

Можлива «конструкція» із хвиль – хвильовий пакет (див. рис. 3.5, б). Хвильовий пакет можна описати інтервалом хвильових чисел Δk , що потрібні для концентрації електромагнітного поля в ділянці простору Δx . При цьому набір хвильових векторів тим більший, чим менші розміри Δx пакета в просторі. Є чисто хвильове співвідношення: $\Delta x \cdot \Delta k \geq 1$, де Δx – розмір хвильового пакета в просторі (невизначеність координати); Δk – невизначеність хвильового вектора в хвильовому пакеті. Порівнюючи цю нерівність зі співвідношенням невизначеності $\Delta x \Delta p \geq \frac{1}{2}\hbar$, можна отримати співвідношення де Бройля: $p = \hbar k$.

Запропоноване вперше де Бройлем це важливе співвідношення хвильової механіки зв'язує швидкість частинки з довжиною її хвилі. Стверджується, що p – імпульс частинки, обернено пропорційний λ – довжині її хвилі: $k = 2\pi/\lambda$. Імпульс частинки дорівнює добутку маси частинки на її швидкість: $p = mU$. Таким чином, відповідно до наведеного співвідношення, чим швидше рухається частинка, тим коротша довжина її хвилі. Інакше кажучи, хвилі ймовірності електрона, що рухається швидко, й електрона, що рухається повільно, будуть значно розрізнятися – так, як це схематично показано на рис. 3.9.

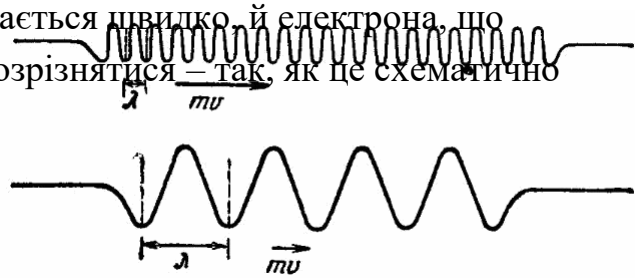


Рис. 3.9. Довжина хвилі (λ) й імпульс (mU)

Грунтуючись на встановленому зв'язку ймовірності перебування частинки в певній точці простору з квадратом амплітуди її хвилі в цій точці, а також на зв'язку швидкості частинки з довжиною її хвилі, можна встановити основні закономірності для атомів. Поведінка електронів в атомі описується таким чином: якщо електрон змушений перебувати в малому об'ємі простору, то довжина його хвилі має бути короткою, щоб він «умістився» у відведений йому об'єм (рис. 3.10). Але якщо довжина хвилі мала, то згідно із співвідношенням де Бройля швидкість частинки (електрона) повинна бути великою. Звідси випливає, що має бути великою і кінетична енергія електрона, яка пропорційна квадрату швидкості частинки.

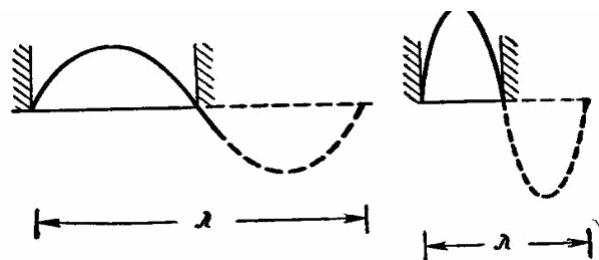


Рис. 3.10. Зменшення доступного для частинки розміру простору залежно від довжини її хвилі

Таким чином, принцип невизначеності означає визнання хвильових

властивостей частинок. Альтернативність понять «хвиля» і «частинка» (або хвиля, або частинка) порушується двоякою: як з боку частинок, що набули хвильових властивостей, так і з боку хвиль – вони набули корпускулярних властивостей.

Хвильові властивості частинок, так само, як і корпускулярні властивості хвиль, були багаторазово підтверджені експериментально. Наприклад, було показано, що електрон в одних випадках поводить себе як частинка, а в інших – як хвиля. Наприклад, корпускулярні властивості хвильового руху виявляються в тому, що енергія E хвиль з частотою ω дорівнює цілому числу квантів енергії $\hbar\omega$ ($E = n\hbar\omega$, де $n = 1, 2, 3, \dots$), а імпульс хвилі p дорівнює $n\hbar k$.

Для фізики твердого тіла, особливо для нанофізики, важливим наслідком принципу невизначеності є те, що рух квантової частинки (електрона, іона, атома), яка локалізована в обмеженому об'ємі простору, не може припинитися навіть за найнижчих температур: зупинення теплового руху атома, іона за температури $T \rightarrow 0$ означало б, що його імпульс $p = 0$ (і, як наслідок, $\Delta p = 0$). Це суперечить принципу Гейзенберга, відповідно до якого відбувається повна делокалізація частинки ($\Delta x = \infty$). Отже, навіть поблизу абсолютного нуля температури в кристалах здійснюється непереборний квантовий рух, який називають «нульовими коливаннями».

