

# ТЕПЛОВЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ

**Теплове випромінювання** – це електромагнітне випромінювання, яке виникає за рахунок внутрішньої енергії випромінюючого тіла. Теплове випромінювання 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.

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

# ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

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

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

Для опису спектрального складу теплового випромінювання розглянемо енергію, випромінювану одиницею поверхні нагрітого тіла в одиницю часу у вузькому діапазоні частот від  $\omega$  до  $\omega + \Delta\omega$ . Цей потік променистої енергії, що випускається з одиниці поверхні тіла в усіх напрямках, пропорційний ширині спектрального діапазону, тобто  $\Delta\omega$ . Енергію, яка припадає на одиничний діапазон частот, називають **спектральною випромінювальною здатністю** тіла або **спектральною густиною енергетичної світності**

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

$$\left[ r_{\omega,T} \right] = \frac{\dot{A} \epsilon}{\text{л}^2}$$

**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  $\omega$  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  $\omega$**  показує, яка частка падаючого на тіло випромінювання частоти  $\omega$ , поглинається тілом

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

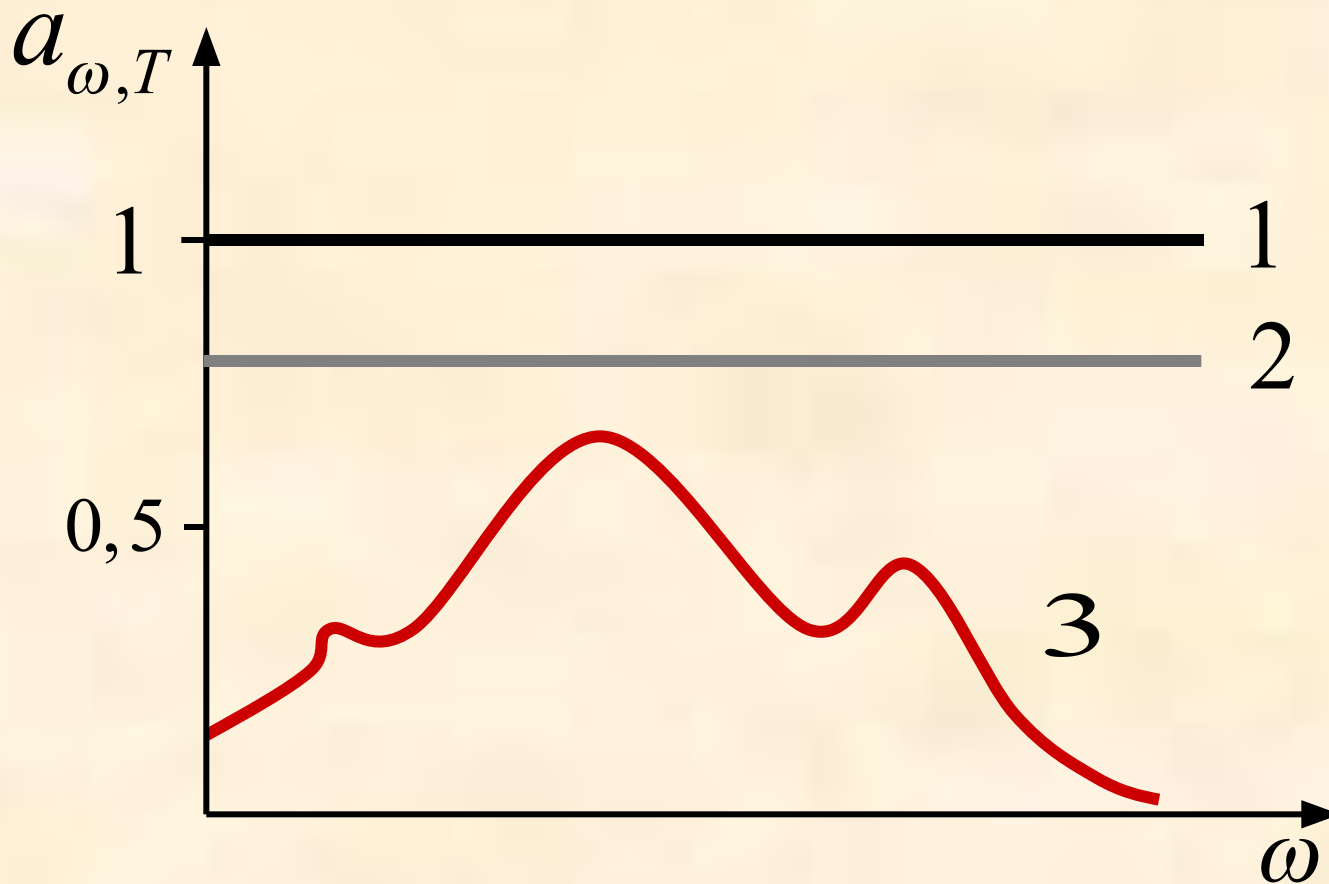
Це безрозмірна величина.

