



## Частина II

# ОСНОВИ КВАНТОВОЇ ФІЗИКИ

## Лекції 13-16

*Іванова В.В.*

ФТІ НТУУ “КПІ ім. І.Сікорського”

## **Розділ 1.**

1.1. Теплове випромінювання

1.2. Квантова оптика

## **Розділ 2.**

2.1. Основи квантової механіки

2.2. Будова атома

# ОПТИКА Л.13.

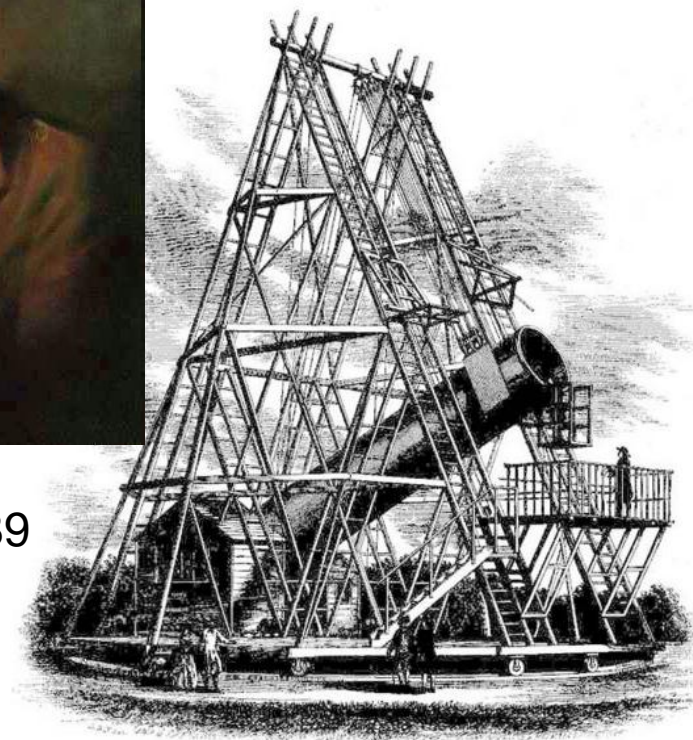
## 1.1. Теплове випромінювання

### Відкриття ІЧ випромінювання

- **Infrared** (IR) is radiation with wavelengths that are longer than 700 nm but shorter than 1 mm.
- Infrared radiation was discovered by *William Herschel* (1738 - 1822) in 1800 in the **spectrum** of the Sun.
- ordinary **glass** absorb infrared wavelengths greater than  $\sim 2 \mu\text{m}$ .



1789



## 1.1. Теплове випромінювання

### Світіння тіл (випромінювання)

Люмінесценція

Зовнішні види енергії збудження

вияви: світлячки, екрани дисплеїв, світлодіоди, лазери і т.п.



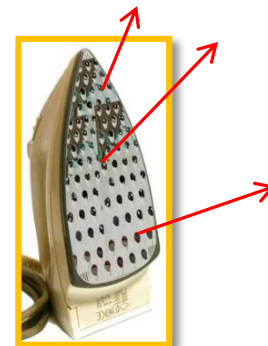
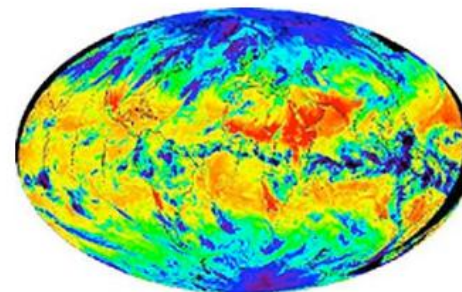
Теплове випромінювання

Теплове (температурне) збудження

Теплове випромінювання зумовлене збудженням атомів і молекул, що здійснюється в процесі їх теплового руху

**Теплове випромінювання існує для всіх об'єктів (гази, пари, рідини, тверді тіла) при температурі вище абсолютного нуля ( $-273.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ )**

Thermal radiation from Earth



# Люмінесценція

*Люмінесценція - випромінювання, надлишкове над тепловим, при даній температурі, тривалість якого значно перевищує період світлових коливань*  
(С.І. Вавилов)

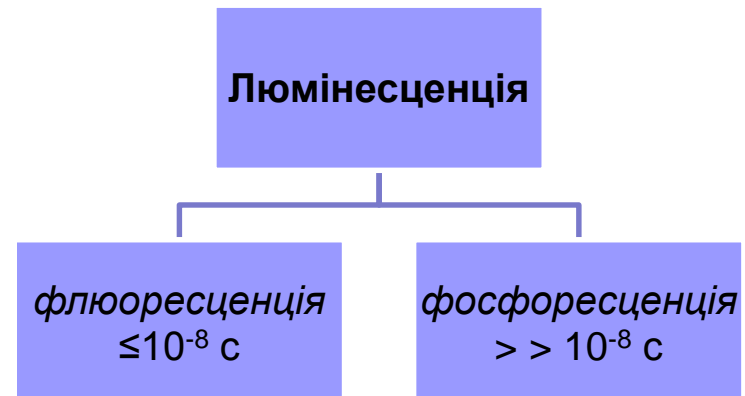


## ВИДИ ЛЮМІНЕСЦЕНЦІЇ

фотолюмінесценція;  
катодолюмінісценція;  
електролюмінесценція:  
    - передпробійна;  
    - інжекційна;  
хемілюмінесценція  
(в т.ч. біолюмінесценція);  
триболюмінесценція;  
кристалолюмінесценція

*«Прибрежья, где ходили тавро-скифы,  
уже не те - лишь море в летний штиль  
все так же сыплет ласково на рифы  
лазурно-фосфорическую пыль.»*

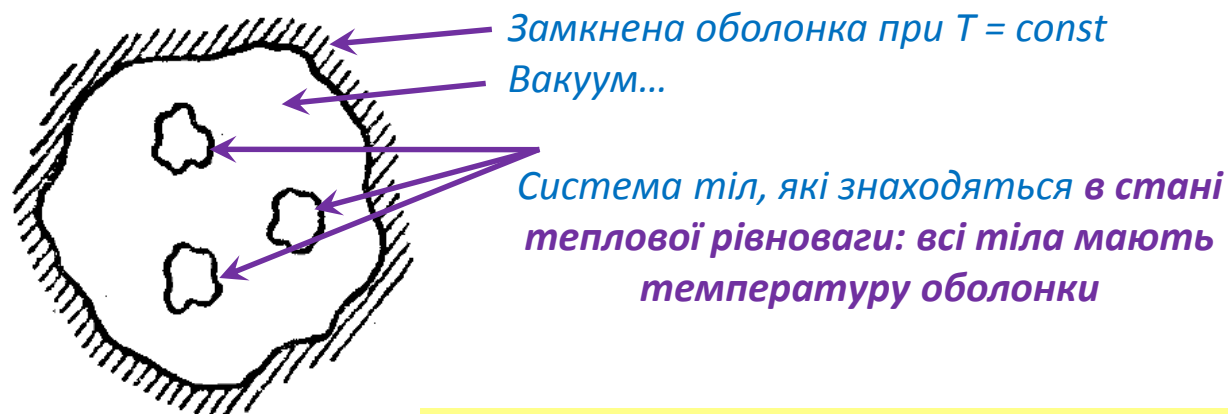
*И.Бунин*



# Теплове випромінювання

На відміну від всіх інших видів випромінювання, **теплове випромінювання** може бути в стані **термодинамічної рівноваги** з нагрітими тілами -

- **воно** називається **рівноважним** або **чорним випромінюванням**



**Рівноважне випромінювання:** кількість поглинутої і випроміненої енергій **рівні** в будь-який проміжок часу

**Енергія**, що випромінюється і енергія, що поглинається, **рівні для кожної частоти  $\omega$  (довжини хвилі  $\lambda$ )**

**Густина енергії і спектральний склад рівноважного теплового випромінювання залежать тільки від температури!**

# Теплове випромінювання

## Характеристики теплового випромінювання

$M_{e,\lambda}$  - спектральна густина енергетичної світності – **випромінювальна**

$$M_{e,\lambda} = \frac{dM_e}{d\lambda} = r_\lambda$$

**здатність  $r_\lambda$**

або

$r_\omega$

$M_e = \int_0^\infty M_{e,\lambda} d\lambda$  - повна (інтегральна) енергетична світність

Або

$$M_e = \int_0^\infty M_{e,\omega} d\omega = \int_0^\infty r_\omega d\omega \quad M_{e,\omega} = r_\omega$$

$$\alpha_{\lambda,T} = \frac{\Phi_{e,\lambda,\text{погл}}}{\Phi_{e,\lambda,\text{пад}}} \quad - \text{ спектральна поглинальна здатність (коефіцієнт поглинання)}$$

(дробове число, що показує, яку частину падаючого випромінювання в інтервалі довжин хвиль ( $\lambda \div \lambda + d\lambda$ ) (або частот ( $\omega \div \omega + d\omega$ ) тіло поглинає за температури  $T$ )

Коефіцієнт поглинання - величина безрозмірна

$$\alpha_{\omega,T} \leq 1$$

*Наприклад, для видимої частини спектра за кімнатної температури поглинальна здатність алюмінію дорівнює 0,1; міді - 0,5; води - 0,67*

$$\alpha_{\omega,T} = 1 \quad \alpha_{\lambda,T} = 1$$

**Абсолютно чорне тіло  
АЧТ**

# Теплове випромінювання

## Закон Кірхгофа

$$\left[ \frac{r_{\lambda,T}}{\alpha_{\lambda,T}} \right]_1 = \left[ \frac{r_{\lambda,T}}{\alpha_{\lambda,T}} \right]_2 = \left[ \frac{r_{\lambda,T}}{\alpha_{\lambda,T}} \right]_3 = \dots = f(\lambda, T)$$

Функція Кірхгофа  
Функція спектрального розподілу випромінювання АЧТ

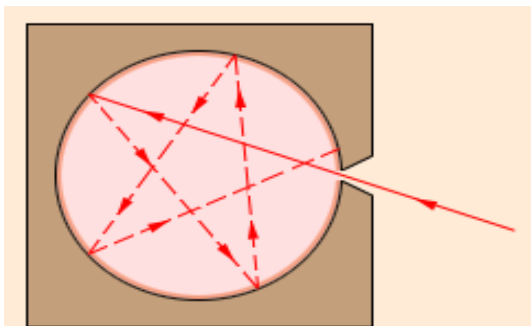
Для системи тіл, що знаходяться в стані теплової рівноваги, відношення випромінювальної і поглинальної здатностей не залежить від природи тіла і є для всіх тіл однією і тією ж універсальною функцією частоти і температури

**АЧТ – 1859 р. Г. Кірхгоф**

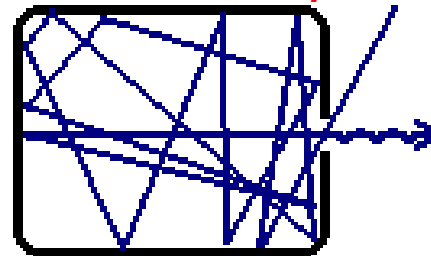
Для АЧТ  $\alpha_{\lambda,T} = 1$

$$M^0_{e,\lambda}(T) = f(\lambda, T) = r_{\lambda}(T)$$

спектральна густина енергетичної світності АЧТ



Тіло, яке поглинає всю променисту енергію будь-якого спектрального складу



Модель АЧТ – порожнина, яка містить ЕМВ в умовах теплової рівноваги



# ОПТИКА Л.13.

## Закони теплового випромінювання

### Закон Кірхгофа

Доведення:

Теплова рівновага: тіло з усіх боків оточено рівноважним випромінюванням.

