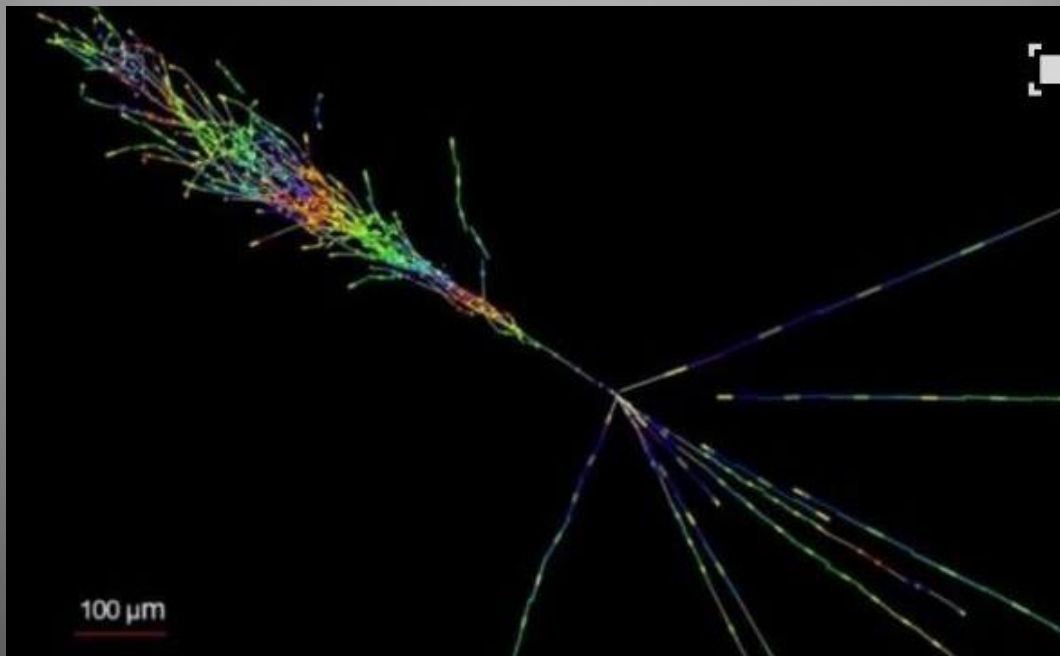


# 6. Квантова фізика

Квантова оптика розглядає світло як **потік корпускул (фотонів)**, при цьому взаємодія квантів світла з речовиною, на відміну від неперервного процесу в хвильовій оптиці, носить **квантовий** (стрибкоподібний) характер



Народження нейтрино (2023 р.)

# 6.1. Теплове випромінювання

6.1.1. Теплове випромінювання та люмінесценція.

6.1.2. Характеристики теплового випромінювання.  
Абсолютно чорне тіло.

6.1.3. Закони теплового випромінювання.

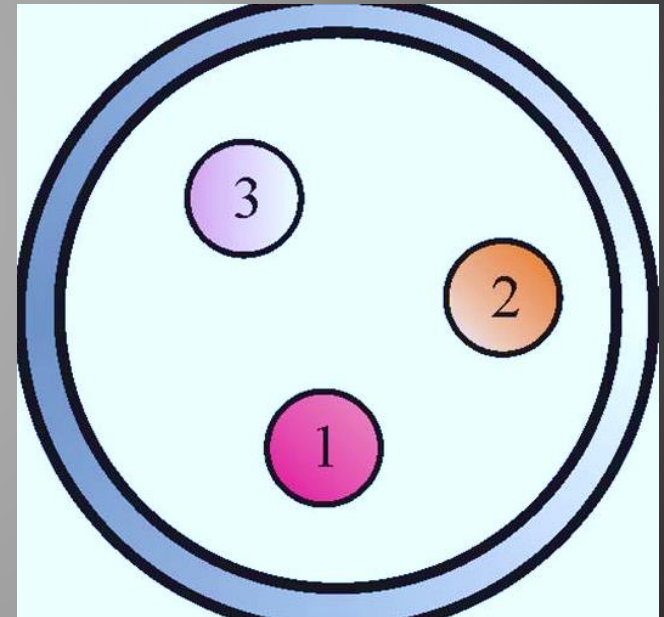
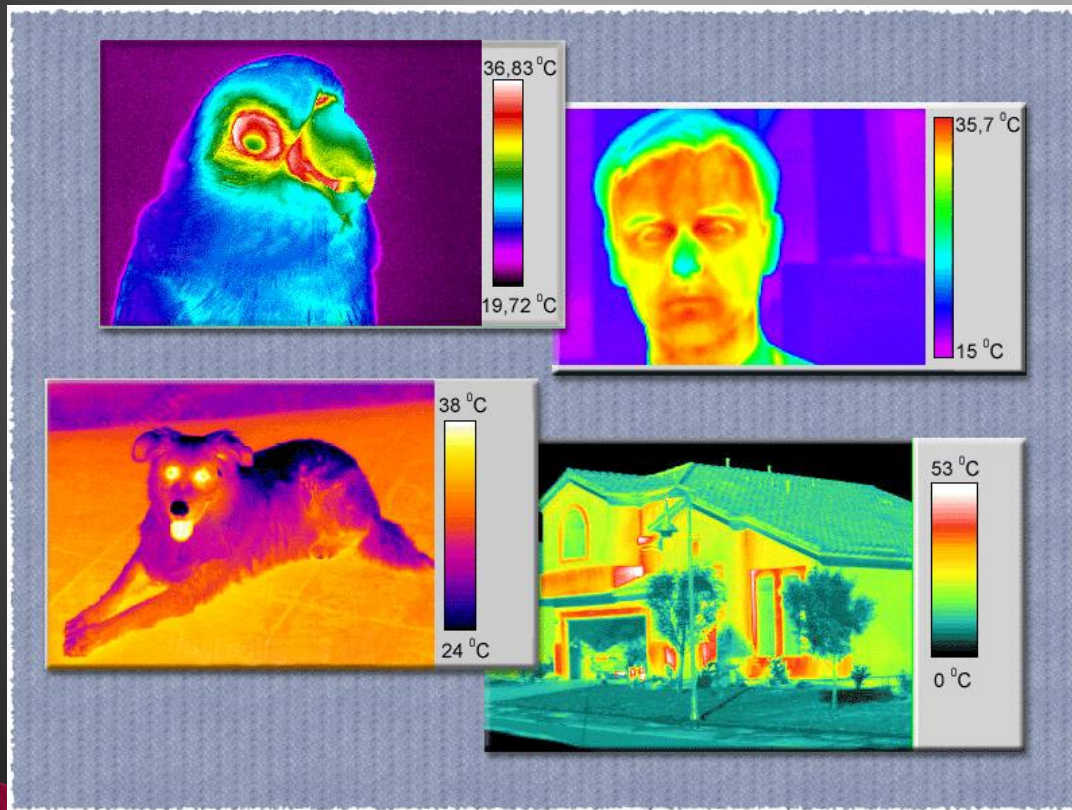
6.1.4. Теорія теплового випромінювання та її ускладнення.

