

**Міністерство освіти і науки України**  
Східноукраїнський національний університет  
імені Володимира Даля  
Академія наук вищої школи України

**Ільченко В.І., Проказа О.Т., Стріха М.В.**

**ФІЗИЧНІ ТЕОРІЇ:  
ЛЮДИ, ІДЕЇ, ПОДІЇ**

Загальна редакція д.ф.м.н. Стріхи М.В.

ББК  
ISBN

## ЗМІСТ

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів

Гриф навчального посібника надано листом МОН №1/11-829 від 13 лютого 2010 року.

## ЗМІСТ

*Фізика є стрижнем гуманітарної освіти нашого часу*

*Ісідор Рабі*

Ісідор Айзек Рабі (1898-1988) – американський фізик. Народився в Риманові в тоді австрійській Галичині (нині – територія Польщі). Закінчив Корнельський і Колумбійський університети, працював у міському коледжі Нью-Йорка, потім – професором Колумбійського університету, був заступником директора Радіаційної лабораторії Массачусетського технологічного інституту. Член Національної АН США, почесний член низки академій наук і наукових товариств, президент Американського фізичного товариства, лауреат Нобелівської премії (1944) за відкриття ядерного магнітного резонансу. Роботи присвячено магнетизму, ядерній фізиці, спектроскопії молекулярних пучків, квантовій механіці.

*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.*

*Іван Вакарчук*

Іван Вакарчук (н. 1947) – український фізик-теоретик. Закінчив Львівський університет, завідувач кафедри теоретичної фізики (з 1985 року) і ректор (у 1990-2007 роках і з 2010 року) цього університету. У 2007-2010 роках – міністр освіти й науки України. Коло наукових інтересів: фізика квантових рідин, теорія фазових переходів, фізика магнітних неупорядкованих систем, математичні методи в теоретичній фізиці, проблеми квантової механіки, теорія зоряних спектрів, філософія науки. У 2001-2004 роках – президент Українського фізичного товариства. Головний редактор «Журналу фізичних досліджень» та науково-популярного журналу «Світ фізики». Автор підручника «Квантова механіка» (1998, 2004, 2007). Лауреат Державної премії України в галузі науки й техніки.

*Не знаю я, що буде після нас,  
В які природа убереться шати.  
Єдиний, хто не втомлюється, – час.  
А ми живі, нам треба поспішати...*

*Щоб ці ліси не вимерли, як тур,  
Щоб ці слова не висохли, як руди.  
Життя іде і все без коректур,  
І як напишеш, так уже і буде.*

*Ліна Костенко*

Ліна Костенко (н. 1930) – визначна українська поетеса. Лауреат Державної премії України імені Тараса Шевченка, багатьох державних та громадських відзнак.

## Замість передмови

Книга, яку Ви тримаєте в руках, незвичайна.

По-перше, вона однаковою мірою адресована і студентам – майбутнім учителям фізики, і тим, хто зробить фізику своїм основним фахом дослідника. Всім їм треба мати достатнє уявлення про досягнення загальнолюдської культури. А наука взагалі (і фізика зокрема) є важливою складовою духовної культури.

По-друге, ця книга почасти «з фізики», почасти «про фізику», але насамперед «про фізиків», тобто – це «фізика (а точніше – основні фізичні теорії) в біографіях великих учених». А тому вона певною мірою сприяє гуманітаризації природничо-наукової освіти, «олюднюючи» навчальний матеріал з фізики.

По-третє, читати цю книгу можна розділ за розділом, а можна вибірково, можна до систематичного вивчення основного матеріалу базового курсу фізики, а можна і в процесі вивчення чи після нього.

Наявні в книзі формули передбачають обізнаність із основами диференціального й інтегрального числення принаймні на рівні першого курсу педагогічного університету. Проте в першому прочитанні окремі складні формули можна й пропустити, зосереджуючись на історії ідей, на людях і подіях, які творили сучасну фізику.

Автори бажають читачам успішного долучення до ще однієї важливої царини загальнолюдської духовної культури!

## Вступ

Чим зумовлено потребу доповнити стандартний підручник фізики посібником історично-гуманітарної спрямованості?

Ще не так давно основний наголос у написанні підручників робили на тому, аби набуті знання слугували інструментом у професійній діяльності – та й годі. Нині концептуальною основою навчання має стати також формування особистості.

Фізика в певному сенсі є «головною наукою» сучасності (саме їй людство переважно завдячує тими тектонічними змінами, які відбулися в його способі життя впродовж другої половини XX століття). Разом із тим, ця наука – один із найважливіших компонентів загальнолюдської культури, що суттєво впливає на розвиток науково-теоретичного (або ж діалектичного) стилю мислення, на формування наукового світогляду, а також робить значний внесок у екологічне, естетичне й етичне виховання.

Є чимало надзвичайно цікавих науково-популярних книг 1960-80 років, авторами яких, зокрема, є видатні науковці сучасності (деякі назви наведено наприкінці посібника, в списку рекомендованої літератури) – на них виростало середнє покоління активних нині українських науковців. Але видання тих років уже малодоступні. Новіші підручники (зокрема й написані та видані в Україні) здебільшого не можуть задовольнити ті потреби, на які була зорієнтована згадана вище науково-популярна література. Є певні відрадні винятки (як-от «Квантова механіка» професора Івана Вакарчука, написана не лише з науковим блиском, але й з численними гуманітарно-літературними екскурсами, чи «Математичні методи теоретичної фізики» професора Анатолія Свідзинського, що містить докладні розділи з історії науки) але їх замало, щоб виправити ситуацію. Цим і пояснюється необхідність появи книги, що її читач тримає в руках.

У основу концепції безперервної фізичної освіти в навчальних закладах України покладено певні принципи, дидактичні й загальнометодичні положення. З них акцентуємо увагу на таких:

- науковість змісту і його методологічна спрямованість;
- гуманітаризація фізичної освіти (розгляд актуальних загальнолюдських проблем світоглядного характеру: історичних, культурологічних, філософських тощо);
- організація навчального матеріалу навколо фундаментальних фізичних теорій: класичної механіки, молекулярно-кінетичної теорії й термодинаміки, електродинаміки, квантової фізики; органічний взаємозв'язок класичної й сучасної фізики.

Тому в своїй книзі автори розглядають методологічні питання, пов'язані зі специфікою наукового пізнання, становлення й розвитку фізичних теорій, еволюції (а часом і революційних змін) уявлень про фізичну картину світу.

З метою «олюднення» фізики багато уваги приділено видатним ученим, причетним до створення її основних розділів. Обізнаність із викладеними фактами, що утворюють гуманітарний компонент фізичної освіти, автори вважають показником загальної освіченості молодого фізика, його науково-історичної ерудиції, врешті-решт – долученості до загальнолюдської культури.

Не випадково визначний український філософ і культуролог, академік Мирослав Попович наголошує: «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».

Автори лишають цей другий підхід для стандартних підручників фізики, а натомість зосереджуються на першому, намагаючись подати історію розвитку головних фізичних теорій на широкому історико-культурному тлі. Запропонована науково-історична хронограма покликана стати ефективним методичним засобом реалізації гуманітарного потенціалу фізики.

В основі кожної науки (й фізики зокрема) лежать досвід та експеримент, які дають нам знання про фізичні явища. Фізичні явища традиційно подаються через сукупність взаємопов'язаних і взаємопроникних областей: явища механічні, теплові, електромагнітні й квантові. (Даючи огляд усталених і основоположних сфер фізики, ми лишаємо за дужками хімічну фізику, біофізику, теорію хаосу, теорію гравітації, фізику елементарних частинок та інші галузі

знань, ступінь завершеності яких ще значно нижча). Суть цих явищ відображено у відповідних теоріях. Таким чином, маємо систему чотирьох фізичних теорій, взаємозв'язаних «наскрізними» фізичними поняттями. Специфічні фізичні поняття властиві кожній із цих теорій.

Наприклад, поняття енергії є «наскрізним», тобто спільним для всіх теорій, а от поняття температури є суттєвим у теорії теплових явищ, однак у механіці його не застосовують.

Отже, «бачення» фізики як системи взаємопов'язаних теорій, володіння системою загальних і специфічних фізичних понять, розуміння законів, що відображають суть фізичних явищ, – усе це лежить у основі наукового світогляду людини, хоча повною мірою його й не зумовлює.

Саме тому ми навіть не намагатимемося дати наскрізної картини розвитку фізики «від Аристотеля до наших днів», а зупинимося окремо на кожній із чотирьох головних фізичних теорій. На цьому шляху будуть неминучі «повернення», хронологічні й персональні перетини, адже великі уми виявляли себе відразу в кількох царинах. Але саме так ми зможемо простежити хід розвитку наукової думки – в усьому драматизмі, притаманному історії кожної з теорій.

Нарешті, саме філософія допомагає фізику шукати відповіді на питання, з якими не впораєшся лише за допомоги традиційних формул і вимірювань. Ще раз надамо слово філософові Мирославу 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. Лейбніціанці (прихильники Ньютонового сучасника, німецького філософа й математика Лейбніца, 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! Лейбніціанець відповів би: з людського погляду – так. Але з погляду Бога – ні. Для Бога безконечний Всесвіт, що розширюється, і незмінний Всесвіт нерозрізновані».

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 десятивимірної простору, що базується на теорії струн, уявлення про вакуум як про надщільне середовище, а про звичайну матерію – як про його «розрідження» тощо. А відтак уміння 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.

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, оди із виявів мудрості людини, елемент її духовної, внутрішньої досконалості.

Типовим представником такого ставлення до знання був 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 випливало, 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 ресурсів планети Земля недостатньо, щоб забезпечити всім її мешканцям бодай рівень життя провідних розвинених країн – так званого «золотого мільярду», – на порядку денному постає питання про синтетичне платонівсько-беконівське ставлення до знання як до поєднання моральності й матеріальної сили. Основа моральності – гуманітарний потенціал природничонаукового знання, основа матеріальної сили – його практична спрямованість. Наш посібник присвячено гуманітаризації змісту навчального матеріалу з фізики – в певному сенсі «головної науки» сучасності.

Тож надамо ще раз слово сучасному українському фізику-теоретику 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 квантовомеханічними 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».

Використати потенціал цієї взаємодії – мета нашої книги.

## I. МЕХАНІКА

### 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. Англійський філософ і теолог Вільям Оккам (бл. 1285-1349), котрий викладав у Оксфордському університеті, а пізніше через звинувачення в єресі 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), Готтфрід Лейбніц (1646-1717), французькі просвітителі XVIII століття, німецькі класичні філософи Еммануїл 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. Такий підхід тривалий час виправдовував себе, проте це не дає підстав вважати, що простоту наукових знань зумовлено простою природою.

Впорядкованість у природі насправді поєднується з хаосом, гармонія з дисгармонією, одноманітність із різноманіттям. Тому треба говорити не про

якусь універсальну простоту природи, не про простоту дійсності, яка насправді складна й багатоманітна, – а про простоту вираження знань про цю складну дійсність, тобто про таку простоту, яка має евристичне значення в процесі пізнання. 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 (1972) 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 суттєві зв'язки, що ховаються за цими фактами, тобто наукові закони. Ці закони розкривають суть явищ, встановлюють єдність у різноманітні, 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 розкриває «лінію поведінки» фізичного об'єкта в певних умовах. Закон, розкриваючи загальне в явищах дійсності, обов'язково містить у собі й одиничні випадки.

Те, що на описовому рівні наукового пошуку виражається в «морі фактів», у законі фіксується в короткій, простій і красивій фразі, а часто в красивій знаково-символічній формі. 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 в собі.

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

Закони науки є структурними елементами наукових теорій, які відображають ширшу царину об'єктивних зв'язків, ніж окремий науковий закон. 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 вихідних положень.

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

Про витонченість і красу рівнянь Максвелла Генріх Герц захоплено й натхненно написав: «Вивчаючи цю дивовижну теорію, не можна не відчувати, що її математичним формулам властиве самостійне життя і власна свідомість, що вони розумніші від нас, розумніші навіть від свого творця, що вони дають нам більше, ніж у них було закладено спочатку».

## Що таке наукове пізнання?

Наукове пізнання – це відкриття невідомого і добування достовірних знань про світ.

Навчання – це засвоєння цих знань.

Навчальне пізнання – це спеціально організована діяльність «добування» знань в певних педагогічних умовах.

І наукове, і навчальне пізнання передбачає пізнавальну активність людини, бажання пізнавати з метою утамувати спрагу до знань. І в обох випадках 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 Ейнштейн).

Вихідним началом гносеології є 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».

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 не вдалося знайти жодної згадки про яблуко. Сам Ньютон писав, що не він здогадався першим про існування унесвітнього 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 унесвітнього 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 вчений XIX століття Карл Гаусс: «Не розумію, як можна припускати, що цей



Рис. 0. Ньютон і яблуко. Шарж Н. Містрі

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 «єдиним кавалерійським наскоком» 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 Алва 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 повинна мала світити яскравим світлом, ніби маяка. Чи заслужив Едісон на такий пам'ятник?

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 запасти волосок у порожню скляну колбу;
- не Едісон першим використовував тугоплавке вугілля, що витримує температуру сліпучого розжарювання.

Перевеємо розповідь простим перерахунком 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 геній Едісона «широко розчинив двері» електричній лампі у великий світ. Йому випало зробити тільки 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 в цьому й полягає його безперечна заслуга, і маємо віддати вченому належне, тим паче що його «розумні руки» залишили свої сліди на телефоні й динамо-машині, на телеграфі й акумуляторі, на фонографі й установці для магнітного сортування руд тощо (загалом 1099 винаходів і удосконалень!).

Повсякденний досвід, практика одного окремо взятого індивіда не може служити підставою для широких і глибоких висновків та узагальнень, які є змістом достовірного знання. Практика окремої людини не може включити все багатство матеріальної й духовної культури, результати всієї діяльності людського суспільства в його історичному розвитку. Рамки індивідуального досвіду дуже вузькі й обмежені. Підставою для достатньо глибоких і широких висновків і узагальнень може служити тільки суспільно-історична діяльність.

Процес пізнання і його результати залежать не лише від зовнішньої діяльності, що знаходить в своє віддзеркалення в мисленні, але й від власної активної духовної діяльності суб'єкта пізнання. Вдосконалення розумової діяльності в процесі пізнання – тривалий і складний шлях духовного розвитку особи, а гуманітарний потенціал фізики є одним із дієвих засобів такого розвитку.

Сучасний філософ Г. Гачев у праці «Книга здивувань або природознавство очима гуманітарія, або образи в науці» висловлює і обґрунтовує таку точку зору. Предмет гуманітарного знання «створює» сама людина, а предмет природничонаукового знання перебуває поза людиною. Якщо природничі науки вивчають те, що виникло й існує незалежно від людини, то гумані-

тарні – «замкнуті в людському всезнанні», тому інтравертні. Природознавство ж – екстравертне, тому що воно відкрите в природу.

Природничонаукова культура включає сукупний загальнолюдський обсяг знань про природу, про конкретні види і сфери буття. Техніко-технологічна культура базується на фізико-технічних знаннях, що складають ядро технічних наук. Гуманітарна культура – це система, що складається з історичного обсягу знань з філософії, етики, культури та інших наук і цінностей гуманітарного знання (гуманізм, ідеали добра, краси, справедливості).

Обидві ці культури мають і риси, які відрізняють їх одна від одної, і спільні риси. Специфіка фізичного знання, яке лежить у основі природничонаукової культури, полягає в тому, що знання про природу відрізняється високим ступенем об'єктивності й достовірності. Системотворчі цінності гуманітарного знання залежать від соціальної позиції людини. А такі мислителі як засновник Української академії наук, творець учення про ноосферу Володимир Вернадський розглядали культуру як цілісну й неподільну категорію, що розкриває інтеграційно-гуманітарний підхід до вивчення загального взаємозв'язку в природі й суспільстві.

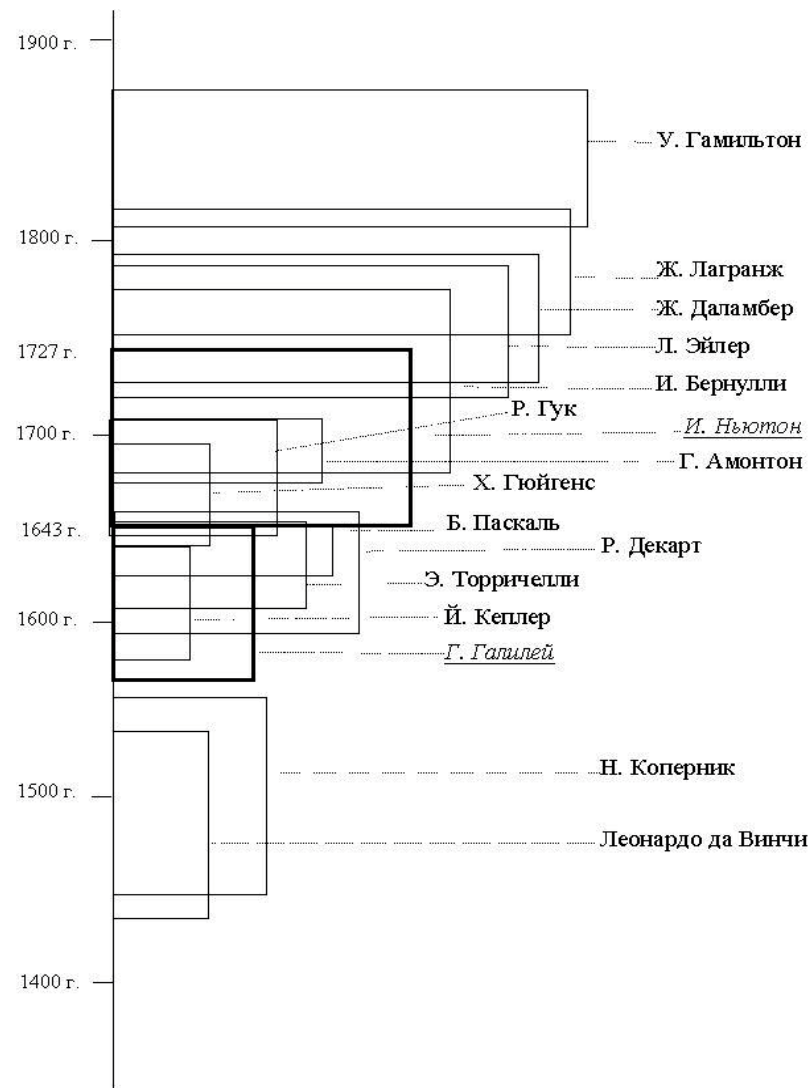
Таким чином, дві культури, природничонаукова й гуманітарна, взаємопов'язані, а тому в процесі вивчення фізики можна виділити аспекти їх зв'язки, що розкривають їх.

## Ньютонові попередники

Світ фізичних явищ багатий і різноманітний. Попри це, більшість із цих явищ можна віднести до однієї з чотирьох взаємозв'язаних і взаємпроникних 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 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 в світ, ми створюємо теорію». Отже, досліді 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!

Повсякденні знання про світ і наукові знання дуже часто не збігаються, хоча джерелом і тих і тих є спостереження, життєвий досвід. Це пов'язано з тим, що людина бачить не лише за допомогою зору, але і за допомогою розуму.



Науково-історична хронограма

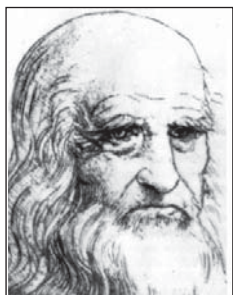
«Бачити» за допомогою розуму можуть не всі люди, а тільки ті з них, кого ми відносимо до когорти науковців. Саме науковці дійшли висновку, що Земля куляста й обертається навколо Сонця, що важкі й легкі тіла падають з однаковим прискоренням, – хоча повсякденний досвід схиляє начебто до інших висновків (і таких прикладів можна наводити безліч). Саме науковці здобувають нові знання, які з часом стають надбанням людей, що отримують відповідну освіту.

Перша фізична теорія – класична механіка. Її творцем, основоположником по праву вважають англійського вченого Ісаака Ньютона, котрий 1687 року опублікував свою фундаментальну працю «Philosophiae Naturalis Principia Mathematica» – «Математичні принципи натуральної філософії». Але щоб скласти уявлення про те, якими були витoki й передумови створення цієї праці, хто і як здобував наукові знання про світ (у нашому випадку про світ механічних явищ), погляньмо на науково-історичну хронограму, що відображає роки життя науковців, котрі зробили найсуттєвіший внесок у становлення й розвиток механіки.

З представлених на хронограмі імен особливо виділено два: це італійський учений Галілео Галілей (1564-1642), котрого вважають батьком сучасної експериментальної фізики (її попередника Аристототелева фізика базувалася не на досліді, а на розмірковуваннях), і англійський учений Ісаак Ньютон (1643-1727), котрий заклав основи першої фізичної теорії (класичної механіки), а тому його по праву можна вважати батьком теоретичної фізики.

Та перш ніж перейти до постатей Галілея й Ньютона, зупинімося бодай побіжно на постатях їхніх попередників і сучасників, чії досягнення так само лягли в підмурівок сучасної науки.

### Леонардо да Вінчі (1452 -1519)



Леонардо да Вінчі

Він був унікальною особистістю в історії людства. 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 у одній людині.

Мабуть, Природа захотіла довести, що можливості людини можуть стати безмежними – завдяки власній допитливості, працьовитості і цілеспрямованості. Леонардо творчо працював усе своє життя, вважаючи, що найкращий відпо-

чинок – це зміна видів діяльності. Уже в наш час інженери взяли креслення деяких конструкцій Леонардо да Вінчі й вирішили побудувати за цими кресленнями реальні об'єкти. Результат їх вразив: вони отримали гвинтокрил, планер, саморушійний екіпаж із пружинним механізмом, парашут, висувні пожежні сходи.

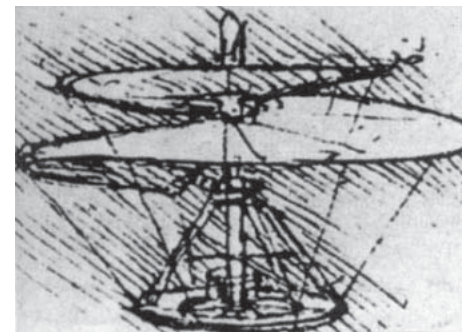


Рис. 3. Проект гелікоптера.

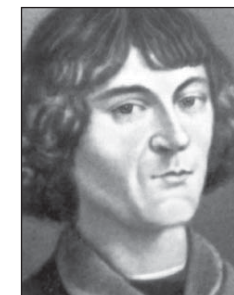
Не забуваймо також, що картини Леонардо зберігаються в найкращих художніх музеях світу, а «Джоконда» є чи не найвідомішим, а принаймні найчастіше репродукованим витвором образотворчого мистецтва в людській історії!

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. Досліджуючи рівновагу сил, прикладених до блоку, він запровадив у механіку поняття моменту сили. Окрім цього, йому належать численні технічні винаходи.

### Миколай Коперник (1473–1543)

Коперник – автор книги «Про обертання небесних сфер», яку було видано в останній рік його життя. 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».

Миколай Коперник, з молодих років і до глибокої старості носячи духовний сан, виявився найнебезпеч-



Миколай Коперник

нішим супротивником усталених і освячених церквою канонів світобудови, згідно з якими нерухома Земля перебувала в центрі Всесвіту, а навколо неї оберталися Місяць, Сонце й планети. Церква «прогледіла» цю небезпеку й похопилася тільки через 73 роки після виходу книги, коли «єресь» Коперника неймовірно поширилася й міцно оволоділа умами освічених людей. Інквізиція внесла книгу в список заборонених.



Рис. 4. Система світу за Арістотелем і Птолемеем (з середньовічного трактату). У центрі – Земля.

Миколай 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. Лука Ваценроде, 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 у Краківському Ягелонському університеті й, нарешті, поїхав до-

вчатися до Італії. Він вивчав канонічне право, а окрім того студював математику, астрономію, філософію, грецьку мову, живопис. До Польщі повернувся широко освіченою людиною, котра виховала в собі потребу до постійного критичного переосмислення здавалося б безперечних істин. 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 Луки Ваценроде 1512 року Коперник оселився в Фромборку й решту тридцять років віддав головній праці свого життя (хоч і до громадських справ раз у раз повертався). Він, безумовно, був великим астрономом, хоча не відкрив жодного нового небесного тіла. Натомість Коперник шукав підтвердження своїм думкам щодо геліоцентричної системи світу. Ідея про нерухомість Сонця й рух Землі навколо нього не була його власним здогадом. Такі думки висловлювали й значно раніше астрономи Греції та арабського світу. Найвідомішою серед них є постать олександрійського астронома Аристарха Самоського (III століття до н.е.), котрий вважав центром світобудови Сонце.

Але як довести неспроможність геоцентричної системи світу видатного античного математика, астронома й географа Клавдія Птолемея (бл. 87-165), чий авторитет упродовж століть був непохитним? Як переконати в необхідності визнання геліоцентричної системи? Миколай Коперник намагався зробити це на основі складних геометричних доказів та зрозумілих фізичних аргументів.

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 використовуваний тоді юліанський календар виявився неточним. У ньому тривалість року перевищувала справжню лише на 11 хвилин 14 секунд, але поступово зайві накопичувалися. Різдво й Великдень з кожним століттям доводилося святкувати дедалі пізніше, й урешті церква задумала реформувати календар. Коперника запросили до участі в цій роботі, відтак до його праці ставилися насамперед як до цінної математичної побудови, яка могла полегшити долю календарної реформи (її таки запровадив папа Григорій XIII 1582 року – цим календарем, григоріанським, ми користуємося донині).

Але Коперника цікавить насамперед те, як влаштовано світ. І він намагається відповісти на всі потенційні заперечення проти руху Землі.

Ще Птоломей вважав, 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 законів Ньютона. Проте Коперник цих законів ще не знав. І він просто поширив принцип «природності» обертального руху, запроваджений у «Фізиці» Аристотеля 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 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 однакова.



Рис. 5. Система світу за Коперником  
(з трактату «Про обертання небесних сфер»). У центрі – Сонце.

І однак він 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 фак-

тично оголошено не більш ніж математичними вправами) учений отримав, уже лежачи на смертному ложі.

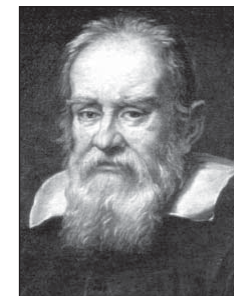
Книга Коперника за викладом матеріалу залишалася ще дуже громіздкою. Річ у тім, що фромборкський канонік (як і Арістотель, авторитет котрого був непохитним понад півтори тисячі років) вірив лише в рівномірні колові рухи небесних сфер. Для того, щоб описати реальне, нерівномірне переміщення планет по 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 так звані «епіцикли» (додаткові рівномірні рухи планет по невеликих колах, центри яких оберталися вже по великих орбітах; за іронією долі, саме епіцикли вважали найбільш штучною і суперечливою частиною Птолемеєвої системи). Єдине, що вдалося тут Коперникові – це зменшити, порівняно з Птолемеєвими підрахунками, кількість епіциклів для кожної з планет на одиницю (адже видимий час від часу «обернений» рух планети на земному небосхилі легко пояснювався взаємним рухом цієї планети й Землі у просторі). А загалом, для практичних потреб обчислення розташування світил на небосхилі таблиці Птолемея ще певний час слугували краще, бо були вельми ретельно розроблені. Однак навіть у такому вигляді система Коперника здобувала дедалі більше прихильників.

Потрібен був поштовх, який зруйнував би догми Аристотелевої фізики, що стримувала розвиток геліоцентричної системи. Цей поштовх зробили двоє сучасників – Галілео Галілей та Йоганн Кеплер.

### Галілео Галілей (1564 – 1642)

Через 21 рік після виходу книги Коперника, в Італії, в заможній і багатодітній родині народився хлопчик, якому судилося продовжити справу 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, й це зумовило його життєвий вибір. По чотирьох роках самостійного вивчення математики, 1589-го Галілей обійняв посаду професора Пізанського університету, з 1592-го по 1610-й він був професором університету Падуї, а згодом став придворним філософом і астрономом тосканського герцога Козімо II Медичі.

У червні 1609 року Галілей сконструював перший телескоп. До того 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.



Галілео Галілей.

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». Спостерігаючи за їх обертанням навколо Юпітера, стежачи, як змінюються фази Венери залежно від взаємного розташування планет, Галілей дедалі більше пересвідчувався: Коперник правий. Помиляються тлумачі Святого писма, котрі стверджують, що світила рухаються навколо нерухомої Землі, й на підтвердження посилаються на... старозавітний переказ про Ісуса Навина, який нібито зупинив рух Сонця по небосхилу.

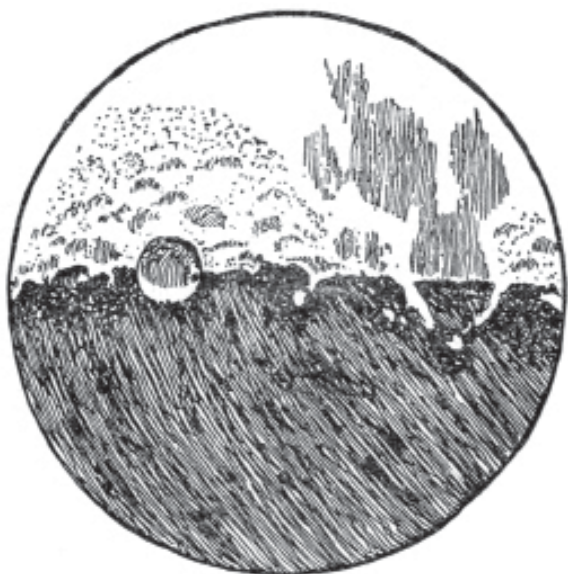


Рис. 7. Видгляд місячної поверхні. Рисунок Галілея.

Сам папа Урбан VIII високо цінував ученого, навіть, коли ще був студентом, присвячував йому вірші. Проте вороги Галілея почали переконувати папу, що розмови про обертання Землі збурюють уми, породжують нездорові думки в головах людей. Почали ширитися чутки, начебто сам папа – Антихрист, бо приятелює з Галілеєм і підтримує єретичне вчення Коперника. Папі довелося підписати декрет (5 березня 1616 року), у якому хоч геліоцентризм

і не було названо єрессю, але на книги про обертання Землі навколо Сонця було накладено цензурну заборону «аж до їх виправлення», а саму думку про таке обертання проголошено «безглуздою й хибною з філософської та гріховною з релігійної точки зору».

Після тривалих спостережень і роздумів, 1632 року 68-річний Галілей видав головну книгу свого життя «Діалог про дві найголовніші системи світу». Формально в цьому діалозі перемагає прибічник традиційного геоцентризму – але аргументи на захист геліоцентризму звучали 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 упізнав самого себе. До того ж, книгу було написано не «вченою» латиною, а «народною» італійською – а отже, вона мала численних читачів.



Рис. 8. Титульний аркуш книги «Діалог про дві найголовніші системи світу».

У лютому 1633 року Галілея викликали до Риму. Папа виявив прихильність 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 Писма, 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. Послухаймо його голос: «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 посягти 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, і 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 розуміє: подальша боротьба – прямий шлях на вогнище. 22 червня 1633 року в церкві монастиря святої Мінерви, підкоряючись вироку суду, Галілей прочитав зречення. Досі переповідають притчу про те, як сімдесятирічний Галілей після зречення своїх поглядів вимовив: «*E pur si muovo!*» – «А все-таки вона рухається!»



Рис. 9. Процес над Галілеєм. Сучасний рисунок.

Учений постійно працював – аж до останніх своїх днів: і коли перебував під домашнім арештом, не маючи права спілкуватися з друзями, і коли поховав улюблену дочку Вірджинію, і коли втратив зір 1637 року... Він устиг завершити книгу «Бесіди й математичні доведення, дотичні до двох нових галузей науки», що підбивала підсумок його праці як фізика. Біля ліжка вми-

рущого 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...

Лише 1758 року 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 Ейнштейн, уже в 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 нецтво 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 сучасною українською мовою В. Литвинова вірш звучить так:

Чом ти ганьбиш безсоромно ім'я Галілеєве, папо?  
 Чим же тобі завинив старець учений, скажи?  
 Може, 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 Стісових 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 зі вдячністю пам'ятало ім'я Галілео Галілея. Проте варто пригадати й інші його заслуги. Він першим встановив закон інерції й закон руху тіла по похилій площині, відкрив закон додавання рухів (з «перетвореннями Галілея» ми зустрінемося, коли говоритимемо про теорію відносності) і закон коливання маятника. Окрім телескопа, він винайшов 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.

...Весняного ранку на знамениту Пізанську похилу вежу піднялася людина, за якою несли чавунне гарматне ядро і свинцеву кулю від мушкета. Юрма

студентів і просто цікавих оточила вежу. Вони знали, що молодий професор кидатиме вниз ядро і кулю. І ті, що стояли внизу, і сам учений, дивлячись згори, переконалися, що легка куля вагою у півфунта і важке ядро вагою у 200 фунтів торкнулися землі одночасно.

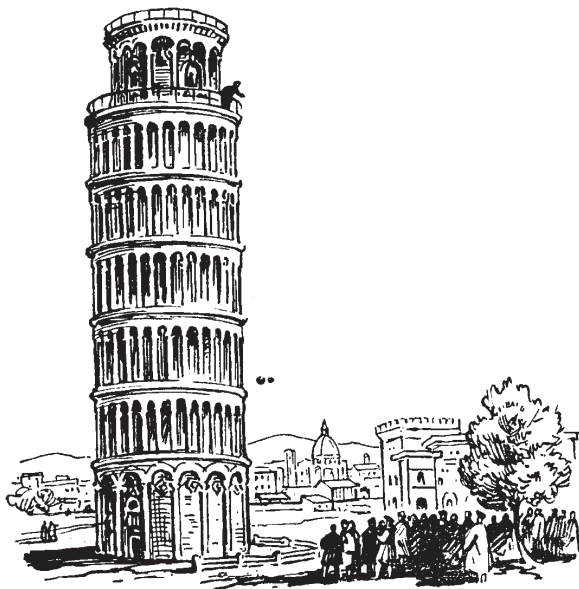


Рис. 11. Дослід з вивчення законів вільного падіння. Сучасний рисунок.

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

Чому ж у цій «істині» засумнівався Галілей? А він міркував таким чином: важче тіло падає швидше, легше – повільніше. А що буде, якщо їх з'єднати разом? Тоді легке уповільнюватиме рух важкого, а важке прискорюватиме рух легшого. Отже, третє тіло (важче 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!

Ідея досліді надзвичайно проста: кинути й подивитися! Результат виявився приголомшливо переконливим: різні за вагою тіла впали з однакової висоти на землю одночасно. Дослід – «уперта річ». Треба визнати цей науковий факт. Але визнати – це ще не означає зрозуміти, пояснити. Для цього знадобився геній Ньютона, і він явився світові, щойно в небуття відійшов Галілей.

Проте пам'ятаймо: перший із чотирьох законів Ньютона, які вивчають в усіх школах світу, є, власне, законом Галілея! 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.

Не менша заслуга Галілея і як батька сучасної експериментальної фізики. Адже більшості вимірювальних приладів, до яких ми звикли сьогодні, тоді просто не існувало. Закон ізохронності коливань маятника Галілей відкрив, спостерігаючи за похитуванням великої люстри зі свічками під церковним склепінням і використовуючи замість годинника власний пульс (і саме цей закон дозволив Гюйгенсові сконструювати за півстоліття точний маятниковий годинник!)

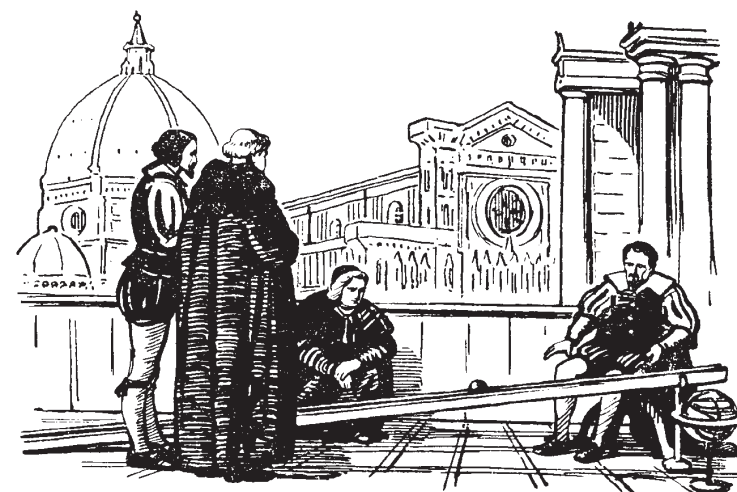


Рис. 12. Дослід з вивчення руху тіл під дією сили тяжіння.

Багато винахідливості виявив учений, вивчаючи рух тіла в стані вільного падіння. Він відразу 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  $\alpha$ . Адже в такому разі на множник  $\sin \alpha$  змінювався лише масштаб руху, а не його закономірності!

Галілей скочував униз по жолобу 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 кореня квадратного пройденої відстані – і це відповідало припущенню про рух зі сталим прискоренням  $a$ :

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

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 розширялося, 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 аж за понад сто років).

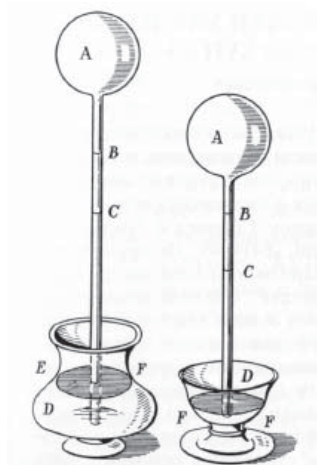


Рис. 10. Термоскоп Галілея.

Люди здавна використовували водяні помпи, в яких вода піднімалася за поршнем. Вважалося, що підніматися змушує її те, що «природа боїться порожнечі». Вивчаючи роботу водяних помп, Галілей поставив питання: а чому цей «страх порожнечі» діє лише до певної висоти – приблизно 32 фути, – і вище за жодних зусиль проста помпа води не підніме? На основі цього запитання учні Галілея Торрічеллі й Вівіані 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».



Рис. 13. Дослід Торрічеллі. Над поверхнею ртуті – вакуум.

Галілей першим зробив спробу визначити швидкість світла. Для цього він і його слуга стали 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 ( $c = 10^8 \text{ м/с}$ ) не дала змоги реалізувати цю в принципі правильну ідею.

Тож швидкість світла вперше було визначено 1667 року, це зробив молодий данський астроном Олаф Рьомер (1644-1710), спостерігаючи за затемненнями супутників Юпітера (які відкрив Галілей). Рьомер помітив певну аперіодичність затемнень супутників (їх 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 розташування цих двох планет і, відповідно, різної відстані між ними. (Відстань до планет було виміряно методом тріангуляції, шляхом одночасного спостереження через телескоп паралаксу (зміни видимого розташування на небосхилі) Марса з двох віддалених точок на поверхні Землі, вперше – з Парижа й Каєнни (Південна Америка).

Очевидно, цього з лишком досить, аби ім'я Галілео Галілея вкарбувати золотими літерами в історію науки. Проте трагедія людини, змушеної 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 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» геніального 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 черепасі,  
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.

Ці речі треба пам'ятати, даючи моральну оцінку вчинкам давно померлого вченого, котрого й нині дехто таврує за його начебто «конформізм» – порівняно з Джордано Бруно, який таки загинув на вогнищі інквізиції. Хоч, напевно, жодних наших виправдань Галілео Галілей давно вже не потребує.

### Йоганн Кеплер (1571–1630)



Йоганн Кеплер

Сучасником Галілея був Кеплер – геніальний астроном і водночас забобонний християнин-протестант, котрий зумів розгадати закони руху планет.

Життя не стелилося перед Кеплером квітами. Народився він дуже хворобливим і дивом вижив, у шестилітньому віці перехворів на віспу (тоді майже смертельну), а в 13 років умирав утретє, але залишився жити. Йоганн ріс у сім'ї власників шинку, де все навколо було скероване на те, аби вибити з хлопчика його допитливий жвавий розум.

Але всупереч усьому Кеплер закінчив Тюбінгенський університет, став великим ученим і написав безліч робіт, у яких містика сусидила з незбагненими осяяннями генія. Він угледів у шеренгах зафіксова-

них небесних координат велику закономірність руху планет, але разом із тим цілком серйозно складав астрологічні гороскопи і вважав, що «Бог може по-веліти з'явитися новому світилу у будь-якому місці і повсякчас».

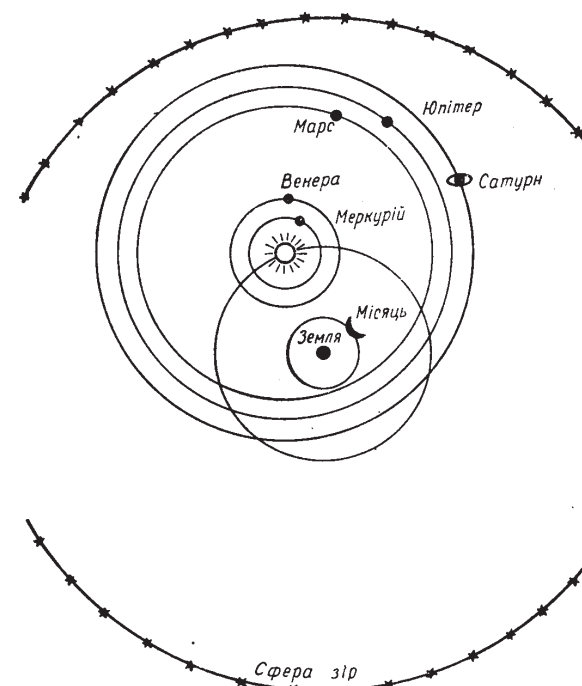


Рис. 15. Система світу за Тихо Браге.

Кеплер як астроном сформувався ще в «до-телескопну» епоху. 1600 року він приїздить до Праги на запрошення знаменитого данського астронома Тихо Браге (1546-1601), котрий знайшов тут притулок при дворі імператора Рудольфа II. Браге належала ідея космічної системи, яка мала примирити Коперника з Птоломеем: планети обертаються навколо Сонця, а Сонце разом із планетами – навколо Землі. Проте справжньою заслугою 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 спорудженій і устаткованій 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.

Надії Браге на щедрість імператора «Священної Римської імперії» (так тоді називали аморфне об'єднання сотень князівств і графств на тери-

торії сучасних Німеччини, Австрії та Чехії) не справдилися – Рудольф 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). Після смерті Браге Кеплер 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 встановив три закони, які названо його іменем.

Перший: планети рухаються не по колах, а по еліпсах, в одному з фокусів яких знаходиться Сонце.

Другий: радіус-вектор планети за рівні проміжки часу покриває під час свого переміщення рівні площі.

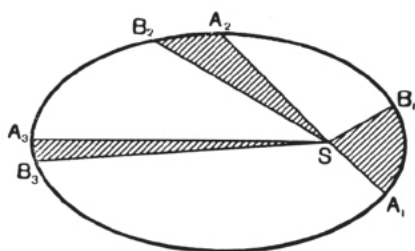


Рис. 16. Другий закон Кеплера: заштриховані площі однакові.

Третій: квадрати часу обертання двох планет навколо Сонця співвідносяться як куби великих півосей їх орбіт.

Сьогодні можна лише дивуватися з наукової скрупульозності Кеплера. Адже він міг використовувати тільки таблиці цифр, що їх уклав 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.

Нині, за багато років, усе це здається досить простим. Але, як слушно зауважив Ейнштейн, «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 квадрату 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 до 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 вважав, що сила такого тяжіння обернено пропорційна до квадрату відстані!

Останні роки Кеплер прожив у злиднях. Він помер, маючи 58 років, і залишив по собі 22 флорини, 2 сорочки, й наукові праці, в яких сформулював закони, що їх вивчають тепер у всіх школах та університетах.

Альберт Ейнштейн 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 десятиків 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 скромно говорив про себе, що коли він і бачив далі за інших, то тільки тому, що стояв на плечах гігантів. Яких же гігантів він мав на увазі? Напевно, перш за все – Коперника, Галілея, Кеплера... В усякому разі, закони вільного падіння Галілея й закони руху планет Кеплера склали ту експериментальну основу, на якій зводилася перша фізична теорія – класична механіка Ньютона.

## Рене Декарт (1596–1650)



Рене Декарт

Було б несправедливо оминати увагою інших учених, попередників і сучасників Ньютона, котрі прямо чи опосередковано вплинули на становлення Ньютона як ученого-природодослідника.

Ньютону було сім років, коли пішов із життя великий француз – Рене Декарт.

Коли Рене був юнаком, важко було передбачити, що він згодом стане всесвітньо відомим ученим. Після закінчення школи молодий Декарт вирушив до Парижа разом зі своїми слугами. Тут він потрапив у товариство «золотої молоді», жив безпечним життям, захоплювався грою в карти.

Але вже за півтора роки Рене винайняв окремих будиночок у паризькому передмісті Сен-Жермен та занурився у вивчення математики.

Творчий розум Декарта будь-які враження негайно переробляв на узагальнення й закономірності. Маючи 21 рік від народження, він запраг, 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 розмірковувати про побачене і зустрінуте».

Двадцятидворічний Декарт за власним бажанням одягає мундир волонтера нідерландської армії, але служить переважно в тилових частинах, нечасто з'являючись на передовій. У армії далі займається математикою – і то так, що стає одним із найбільших математиків світу.

Декарт працює над поєднанням алгебри й геометрії. Він робить дивне, за його словами, відкриття (як з'ясувалося, воно здивувало ціле людство!): кожну 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.

Декарт не раз повертається до Парижа, але переважно живе в Голландії, що була на той час не лише могутньою, але й волелюбною країною. Вже тоді в Нідерландській республіці дотримувалися принципу релігійної віротерпимості. Декарту подобався сам спосіб життя цього діяльного народу, зануреного в свої справи й не надто цікавого до чужинців.

Декарт далі працює над трактатом «Про Божество», але незабаром кидає теологічні заняття й цілком віддається природничо-науковим дослідженням, які підсумовує в трактаті «Про світ».

48-річний Рене Декарт завершує масштабний твір «Принципи філософії». Зазначмо, що Ньютону – майбутньому автору фундаментальної нау-

кової праці «Математичні принципи натуральної філософії» – на той час виповнився рік. У «Принципах філософії» Декарт представляє грандіозну програму створення теорії природи, керуючись своєю методологічною настановою брати за основу найбільш прості та ясні положення.

За Декартом, «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».

Термін «стан» Декарт не пояснює, а згодом Ньютон його конкретизує: «стан спокою або рівномірного прямолінійного руху».

Як бачимо, суть законів Ньютона цілком відповідає правилам Декарта – одного з титанів, на плечах яких стояв Ньютон.

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».

Чи це не суть принципу інерції Галілея й першого закону Ньютона?! У «Принципах філософії» Декарт обговорює проблему існування Бога й зовнішнього світу, створеного Богом. Матерія, за Декартом, це чиста протяжність (безмежна довжина, ширина й глибина Всесвіту). Частинки матерії перебувають у безперервному русі, взаємодіють одна з одною тільки в зіткненнях. Взаємодія матеріальних частинок підпорядковується основним законам або правилам.

Після створення «Принципів філософії» Декарт домагається офіційного визнання свого учення, ставить питання про викладання його в усіх школах, доводячи, що в його ученні немає нічого такого, що суперечить релігії.

52-річного Декарта запрошують до Парижа для призначення на важливу посаду. У Франції 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 поспішив повернутися до Голландії.

Невдовзі шведська королева Хрістіна запрошує Декарта до свого двору, аби займався з нею науками. Людина багата й незалежна, але досить често-

любна, учений приймає це запрошення та їде в «країну ведмедів між скель і криги» (за його висловом).

У Стокгольмі змінюється весь триб життя Декарта. Королева любила працювати з 5-ї години ранку, і до цього часу в палац повинен був приїздити в кінній кареті учений. За ці незручності королева Швеції дарувала йому звання дворянина Шведського королівства й великий маєток у Померанії. Скористатися цими милостями ученому так і не судилося. У одну з ранніх поїздок у палац під пронизливим північним вітром Декарт застудився, захворів на запалення легень – і 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, мовчазний у великому товаристві – адже звик до роздумів насамоті. Але в колі близьких та друзів він був жвавим і веселим співрозмовником, навколо нього завжди утворювалося коло захоплених і відданих прихильників. Гордовитий, часом навіть зарозумілий із рівними собі, перед високими особами він бував улесливим і догідливим.

Елементи наукових знань із учення Декарта можна побачити на сторінках шкільних підручників фізики, часом без посилань на нього.

Загальноновживана й усім відома прямокутна система координат – це Декартова система. Добуток маси тіла та його швидкості – згідно з сучасною термінологією імпульс тіла – це Декартова кількість руху ( $m\vec{v}$ ). (Якщо бути цілком точним, то поняття маси Декарт ще не знав. Важливим поняттям для нього була протяглість, тож він оперував добутком розмірів тіла та його швидкості. Однак для тіл із однаковою густиною ця величина пропорційна масі).

Закон збереження кількості руху для замкнутих систем, що його відкрив Декарт, вивчають у школах та університетах як закон збереження імпульсу. Для двох тіл, що взаємодіють тільки між собою, у сучасному записі він виглядає так:

$$m_1\vec{v}_{01} + m_2\vec{v}_{01} = m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2,$$

Тут  $\vec{v}_{01}$  і  $\vec{v}_{02}$  – швидкості двох тіл із масами  $m_1$  і  $m_2$  у початковий момент часу;  $\vec{v}_1$  і  $\vec{v}_2$  – швидкості цих тіл у кінцевий момент часу.

Нарешті, Декарт створив філософську систему, згідно з якою видимий нам Всесвіт творять матерія та її рух. «Дайте мені матерію й рух – і я побудую світ!» – таким було гасло великого вченого.

### Крістіан Гюйгенс (1629–1695)

Син голландського дворянина Крістіан Гюйгенс фон Цюйліхен був на 14 років старший за Ісаака Ньютона. У родині Гюйгенсів у спадок передавалося не лише дворянство й багатство, але й таланти.



Крістіан Гюйгенс

«судилося вдосконалити й розвинути найважливіші відкриття Галілея».

21-річний Крістіан Гюйгенс мріє потрапити до Стокгольма, щоб побачити Декарта (якого все життя вважав своїм учителем) і поговорити з ним. Але цим мріям і 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.

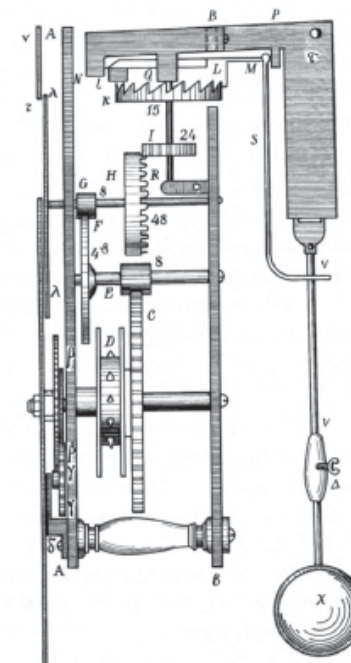


Рис. 20. Маятниковий годинник Гюйгенса.

Гюйгенс – талановитий винахідник. 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 Грінвічської 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. Саме так вчинили герої роману Жуль Верна «Таємничий острів», у яких випадково зберігся кишеньковий годинник, виставлений за часом східного узбережжя США.

У 22 роки Гюйгенс отримує патент на винахід годинника з маятником (ідея цього належала ще Галілеєві), а потім 40 років удосконалює його, що свідчить про захопленість, наполегливість і цілеспрямованість ученого. Годинник із анкерним механізмом і гири («ходи́ки») ще півстоліття тому був у кожній сільській хаті в Україні. А «точні» модифікації такого годинника обсерваторії використовували як еталонні аж до кінця XIX століття!

Походження відкривало Гюйгенсові двері всіх палаців Європи, але він не надто любив «з'являтися в світі». У 34 роки він – член Лондонського Королівського товариства (англійської академії), а ще за три роки стає членом Паризької Академії наук.

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».

«Трактат про світло» – перший науковий текст із хвильової оптики, який сприяв тому, що ім'я Гюйгенса не можна оминути, 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 оден, 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».

Але водночас Гюйгенс досліджував криволінійний рух. Довів, що тіло, падаючи з певної висоти по різних траєкторіях, набуває кінцевої швидкості, яка не залежить від форми траєкторії, а тільки від висоти, з якої рух почався.

Саме Гюйгенс вперше (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!

Саме Гюйгенс записує вираз для доцентрової сили, 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 маятника й 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 вдарає така сама куля, то друга куля зупиняється, а перша – набуває її швидкості.

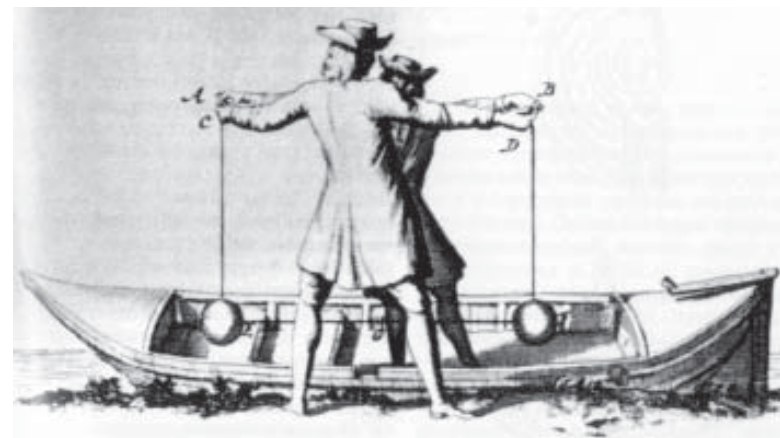


Рис. 21. Зіткнення пружних куль (з книги Гюйгенса).

Хід міркувань ученого в дещо спрощеному вигляді був приблизно такий: нехай дві однакові кулі котяться з однаковою швидкістю назустріч одна одній на палубі човна по 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 ж 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!

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.

Нарешті, саме Гюйгенс на основі вивчення зіткнень пружних куль показав, що у зіткненні зберігаються суми добутоків 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).

Водночас учений 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 енергії та їхньої взаємоперетворюваності за законом:

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

Проте першим назву «живої сили» для вимірювання руху тіла  $mv^2$  (у нинішніх термінах – половини кінетичної енергії) запровадив ще за життя Гюйгенса, 1686 року, Готтфрід Лейбніц. Натомість поняття потенціальної енергії («енергії місцезнаходження») визначив Герман Гельмгольц аж 1847 року.

### Роберт Гук (1635 – 1703)



Роберт Гук

Цей співвітчизник Ньютона був на 8 років старший за нього. Блискучий фізик-експериментатор Роберт Гук зробив великий внесок у становлення механіки.

У 28 років Роберт Гук став членом Лондонського Королівського товариства й протягом кількох років був його вченим секретарем. Основні наукові досягнення Гука лежать у галузі пружності матеріалів, небесної механіки, теплоти, оптики.

Як асистент Роберта Бойля, він разом із ним удосконалив повітряний насос, що його винайшов незадово до того німецький аматор науки Отто фон Геріке, й разом із Гюйгенсом встановив постійні точки танення льоду й кипіння води.

У свої 30 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» він уперше описує клітини бузини, кропу, моркви тощо.

Гук був активним супротивником корпускулярної теорії світла Ньютона, 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.

Що стосується механіки, то Гук написав «Трактат про рух Землі», де висловив ідею тяжіння. 1680 року він висловив припущення, що сила тяжіння обернено пропорційна квадрату відстані між взаємодіючими тілами. Втім Гук, цього не довів, але Ньютон згодом це зробив.

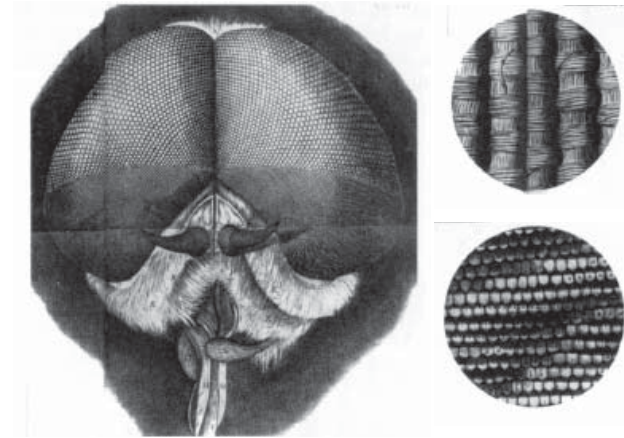


Рис. 23. З книги гука «Мікрографія».

Коли 1686 року Ньютон подав у Лондонське Королівське товариство рукопис трактату «Математичні принципи натуральної філософії», Роберт Гук наполягав на власному пріоритеті в відкритті закону всесвітнього тяжіння. Ньютон заявив, що значно раніше повідомляв про ідею тяжіння й про силу, обернено пропорційну до 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. Проте на сторінках підручників його найчастіше згадують як автора закону пружності (закону Гука).

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 перетину деформованого тіла, тобто  $\delta l \sim$ ;
- 4) Видовження (абсолютна деформація) залежить від пружних властивостей тіла, що деформується.

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

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

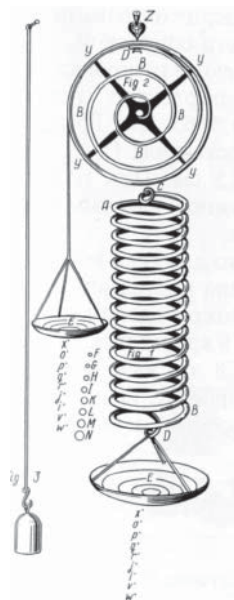


Рис. 24. Дослід Гука з пружиною.

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  $Ox$ :

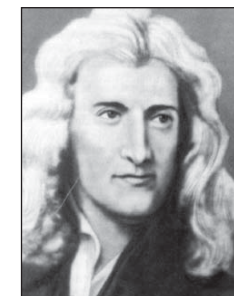
$$(F_{np})_x = -kx$$

### Ісаак Ньютон (1643<sup>1</sup>–1727)

Попри те, що до становлення класичної механіки причетні багато вчених, її називають ньютонівською. Тому про цього вченого слід поговорити докладніше. Спробуймо скласти собі уявлення про людину, котра створила «Математичні принципи натуральної філософії» – працю, в якій сформульовано основні закони механіки, а також відкрила закон унесвітнього тяжіння й по-

<sup>1</sup> З датою народження Ісаака Ньютона часом 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.

яснила на цій основі рух небесних тіл. Крім того, Ньютон відкрив складну структуру білого світла, розкладаючи його промінь за допомогою призми в спектр «на сім кольорів райдуги», висунув 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 Лейбніца розробив диференціальне й інтегральне числення.



Ісаак Ньютон

Уже на початку XX століття, пишучи передмову до німецького видання Ньютонової «Оптики», великий Альберт Ейнштейн розпочав її так: «Щасливий Ньютон, щасливе дитинство науки! Той, хто має час і дозвілля, зможе, переречитуючи 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 з самого досвіду, з чудових дослідів, які він ретельно описує в численних деталях і вишиковує в чергу, наче іграшки. В одній особі він 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».



Рис. 26. Схема досліду Ньютона з розкладу білого світла на спектр.

### 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 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, що мала близько 15 млн. населення, на той час була Франція. Вона мала найбільшу в Європі армію, потужний флот і розкішний королівський двір, звичай якого прагнули наслідува-

ти майже всі монархи інших країн. Проте покріпачене французьке селянство ледве животіло, а самовладдя короля було нічим не обмежене.

Найдинамічнішою й найдемократичнішою країною була тоді Голландія, що звільнилася від влади деспотичної католицької Іспанії. Нідерландська республіка багатіла завдяки розвиненій торгівлі, ремеслам і освіченості своїх громадян.

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

У рік, коли дочасно народився кволий і слабкий хлопчик Ісаак, у Англії вирувала революція. Конфлікт парламенту й короля завершився тим, що влада перейшла до парламенту. Король Карл 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.

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 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 гойдалися: інтриги, змови, війни... Разом із тим, починалася капітальна модернізація економіки, панувало прагнення наздогнати Голландію. Один із тодішніх проектів 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 за 87 років після смерті Ньютона, на полі Ватерлоо, де закотилася зірка Наполеона Бонапарта.

### Ісаак – син фермера

Йомени – так у Англії називався середньовічний стан вільних селян. Ферма в селі Вулсторп 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. Ньютон закінчив сільську школу, потому батьки відправили його вчитися в «королівську школу», розташовану в невеликому містечку за десять кілометрів від рідної домівки. 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, які винаймали землю у ферми. Фермерськими справами Ньютон займався з примусу. Коли його посилали зі слугою в місто продавати зерно на ринку, він до ручав торгівлю слугі, а сам ішов у бібліотеку свого шкільного вчителя.

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 старовірську мови. У школі він зазнав першого (й, схоже, єдиного) кохання. Дівчина була дуже гарна, та на його почуття не відповіла... Але до вступу в університет він підготувався добре.

### Ньютон – студент Трініті-коледжу в Кембриджі

Трініті-коледж (Коледж Святої Трійці) мало чим відрізнявся від решти тодішніх університетів. Це була закрита корпорація, де більшість студентів готувалися стати кліриками, щоб потім отримати місце в церковній ієрархії. Решта – молоді люди з дворянських родин – прагнули здобути освіту як додатковий козир, щоб добре влаштуватися на державну службу.

У Трініті-коледжі Ньютон уникає веселих студентських компаній та вечір, не п'є. Він справляє враження дуже серйозної людини. Це видно також із листа, якого він якось 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».

Вчився Ньютон якось непомітно, його вважали за середняка. Абсолютно неможливо простежити, як за досить короткий час відбулося дивне перетворення вчорашнього звичайного школяра на абсолютно самостійного й оригінального дослідника. Здається, до цього не було жодних зовнішніх спонук.

Можна припустити лише, що могутній розум Ньютона постійно працював. Сучасники свідчать, що учений був поганим співрозмовником, під час розмови міг раптово замовкнути й зануритися в задуму.

### Творче осяяння Ньютона

Ньютону довелося на два роки покинути Кембридж. Рятуючись від пошесті чуми (в самому тільки Лондоні тоді померли 31 тисяча з 200 тисяч меш-

канців), Ньютон виїжджає в рідне село Вулсторп, і працює там мов одержимий. У будинку, де він народився, у ті роки народилися диференціальне та інтегральне числення. Тут за допомогою призми вчений розкладає сонячний промінь, що проник крізь щілини віконниці його кімнати, і пізнає таємницю спектру. Нарешті – як би не ставитися до переказу про падіння яблука, – саме тут Ньютона спіткало осяяння, і він відкрив закон усесвітнього тяжіння.