На площу падає енергія

$$d\Phi_1 = I_\omega d\omega dS \cos \varphi d\Omega dt$$

Відбивається

$I_\omega$  - питома  
інтенсивність  
випромінювання

$$d\Phi_2 = (1 - \alpha_\omega) I_\omega d\omega dS \cos \varphi d\Omega dt$$

Випромінюється

$$d\Phi_3 = M_{e,\omega} d\omega dS \cos \varphi d\Omega dt$$

$$d\Phi_1 = d\Phi_2 + d\Phi_3 \Rightarrow M_{e,\omega} = \alpha_\omega I_\omega$$

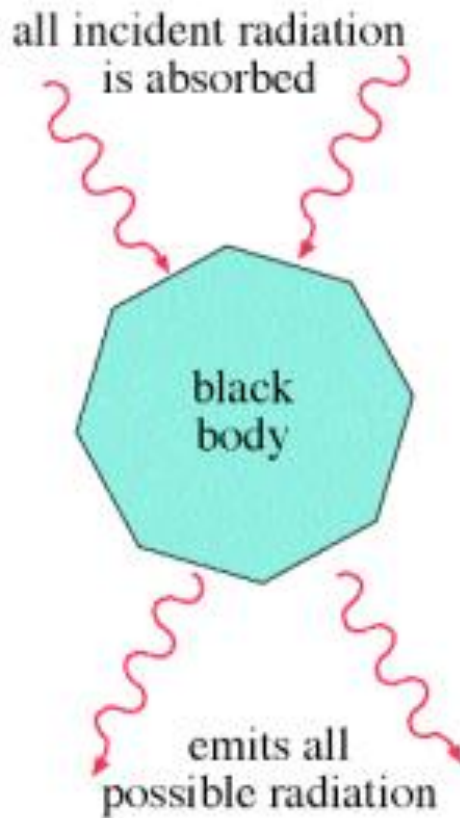
$\alpha_\omega$  - коефіцієнт  
поглинання

**При одній і тій самій температурі АЧТ має  
найбільшу випромінювальну здатність!**

## Закони теплового випромінювання Абсолютно чорне тіло

**АЧТ** (Gustav Kirchhoff, 1859) –

ідеальне тіло, яке **поглинає все** ЕМВ, яке на нього падає, не відбиваючи і не пропускаючи, і **випромінює** ЕМВ – все, яке можливе при заданій температурі



Абсолютно чорне тіло:  $\alpha_{\omega, T} = 1$   
*Ідеальний поглинач!*  
*Ідеальний випромінювач!*

Сіре тіло:

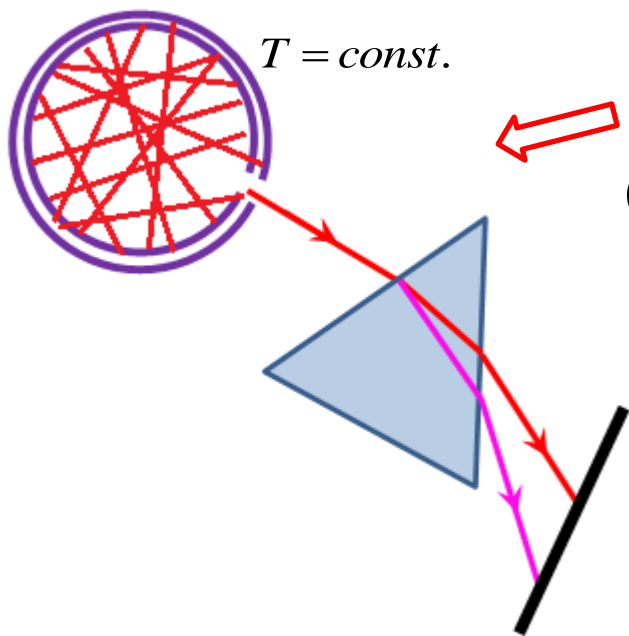
$$\alpha_{\omega, T} = \alpha_T = \text{const} \leq 1$$

Абсолютно біле тіло:

$$\alpha_{\omega, T} = \alpha_T = 0$$

# Теплове випромінювання

## Абсолютно чорне тіло


 $T = \text{const.}$ 

Схема

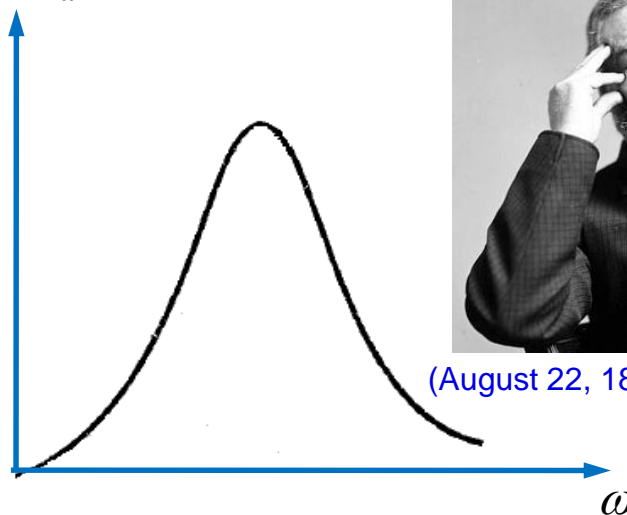
визначення

$$(r_{\omega T})_{\text{АЧТ}} = f(\omega, T)$$

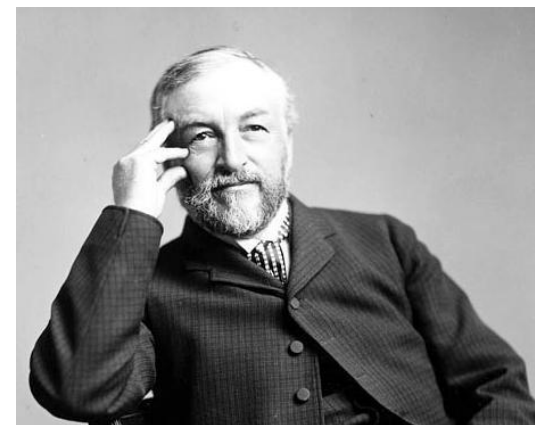
ЕКСПЕРИМЕНТ

*Samuel Pierpont Langley*  
за допомогою болометра (1878)  
експериментально отримав спектр  
випромінювання чорної сажі

$$f(\omega, T) = (r_{\omega T})_{\text{АЧТ}}$$



An American astronomer, physicist, inventor of the bolometer and aviation pioneer



(August 22, 1834 – February 27, 1906)

# Закони теплового випромінювання



Джон Вільям Стретт (лорд Релей)  
1842-1919



Джеймс Гопвуд Джинс  
1877-1946



Вільгельм Він  
1864-1928

## Закон Віна

$$\rho_v = \frac{8\pi h v^3}{c^3} \cdot e^{-hv/kT}$$

## Закон Релея-Джинса

$$\rho(\omega, T) = kT \cdot \frac{\omega^2}{\pi^2 c^3}$$

## Закон зміщення Віна:

$$\nu_{\max} = \frac{\alpha}{h} \cdot kT \approx (5,879 \cdot 10^{10}) \cdot T$$

# Закони теплового випромінювання

## ■ Закон Віна

$$\lambda T \ll hc/k$$

$$r_\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \exp\left(-\frac{hc}{\lambda kT}\right)$$

