

Лекція 11. КВАНТОВА ОПТИКА

1. Теплове випромінювання та його закони
2. Утруднення класичної теорії теплового випромінювання. Квантова гіпотеза випромінювання
3. Явища фотоефекту та ефекту Комптона
4. Корпускулярно-хвильовий дуалізм електромагнітного випромінювання
5. Фотони, їх маса та імпульс

1. Теплове випромінювання та його закони.

Для пояснення закономірностей електромагнітного випромінювання тілами, уявлень про хвильову природу світла було не достатньо, тоді для пояснення цих явищ М. Планк висунув припущення, що атоми тіла випромінюють і поглинають енергію не неперервно, а певними дискретними порціями – квантами.

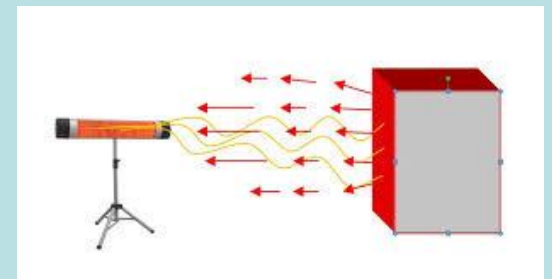
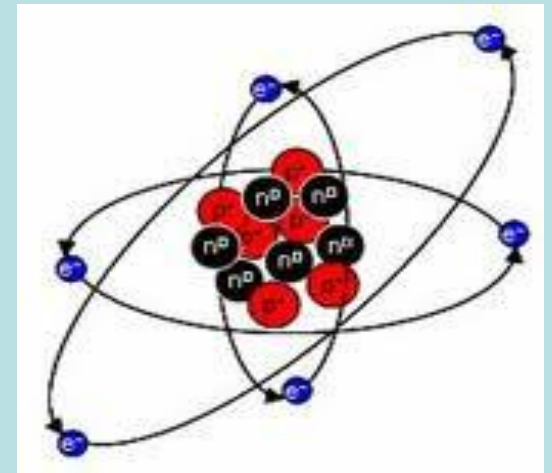


Квантова оптика – розділ фізики, який вивчає процеси випромінювання, поширення та взаємодії електромагнітних хвиль з речовиною з точки зору уявлень про ці процеси як перервні (дискретні) у просторі і часі.

Електромагнітне випромінювання всіх довжин хвиль обумовлюється коливаннями електричних зарядів, з яких складається речовина – іонів, вільних і зв'язаних електронів.

При випромінюванні тілом електромагнітних хвиль його енергія зменшується.

Для тривалого тілом випромінювання необхідно поповнювати його енергію.



Теплове випромінювання – випромінювання тілом електромагнітних хвиль за рахунок його внутрішньої енергії, яка поповнюється через нагрівання.



При низьких температурах тіла випромінюють лише інфрачервоні електромагнітні хвилі, а при високих ще й видимі та ультрафіолетові.



У будівництві поряд з традиційним конвекційним типом опалення широко використовують систему променевого (інфрачервоного) опалення. В обладнанні цього класу продукти згорання нагрівають тіло (металеву трубу, керамічну пластину або мармурову плиту), яке випромінює теплове інфрачервоне випромінювання.

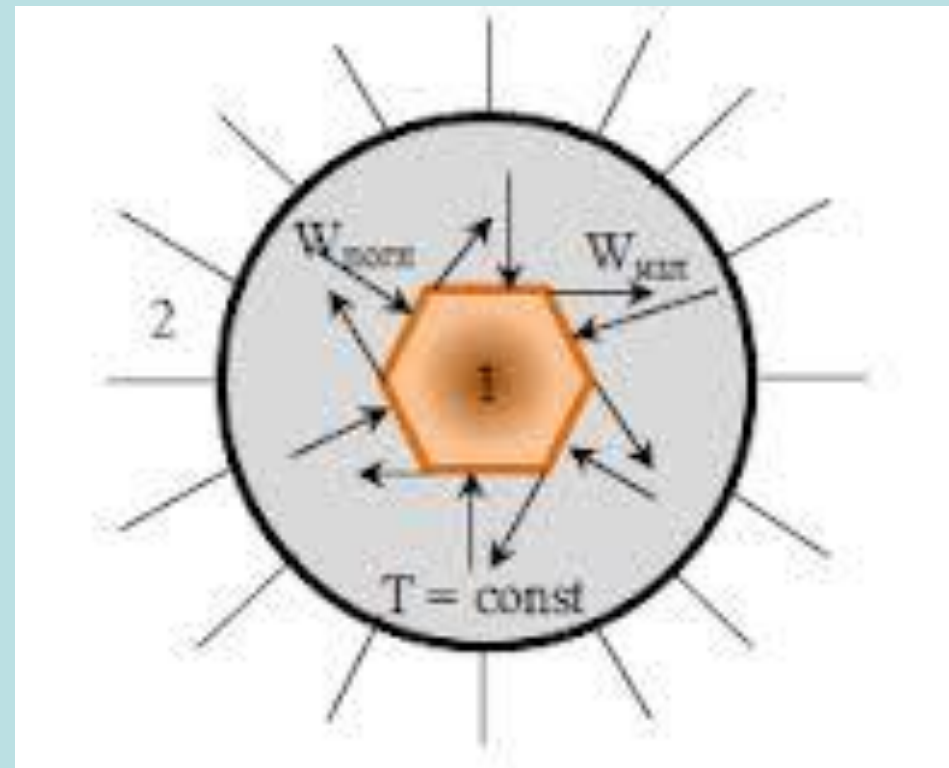


Нагрівачі розташовують у верхній частині приміщення, а теплове випромінювання, поглинаючись поверхнями (одежею і шкірою людини, меблями, стінами, підлогою тощо), створює тепловий комфорт без підвищення температури навколишнього середовища. Повітря нагрівається в основному від конструкцій і предметів.



Якщо тіло за одиницю часу випромінює енергії більше, ніж поглинає, то температура тіла знижується, і навпаки, якщо тіло за одиницю часу поглинає енергії більше, ніж випромінює, то температура тіла підвищується.

Рівноважним називають **випромінювання**, при якому кількість енергії, яку випромінює тіло за одиницю часу, буде дорівнювати кількості енергії, яку поглинає тіло за одиницю часу.



Кількісною характеристикою теплового випромінювання є *спектральна густина енергетичної світності тіла* – енергія, що випромінюється з одиничної площі поверхні тіла за одиницю часу в одиничному інтервалі частот:

$$R_{\nu,T} = \frac{dW_{\nu,\nu+d\nu}^{unp}}{d\nu}, \quad \left[R_{\nu,T} \right] = \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}},$$

де $dW_{\nu,\nu+d\nu}^{unp}$ – енергія електромагнітного випромінювання за одиницю часу (потужність випромінювання) з одиничної площі поверхні тіла в інтервалі частот від ν до $\nu+d\nu$.

Здатність тіл поглинати падаюче на них випромінювання характеризує *спектральна поглинаюча здатність*:

$$A_{\nu, T} = \frac{dW_{\nu, \nu+d\nu}^{\text{погл}}}{dW_{\nu, \nu+d\nu}},$$

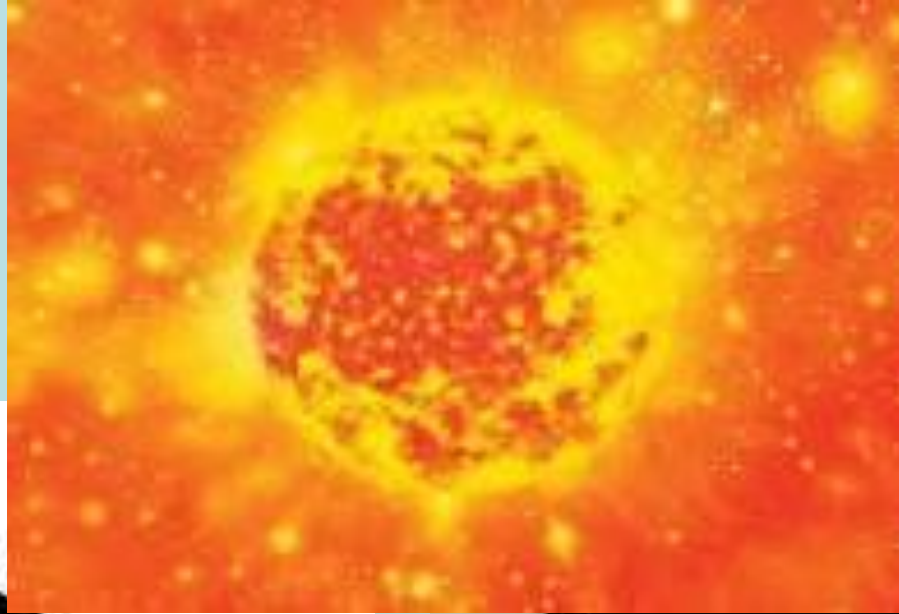
показує долю поглинутої тілом енергії, яка переноситься за одиницю часу через одиничну площу поверхні тіла електромагнітними хвилями з частотами від ν до $\nu+d\nu$.

