



ФІЗИКА (від грец. φυσική — природничий) буквально означає науку про *природу*. Оскільки термін «природа» багатозначний, визначення Ф. потребує уточнення. Якщо розглядати природу в узагальненому значенні як матерію, що охоплює різні речовини, тобто частинки, з яких вони складаються, а також певні силові поля, які взаємодіють з цими частинками, то Ф. можна визначити як фундаментальну науку, що вивчає закономірності, яким підлягає матерія. Крім цього, Ф. вивчає властивості простору і часу, в яких існує матерія, а також фундаментальні сили, що визначають її поведінку.

Чимало фізичних відкриттів зроблено дуже давно. Це використання вогню та колеса, без яких був би неможливий розвиток людської цивілізації. Стародавні єгиптяни також мали деякі фізичні знання, бо інакше не могли б зводити грандіозні піраміди. Давньогрецький математик, фізик, астроном Архімед (287—212 рр. до н. е.) знав правило важеля та основний закон гідростатики, що названий його ім'ям. Він умів фокусувати сонячні промені. Давньогрецькі філософи, зокрема й Демокріт (460—370 рр. до н. е.), висловлювали ідеї атомізму. Початок наукового *природознавства*, побудованого на висновках з експерименту, пов'язаний з ім'ям італійського науковця Галілео Галілея, який відкрив закон інерції та встановив основну властивість гравітації — незалежність прискорення тіла, що падає, від його маси, отримав формулу для визначення періоду коливань маятника й винайшов телескоп, за допомогою якого він відкрив супутники Юпітера та фази Венери. Німецький дослідник Й. Кеплер встановив на підставі астрономічних даних закони руху планет. Однак усі ці визначні факти були розрізненими. Виникла необхідність пов'язати їх, створивши узагальнену теорію, що охоплювала б усі відомі відкриття й спостереження, дозволяла б передбачувати й пояснювати нові факти та явища.

Таку теорію, що отримала назву класичної *механіки*, створив англійський науковець І. Ньютон. Вона викладена в його «Математичних засадах натуральної філософії» (1687). Тоді розпочалася нова епоха не лише в природознавстві, але й в усій людській цивілізації. Він встановив закони руху тіл, пов'язавши силу, що діє на тіло, з прискоренням, набутиим ним. Водночас розвиток механіки вимагав нової математики. І. Ньютон створив новий математичний формалізм, запровадивши поняття диференціалу та інтегралу, і розвинув аналіз нескінченно малих. Він показав, яким чином, знаючи силу та початкові умови, в яких знаходиться тіло, можна визначити траєкторію руху. Сила, згідно з І. Ньютоном, може бути довільною функцією положення. Він виявив

також основні властивості найважливішої з сил, що діють у природі, — сили тяжіння, та встановив закон всесвітнього тяжіння, спираючись на закони Й. Кеплера. Триумф ньютонівної механіки призвів до формулювання концепції класичного детермінізму, про який французький математик, астроном П.-С. Лаплас висловився так: «Розум, якому були б відомі для певного моменту всі сили, що оживлюють природу, та відносні положення всіх її складових частин, і якщо б на додаток він виявився достатньо великим, щоб ці дані проаналізувати, об'єднав би в одній формулі як рух найвагоміших тіл Всесвіту, так і рух найлегших атомів; не залишилося б нічого, що було б для нього недостовірним, і майбутнє, як і минуле, повстало б перед його поглядом». Встановивши загальні закономірності руху, І. Ньютон сформулював фундаментальні закони збереження імпульсу, моменту й енергії. Унаслідок бурхливого розвитку ньютонівної механіки виникла нова галузь науки — *небесна механіка*, що пояснювала рух планет на основі закону всесвітнього тяжіння та призвела до передбачення існування нової планети Нептун (1846), виявлення якої стало значним успіхом класичної механіки Ньютона.

Класична фізика

Після того, як природодослідники пройнялись ідеями атомізму, природно постало завдання застосувати динаміку Ньютона до опису внутрішнього руху незліченної множини атомів і молекул, що утворюють будь-яке макроскопічне тіло. Проте для цього руху, як легко з'ясувати, характерна властивість необоротності, на відміну від зворотного характеру руху окремої матеріальної точки. Газ, що міститься в половині посудини, обмежений перегородкою, після вилучення її займає всю посудину, та сам по собі не повертається до початкового стану. Ця обставина пов'язана з неімовірною кількістю молекул і має статистичний, імовірнісний характер, що не суперечить оберненості руху окремих частинок.

Послідовне вивчення руху сукупності великої кількості частинок призвело до створення на базі динаміки Ньютона статистичної механіки з новим поняттям ентропії, яке ввів німецький фізик Р. Клаузіус. Ентропія характеризує ступінь хаотичності руху та, як показав австрійський фізик Л. Больцман, може бути пов'язана з поняттям імовірності стану, в якому перебуває тіло. Фундаментальне значення мали дослідження американського математика, фізика Дж.-В. Гібза, присвячені побудові статистичної механіки макроскопічних систем, що перебувають у стані термодинамічної рівноваги. Статистична механіка

виявилась основою вчення про теплоту — *термодинаміки*, а остання — основою практичної *теплотехніки*. Статистична механіка сприяла також вивченню нерівноважних процесів — теплопровідності, в'язкості та дифузії. Л. Больцман з цією метою встановив так зване кінетичне рівняння, розв'язок якого дає змогу знаходити коефіцієнти дифузії, теплопровідності та в'язкості. Механіку Ньютона використано також для вивчення руху рідин і газів та для опису пружних процесів у твердих тілах. Швейцарський математик, фізик Л. Ейлер вивів рівняння, що визначає рух рідини, у результаті чого виникли нові галузі Ф. — *гідродинаміка* та *газодинаміка*. Завдяки напрацюванням попередніх століть постала теорія пружності. Були досліджені звукові коливання різних частот, що можуть розповсюджуватися в рідинах, газах та твердих тілах. Галузь Ф., що їх вивчає, назвали *акустикою*. Газодинамічні дослідження дали можливість російському науковцю *М. Жуковському* вивести формулу для підйимальної сили тіла, що рухається в газі. Згодом це започаткувало нову галузь Ф. — *аеродинаміку* — основу практичної авіації.