У паперах Ньютона знаходимо запис: «Того ж (1666) року я почав думати про тяжіння, що простягається 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, радіусом і лінійною швидкістю обертання планети існує простий зв'язок:

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

Відтак, для двох різних планет отримуємо:

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

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 прискорення 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).

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».

Бо щоб перевірити отриманий результат, Ньютон відразу ж порахував доцентрове прискорення Місяця до відносно 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.

Навіть багато хто з пізніших теоретиків вважав 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 радіусу 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 Трініті-коледжу

У свої 23 Ньютон закінчив коледж, отримав ступінь бакалавра й став членом коледжу. Цьому сприяв його вчитель, професор математики Ісаак Барроу (1630-1677). Барроу, лише на 12 років старший за Ньютона, був людиною жвавою, дотепною, різнобічно талановитою. Освічений філолог, він також займався фізикою, написав кілька важливих робіт з математики.

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

Маючи 30 років, Ньютон став членом Королівського товариства (назва англійської академії наук, офіційно заснованої 1660 року) й представив дві роботи: математичну й фізичну. Фізична робота «Нова теорія світла й кольорів» і тепер вражає своєю логікою й майстерністю.

1684 року до Ньютона приїхав молодий астроном Едмунд Галлей (1656-1742) і попросив пояснити, чому планети рухаються не по колах, а по кеплерівських еліпсах. Галлей зумів відтворити наведене вище доведення для колових орбіт, але впоратися з проблемою еліпсів йому не вдалося. Ця наукова проблема надзвичайно зацікавила Ньютона, і лише за півтора року було написано капітальну працю – «Математичні принципи натуральної філософії». Книга вийшла друком 1687 року. У цьому ж році Ньютон виявився втяг-

ним у конфлікт, що виник на ґрунті переплетення наукових, політичних і релігійних мотивів.

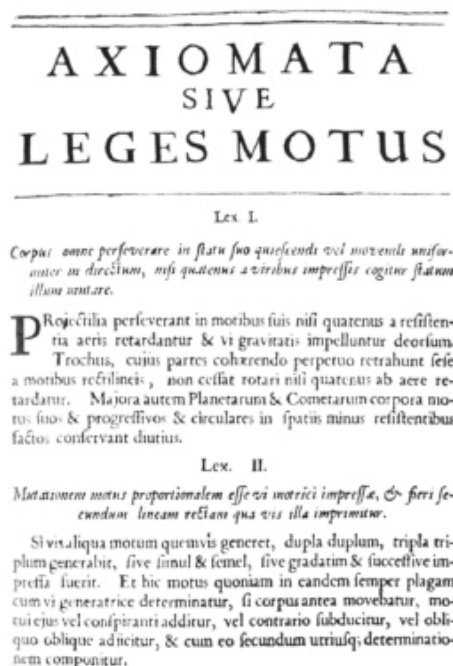


Рис. 27. Аркуш «На???» із першими двома законами механіки.

Король 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, а це вже спричинило переляк і сум'яття. Позицію Ньютона видно з однієї цитати з його листа: «Всі чесні люди, йдучи за Божим і людським законом, повинні коритися законним велінням короля. Але якщо королеві порадили зажадати того, чого згідно з законом зробити не можна, ніхто не може бути покараний, якщо він відмовляється це робити». Зіткнення закінчилося нічиєю, а через рік після «славної революції» Ньютона обрано від корпорації Кембриджського університету членом палати громад парламенту, законодавчі акти якого сформували лад нової Англії.

### Ньютон – державний службовець

Як уже було сказано, під час безкровної «славної революції» 1688 року завдяки ініціативі й активним діям тих парламентаріїв, які складали опози-

цію королеві, Якова II було скинуто з престолу, і він опинився на вигнанні у Франції. Розпочалася війна Англії з Францією, що викликала розлад грошової системи (зараз це називають інфляцією). З'явилося багато фальшивих грошей. Група, до якої входили Ісаак Ньютон і Джон Лок, підготувала проект реформи. У історії Лок відомий як філософ, автор книги «Роздуми про людський розум». Але він був різнобічно освіченою людиною, цікавився алхімією та економікою (з питань алхімії листувався з Ньютоном). 1696 року Ньютон виїхав із Кембриджа й 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 й провели фінансову реформу. На цей час Ньютон уже був шанованою людиною, справжнім національним надбанням Англії.

До обов'язків директора монетного двору належало вести розшук і слідство в справах про фальшивомонетників. Тільки 1697 року Ньютон передав до суду справи, за якими було страчено близько двадцяти порушників закону.

Ньютона приймали при дворі, він бував у найреспектабельніших салонах. 1703 року вчений став на чолі англійської науки, – його вибрали президентом Королівського товариства. Втім, з посади директора лондонського монетного двору Ньютон не пішов, бо саме вона давала вченому основний дохід.

1705 року королева Анна ввела вченого у рицарський стан – перший випадок в історії, коли в такий спосіб було вшановано людину саме за наукові, а не, скажімо, придворні чи військові заслуги.

### Світогляд Ньютона

Члени Королівського товариства за часів Ньютона вважали себе прихильниками нової філософії, основоположником якої був Френсіс Бекон. Нова філософія постала на твердженні, що знання мають ґрунтуватися не на традиції, не на умоглядному мудруванні, а на досліді. Сама ідея знання як засобу життєвого самоствердження була не новою. У середньовіччі носіями цієї 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.

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» він писав: «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, безумовно, читав Ньютон, і вона вплинула на його погляди та переконання. Крім усього решти, Ньютон 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 від 4 грудня 1674 року Ньютон навіть повідомляє про свій намір припинити заняття математикою та оптикою та цілком присвятити себе питанням релігії.

Чи були внутрішні причини таких намірів Ньютона? На це питання прямої відповіді немає. А от зовнішні причини, безумовно, були.

Річ у тім, що 1675 року закінчувався граничний термін перебування Ньютона як магістра мистецтв у Трініті-коледжі Кембриджа. Згідно з усталеним порядком, якщо людина хотіла й надалі залишатися членом коледжу, то вона присягала, що об'єктом її досліджень буде теологія.

Це означає, що Ньютон мусив зробити вибір: прийняти сан священника – або ж покинути університет. Він вибирає перше, й починає ретельно та системно вивчати праці отців церкви. І робить це, намагаючись докопатися до істини, а тому знайомиться також і з творами, які офіційна англійська церква визнала єретичними.

У основі англійства лежав християнський протестантизм, що визнавав догмат святої Трійці недоторканим. Але в той час, у супереччя офіційній церкві, дедалі більше розвивалося й поширювалося уявлення про єдиний, моністичний початок, що лежить у основі природи та людини (унітаризм). Гостре відчуття єдності світу було притаманне Ньютонові. Тому існує версія, що Ньютон мав вагомий підстави приховувати свої релігійні погляди, оскільки віротерпимість натовді не вважали чесною. Ньютон зрозумів, що не може прийняти сан священника, оскільки його релігійні переконання не збігаються з ученням офіційної англійської церкви. І вже готувався покинути Кембриджський університет. Проте, завдяки клопотанню свого вчителя Ісаака Барроу, Ньютон отримав спеціальний дозвіл короля, що дав йому змогу стати членом Трініті-коледжу, не приймаючи духовного сану.

Ньютон був переконаний, що без знання священних текстів Старого й Нового заповіту будь-яке заняття наукою безглузде. Разом із тим, Ньютон вважав, що немає іншого способу пізнати Бога, крім шляху через пізнання системи природи. Тому всяке спотворення віри пов'язане з неправильним розумінням природи. Таким чином, світогляд Ньютона ґрунтувався на трьох зовні суперечливих засадах: релігійній, природничонауковій і алхімічній. Але для вченого це були три складові єдиного цілісного світогляду. У працях Ньютона простежується глибокий зв'язок трьох напрямів його духовних пошуків:

- пошук справжньої релігії;
- пошук справжньої природничонаукової картини світу;
- пошук справжніх принципів моралі.

Святе Письмо уявлялося Ньютону не книгою таїнств, недоступних людському розумінню, але історичним свідомством всемогутності Бога, придатне не лише до сприйняття відчуттями, але й до осягнення розумом. Звідси два шляхи пізнання Бога: через вивчення Природи й через вивчення Історії.

## Механіка Ньютона

Механіка Ньютона виникла не на порожньому місці, вона була результатом досліджень і роздумів не лише самого Ньютона, але також і його попередників та сучасників. Із попередників треба особливо відзначити вже згаданих Галілея, Кеплера й Декарта. Із сучасників – Гюйгенса, Гука і математика, астронома й архітектора, будівничого величного лондонського собору Святого Павла Крістофера Рена (1632-1723).

На момент виходу в світ праці «Математичні принципи натуральної філософії», у якій Ньютон виклав першу фізичну теорію (механіку), учені вже знали закон інерції (Галілей), закон збереження кількості руху (Декарт), уміли обчислювати доцентрове прискорення й доцентрову силу (Гюйгенс). У своїй книзі Ньютон писав: «Досі я висловлював принципи, які визнали математики і які підтверджено численними дослідженнями».

Далі він нагадав читачам, що два перші закони механіки (закон інерції та рівності сили добуток маси на прискорення) відкрив Галілей, а третій (рівності дії й протидії) Ньютон пов'язував з іменами Рена, Волліса й Гюйгенса. Отже, самі закони не були новими – новим було формулювання другого закону в формі диференціального рівняння, яке пов'язувало силу з прискоренням, другою похідною координати за часом. Новим у «Принципах» було також розв'язання складних задач небесної механіки на основі цих законів і пояснення (саме пояснення, а не математичний опис) законів Кеплера та інших складніших явищ. Справді, три закони Кеплера можна було отримати як розв'язки задачі про рух тіла під дією сили тяжіння, що спадає як квадрат відстані між тілами. Сучасники Ньютона завважили й високо оцінили те, що зробив Ньютон.

Новим було розуміння того, що сукупність трьох законів у викладі Ньютона утворює систему, на основі якої будується повна схема розв'язання механічних задач.

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

## Універсальне тяжіння

На початку XVII століття ідея універсального тяжіння була поширена і популярна. Одним із перших писав про тяжіння Роберваль, котрий трохи не до-

жив 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 учених «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 вказав Декарт. Декарт відкидав середньовічні теорії тяжіння, оскільки вважав, що сили не можуть діяти на відстані. За Декартом, взаємодія можлива тільки за контакту, за зіткнення. Виходячи з цієї ідеї, Декарт побудував повну теорію Всесвіту. За його 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, та викладені в них теорії тяжіння абсолютно різні.

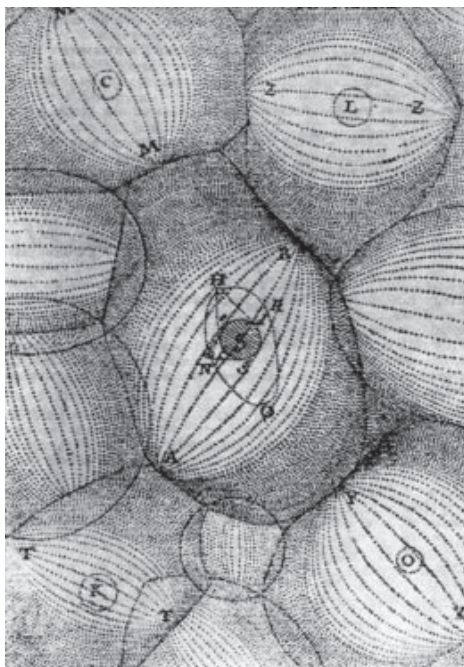


Рис. 18. Всесвіт Декарта з вихорами тонкої матерії.

Погляди Декарта справили дуже сильний вплив на учених того часу. Певну данину ученню Декарта віддавав і Ньютон, хоча свою теорію тяжіння він побудував на основі ідеї далекодії. І хоча пізніше, у XIX столітті, теорія далекодії (миттєвої дії на відстані без участі матеріальних посередників) здобула загальне визнання саме завдяки Ньютонові, сам великий учений ставився до неї з 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.

З історії фізики відомо, що на пріоритет у відкритті закону всесвітнього тяжіння претендував і Роберт Гук. Ми вже сказали, що Гук був блискучим і різнобічним фізиком-експериментатором. Він цікавився теорією зіткнень, проблемою тяжіння, рухом планет, і справді мав найбезпосередніший стосунок до появи «Принципів» Ньютона. 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.

Наступним поштовхом у дослідженні теорії тяжіння Ньютон завдячує уже згадуваному тут Едмунду Галлею. Галлей був не лише мислителем і відомим астрономом, на честь якого названо одну з найвідоміших комет, але й дуже рухливою, товариською й швидкою у рішеннях людиною. Коли в Лондоні перебував інкогніто молодий російський цар Петро I, Галлей підтримував із ним дружні стосунки. У наукових колах Галлей мав славу людини з атеїстичними поглядами, і це завадило йому посісти кафедру астрономії в Оксфорді. Проте згодом він отримав запрошення до двору і став королівським астрономом.

У 1680-их роках Галлей брав активну участь у дискусіях про тяжіння. Він виявив зв'язок між «законом  $1/r^2$ » і третім законом Кеплера, але математично довести рух планет по еліптичній траєкторії не зміг. У розмові з Крістофером Реном, визначним архітектором і аматором-математиком, Галлей з'ясовує, 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 поки що не поділиться, – нехай інші ще попомучаться... Та й пізніше Гук свого доведення не показав. Галлей дійшов висновку, що «містер Гук не такий добрий, як його слова». Насправді Гук просто не зміг розробити доведення – він не був таким блискучим математиком, як Ньютон.

Тоді Галлей вирішив звернутися до Ньютона. Ньютон йому повідомив, що він уже давно знає доведення, й пообіцяв прислати. Врешті-решт Галлей

отримав обіцяне й зрозумів, що тримає в руках дещо виняткове. Галлей не помилився.

За півроку після розмови з Галлеєм Ньютон нарешті надіслав свою працю «Про рух» до Королівського товариства. Але просив не публікувати її, посилаючись на те, що працює над ширшою і ретельнішою працею. А ще за рік, 1687-го, Товариство справді отримало безсмертний том «Математичних принципів».

У цій книзі 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 у тому, що система Земля-Місяць обертається навколо спільного центру мас (оскільки маса Землі у 83 рази більша від маси 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» смужці 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 спроможності праці Ньютоном 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».

Відтак 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 всесвітнього 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 сторони 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 Ейнштейн 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 кресленнях. У той час аналітичні методи викладу в координатній формі ще не було розроблено, і Ньютон користувався геометричними методами не тому, що це було зрозуміліше, а тому, що не було 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 Лейбніц. 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 Лейбніца й Гаука – і це було геть несправедливо.

Відтак рішучий крок уперед зробив Леонард Ейлер (1707-1783), котрий 1736 року написав книгу «Механіка, аналітично викладена». Ейлер 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 Ейлер переформулював механіку аналітично. У книзі Ейлера 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 після Ньютона. Серед її творців, крім Ейлера, слід назвати французів Алексі Клода Клеро (1713-1765), Жана Лерона Даламбера (1717-1783), Жозефа Луї Лагранжа (1736-1813), П'єра Сімона Лапласа (1749-1827), а також ірландця Вільяма Ровена Гамільтона (1805 -1863).

1727-го Ісаак Ньютон відійшов у вічність, маючи 84 роки; Ейлерові тоді було 20, Клеро – 14, Даламберу – 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 світлом 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 підозрював. Старанний, проникливий і вірний тлумач Природи, Старовини й Святого Письма, він прославив у своєму ученні Всемогутнього Творця. Визначену Євангелієм прототипу 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.*

Молодший Ньютонів сучасник, великий англійський поет XVIII ст. Александер Поп ушанував співвітчизника знаменитим віршем:

Сонць і планет стрункий чертог  
Одвіку в півтімі крився.  
«Хай буде світло!» – мовив Бог,  
І Ньютон народився!

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

Старогрецький учений Арістотель (384-322 рр. до н.е.) у своїх наукових трактатах виклав погляди на суть механічного руху. На підставі спостережень, систематизації й критичної оцінки природничонаукових знань він сформулював положення, сенс яких такий: а) без сили немає руху; б) чим більша сила, що діє на тіло, тим більша швидкість його руху.

Постать Аристотеля 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 Аристотеля, був Галілео Галілей, один із тих гігантів, «на чийх плечах 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 Аристотеля не суперечать істині, якщо пам'ятати, що Арістотель враховував 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 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 їх нероздільність.

Насправді, другий закон  $\vec{F} = m\vec{a}$  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 Ейнштейна, закони Ньютона – «це фундамент всієї 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 раз перевіряли в різних умовах, і кожного разу отримані результати підтверджували їх істинність.

Працездатність створених технічних пристроїв, відповідність реальних рухів розрахунковим – переконливе, яскраве підтвердження правильності законів механіки.

І нині закони Ньютона знаходять застосування в проектуванні й конструюванні найсучасніших механо-технічних систем. Та царина застосовності цих законів має межі.

На початку XX століття Альберт Ейнштейн, котрий так високо цінував закони руху Ньютона, своєю геніальною думкою «доторкнувся» до формули  $\vec{F} = m\vec{a}$  (майже одночасно з Ейнштейном це зробив видатний французький математик, фізик і філософ Анрі Пуанкаре (1854-1912)). У результаті цього «дотику» з'ясувалося, що маса тіла, котра є мірою його інертності (маса, яка входить до другого закону, 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 їх маси не можна не враховувати. Докладніше про обмеження, що накладає на класичну механіку спеціальна теорія відносності, ми поговоримо 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, й зростання маси за такої швидкості є таким малим, що в розрахунках руху космічних об'єктів його практично не враховують.

### Докладніше про взаємодію. Третій закон Ньютона

У навколишньому фізичному світі відбувається взаємодія «всього зі всім». Пневматичний молот ударає по заготівці, яка деформується, сам же молот практично зберігає свою форму. Різець взаємодіє з оброблюваною деталлю, знімаючи з неї стружку, сам же різець майже не змінюється. Ніж розрізає буханець хліба на частини, сам же залишається цілим і неушкодженим. Ключка взаємодіє з шайбою, посилаючи її у ворота, сама ж «вважає за краще» залишатися в руках хокеїста. Автомобіль тягне причеп, а не навпаки.

Ці приклади свідчать про те, що у взаємодії двох тіл результат дії першого тіла на друге виявляється не таким, як результат дії другого тіла на перше. Чи немає тут суперечності з третім законом Ньютона, згідно з яким тіла діють одне на одне з силами, спрямованими вздовж однієї прямої в протилежні боки й рівними за модулем?

Ні, третій закон Ньютона  $\vec{F}_{1,2} = -\vec{F}_{2,1}$  (сила дії дорівнює за величиною і протилежна за напрямом силі протидії) виконується і в перелічених вище випадках. Однакові за модулем сили діють і на «холодний» масивний бойок пневматичного молота, і на гарячу «м'яку» заготівку; на лезо різця, виготовлене з твердого сплаву, і на заготовку з «податливої» сталі; на твердий ніж, і на м'який буханець хліба; на ключку в руках хокеїста (велика маса) і на шайбу (маленька маса).

Варто тільки взяти два абсолютно однакових тіла, що перебувають спочатку в однакових станах, і відразу можна сказати, що результат дії першо-

го тіла на друге буде таким самим, як результат дії другого тіла на перше. Дія першого тіла на друге, незалежно від їх властивостей, завжди тотожна дії другого тіла на перше, тобто тіла діють одне на одне однаково інтенсивно, з однаковими за модулем силами.

А результат дії в наведених вище прикладах виявляється різним через відмінність механічних властивостей тіл, що взаємодіють, і відмінності в їх взаємодії з іншими тілами.

Так, ключка, взаємодіючи з шайбою, взаємодіє ще з руками хокеїста. Шайба ж, взаємодіючи з ключкою, безпосередньо з руками хокеїста не взаємодіє, але зате взаємодіє ще з льодом. Очевидно, що це є визначальною причиною того, що шайба ковзає по льоду, а ключка залишається в руках хокеїста, хоча сила, що діє на шайбу з боку ключки, дорівнює за модулем силі, що діє на ключку з боку шайби.

Подальший розгляд цієї взаємодії дозволяє достатньо ясно уявити собі її суть. Якщо взяти в руку шайбу й штовхнути нею ключку, що лежить на льоду, то тепер ключка ковзатиме по льоду, а шайба залишиться в руках хокеїста. За умови рівності сил взаємодії в першому і в другому випадках ключка все-таки отримає меншу початкову швидкість, ніж шайба. Це підтверджує думку про те, що результат взаємодії тіл залежить і від їхніх механічних властивостей. Так, шайба й ключка мають різні маси як міри інертності тіл за їх поступального руху. Ключка додатково пов'язана з хокеїстом, який тримає її.

На підставі розглянутої взаємодії ми можемо з упевненістю сказати, що і причіп діє на автомобіль з такою ж за модулем силою, з якою автомобіль діє на причіп. Чому ж «головну скрипку» грає автомобіль? Відповідь на це питання очевидна: тому що характер взаємодії автомобіля й причепа з іншими тілами (покриттям дороги) різний. Привідні колеса автомобіля взаємодіють із дорогою інакше, ніж колеса причепа.

Звідси висновок: характер руху тіла (прискорення  $\vec{a}$ ) визначається характером взаємодії (сила  $\vec{F}$ ) та фізичними властивостями цього тіла, його інертністю (маса  $m$ ). Дослідити рух нескладно тільки у випадку сталих сил. Тоді рівнодійна (сила  $\vec{F}$  у другому законі Ньютона) буде стала, а отже сталим виявиться й прискорення тіла  $\vec{a}$ . Рух у цьому випадку буде рівноприскорений: швидкість змінюватиметься з часом лінійно  $\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t$  ( $v_x = v_{0x} + a_x t$ , тут  $v_0$  – початкове значення швидкості), а переміщення – за квадратичним

законом  $\vec{s} = \vec{v}_0 t + \frac{\vec{a}t^2}{2}$  ( $s_x = v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}$ ).

Координата тіла за прямолінійного рівноприскореного руху можна виразити як:  $x = x_0 + v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}$ .

Саме таку залежність встановив Галілей, вивчаючи рух тіл по похилій площині під дією сили тяжіння.

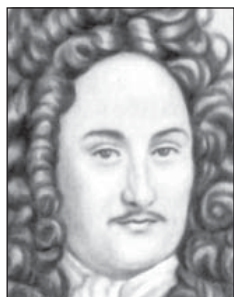
Якщо ж сили, що діють на тіло, не є сталими, тоді й прискорення змінюватиметься, і знайти миттєву швидкість і координату рухомого тіла досить складно. Але складнощі в цьому випадку математичні, а закони фізики (закони Ньютона) «працюють» бездоганно.

## 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 – ватт. 1 ньютон дорівнює силі, яка надає тілу масою 1 кг прискорення  $1 \text{ м/с}^2$  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 дорівнює роботі, яку виконує сила 1 Н, щоб перемістити тіло на відстань 1 м у напрямку сили. Нарешті, потужність 1 Ватт 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.

### Готтфрід Вільгельм Лейбніц (1646–1716)



Як ми вже говорили, термін «жива сила» (маса помножена на квадрат швидкості) для механічних явищ вперше (1686 року) запровадив німецький фізик, математик і філософ Лейбніц. (Однак сам закон збереження «живої сили» для механічних систем першим сформулював дещо раніше Гюйгенс, беручи участь у конкурсі, оголошеному Королівським товариством у Лондоні).

Блискучий математик, один із творців диференціального й інтегрального числення (другим був Ньютон), Лейбніц займався й фізичними дослідженнями в царині механіки, теорії пружності, теорії коливань. Крім того, Лейбніц вказав на зв'язок між показниками барометра й погодою, запропонував ідею створення барометра-анероїда.

Як філософ, Лейбніц розвинув вчення про відносність простору, часу й руху, заперечував проти абсолютного простору й часу Ньютона (на відмінності поглядів ньютоніанців і лейбніціанців наголошував Мирослав Попович

у цитаті, наведений у вступному розділі цієї книги). Про Лейбніца-філософа ми ще поговоримо.

Майбутній учений народився в Лейпцигу. Дитиною Готтфрід цілими днями просиджував у бібліотеці батька, професора етики, читав твори Платона, Арістотеля, Декарта. Вже в 15 років Лейбніц стає студентом Лейпцизького університету. Згодом він учився в Єльському університеті, ступінь доктора права 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 Крістіаном Гюйгенсом, котрий забезпечував його книгами Декарта, Торрічеллі, Паскаля.

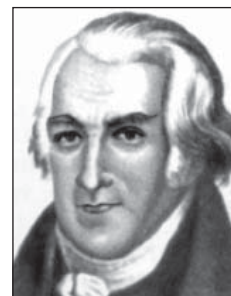
Під час поїздки до Лондона Лейбніц знайомиться з англійськими математиками, зокрема з Ньютоном (відносини двох учених скоро затьмарила голосна суперечка про пріоритет). Обраний членом Паризької академії наук, Лейбніц складає проект створення Берлінської академії й тривалий час спілкується з Петром I на тему створення академії наук в Росії.

З 1676 року учений отримав прибуткову посаду бібліотекаря ганноверських герцогів. З 1700 по 1712 рік був президентом Берлінської академії наук.

У житті Готтфрід Лейбніц був надзвичайно суперечливою особистістю. Він був вхожий до королів, але знався 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.

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

### Джеймс Ватт (1736 – 1819)



Джеймс Ватт

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 – ватт.

Джеймс Ватт, на честь якого названо одиницю виміру потужності, народився в Шотландії. Цей «батько парової машини» був членом трьох Академій наук: Единбурзького Королівського товариства (Шотландія), Лондонського Королівського товариства (Англія) і Паризької Академії наук (Франція).

У той час в Англії на паливо вирубано було вже більшість лісів. Відтак розпочався інтенсивний видобуток вугілля. Копальні робили дедалі глибшими – але їх заливала вода. З допомогою коней, що крутили відповідні пристрої, вичерпувати її стало складно. З'явилася ідея використати для цього силу пари.

Англійський механік Томас Ньюкомен (1663-1729) спорудив 1705 року парову помпу. 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, тому як пара в циліндрі конденсувалася. Для конденсації пари циліндр обливали піднятою з копальні водою. Спершу це робили вручну, потім – за допомоги нескладного механічного пристрою. Потім циліндр знову наповнювала пара з казана – і процес повторювався.

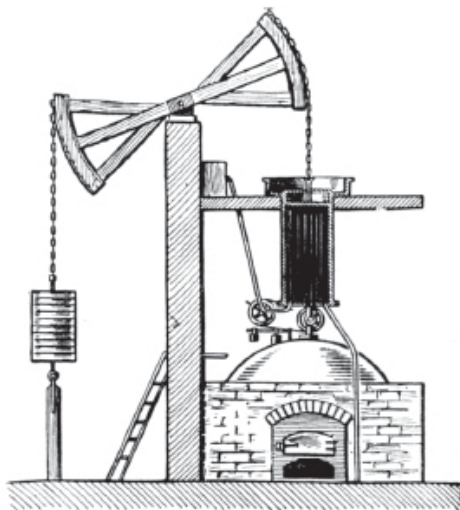


Рис. 31. Пароатмосферна машина Ньютона.

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

Ніякої спеціальної 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 освіта не дозволяли йому 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.

Парадокс: Джеймс Ватт був унікалом і універсалом, якому однак важко було знайти сталу роботу, який-небудь певний рід занять. Він – типовий винахідник і за вдачею, і за способом життя, і за типом мислення.

19-річним хлопцем верхи на коні він 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. За 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. І от одного дня сталося те, про що сам учений розповів 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 еластичним тілом, вона прагнуче 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».

Джеймс Ватт побудував нову модель парової машини, яку й нині можна побачити в Лондонському науковому музеї. 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 через спеціальний патрубок. Замість паро-атмосферної помпи, придатної лише до викачування води, з'явилася універсальна парова машина – бо обертання колеса здатне рухати найрізноманітніші механізми й пристрої!

9 січня 1769 року Джеймс Ватт отримав патент на «способи зменшення споживання пари й, унаслідок цього, палива у вогневих машинах».

Після цієї знаменитої події життя Джеймса Ватта роздвоїлося. Багато часу забирали пошуки коштів на вдосконалення парової машини. Ватт шукав компаньйонів, а коли не знаходив їх, то змушений був братися до роботи, до якої його серце не лежало.

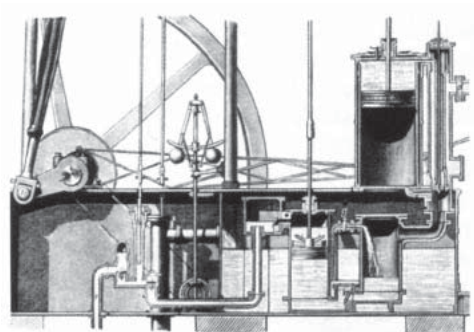


Рис. 32. Машина Ватта.

«Нічого не може бути ганебнішим для чоловіка, ніж братися не за свою справу, – у відчай пише він, працюючи на будівництві каналу, який сам і спроектував. – Я вкрай апатичний, мої робітники не виконують своїх обов'язків, клерки й управителі дурять мене, я маю нещастя бачити й розуміти це. Я волів би стояти перед зарядженою гарматою, ніж укладати торгівельні угоди й зводити кошториси. Коротше кажучи, як тільки мені доводиться робити щонебудь з людьми, так відразу я не на своєму місці. Для інженера цілком досить самої лиш природи, щоб боротися з нею й бачити, як вона на кожному кроці долає його».

Але були в Джеймса Ватта й щасливі дні. Компаньйони часом брали на себе всю ненависну для нього документацію, він забував про свій вічний страх безгрошів'я і міг займатися улюбленою роботою. Він використовував ці нагоди вповні: зробив ескіз пароплавного гвинта, вигадав мікрометр, винайшов відцентровий регулятор і механізм, який назвали згодом «паралелограмом Ватта», й безперервно удосконалював свою парову машину.

1782 року Ватт запатентував паровий двигун із розширенням, а за два роки отримав патент на універсальний паровий двигун.

Парові машини купують господарі шахт, власники копалень, директори заводів. Покупців не цікавлять технічні тонкощі, а тільки прибуток. Зі смутком Джеймс Ватт каже: «Неукам шум вселяє ідею сили, а скромність у машині їм так само малозрозуміла, як і в людях».

Великий промисловець Болтон розгледів геній Ватта. Він 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».

Нарешті Джеймс Ватт – член Лондонського Королівського товариства. Він, компаньйон Болтона, купує собі маєток і вже не думає «про шматок хліба». Він – поважний сивочолий чоловік, має дорослих дітей. У 37 років він

поховав дружину, яку дуже любив. Одружився вдруге і опинився «під підбором» своєї нової обраниці.

Наприкінці життя він багато подорожував, допомагав молодим винахідникам порадами й грошми. З його шести дітей батька пережив лише один старший син. Смерть зустрів спокійно, тому що знав: обов'язок його перед нащадками виконано.

Його винахід – паровий двигун зробив XIX століття «добою пари й електрики», часом небаченого раніше технічного поступу й пов'язаних із ним соціальних змін. Це гостро усвідомлювали сучасники. Подорожуючи пароплавом із Астрахані до Нижнього Новгороду після 10-річного заслання, Тарас Шевченко запише до свого щоденника 27 серпня 1857 року екзальтоване звернення до конструктора пароплава й винахідника парового двигуна: «Великий Фултоне 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 ватт (один джоуль за одну секунду).

### Джеймс Прескотт Джоуль (1818 – 1889)

Англієць Джоуль, власник броварень, був прекрасним фізиком – експериментатором. Джоуль 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 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 в XX 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.

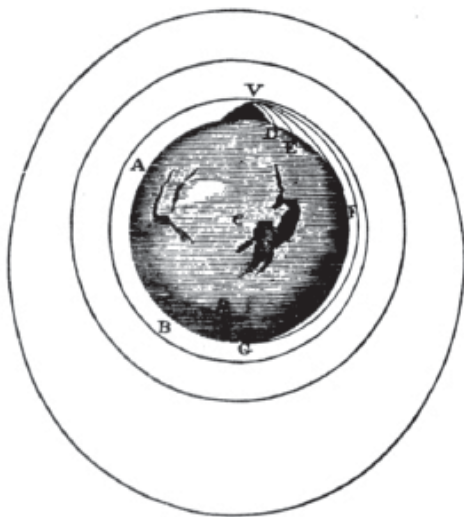


Рис. 33. Перетворення ядра на штучний супутник Землі (рисунок Ньютона).

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

$$g = \frac{v_c^2}{R_3}.$$

Підставляючи в це просте рівняння значення прискорення земного тяжіння  $g=9,8 \text{ м/с}^2$  й радіусу землі  $R_3=6370 \text{ км}$ , 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 навколосезний супутник, що його СРСР запустив 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.

Письменники-фантасти минулого «використовували» порожні гарматні ядра як перші засоби міжпланетного сполучення. Саме в ядрі, випуще-

ному зі спеціально відлітої велетенської гармати, подорожували відважні герої роману Жуль Верна «З Землі на Місяць» (1865). У ядрі в романі Герберта Велса «Війна світів» (1898) прилетіли на Землю зі своєю завойовницькою місією марсіани. Втім, у реальному житті доля сміливців була б сумною: попри всі водяні подушки та інші застережні засоби, які вигадав Жуль 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 Жуль Верна ніколи не вийшло б за межі земної атмосфери.



Рис. 34. Копія першого радянського супутника.

Відтак далі надії людства на міжпланетні подорожі було пов'язано з ракетами, які дозволяють досягнути космічних швидкостей, залишаючись у рамках перевантажень, які може витримати тренувана людина (до  $10g$ ). Одним із перших пропонував використати ракети зі спеціальною горючою сумішшю українець Микола Кибальчич (1853-1881), син священика 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 апарату винахідник робив у фортеці, чекаючи страти. Відтак про них стало відомо лише за багато 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 відносно ракети  $v_0$ , легко розв'язати з використанням закону збереження імпульсу. Це вперше зробив геніальний 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 гетьмана Северина Наливайка, і Костянтин Ціолковський цим пишався.

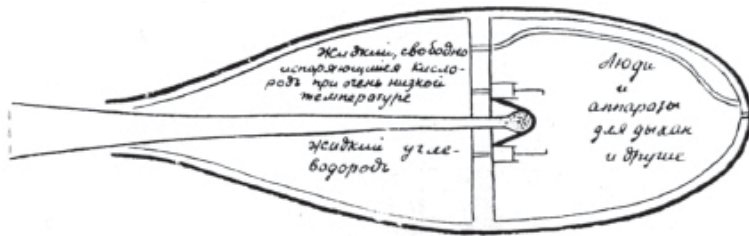


Рис. 35. Космічна Ракета (рисунок Ціолковського).

Тож простежмо хід міркувань ученого. Позначмо через  $m$  масу використаного палива. Тоді за 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:

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

Якщо проінтегрувати обидві частини цього співвідношення, маємо:

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

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, окрім палива, «важать» ще й корпус, двигун, механізми, прилади, пасажери, запаси їжі й води тощо. А це означає, що ракета, коли «спалить» усе паливо, 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 у графі «національність» «українець», хоч у пізніших документах в'язня ГУЛАГу (конструктора було заарештовано 1938 року) і творця перших балістичних ракет у цій графі вже значилося «росіянин»...

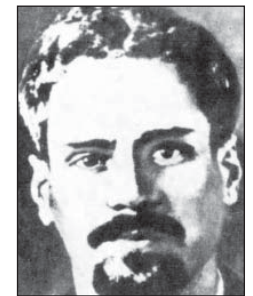
У липні 1969 року командир корабля «Аполлон 11» Ніл Армстронг першим із землян ступив на поверхню Місяця. Аби дістатися туди, астронавти використали «Kondratiuk's route» – «трасу Кондратюка». Задля мінімізації витрат палива, корабель залишився на навколomisячній орбіті, а на поверхню супутника спустився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

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!), і ще коли навчався в полтавській гімназії, 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 чотириступінчатої 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 закликають на кавказький фронт Першої світової.



Олександр Шаргей  
(Юрій Кондратюк)

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 переховується. 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 опинився 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, Кубань, Сибір – і 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 проектували для «соціалістичної батьківщини» потрібні їй споруди. У цей час Олександр Шаргей зводить найбільший у світі дерев'яний елеватор на 10000 тон зерна, проектує найпотужнішу на той час вітроелектростанцію в Криму на Ай-Петрі (пізніше проект 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. За щасливою випадковістю, примірник книжки потрапив до Бібліотеки Конгресу США – і на нього звернули увагу, коли в 1960-ті готували американську «місячну програму».

«Коли одного березневого світанку 1968 року я схвилювано слідкував 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, один із авторів програми перших пілотованих польотів на Місяць.

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 успішним 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 цивільний

дружині Галині Плетньовій датовано січнем 1942-го. Про місце й обставини загибелі вченого нічого невідомо. Втім, такою тоді була доля сотень тисяч солдат.



Рис. 356. Обкладинка книги «Завоювання міжпланетного простору».

До сторіччя вченого за рішенням 28-ї сесії ЮНЕСКО 1997 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 зворотньому боці Місяця, астероїд №3084, політехнічний університет у рідній Полтаві.

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

## Зміст механіки Ньютона з позиції теорії наукового пізнання і сучасних наукових поглядів

Існує кілька досить досконалих логічних форм викладу змісту класичної механіки. Їх розробляли Лагранж, Гамільтон та інші вчені. Проте класична механіка Ньютона історично є першою фізичною теорією, яку заслужено вважають зразком теоретичних побудов. Вона не втратила свого значення в розгляді різних прикладних питань і в наші дні, а тому має цікаві перспективи розвитку.

Нині виникає потреба в науковому розкритті фундаментальних фізичних понять простору, часу і руху.

Створенню теорії завжди передують етапи емпіричних досліджень. Теорія в жодному разі не заперечує емпіричного рівня знань, а лише поглиблює його, дошукуючись суті явища. У зв'язку з цим з методологічної точки зору дуже важливо розрізняти емпіричний і теоретичний рівні знань і передбачати повернення (точніше, нове сходження) до емпіричних знань і їх переосмислення на основі теоретичних знань.

Фізичне наукове пізнання відбувається, як правило, за схемою: експерименти – теорія – практика. На зв'язці експерименти – теорія пізнання рухається від матеріального до ідеального (відбувається узагальнення), а на зв'язці теорія – практика, навпаки, від ідеального до матеріального (відбувається конкретизація). У зв'язку з цим закономірно виникає питання: а чи не можна виключити з процесу пізнання ідеальне й обмежитися тільки матеріальним і діяти за схемою експерименти – практика? Можна навести численні приклади з механіки, які свідчать, що для наукового пізнання явищ самих емпіричних досліджень замало, хоч як би ми вдосконалювали засоби вимірювань.

Недостатньо описати явище на емпіричному рівні. Явище треба зрозуміти, тобто виявити його причинний, внутрішній зміст. Вдаючись до філософської термінології – треба пізнати суть явища, яку неможливо досягнути безпосередніми спостереженнями.

Суть – це характерна особливість явища (в певному сенсі – його ідея), нерозривно пов'язана з матеріальністю, але не дана безпосередньо в спостереженнях і експериментах. У спостережуваному й експериментально досліджуваному фізичному явищі суть виявляється у формі емпіричного закону.

Як же з матеріальних проявів збагнути ідеальне, тобто суть? Це питання є найважчим у теорії пізнання. Перехід від проявів до суті відбувається за рахунок особливої діяльності людського мислення, що володіє фундаментальною для пізнання властивістю, а саме: здатністю створювати образи (абстракції) матеріальної дійсності й оперувати ними.

У мисленні предмет постає як образ, і цей образ відображає власне предмет лише частково – абстрактно, – через нескінченність властивостей реального предмета й обмеженість інформації про нього. Крім того, цей образ є ідеалізованим, оскільки людське мислення наділяє його додатковими властивостями, яких реальний предмет не має. І саме ідеалізація відіграє суттєву творчу роль у процесі наукового пізнання.

Ідеальні фізико-математичні образи постають і існують тільки в мисленні. Ці образи і є носіями суті, за умови якщо вони адекватно віддзеркалюють матеріальний світ. Поняття й закони, складові ядра теорії, описують і пояснюють образний, ідеальний фізико-математичний світ, який відображає сут-

теві властивості реального фізичного світу. Фізики жартують: будь-яка модель завжди є не фотографією, а «карикатурою» реальної дійсності. Проте від умінь фізика залежить, чи вдасться намалювати таку «карикатуру», яка вбере в себе інформацію про суттєві в певному контексті риси явища, абстрагуючись водночас від усього менш суттєвого.

Зробити це буває дуже непросто. Адже перехід від реального фізичного світу до ідеального фізико-математичного світу не є однозначно зумовленим логікою, а це означає, що теорія не виводиться з емпіричних досліджень прямо й безпосередньо.

Між ідеальним фізико-математичним світом (світом ідеальних образів) і реальним фізичним світом є посередник – експериментальний фізичний світ (його утворюють образи експериментального рівня дослідження). На першому етапі фізичного пізнання реального матеріального світу ми створюємо образи його об'єктів і ситуацій, що мають малий ступінь абстрагованості; інакше кажучи, ми відображаємо реальний світ у формі так званих експериментальних образів. На цій основі можна відобразити експериментальні закономірності фізичних явищ.

Потім у процесі пізнання постають нові, значно абстрактніші образи реального світу. Ці теоретичні об'єкти-образи «живуть» уже в ідеальному фізико-математичному світі. На основі причинно-наслідкових зв'язків і відносин у цьому світі формулюються теоретичні закони, які відображають суть реальних фізичних явищ і які можна виразити в знаково-символічній формі. Система теоретичних законів, що відображають суть фізичних явищ у певній царині науки, є фізичною теорією.

Ідеальний фізико-математичний світ ньютонівської механіки є системою таких понять, як простір, час, матеріальна точка, система відліку, швидкість, прискорення, маса, сила, імпульс, момент імпульсу, енергія. Ці самі поняття лежать в основі експериментальних досліджень, але тут вони мають не теоретичний, а емпіричний сенс.

Емпірично простір характеризується властивостями матеріальних тіл (наявністю в них форми й протягності), а також дискретною множинністю тіл. Емпірично простір ототожнюється з «вмістищем», у якому певним чином розташовано матеріальні тіла. Вимірювання цих взаємних розташувань здійснюється за допомогою масштабних лінійок. Проте такими лінійками практично не можна виміряти відстані в мега- й мікросвіті. Тому без попереднього теоретичного визначення поняття відстані для мега- й мікросвіту неможливо зрозуміти, що саме вимірюється і який сенс результатів цих вимірювань.

Абстрактний теоретичний простір ньютонівської механіки – це математичний евклідов простір. Він є безперервною однорідною тривимірною нескінченністю геометричних точок, де відстань між кожними двома точка-

ми визначається в Декартових координатах за допомогою теореми Піфагора в просторі. Емпіричний простір класичної механіки (відносний простір Ньютона) в певних масштабах відповідає евклідовому простору. Проте він принципово не тотожний йому, оскільки евклідів простір є абстракцією, яку витворило людське мислення. Геометричні точки евклідового простору нематеріальні й можуть бути розташовані як завгодно близько одна до одної, тобто, відстань між ними може бути нескінченно малою. Але в реальному просторі неможливо абсолютно точно матеріально відтворити геометричні точки евклідового простору й практично виміряти які завгодно малі відстані між ними.

Таким чином, у рамках класичної механіки Ньютона слід розрізняти теоретичний простір (у термінології Ньютона – абсолютний) і емпіричний простір (у термінології Ньютона – відносний). У «Математичних принципах натуральної філософії» Ньютон писав:

«Абсолютний простір у самій своїй суті безвідносно до будь-чого зовнішнього залишається завжди однаковим і нерухомим». Від абсолютного простору Ньютон відрізняв простір відносний, який виступає мірою абсолютного простору. Розглядаючи відносний простір, що є не чим іншим як простором емпіричним, тобто протяжністю матеріальних об'єктів, необхідно враховувати корпускулярний дискретний характер фізичних уявлень Ньютона про структуру матерії (атомізм). З цього випливає, що відносний простір Ньютона, який виступає як протяжність матеріальних об'єктів, є дискретним унаслідок атомістичної природи матерії.

(Цікаво, що й у питанні атомів Ньютон, за підтримки Роберта Бойля, стояв на позиціях, протилежних до позицій Декарта й Лейбніца, котрі заперечували атомізм!)

За аналогією з простором Ньютон розглядав також абсолютний і відносний час. У визначенні абсолютного часу Ньютон акцентує увагу на тому, що він «за самою своєю суттю, без жодного відношення до будь-чого зовнішнього тече рівномірно, й інакше називається тривалістю». Ясно, що це так званий теоретичний час, оскільки твердження про рівномірний плин часу передбачає наявність чогось, що контролює швидкість потоку часу, – а це практично неможливо.

До того ж, якщо розглядати час «без жодного відношення до чого-небудь зовнішнього», то взагалі немає сенсу говорити про рівномірний або нерівномірний перебіг часу. Емпіричний час визначається за допомогою сукупності матеріальних тіл, які задають еталонний (зазвичай періодичний) рух. Якщо сукупність матеріальних тіл сконструювала людина, то це – годинник. Через тривалість еталонного руху виражається тривалість руху будь-якого реального тіла.

Отже, Ньютон розрізняв теоретичний (ідеальний, абстрактний, математичний – «абсолютний») і емпіричний (практичний, тілесний, повсякденний – «відносний») час.

На підтвердження наведеного нами аналізу «надамо слово» самому мислителю, котрий «промовляє» до нас із сторінок «Математичних принципів натуральної філософії»:

«ЧАС, ПРОСТІР, МІСЦЕ і РУХ є загальновідомими поняттями. Проте слід зазначити, що ці поняття зазвичай відносяться до того, що ми досягаємо своїми відчуттями. Звідси виникають певні хибні думки, для усунення яких необхідно наведені вище поняття розділити на абсолютні й відносні, достеменні й уявлювані, математичні й повсякденні.

І. АБСОЛЮТНИЙ, ІСТИННИЙ, МАТЕМАТИЧНИЙ ЧАС сам по собі й за своєю суттю без жодного відношення до будь-чого зовнішнього протікає рівномірно. й інакше називається тривалістю.

ВІДНОСНИЙ ЧАС, УЯВЛЮВАНИЙ АБО Ж ПОВСЯКДЕННИЙ – є або точна, або змінна, придатна до досягнення відчуттями, зовнішня, визначена за допомогою якого-небудь руху міра тривалості, якою послуговуються в повсякденному житті замість істинного математичного часу, як-от: година, день, місяць, рік.

ІІ. АБСОЛЮТНИЙ ПРОСТІР за самою своєю суттю безвідносно до будь-чого зовнішнього залишається завжди однаковим і нерухомим.

ВІДНОСНИЙ – це його міра, або яка-небудь обмежена рухома частина, яку ми визначаємо за допомоги відчуттів за розташуванням її відносно деяких тіл, і яку в повсякденному житті приймають за простір нерухомий...».

Отже, Ньютоном визначає абсолютні (теоретичні) простір і час як абстрактні ідеалізації емпіричного простору й часу. Крім того, він вводить ці поняття незалежно одне від одного й поза зв'язком із матеріальністю.

У понятті руху відбувається об'єднання ідеалізації простору й часу та по'єднання їх із ідеалізацією матеріальності. Ідеалізація матеріальності відбувається за допомогою такого теоретичного об'єкту як матеріальна точка. У динаміці матеріальність кількісно виражається фізичними величинами, які відповідають фізичним поняттям маси, імпульсу, сили, енергії. Ідеальний фізико-математичний світ Ньютона є системою матеріальних точок, що перебувають у теоретичному евклідовому просторі, й у цьому світі «тече» теоретичний абсолютний час.

Матеріальна точка в емпіричному світі є об'єктом, реальними властивостями якого, крім матеріальності, можна в умовах даної задачі знехтувати. Постулювання матеріальної точки як ідеального об'єкта, здавалося б, забезпечує класичній механіці нічим не обмежену царину застосовності. Проте розвиток фізики у ХХ столітті виявив такі матеріальні об'єкти, які не надаються до ідеалізації в рамках класичної механіки і рух яких принципово не можна описати за допомогою цієї теорії. У царинах із дуже малими просторово-часовими масштабами елементарні частинки керуються іншими законами, відмінними від законів Ньютона.

## Класична механіка: 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 А з боку тіла В, рівна за величиною і протилежна за напрямком силі, що діє на тіло В з боку тіла А.

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

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

$$\vec{P}_{\text{поин}} = \text{const}$$

3. Закон універсального 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  $G$  (її досить точно визначив англійський фізик Генрі Кавендіш (1731-1810)), і якщо виміряємо пряму силу притягання між двома масивними кулями за допомогою точних крутильних ваг), 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.

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  $G$  (її досить точно визначив англійський фізик Генрі Кавендіш (1731-1810)), і якщо виміряємо пряму силу притягання між двома масивними кулями за допомогою точних крутильних ваг), 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.

4. Робота, яку виконує сила  $F$  переміщуючи об'єкт із точки А в точку В, 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.

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

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

6. Кінетична енергія:

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

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

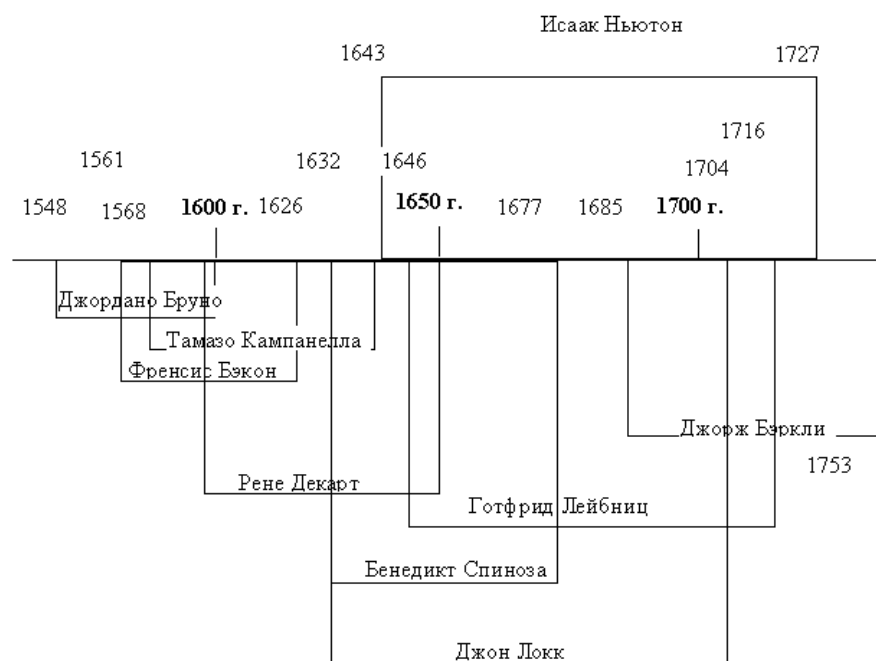
$$K = \sum_{j=1}^N K_j$$

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

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

## Філософські основи класичної механіки

Вище ми вже говорили: на формування системи поглядів Ньютона вплинули не лише фізики – сучасники, але не меншою мірою й філософи, чий імена подано на філософсько-історичній хронограмі. Це не дивно, адже за синкретизму наук, що тривав аж до нового часу, чимало вчених (Арістотель, Декарт, Лейбніц тощо) були відомі й як визначні філософи, і як природодослідники.



Філософсько-історична хронограма

### Плеяда античних філософів

**Демокрит** (460-370 рр. до н. е.) – старогрецький філософ. Розробив атомістичну теорію будови матерії. Атоми за Демокритом – 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 досягаємо за допомогою органів чуття. Все, що відбувається в світі, має природну причину й відбувається з природної необхідності без втручання богів.

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

**Сократ** (469-399 рр. до н. е.) – старогрецький філософ, хоробрий воїн, брав участь у трьох битвах Пелопоннеської війни. На 70-му році життя Со-

крата притягли до суду за невизнання богів, яких шанували афіняни. Сократ стверджував, що бог – це душа людини, його розум і совість. Ніхто ніколи не бачив, щоб Сократ чинив щось безбожне, оскільки він учив молодь, що кожна людина повинна вірити у власного бога, проте має визнавати й інших богів, від яких його бог походить. Втім, ці погляди суперечили чинним правилам і були відмінними від ставлення афінян до богів. Сократа засудили до страти. Філософ відмовився рятуватися втечею, до якої його намовляли друзі, воліючи померти – він випив келих отрути. За певний час афіняни розкаялися. Його позивачів вигнали з Афін, деяких стратили. В історію Сократ увійшов як філософ із незалежними поглядами й думками. Будь-які свої висновки він завжди прагнув винести на нещадний суд розуму, не спираючись на жоден авторитет.

**Платон** (427-347 рр. до н. е.) – старогрецький філософ, справжнє ім'я – Аристокл. Прізвисько Платон він отримав від Сократа за свій високий зріст, широкі плечі й успіхи в боротьбі. Протягом восьми років він навчався філософії у Сократа. Платон вважав, що світ реальних речей є 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.

За Платоном, Бог відкривається нам коли ми хочемо пізнати його. Душа людини – частка Бога, і пізнаючи свою душу, ми пізнаємо Творця – так відкривається вища таємниця. Думка є рух душі, причетної до вищого розуму.

Бог створив із хаосу порядок, вважав Платон. Потім Бог вирішив, що в цьому видимому незнайменні не може бути прекраснішим від розумного, а до розуму нічого не може бути причетне без душі, і тому вселив розум у душу, а душу – в тіло, і з'єднав їх так, що Всесвіт став одушеною розумною істотою. Справжньою істинністю володіє тільки вічне й незмінне, до якого причетна наша душа і завдяки якому вона безсмертна.

Смертну частину душі, якій властиво страждати, а також відчувати щастя, горе, радість, страх, – заховано в серці. Але є й друга, безсмертна частина душі, й обов'язок її – йти за істиною, а не за химерам.

Бог запровадив у світі рух по колу. Душа – божественне начало. Все тілесне підпорядковано їй. Бог бачить у світі тільки самого себе, а душа людини бачить Бога. Бог є початок і кінець світу, його причина і його наслідок, його образ і його зміст. Суть полягає в тому, що світ речей є світом нескінченного становлення й руйнування, а тому в світі речей істини відшукати не можна. Справжньою істинністю володіє тільки душа, тобто Бог.

**Арістотель** (384-322 рр. до н. е.) – старогрецький філософ, він вступив до Академії, яку заснував Платон, маючи 17 років, і близько 20 років наби-

рався 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.

Першопричиною світу, за Аристотелем, 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, який має свій початок, свою першопричину, свою вищу мету – розум. Світ несвідомо прагне до своєї вищої мети. І лише людина йде усвідомлено як до вищої мети до споглядання самої себе за допомоги власного розуму. Таким чином, погляди Платона й Аристотеля на співвідношення світу речей і світу ідей не збігаються. Звідси знаменитий вислів Аристотеля: «Платон мені друг, але істина дорожча».

Основні праці Аристотеля: «Органон», «Метафізика», «Фізика», «Про частини тварин», «Політика», «Аналітика».

Арістотель отримав запрошення від царя Македонії Філіпа стати вихователем його сина Олександра, пізніше відомого в історії як Олександр Македонський (Великий). Лист Філіпа проголошував: «Знай, що у мене народився син, але я вдячний богам меншою мірою за те, що вони мені дали, а більшою мірою за те, що вони йому дозволили народитися в твій час. Бо я сподіваюся, що твоя турбота й твоя наука зроблять його гідним його майбутньої держави».

У середні віки вчення Аристотеля однобічно тлумачили в платонівському дусі. Саме в такому вигляді його канонізувала католицька церква. Завдяки цьому навіть уможливили, не підтверджені дослідом природничонауковим твердження Аристотеля не бралися під сумнів – його авторитет був непорушним. Майже дві тисячі років слова Аристотеля беззастережно вважали істиною. І першим, хто в них засумнівався, був Галілео Галілей.

**Епікур** (341-270 рр. до н.е.) – син шкільного вчителя, філософ-атоміст, послідовник Демокрита. Мета філософії Епікура – пояснення природи світу й природи людини. Він стверджував, що звільнити людину від страху перед богами й страху перед смертю – означає розчистити їй шлях до щастя. Епікур вніс і нове в атомістику Демокрита. Суть цього нового полягає в тому, що атоми за внутрішньою спонукою можуть відхилятися від прямолінійного й рівномірного руху, через це в світі панує не лише необхідність, але й свобода.

Обертаючись і стикаючись у порожнечі, атоми утворюють все, що бачить людина, і саму людину. Невидиме теж складається з атомів: душі, що живуть

у людях, і боги, що перебувають у проміжних просторах світу. Богів треба шанувати, бо це прекрасні істоти. Ми повинні прагнути зрівнятися з богами мудрістю. Не треба боятися богів, оскільки вони не втручаються в життя людей і в життя природи. Не слід також покладати на богів жодних надій, оскільки бог – лише ідеал людини.

Розумність є початком усіх речей і найбільшим благом. Із розумності народжуються всі чесноти.

Епікур заперечував безсмертя душі й замогильне життя. Він вважав, що головна мета життя людини – жити щасливо, насолоджуючись усім, що доступне нашим відчуттям, і керуючись розумом.

Після смерті Епікура «епікурейцями» почали називати людей, котрі надміру тяжіють до плотської насолоди. У пізніші часи для християнських богословів, котрі закликали до вмертвіння плоті заради порятунку душі, слово «епікуреєць» стало синонімом слів «розпусник і «ласолоб».

У філософії Епікур назавжди залишиться видатним мислителем, засновником нового напрямку в етиці.

**Лукрецій, Тім Лукрецій Кар** (бл. 99-95–55 до н. е.), давньоримський поет і філософ.

Достеменних біографічних відомостей про Лукреція майже не збереглося (повідомлення Ієроніма й Светонія датовано IV ст. н. е., і вони є малодостовірними). 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 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 Епікура.

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

Із назв підрозділів книги легко можна уявити собі зміст: «Зі 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 їх 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 недовладностей повно.

Філософи – попередники і сучасники Ньютона  
**Джордано Бруно** (1548-1600).

До народження Ньютона залишалося 43 роки, коли в Римі на Кампо ді Фьоре («Площі квітів») інквізитори живцем спалили Джордано Бруно. Великий італійський мислитель виріс у релігійній сім'ї, в юності був ченцем, кілька років прожив у монастирі. Жвавий і поетичний розум Джордано Бруно швидко сприймав нові віяння й філософські ідеї. Під їх впливом у нього склався пантеїстичний світогляд (пантеїзм – наділення божественністю всієї природи). Дж. Бруно стверджував, що дух і матерія існують споконвіку як єдина субстанція, що творить із себе світ. Бог і світ для Бруно були одне й те ж. Божество було силою, розлиною у Всесвіті, який Бруно вважав нескінченною множиною світів. Всесвіт не має центру, інші світи так само населені, як і Земля. Нескінченний Всесвіт 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 Риму. Жив у 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 й на різкі закиди проти Риму.

Такий небезпечний політичний супротивник не міг не викликати занепокоєння в Римі. Джордано Бруно, котрий оголосив себе вчителем досконалішого богослов'я, сином неба й матері-Землі, звинуватили у сповідуванні псевдовчення й віддали до суду. Венеційська республіка після певних вагань зрештою передала філософа в руки Риму.

Бруно не вважав себе за єретика, його пантеїзм не було офіційно заборонено, – і на цьому він стояв перед судом інквізиції. На процесі Бруно оголосив себе католиком і сином Церкви, а свої релігійно-філософські вчення – такими, що не суперечать християнству. У протоколі судового процесу записано його слова: «Я завжди тримався погляду, якого тримається свята мати Католицька Церква». Ці запевнення не було визнано щирими. 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 досягає 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 викарбовано слова: «Джордано Бруно – від століття, яке він передбачав».

**Томмазо Кампанелла** (1568–1639) – італійський філософ, котрий розвивав ідеї утопічного комунізму. Освіту здобув у монастирі, виступав проти іспанського владарювання в Неаполітанському королівстві, за що його засудили до довічного ув'язнення, і він пробув у в'язниці 27 років. Там написав головну працю свого життя – утопію «Місто Сонця». Природу Кампанелла тлумачив із позиції ідеалізму. Він стверджував, що внутрішній зв'язок речей природи здійснюється єдиною світовою душею, Богом. У релігії людина досягає єднання з Богом як вищим благом.

Етична сила керує життям людей і всім Всесвітом. Кампанелла вірив у передбачення долі за розташуванням зірок.

Ідеал державного устрою – республіка, в якій влада належить священнослужителям і філософам. Праця, розподіл продуктів, навчання й виховання в республіці мають організовуватися на комуністичних принципах.

«Парадокс» Кампанелли полягає в тому, що в нім своєрідно поєднувалися вільнодумство й крайня, майже фатальна релігійність і нетерпимість до носіїв інших поглядів.

**Рене Декарт** (1596–1650 рр.).

Ньютону було сім років, коли з життя пішов великий французький фізик і математик Декарт, про якого ми вже говорили як про вченого-природничника. Проте Декарта, автора знаменитих слів «Я мислю, отже, я існую», небезпідставно вважають одним із засновників сучасної філософії.

Нагадаємо: син дворянина Рене Декарт здобув освіту в єзуїтській школі, брав участь у Тридцятирічній війні, багато подорожував. Після довгих поневі-

рянь трохи пожив у Парижі, а потім вирушив до Голландії, де працював близько 20 років. Саме тут, у найдемократичнішій на той час країні Рене Декарт створює свої знамениті праці: «Роздуми про метод», «Математичні роздуми про першу філософію», «Принципи філософії». Ці книги на багато років визначили шляхи розвитку науки, яка виривалася з середньовічної схоластики.

Питання про співвідношення мислення й буття (основне питання філософії) Рене Декарт вирішує подвійно. Він стверджує, що в світі паралельно, незалежно один від одного, існують два начала (філософською мовою – дві субстанції): матеріальне й духовне; обидва є витвором Бога. Головна, неодмінна властивість (мовою філософії – атрибут) матерії – це протяжність, а головний атрибут духовної субстанції – мислення.

У гносеології (теорії пізнання) Рене Декарт, власне, є родоначальником сучасного раціоналізму (раціо – розум). 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, вважає Декарт, і впорядковує дані свого досвіду, що їх осягає за допомогою органів чуття. Ідея Бога – теж природжена ідея. Це основні філософські погляди Декарта.

Церковники розгледіли небезпеку в теорії пізнання, яку проповідував Декарт. Він 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!

Церква стверджувала: «До пізнання істини веде віра». «До пізнання істини веде думка, – заявив Рене Декарт.

