B на частинку з зарядом q і масою m , яка рухається зі швидкістю v , дорівнює:

$$\vec{F} = q\vec{E} + \frac{q}{c}[\vec{v} \times \vec{B}].$$

Сила ця складається з двох компонент: перша — з боку електричного поля — не залежить від швидкості заряду й має спрямованість уздовж вектора електричної напруженості; друга — описує силову дію магнітного поля на заряд, залежить від швидкості заряду й має спрямованість, перпендикулярну як до вектора швидкості, так і до вектора магнітної індукції. Вперше цю формулу (в покомпонентному вигляді) записав Гендрік Лоренц у 1892 р.

3. Систему чотирьох диференціальних рівнянь для полів $\vec{E}(\vec{r}, t)$ і $\vec{B}(\vec{r}, t)$, що є функціями координат $\vec{r}(x, y, z)$ й часу t , слід уважати повною, оскільки в цій системі є оператори просторових і часових змін полів, а також присутні джерела (густина заряду й струму). Це рівняння Максвелла-Герца-Гевісайда, які зазвичай називають рівняннями Максвелла і які є основними рівняннями електродинаміки.

Систему з 20 рівнянь (або 8 у сьогоdnішньому векторному записі), частина з яких не були незалежними, сформулював на основі робіт попередників (Андре Марі Ампера, Карла Фрідріха Гаусса, Вільгельма Вебера, Майкла Фарадея та інших) Джеймс Клерк Максвелл у «Трактаті з електрики та магнетизму» (1873). До сьогоdnішнього «канонічного» вигляду її привели впродовж двох наступних десятиліть Гайнріх Герц та Олівер Гевісайд.

В інтегральному вигляді в Гауссовій системі (системі СГС) для неполяризованих немагнітних середовищ вони мають такий вигляд:

І. Теорема Гаусса для електричного поля:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = 4\pi \int \rho dV.$$

В диференціальній формі це рівняння є рівнянням Пуассона. Воно стверджує, що навколо електричного заряду виникає електричне поле. Більш загальний вигляд цієї формули вивів у 1828 р. Михайло Остроградський (опубліковано у 1831 р.). Карл Фрідріх Гаусс сформулював свою теорему у 1832 р. на основі закону Кулона.

II. Закон електромагнітної індукції Фарадея:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{1}{c} \int \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{A}.$$

Математично сформульовано Джеймсом Клерком Максвеллом у 1861 р. для опису відкритого Майклом Фарадеем явища електромагнітної індукції (1831 р).

III. Відсутність магнітних зарядів:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0.$$

Формулу виведено Карлом Фрідріхом Гауссом у 1832 р.

IV. Модифікований закон Ампера:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \frac{4\pi}{c} \int \vec{j} \cdot d\vec{A} + \frac{1}{c} \int \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \cdot d\vec{A}.$$

Закон Ампера для зв'язку струму з магнітним полем відкрито в 1820 р. Андре Марі Ампером. Ситуацію для постійного струму описує перший доданок у правій частині. Другий доданок виникає завдяки струму зміщення Максвелла, запровадженому, щоб зробити запис рівняння для закону Ампера несуперечливим для змінного струму. Максвелл увів поняття струму зміщення в статті «Про фізичні лінії сили» (1861). У загальному випадку струм є поєднанням струму провідності та струму зміщення.

4. Будь-який заряд, що рухається з прискоренням, випромінює електромагнітні хвилі, які несуть енергію та імпульс. Електромагнітне поле шириться в просторі у вигляді незагасаючої (у вакуумі) хвилі — енергія магнітного поля повністю переходить в енергію електричного поля, й навпаки. Наслідком рівнянь Максвелла для вакууму є два хвильові рівняння для напруженості електричного і магнітного поля:

$$c^2 \left(\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad \text{і} \quad c^2 \left(\frac{\partial^2 B}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 B}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 B}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial^2 B}{\partial t^2}.$$

З вигляду цих двох хвильових рівнянь Максвелл зробив у 1865 р. два фундаментальних висновки:

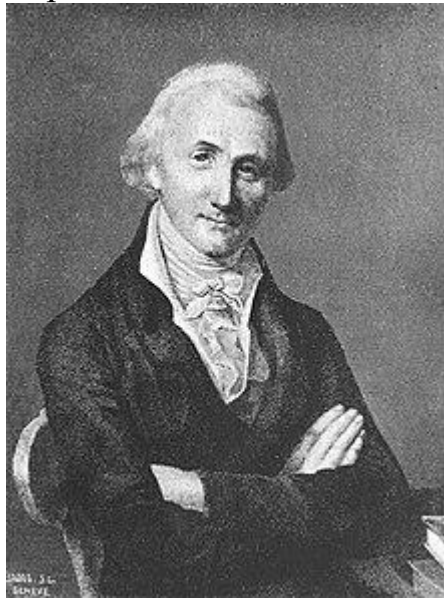
- електромагнітне поле шириться в просторі у вигляді поперечних хвиль зі швидкістю c .
- світло є електромагнітним збуренням.

IV. КВАНТОВА ФІЗИКА

Про передісторію квантової фізики

У грудні 1900 року 42-річний ординарний професор Макс фон Планк уперше висловив «божевільну» ідею про *порційну (дискретну) зміну енергії*, мінімальна порція якої пропорційна частоті випромінювання. Коефіцієнтом пропорційності між енергією і частотою виступала певна константа h , яка і стала своєрідною «міткою» квантових явищ. Про цю фундаментальну фізичну константу ми надалі згадуватимемо часто, називаючи її, як заведено в науці, сталою Планка.

З позиції сьогодення можна простежити витoki квантової фізики, пов'язані з випромінюванням. Ще 1809 року П'єр Прево (1751–1839) вперше заговорив про випромінювання й поглинання променів, до того ж звернув увагу на одну закономірність: тіла, які краще за інші випромінюють світло, краще за інші його й поглинають.



П'єр Прево

Швейцарський фізик, філософ і літератор Прево народився в Женеві, там-таки здобув юридичну освіту. Був учителем і займався літературною діяльністю в Голландії та Франції; член Академії наук і професор філософії в Берліні; професор філософії та загальної фізики в Женевській Академії; член Лондонського й Единбурзького королівських товариств; член Паризької Академії наук. Автор двотомної філософської праці «Досвід філософії, або вивчення людського розуму».

П'єр Прево запровадив поняття *динамічної теплової рівноваги* і показав, що процеси випромінювання й поглинання тепла відбуваються одночасно, неперервно й незалежно один від одного, а перехід тепла — процес не однобічний, він є результатом взаємного променевого теплообміну.

У створенні основ для квантової фізики величезну роль відіграли деякі експериментальні відкриття, зроблені в XIX столітті. Насамперед це надзвичайно важливі закони електролізу Фарадея. З цих законів як наслідок впливав «атомізм» електричного заряду, що його «вгадав» Максвелл («молекули електрики»), — хоч більшість дослідників на це тоді уваги не звернули.

Формула $F = N_A \cdot e$ стала, власне, першою формулою, куди (в її сучасному записі) входять тільки універсальні константи: F — число Фарадея, N_A — число Авогадро, e — заряд одновалентного іона.

Найважливішим відкриттям напередодні виникнення квантової фізики слід вважати відкриття Х-променів 1895-го року, про яке ми вже згадували в попередній частині книги у зв'язку з постаттю нашого співвітчизника Івана Пулюя. Воно, може, найбільшою мірою привернуло увагу тодішньої широкої громадськості до досягнень науки, які обіцяли людству небачені раніше можливості.



Вільгельм Конрад Рентген

Німецький фізик-експериментатор Вільгельм Конрад Рентген (1845-1923) заслужено став першим Нобелівським лауреатом з фізики (1901). Адже відкриття Х-променів (у Німеччині й Росії їх досі називають «рентгенівськими») мало колосальне значення для плідного розвитку фізики.

Рентген, хоч і не зрозумів до кінця фізичної природи променів, які сам відкрив, однак із німецькою скрупульозністю з'ясував їхні основні фізичні характеристики. Зокрема те, що, на відміну від катодних, Х-промені не заломлюються, не відбиваються й не відхиляються в магнітному полі.

«Рентген був великою й цілісною людиною в науці й житті. Вся його особистість, його діяльність і наукова методологія належали минулому. Але тільки на фундаменті, який створили фізики XIX століття й, зокрема, Рентген, могла постати сучасна фізика», — так писав наш земляк із Ромен на Сумщині, учень Рентгена, один із засновників фізики напівпровідників і

діелектриків у колишньому СРСР, дійсний член АН СРСР і Наукового товариства імені Шевченка у Львові Абрам Йоффе (1880–1960).

Майже водночас із відкриттям Рентгена сталася ще одна важлива для розвитку науки подія. Згідно з заповітом шведського хіміка, підприємця, винахідника й філантропа Альфреда Нобеля (1833–1896), підписаним 27 листопада 1895 року, його спадщину було перетворено на цінні папери, відсотки з яких щороку скеровуються на премії тим, хто «впродовж минулого року приніс найбільшу користь людству».

Нобель установив п'ять винагород: у галузі фізики, хімії, фізіології або медицини, літератури, а також тому, хто «зробить найвагоміший внесок у згуртування народів, знищення рабства, зменшення чисельності наявних армій і сприяння мирним домовленостям» (тепер це називають «премією миру»). Причина, яка спонукала Нобеля встановити «премію миру», проста: свої статки він здобув значною мірою завдяки винаходу динаміту — найнебезпечнішої на той час вибухівки (під час робіт із нітрогліцерином загинув молодший брат винахідника Еміль).

Наукові премії не були винаходом Альфреда Нобеля. Ньютон за свої наукові заслуги отримав 1705 року титул «лицаря» й став «сером Ісааком». 1731 року Лондонське королівське товариство встановило першу суто наукову нагороду — медаль Коплі, про яку ми вже неодноразово згадували. Премії за розв'язання певних наукових проблем періодично встановлювала Французька академія.

Проте саме Нобелівська премія здобула найбільший авторитет, оскільки вона найбільшою мірою спирається на думку світової наукової спільноти. Листи щодо номінування кандидатів щороку отримують тисячі провідних учених усього світу, а Шведська академія наук (у галузі фізики й хімії) та Каролінський інститут у Стокгольмі (у галузі фізіології або медицини) лише підбивають підсумки цього без перебільшення всесвітнього обговорення. Вручає премії король Швеції, і щороку це стає значною суспільною подією.



Золота медаль із профілем Альфреда Нобеля

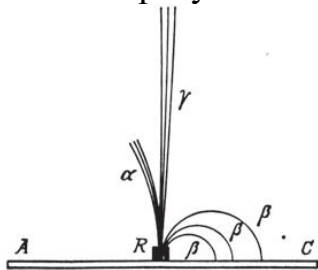
Цікаво, що сам принцип присудження премій, визначений у заповіті Нобеля, відразу дещо змінили. Стало зрозуміло: вшановувати такою нагородою досягнення лише попереднього року може виявитися дещо передчасним. Нині традицією стало преміювати ті роботи, значення яких у науці вже усталилося. А це іноді потребує тривалого проміжку часу. Інколи

від появи роботи до того, як її відзначали Нобелівською премією, минало півстоліття. Окремі визначні вчені не отримали цієї премії лише тому, що не дожили до тієї миті (Нобелівську премію посмертно не присуджують).

Продовжимо перервану розповідь про наукові відкриття межі XIX і XX століть. 1896 року французький фізик Антуан Анрі Беккерель (1852–1908) вирішив дослідити: чи може люмінесцентний матеріал, активований світлом, а не катодними променями, так само випускати X-промені? Готуючись до експерименту, що потребував яскравого сонячного світла, він загорнув флуоресцентну сіль урану — уранілсульфат калію — разом з фотопластинкою в чорний папір. Запланований експеримент провести не вдалося: фотопластинку вже було засвічено. Так було відкрито спонтанну радіоактивність.

Повторюючи експеримент з різними відомими тоді люмінесцентними речовинами, вчений з'ясував, що здатністю засвічувати фотопластинку, загорнуту в чорний папір, наділені лише солі урану або ж чистий уран (який виділяв ці «промені Беккереля» в три-чотири рази інтенсивніше).

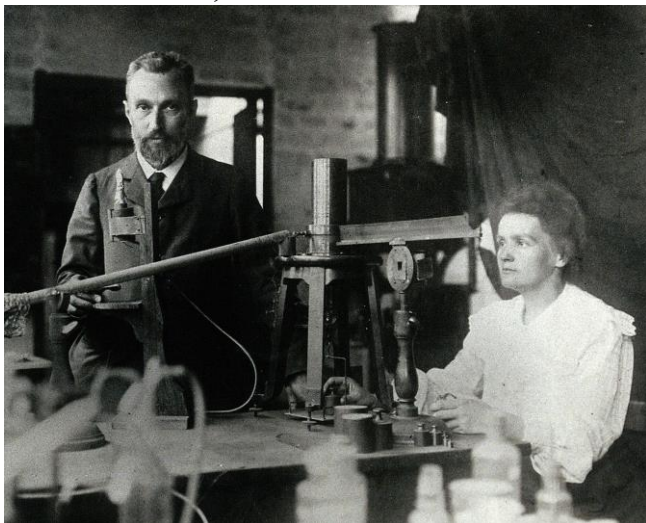
Пізніше Беккерель поставив новий дослід: умістив уран у свинцеву скриню з отвором і вивчав радіоактивні промені, що виходили крізь отвір і відхилялися під дією магніту. Саме так, за напрямом відхилення в магнітному полі, було з'ясовано, що існують три типи радіоактивних променів: позитивно заряджені α -промені, негативно заряджені β -промені й електрично нейтральні γ -промені. Але фізична природа відкритих променів залишалася незрозумілою.



Відхилення α , β і γ променів у магнітному полі (рисунок Марії Склодовської-Кюрі)

Дальші відкриття в царині радіоактивності здійснило легендарне подружжя Кюрі: професор Сорбонни П'єр Кюрі (1859–1906) і Марія Склодовська-Кюрі (1867–1934). Марія, полька з походження, якій у Російській імперії шлях до науки було закрито (жінок там до університетів не допускали), змогла реалізувати мрію про наукову кар'єру лише у Франції. Ініціатива робіт у галузі радіоактивності належала саме Марії, яка була певний час ученицею Антуана Анрі Беккереля. П'єр, на той час уже всесвітньо відомий учений, відкривач «температури Кюрі», за перевищення якої зникають феромагнітні властивості феромагнетика, повірив у наукову інтуїцію студентки, котра стала його дружиною. У 1898–1902 роках героїчні дослідники в сараї П'єра, в надзвичайно шкідливих і небезпечних умовах переробили руками 8 тонн солі урану й виділили з них одну соту грама

нового, невідомого на той час елемента — радію, в мільйон разів радіоактивнішого за уран. Паралельно було відкрито ще один радіоактивний елемент — полоній, названий так на честь батьківщини пані Склодовської.



П'єрі і Марія Кюрі в лабораторії (1907)

У 1901 р. Беккерель звернув увагу на те, що отримав опік на шкірі від мікроскопічної дози радію, залишеної в кишені жилетки. Дуже скоро цю властивість радіоактивних речовин «випікати» живі тканини стали використовувати в медицині для лікування раку. Беккерель і подружжя Кюрі отримали Нобелівську премію 1903 року з фізики за роботи в галузі радіоактивності. Антуан Анрі Беккерель помер у віці лише 55 років. На його тілі лишилися численні опіки, спричинені роботою з радіоактивними матеріалами.

Ще раніше пішов з життя П'єр Кюрі. Після трагічної загибелі чоловіка, котрий потрапив на вулиці під кінний екіпаж, Марія сама продовжувала дослідження. 1910 року вона вперше виділила чистий металічний радій. Було переконливо доведено, що радій — самостійний хімічний елемент.

За це відкриття Марію Склодовську-Кюрі було висунуто до складу Французької академії наук. До того часу жінок в академіки ще не обирали — і визначна дослідниця стала жертвою, як тепер сказали б, «чоловічого шовінізму». Для обрання їй забракло одного голосу. Але 1911 року Нобелівський комітет вдруге відзначив пані Склодовську-Кюрі Нобелівською премією — цього разу з хімії. І досі Марія Склодовська-Кюрі залишається єдиною жінкою, яка вдостойлася двох нобелівських нагород за понад столітню історію цих почесних наукових відзнак (серед чоловіків у неї є троє колег — «подвійних лауреатів»).

Марія Склодовська-Кюрі померла від лейкемії, спровокованої її небезпечними дослідженнями з радіоактивними речовинами. Наукову роботу в Інституті радію, який вона заснувала, продовжила її дочка Ірен Жоліо-Кюрі (1897–1956) разом із чоловіком Фредеріком Жоліо-Кюрі (1900–1958). Подружжя також здобуло Нобелівську премію з хімії 1935 року (за відкриття штучної радіоактивності), а Ірен Жоліо-Кюрі продовжила мартиролог подвижників науки — вона загинула від лейкемії, як і її мати.

Голландський фізик Гейке Камерлінг-Оннес (1853–1926), який організував першу у світі кріогенну лабораторію в Лейдені, 1908 року вперше отримав рідкий гелій за температури 4,2 К. Ще через три роки вчений відкрив за його допомоги явище надпровідності — падіння опору ртуті, а потім і низки інших металів за низьких температур до нуля. Класична фізика була неспроможна пояснити це явище — згідно з нею, метали в околі абсолютного нуля температур мусили б виявляти невеликий, але ненульовий опір, незалежний від температури, зумовлений розсіюванням електронів на дефектах кристалічної структури.

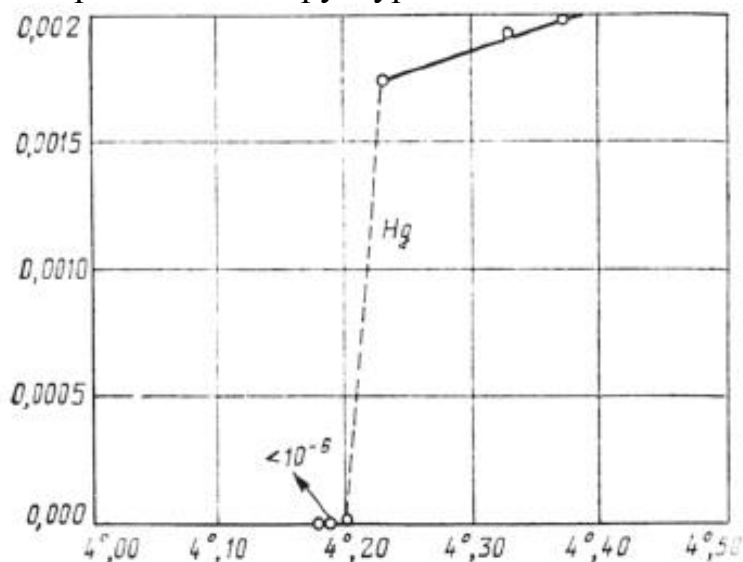


Рисунок зі статті Камерлінга-Оннеса, що демонструє падіння опору ртуті до нуля

Природу катодних променів детально досліджував Джозеф Джон Томсон (ми вже про нього згадували), котрий 1897 року прийшов до відкриття електрона. Сам термін «електрон» запропонував ще 1891 року ірландець Джордж Джонстон Стоні для постульованого ним елементарного електричного заряду.

На базі робіт Томсона голландський фізик Гедрік Антон Лоренц, про якого ми вже теж говорили, створив наприкінці дев'яностих років XIX століття класичну електронну теорію, яка була застосуванням теорії Максвелла до руху мікрочарядів. Власне, він переніс систему рівнянь Максвелла на заряджені частинки. Лоренц пояснив низку нових фізичних явищ, зокрема розщеплення спектральних ліній у магнітному полі. В 1896 р. учень Лоренца нідерландський фізик Пітер Зеєман (1865–1943) відкрив цей ефект експериментально, і це означало величезний успіх теорії Лоренца. 1902 року Лоренца й Зеємана було вшановано Нобелівською премією з фізики.

Подальший розвиток теорії магнетизму був пов'язаний із іменем французького фізика Поля Ланжевена (1872–1946). 1905 року він, базуючись на уявленнях електронної теорії, розробив термодинамічну й статистичну теорію діа- та парамагнетизму. Ці два поняття запровадив 1845 року ще Майкл Фарадей. Говорячи коротко, діамагнетизм — це властивість речовини

намагнічуватися в зовнішньому магнітному полі в напрямку, протилежному до напрямку поля, а парамагнетизм — властивість намагнічуватися в напрямку поля. Теорія Ланжевена пов'язувала діамагнетизм із особливостями руху електронів в атомі, а парамагнетизм — із орієнтацією власних магнітних моментів атомів і молекул уздовж поля.

На той момент була добре відома й залізна руда з сильними магнітними властивостями — цей тип магнетиків саме завдяки їй було названо феромагнетиками (ферум — латиною «залізо»). Спершу феромагнетики вважали частковим випадком «дуже сильних» парамагнетиків, але вже 1907 року французький фізик П'єр Вейсс (1865–1940) висловив здогад про наявність у феромагнетиках спонтанних областей намагніченості — доменів.

Нарешті, ще 1869 року росіянин Дмитро Менделєєв (1834–1907) розташував відомі на той час 63 хімічні елементи в таблицю за збільшенням їхньої атомної ваги так, що в стовпцях (у первісному варіанті — в рядках) опинилися елементи різних груп із подібними властивостями. «Організуючи» свою таблицю, вчений побачив, що певні клітинки таблиці слід залишити порожніми. Й справді, невдовзі було відкрито галій, германій і скандій із характеристиками, що їх передбачив Менделєєв. Відтоді стало очевидно: в основі періодичної системи елементів лежить глибока фізична закономірність, суть якої, однак, залишалася незрозумілою.

Перший начерк періодичної системи елементів (рукопис Дмитра Менделєєва, 1869)

Серед найважливіших досягнень доквантової фізики слід назвати й перші моделі атома, що їх запропонували два визначних однофамільці. Це модель «пудингу з родзинками» Джозефа Джона Томсона (1897–1904) і «вихорова модель» Вільяма Томсона — лорда Кельвіна (1904). Проте ці

примітивні моделі (друга з них була суто механістичною) не могли пояснити реальних фізичних закономірностей, тим паче таких складних, як періодична система елементів.

Великі здобутки XIX століття привели більшість фізиків до переконання: фізику в основному завершено. У 1896 р. Альберт Майкельсон, який став у 1907 р. першим американцем – лауреатом Нобелівської премії з фізики, писав: «Хоч ніколи не можна з певністю стверджувати, що майбутнє фізичної науки вже не припасло для нас жодних дивовиж у своїх коморах, однак видається вірогідним, що найважливіші основоположні принципи вже твердо встановлено і майбутній розвиток полягатиме лише в точнішому застосуванні цих принципів до всіх явищ, які ми спостерігаємо». З таким твердженням, напевно, погодилися б переважна більшість з понад 800 учасників Першого міжнародного конгресу фізиків, який відбувся в Парижі 1900 року.

1901 року лорд Кельвін виголосив промову, присвячену початку нового століття у фізиці. Оглядаючи приголомшливі досягнення попередніх років, він визнав фізику практично завершеною наукою — і радіоактивність, і рентгенівські промені, на його думку, можна було пояснити в рамках класичних уявлень. Правда, лорд Кельвін зауважив, що з'явилися «невеликі хмари на ясному небосхилі». Йшлося про досліди Майкельсона й Морлі, з яких випливала відсутність «ефірного вітру» (про них ми говорили в попередній частині нашої книги), та про труднощі з електронною теплоємністю металів, що поводити себе зовсім не так, як передбачала класична фізика.

До цих двох фактів варто додати ще один — явні труднощі з побудовою адекватної теорії випромінювання абсолютно чорного тіла (АЧТ), про які ми поговоримо згодом. Але складається таке враження, що до Макса фон Планка справжню значущість проблеми випромінювання АЧТ мало хто усвідомлював до кінця, хоча в цій галузі працювало багато видатних учених, і з деякими з них ми вже зустрічалися раніше.

Серед них слід назвати Густава Кірхгоффа (1824–1887), Йозефа Стефана (1835–1893), Людвіга Больцмана (1844–1906), Джона Стретта — лорда Релея (1842–1919), Джеймса Джінса (1877–1946), Вільгельма Віна (1864–1928). Цей «логічний ланцюжок» наукових подій ми розглянемо трохи далі.

Звернімо водночас увагу на одну промовисту обставину. Безпосереднім творцям квантової фізики в день доповіді Макса фон Планка 1900 року було: Макс Борну — 18 років; Нільсу Бору — 15; Ервіну Шредінгеру — 13; Луї де Бройлю — 8; Гендріку Крамерсу — 6; Вольфгангу Паулі — 7 місяців; Джорджу Уленбеку — 8 днів; через 8 місяців народиться Енріко Фермі; рівно через один рік з'явиться на світ Вернер Гейзенберг; через два роки з різницею в один місяць народяться ще два майбутні генії — Самюель Гоудсміт і Поль Дірак, а ще через чотири роки — Ральф Кроніг.

Якщо врахувати, що до 1926–1927 років квантову механіку в основному було створено, можна зробити висновок — її творили дуже молоді люди.

Постачальниками наукових ідей та експериментальних даних, критиками й опонентами, тлумачами й роз'яснювачами багатьох проблем, пов'язаних із квантовими підходами в наукових дослідженнях, були Альберт Айнштайн (1879–1955); Арнольд Зоммерфельд (1868–1951); Анрі Пуанкаре (1854–1912); Ернест Резерфорд (1871–1937); Пауль Еренфест (1880–1933); Артур Комптон (1892–1962); Леон Розенфельд (1904–1974) та багато інших видатних фізиків. Дехто з них так і залишився скептичним, або й просто ворожим до ідеї нового, *ймовірнісного* світу (як-от, великий Айнштайн чи Резерфорд). Але вони своїми роботами так само прислужилися розвитку квантової теорії.

Дати й факти розвитку квантової теорії

Що відбулося:

1900 р. Макс фон Планк сформулював квантову гіпотезу для пояснення випромінювання абсолютно чорного тіла й запровадив фундаментальну константу (названу сталою Планка), що має вимірність дії; так було започатковано квантову теорію.

1905 р. Альберт Айнштайн пояснив закони фотоефекту на підставі гіпотези про поглинання речовиною окремих квантів світла, або фотонів.

1906 р. Макс фон Планк вивів рівняння релятивістської динаміки й отримав вирази для енергії та імпульсу електрона.

1907 р. Розроблено першу квантову теорію теплоємності твердих тіл (Альберт Айнштайн).

1908 р. Ганс Вільгельм Гайгер та Ернест Резерфорд сконструювали прилад для реєстрації окремих заряджених частинок (лічильник Гайгера).

1909 р. Доведено, що альфа-частинки є двічі йонізованими атомами гелію (Ернест Резерфорд).

Альберт Айнштайн отримав формулу для флуктуацій енергії.

1910 р. Вандер Йоганнес де Гааз запропонував модель атома, в якій уперше зроблено спробу зв'язати квантовий характер випромінювання зі структурою атома.

Експериментально остаточно доведено дискретність електричного заряду й уперше достатньо точно виміряно величину заряду електрона (Роберт Міллікен).

1911 р. Ернест Резерфорд відкрив атомне ядро та створив планетарну модель атома (модель Резерфорда).

П'єр Вейс постулював наявність кванта магнітного моменту — магнетона. Незалежно від Вейсса магнетон передбачив Поль Ланжевен і обчислив його величину.

Відкрито явище надпровідності (Гейке Камерлінг-Оннес).

1912 р. Відкрито явище дифракції (інтерференції) Х-променів при проходженні їх через кристали, що остаточно підтвердило їхню електромагнітну природу (Макс фон Лауе, Вальтер Фрідріх, Пауль Кніппінг).

Чарльз Вільсон винайшов прилад для спостереження слідів заряджених частинок (камера Вільсона).

1912 р. Петер Дебай удосконалив квантову теорію теплоємності твердих тіл, урахувавши наявність дисперсії коливань атомів.

1912–1914 рр. Досліди Франка–Герца, що довели існування в атомах дискретних рівнів енергії (стаціонарних станів) і їхній зв'язок із термами спектральних ліній. Тим самим було підтверджено гіпотезу Планка про кванти енергії й квантову теорію атома Бора.

1913 р. Нільс Бор застосував ідею квантування енергії до теорії планетарного атома та сформулював три квантові постулати, які характеризують особливості руху електронів в атомі, а також розробив першу квантову теорію атома водню (теорія атома Бора).

Уведено поняття дефекту маси (Поль Ланжевен).

Ернест Резерфорд передбачив протон (відкрив його трохи пізніше — 1919 р.).

Йоганн Штарк відкрив явище розщеплювання спектральних ліній в електричному полі (ефект Штарка).

Відкрито дифракцію Х-променів при відбитті від кристалів при певних кутах (Вільям Генрі Брегг, Вільям Лоренс Брегг).

Розроблено теорію дифракції Х-променів (Чарльз Галтон Дарвін — метод Дарвіна–Фаулера).

1914 р. Ернест Резерфорд і Едвард Андраде експериментально здійснили дифракцію гамма-променів на кристалі і довели таким чином їхню електромагнітну природу.

Роберт Міллікен перевірів рівняння Айнштейна для фотоефекту й визначив числове значення сталої Планка.

1915 р. Арнольд Зоммерфельд поширив теорію атома Бора на інші одноелектронні атоми, запровадив радіальне й азимутне квантові числа.

1916 р. Петер Дебай і Арнольд Зоммерфельд побудували квантову теорію ефекту Зеемана.

Теоретично передбачено індуковане випромінювання й запроваджено ймовірність спонтанного та вимушеного випромінювань (Альберт Ейнштейн).

1918 р. Нільс Бор сформулював принцип відповідності.

1919 р. Ернест Резерфорд здійснив першу штучну ядерну реакцію — перетворив азот на кисень. У цій реакції було відкрито протон.

1920 р. Петро Капиця і Микола Семенов уперше запропонували ідею визначення магнітних моментів атомів в атомному пучку.

1921 р. Нільс Бор пояснив особливості періодичної системи хімічних елементів.

1922 р. Артур Комптон відкрив явище розсіяння короткохвильового випромінювання на вільному або слабо зв'язаному електроні (ефект Комптона) і цим експериментально довів існування фотона, який постулював 1905 р. Айнштайн.

Отто Штерн і Вальтер Герлах експериментально довели, що магнітний момент електрона в атомі набуває лише дискретних значень (просторове квантування).

1923 р. Артур Комптон і Петер Дебай дали теоретичну інтерпретацію ефекту Комптона.

Петро Капиця помістив камеру Вільсона в магнітне поле й спостерігав викривлення треків заряджених частинок.

Луї де Бройль висловив ідею про хвильові властивості матерії (хвилі де Бройля). Ця ідея про загальність корпускулярно-хвильового дуалізму лягла в основу хвильової механіки Шредінгера.

1924 р. Луї де Бройль розробив теорію хвильових властивостей речовини.

Вольфганг Паулі сформулював один із найважливіших принципів квантової механіки — принцип заборони на перебування двох і більше електронів в одному й тому самому квантовому стані певної системи.

1925 р. Семюел Гоудсміт і Джордж Уленбек постулювали існування внутрішнього механічного й магнітного моментів електрона (гіпотеза спіну).

Вернер Гайзенберг заклав основи нової квантової механіки. Макс Борн і Паскуаль Йордан надали ідеям Гайзенберга коректного математичного формулювання через запровадження матриці координат та імпульсів.

1926 р. Ервін Шредінгер створив хвильову механіку, в основі якої лежить хвильове рівняння (рівняння Шредінгера).

Макс Борн дав статистичну інтерпретацію хвильової функції Шредінгера.

Ервін Шредінгер довів математичну еквівалентність матричної механіки Гайзенберга та хвильової механіки.

1927 р. Вернер Гайзенберг сформулював фундаментальне положення квантової механіки — принцип невизначеності (принцип Гайзенберга).

Нільс Бор сформулював принцип доповнювальності.

Відкриття дифракції електронів (Клінтон Девіссон, Лестер Гермер, Джордж Паджет Томсон).

Поль Дірак побудував квантову теорію випромінювання, поклавши початок квантової теорії електромагнітного поля.

1928 р. Поль Дірак вивів квантово-механічне рівняння, що описує рух релятивістського електрона (рівняння Дірака). З цього рівняння випливала наявність в електрона напівцілого спіну.

1929 р. Отто Штерн відкрив дифракцію атомів і молекул.

1930 р. Відкрито випромінювання великої проникної здатності, що виникає за бомбардування берилію альфа-частинками (Вальтер Ботте, Ріхард Беккер).

Ігор Тамм розробив квантову теорію розсіяння світла в кристалах і запровадив уявлення про пружні коливання у твердому тілі (фонони). Ідея фонона містилася вже в роботах Айнштайна (1907 р.) і Дебая (1912 р.) з теорії теплоємності твердих тіл.

1931 р. Вольфганг Паулі висунув гіпотезу про існування нейтрино.

Поль Дірак передбачив античастинки, народження й анігіляцію пар частинка-античастинка, висунув гіпотезу про існування елементарного магнітного заряду (монополь Дірака).

Винайдено електронний мікроскоп (Макс Кнолль, Ернст Руска).

1932 р. Джеймс Чедвік відкрив нейтрон.

Дмитро Іваненко висунув гіпотезу про нейтронно-протонну будову ядра атома. Ця модель, яку безпосередньо розвинув Гайзенберґ, виявилася основою сучасного розуміння будови атомних ядер.

Відкриття сильних взаємодій.

Карл Андерсон відкрив позитрон, теоретично передбачений Діраком.

1933 р. Відкрито явище утворення електрона й позитрона з гамма-квантів (Фредерік та Ірен Жоліо-Кюрі, Карл Андерсон, Патрік Блекетт, Джузеппе Оккіаліні). Механізм цього явища пояснив Роберт Оппенгеймер.

Енріко Фермі розробив теорію бета-розпаду, в якій запровадив новий тип взаємодії — слабку.

1934 р. Відкриття штучної радіоактивності (Фредерік та Ірен Жоліо-Кюрі).

1935 р. Хідекі Юкава, розвиваючи польову теорію парних ядерних сил, постулював наявність сильно взаємодіючого кванта ядерного поля (мезона) — частинки, що забезпечує взаємодію між нуклонами.

1936 р. Створення краплинної моделі ядра (Нільс Бор, Яків Френкель).

Відкрито дифракцію нейтронів.

1937 р. Лев Ландау розробив теорію проміжного стану надпровідників. Він-таки розробив теорію фазових переходів другого роду.

1938 р. Відкрито явище поділу ядра урану (Отто Ганн, Фріц Штрассманн).

Відкрито явище надплинності гелія II (Петро Капиця, Джон Аллен).

1939 р. Ліза Мейтнер інтерпретує експерименти Гана й Штрассманна як розпад ядра урану на два уламки майже однакової маси.

1940 р. Відкрито явище спонтанного поділу ядер урану-235 (Георгій Фльоров, Костянтин Петржак).

Вольфганг Паулі довів теорему про зв'язок статистики й спіну — показав, що частинки з цілим спіном («бозони») описуються статистикою Бозе-Ейнштейна, а частинки з напівцілим спіном («ферміони») — статистикою Фермі-Дірака.

Синтезовано 94-й елемент — плутоній (Гленн Сіборґ, Артур Валь, Джозеф Кеннеді, Еміліо Сегре).

1940–1941 рр. Відкрито p - n перехід (Вадим Лашкарьов).

1940–1941 рр. Лев Ландау створив теорію надплинності гелію II.

1942 р. Здійснено ланцюгову реакцію поділу ядер урану в першому ядерному реакторі (Енріко Фермі, Герберт Андерсон, Вальтер Зінн).

1945 р. Створено першу ядерну бомбу (США).

1945–46 рр. Збудовано перший комп'ютер (США).

Кінець 1940-1950-ті рр. Завершено створення квантової електродинаміки (Річард Файнмен, Джуліан Швінгер, Сінїтіро Томонага).

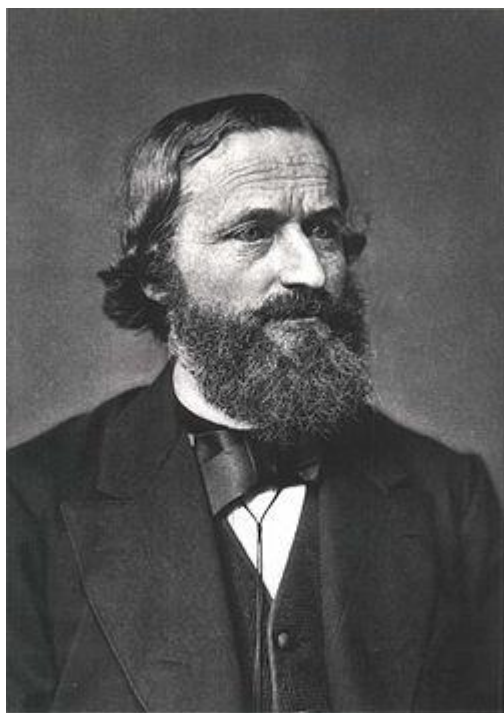
1950 р. У Києві збудовано першу в континентальній Європі електронно-обчислювальну машину (ЕОМ).

1951 р. Створено перший напівпровідниковий транзистор на двох p - n -переходах, що поклав початок революційним змінам в електроніці (Вільям Бредфорд Шоклі, Джон Бардін, Волтер Гаузер Браттейн).

Від законів випромінювання до ідеї квантування енергії

1859 року Густав Кірхгоф запропонував перший в історії фізики експериментальний закон, який описував випромінювання й поглинання променів. Він запровадив універсальну функцію, яку Людвіг Больцман назвав функцією Кірхгофа.

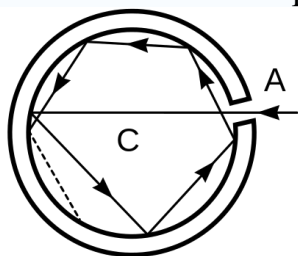
Густав Кірхгоф (1824–1887) — німецький фізик, надзвичайно різнобічна особистість, професор кількох німецьких університетів, член Берлінської та Російської академій наук. Його наукові роботи присвячено електриці, електротехніці, механіці, оптиці, математичній фізиці, теорії пружності, гідродинаміці. Ще студентом Кенігсберзького університету він установив відомі правила для електричних кіл, які сьогодні носять його ім'я. Пізніше Кірхгоф розвинув строгу теорію дифракції, вдосконалив теорію магнетизму Пуассона, досліджував пружність твердих тіл, коливання пластин, форму вільного струменя рідини, рух тіла в рідкому середовищі.



Густав Кірхгоф

Ми згадали про цього вченого у зв'язку з тим, що він у 1859 році відкрив один із основних законів теплового випромінювання, згідно з яким відношення випромінювальної спроможності тіла до його поглинальної спроможності не залежить від природи тіла-випромінювача і для сталої температури й довжини хвилі є сталим.

Саме Кірхгоф запровадив у науку 1862 року поняття абсолютно чорного тіла (АЧТ). АЧТ — фізична абстракція, якою послуговуються в термодинаміці; це — тіло, яке цілком поглинає проміння (всіх довжин хвиль), що падає на нього. Незважаючи на назву, АЧТ може випускати теплове випромінювання. Спектр випромінювання абсолютно чорного тіла визначається тільки його температурою. Практичною моделлю чорного тіла може бути порожнина з невеликим отвором і зачорненими стінками, оскільки світло, що потрапляє крізь отвір у порожнину, зазнає багаторазових віддзеркалень і сильно поглинається. Глибокий чорний колір деяких матеріалів (деревного вугілля, чорного оксамиту) й зіниці людського ока пояснюється таким самим механізмом. Сажа поглинає до 99% світла, що падає на нього у видимому діапазоні (хоч інфрачервоне випромінювання вона поглинає значно гірше). Майже ідеальним АЧТ є також Сонце.



Модель АЧТ, за Кірхгофом

Через 20 років після відкриття закону Кірхгофа, 1879 року, з'явилася стаття Йозефа Стефана «Про залежність теплового випромінювання від температури». Дослідним методом Стефан відкрив закон, згідно з яким повне випромінювання АЧТ пропорційне четвертому степеню абсолютної температури. Загальна енергія теплового випромінювання визначається формулою

$$j = \sigma T^4,$$

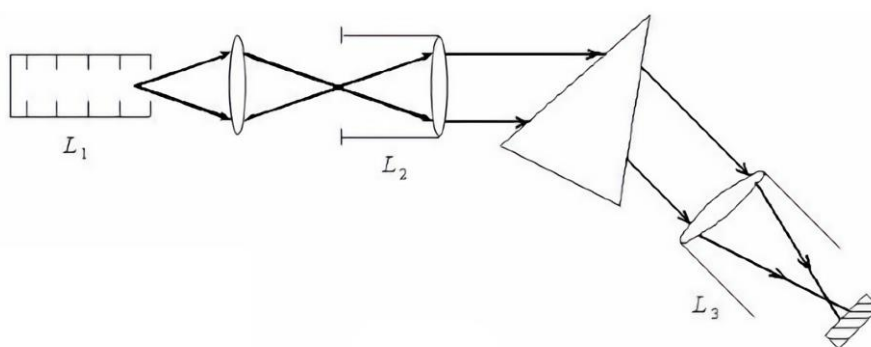
де j — випромінювана потужність на одиницю площі поверхні, σ — стала.

Через п'ять років цей закон строго довів Людвіг Больцман, тому тепер його називають законом Стефана–Больцмана.

Йозеф Стефан (1835–1893) — австрійський фізик; закінчив Віденський університет, був його професором, директором інституту експериментальної фізики університету, а потім ректором цього університету. Наукові дослідження проводив у галузі оптики, акустики, електромагнетизму, кінетичної теорії газів, гідродинаміки, теорії теплового випромінювання. Стефан розробив теорію дифузії газів, вивчав їхню теплопровідність, знайшов значення коефіцієнтів теплопровідності багатьох газів. Професор Стефан виховав багато австрійських фізиків, зокрема й Больцмана.

У кінці XIX століття почалося інтенсивне освітлення міст у Західній Європі. У Берліні було створено спеціальну палату мір, ваг і світла, де чимало прекрасних оптиків займалося вивченням джерел світла та їхнього випромінювання.

Вони експериментально визначили вигляд залежності спектра інтенсивності випромінювання АЧТ залежно від частоти випромінювання й абсолютної температури тіл-випромінювачів. Для цього використовували доволі просту експериментальну установку.

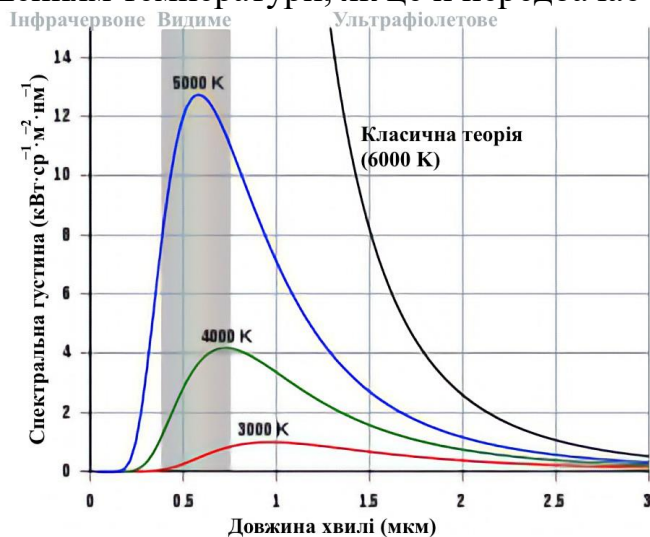


Експериментальна установка для вивчення спектра АЧТ

Реальне АЧТ імітувала виготовлена з відповідного матеріалу трубка L_1 з внутрішніми перегородками та отворами, що вмішувалася в нагрівач. З отвору трубки виходить електромагнітне випромінювання, яке має той самий спектр, що й випромінювання АЧТ при визначеній температурі. Пройшовши через систему лінз L_2 , воно розкладається призмою на спектр. Трубка L_3

«вирізає» з нього вузьку смужку в інтервалі від λ до $\lambda + \Delta\lambda$, інтенсивність якої вимірюється.

Експериментально було виявлено: 1) всі спектральні криві мають максимум і спадають до нуля в області низьких і високих частот; 2) максимуми кривих зміщуються залежно від температури; 3) площа під кривою (сумарна інтенсивність випромінювання) різко зростає зі збільшенням температури, як це й передбачає закон Стефана-Больцмана.



Експериментальні залежності густини випромінювання АЧТ від довжини хвилі (в мікронах) для різних температур. Праворуч — крива, яку дає класична теорія Релея–Джінса (проблема «ультрафіолетової катастрофи»)

Подальші дослідження проблеми теплового випромінювання пов'язані з ім'ям Вільгельма Віна.

Вільгельм Він (1864–1928) був вихованцем Берлінського університету й протягом трьох років співпрацював із Германом Гельмгольцом як його асистент. Це було у фізико-технічному інституті Берлінського університету. Потім учений працював на посаді професора Вюрцбурзького й Мюнхенського університетів.

Наукові роботи Вільгельма Віна належать до теорії теплового випромінювання, оптики, термодинаміки, гідродинаміки, випромінювання електричних розрядів у газах. 1893 року він поширив поняття температури й ентропії на теплове випромінювання та показав, що максимум випромінювання в спектрі АЧТ зі збільшенням температури зміщується в бік коротких хвиль (закон зсуву Віна).

Згідно з цим законом, довжина хвилі, за якої енергія випромінювання максимальна, визначається за емпіричною формулою:

$$\lambda_{\max} = \frac{0,02898}{T},$$

Де $\lambda_{\max}$ — довжина хвилі з максимальною інтенсивністю в метрах, а T — температура в кельвінах.

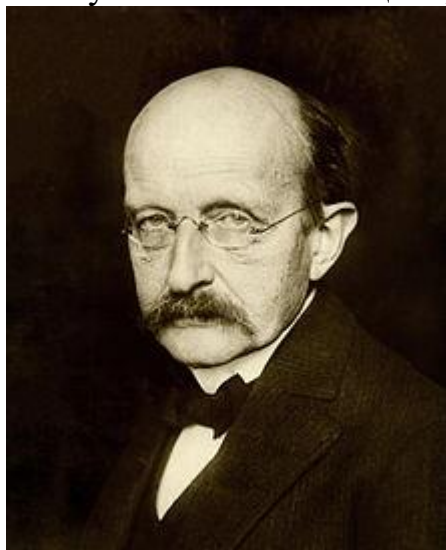
1896 року, виходячи з класичних термодинамічних уявлень, розглядаючи адіабатичне розширення порожнини з хвилею за умов термічної рівноваги, вчений вивів закон розподілу енергії в спектрі АЧТ (закон випромінювання Віна). Проте, як з'ясувалося відразу, формула закону випромінювання Віна виявилася правильною лише в області коротких хвиль.

Над проблемою АЧТ працював і визначний англійський фізик «класичної доби» Джон Вільям Стретт (лорд Релей, 1842–1919). Релей зрозумів, що термодинаміка нездатна вирішити проблеми теплового випромінювання й треба застосувати для цього статистичну фізику. Спільно з Джеймсом Джінсом (1877–1946) він отримав формулу, яка пояснювала функцію Кірхгофа тільки частково, в області довгих хвиль. Натомість в області коротких хвиль випромінювальна здатність АЧТ, згідно з формулою Релея–Джінса, зростала до нескінченності (а згідно з експериментальними даними, вона, навпаки, спадає до нуля). Отже, класична фізика в розгляді проблеми випромінювання АЧТ вела до абсурдного результату.

Цю суперечність передбачень класичної фізики й досліду вчені назвали «ультрафіолетовою катастрофою». Знадобилося «втручання» Макса фон Планка, щоб подолати її наслідки.

Макс фон Планк (1858–1947)

Макс фон Планк походив зі старовинної родини, яка дала Німеччині багатьох учених, державних та церковних діячів; батько майбутнього вченого був професором права Мюнхенського університету. У дитинстві хлопчик виявив неабиякі музичні здібності. Він прекрасно грав на фортепіано й дуже любив музику. У класичній гімназії талановитий учитель математики пробудив інтерес Макса до точних наук і природознавства. Всебічно обдарований хлопчик вивчав класичну філософію, успішно займався музичною композицією, але потім віддав перевагу фізиці.



Макс фон Планк у 1933 р.

Макс фон Планк три роки вивчав математику й фізику в Мюнхенському університеті, а потім ще рік — у Берлінському. Один із професорів, відомий фізик-експериментатор Філіпп фон Жоллі (1809–1884) радив Максу вибрати іншу професію, оскільки, за його словами, у фізиці після відкриття закону збереження енергії вже не залишилося нічого вартого уваги. Адже всі основні диференціальні рівняння вже записано і розв'язано! (Нагадаймо, що й Максвелла двома десятиліттями раніше відроджували в Кембриджі від занять фізикою). Отже, лорд Кельвін не був тоді самотній у песимістичних поглядах на перспективність своєї науки.

У Берліні Планк набув ширшого погляду на фізику завдяки вивченню робіт Германа фон Гельмгольца, Густава Кірхгофа, Рудольфа Клаузіуса. Наукові інтереси Планка надовго зосередилися на термодинаміці.

Учений ступінь доктора Планк отримав 1879 року (це парадоксально, але він ставив у своїй дисертації «Рівноважні стани ізотропних тіл при різних температурах» під сумнів атомізм — і не лише він, такі сумніви мали чимало визначних фізиків кінця XIX століття). 1885 року він став ад'юнкт-професором університету в Кілі, а з 1888 року — професором Берлінського університету й директором Інституту теоретичної фізики (другу посаду було запроваджено спеціально для нього).

З 1896 року Планк зацікавився вимірюваннями, які проводилися в Державному фізико-технічному інституті, а також проблемами теплового випромінювання тіл.

«Послухаймо» самого Макса Планка: «Для того, щоб застосувати співвідношення $S = k \ln P$, де P — термодинамічна ймовірність, до цього випадку, я побудував образ, що складається з дуже великого числа n однакових осциляторів і прагнув обчислити ймовірність того, що цей образ матиме задану енергію. Величину можна знайти тільки за допомогою обрахунку, тобто, треба розглядати енергію як суму дискретних, рівних один одному елементів, кількість яких можна позначити літерою n , і вона може бути дуже великою».