6.1.5. Гіпотеза та закон Планка для теплового випромінювання.

6.1.6. Застосування законів теплового випромінювання. Оптична пірометрія.

## 6.1.1. Теплове випромінювання

Єдиний вид випромінювання тіл, при якому випромінювання знаходиться *в термодинамічній рівновазі* з самим тілом.



# Властивості теплового випромінювання

1. Відбувається *по всьому спектру частот* від нуля до нескінченності

2. Інтенсивність теплового випромінювання нерівномірна по частотах і має явно виражений максимум при певній частоті

3. Із зростанням температури загальна інтенсивність теплового випромінювання зростає

4. Із зростанням температури максимум випромінювання зміщується в бік більших частот (менших довжин хвиль)

5. Характерне для тіл незалежно від їхнього агрегатного стану

6. Має *рівноважений характер випромінювання*



**Люмінесценція - один з видів надлишкового над тепловим випромінювань:  
перевипромінювання тілом енергії після попереднього збудження тіл  
зовнішнім впливом.**

## Фотолюмінесценція

- флуоресценція (час життя 10 мкс);
- фосфоресценція (от 10 мс – 10 с);

## Хемілюмінесценція

- біолюмінесценція

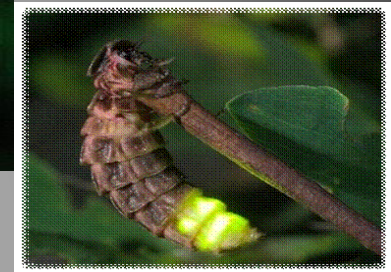
## Катодолюмінесценція

## Радіолюмінесценція

## Рентгенолюмінесценція

## Сонолюмінесценція

## Електролюмінесценція



## 6.1.2. Характеристики теплового випромінювання. Абсолютно чорне тіло

**Випромінюваність** - повна енергія, яку випромінює тіло з одиниці своєї поверхні за одиницю часу:

$$R_e = \frac{\Delta W}{\Delta S \cdot \Delta \tau}$$

**Спектральна поглинальна здатність** - визначається часткою енергії, яка поглинута тілом на даній частоті (чи довжині хвилі), від усієї енергії, що падає на тіло на даній частоті (чи довжині хвилі):

$$a_{\lambda,T} = \frac{W_{\text{погл}}(\lambda, T)}{W_{\text{пад}}(\lambda, T)}$$

$$a_{\nu,T} = \frac{W_{\text{погл}}(\nu, T)}{W_{\text{пад}}(\nu, T)}$$

За цією характеристикою вводиться три типи ідеалізованих тіл:

- ідеальне дзеркало  $a_{\lambda} \equiv 0$ ;
- сірі тіла, у яких  $0 < a_{\lambda} = \text{const} < 1$ ;
- абсолютно чорне тіло (АЧТ), у якого  $a_{\lambda\text{АЧТ}} \equiv 1$ .

**Спектральна випромінювальна здатність** - чисельно рівна тій енергії, яка випромінюється з одиниці поверхні тіла, за одиницю часу, в одиницю спектрального діапазону, тобто

$$r_{\lambda,T} = \frac{\Delta W}{\Delta S \cdot \Delta \tau \cdot \Delta \lambda}$$

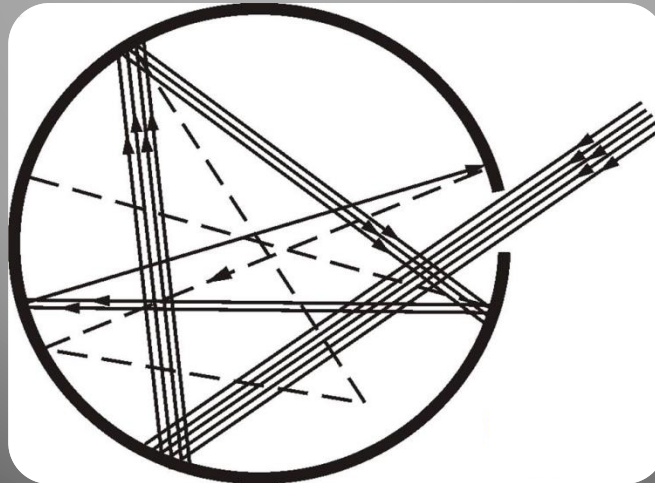
$$r_{\nu,T} = \frac{\Delta W}{\Delta S \cdot \Delta \tau \cdot \Delta \nu}$$

# Абсолютно чорне тіло -

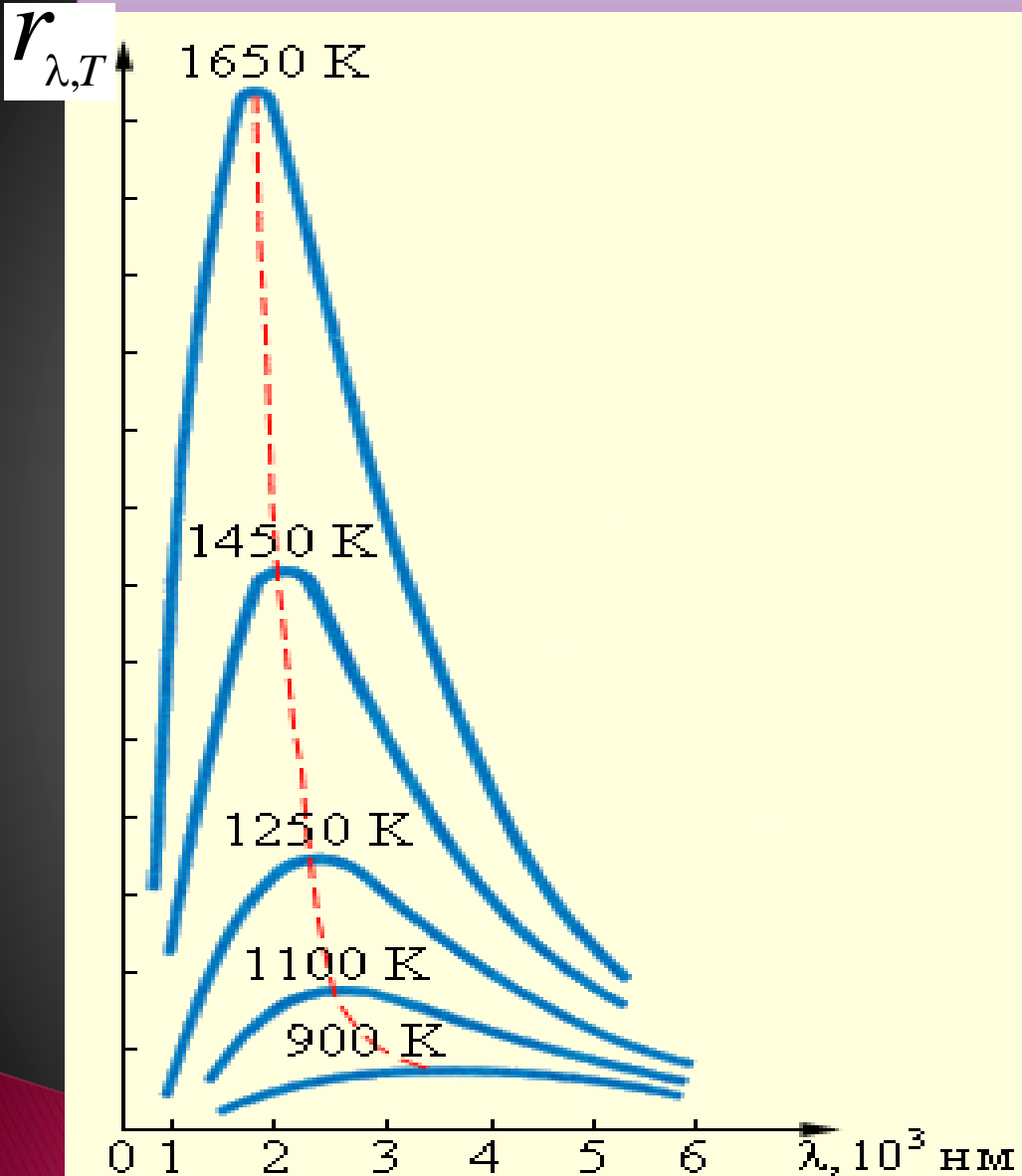
ідеалізована модель тіла, спектральна поглинальна здатність якого тотожно рівна одиниці для будь-яких довжин хвиль падаючого на тіло випромінювання за даної температури

