

# 44 THUYẾT LƯỢNG TỬ ÁNH SÁNG

## LƯỢNG TÍNH SÓNG - HẠT CỦA ÁNH SÁNG

### I - MỤC TIÊU

- Nêu được nội dung cơ bản của giả thuyết lượng tử năng lượng của Plăng và thuyết lượng tử ánh sáng của Anh-xtanh.
- Viết được công thức Anh-xtanh về hiện tượng quang điện ngoài.
- Nêu được ánh sáng có lưỡng tính sóng - hạt.
- Vận dụng được thuyết lượng tử ánh sáng để giải thích ba định luật quang điện.

## II - CHUẨN BỊ

### Học sinh

- Ôn lại Bài 43.
- Ôn lại các khái niệm về hạt và sóng.

## III - NHỮNG ĐIỀU CẦN LƯU Ý

I. Trong bài này, HS sẽ được làm quen với thuyết lượng tử, một trong hai thuyết trụ cột của Vật lí hiện đại, trong các bước đi đầu tiên của nó.

Để giải thích các định luật bức xạ của vật đen tuyệt đối, lúc đầu các nhà vật lí dựa vào quan điểm của Vật lí học cổ điển cho rằng các nguyên tử, phân tử phát xạ và hấp thụ bức xạ điện từ một cách liên tục, đồng thời dựa vào định luật về sự phân bố đều năng lượng theo bậc tự do. Kết quả là họ đã tìm được công thức sau đây xác định năng suất phát xạ đơn sắc  $\rho_{\lambda,T}$  (là năng lượng do một đơn vị diện tích mặt ngoài của vật đen tuyệt đối phát ra bức xạ có bước sóng  $\lambda$  theo mọi phương trong một đơn vị thời gian) :

$$\rho_{\lambda,T} = \frac{2\pi c}{\lambda^4} kT \quad (44.1)$$

với  $c$  là tốc độ ánh sáng,  $T$  là nhiệt độ tuyệt đối của vật,  $k$  là hằng số Bôn-xơ-man. Công thức (44.1) phù hợp khá tốt với thực nghiệm ở vùng nhiệt độ cao và các bước sóng dài. Nhưng ở vùng nhiệt độ thấp và bước sóng ngắn, nó không còn phù hợp với thực nghiệm nữa. Cụ thể là khi đó năng suất phát xạ toàn phần của vật đen tuyệt đối tính theo công thức (44.1) sẽ là :

$$R_T = \int_0^{\infty} \rho_{\lambda,T} d\lambda = \infty \quad (44.2)$$

Kết quả này mâu thuẫn với thực nghiệm, vì theo thực nghiệm thì  $R_T = \sigma T^4$ , với  $\sigma$  là hằng số. Điều mâu thuẫn này được gọi là *sự khủng hoảng ở vùng tử ngoại*.

Để giải quyết triệt để vấn đề bức xạ của vật đen tuyệt đối, năm 1900 Plăng đã đề ra *giả thuyết lượng tử năng lượng*. Dựa vào giả thuyết này, Plăng đã tìm được công thức xác định  $\rho_{\lambda,T}$  như sau :

$$\rho_{\lambda,T} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1} \quad (44.3)$$

với  $h$  là hằng số Plăng. Từ đó Plăng đã tìm được biểu thức của  $R_T$  phù hợp với thực nghiệm, đồng thời đã tìm được các công thức thực nghiệm khác về bức xạ của vật đen tuyệt đối. Tuy vậy, bản thân Plăng cũng như nhiều nhà vật lí khác thời đó vẫn chỉ coi lượng tử năng lượng như một thủ thuật toán học, mà không công nhận nó như một thực thể vật lí.

Giả thuyết lượng tử năng lượng của Plăng chỉ mới đề cập đến tính chất gián đoạn của năng lượng bức xạ của vật đen tuyệt đối. Phát triển giả thuyết lượng tử của Plăng, Anh-xtanh, năm 1905 đã đưa ra *thuyết lượng tử ánh sáng* hay *thuyết photon*.

2. Theo thuyết photon, chùm ánh sáng là dòng các hạt photon, mỗi photon có năng lượng  $\varepsilon = hf$  và động lượng  $\vec{p}$  xác định:  $\vec{p} = \frac{hf}{c} \vec{n}$  với  $\vec{n} = \frac{\vec{c}}{c}$  ( $\vec{c}$  là vectơ vận tốc ánh sáng). Năng lượng và động lượng của photon liên hệ với nhau bởi hệ thức  $\varepsilon = pc$ . Theo thuyết tương đối, hệ thức này chỉ đúng đối với các hạt có khối lượng nghỉ bằng không và luôn luôn chuyển động với tốc độ  $c$ .

