

Chương 7

QUANG HỌC LƯỢNG TỬ

§ 1. BỨC XẠ NHIỆT

I. Bức xạ nhiệt cân bằng

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

Nếu năng lượng bị mất đi do phát xạ bằng năng lượng thu được do hấp thụ thì nhiệt độ của vật không đổi, gọi là bức xạ nhiệt cân bằng.



Hiệu ứng nhà kính xuất phát từ việc bức xạ Mặt Trời xuyên qua tầng khí quyển chiếu xuống mặt đất. Sau khi hấp thụ bức xạ, mặt đất nóng lên và bức xạ sóng dài vào khí quyển để CO₂ hấp thụ khiến nhiệt độ không khí tăng

Hiện nay bức xạ nhiệt đang đạt đến nhiều ứng dụng mang tính hiệu quả trong phát triển kinh tế xã hội, đặc biệt là ứng dụng công nghệ bức xạ trong lĩnh vực chiếu xạ hay soi chiếu an ninh hải quan đồng thời những ứng dụng công nghệ bức xạ hạt nhân mang lại những hiệu quả cao hỗ trợ điều trị bệnh trong lĩnh vực y tế.

§ 1. BỨC XẠ NHIỆT

II. Các đại lượng đặc trưng của bức xạ nhiệt cân bằng

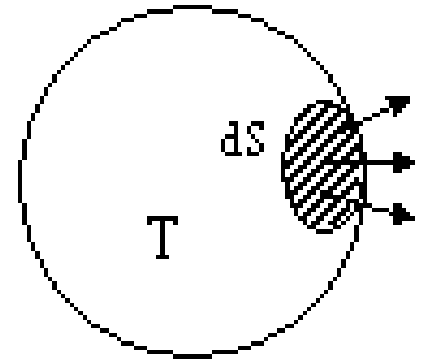
1. Năng suất phát xạ toàn phần

Năng suất phát xạ toàn phần của vật ở nhiệt độ T đo bằng năng lượng bức xạ do một đơn vị diện tích của vật phát ra trong một đơn vị thời gian.

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

$d\Phi_T$ là năng lượng do diện tích dS của vật phát ra trong một đơn vị thời gian

Đơn vị: W/m^2



§ 1. BỨC XẠ NHIỆT

2. Hệ số phát xạ đơn sắc

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

Năng suất phát xạ toàn phần:

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

§ 1. BỨC XẠ NHIỆT

3. Hệ số hấp thụ đơn sắc

Trong một đơn vị thời gian, chùm bức xạ đơn sắc gửi tới 1 đơn vị diện tích của vật năng lượng $d\phi_{\lambda,T}$ nhưng vật hấp thụ năng lượng $d\phi'_{\lambda,T}$

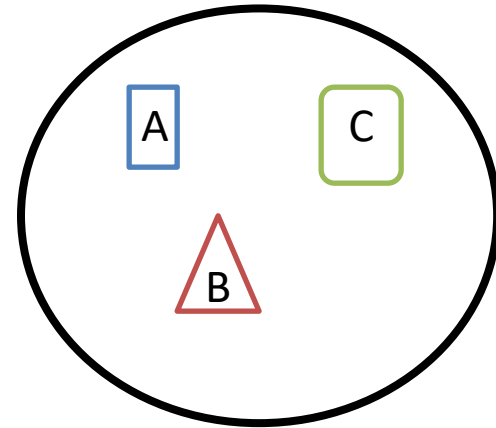
Hệ số hấp thụ đơn sắc:

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

Thông thường $a_{\lambda,T} < 1$, nếu $a_{\lambda,T} = 1$ với mọi nhiệt độ và mọi bước sóng thì vật đó gọi là vật đen tuyệt đối

