

Quang lượng tử

Lê Quang Nguyên
www4.hcmut.edu.vn/~leqnguyen
nguyenquangle59@yahoo.com

Nội dung

1. Mở đầu
2. Bức xạ nhiệt
3. Hiện tượng quang điện
4. Tán xạ Compton



Max Planck
(1858-1947)



Albert Einstein
(1879-1955)



Arthur Compton
(1892-1962)

1. Mở đầu

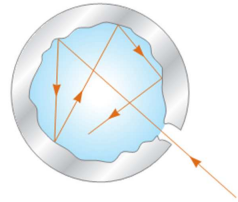
- Các nhà thiên văn đo nhiệt độ của các vì sao như thế nào?
- Ngôi sao màu xanh và ngôi sao màu đỏ, sao nào nóng hơn?
- Nhiệt kế cảm ứng (đo nhiệt độ cơ thể qua lỗ tai) hoạt động ra sao?
- Tại sao lớp ozone bao quanh trái đất chống được các tia cực tím?

2. Bức xạ nhiệt

- a. Một số định nghĩa
- b. Các định luật bức xạ nhiệt
- c. Thuyết lượng tử về bức xạ nhiệt
- d. Màu sắc và nhiệt độ các vì sao

2a. Một số định nghĩa – 1

- **Bức xạ nhiệt** là các bức xạ điện từ phát ra từ một vật được nung nóng.
- Ví dụ: bức xạ từ mặt trời, hơi ấm từ ngọn lửa ...
- **Vật đen tuyệt đối** là vật hấp thụ hết các bức xạ đi đến nó.
- Ví dụ: vật sơn đen, hốc sâu có miệng nhỏ ...



2a. Một số định nghĩa – 2

- **Năng suất bức xạ toàn phần R** là năng lượng bức xạ từ một đơn vị diện tích của vật, trong một đơn vị thời gian.
- R có đơn vị $J/(m^2.s)$ hay W/m^2 .

2a. Một số định nghĩa – 3

- Gọi dU là năng lượng bức xạ từ một đơn vị diện tích, trong một đơn vị thời gian, của các bước sóng trong khoảng $(\lambda, \lambda + d\lambda)$.
- **Năng suất bức xạ đơn sắc R_λ** ở bước sóng λ là:

$$R_\lambda = \frac{dU}{d\lambda}$$

- R_λ liên hệ với R qua:

$$R = \int_0^\infty dU = \int_0^\infty R_\lambda d\lambda$$

2a. Một số định nghĩa – 4

- Gọi dU là năng lượng bức xạ từ một đơn vị diện tích, trong một đơn vị thời gian, của các tần số trong khoảng $(f, f + df)$.
- **Năng suất bức xạ đơn sắc R_f** ở tần số f là:

$$R_f = \frac{dU}{df}$$

- R_f liên hệ với R qua:

$$R = \int_0^\infty dU = \int_0^\infty R_f df$$

2b. Các định luật bức xạ nhiệt – 1

- Định luật Stefan-Boltzmann cho vật đen tuyệt đối ở nhiệt độ T :

$$R = \sigma T^4$$

- σ là hằng số Stefan-Boltzmann.
- $\sigma = 5,670 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$
- Với các vật khác:

$$R = \alpha \sigma T^4$$

- với $\alpha < 1$ là hệ số hấp thụ của vật.

2b. Các định luật bức xạ nhiệt – 2

- Định luật Wien cho vật đen tuyệt đối ở nhiệt độ T :

$$\lambda_m T = b$$

b : hằng số Wien

- $b = 2,8978 \times 10^{-3} \text{ m.K} = 2897,8 \text{ } \mu\text{m.K}$
- λ_m là bước sóng ứng với năng suất bức xạ đơn sắc lớn nhất – vật bức xạ mạnh nhất ở bước sóng λ_m .
- Dùng để đo nhiệt độ của vật đen tuyệt đối – các vì sao, hố lỗ tai ...
- Vật nóng hơn thì bức xạ mạnh ở bước sóng ngắn hơn.

