

Лекція № 11

**Тиск світла. Теплове і
рентгенівське
випромінювання**

План лекції

1. Досліди Лебедева.
2. Рентгенівське випромінювання.
3. Ефект Комптона.
4. Рівноважне випромінювання та його характеристики.
5. Закони теплового випромінювання.
6. Оптична пірометрія.(самостійно)

1. Тиск світла. Досліди Лебедеєва

$$dK_n = nh\nu dt \cos^2 \alpha$$

- нормальна складова імпульсу фотона, що падає на на площадку dS за час dt

$$p = \frac{dF}{dS} = nh\nu(1 + \rho)\cos^2 \alpha$$

- тиск світла

ρ

- коефіцієнт дзеркально відбивання

При $\rho = 0,5$ тиск світла $0,000007\text{Па}$

Наслідки дії сили тиску:

1. Утворення хвостів комет
2. Незаплановане обертання супутників Землі.
3. Прискорення частинок лазерним променем.
4. При розгляді гравітаційної взаємодії частинок (гравітаційна - пропорційна кубу радіусу частинки, а тиск світла - квадрату частинки)

2. Рентгенівське



$$\lambda = 7 \cdot 10^{-5} \text{ мкм}$$

Довжина рентгенівської хвилі



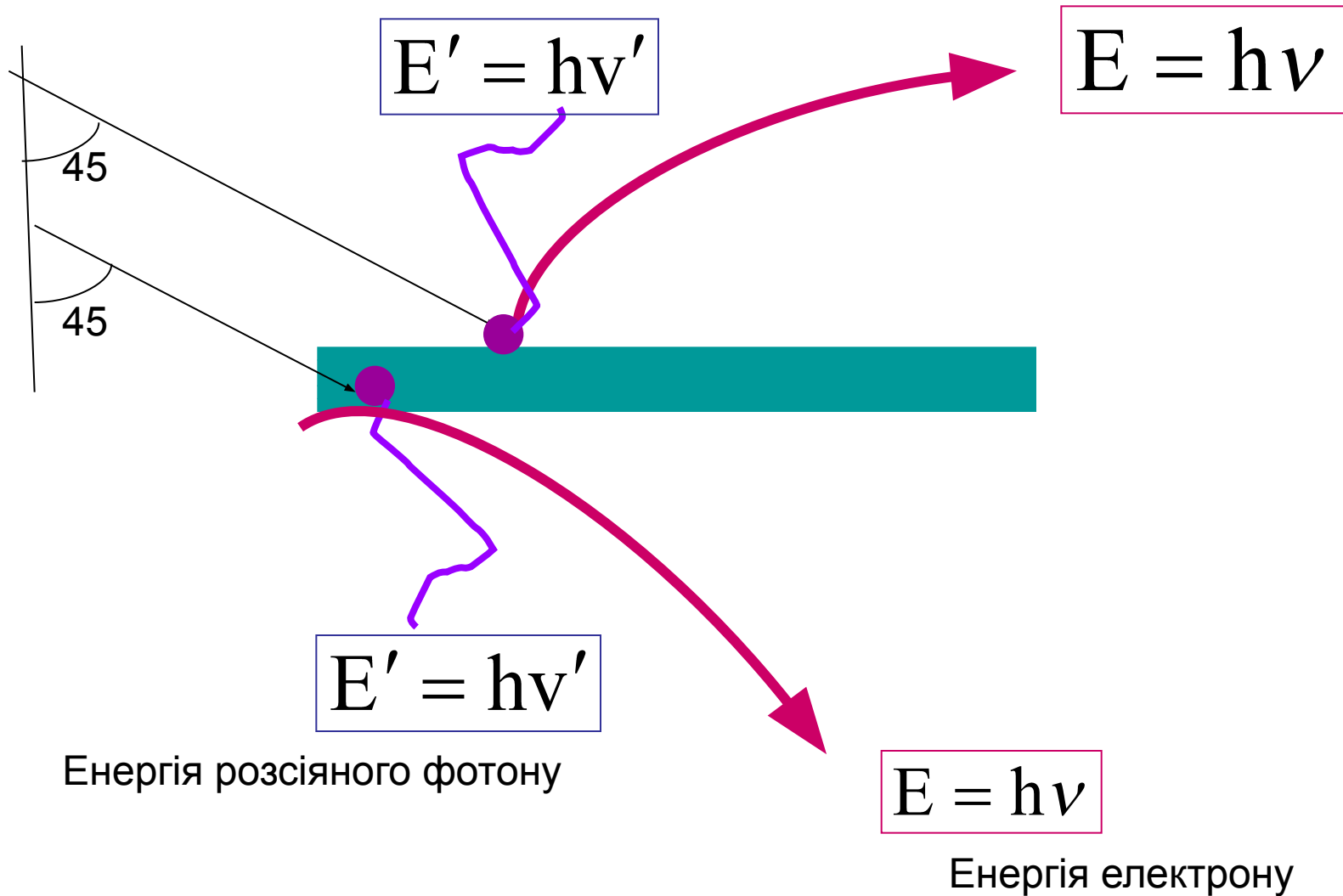
Катод

Анод

Свинцевый экран

рентген промені

3. Ефект Комптона



Відповідно до закону збереження імпульсу фотона і електрона під час зіткнення маємо:

$$\frac{h\nu^{\square}}{c} = m\nu + \frac{h\nu'^{\square}}{c}$$

$$h\nu = m_0c^2 = h\nu' + mc^2$$

$$m = m_0 \left(1 - \frac{\nu^2}{c^2} \right)^{-\frac{1}{2}}$$

Відповідно до теореми косинусів

$$m^2c^2 = m_0^2c^2 + \left(\frac{h\nu}{c} \right)^2 + \left(\frac{h\nu'}{c} \right)^2 + 2m_0h\nu - 2\frac{h^2\nu\nu'}{c^2} - 2m_0h\nu'$$

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{2h}{m_0c} \sin^2 \frac{\Theta}{2}$$

Комптонівська довжина хвилі

$$\Lambda_0 = \frac{h}{m_0c} = 2.4263096(15) \cdot 10^{-12} \text{ м}$$

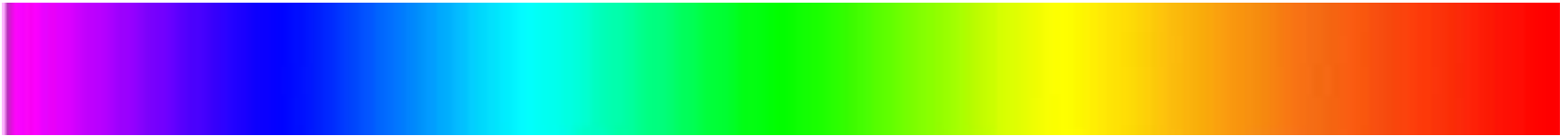
