



# CHƯƠNG 7

# QUANG HỌC LƯỢNG TỬ

# 1. BỨC XẠ NHIỆT

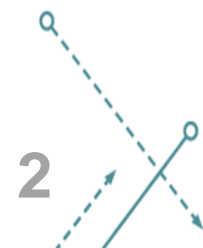
## 1.1 Bức xạ nhiệt cân bằng

Bức xạ là hiện tượng các vật bị kích thích phát ra sóng điện từ.

**Định nghĩa:** *Bức xạ nhiệt là hiện tượng sóng điện từ phát ra từ những vật bị kích thích bởi tác dụng nhiệt.*

Trong trường hợp nếu phần năng lượng của vật bị mất đi do phát xạ bằng phần năng lượng vật thu được do hấp thụ, thì nhiệt độ của vật sẽ không đổi theo thời gian và bức xạ nhiệt của vật cũng không đổi.

Bức xạ nhiệt trong trường hợp này được gọi là **bức xạ nhiệt cân bằng** và trạng thái này được gọi là trạng thái cân bằng nhiệt động.



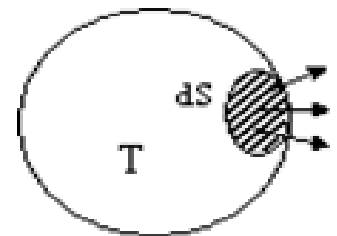
## 1. 2. Các đại lượng đặc trưng của bức xạ nhiệt cân bằng

### 1. Năng suất phát xạ toàn phần

Xét một vật đốt nóng được giữ ở nhiệt độ  $T$  không đổi (hình). Diện tích  $dS$  của vật phát xạ trong một đơn vị thời gian một năng lượng toàn phần  $d\phi_T$

Khi đó năng suất phát xạ toàn phần của vật ở nhiệt độ  $T$  là:

$$R_T = \frac{d\phi_T}{dS}$$



**Định nghĩa:** Năng suất phát xạ toàn phần của vật ở nhiệt độ  $T$  là một đại lượng có giá trị bằng năng lượng bức xạ toàn phần do một đơn vị diện tích của vật đó phát ra trong một đơn vị thời gian ở nhiệt độ  $T$ .

Đơn vị trong hệ SI  $[W/m^2]$

## 2. Hệ số phát xạ đơn sắc

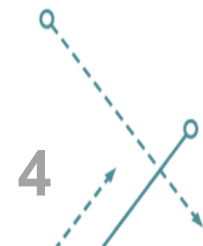
Năng lượng bức xạ phân bố không đồng đều cho tất cả mọi bức xạ có bước sóng khác nhau. Vì thế năng lượng phát xạ ứng với bước sóng thay đổi trong khoảng  $\lambda$  đến  $\lambda+d\lambda$  chỉ là một vi phân của năng suất phát xạ toàn phần.

**Hệ số phát xạ đơn sắc** của vật ở nhiệt độ  $T$  ứng với bước sóng  $\lambda$  là đại lượng:  $[W/m^3]$

$$r_{\lambda, T} = \frac{dR_T}{d\lambda}$$

Bằng thực nghiệm ta có thể xác định được  $r_{\lambda, T}$  ứng với bức xạ đơn sắc bước sóng  $\lambda$  của vật phát ra ở nhiệt độ  $T$  từ đó ta sẽ xác định được năng suất phát xạ toàn phần:

$$R_T = \int dR_T = \int_0^{\infty} r_{\lambda, T} d\lambda$$



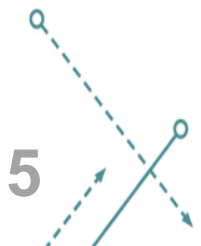
### 3. Hệ số hấp thụ đơn sắc

Giả sử trong một đơn vị thời gian, chùm bức xạ đơn sắc có bước sóng nằm trong khoảng từ  $\lambda$  đến  $\lambda + d\lambda$  gửi tới một đơn vị diện tích của vật một năng lượng  $d\phi_{\lambda, T}$  nhưng vật đó chỉ hấp thụ một phần năng lượng  $d\phi'_{\lambda, T}$  khi đó:

$$a_{\lambda, T} = \frac{d\phi'_{\lambda, T}}{d\phi_{\lambda, T}}$$

Gọi là hệ số hấp thụ đơn sắc của vật ở nhiệt độ  $T$  ứng với bước sóng  $\lambda$ .

