



CHƯƠNG VII: QUANG HỌC LƯỢNG TỬ

Bài giảng môn Vật lý 3 và thí nghiệm

Giảng viên: Tô Thị Thảo

Ngày 3 tháng 10 năm 2024

1 Bức xạ nhiệt

- 1. Bức xạ nhiệt cân bằng
- 2. Các đại lượng đặc trưng của bức xạ nhiệt cân bằng
- 3. Định luật Kirchhoff

2 Thuyết lượng tử Planck

- 1. Sự thất bại của sóng ánh sáng trong việc giải thích hiện tượng bức xạ nhiệt
- 2. Thuyết lượng tử của Planck
- 3. Các định luật bức xạ của vật đen tuyệt đối.

3 Thuyết photon của Einstein

- 1. Thuyết photon của Einstein
- 2. Động lực học photon

4 Hiện tượng quang điện

- 1. Hiệu ứng quang điện
- 2. Giải thích hiện tượng quang điện

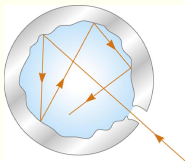
5 Hiệu ứng Compton

- 1. Hiệu ứng Compton
- 2. Giải thích hiệu ứng Compton

Sự ra đời của Cơ học lượng tử - Cơ học sóng.

- Cuối thế kỷ 19, đầu thế kỷ 20: Lý thuyết tương đối đã giải thích được nhiều hiện tượng vật lý của các hệ có vận tốc chuyển động lớn.
- *Hạn chế*: nhiều hiện tượng vẫn chưa giải thích được bằng cơ học cổ điển và quang học sóng:
 - Hiện tượng bức xạ điện từ phát ra từ các vật thể bị đốt nóng (bức xạ của các vật đen).
 - Hiện tượng quang điện: bức xạ điện tử khi chiếu ánh sáng trên bề mặt kim loại.
 - Tia bức xạ của khí nguyên tử trong ống phóng điện.
- 1900-1930: Cơ học lượng tử hay cơ học sóng ra đời.
 - Giải thích được các hiện tượng vật lý trong thế giới vi mô: Nguyên tử, phân tử, hạt nhân.
 - Lý thuyết lượng tử: Thế giới vật chất mang lưỡng tính sóng-hạt.
 - Các nhà vật lý nổi tiếng: Einstein, Heisenberg, Bohr, Schrödinger, Planck...

Vật đen:



- Là một hệ lý tưởng mà nó hấp thụ tất cả các bức xạ chiếu vào nó.
- Vật đen có thể được tạo ra bởi một lỗ nhỏ của một khối vật rỗng.

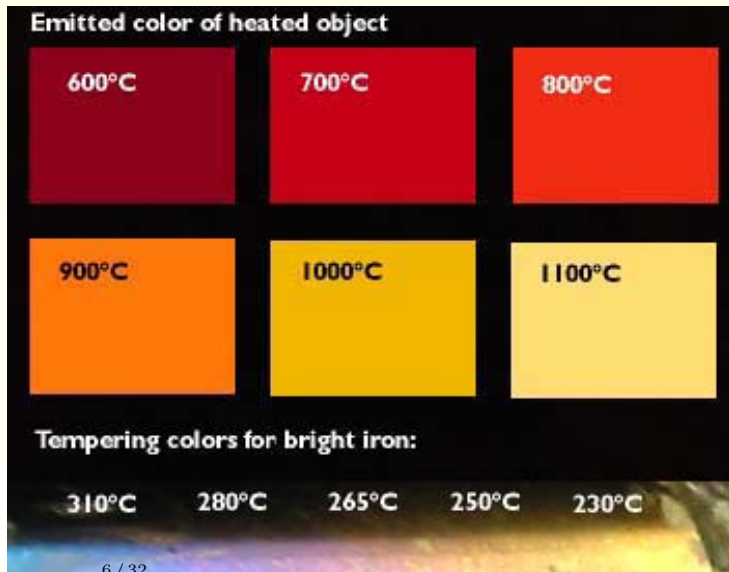
Sự bức xạ trong vật đen qua một lỗ nhỏ chỉ phụ thuộc vào nhiệt độ của vỏ vật đen, không phụ thuộc vào thành phần cấu tạo nên vật đen và hình dạng của vật đen.