Отже, якби і була досяжною абсолютна температура $T = 0$ К, то і тоді б атоми у твердому тілі здійснювали б «нульові коливання». Тому, зокрема, гелій за нормального тиску навіть у разі найнижчої досяжної температури 10^{-6} К не може кристалізуватися («замерзнути») – він залишається рідиною. Так само не може виникнути спонтанна поляризація в параелектриках типу титанату стронцію або танталату калію. Спонтанна поляризація означала б спонтанний зсув від центра електричної симетрії активних іонів і їх фіксацію у кристалічних ґратках, оскільки цьому заважають квантові «нульові коливання».

Співвідношення невизначеностей – незакономірний наслідок корпускулярно-хвильової моделі мікрочастинок, яка є основою квантової механіки.

Квантова механіка пояснює, чому всі атоми однієї речовини (наприклад, водню) однакові, оскільки всі вони перебувають в *однаковому* (основному) стані. Але цього факту недостатньо для пояснення *періодичного закону Менделєєва*, тобто для обґрунтування як подібності, фізико-хімічних властивостей атомів різних елементів, так і розбіжності. Пояснює ці і багато інших властивостей атомних об'єктів *принцип Паулі*. Порядковий номер елемента Z відповідає кількості електронів у його атомі. Але те, що різні атоми мають різну кількість електронів, ще недостатньо для розуміння властивостей хімічних елементів.

Ядро атома разом з електронами створює деяке електричне поле, і кожен електрон рухається у ньому. У цьому полі є «дозволені» стани, а серед них – найнижчий. Здавалося б, що в ньому мають перебувати всі електрони. Але в такому разі додавання ще одного електрона мало що змінює, особливо якщо число Z велике. Однак така картина зовсім несхожа на дійсність: досить порівняти властивості аргону Ar і калію K, тобто властивості інертного газу і лужного металу, у яких кількості електронів (атомні номери) відрізняються усього на одиницю. Квантова механіка для пояснення властивостей елементів і багатьох інших закономірностей мікроскопічної фізики має використовувати, крім принципу невизначеності, ще один принцип заборони, сформульований Паулі. Цей принцип забороняє двом (і більше) електронам перебувати в однакових станах. Тобто кожен електрон повинен мати свій стан. Іноді два стани поєднуються в один і відповідно змінюється формулювання принципу Паулі: один стан для двох електронів (однак не всі частинки в природі підкоряються принципу Паулі).

Заборона ця настільки сувора, що її не може подолати природне для всякої фізичної системи прагнення частинки зайняти стан з найбільш низькою енергією. Періодичний закон можна пояснити розміщенням електронів атомів по станах з урахуванням принципу Паулі. Таким чином, квантова механіка виявляється основою не тільки фізики, але й хімії.

3.7. Нуклони, постійна тонкої структури і Всесвіт

Вивчення електричних і магнітних властивостей речовини дає змогу глибше зрозуміти природу взаємодій. Електричні поля атомних ядер великі і визначаються кількістю протонів у ядрі. При цьому ядерний магнетизм на три порядки за величиною менший від електронного магнетизму, і тому у фізиці твердого тіла під час вивчення електронного магнетизму властивості ядер могли б не враховуватися. Метод ядерного магнітного резонансу «на протонах» використовується у фізиці і медицині для діагностики структури речовини.

У фізиці твердого тіла і особливо в нанофізиці іноді доводиться враховувати більш «тонку» будову речовини. Основними «структурними елементами», крім електронів e , є протони p і нейтрони n . Атомний номер хімічного елемента відповідає кількості електронів у нейтральному атомі і ця кількість дорівнює кількості протонів у ядрі (дотримується принцип електричної нейтральності). Однак, визначаючи масу атома, електрони можна не враховувати: електрон приблизно у 1840 разів легший від протона або нейтрона (це число 1840 не вдається одержати з фундаментальних

констант). Як показує експеримент, розмір ядра атома становить 10^{-13} см, що нехтовно мало порівняно з розміром атома (10^{-8} см). Оскільки маса ядер на чотири порядки за величиною перевершує масу електронів, можна з дуже великим наближенням вважати ядро «нескінченно важким» при розгляді електронних процесів, що й використовується у фізиці конденсованих середовищ для обґрунтування зонної теорії електронних спектрів (адіабатична гіпотеза).

Порівняльні параметри електрона, нейтрона і протона наведено в табл. 3.1, у якій заряд частинки наведено в одиницях заряду електрона, а її маса – в одиницях електронної маси, магнітний момент електрона взято за одиницю.

Таблиця 3.1. Параметри деяких елементарних частинок

Частка	Заряд	Маса	Спін	Магнітний момент
e	-1	1	$\frac{1}{2}$	1
n	0	1840	$\frac{1}{2}$	1,9/1838
p	+1	1838	$\frac{1}{2}$	2,89/1838

Наведені в таблиці частинки є *ферміонами*, оскільки їх спін дорівнює $\frac{1}{2}$, тобто є півцілим. Магнітний момент нейтрона, незважаючи на те, що немає електричного заряду, майже в два рази більший, ніж електрона. Протон характеризується трохи більшим магнітним моментом порівняно з нейтроном.

Коли протон перебуває «далеко» від ядра (тобто на відстані, більшій за 10^{-12} см), то можна враховувати тільки його електричне (кулонівське) відштовхування від ядра. Тому протон може наблизитися до ядра тільки в тому разі, якщо він має дуже велику енергію.