2. Рівноважне випромінювання та його характеристики



Теплове випромінювання є рівноважним, тобто може знаходитися в тепловій рівновазі з речовиною.

Теплове випромінювання

- це електромагнітне випромінювання, яке виникає за рахунок внутрішньої енергії випромінюючого тіла.
- залежить тільки від температури та оптичних властивостей тіла.
- Будь-яке тіло, температура якого вища за абсолютний нуль дає теплове випромінювання.
- Експерименти свідчать, що теплове випромінювання має безперервний спектр.



- Це означає, що нагріте тіло випускає деяку кількість енергії випромінювання у будь-якому діапазоні частот або довжин хвиль. Розподіл енергії випромінювання тіла по спектру залежить від температури тіла.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Потік енергії – загальна кількість енергії, яка випромінюється тілом за одиницю часу (енергетична потужність):

$$\Phi = \frac{dW}{dt} \quad [\Phi] = \text{Вт}$$

Енергію, яка припадає на одиничний діапазон частот, називають **спектральною випромінювальною здатністю** тіла або **спектральною густиною енергетичної світності**

$$r_{\omega, T} = \frac{dW_{\omega}}{dt \cdot dS \cdot d\omega}$$

$$\left[r_{\omega, T} \right] = \frac{\ddot{A} \alpha}{\lambda^2}$$

Інтегральна випромінювальна здатність або енергетична світність визначається потоком енергії, яка випромінюється з одиниці поверхні тіла у всіх напрямках і на всіх довжинах хвиль (частотах):

$$R = \frac{d\Phi}{dS} = \frac{dW}{dt dS} \quad [R] = \frac{Вт}{м^2}$$

Енергетична світність та спектральна випромінювальна здатність пов'язані між собою залежністю:

$$R = \int_0^{\infty} r_{\omega, T} d\omega$$

Спектральна поглинальна здатність тіла характеризує процес поглинання випромінювання тілом.