Спектральна густина енергетичної світності тіла $R_{\nu,T}$ і спектральна поглинаюча здатність $A_{\nu,T}$ залежать від природи тіла, його термодинамічної температури і при цьому різняться для випромінювання різних частот.

Тіло, здатне повністю поглинати усе падаюче на нього випромінювання усіх частот при будь-якій температурі, називають **абсолютно чорним**, тобто

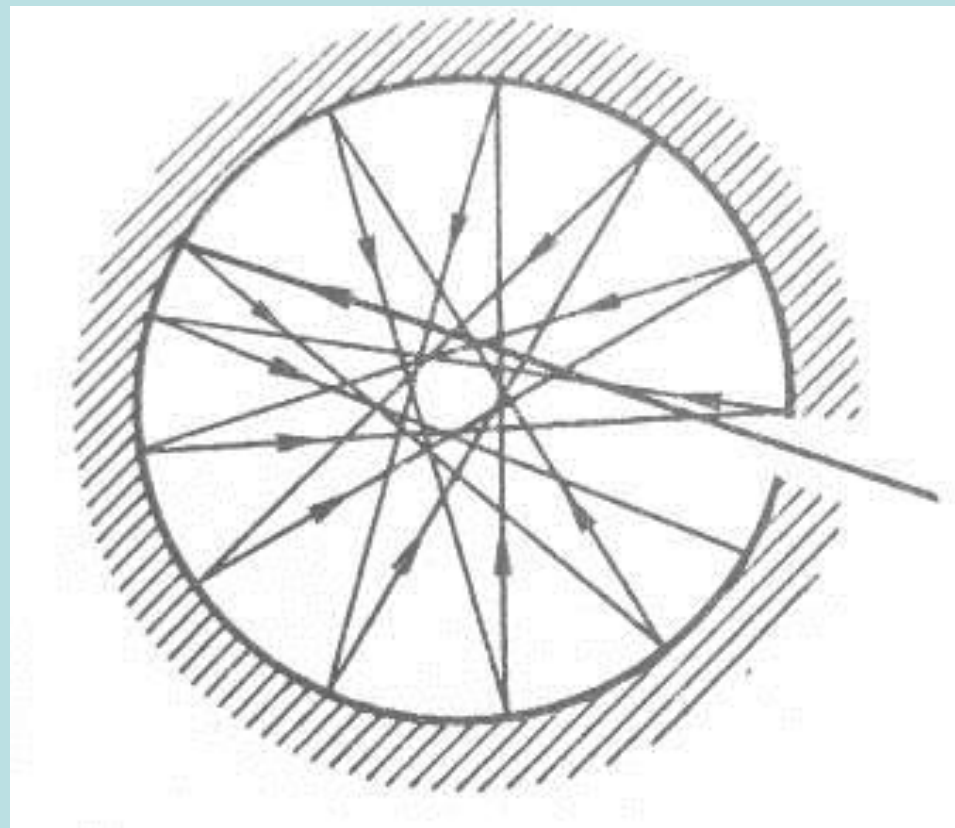
$$A_{\nu,T}^{\text{чорн}} = 1.$$

Абсолютно чорних тіл у природі не існує, хоча такі тіла, як Сонце, сажа, чорний бархат тощо, у певному інтервалі частот за своїми властивостями близькі до них.



Ідеальною моделлю чорного тіла є замкнута порожнина з невеликим отвором, внутрішня поверхня якої почорнена.

Промінь світла, що попадає всередину такої порожнини, зазнає багатократного відбивання від стінок, у результаті чого інтенсивність випромінювання, яке виходить, буде близька до нуля.



Це пояснює те явище, що відкриті вікна будинків з вулиці видаються темними, хоча в кімнаті досить світло.



Випромінювання абсолютно чорного тіла описується такими законами:

- законом Кірхгофа,
- законом Стефана-Больцмана,
- законом зміщення Віна.

1. Закон Кірхгофа: відношення спектральної густини енергетичної світності до спектральної поглинаючої здатності не залежить від природи тіла, воно є для усіх тіл універсальною функцією частоти і температури:

$$\frac{R_{\nu,T}}{A_{\nu,T}} = r_{\nu,T} \cdot$$

Так як спектральна поглинаюча здатність абсолютно чорного тіла

$$A_{\nu, T}^{\text{чорн}} = 1,$$

то із закону Кірхгофа випливає, що $R_{\nu, T}^{\text{чорн}} = r_{\nu, T}$, отже *фізичний зміст універсальної функції Кірхгофа* $r_{\nu, T}$ полягає у тому, що вона є спектральною густиною енергетичної світності абсолютно чорного тіла.

2. Для визначення *енергетичної світності абсолютно чорного тіла*, яка залежить лише від температури, необхідно проінтегрувати універсальну функцію Кірхгофа по усім частотам:

$$R_e = \int_0^{\infty} r_{\nu,T} d\nu,$$

R_e – енергія, що випромінюється тілом з одиничної площі поверхні за одиницю часу.

Згідно закону *Стефана-Больцмана*, енергетична світність абсолютно чорного тіла пропорційна четвертому степеню його термодинамічної температури:

$$R_e = \sigma T^4,$$

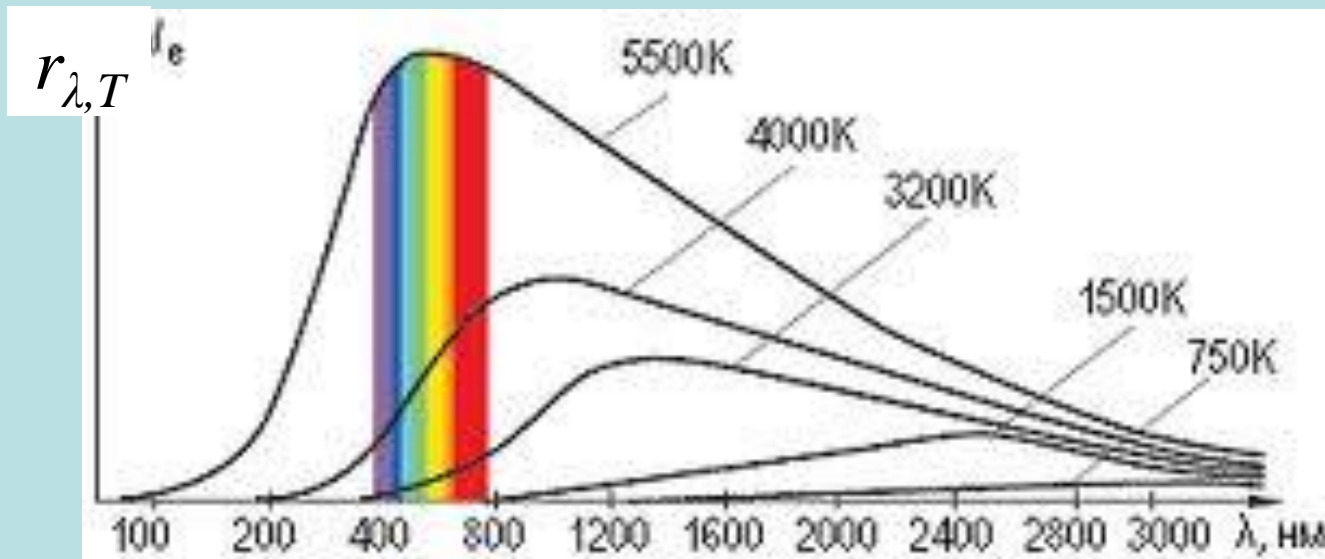
де σ – стала Стефана-Больцмана, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4}$.

3. Закон зміщення Віна визначає залежність

довжини хвилі λ_{\max} , яка відповідає максимальному значенню спектральної густини енергетичної світності $r_{\nu, T}$ абсолютно чорного тіла, від температури T :

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

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



Закон Віна пояснює, чому при зниженні температури нагрітих тіл у їх спектрі все сильніше переважає довгохвильове випромінювання (наприклад, перехід кольору розжареного металу від білого до червоного при остиганні).