2c. Thuyết lượng tử về bức xạ nhiệt – 1

- Giả thuyết Planck (1900): Các nguyên tử, phân tử bức xạ năng lượng thành từng lượng tử, mỗi lượng tử có năng lượng:

$$\varepsilon = hf$$

- h là hằng số Planck.
- $h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J.s}$

2c. Thuyết lượng tử về bức xạ nhiệt – 2

- Từ giả thuyết Planck, tìm được biểu thức của năng suất bức xạ đơn sắc:

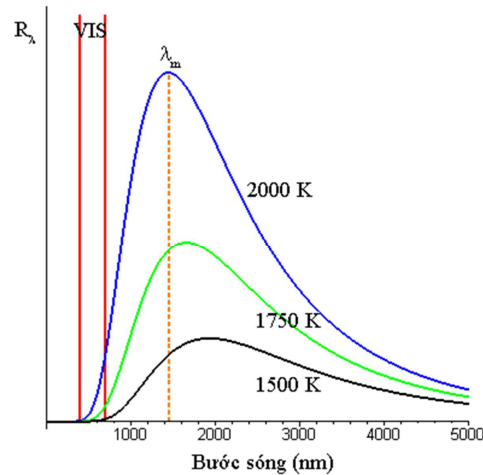
$$R_\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1} \rightarrow \frac{hc}{\lambda k_B T}$$

$$R_f = \frac{2\pi hf^3}{c^2} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hf}{k_B T}} - 1} \rightarrow \frac{hf}{k_B T}$$

- k_B là hằng số Boltzmann.
- $k_B = 1,381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$

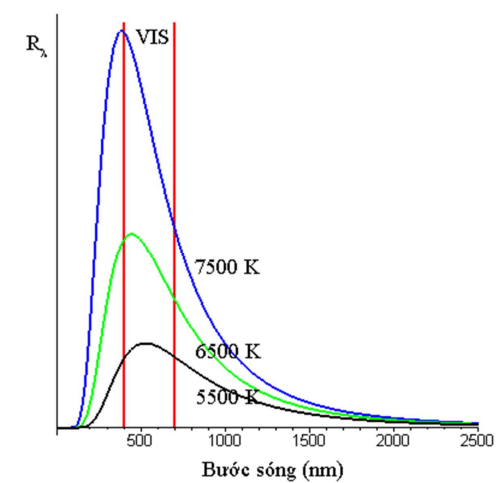
2c. Thuyết lượng tử về bức xạ nhiệt – 3

- Ở nhiệt độ thấp, vật bức xạ chủ yếu trong vùng hồng ngoại.
- Đỉnh của năng suất bức xạ ứng với bước sóng vật bức xạ mạnh nhất λ_m .
- Nhiệt độ tăng, λ_m giảm dần, phù hợp với ĐL Wien.



2c. Thuyết lượng tử về bức xạ nhiệt – 4

- Ở nhiệt độ cao, vật bắt đầu bức xạ trong vùng khả kiến.
- Nhiệt độ tăng, λ_m giảm dần từ đỏ đến xanh.
- Vật phát sáng màu xanh nóng hơn vật “nóng đỏ”!

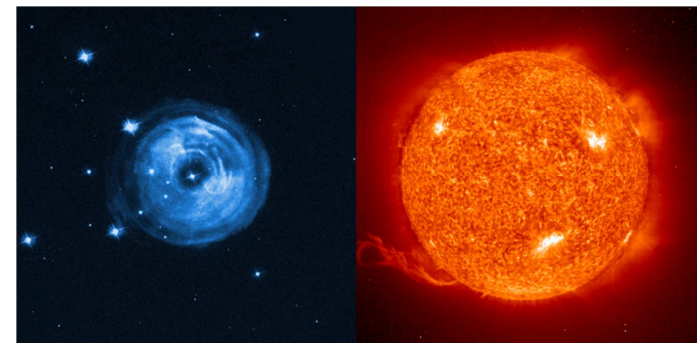


2c. Thuyết lượng tử về bức xạ nhiệt – 5

- Từ biểu thức của R_λ có thể suy ra các định luật Stefan-Boltzmann và Wien.
- Tích phân của R_λ theo λ từ 0 đến ∞ cho năng suất bức xạ toàn phần R .
- Bước sóng λ_m được xác định từ điều kiện cực đại của R_λ .