Ця цитата «проливає світло» на те, як народилася в Планка геніальна й, разом із тим, «єретична» ідея про дискретну («порційну») зміну енергії. Задля справедливості слід зазначити: Людвіг Больцман значно раніше, в мемуарі, присвяченому статистиці, розрахував енергію молекули в припущенні, що вона має дискретні значення, кратні одній і тій самій величині. Больцман розглядав це як певну математичну операцію. Потім він переходив до граничного випадку безперервної зміни енергії, вважаючи цю порцію енергії нескінченно малою, а кількість порцій — дуже великою.

Цю методику використав і Планк. Він застосував її до випромінювання АЧТ, припускаючи, що енергія АЧТ поглинається й випромінюється не неперервно, а «порціями», квантами величиною $h\nu$, де ν — частота поглинання й випромінювання. У результаті він отримав теоретичну криву з максимумом, яка в області довгих хвиль (малих частот) спадала за законом Релея–Джінса, а в області коротких хвиль (великих частот) — за законом

Віна. А в цілому теоретична крива добре пояснювала відомий експериментальний вигляд функції Кірхгофа. «Ультрафіолетову катастрофу» було подолано!

Справді, в чому полягала причина «катастрофи» з погляду класичної фізики? Випромінювання АЧТ можна описати як стоячу електромагнітну хвилю в «ящику» з маленьким отвором (ми вже говорили: промінь, який потрапить у такий «ящик» ззовні крізь отвір, має значно більше шансів поглинутись, аніж вийти після низки відбиттів знову назовні).

Але скільки стоячих хвиль може вміститися в такому «ящику»? Щоб виникла стояча хвиля, від стінки й до стінки має вкластися ціла кількість напівхвиль. Чим коротша довжина хвилі, тим легше виконати цю умову. Отже, кількість можливих хвиль зростає зі збільшенням частоти коливань. А за класичною термодинамікою, на кожну степінь вільності (тобто, на кожну хвилю!) припадає одна й та сама енергія kT — половина на потенціальну енергію й половина на кінетичну. Отже, якщо кількість хвиль зростає з частотою, то зростає й енергія випромінювання. Але це різко суперечить дослідів — насправді інтенсивність на великих частотах різко спадає за законом Віна.

Згідно з теорією Планка, щоб збудити випромінювачі з високою частотою, треба передати їм велику енергію $E = h\nu$. Коли ця енергія значно перевищує теплову, $h\nu \gg kT$, ймовірність того, що випромінювач набуде енергії E , різко спадає зі збільшенням співвідношення $\frac{E}{kT}$. Отже, в тепловій рівновазі можливо збудити тільки малу частину таких випромінювачів. Тож й інтенсивність випромінювання, що йде від них, мала. Таким чином, класична фізика «переоцінювала» значення високих частот, а квантова теорія все розставила на місця. Закон Віна було пояснено. Мало того, вже перші порівняння теорії з експериментом дозволили з високою точністю визначити числове значення сталої h .

Про результати своїх теоретичних розрахунків Планк доповів на засіданні Німецького фізичного товариства. День 14 грудня 1900 року став знаменною датою народження квантової теорії.

Макс фон Планк був «класиком» за освітою, за світоглядом і за стилем мислення. Своє відкриття він назвав «актом відчаю». В одному з листів Планк писав: «Я знав, якою має бути формула, але не міг знайти її обґрунтування. Почалися кілька найбільшніх у моєму житті тижнів, протягом яких я намагався знайти пояснення».

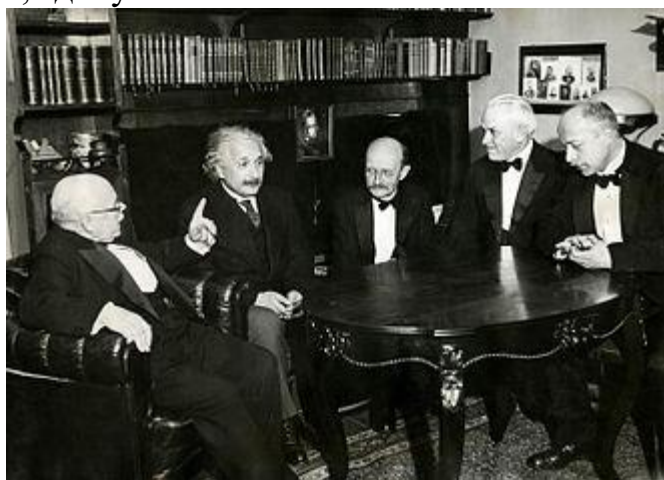
Зазначмо, що в цей момент Планка дуже підтримав його друг Людвіг Больцман, до котрого Планк звернувся за порадою. Відповідь Больцмана була конкретно й лаконічною: «Ви ніколи не вирішите проблему випромінювання, якщо не введете у свою теорію елементу дискретності».

Реалізація ідеї дискретності стосовно випромінювання, яку здійснив Планк, була в повному розумінні блискуча. Планк був прекрасним математиком і дуже ерудованим фізиком. Він не прагнув бути революціонером у науці, але став ним «вимушено».

Ні сам Планк, ні інші фізики не усвідомлювали спершу глибокого значення поняття «квант» (порція енергії). Для Планка квант був лише математичним засобом, що дозволив вивести формулу, яка задовільно узгоджується з експериментальною кривою випромінювання АЧТ. Планк не раз намагався досягти такої узгодженості в рамках класичної фізики, але безуспішно.

Оцінюючи значення відкриття Планка, Альберт Айнштайн писав: «Він переконливо показав, що, крім атомістичної структури матерії, існує своєрідна атомістична структура енергії, керована універсальною сталою, яку запровадив Планк. Це відкриття стало основою для всіх досліджень у фізиці XX століття і з того часу майже повністю визначило її розвиток. Без цього відкриття було б неможливо створити справжню теорію молекул, атомів та енергетичних процесів, що керують їхніми перетвореннями. Мало того — воно зруйнувало кістяк класичної механіки й електродинаміки та поставило перед наукою завдання: знайти нову пізнавальну основу для всієї фізики».

1918 року Планка вшановано Нобелівською премією з фізики «на знак визнання його заслуг у справі розвитку фізики завдяки відкриттю квантів енергії». Представник Шведської королівської академії наук на церемонії вручення премії промовив такі слова: «Теорія випромінювання Планка — найяскравіша з дороговказних зірок сучасного фізичного дослідження, і промине, наскільки можна судити, ще немало часу, перш ніж вичерпаються скарби, здобуті його генієм».



Вальтер Нернст, Альберт Айнштайн, Макс фон Планк, Роберт Міллікен, Макс фон Лауе (Берлін, 1931 р.)

За політичними поглядами фон Планк був консерватором, і тому беззастережно підтримував уряд кайзерівської Німеччини під час Першої світової війни. Але як людина з релігійними переконаннями, як людина справедлива й порядна, Планк публічно виступав на захист єврейських учених, вигнаних зі своїх посад і вимушених тікати з Німеччини після приходу до влади Гітлера. Коли Планк як президент Товариства фундаментальних наук кайзера Вільгельма офіційно відвідав Гітлера як главу держави, він спробував переконати фюрера не переслідувати вчених-євреїв.

Проте Гітлер вибухнув гнівною тирадою проти євреїв узагалі й заявив: лише похилий вік рятує вченого від концтабору.

Максу фон Планку було надзвичайно складно виконувати всі передбачені тодішнім ритуалом приписи. Очевидці згадували, що відкриваючи 1934 року новий інститут фізики металів у Штутгарті, він двічі підіймав і опускав руку, поки нарешті присилував себе видушити обов'язкове тоді привітання «Хайль Гітлер!». Проте він ішов на ці компроміси з сумлінням — аби спробувати врятувати тих і те, що ще можна було тоді врятувати.

Через це навколо самого Планка збираються хмари. Йоганн Штарк, нобелівський лауреат з фізики 1919 р. і водночас переконаний нацист, публічно назвав Планка, Зоммерфельда й Гайзенберга «білими юдами». Проти Планка розпочинають розслідування в «расовій чистоті» згідно з ухваленими в Рейху т.зв. Нюрнберзькими законами, які забороняли євреям посідати будь-які державні посади. Проте встановлюють, що Планк — єврей лише на 1/16, що не давало формальних підстав для переслідувань. У 1938 р. урочисто святкують 80-річчя вченого. Він отримав 900 привітань від учених усього світу — й відразу ж потому подав у відставку з усіх своїх академічних посад.

Макса фон Планка переслідували й родинні трагедії. Його перша дружина померла 1909 року, старший син був льотчиком і загинув під час Першої світової війни. Другого сина стратили наприкінці 1944 року за участь у невдалій змові проти Гітлера. Будинок Планка та його особиста бібліотека згоріли під час чергового повітряного нальоту «союзників» на Берлін. Сам він дивом залишився живий, — але й по війні далі провадив активне наукове життя, знову очоливши Товариство кайзера Вільгельма, яке ще за життя вченого на визнання його заслуг стало Товариством Макса Планка.

Планк глибоко цікавився філософськими проблемами природознавства, етикою й питанням свободи волі. Виконуючи обов'язки пастора (без священницького сану) в Берліні, Планк був переконаний у тому, що наука доповнює релігію, і разом вони вчать правдивості й поваги.

Джордж Паджет Томсон, син відкривача електрона Джозефа Джона Томсона, писав у своїй книзі: «Він був типовим німцем у найкращому сенсі цього слова. Чесний, педантичний, з відчуттям власної гідності, мабуть, досить черствий, але за сприятливих умов здатний відкинути всю манірність і перетворитися на привабливу людину».

Планк був чудовим піаністом і часто виконував музичні твори разом зі своїм другом Айнштайном, поки той не покинув Німеччину в гітлерівські часи. Захоплений альпініст, він майже кожную свою відпустку проводив в Альпах.

Макс фон Планк був членом Німецької та Австрійської академій наук, а також наукових товариств і академій Англії, Данії, Ірландії, Фінляндії, Греції, Нідерландів, Угорщини, Італії, Швеції, Сполучених Штатів Америки і Радянського Союзу. 1924 року його було обрано членом Наукового

товариства імені Шевченка у Львові. Зберігся лист ученого до НТШ, у якому він дякує за це обрання.

Як ми вже згадували, в повоєнній демократичній ФРН Товариство фундаментальних наук кайзера Вільгельма було перейменовано в Товариство Макса Планка; було також засновано вищу наукову нагороду Німеччини — медаль Планка.



Могила Макса фон Планка в Геттінгені

Півроку не дожив цей геніальний фізик до свого дев'яносторіччя. На його надгробку викарбовано тільки ім'я та прізвище, та ще внизу чисельне значення сталої Планка: $h = 6,6260753 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$

І ще раз Альберт Айнштейн

З п'яти робіт, що їх надрукував 1905 року 26-річний Айнштейн, принаймні три були варті Нобелівської премії. Проте реально премію 1921 року науковець отримав на підставі тієї з них, що називалася «Про одну евристичну точку зору, що стосується виникнення й перетворення світла».

У вступі Ейнштейн писав: «Хвильова теорія світла, що оперує неперервними в просторі функціями, може призводити до суперечності з дослідом, коли її застосовуватимуть до явищ виникнення й перетворення світла. Я вважаю, що досліди, які стосуються випромінювання чорного тіла, фотолюмінесценції, виникнення катодних променів за освітлення ультрафіолетовими променями, та інші групи явищ, пов'язані з виникненням і перетворенням світла, краще можна пояснити припущенням, що енергія світла поширюється в просторі дискретно. Згідно з цим припущенням, енергія пучка світла, що вийшло з певної точки, не розподіляється безперервно у дедалі більшому об'ємі, а складається зі скінченної кількості локалізованих у просторі неподільних квантів енергії, що поглинаються або виникають тільки без остачі». З цього випливає, що кванти світла не дробляться (як і кванти випромінювання АЧТ Планка).

Відомо, що електромагнітна теорія не змогла пояснити явище викидання електронів із речовини під дією світла, назване явищем

фотоефекту. Це явище відкрив 1887 року Гайнріх Герц, із яким ми зустрічалися в попередній частині книги. Багато для його вивчення зробили російський фізик Олександр Столетов (1839–1896) і німецький фізик Філіпп Ленард — саме той, який пізніше зробився активним нацистом і гонителем Айнштейна.

Було експериментально показано, що енергія електронів залежить від частоти світла, що діє на речовину, а інтенсивність світла лише збільшує кількість електронів, вирваних із речовини. Крім того, існує певна мінімальна частота випромінювання (так звана «червона межа» фотоефекту), і випромінювання, що має частоту нижчу за мінімальну, явища фотоефекту взагалі не викликає.



Електроскоп демонструє наявність «червоної межі» фотоефекту

Спостерігали це в дуже простих експериментах. Коли електроскоп зарядити негативно, на листочках фольги виникне надлишок електронів, і вони розійдуться. Якщо освітити електроскоп світлом з низькою довжиною хвилі й високою частотою (наприклад, від ультрафіолетової лампи), він розрядиться, й листочки фольги опадуть. Але якщо освітити звичайним світлом з довжиною хвилі, більшою за певне порогове значення, ніякого розрядження електроскопа не відбудеться, хоч як довго ми світитимемо.

Класична фізика пояснити цього не могла. Адже якщо світло — це електромагнітна хвиля, то енергія вирваних електронів має залежати саме від інтенсивності, яка визначає амплітуду коливання. Частота коливання начебто тут взагалі ні до чого. Поруч із «ультрафіолетовою катастрофою» з'явилася ще одна проблема, де класична фізика принципово була безсила.

На підтвердження зробімо певні оцінки з позиції хвильової електромагнітної теорії світла. Вважатимемо, що потужність світла, яке падає на речовину, дорівнює P , а кількість електронів у поверхневому шарі дорівнює N . Тоді на один електрон припадає потужність

$$P_o = \frac{P}{N}, \text{ де } N = nV, V = dS.$$

Тут n — концентрація електронів в об'ємі речовини, V — об'єм поверхневого шару, на електрони якого світло діє, d — товщина такого шару, S — площа поверхні шару.

Фотоефект має місце, якщо енергія W світла не менша від роботи A виходу електрона з речовини, тобто $W \geq A$. Вважатимемо, що $W = A$.

Тоді:

$$A = P_0 \Delta t \Rightarrow \Delta t = \frac{A}{P_0};$$

$$P_0 = \frac{P}{ndS}; \quad \Delta t = \frac{AndS}{P}.$$

Щоб вирахувати проміжок часу, по закінченні якого розпочнеться фотоефект, візьмімо такі дані: $S = 1 \text{ м}^2$; $d = 10^{-10} \text{ м}$ (порядку розмірів окремого атома); $P = 10^{-3} \text{ Вт}$; $n = 10^{28} \text{ 1/м}^3$; $A = 6,4 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$.

Звідси $\Delta t = 10^4 \text{ с}$, тобто приблизно 3 години. Досліди ж свідчать, що коли фотоефект є, то він настає практично «миттєво». Кажуть, що явище фотоефекту «безінерційне». Отже, класична фізика в цьому випадку не працює. Маємо суперечність, про яку писав Айнштайн.

Цю наукову проблему Айнштайн і вирішив. Він створив теорію фотоефекту, в якій передбачив, що світло не лише випромінюється, але й поглинається квантами, енергія E яких, за Планком, $E = \nu h$, де ν — частота світла, h — стала Планка. Все, як виявилось, геніально просто: якщо енергія кванта світла більша за роботу виходу електрона з речовини, то фотоефект виникає, саме це підтвердили досліди. Наявність «червоної межі» було пояснено.

Рівняння Айнштейна для фотоефекту сам він спершу записав так:

$$We = \frac{R}{N_A} \beta \nu - A,$$

де W — поверхневий потенціал електрона, що вибивається світлом, e — його заряд, β — константа з емпіричної формули, A — робота виходу електрона з металу, R — газова стала, N_A — число Авоґрадро.

Саме в такому вигляді вперше з'явилося рівняння фотоефекту в параграфі «Про збудження катодних променів за освітлення твердих тіл» вищеназваної статті Айнштейна. Сьогодні рівняння Айнштейна для фотоефекту записують у дещо іншому вигляді:

$$h\nu = A + \frac{m\bar{v}^2}{2}.$$

Тут m — маса фотоелектрона, $\bar{v}$ — його швидкість, а отже, $\frac{m\bar{v}^2}{2}$ — кінетична енергія фотоелектрона.

Порівнявши цей вираз із первинним рівнянням Айнштейна, ми побачимо, що

$$We = E_k = \frac{m\bar{v}^2}{2},$$

а $\frac{R\beta}{N_A} = h$ — стала Планка, виражена через інші константи.

1907 року Альберт Айнштайн робить перший суттєвий крок у застосуванні квантової теорії до речовини. (До цього квантову теорію застосовували тільки до випромінювання). Айнштайн зробив спробу на основі квантових ідей вирішити проблему теплоємності.

Інтерес до цієї проблеми пояснювався тим, що дослідні дані щодо теплоємності твердих тіл за низької температури перебували в різкій суперечності з теорією. Класична фізика розглядала тверде тіло (обмежуємося випадком одноатомної простої речовини) як сукупність атомів-осциляторів, кожен із яких, згідно з Больцманом, мав енергію $3kT$ (припускали, що кожен із них має 3 степені вільності, на кожен із яких припадає енергія kT — половина на кінетичну енергію й половина на потенціальну). Таким чином, сумарна енергія одного моля речовини складає:

$$E = 3N_A kT = 3RT,$$

де N_A — число Авогадро, R — газова стала з рівняння Менделєєва-Клапейрона.

Звідси просто знайти теплоємність за сталого об'єму:

$$C_V = \left. \frac{\partial E}{\partial T} \right|_{V=\text{const}} = 3R.$$

Тобто, чисельно атомна теплоємність усіх твердих тіл (кількість тепла, яку треба надати одному молю, щоб підняти його температуру на один градус) дорівнює приблизно шести калоріям. Цей закон Дюлонга–Пті (його експериментально відкрили французькі вчені П'єр Луї Дюлонг (1785–1838) та Алексіс Пті (1791–1820) ще 1819 року) справді так добре виконується для більшості речовин в області досить високих температур, що хіміки XIX століття навіть використовували його для визначення молекулярної ваги деяких речовин. Але, як свідчив експеримент, деякі дуже тверді речовини (наприклад, алмаз і бор) мають суттєво нижчу теплоємність навіть за кімнатної температури. А за низьких T , близьких до абсолютного нуля шкали Кельвіна, теплоємність усіх твердих тіл прямувала до нуля за кубічним законом:

$$C_V \propto T^3.$$

Класична фізика пояснити цього не могла.

У 122 томі «Annalen der Physik» Айнштайн опублікував свою статтю «Теорія випромінювання Планка й теорія теплоємності». Формули, що їх отримав Айнштайн, давали квантові вирази для енергії моля речовини й для теплоємності.

Це було перше квантове дослідження в галузі фізики твердого тіла. Формула Айнштейна для теплоємності пояснила, чому за високих температур працює закон Дюлонга–Пті, пояснила й прямування C_V до нуля. Хід міркувань Айнштейна був такий: коливанням у твердому тілі з частотою ν_0 відповідає квант енергії $k\Theta = h\nu_0$ (тут k — стала Больцмана, Θ — величина, що має вимірність температури). Коли температура висока, тобто $T \gg \Theta$,

збуджуються коливання всіх атомів, справджується рівномірний розподіл енергії за степенями вільності й працює описане вище класичне наближення, для якого теплоємність стала.

Проте в окремих дуже твердих речовинах (для тих-таки алмазу й бору) атоми зв'язані між собою настільки жорстко, що енергія кванта, пов'язаного з коливаннями, дуже велика, й величина Θ чисельно одного порядку з кімнатною температурою або й навіть перевищує її. А це означає, що вже за кімнатної температури збудженими виявляться не всі коливання, й теплоємність твердого тіла буде нижчою від передбаченої законом Дюлонга-Пті (для алмазу вона справді становить 1,44 калорії, для бору — 2,44 калорії, замість приблизно шести).

Нарешті, за зниження температури рано чи пізно співвідношення $T \gg \Theta$ виявиться порушеним для кожного твердого тіла. А це знов-таки означає, що за дальшого зниження T збудженою виявиться дедалі менша частина коливань і теплоємність спадатиме як $\exp\left(-\frac{h\nu_0}{kT}\right)$. А за $T = 0$ всі коливання виявляться «замороженими», й теплоємність дорівнюватиме нулю.

Але теорія Айнштейна не пояснила експериментального кубічного закону прямування теплоємності до нуля. Причина полягала в тому, що Айнштейн уважав: усі атоми в твердому тілі коливаються з однаковою сталою частотою ν_0 . Тим часом у твердому тілі насправді є набори частот коливань, а тому теорія теплоємності Айнштейна потребувала суттєвого вдосконалення.

Її вдосконалив визначний голландський фізик Петер Дебай (1884–1966) 1912 року. Теоретична формула Дебая, яка виходила з того, що у твердому тілі реалізуються різні коливання з частотами від 0 до найвищої можливої в цьому матеріалі частоти ν_0 , якнайкраще пояснювала експериментальні дані для низьких температур. А температура Θ , що характеризує «жорсткість» міжатомного зв'язку у твердому тілі, отримала назву температури Дебая (фізичне значення цього параметра дуже важливе: коливання атомів твердого тіла виявляють класичну поведінку за температур, вищих від температури Дебая, й квантову — за нижчих). Але теорію квантів до твердого тіла першим застосував саме Айнштейн.

1909 року Айнштейн повернувся до проблеми випромінювання й опублікував свої роботи, присвячені флуктуаціям енергії випромінювання та світлового тиску. Науковець виконав дуже тонке й громіздке теоретичне дослідження, в результаті якого отримав двочленну формулу для міри флуктуацій енергії випромінювання.

Перший член цієї формули має квантовий характер, оскільки включає енергію фотона. Другий член нічого квантового не містить і може вважатися хвильовим доданком. За малих частот випромінювання суттєвий вплив чинить другий, «класичний» член, а за великих частот — перший, тобто квантовий.

Фундаментальний висновок, що його зробив Айнштейн, полягав у тому, що жоден із цих двох членів порізно не описує повною мірою флуктуації енергії. Тільки обидва члени в сукупності дають повну картину флуктуацій енергії світла. Одночасно виявляються й квантові властивості світла, і хвильові. Ці результати справили на самого Айнштейна величезне враження. Він вирішує зайнятися обчисленням світлового тиску.

Світловий тиск теоретично передбачав ще Максвелл у своїй електромагнітній теорії. Це передбачення фізики не сприймали серйозно аж до 1900 року, коли російський фізик-експериментатор Петро Лебедев (1866–1912) таки «примудрився» виміряти його дослідно. Результати дослідів Лебедева було опубліковано в російських, німецьких і французьких журналах.

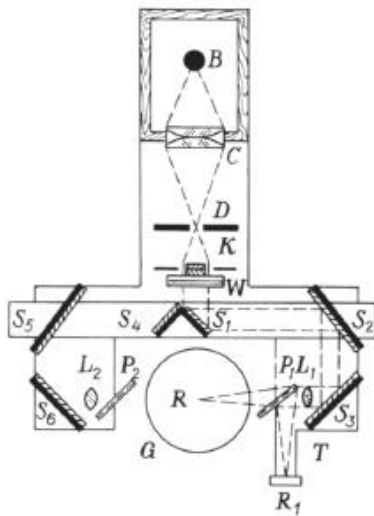
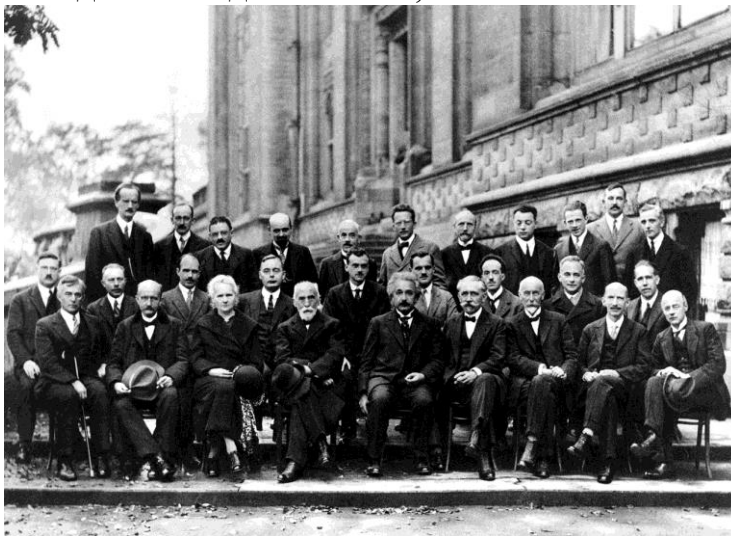


Схема установки Лебедева для вимірювання світлового тиску на тверді тіла

Для флуктуацій світлового тиску Айнштейн отримав формулу, що також складається з двох членів, — квантового й хвильового!



Учасники V Сольвеївського конгресу (1927 р.): третій ряд, стоять (зліва направо): О. Піккар, Е. Анрію, П. Еренфест, Е. Герцен, Т. де Дондер, Е. Шредінгер, Ж.-Е. Фершафельт, В. Паулі, В. Гайзенберґ, Р. Фаулер, Л. Бріллоен; Другий ряд, сидять: П. Дебай, М. Кнудсен, В.Л. Бреґґ, Г.

Крамерс, П. Дірак, А. Комптон, Л. Бройль, М. Борн, Н. Бор; Перший ряд, сидять: І. Ленгмюр, М. Планк, М. Кюрі, Г. Лоренц, А. Айнштайн, П. Ланжевєн, Ш.Е. Гюї, Ч.Т.Р. Вільсон, О.В. Річардсон.

Багато вчених не лише здивувалися, але й розгубилися «від цієї двоїстості». Наведемо уривки з кількох виступів тодішніх світил на першому Сольвеївському конгресі фізиків 1911 року.

Анрі Пуанкаре: «Мені здається, що останні дослідження ставлять під питання не лише основні принципи механіки, але й те, що досі уявлялося невіддільним від самого поняття «закон природи». Чи зможемо ми виразити ці закони у вигляді диференціальних рівнянь? Мене вразило в дискусії те, що одна й та сама теорія спирається то на принципи старої механіки, то на нові гіпотези, що є запереченням цієї механіки. Не можна забувати, що немає положення, якого не можна було б довести, якщо використати при доведенні два протилежні посилення».

Леон Бріллоєн (22-річний фізик, учень Поля Ланжевєна): «Я б хотів резюмувати враження, яке справило на мене читання доповідей, а ще більше наша дискусія в цілому. Мабуть, наймолодшим із нас мій висновок видається надто обережним, але й такий він здається мені вже дуже значущим. Мені здається, віднині можна бути певним того, що необхідно ввести в наші фізичні й хімічні концепції поняття переривчастої стрибкоподібної зміни, про яку ми кілька років тому не мали жодного уявлення. Як слід було б його вводити — це я бачу менш ясно. Треба йти ще далі й руйнувати самі основи електромагнетизму й класичної механіки, замість того, щоб обмежитися застосуванням нового поняття переривчастості до старої механіки».

Питання про двоїстість випромінювання так непокоїло всіх фізиків, що один із них, англієць Вільям Генрі Брег (1862–1942), нобелівський лауреат 1915 року за відкриття дифракції Х-променів, із гіркотою промовив: «Якщо працювати в понеділок, вівторок і середу з фотоелементами, то треба вважати світло за потік фотонів, а якщо в четвер, п'ятницю й суботу з дифракційними ґратками — вважати за хвилі. Слава Богу, що є неділя, коли можна забути й про те, й про інше». Ці слова не потребують коментарів.

Нарешті, вже спираючись на модель атома Бора (про неї ми поговоримо дещо пізніше), Айнштайн висловив 1917 року припущення про існування не лише спонтанних, але й стимульованих атомних переходів. Розвиваючи це припущення, радянські фізики Олександр Прохоров (1916–2002) і його учень Микола Басов (1922–2001) теоретично сформулювали в 1950-х роках принцип підсилення електромагнітних хвиль і побудували перший такий підсилювач у радіочастотному діапазоні — мазер (назва походить від англійського *microwave amplification stimulated by emission of radiation* — посилення мікрохвиль стимульованим випромінюванням). Трохи згодом у США було реалізовано, виходячи з тих самих принципів, підсилювач в оптичному діапазоні — лазер (від англійського *light amplification stimulated by emission of radiation* — посилення світла стимульованим випромінюванням). Винахідники мазера разом із

винахідником лазера Чарлзом Таунсом (1915–2015) спільно отримали Нобелівську премію 1964 року.



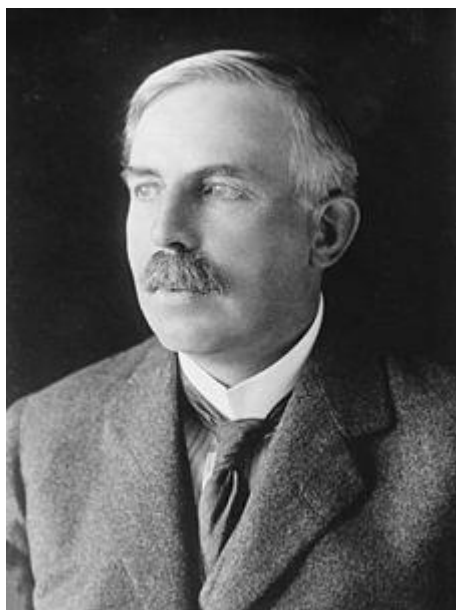
Прохоров, Таунс і Басов

Лазери отримали надзвичайно широке застосування — наукове, технологічне, медичне, військове й інформаційне. Використання напівпровідникових лазерів і оптоволоконних ліній спричинило справжню революцію у зв'язку, в мільйони разів збільшило можливості передавання інформації. Саме лазерні напівпровідникові пристрої «зчитують» інформацію з компакт-дисків. Відтак експерти вважають винайдення лазера однією з трьох (поряд зі створенням квантової механіки й винайденням напівпровідникового транзистора) найвизначніших фізичних подій XX століття. А ідею, покладену в основу їхньої роботи, сформулював Альберт Айнштейн 1917 року.

Лазерне випромінювання «народжується» в атомах. А як же все-таки влаштовано атом? Найпереконливіше (експериментально) на це питання відповів Ернест Резерфорд.

Ернест Резерфорд (1871–1937)

Ернест Резерфорд народився в Новій Зеландії в родині переселенця з Шотландії. Його мати — сільська вчителька, батько — власник деревообробного підприємства. Ернест отримав у батьковій майстерні добру технічну підготовку, яка згодом допомогла йому в конструюванні наукової апаратури.



Ернест Резерфорд

Після школи Ернест отримав стипендію для продовження освіти в коледжі, а через два роки склав іспит в інший коледж — філію Новозеландського університету. 21-річний Резерфорд отримав ступінь бакалавра мистецтв, найкраще склавши екзамени з математики і фізики. Його магістерська робота стосувалася виявлення високочастотних радіохвиль, існування яких довів 1888 року Гайнріх Герц. Для вивчення цього явища Резерфорд сконструював бездротовий радіоприймач (незалежно від Марконі й Тесли).

1894 року у «Вістях філософського інституту Нової Зеландії» було опубліковано першу роботу Резерфорда «Намагнічування заліза високочастотними розрядами». 1895 року Резерфорд отримав стипендію для здобуття наукової освіти в Англії. Джозеф Джон Томсон запросив молодого новозеландця працювати в Кембриджі в лабораторії Кавендіша. Це був початок великого наукового сходження Ернеста Резерфорда.

Першою темою, запропонованою йому в Кембриджі, стала детекція електромагнітних хвиль — і він зумів поставити на певний час світовий рекорд, виявивши випромінення на відстані півмилі. Щоправда, дуже швидко цей рекорд було побито Марконі, який тоді ж так само переїхав до Англії.

Подальша співпраця Резерфорда з Томсоном увінчалася значними результатами. Томсон і Резерфорд висунули припущення, що Х-промені, проходячи крізь газу, руйнують атоми газу й вивільняють однакову кількість позитивно й негативно заряджених частинок. Негативно зарядженими частинками є електрони, а позитивно заряджені частинки вони називали іонами. Їхні роботи поклали початок інтенсивному вивченню четвертого агрегатного стану речовини — плазми (сам термін «плазма» запровадить американець Ірвінг Ленгмюр (1881–1957) у 1928 р.). Після цих робіт Резерфорд цілеспрямовано зайнявся вивченням структури атомів.

1898 році Резерфорд переїхав до Монреаля (Канада), де обійняв посаду професора в університеті. Сім років він працював у Канаді й зробив там

низку фундаментальних відкриттів. Зокрема, там у 1899 році було розгадано природу так званої індукованої радіоактивності; встановлено (незалежно від Беккереля), що радіоактивне випромінювання складається з двох типів променів, які Резерфорд назвав α - та β -променями (γ -промені відкрив 1900 року французький фізик Поль Віллар (1860–1934), а назву їм дав так само Резерфорд на три роки пізніше). Резерфорд показав, що α -промені поглинаються в 100 разів сильніше.

Ще Беккерель 1900 року, відхиляючи β -промені в магнітному полі й фотографуючи слід від їхнього потрапляння на екран, показав, що співвідношення $\frac{q}{m}$ для них таке саме, як і для електронів, що їх відкрив

Томсон, але їхні швидкості сягають половини швидкості світла. Щодо α -променів, то визначити їхній питомий заряд виявилось складно через їхню в тисячі разів більшу масу. Проте врешті-решт Резерфордові це вдалося, і виявилось, що ці частинки можуть бути або спареними йонізованими атомами водню, або ж подвійно йонізованими атомами гелію. І тоді Резерфорд разом зі співробітниками провів ще один дослід, який мусив дати остаточну відповідь: він зібрав достатню кількість α -частинок і методом спектрального аналізу переконався, що такі має справу з гелієм.

З Фредеріком Содді (1877–1956) Резерфорд відкрив радіоактивний розпад і встановив закон цього розпаду. Виявилось, що коли елемент випускає α -промені, утворюється новий елемент, що стоїть у періодичній таблиці на дві клітинки лівіше, а за бета-розпаду виникає елемент, який стоїть на клітинку правіше від вихідного. Було також показано, що інтенсивність розпаду зменшується з часом (період зменшення інтенсивності вдвічі Резерфорд і Содді назвали «періодом напіврозпаду»). Проте чому атоми певної радіоактивної речовини розпадаються за статистичним законом, до того ж одні — за лічені секунди, інші — за мільйони років, залишалося незрозумілим.

Резерфорд і Содді зробили висновок, що «енергія, прихована в атомі, у багато разів перевищує енергію, що вивільняється за звичайного хімічного перетворення». Зокрема, постійність сонячної енергії можна пояснити тим, «що на Сонці відбуваються процеси субатомного перетворення» (адже ще в ХІХ столітті фізики зрозуміли, що випромінювання Сонця й інших зірок не можна пояснити хімічними процесами чи гравітаційним стисненням; проте що ж саме змушує світила горіти мільйони років, не згасаючи, залишалося незрозумілим, і на цій підставі лорд Кельвін доводив, що Сонце порівняно «молоде», й на Землі через це було обмаль часу для еволюції). Приголомшує прозорливість авторів, котрі ще 1903 року змогли усвідомити космічну роль ядерної енергії, яку вони назвали внутрішньоатомною.

Розмах наукової роботи Резерфорда в Монреалі величезний. Він особисто й спільно зі співробітниками опублікував 66 наукових статей і книгу «Радіоактивність», що принесла науковцю славу першокласного дослідника в фізиці та хімії. Врешті, він отримує запрошення посісти

кафедру в Манчестерському університеті, й у травні 1907 року повертається до Англії.

У Манчестері Резерфорд розгорнув інтенсивну діяльність. Нільс Бор, котрий приїхав до Резерфорда 1912 року, так характеризував цей період: «У цей час навколо Резерфорда гуртувалося багато молодих фізиків із різних країн світу, приваблених його надзвичайною обдарованістю як фізика й рідкісними здібностями як організатора наукового колективу».

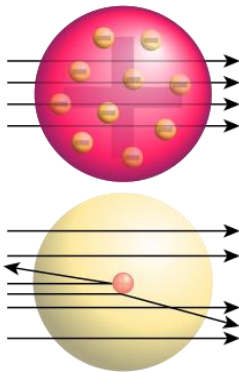
Ще 1908 року Резерфорду присуджено Нобелівську премію з хімії «за проведені дослідження в галузі розпаду елементів у хімії радіоактивних речовин». Представник Шведської королівської академії наук указав на зв'язок між працею, яку виконав Резерфорд, і роботами Джозефа Джона Томсона, Анрі Беккереля, П'єра й Марі Кюрі: «Відкриття привели до приголомшливого висновку: хімічний елемент... здатен перетворюватися на інші елементи».

У своїй Нобелівській лекції Ернест Резерфорд, зокрема, зазначив: «Є всі підстави вважати, що α -частинки, які так вільно викидаються з більшості радіоактивних речовин, ідентичні за масою та складом і повинні складатися з ядер атомів гелію. Ми, отже, не можемо не прийти до висновку, що атоми основних радіоактивних елементів, таких як уран і торій, повинні будуватися, принаймні частково, з атомів гелію».

А в колі друзів після отримання Нобелівської премії з хімії учений жартома визнав: з усіх численних перетворень, які він виявив у природі, найдивовижнішим і найнесподіванішим було його власне перетворення з фізика на хіміка!

Проведені 1910 року фундаментальні дослідження Резерфорда та його учнів — бомбардування тонкої золотої фольги α -частинками та їхнє розсіювання під різними кутами — однозначно засвідчили: атоми речовини мають планетарно-ядерну структуру: є важке й маленьке ядро, в якому зосереджена маса атома, і є електрони, які обертаються навколо ядра. Доти більшості фізиків здавалося, що важкі α -частинки мають проходити крізь атом, наче ніж крізь масло (щойно з'явилася модель атома Джозефа Джона Томсона — «родзинки в пудингу», згідно з якою електрони «плавають» у нещільній хмарі позитивного заряду, коливаючись навколо певних «точок рівноваги»).

Те, що деякі α -частинки відбивалися фольгою майже назад, було цілковитою несподіванкою. Задачу про розсіювання α -частинок на великі (близько 180 градусів) кути було запропоновано новачкові-асистентові як суто навчальну — бо її негативний результат не викликав сумніву. Але одна з 7–8 тисяч частинок таки відбивалася. Асистент Ернест Марсден певний час не наважувався навіть повідомити шефові про отриманий результат, вважаючи його помилкою. Але численні перевірки підтвердили: дослідження правильні. Пізніше Резерфорд згадував: «це було так само неймовірно, якби за обстрілювання 15-дюймовими снарядами аркуша паперу нас поранило б рикошетом». Але це однозначно свідчило на користь наявності в атомах маленьких важких ядер, здатних відбивати α -частинки.



Альфа-частинки легко проходять крізь «атом Томсона», але можуть відбиватися від ядра в планетарному «атомі Резерфорда»

Німецький фізик Ганс Гейгер (1882–1945), котрий теж брав участь у дослідях як безпосередній керівник Мардсена, але уславився як винахідник лічильника заряджених частинок, розповідав: «Одного разу Резерфорд увійшов до моєї кімнати, очевидно, в чудовому гуморі, й промовив: “Тепер я знаю, як виглядає атом!”». Пояснити кутовий розподіл розсіяних частинок (для якого Резерфорд спеціально вивів формулу для перерізу розсіяння на кулонівському потенціалі) можна було, тільки припустивши, що майже вся маса атома зосереджена в позитивно зарядженому крихітному ядрі розміром порядку 10^{-12} см. При цьому заряд ядра приблизно дорівнював зарядові електрона, помноженому на атомний номер елемента, поділений на 2. Електронам при цьому не залишалося нічого іншого, як обертатися навколо цього ядра.

LXXIX. *The Scattering of α and β Particles by Matter and the Structure of the Atom.* By Professor E. RUTHERFORD, F.R.S., University of Manchester*.

§ 1. **I**T is well known that the α and β particles suffer deflexions from their rectilinear paths by encounters with atoms of matter. This scattering is far more marked for the β than for the α particle on account of the much smaller momentum and energy of the former particle. There seems to be no doubt that such swiftly moving particles pass through the atoms in their path, and that the deflexions observed are due to the strong electric field traversed within the atomic system. It has generally been supposed that the scattering of a pencil of α or β rays in passing through a thin plate of matter is the result of a multitude of small scatterings by the atoms of matter traversed. The observations, however, of Geiger and Marsden† on the scattering of α rays indicate that some of the α particles must suffer a deflexion of more than a right angle at a single encounter. They found, for example, that a small fraction of the incident α particles, about 1 in 20,000, were turned through an average angle of 90° in passing through a layer of gold-foil about $\cdot 00004$ cm. thick, which was equivalent in stopping-power of the α particle to 1·6 millimetres of air. Geiger‡ showed later that the most probable angle of deflexion for a pencil of α particles traversing a gold-foil of this thickness was about $0^\circ 87$. A simple calculation based on the theory of probability shows that the chance of an α particle being deflected through 90° is vanishingly small. In addition, it will be seen later that the distribution of the α particles for various angles of large deflexion does not follow the probability law to be expected if such large deflexions are made up of a large number of small deviations. It seems reasonable to suppose that the deflexion through a large angle is due to a single atomic encounter, for the chance of a second encounter of a kind to produce a large deflexion must in most cases be exceedingly small. A simple calculation shows that the atom must be a seat of an intense electric field in order to produce such a large deflexion at a single encounter.

Recently Sir J. J. Thomson§ has put forward a theory to

* Communicated by the Author. A brief account of this paper was communicated to the Manchester Literary and Philosophical Society in February, 1911.

† Proc. Roy. Soc. lxxxii. p. 495 (1909).

‡ Proc. Roy. Soc. lxxxiii. p. 492 (1910).

§ Camb. Lit. & Phil. Soc. xv. pt. 5 (1910).

Стаття Резерфорда в журналі «Philosophical Magazine» (червень 1911 р.), де вперше описано планетарну модель атома і запроваджено поняття «атомне ядро»

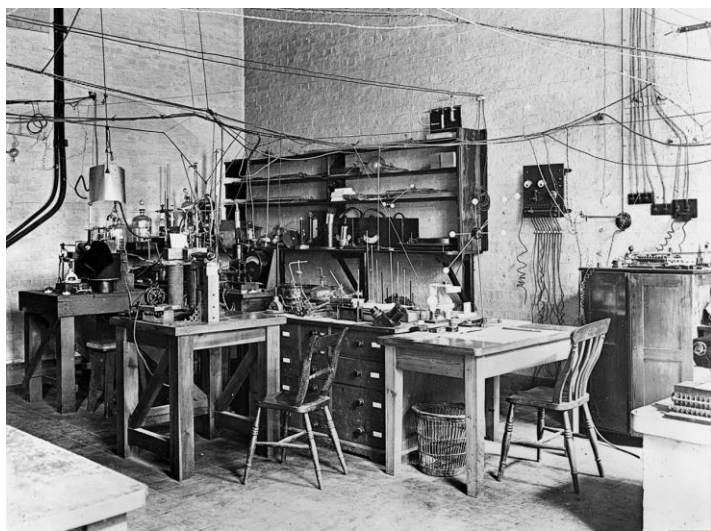
Це відкриття відразу ж привело до гострих суперечностей із класичною електродинамікою, в спроможності якої після Максвелла–Герца–Лоренца ніхто з фізиків не сумнівався. Адже електрон, обертаючись по круговій орбіті, рухається прискорено — його доцентрове прискорення дорівнює

$$a = \frac{\vec{v}^2}{R}.$$

А згідно з рівняннями Максвелла, будь-який заряд, який рухається з прискоренням, повинен випромінювати й втрачати енергію! Швидкість і радіус орбіти електрона Резерфорд оцінив — і отримав приголомшливий результат: за дуже маленький час $\tau \sim 10^{-10}$ с електрон повинен утратити всю свою енергію та впасти на ядро! Науковець зрозумів, що він відкрив «приречений атом».

Але реально планетарний атом Резерфорда існував і був стабільний. Класична фізика ще раз зайшла у «глухий кут». Вихід із цього кута судилося знайти данцеві Нільсові Бору.

Плідну роботу резерфордівської групи перервала Перша світова війна. Убито на війні надзвичайно талановитого основоположника рентгенівської спектроскопії Генрі Мозлі (1877–1915), — він загинув під час невдалого десанту на Дарданеллах, тоді, коли наказ про його відкликання з фронту було вже підписано й надіслано в частину; майбутній нобелівський лауреат і відкривач нейтрона Джеймс Чедвік (1891–1974) перебував у німецькому полоні; а самого Резерфорда англійський уряд призначив членом «Адміральського штабу винаходів і досліджень» — він мусив розробляти засоби боротьби з підводними човнами супротивника.



Лабораторія Ернеста Резерфорда

Після війни Резерфорд повернувся в манчестерську лабораторію й 1919 року зробив ще одне фундаментальне відкриття. Йому вдалося в лабораторних умовах провести першу ядерну реакцію перетворення атомів — перетворити азот на кисень. Трохи раніше було зареєстровано йон водню — протон, частинку, що несе одиничний позитивний заряд (назва «протон»

теж належить Резерфордові). Відтоді різко зріс інтерес фізиків до природи атомного ядра.

Потому 48-річного вченого, котрий здобув світове визнання, запросили в Кембриджський університет, де він став наступником Джозефа Джона Томсона як професора експериментальної фізики й директора Кавендішської лабораторії, а за два роки він обійняв посаду професора природничих наук у Королівському інституті в Лондоні. У роки, коли Резерфорд керував Кавендішською лабораторією, нобелівські премії з фізики було присуджено її співробітникам Джеймсу Чедвіку за відкриття нейтрона, Джону Кокрофту та Ернесту Волтону — за експеримент, який став відомий як розщеплення атома за допомогою прискорювача частинок, та Едварду Епплону — за демонстрацію існування йоносфери.

У своїх «Спогадах про професора Резерфорда» його учень, видатний радянський фізик Петро Капиця (1894–1984) писав: «Статурою він був досить міцний, зріст — вищий за середній, очі мав блакитні, завжди дуже веселі, обличчя дуже виразне. Він був рухливий, голос у нього був гучний, він погано вмів його модулювати, всі знали про це, і з інтонації можна було визначити — в доброму гуморі професор чи ні. У всій його манері спілкування з людьми відразу, з першого слова впадали в око його щирість і безпосередність. Відповіді його були завжди короткі, ясні й точні. Коли йому що-небудь розповідали, він негайно реагував, що б це не було. З ним можна було обговорювати будь-яку проблему — він відразу починав охоче говорити про неї».

Учні й колеги згадували про Резерфорда не лише як про видатного науковця, але і як про милу, добру людину. Вони захоплювалися його незвичайним творчим мисленням. До певної міри, Резерфорд своєю безмежною фантазією й винахідливістю в дослідках був подібний до Фарадея. Обидва науковці так само уникали формул (хоч, на відміну від самоука Фарадея, Резерфорд добре знав математику й за потреби нею успішно користувався — він вивів, наприклад, відому формулу для розсіювання заряджених частинок на кулонівському потенціалі). Різнило їх, може те, що Фарадей піднявся на вершину, яка височіла над усією фізикою і хімією, а сфера інтересів Резерфорда таки була дещо вужчою. Це, очевидно, стало наслідком вужчої спеціалізації науковців початку ХХ століття.

Ернест Резерфорд — член усіх академій наук світу, він створив велику школу фізиків, серед яких понад два десятки — зі світовим іменем. Ставши членом Лондонського Королівського товариства в 1903 р., він очолював його як президент з 1925 по 1930 рр. У 1914 р. Резерфорда, як колись Ньютона, було вдостоєно лицарства, і він став «сером Ернестом».

Практично до кінця свого життя Ернест Резерфорд мав міцне здоров'я й помер після нетривалої хвороби. Поховано Резерфорда у Вестмінстерському абатстві неподалік від Ньютона — на визнання його видатних заслуг у розвитку науки.

Зазначмо, що Ернест Резерфорд не брав участі у створенні квантової теорії прямо й безпосередньо. Мало того — він досить скептично ставився до

нової фізики й, коли його якось поспитали, чому він ніколи не посилається на роботи Айнштейна, відповів, що йому це не потрібно. Але експерименти Резерфорда з розсіювання альфа-частинок на атомах речовини довели планетарно-ядерну модель атома. Цю модель неможливо було пояснити законами класичної фізики — «резерфордівський» атом, згідно з рівняннями Максвелла, міг існувати не довше як 10^{-10} с. Але ж насправді він існував і був стабільним у часі!

Вирішення цієї наукової проблеми привело врешті-решт до створення квантової механіки — теорії мікроявищ у світі атомів.

Нільс Бор (1885–1962)

Данський фізик Нільс Бор народився в Копенгагені в сім'ї професора фізіології, якого двічі номінували на здобуття Нобелівської премії з фізіології або медицини. Навчався Нільс у граматичній школі й закінчив її у свої 18. Родина зі сталими «професорськими традиціями» підтримувала атмосферу високої інтелектуальності, яка поєднувалася зі щиросердям і добротою.



Нільс Бор

У школі Нільс вчився без особливого блиску, але його вважали за здібного учня, вдумливого й допитливого. Він вирізнявся старанністю та працьовитістю. Десь до сьомого класу стало зрозуміло, що до фізики й математики хлопчик має талант. Сам Нільс Бор так певен був власних знань, що почав критикувати шкільний підручник фізики, який нібито неправильно тлумачив деякі питання. Разом із тим, Нільс захоплювався історією й мовами, успішно писав твори латиною. Любов до фізики й математики благополучно уживалися в Нільса з любов'ю до поезії. Вірші він читав напам'ять, повільно і мрійливо, неначе вимовляв молитву.

В університетські роки брат Нільса Гаральд мав більшу популярність, ніж Нільс, — правда, не стільки як талановитий студент, скільки як один із найкращих футболістів Данії. 1908 року Гаральд на лондонській олімпіаді в складі збірної Данії завоював срібну медаль. Нільс також був пристрасним футболістом, грав воротарем в університетській команді, інколи виступав як воротар у команді вищої ліги.

Як згадував Бор наприкінці життя, в студентські роки він намагався створити математичну модель для проблеми свободи волі людини, над якою так довго билися богослови й філософи. Звісно, з цього нічого не вийшло, але символічно, що таку спробу здійснив майбутній руйнатор класичного детермінізму.

У дипломному проекті Нільс Бор визначав поверхневий натяг води за вібрацією водяного струменя. За це дослідження йому присуджено золоту медаль Данської королівської академії наук. Його докторську дисертацію з теорії електронів у металах було визнано значним теоретичним дослідженням. Відзначмо, що в цій роботі розкривалася нездатність класичної електродинаміки пояснити магнітні явища в металах. Бор зміг зрозуміти на ранній стадії своєї наукової діяльності, що класична теорія не може повністю описати поведінку електронів.