$$a_{\lambda АЧТ} \equiv 1$$

**Модель абсолютно чорного  
тіла АЧТ**



## 6.1.3. Закони теплового випромінювання





## 6.1.3. Закони теплового випромінювання

### Закон Кірхгофа

Оснований на застосуванні принципів **термодинамічної рівноваги** до систем з тепловим випромінюванням.

Відношення **спектральної випромінювальної здатності** до **спектральної поглинальної здатності** не залежить від природи тіл і є універсальною функцією частоти та температури:

$$\frac{r_{\lambda,T1}}{a_{\lambda,T1}} = \frac{r_{\lambda,T2}}{a_{\lambda,T2}} = \dots = \frac{r_{\lambda,T(\text{АЧТ})}}{a_{\lambda,T(\text{АЧТ})}} = r_{\lambda,T(\text{АЧТ})}$$

## 6.1.3. Закони теплового випромінювання

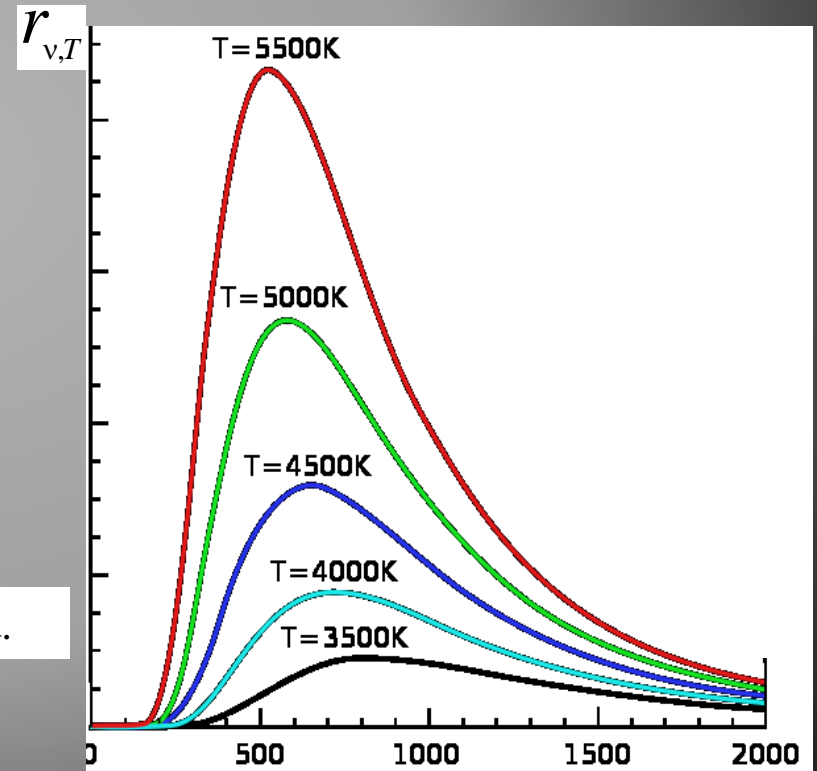
### Закон Стефана-Больцмана

Отриманий на основі аналізу спектрів випромінювання АЧТ Площа під графіком – випромінюваність тіла

Випромінюваність АЧТ  
прямопропорційна четвертій степені  
абсолютної температури тіла:

$$R_e = \sigma T^4$$

де  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$  – стала Стефана-Больцмана.



## 6.1.3. Закони теплового випромінювання

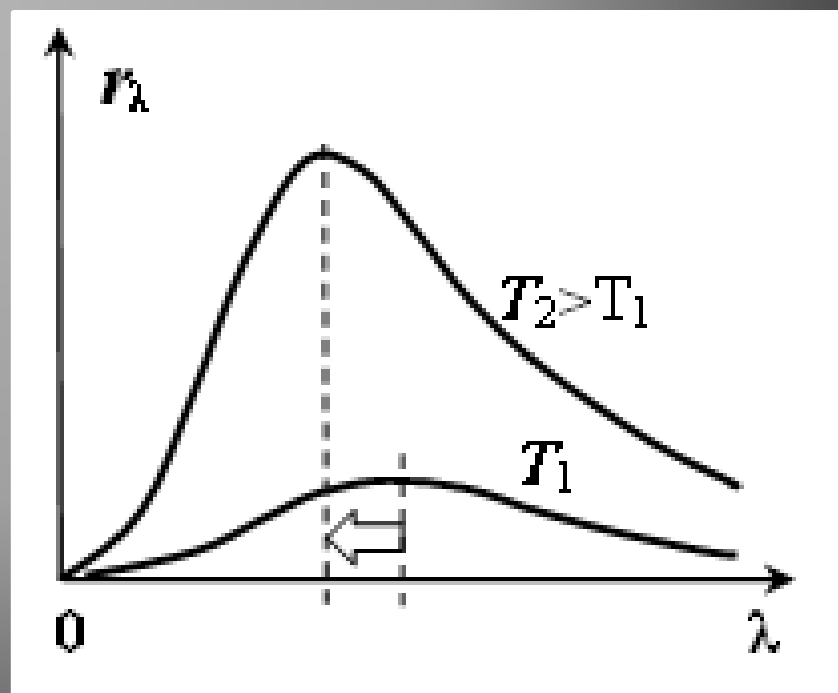
### Закон зміщення Віна

Отриманий на основі вивчення спектрів АЧТ:

Довжина хвилі, на яку припадає **максимум** в спектрі випромінювання АЧТ, обернено пропорційна абсолютній температурі  $T$ , при якій знаходиться тіло:

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

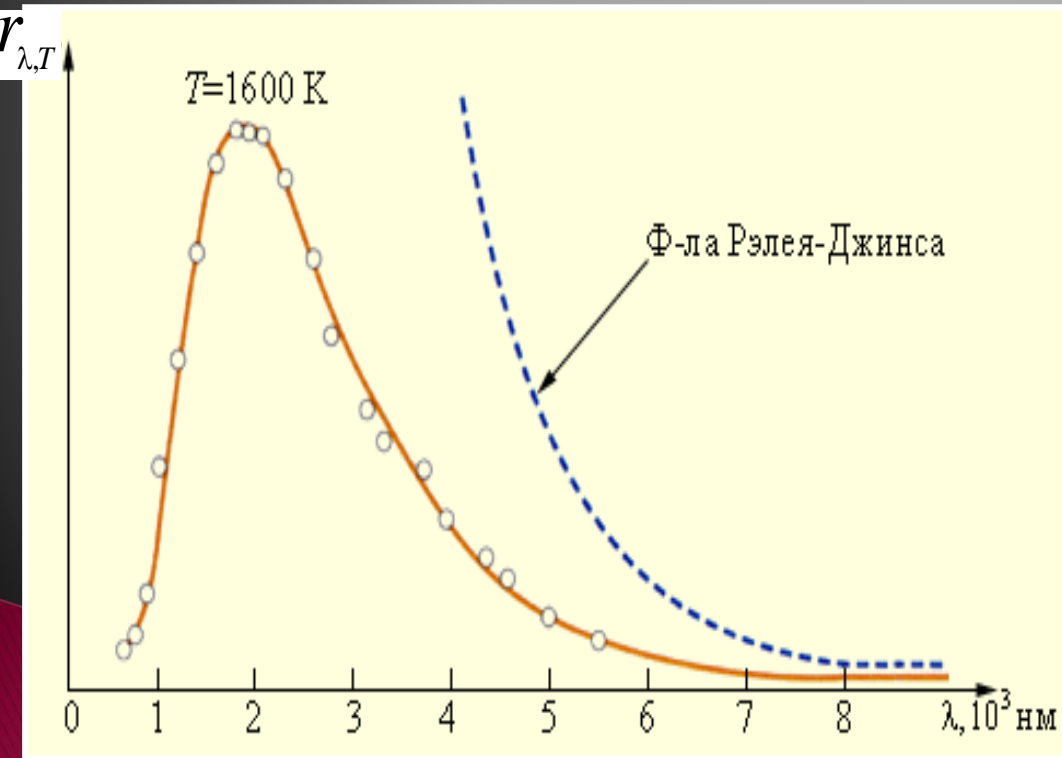
де  $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$  – стала Віна.



## 6.1.4. Теорія теплового випромінювання та її утруднення

Жодна з багатьох спроб (Кірхгоф, Він, Релей, Джінс) отримати теоретичний спектр теплового випромінювання (близький до експериментального спектру АЧТ) на основі класичних уявлень (неперервний характер випромінювання) не привела до успіху.

Зокрема формула **Релєя-Джінса** породжувала цілу проблему, яку називали "тепловою смертю Всесвіту".

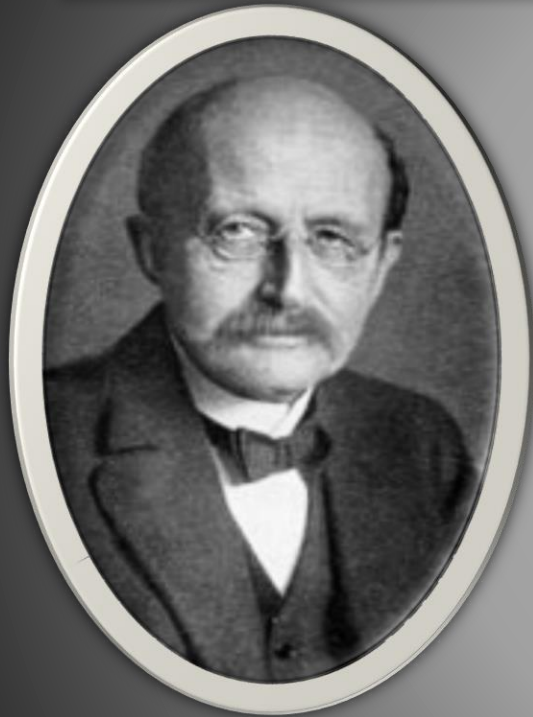


$$r_{\nu,T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \cdot kT$$

$$r_{\nu,T} = 2\pi\lambda^2 \cdot kT$$



## 6.1.5. Гіпотеза та закон Планка для теплового випромінювання 1900 р



- Німецький фізик.
- Основоположник квантової теорії.
- Вперше, всупереч представленням класичної фізики, передбачив, що енергія випромінювання випускається не безперервно, а порціями – квантами, і на основі цієї гіпотези вивів закон теплового випромінювання (закон Планка).
- Ввів (1900) фундаментальну фізичну постійну – сталу Планка, без якої неможливий опис властивостей атома, молекули і інших квантових систем.
- Нобелівська премія з фізики (1918).

23. 04. 1858 –  
04. 10. 1947

## 6.1.5. Гіпотеза та закон Планка для теплового випромінювання

Як показав досвід, єдина можливість обійти ускладнення при поясненні законів теплового випромінювання – це відмова від уявлень про **неперервний характер випромінювання**.

Тому в 1900 році Планк сформулював гіпотезу про квантовий (стрибкоподібний) характер теплового випромінювання у **вигляді порції енергії**:

$$W = h \nu$$

де  $h = 6,625 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – стала Планка

$$W = \frac{hc}{\lambda}$$

## 6.1.5. Гіпотеза та закон Планка для теплового випромінювання

### Формула Планка для спектра АЧТ

На основі гіпотези про квантовий характер випромінювання у 1900 р. Планк отримав формулу для **спектральної випромінювальної здатності АЧТ**

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

Формула ідеально описувала експериментальні спектри АЧТ. Планком було показано, що з цієї формули легко вивести закони Стефана-Больцмана та Віна.

## 6.1.5. Закони теплового випромінювання, які можна отримати із закону Планка

### 1. Стефана – Больцмана (інтеграл)

$$R_e = \int_0^{\infty} r_{\nu, T} d\nu = \int_0^{\infty} \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \cdot \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} d\nu \Rightarrow$$

$$R_e = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} \cdot T^4 \Rightarrow \sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4}$$



## 6.1.5. Закони еплового випромінювання, які можна отримати із закону Планка

### 2. Віна (похідна)

$$\frac{\partial r_{\lambda,T}}{\partial \lambda} = 0 \Rightarrow \lambda_{\max} T = \frac{hc}{4,965k}$$

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

$$b_1 = \frac{hc}{4,965k} - \text{стала Віна}$$

### 3. Релея-Джінса

$$\text{Якщо: } h\nu \ll kT$$

$$e^{\frac{h\nu}{kT}} \approx 1 + \frac{h\nu}{kT} \Rightarrow e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1 = \frac{h\nu}{kT} \Rightarrow$$

$$r_{\nu,T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT$$

## 6.1.6. Застосування законів теплового випромінювання

*Оптична пірометрія це застосування законів теплового випромінювання для вимірювання температури сильно розігрітих тіл.*