У нейтронах кулонівського відштовхування не відбувається, а отже, його зіткненню з ядром може не перешкоджати. Зі зближенням з ядром на відстань 10^{-13} см на протони і нейтрони діють вже інші, більш потужні сили, що можуть переборювати взаємне відштовхування протонів. Таким чином, електричні взаємодії в ядрах змінюються іншими – **ядерними взаємодіями**. Помітно, що на електрони ядерні сили не діють.

Закон Кулона (повільне зниження електричної взаємодії зі зближенням відстані) зобов'язаний нульовій масі фотона. Для ядерних сил (які утримують нуклони – протони і нейтрони в ядрі) характерним є протилежний випадок: ці сили взаємодії знижуються зі збільшенням відстані набагато швидше від кулонівські. Цю **короткодію** зумовлює *ненульова маса частинок*, що забезпечує зв'язок нуклонів у ядрі.

Швидку зміну ядерних взаємодій зі збільшенням відстані зручно апроксимувати «посиленим» кулонівським потенціалом – *потенціалом Юкави*:

$U(r) = (q_1q_2/4\pi\epsilon_0r)\exp(-r/r_0)$, де r_0 – радіус дії $U(r)$. Цей радіус пов’язаний простим співвідношенням, маса частинки у якому $r_0 = \hbar/me$. За *сильної взаємодії* ядерні сили на два порядки перевищують кулонівські сили, але діють тільки на малих відстанях: радіус дії ядерних сил $r_0 \sim 10^{-13}$ см. Ядерні сили забезпечуються частинками, що називаються π -мезонами (тобто «проміжними»). Така назва обумовлена тим, що маса π -мезона $m_{\text{мез}}$ виглядає проміжною між масою електрона m_e і масою протона m_p : $m_{\text{мез}} \sim \sqrt{m_e m_p} \sim 300 m_e$. Таку ж оцінку маси мезонів можна отримати за формулою $r_0 = \hbar/me$, якщо припустити, що $r_0 \approx 10^{-13}$ см.

Експериментально виявлено три типи π -мезонів: π^- , π^+ і π^0 – верхній індекс відповідає знаку електричного заряду мезона. Таким чином, носій сил зв’язку між нуклонами може бути як нейтральним, так і електрично зарядженим. Заряджені мезони (π^- і π^+) можуть випускати і поглинати фотони. Спін усіх π -мезонів дорівнює нулю: на відміну від електронів мезони є бозе-частинками.

Як відомо, у фізиці елементарних частинок розглядають сотні різних частинок. Однак усі вони виникають і зазвичай швидко зникають у процесі ядерних реакцій і їх можна не брати до уваги, вивчаючи проблеми фізики конденсованих середовищ.

Таким чином, на відстанях 10^{-13} см і менших діють ядерні сили. Вони зв’язують між собою нуклони (протони і нейтрони). Для ядерних сил нейтрон «заряджений», а електрон – «нейтральний», тобто *електрон не взаємодіє з нуклоном за допомогою ядерних сил*, навіть якщо наблизиться до нього на відстань 10^{-13} см. Але електрон взаємодіє з протоном за допомогою *електромагнітного поля*.

Три фундаментальні параметри (заряд електрона e , швидкість світла c і постійна Планка \hbar) утворюють безрозмірну комбінацію: $\alpha = e^2/\hbar c = 1/137$, що відома в квантовій фізиці як «*одна сто тридцять сьома*» (названа також «*постійною тонкою структурою*»). Така назва параметра α з’явилася через те, що під час спектроскопічних досліджень виявилось невелике розщеплення – «тонка структура» у спектрі водню. Енергію іонізації водню можна визначити за співвідношенням $R_\infty = \frac{1}{2} \alpha^2 m c^2$.

У нерелятивістській теорії енергія іонізації не залежить від швидкості світла c . Таким чином, параметр α є релятивістським співвідношенням для основної структури енергетичних рівнів – ураховується відношення швидкості електрона на орбіті до швидкості світла: $U/c \sim \alpha$. Тонка структура ліній водню являє собою релятивістський ефект.

Параметр α – це безрозмірна фундаментальна константа зв'язку між електромагнітним полем і елементарним зарядом. Та обставина, що параметр $\alpha \ll 1$, фізично означає слабкий зв'язок між частинками й електромагнітним полем. Тільки тому і частинки, і електромагнітні хвилі можна вважати деяким «базисом», за допомогою якого квантова механіка описує явища в речовинах. Атом же являє собою «слабкозв'язану» структуру з «повільним» (за релятивістськими поняттями) рухомих електроном. Тому нерелятивістська теорія атома є задовільним наближенням: релятивістські виправлення становлять $(v/c)^2 \sim \alpha^2$.

Якщо вважати, що швидкість світла c і постійна Планка \hbar – основні фізичні параметри, що описують світобудову («світові константи»), то постійна тонкої структури α може бути мірою заряду електрона: $e = (\alpha \hbar c)^{1/2} = (\hbar c / 137)^{1/2}$.

Магнітна енергія взаємодії електронів в атомі оцінюється як $U_M \approx \mu_B^2 / a^3$, де μ_B – магнетон Бора; a – середня відстань між електронами. Енергія електростатичної взаємодії двох електронів у цих же умовах $U_{кул} = e^2 / a$. Якщо оцінити відношення двох енергій, можна отримати $U_M / U_{кул} \approx (1/137)^2$.