У будівництві для безконтактного знаходження ділянок з поганою теплоізоляцією, контролю якості будівництва нових споруд, знаходження комунікаційних пошкоджень застосовують метод інфрачервоної термографії. Він полягає у реєстрації на відстані теплового поля об'єкту.

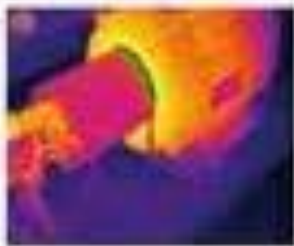
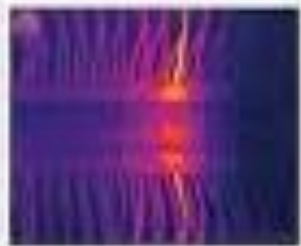
Температура поверхонь будівельних конструкцій – дуже важливий і наочний показник у діагностиці, оскільки залежить від теплофізичних властивостей матеріалів, наявності теплопровідних включень, як конструктивно обумовлених, так і технологічних або конструктивних дефектів тощо.



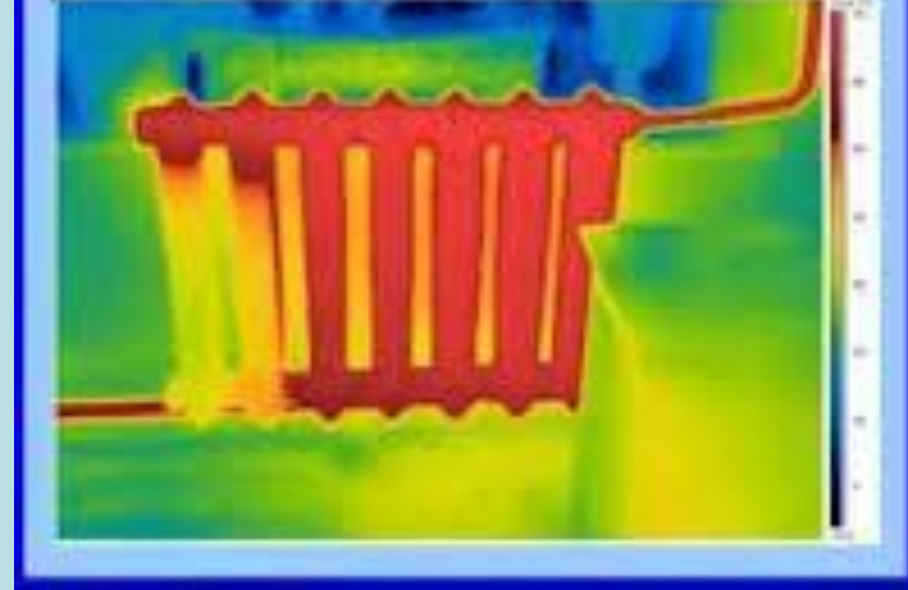
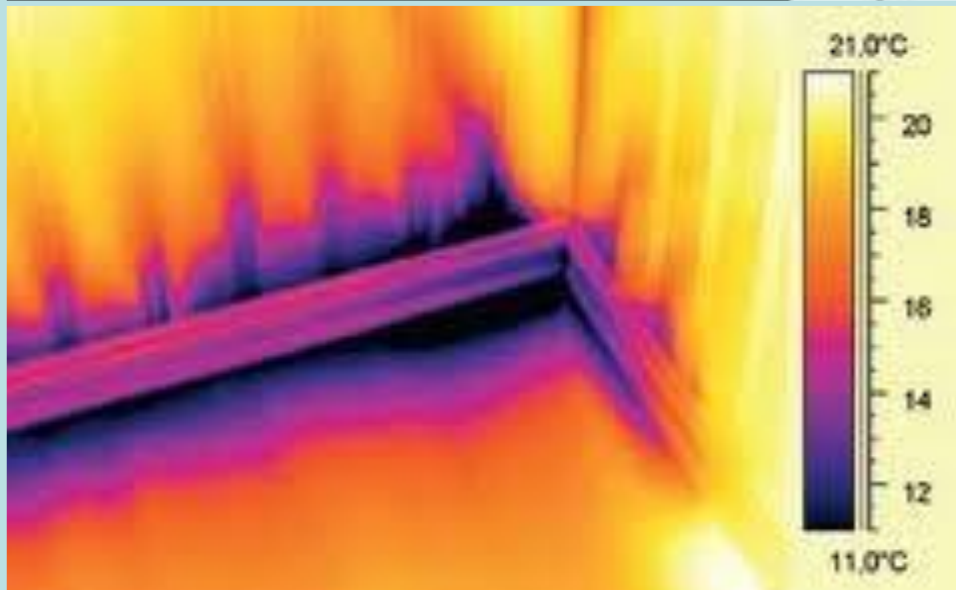
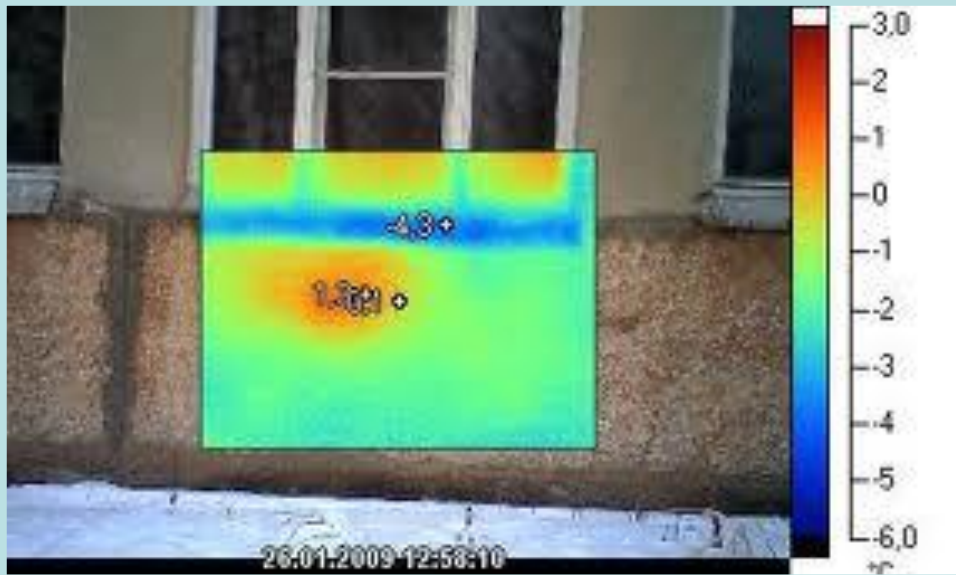
Тепловізор «переводить» у видиму область спектру власне теплове випромінювання людей, техніки та інших джерел. За кольоровим «відбитком» можна легко встановити місцезнаходження джерела втрат тепла. Кольорове зображення конструкції, зведеної без порушень, буде мати забарвлення в холодній гамі (тобто використані матеріали мають необхідні теплоізоляційні властивості й не пропускають тепло назовні).

Якщо на «фото» є яскраві кольорові плями – це попередження про втрату тепла в цих місцях унаслідок низьких якостей застосованих будівельних матеріалів або будівельний брак.

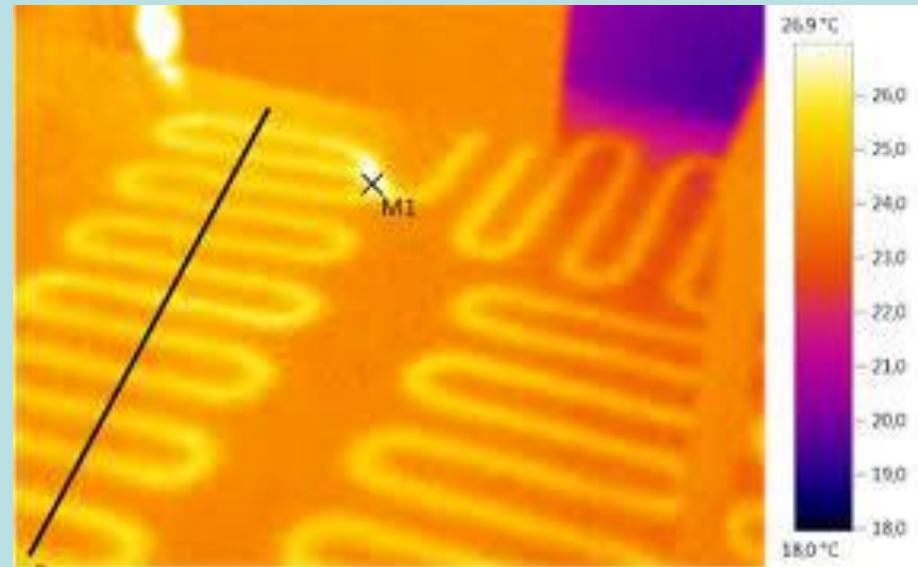




Розрізняють зовнішню і внутрішню термографічну зйомку.