Виділимо вузький інтервал частот від ω до

$$\omega + \Delta\omega \cdot$$

$d\Phi_{\omega}$ - потік випромінювання, що падає на поверхню тіла.

$d\Phi'_{\omega}$ - потік енергії, що поглинається тілом.

Поглинольна здатність (коефіцієнт поглинання) тіла на частоті ω показує, яка частка падаючого на тіло випромінювання частоти ω , поглинається тілом

$$a_{\omega, T} = \frac{d\Phi'_{\omega}}{d\Phi_{\omega}}$$

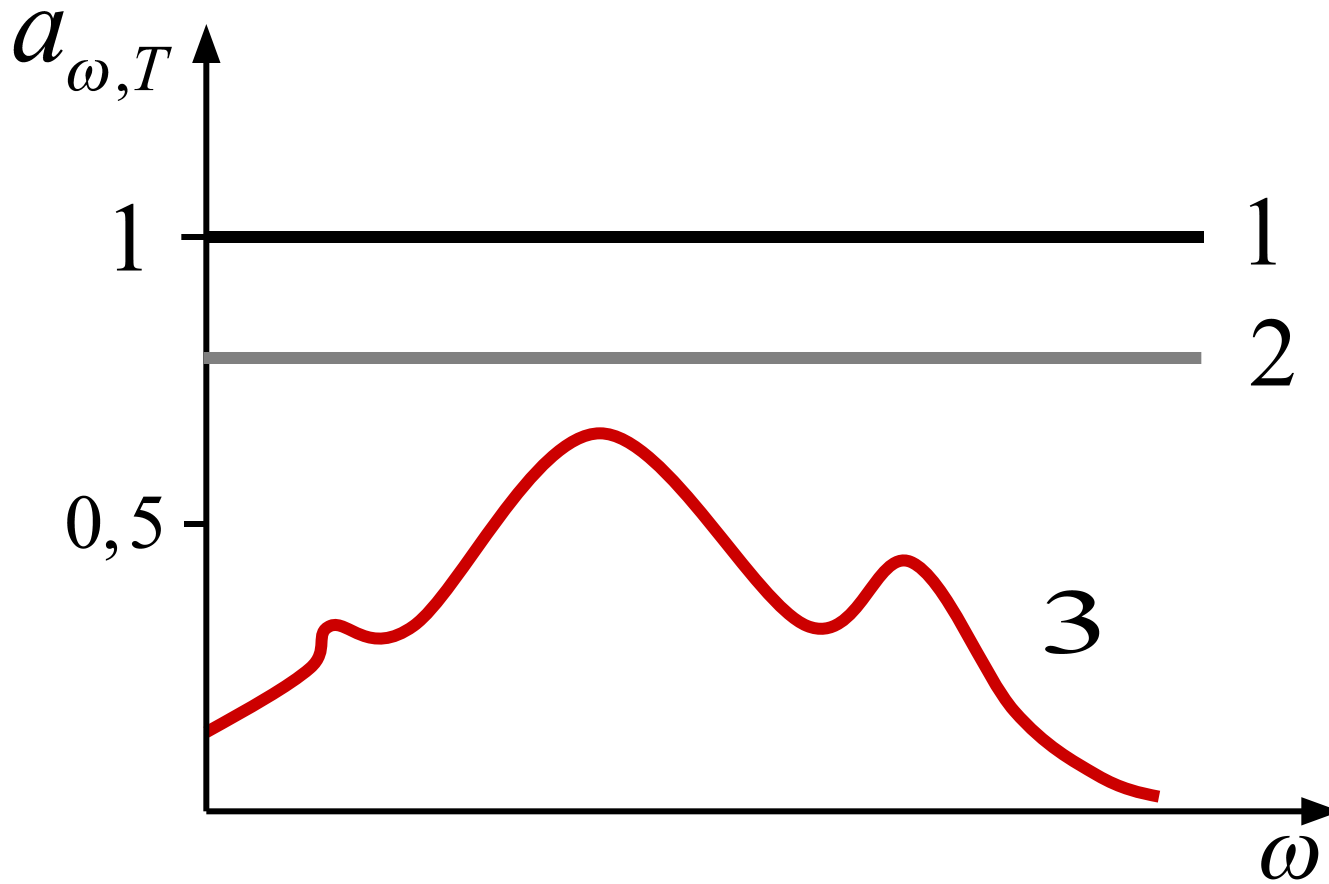
Це безрозмірна величина.