Після отримання докторського ступеня, у свої 26 Бор вирушив до Англії, у Кембриджський університет, щоб попрацювати з відкривачем електрона Джозефом Джоном Томсоном. Слід зазначити, що на той час Томсон уже займався іншими проблемами, тож він не виявив особливої цікавості до дисертації Бора й викладених у ній висновків. То був уже «пізній», відлюдкуватий та інертний «Джей-Джей».

Недостатнє знання англійської мови утруднювало можливості спілкування Бора з ученими-фізиками Кембриджа. Із властивим йому терпінням він долав ці труднощі, не розлучаючись із англійським словником ціле своє життя.

У жовтні 1911 року на щорічному святковому обіді в Кавендішській лабораторії Нільс Бор уперше побачив Ернеста Резерфорда, котрий справив на нього сильне враження. Бор відразу зацікавився дослідженнями Резерфорда та його співробітників — з проблем радіоактивності елементів та будови атома.

Протягом кількох місяців на початку 1912 року Бор зробив багато висновків з приводу ядерної моделі атома, яка до того часу ще не здобула широкого визнання. У дискусіях із Резерфордом та іншими науковцями Бор виношував і відпрацьовував ідеї, які привели його до створення своєї власної моделі будови атома.



Бор із майбутньою дружиною Маргарет у день заручин (1910)

Улітку 1912 року Нільс Бор повернувся в Данію й став асистент-професором Копенгагенського університету. Незабаром він одружився. У весільну подорож молоде подружжя поїхало до Англії, де Бор знову зустрівся з Резерфордом.

Маргарет Бор стала справжньою й незамінною опорою чоловікові не лише завдяки силі свого характеру, розуму й знанню життя, але, перш за все, завдяки своїй безмежній відданості. У подружжя було шестеро синів, один із яких, Оге Бор, також став відомим фізиком.

Бор продовжував працювати над проблемою «приреченого» атома Резерфорда. Можливе вирішення цієї наукової проблеми, як уважав Бор, лежить у квантовій теорії.

Застосовуючи нові квантові ідеї до проблеми будови атома, Нільс Бор передбачив, що електрони мають певні «дозволені» стійкі орбіти, перебуваючи на яких, вони не випромінюють енергії. Ідея визначеності орбіт (орбіти не можуть бути довільними!), відома як «перший постулат Бора», була, безумовно, революційною. Ця ідея давала ключ до розуміння спектрів випромінювання й поглинання атомів.

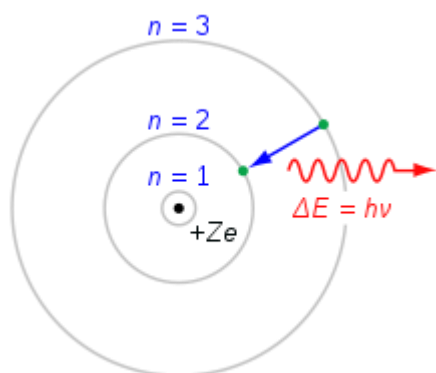
Згідно з «другим постулатом Бора», електрони в атомі можуть стабільно перебувати лише на тих орбітах, де їхній момент кількості руху відповідає правилу квантування:

$$mvR = n\hbar, n = 1, 2, 3, \dots$$

Тут уведено сталу $\hbar = h/2\pi$, яку часто називають зведеною сталою Планка, хоча вперше запровадив її саме Нільс Бор.

Слід зазначити: фізичного пояснення для свого правила квантування орбіт Бор не мав. Він просто «вгадав» його, перебираючи багато різних варіантів.

Далі Бор розв'язав нескладну задачу для електрона, який рухається по коловій орбіті з кінетичною енергією $\frac{mv^2}{2}$ в потенціальному полі одиничного позитивного кулонівського заряду ядра $-\frac{e^2}{r}$, і рух якого підпорядковується наведеному вище правилу квантування.



Електронні орбіти атома водню, за Бором

Наслідки виявилися дивовижними. Бор показав, що електрон може перебувати в атомі водню лише на певних дискретних рівнях із енергією:

$$E_n = -\frac{hcR_\infty}{n^2},$$

де в чисельник входять стала Планка, швидкість світла та експериментально відома вже на той час стала Рідберга (названа на честь шведського фізика Йоганна Рідберга (1854–1919), який її запровадив), а в знаменнику $n = 1, 2, 3, \dots$. Найглибшому з цих рівнів за $n = 1$ (говорять про основний рівень електрона) відповідає енергія $E_1 = -2,485 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = -13,53 \text{ еВ}$ (її відраховано вниз від «рівня вакууму»), а також радіус «основної орбіти» $0,53 \cdot 10^{-10} \text{ м}$. Обидва значення з високою точністю відповідали експерименту.

Згідно з «третім постулатом Бора», випромінюватися (поглинатися) можуть тільки кванти світла з енергіями, що відповідають переходам між різними «дозволеними» орбітами. Крім того, автоматично виходила й формула для частот спектральних ліній випроміненого світла за переходу електрона з вищого рівня з квантовим числом k на нижчий із квантовим числом n :

$$\nu_{kn} = \frac{E_k - E_n}{h} = R_\infty \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right).$$

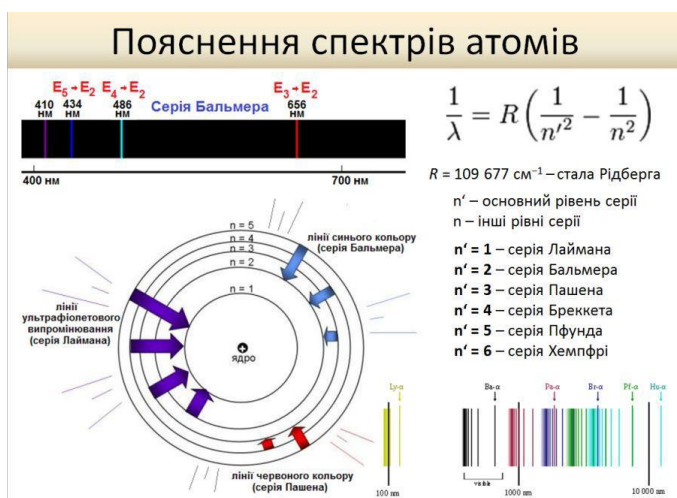
Ще 1885 року (рік народження Бора!) швейцарський фізик Йоганн Бальмер вивів емпіричну формулу для частот у спектрі атома водню:

$$\nu_{kn} = R_\infty \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{k^2} \right),$$

куди входить та ж сама стала Рідберга. Формула Бальмера прекрасно відповідає формулі Бора для $n = 2$. Атом водню нарешті став «зрозумілий»!

(Цікаво, що Бор, коли «придумав» два перші постулати, ще нічого не знав про саме існування спектральних формул. Про те, як нова модель описує серію Бальмера, його випадково поспитав колишній університетський товариш оптик Ганс Гансен — і Бор, після певних нескладних розрахунків, дістав найголовніший козир на користь своєї теорії. Але революційність висновку Бора була очевидна — вперше частота випромінювання «відривалася» від періоду обертання електрона в атомі! Згодом Айнштейн

зіймався: за кілька років до того в нього майнула подібна ідея, але він її відкинув як занадто сміливу...)



Серії Бальмера, Лаймана, Пашена, Бреккета, Пфунда, Хемпфрі, структура енергетичних рівнів та електронні переходи в атомі водню згідно з постулатами Бора. Із сучасного посібника з фізики.

Звернімо увагу на важливу обставину: і правило квантування Бора для моменту кількості руху, і формули Бора для енергетичних рівнів і частот спектральних переходів містили квантову сталу Планка.

Теорія Бора, опублікована 1913 року, принесла вченому визнання. Почали говорити, що «приречений» атом Резерфорда «врятував» Бор, отже, ця модель атома стала моделлю Резерфорда–Бора.

Резерфорд дуже швидко оцінив важливість робіт Бора й запропонував йому ставку лектора в Манчестерському університеті. Бор дав згоду й обіймав цю посаду з 1914 по 1916 рік, а потому зайняв посаду професора, засновану особисто для нього в Копенгагенському університеті.

Учений далі працював над проблемою будови атома. 1920 року він заснував Інститут теоретичної фізики в Копенгагені, де вже невдовзі запропонував перше пояснення періодичної системи елементів, виходячи з послідовного заповнення атомних оболонок, яким відповідають різні квантові числа, електронами. Бор керував цим Інститутом теоретичної фізики до кінця свого життя, за винятком періоду Другої світової війни, коли йому довелося покинути Данію, яку окупували гітлерівські війська. Під керівництвом Нільса Бора цей інститут відіграв дуже важливу роль у розвитку квантової механіки.

Нобелівську премію 1922 року Бору присудили «за заслуги в дослідженні будови атомів і їхнього випромінювання». На презентації лауреата представник Шведської королівської академії наук Ареніус зазначив, що наукові відкриття Бора «підвели його до теоретичних ідей, які

лежали в основі класичних постулатів Джеймса Клерка Максвелла», і що принципи, які заклав Бор, «обіцяють рясні плоди в майбутніх дослідженнях».

А ось як сприйняв науковий світ ідеї Нільса Бора в перші роки розробки теорії атома.

1913 рік, Альберт Айнштейн: «Якщо це правильно, то це означає кінець фізики як науки».

Той самий рік, Ернест Резерфорд (у листі до Бора): «Ваші погляди на механізм народження водневого спектра вельми дотепні й видаються чудово опрацьованими. Однак поєднання ідей Планка зі старою механікою вельми ускладнює фізичне розуміння того, що лежить в основі такого механізму. Мені здається, що є серйозний камінь спотикання у вашій гіпотезі, і я не сумніваюся, що ви цілком усвідомлюєте це, а саме: як вирішує електрон, з якою частотою він мусить коливатися, коли відбувається його перехід із одного стану в інший? Мені здається, ви будете змушені припустити, що електрон заздалегідь знає, де він збирається зупинитися».

1920 рік, відомий нідерландський фізик Гендрік Крамерс: «Теорія квантів подібна до інших перемог у науці: якийсь час ви втішаєтеся ними, а потім роками плачете»; молодий німецький фізик Вернер Гайзенберг: «Нехай це й безумство, але в ньому є метод».

1923 рік, видатний нідерландський фізик Гендрік Лоренц: «Усе це красиво й украй важливо, але, на жаль, не дуже зрозуміло». «Класик» Лоренц шкодував, що не помер кількома роками раніше, коли у фізиці зберігалася відносна ясність.

1925 рік, видатний швейцарський фізик Вольфганг Паулі: «Фізика знову зайшла в безвихідь. У кожному разі, для мене вона заважка, і я волів би бути коміком у кіно або кимсь на кшталт цього й не чути нічого про фізику».

Модель атома Бора, попри свою незвичайність і навіть «єретичність» у сприйнятті тодішніх учених, була, власне, сполучним містком між класичною та справжньою квантовою фізикою. Вона добре працювала не лише для водню. Арнольд Зоммерфельд невдовзі розповсюдив її на всі йонізовані атоми з одним електроном. Непогано описувала вона й атоми лужних металів, де один зовнішній електрон перебуває в полі ядра й решти «внутрішніх» електронів, які можна вважати «ефективним ядром» із одиничним зарядом, але з відповідною масою. Проте, попри всі зусилля самого Бора, його співробітників та послідовників, пояснити вже наступний за складністю атом гелію з двома електронами вона так і не змогла. Нарешті, вона не давала відповіді на очевидне запитання: чому саме орбіти «квантовані»?

Потрібен був якісний ривок — і зробили його невдовзі Ервін Шредінгер та Вернер Гайзенберг, роботи яких у 1925–26 рр. завершили короткий, але сповнений драматичних подій період «старої теорії квантів», що почався в грудні 1900 р. з доповіді Макса фон Планка, і поклали початок сучасній квантовій механіці.

Однак наукові заслуги Бора моделлю атома водню аж ніяк не обмежуються. Під науковим керівництвом Нільса Бора у 1926–27 рр. було створено те, що згодом назвали «копенгагенською інтерпретацією квантової механіки» (про неї докладніше ми поговоримо далі).

Беручи за основу принцип невизначеності Вернера Гайзенберга, копенгагенська наукова школа Бора вкорінювала в свідомості науковців думку про те, що жорсткі закони причини й наслідку не можна застосовувати до внутрішньоатомних явищ. Ці явища можна тлумачити тільки мовою ймовірності, а тому ні про які класичні траєкторії електрона в атомі не може бути й мови. А відтак і модель Бора, де йшлося про класичні, хоч і квантовані, орбіти електрона, була не більше ніж вдалою ілюстрацією значно складнішої фізичної картини.

Нільс Бор сформулював два фундаментальні принципи, покладені в основу розвитку квантової фізики: *принцип відповідності* (у 1918 р.) й *принцип доповнюваності* (у березні 1927 р.).

Принцип відповідності стверджує, що квантово-механічний опис макросвіту повинен відповідати його опису в рамках класичної фізики за переходу до випадку великих квантових чисел (до великого значення дії — про це ми поговоримо згодом).

Принцип доповнюваності стверджує, що хвильовий і корпускулярний характери речовини й випромінювання є взаємодоповнюваними властивостями й однаково необхідними компонентами розуміння природи. Водночас це означає, що існують пари спряжених величин (наприклад, імпульс і координата, енергія і час), які не можуть бути одночасно виміряні з абсолютною точністю. Як ми побачимо, цей принцип тісно пов'язаний з *принципом невизначеності* Гайзенберга.

У тридцяті роки Бор почав займатися проблемами ядерної фізики. У цей час Енріко Фермі зі співробітниками вивчав атомні ядра, бомбардуючи їх нейтронами. Бор разом із іншими вченими розробив «краплинну» модель ядра, що передбачала можливість його розщелення. У 1938 р. німецькі радіохіміки Отто Ган і Фріц Штрассман бомбардували уран-235 нейтронами і виявили, що одним із продуктів реакції є значно легший барій. Проте сам Ган поставився до власного результату з недовірою, вважаючи, що він спостерігав не барій, а хімічно подібний невідомий ізотоп значно важчого радію. Але вже в 1939 р. австро-німецька фізикиня Ліза Мейтнер разом зі своїм небожем Отто Фрішем правильно інтерпретували дослід як розщеплення ядра ^{235}U на ^{92}Kr і ^{141}Ba . Різниця мас первісного ядра і його вихідних уламків, згідно з формулою Айнштейна $E = mc^2$, перетворювалася при такому розщепленні на енергію. З'явилася перспектива створення нової надзвичайно руйнівної зброї, базованої на цьому фізичному ефекті. Нільс Бор одним із перших зрозумів таку перспективу.

У перші роки війни учений працював у Копенгагені в умовах німецької окупації, які спершу не були надто жорсткими. На відміну від інших поневолених народів Європи, данцям дозволили зберегти власних короля й уряд. Проте згодом окупаційний режим став значно суворішим, над

ученим і його родиною нависла загроза арешту. 1943 року Бор човном переправився до сусідньої Швеції, а звідти англійська розвідка переправила його разом із сином Оге до Англії в порожньому бомбовому відсіку британського військового літака. Пізніше вчений (працюючи в Лос-Аламосі під іменем Ніколаса Бейкера) взяв участь в американському атомному проєкті — і ще до створення бомби усвідомив її небезпеку для майбутнього людства.

Нільс Бор зустрічався з президентом США Рузвельтом і прем'єр-міністром Великобританії Черчиллем, намагаючись переконати їх установити систему контролю над озброєннями в післявоєнний період. 1950 року Бор надіслав відкритого листа до ООН, закликаючи до «відкритого світу» й міжнародного контролю над озброєннями.

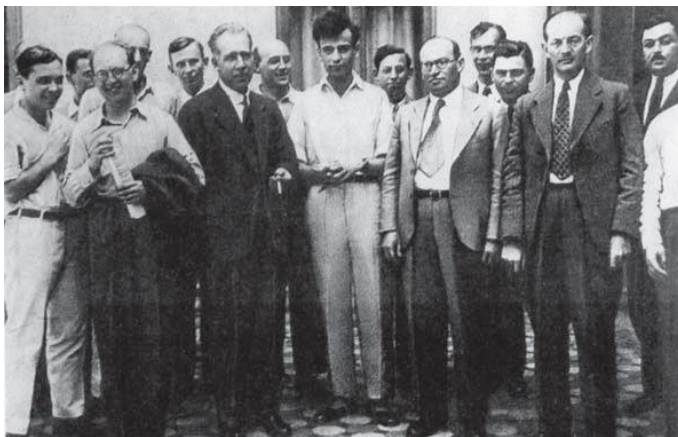


Герб Нільса Бора

У 1947 р. король Фредерік IX вручив Бору найвищу державну нагороду Данії — Орден слона. Ним, за словами короля, було відзначено не тільки заслуги Бора, але й усю данську науку. З цієї нагоди вчений одержав герб із латинським девізом: *contraria sunt complementa* «протилежності взаємодоповнюються».

Нільс Бор пішов із життя в 77-літньому віці вві сні — зупинилося серце. Він був почесним членом понад 20 академій наук і багатьох наукових товариств.

Для нас цікаво, що Нільс Бор приїздив, зокрема, й до України. 1934 року він робив доповідь на конференції з теоретичної фізики в Харкові, який був тоді не лише столицею Української Соціалістичної Радянської Республіки, але й однією з «фізичних столиць» Європи. До членства в науковій раді Українського фізико-технічного інституту (нині — Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України) було запрошено й Нільса Бора. Збереглося фото, на якому Бор стоїть серед учасників конференції поруч із керівником теоретичного відділу Українського фізико-технічного інституту 26-річним Левом Ландау, котрий стажувався в Копенгагені 1927-го. На жаль, більшість «радянських» учасників цієї конференції, яких бачимо на цьому фото, загинуть через 3–4 роки під час «великих репресій».



Нільс Бор серед учасників конференції з теоретичної фізики в Харкові, 1934 р.

Востаннє Нільс Бор приїздив до СРСР разом із дружиною, сином Оге й невісткою в травні 1961 року. На семінарі в Петра Капиці Лев Ландау запитав свого колишнього вчителя Бора, в чому його секрет роботи з молодими науковцями. Бор відповів: «Ми не боялися показати молодій людині, що ми самі не надто мудрі. Ми ніколи не утримувалися від загострення розбіжностей і суперечностей. Крім того, я завжди був проти того, щоб висловлювали якісь «остаточні й визначені» судження. Я вважаю, що питання треба підтримувати в стані невизначеності й ніколи не втрачати почуття гумору».

Альберт Айнштейн сказав про Бора так: «Дивовижно приваблює до Бора — науковця й мислителя — його рідкісний сплав сміливості й обережності; мало хто володіє такою здатністю інтуїтивно схоплювати суть прихованих речей, поєднуючи це з загостреним критицизмом. Він, без сумніву, є одним із найбільших наукових умів нашого століття».

Арнольд Зоммерфельд (1868–1951)

Арнольд Зоммерфельд, німецький фізик–теоретик, народився в Кенігсберзі (після Другої світової війни це німецьке місто, де працював і похований великий філософ Кант, стало російським Калінінградом), учився в кенігсберзькому університеті, обіймав професорські посади в Геттінгенському університеті, в Гірничій академії, у Вищій технічній школі, в Мюнхенському університеті. Наукові роботи Зоммерфельда присвячено квантовій теорії атома, квантовій теорії металів, спектроскопії, математичній фізиці.



Арнольд Зоммерфельд

Починаючи з 1915 року, Зоммерфельд досить успішно розвивав борівську теорію, використовуючи замість кругових орбіт для електронів в атомі еліптичні кеплерівські орбіти. Тому замість єдиної квантової умови Бора (квантування лише моменту імпульсу) Зоммерфельд постулював, що «фазовий інтеграл» для кожної узагальненої координати q_k та узагальненого імпульсу p_k дорівнює цілому числу n_k величин сталої Планка:

$$\oint p_k dq_k = n_k h.$$

Спочатку Зоммерфельд записав для 2-х полярних координат — радіуса r та кута ϕ — задачу про рух електрона по нерухомому в просторі еліпсі. Цим координатам, куту й радіусові-векторові, відповідали два квантові числа: радіальне k й азимутальне l . Умови квантування для електрона з масою m_0 при цьому записувалися так:

$$\oint p_r dr = kh, \quad \oint p_\phi d\phi = mh,$$

$$p_r = m_0 \dot{r}, \quad p_\phi = L = m_0 r^2 \dot{\phi}.$$

Зоммерфельд показав, що енергія електрона залежить лише від суми радіального й азимутального чисел, яку Зоммерфельд назвав головним квантовим числом $n = k + l$. Головному квантовому числу n відповідає набір азимутальних квантових чисел $l = 1, 2, \dots, n$.

Кожному головному квантовому числу залежно від співвідношення азимутального і радіального чисел відповідає набір різних конфігурацій еліптичних орбіт. Тому головному числу 1 може відповідати тільки азимутальне число 1 і радіальне 0, і єдина колова орбіта. Головному числу 2 відповідає вже як колова орбіта (азимутальне число 2), так і еліптична (азимутальне число 1), і так далі.

Потому Зоммерфельд розглянув атом як систему з трьома степенями вільності, де орбіта електрона нахилена під певним кутом до обраної полярної осі, й показав, що такий кут нахилу може мати лише квантовані значення, а тому проєкція моменту імпульсу L на цю вибрану вісь так само квантується:

$$L_z = m\hbar,$$

причому для кожного значення азимутального квантового числа l число m може набувати всіх цілочислених значень у діапазоні від $-l$ до $+l$. Таке додаткове квантування сам Зоммерфельд назвав «просторовим».

У 1916 р. Зоммерфельд спільно з Петером Дебаєм побудував квантову теорію ефекту Зеємана (розщеплення спектральних ліній у магнітному полі). Адже коли обрану вісь задано напрямком магнітного поля, число m набуває значення магнітного квантового числа. Єдиний енергетичний рівень, що характеризується головним квантовим числом, розщеплюється в магнітному полі на підрівні, між якими можливі переходи. Звісно, що класична теорія Лоренца пояснити цих усіх переходів не могла — адже вона, як пам'ятаємо, передбачала в усіх випадках лише триплет частот коливань.

Арнольд Зоммерфельд був не лише визначним науковцем, але й прекрасним педагогом. Він створив у Мюнхені наукову школу, яку пройшли багато нобелівських лауреатів із фізики: Вольфганг Паулі, Вернер Гайзенберг, Ганс Бете тощо. Він створив багатотомний курс теоретичної фізики, який не втратив свого значення й нині. Зоммерфельд — член багатьох академій наук і наукових товариств.

За часів гітлерівського режиму учений, не будучи євреєм, теж зазнав гонінь від фізиків-нацистів, які прагнули побудувати «арійську фізику». Проте Зоммерфельд пережив і гоніння, і війну, не покидаючи наукової активності, і в глибокій старості загинув в автомобільній катастрофі.

В історії фізики нерідко траплялося, що одну проблему розробляли незалежно один від одного кілька науковців. Це свідчило про актуальність проблеми. Тож серед великої кількості дослідників, які розробляли цю проблему одночасно, найбільших успіхів у побудові теорії атомних спектрів досяг Зоммерфельд. Ці дослідження стали ядром його майбутньої знаменитої книги «Будова атома й спектри». Робота складалася з трьох частин: теорія серії Бальмера; тонка структура водневих і воднеподібних атомів; теорія рентгенівських спектрів.

У першій частині Зоммерфельд показує, що теорію Бора може суттєво доповнити введенням неколових орбіт. Потім Зоммерфельд формулює загальний принцип теорії спектральних серій: «Стаціонарні орбіти електронів в атомі (й надалі — в молекулі) не утворюють континууму, а являють собою певну сітчасту конструкцію. Фазовий простір, як безліч усіх мислимих, зокрема й нестаціонарних станів, пронизаний петлеподібними фазовими кривими стаціонарних орбіт. Розміри петель визначаються планківською сталою h ».

Зоммерфельд обґрунтував, що відмінність між оптичними (серія Бальмера) й рентгенівськими спектрами полягає в тому, що оптичні спектри збуджуються периферичними електронами атома, що не належать до внутрішньої електронної хмари, тоді як Х-спектри випромінюються всередині цієї хмари. І оптичні, й рентгенівські спектри будуть тим більш воднеподібними, чим далі від внутрішньої електронної хмари розташовано

місце їхнього збудження. Тому у видимих спектрах простота серіального закону зберігається тим краще, чим вищий серіальний номер.

Нарешті, Зоммерфельд із учнями з'ясував ще одну важливу обставину. Попарно комбінуючи всі стаціонарні стани атома, характеризовані певними наборами квантових чисел, він отримав частоти всіх можливих переходів. Зіставляючи їх із дослідними даними, він переконався: всі експериментальні значення добре описуються теорією. Проте не всі передбачені теорією лінії виявляються в експерименті. Аналіз цієї обставини дозволив установити «правило відбору»: експериментально реалізуються лише ті переходи, де азимутальне квантове число збільшується (або зменшується) на одиницю. Однак фізичної причини цього теорія Бора–Зоммерфельда не пояснювала.



Учасники Першого Сольвеївського конгресу (1911): Зоммерфельд стоїть четвертий зліва

Таким чином, Арнольд Зоммерфельд розвинув і вдосконалив теорію атома Бора та поширив її на всі воднеподібні атоми. Проте ця модель все-таки відмовлялася на чисельному рівні працювати для багатоелектронних атомів. Не пояснювала вона й імовірностей різних переходів, а також того, чому одні з них реалізуються на досліді, а інші — ні. Потрібен був черговий прорив у квантовій механіці, щоб показати: нові квантові числа (головне, азимутальне, магнітне), що їх запровадив Зоммерфельд, а також установлені правила відбору для квантових переходів є логічними наслідками послідовного розв'язання рівняння Шредінгера для електрона в атомі.

Луї де Бройль (1892–1987)

Луї де Бройль народився на півночі Франції. Він був нащадком старовинного герцогського роду. Його далекий предок у XVII столітті перейшов на службу до французького короля з Італії. Ми вже зазначали, що саме в родовому маєтку де Бройлів народився Огюстен Жан Френель —

основоположник хвильової оптики. Він був онуком управителя маєтку де Бройлів.

У родині де Бройлів було багато знаменитих людей — міністри, маршали, парламентарі, але фізики — Луї та його старший брат Моріс (1875-1960) — з'явилися тільки в ХХ столітті. Повне ім'я Луї де Бройля було Луї-Віктор-П'єр-Раймон, сьомий герцог Брольї (шостим був Моріс, до його смерті Луї залишався «просто» князем Священної Римської імперії). Під літературними текстами він часом підписувався «Принц Луї де Бройль» — на цей титул він мав цілковите право. Але світове визнання братам де Бройлям — герцогу й князю — принесли досягнення у фізичних дослідженнях.



Луї де Бройль

Луї та Моріс ішли в науці абсолютно різними шляхами. Моріс був на 17 років старший за Луї й займався фізикою професійно. Він працював у визначного французького фізика, творця теорії діамagnetизму й парамагнетизму Поля Ланжевена, керував лабораторією з дослідження властивостей рентгенівських променів. Хвильову природу Х-променів було до кінця досліджено тільки 1912 року, коли німецький фізик Макс фон Лауе (1879-1960) вивчив їхню дифракцію в кристалах. Адже Х-випромінювання таке короткохвильове, що дифракційною ґраткою для нього може служити кристалічна ґратка речовини.

Моріс де Бройль як співробітник Ланжевена був ученим секретарем Сольвеївського конгресу фізиків. Він опрацьовував і готував до друку наукові праці конгресу. При його роботі був присутній молодший брат Моріса — Луї де Бройль.

Луї закінчив ліцей у Парижі, а потім отримав ступінь бакалавра історії в Паризькому університеті — Сорбонні. Потім він виявив у собі цікавість та

схильність до точних наук і відмовився від кар'єри історика й палеонтолога; у тій-таки Сорбонні він згодом отримав ступінь бакалавра точних наук.

Після служби в армії в роки Першої світової війни радистом і сапером Луї де Бройль працював у лабораторії брата, де займався експериментальним вивченням найбільш високочастотних випромінювань, які надавалися тільки до спектроскопічного дослідження й для яких проблема вибору між корпускулярним і хвильовим трактуваннями оптичних явищ стояла особливо гостро.

1923 року з'явилися перші роботи Луї де Бройля. У статті «Хвилі і кванти» він висловив революційну ідею: стаціонарними є ті орбіти в атомі Бора-Зоммерфельда, на яких укладається ціле число довжин певної хвилі, пов'язаної з електроном, що рівномірно обертається. А в 1924-му він захистив свою докторську дисертацію на тему: «Дослідження в галузі квантової теорії», в якій спробував перекинути місток між протилежними підходами: хвильовим і корпускулярним. Науковий керівник Ланжевен так писав про цю дисертацію Джозефу Джону Томсону: «Ідеї дисертанта — очевидна маячня, але розвинуто їх із такою вишуканістю й блиском, що я прийняв дисертацію до захисту».

Де Бройль розширив ідею Айнштайна про подвійну природу світла на речовину й передбачив, що потік матеріальних частинок повинен мати й хвильові властивості, однозначно пов'язані з масою та енергією. Інакше кажучи, рух частинки де Бройль зіставив із поширенням хвилі. Проте коли йдеться про частинки зі значною масою, з якими має справу класична механіка, цілком переважають корпускулярні властивості. А хвильові властивості є визначальними для частинок, розміри яких наближені до атомних.

Де Бройль спершу відступив був від глибокого революційного змісту своєї теорії й спробував зберегти за допомогою різних гіпотез традиційну детерміністську інтерпретацію класичної фізики. Проте наразився на величезні математичні труднощі й вимушений був погодитися з *імовірнісною інтерпретацією*, в якій класична механіка ставала просто частковим випадком загальнішої хвильової механіки.

Експериментальне підтвердження теорії де Бройля отримали чотири роки потому американські фізики, котрі виявили, що атомні частинки (електрони й протони) завдяки своїм хвильовим властивостям можуть, подібно до світла й Х-променів, зазнавати дифракції.



Незалежно від цих американських науковців — Клінтона Девіссона (1881–1958) й Лестера Джермера (1896–1971), — експериментально підтвердив хвильові властивості електронів і Джордж Паджет Томсон (1892–1975) — син знаменитого Джозефа Джона Томсона, котрий відкрив електрон. За ці роботи Девіссону й Томсону присудили Нобелівську премію з фізики 1937 року. Пізніше ідея де Бройля та його теорія отримали практичне застосування в розробці магнітних лінз, що служили основою електронного мікроскопа.

Лауреат Нобелівської премії в галузі фізики 1929 року Луї де Бройль того-таки року отримав від Французької академії наук щойно засновану медаль Анрі Пуанкаре.

З 1926 року він багато займався питаннями освіти. Де Бройль прочитав цикли лекцій у Сорбонні й Гамбурзькому університеті й отримав кафедру теоретичної фізики в Інституті імені Анрі Пуанкаре, де організував центр вивчення новітньої теоретичної фізики та відділ досліджень у галузі прикладної механіки. Цікавість до практичного застосування результатів теорії відображено в його останніх роботах, присвячених прискорювачам заряджених частинок, хвилеводам, атомній енергії й кібернетиці.

Луї де Бройль спільно зі своїм братом Морісом опублікував важливі наукові роботи з фізики атомних частинок та оптики. У своїх лекціях і популярних книгах він обговорює філософські аспекти наукових проблем, що виникають у нових фізичних теоріях. У виданій уперше 1936 року книзі «Революція у фізиці. Нова фізика й кванти» де Бройль зумів захопливо розповісти про народження й еволюцію нової квантової теорії, не використавши жодної формули.

Науковця вшанували обранням 1946 року до Французької академії. По війні, протягом якої пішло з життя багато академіків, для цього не могли зібрати передбаченого правилами кворуму в 20 осіб. Але з огляду на унікальність випадку, за нього одноголосно проголосували всі 17 наявних на зборах академіків, і серед них — його старший брат Моріс. Луї де Бройль був почесним президентом Французької асоціації письменників-науковців, і 1952 року він отримав першу премію за високу якість наукових робіт.

Коли 1945 року французький уряд утворив Вищу Комісію з атомної енергії, Луї де Бройля призначили її технічним радником. А в 1949 р. саме він висловив пропозицію про створення Європейського центру ядерних досліджень — ЦЕРНу, яку й було реалізовано через 5 років. У 2014 р. асоційованим членом ЦЕРНу стала й Україна, — наші учені й інженери зробили, зокрема й вагомий внесок у відкриття на Великому адронному колайдері бозону Гігса.

Наукові роботи Луї де Бройля — величезний крок у розвитку квантової фізики. Він не лише висунув ідею хвильових властивостей речовини, але ще й поєднав цю ідею зі спеціальною теорією відносності. В основу своєї роботи де Бройль поклав два принципи: принцип найменшої дії Гамільтона з

теоретичної механіки та принцип Ферма з оптики. Перший стверджує, що вільна частинка рухається між двома точками по найкоротшому шляху так, що дія вздовж цього шляху є мінімальною. Другий принцип, що його встановив в оптиці ще в XVII столітті французький математик П'єр Ферма, стверджує, що світловий промінь проходить між двома точками по найкоротшому оптичному шляху, витрачаючи на це мінімальний час. Це і є так звана оптико-механічна аналогія.

Розгляньмо хвилі де Бройля математичною мовою, що відображає їхню фізичну суть.

Енергія фотона на основі формули Планка $E = h\nu$, а на основі формули Айнштейна — $E = mc^2$. Оскільки $c = \lambda\nu$, $p = mc$, то $\lambda = \frac{h}{p}$.

Блискуча ідея де Бройля полягає в наступному: якщо світлові хвилі мають також корпускулярні властивості, то частинки (електрони) повинні виявляти також і хвильові властивості!

А тому частинці-електрону за аналогією можна приписати довжину хвилі $\lambda = \frac{h}{mv}$, де m — маса електрона, v — його швидкість.

У своїх перших роботах де Бройль розглядав проблему на прикладі електрона, але отримана формула працює для будь-яких матеріальних тіл, і довжина хвилі де Бройля тим менша, чим більша маса тіла. Звідси випливає, що для макротіл довжина хвилі значно менша від розмірів тіла, тому їхні хвильові властивості практично не виявляються.

Треба зазначити: якщо за класичного підходу хвиля є станом руху неперервного середовища, то за квантового розгляду частинки рухаються й розподіляються в інтерференційній картині так, ніби вони належать до певної хвилі. Як писав де Бройль, «нова механіка не дозволяє приписувати корпускулі місце розташування в просторі, яке вона посідає з повною вірогідністю. Вона лише стверджує, що корпускула з необхідністю перебуває в тій області простору, яка зайнята хвилею. Чим більша амплітуда хвилі в даній точці, тим більше шансів виявити частинку в цій точці». З цього виходить, що, власне, Луї де Бройль запровадив поняття *хвилі ймовірності*.

У техніці давно навчилися «поводитися» з електронними хвилями. Те, що швидкі електрони можуть легко відхилятися під дією електричних і магнітних полів, стало перевіреним науковим фактом. Використовуючи магнітні котушки спеціальної форми й відповідно розташовуючи їх, ми можемо фокусувати й спрямовувати електронні пучки абсолютно так само, як ми це робимо зі світловими пучками в оптичних системах, що складаються з лінз. Це відкриття привело до створення в 1931 р. німецькими інженерами Ернестом Рускою і Максом Кноллем електронного мікроскопа.



Сучасний електронний мікроскоп

Визначальним критерієм для мікроскопа є його роздільна здатність. Найменша доступна для виявлення відстань між двома точками становить величину порядку половини довжини хвилі використовуваного для освітлення світла. Довжина хвилі де Бройля для електрона залежить від його швидкості, а тим самим — від напруги, яка прискорює електрони. За напруги 15 кВ довжина хвилі сягає 0,01 нм (10^{-11} м), отже, роздільна здатність зростає порівняно зі здатністю оптичного мікроскопа на багато порядків. Серійні електронні мікроскопи гарантують розрізнення точок, розташованих на відстані 0,5 нм одна від одної, що відповідає збільшенню в 500000 разів. Тому Ернест Руска був вшанований за свій винахід Нобелівською премією 1986 р. — через 55 років після здійснення самого винаходу. Його співавтор Макс Кноль до цього не дожив і премії тому не отримав.

І нарешті, «послухаймо» самого Луї де Бройля, який у вступі до вже згаданої книги «Революція у фізиці» пише: «Щодо квантової теорії, то про неї, я гадаю, читач має ще туманніше уявлення. Правда, це можна вибачити, адже кванти — досить загадкова річ. Що ж до мене, то я почав займатися квантами, коли мені було близько двадцяти років, і я вивчав їх протягом чверті століття. Та все ж я мушу чесно зізнатися, що — хоча за весь цей час я й досяг дещо глибшого розуміння деяких сторін цього питання, — я не можу ще з цілковитою певністю сказати, що зачалося під маскою, яка приховує справжнє обличчя квантів. Проте мені здається, що, попри всю важливість і значущість прогресу, який відбувся у фізиці за останні століття, науковці не зуміли глибоко зрозуміти справжню природу явищ, поки вони нічого не знали про існування квантів. Бо без квантів не можна було б уявити собі ні світла, ні матерії».

І далі: «Сказаного тут уже досить, щоб показати читачеві, яка глибока й цікава квантова теорія. Вона не лише покликала до життя атомну фізику — найцікавішу й найзахопливішу галузь науки, але також, безперечно,

розширила наші уявлення про світ і зумовила появу багатьох нових ідей, які залишать, без сумніву, глибокий слід в історії людської думки. Саме тому квантова фізика цікавить не лише фахівців — вона варта уваги кожної культурної людини».

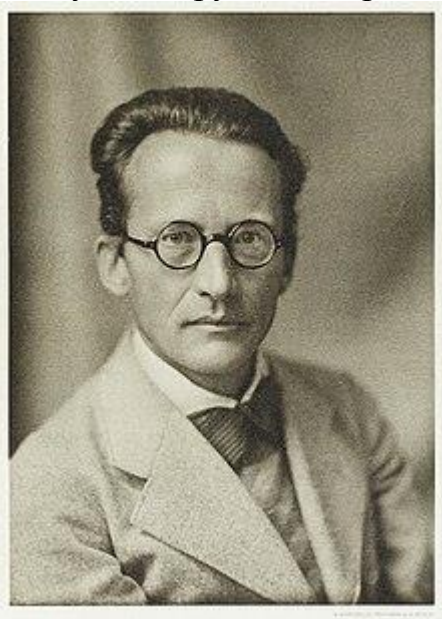
Луї де Бройль дожив до 95 років (при цьому ніколи в житті не був одружений). За роки своєї активної діяльності він написав 43 книги, останню з них — коли йому було вже 90. Він є автором понад 200 наукових статей із квантової фізики, опублікованих у різний час і в різних журналах.

Дебройлівською ідеєю про загальність корпускулярно-хвильового дуалізму скористався Ервін Шредінгер, створюючи свою хвильову механіку.

Ервін Шредінгер (1887–1981)

Майбутній австрійський фізик і лауреат Нобелівської премії народився в родині фабриканта. Його батько був власником фабрики з виробництва церати, а водночас захоплювався живописом і цікавився ботанікою. Ервін був єдиною дитиною в сім'ї і початкову освіту здобував удома. Про свого батька Шредінгер згодом згадував як про «друга, вчителя й невтомного співрозмовника». В Академічній гімназії Ервін був найкращим учнем із грецької мови, латини, класичної літератури, математики й фізики. У гімназійні роки в Ервіна виникла й зміцніла любов до театру.

У Віденському університеті на Шредінгера справили глибоке й незабутнє враження лекції з фізики Франца Екснера (1849–1926). 1910 року Шредінгер захистив докторську дисертацію (експериментальну, присвячену дослідженню впливу вологості повітря на ізоляційні властивості різних матеріалів), а 1913 року разом із Кольраушем отримав премію Імператорської академії наук за експериментальні дослідження радію, який тоді щойно відкривало було подружжя Кюрі.



Ервін Шредінгер

Під час Першої світової війни Шредінгер служив офіцером-артилеристом у гарнізоні, розташованому в горах, досить далеко від передової австрійсько-італійського фронту. У вільний час він вивчав загальну теорію відносності Айнштайна. Після війни Ервін Шредінгер повернувся в Другий фізичний інститут у Відні, де продовжив свої дослідження з загальної теорії відносності, статистичної механіки й дифракції Х-випромінювання.

Цікавлячись широким колом фізичних задач, Шредінгер стежив і за розвитком квантової теорії, але конкретно не займався цими проблемами аж до 1925 року. Цього року Шредінгер ознайомився зі сприятливим відгуком Айнштайна з приводу хвильової теорії матерії Луї де Бройля.

Під враженням коментарів Айнштайна з приводу ідей де Бройля Шредінгер спробував застосувати хвильовий опис електронів до побудови послідовної квантової теорії, не пов'язаної з неадекватною (як писав Шредінгер) моделлю атома Бора. Власне, він спробував зблизити квантову теорію з класичною фізикою, яка накопичила чимало прикладів математичного опису хвиль.

Перша спроба, зроблена 1925 року, виявилася невдалою. У теорії Шредінгера швидкості електронів були близькими до швидкості світла, і це вимагало включення в теорію релятивістських ефектів. Однією з причин провалу було те, що Шредінгер не врахував наявності специфічної квантової властивості електрона, а саме — його спіну, про який на той час знали мало.

1926 року Шредінгер робить нову спробу, заздалегідь вибираючи швидкості електронів — достатньо малі для того, щоб необхідність застосування спеціальної теорії відносності відпала сама собою. За таких умов Шредінгеру вдалося скласти хвильове рівняння, яке дозволяло здійснювати математичний опис матерії на основі хвильової функції.

Учений діяв так: спочатку він записав співвідношення, яке для певної задачі в класичній механіці давало б енергію як функцію координат частинки й компонентів її імпульсу. Для матеріальної частинки з масою m , яка рухається в потенційному полі $U(x,y,z)$, цей вираз має простий і зрозумілий вигляд:

$$H(p_x, p_y, p_z, x, y, z) = \frac{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2}{2m} + U(x, y, z).$$

Далі в цьому виразі, який у механіці називається «гамільтоніан» (на честь визначного ірландського фізика й математика ХІХ ст. Вільяма Ровена Гамільтона), кожна компонента імпульсу в декартовій системі координат замінювалася на символ похідної за відповідною координатою, помножений на константу, пропорційну сталій Планка. Таким чином, гамільтоніан було перетворено на певний оператор, який дістав назву «оператор Гамільтона» $\hat{H}$. Тепер достатньо було застосувати цей оператор до хвильової функції системи (її зазвичай позначають грецькою літерою Ψ) і порівняти

отриманий результат до похідної хвильової функції за часом, помноженої на ту ж таки сталу Планка:

$$\hat{H}\Psi(x, y, z, t) = i\hbar \frac{\partial \Psi(x, y, z, t)}{\partial t};$$

$$\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) + U(x, y, z, t).$$

Тут m — маса частинки, U — силове поле, в якому ця частинка рухається. Якщо це поле стаціонарне й не залежить від часу, змінні в хвильовій функції можна розділити:

$$\Psi(x, y, z, t) = \psi(x, y, z) \exp(-i \frac{E}{\hbar} t).$$

Тут E — повна енергія частинки, а експонента є наслідком хвильової природи частинки, якій відповідає циклічна частота коливання $E/\hbar$. Підстановка цього виразу в записане вище хвильове рівняння дає:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \psi(x, y, z) + U(x, y, z) \psi(x, y, z) = E \psi(x, y, z).$$

Це — так зване стаціонарне рівняння Шредінгера, що є диференціальним рівнянням другого порядку. Його можна розв'язати, якщо знати вигляд потенціальної енергії U . Для найпростіших випадків (атом водню, гармонічний осцилятор тощо) цей розв'язок задачі на власні функції та власні значення можна отримати в явному аналітичному вигляді. Для складніших випадків (атом гелію, наприклад) треба застосовувати наближені, або чисельні методи розв'язку (це стало простішим лишень у 1950-ті роки, з появою перших комп'ютерів, а до того сумлінні науковці рахували такі задачі роками на механічних арифмометрах). Для складних об'єктів (наприклад, для металу, кожен кубічний сантиметр якого містить 10^{23} йонів і стільки ж електронів провідності) вигляд потенційної енергії треба апроксимувати різними моделями — справжня картина надто складна, і жоден комп'ютер тут «напрямую» не зарадить.

Роблячи своє відкриття, Шредінгер пам'ятав: Гамільтон у 1834 році довів, що формальна аналогія між траєкторією руху частинок і траєкторією світлового променя має строгий математичний зміст. У фізиці поняття закону руху виражається за допомогою формул — рівнянь руху. Для хвиль і частинок вони зовсім різні. Але в оптиці можна визначити траєкторію світлового променя, знаючи переміщення фронту світлової хвилі. Гамільтон довів, що в механіці можна зробити дещо протилежне: замінити траєкторію руху частинки поширенням фронту деякої хвилі. Або ще точніше, рівняння руху механіки можна записати в такому вигляді, що вони цілком збігатимуться з рівняннями геометричної оптики, що описують поширення променя світла без урахування його хвильових властивостей. Тим самим Гамільтон довів оптико-механічну аналогію: рух частинок по траєкторії можна уявити у вигляді поширення променя світла без урахування його хвильових властивостей.

Шредінгер пішов далі й припустив: оптико-механічна аналогія залишається справедливою також і у випадку хвильової оптики. Це означає, що завжди будь-який рух частинок можна уподібнити до поширення хвиль. Як і будь-яке інше глибоке відкриття, гіпотеза Шредінгера нізвідки логічно не випливала. Але, як усяке справжнє відкриття, вона мала логічні наслідки. Шредінгер розумів: якою б не була природа електронних хвиль, їхній рух повинен підпорядковуватися хвильовому рівнянню.

Для простих випадків розв'язок хвильового рівняння Шредінгера перебував у згоді з експериментальними даними, і це справило глибокий вплив на подальший розвиток квантової теорії. Наприклад, стаціонарні орбіти, що їх «вгадав» Бор, є точними розв'язками наведеного вище стаціонарного рівняння Шредінгера для руху електрона в полі кулонівського потенціалу. Те, що вражало своєю загадковістю й певною штучністю, виявилось частковим і цілком зрозумілим випадком великої стрункої теорії!

Робота Шредінгера мала великий резонанс. Ось як описував ситуацію Вернер Гайзенберг: «1926-й рік почався з сенсації. Спочатку з чуток, а потім у вигляді коректурних аркушів ми отримали відомості про першу роботу Шредінгера з хвильової механіки, де завдання визначення енергетичних рівнів в атомі розв'язувалося просто як проблема відшукування власних значень для тривимірних матеріальних хвиль. Фізична картина, з якої виходив Шредінгер, належала Луї де Бройлю й виглядала абсолютно інакше, ніж атомна модель Бора, яку ми взяли за основу. Але результати виходили ті самі, й важливі формальні аналогії були наявні. Поняття електронної орбіти у Шредінгера не було, як і не було його в геттінгенській квантовій механіці, і в обох теоріях визначення енергетичних рівнів стаціонарних станів зводилися до проблеми власних значень у лінійній алгебрі. Підозра, що обидві теорії математично еквівалентні, тобто допускають взаємне перетворення, виникла дуже скоро і обговорювалася повсюдно».

Сам Шредінгер критично висловлювався про матричну теорію Гайзенберга, сформульовану на кілька місяців раніше (про неї йтиметься в наступному розділі): «Звичайно, я знав про його теорії, однак мене відлякували, якщо не сказати — відштовхували, методи трансцендентної алгебри, що здавалися мені дуже важкими, і відсутність будь-якої наочності». Все ж, Шредінгер був переконаний в еквівалентності формалізмів хвильової й матричної механіки. Доказ цієї еквівалентності він подав у статті «Про стосунок квантової механіки Гайзенберга–Борна–Йордана до моєї», отриманої редакцією журналу «Annalen der Physik» 18 березня 1926 року. Він формально довів, що будь-яке рівняння хвильової механіки можна подати в матричній формі і, навпаки, від заданих матриць можна перейти до хвильових функцій.

Однак з фізичною інтерпретацією хвильової функції в рівнянні Шредінгера мали місце принципові розбіжності, які чітко сформулював той-таки Вернер Гайзенберг: «Шредінгер розумів тоді свої хвилі як справжні тривимірні матеріальні хвилі — порівнянні, скажімо, з електромагнітними хвилями, — і мав намір повністю вигнати з квантової теорії риси

переривчастості, особливо так звані квантові переходи. Я протестував проти цього на обговоренні доповіді, оскільки, як я розумів, ідучи таким шляхом, неможливо пояснити навіть закон теплового випромінювання Планка. Але до згоди тоді дійти не вдалося, й інші фізики переважно сподівалися разом зі Шредінгером, що квантових переходів можна якось уникнути. Потім, у вересні, в Копенгагені відбулася тривала дискусія між Бором і Шредінгером, що розтяглася, наскільки я пам'ятаю, більше ніж на тиждень; я брав участь у ній так довго, як було можливо. Суперечки були пристрасними, й розбіжності доходили до взаємних докорів. Врешті-решт ми, копенгагенці, переконалися, що шредінгерівська інтерпретація неспроможна і що квантові переходи є суттєвою частиною внутрішньоатомних процесів».

Шредінгер запропонував найголовніше рівняння квантової механіки — і разом із тим сподівався, що частинки логічно постануть як хвильові пакети, сформовані з його розв'язків, і помилково вірив, що його рівняння, нарешті, покінчать із квантовими стрибками. Ось його вигук під час дискусії: «Якщо ніяк не можна обійтися без цих проклятих квантових стрибків, то я шкодую, що зв'язався з атомною теорією!».

Але повернення до фізики безперервного, звичайно, не сталося. Квантові значення різних величин природним чином виникали в результаті розв'язання відповідних рівнянь Шредінгера. І знов скрізь маячила «мітка» квантових явищ — стала Планка h . «Прокляті квантові стрибки» з їхнім неминучим імовірнісним трактуванням міцно утвердилися в квантовій фізиці. Навіть більше — сама хвильова функція Шредінгера отримала ймовірнісне тлумачення.

Стан класичної частинки характеризується точними значеннями координат (x, y, z) та імпульсів (p_x, p_y, p_z) одночасно.

