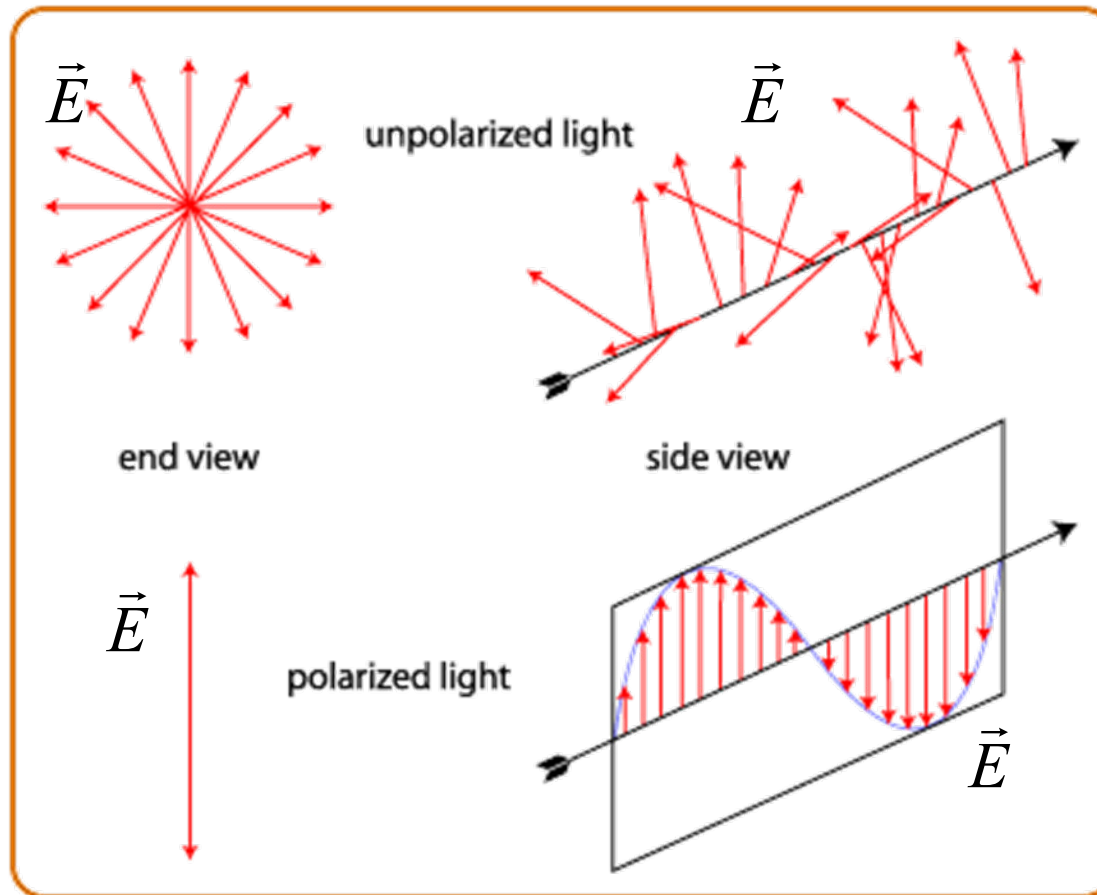
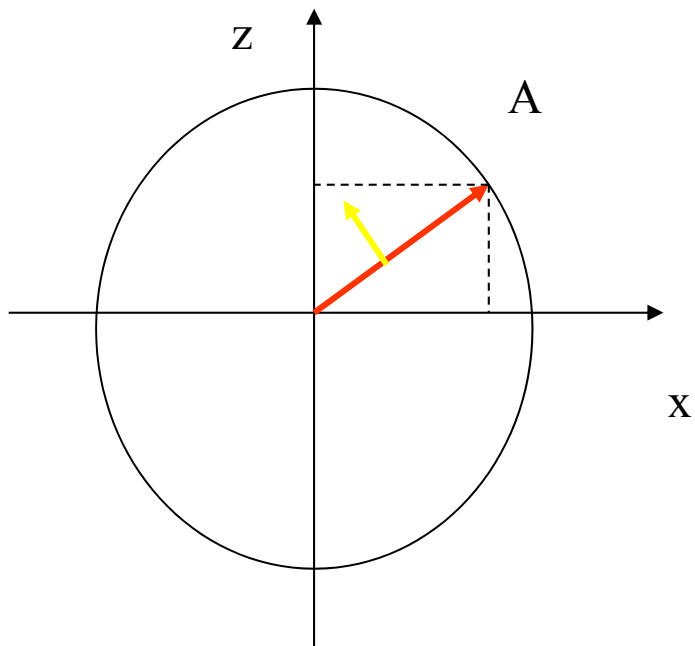


# Поляризирана светлина

- ✓ Направление на поляризация е направлението в което трепти вектора на интензитета на **електричното** поле. Ако при разпространение той не променя направлението си на трептене, вълната се нарича **линейно** (плоско) поляризирана.