Отже, магнітна взаємодія електронів набагато поступається електростатичній. Для фізики магнетизму важливо також і те, що постійна тонкої структури передбачає мале значення магнітної сприйнятливості діамагнетиків. Можна показати, що діамагнітна сприйнятливість оцінюється $\alpha^2 = (1/137)^2 \approx 5 \cdot 10^{-5}$, що узгоджується з експериментальними даними.

Цікаво відзначити, що через параметр α можна виразити також і розмір атома водню:

$$a_0 = \hbar^2 / m_e c^2 = r_e / \alpha^2 = (137)^2 r_e,$$

де $r_e = e^2 / m_e c^2 = 1,25 \cdot 10^{-13}$ см – радіус електрона. Розмір атома водню a_0 можна обчислити, якщо дорівняти електростатичну енергію електрона радіуса r_e , що дорівнює e^2 / r_e , до енергії спокою електрона $m_e c^2$.

Спираючись на наведені співвідношення, можна стверджувати, що безрозмірна постійна α має важливе значення. У квантовій фізиці, крім $e^2 / \hbar c \approx 1/137$, є й інші значущі безрозмірні параметри, наприклад, відношення маси електрона до маси протона: $m_e / m_p \approx 1/1840$, відношення $e^2 / \gamma m_p^2 \approx 4,10^{42}$ (γ – гравітаційна постійна) і т.ін.

Можливості застосування квантової механіки до опису властивостей мікроскопічних об'єктів можуть бути оцінені з погляду більш загальної теорії – релятивістської квантової механіки. Виявляється, що висока точність квантової теорії, що використовується для опису властивостей електронів в атомах,

обумовлена саме малістю $\alpha = 1/137$. Інакше не можна було б говорити про дозволені стани в атомі. Зокрема, тільки завдяки малості α електрон може порівняно довго перебувати в збудженому стані, перш ніж перейти з випромінюванням електромагнітної хвилі в більш низький енергетичний стан.

Визначений методами класичної фізики радіус електрона вважають $r_e \sim 10^{-13}$ см з припущення, що електрон є зарядженою сферою, і можна знайти його електростатичну енергію: $U_{ел} \sim e^2/r_e$. Ця оцінка не є доказовою, оскільки не зрозуміло, чи може закон Кулона діяти на такій відстані. Крім того, оскільки електрон є елементарною частинкою, то не визначено природу сили, що утримує його заряд.

Слід зазначити, що до квантової теорії можна було б додати також поняття *фундаментальної довжини* λ_0 і *фундаментального часового інтервалу* $t_0 = \lambda_0/c$. Інакше кажучи, порівняно з класичною механікою, де і простір, і час – безперервні, переглядається сама **структура простору і часу**. Наявність фундаментальної довжини λ_0 означає відмову від цієї безперервності на користь дискретності простору-часу. Із сукупності експериментальних даних випливає, що фундаментальна довжина $\lambda_0 \approx 10^{-13}$ см. Відзначимо, що саме ця величина відповідає передбачуваному радіусу електрона. Оскільки розмір атома ($a_0 \sim 10^{-8}$ см) у 10^5 разів більший від розмірів як ядра ($r_{я} \sim 10^{-13}$ см), так і електрона ($r_e \sim 10^{-13}$ см), то з погляду класичної механіки атом може здаватися «порожнім».

Проте, вивчаючи фізику твердого тіла і нанофізику, досить вважати простір і час безперервними, а також те, що кристал (наночастинка) складається тільки з атомів (або іонів) і «вільних» електронів. Електромагнітні хвилі не належать до цього базису. Як відомо, у разі виникнення у твердому тілі збудженого атома, що «прагне» набути стану з меншою енергією, перехід цей досягається випромінюванням надлишкової енергії у вигляді електромагнітної хвилі (світла). Однак це не означає, що збуджений атом містить світлову хвилю: вона була створена в момент переходу збудженого атома в атом, що перебуває в основному стані. Хвиля, довжина якої $10^{-1} - 10^{-4}$ см, не може «міститися» в атомі, розмір якого становить лише 10^{-8} см.

Усі частинки і поля взаємодій виникли в процесі еволюції Всесвіту, що підкоряється єдиним законам природи.

Умовну схему еволюції Всесвіту показано на рис. 3.11. По осі ординат відкладено час t – від моменту зародження Всесвіту і аж до нашого часу (близько 14 млрд років). Використовують умовний і стиснутий масштаби – спочатку час наводять у частках секунд, потім у секундах і, нарешті, у ро-

ках. Масштаб вибрано таким чином, щоб було зручно пояснювати, що відбувалося на різних етапах еволюції. По осі абсцис від точки «0» відкладається розмір Всесвіту в метрах. Натепер Всесвіт розширився до розміру радіуса $R \approx 10^{26}$ м.

Суцільні криві, що виходять від зародження Всесвіту і проведені дотепер, залежно від розміру Всесвіту, що розширюється, – довільні і відповідають чотирьом відомим у фізиці фундаментальним взаємодіям. Послідовність кривих, що позначають гравітацію 1, слабку взаємодію 2, електромагнітну взаємодію 3 і сильну взаємодію 4, умовно вказує на відносну силу фундаментальних взаємодій.