§ 1. BỨC XẠ NHIỆT

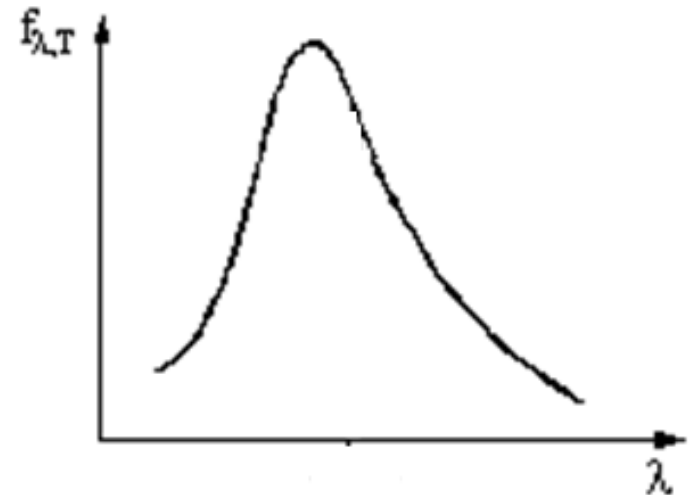
4. Định luật Kirchhoff



Tỉ số giữa hệ số phát xạ đơn sắc và hệ số hấp thụ đơn sắc của một vật ở trạng thái cân bằng nhiệt không phụ thuộc vào bản chất của vật mà chỉ phụ thuộc vào nhiệt độ T của vật và bước sóng của chùm bức xạ đơn sắc

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

$f_{\lambda,T}$ là hàm phổ biến chung cho mọi vật



§ 1. BỨC XẠ NHIỆT

III. Các định luật phát xạ của vật đen tuyệt đối

1. 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.

$$R_T = \sigma T^4$$

$$\sigma = 5,67.10^{-8} \text{W/m}^2\text{K}^4$$



Josef Stefan
1835 – 1893 (Áo)



Ludwig Eduard Boltzmann
1844 – 1906 (Áo)

Định luật được nhà vật lý Stefan đề cập đến lần đầu tiên vào năm 1879 dựa trên các đo đạc thực nghiệm và được Boltzmann suy luận ra bằng các tính toán lý thuyết vào năm 1884 sử dụng nhiệt động lực học.

§ 1. BỨC XẠ NHIỆT

2. Định luật Wien

Đối với vật đen tuyệt đối bước sóng của chùm bức xạ đơn sắc mang nhiều năng lượng nhất tỉ lệ nghịch với nhiệt độ tuyệt đối của vật đó.

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

$$b = 2,898.10^{-3}\text{mK}$$



Wilhelm Carl Werner Otto Fritz Franz Wien
1864 – 1928 (Đức)

§ 1. BỨC XẠ NHIỆT

3. Sự khủng hoảng ở vùng tử ngoại

Theo quan điểm cổ điển nếu coi ánh sáng là sóng thì Rayleigh – Jeans tìm được:

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

Công thức này chỉ đúng với thực nghiệm ở vùng tần số nhỏ còn vùng tần số lớn hoàn toàn không đúng.

Từ đó tính được năng suất phát xạ toàn phần của vật đen tuyệt đối:

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

§ 1. BỨC XẠ NHIỆT

IV. Thuyết lượng tử Planck

- Bức xạ điện từ gồm vô số hạt nhỏ gọi là lượng tử ánh sáng hay photon
- Năng lượng của một lượng tử:

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

Hàm phổ biến:

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

- Vẽ được đường đặc trưng phổ phát xạ của VĐTĐ phù hợp với thực nghiệm.
- Có thể suy ra được công thức Rayleigh – Jeans
- Giải thích được định luật Stephan - Boltzmann

§ 1. BỨC XẠ NHIỆT

V. Thuyết photon của Einstein

1. Nội dung

- Bức xạ điện từ gồm vô số hạt nhỏ gọi là lượng tử ánh sáng hay photon
- Mỗi photon mang năng lượng:

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

- Trong mọi môi trường các photon được truyền đi với cùng vận tốc
- Khi vật phát xạ hay hấp thụ bức xạ điện từ là phát xạ hay hấp thụ photon.
- Cường độ chùm bức xạ điện từ tỉ lệ với số photon phát ra từ nguồn trong một đơn vị thời gian

§ 1. BỨC XẠ NHIỆT

2. Động lực học photon

- Năng lượng của photon

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

- Khối lượng của photon

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

- Động lượng của photon

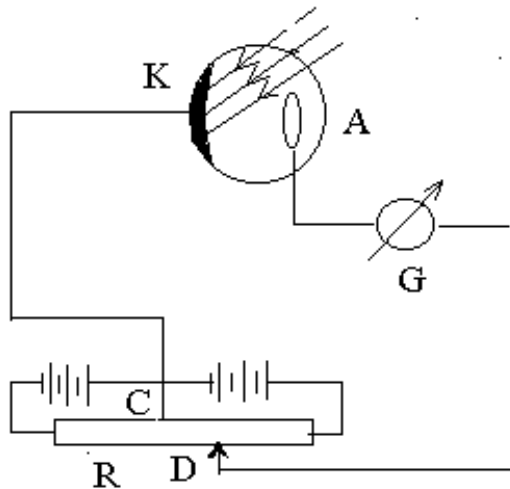
$$p = mc = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