# Елиптична (кръгова) поляризация



$$A_x = A \cos \omega t$$

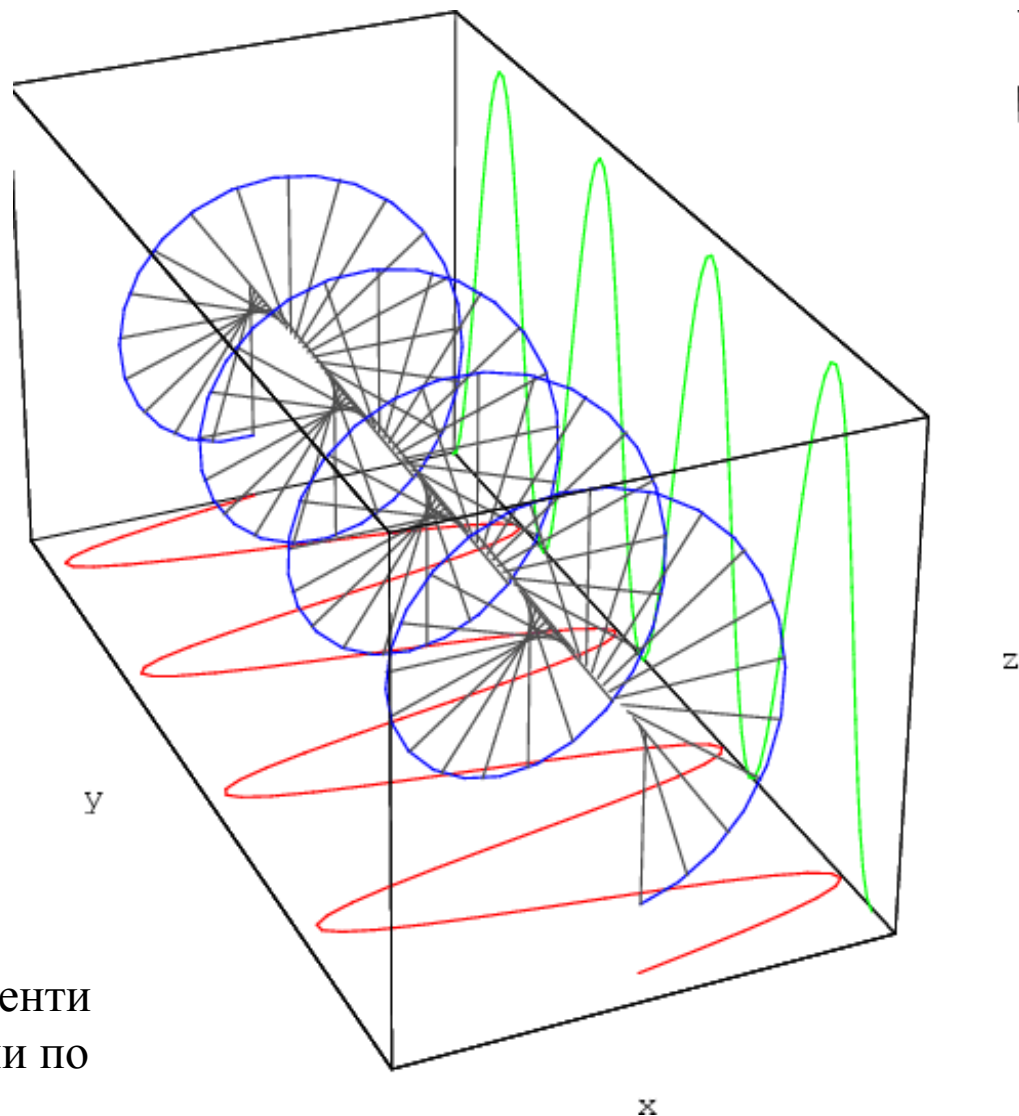
$$A_z = A \sin \omega t$$

$$A_x > A_z$$

$$A_x < A_z$$

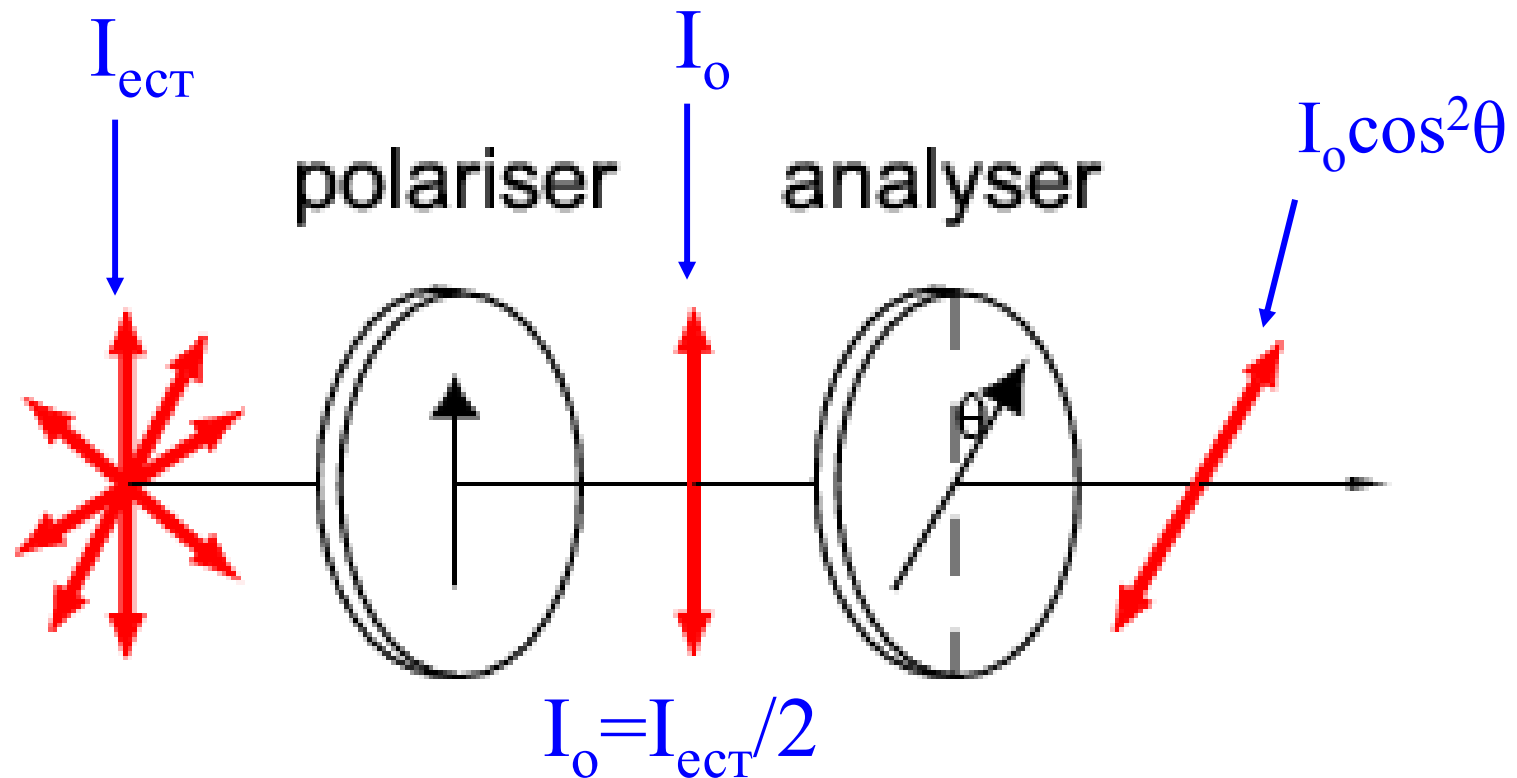
$$A_x = A_z$$

Разпространение е по y. Двете компоненти на вектора на поляризация са отместени по фаза на  $\pi/2$



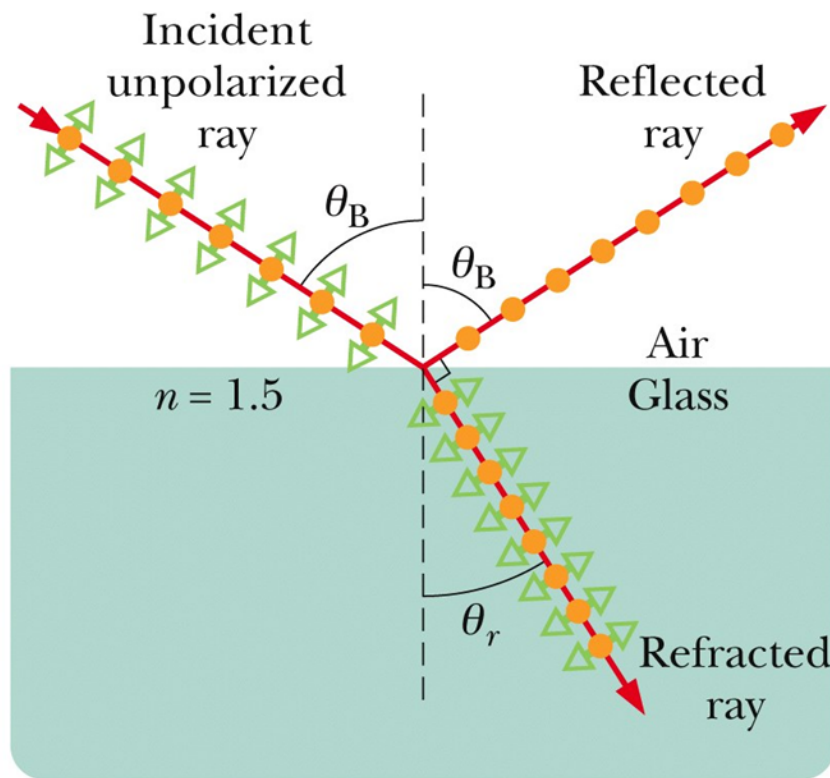
# Закон на Малюс

$$I = I_o \cos^2 \theta$$



Как е поляризирана светлината след отражение от тънка пластина?

**Поляризация чрез отражение:** Закон на Брюстер



- Component perpendicular to page
- ↔ Component parallel to page

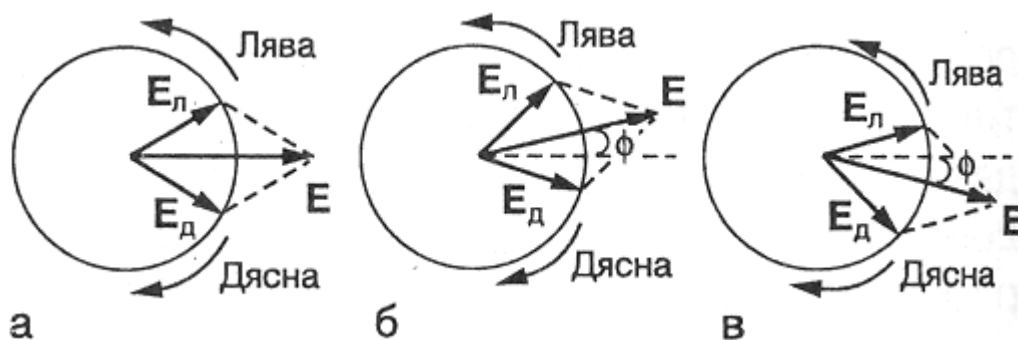
$$\frac{\sin(\theta_B)}{\sin(\theta_r)} = n$$

$$\theta_r = \frac{\pi}{2} - \theta_B$$

$$\tan \theta_B = n$$

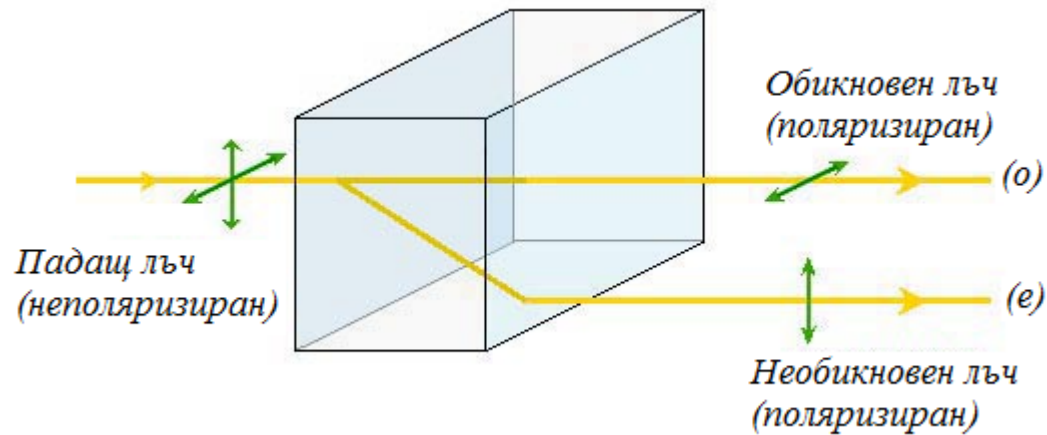
## ВЪРТЕНЕ НА РАВНИНАТА НА ПОЛЯРИЗАЦИЯ

- ✓ При преминаване на линейно поляризирана светлина през някои вещества, наричани **оптически активни**, равнината на поляризация се завърта около посоката на разпространение на лъча.
  - Оптически активни са:
    - някои кристали (кварц, киновар)
    - чисти течности (скипидар, никотин)
    - разтвори (камфор в бензол, водни разтвори на захари, глюкоза, винена киселина).
- ✓ Линейно поляризираната плоска монохроматична светлина се представя като комбинация от две кръгово поляризирани плоски вълни с противоположни посоки на завъртане—лява и дясна и различни скорости скорости  $v_L$  и  $v_D$ . Ако: (а)  $v_L = v_D$  в-вото е оптически неактивно; (б)  $v_L > v_D$  в-вото е ляво въртящо; в)  $v_L < v_D$  в-вото е дясно въртящо



