

## Розділ 6. Квантова фізика

### Квантова природа випромінювання

$R_e = \frac{\Phi_e}{S} = \frac{1}{S} \frac{dW_e}{dt}$  – енергетична світність (випромінюваність) тіла;  $\Phi_e$  – світловий потік випромінювання;  $S$  – площа поверхні, яка випромінює світло;  $W_e$  – енергія, яку випромінює поверхня за час  $dt$ .

$r_{\lambda,T} = \frac{dR_e}{d\lambda}$  – випромінювальна здатність або спектральна густина енергетичної світності  $R_{\lambda,T}$ , яка характеризує розподіл енергії в спектрі випромінювання за довжинами хвиль;  $R_e$  – енергетична світність, яка припадає на інтервал довжин хвиль від  $\lambda$  до  $\lambda+d\lambda$ .

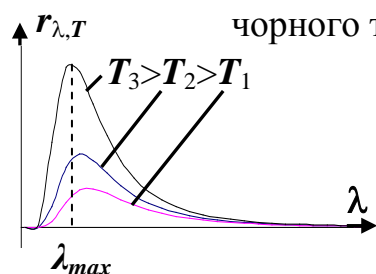
$R_e = \int_0^{\infty} r_{\lambda,T} d\lambda$  – зв'язок між енергетичною світністю  $R_e$  і випромінювальною здатністю тіла

$\alpha_{\lambda,T} = \frac{\Phi_n}{\Phi_e}$  – поглинальна здатність тіла – відношення поглинутого світлового потоку  $\Phi_n$  до світлового потоку, що падає на дану поверхню  $\Phi_e$ . Якщо  $\alpha_{\lambda,T} = 1$ , то тіло має назву **абсолютно чорного тіла**.

$\frac{r_{\lambda,T}}{\alpha_{\lambda,T}} = f(\lambda, T)$  – Закон Кірхгофа: відношення випромінювальної здатності тіла до його поглинальної здатності не залежить від природи тіла і є функцією довжини хвилі і температури.

$R_e = \sigma T^4$  – закон Стефана-Больцмана;  $R_e$  енергетична світність (випромінюваність) чорного тіла;  $\sigma$  – стала Стефана-Больцмана;  $T$  – термодинамічна температура.

$\lambda_m = \frac{b}{T}$  – закон зміщення Віна;  $\lambda_m$  – довжина хвилі, що відповідає максимальному значенню випромінювальної здатності абсолютно чорного тіла;  $b$  – стала зміщення закону Віна.



На рисунку показані випромінювальної здатності абсолютно чорного тіла від довжини хвилі і температури. Ці залежності одержані експериментально.

$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$  – енергія кванта (формула Планка);  $h$  – стала Планка;  $\nu$  – частота випромінювання;  $\lambda$  – довжина хвилі випромінювання.

$r_{\lambda,T} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$  – формула Планка для функції Кірхгофв або випромінювальної здатності абсолютно чорного тіла;  $k$  – стала Больцмана;  $T$  – термодинамічна температура;  $h$  – стала Планка.

$E = h\nu = A_{вих} + \frac{m\nu_{max}^2}{2}$  – рівняння Ейнштейна для зовнішнього фотоефекту;  $A_{вих}$  – робота виходу електрона з металу.

$\nu_0 = \frac{A}{h}$  – «червона межа» фотоефекту для металу;  $\lambda_0$  – максимальна довжина хвилі випромінювання, при якій фотоефект ще можливий.

$m_\phi = \frac{E}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2}$  – маса фотона, енергія якого дорівнює  $h\nu$ .

$p_\nu = \frac{h\nu}{c}$  – імпульс фотона, енергія якого дорівнює  $h\nu$ .

$p = \frac{E_e}{c}(1 + \rho) = \omega(1 + \rho)$  – тиск, який чинить світло при нормальному падінні на поверхню;  $E_e = N h\nu$  – опромінюваність поверхні (енергія всіх фотонів, що падають на одиницю поверхні за одиницю часу);  $\rho$  – коефіцієнт відбивання;  $\omega$  – об'ємна густина енергії випромінювання.

### **Ефект Комптона**

Ефект Комптона полягає в тому, що при падінні на речовину рентгенівського випромінювання з довжиною хвилі  $\lambda$  розсіяне випромінювання має більшу довжину хвилі  $\lambda'$ , причому різниця  $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$  не залежить від довжини падаючого світла і природи розсіювання випромінювання.

$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \lambda_C(1 - \cos\theta)$  – зміна довжини хвилі рентгенівського випромінювання при комптонівському розсіюванні;  $\theta$  – кут розсіювання;  $\lambda_C$  – комптонівська довжина хвилі.

### **Рентгенівське випромінювання**

$\lambda_{min} = \frac{ch}{eU}$  – короткохвильова границя суцільного рентгенівського спектру;  $e$  – заряд електрона;  $U$  – різниця потенціалів, прикладена до рентгенівської трубки;  $h$  – стала Планка.

$$\nu = R(Z - \sigma)^2 \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$
 – закон Мозлі, який визначає частоти спектральних ліній характеристичного рентгенівського випромінювання;  $R$  – стала Рідберга;  $Z$  – порядковий номер елемента в періодичній системі;  $\sigma$  – стала екранування;  $m$  – визначає рентгенівську серію ( $m=1, 2, 3, \dots$ );  $n$  – визначає окремі лінії відповідної серії ( $n=m+1, m+2, \dots$ ).

