

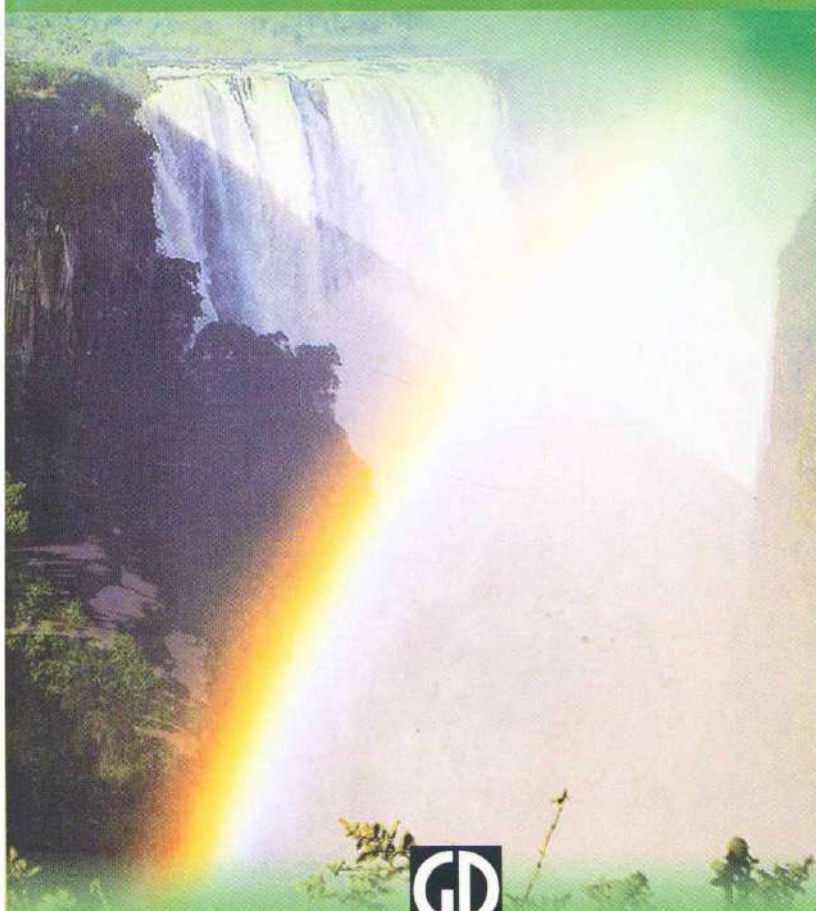
VŨ QUANG – VŨ THANH KHIẾT

TÀI LIỆU CHUYÊN VẬT LÝ

VẬT LÝ

12

TẬP HAI



NHÀ XUẤT BẢN GIÁO DỤC VIỆT NAM

VŨ THANH KHIẾT - VŨ QUANG

TÀI LIỆU CHUYÊN VẬT LÝ
VẬT LÝ **12**
TẬP HAI

(Tái bản lần thứ hai)

NHÀ XUẤT BẢN GIÁO DỤC VIỆT NAM

Lời nói đầu

Bộ sách *Tài liệu chuyên Vật lí* bao gồm 10 cuốn (6 cuốn lí thuyết, 3 cuốn bài tập và 1 cuốn thực hành) được viết theo chương trình dạy học môn Vật lí cho các lớp chuyên Vật lí do Bộ Giáo dục và Đào tạo quy định từ năm 2009, nhằm thống nhất trên toàn quốc nội dung dạy học môn Vật lí cho các trường trung học phổ thông (THPT) chuyên và nội dung bồi dưỡng học sinh giỏi cấp THPT.

Chương trình dạy học môn Vật lí cho các lớp chuyên Vật lí bao gồm hai phần :

- *Nội dung Vật lí nâng cao* (đúng như nội dung chương trình Vật lí nâng cao THPT).
- *Nội dung vật lí chuyên sâu.*

Hai phần này trong bộ sách *Tài liệu chuyên Vật lí* được kết hợp thống nhất trong một hệ thống các bài học nối tiếp nhau theo thứ tự dạy học trong từng phân môn.

Để thuận tiện cho việc dạy học, một số nội dung trong sách giáo khoa *Nâng cao* được đưa vào các tài liệu này sau khi được tinh giản và bổ sung một cách thích hợp.

Bộ sách *Tài liệu chuyên Vật lí* sẽ là tài liệu tốt dành cho học sinh và giáo viên các trường chuyên.

Cuốn *Tài liệu chuyên Vật lí. Vật lí 12 – Tập hai* gồm sáu chương :

Chương I, II do tác giả Vũ Quang biên soạn.

Chương III, IV, V và VI do tác giả Vũ Thanh Khiết biên soạn.

Chúng tôi mong nhận được sự góp ý của quý độc giả để lần in sau sách được tốt hơn, mọi ý kiến góp ý xin gửi về :

BAN BIÊN TẬP SÁCH VẬT LÍ

Công ty cổ phần Dịch vụ xuất bản Giáo dục Hà Nội –

Nhà xuất bản Giáo dục Việt Nam,

187B Giảng Võ, Hà Nội

NHÀ XUẤT BẢN GIÁO DỤC VIỆT NAM

Chương I

SÓNG ÁNH SÁNG

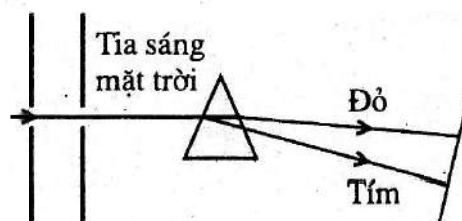
1

SỰ TÁN SẮC ÁNH SÁNG

1. Hiện tượng

a) Thí nghiệm Niu-ơn về hiện tượng tán sắc ánh sáng

Chiếu một chùm tia sáng mặt trời hẹp qua một lăng kính thủy tinh. Ta thấy chùm tia ló bị trải ra thành một dải có màu sắc sặc sỡ đi từ đỏ đến tím. Tia đỏ bị lệch ít nhất, tia tím bị lệch nhiều nhất. *Hiện tượng tia sáng ban đầu bị lăng kính phân tích thành những tia có màu sắc khác nhau gọi là hiện tượng tán sắc ánh sáng.*



Hình 1.1

Thí nghiệm này được Niu-ơn thực hiện năm 1682 (Hình 1.1).

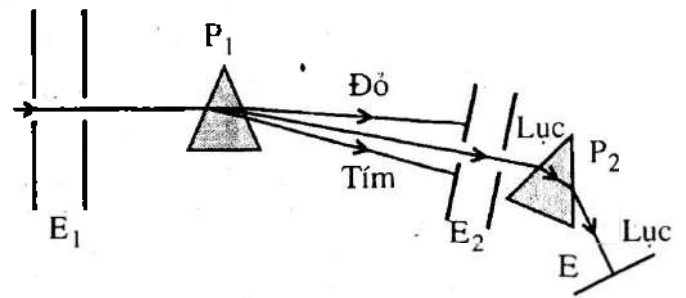
b) Ánh sáng trắng và ánh sáng đơn sắc

Dùng một hệ thống màn chắn có khe hẹp E_2 để tách ra một chùm tia sáng hẹp có màu nhất định (màu lục chẳng hạn). Sau đó, cho chùm tia màu lục này đi qua một lăng kính thứ hai P_2 . Ta thấy chùm tia ló ra khỏi lăng kính P_2 vẫn có màu lục. Vậy chùm tia màu lục đi qua lăng kính P_2 không bị phân tích (Hình 1.2). Ta gọi nó là chùm tia sáng đơn sắc.

Vậy : *Ánh sáng đơn sắc là ánh sáng có một màu nhất định và không bị lăng kính phân tích thành các ánh sáng có màu khác.*

Trong dải màu từ đỏ đến tím được tách ra từ ánh sáng mặt trời, Niu-ton phân định ra thành 7 màu đơn sắc chính là : *đỏ, da cam, vàng, lục, lam, chàm, tím*.

Thực ra, dải màu nói trên có màu sắc biến đổi liên tục từ đỏ đến tím, giữa các màu đơn sắc cạnh nhau không có ranh giới rõ rệt.



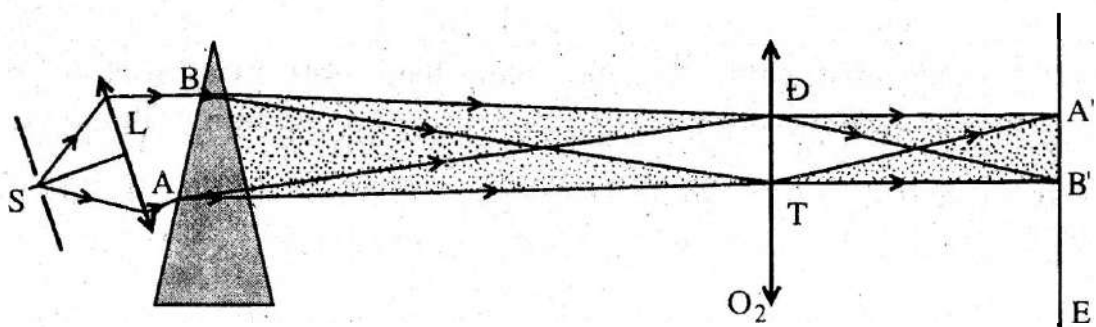
Hình 1.2

Chùm tia sáng mặt trời chiếu đến gọi là chùm ánh sáng trắng.

Vậy : *Ánh sáng trắng là tập hợp của vô số ánh sáng đơn sắc, có màu biến thiên liên tục từ đỏ đến tím.*

Muốn xác nhận một cách chặt chẽ kết luận vừa nêu, phải tìm cách tập hợp tất cả các ánh sáng đơn sắc thu được với tỉ lệ thành phần đúng như vậy để xem có thu được ánh sáng trắng hay không.

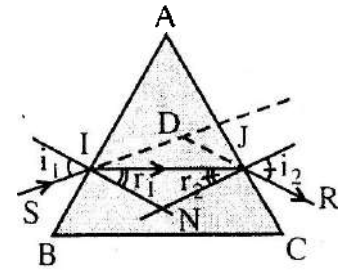
Niu-ton cũng đã thực hiện được nhiều thí nghiệm về tổng hợp ánh sáng trắng. Dưới đây là một trong các thí nghiệm đó (Hình 1.3). Chiếu một chùm sáng trắng qua một lỗ tròn nhỏ nằm trên trục chính của một thấu kính hội tụ L sao cho có một ảnh thật, màu trắng (trên hình 1.3 ta không vẽ ảnh này). Dùng một lăng kính chắn chùm tia sáng trắng trước điểm hội tụ (tức là trước ảnh thật nói trên). Chùm sáng sẽ bị tán sắc và cho một dải gồm nhiều màu liên tục. Đặt một thấu kính O_2 , sao cho dải màu này nằm ngay trên mặt của thấu kính. Di chuyển một màn ảnh E sau thấu kính O_2 , ta sẽ tìm được được một vị trí của màn mà tại đó ta thấy có một vết sáng trắng trên màn. Vết sáng trắng này nằm ở vị trí ảnh và là chỗ chồng chập của các chùm sáng đơn sắc khác nhau. Thí nghiệm này cho phép ta kết luận là : *Nếu tổng hợp các ánh sáng đơn sắc khác nhau, ta sẽ được ánh sáng trắng.*



Hình 1.3

2. Giải thích hiện tượng tán sắc ánh sáng

- a) Ta biết rằng góc lệch D của tia sáng khi đi qua lăng kính phụ thuộc vào góc chiết quang A , chiết suất n của lăng kính và góc tới i_1 của tia sáng theo các công thức (Hình 1.4) :



Hình 1.4

$$\begin{aligned} \sin i_1 &= n \sin r_1 \\ \sin i_2 &= n \sin r_2 \\ r_1 + r_2 &= A \\ D &= i_1 + i_2 - A \end{aligned} \quad (1.1)$$

Như vậy D là hàm của A , n và i_1 : $D = f(A, n, i_1)$.

Trong thí nghiệm về sự tán sắc, A và i_1 là chung cho mọi tia sáng đơn sắc. Sự kiện các tia sáng đơn sắc khác nhau sau khi qua lăng kính bị lệch nhiều, ít khác nhau chỉ còn do nguyên nhân : chiết suất của lăng kính đối với các tia sáng đơn sắc khác nhau thì khác nhau :

$$n_{\text{đỏ}} < n_{\text{da cam}} < n_{\text{vàng}} < n_{\text{lục}} < n_{\text{lam}} < n_{\text{chàm}} < n_{\text{tím}}$$

Ví dụ : Chiết suất của thủy tinh đối với các tia đơn sắc như trên bảng 1.1.

Bảng 1.1

Số TT	Ánh sáng đơn sắc	Chiết suất
1	Đỏ	$n_{\text{đ}} = 1,5140$
2	Da cam	$n_{\text{dc}} = 1,5149$
3	Vàng	$n_{\text{v}} = 1,5170$
4	Lam	$n_{\text{l}} = 1,5230$
5	Tím	$n_{\text{t}} = 1,5318$

- b) Trong thuyết sóng ánh sáng, người ta có thể chứng minh dễ dàng là chiết suất của một môi trường phụ thuộc tốc độ truyền v của sóng đó trong môi trường :

$$n = \frac{c}{v} \quad (1.2)$$

c là tốc độ của ánh sáng trong chân không.

Điều đó có nghĩa là tốc độ truyền của các ánh sáng đơn sắc khác nhau trong môi trường là khác nhau :

$$v_d > v_{dc} > v_v > \dots > v_t$$

Nếu coi mỗi ánh sáng đơn sắc là một sóng điện từ có một tần số góc ω nhất định, ta có thể đi đến kết luận : Tốc độ truyền của các ánh sáng đơn sắc khác nhau trong một môi trường phụ thuộc vào tần số của ánh sáng đó :

$$v = f(\omega)$$

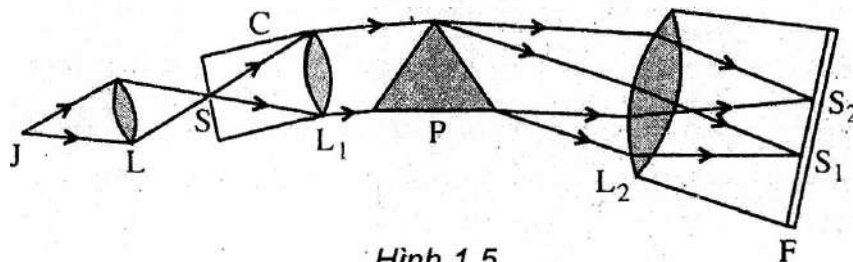
3. Máy quang phổ lăng kính

Một trong những ứng dụng quan trọng của hiện tượng tán sắc ánh sáng trong các lăng kính là để phân tích ánh sáng trong các máy quang phổ.

Máy quang phổ là dụng cụ dùng để phân tích chùm sáng có nhiều thành phần thành những thành phần đơn sắc khác nhau. Nói khác đi, nó dùng để nhận biết các thành phần cấu tạo của một chùm sáng phức tạp do một nguồn sáng phát ra.

Máy quang phổ có 3 bộ phận chính :

- Ống chuẩn trực là bộ phận tạo ra chùm tia sáng song song. Nó có một khe hẹp S nằm ở tiêu diện của một thấu kính hội tụ L_1 (Hình 1.5). Chùm ánh sáng phát ra từ nguồn J mà ta cần nghiên cứu được rọi vào khe S. Chùm tia sáng ló ra khỏi thấu kính L_1 là một chùm song song.
- Lăng kính P là bộ phận có tác dụng làm tán sắc chùm tia song song từ L_1 chiếu tới thành nhiều chùm tia đơn sắc song song.
- Buồng ảnh gồm một thấu kính hội tụ L_2 đặt chắn chùm tia sáng đã bị tán sắc sau khi qua lăng kính P.



Hình 1.5

Chùm tia sáng ló ra khỏi lăng kính gồm nhiều chùm tia sáng đơn sắc song song lệch theo các phương khác nhau. Mỗi chùm tia sáng đơn sắc song song

cho trên tiêu diện của thấu kính L_2 một vạch màu. Mỗi vạch màu là một ảnh đơn sắc của khe S.

Tại tiêu diện của thấu kính L_2 có đặt một tấm kính ảnh F để chụp ảnh quang phổ (hoặc một tấm kính mờ để quan sát quang phổ).

Nếu nguồn sáng J phát ra bao nhiêu ánh sáng đơn sắc thì trên tấm kính ảnh F ta thu được bấy nhiêu vạch màu $S_1, S_2, S_3, \dots$ trên một nền tối. Mỗi vạch màu ứng với một thành phần ánh sáng đơn sắc do nguồn J phát ra.

Tập hợp các vạch màu đó tạo thành quang phổ của nguồn J.



BÀI TẬP

- 1.1. Giải thích sự tạo thành cầu vồng và tính bán kính góc của cầu vồng.
- 1.2. Một tia sáng trắng hẹp đập vào một lăng kính thủy tinh tam giác đều, sao cho góc lệch của tia vàng là cực tiểu. Tính góc tạo bởi tia đỏ và tia tím trong chùm tia ló. Cho chiết suất của lăng kính đối với các tia đỏ, vàng, tím lần lượt là : $n_d = 1,50$; $n_v = 1,51$; $n_t = 1,52$.



BÀI ĐỌC THÊM

LÍ THUYẾT TÁN SẮC

Hiện tượng tán sắc không thể giải thích theo quan điểm vĩ mô. Thực vậy, giữa chiết suất n của môi trường và hằng số điện môi ϵ của nó có hệ thức :

$$n \approx \sqrt{\epsilon \mu} \quad \text{với } \mu \approx 1$$

Đối với các sóng vô tuyến thì hệ thức trên khá đúng. Tuy nhiên, đối với ánh sáng, ta thấy có những sai lệch sau đây :

- Nếu coi hằng số điện môi của một môi trường là không đổi thì chiết suất của môi trường đó cũng không đổi và do đó không giải thích được hiện tượng tán sắc.
- Nếu dùng các trị số của ϵ mà ta đã đo được trong các thí nghiệm tĩnh điện để thay vào công thức trên thì ta sẽ thu được những trị số của chiết suất khác xa với thực nghiệm.

Ví dụ : Đối với nước $\epsilon = 81$ và $\mu \approx 1$, vậy đáng lẽ $n \approx \sqrt{81} = 9$ nhưng trên thực tế $n = 1,33$.

Vấn đề là không phải công thức trên sai mà là có sự phụ thuộc của hằng số điện môi vào tần số ánh sáng. Đối với ánh sáng, một loại sóng điện từ có tần số lớn, ta không thể dùng các trị số của hằng số điện môi ϵ bằng phương pháp tĩnh điện được, mà chỉ có thể tính hằng số điện môi bằng hệ thức $n = \sqrt{\epsilon\mu}$ hoặc dựa vào độ phân cực điện của môi trường.