1. **Радіаційна температура** – із закону Стефана – Больцмана  
*Використовують так званий радіаційний пірометр.*

$$T_{\text{рад}} = \sqrt[4]{\frac{R_e}{\sigma}}$$

$$T_{\text{рад}} \leq T_{\text{іст}}$$

2. **Колірна температура.** В якості пірометра використовують спектральний прилад. Колірну температуру визначають по максимуму в спектрі (закон зміщення Віна). Метод складний, проте визначає температуру тіл найбільш точно:

$$T_{\text{колір}} = \frac{b}{\lambda_{\text{max}}}$$

$$T_{\text{колір}} = T_{\text{іст}}$$

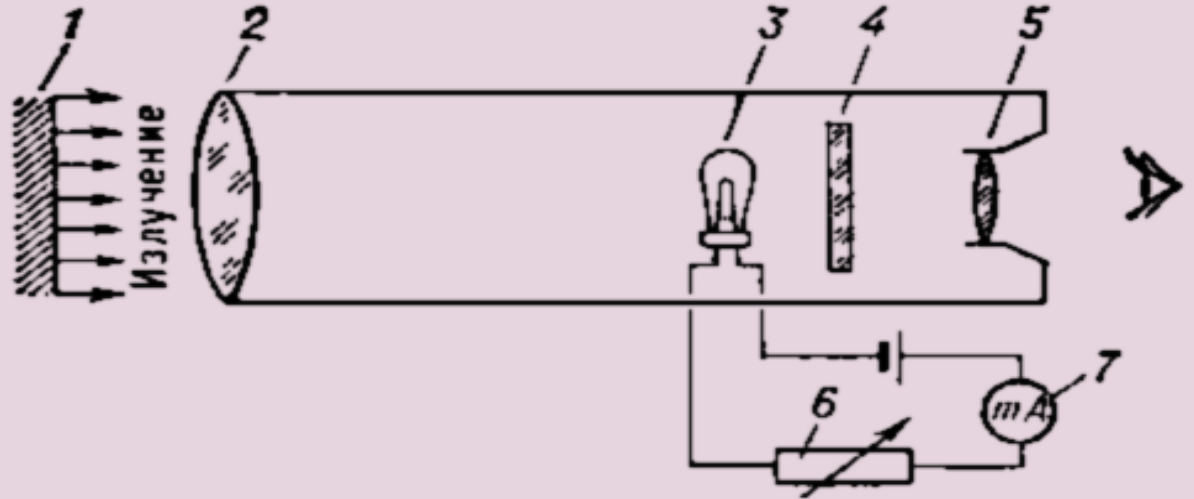
$$\lambda_{\text{max}} = \frac{b}{T_{\text{колір}}} = \frac{2.3 \times 10^{-3}}{36.6 + 273} =$$

3. **Яскравісна температура.** Експрес-метод. Застосовують пірометр з ниткою, що «зникає». Насправді мова йде про розігріту калібровану нитку, яка стає невидимою на фоні розігрітого тіла.

## 6.1.6. Застосування законів теплового випромінювання.

### Яскравісна температура.

Застосовують пірометр з ниткою, що «зникає», тобто про розігріту калібровану нитку, яка стає невидимою на фоні розігрітого тіла.



Принципова схема візуального *яскравісного пірометра* зі зникаючою ниткою:

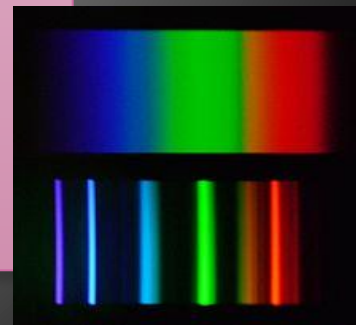
- 1 - джерело випромінювання
- 2 - оптична система (телескоп пірометра)
- 3 - еталонна лампа розжарювання
- 4 - фільтр з вузькою смугою пропускання
- 5 - об'єктив
- 6 - реостат, яким регулюють струм напруги
- 7 - вимірювальний прилад (міліамперметр)



# **Застосування законів теплового випромінювання**

## **Джерела світла**

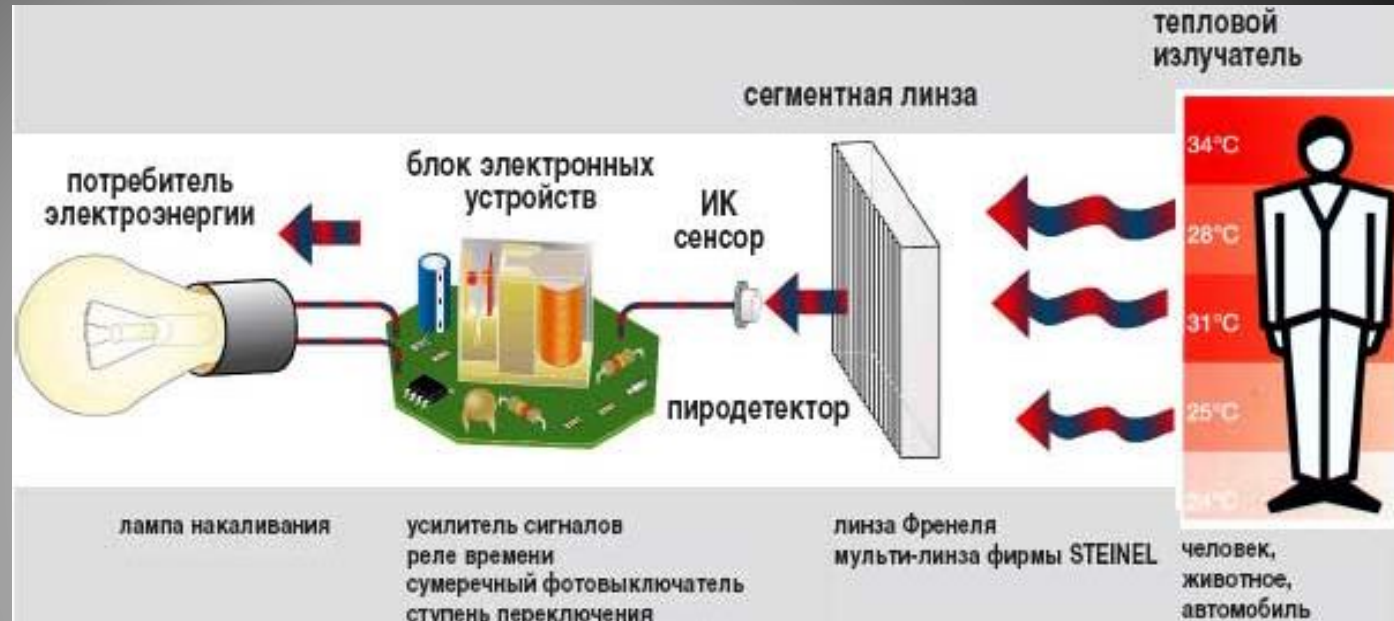
- У 1809 році англієць Деларю будує першу лампу розжарювання з платиновою спіраллю.
- У 1838 році бельгієць Жобар винаходить вугільну лампу розжарювання.
- У 1854 році німець Генріх Гебель розробив першу «сучасну» лампу: обвуглену бамбукову нитку у вакуумній посудині.
- 11 липня 1874 року О.М. Лодигін отримав патент на лампу з ниткою розжарення. Як нитку розжарення він використовував вугільний стрижень, поміщений у вакуумну посудину.
- У 1875 році В. Ф. Дідріхсон удосконалив лампу Лодигіна, здійснивши відкачування повітря з неї і застосувавши в лампі декілька волосків (в разі перегорання одного з них, наступний включався автоматично).
- У 1876 році П. М. Яблочков розробив один з варіантів електричної вугільної дугової лампи, названий "свічкою Яблочкова". Перевагою конструкції була відсутність необхідності в механізмі, що підтримує відстань між електродами для горіння дуги. Електродів вистачало приблизно на 2 години.