### Елементи квантової механіки

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m\nu}$$
 – зв'язок де-бройлівської довжини хвилі частинки з імпульсом  $p$ ;  $m$  – маса частинки,  $\nu$  – швидкість,  $h$  – стала Планка.

$$\Delta x \Delta p_x \geq h,$$

$$\Delta y \Delta p_y \geq h,$$

$$\Delta z \Delta p_z \geq h$$
 – співвідношення невизначеностей для координат та імпульсу частинки;  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  – невизначеність координат;  $\Delta p_x, \Delta p_y, \Delta p_z$  – невизначеність відповідних проекцій імпульсу частинки на осі координат.

$$\Delta E \Delta t \geq h$$
 – співвідношення невизначеностей для енергії та часу;  $\Delta E$  – невизначеність енергії цього квантового стану;  $\Delta t$  – час, який система перебуває в цьому стані.

$$dW = \Psi \Psi^* dV = |\Psi|^2 dV$$
 – імовірність знаходження частинки в об'ємі  $dV$ ;  $\Psi = \Psi(x, y, z, t)$  – хвильова функція, яка описує стан частинки;  $\Psi^*$  – функція, комплексно спряжена з  $\Psi$ ;  $|\Psi|^2 = \Psi \Psi^*$  – квадрат модуля хвильової функції.

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\Psi|^2 dV = 1$$
 – умова нормування ймовірностей; інтегрування виконується по всьому нескінченному простору, тобто по координатах  $x, y, z$  від  $-\infty$  до  $+\infty$ .

$$W = \int_{x_1}^{x_2} |\Psi(x)|^2 dx$$
 – імовірність знаходження частинки в інтервалі від  $x_1$  до  $x_2$ .

$$\Delta \psi + \frac{2m}{h^2} (E - U) \psi = 0$$
 – рівняння Шредінгера для стаціонарних станів;  $\psi = \psi(x, y, z)$  – координатна частина хвильової функції;  $E$  – повна енергія частинки;  $U = U(x, y, z)$  – потенціальна енергія частинки.

### Теорія атому водню за Бором

$m_e \mathbf{v} r_n = n \hbar$ , – перший постулат Бора (постулат стаціонарних станів);  
 ( $n=1, 2, 3, \dots$ )  $m_e$  – маса електрона;  $\mathbf{v}$  – швидкість електрона на  $n$ -й орбіті  
 радіусом  $r_n$ .

$h\nu = E_n - E_m$  – другий постулат Бора (правило частот);  $E_n$  і  $E_m$  – енергія  
 стаціонарних станів до і після випромінювання (поглинання).

$U(r) = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r}$  – потенціальна енергія  $U(r)$  взаємодії електрона з ядром у воднеподіб-  
 ному атомі;  $r$  – відстань між електроном і ядром;  $Z$  – порядковий номер  
 елемента;  $\epsilon_0$  – електрична стала.

$E_n = -\frac{1}{n^2} \cdot \frac{Z^2 m_e e^4}{8h^2 \epsilon_0^2}$  – енергія електрона на  $n$ -й стаціонарній орбіті.

### *Лінійчатий спектр атома водню*

$\nu = R \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$  – узагальнена формула Бальмера, яка визначає частоту  $\nu$   
 спектральних ліній у спектрі атома водню;

$R=3,29 \cdot 10^{15} \text{ c}^{-1}$  – стала Рідберга;  $m$  визначає серію ( $m=1, 2, 3, \dots$ );  $n$  визна-  
 чає окремі лінії, що відповідають серії ( $n=m+1, m+2, \dots$ ).

### *Квантова теорія атома водню*

$L_l = \hbar \sqrt{l(l+1)}$  – момент імпульсу (механічний момент) електрона;  $l$  – ор-  
 бітальне квантове число, яке приймає при заданому  $n$  такі  
 значення:  $l=0, 1, \dots, (n-1)$  (усього  $n$  значень).

$L_{lz} = \hbar m_l$  – проекція моменту імпульсу електрона на напрямок  $z$  зовніш-  
 нього магнітного поля;  $m_l$  – магнітне квантове число, яке приймає  
 при заданому  $l$  такі значення:  $m_l=0, \pm 1, \dots, \pm l$  (всього  $(2l+1)$  зна-  
 чень).

$L_s = \hbar \sqrt{s(s+1)}$  – спін (власний механічний момент імпульсу) електрона;  $S$   
 – спінове квантове число ( $S=1/2$ ).

$L_{sz} = \hbar m_s$  – проекція спіну на напрям  $z$  зовнішнього магнітного поля;  $m_s$  –  
 магнітне спінове квантове число ( $m_s=\pm 1/2$ ).

$Z(n, l, m_l, m_s) = 0$  або  $1$  – принцип Паулі;  $Z(n, l, m_l, m_s)$  – число елект-  
 ронів, що знаходяться в квантовому стані, який опису-  
 ється набором чотирьох квантових чисел:  $n$  – головно-  
 го,  $l$  – орбітального,  $m_l$  – магнітного,  $m_s$  – магнітного  
 спінового.