Giữa độ cảm ứng điện D và độ phân cực điện P của môi trường có hệ thức :

$$D = \epsilon E = E + 4\pi P$$

Độ phân cực điện P là tổng các vector phân cực của các nguyên tử trong một đơn vị thể tích :

$$P = Np$$

N là số nguyên tử bị phân cực trong một đơn vị thể tích. Giả sử trong mỗi nguyên tử có một electron tham gia vào hiện tượng tán sắc và dưới tác dụng của điện trường E trong sóng ánh sáng nó bị lệch khỏi vị trí cân bằng một khoảng r . Như vậy, nguyên tử sẽ trở thành một lưỡng cực có vector phân cực là :

$$p = er$$

Do đó :

$$P = Ner$$

r là độ lệch tức thời của electron. Ta có thể hiểu đó là độ lệch của tâm điện của đám mây quang electron so với tâm của ion còn lại.

Để tìm r , ta phải viết phương trình dao động của một quang electron dưới tác dụng của điện trường. Electron bị ba lực tác dụng là :

- Lực điện trong ánh sáng tới : $eE = eE_0 \sin \omega t$.
- Lực giả đàn hồi kéo về vị trí cân bằng. Lực này tỉ lệ với độ lệch : $-br$. Lực này có nguồn gốc là lực Cu-lông, nhưng nó là một tổng hợp rất phức tạp của rất nhiều lực Cu-lông do các hạt nhân và các electron khác tác dụng lên electron ta xét.
- Lực tiêu hao $-gr'$ tỉ lệ với vận tốc của electron. Lực này tương tự lực ma sát trong cơ học và đặc trưng cho quá trình tiêu hao năng lượng ánh sáng thành năng lượng nhiệt. Lực tiêu hao này là nguồn gốc của hiện tượng hấp thụ ánh sáng.

Phương trình dao động của electron sẽ là :

$$mr'' = -br - gr' + eE_0 \sin \omega t$$

Với m là khối lượng của electron và e là độ lớn điện tích của nó.

Để đơn giản, trước hết ta hãy giả thiết là môi trường không hấp thụ ánh sáng : $g = 0$. Khi đó ta có :

$$mr'' = -br + eE_0 \sin \omega t$$

Phương trình trên là một phương trình dao động cưỡng bức không có ma sát mà ta đã gặp trong cơ học.

Nghiệm của nó có dạng : $r = A \sin \omega t$

Với :
$$A = \frac{eE_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)}$$

Và :
$$\omega_0 = \sqrt{\frac{b}{m}}$$

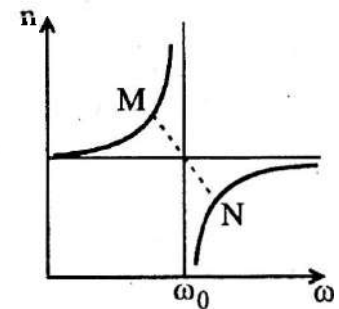
(ω_0 là tần số dao động riêng của quang êlectron)

Độ phân cực điện của môi trường sẽ là :

$$P = N e r = N \frac{e^2 E_0 \sin \omega t}{m (\omega_0^2 - \omega^2)}$$

Mặt khác ta có :
$$n^2 = \epsilon = 1 + 4\pi \frac{P}{E}$$

Do đó :
$$n^2 = 1 + \frac{4\pi N e^2}{m(\omega_0^2 - \omega^2)}$$



Hình 1.6

Đồ thị $n = F(\omega)$ có dạng như hình 1.6.

Tại $\omega_0 = \omega$ thì $n = \pm \infty$. Sớ dĩ có điều vô lí này vì ta đã bỏ qua hiện tượng hấp thụ ánh sáng ($g = 0$). Nếu xem $g \neq 0$ thì ta sẽ thu được đường cong biểu diễn bằng đường chấm chấm, phù hợp với thực tế.

Khi tần số ánh sáng tới khác tần số dao động riêng của quang êlectron rất nhiều : $|\omega_0 - \omega| \gg 0$ thì đường cong trên đồ thị 1.6 chứng tỏ chiết suất tăng khi tần số ánh sáng tới tăng (hay bước sóng giảm). Đó là các vùng tán sắc bình thường.

Ở vùng tần số lân cận giá trị ω_0 (vùng MN), chiết suất giảm khi tần số ánh sáng tới tăng. Đó là vùng tán sắc dị thường. Như vậy, hiện tượng tán sắc dị thường quan sát được khi tần số ánh sáng tới gần bằng tần số dao động riêng của quang êlectron trong môi trường. Ở vùng ánh sáng này sẽ xảy ra sự hấp thụ rất mạnh ánh sáng gọi là *hấp thụ cộng hưởng*.

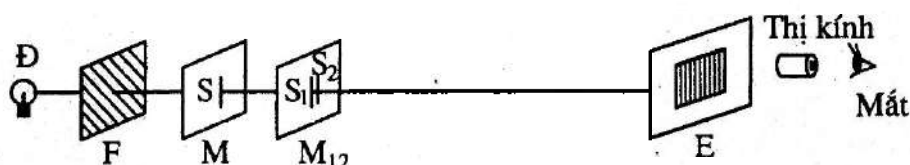
2

SỰ GIAO THOA ÁNH SÁNG

1. Các thí nghiệm về hiện tượng giao thoa của hai chùm tia sáng. Vân không định xứ

a) Khe Y-âng

- Thí nghiệm này được Y-âng (Thomas Young) thực hiện đầu tiên vào năm 1802.



Hình 2.1

Dùng một đèn Đ chiếu sáng một khe hẹp S, nằm trên một màn chắn M (Hình 2.1). Ánh sáng của đèn được lọc qua một kính lọc sắc F (kính, đỏ chẳng hạn). Chùm sáng đơn sắc sau khi lọt qua khe S được chiếu đồng thời vào hai khe S_1 và S_2 , nằm rất sát nhau, song song với nhau và với khe S. Hai khe này được khoét trên một màn chắn M_{12} , đặt song song và gần màn chắn M. Hình ảnh giao thoa được hứng trên màn ảnh E đặt cách màn M_{12} khoảng chừng 1 m ; khoảng cách giữa hai khe S_1 và S_2 vào cỡ vài phần mười milimét.

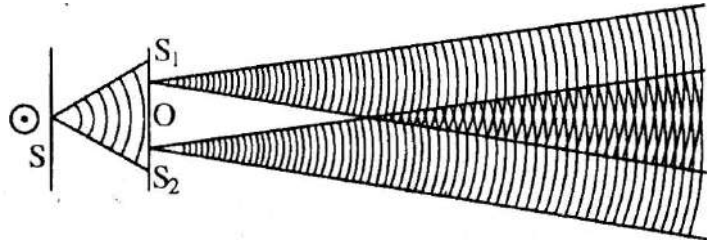
Thực ra, các vân giao thoa nằm rất xít nhau, nên muốn quan sát được chúng, ta không dùng màn ảnh mà phải dùng một thị kính, ngắm chừng tại vị trí của màn ảnh. Khi đó ta sẽ thấy có những vạch sáng (đỏ) và những vạch tối xen kẽ nhau một cách đều đặn.

Hiện tượng quan sát được gọi là hiện tượng giao thoa ánh sáng.

- Sự xuất hiện các vạch tối trong vùng hai chùm sáng gặp nhau buộc ta phải thừa nhận ánh sáng có tính chất sóng. Thực vậy, chỉ có hai sóng gặp nhau thì

mới có những chỗ chúng triệt tiêu lẫn nhau ; những chỗ này chính là những vạch tối. Ta giải thích chi tiết kết quả thí nghiệm Y-âng như sau :

Sóng ánh sáng đơn sắc từ ngọn đèn truyền đến khe S sẽ làm cho khe này trở thành một nguồn sáng thứ cấp. Sóng ánh sáng từ khe S truyền đến hai khe S_1 và S_2 lại làm cho hai khe này trở thành hai nguồn sáng thứ cấp khác.

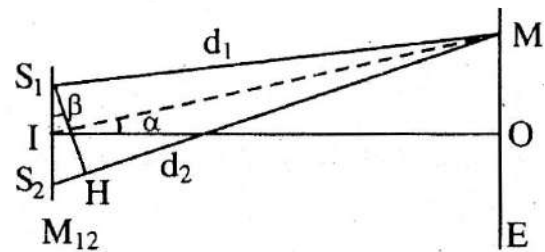


Hình 2.2

Hai nguồn này là hai nguồn kết hợp (hơn nữa, nếu chúng cách đều nguồn S thì chúng là hai nguồn đồng bộ). Do đó, khi sóng từ hai nguồn S_1 và S_2 gặp nhau, chúng sẽ giao thoa với nhau⁽¹⁾. Những vạch sáng là những chỗ hai sóng tăng cường lẫn nhau. Ta gọi chúng là những *vân sáng*. Những vạch tối là những chỗ hai sóng triệt tiêu lẫn nhau. Ta gọi chúng là những *vân tối*.

- Vị trí của các vân sáng và vân tối trên màn ảnh E được xác định như sau (Hình 2.3) :

Gọi IO là đường thẳng vuông góc với màn E và màn M_{12} tại trung điểm I của S_1S_2 .



Hình 2.3

Giả sử tại điểm M trên màn E có một vân sáng. Vị trí của điểm M được xác định bằng đoạn thẳng $x = OM$.

Đặt $S_1S_2 = a$; $IO = D$; $S_1M = d_1$; $S_2M = d_2$; góc $OIM = \alpha$; góc $S_2S_1H = \beta$; H là chân của đường thẳng góc hạ từ S_1 xuống S_2M .

Ta có những phép tính gần đúng sau :

$$\alpha \approx \beta ; d_2 - d_1 \approx S_2H = \Delta$$

Ta lại có : $\tan \alpha = \frac{x}{D}$ và $\sin \beta = \frac{\Delta}{a}$ với $\tan \alpha \approx \sin \beta$, ta được : $x = \frac{\Delta \cdot D}{a}$.

(1) Lí thuyết về sự giao thoa của các sóng cơ vẫn áp dụng được cho sóng ánh sáng. Hai nguồn kết hợp là hai nguồn có cùng tần số dao động (đối với ánh sáng thì đó là hai nguồn phát ra hai sóng ánh sáng đơn sắc giống nhau) và có hiệu số pha dao động không thay đổi theo thời gian.

Ta đã biết : những điểm có hiệu khoảng cách đến hai nguồn đồng bộ bằng một số nguyên lần bước sóng là những điểm cực đại giao thoa :

$$d_2 - d_1 = \Delta = k\lambda \text{ với } k = 0 ; \pm 1, \pm 2 ; \pm 3 ; \dots$$

Cuối cùng, vị trí các vân sáng được xác định bởi công thức :

$$x_k = k \frac{\lambda D}{a} \quad (2.1)$$

k gọi là *bậc giao thoa* của vân sáng : $k = 0$ ứng với vân trung tâm ; $k = \pm 1$ ứng với vân bậc 1 ; $k = \pm 2$ ứng với vân bậc 2 ; ...

Tương tự, vị trí các vân tối ứng với :

$$d_2 - d_1 = (2k + 1) \frac{\lambda}{2} \text{ và } x = (2k + 1) \frac{\lambda D}{2a} \quad (2.2)$$

Đối với các vân tối, không có khái niệm bậc giao thoa.

Khoảng vân giao thoa i là khoảng cách giữa hai vân sáng (hoặc vân tối) liên tiếp. Ta có công thức tính khoảng vân :

$$i = x_{k+1} - x_k = \frac{\lambda D}{a} \quad (2.3)$$

Nếu đo được i , a và D thì sẽ tính được λ . Đó là cơ sở của phép đo bước sóng ánh sáng.

Vì đặt màn ảnh E ở bất kì vị trí nào trong vùng giao thoa ta cũng hứng được vân giao thoa, nên các vân giao thoa này được gọi là *vân không định xứ*.

- Trường hợp khe sáng S phát ra ánh sáng trắng

Ánh sáng trắng là một tập hợp của vô số ánh sáng đơn sắc, có màu biến thiên liên tục từ tím đến đỏ và có bước sóng biến thiên liên tục từ $0,38 \mu\text{m}$ đến $0,75 \mu\text{m}$.

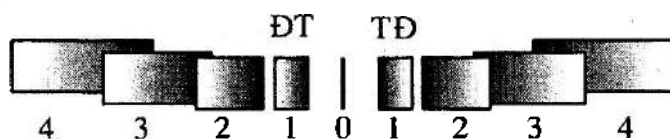
Mỗi ánh sáng đơn sắc trong chùm sáng trắng cho một hệ vân giao thoa có khoảng vân tỉ lệ với bước sóng của ánh sáng đó. Các hệ vân này nằm chồng chất trên màn ảnh E .

Tại điểm có $x = 0$, vân sáng trung tâm của tất cả các hệ vân trùng với nhau, cho ta một vân sáng trắng. Đó là *vân trắng trung tâm* (kí hiệu bằng số 0 trên hình 2.4).

Ở hai bên vân trắng trung tâm, các vân sáng của các hệ vân không trùng nhau nữa, vì khoảng vân của chúng khác nhau :

$$i_{\text{đỏ}} > i_{\text{da cam}} > i_{\text{vàng}} > i_{\text{lục}} > i_{\text{lam}} > i_{\text{chàm}} > i_{\text{tím}}$$

Như vậy, ở sát hai bên vân trắng trung tâm là hai khoảng tối. Tiếp đến là các vân sáng bậc 1 của các hệ vân, nằm sát nhau một cách liên tục, tạo thành một dải màu cầu vồng liên tục, từ tím đến đỏ ; tím ở trong, đỏ ở ngoài. Dải màu này gọi là *quang phổ bậc 1* (kí hiệu bằng số 1 trên hình 2.4).



Hình 2.4

Sau quang phổ bậc 1 là *quang phổ bậc 2*. Quang phổ bậc 2 rộng gấp đôi quang phổ bậc 1. Giữa đầu tím của quang phổ bậc 2 và đầu đỏ của quang phổ 1 có một khoảng tối hẹp. Đó là vì : $i_{\text{đỏ}} < 2i_{\text{tím}}$.

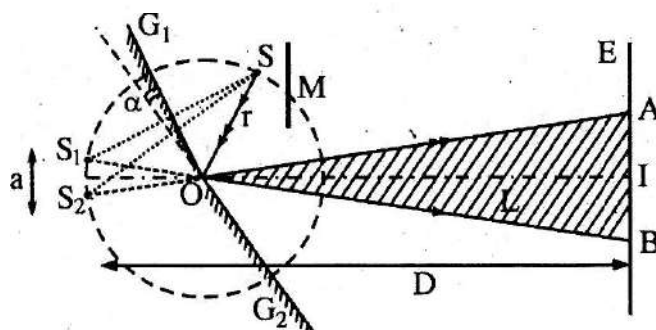
Sau quang phổ bậc 2 là *quang phổ bậc 3, bậc 4,...* Các quang phổ này rộng gấp 3, gấp 4,... quang phổ bậc 1. Đầu đỏ của quang phổ bậc 2 đè một chút lên đầu tím của quang phổ bậc 3. Đó là vì : $2i_{\text{đỏ}} > 3i_{\text{tím}}$.

Các quang phổ bậc càng cao càng đè lên nhau nhiều. Tại mỗi điểm ở xa vân trắng trung tâm thì có rất nhiều cực đại của các màu khác nhau nằm trùng lên nhau, nên sẽ có màu trắng nhờ nhờ gọi là *màu trắng bậc cao*.

b) *Gương Fre-nen (Fresnel)*

Hai gương phẳng G_1 và G_2 hợp với nhau một góc rất nhỏ α . Một khe sáng đơn sắc S song song với giao tuyến O của hai gương và cách O một khoảng r . Ảnh của S trong hai gương là S_1 và S_2 .

Hai chùm sáng phản xạ trên hai gương tựa như phát ra từ hai nguồn kết hợp S_1 và S_2 . Vùng có gạch chéo AOB trên hình 2.5 là vùng chung của hai chùm sáng, tại đó xảy ra hiện tượng giao thoa ánh sáng. Vân giao thoa được hứng trên màn ảnh E , đặt vuông góc với trung trực của S_1S_2 và cách O một khoảng $OI = L$.



Hình 2.5

Khoảng vân cũng được tính bằng công thức (2.3), với $a = 2\alpha r$ và $D = r + L$.

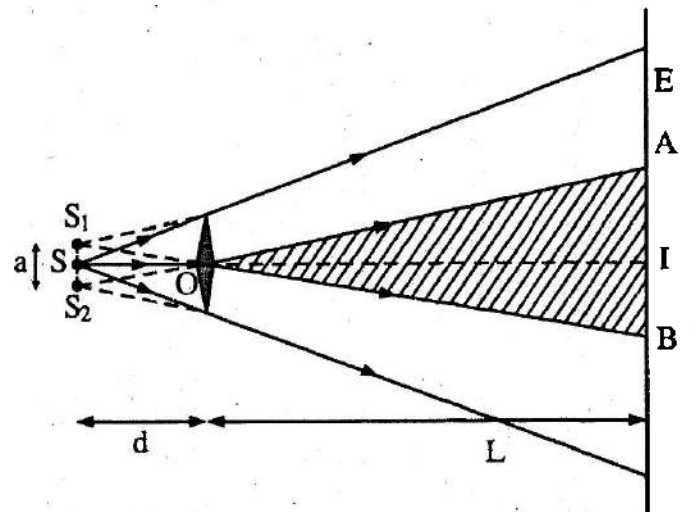
Một màn chắn M ngăn không cho ánh sáng chiếu trực tiếp từ nguồn sáng S đến màn ảnh.

Chú ý rằng các gương trong thí nghiệm này chỉ có một mặt phản xạ là mặt trên, còn mặt dưới phải bôi đen để hoàn toàn không phản xạ ánh sáng.

c) Lăng kính Fre-nen

Hai lăng kính có góc chiết quang A nhỏ, có chiết suất n, đáy được dán với nhau, tạo thành một lăng kính Fre-nen (Hình 2.6).

Một khe sáng đơn sắc, hẹp, được đặt trong mặt phẳng đáy chung của hai lăng kính song song với các cạnh và cách hai lăng kính một khoảng $SO = d$. Qua hai lăng kính, ta được hai ảnh ảo S_1 và S_2 của S.



Hình 2.6

Hai chùm sáng ló ra khỏi hai lăng kính tựa như được phát ra từ hai nguồn sáng kết hợp S_1 và S_2 . Trong phần chung (phần AOB được gạch chéo trên hình 2.6) của hai chùm tia sẽ có hiện tượng giao thoa ánh sáng. Vân giao thoa được hứng trên một màn ảnh E, đặt vuông góc với SO và cách O một khoảng $OI = L$.

Khoảng vân giao thoa vẫn được tính theo công thức (2.3).

Trong đó : $D = d + L$

Gọi δ là góc lệch của tia sáng khi đi qua lăng kính : $\delta = A(n - 1)$;

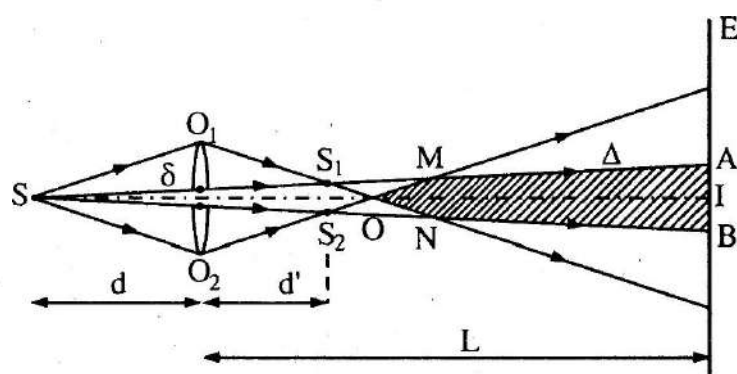
$$\widehat{S_1OS_2} = \widehat{AOB} = 2\delta = 2A(n - 1)$$

$$a = 2\delta d = 2dA(n - 1)$$

d). Bán thấu kính Bié (Billet).