Натомість стан квантової частинки характеризується хвильовою функцією Ψ . Під час руху квантової частинки змінюється область її локалізації, змінюється ймовірність можливих значень її імпульсу; до того ж, за зміни стану змінюється й хвильова функція $\Psi(x, y, z, t)$. Визначити новий стан квантової частинки — означає визначити, як змінюється її хвильова функція, тобто — знайти нову хвильову функцію, якщо відоме її початкове значення й поля, що діють на квантову частинку. Основний закон квантової механіки — закон зміни стану, тобто закон зміни хвильової функції. У математичній формі цей закон — рівняння Шредінгера.

Закон, що описує просторово-часову еволюцію квантової частинки, — рівняння Шредінгера, як і другий закон Ньютона, неможливо вивести. Це початкові фундаментальні закони, що є узагальненням великої кількості дослідних даних.

Імовірнісну інтерпретацію хвильової функції Шредінгера запропонував 1926 року німецький фізик-теоретик Макс Борн (1882–1970), про якого ми докладно розповімо дещо пізніше. Він же трохи згодом розв'язав і ще одну важливу задачу — за допомоги розв'язків рівняння Шредінгера дав алгоритм

обчислення ймовірності квантових переходів між різними стаціонарними станами.

Проте ця імовірнісна інтерпретація довго наражалася на нерозуміння та неприйняття навіть із боку дуже відомих фізиків. Саме в листі до Макса Борна 1926 року Альберт Айнштайн написав знамениті слова: «Ця теорія багато дає, але до таємниці Старого вона нас не наближає. У кожному разі, я переконаний, що Він не підкидає кості». Пізніше фразу «Бог не грає в кості зі Всесвітом!» Айнштайн публічно повторив на 5-му Сольвеївському конгресі восени 1927-го. Фактично до кінця життя геніальний творець теорії відносності вірив в існування певних «прихованих параметрів», невідомих наразі теоретикам, які б перетворили випадковість на детермінованість.

А сам Ервін Шредінгер проілюстрував результат, до якого приводить імовірнісна інтерпретація хвильової функції, парадоксом про живо-мертвого kota. Нехай у скриньці з непроникними для світла стінками сидить кіт. У скриньці є отвір, який можна відкрити на час, необхідний для пропускання лише одного фотона. На шляху фотона є дзеркало, яке з імовірністю $\frac{1}{2}$ відбиває фотон і з такою ж імовірністю пропускає його. Якщо фотон проходить крізь дзеркало, то він задіює певний пристрій, що вбиває kota. Якщо фотон відбивається — нічого не відбувається.

Тому хвильова функція, яка описуватиме kota, виявиться суперпозицією двох станів: живого й мертвого. Описаний такою функцією кіт буде недетермінованим — живим і мертвим водночас! Цей парадокс свідчить про атмосферу інтелектуальних пошуків, яка панувала у фізиці в середині 1920-х. (Розв'язок його полягає в тому, що недетермінованість зникне відразу після того, як ми відкриємо скриньку, щоб подивитися: як же там той кіт?)

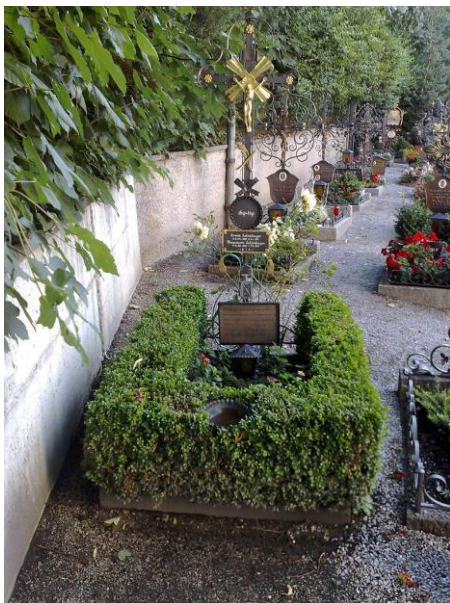
1927 року, коли Макс фон Планк за віком мав піти у відставку з посади завідувача кафедри, Шредінгер посів його місце. Це свідчило про дуже високу оцінку ролі Шредінгера у створенні квантової механіки. Після Берліна вчений працював в Оксфорді й австрійському Граці, звідки змушений був тікати, коли Гітлер у 1938 р. захопив Австрію. Спершу він знайшов притулок у бельгійському Генті, але війна наздогнала його й там. І лише завдяки заступництву ірландського прем'єр-міністра Еймона де Валери англієць пропустив його до Дубліна. До рідної країни Шредінгер повернувся тільки в 1956 р., коли з неї було виведено окупаційні війська союзників. Президент Австрії створив для нього спеціальну посаду професора теоретичної фізики Віденського університету, яку Шредінгер обіймав аж до смерті.

Особа Шредінгера цікава в багатьох відношеннях. Крім фізики, він професійно займався філософією. Він — автор книг про грецьку філософію, а також книги «Що таке життя», в якій детально й ґрунтовно досліджено генетичний код.

Ервін Шредінгер був широко ерудованою людиною, знав, окрім рідної німецької, ще шість мов (старогрецьку, латину, англійську, французьку,

іспанську та італійську), цікавився мистецтвом, сам займався ліпленням. Учений опублікував том своїх віршів.

Його шлюб з Аннемарі Бертель, з якою вони побралися в 1913 р., протривав аж до смерті вченого, хоч і дружина, і чоловік не крилися зі своїми численними захопленнями на стороні. У 1925 році Шредінгер працював над хвильовою механікою, перебуваючи на канікулах із зовсім юною коханкою, тому в нього було кілька дітей від різних жінок (з дружиною дітей вони не мали). Неприйняття навколишніми такого способу життя призвело до того, що Шредінгер повинен був дочасно залишити роботу в пуританському Оксфорді.



Могила Ервіна та Аннемарі Шредінгерів

Окрім Нобелівської премії з фізики за 1933 рік, Шредінгера було вшановано багатьма нагородами й почесними. Він був почесним доктором університетів Гента, Дубліна, Единбурга, членом Папської академії наук, Лондонського королівського товариства, Берлінської академії наук, Академії наук СРСР, Дублінської академії й Мадридської академії наук. На скромному пам'ятнику над могилою Шредінгера та його дружини Аннемарі вгорі записано рівняння: $i\hbar\dot{\Psi} = H\Psi$.

Вернер Гайзенберг (1901–1976)

Майбутній учений народився тоді, коли ідеї квантування виповнився рівно рік. Це означає, що Вернер Гайзенберг був одним із наймолодших учених — творців квантової теорії. Він — автор відкриття одного з надзвичайно важливих принципів науки — *принципу невизначеності*.

Родина Гайзенбергів жила в німецькому місті Вюрцбург. Його батько завдяки успішній науковій діяльності зумів піднятися до рівня представників

вищого класу. 1910 року, коли Вернеру було 9, батько став професором візантійської філософії Мюнхенського університету.



Вернер Гайзенберг у час створення принципу невизначеності (1927)

Ще коли Вернер тільки народився, родина вирішила, що він теж мусить досягти високого соціального статусу завдяки освіті. Десятирічного Вернера віддали в престижну гімназію, а 1920 року він вступив у Мюнхенський університет. Вчився він тут нерівно: блискуче встигав з теоретичних дисциплін, написав дисертацію на запропоновану Зоммерфельдом тему з гідродинаміки (професор уважав, що студент матиме так менше клопоту під час захисту), але завалив випускний іспит з експериментальної фізики (екзаменатором був нобелівський лауреат Вільгельм Він — автор двох законів, що описують випромінювання АЧТ). Але хист студента до теорії оцінили і після закінчення університету Гайзенберга на прохання Зоммерфельда скерували працювати асистентом Макса Борна в Геттінгенському університеті.

Макс Борн був переконаний, що атомний мікросвіт так відрізняється від макросвіту, описаного в класичній фізиці, що вченим не слід користуватися у вивченні атома звичними поняттями про рух і час, швидкість і певне розташування частинок у просторі. Основа мікросвіту — кванти, які не слід намагатися зрозуміти або пояснити з наочних позицій класичної фізики. Ця радикальна філософія, специфічний науковий світогляд знайшли зацікавлений, гарячий відгук у душі молодого асистента Вернера Гайзенберга.

Атомна фізика в той час нагадувала безладне нагромадження гіпотез, і це не могло не дратувати фізиків, а надто теоретиків. Виходити тільки з припущень, що є атомом і електроном, для по-німецьки педантичного Гайзенберга було з наукової точки зору некоректно.

У нього з'явилася ідея відкинути всі припущення й створити теорію, засновану тільки на відомих експериментальних даних про атом. А що

відомо? Атом випромінює світло. Світло має частоту й характеризується певною інтенсивністю.

Відповідно до теорії Бора, атом випромінює світло, переходячи з одного енергетичного стану в інший. А за теорією Айнштейна, інтенсивність світла певної частоти залежить від кількості фотонів. Звідси — ідея спробувати пов'язати інтенсивність випромінювання з імовірністю атомних переходів із одного енергетичного стану в інший.

Квантові коливання електронів, за задумом Гайзенберга, необхідно представити тільки за допомогою чистих математичних співвідношень, що підтверджуються дослідами. Виникла проблема розробки математичного апарату. Перебуваючи на відпочинку на острові Гельголанд у Північному морі, Гайзенберг зупинився на матричному численні. Цей вибір виявився дуже вдалим, і досить швидко (але це не значить — легко й просто) теорію було створено, — за допомоги молодого теоретика Паскуаля Йордана (1902–1980), який добре знав математичний апарат матричного числення.

Матрична механіка Гайзенберга заклала основи науки про рух мікрочастинок і згодом стала називатися квантовою механікою. Квантова механіка об'єднала матричну механіку Гайзенберга та хвильову механіку Шредінгера. Але це сталося не відразу, події розвивалися драматично, хоча й зі сприятливою для науки розв'язкою.

У матричній механіці Гайзенберга взагалі нічого не сказано ні про який рух електрона в атомі. Матриці-таблиці описують просто зміни стану системи. У такому разі самі собою відпадають спірні питання про рух електрона навколо ядра, про його випромінювання, а отже — про стійкість атома. Замість орбіти в матричній механіці Гайзенберга електрон характеризується набором окремих чисел.

Наукові ідеї Гайзенберга підхопили й інші фізики, їх підтримав Нільс Бор, за висловом якого матрична механіка набула «вигляду, який за своєю логічною завершеністю й загальністю міг конкурувати з класичною механікою».

У вересні 1926 року між Бором і Шредінгером розгорілася запекла дискусія, в результаті якої було визнано, що жодну з наявних інтерпретацій (дискретну або безперервну) квантової механіки не можна вважати за цілком прийнятну.

У лютому 1927 року Гайзенберг несподівано дав потрібну інтерпретацію — сформулювавши *принцип невизначеності*.

Згідно з цим принципом, одночасне вимірювання двох так званих *зв'язаних змінних* (наприклад, координати та імпульсу частинки) неминуче приводить до обмеження точності. Чим точніше виміряно положення частинки — тим із меншою точністю можна виміряти її імпульс, і навпаки. У граничному випадку абсолютно точне визначення однієї зі змінних веде до повної втрати вірогідної інформації у вимірюванні іншої.

Ця невизначеність (втрата точності) не є наслідком технічної недосконалості вимірювань або провини експериментатора. Вона є характерною властивістю кожного квантового експерименту й

фундаментальним наслідком рівнянь квантової механіки. Вперше було проголошено, що існують межі наукового пізнання.

З математичного погляду принцип невизначеності став наслідком того, що, у відповідності до законів лінійної алгебри, за множення матриць A і B , взагалі кажучи, має місце співвідношення:

$$AB \neq BA.$$

Оскільки у гайзенбергівській матричній механіці матрицям відповідають не певні спостережувані величини, а саме операції над спостережуваними величинами, то результат логічно залежить від послідовності здійснення цих операцій (на емоційному рівні легко зрозуміти, що ввести наркоз і потім вирвати зуб — це аж ніяк не те саме, що вирвати зуб, а вже потім вколоти знеболювальне!)

У мікросвіті матрицям A і B логічно співвіднести вимірювання координати електрона і його імпульсу. Тоді математичним наслідком співвідношення $AB \neq BA$ є співвідношення для можливих точностей одночасного вимірювання координати й імпульсу:

$$\Delta A \Delta B \geq h!$$

Разом із ідеями таких наукових світил, як Нільс Бор і Макс фон Планк, принцип невизначеності Гайзенберга ввійшов до логічно замкнутої системи «копенгагенської інтерпретації квантової механіки», яка підтвердила свою правильність у численних застосуваннях і від кінця 1920-х уже практично не зазнала змін. Гайзенберг став професором теоретичної фізики Лейпцигського університету. Він став наймолодшим професором у Німеччині — йому було натоді лише 25 років.

Принцип невизначеності Гайзенберга приводить до висновку, що однозначний причинний зв'язок між теперішнім і майбутнім втрачається. На основі законів квантової механіки передбачення мають імовірнісний характер.

Зупинімося тут дещо докладніше. Замислюючись над єдиною фізичною картиною світу, вчені в середині 1920-х переживали виразне почуття незадоволення, пов'язане з корпускулярно-хвильовим дуалізмом, який виявляє себе в мікросвіті. Виникало питання: чому частинки атомних розмірів і макроскопічні тіла мають такі різні властивості?

Чи існує такий загальний закон, за допомогою якого можна здолати глибоку відмінність між макро- й мікросвітом? Такий закон (принцип) справді вивів Вернер Гайзенберг.

Звичайне поняття невизначеності (неточності) ми пов'язуємо з точністю вимірювань. Будь-яке вимірювання обмежене певною точністю. Проте варто наголосити, що в принципі невизначеності Гейзенберга йдеться зовсім не про технічні проблеми точності вимірювань. Співвідношення $\Delta X \cdot \Delta P_x \geq \hbar$ або $\Delta X \cdot \Delta V_x \geq \frac{\hbar}{m}$ (де ΔX — невизначеність координати, ΔP_x — невизначеність імпульсу вздовж цієї координати) стверджує, що невизначеність не вдається усунути навіть у найідеальнішому експерименті.

Спробуємо простежити за ходом дискусій, які точилися з ініціативи Нільса Бора в Копенгагені в 1926–27 рр. щодо того, чому експеримент не може принципово дати більшої точності, ніж дозволяє принцип Гайзенберга. Вважатимемо, що йдеться про розташування частинки в просторі. Щоб дізнатися, де вона перебуває, її треба «освітити». Можливості розрізнення деталей визначаються (обмежуються) довжиною хвилі використовуваного випромінювання. Чим довжина хвилі менша — тим краще.

Але зменшуючи довжину хвилі, ми збільшуємо частоту світла, а отже, й енергію фотона ($E = h\nu$). «Удар», якого зазнає від фотона частинка, позбавляє нас можливості робити висновки про її швидкість до зустрічі з фотоном.

Інший приклад. Ми ставимо на шляху електрона вузьку щілину, електрон пролітає крізь неї й потрапляє на екран. На екрані видно спалах у точці потрапляння електрона. З точністю до ширини щілини встановлено розташування електрона в момент прольоту крізь щілину. Збільшимо точність шляхом зменшення розмірів щілини. Тоді хвильові властивості електрона почнуть позначатися різкіше, й електрон дедалі більше відхилятиметься від прямого шляху. А це означає, що ми дедалі більше втрачатимемо інформацію про компоненту його швидкості в площині щілини.

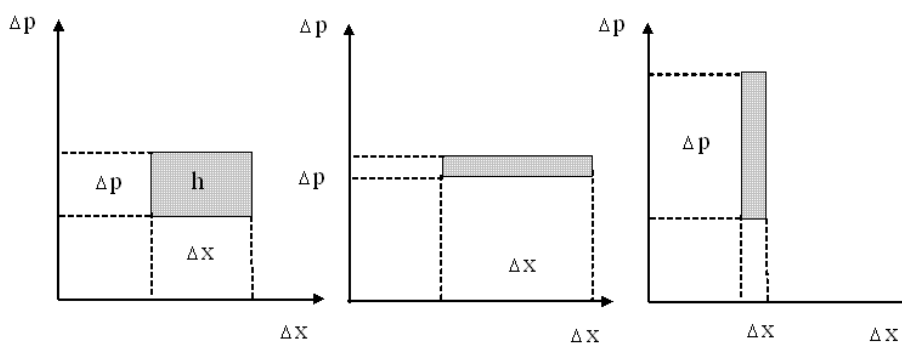
Ще приклад. Припустимо, що йдеться про електрони в атомі. Оскільки розміри атома — порядку 10^{-10} м, то бажано отримати точність розташування електрона в атомі хоча б на порядок меншу — на рівні 10^{-11} м. Оцінимо за допомогою принципу невизначеності втрату інформації про цей електрон.

Для електрона $\frac{h}{m} = 0.0007 \text{ м}^2/\text{с}$, тоді $\Delta X \cdot \Delta V \geq 0.0007 \text{ м}^2/\text{с}$. За $\Delta X = 10^{-11} \text{ м}$ (точність, якої ми прагнемо!) маємо $\Delta V \geq 7 \cdot 10^7 \text{ м/с}$. Тобто, про швидкість електрона нічого певного сказати не можна. Якщо ж усе-таки спробувати визначити швидкість у розумних межах — тоді ми втратимо інформацію про місце, де електрон розташовується. Отже, поняття траєкторії електрона в атомі позбавлене сенсу.

Картина змінюється, якщо ми вивчаємо рух електрона, скажімо, в кінескопі або в іонізаційній камері. Трек електрона зримий, отже — поняття траєкторії має сенс. Товщина треку — близько 0,1 мм, отже, невизначеність у значенні швидкості електрона, який пролітає через камеру зі швидкістю 1 км/с, цілком прийнятна: $\Delta V = 7 \text{ м/с}$, це на понад два порядки менше від самої швидкості.

Неважко досліджувати й поведінку молекули в газі. Така молекула поводить себе як класична частинка, і траєкторія її хаотичного руху має цілком певний сенс.

Графічне зображення принципу невизначеності Гайзенберга має такий вигляд:



Дія принципу невизначеності Гайзенберга: площі заштрихованих прямокутників однакові, оскільки вони виражаються через сталу Планка h

Наукова праця Вернера Гайзенберга здобула широке визнання й забезпечила йому високе становище в суспільстві й у науці. 1932 року йому присуджено Нобелівську премію. Нагадаємо: Шредінгер та Дірак отримали її наступного, 1933 року.

Протягом п'яти років в Інституті Гайзенберга було створено квантову теорію твердокристалічного стану, молекулярної структури, розсіяння випромінювання на ядрах, а також протонно-нейтронну модель ядер. Спільно з іншими теоретиками вчений зробив величезний крок у бік релятивістської квантової теорії поля й заклав основу для розвитку досліджень у галузі фізики високих енергій.

Попри те, що Вернера Гайзенберга по праву вважають одним із найбільших фізиків, ставляться до нього історики науки по-різному, і це обумовлено його поведінкою в ті часи, коли при владі в Німеччині був Гітлер. У 1930-ті вчений теж став об'єктом цькування з боку таких фізиків-нацистів, як Філіпп Ленард чи Йоганн Штарк, які оголосили квантову механіку «єврейською наукою». Але потім ситуація змінилася. Гайзенберг звернувся з проханням про захист до райхсфюрера СС Гайнріха Гімmlера, і той (можливо, і з огляду на те, що його батько вчителював разом із дідом ученого) узяв фізика під свою опіку. Надалі Гайзенберг поведився щодо влади лояльно, посів високі посади в академічній науці й став одним із символів німецької «арійської» культури (хоч до нацистської партії так і не вступив).

Під час Другої світової війни він був директором Інституту фізики кайзера Вільгельма та професором Берлінського університету, очолював основні дослідження з розщеплювання ядер урану, в яких був зацікавлений Третій райх. Тому дуже драматичною і напруженою була зустріч Гайзенберга з Бором в окупованому Копенгагені у вересні 1941 р. — співрозмовники вже не довіряли один одному.

На щастя, для людства, «уранова програма» Райху не мала успіху. Хоч 1940–41 рр. німецькі вчені першими у світі завершили теоретичні дослідження, необхідні для побудови ядерного реактора, пізніше, однак, вони не зуміли реалізувати жоден із п'яти сценаріїв збагачення урану, над якими

велася робота (до реакції поділу придатний рідкісний ізотоп ^{235}U , а в природному урані 99,3% складає дещо важчий ізотоп ^{238}U). Вважають, що винні в тому насамперед нацистські провідники, які через власну інтелектуальну обмеженість не лише не змогли зрозуміти значення того, про що розповідали їм учені рівня Гайзенберга, а й своєю підтримкою «ідеологізованої науки» Ленарда та Штарка та вигнанням учених-євреїв завдали тяжкого удару теоретичній фізиці в Німеччині взагалі.



До війни розмови Гайзенберга й Бора були приятні

В останні роки життя Гайзенберг зосередив свої зусилля на створенні єдиної теорії поля. Він розумів, що споруда такої теорії мусить стояти на міцній експериментальній базі — і, прагнучи створити її, став першим головою Комітету з наукової політики заснованого 1954 р. ЦЕРНу — Європейського центру ядерних досліджень. Пишучи про неуспіх спроб своїх попередників, Гейзенберг наголошував: «у той час, коли Айнштайн працював над єдиною теорією поля, науковці безперервно відкривали нові елементарні частинки й співвіднесені з ними поля. Тому для здійснення айнштайнівської програми все ще не було міцної емпіричної основи, й спроба Айнштайна не дала ніяких переконливих результатів». Утім, мусимо визнати: і Гайзенбергові не пощастило посунутися тут значно далі.

Багато «пізніх» робіт Гайзенберга було присвячено філософським проблемам фізики, теорії пізнання. Науковець був переконаний: атом «можна лише символічно представити диференціальним рівнянням у часткових похідних в абстрактному багатовимірному просторі; тільки досліди експериментатора змушують атом набувати певного розташування. У сучасній фізиці всі характеристики атома невизначені; безпосередньо він не має жодних матеріальних властивостей». Гайзенберг уважав: розвиток квантової фізики XX століття з її відходом від детермінованості дозволив остаточно вирішити одвічну суперечку ідеаліста Платона з матеріалістом Демокрітом на користь Платона, котрий уважав, що справжня сутність речей назавжди залишиться для нас прихованою.

Водночас Гайзенберг перекинув несподіваний місточок від сучасної теорії поля, де частинки описують групами симетрії, до уявлень Платона, який, як пам'ятаємо, описував «першоеlementи» правильними

геометричними фігурами. Постійні інтелектуальні пошуки Гайзенберга ілюструє переказ: він зізнався, що запитав би в Бога, якби мав таку нагоду, про теорію відносності й про турбулентність. Але відповідь розраховував би одержати тільки на перше з запитань — теорія турбулентності навіть для Бога є надто складною.

Макс Борн (1882–1970)

Утвердженням поняття корпускулярно-хвильового дуалізму (Луї де Бройль), створенням хвильової (Ервін Шредінгер) та матричної (Вернер Гайзенберг) механіки завершилася доба, яку історики науки називають «старою теорією квантів», і протягом якої вчені ще намагалися поєднати поняття класичної фізики (як-от, визначені орбіти електрона) з ідеєю квантованості. Натомість почалася доба сучасної квантової механіки з її принципово ймовірнісним описом подій та відмовою від строго визначених класичних траєкторій. Серед імен учених, які започаткували цю нову добу, почесне місце посідає ім'я Макса Борна. Він є автором багатьох основоположних робіт із квантової механіки, теорії будови атома і теорії відносності.



Макс Борн

Макс Борн народився в пруському місті Бреслау (тепер це — польський Вроцлав) у родині професора анатомії. Його мати була талановитою піаністкою. Тож Макс зростав в інтелектуальному середовищі, в атмосфері, що сприяла його всебічному розвитку.

Хлопчик збирався стати інженером, але за порадою батька прослухав різноманітні університетські курси й незабаром захопився математикою та фізикою. 1904 року Макс вступив у Геттінгенський університет, де на той час працювали визначні математики Давид Гільберт і Фелікс Кляйн, а також Герман Мінковський (1864–1909), який лишив яскравий доробок і в математиці, і у фізиці.

Після захисту дисертації на ступінь доктора філософії в галузі теорії стійкості пружних тіл наукові інтереси Борна зазнали зміни й змістилися в царину електродинаміки й теорії відносності.

Ученого покликали на військову службу в кавалерійський полк Берліна, але незабаром за станом здоров'я демобілізували. Цей життєвий епізод сприяв формуванню неприязного ставлення Борна до мілітаризму, і з роками це ставлення дедалі поглиблювалося.

Півроку Макс Борн займався науковими дослідженнями в Кембриджському університеті, де слухав лекції Джозефа Джона Томсона. Під

час цього стажування Борн об'єднав наукові ідеї Айнштайна з математичними положеннями Мінковського — і запропонував новий, спрощений метод обчислення маси електрона. Мінковський високо оцінив цю роботу й запросив науковця повернутися в Геттінгенський університет, пропонуючи йому посаду свого асистента. Після раптової смерті Мінковського Макс Борн став лектором університету з теорії відносності. Тут-таки він узявся досліджувати властивості кристалів у залежності від розташування атомів. Побудована ним теорія залежності теплоємності від температури (разом із виконаними дещо раніше аналогічними роботами Петера Дебая — обоє вчених виходили з квазінеперервної моделі твердого тіла) стала основоположною для сучасної фізики кристалічних структур.

1915 року Макс Борн став асистент-професором у Макса фон Планка в Берлінському університеті. Однак Макс фон Лауе висловив своє бажання попрацювати з Максом фон Планком і запропонував Макс Борну тимчасово помінятися місцями роботи. Борн погодився і 1919 року перебрав на себе обов'язки професора фізики й директора Інституту теоретичної фізики у Франкфуртському університеті. Ще за два роки Макс Борн повернувся до Геттінгена й став директором університетського фізичного інституту. Під керівництвом Борна цей інститут став провідним центром теоретичної фізики та математики.

Борн пильно стежив за розвитком теорії атома й був одним із перших, хто надав квантовим ідеям Вернера Гайзенберга строгої математичної форми. З 1926 року ідеї де Бройля вже не здавалися Борну дивними. Дифракційна картина електронів легко пояснювалася за допомогою гіпотези про «хвилі матерії» — на цій основі можна було обчислити довжину хвиль, що відповідала експерименту. Проте мучило питання: що розуміти під «хвилями матерії»? Пульсацію електрона — кульки? Коливання якогось середовища на кшталт ефіру? Чи вібрацію чогось ще більш гіпотетичного — але все-таки матеріального?

Після довгих роздумів Макс Борн дійшов «несподіваного» висновку про те, що «хвилі матерії» є не матеріальними хвилями, а «хвилями ймовірності». Вони характеризують імовірність потрапляння електрона в певне місце макроприладу, тобто в певну точку фотопластини.

Усі три умови теорії ймовірностей виконуються в дослідах із розсіювання електронів, унаслідок чого завжди виходить дифракційна картина:

- електрон як частинка розсіюється незалежно від інших електронів;
- електрони у квантовій фізиці нерозрізнявані, до того ж нерозрізнявані й окремі акти їхнього розсіювання;
- точні значення координат та імпульсів електронів не можна задати в принципі, оскільки це «заборонено» принципом невизначеності Гайзенберга.

Відповідно до викладеного, пошук траєкторії кожного електрона окремо втрачає сенс. Необхідно навчитися обчислювати ймовірність потрапляння електрона в певне місце, тобто обчислити функцію розподілу ймовірності потрапляння. А щоб обчислити функцію, що описує розподіл електронів на фотопластині, необхідно розв'язати рівняння Шредінгера. Макс Борн зрозумів, що ймовірність знайти електрон у певній точці дорівнює квадрату модуля хвильової функції Шредінгера.

А як бути з електронами в атомах? Рух окремих електронів в атомі зовсім не схожий на поширення певних коливань, але в цілому спостережні траєкторії електронів належать єдиному ансамблю, який і є хвилею ймовірності. А форму цієї хвилі зумовлюють закони квантової механіки. Ми не знаємо напевно, в яке місце фотопластини потрапить електрон, що «летить», і так само ми не знаємо, в якому місці атома ми його виявимо в певний момент часу. Як і раніше, ми можемо вказати тільки ймовірність виявлення електрона в якомусь певному місці. В одній точці атома ця ймовірність більша, в іншій — менша, але в цілому розподіл імовірності утворює закономірний «силует», який ми й приймаємо за форму атома.

Для електрона в атомі працюють закони випадку, і якраз це необхідно враховувати. Для кожного окремого атома функція розподілу густини ймовірності дозволяє знайти електрон у певній точці атома. Саме в цьому сенсі можна поговорити про ймовірнісну форму окремого атома. Ця картина цілком вірогідна, оскільки вона однозначна для будь-якої сукупності однакових атомів.

Математично суть підходу Борна полягала в розгляді задачі в першому порядку теорії збурень, що дозволило отримати вираз для хвильової функції розсіяної частинки у вигляді залежності від кута розсіяння. Борн був переконаний: корпускулярне трактування цієї формули буде можливе, тільки якщо допустити інтерпретацію квадрата хвильової функції як міри ймовірності розсіювання частинки в даному напрямку.

Як зазначав сам Борн, ймовірнісна інтерпретація хвильової функції виникла під впливом трактування Айнштайном інтенсивності світла як міри щільності світлових квантів (ймовірності їхньої присутності в сенсі класичної статистичної фізики). З борнівського підходу безпосередньо впливав ефект «інтерференції ймовірностей», тобто відмінності щільності ймовірності суми хвильових полів від суми густин ймовірності кожного з цих полів окремо. Борн також показав, що квадрати коефіцієнтів розкладу хвильової функції за повним набором власних функцій рівняння Шредінгера можна розглядати як частоти появи стану, що відповідає певній власній функції.

Запропонувавши ймовірнісне тлумачення хвильової функції, Макс Борн відразу ж зробив і наступний крок: у роботі «Адіабатичний принцип у квантовій механіці» (завершений у жовтні 1926 р.) він отримав вираз для ймовірності переходу квантової системи з одного стану в другий під дією зовнішньої сили, відповівши тим через 13 років на запитання, поставлене Резерфордом Бору: як електрон, розпочавши перехід з однієї орбіти на другу, знає, де йому зупинитися? Водночас учений довів квантово-механічний аналог адіабатичної теореми, згідно з яким під час адіабатичного процесу (нескінченно повільні збурення) система залишається у початковому стані (ймовірність переходу дорівнює нулю).

Сам термін «квантова механіка», що його запровадив Макс Борн, позначав нову високоматематизовану квантову теорію. Статистична інтерпретація квантової механіки почала називатися «копенгагенською», оскільки Нільс Бор разом зі своїми учнями й співробітниками зробив величезний внесок у її становлення, а очолюваний ним Інститут теоретичної фізики зробився в 1926–27 рр. центром гарячих дискусій усіх тодішніх провідних фізиків.

Проте низка засновників квантової теорії не погоджувалася з «копенгагенською інтерпретацією». Борн і Айнштайн вели тривалу полеміку щодо цієї проблеми, хоча ці фундаментальні наукові розбіжності ніколи не затьмарювали їхньої дружби. Окрім фізики, їх єднала любов до музики, і вони разом із насолодою виконували сонати — Айнштайн на скрипці, Борн — на фортепіано. У Берліні партнером Борна в його музичних вправах ставав Вернер Гайзенберг.

Після приходу до влади Гітлера геттінгенський науковий центр фактично припинив свою плідну діяльність, бо з початком гоніння на євреїв кількох провідних професорів і самого декана наукового центру Макса Борна було усунуто з посад. Сам учений був за віросповіданням лютеранином (великий релігійний реформатор XVI ст. Мартін Лютер був одним із предків Гедвіги, дружини Борна), але нацисти (на відміну від середньовічної інквізиції) переслідували юдеїв не за вірою, а саме за кров'ю.

1933 року Макс Борн покинув Німеччину й переїхав до Великої Британії. Тут він працював в університетах Кембриджа й Единбурга, в Единбурзькому — аж до виходу у відставку 1953 року. 1954 року вчений повернувся до Геттінгена.

У Макса Борна було багато учнів. У нього працювали фізики, що стали видатними науковцями: Гайзенберг, Паулі, Фермі, Дірак, Вайскопф, Оппенгеймер та інші. Критичний талант Борна так тісно поєднувався з доброзичливістю, що всі його учні й співробітники відчували себе єдиною великою сім'єю, головною життєвою метою якої було пізнання. Макс Борн був надзвичайно привабливою людиною. Разом із тим, він був рішучим у своїй безкомпромісності, коли бачив десь несправедливість.



Макс Борн (праворуч) із учнями Фрідріхом Гундом та Вернером Гайзенбергом (Геттінген, 1966)

Особисті якості Макса Борна сприяли тому, що в його науковій школі об'єдналися люди, котрі де в чому стояли на протилежних світоглядних позиціях. Така відмінність у наукових світоглядах не заважала їхній науковій співпраці аж доти, доки вони не постали перед необхідністю визначити свої політичні погляди у зв'язку з приходом до влади нацистів.

Нобелівську премію з фізики 1954 року присудили Макс Борну «за фундаментальні дослідження з квантової механіки, особливо за його статистичну інтерпретацію хвильової функції».

1955 року Борн був одним із шістнадцяти нобелівських лауреатів, які виробили заяву, що засуджувала подальшу розробку й використання ядерної зброї. Цю декларацію згодом підписав п'ятдесят один нобелівський лауреат.



Надгробок Макса Борна та його дружини Гедвіги

На надробку Макса Борна в Геттінгені викарбувано одну з найвідоміших виведених ним формул: фундаментальне перестановочне співвідношення

$$pq - qp = \frac{h}{2\pi i},$$

що пов'язує між собою матриці операторів імпульсу та координати p та q .

Вольфганг Паулі (1900–1958)

Майбутній науковець народився у Відні в родині заможних пражьких євреїв, але виховували його як католика. Коли в грудні 1900 року було вимовлено слово «квант», йому було сім місяців. Паулі закінчив Мюнхенський університет, працював асистентом у Макса Борна в Геттінгенському університеті, а потім — у Копенгагенському інституті теоретичної фізики у Нільса Бора.



Вольфганг Паулі

У 1923–1928 роках Паулі — доцент Гамбурзького університету, потім — професор Політехнікуму в Цюриху. Після захоплення Австрії нацистами в 1938 р. Паулі спробував змінити австрійське громадянство на швейцарське, але не зумів подолати бюрократичних перешкод, які ставив перед чужинцями швейцарський уряд. Тому він завбачливо переїхав до США, де впродовж десяти років працював у Прінстонському інституті перспективних досліджень під керівництвом Альберта Айнштейна. У 1946 р. учений повернувся на попередню професорську посаду до Цюриху.

Наукові роботи Вольфганга Паулі належать до багатьох розділів сучасної теоретичної фізики, в розвитку яких він брав безпосередню участь — як розробник або як критик-опонент. Він причетний до становлення й розвитку квантової механіки, квантової електродинаміки, теорії відносності, квантової теорії поля, теорії твердого тіла, ядерної фізики, фізики елементарних частинок. Саме він запропонував у 1921 р. використовувати магнетон Бора як одиницю магнітного моменту.

Знаменитий «*принцип заборони*» Паулі (1925 р.) відіграв винятково важливу роль у квантовій фізиці й нині залишається одним із фундаментальних її принципів. Перше формулювання цього принципу було подано в статті «Про зв'язок заповнення атомних оболонок в атомі зі складною будовою атомів». Формулювання мало такий вигляд: «В атомі не може існувати два або більше еквівалентних електронів, для яких значення всіх квантових чисел у магнітному полі однакове». Якщо в атомі є електрон, для якого всі ці числа мають певне значення, то цей стан зайнятий (слово «зайнятий» Паулі підкреслив). Наступний електрон може розташуватися тільки в іншому стані — такому ж або вищому за енергією (якщо всі нижчі за енергією стани вже зайняті іншими електронами).

Періодична система елементів згідно з Бором-Паулі

Саме принцип заборони, що діє для так званих «ферміонів» — частинок із напівцілим спіном, до яких належать, зокрема, електрони — дозволив до кінця зрозуміти фізичну причину існування періодичної системи елементів Дмитра Менделєєва. Всі орбіти в атомі поділяються на шари, які в порядку їхнього віддалення від ядра заведено позначати *K*, *L*, *M*, *N*, *O* тощо. Шар *K* може вмістити тільки два електрони — відтак у першому періоді системи Менделєєва є тільки два елементи — водень та інертний гелій. У шарі *L* може бути 8 електронів — відтак у другому періоді вже вісім елементів, починаючи від лужного літію (з одним валентним електроном) і закінчуючи інертним неонем (із заповненими всіма електронними орбітами). Ситуація з наступними шарами стає трохи складнішою — але періодична система, яка спершу здавалася абсолютно незрозумілою, виявилася відбиттям глибинної структури атома.

За допомоги принципу заборони вдалося пояснити й зонну структуру твердих тіл, наявність там «заборонених» і «дозволених» зон енергії, причини відмінностей між металами, діелектриками й напівпровідниками. Урешті-решт, цей принцип став однією з фізичних основ для сучасної електроніки.

Справді, працюючи разом із Бором у Копенгагені, Паулі задумався над зв'язком електронної теорії зі статистикою, і це поклало початок дослідженням поведінки електронів у конденсованому середовищі. 1927 року Вольфганг Паулі разом із Енріко Фермі розробив теорію сильно виродженого електронного газу в металах, яка пояснила високу провідність металів — на відміну від напівпровідників і діелектриків.

Згідно з цією теорією, електрони в металах заповнюють верхню з дозволених зон енергії лише частково, і тому потрібна дуже невелика енергія, щоб змусити ці електрони взяти участь у процесі провідності (зовсім поруч вище є вільні енергетичні стани, куди ці електрони можуть перейти!)

Було пояснено й те, чому ніяк не виявляє себе теплоємність електронного газу в металах, яка за класичними уявленнями мусила б складати $\frac{3}{2}R$, як і теплоємність звичайного газу, і чому відтак теплоємність металів практично дорівнює теплоємності діелектриків, де вільних електронів немає. Стало зрозуміло, що електрони в металах є «виродженим газом», який щільно

заповнює всі можливі енергетичні рівні аж до верхнього (його ще називають рівнем Фермі). І тому тільки невелика частина електронів в енергетичному околі рівня Фермі завширшки kT може «сприймати» теплову енергію й робити внесок у теплоємність — а в переважній більшості електронів просто немає вільних місць, куди б вони могли перейти «вгору» за енергією.

Оскільки енергія kT за кімнатної температури дорівнює 0,026 меВ, а енергія Фермі для електронів у металі з концентрацією n дорівнює:

$$E_F = (3\pi^2 n)^{2/3} \frac{\hbar^2}{2m},$$

то для значення концентрації $n \sim 10^{23} \text{ см}^{-3}$ значення енергії Фермі становить порядку 100 еВ. Це означає, що в процесі теплоємності може брати лише дуже мала частина електронів, що утворюють сильно вироджений газ, і теплоємність металу майже не відрізняється від теплоємності діелектрика. Так квантова механіка дозволила пояснити одну з двох проблем, які лорд Кельвін назвав у 1901 р. «хмаринками на ясному небі класичної фізики».

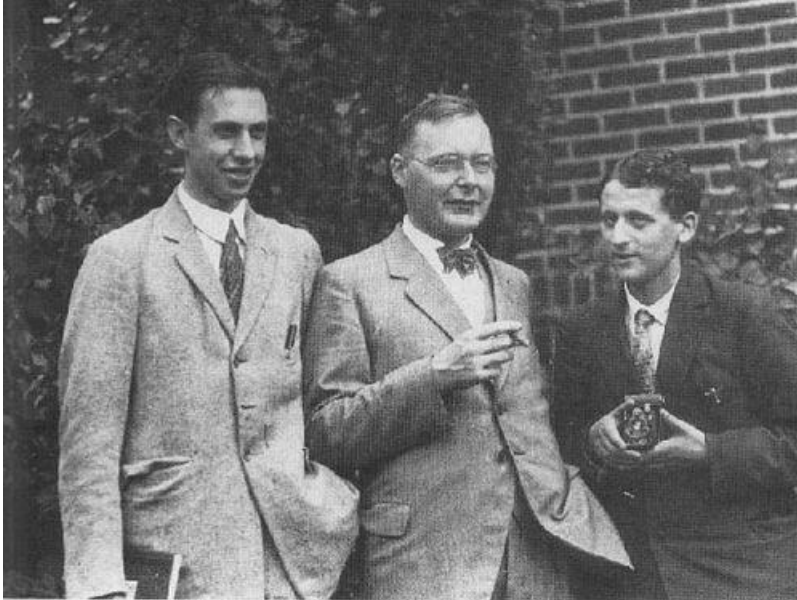
Натомість у напівпровідниках і діелектриках за достатньо низьких температур верхня з заповнених електронами зон заповнена ними повністю, вільних станів тут уже немає, й електрони в цій заповненій зоні участі в провідності не беруть (їм теж нікуди переходити вгору за енергією). Щоб електрон таки став проводити, він має отримати енергію порядку ширини «забороненої зони» між заповненою й вищою від неї вільною дозволеною зонами. Для напівпровідників ця енергія, як правило, лежить у рамках від десятої до двох-трьох електрон-вольтів, і такий перехід можливий під дією світла (фотопровідність) або температури. Для діелектриків заборонена зона ширша — кілька електрон-вольт, — і тому температура на їхню провідність практично не впливає. Хоча оптичні переходи під дією високоенергетичних квантів можливі й тут. До цих висновків дійшов у 1931 р. британський учений Алан Вілсон, про якого ми докладніше говоритимемо далі, в розділі, присвяченому початку розвитку фізики напівпровідників.

1929 року Паулі разом із Гайзенбергом сформулював перший варіант квантової електродинаміки (схему квантування полів). 1931 року Паулі запропонував гіпотезу нейтрино — нейтральної частинки, яка дуже слабо взаємодіє з речовиною — для того, щоб пояснити перетворення частинок (протонів і нейтронів) одна на одну під час бета-розпаду. Назву «нейтрино» (по-італійськи — «маленький нейтрон») тоді ж дав Енріко Фермі. Проте експериментально цю «невловиму» частинку пощастило виявити лише 1959 року.

Відомо, що багато славетних фізиків, зокрема й Вольфганг Паулі, спочатку не прийняли ідеї «спіну електрона» (власного моменту кількості руху, який у наближеній класичній аналогії можна пов'язати з обертанням електрона навколо своєї осі, але який дивовижним чином може набувати лише двох квантових значень).

Це поняття запровадив на початку 1925 року 20-річний нідерландський фізик Ральф Кроніг (1904–1995). Того самого року, спостерігаючи за розщепленням пучка водню в магнітному полі, Самюель Гоудсміт (1902–1978) та Джордж Уленбек (1900–1988), котрі працювали тоді в Лейдені, дійшли

висновку: без запровадження нового квантового числа, яке описує власний момент кількості руху електрона й набуває лише двох значень, пояснити таке розщеплення неможливо. Адже у водні, де є лиш один електрон на головному квантовому рівні $n=1$, значення магнітного квантового числа, що тепер стало наслідком точного розв'язку рівняння Шредінгера і визначає орбітальний магнітний момент електрона, могло бути лише $m=0$, а отже, пучок розщеплюватися не міг; натомість на досліді він чітко розщеплювався на два.



Джордж Уленбек, Гендрік Крамерс і Самюель Гудсміт

Визначний фізик-теоретик Пауль Еренфест (1880–1933) очолював тоді в Лейдені колишню кафедру Лоренца. Він мав славу «конструктивного критика» — й науковці всієї Європи зверталися до нього, щоб почути тверезе судження про занадто нові й радикальні ідеї. Звернулися до нього й Гудсміт з Уленбеком: адже, за їхніми підрахунками, швидкість обертання навколо осі на «екваторі» електрона мала перевищити швидкість світла.

Реакція Еренфеста була такою: «це або напрочуд цікаво — або нісенітниця». А проте він попросив молодих фізиків зробити коротке повідомлення для журналу. Вони дослухалися — й передали повідомлення Еренфестові (до редакції навіть не надсилали, вважаючи ідею надто неймовірною).

На їхній подив, повідомлення невдовзі було надруковано. Його надіслав до журналу сам Еренфест. А двом дослідникам він сказав: «Ви обидва достатньо молоді, щоб дозволити собі зробити дурницю!».

Проте не всі були такими толерантними. Найбільше опирався ідеї спіну Паулі. Він перестрів на гамбурзькому вокзалі Нільса Бора, котрий їхав із Копенгагена до Лейдена, й суворо застеріг його щодо гіпотези спіну. Після повернення Бора з Лейдена Паулі зустрів його в Берліні, висловивши в різких словах розчарування з приводу його «відступництва» й жаль через те, що в атомній фізиці виникає нова «єресь».

З листів Паулі до Бора і з його нобелівської лекції ми можемо зрозуміти, що основне заперечення проти ідеї спіну зводилося до наступного: гіпотеза про електрон, який обертається навколо осі, наче дзига, має класичний характер, а

розрахунки на основі цієї гіпотези призводять до суперечності з теорією відносності. Інтуїція Паулі підказувала йому, що «двозначність спіну електрона» є типово квантовим ефектом, який не можна описувати мовою класичної механіки.

Проте коли 22-річний американський теоретик Льовелін Гіллет Томас, коректно користуючись методами релятивістської механіки, отримав несуперечливі з дослідом результати, Паулі в березні 1926 року погодився з ідеєю спіну. У нобелівській лекції він писав:

«Хоча спочатку я ставив цю ідею під сумнів через її класичний характер, врешті-решт я став її прихильником — після того, як Томас обчислив величину дуплетного розщеплення. З іншого боку, мої колишні сумніви, а також обережний вислів «двозначність, непідвладна класичному опису», пізніше отримали відоме підтвердження, оскільки Бор показав за допомогою хвильової механіки, що спін електрона не можна виміряти в класично описуваних дослідах».

А в 1940 році Вольфганг Паулі довів теорему про зв'язок спіну зі статистикою: для частинок із напівцілим спіном — «ферміонів» (як-от, для електронів) діє принцип заборони Паулі, й вони описуються статистикою Фермі–Дірака. А частинки чи квазічастинки з цілим спіном — «бозони» — можуть накопичуватися в одному квантовому стані в будь-якій кількості. Ці частинки описуються статистикою Бозе–Айнштейна, і при наднизьких температурах з ними може відбуватися бозе–айнштейнівська конденсація.

Принцип Паулі було «увінчано» Нобелівською премією 1945 року. Паулі нагороджено також медалями Гендріка Лоренца (1930), Бенджаміна Франкліна (1952), Макса Планка (1958) та багатьма іншими науковими відзнаками. До 60-ліття Вольфганга Паулі готували спеціальний збірник, який називався «Теоретична фізика XX століття». До нього ввійшли багато робіт ювіляра, а також наукові праці інших найбільших науковців сучасності. Однак напередодні свого ювілею Вольфганг Паулі після тяжкої хвороби — раку підшлункової залози — пішов із життя. Тож цей науковий збірник виявився своєрідною епітафією великому науковцю-фізику.

В особистому житті вчений не був щасливий. Мати його в 1927 р. наклала на себе руки, а його відносини з батьком після цього геть попсувалися. Перша дружина, балерина, з якою він узяв шлюб у 1929 р., через рік пішла до давнього приятеля. Другий його шлюб залишився бездітним. Уважали, що Паулі приносить нещастя й іншим — коли він заходив до експериментальної лабораторії, там неодмінно псувалося обладнання (це навіть назвали жартома «ефектом Паулі»).

Через удари долі вчений остаточно відійшов від віри в Бога, почав зазирати в чарку і часто западав у депресію. Намагаючись позбутися її, він почав активно спілкуватися зі знаменитим швейцарським психологом та психіатром Карлом Густавом Юнгом (1875–1961). Це спілкування спонукало Паулі до активних роздумів про зв'язок людської свідомості та її матеріальних носіїв — однак цю проблему не розв'язано наукою ще й досі.



Бюст Вольфганга Паулі

Вольфганг Паулі помер 14 грудня 1958 року — рівно за 58 років потому, як Макс Планк доповів Берлінському фізичному товариству про свою гіпотезу випромінювання, що ознаменувала народження квантової теорії. Помирає він у Цюриху в лікарняній палаті з номером 137. За життя він багато замислювався над тим, чому значення сталої тонкої структури α , яку запровадив у 1916 р. Арнольд Зоммерфельд, і яка пов'язує три інші фундаментальні сталі — заряд електрона, швидкість світла й сталу Планка $\alpha = \frac{e^2}{\hbar c}$ (у системі СГС), — дорівнює майже точно $1/137$...

Як фізик Паулі був великим перфекціоністом, який в усьому прагнув досконалості. Він був вимогливий не лише до себе, але й безжально критикував помилки своїх колег. Зовсім погані роботи він коментував приблизно так: «Це не тільки неправильно, це навіть не дотягує до помилкового!» У колах його колег з цього приводу ходив жарт: «Після смерті Паулі удостоюється аудієнції у Бога. Паулі запитує Бога, чому стала тонкої структури дорівнює $1/137$. Бог киває, йде до дошки і починає зі страшною швидкістю писати рівняння за рівняннями. Паулі дивиться спочатку з великим задоволенням, але незабаром починає різко й заперечливо хитати головою».

Поль Дірак (1902–1984)

Поль Адрієн Моріс Дірак народився в англійському місті Брістоль. Історія роду Діраків пов'язана зі Швейцарією, але батько Поля емігрував до Англії, де заробляв на життя викладанням французької мови. Французьку він уважав рідною й наполягав, щоб удома говорили саме цією мовою, хоч його дружина була англійкою.



Поль Дірак

Батько дбав про освіту сина. Він улаштував його в навчальний заклад, у якому викладав сам — це була своєрідна школа торговельних підприємців, поєднана з технічним коледжем. Її було засновано при спілці «The Society of Merchant Venturers» — «Товаристві купців, які працюють у заморській торгівлі» (загальноприйнята аббревіатура — MV). Ця підприємницька та благодійна організація в Брістолі існувала ще з XIII ст.

Сам Поль Дірак так розповідає про цю школу: «MV була прекрасною школою природничих наук і сучасних мов. Я був дуже щасливий, що можу відвідувати цю школу. У MV я вчився з 1914 по 1918 рік, якраз під час Першої світової війни. Багато хлопців покинули школу задля служіння нації. Як наслідок, старші класи зовсім спорожніли. Щоб заповнити їх, почали просувати молодших тією мірою, якою вони могли впоратися зі складнішою роботою. Мені це було вигідно: я швидко «проскочив» молодші класи й у дуже ранньому віці ознайомився з основами математики, фізики, хімії на вельми пристойному рівні. Математику вивчав за книгами, які зазвичай містили більше, ніж знав клас. Швидке просування вперед сприяло подальшим моїм успіхам. Але це заважало мені брати участь у спортивних іграх, які відбувалися щосереді в другій половині дня. Я грав у футбол і крикет; решта учасників ігор були старші й сильніші від мене, й мені не щастило. Проте в школі цінували мою відданість науці. Дуже корисним було й те, що школа розташовувалася в одній будівлі з технічним коледжем. Заняття в коледжі відбувалися ввечері, після того, як закінчувалися заняття в школі. Коледж мав прекрасні аудиторії, які вдень були відкриті для школи. Крім того, деякі співробітники школи поєднували викладання в школі вдень з викладанням у коледжі ввечері».

