



КВАНТОВА МЕХАНІКА — один із фундаментальних розділів сучасної теоретичної фізики. Є основою квантової фізики, описує поведінку електронів, ядер, атомів, молекул у різних середовищах, взаємодію випромінювання з речовиною. Традиц. явища, які вивчає К. м., відбуваються у мікросвіті, розміри якого коливаються в межах 10^{-6} – 10^{-14} см. Спостереження поведінки об'єктів мікросвіту можливе лише за допомогою відповід. приладів, зокрема лічильника Гайгера (детектор окремих заряджених частинок, винайдений 1908 нім. фізиком Г. Гайгером і англ. фізиком Е. Резерфордом), камери Вільсона (перший трековий детектор заряджених частинок, винайдений 1912 англ. фізиком Ч.-Т. Вільсоном), електрон. мікроскопів, спектрал. та ін. приладів. Класична фізика, що спирається на закони Ньютона (див. *Механіка класична*) та рівняння Максвелла для електромагніт. поля (осн. рівняння класич. макроскопич. *електродинаміки*, які описують електромагнітні явища у довол. середовищах і вакуумі, сформульовані у 1860-х рр. англ. фізиком Дж.-К. Максвеллом), неспроможна пояснити стійкість атомів і молекул та їхню взаємодію з електромагніт. випромінюванням. Дослідж. умов рівноваги електромагніт. випромінювання та речовини показало, що воно, крім хвильових, має ще й корпускулярні властивості — випускається та вбирається окремими порціями, тобто квантами. Квант світла назвали фотоном. Його енергія E дорівнює $h\nu$, де ν — частота електромагніт. хвилі ($[\nu]=1/\text{сек.}$), h — універсал. фіз. величина, що має розмірність дії ($[h] = \text{енергія} \times \text{час}$, $h \approx 6,626176 \times 10^{-34}$ Дж·сек., запровадж. 1900 нім. фізиком М. Планком при дослідж. випромінювання абсолютно чорного тіла). Поширення електромагніт. випромінювання має хвильову природу, що проявляється в явищах інтерференції та дифракції. Дифракц. картина виникає й при багатократно повтореному розсіянні поодинокого фотона. Отже, хвильова природа притаманна окремому кванту світла. Під час проходження крізь метал. фольгу пучка електронів (чи при багатократно повтореному проходженні одного електрона) на екрані виникає дифракц. картина, що свідчить про їхню хвильову природу. Дуалістична корпускулярно-хвильова природа притаманна всім об'єктам мікросвіту. Матем. апарат К. м. започатк. 1924 гіпотезою франц. фізика Л. де Бройля про те, що стан вільної частинки з імпульсом p_x описується плоскою хвилею з хвильовим числом $k_x = 2\pi/\lambda$, де λ — довжина хвилі, причому $p_x = \hbar k_x/2\pi$. Між шириною пакета хвиль Δp_x і точністю визначення положення частинки у ньому Δx існує співвідношення невизначеностей.

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{4\pi}.$$

Це фундам. співвідношення К. м. сформулював 1927 нім. фізик В. Гайзенберг. У пакеті хвиль де Бройля виникає також співвідношення невизначеностей між енергією частинки та часовою тривалістю її визначення:

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{4\pi},$$

звідки випливає, що стани з фіксов. значенням енергії ($\Delta E = 0$) мають існувати безмежно довго. Співвідношення невизначеностей породило суттєву відмінність в описі стану фіз. об'єкта у класич. і квант. фізиці. У класич. фізиці постулюється, що стан частинки повністю описується заданням координат (x, y, z) та імпульсів частинки (p_x, p_y, p_z) у довол. момент часу t . Їхня зміна в часі визначає траєкторію руху частинки, що може бути отримана з розв'язку рівнянь типу Ньютона (детермінізм класич. механіки). У квант. фізиці за співвідношенням невизначеностей ці величини не можуть бути одночасно визначені з довол. точністю. Тому траєкторії руху частинки в класич. розумінні не існує. Квант. частинка поширюється радше як хвиля. У К. м. постулюється, що стан будь-якого квант. фіз. об'єкта повністю визначається хвильовою функцією $\psi(x,t)$, яка залежить від сукупності динаміч. змінних x і часу t . Кількість динаміч. змінних x дорівнює числу ступенів вільності. Квадрат модуля хвильової функції $|\psi(x,t)|^2$ описує густину ймовірності значень динаміч. змінних x для довол. моменту часу t у стані $\psi(x,t)$ (ймовірнісна інтерпретація К. м., нім. фізик М. Борн, 1926). Для хвильових функцій, що описують стани у К. м., діє принцип суперпозиції: якщо частинка може перебувати у станах, що описуються хвильовими функціями $\psi_1(x,t)$ і $\psi_2(x,t)$, то вона може перебувати і в стані, котрий описується функцією $\psi(x,t) = c_1\psi_1(x,t) + c_2\psi_2(x,t)$, яка є ліній. комбінацією функцій $\psi_1(x,t)$ і $\psi_2(x,t)$. Якщо $\psi_1(x,t)$ і $\psi_2(x,t)$ ортогональні, то $|c_1|^2$ — ймовірність того, що стан $\psi(x,t)$ збігається зі станом $\psi_1(x,t)$, а $|c_2|^2$ — ймовірність того, що стан $\psi(x,t)$ збігається зі станом $\psi_2(x,t)$. Густина ймовірності у стані $\psi(x,t)$ дорівнює $|\psi(x,t)|^2$. Принцип суперпозиції вимагає, щоб рівняння, яким задовольняють хвильові функції $\psi(x,t)$, були лінійними. Цей принцип відрізняє К. м. від статистич. фізики. З аналізу співвідношення невизначеностей для координати x та імпульсу p_x випливає, що у стані $\psi(x,t)$, де x — сукупність координат частинки, імпульсові відповідає певна операція. Тобто класич. динаміч. величинам у К. м. ставляться у відповідність лінійні самоспряжені (ерміт.) оператори. Власні функції цих операторів формують повну систему функцій, а їхні власні значення збігаються з усіма можливими значен-