Будь-яке реальне тіло поглинає випромінювання різних частот по різному залежно від його температури. Тому спектральна поглинальна здатність тіла є функцією частоти  $\omega$ , 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**

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

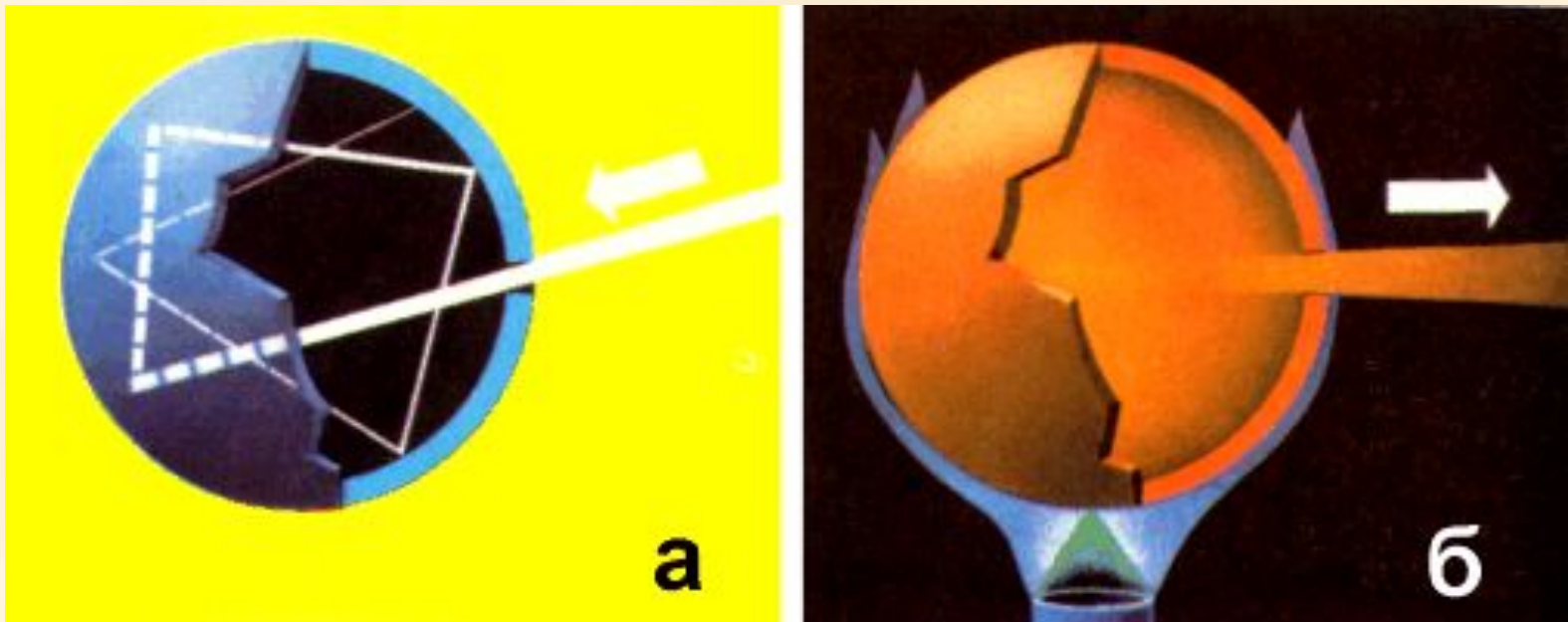


## **Поглинальна здатність**

**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 впливає 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.

# КИРХГОФ Густав Роберт



**1824 —1887**

Німецький фізик  
член Берлінської АН

Народився у Кенігсберзі. Закінчив Кенігсберзький ун-т (1846). Роботи в областях електрики, механіки, оптики, математичної фізики, теорії пружності, гідродинаміки. У 1845—47 - правила Кірхгофа для електричних мереж. Разом із Р. Бунзеном у 1859 розробив метод спектрального аналізу та відкрив нові елементи — цезій (1860) та рубідій (1861). Встановив (1859) один з основних законів теплового випромінювання (закон Кірхгофа), запропонував (1862) концепцію чорного тіла. Розвинув (1882) строгу теорію дифракції. Удосконалив теорію магнетизму Пуассона. Досліджував пружність твердих тіл, коливання пластин та дисків, форму вільного струменя рідини, рух тіла у рідинах.