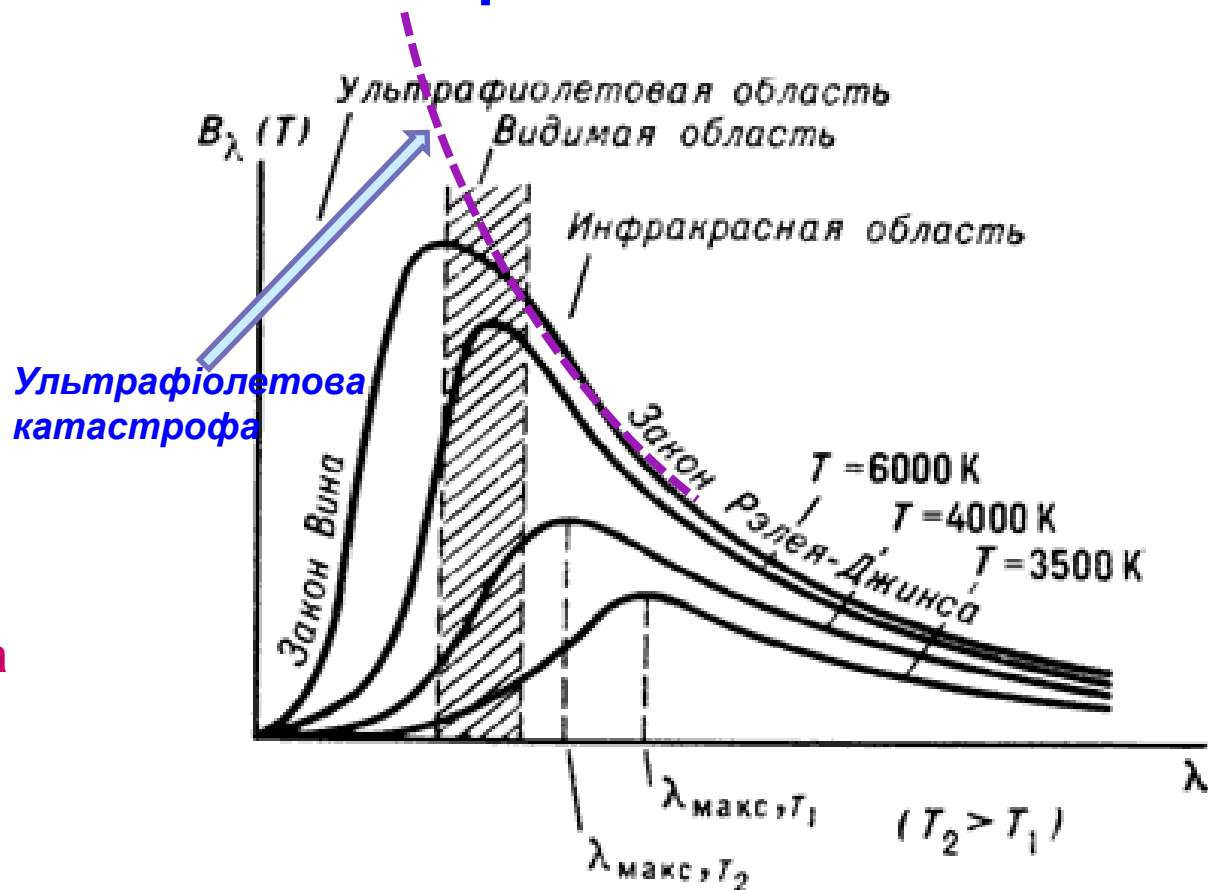
## ■ Закон Релея-Джинса

$$\lambda T \gg hc/k$$

$$r_\lambda = 2\pi c \frac{kT}{\lambda^4}$$

## ■ Закон зміщення Віна

$$\lambda_{\max} = \frac{2898}{T}, \text{ мкм}$$

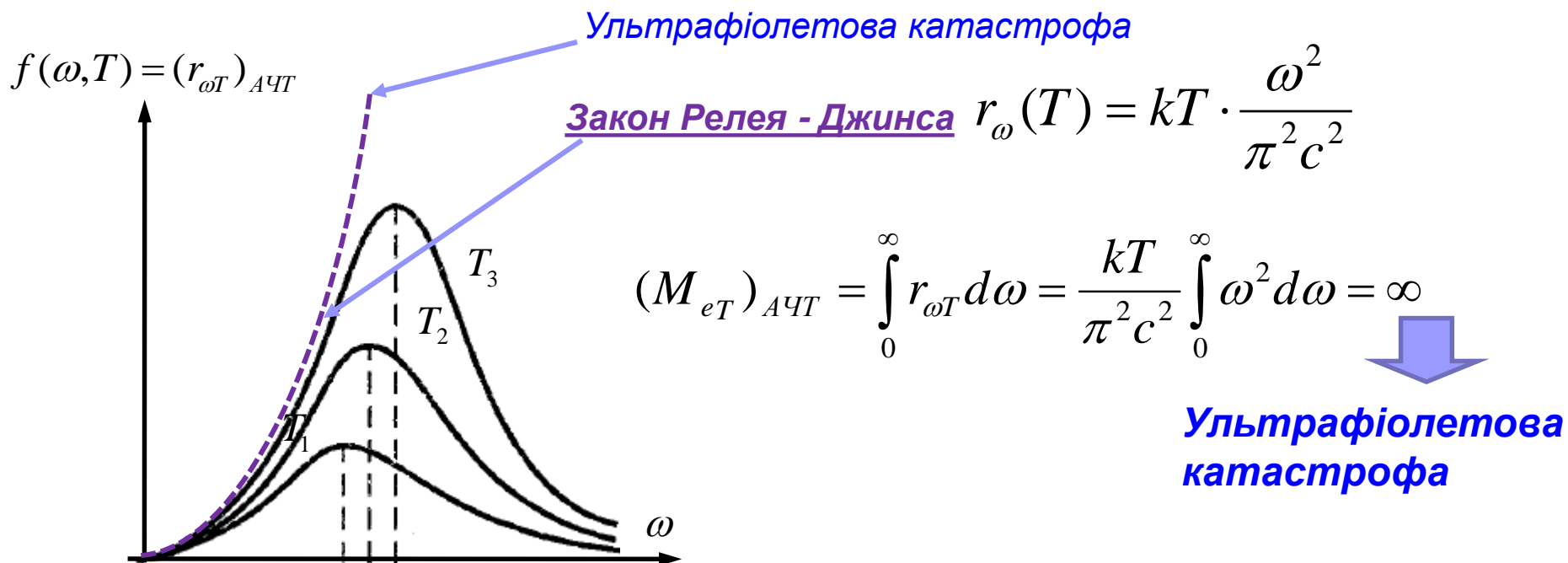


Сонце:  $T=6000\text{K} \rightarrow \lambda_{\max}=0,5 \text{ мкм}$

$T=290\text{K} \rightarrow \lambda_{\max}=10 \text{ мкм}$

$T=77\text{K} \rightarrow \lambda_{\max}=38 \text{ мкм}$

# Теплове випромінювання



Теорія Релея – Джинса:

виходить із хвильової природи світла, в рамках класичної фізики не здатна пояснити ультрафіолетову катастрофу

# Закони теплового випромінювання

Залежність випромінювальної здатності АЧТ від температури

## ■ Закон Стефана – Больцмана

$$M_e = \int_0^{\infty} r_{\lambda} d\lambda = \sigma T^4$$

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}, \text{ Вт} / \text{ м}^2 \text{ К}^4$$

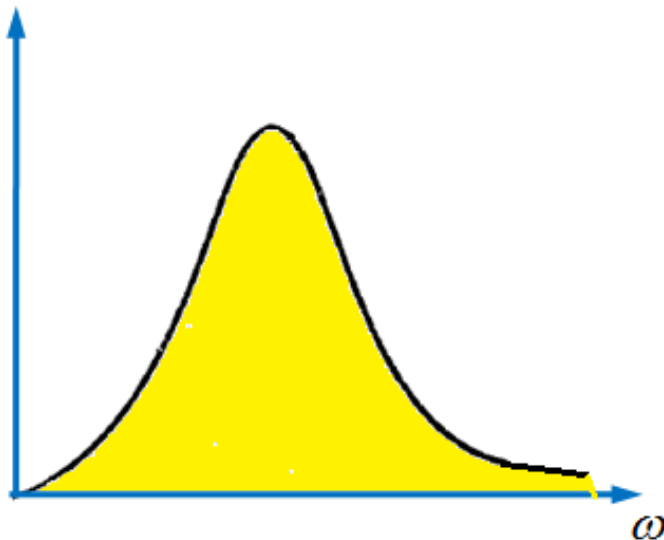
стала Стефана – Больцмана

1879 р. – Й.Стефан (експериментально)

1884 р. – Л.Больцман (теоретично)

**Енергетична світність АЧТ  
пропорційна четвертому степеню  
температури**

$$f(\omega, T) = (r_{\omega T})_{\text{АЧТ}}$$



# Закони теплового випромінювання

## ■ Закон Стефана – Больцмана

$$M_e = \int_0^{\infty} r_{\lambda} d\lambda = \sigma T^4$$

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}, \text{Вт} / \text{м}^2 \text{К}^4$$

### Приклад:

Інтегральна поверхнева густина потоку  
випромінювання тіла при  $T=300\text{K}$

$$M_e = 0,05 \text{ Вт/см}^2$$

Якщо площа шкіряного покриву  $\sim 2\text{м}^2$

$$P = 1\text{кВт}$$





# Теплове випромінювання



Max Karl Ernst Ludwig Planck; 23 квітня 1858,  
Кіль — 4 жовтня 1947,  
Геттінген

## ОСНОВОПОЛОЖНИК КВАНТОВОЇ ТЕОРІЇ

Нобелівська премія (1918 р.)

За відкриття кванту дії

*"... він переконливо показав, що крім атомістичної структури матерії існує свого роду атомістична структура енергії, керована універсальною сталою, введеною Планком. Це відкриття стало основою для всіх досліджень у фізиці XX століття, і з того часу майже повністю зумовило її розвиток..."*

*/А.Ейнштейн/*

## Гіпотеза и формула Планка (1900 р.)

Електромагнітне випромінювання здійснюється окремими порціями енергії (квантами), величина яких пропорційна частоті випромінювання:

$$\varepsilon = h\nu = \frac{h}{2\pi} \omega = \hbar \omega$$

Стала Планка  $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,054 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

*«Наукова істина тріумфує у міру того, як вимирають її супротивники»*

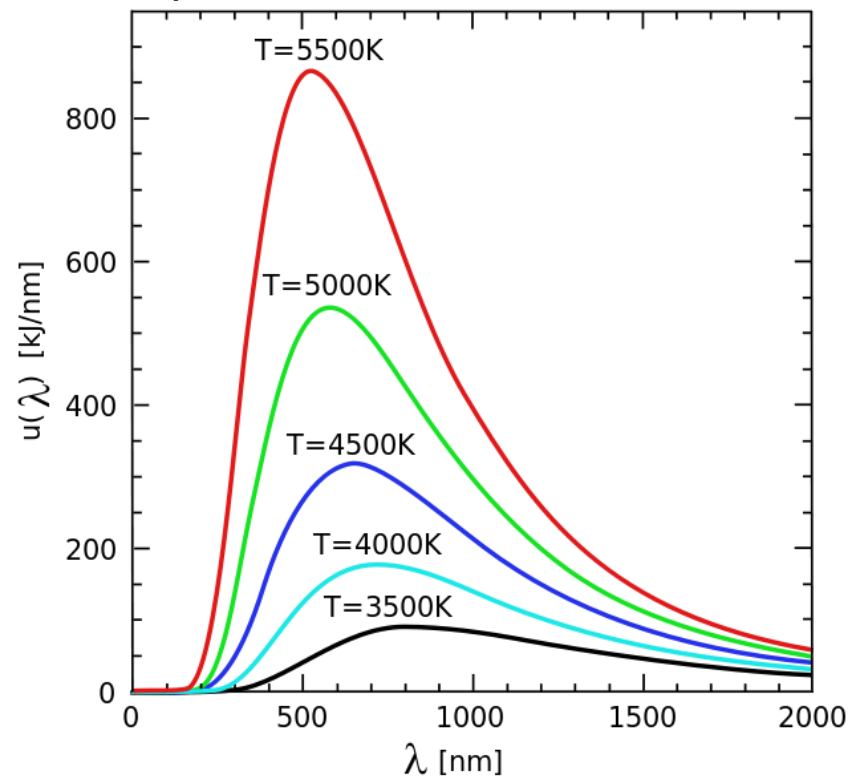
*М.Планк*

# Теплове випромінювання

Формула Планка (1900)

Енергія електромагнітного випромінювання (в тому числі такого, яке заповнює нагріту порожнину) може змінюватися не безперервно, а дискретно, а саме на величину кратну  $\hbar\omega$

**Спектральний розподіл об'ємної густини** електромагнітного випромінювання



$$\rho(\omega) = \frac{\omega^2}{\pi^2 c^3} \cdot \frac{\hbar\omega}{e^{\frac{\hbar\omega}{kT}} - 1};$$