Самою слабкою взаємодією є **гравітаційна взаємодія**: її константа оцінюється значенням близько 10^{-39} , що в 10^{33} разів менше від наступної за нею **слабкої ядерної взаємодії** з константою взаємодії 10^{-14} . Однак гравітаційна взаємодія діє всюди: її радіус нескінченний ($R_g = \infty$), у той час, як радіус дії слабкої взаємодії (характерної для елементарних частинок) надзвичайно малий: $R_w \sim 10^{-16}$ см.

Наступна за силою **електромагнітна взаємодія** з константою взаємодії близько 10^{-2} значно сильніша від гравітаційної і також має нескінченний радіус ($R_{em} = \infty$). Однак ця взаємодія за силою поступається **сильній (ядерній) взаємодії**, де константа взаємодії дорівнює 10, хоча радіус сильної взаємодії досить малий: $R_s \sim 10^{-13}$ см.

Саме таким значенням оцінюється розмір як атомного ядра, так і розмір електрона.

Використовуючи показану на рис. 3.11 схему, можна навести основні етапи еволюції Всесвіту відповідно до теорії **Великого вибуху**. У цій теорії «інфляції» (розширення) виникнення Всесвіту пов'язано з фізичними процесами, що відбуваються у вакуумі, причому теорія поєднує процеси в мікросвіті та мегасвіті. За сучасними уявленнями **вакуум** – це складна і всюди існуюча динамічна квантовомеханічна система, яка постійно і повсюдно породжує віртуальні

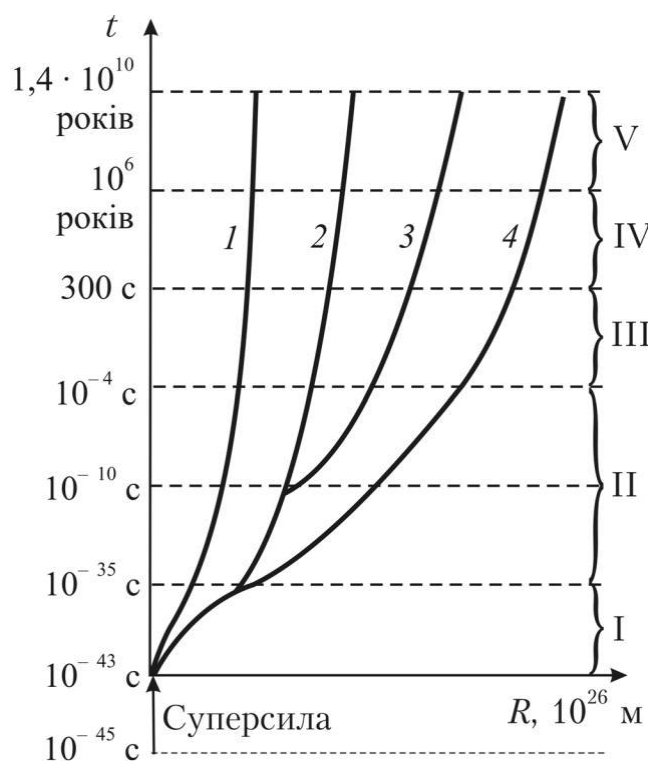


Рис. 3.11. Схематичне зображення еволюції Всесвіту: 1, 2, 3, 4 – основні взаємодії; I – V – періоди еволюції

частинки й античастинки. Досить складні процеси у вакуумі, названі «інфляційними», лежать в основі зародження Всесвіту.

Наш Всесвіт виник приблизно 14 млрд років тому від початку надзвичайно малого об'єму і став дуже швидко розширюватися. Такий період в історії Всесвіту називається періодом *інфляції*. До початку інфляції існував лише один вид фундаментальної взаємодії між елементарними частинками, що заповнювали Всесвіт. Ця взаємодія названа «*суперсилою*». У момент часу 10^{-43} с від суперсили відокремилася *гравітація* (крива 1 на рис. 3.11). Епоха інфляції (період I) продовжувалася дуже малий проміжок часу – від 10^{-43} до 10^{-35} с; але теорія цієї самої ранньої стадії розвитку Всесвіту ще не довершена.

Гравітація існує як окрема фундаментальна сила й у наш час.

Далі, окрім гравітації, виникли три взаємодії: сильна, електромагнітна і слабка, і почався період, який у теорії Великого вибуху отримав строге теоретичне обґрунтування. Таким чином, у процесі еволюції Всесвіту єдина взаємодія (суперсила) розпалася на чотири фундаментальні взаємодії.

Потім у процесі еволюції Всесвіту формувалися матеріальні структури неорганічної природи.

У період *інфляції* ($10^{-43} - 10^{-35}$ с) виникла тільки першопричина появи в майбутньому всього речовинного. Під час інфляції температура Всесвіту була близько 10^{30} К, оскільки матерія могла існувати тільки у вигляді випромінювання, елементарних частинок і античастинок. На наступних етапах еволюції частинки й античастинки попарно анігілювали, перетворюючись у випромінювання. Збереглася при цьому тільки певна кількість частинок (яка все-таки велика: близько 10^{80}). Зазначимо, що дослідження елементарних частинок актуальні: Нобелівську премію 2008 р. з фізики одержали Й. Намбу, М. Кобаясі і Т. Маскава (вчені із США та Японії) за відкриття спонтанного порушення електрично слабкої симетрії і за пояснення причин цього явища. Вони довели наявність у природі трьох сортів кварків, завдяки яким у разі збільшення сил взаємодії між частинками вони стрибком переходять у новий стан – із безмасового в масовий (частинки набувають масу).