Здавалося, що все, зокрема електричні та магнітні явища, підпорядковане ньютонівській механіці, так що ми маємо право говорити про механічний світ Ньютона. Справді, поміж електричними зарядами діє сила, що визначається законом, виведеним французьким фізиком Ш.-О. Кулоном, а між струмами — сила, що визначається законом, сформульованим французьким фізиком А.-М. Ампером. Але якщо сили відомі, то повинна діяти динаміка Ньютона. Так воно і є, доки ми вивчаємо постійні струми та непорушні заряди. Щоправда, досліджуючи властивості магнітів, англійський фізик М. Фарадей встановив, що при русі магніту поблизу замкненого провідника в останньому виникає електричний струм. Науковець відкрив закон електромагнітної індукції. М. Фарадей вважав магнітний потік також фізичною реальністю, як і власне речовину. Однак його закон електромагнітної індукції суперечив механіці Ньютона. Згодом шотландський науковець Дж.-К. Максвел створив нове фізичне обґрунтування — теорію електромагнітного поля, що нині називають класичною *електродинамікою* Максвелла. Він передбачив, що не лише при зміненому магнітному полі виникає електричне поле, а й змінне електричне поле створює магнітне. Дж.-К. Максвел сформулював диференціальні рівняння для електричного і магнітного полів. Згідно з ними зміна одного з цих полів у певному місці простору зумовлює виникнення іншого поля в сусідньому місці. Отже, обидва поля взаємодіють між собою таким чином, що будь-яка флуктуація полів у якомусь місці простору не локалізується в ньому, а поширюється у вигляді хвиль з певною швидкістю, що збігається зі швидкістю світла в порожнечі. Як наслідок вчення про світло, тобто *оптика*, знайшло своє місце в електродинаміці Максвелла. Вчення про електрику, магнетизм та оптику об'єднали в єдине ціле — теорію

електромагнетизму Максвелла. Взаємодія між цими галузями стала такою потужною, що почали говорити про електромагнітний світ Максвелла.

Електричне та магнітне поля, що належать до рівнянь Максвелла, постають як певна фізична реальність, що відрізняється від матеріальних частинок — єдиної фізичної реальності, з якою мала справу механіка Ньютона. Рівняння Максвелла настільки симетричні та довершені, що Л. Больцман, засновник фізичної кінетики, висловився про них так: «Чи не боги накреслили ці знаки». Хоча вплив вчення І. Ньютона був великим, однак Дж.-К. Максвел не хотів миритися з уявленнями, що його поля — це фізична реальність. Пізніше було показано, що ці поля можуть перетворюватися в матеріальні частинки, а останні — в електромагнітне поле. Дж.-К. Максвел цього не знав і створював різні механічні моделі, щоб зрозуміти змінні поля з механічної точки зору. Попри те, що задум не здійснився, спадщиною прагнень Дж.-К. Максвелла залишився термін «струм зміщення», яким він позначив змінне електричне поле.

Рівняння Максвелла в найпростішій формі сформульовані для вакууму. Проте постає питання: як розуміти їх тоді, коли йдеться про поля в речовині. Річ у тім, що речовина складається з атомів і молекул, які мають внутрішню електричну структуру — вони містять у собі електрони та ядра, що самостійно здійснюють складні рухи всередині тіла. Ці заряди створюють власні електричні та магнітні поля, що якось повинні узгоджуватися із зовнішніми полями, які діють у середовищі. Отже, питання стосується врахування цих власних полів. Оскільки заряджених частинок вкрай багато, то вчені почали застосовувати статистичні методи, що були використані раніше під час створення статистичної механіки. Нову наукову задачу — узагальнення електродинаміки на випадок середовища — розв'язав нідерландський фізик Г. А. Лоренц. У результаті рівняння, які описують електромагнітне поле в речовині, стали відомі як рівняння Максвелла—Лоренца. Теорія електромагнетизму в середовищі призвела до створення шведським фізиком, астрономом Г.-У. Альфвенем нового напрямку — магнітної гідродинаміки, що вивчає різноманітні рухи рідини в зовнішньому магнітному полі, а також до зародження *фізики плазми*, у якій досліджують сильно іонізовані гази. Особливо значного розмаху набули дослідження з Ф. плазми у зв'язку з проблемою керованого термоядерного синтезу. Електродинаміка Максвелла, подібно до механіки Ньютона у попередню епоху, стала теоретичною основою для розвитку нових галузей техніки — спершу *електротехніки*, а згодом і *радіотехніки*. Вона поклала початок сучасній енергетиці з можливістю передавання електроенергії на великі відстані, сприяла появі нових засобів зв'язку та *радіолокації*.

Теорії відносності

Незважаючи на значні досягнення електродинаміки та механіки, поступово дедалі виразніше окреслювалося протиріччя між основними ідеями цих двох фундаментальних теорій. Воно полягає в тому, що в механіці Ньютона має місце принцип далекодії — два тіла, як би далеко вони не розташовувалися одне від одного, взаємодіють між собою миттєво. Дія і протидія відбуваються в той же момент часу. В електродинаміці Максвелла миттєва взаємодія відсутня, вона може розповсюджуватися лише з кінцевою швидкістю, що дорівнює швидкості світла. Наприклад, якщо Сонце випромінює світло, то цей потік, дійшовши до Землі, буде виявляти тиск на неї (існування світлового тиску експериментально доведене 1899 російським вченим П. Лебедевим), але світловим променям знадобиться приблизно 8 хвилин, щоб дійти від Сонця до Землі.