Внутрішній тепловий контроль будівель допомагає виявити не лише сліди протікань між перекриттями і дахом, але й ділянки порушень у системі опалення і гарячого водопостачання (так, повітряна пробка або засмічення у трубі будуть відображені на фото у вигляді темної плями на яскраво-теплому фоні).

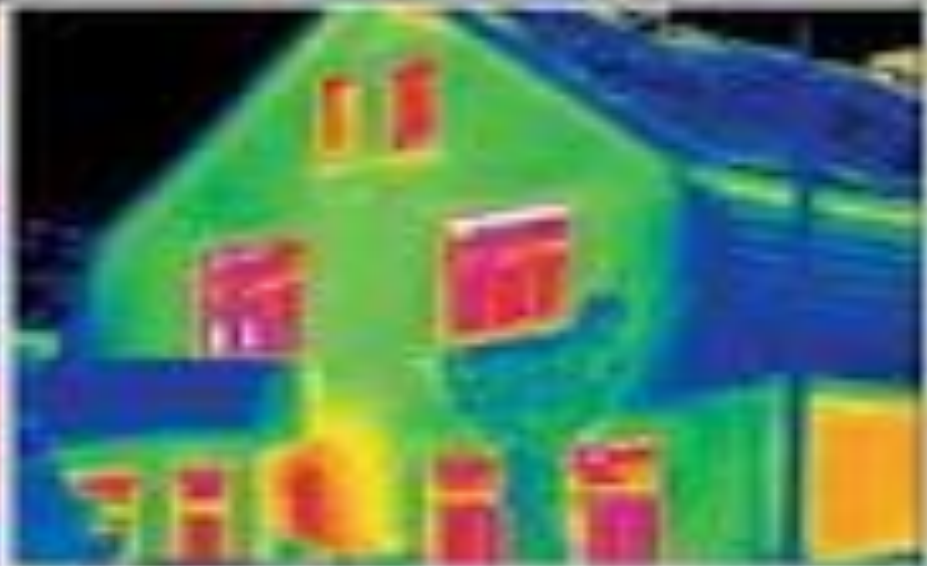


Діагностування економить час і кошти при пошуку дефектних і аварійних ділянок у конструкціях та комунікаціях, а після ремонтних робіт дозволить переконатися в якості їх проведення.

Втрати тепла

великі

незначні



до утеплення

після утеплення

12:22:54

1X  



12:22:50

1X  



12:22:40

1X  



2. Утруднення класичної теорії теплового випромінювання. Квантова гіпотеза випромінювання.

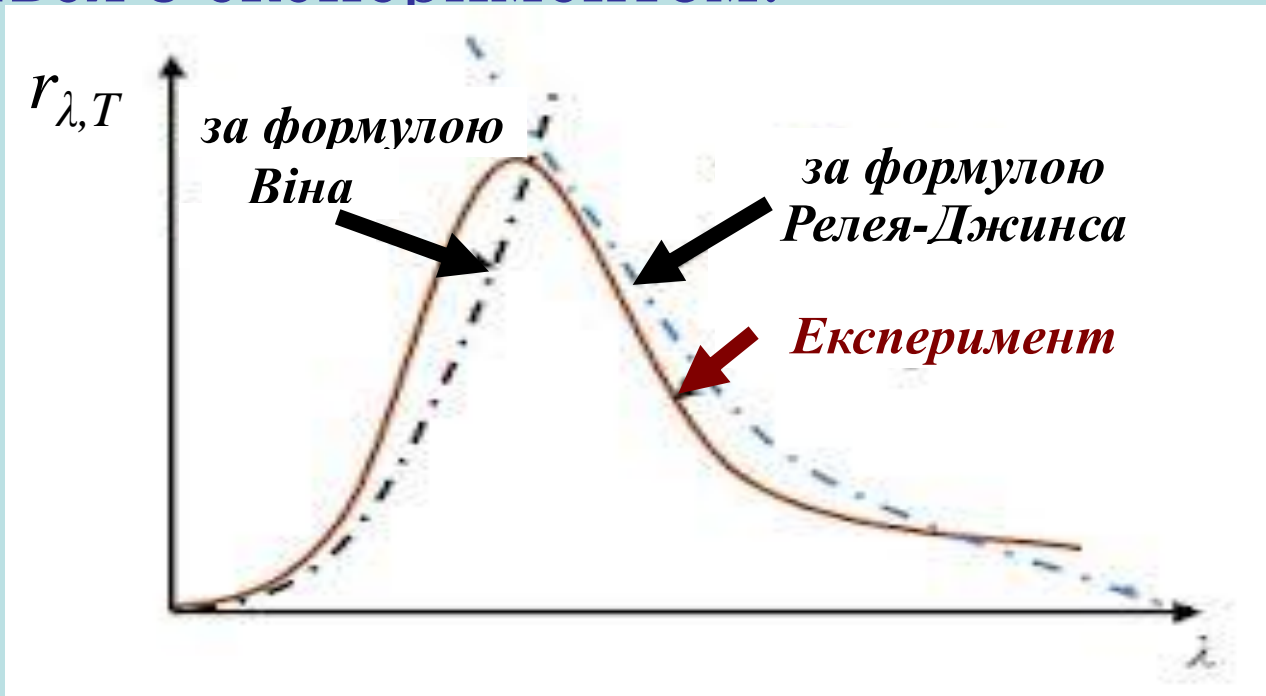
Англійські вчені Д. Релей і Д. Джинс спробували теоретично вивести універсальну функцію Кірхгофа $r_{\nu,T}$, враховуючи, що за класичними законами статистичної фізики:

- випромінювання відбувається неперервно;
- розподіл енергії рівномірний ($\frac{1}{2}kT$ на кожен ступень свободи).

За формулою Релея-Джинса:

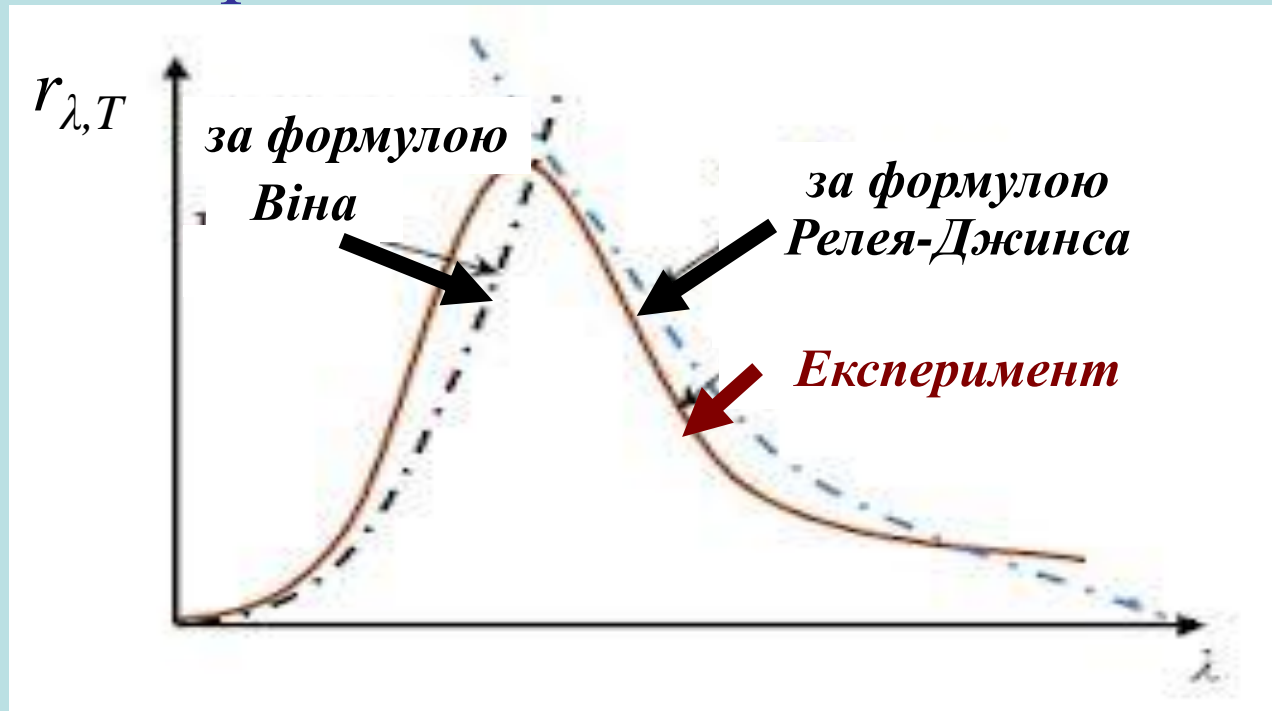
$$r_{\nu,T} = \left(\frac{2\pi\nu^2}{c^2} \right) kT.$$