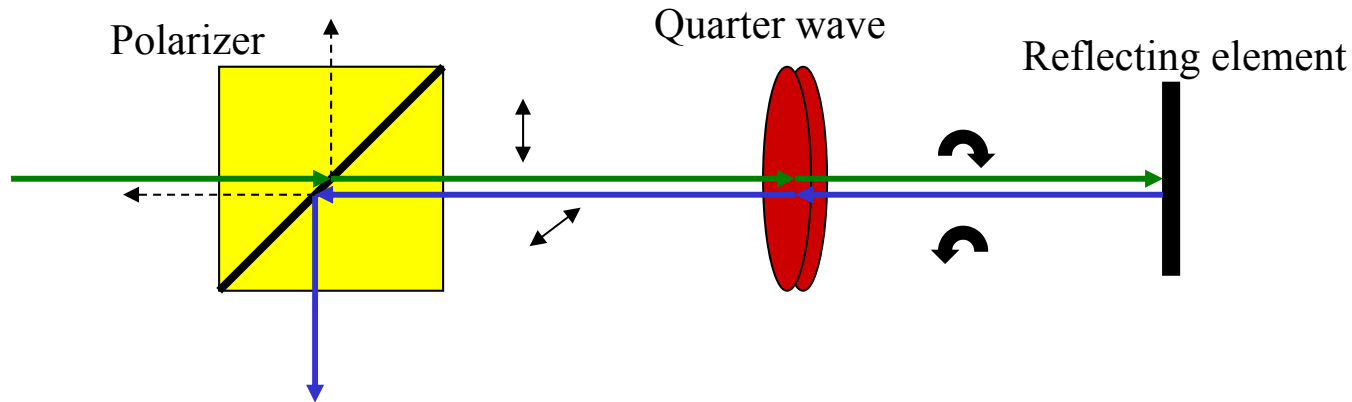
# Поляризация на светлината при двулъчепречупване

- ✓ При преминаване на светлината през прозрачни кристали с изключение на оптически изотропните, се наблюдава явлението **двулъчепречупване** - светлинен лъч, паднал върху повърхността на кристала се разделя на два пречупени лъча наречени условно обикновен и необикновен, поляризирани в две взаимно перпендикулярни направления. При пречупването си в кристала обикновения лъч се подчинява на закона на Снелиус а необикновения не. При излизането си от кристала двата лъча са успоредни, но могат да бъдат с различен интензитет ако в/у кристала пада линейно поляризирана светлина.



# Изолатори

- Поляризатор и четвърт вълнова пластинка
- Две преминавания през четвърт вълновата пластинка
  - при всяко преминаване върти поляризацията с  $45^\circ$
- Поляризатора спира отразената светлина поради това че вече е перпендикулярно поляризирана