Dùng thuyết photon có thể giải thích một cách trực quan áp suất ánh sáng trên vật được rọi sáng. Các photon truyền cho vật động lượng khi chúng va chạm với bề mặt của vật. Giả sử chùm sáng hướng vuông góc vào mặt một vật có hệ số phản xạ  $R$ .

Số photon trong một đơn vị thể tích là  $N = \frac{\rho}{hf}$  với  $\rho$  là mật độ năng lượng bức xạ.

Tất cả các photon đều bay vuông góc với vật và mỗi photon có động lượng  $\frac{hf}{c}$ . Áp

suất do ánh sáng tác dụng lên vật sẽ bằng động lượng truyền cho một đơn vị diện tích của vật trong một đơn vị thời gian. Số photon tới trên một đơn vị diện tích của mặt vật, trong một đơn vị thời gian là  $Nc$ . Như vậy, sẽ có  $RNc$  photon phản xạ và  $(1 - R)Nc$  photon bị hấp thụ bởi vật. Khi photon phản xạ, vật nhận được

xung lượng  $\frac{2hf}{c}$ , còn khi hấp thụ thì nhận được xung lượng  $\frac{hf}{c}$ . Do đó các photon

truyền cho một đơn vị diện tích của vật trong một đơn vị thời gian một xung lượng

bằng  $\frac{2RNchf}{c} + \frac{(1 - R)Nchf}{c} = Nhf(1 + R)$ , từ đó suy ra:

$$p = Nhf(1 + R) = \frac{\rho}{hf} hf(1 + R) = \rho(1 + R)$$

3. Trong hiện tượng quang điện (ngoài), electron hấp thụ một photon, do đó năng lượng của electron tăng lên còn photon thì "biến mất". Electron chỉ có thể hấp thụ hoàn toàn một photon với điều kiện là electron ở trạng thái liên kết (trong nguyên tử, phân tử, hay trong vật rắn). Sự hấp thụ hoàn toàn photon bởi electron tự do là không thể xảy ra, là bị "cấm", vì sẽ vi phạm các định luật bảo toàn năng lượng và động lượng. Ta hãy chứng minh điều đó : Để cho đơn giản, giả sử rằng, trước khi hấp thụ photon, electron đứng yên. Khi đó, áp dụng các định luật bảo toàn năng lượng và động lượng cho các hạt tương tác (photon và electron) ta có, theo thuyết tương đối :

$$m_0c^2 + hf = \sqrt{m_0^2c^4 + p^2c^2} \quad \text{và} \quad \frac{h}{\lambda} = p$$

trong đó  $hf$  và  $\frac{h}{\lambda}$  tương ứng là năng lượng và xung lượng của photon, còn  $p$  là động lượng của electron sau khi hấp thụ photon,  $m_0c^2$  là năng lượng nghỉ của electron. Từ hai phương trình đó suy ra (chú ý rằng  $\frac{c}{\lambda} = f$ ) :

$$m_0c^2 + hf = \sqrt{m_0^2c^4 + h^2f^2}$$

Để dàng thấy rằng đẳng thức vừa tìm được sẽ không đúng với mọi tần số  $f$  khác không. Do đó, ta phải kết luận rằng, trong hiệu ứng quang điện photon tương tác với electron liên kết. Sự liên kết của electron trong nguyên tử được đặc trưng bởi năng lượng ion hoá nguyên tử, còn trong vật rắn thì nó được đặc trưng bằng công thoát  $A$ . Như vậy, để hiệu ứng quang điện ngoài có thể xảy ra, thì năng lượng của photon phải lớn hơn năng lượng ion hoá hay công thoát. Năng lượng này thực ra chưa phải là lớn. Với những photon có năng lượng chừng hàng chục đến hàng trăm nghìn electron vôn, xác suất của hiệu ứng quang điện giảm đi nếu năng lượng photon tiếp tục tăng.

4. Chú ý rằng, thuyết lượng tử ánh sáng không khẳng định rằng mọi năng lượng có tính gián đoạn, mà chỉ khẳng định rằng năng lượng ánh sáng do nguyên tử hoặc phân tử bức xạ hoặc hấp thụ mới có tính gián đoạn mà thôi. Còn động năng tịnh tiến của phân tử, nguyên tử và electron vẫn có thể biến thiên những giá trị tùy ý, tức là vẫn liên tục. Trong công thức Anh-xtanh, ta cũng thấy rằng động năng của electron luôn luôn nhỏ hơn lượng tử năng lượng  $hf$ .