Ця формула дуже добре описує розподіл енергії у довгохвильовій частині спектра випромінювання, тобто для малих частот, проте в інтервалі малих довжин хвиль (великих частот) вона різко розходиться з експериментом:

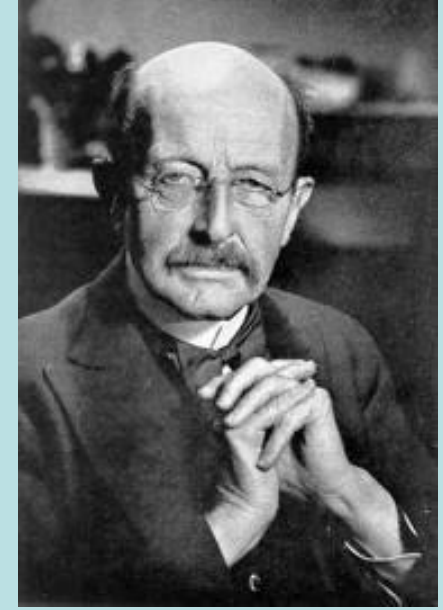


зі зменшенням довжини хвилі випромінювальна здатність АЧТ не зменшується до нуля, як про це свідчить експеримент, а зростає до нескінченності.

Отже, у короткохвильовому діапазоні формула Релея-Джинса дає абсурдний результат, який назвали “ультрафіолетовою катастрофою”. Класична фізика не змогла пояснити закони розподілу енергії у спектрі АЧТ.



У 1900 р. М. Планк запропонував принципово новий метод розрахунку виразу для розподілу спектральної густини енергетичної світності АЧТ. М. Планк висунув припущення, що



Макс Планк

атоми тіла випромінюють і поглинають енергію не неперервно, а певними дискретними порціями — квантами.

Енергія кванта ε пропорційна частоті випромінювання (обернено пропорційна довжині хвилі):

$$\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda},$$

$$\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda},$$

де $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – стала Планка,

$c = 3 \cdot 10^8$ м/с – швидкість світла,

ν – частота випромінювання,

λ – довжина хвилі випромінювання.



Враховуючи кванто-ві уявлення про природу теплового випромінювання, М. Планк дістав вираз розподілу спектральної густини енергетичної світності АЧТ:

$$r_{\nu,T} = \frac{2\pi h c^2}{\nu^5} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1},$$

Формула Планка є повним розв'язком основної задачі теплового випромінювання, оскільки не лише добре погоджується з експериментальними даними, але й з неї легко виводяться всі часткові закони теплового випромінювання і обчислюються його сталі.

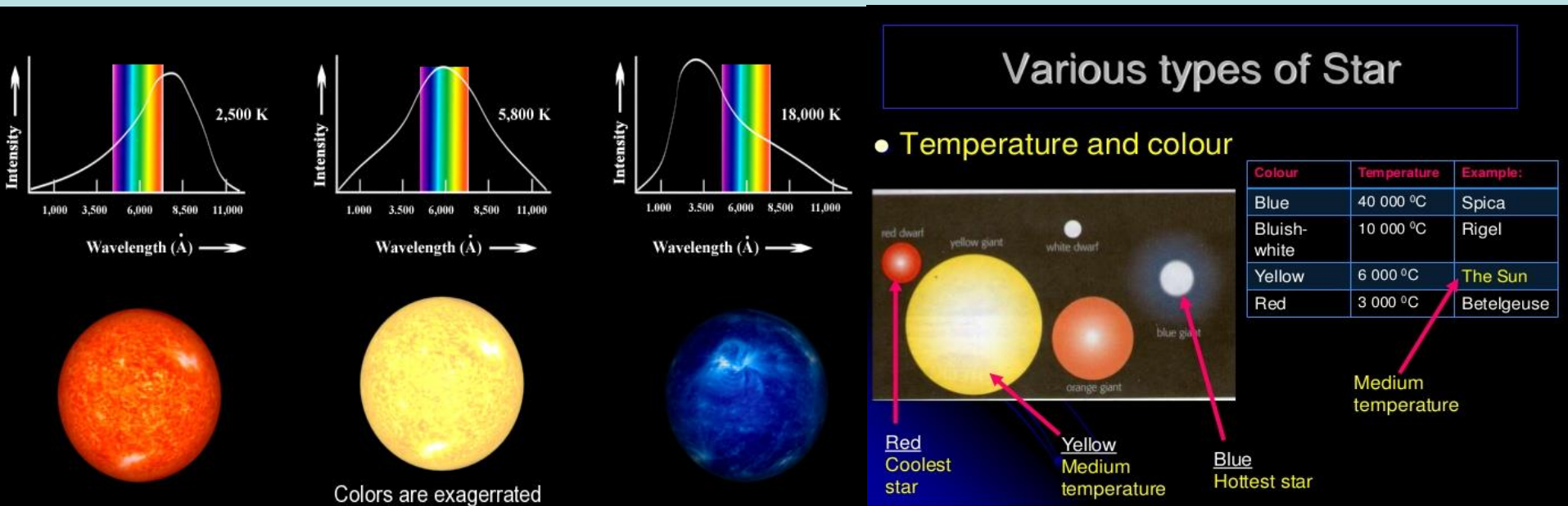


Закони теплового випромінювання використовують для вимірювання температур розжарених тіл, що світяться.

Методи вимірювання високих температур, які ґрунтуються на законах рівноважного випромінювання, називають *оптичною пірометрією*.



Вони не потребують безпосереднього контакту вимірювальних приладів із досліджуваним тілом, завдяки чому можна вимірювати високі температури, а також температури віддалених тіл (наприклад, зірок).

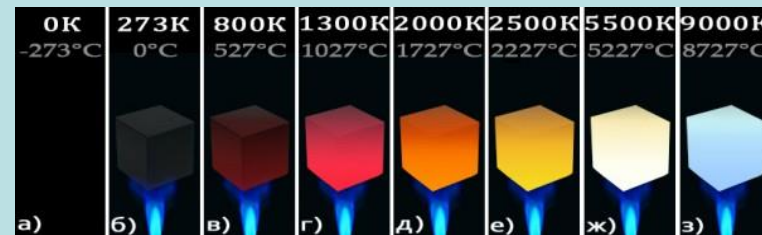
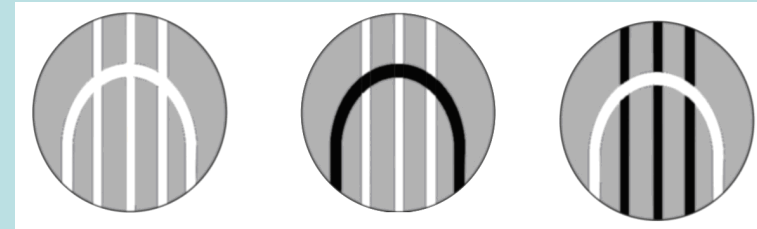


Залежно від закону, покладеного в основу методу вимірювання температур, розрізняють три умовні температури:

1. під **радіаційною** розуміють температуру АЧТ, при якій його енергетична світність однакова з енергетичною світністю тіла;

2. під **яскравісною** розуміють температуру АЧТ, при якій його спектральна випромінювальна здатність дорівнює спектральній випромінювальній здатності досліджуваного тіла для тієї самої довжини хвилі;

3. під **колірною** розуміють температуру АЧТ, при якій спектральний склад його випромінювання однаковий із спектральним складом досліджуваного тіла.