Це протиріччя розв'язав [А. Айнштейн](#), який 1905 сформулював спеціальну [відносності теорію](#). Це була третя велика фізична теорія, що з'явилася після механіки Ньютона і електродинаміки Максвелла. У ній відбувається відмова від абсолютного перебігу часу. Це означає, що час, який показує годинник, що рухається, буде відрізнятися від часу, який показує інший годинник, що залишається в спокої. Якщо один з годинників починає рухатися з якогось місця замкнутою траєкторією, то після повернення його на початкову позицію він покаже менший час, ніж той, що залишався на місці. Відмова від абсолютного перебігу часу зумовлена тим, що при абсолютному перебігові часу має місце звичайний, добре відомий закон додавання швидкостей, згідно з яким швидкість будь-якого руху різна в різних системах відліку, а різниця визначається швидкістю руху однієї системи відносно іншої. Але рух світла не відповідає цій умові. Дуже точні досліді американського фізика А.-А. Майкельсона засвідчили, що швидкість світла не залежить від руху джерела світла та руху спостерігача, а залишається однаковою в усіх системах відліку, що рухаються одна відносно іншої. Ця унікальна властивість світла дозволяє пов'язати просторові координати й момент часу, що характеризують будь-яку подію в одній системі відліку, з координатами та моментом часу, що відповідають цій же події в іншій системі відліку. Співвідношення, що зв'язують координати й час для однієї події в різних системах відліку, називають перетвореннями Лоренца. Їх виведено з єдиної вимоги — інваріантності, тобто однаковості, швидкості світла в різних системах відліку. Часовий інтервал між двома подіями не буде однакоим у різних системах відліку, як і те, що довжина стрижня буде залежати від системи відліку, в якій проваджується вимір довжини. Під час руху стрижня його довжина зменшується, так що найбільшу довжину стрижень має в тій системі відліку, де він не рухається.

Відмова від припущення про абсолютний перебіг часу, що була притаманною механіці Ньютона, була

поштовхом до формулювання А. Айнштейном нової, так званої релятивістської динаміки, що відрізняється від динаміки Ньютона. Визначним виявилось те, що нова релятивістська динаміка вже не суперечить, а повністю узгоджена з електродинамікою Максвелла. Вони немов би поєднані в єдине ціле. Не потрібно, однак, думати, що А. Айнштейн скасував твердження І. Ньютона. Навпаки, механіка Ньютона піднеслася ще вище, бо виявилось, що її висновки будуть справедливими, якщо швидкості руху тіл малі порівняно зі швидкістю світла у вакуумі, і лише при швидкостях руху, що дорівнюють швидкості світла, релятивістська динаміка демонструє результати, відмінні від класичної механіки Ньютона. У релятивістській механіці злилися воедино закони збереження маси та енергії. Зміна маси тіла зумовлює зміну його енергії, причому на ту ж саму величину, помножену на квадрат швидкості світла. Зокрема, Сонце чи зірка за рахунок випромінювання світла втрачають частину своєї енергії, і відповідно до цього зменшується їхня маса. Релятивістська механіка дозволяє дійти висновку про можливість існування частинок, що не мають маси й повинні рухатися зі швидкістю світла. Зокрема, такими частинками є світлові фотони — частинки світла.

Спеціальна теорія відносності має справу з так званими інерціальними системами відліку, що рухаються одна відносно іншій з постійними швидкостями. Всі вони не мають відмінностей, і закони природи діють однаково в усіх інерціальних системах відліку. Проте для опису різних фізичних явищ не обов'язково користуватися лише інерціальними системами відліку. Природі байдуже на обрані спостерігачем системи відліку, тому допустимі будь-які, тобто і неінерціальні системи. Всі закони повинні формуватися в однаковому вигляді незалежно від систем, що застосовуються. Якщо ввести поняття 4-мірного простору, який об'єднує звичайний тримірний простір і час, то кожна точка в чотирьохмірному просторі буде відповідати якійсь події. Довкола кожної точки в цьому просторі, або, як кажуть, світової точки, можна ввести свою локальну інерціальну систему. Щоправда, для опису явищ в усьому чотирьохмірному світі потрібно буде мати незліченну множину таких локальних систем, тобто не можна ввести глобальну інерціальну систему. Оскільки просторові координати й час, що відповідають якійсь події, не є однаковими для різних інерціальних систем (для різних систем вони пов'язані перетвореннями Лоренца), то при використанні загальних інерціальних систем відліку ми не зможемо користуватися єдиним просторовим масштабом і єдиними годинниками для всього чотирьохмірного світу. Крім цього, втрачає сенс евклідова геометрія, у чому легко переконатися, якщо розглянути диск, який обертається навколо вісі, що проходить крізь його центр перпендикулярно площині диска. Дійсно, якщо взяти невелику лінійку та прикладати її вздовж

периферії непорушного диска і вздовж одного з його радіусів, то відношення чисел відміток лінійки, якщо вона буде достатньо малою, дорівнюватиме 2π . Але якщо диск розпочне обертатися, то число відміток лінійки вздовж периферії збільшиться порівняно з випадком непорушного диска, оскільки при цьому відбудеться скорочення довжини лінійки. Що ж стосується радіуса, то число відміток на ньому не збільшиться, оскільки в цьому разі рух відбувається не уздовж лінійки, а перпендикулярно до неї. Як наслідок відношення числа відміток уздовж кола диска до числа відміток уздовж радіуса диска стане більше 2π .