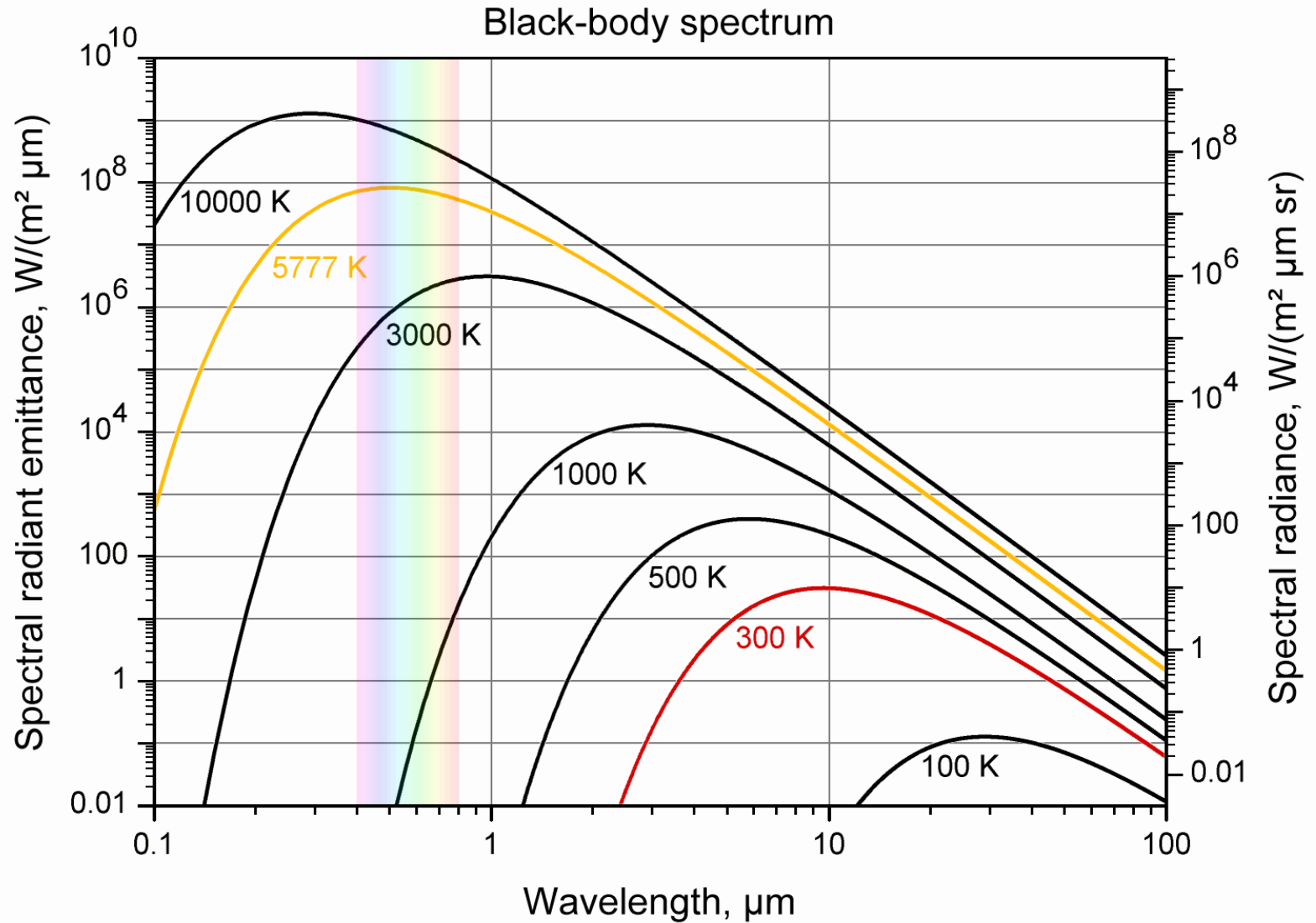
$$[\text{Дж} / (\text{м}^3 \cdot \text{Гц})]$$

