


Лекція 1 з курсу  
Квантова механіка

Експериментальні причини виникнення  
квантової механіки і її ключові ідеї.

Боровий М.О., Вільчинський С.Й., Оліх О.Я. 

26 лютого 2025 р. 

## Зміст

|          |   |          |
|----------|---|----------|
| <b>1</b> | <b>Базові уявлення фізики на рубежі 19-20 століть</b>   | <b>3</b> |
| <b>2</b> | <b>Експериментальні факти, які не могли бути пояснені на основі базових уявлень фізики на рубежі 19-20 століть</b>                            | <b>4</b> |
| 2.1      | Нестійкість класичної моделі атому . . . . .  | 4        |
| 2.2      | “Парадокс коваля” . . . . .   | 5        |
| 2.3      | Проблема теплоємності кристалів . . . . .   | 5        |
| 2.4      | Лінійчастість спектру випромінювання атомів . . . . .   | 5        |
| 2.5      | Фотоефект . . . . .   | 5        |
| 2.6      | “Ультрафіолетова катастрофа” ( $\equiv$ проблема рівноважного електромагнітного випромінювання тіла, нагрітого до температури $T$ ) . . . . . | 5        |
| <b>3</b> | <b>Виникнення основних квантових уявлень</b>  | <b>6</b> |
| 3.1      | 1 крок - ідея М. Планка про дискретність випромінювання і поглинання світла. . . . .  | 6        |
| 3.2      | 2 крок - ідея про те що електромагнітне поле є набір частинок (квантів) світла . . . . .  | 9        |
| 3.3      | Кроки 3 - ідея Н.Бора про дискретність деяких фізичних величин . . . . .  | 10       |
| 3.4      | Крок 4 - ідея Луї де Бройля про хвильові властивості речовини . . . . .   | 10       |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 3.5      | Крок 5 - стан системи визначається хвильовою функцією $\Psi$ , яка не є експериментально вимірюваною величиною, має статистичну інтерпретацію і задовільняє еволюційному рівнянню . . . . . | 13        |
| <b>4</b> | <b>Квантова механіка та "здоровий глузд".</b>   | <b>14</b> |
| <b>5</b> | <b>Квантова механіка – теорія перетворень</b>   | <b>15</b> |
|          | <i>Рекомендована література по темі лекцій:</i>   |           |
| 1.       | <i>І.О. Вакарчук Квантова механіка видання 4, доповненеб 2012 р., Львів</i>   |           |
|          | Вступ. Історичний нарис створення квантової теорії. стор.13-31  |           |
| 2.       | Walter Greiner "Intro"duction in Quantum Mechanics"   |           |
|          | Chapters 1,2  |           |
|          | 3, Steven Weinberg "Lectures on Quantum Mechanics"  |           |
|          | Chapter 1. Historical Introduction  |           |

# 1 Базові уявлення фізики на рубежі 19-20 століть

Квантова механіка була створена в період 1900–1930 рр.

Виникнення квантової механіки стало наслідком неспроможності пояснити результати достатньо великої кількості різноманітних спостережуваних та експериментальних даних на основі базових уявлень фізики, які склались на той час — рубіж 19-20 століття.

- У цей період існувала впевненість у фізичній спільноті, що будь-яке явище можна пояснити на основі законів Ньютона, електродинаміки (закони Максвелла), термодинаміки та статистичної фізики.

- Існує два види матерії:

- Речовина
- Поле

- **Речовина** — форма матерії, утворена з частинок (на сучасному рівні розуміння — з ферміонів, частинок з напівцілим спіном).

- Рух речовини розглядається як рух частинок по певних **траєкторіях**.
- Траєкторію частинки можна однозначно визначити, розв'язуючи рівняння Ньютона (Лагранжа, Гільберта).
- Траєкторія частинки визначається її координатами та імпульсами (узагальненими координатами та імпульсами).
- Енергія  $E$  вільної частинки (частинки, що не знаходиться під дією зовнішніх сил або рівнодійна цих сил дорівнює нулю) маси  $m$  пов'язана з імпульсом  $p$  дисперсійним співвідношенням:

$$E = \frac{(\vec{p})^2}{2m} \quad (1)$$

- Для речовини (частинок) **нехарактерні** такі явища, як **дифракція** і **інтерференція**. Речовині притаманні **корпускулярні** властивості.