# Застосування законів теплового випромінювання

## Сенсорні датчики. Тепловізори.



Сенсор - це елемент, який служить для електричного вимірювання неелектричних величин.

*Пасивний інфрачервоний реєстратор руху.*

Принципова схема:

Теплові промені фокусуються за допомогою сегментної лінзи і направляються до піродетектору. Теплове тіло рухається, теплове випромінювання змінюється і піродетектор створює напругу. Ця напруга використовується як сигнал для електроніки.

## 6.2. Основи квантової фізики

6.2.1. Зовнішній фотоефект, його закономірності. Використання в техніці.

6.2.2. Фотони. Маса та імпульс фотону.

6.2.3. Світловий тиск. Формула Лебедєва. Ефект Комптона.

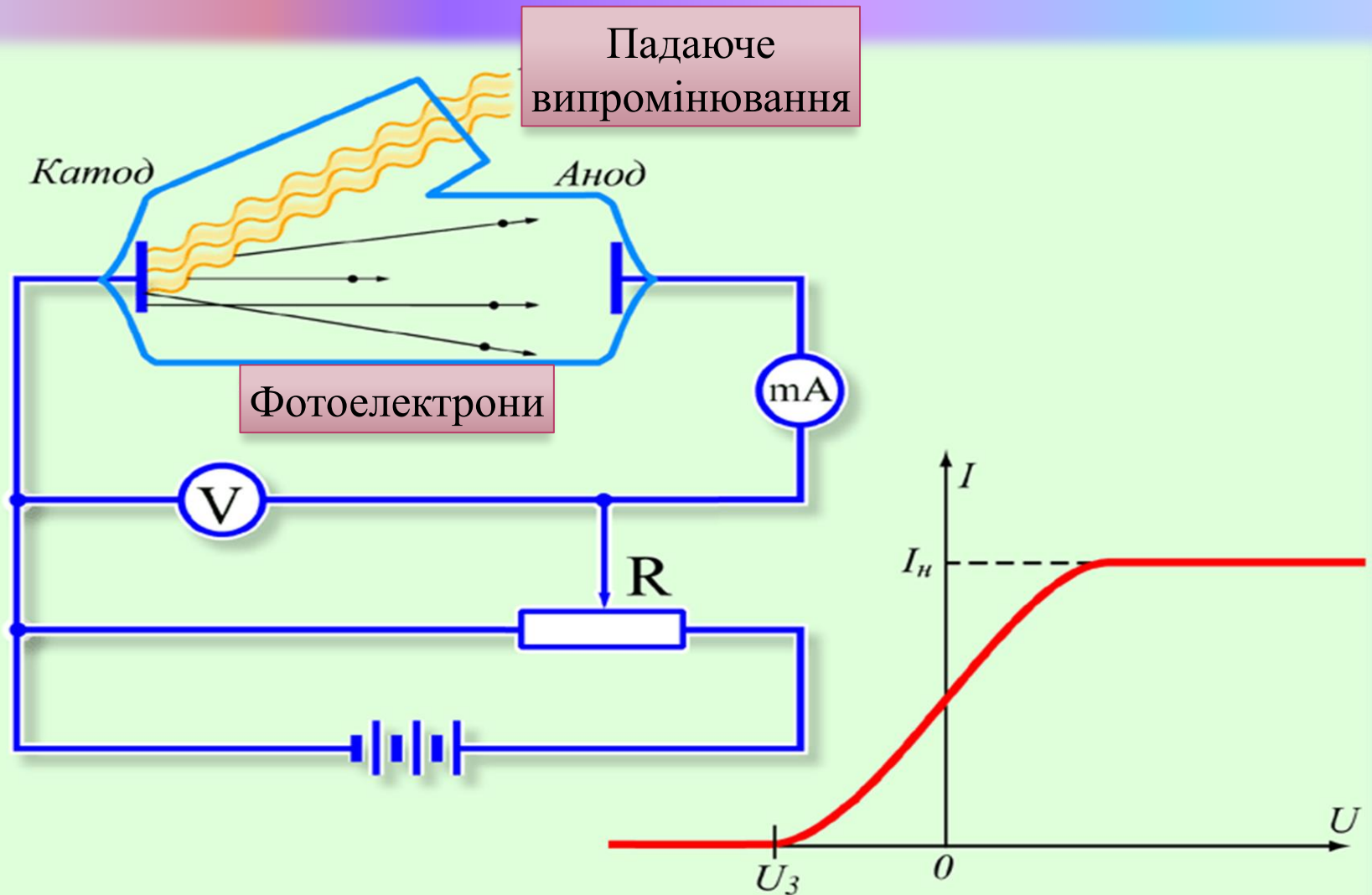
6.2.4. Корпускулярно-хвильовий дуалізм електромагнітного випромінювання.

## 6.2.1. Зовнішній фотоефект, його закономірності. Використання в техніці.

1. Фотоелектричний ефект був відкритий в 1887 році німецьким фізиком Г. Герцем.
2. У 1888–1890 роках експериментально досліджений А. Р. Столетовим.
3. Якнайповніше дослідження явища фотоефекту було виконане Ф. Ленардом в 1900 р.
4. У 1905 р. теоретичне пояснення закономірностей фотоефекту дав А. Ейнштейн на основі гіпотези М. Планка