У період часу $10^{-35} - 10^{-4}$ с настає час *адронів* (позначено на рис. 3.11 періодом II), а подальше розширення Всесвіту продовжується відповідно до теорії Великого вибуху. Температура Всесвіту при цьому спадає від 10^{28} до 10^{12} К. Наприкінці цього періоду часу кварки об'єдналися в адрони, до яких належать, зокрема, протони і нейтрони. Таким чином, утворилися частинки, з яких складаються ядра атомів. Однак у період адронів об'єднання нейтронів і протонів у ядра атомів відбутися ще не могло, оскільки температура ще була надто високою ($T > 10^{12}$ К).

У період *лептонів* (10^{-4} – 300 с, період III) відбувається реакція між протонами і нейтронами, у результаті якої відношення кількості нейтронів, що залишилися, до кількості протонів стало дорівнювати приблизно 0,15. До моменту 300 с температура Всесвіту, що розширювався, спала до 10^9 К, і виникли умови для утворення ядер ізотопу водню (дейтерію) та гелію.

Це було початком періоду *фотонів*, що тривав приблизно від 300 с до 10^6 років (рис. 3.11, IV), поки нейтрони не були витрачені цілком на утворення ядер гелію (~25%), а протони, що залишилися, проявилися надалі як *ядра* атомів водню (~75%). Приблизно це ж співвідношення між умістом гелію і водню збереглося в середньому у Всесвіті й у наш час.

Після утворення ядер легких елементів речовина ще тривалий час (~ 10^6 років) являла собою плазму. Висока температура не дозволяла існувати нейтральним атомам. Лише після зниження температури Всесвіту приблизно до 4000 К електрони стали утримуватися поблизу ядер, утворили *атоми* водню і гелію. Активність взаємодії фотонів з речовиною послабилася і Всесвіт, який раніше був непрозорим, став прозорим. Почався період *речовини* (період зірок), що продовжується й тепер.

У періоди адронів, лептонів і фотонів, тобто до періоду *речовини* (рис. 3.11, V), матеріальні системи ускладнювалися й урізноманітнювалися через об'єднання елементарних складових у більш складні конструкції. Навколо спочатку досить слабких неоднорідностей стали утворюватися речовини (за рахунок гравітаційних сил) і величезні газові згущення. Згодом вони перетворилися в галактики, що, у свою чергу, розпалися на протозорі. Стискаючись, протозорі нагрівалися до виникнення власного світіння й у такий спосіб ставали зірками.

У підсумку, спочатку суцільне, майже однорідне плазмове середовище Всесвіту перетворилося за рахунок гравітаційної (і меншою мірою – електромагнітної) взаємодії у відособлені зоряні скупчення – галактики. Виникли нові процеси самоорганізації, що призвели спочатку до ядерного перетворення зоряного водню в гелій, а також у більш важкі елементи (аж до заліза), а потім і в ще важчі елементи (аж до урану) – унаслідок вибухів зірок, що перебувають у метастабільному стані («вибухи наднових»). Так з'явився «будівельний матеріал» для виникнення речовини.

3.8. Атоми

«Якщо в результаті якоїсь світової катастрофи всі нагромаджені наукові знання виявилися б знищеними і до прийдешніх поколінь живих істот перейшла б тільки одна фраза, то яке твердження, складене з найменшої кількості слів, містило б найбільшу інформацію? Я вважаю, що це – атомна гіпотеза (можете називати її не гіпотезою, а фактом, але це нічого не змінює): усі тіла складаються з атомів – маленьких тілець, що перебувають у безперервному русі і притягаються на невеликій відстані, але відштовхуються, якщо одне з них щільніше притиснути до іншого. В одній цій фразі утримується неймовірна кількість інформації про світ, варто лише прикласти до неї небагато уваги і деяке розуміння»¹.

Атом можна описувати за допомогою двох взаємодоповняльних моделей: просторової й енергетичної. Просторова модель атома відображає його тривимірну об'ємну структуру і те, як у межах цієї структури розподілені щільності ймовірності перебування електронів атома. Сукупність розподілених поблизу ядра електронів (точніше – ймовірностей їх перебування там) називають електронною хмарою. У найпростішому випадку вона сферична (наприклад, для водню в незбудженому стані), але частіше має складну конфігурацію.

У курсі хімії середньої школи наведено умовні зображення зовнішньої форми електронної хмари для електронів, що перебувають у різних квантових станах. Для атома водню рівняння Шредінгера дозволяє отримати строгий математичний опис геометричних особливостей електронної хмари. Однак його наочне подання неможливе, оскільки розподіл імовірності перебування електрона в хмарі досить складний. Тому для опису атома часто використовують спрощену модель атома – модель Бора (Нобелівська премія, 1922 р.). Ця модель допускає зображення атома у вигляді центрального ядра й електронів, що рухаються довкола нього по визначених орбітах.