2d. Màu sắc và nhiệt độ các vì sao

- [Applet minh họa.](#)



Bài tập 2.1

Nhiệt độ bề mặt của một ngôi sao ở cách xa trái đất $5,2 \times 10^{18}$ m là 5400 K. Công suất nhận được trên một đơn vị diện tích ở trái đất là $1,4 \times 10^{-4}$ W/m². Hãy ước lượng bán kính của ngôi sao.

Trả lời BT 2.1

- Gọi r là khoảng cách từ ngôi sao đến trái đất, S_E là công suất nhận được trên mỗi m² ở trái đất.
- Nếu năng lượng phát xạ không bị mất mát dọc đường truyền, công suất phát xạ của ngôi sao bằng công suất nhận được trên mặt cầu bán kính r :

$$P = 4\pi r^2 S_E \quad (1)$$

- Mặt khác, ta có công suất phát xạ:

$$P = 4\pi R^2 S = 4\pi R^2 (\sigma T^4) \quad (2)$$

- S là năng suất phát xạ, theo định luật Stefan-Boltzman.

Trả lời BT 2.1 (tt)

- Từ (1) và (2) suy ra bán kính ngôi sao:

$$R = \left(\frac{r^2 S_E}{\sigma T^4} \right)^{1/2} = \frac{r}{T^2} \left(\frac{S_E}{\sigma} \right)^{1/2}$$

- Thay bằng số ta được:

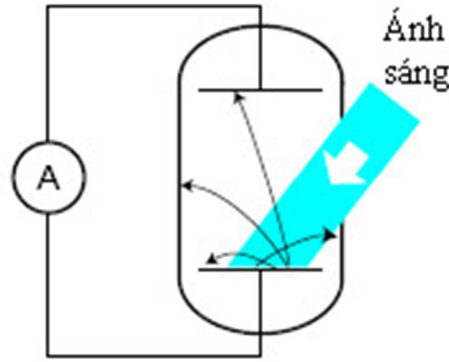
$$R = \frac{5,2 \cdot 10^{18}}{5400^2} \left(\frac{1,4 \cdot 10^{-4}}{5,67 \cdot 10^{-8}} \right)^{1/2} = 8,86 \cdot 10^{12} \text{ m}$$

3. Hiện tượng quang điện

- Hiện tượng
- Thuyết photon của Einstein
- Giải thích hiện tượng
- Đo hằng số Planck và công thoát
- Ứng dụng

3a. Hiện tượng quang điện

- Chiếu ánh sáng đến bản kim loại.
- Có dòng quang điện khi bước sóng nhỏ hơn bước sóng ngưỡng.
- Bước sóng ngưỡng thay đổi theo kim loại.



3b. Thuyết photon của Einstein (1905)

- Mọi bức xạ điện từ đều cấu tạo từ những hạt nhỏ gọi là **photon**, mỗi photon có năng lượng và động lượng:

$$\varepsilon = hf$$

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

- Giữa chúng có hệ thức:

$$\varepsilon = h \frac{c}{\lambda} = pc$$

- Phù hợp với thuyết tương đối:

$$\varepsilon^2 = (pc)^2 + (m_0c^2)^2 = (pc)^2$$

Khối lượng nghỉ của photon bằng không

3c. Giải thích hiện tượng

- Để tách được một electron ra khỏi kim loại, photon tới phải có năng lượng ít nhất bằng công thoát của kim loại đó:

$$hf = h \frac{c}{\lambda} \geq W \Rightarrow \lambda \leq \frac{hc}{W}$$

- Vậy bước sóng ngưỡng là:

$$\lambda_t = \frac{hc}{W}$$

- Công thoát phụ thuộc vào kim loại, do đó bước sóng ngưỡng cũng thay đổi theo kim loại.

3d. Đo hằng số Planck và công thoát

- Động năng cực đại của electron thoát:

$$K_{\max} = hf - W$$

- Áp một hiệu điện thế để cản electron thoát, khi dòng quang điện bằng không thì công của hiệu thế cản bằng động năng cực đại của electron:

$$e\Delta V = hf - W$$

- Vẽ đường thẳng ΔV theo f , suy ra h và W .
- [Applet minh họa.](#)

Bài tập 3.1

Ánh sáng bước sóng 200 nm được chiếu tới bề mặt Cadmium. Người ta phải dùng một hiệu thế hãm bằng 2.15 V để ngăn hoàn toàn dòng quang điện. Hãy tìm công thoát của Cadmium bằng eV.