1. Bức xạ nhiệt cân bằng

- Bức xạ
 - Sóng điện từ do các vật phát ra gọi là bức xạ
- Bức xạ nhiệt
 - Sóng điện từ do các nguyên tử, phân tử kích thích bởi nhiệt phát ra gọi là bức xạ nhiệt.
 - Tất cả các chất có $T > 0K$ đều phát bức xạ nhiệt.

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

- Bức xạ nhiệt cân bằng
 - Trong khoảng thời gian dt , năng lượng mà vật hấp thụ được cùng bằng năng lượng mà vật phát xạ \Rightarrow năng lượng của vật không đổi. Quá trình đó được gọi là bức xạ nhiệt cân bằng.
 - Vật bức xạ nhiệt cân bằng thì nhiệt độ của vật không đổi.



- Xét một vật bức xạ nhiệt ở nhiệt độ T không đổi.
- Năng lượng bức xạ phát ra từ dS trong đơn vị thời gian (năng thông bức xạ từ dS) bởi các bức xạ có tần số trong khoảng $\nu, \nu + d\nu$ là $dW_p(\nu, T)$

$$dW_p(\nu, T) = r(\nu, T).dS.d\nu \quad (1)$$

$r(\nu, T)$: năng suất phát xạ đơn sắc ứng với tần số ν của vật.

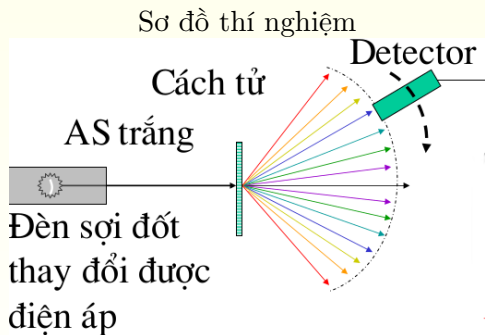
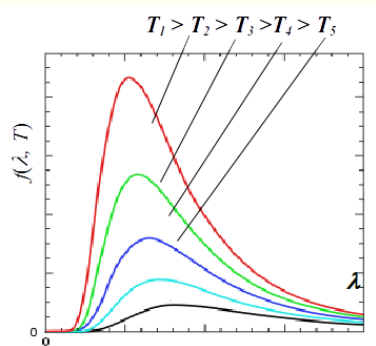
Năng suất phát xạ toàn phần hay độ đặc trưng của vật phát xạ:

$$R(T) = \int_0^{\infty} r(\nu, T) d\nu \quad (2)$$

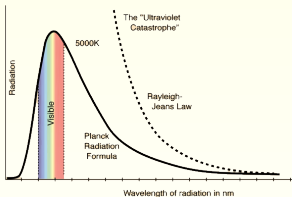
Hệ số hấp thụ đơn sắc:

$$a(\nu, T) = \frac{dW_t(\nu, T)}{dW(\nu, T)} \leq 1 \quad (3)$$

3. Định luật Kirchhoff



1. Sự thất bại của sóng ánh sáng trong việc giải thích hiện tượng bức xạ nhiệt



- Sự thất bại của thuyết sóng ánh sáng trong việc giải thích hiện tượng bức xạ nhiệt.
 - Lý thuyết bức xạ điện từ cổ điển cho hàm phổ biến (Rayleigh và Jeans):

$$f(\nu, T) = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} k_B T$$

$k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$: hằng số Boltzmann.

Năng suất phát xạ toàn phần của vật đen tuyệt đối:

$$R(T) = \int_0^\infty r(\nu, T) d\nu = \int_0^\infty f(\nu, T) d\nu$$

1. Sự thất bại... giải thích bức xạ nhiệt



$$R(T) = \int_0^{\infty} \frac{2\pi\nu^2}{c^2} k_B T d\nu = \infty$$

- Khi tần số bức xạ càng lớn thì năng suất phát xạ toàn phần càng lớn và tiến tới vô cùng.
- Bế tắc này còn được gọi là **khủng hoảng vùng tử ngoại**.

2. Thuyết lượng tử của Planck

Năm 1900 Planck đưa ra thuyết lượng tử năng lượng.