Nó phụ thuộc vào bản chất và nhiệt độ của vật, phụ thuộc vào bước sóng  $\lambda$  của chùm bức xạ đơn sắc gửi tới.



- Thông thường vật không hấp thụ hoàn toàn năng lượng của chùm bức xạ gửi tới, do đó  $a_{\lambda,T} < 1$
- Những vật mà  $a_{\lambda,T} = 1$  với mọi nhiệt độ  $T$  và mọi bước sóng  $\lambda$  được gọi là ***vật đen tuyệt đối***.

## 1. 3. Định luật Kirchhoff

- “Tỉ số giữa hệ số phát xạ đơn sắc  $r_{\lambda,T}$  và hệ số hấp thụ đơn sắc  $a_{\lambda,T}$  của một vật bất kì ở trạng thái bức xạ nhiệt cân bằng không phụ thuộc vào bản chất của vật đó, mà chỉ phụ thuộc vào nhiệt độ  $T$  của nó và bước sóng  $\lambda$  của chùm bức xạ đơn sắc”.

$$\frac{r_{\lambda,T}}{a_{\lambda,T}} = f_{\lambda,T}$$

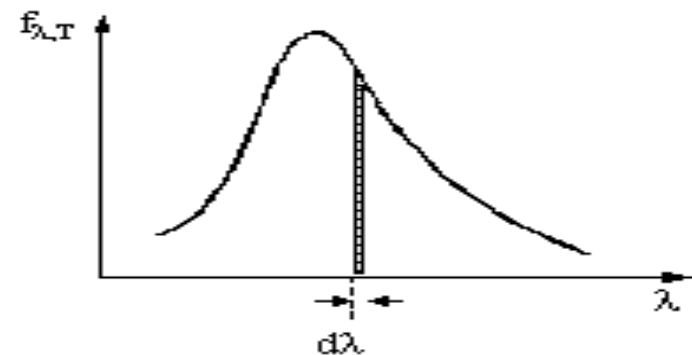
$f_{\lambda,T}$  là hàm số chung cho mọi vật nên được gọi là ***hàm phổ biến***



- Vì vật đen tuyệt đối có hệ số hấp thụ đơn sắc  $a$  bằng 1 nên hàm phổ biến chính là hệ số phát xạ đơn sắc  $r$  của vật đen tuyệt đối. Làm thí nghiệm với mô hình của vật đen tuyệt đối người ta xác định được  $f_{\lambda,T}$  bằng thực nghiệm:

Hình vẽ là đồ thị của hàm phổ biến  $f_{\lambda,T}$  theo bước sóng  $\lambda$  ở nhiệt độ  $T$ .

Đường cong này được gọi là đường đặc trưng phổ phát xạ của vật đen tuyệt đối. Năng suất phát xạ toàn phần của vật đen tuyệt đối được sẽ có trị số bằng toàn bộ diện tích giới hạn bởi đường đặc trưng phổ phát xạ và trục hoành  $\lambda$ .