Chấp nhận thuyết photon không có nghĩa là từ bỏ thuyết sóng và quay trở lại với thuyết hạt Niu-tơn, vì trong thuyết photon, ta vẫn phải dùng tần số của ánh sáng, là một trong những khái niệm của thuyết sóng.

Photon là một hạt mà khối lượng nghỉ bằng 0. Đó cũng chính là một tính chất phân biệt nó với hạt ánh sáng của Niu-ton.

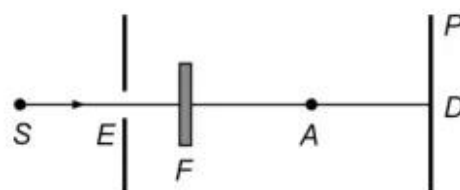
### 5. Về lưỡng tính sóng – hạt của ánh sáng. Mô hình ánh sáng

Trong phạm vi thuyết lượng tử ánh sáng, ta hiểu sự thống nhất giữa tính chất sóng và tính chất hạt của ánh sáng như thế nào ?

Trước hết, bản chất ánh sáng là bản chất điện từ. Trường sáng là trường điện từ. Trường điện từ vừa có tính chất sóng, vừa có tính chất hạt (lượng tử). Vậy trường sáng có cấu trúc như thế nào để nó thoả mãn đồng thời cả hai tính chất nói trên ?

Các TN nhiễu xạ đã cho thấy : muốn có ảnh nhiễu xạ, sóng ánh sáng phải đồng thời có mặt tại nhiều điểm cách xa nhau trong không gian. Ngược lại, photon chỉ có thể định xứ tại một điểm trong không gian.

Người ta đã làm nhiều TN có tính chất quyết định để xem ánh sáng thực sự là sóng hay là hạt. Một trong những thí nghiệm đó do Tay-lo (Taylor) thực hiện (vẽ trên Hình 44.1).



Hình 44.1

Ông cho một chùm tia sáng rất yếu nhiễu xạ qua một cái kim A. Trên hình vẽ : S là nguồn sáng, E là màn chắn sáng có lỗ nhỏ. F là kính lọc làm yếu ánh sáng và P là kính ảnh. Chùm sáng được làm yếu đến mức xác suất để cho hai photon cùng gặp kim A là rất nhỏ. Sau một thời gian chụp ảnh rất lâu, người ta đem rửa ảnh thì thấy trên kính ảnh vẫn có một ảnh nhiễu xạ của kim A giống hệt như ảnh nhiễu xạ khi ta dùng một chùm sáng mạnh chiếu vào kim và chụp ảnh trong một thời ngắn. Như vậy, hiệu ứng do một số lớn photon gây ra, hạt nọ sau hạt kia, trong một thời gian dài cũng đồng nhất với hiệu ứng do một số lớn photon cùng gây ra đồng thời. Điều đó chứng tỏ từng photon một cũng biểu lộ tính chất sóng.

Những thí nghiệm tương tự cho ta cách giải thích một cách thống kê xác suất về lưỡng tính sóng – hạt của ánh sáng.

Năng lượng thực sự tập trung tại những chỗ có photon ; nhưng sự phân bố của photon trong không gian được xác định bởi bình phương của biên độ dao động của sóng ứng với photon đó. Nói khác đi, bình phương của biên độ dao động xác định xác suất phân bố photon trong không gian. Vậy, sóng này là sóng điện từ hay "sóng xác suất" ?

Để hiểu rõ vấn đề này, ta hãy xét sự phát sáng của một nguyên tử. Theo thuyết lượng tử ánh sáng, khi từ một trạng thái kích thích trở về trạng thái cơ bản, nguyên tử sẽ phát ra một photon. Theo điện động lực học, khi đó nguyên tử phát ra một

"đoàn sóng" điện từ (Hình 44.2). Đó là một xung điện từ có dạng rất tuần hoàn, chứa tới hàng vạn bước sóng.



Hình 44.2

Đoàn sóng điện từ này mang toàn bộ năng lượng mà nguyên tử phát ra. Đoàn sóng này ứng với một photon.