- a. Các nguyên tử, phân tử phát xạ hay hấp thụ năng lượng của một bức xạ điện từ một cách gián đoạn. Phần năng lượng phát xạ hay hấp thụ bằng bội số nguyên của một lượng năng lượng vô cùng bé mà nó được gọi là “**lượng tử năng lượng**” (quantum energy).
- b. Đối với bức xạ đơn sắc có tần số ν (bước sóng λ), lượng tử tương ứng bằng

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

$h = 6,625.10^{-34} J.s$: hằng số Planck

- c. Công thức hàm phân bố Planck: phát xạ đơn sắc của vật đen tuyệt đối

$$f(\nu, T) = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \frac{h\nu}{\exp(\frac{h\nu}{k_B T}) - 1}$$

2. Thuyết lượng tử của Planck



Giới hạn cổ điển: Khi nhiệt độ lớn

$$\frac{h\nu}{k_B T} \ll 1 \Rightarrow \exp\left(\frac{h\nu}{k_B T}\right) - 1 \approx \frac{h\nu}{k_B T}$$

$f(\nu, T) \approx \frac{2\pi\nu^2}{c^2} k_B T$: biểu thức của Rayleigh và Jeans

3. Các định luật bức xạ của vật đen tuyệt đối.

- Năng suất phát xạ toàn phần của vật đen tuyệt đối:

$$R(T) = \int_0^{\infty} f(\nu, T) d\nu = \int_0^{\infty} \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \frac{h\nu}{\exp(\frac{h\nu}{k_B T}) - 1} d\nu$$

Sử dụng phép đổi biến $x = \frac{h\nu}{k_B T}$ ta có:

$$R(T) = \frac{2\pi k_B^4 T^4}{c^3 h^3} \int_0^{\infty} \frac{x^3 dx}{e^x - 1} = \sigma T^4$$

$$R(T) = \sigma T^4,$$

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} W/m^2 K^{-4}$: hằng số Stefan-Boltzmann.

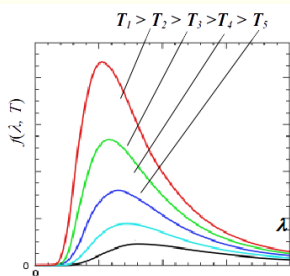
Năng suất phát xạ toàn phần của vật đen tuyệt đối tỷ lệ thuận với lũy thừa bậc bốn của nhiệt độ tuyệt đối của vật đó.

$$R(T) = \frac{P}{S} = \frac{Q}{tS}; \text{ với } \begin{cases} P & : \text{ công suất bức xạ} \\ S & : \text{ diện tích bề mặt của vật} \\ Q & : \text{ Năng lượng bức xạ} \\ t & : \text{ thời gian bức xạ} \end{cases}$$

- Nếu vật không phải là vật đen tuyệt đối $R'(T) = a \cdot \sigma \cdot T^4$
 hệ số hấp thụ $a = \frac{R'(T)}{R(T)}$: tỉ số giữa năng suất phát xạ toàn phần của vật và vật đen tuyệt đối cùng nhiệt độ.

3. Các định luật bức xạ của vật đen tuyệt đối.

• Định luật Wien



- Lấy đạo hàm $\frac{df(\nu, T)}{d\nu} = 0$

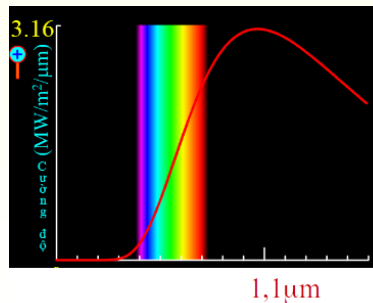
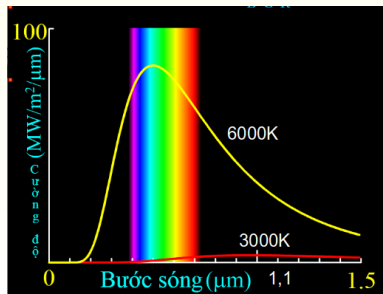
Đối với vật đen tuyệt đối bước sóng của chùm bức xạ đơn sắc mang nhiều năng lượng nhất tỷ lệ nghịch với nhiệt độ tuyệt đối của vật

$$\lambda_m = \frac{b}{T}; \quad b = 2,898 \cdot 10^{-3} m \cdot K$$

với b là hằng số Wien.