Đường đặc trưng phổ phát xạ của vật đen tuyệt đối

$$R_T = \int dR_T = \int_0^{\infty} r_{\lambda,T} d\lambda$$



## 2. CÁC ĐỊNH LUẬT PHÁT XẠ CỦA VẬT ĐEN TUYỆT ĐỐI

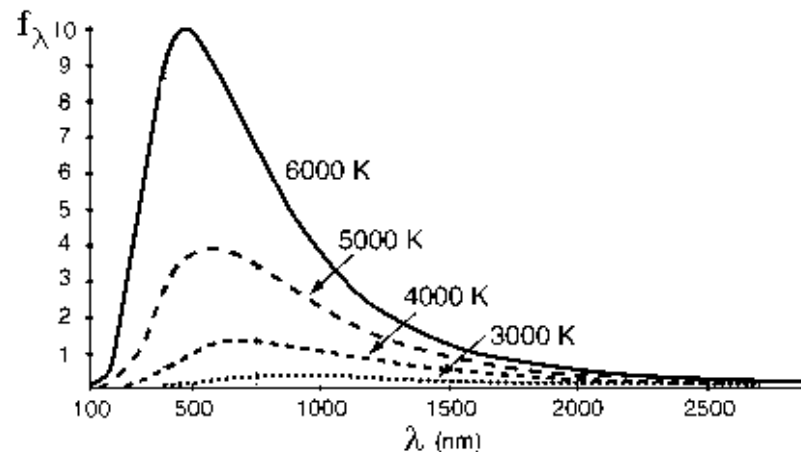
### 2. 1. Định luật Stefan-Boltzmann

**Định luật Stefan-Boltzmann:** *Năng suất phát xạ toàn phần của vật đen tuyệt đối tỉ lệ thuận với lũy thừa bậc bốn của nhiệt độ tuyệt đối của vật đó:*

$$R_T = \sigma T^4$$

Với hằng số Stefan-Boltzmann

$$\sigma = 5,6703 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$$



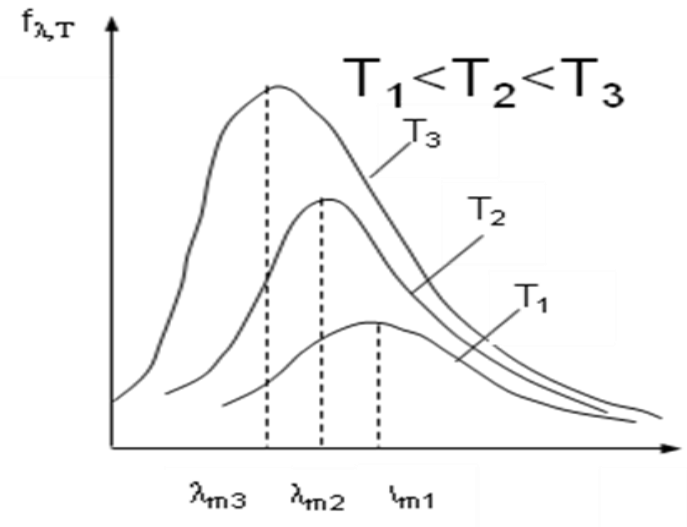
Phổ phát xạ của vật đen tuyệt đối ở các nhiệt độ khác nhau

## 2. 2. Định luật Wien

**Định luật Wien:** Đối với vật đen tuyệt đối, bước sóng  $\lambda_{max}$  của chùm bức xạ đơn sắc mang nhiều năng lượng nhất tỷ lệ nghịch với nhiệt độ tuyệt đối của vật đó.

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

$b = 2,898.10^{-3} \text{ m.K}$  và được gọi là hằng số Wien.



Phổ phát xạ của vật đen tuyệt đối ở các nhiệt độ  $T_1 < T_2 < T_3$

## 2. 3. Sự khủng hoảng ở vùng tử ngoại

Xuất phát từ quan niệm của vật lí cổ điển coi các nguyên tử và phân tử phát xạ hoặc hấp thụ năng lượng một cách liên tục, Rayleigh-Jeans đã tìm được một công thức xác định hệ số phát xạ đơn sắc của vật đen tuyệt đối như sau:

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

Từ đó ta tính được năng suất phát xạ toàn phần của một vật đen tuyệt đối ở nhiệt độ T:

$$R_T = \int_0^{\infty} f_{\nu, T} d\nu = \frac{2\pi kT}{c^2} \int_0^{\infty} \nu^2 d\nu = \infty$$

Điều này là sai. Do đó, Planck đã phủ định lí thuyết cổ điển về bức xạ và đề ra một lí thuyết mới gọi là thuyết lượng tử năng lượng.

## 3. THUYẾT LƯỢNG TỬ PLANCK VÀ THUYẾT PHÔTÔN EINSTEIN

### 3. 1. Thuyết lượng tử năng lượng của Planck

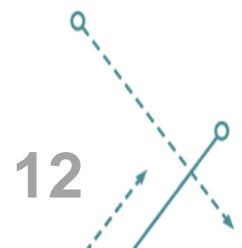
**Phát biểu:** Các nguyên tử và phân tử phát xạ hay hấp thụ năng lượng của bức xạ điện từ một cách gián đoạn.

nghĩa là phần năng lượng phát xạ hay hấp thụ luôn là bội số nguyên của một lượng năng lượng nhỏ xác định gọi là lượng tử năng lượng hay quantum năng lượng. Một lượng tử năng lượng của bức xạ điện từ đơn sắc tần số  $\nu$ , bước sóng  $\lambda$  là:

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

$h$  là hằng số Planck,  $h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{Js}$ ,

$c$  là vận tốc ánh sáng trong chân không.