Cắt một thấu kính hội tụ, tiêu cự f ra làm đôi theo một mặt phẳng chứa trục chính Δ , rồi đưa hai nửa ra xa nhau một khoảng δ rất nhỏ. Như vậy, quang tâm của hai nửa sẽ nằm đối xứng với nhau ở hai bên trục chính cũ Δ và cách nhau một khoảng $O_1O_2 = \delta$.

Đặt một khe sáng S , đơn sắc, hẹp, nằm trong mặt phẳng trung trục của O_1O_2 và vuông góc với mặt phẳng tạo bởi Δ và O_1O_2 (Hình 2.7). Khoảng cách từ khe sáng S đến O_1O_2 là $d > f$.



Hình 2.7

Qua hai nửa thấu kính, ta được hai ảnh thật S_1 và S_2 , nằm cách O_1O_2 khoảng d' , tính được bằng công thức thấu kính. S_1 và S_2 trở thành hai nguồn sáng phát ra hai chùm sáng kết hợp. Trong vùng chung của hai chùm sáng này (biểu diễn bằng phần có gạch chéo AMONB trên hình 2.7) sẽ có hiện tượng giao thoa ánh sáng.

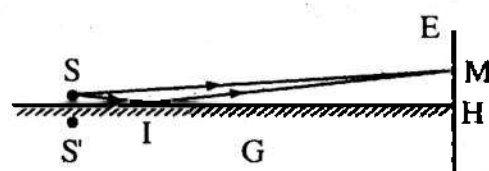
Dùng một màn ảnh E , vuông góc với trục Δ , để hứng vân giao thoa.

Khoảng vân giao thoa vẫn được tính bằng công thức (2.3) với $D = L - d'$ và $a = S_1S_2$. Ta tính a theo công thức sau : $a = \delta \frac{d + d'}{d} = \delta \left(1 + \frac{d'}{d} \right)$.

Nếu khe S nằm trong khoảng tiêu cự của các thấu kính O_1, O_2 thì S_1 và S_2 sẽ là các ảnh ảo. Hiện tượng giao thoa sẽ không xảy ra vì hai chùm tia ló không có phần chung.

e) *Gương Lôi (Lloyd)*

Một khe sáng hẹp, đơn sắc S , đặt song song với một gương phẳng G và rất gần mặt gương (Hình 2.8). Đặt một màn ảnh E vuông góc với mặt gương và song song với khe sáng. Trên màn ảnh sẽ xuất hiện những vân giao thoa nằm song song với giao tuyến H giữa màn ảnh và mặt gương.



Hình 2.8

Đó là kết quả của sự giao thoa giữa sóng ánh sáng đi trực tiếp từ nguồn S đến màn ảnh và sóng phản xạ trên gương truyền đến. Sóng phản xạ tựa như được phát ra từ nguồn S' , ảnh của S trong gương.

Khoảng vân giao thoa vẫn được tính bằng công thức (2.3), với D là khoảng cách từ S đến màn ảnh và $a = SS'$.

Điều đặc biệt là tại H xuất hiện một vân tối, mặc dù $SH = S'H$. Điều đó có nghĩa là, tại H , sóng phản xạ ngược pha với sóng tới. Trong việc tính toán

người ta thể hiện điều này bằng việc cộng hay trừ $\frac{\lambda}{2}$ vào đường đi của tia phản xạ và gọi là *sự mất nửa sóng*. Hiện tượng này tương tự như sự phản xạ của sóng cơ trên một sợi dây tại một đầu cố định và có tính khái quát.

Khi phản xạ trên một môi trường chiết quang mạnh hơn thì tia phản xạ bị mất nửa sóng. Còn nếu phản xạ trên một môi trường chiết quang yếu hơn thì tia phản xạ không bị mất nửa sóng.

2. Mối liên hệ giữa chiết suất của môi trường và bước sóng ánh sáng

a) **Bước sóng và màu sắc ánh sáng** : Đo bước sóng của những ánh sáng đơn sắc khác nhau bằng phương pháp giao thoa, người ta thấy mỗi ánh sáng đơn sắc có một bước sóng hoàn toàn xác định. Chẳng hạn :

- Ánh sáng màu đỏ ở đầu dải liên tục có bước sóng $0,760\mu\text{m}$.
- Ánh sáng màu tím ở cuối của dải liên tục có bước sóng $0,380\mu\text{m}$.
- Ánh sáng vàng do đèn hơi natri phát ra có bước sóng $0,589\mu\text{m}$.

Như vậy, ánh sáng đơn sắc là ánh sáng có một bước sóng xác định. Màu ứng với ánh sáng đó gọi là màu đơn sắc hay màu quang phổ.

Thực ra, mắt chỉ có khả năng phân biệt được các vùng màu khác nhau. Trong miền ánh sáng nhìn thấy (gọi là quang phổ khả kiến), người ta phân định khoảng bước sóng của 7 màu chính trên quang phổ Mặt Trời như trên bảng 2.1.

Bảng 2.1

Màu ánh sáng	Bước sóng λ (μm) (trong chân không)
Đỏ	$0,640 \div 0,760$
Cam	$0,590 \div 0,650$
Vàng	$0,570 \div 0,600$
Lục	$0,500 \div 0,575$
Lam	$0,450 \div 0,510$
Chàm	$0,430 \div 0,460$
Tím	$0,380 \div 0,440$

Ngoài các màu đơn sắc, còn có các màu không đơn sắc, là hỗn hợp của nhiều màu đơn sắc với những tỉ lệ khác nhau.

b) Chiết suất của môi trường và bước sóng ánh sáng

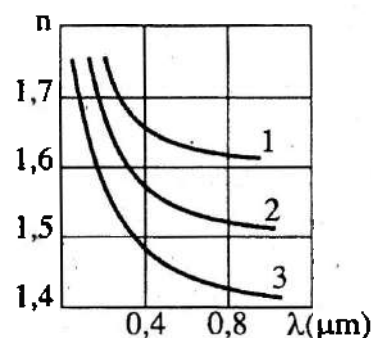
Trong hiện tượng tán sắc, ta đã thấy chiết suất của cùng một môi trường trong suốt đối với những ánh sáng đơn sắc khác nhau thì khác nhau. Mặt khác, ta lại thấy mỗi ánh sáng đơn sắc có một bước sóng nhất định. Như vậy, *chiết suất của một môi trường trong suốt nhất định đối với các ánh sáng đơn sắc khác nhau, phụ thuộc vào bước sóng của ánh sáng đó*⁽¹⁾.

Khi đo chiết suất của các môi trường trong suốt khác nhau (nước, thủy tinh, thạch anh,...) đối với các ánh sáng đơn sắc khác nhau người ta thấy : chiết suất của một môi trường trong suốt nhất định đối với các ánh sáng có bước sóng dài thì nhỏ hơn chiết suất của môi trường đó đối với ánh sáng có bước sóng ngắn. Chẳng hạn, đối với nước, ta thu được bảng 2.2.

Bảng 2.2

Màu	Bước sóng $\lambda(\mu\text{m})$ (trong chân không)	Chiết suất
Đỏ	0,6563	1,3311
Vàng	0,5893	1,3330
Lam	0,4861	1,3371
Tím	0,4047	1,3428

- c) Bằng thực nghiệm, người ta đã vẽ được những đường cong biểu diễn sự phụ thuộc của chiết suất của nhiều môi trường trong suốt khác nhau (nước (3) ; thủy tinh (2) ; thạch anh (1) ;...) vào bước sóng ánh sáng. Chúng đều có dạng hypebol bậc hai (Hình 2.9). Cô-si đã tìm được biểu thức của chiết suất n phụ thuộc vào bước sóng λ có dạng :



Hình 2.9

$$n = A + \frac{B}{\lambda^2} \quad (2.4)$$

Với A và B là các hằng số phụ thuộc vào bản chất của môi trường.

- (1) Khi sóng ánh sáng truyền từ môi trường này sang môi trường khác thì tần số của dao động không thay đổi, nhưng vận tốc sóng thay đổi ; do đó, bước sóng sẽ thay đổi. Gọi λ_0 và λ là bước sóng của một sóng ánh sáng trong chân không và trong môi trường có chiết suất n (đối với ánh sáng đó), ta có hệ thức $\lambda_0 = n\lambda$.

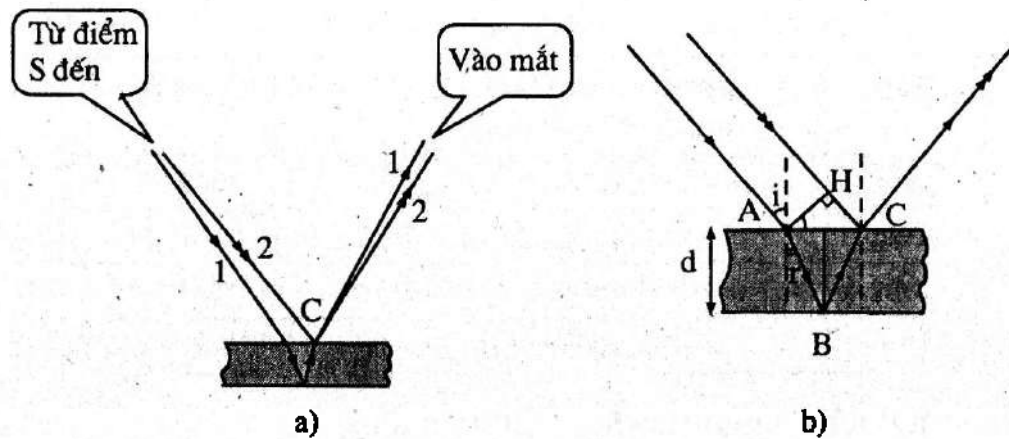
3. Sự giao thoa ánh sáng trên các bản mỏng. Vân định xứ

Nhìn vào bề mặt của các văng dầu, mỡ, bong bóng xà phòng, ta thường thấy có những quang màu rực rỡ. Đó là những vân giao thoa trên các bản mỏng. Các vân này chỉ xuất hiện trên mặt các bản mỏng. Đó là *vân định xứ*.

a) Nêm

Ta hãy giải thích sự giao thoa ánh sáng trên các văng dầu.

Một vùng nhỏ của văng dầu coi như một lớp mỏng có chiết suất n và có hai mặt phẳng làm với nhau một góc α rất nhỏ, tạo thành một *cái nêm* bằng dầu. Nguồn sáng là nguồn sáng trắng rất rộng và nằm xa điểm mà ta quan sát trên văng dầu. Mắt người quan sát cũng ở xa điểm đó (Hình 2.10a).



Hình 2.10

Một tia sáng đơn sắc (λ) phát ra từ một điểm sáng S ở nguồn, chiếu đến mặt nêm (tia số 1). Tia này khúc xạ, truyền vào trong nêm, phản xạ ở mặt dưới của nêm, trở lại mặt trên tại điểm C, rồi đi ra ngoài không khí. Góc ló bằng góc tới.

Một tia sáng đơn sắc thứ hai (λ) phát ra từ S (tia số 2) chiếu đến mặt nêm tại C, gặp tia số 1 tại đó và giao thoa với nhau (vì đó là hai tia kết hợp). Tín hiệu về trạng thái giao thoa sẽ được truyền đến mắt theo một chùm tia rất hẹp 1, 2. Thực tế, chỉ có một cặp tia 1, 2 đi từ nguồn, phản xạ trên mặt nêm tại C rồi đi vào mắt theo phương nói trên.

Một vùng rất nhỏ của văng dầu quanh điểm C coi như một bản mặt song song có bề dày d . Các tia tới 1 và 2 coi như song song với nhau, với góc tới là i . Hai tia đi vào mắt coi như trùng nhau (Hình 2.10b).

Để xét sự giao thoa ánh sáng tại C, ta hãy đưa ra lí thuyết tổng quát sau :

Giả sử có hai nguồn đồng bộ S_1, S_2 phát sóng ánh sáng trong một môi trường trong suốt, chiết suất n . Vận tốc chuyển sóng là v . d_1, d_2 là đường truyền của sóng từ hai nguồn đến điểm giao thoa. Hiệu pha của hai sóng tại điểm giao thoa sẽ là:

$$\begin{aligned}\Delta\varphi &= \omega\left(t - \frac{d_1}{v}\right) - \omega\left(t - \frac{d_2}{v}\right) = \frac{\omega}{v}(d_2 - d_1) = \frac{2\pi}{v.T}(d_2 - d_1) \\ &= \frac{2\pi n}{cT}(d_2 - d_1) = \frac{2\pi}{\lambda}n(d_2 - d_1) ;\end{aligned}$$

λ là bước sóng ánh sáng trong chân không.

Nếu $\Delta\varphi = 2k\pi$ thì ta có cực đại giao thoa. Điều này cho ta :

$n(d_2 - d_1) = k\lambda$. Các tích nd_2 và nd_1 là các quang trình ứng với các đường truyền d_2, d_1 .

$\Delta = n(d_2 - d_1)$ là hiệu quang trình.

Vậy : Cực đại giao thoa sẽ xuất hiện tại các điểm mà tại đó hiệu quang trình của hai tia sáng bằng một số nguyên lần bước sóng ánh sáng trong chân không.

Hiệu quang trình giữa hai tia sáng tại điểm C sẽ là :

$$\Delta = (AB + BC).n - HC + \frac{\lambda}{2}$$

với $AB = BC = \frac{d}{\cos r}$; $HC = 2d.\tan r.\sin i$ và $\sin i = n \sin r$.

Tia số 2 bị mất nửa sóng vì phản xạ từ không khí trên dầu.

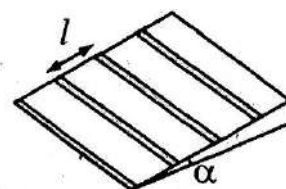
$$\text{Kết quả, ta được : } \Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} + \frac{\lambda}{2} = 2dn \cos r + \frac{\lambda}{2} \quad (2.5)$$

Nếu $\Delta = k\lambda$ ($k = 1, 2, 3, \dots$) thì ta thấy có cực đại của ánh sáng có bước sóng λ .

Nếu $\Delta = (2k + 1)\frac{\lambda}{2}$ hay $2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} = k\lambda$ ($k = 0, 1, 2, 3, \dots$) thì ta có cực tiểu giao thoa của ánh sáng đó. Khi thay đổi điểm quan sát C thì d và i thay đổi rất chậm, do đó, vùng cực đại giao thoa chiếm một khoảng tương đối rộng trên mặt văng dầu.

Đặc biệt, nếu nêm có dạng hai mặt phẳng giao nhau (Hình 2.11), thì cực đại giao thoa có dạng những dải sáng màu, nằm song song với cạnh nêm.

Cực tiểu giao thoa có dạng những vạch tối nằm song song với cạnh nê-m và cách nhau đều đặn. Ngay tại cạnh nê-m là một vân tối.



Hình 2.11

Nếu quan sát theo phương vuông góc với mặt nê-m, thì khoảng cách giữa hai vân tối liên tiếp là :

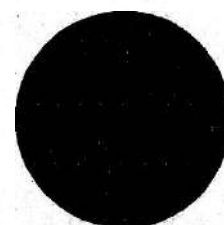
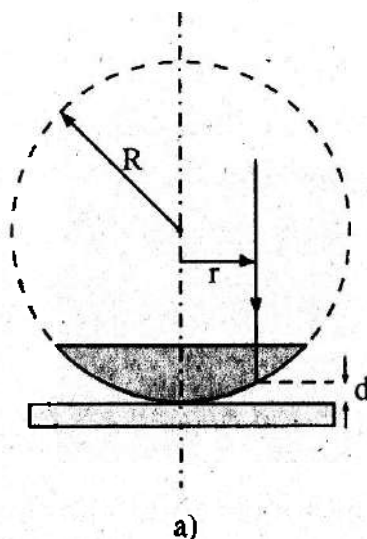
$$l = \frac{\lambda}{2n\alpha} \quad (2.6)$$

Biết λ và n ; đo được l , ta sẽ tính được α . Đây là một phương pháp thường dùng để đo các góc nhỏ giữa hai mặt của các lớp mỏng.

Nếu nguồn phát ra ánh sáng trắng thì trên mặt nê-m sẽ xuất hiện những dải màu sắc sỡ, tương đối rộng. Các bản mỏng là dụng cụ rất tiện lợi cho việc nghiên cứu màu sắc ánh sáng.

b) Vân tròn Niu-ton

Thiết bị tạo vân tròn Niu-ton gồm một thấu kính hội tụ, một mặt phẳng, một mặt cầu, đặt trên một tấm thủy tinh phẳng (Hình 2.12). Mặt cầu của thấu kính tiếp xúc với tấm thủy tinh. Lớp không khí nằm xen giữa thấu kính và tấm thủy tinh tạo ra một bản mỏng không khí.



Hình 2.12

Xét trường hợp một chùm sáng song song, đơn sắc, chiếu vuông góc vào mặt phẳng của thấu kính.

Hiệu quang trình giữa tia sáng phản xạ ở mặt trên và tia sáng phản xạ ở mặt dưới của lớp không khí, tại điểm có bề dày d là (Hình 2.12a) :

$$\Delta = 2d + \frac{\lambda}{2}$$

Tia phản xạ ở mặt dưới bị mất nửa sóng.

Tất cả các điểm nằm trên mặt cầu ứng với cùng một bề dày d sẽ tạo thành một vân giao thoa có dạng tròn.

Gọi r là bán kính của vân, R là bán kính của mặt cầu, ta có :

$$r^2 = d(2R - d) \approx 2Rd \text{ với } d \ll R.$$

Ứng với vân sáng, ta có :

$$\Delta = k\lambda \Rightarrow d = k\frac{\lambda}{2} - \frac{\lambda}{4} \Rightarrow r_{\text{sáng}} = \sqrt{2Rd} = \sqrt{R\lambda\left(k - \frac{1}{2}\right)} \quad (2.7)$$

với $k = 1, 2, 3, 4, \dots$

Ứng với vân tối, ta có :

$$\Delta = (2k + 1)\frac{\lambda}{2} \Rightarrow d = k\frac{\lambda}{2} \Rightarrow r_{\text{tối}} = \sqrt{kR\lambda} \quad (2.8)$$

với $k = 0, 1, 2, 3, \dots$

Tại tâm của hệ vân ($r = 0$), ta có một vân tối. Điều này ứng với sự mất nửa sóng của tia phản xạ ở mặt dưới khi $d = 0$. Hình dạng của hệ vân được vẽ trên hình 2.12b.

Biết λ , đo được r , ta sẽ tính được R .

4. Một vài ứng dụng của hiện tượng giao thoa ánh sáng

a) Kiểm tra phẩm chất các bề mặt quang học

Ví dụ : ta muốn kiểm tra bề mặt một gương phẳng.