Отже, при використанні довільних систем відліку не можна застосовувати звичайну евклідову геометрію. З іншого боку, використовуючи загальні неінерціальні системи відліку, необхідно обов'язково враховувати дію сили гравітації. Справді, у ліфті, який вільно падає, проявляється невагомість, тобто тіло втрачає свою вагу, і навпаки, якщо ліфт здійснюється догори з прискоренням, то тіло чинить тиск, що перевищує його вагу, на підлогу. Тут діє очевидний принцип еквівалентності, який полягає в тому, що рух тіла в неінерціальній системі відліку, що рухається з постійним прискоренням, відбувається так само, як рух в інерціальній системі відліку, в якій діє постійне гравітаційне поле. Таким чином, неінерціальність пов'язана з гравітацією та неевклідовістю геометрії простору. Гравітація є загальною властивістю матерії, якщо розуміти її як речовину та електромагнітне поле, хоча насправді потрібно говорити й про інші взаємодії, наприклад, ядерну. Відтак з'ясовано ідею про внутрішній зв'язок між геометрією чотирьохмірного світу, або метрики чотирьохмірного світу, та існуванням матерії, що перебуває в цьому чотирьохмірному світі. Це і є основна ідея створеної А. Айнштайном 1915 загальної теорії відносності, четвертої після класичної механіки, класичної електродинаміки та спеціальної теорії відносності великої фізичної теорії. Метрика, тобто геометрія світу, вже не є евклідовою, і простору, в якому є матерія, притаманна кривизна (кривина), що, згідно з А. Айнштайном, визначається кількістю матерії, її енергією та іншими величинами, що характеризують стан матерії.

Ніколи раніше Ф. ще не знала настільки дивної теорії, що залучила до себе геометрію. Відповідно до загальної теорії відносності гравітаційні сили не є окремими силами, а радше сприймаються як наслідок викривлення простору-часу. Загальна теорія відносності є також теорією гравітації, або іншими словами, релятивістською теорією гравітації, на відміну від класичної теорії гравітації Ньютона. З її допомогою встановлено модифіковані закони руху тіл, зокрема, з'ясовано рух перигелію Меркурія, що не мав раніше пояснення, передбачено відхилення променя світла в гравітаційному полі Сонця, що було згодом спостережено, пояснено так зване червоне зміщення, що полягає в зменшенні частоти світлової хвилі, що при-

йшла від зірки або Сонця, порівняно з частотою світла, що випромінюється таким же атомом на Землі. Зрештою, загальна теорія відносності передбачила існування так званих гравітаційних хвиль, що є збуреннями, які поширюються, та метрики простору-часу. Ці хвилі, як і світлові, є поперечними, і швидкість їх розповсюдження дорівнює швидкості світла.

Загальна теорія відносності зародила нову галузь Ф. — *космологію* — науку про будову й еволюцію Всесвіту. Визначним висновком цієї науки є твердження про те, що метрика Всесвіту може бути нестационарною. 1922 О. Фрідман висунув ідею Всесвіту, що розширюється, для якого є початок відліку часу — це момент, коли радіус його кривизни Всесвіту дорівнював нулю. Цей початок існування Всесвіту Дж. Гамов інтерпретував як Великий Вибух, при якому щільність та температура матерії були, можна сказати, нескінченними. Відповідно до розширення Всесвіту відбувалося його охолодження, і свідками цього процесу залишилися так звані реліктові фотони (були передбачені Дж. Гамовим і згодом виявлені експериментально), що відповідають температурі в декілька градусів Кельвіна.

Квантова механіка

Після створення загальної теорії відносності здавалося, що Ф. відбулася. Та насправді її підстерігала нова криза, ще вираженіша за ту, що спричинила народження спеціальної теорії відносності. Тепер ішлося про безпосереднє існування атома, що суперечило і механіці Ньютона, і електродинаміці Максвелла, і теорії відносності Айнштайна. Це стало зрозуміло після дослідів британського фізика Е. Резерфорда (1871 — 1937), який виявив, що атом має складну електричну структуру: всередині нього знаходиться масивне позитивно заряджене ядро, навколо якого рухаються негативно заряджені електрони, що притягуються за законом Кулона до ядра. У випадку атома водню маємо тільки один електрон, а ядро складає протон. Але електрон, який рухається, можна уподібнити до маленької радіоантени, що випромінює електромагнітні хвилі. Ці хвилі несуть із собою енергію, що випромінює електрон, який рухається. Як наслідок — він втрачає свою енергію. І, як показує розрахунок, протягом декількох десятитисячних часток мікросекунди він повинен втратити свою енергію і впасти на ядро. Інакше кажучи, випромінювання електромагнітних хвиль повинно призводити до нестійкості атома.

Ситуація ще ускладнилася відкриттям нових хвиль — хвиль матерії неелектромагнітного походження, що не мали нічого спільного з колективними коливаннями частинок (їх спостерігають у гідродинаміці та твердих тілах). Ці хвилі спочатку передбачив французький фізик Л. де Бройль, а згодом їх виявили в дослідах з розсіювання електронів у кристалічних ґратках, коли електрони поводити себе як рентгенівські промені, і з дослідів

можна було визначити довжину хвилі, пов'язану з електронами. Вона виявилася обернено пропорційною величині імпульсу електрона й точно підтвердила відкриття Л. де Бройля. Іншими словами, існували хвилі, була відома їх довжина, але залишалася не відома їх природа. Далі з'ясувалося, що такі ж хвилі пов'язані і з іншими, більш важкими частинками, наприклад, з нейтронами. Виявилось, що всі частинки, що існують в природі, мають не тільки корпускулярні, а й хвильові властивості. Інакше кажучи, для всієї матерії в цілому характерний корпускулярно-хвильовий дуалізм: кожний її об'єкт має як корпускулярні, так і хвильові властивості. Ця ознака стосується і світла, частинками (або корпускулами) якого є фотони — частинки, що не мають маси й рухаються зі швидкістю світла. Корпускулярно-хвильовий дуалізм не можна пояснити у межах класичної Ф., під якою ми розуміємо класичну механіку, класичну електродинаміку і теорію відносності. Поєднання корпускулярних та хвильових властивостей в одному й тому ж об'єкті суперечить класичній Ф. і пояснюється лише в новій фізичній теорії — **квантовій механіці**, що одночасно обґрунтовує стійкість атома. Квантова механіка насамперед встановлює, як змінюється в просторі та часі хвильова функція частинки, що описує матеріальну хвилю, якщо відоме силове поле, в якому перебуває частинка.