**Бенедикт (або Барух) Спіноза** (1632-1677) – великий нідерландський філософ, на 11 років старший за Ньютона. Він прожив лише 45 років, і залишив людству «Етику», «Богословсько-політичний трактат» і «Основи філософії Декарта» – головні свої твори.

Майбутній філософ народився в родині євреїв-утікачів із католицької Португалії, котрі шукали порятунку в релігійно толерантних Нідерландах. Він присвятив своє життя пошукам доказів багатьох істин. Головною істиною для Спінози було те, що існує природа, єдина й цілісна. Вона виключає існування якого-небудь іншого початку, і тому є причиною самої себе, діє за своїми власними законами й без чийого-небудь примусу.

Відповідно до філософського вчення Спінози, природу ніхто не створив, і немає нікого ні над нею, ні поза нею. Поняття «природа», «першооснова», «Бог» для Спінози означають одне і те саме, тобто – є синонімами. Власне, Спіноза йде за Джордано Бруно, котрий, як відомо, сповідував пантеїзм. Природа вічна й нескінченна; вона сама творить із себе світ речей, а цей світ надається до осягнення людським розумом.

Коли Спінозі повідомили про бажання короля Франції призначити йому довічну пенсію, якщо він присвятить королеві який-небудь зі своїх творів, філософ відповів: «Я свої твори присвячую тільки істині». Так само відхилив він і пропозицію обійняти кафедру в Гейдельберзі.

Амстердамська єврейська громада викинула філософа зі своїх лав за вільнодумство. Тому Спіноза жив відлюдником і кошти для існування заробляв тим, що шліфував оптичні лінзи. Складений пил, який він вдихав під час цієї роботи, прискорив його смерть.

Великий французький мислитель Дені Дідро сказав про Спінозу: «Його серце не було заплямовано жодною з тих вад, які позбавляють права називатися людиною».

**Джон Лок** (1632-1704) – видатний англійський філософ-матеріаліст, сучасник Ньютона, а з деяких питань і його співробітник.

Головна філософська праця Лока, «Роздуми про людський розум», з'явилася друком, коли Ньютонові було 47. Лок виступав проти «природжених ідей» Декарта і його раціоналізму, протиставляючи йому концепцію емпіризму (емпірія – досвід). Лок вважав, що повсякденний досвід – джерело всіх людських знань, і в людському розумі немає нічого такого, чого не було б раніше в повсякденному досвіді. Саме у відчуттях людині відкривається якість речей.

Лок розділяв якості речей на первинні (протяжність, форма, вага), що властиві всім речам, і вторинні (колір, смак, запах). Вторинні якості, на відміну від первинних, не належать самим речам, а є результатом нашої здатності відчувати. (Зазначмо, що проблему первинних і вторинних якостей досі активно обговорюють у теорії пізнання й психофізіології, і наразі її не можна вважати остаточно вирішеною).

**Готтфрід Лейбніц** (1646-1712) – видатний німецький мислитель-енциклопедист, залишив помітний слід не лише в філософії, але і в математиці, фізиці, геології, біології, історії (як про математика й фізика ми вже про нього говорили). Мало того – він був ще й юристом, педагогом, дипломатом, політиком, мандрівником.

Один із найвизначніших філософських творів Лейбніца – «Нові роздуми про людський розум». У цій своїй роботі Лейбніц полемізує з Локом. Він виступає проти емпіричної теорії пізнання Лока, обстоюючи, зокрема, принцип Декарта про наявність у людському розумі природжених ідей.

Вихідні позиції Джона Лока й Готтфріда Лейбніца можна сформулювати приблизно так:

Лок: Немає нічого в розумі, чого не було б раніше у відчуттях.

Лейбніц: – Немає нічого в розумі, чого не було б раніше у відчуттях, за винятком самого розуму.

З часів цієї знаменитої суперечки Лейбніца з Локом минуло близько трьох століть. Їхні ідеї вивчено й оцінено. Багато з того, що вони обстоювали,

вважаючи за істину, спростовано наукою. Багато з того, що вони стверджували, але не змогли довести, тепер доведено. Окремі питання ще чекають відповідей і доказів. Так було у філософії завжди. Найбільша заслуга Лока й Лейбніца полягає в тому, що вони поставили складну філософську проблему й своєю суперечкою намітили шляхи її рішення.

**Джордж Берклі** (1685-1753) – англійський філософ-ідеаліст. Його основна праця – «Трактат про принципи людського знання».

Основний принцип філософії Берклі: існувати – означає бути сприйнятим. Його перше слово – ідея, його останнє слово – Бог.

Джордж Байрон у своїй знаменитій поемі «Дон Жуан» згадав Джорджа Берклі: ««Матерія – лиш маячня порожня», – єпископ Берклі говорив колись».

Єпископ Берклі – справді переконаний противник матеріалізму, і то противник не бездарний. Він звернув увагу на суттєву прогалину в матеріалістичній філософії того часу. Ця прогалина пов'язана з психологією процесу пізнання. Берклі зробив низку важливих припущень – наприклад, вказав на вирішальну роль відчуттів у зв'язку людини із зовнішнім світом, – але використовував усе це проти матеріалізму.

Не існує – вважав Берклі – тілесної або матеріальної субстанції; джерелом ідей є Дух. Акт творіння полягає в тому, що Бог бажає, аби ті речі, які раніше були відомі тільки йому, тепер сприймали й інші душі.

Багато філософів не ставили питання так, як його ставив Берклі: «Бог – або матерія». Ісаак Ньютон, наприклад, переконано стверджував: і Бог, і Матерія.

## Дати й факти розвитку механіки

Цей матеріал можна переглянути, щоб скласти загальне враження, можна прочитати задля цікавості, можна перечитувати, щоб запам'яталися імена, дати й факти – але в кожному разі з ним варто ознайомитися для розвитку ерудиції!

Яку стратегію обрати – вирішуйте самі!

### Епоха Античності (VI ст. до н.е. – V ст. н.е.)

#### IV століття до н.е.

- Зародження елементів механіки. Розгляд прямолінійних і криволінійних рухів. Встановлення правила складання 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 (Аристарх Самоський).
- Перші спроби визначення відстані до Місяця й до Сонця (Аристарх Самоський).
- Архімед розробив наукові основи статички, ввів поняття про центр тяжіння й момент сил відносно прямої й площини, визначив центр тяжіння трикутника, дав строгу теорію важеля, сформулював правило складання 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, клина, гвинта й блока, встановив правило для важеля й блока, описав прилад, що є прообразом сучасної парової турбіни.
- Клавдій Птолемей надав завершену форму геоцентричній теорії Всесвіту (система світу Птолемея).

### Епоха Середньовіччя (VI-XIV ст.)

#### VI ст.

- Перша згадка про механічний годинник.

#### XI ст.

- Розкладання швидкості кинутого тіла на дві складові – паралельну й перпендикулярну до площини (Альхазен).
- Омар Хайям 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 рух і про шлях, пройдений за рівноприскореності 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 руху.

- 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.

### Епоха Відродження (XV-XVI ст.)

#### XV cm.

- Дослідження вільного падіння й руху тіла, кинутого горизонтально, вивчення зіткнення тіл, розширення поняття моменту сили, винахід механізмів для передачі й перетворення рухів – шарикопідшипник, ланцюгові й ремінні передачі тощо (Леонардо да Вінчі).

#### 1475 p.

- Леонардо да Вінчі висловив ідею про неможливість вічного двигуна.

#### XV cm.

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

#### 1543 p.

- 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 p.

- Галілео Галілей відкриває ізохронність коливань маятника.

#### 1584 p.

- Оpubліковано діалог Джордано Бруно «Про нескінченність, Всесвіт і світи», де висловлено ідею про нескінченність Всесвіту, про існування в ньому, окрім 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 p.

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

#### 1586 p.

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

щині, відкрито закон складання сил (паралелограм сил) і розкладання сили на дві складові, сформульовано для окремого випадку принцип можливих переміщень.

### Епоха становлення фізики як науки (XVII ст. – 80-ті р.р. XVII ст.)

#### 1604 p.

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

#### 1609 p.

- Вийшла в світ праця Йогана Кеплера «Нова астрономія», де вміщено перші два закони руху планет і висловлена думка, що тяжіння – властивість, притаманна всім небесним тілам.

#### 1619 p.

- Оpubлікований трактат Йогана Кеплера «Гармонія світу» що містить третій закон руху планет.

#### 1628 p.

- Бенедетто Кастеллі встановив закон оберненої пропорційності швидкості протікання рідини до площі поперечного перерізу трубки.

#### 1632 p.

- Вийшла праця Галілео Галілея «Діалог про дві основні системи світу» – Птолемеєву й Копернікову, де викладено принципи інерції й відносності.

#### 1638 p.

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

#### 1641 p.

- П'єр Гассенді провів дослід на підтвердження принципу відносності Галілея.
- Оpubліковано працю Еванджеліста Торрічеллі «Про рух вільно падаючих і кинутих тіл», 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 p.

- Вийшла в 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 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.

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

1660 р.

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

1665 – 66 р.р.

- Ісаак Ньютон вивів обернену пропорційну залежність сили тяжіння до квадрату відстані між тілами, що притягуються.

1669 р.

- Крістіан 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. Лейбніц, він-таки сформулював закон збереження «живих сил».

1673 р.

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

1678 р.

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

**Епоха класичної фізики (кінець XVII ст. – початок XX ст.)**1687 р.

- Вийшла в світ праця Ісаака Ньютона «Математичні принципи натуральної філософії», що містить основні поняття й аксіоматику механіки, зокрема три основні її закони (закони Ньютона) та закон унесвітнього тяжіння. Вихід у світ «Принципів» відкрив новий період у історії фізики, оскільки в них уперше було викладено завершену систему механіки, закони якої керують великою кількістю процесів у природі.

1699 р.

- Гільом Амонтон відкрив закон зовнішнього тертя твердих тіл.

1703 р.

- Вийшла в світ праця Крістіана Гюйгенса «Про відцентрову силу».

1746 р.

- Сформульовано закон збереження моменту кількості руху (Леонард Ейлер, Даниїл Бернуллі).

1748 р.

- Михайл Ломоносов сформулював положення, що матерія й рух не знищенні й нестворені.

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 Ейлер розробив аналітичну механіку рідин, вивів основні рівняння руху ідеальної рідини. Спільно з Даниїлом Бернуллі є творцем теоретичної гідродинаміки.

1796 р.

- Вийшла в світ праця Пера-Сімона Лапласа «Виклад системи світу», в якому міститься його гіпотеза утворення Сонячної системи.
- Ернст Хладні виміряв швидкість звуку в твердих тілах.

1798 р.

- Генрі Кавендіш за допомогою крутильних терезів виміряв тяжіння двох тіл, і цим підтвердив закон унесвітнього тяжіння Ньютона, а також обчислив густину Землі –  $5,18 \text{ г/см}^3$  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 стискання (коефіцієнт Пуассона).

1826 р.

- Жан-Віктор Понселе й незалежно Гаспар Гюстав Коріоліс запровадили поняття роботи як добутку сили на пройдений шлях.

1827 р.

- Жан Данієль Колладон і Шарль Франсуа Штурм провели дослід на Женевському озері, щоб визначити швидкість звуку в воді, отримали значення  $1435 \text{ м/с}$ .

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.

### Період сучасної фізики (з 1905 року)

1905 р.

- Альберт Ейнштейн (і, незалежно від Енштейна, Анрі Пуанкаре) створюють спеціальну теорію відносності, що визначила релятивістську межу застосовності класичної механіки Ньютона.

1927 р.

- Створено квантову механіку, визначено квантово-механічну межу застосовності класичної механіки.

## 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.

Природу теплоти пояснювали безперечним і очевидним, як здавалося, фактом: коли тіла 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 назвали флогістоном (теплородом) і вважали, що він не виникає й не зникає, а тільки перерозподіляється між тілами. Цієї гіпотези дотримувався спершу Галілео Галілей (про це він писав 1613 року). Багато учених поділяли його точку зору ще понад два з половиною століття.

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 у праці «Роздуми про причину теплоти й холоду» (1749) геніальний російський учений Михайло Ломоносов (1711-1765). Цікаво, що цей фізик, хімік, астроном, винахідник, митець і філолог у жовтні-грудні 1734 року вдосконалював свої знання в Києво-Могилянській академії. 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 частинами й сильними ударами, а якщо їх припинити, то теплота зменшується й створений вогонь врешті-решт гасне».

На жаль, праці Ломоносова лишилися невідомими в Європі, й навіть у самій Росії в XIX столітті про нього згадували переважно як про поета – автора од і творця російської силабо-тонічної системи віршування.

Ще довго зрозумілішою й наочнішою здавалася модель флогістону, згідно з якою теплота подібно до рідини перетікала з одного тіла в інше. Теорія теплового двигуна, яку створив у XIX столітті Саді Карно, ґрунтувалася саме на моделі флогістону. На підставі цієї моделі було запроваджено й одиницю тепла – калорію (1 калорія – кількість тепла, необхідна для нагрівання 1 г води на 1 градус Цельсія за нормального тиску й кімнатної температури). Пізніше з'ясувалося, що різні речовини мають різні теплоємності – й модель флогістону дозволяла визначити температуру суміші різних речовин з різними початковими температурами й різними теплоємностями.

Теорія Карно така фундаментальна, що про неї варто сказати більше, і ми це зробимо трохи згодом. А зараз зазначмо, що модель флогістону не витримала випробування часом. Перше серйозне заперечення проти неї пролунало, коли було відкрито приховану теплоту плавлення льоду. Тепло, підведене до льоду за 0 градусів Цельсія, не приводить до підвищення температури. Лід просто тане. Виявилось, що для перетворення 1 г льоду на воду без зміни температури потрібно 80 калорій.

Інші суттєві суперечності моделі флогістону виявив Бенджамен Томсон (1753-1814), котрий за свої дослідження отримав 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 заточені? Чому свердлінням можна було добути практично необмежену кількість тепла? Все це ніяк не вкладалось в просту модель перетікання флогістону. Румфорд схилився до того, щоб пов'язати природу теплоти з рухом. Його підтримали Деві та Юнг, вони посилялися на коливання й обертання молекул у будь-яких речовинах, і теплоту пов'язували з інтенсивністю цих рухів.

Особливо вишуканий дослід поставив Гемфрі Деві (1778-1829), відомий роботами в багатьох галузях фізики (зокрема, відкриттям дуги електричного розряду). Він вмістив 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 один. 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, флогістон 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 кілограм-метри виявилися рівними 1000 ка-

лорій (нині встановлене співвідношення: 1 калорія = 4,1868 джоуля). Трохи раніше цей кількісний зв'язок, але з меншою точністю (365 кгм/ккал), обчислив Роберт Маєр, використавши для цього результат дослідів Гей-Люссака з розширення газів у порожнечі.

Тільки після цього модель флогістону остаточно стала гальмом для розвитку теорії теплових явищ, і досить швидко її відкинули. Все це прискорило розвиток кінетичної теорії тепла. Суттєвий внесок у створення цієї теорії зробив Джеймс Кларк Максвелл.

Задля справедливості назвимо й інших корифеїв, які сприяли становленню сучасної теорії теплових явищ. Це Бенуа Клапейрон, Генріх Гельмгольц, Рудольф Клаузіус, Людвіг Больцман, Макс Планк та багато інших учених, чий імена відображено на науково-історичній хронограмі.

## «Місток між механікою і теплотою»

Може здатися, що вивчаючи теплові явища, ми досліджуємо абсолютно нову й досить «чужу» для механіки область. Слово «теплота» має подвійний зміст. З одного боку, воно означає тепловий стан тіла й вказує 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, а в другому – кількості теплоти. Але довгий час обидва ці поняття залишалися в певному сенсі загадовими, таємничими, а тому в пізнавальному плані привабливими.

Початок розкриття цієї «таємниці» пов'язаний із дослідом англійського ботаніка Роберта Броуна (1773-1858), котрий уперше 1827 року спостерігав у мікроскоп дивну, захопливу картину. Крихітні частинки, виділені з рослинних клітин, безперервно й хаотично рухалися по поверхні рідини! За вищої температури рух частинок ставав інтенсивнішим, а за зниження температури частинки починали «заспокоюватися». Ось він – зв'язок, або ж «місток» між механікою й теплотою! Рух молекул взаємозв'язаний із температурою, і тепла енергія це не що інше, як сукупність кінетичних енергій усіх частинок.

Остаточно роз'яснив цю проблему австрійський фізик Людвіг Больцман (1844-1906). У кінці XIX століття йому довелося захищати молекулярно-кінетичну теорію теплоти в запеклих дискусіях із 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 тому ж і річ, що в мікроскопі можна було роздивитися тільки досить великі «броунівські частинки», молекули залишалися невидимими, а тому – гіпотетичними.

Але перш ніж учені заглибилися у вивчення питань, пов'язаних із рухом окремих молекул, на макрорівні досить успішно досліджували експериментально теплові явища, доступні безпосереднім спостереженням. Було відкрито так звані газові закони, названі іменами відкривачів. Це англійський вчений Роберт Бойль, французькі учені Едм Маріотт, Жозеф Гей-Люссак, Жак Шарль, Бенуа Клапейрон.

### Роберт Бойль (1627–1691)



Роберт Бойль

Роберт Бойль був тринадцятою (передостанньою) дитиною, що з'явилася на світ у одному з ірландських маєтків батька, котрий примножував свої угіддя захопленням чужих земель. Королева Єлизавета I дозволяла своїм вельможам збагачуватися таким чином у загарбаній Ірландії. Хлопець не вчився в школі, натомість здобув прекрасну домашню освіту й, маючи вісім років став студентом Ітонського коледжу. Після закінчення коледжу дванадцятирічний Роберт разом із братом вирушив у подорож Європою. Але це була не розважальна подорож. Протягом шести років він продовжував освіту в Швейцарії та Італії. Вісімнадцятирічний Роберт Бойль повернувся до Англії вже після смерті батька, котрий залишив йому велику спадщину. На одному з поверхів батьківського замку розташовувалися спальня, кабінет, простора зала й багата бібліотека. Щотижня з Лондона доставляли скрині з новими книгами. Роберт Бойль буквально «ковтав» їх, міг просидіти за якою-небудь книгою з раннього ранку до пізнього вечора.

Деякі споруди батьківського маєтку за вказівкою Роберта Бойля переобладнали під наукові лабораторії. 1645 року хлопець починає проводити власні експериментальні дослідження з фізики, хімії й агрохімії. Бойль любив працювати одночасно над кількома проблемами. Як правило, 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.

Маючи двадцять шість років, Роберт Бойль, котрого вже сміливо можна було назвати вченим, перебрався до Оксфорда, і там продовжив свої дослідження, мета яких полягала в систематизації речовин відповідно до їхніх властивостей.

Разом із молодим асистентом Робертом Гуком, Роберт Бойль експериментально досліджував властивості газів і розвивав корпускулярну теорію.

Ми вже згадували: ще учні Галілея Вівіані й Торрічеллі у 1640-их роках відкрили атмосферний тиск. Німецький аматор наук, бургомістр міста Магдебурга Отто фон Геріке (1602-1686) за допомоги примітивної помпи (вона складалася з поршня в циліндрі та двох засувки на отворах, крізь які повітря викачувалося й потім випускалося в зовнішню атмосферу; їх по черзі перекривали вручну) викачав повітря з двох щільно стулених півкуль із ретельно шліфованими краями. Не урівноважений зсередини атмосферний тиск стулив ці «магдебурзькі півкулі» так, що їх насилу розірвали 2 запряги по 8 коней у кожному. Цей дослід, поставлений 1654 року в присутності членів рейхстагу в Регенсбурзі, справив величезне враження на всю тодішню освічену Європу.

Бойль, удосконалюючи ідею Геріке, винайшов оригінальну конструкцію повітряного насоса, перший зразок якого було збудовано з допомогою Гука. Видаляючи повітря з посудини за допомогою свого насоса, 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».

Політична криза в Англії, пов'язана з жорстокою диктатурою Олівера Кромвеля, котрому активно протистояли прихильники монархії, наклала відбиток на всі сфери життя країни. Роберт Бойль повертається в свій 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).

Після відновлення королівської влади Роберт Бойль повернувся до Оксфорда. Він досить часто відвідував Лондон, де спілкувався з колегами-ученими.

У ці роки Бойль робить своє найголовніше відкриття: він експериментально встановлює, що об'єм газу обернено пропорційний його тиску за постійної температури (1662). Для цього він використав U-подібний барометр, короткий відросток якого було запаєно, а довший лишився відкритим. Бойль наливав у барометр ртуть так, щоб її рівень у обох колінах спершу був однаковий. Потім 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 запаєному відростку.

Окрім того, Бойль встановив, що за зміни тиску можуть випаровуватися навіть ті речовини, які в звичайних умовах не випаровуються (лід); вперше описав розширення тіл за зміни температури (розрив залізної труби, наповненої водою, коли ця вода замерзає); показав, що за зменшення тиску повітря вода може кипіти за значно нижчої температури. Цікаво, що аналогічний результат отримав і Отто фон Геріке. Викачуючи повітря з бочки з водою, він побачив, що вода раптом сама собою закипіла вже за кімнатної температури!

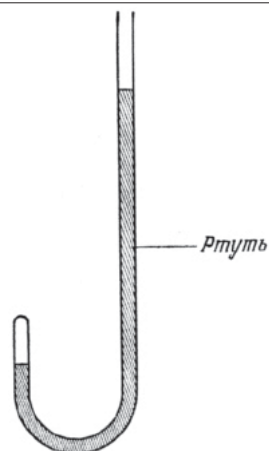


Рис. 39. Прилад, за допомогою якого Бойль встановив зв'язок між тиском і об'ємом газу.

Уже коли був відомим ученим, Роберт Бойль виступив з ініціативою організації Товариства учених, яке згодом отримало назву «Лондонське Королівське товариство», і став одним із його засновників (разом з Джоном Локком, Ісааком Ньютоном, Джоном Воллісом, іншими славетними сучасниками). У 1680 році Бойля було обрано президентом товариства, але він від цієї честі відмовився, щоб не складати обов'язкової присяги, що суперечила його релігійним переконанням.

Роберт Бойль у zenіті слави. Його запрошують у королівський палац, «сильні світу цього» мають за честь поговорити зі світилом англійської науки. Його наділяють усілякими почестями й матеріальними винагородами, які він скеровує на розвиток науки. Інколи Бойль приїздить до Кембриджа, щоб поспілкуватися з Ньютоном.

Наприкінці життя його цікавили переважно філософські проблеми. Бойлю було визнано найбільшим теологом свого часу. Щоб читати біблійні тексти в оригіналах, Бойль вивчив грецьку та старовірську мови. Він також заснував щорічні наукові читання з теології та історії релігії.

Роберт Бойль мав незаперечний літературний хист. Він написав кілька віршів і трактат на теми моралі й моральності.

Подіювали, що Бойль боїться смерті лише з однієї причини: його страхає перспектива нового життя, де все вже відомо й не треба експериментувати та досліджувати!

Автора фундаментальних відкриттів і одного з перших у світі організаторів науки поховано у Вестмінстерському абатстві поруч із видатними людьми Англії.

Роберт Бойль заповідав 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.

Через п'ятнадцять років після встановлення закону Бойля ( $PV = \text{const}$ ) цей самий закон незалежно відкрив у Франції Едм Маріотт (1620?-1684), тому тепер його називають закон Бойля-Маріотта.



Рис. 40. Дослід Маріотта з розширенням повітря.

### Жозеф Луї Гей-Люссак (1778-1850)

Найважливішою властивістю всіх газів є сильна зміна їх 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 газом за 0 градусів за Цельсієм, відповідно до закону

$$V = \frac{V_0}{273}(273 + t).$$

Тут  $t$  – температура за Цельсієм. Відповідно до закону, якщо зменшення температури на 1 градус, починаючи від 0 за шкалою Цельсія, станеться 273 рази, то від первинного об'єму газу «нічого не лишиться». Насправді цього, звичайно ж, не відбувається, оскільки всі реальні гази за певної (достатньо низької) температури перетворюються на рідини.



Жозеф Гей-Люссак

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).

У свої 22 роки Гей-Люссак закінчив знамениту Політехнічну школу, а в 24 він уже викладав у цій школі. Ученого обрано членом Паризької Академії наук, він працював професором фізики Паризького університету. 1804 року він двічі здійснив польоти на повітряних кулях – звісно не задля розваги. Під час польотів учений робив наукові дослідження, вимірюючи температуру й вологість повітря. Так він уперше з'ясував, що на висоті 7000 м температура становить – 9,5 (тоді як у Парижі термометр показував + 27,5 у затінку!). 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).

1807 року Гей-Люссак встановив, що температура повітря знижується за адіабатичного розширення й підвищується за адіабатичного стиснення (без теплообміну з навколишнім середовищем).

Гей-Люссак винайшов низку приладів, зокрема гідрометр, спиртометр, барометр, насос, різні термометри. 1829 року його було обрано членом Петербурзької Академії наук.

Нині закон Гей-Люссака найчастіше записують так:

$$V/T = \text{const}, \text{ при } P = \text{const}.$$

## Роздуми з приводу відкритих газових законів

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. Жак Шарль (1746-1823) – французький учений, член Паризької Академії наук, професор експериментальної фізики в Консерваторії мистецтв і ремесел у Парижі.

Англієць Бойль (і його співробітники), французи Маріотт, Гей-Люссак і Шарль вивчали фізичні явища лише ззовні, вимірюючи тиск, об'єм і температуру досить грубими приладами, не вдаючись до понять атомів та молекул.

кул. Таким чином, учення про теплоту, як і вчення про механічні явища, спочатку виникло з досвіду. Цей досвід був строкатою сумішшю спостережень, експериментів і повсякденного сприйняття явищ природи. Ще й сьогодні багато основних понять фізики мають яскраво виражений антропоморфний (пов'язаний саме з життям людини) характер.

Були відомі учені, котрі вважали, що «вільний розум використовує тільки такі правила мислення, в яких узагальнено повсякденне тілесне сприйняття» (професор фізики з Відня Ернст Мах (1838-1916)). Таким чином, Мах вважав, 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?»

Математичне узагальнення всіх трьох експериментальних газових законів вперше 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:

$$PV/T = \text{const}.$$

За 40 років видатний російський вчений Дмитро Менделєєв (1834-1907) обґрунтував необхідність враховувати в явному вигляді масу газу. Рівняння Клапейрона-Менделєєва набуло такого вигляду:

$$PV = \left(\frac{m}{M}\right)RT,$$

де  $M$  – молярна маса газу,  $R$  – універсальна газова стала. Його записують також як

$$PV = NkT$$

де  $N$  – число частинок газу,  $k$  – стала Больцмана.

Математичне узагальнення експериментальних законів не можна вважати за їх теоретичне обґрунтування. Ці закони породжували багато питань, наприклад: чому ці закони працюють для всіх газів, незалежно від їх хімічного складу? Яка фізична природа тиску газу та його температури? Всі ці питання виникали на тлі браку прямих експериментальних доказів реальності існування атомів. Ставало дедалі зрозумілішим, що відповіді на ці запитання можна отримати тільки на основі уявлень про внутрішню будову речовини, зокрема й газів.

Теорія газів, створена на основі атомістичної гіпотези, отримала назву молекулярно-кінетичної теорії. В основі цієї теорії 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 ма-

лий. Відтак властивості газів (на відміну від твердих тіл і рідин) 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 створення цієї теорії доклалися багато вчених, але найсуттєвіший внесок зробили німецький фізик Рудольф Клаузіус, англійський фізик Джеймс Максвелл і австрійський фізик Людвіг Больцман.

### Рудольф Клаузіус (1822-1888)



*Рудольф Клаузіус* Задля справедливості слід зазначити, що першим ученим, котрий застосував атомістичні уявлення до розрахунку властивостей газів, був швейцарський учений Даниїл Бернуллі (1700-1782). 1738 року він виконав теоретичний розрахунок тиску газу й теоретично вивів закон Бойля-Маріотта. 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 Амадео Авогадро (1776-1856), котрий усе життя прожив і пропрацював у рідному Турині. 1811 року він відкрив закон, згідно з яким у рівних об'ємах різних газів за однакового тиску й температури міститься однакова кількість молекул. На честь Авогадро названо число Авогадро  $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$  – кількість структурних елементів (атомів, молекул, іонів) у одній грам-молекулі речовини. Нині значення числа Авогадро прив'язують до кількості атомів вуглецю, які містяться в його 12 г.

Більш ніж за 100 років після Бернуллі 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 наштотувала 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 німецький фізик Рудольф Клаузіус опублікував велику роботу з кінетичної теорії газів. Він теоретично вивів рівняння, нині відоме як основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії. Згідно з ним, ідеальний газ, що складається з  $N$  твердих маленьких кульок масою  $m$  кожна, вміщений у по-

судину 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.

Клаузіус уперше обчислив середні швидкості молекул газу. Наприклад, для швидкості молекул кисню за нормальних умов він отримав  $v = 461 \text{ м/с}$ , а для молекул водню –  $v = 1844 \text{ м/с}$ . 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. Для повітря за атмосферного тиску ця величина дорівнює 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.

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. Це був час великих теоретичних «фантазій» у фізиці!

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.

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 (перше начало термодинаміки), а також дав математичне вираження другого начала термодинаміки для оборотних і необоротних процесів.

Окремо зазначимо, що, розвиваючи свої термодинамічні ідеї, Клаузіус ввів нове фундаментальне поняття – поняття ентропії (1865). Це поняття для сучасної науки й наукового світогляду є надзвичайно важливим, і ми пізніше розглянемо його детальніше. 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. Йому опонував Больцман, спираючись на статистичний характер другого начала.

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!

Використовуючи ці дані, австрійський вчений Йоган Лошмідт (1821-1895) 1865 року вперше обчислив розміри молекул повітря, і їх 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 їх зіткнення.

Неймовірно малі й неймовірно великі числа стали конкретними і цілком визначеними. Дивовижні наслідки випливали з факту величини числа Лошмідта ( $2,7 \cdot 10^{25}$  молекул/м<sup>3</sup>). Перед наукою постала нова серйозна проблема. Адже наукова картина світу й світогляд ґрунтувалися на теорії Ньютона. А це означає, що необхідно скласти 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 електронно-обчислювальні машини. До того ж і поставити це 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 дійсній картині зіткнень молекул, а отже, і обміну енергіями. Але введення однієї середньої швидкості «приховує» принципову відмінність між класичною механікою, що описує рухи нейтральних частинок, і механікою ансамблів цих частинок. Для подальшого розвитку молекулярно-кінетичної теорії «потрібен був» Максвелл.

### Джеймс Клерк Максвелл (1831-1879)



Джеймс Максвелл

Джеймс Максвелл народився в столиці незалежної колишньої Шотландії Единбурзі, в родині шотландського лендлорда. Коли виріс, Джеймс не раз повторював, що добрі й мудрі батьки – це один із найбільших успіхів, про які можна мріяти; з цим йому справді пощастило. Його батько-адвокат цікавився багатьма речами: подорожував, займався спортом, майстрував, конструював машини, ставив фізичні досліди, захоплювався технікою, писав наукові статті.

Але Джеймсу Максвеллу поталанило й у іншому: що він народився в період промислового розквіту Бри-

танії, коли винахідництво й наукові знання почали високо цінувати. Втім, у школі надзвичайно допитливому хлопчикові не сподобалося. Часто отримував посередні оцінки, особливо з арифметики (і це – майбутній геніальний математик!). 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 Трініті-коледж, де колись вчився 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. Особливо значущими є заслуги Максвелла в створенні теорії електромагнітного поля, але він зробив суттєвий внесок і в побудову молекулярно-кінетичної теорії.

Максвел 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 «по групах» 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 залишається незмінною.

Відтак учений вивів так званий розподіл Максвелла: кількість молекул, швидкості яких лежать у інтервалі між  $v$  і  $v+dv$ , залежить від кількості молекул у одиниці об'єму, їхньої маси й температури:

$$dn_v = \frac{N}{V} \left( \frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} e^{-mv^2/2kT} dv_x dv_y dv_z$$

Звідси видно: шанси знайти молекулу з дуже великою швидкістю, що суттєво перевищує добуток сталої Больцмана на температуру, малі. 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.

Нові методи непросто 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, взагалі не можна застосовувати в науці про явища природи. Світогляд більшості фізиків середини XIX 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 Людвіг Больцман. Але перш ніж віддати належне цьому геніальному вченому, приділимо увагу основоположникові теорії теплових явищ – Саді Карно.

### Саді Карно (1796-1832)



*Саді Карно*

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 ученого, державного діяча, учасника Великої французької революції Саді Карно закінчив у Парижі Політехнічну школу, після чого служив у інженерних військах у чині капітана. Перебуваючи на військовій службі, дуже багато часу приділяв науковій роботі, результатом якої стала опублікована книга.

Карно вперше показав, що корисну роботу можна отримати лише в тому випадку, коли тепло переходить від нагрітого тіла до холоднішого. Жоден із помітних учених відразу не звернув уваги на, власне, геніальну думку інженера, викладену в таких словах: «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».

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 флогістону».

З цієї цитати випливає: Карно дотримувався гіпотези про те, що тепло – це особлива матерія (флогістон). Проте модель флогістону 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 за зникнення 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».

Тільки за 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 за 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 начала 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.

### Людвіг Больцман (1844–1906)



*Людвіг Больцман*

З блискучої когорти видатних фізиків ми виокремили Саді Карно як основоположника фізичної теорії термодинаміки, й Людвіга Больцмана. Адже саме Больцман записав і обґрунтував формулу, якій справді «вміщує» цілий світ. Але щоб гідно оцінити щось у науці, треба це «щось» перш за все зрозуміти.

Чарівлива гармонія віршованих рядків, титанічна сила музичних творінь звернені безпосередньо до наших відчуттів і знаходять емоційний відгук у душах всіх, хто ними цікавиться. А от щоб оцінити інтелектуальну потужність наукових ідей і теорій, потрібен певний рівень наукових знань – та не тільки! Адже багатьом ученим, котрі в свій час не змогли зрозуміти й належно оцінити наукові досягнення Больцмана, ніяк не можна закинути брак наукових знань. Проте за життя Больцмана його основоположні новаторські ідеї та праці не здобули належного розуміння і визнання, – навіть попри те, що він зі всією принциповістю й науковою сумлінністю відстоював ці ідеї, маючи на озброєнні завзяття прекрасного полеміста й стійкість перекonanого борця.

Читаючи праці Больцмана, важко не думати про автора написаного. Перед нами жвава й дотепна людина, що полонить нас не лише глибиною думки, але й тонким гумором. Це прекрасний педагог, який чітко і ясно викладає найважчі наукові проблеми. Гострі дискусії він провадить у душі високого благородства й пошани до своїх опонентів. Усебічно освічена людина, знавець лі-

тератури, шанувальник Гете й особливо Шіллера, добрий піаніст, котрий тонко відчував музику, Больцман і в науці над усе цінує естетичні начала, надаючи великого значення красі й витонченості фізичних теорій. Наука й мистецтво зливалися для нього в єдине ціле загальнолюдської культури.

Народився Людвіг у Відні 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. Все, чим він займався, робив серйозно і з великим захопленням. Крізь усе життя проніс Больцман захоплене, поетичне ставлення до незбагненої гармонії, що панує в природі.

У Людвіга була прекрасна пам'ять, він добре вчився. Міг напам'ять цитувати великі уривки з творів Гомера, Гете й особливо з Шіллера:

Вчених з істини свічада  
Радість успіхом віта,  
До чеснот провадить радо,  
Хоч тропа до них крута;  
На ясній вершині віри  
Піднімає хоругов,  
В день воскресний на псалтирі  
Славить тих, хто смерть зборов.  
(переклад Миколи Лукаша)

Великий поет – романтик бачив шлях до вирішення проблем людства в створенні людиною самої себе, в естетичному вихованні людей. Ідеали Шіллера стали основоположними для життєвої позиції Больцмана й суттєво вплинули на його світогляд. «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.

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 учні: Стефан, Лошмідт, Доплер. Нагадаймо, що до фундаментальної фізики навіки увійшли поняття: «закон Стефана-Больцмана», «число Лошмідта», «ефект Доплера». Больцман зауважує загострене «почуття нового» в Стефана, «велич душі» в Лошмідта, під впливом яких і відбувалося його наукове становлення. Починаючи з 1865 року, наукові роботи Больцмана, 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 ж складного фізичного поняття температури.

## Температура

Термометри вигадано й сконструйовано задовго до того, як учені зрозуміли, що ж саме вони вимірюють. Річ у тому, що температура пов'язана з вельми невизначеними 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. Це й сприяло вкоріненню ілюзорної думки про те, що поняття температури просте й зрозуміле.

Історія створення термометра цікава й повчальна. 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. 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 Фаренгейт (1686-1736), складув із Голландії. Це був спиртовий термометр. Найнижчу температуру зими Фаренгейт імітував сумішшю льоду, кухонної солі й нашатирю (температур «нижче нуля» винахідник взагалі прагнув уникнути). Другу точку він отримав, занурюючи термометр у суміш льоду й води. Відстань між цими двома точками Фаренгейт 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 Фаренгейта). Існує просте співвідношення для перетворення градусів Фаренгейта на градуси Цельсія:

$$t_C = \frac{5}{9}(t_F - 32).$$

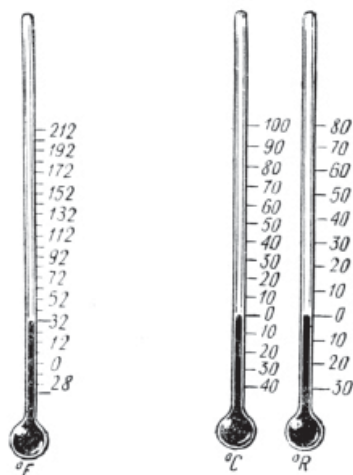


Рис. 46. Термометри Цельсія, Фаренгейта і Реомюра.

Цікаво, що з нього випливає:  $(-40)_C = (-40)_F$ .

У Франції з 1730 року набула поширення шкала Рене Антуана Реомюра (1683-1757), 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.

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 тепла. За допомогою термометра можна було легко порівнювати температуру різних тіл, але неможливо було порівняти величини градуса в різних частинах шкали.

Залишалося недоведеним, що один градус поблизу нуля має ту ж величину, 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.

Спосіб визначення температури за допомогою термометра, покази якого не залежали б від термометричної речовини, запропонував Рудольф Клаузіус, ґрунтуючись на вченні Саді Карно. Це було 1848 року. Цього ж року наукові ідеї Карно належно оцінив 24-річний Вільям Томсон (1824-1907), котрий народився в рік публікації знаменитої роботи Карно. Томсон (згодом лорд Кельвін) 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. Теорія Карно вперше перекидала місток між температурою та механічними величинами. Карно довів лише одну теорему, але його формула

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

де  $Q_1$  і  $Q_2$  – тепло, яке робоче тіло отримує від нагрівача і яке передає холодильнику,  $T_1$  і  $T_2$  – температури нагрівача й холодильника, містить вельми глибоку наукову інформацію.

Після Карно поняття температури набуло точного наукового змісту. Формула Карно дозволяла визначати відношення температур через відношення цілком вимірних 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. За цією шкалою, лід починає плавитися, коли температура за шкалою Цельсія становить 0,01 С, а всі три фази (пара – лід – вода) перебувають у рівновазі. Точку 0,01 С (легко відтворювану в лабораторних умовах) беруть за еталонну, а за термодинамічною шкалою вона виявляється рівною 273,16 К (градусів Кельвіна). Тоді звичайний нуль Цельсія відповідає температурі 273,15 К.

Після роботи 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 іншого боку, вона входила в рівняння стану ідеального газу, й треба було зрозуміти, чому добуток тиску газу на його об'єм пропорційний температурі.

Розв'язок проблеми формально лежав поруч, оскільки зміна температури була пов'язана зі зміною об'єму, тобто – з роботою газу, а отже – з рухом. Однак строге теоретичне вирішення проблеми ознаменовано великими труднощами. Над ним працювали послідовно Ватерсон, Кроніг, Джоуль, Клапейрон, Клаузіус, Максвелл, Больцман і, нарешті, Планк. На основі формули тиску

ідеального газу й рівняння Клапейрона було отримано досить просту формулу для середньої енергії однієї молекули, що має глибокий фізичний зміст:

$$E = \frac{3}{2} kT$$

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 кожен молекулу. Це частковий випадок загального закону рівнорозподілу за енергіями.

Цікаво зазначити, що стали Больцмана  $k = 1,380662 \cdot 10^{-23}$  Дж/К ввів «батько квантової фізики» Макс Планк. Стала Больцмана переводить градуси Кельвіна в джоулі, тобто встановлює відповідність між температурними й енергетичними одиницями.

Оскільки кінетичні енергії молекул у кожен визначений момент часу різні, то виникає питання – скільки молекул має ту чи іншу енергію й від чого це залежить. Цю задачу свого часу 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 великим числом ступенів свободи. Саме ці системи «забувають» про своє минуле, й розподіл молекул за енергіями в кінцевому підсумку перетворюється на розподіл Максвелла. І для будь-якої температури цей розподіл строго визначений!

Температура виступає в новій ролі. Вона характеризує відхилення енергії молекул від її середнього значення. Тож, як бачимо, температура – це досить складне фізичне поняття.

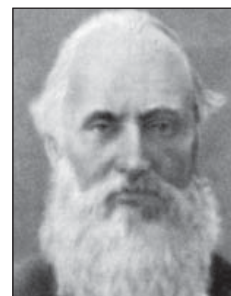
Чому ж сталося так, що це складне поняття здавна відоме – а проте людство не відчувало «дискомфорту нерозуміння»? Відповідь – у відносній простоті порівняння двох температур. Адже емпірично порівняно легко визначити, яке тіло має вищу температуру (звісно, в порівняно вузькому діапазоні температур, з якими ми стикаємося в навколишній дійсності).

А ось способу порівняння ентропії двох різних систем не існує! У нас немає способів вимірювання ентропії на зразок тих, які існують для вимірювання тиску, температури й об'єму. Тому й нелегко було здогадатися, що поруч із поняттям температури існує пов'язане з ним інше поняття, що встановлює зв'язок між фізичними величинами температури й кількості теплоти. Зміна цієї величини (ентропії), помножена на температуру, визначає кількість теплоти, яку отримало чи віддало тіло:

$$T \Delta S = \Delta Q.$$

Ми вже згадували, що формально поняття ентропії математично запровадив Клаузіус, і воно довгий час вважалося незрозумілим – через нерозуміння його глибокого фізичного змісту.

### Вільям Томсон (лорд Кельвін) (1824–1907)



Вільям Томсон

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, влаштувалися в Глазго. Батько – професор математики в університеті – був добрим духовним наставником для Вільяма.

У Шотландії існувала традиція вступати до університету в шістнадцятилітньому віці, але для Вільяма Томсона зробили виняток – його прийняли, коли йому виповнилося десять років. За якийсь час молодий студент дістав можливість перейти в Кембриджський університет, що був провідним науковим центром Англії.

Рання інтелектуальна зрілість і широка освіта не гарантували самі по собі доброчесної поведінки Вільяма Томсона в студентському віці. Тому його батько своїми листами завжди прагнув настановити сина. Ось приклад батьківських повчань: «Пам'ятай – ти молодий, будь обережний, не збийся зі шляху. Будь-який помилковий крок, погана звичка, схильність можуть зіпсувати тобі все життя. Частіше аналізуй свою поведінку й набирайся розуму на майбутнє». Син не розчаровував батька й вів доброчесний спосіб життя. Заняття науками поєднувалися зі спортивними захопленнями. Вільям Томсон став першокласним веслярем, це допомагало йому в навчанні значно більше, ніж звичайні прогулянки. Він був 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.

Величезні заслуги Томсона, пов'язані з успішним прокладенням трансатлантичного телеграфного кабелю, який у 1860-их роках уперше з'єднав Європу з Америкою, гідно оцінив муніципалітет Глазго – вченого обрано почесним громадянином міста. Тоді ж він отримав від королеви рицарське звання, тож у тридцять чотири роки його стали називати «сером». А перше повідомлення, яке передали кабелем між континентами, було «Слава Богу на небесах і мир на землі, й добрі побажання всім людям!»

Молодому професорові Вільяму Томсону лише двадцять два роки, а його обирають завідувачем кафедри фізики в університеті Глазго. Рідкісний у історії науки випадок – надзвичайно плідна науково-педагогічна діяльність професора фізики Вільяма Томсона на одній кафедрі тривала протягом п'ятдесяти трьох років! Університет віддавав належне заслугам професора – обрав його своїм президентом, а королева Вікторія вшанувала його титулом лорда Кельвіна.

Сер Вільям Томсон, лорд Кельвін 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, і цю статтю було опубліковано в «Працях Кембриджського математичного товариства».

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.

Розгадка природи тепла й запровадження абсолютної шкали температур – наріжні камені науки термодинаміки, у яку лорд Кельвін зробив відчутний внесок. На його честь названо абсолютну шкалу температур – шкала Кельвіна, а також одиницю температури – один градус Кельвіна, або ж просто один Кельвін (1 К).

Вільям Томсон логічно дійшов висновку, що має існувати нижня межа ступеню охолодження тіл, тобто універсальний і природний нуль температури. Нині кожен, хто має базову загальну освіту, може пояснити це таким чином. Якщо тіло дуже гаряче, то його молекули (атоми) мають досить високу енергію. Наскільки нам відомо, 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 К). За шкалою Цельсія, природний, абсолютний нуль температури складає  $-273,15^{\circ}\text{C}$ . Відповідно, температура плавлення (танення) льоду за нормальних фізичних умов становитиме  $273,15\text{ K}$  (0 C).

Учений 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.

Вільям Томсон (лорд Кельвін), як і його великий співвітчизник Ісаак Ньютон, вважав, що тільки через пізнання природи можна прийти до віри в Бога.

## Закон збереження й перетворення енергії:

### Роберт Маєр (1814-1878)

Часткові випадки закону збереження й перетворення енергії розглядали багато вчених, починаючи з сімнадцятого століття.



Роберт Маєр

У середині XIX століття було відкрито закон збереження й перетворення енергії, що спрацьовує для всіх фізичних явищ, а не тільки для механічних. До відкриття цього закону причетні багато дослідників, проте найбільші заслуги в цьому фундаментальному відкритті належить трьом видатним ученим – Роберту Маєру, Герману Гельмгольцу та Джеймсу Прескотту Джоулю.

Роберт Маєр – німецький лікар, у 1840-41 роках він узяв участь у плаванні на острів Яву. Він помітив, що колір венозної крові матросів у тропіках стає значно світлішим, ніж у північних широтах. Ця зміна кольору крові привела його до думки, що існує зв'язок між споживанням речовини й утворенням тепла. Маєр встановив, що кількість окислюваних продуктів у організмі людини зростає зі збільшенням виконуваної роботи. Все це сприяло виникненню припущення, що теплота й механічна робота здатні взаємоперетворюватися (1840). Від розгляду енергетичних процесів у живому організмі Роберт Маєр перейшов до фізичних процесів, у кожному випадку встановлюючи факт збереження енергії за її перетворення. Ось одне з його міркувань: «Один кубічний сантиметр ( $1\text{ cm}^3$ ) атмосферного повітря за  $0^{\circ}\text{C}$  і тиску 0,76 м (ртутного стовпчика) важить 0,001322 г; після нагрівання за постійного тиску на  $1^{\circ}\text{C}$  він розширюється на  $\frac{1}{273}$  частину свого об'єму. Водночас він піднімає стовпчик ртуті заввишки 76 см з основою  $1\text{ cm}^2$  на висоту  $\frac{1}{273}$  см. Вага такого стовпчика – 1033 г. Питома теплоємність атмосферного повітря за постійного тиску дорівнює 0,267 ккал/кг-град. Отже, кількість тепла, що його приймає наш  $1\text{ cm}^3$  повітря для підвищення температури на 1 C, –  $0,0013 \times 0,267 = 0,000347$  ккал. Кількості теплоти, яке повітря приймає за постійного об'єму й постійного тиску, співвідносяться як  $\frac{1}{1,421}$ . Отже для нагрівання  $1\text{ cm}^3$  повітря за постійного об'єму потрібна кількість тепло-

ти  $\frac{0,000347}{1,421} = 0,000244$  ккал. Різниця  $0,000347 - 0,000244 = 0,000103$  ккал – це

кількість теплоти, потрібна для підняття вантажу вагою 1033 г на висоту

$$h = \frac{1}{273} \text{ см} \gg.$$

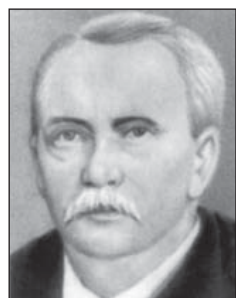
Проте видатне відкриття Роберта Маєра не здобуло загального визнання. Свою роботу «Органічний рух у його зв'язку з обміном речовин» він опублікував 1845 року окремою брошурою на власні гроші, і тривалий час вона залишалася майже не відомою. Лише у 1850–60-х роках пріоритет Маєра у відкритті закону збереження й перетворення енергії було визнано.

Маєр розглядав шість форм енергії, що перетворюються одна на одну: енергію падіння тіл (потенціальну енергію), кінетичну енергію, теплоту, маг-

нетизм, 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.

Таким чином, необхідно наголосити, що саме Роберт Маєр сформулював закон збереження й взаємоперетворення енергії в найзагальнішій формі та вказав на його значущість в усіх явищах природи.

### Герман Гельмгольц (1812-1894)



Герман 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 (Німеччина). 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 займається в домашній фізичній лабораторії відомого фізика й хіміка Густава Магнуса (1802-1870).

Домашня фізична лабораторія стає «розсадником» фізиків-експериментаторів. Згодом Герман Гельмгольц переносить усе устаткування цієї фізичної лабораторії в Берлінський університет, де фізична лабораторія перетворюється на світовий науковий центр.

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: силу 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 вихідні 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». Рівність робіт центральних сил за переміщення

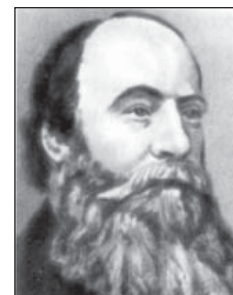
тіл із однієї точки в іншу й назад він пояснив незмінністю суми потенціальної енергії й кінетичних енергій («живих сил») у системі, на яку не діють зовнішні сили. У такій загальній формі Гельмгольц сформулював принцип «збереження сили», або, в сучасних термінах, закон збереження енергії.

1871 року Гельмгольц створює фізичний інститут, у який приїздили вчитися й працювати фізики всього світу. 1883 року 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 Майєра й Джоуля, але наголошував, що з роботою Майєра не був знайомий, а роботи Джоуля знав недостатньо.

Принцип Майєра «ні з чого нічого не буває» Герман Гельмгольц конкретизує: «Неможливо за існуванні будь-якої довільної комбінації тіл отримувати безперервно ні з чого русійну силу».

### Джеймс Прескотт Джоуль (1818-1889)



Джеймс Джоуль

Видатний англійський учений Джеймс Прескотт Джоуль, про якого ми вже згадували в першій частині нашої книги, народився поблизу Манчестера в родині багатого власника броварні. 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 була слабкою, і це надалі дуже заважало йому в дослідженнях, може навіть не дало зробити ще значніших відкриттів.

Замолоду Джоуль не знав ніякої іншої роботи, крім допомагати в управлінні батьковою броварнею. Удень він був зайнятий там, і тільки ночами міг займатися своїми дослідженнями. 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, щоб мати можливість продовжувати дослідження, звернувся по фінансову допомогу до королеви Вікторії.

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 двохсоті градуса, 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).

У червні 1847 року Джоуль зробив доповідь на зборах Британської асоціації вчених, у якій він повідомив про найбільш точні виміри механічного еквіваленту теплоти. На напівсонних слухачів доповідь не справила жодного враження, і лише молодий палкий Вільям Томсон (майбутній лорд Кельвін) пояснив своїм старшим колегам значення роботи Джоуля. Доповідь стала поворотним пунктом у кар'єрі вченого. 1850 року Джоуля обрано членом Лондонського Королівського товариства. Він став одним із авторитетних учених свого часу, володарем багатьох титулів і нагород. Королева вдостоїла його звання рицаря. Ім'ям Джоуля пізніше названо одиницю енергії.

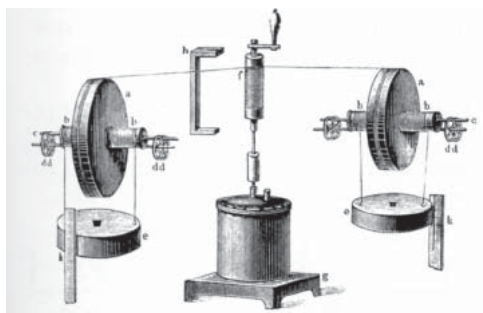


Рис. 51. прилад Джоуля для визначення механічного еквіваленту теплоти.

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!

(Іноді любов ученого до експериментування, у поєднанні з притаманною йому прискіпливістю, доходила до комічного. Так, захопившись нововинайденими електричними двигунами, він невдовзі неспростовно довів, що утримувати коня для виконання аналогічної роботи дешевше, аніж купувати весь час цинк для вольтових батарей!)

Джоуль вірив, що природа влаштована просто, і прагнув знайти прості співвідношення між важливими фізичними величинами. Особливо вражають 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 природі одне і те саме питання: «Чи кожна одиниця роботи дає ту саму кіль-

кість 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 плити, експериментував із електричним струмом, отримуваним за рахунок падіння вантажів, що нагрівав котушку, експериментував із повітрям, що нагрівається за рахунок роботи стискування.

Такі досліди, але аж так докладно, ставили й інші вчені: Вебер у 1857-59 роках, Гірна у 1857-61 рр., Роуланд в 1879 р., Маєр в 1842 р., Румфорд у 1798 р., Деві в 1799 році.

Всі ці досліди разом із фундаментальними дослідженнями Джоуля дають необхідні підстави для узагальнення, що отримало назву першого принципу (або ж закону) термодинаміки. Він є не що інше, як закон збереження й перетворення енергії – фундаментальний закон природи:

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta W$$

Це співвідношення означає: тепло, яке надходить у систему, витрачається на збільшення внутрішньої енергії системи й на роботу, яку здійснює ця система.

## Пізнання – розуміння – піднесення

Розуміння світу є основною метою не лише науки, але й інших царин людської духовної культури: релігії, філософії, мистецтва. У кожному випадку шукане, бажане розуміння пов'язане зі сприйняттям внутрішнього ладу та єдності хаотичного світу нашого життєвого досвіду. Далеко не просто точно сформулювати, що ми маємо на увазі під відчуттям ладу та єдності за зовнішнім різноманіттям. На щастя, таке відчуття властиве не лише вченим або філософам, а досить поширене й у буденному житті.

Суттєва особливість стану й процесу розуміння: людина, котра приходить до розуміння, інакше дивиться на світ. Факти, що раніше здавалися такими, які не мають особливого значення, тепер вкладаються в струнку картину. Інші факти, що здавалися важливими, вже такими не є. Разом із новим знанням на основі розуміння приходить відчуття піднесення.

Розуміння й пов'язане з ним відчуття піднесення не є винятковою привілеєю вчених. Емоції вченого в момент здійснення наукового відкриття можна порівняти з емоціями поета в момент натхнення, з емоціями людей у стані релігійного осяяння, з емоціями інших людей, для яких відкривається новий погляд на дійсність.

У науці нам доводиться розплачуватися за прагнення знайти фундаментальні загальні закони, оскільки водночас ми втрачаємо багато конкретних деталей окремих речей і подій.

Якщо ми шукаємо загальну закономірність у великій кількості різноманітних подій, ми маємо враховувати, що жодні дві події не збігаються цілком, в усіх деталях одна з одною. Ми можемо виявити закономірності лише за рахунок вибору небагатьох подробиць, нехтуючи рештою. У науковому пізнанні ми завжди повинні абстрагується від реальності, створюючи ідеальну в певному сенсі модель цієї реальності. Це і є «плата» за узагальнення, і саме тому в інших умовах створені нами моделі «відмовляються працювати».

Таким чином, наука займається загальним, а не частковим, але інколи потрібен певний науковий аналіз, щоб вирішити, що є загальним, а що – частковим.

Особливість науки, що відрізняє її від інших способів розуміння й пояснення світу, полягає, перш за все, в тому, що вона покладається на «авторитет експерименту». Експериментальна перевірка теорії – це не автоматичний і не тривіальний процес. Експерименти, які здавалися вирішальними на одному рівні розуміння, надалі втрачали свою переконливість, і навпаки.

Останнє слово завжди залишається за узгодженою думкою учених, котрі використовують критерії істинності й значущості на основі загального розуміння.

А поки такого загального розуміння немає, то виникають труднощі, схожі на ті, що постали перед Румфордом у його спробах переконати сучасників у правильності кінетичної теорії теплоти. Експерименти зі збереження теплоти були кількісними, а тому достатньо переконливими: можна було точно передбачити кінцеву температуру, коли певну кількість кілограмів розжареного заліза опускали в посудину з певною кількістю холодної води. Але все це узгоджується і з теорією флогістону. Кінетична (а не флогістонна) теорія теплоти стала переконливою, коли Джоуль фактично повторив досліди Румфорда, але виконав кількісні вимірювання того, як певна кількість роботи дає певну кількість теплоти.

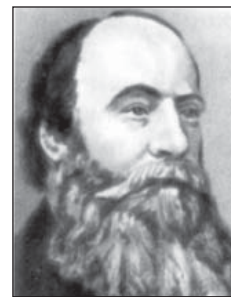
Наукова діяльність складна, в дослідженнях можливі помилки. Шлях до істини шукають багато дослідників із різними цілями, інтересами, науковою підготовкою та глибиною розуміння. Ступінь упевненості в достовірності наукового знання не можна виміряти кількісно, оскільки тут завжди задіяно суб'єктивний чинник.

Щоб експеримент вплинув на наші переконання, ми маємо бути готові до різних результатів, повинні мати схильність до альтернатив. Експериментальна перевірка наукової теорії не може бути механічним, автоматичним процесом. Тривалий процес перевірки теорії, як і процес її створення, вимагає творчих пошуків і уяви.

Упевненість – і водночас сумнів у достовірності наукових результатів – характерний стан ученого. Упевненість зростає, якщо наукові результати надаються до вираження мовою математики. Мова математики – точна мова, і

коли закони природи виражаються в математичній формі, вони теж набувають точності. Передбачення, які можна зробити з їхньою допомогою, мають числову форму. Кількісний збіг теоретичних обчислень і експериментальних вимірювань є передумовою й засобом узгодженого всіма розуміння результатів наукових досліджень.

### Альберт Ейнштейн (1879-1955)



Альберт Ейнштейн

2005 року людство за рішенням ЮНЕСКО відзначало Рік фізики. Його було приурочено до сторіччя від дня публікації п'ятих статей Альберта Ейнштейна 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 Ейнштейна 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 Ейнштейн 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 вперше побачив магнітний компас – і сповнився подивом й бажанням зрозуміти «поведінку» стрілки. Прагнення пізнати суть лежало в основі всіх його найбільших наукових досягнень. Коли він дванадцятирічним хлопцем уперше розгорнув «Геометрію» славетного грека Евкліда, відчув такий самий захоплений подив і прагнення досягнути побачене.

У пошуках заробітку батьки міняють місця проживання: Ульм – Мюнхен – Мілан – Цюрих... Альберт Ейнштейн 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 по-радив 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 Ейнштейн вступив-таки в політехнікум на вчительський факультет, оскільки вирішив стати викладачем фізики, і почав старанно працювати в фізичній лабораторії. У студентські роки Ейнштейн 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 Ейнштейн отримав диплом вчителя фізики й математики, але тривалий час не міг знайти постійної роботи, лише тимчасово замінюючи інших учителів. Матеріальне становище Ейнштейна було кепське, і якось він сказав, що на шматок хліба йому доведеться заробляти, граючи на скрипці для перехожих.

Влітку 1902 року, завдяки рекомендації друга, Альберта Ейнштейна прийняли на роботу в федеральне бюро патентів у Берні на посаду експерта третього класу. Необтяжлива робота в патентному бюро сприяла тому, що саме в ці роки (1902-1909) Ейнштейн значно виріс як науковець і став видатним фізиком-теоретиком. Нікому в ученому світі доти не відомий дрібний патентний клерк міг дозволити собі вступати в дискусії з маститими ученими-фізиками. 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 Ейнштейнові гурток друзів. Молоді люди збиралися найчастіше втрех – Ейнштейн, Габіхт і Соловін, вечеряли разом, читали фізиків і філософів (Спінозу, Канта, Юма), або ж романи чи вірші, слухали гру Альберта на скрипці. Найчастіше Ейнштейн виконував Баха, Гайдна, Шуберта й Моцарта. А напередодні вихідних друзі влаштовували нічні прогулянки в гори, милуючись їх величною красою.

1904 року Альберт Ейнштейн запропонував журналу «Аннали фізики» свої статті з деяких питань статистичної механіки та молекулярної теорії теплоти. За рік ці статті було надруковано. За висловом французького фізика Луї де Бройля, ці теоретичні дослідження були немов сліпучі ракети, що освітили місячні 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 Ейнштейна потому, як 1909 року він нарешті перебрався з патентного бюро на посаду екстраординарного професора Цюрихського університету.

У цьому розділі для нас важливо те, що Альберт Ейнштейн з позицій молекулярної кінетичної теорії пояснив броунівський рух молекул, і це саме не-

залежно від нього зробив польський фізик, львів'янин за місцем появи основних своїх праць, Мар'ян Смолуховський. Його праці побачили світ за кілька місяців після виходу робіт Ейнштейна з броунівського руху.

### Мар'ян Смолуховський (1872-1917)



Мар'ян  
Смолуховський

Мар'ян 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 Яна Казимира (тепер – Львівський національний університет імені Івана Франка), де кафедру української історії тоді ж очолював Михайло Грушевський. Учень Мар'яна Смолуховського був, зокрема, один із перших українських фізиків-теоретиків, що працювали в царині квантової фізики, дійсний член Наукового товариства імені Тараса Шевченка у Львові Володимир Кучер (1885-1959).

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 помер молодим він помер від дизентерії, яка лютувала в час Першої світової війни.

Основні дослідження Мар'яна Смолуховського присвячені молекулярній фізиці, термодинаміці, статистичній механіці, зокрема кінетичній теорії газів і рідин, теорії броунівського руху, молекулярній статистиці. Теоретичні дослідження Смолуховського з броунівського руху та питань про межі застосовності другого начала термодинаміки обґрунтовували й розвивали ідеї Людвіга Больцмана. Смолуховський у 1905-1906 роках незалежно від Альберта Ейнштейна створив теорію броунівського 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 броунівського руху, спираючись на кінетичний закон рівномірного розподілу енергії. Виходячи з цього закону, частинка діаметром 1 мм (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 невпорядковані зіткнення відновлюють її, – і таким чином йому вдалося дати кількісне пояснення явища.