Muốn thế, ta dùng một "gương thử" có phẩm chất tốt. Đó là một tấm thủy tinh phẳng, hai mặt song song với nhau, được chế tạo bằng một phương pháp đặc biệt, sao cho hai mặt của tấm thủy tinh đó sai khác hai mặt phẳng lý tưởng không quá một phần trăm của bước sóng ánh sáng.

Đặt "gương thử" lên trên gương cần thử, sao cho giữa hai gương đó có một nêm không khí mỏng. Chiếu một chùm sáng đơn sắc vào mặt nêm, ta sẽ thấy xuất hiện những vân giao thoa cùng độ dày.

Nếu cả hai mặt đều là phẳng thì các vân giao thoa sẽ có dạng những đường thẳng song song với cạnh nêm. Chỗ nào không thật phẳng thì chỗ đó sẽ có các vân giao thoa cong queo.

Bằng cách lần lượt ấn bờ này, rồi bờ kia của bản, ta có thể thay đổi vị trí của cạnh nêo và do đó kiểm tra phẩm chất của bề mặt gương theo đủ mọi phương.

Thiết bị kiểm tra được bố trí như hình 2.13, trong đó :

S là nguồn sáng đơn sắc ;

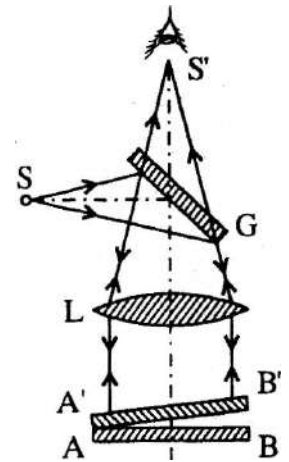
G là gương bán mạ bạc ;

L là thấu kính hội tụ, tiêu điểm nằm đúng vị trí ảnh S' của S qua gương G ;

AB là gương cân thử ;

A'B' là gương thử.

Chùm tia sáng đơn sắc phát ra từ S, bị phản xạ trên gương G sẽ đi qua thấu kính L và trở thành chùm tia song song. Chùm tia song song phản xạ trên mặt trên và mặt dưới của nêo không khí $ABB'A'$. Các chùm phản xạ trở lại thấu kính, rồi hội tụ tại S' . Mắt người quan sát đặt tại S' .



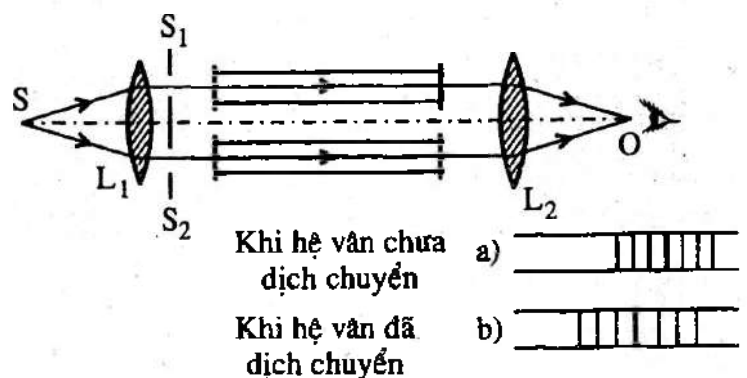
Hình 2.13

b) Máy giao thoa Rây-lây (Rayleigh)

Máy giao thoa Rayleigh dùng để đo chiết suất của các chất khí (n rất gần 1).

Sơ đồ cấu tạo của máy được biểu diễn trên hình 2.14 :

- Một nguồn sáng đơn sắc S đặt tại tiêu diện của một thấu kính hội tụ L_1 . Nó cho ta một chùm tia song song.
- Chùm tia song song đi qua hai khe hẹp S_1 và S_2 , song song với nhau, rồi đi qua một thấu kính hội tụ L_2 . Hai tia đi qua hai khe gặp nhau ở tiêu diện của L_2 , tại đó chúng giao thoa với nhau. Hệ vân giao thoa có dạng những vạch sáng cách đều nhau.



Hình 2.14

Vân trung tâm có bậc $k = 0$, nằm chính giữa trường sáng.

- Trên đường đi của hai tia, người ta đặt hai bình thủy tinh đáy phẳng, trong suốt, giống hệt nhau. Hình ảnh giao thoa không bị ảnh hưởng gì.

Muốn đo chiết suất của một chất khí, ta làm như sau :

- Rút hết không khí ở một ống và bơm vào đó chất khí có chiết suất n mà ta muốn đo.
- Quang trình của tia sáng đi qua ống chứa khí đã bị thay đổi. Gọi d là chiều dài của ống ; quang trình đó đã tăng lên một lượng là :

$$d(n - 1) \quad (\text{Chiết suất của không khí coi như bằng 1})$$

Hiệu quang trình tại điểm giữa của trường sáng (ở vị trí của vân trung tâm trước đây) không phải bằng 0 nữa mà bằng $d(n - 1)$:

$$\Delta = d(n - 1)$$

Giả sử hiệu quang trình này bằng một số nguyên lần bước sóng :

$$\Delta = d(n - 1) = k\lambda$$

Khi đó, tại giữa trường sáng sẽ có vân bậc k . Như vậy, hệ thống vân đã bị dịch chuyển k vân về phía bình chứa khí và vân bậc k đến chiếm vị trí vân trung tâm trước đây.

Biết λ và d ; nếu đếm được số vân dịch chuyển k , ta sẽ xác định được n :

$$n = k \frac{\lambda}{d} + 1$$



BÀI TẬP

- 2.1. Khoảng vân trong thí nghiệm Y-âng sẽ thay đổi như thế nào nếu thay ánh sáng xanh ($\lambda_x = 0,5\mu\text{m}$) bằng ánh sáng đỏ ($\lambda_d = 0,65\mu\text{m}$) ?
- 2.2. Trong thí nghiệm Y-âng, khoảng cách giữa hai khe là 1 mm, khoảng cách từ hai khe đến màn ảnh là 3 m, khoảng vân đo được là 1,8 mm. Hãy tính bước sóng của ánh sáng.
- 2.3. Chiếu khe sáng S trong thí nghiệm Y-âng bằng ánh sáng trắng. Hãy tính xem tại chỗ có vân sáng bậc $k = 10$ của ánh sáng xanh ($\lambda_x = 0,5\mu\text{m}$) có những cực đại của những ánh sáng đơn sắc nào nằm trùng ở đó.
- 2.4. Hãy giải thích sự xuất hiện những quang màu trên các váng dầu, mỡ trên mặt nước.

Tại sao nhìn vào cùng một chỗ trên văng theo những phương khác nhau sẽ thấy những màu sắc khác nhau ?

- 2.5. Ép hai tấm thủy tinh phẳng vào nhau : chiếu một chùm ánh sáng xanh ($\lambda_1 = 0,5 \mu\text{m}$) vuông góc với tấm thủy tinh và quan sát theo phương vuông góc, ta thấy một hệ vân trên mặt bàn có khoảng vân là $0,55 \text{ cm}$. Hãy tính góc của nêm không khí nằm giữa hai tấm thủy tinh.

Thay ánh sáng xanh bằng ánh sáng đỏ ($\lambda_d = 0,75 \mu\text{m}$) thì khoảng vân sẽ bằng bao nhiêu ?

- 2.6. Hai tấm thủy tinh phẳng nhỏ hình vuông có các cạnh là $2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ được đặt chồng khít lên nhau. Chiếu một chùm sáng đỏ vuông góc với mặt thủy tinh. Quan sát theo phương vuông góc với mặt thủy tinh.

Ép nhẹ hai tấm thủy tinh vào nhau, ta thấy xuất hiện một hệ thống vân giao thoa. ép mạnh hơn, hệ thống sẽ nở ra. Hãy giải thích hiện tượng này.

Ép cho đến lúc hệ thống vân vừa vặn biến mất, trên mặt bàn có một quảng đỏ. Tính góc giữa hai tấm thủy tinh lúc đó. Cho $\lambda_d = 0,65 \mu\text{m}$ và hai tấm thủy tinh không bị cong khi ép.

- 2.7. Trong thí nghiệm Y-âng, ta đặt sau một khe một tấm thủy tinh hai mặt phẳng song song với nhau. Đặt sao cho các tia sáng gần như vuông góc với bản thủy tinh. Ta thấy vân sáng bậc $k = 50$ đến chiếm vị trí cũ của vân trung tâm. Hãy xác định bề dày của bản thủy tinh. Cho biết bước sóng của ánh sáng $\lambda = 0,60 \mu\text{m}$; chiết suất của thủy tinh $n = 1,5$.

- 2.8. Trong một máy giao thoa Rây-lây, khi thay không khí trong một ống bằng một chất khí khác có chiết suất n . Người ta thấy hệ thống vân dịch chuyển đi k vân về phía bình chứa khí ($k = 180$). Hãy tính chiết suất của chất khí. Cho biết chiều dài của ống $d = 30 \text{ cm}$; bước sóng của ánh sáng $\lambda = 0,60 \mu\text{m}$.

- 2.9. Một thiết bị vân tròn Niu-ton gồm một thấu kính phẳng lồi có đường kính mặt cong là 8 m và một tấm thủy tinh phẳng. Chùm tia sáng đơn sắc chiếu vuông góc với mặt thấu kính. Đường kính của vân tối thứ 4 là 4 mm (coi vân tối ở tâm là vân tối thứ không). Tính bước sóng của ánh sáng.

- 2.10. Khoảng cách giữa vân tối thứ 4 và vân tối thứ 25 trong thiết bị vân tròn Niu-ton là 9 mm . Bán kính mặt cong của thấu kính là 15 m . Tính bước sóng ánh sáng, biết rằng ánh sáng phản xạ và các tia tới chiếu vuông góc với mặt thấu kính.

3

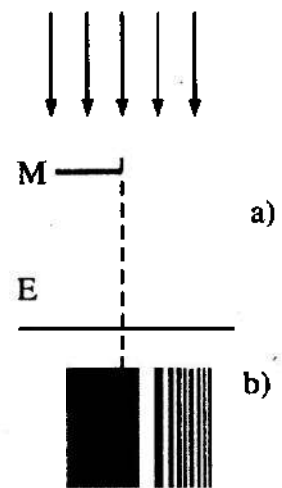
SỰ NHIỀU XẠ ÁNH SÁNG

1. Hiện tượng nhiễu xạ ánh sáng

Cho chùm tia sáng mặt trời chiếu vuông vào mép thẳng của một màn chắn M. Phía sau màn chắn, ta đặt một màn ảnh E song song với M (Hình 3.1a). Quan sát hình ảnh trên màn ảnh, ta thấy : vùng bóng tối lấn vào vùng sáng hình học một chút ; ở biên giới vùng sáng, có những vân tối và vân sáng xen kẽ nhau trước khi chuyển sang vùng sáng hoàn toàn (Hình 3.1b).

Hiện tượng quan sát được không thể giải thích bằng định luật truyền thẳng ánh sáng.

Đó là kết quả của hiện tượng nhiễu xạ ánh sáng. Vậy, hiện tượng nhiễu xạ ánh sáng là hiện tượng truyền ánh sáng sai lệch với định luật truyền thẳng ánh sáng khi chùm sáng gặp vật cản chia cắt mặt sóng ánh sáng.

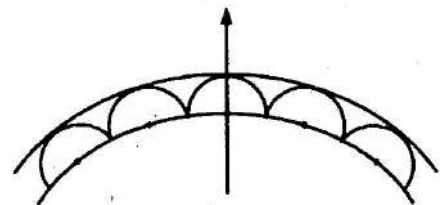


Hình 3.1

2. Nguyên lý Huy-ghen – Fre-nen

Để giải thích và tính toán về hiện tượng nhiễu xạ, người ta phải dựa vào nguyên lý Huy-ghen – Fre-nen. Nội dung sơ lược của nguyên lý này như sau :

- a) Mỗi điểm trên mặt sóng sơ cấp ở thời điểm t sẽ trở thành một nguồn phát sóng thứ cấp. Mặt sóng sơ cấp ở thời điểm tiếp sau đó $t + \Delta t$ sẽ là bao hình của các mặt sóng thứ cấp ở thời điểm đó (Hình 3.2).



Hình 3.2

- b) Để tìm biên độ của sóng nhiễu xạ tại một điểm M sau vật cản, phải chia mặt sóng sơ cấp trước vật cản thành nhiều phần rất nhỏ, mỗi phần coi như một nguồn phát sóng thứ cấp. Dao động sáng tại M coi như tổng hợp dao động do tất cả các sóng thứ cấp gây ra tại đó. Các nguồn thứ cấp chỉ phát sóng về phía trước (theo hướng truyền của sóng sơ cấp) mà không phát sóng về phía ngược lại.

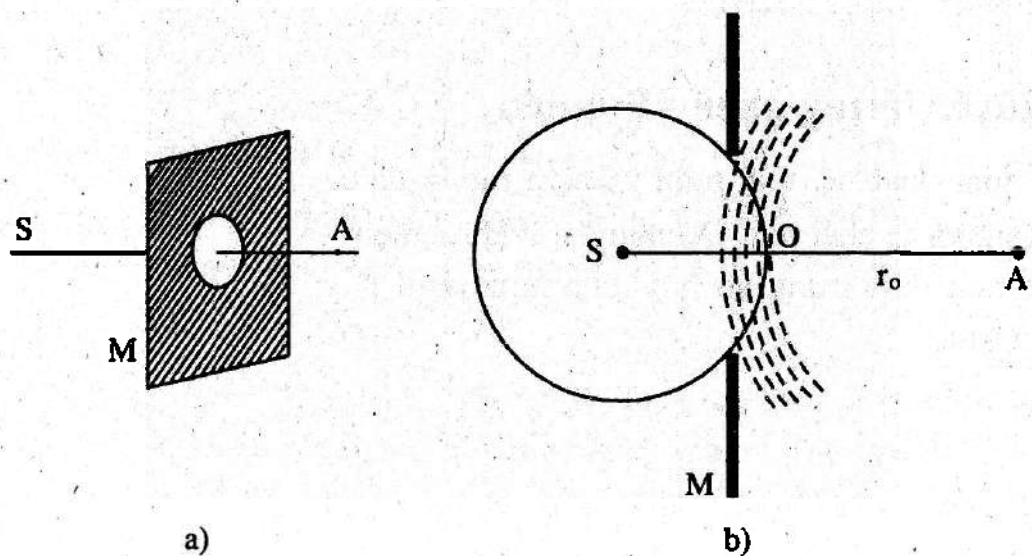
3. Nhiễu xạ của một sóng cầu (hay nhiễu xạ Fre-nen)

Ta hãy xét sự nhiễu xạ của một sóng cầu qua một lỗ tròn.

Giả sử có một điểm sáng đơn sắc S nằm trên trục của một lỗ tròn nhỏ, khoét trên một màn chắn M (Hình 3.3a). Ta hãy xét cường độ sáng của một điểm A trên trục của lỗ.

Muốn thế, ta hãy chia mặt sóng qua lỗ thành những nguồn thứ cấp theo cách sau đây : trước tiên ta vẽ mặt cầu tâm A, bán kính $r_0 = AO$; O là đỉnh của mặt sóng qua lỗ. Sau đó, ta tiếp tục vẽ các mặt cầu tâm A, bán kính $r_0 + \frac{\lambda}{2}$;

$r_0 + 2\frac{\lambda}{2}$; $r_0 + 3\frac{\lambda}{2}$; $r_0 + 4\frac{\lambda}{2}$; ... (Hình 3.3b). Các mặt cầu này chia mặt sóng qua lỗ thành những đới cầu, gọi là *đới cầu Fre-nen*. Mỗi đới cầu là một nguồn thứ cấp. Đường truyền của hai sóng ánh sáng từ hai đới cạnh nhau đến điểm A hơn kém nhau $\frac{\lambda}{2}$.



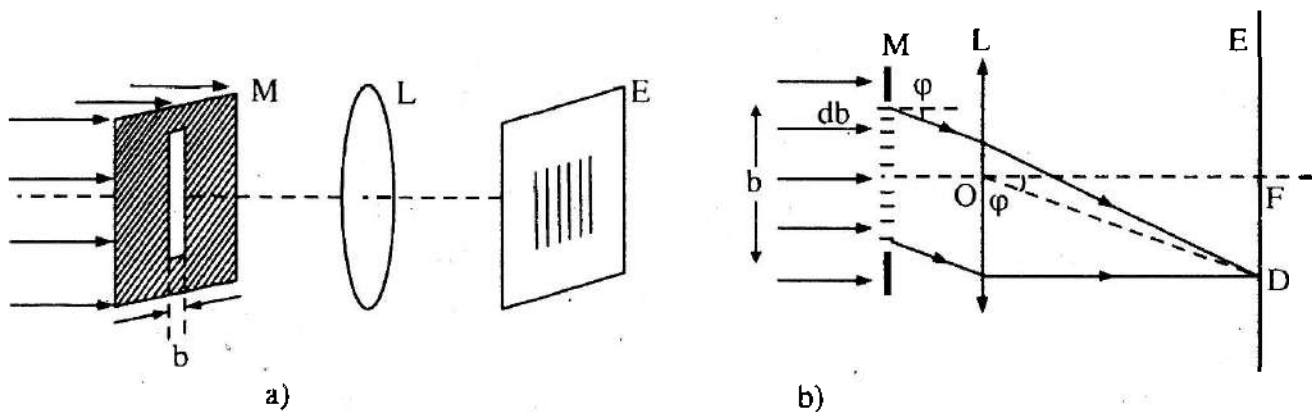
Hình 3.3

Do đó, dao động sáng mà hai dãi đó gây ra tại A sẽ ngược pha với nhau và hai sóng đó sẽ triệt tiêu lẫn nhau.

Kết quả là : nếu phần mặt sóng đi qua lỗ chứa một số chẵn dãi cầu Fre-nen thì điểm A sẽ là điểm tối. Chú ý rằng số dãi cầu Fre-nen sẽ được phụ thuộc vào kích thước của lỗ tròn, bước sóng ánh sáng và vị trí của điểm A. Nếu phần mặt sóng đó chứa một số lẻ dãi cầu Fre-nen thì điểm A sẽ là điểm sáng. Như vậy, đi dọc trục SO, ta sẽ lần lượt gặp các điểm sáng và điểm tối. Điều này hoàn toàn mâu thuẫn với quang hình học.