- Xuất phát từ thuyết lượng tử, Planck đã tìm ra công thức của hàm phổ biến, tức là hệ số phát xạ đơn sắc của vật đen tuyệt đối như sau:

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

trong đó  $k$  là hằng số Boltzmann,  $T$  là nhiệt độ tuyệt đối. Công thức này được gọi là **công thức Planck**.

## 3. 2. Thành công của thuyết lượng tử năng lượng

1. Công thức Planck cho phép ta vẽ được đường đặc trưng phổ phát xạ của vật đen tuyệt đối phù hợp với kết quả thực nghiệm ở mọi vùng nhiệt độ và mọi vùng tần số khác nhau.
2. Từ công thức Planck ta có thể suy được công thức của Rayleigh và Jeans và các công thức thể hiện các định luật của vật đen tuyệt đối.

$$h\nu \ll kT \quad e^{h\nu/kT} - 1 \approx \frac{h\nu}{kT}$$

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

### 3. Từ công thức Planck ta tìm được định luật Stephan-Boltzmann

$$R_T = \sigma T^4$$

Năng suất phát xạ toàn phần của vật đen tuyệt đối tại một nhiệt độ  $T$  nào đó bằng:

$$R_T = \int_0^{\infty} f_{\nu, T} d\nu = \int_0^{\infty} \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1} d\nu$$

Đặt  $x = h\nu/kT$  ta được

$$R_T = \frac{2\pi k^4 T^4}{c^2 h^3} \int_0^{\infty} \frac{x^3 dx}{e^x - 1} = \frac{2\pi k^4 T^4}{c^2 h^3} \frac{\pi^4}{15}$$

### 4. Từ công thức Planck ta tìm được định luật Wien

Nếu ta lấy đạo hàm của  $f_{\nu, T}$  theo  $\nu$  và cho nó triệt tiêu rồi tìm  $\nu_{\min}$  (hay  $\lambda_{\max}$ ) tại các nhiệt độ khác nhau

### 3. 3. Thuyết phôtôn của Einstein

- a. Bức xạ điện từ gồm vô số những hạt rất nhỏ gọi là lượng tử ánh sáng hay phôtôn.
- b. Với mỗi bức xạ điện từ đơn sắc nhất định, các phôtôn đều giống nhau và mang một năng lượng xác định bằng  $\epsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$
- c. Trong mọi môi trường (và cả trong chân không) các phôtôn được truyền đi với cùng vận tốc  $c = 3.10^8 \text{ m/s}$ .
- d. Khi một vật phát xạ hay hấp thụ bức xạ điện từ có nghĩa là vật đó phát xạ hay hấp thụ các phôtôn.
- e. Cường độ của chùm bức xạ tỉ lệ với số phôtôn phát ra từ nguồn trong một đơn vị thời gian.





### 3. 4. Động lực học photon

- Năng lượng và khối lượng của photon ứng với một bức xạ điện từ đơn sắc tần số  $\nu$  là:  $\varepsilon = h\nu$

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

- Theo thuyết tương đối:

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

Vận tốc của photon bằng  $c$ , do đó photon có khối lượng nghỉ bằng 0

- Động lượng của photon:  $p = mc = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$