Пізнання сутності броунівського руху привело до раптового зникнення будь-яких сумнівів у достовірності больцманівського 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: «всі явища, які здаються необоротними, насправді є оборотними. Для цього не потрібен жоден спеціальний пристрій, треба лиш тільки зачекати, поки це статеться 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  $A/T$  дорівнює 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».

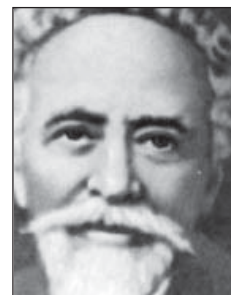
У випадку з броунівським рухом флуктуації дуже малі й спостерігати їх складно. Однак 1908 року Смолуховський окреслив іншу групу спостережуваних явищ, у яких флуктуації виявляються безпосередньо. Це – критична опалесценція газів і рідин. У своїй теорії Смолуховський показав, що чим більша стисливість 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 Ейнштейна й Смолуховського з теорії броунівського руху – справді величезне. Проте насправді больцманівська кінетична тео-

рія остаточно й безповоротно утвердилася в умах учених тільки після експериментального підтвердження передбачень цих робіт, що його зробив французький учений Жан Перрен.

### Жан Перрен (1870-1942)



Жан Перрен

Жан Батіст Перрен – французький фізик і фізико-хімік, з 1936 року був президентом Паризької Академії наук. 1908 року він здійснив цикл експериментальних досліджень броунівського руху, що підтвердили молекулярно-статистичну теорію Ейнштейна-Смолуховського й остаточно переконали в тому, що броунівський рух є наслідком теплового руху молекул середовища, а отже – переконали в реальності самих молекул. Це означає, що тільки 1908 року молекулярна гіпотеза стала достовірним науковим фактом!

Досліди Перрена переконливо засвідчили, що середній квадрат зсуву броунівської 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! Аналогічні спостереження за допомогою мікроскопа за зсувами броунівських частинок, вимірювання цих зсувів та зіставлення з теоретичними результатами й виконав Жан Перрен. Праця вченого справді титанічна, а досліди його визначно фундаментальними.

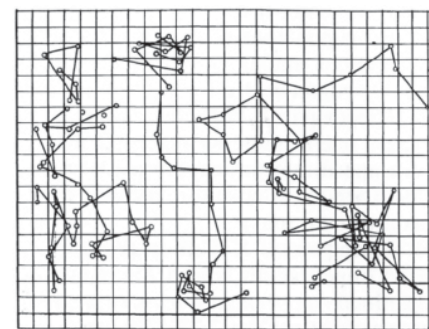


Рис. 53а. Броунівський рух (рисунок Перрена).

Після цих дослідів ніхто вже не сумнівався в реальності молекул. Один із найпринциповіших опонентів атомізму, німецький фізхімік та філософ Віль-

гельм Оствальд (1853-1932) мав мужність визнати: «Я переконався, що ми нещодавно отримали експериментальний доказ переривчастості, або зернистості 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, – *автори*), а також збіг законів броунівського 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 відомоєно Нобелівської премії з фізики.

Окрім цього, Перрен вивчав розподіл броунівських частинок у полі земного тяжіння. У цих дослідках 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...

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.

## Ентропія

Клаузіус прийшов до поняття ентропії, вивчаючи роботи Карно й намагаючись зрозуміти їх глибинне фізичне підґрунтя. Спробуємо простежити за ходом міркувань Клаузіуса.

Співвідношення

$$Q_1 : Q_2 = T_1 : T_2$$

діє 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 теплова машина не виконує роботу, а сама є об'єктом виконуваної роботи.

Якщо приписати кількості теплоти знаки «плюс» і «мінус» в разі теплоприйняття й тепловіддачі відповідно, знамениту формулу Карно можна переписати так:

$$\frac{Q_1}{T_1} = -\frac{Q_2}{T_2} \text{ або } \frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0$$

Відповідно до моделі флогістону, мало би бути

$$Q_1 + Q_2 = 0$$

Це означало б, що кількість теплоти зберігається, а робота виконується. Насправді ж в оборотному термодинамічному циклі зберігається не кількість теплоти (флогістону), а зовсім інша величина:

$$S = \frac{Q}{T}$$

Цю величину й було названо ентропією. Зміна цієї величини пов'язана температурою і зміною теплоти співвідношенням

$$\Delta S = \frac{\delta Q}{T}$$

Ми бачимо, в термодинаміці ентропію було введено формально – як величину, що зберігається в оборотному процесі.

А ось у кінетичній теорії газів ентропія набула нового значення. У цьому, безумовно, велика заслуга Людвіга Больцмана. Формула Больцмана, про яку ми поговоримо нижче, описує зв'язок між термодинамічною величиною (ентропією) та ймовірністю термодинамічного стану системи, яка обчислюється за статистичними законами.

Другий закон термодинаміки 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 (посилення «хаосу» на основі випадкових подій) 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 їх основі в усіх патентних бюро світу було оголошено заборону на розгляд проектів із винаходу вічних двигунів.

Тепер простежмо за можливою логікою вчених. Другий закон термодинаміки – закон зростання ентропії – це закон природи. Всі природні довільні процеси призводять до рівномірного розподілу тепла і вирівнювання темпе-

ратури. 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.

Теологічне тлумачення закону зростання ентропії знайшло своє втілення на засіданні Папської Академії наук у Ватикані. «Ця сумна необхідність красномовно свідчить про існування Необхідної Істоти» – заявив папа Пій XII, маючи на увазі «теплову смерть Всесвіту» і обґрунтовуючи наявність Бога.

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 знов-таки заслуга Людвіга Больцмана. У результаті глибоких теоретичних досліджень він дійшов висновку, який мав колосальне фізичне (й світоглядне) значення: ентропія системи пропорційна термодинамічній ймовірності стану даної системи (якщо точно, то логарифму ймовірності, тобто  $S = k \ln W$ ). Це фундаментальний науковий результат – саме загальнонауковий, а не тільки фізичний. Наближення газу до стану з максимальною ентропією є не що інше, як перехід у найбільш імовірний стан.

«Послухаємо» самого Больцмана: «друге начало 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».

Ще трохи про поняття ентропії в сучасній науці

Слово «ентропія» 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. Сам Клаузіус сформулював перший і другий закони термодинаміки таким чином: 1) енергія Всесвіту стала; 2) ентропія Всесвіту прагне до максимуму. Просто й лаконічно, але, на жаль, не дуже зрозуміло. І, перш за все, не дуже зрозуміло тому, що вживається термін «ентропія».

Наведемо кілька формулювань, які за великим рахунком не можна назвати вичерпними визначеннями.

*Ентропія* – це особлива функція стану термодинамічної системи. Ентропія ізольованої системи може тільки зростати (якщо в системі протікає необоротний процес), або залишатися сталою (якщо в системі протікає оборотний процес).

*Ентропія* – це міра, ступінь невизначеності (хаотичності) імовірнісних (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.

Все це, безумовно, правильно, але саме поняття ентропії пов'язують не лише з хаотичним рухом молекул газу. Це поняття включає й мутації генів, що породжують новий біологічний вид, і творчий пошук методом проб і помилок, і шумові сигнали, що їх спеціально «підмішують» в евристичні програми електронно-обчислювальних машин. Якщо ці процеси позбавити (якимсь гіпотетичним чином) ентропії, що є їх складовою, то вони не породять нічого несподіваного, нічого нового. Цей висновок можна поширити на всі процеси розвитку, що відбуваються навколишньому світі.

Якби світ вдалося 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, надлишок і зростання якої нібито загрожує тепловою смертю. У цьому й полягає двоєдина, діалектично суперечлива сутність ентропії. Вона настільки ж суперечлива, як і весь навколишній світ.

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 запропонував використовувати для кількісного вимірювання інформації формулу взаємозв'язку ентропії з імовірністю, яку ввів у науку Людвіг Больцман. Невдовзі формула Больцмана-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 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.

Пізніше французький фізик Леон Бріллюен (1889-1969) показав, що кількість накопиченої інформації, яка зберігається в структурі систем, точно дорівнює зменшенню їх ентропії. Таким чином, ідеться про двоєдині інформаційно-ентропійні процеси, в яких за репродукцію, повторюваність «відповідає» інформація, а за творче оновлення «відповідає» ентропія.

Для нормального функціонування «ниви життя» (а життя не може стояти на місці, не перетворюючись на смерть – це ми мусимо сприймати як належне й природне) 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 на свій «мислячий дух», тобто на людину.

Якби в світі «панувала» лише ентропія, то ми б неминуче прийшли 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 електронно-обчислювальних систем.

Сучасна наука знаходить нові й нові підтвердження тому, що випадковості неминучі, що всі явища в світі за суттю своєю ймовірнісні та що їх статистичний опис відповідає ймовірнісній природі, і ніякими іншими методами дослідити й описати їх неможливо.

Творча роль ентропії полягає в тому, що:

Не було б ентропії в комп'ютері – він був би приречений розв'язувати тільки «нетворчі» задачі.

Не було б ентропії в друкованому тексті – всі книги перетворилися б на нудне повторення абеткових істин.

Не було б ентропії в генетичному коді – неможлива була б еволюція тваринних і рослинних видів. Адже мікроскопічна статеві клітина містить у собі таку кількість спадкової інформації, яка не вмістилася б на сторінках тисячі книг.

Не було б ентропії в природі – нас пригнічував би своєю незмінністю фатально детермінований світ.

Ентропія необхідна природі, але якщо її «передозувати», вона почне нищити той лад, який мільярди років накопичував і зберігав наш світ. Щоб «приборкати» ентропію, природа (сама природа!) «навчилася» накопичувати інформацію, виробляти правила формування структур різноманітних систем.

Таким чином, у 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.

### Ентропія й сучасна наука. Ілля Пригожин (1917 – 2003)

Ілля Пригожин, видатний фізик і фізико-хімік сучасності, народився в Москві, але його родина емігрувала через Литву до Бельгії після більшовицького



Ілля Пригожин

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 начала термодинаміки й запропонував принцип локальної рівноваги. Згідно з цим принципом, у нерівноважній системі можуть існувати області, які перебувають у квазірівноважному стані.

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. За роботи з термодинаміки необоротних процесів і їх використання в хімії та біології ученого вшановано 1977 року Нобелівською премією.

На якій же класичній основі Ілля Пригожин розширив і поглибив поняття ентропії? Акцентуємо особливу увагу на підкресленому в зв'язку з тим, що останнім часом досить часто в наукових текстах трапляються твердження про запровадження нового поняття ентропії для певних класів нестійких динамічних систем. Моделі таких систем справді є новими, новими є й закони зміни ентропії для таких систем. Саме ж наукове поняття ентропії залишається незмінним.

Для ідеального циклу Карно легко показати, що ККД ідеальної (оборотної) теплової машини можна виразити через абсолютні температури нагрівача й холодильника, тобто  $\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$ .

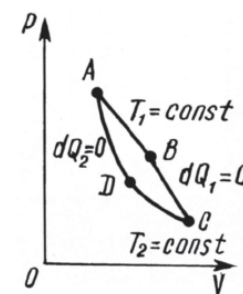


Рис. 54. Цикл Карно.

Для будь-якої теплової машини  $\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$ , тоді для машини, що працює за циклом Карно, отримуємо:

$$\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \Rightarrow 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \Rightarrow \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1} \Rightarrow \frac{Q_2}{T_2} = \frac{Q_1}{T_1}$$

Зауважимо, що  $\frac{Q}{T} = S$  – ентропія. Тобто, ентропія термодинамічної системи зберігається.

Термодинамічні процеси будь-яких реальних теплових машин є необоротними, і для них ККД

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} < \frac{T_1 - T_2}{T_1} \Rightarrow 1 - \frac{Q_2}{Q_1} < 1 - \frac{T_2}{T_1} \Rightarrow \frac{Q_2}{Q_1} > \frac{T_2}{T_1} \Rightarrow \frac{Q_2}{T_2} > \frac{Q_1}{T_1}$$

тобто  $S_2 > S_1$ .

Це означає, що за реальних (а вони завжди необоротні!) термодинамічних процесів ентропія термодинамічної системи завжди зростає!

Ось так було знайдено можливість однозначно розрізняти оборотні й необоротні процеси. Якщо ентропія в перебігу якого-небудь процесу стала, то процес оборотний, якщо ж зростає – процес необоротний.

Таким чином, ентропія – це міра оборотності (або необоротності) процесів.

Ентропія, звичайно ж, абстрактне поняття, але воно характеризує конкретні процеси. Використання абстрактних понять не заважає нам створювати адекватну картину світу. Саме безперервне розширення й поглиблення нашого розуміння дедалі більше розкриває перед нами картину світу й робить її дедалі ціліснішою. Ось чому відкриття кількісної міри оборотності, яке зробив Клаузіус, належить до фундаментальних. «Багато в небі й на землі такого, що нашій філософії й не снилось», – ці адресовані до Горація слова Гамлета актуальні сьогодні так само, як і тоді, коли їх написав Шекспір.

Важливість поняття ентропії виходить далеко за межі кола питань, пов'язаних із тепловими машинами. Абсолютно оборотних процесів не існує, і тому за будь-яких фізичних процесів ентропія повинна зростати. У цьому й полягає суть другого закону термодинаміки. Однобічне тлумачення цього закону інколи призводить до непорозуміння. Так, наприклад, якщо склянка з гарячою водою поволі вистигає, то її ентропія, безумовно, зменшується. Проте для повної системи (склянка з водою + навколишнє середовище) ентропія обов'язково зростатиме.

Тенденція до зростання ентропії визначає напрям усіх процесів у природі. Вони протікають так, що повна ентропія системи зростає. Цей загальний принцип – зростання ентропії – «вказує» напрям потоку тепла або напрям перебігу хімічної реакції; він же визначає, куди мають рухатися молекули стиснутого газу за наявності вільного простору.

Хаотичний, безперервний рух молекул є ідеальною ареною для випадкових подій. Водночас ми знову стикаємося з необоротністю. Мірою такої необоротності є термодинамічна ймовірність стану цієї системи.

За всіх спонтанних процесів ентропія зростає і прямує до максимального значення. Термодинамічна ймовірність також прямує до максимального значення. Ми вже згадували: Людвіг Больцман показав, що між ентропією й термодинамічною ймовірністю існує зв'язок

$$S = k \ln W$$

Закон Больцмана розкриває найглибший зміст поняття ентропії. Усі фізичні процеси протікають у напрямі поступового переходу від впорядкованого стану до невпорядкованого, від станів із меншою ймовірністю до станів із більшою ймовірністю. Макс Планк із цього приводу зазначив, що «принцип зростання ентропії як добре обґрунтований факт включається в фізичну картину світу». Ентропія – міра безладу!

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. Наші сучасні уявлення про прямування ентропії до максимального значення справедливі для обмежених систем. Існують серйозні сумніви в застосовності закону збільшення ентропії до мегасистемам, наприклад – до нескінченного Всесвіту.

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). Сучасні вчені, зокрема Ілля Пригожин, встановили, 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 прагне до мінімуму! Водночас слід наголосити: маємо нову поведінку ентропії в специфічних системах, а не нове поняття ентропії.

До сучасних проблем слід віднести й такі, як: структура й напрям часу (темпоральність); роль необоротності в процесах самоорганізації; роль спостерігача, який не лише фіксує, але й активно змінює перебіг явищ на макроскопічному рівні.

## Наукові досягнення й світогляд учених

Світогляд фізиків XIX століття виховувався на строгих динамічних законах ньютонівської механіки, що приводять до однозначного результату. Після досліджень Больцмана (і Максвелла) знову відродилося питання про причи-

ни розвитку, яке піднімали ще мислителі давньої Еллади. Який же справжній характер фізичних законів?

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, а це, на перший погляд, погано. Але саме неоднозначний, імовірнісний його характер значно більше сприяв його всеохопності.

Акцентуємо увагу на суттєвій відмінності між висновками, які ми отримуємо на основі однозначних динамічних законів і ймовірнісних статистичних. Перші, власне, 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 ймовірнісний 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, 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. А от 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 відкрив 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. Брала під сумнів і нещадно критикували й математичні методи його досліджень, і фізичний сенс, і – перш за все – атомістичну гіпотезу. Нині здається неймовірним, що навіть напере-

додні ХХ століття багато вчених скептично сприйняли визнання існування атомів. Навіть молодий Макс Планк у своїй дисертації 1879 року 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 Мах категорично заперечував атомістику.

Ще навіть 1898 року вченому 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».

У Больцмана різко погіршується здоров'я. Тяжка форма астми завдає йому сильних страждань. Довгі роки жорстокої полеміки позначилися й на стані його нервової системи, він часті потерпає від депресії. Загальне визнання наукових заслуг прийшло до вченого за життя, але надто пізно. Його вже майже не тішить видана на честь його 60-ліття ювілейна збірка, в складанні якої взяли участь 117 найвідоміших науковців того часу. Ідеї Больцмана поступово здобувають дедалі більше визнання. На основі цих ідей 1900 року Макс Планк заклав основи квантової теорії, а 1905 року Альберт Ейнштейн створив теорію броунівського руху. Статистичні ідеї розвиває в красиву й струнку теорію американський фізик-теоретик Джозая Гіббс (1839-1903). Больцмана обирають своїм членом Академії в Геттінгені, Берліні, Стокгольмі, Туріні, Римі, Амстердамі, Петербурзі, Нью-Йорку, Лондоні, Парижі, Вашингтоні, його обирає почесним доктором університет у Оксфорді.

Творець нової теорії й велет духу, який віддав усі сили справі захисту своїх наукових ідей, сам вкоротив собі віку. Сталася ця трагедія 5 вересня 1906 року. Точної причини, що спонукала його до самогубства, не знає ніхто.

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 Мейтнер (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 йшли, відчуваючи, що нам відкрився новий і дивовижний світ».

Лише два роки не дожив Больцман до експериментального підтвердження існування атомів – його зробив французький учений Перрен 1908 року. Після дослідів Перрена настає не просто загальне визнання, а триумф атомно-молекулярного учення, а праці Больцмана оголошено класичними.

Роздумуючи над науковими ідеями Больцмана, захоплюючись його особистістю, сумуючи з приводу його трагічного кінця, спробуємо «прочитати» дещо між рядків, які він колись написав: «Те, на що скаржиться поет, правиль-

не й для теоретика: творіння його написані кров'ю його серця, і найвища мудрість межує з найвищим безумством».

Закінчімо «написання портрету» Людвіга Больцмана 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 непереборними, 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, вже згадуваному рішучому опоненту Больцмана Вільгельмові Освальду довелося визнати, що «Больцман – людина, яка в своїй галузі перевершила всіх нас проникливістю та ясністю розуму». Після Людвіга Больцмана в фізиці почала «обживатися» закономірність випадкового! А це вимагало нового стилю мислення.

З роками усвідомлення вагомості вкладу вченого в розвиток науки тільки зростало. У Відні на центральному кладовищі підноситься біломармуровий бюст Больцмана, а на постаменті викарбовано формулу, що є найвищим творчим досягненням ученого:

## Теплові явища: резюме

1. Ідеальний газ, що складається з  $N$  твердих маленьких кульок 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 – Клайперона):

$$PV = NkT$$

Температуру можна вимірювати висотою стовпа ідеального газу за сталого тиску, або ж тиском за сталого об'єму ідеального газу.

2. Температури двох тіл, що достатньо довго контактують одне з одним, однакові («нульовий» закон термодинаміки). У стані теплової рівноваги на одну ступінь вільності припадає та сама кількість енергії.

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,

$$dW = PdV.$$

4. Один моль будь-якої хімічної речовини (молекулярна маса, виражена в грамах) містить  $N_o = 6,02 \cdot 10^{23}$  молекул (число Авогадро).

5. Для будь-якого ідеального одноатомного газу теплоємність за сталого об'єму:

$$C_v = \left. \frac{dQ}{dT} \right|_{V=const} = \frac{3N_o k}{2} = \frac{3R}{2}.$$

Це є прямим результатом кінетичної теорії та рівномірного розподілу енергії за ступенями вільності. 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 механіка показала, що ці закони діють лише для досить високих температур, за прямуюванні 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) 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).

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 вище, 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  $\Delta Q$  – тепло, яке підводиться в систему оборотним шляхом.

За зростання ентропії системи корисна механічна енергія втрачається:

$$\Delta W = T_{\min} \Delta S, T_{\min} - \text{найнижча енергія в системі.}$$

## Філософські основи теорії теплових явищ

Плеяда античних філософів, чиї ідеї ми розглядали в заключному розділі першої частини, безумовно, вилинула й на формування світогляду учених, причетних до створення теорії теплових явищ.

Так, фізики XIX століття в суперечках щодо співвідношення детермінізму та ймовірності поверталися до проблеми, порушеної ще в працях Епікура й Аристотеля. Адже ще Епікур дійшов висновку, що безперервний ланцюг причин природа повинна розривати біля самої основи: на атомному рівні. Атомам, за Епікуром, властиві не лише рухи, зумовлені дією сили їх тяжіння та взаємними зіткненнями один із одним, але й інші – спонтанні, непередбачувані, які не підпорядковуються жодним законам і виникають нібито «зі внутрішніх спонук» самих атомів, відображаючи притаманну атомам «вільну волю».

Звісно, питання взаємозв'язку ймовірнісних явищ і статистичних закономірностей із діалектикою поставлено на порядок денний розвитком сучасної науки (квантової фізики, генетики, кібернетики, теорії інформації). Але деякі з цих питань поставив і почасти вирішив ще Арістотель.

У своїй книзі «Топіка», що означає «Загальні принципи», Арістотель звертає увагу на *два способи* логічного мислення. Перший спосіб Арістотель назвав аподиктичним. Він заснований на формальних законах і приводить до однозначних висновків, що мають цілковиту достовірність.

Другий спосіб Арістотель назвав діалектичним (!). За такого способу мислення всі висновки мають гіпотетичний характер і тому часто суперечать один одному – вчив Арістотель.

Сталося так, що впродовж багатьох століть у центрі уваги був саме формально-логічний, а не діалектичний спосіб мислення. Особливо яскраво це виявилось в роки панування раціоналізму Френсіса Бекона й тріумфу динамічних закономірностей класичної механіки Ньютона. Отже, філософи, позначені на філософсько-історичній хронограмі в першій частині посібника, безумовно, впливали й на світогляд учених, котрі займалися дослідженням теплових явищ.

Але тепер, вважаючи 1824 рік роком народження теорії теплових явищ, доповнимо плеяду видатних філософів новими іменами: Іммануїл Кант, Йоганн Фіхте, Георг Гегель, Фрідріх Шеллінг, Людвіг Фейєрбах, Фрідріх Енгельс.

**Іммануїл Кант** (1724-1804) – великий німецький філософ, основоположник класичного ідеалізму. Працював учителем, потім став професором Кенігсберзького університету й згодом його ректором. Кант розробив космогонічну гіпотезу, згідно з якою Сонячна система виникла й розвивалася з первинної дифузної хмари матерії на основі законів тяжіння та відштовхування.

Другий період своєї творчості, понад тридцять років, Кант присвятив дослідженню пізнавальних і етичних спроможностей людини. Кант дотримувався погляду, що справжня природа речей не може бути доступна пізнанню. Закони природи є творіння Розуму. Ми знаємо речі тільки такими, якими вони нам видаються (це «речі для нас»), але ми нічого не знаємо й не дізнаємося про те, які речі насправді. Річ, що перебуває за межами наших відчуттів, Кант називав «річчю в собі». Таким чином, Кант обмежив знання, щоб звільнити місце вірі. Він мав на меті дві речі: по-перше, прагнув уберегти істинне знання від умоглядних думок, довести, що джерелом наукових знань не можуть бути божественні одкровення й логічні побудови, не засновані на дослідних даних; по-друге, Кант прагнув залишити Бога як джерело віри у вищу єдність, у вищий етичний закон волі.

Прислухаймося до одного з етичних принципів Канта: «Людина, що вчинила замах на гідність іншої людини, втрачає свою гідність».

Кант увесь час намагався з'єднати знання й віру, примирити науку та релігію. У його вченні про пізнання є дуже важливі думки, які фактично відкривають шлях до розуміння творчої сили розуму, що пізнає.

**Йоганн Фіхте** (1762-1814) – представник німецького класичного ідеалізму. Його девіз: яка людина, така її філософія. Фіхте був особою рішучою, без-

компромісною, одержимою. Він вважав себе жерцем Істини та служив їй безкомпромісно й самовіддано. Феноменальна пам'ять відкрила синові ремісника шлях до вищої освіти. У 28 років він уперше прочитав кантівську філософську працю й дійшов висновку: перед ним істина. Особливо захоплювала його кантівська етика, ідея свободи як виконання обов'язку.

У брошурі «Поняття щодо вчення про науку або так звану філософію» Фіхте стверджував, що «філософія» – застарілий термін. Треба створити «науку всіх наук», строго й доказово вивести знання з єдиного принципу.

**Георг Гегель** (1770-1831) – творець філософської системи, яку заведено називати ідеалістичною системою Гегеля. За Гегелем, першоосновою всіх явищ природи й суспільства є не матерія, а дух, «світовий розум».

Цей розум творить природу, людину та людське суспільство.

Безперечно й головна заслуга Гегеля полягає в тому, що він глибоко розробив питання про діалектичну логіку та сформулював основні закони діалектики: переходу кількісних змін у якісні, єдності й боротьби протилежностей, а також закон «заперечення заперечення», або розвитку по спіралі. Він розробив такі основні категорії діалектики: форми й змісту, явища й суті, цілого й частини, можливості й дійсності, необхідності й випадковості. Його головні філософські твори – «Феноменологія духу» й «Наука логіки». Діалектичний метод пізнання дійсності має величезне значення і є каркасом будь-якого наукового пізнання.

Майбутній філософ народився в місті Штутгарті в родині шанованого бюргера – секретаря скарбниці. Ні в дитинстві, ні в юності жодних геніальних здібностей він не виявляв. У гімназії вчився рівно й добре, переходячи з класу в клас отримував відзнаки. Любив читати, систематично – двічі на тиждень – ходив у бібліотеку, але, на відміну від своїх однолітків, читав не романи, а твори вчених, і неодмінно щось записував. Його цікавили філологія, естетика, геометрія, арифметика, психологія, історія, богослов'я, філософія. Час від часу він перечитував свої власні записи.

Ось один із його записів, який є вельми красномовним: «Як у справах, так і в поглядах людей великі революції ніколи не відбуваються без підготовки. Їх так ніколи й не називали б, якби придивилися до безперервної низки попередніх змін. Людям, яких називають винахідниками, не можна відмовити в таланті й геніальності, але разом із тим ясно, що людина, знайома зі станом науки на момент винаходу, значно менше дивується з останнього, ніж та, що розглядає винахід як щось непідготовлене. Світлі уми один за одним роблять якісь невеликі відкриття. Про це зазвичай мало знають. Але приходять мислитель – і ніби підбиває їм підсумок. Він з'являється в той момент, коли рух думки закінчується в певній точці, що відкриває нові шляхи в нові сфери. Він робить, отже, тільки один крок – але оскільки саме він досягає мети, то бачать тільки його, не замислюючись про те, як близько до мети він уже був,

коли починав. У людині, в природі, в душі відбувається безперервне зростання, розвиток».

18-річний Гегель вступає на богословський факультет Тюбінгенського університету. Випускники цього університету ставали або священиками, або вчителями. Гегель став домашнім учителем. У випускному свідоцтві Гегеля записано: «Здоров'я слабке. Зріст середній. Красномовством не вирізняється. Жестикація стримана. Здібності відмінні. Думки здорові. Пам'ять тверда. У писанні й читанні утруднень не має. Поведінка добра. Працьовитість нерегулярна. Фізичний розвиток достатній. З теології встигав. Церковним красномовством займався не без старанності, проте великим промовцем себе не виявив. У філології досвідчений. У філософії ніяких старань не виявив». Так було в оригіналі, який зазнав виправлення, і останній рядок став виглядати так: «У філософії багато старань виявив». Коли було зроблено це виправлення – ніхто не знає.

Право читати лекції в університеті Гегель отримав тільки на 32-му році життя. Ось як схарактеризував лектора один із його студентів: «Суворі риси обличчя й блиск великих очей вселяли страх, і якщо не відлякували, то, в усякому разі, стримували. Але, з іншого боку, впокорювала й зближувала м'яка і доброзичлива манера говорити. Гегель мав надзвичайну усмішку. Лише в небагатьох людей я бачив таку. Вона була доброзичливою – і водночас різкою, жорстокою, або навіть хворобливою, іронічною чи саркастичною. Я б порівняв цю усмішку з лицем сонця, що пробивається крізь важкі хмари».

Лекції Гегеля та його наукові твори висловлено складною, важкодоступною мовою. Але осягати їх необхідно заради пізнання істини. А істина, за Гегелем, це «велике слово й ще більший предмет. Якщо дух і душа людини ще здорові, то в неї при звуках цього слова повинні вище здійматися груди».

Уявлення про пасивну споглядальну роль свідомості вперше відкинув Кант, котрий висунув тезу про «діяльну роль свідомості». Ідею Канта про активну роль людської свідомості сприйняв і розвивав Фіхте, котрий стверджував, що весь світ є результат діяльності людини, її свідомості.

Велика заслуга Гегеля полягає в тому, що він закони розуму зіставляв із законами самого світу. А от процес пізнання він пропонував починати з пізнання розуму, досліджувати процес самопізнання світового розуму, духу, і тоді перед нашим поглядом постане процес розвитку справжнього світу.

Основний здобуток філософії Гегеля – діалектика, діалектичний метод, вчення про розвиток, про суперечність, що є джерелом будь-якого розвитку, про природу мислення й логічних форм.

Багато вчених сучасників Гегеля не зуміли своєчасно глибоко вивчити, належно оцінити й узяти на озброєння цей основний здобуток філософії Гегеля. У XIX столітті діалектичні ідеї, діалектичний стиль мислення стихійно й повільно проникали в свідомість учених-природодослідників. Але «дух діалектики» витав у повітрі й був тим «філософським фоном», який сприяв тор-

жесту наукової істини в багатьох наукових дослідженнях, зокрема й у створенні теорії теплових явищ.

**Фрідріх Шеллінг** (1775-1854). Філософія Шеллінга переживає нині своєрідний ренесанс. У сьогодишні світоглядні суперечки він увійшов як мислитель, котрий перед загрозою екологічної кризи й соціальних катастроф закликає людину до єднання з природою – і навколишньою, і своєю внутрішньою. Філософія Шеллінга позбавлена повчальності, моралізаторства, вона вся пошукова – а тому проблематична.

Шеллінг народився в сім'ї діякона, в школі вчився недовго, оскільки вчитель заявив, що хлопчик знає всю програму і за партою йому нічого робити. Всі дивуються з його знань і здібностей. Він вільно володіє багатьма мовами: латиною, грецькою, арабською, старосврейською.

За спеціальним дозволом (у зв'язку з віковими обмеженнями) він стає студентом богослов'я, живе в інтернаті богословського факультету, де провів свої юні роки знаменитий Кеплер. Займався Шеллінг у одній кімнаті з двома старшокурсниками; один із них був Гегель.

Чи мав богословський інтернат Тюбінгенського університету якісь особливо сприятливі умови для розвитку творчих здібностей студентів? Відповідь на це питання – ні. Тодішній Тюбінген – типова глушина, богословський факультет – церковна напівказарма з мало не середньовічними звичаями й методами навчання. Студенти ходять у чорній формі, вдосвіта їх ведуть на молитву, потім на трапезу, на обов'язкові лекції. Палити заборонено. За провину – покарання, аж до карцеру. В одних це викликає страх і покірливість, в інших – ненависть і протест.

Тюбінгенські професори вимагають завчати біблійні тексти і канонічно їх тлумачити. Вся інтелектуальна Німеччина живе філософськими ідеями Канта, а тюбінгенські професори філософії, швидше за все, навіть не читали його праць. Але студенти самостійно вивчають Канта, обмінюються думками, сперечаються. Вони потай читають «Розбійників» Шиллера, по руках ходять трактати Жан Жака Руссо. Отже – генії народжувалися в цих стінах не завдяки певній системі виховання, а всупереч їй!

Один із найбільших філософів свого часу, Шеллінг займався й натурфілософськими побудовами. Наприклад, він задовго до Ерстеда, з яким був у дружніх взаєминах, назвав електрику «розламаним магнетизмом». Туманно? Так, але разом із тим і прозріливо! Думка про єдність сил природи з наукового погляду була дуже цінна. Така світоглядна настанова могла сприятливо впливати на творчі пошуки вчених.

**Людвіг Фейєрбах** (1804-1872) – син відомого німецького юриста, після закінчення гімназії вивчав богослов'я в Гейдельберзькому університеті, але дуже швидко захопився філософією й виїхав до Берліна, де слухав лекції Гегеля. Основна праця Фейєрбаха – «Суть християнства».

Фейєрбах розглядав людину тільки як біологічний вид, як природну істоту; взаємини людей у суспільстві він обмежував природними зв'язками.

Велику частину життя Фейєрбах провів на селі, любив самоту, тривалі прогулянки на природі. Незадовго до смерті вступив у лави соціал-демократичної партії Німеччини.

За Фейєрбахом, Бог – це виплід нашої фантазії про людину й природу, фантазії, що створює втіху й надію. Бог – казка, але ця казка відрізняється від інших казок тим, що ми віримо, ніби вигадане існує насправді. Розум наш могутній, і тому наділив Бога своєю могутністю, а уява бідна, і тому Бог постає нам в образі людини. Бог – це людська туга за кращою долею. Він – всього лише людина в своїй досконалості й могутності. Але щоб людина справді стала такою, досконалою й могутньою, вона не повинна сподіватися на ласку божу – з покірливо складеними на грудях руками, дозволяючи злу безперешкодно існувати. Ми повинні на місце любові до Бога поставити любов до людини як єдину істинну релігію, на місце віри в Бога – віру людини в саму себе, в свої сили, в те, що доля людська залежить не від істоти, яка стоїть поза нею чи над нею, а від неї самої.

**Фрідріх Енгельс** (1820-1895) є (спільно з Карлом Марксом) творцем філософії діалектичного й історичного матеріалізму, яка (в препарованому старанні Володимира Ульянова-Леніна вигляді) стала ідейною основою для глибоких і трагічних суспільних катаклізмів ХХ століття, того комуністичного експерименту, за який людство заплатило сотнями мільйонів життів (серед них – мільйонів українців). Проте перекладати на Енгельса з Марксом усю відповідальність за те, що коїли їхні «ідейні нащадки» в Росії, Китаї, Північній Кореї чи Камбоджі, навряд чи справедливо. Скоріш за все, німецькі філософи самі жажнулися б і першими відхрестилися б від таких «продовжувачів» їхньої справи.

До речі, саме такий мотив зустрічаємо у визначного українського поета, лідера гурту неокласиків, згодом розстріляного в урочищі Сандармох у Карелії разом зі ще 1116 представниками української інтелігенції Миколи Зерова (180-1937). У сонеті «Nature-mort», написаному 1921 року, зображено мерзенисть пореволюційного запустіння:

На килимах затоптані цигарки  
І понад кріслами смердючий дим...

А над вертепищем Маркс і Лассаль...  
В очах у Маркса залягла печаль,  
Шляхетне серце тягота притисла:

– Лассалю! Та невже в одвіті ми  
За ці брудні й понівечені крісла,  
За ці лихі й подерті килими!

З юнацьких років Енгельс роздумує про перетворення суспільних відносин. Відбуває військову службу в Берліні, а у вільний час відвідує лекції в університеті. В цей час він дотримувався філософських поглядів Гегеля, критикував Шеллінга. За наполяганням батька-фабриканта Енгельс переїздить до Англії, щоб вивчати комерцію. Спостерігаючи за життям робітничого класу найбільш розвинутої тоді промислової країни, Енгельс глибоко замислюється про причини тяжкого економічного становища робітників, про їхнє політичне безправ'я.

До 24 років Енгельс пройшов великий шлях філософських шукань. Він вивчив праці Платона, Аристотеля, Джордано Бруно, Спінози, Френсіса Бекона, Лейбніца, Лока, Декарта, Руссо, Дідро, Гельвеція, Гольбаха, Вольтера, Канта, Гегеля, Шеллінга, Фейєрбаха.

Філософські істини й одкровення не з'являються раптово, ні з чого; вони завжди є підсумком розвитку наукових знань. Енгельс – яскраве тому підтвердження.

Особливо велика заслуга належить Енгельсу в застосуванні ідей діалектичного матеріалізму до природознавства. Глибину цих філософських ідей почали осягати значно пізніше (і тут, на жаль, дуже зашкодили вульгаризатори з числа комуністів-ортодоксів). Енгельс, власне, передбачив багато фундаментальних відкриттів науки XX століття (уявлення про нерозривність матерії й руху та пов'язане з ним учення про єдність простору й часу; про невичерпність форм матерії та складну будову атома; про життя як форму руху матерії, що виникла на певній стадії розвитку природи; критика теорії «теплової смерті» Всесвіту тощо).

## Дати й факти розвитку теорії теплових явищ

V-IV ст. до н.е. – Виникнення ідеї про дискретну, зернисту будову матерії, встановлення межі подільності речовини – атомарна гіпотеза (Левкіпп, Демокрит).

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 гігмометр (з шерсті).

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

Бл. 1490 р. – Леонардо да Вінчі відкриває явище капілярності, спостерігаючи піднімання рідини у вузьких трубках.

XV ст. – Нікола Кузанський висловив думку, що Земля й усі небесні тіла створено з однієї першоматерії.

1592 р. – Галілео Галілей винайшов термоскоп, що є прообразом термометра.

1604 р. – Корнелій Дреббель виконав дослід з розширення тіл від теплоти.

1609 р. – Винайдено термостат.

1620 р. – Оpubлікований трактат Френсіса Бекона «Новий органон», у якому вперше висловлено ідею, що тепло є рух.

– Вперше описано термометр (Френсіс Бекон).

1631 р. – Жан Ре винайшов рідинний термометр.

1641 р. – Створено спиртовий термометр.

1643 р. – Відкриття атмосферного тиску (Еванджеліста Торічеллі).

1644 р. – Отримання вакууму («торічеллієвої порожнечі») й створення барометра (Еванджеліста Торічеллі).

1646 р. – Еванджеліста Торічеллі продемонстрував спиртовий термометр.

1648 р. – Експериментально виявлено зменшення атмосферного тиску з висотою (Ф.Пер'є, згідно з ідеєю Б.Паскаля).

1654 р. – Отто Геріке виконав дослід із «магдебурзькими півкулями» (після того, як з прикладеної одна до одної півкуль відкачали повітря, їх насилу змогли розірвати коні). Це довело існування атмосферного тиску.

1655 р. – Винахід ртутного термометра.

1661 р. – Роберт Бойль і Річард Таунлі встановили обернено пропорційну залежність між об'ємом газу та його тиском; окремо від них цю залежність встановив 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. паро-атмосферну машину створив Томас Ньюкомен.

1665 р. – Крістіан 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 точки кипіння й плавлення стали.

1674 р. – Відкриття залежності точки кипіння від тиску.

1680 р. – Дені Папен винайшов паровий котел. 1681 р. він же оснастив його запобіжним клапаном.

1710 р. – З'явився термометр Габріеля-Даніеля Фаренгейта.

1730 р. – Рене-Антуан Реомюр запропонував застосовувати в термометрах шкалу від 0 до 80 градусів.

1738 р. – Даниїл Бернуллі запропонував теплоту вважати 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 Михаїла Ломоносова «Роздуми про причину тепла й холоду».

1755 р. – Жан-Андре Делюк вперше встановив, що недостатньо нагріти лід до температури плавлення, щоб він розплавився – знадобиться ще додаткова кількість теплоти (прихована теплота плавлення).

1763 р. – Вперше виміряно питому теплоту плавлення льоду й питому теплоту пароутворення (Джозеф Блек).

1763 р. – Іван Ползунов розробив проект парової машини.

1770 р. – Джозеф Блек запровадив поняття теплоємності.

1772 р. – Йоган Вільке виконав перші вимірювання теплоємності твердих тіл.

1784 р. – Джеймс Ватт створив парову машину подвійної дії.

1787 р. – Жак Шарль встановив один із газових законів.

1798 р. – Бенджамін Томсон-Румфорд здійснив досліди, що свідчать про механічну теорію теплоти.

1799 р. – Гемфрі Деві здійснив досліди з перетворення льоду на воду (тертям).

1802 р. – Закон Гей-Люссака про залежність об'єму газу від температури.

1807 р. – Встановлено пониження температури за адіабатичного розширення газу (Жозеф Луї Гей-Люссак).

1811 р. – Амедео Авогадро розробляє молекулярну гіпотезу будови речовини й відкриває закон, згодом названий «законом Авогадро».

1813 р. – Франсуа Деларош і Жак Берар виконали перші дослідні вимірювання питомих теплоємностей газу.

1822 р. – Вийшла в світ праця Жана Фур'є «Аналітична теорія теплоти».

1823 р. – Симеон-Дені Пуассон вивів рівняння адіабати.

1824 р. – Вийшла в світ праця Саді Карно «Роздуми про рушійну силу вогню і про машини, здатні розвивати цю силу».

1827 р. – Роберт Броун відкрив хаотичний рух дрібних частинок.

1834 р. – Бенуа Клапейрон вивів рівняння стану ідеального газу, яке узагальнив 1874 р. Дмитро Менделєєв.

1842 р. – Роберт Майєр відкрив закон збереження енергії й визначив механічний еквівалент теплоти (незалежно від нього це зробили Джеймс Джоуль – 1843 р., та Дж. Грін і Герман Гельмгольц – 1847 р.).

1848 р. – Вільям Томсон (лорд Кельвін) запроваджує поняття абсолютної температури й абсолютної шкали.

– Джеймс Джоуль обчислив швидкість руху молекул газу (водню); розрахунки опубліковано 1851 р.

1849 р. – Вільям Ранкін і Рудольф Клаузіус незалежно сформулювали перше начало термодинаміки.

1850 р. – Рудольф Клаузіус сформулював друге начало термодинаміки.

1854 р. – Рудольф Клаузіус дав математичний вираз для другого начала термодинаміки.

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 встановив один із законів теплового випромінювання.

– Джеймс-Клерк Максвелл встановив 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.

– Йоган-Йозеф Лошмідт розрахував діаметр молекул і визначив кількість молекул у  $1 \text{ см}^3$  газу (число Лошмідта).

1866 р. – Людвіг Больцман узагальнив Максвеллів закон розподілу молекул за швидкостями.

1867 р. – Джеймс-Клерк Максвелл встановив статистичну природу другого закону термодинаміки.

1872 р. – Людвіг Больцман вивів основне кінетичне рівняння для ідеального газу.

– Людвіг Больцман встановив зв'язок ентропії фізичної системи з імовірністю її стану й довів статистичний характер другого начала термодинаміки.

1873 р. – Ван дер Ваальс вивів рівняння стану реального газу.

– Джозая Вілард Гіббс заклав основи загальної теорії термодинамічної рівноваги.

1879 р. – Встановлення закону Стефана-Больцмана.

1883 р. Вільгельм Він встановив закон зміщення Віна.

1900 р. Макс Планк сформулював квантову гіпотезу й увів фундаментальну сталу, запропонував нову формулу для розподілу за енергіями спектру випромінювання абсолютно чорного тіла.

1905 р. Альберт Ейнштейн створив теорію броунівського руху, розвиваючи теорію флуктуацій.

1906 р. Мар'ян Смолуховський (незалежно від Ейнштейна) дав послідовне пояснення броунівського руху на основі молекулярно-кінетичної теорії.

1908 р. Жан-Бітіст Перрен здійснив експерименти з дослідження броунівського руху, що остаточно довели реальність існування молекул та підтвердили атомно-молекулярну теорію будови речовини й кінетичну теорію теплоти.



### III. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ЯВИЩА

#### Про специфіку електромагнітних явищ

Про існування електричних і магнітних явищ люди знали ще в глибоку давнину.

У дочки філософа Фалеса з Мілета, котрий жив у шостому столітті до нашої ери, було янтарне веретено. Ця дочка нібито й помітила явище електризації янтарю – коли його потерти об вовну, він набував властивості притягувати порошок, нитки, шматочки папірсу. Можливо, це й вигадана подія, але історики науки свідчать, що янтар вживали тоді дуже широко, тож на таку незвичайну властивість напевно звернули б увагу. Не виключено, що саме історія з янтарним веретеном через багато століть подарувала світу нове слово – «електрика». Адже янтар по-грецьки – електрон.

Не менш давню історію має й магніт. Три тисячі років тому в Китаї вже користувалися простим компасом – він вказував на південь.

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 злочинця.

За твердженням Платона, назву «магніт» вигадав Евріпід. За версією Плутарха, своє ім'я магніт отримав на честь казкового пастуха Магніса, до чийх сандалів і до палиці прилипали дивні камені. У сандалях були залізні цвяхи, а в палиці – залізний наконечник.

Тит Лукрецій Карр у своїй поемі «Про природу речей» стверджує, що слово магніт походить від назви провінції Магнезія (Манісса) в Малій Азії. Є там гора, де й досі трапляються магнітні камені.

Вперше 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. «Випадок допомагає лише умам, готовим до відкриття» (Луї Пастер). Розум Ерстеда, безумовно, до цього відкриття був готовий. За кілька років перед тим Ерстед писав: «Слід випробувати, чи не справляє електрика якоїсь дії на магніт».

Подальші події такі цікаві й значущі, що ми докладніше поговоримо про них і про їх дійових осіб. А тут коротко зазначмо, що обернений зв'язок магнетизму з електрикою відкрив Майкл Фарадей. Коли він продемонстрував англійському королеві Георгу IV свій дослід, той спохмурнів і запитав: «Чому ваш винахід не приносить практичної користі?». На це питання вчений відповів: «Ваша величносте, а яку користь приносять діти, які щойно з'явилися на світ?»

Є підстави припускати, що Фарадей інтуїтивно відчував, яку користь у майбутньому принесе його відкриття. Вже тоді в нього виникла думка про електричну й магнітну хвилю. Але ця думка тоді здавалася такою незвичайною, навіть еретичною, що Фарадей не наважився її опублікувати. 12 березня 1832 року він передав для зберігання в архів Королівського товариства запечатаний конверт із написом «Нові погляди, які належить до часу зберігати в архівах Королівського товариства». Конверт було розпечатано аж за 106 років – 1938-го. Геніально 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 вигляді електромагнітних хвиль зі швидкістю світла (1865). За 23 роки цей теоретичний висновок підтвердив експериментально Генріх Герц (1888).

Закони Фарадея, в основі яких лежали безпосередні спостереження й вимірювання, належать до емпіричних. Закони Максвелла, створені на основі експериментальних даних шляхом узагальнення, абстрагування, ідеалізації, підпадають під визначення теоретичних. Водночас експериментальні й теоретичні закони тісно пов'язані між собою. Так, наприклад, із теоретичних законів електромагнетизму Максвелла випливають емпіричні закони Кулона, Ома, Фарадея. Тобто, емпіричні закони за допомогою певних положень, які називаються правилами відповідності, можна вивести з теоретичних законів.

Проте значення теоретичних законів (і наукової теорії, яка є сукупністю взаємопов'язаних теоретичних законів) не вичерпується тільки тим, що вони пояснюють уже відомі емпіричні закони. Важлива роль теоретичних законів у розвитку науки полягає також у тому, що на їх основі можна передбачити нові, ще не відомі закономірності. Так, із законів електродинаміки Максвелла було виведено багато невідомих раніше законів електрики й магнетизму, що уможливило розгляд оптики як окремого випадку вчення про електромагнетизм.

Таким чином, теоретичні закони, органічно вплетені в тканину наукових теорій і покладені в їх основу, найглибше виражають внутрішні, сутнісні характеристики об'єктивного світу. Це виявляється в тому, що в невеликій кількості фундаментальних теоретичних законів у концентрованому вигляді знаходиться вираження велика кількість окремих емпіричних фактів і закономірностей. Тому перехід до дедалі загальніших, дедалі абстрактніших і фундаментальніших наукових теорій, за якого відбувається ніби «поглинання» часткових теорій загальнішими і глибшими, характеризує прагнення людей до повнішого й глибшого пізнання світу та побудови наукової картини цього світу.

### Нарис розвитку поглядів на електрику й магнетизм від найдавніших часів до початку XIX століття

Початок досліджень 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. Писані праці цього мислителя не дійшли до наших днів, а про його погляди й висновки ми дізнаємося тільки з переказів пізніших мудреців: Діогена, Плутарха, Плінія, Аристотеля. За цими переказами, Фалеса можна було б вважати носієм почесного звання першого мудреця. Пізнавальні інтереси Фалеса були вельми різнобічними: математика, фізика, філософія, астрономія. Проте перекази давніх мислителів про наукові заслуги знаменитого мілетянина неповні й часом суперечливі. Найбільш достовірний факт біографії філософа – те, що він передбачив сонячне затемнення 585 р. до н.е. Ця дата є першою точною датою в історії науки.

Проте брак точних відомостей про життя та наукові відкриття великого вченого старовини дещо компенсує велика кількість легенд, пов'язаних із його іменем. Як ми вже згадували, в одній із них автором відкриття електричних явищ виступає навіть не сам Фалес, а його дочка. Протираючи одного дня вовняним клептом янтарне 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 ворсинки. Фалес зацікавився цим явищем і власноруч виконав дослід із янтарем, щоб переконатися в існуванні фактів, про які повідомляла йому дочка.

Тож можна вважати, що перші цілеспрямовані досліді зі статичною електрикою пов'язані з ім'ям Фалеса Мілетського, котрий жив у VI столітті до н.е.

Ті самі старогрецькі мислителі, 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 янтар, 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 унікальні явища не було. Густий туман містики надійно огорнув наявні мізерні відомості про електричні та магнітні явища. З праць того часу вирізняється хіба що датований кінцем XIII століття манускрипт Перегріна, де вказано, що кожен магніт має два місця, де магнітна дія особливо велика. Один із цих полюсів показує на північ, другий – на південь. Перегрін з'ясував, що однойменні полюси магнітів відштовхуються, а різнойменні – притягуються. Якщо магніт розломити навпіл, то кожен із уламків також матиме два полюси.

«Дитинство» електрики та магнетизму затяглося майже на два тисячоліття й завершилося тільки в 1600 році. «Винуватцем» становлення електрики та магнетизму як науки був англійський дослідник, придворний лікар англійської королеви Єлизавети I Вільям Гілберт (1544-1603).

XVI століття. В минулому лишилися сутички закутих у броню рицарів, прихильників Червоної та Білої троянд. «Стара добра Англія» ще не усвідомлює, що на її землі народилися два генії, два Вільями, яким призначено прославити цю країну на цілий світ. Один Вільям – Шекспір, автор знаменитого «Гамлета». Другий Вільям – це лейб-медик королеви на прізвище Гілберт, котрий уславився як перша людина, що подивилася на електрику й магнетизм із наукових позицій.

Важко сказати, чому саме медик написав першу наукову роботу з електрики й магнетизму. Може, тому, що товчений магніт середньовічні лікарі вважали за сильне проносне й використовували з цією метою. Сам Вільям Гілберт 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».

На відміну від досліджень попередників, які пізнання природи зводили до інтуїтивних висновків, а часто – із залученням потойбічних, надприродних сил, дослідження Гілберта були строго експериментальними.

Вільям Гілберт зацікавився дослідом Фалеса у викладі Аристотеля, повторив їх і, коли вже переконався, що давній філософ мав слушність, значно розширив область експериментів. Маючи неабияку винахідливість, він придумував нові й нові досліді, виконував їх, а потім аналізував результати спостережень. Підсумком багатолітніх досліджень Гілберта стала праця, опублікована в Лондоні 1600 року. Книга називалася оригінально: «Про магніт, магнітні тіла й про великий магніт – Землю. Нова фізіологія, доведена безліччю аргументів і дослідів».

З величезної кількості описаних дослідів вирізняються експерименти в царині електричних явищ. Для своїх досліджень Гілберт винайшов спеціальний прилад, за допомогою якого з'ясував, що «не лише янтар притягує до себе тіла, те саме роблять і алмаз, сапфір, карбункул, камінь, опал, аметист, берил

і кристал... Притягують також сірка, мастика й сургуч, зроблений із лаку, забарвленого в різні кольори. Всі вони притягують не лише соломинки та полу, але й усі метали, дерево, листя, камені, землі, навіть воду, рослинну олію й усе, що підвладне нашим відчуттям». До речовин, які не піддаються електризації, Гілберт відносить мармур, перли, кістки й метали.



Рис. 55. кування магнітів (рисунок із книги Гілберта).

У цій же роботі Гілберт 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 прагне все. Магніт піднімає великі вантажі; електричні сили притягують лише тіла дуже малої ваги».

Гілберт виготовив велику кулю з магнітної руди й дослідив, як біля неї поводитиметься маленька залізна стрілка. Він виявив дивовижну подібність поведінки цієї стрілки до поведінкою компасної стрілки поблизу Землі – і дійшов висновку, що Земля являє собою велетенський магніт!

На основі вчення Гілберта 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 Гілберта, яку дав Галілео Галілей: «Я віддаю найбільшу хвалу й заздрю цьому авторові, бо йому спало на думку таке диво-

вижне 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 достовірних 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».



Рис. 56. Модель Землі з магнітного заліза, яку виготовив Гілберт.



Рис. 57. Компас (із книги Гілберта).

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 навколишньої дійсності. Сам Гілберт свої заслуги дуже цінував. Вперше в практиці книгодрукування він поставив своє ім'я перед назвою книги, і ніхто його за це не засудив.

За рік після виходу в світ книги Вільяма Гілберта «Про магніт» Вільям Шекспір створює «Гамлета». Обом книгам судилося довге життя.

Заслуги Вільяма Гілберта справді великі. Найвизначнішою з них є те, що він уперше в історії пізнання, ще за 11 років до виходу в світ «Нового органона» Френсіса Бекона, основоположника індуктивного методу в науці, проголосив досвід критерієм істини й усі положення перевіряв у процесі спеціально поставлених експериментів.

Гілберт 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 в науці було з'ясовано тільки в 30-х роках XX століття!

І якщо Вільям Шекспір силою свого літературно-художнього генія проникливо розкривав хитросплетіння взаємин між людьми, то Вільям Гілберт у той самий історичний час з'ясовував «взаємини» між електрикою та магнетизмом.

По-справжньому електрика та магнетизм «поріднилися» й стали «нерозлучними» тільки 1820 року. Сприяв цій епохальній події данський професор Ганс Крістіан Ерстед, а свідками були студенти Копенгагенського університету. Але до цієї події 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 ані найменшої зміни у вазі, що наводило на думку про «невагому електричну рідину».

Помітною віхою на шляху розвитку вчення про електрику були дослідження магдебурзького інженера й пізніше бургомістра Отто фон Геріке, про якого ми вже згадували. Геріке зацікавився електричними явищами й вивчив трактат Гілберта, 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 розкрити кулю притримувати долонями, то вона накопичує електричний заряд. Це дозволяло виконувати багато «дивних» дослідів.



Рис. 58. Досліди фон Геріке з електрики.

Народився Отто фон Геріке за рік до смерті Вільяма Гілберта, вчився в Лейпцігу, займався юриспруденцією в Ієні, потім вирушив до Голландії, де захопився фізикою, математикою, фортифікацією. Переїхав до Англії, потім до Франції, де старанно студіював точні науки. Повернувшись в Німеччину 25-річним ерудованим ученим. Був він і генералом-квартирмейстером, і інженером-будівельником, і дипломатом. У 44 роки фон Геріке обрано бургомістром рідного Магдебурга, а на дозвіллі він старанно займався науками.

У 60 він закінчив книгу, в якій описав багато фізичних дослідів. Ця книга і знамениті «магдебурзькі півкулі» здобули дуже широку популярність у цілій Європі.

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 правцю було вражено так сильно, що все тіло здригнулося, як від удару блискавки – одним словом, я думав, що мені прийшов кінець».

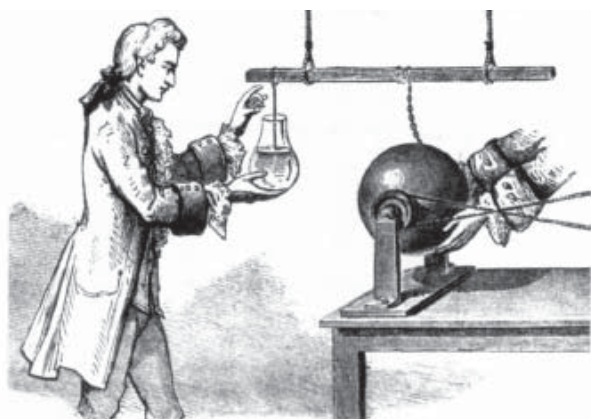


Рис. 59. Дослід з лейденською банкою.

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 з великою місткістю 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: навіть «...заради французької корони я не погодився б ще раз піддатися такому страшному струсові».

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, спалаху-

вав 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 у 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 судомою, скрикнули з жахом на обличчях.

Сто вісімдесят королівських мушкетерів за наказом брали участь у експерименті: «Перший тримав у вільній руці банку, а останній видобував іскру; удар відчували 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.

Водночас тривало й наукове вивчення електрики. 1729 року англійський фізик Стівен Грей (1679-1736) відкрив явище електропровідності. Він узяв скляну пляшку й закрив її корком, у який ввіткнув металевий стрижень із кулькою зі слоновієї кістки на кінці. Потім він наелектризував пляшку клаптем сукна. Виявилось, що електрика перейшла з пляшки на кульку – це можна було визначити з притягування до неї дрібних порошин, клаптів паперу тощо.

Продовжуючи досліди, Грей з'ясував, що електрику добре проводять не лише металеві дроти, але й вугільні стрижні, 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». Одноїменно заряджені тіла відштовхуються, а різноїменні – притягуються. За легендою, спонукала Дюфе взятися до вивчення електрики... улюблена кішка. Погладжуючи її, вчений помітив ледь чутне потріскування й іскорки від електризації шерсті.

Справжній прорив у вивченні електрики стався, однак, не в респектабельній Європі, а в далекій Америці, яка щойно вирушила в гонитву за Європою.

Йшов 1747 рік. На лекцію з електрики в Бостоні потрапив середнього віку джентльмен. Високий, із показною статурою, в оточенні друзів і шанувальників. Як заворожений, дивився він на сині електричні іскри від лейденської банки, жадібно вдихав свіже, збагачене озоном від розрядів повітря. Цією людиною був Бенджамен Франклін (1716-1790) – видатна й популярна в тодішній Америці особа, чиє обличчя досі знає весь світ завдяки портрету на стодоларових купюрах.

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 геніальний 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 «смолянну» – «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.

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».

Своїми дослідженнями Бенджамен Франклін «викреслив» із наведеної цитати слова «можливо» і «видається» – він перетворив припущення Дюфе на доведені наукові факти. 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 ко-

жен такий дослід чаїв смертельну небезпеку. Коли стала очевидною електрична природа блискавки, Франклін зміг здійснити головний винахід свого життя – громовідвід, високе металеве вістря, ізольоване від будинку й поєднане провідником із землею.

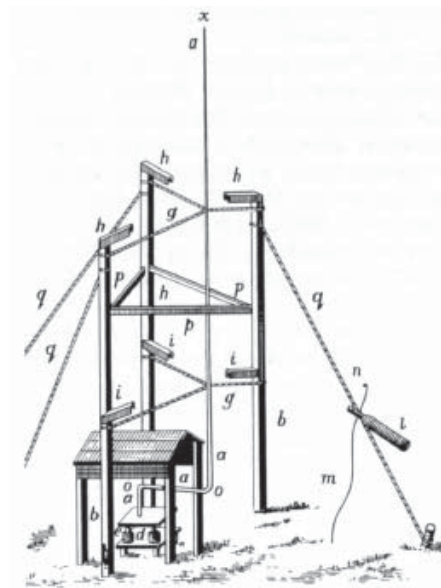


Рис. 61. Дослід Франкліна з атмосферою електрикою.

(Франклінові щастило; аналогічні досліді проводили в Петербурзі Михайло Ломоносов і Георг Ріхман (1711-1753), і під час одного з них Ріхман загинув від кульової блискавки).

Перший громовідвід було встановлено 1760 року в Філадельфії. За 22 роки їх було вже понад 400, зокрема на всіх громадських будинках, окрім французького посольства (Франція офіційно громовідводи не визнавала). Під час сильної грози саме туди вцілила блискавка, і вбила французького офіцера. Це стало остаточним доказом необхідності громовідводів. Їх почали ставити навіть на церквах (за висловом Едісона, це обов'язково слід робити, бо «часом Провидіння буває неухвалне»).

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 частини заряджених частинок!

Щодо фізичної природи електрики, то Франклін вважав її особливою невагомою рідиною, рівень якої у природі назагал сталий. Можна лишень ви-

кликати в певних місцях надлишок або брак цієї рідини – і це, власне, є створенням позитивного чи негативного заряду. Таке припущення, попри його уможлядність, дивовижним чином корелює з сучасними уявленнями (лишень надлишок електронів дає «мінус», а їх брак – «плюс»).

Запровадив Франклін і поняття «напряму струму». За пропозицією Франкліна, яка випливала 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.

Пізніше Франклін став однією з видатних фігур політичного життя Америки, активним борцем за звільнення Америки від колоніального панування Англії. 1775-го року Франклін бере участь у складанні Декларації незалежності.

Завдяки дипломатичному хисту Франкліна Америці вдається в боротьбі проти Англії привабити на свою бік Францію, а за ініціативою Росії низка європейських держав оголосила «озброєний нейтралітет», що сприяло підписанню мирного договору, в якому Англія визнавала повну незалежність американських колоній.

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, scemprungue tyrannis» – вирізьблено на відомому бюсті Франкліна скульптора Гудона.



Рис. 61а. Електроскоп, який використовував Вольт.

Ще за Франклінового життя електрику навчилися вимірювати. Англієць Джон Кантон (1718-1772) сконструював електроскоп. В основі приладу був металевий стрижень із підвішеними до нього ягодами бузини, які розходилися, коли виникав електричний заряд. Отже, можна було з'ясувати, заряджене тіло – чи ні, не придивляючись, чи притягує воно дрібні порошинки.

Вдосконалюючи електроскоп, Абрагам Беннет замінив ягоди бузини двома листочками тонкої золотої фольги. За наявності заряду листочки розходилися, до того ж із кута їх розходження можна було робити висновки про величину заряду.

«Дитинство» науки про електрику можна вважати завершеним з виведенням кількісного закону взаємодії зарядів – закону Кулона.

### Шарль Огюстен Кулон (1736-1806)

Народився майбутній учений 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 середньопропорційних кривих». Робота дістала схвалення, і дослідника-початківця обрали ад'юнктом по класу математики.

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 в зв'язку з дослідженнями з використанням лейденської банки).