1918 року Поль Дірак стає студентом електротехнічного факультету Брістольського університету, через три роки він закінчує університет із відзнакою. Але його здібності до техніки не було оцінено роботодавцями, й Діраку не вдалося знайти праці інженерно-технічного профілю. Він навіть не зацікавив фірми, де проходив практику.

У цей час Поль Дірак уперше ознайомився з теорією відносності, яку в університеті читав професор філософії. Через інтерес до теорії відносності Поль Дірак серйозно захопився математикою й зробив спробу вступити до Кембриджського університету. Але стипендію він отримати не зміг, а тому повернувся до Брістоля, де йому дозволили слухати лекції неофіційно, не платячи за навчання.

Викладав математику в Брістольському університеті невідомий ученому світові Пітер Фрезер, котрий був, однак, справжнім педагогом. Він прищеплював своїм студентам розуміння краси математики та її логічної стрункості. Лекції та семінари Фрезера глибоко запали в душу Поля Дірака.

Через два роки, 1923-го, Поль Дірак отримав невелику стипендію й став аспірантом Ральфа Фаулера (1889–1944) у Кембриджі. І вже за півроку надрукував свої перші дві роботи зі статистичної механіки. А ще за два роки, 1925-го, з'являється його фундаментальна робота зі знаменитим релятивістським хвильовим рівнянням, яке тепер носить його ім'я.

Проте це рівняння діє не лише в області надвисоких енергій. Спектр електронів у вперше отриманому в 2004 року графені — моноатомному шарі вуглецю, якому вже присвячено величезну кількість експериментальних і теоретичних робіт — так само описується рівнянням Дірака.

У 1920-х роках в Кембриджі працювали «віртуозні» математичні фізики й астрофізики, блискучі «зірки природознавства». Тут завжди знали про все, що відбувалося в усіх лабораторіях світу. Практично всі помітні фізики Європи та США приїздили до Кембриджа поділитися результатами своїх пошуків і досліджень. Цю наукову атмосферу співпраці жадібно всотує Поль Дірак.

У статті «Про теорію квантової механіки», надрукованій у «Працях Королівського товариства» (1926) і написаній за матеріалами його дисертації на ступінь доктора філософії в Кембриджі, Дірак одержав формулу для статистичного розподілу енергії в системі електронів, відому тепер під назвою розподілу Фермі–Дірака (італієць Енріко Фермі, про якого йтиметься далі, прийшов до аналогічної формули незалежно і майже одночасно). Ця фундаментальна робота мала велике значення для теоретичного осмислення електричних властивостей металів і напівпровідників.

Ферміони — це частинки з напівцілим спіном, які підкоряються «забороні Паулі» й не можуть перебувати в квантово-механічному стані з однаковими квантовими числами більш як по одній; ця заборона накладає обмеження на їхній розподіл за енергією. Імовірність знайти ферміон у певному стані з енергією ε_n (під n тут розуміють певний набір квантових чисел, які цей стан характеризують) задається виведеною Діраком формулою:

$$f(\varepsilon_n) = \frac{1}{e^{(\varepsilon_n - \mu)/k_B T} + 1}.$$

Тут μ — хімічний потенціал, k_B — стала Больцмана, T — температура.

Характерною особливістю цього розподілу є «плюс одиниця» в знаменнику. Вона визначає особливий вигляд розподілу Фермі–Дірака порівняно з розподілом Бозе–Айнштейна, який описує частинки з цілим спіном — «бозони» (Шатьєндранат Бозе (1892–1974) — індійський фізик, котрий 1924 року вперше розглянув задачу про розподіл «бозонів»).

Для «бозонів» заборона Паулі не діє — і це зумовлює низку дивовижних явищ, як-от, Бозе-конденсація. Частковим виявом її є відкрита в 1938 р. надплинність основного ізотопу гелію-4. Ядра гелію-4 за температур, близьких до абсолютного нуля, конденсуються в стані з нульовою енергією та імпульсом (їх може «вміститися» в такому стані скільки завгодно!). Отже, оскільки нульовий імпульс цілком визначений, їхня невизначеність за координатою, згідно з принципом Гайзенберга, стає нескінченно великою. Відтак ми вже не можемо сказати, де саме перебуває кожен атом конденсату гелію в посудині, в якій відбулося охолодження. А явище надплинності гелію-4 виявляється в тому, що за температури, нижчої від 2,17 К, рідкий гелій утрачає в'язкість і може вільно просочуватися крізь найменші щпарини. Математично формула для розподілу Бозе–Ейнштейна дуже схожа на формулу для розподілу Фермі–Дірака, але перед одиницею в знаменнику стоїть «мінус», і це веде до важливих фізичних наслідків.

Хімічний потенціал μ визначається з умови нормування розподілу й залежить від повної кількості частинок у системі N .

$$N = \sum_n \frac{1}{e^{(\varepsilon_n - \mu)/k_B T} + 1}.$$

(Цей вираз записано для ферміонів, для бозонів перед одиницею в знаменнику стоятиме «мінус»). Звідси важливий висновок: поняття хімпотенціалу має сенс лише для систем, де кількість частинок зберігається. Якщо квазічастинки «народжуються» й «гинуть» (як-от, фотони в задачі Планка про випромінювання АЧТ, чи коливання атомів-фононів у задачі Айнштейна про теплоємність твердого тіла), умова нормування вже не діє й хімпотенціал дорівнює нулю (окремо наголосімо — фотони й фонони є «бозонами», а, отже, описуються статистикою Бозе–Айнштейна). А коли хімпотенціал для бозонів можна таки запровадити, він, як це безпосередньо видно з формули, не може бути додатним — бо інакше під інтегралом може виникнути нефізична розбіжність.

В основному стані ферміони займають якомога нижчі енергетичні рівні. Накладена принципом Паулі заборона приводить до того, що за нульової температури всі найнижчі одноферміонні рівні зайняті. Найвищий зайнятий у такому стані рівень називається рівнем Фермі (зрозуміло, що, водночас, саме цей рівень є рівнем хімпотенціалу). Функція розподілу Фермі–Дірака за низьких температур має вигляд сходинок: ймовірність заповнення станів дорівнює одиниці за енергій, що нижчі від рівня Фермі, і нулю — за енергій, більших за рівень Фермі. Саме такий розподіл реалізується за нульової температури в металах.

За збільшення температури існує певна ймовірність того, що ферміони системи матимуть енергію, вищу за енергію рівня Фермі (водночас сам рівень Фермі, у відповідності до виведеної Діраком формули, має фізичний зміст енергії, для якої ймовірність заповнення відповідного стану становить 1/2). Завдяки цьому існує відмінна від нуля ймовірність того, що рівень із енергією, нижчою від енергії рівня Фермі, стане вільним. Чим вища температура, тим пологішою стає крива розподілу. За високих температур, коли значення квантової ймовірності заповнення стану значно менше від одиниці, розподіл Фермі–Дірака переходить у класичний розподіл Максвелла–Больцмана.

Справжня слава прийшла до Дірака, коли йому було 30 років. Учений передбачив, що майже всі електрони Всесвіту займають рівні з негативною енергією і, згідно з принципом Паулі, утворюють фон спостереження. Виявити абсолютну більшість із них ніяк не можна — бо ближчі енергетичні стани вгорі теж заповнені тими самими електронами, і їм просто нікуди переходити, а відтак на різні впливи вони не реагують (щось подібне відбувається з більшістю електронів у металі: вони не беруть участі в провідності і в набуванні тепла, оскільки всі енергетичні стани над ними щільно зайняті). Надаються до спостереження тільки електрони з позитивною енергією.

«Послухаємо» самого Дірака: «Електрони розподілені по всьому Всесвіту з великою густиною в кожній точці. Досконалою порожнечою є та область, де всі стани з негативною енергією зайняті. Незаповнені стани з негативною енергією уявляють як «дещо» з позитивною енергією, бо для того, щоб вони зникли, необхідно внести туди електрони з негативною енергією. Ми передбачаємо, що ці незайняті стани з негативною енергією — це протони».

Теорію Дірака зустріли й сприйняли досить скептично. Але сам Дірак був налаштований оптимістично, оскільки вважав свою теорію «дуже симетричною щодо електронів і протонів».

Але ж протон відрізняється від електрона не лише знаком електричного заряду, але й масою. Відкриття позитрона, частинки справді симетричної щодо електрона, змусило по-новому оцінити теорію Дірака, яка, власне, передбачила існування позитрона та інших античастинок. На Ленінградській науковій конференції 1933 року Поль Дірак виклав суть теорії позитрона: «Припустімо, що в тому світі, який ми знаємо, майже всі електронні стани з негативною енергією зайняті електронами. Ця сукупність електронів, що сидять на негативних рівнях енергії, унаслідок своєї однорідності не може сприйматися нашими відчуттями й вимірювальними приладами, і лише не зайняті електронами рівні, які є чимось винятковим, якимось порушенням однорідності, ми можемо помітити абсолютно так само, як помічаємо зайняті стани електронів із позитивними енергіями. Незайняті стани з негативною енергією, тобто «дірки» в розподілі електронів із негативною енергією, ми будемо сприймати як частинки з позитивною енергією; адже відсутність негативної кінетичної енергії рівносильна присутності позитивної кінетичної енергії, оскільки мінус на мінус дає плюс. Видається доречним ототожнити таку «дірку» з позитроном, тобто стверджувати, що позитрон є «діркою» в розподілі електронів із негативною енергією».

Згідно з теорією Дірака, позитивний електрон у зіткненні з вільним або слабо зв'язаним негативним електроном може зникати, утворюючи два фотони, що випромінюються в протилежних напрямках. Існує й зворотний процес — «матеріалізація» фотонів, коли «фотони з достатньо великою енергією у зіткненні з важкими ядрами можуть створювати позитивні електрони. Фотон, взаємодіючи з ядрами, може створити два електрони з протилежними зарядами» — так писав Фредерік Жоліо-Кюрі про теорію Дірака.

Антиелектрон-позитрон, що його теоретично передбачив Дірак, експериментально відкрив 1932 року американський фізик Карл Андерсон (1905–1991). У 1955 р. існування антипротона підтвердив інший американець, Оуен Чемберлен (1920–2006).



Дірак із дружиною в Копенгагені (1963 р.)

Поль Дірак і Ервін Шредінгер отримали Нобелівську премію з фізики 1933 року «за відкриття нових продуктивних форм атомної теорії». У своїй короткій нобелівській лекції Дірак говорив: «Із загальнофілософської точки зору, кількість різних типів елементарних частинок (принаймні, так здається на перший погляд) повинна бути мінімальною, наприклад одна, або щонайбільше дві. Але з експериментальних даних відомо, що кількість різних типів цих частинок набагато більша. До того ж, кількість типів елементарних частинок виявляє останніми роками вельми тривожну тенденцію до збільшення». На закінчення лекції Дірак указав на можливість існування «зірок, що складаються головним чином з позитронів і антипротонів, що впливає з симетрії між додатними і від'ємними електричними зарядами. Можливо, одна половина зірок належить до одного типу, а інша — до іншого. Ці два типи зірок повинні були б мати однакові спектри, і розрізнити їх методами сучасної астрономії б було неможливо».

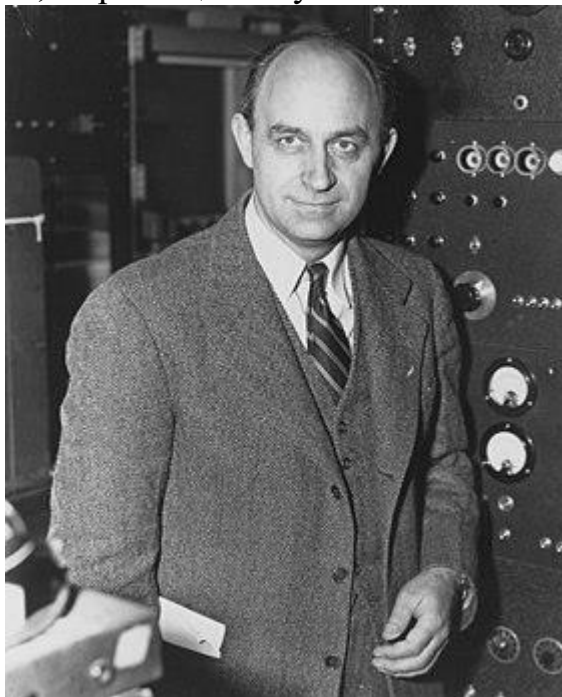
Поль Дірак — почесний член низки академій наук і наукових товариств. Його нагороджено Королівською медаллю (1939), медаллю Коплі (1952) та орденом Великобританії «За заслуги»; також він отримав премію Оппенгеймера. З 1961 року Дірак — член Папської академії наук. Для нас цікаво, що Дірака (разом із Бором) було запрошено до роботи у вченій раді створеного у 1928 р. в Харкові Українського фізико-технічного інституту.

У 1971 р. учений, якого виховували католиком, так підсумував свої думки про існування чи неіснування Бога: якщо ймовірність виникнення життя є надзвичайно малою (наприклад, 10^{-100}), то тоді напевно потрібне божественне втручання, щоб пояснити те, чому життя на Землі таки почалося й розвивається. Але якщо ця ймовірність достатньо висока, то «тоді я казав би, що Бога немає».

У житті Дірак був тихою і небагатослівною людиною. Він волів працювати самотійно — і тому в нього було небагато безпосередніх учнів. Його дружина Маргіт Вігнер була рідною сестрою американського фізика угорського походження Юджина Пола Вігнера (1902–1995), нобелівського лауреата 1963 р. Перекладена багатьма мовами книга вченого «Спогад про надзвичайну епоху» — яскраве свідчення про атмосферу тих інтелектуальних пошуків, безпосереднім учасником яких був Поль Адрієн Моріс Дірак.

Енріко Фермі
(1901–1954)

Енріко Фермі народився в Римі в родині службовця-залізничника та вчительки. Коли 42-річний професор Макс фон Планк уперше вимовив слово «квант», Енріко ще не було на світі.



Енріко Фермі

«Великий італійський фізик Енріко Фермі посідає особливе місце серед сучасних науковців: у наш час, коли вузька спеціалізація в наукових дослідженнях стала типовою, важко назвати ще одного такого ж універсального фізика, яким був Фермі. Можна навіть сказати, що поява на науковій арені ХХ століття людини, яка зробила такий величезний внесок у розвиток і теоретичної фізики, й експериментальної фізики, й астрономії, і технічної фізики, — явище радше унікальне, аніж рідкісне», — так писав про Фермі його учень Бруно Понтекорво (1913–1993).

Ще в дитинстві Енріко виявив незвичайно великі здібності до математики й фізики. Його обізнаність у цих науках, набута переважно через самоосвіту, дозволила йому отримати 1918 року стипендію та вступити до Вищої нормальної школи при Пізанському університеті. Потім, за протекцією директора Фізичного інституту Римського університету сенатора Орсо Корбіно (1876–1937), Енріко отримав тимчасову посаду викладача математики для хіміків у Римському університеті.

Ще під час навчання Енріко Фермі прагнув пізнати нові на той час галузі фізики, що стосуються будови матерії й квантової теорії. Але в італійських університетах цих розділів тоді ще не читали — довелося задовольнятися класичною фізикою й теорією відносності. «Оскільки для курсів мені майже нічого не треба робити, я намагаюся розширити свої знання з математичної фізики, й те саме робитиму в галузі математики, адже я можу користуватися безліччю книг», — писав Фермі 1919 року.

Протягом двох студентських років він опрацював «Теорію вихорів» Пуанкаре, «Аналітичну механіку» Аппеля, «Електронну теорію матерії»

Річардсона, «Простір, час, матерію» Вейля, «Будову атома і спектри» Зоммерфельда та інші серйозні монографії. Енріко Фермі володів німецькою, французькою та англійською мовами, й це дуже допомагало йому в науковій праці.

«Його метод вивчення книги завжди полягав у тому, що він брав із неї постановку задачі й результати дослідів, сам обробляв їх, і потім порівнював свої результати з результатами автора. Часом у перебігу цієї роботи він ставив нові задачі й розв'язував їх. Так і виникли його перші друковані праці», — згадував італійський фізик Енріко Персіко (1900–1969), котрий добре знав Фермі в студентські роки.

На початку 1923 року 21-річного Енріко Фермі Міністерство освіти Італії відрядило для стажування в Геттінген до Макса Борна. Тут Фермі самостійно виконав низку наукових робіт. Одна з цих робіт — у галузі теоретичної механіки — дуже сподобалася Паулю Еренфесту, і він написав про це Фермі. Згодом Фермі переїздить до Лейдена й навчається в Еренфеста, на той час уже відомого фізика-теоретика. Саме під впливом Еренфеста Енріко Фермі набуває впевненості у власних силах. У нього з'являються характерні риси серйозного дослідника: прагнення до конкретності в усьому, вміння виділяти головне, винятковий здоровий глузд. Майже всі теоретичні дослідження Фермі здійснює для того, щоб пояснити поведінку певної експериментальної кривої, незрозумілість якого-небудь експериментального факту.

У 1925–1926 роках Фермі працює тимчасовим професором у Флоренції, де читає лекції з теоретичної механіки й математичної фізики. Тут він отримує науковий ступінь «вільного доцента», створює знамениту роботу з квантової статистики (в якій незалежно отримує ту саму формулу для розподілу електронів, що й Дірак) і пише прекрасну книгу «Вступ до атомної фізики», яка пізніше стала основним підручником з теоретичної фізики для студентів університетів.

Восени 1926 року в Римському університеті спеціально для Фермі створюють кафедру теоретичної фізики, яку жартівники охрестили «кафедрою Ферміфізики». 25-річний Енріко Фермі успішно витримує конкурс і обіймає посаду професора столичного університету, в якому працюватиме аж до 1938 року.

Лекції професора Фермі з квантової механіки, атомної фізики, математичної фізики, термодинаміки, геофізики вирізнялися винятковою ясністю й стрункістю викладу. У фізиці, як уважав Фермі, не повинно бути місця для плутаних думок, а фізичну суть будь-якого питання можна пояснити без допомоги складних математичних виразів. Усе це Фермі чудово ілюстрував власними роботами та своїм науково-педагогічним стилем.

«Метод роботи Фермі над теоретичними проблемами понад усе приголомшував мене своєю простотою. Він міг проникнути в суть будь-якої задачі, хоч би якою складною вона здавалася. Він зривав із неї вкривало математичних ускладнень і непотрібного формалізму. За допомогою такого методу йому часто вдавалося не більше ніж за півгодини розв'язати вельми складне фізичне завдання. Він був майстром отримання важливих результатів мінімальними зусиллями й простим математичним апаратом», — згадував

відомий американський фізик-теоретик Ганс Бете (1906-2005), молодший від Фермі на 5 років.

Інтенсивна наукова робота Фермі в період із 1926 року по 1933 рік відбувалася переважно за трьома головними напрямками.

По-перше, Фермі успішно розвивав квантову механіку, пояснював і пропагував її в наукових колах Італії.

По-друге, Фермі результативно проводив теоретичні дослідження в галузі статистичної механіки (про розподіл Фермі–Дірака ми вже говорили вище).

По-третє, своїми теоретичними роботами Фермі зробив великий внесок у вчення про структуру атомів і молекул, узагальнений ним самим у книзі «Молекули й кристали».

Водночас Фермі вчив студентів і своїх учнів-дослідників не лише фізики, але й пристрасної любові до науки, розуміння її духу. Він завжди наголошував на високій моральній відповідальності науковця за опубліковані роботи, був нетерпимий до прагнення деяких науковців завищувати точність своїх вимірювань (не підвищувати, а саме завищувати!), неухильно дотримувався думки, що шукати нове треба тільки тоді, коли вичерпано всі можливості старого.

Після 1933 року Фермі цілком занурюється в проблеми ядерної фізики. Він створює теорію β -розпаду (1934), яка лягла в основу теорії взаємодії елементарних частинок.

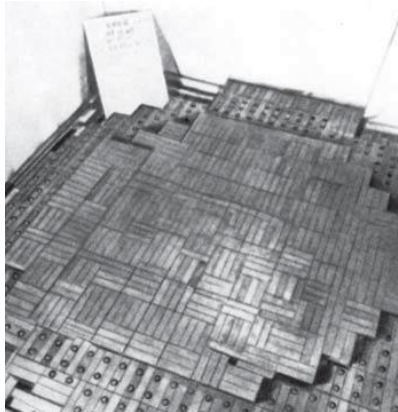
Відразу після відкриття штучної радіоактивності «тільки у Фермі вистачило розуму вибрати оригінальний напрям, що виявився на диво плідним», — такий висновок зробив відомий австрійський та англійський фізик-експериментатор, учасник «Мангеттенського проєкту» Отто Фріш (1904–1979) з приводу ідеї Фермі використовувати нейтрони як «снаряди» для бомбардування ядер.

Справді, поціляючи ядро атома, нейтрон може або стимулювати альфа-чи бета-розпад — або ж просто приєднатися до інших нейтронів ядра. У залежності від цього з'являються нові елементи або ізотопи. На початку 1930-х Фермі з'ясував, що реакція йде активніше, якщо бомбардувати повільними нейтронами. Він знайшов спосіб сповільнювати нейтрони, пропускаючи їх крізь такі багаті на протони речовини, як вода, парафін тощо (адже ядро атома водню, що належить до складу цих речовин, і є протон!).

Робота групи Фермі отримала дуже високу оцінку в науковому світі. Це був початок так званої «нейтронної фізики».

За серію робіт із отримання радіоактивних елементів шляхом нейтронного бомбардування та за відкриття ядерних реакцій під дією повільних нейтронів 1938 року Енріко Фермі присуджено Нобелівську премію. Фермі виїхав на її вручення до Стокгольма разом із родиною, й уже не повернувся до Італії, де фашистська диктатура Муссоліні набувала дедалі потворнішого вигляду. Адже вслід за нацистською Німеччиною там теж почалося (хоча із запізненням) переслідування євреїв, а Лаура, дружина Фермі, походила зі старовинної єврейської родини, що жила в Італії багато століть. Пізніше Лаура Фермі напише про свого чоловіка прекрасну книгу спогадів «Атоми в нас удома».

Розпочалася Друга світова війна. Змушені тікати з окупованої нацистами Європи фізики (Альберт Айнштайн, Лео Сілард, Енріко Фермі) добре розуміли, що буде, коли Німеччині вдасться першою використати нові відкриття атомної фізики з воєнною метою. (Щасливим шансом для людства стало те, що досліди з опромінення урану нейтронами наприкінці 1930-х не дали сподіваного результату — інакше атомну бомбу Райху могло бути створено ще перед Другою світовою!)



Верхній шар першого атомного реактора (1942 р.)

Тому з ініціативи науковців у США було започатковано «Мангеттенський проєкт» для робіт зі створення атомної бомби (назва походить від того, що попередні дослідження велися в Колумбійському університеті в Нью-Йорку, розташованому на Мангеттені). Очолював його американський фізик Роберт Опенгеймер (1904–1967). Для здійснення проєкту було концентровано величезні інтелектуальні та матеріальні ресурси — понад 130000 працівників у 30 різних локаціях, а його сумарне фінансування склало 2 млрд доларів (або понад 30 млрд доларів за сьогоднішнім курсом). Певний час проєкт споживав 1/6 електроенергії, яка генерувалася тоді в США. Відповідальність за дослідження ланцюгової реакції й отримання плутонію було покладено на Фермі. Саме він побудував перший реактор («урановий котел») і 2 грудня 1942 року реалізував самопідтримувану ланцюгову реакцію, під час якої за розпаду ядра урану виникають 2–3 нові нейтрони, що, у свою чергу, спричиняють нові розпади ядер. «Було зрозуміло, — писав згодом керівник англійського проєкту атомної бомби Джон Кокрофт (1897–1967), — що Фермі відчинив двері в атомне століття».



16 червня 1945 року на полігоні в пустелі штату Нью-Мексико вибухнула перша атомна бомба, створена в межах «Мангеттенського проєкту». Дві такі бомби наприкінці війни було скинуто на японські міста Гіросіму й Нагасакі — це, безумовно, пришвидшило капітуляцію Японії й урятувало життя сотень тисяч американських, англійських та рядянських солдатів, які неминуче загинули б на кінцевій стадії війни, але більшість людей на Землі досі сприймають ту атаку вкрай неоднозначно. Фізики випустили «джина з пляшки».

Пізніше Фермі разом з двома іншими фізиками-емігрантами, Едвардом Теллером і Станіславом Уламом, задумав і спроектував ще потужнішу термоядерну зброю, базовану не на розщепленні ядер урану чи плутонію, а на злитті ядер водню. Перше випробування американської водневої бомби відбулося на атолі Еніветок у Тихому океані в 1952 році; вибух мав еквівалент 10 мегатон тротилу.

1953 року вибухнула перша радянська воднева бомба. Наступного року в СРСР було запущено першу атомну електростанцію — в місті Обнінськ. Ці роботи, що відбувалися під керівництвом Ігоря Курчатова (1903–1960), на якийсь час вивели СРСР уперед у гонитві озброєнь, яка 1962 року, під час «карибської кризи», поставила цілий світ на межу знищення. У 1961 в СРСР на острові Нова Земля було підірвано водневу бомбу з еквівалентом у 50 мегатон тротилу – найпотужнішу за всю історію випробувань. Починаючи з 1970-х років, уряди США і СРСР (спершу дуже непослідовно та в обмежених обсягах) почали домовлятися про необхідність роззброєння.

Однак аж до розпаду СРСР 1991 року реальна можливість ядерного протистояння двох систем існувала, а сьогодні ядерний потенціал Росії та інших диктаторських агресивних режимів є суттєвим фактором міжнародної дестабілізації. Особливо це виявилось після початку повномасштабного вторгнення російської армії в Україну 24 лютого 2022 р., коли ядерний шантаж зробився одним із важливих інструментів агресивної політики Кремля.

Розвиток атомної енергетики також мав неоднозначні наслідки. Людство отримало доступ до екологічно чистої енергії, виробництво якої не збільшує вмісту вуглекислого газу в атмосфері. Проте вже 1979 року відбулася серйозна аварія на американській АЕС Три–Майл–Айленд. 26 квітня 1986 р. через технологічні недоліки й порушення регламенту експлуатації вибухнув четвертий блок Чорнобильської АЕС, і цей вибух спричинив найбільшу техногенну катастрофу в історії людства, наслідки якої досі відчувають мільйони українців і білорусів. 11 березня 2011 р. після потужного землетрусу внаслідок низки помилок персоналу відбулася й масштабна аварія на АЕС у Фукусімі (Японія).

А після початку повномасштабної російсько-української війни, окупації найбільшої в Європі Запорізької АЕС військами держави-агресора та масованих російських ракетних атак на українську енергосистему рівень загрози масштабних аварій на АЕС зробився як ніколи високим.

Такими неодноразовими були здобутки атомної доби, яку провів запуск «уранового котла», що його сконструював Фермі. Останні роки життя вчений працював над проблемами фізики високих енергій.

Фермі був безмежно енергійною людиною з видатним інтелектом, завжди незмінно доброзичливим у спілкуванні, чудовим сім'янином. Він захоплювався альпінізмом, зимовими видами спорту й тенісом. Навіть у зеніті слави Фермі вражав усіх своєю скромністю й невибагливістю до життєвого комфорту. Одного разу він прийшов у залу, де мусив читати урочисту публічну лекцію, заздалегідь. Професор-організатор лекції не впізнав нобелівського лауреата, вирішивши, що це один зі слухачів, і змусив Фермі готувати аудиторію разом із аспірантами. Славний науковець навіть не спробував заперечити й заходився переставляти столи та стільці разом із молодими дослідниками...

Енріко Фермі помер 28 листопада 1954 року від раку шлунку, маючи лише 53 роки. Хворобу було, очевидно, спровоковано небезпечними дослідженнями з радіоактивністю, в яких науковець брав участь. Ще влітку того року, знаючи про свій смертельний діагноз, він здійснив «прощальне турне» Європою, читаючи лекції та спілкуючись із колегами та друзями.

Важко уявити, що міг би зробити ще цей справді великий фізик, якби прожив бодай ще пару десятків років. За словами Бруно Понтекорво, якби відкриття, що їх зробив Енріко Фермі, належали кільком науковцям, — людство мало б ще 6–8 нобелівських лауреатів.

1955 року було відкрито новий, сотий хімічний елемент, який назвали на честь видатного науковця-фізика фермієм.

Народження квантової фізики: ретроспективний погляд

Квантова фізика народилася в лоні багатой європейської культури, а науковці, що її створили, були людьми з глибокими гуманітарними зацікавленнями. Айнштайн, Бор, Гайзенберг, Еренфест, Лауе були також чудовими музикантами, а Планк в юності навіть плевав намір стати професійним піаністом; в університеті він читав лекції з теорії музики та керував студентським хором, у якому співав молодий Отто Ган (1879–1968), котрий 1938 року відкрив разом із Фріцом Штрассманном (1902–1980) явище поділу ядер урану нейтронами й отримав за це Нобелівську премію з хімії 1944 року.

Гайзенберг, Паулі, Лауе, Шредінгер володіли давніми мовами, Луї де Бройль — фаховий історик, Шредінгер писав вірші й наприкінці життя видав власну поетичну збірку. Навіть у науковому листуванні Планк і Зоммерфельд часом обмінювалися віршами.

Нарешті, всі вони переймалися питаннями філософії й релігії (Шредінгер писав на ці теми цілком професійно й мав репутацію одного з найкращих у Європі знавців індуїзму й давньогрецьких містиків). 1985 року було зібрано й видано збірник філософських текстів «Квантові питання», куди увійшли статті й уривки з книг більшості фізиків, про яких ми розповідали вище. Цікаво, що жоден із них не позиціонував себе як переконаного атеїста, і для більшості питання віри та науки лежали в паралельних площинах. За словами Айнштейна,

теорія відносності не може ані спростувати, ані утвердити віру в Бога, — й навпаки, віра не здатна ані спростувати, ані підтвердити теорію відносності.

Вище ми послідовно зверталися до «наукових портретів» цих людей. Проте в історії квантової механіки їхні долі й ідеї так тісно переплетені, що спробуємо поглянути ще раз на загальне історико-наукове тло, пов'язане зі створенням нової фізики протягом надзвичайно стислого історичного періоду — всього близько трьох років у середині 1920-х.

Сплетення долі і ситуацій можна простежити в наукових біографіях фактично всіх визначних фізиків того часу. Наведемо спершу як приклад узяті зі спогадів і науково-популярних книжок кілька промовистих епізодів з життя творця «матричної механіки» Вернера Гайзенберга.

Зберігся переказ про те, як одного дня 1919 року Арнольд Зоммерфельд увійшов до кімнати, де збавляв час за грою в шахи другокурсник Гайзенберг, відірвав його від шахової партії, дав у руки фотопластинку з фотографією спектра випромінювання атома в магнітному полі й запропонував знайти закономірності в розташуванні спектральних ліній.

Трьома роками пізніше, в червні 1922 року, Гайзенберг отримав унікальну нагоду обговорити свої тодішні ідеї й сумніви під час тривалої прогулянки разом із Бором, котрий на запрошення Геттінгенського університету читав там цикл лекцій із квантової теорії.

А наприкінці травня 1925 року асистент Гайзенберг захворів на сінну гарячку й, за порадою свого тодішнього керівника Макса Борна, виїхав відпочивати на маленький острів Гельголанд у Північному морі. Там він виконав свої знамениті обчислення й пережив рідкісне душевне піднесення, про яке згодом розповідав так: «Нарешті настав вечір, коли я зміг узятися до обчислення енергії окремих членів в енергетичній таблиці або, як кажуть тепер, — у матриці енергії. Збудження, що охопило мене, заважало зосередитися, і я почав робити в обчисленнях помилку за помилкою.

Остаточний результат удалося отримати лише близько третьої ночі. У перший момент я злякався. Від думки, що я став володарем усіх цих скарбів — витончених математичних структур, які природа відкрила переді мною, — мені перехопило подих. Про те, щоб заснути, годі було й думати. Почало вже світати. Я вийшов із дому й вирушив до південного краю острова, де в море видавалася самотня скеля. Без особливих зусиль я здолав висоту й дочекався сходу сонця на її вершині».



Пам'ятна табличка на острові Гельголанд на місці, де Гайзенберг створив матричну механіку

Вже 5 червня, після повернення з відпустки, Гейзенберг написав про свої обчислення Кронігу, 24 червня — надіслав докладного листа Паулі, а чернетку статті віддав Максу Борну з проханням учинити з нею на його розсуд. Борн схвалив її ідею, і 29 червня 1925 р. стаття Гейзенберга «Про квантово-теоретичне тлумачення кінетичних і механічних співвідношень» надійшла в редакцію журналу. Сам Гайзенберг, мабуть, не відразу усвідомив значущість своєї роботи, оскільки, виступаючи 28 липня на запрошенні «клубу Капиці» в Кембриджі, він вибрав для доповіді іншу тему: «Про терм-зоологію й Зеєман-ботаніку» (попри жартівливу назву, цілком серйозно йшлося про поведінку атомних рівнів енергії в магнітному полі).

Макс Борн наполегливо думав про фізичний сенс роботи свого асистента. «Гайзенбергове правило множення, — згадував він у своїй нобелівській промові, — не давало мені спокою, і через вісім днів інтенсивних роздумів і перевірок у моїй пам'яті воскресла теорія алгебри, якої вчив мене професор Розанес у Бреслау. Я ніколи не забуду того глибокого хвилювання, яке я пережив, коли мені вдалося сконцентрувати ідеї Гайзенберга про квантові умови у вигляді таємничого рівняння $pq - qp = \frac{h}{2\pi i}$ ».

Якраз у цей час Борн, їдучи до Ганновера потягом, поділився труднощами нового числення з попутником — колегою з Геттінгена. З волі випадку чи з примхи долі, у тому самому купе їхав недавній студент Паскуаль Йордан — один із небагатьох, хто знали в той час матричне числення, оскільки саме він допомагав Ріхарду Куранту готувати до друку знаменитий курс «Методи математичної фізики» Куранта й Гільберта, що вийшов 1924 року. На вокзалі в Ганновері Йордан представився Борну й запропонував свою допомогу.

Це було дуже до речі, оскільки Паулі співпрацювати з Борном відмовився й радив йому взагалі не втручатися в розвиток подій, щиро вважаючи, що нова наука — це «Knabenphysik» — «хлоп'яча фізика» (Борну на той час було 42 роки — дуже багато, на думку Паулі). Борн і Йордан завершили свою статтю до осені, незабаром до них приєднався Гайзенберг, і спільно вони дали перший послідовний виклад матричної механіки. 16 листопада 1925 року їхня стаття «Про квантову механіку» надійшла до редакції журналу.

Трохи раніше, 7 листопада того самого року, в редакцію надійшла стаття Дірака «Основні рівняння квантової механіки», в якій він запропонував своє математичне оформлення ідей Гайзенберга. За освітою Дірак, як ми пам'ятаємо, був інженером-електриком, котрий у роки післявоєнної депресії не знайшов роботи за фахом і вирішив продовжити освіту в Кембриджі під керівництвом Ральфа Фаулера, від якого й дізнався про статтю Гайзенберга — у вересні 1925 року Фаулер отримав її в гранках від Борна.

Тієї-таки осені Борн виїхав у тривале відрядження до Америки і там, узимку 1926 року, спільно з Норбертом Вінером — майбутнім творцем кібернетики — запровадив одне з найважливіших понять квантової механіки — поняття оператора фізичної величини, який, зокрема, можна представити й матрицею, як у схемі Гайзенберга.

Узимку того року Вольфганг Паулі за допомогою матричної механіки знайшов енергії рівнів атома водню і показав, що вони збігаються з енергіями стаціонарних станів у моделі атома Бора.

Роком раніше, 29 листопада 1924 р., Луї де Бройль захистив дисертацію «Дослідження з теорії квантів». Як уже згадувалося, 1910 року він отримав у Сорбонні звання ліценціата літератури з розділу історії, проте під впливом брата, лекцій Ланжевена з теорії відносності та книг Пуанкаре «Наука й гіпотеза», «Цінність науки» він з усім запалом юності віддався вивченню фізики.

Брат Луї де Бройля Моріс був визнаним фахівцем у фізиці Х-променів і багато думав про їхню природу. Він був згоден з Вільямом Бреггом, який ще в 1912 році, відразу після відкриття Лауе і за 10 років до досліду Комптона, писав: «Проблема тепер полягає не в тому, щоб вибрати між двома теоріями Х-променів, а в тому, щоб знайти одну теорію, яка поєднує можливості обох».

1963 року Луї де Бройль згадував: «Мій брат уважав Х-промені якоюсь комбінацією хвилі й частинки, але, не будучи теоретиком, не мав особливо чітких уявлень про цей предмет. Він наполегливо звертав мою увагу на важливість і безперечну реальність дуальних аспектів хвилі й частинки. Ці довгі розмови допомогли мені глибоко зрозуміти необхідність обов'язкового зв'язку хвильової й корпускулярної точок зору».

Вже у своїй першій статті 1923 року Луї де Бройль висловив припущення, що «пучок електронів, котрий проходить через достатньо вузький отвір, також повинен виявляти здатність до інтерференції». Тоді на це зауваження ніхто з серйозних експериментаторів уваги не звернув, хоча вже в той час був відомий експеримент Девіссона й Кансмена, а також досліди Карла Рамзауера (1879–1955) й Джона Таунсенда (1868–1957), з яких випливало, що електрони, проходячи через гази за певних енергій, майже не розсіюються — явище, аналогічне ефектам просвітлення оптики й протилежне резонансному поглинанню, спостереженому в досліді Франка й Герца.

Поль Ланжевен, керівник дисертації де Бройля, ставився до його ідей вельми стримано, але толерантно. У квітні 1924 року він презентував їх учасникам IV Сольвеївського конгресу, а в грудні надіслав дисертацію на відгук Айнштайнові, котрий, у свою чергу, гаряче радив Максу Борну: «Прочитайте її! Хоча й здається, що її писав божевільний, написана вона солідно». Потім Айнштайн навіть цитував її у своїх роботах, а Шредингер

згодом дякував йому за те, що він його вчасно «стукнув по носі та вказав на важливість ідей де Бройля».

Не всі прийняли ідею про хвилі матерії так прихильно. Планк згадував згодом, що він, коли почув від Крамерса на одному з семінарів про роботу де Бройля, «тільки похитав головою», а присутній на тому ж семінарі Лоренц сказав: «Ці молоді люди вважають, що відкидати старі поняття у фізиці надзвичайно легко!».

На початку 1925 року Макс Борн обговорював ці ідеї зі своїм близьким другом і колегою з Геттінгенського університету Джеймсом Франком (1882–1964). На обговоренні був присутній студент Борна, пізніше відомий фізик і геофізик Вальтер Ельзассер (1904–1991), котрий тут-таки запропонував провести експеримент з дифракції електронів. «Це не конче потрібно, — відповів Франк, — експерименти Девіссона вже встановили наявність спостережуваного ефекту» (сам Девіссон так не вважав і взагалі навряд чи добре був обізнаний з ідеєю де Бройля). Вальтер Ельзассер після цих дискусій написав коротку статтю, в якій пояснював результати дослідів Девіссона й Кансмена, а також ефект Ромзауера–Таунсенда за допомогою уявлень про хвилі матерії.

Статтю Ельзассера надрукували в липні 1925 року — ще до того, як було надіслано до друку першу роботу Гайзенберга, — але на неї мало хто звернув тоді увагу: незабаром більшість захопилася новою матричною механікою.

Ервіну Шредінгеру 1925 року було вже 38, і він не так просто піддавався моді й захопленням. Як і Гайзенберг, він закінчив класичну гімназію, де основними предметами були латина й грецька, а за складом розуму він був поетом і мислителем. На жаль, Шредінгер не залишив після себе, як Гайзенберг, яскравих спогадів про епоху «Sturm und Drang» («бурі й натиску») квантової механіки. Мабуть, тому, що свої головні відкриття він зробив у зрілі роки, коли юнацький запал дії змінився спокійною мудрістю знання.

Шредінгер згодом згадував про своє тодішнє враження від теорії Гайзенберга–Борна–Йордана: «Мене відлякували, якщо не сказати відштовхували, методи трансцендентної алгебри, що здавалися мені дуже важкими, й відсутність будь-якої наочності». Погляди де Бройля були йому явно ближчі, й тут-таки випала нагода вивчити їх пильніше: в кінці 1925 року Петер Дебай, якого він змінив на кафедрі фізики в Цюрихському університеті, попросив розповісти про роботи де Бройля аспірантам знаменитого Цюрихського політехнікуму.

Незабаром після цього з'явилася перша стаття з серії робіт Шредінгера «Квантування як проблема власних значень» (вона надійшла в редакцію 27 січня 1926 року, приблизно в той самий час, коли Борн і Вінер запровадили поняття оператора, а Паулі за допомогою матричної механіки знайшов спектр атома водню). 21 червня 1926 року Шредінгер надіслав до редакції ще одну, шосту статтю серії, а вже 25 червня Борн надіслав у друк повідомлення, в якому було запропоновано статистичну інтерпретацію хвильової функції. Тим самим побудову основ хвильової квантової механіки було, власне, завершено.

Через багато років Макс Борн, говорячи про ці роботи Шредінгера, вигукне: «Що є видатнішого в теоретичній фізиці?», а Макс Планк додасть: «Рівняння Шредінгера в сучасній фізиці посідає таке саме місце, яке в

класичній механіці посідають рівняння, що їх знайшли Ньютон, Лагранж і Гамільтон». Але в той час теоретики зустріли хвильову механіку насторожено, оскільки в ній явно були відсутні квантові стрибки — те, до чого лише недавно (й насилу!) звикли і що вважали за головну особливість атомних явищ.

У червні 1926 року Гайзенберг приїхав до Мюнхена відвідати батьків і «впав у цілковитий відчай», коли почув на одному з семінарів доповідь Ервіна Шредінгера та його інтерпретацію квантової механіки. «Чим більше я роздумую над фізичною стороною теорії Шредінгера, тим жахливішою вона мені здається», — писав він Паулі.

Зате експериментатори (Вільгельм Він та інші), які називали теорію Гайзенберга «атомістикою» (тобто «містикою атома»), вітали теорію Шредінгера з натхненням. (Професор Він до того ж, без сумніву, не забув, як Гайзенберг провалив йому випускний екзамен з експериментальної фізики.)

Суперечки про хвильову механіку тривали годинами і днями, й досягли граничної гостроти у вересні 1926 року, коли Шредінгер приїхав на запрошення Бора до Копенгагена.

Шредінгер так утомився від дискусій, що навіть захворів і кілька днів провів у будинку Бора, котрий майже не відходив від ліжка Шредінгера протягом усієї його хвороби. Час від часу, характерним жестом підносячи палець, Нільс Бор повторював: «Але, Шредінгере, ви все ж таки повинні погодитися». Одного дня, майже у відчай, Шредінгер вигукнув: «Якщо ми збираємося зберегти ці прокляті квантові стрибки, то я взагалі шкодую, що мав справу з атомною теорією!». «Зате інші вельми вдячні вам за це», — відповів йому Бор.



Інститут Нільса Бора в Копенгагені

З часом точки зору прихильників матричної й хвильової механік зближувалися. Сам Шредінгер довів їхню математичну еквівалентність ще в березні 1926 року, і незалежно від нього того ж висновку дійшли Карл Еккарт в Америці, Корнеліус Ланцет та Вольфганг Паулі в Німеччині.

У серпні 1926 року на з'їзд Британської асоціації сприяння науці приїхав з Америки Девіссон. Він обговорював свої нові експерименти з відбиття електронів від поверхні кристалів із Бором, Гартрі та Франком, котрі забезпечили його статтями Шредінгера, які він старанно вивчав дорогою назад через океан. Рік потому, продовжуючи з Джермером свої дослідження, Девіссон експериментально довів реальність електронних хвиль. За півроку до цього, в

травні 1927 року, Джордж Паджет Томсон також виявив дифракцію електронів — хвильова механіка знайшла міцну експериментальну основу.

Досліди з дифракцією електронів, що вперше стали відомими влітку 1926 року, сильно зміцнили віру в теорії де Бройля й Шредінгера. Поступово фізики зрозуміли, що дуалізм «хвиля-частинка» — це твердо встановлений факт, а не дотепна гіпотеза, і змирилися з цією обставиною. Тепер науковці прагнули збагнути, до яких наслідків він веде і які обмеження накладає на уявлення про квантові процеси. Разом із тим, вони стикалися з десятками парадоксів, сенс яких зрозуміти часто не вдавалося.

Восени 1926 року Гайзенберг жив у мансарді фізичного інституту в Копенгагені. Вечорами до нього піднімався Бор, і починалися дискусії, які нерідко затягувалися далеко за північ. «Інколи вони закінчувалися повним відчаєм через квантову теорію вже в помешканні Бора за склянкою портвейну, — згадував Гейзенберг. — Одного дня після такої дискусії я, глибоко стурбований, спустився в розташований за інститутом Феллед-парк, щоб прогулятися на свіжому повітрі й трохи заспокоїтися перед сном. Під час цієї прогулянки під зоряним нічним небом у мене промайнула думка — чи не слід постулювати, що природа допускає існування тільки таких експериментальних ситуацій, в яких не можна одночасно визначити місце та швидкість частинки». У цій думці — зародок майбутнього співвідношення невизначеності.

Мабуть, щоб зняти напругу тих днів, наприкінці лютого 1927 року Нільс Бор виїхав відпочити до Норвегії. Гайзенберг, коли залишився сам, продовжував напружено думати. Зокрема, йому не давало спокою давнє питання товариша по навчанню Борґерта Друде (сина відомого фізика, автора класичної теорії провідності металів Пауля Друде): «Чому не можна спостерігати орбіту електрона в атомі за допомогою променів із дуже малою довжиною хвилі, наприклад, гамма-променів?». Обговорення цього експерименту швидко привело його до співвідношення невизначеності.

(Слід думати, що Гайзенберг із вдячністю пригадав старого екзаменатора Вільгельма Віна, котрий хотів прогнати його з іспиту за незнання межі роздільної здатності мікроскопа. Як згодом зізнався сам Гайзенберг, він був достатньо добросовісним, щоб усе ж таки вивчити цей розділ оптики після іспиту, який йому зарахували лише завдяки заступництву Зоммерфельда, і знання ці тепер йому вельми знадобилися.)

За кілька днів повернувся з відпуски Бор із готовою ідеєю доповнюваності, яку він остаточно продумав у Норвегії. Ще за декілька тижнів напружених дискусій за участі шведського теоретика Оскара Клейна (1894–1977) усі дійшли висновку, що співвідношення невизначеності — це окремий випадок принципу доповнюваності, для якого можливий кількісний запис мовою формул. 23 березня 1927 року стаття Гайзенберга «Про наочний зміст квантово-теоретичної кінематики і механіки» з коментарями Бора надійшла в редакцію.

На той час квантову механіку вивчали вже повсюдно, насамперед, звичайно, в Геттінгені й Копенгагені. У зимовому семестрі 1926-1927 років Давид Гільберт двічі на тиждень читав у Геттінгенському університеті курс із математичних методів квантової механіки (його було видано вже навесні 1927 року). Гільберту тоді допомагав 23-річний виходець із Угорщини Джон (Янош,

Йоханн) фон Нейман (майбутній творець обчислювальних машин, теорії ігор, один із найбільших математиків XX століття), котрий через два роки надасть квантовій теорії межі математичної строгості й концептуальної незалежності.

З часу появи першої статті Гайзенберга математичний апарат нової механіки безперервно вдосконалювався, а її інтерпретація поступово доповнювалася й уточнювалася. За перші два роки після тієї публікації, до осені 1927 року, вийшло понад двісті робіт із квантової механіки, і значна їхня частина не застаріла досі. 16 вересня 1927 року в Копенгагені на Міжнародному конгресі на честь ювілею Алессандро Вольти Нільс Бор прочитав доповідь «Квантовий постулат і новітній розвиток атомної теорії». У ній він уперше послідовно виклав систему понять нової квантової фізики й запровадив термін «доповнюваність».

За кілька тижнів потому, наприкінці жовтня 1927 року, в Брюсселі на V Сольвейвський конгрес зібралися Планк, Айнштайн, Лоренц, Бор, де Бройль, Борн, Шредінгер, а з молодих — Гайзенберг, Паулі, Дірак, Крамерс. Тут остаточно утвердилися ті уявлення про квантову механіку й та система понять, які згодом отримали назву «Копенгагенської інтерпретації». Дискусії на конгресі стали найсуворішою перевіркою всіх положень квантової механіки.



Семінар в Інституті теоретичної фізики в Копенгагені, 1930 рік. У першому ряді (зліва направо) О. Клейн, Н. Бор, В. Гайзенберг, В. Паулі, Г. Гамов, Л. Ландау, Г. Крамерс

Ключовими для «Копенгагенської інтерпретації» квантової механіки є п'ять наведених нижче тверджень.

1. Хвильова функція описує кожен окремий квантовий об'єкт.
2. Поведінку квантових об'єктів неможливо відокремити від результатів вимірювань (принцип відносності щодо засобів вимірювання).
3. Вимірювання викликає редукцію (колапс) хвильової функції скрізь поза місцем, де частинку реально виявлено, тому його результати повинні описуватися мовою класичної доквантової фізики.
4. Приховані параметри фізичних частинок не існують.
5. Квантова механіка дає повний опис поведінки квантових об'єктів.

Усі ці положення не можна назвати очевидними. Перше положення суперечливе бодай тому, що квантові системи, напевно, не зводяться до окремих частинок. Принцип відносності засобів вимірювання також може

викликати сумнів: адже квантові об'єкти у далекій частині Всесвіту напевно не залежать від їхнього вимірювання нашими приладами, адже люди до них не дісталися. Однак квантові об'єкти самі по собі й вимірювані квантові об'єкти, за «копенгагенцями», є двома різними типами реальності. У доквантовій фізиці ці типи реальності не відрізнялися один від одного, натомість, згідно з «Копенгагенською інтерпретацією», вимірювання створює новий тип реальності.