4. Nhiễu xạ của một sóng phẳng hay nhiễu xạ Fra-nô-fo (Fraunhofer)

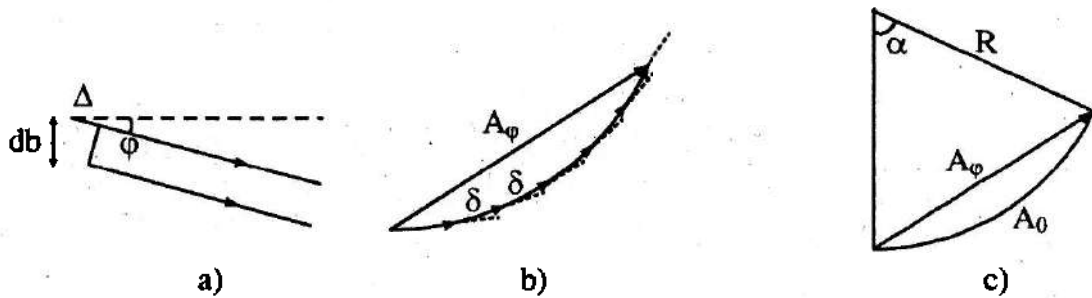
a) Nhiễu xạ của sóng phẳng qua một khe



Hình 3.4

Chiếu một chùm tia sáng song song đơn sắc, vuông góc vào một màn chắn M có khoét một khe hẹp. Bề rộng b của khe rất nhỏ so với bề dài của nó. Chùm sáng nhiễu xạ sau khe được thu vào một thấu kính hội tụ L có trục chính vuông góc với mặt khe. Trên một màn ảnh E đặt tại tiêu diện của thấu kính, vuông góc với trục chính của nó, ta thấy xuất hiện những vân nhiễu xạ, là những dải sáng và tối, xen kẽ nhau (Hình 3.4a).

Để giải bài toán nhiễu xạ này, ta hãy tưởng tượng chia khe b thành nhiều dải hẹp có bề rộng db như nhau (Hình 3.4b là hình vẽ chứa trục chính và cắt vuông góc với khe b). Mỗi dải hẹp trở thành một nguồn sáng thứ cấp. Sóng ánh sáng mà các dải này phát ra theo cùng một phương, làm với pháp tuyến của mặt khe một góc φ , sau khi qua thấu kính, sẽ hội tụ tại một điểm D trên tiêu diện và trên trục phụ, làm với trục chính góc φ . Tại D, các sóng đó giao thoa với nhau vì là các sóng kết hợp.



Hình 3.5

Hiệu quang trình giữa hai tia sáng đi từ hai dải cạnh nhau đến điểm D là (Hình 3.5a) :

$$\Delta = db \cdot \sin \varphi$$

Hiệu số pha giữa hai dao động sáng mà hai dải cạnh nhau gây ra ở D là :

$$\delta = \frac{2\pi\Delta}{\lambda} = \frac{2\pi db \cdot \sin \varphi}{\lambda}$$

Người ta thừa nhận rằng biên độ của dao động sáng mà các nguồn thứ cấp gây ra tại D là như nhau và không phụ thuộc góc φ . Như vậy, dao động sáng do các dải khác nhau gây ra ở D đều được biểu diễn bằng các vectơ Fre-nen có cùng chiều dài, nhưng không cùng phương.

Nếu biểu diễn dao động sáng do dải đầu tiên gây ra ở D bằng một vectơ có phương nằm ngang thì : dao động sáng do dải thứ hai gây ra sẽ được biểu diễn bằng một vectơ có chiều dài như thế, nhưng làm với vectơ thứ nhất một góc δ , bằng hiệu số pha đã nêu trên. Ngọn của vectơ trước trùng với gốc của vectơ sau. Tương tự như thế với các vectơ thứ ba, thứ tư... Kết quả là ta được một đường đa giác đều (Hình 3.5b). Dao động sáng tổng hợp sẽ được biểu diễn bằng vectơ A_φ có gốc là gốc của vectơ đầu tiên và ngọn là ngọn của vectơ cuối cùng. Chiều dài A_φ biểu diễn biên độ dao động sáng tổng hợp tại D.

Vì số dải hẹp rất lớn và chiều dài của mỗi vectơ biểu diễn dao động sáng được chọn đủ nhỏ nên đường đa giác đều sẽ biến thành một cung tròn (Hình 3.5c). Vectơ A_φ sẽ là dây của cung đó.

Tại tiêu điểm chính F của thấu kính : $\varphi = 0 \Rightarrow \delta = 0$. Các vectơ biểu diễn dao động sáng sẽ nằm nối đuôi nhau trên một đoạn thẳng có chiều dài A_0 . A_0 biểu diễn biên độ dao động sáng tổng hợp tại F và A_0 chính là chiều dài của cung tròn trên hình 3.5c.

Ta hãy tính A_φ theo A_0 . Gọi R là bán kính của cung tròn ; α là góc hợp bởi hai bán kính ở hai đầu cung tròn. α đúng bằng độ lệch pha giữa hai dao động sáng mà dải đầu tiên và dải cuối cùng gây ra ở D.

Để dàng tính được : $\alpha = \frac{2\pi b \sin \varphi}{\lambda}$

Ta lại có các hệ thức sau : $A_0 = R\alpha$

$$A_\varphi = 2R \sin \frac{\alpha}{2}$$

Từ đó, ta có :

$$A_\varphi = A_0 \frac{\lambda}{\pi b \sin \varphi} \sin \left(\frac{\pi b \sin \varphi}{\lambda} \right)$$

Vì cường độ sáng tỉ lệ với bình phương của dao động sáng, nên ta có :

$$I_\varphi = I_0 \left[\frac{\lambda}{\pi b \sin \varphi} \sin \left(\frac{\pi b \sin \varphi}{\lambda} \right) \right]^2$$

Đồ thị của $\frac{I}{I_0}$ theo $\sin \varphi$ được vẽ trên hình 3.6a.

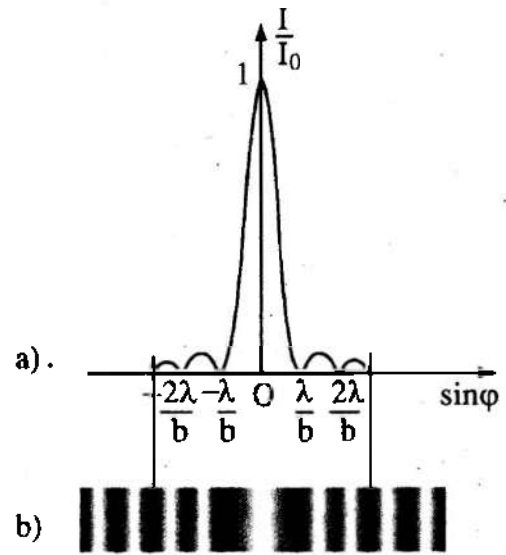
$$I_\varphi = 0 \text{ khi } \sin \left(\frac{\pi b \sin \varphi}{\lambda} \right) = 0 \Rightarrow \frac{\pi b \sin \varphi}{\lambda} = k\pi \Rightarrow \sin \varphi = k \frac{\lambda}{b}$$

Vậy, ta thấy xuất hiện các vạch tối tại các vị trí xác định bởi hệ thức :

$$\sin \varphi = k \frac{\lambda}{b} \text{ với } k = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (3.1)$$

Các vân tối ứng với trường hợp cung tròn trên hình 3.5c cuộn thành đúng một vòng tròn, hai vòng tròn, ba vòng tròn,...

Giữa hai vân tối là một vân sáng. Nếu coi bề rộng của vân sáng là khoảng cách giữa hai vân tối ở hai bên vân đó thì ta có hình ảnh vân nhiễu xạ qua một khe như sau (Hình 3.6b) : ở chính giữa có một vân sáng gọi là *cực đại trung tâm*, ở hai bên cực đại trung tâm có các vân sáng khác gọi là *các cực đại phụ*. Cực đại trung tâm có bề rộng lớn gấp đôi bề rộng các cực đại phụ và có cường độ lớn hơn rất nhiều cường độ của các cực đại phụ.

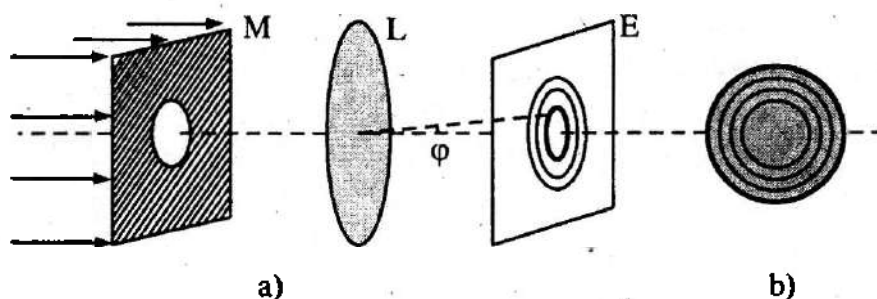


Hình 3.6

b) Nhiễu xạ của một sóng phẳng qua một lỗ tròn

Ta bố trí thí nghiệm quan sát sự nhiễu xạ của sóng phẳng qua một lỗ tròn tương tự như thí nghiệm quan sát sự nhiễu xạ qua một khe (Hình 3.7a).

Trên màn chắn M, ta thay khe hẹp bằng một lỗ tròn nhỏ có bán kính r .



Hình 3.7

Trên màn ảnh E, ta thấy một hệ thống vân tròn (Hình 3.7b) : Ở chính giữa là một vân sáng có cường độ lớn gọi là *cực đại trung tâm*. Bao quanh cực đại trung tâm là cực tiểu thứ nhất, rồi đến cực đại phụ và cực tiểu khác.

Nếu coi cực tiểu thứ nhất là giới hạn của cực đại trung tâm thì ta có : *Bán kính góc của cực đại trung tâm, nhìn từ quang tâm của thấu kính là :*

$$\sin \varphi = 0,61 \frac{\lambda}{r} \quad \text{hoặc} \quad \sin \varphi = 1,22 \frac{\lambda}{d} \quad (3.2)$$

với $d = 2r$ là đường kính của lỗ tròn.

5. Một vài ứng dụng của hiện tượng nhiễu xạ

a) Năng suất phân giải của các dụng cụ quang học

Hiện tượng nhiễu xạ ánh sáng đã hạn chế khả năng phân giải của các dụng cụ quang học như kính hiển vi, kính thiên văn,...

Ta hãy lấy vấn đề về năng suất phân giải của kính thiên văn làm ví dụ.

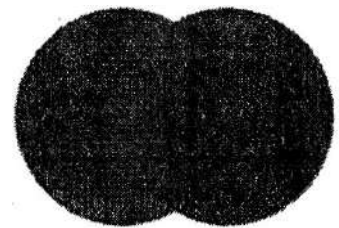
Chùm tia sáng từ một ngôi sao chiếu đến vật kính của kính thiên văn là một chùm tia song song. Chùm tia này gặp giả đỡ vật kính sẽ bị nhiễu xạ tương tự như nhiễu xạ qua một lỗ tròn. Kết quả là trên tiêu diện của vật kính ta sẽ thu được một ảnh nhiễu xạ giống như hình 3.7b. Bán kính góc của cực đại trung tâm được xác định bởi công thức (3.2).

Hai ngôi sao khác nhau cho trên tiêu diện của vật kính hai ảnh nhiễu xạ có hình dạng và kích thước như nhau. Tuy nhiên, màu sắc của hai ảnh thì khác

nhau tùy thuộc vào nhiệt độ bề mặt của hai ngôi sao. Nếu hai ngôi sao có cùng nhiệt độ thì hai ảnh nhiễu xạ hoàn toàn giống nhau.

Giả sử có hai ngôi sao nằm trên hai phương nhìn rất gần nhau đến mức hai ảnh nhiễu xạ có một phần chồng lên nhau. Vì hai ngôi sao là hai nguồn sáng không kết hợp, nên tại phần chung chỉ có sự cộng cường độ.

Nếu phần chồng chập rất lớn thì ta sẽ phân biệt được hai ảnh nhiễu xạ của hai ngôi sao đó nữa. Ray-lây (Rayleigh) đã đề ra chuẩn sau đây : Hai ảnh nhiễu xạ còn có thể phân biệt được nếu tâm của cực đại trung tâm này nằm trên mép của cực đại trung tâm kia (Hình 3.8).



Hình 3.8

Góc trông nhỏ nhất $\gamma_{\min}$ giữa hai ngôi sao mà ta còn có thể phân biệt được hai ảnh của chúng trong kính thiên văn gọi là năng suất phân giải của kính thiên văn đó.

Theo chuẩn Ray-lây, ta có : $\sin \gamma_{\min} = 1,22 \frac{\lambda}{d}$

với d là đường kính của vật kính. Ta thấy vật kính có đường kính càng lớn thì có năng suất phân giải càng cao.

b) Cách tử nhiễu xạ

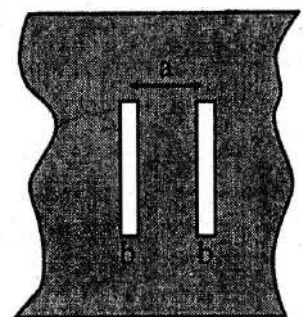
Cách tử nhiễu xạ là một hệ thống rất nhiều khe hẹp khoét song song cách đều nhau trên một màn chắn (Hình 3.9).

Bề rộng b của mỗi khe rất nhỏ so với khoảng cách a giữa hai khe cạnh nhau ; a gọi là hằng số cách tử.

Bố trí thí nghiệm với cách tử giống như ở hình 3.4a hoặc 3.7a ; trong đó, ta thay màn chắn có khe hoặc có lỗ tròn bằng một cách tử.



a)



b)

Hình 3.9

Khi chiếu một chùm sáng song song, đơn sắc, vuông góc vào một cách tử thì mỗi khe trên cách tử sẽ tạo ra trên tiêu diện của thấu kính một hệ thống vân nhiễu xạ giống như ở hình 3.6b. Chỉ có điều khác là : do khe rất hẹp, nên cực đại trung tâm rất rộng.

Vì vị trí của hệ vân trên tiêu diện của thấu kính không phụ thuộc vị trí của khe trên màn chắn, nên tất cả các hệ vân do các khe tạo ra sẽ chồng khít lên nhau. Tuy nhiên, vì các chùm sáng nhiễu xạ qua các khe là các chùm kết hợp, nên khi gặp nhau trên tiêu diện chúng sẽ giao thoa với nhau.

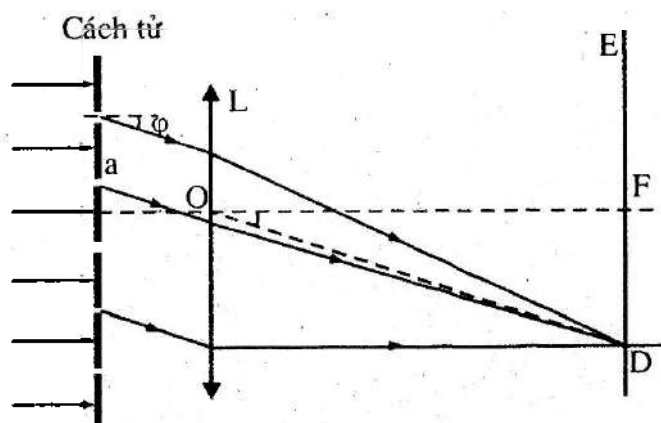
Do đó, trong vùng của các cực đại nhiễu xạ sẽ xuất hiện các vân giao thoa (Hình 3.10).



Hình 3.10

Ta hãy xác định vị trí của các vân giao thoa. Xét sự giao thoa của các sóng tại điểm D trên tiêu diện của thấu kính (Hình 3.11). Trục phụ qua D làm với trục chính góc φ .

Các tia sáng nhiễu xạ phát ra từ các khe, làm với pháp tuyến của mặt cách tử góc φ , sau khi qua thấu kính sẽ hội tụ tại điểm D và giao thoa với nhau. Các dao động sáng mà các khe gây ra ở D đều có cùng biên độ A_φ . Hiệu quang trình giữa hai tia phát ra từ hai khe cạnh nhau là :



Hình 3.11

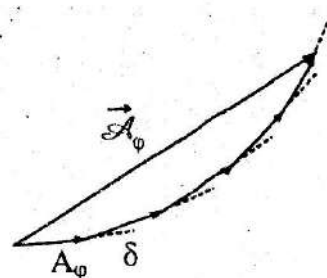
$$\Delta = a \sin \varphi$$

Hiệu số pha giữa hai dao động sáng do hai khe cạnh nhau gây ra ở D là :

$$\delta = \frac{2\pi\Delta}{\lambda} = \frac{2\pi a \sin \varphi}{\lambda}$$

Mỗi dao động sáng tại D được biểu diễn bằng một vectơ Fre-nen có môđun tỉ lệ với A_φ và có giá làm với giá của vectơ trước nó một góc δ . Tập hợp các vectơ biểu diễn các dao động sáng do các khe tiếp nhau gây ra tại D tạo thành một đường đa giác đều gồm N cạnh (Hình 3.12).

N là số khe của cách tử. Dao động tổng hợp tại D được biểu diễn bằng vectơ $\vec{A}_\varphi$ trên hình 3.12.



Hình 3.12

Mỗi khi $\delta = 2k\pi$ thì đường đa giác đều sẽ trải ra thành một đoạn thẳng có chiều dài là $A_\varphi = NA_\varphi$. Đó là biên độ cực đại của dao động tổng hợp.

Vậy, cực đại giao thoa nằm tại các vị trí xác định bởi :

$$\delta = 2k\pi \Rightarrow \frac{2\pi a \sin \varphi}{\lambda} = 2k\pi \quad \text{hay} \quad \sin \varphi = k \frac{\lambda}{a} \quad (3.3)$$

So sánh hai công thức (3.3) và (3.1), ta thấy : vì $a \gg b$, nên các cực đại giao thoa nằm lọt trong cực đại trung tâm nhiễu xạ (Hình 3.10).

Nếu nguồn sáng phát ra chùm sáng song song, không đơn sắc, gồm các ánh sáng có bước sóng $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots$ thì trên tiêu diện của thấu kính ta sẽ có các vạch màu đơn sắc $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots$ nằm riêng rẽ.

Tập hợp các vạch ứng với $k = 1$ tạo thành quang phổ bậc 1 của nguồn sáng.

Tập hợp các vạch ứng với $k = 2$ tạo thành quang phổ bậc 2 của nguồn sáng...

Khoảng cách giữa các vạch trong quang phổ bậc 2 rộng gấp đôi khoảng cách giữa các vạch trong quang phổ bậc 1,...

Tất cả các vấn đề đề cập đến trong khe Y-âng đều áp dụng được cho cách tử nhiễu xạ. Đó là vì khe Y-âng là một cách tử có 2 khe.

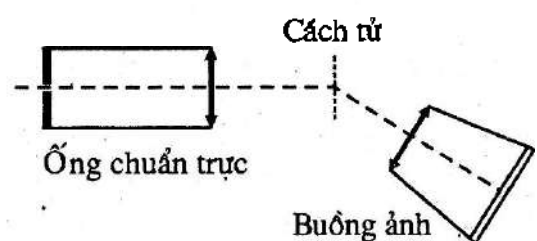
Tuy nhiên, các vạch quang phổ cho bởi cách tử nhiễu xạ thì sắc nét hơn nhiều các vạch quang phổ cho bởi khe Y-âng.

c) Máy quang phổ cách tử

Tương tự như máy quang phổ lăng kính, máy quang phổ cách tử cũng có ba bộ phận chính (Hình 3.13) :

- Ống chuẩn trực là bộ phận tạo ra chùm tia sáng song song từ chùm sáng của nguồn cần phân tích chiếu tới.
- Cách tử dùng để phân tích chùm sáng từ ống chuẩn trực chiếu tới.
- Buồng ảnh dùng để thu ảnh của quang phổ do cách tử tạo ra.

Trong các máy quang phổ cách tử, để có độ phân giải cao, người ta thường dùng các quang phổ bậc 2, bậc 3,...