Після закінчення школи Кулон брав участь у будівництві військових фортифікаційних споруд, і незабаром отримав чин капітана – на ті часи це було дуже швидко просування по службі. Його наукові дослідження з теорії пружності й опору матеріалів були оцінені як основоположні.

Навесні 1773 року Кулон подав свій науковий мемуар 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 статистику. Всюди в його дослідженні ми бачили глибоке знання аналізу нескінченно малих і мудрість у виборі фізичних гіпотез, а також у їх застосуванні. Тому ми вважаємо, що ця робота цілком заслуговує на схвалення Академії й гідна публікації».



Шарль Кулон

Молодий учений розширює коло своїх досліджень. Він взявся розробляти оптимальний метод виготовлення магнітних стрілок для точних вимірів магнітного поля Землі. Цю тему було визначено в конкурсі, який оголосила Паризька академія наук.

Кулон – переможець 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 діаметру.

Подальші дослідження та 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.

Після того, як розробив такий чутливий фізичний прилад, Кулон взявся 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 їх форми».

П'ятий і шостий мемуари присвячено кількісному аналізу розподілу заряду між провідними тілами, що дотикаються, й визначенню щільності заряду на різних ділянках поверхні цих тіл. Кулон з'ясував: за доторку двох одна-

кових кульок із провідника – зарядженої і незарядженої – заряд першої ділиться між двома порівну.

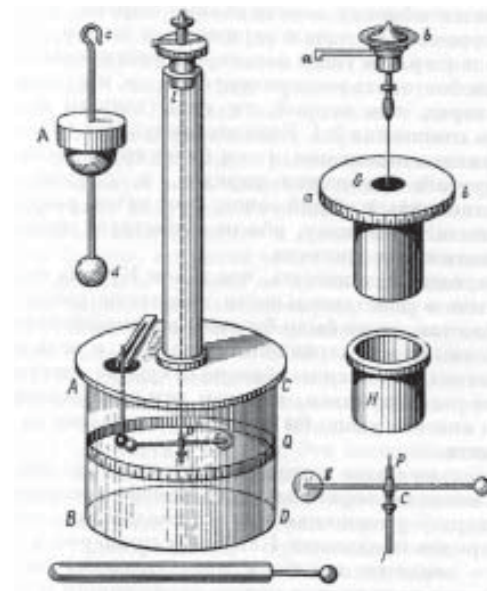


Рис. 63. Крутильні ваги Кулона.

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 діаметру. Вимірювання показали, що на порожнисту кулю перейшла рівно половина електрики масивної. 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 (1731-1810) не лише виміряв гравітаційну взаємодію між двома масивними свинцевими кулями й визначив на цій підставі коефіцієнт пропорційності, що входить до четвертого закону Ньютона, але й встановив закон Кулона... на 18 років раніше від самого Кулона! Проте, вважаючи себе насамперед хіміком, і назагал будучи людиною дивакуватою й відлюдкуватою (учений жив самотником, панічно боявся жінок і навіть зі слугами спілкувався за допомоги записочок) Кавендіш не друкував своїх робіт з 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 Лавуаз'є). 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 ученого. 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.

$$\left. \begin{array}{l} \text{"Крутильні} \\ \text{терези"} \\ \text{Досліди:} \end{array} \right| \Rightarrow \left| \begin{array}{l} F \sim q_1; F \sim q_2; \\ F \sim \frac{1}{r^2} \end{array} \right| \Rightarrow \left| \begin{array}{l} 1785 \text{ рік:} \\ F = k_o \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \\ \text{Закон Кулона} \end{array} \right|$$

Що ж до коефіцієнту пропорційності  $k_o$ , то він залежить від вибору системи одиниць. У системі СГС (або ж у Гауссовій системі, названій так на честь визначного німецького математика й фізика Карла Фрідріха Гаусса (1777-1856)), цей коефіцієнт вважають рівним одиниці, а закон Кулона в спрощеному вигляді  $F = \frac{q_1 q_2}{r^2}$  використовують для визначення величини одиничного заряду (такого заряду, що взаємодіє з однаковим розміщеним на відстані 1 см зарядом із силою в 1 дину). Натомість у системі СІ заряд визначають 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  $c$ :

$$1 \text{ Кл} = 2,998 \cdot 10^9 \text{ СГС.}$$

Коефіцієнт переходу точно дорівнює швидкості світла в системі СІ, помножений на 10. Про причини цього ми поговоримо дещо згодом.

А поки зробимо певні висновки:

Закон Кулона належить до фундаментальних законів природи.

Кулон вимірював силу взаємодії заряджених кульок, а узагальнив результати у вигляді закону взаємодії електричних зарядів.

Закон сформульовано з припущенням, що силою всесвітнього тяжіння між кульками можна знехтувати. Коли було виміряно гравітаційну сталу, це інтуїтивне припущення отримало кількісне обґрунтування.

У системі СІ коефіцієнт пропорційності, що входить до закону Кулона, дорівнює:

$$k_o = 8,988 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{Кл}^2}.$$

Говорячи про «рух зарядів» у електричному й магнітному полях, ми повинні пам'ятати: прискорення зарядженої частинки залежить не лише від її заряду, але і від маси:

$$\vec{m}\vec{a} = q\vec{E} \text{ — для електричного поля;}$$

$$\vec{m}\vec{a} = q[\vec{v} \times \vec{B}] \text{ — для магнітного поля}$$

У обох випадках  $a \approx \frac{q}{m}$ . У першому з цих співвідношень введено напруженість електричного поля  $E$ , яка характеризує інтенсивність цього поля в певній точці простору (поняття електричного й магнітного поля запровадив у фізику Фарадей). 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 століття услід за Фарадеєм 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, встановлений на основі експериментів із макротілами, буде чинним і для взаємодії заряджених мікрочасток. За часів Кулона учені виходили з припущення, що закони мікросвіту й макросвіту тождні. 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 -частинок із ядрами атомів. Він виходив із припущення, що закон Кулона працює на відстанях порядку діаметра атома. Ця теорія підтвердилася дослідженнями, які розкрили «загадки» структури атомів.

Сучасна фізика вважає, що закон Кулон «відмовляється працювати» лише на відстанях порядку діаметру атомних ядер, тобто в царині дії ядерних сил, і лише тому, що ядерні сили значно більші за кулонівські.

### Алессандро Вольта (1745-1827)



Алессандро Вольта

Народився майбутній вчений у Італії, в родовому маєтку, де його предки жили протягом багатьох століть. У ранньому дитинстві він сильно відставав від однолітків – бо навіть говорити навчився щойно в чотирирічному віці. Але згодом Вольта швидко надолужив загаяне. Він навчався в школі ордена 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).

У 30 років Вольта вже знаменитий, оскільки винайшов електрофор – прилад для дослідів зі статичною електрикою. Він складається зі смоляного диска й металевої кришки трохи меншого діаметру. Кришка має скляну ручку, за яку її можна брати, щоб покласти 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. Дотор-

кнувшись 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 зробити багато разів, не заряджаючи більше смоляний диск.



Рис. 65. Електрофор Вольти.

На вченого «золотим дощем» сиплються почесні від багатьох академій. Його електрофор – безвідмовний прилад для отримання потужних розрядів електрики.

Але головне відкриття Вольта ще попереду. А поки що він – професор, прогресивний і сміливий, оскільки пориває з традиційною латиною та навчає студентів по-італійськи.

Вольта багато подорожує: Брюссель, Амстердам, Париж, Лондон, Берлін. Серед його друзів – Бенджамен Франклін, у той час представник англійських колоній у Америці. У кожному місті на його честь проводять збори вчених, йому вручають золоті медалі й усіляко вшановують. Але все це потьмяніє перед пізнішими тріумфальними поїздками Вольта – коли він уже буде творцем «вольтового стовпа» – першої в історії людства електричної батареї.

Професорові Вольта 1791 року потрапив на очі щойно виданий трактат Луїджі Гальвані (1737-1798) «Про електричні сили в м'язах». За переказом, Гальвані виявив дію електрики на м'яз жаби, коли препарував плазуна для приготування «лікувального» (за уявленнями XVIII століття) супу поблизу електрофора, який випадково виявився в лабораторії.

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).

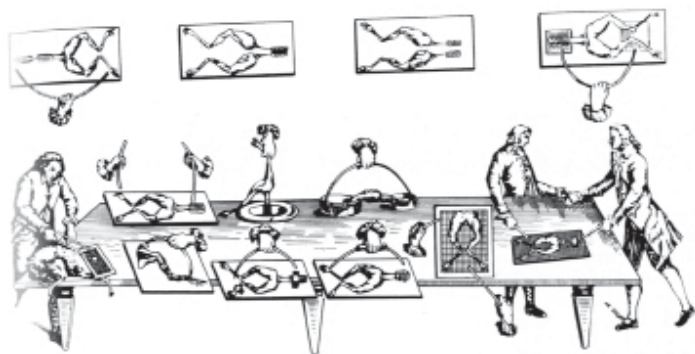


Рис. 66. Досліди Гальвані з жабами.

Відкриття Гальвані зумовило виникнення терміна «гальванічна електрика», а також започаткувало 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!

Вольта приголомшив зміст трактату. Він перечитує його кілька разів і 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 взявся до перших дослідів: таким неймовірними здавалися вони мені, такими далекими від усього, що нам досі відомо було про електрику. Нині я на вернувся 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). Геніальний здогад! Вольта поставив одне на одне понад сто металевих (цинк і срібло) кружалець, розділених змоченим солоною водою папером, і отримав досить потужне джерело електрики – «вольтів стовп». На противагу машині Геріке й електрофору, «вольтів стовп» діяв не одну мить розряду, а постійно.



Рис. 67. Перший гальванічний елемент Вольти.

20 березня 1800 року Вольта повідомив про свої дослідження Лондонському королівському товариству. Учені добре зрозуміли значущість цього відкриття для дальшого поступу науки й техніки: буквально відразу після цього повідомлення англійці Вільям Ніколсон (1753-1815) 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, виявляючи увагу. Вольта вітали фізики Лаплас, Кулон, Біо, хімік Бертолле, палеонтолог Кюв'є та інші тогочасні «світила».

Його прийняв 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 у 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 єди-на тоді тяглова сила не мусили постраждати...

Вольта став лицарем орденів Почесного легіону, Залізного Хреста, отримав звання сенатора й графа.

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 Вольта».

Наполеон Бонапарт – генерал, Перший консул, імператор Франції. Його ім'я знають усі, але мало хто знає, що він сприяв інтенсивному дослідженню електрики. У післяреволюційній Франції відбувався різкий підйом наукової діяльності. Саме в цей час у Франції вперше в 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 наука. Наполеон запровадив у практику широку підтримку (зокрема й матеріальну) вчених із боку держави.

Наполеон 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 Сімон Лаплас (1749-1827). Блискучий учений справив на майбутнього імператора незабутнє враження. Згодом Лаплас став технічним експертом, членом сенату і другом Наполеона.

Ставлення Наполеона до науки та її діячів було приязним завжди, але його заступництво набуло особливої ваги після приїзду до Парижа Вольты. Наполеон відвідав лекції Вольты та виступив із промовою – заявив, що вважає приїзд Вольты значною подією в історії французької науки.

Імператор 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 Вольты 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.

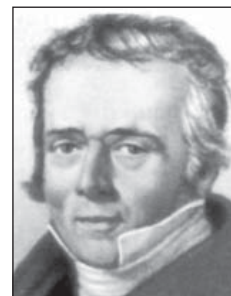
Про професора фізики Павійського університету Алессандро Вольты знаменитий французький фізик, один із представників «Аркюельського сузір'я» Домінік Франсуа Араго говорив так: «Сміливий і швидкий розум, великі й правильні думки, м'який і щирый характер – такі були основні якості знаменитого професора. Ніколи честолюбство, 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. Напевно, в цих теках було дуже багато цікавого. Але Вольта вічний, тому що є «один вольт», «двісті двадцять вольт», «тисяча кіловольт», «мільярд електрон-вольт».

У музеї міста Комо є запис професора Берцоларі: Вольты «був найбільшим фізиком, котрий жив у Італії після Галілея».

### Ганс Крістіан Ерстед (1777-1851)



Ганс Ерстед

Народився майбутній фізик на данському острові в сім'ї бідного аптекаря. Початкову освіту він здобував вельми оригінально: 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, зацікавив його й привчив любити «аромат» таємниці.

За стійкою батьківської аптеки Ганс долучається до медицини, потім він вступає до Копенгагенського університету й береться за вивчення всього – медицини, фізики, астрономії, філософії, поезії.

Він був абсолютно щасливий в університетських стінах, де панувала свобода. Тут майбутній учений міг втішатися належністю до великого царства думки та уяви, де є боротьба, де є свобода висловлювання, де переможеному дано право повстати й боротися знову – саме так оцінював своє студентське життя Ганс Ерстед.

Хоч би чим займався в студентські роки Ганс Ерстед, він робив це захоплено, а тому успішно й результативно. 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 звання доктора філософії, було присвячено медицині.

Дев'ятнадцяте століття заявило про себе новим способом життя, думок, новими соціальними й політичними ідеями, новою філософією, новим сприйняттям мистецтва і літератури. Захопленість Ерстеда не знає кордонів. Він прагне туди, де вирують наукові пристрасті – в Німеччину, Францію, інші країни, оскільки Данія на той час була європейською провінцією.

Ерстед блискуче захистив дисертацію й 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. Він у захваті від Шеллінга, особливо вразила його шеллінгівська ідея про загальний зв'язок фізичних явищ. Ерстед побачив у ній виправдання своєї різнобічності, «розкиданості» – все, що він вивчав, виявилось, згідно з цією філософією, взаємопов'язаним і взаємозумовленим. Він став одержимим ідеєю зв'язку всього зі всім!

Знайшлися споріднені душі, такі ж одержимі й романтичні. Це німецький філософ Шеллінг і німецький фізик Ріттер – винахідник акумулятора, геніальний фантазер, генератор навіжених ідей. Виходячи з суто астрономічних міркувань, Ріттер «обчислив», що епоха нових електричних відкриттів настане в 1819-1820 роках. Це передбачення збулося, відкриття сталося в лютому 1820 року, автор відкриття – Ганс Крістіан Ерстед!

Передісторія й передумови цього відкриття вельми красномовні. 1806 року Ерстед став професором Копенгагенського університету. Захоплений і перейнятий вірою в філософію Шеллінга, він багато роздумував про зв'язки між теплотою, світлом, електрикою й магнетизмом. 1813 року в Франції виходить його робота «Дослідження ідентичності хімічних і електричних сил». У цій роботі Ерстед вперше 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, і багато найкращих умів Європи нею захопилися.

У лютому 1820 року Ерстед, професор Копенгагенського університету, читав лекцію студентам і демонстрував 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 один із них звернув увагу на «дивну» поведінку магнітної стрілки, а здивування й захоплення професора в зв'язку з цим, за їхніми спогадами, було непідробне. Тут мають місце історичні різночитання, оскільки 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 Гілберт, виходячи з тих виразів, які я використовував, коли вперше сповістив про відкриття».

Хоч би як там було, але в цьому разі випадковість виявилася закономірною, оскільки Ерстед був у числі тоді ще небагатьох дослідників, що вивча-

ли зв'язок між явищами електрики й магнетизму і, як ніхто інший, Ерстед у такий зв'язок вірив. У кожному разі, данський професор відразу ж поставив простий і переконливий дослід. 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 відхилилася в протилежний бік, а за його вимкнення поверталася в початковий стан.

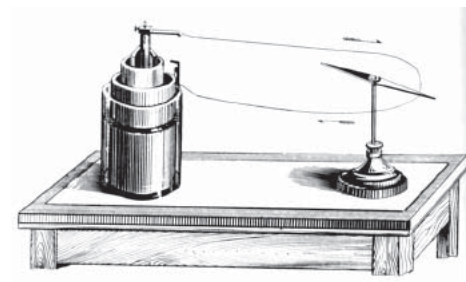


Рис. 70. Дослід Ерстеда.

Чотиристорінковий мемуар Ерстеда з описом дослідів 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 з'явився в Женеві, де в цей час перебував Домінік Франсуа Араго. Він відразу зрозумів, що знайдене вирішення проблеми, над якою він та інші вчені працювали дуже довго. Враження від демонстрованого досвіду було настільки велике, що один з присутніх з хвилюванням вимовив: «Панове, відбувається переворот!»

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 відкрив термоелектричний ефект (його незалежно відкрив німецький фізик Томас Зеєбек 1822 року) і побудував перший термоелемент. Елемент складався з двох вісмуткових пластинок, з'єднаних мідним дротом. Після того, як одну з пластинок занурювали в гарячу, а другу – в холодну воду, в колі виникав струм. 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.

Ще за життя Ерстед став національним героєм Данії. У останню дорогу його проводжали вчені, урядовці, члени королівської родини, дипломати багатьох країн, студенти й прості данці – загалом понад двісті тисяч чоловік. Звучали траурні марші, спеціально складені в його пам'ять. Усі відчували його смерть як особисту втрату.

Французький вчений Андре Марі Ампер писав про данського колегу Ганса Християна Ерстеда так: «Вчений 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».

### Домінік Франсуа Араго (1786-1853)



Домінік Араго

Араго, котрий одним із перших оцінив значення відкриття Ерстеда, навчався в Політехнічній школі в Парижі. Як член «Аркюельського гуртка» він брав участь у вимірюванні дуги паризького меридіану. 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 знову повертається до Парижа, де за кілька днів його обирають членом Французької академії.

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-Філіппа) вченого кілька разів обирають членом палати депутатів.

Роботи Араго надзвичайно різнопланові. Вони належать до астрономії, фізики, математики, метеорології. Він обстоював хвилову природу світла (всупереч панівним тоді корпускулярним уявленням). Саме на пропозицію Араго Іпполіт Жан Фізо (1819-1896) і Жан Фуко (1819-1868) поставили свої класичні досліди з визначення швидкості світла, а Урбан Левер'є (1811-1877) 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.

Араго, як тільки дізнався про відкриття Ерстеда, негайно розпочав серію цікавих дослідів. Він обвинув мідним дротом скляну рурку, в яку ввів залізний стрижень. Щойно дріт увімкнули в електричне коло, стрижень 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)



Андре Ампер

Ампер у 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 управління 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, якось він

кілька хвилин варив власний годинник, тримаючи в руці яйце! Народився майбутній учений у сім'ї ліонських торговців, його дитинство минуло в невеликому маєтку, який його батько купив у 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 Даламбер.

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 кола. 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, хоча він усе й завжди робив тільки з найкращими намірами. Після страти 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, оскільки успішно вирішувала поставлене перед нею завдання: готувати високоосвічених технічних фахівців з глибокими знаннями фізико-математичних наук.

Час Ампера – час великих відкриттів у царині електрики.

Експерименти Франкліна було поставлено, коли Андре мав шістнадцять років. Перша стаття Алессандро Вольта про гальванічну електрику з'явилася, коли Амперу було двадцять п'ять років. У цей же час Французька академія наук за вказівкою Наполеона оголосила конкурс із великою винагородою за дослідження в області вольтаїчної електрики.

Ампер уже з часів франклінових дослідів постійно думав про проблеми електрики. До двадцяти семи років у Ампера вже намітилися в загальному вигляді ті наукові ідеї, які потім буде розвинено мовою електродинаміки – науки, яку він сам і створив.

Час розквіту наукової діяльності Ампера припадає на період із 1814 по 1826 рік; за перші шість років було отримано значні математичні результати, а 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 Доменік 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 встановив, що два паралельні дроти, по яких тече струм в однаковому напрямі, притягуються один до одного, а якщо напрями струмів протилежні, дроти відштовхуються.

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 стрижень став магнітом тому, що навколо йшов струм. Араго створив перший електромагніт.

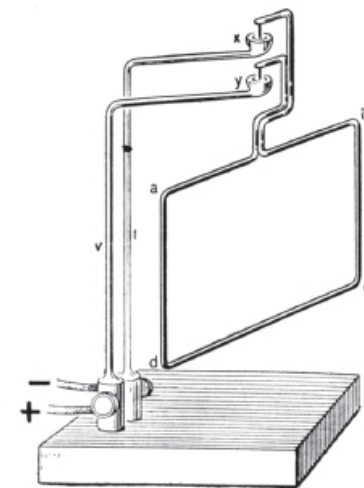


Рис. 73. Прилад Ампера.

Сьогодні вся електротехніка «пронизана» законом Ампера. Електродинаміка, яку створив Ампер, зіграла величезну роль не лише в історії розвитку фізики, але й у історії людської цивілізації.

На його честь названо місто, залізничну станцію, науково-дослідний центр, є ще музей Ампера й «Товариство друзів Ампера». У міжнародній системі одиниць (СІ) серед основних одиниць є й одиниця сили струму – один ампер.

А у всіх підручниках фізики є закон Ампера – закон взаємодії паралельних провідників довжиною  $l$ , розташованих на відстані  $R$  один від одного, по яких течуть електричні струми  $I_1$  та  $I_2$ :

$$\left. \begin{array}{l} F \sim I_1 \\ F \sim I_2 \\ F \sim l \\ F \sim \frac{1}{R} \end{array} \right\} \Rightarrow \left. \begin{array}{l} 1820 \text{ рік} \\ F = K \frac{I_1 \cdot I_2 \cdot l}{R} \\ \text{Закон Ампера} \end{array} \right\}$$

Відтак 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.

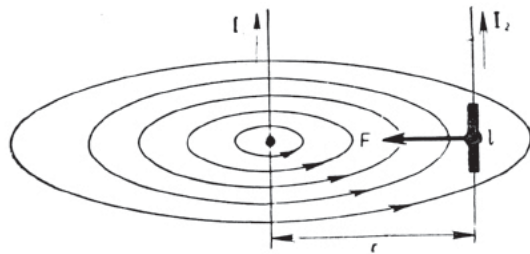


Рис. 74. Взаємодія паралельних струмів.

Із дослідних закономірностей було запроваджено величину  $B$ , яка характеризує інтенсивність магнітного поля. Вирази для магнітної індукції, що її створює струм, протікаючи по провіднику, на відстані  $R$  від цього провідника, задає 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:

$$\frac{k \cdot I_1}{R} = B_1$$

$$\frac{k \cdot I_2}{R} = B_2$$

Силкові лінії магнітної індукції навколо провідників мають форму кіл. Звідси легко отримати вираз для сили взаємодії двох паралельних провідників:

$$F = B_1 \cdot I_2 \cdot l$$

$$F = B_2 \cdot I_1 \cdot l$$

А якщо підставити у перший вираз  $B_1$  із закону Біо-Савара (або ж у другий вираз –  $B_2$ ), легко отримати записаний вище закон Ампера для сили взаємодії паралельних провідників.

Узагальнений варіант закону Ампера, який описує силу, що діє на елемент провідника завдовжки  $\delta l$ , по якому протікає струм  $I$ , з боку магнітного поля з індукцією  $B$ , спрямованого під кутом  $\alpha$  до провідника:

$$\delta F_A = B \cdot I \cdot \delta l \cdot \sin \alpha$$

**Сила Ампера спрямована в напрямку, перпендикулярному й до напрямку струму, й до напрямку магнітного поля. Напрямок її визначається правилом лівої руки.**

У векторній формі цей вираз зручно переписати як:

$$\delta F_A = B \cdot [I \cdot \delta l]$$

### Георг Сімон Ом (1787-1854)



Георг Ом

університету на відкритті пам'ятника Ому 1895 року.

Наукове відкриття Ома – закон його імені, – на відміну від відкриттів Вольты, Ерстеда, Ампера, Фарадея, не зумовило революційних змін у науковому світогляді. Але без цього наукового відкриття 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 народився в баварському місті Ерлангені неподалік від Нюрнберга в родині слюсаря, котрий успадкував ремесло своїх предків. Його мати померла, коли Георгу виповнилося сім років. Батько в повному розумінні 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 Ерлангенського 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 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, а потім повертається до Ерлангена. Та його самостійні заняття були такими успішними, що Ом за один рік закінчує університет, захищає дисертацію та отримує ступінь доктора філософії.

Викладацька робота цілком відповідала бажанням і здібностям Ома. Незабаром Ом отримує запрошення на місце вчителя математики й фізики в місті Кельн, де він «перетворився» з математика на фізика. Він із захопленням віддається не лише викладацькій, але й дослідницькій роботі, проводячи довгі години в майстерні та в сховищі приладів.

Настав час для виявлення кількісних зв'язків, що характеризують електричний струм. Треба було вибрати величини, що надаються до вимірювання. Такі поняття як напруга, падіння напруги, опір провідників ще не увійшли до наукового обігу й не стали звичними характеристиками у вивченні 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 їх опорах. Експериментатори намагалися знайти співвідношення між величинами, що характеризують електричний струм, але це їм не вдавалося.

Завдяки завзятості й цілеспрямованості, фізичній інтуїції, впевненості в успіху й ретельності, з якою Ом проводив свої експерименти, йому вдалося 1826 року встановити основний закон електричних кіл, справедливо названий його ім'ям. Для цього вченому 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.

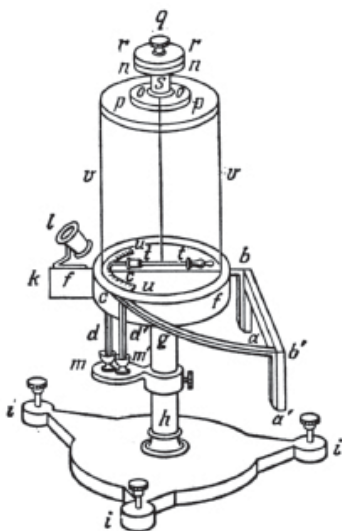


Рис. 76. Прилад Ома для визначення залежності між струмом і опором.

По-друге, на той час ще не існувало стабільних джерел напруги. Електро-рушійна сила «вольтового стовпа» після ввімкнення досить швидко зменшу-

валася. Тому Ом використав термоелемент, що його сконструювали незалежно Зеебек і Ерстед. Учений виміряв залежність кута закручування від довжини однорідного провідника (опір пропорційний довжині), й отримав пряму. Сучасною мовою – Ом показав, що напруга пропорційна до опору.

Рівно за рік – 1827 – 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. 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.

Першими з усіх зарубіжних учених Ома визнали російські фізики Еміль Ленц (1804-1865) і Борис Якобі (1801-1874), це посприяло його міжнародному визнанню. Остаточний актом визнання стало те, що Лондонське королівське товариство нагородило Ома золотою медаллю й обрало своїм членом.

Дуже емоційно відгукнувся про заслуги німецького вченого 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 столиці Баварії Мюнхені, про яку мріяв усе своє життя. За рік він одним із перших отримав щойно заснований орден «За видатні досягнення в царині науки», а ще через рік Ом помер.

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 у один ампер спричиняє падіння напруги на один вольт. Так у законі Ома стали назавжди «нерозлучними» троє видатних учених, котрі за життя ніколи не зустрічалися. Це італієць Алессандро Вольта, француз Андре Марі Ампер і німець Георг Сімон Ом. Коли 1826 року Ом опублікував свою першу наукову статтю з результатами експериментальних досліджень, 81-річному Вольта залишалося жити всього один рік, а 51-річному Амперу – 10 років.

Нині в усіх підручниках з фізики є:

закон Ома для ділянки кола з опором  $R$  ( $U$  – падіння напруги на цій ділянці,  $I$  – сила струму):

$$I = \frac{U}{R} \quad 1826 \text{ рік};$$

закон Ома для повного кола, де  $E$  – електрорушійна сила,  $r$  – внутрішній опір джерела ЕРС,  $R$  – зовнішній опір,  $I$  – струм у колі.

$$I = \frac{E}{R+r} \quad 1827 \text{ рік.}$$

### Майкл Фарадей (1791-1867)



Майкл Фарадей

Цей англійський учений зробив за своє 76-річне життя стільки відкриттів, що їх вистачило б доброму десятку дослідників, щоб обезсмертити своє ім'я. За 5 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 вузьких лабораторних стежин на широку магістральну дорогу.

Народився Майкл у одному з бідних районів Лондона в родині коваля. У початковій школі навчився читати, писати й лічити. Після початкової школи 13-річний Майкл влаштувався 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, фундатора електрохімії Гемфрі Деві (1778-1829). Свої докладні записи лекцій Майкл акуратно опрацював у палітурку й вручив ученому. Той був так приємно здивований, що запропонував Фарадею працювати в нього секретарем. Незабаром Деві вирушив у подорож Європою й узяв із собою Фарадея. За два роки 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!

Деві був світською людиною, й тихий лаборант Майкл вбирає досвід спілкування знаменитого вченого. Усе навколо – Париж, Флоренція, інші міста, зустрічі з Ампером, Гей-Люссаком, іншими вченими – все було для Фарадея школою життя. Але на старості Деві з гордістю говорив, що найбільшим його відкриттям був саме Фарадей.

Фарадей повернувся до Англії 1815 року й почав працювати асистентом у одній із лабораторій Королівського інституту в Лондоні. 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:

Перший: маса речовини, що виділилася на електроді, прямо пропорційна електричному зарядові, що пройшов через електроліт:

$$M = kQ = kIt \quad .$$

Тут  $k$  – електрохімічний еквівалент речовини.

Другий: 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  $F = N_A e$ . 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 справжню 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 Дж. Дж. 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 зворотнє 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 випадку гальванометр фіксував струм. Але щойно котушку зупиняли – струм зникав.

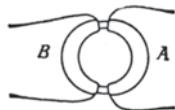


Рис. 78. Рисунок Фарадея, на яких зображено досліди, за допомогою яких він відкрив явище електромагнітної індукції.

Другий дослід виглядав так: учений узяв мідне кільце й обмотав його двома заізованими один від одного мідними дротами. У момент, коли він пропускав струм по одному з дротів, у другому також з'являвся струм.

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.

Висновок із цих дослідів міг бути тільки один: струм у замкнутому провіднику виникав за зміни магнітного поля, в якому цей провідник перебував. Так Фарадей відкрив третій вид електрики – індукційну, на додачу до перших двох: статичної та гальванічної.

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:

$$E_{\text{ЕІ}} = -\frac{d\Phi_B}{dt}; \Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

Тільки після досліджень Фарадея в царині електромагнетизму, тільки після того, як він відкрив цей прояв електромагнітної енергії, стали можливими ті «чудеса техніки», яке зробили XIX століття «віком електрики й пари» і мали бурхливе продовження в столітті XX. Першим у 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 жили 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 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). Сіменс звер-

нув увагу на те, що залізо серцевини електромагніта зберігає сліди намагніченості й потому, як струм вимкнено. Отже, коли ротор починає обертання, цей залишковий магнетизм відразу забезпечує початок генерації без додаткового незалежного кола живлення електромагніта.

А все почалося зі скромного мідного кільця з двома обмотками. Саме таке кільце бронзовий Фарадей тримає в руках на пам'ятнику, встановленому перед Королівським інститутом у Лондоні, професором якого вчений був із 1827 року.



Рис. 79. Статуя Фарадея з катушкою, за допомогою якої було відкрито електромагнітну індукцію.

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 розташовувалася перпендикулярно щодо того, як розташовувалася 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 XX століття Поль Ланжевєн.

На час відкриття електромагнітної індукції роботу Фарадея вже добре винагороджували, а всі життєві турботи зняла з нього дружина, 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. Шукаючи сутність реальних явищ, саме Фарадей запровадив поняття про «поле» як середовище, крізь яке передається електрична й магнітна дія. 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 вмістити в поле. І залізні ошурки, й діелектричні кристалики вишиковуються за лініями поля, роблячи його видимим, а отже – матеріальним!

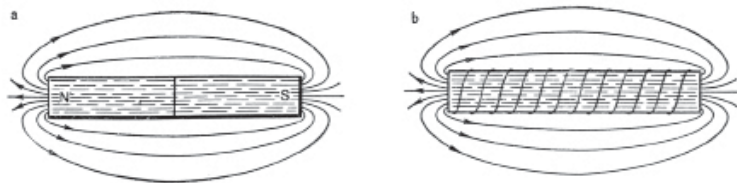


Рис. 80. Силові лінії постійного магніта і соленоїда.

Фарадей уславився не лише своїми численними дослідженнями (пригадаймо 16041 дослід!) й 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. Коли вже був 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 «дитячих» лекціях можна було зустріти слухачів «від 8 до 80». Фарадей вважав, що діти з цікавістю сприймають усе, що їх оточує, й прагнуть усе знати. Найнебезпечніше – це вбити в дітей відчуття подиву й захоплення!

Своїх популярних лекцій Фарадей, на жаль, не записував. Але, на щастя, серед його слухачів був молодий чоловік на ім'я Вільям Крукс, котрий записав два цикли таких лекцій: «Про різні сили в природі» (1860) та «Хімічна історія свічки» (1861) й надрукував їх. Їх переклали багатьма мовами (російською – ще за життя Фарадея) 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 виийняли 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 Хайгейтському кладовищі 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 надписа-

но так: «Нові погляди, що їх належить до часу зберігати в архівах Королівського товариства».

Понад століття потому (1938 року) конверт було розкрито в присутності англійських учених. Слова на пожовклому аркуші паперу вразили всіх! Виявилось, що вже у той час 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.

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. Але саме роботи Майкла Фарадея стали стати 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».

Дуже категорично? – Так. Але ці слова він підтвердив власним життям. А тому 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.

У записях 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

Джозеф Генрі – американський фізик, член Національної академії наук США, протягом останніх двадцяти років життя її президент. Його наукові роботи присвячено електромагнетизму. Генрі вперше сконструював потужний підковоподібний електромагніт, застосовуючи багатопарові обмотки з ізолюваного дроту (вантажопідйомність досягла однієї тонни).

1831 року він 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 Принстонського 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 коливання камертона, й урешті-решт мало величезне значення для розвитку радіотехніки.

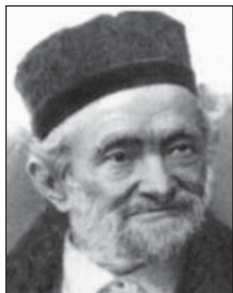
Історія цього відкриття вельми повчальна й прекрасно демонструє силу людської винахідливості, що виявлялася тоді, коли сучасних електровимірювальних приладів ще не існувало. Генрі розряджав лейденську банку через спіральну обмотку. Всередину обмотки він увів цвяхи – і ці цвяхи намагнітилися. В цьому 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 вклав у обмотку дуже маленькі цвяшки, 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 цвяшки 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 зберігалося у вдячній пам'яті нащадків. Пам'ятаймо: одиницю індуктивності «генрі» названа на честь ученого-фізика Джозефа Генрі.

### Вільгельм Вебер (1804-1891)



Вільгельм Вебер

Одиниця вимірювання магнітного потоку в системі СІ – один вебер. Хто стоїть за цією назвою?

Вільгельм Вебер – німецький фізик, чий науковий дослідження присвячено електромагнетизму. Він побудував перший у Німеччині електромагнітний телеграф – спільно з Карлом Гауссом (1777-1855), розробив теорію електродинамічних явищ і відкрив закон взаємодії рухомих зарядів.

Вебер уперше вказав на зв'язок сили струму з густиною електричних зарядів і швидкістю їх 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.

Щоб запровадити абсолютну систему одиниць у електромагнетизм, треба було виконати тонку метрологічну роботу, що вимагала одночасно глибоких теоретичних підстав і експериментальної витонченості.

Наука знайшла блискучого виконавця цього складного завдання в особі Вільгельма Вебера. Понад двадцять років Вебер вів систематичні метрологічні дослідження, в яких реалізувалася ідея Гауса про зведення вимірювання всіх фізичних величин до вимірювання маси, довжини й часу.

Експерименти Вебера (1856) 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), і абсолютною одиницею сили струму, встановленої з магнітної взаємодії струмів на основі закону Ампера. Досліди Вебера дали дивовижний результат: це відношення виявилось рівним

$3 \cdot 10^8$  м/с, що збіглося зі швидкістю світла! (Наслідком цього є аналогічна ситуація з коефіцієнтом пропорційності між одиницями заряду в системах СІ та СГС, про яку ми вже говорили).

Цей збіг не привернув особливої уваги Вебера. Проте приблизно за десять років Джеймс Максвелл побачив у цьому збігові одну з експериментальних підстав електромагнітної теорії світла. Справді, відношення величин, що мають електромагнітну природу, дає за чисельним значенням і розмірністю швидкість світла у вакуумі. Це не могло бути випадковістю. І подальший розвиток фізики підтвердив проникливість Максвелла.

### Михайло Остроградський (1801-1862)



Михайло  
Остроградський

Серед учених, котрі формували математичний апарат фізики й сприяли таким чином завершенню стрункої будови класичної електродинаміки, почесне місце належить нашому землякові Михайлові Васильовичу Остроградському.

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 часто завдавав тим 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 ступеню кандидата в Харківському університеті – 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 Парижу, 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 Коші 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 мо-

лодого вченого до боргової в'язниці, звідки його визволив, сплативши штраф, той-таки Коші.

За рекомендацією вчителя Остроградський отримує кафедру математики в престижному тоді 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 Ейлера – 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 відчуваючи 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 Гюґо «Знедолені». На революційних барикадах дістає тяжке поранення, сліпота на праве око й головний біль лишаються з ним до кінця життя. Ще недужий, учений на особистий наказ імператора Миколи I повертається до Росії.

Подорож взимку через усю Європу мало не вбила його. Тільки двомісячне лікування в Ризі рятує Остроградського від повної сліпоти, але до занять наукою він може 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 снаряду 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» він вивів знамениту формулу, що пов'яже інтеграл, взятий по об'єму, з інтегралом по поверхні, 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

єдиний набуде вигляду фундаментального рівняння електродинаміки, першого з чотирьох рівнянь Максвелла:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = 4\pi \int \rho dV$$

Фізично це співвідношення означає: потік електричного поля через замкнуту поверхню дорівнює повному зарядові, що міститься всередині цієї поверхні, помноженому на  $4\pi$  ( $\rho$  – густина заряду). Таке твердження отримало назву теореми Гаусса, на честь Карла Гаусса, котрий вивів другу з формул, виходячи з закону Кулона.

Через те й перше, більш загальне з двох рівнянь, що пов'яже 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 учений мав у очах влади ярлик «неблагонадійного». Особливо посилилися 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 автора талановитої магістерської дисертації про метеори Головка 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 засланні 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 погірбіці, 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 запише 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 застудив-

ся – і вже не зміг одужати. У перший день нового 1862 року вчений згас у рідній Полтаві.

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 на честь визначного математика названо державний університет у Кременчуку.

### 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, а 13 червня 1831 року – день народження Джеймса Максвелла, з яким ми вже зустрічалися в попередній частині посібника, говорячи про його праці з молекулярно-кінетичної теорії газів.

На основі відкриття Фарадея спадкоємець знаменитого старовинного шотландського роду згодом сформулює великі рівняння – рівняння Максвелла.

Перш ніж взятися до побудови теорії електромагнітного поля, Максвелл ретельно вивчив експериментальні дослідження Фарадея. Він дійшов висновку, що Фарадей у своїх пошуках спирався на систему переконань, яку можна виразити в математичній формі.

Фарадееве уявлення про електромагнітне поле було безпосереднім вираженням даних досліду. Максвелл знайшов математичні вирази, адекватні моделям Фарадея. Вони дозволили глибше зазирнути в суть електромагнітних явищ і передбачити основні властивості електромагнітного поля.

«Трактат з електрики й магнетизму» – так називається головна праця Максвелла й вершина його наукової творчості. У ній він підбив підсумки багатолітніх досліджень з електромагнетизму. Дев'ятнадцять років працював Джеймс Максвелл над своєю основоположною працею!

Максвелл розглянув 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 підтверджував: взаємодія на відстані шириться миттєво. А отже, сама думка про скінченність швидкості поширення взаємодії багатьом здавалася єретичною. Тож Максвелл виклав фарадєївську 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 учення.

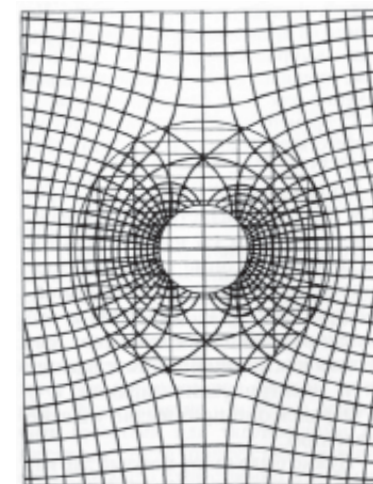


Рис. 84. Картина силових ліній електромагнітного поля з «Трактату з електрики й магнетизму» Максвелла.

«Експериментальні дослідження з електрики» Фарадея двадцятирічний Максвелл сприйняв так, що цю «зустріч» можна характеризувати не лише як любов із першого погляду, але і як любов на все життя. Ця робота Фарадея справила на 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 вдягти 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».

Ось цією «якщо не технічною, то природною» мовою Фарадей зміг виразити складні поняття, які лягли в основу максвеллівської теорії.

Реалістично мислячи, Фарадей, котрий докопувався до найглибших 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 дію, Фарадей назвав полем. Теорію цього фарадеївського електромагнітного поля створив Максвелл, котрий «за щасливою закономірністю» був блискучим математиком.

Вчитуючись у сторінки «Експериментальних досліджень» Фарадея, Максвелл усвідомив, що закиди в «нематематичності» переконань Фарадея були невиправданими, а тому й неспроможними. 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 в звичайній математичній формі й таким чином уможливити його зіставлення з методами визнаних математиків».

Метод можна виразити «в звичайній математичній формі». Для кого звичайній? – Далеко не для всіх!

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». У інтегральному вигляді в Гауссовій системі (системі СГС) рівняння Максвелла нині записують так:

I. Теорема Гаусса:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = 4\pi \int \rho dV$$

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:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \frac{4\pi}{c} \int \vec{j} \cdot d\vec{A} + \frac{1}{c} \int \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \cdot d\vec{A}$$

Генріх Герц, знаменитий німецький фізик, котрий надав цим рівнянням їхнього «канонічного вигляду», так писав про невичерпність теорії Максвелла: «Не можна вивчати цю дивовижну теорію, не переживаючи часом такого відчуття, ніби математичні формули живуть власним життям, володіють власним розумом – здається, що ці формули розумніші за нас, розумніші навіть від самого автора, бо вони дають нам більше, ніж свого часу було в них закладено».

Теорія електромагнітного поля Максвелла – триумф ідей Фарадея. Максвелл, за висловом американського фізика Роберта Міллікена (1868-1953), ко-

трий, 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! Максвелл безперервно думав про цей дивний збіг, і рівняння теж «думали».

Електромагнітне поле, як зрозумів Максвелл, шириться у вигляді хвилі, до того ж хвилі незгасаючої (у вакуумі) – енергія магнітного поля повністю переходить у енергію електричного поля, й навпаки. Але ж у вигляді таких самих поперечних хвиль шириться й світло!

Максвелл робить відразу два фундаментальних і далекосяжних висновки:

- Електромагнітне поле шириться в просторі у вигляді поперечних хвиль.
- 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 – це і є видиме світло!

Цей 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, встановленої через заряд і час (струм – це кількість заряду, що проходить через переріз провідника в одиницю часу), та абсолютною одиницею сили струму, встановленої через магнітну взаємодію струмів на основі закону Ампера. Дослід базувався на урівноваженні 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.

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 електричних взаємодій.

Після виходу в світ «Трактату про електрику й магнетизм» 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 триумфального торжества своєї теорії не дочекався.

Очевидно, здоров'я вченого підкосила й 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 вгору 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 яких бриніло справжнє почуття. Звістку про фатальний діагноз (рак у 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» – ось «сліди» в науці «визнаного лідера математичних фізиків». Він створив ще безліч шедеврів у найрізноманітніших галузях – від першої в 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 зсуву Максвелла». Пам'ять про нього зберігає й назва одиниці магнітного потоку в гауссовій системі – максвел.

Експериментально підтвердив існування електромагнітних хвиль, що їх теоретично передбачив Максвелл, німецький фізик Генріх Герц за дев'ять років після смерті геніального вченого – 1888 року.

### Генріх Герц (1857-1894)



Генріх Герц

Генріх 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 Генріха суттєво змінилися. Батьки не заважали хлопчикові шукати своє покликання й дозволили йому перейти в гімназію, по закінченні якої він набував право вступу до університету.

Генріх 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 зем-

не – нічого в ній 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 ексцеленціє!»

Вченого-початківця Генріха Герца повністю захопила обов'язкова для випускника робота над докторською дисертацією. Незабаром дисертацію було блискуче захищено, а її автору присуджено ступінь доктора наук із рідкісним у історії Берлінського університету предикатом – «з відзнакою». І це у таких строгих і вимогливих професорів, якими були Гельмгольц та Кірхгофф!

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 Берліну 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 Нойманна (1798-1895) – одного з яскравих прихильників ідеї далекодії. Електродинамічні рівняння Нойманна 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 Нойманна 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 експериментальна лабораторія, яка забезпечила Герцу свободу творчого експерименту-

вання, 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 вельми швидкі електричні коливання».

Учений здійснив перехід до відкритого коливального контуру! Герц конструює вібратор (генератор) – він складався з 2-х прямокутних цинкових пластин 40 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 встановлює 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.

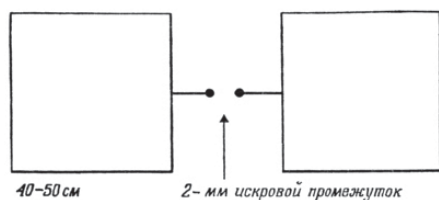


Рис. 86. Вібратор Герца.

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 зникло малими».

Пояснімо «подив» Герца. Електромагнітне поле поблизу лінійного вібратора (у так званій ближній зоні) визначається миттєвими значеннями сили

струму та заряду в 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, окрім 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  $r$  значним є 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 електромагнітна хвиля. Змінні електрична та магнітна складові хвилі забезпечують тим самим, відповідно до теорії Максвелла, існування електромагнітного поля, що шириться; тобто, саме в мінливості – основа існування електромагнітної хвилі.

Щоб не збитися зі шляху під час експериментування, треба було вирішити й теоретичні проблеми. А позитивний досвід у Герца щодо цього, безумовно, був.

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 їх 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 пучності!

Генріх 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; результати їх 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».

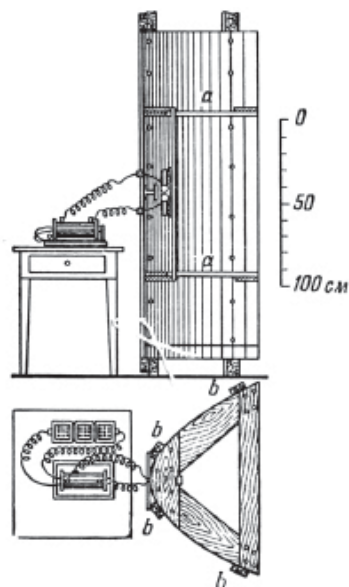


Рис. 87. Прилад Герца для дослідження властивостей електромагнітних хвиль.

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 двохтонну асфальтову лінзу, й показав, що ці хвилі заломлюються!

Генріх 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: «Всі ці досліди дуже прості в принципі, а проте вони тягнуть за собою найважливіші наслідки. Вони руйнують кожну 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».

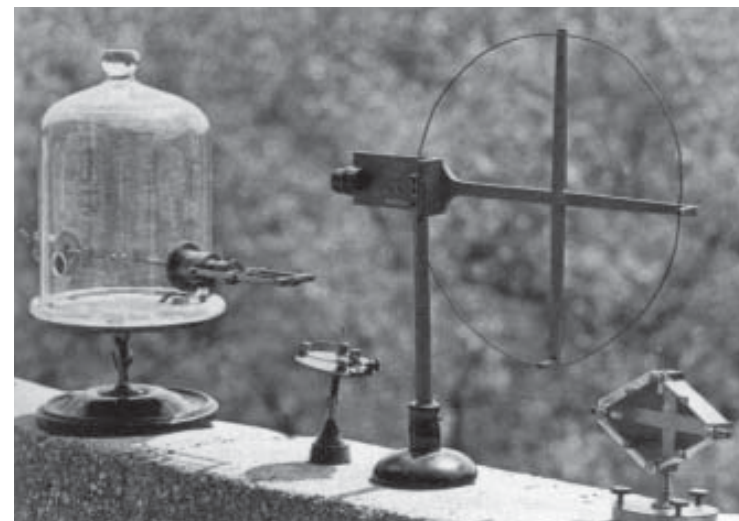


Рис. 88. Прилад Герца для генерації електромагнітних хвиль.

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 видивлятися ледь помітні іскорки. Потім настало загальне зараження крові в ослабленому роботою з радіовипромінюванням організмові. Проте до самого кінця вчений не шкодував, що прожив своє життя саме так.

Ще за життя Герц удостоївся великих почесей – отримав багато нагород, премій і медалей. А після його смерті вдячні нащадки спорудили йому «вічний пам'ятник»: ім'ям Герца названа одиниця частоти коливань: один герц – одне коливання в секунду.

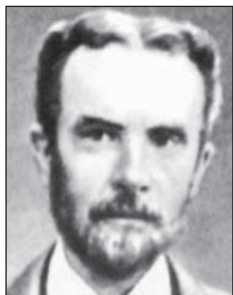
Досліди Герца були фундаментальні не лише з фізичної, але і з філософської точки зору.

У статті «Дослідження щодо поширення електричної сили» Герц так оцінив значущість своїх робіт: «Сукупністю описаних дослідів вперше було доведено ширення зі скінченною швидкістю сили, яку досі вважали такою, що діє на відстані миттєво. Цей факт є філософським, і заразом, у певному сен-

сі, найважливішим досягненням дослідів. У цьому доказі містилося пізнання того, що електричні сили можуть відділятися від тіл із вагою й існувати далі самотійно, як стани або зміни простору».

Генріх 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 Хевісайд (1850-1925)



Треба віддати данину історичній справедливості. Річ у тім, що рівняння Максвелла в тому вигляді, в якому їх нині бачимо в усіх підручниках фізики для вищої школи, записав не Максвелл; це зробили Генріх Герц і Олівер Хевісайд.

«Трактат із електрики й магнетизму» Максвелла – величезна праця. У ній понад тисячу сторінок, на яких обгрунтовано й пояснено сенс максвеллівських рівнянь.

Вивчаючи цю фундаментальну працю Максвелла, Герц і Хевісайд (незалежно один від одного) показали, що деякі з рівнянь виводяться одне з одного, тобто не є незалежними. У рівняннях Максвелла треба було розібратися, виділити основні й подати у вигляді лаконічної системи.

Генріх 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 Генріх Герц, як «справжній німець», використовував символіку старонімецького готичного шрифту.

Теорія Максвелла захопила ще одного вченого, англійського фізика й математика Олівера Хевісайда. Він ретельно опрацював «Трактат» Максвелла і, так само як Герц, прийшов до необхідності гармонізувати системи рівнянь теорії електромагнітного поля. Таким чином, завдяки зусиллям Герца і Хевісайда, «розкидані формули» Максвелла було зв'язано в струнку систему рівнянь, яка залишається незмінною досі.

Хевісайд, безумовно, був генієм – це розуміли його сучасники, і тим паче очевидним це виглядає з точки зору сьогодення. Адже він отримав формулу  $E = mc^2$  раніше від Ейнштейна на півтора десятки років.

У свої 18 Олівер Хевісайд 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 зі вдвічі

більшою швидкістю, ніж у зворотному напрямку. Рівняння Максвелла допомогли Оліверу знайти розгадку цього явища. Виявилось, що кабелі Англії й Данії мали різні перетини.

Вважаючи математику за служницю техніки, Хевісайд запропонував безліч дуже корисних математичних формул. Схоже, що ці формули він не виводив і не обгрунтовував – 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 Хевісайд, збагатила не одного підприємця, а він сам – вчений, відлюдник і дивак за вдачею, – жив досить бідно.

Хевісайда вибрали членом Лондонського королівського товариства, але він ніколи не брав участі в засіданнях, оскільки був байдужим до цієї високої наукової почесності.

Після відкриттів Герца Хевісайд зацікавився проблемою поширення електромагнітних хвиль і визначив, що у верхніх шарах атмосфери має бути іонізований шар, що відбиває радіохвилі. Нині цей шар по праву називається шаром Хевісайда. Саме він дозволяє нам чути передачі на коротких хвилях за тисячі кілометрів, а не в межах прямої видимості ретрансляторів, як телепередачі чи передачі FM-станцій.

Протягом двадцяти років Хевісайд не опублікував жодної роботи – адже, знаючи про непросту вдачу вченого, редактори шанованих наукових журналів ставилися до його праць із пересторогою. Нині ми не можемо вповні оцінити, чого ж «накоїв» у науці й техніці цей дивакуватий, але, безумовно, геніальний англієць. Коли 75-річний Хевісайд пішов із життя, його рукописи хтось викрав. Проте п'ятитомна монографія Хевісайда «Електромагнітна теорія», на щастя, все-таки залишилася.

### Олександр Попов (1859-1906)



Винахідник радіо, фізик і електротехнік Олександр Попов народився на Уралі, в сім'ї священика. Закінчив загальноосвітній цикл пермської духовної семінарії й почав самотужки готуватися до вступних іспитів у Петербурзький університет на фізико-математичний факультет. Уже студентом, шукаючи підзаробітку, Попов приходив у 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 Техніч-

ному 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.

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 їх 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, який сам сконструював. Учений закінчив доповідь такими словами: «можу висловити сподівання, що мій прилад за подальшого вдосконалення можна буде застосовувати для передання сигналів на відстань за допомогою швидких електромагнітних коливань, що мають достатню енергію».

За рік, 26 травня 1896 року, Попов передав першу в світі радіограму, яка складалася з двох слів: «Генріх Герц». Потому вчений посилено працює над вдосконаленням свого винаходу й передає сигнали на 60 м, на 250 м, на 5 км, і, нарешті, 1899 року – на 50 км.

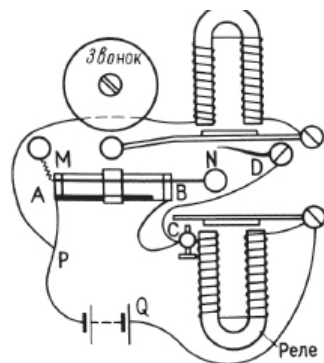


Рис. 91. Схема приймача Попова.

Морське відомство доручає Попову почати широку роботу з впровадження бездротового телеграфу на судах російського флоту. І водночас – засекречує на певний час його роботи, що фатальним чином відбулося на пріоритеті та міжнародній відомості російського дослідника.

1896 року італійський інженер Гульєльмо Марконі (1874-1937) подав заявку на патент на винайдення радіо. 1897 року він отримав англійський па-

тент, що закріпив його юридичне право на цей винахід. На початку 1897 року в маловідомій кронштадській газеті «Котлін», розрахованій на офіцерів флоту, з'явилася коротка стаття Попова, в якій він писав, що ще 1895 року сконструював і продемонстрував на засіданні Фізико-хімічного товариства прилад, що його тепер запатентував Марконі.

Проте цю статтю мало хто прочитав. І світ досі вважає винахідником радіо італійського інженера-самоука (Марконі мав лише домашню освіту), а не російського професора, змушеного працювати в умовах секретності.

Італійський винахідник справді 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. Трохи пізніше Браун винайшов перші кристалічні детектори: кристали напівпровідника (тоді найчастіше використовували сульфід кадмію) з притиснутим металічним вістрям, які мали випрямляючі властивості. Такі контури й детектори дозволили створити перші детекторні приймачі. Ці 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!



Рис. 92. Марконі біля приймача.

Навіть із застосуванням таких примітивних приймачів 1901 року вперше було вловлено сигнал через Атлантичний океан. Радіо швидко стало реальністю життя мільйонів людей. 1909 року Марконі й Браун отримали Нобелівську премію з фізики. Кандидатури Попова за його життя ніхто не розглядав...

Дальший розвиток радіо 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. За роботи, покладені в основу принципу дії електронних ламп і (пізніше) кінескопів, Річардсон став лауреатом Нобелівської премії 1928 року.

### Микола Пильчиков (1857-1908)



Микола Пильчиков

5 квітня (за старим стилем – 25 березня) 1898 року в переповненій залі Одеської Біржі професор Новоросійського університету (тепер – Одеський національний університет ім. Іллі Мечнікова) Микола Пильчиков продемонстрував низку дивовижних дослідів: за командою, переданою радіосигналом, спрацювали моделі семафора й маяка, стріляла маленька гарматка, вибухала модель яхти в басейні. Так було покладено початок новій дисципліні – радіотелемеханіці.

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 (значно пізніший фонограф Едісона був лише механічним!)

Залишений після навчання для підготовки до отримання професорського звання, молодий дослідник конструює 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 спектру (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. Так було відкрито явище електрофотографування (сам учений назвав його фотогальванографією).

Паралельно вчений працює над вивченням щойно відкритих Х-променів і радіоактивності. Він також захоплюється роботами з радіозв'язку (у вересні 1897 Пильчиков навіть асистував був О.Попову під час його доповіді в Одесі). Саме він стає ініціатором створення Фізичного інституту при Ново-

російському університеті й комплектує тут першокласну вимірювальну лабораторію.

Після повернення 1902 року до Харкова Пильчиков очолює кафедру фізики й фізичну лабораторію Технологічного інституту (тепер – Національний технічний університет «ХПІ»). 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 милітаризму й воєнного застосування наукових відкриттів.

Але після короткої відлиги часів революції 1905-6 років у Російській імперії починається жорстока політична реакція. Знову наростають гоніння на все українське. Микола Пильчиков не витримав цькування чорносотенних колег-професорів, 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 в світі вважають американця (хорвата за походженням) Ніколу Тесла (1856-1943), 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)



Іван Пулюй

На відміну від Миколи Пальчикова, людська доля Івана Пулюя була відносно благополучною. Прожив учений тривале (як на той час) і насичене життя. Проте єднає його з Миколою Пальчиковим те, що обидва були свідомими українцями й обидва мали шанс потрапити до шкільних підручників фізики. Але в силу не залежних від них обставин не зреалізували цього шансу – і аж ніяк не мализна їхнього наукового доробку стала на заваді.

Іван Пулюй народився в містечку Гримайлові (тепер це Тернопільська область) у родині заможного й шанованого землероба, котрий певний час обіймав був навіть посаду місцевого бургомістра. По закінченні Тернопільської гімназії батько вирядив сина до столиці імперії, Відня, сподіваючись, що там він отримає першокласну освіту й повернеться в рідне містечко священиком.

Проте математика, фізика й астрономія переважили – й усупереч батьковій волі Іван переходить із теологічного на філософський факультет. По закінченні університету молодий учений отримує престижне призначення у Військово-морську академію в місто Фіуме (тепер – Рієка в Хорватії).

А 1875 року переїздить до Страсбурга, де отримує ступінь доктора філософії з фізики. Тут він уперше перетинається зі своїм однолітком Карлом Рентгеном.

З 1884 року вчений працює у Вищій німецькій технічній школі в Празі. Для нього то не був закордон – адже й Прага, й рідний Гримайлів лежали тоді в межах однієї імперії – Австро-Угорської. З 1902 року він – декан першого в Європі електротехнічного факультету. А в 1912-13 роках товаришує з Альбертом Ейнштейном, котрий теж тоді викладав у Празі...

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 одній грам-молекулі тощо. Відтак цифри, що їх отримали попередники (зокрема й славетний Максвелл) було суттєво уточнено.

Друге коло робіт Пулюя пов'язане власне з електротехнікою. Він суттєво вдосконалив технологію виготовлення ниток для ламп розжарювання, – і його лампи, що значно перевершували за характеристиками лампи Едісона, демонструвалися на Всесвітній виставці 1884 року. Він першим дослідив неонове світло. Він принципово вдосконалив конструкцію телефонних станцій із застосуванням розподільчого трансформатора – й отримав на це кілька патентів різних країн. Зрештою, він отримав звання державного радника – і суттєво впливав на формування «електротехнічної політики» Австро-Угорщини.



Рис. 95. Лабораторія Пулюя в Празі.

Нарешті, він ще 1882 року (значно раніше від Рентгена!) сконструював газорозрядну трубку, за допомоги якої отримав Х-промені. Й тут дослідникові-українцеві фатально не пощастило.

Невідомі раніше промені, за допомогою яких можна було бачити крізь непрозорі стінки, фотографувати внутрішні органи чи кістки, Карл Рентген виявив (за його власними словами – випадково) 8 листопада 1895 року, а коротку статтю-повідомлення про це подав до провінційного наукового журналу в Німеччині 28 грудня того самого року (фізичний механізм відкриття натовді був для Рентгена незрозумілим).



Рис. 96. Знімок руки, який отримав К. Рентген.

Натомість дві докладні статті Пулюя, які підсумовували тривале дослідження Х-променів, було надіслано 13 лютого і 5 березня 1896 року до престижного журналу «Повідомлення Імператорської академії наук» у Відні. У них Пулюй, крім усього, описує іонізуючу здатність нововідкритих променів. Багато місця Пулюй приділяє місцю та механізму виникнення Х-променів.

Про це було написано дослівно 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».

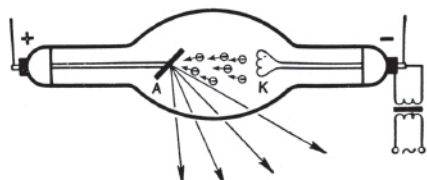


Рис. 97. Бомбардований катодними променями (електронами) анод А випромінює  $x$ -промені.

На той час іще широко застосовували поняття про ефір як про середовище виникнення і розповсюдження 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 Карл Рентген і через десять років не цілком розумів, що ж саме він бачив. Нарешті, саме Пулюй першим отримав якісні рентгенограми внутрішніх органів і кісток людини (ці знімки репродукували всі наукові журнали), а також зробив перший знімок цілого людського скелету.

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 за нього Пулюй – зустрілися навесні 1869 року в Відні й вирішили об'єднати свої зусилля. Адже Пулюй добре знав грецьку, якою написано Євангелія! 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. Впевнивши себе таким чином у вірності нашого перекладу, робили ми послідню редакцію красномовну».

Протягом 1872 року в основному було завершено переклад усього Святого Письма – але видати його завадив брак коштів. Вдалося 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.

Після виходу української Біблії Пулюй вживав 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 Победоносцева. Мало того – примірники, що їх він 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.

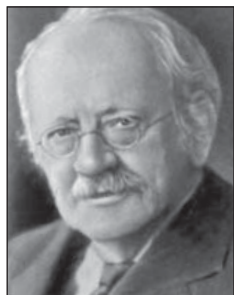
Текст Святого Письма в перекладі Куліша, Пулюя й Нечуя-Левицького не раз перевидано – востаннє 2003 й 2008 року.