Будь-яке реальне тіло поглинає випромінювання різних частот по різному залежно від його температури. Тому спектральна поглинальна здатність тіла є функцією частоти ω , від якої змінюється при зміні температури тіла.

Тіло, поглинальна здатність якого менша за одиницю і однакова на всьому діапазоні частот, називають **сірим тілом**.

Інтегральна поглинальна здатність (коефіцієнт чорноти) тіла називається

$$a_T = \frac{\int_0^{\infty} a_{\omega, T} \cdot f(\omega, T) d\omega}{\int_0^{\infty} f(\omega, T) d\omega}$$

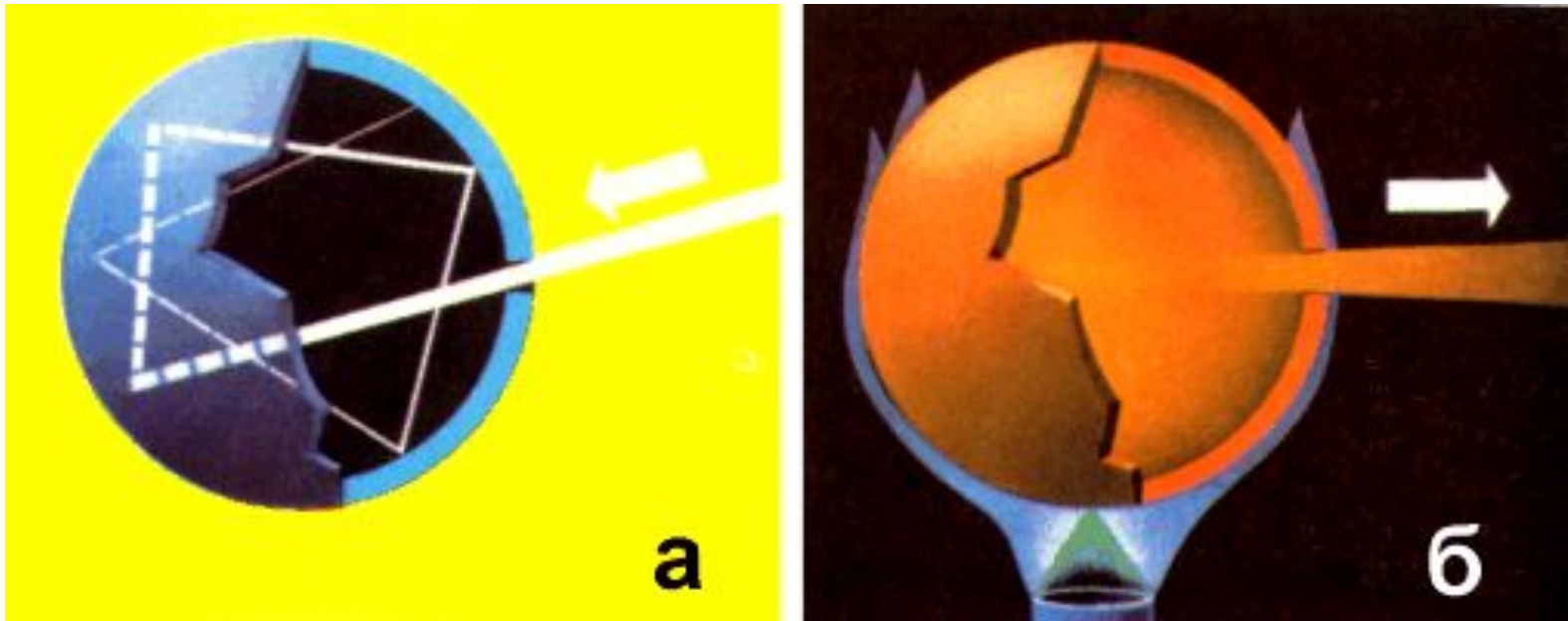


Поглинальна здатність

1 - абсолютно чорного тіла; 2 - сірого тіла;