- **Поле** ( $\equiv$  електромагнітне поле)

Поле — певна область простору-часу, з діючою у кожній точці силою, що створюється речовиною (матеріальним тілом). Поле забезпечує **миттєву взаємодію** між матеріальними тілами (речовина) **на відстані**

- Поле визначається скалярною, векторною чи тензорною функцією, заданою в кожній точці простору-часу. Наприклад, електромагнітне поле може бути описано за допомогою векторів напруженості електричного  $\vec{E} = \vec{E}(t, \vec{r})$  та магнітного  $\vec{H} = \vec{H}(t, \vec{r})$  полів.
- Еволюція польових функцій визначається системою диференціальних рівнянь другого порядку в частинних похідних.
- Розв’язуючи ці рівняння (рівняння Максвелла або рівняння Ейнштейна), знаходять інтенсивності польових функцій. В розподілі інтенсивностей польових функцій проявляються характерні тільки для полів і нехарактерні для речовин явища **дифракції й інтерференції**.
- Будь-яку польову функцію можна представити у вигляді суперпозиції плоских монохроматичних хвиль, кожна з яких характеризується частотою коливань  $\omega$  і хвильовим вектором  $\vec{k}$ , пов’язаним між собою дисперсійним співвідношенням:

$$\omega = v \cdot |\vec{k}| \quad (2)$$

- Поняття “траєкторії” для польових функцій є **незастосовним**.

На основі концепцій **Матерія** і **Поле** були побудовані всі теорії спостережуваних на той момент фізичних явищ і була надана адекватна фізична інтерпретація домінуючої кількості результатів фізичних експериментів. Але була на той момент обмежена кількість експериментальних даних, які теоретичні моделі пояснити не могли. **неузгодженостей між**

## 2 Експериментальні факти, які не могли бути пояснені на основі базових уявлень фізики на рубежі 19-20 століть

### 2.1 Нестійкість класичної моделі атому

Згідно планетарній моделі атома, запропонованій Е. Резерфордом, електрони обертаються навколо ядра по близьких до колових траєкторіях. Згідно з законами класичної електродинаміки, електрон, рухаючись по коловій орбіті, рухається **пришвидщено**, а тому неперервно випромінює електромагнітні хвилі і втрачає свою енергію. Внаслідок цього, радіус орбіти, по якій рухається електрон, повинен зменшуватись і електрон

через певний проміжок часу “впаде” на ядро. “Час життя” атому мав би бути  $\sim 10^{-8}$  сек, якби все відбувалось згідно з законами класичної електродинаміки. Однак експерименти показують, що атоми є стійкими структурами.

## 2.2 “Парадокс коваля”

Згідно обчисленням, проведеним на основі класичної статистичної фізики і термодинаміки та електродинаміки, колір випромінювання тіла, яке нагрівають тім чи іншим способом, не залежить від його температури. Дослід нагрівання бруска металу (ковалем :-)) однозначно вказує на залежність кольору бруска, що розігрівають, від температури розжарювання.

## 2.3 Проблема теплоємності кристалів

Теоретичний розрахунок теплоємності кристалу, проведений на основі законів термодинаміки і статистичної фізики, вказує, що  $C_V = 3R$  ( $R$  – універсальна газова стала) і не залежить від температури. Досліди вказують на те, що  $C_V \sim T$ .

## 2.4 Лінійчастість спектру випромінювання атомів

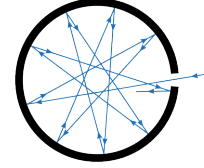
На основі класичної фізики неможливо було хоч якось пояснити лінійчатий характер спектру випромінювання атомів.

## 2.5 Фотоефект

Неможливо пояснити також і явище фотоефекту — явище “вибивання” світлом електронів з речовини (експериментально відкрите в 1888 р. Г. Герцем і О. Столетовим) — неможливо було пояснити порогові значення частоти та довжини хвилі (близьких до “червоного” світла), які відповідають межі існування фотоефекту, — світло з меншою частотою (та більшою довжиною) фотоелектрони не вибиває.

## 2.6 “Ультрафіолетова катастрофа” ( $\equiv$ проблема рівноважного електромагнітного випромінювання тіла, нагрітого до температури $T$ )

При розгляді задачі про рівноважне електромагнітне випромінювання в замкненій порожнині Релеєм і Джином, було знайдено формулу для густини енергії е.-м. випромінювання:



$$u(\omega, T)d\omega = \frac{\omega^2}{\pi^2 c^3} kT d\omega, \quad (3)$$

що приводить до розбіжності інтегральної густини

$$\rho(T) = \int_0^{+\infty} u(\omega, T)d\omega = \frac{kT}{\pi^2 c^3} \int_0^{+\infty} \omega^2 d\omega \rightarrow \infty.$$

Це означає, що рівновага між матеріальним тілом, стінки якого мають температуру  $T$ , та електромагнітним випромінюванням могла б наступити тільки при нескінченній густині випромінювання, що різко суперечить експериментальним спостереженням. Знайдене співвідношення для  $u(\omega, T)$  добре описує експеримент тільки для малих частот, а отже, маємо ‘ультрафіолетову катастрофу’.