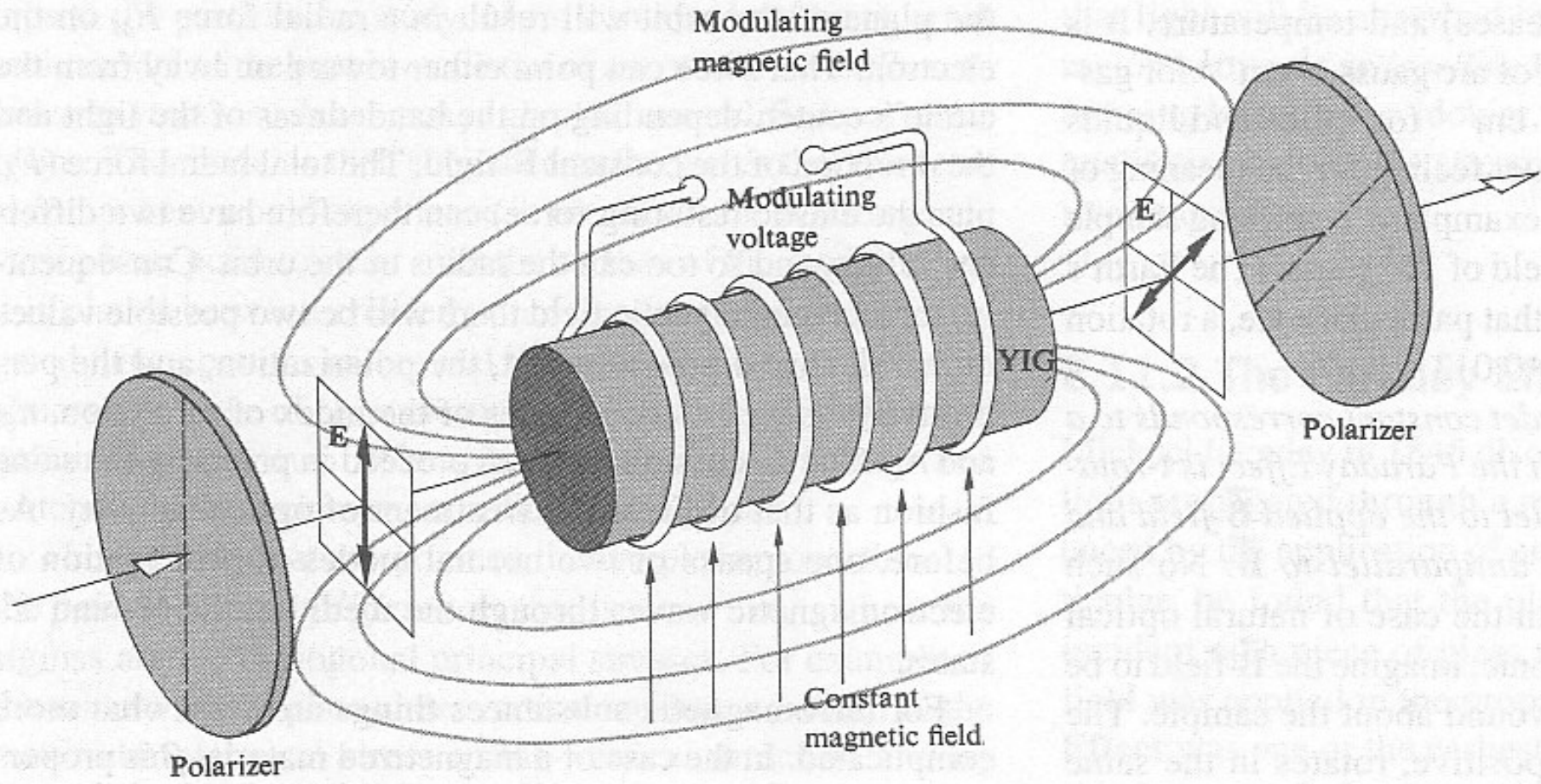


# Ефект на Фарадей за поляризацията

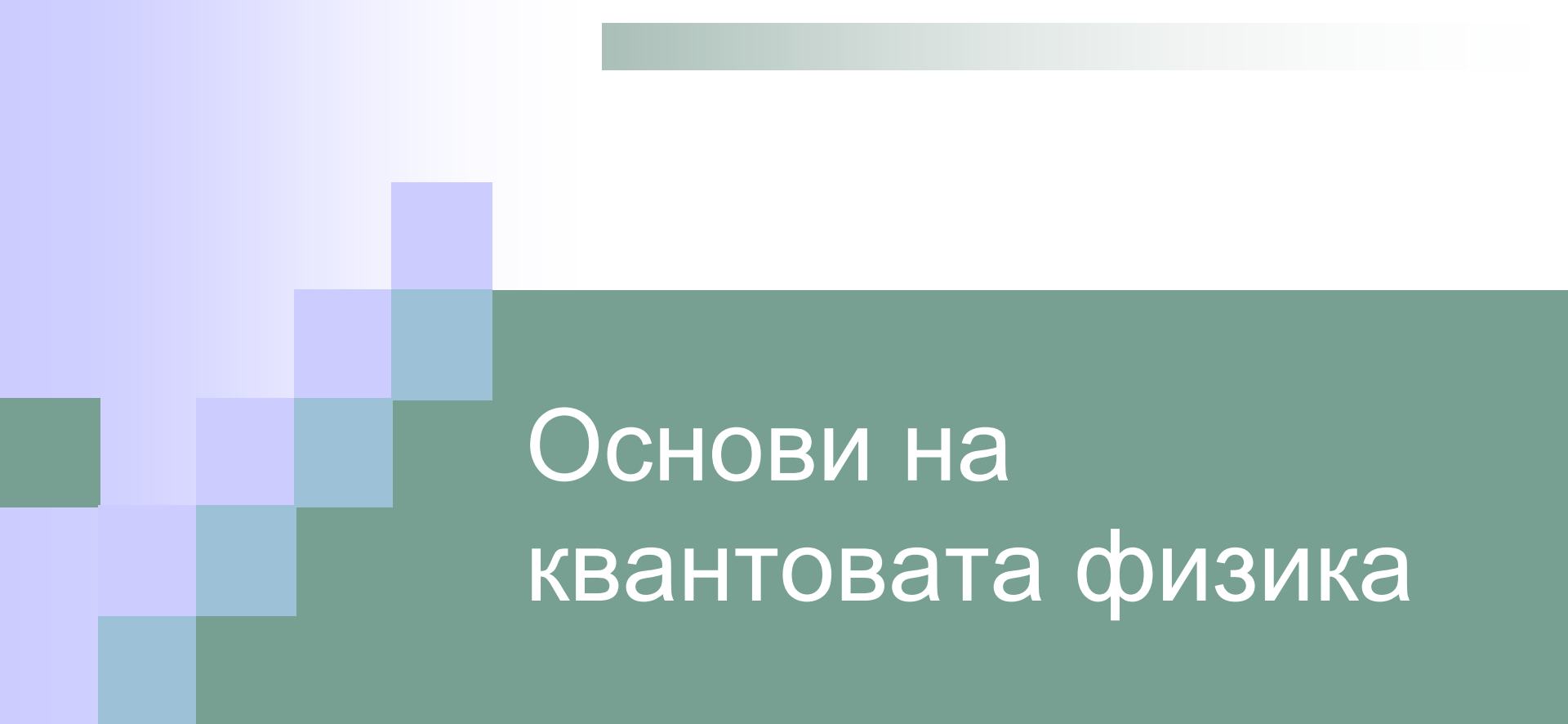
Магнитното поле предизвиква въртене с ъгъл  $\phi$  на поляризацията в *оптически неактивни вещества*:

$$\phi = V l B$$

$V$  - константа на Верде – зависи от вида на веществото и дължината на вълната,  $l$  - пътът на светлината в средата,  $B$  – магнитната индукция





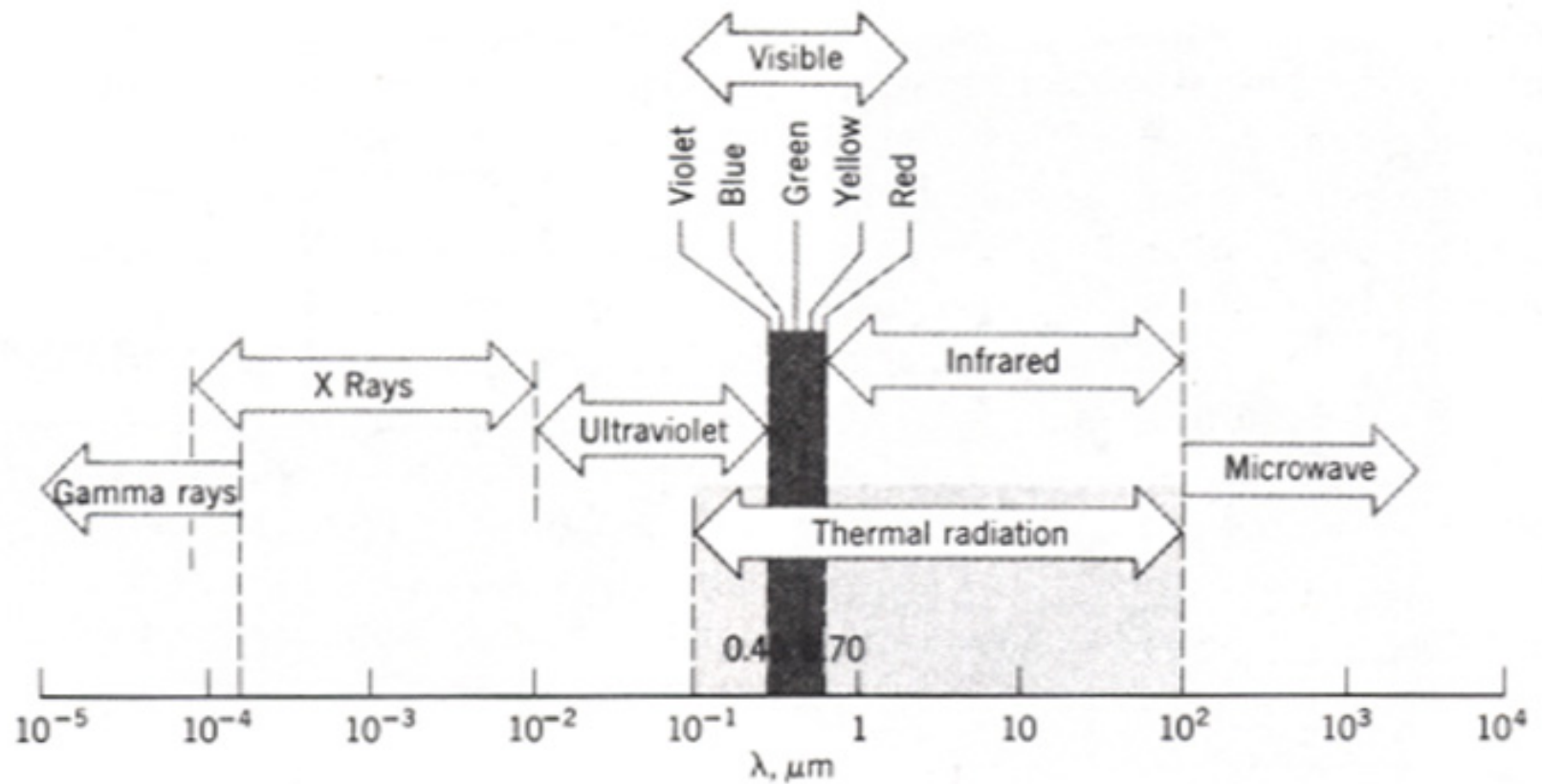


# Основи на квантовата физика

## Топлинно излъчване

# Топлинно излъчване

- ✓ Нагreti са всички тела с температура  $T > 0$  К. Топлинното лъчение е *електромагнитното* излъчване на нагretите тела



# Основни величини

Спектрална  
излъчвателна  
способност

$$r_{\lambda,T} \left[ \frac{W}{m^3} \right]$$

интегрална  
излъчвателна  
способност

$$R_{\lambda,T} = \int_0^{\infty} r_{\lambda,T} d\lambda \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

Спектрална  
абсорбционна  
способност

$$0 \leq a_{\lambda,T} \leq 1$$

- Сиво тяло  $a_{\lambda,T} < 1$
- Абсолютно черно тяло  $a_{\lambda,T} = 1$

### **Кратко теоретично въведение:**

Топлинно лъчение (ТЛ) е електромагнитното излъчване на телата, чиято температура е по-висока от абсолютната нула. Топлинното лъчение е равновесно излъчване, което означава, че в изолирана система, излъчената енергия е равна на погълнатата като тялото остава в състояние на термодинамично равновесие.

Топлинното излъчване като електромагнитно поле (ЕМП) се характеризира с величината обемно-спектрална плътност на енергията  $\rho(\nu, T)$  измервана в единици  $[J.s/m^3]$  и свързаната с нея пълна обемна плътност на енергията измервана в  $[J/m^3]$ . Тези характеристики на топлинното излъчване не зависят от природата на телата, които го създават а само от тяхната температура, затова понякога се казва, че температурата на равновесното топлинно излъчване е равна на температурата на тялото.

За да получим представа за свойствата на топлинното излъчване обаче, трябва накратко да обсъдим основните излъчвателни характеристики на нагретите тела, като спектрална излъчвателна способност, спектралната поглъщателна способност, и свързаните с тях интегрални величини [1,2].

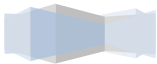
Спектралната излъчвателна способност  $r_{\nu, T}$  която се измерва в единици  $[J/m^2]$  представлява излъчената енергия за единица време от единица площ на повърхността на тялото в единичен честотен интервал  $d\nu$  около честотата  $\nu$ .