# II закон теплового випромінювання – ЗАКОН СТЕФАНА – БОЛЬЦМАНА

Енергетична світність абсолютно чорного тіла пропорційна четвертому ступеню абсолютної температури:

$$R = \sigma T^4$$

$\sigma$  - стала Стефана –  
Больцмана,

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

**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  
 $a_T < 1$ .

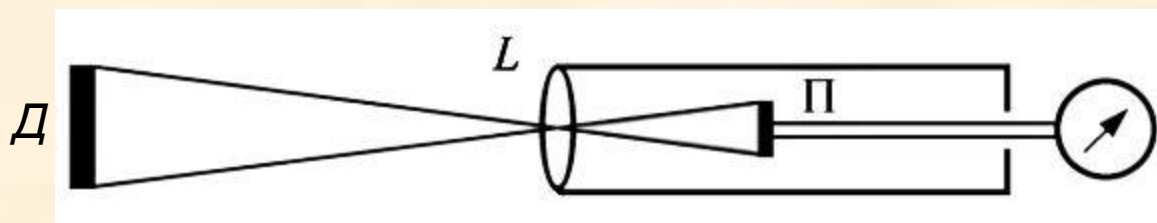
Пірометр – прилад, призначений для безконтактного вимірювання високої радіаційної температури тіл по їх сумарному тепловому випромінюванню по всім довжинам хвиль



## Принцип дії пірометра

У пірометрі зображення досить віддаленого нагрітого джерела  $D$  проектує за допомогою об'єктива  $L$  на приймач  $\Pi$  так, щоб зображення випромінювача повністю перекривало приймач. Для оцінки енергії випромінювання, що потрапило на приймач, використовують металеві або напівпровідникові болометри або термоелементи. Дія болометрів заснована на зміні електричного опору металу або напівпровідника при зміні температури, викликаній поглинанням падаючого потоку випромінювання. Зміна температури поглинаючої поверхні термоелементів приводить до появи в них термо-ЕРС.

Показання приладу, приєднаного до болометра або термоелемента, виявляється пропорційним енергії випромінювання, що потрапила на приймач пірометра. Проградувавши попередньо пірометр по випромінюванню еталона абсолютно чорного тіла при різних температурах, можна за шкалою приладу вимірювати радіаційні температури різних нагрітих тіл.



Якщо відомий інтегральний коефіцієнт поглинання матеріалу випромінювача, то за значенням радіаційної температури можна визначити його справжню температуру за формулою

$$T = \frac{T_p}{\sqrt[4]{a_T}}$$

Зокрема, якщо радіаційний пірометр покаже температуру  $T_p=933\text{K}$  при спостереженні розжареної поверхні вольфрамового випромінювача ( $a_T=0,15$ ), то його справжня температура  $T=1500\text{K}$ .





**Йозеф СТЕФАН**

1835 - 1893

Австрійський фізик-експериментатор. Закінчив Віденський університет, працював професором кафедри вищої математики та фізики та директором Інституту експериментальної фізики при Віденському університеті. Дослідження в галузях електрики, дифузії, молекулярно-кінетичної теорії газів. Він експериментально встановив формулу закону Стефана - Больцмана, теоретичне обґрунтування якої дав його учень Больцман. Використовуючи свій закон, Стефан уперше дав достовірну оцінку температури поверхні Сонця — близько 6000K.