### 3 Виникнення основних квантових уявлень

#### 3.1 1 крок- ідея М. Планка про дискретність випромінювання і поглинання світла.

У 1900 р. Макс Планк інтуїтивно знайшов спосіб як вирішити проблему “ультрафіолетової катастрофи”.

Що знав М. Планк і інші фізики про випромінювання абсолютно чорного тіла (АЧТ)?

1. Закон Релея-Джинса про спектральну густину енергії випромінювання електромагнітного поля  $u(\omega, T)d\omega = \frac{\omega^2}{\pi^2 c^3} kT d\omega$ , який добре описує густину енергії випромінювання АЧТ для невеликих значень частот  $\omega$ , але цей закон генерує “ультрафіолетову” катастрофу для великих значень частоти.
2. Закони Кіргхофа  $E = f(T)$  і Стефана-Больцмана  $\rho(T) = \int u(\omega, T)d\omega \sim T^4$  — густина випромінювання АЧТ пропорційна температурі АЧТ в четвертому степені.



Закон Віна:

???? (тут  $\alpha$  – емпірична стала)

$$u(\omega, T) = \text{const} \cdot \omega^3 e^{-\frac{\alpha\omega}{T}} \quad (4)$$

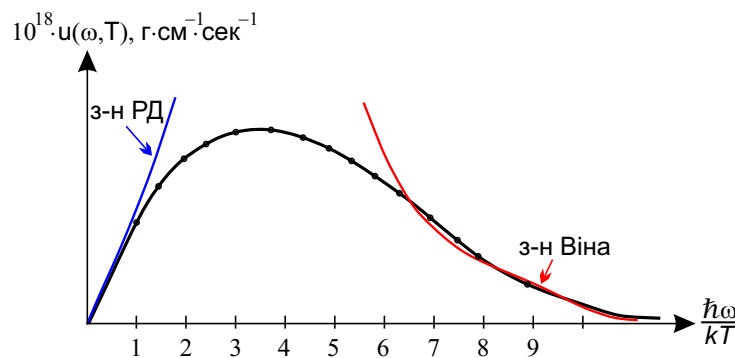
Закон Віна добре описує густину енергії випромінювання при  $\omega \rightarrow \infty$ , але є помилковим (і теоретично, і не узгоджується з експериментом) при  $\omega \rightarrow 0$ .

М. Планк, моделюючи набір незалежних гармонічних осциляторів і ввівши гіпотезу про електромагнітну ентропію, вгадав формулу для спектральної густини:

$$u(\omega, T) = \frac{\omega^2}{\pi^2 c^3} \frac{\hbar \omega}{e^{\frac{\hbar \omega}{kT}} - 1} \quad (5)$$

де  $\hbar = 1.02 \times 10^{-27} \text{ г} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{сек}^{-1}$  — стала Планка.

Це співвідношення дуже добре узгоджувалось з експериментальною спостережуваними даними по спектральному випромінюванню АЧТ.



При  $\omega \rightarrow 0$  закон Планка переходить в закон Стефана-Больцмана:

$$u(\omega, T)d\omega = \frac{\omega^2}{\pi^2 c^3} \frac{\hbar \omega}{e^{\frac{\hbar \omega}{kT}} - 1} d\omega \underset{\omega \rightarrow 0}{\simeq} \frac{\omega^2}{\pi^2 c^3} \frac{\hbar \omega d\omega}{1 + \frac{\hbar \omega}{kT} - 1} = \frac{\omega^2}{\pi^2 c^3} kT d\omega$$