Іван Пулюй був справжнім ученим-патріотом, просвітником свого народу. Він надрукував кілька десятків своїх праць у найпрестижніших тогочасних наукових журналах Європи, й опублікував також чотири статті українською мовою у виданнях Наукового товариства імені Шевченка у Львові. Кількома виданнями вийшли українською мовою (у Відні та Львові) його науково-популярні книжки «Непропаща сила» (про закон збереження енергії) та «Нові і перемінні звізди» (про досягнення астрономії). Мова цих книжок здаватиметься сучасному читачеві подекуди дивною, 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, змуджені 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».

Сьогодні ім'я Івана Пулюя носить Тернопільський національний технічний університет. На його честь названо премію за наукові досягнення, яку призначила президія НАН України.

### Джозеф Джон Томсон (1856-1940)



Джозеф  
Джон Томсон

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 Трініті-коледжі Кембриджського університету. Після закінчення університету почав працювати в не менш знаменитій Кавендішській фізичній лабораторії.

Маючи 24 роки, Томсон публікує першу свою наукову статтю про електромагнітну теорію світла.

Томсон був одержимий експериментальною фізикою. Він так звик самотужки досягати поставленої мети, що говорили про його зневагу до думки авторитетів. Кажали також, що Томсон вважав за краще самостійно шукати відповідь на будь-яке наукове питання, замість того щоб звертатися до книг і готових відповідей. Може, це й перебільшення, але «немає диму без вогню».

Директор лабораторії так високо цінував наукові досягнення молодого вченого, що, йдучи з посади, порекомендував кандидатуру свого наступника – 28-річного Томсона.

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 поквапне рішення.

Всі, 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. 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 денного стояли такі наукові проблеми: проходження електричного струму через

гази, електронна теорія металів, дослідження фізичної природи різних променів тощо.

Вдосконалення газорозрядних трубок зумовило актуалізацію питання про фізичну природу так званих «катодних променів», джерелом яких є катод (негативний електрод) трубки. Коли з трубки відкачували 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 вважали їх хвилями. Проте англієць Вільям Крукс (1832-1909) за допомоги легкого пропелера, що обертався, продемонстрував наявність у цих променів імпульсу й висловив припущення про їхню корпускулярну природу. Його підтримав «старійшина» німецьких фізиків Гельмгольц.

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 їх 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 у електричному полі (сила його не залежить від швидкості корпускул) компенсувалося відхиленням у магнітному полі (сила якого пропорційна швидкості). Звичайно, тут саме відхилення в електричному полі від швидкості залежить – адже саме вона визначає, скільки часу частинка летітиме між електродами, які її відхиляють.

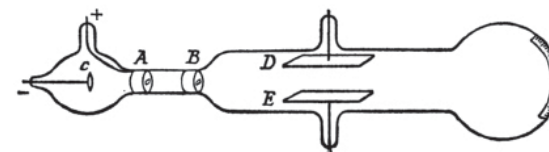


Рис. 99. Прилад Томсона для визначення співвідношення  $q/m$  частинок катодних променів.

Відтак учений отримав два несподівані результати: виявилось, що частинки рухаються з величезними швидкостями порядку  $1/10$  с (доти таких швидкостей у 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. Відтак 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 гарне 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 мусили бути надзвичайно малими!

Томсон виявив: відношення заряду корпускул, із яких складаються промені, до їх 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.

Отже, «неподільний» атом складається з чогось дрібнішого? На той час сама думка про таке здавалася єретичною!

Томсон взявся за розрахунки. І ось вони, перші результати розрахунків: сумнівів немає, невідомі частинки – не що інше, як найдрібніші електричні заряди, неподільні атоми електрики – електрони! Ці найдрібніші частинки приблизно в 2000 разів легші за найлегший атом 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 їх існування. 29 квітня 1897 року відбулася доповідь у приміщенні, де вже понад двісті років проводило засідання Лондонське королівське товариство. Високий худорлявий доповідач говорить упевнено й чітко. Асистенти тут-таки, на очах у присутніх готують і проводять демонстраційні досліди. Катодні промені в трубці слухняно відхилялися й притягувалися магнітним і електричним полями. Відхилялися й притягувалися так, як мали відхилятися й притягуватися, якщо вважати, що вони складаються з найдрібніших негативних заряджених частинок.

Слухачі були в захопленні, доповідь не раз переривали оплесками. Поважні члени Королівського товариства схоплювалися з місць, юрмилися біля демонстраційного столу, висловлюючи свій захват. Отже, «неподільний» атом – складна структура?!

У 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.

Він-таки запропонував на початку XX століття електронну модель атома: так званий «пудинг із родзинками». У цій моделі атом являв собою «хмару»

позитивного заряду, в якій «плавали» негативні електрони. 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 дослідами з розсіювання  $\alpha$ -частинок «планетарну» модель атома, в якому позитивний заряд зосереджено в центральному важкому ядрі.

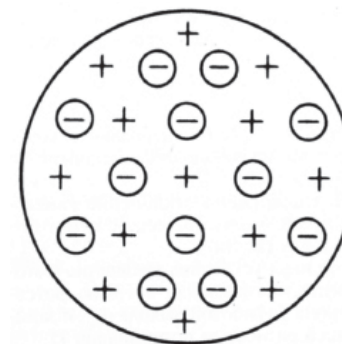


Рис. 100. Модель атома Томсона.

1936 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 талент у Кембриджі Томсон «прогледів» на початку 1910-х. Але замолоду «Джей-джей» встиг зробити стільки, що забезпечив собі без сумніву почесне місце в історії науки.

### Друде Пауль Карл Людвіг (1863-1906)



Пауль Друде

Після відкриття електрона Джозеф Джон Томсон взявся до побудови електронної теорії провідності металів. Паралельно цю саму проблему досліджував німецький учений Пауль Друде.

Народився майбутній фізик у Брауншвейгу (що славився на цілий світ своїми ковбасами). Навчався в Геттінгенському університеті. Попри молодий вік (ученому було відпущено неповні 43 роки життя) був професором Лейпцигського й Берлінського університетів.

З 1900 року Друде редагував найкращий на той час науковий журнал у галузі фізики «Аннали фізики», що

виходив німецькою мовою. Знамениті статті Ейнштейна, які 1905 року пояснили броунівський рух і червону межу фотоефекту, а також започаткували спеціальну теорію відносності, підписав до друку саме Друде. Навряд чи він в усьому поділяв «єресі» 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 поведуться як класичний ідеальний газ. З прикладанням електричного поля з напруженістю  $E$  вони починають рухатися з прискоренням

$$a = \frac{e}{m} E.$$

Цей газ електронів (як і звичайний газ) характеризують середня довжина вільного пробігу й середній час вільного пробігу  $\tau$  між двома зіткненнями. Єдина відмінність полягає в тому, що молекули в газі розсіюються під час зіткнень одна з одною, а в металі електрони можуть розсіюватися й на інших електронах, і на атомах кристалу. Тому середня швидкість електронів, що 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 «електростатичного визначення» (струм – це заряд, що проходить через одиницю перетину за одиницю часу) легко записати як:

$$j = env$$

Тут  $n$  – концентрація електронів (їх кількість у одиниці об'єму),  $e$  – заряд одного електрона. 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 дала й вираз для питомої електропровідності (величини, оберненої до питомого опору):

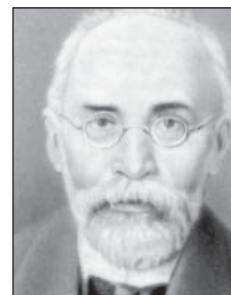
$$\sigma = \frac{e^2 n \tau}{2m}.$$

Оскільки концентрація електронів у всіх металах приблизно однакова, залежність провідності від температури й характеристик металу визначається середнім часом вільного пробігу.

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. До того ж, якщо припускати, що на кожен атом кристалу припадає один електрон провідності, молярна теплоємність металу має бути в півтора рази більшою за теплоємність діелектрика (коливаючись навколо положень рівноваги, атоми мають потенціальну й кінетичну енергію, а вільні електрони – лише кінетичну).

Але експерименти показували: теплоємність одного моля металу й одного моля діелектрика однакова! Цього класична фізика пояснити не могла – і це означало, що вона стоїть на порозі великих змін.

### Гендрік Антон Лоренц (1853-1928)



Гендрік Лоренц

Цей видатний учений увійшов до історії фізики як творець електронної теорії, в якій синтезовано наукові ідеї теорії поля й атомістики.

Народився Гендрік у Голландії. 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.

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». Дібрати 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 (1788-1827). 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 про електрику й магнетизм» 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 в 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 у Амстердамі.

1895 року вийшла фундаментальна робота Лоренца «Спроба теорії електричних і оптичних явищ у рухомих тілах», яка дає системний виклад електронної теорії. Слово «електрон» у ній ще не використано, хоча елементарна кількість електрики вже називалася саме так (Томсон експериментально відкриває електрон за два роки). Лоренц використовує власні терміни й говорить про заряджені позитивно або негативно частинки матерії.

Саме Лоренц доповнив записані для неперервного середовища рівняння Максвелла рівняннями для сили, яка діє 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».

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 із Пітером Зеєманом) став другим (після Рентгена) лауреатом Нобелівської премії з фізики за теоретичне передбачення явища розщеплення спектральних ліній у магнітному полі.

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 в 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 Ейнштейн.

На початку XX століття в фізиці сталися тектонічні зміни, яким буде присвячено наступну частину нашого посібника. Споруда класичної фізики (яку Лоренц будував і в яку вірив) почала тріскатися. 1911 року на I Міжнародному Сольвеївському конгресі фізиків (ці конгреси скликали з ініціативи закоханого в науку бельгійського фабриканта-філантропа Ернеста Сольвея) в Брюсселі обговорювали проблему «Випромінювання й кванти». У роботі цього конгресу брали участь двадцять три знаменитості тогочасної фізи-

ки. 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 пітьму, що оточує нас з усіх боків. Ми будемо дуже щасливі, якщо нам вдасться хоч трохи наблизитися до тієї майбутньої механіки, про яку всі говорять».

Драму класичної фізики вчений сприйняв як особисту. Наприкінці життя він із боєм 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 національний траур. 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 Ейнштейн.

Над прахом Лоренца Ейнштейн сказав: «Його блискучий розум вказав нам шлях від теорії Максвелла до досягнень фізики наших днів. Саме він заклавав наріжні камені цієї фізики, створив її методи. Образ і праця його служать тимуть 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 оцінював заслуги Лоренца 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.

### Альберт Ейнштейн (1879-1955)

Про цього видатного ученого ми вже говорили в попередній частині нашого посібника – в зв'язку з його теорією броунівського руху. Проте в масовій свідомості Ейнштейн 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, так що ми не маємо і не можемо мати ніяких засобів, щоб розрізнити, перебуваємо ми в такому русі, чи ні».

Наступного, 1905 року вийшла стаття Ейнштейна «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 Ейнштейна, 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 Ейнштейн.

У статті «Теорія відносності» Ейнштейн 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 в 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» Ейнштейн зумів нарешті отримати посаду екстраординарного професора в Цюріху. Невдовзі потому він переїздить до Праги – де стає вже повним (ординарним) професором. 1912 року він знову повертається до Цюріха. А 1914 року Пруська академія, яку на той час очолював Макс Планк, обирає Ейнштейна 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 нау-

ковій праці» – так розпочав Ейнштейн 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. Вчений у зеніті 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.

У повоєнні роки міцніє дружба ще молодого, повного снаги, темпераментного Ейнштейна з Максом Планком – зовні дуже несхожим, старіючим, сухим, короткозорим. Але науковців єднає любов до краси фізики й краси музики. Вони можуть годинами обговорювати формули – або ж грати (часом Ейнштейн 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 Ейнштейну, створити «расово чисту німецьку фізику».

1933 року Гітлер прийшов до влади. Спробу Планка виступити на захист Ейнштейна різко обриває сам фюрер. Оселю Ейнштейна розгромлено, архів спалено. І вчений вирішив залишитися в США, де читав на той час лекції. Він обійняв запропоновану йому посаду професора Принстонського інституту вищих досліджень.

Автор формули, що пов'язала енергію з масою, Ейнштейн краще за інших розумів небезпеку створення гітлерівським Рейхом атомної бомби. Тому 2 серпня 1939 року від надсилає листа президентові Рузвельту. Лист, що виник з ініціативи кількох видатних учених-втікачів із Європи, став поштовхом до розгортання американського атомного проекту.

По війні Ейнштейн 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 у єдину теорію. Ще 1948 року лікарі попередили: його розширена аорта може розірватися будь-якої хвилини.

Ейнштейн 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 ґатунком мила, щоб не перейматися, яке мило для миття, а яке – для гоління, лише в холодну пору надягав шкарпетки...

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 Ейнштейн, 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 Ейнштейн 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 попел розвіяли за вітром. Тому Ейнштейн, без перебільшення, належить цілому світу.

У цьому сенсі належить Ейнштейн і Україні. Цікаво, що поміж десятків наукових товариств, що обрали науковця до свого складу, була й перша українська академія – Наукове товариство імені Тараса Шевченка у Львові (діяло в академічному статусі з 1892 року). До складу НТШ в різні роки було обрано низку всесвітньовідомих учених-фізиків із різних країн світу. Серед них Макс Планк, Микола Крилов, Степан Тимошенко, Абрам Йоффе.

Альберта Ейнштейна 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».

Серед фізиків колишнього Радянського Союзу існував переказ: коли, за наполяганням керівництва компартії, АН СРСР у 1970-тих 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 Петро Капіца досить гучно промовив із місця: «Ви помиляєтеся, прецедент був. Адольф Гітлер виключив із Пруської академії Альберта Ейнштейна». І питання про виключення Сахарова було знято з порядку денного.

«Я не знав величнішої людини» – сказав про Ейнштейна 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 Ейнштейна, у мене з'являється таке відчуття, що я вже не самотній».

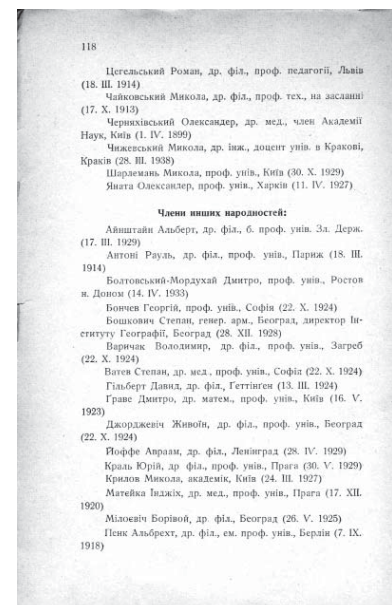


Рис. 103. Сторінка «Хроніки НТШ» за 1938 рік з переліком іноземних членів НТШ; Ейнштейн серед них перший.

## 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 багатьом 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 увійшла 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.

Справді, в класичній механіці є прості формули для взаємного перетворення координат у інерційних системах (так звані перетворення Галілея), згідно з якими відстань між двома точками є інваріантною й не залежить від вибору інерційної системи. Справді, нехай система координат  $K'$  рухається щодо системи  $K$  праворуч вздовж осі  $x$  зі швидкістю  $v$ . Тоді координати в обох системах пов'язані перетвореннями Галілея:

$$\begin{aligned}x' &= x - vt, \\y' &= y, \\z' &= z, \\t' &= t.\end{aligned}$$

(Час у класичній механіці абсолютний, і дві події, одночасні в одній інерційній системі, будуть одночасними й у всіх інших). Використовуючи перетворення Галілея, легко перекоонатися, що закони Ньютона виконуються для всіх інерційних систем. Адже прискорення (яке маємо в другому законі Ньютона) і відстань між двома точками (яку маємо в законі всесвітнього 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 Ейнштейн. Через понад півстоліття він згадавав:

«Парадокс полягав у наступному. Якби я став рухатися вслід за променем світла зі швидкістю  $c$  (швидкість світла в вакуумі), то я мав би був 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

ча, 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 б щодо ефіру в спокої, то через рух планети по майже коловій орбіті швидкість Землі щодо ефіру за півроку була б уже максимальною.

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 пластинкою 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.

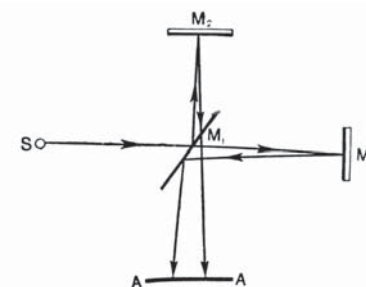


Рис. 104. Схема досліду Майкельсона.

Альберт Майкельсон здійснив цей дослід сам, а 1887 року, в удосконаленому варіанті, – разом із Едвардом Морлі (1839-1923). Обидва рази дослід дав негативний результат. Руху Землі щодо ефіру виявлено не було. 1907 року Майкельсон став за ці досліди 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 їх пояснення спершу

ірландський фізик Джон Фіцджеральд (1851-1901) 1891 року, а за чотири роки – Гендрік Лоренц висунули гіпотезу про скорочення розмірів матеріальних тіл за їх руху відносно ефіру. Згідно з гіпотезою, поперечні розміри залишалися незмінними, а поздовжні, зменшуючись, точно компенсували вплив відносного руху на швидкість поширення світла.

Трошки згодом Лоренц показав: рівняння Максвелла, не будучи інваріантними щодо перетворень Галілея, водночас є інваріантними щодо інших, трохи складніших перетворень, які дістали назву перетворень Лоренца:

$$\begin{aligned}x' &= \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}, \\y' &= y, \\z' &= z, \\t' &= \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}.\end{aligned}$$

Спершу цей факт було сприйнято як математичний курйоз, що не має жодного фізичного сенсу. Але Ейнштейн виходив із протилежного. Він припустив: перетворення Лоренца відображає справжню фізичну реальність і справді пов'язує 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 Ейнштейн осягнув у одній зі своїх основоположних робіт, виданих 1905 року. Висновки Ейнштейна 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, Ейнштейн прийняв як базовий постулат, що жоден матеріальний об'єкт, жодна енергія, жоден сигнал не можуть ширитися зі швидкістю, більшою за швидкість світла в вакуумі. Ця швидкість, позначувана « $c$ », стала й ізотропною (незалежною

від напрямку). Саме цей постулат дозволив надати фізичного змісту перетворенням Лоренца.

Спеціальна теорія відносності Ейнштейна передбачала: якщо маємо дві інерційні системи  $A$  і  $B$ , що рухаються одна відносно одної, якщо нам вдасться 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 в вакуумі  $c$ .

Далі на основі перетворень Лоренца Ейнштейн показав, що будь-яке матеріальне тіло, яке рухається щодо спостерігача, здаватиметься йому коротшим у відношення  $\sqrt{1 - (v/c)^2}$ , 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 Ейнштейна 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 у відношення  $1/\sqrt{1 - (v/c)^2}$ . 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 Ейнштейна.

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 лише пасажирам 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 й 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 вводять 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 підіймається 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 до-

бре 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 Ейнштейна 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-час входить звичайний евклідов простір. Натомість у загальній теорії відносності Ейнштейн описав дію гравітаційних полів у певній точці чотиривимірного часо-простору запровадженням локальної кривизни цього часо-простору. Спостерігач, що перебуває в неевклідовому просторі, мусить користуватися криволінійною системою координат. Як у класичній механіці відцентрові сили й силу Коріоліса можна математично отримати, запроваджуючи евклідов чотиривимірний тензор, так у загальній теорії відносності чотиривимірний викривлений неевклідов часо-простір 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.

Спеціальна, а потім загальна теорія відносності мала величезний вплив на уми не лише фізиків. Вона здавалася такою парадоксальною й незрозумілою, що анонімний дотепник доточив до написаного на початку ХУІІІ чотиривірша славетного Александра Попа, що ушлявляє Ньютона, який зробив світобудову ясною й зрозумілою, ще два рядки:

Та чорт вернув усе на місце притьма:  
Прийшов Ейнштейн – і знов запала питьма!

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 в створенні атомної бомби. Висновки загальної теорії відносності підтверджено спостереженнями астрономів – вони виявили мале зміщення перигелія Меркурія й дуже слабке відхилення

променів, які проходять поблизу Сонця, що має гігантську масу. Відтак теорія відносності стала не лише науковою класикою, але й у певному сенсі важливою складовою загальнолюдської культури XX століття.

### Суть класичної електродинаміки

1. Завдяки скінченній швидкості поширення взаємодії, електромагнітне поле стає самостійною сутністю. На відміну від цього, в класичній механіці, де визнається принцип далекодії, поле було лише певним формально-математичним способом опису.

2. 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.

3. Найважливішими величинами, що характеризують фізичні системи, є їхні енергія та імпульс. Вираз для енергії взаємодії часток із полем мусить містити характеристики й поля, і рухомих частинок, а також електродинамічну сталу  $1/c$ , де  $c$  – швидкість поширення взаємодії (швидкість світла у вакуумі).

4. Просторові компоненти утворюють тривимірний векторний потенціал, а часова компонента – скалярний потенціал поля.

5. Для характеристики поля можна було б у принципі обмежитися лише потенціалами. Проте зазвичай вводять додатково (це зручно) так звані напруженості електричного й магнітного полів, пов'язані з потенціалами.

6. Про існування вельми різних складових електромагнітного поля (електрична складова й магнітна) свідчить сам вид рівняння руху заряду в електромагнітному полі. У цьому рівнянні сила Лоренца складається з двох компонент: перша – з боку електричного поля – не залежить від швидкості заряду й має спрямованість уздовж вектора електричної напруженості; друга – описує силу дію магнітного поля на заряд, залежить від швидкості заряду й має спрямованість, перпендикулярну й до вектора швидкості, й до вектора магнітної індукції.

7. Джерелом електричного поля є заряди. Існує й вихрове електричне поле, породжуване змінним магнітним полем.

8. «Магнітних зарядів» у природі не існує. Вихрове магнітне поле створюють рухомі заряди й змінне електричне поле.

9. 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 вважати повною, оскільки в цій системі є оператори просторових і часових змін полів, а також присутні джерела (густина заряду й струму). Це рівняння Максвелла-Герца-Хевісайда, які зазвичай називають рівняннями Максвелла і які є основними рівняннями електродинаміки.

У інтегральному вигляді в Гаусовій системі (системі СГС) вони мають такий вигляд:

I. Теорема Гауса:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = 4\pi \int \rho dV$$

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:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \frac{4\pi}{c} \int \vec{j} \cdot d\vec{A} + \frac{1}{c} \int \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \cdot d\vec{A}$$

10. Будь-який заряд, що рухається з прискоренням, випромінює електромагнітні хвилі, які несуть енергію та імпульс. Це безпосередньо впливає з рівнянь Максвелла.

### Філософські основи електродинаміки

Теорії теплових і електромагнітних явищ у історичному плані створювалися паралельно, часом – зусиллями тих самих науковців (найяскравіші приклади – Джеймс Клерк Максвелл і Альберт Ейнштейн). Умовно можна визначити «роки народження» кожної з теорій. Це 1820 – для теорії електромагнітних явищ (електродинаміки Ампера), і 1824 – для теорії теплових явищ (термодинаміки Карно).

Виходячи з цього, плеяда видатних філософів (від Іммануїла Канта до Фрідріха Енгельса), яких ми згадували в зв'язку з формуванням світогляду творців молекулярно-кінетичної теорії та термодинаміки, має безпосередній стосунок і до теорії електромагнітних явищ.

У зв'язку з цим вважаємо за необхідне детальніше зупинитися в контексті історії розвитку електрики й магнетизму принаймні на двох мислителях того часу й, перш за все, ще раз повернутися до філософських поглядів Шеллінга.

**Фрідріх Шеллінг** (1775-1854).

Філософ народився в один рік із Ампером (Франція). На той час Алессандро Вольта (Італія) було вже тридцять. На два роки молодший від Шеллінга Ерстед (Данія). Пішов із життя Шеллінг того самого року, що й Ом, отже – 1854 року Німеччина втратила великого філософа й великого фізика.

1832 року Фрідріх Шеллінг виступив у Академії наук із доповіддю «Про нове відкриття Фарадея», що засвідчила про його незбутню цікавість до природознавства. Відомо, що ще в юному віці Шеллінг сповідував ідею про зв'язок між магнітними й електричними явищами. Виступаючи тепер із приводу відкриття Майкла Фарадея, він наголошує, що «деякі німці» (саме так він висловився, маючи на увазі, перш за все, себе) давно говорили про єдність магнітних, електричних і хімічних явищ. 1820 року Ерстеду вдалося продемонструвати магнітну дію електричного струму. Тепер, 1831 року, Фарадей відкрив виникнення електричного струму під впливом магніту. Шеллінг стверджує, що коли встановлюється зв'язок між різними явищами природи, між науками, що існують порізно, це означає – науки починають справжнє життя. Процес наукового пізнання завжди тішить!

Свої натурфілософські ідеї Шеллінг виклав у зібранні творів під назвою «Опис природного процесу». Ось його основні думки:

Кожна наука має свій особливий предмет вивчення (астрономія вивчає структуру космосу, хімія – властивості тіл, тощо). Кожна наука вивчає щось, що існує, а філософія вивчає існування як таке. Те, що існує, існує не випадково, а є вираженням необхідності. Природа матеріальна. Матерія не може бути споконвічною, як у Аристотеля, вона стає такою в процесі зміни й розвитку. Поняття матерії найважче – відверто зізнається Шеллінг. Він не годен пояснити, як відбувається матеріалізація «виняткового суцього».

Шеллінг розбирає проблему простору, розглядає також інші категорії філософії природи. Він говорить про магнетизм, електрику, хімічні процеси, нагадує, що їх єдність філософія виявила раніше, ніж емпіричне природознавство. Його цікавить проблема переходу від неорганічної природи до органічної. «На початку органічне насилу відділяється від неорганічного, оскільки кожен подальший ступінь затримує щось від попереднього. У неорганічному матерія утверджує свою субстанціональність, в органічному вона дедалі більше опускається до акциденції», – пише Шеллінг. Разом із людиною, наділеною свідомим цілепокладанням та свободою, закінчується історія природи, відбувається необхідний перехід у новий світ; це «світ духу, ідеальна сторона універсуму».

Проблема матерії, на думку Шеллінга, – це справжня «пастка для філософії». У цю «пастку» легко втрапив філософ Якобі, коли його, серед інших учених, представили Наполеонові. Як відомо, Наполеона мав звичку питати відразу про найголовніше й розраховувати на швидку й точну відповідь. Як у бою, Наполеон не давав часу для роздумів. «Що таке матерія?» – швидко й чітко запитав Наполеон філософа. Якобі зняковів і нічого не відповів, а тому відразу став не цікавий Наполеонові. Якби на місці Якобі опинився Шеллінг, то відповідь була б такою: «Матерія – це пролитий дух».

За Шеллінгом, кантівський постулат практичного розуму – це ідея Бога як регулювальника людської поведінки. У самого Шеллінга все складніше. Бог

Шеллінга в природному ході речей вторинний. Він набуває первинного визначального характеру лише в практичній діяльності людини як вільне моральне діяння. Філософія (за Шеллінгом) має виховати людину, наділену не лише розумом (цього мало!), але й високою моральністю, етичною відповідальністю. Людину треба уподібнити до Бога (всезнаючого, всемогутнього, всевишнього), навчити її в акті вільної волі перетворити, переорієнтувати світ на істину, добро й красу. Своє завдання Шеллінг вбачає в тому, щоб здолати роз'єднаність раціоналізму й емпіризму; щоб у пізнанні Бога виходити з єдності загальної й особливої. Бог є загальна й водночас одинична, жива істота. Він творить світ унаслідок акту вільної волі. Позитивна філософія – філософія свободи. Позитивний – означає кимсь покладений, встановлений у результаті певної дії.

Позитивна філософія Шеллінга «Філософія одкровення» присвячена християнській релігії.

Послухаймо самого Фрідріха Шеллінга.

«У жодну епоху не було такої кількості умів, що цілком втратили зв'язок із дійсністю, як нині. Причина лежить у поширеній думці, ніби справжня освіта полягає в тому, щоб зануритися в світ абстракцій і загальних положень, тоді як усе природне й усе людське між собою пов'язані складним чином. Ідея безперервного поступу є ідея безцільного поступу, а те, що не має мети, не має сенсу, отже, нескінченний поступ – це найпохмуріша й порожня думка. Заключна мета пізнання – досягти стану спокою. Спокій знання обґрунтований всім попереднім розвитком, це остання зупинка науки, коли вона може перейти у віру. Починати з віри наука не може, але завершитися нею повинна. Віра не усуває пошуку, вона стимулює його, бо вона є досягнута мета». «Шукайте, та віднаймете». Такий Фрідріх Шеллінг.

Нині ми все частіше сполучаємо науку з моральністю, вимагаємо від науки постійного етичного самоконтролю. Шеллінг вважав, що в справжньої філософії одна назва – моральність. Філософія означає любов до мудрості. «Отже, не всяке знання безстосовно до його змісту потрібне філософові, але знання, що містить мудрість», – пише Шеллінг і продовжує: «Мудрість не припишеш тому, що скеровує до аморального, або прагне досягнути доброї мети, використовуючи негідні засоби».

Фрідріх Шеллінг – актуальний мислитель, особливо сьогодні, перед лицем екологічної кризи, техногенних і соціальних катастроф. Він закликає людину: будь єдина зі своєю природою, – з тією, що оточує тебе, і з внутрішньою тобі властивою!

На пам'ятнику Фрідріху Шеллінгу викарбувано напис: «Першому мислителю Німеччини».

**Йоганн Вольфганг фон Гете (1749-1832)**

Майбутній великий поет і філософ народився у Франкфурті на Майні в родині заможного бюргера, вчився в Лейпцигу й Страсбурзі. Найбільший німецький мислитель прожив 83 роки, сповнені плідною працею в літературі,

науці, мистецтві та суспільному житті. Він написав багато ліричних віршів, кілька романів і драм, роботи з природознавства і мистецтвознавства.

Багатство ідей і художня досконалість творів Гете приносять йому ще за життя загальне визнання. Він сповідає ідеї гуманізму, утверджує людські ідеали добра, мужності, любові, краси.

Гете й Шеллінг зустрілися випадково в будинку Шіллера. Наступного дня вони вже разом ставили оптичні досліди, а потім Гете писав впливовому веймарському міністрові, рекомендуючи Шеллінга в єнські професори: «упевнений, що він зробить нам честь і виявиться корисним університетові, бо в молодого чоловіка ясна й енергійна голова, влаштована за новітньою модою».

Гете – гуманіст, що виразив у своїх творах ідею постійного розвитку та вдосконалення людини, яка неухильно прагне до пізнання світу, оволодіння його багатствами, служіння благу людства. Гете – автор «Фауста». Лише це говорить про поета дуже багато, хоча далеко не все!

Необхідність відмовитися від тоді наявної природничо-наукової традиції, в межах якої людина відсторонювалася від природи й у думках готова була нескінченно її препарувати, добре усвідомлював Гете. Ось промовисті рядки з «Фауста»:

Блаженний той, хто ще надію має  
На світ зірнуть із цього моря тьми!  
Бо треба нам, чого не знаєм ми,  
Що знаємо – з того пуття немає.

(Тут і далі уривки в перекладі Миколи Лукаша)

Всесвіт, за Гете, величний, усе в природі перебуває в безперервному русі. Ось своєрідний космічний фон усесвіту, в якому в пролозі до «Фауста» між Богом і дияволом відбувається суперечка про людину, про сенс її існування:

Земля із швидкістю страшною  
Круг сонця кулею літа  
І райське світло дня чергою  
Змінє ночі темнота.  
Хвилює море неозоре  
І шумом скелі покрива, –  
Та сфер стремління вічно-скорє  
І гори й море порива.

Роль суперечливого Мефістофеля досить складна й багатозначна. Під час першої своєї появи перед Фаустом він називає себе частиною тої сили,

Що робить лиш добро, бажаючи лиш злого.  
Я – заперечення усього!

Гете одного дня обмовився, що обидва – Фауст і Мефістофель – втілюють різні грані його власного Я. Таким чином, автор підказав нам, що зіткнення

цих двох персонажів можна розуміти і як боротьбу протилежних тенденцій у душі людини: віри й сумнівів. Сам Фауст вимовив знаменні слова, адресовані учневі-схоластові, нездатному до творчих злетів Вагнерові:

Тобі одна знайома путь,  
А я – стою на роздорожжі...  
У мене в грудях дві душі живуть,  
Між себе вкрай несхожі – і ворожі.  
Одна впиласть жадливо в світ земний  
І розкошує з ним в любовній млості,  
А друга рветься в тузі огневій  
У неба рідні високості.

Гете надзвичайно скептично ставився до схоластичного середньовічного знання, побудованого на начотництві й схилянні перед авторитетами. Ось як знущально говорить Мефістофель у прибраній подобі Фауста учневі, котрий прийшов просити поради:

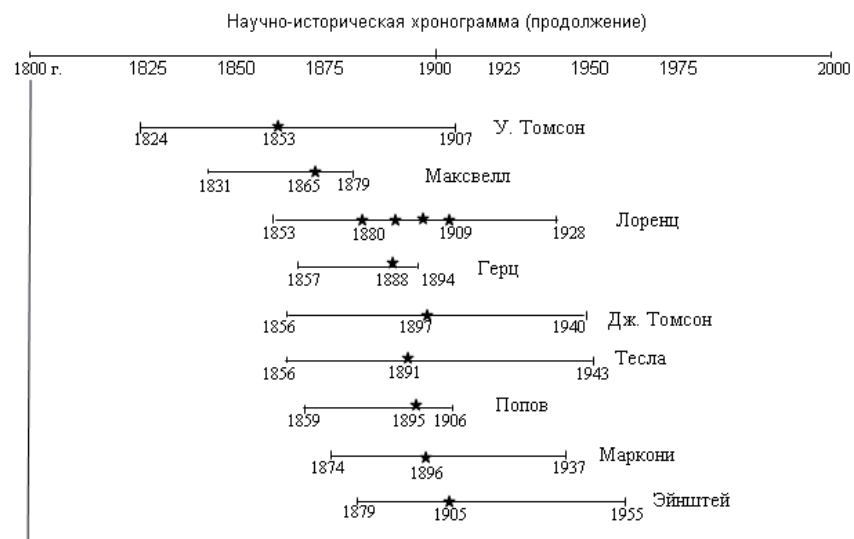
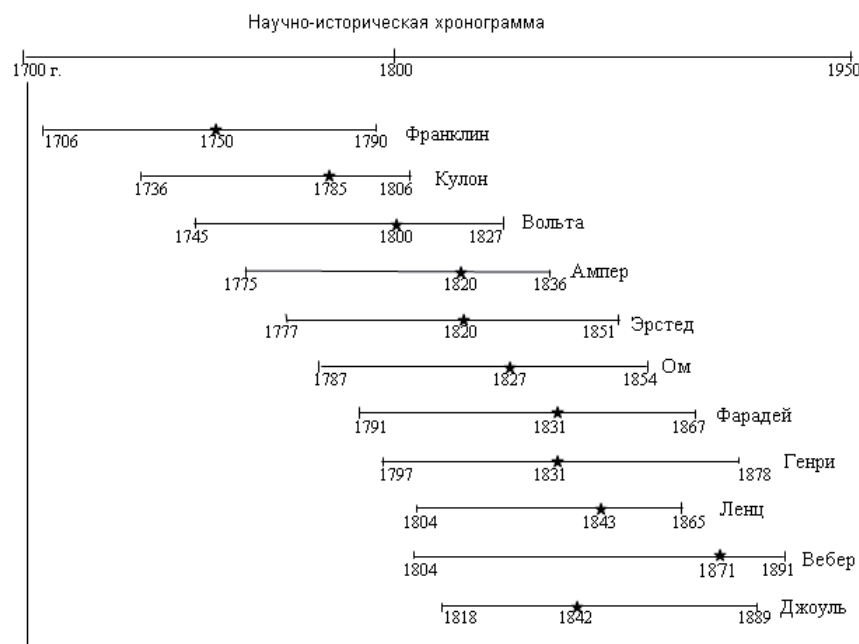
Заздалегідь завчіть урок  
З своїх книжок – рядок в рядок  
Побачите, що вчитель вчить  
Достотно так, як там стоїть,  
І все пишійте у зошит свій,  
Мов то диктує дух святий.

Антитезою для поета начебто є знання, побудоване на досвіді. Тим більше, майже зразу за цитованими знаходимо у «Фаусті» й інші слова:

Теорія завжди, мій друже, сіра,  
А древо життя – золоте.

Ці слова надзвичайно любив цитувати (в досить приблизному російському перекладі) вождь більшовицького перевороту Володимир Ульянов (Ленін), котрий також принагідно любив одягти тогу філософа. Посполитий читач «Фауста» був неабияк здивований, коли бачив: ці слова Мефістофель так само промовляє в досить знущальному контексті. Адже перед тим він радить простуватому учневі стати медиком... аби мати доступ до гарненьких пацієнтів! Отже, великий поет складніший від будь-яких простих схем, у які його намагалися вкласти...

Три останніх десятиліття свого життя Гете прожив у ХІХ столітті, і від його проникливого погляду не сховалися суперечності нового часу. Однак оптимізм самого Гете не захитався. У цьому – велич титанів століття Просвітництва, до яких він, безумовно, належав. Ідеологія Просвітництва вимагала без вагань нести віру в людину, в її високе покликання. Головна настанова Гете – невтомно рухатися вперед. Пасивність, примирення зі злом, байдужість і заспокоєність згубні для людини.



### Дати і факти розвитку теорії електромагнітних явищ

VI ст. до н.е. Перші дослідження електризації та природних магнітів. Відкриття властивості натертого янтарю 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.

1600 р. Вийшов у світ трактат Вільяма Гілберта «Про магніт, магнітні тіла й великий магніт Землі», у якому закладено основи електро- й магнітостатики.

1698 р. Винайдення електричної машини (Волл).

1706 р. Сконструйовано першу скляну електричну машинку й почато дослідження розрядів у газах (Френсіс Гауксбі).

1710 р. Відкрито свічення газу в трубці при електричному розряді.

1729 р. Відкрито явище електропровідності (Стівен Грей).

1733 р. Відкриття двох видів електрики, встановлення факту притягування (відштовхування) різнойменних (однойменних) зарядів (Шарль Франсуа Дюфе).

1742 р. Запроваджено поняття «провідник» і «напровідник» електрики (Жан Теофіл Деагюльє).

1745 р. Винайдено електрометрію (Георг Вільгельм Ріхман).

1745-1746 рр. Винайдено лейденську банку (Евальд фон Клейст, Пітер ван Мушенбрук).

1747 р. Дослідження атмосферної електрики; Бенеджамен Франклін доводить електричну природу блискавки.

1750 р. Винахід громовідводу. Вперше сформульовано закон збереження заряду (Бенджамен Франклін).

1752-1753 рр. Досліди з вивчення атмосферної електрики (Михайло Ломоносов, Георг Вільгельм Ріхман).

1754 р. Побудовано перший громовідвід (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 чутливу електрометрію з 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 елемент Вольта.

1800 р. Відкриття електролізу (Вільям Нікольсон, Ентоні Карлейль).

1802 р. Відкриття електричної дуги (Василь Петров).

- 1811 р. Розповсюдження Симеоном 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 ошурків електричним струмом (Домінік Араго).
- 1820 р. Винайдено гальванометр (Йоган Швейггер).
- 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. Встановлено залежність опору провідника від його довжини, поперечного перетину і температури (Гемфрі Деві).
- 1821 р. Отримано обертання провідника в магнітному полі (Майкл Фарадей).
- 1821 р. Відкриття термоелектрики (Томас Йонатан 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.
- 1829 р. Відкриття електромагнітної індукції (Майкл Фарадей).
- 1831 р. Відкрито закон електромагнітної індукції (Майкл Фарадей).
- 1831 р. Побудовано перший електродвигун (Джозеф Генрі, Сальваторе даль Негро).
- 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 Леонтович 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. Введено поняття силових ліній (Майкл Фарадей).
- 1835 р. Доведено існування екстраструмів замикання / розмикання (Майкл Фарадей).
- 1839 р. Створення теорії потенціалів (К. 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 Еміль 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 (Генріх 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).
- 1855-1865 рр. Створення теорії електромагнітного випромінювання (Джеймс Клерк Максвелл).
- 1860 р. Побудовано електродвигун постійного струму.
- 1861 р. Введено поняття струмів зсуву (Джеймс Клерк Максвелл).
- 1865 р. Постульовано існування електромагнітних хвиль. Електромагнітна теорія світла (Джеймс Максвелл).
- 1872 р. Винайдено електричний лічильник (В. Томсон).
- 1873 р. Відкриття фотопровідності (Віллобі Сміт).
- 1874 р. Введено поняття про напрям розповсюдження електромагнітної енергії (Джон Генрі).
- 1874-1881 рр. Припущення про дискретність заряду (Джеймс Клерк Максвелл та інші).
- 1879 р. Відкрито ефект Холла (Едвін Холл).
- 1880 р. Відкриття п'єзоелектричного ефекту (П'єр Кюрі).
- 1882 р. Створено розрядну трубку – джерело катодних променів (Іван Пулюй).
- 1888 р. Досліди Герца, доведено існування електромагнітних хвиль.
- 1888 р. Відкриті закони зовнішнього фотоэффекту (Олександр Столетов).
- 1891р. Перша передача трифазного струму (Михайло Доливо-Добровольський).
- 1893 р. Винайдено електронний осцилограф.
- 1894 р. Відкрито сегнетоелектрику.
- 1895 р. Винахід радіо (Олександр Попов).
- 1895-1902 рр. Створення електродинаміки рухомого середовища (Гендрік Антон Лоренц).

1895 р. Відкриття електрона (Джозеф Джон Томсон).  
1905 р. Спеціальна теорія відносності (Альберт Ейнштейн).  
1905 р. Розроблена теорія діа- та парамагнетизму (Поль Ланжевен).  
1907 р. Теоретично розроблено принцип отримання телезображення (Борис Розінг).

## IV. КВАНТОВА ФІЗИКА

### Про передісторію квантової фізики

У грудні 1900 року 42-річний ординарний професор Макс фон Планк вперше 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 згадуватимемо достатньо часто, називаючи її, як заведено в науці, сталою Планка.

З позиції сьогодення можна простежити витоки 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.

Швейцарський фізик, філософ і літератор Прево народився в Женеві, тат-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 випускання й поглинання тепла протікають одночасно, неперервно й незалежно один від одного, а перехід тепла – процес не односторонній, він є результатом взаємного променистого теплообміну.

У розвитку квантової фізики величезну роль відіграли деякі *експериментальні відкриття*, зроблені в XIX столітті. Насамперед це надзвичайно важливі закони електролізу Фарадея. З цих законів як наслідок випливав «атомізм» електричного заряду, що його «вгадав» був Максвелл («молекули електрики»), хоча це і не всім було зрозуміло тоді.

Формула  $F = N_A \cdot e$  стала, власне, першою формулою, що пов'язує тільки універсальні константи:  $F$  – число Фарадея,  $N_A$  – число Авогадро,  $e$  – заряд одновалентного іона.

Найважливішим відкриттям напередодні виникнення квантової фізики слід вважати відкриття *X-променів* 1895-го року, про яке ми вже згадували в попередній частині книги в 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.

Німецький фізик-експериментатор Вільгельм Конрад Рентген (1845-1923) заслужено став першим Нобелівським лауреатом з фізики (1901). Адже відкриття *X-променів* (у Німеччині й Росії їх досі називають «рентгенівськими») мало колосальне значення для плідного розвитку фізики.



Вільгельм Рентген

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, *X-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 багатьох закордонних наукових товариств, серед яких Наукове товариство імені Тараса Шевченка у Львові, Абрам Іоффе (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 встановив п'ять винагород: у галузі фізики, хімії, фармакології та медицини, літератури, а також тому, хто «зробить найвагоміший внесок у згуртування народів, знищення рабства, зменшення численності 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 – най-

небезпечнішою на той час вибухівкою (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 «рицаря» й став «сером Ісааком». 1731 року Лондонське королівське товариство встановило першу суто наукову нагороду – медаль Коплі. 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 Каролінгський інститут у Стокгольмі (у галузі фізіології й медицини) лише підбивають підсумки цього без перебільшення всесвітнього обговорення. Вручає премії король Швеції, і щороку це стає значною суспільною подією.

Цікаво, що сам принцип присудження премій, визначений у заповіті, 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 відзначать 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) відкрив спонтанну радіоактивність: виявив, що солі урану, загорнуті в чорний папір, здатні засвічувати фотопластинку. Пізніше він поставив новий дослід: вмістив уран у свинцевий короб із 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  $\alpha$ -промені, негативно заряджені  $\beta$ -промені й електрично нейтральні  $\gamma$ -промені. Але фізична природа відкритих променів залишалася незрозумілою.

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 у російські університети не допускали), змогла реалізувати мрію про наукову кар'єру лише у Франції. Ініціатива робіт у галузі радіоактивності належала саме Марії. П'єр, на той час уже всесвітньовідомий 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 до-

слідники в сараї П'єра, в надзвичайно шкідливих і небезпечних умовах переробили руками 8 тон солі урану й виділили з них одну соту граму нового, невідомого на той час елементу – радію, в мільйон разів радіоактивнішого за уран. Паралельно було відкрито ще один радіоактивний елемент – полоній, названий так на честь батьківщини пані Склодовської.

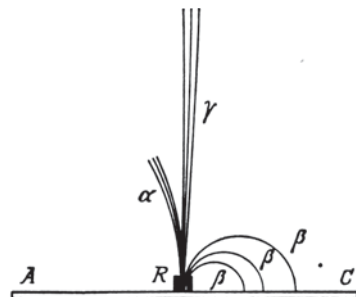


Рис. 107. Відхилення  $\alpha$ ,  $\beta$  і  $\gamma$  променів під дією магнітного поля.  
Рисунок Марії Склодовської-Кюрі.

Беккерель і подружжя Кюрі отримали Нобелівську премію 1903 року з фізики за роботи в галузі радіоактивності.

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.

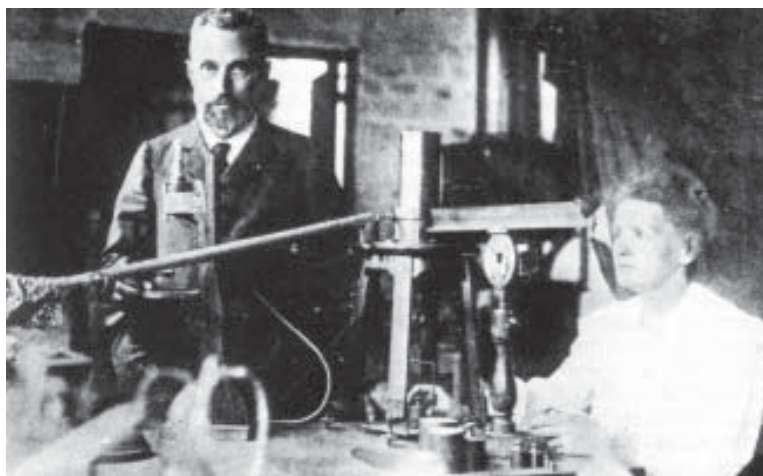


Рис. 108. П'єр Кюрі і Марія склодовська-Кюрі в лабораторії.

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 удостоїлася 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, а Ірен Жоліо-Кюрі продовжила мартиролог подвижників науки – вона загинула від лейкемії, як і її мати.

Голландський фізик Гейке Камерлінг-Оннес (1853-1926) 1908 року вперше отримав рідкий гелій за температури 4,2 К. Ще за три роки вчений відкрив за його допомоги явище надпровідності – падіння опору низки 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 кінцевий опір, незалежний від температури, зумовлений розсіюванням електронів на дефектах кристалічної структури.

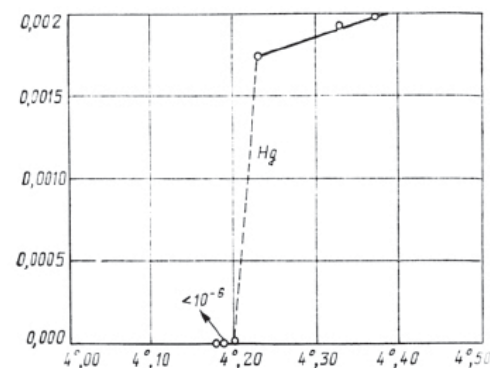


Рис. 109. Графік з роботи Камерлінга-Оннеса, що демонструє падіння опору ртуті до нуля.

Природу катодних променів детально досліджував Джозеф Джон Томсон (ми вже про нього згадували), котрий 1897 року прийшов до відкриття елек-

трона. Сам термін «електрон» запропонував ще 1891 року ірландець Джон-стон Стоні для постульованого елементарного електричного заряду.

На базі робіт Томсона голландський фізик *Гедрік Антон Лоренц* створив наприкінці дев'яностих років XIX століття класичну електронну теорію, яка була застосуванням теорії Максвелла до руху мікрозарядів. Власне, він переніс систему рівнянь Максвелла на заряджені частинки. Лоренц передбачив низку нових фізичних явищ, зокрема розщеплення спектральних ліній у магнітному полі. Коли 1896 року нідерландський фізик Пітер Зеєман (1865-1943) відкрив цей ефект експериментально, 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 у атомі, а парамагнетизм – із орієнтацією власних магнітних моментів атомів і молекул уздовж поля.

На той момент була 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 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 геніальний росіянин Дмитро Менделєєв (1834-1907) розташував відомі на той час 63 хімічні елементи в таблицю за збільшенням їхньої атомної ваги, так, що в стовпцях опинилися елементи різних груп із подібними властивостями. «Організуючи» свою таблицю, вчений побачив, що певні клітинки таблиці слід лишити порожніми. Й справді, недовзі було відкрито галій, германій і скандій із характеристиками, що їх передбачив Менделєєв. Відтоді стало зрозуміло – в основі періодичної системи елементів лежить глибока фізична закономірність.

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.

1901 року лорд Кельвін виголосив промову, присвячену початку нового століття в 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 досліді Майкельсона й Морлі, з яких випливала відсутність «ефірного вітру» (про них ми говорили в попередній частині нашого посібника), та про труднощі з електронною теплоємністю металів, що поводила себе зовсім не так, як передбачала класична фізика.

**ОПЫТ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВ,  
ОСНОВАННОЙ НА ИХ АТОМНОМ ВЕСЕ  
И ХИМИЧЕСКОМ СХОДСТВЕ**

			Ti = 50	Zr = 90	? = 180.
			V = 51	Nb = 94	Ta = 182.
			Cr = 52	Mo = 96	W = 186.
			Mn = 55	Rh = 104,4	Pt = 197,4
			Fe = 56	Ru = 104,4	Ir = 198.
			Ni = Co = 59	Pt = 106,6	Os = 199.
			Cu = 63,4	Ag = 108	Hg = 200.
H = 1	Be = 9,4	Mg = 24	Zn = 65,2	Cd = 112	
	B = 11	Al = 27,4	? = 68	U = 116	Au = 197?
	C = 12	Si = 28	? = 70	Sn = 118	
	N = 14	P = 31	As = 75	Sb = 122	Bi = 210?
	O = 16	S = 32	Se = 79,4	Te = 128?	
	F = 19	Cl = 35,5	Br = 80	I = 127	
Li = 7	Na = 23	K = 39	Rb = 85,4	Cs = 133	Tl = 204
		Ca = 40	Sr = 87,6	Ba = 137	Pb = 207
		? = 45	Ce = 92		
		? Er = 56	La = 94		
		? Yt = 60	Di = 95		
		? In = 75,6	Th = 118?		

Рис. 110. Сторінка праці Менделєєва, де вперше подано періодичну систему елементів.

До цих двох фактів варто додати ще один – явні труднощі з теорією випромінювання абсолютно чорного тіла (АЧТ), про які ми поговоримо згодом. Але складається таке враження, що до Макса 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 Ре-

лея (1842-1919), Джеймса Джінса (1877-1946), Вільгельма Віна (1864-1928). Цей «логічний ланцюжок» наукових подій ми розглянемо в подальшому.

Проте основну нашу увагу буде зосереджено не на витоках, а на процесі *становлення й розвитку квантової механіки* як теорії квантових явищ.

Безпосереднім творцям цієї дивовижної та незвичайної фізичної теорії в день доповіді Макса Планка 1900 року було:

Максу 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; за два роки з різницею в один місяць народяться ще два майбутні генії – Семюел Гаудсміт 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 Ейнштейн (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.

## Світ перестає бути детермінованим?

Квантова механіка мірою свого створення безмежно здивувала багатьох: світ остаточно перестав бути детермінований!

З незапам'ятних часів людину хвилює питання про свободу волі й думки. Чому за певних обставин людина подумала й вчинила саме так, а не інакше? Чи завжди можна передбачати власні вчинки, а тим паче лінію поведінки?

У старогрецьких трагедіях поведінку людей визначала невідворотна доля. Від самої людини нічого не залежало. Вона була тільки сліпим знаряддям у руках долі.

Проте людська думка шукала й інших вирішень проблеми свободи волі. Про неї сперечалися богослови, включаючи в дебати й питання про відповідальність людей за свої вчинки – і то про відповідальність, перш за все, перед Богом. Католицькі й православні богослови свободу волі визнавали (Адам винен у тому, що покоштував плодів із дерева пізнання; – адже він міг вибрати: послухати Божої настанови, чи ні). Натомість частина протестантів (насамперед – кальвіністи) стояли на тих самих позиціях, що й давні греки, тільки місце неблаганної Долі посіло Боже провидіння.

На тему свободи волі точилися затяті богословські суперечки, в які часто втручалася інквізиція – з дуже сумними наслідками.

Чий розум суть речей пізнати умів,  
Хто розкривав усім душі скрижалі, –  
Того карали страшно в лютім шалі  
Ще від найперших світу цього днів.

Так змалював ситуацію «пізнання суті речей» великий Іоганн Вольфганг фон Гете. Гнаними часто були й перші вчені-природодослідники: алхіміки й астрологи.

А як усе виглядало з точки зору «строгої» науки? Крайню позицію сформулював на основі законів ньютонівської механіки визначний французький астроном, фізик і математик П'єр Сімон Лаплас (1749-1827). Детермінізм, за Лапласом, виявляється в тому, що за як завгодно точного завдання початкових координат і швидкостей матеріальних точок певної замкнутої механічної системи з тією самою точністю можна визначити координати й швидкості в будь-якій подальшій момент часу. Це відкриває принципову можливість передбачити на основі розв'язання системи рівнянь (хоча й дуже складної) всієї подальшої долі Всесвіту. Науковець із гордістю писав: «Той розум, який на певний момент знав би всі чинники природи та взаємне розташування всіх тіл, із яких вона складається, коли б він був до цього досить могутній, щоб обчислити ці дані, охопив би в одній формулі рухи світил небесних і найменших атомів; ніщо не було б для нього непевне, і майбутнє, як і минуле, рівно станули б перед його оком».

Може здатися, що програма Лапласа має уможлиблюючий характер, тому що практично неможливо записати й розв'язати диференціальні рівняння для руху всіх тіл у Всесвіті й, тим паче, визначити для них початкові умови, щоб однозначно передбачити майбутнє. Проте непереборні труднощі тут – саме технічні, а не принципові, хоча навряд чи хто-небудь із учених-фізиків сушив собі голову над проблемою розв'язання світової системи диференціальних рівнянь Лапласа.

Однак механічний детермінізм у його ньютонівській формі виявився неспроможним не лише в механіці безлічі тіл, де роль випадковості можна звести до неможливості однозначно визначити початкові умови для кожного з тіл. Як показала квантова фізика, ще гостріше виявилася непридатність старого визначення причинності для одного тіла, якщо це тіло – елементарна частинка з мікросвіту.

«Простий» рух електрона в атомі водню «відмовився коритися» динамічним законам Ньютона й механічному детермінізму! У цьому й полягає найдивніший і найплідніший результат фізики XX століття.

## Ще дещо про специфіку квантових явищ

Ніхто й ніколи не сумнівався, що Місяць і планети сонячної системи рухаються по своїх орбітах незалежно від того, чи спостерігаємо ми за їхнім рухом, чи ні. Це означає, що наші спостереження абсолютно не впливають на характер руху небесних тіл.

Механіка Ньютона, що виникла на основі законів Кеплера й експериментальних законів падіння Галілея, навіть не ставила питання про вплив спостереження на рухи планет, супутників, снарядів, ракет тощо. А ця механіка була основою всього точного природознавства!

У зв'язку з тим, що за спостереження мікрооб'єктів ситуація різко змінилася, обговорімо детально процес фізичного вимірювання. Адже не усвідомлюючи сенсу того, що відбувається за вимірювання величини, неможливо визначити цю величину як фізичну. Фіксуючи положення якого-небудь небесного світила або фотографуючи швидкісним методом кулю в польоті, ми ніяк не змінюємо їхнього подальшого стану. Закономірно, у вчених виникла неуспішна впевненість у тому, що об'єкт спостереження не може піддаватися якій-небудь дії з боку вимірювального приладу.

Проте ситуація виявляється неоднозначною, якщо об'єктом спостереження стає мікрооб'єкт. Поки атом залишався уявним, ніхто й не замислювався про те, що сам вимірювальний прилад може суттєво змінювати стан атома.

Отже, треба з'ясувати: в чому ж полягає взаємовідношення між фізичним законом і фізичним вимірюванням? Оскільки дія фізичного закону не залежить від волі дослідника, то напрошується така відповідь на поставлене питання: одне й те саме вимірювання, здійснене в однакових умовах щодо одного й того самого об'єкта, завжди має давати однаковий результат. Але чи завжди це так?

Переважну частину своїх знань про світ людина здобуває за допомогою зору. Ніхто й ніколи не сумнівався, що, спостерігаючи зірку на небосхилі, ми ніяк на неї не впливаємо. Цю специфічну особливість ми автоматично переносимо й на інші об'єкти спостережень. Таким чином укорінилося переконання, що явище існує незалежно від спостереження.

Разом із тим, той-таки щоденний досвід переконує нас, що чим менший об'єкт спостереження, тим легше порушити його стан. А якщо об'єкти спостережень – атоми та електрони? Визначити їхні властивості зусиллям волі й уявними міркуваннями неможливо. Вимірювання за допомогою приладів необхідні. Фізичний прилад і об'єкт спостереження повинні користися квантовим законам. А головна особливість квантових явищ – їхня дискретність.

У світі квантових явищ (у мікросвіті) взаємодії відбуваються за принципом: або все – або нічого. Ми не можемо як завгодно слабо впливати на

квантовий об'єкт, – він такої дії «не відчує». Якщо ж дію ми збільшимо до певного порогового значення, то квантовий об'єкт її нарешті «відчує», але тоді він стрибком перейде в новий квантовий стан або перестане існувати (просто загине).

У світі, де діють квантові закони, одне проведене вимірювання суттєво змінює подальший перебіг подій. Саме це і є тим принципово новим, що внесла квантова теорія в поняття вимірювання.

## Від законів випромінювання до ідеї квантування енергії

1859 року Густав Кірхгоф запропонував перший у 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 академії наук. Його наукові роботи присвячено електриці, механіці, оптиці, математичній фізиці, теорії пружності, гідродинаміці. Зокрема Кірхгоф розвинув строгу теорію дифракції, вдосконалив теорію магнетизму Пуассона, досліджував пружність твердих тіл, коливання пластин, форму вільного струменя рідини, рух тіла в рідкому середовищі.

Ми згадали цього ученого в зв'язку з тим, що він відкрив один із основних законів теплового випромінювання, згідно з яким відношення випромінювальної спроможності тіла до поглинальної не залежить від природи тіла-випромінювача.

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, абсолютно чорне тіло 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.

За 20 років після відкриття закону Кірхгофа, 1879, з'явилася стаття Йозефа Стефана «Про залежність теплового випромінювання від температури». Дослідним методом Стефан відкрив закон, згідно з яким повне випромінювання АЧТ пропорційне четвертій степені абсолютної темпе-

ратури. Загальна енергія теплового випромінювання визначається формулою

$$j = \sigma T^4,$$

де  $j$  — потужність на одиницю площі поверхні випромінювання, а  $\sigma$  — стала.

За 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 їх теплопровідність, знайшов значення коефіцієнтів теплопровідності багатьох газів. Професор Стефан виховав багато австрійських фізиків.

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 їх випромінювання.

Вони експериментально визначили вигляд функції Кірхгофа залежно від частоти випромінювання й абсолютної температури тіл-випромінювачів. Експериментально було виявлено: 1) всі криві мають максимум і спадають у області високих частот; 2) максимумами кривих зміщуються залежно від температури.

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 в 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  $T$  — температура в кельвінах, а  $\lambda_{\max}$  — довжина хвилі з максимальною інтенсивністю в метрах.

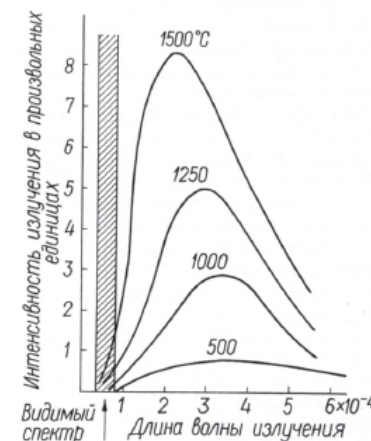


Рис. 111. Розподіл інтенсивності випромінювання в спектрах розжарених тіл.

1896 року, виходячи з класичних уявлень, учений вивів закон розподілу енергії в спектрі АЧТ (закон випромінювання Віна). Проте, як незабаром з'ясувалося, формула закону випромінювання Віна виявилася правильною лише в області коротких хвиль.

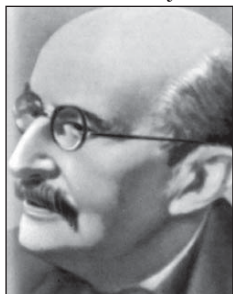
Над проблемою АЧТ працював і визначний англійський фізик «класичної доби» *Джон Вільям Стретт* (лорд Релей, 1842-1919). Релей зрозумів, що термодинаміка нездатна вирішити проблеми теплового випромінювання й треба застосувати для цього статистичну фізику. Спільно з Джеймсом Джінсом (1877-1946) він отримав формулу, яка пояснювала функцію Кірхгофа тільки частково, в області довгих хвиль. Натомість у 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 Планка*, щоб подолати її наслідки.

### Макс фон Планк (1858-1947)

Макс фон Планк народився в сім'ї професора права Мюнхенського університету. У дитинстві хлопчик виявив неабиякі музичні здібності. Він пре-

красно грав на фортепіано й дуже любив музику. У класичній гімназії талановитий вчитель 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

Макс 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 песимістич-

них 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.

Вчений ступінь доктора Планк отримав 1879 року (це парадоксально, але він ставив у своїй дисертації 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, число яких можна позначити літерою  $n$ , і воно може бути дуже великим».