Trả lời BT 3.1

- Khi dòng quang điện bằng không thì công của hiệu thế cản bằng động năng cực đại của electron:

$$e\Delta V = h\frac{c}{\lambda} - W$$

- Suy ra công thoát:

$$W = h\frac{c}{\lambda} - e\Delta V$$

$$W = \frac{(6,63 \cdot 10^{-34})(3 \cdot 10^8)}{200 \cdot 10^{-9}} - (1,6 \cdot 10^{-19}) \cdot 2,15$$

Trả lời BT 3.1 (tt)

- Đổi sang đơn vị eV:

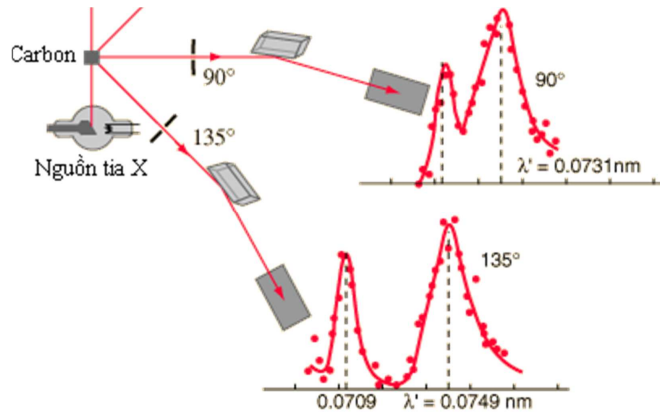
$$W(eV) = \frac{(6,63 \cdot 10^{-34})(3 \cdot 10^8)}{200 \cdot 10^{-9} (1,6 \cdot 10^{-19})} - 2,15 = 4,07 eV$$

4. Tán xạ Compton

- Tán xạ Compton
- Giải thích hiện tượng
- Chứng tỏ công thức Compton
- Tầng ozone bảo vệ trái đất như thế nào?

4a. Tán xạ Compton (1923) – 1

- Khi chiếu tia X đến một bia carbon, Compton thấy tia tán xạ có hai bước sóng : bước sóng λ bằng bước sóng tới, và bước sóng $\lambda' > \lambda$.



4a. Tán xạ Compton (1923) – 2

- Độ chênh lệch giữa hai bước sóng phụ thuộc vào góc tán xạ θ theo công thức Compton:

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

$$\lambda' - \lambda = \lambda_c (1 - \cos \theta)$$

$$\lambda_c = 2,43 \times 10^{-12} \text{ m}$$

- λ_c là bước sóng Compton.
- θ là góc lệch của photon tán xạ.

4b. Giải thích hiện tượng

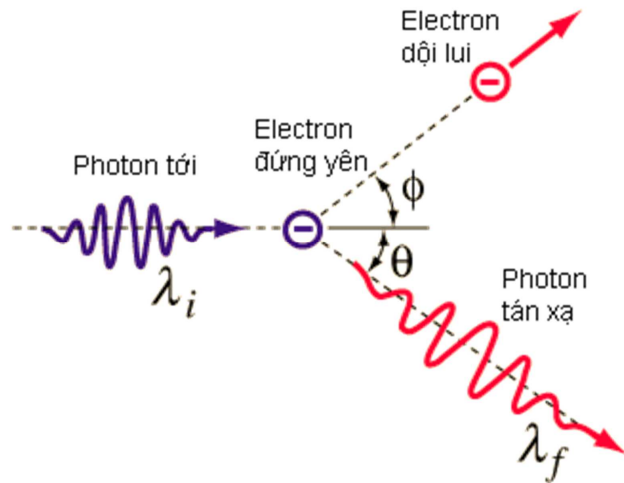
- Khi va chạm với một electron liên kết yếu, photon truyền động năng cho electron, do đó năng lượng giảm, tức là bước sóng tăng.
- Khi va chạm với một electron liên kết chặt thì photon mất rất ít năng lượng và có bước sóng gần như không đổi.
- Do đó có hai bước sóng trong tán xạ Compton: λ bằng bước sóng tới, và $\lambda' > \lambda$.