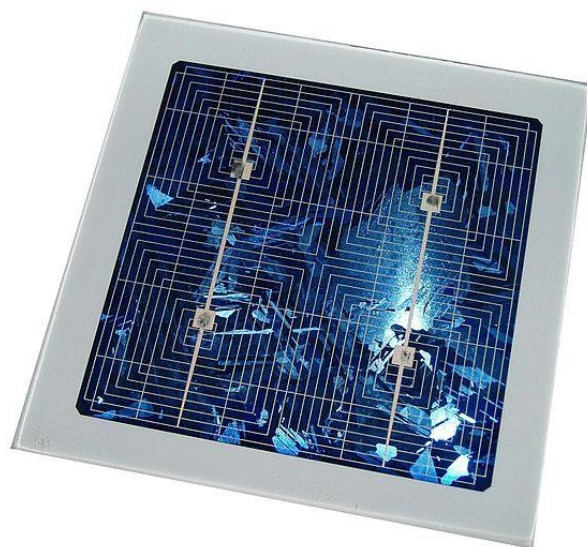
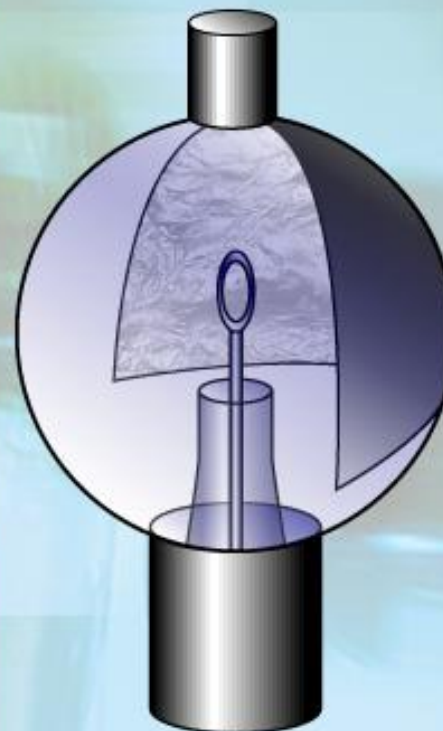
$$h\nu = A_{\text{вих}} + \frac{mv_{\text{max}}^2}{2}$$

# Схема експериментальної установки для дослідження зовнішнього фотоелектричного ефекту





# Фотоэлементы



СУРЬМЯНО-ЦЕЗИЕВЫЙ  
ВАКУУМНЫЙ ФОТОЭЛЕМЕНТ

Тип СЦВ-51 № 478

Т. У. №

Номинальное напряжение 240 в.

Чувствительность при номинальном напряжении

240 в. 104 мка/лм

Дата

Контролер ОТК

ОТК  
59



## 6.2.2. Фотони. Маса та імпульс фотону.

1

$$E = mc^2$$
$$E = h\nu$$

$\Rightarrow$

$$m_{\phi} = \frac{h\nu}{c^2}$$

2

$$m_{\phi} = \frac{m_{\phi 0}}{\sqrt{1 - \frac{c^2}{c^2}}} \equiv 0$$

$\Rightarrow$

Фотон існує тільки у русі!

3

$$p_{\phi} = m_{\phi}c = \frac{h\nu}{c^2}c$$

$\Rightarrow$

$$p_{\phi} = \frac{h\nu}{c}$$

$\Rightarrow$

$$p_{\phi} = \frac{h}{\lambda}$$



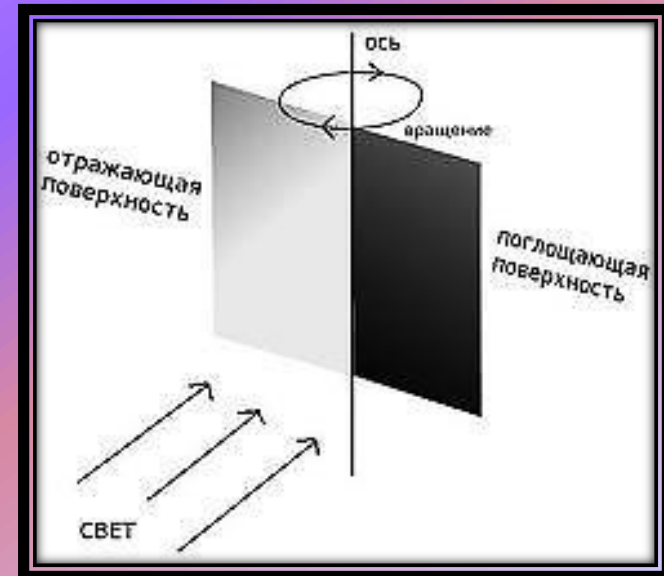
### 6.2.3. Світловий тиск. Формула Лебедєва.