Theo phép phân tích Fu-ri-ê (Fourier), ta có thể phân tích đoàn sóng này thành một tập hợp của một số rất lớn các sóng đơn sắc, tuần hoàn vô hạn trong không gian và thời gian, có tần số nằm trong khoảng từ  $f - df$  đến  $f + df$ . Tập hợp các sóng này được gọi là một *nhóm sóng* hay *bó sóng*. Đoàn sóng ứng với chỗ mà biên độ dao động tổng hợp của các sóng trong bó sóng khác không; ở ngoài vị trí của đoàn sóng, biên độ dao động tổng hợp bằng không. Vận tốc của đoàn sóng là vận tốc nhóm của bó sóng và cũng là vận tốc của photon. Tần số  $f$  của photon là tần số của sóng cơ bản trong bó sóng. Như vậy :

$$\text{PHÔTÔN} = \text{ĐOÀN SÓNG} = \text{BÓ SÓNG}$$

(Nói về không gian)                      (Nói về tần số)

Ta hãy thử ước tính số dao động trong một đoàn sóng. Khoảng  $2df$  chính là bề rộng tự nhiên của vạch quang phổ do nguyên tử phát ra. Bề rộng tự nhiên của vạch quang phổ liên hệ với thời gian sống  $\tau$  của nguyên tử ở trạng thái kích thích bằng hệ thức bất định Hai-sen-béc (Heisenberg).

$$2df \geq \frac{h}{\tau}$$

Vạch càng đơn sắc,  $2df$  càng hẹp, thì thời gian sống  $\tau$  càng dài và đoàn sóng càng chứa nhiều dao động. Ví dụ : vạch quang phổ 6 000Å (đỏ) có bề rộng tự nhiên 0,01Å sẽ ứng với một đoàn sóng chứa chừng 600 000 bước sóng  $\lambda$ . Nói khác đi : bó sóng càng "hẹp" thì đoàn sóng càng "dài" và sóng càng đơn sắc.

Ta không thể nào thu được một sóng tuyệt đối đơn sắc vì không thể có trạng thái kích thích có thời gian sống bằng  $\infty$ . Điều đó cũng hiển nhiên, vì sóng tuyệt đối đơn sắc sẽ là một sóng tuần hoàn vô hạn trong không gian và thời gian, trong khi đó thì photon lại định xứ tại một điểm. Như vậy, photon chỉ có thể ứng với một sóng gần đơn sắc, tức là ứng với một đoàn sóng.

Như vậy, *sóng ứng với photon là sóng điện từ. Mỗi photon ứng với một đoàn sóng điện từ.* Ngoài vùng không gian của đoàn sóng điện từ thì không có photon, cũng không thể có sóng điện từ. Nói rằng trong khoảng không gian nào đó không có sóng điện từ, hoặc có các sóng điện từ triệt tiêu lẫn nhau, thực tế chỉ là một.

Với quan niệm này, ta có thể giải thích thí nghiệm của Tay-lo mà ta vừa nói ở trên theo hai cách : hoặc là có sự phân bố lại của các photon sau khi gặp vật cản, sự phân bố này quyết định bởi sóng nhiễu xạ ứng với photon đó ; hoặc là có sự tạo ra những đoàn sóng mới từ những sóng nhiễu xạ của bó sóng tới. Hai cách giải thích này thống nhất với nhau.

Về tốc độ của ánh sáng thì *tốc độ của photon chính là tốc độ của đoàn sóng và cũng là tốc độ nhóm của bó sóng. Các sóng đơn sắc trong bó sóng truyền với tốc độ pha. Trong chân không, tốc độ pha và tốc độ nhóm bằng nhau, còn trong các môi trường vật chất thì tốc độ nhóm sẽ nhỏ hơn tốc độ pha, điều này thể hiện trong hiện tượng tán sắc ánh sáng.*

Cuối cùng, ta cần nhấn mạnh là : khi dùng mô hình đoàn sóng và bó sóng để mô tả photon và sóng ứng với nó thì điều đó không có nghĩa là ta đã trở về quyết định luận cổ điển của La-pla-xơ.

Theo Cu-pơ (Cooper) thì photon (cũng như các hạt cơ bản khác) là những đối tượng phi cổ điển. Không có bất kì một mô hình cổ điển nào tương tự với chúng cả. Mô tả photon bằng bất kì một mô hình cổ điển nào cũng đều thiếu sót. Mô hình đẹp nhất của photon là các mô hình toán học, trong đó chứa đựng cả những đặc trưng sóng và hạt của photon.

Mô hình ánh sáng mà chúng ta đề cập ở đây tuy đã rất phức tạp, nhưng vẫn còn thô thiển. Chúng ta chưa giải thích được nhiều hiện tượng như sự sinh cặp, sự huỷ cặp chẳng hạn. Chính vì vậy mà cho đến cuối đời mình, Anh-xanh vẫn còn viết : Cho đến nay, tôi vẫn còn tiếp tục suy nghĩ xem ánh sáng là gì ?

## IV - GỢI Ý VỀ PHƯƠNG PHÁP VÀ TỔ CHỨC HOẠT ĐỘNG DẠY HỌC

### 1. *Thuyết lượng tử ánh sáng*

GV đặt vấn đề : Ta cần giải thích hiện tượng quang điện và các định luật quang điện.