Hình 3.13

6. Nhiễu xạ tia X

Để đo bước sóng tia X, ta không thể dùng các cách tử thông thường được. Đó là vì hằng số cách tử vào cỡ 10^{-6} m, trong khi đó, bước sóng tia X vào cỡ 10^{-10} m ; tức là bước sóng tia X quá nhỏ so với hằng số cách tử và hiện tượng nhiễu xạ sẽ không đáng kể.

Năm 1913, Lau-e (Lauer) đề xuất ý kiến dùng tinh thể làm cách tử nhiễu xạ đối với tia X. Chiếu một chùm tia X mảnh vào một tinh thể (Hình 3.14).

Hứng các tia X nhiễu xạ trên một phim ảnh. Ta được một hình ảnh nhất định (Hình 3.14) đó là ảnh nhiễu xạ tia X. Mỗi loại tinh thể cho một kiểu ảnh nhiễu xạ riêng. Nếu biết hằng số mạng tinh thể, ta có thể tính được bước sóng tia X ; ngược lại, nếu biết bước sóng tia X ta sẽ xác định được cấu trúc của mạng tinh thể.

Phép nghiên cứu cấu trúc tinh thể dựa vào ảnh nhiễu xạ tia X gọi là *phép phân tích cấu trúc*.

Ta hãy tìm công thức xác định vị trí các cực đại nhiễu xạ của tia X trên phim. Chiếu một chùm tia X song song, đơn sắc vào bề mặt (phẳng) của một tinh thể.

Có một lớp nguyên tử (hoặc ion) trên bề mặt đóng vai trò của những tâm phát sóng thứ cấp. Lớp nguyên tử thứ hai nằm cách lớp trên một khoảng d . Các tia X tới làm với lớp tinh thể góc θ mà ta gọi là *góc trượt* (Hình 3.15).

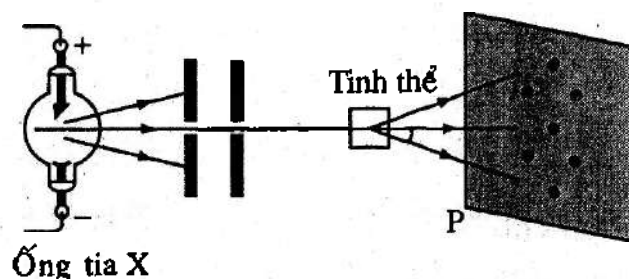
Ta hãy xem khi nào theo phương phản xạ sẽ có cực đại nhiễu xạ của các tia X. Muốn thế, ta hãy tính hiệu đường đi Δ giữa hai tia phản xạ trên hai nút mạng bất kì nằm trên hai lớp cạnh nhau.

Dễ dàng chứng minh được công thức sau đây : $\Delta = 2d\sin\theta$.

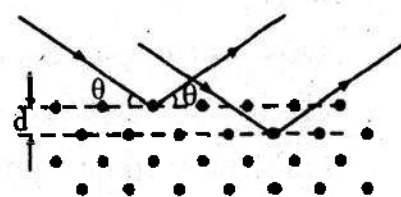
Vậy, điều kiện để theo phương phản xạ có cực đại nhiễu xạ tia X là :

$$2d\sin\theta = k\lambda \quad (3.4)$$

Công thức (3.4) là công thức Bra-gơ (Bragg) về nhiễu xạ tia X.



Hình 3.14



Hình 3.15



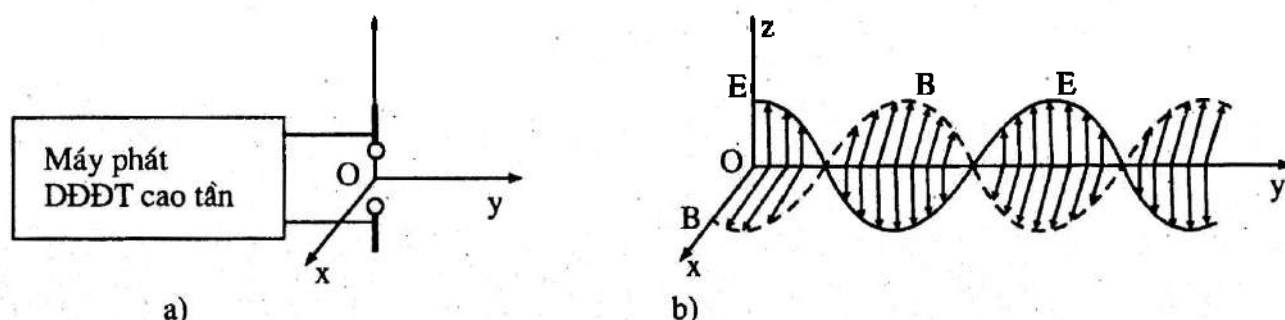
- 3.1. Một nguồn điểm đơn sắc S đặt trên trục của một lỗ tròn, khoét trên một màn chắn sáng. Bước sóng của ánh sáng là $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$. Đường kính của lỗ là 2 mm. Khoảng cách từ nguồn tới lỗ là 1 m. Hãy xác định tại điểm P nằm trên trục của lỗ, ở phía sau màn, cách lỗ 1 m, ta có điểm sáng hay điểm tối.
- 3.2. Một nguồn sáng điểm S phát ra ánh sáng đơn sắc có bước sóng $\lambda = 0,6 \mu\text{m}$. Một màn ảnh được đặt cách nguồn một khoảng $SC_0 = l$. Tại trung điểm của đoạn SC_0 người ta đặt một màn chắn trên có khoét một lỗ tròn, đường kính 1 cm. Hỏi đoạn l phải bằng bao nhiêu để từ điểm C_0 ta chỉ vẽ được một đới Fre-nen ?
- 3.3. Một chùm tia sáng đơn sắc, song song tới đập vuông góc vào một màn chắn trên có khoét một khe hẹp có bề rộng $2 \cdot 10^{-3} \text{ cm}$. Sau khe có đặt một thấu kính hội tụ, tiêu cự $f = 0,5 \text{ m}$. Hãy tính bề rộng của vân sáng trung tâm trên màn ảnh đặt ở tiêu diện của thấu kính biết bước sóng của ánh sáng là $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$.
- 3.4. Một cách tử nhiễu xạ có hằng số $b = 2,8 \mu\text{m}$. Chiếu một chùm tia sáng đơn sắc, song song, đập vuông góc với cách tử. Người ta quan sát thấy vạch quang phổ bậc 2 nằm theo phương làm với pháp tuyến của cách tử một góc $\varphi = 30^\circ$. Tính bước sóng của ánh sáng.
- 3.5. Chiếu một chùm tia sáng song song, do một ngọn đèn phát ra, vuông góc với một cách tử nhiễu xạ. Góc lệch của một vạch $\lambda = 5890 \text{ \AA}$ trong quang phổ bậc 1 là $17^\circ 8'$. Góc lệch của một vạch khác trong quang phổ bậc 2 là $24^\circ 12'$. Hãy tính hằng số cách tử và bước sóng của vạch thứ hai nói trên.
- 3.6. Một cách tử nhiễu xạ có hằng số $b = 2 \mu\text{m}$, đặt trong một máy quang phổ cách tử. Mặt phẳng của cách tử vuông góc với trục của ống chuẩn trực. Tính bề rộng của quang phổ liên tục bậc 1, bậc 2 và bậc 3. Cho biết tiêu cự của thấu kính buồng ảnh là $f = 40 \text{ cm}$, bước sóng của ánh sáng đỏ là $0,76 \mu\text{m}$ và ánh sáng tím là $0,38 \mu\text{m}$.
- 3.7. Một chùm tia X song song, đơn sắc, chiếu vào mặt giới hạn tự nhiên của một đơn tinh thể NaCl. Khi góc tới là 30° thì theo phương phản xạ gương có một cực đại. Tăng dần góc tới lên, đến giá trị $64^\circ 20'$ ta lại thu được một cực đại theo phương phản xạ gương. Tính bước sóng của tia X. Biết khối lượng riêng của NaCl là 2160 kg/m^3 .

4

SỰ PHÂN CỰC ÁNH SÁNG

1. Sóng điện từ phân cực phẳng

Hai quả cầu kim loại được nối với một máy phát dao động điện từ cao tần tạo thành một *dao động tử* (Hình 4.1a). Tại gốc O của hệ trục tọa độ Oxyz xuất hiện một điện trường xoay chiều cao tần có phương nằm dọc theo trục Oz.



Hình 4.1

Từ O xuất hiện một sóng điện từ lan truyền ra xung quanh. Ta hãy xét sóng lan truyền theo phương Oy (Hình 4.1b). Khi sóng lan truyền thì tại mỗi điểm vectơ cường độ điện trường luôn song song với Oz và có môđun "dao động" theo hàm số sin :

$$E = E_0 \cos \left(\omega t - \frac{y}{v} \right)$$

(v là tốc độ truyền sóng điện từ trong môi trường).

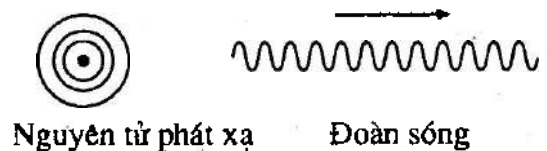
Người ta nói *mặt phẳng yOz là mặt phẳng dao động của sóng điện từ*. Như vậy, mặt phẳng dao động là mặt phẳng chứa các vectơ cường độ điện trường. Mặt phẳng vuông góc với mặt phẳng dao động được gọi là *mặt phẳng phân cực*.

Sóng truyền theo phương Oy có mặt phẳng dao động không đổi gọi là *sóng phân cực phẳng*. Nói chung, sóng điện từ phát ra từ một máy phát đều là sóng phân cực phẳng.

Vì trong sóng điện từ phân cực phẳng có một phương ưu tiên, nên ta dễ dàng phát hiện ra phương này. Chẳng hạn, có thể dùng anten râu của một máy thu để phát hiện phương dao động của vectơ cường độ điện trường E : Nếu anten song song với vectơ E thì tín hiệu thu được sẽ cực đại, nếu anten vuông góc với vectơ E thì tín hiệu thu được sẽ bằng không.

2. Ánh sáng phân cực phẳng và ánh sáng tự nhiên

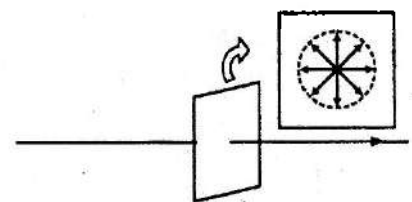
Ánh sáng do các nguyên tử (hay phân tử) của nguồn sáng phát ra. Mỗi nguyên tử khi phát ra ánh sáng đóng vai trò như một dao động tử. Nó phát ra một *đoàn sóng điện từ (sóng ánh sáng) phân cực phẳng* gồm hàng vạn chu kỳ (Hình 4.2).



Hình 4.2

Tuy nhiên, trong một nguồn sáng có vô số nguyên tử đồng thời phát sáng. Theo bất kỳ một phương Oy nào cũng có vô vàn sóng ánh sáng truyền đi. Các mặt phẳng dao động của các sóng ánh sáng được sắp xếp đều xung quanh phương Oy của tia sáng. Đó là ánh sáng tự nhiên. Vậy, *ánh sáng tự nhiên là ánh sáng trong đó, dao động sóng được thực hiện như nhau trong tất cả các mặt phẳng chứa tia sáng.*

Không thể dùng mô hình 4.1b để biểu diễn ánh sáng tự nhiên được. Trên một mặt phẳng vuông góc với tia sáng (Hình 4.3), các dao động sóng được biểu diễn bằng các vectơ có gốc nằm trên tia sáng và ngọn nằm trên một đường tròn có tâm nằm trên tia sáng.



Hình 4.3

Nếu bằng cách nào đó giữ lại các dao động sóng trong một mặt phẳng nhất định chứa tia sáng và triệt tiêu các dao động sóng trên tất cả các mặt phẳng khác thì ta sẽ có ánh sáng phân cực phẳng.

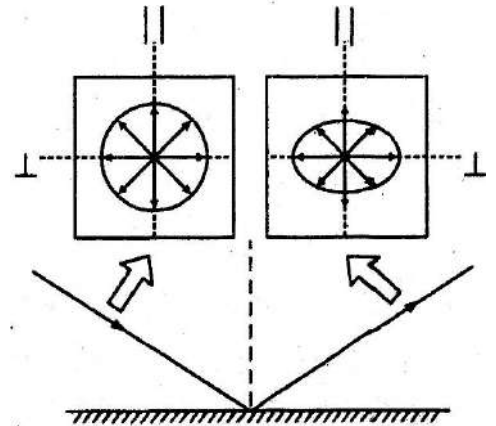
Vậy, *ánh sáng phân cực phẳng là ánh sáng trong đó dao động sóng chỉ được thực hiện trong một mặt phẳng nhất định chứa tia sáng.*

3. Sự phân cực vì phản xạ. Ánh sáng phân cực một phần

Việc biến ánh sáng tự nhiên thành ánh sáng phân cực gọi là *sự phân cực ánh sáng*.

Có nhiều cách tạo ra ánh sáng phân cực. Cách đơn giản nhất là cho ánh sáng tự nhiên phản xạ trên một gương phẳng (Hình 4.4).

Ánh sáng phản xạ không còn là ánh sáng tự nhiên nữa. Tuy trong ánh sáng phản xạ vẫn còn các dao động sáng nằm trong các mặt phẳng khác nhau chứa tia sáng, nhưng biên độ của các dao động sáng không còn bằng nhau nữa : dao động sáng nằm trong mặt phẳng tới (biểu diễn bằng kí hiệu $\parallel$) có biên độ nhỏ nhất ; dao động sáng nằm trong mặt phẳng vuông góc với mặt phẳng tới (biểu diễn bằng kí hiệu $\perp$) có biên độ lớn nhất.



Hình 4.4

Nếu biểu diễn các dao động sáng trong một mặt phẳng vuông góc với tia phản xạ bằng những vectơ có gốc nằm trên tia sáng thì ngọn của các vectơ này sẽ nằm trên một đường elip.

Khi đó, ánh sáng phản xạ là *ánh sáng phân cực một phần*. Có thể nói dao động sáng song song với mặt gương thì phản xạ tốt hơn dao động sáng nằm trong mặt phẳng vuông góc với mặt gương.

Nếu cho tia sáng phản xạ nhiều lần trên các gương phẳng có mặt phản xạ quay vào nhau và song song với nhau thì tia sáng ló ra cuối cùng sẽ là tia sáng phân cực phẳng.

Đặc biệt, nếu góc tới thoả mãn điều kiện : *Tia phản xạ vuông góc với tia khúc xạ* (Điều kiện Briu-xơ – (Brewster)) thì *tia phản xạ sẽ là tia sáng phân cực phẳng*. Khi đó, ta có công thức :

$$\tan i = n \quad (4.1)$$

i là góc tới ; n là chiết suất của gương.

4. Sự phân cực vì lưỡng chiết. Ánh sáng phân cực tròn

- a) Nhìn một dòng chữ qua một khối tinh thể đá băng lan (CaCO_3 kết tinh) ta thấy xuất hiện hai dòng chữ (Hình 4.5). Như vậy, một tia sáng khi truyền vào đá băng lan đã bị khúc xạ thành hai tia.



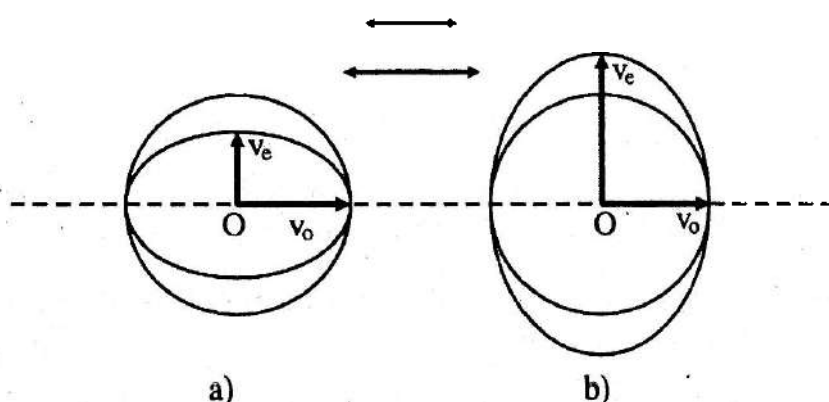
Hình 4.5

Đó là *hiện tượng lưỡng chiết*.

Có rất nhiều tinh thể tự nhiên và nhân tạo có tính lưỡng chiết.

- b) Người ta giải thích hiện tượng lưỡng chiết như sau : Khi một nút mạng tinh thể (Nút O trên hình 4.6) bị kích thích dao động thì nó sẽ đồng thời phát ra hai loại sóng thứ cấp. Sóng thứ nhất là *sóng cầu*, truyền đi theo mọi phương với cùng một tốc độ v_0 . Sóng này gọi là *sóng thường*. Sóng thứ hai là *sóng elipxôit tròn xoay*.

Dọc theo một phương đặc biệt, sóng này truyền với tốc độ v_0 . Dọc theo các phương vuông góc với phương đặc biệt nói trên, sóng này truyền với tốc độ v_e , hoặc nhỏ hơn v_0 (Hình 4.6a), hoặc lớn hơn v_0 (Hình 4.6b).



Hình 4.6

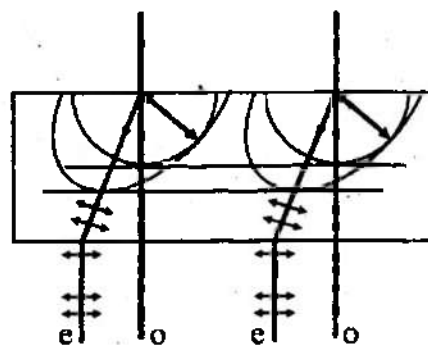
Sóng này là *sóng bất thường*.

Dọc theo các phương khác vận tốc truyền sóng bất thường có giá trị trung gian giữa v_0 và v_e . Trong trường hợp a, mặt sóng bất thường có dạng như quả dưa hấu ; trong trường hợp b, mặt sóng bất thường có dạng như quả bí đỏ.

Phương đặc biệt dọc theo đó hai sóng thường và bất thường truyền với cùng tốc độ gọi là *phương của trục tinh thể*. Phương này được biểu diễn bằng kí hiệu $\Rightarrow$ trên hình 4.6. Tinh thể có một trục gọi là *tinh thể đơn trục*.

- c) Dùng cách vẽ Huy-ghe, ta sẽ vẽ được các mặt sóng thường và bất thường trong tinh thể đơn trục, từ đó ta sẽ vẽ được các tia thường và bất thường.

Xét trường hợp có một chùm sáng song song chiếu vuông góc vào mặt một tinh thể đơn trục, có trục làm với mặt phân cách một góc nào đó (Hình 4.7). Giả sử mặt sóng trong tinh thể đó có dạng ở hình 4.6b.



Hình 4.7

Các mặt sóng thường là các mặt cầu có cùng bán kính. Mặt bao của các mặt cầu này là mặt phẳng song song với mặt phân cách. Các tiếp điểm của mặt bao với các mặt cầu đều nằm trên phương của tia tới.