закон СВ

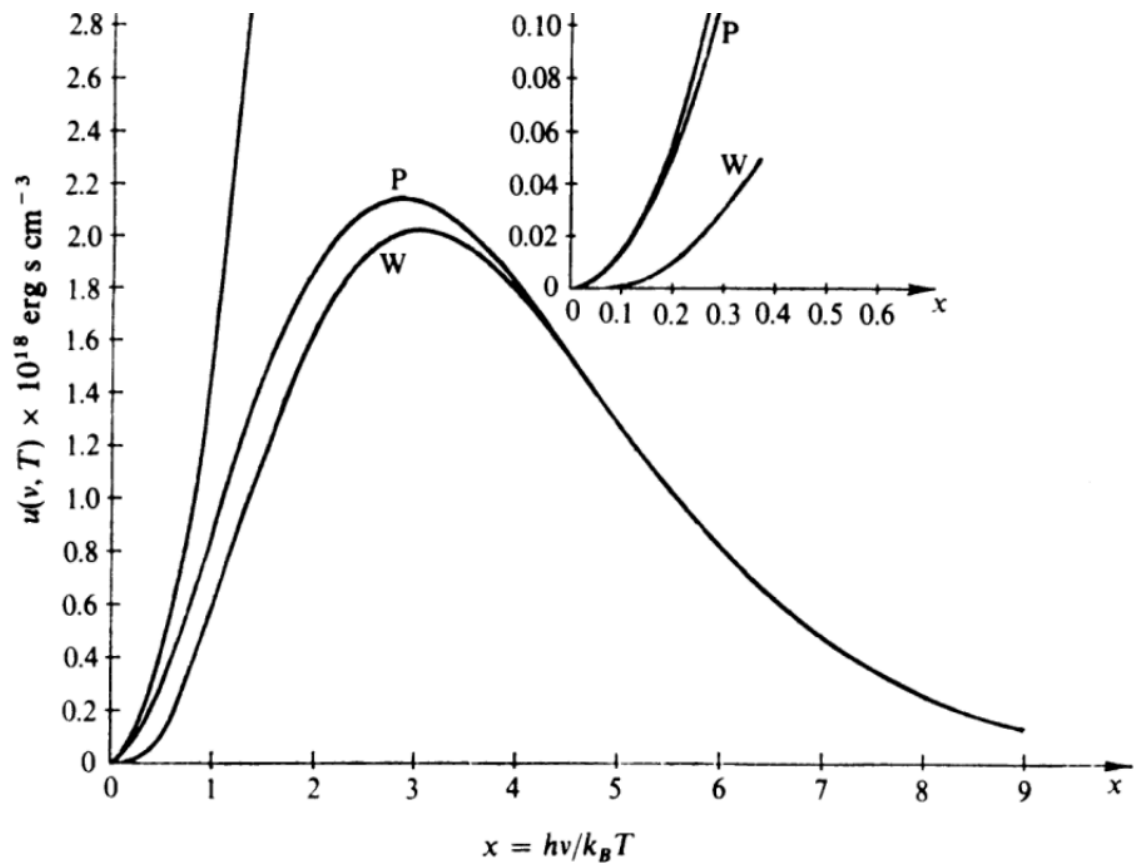
При  $\omega \rightarrow \infty$ :

$$u(\omega, T) = \frac{\omega^2}{\pi^2 c^3} \frac{\hbar \omega}{e^{\frac{\hbar \omega}{kT}} - 1} \simeq \frac{\hbar}{\pi^2 c^3} \omega^3 e^{-\frac{\hbar \omega}{kT}}$$

закон Віна

$$\begin{aligned} \rho(T) &= \int_0^{+\infty} \frac{\omega^2}{\pi^2 c^3} \frac{\hbar \omega}{e^{\frac{\hbar \omega}{kT}} - 1} d\omega = \left| \frac{\hbar \omega}{kT} = z, \omega = \frac{kTz}{\hbar}, d\omega = \frac{kT}{\hbar} dz \right| = \\ &= \frac{1}{\pi^2 c^3} \left( \frac{kT}{\hbar} \right)^4 \int_0^{+\infty} \frac{z^3 dz}{e^z - 1} = 7.66 \cdot 10^{-15} T^4 \frac{\text{ерг}}{\text{см}^3} \end{aligned}$$

закон Стефана-Больцмана



**Fig. 1.1.** A comparison of the Wien (W), Rayleigh-Jeans (RJ) and Planck (P) laws for  $T = 300 \text{ K}$



Основна заслуга Планка полягає не в тому, що ним було усунено “ультрафіолетову катастрофу”, а в тому, що він для вирішення цієї проблеми, виходячи з експериментально встановленої лінійчастості спектрів атомів та молекул і використовуючи ідею Л. Больцмана про пропорційність ентропії до кількості станів, однозначно показав, що для теоретичного обґрунтування вгаданої ним формули необхідно припустити, що світло випромінюється і поглинається **дискретно**, порціями, пропорційними частоті  $\hbar\omega$ ,  $2\hbar\omega$ ,  $3\hbar\omega$ , ...,  $n\hbar\omega$ .

### 3.2 2 крок - ідея про те що електромагнітне поле є набір частинок (квантів) світла

А. Ейнштейн 1905, теорія фотоефекту:

$$\hbar\omega = A + \frac{mv^2}{2} \equiv \text{основна ідея -}$$

**квантові ефекти при сприйнятті світла як такого.**

Ейнштейн показав, що для пояснення явища фотоефекту електромагнітне поле потрібно розглядати не як хвилю, а як набір частинок (квантів) світла (пізніше їх назвуть фотонами), кожен з яких має енергію  $E = \hbar\omega$  і імпульс  $\vec{p} = \hbar\vec{k}$ .