§ 2. HIỆN TƯỢNG QUANG ĐIỆN VÀ HIỆU ỨNG COMPTON

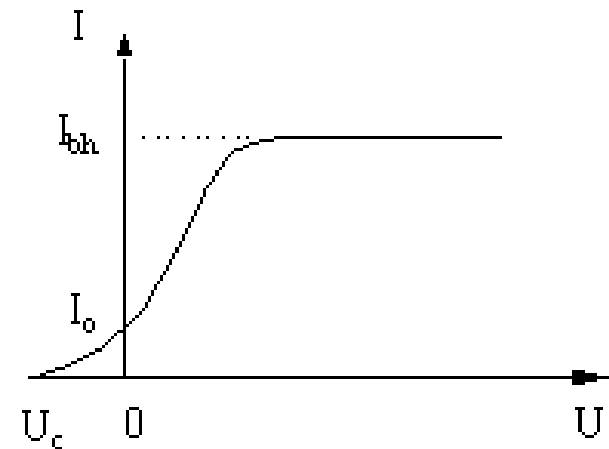
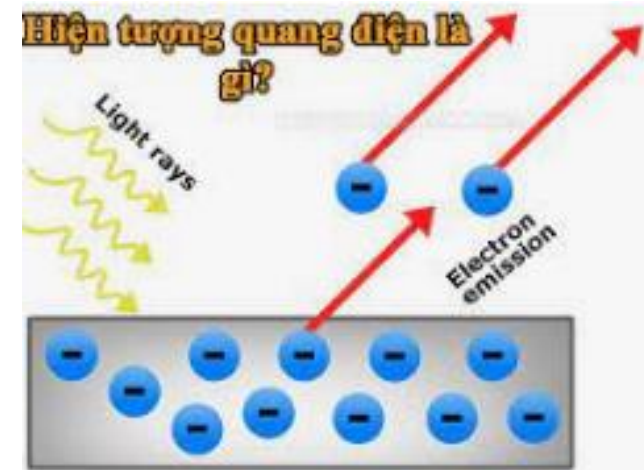
I. Hiện tượng quang điện

Là hiện tượng các electron từ tấm kim loại bắn ra khi rọi vào tấm kim loại một bức xạ điện từ có bước sóng thích hợp.

Thí nghiệm với tế bào quang điện



- Khi U_{AK} tăng thì I tăng
- $U_{AK} = 0$ thì $I \neq 0$
- Để $I = 0$ thì đặt một hiệu điện thế hãm



$$eU_h = E_{đ(\max)}$$

§ 2. HIỆN TƯỢNG QUANG ĐIỆN VÀ HIỆU ỨNG COMPTON

Ba định luật quang điện

a. Định luật 1: Đối với mỗi kim loại xác định, hiện tượng quang điện chỉ ra khi bước sóng ánh sáng chiếu tới nhỏ hơn một giá trị xác định.

b. Định luật 2: Cường độ dòng quang điện bão hòa tỉ lệ với cường độ của chùm bức xạ tới.

c. Định luật 3: Động năng ban đầu cực đại của các quang electron chỉ phụ thuộc vào tần số của chùm bức xạ đó.

§ 2. HIỆN TƯỢNG QUANG ĐIỆN VÀ HIỆU ỨNG COMPTON

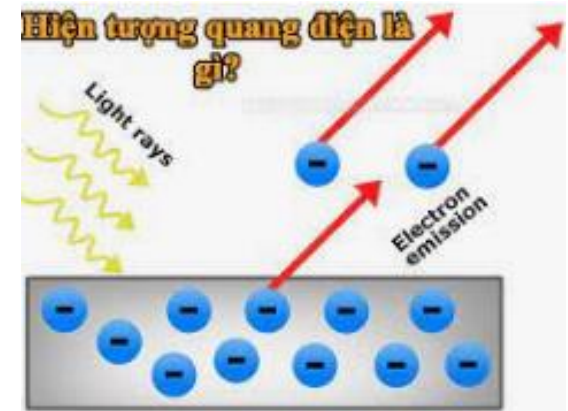
Giải thích ba định luật quang điện

Khi có một chùm ánh sáng thích hợp chiếu tới catôt, mỗi e hấp thụ 1 photon và năng lượng của photon chuyển thành công thoát A phần còn lại biến thành động năng ban đầu của e, đối với các e ở sát bề mặt kim loại thì động năng này là lớn nhất

$$h\nu = \frac{hc}{\lambda} = A + E_{đ(max)}$$

Giải thích định luật I:

$$E_{đ(max)} \geq 0 \text{ nên } \frac{hc}{\lambda} \geq A \rightarrow \lambda \leq \frac{hc}{A} = \lambda_0$$