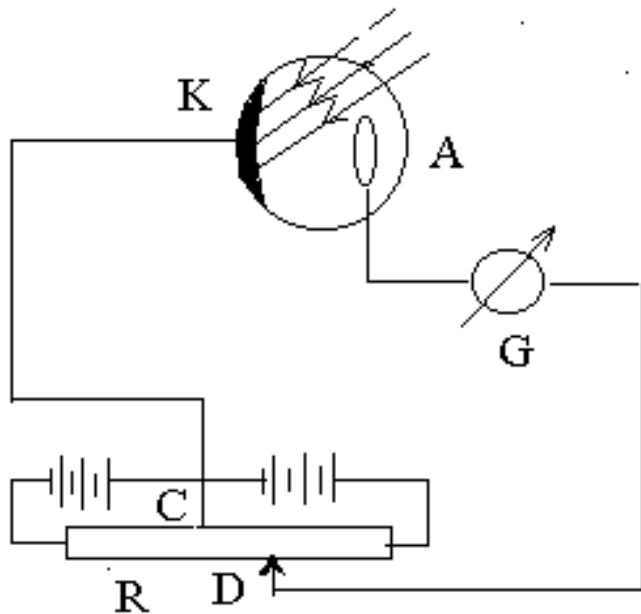
## 4. HIỆN TƯỢNG QUANG ĐIỆN

### 4. 1. Định nghĩa:

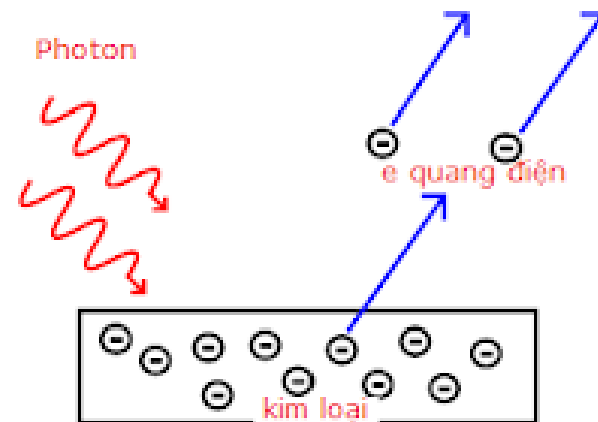
*Hiệu ứng bắn ra các electron từ một tấm kim loại khi rọi vào tấm kim loại đó một bức xạ điện từ thích hợp được gọi là hiện tượng quang điện. Các electron bắn ra được gọi là các quang electron.*

Để nghiên cứu hiện tượng quang điện người ta đã làm thí nghiệm với tế bào quang điện như sau:

## Hiện tượng quang điện

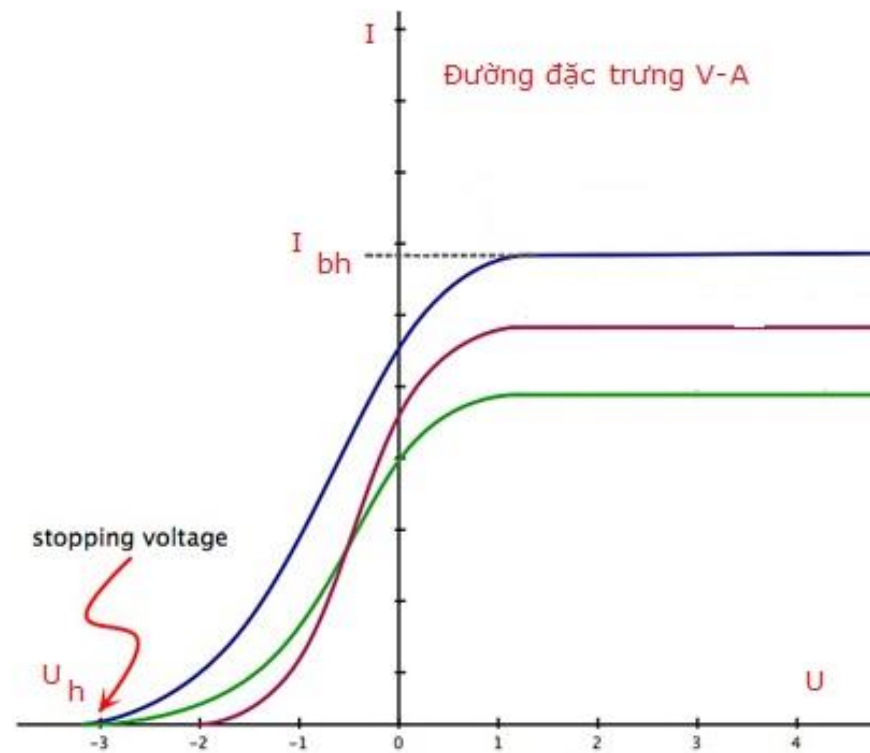
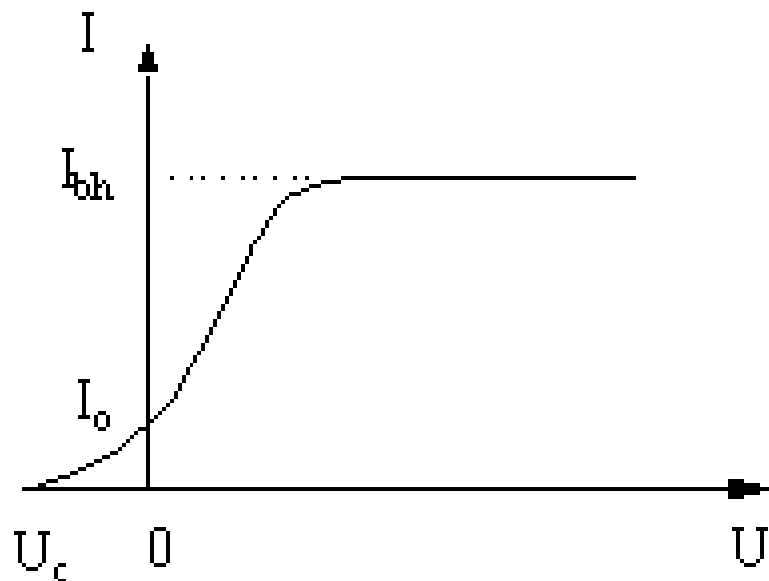