Закон цієї зміни визначають рівняння, які сформулював австрійський фізик Е. Шредінґер; вони є основними постулатами нової фундаментальної теорії. Найпростішим з них є рівняння для електрона в атомі водню. У цьому випадку (і це є загальною ситуацією) рівняння має розв'язок тільки для певних дискретних значень енергії електрона, що характеризують стаціонарний стан атома. Це, власне кажучи, і розв'язує проблему стійкості атома водню, що може знаходитися тільки в певних енергетичних станах. Дивно, що при цьому не зачіпається проблема фізичного змісту хвильової функції. Для того, щоб розв'язати цю проблему, треба прояснити принципове питання: чи можна описувати рух частинки згідно з класичною механікою, тобто говорити, що частинка в кожний момент часу має певні значення координат та швидкості, тому що має сенс поняття траєкторії частинки. Можна упевнитися, що такий опис не має сенсу. Для того, щоб визначити положення частинки, що рухається з постійною швидкістю вздовж прямої, треба освітити частинку пучком променів, що сходяться, у результаті чого отримаємо деяку світлу плямочку, у якій перебуває частинка. Під час освітлення частинки відбуваються певні дії, бо фотони, що входять до складу пучка, чинять тиск на неї, тобто передають їй свій імпульс, тому її швидкість зміниться, причому зміна швидкостей буде тим більша, чим менший розмір плямочки. Це призводить до відомого співвідношення невизначеності, сформульованого німецьким фізиком В.-К. Гайзенберґом, згідно з яким добуток неточностей у ви-

значенні положення та швидкості частинки не може бути меншим за певну межу. Ці міркування показують, що поняття траєкторії в класичній механіці не має абсолютно точного сенсу, і його використовують лише з певним ступенем точності. Подальший аналіз такого роду міркувань дав змогу дійти фундаментального висновку: описувати рух можна, використовуючи концепцію ймовірності. Якщо йдеться про положення електрона в атомі, то має сенс твердження, що електрон розташований у цьому місці простору лише з певною ймовірністю. Вона визначається інтенсивністю хвильової функції ψ , яку з цієї причини часто називають амплітудою ймовірності.

Квантова механіка продемонструвала, що різні фізичні величини асоціюються не зі звичайними числами, а з математичними операторами, які можуть бути представлені у вигляді матриць. Власні значення цих операторів є спостережуваними значеннями різних фізичних величин. У Ф. увійшов новий, якщо порівнювати з епохою Ньютона, математичний формалізм. Ця, 5-та за ліком фундаментальна фізична теорія була створена у 1920-х рр. працями Л. де Бройля, В. Гайзенберґа, Е. Шредінґера, німецьких фізиків М. Планка, М. Борна, австрійського фізика В. Паулі, данського фізика Н. Бора та британського фізика П. Дірака.

Жодна фізична теорія, навіть теорія відносності, не пов'язана так з *філософією*, як квантова механіка. Відкинувши поняття траєкторії, вона докорінно змінила звичайні уявлення про рух, а запровадивши концепцію ймовірності як внутрішню властивість матерії, нівелювала звичайний механістичний детермінізм. Успіхи її величезні, і можна цілком справедливо говорити про золотий вік квантової теорії. Було пояснено як існування стійких атомів і молекул, так і не-ймовірну кількість явищ, що належать до атомного світу. У *хімії* розтлумачено природу хімічного зв'язку та поняття валентності, подано фізичне трактування періодичному закону, сформульованого **Д. Менделєєвим**. Науковці встановили розподіл речовин на метали, діелектрики й напівпровідники, а також відмінність між пара- і діамagnetиками, пояснили такі явища, як феро- та антиферомагнетизм, надпровідність та надплинність. Квантова механіка передбачила можливість нового явища — проходження частинки через потенційний бар'єр. Це так званий тунельний ефект, неможливий у межах класичної механіки. Прикладом цього ефекту є α -розпад ядер, при якому з радіоактивного ядра вилітає, пройшовши через бар'єр, α -частинка, що складається з двох протонів і двох нейтронів. Теорію цього ефекту висунув Дж. Гамов. У *біології* ідеї квантової механіки сприяли розумінню стійкості генів та розшифруванню коду спадковості.

Важливим етапом у розвитку квантової теорії було створення П. Діраком релятивістської квантової механіки електрона, що поєднала ідеї квантової

механіки з вимогами теорії відносності. Синтез релятивістської квантової механіки електрона з електродинамікою Максвелла призвів до виникнення *квантової електродинаміки*, що вивчає різні явища, пов'язані зі взаємодією електронів з електромагнітним полем. Важливим виявилось передбачення П. Дірака про можливість перетворення фотонів в електрон-позитронні пари та анігіляції електронів і позитронів у фотони. Ці ефекти були спостережені на досліді та з особливою чіткістю показали, що електромагнітне поле такою ж мірою матеріальне, як і речовина. Найважливішим практичним застосуванням квантової механіки та квантової електродинаміки було створення потужних когерентних джерел і підсилювачів електромагнітних хвиль різних діапазонів частот — лазерів і мазерів, розвитком і вдосконаленням яких займається *квантова електроніка*. Поширення результатів квантової електродинаміки призвело до ідеї про можливість народження нових частинок при зіткненнях між «старими». Ця ідея була реалізована завдяки спеціально побудованим прискорювачам заряджених частинок. З їх допомогою виник новий світ частинок та античастинок, що можуть перетворюватися одна в одну. Експериментально доведено можливість штучного створення нових форм матерії.