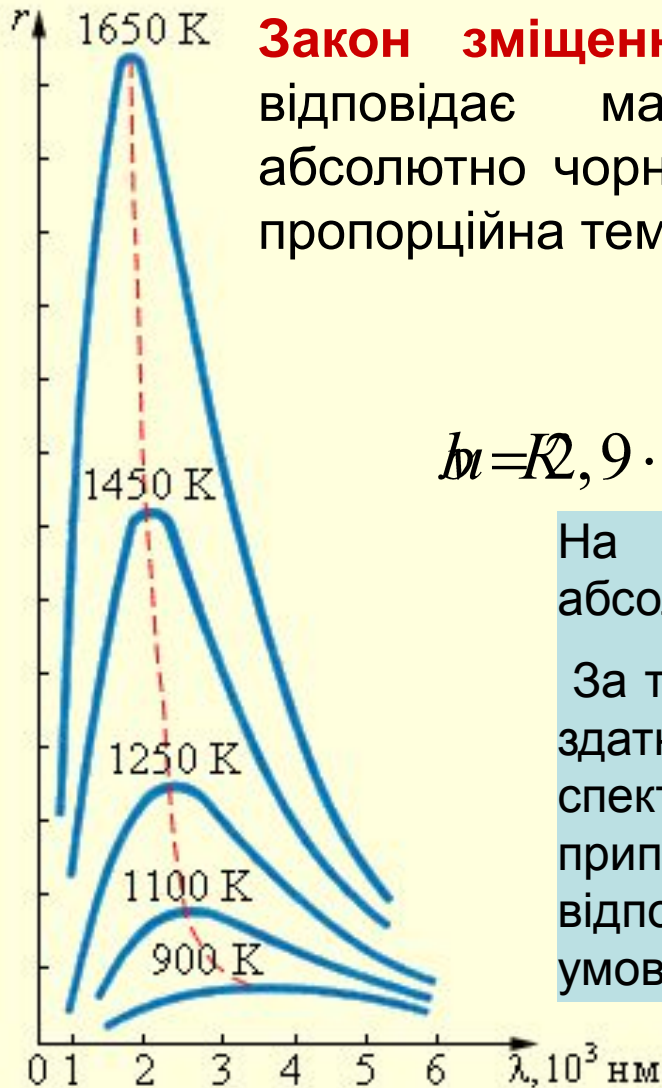
**Людвіг Больцман**

1844 - 1906

Австрійський фізик-теоретик, один з основоположників класичної статистичної фізики, член Австрійської Академії наук (1895). Народився у Відні. Закінчив Віденський університет (1866). Професор університетів у Граці (1869-1873 й 1876-1889), Відню (1873-1876, 1894-1900 і з 1903), Мюнхені (1889-1894), Лейпцизі (1900-1902).

Основні роботи в області кінетичної теорії газів (розподіл Больцмана, основне рівняння МКТ), термодинаміки (статист. Характер ентропії) та теорії випромінювання (формула Стефана – Больцмана).

# 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

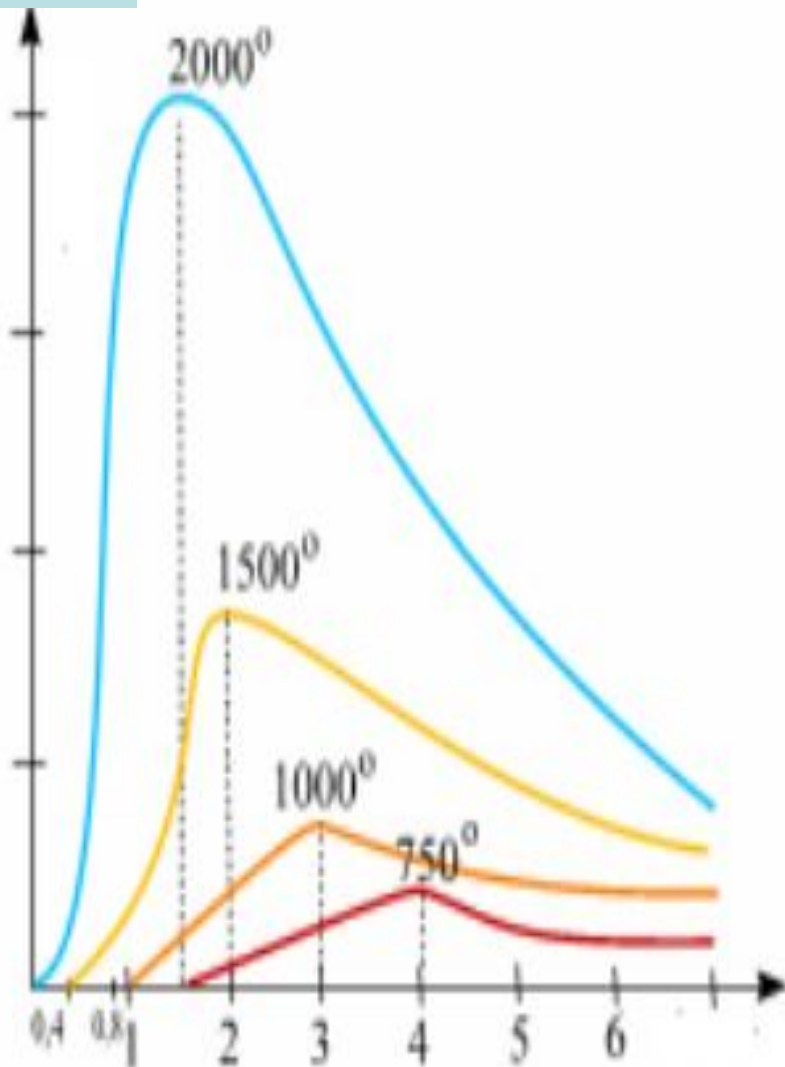
$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}$$