GV trình bày sơ lược để HS hiểu giả thuyết lượng tử năng lượng của Plăng, sau đó trình bày nội dung cơ bản của thuyết lượng tử ánh sáng, phân tích rõ từng điểm một. GV yêu cầu HS trả lời **C1**, qua đó gợi ý HS hình dung được năng lượng rất nhỏ của photon và ước lượng được một bóng đèn pin mỗi giây phát ra bao nhiêu photon. Từ đó giải thích được tại sao ta nhìn thấy chùm sáng liên tục. GV yêu cầu HS trả lời **C2**.

**C1** GV hướng dẫn HS áp dụng công thức  $\varepsilon = hf$ , với  $f = \frac{c}{\lambda}$ . Suy ra  $\varepsilon = \frac{hc}{\lambda}$ .

Thay số (chú ý đổi đơn vị) tìm được :

$$\varepsilon = \frac{6,625 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{0,75 \cdot 10^{-6}} \approx 2,65 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

**C2** Một loại photon ứng với  $\lambda = 0,76 \mu\text{m}$  nếu là chùm ánh sáng đơn sắc đỏ.

Vô số loại photon ứng với  $\lambda = 0,640 \div 0,750 \mu\text{m}$  nếu là chùm sáng màu đỏ (vùng màu đỏ).

### 2. Giải thích các định luật quang điện

GV hướng dẫn HS thiết lập công thức Anh-xtanh dựa vào thuyết photon và định luật bảo toàn năng lượng. GV yêu cầu HS trả lời **C3**.

**C3** Đối với các electron nằm ở các lớp sâu bên trong mặt kim loại thì trước khi đến bề mặt kim loại, chúng đã va chạm với các ion của kim loại và mất một phần năng lượng, do đó động năng ban đầu của chúng nhỏ hơn  $\frac{mv_{0\max}^2}{2}$ .

Sau đó, GV hướng dẫn HS dựa vào công thức Anh-xtanh để giải thích các định luật quang điện thứ nhất, thứ hai và yêu cầu HS trả lời **C4**.

**C4** GV hướng dẫn HS thực hiện. Áp dụng công thức Anh-xtanh để suy ra  $\left( \frac{mv_{0\max}^2}{2} = hf - A \right)$ .

### 3. Lượng tử sóng – hạt của ánh sáng

GV yêu cầu HS trả lời **C5**.

**C5** Lấy ví dụ chuyển động của một vật và sóng cơ đã học để so sánh (kích thước, vị trí...).

Từ đó GV yêu cầu HS thảo luận :

– Ánh sáng có phải là sóng không ? Tính chất sóng của ánh sáng giúp ta giải thích được các hiện tượng gì đã học ?

– Ánh sáng có phải là hạt không ? Tính chất hạt của ánh sáng giúp ta giải thích được hiện tượng nào ?



– Xét về mặt bước sóng thì khi nào phải thừa nhận ánh sáng là sóng, khi nào phải thừa nhận ánh sáng là các hạt photon ?

Căn cứ vào đó GV nêu kết luận như SGK.

## V - HƯỚNG DẪN TRẢ LỜI CÂU HỎI VÀ GIẢI BÀI TẬP

### Câu hỏi

1. Xem mục 1 SGK.
2. Xem mục 2 SGK.
3. Xem mục 3 SGK.

### Bài tập

1. D.
2. B.
3. B.

4. Áp dụng công thức Anh-xtanh :

$$hf = h \frac{c}{\lambda} = A + \frac{mv_{0\max}^2}{2}$$

Từ đó rút ra :  $v_{0\max} = \sqrt{\frac{2}{m} \left( \frac{hc}{\lambda} - A \right)}$ . Thay số ta được :  $v_{0\max} \approx 4,7.10^5$  m/s.

5. Từ các công thức :  $\frac{mv_{0\max}^2}{2} = eU_h$  và  $\frac{hc}{\lambda} = A + \frac{mv_{0\max}^2}{2}$ , rút ra :

$$\frac{hc}{\lambda} = A + eU_h \Rightarrow A = \frac{hc}{\lambda} - eU_h ;$$

Thay số ( $U_h = 1,38$  V ;  $\lambda = 0,330 \mu\text{m} = 0,330.10^{-6}$  m) ta được :  $A = 3,815.10^{-19}$  J.

Áp dụng công thức :  $\lambda_0 = \frac{hc}{A}$ , ta tìm được

$$\lambda_0 \approx 0,520.10^{-6} \text{ m} = 0,520 \mu\text{m}.$$