Адже кожне вимірювання руйнує квантовий об'єкт. Відтворити його в колишньому вигляді неможливо, і тому, за відсутністю кращого, доводиться оперувати лише об'єктами, схожими за своїми параметрами. Бор уважав, що він обходить ці труднощі, проголошуючи принцип доповнювальності. Всі дані вимірювань пар комплементарних величин слід об'єднувати, вважаючи їх доповнювальними одні щодо одних. Інакше неможливо добитися повної картини світу.

Поняття редукації (колапсу) хвильової функції було запроваджене тому, що вимірювання начебто скасовує квантову природу об'єкта; він, зокрема, втрачає здатність демонструвати свої інтерференційні (хвильові) властивості. Це означає, що результат вимірювання виражається мовою класичної фізики. Але й це викликає подив, бо квантова механіка, з одного боку, «скасовує» класичну фізику, а з другого — не може обійтися без неї.

Після появи робіт Шредінгера і Гайзенберга учені дискутували можливість уведення гіпотетичних внутрішніх параметрів, властивих вимірюваним системам (наприклад, частинкам), які б дозволили від імовірності повернутися до звичної детермінованості. Значення таких параметрів не можуть бути виміряні експериментально (зокрема, вони не впливають на власні значення енергії системи), але визначають результат вимірювання інших параметрів системи, що описуються у квантовій механіці хвильовими функціями і/або векторами стану. «Копенгагенці» погодилися: приховані параметри не існують, бо їхня наявність суперечить статусу хвильової функції, якій немає альтернативи. Квантовий опис є повним. Не мають рації ті фізики, які заперечують актуальність цього опису.

Наведена вище «Копенгагенська інтерпретація» з честю витримала перевірку часом, і за понад 90 років не зазнала майже ніяких змін у своїх основах.

У ті роки в Копенгагені в інституті Бора створювалася не лише наука про атом — там виросла інтернаціональна сім'я молодих фізиків. Серед них були Крамерс, Гоудсміт і Розенфельд — із Голландії, Клейн — зі Швеції, Дірак — із Англії, Гайзенберг — із Німеччини, Бріллюєн — із Франції, Паулі — з Австрії, Нішина — з Японії, Уленбек — із Америки, Гамов і Ландау — з СРСР (Гамов мав українське коріння, Ландау буде пов'язаний з Україною пізнішою роботою в Харкові).

Безприкладну в історії науки співдружність учених вирізняли безкомпромісне прагнення до істини, щире захоплення величчю завдань, які їм випало вирішувати, і блискуче почуття гумору, що так гармоніювало зі спільним духом інтелектуального благородства. «Є речі такі серйозні, що про них можна говорити лише жартома», — любив повторювати Нільс Бор, котрий став їхнім учителем і духовним батьком.

Через багато років політичні бурі розкидають їх по цілому світу: Гайзенберг стане керівником німецького «уранового проєкту», Нішина очолить японську уранову програму, сам Нільс Бор, рятуючись від нацистів, опиниться в американському центрі атомних досліджень Лос-Аламос.

Нікого з цих людей давно вже немає серед живих: Шредінгер помер 1961 року, Бор — 1962, Борн — 1970, Гайзенберг — 1976, Дірак — 1985, де Бройль — у 1987 році, й разом із ними пішла ціла епоха фізики, яку можна порівняти з епохою Галілея й Ньютона.

Фотон та принципи невизначеності й відповідності

Нові поняття квантової механіки дуже непросто торували шлях у свідомість навіть фахових учених. Принцип невизначеності Гайзенберга «заборонив» електрону в атомі мати певну траєкторію руху — і навіть фізикам непросто було залишити в минулому поняття класично визначеної траєкторії, яким послуговувалися покоління їхніх попередників. Те ж саме відбувалося і з усіма іншими усталеними поняттями.

Вже в старості Альберт Айнштайн зізнавався: «Усі ці п'ятдесят років нескінченних роздумів ні на йоту не наблизили мене до відповіді на питання: що ж таке кванти світла?...». І це написав автор фотонної теорії фотоефекту, саме за неї вшанований Нобелівською премією. Причому написав через три десятиліття після відкриття й створення теорії ефекту Комптона (його ще називають комптонівським розсіюванням), за що американський фізик Артур Комптон (1892–1962) отримав Нобелівську премію 1927 року. Цей ефект зміни довжини хвилі Х-променів після розсіяння їх електронами речовини вважається прямим доказом існування фотона.

Однак поняття «фотон» (цю назву кванту випромінювання дав 1926 року американський фізик-хімік Гільберт Ньютон Льюїс (1875–1946)), як бачимо, формувалося й утверджувалося теж дуже складно.



Артур Комптон

Послухаймо одного з творців квантової теорії Луї де Бройля: «Відкриття 1923 року ще одного явища дало нові докази існування фотонів. Ми маємо на увазі ефект Комптона. Найбільш характерною особливістю явища, що його відкрив Комптон, була залежність частоти розсіяного випромінювання від кута розсіювання та незалежність її від природи розсіювача тіла. Комптон і, майже водночас, Дебай указали, що всі основні особливості цього нового явища можна пояснити, якщо розглядати взаємодію між електроном і електромагнітною хвилею як зіткнення електрона з падаючим квантом випромінювання, або фотоном. Теорія ефекту Комптона, що прекрасно узгоджується з експериментальними даними, надзвичайно проста й дозволяє, використовуючи лише закони збереження імпульсу й енергії, точно визначити залежність частоти розсіяного фотона від кута розсіювання. Незалежність частоти розсіяного випромінювання від природи розсіювача пояснюється елементарно. Справді, в акті розсіювання беруть участь лише падаючі фотони й електрони, властивості яких абсолютно не залежать від конкретної природи речовини, до складу якої вони належать. Теорія Комптона–Дебая так просто й витончено пояснила найбільш суттєві особливості комптонівського розсіювання, що відразу стала ще одним блискучим доказом спроможності фотонної теорії світла».

Справді, задачу про зіткнення фотона з нерухомим електроном розв'язати майже так само просто, як і задачу про зіткнення двох куль із різною масою. Процес зіткнення та його результати зображено на рисунку:

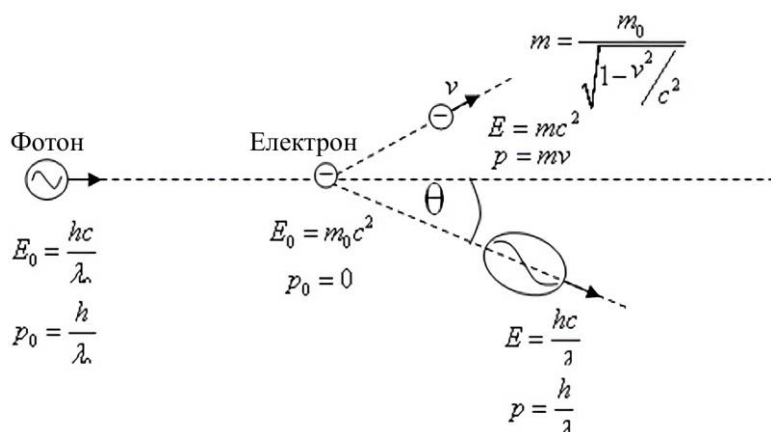


Схема ефекту Комптона: вказано енергії та імпульси фотона й електрона до і після взаємодії

Ми, слідом за самим Комптоном, завжди можемо вважати, що електрон до зіткнення перебуває в спокої, бо його швидкість значно менша від швидкості світла, з якою рухається фотон. Якщо запишемо релятивістські закони збереження енергії та імпульсу для фотона й електрона, отримаємо результат для зміни довжини хвилі фотона, розсіяного під кутом θ до початкового напрямку його руху:

$$\lambda - \lambda_0 = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \theta)$$

Звідси маємо важливий висновок: зміна довжини хвилі є функцією лише кута й ніяк не залежить від матеріалу розсіювача:

$$\Delta\lambda = f(\theta).$$

Разом із тим, завжди виконується співвідношення $\lambda > \lambda_0$ — фотон «червоніє», довжина його хвилі збільшується. Як легко можна побачити, максимальна зміна довжини хвилі відповідатиме розсіянню назад. Її легко вирахувати:

$$\Delta\lambda_{\max}(\pi) = \frac{h}{m_0 c} = 2,42 \cdot 10^{-10} \text{ м.}$$

Отже, ефект Комптона виявляється «виразно», якщо енергія $h\nu$ фотона одного порядку з енергією спокою $m_0 c^2$ електрона. Тому для його спостереження потрібні не будь-які фотони, а вельми високоенергетичні Х-промені.

Усі передбачення нескладної теорії блискуче справдилися на досліді, який Артур Комптон провів у 1923 р. Дослід продемонстрував: діє саме квантова фізика, а не класична (згідно з класичними уявленнями, ніякої зміни частоти не відбувається: електрон випромінює відбиту хвилю на тій самій частоті, що й поглинає). Але розроблена Комптоном теорія, як і теорія фотоефекту, не дає прямої відповіді на питання: а що ж таке сам фотон?

Після створення квантової теорії, до якої ввійшов принцип невизначеності Гайзенберга (1927 рік), фізичний зміст поняття «фотон» суттєво змінився.

Учені, які працювали над «Копенгагенською інтерпретацією», знали: фотон характеризується енергією $E = h\nu$ й імпульсом $E = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$, тобто, для певного фотона імпульс — строго визначена величина, оскільки стала Планка h , довжина хвилі λ , швидкість світла c — мають конкретні значення. Проте принцип невизначеності приводив їх до думки: якщо частинка характеризується певним значенням імпульсу, то має місце повна невизначеність її локалізації в просторі. Звідси випливає, що ніякого просторового поділу електромагнітної хвилі на фотони немає й бути не може.

Але водночас електромагнітна хвиля може мати не довільну, а строго певну (дискретну) низку значень енергії, і мінімальна порція цієї енергії $\Delta E = h\nu$. Чим більша частота випромінювання, тим ця порція більша. За взаємодії електромагнітної хвилі з електронами речовини її енергія змінюється «порційно». Цю ситуацію можна описати моделлю взаємодії фотона, що має енергію $E = h\nu$, з електроном, що перебуває в спокої, оскільки його швидкість значно менша від швидкості фотона. Як стали вважати, саме в цьому й полягає фізичний сенс поняття «фотон». «Поглинання» або «випускання» фотона означає збільшення або зменшення енергії хвилі на певну величину.

Оскільки немає просторового поділу хвилі на фотони, то фотон не є частинкою у звичайному розумінні, як, наприклад, вільний електрон або протон (але не електрон в атомі чи протон в ядрі).

Таким чином, фотон — квазічастинка. Його фізичний зміст полягає в тому, що він є збудженим станом електромагнітного поля. Фотон — квант цього поля, що виявляється у взаємодіях.

До того ж, фотон став лише першою з довгого ряду квазічастинок, відомих сучасній фізиці. До них належать фонони (кванти коливань кристалічної ґратки — це поняття запровадив у 1930 р. радянський фізик Ігор Тамм (1895–1971), хоч до того воно було фактично присутнє в роботах Айнштейна та Дебая з теплоємності твердих тіл), магнони («відповідають» за магнітні явища в магнетиках, концепцію магнону запровадив у 1930 р. швейцарський фізик Фелікс Блох (1905–1983), поглибив і формалізував її в 1946 р. український фізик Олександр Ахієзер), екситони, плазмони, полярони тощо. Врешті-решт, квазічастинками є електрони й «дірки» у твердих тілах, а також нуклони в ядрі.

У ході тривалих дискусій прийшло розуміння того, що квазічастинка фотон — це «наочний» модельний образ і зручний метод дослідження збуджених станів складних систем. Складна задача про взаємодію електронів речовини з полем, що має дискретні рівні енергії, зводиться до значно простішої задачі про зіткнення частинок на основі законів збереження. Реально електрон взаємодіє не з якоюсь певною частинкою, а з електромагнітним полем усієї хвилі.

У релятивістській механіці можливе існування частинок із нульовою масою спокою, — тобто, такі частинки завжди рухаються зі швидкістю світла c . Енергія й імпульс таких частинок зв'язані співвідношенням $E = pc$. Це співвідношення працює й для електромагнітних хвиль — основи квантової теорії поля почав закладати наприкінці 1920-х Поль Дірак. Якщо ці хвилі вкласти у «скриню з дзеркальними стінками», то матимуть місце власні коливання поля. Їх можна проквантувати, використовуючи основні положення квантової механіки. Як результат, ми абсолютно природно приходимо до уявлення про електромагнітне поле як сукупність частинок із нульовою масою спокою, які називають фотонами.

Квантування поля є суттєвим, якщо розглядати процеси випускання й поглинання світла атомом. Електромагнітне поле хвилі у взаємодії з речовиною обмінюється з нею енергією та імпульсом. Отже, поле фотонів буде системою зі змінною кількістю частинок, оскільки фотони поглинатимуться й випускатимуться речовиною.

Фотон, коли виникне, рухається зі швидкістю c , тому він є принципово релятивістським об'єктом, енергія й імпульс якого виражаються через сталу Планка: $E = h\nu$, $p = \frac{h}{\lambda}$. Константа h — все та ж «мітка» квантових об'єктів і явищ. Таким чином, фотон — суто квантовий об'єкт.

Перехід від квантових об'єктів до неквантових описується сформульованим Нільсом Бором ще в 1918 р. принципом відповідності, що стверджує: квантово-механічний опис макросвіту повинен відповідати його опису в рамках класичної фізики за переходу до випадку великих квантових чисел (або до великого значення дії).

Очевидно, що масивні й повільні тіла, для яких дебройлівська довжина хвилі значно менша від їхніх лінійних розмірів, мають добре описуватися законами класичної фізики. Проте, виходячи з принципу відповідності Бора, існує строгий чисельний критерій переходу від квантового до класичного опису явищ природи.

У теоретичній механіці дія — це фізична величина, яка має ту саму вимірність (енергія, множена на час), що й стала Планка h : $[S] = \text{Дж} \cdot \text{с}$. (у системі СІ).

Формулювання законів природи в інтегральній формі дозволяє виключити залежність виду цих законів від вибору динамічних змінних, які використовуються в математичних виразах. Тому дію в найзагальнішому вигляді можна записати як інтеграл:

$$S = \int_{t_1}^{t_2} L dt.$$

Тут L — функція всіх узагальнених координат, узагальнених швидкостей і часу, називається вона функцією Лагранжа. Як ми вже зазначали в резюме до першої частини нашої книги, спрощено її можна уявити як різницю кінетичної та потенціальної енергій. Фундаментальний принцип найменшої дії системи має вигляд:

$$\delta S = 0.$$

Це означає, що реальний рух системи між заданими початковим і кінцевим положеннями відбувається так, що дія S набуває мінімального значення для даних умов.

Математично в задачах теоретичної механіки дію S варіюють за близькими траєкторіями за незмінних крайових умов системи. Така операція приводить до висновку, що рух системи вздовж дійсної траєкторії відбувається відповідно до рівнянь Лагранжа й законів Ньютона.

Зв'язок дії з іншими динамічними характеристиками такий:

$$\text{імпульс } p = \frac{\partial S}{\partial q};$$

$$\text{енергія } E = \frac{\partial S}{\partial t};$$

$$\text{момент імпульсу } L = \frac{\partial S}{\partial \varphi}.$$

Тут q і φ — узагальнені координати, що відповідають руху за радіусом і кутом у полярних координатах, t — час.

Як стало зрозуміло після класичних робіт Жозефа-Луї Лагранжа (1760–61 рр.) та Вільяма Ровена Гамільтона (1834–35 рр.), поняття дії є універсальним. Фізичні системи різної природи можна описати з використанням цієї фізичної характеристики.

У квантованому світі існує елементарний (мінімальний) квант дії. Як можна здогадатися, це квантова стала Планка, що має однакову з дією вимірність: $h = 6,6260753 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$.

Якщо дія S системи значно більша за h , то квантові ефекти в ній практично не виявляються. Принцип відповідності Бора пояснює, чому присутність h у формулах є своєрідною «міткою» квантових явищ.

За переходу до класичного розгляду ($S \gg h$, або ж величиною h можна знехтувати) поняття фотона «зникає само собою», оскільки за $h = 0$ «зникає» його енергія $E = h\nu$. У цьому ще раз виявляється принцип відповідності Бора:

квантовий опис за великих квантових чисел (великих значеннях дії) переходить у класичний.

На відміну від фотона, електрон можна розглядати і в нерелятивістському, і в неквантовому наближенні ($m \neq 0$; $v \ll c$). Виходячи з цього, фотони слід відносити до квантів поля (польових частинок), а електрони вважати справжніми частинками (частинками речовини).

Проте енергія релятивістського електрона (як це строго показав Поль Дірак) $E^2 = (cp)^2 + (m_0c^2)^2$, а в ультрарелятивістському наближенні, коли $cp \gg m_0c^2$, маємо для електрона $E = cp$ — тобто, зв'язок між енергією та імпульсом електрона буде такий самий, як і у фотона. Таким чином, в ультрарелятивістській квантовій області грані й відмінності між польовими частинками й частинками речовини стираються. Це означає, що взаємне перетворення електромагнітного поля на речовину, а речовини — на електромагнітне поле енергетично не заборонено.

Усі ці результати теоретичних дискусій 1920-х рр. отримали в подальшому експериментальне підтвердження.

Поява фізики напівпровідників

Саме напівпровідники як клас матеріалів найбільшою мірою змінили життя людства, починаючи з другої половини XX ст. Завдяки напівпровідникам з'явилися компактні радіоприймачі, комп'ютери, побутова електроніка та багато інших речей, які ще кілька десятиліть тому здавалися б фантастичними. Водночас становлення науки про напівпровідники, розуміння фізичних основ їхнього функціонування в приладах стало можливим лише завдяки розвитку квантової механіки, появі формалізму хвильового рівняння Ервіна Шредінгера і тим роботам з фізики й статистики електронного газу в твердих тілах, які виконали, починаючи з середини 1920-х рр., Вольфганг Паулі, Поль Дірак, Енріко Фермі.

З окремими напівпровідниками (наприклад, з кремнієм) люди мали справу з давніх-давен — щоправда, не в їхній «електричній іпостасі». Починаючи з XVIII ст., учені активно вивчали електричні властивості різних матеріалів, які ми сьогодні називаємо напівпровідниковими. Ми вже декілька разів згадували про те, що в 1729 р. англієць Стівен Грей відкрив явище електропровідності. Саме слово «напівпровідник» уперше вжив славетний італійський учений Алессандро Вольта у доповіді перед Лондонським Королівським товариством 14 березня 1782 року. Доторкаючись до електрометра різними предметами, він установив, що доторк металу призводить до миттєвого розряду електрометра, доторк діелектрика не розряджає електрометра зовсім, але існують певні матеріали, через які електрометр теж розряджається, але впродовж певного скінченного часу. Їх Вольта й назвав «напівпровідниками». Однак це визначення ще дуже далеке від сучасного розуміння суті напівпровідників.

Використовуючи «вольтів стовп», англійський фізико-хімік Гамфрі Деві у 1821 р. встановив факт залежності електричної провідності від температури,

причому зі збільшенням температури провідність металів (тоді вживали термін «сила провідності» — «*conducting power*») зменшувалася. Геніальний учень Деві Майкл Фарадей у 1833 році виявив дивовижну властивість сульфїду срібла Ag_2S : при кімнатній температурі його провідність була дуже низькою, однак при 175°C різко зростала до «металічних» значень. Таким чином, було відкрито, що провідність з температурою може в окремих речовинах зростати. На жаль, Фарадей, який віддавав перевагу якісним експериментам, не залишив при цьому жодних кількісних таблиць чи графіків.

Пізніше виявилось, що на провідність твердих тіл може впливати не лише температура, але й світло. У 1839 році молодий французький фізик Едмон Беккерель (1820–1891), помістивши в електроліт платівку хлориду срібла з платиновими контактами, вперше спостеріг явище фотоефекту — появи напруги при освітленні. Англійський інженер Вілловбі Сміт (1828–1891) у 1873 році встановив факт різкого зменшення опору селену при його освітленні. На цьому ефекті упродовж майже півтора століття діють різноманітні фотоекспонетри. А в 1884 р. американець Чарлз Фрітс створив на основі селену першу працюючу сонячну батарею. Однак фізична природа дивовижних властивостей селену залишалась незрозумілою впродовж майже 60 років.

1874 року німецький фізик і винахідник Карл Фердинанд Браун опублікував статтю «Про провідність струму через поверхні металів». У ній він стверджував, що точковий контакт металу з сульфідом металу може бути випрямлячем: пропускати струм в одному напрямку і не пропускати в іншому. Це відкриття широко застосовувалося в перших «детекторних» приймачах, які не потребували електричного живлення. Як ми вже згадували, пізніше Браун активно співпрацював з винахідником радіо Гульєльмо Марконі, і їх разом було вшановано Нобелівською премією з фізики 1909 року.

Новим потужним методом вивчення твердих тіл стало застосування ефекту Голла, відкритого американцем Едвіном Голлом (1855–1938) у 1879 році. Відхилення носіїв заряду в тонкій пластині провідника під дією перпендикулярного до пластини магнітного поля дозволяло за поперечною «голлівською» напругою, що при цьому виникає, визначити не тільки знак заряду носіїв (позитивні й негативні заряди відхиляються магнітним полем у різний бік), але і їхню концентрацію. Проте фізична природа носіїв заряду в провідниках усе ще була незрозумілою (як ми пам'ятаємо з попередньої частини нашої книги, це питання довго лишалося відкритим — від XVIII століття вірили в існування спеціальної «електричної рідини», здатної перетікати між тілами). У 1897 р. Джозеф Джон Томсон показав, що катодні промені складаються з негативно заряджених частинок — електронів. Так було остаточно вирішено питання про матеріальні переносники електричного струму.

На основі цих відкриттів Пауль Друде побудував класичну електронну теорію електропровідності металів (1900). Згідно з нею, струм у металі переносять електрони, які поводять себе як класичний ідеальний газ. Ми вже згадували в попередній частині книги про те, що одержана Друде формула для питомої провідності свідчила: оскільки з підвищенням температури електрони повинні розсіюватися інтенсивніше, середній час життя і провідність мають падати. Так теорія якісно пояснила встановлене експериментально ще Деві

збільшення питомого опору металів $\rho = 1/\sigma$ з температурою (що справедливо для діапазону не надто низьких температур):

$$\rho(t) = \rho_0(1 + \alpha t),$$

де t — температура в градусах Цельсія, α — коефіцієнт пропорційності. (Аналітично цю формулу для діапазону достатньо високих температур з урахуванням розсіяння електронів на коливаннях ґратки — фононах отримав Фелікс Блох лишень у 1930 році.)

Нарешті, на якісному рівні стала зрозуміла й різниця між металами й діелектриками: в перших є багато електронів провідності (це зумовлює їхній характерний «металічний» блиск — поверхневий заряд добре відбиває світло), у других електронів провідності чомусь немає.

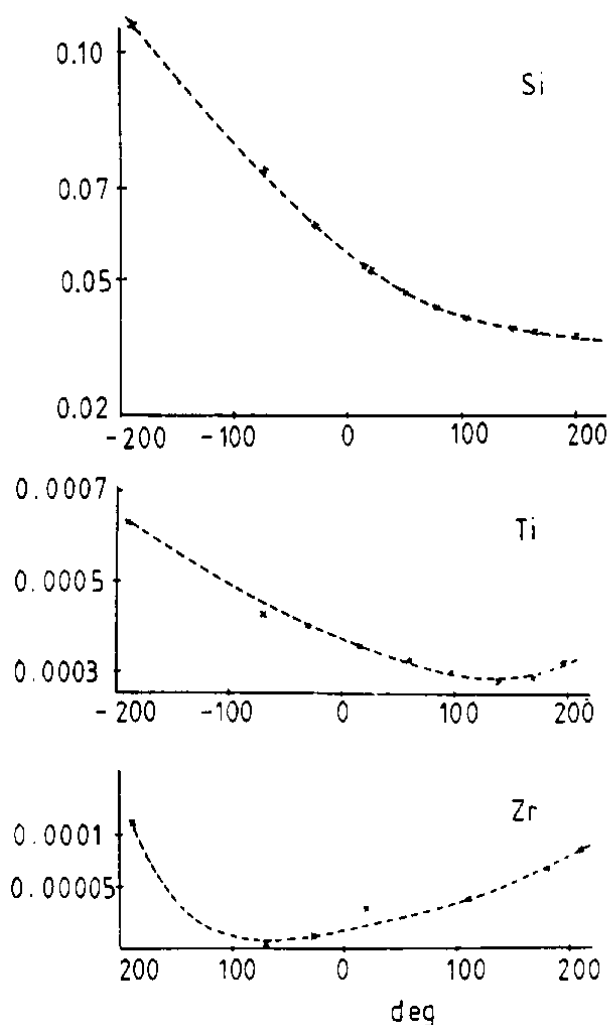
Для підтвердження теорії Друде був поставлений ряд дослідів. Німецький фізик Карл Рікке в 1901 році взяв три циліндри — два мідні й один алюмінієвий — з добре відшліфованими торцями, зважив їх і склав послідовно в коло мідь–алюміній–мідь. Через такий складений провідник протягом року безперервно пропускали постійний струм. За рік через цей провідник пройшов велетенський заряд близько $3,42 \cdot 10^6$ Кл. Дослідження циліндрів показало, що пропускання струму не вплинуло на вагу циліндрів. Більше того, не було виявлено слідів проникнення одного металу в інший на торцях циліндрів. Таким чином, дослідни показували, що перенесення заряду в металі здійснюється не атомами, а таки електронами.

Однак наявності матеріалів, опір яких з температурою зменшується, теорія Друде пояснити не могла. Наступний крок у спробах пояснити таку «аномалію» зробив професор Фрайбурзького університету в Німеччині Йоганн Георг Кенігсбергер (1874–1946). Професор Кенігсбергер був різнобічним ученим, його праці стосувалися електричних, оптичних та термічних властивостей багатьох природних мінералів та штучних сполук. Крім того, вчений цікавився спектроскопією, термічним випромінюванням і геофізичними явищами.



Йоганн Кенігсбергер

У 1908 р. Кенігсбергер разом з Шіллінгом показав, що температурна залежність питомого опору низки матеріалів (наприклад, титану і цирконію), має вигляд кривої з мінімумом, а опір кремнію знижується в усьому досліджуваному діапазоні температур.



Температурна залежність питомого опору Si, Ti, Zr (графіки з роботи Кенігсбергера та Шіллінга, 1908 р.)

Намагаючись пояснити отримані залежності, Кенігсбергер постулював, що насправді носії провідності в будь-якому матеріалі з'являються в результаті дисоціації атомів на вільні електрони та позитивні йони, кількість яких дорівнює:

$$N = N_o \exp\left(-\frac{Q}{t + 273}\right),$$

де величина Q пропорційна енергії дисоціації. Це припущення дозволило модифікувати записаний вище вираз для температурної залежності провідності як

$$\rho(t) = \rho_o(1 + \alpha t) \exp\left(\frac{Q}{t + 273}\right),$$

що очевидно може пояснити одержані Кенігсбергером експериментальні криві з мінімумами: спершу опір падає через збільшення кількості числа електронів провідності, а потім починає зростати через збільшення їхнього розсіювання на коливаннях йонів кристалічної ґратки. Хоча сам Кенігсбергер не міг запропонувати жодної моделі для визначення енергії дисоціації, однак у подальшій роботі він у 1914 р. розділив усі матеріали на метали, ізолятори і «змінні провідники» (нім. *variable Leiter*) саме за значенням Q : для ізоляторів Q прямує до нескінченності (отже, вільних електронів провідності в них немає), а

для металів при високих температурах — до нуля (тому в металах число електронів провідності дорівнює числу атомів — Друде виходив саме з цього припущення). У «змінних провідниках» натомість значення Q скінченне, що призводить до експоненційного зниження їхнього питомого опору з підвищенням температури!

Слід наголосити: Кенігсбергер також експериментально показав, що значення Q у «змінних провідниках» критично залежить від ступеня їхнього очищення й наявності структурних недосконалостей досліджуваних зразків. Це дає нам змогу датувати початок науки про напівпровідники саме 1914 роком — часом появи роботи Кенігсбергера. Адже віднині експериментальні факти стосувалися вже не розрізнених «аномальних» матеріалів, а нового класу речовин із цілком визначеними властивостями.

Цікаво, що самого терміна «напівпровідник» (нім. *Halbleiter*) Кенігсбергер при цьому не вживав. Це слово вперше застосував його студент Вайсс у захищеній 1910 року докторській дисертації; саме воно потім набуло загального поширення. Але навіть ця термінологічна неузгодженість не заважає оголосити саме Йоганна Кенігсбергера «батьком» сучасного поняття «напівпровідники».

Паралельно з Кенігсбергером і його учнями напівпровідникові матеріали активно вивчав також професор фізики в університеті в Єні Карл Бедкер (1877–1914). Талановитий фізик, син видавця всесвітньо відомих туристичних путівників Фріца Бедкера, загинув на фронті 37-річним у перший же тиждень Першої світової війни. Тому його список праць короткий, але головні його роботи відзначаються великою ретельністю й піонерським підходом, а книга «Електричні явища в металічних провідниках» (1911) правила за підручник ще упродовж двох десятиліть.



Карл Бедкер

Чи не найбільшим «бичем» тодішнього експерименту щодо провідності була дуже погана відтворюваність результатів. У 1907 р. Бедкер запропонував

новий метод виготовлення зразків. Він наносив тонкі плівки міді, срібла, кадмію, талію та свинцю на скляну або слюдяну підкладку розпорошуванням. При цьому товщину отриманої плівки вчений визначав точним зважуванням. Потому ці плівки витримувалися в кисні або ж у парах сірки, селену, миш'яку чи йоду для отримання потрібних сполук.

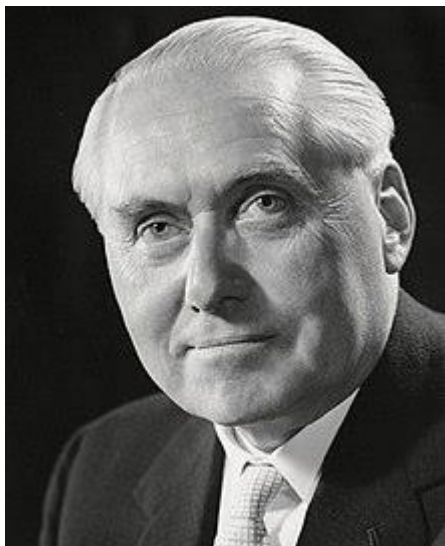
Найцікавіші результати було отримано на йодиді міді CuI . Отримані плівки мали дуже високу, суто металічну провідність, але, залишені на повітрі при кімнатній температурі, робилися майже ізоляторами. Але поновне експонування плівки в парах йоду повертало металічну провідність, зменшуючи опір на кілька порядків. Причому такий оборотний процес можна було повторити кілька разів. Звідси впливав очевидний висновок: провідність критично залежала від умісту йоду в зразку.

Саме Бедекер першим виміряв ефект Голла в напівпровідниковій плівці CuI . Першою несподіванкою виявилось те, що полярність голлівської напруги була протилежною до тієї, яка, за аналогічної геометрії досліду, спостерігалася у вісмуті. Отже, слід було припустити, що струм у CuI переносять носії з позитивним зарядом! Так було вперше виявлено діркову провідність у напівпровіднику — хоч ані слова «дірка», ані слова «напівпровідник» ужито при цьому ще не було. Але, вимірюючи величину сталої Голла і припустивши, що струм переносять носії одного виду, Бедекер підтвердив справедливості постульованої Кенігсбергером формули: число носіїв справді експоненційно зростало з температурою.

У наступні роки різними дослідниками було виявлено чимало сполук із напівпровідниковими властивостями. Чи не «найпопулярнішою» з них став закис міді CuO_2 . Як показав професор Геттінгенського університету Бернгард Гудден (1892–1945), автор чи не першого огляду з провідності напівпровідникових сполук, що вийшов у 1924 р., опір різних зразків CuO_2 при кімнатній температурі міг різнитися на 6–7 порядків. При цьому провідність закису міді зростала при збільшенні тиску кисню.

Напівпровідники поставили неабияку загадку перед теоретиками, і розгадати її класична фізика не могла принципово. Як ми вже згадували вище, в 1927 р., відразу ж після створення основ квантової механіки, Вольфганг Паулі й Енріко Фермі розробили теорію сильно виродженого електронного газу в металах, а швейцарець Фелікс Блох, тоді пост-док у Гайзенберга в Лейпцигу, у 1928 р. отримав загальний вигляд хвильових функцій у періодичному потенціалі і двома роками пізніше розвинув теорію температурної залежності опору металів з урахуванням розсіяння носіїв на коливаннях іонів ґратки. Він отримав відомий «класичний» граничний випадок для високих температур ($\rho \sim T$) і показав, що за низьких температур може реалізуватися т.зв. «режим Блоха–Грюнайзена» $\rho \sim T^5$. Проте Блох навіть не намагався пояснити існування металів, напівпровідників та ізоляторів.

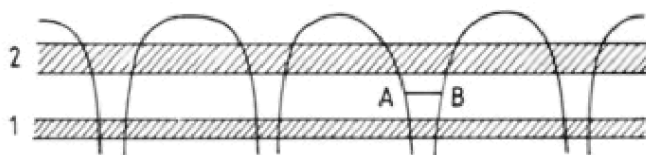
Тому «батьком» зонної теорії твердих тіл можна по праву вважати британця Алана Вілсона (1906–1995), який, після навчання у Рольфа Фаулера в Кембриджі (в нього вчився й Поль Дірак), стажувався на початку 1930-х у Лейпцигу в Гайзенберга, де й познайомився з роботами Блоха.



Алан Вілсон (1969 р.)

Дві класичні статті Вілсона з'явилися в «Працях Королівського товариства» впродовж 1931 року. В них учений уперше запровадив звичну для нас картинку з зонами дозволених енергій і забороненими зонами поміж ними, ввів поняття «донорів» і «акцепторів», запропонував розрізняти «власні» (*intrinsic*) і «домішкові» (*extrinsic*) напівпровідники, де провідність у першому випадку зумовлена переходами електронів між двома дозволеними зонами, а в другому — переходами з домішкового рівня в дозволену зону. Таким чином, інтуїтивно запроваджене Кенігсбергером поняття «енергії дисоціації» отримало фізичний зміст енергії забороненої зони (реально за стану тодішніх технологій — енергії термічної активації домішкового рівня), а запропонований 1914 року поділ на метали, діелектрики і напівпровідники отримав пояснення й підтвердження.

Варто зазначити, що остаточно поняття «дірок» як носіїв струму з позитивним зарядом було запроваджено того ж 1931 року Вернером Гайзенбергом, який інтерпретував таким чином вільні місця у майже заповненій валентній зоні.



Найперша зонна діаграма напівпровідника з роботи Алана Вілсона (1931 р.)

В ті ж роки незалежно російський фізик Яків Френкель (1894–1952) та німець Вальтер Шотткі (1886–1976) розробили власні моделі точкових дефектів у кристалічних ґратках, які не лише дозволили описати електронну провідність іонних кристалів, а й відіграли велику роль у дальшому розвитку науки про напівпровідники. Так на початку 1930-х було закладено підвалини теорії напівпровідників.

Вільям Шоклі

(1910–1989)

Хоча зонна теорія напівпровідників і досягнула в 1930-і великих успіхів, однак цілковита нерозробленість технологій отримання «чистих» матеріалів аж до кінця 1940-х рр. ставила під сумнів саму можливість експериментального дослідження «власних» напівпровідників. Усі реальні тогочасні напівпровідники були «брудними», сильно «домішковими», а результати на них — погано відтворюваними. Прочитуємо лист Вольфганга Паулі до Рудольфа Паєрлса, написаний 1931 року: «З напівпровідниками працювати не варто, вони — суцільна плутанина, хтозна, чи існують ці напівпровідники взагалі». Таке ставлення до напівпровідників зберігалося загалом до кінця 1930-х.



Джон Бардін, Вільям Шоклі, Волтер Браттейн (1948 р.)

Таке ставлення радикально змінилося лише після винайдення американським ученим Вільямом Шоклі та його колегами Джоном Бардінім (1908–1991) і Волтером Браттейном (1902–1987) транзистора на p - n переходах (1951). Цей винахід уможливив неймовірний технологічний прорив людства практично в усіх галузях і був ушанований Нобелівською премією 1956 року. Експерти вважають винайдення транзистора однією з трьох центральних фізичних подій XX століття (поруч зі створенням квантової механіки та винайденням лазерів). Цей винахід прямо пов'язаний зі здобутками квантової механіки, описаними вище. А доля винахідника транзистора Вільяма Шоклі є яскравою ілюстрацією того, якою непростю іноді буває історія наукових відкриттів і технологічних здобутків.

Майбутній науковець закінчив 1932 року Каліфорнійський технологічний інститут, а ще за два роки — докторат у Массачусетському технологічному інституті під керівництвом Джона Слейтера (1900–1976), одного з піонерів квантової фізики твердого тіла. Потому працював у «Белл Лабораторіз». Під час Другої світової — у групі боротьби з підводними човнами розробляв переважно логістику (вибір оптимальних маршрутів для конвоїв, глибини встановлення мін тощо). З 1944 року навчав пілотів B29 користуватися першими радарми. У липні 1945-го — брав участь в опрацюванні оцінки можливих наслідків десанту на Японські острови. Отримані цифри (5–10 мільйонів убитих японців, втрати союзників — 1,7–4 мільйони, із них 400–800 тисяч убитих) стали одним із аргументів на користь рішення про атомне бомбардування Гіросіми й Нагасакі.

Після війни Шоклі повернувся в «Белл Лабораторізі», де очолив групу фізики твердого тіла. На той час як випрямлячі й підсилювачі в радіотехніці й перших комп'ютерах (найперший споруджено в США в 1945–46 роках, перший у континентальній Європі — в Києві 1950 року) використовували електронні вакуумні лампи (діоди й тріоди) — громіздкі й недовговічні, через які техніка часто перегрівалася й виходила з ладу. Завданням групи було отримати ефект підсилення на напівпровідниках, щоб зробити підсилювачі компактнішими й надійнішими.

Спершу Шоклі захопився ідеєю польового транзистора, де провідність в каналі від витоку й до стоку можна було б регулювати, прикладаючи напругу до затвору і таким чином отримуючи необхідний ефект підсилення: малий сигнал на затворі приводив би до великих змін струму в колі витік-стік. (Точно за такою схемою працювали вакуумні тріоди, де струм між анодом і катодом регулювався поданням невеликої напруги на проміжний електрод — сітку).

Проте реально на тогочасних погано виготовлених зразках реалізувати цю ідею не вдалося. Як з'ясував один зі співробітників Шоклі, Джон Бардін, зовнішнє поле екранувалося великою кількістю носіїв, зв'язаних на енергетичних станах на поверхні, й фактично не проникало всередину. Так суто експериментальне завдання стало поштовхом для створення квантово-механічної теорії поверхневих станів у напівпровідниках (1946).

Коли ж нарешті всі труднощі було подолано й перші експериментальні зразки польових транзисторів були готові, виявилось, що ідею ще 1925 року запатентував Юліус Лілієнфельд (1882–1963) — фізик, котрий народився у Львові, почав наукову кар'єру в Німеччині й продовжив її у США. Дарма що тоді ідею польового транзистора ще не можна було здійснити технологічно — патент, що його отримав Лілієнфельд, виключав можливість комерційного використання ідеї Шоклі та його колег.

Відтак Джон Бардін разом із Волтером Браттейном зосередилися на ідеї створення транзисторів на точкових контактах. Адже випрямляючі властивості контактів метал-напівпровідник були на той час уже відомі (над цими питаннями ще до війни в СРСР працював Абрам Йоффе, а перший кристалічний детектор — кристал напівпровідника, в який впирається тонкий металевий дріт, — винайшов ще в XIX ст. професор Страсбурзького університету Карл Фердинанд Браун). Ідею транзистора на точкових контактах було практично реалізовано в грудні 1947-го — проте такі транзистори виявилися нетехнологічними й великого поширення не набули.



Перші транзистори на точкових контактах, продемонстровані 23 грудня 1947 р.

Натомість Шоклі вважав перспективним створення транзистора на двох p - n -переходах (ефект випрямлення на напівпровідниковому p - n -переході отримав експериментально Вадим Лашкарьов 1941 р. в Києві — про це відкриття ми докладніше поговоримо в наступному розділі). Але для початку треба було зрозуміти, як саме носії заряду — електрони й дірки — рухаються й рекомбінують усередині напівпровідника. Шоклі розв'язав диференціальні рівняння для дифузійного й дрейфового руху носіїв і побудував модель рекомбінації через домішкові рівні (модель Шоклі-Ріда). Результати, які він отримав, лягли в основу фундаментальної монографії «Електрони й дірки в напівпровідниках» (1950).

Наступного року науковець стає дійсним членом Американської академії наук — наймолодшим упродовж усієї її попередньої історії. І — найголовніше — того-таки 1951 року схожі на триногих павучків перші напівпровідникові транзистори, в яких невеликою зміною струму через електрод бази можна було ефективно керувати струмом у колі «емітер–колектор», почали переможну ходу планетою, несучи справжню технологічну революцію. Компактні (порівняно з громіздкими ламповими попередниками) транзисторні радіоприймачі стали (разом із групою «Бітлз», чії пісні через ці приймачі лунали) одним із символів 1960-х років.

1953 року вчений залишає «Белл Лабораторіз» і переїздить до Каліфорнійського технологічного. З 1955 року він — директор «Напівпровідникової лабораторії Шоклі» в Маунт Веллі у Каліфорнії (пізніше ця місцевість — «Кремнієва долина» — стане символом стрімкого технологічного поступу). Хоча перші транзистори «Белл Лабораторіз» було створено на германії, саме Шоклі правильно передбачив технологічні переваги кремнію і розгорнув роботи саме з цим матеріалом, який досі є основою напівпровідникової електроніки. Проте ніхто з колишніх колег із «Белл Лабораторіз» із Шоклі не поїхав — через дуже складний і конфліктний характер ученого.

1956 року Шоклі, Бардіну й Браттейну за винайдення транзистора було присуджено Нобелівську премію з фізики, й колишні колеги знову зустрілися на церемонії її вручення. Існує переказ, що король Швеції Густав VI Адольф запитав у Бардіна, чому з ним немає його синів, а коли почув у відповідь, що науковець не вважав за доцільне відривати їх від лекцій у Гарварді, покарав Бардіна за те, що той позбавив їх унікальної нагоди. «Наступного разу я візьму їх із собою!» — пообіцяв Бардін. І справді, 1972 року він став нобелівським лауреатом удруге, цього разу — разом із Леоном Купером (1930-2024) та Джоном Робертом Шріффером (1931–2019) за побудову теорії надпровідності, й став одним із чотирьох «двічі лауреатів» за весь час присудження Нобелівських премій. (Нагадаємо: першим «двічі лауреатом» — з фізики (1903) і з хімії (1911) — стала легендарна Марія Склодовська-Кюрі за дослідження в галузі радіоактивності).

Нобелівська премія стала для Шоклі останнім злетом. 1957 року від нього пішли основні співробітники. Відомі як «зрадницька вісімка», вони заснували фірму «Fairchild Semiconductor», яка незабаром зробилася лідером у галузі напівпровідникових технологій. Протягом наступних 20 років «Fairchild Semiconductor» стала інкубатором для десятків високотехнологічних корпорацій, включаючи таких гігантів Кремнійової долини, як Intel Corp. та Advanced Micro Devices, Inc. (AMD). Не маючи можливості конкурувати з «Fairchild Semiconductor», Шоклі покинув електронну промисловість у 1963 році, щоб стати професором технічних наук у Стенфордському університеті. Ще раніше, в 1961 році науковець потрапляє в серйозну автокатастрофу.

Останні роки життя Шоклі пов'язані переважно зі скандалами. Науковець завжди славився неймовірно складною вдачею й нехиттю зважати на усталені правила. Так, він відверто позиціонував себе як атеїста — а в тодішній Америці це було щонайменше не заведено. Він єдиний відкрито оголосив, що віддав свою сперму в «Банк Нобелівських лауреатів» — для зачаття майбутніх геніїв.

Цей екстравагантний учинок був пов'язаний із тим, що науковець серйозно захопився євгенікою — ученням про те, що людські здібності успадковуються. Тодішня євгеніка мала виразно расистський присмак: вважалося, що серед чорних народжується значно більше нездібних дітей і менше талановитих, аніж серед білих. Якщо додати сюди заяви Шоклі про необхідність примусової стерилізації осіб із нижчим від 100 IQ, то зрозуміло, чому науковець став об'єктом цькування з боку газет (із якими він постійно судився).

Через це все між науковцем і його оточенням виросла справжня стіна непорозуміння. Коли він помер 1989 року від раку простати, його власні діти від першого шлюбу довідалися про це з повідомлень телебачення.

Поза тим Шоклі не був похмурим відлюдьком чи людиноненависником. Він захоплювався альпінізмом, любив показувати фокуси, і після однієї зі своїх доповідей на Американському фізичному товаристві вразив аудиторію — несподівано видобув невідь-звідки букет троянд.

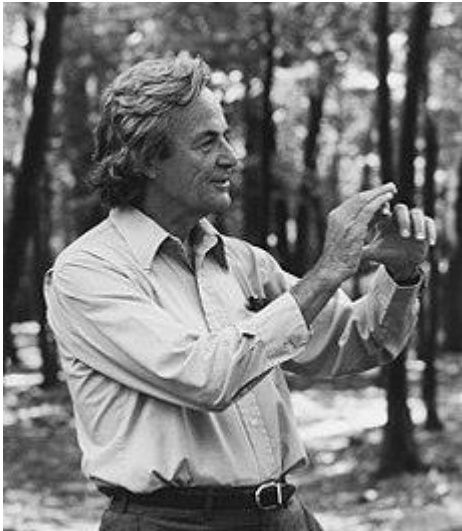
Такою звивистою і по-своєму трагічною виявилася доля людини, котра подарувала світові одне з найвизначніших відкриттів XX століття, відкриття, яке, без перебільшення, революціонізувало технічні можливості людства — і зробило це неймовірно швидко. Адже першу інтегральну мікросхему — два

транзистори, опір і кілька конденсаторів — було зібрано 1959 року на одному кристалі, що мав у діаметрі 2 см, фактично вручну. Нині робоча довжина каналу кремнійового транзистора метал–оксид–напівпровідник наближається до 5 нм — і близька вже до фундаментальної межі, що виникає через квантові ефекти.

2002 року Шоклі посмертно названо «людиною, яка принесла кремній у Кремнійову долину».

Річард Файнмен (1918–1988)

Річард Філіпс Файнмен належить до найяскравіших, і водночас — найсимпатичніших постатей історії науки. За ним — не лише величезний доробок у квантовій теорії поля, фізиці елементарних частинок та теорії слабких взаємодій, який свідчить про справжню геніальність ученого, але й безліч легенд і переказів, пов'язаних з його артистичною натурою та екстравагантною поведінкою.



Річард Файнмен (1984 р.)

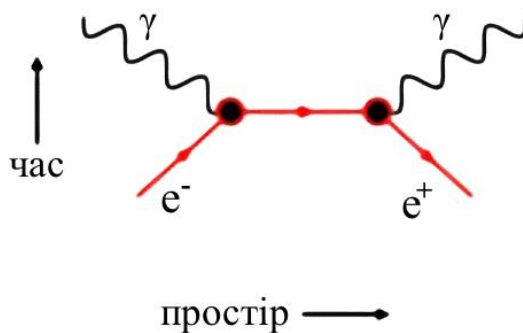
Майбутній учений народився в Нью-Йорку в родині євреїв, які прибули до Америки з Мінська. Нахил до знань у хлопчику тактовно намагався пробудити батько — і його зусилля впали на вдячний ґрунт. А в 13 років Річард сам почав заробляти, ремонтуючи сусідам радіоприймачі (нагадаємо: вони ще були тоді технічною «дивовижею»).

Талановитий юнак закінчив чотирирічний курс у Массачусетському технологічному і продовжив навчання в Принстоні. Аспіранта Файнмена (ступінь доктора філософії він здобув у 1942-му за дисертацію «Принцип найменшої дії в квантовій механіці») було залучено до роботи в «Мангеттенському проєкті», і він відбув до Лос-Аламоса. Перед тим він у супереч волі батьків узяв шлюб із Арін Грінбаум, у яку був закоханий з дитинства. Уже тоді його наречена була смертельно хвора на сухоти. Всі вихідні під час роботи над атомним проєктом Файнмен проводив у госпіталі разом із дружиною, і її смерть стала для нього тяжкою втратою.

Слід відзначити: на початку проблема того, чи варто працювати над нищівною бомбою, здавалася молодому вченому морально неоднозначною. Але розуміння того, що в іншому разі бомбу першими можуть зробити й використати нацисти, переконало Файнмена в правильності такого кроку. Вже в Лос-Аламосі виявилася й неординарність вдачі вченого: прагнучи продемонструвати недостатність заходів безпеки, він навчився відкривати замки найскладніших сейфів, причому робив це не інтуїтивно, а спираючись на строгу теоретичну базу, що вимагала розуміння тонкощів роботи замкових механізмів.

У 1950-і Файнмен працює в Каліфорнійському технологічному інституті. Його стиль дослідника передбачав ставлення до задачі як до захопливої інтелектуальної гри (саме так він знаходив раніше несправності в радіоприймачах і отримував алгоритми відмикання сейфів). Його роботи цих років стосуються багатьох питань квантової фізики, серед яких поглиблення теорії надпровідності й надплинності. Разом із першовідкривачем «кварків» Мюррі Гелл-Манном (1929–2019) він створив теорію так званого «слабкого розпаду» — бета-розпаду вільного нейтрона на протон, електрон та антинейтрино.

Під час своєї роботи Файнмен розробив метод інтегралів за траєкторіями (1948), яким спробував продемонструвати принципову різницю квантового та класичного рухів частинок, і запропонував техніку діаграм для візуалізації взаємодій частинок у просторі-часі, що нині носять його ім'я (1949), і без якої через спрощення і наочність розрахунків уже неможливо уявити розв'язання надзвичайно глибоких і складних квантово-електродинамічних задач.