3 - реального тіла

Абсолютно чорне тіло - це тіло, яке повністю поглинає падаючий на нього потік променистої енергії на всіх довжинах хвиль. Для будь-кого абсолютно чорного тіла $a_T = 1$. Абсолютно чорні тіла не тільки повністю поглинають зовнішній потік енергії, але й самі випромінюють певний потік енергії



Моделлю **абсолютно чорного тіла** є сферична порожнина з ідеально відбиваючими стінками, у якій є отвір розміром меншим за 0.1 діаметра порожнини

Близькими до випромінювання абсолютно чорного тіла є муфельні печі, які спочатку поглинають енергію, а потім віддають її.

Сонце і зірки є тілами надзвичайно близькими до абсолютно чорного тіла за випромінюванням.

Закони теплового випромінювання встановлені для рівноважного випромінювання для абсолютно чорного або для сірого тіл.

I закон теплового випромінювання – закон Кірхгофа

Закон Кірхгофа: для рівноважних станів тіл для будь-яких довжин хвиль і температур відношення випромінювальної здатності до поглинальної здатності не залежить від матеріалу тіла і є функцією тільки температури та частоти:

$$\frac{r_{\omega,T}}{a_{\omega,T}} = f(\omega, T)$$

При переході до інших довжин хвиль або при зміні температури тіла числове значення цього відношення змінюється, але при нових фіксованих значеннях температури і довжини хвилі теж залишається сталим для будь-яких тіл. Це означає, що $f(\lambda, T)$ є **універсальною функцією розподілу енергії в спектрі рівноважного теплового випромінювання будь-яких тіл**. Закон Кірхгофа випливає з другого закону термодинаміки, відповідно до якого при тепловій рівновазі в ізольованій системі будь-які тіла, що входять у цю систему, не можуть обмінюватися теплотою.

II закон теплового випромінювання – ЗАКОН СТЕФАНА – БОЛЬЦМАНА

Енергетична світність абсолютно чорного тіла пропорційна четвертому ступеню абсолютної температури:

$$R = \sigma T^4$$

σ - стала Стефана –
Больцмана,

$$\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8} \frac{Вт}{м^2 К^4}$$

Закон Стефана – Больцмана для сірого тіла

$$R = a_T \sigma T^4$$

a_T - інтегральний коефіцієнт поглинання (коефіцієнт чорноти)

Для реальних нечорних тіл можна увести поняття **ефективної радіаційної температури** T_p , що визначається як температура абсолютно чорного тіла, яке має таку саму енергетичну світність, що й реальне тіло. Радіаційна температура тіла завжди менша справжньої температури тіла. Так, для реального тіла