$$P_{\phi} = \frac{N h \nu}{S_{ct}} (1 + \rho)$$

$$\rho = 1$$

$$\rho = 0$$

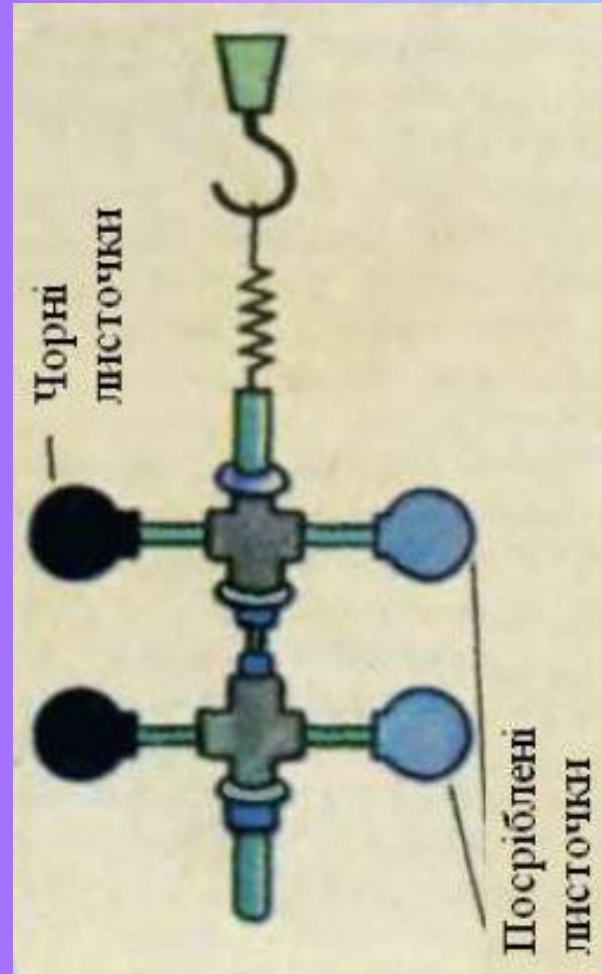


## 6.2.3. Світловий тиск. Формула Лебедєва.

### Схема досліду Лебедєва 1900



1866 - 1912



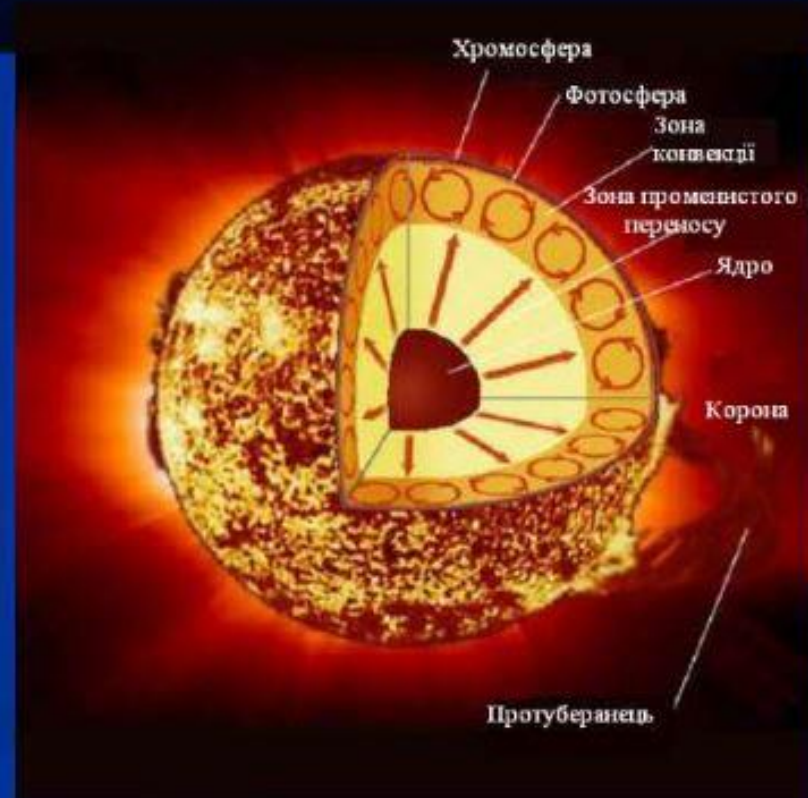


# Прояви тиску світла

Тиск сонячного світла є однією з причин утворення кометних хвостів.

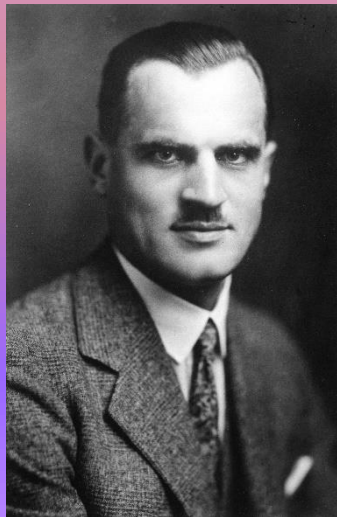


Під дією сили тяжіння речовина зірки намагається стиснутися. Цьому стисканню протистоїть тиск світла. Тому зірка має кулясту форму.

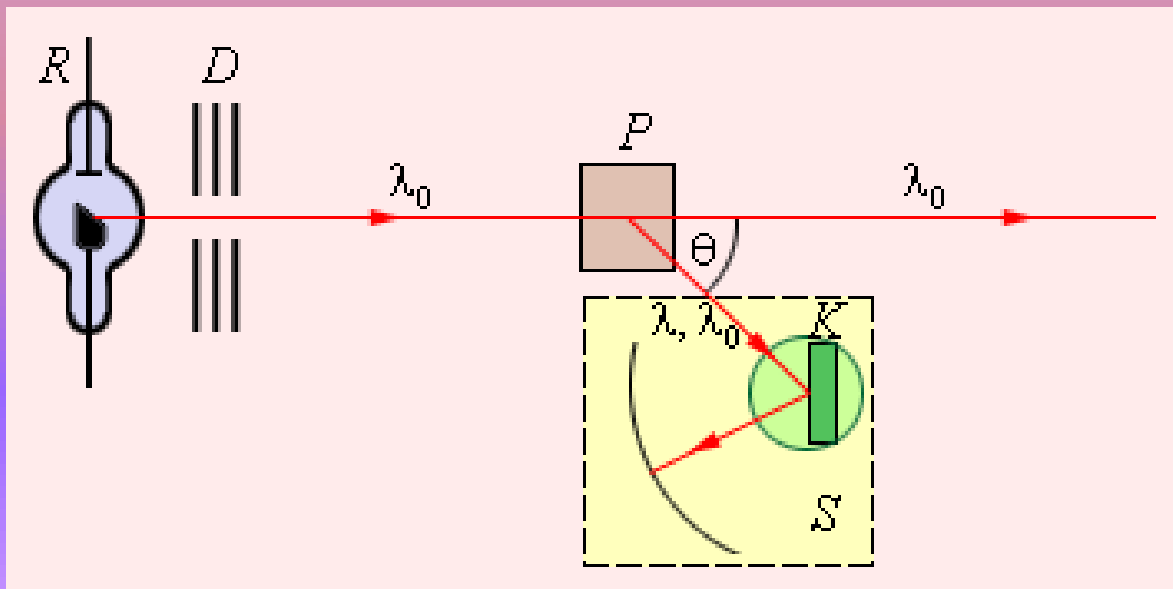


# Ефект Комптона 1923

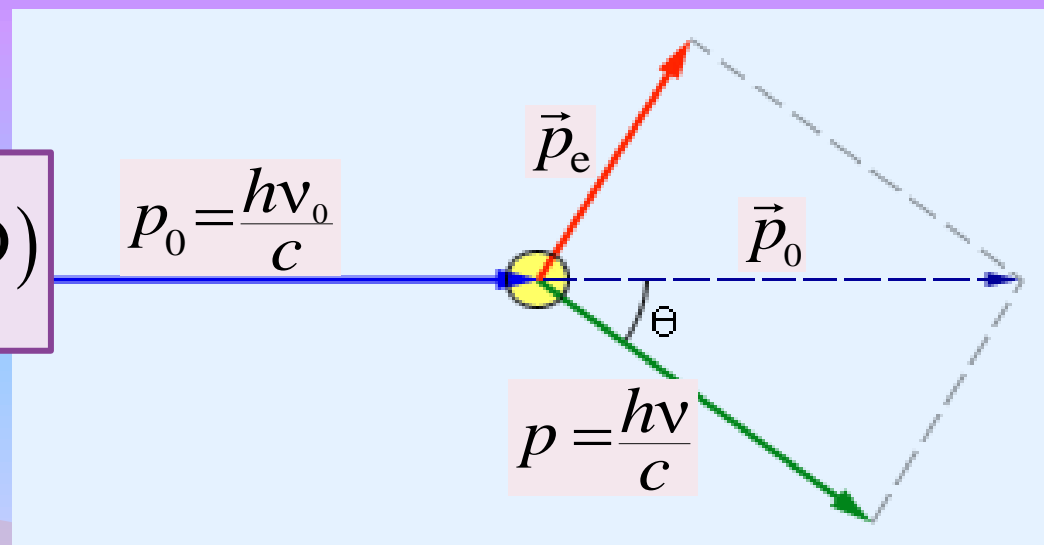
**Комптонівське розсіювання** — явище непружного розсіювання фотонів на вільних заряджених частинках, наприклад, електронах.



1892 - 1962



$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda_0 = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \Theta)$$



Ефект Комптона 1927 – нобелівська премія

Комптон розділив нагороду з Ч.Т.Р.Вільсоном



## 6.2.4. Корпускулярно-хвильовий дуалізм електромагнітного випромінювання

Хвильові характеристики  
 $\nu$ ,  $k=2\pi/\lambda$

1. Інтерференція

2. Дифракція

3. Поляризація

4. Дисперсія

видиме світло,  
інфрачервоне випромінювання,  
радіохвилі

Корпускулярні характеристики  
 $\varepsilon=h\nu$ ,  $p=h/\lambda$

1. Фотоефект

2. Комптон ефект

3. Світловий тиск

гамма - промені,  
рентгенівське випромінювання,  
ультрафіолетові хвилі