Съответно свързаната с  $r_{\nu, T}$  пълна или интегрална излъчвателна способност за целия диапазон от честоти се дава чрез:

$$R_T = \int_0^{\infty} r_{\nu, T} d\nu, \quad [W/m^2] \quad (1)$$

Спектралната поглъщателна способност на тялото  $a_{\nu, T}$ , е безразмерна величина, която показва каква част от енергията на електромагнитното лъчение в диапазона от честоти от  $\nu$  до  $\nu + d\nu$ , попаднала върху единица площ за единица време, при дадена температура  $T$  се поглъща от него. Тяло което поглъща изцяло падналото върху него електромагнитно излъчване ( $a_T=1$ ), независимо от неговия спектрален състав, поляризация или посока на разпространение се нарича абсолютно черно тяло (АЧТ). Излъчването на абсолютно черното тяло представлява топлинно излъчване с температура, равна на температурата на тялото (топлинно или още равновесно излъчване). Добър модел за абсолютно черно тяло е например куха обвивка с непрозрачни поглъщащи стени, поддържани при постоянна температура в които е направен малък отвор. В заграждения от обвивката обем се установява почти равновесно лъчение малка част от което непрекъснато напуска обвивката през отвора. Така отворът може да се разглежда като абсолютно черно тяло с температура, равна на температурата на равновесното лъчение, т.е. на обвивката. По тази логика, съществуват редица тела в природата, които с приближение ( $a_T \leq 1$ ) могат да се разглеждат като абсолютно черни, тъй като излъченото от тях електромагнитно поле съответства на тяхната температура. Такива са например Слънцето или електрическа крушка с нажежаема нишка.

Съотношението между спектралната излъчвателна и спектралната поглъщателна способност на телата не зависи от природата на телата и се явява за всички тела една и съща универсална функция на честотата и температурата (наречена универсална функция на Кирхоф). Това твърдение е формулираният през 1859 г. от Кирхоф закон:



$$r_{\nu,T} / a_{\nu,T} = f(\nu, T), [\text{J/m}^2] \quad (2)$$

Универсалната функция на Кирхоф е равна на излъчвателната способност на АЧТ ( $a_{\nu,T}=1$ ), и е свързана с обемно-спектралната плътност на енергията на топлинното излъчване като ЕМП в пространството чрез формулата:

$$\rho(\nu, T) = \frac{4}{c} f(\nu, T), [\text{J.s/m}^3] \quad (3)$$

През 1879 г. австрийският физик Йозеф Стефан анализирайки експериментални данни установява, че за произволно нагрятото тяло интегралната излъчвателна способност  $R_T$  е право пропорционална на четвъртата степен на нейната абсолютна температура  $T$ . Малко по-късно (през 1884 г.) неговият сънародник Лудвиг Болцман от термодинамични съображения получава известната днес зависимост свързваща интегралната излъчвателна способност на абсолютно черно тяло с неговата температура  $T$ , наречена закон на Стефан:

$$R_{T, \text{АЧТ}} = \sigma T^4, [\text{W/m}^2] \quad (4)$$

където  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{W/m}^2 \text{K}^4$  е т.нар. *константа на Стефан-Болцман*.

Тъй като в затворен краен обем, топлинното излъчване може да се представи като съвкупност от стоящи вълни, то за получаването на универсалната функция на Кирхоф е необходимо да бъде определен техният брой и енергия (т.е. да се определи обемната плътност на енергията). Релей и Джинс направили такъв опит и установили, че обемната плътност на енергията на топлинното излъчване и респективно универсалната функция на Кирхоф  $f(\nu, T)$  на АЧТ в честотния интервал  $d\nu$  могат да се определят по формулата.

$$f(\nu, T) = \frac{\nu^2}{c^2} kT, [\text{J/m}^2] \quad (5)$$

Във формулата на Релей и Джинс съществува фундаментален проблем - пълната енергия на топлинното излъчване и съответно интегралната излъчвателна способност при нарастване на честотата клонят към безкрайност. През 1900 г. на Планк му се удава да разреши този проблем и изключително точно да получи универсалната форма на функцията  $f(\nu, T)$ . За целта му се налага да направи предположението, че електромагнитното излъчване се изпуска под формата на отделни порции енергия (кванти), големината на които е пропорционална на честотата на излъчването:

$$\varepsilon = h\nu, [\text{J}] \quad (6)$$

където  $h = 6.62 \cdot 10^{-34} [\text{J.s}]$  е константата на Планк. Видът на функцията на Кирхоф намерена от Планк е следния (дадена чрез честотата и чрез дължината на вълната - фиг.1):

$$f(\nu, T) = \frac{h\nu^3}{c^2 (e^{h\nu/kT} - 1)}, [\text{J/m}^2] \quad \leftrightarrow \quad I(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/kT\lambda} - 1)}, [\text{W/m}^2] \quad (7)$$

( $I(\lambda, T)$  получаваме като умножим  $f(\nu, T)$  с  $2\pi c/\lambda^2$  и заместим  $\nu$  с  $c/\lambda$ ),  $k = 1.38 \cdot 10^{-23} [\text{J/K}]$  е константа на Болцман,  $c = 3 \cdot 10^8 [\text{m/s}]$  е скорост на светлината.

Използвайки своята формула, Планк аналитично получава израз за интегралната излъчвателна способност (1) на АЧТ който идеално съответства на получения по-рано по експериментален път закон на Стефан-Болцман:

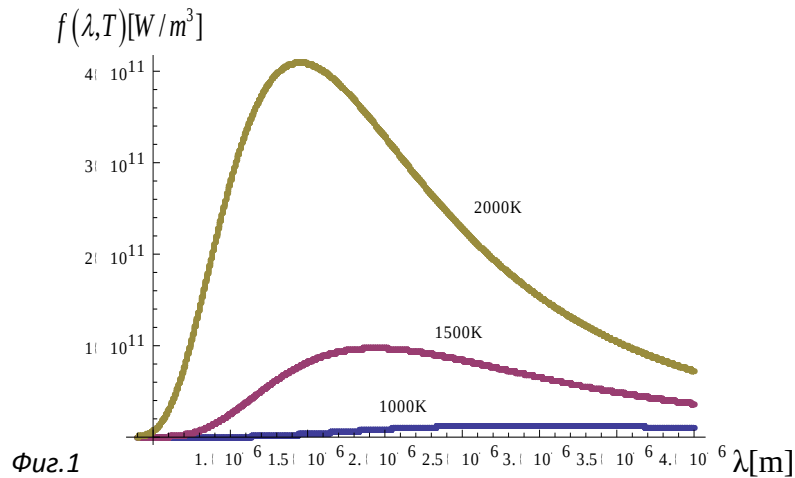
$$R_{T, \text{АЧТ}} = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} T^4 = \sigma T^4, [\text{W/m}^2] \quad (8)$$



Обикновено законът на Стефан-Болцман се дефинира във формата дадена в (8) но често се записва и чрез мощността на топлинното излъчване на АЧТ, изразена във ватове:

$$P = a_T S \sigma T^4, [W] \quad (9)$$

където  $S$  е излъчващата повърхност на тялото, ( $a_T \leq 1$ ) е безразмерен параметър наречен излъчваемост, който зависи по сложен начин от температурата, материала, вида и състоянието на излъчващата повърхност.



На Фиг. 1. е показана излъчвателна способност (функцията на Кирхоф) на АЧТ за 1000, 1500, 2000 Келвина.

С повишаване на температурата Максимумът на кривата се отмества към по-малките дължини на вълните.





*Топлинното излъчване е в термодинамично равновесие с нагретите тела.*

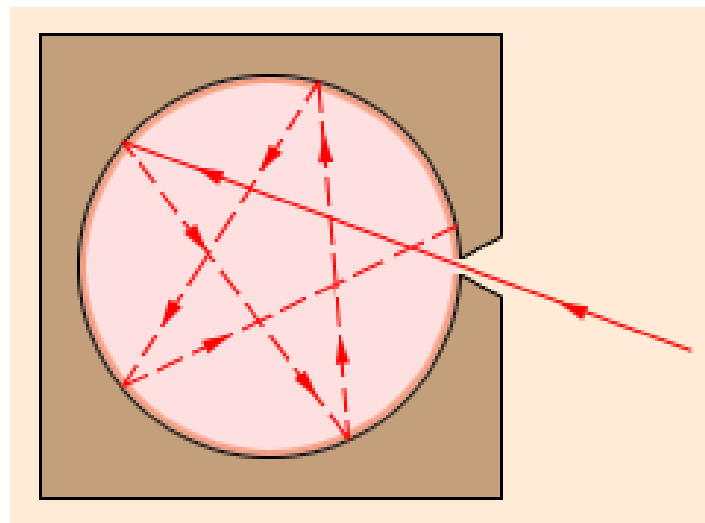
Ако в затворена повърхност с огледално отразяващи стени сложим няколко нагрети до различна температура тела, с течение на времето такава система ще дойде в състояние на ТДР, при което всички тела ще имат еднаква температура.

При ТДР всяко тяло излъчва толкова енергия, колкото поглъща.