Thí nghiệm quang điện



Các electron bị bật ra khỏi bề mặt kim loại gọi là **electron quang điện**

$$eU_c = \frac{1}{2}mv_{0\max}^2$$



Đặc trưng vôn-ampe của tế bào quang điện

## 4. 2. Các định luật quang điện và giải thích

### 1. Phương trình Einstein.

Chiếu chùm ánh sáng thích hợp tới catốt – mỗi e tự do hấp thụ một photon và nhận một năng lượng  $h\nu$  - nó chuyển hóa thành công thoát e ra khỏi kim loại và động năng ban đầu của quang electron. Động năng ban đầu sẽ cực đại đối với các electron ở sát mặt ngoài kim loại.

$$h\nu = A_{th} + \frac{mv_{0\max}^2}{2}$$

## 2. Định luật về giới hạn quang điện

(định luật thứ nhất của hiện tượng quang điện)

- Phát biểu: Đối với mỗi kim loại xác định, hiện tượng quang điện chỉ xảy ra khi bước sóng  $\lambda$  (hay tần số  $\nu$ ) của chùm bức xạ điện từ rơi tới nhỏ hơn (lớn hơn) một giá trị xác định  $\lambda_0$  ( $\nu_0$ ),  $\lambda_0$  gọi là giới hạn quang điện của kim loại đó.

- Giải thích:

Trong phương trình Einstein vì  $\frac{mv_{o\max}^2}{2} > 0$  và đặt  $A_{th} = h\nu_0$

$$h\nu > h\nu_0 \Rightarrow \nu > \nu_0$$

$$\lambda_0 = hc / A_{th}$$

$$\frac{hc}{\lambda} > \frac{hc}{\lambda_0} \Rightarrow \lambda < \lambda_0$$



### 3. Định luật về dòng quang điện bão hoà (Định luật 2)

- Phát biểu: Cường độ dòng quang điện bão hoà tỉ lệ với cường độ của chùm bức xạ tới.

- Giải thích:

$$\begin{aligned} N_e \sim N_{ph}, N_{ph} \sim I_{ph} &\Rightarrow N_e \sim I_{ph} \\ I_{bh} \sim N_e &\Rightarrow I_{bh} \sim I_{ph} \end{aligned}$$

## 4. Định luật về động năng ban đầu cực đại của quang electron

Phát biểu: Động năng ban đầu cực đại của quang electron không phụ thuộc vào cường độ chùm bức xạ tới mà chỉ phụ thuộc vào tần số của chùm bức xạ đó.