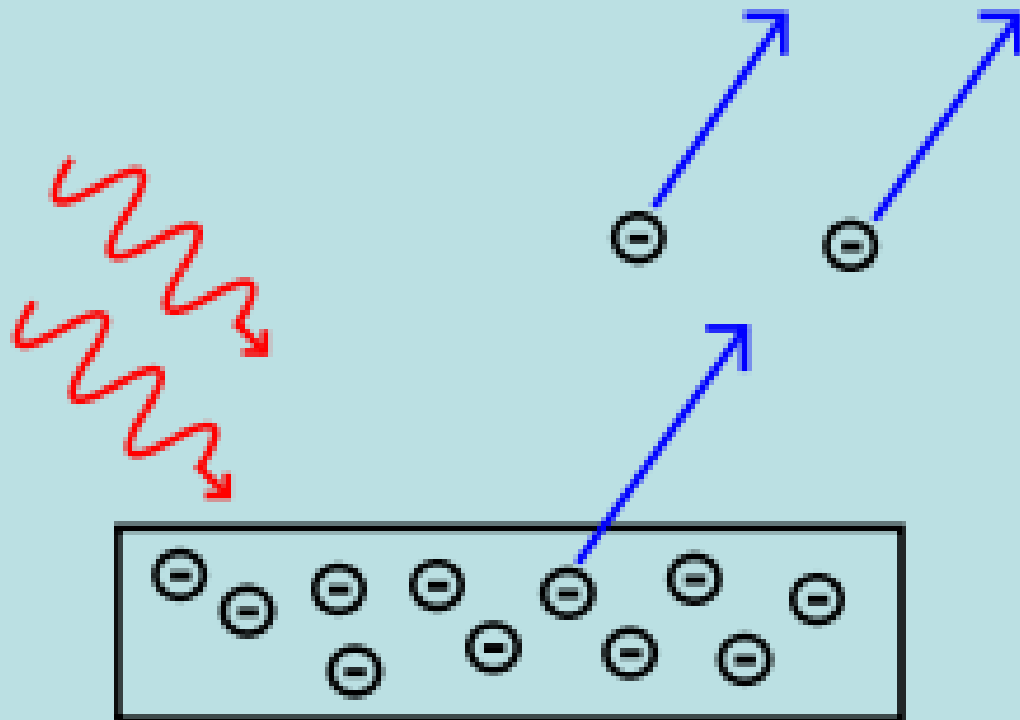
3. Явище фотоефекту та ефекту Комптона

Фотоефектом називають явище взаємодії електромагнітного випромінювання з речовиною, в результаті чого енергія випромінювання передається електронам речовини.

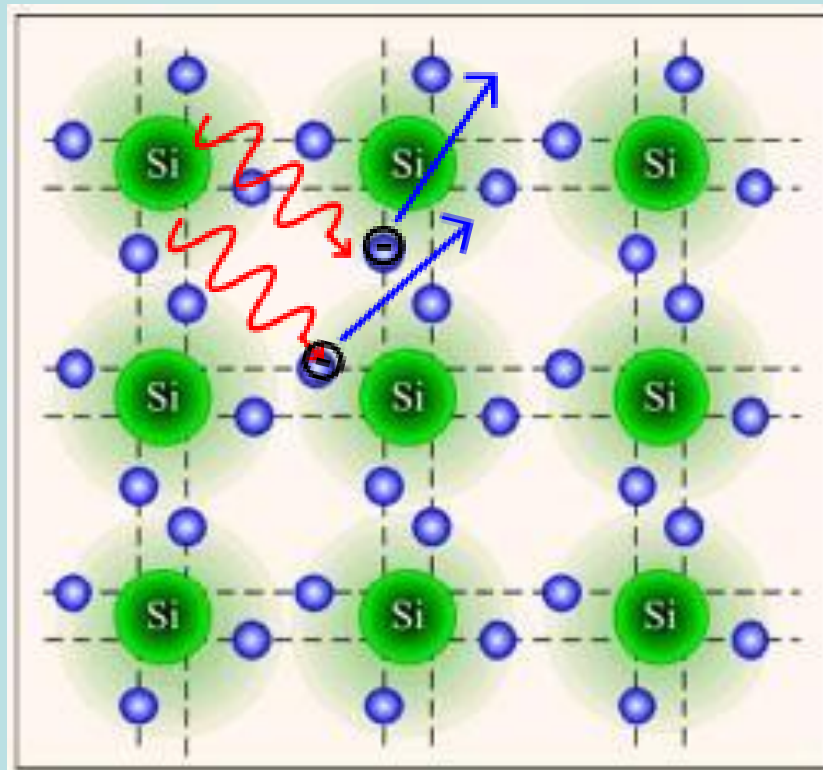
Розрізняють три види фотоефекту:

- зовнішній фотоефект;
- внутрішній фотоефект;
- вентильний фотоефект.

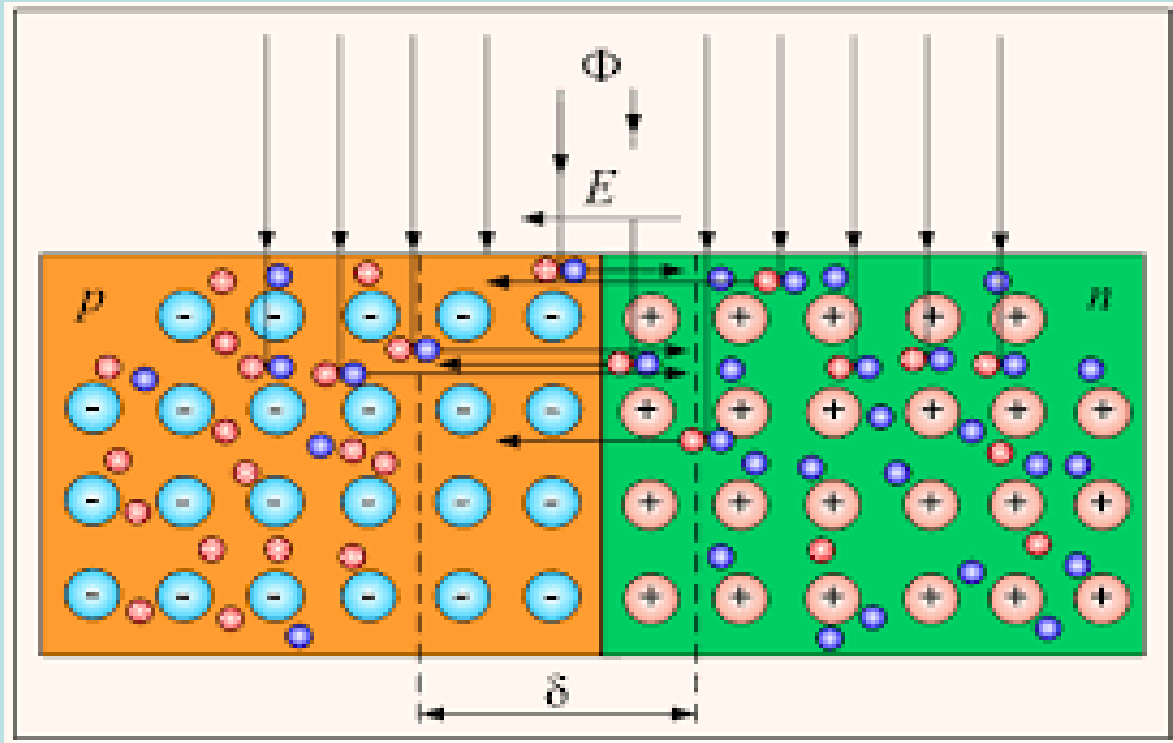
Зовнішній фотоефект – явище взаємодії електромагнітного випромінювання з речовиною, в результаті чого вільні електрони вириваються з поверхні речовини за рахунок енергії випромінювання.



Внутрішній фотоефект – явище взаємодії електромагнітного випромінювання з речовиною, в результаті чого електрони речовини переходять із зв'язаного стану у вільний за рахунок енергії випромінювання.



Вентильний фотоэффект – явище виникнення електрорушійної сили (фото-е.р.с.) при опроміненні електромагнітними хвилями контакту двох напівпровідників з різним типом провідності, або контакту напівпровідника з металом.