Діаграма Файнмена для процесу анігіляції електрона й позитрона

У 1959 р. у своїй знаменитій лекції «Внизу є багато місця», прочитаній на засіданні Американського фізичного товариства в Каліфорнійському технологічному інституті, Файнмен передбачив колосальні можливості, які відкриє перед дослідниками й технологіями перехід до лінійних розмірів електронних пристроїв, порівняних із довжиною хвилі де Бройля для електрона. Він стверджував, що при цьому фізичні й хімічні властивості звичних для нас матеріалів радикально зміняться найнесподіванішим чином. Тому саме Фейнман став постаттю, чий дивовижний прогноз заклав ідейне підґрунтя для майбутнього поступу нанофізики й нанотехнологій.

Нобелівську премію 1965 р. з фізики Файнмену було присуджено разом із японцем Сінїтіро Томонагою (1906–1979) та американцем Джуліаном Швінгером (1918–1994) «за фундаментальні роботи з квантової електродинаміки, які мали велике значення для фізики елементарних частинок».

У 1960 р. теоретику Файнмену було запропоновано створити новий курс лекцій із загальної фізики, — оскільки керівництво Каліфорнійського технологічного інституту вирішило, що традиційні лекційні курси вже не відповідають вимогам сьогодення і не готують студентів до справді творчої роботи. Наслідком стала поява у 1963 р. знаменитих «Файнменових лекцій з фізики» в трьох томах. Сьогодні цей без перебільшення найпопулярніший підручник з фізики останніх десятиліть перекладено багатьма мовами (зокрема, готується й український переклад), а в оригіналі його виставлено в загальному доступі: feynmanlectures.caltech.edu.

Водночас Файнмен, будучи багатогранною особистістю, яскраво виявляв себе і в речах, далеких від фізики: він прекрасно танцював самбу, грав на тамтамі, професійно малював портрети, брав участь у ризикованих психологічних експериментах зі збудження галюцинацій. Про все це він цікаво, дотепно й чесно розповів у автобіографічній книзі «Та ви жартуєте, містере Файнмен! Пригоди допитливого дивака», що зробилася світовим бестселером і була видана в 2018 р. в перекладі й українською мовою.

У 1986 р. саме Файнмен у простих і наочних експериментах не побоявся продемонструвати реальну причину катастрофи на 73-й секунді злету космічного шатла «Челленджер», жертвами якої стали семеро астронавтів, і яка вразила без перебільшення весь світ (мільйони людей спостерігали за нею в прямій телетрансляції). Причиною трагедії стала ненадійність характеристик теплозахисних покриттів гумових з'єднань першого ступеня ракети-носія при роботі за низьких температур, які спричинили руйнування конструкцій, а потім — вибух від механічного удару уламка в паливний бак. Керівництво НАСА, як виявилось, знало про цю проблему, але, сподіваючись, що «пронесе», призначило старт за прохолодної січневої погоди. Вирішальний дослід учений провів у прямому ефірі з допомогою шматочка гумового з'єднання, склянки з льодом та пасатижів. Так само наочно він намагався пояснювати й інші, значно складніші фізичні проблеми.

Протягом останніх десяти років життя Файнмен мужньо боровся з рідкісним поєднанням двох різновидів раку. На певному етапі, коли болі зробилися нестерпними, він вирішив припинити виснажливе й уже безперспективне лікування. Поруч із ним було пізніше поховано його третю дружину Гвінет, з якою вони разом щасливо прожили понад чверть століття.

Не буде перебільшенням сказати, що саме Річард Файнмен надав сучасній квантовій фізиці (включаючи квантову електродинаміку) класичної завершеності.

Український внесок у квантову фізику

До 1917 року Україна залишалася поділеною між двома імперіями — Російською та Австро-Угорською. На її території діяло п'ять класичних університетів (три — Харківський, Київський та Новоросійський в Одесі — в імперії Романових, два — Львівський та Чернівецький — в імперії Габсбургів). Навчальні програми всіх цих університетів включали курси фізики, проте відповідні кафедри через проблеми з кваліфікованими кадрами й лабораторним обладнанням рідко виходили на передній край світового наукового пошуку. До винятків можна зарахувати роботу Мар'яна Смолуховського у Львові; Миколи Умова, який у 1874 році запровадив поняття густини потоку енергії, та Миколи Пильчикова в Одесі; Миколи Бекетова, який уперше почав читати фізичну хімію як самостійну дисципліну, в Харкові — але цим список майже й вичерпується. Активний розвиток промисловості наприкінці XIX століття зумовив відкриття нових політехнічних та технологічних інститутів — у Харкові, Києві, Катеринославі (тепер Дніпро), Львові тощо. Ці інститути також ставали осередками фізичних досліджень, здебільшого — прикладних.

Проте науковців-фізиків, котрі працювали тоді в цих університетах та інститутах, були лічені одиниці. Адже навіть у Петербурзі, столиці Російської імперії, за підрахунками істориків науки, працювало на початку XX століття не більше як двадцять активних фізиків. А всього в світі у 1900 р. налічувалося лише близько 1000 дослідників у всіх царинах фізичної науки – більшість із них взяли участь у скликаному тоді Міжнародному конгресі фізиків у Парижі.

1892 року академічного статусу набуло Наукове товариство імені Шевченка у Львові (тоді — Австро-Угорська імперія), яке в статусі літературно-наукового діяло з 1873 року, і до складу якого входила й математично-природописно-лікарська секція, членами якої були відомі фізики — й українці (Іван Пулюй), й іноземці (Макс фон Планк, Альберт Айнштайн, Абрам Йоффе). Проте ця організація діяла майже без підтримки з боку контрольованої тоді поляками крайової влади Галичини, спираючись лише на ентузіазм українських патріотів. Її робота мала величезне просвітницьке й термінологічне значення — саме в рамках «Записок НТШ» почала формуватися сучасна українська наукова термінологія, оскільки аж до 1917 року над використанням української мови в громадському житті в Російській імперії тяжіла царська заборона. Однак власних наукових інституцій у царині фізики, що могли б конкурувати з провідними тогочасними світовими науковими центрами, НТШ створити, звісно, не мало змоги.

1917 року Україну було проголошено незалежною. Це відкрило нові шанси для розвитку національної науки. Попри нестабільність воєнного часу, 14 листопада 1918 року гетьман України Павло Скоропадський підписав закон про створення Академії наук (до 1936 року — Всеукраїнська Академія Наук (ВУАН); нині — Національна Академія Наук України), затвердив її Статут та призначив перших 12 академіків (цікаво, що жодного фізика серед них ще не було). 27 листопада відбулися перші збори академіків, на яких президентом академії було обрано визначного природознавця, автора вчення про ноосферу Володимира Вернадського (1863–1945).

Хоча українські «визвольні змагання» 1917–1921 років зазнали поразки у війні з більшовицькою Росією, їхнім позитивним наслідком стало те, що переможці впродовж 1920-х років провадили політику підтримки національно-

культурного й наукового розвитку Української Соціалістичної Радянської Республіки, яку проголосили формально суверенною в складі СРСР. 30 жовтня 1928 року постановою Раднаркому (уряду) УСРР було засновано Український фізико-технічний інститут у Харкові, й це відразу зробило тодішню столицю України одним із центрів світової фізичної науки. Ініціатором створення установи і першим головою її науково-технічної ради став Абрам Йоффе, а першим директором — Іван Обреїмов (1894–1981).



Лев Шубніков, Олександр Лейпунський, Лев Ландау, Петро Капиця, Кирило Синельников та інші молоді вчені на сходах головного корпусу УФТІ. 1935 рік

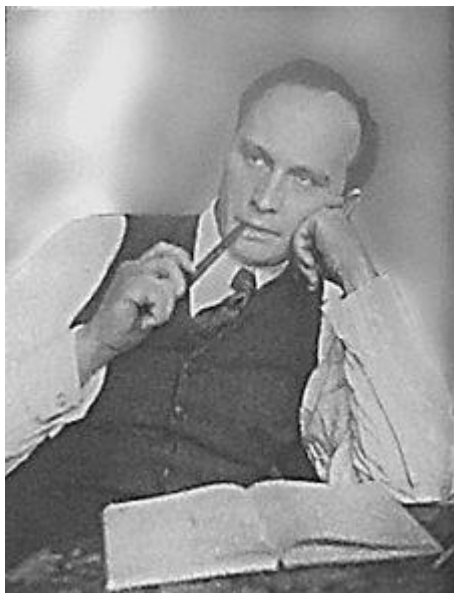
В інституті було зібрано плеяду блискучих молодих учених, які, за оцінкою тодішнього директора Фізичного інституту АН СРСР, майбутнього президента АН СРСР Сергія Вавілова, забезпечили на початок 1937 року приблизно чверть результатів радянської фізики. Ось дуже короткий перелік досягнень першого десятиліття роботи УФТІ:

тут виконували найпередовіші дослідження з ядерної фізики;

тут 1932 року Антон Вальтер, Кирило Синельников, Олександр Лейпунський і Георгій Латишев здійснили першу в СРСР і другу у світі реакцію розщеплення ядра літію прискореними протонами;

тут 1940 року було подано першу у світі авторську заявку на створення атомної бомби (авторське свідоцтво було оформлено вже після вибуху атомної бомби над Гіросімою, автор ідеї Віктор Маслов загинув на фронті ще на початку німецько-радянської війни);

нарешті, тут було створено першу в СРСР і третю у світі кріогенну лабораторію, яку з 1930 року очолював, по приїзді з Лейдена, визначний фізик-експериментатор Лев Шубніков (1901–1937).



Лев Шубніков

Ще працюючи в Лейдені в лабораторії відкривача надпровідності Каммерлінга–Оннеса, він разом із Вандером де Гаазом (1878–1960) відкрив у достатньо чистому вісмуті осциляції провідності за низьких температур. Ці осциляції Шубнікова–де Гааза й нині широко використовують для визначення густини заряду в металах і напівпровідниках. В УФТІ Шубніков виконав низку пріоритетних робіт із надпровідності й антиферромагнетизму, разом із Іваном Обреїмовим запропонував метод вирощування монокристалів металів. Саме в УФТІ Шубніков відкрив надпровідники II роду, які (на відміну від надпровідників I роду, що їх відкрив Каммерлінг–Оннес 1911 року) в певному інтервалі магнітних полів не «виштовхують» назовні магнітне поле цілком.

Першим керівником теоретичного відділу УФТІ був Дмитро Іваненко (1904–1994). Науковець народився в селі Мачухи під Полтавою. Навчаючись у Полтавському педінституті, він паралельно працював у місцевій обсерваторії, потім продовжив освіту в Харківському й Ленінградському університетах. Після короткого періоду роботи у Фізико-математичному інституті АН СРСР він повернувся в Україну — створювати УФТІ. Саме в цей час у нього народжуються ідеї дискретності простору й народження та анігіляції масивних частинок, що лежать в основі сучасної квантової теорії поля й елементарних частинок. 1932 року він публікує роботу, в якій обґрунтовує протонно-нейтронну модель ядра (до того вважали, що ядро складається з протонів і електронів, які «врівноважують» приблизно половину протонного заряду). Зауважмо — це сталося того самого року, коли Джеймс Чедвік виявив експериментально нейтрон. На жаль, Дмитро Іваненко працював у УФТІ недовго. У 1931 році він повертається до Ленінграда.

Після нього у 1932–37 роках відділ теоретичної фізики в УФТІ очолював геніальний фізик-теоретик Лев Ландау (1908–1968). Дослідження Ландау охоплюють практично всі галузі сучасної теоретичної фізики — від механіки рідин до квантової теорії поля. В історію фізики він увійшов як автор понять «рівні Ландау», «діамагнетизм Ландау», «рівняння Ландау–Ліфшиця» для магнітного моменту тощо. У період роботи в УФТІ Ландау розробив сучасну

теорію феромагнетизму, запровадив поняття «антиферомагнетиків» і розробив загальну теорію фазових переходів другого роду (1936–37 рр.).

Водночас Ландау очолював кафедру експериментальної фізики в Харківському університеті. Саме тоді в нього з'явилася ідея «теормінімуму» — базового набору теоретичних знань, без яких не можуть обійтися сучасні фізики. На основі теормінімуму Ландау спільно з Євгеном Ліфшицом (1915–1985), котрий також працював у 1930-х у теорвідділі УФТІ, створив унікальний багатотомний «Курс теоретичної фізики», який досі є настільною книгою для фізиків цілого світу. Створюючи цей курс, науковці запровадили собі своєрідний «розподіл праці»: Ландау генерував і викладав ідеї, а Ліфшиць оформлював текст.

Ландау був, безумовно, унікальною людиною. Він народився в Баку в родині інженера-нафтовика. Маючи 14 років, вступив у Бакинський університет, де навчався одночасно на двох факультетах: фізико-математичному й хімічному. Після закінчення Ленінградського університету (1927) вступив до аспірантури Ленінградського фізико-технічного інституту.

Дау (так називали Ландау друзі й колеги) був неймовірно обдарований математично. Сам він жартома говорив про себе: «Інтегрувати навчився років у 13, а диференціювати вмів завжди». У 18–19 років він уже опублікував перші зрілі роботи з теоретичної фізики. 1927 року, коли радянських науковців ще надсилали стажуватися за кордон, Ландау (ще навіть не 20-річного) відрядили в Данію до Нільса Бора, котрого він відтоді вважав своїм учителем.

Був Ландау обдарований і філологічно. Як свідчить його особиста анкета з архівів Харківського університету, окрім російської, він вільно володів німецькою, англійською і французькою, говорив по-данському, читав голландською, італійською та українською.

Професор Ландау був вимогливий до своїх студентів. Отримати від нього позитивну оцінку, не знаючи предмета, було неможливо. На жаль, у 1937-му, коли цінувалися не реальні знання, а комуністичне начотництво, це стало небезпечним. На професора пишуть політичні доноси. Про атмосферу тих років свідчить доповідь секретаря парткому Харківського університету Кравченка на бюро Харківського міського КП(б)У 15 січня 1937 року: «Ландау і Шубніков пропагують расові фашистські теорії, а саме: вони заявляють, що «фізиками можуть бути люди особливої породи, з дитинства обдаровані фізичним талантом» і, звертаючись до студентів фізико-математичного факультету, заявляють, що «з усіх вас якщо й закінчать університет 15% (фізичне відділення), то це буде добре, решта мають відсіятись».

Крім того, професорові Ландау закидали «ідеалізм» і зневажливі відгуки про філософські праці Енгельса (за іронією долі, Ландау був якраз переконаним матеріалістом і войовничим атеїстом). Звинувачення, як на той час, більш ніж серйозні.

Щоб уберегти Ландау від більших неприємностей, ректор Харківського університету Олексій Нефоросний ще наприкінці 1936 року пропонує йому піти «за власним бажанням». Але на захист колеги стають провідні харківські фізики (Лев Шубніков, Ісаак Померанчук, Олександр Ахієзер, Євген Ліфшиць, Абрам Кікоїн, Вадим Горський), котрі також подають заяви про звільнення з

університету за власним бажанням. Усе це набуває присмаку політичної акції солідарності — немислимий в тоталітарному СРСР.

Як наслідок, ректор повертає Ландау до університету — вже як завідувача кафедри теоретичної фізики (нагадаємо: до того теоретик Ландау завідував кафедрою експериментальної фізики). Але Ландау все одно вирішив переїхати до Москви, до Інституту фізичних проблем. Туди його кликав Петро Капиця, котрий щойно відкрив явище надплинності гелію й потребував його теоретичного пояснення.



Лев Ландау — в'язень (1938 р.)

Однак у Москві Ландау через рік заарештовують, і лише після року допитів відпускають — украй виснаженого фізично, — після того, як Петро Капиця звернувся особисто до Сталіна. Важливою була й підтримка з боку директора Фізичного інституту АН СРСР Сергія Вавілова (1891–1951). (Визначний фізик, з 1945 року — президент АН СРСР, Вавілов, за спостереженням нобелівського лауреата Віталія Гінзбурга (1916–2009), виконував у сталінському СРСР ту саму роль, що й Макс фон Планк у гітлерівському Райху — намагався, використовуючи своє офіційне становище, врятувати всіх, кого можна було врятувати. Це — попри те, що його старшого брата, видатного генетика Миколу Вавілова, було засуджено 1941 року до розстрілу й він загинув через два роки в Саратовській тюрмі.)

1941 року Ландау створює (спільно з В. Гінзбургом) феноменологічну теорію надплинності, за яку через 21 рік отримує Нобелівську премію з фізики. На жаль, на той час він уже не міг активно займатися наукою — через травми, яких зазнав у автомобільній катастрофі на початку 1962 року.

Доля його харківських колег склалася значно трагічніше. І Лева Шубнікова, і ректора Олексія Нефросного, і блискучого 32-річного фізика Вадима Горського розстрілюють 1937 року. Шубнікова — як «шпигуна, диверсанта й шкідника», Горського — як «троцькіста», Нефросного — як «українського націоналіста». Відтак до кінця 1950-х років, коли почалася кампанія «реабілітації» репресованих, ім'я розстріляного Шубнікова згадувати було не можна, — навіть у зв'язку з ефектом, який він відкрив. Після «реабілітації» — й аж до кінця 1980-х усі довідкові видання СРСР друкували фальшиву дату смерті науковця — 1945 рік, і ні словом не згадували про трагічні обставини цієї смерті. Дружина вченого довідалася про справжню дату його загибелі тільки в 1991 році. Репресовано було й більшість науковців «першого призову», які працювали в УФТІ, включно з його першим директором Іваном Обреїмовим — і це завдало інституту важкого удару.

Не обминули репресії й Дмитра Іваненка. 1935 року його засуджують на три роки заслання. Але завдяки заступництву провідних радянських фізиків тієї доби — Сергія Вавілова, Якова Френкеля, Абрама Йоффе — йому дозволили відбути заслання в Томську, працюючи в Сибірському фізико-технічному інституті. 1940 року науковець встиг ще раз повернутися в Україну, де очолював до початку німецько-радянської війни кафедру теоретичної фізики Київського університету. Повоєнна робота Дмитра Іваненка пов'язана вже з Московським університетом, де він викладав до майже 90-річного віку.

Звичайно, Лева Шубнікова й Лева Ландау називати «українськими фізиками» можна лише зі значними застереженнями. Самі себе вони ідентифікували, напевно, як радянських фізиків, котрим випало певний час працювати в Україні. Але тут вони зробили великий внесок у розвиток фізичної науки. До того ж, нині ніхто не дивується, коли «польським астрономом» називають Миколая Коперника — народженого у вільній ганзейській Торуні урядовця напіваавтономної Вармії, котрий у побуті послуговувався переважно німецькою й наукові праці писав виключно латиною.

Україна багато важила і в особистому житті обох науковців — саме тут Ландау зустрів дружину, студентку хімічного факультету Конкордію Дробанцеву, котра згодом самовіддано допомогла повернути до життя геніального науковця після страшної автокатастрофи, й уже після смерті чоловіка написала про великого фізика та його добу гранично відверті й емоційні спогади «Академік Ландау. Як ми жили» (1983). І саме тут, у Холодногірській тюрмі Харкова, обірвалося від енкаведистської кулі життя Шубнікова...

А один із найвидатніших фізиків-теоретиків і математиків XX століття Микола Боголюбов (1909–1992), безумовно, ідентифікував себе саме як українського науковця — попри те, що народився він у Нижньому Новгороді над Волгою. Коли майбутньому академікові виповнився рік, його батько — священник і викладач богослов'я та філософії — отримав призначення до Ніжинського історико-філософського інституту князя Безбородька, а ще за якийсь час став професором богослов'я в Київському університеті Святого Володимира. Мати майбутнього науковця була вчителькою музики, й це також сприяло формуванню гармонійної, духовно багатой особистості.

Після перемоги більшовиків університет перетворили на КІНО — Київський інститут народної освіти, а богослов'я зі списку навчальних програм викреслили. Тож батько науковця мусив перебратися до села Велика Круча над мальовничою річкою Удай, приблизно на півдорозі від Києва до Полтави, де став парафіяльним священником.

Семирічну школу у Великій Кручі Микола Боголюбов із вдячністю згадував до кінця життя. Звідси він виніс, окрім усього, добре знання української мови й любов до «Кобзаря», рядки з якого любив цитувати з будь-якої нагоди. До речі, посвідчення про закінчення школи-семирічки було єдиним документом про формальну освіту, який Боголюбов отримав за ціле життя.

Річ у тому, що в Києві, куди 14-річний Микола Боголюбов вирушив після закінчення семирічки, всі тогочасні виші не відповідали рівневі запитів і знань талановитого юнака, котрий жадібно займався самоосвітою. Батько науковця завжди дуже уважно ставився до синові освіти й порадився з цього

приводу зі своїм колишнім університетським колегою, визначним математиком, академіком ВУАН Дмитром Граве (1863–1939). Після розмови з юнаком академік зрозумів: університетські лекції йому вже нічого не дадуть. Відтак Микола Боголюбов отримує дозвіл відвідувати математичний семінар у Граве, а ще за кілька місяців його запрошують (без формальної університетської освіти!) аспірантом на кафедру іншого визначного математика, академіка Миколи Крилова (1879–1955).

У 15 років Микола Боголюбов друкує свою першу самостійну наукову працю. А в квітні 1930 року фізико-математичний відділ ВУАН за поданням академіків Крилова й Граве присвоює 20-річному Миколі Боголюбову ступінь доктора математики.

Основні роботи Боголюбова з математики й механіки присвячено варіаційному численню, наближеним методам математичного аналізу й диференціальних рівнянь, теорії динамічних систем. Особливо значним був його внесок у розвиток статистичної механіки, де науковець створив метод отримання кінетичних рівнянь, виходячи з механіки системи молекул.

Повоєнні роботи Миколи Боголюбова присвячено квантовій фізиці. 1946 року він створив квантову теорію надплинності, а ще за 10 років — квантову теорію надпровідності. У 1950-х він працює над квантовою теорією поля.

1949 року вчений видає в Києві свою піонерську фундаментальну працю «Лекції з квантової статистики. Питання статистичної механіки квантових систем». Цю написану українською мовою книгу читали в оригіналі всі теоретики колишнього Радянського Союзу й країн «народної демократії».

З 1950 року Микола Боголюбов працює в Москві. З 1965 року він очолює Об'єднаний інститут ядерних досліджень у Дубні, що мав міжнародний статус. Незалежна Україна аж до початку російської військової агресії в 2014 р. була одним із найактивніших учасників цієї міжнародної наукової організації. На жаль, сьогодні путінський режим перетворив цей інститут у Дубні на одне з коліщаток російської військової машини.

Не поривав Микола Боголюбов і зв'язків із Україною. 1966 року за його ініціативою в Києві створюють Інститут теоретичної фізики АН — і Боголюбов перші сім років працює його директором, періодично приїздячи з Дубни. 1970 року в Києві відбувається Рочестерська конференція — найбільший міжнародний форум із фізики високих енергій. На неї прибули провідні тодішні фізики — Янг, Марков, Салам, Маршак, Редже, Понтекорво...



Микола Боголюбов (у центрі) та Віталій Шелест (праворуч) під час Рочестерської конференції з фізики високих енергій у Києві (1970 р.)

Безумовно, допомогла підтримка тодішнього керівника України Петра Шелеста, син якого Віталій обрав собі шлях фізика-теоретика. Невдовзі після усунення Петра Шелеста від влади зі звинуваченням у «націоналістичних помилках» (1972), полишив директорство в Інституті теоретичної фізики Микола Боголюбов. Мусив «емігрувати» до Москви і його учень Віталій Шелест (1940 — 2020).

Ім'я вченого, вшанованого за життя всіма можливими відзнаками колишнього СРСР, сьогодні носить заснований ним Інститут теоретичної фізики НАН України.

2009 року Україна на державному рівні святкувала 100-річчя видатного науковця, про якого його брат Олексій згадував: «Починаючи від великокручанської епопеї, він поріднився з Україною, а поезія Шевченка була, власне, першою поезією, якою він захопився. Молодий аспірант кафедри математичної фізики писав протоколи семінарів кафедри по-українськи, і перші його роботи також були написані по-українськи. Від батька він успадкував дух протиріччя. Той, коли був священником, носив коротку зачіску й маленьку борідку. А коли священників стали переслідувати й носити довгу бороду стало непристойним — він відростив бороду. Микола Миколайович у тяжкі для України часи, коли почали знищувати українську інтелігенцію, коли в Харкові відбувався ганебний процес СВУ, а українські книги горіли, — визнав себе українцем і вважав себе ним усе своє життя. Та, власне, й усе становлення його наукової творчості відбувалося в Україні, і далі теж було пов'язане з Україною. Недаремно він називав Київ своїм улюбленим містом, прирівнюючи до нього лише Париж».

1928 року в Києві було засновано Інститут фізики ВУАН. При ньому до початку німецько-радянської війни виходив перший фаховий журнал з фізики українською мовою — «Українські фізичні записки». Основними напрямками досліджень інституту стали електронні властивості твердих тіл та оптика. Школи Олександра Давидова (1912–1993) та Антоніни Прихотько (1906–95) теоретично й експериментально довели існування нового типу квазічастинок — екситонів малого радіуса, що відіграють ключову роль у процесах переносу енергії й заряду не лише в конденсованих середовищах, але й у біомолекулярних структурах.

Ще один тип квазічастинок — поляронів (електронів, які самоузгоджено взаємодіють із середовищем і знижують тим свою енергію) запровадив у науковий обіг 1946 року визначний теоретик, киянин за місцем народження й за місцем роботи впродовж цілого життя Соломон Пекар (1917–1985). Про захист його кандидатської дисертації 1941 року (за неї 24-річному пошукачеві було відразу присуджено ступінь доктора фізико-математичних наук) Ландау у властивій йому експресивній манері сказав: «У Києві відбулося самозародження теоретичної фізики!».

Студентом Соломон Пекар спеціалізувався на кафедрі електрофізики Київського університету, — її очолював один з основоположників сучасної фізичної електроніки Наум Моргуліс (1904–1976), який побудував теорію автоелектронної емісії з напівпровідників, успішно працював у галузі емісійної електроніки та фізики плазми. Учень Моргуліса був так само Микола Находкін (1925–2018), який став одним із піонерів розвитку в Україні спершу

мікроелектроніки, а потім — нанотехнологій. Саме він на початку ХХІ ст. був керівником першої української державної нанопрограми.

У новозаснованому Інституті фізики ВУАН активно розвиваються дослідження з нової актуальної галузі — фізики напівпровідників. Ще з 1929 року під керівництвом першого директора інституту Олександра Гольдмана (1884–1971) тривали роботи з вивчення нових аспектів фотогальванічного ефекту Беккереля. На жаль, 1938 року Гольдмана було заарештовано за звинуваченням в «українському націонализмі» (попри єврейське походження й лютеранське віросповідання вченого), і він зумів повернутися до наукової роботи лише через десятиліття ув'язнення і заслання. Як з'ясувалося вже в наші при вивченні архівної справи Гольдмана, ще перед арештом у 1937 р. він побудував теорію роботи контакту метал-напівпровідник, на рік випередивши класичні праці англійця, нобелівського лауреата Невілла Мотта (1905 – 1996) та німця Вальтера Шотткі (1886 – 1976); проте опублікувати цих результатів уже не встиг.

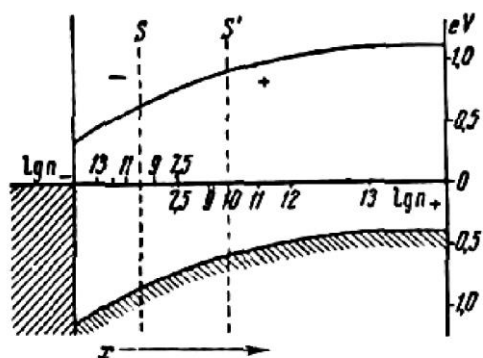
Як ми вже зазначали в попередньому розділі, присвяченому появі науки про напівпровідники, основою радіотехніки 1930-х були лампові діоди й тріоди. Двоелектродна лампа — діод — служила для випрямлення струму: за прикладення негативної напруги на катод і позитивної на анод струм проходив, якщо ж полярність була протилежною — ні. Проте лампи були громіздкими й ненадійними, і стояло завдання замінити їх компактними твердотільними відповідниками, які були б позбавлені недоліків перших примітивних кристалічних детекторів (для них навіть точку притискання металевого дрослика до кристалу, в якій ефект випрямлення виявлявся б найкраще, треба було шукати вручну). Це завдання розв'язав основоположник фізики напівпровідників в Україні Вадим Лашкарьов (1903–1974).

Майбутній науковець народився в Києві. Його батько був прокурором, мати — закінчила Інститут шляхетних дівчат. Ці обставини після встановлення радянської влади довелося приховувати, втім, це не врятувало родину від адміністративного заслання на 5 років до Казахстану. 1924 року Вадим Лашкарьов закінчив Київський інститут народної освіти — і перші самостійні кроки в науці зробив на кафедрі фізики Київського політехнічного інституту (перші його статті було присвячено рентгенографії та теорії гравітації).

У 1929–30 роках науковець очолює відділ рентгенофізики новоствореного Інституту фізики ВУАН. Абрам Йоффе помітив яскраві роботи молодого киянина й запросив його на роботу до ленінградського Фізико-технічного інституту. Тут 1935 року Вадим Лашкарьов за результатами публічного захисту отримує ступінь доктора фізико-математичних наук. Того самого року, водночас із Дмитром Іваненком, молодого доктора наук заарештовують. Завдяки заступництву Абрама Йоффе Лашкарьову щастить — він відбуває заслання в провінційному Архангельську на кафедрі фізики місцевого медінституту. Тут йому випало стати викладачем майбутнього славетного хірурга, письменника й громадського діяча Миколи Амосова (1913–2002), чие ім'я носить створений ним інститут кардіохірургії в Києві.

1939 року Вадим Лашкарьов повертається до Києва на посаду завідувача відділу напівпровідників Інституту фізики, й водночас — завідувача кафедри фізики в Київському університеті імені Тараса Шевченка. 1941 року він робить

головне відкриття свого життя. Досліджуючи за допомоги термозонда запірні шари примітивних міднозакисних випрямлячів, науковець відкрив p - n -перехід. Тоді ж він з'ясував роль p - n -переходу у виникненні вентильного фотоефекту — появи напруги за освітлення контакту областей напівпровідника з двома типами провідності.



Найперша схема p - n -переходу (з роботи В.Лашкарьова, 1941). Область p -провідності розташовано праворуч від вертикальної лінії S' , а область n -провідності ліворуч від вертикальної лінії S . Цифри нижче і вище від осі абсцис позначають логарифми концентрацій дірок (n_+) і електронів (n_-)

Ця робота Лашкарьова, надрукована в журналі «Известия АН СССР» за квітень-травень 1941 р., за своїм науковим значенням не поступалася працям Шоклі, Бардіна й Браттейна, котрих було вшановано Нобелівською премією. Адже функціонування p - n -переходу лежить в основі роботи сучасних напівпровідникових приладів — від простих випрямлячів до найскладніших інтегральних схем. А фотоефект у напівпровідниках забезпечує роботу відомих нині всім сонячних батарей.

Проте тоді на цю роботу не звернули тієї уваги, якої вона була варта. Може — через те, що вже точилася Друга світова війна, може — тому, що вона суттєво випереджала розвиток технології отримання та застосування германію й кремнію, яким у наступному десятилітті судилося стати основними напівпровідниковими матеріалами.



Кафедра фізики напівпровідників Київського університету ім. Т.Г. Шевченка (1956 р.). Зліва направо сидять: Н.Я. Карханіна, В.І. Ляшенко, В.Є. Лашкар'юв, Ю.І. Карханін, Г.А. Холодар, Ю.І. Гриценко; стоять: І.Г. Самбур, Є.М. Березняковський, В.А. Житков, В.Є. Кожевін, Г.П. Пека, Г.П. Зубрін, В.І. Стріха, Р.М. Бондаренко

Після Другої світової війни Вадим Лашкар'юв реалізовує велику програму дослідження напівпровідників. Робить він це паралельно в Інституті фізики й у Київському університеті імені Тараса Шевченка. На базі відділу напівпровідників Інституту фізики 1960 року було організовано новий Інститут фізики напівпровідників, що його Вадим Лашкар'юв очолював упродовж наступного десятиліття, — нині він носить ім'я ученого. Роботи академіка Лашкар'юва мали широке практичне застосування в електроніці, автоматичі, телемеханіці, обчислювальній техніці.

Водночас В.Лашкар'юв створює і в 1952–57 роках очолює потужну кафедру фізики напівпровідників у «шевченківському» університеті. Пізніше впродовж понад 20 років її очолював його учень — Віталій Стріха (1931–1999), творець загальної теорії контакту метал-напівпровідник, засновник і перший президент АН вищої школи України. Ще в 1960-ті рр. В.Стріха розробив теорію так званого притискового контакту з зазором, що фактично лягла в основу створення в 1981 р. сканувального тунельного мікроскопа, який надзвичайно пришвидшив поступ у сфері нанотехнологій, і за який його творці Герд Бінніг та Гайнріх Рорер отримали Нобелівську премію з фізики 1986 року.

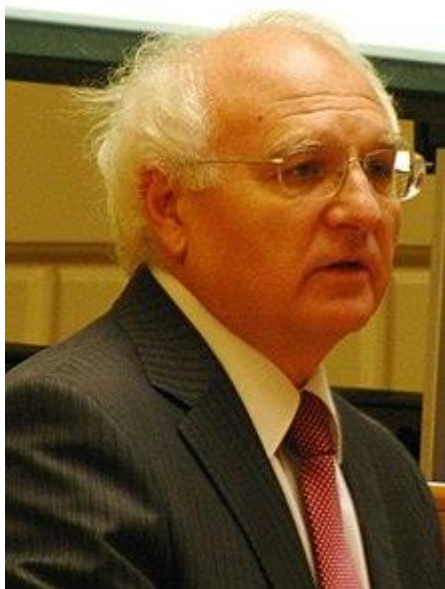
Розвивалися дослідження в галузі квантової фізики й у Львові. Лідером львівської наукової школи в останнє передвоєнне й перші повоєнні десятиліття був професор Василь Міліянчук (1905–1958). Майбутній науковець народився в Добровідці на Прикарпатті. Після закінчення Львівського університету та Львівської політехніки, 1936 року стажувався у Фізичному інституті Лейпцигського університету, де на той час працювали Гайзенберг, Гунд, Дебай. Перші роботи Міліянчука було присвячено релятивістській квантовій механіці Дірака, поздовжньому та поперечному ефекту Зеємана квадрупольних ліній і комптонівському розсіянню.

За ці роботи науковець отримав ступінь доктора філософії (1935). З 1932 року він — член НТШ, нашої першої національної академії на західноукраїнських землях.

Входження Західної України до складу УРСР 1939 року потягло за собою ліквідацію всіх колишніх українських громадських організацій, зокрема й НТШ (офіційно розпущене в СРСР, Товариство продовжило діяльність за кордоном і було відроджене у Львові 1990 року). Водночас колишній польський університет Яна Казимира у Львові було «українізовано». З 1940 року Міліянчук — професор кафедри теоретичної фізики Львівського університету імені Івана Франка, а з 1945 року й до останніх днів життя очолював цю кафедру.

У повоєнні роки спектр наукових інтересів науковця був надзвичайно широким. До нього належали: вплив неоднорідності електричного поля в газорозрядній плазмі на атомні спектри, задачі мезодинаміки з похідними вищих порядків, теорія мезонно-нуклонних взаємодій, квантова

електродинаміка й теорія поля. На жаль, рання смерть не дала Міліянчуку до кінця реалізувати свій потенціал дослідника.



Іван Вакарчук (2010 р.)

Від 1948 р. у Львівському університеті працював також талановитий теоретик Абба Глауберман (1917–1974), учень згадуваного вище Якова Френкеля. Він залишив не лише яскраві роботи з квантової теорії твердого тіла та статистичної теорії конденсованих систем, але й перший в історії оригінальний підручник «Квантова механіка» українською мовою (1962). Його студентом був, зокрема, визначний фізик, а пізніше також громадський і політичний діяч, голова Народної ради в парламенті першого скликання, автор ідеї референдуму, який 1 грудня 1991 р. підтвердив незалежність України, Ігор Юхновський (1925 - 2024). Він у 1969 р. за сприяння Миколи Боголюбова організував у Львові Відділ статистичної теорії конденсованих станів Інституту теоретичної фізики АН УРСР, на основі якого виникла й сформувалася потужна львівська школа статистичної фізики. Одним із яскравих представників цієї школи був Іван Вакарчук (1947–2020) — довголітній ректор Львівського університету імені І.Франка, міністр освіти і науки України (2007–2010 рр.), автор нового, фундаментального і яскравого за викладом університетського підручника «Квантова механіка», що витримав кілька перевидань. У 1990 р. організований І.Юхновським відділ було перетворено на Інститут конденсованих станів НАН України.

Проте й упродовж 1940–1960-х років столицею української квантової фізики залишався Харків. Продовжував активно працювати (значною мірою в інтересах радянських військових програм) УФТІ, перейменований на ХФТІ — саме слово «український» у назві мусило тоді поступитися нейтральнішому «харківський». У повоєнні роки під керівництвом Олександра Ахієзера (1911–2000) тут здійснено піонерські роботи з фізики магнетизму, в яких брав активну участь і його учень Віктор Бар'яхтар (1930–2020), пізніший засновник і завідувач кафедри теоретичної радіофізики Київського університету імені Тараса Шевченка, перший президент створеного в 1990 р. Українського фізичного товариства. У 1960 року на основі частини підрозділів ХФТІ було створено

новий Фізико-технічний інститут низьких температур, який нині носить ім'я його засновника Бориса Веркіна (1919–1990).

Борис Веркін народився в Харкові в родині вчителів. Перші 8 класів він закінчив у школі з німецькою мовою викладання (були в Україні до погрому 1933 року й такі, зорієнтовані на обслуговування потреб німецької меншини). Дарма що Веркін не був німцем — мову цю він вивчив бездоганно. Після школи вступив на фізичний факультет університету — і паралельно навчався два роки в консерваторії за класом фортепіано. Певний час він навіть вагався щодо вибору дальшого шляху. Але навіть коли обрав фізику, залишився до кінця життя відданим шанувальником музики. Аж поки його в середині 1980-х не спіткав інсульт, він бездоганно грав складні фортепіанні твори, а для співробітників інституту і пізніше влаштовував високого рівня філармонійні вечори, запрошуючи найкращих виконавців. Символічно, що Харківський національний університет мистецтв ім. І.П.Котляревського довгі роки очолювала дочка вченого — піаністка і співачка професор Тетяна Веркіна (1946 – 2022).



Борис Веркін у лабораторії ХФТІ (1948 р.)

Борис Веркін був людиною з надзвичайно широкими гуманітарними зацікавленнями. Ще в дитинстві він відвідував вистави театру «Березіль» Леся Курбаса, про які зберіг спогади на все життя. А вже після тяжкої хвороби в 1980-і розробляв паралізовані пальці тим, що передруковував на друкарській машинці взяті зі спецховів Харківської бібліотеки імені В. Короленка твори недрукованих тоді російських поетів «срібного віку» — Гумільова, Гіппіус, Мережковського — опрацьовував саморобні книжечки в палітурки й дарував їх друзям.

1940 року Борис Веркін вступає до аспірантури в кріогенну лабораторію ХФТІ. Але через рік його мобілізують на радянсько-німецький фронт. Під Сталінградом лейтенант піхоти Веркін зазнав тяжкої контузії й дивом лишився живий. Тому решту війни він прослужив у тилу, і його демобілізували, коли потреби розгортання радянського атомного проєкту (його курував особисто всесильний нарком Лаврентій Берія) вимагали дедалі більшої кількості фізиків.

В ХФТІ Веркін поновлює перервані війною досліди й публікує роботи з низькотемпературних осциляцій магнітної сприйнятливості металів (ефект де Гааза — ван Альфена), які стали класичними. Раніше ці осциляції спостерігали лише в напівметалевому вісмуті. Команда харківських науковців натомість виявила їх в олові, берилії, магнії, кадмії, талії, сурмі, ртуті, показавши, що йдеться про ефект, притаманний металам узагалі. А особливості цих осциляцій було поставлено у відповідність до особливостей зонної структури металів. Таким чином фізики отримали надійний метод реконструювати вигляд поверхні Фермі в кожному окремому металі.

Для того, щоб отримати ці результати, треба було спершу навчитися надійно очищувати метали від домішок. Під керівництвом Бориса Веркіна було розроблено метод такого очищення шляхом багаторазової перекристалізації, який знайшов широке застосування в різноманітних технологіях.

У перші повоєнні роки панувала думка, що правильно вживати термін «фізика за низьких температур». Веркін натомість наполягав, що якісні зміни конденсованих середовищ за переходу від температур, де діє класична фізика, до температур, де все визначає квантова механіка, де реалізуються явища надпровідності й надплинності, дають підстави говорити про нову фізику низьких температур.

Веркін не встиг перетнутися в ХФТІ з Шубніковим, котрий загинув 1937 року. Але вважав його своїм учителем і еталоном справжнього вченого. Наприкінці 1950-х років він зробив усе можливе для посмертної реабілітації Шубнікова й повернення його імені в науковий обіг у СРСР (на Заході це ім'я ніколи й не зникало).

1960 року за ініціативою Бориса Веркіна було створено Фізико-технічний інститут низьких температур. Ініціативу організації ФТІНТ підтримали Петро Капиця, відомий своїми кріогенними роботами ще передвоєнного часу (саме за них він отримає 1978 року Нобелівську премію) і Сергій Корольов. Веркін бере з собою у ФТІНТ команду блискучих молодих науковців. Водночас він домагається спорудження для ФТІНТ масштабного комплексу на тодішній околиці Харкова.

У ФТІНТ апробували в умовах, наближених до реальних, чимало речей, які потім пройшли через космос: піропатрони, системи астронавігації, навіть страхувальний фал, на якому 1965 року вперше вийшов у відкритий космічний простір космонавт Леонов. Водночас тут було здійснено широкий спектр фундаментальних і прикладних досліджень.

Інститут робив усе: від найтоншої кріохірургії до заморожування м'ясних туш для тривалого зберігання. Від потужних надпровідних генераторів електростанцій до надчутливих магнітометрів, які відчують мозкові процеси людини. Від систем дихання на зріджених газах для підводників до методів консервації крові для кісткового мозку.

Водночас тут було отримано фундаментальні результати в експериментальній і теоретичній фізиці та математиці. Зокрема, саме тут Ігор Дмитренко (1928–2009), Ігор Янсон (1938–2011) та Володимир Свистунов (1941–2017) у 1964 р. вперше у світі експериментально реалізували нестаціональний ефект Джозефсона, що полягав у генерації НВЧ-випромінювання на контакті двох надпровідників. Цей ефект теоретично

передбачив за два роки до того молодий англійський фізик Браян Джоєфсон (н.1940), котрого за це передбачення вшанували Нобелівською премією 1973 року. А в 1987 році в інституті розгорнули масштабні роботи з вивчення високотемпературної надпровідності — лише через рік після того, як її було відкрито швейцарськими фізиками Георгом Беднорцом та Александром Мюллером, які теж отримали за своє відкриття Нобелівську премію з фізики.

Ще одним цікавим штрихом особистості Веркіна як організатора науки було те, що всі без винятку статті свого велетенського (4000 співробітників) інституту він «пропускав» крізь себе. І найкращі з них друкував у журналі «Фізика низьких температур», який сам і заснував — цей журнал досі перебуває на верхніх щаблях рейтингу українських наукових видань з фізики, знаних у світі.

Але вдома, на затишній харківській вулиці Чернишевського, Борис Веркін не тримав жодної книги з фізики. Тут панували література, поезія, мистецтво (науковець був відомим збирачем картин) і музика. У музиці він ділив композиторів, за аналогією з зірками, на класи: від найяскравішого (перший) до ледь помітного оку (шостий). До надяскравих (клас «нуль») він відносив Баха й Бетовена. Якби застосувати таку саму градацію до науковців, академік Борис Веркін опинився б на найвищих її щаблях.

Наведені вище портрети не вичерпують і близько всієї картини українського внеску в квантову фізику. Не відтворюють вони цілком і тих справді драматичних умов, у яких науковцям доводилося працювати. Адже за умов тоталітарного режиму наукова ситуація середини ХХ століття й філософські дискусії навколо основ квантової механіки лишали багато простору для ідеологічних і політичних звинувачень.

Наприкінці 1940-х років у СРСР розгорнулася так звана «дискусія в біології». Її наслідком стало торжество напівграмотного, але озброєного комуністичною тріскотливою риторикою агронома Трохима Лисенка та справжні гоніння на видатних учених-генетиків. Майже водночас статус «буржуазної лженауки» отримала й кібернетика.

В останні роки життя Сталіна аналогічну дискусію планували розгорнути й у фізиці. Формальним її початком стало цькування в 1950 році професора горківського (тепер нижегородського) університету Геннадія Горелика за начебто «ідеалістичні помилки» в його книзі «Коливання й хвилі». У статтях, які «викривали» ідеологічні «злочини» Горелика, лунали нотки, на диво подібні до тих, що звучали півтора десятиліття перед тим у гітлерівському Райху — у виступах ревнителів «арійської фізики» Ленарда та Штарка.

Радянські фізики були по-справжньому налякані. Як згадував пізніше автор поняття «полярон» Соломон Пекар, він тоді на всі наявні в нього гроші... передплатив наперед фахову літературу. Розрахунок був простий: за обстоювання квантової фізики, скоріш за все, не заарештують, але вислати з Києва до якогось провінційного педінституту можуть. А там не буде можливості спілкуватися з колегами відповідного рівня. То ж єдиний спосіб не дискваліфікуватися як науковцю — це принаймні надовго забезпечити себе фаховими журналами.

На щастя, провідні фізики переконали куратора радянського атомного проекту Лаврентія Берію, а той переконав Сталіна, що з заборонаю квантової

механіки радянська воднева бомба ніколи не вибухне (провчившись певний час у Бакинському політехнічному інституті, Берія єдиний серед тодішнього радянського вищого керівництва знав основи диференціального та інтегрального числення, а отже, міг говорити на наукові теми більш-менш фахово). І плановану «дискусію в фізиці» тихенько згорнули.

Але навіть за таких складних, часом драматичних умов українські науковці зробили свій гідний внесок у квантову фізику ХХ століття. 2008 року до 90-річчя НАН України було видано спеціальний випуск «Українського фізичного журналу», куди ввійшли найкращі роботи 35 визначних українських фізиків від кінця 1920-х років. Кожна з цих робіт посіла помітне місце в історії науки, знаменуючи початок нового важливого напрямку досліджень або ж сповіщаючи про одне з тих наукових відкриттів, на яких тримається споруда сучасної фізики. Основу цього випуску складають роботи тих науковців, чиї портрети було коротко окреслено в цьому розділі нашої книги.



Георгій Гамов

Працювали українці і в наукових установах багатьох інших країн.

Георгій (Джордж) Гамов (1904–1968) народився в Одесі. Його батько був учителем російської літератури (одним із його учнів був відомий революційний діяч Лев Троцький). Мати походила з родини Лебединцевих, нащадків козацької старшини, яка в ХІХ ст. дала кількох визначних діячів українського руху; зокрема, її рідний дядько Теофан Лебединцев був видавцем і першим редактором журналу «Київська старовина», який виходив з 1882 р. і навколо якого гуртувалися всі тодішні «українофіли».

Георгій почав учитися в Новоросійському (Одеському) університеті, але, незадоволений рівнем викладання, перевівся до Петроградського, де його товаришами на студентській лаві були згадані вище Лев Ландау та Дмитро Іваненко. Вже перші студентські наукові роботи Гамова (зокрема, написана ним разом із Ландау та Іваненком стаття «Світлові сталі й граничний перехід») звернули на себе увагу, і в 1928 р. його посилають на стажування до Геттінгена.

Під час перебування за кордоном Гамов знайомиться з Бором, відвідує Резерфорда, отримує запрошення зробити доповідь про побудовану ним квантову теорію альфа-розпаду на І Міжнародному конгресі з ядерної фізики в

Римі (1931). У ній уперше було розглянуто підбар'єрний (неможливий у класичній фізиці) рух частинки, що отримав назву «тунелювання». Повернувшись до СРСР, молодий учений уже не отримав дозволу виїхати на конгрес, проте його доповідь було надруковано в матеріалах цього наукового форуму, що зібрав усіх найславетніших тодішніх фізиків.

Відчуваючи стрімке посуворішання політичного клімату, Гамов відчайдушно намагається залишити СРСР — одного разу навіть човном з Криму до Туреччини, що мало не закінчилося для нього з дружиною трагічно (на щастя, «органи» вдалося переконати, що у відкрите море їх винесло випадково).

У 1932 р. Гамова (на пропозицію Володимира Вернадського) було обрано наймолодшим в історії членом-кореспондентом АН СРСР. Ще через два роки вчений таки виїждить на Сольвеївський конгрес — і залишається разом з дружиною на Заході. Очевидно, він використав останню нагоду опинитися по той бік «залізної завіси», бо невдовзі потому радянських учених практично перестали випускати за кордон.

У США наукові інтереси Гамова зміщуються в бік космології та астрофізики. У 1937–40 рр. він розробив першу теорію еволюції зірок з термоядерними процесами. Вже по війні Гамов пропонує теорію утворення хімічних елементів шляхом послідовного захоплення нейтронів та теорію «Великого вибуху». З 1954 р. учений працює також у галузі біології, де формулює концепцію генетичного коду. Усього Гамов став розробником трьох гіпотез, за експериментальне підтвердження яких було присуджено Нобелівські премії (на жаль, сам він нобелівським лауреатом так і не став).

Крім того, Гамов мав яскравий хист популяризатора науки, і книжки, де він без формул, доступною мовою розповідав про свої відкриття та про роботи колег, робилися бестселерами. Спеціально за цю діяльність він отримав престижну премію ЮНЕСКО. Постаті цього унікального вченого присвячено белетризовану біографію Джуліо Сегре «Звичайні генії», яку 2017 р. було перекладено й українською мовою.



Олександр Смакула

Основоположник органічної квантової хімії і винахідник методу «просвітлення оптики» Олександр Смакула (1900–1983) народився на Тернопіллі й здобув освіту в Геттінгенському університеті. Під час українських

«визвольних змагань» 1917–21 рр. він стає до лав Української галицької армії. Здобувши у Німеччині ступінь доктора філософії в 1927 р., він наступного року здійснює спробу повернутися в Україну й працює певний час в Одеському університеті. Проте там не можуть забезпечити вченому належних умов для досліджень, і він знову повертається до Німеччини — спершу до Гайдельберзького університету. Тут, використавши поняття квантових осциляторів, він вивів відому «формулу Смакули» (1930) для радіаційного забарвлення кристалів, що пов'язує довжину хвилі забарвлення з концентрацією дефектів у кристалі та довжиною хвилі падаючого випромінювання.

