

Chương 4. Tính chất lượng tử của ánh sáng - (4 LT, 1 BT, 1 TH)

- 4.1. Bức xạ nhiệt và các định luật về bức xạ nhiệt
- 4.2. Thuyết lượng tử của Plank cho ánh sáng
- 4.3. Hiện tượng quang điện, pin mặt trời
- 4.4. Hiệu ứng Compton
- 4.5. Một số ứng dụng thực tiễn của bức xạ

Thuyết lượng tử ánh sáng

- Hiện tượng giao thoa nhiễu xạ và phân cực ánh sáng là những hiện tượng chứng tỏ ánh sáng có bản chất sóng.
- Các hiện tượng quang học như phát xạ nhiệt, hiệu ứng quang điện không thể giải thích được nếu chỉ dựa vào quang học sóng. Để giải thích các hiện tượng đó phải dựa vào thuyết lượng tử của Planck và thuyết photon của Einstein

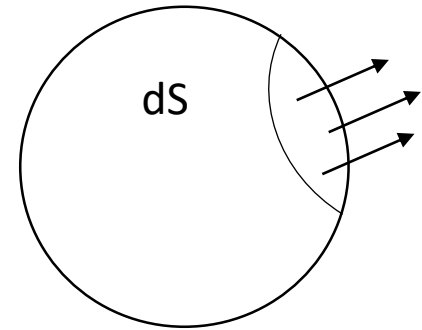
Bức (phát) xạ nhiệt

- Bằng một cách nào đó kích thích các phân tử, nguyên tử làm cho chúng từ trạng thái cơ bản chuyển sang trạng thái kích thích thì khi chúng từ trạng thái kích thích này trở về trạng thái cơ bản, năng lượng thu được sẽ trả lại môi trường, thường dưới dạng năng lượng sóng điện từ (bức xạ điện từ).
- Có nhiều cách cung cấp năng lượng để kích thích các phân tử, nguyên tử. Nếu năng lượng cung cấp ở dạng nhiệt thì bức xạ điện từ phát ra gọi là bức xạ nhiệt và hiện tượng đó gọi là phát xạ (vì) nhiệt.
- Bức xạ nhiệt trong một số điều kiện có thể tồn tại cân bằng với vật, nghĩa là năng lượng bức xạ do vật phát ra đúng bằng năng lượng dưới dạng nhiệt mà vật thu vào bằng cách hấp thụ bức xạ. Khi đó vật ở trạng thái cân bằng (động) ứng với một nhiệt độ xác định.

Bức xạ nhiệt

Các đại lượng đặc trưng

- Xét phần tử diện tích dS ở mặt ngoài của một vật phát xạ cân bằng (i.e vật có nhiệt độ xác định T).
- Trong quá trình phát xạ, vật phát ra mọi bức xạ điện từ có tần số từ nhỏ đến lớn. Năng lượng bức xạ phát ra từ dS trong một đơn vị thời gian (gọi là năng thông bức xạ phát ra từ dS) mang đi bởi các bức xạ điện từ có tần số trong khoảng $(f, f + df)$ được kí hiệu là $dE(f, T)$
- Năng lượng này tỉ lệ với dS và df



$r(f, T)$ là năng suất phát xạ đơn sắc ứng với tần số f

$$dE(f, T) = r(f, T) \cdot dS \cdot df$$

Bức xạ nhiệt

- Đại lượng

$$R(T) = \int_0^{\infty} r(f, T) df$$

được gọi là năng suất phát xạ toàn phần của vật

- Giả sử năng thông tương ứng khoảng tần số $(f, f + df)$ gửi tới dS là $dE(f, T)$, trong đó dS hấp thụ năng thông $dE_t(f, T)$
- Hệ số hấp thụ đơn sắc ứng với tần số f

$$a(f, T) = \frac{dE_t(f, T)}{dE(f, T)}$$

Rõ ràng $a(f, T) \leq 1$

- Những vật mà $a(f, T) = 1$ với mọi (f, T) được gọi là vật đen tuyệt đối

Phát xạ của vật đen tuyệt đối, thuyết lượng tử ánh sáng

Ví dụ: Một bình kín rỗng cách nhiệt có khoét một lỗ nhỏ, mặt trong được phủ một lớp chất xốp đen có thể coi là một vật đen tuyệt đối. Trong trường hợp này khi một tia bức xạ lọt qua lỗ vào bình, nó sẽ bị phản xạ liên tiếp trên thành và thực tế có thể coi là bị hấp thụ hoàn toàn