Іншими словами, Ейнштейн показав, що плоску монохроматичну хвилю, яка характеризується частотою  $\omega$  і хвильовим вектором  $\vec{k}$ , можна інтерпретувати як частинку з енергією  $\hbar\omega$  і імпульсом  $\vec{p} = \hbar\vec{k}$ . В силу  $E^2 = p^2c^2 + m^2c^4$  і  $\omega = c|\vec{k}|$ , приходимо до висновку, що маса цієї частинки  $m = 0$  ( $\hbar^2\omega^2 = c^2\hbar^2|\vec{k}|^2 + m^2c^4 = \hbar^2\omega^2 + m^2c^4 \rightarrow m = 0$ ).

Якщо така гіпотеза справедлива, то світло при розсіянні на вільному електроні повинно змінювати свою частоту (нагадаємо, що згідно з законами класичної електродинаміки частота світла при розсіянні на вільному електроні не змінюється). Процес розсіяння фотона з енергією  $\hbar\omega$  і імпульсом  $\hbar\vec{k}$  повинен відбуватись згідно з законом збереження енергії і імпульсу

$$\begin{cases} m_e c^2 + \hbar\omega = \sqrt{m_e^2 c^4 + p^2 c^2} + \hbar\omega', \\ \hbar\vec{k} + \vec{v} = \hbar\vec{k}' + \vec{p} \end{cases} \Rightarrow \dots$$

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = \frac{\omega - \omega'}{\omega} = \frac{1}{1 + \frac{m_e c^2}{2\hbar\omega \sin^2 \theta/2}}, \quad (\theta - \text{кут розсіяння, } m_e - \text{маса електрона}) \quad (6)$$

ефект Комптона  $\text{При } m_e c^2 \gg \hbar\omega \quad \frac{\Delta\omega}{\omega} \rightarrow 0.$

$$m_e c^2 \simeq 10^4 \text{ електронвольт.}$$

Для видимого діапазону частот  $\omega \sim 1 \text{ eV}$ , тому при розсіянні світла на вільному електроні частота практично не змінюється. Але при розсіянні рентгенівського випромінювання ( $\hbar\omega \sim 10^4 \text{ eV}$ )  $\frac{\Delta\omega}{\omega} \neq 0$ . Досліди Комптона підтвердили правильність гіпотези А. Ейнштейна про те, що поле можна розглядати як набір частинок. Іншими словами, **полю притаманні корпускулярні властивості!!!**

1907 р. А. Ейнштейн, П. Дебай — на основі ідеї про те, що електромагнітна хвиля є потік частинок, пояснили теплоємність кристалів.

### 3.3 Кроки 3 - ідея Н.Бора про дискретність деяких фізичних величин

1913 р. — постулати Н. Бора про дискретність можливих значень енергії електрона в атомі, що пояснює лінійчастість спектру атомів та молекул  
??????

### 3.4 Крок 4 - ідея Луї де Бройля про хвильові властивості речовини

!!! гіпотеза де Бройля:

якщо світлу (хвилям, полю) притаманні корпускулярні властивості, то речовині (частинкам) притаманні хвильові властивості.

Хвиля де Бройля

Будь-якій частинці (матеріальному об'єкту) з імпульсом  $\vec{p}$  ставимо у відповідність хвилю  $\lambda_{dB}$ . Експерименти Девіссона, Джермера, Томсона відкрили явище дифракції електронів на кристалічній ґратці, підтвердивши гіпотезу де Бройля.

Довжина хвилі де Бройля

$$\lambda_{dB} = \frac{\hbar}{p} = \frac{h}{2\pi p} \quad (8)$$

є важливою характеристикою для встановлення того, які закони фізики -класичної механіки чи квантової механіки, треба застосовувати для опису стану фізичної системи. Більш точно, враховуючи, що закони квантової механіки не відміняють справедливості законів класичної фізики, порівняння довжини хвилі де Бройля з характерними розмірами системи дає відповідь на питання, чи достатньо для адекватного опису фізичного

об'єкту застосувати класичну фізику, чи є потреба застосовувати все ж квантову механіку:

- якщо характерні розміри фізичної системи  $l$  є такими, що  $l \gg \lambda_{\text{дВ}}$ , то достатньо класичної фізики
- якщо  $l \lesssim \lambda_{\text{дВ}}$ , то є потреба використовувати квантову механіку.

Приклад 1 – атом водню.