Ця цитата «проливає світло» на те, як народилася в Планка геніальна й, разом із тим, «навіжена» ідея про *дискретну* («порційну») зміну енергії. Для 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, припускаючи, що енергія АЧТ поглинається й випромінюється не неперервно, а «порціями», квантами величиною  $h\nu$ , де  $\nu$  – 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 поглинутися, 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 вкlastися ціле число напівхвиль. Чим коротша довжина хвилі, тим легше виконати цю умову. Отже, кількість можливих хвиль зростає зі збільшенням частоти коливань. А за класичною термодинамікою, на кожен ступінь вільності (тобто, на кожен 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 Планк був класиком за освітою, за світоглядом і за стилем мислення. Своє відкриття він назвав «актом відчаю». У одному з листів Планк писав: «Я знав, якою має бути формула, але не міг знайти її обґрунтування. По-

чалися кілька найбільшніх у моєму житті тижнів, протягом яких я намагався знайти пояснення».

Зазначмо, що в цей момент Планка дуже підтримував 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 в 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 абсолютно чорного тіла. Планк не раз намагався досягти такої узгодженості в рамках класичної фізики, але безуспішно.

Оцінюючи значення відкриття Планка, Альберт Ейнштейн 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 їх перетвореннями. Мало того – воно зруйнувало остов класичної механіки й електродинаміки та поставило перед наукою завдання: знайти нову пізнавальну основу для всієї фізики».

1919 року Планка вшановано Нобелівською премією з фізики «на знак визнання його заслуг у справі розвитку фізики завдяки відкриттю квантів енергії».

Член 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».

Як людина з релігійними переконаннями, як людина справедлива й порядна, Планк публічно виступав на захист єврейських учених, вигнаних зі своїх посад і вимушених емігрувати 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.

Макса 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 на Берлін. Сам він дивом залишився живий, – але й далі провадив активне наукове життя.

Планк глибоко цікавився філософськими проблемами природознавства, етикою й питанням свободи волі. Виконуючи обов'язки пастора (без священного сану) в Берліні, Планк був глибоко переконаний у тому, що *наука допомагає релігії*, 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 Ейнштейном, поки той не покинув Німеччину в гітлерівські часи. Захоплений альпініст, він майже кожну свою відпустку проводив у 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 Тараса Шевченка у Львові.

У повоєнній демократичній ФРН Товариство фундаментальних наук кайзера Вільгельма було перейменовано в Товариство Макса Планка, було також засновано вищу наукову нагороду Німеччини – медаль Планка.

Півроку не дожив цей геніальний фізик до свого дев'яносторіччя. На його могильній плиті викарбовано тільки ім'я та прізвище, та ще чисельне значення сталої Планка:

$$h = 6,6260753 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

### І знову Альберт Ейнштейн

З п'яти робіт, що їх надрукував 1905 року 26-річний Ейнштейн, принаймні три були варті Нобелівської премії. Проте реально премію 1921 року на-

уковець 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 виривання електронів із речовини під дією світла, назване явищем фотоефекту. Це явище відкрив 1887 року Генріх Герц, із яким ми зустрічалися в попередній частині книги. Багато для його вивчення зробили російський фізик Олександр Столетов (1839-1896) і, за іронією долі, німецький фізик Філіпп Ленард – саме той, який пізніше зробився активним нацистом і гонителем Ейнштейна.

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 нижчу за мінімальну частоту, явища фотоефекту взагалі не викликає.

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, –  $P$ , а кількість електронів у поверхневому шарі  $N$ . Тоді на один електрон припадає потужність

$$P_o = \frac{P}{N}, \partial e N = nV, V = dS$$

Тут  $n$  – концентрація електронів у 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 світла не менша від роботи виходу електрона з речовини, тобто  $W \geq A$ . Вважатимемо, що

$$A = P_o \Delta t \Rightarrow \Delta t = \frac{A}{P_o} \quad P_o = \frac{P}{ndS} \quad \Delta t = \frac{AndS}{P}$$

Щоб вирахувати проміжок часу, по закінченні якого розпочнеться фотоефект, візьмімо такі дані:  $S = 1 \text{ м}^2$ ;  $d = 10^{-10} \text{ м}$  (порівняне з розмірами 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 Ейнштейн.

Цю наукову проблему Ейнштейн і вирішив. Він створив теорію фотоефекту, у якій передбачив, що світло не лише випромінюється, але й поглинається квантами, енергія яких, за з Планком  $E = h\nu$ , де  $\nu$  – частота світла,  $h$  – стала Планка. Все, як виявилось, геніально просто: якщо енергія кванта світла більша від роботи виходу електрона з речовини, то фотоефект виникає, саме це підтвердили досліди. Наявність «червоної межі» було пояснено.

Рівняння Ейнштейна для фотоефекту спочатку мало вигляд:

$$We = \frac{R}{N_A} \beta \nu - A$$

де  $W$  – поверхневий потенціал електрона, що вибивається світлом,  $e$  – його заряд,  $\beta$  – константа з емпіричної формули,  $A$  – робота виходу електрона з металу.

Саме в такому вигляді вперше з'явилося рівняння фотоефекту в параграфі «Про збудження катодних променів за освітлення твердих тіл» вищезазначеної статті Ейнштейна. Сьогодні рівняння Ейнштейна для фотоефекту записують у дещо іншому вигляді:

$$h\nu = A + \frac{m\vec{v}^2}{2}$$

Тут  $m$  – маса фотоелектрона,  $\vec{v}$  – його швидкість, а отже  $\frac{m\vec{v}^2}{2}$  – кінетична енергія фотоелектрона.

Порівняймо з первинним рівнянням Ейнштейна – й побачимо, що

$$We = E_k = \frac{m\vec{v}^2}{2},$$

а  $\frac{R\beta}{N_A} = h$  – стала Планка, виражена через інші константи.

1907 року Альберт Ейнштейн робить перший суттєвий крок у *застосуванні квантової теорії до речовини*. (До цього квантову теорію застосовували тільки до випромінювання). Ейнштейн зробив спробу на основі квантових ідей вирішити проблему теплоємності.

Інтерес до цієї проблеми пояснювався тим, що дослідні дані щодо теплоємності перебували в різкій суперечності з наявною теорією. Класична фізика розглядала тверде тіло (обмежуємося випадком одноатомної простої речовини) як сукупність атомів-осциляторів, кожен із яких, згідно з Больцманом, мав енергію  $3kT$  (разом із тим припускали, що кожен із них має 3 ступені вільності, на кожен із яких припадає енергія  $kT$  – половина на кінетичну 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:

$$C_V = \left. \frac{\partial E}{\partial T} \right|_{V=const} = 3R$$

Тобто, чисельно атомна теплоємність усіх твердих тіл (кількість тепла, яку треба надати одному грам-атомові, 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. 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» Ейнштейн опублікував свою статтю «Теорія випромінювання Планка й теорія теплоємності». Формули, що їх отримав Ейнштейн, давали квантові вирази для енергії моля речовини й для теплоємності.

Це було перше квантове дослідження в галузі фізики твердого тіла. Формула Ейнштейна для теплоємності пояснила, чому за високих температур працює закон Дюлонга-Пті, пояснила й прямування  $C_V$  до нуля. Хід мірку-

вання Ейнштейна був такий: коливанням у твердому тілі з частотою  $\nu_0$  відповідає квант енергії  $k\Theta = h\nu_0$  (тут  $k$  – стала Больцмана,  $\Theta$  – величина, що має розмірність температури). Коли температура висока, тобто  $T \gg \Theta$ , збуджуються коливання всіх атомів, справджується рівномірний розподіл енергії за ступенями 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  $\Theta$  чисельно одного порядку з кімнатною температурою, або й навіть перевищує її. А це значить, що вже за кімнатної температури збудженими виявляються не всі коливання, й теплоємність твердого тіла буде нижчою від передбаченої законом Дюлонга-Пті (для алмазу вона справді складає 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 зниженні  $T$  збудженою виявиться дедалі менша частина коливань. А за  $T = 0$  всі коливання виявляються «замороженими» й теплоємність дорівнюватиме нулю.

Але теорія Ейнштейна не пояснила експериментального кубічного закону прямування теплоємності до нуля. Причина полягала в тому, що Ейнштейн вважав: усі атоми в твердому тілі коливаються з однаковою сталою частотою  $\nu_0$ . Тим часом у твердому тілі насправді є *набори частот* коливань, а тому теорія теплоємності Ейнштейна потребувала суттєвого вдосконалення.

Її вдосконалив визначний голландський фізик Петер Дебай (1884-1966) 1912 року. Теоретична формула Дебая, яка виходила з того, що в твердому тілі реалізуються різні коливання з частотами від 0 до найвищої можливої в цьому матеріалі частоти  $\nu_0$ , якнайкраще пояснювала експериментальні дані для низьких температур. А температура  $\Theta$ , що характеризує «жорсткість» міжатомного зв'язку в твердому тілі, отримала назву температури Дебая (фізичне значення цього параметру дуже важливе: коливання атомів твердого тіла виявляють класичну поведінку за температур, вищих від температури Дебая, й квантову – за нижчих). Але правильний початок поклав Ейнштейн.

1909 року Ейнштейн 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 членом. За малих частот випромінювання суттєвий вплив чинить другий, «класичний» член, а за великих частот – перший, тобто квантовий.

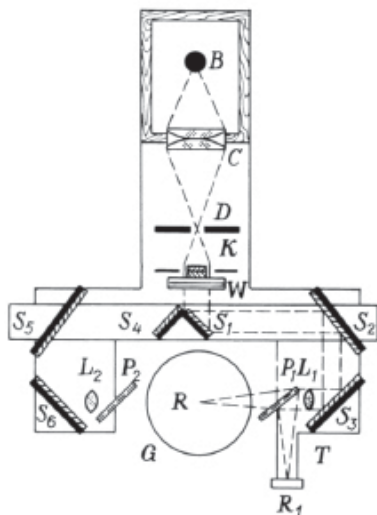


Рис. 112. Схема установки Лебедева для вимірювання тиску світла на тверді тіла.

Фундаментальний висновок, що його зробив Ейнштейн, полягав у тому, що жоден із цих двох членів порізно не описує повною мірою флуктуації енергії. Тільки обидва члени в сукупності дають повну картину флуктуації енергії світла. Одночасно виявляються й квантові властивості, і хвильові! Ці результати справили на самого Ейнштейна 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 видатний російський фізик-експериментатор *Петро Лебедев* (1866-1912) таки «примудрився» виміряти його дослідно. Результати дослідів Лебедева було опубліковано в російських, німецьких і французьких журналах.

Для флуктуацій світлового тиску Ейнштейн отримав формулу, що також складається з двох членів, – квантового й хвильового!

Багато вчених не лише здивувалися, але й розгубилися «від цієї двоїстості». Наведемо уривки з кількох виступів тодішніх світил на першому Сольвевському 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 не-

віддільним 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 ввести в доказ дві протилежні посилки».

*Леон Бріллюен* (22-річний фізик, учень Поля Ланжевена): «Я б хотів резюмувати враження, яке справило на мене читання доповідей, а ще більше наша дискусія в цілому. Мабуть, наймолодшим із нас мій висновок видасться боязким, 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 переривчастої до старої механіки».

Питання про двоїстість випромінювання так непокоїло всіх фізиків, що один із них, англієць *Генрі Брегг* (1862-1942), 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 – то хвилями. 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), Ейнштейн висловив 1917 року припущення про існування не лише спонтанних, але й стимульованих атомних переходів. Розвиваючи це припущення, російські 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 у оптичному діапазоні – лазер (від англійського *light amplification stimulated by emission of radiation* – посилення світла стимульованим випромінюванням). Винахідники мазера разом із винахідником лазера Чарлзом Таунсом (народився 1915 року) спільно отримали Нобелівську премію 1964 року.

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

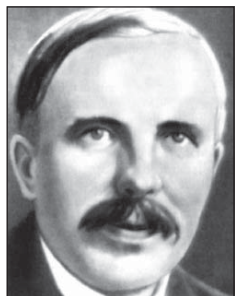
експерти вважають винайдення лазера однією з трьох (поруч зі створенням квантової механіки й винайденням напівпровідникового транзистора) найважливіших фізичних подій XX століття. А ідею, покладену в основу їх роботи, сформулював Альберт Ейнштейн 1917 року!



Рис. 113. Прохоров, Таунс і Басов.

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 підготовку, яка згодом допомогла йому в конструюванні наукової апаратури.

Після школи Ернест отримав стипендію для продовження освіти в коледжі, а за два роки склав іспит у інший коледж – філію Новозеландського університету. 21-річний Резерфорд отримав ступінь бакалавра мистецтв, він найкраще склав екзамени з *математики і фізики*. Його магістерська робота стосувалася виявлення високочастотних радіохвиль, існування яких довів 1888 року Генріх Герц. Для вивчення цього явища Резерфорда сконструював бездротовий радіоприймач (незалежно від Попова й Марконі), і з його допомогою отримував сигнали, передані з відстані у півмилі.

1894 року в «Вістях філософського інституту Нової Зеландії» було опубліковано першу роботу Резерфорда «Намагнічування заліза високочастотними розрядами». 1895 року Резерфорд отримав стипендію для здобуття на-

укової освіти в Англії. *Джозеф Джон* Томсон запросив молодого новозеландця працювати в Кембриджі в лабораторії Кавендіша. Це був початок великого наукового сходження Ернеста Резерфорда.

Співпраця Резерфорда з Томсоном увінчалася значними результатами, серед яких відкриття Томсона – він виявив електрон, субатомну частинку, що має негативний електричний заряд. Спираючись на свої дослідження, Томсон і Резерфорд висунули припущення, що рентгенівські промені, проходячи крізь гази, руйнують атоми газу й вивільняють однакову кількість позитивно й негативно заряджених частинок. Ці частинки вони називали *іонами*. Після цих робіт Резерфорд цілеспрямовано зайнявся вивченням структури атомів.

1898 році Резерфорд переїхав до Монреаля (Канада) й обійняв посаду професора в університеті. Сім років він працював у Канаді й зробив там низку фундаментальних відкриттів. Зокрема, розгадано природу так званої індукованої радіоактивності; встановлено (незалежно від Беккереля), що радіоактивне випромінювання складається з двох типів променів, які Резерфорд назвав  $\alpha$ - та  $\beta$ -променями ( $\gamma$ -промені відкрив 1900 року французький фізик Поль Віллар (1860-1934)). Резерфорд показав, що  $\alpha$ -промені поглинаються в 100 разів сильніше.

Ще Беккерель 1900 року, відхиляючи  $\beta$ -промені в магнітному полі й фотографуючи слід від їх потрапляння на екран, показав, що співвідношення  $\frac{q}{m}$  для них таке саме, як і електронів, що їх відкрив Томсон, але їхні швидкості сягають половини швидкості світла. Щодо  $\alpha$ -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 іонізованими атомами водню, або ж подвійно іонізованими атомами гелію. І тоді Резерфорд разом зі співробітниками провів ще один дослід, який мусив дати остаточну відповідь: він зібрав достатню кількість  $\alpha$ -частинок, і методом спектрального аналізу переконався, що такі має справу з гелієм.

З Фредеріком Содді (1877-1856) Резерфорд відкрив *радіоактивний розпад* і встановив закон цього розпаду. Виявилось, що коли елемент випускає  $\alpha$ -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 певного 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 XIX 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). 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 зайняти 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 вказав на зв'язок між працею, яку зробив 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  $\alpha$ -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 дослід Резерфорда та його учнів – бомбардування тонкої золотої фольги  $\alpha$ -частинками та їх розсіювання під різними кутами – однозначно свідчили: 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  $\alpha$ -частинки мають проходити крізь атом, наче ніж крізь масло (щойно з'явилася модель атома Джозефа Джона Томсона – «родзинки в пу-

дингу», згідно з якою електрони «плавають» у нещільній хмарі позитивного заряду, коливаючись навколо певних «точок рівноваги»).

Те, що деякі  $\alpha$ -частинки відбивалися фольгою майже назад, було цілком несподіванкою. Задачу про розсіювання  $\alpha$ -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: дослід правильний. 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  $\alpha$ -частинки.

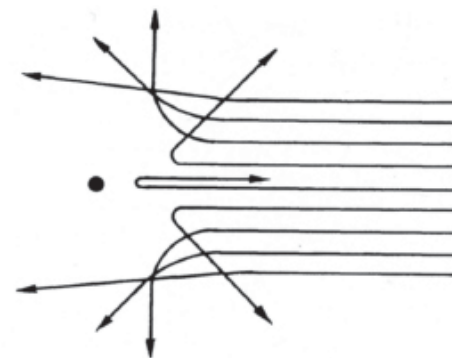


Рис. 115. Траєкторії розсіяних  $\alpha$ -частинок у досліді Резерфорда.

Німецький фізик Ганс Гейгер (1882-1945), котрий теж брав участь у досліді 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!»»

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

$$a = \frac{\bar{v}^2}{R}.$$

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 втратити всю свою енергію та впасти на ядро! Науковець зрозумів, що він відкрив *«приречений атом»*.



Рис. 116. Атом за Резерфордом.

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.

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 іон водню – протон, частинку, що несе одиничний позитивний заряд (назва «протон» теж належить Резерфордові). Відтоді різко зріс інтерес фізиків до природи атомного ядра.

48-річного вченого, котрий здобув світову популярність, 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 своїх «Спогадах про професора Резерфорда» його учень, видатний російський фізик Петро Капіца (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 умів 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 хіба що те, що Фарадей піднявся на вершину, яка височіла над усією фізикою і хімією, а сфера інтересів Резерфорда була таки 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. Практично до кінця свого життя Ернест Резерфорд мав міцне здоров'я й помер після нетривалої хвороби. Поховано Резерфорда у Вестмінстерському абатстві – на визнання його видатних заслуг у розвитку науки.

Зазначмо, що Ернест Резерфорд не брав участі в створенні квантової теорії прямо й безпосередньо. Мало того – він досить скептично ставився до нової фізики й, коли його якимось поспитали, чому він ніколи не посилався на роботи Ейнштейна, 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!

Вирішення цієї наукової проблеми привело врешті-решт до створення *квантової механіки* – теорії мікроявиць у світі атомів.

### Нільс Бор (1885-1962)

Данський фізик Нільс Бор народився в Копенгагені в сім'ї професора фізіології. Навчався Нільс у граматичній школі, й закінчив її у свої 18.

Родина зі сталими «професорськими традиціями» підтримувала атмосферу високої інтелектуальності, яка поєднувалася зі щирістю і добротою.

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 ясно, 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.



Нільс Бор

Любов до фізики й математики благополучно уживалися в Нільса з любов'ю до поезії. Вірші він читав напам'ять, повільно і мрійно, неначе вимовляв молитву. Він володів справжнім ліричним чуттям.

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.

У навчанні Нільс Бор досяг успіху, й дуже скоро в університеті про нього заговорили. Ось що писала одна студентка своєму другові: «До речі, про геніїв. З одним із них я зустрічаюся щодня. Це Нільс Бор, про якого я тобі вже розповідала; його неабиякі здібності виявляються дедалі більшою мірою. Це найкраща, найскромніша людина в світі. У нього є брат Гаральд, він майже такий самий талановитий і вчиться на математичному відділенні. Я ніколи не зустрічала двох таких нерозлучних і прихильних один одного людей. Вони дуже молоді, одному – 17, другому – 19 років, але я вважаю за краще розмовляти тільки з ними, тому що вони дуже приємні».

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 проєкті 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 розкривалося *нездатність класичної електродинаміки пояснити магнітні явища* в металах. Бор зміг зрозуміти на ранній стадії

своїєї наукової діяльності, що класична теорія не може повністю описати поведінку електронів.

Після отримання докторського ступеня, в 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. З 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.

Влітку 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 вважав 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 введено сталу  $\hbar = h/2\pi$ , яку часто називають сталою Планка, хоча точніше називати її «стала Дірака» – на честь англійського фізика, котрий вперше запровадив це позначення.

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  $-\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$ , і рух якого підпорядковується наведеному вище правилу квантування.

Наслідки виявилися дивовижними. Бор показав, що електрон може перебувати в атомі водню лише на певних дискретних рівнях із енергією:

$$E_n = -\frac{me^4}{(4\pi\epsilon_0)^2 \cdot 2\hbar^2} \cdot \frac{1}{n^2}$$

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 «дозволенними» 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 з квантовим числом  $n$ :

$$\nu_{kn} = \frac{E_k - E_n}{h} = R \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right)$$

Ще 1885 року (році народження Бора!) швейцарський фізик Йоганн Бальмер вивів емпіричну формулу для частот у спектрі атому водню:

$$\nu_{kn} = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{k^2} \right)$$

де  $R$  – стала Рідберга (названа на честь шведського фізика, який її запровадив). 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 розрахунків, дістав найголовніший козир на користь своєї теорії. Але революційність висно-

вку Бора була очевидна – вперше частота випромінювання «відривалася» від періоду обертання електрона в атомі! Згодом Ейнштейн зізнався: за кілька років до того в нього майнула подібна ідея, але він її відкинув як надто сміливу...)

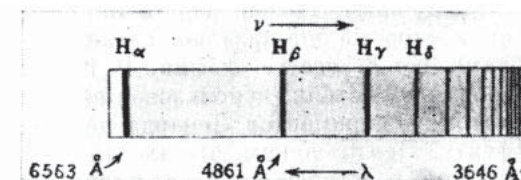


Рис. 118. Серія Бальмера в спектрі атома Водню.

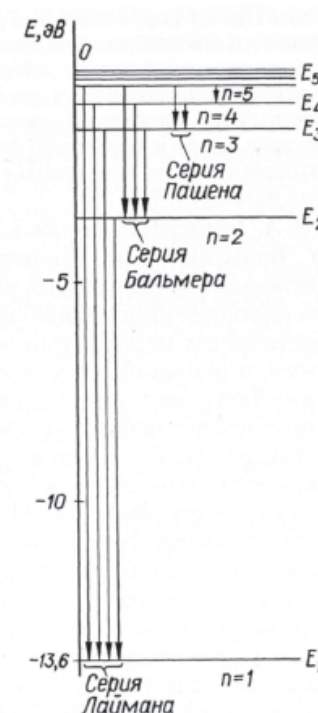


Рис. 119. Схема енергетичних рівнів атома водню за Бором.

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 популярність. 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. Бор керував цим інститутом 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 член 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 закрив 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 Ейнштейн: «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 спектру вельми дотепні й видаються чудово опрацьованими. Однак поєднання ідей Планка зі старою механікою вельми ускладнює фізичне розуміння того, що лежить у 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 Гейзенберг: «Нехай це й безумство, але в нім є метод».

1923 рік, видатний нідерландський фізик Гендрік Лоренц: «Все це красиво й украй важливо, але, на жаль, не дуже зрозуміло». «Класик» Лоренц шкодував, що не помер кількома роками раніше, коли в 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, але й для всіх іонізованих атомів із 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 та його співробітників, 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 Гейзенберг.

Однак наукові заслуги Бора моделлю атома водню аж ніяк не обмежуються. Під науковим керівництвом Нільса Бора згодом було створено те, що згодом назвали «копенгагенською інтерпретацією квантової механіки».

Беручи за основу *принцип невизначеності* Вернера Гейзенберга, 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 й принцип доповнювальності.

*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 доповнювальності* стверджує, що хвильовий і корпускулярний характер речовини й випромінювання є взаємодоповнювальними властивостями й однаково необхідними компонентами розуміння природи.

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 дало можливість наприкінці 1938 року розробити теорію поділу ядра. Це зробили німецькі фізики Отто Ганн, Отто Фріш і Ліза Мейтнер.

У перші роки війни Бор 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.

Нільс Бор зустрічався з президентом США Рузвельтом і прем'єр-міністром Великобританії Черчиллем, намагаючись переконати їх встановити систему контролю над озброєннями в післявоєнний період. 1950 року Бор надіслав відкритого листа до ООН, закликаючи до «відкритого світу» й міжнародного контролю над озброєннями.

Нільс Бор пішов із життя в 77-літньому віці уві 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. 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...

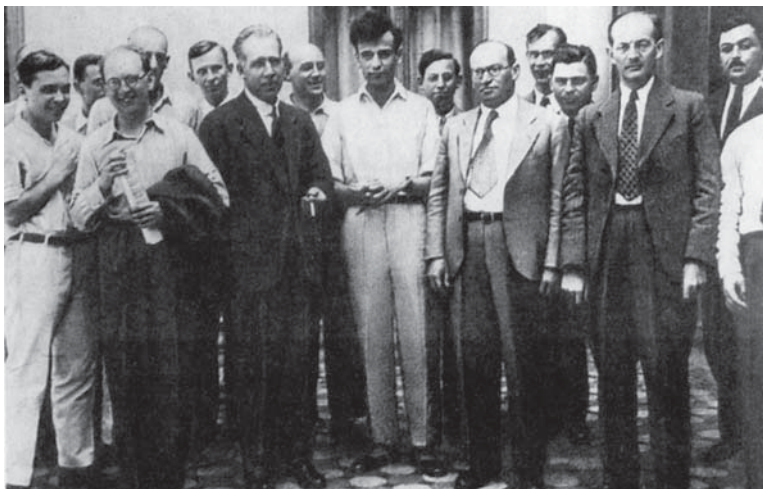


Рис. 120. Нільс Бор і Лев Ландау (у першому ряді посередині) на конференції з теоретичної фізики в Харкові, 1934 рік.

Востаннє Нільс Бор приїздив до СРСР разом із дружиною, сином Оге й невісткою в травні 1961 року. На семінарі в Петра Капіці 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 Ейнштейн 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

Арнольд Зоммерфельд, німецький фізик-теоретик, народився в Кенігсберзі, вчився 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.

Починаючи з 1915 року, Зоммерфельд досить успішно розвивав борівську теорію, використовуючи замість кругових орбіт для електронів у атомі еліптичні кеплерівські орбіти. У квантовій теорії спектральних ліній, виходячи з борівської моделі атома, здійснив синтез квантової теорії та теорії відносності (адже електрони рухаються з величезними релятивістськими швидкостями!), розробив квантову теорію еліптичних орбіт (теорія Бора-Зоммерфельда).

Справді, за Кеплером, на еліптично витягнутій орбіті швидкість електрона увесь час змінюється не лише за напрямком (як у русі по колу), але й за величиною. Далеко від ядра швидкість менша, поблизу ядра – більша. Але, за Ейнштейном, – тоді змінюється й маса електрона.

Отже, електрон, коли описує оберт навколо ядра, дещо зміщується вбік порівняно з початковим станом. Так він «плете» навколо ядра одну «пелюстку» за одною. Математично така крива називається «розеткою», й за багато обертів електрон вимальовує навколо ядра щось схоже на багатопелюсткову ромашку.

Але кожен із цих рухів квантується: і головний еліпс, і обертання цього еліпса навколо ядра в площині, і його-таки можливе обертання в тривимірно-

му просторі. Відтак, на додачу до головного квантового числа  $n$ , Зоммерфельд для характеристики стану електрона в атомі запровадив радіальне й азимутне квантові числа, чим пояснив тонку структуру водневого та рентгенівського спектрів. 1916 року він спільно з Петером Дебаєм побудував квантову теорію ефекту Зеємана (розщеплення спектральних ліній у магнітному полі) й запровадив магнітне квантове число.

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 Гейзенберг, Ганс Бете тощо. Він створив багатотомний курс теоретичної фізики, який не втратив свого значення й нині. Зоммерфельд – член багатьох академій наук і наукових товариств.

У історії фізики нерідко траплялося, що одну проблему розробляли незалежно один від одного кілька науковців. Це свідчило про актуальність проблеми. 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 вказує, що теорію Бора може суттєво доповнити введення неколових орбіт. Потім Зоммерфельд формулює загальний принцип теорії спектральних серій: «Стаціонарні орбіти електронів у 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 рентгенівські спектри випромінюються всередині цієї хмари. І оптичні, й рентгенівські спектри будуть тим більш воднеподібними, чим далі від внутрішньої електронної хмари розташовано місце їх збудження. Тому в видимих спектрах простота серіального закону зберігається тим краще, чим вищий серіальний номер.

Нарешті, Зоммерфельд із учнями зсував ще одну важливу обставину. Парно 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 встановити «правило відбору»: експериментально реалізуються лише ті переходи, де ази-

мутальне квантове число збільшується (або зменшується) на одиницю. Однак фізичної причини цього теорія Бора-Зоммерфельда не пояснювала.

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 (орбітальне, азимутальне, магнітне), що їх запровадив Зоммерфельд, а також встановлені 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

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. Цікаво зазначити, що саме в родовому маєтку де Бройлів народився Огюстен Жан Френель (1788-1827) – основоположник хвильової оптики. Він був онуком управителя маєтку де Бройлів.

Луї і його старший брат Моріс (1875-1960) стали фізиками, але йшли 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 рентгенівських променів було до кінця досліджено тільки 1912 року, коли німецький фізик Макс фон Лауе (1879-1960) вивчив їх дифракцію в кристалах. Адже рентгенівське 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 цьому був присутній молодший брат Моріса – Луї де Бройль.

Луї закінчив лицей 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 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 трактуванням оптичних явищ стояла особливо гостро*.

1923 року з'явилися перші роботи Луї де Бройля, а 1924 він захистив свою докторську дисертацію на тему: «Дослідження в галузі квантової теорії», в якій спробував перекинути місток між протилежними підходами. Науковий керівник Ланжевєн 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 Ейнштейна 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 рентгенівських 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 вперше 1936 року книзі «Революція в фізиці. Нова фізика й кванти» де Бройль зумів захопливо розповісти про народження й еволюцію нової квантової теорії, не використавши жодної формули!

За літературну роботу науковця вшанували обранням 1946 року до Французької академії. 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.

У родині де Бройлів було багато знаменитих людей – міністри, маршали, парламентарі, але фізики з'явилися тільки в ХХ столітті. Повне ім'я Луї де Бройля було Луї Віктор П'єр Раймон, сьомий герцог Бройль. 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 принцу – принесли досягнення в фізичних дослідженнях.

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. У 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 у оптиці ще в XVII столітті французький математик П'єр Ферма (1601-1665), 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 Ейнштейна –  $E = mc^2$ . Оскільки,  $p = mc$ , то  $\lambda = \frac{h}{p}$ .

*Близька 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 місцезонашування в просторі, яке вона посідає з повною достовірністю. 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 відхилитися під дією електричних і магнітних полів, стало достовірним 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 електронного мікроскопа!*

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 кілька порядків. Серійні електронні мікроскопи гарантують розрізнення точок, розташованих на відстані 0,5 нм одна від одної, що відповідає збільшенню в 500000 разів!

І нарешті, «послухаймо» самого Луї де Бройля, який у вступі до вже згаданої книги «Революція в 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 в 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 у історії людської думки. Саме тому квантова фізика цікавить не лише фахівців – вона варта уваги кожної культурної людини».

Луї де Бройль дожив до 95 років. 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)



Ервін Шредінгер

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». У 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. 1910 року Шредінгер захистив докторську дисертацію, а 1913 року разом із Кольраушем отримав премію Імператорської академії наук за експериментальні дослідження радію, який тоді щойно відкривало було подружжя Кюрі.

Під час першої світової війни Шредінгер служив офіцером-артилеристом у гарнізоні, розташованому в горах, далеко від лінії фронту. У вільний час він вивчав загальну теорію відносності Ейнштейна. Після війни Ервін Шредінгер повернувся в Другий фізичний інститут у Відні, де продовжив свої дослідження з загальної теорії відносності, статистичної механіки й дифракції рентгенівського 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 Ейнштейна з приводу хвильової теорії матерії Луї де Бройля.

Під враженням коментарів Ейнштейна 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 XIX ст. Вільяма 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  $\Psi$ ) і прирівняти отриманий результат до похідної хвильової функції за часом, помноженої на ту-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  $10^{23}$  атомів і стільки ж електронів провідності) вигляд потенційної енергії треба апроксимувати різними моделями – справжня картина надто складна, і жоден комп'ютер тут не зарадить.

Проте 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, виявилася частковим і цілком ясним випадком великої стрункої теорії!

Робота Шредінгера мала великий резонанс. Ось як описував ситуацію Вернер Гейзенберг: «1926 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 у 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 важли-

ві 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».

З фізичною інтерпретацією хвильової функції в рівнянні Шредінгера мали місце принципові розбіжності, які чітко сформулював той-таки Вернер Гейзенберг: «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, покінчить 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 їх 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  $\Psi$ . 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.

Хвильова функція є специфічним відображенням, що має «хвильовий» характер. «Хвильове відображення» перетворює сукупність окремих можливостей квантових систем у певний єдиний утвір – квантову частинку. Так, дискретність поєднується з неперервністю, частина – з цілим, елемент – із системою, визначеність – із невизначеністю, можливість – із дійсністю!

*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 Ейнштейн написав знамениті слова: «Ця теорія багато дає, але до таємниці Старого вона нас не наближає. У кожному разі, я перекоаний, що Він не підкидає кості». Пізніше фразу «Бог не грає в кості зі Всесвітом!» Ейнштейн публічно повторив на 5-му Сольвейвському конгресі восени 1927-го. Фактично до кінця життя геніальний творець теорії відносності вірив у 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 в 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?)

1924 року, коли Макс Планк за віком мав піти у відставку з посади завідувача кафедри, Шредінгер посів його місце. Це свідчило про дуже високу оцінку ролі Шредінгера в створенні квантової механіки.

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, цікавився мистецтвом, сам займався ліпленням. Учений опублікував том своїх віршів.

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.

### Вернер Гейзенберг (1901-1976)



Вернер Гейзенберг

Майбутній учений народився тоді, коли ідеї квантування виповнився рівно рік. Це означає, що Вернер Гейзенберг був одним із наймолодших учених – творців квантової теорії. Він – автор відкриття одного з надзвичайно важливих принципів науки – принципу невизначеності.

Родина Гейзенбергів жила в німецькому місті Вюрцбурзі. 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.

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, але якось мало не 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 Гейзенберга 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 радикаль-

на філософія, специфічний науковий світогляд знайшли зацікавлений, гарячий відгук у душі молодого асистента Вернера Гейзенберга.

Атомна фізика в той час нагадувала безладне нагромодження гіпотез, і це не могло не дратувати фізиків, а надто теоретиків. Виходити тільки з припущень, що є атомом і електроном, для по-німецьки педантичного Гейзенберга 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. Наразі майже все...

Відповідно до теорії Бора, атом випромінює світло, переходячи з одного енергетичного стану в інший. А за теорією Ейнштейна, 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 Гейзенберга, необхідно представити тільки за допомогою *чистих математичних співвідношень, що підтверджуються дослідями!* Виникла проблема розробки математичного апарату. Гейзенберг зупинився на матричному численні. Цей вибір виявився дуже вдалим, і досить швидко (але це не значить – легко й просто!) теорію було створено.

Матрична механіка Гейзенберга заклала основи науки про рух мікродієльностей і згодом стала називатися квантовою механікою. Квантова механіка об'єднала матричну механіку Гейзенберга та хвильову механіку Шредінгера. Але це сталося не відразу, події розвивалися драматично, хоча й зі сприятливою для науки розв'язкою.

У матричній механіці Гейзенберга 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 Гейзенберга електрон характеризується набором *окремих чисел*.

Наукові ідеї Гейзенберга 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 Гейзенберг «несподівано» (для інших, але не для себе!) дав потрібну інтерпретацію – сформулювавши принцип невизначеності, ані трохи не сумніваючись у його правильності!

Згідно з цим принципом, одночасне вимірювання двох так званих зв'язаних змінних (наприклад, координати та імпульсу частинки), неминує приводить до обмеження точності. Чим точніше виміряно положення частинки – тим із меншою точністю можна виміряти її імпульс, і навпаки! У граничному випадку абсолютно точно визначення однієї зі змінних веде до повної втрати достовірної 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!

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 гейзенбергівській 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:

$$\Delta A \Delta B \geq \hbar!$$

Разом із ідеями таких наукових світил, як Нільс Бор і Макс Планк, принцип невизначеності Гейзенберга увійшов 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. Гейзенберг став професором теоретичної фізики Лейпцигського університету. Він став наймолодшим професором у Німеччині – йому було натовді лише 25 років.

Принцип невизначеності Гейзенберга 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 сучасною фізичною картиною світу, ми все ж переживаємо певне відчуття незадоволення, пов'язане з корпускулярно-хвильовим дуалізмом, який виявляє себе в мі-

кросвіті. Виникає 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 Гейзенберг.

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  $\Delta X$  – невизначеність координати,  $\Delta P_x$  – невизначеність імпульсу вздовж цієї координати) стверджує, що *невизначеність не вдається усунути навіть у найідеальнішому експерименті!*

Спробуємо пояснити, чому експеримент не може принципово дати більшої точності, ніж дозволяє принцип Гейзенберга. 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 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 елек-

трона  $\frac{\hbar}{m} = 0.0007 \text{ м}^2 / \text{с}$ , тоді  $\Delta X \cdot \Delta V \geq 0.0007 \text{ м}^2 / \text{с}$ . За  $\Delta X = 10^{-11} \text{ м}$  (точ-

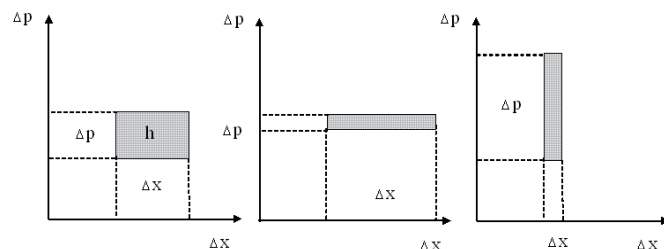
ність, якої ми прагнемо!) маємо  $\Delta V \geq 7 \cdot 10^7 \text{ м} / \text{с}$ . Тобто, про швидкість електрона нічого певного сказати не можна! Якщо ж усе-таки спробувати визначити швидкість у розумних межах – тоді ми втратимо інформацію про міс-

це, 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 як класична частинка, і траєкторія її хаотичного руху має цілком певний сенс.

Графічне зображення принципу невизначеності Гейзенберга має такий вигляд:



Площі заштрихованих прямокутників однакові, оскільки вони виражаються через сталу Планка  $h$ !

Наукова праця Вернера Гейзенберга 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 у Інституті Гейзенберга було створено квантову теорію твердокристалічного стану, молекулярної структури, розсіяння випромінювання на ядрах, а також протон-нейтронну модель ядер. Спільно з іншими теоретиками він зробив величезний крок у бік релятивістської квантової теорії поля й заклав основу для розвитку досліджень у галузі фізики високих енергій.

Попри те, що Вернера Гейзенберга по праву вважають одним із найбільших фізиків, ставляться до нього в наш час по-різному. Річ у тому, що під час правління Гітлера Гейзенберг посідав високі посади в академічній науці й був символом німецької «арійської» культури. 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 рейх.

Гейзенберг, котрому вдалося зазирнути в таємниці природи, не зумів осягнути глибини трагедії, яку переживала його батьківщина. Проте членом нацистської партії, як Філіпп Ленард чи Йоган Штарк, учений ніколи не був.

В останні роки життя Гейзенберг зосередив свої зусилля на створенні єдиної теорії поля. Він розумів, що споруда такої теорії мусить стояти на міцній експериментальній базі. Пишучи про неуспіх спроб своїх попередників, науковець наголошував: «у той час, коли Ейнштейн працював над єдиною теорією поля, науковці безперервно відкривали нові елементарні частинки й співвіднесені з ними поля. Тому для здійснення ейнштейнівської програми все ще не було міцної емпіричної основи, й спроба Ейнштейна не дала ніяких переконливих результатів». Втім, мусимо визнати: і Гейзенбергові не пощастило посунутися тут значно далі.

Багато «пізніх» робіт Гейзенберга було присвячено філософським проблемам фізики, теорії пізнання. «Кроки за горизонт» Вернер Гейзенберг намагався робити, стоячи на ідеалістичних позиціях. Науковець був переконаний: атом «можна лише символічно представити диференціальним рівнянням у часткових похідних у 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». Гейзенберг вважав: розвиток квантової фізики ХХ століття з її відходом від детермінованості дозволив остаточно вирішити одвічну суперечку ідеаліста Платона з матеріалістом Демокритом на користь Платона, котрий вважав, що справжня сутність речей назавжди залишиться для нас прихованою.

### Макс Борн (1882-1970)



Макс Борн

Цього німецького вченого заслужено вважають одним із засновників квантової механіки. Він є автором багатьох основоположних робіт із квантової механіки, теорії будови атома та теорії відносності.

Макс народився в місті Бреслау (тепер це – польський Вроцлав) у родині професора анатомії. Його мати була талановитою піаністкою. Тож Макс зростав у 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 Давід Гілберт і Фелікс Клейн, а також відомий фізик Герман Мінковський.

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 міцніло.

Півроку Макс Борн займався науковими дослідженнями в Кембриджському університеті, де слухав лекції Джозефа Джона Томсона.

Борн об'єднав наукові ідеї Ейнштейна з математичними положеннями визначного німецького математика й фізика Германа Мінковського (1864-1909) – 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. Проте незабаром після раптової смерті Мінковського Макс Борн став лектором університету з теорії відносності. Тут-таки він взявся досліджувати властивості кристалів у залежності від розташування атомів. Теорія залежності теплоємності від температури досі лежить у основі вивчення кристалічних структур.

1915 року Макс Борн став асистент-професором у Макса фон Планка в Берлінському університеті. Макс фон Лауе висловив своє бажання попрацювати з Максом 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 Гейзенберга строгої математичної форми. З 1926 року Борн багато розмірковував про результати дослідів з дифракції електронів. 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» не є матеріальними, а є «хвилями ймовірності»*. Вони характеризують ймовірність потрапляння електрона в певне місце макроріяду, тобто в певну точку фотопластини.

Всі три умови теорії ймовірностей виконуються в дослідах із розсіювання електронів, внаслідок чого завжди виходить дифракційна картина:

***Електрон як частинка розсіюється незалежно від інших електронів.***

***Електрони в квантовій фізиці нерозрізновані, до того ж нерозрізновані й окремі акти їх розсіювання.***

***Точні значення координат та імпульсів електронів не можна задати в принципі, оскільки це «заборонено» принципом невизначеності Гейзенберга.***

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 у 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. У одній точці атома ця ймовірність більша, в іншій – менша, але *в цілому розподіл ймовірності 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 достовірна, оскільки вона однозначна для будь-якої сукупності однакових атомів.

Психологічно, на основі так званого життєвого досвіду (а це завжди макродосвід!) нам «затишніше» уявити електрон частинкою. Тому ймовірнісна природа його хвильових властивостей у вигляді хвиль ймовірності не викликає в нас надмірного протесту, коли нам повідомляють, що «електрон – це хвиля». (Хоча були вчені, яким така аналогія була не потрібна. Лев Ландау жартував: «Частинка-хвиля – це обман трудящих!») Очевидно, Ландау з його віртуозним математичним хистом справді не потребував «зорових» образів, прив'язаних до повсякденного досвіду).

Образ атома на основі квантової теорії без використання достатньо складного рівняння Шредінгера не дає можливості передбачити жодного атомного явища. Але цей *квантово-механічний* образ дає можливість багато чого пояснити – якщо його правильно використовувати й завжди пам'ятати, як ми його «побудували».

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.

Проте низка засновників квантової теорії не погоджувалися з «копенгагенською інтерпретацією». Борн і Ейнштейн вели тривалу полеміку щодо цієї проблеми, хоча ці фундаментальні наукові розбіжності ніколи не затмарювали їхньої дружби. Окрім фізики, їх єднала любов до музики, і вони разом із насолодою виконували сонати – Ейнштейн на скрипці, Борн на фортепіано.

Макс Борн був надзвичайно привабливою людиною. Разом із тим, він був рішучим у своїй безкомпромісності, коли бачив десь несправедливість. Після приходу до влади Гітлера геттінгенський науковий центр фактично припинив свою плідну діяльність, бо з початком гоніння на євреїв кількох провідних професорів і декана наукового центру Макса Борна було усунуто з посад.

1933 року Макс Борн покинув Німеччину й переїхав до Великої Британії. Працював у 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: Гейзенберг, 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.

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 в 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.

### Вольфганг Паулі (1900-1958)



Вольфганг Паулі

Майбутній науковець народився у Відні. Коли в грудні 1900 року було вимовлено/виголошувати/ 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.

У 1923-1928 роках Паулі – доцент Гамбурзького університету, потім – професор Політехнікуму в Цюріху. Упродовж десяти років загалом Паулі працював у Принстонському інституті перспективних досліджень (США).

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.

Знаменитий «принцип заборони» Паулі 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 у атомі зі складною будовою атомів». Формулювання мало такий вигляд: «У 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).

Саме принцип заборони, що діє для так званих «ферміонів» – частинок із напівцілим спіном, до яких належать, зокрема, електрони – дозволив до кінця зрозуміти періодичну систему елементів Дмитра Менделєєва. У відповідності до розв'язку рівняння Шредінгера, всі орбіти в атомі поділяються на шари, які в порядку їх 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 неоном (із заповненими всіма електронними орбітами). Ситуація з наступними шарами стає трохи складнішою – але періодична система, яка спершу багатьом здавалася фантазією, виявилася відбиттям глибинної структури атома.

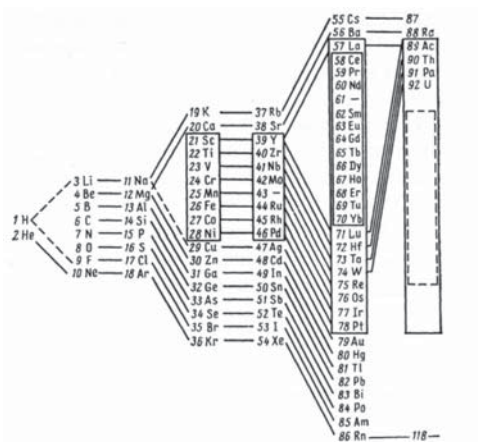


Рис. 127. Періодична система елементів за Бором-Паулі.

За допомоги принципу заборони вдалося пояснити й зонну структуру твердих тіл, наявність там «заборонених» і «дозволених» зон енергії, причини відмінностей між металами, напівпровідниками й діелектриками і, врешті-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.



Рис. 128. Схематичне зображення рівнів енергії в метані (а) та в напівпровіднику (б).

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 (це одна з «хмаринок», які непокоїли лорда Кельвіна). 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 у околі рівня Фермі завширшки  $kT$  може «сприймати» теплову енергію й робити внесок у теплоємність – а в переважної більшості електронів просто немає вільних місць, куди б вони могли перейти «вгору» за енергією!

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 ній 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 півтора-двох 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.

Крім того, у заповнених зонах напівпровідників під дією цих переходів утворюються вільні місця, які поводять себе як квазічастинки з позитивним зарядом. Їх називають «дірками», й вони теж можуть проводити струм.

1929 року Паулі разом із Вернером Гейзенбергом 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» (італійськи – «маленький нейтрон») тоді ж дав Енріко Фермі. Проте експериментально цю «невловиму» частинку пощастило виявити лише 1959 року.

Відомо, що багато славних фізиків, зокрема й Вольфганг Паулі, спочатку не прийняли наукової ідеї про необхідність запровадити поняття «спін електрона» (власний момент кількості руху, який у грубій 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 атомарного водню в магнітному полі на два, Семюел Гауд-

сміт (1902-1979) 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 в атомарному водні, де є лиш один електрон на головному квантовому рівні  $n=1$ , значення магнітного квантового числа (його запровадив Зоммерфельд), яке визначає орбітальний магнітний момент електрона, могло бути лише  $m=0$ , а отже – пучок розщеплюватися не міг).

Визначний фізик-теоретик Пауль Ернфест (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 Гаудсміт з Уленбеком: адже, за їхніми підрахунками, швидкість обертання на поверхні електрона мала перевищити швидкість світла!

Реакція Ернфеста була такою: «це або напрочуд цікаво – або нісенітниця». А проте він попросив молодих фізиків зробити коротке повідомлення для журналу. Вони дослухалися – й передали повідомлення Ернфестові (до редакції навіть не надсилали, вважаючи ідею надто неймовірною).

На їхній подив, повідомлення невдовзі було надруковано. Його надіслав до журналу сам Ернфест. 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, висловив у 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 дулетного розщеплення. З іншого боку, мої колишні сумніви, а також обереж-

ний 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».

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 увійшли багато робіт ювіляра, а також наукові праці інших найбільших науковців сучасності. Однак напередодні свого ювілею Вольфганг Паулі після тяжкої хвороби пішов із життя. Тож ця наукова збірка виявилася, власне, своєрідною епітафією великому науковцю-фізику.

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, яка, своєю чергою, зробила справжню революцію в фізиці.

### Поль Дірак (1902-1984)



Поль Дірак

Поль Андрієн Моріс Дірак народився в англійському місті Брістолі. Історія роду Діраків пов'язана зі Швейцарією, але батько Поля емігрував до Англії, де заробляв на життя викладанням французької мови. Французьку він вважав рідною й наполягав, щоб удома говорили саме цією мовою.

Батько дбав про освіту сина. Він влаштував його в навчальний заклад, у якому викладав – це була своєрідна школа торгівельних підприємців, поєднана з технічним коледжем.

Сам Поль Дірак так розповідає про цю школу: «MV (аббревіатура від англійського «Merchant Venturers»; «The Society of Merchant Venturers» – «Товариство купців, які працюють у заморській торгівлі» – приватна підприємницька та благодійна організація Брістоля, заснована ще в 13 столітті, при якій ця школа працювала, – *автори*) 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 щосередини 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, 1921 року він закінчує університет із відзнакою. Але його здібності до техніки не було достатньо високо оцінено, й Діраку не вдалося знайти роботу інженерно-технічного профілю.

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 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. Як виявилось зовсім нещодавно, спектр електронів у відкритому 2004 року графені – моноатомному шарі вуглецю, якому вже присвячено величезну кількість експериментальних і теоретичних робіт – так само описується рівнянням Дірака.

Свого часу, після закінчення електротехнічного факультету Брістольського університету фірма, Дірак навіть не зацікавив фірму, в якій проходив інженерну практику. Тепер же перетворення не надто успішного інженера на видатного науковця виглядало дивом. Проте це «диво» має цілком виправдане пояснення. Належне виховання в дитинстві, своєрідне навчання в Брістолі (у школі і в університеті) отримали закономірне й органічне завершення в Кембриджі. Коли б не Кембридж – хтозна, може, здібності й можливості Дірака не реалізувалися б так повно й блискуче.

У 1920-их 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.

Справжня слава прийшла до вченого, коли йому було 30 років. Ось один із прикладів його наукових осяянь. Дірак 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 згори теж заповнені тими самими електронами, і їм просто нікуди переходити, а відтак на різні впливи вони не реагують (щось подібне відбувається з електронами в цілком заповнених енергетичних зонах діелектриків – вони теж не реагують на поле й не проводять струм). Надаються до спостереження тільки електрони з позитивною енергією.

«Послухаємо» самого Дірака: «Електрони розподілені по всьому Всесвіту з великою густиною в кожній точці. Досконала порожнеча 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 незайняті електронами рівні, які є чимось винятковим, якимсь 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 негативною 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 випускаються 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). 1955 року існування антипротона підтвердив інший американець, Оуен Чемберлен (1920-2006).

Пізніше Дірак відкрив *статистичний розподіл енергії в системі електронів*, відомий тепер під назвою *статистики Фермі-Дірака*. Ця фундаментальна робота мала велике значення для теоретичного осмислення електричних властивостей металів і напівпровідників.

Оскільки ферміони – це частинки з напівцілим спіном, які підкоряються «забороні Паулі» й не можуть перебувати в квантово-механічному стані з однаковими квантовими числами; ця заборона накладає обмеження на їхній розподіл за енергією. Імовірність знайти ферміон у певному стані з енергією  $\varepsilon_n$  (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  $\mu$  – хімічний потенціал,  $k_B$  – стала Больцмана,  $T$  – температура.

Характерною особливістю цього розподілу є одиниця в знаменнику. Вона визначає особливий вигляд розподілу Фермі-Дірака порівняно з розподілом Бозе-Ейнштейна, який описує частинки з цілим спіном – «бозони» (Шатьєн-дранат Бозе (1892-1974) – індійський фізик, котрий 1924 року вперше поставив задачу про розподіл «бозонів»).

Для «бозонів» заборона Паулі не діє – і це зумовлює низку дивовижних явищ, як-от Бозе-конденсація гелію. Ядра гелію 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 Гейзенберга, стає нескінченно великою. Відтак ми вже не можемо сказати, перебуває конденсат гелію в посудині, де відбулося охолодження, чи ні! Математично формула для розподілу Бозе-Ейнштейна дуже схожа, але перед одиницею в знаменнику стоїть «мінус», і це веде до важливих фізичних наслідків.

Хімічний потенціал  $\mu$  визначається з умови нормування розподілу й залежить від повного числа часток у системі  $N$ .

$$N = \sum_n \frac{1}{e^{(\varepsilon_n - \mu)/k_B T} + 1}$$

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 Ейнштейна 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-Ейнштейна).

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 має вигляд сходинки: ймовірність заповнення станів дорівнює одиниці за енергій, що дорівнюють рівню Фермі, або нижчих, 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 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 за енергію рівня Фермі, стане вільним. Чим вища температура, тим пологішою стає крива розподілу. За дуже високих температур розподіл Фермі-Дірака переходить у класичний розподіл Максвела-Больцмана.

Поль Дірак і Ервін Шредінгер отримали Нобелівську премію з фізики 1933 року «за відкриття нових продуктивних форм атомної теорії».

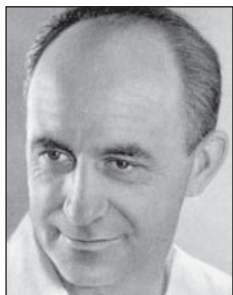
Поль Дірак – почесний член низки академій наук і наукових товариств. Його нагороджено Королівською медаллю (1939), медаллю Коплі (1952) та орденом Великобританії «За заслуги»; також він отримав премію Оппенгеймера. З 1961 року Дірак – член Папської академії наук.

Думки й роботи Дірака позначені дивовижною красою. Його книга «Спогад про надзвичайну епоху» – яскраве свідчення незвичайності цього генія, повне ім'я якого Поль Андрієн Моріс Дірак.

### Енріко Фермі (1901-1954)

Енріко Фермі народився в Римі в родині службовця-залізничника та вчительки. Коли 42-річний ординарний професор Макс Планк вперше вимовив слово «квант», Енріко ще не було на світі.

«Великий італійський фізик Енріко Фермі посідає особливе місце серед сучасних науковців: у наш час, коли вузька спеціалізація в наукових дослі-



Енріко Фермі

дженнях 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 коли був студентом, 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.

За два студентські роки 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 за скеруванням Міністерства освіти Італії відрядили для вдосконалення в галузі наукових досліджень у 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, «дивацтво» 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* й 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 вважав 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 за 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.

По-третє, своїми теоретичними роботами Фермі зробив великий внесок у вчення про структуру атомів і молекул, узагальнений 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 не-

терпимий 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  $\beta$ -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 англійський фізик-експериментатор, учасник «манхеттенського проекту» 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.

Розпочалася Друга світова війна. Змушені тікати з окупованої нацистами Європи фізики (Альберт Ейнштейн, 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 досліді з опромінення урану нейтронами наприкінці 1930-х не дали сподіваного результату – інакше атомну бомбу Рейху могло бути створено ще перед Другою світовою!)

Тому з ініціативи науковців у США було започатковано «Манхеттенський проект» для робіт зі створення атомної бомби. Очолював його американський фізик Роберт Опенгеймер (1904-1967). 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, в свою чергу, спричиняють нові розпади ядер. «Було ясно, – писав згодом керівник англійського проекту атомної бомби Джон Кокрофт (1897-1967), – що Фермі відчинив двері в атомне століття».

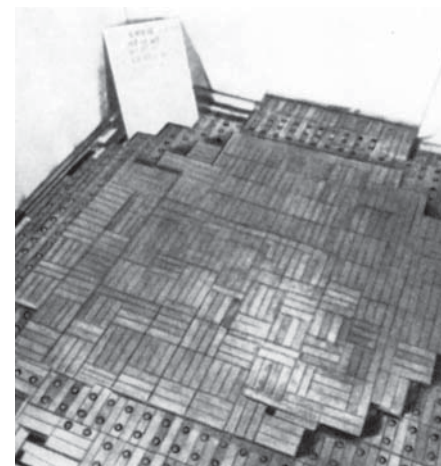


Рис. 131. Верхній шар першого атомного реактора.

16 червня 1945 року в пустелі штату Нью-Мексіко вибухнула перша атомна бомба, створена в межах «манхеттенського проекту». Дві такі бомби наприкінці війни було скинуто на японські міста Хіросіму й Нагасакі – це, безумовно, пришвидшило капітуляцію Японії, але більшість людей на Землі досі сприймають ту атаку вкрай неоднозначно. Фізики випустили джина з пляшки.



Рис. 132. Хіросіма після атомного бомбардування.

1953 року вибухнула перша радянська воднева бомба. Наступного року в СРСР було запущено першу атомну електростанцію – в місті Обнінську. Ці роботи, що відбувалися під керівництвом Ігоря Курчатова (1903-1960), на якийсь час вивели СРСР уперед у гонитві озброєнь, яка 1962 року, під час «ка-

рибської кризи», поставила цілий світ на межу знищення. 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 можливість ядерного протистояння двох систем існувала.

Розвиток атомної енергетики також мав неоднозначні наслідки. Людство отримало доступ до порівняно чистої екологічно енергії, виробництво якої не збільшує вмісту вуглекислого газу в атмосфері. Проте вже 1979 року відбулася серйозна аварія на американській АЕС у Трімайл-Айленді. А 26 квітня 1986 року вибухнув четвертий блок Чорнобильської АЕС, і цей вибух спричинив найбільшу техногенну катастрофу в історії людства, наслідки якої досі відчувають мільйони українців і білорусів.

Такими неодновимірними були здобутки атомної доби, яку провів Фермі. Запуск «уранового котла», що його сконструював Фермі.

Останні роки життя Фермі працював над проблемами фізики високих енергій.

Фермі був безмежно енергійною людиною з видатним інтелектом, завжди незмінно доброзичливий у спілкуванні, чудовий сім'янин. 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, задалегідь. Професор-організатор лекції не впізнав нобелівського лауреата, вирішив, 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 лиш 53 роки. Хворобу було, очевидно, спровоковано небезпечними дослідженнями з радіоактивністю, в яких науковець брав участь.

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 багатющої європейської культури, а науковці, що її створили, були людьми з глибокими гуманітарними зацікавленнями. Ейнштейн, Бор, Гейзенберг, Еренфест, Лауе були також чудовими музикантами, а Планк в юності навіть плекав намір стати професійним пі-

аністом; в університеті він читав лекції з теорії музики та керував студентським хором, у якому співав молодий Отто Ганн (1879-1968), котрий 1938 року відкрив разом зі Фріцом Штрассманном (1902-1980) явище поділу ядер урану нейтронами й отримав за це Нобелівську премію з хімії 1944 року.

Гейзенберг, 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 ввійшли 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 питань віри та науки лежали в паралельних площинах. За словами Ейнштейна, теорія відносності не може ані спростувати, ані утвердити віру в Бога, – й навпаки, віра не здатна ані спростувати, ані підтвердити теорію відносності.

Вище ми 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 історично-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 як приклад кілька промовистих епізодів з життя творця «матричної механіки» Вернера фон Гейзенберга.

Зберігся переказ про те, як одного дня 1919 року Арнольд Зоммерфельд увійшов до кімнати, де збавляв час за грою в шахи другокурсник Гейзенберг, відірвав його від шахової партії, дав у руки фотоплатівку з фотографією спектру випромінювання атома в магнітному полі й запропонував знайти закономірності в розташуванні спектральних ліній. Трьома роками пізніше, в червні 1922 року, Гейзенберг 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 Гейзенберг захворів на сінну лихоманку 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 у 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 вдалося 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».

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 вчинити з нею на його розсуд. Борн схвалив її ідею, і 29 червня стаття Гейзенберга «Про квантово-теоретичне тлумачення кінетичних і механічних співвідношень» надійшла в редакцію журналу. Сам Гейзенберг, мабуть, не відразу усвідомив значущість своєї роботи, оскільки, виступаючи 28 липня на запрошення «клубу Капіці» 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. «Гейзенбергове 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 Гейзенберга про квантові умови у вигляді таємничого рівняння  $pq - qp = \frac{h}{2\pi}$ ».

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 Гілберта, 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», фізика для хлопчиків (Борну на той час було 42 роки – дуже багато, на думку Паулі). Борн і Йордан завершили свою статтю до осені, незабаром до них приєднався Гейзенберг, 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», у якій він запропону-

вав своє математичне оформлення ідей Гейзенберга. 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 (1889-1944), від якого й дізнався про статтю Гейзенберга – 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 Гейзенберга.

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, 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 зі всім запалом юності віддався вивченню фізики.

Брат Луї де Бройля Моріс був визнаним фахівцем у фізиці рентгенівських променів і багато думав про їхню природу. Він був згоден з Вільямом Брегом, який ще в 1912 році, відразу після відкриття Лауе і за 10 років до дослідів Комптона, писав: «Проблема тепер полягає не в тому, щоб вибрати між двома теоріями рентгенівських променів, а в тому, щоб знайти. одну теорію, яка поєднує можливості обох».

1963 року Луї де Бройль згадував: «Мій брат вважав рентгенівські 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 досліді 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 учас-

никам IV Сольвеївського конгресу, а в грудні надіслав дисертацію на відгук Ейнштейнові, котрий, у свою чергу, гаряче радив Максу Борну: «Прочитайте її! Хоча й здається, що її писав божевільний, написана вона солідно». Потім Ейнштейн навіть цитував її в своїх роботах, а Шредінгер 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 в 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 Волтер 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). Волтер Ельзассер після цих дискусій написав коротку статтю, в якій пояснював результати дослідів Девіссона й Кансмана, 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 Гейзенберга, – 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 Гейзенберг, 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 Гейзенберг, яскравих спогадів про епоху «Sturm und Drang» («бури й натиску») квантової механіки. Мабуть, тому, що свої головні відкриття він зробив у зрілі роки, коли юнацький запал дії змінився спокійною мудрістю знання, а тріумфування першовідкривача – розумінням відносної цінності всього сущого.

Про своє тодішнє враження від теорії Гейзенберга-Борна-Йордана Шредінгер згодом згадував: «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 Цюріхському університеті, попросив розповісти про роботи де Бройля аспірантам знаменитого Цюріхського політехнікуму. Незабаром після цього з'явилася перша стаття з серії робіт Шредінге-

ра «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 насильно!) звикли і що вважали за головну особливість атомних явищ.

У червні 1926 року Гейзенберг 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 Гейзенберга «атомістикою» (тобто «містикою атома»), вітали теорію Шредінгера з натхненням. (Професор Він до того ж, без сумніву, не забув, як Гейзенберг провалив йому випускний екзамен з експериментальної фізики!).