Do đó, tia sáng sẽ truyền thẳng. Đó là *tia thường* (kí hiệu bằng chữ o). Tia thường tuân theo định luật khúc xạ.

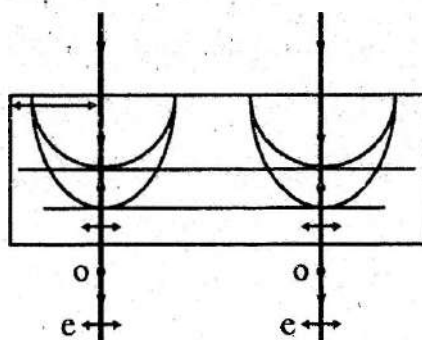
Các mặt sóng bất thường là các mặt elipxôit tròn xoay giống nhau. Mặt bao của các mặt elipxôit cũng là mặt phẳng song song với mặt phân cách. Tiếp điểm của mặt bao với các mặt elipxôit lại nằm lệch khỏi phương của tia tới. Do đó, tia khúc xạ trong tinh thể sẽ lệch khỏi phương tia tới. Đó là *tia bất thường* (kí hiệu bằng chữ e). Tia bất thường không tuân theo định luật khúc xạ. Ra khỏi tinh thể, tia bất thường lại truyền song song với tia tới.

Như vậy, ứng với mỗi tia tới có một tia thường và một tia bất thường.

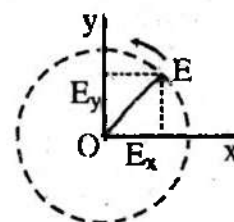
- d) Đặc biệt là cả tia thường và tia bất thường đều là các *tia sáng phân cực phẳng*. *Mặt phẳng dao động của tia bất thường trùng với mặt phẳng tạo bởi trục tinh thể và tia sáng*. Mặt phẳng này gọi là *mặt phẳng chính*. *Mặt phẳng dao động của tia thường vuông góc với mặt phẳng chính*.

Trong các máy phân cực, tức là máy tạo ra ánh sáng phân cực phẳng từ ánh sáng tự nhiên, người ta tìm cách tách riêng hai tia thường và bất thường ra với nhau và chỉ dùng một tia.

- e) Xét trường hợp một chùm sáng song song, đơn sắc, phân cực phẳng, chiếu vuông góc vào mặt một bản tinh thể đơn trục được mài sao cho mặt phân cách song song với trục tinh thể (Hình 4.8a).



a)



b)

Hình 4.8

Trong trường hợp này, tia thường và tia bất thường đều truyền thẳng, nhưng mặt phẳng dao động của chúng vuông góc với nhau và tốc độ truyền của chúng khác nhau.

Ra khỏi bản tinh thể, hai sóng vẫn có chung đường truyền và truyền với cùng tốc độ c , tuy mặt phẳng dao động của chúng vẫn vuông góc với nhau. Mặt khác, hai sóng lại là hai sóng kết hợp, nên chúng sẽ giao thoa với nhau. Ta hãy xét hệ quả của sự giao thoa này.

Lấy hệ trục Oxy vuông góc với nhau và với tia sáng. Trục Ox song song với dao động sáng của tia thường, còn trục Oy song song với dao động sáng của tia bất thường (Hình 4.8b).

Tại mặt trước của bản tinh thể, hai dao động sáng thường và bất thường cùng pha với nhau. Nếu bố trí cho mặt phẳng dao động của ánh sáng tới chứa phân giác của góc xOy thì biên độ của hai dao động nói trên sẽ bằng nhau. Phương trình của hai dao động thường và bất thường sẽ là :

$$E_x = E \cos \omega t \text{ và } E_y = E \cos \omega t \quad (\omega \text{ là tần số ánh sáng}).$$

Tại mặt sau của bản tinh thể hai dao động sáng sẽ lệch pha với nhau :

$$E_x = E \cos \omega \left(t - \frac{d}{v_o} \right) \text{ và } E_y = E \cos \omega \left(t - \frac{d}{v_e} \right) \quad (d \text{ là bề dày của bản tinh thể}).$$

$$\text{Hiệu số pha giữa hai dao động là : } \delta = \omega d \left(\frac{1}{v_o} - \frac{1}{v_e} \right).$$

Có thể chọn bề dày d sao cho hiệu số pha đạt điều kiện :

$$\delta = (2k + 1) \frac{\pi}{2} \Rightarrow d = \frac{(2k + 1) \pi}{2\omega} \frac{v_o v_e}{v_e - v_o}$$

Khi đó có thể biểu diễn hai dao động thường và bất thường tại mặt sau của bản tinh thể là :

$$E_x = E \cos(\omega t - \varphi) \text{ và } E_y = E \sin(\omega t - \varphi)$$

Tổng hợp hai vectơ $\vec{E}_x$ và $\vec{E}_y$ thành vectơ $\vec{E}$ có gốc tại O và ngọn quay đều quanh O, trong mặt phẳng Oxy với tốc độ góc ω (Hình 4.8b). Đó là *ánh sáng phân cực tròn*.

Nếu hai biên độ của hai dao động sáng E_x và E_y không bằng nhau thì ta sẽ không được ánh sáng phân cực tròn mà được ánh sáng phân cực elip.

5. Bản pôlarôit

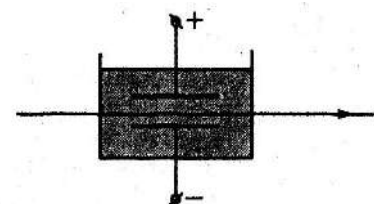
Bản pôlarôit là một bản nhựa trong, trên có phủ một lớp mỏng hợp chất hữu cơ sunfat-iot – kí ninh. Có thể định hướng dễ dàng các phân tử chất này theo một hướng nhất định. Lớp chất hữu cơ này sẽ cho ánh sáng có dao động sáng nằm trong một mặt phẳng nhất định đi qua. Do đó, khi cho một chùm sáng tự nhiên đi qua một bản pôlarôit thì chùm sáng ló ra sẽ là ánh sáng phân cực phẳng.

Bản pôlarôit được dùng phổ biến ở các màn hiển số của các máy tính bỏ túi.

6. Sự phân cực ánh sáng trong điện trường. Hiệu ứng Ke (Kerr)

Một khối chất lỏng đặt trong một điện trường sẽ có tính lưỡng chiết giống như một tinh thể đơn trục, có trục hướng theo đường sức điện trường (Hình 4.9).

Hiệu ứng phân cực ánh sáng trong điện trường gọi là *hiệu ứng Ke*. Hiệu ứng Ke có thể xảy ra cả trong chất rắn và chất khí. Thiết bị tương tự như ở hình 4.9 gọi là tế bào Ke. Tế bào Ke được sử dụng như một thiết bị đóng ngắt không có quán tính trong kĩ thuật vô tuyến.



Hình 4.9



BÀI TẬP

- 4.1. Chiếu một tia sáng tự nhiên vào một gương phẳng có chiết suất $n = 1,5$. Giải thích tại sao khi góc tới i thoả mãn điều kiện $\tan i = 1,5$ thì tia sáng phản xạ lại là tia phân cực phẳng?
- 4.2. Cho một thiết bị vân tròn Niu-ton gồm một thấu kính hội tụ phẳng – lõm, đặt trên một tấm thủy tinh phẳng. Mặt cầu tiếp xúc với mặt thủy tinh.
 - a) Chiếu một chùm tia sáng đơn sắc, song song vào thiết bị nói trên theo phương vuông góc với mặt phẳng của thấu kính. Mô tả hình ảnh quan sát được theo phương phản xạ.
 - b) Nếu chùm tia tới là chùm đơn sắc, song song, phân cực phẳng thì hình ảnh giao thoa bị thay đổi như thế nào?

5

CÁC LOẠI QUANG PHỔ

1. Quang phổ liên tục

Dùng một bóng đèn có dây tóc nóng sáng để chiếu sáng khe của một máy quang phổ. Trên tấm kính mờ của buồng ảnh ta thấy có một dải sáng có màu biến đổi liên tục từ đỏ đến tím. Đó là quang phổ liên tục của ngọn đèn.

Các vật rắn, lỏng hoặc khí có tỉ khối lớn khi bị nung nóng sẽ phát ra quang phổ liên tục. Mặt Trời là một khối khí có tỉ khối lớn phát sáng. Quang phổ của ánh sáng mặt trời là quang phổ liên tục. Trong quang phổ liên tục các vạch màu nằm cạnh nhau, nằm sát nhau đến mức chúng nối liền với nhau tạo nên một dải màu liên tục.

Một đặc điểm quan trọng của quang phổ liên tục của Mặt Trời và các vì sao, là nó không phụ thuộc vào thành phần cấu tạo của vật phát sáng mà chỉ phụ thuộc vào nhiệt độ của vật đó.

Đây là một cơ sở quan trọng để ta xác định được nhiệt độ của Mặt Trời và các vì sao xa xôi.

Nhiệt độ bề mặt của Mặt Trời khoảng 6000 K. Vùng sáng mạnh của quang phổ liên tục của Mặt Trời nằm lân cận bước sóng 0,47 μm . Ánh sáng mặt trời là ánh sáng trắng.

Trên bầu trời có các ngôi sao màu sáng xanh. Nhiệt độ của các ngôi sao này cao hơn nhiệt độ của Mặt Trời rất nhiều.

Đối với các vật nóng sáng thông thường, phát sáng không hoàn toàn như một vật đen tuyệt đối, thì ngoài sự phụ thuộc nhiệt độ, quang phổ liên tục do vật phát ra còn phụ thuộc thành phần cấu tạo của vật.

Nhiệt độ càng cao miền phát sáng của vật càng mở rộng về phía ánh sáng có bước sóng ngắn của quang phổ liên tục, đồng thời vật càng bức xạ mạnh các ánh sáng có bước sóng ngắn.

Ở nhiệt độ 500°C, vật bắt đầu phát ra ánh sáng ở vùng ánh sáng đỏ, nhưng rất yếu, nên mắt chưa cảm nhận được và vật vẫn tối.

Các dây tóc bóng đèn có nhiệt độ vào khoảng từ 2500 K đến 3000 K phát ra ánh sáng khá mạnh ở vùng ánh sáng nhìn thấy và cho một quang phổ liên tục có đủ màu sắc từ đỏ đến tím. Ánh sáng của các bóng đèn này là ánh sáng trắng.

Người ta lợi dụng sự phụ thuộc của quang phổ liên tục của vật sáng vào nhiệt độ để đo nhiệt độ của các vật nóng sáng ở nhiệt độ cao như dây tóc bóng đèn, lò nhiệt cao,...

Muốn đo nhiệt độ của một vật bị nung nóng sáng, người ta so sánh độ sáng của vật đó với độ sáng của một dây tóc bóng đèn ở một vùng bước sóng nào đó (thường là đỏ). Nhiệt độ của dây tóc bóng đèn ứng với những độ sáng khác nhau đã hoàn toàn biết trước.

2. Quang phổ vạch phát xạ

Chiếu một chùm tia sáng do một đèn phóng điện chứa khí loãng (đèn hơi thủy ngân, đèn hiđrô, đèn natri,...) phát ra vào khe của một máy quang phổ, ta sẽ thu được trên tấm kính của buồng ảnh *một quang phổ vạch phát xạ của chất khí hoặc hơi kim loại đó. Quang phổ này bao gồm một hệ thống những vạch màu riêng rẽ nằm trên một nền và gọi là quang phổ vạch.*

Quang phổ vạch phát xạ do các khí bay hơi ở áp suất thấp bị kích thích phát sáng phát ra. Có thể kích thích cho một chất khí phát sáng bằng cách đốt nóng hoặc bằng cách phóng một tia lửa điện qua đám khí hay hơi đó...

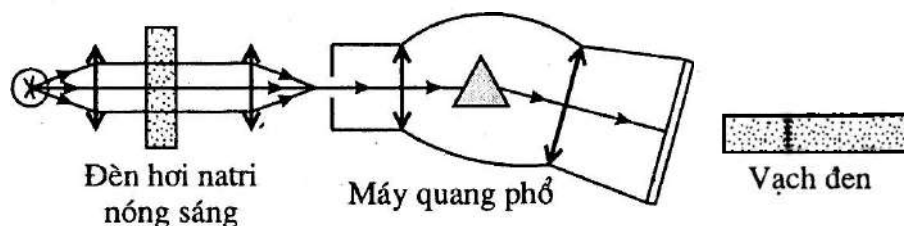
Chẳng hạn quang phổ của hơi natri có hai vạch vàng rất sáng nằm cạnh nhau (vạch kép) ứng với các bước sóng $0,5890\mu\text{m}$ và $0,5896\mu\text{m}$. Quang phổ của hiđrô có hệ thống bốn vạch rất đặc trưng là vạch đỏ H_α ($\lambda_\alpha = 0,6563\mu\text{m}$) ; vạch lam H_β ($\lambda_\beta = 0,4861\mu\text{m}$) ; vạch chàm H_γ ($\lambda_\gamma = 0,4340\mu\text{m}$) và vạch tím H_δ ($\lambda_\delta = 0,4102\mu\text{m}$).

Như vậy, *mỗi nguyên tố hoá học ở trạng thái khí hay hơi nóng sáng dưới áp suất thấp cho một quang phổ vạch riêng, đặc trưng cho nguyên tố đó.*

3. Quang phổ vạch hấp thụ

- a) Chiếu một chùm sáng trắng do một đèn có dây tóc nóng sáng phát ra vào khe của một máy quang phổ ta thu được một quang phổ liên tục trên tấm kính của buồng ảnh. Nền trên đường đi của chùm sáng ta đặt một ngọn đèn có hơi natri nung nóng thì trong quang phổ liên tục nói trên xuất hiện một vạch

tối (thực ra là hai vạch tối nằm rất sát nhau) ở đúng vị trí của vạch vàng trong quang phổ vạch phát xạ của natri (Hình 5.1). Đó là *quang phổ hấp thụ* của natri.



Hình 5.1

Nếu thay hơi natri bằng hơi kali thì trên quang phổ liên tục xuất hiện những vạch tối ở đúng chỗ những vạch màu của quang phổ phát xạ kali. Đó là quang phổ hấp thụ của kali.

Thực ra, quang phổ của Mặt Trời mà ta thu được trên Trái Đất là quang phổ hấp thụ. Phần lõi của Mặt Trời (quang cầu) phát ra một quang phổ liên tục. Ánh sáng từ quang cầu đi qua lớp khí quyển của Mặt Trời đến Trái Đất cho ta một quang phổ hấp thụ của khí quyển đó.

Điều kiện để thu được quang phổ hấp thụ là nhiệt độ của đám khí hay hơi hấp thụ phải thấp hơn nhiệt độ của nguồn sáng phát ra quang phổ liên tục.

b) *Hiện tượng đảo sắc các vạch quang phổ*

Có một hiện tượng đặc biệt liên hệ giữa quang phổ vạch hấp thụ và quang phổ vạch phát xạ của cùng một nguyên tố, đó là hiện tượng đảo sắc. Hiện tượng này xảy ra như sau :

Giả sử đám hơi hấp thụ ở trong thí nghiệm trên được nung nóng đến nhiệt độ mà chúng có thể phát sáng, tuy nhiệt độ này vẫn còn thấp hơn nhiệt độ của nguồn sáng trắng. Trên tấm kính ảnh của máy quang phổ, ta thu được quang phổ hấp thụ của đám hơi đó.

Bây giờ, ta đột nhiên tắt nguồn sáng trắng đi. Ta sẽ thấy nền quang phổ liên tục trên tấm kính ảnh biến mất, đồng thời những vạch đen của quang phổ hấp thụ trở thành các vạch màu của quang phổ vạch phát xạ của chính nguyên tố đó. Đó là *hiện tượng đảo sắc của vạch quang phổ*.

Ví dụ : Trong quang phổ hấp thụ của hơi natri có một vạch đen kép nằm đúng vị trí của hai vạch vàng ($0,5890 \mu\text{m}$ và $0,5896 \mu\text{m}$) của natri.

Vậy, ở một nhiệt độ nhất định, một đám hơi có khả năng phát ra những ánh sáng đơn sắc nào thì cũng có khả năng hấp thụ ánh sáng đơn sắc đó.

- c) **Quang phổ vạch hấp thụ** của mỗi nguyên tố cũng có những tính chất đặc trưng cho nguyên tố đó. Vì vậy, cũng có thể căn cứ vào quang phổ vạch hấp thụ để nhận biết sự có mặt của nguyên tố đó trong các hỗn hợp hay hợp chất. Đó là nội dung của phép phân tích quang phổ hấp thụ.

Nhờ có việc phân tích quang phổ hấp thụ của Mặt Trời mà người ta đã phát hiện ra heli ở trên Mặt Trời, trước khi nhìn thấy nó ở Trái Đất. Ngoài ra người ta còn thấy có mặt của rất nhiều nguyên tố trong khí quyển Mặt Trời như hiđrô, natri, canxi, sắt,...

Các dung dịch cũng cho ta quang phổ hấp thụ, nhưng không phải là các vạch riêng biệt, mà là những đám liên tục. Vị trí của những đám này cũng đặc trưng cho chất bị hoà tan trong dung dịch.

4. Phép phân tích quang phổ

Phép phân tích thành phần cấu tạo của các chất dựa vào việc nghiên cứu quang phổ gọi là phép phân tích quang phổ.

Trong phép phân tích định tính, người ta chỉ cần biết sự có mặt của các thành phần khác nhau trong mẫu mà người ta cần nghiên cứu. Phép phân tích quang phổ định tính thì đơn giản và cho kết quả nhanh hơn các phép phân tích hoá học.

Trong phép phân tích định lượng, người ta cần biết cả nồng độ của các thành phần trong mẫu. Phép phân tích quang phổ rất nhạy, người ta có thể phát hiện được nồng độ rất nhỏ của chất trong mẫu (thường vào khoảng 0,002%).

Nhờ phép phân tích quang phổ mà người ta đã biết được thành phần cấu tạo và nhiệt độ của các vật ở rất xa như Mặt Trời và các sao.



BÀI TẬP

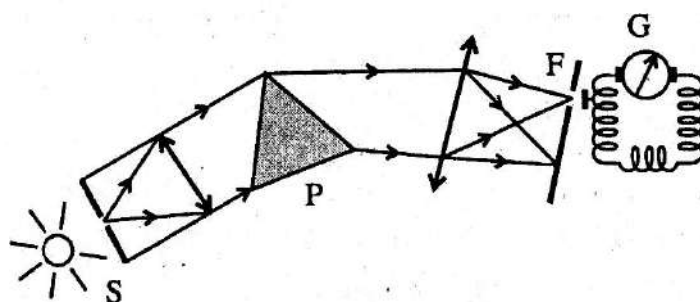
- 5.1. Sự tồn tại của heli được phát hiện đầu tiên trong việc nghiên cứu quang phổ Mặt Trời. Đó là loại quang phổ gì? Tại sao?
- 5.2. Cách tử trong một máy quang phổ cách tử có 50 vạch trên 1 mm. Hỏi chiều dài của cách tử (hay tổng số vạch trong cách tử) phải bằng bao nhiêu để có thể phân giải được hai vạch vàng $0,5890 \mu\text{m}$ và $0,5896 \mu\text{m}$ trong quang phổ bậc 2 của natri?