Постала нова велика галузь Ф. — *фізика елементарних частинок*. Науковці розробили класифікацію елементарних частинок і довели, що низка їх має складну внутрішню структуру. Виникла ідея про кварки та антикварки, з яких, зокрема, побудовані такі частинки, як протон і нейтрон, що досі вважалися неподільними. Доведено, що цьому розмаїтті частинок діють, крім гравітаційної, тільки 3 види взаємодій: сильна, електромагнітна й слабка, що відрізняються одна від одної як інтенсивністю, так і радіусом дії. Інтенсивність сильної взаємодії у понад 100 разів перевищує інтенсивність електромагнітної взаємодії та на багато порядків більша за інтенсивність слабкої взаємодії. З'ясовано, що фундаментальна взаємодія між двома частинками завжди здійснюється шляхом обміну між цими частинками деякою третьою частинкою. Електромагнітна взаємодія панує в атомному світі, зумовлюючи існування атомів і молекул усіх конденсованих форм матерії, сильна — у світі атомних ядер. Інакше кажучи, взаємодія між нейтронами й протонами, що входять до складу ядра, є сильною. Радіус її дії залежить від масштабу розмірів ядра, тобто близько 10–13 см. Ця величина на п'ять порядків менша за величину розмірів атома, тобто величини порядку 10^{-8} см. Слабка взаємодія спричинює деякі види розпадів елементарних частинок і β -розпад низки ядер.

У квантовій механіці розглядають ядро як певний точковий силовий центр, але ядра складаються з протонів і нейтронів, тобто самі по собі мають складну внутрішню структуру. Тому природно, що після атомної

Ф. зародилася і ядерна Ф., що вивчає будову ядер та різні реакції, які відбуваються при зіткненнях між ядрами. В її основі, як і в атомній фізиці — квантова механіка. Оскільки між ядерними частинками — нейтронами й протонами — діють потужні ядерні сили, то в ядрі зосереджена величезна енергія. Тому виникає питання про вивільнення і використання цієї енергії. Реалізувати це стало можливим після визначного відкриття 1938 німецькими фізиками О. Ганом та Ф. Штрассманом поділу ядер урану під дією нейтронів, що зіштовхуються з ними. Під час такого процесу виділяється величезна енергія, що в мільйони разів перевищує ту, що пов'язана з хімічними перетвореннями атомів. Крім цього, при поділі ядра урану вилітають, як дрібні уламки, декілька нейтронів. Це зумовлює протікання ланцюгової ядерної реакції, під час якої нейтрони, що вилітають при поділі ядра, ділять у свою чергу сусідні ядра урану. Така ланцюгову реакцію вперше здійснено 1942 італійським фізиком Е. Фермі. Він побудував перший ядерний реактор, що дозволяв одержувати величезну кількість енергії. Велике відкриття Е. Фермі знаменувало початок розвитку нової енергетики.

Розглянувши основні етапи в розвитку фізичної науки, постає питання, як створюється нова фізична теорія. Розрізняють теоретичну та експериментальну Ф. Методом першої є математичний аналіз, другої — експериментальне спостереження. Обидві вони, доповнюючи одна одну, взаємодіють між собою. Однак не варто вважати, що в основі фізичної теорії лежить простий дослід, що можна створити нову теорію, базуючись лише на експериментальних фактах. А. Айнштейн зауважував, що «спроба чисто логічного виведення основних понять і принципів механіки (тобто фізичної теорії) із окремих дослідів приречена на невдачу». Це означає, що немає однозначного логічного шляху від фактів досліду до теоретичних систем Ф. Створення фізичної теорії (побудова фізичної картини світу) пов'язане не тільки з даними досліду, а й із формуванням певних понять і введенням низки абстракцій. У цьому сенсі величезну роль відіграє математика. Без математичної форми не існує фізичних закономірностей. Фізичні ідеї невідірвні від математичного формалізму. Особливу роль математики, її ефективність не раз відзначали найвизначніші натуралісти. «У цьому зв'язку виникає питання, яке хвилювало дослідників усіх часів. Чому можлива така чудова відповідність математики реальним предметам, якщо вона є творінням лише людської думки, не пов'язаної із жодним дослідом?» — говорив А. Айнштейн. «Головною метою усіх досліджень зовнішнього світу має бути відкриття раціонального порядку та гармонії, які Бог послав світу і відкрив нам мовою математики», — писав Й. Кеплер. Н. Бор зазначав, що математика — це більше, ніж наука, — це мова. Математичний формалізм володіє величезною

передбачувальною силою. Це можна простежити на всіх етапах розвитку Ф. Наприклад, щодо передбачення існування нової планети Нептун і нової елементарної частинки — позитрону.

П. Дірак, підсумовуючи передбачення теоретичної Ф., говорив: «Природі притаманна та фундаментальна особливість, що найосновніші фізичні закони описуються математичною теорією, апарат якої має надзвичайну силу й красу». Свою віру у величезну передбачувальну силу математичного формалізму фізичної теорії П. Дірак сформулював таким чином: «Наші жалюгідні математичні зусилля дозволяють поки мало що зрозуміти у Всесвіті. Та, розвиваючи все більш досконалі математичні методи, ми можемо сподіватися на краще розуміння Всесвіту. Математичні дослідження дають надію передбачити, яким буде апарат майбутньої теоретичної фізики».