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

Cơ thể người	$T = 310 \text{ K}$	$\lambda_m = 9,35\mu\text{m}$	tia hồng ngoại
Dây tóc bóng đèn	$T = 3000 \text{ K}$	$\lambda_m = 0,97\mu\text{m}$	tia hồng ngoại
Mặt trời	$T = 6000 \text{ K}$	$\lambda_m = 0,48\mu\text{m}$	ánh sáng xanh
Bom nguyên tử	$T = 10^7 \text{ K}$	$\lambda_m = 0,03.10^{-3}\mu\text{m}$	tia phóng xạ



Thí dụ 1: Một ngôi nhà gạch trát vữa có diện tích mặt ngoài tổng cộng là 800m^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.

Cho hằng số Stefan – Boltzman $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$, hằng số Wien $b = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ m.K}$

1. Thuyết photon của Einstein

Thuyết Planck chưa nên lên được bản chất gián đoạn của bức xạ điện từ \Rightarrow thuyết photon 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 $c = 3.10^8 m/s$
- 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.

Thuyết phôtôn của Einstein giải thích được các hiện tượng thể hiện bản chất hạt của ánh sáng: hiện tượng quang điện, hiệu ứng Compton.

2. Động lực học photon

- Năng lượng của photon ứng với một bức xạ điện từ đơn sắc tần số ν :

$$\epsilon = h\nu$$

- Khối lượng của photon

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

- Theo thuyết tương đối $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \Rightarrow m_0 = m\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$

- $v = c \Rightarrow m_0 = 0$: khối lượng nghỉ bằng của photon bằng 0

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

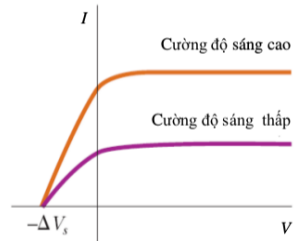
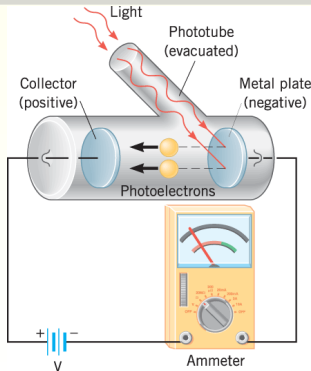
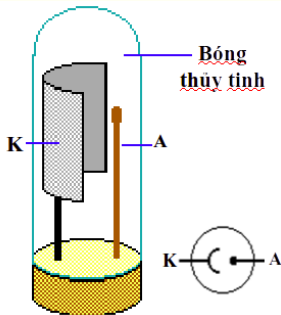
Động lượng của photon tỉ lệ thuận với tần số và tỉ lệ nghịch với bước sóng của bức xạ điện từ.

1. Hiệu ứng quang điện



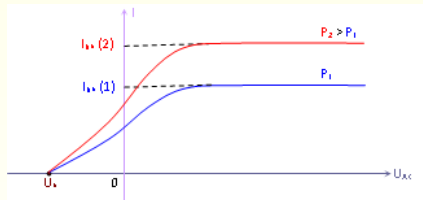
Định nghĩa:

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.



1. Hiệu ứng quang điện

Thực nghiệm: tạo cấu trúc 2 bản cực, cathode (K) có kim loại phát ra e- quang nối với cực (-), và anode (A) nối với cực (+) nguồn điện \Rightarrow chiếu sáng \Rightarrow e- quang đi về A \Rightarrow tạo ra dòng điện I (dòng quang điện).



- Cường độ dòng quang điện tăng theo hiệu điện thế V . Nó chỉ tăng đến một giá trị ngưỡng và được gọi là cường độ dòng điện bão hòa.
- Khi $V = 0$, vẫn có cường độ dòng điện chạy qua mạch.