Телата обменят енергия единствено чрез изпускане и поглъщане на лъчиста енергия и в пространството между тях плътността на енергията на излъчването достига стойност, зависеща единствено от установената температура на телата.

Това излъчване се нарича **равновесно**. Неговата плътност и спектрален състав зависят единствено от температурата.

# Абсолютно черно тяло



Модел на АЧТ

Тъй като при ТДР всяко тяло излъчва толкова енергия, колкото поглъща, а за АЧТ  $a_{\lambda,T} = 1$ , следва, че:

Излъчвателната способност на АЧТ при дадена температура е най-голяма!



# Универсална функция на Кирхоф.

- При излъчване, енергията на топлинно движение преминава в енергия на ЕМ вълни.
- При поглъщане на ЕМ вълни енергията се превръща в енергия на топлинното движение.

И в двата случая взаимните превръщания на енергията преминава през трептене на електричните заряди. Затова емисионната и абсорбционната способност са тясно свързани.

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

- универсална функция на Кирхоф

За АЧТ

$$a_{\lambda,T} = 1; \Rightarrow r_{\lambda,T} = f(\lambda, T)$$

# Закони на Стефан–Болцман и Вин

**1879 година.** **Йозеф Стефан** на основата на анализ на експериментални данни заключава, че мощността на топлинното излъчване е пропорционална на площта на излъчващата повърхност и на четвъртата степен на абсолютната температура:

Закон на Стефан-Болцман:

$$P = a\sigma ST^4$$

$$a = 0..1$$

$$a = 1(АЧТ)$$

**1884 година.** **Л. Болцман** извежда теоретически тази зависимост от термодинамични съображения.

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ [W/m}^2\text{K}^4\text{]}$$

**~1890 година.** От принципите на термодинамиката **Вин** получава, че с увеличаване на температурата максимумът на излъчване се измества към по-късите дължини на вълната:

Закон на Вин:

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

$$b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ [mK]}$$

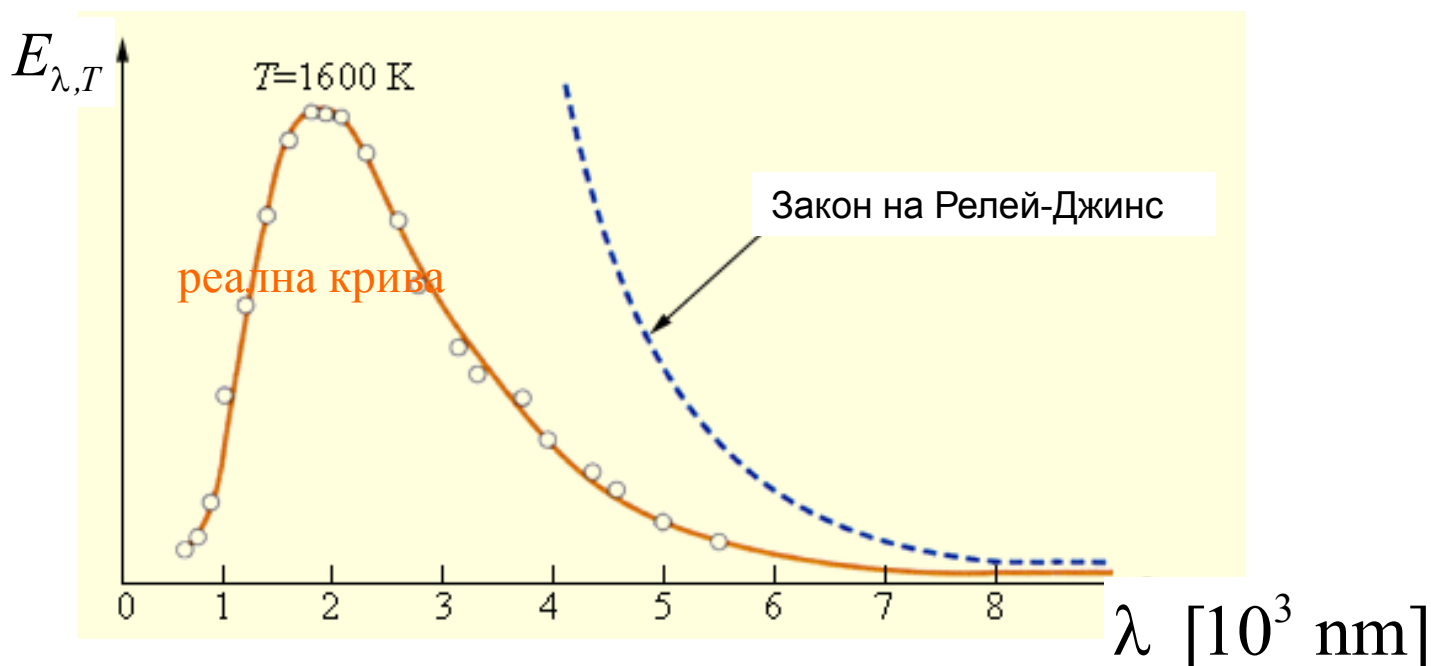
- константа на Вин

# Закон на Релей-Джинс

**1900 година.** Д. Релей, прилага теоремата от молекулно кинетичната теория за равномерно разпределение на енергията по степените на свобода при термодинамично равновесие към равновесното излъчване в кухня. Подробно тази идея е развита по-късно от Джинс. Така е получена зависимостта:

$$f(\lambda, T) = 8\pi kT \lambda^{-4}$$

Описва добре дълговълновата част на кривата на излъчване на АЧТ, но не и късовълновата.



**Ултравиолетова катастрофа!**

## Хипотеза на Планк:

Излъчването и поглъщането на електромагнитните вълни става на порции (кванти) с енергия

$$E = h\nu$$

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ [J.s]} \quad \text{- константа на Планк}$$

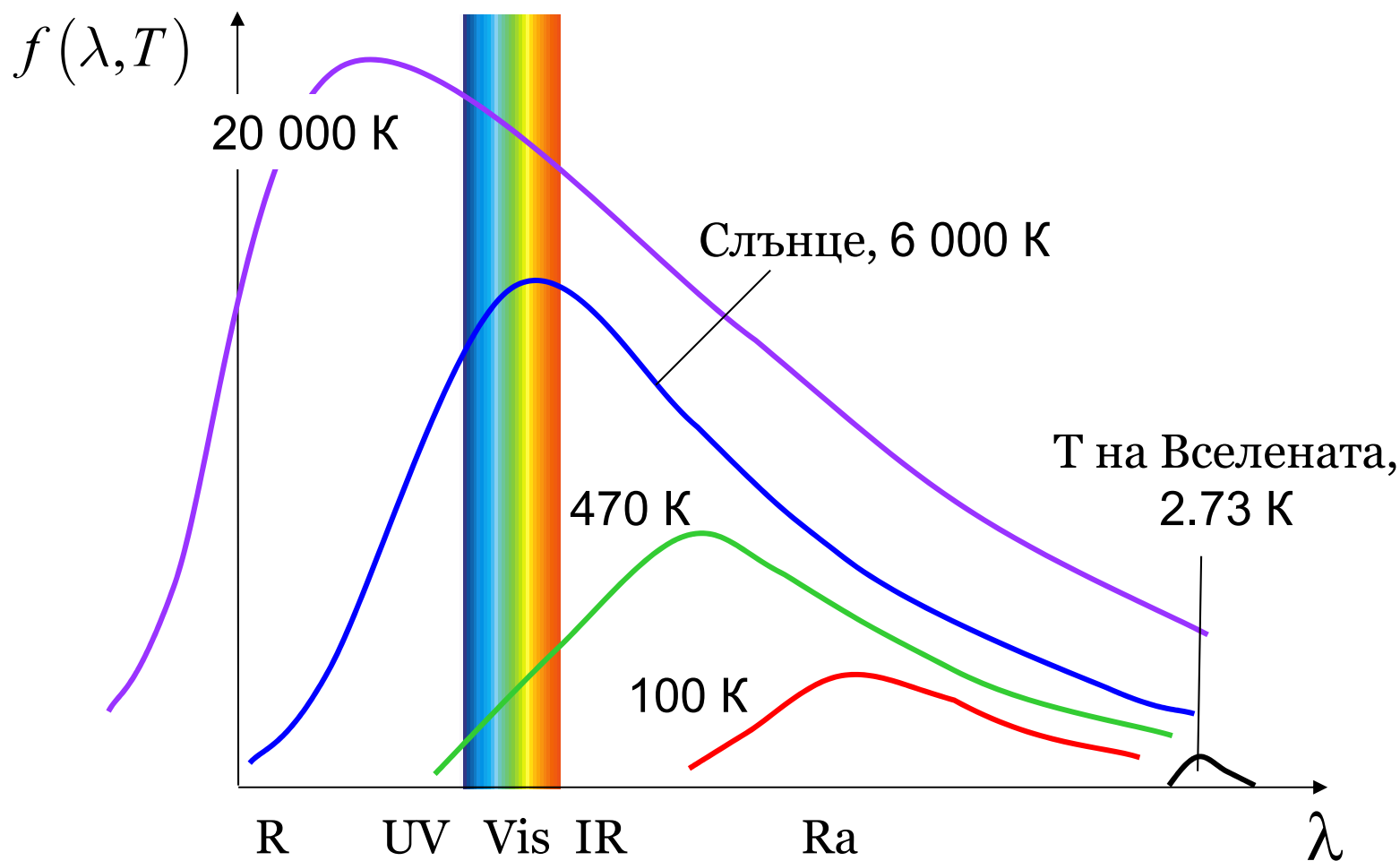
## Формула на Планк за топлинното излъчване на АЧТ:

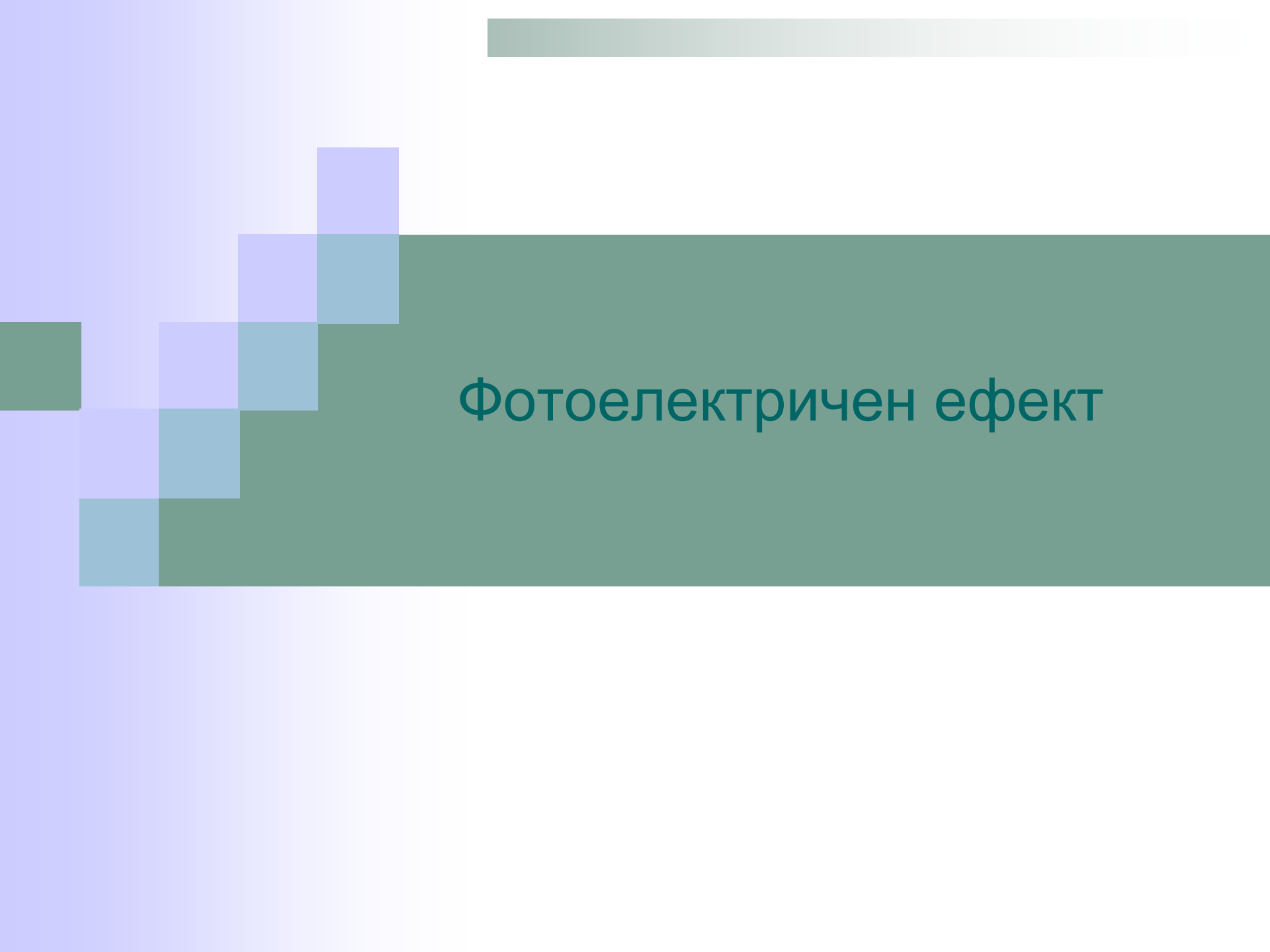
$$f(\lambda, T) = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5 (e^{hc/kT\lambda} - 1)}$$

**Следствия:**  $E_{\lambda, T} = \int_0^{\infty} f(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4 [W / m^2]$

$$P = S\sigma T^4 [W]$$

Формулата на Планк описва коректно топлинното излъчване на телата и реалната крива съвпада с теоретичната





# Фотоелектричен ефект



Г. Херц

**1887** година – Г. Херц установява, че металите се зареждат положително под действие на ултравиолетова светлина (губят електрони).

**1888 г.** Столетов  
изследва основните  
закономерности



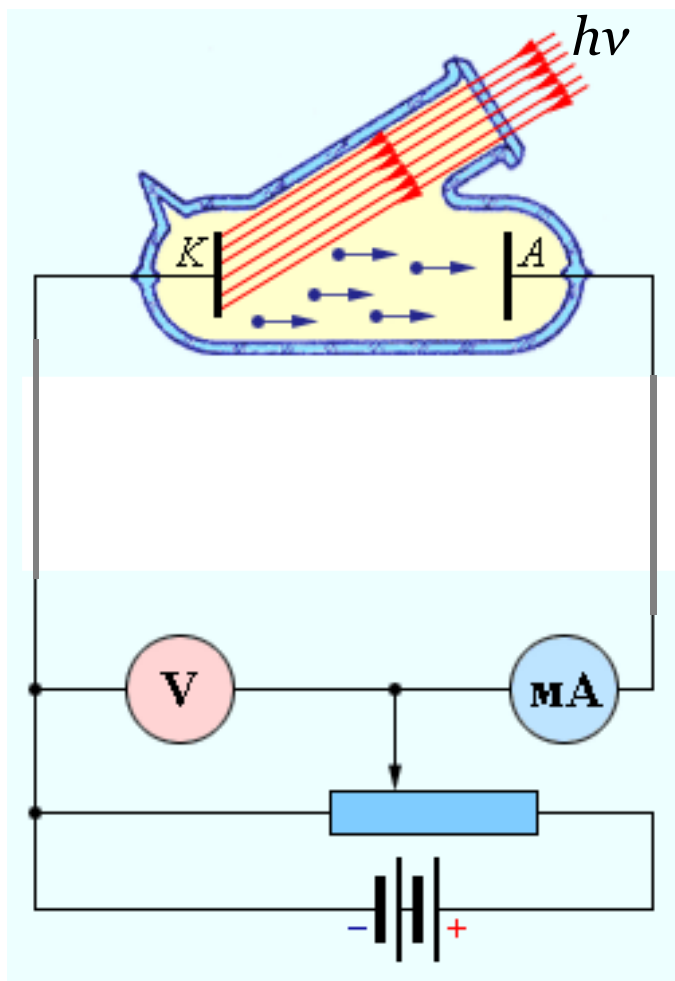
А. Столетов

Ленард и Томсон измерват специфичния заряд на напускащите частици и установяват, че това са електрони.

Видове:

- Външен
- Вътрешен
- Галваничен
- Фотойонизация

## ■ Фотоелектричен ефект - качествено обяснение



При облъчване с високоенергетично излъчване от металите се отделят електрони

Формула на Айнщайн:

$$h\nu = A + E_{k,\max} = A + \frac{mv_{\max}^2}{2}$$

$h\nu$  - енергия на фотона

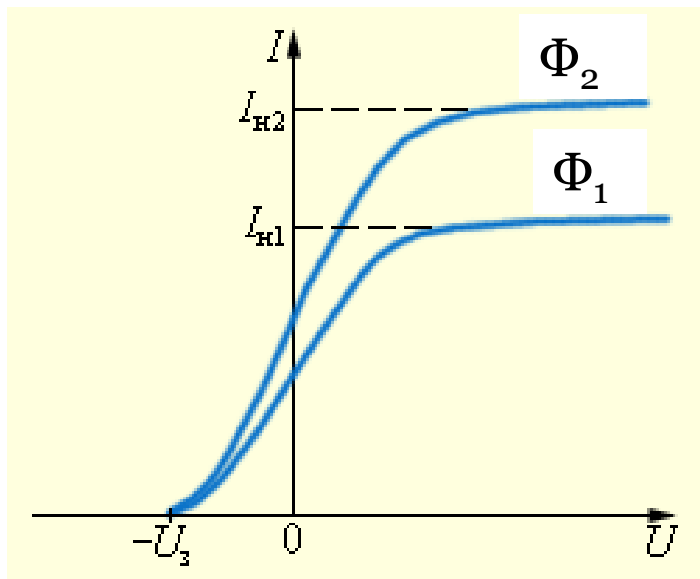
$A$  - отделителна работа на метала

$E_{k,\max}$  - максимална кинетична енергия



# Основни закономерности

I. Фототока спира да нараства при подаване на напрежение м/у катода и анода (насищане на фототока). Наситеният фототок е пропорционален на светлинния поток.