Узагальнюючи результати експериментальних даних, встановлено такі *закономірності зовнішнього фотоефекту*:

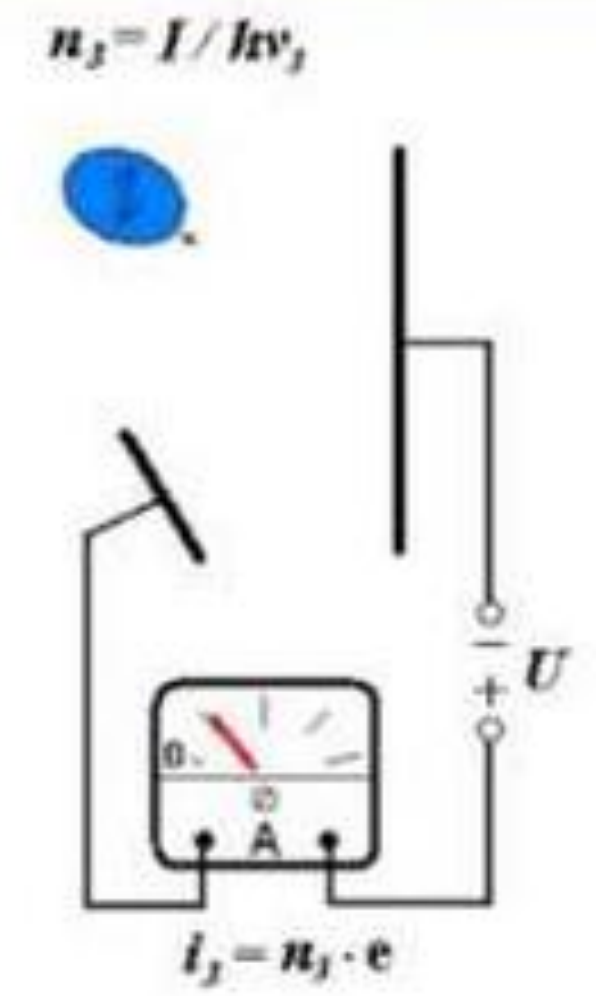
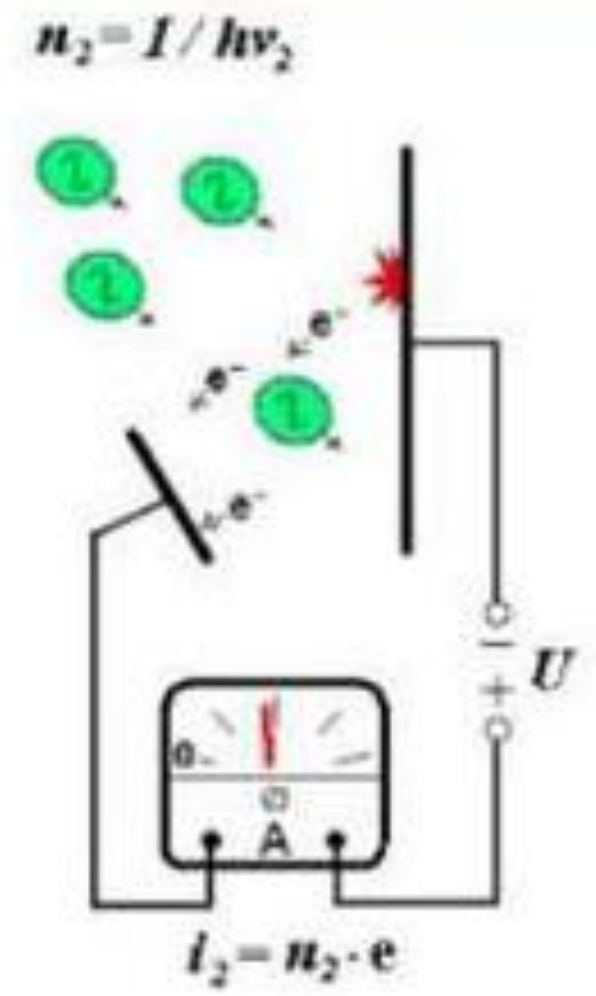
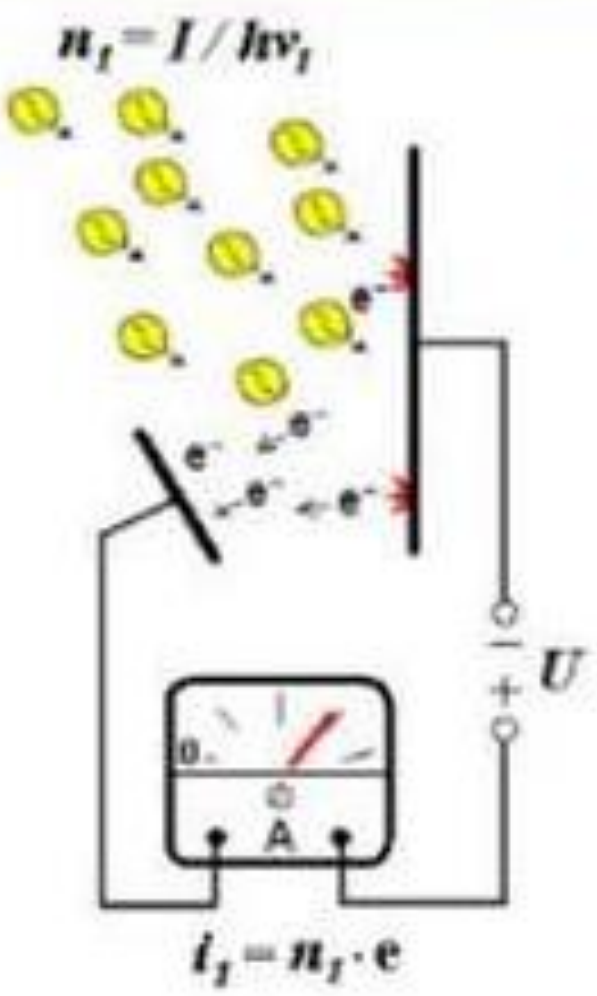
1. сила фотоструму насичення I прямо пропорційна світловому потоку Φ , що падає на катод (*фотострумом насичення I_n* називається максимальна сила струму, яка досягається між катодом і анодом при збільшенні зовнішньої напруги для заданого освітлення) – *I закон Столетова*;

2. початкова кінетична енергія звільнених електронів лінійно залежить від частоти падаючого на катод світла і не залежить від його інтенсивності – *II закон Столетова*;

3. гальмівна напруга лінійно залежить від частоти і не залежить від його інтенсивності (*гальмівною напругою* називають таку від'ємну напругу між катодом і анодом при якій фотострум відсутній);

4. фотоефект не виникає, якщо частота світла менша від деякої характерної для металу величину ν_{min} (мінімальна частота ν_{min} або максимальна довжина λ_{max} світла при яких електрони ще вилітають з металу, але їхня швидкість дорівнює нулю, називається *червоною межею фотоефекту*);

5. фотоефект – явище безінерційне, тобто з припиненням освітлення воно припиняється.



$I = const, \nu_1 < \nu_2 < \nu_3 \Rightarrow i_1 > i_2 > i_3$

А. Ейнштейн пояснив явище фотоефекту та його закономірності на основі квантової теорії Планка, припустивши, що світло не лише випромінюється, а й поширюється і поглинається певними порціями (квантами) електро-магнітного випромінювання – *фотонами*.

Кожен квант (фотон) світла, за Ейнштейном, поглинається тільки одним електроном.

За законом збереження енергії:

$$h\nu = A_{\text{вих}} + \frac{mv^2}{2} \quad \text{– рівняння Ейнштейна для зовнішнього фотоефекту,}$$

де $h\nu$ – енергія одного фотона,

$A_{\text{вих}}$ – *робота виходу* – енергія, яку необхідно надати електрону, щоб він вирвався за межі металу,

$(mv^2)/2$ – початкова кінетична енергія електрона.

На основі явища фотоефекту заснована дія фотоелектронних приладів.

Фотоелементи – приймачі випромінювання, які працюють на явищі фотоефекту і перетворюють енергію електромагнітного випромінювання в електричну енергію.

Сфера застосування фотоелектронних пристроїв (фотоелементів, фотоелектронних помножувачів, фотодіодів, фотоопорів, електронно-оптичних перетворювачів тощо) дуже широка. Їх використовують як датчики реєстрації випромінювання.

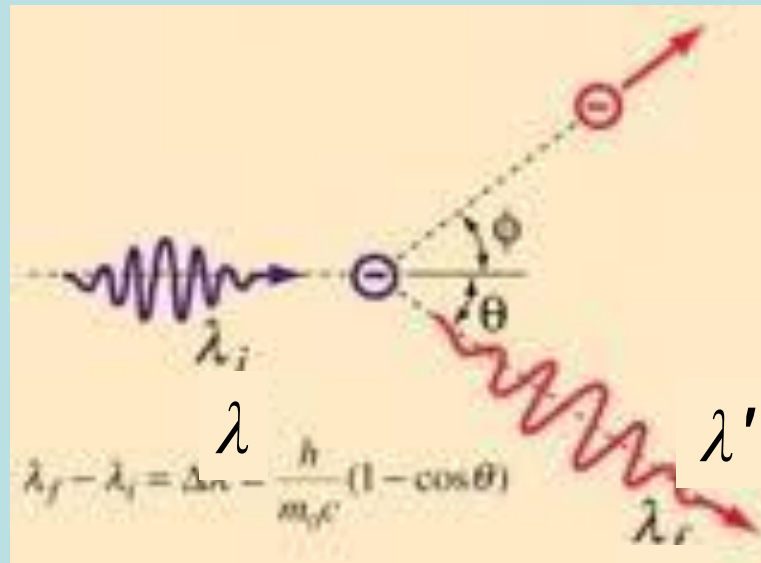
В основі принципу фотографування лежить фотохімічна дія світла на речовину. При розробленнях нових систем запису і зберігання інформації, створенні захисних світлофільтрів використовується явище зміни оптичних властивостей речовини під дією світла (фотохромізм).