\Rightarrow các quang electron khi bắn ra khỏi bản cực đã **có sẵn động năng**:

$$W_d = \frac{1}{2}mv^2.$$

- đảo chiều nguồn điện, hiệu điện thế cản \rightarrow để triệt tiêu dòng quang điện có giá trị sao cho công cản của lực điện trường bằng động năng cực đại ban đầu của quang electron.

$$eU_c = \frac{1}{2}mv^2$$

- Giả thiết : công để điện tử thoát ra khỏi hạt nhân: A_{th}
- Ở điều kiện thường, động năng chuyển động nhiệt của các electron bé hơn công thoát A_{th} .
- Dưới tác dụng của bức xạ điện từ thích hợp, các electron sẽ hấp thụ photon với năng lượng là $\epsilon = h\nu$.
- Năng lượng hấp thụ photon chia thành hai phần
 - Một phần chuyển thành công thoát.
 - Một phần chuyển thành động năng ban đầu của electron. Phần động năng ban đầu của các electron càng lớn khi electron càng nằm xa hạt nhân.
- Theo định luật bảo toàn năng lượng:

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

Phương trình này được gọi là **phương trình Einstein**.

Định luật về giới hạn quang điện.

- **Giới hạn dòng quang điện:** Đối với mỗi kim loại xác định, hiện tượng quang điện chỉ xảy ra khi bước sóng λ (hay tần số ν) của chùm bức xạ điện từ rơi tới nhỏ hơn (lớn hơn) một giá trị xác định λ_0 (ν_0), λ_0 gọi là giới hạn quang điện của kim loại đó.

$$\lambda < \lambda_0 = \frac{hc}{A_{th}}$$

- **Dòng bão hòa:** Cường độ dòng quang điện bão hòa tỉ lệ với cường độ của chùm bức xạ tới. $I_{qđiện} \sim \text{số e bắn ra} \sim \text{Số photon bắn vào K} \sim I_{\text{ánh sáng}} \Rightarrow I_{qđiện} \sim I_{\text{ánh sáng}}$
- **Động năng cực đại:** 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.

$$h\nu = A_{th} + \frac{mv_{0max}^2}{2} = h\nu_0 + \frac{mv_{0max}^2}{2}$$

$$\frac{mv_{0max}^2}{2} = h(\nu - \nu_0) \Rightarrow eU_c = h(\nu - \nu_0)$$

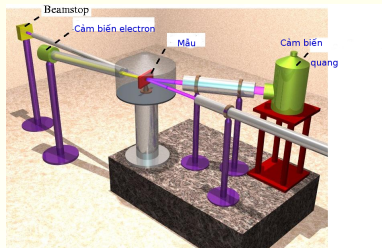
Thí dụ 2: Chiếu một bức xạ điện từ đơn sắc bước sóng $\lambda = 0,41\mu\text{m}$ lên một kim loại dùng làm catôt của tế bào quang điện thì có hiện tượng quang điện xảy ra. Nếu dùng một hiệu điện thế hãm $0,76\text{V}$ thì các quang electron bắn ra đều bị giữ lại. Tìm:

- Công thoát của electron đối với kim loại đó.
- Vận tốc ban đầu cực đại của các quang electron khi bắn ra khỏi catôt.

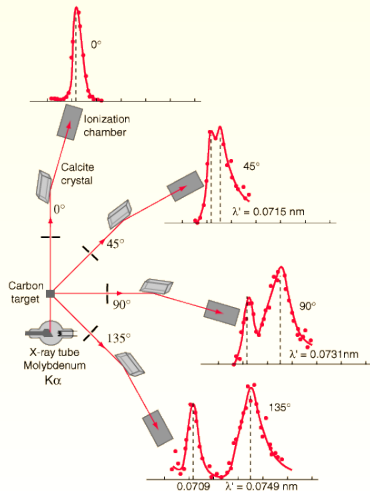
Thí dụ 3: Tìm năng lượng và động lượng của photon ứng với bước sóng $\lambda = 10^{-12}\text{m}$.

1. Hiệu ứng Compton

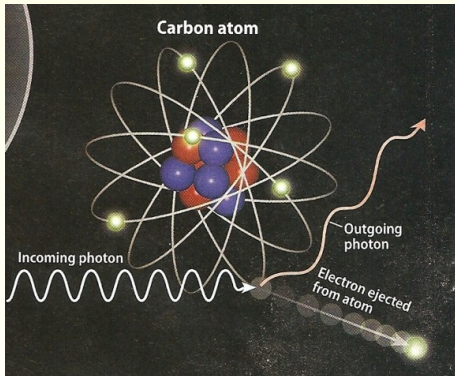
Chiếu một chùm tia X, bước sóng λ vào nguyên tử graphit.