$$I_n = \gamma \Phi$$

$\gamma$  [ $\mu\text{A/Lm}$ ] - чувствителност на катода:

II. Ако между катода и анода приложим обратно напрежение равно на  $E_{k,max}$  на електроните (задържащо напрежение) то фототока се нулира. Установено е че задържащото напрежение е зависи от енергията на кванта и отделителната работа за метала

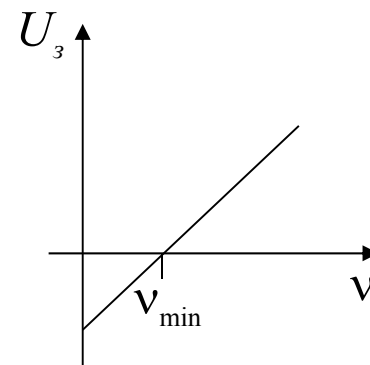
$$E_{k,max} = eU_3 = \frac{h}{e}\nu - \frac{A}{e}$$

III. Съществува “червена граница” за веществото на катода:

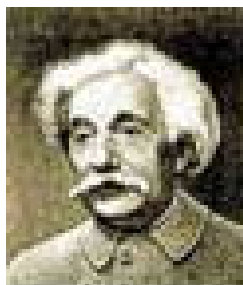
$$\lambda_{max} ; \nu_{min}$$

$$\text{за } \begin{matrix} \nu < \nu_{min} \\ \lambda > \lambda_{max} \end{matrix}$$

няма  
фотоефект



IV. Явлението е безинерционно.



А. Айнщайн

# Обяснение на фотоефекта

Електромагнитните вълни се излъчват, разпространяват и поглъщат на порции с енергия  $h\nu$ .

Уравнение на Айнщайн:

$$h\nu = A + \frac{mV_{\max}^2}{2}$$

$A$  – отделителна работа;  $h\nu$  – енергия на фотона;  $\frac{mV_{\max}^2}{2}$  – енергия на свободния електрон;

Всеки електрон поглъща мигновено и изцяло точно един фотон.  $\Rightarrow$  IV закон:  $\tau \sim 10^{-9} \text{ s}$

$\Rightarrow$  I закон: Броят на отделените електрони е пропорционален на светлинния поток ( $\sim$  броя на фотоните).

$$I = ne = \gamma\Phi$$

$\Rightarrow$  II закон:

$$\frac{mV_{\max}^2}{2} = h\nu - A$$

$$eU_3 = \frac{h}{e}\nu - \frac{A}{e}$$

За да има фотоефект, енергията на фотона трябва да е равна най-малко на отделителната работа.

$$\frac{mV_{\max}^2}{2} = 0; \quad h\nu \geq A \quad \Rightarrow \text{III закон: } \nu \geq \frac{A}{h} = \nu_{\min}$$

# Приложения на фотоефекта



Международната космическа станция

**Фотоелектронни прибори** - основани са на превръщане на светлинния сигнал в електрически:

- Електричното съпротивление на полупроводника пада при осветяване (**вътрешен фотоефект**) – създават се фотосъпротивления;
- **Галваничният фотоефект**, при който възниква фотоелектродвижещо напрежение позволява да се преобразува светлинната енергия в електрическа в слънчевите батерии;
- **Фотоелектронните умножители** позволяват да се регистрират много слаби излъчвания, дори отделни фотони;
- Анализът на енергиите и ъглите на излитане на фотоелектроните позволява да се изследва повърхността на материалите.

През 2004 г. японските изследователи създадоха нов тип полупроводников прибор - **фотокондензатор**, съединяващ в себе си фотоелектричен преобразовател и средство за съхранение на енергията - два пъти по-ефективен от обикновените силициеви слънчеви батерии.

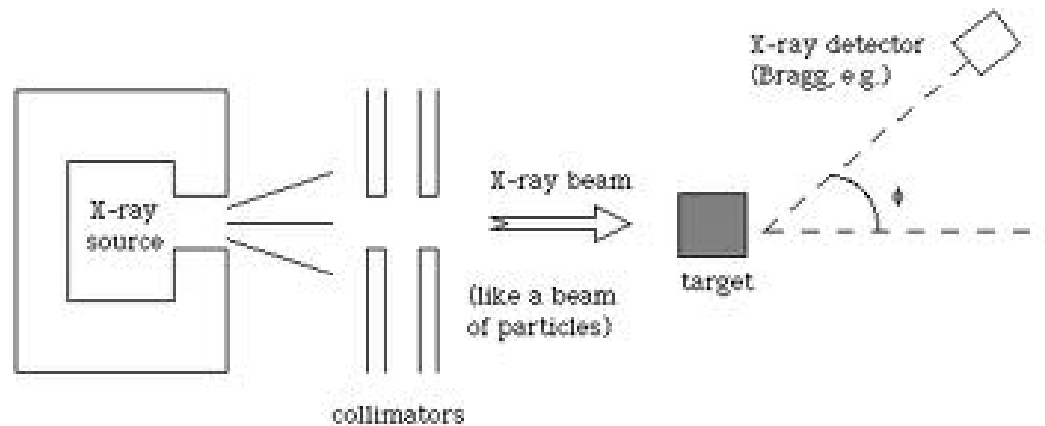


# Корпускулярно- вълнов дуализъм

# Корпускулярно-вълнов дуализъм

| Проявяват вълнови свойства<br>при: | Проявяват корпускулярни<br>свойства при |
|------------------------------------|-----------------------------------------|
|                                    | Топлинно излъчване                      |
| Интерференция                      | Фотоелектричен ефект                    |
| Дифракция                          | Комптънов ефект                         |
| Поляризация                        | Раждане на двойка електрон-<br>позитрон |

# Комптънов ефект



$$\Delta\lambda = 2\lambda_c \sin^2 \frac{\phi}{2}$$

$$\frac{h}{m_e c} = \lambda_c$$

$\lambda_c$  Комптъновска дължина на вълната

$\lambda$  на разсеяното излъчване зависи от ъгъла на падане на рентгеновите лъчи. Класическата физика не дава обяснение. Ефекта се обяснява от квантова гледна точка като резултат от взаимодействието на падащото излъчване с електроните на веществото.

# Микрочастици

1923 г. **ХИПОТЕЗА** на дьо Бройл:

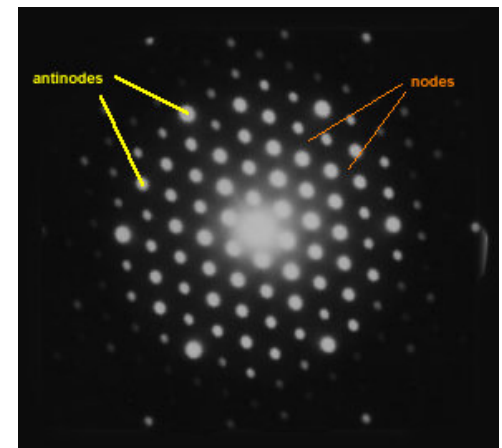
“С всеки микрообект са свързани от една страна корпускулярни характеристики – енергия и импулс, а от друга – вълнови – дължина на вълната.”

На всяка микрочастица с импулс  
се приписва дължина на вълната

$$p = mV$$

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

**ПОТВЪРЖДЕНИЕ:** 1927 г. Дейвисън и Джермер наблюдават дифракция на електронен сноп върху никелов кристал, а **Томсон** през 1928г. - през златно фолио.

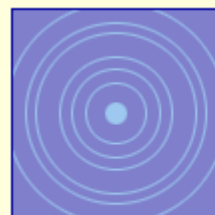




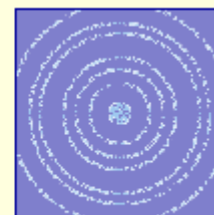
При ниски честоти, когато размерите на препятствия са сравними с дължината на вълната (например в радиодиапазона) доминират вълновите свойства.

Когато честотата на вълната е по-висока от тази на **UV**, вълновите свойства са по-трудно наблюдаеми и започват да доминират корпускулярните свойства.

През кристал електроните преминават като вълна, а с фотоемулсията взаимодействат като частици.



(a)



(b)

Дифракция на електрони:

(a) дълга, (b) къса експозиция



1500 kg, 5 km/h

$$\lambda_{\text{слон}} = 8,8 \cdot 10^{-42} [\text{m}]$$

Не съществуват кристали с такива размери, може би затова слонът не проявява в ежедневието вълновата си природа.