$b = 2,9 \cdot 10^{-3}$  . - стала закону зміщення Віна.

На рисунку наведений розподіл випромінювання абсолютно чорного тіла при різних температурах.

За температур  $T > 5000\text{K}$  максимум випромінювальної здатності знаходиться в ультрафіолетовій області спектра. Максимум енергії випромінювання Сонця припадає на 470 нм (зелена область спектру), що відповідає температурі поверхні Сонця  $\sim 6200\text{K}$  (за умови, що Сонце є абсолютно чорним тілом).

## Енергія



Довжина хвилі (мкм)

Для всіх тіл зі збільшенням температури максимум енергії випромінювання зміщується у короткохвильову ділянку спектра, а загальна енергія випромінювання збільшується. Так, якщо батареї центрального опалювання (300K) має пік енергії у діапазоні невидимого інфрачервоного випромінювання, то розжарена поверхня Сонця (6000K) випромінює значну частину енергії у діапазоні видимого світла, а при ядерному вибуху (5000000K) більша частина енергії вибуху припадає на короткохвильове рентгенівське та гамма - випромінювання.



**ВІЛЬГЕЛЬМ ВІН**

**1864–1928**

Лаурет Нобелівської  
премії з фізики за  
1911р.

Німецький фізик. Закінчив Берлінський університет, працював асистентом Гельмгольца у Фіз-техн. університеті в Берліні. В 1892-1896 - приват-доцент Берлінського університету, в 1896-1890 - професор Вищої технічної школи в Ахені, професор Вюрцбургського та Мюнхенського університетів. Дослідження з теорії теплового випромінювання, оптики, термодинаміки, гідродинаміки. У 1893 встановив закон зміщення Віна. У 1896 Він одержав формулу для розподілу енергії у спектрі чорного тіла (закон випромінювання Віна), який добре узгоджується з експериментальними даними в області коротких хвиль. У 1907 виміряв довжину хвилі рентгенівських хвиль. Написав кілька книг з гідродинаміки, теоретичної фізики та теорії відносності, протягом тривалого часу був редактором журналу «Annalen der Physik».

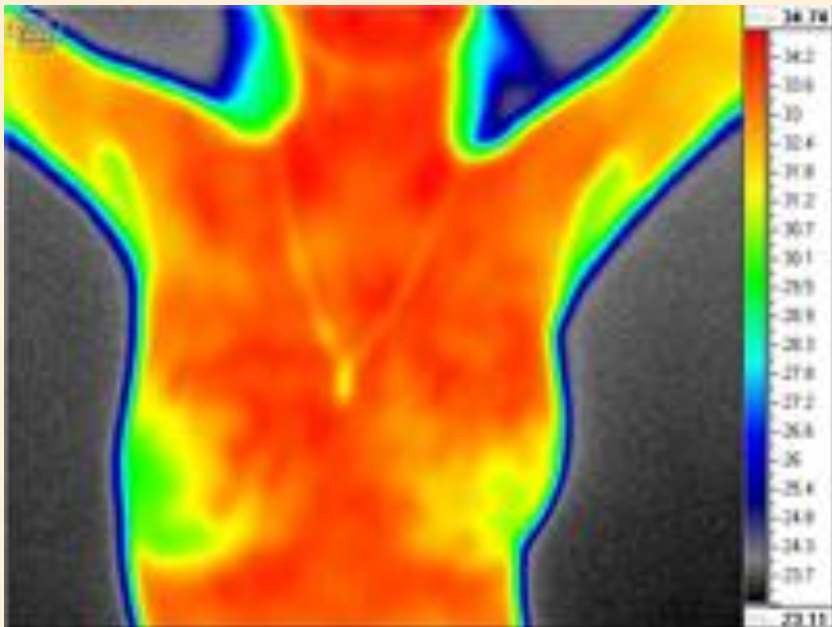
Для реальних тіл закон Віна виконується тільки якісно. Зі збільшенням температури будь-якого тіла довжина хвилі, в околі якої тіло випромінює найбільше енергії, також зміщується в бік коротких довжин хвиль. Але це зміщення вже не задовольняє закону зміщення Віна, який для випромінювання реальних тіл можна використовувати тільки як оціночну.