$$\rho_{\omega} = \frac{I_{\omega}}{c}$$

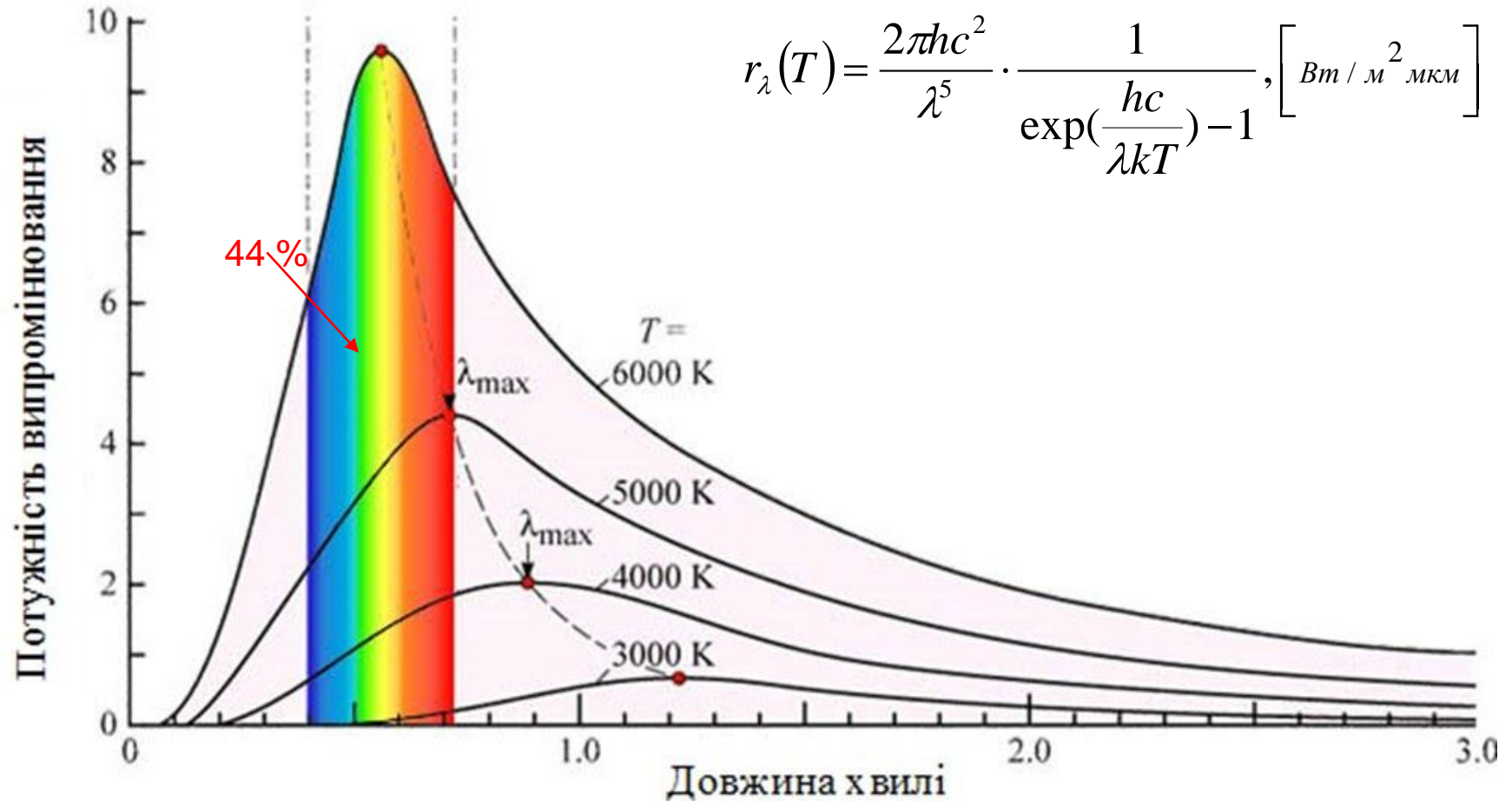
$$I_{\omega} = c \cdot \rho_{\omega}$$

# ОПТИКА Л.13.

## Випромінювання АЧТ

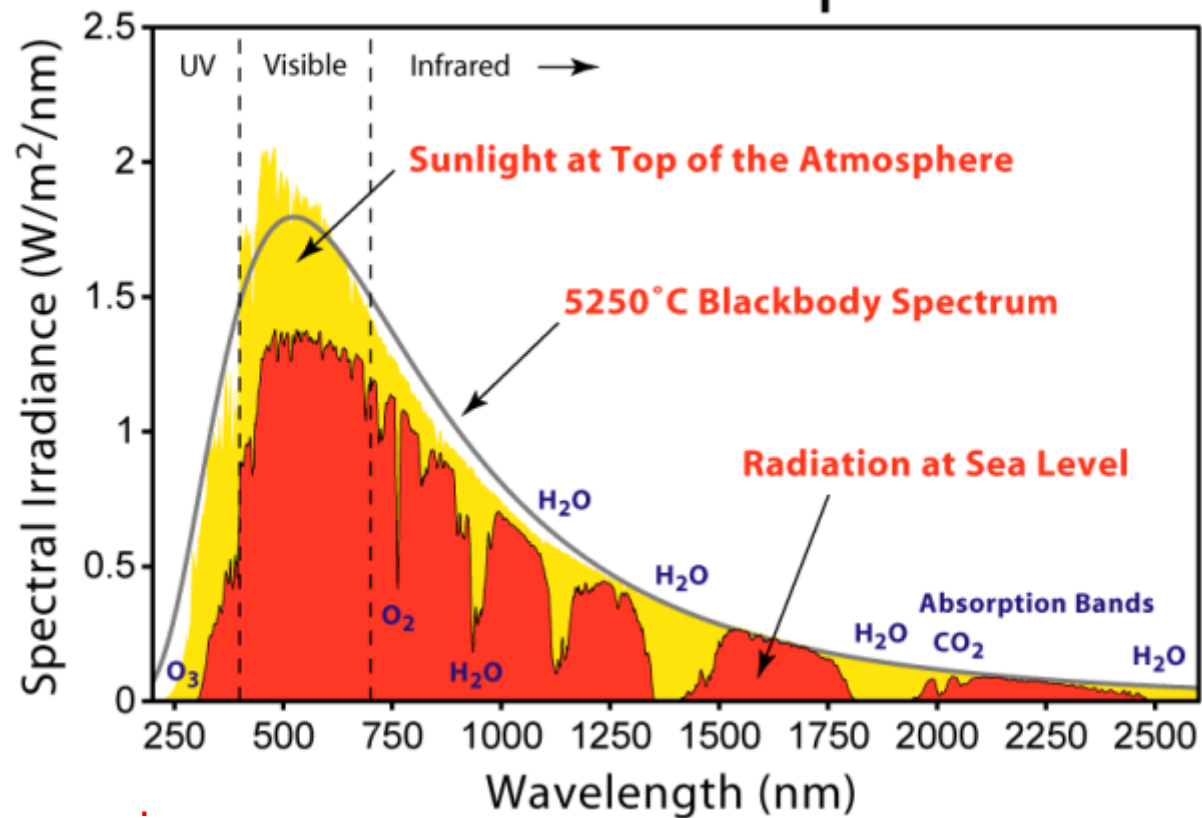


## Закони теплового випромінювання



## Закони теплового випромінювання

## Solar Radiation Spectrum



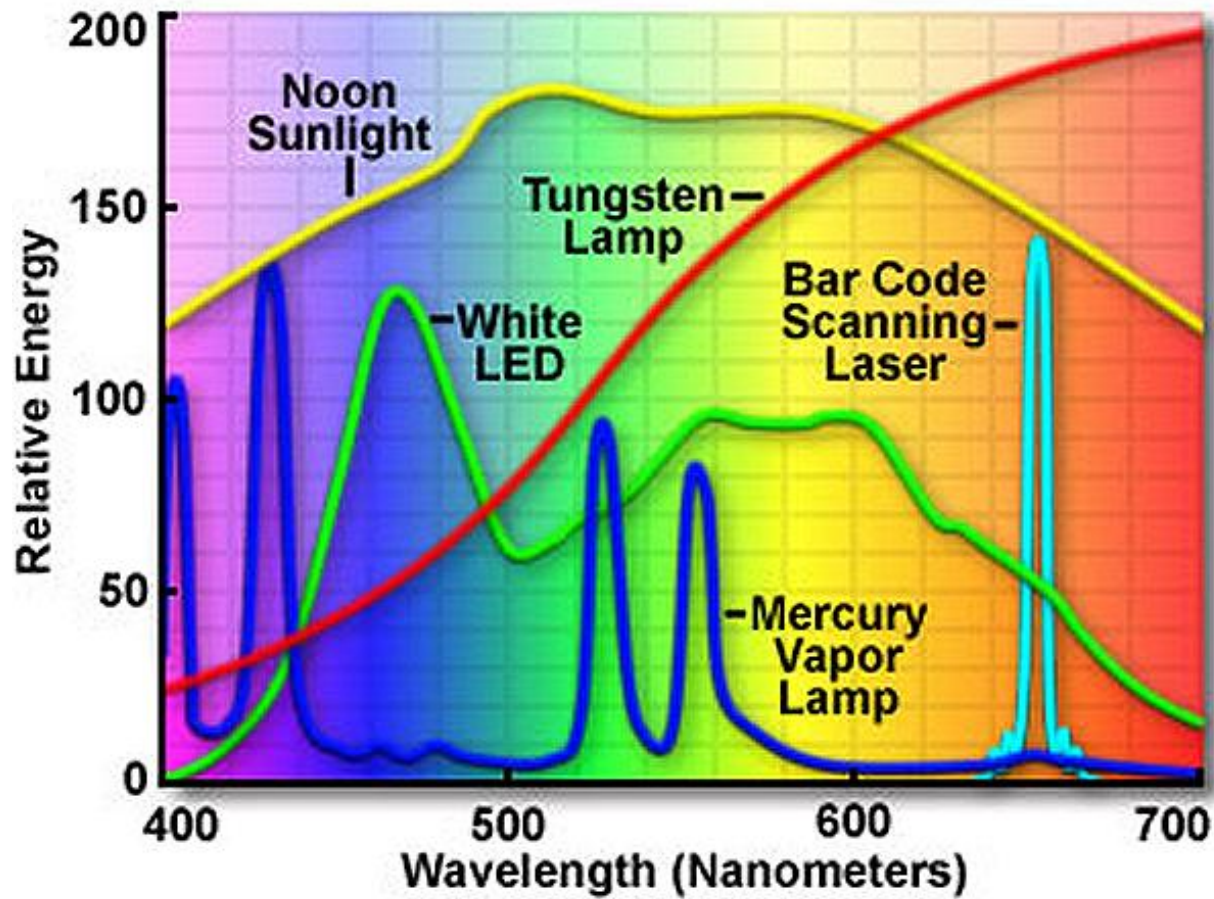
46 % - видиме світло

49 % - ближнє ІЧ

5 % - УФ

## Закони теплового випромінювання

Spectra From Common Sources of Visible Light



## Закони теплового випромінювання

## ПРИКЛАД:

Ніхромовим дротом діаметром 1 мм проходить електричний струм силою 8 А, а теплота, що виділяється, відводиться випромінюванням. Питомий опір дроту  $1,1 \cdot 10^{-6}$  Ом м. Температура навколишнього середовища дорівнює  $10^\circ \text{C}$ . Розрахувати температуру дроту. Ступінь чорноти ніхромового дроту прийняти рівною 0,8.

$$Q=W$$

$$I^2 \frac{\rho_{\text{эл}} l}{f} = \varepsilon \sigma_0 (T_1^4 - T_2^4) F \quad \Rightarrow \quad I^2 \frac{\rho_{\text{эл}} l}{\frac{\pi d^2}{4}} = \varepsilon \sigma_0 (T_1^4 - T_2^4) \pi d l$$

$F$  – площа теплообміну

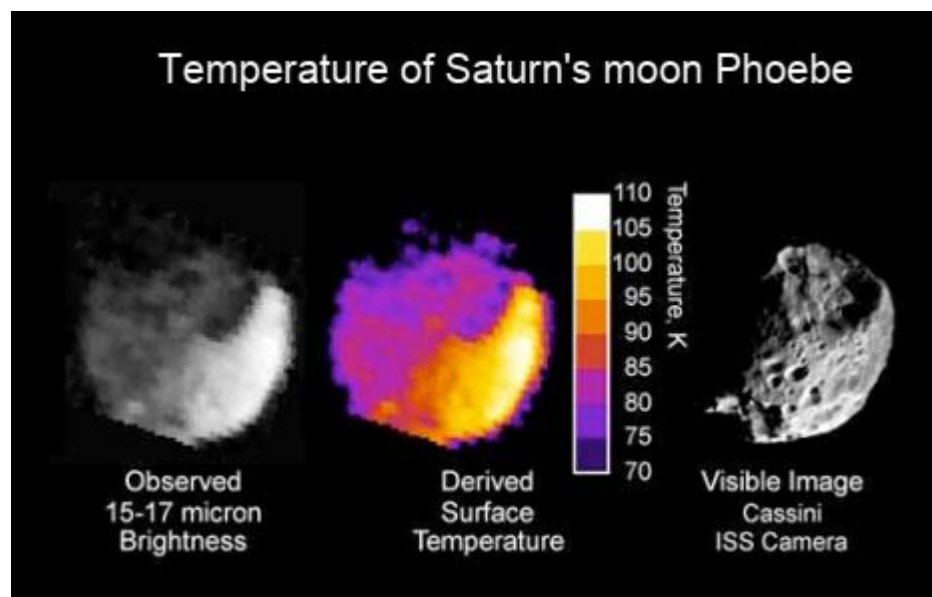
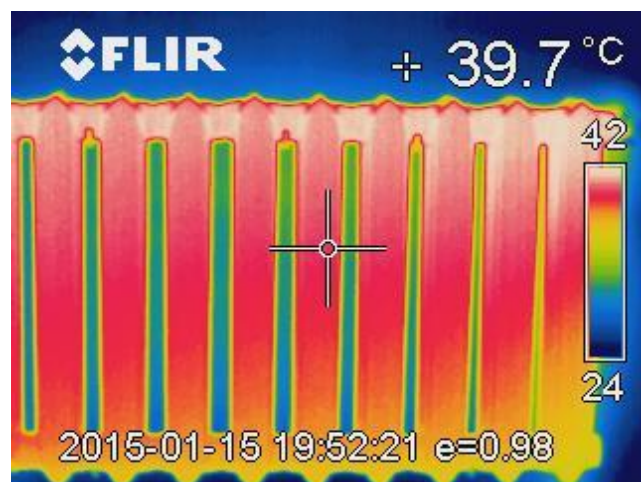
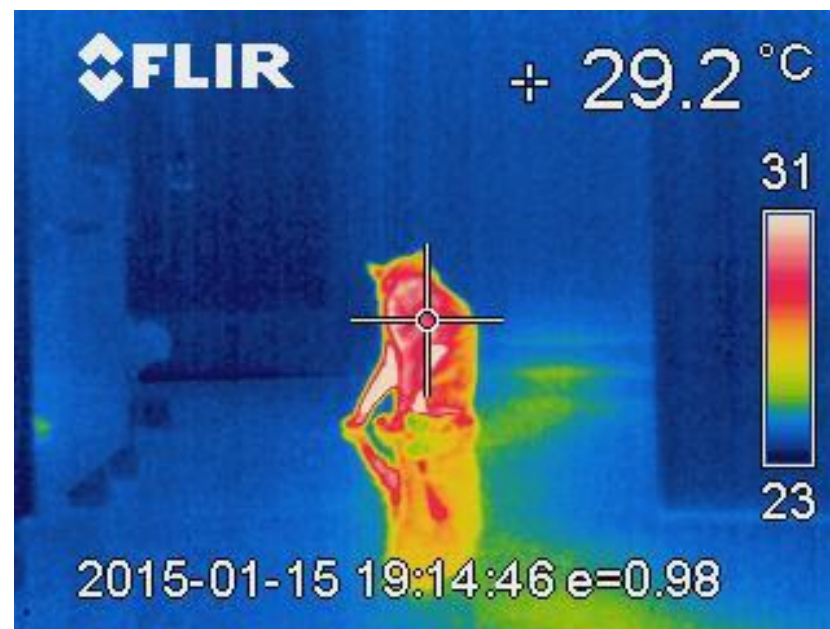
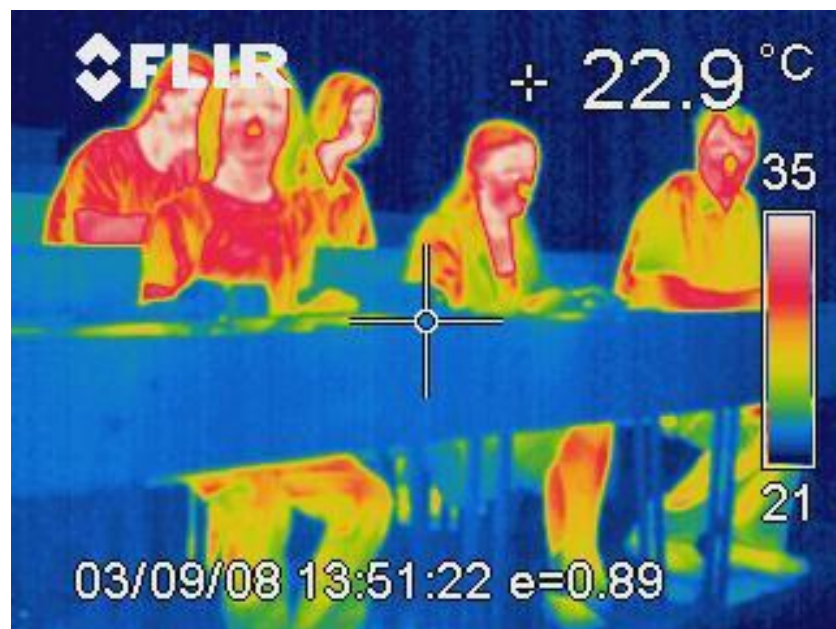
$f$  - площа поперечного перерізу дроту

$$T_1 = \sqrt[4]{\frac{4I^2 \rho_{\text{эл}}}{\varepsilon \sigma_0 \pi^2 d^3} + T_2^4} = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot 8^2 \cdot 1,1 \cdot 10^{-6}}{0,8 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \pi^2 \cdot 0,001^3} + 283^4} = 893 \text{ K} = 620^\circ \text{C}$$



# ОПТИКА Л.13.

## Теплобачення





# Теплобачення



# Теплове випромінювання

## Коментар:

Якщо в замкнену порожнину зі стінками, що дзеркально відбивають світло, помістити декілька тіл, нагрітих **до різної температури**, то, як показує дослід, така система **з часом** приходить в стан **теплової рівноваги**, при якій всі тіла набувають однакової температури. Тіла обмінюються енергією **лише шляхом випромінювання** і поглинання променистої енергії. В стані рівноваги ці процеси в середньому компенсують один одного, і в просторі між тілами густина енергії випромінювання досягає певного значення, залежного лише від сталої температури тіл. Це випромінювання, що перебуває в термодинамічній рівновазі з тілами, що мають певну температуру, називається **рівноважним або чорним випромінюванням**. Густина енергії рівноважного випромінювання і його спектральний склад залежать лише від температури.