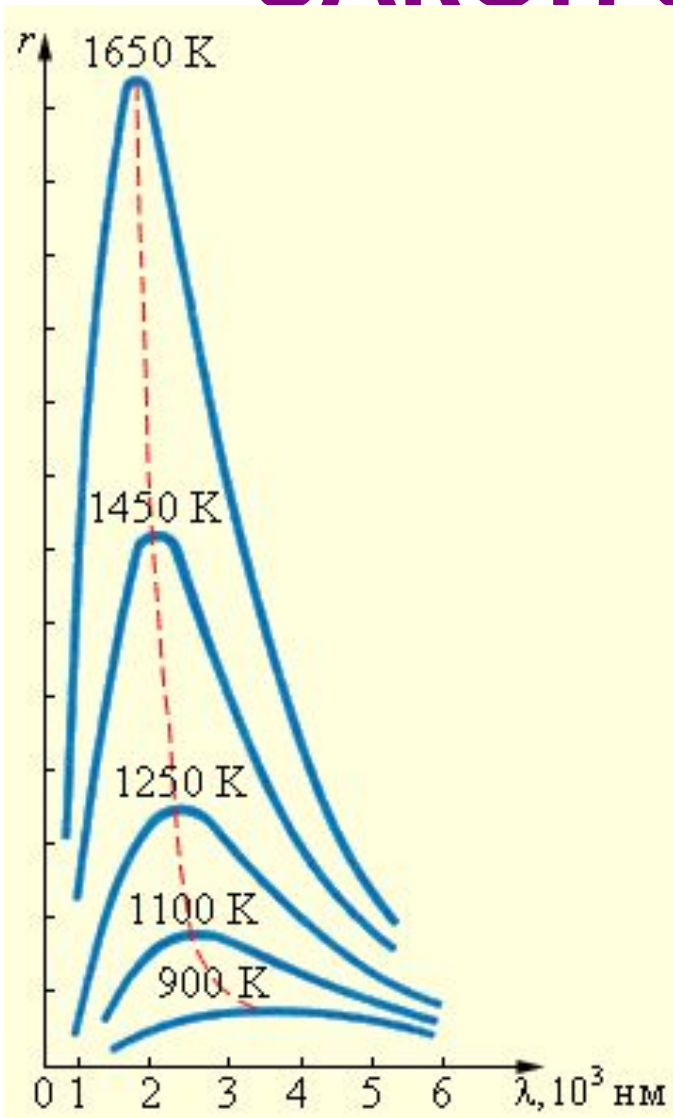
$$R = \sigma T_p^4 = a_T \sigma T^4$$

Звідки
реальних тіл $T_p = \sqrt[4]{a_T} T$, тобто $T_p < T$, оскільки у
 $a_T < 1$.

Пірометр – прилад, призначений для безконтактного вимірювання високої радіаційної температури тіл по їх сумарному тепловому випромінюванню по всім довжинам хвиль



III закон теплового випромінювання – ЗАКОН ЗМІЩЕННЯ ВІНА



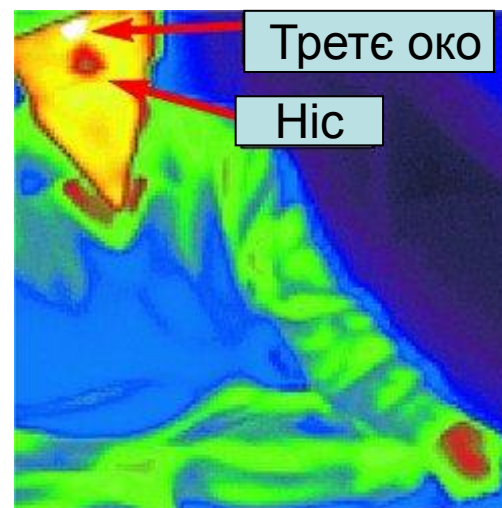
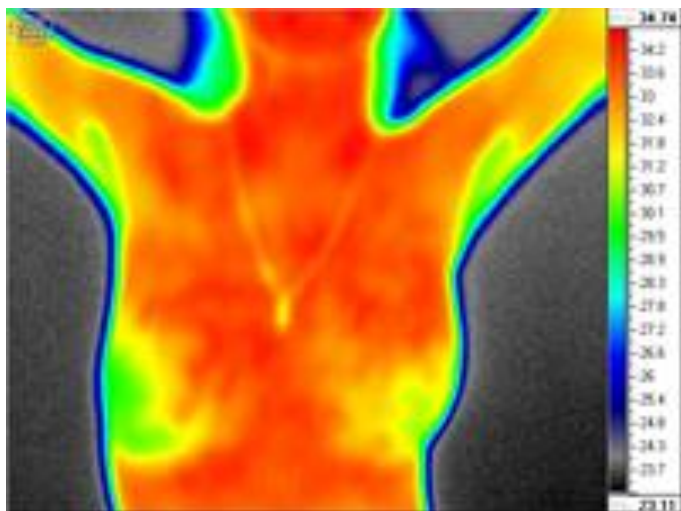
Закон зміщення Віна: (1893 р.) довжина хвилі, що відповідає максимальній випромінювальній здатності абсолютно чорного тіла при заданій температурі обернено пропорційна температурі тіла

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}$$

$$b = 2,9 \cdot 10^{-3}$$

·
- стала закону зміщення Віна.