*Нічне бачення.* Вночі за відсутності сонячного світла людина у темряві перестає бачити оточуючі її предмети. Однак, усі вони, маючи ненульову температуру, випромінюють електромагнітне теплове випромінювання і вночі. За допомогою закону Віна можна оцінити довжину хвилі, на яку припадає максимум випромінювальної здатності тіла, якщо відома його температура. Із цього оцінювання випливає, що при середній температурі тіл порядку 300 К основна енергія їх теплового випромінювання припадає на інфрачервоне випромінювання з довжиною хвилі порядку 10 мкм. Випромінювання у видимій області спектра (0,4 мкм - 0,7 мкм) при таких температурах має занадто малу енергію і не може бути виявлене неозброєним оком.

Усі тіла, температура яких більша за температуру земної поверхні, можна зафіксувати у мікрохвильовому діапазоні. Побачити такі джерела інфрачервоного випромінювання можна тільки за допомогою спеціальних приладів, в яких мікрохвильове випромінювання реєструється спеціальними датчиками інфрачервоного випромінювання і перетворюється у модульовані електричні сигнали, які керують електронним пучком, що дає на екрані зображення предметів.

У кінці ХХ ст. відбулася якісна зміна техніки нічного бачення, пов'язана зі створенням електронно-оптичних перетворювачів нового типу. За допомогою сучасних біноклів та прицілів нічного бачення можна отримати в темноті видиме зображення достатньо високої якості людини на відстані кількох сот метрів або рухомого танка на відстані кількох кілометрів. А пілотажні окуляри нічного бачення дозволяють експлуатувати гелікоптери в умовах обмеженого бачення практично повну добу.





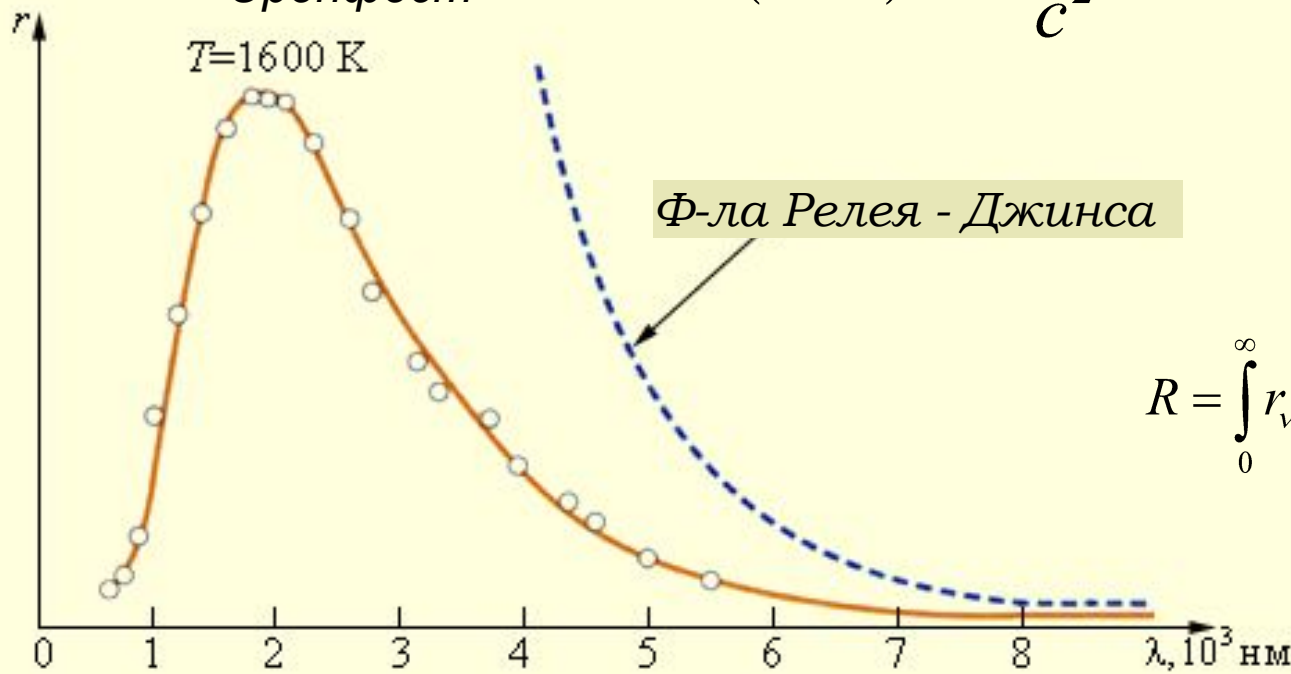
1900 р. Релей (пізніше Джинс) отримали всю криву спектрального розподілу випромінювання чорного тіла  $r(\lambda, T)$  виходячи з теореми про **рівномірний розподіл енергії за ступенями вільності в стані термодинамічної рівноваги**. Ця теорема була застосована Релеєм до рівноважного випромінювання в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