Тіло в порожнині, **яке поглинає всю променисту енергію будь-якого спектрального складу**, яка попадає на його поверхню називають **абсолютно чорним**. Якщо порожнина нагріта до певної температури  $T$ , і всередині встановилася тепла рівновага, то власне випромінювання порожнини, що виходить через отвір, буде випромінюванням абсолютно чорного тіла. Таким чином моделюється абсолютно чорне тіло у всіх експериментах по дослідженню теплового випромінювання.

*Якщо через маленький отвір зазирнути всередину порожнини, в якій встановлена термодинамічна рівновага між випромінюванням і нагрітими тілами, то очі не розрізняють тіла за зовнішнім виглядом і фіксують лише однорідне світіння всієї порожнини в цілому*

## 1.2. Квантова оптика

1. Фотоелектричний ефект.  
Дослідження О. Г. Столетова
2. Рівняння Ейнштейна
3. Енергія, маса та імпульс фотона
4. Досліди В. Боте і С.Вавилова
5. Тиск світла. Досліди П.М.Лебедева
6. Ефект Комптона
7. Фотоелементи

## 1.2. Квантова оптика

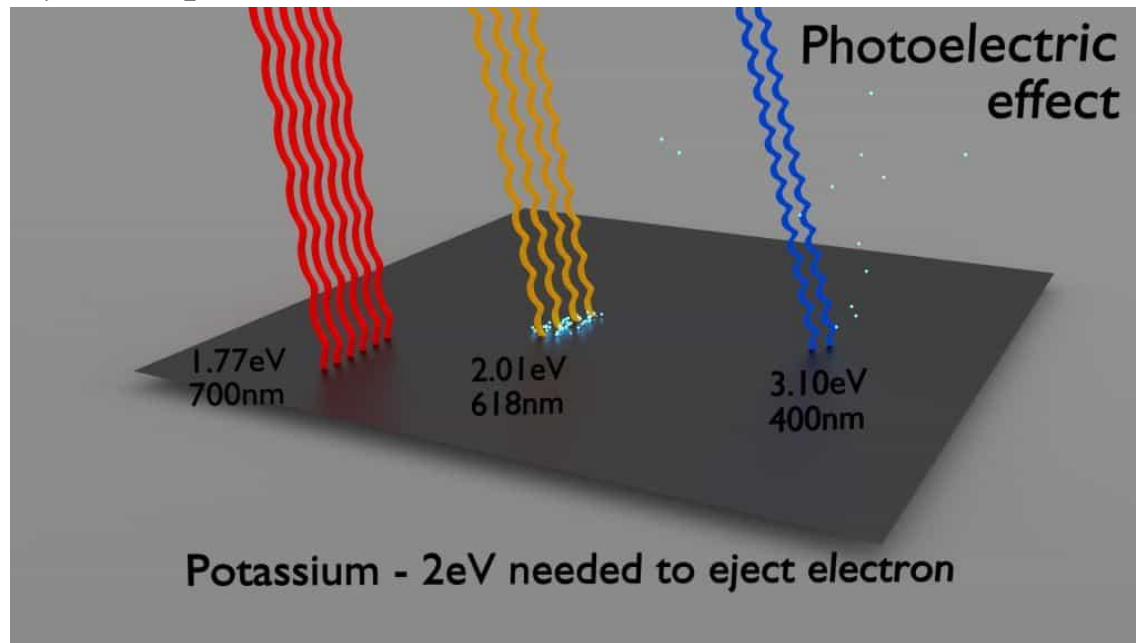
### 1.2.1. Фотоелектричний ефект. Дослідження О. Г. Столетова (1888-1890 р.р.)

#### Фотоелектричний ефект

(Г. Герц у 1883 р.)

зовнішній

внутрішній (1873 р. - У. Сміт)

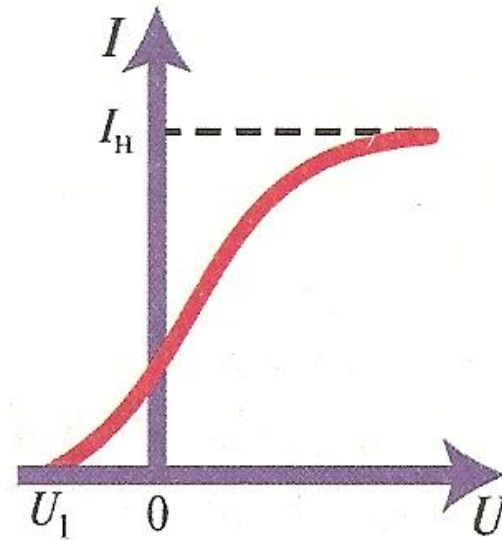
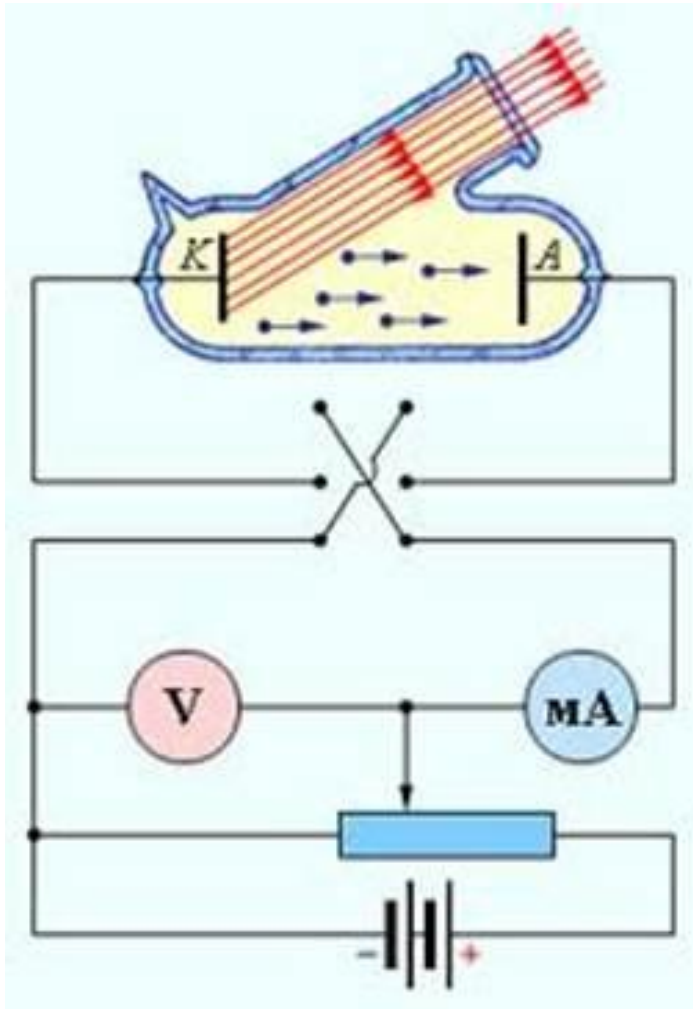


Зовнішній фотоелектричний ефект – звільнення електронів з речовини під дією світла

[http://javalab.org/lee/2016/photoelectric\\_effect\\_2/](http://javalab.org/lee/2016/photoelectric_effect_2/)  
[http://javalab.org/lee/2016/photoelectric\\_effect\\_2/](http://javalab.org/lee/2016/photoelectric_effect_2/)

# 1.2. Квантова оптика

## Фотоелектричний ефект



Струм насичення

$$I_H = en$$

$I_H$  - струм насичення,  $e$  - заряд електрона,  $n$  - число електронів, що вивільнюються з катода за одиницю часу

$U_1$  — гальмівна напруга

## Квантові оптичні явища



**Heinrich Rudolf Hertz**

22 February 1857 – 1 January 1894



**О. Г. Столетов**

10 August 1839 – 27 May 1896

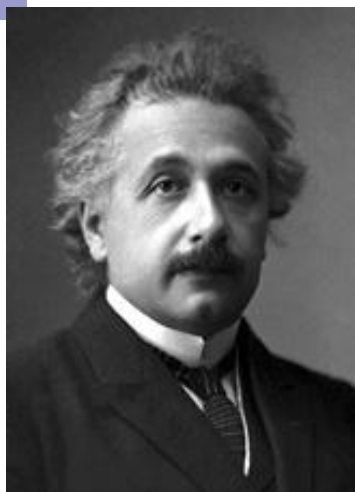
### Закономірності фотоефекту:

1. Явище фотоефекту **безінерційне**.
2. **Число електронів**, що вивільнюються світлом за 1с, прямо **пропорційне величині світлового потоку**, що падає на досліджуване тіло.
3. **Швидкість** фотоелектронів, що **вилітають**, тим більша, чим більша **частота** падаючого світла, але вона **не залежить від його інтенсивності**.  
*Гальмівна напруга лінійно залежить тільки від частоти світла і не залежить від інтенсивності.*
4. Фотоефект починається тільки за цілком певної для даного металу мінімальної частоти світла; цю частоту (довжину хвилі) називають «**червоною межею**» фотоефекту.

**Закономірності фотоефекту неможливо було узгодити з основними положеннями хвильової теорії світла!**

## 1.2. Квантова оптика

### Рівняння Ейнштейна (1905 р.)



Альбэрт Ейнштэйн  
(14 березня 1879 р. - 8 квітня 1955 р.)