4c. Chứng tỏ công thức Compton – 1

- Coi va chạm giữa photon và electron là đàn hồi, và electron ban đầu đứng yên.
- Năng lượng và động lượng trong va chạm được bảo toàn.
- Theo cơ tương đối, động năng và động lượng của một hạt có khối lượng nghỉ m , chuyển động với vận tốc v :

$$K = mc^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} - 1 \right) \quad p = \frac{mv}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

4c. Chứng tỏ công thức Compton – 2

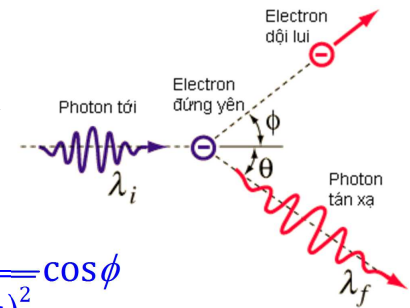


4c. Chứng tỏ công thức Compton – 3

- Định luật bảo toàn động lượng trên phương ngang và phương thẳng đứng:

$$\frac{h}{\lambda} = \frac{h}{\lambda'} \cos \theta + \frac{mv}{\sqrt{1-(v/c)^2}} \cos \phi$$

$$0 = \frac{h}{\lambda'} \sin \theta - \frac{mv}{\sqrt{1-(v/c)^2}} \sin \phi$$



4c. Chứng tỏ công thức Compton – 4

- Định luật bảo toàn năng lượng:

$$\frac{hc}{\lambda} = \frac{hc}{\lambda'} + m_e c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}} - 1 \right)$$

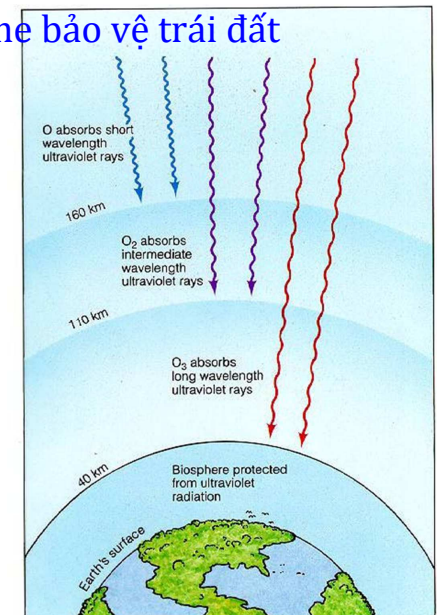
- Khử v , ϕ từ 3 phương trình trên, ta được công thức Compton:

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

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

4d. Tầng ozone bảo vệ trái đất

- Các tia cực tím tán xạ Compton trên tầng ozone, nên bước sóng của chúng dài ra, không nguy hiểm như lúc đầu nữa.
- Chất sinh hàn CFC làm tầng ozone mỏng đi, nhất là ở vùng cực.



Bài tập 4.1

Một tia gamma năng lượng 5,5 MeV đến và chạm với một electron đứng yên. Tìm năng lượng của photon tán xạ ở góc 60° (đo bằng MeV).

Trả lời BT 4.1

- Bước sóng của photon tới:

$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{(6,63 \cdot 10^{-34})(3 \cdot 10^8)}{(5,5 \cdot 10^6)(1,6 \cdot 10^{-19})} = 2,26 \cdot 10^{-13} m$$

- Bước sóng của photon tán xạ:

$$\lambda' = \lambda + \lambda_c (1 - \sin \theta)$$

$$\begin{aligned}\lambda' &= 2,26 \cdot 10^{-13} + 2,43 \cdot 10^{-12} (1 - \cos 60^\circ) \\ &= 1,44 \cdot 10^{-12} m\end{aligned}$$

Trả lời BT 4.1 (tt)

- Năng lượng của photon tán xạ:

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

$$E = \frac{(6,63 \cdot 10^{-34})(3 \cdot 10^8)}{(1,44 \cdot 10^{-12})(1,6 \cdot 10^{-19})} = 0,86 MeV$$