Характерний розмір атому водню

$$l_{\text{Н}} \sim 10^{-8} \text{ см.} \quad (9)$$

Довжина хвилі де Бройля атому водню при температурі  $T = 293\text{K}$

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{дВ}} &= \frac{\hbar}{mv} = \left\| \frac{mv^2}{2} = kT \right\| \\ &= \frac{\hbar}{\sqrt{2mkT}} = \left\| m_{\text{Н}} = 1.67 \cdot 10^{-24} \text{ г} \quad T \sim 300\text{K} \right\| \\ &= 1.8 \cdot 10^{-8} \text{ см} \end{aligned} \quad (10)$$

$\Downarrow$

$$\lambda_{\text{дВ}} = 1.8 \cdot 10^{-8} \text{ см} > l_{\text{Н}} = 10^{-8} \text{ см},$$

тому для опису атому водню необхідно застосовувати квантовомеханічні принципи.

Приклад 2 – рідкий гелій-4 ( $\text{He}^4$ ).

$\text{He}^4$  перетворюється з газоподібного стану в рідину при температурі  $T = 4.2\text{K}$ .

В інтервалі температур  $4.2\text{K} > T > 2.17\text{K}$  властивості рідини  $\text{He}^4$  добре описуються рівняннями **класичної** гідродинаміки. Ці властивості дуже схожі на властивості інших класичних рідин (в'язкі рідини). При  $T = 2.17\text{K}$  у  $\text{He}^4$  відбувається фазовий перехід другого роду, (по суті рідина з класичного стану переходить в квантовий стан)

В інтервалі температур  $2.17\text{K} < T < 0\text{K}$  фізичні властивості рідини  $\text{He}^4$  є суттєво іншими-рідина втрачає вязкість і стає надплинною (при  $T > 2.17\text{K}$  вязкість відмінна від нуля). Виявилось, що при  $T < 2.17\text{K}$  для опису властивостей рідини  $\text{He}^4$  необхідно застосовувати квантово-механічні принципи.

Причина цього в тому, що в інтервалі  $4.2\text{K} < T < 2.17\text{K}$  довжина хвилі де Бройля менша за середню відстань між атомами гелію в рідині, а в інтервалі  $T < 2.17\text{K}$  – навпаки,  $\lambda_{\text{дВ}} > l$ . Дійсно, характерна довжини  $l$  рідкого гелію є середня відстань між атомами рідини, яка визначається так:

$$l = \frac{1}{n^{1/3}}, \quad (11)$$

де  $n = \sqrt{\rho/m_{He}}$  – концентрація атомів гелію в рідині. Тут  $\rho = 0.15$  г/см<sup>3</sup> – густина рідини  $He^4$ , яка практично не змінюється в інтервалі  $4.2K < T < 0K$ ;  $m_{He} \cong 10^{-23}$  г. Підставивши дані чисельні значення в (11), отримуємо

$$l = \left(\frac{m}{\rho}\right)^{1/3} = \left(\frac{10^{-23} \text{ г}}{0.15 \text{ г/см}^3}\right)^{1/3} \cong 4 \cdot 10^{-8} \text{ см.} \quad (12)$$

Довжина хвилі де Бройля:

- при  $T = 4K$ , див. (12),

$$\lambda_{dB} = \frac{\hbar}{\sqrt{2mkT}} \cong 3 \cdot 10^{-8} \text{ см} < l \Rightarrow \text{рідина класична} \quad (13)$$

- при  $T = 2K$ , див. (12),

$$\lambda_{dB} = \frac{\hbar}{\sqrt{2mkT}} \cong 4.2 \cdot 10^{-8} \text{ см} > l \Rightarrow \text{рідина **квантова!**} \quad (14)$$

Явище надплинності бозе-рідини  $He^4$  є проявом квантовомеханічних закономірностей на **макроскопічному** рівні.

Квантовомеханічні закономірності притаманні не лише на просторових масштабах атомів та елементарних частинок  $l \lesssim 10^{-8}$  см. Ці закономірності можуть проявлятися і на макроскопічних масштабах.

Важливою характеристикою також є **комптонівська** довжина хвилі

$$\lambda_C = \frac{\hbar}{mc}, \quad (15)$$

де  $c$  – швидкість світла.

Із виразів для довжин хвилі де Бройля (8) та комптонівської (15) отримуємо, що

$$\lambda_C \leq \frac{\hbar}{mv} = \lambda_{dB}. \quad (16)$$

Для процесів, просторовий масштаб яких є  $\sim \lambda_C$ , або часовий масштаб є порядку комптонівського

$$t_C = \frac{\lambda_C}{c} = \frac{\hbar}{mc^2}, \quad (17)$$

потрібно використовувати закони не нерелятивістської квантової механіки, а **релятивістської** квантової механіки (більш точно – квантової теорії поля).