А. Ейнштейн зробив припущення, що світло, не тільки випромінюється, а й поглинається теж квантами. Застосувавши до взаємодії фотона з електроном закон збереження енергії, А. Ейнштейн вивів рівняння фотоефекту:

$$h\nu = A_{\text{вих}} + \frac{mv^2}{2}$$

$h\nu$  - енергія фотона

$A$  - робота виходу електрона

$\frac{mv^2}{2}$  - кінетична енергія, надана електрону

$$\nu_{\min} = A_{\text{вих}}/h$$

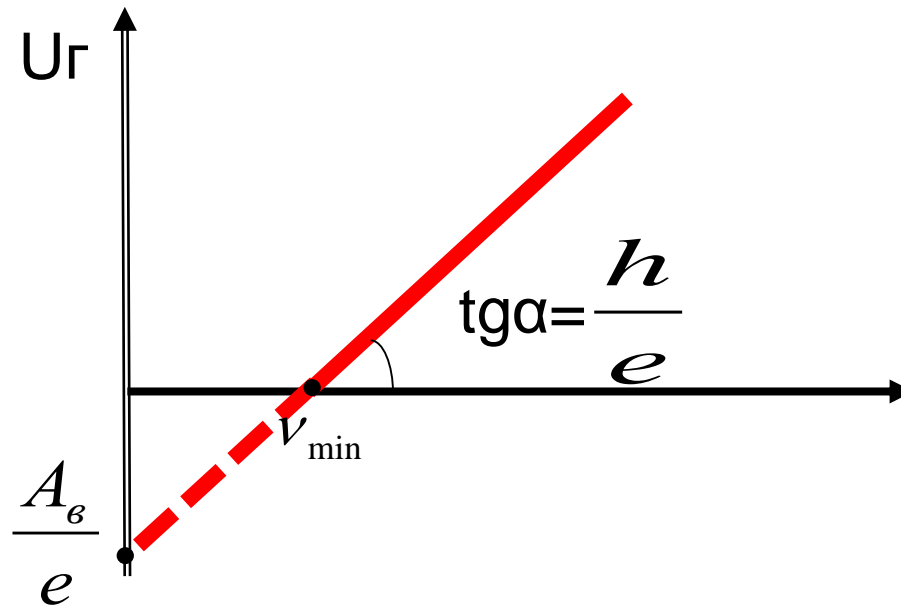


$$\lambda_{\max} = hc/A_{\text{вих}}$$

$$U_{\Gamma} = \frac{h\nu}{e} - \frac{A_{\text{вих}}}{e}$$

Einstein was awarded the Nobel Prize in 1921 for "his discovery of the law of the photoelectric effect"

## 1.2. Квантова оптика



Експериментальна залежність гальмівної напруги від частоти дає змогу визначити сталу Планка та роботу виходу електронів з металу



## 1.2. Квантова оптика

### Закони фотоефекту

1. Кількість електронів, які вириваються світлом з поверхні металу за одиницю часу, прямо пропорційна поглинутій за цей час енергії світлової хвилі.
2. Максимальна кінетична енергія фотоелектронів лінійно зростає з частотою світла та не залежить від його інтенсивності.
3. Червона межа фотоефекту залежить лише від речовини фотокатода

# ОПТИКА Л.14.

## Фотонні приймачі

на зовнішньому фотоелекті

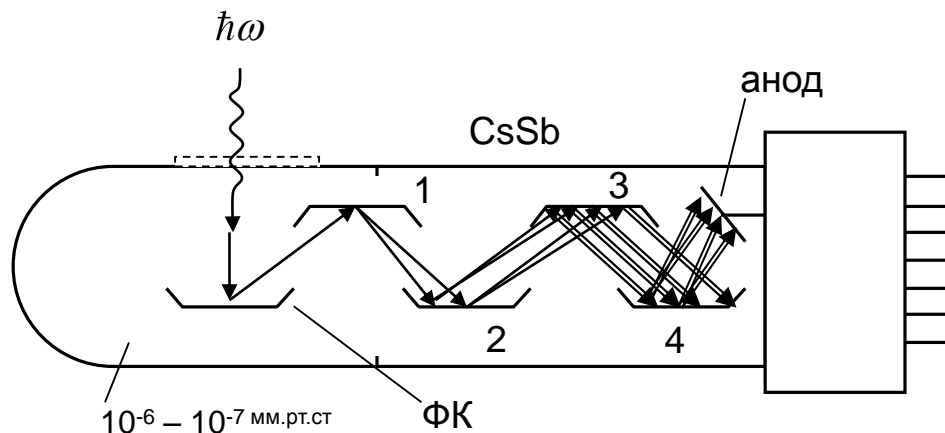
на внутрішньому фотоелекті

Фотоелектронні  
помножувачі (ФЕП)

ОЕП

Фотоелементи

Фоторезистори  
Фотодіоди  
Фототранзистори  
ФПЗЗ



$$\Phi_{ph0} \sim 10^{-19} \text{ Вт}$$



ФТІ кафедра ЛФ

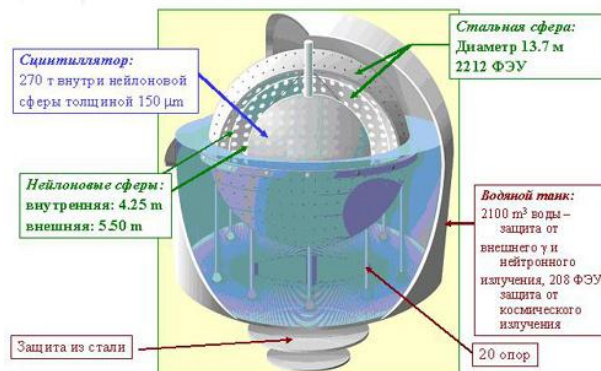
## 1.2. Квантова оптика

### Приклад

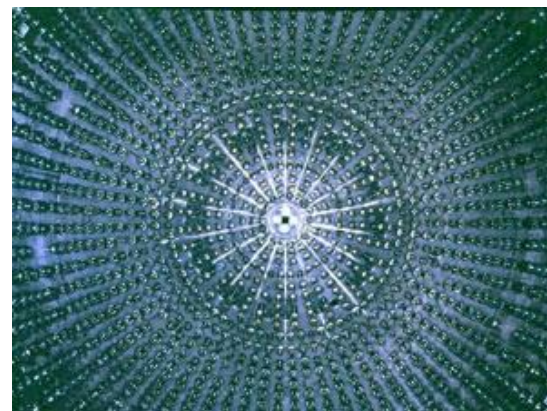
*Знайти роботу виходу електронів з поверхні деякого металу, якщо при переході з опромінення його фотонами з енергією в 2 еВ на опромінення фотонами з енергією 1 еВ максимальна швидкість фотонів змінилась удвічі.*

**2/3 еВ**

## Застосування ФЕП



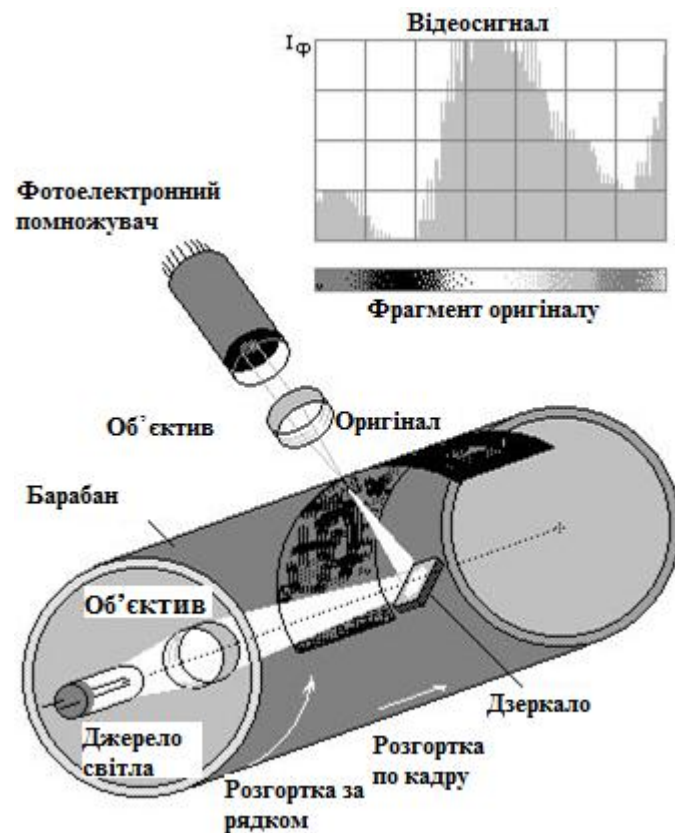
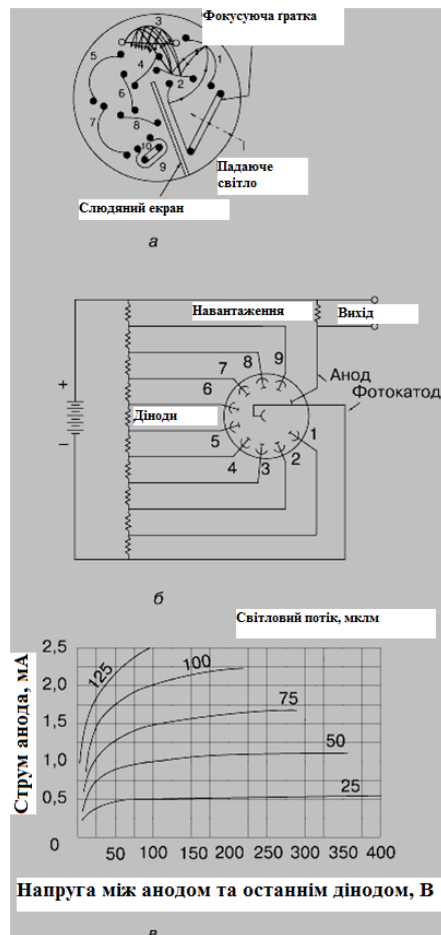
2212 ФЕП



Детектор Борексіно, створений за участю міжнародних кооперацій провідних світових наукових центрів в підземній лабораторії, розташованій в гірському масиві Гран Сассо (Італія), розпочав реєстрацію нейтрино, що випромінюються Сонцем. Вперше були спостережені сонячні нейтрино з енергією менше 1 MeV (мегаелектронвольт), які народжуються в ядерних реакціях, що відбуваються в центральній області Сонця.