Trong phổ tia X bị tán xạ, ngoài vạch có bước sóng λ còn có vạch ứng với bước sóng $\lambda' > \lambda$

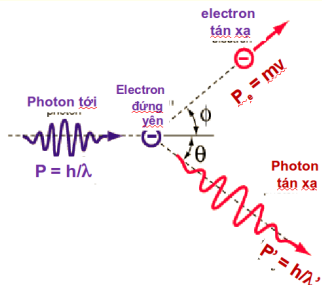


1. Hiệu ứng Compton



- Vạch có bước sóng λ của tia X do tán xạ của tia X lên các e- ở bên trong (liên kết mạnh với hạt nhân),
- Vạch có bước sóng $\lambda' > \lambda$, do tán xạ của tia X lên các e- ở bên ngoài (liên kết yếu với hạt nhân).

1. Hiệu ứng Compton



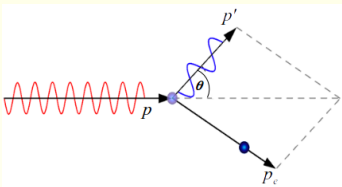
Bước sóng λ' phụ thuộc góc tán xạ θ đàn hồi của tia X với các e- trong nguyên tử.

Tia X có năng lượng lớn, mà e- có khối lượng rất nhỏ \Rightarrow động lượng của $e^- \in$ vận tốc.

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

$\Lambda_c = 2,426 \cdot 10^{-12}$ m: bước sóng Compton.

2. Giải thích hiệu ứng Compton



Áp dụng cơ học tương đối tính \Rightarrow khối lượng nghỉ của e^- là m_{0e} và khi chuyển động là:

$$m_e = \frac{m_{0e}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Động lượng và năng lượng của hệ “photon - electron”, vận tốc của e^- trước va chạm $v = 0$:

Hạt	Động lượng		Năng lượng	
	Trước va chạm	Sau va chạm	Trước va chạm (ϵ)	Sau va chạm (ϵ)
Photon (γ)	$p_\gamma = mv = \frac{hv}{c} = \frac{h}{\lambda}$	$p'_\gamma = \frac{hv'}{c} = \frac{h}{\lambda'}$	$h\nu$	$h\nu'$
Electron (e^-)	0	$p_e = \frac{m_{0e} \cdot v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$	$m_{0e}c^2$	$\frac{m_{0e} \cdot c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$

2. Giải thích hiệu ứng Compton

Hệ cô lập: Bảo toàn năng lượng, động lượng. (Ký hiệu $m_{0e} = m_e$)

- Bảo toàn năng lượng:

$$h\nu + m_e c^2 = h\nu' + \frac{m_e c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \Rightarrow (h\nu + m_e c^2 - h\nu')^2 = \frac{m_e^2 c^4}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (1)$$

- Bảo toàn động lượng:

$$\begin{aligned} \vec{p}_{ph} &= \vec{p}'_{ph} + \vec{p}_e \Leftrightarrow (\vec{p}_{ph} - \vec{p}'_{ph})^2 = \vec{p}_e^2 \\ &\Leftrightarrow p_{ph}^2 + p_{ph}'^2 - 2p_{ph}p_{ph}' \cos \theta = p_e^2 \\ &\Leftrightarrow \left(\frac{h\nu}{c}\right)^2 + \left(\frac{h\nu'}{c}\right)^2 - 2\frac{h^2\nu\nu'}{c^2} \cos \theta = \frac{m_e^2 v^2}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (2) \end{aligned}$$

2. Giải thích hiệu ứng Compton



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

Thay $\nu = \frac{c}{\lambda} \Rightarrow$ độ dịch Compton:

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = 2 \frac{h}{m_e c} \sin^2 \frac{\theta}{2}$$

$$\Lambda_c = \frac{h}{m_e c} = 2,42 \cdot 10^{-12} \text{m: bước sóng Compton.}$$

Thí dụ 4: Tìm động lượng của electron khi có photon bước sóng $\lambda = 0,05 \text{ \AA}$ đến và chạm và tán xạ theo góc $\theta = 90^\circ$. Lúc đầu electron đứng yên. ($\Lambda_c = 2,426 \cdot 10^{-12} \text{ m}$).