### Формула Релея – Джинса

"ультрафіолетова катастрофа" П.С. Эренфест

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

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



### 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.





**СТРЕТТ, Дж. У., лорд Релей**

1842 – 1919

Нобелівська премія з фізики,  
1904 р.

Англійський фізик. Вивчав акустику та оптику, отримав закон розсіювання світла Релея. Серед проведених їм досліджень ми зустрічаємо експериментальні й теоретичні роботи з оптичних приладів, у результаті яких уперше була визначена роздільна здатність дифракційної решітки, а також був зроблений фундаментальний аналіз оптичних властивостей спектроскопів.

Після смерті Максвелла став директором Кавендішської лабораторії, працював над новою системою одиниць, увів для студентів лабораторні роботи з фізики.

Відкрив інертний газ аргон.

Його двотомна монографія «Теорія звуку» дотепер залишається незмінним керівництвом для сучасних вчених та інженерів. Опублікував понад 400 робіт за більш ніж п'ятдесят років своєї дослідницької діяльності.



**ДЖИНС Джеймс  
Хопвуд**

1877-1946

Англійський фізик і астрофізик. Основні праці з кінетичної теорії газів, теорії теплового випромінювання; фігур рівноваги обертювих рідких тіл, будови та еволюції Всесвіту.

Серед основних праць Джинса – *Динамічна теорія газів* (1904); *Проблеми космогонії та зоряної еволюції* (1919); *Астрономія та космогонія* (1928). Починаючи з 1928 Джинс зайнявся популяризацією науки. Його найбільш відомі науково-популярні книги –

*Загадковий Всесвіт*, у якій він робить висновок, що Бог – чистий математик; *Зірки і їхні долі*, *Еос, або Космогонія в широкому змісті*. Пізніше він звернувся до філософії й написав книги *Нові підстави науки та Фізика і філософія*.

# 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!**

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

# Планк Макс Карл Ернст Людвиг



1858 - 1947

Німецький фізик,  
Родоначальник  
квантової механіки

Навчався у Мюнхенському, потім у Берлінському університеті. Вивчення праць Гельмгольца, Кірхгофа та Клаузіуса призвело до захоплення термодинамікою. Пізніше під впливом теорії Максвелла він створив теорію випромінювання абсолютно чорного тіла, де увів поняття кванта. У 1919 г. Планк отримав **Нобелівську премію з фізики** за 1918 р. *“у знак признання його заслуг у ділі розвитку фізики завдяки відкриттю кванті енергії”*. На церемонії вручення премії один із шведських вчених сказав: *“Теорія випромінювання Планка – найяскравіша з из дороговказних зірок сучасного фізичного дослідження, і пройде ... ще чимало часу, перед тим як витратяться скарби, які були добуті його генієм”*.