# ОПТИКА Л.14.

## Застосування ФЕП



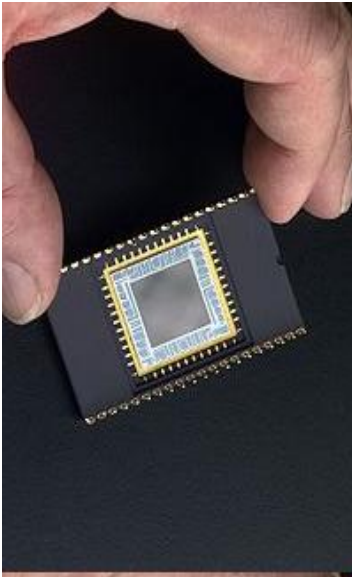
**Схема барабанного сканера з ФЕП**  
 Обертанням барабана забезпечується рядкова розгортка зображення, а переміщенням фотоголівки уздовж барабана - кадрова



# ОПТИКА Л.14.

## Внутрішній фотоефект

### Фото-прилади із зарядовим зв'язком (Нобелівська премія з фізики 2009)



Copyright © National Academy of Engineering

Willard S. Boyle

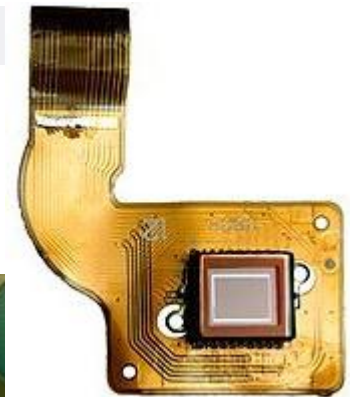
🕒 1/4 of the prize



Photo: National Inventors Hall of Fame Foundation/SCANPIX

George E. Smith

🕒 1/4 of the prize

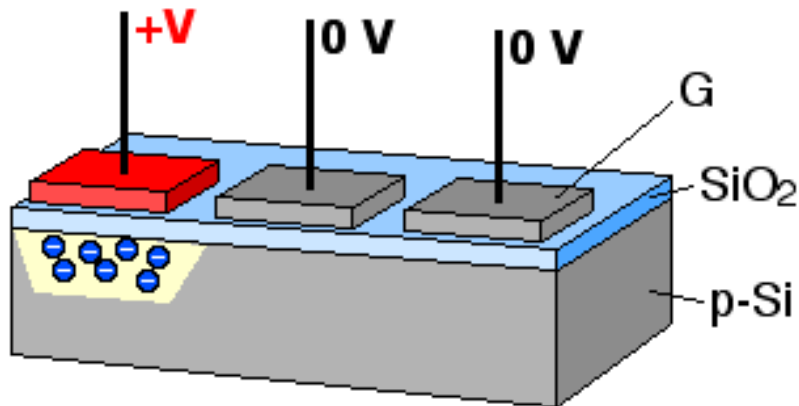


ПЗЗ-лінійка CCD from a fax machine



ФТІ кафедра ПФ

Array of 30 CCDs used on Sloan Digital Sky Survey telescope imaging camera



Принцип роботи ПЗЗ

## 1.2. Квантова оптика

### Енергія, маса та імпульс фотона

За теорією Ейнштейна «Світло – потік «частинок» - фотонів»

$$E_{\phi} = h\nu = \hbar\omega$$

Виходячи із взаємозв'язку  
маси та енергії

$$m = \frac{E_{\phi}}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{c\lambda}$$

Маса частинки, що  
рухається зі швидкістю  $v$ ,  
де  $m_0$  - маса спокою

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

**маса спокою  
фотону  
дорівнює нулю!**

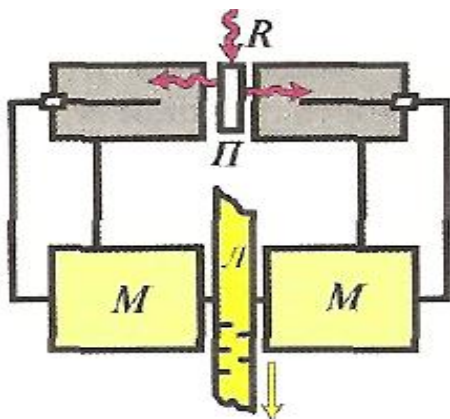
Імпульс фотона

$$p_{\phi} = \frac{E_{\phi}}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} = \hbar k$$

## 1.2. Квантова оптика

Досліди зі слабкими світловими потоками -  
підтвердження фотонної природи світла

Досліди В. Боте і С.І.Вавилова



Дослідивши слабе рентгенівське випромінювання, В. Боте (1891-1957) довів, що воно поширюється в різні боки не одночасно: його фотони довільно вилітають у той чи інший бік.



Ідея С.І.Вавилова про флуктуації числа фотонів у світловому пучку



Реєстрація спалахів в досліді Вавилова



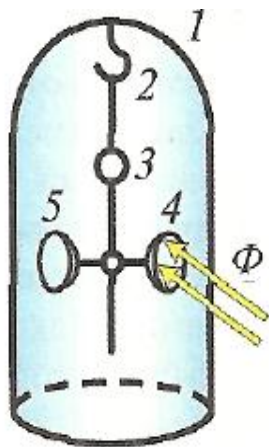
### Тиск світла у хвильовій і фотонній теоріях

#### Досліди П.М.Лебедева

*Ідея про тиск світла на освітлені тіла - І. Кеплер (1571—1630) (причина зміщення кометних хвостів у напрямку від Сонця)*

*К. Максвелл теоретично обґрунтував і визначив величину світлового тиску, виходячи з уявлень про електромагнітну природу світла*

*Фотонна теорія: результат передачі імпульсу фотонів поверхні тіла*



Експериментально світловий тиск вперше виявив і виміряв П.М.Лебедев у 1900 р. У посудині 1 із високим вакуумом підвішували на тонкій скляній нитці 2 систему з двох дуже тонких пластинок 4 і 5. У таких пластинках температура на обох поверхнях практично була однаковою, що за низького тиску давало змогу усунути радіометричний ефект. Одна пластинка мала чорну, інша -дзеркальну поверхню. Пластинка, на яку посилали пучок інтенсивного світла  $\Phi$  від електричної дуги, під дією світлового тиску зміщувалася. При цьому скляна нитка підвісу закручувалася на деякий кут, який вимірювали за допомогою зорової труби і дзеркальця 3, прикріпленого до нитки. За величиною кута закручування обчислювали світловий тиск на пластинку.

Тиск сонячного світла, що падає нормально на чорну поверхню,  $4 \cdot 10^{-6} \text{Па}$ .

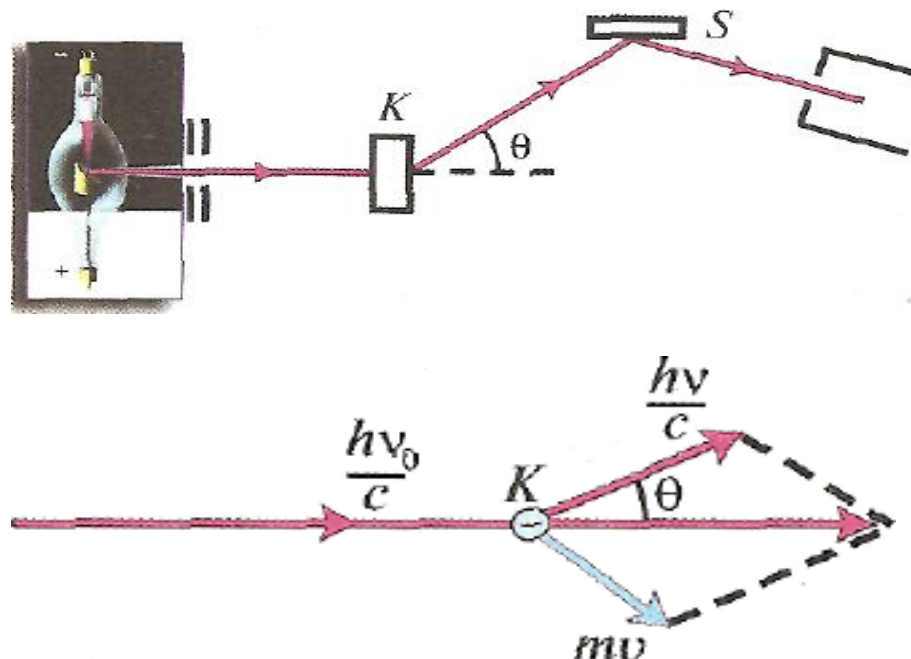
## Ефект Комптона (1922р.)



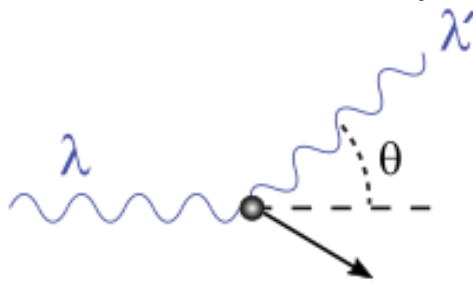
**Arthur Holly Compton** (1892 – 1962)

an American physicist.

Nobel Prize in Physics, 1927 ( for his 1923 discovery of the Compton effect)



Вузький пучок рентгенівських променів спрямовували на деяку речовину K і після розсіювання у ній досліджували спектрографом. У 1923 р., досліджуючи розсіювання жорстких рентгенівських променів на парафіні, А. Комптон (1892—1962) помітив, що в спектрі розсіяних променів під яким завгодно кутом  $\theta$  до початкового напрямку поряд із лінією, що відповідає частоті падаючих променів  $\nu_0$ , з'являється лінія променів меншої частоти  $\nu$ .



$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = 2\lambda_k \sin^2 \frac{\theta}{2}$$

# 1.2. Квантова оптика

## Ефект Комптона

Закони збереження:

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

→ Розділивши на  $c$ , піднесемо до квадрату

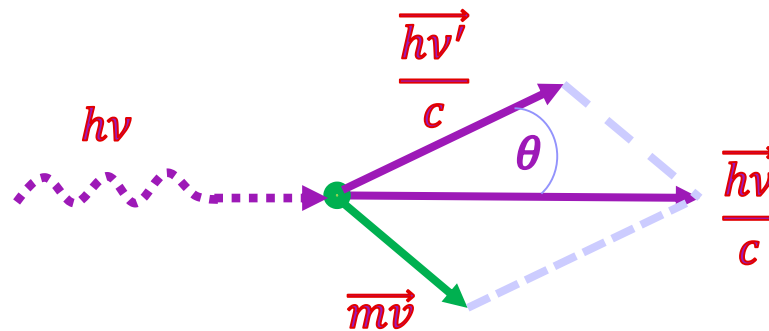
імпульсу  $\frac{h\nu}{c} = \frac{h\nu'}{c} + m\vec{v}$

$$m^2c^2 = m_0^2c^2 + \left(\frac{h\nu}{c}\right)^2 + \left(\frac{h\nu'}{c}\right)^2 + 2m_0h\nu - 2\frac{h^2\nu\nu'}{c^2} - 2hm_0v'$$

За теоремою косинусів  $(m\vec{v})^2 = \left(\frac{h\nu}{c}\right)^2 + \left(\frac{h\nu'}{c}\right)^2 - 2\frac{h^2\nu\nu'}{c^2}\cos\theta.$

Після віднімання  $m^2(c^2 - v^2) = m_0^2c^2 + 2m_0h(\nu - \nu') - 2\frac{h^2\nu\nu'}{c^2}(1 - \cos\theta)$

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \Rightarrow m^2(c^2 - v^2) = m_0^2c^2$$



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

$$\Lambda_0 = h/m_0c = 2,426\,3096(15) \cdot 10^{-12} \text{ м}$$