Важливо зрозуміти, що *класична фізика* дійсно не може пояснити сам факт існування атомів. Відомо, що атом складається з ядра, що містить деяку кількість протонів і нейтронів, та електронів, що оточують це ядро. Кількість електронів визначає положення атома в таблиці Менделєєва і точно дорівнює кількості протонів у ядрі атома. Розміри ядра атома становить 10^{-15} м, такий же приблизно і розмір електрона. Проте розмір атома в сотисяч разів більший. Таким чином, об'єм атома майже «порожній» – однак у багатьох розділах фізики твердого тіла добре «працює» модель, відповідно до якої атом вважається твердою кулькою.

¹ Р. Фейнман Лекції з фізики.— М.: Світ, 1965 – Вип. 1. 0150. – С. 23.

З експериментів відомо, що радіус атома $a \approx 3 \cdot 10^{-10}$ м. Далі, для спрощення, розглядається *атом водню*, що складається з одного електрона й одного протона. У такому атомі позитивно заряджене ядро утримує негативно заряджений електрон за допомогою сили кулонівського притягання: $F_{\text{кул}} = e^2/a$, де e – заряд електрона (дорівнює заряду протона). Для стійкості атома сила притягання має бути зрівноважена силою відштовхування. Такою силою є відцентрова сила: $F_{\text{відц}} = meU^2/a$, де U – швидкість електрона. Рівність сил дозволяє визначити швидкість електрона на коловій орбіті: $U = (e^2/mea)^{1/2}$.

Як заряд електрона e , так і його маса m_e являють собою фундаментальні константи. Підставляючи ці константи в наведену вище формулу, знаходимо швидкість електрона на орбіті: $U = 10^6$ м/с. Релятивістськими ефектами при цих розрахунках можна знехтувати, оскільки $U/c \approx 1/300$ (якби атом був величиною з атомне ядро (10^{-15} м), то швидкість електронів у ньому була б близькою до швидкості світла).

Повна енергія електрона в полі ядра (сума його кінетичної і потенціальної енергій) $E = -e^2/2a$.

Знак «мінус» означає, що за нуль вибирається енергія електрона на нескінченній відстані від ядра (зі зменшенням відстані енергія зменшується). Розрахунок показує, що за час $t = 10^{-10}$ с вся енергія електрона виявиться випроміненою. Саме через це *класична фізика не може пояснити існування атома*.

Відповідно до найпростішої моделі електрон в атомі рухається зі швидкістю $U \approx 10^6$ м/с по колу, тобто вектор його швидкості увесь час змінює напрямок. Це дає підставу вважати, що $\Delta U \approx U$, що означає: невизначеність швидкості ΔU має порядок величини самої швидкості. Оскільки $\Delta x \Delta p \geq \frac{1}{2}\hbar$ і імпульс $p = mU$, то невизначеність координати електрона $\Delta x \geq \hbar/2m_eU$. Підставивши масу електрона $m_e \approx 10^{-30}$ кг, його швидкість 10^6 м/с і постійну Планка можна знайти $\Delta x \geq 10^{-10}$ м, що майже збігається з розміром атома.

Це означає, що сфера радіуса a і є той об'єм, у якому міститься електрон, але уточнити його положення в цьому об'ємі неможливо.

Слід зазначити, що деякі міркування дають змогу оцінити і радіус електрона: виявляється, що він має приблизно таку саму величину, що і ядро атома: близько 10^{-15} м. Варто зазначити, що обидва параметри виявляються в 10^5 разів меншими, ніж *невизначеність* положення електрона в атомі.

Квантовомеханічний принцип невизначеності також дає змогу оцінити розмір атома. Справді, радіус атома оцінюється невизначеністю положення орбітальних електронів: $a \approx \Delta x \approx \hbar/mU$. Використовуючи цей вираз для орбі-

тальної швидкості електрона: $U = (e^2 / m_e a)^{1/2}$, отримаємо: $a = a_0 = \hbar^2 / m_e e^2$. Таким чином, радіус атома a_0 можна виразити через фундаментальні параметри – постійну Планка \hbar , масу електрона m_e і його заряд e . Такий радіус, що приблизно дорівнює $0,5 \cdot 10^{-10}$ м, називають **боровським радіусом**; він збігається з радіусом атома водню в основному стані.

У класичній фізиці частинка, що притягується до «кулонівського» центра, якщо вона не випромінює, може рухатися навколо цього центра по різних траєкторіях, розміри і форми яких визначаються інтегралами руху (інтегралами руху називають параметри, які не змінюються у процесі руху; повна енергія – один з них). Радіус колової траєкторії залежить тільки від енергії електрона, а рівняння $E = -e^2/2a$ описує цю залежність. Відповідно до квантової механіки дозволені не всі стани, а тільки з визначеними енергіями; є один стан (основний), перебуваючи у якому, електрон не випромінює зовсім. Крім цього основного стану з боровським радіусом a_0 , існує ряд збуджених станів, переходи між якими зумовлюють випромінювання (або поглинання) квантів світла. Коли енергія електрона порівняно велика, відстані між сусідніми рівнями дуже малі (квазінеперервний спектр) і енергетичні переходи стають схожими на безперервне «віддалення» електрона від ядра.

Оскільки електронні хвилі в атомі поширюються в трьох вимірах, графічно зобразити їх можна лише за допомогою перетинів. На рис. 3.12 показано такі перетини для двох дозволених типів хвиль (*a* і *б*) у трьох квантових системах: електрон в атомі водню 1, частинка в одновимірному обмеженому просторі 2 і квантовий осцилятор 3.