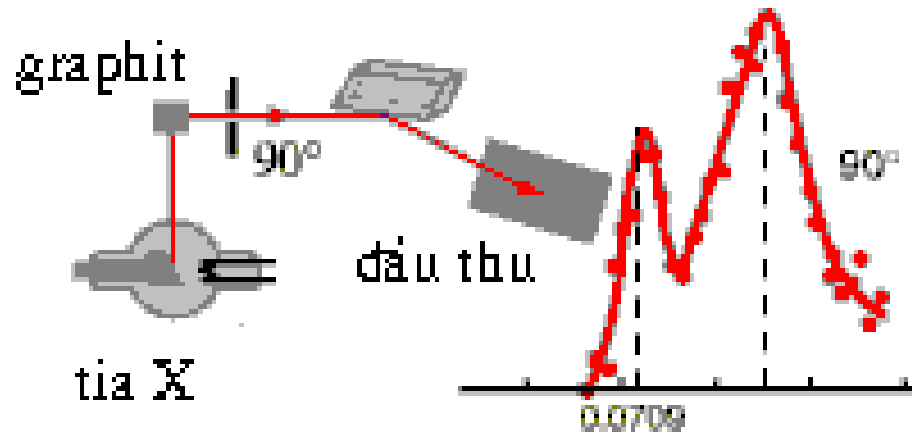
Giải thích định luật II: số quang e thoát ra khỏi katôt tỉ lệ với số photon bị hấp thụ; số photon này lại tỉ lệ với cường độ chùm bức xạ.

Giải thích định luật III:

$$E_{đ(max)} = \frac{hc}{\lambda} - A$$

§ 2. HIỆN TƯỢNG QUANG ĐIỆN VÀ HIỆU ỨNG COMPTON

II. Hiệu ứng Compton



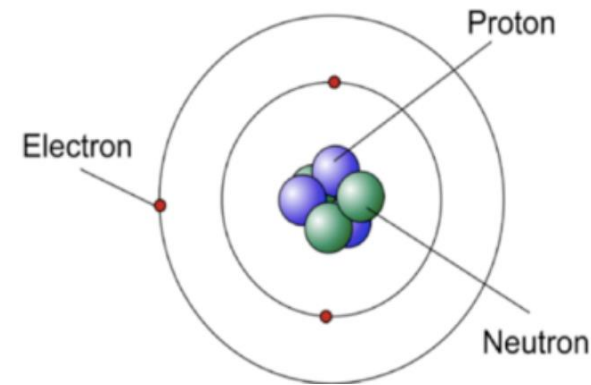
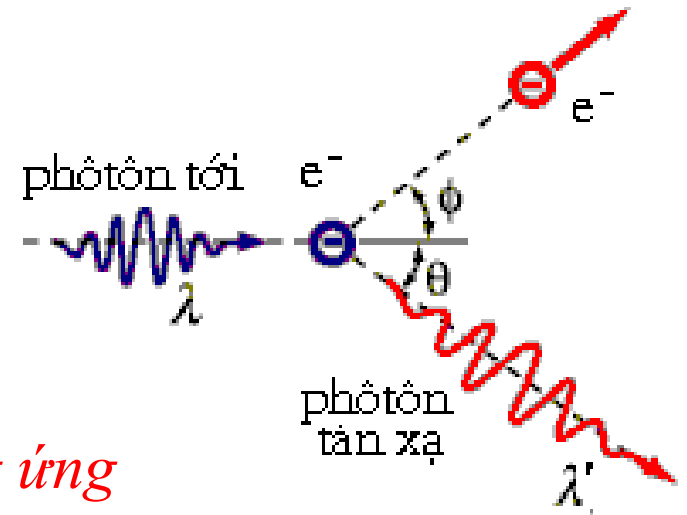
*Cho chùm tia X bước sóng λ tán xạ lên một số chất graphit, paraffin,..
. trong phổ tán xạ của tia X ngoài các vạch có bước sóng λ còn có
những vạch bước sóng $\lambda' > \lambda$.*