Giải thích:

$$h\nu = A_{th} + \frac{1}{2}mv_{o\max}^2 = h\nu_o + \frac{1}{2}mv_{o\max}^2$$

$$\frac{1}{2}mv_{o\max}^2 = h(\nu - \nu_o)$$

$$eU_c = h(\nu - \nu_o)$$



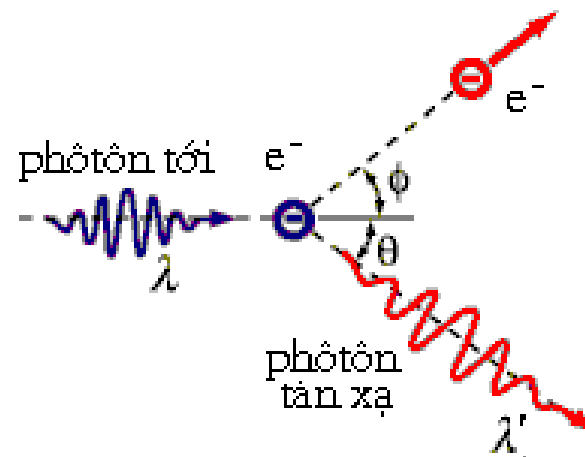


## 5. HIỆU ỨNG COMPTON

### 5.1. Hiệu ứng Compton

**Thí nghiệm Compton:** Cho một chùm tia X bước sóng  $\lambda$  chiếu vào graphit hay paraffin... Khi đi qua các chất này tia X bị tán xạ theo nhiều phương. Trong phổ tán xạ, ngoài vạch có bước sóng bằng bước sóng  $\lambda$  của chùm tia X chiếu tới còn có những vạch ứng với bước sóng

$$\lambda' > \lambda$$



- Thực nghiệm chứng tỏ rằng bước sóng  $\lambda'$  không phụ thuộc cấu tạo của các chất được tia X rọi đến mà chỉ phụ thuộc vào góc tán xạ  $\theta$ . Độ tăng của bước sóng được xác định bởi :

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

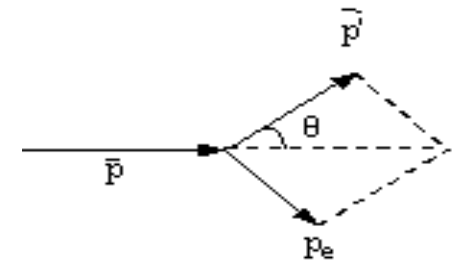
trong đó  $\lambda_c = 2,426.10^{-12}$  m là một hằng số chung cho mọi chất, được gọi là bước sóng Compton.

## 5. 2. Giải thích hiệu ứng Compton

Coi hiện tượng tán xạ tia X như một va chạm hoàn toàn đàn hồi giữa một photon và một electron trong chất mà tia X chiếu tới.

### ***Trong phổ tán xạ:***

- Vạch có bước sóng bằng bước sóng tia tới X là sự tán xạ của tia X lên các e ở sâu trong nguyên tử có liên kết mạnh với hạt nhân
- Vạch có bước sóng lớn hơn bước sóng tia X là sự tán xạ tia X lên các electron liên kết yếu với hạt nhân. Năng lượng liên kết của các e này rất nhỏ so với năng lượng của chùm tia X chiếu tới, do đó các e đó có thể coi như tự do.



Bảo toàn động lượng

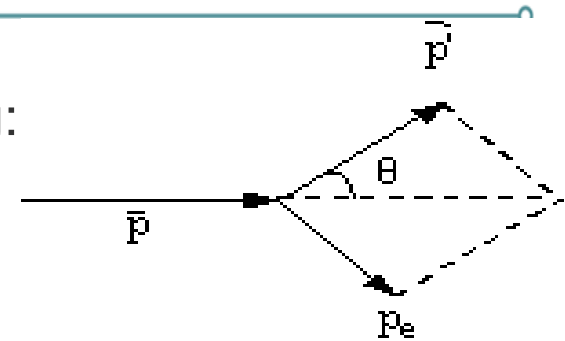
## Giải thích hiệu ứng Compton

Hạt	Năng lượng		Động lượng	
	Trước va chạm	Sau va chạm	Trước va chạm	Sau va chạm
Photon	$E = h\nu$	$E' = h\nu'$	$p = mc = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$	$p' = \frac{h\nu'}{c} = \frac{h}{\lambda'}$
Electron	$m_0 c^2$	$\frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} c^2 = mc^2$	0	$p_e = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} v = mv$

Theo định luật bảo toàn năng lượng và động lượng:

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

$$\vec{p} = \vec{p}' + \vec{p}_e$$



Bình phương 2 vế của các phương trình rồi lấy phương trình thứ 1 trừ đi phương trình thứ 2 ta được:

$$m_0c^2(\nu - \nu') = h\nu\nu'(1 - \cos\theta) = 2h\nu\nu' \sin^2 \frac{\theta}{2}$$

$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

$$\Rightarrow \lambda' - \lambda = 2 \frac{h}{m_0c} \sin^2 \frac{\theta}{2} = 2\lambda_c \sin^2 \frac{\theta}{2}$$

$$\lambda_c = \frac{h}{m_0c} = 2,426 \cdot 10^{-12} \text{ (m)}$$

Đại lượng  $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$  là độ biến thiên của bước sóng trong tán xạ, nó chỉ phụ thuộc vào góc tán xạ mà không phụ thuộc vào vật liệu làm bia.