Thuyết lượng tử Planck

- Theo lí thuyết bức xạ điện từ cổ điển, các nguyên tử, phân tử phát xạ/hấp thụ một cách liên tục. Năng suất phát xạ toàn phần của một vật đen tuyệt đối tính được như sau

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

- Khi tần số bức xạ lớn thì tích phân sẽ vô cùng lớn, tiến tới vô cùng: sự khủng hoảng ở vùng tử ngoại

Phát xạ của vật đen tuyệt đối, thuyết lượng tử ánh sáng

Năm 1900, Planck đã nêu một thuyết mới thay thế cho thuyết cổ điển: thuyết lượng tử năng lượng

a) Các nguyên tử, phân tử phát xạ hay hấp thụ năng lượng của bức xạ điện từ một cách gián đoạn: 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 (quantum)

b) Với bức xạ điện từ đơn sắc tần số f , bước sóng λ , lượng tử năng lượng tương ứng bằng” $\varepsilon = hf = h \frac{c}{\lambda}$ (lượng tử năng lượng)

h là hằng số Planck, $6,625 \cdot 10^{-34}$ J.s

c) Công thức Plack

Năng suất phát xạ đơn sắc của vật đen tuyệt đối

$$r(f, T) = \frac{2\pi f^2}{c^2} \frac{hf}{e^{\frac{hf}{k_B T}} - 1}$$

Phát xạ của vật đen tuyệt đối, thuyết lượng tử ánh sáng

Các định luật phát xạ của vật đen tuyệt đối

a) Năng suất phát xạ toàn phần của vật đen tuyệt đối

$$R(T) = \int_0^{\infty} r(f, T) df = \int_0^{\infty} \frac{2\pi f^2}{c^2} \frac{hf}{e^{\frac{hf}{k_B T}} - 1} df = \sigma T^4$$

σ là hằng số Stephane-Boltzman, $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

- Đ/luật Stephane-Boltzman: “Năng suất phát xạ toàn phần của một vật đen tuyệt đối tỉ lệ với lũy thừa bốn của nhiệt độ tuyệt đối của vật ấy”

Phát xạ của vật đen tuyệt đối, thuyết lượng tử ánh sáng

b) Năng suất bức xạ đơn sắc $r(f, T)$ có một giá trị cực đại ứng với bước sóng λ_m , nghĩa là vật đen phát xạ mạnh nhất tại bước sóng λ_m , giá trị đặc biệt này được tìm thấy khi thỏa mãn

$$\lambda_m T = b$$

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

- Định luật Wien: “Đối với vật đen tuyệt đối, bước sóng λ_m của chùm bức xạ đơn sắc mang nhiều năng lượng nhất tỉ lệ nghịch với nhiệt độ tuyệt đối của vật”