Наприклад, в атомі водню ефекти, пов'язані з вкладом вакуумних ефектів до спектру системи, проявляються на масштабах  $\sim \lambda_C$ . Особливо яскраво це демонструє мюонний водень (атом водню, утворений протоном і мюоном), в якому борівський радіус мюона  $\sim \lambda_C$ .

Слід зазначити, що загалом квантовомеханічні закономірності притаманні не лише мікросвіту (просторові масштаби  $\lesssim 10^{-8}$  см), але й макросвіту (явище надплинності  $He^4$  і  $He^3$ , надпровідності, бозе-ейнштейнівського конденсації, когерентне випромінювання). Більш того, навіть на космологічних масштабах є “квантові” об’єкти (нейтронні зорі, чорні діри).

В 1915-1920 роках стало очевидним, що фізичний світ, в якому ми живемо, є **релятивістським** (с -швидкість світла) , **квантовим** ( $\hbar$  -стала Планка) **гравітаційним** (G-стала гравітаційної взаємодії).

Більш того, поряд із великою кількістю макроскопічних фізичних явищ (лазери, надплинність, надпровідність, квантування потоку магнітного поля, квантові вихори, нейтронні зорі, БЕК, чорні діри) існують гіпотези про те, що й людська свідомість також є макроскопічним **квантовим явищем** (ідея Пенроуза).

### 3.5 Крок 5 - стан системи визначається хвильовою функцією $\Psi$ , яка не є експериментально вимірюваною величиною, має статистичну інтерпретацію і задовільняє еволюційному рівнянню

1924-1930 рр. В. Гейзенберг, Е. Шредінгер,  П. Дірак математично сформулювали основні рівняння і принципи квантової механіки.

**Важливо!** На відміну від класичної механіки, електродинаміки, основні рівняння квантової механіки не можуть бути сформульовані на основі узагальнення експериментальних фактів. Причина цього полягає в тому, що на відміну від “класичних” рівнянь, які записуються відносно спостережуваних величин, основні рівняння квантової механіки (рівняння Шредінгера, Паулі, Дірака, Дайсона-Швінгера) записуються відносно величини, яка **не є спостережуваною експериментально**.

Дві ключові ідеї квантової механіки такі:





1. Випромінювання АЧТ, фотоефект, лінійчатий спектр випромінювання атомів пояснюються на ідеї **про дискретність** фізичних величин  $\equiv$  **ідеї квантування**.
2. ідея про корпускулярно-хвильовий дуалізм: будь-якому матеріальному об’єкту притаманні і корпускулярні, і хвильові властивості.

Але (!!!) експериментально себе проявляють або хвильові, або корпускулярні властивості. Одночасно вони себе ніколи не проявляють.

## 4 Квантова механіка та "здоровий глузд".

*Квантова механіка суттєво відрізняється від класичної (доквантової) механіки. Ідейно квантова механіка влаштована інакше, ніж класична механіка.*

Приклади загальних положень, які чудово “працювали” століттями в класичній фізиці, і які перестали бути вірними в квантовій механіці:

1. Точкова частинка знаходиться в деякій єдиній точці простору в довільний момент часу. Якщо це не так, то це не точкова частинка!
2. Якщо провести над системою вимірювання, то ми станемо краще знати, в якому стані ця система знаходиться, якщо міряти достатньо довго. 
3. Вимірювання можна провести як завгодно точно (в принципі, жодних обмежень немає). 
4. Якщо вимірювання, проведене над системою, приводить до якогось результату ( $\equiv$  система має якусь певну властивість), то таке ж вимірювання над іншою такою ж системою дасть точно такий же результат. 
5. Для того, щоб стан системи змінився, потрібно, щоб система провзаємодіяла із “чимось”.
6. Стани всіх підсистем однозначно визначають стан системи, яку ці підсистеми утворюють.
7. Наука є об’єктивною – при вивченні довільного явища можна відкинути суб’єкт, який це явище вивчає. 

**Усі ці твердження у квантовій механіці не працюють.**

«Не працюють» не означає, що це «взагалі» невірні твердження. У своїй області застосовності (в класичній фізиці) вони працюють чудово, але не в квантовій механіці. Ці твердження виявилися не фундаментальними властивостями природи або проявами «здорового глузду», а феноменологічними узагальненнями з дуже широкою, але все таки обмеженою областю застосовності.

Ці складнощі пов'язані зі структурою квантової теорії, в якій, як і в інших неklasичних теоріях, аналіз процесу вимірювання грає принципову роль і дозволяє або змушує відмовитися від деяких звичних, але принципово неспостережуваних понять.