§ 2. HIỆN TƯỢNG QUANG ĐIỆN VÀ HIỆU ỨNG COMPTON

2. Giải thích

Coi hiện tượng tán xạ tia X như sự va chạm đàn hồi của photon lên e

- Đối với những vạch có bước sóng λ tương ứng với sự tán xạ của photon lên e nằm sâu trong nguyên tử.
- Đối với những vạch có bước sóng λ' tương ứng với sự tán xạ của photon lên e ở lớp ngoài cùng liên kết yếu với hạt nhân và coi gần đúng là e tự do



| Hạt | Năng lượng | | Động lượng | |
|----------|------------------------------------|--|-------------------------|--|
| | Trước | Sau | Trước | Sau |
| Pho ton | $\varepsilon = \frac{hc}{\lambda}$ | $\varepsilon' = \frac{hc}{\lambda'}$ | $p = \frac{h}{\lambda}$ | $p' = \frac{h}{\lambda'}$ |
| electron | $m_{0e}c^2$ | $\frac{m_{0e}c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ | 0 | $p_e = \frac{m_{0e}v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ |

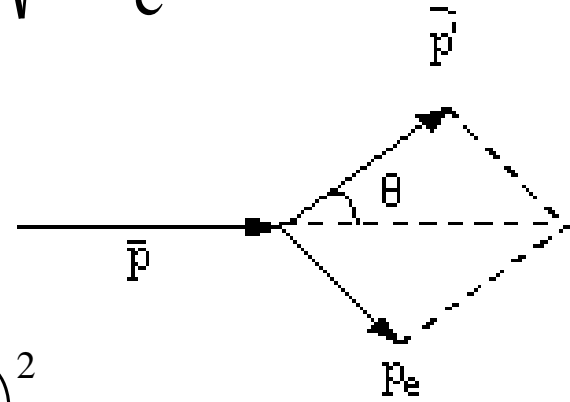
§ 2. HIỆN TƯỢNG QUANG ĐIỆN VÀ HIỆU ỨNG COMPTON

Định luật bảo toàn năng lượng

$$\frac{hc}{\lambda} + m_{0e}c^2 = \frac{hc}{\lambda'} + \frac{m_{0e}c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \rightarrow E_d = \frac{m_{0e}c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - m_{0e}c^2 = \frac{hc}{\lambda} - \frac{hc}{\lambda'}$$

Định luật bảo toàn động lượng

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



$$p_e^2 = p^2 + p'^2 - 2pp' \cos \theta \text{ hay } \left(\frac{m_{0e}v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right)^2 = \frac{h^2}{\lambda^2} + \frac{h^2}{\lambda'^2} - \frac{2h^2}{\lambda\lambda'} \cos \theta$$

$$\rightarrow \lambda' - \lambda = 2 \frac{h}{m_{0e}c} \sin^2 \frac{\theta}{2} = 2\lambda_c \sin^2 \frac{\theta}{2}$$

$$\text{trong đó } \lambda_c = \frac{h}{m_{0e}c} = 2,426 \cdot 10^{-12} \text{ m}$$



Arthur Compton

1892 – 1962 (Mỹ)

Arthur Compton là một nhà vật lý. Ông đoạt Giải Nobel Vật lý năm 1927 cùng với Charles Wilson cho khám phá của ông về hiệu ứng Compton

Ví dụ 1. Vật đen tuyệt đối có dạng một quả cầu đường kính $d = 10\text{cm}$ ở nhiệt độ T không đổi. Tìm nhiệt độ T , cho biết công suất bức xạ ở nhiệt độ đã cho bằng 12kcalo/phút .

$$\Phi = 12\text{kcalo/phút} = 12 \cdot 10^3 \cdot 4,18 / 60 \text{ (J/s)}$$

$$R_T = \frac{\Phi}{S} = \frac{\Phi}{\pi d^2} = \sigma T^4 \rightarrow T =$$

Ví dụ 2. Nhiệt độ của sợi dây tóc vonfram của bóng đèn điện luôn biến đổi vì được đốt nóng bằng dòng điện xoay chiều. Hiệu số giữa nhiệt độ cao nhất và thấp nhất bằng 80^0 , nhiệt độ trung bình bằng $2300K$. Hỏi công suất bức xạ biến đổi bao nhiêu lần, coi dây tóc bóng đèn là vật đen tuyệt đối.