Phát xạ của vật đen tuyệt đối, thuyết lượng tử ánh sáng

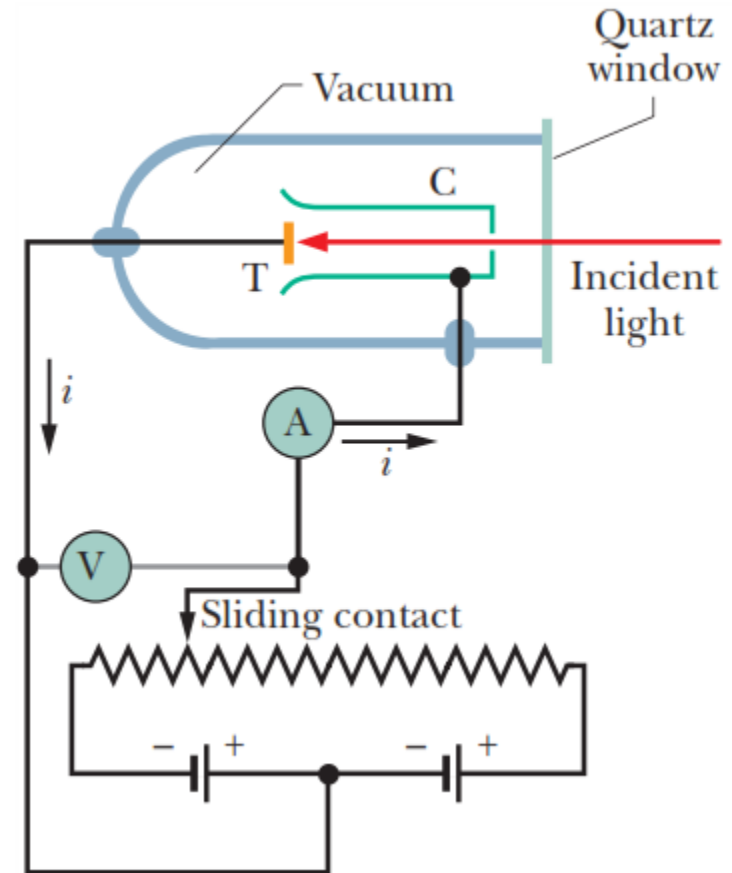
Thuyết photon của Einstein

- a) Bức xạ điện từ cấu tạo bởi vô số các hạt gọi là lượng tử ánh sáng hay photon
- b) Với mỗi bức xạ điện từ đơn sắc, các photon đều giống nhau và mang một năng lượng xác định bằng
$$\varepsilon = hf = h \frac{c}{\lambda}$$
- c) Các photon truyền đi với cùng vận tốc $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
- d) Khi một vật phát xạ hay hấp thụ bức xạ điện từ thì có nghĩa là vật đó phát hay hấp thụ các photon
- e) Cường độ của chùm bức xạ tỉ lệ với số photon phát ra từ nguồn trong một đơn vị thời gian

Dựa vào thuyết photon của Einstein ta giải thích được hiện tượng quang điện và hiện tượng Compton

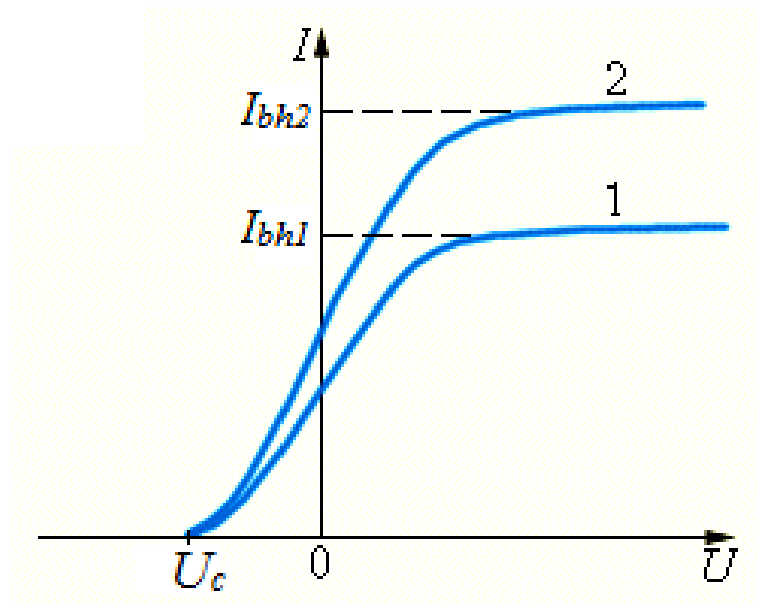
Hiện tượng quang điện

- Hiện tượng quang điện là 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. Các electron bắn ra được gọi là các quang electron.
- Để nghiên cứu thực nghiệm hiện tượng quang điện ta bố trí thí nghiệm như hình bên trong đó phần tử chủ yếu là một tế bào quang điện.



Hiện tượng quang điện

- Khi rọi một chùm bức xạ điện từ thích hợp vào cathode của tế bào quang điện trong mạch xuất hiện dòng quang điện đo bởi điện kế G. Thay đổi hiệu điện thế U giữa anode và cathode ta được đồ thị dòng quang điện như hình vẽ.



Hiện tượng quang điện

Nhận xét:

- a) Ban đầu cường độ dòng quang điện tăng theo hiệu điện thế U , đến một giá trị nhất định của U , dòng quang điện đạt tới giá trị không đổi (dòng quang điện bão hòa)
- b) Ngay khi hiệu điện thế $U=0$, ta vẫn có dòng quang điện $\neq 0$, chứng tỏ các quang electron khi bắn ra khỏi cathode đã có sẵn động năng ban đầu $\frac{1}{2}mv_0^2$
- c) Có thể triệt tiêu dòng quang điện bằng cách tác dụng lên hai cực của tế bào quang điện một hiệu điện thế ngược U_c sao cho công cản của điện trường bằng động năng ban đầu cực đại của quang electron

$$eU_c = \frac{1}{2}mv_0^2$$

Hiện tượng quang điện

Giải thích hiện tượng quang điện:

- Electron tự do trong kim loại muốn thoát ra ngoài phải có năng lượng ít nhất bằng công thoát A_{th} của electron đối với kim loại đó. Bình thường động năng chuyển động nhiệt của các electron đều nhỏ hơn A_{th} . Tuy nhiên khi bức xạ điện từ thích hợp dọi tới các electron tự do trong kim loại sẽ hấp thụ photon, mỗi điện tử hấp thụ một photon sẽ được truyền thêm một năng lượng $\varepsilon = hf$. Năng lượng này một phần chuyển thành công thoát A_{th} , phần còn lại chuyển thành động năng ban đầu của quang electron.
- Phương trình cơ bản của hiện tượng quang điện (phương trình Einstein)

$$hf = h\frac{c}{\lambda} = A_{th} + \frac{mv_0^2}{2}$$

Hiện tượng quang điện

- Định luật về giới hạn quang điện: Đối với mỗi kim loại xác định, hiện tượng quang điện chỉ xảy ra khi bước sóng λ của chùm bức xạ điện từ dọi tới nhỏ hơn một giá trị xác định λ_0 , λ_0 là giới hạn quang điện của kim loại đó.
- Định luật về dòng quang điện bão hòa: Cường độ dòng quang điện bão hòa tỉ lệ với cường độ của chùm bức xạ dọi tới.
- Định luật về động năng ban đầu cực đại của quang electron: Động năng ban đầu cực đại của quang electron không phụ thuộc cường độ của chùm bức xạ dọi tới mà chỉ phụ thuộc tần số của chùm bức xạ đó.

Pin mặt trời (solar panel)



- Hình ảnh một tế bào quang điện được làm từ tinh thể silicon. Trên bề mặt pin được phủ các đường dẫn bằng kim loại với các nhánh nhỏ hơn tỏa ra trên bề mặt pin để thu thập electron sinh ra bởi hiệu ứng quang điện
- Do giá thành còn đắt, pin mặt trời đặc biệt thích hợp cho các vùng mà điện lưới khó vươn tới như núi cao, ngoài đảo xa, hoặc phục vụ các hoạt động trên không gian; cụ thể như các vệ tinh quay xung quanh quỹ đạo Trái Đất, máy tính cầm tay, các máy điện thoại cầm tay từ xa, thiết bị bơm nước...
- Các Pin năng lượng Mặt trời được thiết kế như những modul thành phần, được ghép lại với nhau tạo thành các tấm năng lượng Mặt trời có diện tích lớn, thường được đặt trên nóc các tòa nhà nơi chúng có thể có ánh sáng nhiều nhất, và kết nối với bộ chuyển đổi của mạng lưới điện.

Pin mặt trời (solar panel)

- Pin mặt trời được chế tạo từ tinh thể silicon loại đa tinh thể hoặc đơn tinh thể.
- Hiệu suất của pin mặt trời thương mại cỡ 5% - 10%. Hiệu suất là tỉ số giữa năng lượng điện từ chuyển đổi và năng lượng ánh sáng mặt trời dọi tới.
- Vào buổi trưa một ngày trời trong, ánh Mặt trời tỏa nhiệt khoảng 1000 W/m^2 . Như vậy 10% hiệu suất của 1 module 1 m^2 cung cấp năng lượng khoảng 100 W.

Hiệu ứng Compton

- Hiệu ứng Compton thể hiện bản chất hạt của bức xạ điện từ.
- Năm 1892, Compton đã làm thí nghiệm cho 1 chùm tia X bước sóng λ dội vào các chất như paraffine, graphite. Ông nhận thấy khi đi qua các chất này chùm tia X bị tán xạ. Trong phổ tia X tán xạ ngoài vạch có bước sóng bằng λ của chùm tia X tới, còn xuất hiện vạch có bước sóng $\lambda' > \lambda$.
- Thực nghiệm chứng tỏ λ' không phụ thuộc cấu tạo các chất được dội tia X mà chỉ tùy thuộc vào góc tán xạ θ . Độ tăng bước sóng

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

λ_c là hằng số chung cho mọi chất gọi là bước sóng Compton, $2,426.10^{-12}\text{m}$

- Hiệu ứng Compton là kết quả của quá trình tán xạ đàn hồi của chùm tia X lên các electron trong các chất