Суперечки про хвильову механіку тривали годинами і днями, і досягли граничної гостроти у вересні 1926 року, коли Шредінгер приїхав на запрошення Бора до Копенгагена.

Шредінгер так втомився 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 відчаї, 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.

З часом точки зору прихильників матричної й хвильової механік зближувалися. Сам Шредінгер довів їх математичну еквівалентність ще в березні 1926 року, і незалежно від нього того ж висновку дійшли Карл Еккарт у 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, Хартрі та Франком, котрі забезпечили його статтями Шредінгера, які він старанно вивчав дорогою назад че-

рез океан. Рік потому, продовжуючи з Джермером свої досліді, 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.

Досліді 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 змірилися з цією обставиною. Тепер науковці прагнули зрозуміти, 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 частенько не вдавалося.

Восени 1926 року Гейзенберг жив у мансарді фізичного інституту в Копенгагені. Вечорами до нього піднімався Бор, і починалися дискусії, які час-то 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 невизначеностей.

Мабуть, щоб зняти напругу тих днів, наприкінці лютого 1927 року Нільс Бор виїхав відпочити до Норвегії. Гейзенберг, коли залишився сам, продовжував напружено думати. Зокрема, йому не давало спокою давнє питання товариша по навчанню Боргерта 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 невизначеностей.

(Слід думати, що Гейзенберг із вдячністю пригадав старого екзаменатора Вільгельма Віна, котрий хотів прогнати його з іспиту за незнання межі роздільної здатності мікроскопа. Як згодом зізнався сам Гейзенберг, 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 доповнювальності, 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 невизначеностей – це окремий випадок *принципу доповнювальності*, для якого можливий кількісний запис мо-

вою формул. 23 березня 1927 року стаття Гейзенберга «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 Давід Гілберт двічі на тиждень читав у Геттінгенському університеті курс із математичних методів квантової механіки (його було видано вже навесні 1927 року). Гілберту тоді допомагав 23-річний виходець із Угорщини Джон (Янош, Йоханн) фон Нойманн (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 Гейзенберга 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 з квантової механіки, і значна їх 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 «доповнювальність». За кілька тижнів потому, наприкінці жовтня 1927 року, в Брюсселі на V Сольвейвський конгрес зібралися Планк, Ейнштейн, Лоренц, Бор, де Бройль, Борн, Шредінгер, а з молодих – Гейзенберг, Паулі, Дірак, Крамерс.



Рис. 133. Семінар в Інституті теоретичної фізики в Копенгагені, 1930 рік. У першому ряді (зліва направо) О. Клейн, Н. Бор, В. Гейзенберг, В. Паулі, Г. Ганов, Л. Ландау, Г. Крамерс.

Тут остаточно утвердилися ті уявлення про квантову механіку й та система понять, які згодом отримали назву «Копенгагенської інтерпретації». Дис-

кусії на конгресі стали найсуворішою перевіркою всіх положень квантової механіки. Вона її з честю витримала, і відтоді 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, Гаудсміт і Розенфельд – із Голландії, Клейн – зі Швеції, Дірак – із Англії, Гейзенберг – із Німеччини, Бріллюен – із Франції, Паулі – з Австрії, Нішина – з Японії, Уленбек – із Америки, Гамов і Ландау – з СРСР. Безприкладну в історії науки співдружність учених вирізняли безкомпромісне прагнення до істини, щире захоплення величиною завдань, які їм випало вирішувати, ними 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.

У них жила та іскра космічного почуття, яка відрізняє людей істинно великих. Це почуття вічності вони зберегли навіть у політичних і міждержавних чварах, сучасниками (і учасниками) яких їм довелося стати. Через багато років політичні бурі розкидають їх по цілому світу: Гейзенберг стане керівником німецького «уранового проекту», 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, Гейзенберг – 1976, Дірак – 1985, де Бройль – 1987 році, і разом із ними пішла ціла епоха фізики, яку можна порівняти з епохою Галілея й Ньютонів.

## Квантова механіка – й деякі евристичні точки зору

На світанку «квантової доби», у 1902-1904 роках Вільям Томсон (лорд Кельвін) розвивав «вихорову теорію» атома. Згідно з цією теорією, атом міг набувати різних форм. Як стверджував Кельвін, атоми подібні до кілець диму, які випускає досвідчений курець. 1905 року ректор Мюнхенського університету Фердинанд Ліндеманн висловив оригінальну точку зору – що «атом кисню має форму кільця, а атом сірки – форму коржика».

Після появи робіт Резерфорда й Бора загальноприйнятою стала планетарна модель атома. І ніхто (крім істориків науки) не згадував більше про теорію «вихорового атома» Кельвіна та про «кільця-коржики» Ліндеманна.

А тим часом об'ємні зображення атома водню в різних станах збудження з певними квантовими числами, побудовані за функціями щільності електронної хмари, обчисленими з рівняння Шредінгера, дають саме такі химерні форми, що нагадують образи атомів Кельвіна й Ліндеманна. Форма збудже-

них атомів відрізняється від сферичної тим більше, чим сильніше атом збуджений. Збуджуючи атом, ми витрачаємо енергію на перебудову електронної хмари. Вона може набувати різних форм залежно від порцій витраченої енергії.

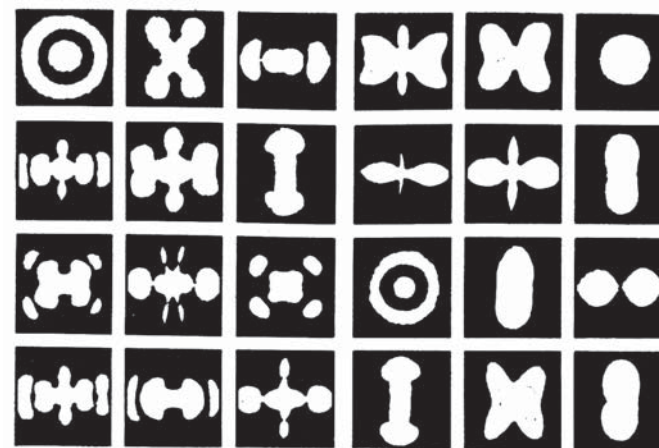


Рис. 133а. Розрахований розподіл густини ймовірностей для водню (вгорі й ліворуч), гелію та складніших атомів.

Форми електронних хмар у складних атомах в цілому не дуже відрізняються від форм, розрахованих для атома водню. Але розрахувати ці форми не так просто. Це вдалося тільки після робіт Володимира Фока (1898-1974) і Дугласа Хартрі (1897-1958). Задача Хартрі-Фока обчислювально дуже складна, її можна розв'язати тільки за допомоги потужних обчислювальних машин. А перші розрахунки найпростішого після водню атома гелію виконували ще до появи електронних комп'ютерів на механічних арифмометрах упродовж кількох років...

*Квантова механіка* – це математична теорія, яка дає схему обчислень фізично вимірних характеристик явищ мікросвіту. Проте наука покликана дати нам і правдоподібну картину світу. Зробити це тільки з формулами й числами неможливо. Треба створити ще й ідеалізовані, але правдоподібні образи *об'єктів, що піддаються звичайній людській уяві*. Особливо важливо це для тих, хто не знає і не розуміє формул квантової механіки. Для них мова образів і понять – єдиний спосіб мати наукові уявлення про реальність. А ця реальність така, що образ атома можна уявляти в різних формах: сфера, гантель, тор-«бублик», тор зі сферою всередині, тор із двома сферами, тор із гантеллю тощо!

Все це – про «електронну хмару» в атомі! А ядро?

Загальноприйнята точка зору: ядро атома складається з нуклонів, які бувають у двох станах, – протони й нейтрони. Їх здебільшого уявляють частин-

ками. Проте застосуємо принцип невизначеності Гейзенберга, наприклад, до протона в ядрі, розмір якого порядку одного фермі, тобто приблизно  $10^{-15}$  м. Невизначеність положення протона має бути меншою від цієї величини. Якщо це так, то, відповідно до співвідношення невизначеностей, неточність у оцінці швидкості протона в ядрі одного порядку зі швидкістю світла, що, звісно, абсурдно: неточність у оцінці швидкості більша від самої швидкості! І навпаки, якщо прийняти невизначеність швидкості протона «в розумних межах», тоді невизначеність його положення в ядрі виходить за межі цього ядра! Напрошується евристичний висновок: нуклонну структуру ядра «не можна побачити». Ядро – своєрідна «річ у собі» (якщо йти за термінологією Канта).

Але протонно-нейтронна модель ядра прийнятна, це виявляється в багатьох дослідях! Тож можна хіба що вважати, що протонно-нейтронна структура ядра має місце тільки потенційно, та актуально виявляється тільки за певних взаємодій.

Аналогічним чином принцип невизначеності Гейзенберга «заборонив» електрону в атомі мати певну траєкторію руху. І до цього фізики також мусили звикнути.

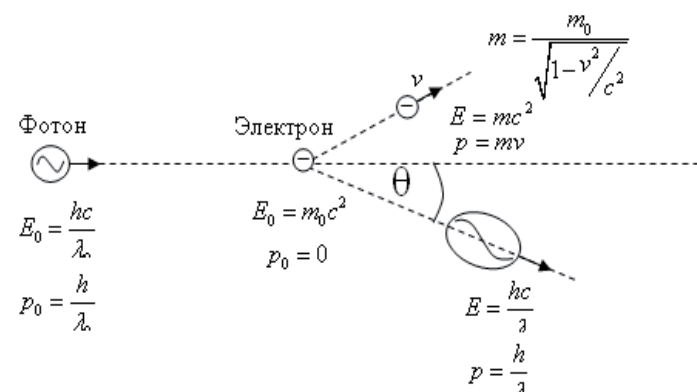
Ще раз звернімося до слів Альберта Ейнштейна: «Всі ці п'ятдесят років нескінченних роздумів ні на йоту не наблизили мене до відповіді на питання: що ж таке кванти світла?..» Чи не парадоксально, що автор фотонної теорії фотоефекту, саме за неї вшанований Нобелівською премією, щиро зізнається у власній неспроможності зрозуміти, що ж таке фотон? І це після відкриття й створення теорії ефекту Комптона, за що американський фізик Артур Комптон (1892-1962) теж отримав Нобелівську премію 1927 року. Цей ефект зміни довжини хвилі Х-променів після розсіювання їх електронами речовини вважається прямим доказом існування фотона!

То все-таки – що таке фотон (цю назву квантові випромінювання дав 1926 року американський фізик-хімік Гілберт Ньютон Люїс (1875-1946))?

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 вказали, 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. Справ-

ді, 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:



Ми 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  $\theta$  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 спо-

стереження потрібні не будь-які фотони, а вельми високоенергетичні рентгенівські.

Всі передбачення нескладної теорії блискуче справдилися на досліді. І продемонстрували: 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 ця теорія, як і теорія фотоефекту, не відповідає на питання: а що ж таке сам фотон?

*Після створення квантової теорії, до якої увійшов принцип невизначеності Гейзенберга-Бора (1927 рік), фізичний зміст поняття «фотон» суттєво змінився.*

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  $\lambda$ , швидкість світла  $c$  – конкретні. Проте 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!*

Разом із тим, 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. 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 в звичайному розумінні, як, наприклад, вільний електрон або протон (але не електрон у атомі! чи протон у 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), магнони («відповідають» за магнітні явища в магнетиках), екситони, плазмони, полярони тощо. Врешті-решт, квазічастинками є електрони й «дірки» в твердих тілах, а також нуклони в ядрі.

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 збере-

ження. Реально електрон взаємодіє не з якоюсь певною частинкою, а з електромагнітним полем усієї хвилі. Надзвичайно складне зводиться до відносно простого, але ми бачимо, що це досить *складна простота!*

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. Якщо ці хвилі укласти в «ящик із 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.

*А які об'єкти не-квантові?*

*Ми вже розуміємо: масивні й повільні тіла, для яких дебройлівська довжина хвилі значно менша від їхніх лінійних розмірів, мають добре описуватися законами класичної фізики. Проте існує строгий чисельний критерій переходу від квантового до класичного опису явищ природи.*

*У теоретичній механіці вводять поняття «дії». Дія – це фізична величина, яка має ту саму розмірність, що й стала Планка  $h$ :*

$$[S] = \text{Дж} \cdot \text{с}.$$

*Формулювання законів природи в інтегральній формі дозволяє виключити залежність виду цих законів від вибору динамічних змінних, які використовуються в математичних виразах законів. 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. 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:

$$\text{Імпульс } p = \frac{\partial S}{\partial q}.$$

$$\text{Енергія } E = \frac{\partial S}{\partial t}.$$

$$\text{Момент імпульсу } L = \frac{\partial S}{\partial \phi}.$$

Тут  $q$  і  $\phi$  – узагальнені координати,  $t$  – час.

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 розмірність:

$$h = 6,6260753 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

Якщо дія  $S$  системи значно більша від  $h$ , то квантові ефекти в ній практично не виявляються. Ось 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 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  $E^2 = (cp)^2 + (m_0c^2)^2$ , 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 са-

мий, 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.

Все це отримало блискуче експериментальне підтвердження.

### Вільям Шоклі (1910-1989)

З усіх важливих винаходів ХХ століття, які уможливили неймовірний технологічний прорив людства, центральне місце посідає винайдення транзистора, що зумовило стрімкий розвиток електроніки й обчислювальної техніки. Мало того, експерти (серед них нобелівський лауреат Жорес Алфьоров (н.1930)) вважають винайдення транзистора однією з трьох центральних фізичних подій ХХ століття (поруч зі створенням квантової механіки та винайденням лазерів). Цей винахід напруги пов'язаний зі здобутками квантової механіки, описаними вище. А доля винахідника транзистора Вільяма Шоклі (1910-1989) є яскравою ілюстрацією того, якою непростою часом 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 Лабораторі. Під час Другої світової – в складі групи боротьби з підводними човнами розробляв переважно питання логістики (вибору оптимальних маршрутів для конвоїв, глибини встановлення мін тощо). З 1944 року навчав пілотів В29 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 Хіросіми й Нагасакі.

Після війни Шоклі повернувся в Бел Лабораторі, де очолив групу фізики твердого тіла. На той час як випрямлювачі й посилювачі 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 посилення на напівпровідниках, щоб зробити посилювачі 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 посилення: 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 (1908-1991), зовнішнє поле екранувалося великою кількістю носіїв, зв'язаних на енергетичних станах на поверхні, і фактично не проникало всередину. Так суто експериментальне завдання стало поштовхом для створення квантово-механічної теорії поверхневих станів у напівпровідниках (1946).

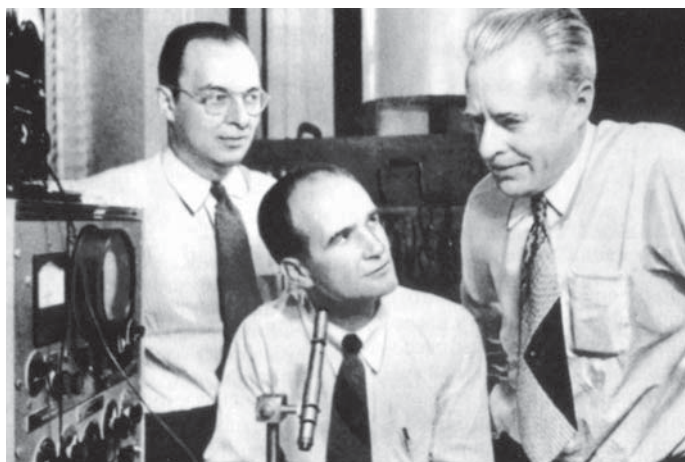


Рис. 134. Винахідники транзистора Дж. Бардін, В. Шоклі та В. Браттейн.

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 (1902-1987) 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 на межі XIX й XX століть 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.

Натомість Шоклі вважав перспективним створення транзистора на двох  $p$ - $n$ -переходах (ефект випрямлення на напівпровідниковому  $p$ - $n$ -переході отримав експериментально Вадим Лашкарьов, 1941 року в Києві). 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. І – найголовніше – того-таки 1951 року схожі на триногих павучків перші напівпровідникові транзистори, в яких невеликою зміною напруги на базі 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», чий пісню через ці приймачі лунали) одним із символів 1960-х років.



Рис. 135. Перший транзистор.

1953 року вчений залишає Белл Лабораторію 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). Проте ніхто з колишніх колег із Белл Лабораторії 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 (н. 1930) та Джоном Робертом Шрайфером (н. 1931) 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, формально – через його рішення більше не займатися кремнієм. 1961 року 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 вчинок був пов'язаний із тим, що, на лихо, 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, ніж 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 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 ХХ 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 на такій площі мікросхем розміщують уже  $10^8$  транзисторів. Розвиток нанотехнологій обіцяє ще фантастичніші цифри.

2002 року Шоклі посмертно названо «людиною, яка принесла кремній у Кремнієву долину».

## 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 за невеликими винятками (робота Мар'яна Смолуховського у Львові чи Миколи Пильчикова в Одесі) через проблеми з кваліфікованими кадрами й лабораторним обладнанням рідко виходили на передній край світового наукового пошуку. Активний розвиток промисловості наприкінці ХІХ століття зумовив відкриття нових політехнічних та технологічних інститутів – у Харкові, Києві, Катеринославі (тепер Дніпропетровськ), 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 столиці російської імперії Петербурзі, за підрахунками істориків науки, працювало на початку ХХ століття не більше як двадцять активних фізиків. Не набагато більше було їх у Москві.

1892 року академічного статусу набуло Наукове товариство імені Тараса Шевченка у Львові, до складу якого належала й математично-природописно-лікарська секція, членами якої були відомі фізики – й українці (Іван Пулюй), й іноземці (Макс Планк, Альберт Ейнштейн, Абрам Йоффе). Проте ця організація діяла без державної підтримки, 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). 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 упродовж 1920-х років провадили політику підтримки національно-культурного й наукового розвитку Української Соціалістичної Радянської Республіки, яку проголосили формально суверенною в складі СРСР. 1928 року було засновано Український фізико-технічний інститут у Харкові, й це відразу зробило тодішню столицю України одним із центрів світової фізичної науки.

Ось дуже короткий перелік досягнень першого десятиліття роботи УФТІ:

- тут виконували найпередовіші дослідження з ядерної фізики;
- тут 1932 року було здійснено першу в СРСР і другу в світі ядерну реакцію на швидких нейтронах;
- тут 1940 року було подано першу в світі авторську заявку на створення атомної бомби (авторське свідоцтво було оформлено вже після вибуху атомної бомби над Хіросімою, автор ідеї Віктор Маслов загинув на фронті ще на початку війни);
- нарешті, тут було створено першу в СРСР і третю в світі кріогенну лабораторію, яку з 1930 року очолював, по приїзду з Лейдена, визначний фізик-експериментатор Лев Шубніков (1901-1937).

Ще працюючи в Лейдені, він разом із Вандером де Гаазом (1878-1960) відкрив у 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 (1894-1981) 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 температур не «виштовхують» назовні магнітне поле.

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 в 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 року він повертається до Ленінграду.

Після нього у 1932-1937 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. У 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 ферромагнетизму, запровадив поняття «антиферромагнетиків» 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 «теоремінімуму» – базового набору теоретичних знань, без яких не можуть обійтися сучасні фізики. На основі теоремінімуму Ландау спільно з Євгеном Ліфшицом (1915-1985), котрий також працював у 1930-тих у теоретичному УФТІ, створив унікальний багатотомний «Курс теоретичної фізики», який досі є настільною книгою для фізиків цілого світу. Складаючи цей курс, науковці запровадили собі своєрідний «розподіл праці»: Ландау генерував і викладав ідеї, а Ліфшиц 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!) відрадили 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 предмету було неможливо. На жаль, у 1937-му, коли цінувалися не реальні знання, а комуністичне начотництво, це стало не-

безпечним. 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 відгук про філософські праці Енгельса (за іронією долі, Ландау був якраз переконаним матеріалістом і войовничим атеїстом). Звинувачення, як на той час, більш ніж серйозні.

Щоб вберегти 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 – немислимої в тоталітарному СРСР.

Як наслідок, ректор повертає Ландау до університету – вже як завідувача кафедри теоретичної фізики (до того теоретик Ландау завідував кафедрою фізики експериментальної). Але Ландау все одно вирішив переїхати до Москви, до Інституту фізичних проблем. Туди його кликав Петро Капіца, котрий щойно відкрив явище надплинності гелію й потребував його теоретичного пояснення.



*Лев Ландау – в'язень тюрми НКВС СРСР на Луб'янці в Москві, 1938 рік.*

Однак у Москві Ландау через рік заарештовують, і лише після року допитів відпускають – украй виснаженого фізично, – після того, як Петро Капіца звернувся особисто до Сталіна. Важливою була й підтримка з боку директора Фізичного інституту АН СРСР Сергія Вавілова. (Визначний фізик, з 1945 року – президент АН СРСР, Вавілов (1891-1951), за спостереженням нобелівського лауреата Віталія Гінзбурга (1916-2009), виконував у сталінському СРСР ту саму роль, що й Макс Планк у гітлерівському Рейху – намагався, використовуючи своє офіційне становище, врятувати всіх, кого можна було врятувати. 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 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 Нефоросного, і блискучого 32-річного фізика Вадима Горського розстрілюють 1937 року. Шубнікова – як «шпигуна, диверсанта й шкідника», Горського – як «троцькіста», Нефоросного – 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.

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 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 Миколу Коперника – народженого у вільній ганзейській Торуні урядовця напівавтономної 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 допомогла буквально повернути до життя геніального науковця після страшної автокатастрофи, й уже після смерті чоловіка написала гранично відверті й емоційні спогади про великого фізика та його добу «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 ХХ 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 Ніжин-

ського 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 священиком.

Семирічну школу в Великій Кручі Микола Боголюбов із вдячністю згадував до кінця життя. Звідси він виніс, крім 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 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 фізико-математичних наук.

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-их 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 нині є членом цієї відомої міжнародної наукової організації.

Не пориває 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, Понткорво...



*Рис. 137. М. Боголюбов (у центрі) і В. Шелест (праворуч) під час Рочестерської конференції з фізики високих енергій у Києві, 1970 рік.*

Безумовно, допомогла підтримка тодішнього керівника України Петра Шелеста, син якого Віктор 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, член-кореспондент АН УРСР Віктор Шелест.

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 священиком, носив коротку зачіску й ма-



Вадим Лашкарьов

леньку борідку. А коли священиків 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 СБУ, а українські книги горіли, – визнав себе українцем і вважав себе ним усе своє життя. Та, власне, і все становлення його наукової творчості відбувалося в Україні, і далі теж було пов'язане з Україною. Не даремно він називав Київ своїм улюбленим містом, прирівнюючи до нього лише Париж».

1928 року в Києві було засновано Інститут фізики ВУАН. Основними напрямками його досліджень стали електронні властивості твердих тіл та оптика. Школи академіків Олександра Давидова (1912-1993) та Антоніни Прихотко (1906-1991) теоретично й експериментально довели існування нового типу квазічастинок – екситонів малого радіусу, 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, академік 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!»

У цьому-таки Інституті фізики активно розвиваються дослідження з нової актуальної галузі – фізики напівпровідників.

Річ у тім, що основою радіотехніки 1930-х були лампові діоди й тріоди. Двоелектронна 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 громіздкі й ненадійні, і стояло завдання замінити їх компактними твердотільними відповідниками, які б були позбавлені недоліків перших примітивних кристалічних детекторів (для них навіть точку притискання металевого дротика до кристалу, в якій ефект випрямлення виявлявся б найкраще, треба було шукати вручну). Це завдання виконав основоположник фізики напівпровідників в Україні академік Вадим Лашкарьов (1903-1974).

Майбутній науковець народився в Києві. Його батько був товаришем прокурора (заступником прокурора в сьогоденній термінології), мати – закінчила Інститут шляхетних дівчат. Ці обставини після встановлення радянської влади довелося приховувати, втім, це не врятувало родину від адміні-

стративного 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.

У 1929-1930 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 без публічного захисту докторської отримує ступінь доктора фізико-математичних наук. Того самого року, водночас із Дмитром Іваненком, молодого доктора наук висилають із Ленінграду. 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.

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 термозонду запірні шари примітивних міднозакисних випрямлячів, науковець відкрив р-п-перехід. Тоді ж він з'ясував роль р-п-переходу у виникненні вентильного фотоэффекту – появи напруги за освітлення контакту областей напівпровідника з двома типами провідності.

Ця робота Лашкарьова, надрукована в журналі «Известия АН СССР», за своїм науковим значенням не поступалася працям Шоклі, Бардіна й Браттейна, котрих було вшановано Нобелівською премією. Адже функціонування р-п-переходу лежить у основі роботи сучасних напівпровідникових приладів – від простих випрямлячів до найскладніших інтегральних схем. А фотоэффект 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 точилася Друга світова війна, може – тому, що вона суттєво випереджала розвиток технології германію й кремнію, яким у наступному десятилітті судилося стати основними напівпровідниковими матеріалами.

Після війни Вадим Лашкарьов реалізовує велику програму дослідження напівпровідників. Робить він це паралельно в Інституті фізики й у Київському університеті імені Тараса Шевченка. Тут він створює і в 1950-58 роках очолює потужну кафедру фізики напівпровідників, яку пізніше впродовж понад 20 років очолював його учень – професор Віталій Стріха (1931-1999), творець загальної теорії контакту метал-напівпровідник, засновник і перший президент АН вищої школи України. На базі відділу напівпровідників Інституту фізики 1960 року було організовано новий Інститут фізики напівпровідників, що його науковець очолював упродовж наступного десятиліття, а нині він носить ім'я Вадима Лашкарьова. Роботи академіка Лашкарьова мали

широке практичне застосування в електроніці, автоматичній, телемеханіці, обчислювальній техніці.

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 Гейзенберг, Гунд, Дебай. Перші роботи Міліянчука було присвячено релятивістській квантовій механіці Дірака, позовжньому та поперечному ефекту Зеємана квадрупольних ліній і комптонівському розсіянню.

За ці роботи науковець отримав ступінь доктора філософії (1935). З 1932 року він – член НТШ, першої національної академії на західноукраїнських землях.

Включення 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 мезон-нуклонних взаємодій, квантова електродинаміка й теорія поля. На жаль, рання смерть не дала Міліянчуку до кінця реалізувати свій потенціал дослідника.

Проте й упродовж 1940-1960-х років столицею української квантової фізики залишався Харків. Тут 1960 року було засновано на основі частини колишнього УФТІ новий Фізико-технічний інститут низьких температур, який нині носить ім'я засновника, академіка 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 з ним не трапився інсульт у середині 1980-х, він бездоганно грав складні фортепіанні твори, а для співробітників інституту влаштовував високого рівня філармонійні ве-



*Борис Веркін*

чори, запрошуючи найкращих виконавців. Символічно, що нині Харківську консерваторію очолює дочка вченого – професор Тетяна Веркіна.

Борис Веркін був людиною з надзвичайно широкими гуманітарними зацікавленнями. Ще в дитинстві він відвідував вистави театру «Березіль» Леся Курбаса, про які зберіг спогад на все життя. А вже після тяжкої хвороби розробляв паралізовані пальці тим, що передруковував на друкарській машинці взяті зі спецховів бібліотеки імені В. Короленка твори недрукованих тоді російських поетів «срібного віку» – Гумільова, Гіппіус, Мережковського – оправляв саморобні книжечки в палітурки й дарував їх друзям.

1940 року Борис Веркін вступає до аспірантури в кріогенну лабораторію УФТІ. Але за 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 проекту (його курував особисто всесильний нарком Лаврентій Берія) вимагали дедалі більшої кількості фізиків.

В УФТІ Веркін поновлює перервані війною досліди й публікує роботи з низькотемпературних осциляцій магнітної сприйнятливості металів, які стали класичними. 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 УФТІ з Шубніковим, котрий загинув 1937 року. Але вважав його своїм учителем і сталоном 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 Капіца, 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 косміч-

ний 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 відчувають 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 майбутні академіки Ігор Дмитренко (н.1928) та Ігор Янсон (н.1938) разом із майбутнім професором Харківської політехніки Володимиром Свистуновим (н.1941) 1964 року вперше в світі експериментально реалізували нестациональний ефект Джо-зефсона, що полягав у генерації НВЧ-випромінювання на контакті двох надпровідників. Цей ефект теоретично передбачив за два роки до того молодий англійський фізик Браян Джо-зефсон (н.1940), котрого за це передбачення вшанували Нобелівською премією 1973 року.

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 очолює рейтинг 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 над-яскравих (клас «нуль») він відносив Баха й Бетховена. 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 термінологією агронома Трохима Лисенка та справжнє 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

горьківського (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 Рейху – у виступах ревнителів «арійської фізики» Ленарда!

Фізики були справді налякані. Як згадував пізніше автор поняття «полярон» академік 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 вищого радянського 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 – і майже до нашого часу. 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 нашого посібника.

Рис. 140. Ювілейний випуск «Українського фізичного журналу» (обкладинка).

## Науково-історична хронограма

## Квантово-механічне резюме

Експериментальне вивчення фізичних явищ, що відбуваються з частинками дуже малої маси і в дуже малих областях простору, продемонструвало низку результатів, які класична фізика пояснити не могла.

1. Пропускання через тонку кристалічну речовину (фольгу) одиночних електронів дає на фотопластині або сцинциляційному екрані картину чергування максимумів і мінімумів. Ця картина нагадує *дифракційну картину* рентгенівських променів (лауеграму). Результат дослідження означає, що електрони коряться у вказаних умовах законам хвильового руху.

Найпереконливіше картина дифракції електронів виглядає тоді, коли їхня *дебройлівська довжина хвилі одного порядку з шириною «щілин»* у своєрідних «дифракційних ґратках» (міжатомні відстані в кристалі).

2. Поняття траєкторій працює з достатньою точністю для електронів, що рухаються від «електронної гармати» до екрану. Ситуація різко змінюється, якщо просторова область, де рухається електрон, одного порядку з довжиною хвилі рухомого електрона. У цьому випадку на перший план виступають хвильові ефекти, й до електрона як до частинки *не можна застосувати поняття траєкторії*.

Чинним виявляється **принцип невизначеності**. Згідно з цим принципом, швидкість (а також імпульс) частинки не може мати певного визначеного значення водночас із її координатами. Швидкість, помножена на як завгодно малий проміжок часу, визначає зсув частинки за цей час. Тому невизначеність швидкості в цьому положенні приводить до того, що вже в нескінченно близький момент часу координати частинки взагалі не матимуть ніякого певного значення! Ми змушені говорити тільки про ймовірність знаходження квантової частинки в тій або іншій точці в області її локалізації. Поняття траєкторії частинки повністю втрачає сенс.

3. Для опису поведінки електрона в областях (наприклад, у атомі), де він виявляє хвильові властивості, вводять **хвильову функцію**, квадрат модуля якої дає розподіл ймовірності *перебування електрона* в тій чи іншій точці простору. Рівняння Шредінгера та його розв'язки чудово описують подвійну (корпускулярно-хвильову) поведінку мікрочасток (квантів).

4. Оптичні дослідження показують, що навіть у простій фізичній системі протон-електрон (атом водню) значення енергії системи утворюють *дискретний набір* (спектр). З цього випливає: щоб знайти спектр значень енергії, треба розв'язувати рівняння Шредінгера задля знаходження власних значень.

5. Загальний *квантовомеханічний принцип*: у квантовій теорії будь-якої фізичній величині треба поставити у відповідність певний оператор. Операторне числення – великий крок уперед в науці!

6. Вирахування швидкості електрона в атомі на основі принципу невизначеності дає результат порядку  $10^6$  м/с. Це означає, що електрон у атомі водню в певному наближенні можна розглядати в межах нерелятивістського підходу.

Дебройлівська довжина хвилі електрона – порядку  $10^{-10}$  м. Отже, в цих умовах обов'язково діють квантові закономірності!

Вирахування енергії електрона в атомі водню (відрахованої від «рівня вакууму» – мінімальної енергії електрона, відірваного від атома) дає результат порядку  $-10$  Ев. Тоді частоти спектру випромінювання збудженого атома мають порядок  $10^{16}$  с<sup>-1</sup>, або, в довжинах хвиль, –  $10^{-7}$  м. Це означає, що збуджений атом водню є джерелом світла. Світло народжується в атомі!

### Релятивістські квантові узагальнення

1. У спеціальній теорії відносності можливі частинки з нульовою масою спокою, які рухаються тільки зі швидкістю світла  $c$ . Енергія та імпульс таких частинок зв'язані співвідношенням  $E=pc$ .

Це співвідношення працює і для будь-яких електромагнітних хвиль. Якщо їх укласти в «ящик із дзеркальними стінками», то виникнуть *власні коливання поля з дискретними значеннями енергії*. Як результат, ми абсолютно природно приходимо до уявлення про електромагнітне поле як сукупність частинок із  $m=0$  і  $v=c$ . Це і є фотони.

2. Поле електромагнітної хвилі у взаємодії з речовиною обмінюється з нею енергією та імпульсом. З цього випливає, що *поле фотонів є системою зі змінним числом частинок* (речовина поглинає і випускає фотони).

3. На відміну від фотона, *електрон* можна розглядати й у нерелятивістському, і в неквантовому, тобто в класичному наближенні. Виходячи з цього, фотон – квант поля, а електрон – частинка речовини. Інакше кажучи, фотон – квазічастинка, а електрон – «справжня частинка»!

Проте в *ультрарелятивістському наближенні* маємо для електрона  $E=cp$ , тобто – те саме співвідношення, що й для фотона! Це означає, що в ультрарелятивістській квантовій області *«стирається» відмінність між полем і частиками речовини, й між ними можливі взаємні перетворення*.

4. Співвідношення невизначеностей у енергетичній формі  $\Delta E \Delta t \geq \hbar$  для ультрарелятивістського випадку ( $E=cp$ ) дає цікавий для аналізу результат:

$$\Delta p \Delta t \geq \frac{\hbar}{c}$$

Це означає, що в цьому випадку *не можна детально розглядати взаємодію частинок!* Мала тривалість акту взаємодії породжує неможливість «стежити» за імпульсами частинок, що взаємодіють.

5. Відмова від поняття взаємодії позбавляє сенсу питання про існування «складених» і справді елементарних частинок, оскільки *складену частинку неможливо побудувати без розгляду взаємодій*. Як результат, у межах релятивістських квантових уявлень усі частинки виступають як «рівноправні». У такій системі як протон-електрон (атом водню) відношення енергії зв'язку до власної енергії буде порядку  $10^{-5}$ , і тоді про зв'язаний електрон є сенс говорити як про самостійний об'єкт. А ось для протон-піонної системи, яка живе

$10^{-23}$  секунди, відношення енергії зв'язку  $\Delta E = \frac{\hbar}{\Delta t}$  до власної енергії піона

$E_\pi = m_\pi c^2$  буде порядку одиниці. Таким чином, «система протон-піон» такою ж мірою елементарна, як і протон і піон, що розглядаються окремо.

### Філософсько-історична хронограма

## Філософські основи квантової фізики.

Учення античних філософів, а також філософів доби Відродження й нового часу, що їх ми стисло розглядали в попередніх розділах, мають безпосереднє відношення до світогляду науковців-творців квантової теорії. Тому доповнімо цю плеяду видатних філософів новими іменами 19-го й початку 20 століть.

**Йоган Дройзен (1808-1884).** Якщо у нас немає даних, які не залежать від інтерпретації (від нашого розуміння), то слід пояснити, як і в якому сенсі може бути об'єктивною наша інтерпретація в світлі кореспондуючої концепції істини (істини як відповідності). Саме Дройзен проводить розрізнення між розумінням як методом гуманітарних наук і поясненням як методом природничих наук. Цей методологічний дуалізм є одним із найбільш проблематичних питань і нині. Програма розвитку гуманітарних наук, заснована на методі розуміння, посіла центральне місце в ученнях Вільгема Дільтейа й Макса Вебера.

**Вільгельм Дільтей (1833-1911)** багато уваги приділив фундаментальній епістемологічній проблемі, суть якої полягає в з'ясуванні специфіки гуманітарних наук та їх відмінності від наук природничих. (Епістемологія, інакше – гносеологія, – теорія пізнання).

Дільтей вважав, що виникнення гуманітарних наук було своєрідною революцією герменевтики (герменевтика – розділ філософії, що вивчає інтерпретації). За Дільтеєм, життя безпосередньо об'єктивізується в наукових текстах і творах мистецтва, тобто, предметом вивчення гуманітарних наук є форма об'єктивізації духу. Об'єктивний дух як віддзеркалення життя присутній у моралі, релігії, науці, мистецтві й філософії. Розуміння в гуманітарних науках полягає в необхідності та здатності дослідника відтворити й пережити первинне переживання творця гуманітарного знання. З цією метою Дільтей вводить в свою герменевтику важливий принцип подібності між творцем певного виразу (наприклад, тексту або картини) та дослідником, котрий намагається зрозуміти цей вираз. За Дільтеєм, ця подібність виникає зі спільної людської природи автора й інтерпретатора. На основі принципу подібності, як стверджує Дільтей, існує внутрішній взаємозв'язок між життям, життєвим досвідом і гуманітарними науками, що їх відображають. Людина може зрозуміти те, що створене людиною!

Відмінність між природничими і гуманітарними науками Вільгельм Дільтей формулює таким чином: «Тільки те, що створено духом, дух може досягнути. Природа, предмет природознавства, охоплює реальність, яка виникла незалежно від зусиль людського духу. Все те, на чому людина залишила свій відбиток, утворює предмет досліджень гуманітарних наук».

Згідно з Дільтеєм, розуміння ґрунтується на тому, що суб'єкти різних епох і цивілізацій мають здатність розпізнавати себе в інших.

Разом з тим, і Дройзен, і Дільтей акцентують увагу на наявності творчого елементу в розумінні певного виразу. Можливість відтворити переживання в певному значенні долає відчуженість всякого знання.

«Вираз», згідно з Дільтеєм, це дещо внутрішнє, що стає зовнішнім у різних формах, яким віддає перевагу автор виразу. Тож у зовнішньому виразі дослідник має завжди шукати сенс, тобто внутрішню суть! Усе це сприяє тому, що герменевтика (теорія інтерпретації) має стати фундаментальною основою методології гуманітарних наук. Категоріальна структура «частина-ціле» (і «ціле-частина») є необхідною передумовою розуміння в гуманітарних науках. Від себе додамо, що ця категоріальна структура є надзвичайно важливою й щодо проблеми «пояснення-розуміння» в квантовій фізичній теорії!

**Серен К'єркегор (1813-1855).** Світогляд Нільса Бора в юнацькі роки формувалися під впливом філософії Серена К'єркегора. Цього данського мислителя в сучасній філософії вважають основоположником екзистенціалізму, – філософської течії, що набула поширення вже в ХХ столітті й розглядала людину як унікальну духовну істоту, здатну до вибору власної долі. К'єркегор прагнув збагнути – що означає існувати як людина. Філософія К'єркегора взагалі своєрідна й цікава, але ми акцентуємо увагу на його вченні про істину.

К'єркегор розрізняє об'єктивну й суб'єктивну істини. Перша передбачає, що має місце відповідність висловів фактичному стану справ (кореспондуюча концепція істини). Суб'єктивна істина має місце, коли ми характеризуємо наші стосунки до світу, тобто – це екзистенціальна якість людського ставлення до того, що, за К'єркегором, не є чимось об'єктивним. Цей термін використовується виключно для позначення вирішальної ролі людських стосунків у конкретній ситуації.

У науковому плані Серен К'єркегор використовує поняття абсолютної істини для визначення нескінченного наближення до неї в процесі пізнання. Ми ніколи не досягнемо остаточного й абсолютно певного знання на основі наукового підходу. У зв'язку з цим завжди існуватиме відмінність між природничо-науковим знанням, отриманим як результат досліджень, і особистим релігійним знанням, заснованим на вірі в особистого Бога.

К'єркегор, услід за Паскалем і Кантом, вважав, що наукові аргументи, незалежно від способу їх отримання й перевірки, ніколи не матимуть вирішального значення в релігійній сфері. І цю його думку поділяли більшість визначних фізиків ХХ сторіччя.

Таким чином, К'єркегор стверджував, що ми можемо мати суб'єктивно дійсну настанову щодо об'єктивної істини. Головне не в тому, щоб сповістити об'єктивну (наукову або релігійну) істину, а в тому, щоб показати, якою важливою є «суб'єктивна» істина! Наповнене парадоксами та суперечностями людське життя знайшло згодом своє яскраве втілення в процесі наукового пізнання квантових явищ.

**Фрідріх Ніцше (1844-1900).** До Ніцше філософи розглядали світ як осмислений, раціональний і справедливий Усесвіт. У світі панував лад, закладений Богом, а тому існування людини мало сенс. Світ – упорядкований космос, у якому людина мала певне, визначене місце. Ось цю філософську концепцію й прагнув зруйнувати Фрідріх Ніцше, для якого філософські й релігійні картини світу не є справжнім відображенням реальності, а тільки виражають потребу людини в наявності сенсу власного існування та необхідності певного порядку.

Ніцшеанське розуміння істини складає суть його епістемології. Науки й усі метафізичні системи, згідно з Ніцше, – фікції, що накладаються на реальність і є вираженням жадання влади. Ніцше розглядає пізнання у взаємозв'язку з цікавістю на основі натуралістичної точки зору. «Наша віра в науку спирається все ще на метафізичну віру, – навіть ми, що пізнаємо нині, ми – безбожники й антиметафізики, – беремо наш вогонь усе ще з тієї пожежі, яку розпалила тисячолітня віра, та християнська віра, яка була також вірою Платона, – віра в те, що Бог є істина, що істина божественна. А що, коли саме це стає дедалі сумнівнішим, коли ніщо вже не виявляється божественним, – хіба що помилкою, сліпотою, брехнею, коли сам Бог виявляється найтривалішою нашою брехнею?» – так запитував Ніцше.

Теорія Ніцше «достеменна», як він вважав, не в тому сенсі, що виражає істину про світ (такої істини просто не існує), а в тому сенсі, що істина служить людям. Це так звана прагматична («життєствердна») концепція істини. Якщо це так, то що може бути критерієм «життєствердного» й «життєзаперечувального»?

Ніцше розглядав себе та свою філософію як експеримент. Він піддає критиці й запереченню глибоко вкорінені людські уявлення. Він сумнівається в цінностях, що їх часто догматично й безпроблемно сприймали як самі собою зрозумілі, самоочевидні. Саме ця його позиція могла утворити ту методологічну основу, яка зіграла б позитивну роль у процесі фізичних досліджень квантових явищ. Хоча насправді ніцшеанською філософією з її відкиданням установлених норм скористалися в XX столітті ідеологи Третього рейху, які прагнули довести право «арійської надлюдини» чинити будь-які злочини щодо інших.

**Макс Вебер (1864-1920).** Згідно з Вебером, існує фундаментальна відмінність між фактами й цінностями. У науці ми шукаємо істину, яка має значення для всіх і кожного. Макс Вебер проводить відмінність між науками про культуру, заснованими на розумінні, й природничими науками, заснованими на поясненні. Ми бачимо, що тут Вебер продовжує лінію Дройзена, Дільтея та деяких інших філософів. Разом із тим, позиція Вебера достатньо близька до позиції Ніцше щодо різноманіття суб'єктивних ціннісних точок зору. Веберівська філософія сповідує ідею плюралізму цінностей і свободи вибору. Кожному, хто хотів би вивчати й описувати світ без ціннісних передумов,

довелося би здійснити нескінченну кількість спостережень і мати набір важливих і неважливих фактів. Тому ми оцінюємо хаос, який оточує нас, у такий спосіб, що в певному сенсі значущою стає тільки частина реальності.

Йдучи за традицією герменевтики, Макс Вебер усе-таки наголошує, що «розуміння» не виключає «пояснення». Метод герменевтики розуміння є додатковим до методу причинного пояснення, характерного для природничих наук. (Чи не тут витоки наукового принципу доповнювальності Нільса Бора, надзвичайно важливого принципу в квантовій теорії?)

«Ідеальні типи» Вебера як базисні наукові поняття в сукупності утворюють певну модель реальності. Наукова цінність «ідеальних типів» визначається типами дій. Таких «чистих» дій для Вебера є чотири:

**Ціле-раціональна дія;**

**Ціннісно-раціональна дія;**

**Афектна або емоційна дія;**

**Традиційна дія, зумовлена глибоко вкоріненими звичками.**

Узагальнені «ідеальні типи» й відповідні до них дії створюють своєрідний «міст» між науками, які мають справу з універсальними законами, і науками, які описують окремі неповторні факти.

Макс Вебер виділяє особливий вид раціональності, характерний для західної культури: «Сучасна людина, дитя європейської культури, неминуче й цілком підставово розглядає універсально-історичні проблеми з цілком певної точки зору. Її цікавить перш за все питання: яке поєднання обставин призвело до того, що саме на Заході, і лише тут, виникли такі явища культури, які розвивалися – принаймні, як ми схильні вважати, – в напрямі, що набув універсального значення».

Згідно з Вебером, саме на Заході виникла наука, що має загальне значення для всіх людей. Емпіричне знання, філософські й теологічні учення існували й у східній культурі. Проте знання, здобуті там, не мали системної математичної основи, раціональних доказів і обґрунтувань на основі чітких наукових понять.

Вебер застерігає, що наукова раціоналізація веде до «втрати сенсу й внутрішньої потреби». Мірою того, як наука сприяє скієнтизації світу, зростає наша потреба в сенсі. Проте цю потребу не можна задовольнити наукою: «Доля культурної епохи, що «скуштувала» плоду від дерева пізнання, полягає в необхідності розуміння, що сенс світобудови не розкривається дослідженням – хоч яким досконалим воно є, що ми самі покликані створити цей сенс, що «світогляди» ніколи не можуть бути продуктом розвитку дослідного знання і, отже, вищі ідеали, що найбільше нас хвилюють, у всі часи знаходять своє вираження лише в боротьбі з іншими ідеалами, настільки ж священними для інших, як наші для нас».

Певні фундаментальні цінності є конститутивними для наукової діяльності. Істина й загальнозначущість є основоположними для будь-якого дослідження. Це не залежить від царини дослідження. Дослідник діє, виходячи з власних або властивих його епосі ціннісних уявлень.

**Едмунд Гуссерль (1859-1938)** розвивав вчення про те, що філософія й наука телеологічно (цілеспрямовано) передбачають раціональність, а феноменологія покликана висвітлювати й роз'яснювати базисні проблеми науки. Згідно з Гуссерлем, феноменологія повинна підтримувати науку в умовах «кризи європейських наук» шляхом детального вивчення життєвого світу як сенсотворчої підстави наук. Феноменологія не лише описує явища, але й наміри людей (науковців), і ці наміри в основному виявляються в контекстах результатів їхніх досліджень. Епістемологічні проблеми обговорюються з акцентом на дії, а не на пасивний тілесний досвід. Усвідомлення того, що ми робимо, є фундаментальним і не зводиться до простих тілесних вражень.

У феноменологічному аналізі контекстів, заснованому на понятті дії й наміру дійової особи, головним є представлення сфери дії за допомогою категорій, що їх використовує дійова особа. Отже, феноменологія Гуссерля має досить тісний взаємозв'язок із методом дослідження, характерним для гуманітарних і соціальних наук (метод розуміння – на відміну від методу пояснення в природничих науках).

**Мар틴 Гайдеггер (1889-1976)** вважав, що західна цивілізація в її історичному розвитку не є рухом «до світла й щастя». Чим більше люди намагаються охопити дійсність у своїх теоретичних поняттях, тим далі вони йдуть від того, що є життєво важливим і суттєвим. Наше розуміння дійсності можна розвинути й поглибити на тлі того, що ми знаємо. Нове ми бачимо в світлі відомого, тому завжди мають місце певні передумови. Разом із тим, ми можемо видозмінювати наші первинні настанови, а тому осягнення реальності характеризуватиметься певною новизною. У зв'язку з цим ми змінюємося й самі, формуємо самих себе, наповнюючи внутрішній світ новими якісними утворами. Ми усвідомлюємо (розуміємо) навколишній світ і себе в цьому світі по-новому. Згідно з Гайдеггером, герменевтика – «це базисна схема людського пізнання».

Критицизм Гайдеггера скеровано проти наукової раціональності з її технічним і технологічним втіленням. Попри тріумф науково-технічних досягнень, не вони є справді важливими.

Активною силою конституювання сенсу, відкриття світу є поезія. У ній суттєвим має бути передання певного настрою як способу розкриття справжньої суті буття. «Мова є будинком людини, а поезія – нашим творчим відтворенням і актуалізацією». У авангарді людства перебувають поети, а не науковці чи політики! – ось позиція Гайдеггера.

Відтак поетичне ставлення до дійсності має зумовлювати й гуманістичну спрямованість природничонаукових досліджень і технічних вирішень.

## Дати й факти розвитку квантової теорії

1900 р. Макс Планк сформулював квантову гіпотезу й запровадив фундаментальну константу (стала Планка), що має розмірність дії, і цим започаткував квантову теорію.

1905 р. Альберт Ейнштейн пояснив закони фотоелектру на підставі існування квантів світла, або фотонів.

**Альберт Ейнштейн відкрив закон взаємозв'язку маси та енергії  $E = mc^2$ .**

1906 р. Макс Планк вивів рівняння релятивістської динаміки й отримав вирази для енергії та імпульсу електрона.

1907 р. Розроблено першу квантову теорію теплоємності твердих тіл (Альберт Ейнштейн).

1908 р. Ганс Вільгельм Гейгер та Ернест Резерфорд сконструювали прилад для реєстрації окремих заряджених частинок (лічильник Гейгера).

1909 р. Доведено, що альфа-частки є двічі іонізованими атомами гелію (Ернест Резерфорд і Томас Ройдс).

**Альберт Ейнштейн 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 Вейсс постулював наявність кванту магнітного моменту – магнетона. Незалежно від Вейсса магнетон передбачив Поль Ланжевєн і обчислив його величину.**

**Відкрито явище надпровідності (Гейке Камерлінг-Оннес).**

1912 р. Відкрито явище дифракції (інтерференції) рентгенівських променів за проходження їх через кристали, що остаточно підтвердило їх електромагнітну природу (Макс фон Лаує, Вальтер Фрідріх, Пауль Кніппінг).

**Чарльз Вільсон винайшов прилад для спостереження слідів заряджених частинок (камера Вільсона).**

1912-1914 рр. Досліди Франка-Герца, що довели існування в атомах дискретних рівнів енергії (стаціонарних станів) і їх 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 у атомі, а також розробив першу квантову теорію атома водню (теорія атома Бора).

**Введено поняття дефекту маси (Поль Ланжевен).**

**Ернест Резерфорд передбачив протон (відкрив його трохи пізніше – 1919 р.).**

**Йоганнес Штарк відкрив явище розщеплювання спектральних ліній у електричному полі (ефект Штарка).**

**Розроблено теорію дифракції рентгенівських променів (Чарльз Дарвін).**

1914 р. Ернест Резерфорд і Едвард Андраде експериментально здійснили дифракцію гамма-променів на кристалі, і довели таким чином їх електромагнітну природу.

**Роберт Міллікен перевіряв рівняння Ейнштейна для фотоэффекту й визначив чисельне 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 А. Зоммерфельд побудували квантову теорію ефекту Зеемана.

**Теоретично передбачено індуковане випромінювання й запроваджено ймовірність спонтанного та вимушеного випромінювання (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 Капіца і Микола Семенов уперше запропонували ідею визначення магнітних моментів атомів у атомному пучку.

1921 р. Нільс Бор пояснив особливості періодичної системи хімічних елементів.

1922 р. Артур Комптон відкрив явище розсіяння короткохвильового випромінювання на вільному або слабко зв'язаному електроні (ефект Комптона), і цим експериментально довів існування фотона, який постулював 1905 р. Ейнштейн.

**Отто Штерн і Вальтер Герлах експериментально довели, що магнітний момент електрона в атомі набуває лише дискретних значень (просторове квантування).**

1923 р. Артур Комптон і П. Дебай дали теоретичну інтерпретацію ефекту Комптона.

**Петро Капіца помістив камеру Вільсона в магнітне поле й спостерігав викривлення траєкторій 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 у одному й тому самому квантовому стані певної системи.**

1925 р. Семюел Гавдсміт і Джордж Уленбек постулювали існування внутрішнього механічного й магнітного моментів електрона (гіпотеза спіну).

**Вернер Гейзенберг заклав основи нової квантової механіки. Макс Борн і Паскуаль Йордан надали ідеям Гейзенберга 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 Гейзенберга та хвильової механіки.**

1927 р. Вернер Гейзенберг сформулював фундаментальне положення квантової механіки – принцип невизначеності (принцип Гейзенберга).

**Нільс Бор сформулював принцип доповнювальності.**

**Відкриття дифракції електронів (Клінтон Девіссон, Лестер Джермер, 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 випливали наявність у 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-частками (Вальтер Ботте, Ріхард Беккер).

**Ігор Тамм розробив квантову теорію розсіяння світла в кристалах і запровадив уявлення про пружні коливання в твердому тілі (фонони). Ідея фонона містилася вже в роботах Ейнштейна (1911 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 Кноль, Ернст Руска).**

1932 р. Джеймс Чедвік відкрив нейтрон.

**Дмитро Іваненко висунув гіпотезу про нейтронно-протонну будову ядра атома. Ця модель, яку безпосередньо розвинув Гейзенберг, 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, Яков 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 Капіца, 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 Флеров, Костянтин Петражак).

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 Сіборг, Артур Валь, Джо-зеф Кеннеді, Еміліо Сегре).

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 першу електронно-обчислювальну машину (США). У континентальній Європі першу ЕОМ збудовано 1950 р. в Києві.

1951 р. Створено перший напівпровідниковий транзистор на двох *p-n*-переходах, що поклав початок революційним змінам у електроніці (Вільям Брекфорд Шоклі, Джон Бардін, Волтер Гаузер Браттейн).

## Замість післямови

Як свідчить історія науки, нові відкриття відбувалися 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 у 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 Поп висловив це відчуття знаменитим чотиривіршем:

Сонць і планет стрункий чертог  
Одвіку в п'їтмі крився.  
«Хай буде світло!» – мовив Бог,  
І Ньютон народився!

На початку XX століття анонімний дотепник доточив до чотиривірша ще два рядки:

Та чорт вернув усе на місце притьма:  
Прийшов Ейнштейн, і знов запала п'їтма!

Релятивістська фізика й квантова теорія (а разом із ними астрофізика й квантова теорія поля, які залишилися 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. Настрій, який панував в умах на початку XX століття, добре відбиває вірш російського поета Валерія Брюсова (1873-1924) «Світ електрона»:

Можливо, в кожному електроні –  
Світи, де п'ять материків,  
Знання, мистецтва, війни, трони  
І досвід сорока віків!

А в атомі, що цілим мислим,  
Є світ з планетами стома,  
Де все, що тут, в об'ємі стислим,  
Ще й те, чого в нас тут нема!

Людство розуміло, що завдячує новими відкриттями фізикам. І «фізики в картатих сорочках», хлопці, які роблять неймовірні експерименти й пишуть запаморочливо складні формули, стали героями багатьох фільмів і книжок середини XX століття.

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!

«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 нашому посібнику, на позір до певної міри нагадує той, у якому перебувала класична фізика кінця XIX століття, яка здавалася завершеною навіть такому визначному вченому, як лорд Кельвін. Роль «хмаринки на ясному небі» відіграють (за Нобелівським лауреатом, визначним фізиком-теоретиком Віталієм Гінзбургом) хіба що проблеми необоротності часу, адекватності квантових вимірювань та походження життя. Але це – надзвичайно фундаментальні проблеми!

Існує й чимало робочих моментів: не створено досі послідовних теорій високотемпературної надпровідності й квантового ефекту Холла (експериментально відкриті ще в середині 1980-х років), поведінки бозе-ейнштейнівського конденсату (вперше експериментально реалізованого 1995 року) тощо. Водночас, стрімкий розвиток мікроелектроніки й нанотехнологій ще раз демонструє торжество принципів і рівнянь квантової механіки.

Проте не менш гарячі дискусії, аніж дебати фізиків середини 1920-х років, нині точаться навколо спроб побудувати універсальну теорію поля, яка

об'єднала б усі можливі фізичні взаємодії. Фізика високих енергій, яку уособлює Великим адронний колайдер, споруджений унаслідок співробітництва вчених десятків країн, безпосередньо зустрілася з проблемами початку й меж нашого Всесвіту. Поняття «темної матерії» звучить нині не менш загадково, аніж слово «квант» сто років тому. Уявити десятивимірний простір, у чотири-вимірному 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, 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 Ейнштейн?

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 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:

Як біомолекули «впізнають» одна одну?

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!

Тож закінчимо розповідь про головні фізичні теорії на тлі їхнього історично-культурного підґрунтя трьома висловами великих людей, вважаючи їх інформацією до подальших роздумів:

**«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 ясно». (Луї Пастер).**

Нарешті, автори книги усвідомлюють, що в словах і формулах часом бракує почуттів, а тому написане не завжди достатньо повно виражає *душевний стан людини, яка пізнає світ!* І тут на допомогу приходить поезія. Відомий російський поет, молодший сучасник Пушкіна Федір Тютчев у певному сенсі мав рацію, коли написав:

Як серцю висловить себе?  
Як іншим зрозуміть тебе?  
І де життя твого межа?  
Бо мисль проречена є лжа.

Кожне покоління науковців дає свої відповіді на ці вічні запитання.

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».

## Література

Храмов Ю.А. История физики. – Киев: «Фенікс», 2006. – 1176 с.

Бублейников Ф.Д., Веселовский И.Н. Физика и опыт. Исторические очерки. – Москва: „Просвещение”, 1970. – 272 с.

Ю.В.Павленко, С.П.Руда, С.А.Хорошева, Ю.О.Храмов. Природознавство в Україні до початку XX ст. в історичному, культурному та освітньому контекстах / К.: Академперіодика, 2001. – 422 с.

Липсон Г. Великие эксперименты в физике. – Москва: „Мир”, 1972. – 216 с.

Павленко Ю.В., Руда С.П., Хорошева С.А., Храмов Ю.О. Природознавство в Україні до початку XX ст. в історичному, культурному та освітньому контекстах / К.: Академперіодика, 2001. – 422 с.

Аксіоми для нащадків. Українські імена у світовій науці. Збірник нарисів / Упорядкування і передмова О.К.Романчука. – Львів: «Меморіал», 1992. – 544 с.

Інститут фізики НАН України. 80 років / За редакцією Л.П.Яценка. – Львів: Євросвіт, 2009. – 536 с.

Толок В.Т., Коган В.С., Власов В.В. Физика и Харьков. – Харьков: Тимченко, 2009. – 408 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.

Азархін В.П., Горський В.С. Коперник. Бруно. Галілей. – Київ: „Наукова думка”, 1974 – 200 с.

Климишин І.А. Астрономія вчора і сьогодні. – Київ: „Наукова думка”, 1976. – 288 с.

Хрестоматія по фізиці. Под редакцией профессора Б.И.Спасского. – Москва: «Просвещение», 1982. – 224 с.

Эйнштейн А. Физика и реальность. Сборник статей. – Москва: «Наука», 1965. – 360 с.

Бор Нильс. Атомная физика и человеческое познание. – Москва: ИИЛ, 1961. – 152 с.

Де Бройль Луи. Революция в физике. (Новая физика и кванты). – Москва: Атомиздат, 1963. – 232 с.

Ансельм А.И. Очерк развития физической теории в первой трети XX века. – Москва: «Наука», 1986. – 248 с.

Чолаков В. Нобелевские премии. Ученые и открытия. – Москва: «Мир», 1987. – 368 с.

Мигдал А.Б. Как рождаются физические теории. – Москва, «Педагогика», 1984. – 128 с.

Данин Д.С. Вероятностный мир. – Москва: «Знание», 1981. – 208 с.

Карцев В.П. Приключения великих уравнений. – Москва: «Знание», 1970. – 318 с.

Парнов Е.И. На перекрестке бесконечностей. – Москва: «Атомиздат», 1967. – 464 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.

Ukrainian Journal of Physics. Golden contribution of Ukrainian physicists to modern science. Special issue dedicated to the 90<sup>th</sup> 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.

## Про авторів

**Ільченко Валерій Іванович** – кандидат педагогічних наук, доцент. Народився 1943 р. в Луганську. 1965 р. закінчив фізико-математичний факультет Луганського педінституту імені Тараса Шевченка. Працював учителем, викладачем педагогіки й дидактики в різних ВНЗ. З 2003 року – доцент кафедри практичної філософії та теології Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля. Досліджує наукову спадщину визначних українських мислителів минулого – С.Гогоцького, П.Юркевича, М.Пирогова, К.Ушинського та інших.

Автор та співавтор понад 150 наукових та науково-методичних статей, 17 книжок та хрестоматій у різних галузях знань (фізика, педагогіка, психологія, соціологія, філософія, теологія).

Має звання «вчитель-методист» та «вчитель фізики вищої категорії». Лауреат численних освітянських відзнак.

**Проказа Олександр Тихонович** – кандидат педагогічних наук, доцент. Народився 1937 р. в селі Підготовка Старобільського району Луганської обл. 1960 р. закінчив Харківський інститут механізації та електрифікації сільськогосподарства, з 1963 р. доля пов'язана з Луганським національним педагогічним університетом ім. Тараса Шевченка (у 1968-72 рр. – декан фізико-математичного факультету, у 1994-99 рр. – завідувач кафедри фізики, нині – доцент цієї кафедри). Почесний професор університету.

Читає науково-навчальні курси: «класична механіка», «проблемне вивчення фізики», «теоретичні основи та методика поглибленого вивчення фізики».

Паралельно багато років працював шкільним учителем-методистом фізики. Організатор численних фізичних олімпіад школярів. Лауреат багатьох педагогічних відзнак.

Автор та співавтор понад 280 публікацій, зокрема 15 книг.

Член-кореспондент Міжнародної академії наук педагогічної освіти.

**Стріха Максим Віталійович** – доктор фізико-математичних наук. Народився 1961 р. в Києві. Після закінчення Київського державного університету ім. Тараса Шевченка з 1983 року працює в Інституті фізики напівпровідників НАН України (нині – на посаді провідного наукового співробітника за сумісництвом). Автор близько 100 робіт з теорії напівпровідників. З 2008 року – на посаді професора кафедри фізичної електроніки Київського національного університету ім. Тараса Шевченка (за сумісництвом) читає курс «Фізика конденсованого середовища».

Дійсний член АН вищої школи України. Має відзнаку «За наукові досягнення» НАН України. Лауреат Нагороди Ярослава Мудрого АН ВШ України.

Поет, перекладач, есеїст. Член Національної спілки письменників України та Асоціації українських письменників. Автор численних перекладів творів світової класики українською мовою. У монографії «Український художній переклад: між літературою і націєтворенням» (2006) обґрунтував концепцію націєтворчої функції українського перекладу.

З лютого 2008 року – заступник міністра освіти і науки України.