# Bài tập ví dụ

## Ví dụ 1/

Công thoát của kim loại dùng làm catốt của tế bào quang điện  $A = 5\text{eV}$ .  
Tìm:

1. Giới hạn quang điện của tấm kim loại đó.
2. Vận tốc ban đầu cực đại của các quang electron khi catốt được chiếu bằng ánh sáng đơn sắc bước sóng  $\lambda = 0,2\mu\text{m}$ .
3. Hiệu điện thế hãm để không có một electron nào đến được anốt.

1. Giới hạn quang điện của catốt:

$$\lambda_0 = \frac{hc}{A} = \frac{6,625 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{5,1,6 \cdot 10^{-19}} = 2,48 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

2. Vận tốc ban đầu cực đại của các electron:

$$\frac{hc}{\lambda} = A + \frac{1}{2} m_e v_{0 \max}^2 \rightarrow v_{0 \max} = \sqrt{\frac{2}{m_e} \left( \frac{hc}{\lambda} - A \right)}$$

$$v_{0 \max} = \sqrt{\frac{2}{9,1 \cdot 10^{-31}} \left( \frac{6,625 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{0,2 \cdot 10^{-6}} - 5,1,6 \cdot 10^{-19} \right)} = 0,65 \cdot 10^6 \text{ m/s}$$

3. Hiệu điện thế hãm:

$$\frac{hc}{\lambda} = A + eU_h \rightarrow U_h = \left( \frac{hc}{\lambda} - A \right) \frac{1}{e} = \left( \frac{6,625 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{0,2 \cdot 10^{-6}} - 5,1,6 \cdot 10^{-19} \right) \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 1,2 \text{ V}$$



## Ví dụ 2

Photon mang năng lượng  $0,15\text{MeV}$  đến tán xạ trên electron tự do. Sau khi tán xạ bước sóng của chùm photon tán xạ tăng thêm  $\Delta\lambda = 0,015\text{\AA}$ . Xác định bước sóng của photon và góc tán xạ của photon.





$$\varepsilon = \frac{hc}{\lambda} \rightarrow \lambda = \frac{hc}{\varepsilon} = \frac{6,625 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{0,15 \cdot 1,6 \cdot 10^{-13}} = 8,28 \cdot 10^{-12} \text{ m}$$

$$\Delta\lambda = 2\lambda_c \sin^2 \frac{\theta}{2} \rightarrow \sin^2 \frac{\theta}{2} = \frac{\Delta\lambda}{2\lambda_c} = 0,31 \rightarrow \sin \frac{\theta}{2} = 0,556 \rightarrow \theta = 67^{\circ}33'$$

### Ví dụ 3

Một lò luyện kim có cửa sổ quan sát rộng  $8\text{cm} \times 15\text{cm}$  phát xạ với công suất  $10887\text{W}$ . Coi bức xạ được phát ra từ một vật đen tuyệt đối. Tìm nhiệt độ của lò và bước sóng ứng với năng suất phát xạ cực đại của lò.



- Năng suất phát xạ toàn phần của vật đen tuyệt đối:  $R = \sigma T^4$
- R là năng suất do một đơn vị diện tích phát ra trong một đơn vị thời gian, nên R liên hệ với công suất phát xạ là:  $P = R.S$

$$\rightarrow T = \sqrt[4]{\frac{P}{\sigma.S}} = \sqrt[4]{\frac{10887}{5,67.10^{-8} . 8.15.10^{-4}}} = 2000 (K)$$

Bước sóng ứng với năng suất phát xạ cực đại của lò được xác định theo định luật Wien

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T} = \frac{2,896.10^{-3}}{2000} = 1,448 \mu m$$