Фізика нової епохи та її розвиток в Україні

20 ст. ознаменоване створенням нових фундаментальних фізичних теорій — теорії відносності та квантової механіки, що є кульмінаційними віхами у духовному розвитку людства. Для цього часу характерний також розквіт експериментальної Ф., надбанням якої стали унікальні прилади й установки, що дають змогу вивчати глибинні властивості матерії та бачити окраїни Всесвіту — нові галактики, які перебувають на відстанях, що перевершують десять мільярдів світлових років. За допомогою потужних прискорювачів заряджених частинок утворено нові форми матерії та антиматерії, не відомі досі в земних умовах. Були відкриті мезони — частинки, що переносять ядерну взаємодію (передбачені теоретично японським фізиком Х. Юкавою), а також проміжні W- та Z-бозони — частинки, що переносять слабку взаємодію. Арсенал експериментальної Ф. доповнено ядерними реакторами, що дозволяють використовувати нейтрони для досліджень різних фізичних процесів. У лабораторній практиці почали широко застосовувати лазери. Одержано нові матеріали, що відповідають потрібним вимогам, і відкрито високотемпературні надпровідники з широким полем застосування. Досягнуто наднизьких температур близько 10^{-8} К, що посприяло дослідженню властивостей речовин поблизу абсолютного нуля. Виникла широка мережа фізичних інститутів в усіх високорозвинених країнах.

Серед багатьох першовідкривачів у галузі фізики і суміжних наук чільна когорта українців: І. Пулюя (дослідження катодних і рентгенівських променів), М. М. Боголюбов (статистична механіка та квантова теорія поля), Дж. Гамов (теорія Великого вибуху та передбачення реліктового випромінювання), О. Т. Смакула (винахід технології просвітлення оптики), Ю. В. Кондратюк (розрахунки траєкторій космічних польотів), В. Й. Векслер (вторець синхротрона), Б. П. Грабовський (один із творців електронного телебачення), О. Г. Гольдман (від-

криття явища тунельного переходу електронів у р-п-переході), Б. Є. Патон (електрозварювання, зокрема в космосі). Становлення української фізичної термінології пов'язане з діяльністю Наукового товариства імені Шевченка, зокрема, у його «Записках» та «Збірнику» надруковано статті І. Пулюя «Апарат до мірвання різниці фаз межі перемінними потоками і кілька з його поміччю зроблених помірок» (1894), В. Левицького «Електромагнетна теорія світла і філії електричні» (1897), В. Кучера «Динаміка електрона» (1912), Р. Цегельського «Із сучасних дослідів над магнетизмом» (1916) та ін.

Розвитку фізичних досліджень в Україні сприяв створений 1928 Український фізико-технічний інститут (нині «Харківський фізико-технічний інститут» Національний науковий центр НАНУ). У ньому почали успішно проводити дослідження в різних галузях Ф. — Ф. ядра, Ф. низьких температур, Ф. твердого тіла, радіофізики. 1932 там уперше в СРСР здійснено розщеплення атомного ядра літію (*К. Синельников, О. Лейпунський, А. Вальтер, Г. Латишев*). Значний внесок до всіх розділів теоретичної Ф. зробив *Л. Ландау*. Він вперше увів до квантової механіки поняття матриці густини, побудував теорію фазових переходів 2-го роду, розвинув теорію діамagnetизму електронів, передбачив існування нейтронних зірок, розвинув теорію надплинності HeII, відкрив затухання хвиль у плазмі без зіткнень, установив рівняння руху магнітного моменту у ферромагнетикі, дав теорію утворення електрон-позитронних пар при зіткненні частинок, увів поняття СР-парності й виконав ще багато інших робіт. Л. Ландау заснував наукову школу, що має світову славу, і почав створювати, працюючи в Україні, відомий багатотомний «Курс теоретической физики», за яким і нині навчаються в усьому світі.

Л. Шубников встановив основну властивість надпровідників — неможливість проникнення у них магнітного поля; відкрив надпровідники 2-го роду, довів, що антиферромагнетизм є окремою фазою речовини й уперше виявив осциляційні властивості провідників в магнітному полі, зафіксував осциляції магнітоопору вісмуту в магнітному полі (ефект Шубникова—де Гааза). Він є засновником вітчизняної Ф. низьких температур. У післявоєнні роки із Українського фізико-технічного інституту виділили дві групи співробітників, що заснували в Харкові *Радіофізики та електроніки Інститут імені О. Усикова НАНУ* й *Фізико-технічний інститут низьких температур імені Б. Веркіна НАНУ*.

Велику роль у розвитку Ф. в Україні відіграв математик та фізик-теоретик М. Боголюбов, який заснував у Києві Теоретичної фізики Інститут імені М. Боголюбова НАНУ. Він виконав низку фундаментальних робіт у теоретичній Ф., показав, як з перших принципів механіки можуть бути одержані різні кінетичні рівняння, зокрема рівняння Больцмана (сам Л. Больцман не давав

виводу свого рівняння). Йому належить важлива праця, присвячена побудові мікроскопічної теорії надплинності слабо неідеального Бозе-газу. М. Боголюбов увів до статистичної Φ часові функції Гріна; є автором нового методу опису надпровідності. Також показав, як можуть бути доведені дисперсійні співвідношення в теорії елементарних частинок, дав математичне обґрунтування теорії перенормувань квантової електродинаміки. Врешті, він зробив суттєвий внесок у теорію нелінійних коливань.