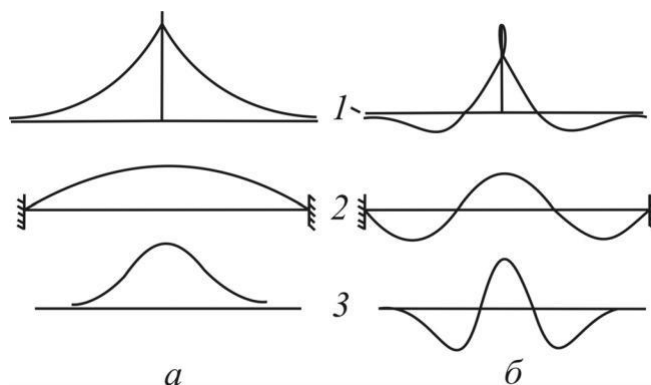


Рис. 3.12. Форми хвиль імовірності для двох станів, дозволених для електрона в атомі 1, для частинки, що рухається по прямій 2 і для гармонічного осцилятора 3

Той факт, що всі електронні хвилі в атомі й осциляторі мають «хвіст», що тягнеться на нескінченно велику відстань, показує, що електрон може мати якусь імовірність перебування у всьому просторі, але все-таки найбільш імовірно його розміщення поблизу ядра. При цьому рівні енергії електрона, що відповідають його можливим хвилям в атомі водню (на рис. 3.12, 1 показано лише дві з них), можна розташувати у вигляді ряду, як показано на рис. 3.13, б.

На відміну від рівнів енергії квантового осцилятора, що розташовані на однаковій відстані $h\nu$, відстань між рівнями енергії електрона в атомі змен-

шується зі зростанням самої енергії. Тому, набуваючи достатньої енергії, електрон може залишити атом, і тоді його енергія буде змінюватися безупинно, як показано на рис. 3.13, б,

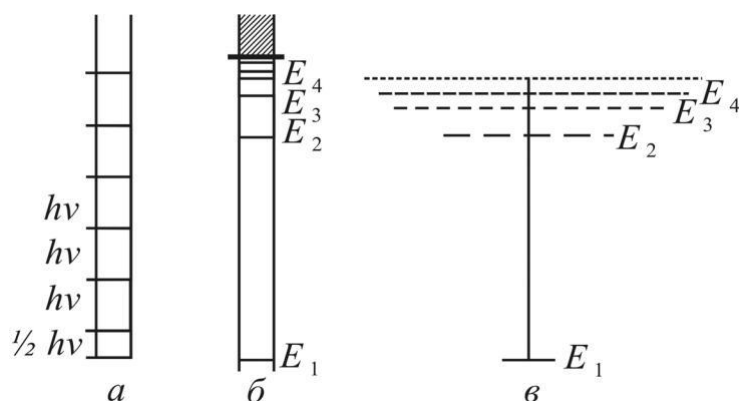


Рис. 3.13. Енергетичний спектр квантового осцилятора й атома водню: а – дозволені рівні енергії осцилятора; б – дозволені рівні енергії для електрона в атомі водню; в – дозволені стани, що відповідають цим рівням (кількість рисок)

но, як показано на рис. 3.13, б, вгору *неперервним енергетичним спектром*. При цьому за нульовий рівень відліку енергії вибирається енергія такого стану, у якому електрон дуже віддалений від ядра.

Розглянемо *порядок заповнення* електронних оболонок в атомах.

У разі взаємного зближення електрони попадають у ділянку дії магнітного поля

сусіднього електрона (незалежно від того, чи прикладено магнітне поле ззовні). Тому електрони взаємодіють один з одним так само, як взаємодіяли б два маленьких магніти. Принцип Паулі полягає в тому, що якщо два електрони перебувають у тому самому стаціонарному стані (наприклад, на одній орбіті), їхні спіни не можуть бути орієнтовані в одному напрямку, але обов'язково – у протилежному. Інакше кажучи, два електрони можуть перебувати на просторово об'єднаних орбітах і мати однакову енергію лише за умови, що їх *електростатичне відштовхування компенсоване магнітним притяганням спінових магнітних моментів* і саме ця обставина вимагає протилежних орієнтацій їхніх спінів. Три електрони уже не можна розмістити на об'єднаній орбіті і відповідно вони не можуть мати однакову енергію. Загальний наслідок принципу Паулі: в системі взаємодійних електронів кожний дозволений енергетичний стан реалізується не більше, ніж двома електронами, незалежно від кількості електронів у системі.

Стан електронів в атомах того або іншого елемента визначає його фізичні й хімічні властивості. Наприклад, хімічно нейтральний інертний газ аргон має у своїй оболонці 18 електронів, але додавання в оболонку лише одного електрона (і одного протона в ядро) перетворює аргон в атом хімічно досить активного калію.

Один з дозволених станів електрона в атомі водню відповідає найнижчому можливому значенню енергії електрона. Єдиний електрон атома водню зазвичай і перебуває саме в такому $1s^1$ стані. Однак, додаючи електрону достатню енергію ззовні, можна збудити його і перевести в інший дозволе-