нями розглядуваної фіз. величини. Середнє значення довл. фіз. величини A , якій ставиться у відповідність самоспряжений (ерміт.) оператор $\hat{A}$, у стані $\psi(x,t)$, виражається інтегралом $\langle A \rangle = \int \psi^*(x,t) A \psi(x,t) dx$, де $\psi^*(x,t)$ — комплексно спряжена до $\psi(x,t)$, інтегрування ведеться по всій множині значень x . Ерміт. оператори у К. м., що між собою комутують, визначають набір фіз. величин, які можна точно виміряти в одному експерименті. Для всіх інших діють співвідношення невизначеностей. Сукупність усіх незалеж. фіз. величин, які можна виміряти одночасно з довл. точністю, задає т. зв. повний опис. Вимір. прилад у К. м. змінює стан об'єкта, над яким здійснюється вимірювання. У матрич. формулюванні К. м. вдалося виявити нові особливості частинок, що не властиві класич. об'єктам, зокрема наявність спіна. Тому повний момент кількості руху є сумою орбітал. і спін. моментів. Квантуються не тільки значення енергії, але й значення моменту кількості руху. У К. м. постулюється рівняння, що описує еволюцію станів. У випадку нерелятивіст. квант. систем еволюція стану з часом описується хвильовим рівнянням Шредінґера (назване на честь австр. фізика Е. Шредінґера, який його сформулював 1926):

$$\frac{2\pi}{ih} \frac{\delta \psi(x,t)}{\delta t} = H(x,t) \psi(x,t),$$

де $H(x,t)$ — оператор енергії частинки (гамільтоніан). Якщо $H(x,t)$ не залежить явно від часу, то енергія частинки зберігається (є інтегралом руху), а хвильове рівняння допускає існування стаціонар. станів частинки. Залежно від симетрії простору та часу, у якому рухається частинка, її гамільтоніан є інваріантним відносно перетворень, що впливають з умов симетрії. У результаті, крім енергії, виникають додатк. інтеграли руху, які у сукупності відображають симетрійні властивості задачі. Повний опис стану квант. частинки визначається 4-ма квант. числами, 3 з них характеризують рух частинки (інтеграли руху частинки) у тривимір. декарт. просторі, 4-е квант. число вказує на величину спіна. Для станів електрона в атомі гол. квант. число характеризує значення його енергії та середню відстань від ядра. При описі станів з великими квант. числами та при русі у повільно змін. потенціал. полі хвильове рівняння Шредінґера переходить у рівняння класич. механіки. Має місце принцип відповідності. У випадку релятивістич. квант. систем слід враховувати наявність енергії спокою частинки mc^2 , де c — швидкість світла, яка дорівнює $3 \cdot 10^{10}$ см/сек. Співвідношення невизначеності набирає нових рис. При намаганні визначити координату частинки з точністю $\Delta x \geq \lambda_k = h/2\pi mc$, де λ_k — довжина хвилі Комптона (назва пов'язана з ім'ям амер. фізика А.-Г. Комптона), яка для електрона становить $3,86 \cdot 10^{-11}$ см, для протона — $2,10 \cdot 10^{-14}$ см, частинці передається імпульс $\Delta p \geq h/2\pi \lambda_k = mc$, достатній для народження нової тотож. частинки з енергією спокою mc^2 . Унеможливується розгляд руху однієї частинки. Релятивістична К. м. переходить у