А в 1934 році Олександр Смакула стає керівником дослідної лабораторії знаменитої фірми «Карл Цайсс» у Єні. Саме там через рік учений винайшов метод «просвітлення оптики», що став одним із найважливіших технологічних відкриттів ХХ століття. Він запропонував для підвищення прозорості лінз наносити на їхню поверхню тонкий шар діелектрика з коефіцієнтом заломлення меншим, аніж у лінзи. Коли товщина шару становить $\frac{1}{4}$ довжини хвилі падаючого випромінювання, то інтерференція хвиль, відбитих від передньої і задньої поверхонь шару, призводить до того, що сумарна інтенсивність відбитої від лінзи хвилі дорівнює нулю. Оскільки максимум чутливості людського ока припадає на середину оптичного діапазону, зазвичай товщину діелектричного шару розраховують для хвилі з довжиною 555 нм.

У «цайсівській» лабораторії Смакула вперше створив такі оптичні кристали, як фтористий літій, фтористий натрій та бромйодид талію, який досі широко використовують у приладах нічного бачення. Тут-таки, досліджуючи різні органічні кристали, він фактично заклав основи органічної квантової хімії.

По війні американці вивезли професора Смакулу з Німеччини до США, де він очолив лабораторію кристалів у Массачусетському технологічному інституті. В МТІ у той час разом із ним працювали Клод Шеннон, Девід Слейтер та інші визначні вчені, згадані в цій книзі. Там він зробив вагомий внесок у розвиток тонкоплівкових технологій та лазерної техніки. Досліджував він так само й органічні кристали — що дало змогу синтезувати вітаміни А, В2 та D.

У 1972 р. Смакула один-єдиний раз зумів відвідати рідне Тернопілля, повертаючись з міжнародної кристалографічної конференції у Вірменії. До падіння «залізної завіси» й до незалежної України учений, на жаль, не дожив. Його фундаментальну монографію «Монокристали: вирощування, виготовлення і застосування» (1962) було перекладено українською мовою й видано в Україні заходами популяризатора історії науки професора Василя Шендеровського в 2000 р.

На жаль, інтегрованої історії, що охопила б внесок у розвиток світової науки як тих учених, що працювали на українських землях (що в різний час входили до різних імперій), так і тих вихідців з наших земель, які з волі обставин уславилися, працюючи в лабораторіях Австрії, Німеччини, Росії, Сполучених Штатів та інших країн, але відчували свою спорідненість з Україною (ми згадували в нашій книзі імена Остроградського, Пулюя, Кондратюка-Шаргея, Гамова, Смакули), досі ще не написано.

Але й робота українських учених далі триває, навіть попри повномасштабне російське вторгнення, що розпочалося 24 лютого 2022 року і призвело до руйнування чи пошкодження наукових установ у багатьох українських містах (знаменитий ХФТІ, про який багато разів згадувалося вище, протягом перших місяців «великої війни» перебував практично на лінії фронту і став мішенню для багатьох артилерійських та ракетних ударів), вимушеної еміграції чи навіть загибелі дослідників, особливо з прифронтових міст.

Квантово-механічне резюме

1. Діє принцип корпускулярно-хвильового дуалізму: енергія фотона на основі формули Планка становить $E = h\nu$, а на основі формули Айнштайна — $E = mc^2$. Оскільки $c = \lambda\nu$, $p = mc$, то $\lambda = \frac{h}{p}$. Частинці-електрону за аналогією можна приписати довжину хвилі $\lambda = \frac{h}{mv}$, де m — маса електрона, v — його швидкість.

Ідею про те, що випромінювання енергії відбувається дискретними порціями, запровадив у 1900 р. Макс фон Планк. При цьому сам він спершу розглядав цю ідею виключно як математичну абстракцію, необхідну для отримання правильної формули залежності спектральної густини випромінювання АЧТ від довжини хвилі. Ідею про те, що випромінювання й поглинається так само квантами, застосував Альберт Айнштайн у роботі про фотоефект (1905 р.), що дало можливість зрозуміти причину наявності «червоної межі» фотоефекту. Він же вперше застосував поняття квантів до фізики твердого тіла (робота з теплоємності, 1907 р.). Дифракцію Х-променів на кристалах (що підтвердило хвильову природу цих променів) спостерігав у 1912 р. Макс фон Лауе. Артур Комптон у дослідях з розсіюння світла на електронах (1923 р.) показав, що фотони можна описувати як частинки. У 1923–24 рр. Луї де Бройль теоретично обґрунтував принцип корпускулярно-хвильового дуалізму: формула $\lambda = \frac{h}{p}$ описує і хвилі, і частинки. У 1927 р.

Клінтон Девіссон і Лестер Джермер спостерігали дифракцію електронів при їхньому відбитті від поверхні кристала нікеля, і цим експериментально підтвердили справедливості гіпотези де Бройля. Незалежно від них дифракцію електронів того ж року спостерігав Джордж Паджет Томсон.

2. Якщо дія системи $S = \int_{t_1}^{t_2} L dt$ (L — функція Лагранжа всіх узагальнених координат, узагальнених швидкостей і часу) значно більша за сталу Планка $h = 6,6260753 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$, то квантові ефекти в системі практично не виявляються і може бути застосований класичний опис. У протилежному випадку важливою стає квантова природа явищ.

Про це говорить сформульований у 1918 р. принцип відповідності Бора: квантово-механічний опис макросвіту повинен відповідати його опису в рамках

класичної фізики за переходу до випадку великих квантових чисел (до великого значення дії).

3. Явища, що потребують квантового опису, підкоряються хвильовому рівнянню Шредінгера:

$$\hat{H}\Psi(x, y, z, t) = i\hbar \frac{\partial \Psi(x, y, z, t)}{\partial t};$$

$$\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) + U(x, y, z, t).$$

Тут m — маса частинки, U — силове поле, в якому ця частинка рухається. Якщо це поле стаціонарне й не залежить від часу, змінні в хвильовій функції можна розділити:

$$\Psi(x, y, z, t) = \psi(x, y, z) \exp(-i \frac{E}{\hbar} t).$$

Тут E — повна енергія частинки, а експонента є наслідком хвильової природи частинки, якій відповідає циклічна частота коливання $E / \hbar$. Підстановка цього виразу в записане вище хвильове рівняння дає:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \psi(x, y, z) +$$

$$+ U(x, y, z) \psi(x, y, z) = E \psi(x, y, z).$$

Це — так зване стаціонарне рівняння Шредінгера, що є диференціальним рівнянням другого порядку. Його можна розв'язати, якщо знати вигляд потенціальної енергії U . Для найпростіших випадків (атом водню, гармонічний осцилятор тощо) цей розв'язок задачі на власні функції та власні значення можна отримати в явному аналітичному вигляді.

Рівняння було постульоване Ервіном Шредінгером у 1926 р. Енергії електрона на кругових орбітах в атомі водню, що піддаються правилам квантування моменту імпульсу, запровадженням Нільсом Бором у 1913 р., є наслідками строгого розв'язання рівняння Шредінгера для атома водню. Імовірнісну інтерпретацію хвильової функції Ψ , що входить до рівняння Шредінгера, дав Макс Борн у 1926 р. Він же отримав вираз для ймовірності переходу між двома квантовими станами під дією зовнішньої сили.

4. У матричній механіці Гайзенберга фізично вимірюваним величинам відповідають матриці операторів. Якщо за множення матриць A і B має місце співвідношення

$$AB \neq BA,$$

наслідком цього стає співвідношення для можливих точностей одночасного вимірювання фізичних величин, що відповідають цим матрицям:

$$\Delta A \Delta B \geq \hbar.$$

Це є математичним записом сформульованого в лютому 1927 року Вернером Гайзенбергом *принципу невизначеності*. Згідно з цим принципом, одночасне вимірювання двох так званих *зв'язаних змінних* (наприклад, координати та імпульсу частинки) неминуче приводить до обмеження точності.

Чим точніше виміряно положення частинки — тим із меншою точністю можна виміряти її імпульс, і навпаки. У граничному випадку абсолютно точне визначення однієї зі змінних веде до повної втрати вірогідної інформації у вимірюванні іншої.

Ця невизначеність (втрата точності) не є наслідком технічної недосконалості вимірювань або провиною експериментатора. Вона є характерною властивістю кожного квантового експерименту й фундаментальним наслідком рівнянь квантової механіки. Вперше було проголошено, що існують межі наукового пізнання. Принцип невизначеності Гайзенберга приводить до висновку, що однозначний причинний зв'язок між теперішнім і майбутнім утрачається. На основі законів квантової механіки передбачення мають імовірнісний характер.

Ще одним математичним записом принципу невизначеності є фундаментальне перестановочне співвідношення

$$pq - qp = \frac{h}{2\pi i},$$

що пов'язує між собою матриці операторів імпульсу та координати p та q . Його було отримано 1926 р. Максом Борном.

Принцип невизначеності Гайзенберга (разом із принципом відповідності Бора) ліг в основу «Копенгагенської інтерпретації» квантової механіки, створеної в 1926–27 рр. унаслідок дискусій провідних тодішніх фізиків, що проводилися за ініціативою Нільса Бора в очолюваному ним Інституті теоретичної фізики в Копенгагені й остаточно закріпленої на V Сольвеївському конгресі фізиків у жовтні 1927 р.

5. Для частинок із напівцілим спіном (ферміонів) справедливий принцип заборони Паулі: дві частинки не можуть перебувати в стані, що описується однаковим набором квантових чисел, включаючи спін. Для ферміонів справедливий розподіл Фермі–Дірака: ймовірність знайти ферміон у певному стані з енергією ε_n (під n тут розуміють певний набір квантових чисел, які цей стан характеризують) задається формулою:

$$f(\varepsilon_n) = \frac{1}{e^{(\varepsilon_n - \mu)/k_B T} + 1}.$$

Тут μ — хімічний потенціал, k_B — стала Больцмана, T — температура.

Для частинок з цілим спіном (бозонів) принцип заборони Паулі не діє. Для них справедливий розподіл Бозе–Айнштайна:

$$f(\varepsilon_n) = \frac{1}{e^{(\varepsilon_n - \mu)/k_B T} - 1}.$$

При малих значеннях імовірності заповнення квантового стану (при високих температурах, отже, для великих значень дії) обидва розподіли переходять у класичний розподіл Максвелла–Больцмана.

Принцип заборони Вольфганг Паулі сформулював у 1925 р. для електронів. У 1926 р. Поль Дірак і незалежно від нього Енріко Фермі отримали функцію для квантового розподілу електронів. У 1924 р. Шат'єндранат Бозе отримав квантову функцію розподілу частинок, кількість яких в одному стані може бути необмежена; його результат скоригував Альберт Айнштайн. У 1940 р. Вольфганг Паулі довів теорему, яка пов'язує тип квантового розподілу зі

спіном: ферміони описуються розподілом Фермі–Дірака, а бозони — Бозе–Айнштейна.

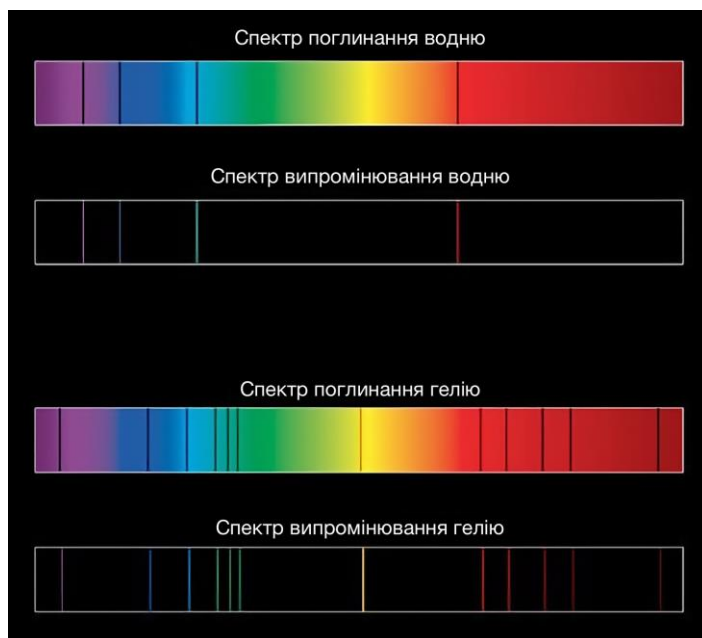
На основі рівняння Шредінгера на розподілі Фермі–Дірака упродовж 1920–40-х рр. було в основному побудовано теорію зонних станів та електронних явищ у твердих тілах.

Після створення основ квантової теорії

І після того, як основи квантової теорії було сформовано, розвиток фундаментальної фізики продовжувався, причому особливо інтенсивно – на двох протилежних кінцях шкали масштабів, в області атомних та субатомних відстаней з одного боку, та в області масштабів цілого Всесвіту – з другого. Наука як ніколи раніше близько підійшла до розгадки двох фундаментальних запитань: як влаштовано цей світ? І з чого він почався?

Одним з найважливіших інструментів для відповідні на ці запитання стала спектроскопія, вивчення того, як матерія випромінює і поглинає електромагнітні хвилі та інше випромінювання. В частині першій нашої книги ми вже згадували, що Ньютон поставив один з перших спектроскопічних дослідів, пропустивши сонячний промінь крізь скляну призму і одержавши неперервну смугу кольорів від червоного до фіолетового, тобто спектр випромінювання абсолютно чорного тіла, що ним є Сонце, розкладений по довжинах хвиль. Німецький фізик Йозеф Фраунгофер (1787 – 1826) удосконалив цей метод, винайшовши в 1814 р. спектроскоп. Поєднання призми та лінзи розкладало сонячний промінь з більшою роздільною здатністю, аніж досягнув Ньютон, і дозволило виявити багато вузьких чорних ліній на тлі кольорів веселки.

Як зрозуміли пізніше, ці лінії показують склад джерела випромінювання. Гарячий газ випромінює енергію на певних довжинах хвиль, що відповідають квантовим переходам саме в цьому газі, і тим створює «відбиток пальця», унікальний для кожного атому (наприклад, для водню – на цьому ми докладно зупинялися, коли розповідали про «атом Бора»). Різні елементи можна ідентифікувати і за спектрами поглинання, коли квантові переходи в холодніших зовнішніх шарах зірки поглинають випромінювання з гарячіших внутрішніх областей і виявляються як темні лінії, де на певних довжинах хвиль енергія відсутня. Спектри випромінювання і поглинання, що розповідають про склад небесних тіл, стали приносити несподіванки. У 1868 р. в спектрі нашого Сонця було виявлено невідому до того лінію випромінювання на довжині 587,49 нанометрів. Вона належала невідомому доти елементу гелію, з якого складається значна частина активних зірок, і який тільки пізніше виявили на Землі. Сама назва «гелій» і походить від імені Геліоса – бога Сонця в давніх греків.



Квантові переходи призводять до появи спектральних ліній, які розповідають про склад небесних тіл

Спектроскопічні дані також розповідають про небесні рухи. Відкритий австрійським фізиком Крістіаном Доплером (1803 – 1853) ефект, який сьогодні носить його ім'я, призводить до того, що світло від рухомого тіла зсувається в бік довших червоних чи коротших фіолетових довжин хвиль залежно від того, рухається це тіло від чи до спостерігача, а міра зсуву залежить від швидкості тіла. У 1929 р. американський астроном Едвін Габбл (1889 – 1953) виявив червоний зсув у спектрах галактик, які він спостерігав через найбільший на той час телескоп з діаметром дзеркала 100 дюймів (близько 2,5 м) на вершині гори Вілсон. Це вказувало, що вони віддаляються від нас, і так само віддаляються одна від одної. Результат Габбла був першим чітким спостереженням того, що ми живемо в світі, який розширюється.

Дальші прориви принесло вивчення хвиль радіодіапазону. У 1928 р. американський фізик Карл Янскі, що працював у Белл Лабз, шукав джерел якихось постійних завад, які перешкоджали щойно запущеному трансатлантичному радіотелефонному зв'язку. Його антена в Гомленді вловлювала розряди від гроз, а також зареєструвала сигнал від невідомого джерела. Досліджуючи цей сигнал упродовж часу й на різних напрямках, Янскі дійшов висновку, що він походить майже з центру нашої галактики Молочний Шлях.

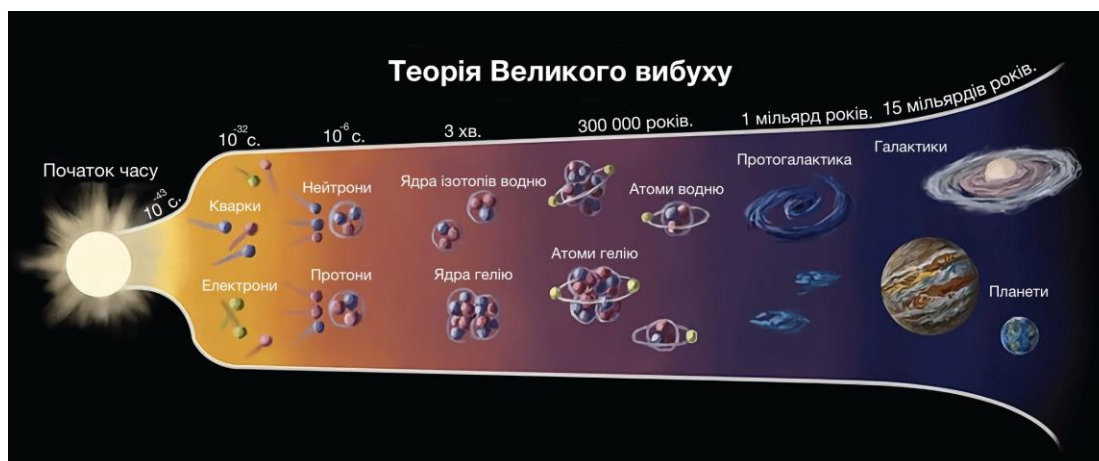
Через три десятиліття радіоастрономам з Белл Лабз Арно Пензіасу (1933 - 2024) і Роберту Вілсону (н. 1936) поталанило зробити ще одне неочікуване відкриття. У 1964 р., вивчаючи радіосигнали з Всесвіту з допомогою рогоподібної антени заввишки 6 метрів, побудованої для того, щоб тестувати сигнали з супутників зв'язку, вони вловили неочікуваний радіосигнал на мікрохвилі довжиною 7,35 сантиметрів. Він не походив ані з відомих позаземних джерел, ані з земних, таких як недалеко місто Нью-Йорк; він так само не був артефактом, спричиненим голубиним послідом на антені. Це був

справжній сигнал, чіткий і незмінний незалежно від того, на яке місце в небі дослідники скеровували свою антену, і він потребував пояснення.

На той час існували дві різні думки щодо походження Всесвіту, розширення якого відкрив Едвін Габбл. У теорії сталого стану Всесвіт залишався гомогенним і незмінним під час свого розширення, зумовленого тим, що весь час виникає нова матерія. У теорії Великого вибуху Всесвіт почався з однієї точки й надвисокої температури і розширювався, аж поки досягнув свого теперішнього стану. Пензіас із Вілсоном знали: американський фізик Роберт Дік (1916 – 1997) ще раніше порахував, що Великий вибух мусив залишити по собі електромагнітні хвилі, які заповнюють увесь простір, так зване реліктове мікрохвильове випромінювання (РМВ). Це найдавніше випромінювання у Всесвіті повинне було бути того ж типу, що й випромінювання абсолютно чорного тіла (АЧТ).

Як ми вже згадували на початку четвертої частини нашої книги, випромінювання АЧТ збуджується коливаннями атомів у кожному об'єкті, температура якого вища від абсолютного нуля, а його інтенсивність та спектр залежать від температури. Наше Сонце випромінює при температурі близько 5800 градусів Кельвіна (або 5500 градусів Цельсія), і частина його випромінювання припадає на видимий діапазон від 400 до 750 нанометрів. Дік передбачив, що простір заповнений мікрохвильовим випромінюванням чорного тіла при температурі приблизно 3 градуси Кельвіна (мінус 270 градусів Цельсія), - тій температурі, до якої простір охолонув після температур у мільярди градусів. Коли найперші вимірювання Пензіаса та Вілсона було розширено на весь мікрохвильовий діапазон, ці дані точно відповідали передбаченням теорії для температури в 2,7 градуси Кельвіна. Ця дивовижно добра узгодженість стала потужним свідченням на користь Великого вибуху, який відтак зробився загальноприйнятою теорією.

Сьогоднішня наука достатньо добре уявляє процес еволюції Всесвіту від Великого Вибуху, який стався приблизно 13,8 млрд років тому, й до нинішнього дня. Проте що саме відбувалося в момент Великого Вибуху, коли густина й температура Всесвіту була нескінченно великими, і що йому передувало, ми не знаємо, і, можливо, ніколи й не довідаємося достеменно.

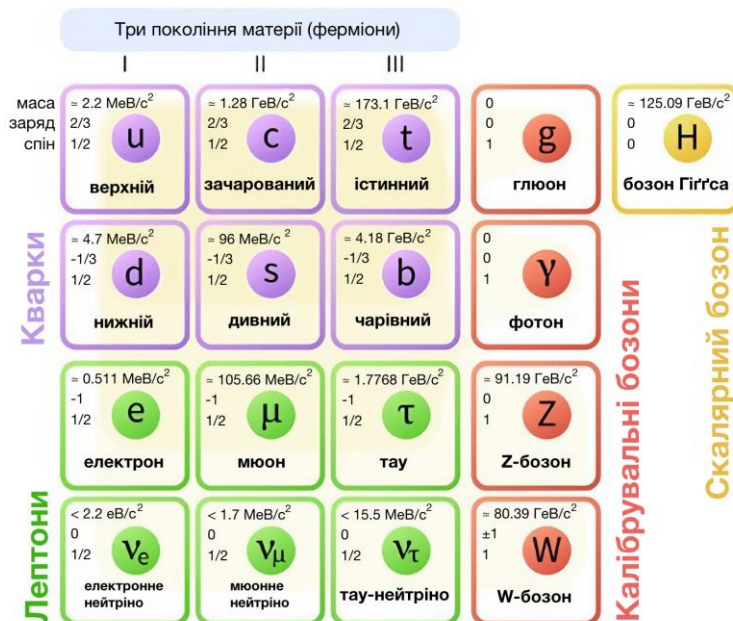


Значний поступ відбувся й на протилежному кінці шкали масштабів. Ми вже говорили про те, як, спираючись на доробок попередніх дослідників, американські теоретики Річард Файнмен та Джуліан Швінгер разом із японським теоретиком Сінїтіро Томонагою наприкінці 1940-х та в 1950-х рр. остаточно побудували квантову електродинаміку (КЕД), тобто квантову теорію електромагнетизму. Вона показує, як світло й матерія взаємодіють, обмінюючись фотонами, і була підтверджена через надзвичайно точне чисельне передбачення рівнів енергії в атомі водню.

КЕД пояснює електромагнітну взаємодію, одну з чотирьох фундаментальних взаємодій у Всесвіті. Подальші роботи показали, що дві з решти трьох взаємодій так само зумовлені обміном елементарними частинками. Сильна ядерна взаємодія, яка утримує разом кварки в протонах і нейтронах, зв'язуючи останні в атомні ядра, зумовлена обміном безмасовими частинками, які мають назву глюонів. Слабка ядерна взаємодія, яка виявляється в радіоактивному розпаді, зумовлена тим, що нейтрони, електрони та інші частинки обмінюються одним з трьох типів частинок, що мають назву W^+ , W^- та Z бозонів (тепер відомо, що електромагнетизм і слабка взаємодія є аспектами єдиної «електрослабкої» взаємодії).

Після багатьох зусиль усі ці результати в середині ХХ ст. розвинулися в Стандартну модель, яка організовує всі відомі елементарні частинки по групах. Окрім фотонів, глюонів, W^+ , W^- та Z бозонів (п'яти так званих «калібрувальних бозонів» - частинок, які переносять взаємодію), модель включає шість кварків та шість лептонів, які утворюють матерію. Цю теорію було експериментально підтверджено, коли виявили передбачені нею частинки: перші два типи кварків у 1968 р., а потім решту чотири типи кварків, інші елементарні частинки, і насамкінець у 2012 р. бозон Гігса (який також називають «скалярним бозоном»). Шотландський теоретик Пітер Гігс (1929 - 2024), який передбачив існування цієї частинки, що надавала Стандартній моделі завершеності, отримав Нобелівську премію з фізики 2013 року разом зі своїм бельгійським колегою Франсуа Англером (н. 1932).

Стандартна модель елементарних частинок



Зусилля багатьох фізиків призвели до створення Стандартної моделі

Таким чином, десятиліття експериментів у фізиці елементарних частинок з використанням таких велетенських установок, як Великий адронний колайдер (БАК) ЦЕРНу, разом із розвитком теорії народили Стандартну модель. Вона поділяє всі відомі елементарні частинки на класи й пояснює походження трьох із чотирьох фундаментальних взаємодій, які дають лад Всесвітові на відстанях від кварків і до галактик, - електромагнітній взаємодії і так званим слабкій та сильній взаємодіям в атомному ядрі. Але вона не описує гравітації, яку окремо пояснює загальна теорія відносності Альберта Айнштейна, яка, на відміну від Стандартної моделі, принципово не містить ідеї квантування.

Сьогодні теоретики намагаються досягнути квантування гравітації і вкладання її в одну схему з іншими трьома взаємодіями, описуваними Стандартною моделлю. Таке об'єднання призведе до універсальної Теорії всього, яка описуватиме дійсність на будь-якому масштабі відстаней. Чільним кандидатом на появу такої теорії в очах великої частини фізиків є Теорія струн, у якій крихітні одновимірні об'єкти, названі струнами, замінюють точкові елементарні частинки. Але, оскільки струни мають масштаб 10^{-35} м, таку теорію принципово неможливо перевірити на досліді, адже вона потребуватиме прискорювача частинок, настільки більшого від БАК, що його навряд чи можна буде спорудити.

Однак, ставши перед відсутністю інших теоретичних проривів, деякі фізики пропонують не перейматися експериментальним підтвердженням і просто прийняти Теорію струн і пов'язану з нею ідею про те, що дійсність складається з множинних світів, «множинного всесвіту», - що є радикальним відходом від того, як фізика діяла впродовж століть. Така пропозиція викликає гарячі заперечення з боку інших авторитетних науковців, зокрема й нобелівського лауреата з фізики 2020 р. Роджера Пенроуза (н.1931).

Вже впродовж останніх десятиліть було здійснено чотири фундаментальні відкриття. Про одне з них, виявлення на ВАК бозона Гігса, що стало в 2012 р. наслідком тривалих цілеспрямованих пошуків, ми вже згадували. Така ж очікувана подія відбулася і в 2015 р., коли масивні наземні детектори Лазерної інтерферометричної гравітаційно-хвильової обсерваторії (ЛІГО) в штаті Вашингтон вперше вловили існування гравітаційних хвиль. Це підтвердило зроблене ще за сотню років перед тим передбачення Айнштейна з його загальної теорії відносності, що гравітаційну взаємодію переносять зі швидкістю світла збурення часопростору. Комп'ютерна симуляція поведінки «чорної діри» підтвердила, що вловлений сигнал походить від зіткнення двох «чорних дір» на відстані 1,4 мільярда світлових років від нас.

Але два інші відкриття виявилися цілком неочікуваними. Більше того, хоча «темна матерія» з «темною енергією» є надзвичайно важливими для розуміння того, як влаштовано Всесвіт, вони досі лишаються загадковими.

«Темну матерію» відкрили спершу непрямим шляхом, через спричинені нею гравітаційні ефекти. Потому, як попередні астрономічні дані вказали на існування невидимої космічної матерії, у 1970-ті американська астрономиня Вера Рубін (1928 – 2016) помітила аномалії в динаміці спіральних галактик, таких, як наш власний Молочний Шлях. Як і будь-які інші тіла, що обертаються, ці велетенські «дзиги» розгубили б усі свої зовнішні частини, якби їх не стримувало тяжіння серцевини галактики, обумовлене її масою. Рубін виявила, що для утримання зірок від розлітання навсібіч потрібна в багато разів більша маса, ніж її видно в галактиці, - і це було перше надійне підтвердження існування «темної матерії».

«Темну енергію» також відкрили непрямим шляхом. У 1998 р. астрономи виявили, що деякі наднові – потужні вибухи зірок у їхніх передсмертних муках – у мільярдах світлових років від нас є тьмянішими, ніж це передбачає теорія розширення Всесвіту після Великого вибуху. З великим подивом було зустрінуто нові дані, які показали, що швидкість розширення збільшується, всупереч тому, що раніше сподівалися: тяжіння маси Всесвіту може з часом сповільнити розширення, чи навіть перетворити його на стискання.

Айнштейн врахував таку силу в 1917 р., запровадивши в свою загальну теорію відносності так звану «космологічну сталу», свого роду анти-гравітацію, яка розштовхувала галактики, щоб не дати Всесвіту колапсувати через силу тяжіння. Але коли Габбл показав, що Всесвіт насправді розширюється, Айнштейн відкинув ідею такої сталої, назвавши її згодом своєю «найбільшою помилкою». У 1998 р. відкриття прискореного розширення відродило цю ідею – вже під назвою «темної енергії».

Наступне потужне підтвердження «темної» природи Всесвіту надійшло в 2003 році. НАСА досліджувало ранній Всесвіт шляхом вивчення анізотропії реліктового мікрохвильового випромінювання; точніше ці дослідження було повторено на супутнику імені Планка, запущеному Європейським космічним агентством у 2009 році. Їх результати показали, що в структурі маси та енергії Всесвіту лише 5% припадає на звичайну матерію, - проти 26% темної матерії і 69% темної енергії, які разом складають 95% Всесвіту. Ці пропорції визначають космологічну «стандартну модель», яка успішно описує багато рис Всесвіту,

включаючи його розширення з прискоренням, спричинений ним розподіл галактик, і встановлює вік Всесвіту в 13,8 мільярдів років.

Ці пропорції є також приголомшливим свідченням того, що після тривалих зусиль людство дослідило тільки малу частину дійсності, і майже нічого не знає про решту її, як-от про саме походження «темної енергії». Одне з припущень в дусі ідеї Пола Дірака, про яку йшлося в нашій книзі, переносить нас на квантовий рівень; згідно з ним «темна енергія» - це так звана «енергія вакууму», яка зумовлена роєм віртуальних частинок, що випадково з'являються і зникають у просторі. Енергія вакууму збільшується з розширенням Всесвіту, і підживлює його даліше розширення з усе більшою швидкістю.

Але, на жаль, ці теоретизування не підтверджено цифровими оцінками. Обчислена на такий спосіб енергія вакууму в 10^{60} разів більша, аніж потрібно, щоб пояснити експериментальні дані для наднових, які й призвели до відкриття «темної енергії». У рамках теорії струн, яка призводить до «множинного Всесвіту», поясненням цієї приголомшливої розбіжності може бути те, що саме в нашому Всесвіті так сталося, що енергія вакууму надзвичайно мала. Однак таке твердження демонструє складність отримання визначених відповідей тоді, коли можна просто заявити, що в різних всесвітах діє різна фізика. То ж слід визнати: про «темну енергію» ми просто нічого не знаємо.

«Темна матерія» викликає свої власні запитання. Ми вважаємо, що Стандартна модель описує всі «цеглинки», з яких побудовано Всесвіт – кварки, лептони включно з електронами, мюонами, тау-частинами й нейтріно, і бозон Гігса. Жодна з цих «цеглинок» не має властивостей, необхідних для формування «темної матерії»; отже, потрібна нова частинка. Головним кандидатом, за яким стоять певні астрономічні свідчення, є слабковзаємодіюча масивна частинка (ВІМП), яка мало впливає на звичайну матерію.

Але попри спокусливі підказки, тридцять років експерименту, включаючи й зовсім свіжі результати груп з Італії та Китаю, не дали чітких підтверджень існування ВІМПів. Тому слід визнати: сучасна фізика далека від завершеності.

Фундаментальні відкриття (можливо, не такі приголомшливі) відбуваються й на проміжних масштабах. Ми вже згадували, що Вернер Гайзенберг навіть від Бога не очікував почути відповіді на запитання: що ж таке турбулентність? Виявилося, що в складних динамічних системах надзвичайне значення має точний вибір початкових умов. У 1961 р. американський математик та метеоролог Едвін Лоренц (1917 – 2008) помітив, що введення 0,506 замість 0,506127 як початкового значення змінної в його комп'ютерних моделюваннях погоди радикально змінило картину на ближчі два місяці. Це стало внеском Лоренца в теорію хаосу, у вивчення систем, динамічна поведінка яких сильно залежить від початкових умов, що Лоренц підсумував у «ефекті метелика», коли легкий змах крилець метелика потенційно може спричинити торнадо. Відкриття Лоренца було оцінено комітетом з Премії Кіото в галузі наук про Землю за 1991 рік як таке, що спричинило одну з найдраматичніших змін у поглядах людства на природу від часів Ньютона.

На базі теоретичних ідей, що містилися в уже згаданій доповіді Річарда Файнмена «Внизу є багато місця» (1959) та стрімкого розвитку ряду прикладних наук реаліями нашого життя стали нанотехнології. Вони призвели до відкриття, одержання та вивчення таких надзвичайно цікавих з

фундаментального та прикладного погляду систем, як фулерен C-60 (1986), вуглецеві нанотрубки (1991), графен (2004). Новий технологічний потенціал мають також інші новітні матеріали.

Група, що одержала назву «топологічних матеріалів», демонструє силу математики при аналізі фізичних явищ. Топологія – це галузь математики, яка аналізує просторові властивості, що зберігаються при плавній деформації форми тіла; наприклад, якщо ви візьмете бублик і почнете розтягувати чи повертати його, в ньому однак лишатиметься тільки одна дірка, аж поки ви його не розірвете. Зв'язки між цим та фізикою можуть здатися надто далекими, але в 1980-ті фізики виявили, що можна зазирнути в природу речовини значно глибше, застосовуючи топологічну математику до квантових ефектів. Ця діяльність мала кульмінацією Нобелівську премію з фізики 2016 року, що її британські теоретики Девід Таулесс, Майкл Костерліц і Данкан Галдейн одержали за відкриття «топологічних фаз речовини».

Застосовуючи такий підхід, фізики пояснили загадкові квантові ефекти в твердих тілах і виявили нові екзотичні матеріали, наприклад, діелектрик, який не проводить струму в об'ємі, але проводить його по поверхні; «напівметал», у якому електрони рухаються надзвичайно швидко, не відчуваючи мікроскопічних перешкод; і матеріал, який пропускає світло лише в одному напрямку. Сподіваються, що такі ефекти призведуть до появи мініатюрніших та швидкодійніших електронних пристроїв, зокрема й важливих для квантових комп'ютерів, а також для ефективніших оптоволоконних мереж.

Дедалі більше досягнень квантової фізики знаходять практичне застосування в найрізноманітніших сферах від будівництва й до медицини. Проте, підсумовуючи найважливіші з викликів, які стоять перед ученими, відомий американський фізик і популяризатор науки Сідні Перковіц стверджує, що основні запитання, які надихають фізиків сьогодні й визначають майбутнє їхньої науки, звучать так: «Що лежить поза Стандартною моделлю?» - бо це стосується нашого глибшого розуміння природи; і «Чи зможемо ми виробляти чистішу енергію?» - бо відповідь на нього, сподіваємося, покращить умови життя людей.

Замість післямови

Як свідчить історія науки, нові відкриття сприймали досить безболісно, коли вони не зачіпали звичну основу наших поглядів на природу речей.

Значно важче було прийняти нові переконання, якщо вони суперечили усталеній картині світогляду. У XVI столітті люди були готові відправити на вогнище єретика, котрий наважився заперечувати той очевидний факт, що Сонце рухається навколо нерухомої Землі. Мозок людей, як правило, протестує, коли їх намагаються переконати в чомусь, що суперечить життєвому досвіду. Особливо важко було змиритися з твердженнями, які містилися в теоретичних концепціях, що лежать в основі теорії відносності й квантової фізики.

Наприкінці XVII століття було сформовано першу цілісну наукову теорію — ньютонівську механіку. Враження, яке вона справила на сучасників було

колосальне. Світобудова раптом набула струнких і завершених обрисів. Як ми вже згадували, молодший Ньютонів сучасник, великий англійський поет XVIII століття Александер Поуп висловив це відчуття знаменитим двовіршем:

*Закони Всесвіту в пільмі ховалися від нас.
«Хай буде Ньютон!» — мовив Бог; і світло стало враз.*

На початку XX століття англійський поет Джон Коллінгс Сквайр дописав до цієї захопленої епітафії Ньютону ще два рядки:

*Але тривати без кінця воно так не могло:
«З'явись, Айнштейне!» — чорт велів; і стало як було.*

Релятивістська фізика й квантова теорія (а разом із ними астрофізика, космологія і квантова теорія поля, які залишилися майже поза межами нашого розгляду) привели до радикальної зміни наших уявлень про фізичну будову матеріального світу. Вони відкрили людству нові обрії, про які люди раніше й не здогадувалися. Людство в середині XX ст. зрозуміло, що завдячує фізикам не лише нові відкриття, але й зміну всього усталеного способу життя, різке розширення повсякденних можливостей. І «фізики в картатих сорочках», хлопці, які роблять неймовірні експерименти й пишуть запаморочливо складні формули, стали героями багатьох тодішніх фільмів і книжок.

Водночас квантова механіка й релятивістська теорія продемонстрували дивовижну закономірність розвитку науки про природу: коли нова теорія створюється на основі правильного тлумачення експериментальних даних, її остаточна структура часом не залежить від початкових (частіше — інтуїтивних) уявлень її творців — а то й вступає в суперечність із ними. Так сталося з основоположником квантової фізики Максом фон Планком, який дуже довго розглядав ним же запроваджені кванти лише як певну математичну абстракцію, необхідну для правильного опису експериментальних кривих. Однак розвиток теорії довів: насправді за квантами стоїть глибока фізична реальність.

«Драма ідей» навколо інтерпретації фізичних основ квантової теорії не знала собі рівної у всій історії розвитку фізики. Але, врешті-решт, струнку споруду квантової фізики було збудовано, і вона вже не здається більшості з нас абсурдною — навіть з погляду повсякденного досвіду.

Нинішній стан тих чотирьох основоположних фізичних теорій, історію яких коротко викладено в нашій книзі, для більшості науковців, що не заглиблюються в питання побудови «Теорії всього» до певної міри нагадує той, у якому перебувала класична фізика кінця XIX століття, яка здавалася завершеною навіть такому визначному вченому, як лорд Кельвін. Однак, як ми побачили в попередньому розділі, таке враження глибоко хибне. На початку XXI ст. роль «хмаринки на ясному небі» відіграють (за оцінкою нобелівського лауреата Віталія Гінзбурга) проблеми необоротності часу, адекватності квантових вимірювань та походження життя. Це — надзвичайно фундаментальні проблеми, і зараз нам важко навіть передбачити, до чого ще приведуть науку спроби їхнього розв'язання.

Існує й чимало «робочих моментів» фізики на «проміжних масштабах» між Всесвітом та атомним ядром: не створено досі послідовних теорій високотемпературної надпровідності й квантового ефекту Голла (експериментально відкриті ще в середині 1980-х років), поведінки бозе-айнштайнівського конденсату (вперше експериментально реалізованого 1995 року) тощо. Водночас, стрімкий розвиток мікроелектроніки й нанотехнологій ще раз демонструє торжество принципів і рівнянь квантової механіки.

Не менш гарячі дискусії, аніж дебати фізиків середини 1920-х років, нині точаться навколо спроб побудувати універсальну «Теорію всього», яка об'єднала б усі можливі фізичні взаємодії. Фізика високих енергій, яку уособлює Великий адронний колайдер, споруджений унаслідок співробітництва вчених десятків країн, безпосередньо зустрілася з проблемами початку й меж нашого Всесвіту (не випадково таку загальну увагу було приділено «полюванню» на бозон Гігса, відкритий врешті-решт у 2012 р.). Поняття «темної матерії» та «темної енергії» звучать нині не менш загадково, ніж слово «квант» сто років тому. Уявити передбачений Теорією струн десятивимірний простір, у чотиривимірному зрізі якого (три «декартові» координати й час) ми живемо, нам так само складно, як нашим прадідам складно було змиритися з корпускулярно-хвильовим дуалізмом і принципом невизначеності.

На думку сучасного українського фізика-теоретика Вадима Локтева (н.1945), досі відкритими залишаються такі фундаментальні наукові питання:

Чи може бути уніфіковано закони фізики? Отже — чи має сенс робота над єдиною теорією поля, якої так і не побудував Айнштейн?

Чи є фундаментальні сталі (як-от, стала Планка, швидкість світла) справді сталими, чи вони змінюються в часі (хоч і дуже повільно)?

Чи самі ми у Всесвіті?

Яка будова Всесвіту й роль «темної матерії» та «темної енергії» — слабо взаємодіючої субстанції, яка пронизує весь простір видимого Всесвіту, і відкриття якої стало сенсацією на межі XX–XXI сторіч?

Чи є глибші фізичні принципи, ніж принцип невизначеності?

Звідки приходять промені з ультрависокими енергіями?

У чому полягає фізичний механізм високотемпературної надпровідності, й узагалі, чи є обмеження на температуру її появи?

Як залежать властивості води від її структури?

Що таке скло й скляний стан?

Що керує сонячними циклами?

Чому напрям магнітного поля Землі змінюється з часом?

Чому відбуваються землетруси і як їх передбачити?

Ще більше питань постає перед фізиками тоді, коли вони звертаються до науки про життя. Серед них чи не найзагадковіші:

Чи/чим відрізняється фізика живого від фізики неживого?

Як біомолекули «впізнають» одна одну?

Що керує біопроцесами в часі?

Чи можна пояснити в термінах фізичних взаємодій людську свідомість?

Цей короткий перелік дозволяє читачеві впевнитися: попри всі песимістичні прогнози, в науку йти варто. Вона забезпечить цікавою роботою ще не одне покоління дослідників!

Закінчимо розповідь про еволюцію головних фізичних теорій трьома висловами великих людей:

- «Кожен школяр знайомий тепер із істинами, за які Архімед віддав би життя» (Ернест Ренан).
- «Що доповнює поняття «істина»? Відповідь: ясність». (Нільс Бор).
- «Нещасні ті люди, яким усе зрозуміло». (Луї Пастер).

І насамкінець — ще раз наведемо слова сучасного українського фізика Івана Вакарчука: «Можливо, Природа «підсовує» нам лише те, що ми хочемо побачити. Можливо, справжнє розуміння вона віддаляє на межу можливостей нашого розуму, де воно лише мерехтить. Але важливим є те, що просте слово «цікаво» керує нами в нестримному прагненні пізнати всю її Красу».

Автор складає пошану світлій пам'яті професора Івана Вакарчука, який уважно стежив за роботою ще над першою версією цієї книги і дав декілька цінних порад (зокрема, саме він умотивовано наполіг на тому, щоб відтворювати українською мовою назву основоположної праці Ісаака Ньютона саме як «Математичні принципи натуральної філософії», а не «Начала», як це звикли в нас робити, йдучи за російським перекладом). Автор вдячний академікам НАН України Юрію Головачу, Віктору Грінченку, Вадиму Локтеву, які прочитали всю цю книгу (або її частини) і зробили важливі зауваження; науковому секретареві НТШ докторові Роману Пляцку, який суттєво доповнив своїми порадами розділ про Івана Пулюя, професорам Ігореві Анісімову та Анатолію Векличу, які стали уважними рецензентами рукопису (а професор Веклич ще й наполіг, щоб рукопис цей з'явився якомога швидше — без його втручання автор ще довго міг би відкладати цю роботу на майбутнє).

Нарешті, автор вдячний студентам, які, прослухавши в нього курс «Розвиток фізичних теорій» на третьому році бакалаврату на факультеті радіофізики, електроніки і комп'ютерних систем Київського національного університету імені Тараса Шевченка, своїми запитаннями під час лекцій і відповідями під час контрольних робіт подарували йому багато думок, які сприяли покращенню цієї книги. Особлива вдячність серед них Ростиславу Хілінічу, який суттєво допоміг у покращенні якості ілюстрацій. Годі й казати, що за всі неминучі недоліки огріхи, які однак залишилися в книзі такого обсягу й рівня охоплення матеріалу, відповідальність несе виключно сам автор.

Рекомендована література

Статті в англomовній та україномовній «Вікіпедії», присвячені згаданим у цій книзі вченим та фізичним явищам.

Вайнберг С. Пояснюючи світ. Історія сучасної науки. — Х.: Клуб сімейного дозвілля, 2019. — 352 с.

Храмов Ю.О. Фізика. Історія фундаментальних ідей, теорій та відкриттів. — Київ: «Фенікс», 2015. — 816 с.

Ільченко В.І., Проказа О.Т., Стріха М.В. Фізичні теорії: люди, ідеї, події. — Луганськ: Елтон-2, 2012. — 382 с.

Азархін В.П., Горський В.С. Коперник. Бруно. Галілей. — Київ: «Наукова думка», 1974 — 200 с.

Дрейк Стілман. Галілей. Дуже коротке введення. Тернопіль: Навчальна книга — Богдан, 2022. — 232 с.

Сорелл Том. Декарт. Дуже коротке введення. Тернопіль: Навчальна книга — Богдан, 2022. — 192 с.

Айлеф Роб. Ньютон. Дуже коротке введення. Тернопіль: Навчальна книга — Богдан, 2021. — 246 с.

Лоуренс М. Пріслі. Наукова революція. Дуже коротке введення. Тернопіль: Навчальна книга — Богдан, 2021. — 208 с.

Айзексон Волтер. Леонардо да Вінчі. Біографія // К.: «Наш формат», 2019. — 488 с.

Айзексон Волтер. Ейнштейн. Життя і всесвіт генія / К.: «Наш формат», 2020. — 526 с.

Нікола Тесла. Мої винаходи / Львів: Видавництво старого Лева, 2019. — 132 с.

Річард Файнмен. «Та ви жартуєте, містере Файнмен!» Пригоди допитливого дивака. К.: «Наш формат», 2018. — 398 с.

Павленко Ю.В., Руда С.П., Хорошева С.А. Храмов Ю.О. Природознавство в Україні до початку ХХ ст. в історичному, культурному та освітньому контекстах / К.: Академперіодика, 2001. — 422 с.

Галаган Микола. Атомістично-молекулярна теорія. Нарис еволюції наукових поглядів на тонку будову матерії / Прага: Український громадський видавничий фонд, 1925. — 188 с.

Аксіоми для нащадків. Українські імена у світовій науці. Збірник нарисів / Упорядкування і передмова О.К.Романчука. — Львів: «Меморіал», 1992. — 544 с.

Гайда Роман, Пляцко Роман. Іван Пулюй. Життя і творчість. Вид. 2-ге, уточнене і доповнене / Львів: НТШ, 2019. - 219 с.

Іван Пулюй. Збірник праць за ред. В. Шендеровського / К.: Рада, 1996. - 712 с.

Шендеровський Василь. Нехай не гасне світ науки. За редакцією Емми Бабчук. К.: Рада, 2003. — 416 с.

Історія Наукового товариства ім.Шевченка. Нью-Йорк — Мюнхен: Накладом НТШ, 1949. - 52 с.

Інститут фізики НАН України. 80 років / За редакцією Л.П.Яценка. — Львів: Євросвіт, 2009. — 536 с.

Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є.Лашкарьова НАН України. 1960 — 2020 / Редколегія: О.Є.Беляєв (голова) та ін. — Київ: Академперіодика, 2020. — 290 с.

Овчаренко Ю.С. Історія кріофізики в Україні. Х: 2019. — 134 с.

Боголюбов О.М. Нариси з історії механіки. — Київ: «Наукова думка», 1974. — 192 с.

Мриглод І.М., Ігнатюк В.В., Головач Ю.В. Микола Боголюбов та Україна. — Львів: Євросвіт, 2009. — 192 с.: іл.

Литвинко А.С. Микола Миколайович Боголюбов та статистична фізика в Україні. — Київ: Академперіодика, 2009. — 304 с.

Шелест В.П., Рожен О.П. Фізика сперечаються. — Київ: «Наукова думка», 1973. — 176 с.

Климишин І.А. Астрономія вчора і сьогодні. — Київ: «Наукова думка», 1976. — 288 с.

Вакарчук І.О. Квантова механіка. — Львів: «ЛНУ імені Івана Франка», 2007. — 848 с.

Свідзинський А.В. Математичні методи теоретичної фізики: Підручник. У 2-х томах. Київ: Ін-т теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова, 2009. — Т.1. — 396 с.; Т.2. — 436 с.

Кияк Б., Проскура О. Доля академіка Олександра Гольдмана // З архівів ВЧК-ГПУ-НКВД-КГБ. — 1997. - №1-2. — С. 253-262.

Головач Ю., Гончар Ю., Красницька М. Фізика і фізики в НТШ у Львові // Журнал фізичних досліджень. — 2018. — т. 22, №4. — С. 4003—4031.

Петрук Олег. Математично-природописно-лікарська секція Наукового товариства імені Шевченка // Світогляд. — 2023. - №5. — С.34-37.

Стріха М.В. Сторіччя науки про напівпровідники: витоки і український внесок // Український фізичний журнал. — 2014. — т.59, №8. — С. 830–839.

Стріха М.В. До питання про історію фізики // Світогляд. — 2022. - №1. — С.39-55.

Стріха М.В. Вадим Євгенович Лашкар'єв – визначний український фізик ХХ століття, першовідкривач *p-n*-переходу в напівпровідниках (до 120-річчя від дня народження) // Укр. фіз. журн. — 2023. — т.68, №10. — С.707-716.

Стріха М.В. Українська мова й фізика: коротка історична ретроспектива (до 150-річчя Наукового товариства імені Шевченка) // Укр. фіз. журн. — 2024. — т.69, №2. — С.124-140.

Sidney Perkowitz. Physics. A Very Short Introduction. Oxford University Press, 2019. — 101 p.

The Oxford Handbook of the History of Physics. Ed. by Jed Buchwald and Robert Fox. Oxford University Press, 2013. — 956 p.

Ukrainian Journal of Physics. Golden contribution of Ukrainian physicists to modern science. Special issue dedicated to the 90th anniversary of the National Academy of Sciences of Ukraine. — 2008. — Vol.53. — 210 p.

Quantum Questions. Mystic Writings of the World's Great Physicists. / Edited by Ken Wilber. — Boston and London: "New Science Library", 1985. — 212 p.