Практичне використання закону Віна



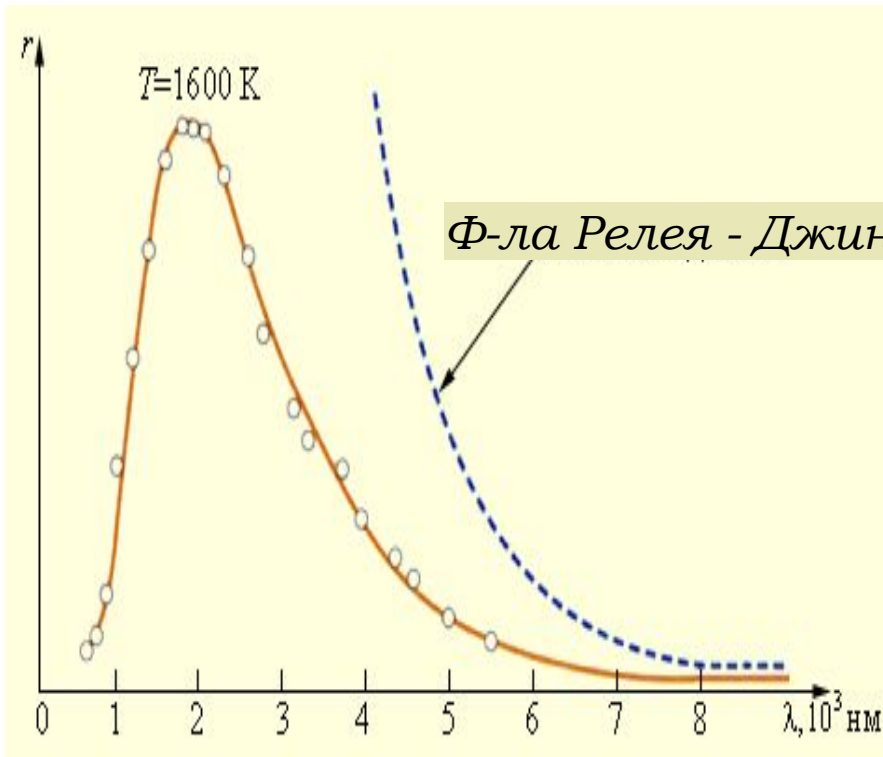
1900 р. Релей (пізніше Джинс) отримали всю криву спектрального розподілу випромінювання чорного тіла $r(\lambda, T)$ виходячи з теореми про **рівномірний розподіл енергії за ступенями вільності в стані термодинамічної рівноваги**. Ця теорема була застосована Релеєм до рівноважного випромінювання в порожнині.

Формула Релея – Джинса

$$r(\lambda, T) = \frac{2\pi kT}{\lambda^2}$$

"ультрафіолетова катастрофа" П.С. Эренфест

$$r(\nu, T) = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT$$



Висновки

- 1 Узгоджується з експериментом лише в області довгих хвиль;
- 2 Випромінювальна здатність чорного тіла стає нескінченною

$$R = \int_0^{\infty} r_{\nu} d\nu = \frac{2\pi kT}{c^2} \int_0^{\infty} \nu^2 d\nu = \infty$$

рівновага можлива лише при абсолютному нулю.

Формула Планка

Планк припустив, що світло випромінюється порціями – квантами. **Енергія кванта світла**

$$\varepsilon = h\nu$$

$h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с - стала Планка. Стала Планка – це універсальна константа, яка відіграє у квантовій механіці величезну роль

Формула Планка

$$r_{\nu, T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \cdot \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

Висновки

1 Дає кінцеве значення енергії випромінювання абсолютно чорного тіла у всьому діапазоні частот – закон Стефана - Больцмана

$$R = \int_0^{\infty} r_{\nu, T} d\nu = \frac{2\pi h}{c^2} \int_0^{\infty} \frac{\nu^3 d\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} = \frac{2\pi k^4}{c^2 h^3} T^4 \int_0^{\infty} \frac{\left(\frac{h\nu}{kT}\right)^3 d\left(\frac{h\nu}{kT}\right)}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} = \sigma T^4$$

2 Для малих частот $h\nu \ll kT$ співпадає з формулою Релея - Джинса

$$e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1 \approx 1 + \frac{h\nu}{kT} - 1 = \frac{h\nu}{kT}, \text{ тоді } r_{\nu} \approx \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT$$

3 Для великих частот $h\nu \gg kT$ описує випромінювання в області високих частот. Тобто, **ультрафіолетова катастрофа ліквідована!**

$$e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1 \approx e^{\frac{h\nu}{kT}}, \text{ тоді } r_{\nu} \approx \frac{2\pi\nu^3}{c^2} e^{-\frac{h\nu}{kT}}$$