квантову теорію поля. Оригін. матем. апарат релятивістич. К. м., побудований у 1930-х рр. англ. фізиком П.-А. Діраком, дав змогу передбачити нові фундам. особливості елементар. частинок, зокрема уможливив відкриття античастинки та запровадити поняття фіз. вакууму. Серед фундам. результатів К. м. — доказ властивостей симетрії хвильових функцій систем тотож. частинок, які мають однакову масу, заряд, спін і поводяться однаково за однакових зовн. умов. Хвильові функції систем тотож. частинок, що мають півцілий спін (ферміони), — антисиметричні стосовно перестановки частинок (електрони, позитрони, нуклони, μ -мезони, гіперони); хвильові функції системи тотож. частинок, що мають цілий спін (бозони), — симетричні (фотони, π - і K -мезони). Симетрія хвильової функції — універсал. властивість системи тотож. частинок. Одним з її наслідків є відомий принцип Паулі (названий на честь швейцар. фізика В. Паулі, який його сформулював), відповідно до якого у квант. системі дві або більше тотож. частинок із півцілим спіном не можуть одночасно перебувати в одному й тому ж стані. У К. м. одержано точні розв'язки для низки важливих задач: про рух вільної частинки, проходження квант. частинки крізь потенціал. бар'єри різного типу, про гармоніч. осцилятор, про рух електрона у полі ядра. Отримано тонку та надтонку структури енергет. рівнів електрона в атомі водню, квант. числа усіх фіз. величин, що зберігаються (інтегралів руху), та правила відбору, що взаємно обмежують значення квант. чисел, напівширину збуджених рівнів. Найбільшого успіху К. м. досягнула у розробленні методів наближеного розв'язку задач, зокрема т. зв. теорії збурень. Тут як нульові наближення використано згадані вище точні розв'язки. Вдалося пояснити властивості атомів періодич. системи елементів, яку склав рос. хімік Д. Менделєєв, побудувати теорію молекул, описати квант. переходи в атомах і молекулах під впливом електромагніт. поля, підтвердити справедливість формули Планка для щільності енергії рівноваж. випромінювання, створити науку про елементарні збудження у конденс. системах, побудувати теорію металів, сплавів, напівпровідників. К. м. пройшла 4 етапи розвитку. Перший — етап становлення — це роботи М. Планка про квантування енергії електромагніт. випромінювання та введення сталої h , встановлення законів фотоефекту та введення поняття «фотон» нім. і амер. фізиком А. Айнштайном (1905), досліди Е. Резерфорда (1912) та розроблення планетар. моделі атома. Початком другого етапу розвитку К. м. стали постулати данського фізика Н.-Г. Бора (1913; «стара» К. м.), що стосувалися рівнів енергії електрона в атомі водню, досліди нім. фізиків Дж. Франка та Г. Герца (1914), що підтвердили дискретність енергетич. станів електронів в атомах, доведення існування в атомів магніт. моменту та його простор. квантування нім. фізиками О. Штерном і В. Герлахом (1921-22). Третій етап розпочався з гіпотези Л. де Бройля про

хвильову функцію вільної частинки, з робіт Е. Шредінгера стосовно хвильового рівняння К. м. і М. Борна про ймовірнісну інтерпретацію амплітуди хвильової функції. У цей час квант. хвильова теорія знайшла довершення у роботах В. Паулі, амер. фізика Ю.-П. Вігнера та рос. фізика В. Фока. Амер. фізики К.-Дж. Девіссон і Л. Джермер (1927), англ. фізик Дж.-П. Томсон, укр. фізик П. Тартаковський (1928) отримали дифракц. картини при розсіянні електронів і остаточно довели хвильову природу елементар. частинок. Тоді ж інше формулювання К. м. як теорії операторів та їхніх матриць розвинуто М. Борном, В. Гайзенбергом, П.-А. Діраком і нім. фізиком П. Йорданом. Ці різні формулювання доповнили одне одного та створили досконалу теорію мікросвіту. Четвертий — новіт. етап розвитку К. м. — пов'язаний зі створенням нових напрямів і відкриттям нових явищ, зокрема **квантової криптографії**, квант. комп'ютера, квант. телепортації. На цьому етапі виникла нова сфера — квант. інформатика, в якій для передавання, зберігання та перетворення інформації використовують квант. носії — квант. біти (див. **Квантова теорія інформації**). Досягнення К. м. застосовано для пояснення природи хім. зв'язків і реакцій, явищ надпровідності та надплинності, властивостей металів і діелектриків, у проблемах сучас. біології, спектроскопії, фізиці і технології напівпровідників,

нанофізиці, дослідж. будови і розвитку Всесвіту, а також для створення найсучасніших приладів і установок.

Рекомендована література

1. Шифф Л. Квантовая механика: Учеб. пособ. / Пер. с англ. Москва, 1959;
2. Бом Д. Квантовая теория / Пер. с англ. Москва, 1961;
3. Глауберман А. Ю. Квантова механіка. Л., 1962;
4. Ферми Э. Квантовая механика: Конспект лекций / Пер. с нем. Москва, 1968;
5. Дирак П. А. М. Принципы квантовой механики / Пер. с англ. Москва, 1979;
6. Блохинцев Д. М. Начала квантовой механики. Москва, 1983;
7. Джеммер М. Эволюция понятий квантовой механики / Пер. с англ. Москва, 1985;
8. Юхновський І. Р. Основи квантової механіки. К., 2002;
9. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Квантовая механика: Нерелятивистская теория. Москва, 2008;
10. Вакарчук І. О. Квантова механіка. Л., 2012;
11. Давидов О. С. Квантова механіка. К., 2012.

І. Р. Юхновський

Бібліографічний опис:

Квантова механіка / І. Р. Юхновський // 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, 2012. — Режим доступу: <https://esu.com.ua/article-11528>. – Останнє поновлення : 2025.

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