## 5 Квантова механіка – теорія перетворень

Дві ключові ідеї квантової механіки є такі:

1. **Дискретність значень фізичних величин** *Лінійчатий спектр випромінювання атомів, спектр випромінювання абсолютно чорного тіла, фотоефект можуть бути пояснені на основі припущення про дискретність фізичних величин*



2. **Корпускулярно-хвильовий дуалізм** *Будь-якому фізичному об'єкту притаманні і корпускулярні і хвильові властивості. Але експериментально можуть проявлятися або корпускулярні, або хвильові властивості. Одночасно корпускулярні і хвильові властивості проявляти себе експериментально не можуть.*

На відміну від класичної механіки, електродинаміки, загальної теорії відносності основні закони квантової механіки не можуть бути сформульовані як узагальнення емпіричних фактів. Причина цього в тому, що на відміну від основних рівнянь класичної механіки, електродинаміки, загальної теорії відносності основні рівняння, які записуються відносно **спостережуваних на досліді величин**, всі рівняння квантової теорії записуються відносно **званої хвильової функції** (вектор у гільбертовому просторі), яка **не спостережуваною!**

Одна з основних ідей квантової механіки полягає в тому, що, за своєю суттю, **квантова механіка – це теорія перетворень систем із одного стану в інший, але на відміну від класичної фізики, в квантовій механіці прослідкувати процес перетворення неможливо.**

Наприклад, у класичній фізиці частинка з точки  $A$  в точку  $B$  потрапляє, рухаючись по певній (конкретній) траєкторії, див. Рис. 1.

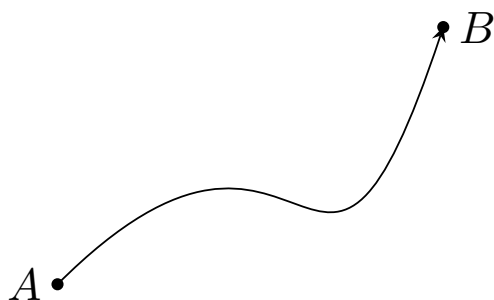


Рис. 1: Перехід з точки  $A$  в точку  $B$  згідно класичної фізики

У квантовій механіці при аналізі процесу переходу частинки з точки  $A$  в точку  $B$  приходять до висновку про те, що частинка може потрапити в точку  $B$  по всіх можливих траєкторіях, за допомогою яких можна з'єднати точки  $A$  та  $B$ , див. Рис. 2.

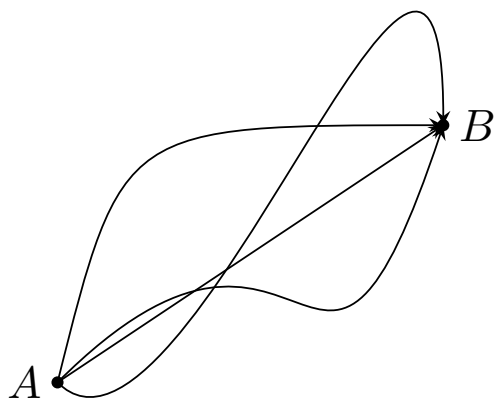



Рис. 2: Перехід з точки  точку  $B$  згідно квантової механіки



Тобто, якщо перетворення може відбуватися різними способами, і ми не можемо ці способи розрізняти між собою, то реалізуються всі способи одночасно; всі способи дають вклад.



Перелічимо деякі важливі випадки перетворень:

1. Будь-який фізичний процес - перетворення системи з початкового стану в кінцевий.
2. Розпад елементарної частинки, або радіоактивного ядра - це перетворення. Частинка, що розпадається, може не містити в собі чогось схожого на продукти розпаду, в які вона перетворюється в деякий момент часу (момент точно не визначений і взагалі «розмитий» в часі). Приклад- розпад нейтрона на протон, електрон і антинейтрино:  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$
3. Осциляції нейтрино (аналогічно осциляції кварків) - процес взаємперетворення різних сортів нейтрино один в одного.
4. Фундаментальні перетворення - це елементарні перетворення, на які можуть бути розкладені всі інші, більш складні перетворення. Стандартні «4 фундаментальні взаємодії» - це ті фундаментальні перетворення, які змінюють число частинок, є й інші фундаментальні перетворення, які число часток не змінюють (приклад див. Наступний пункт).
5. Важливе фундаментальне перетворення - перетворення елементарної частинки в себе зі зміною координат або без зміни імпульсу (не забуваємо, що координата і імпульс одночасно не можуть бути визначені).
6. Якщо процес (перетворення) може відбуватися різними способами (наприклад, процес може бути різними способами розкладений на фундаментальні взаємодії), і ми не можемо ці способи розрізні між собою, то реалізуються всі способи одночасно, тобто всі способи дають внесок в процес.