Нині в Україні фізичні дослідження проводять у низці університетів і академічних установ, зокрема в [Донецькому фізико-технічному інституті імені О. Галкіна НАНУ](#), [Електронній фізиці Інституті НАНУ](#), [Магнетизму Інституті НАНУ](#), [Металофізиці Інституті імені Г. Курдюмова НАНУ](#), [Технічній теплофізиці Інституті НАНУ](#), [Фізиці інституті НАНУ](#), [Фізиці конденсованих систем Інституті НАНУ](#), [Фізиці напівпровідників Інституті НАНУ](#), [Ядерних досліджень Інституті НАНУ](#). Вони стосуються проблем теоретичної Φ ., ядерної Φ ., Φ твердого тіла та конденсованого стану, Φ низьких температур, фізичної оптики, Φ поверхні, Φ плазми, магнетизму, квантової електроніки, Φ напівпровідників та радіофізики. Значний внесок у розвиток Φ зробили [В. Ажажа](#), [М. Азаренков](#), [В. Архаров](#), [О. Ахієзер](#), [В. Бар'яхтар](#), [О. Беляєв](#), [М. Бондар](#), [С. Брауде](#), [М. Бродин](#), [О. Бродський](#), [Л. Булавін](#), [Б. Веркін](#), [І. Вишневський](#), [Д. Волков](#), [О. Галкін](#), [І. Гаркуша](#), [Ю. Головач](#), [І. Горбань](#), [Б. Гриньов](#), [В. Гриднєв](#), [В. Гусинін](#), [О. Гольдман](#), [О. Давидов](#), [В. Данилов](#), [В. Денисов](#), [Є. Дибан](#), [І. Дмитренко](#), [А. Долінський](#), [В. Єременко](#), [А. Загородній](#), [В. Зеленський](#), [В. Іванов](#), [О. Івасишин](#), [А. Комар](#), [Й. Косоногов](#), [Г. Курдюмов](#), [Б. Лазарев](#), [В. Лашкарьов](#), [Б. Лев](#), [М. Лисиця](#), [Л. Литвиненко](#), [І. Ліфшиць](#), [В. Локтєв](#), [В. Манжелій](#), [І. Мриглод](#), [А. Наумовець](#), [М. Находкін](#), [І. Неклюдов](#), [В. Немошкаленко](#), [О. Німець](#), [О. Парасюк](#), [М. Пасічник](#), [С. Пекар](#), [С. Пелетминський](#), [Д. Петрина](#), [О. Петров](#), [А. Прихотько](#), [Василь](#) та [Сергій Свечникови](#), [В. Семиноженко](#), [О. Ситенко](#), [В. Слісенко](#), [А. Слуцкін](#), [Ю. Слюсаренко](#), [А. Смирнов](#), [О. Снітко](#), [В. Сторіжко](#), [В. Толубинський](#), [В. Трефілов](#), [О. Усиков](#), [Я. Файнберг](#), [М. Харченко](#), [В. Шестопалов](#), [А. Шпак](#), [М. Шпак](#), [О. Шпеник](#), [В. Шульга](#), [І. Юхновський](#), [В. Яковенко](#), [І. Янсон](#), [Л. Яценко](#) та ін.

Рекомендована література

1. Левицький В. Фізика для висших клас середніх шкіл. Л., 1912;
2. Ландау Л. Д., Румер Ю. Б. Что такое теория относительности. Москва, 1960;
3. Дирак П. Эволюция физической картины мира // Над чем думают физики / Пер. с англ. Вып. 3. Москва, 1965;
4. Гайда Р. П. Атомная физика. Л., 1965;
5. Эйнштейн А., Инфельд Л. Эволюция физики / Пер. с англ. Москва, 1965;
6. Планк М. Единство физической картины мира. Москва, 1966;
7. Эйнштейн А. Собрание научных трудов. Москва, 1967;
8. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике / Пер. с англ. Вып. 1—9. Москва, 1967—78;
9. Ландсберг Г. С. Элементарный підручник фізики: В 3 т. К., 1968;
10. Роджерс Э. Физика для любознательных / Пер. с англ. Москва, 1971;
11. Берклеевский курс физики / Пер. с англ. Т. 1—6. Москва, 1971—74;
12. Білий М. У. Атомна фізика. К., 1973;
13. Хунд Ф. История квантовой теории / Пер. с нем. К., 1980;
14. Гончаренко С. У. Фізика: Основні закони і формули. К., 1996;
15. Физика твердого тела. Атомная и ядерная физика (практикум по физике): Учеб. пособ. Св., 1998;
16. Загальні основи фізики: Навч. посіб. У 2 кн. К., 1998;
17. Венгер Е. Ф., Гончаренко А. В., Дмитрук М. Л. Оптика малых частиц и дисперсных сред. К., 1999;
18. Юхновський І. Р. Основи квантової механіки. К., 2002;
19. Воловик П. М. Фізика для університетів. К., 2005;
20. Находкін М. Г., Шека Д. І. Фізичні основи мікро- та наноелектроніки. К., 2005;
21. Король А. М., Андріяшик М. В. Фізика. К., 2006;
22. Тяньшина А. В. Засновники харківських шкіл у фізиці. К., 2006;
23. Пінкевич І. П., Сугаков В. Й. Теорія твердого тіла. К., 2006;
24. Кучерук І. М., Горбачук І. Т., Луцик П. П. Загальний курс фізики. К., 2006;
25. Білий М. У., Охрименко Б. А. Атомна фізика. К., 2009;
26. Погосов В. В., Корніч Г. В., Васютін Є. В. та ін. Основи нанофізики і нанотехнологій. З., 2008;
27. Курс загальної фізики: Підруч.: У 6 т. О., 2011—12;
28. Афанасьєв В. Д. Розсіяння релятивістських електронів ядрами. Х., 2011;
29. Давидов О. С. Квантова механіка. Л., 2012;
30. Азаренков М. О. та ін. Наноматеріали і нанотехнології. Х., 2014;
31. Чалий О. В. та ін. Медична та біологічна фізика. В., 2017.

О. І. Ахієзер

Бібліографічний опис:

Фізика / О. І. Ахієзер // Енциклопедія Сучасної України [Електронний ресурс] / Редкол.: І. М. Дзюба, А. І. Жуковський, М. Г. Железняк [та ін.] ; НАН України, НТШ. — К. : Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2025. — Режим доступу: <https://esu.com.ua/article-889287>

2001-2025 © Ця енциклопедична стаття захищена авторським правом згідно з чинним законодавством України ([докладніше](#)).