У будівельній галузі фотоелементи використовуються для контролю, управління та автоматизації різних процесів (датчики освітленості, сигналізації, локації невидимого випромінювання та для перетворення променевої енергії Сонця в електричну – сонячні батареї).

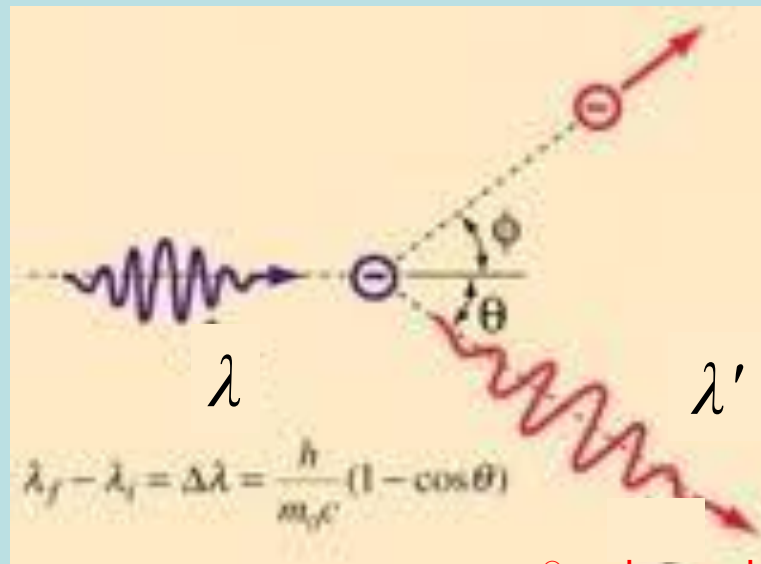


Ефектом Комптона називають явище пружного розсіювання короткохвильового електромагнітного випромінювання (рентгенівського і γ -випромінювання) на вільних або слабкозв'язаних електронах речовини, яке супроводжується збільшенням довжини хвилі випромінювання



$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = 2\Lambda \sin^2 \frac{\theta}{2} = \frac{2h}{m_{e0}c} \sin^2 \frac{\theta}{2},$$

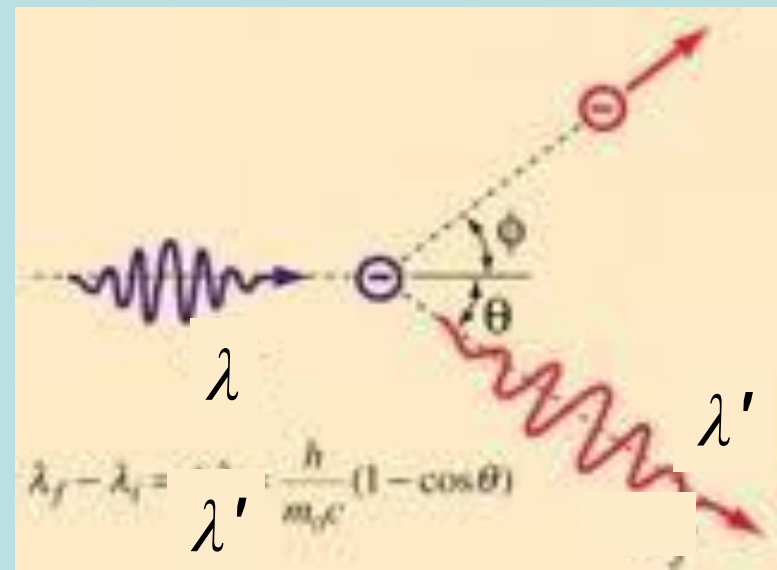
де λ – довжина падаючої на речовину хвилі,
 λ' – довжина розсіяного випромінювання,
 Λ – комптонівська довжина хвилі (при розсіянні фотона на електроні $\Lambda = 2,426$ нм),
 θ – кут розсіювання.



Зміна довжини хвилі не залежить від довжина падаючого на речовину випромінювання і природи речовини, на яку падає хвиля, а визначається величиною кута розсіювання.

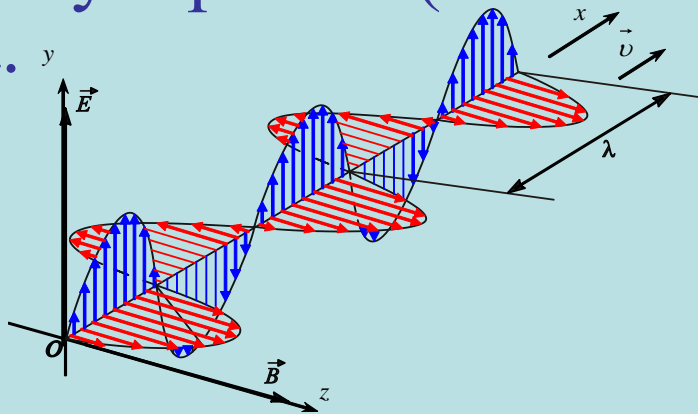
Пояснюють ефект Комптона на основі квантових уявлень.

У процесі пружного зіткнення рентгенівських фотонів з вільними електронами речовини фотон передає електрону частину своєї енергії та імпульсу у відповідності до законів їх збереження:



4. Корпускулярно-хвильовий дуалізм електромагнітного випромінювання. Фотони та їх характеристика.

Пояснити такі явища, як інтерференція, дифракція і поляризація можна лише виходячи з уявлень про світло як електромагнітну хвилю; такі явища, як теплове випромінювання, фотоефект тощо, можна пояснити лише припустивши, що світло – це потік частинок (корпускул), які назвали фотонами; а такі явища, як світловий тиск і заломлення світла гарно пояснюються як хвильовою, так і корпускулярною (квантовою) теоріями про природу світла.



Таким чином, світло виявляє єдність двох взаємовиключних властивостей – неперервних (хвильових) і дискретних (корпускулярних), які доповнюють одна одну.

Хвильові властивості світла проявляються у закономірностях його поширення, а корпускулярні – у процесах взаємодії світла з речовиною.

Чим більша довжина хвилі, тим менша енергія та імпульс фотона і тим складніше виявляються квантові властивості світла, навпаки – чим менша довжина хвилі, тим більша енергія та імпульс фотона і тим складніше виявляються хвильові властивості світла.

Основні рівняння, які пов'язують корпускулярні властивості електромагнітного випромінювання (енергію та імпульс фотона) з хвильовими властивостями (частотою і довжиною хвилі):

$$\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \quad p_{\phi} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}.$$

Особливість електромагнітного випромінювання, яка полягає у виявленні як корпускулярних так і хвильових властивостей, називають **корпускулярно-хвильовим дуалізмом електромагнітного випромінювання**.

Згідно квантової теорії, світло випромінюється, поширюється і поглинається дискретними порціями (квантами), які називають *фотонами*. Енергія фотона $\varepsilon = h\nu$, за законом взаємозв'язку маси і енергії $\varepsilon = mc^2$, з чого випливає, що маса фотона:

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

(для найбільш чутливої для людського ока монохроматичної хвилі $\lambda = 555$ нм $m_{\phi} = 4 \cdot 10^{-36}$ кг).

Частинка, що рухається зі швидкістю v і має масу спокою m_0 , матиме масу

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

Фотон не має маси спокою $m_0=0$ і може існувати тільки під час руху.

Імпульс фотона

$$p_{\phi} = m_{\phi} c = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}.$$

Тиск світла на поверхню становить:

$$p = \frac{E_e}{c} (1 + \rho).$$

де E_e – сумарна енергія
усіх фотонів,
 ρ – коефіцієнт відби-
вання світла.



**Сонячний млин, або
Радіометр Крукса.**

Лекція 11. КВАНТОВА ОПТИКА

1. Теплове випромінювання та його закони.
2. Утруднення класичної теорії теплового випромінювання. Квантова гіпотеза випромінювання.
3. Явища фотоефекту та ефекту Комптона.
4. Корпускулярно-хвильовий дуалізм електромагнітного випромінювання. Фотони, їх маса та імпульс.