$$T_{\max} - T_{\min} = 80$$

$$\frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} = 2300$$

$$\frac{R_{T(\max)}}{R_{T(\min)}} = \frac{T_{\max}^4}{T_{\min}^4} =$$

Ví dụ 3. Một thỏi thép đúc có nhiệt độ 727°C . Trong một giây, mỗi cm^2 của nó bức xạ một lượng năng lượng 4J . Xác định hệ số hấp thụ của thép ở nhiệt độ đó, nếu coi rằng hệ số hấp thụ là như nhau đối với mọi bước sóng.

Năng suất phát xạ toàn phần của vật:

$$R_T = \frac{4}{10^{-4}} = 4 \cdot 10^4 (\text{W} / \text{m}^2)$$

$$R_T = a\sigma T^4 \rightarrow a =$$

Ví dụ 4. Một ngôi nhà gạch trát vữa có diện tích mặt ngoài tổng cộng là 800 m^2 , nhiệt độ của mặt bức xạ là 27°C và hệ số hấp thụ khi đó bằng $0,8$. Tính:

- Năng lượng bức xạ trong một ngày đêm từ ngôi nhà đó.
- Bước sóng ứng với năng suất phát xạ cực đại của ngôi nhà nếu coi nó là vật đen tuyệt đối.

Năng suất phát xạ toàn phần của vật: $R_T = 0,8 \cdot \sigma T^4 =$

Công suất bức xạ của ngôi nhà đó:

$$\Phi = R_T S =$$

Năng lượng bức xạ trong một ngày đêm từ ngôi nhà đó.

$$W = \Phi \cdot 86400 =$$

Bước sóng ứng với năng suất phát xạ cực đại của ngôi nhà nếu coi nó là vật đen tuyệt đối

$$\lambda_m = \frac{b}{T} =$$

Ví dụ 5. Xác định vận tốc cực đại của các quang electron bị bứt khỏi mặt kim loại bạc khi chiếu tới mặt kim loại các tia gama có bước sóng $\lambda = 0,001 \text{ nm}$. Cho công thoát của bạc bằng $0,75 \cdot 10^{-18} \text{ J}$.

$$\frac{hc}{\lambda} = A + E_{\text{đ}(\text{max})}$$

$$\frac{hc}{\lambda} = A + E_{\text{đ}} = A + m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right) \rightarrow v =$$

Ví dụ 6. Trong thí nghiệm Compton, photon ban đầu có năng lượng 0,6MeV tán xạ trên một electron tự do và thành photon ứng với bức xạ có bước sóng bằng bước sóng Compton. Tính góc tán xạ và năng lượng của photon tán xạ.

$$\varepsilon = 0,6\text{MeV} = 0,6.10^6.1,6.10^{-19} \text{ J}$$

Bước sóng của photon chiếu tới:

$$\varepsilon = \frac{hc}{\lambda} \rightarrow \lambda =$$

Góc tán xạ

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

Năng lượng của photon tán xạ:

$$\varepsilon' = \frac{hc}{\lambda_c} =$$

Ví dụ 7. Trong hiện tượng tán xạ Compton, bức xạ Rơngen có bước sóng λ đến tán xạ trên electron tự do. Tìm bước sóng đó, cho biết động năng cực đại của electron bắn ra bằng 0,19MeV.

Động năng của e bắn ra:

$$E_{\text{đ}} = \frac{hc}{\lambda} - \frac{hc}{\lambda'} = \frac{hc}{\lambda} - \frac{hc}{\lambda + 2\lambda_c \sin^2 \frac{\theta}{2}}$$

Động năng của electron cực đại khi $\sin^2 \theta/2 = 1$

$$E_{\text{đ}(\text{max})} = \frac{hc}{\lambda} - \frac{hc}{\lambda + 2\lambda_c} \rightarrow \lambda =$$

Ví dụ 8. Trong hiện tượng Compton, bước sóng của chùm photon bay tới là $0,03\text{\AA}$. Tính phần năng lượng truyền cho electron đối với photon tán xạ dưới những góc 60° , 90° , 180° .

Bước sóng của photon tán xạ:

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

Năng lượng truyền cho electron

$$E = \frac{hc}{\lambda} - \frac{hc}{\lambda'} =$$