6

TIA HỒNG NGOẠI. TIA TỬ NGOẠI

1. Thí nghiệm phát hiện các tia hồng ngoại và tử ngoại

Chiếu ánh sáng trắng từ một ngọn đèn có công suất lớn vào khe S của một máy quang phổ lăng kính (Hình 6.1). Trên tiêu diện của thấu kính buồng ảnh của máy sẽ có một quang phổ liên tục. Đặt một màn chắn có khoét một khe hẹp F tại tiêu diện đó, sao cho có thể tách ra được một thành phần đơn sắc nhất định đi qua. Ánh sáng đơn sắc này được chiếu vào đầu nóng của một pin nhiệt điện nhạy. Đầu lạnh của pin được giữ ở một nhiệt độ nhất định ta thấy kim điện kế chỉ một dòng điện nhất định. Điều đó chứng tỏ ánh sáng đơn sắc nói trên đã làm nóng mối hàn này. Xê dịch màn chắn sao cho khe F quét hết quang phổ. Số chỉ của điện kế thay đổi, như vậy, *tác dụng nhiệt của các dòng ánh sáng đơn sắc khác nhau thì khác nhau.*



Hình 6.1

Nếu di chuyển khe F và mối hàn của pin nhiệt điện ra ngoài phạm vi dải màu liên tục, ngoài vùng ánh sáng nhìn thấy, ta vẫn thấy kim điện kế bị lệch. Điều đó chứng tỏ, *ở ngoài vùng dải màu liên tục vẫn còn có những loại ánh sáng (hay còn gọi là bức xạ) nào đó, không nhìn thấy được.*

2. Tia hồng ngoại

Tia hồng ngoại là những bức xạ không nhìn thấy được có bước sóng lớn hơn bước sóng của ánh sáng đỏ ($> 0,76 \mu\text{m}$).

Tia hồng ngoại có bản chất là sóng điện từ. Tia hồng ngoại do các vật bị nung nóng phát ra.

Vật có nhiệt độ thấp chỉ phát ra được các tia hồng ngoại. Chẳng hạn như thân thể người ở nhiệt độ 37°C chỉ phát ra các tia hồng ngoại trong đó mạnh nhất là các tia có bước sóng ở vùng $9 \mu\text{m}$.

Vật có nhiệt độ 500°C bắt đầu phát ra ánh sáng màu đỏ tối, nhưng mạnh nhất vẫn là các tia hồng ngoại. Nguồn phát tia hồng ngoại thường dùng là các bóng đèn có dây tóc bằng vonfam nóng sáng, có công suất từ 250 W đến 1000 W . Nhiệt độ dây tóc bóng đèn khi sáng vào khoảng 2000°C .

Tác dụng nổi bật nhất của tia hồng ngoại là tác dụng nhiệt. Ngoài ra, tia hồng ngoại cũng có tác dụng lên một loại kính ảnh đặc biệt gọi là kính ảnh hồng ngoại. Nếu chụp ảnh các đám mây bằng kính ảnh hồng ngoại thì hình ảnh các đám mây sẽ nổi lên rất rõ rệt. Đó là vì các đám mây chứa hơi nước ít hay nhiều sẽ hấp thụ các tia hồng ngoại yếu hay mạnh rất khác nhau.

Ứng dụng quan trọng nhất của tia hồng ngoại là dùng để sấy hoặc sưởi. Trong công nghiệp, người ta dùng tia hồng ngoại để sấy khô các sản phẩm sơn (như vỏ ô tô, vỏ tủ lạnh,...) hoặc các hoa quả (vải, chuối, nho,...). Trong y học, người ta dùng đèn hồng ngoại để sưởi ấm ngoài da cho máu lưu thông được tốt.

3. Tia tử ngoại

Tia tử ngoại là những bức xạ không nhìn thấy được, có bước sóng ngắn hơn bước sóng của ánh sáng tím ($< 0,38 \mu\text{m}$).

Tia tử ngoại có bản chất là sóng điện từ.

Mặt Trời là một nguồn phát tia tử ngoại rất mạnh. Khoảng 9% công suất của chùm sáng mặt trời thuộc về các tia tử ngoại. Các hồ quang điện cũng là những nguồn phát tia tử ngoại mạnh. Trong các bệnh viện và phòng thí nghiệm, người ta dùng các đèn thủy ngân làm nguồn phát tia tử ngoại. Ngoài ra những vật được nung nóng trên 3000°C cũng phát ra tia tử ngoại rất mạnh.

Tia tử ngoại bị thuỷ tinh, nước,... hấp thụ rất mạnh. Thạch anh thì gần như trong suốt đối với các tia tử ngoại có bước sóng nằm trong vùng từ $0,18\text{ }\mu\text{m}$ đến $0,40\text{ }\mu\text{m}$ (gọi là vùng tử ngoại gần).

Tia tử ngoại có tác dụng rất mạnh lên kính ảnh. Nó có thể làm cho một số chất phát quang. Nó có tác dụng ion hoá không khí. Ngoài ra, nó còn có tác dụng gây ra một số phản ứng quang hoá, phản ứng quang hợp,... Tia tử ngoại có một số tác dụng sinh học.

Trong công nghiệp, người ta sử dụng tia tử ngoại để phát hiện các vết nứt nhỏ, vết xước trên bề mặt các sản phẩm tiện. Muốn vậy, người ta xoa trên bề mặt sản phẩm một lớp bột phát quang rất mịn. Bột sẽ chui vào các khe nứt, vết xước. Khi đưa sản phẩm vào chùm tia tử ngoại, các vết đó sẽ sáng lên.

Trong y học, người ta dùng tia tử ngoại để chữa bệnh còi xương.



BÀI TẬP

- 6.1. Phải thay chất liệu của những bộ phận nào trong một máy quang phổ lăng kính thuỷ tinh để có thể chụp được quang phổ trong vùng tử ngoại gần ? Chất liệu thay thế có thể là chất gì ?
- 6.2. Dùng máy quang phổ cách tử nghiên cứu quang phổ trong vùng hồng ngoại hay vùng tử ngoại thì tốt hơn ? Tại sao ?

7

TIA X. THANG SÓNG ĐIỆN TỪ

1. Ống tia X

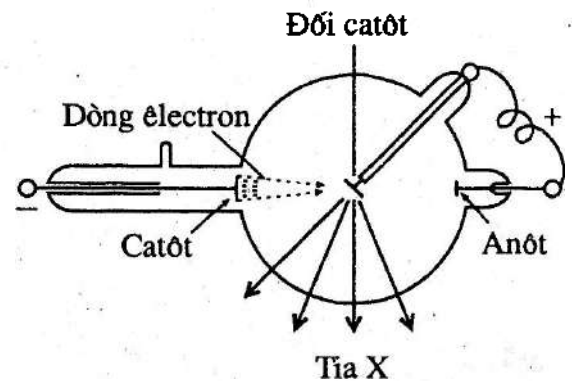
Ống tia X là một ống tia catôt, trong đó có lắp thêm một điện cực bằng kim loại có nguyên tử lượng lớn và điểm nóng chảy cao như platin, vonfam,... để chặn dòng tia catôt. Cực kim loại này gọi là đối catôt (Hình 7.1). Đối catôt thường được nối với anôt.

Áp suất trong ống vào khoảng 10^{-3} mmHg.

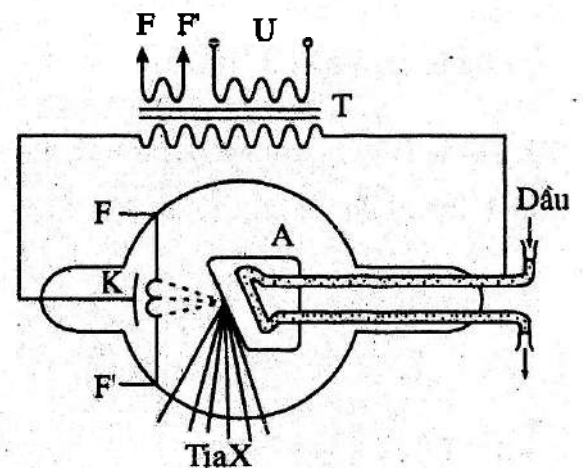
Hiệu điện thế giữa anôt và catôt khoảng vài vạn vôn. Dòng electron phát ra từ catôt được tăng tốc rất mạnh. Khi chúng đập vào đối catôt sẽ làm cho đối catôt phát ra một loại bức xạ không nhìn thấy, có khả năng đi xuyên qua vỏ thủy tinh ra ngoài. Bức xạ này gọi là tia X hay tia Rơn-ghen. Một màn huỳnh quang (hay một tấm kính ảnh) đặt ngoài ống, chắn chùm tia X, sẽ phát sáng (hoặc bị làm đen).

Bức xạ này được nhà bác học Rơn-ghen (Röntgen), người Đức, phát hiện vào năm 1895.

Các ống tia X mà người ta thường dùng trong y học và trong công nghiệp chỉ có catôt và đối catôt (dùng thay cả anôt). Catôt được nung nóng và đối catôt được làm nguội bằng một dòng dầu. Ống tia X này được gọi là ống Cu-lít-giơ (Coolidge) (Hình 7.2).



Hình 7.1



Hình 7.2

2. Bản chất của tia X

Khi mới được phát hiện, người ta tưởng lầm tia X là một dòng hạt nào đó. Tuy nhiên, khi cho tia X đi qua điện trường và từ trường mạnh thì nó không bị lệch đường. Như vậy, tia X không mang điện.

Về sau, người ta mới xác nhận được rằng tia X là một loại sóng điện từ được phát ra theo cơ chế dưới đây :

Dòng electron trong tia catôt được tăng tốc trong điện trường mạnh, nên thu được một động năng rất lớn. Khi đập vào đối catôt, các electron xuyên sâu vào những lớp electron trong cùng của vỏ nguyên tử và tương tác với những electron của lớp này và với hạt nhân nguyên tử. Trong tương tác này, có phát ra những sóng điện từ có bước sóng rất ngắn, đó là tia X.

Phần lớn năng lượng của electron biến thành thành nhiệt làm nóng đối catôt. Phần còn lại biến thành năng lượng của dòng tia X. Vì đối catôt bị nóng rất mạnh, nên người ta phải luôn luôn làm nguội nó.

Việc đo bước sóng các tia X gặp khó khăn lớn ở chỗ bước sóng của tia X quá nhỏ so với hằng số của các cách tử thông thường. Người ta phải dùng các mạng của các tinh thể thông thường làm cách tử để đo bước sóng các tia X.

Việc nghiên cứu hiện tượng nhiễu xạ của tia X trên các tinh thể được Lau-e nghiên cứu đầu tiên vào năm 1913.

3. Tính chất và công dụng của tia X

Tia X có những tính chất và công dụng sau đây :

- a) Tính chất nổi bật là khả năng đâm xuyên. Nó xuyên qua được những vật chắn sáng thông thường như giấy, bìa, gỗ. Nó đi qua kim loại khó khăn hơn. Kim loại có khối lượng riêng càng lớn thì khả năng cản tia X càng mạnh. Chẳng hạn, tia X xuyên qua dễ dàng một lớp nhôm dày vài cm, nhưng lại bị một lớp chì dày vài mm cản lại. Vì vậy, chì được dùng làm các màn chắn bảo vệ trong kĩ thuật tia X.

Nhờ khả năng đâm xuyên mà tia X được dùng trong y học để chiếu điện, chụp điện (Hình 7.3) ; trong công nghiệp để dò các lỗ hổng khuyết tật nằm bên trong các sản phẩm đúc.



Hình 7.3

- b) Tia X có tác dụng rất mạnh lên kính ảnh. Nhờ đó ta có phép chụp điện.
- c) Tia X có tác dụng làm phát quang các chất. Màn huỳnh quang dùng trong việc chiếu điện là màn có phủ một lớp kẽm sunfua pha bari xianua. Lớp này phát quang màu xanh lục dưới tác dụng của tia X.
- d) Tia X có khả năng làm ion hoá các chất khí.
- e) Tia X có tác dụng sinh lí. Nó có thể huỷ hoại tế bào, giết vi khuẩn. Vì thế, ở một số nước người ta dùng tia X để diệt trùng trong nước máy. Tia X còn được dùng để diệt tế bào ung thư ở da.

4. Thang sóng điện từ

- a) Tia X, tia tử ngoại, ánh sáng nhìn thấy, tia hồng ngoại và sóng vô tuyến đều có chung bản chất là sóng điện từ.

Chúng đều không mang điện và đều không bị lệch đường trong điện trường và từ trường. Chúng đều là sóng ngang.

- b) Điểm khác cơ bản giữa các tia trên là có bước sóng lớn, nhỏ khác nhau. Do có sự khác nhau rất nhiều về bước sóng mà tính chất vật lí của chúng trở nên rất khác nhau.

Bảng bước sóng của các loại tia

Loại tia	Khoảng bước sóng (m)
Tia X	$10^{-8} \div 10^{-11}$
Tia tử ngoại	$3,8.10^{-7} \div 10^{-9}$
Ánh sáng nhìn thấy	$7,6.10^{-7} \div 3,8.10^{-7}$
Tia hồng ngoại	$10^{-3} \div 7,6.10^{-7}$
Các sóng vô tuyến	$3.10^4 \div 10^{-4}$

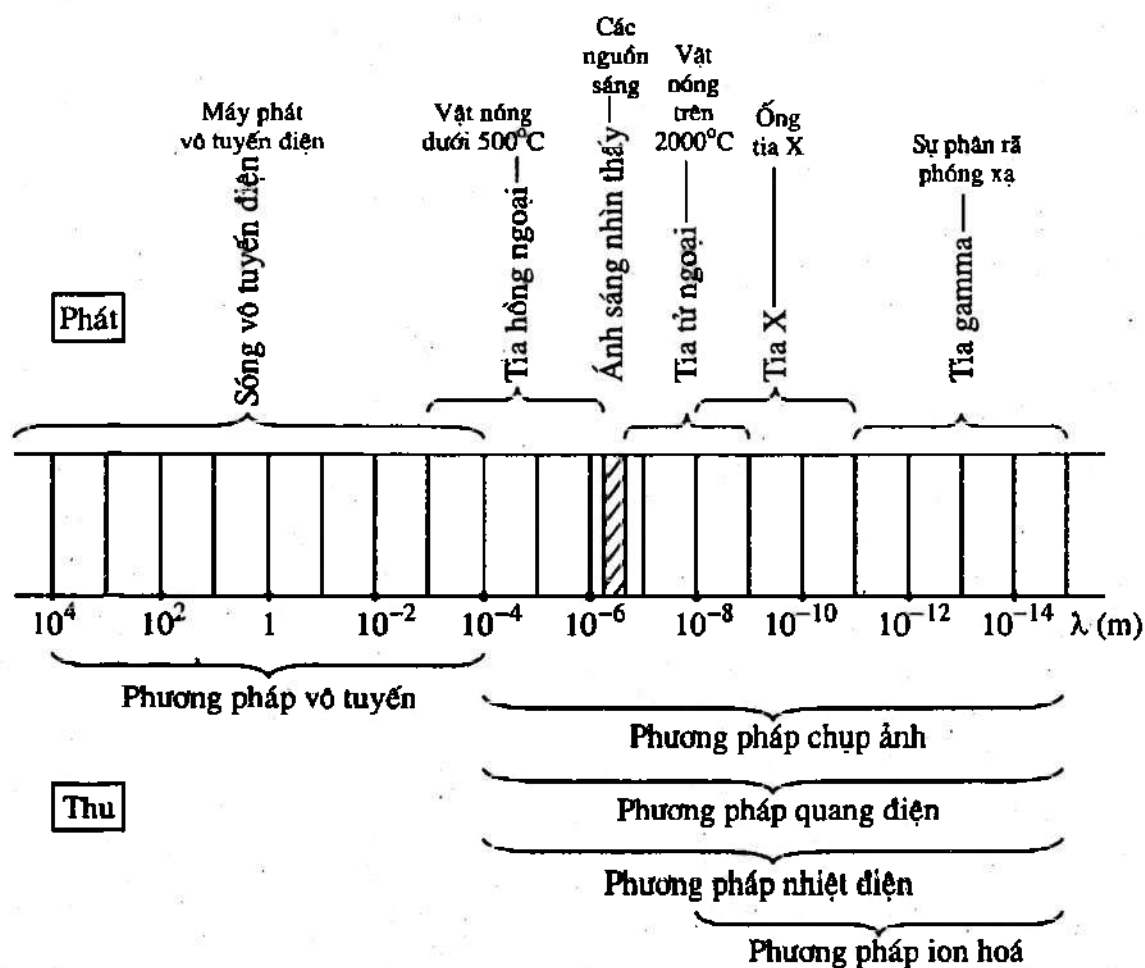
Ngoài ra, trong sự phân rã của các hạt nhân nguyên tử đều có phát ra sóng điện từ có bước sóng cực ngắn (dưới 10^{-12} m). Sóng này gọi là tia gamma.

- c) Thực ra, giữa các vùng tia không có ranh giới rõ rệt. Vì bước sóng khác nhau, nên tính chất của các tia sẽ rất khác nhau.
- Các tia có bước sóng càng ngắn (tia gamma, tia X) càng dễ đâm xuyên, tác dụng lên kính ảnh, làm phát quang các chất và ion hoá không khí.

- Các tia có bước sóng càng dài càng dễ giao thoa và nhiễu xạ. Tính chất sóng ngang của chúng càng dễ quan sát.

d) Cách phát và thu các tia đó cũng khác nhau rất nhiều

Phương pháp thu các loại sóng hay tia được nêu trên hình 7.4.



Hình 7.4



BÀI TẬP

- 7.1. Tại sao trong việc chiếu, chụp bằng tia X, người ta phải cho chùm tia X đi qua một tấm nhôm mỏng, trước khi chiếu vào người bệnh ?
- 7.2. Tại sao không thể dùng các cách tử thông thường để đo bước sóng tia X được ?

8

HIỆN TƯỢNG HẤP THỤ ÁNH SÁNG

1. Hiện tượng hấp thụ ánh sáng

Chiếu một chùm sáng trắng vào một bể kính đựng nước màu xanh. Đặt mắt ở phía đối diện, ta thấy ánh sáng xanh. Nhìn vào bể theo các phương khác nhau ta cũng chỉ thấy ánh sáng xanh (Hình 8.1).



Hình 8.1

Ta đã biết trong chùm sáng trắng có đủ mọi ánh sáng màu. Vậy, các ánh sáng màu khác, ánh sáng đỏ chẳng hạn đã đi đâu ?

Nếu cho chùm sáng xanh, ló ra khỏi bể nước, đi vào một máy quang phổ, ta sẽ thấy có cả ánh sáng các màu khác nữa. Tuy nhiên, vùng ánh sáng màu xanh thì mạnh, còn vùng các ánh sáng màu khác thì yếu hơn.

Nếu chùm sáng trắng có cường độ mạnh thì nước trong bể sẽ nóng lên rõ rệt.

Các thí nghiệm trên cho thấy bể nước hấp thụ yếu ánh sáng xanh và hấp thụ mạnh các ánh sáng khác. Năng lượng của các ánh sáng bị hấp thụ đã làm nóng nước.

Hiện tượng hấp thụ ánh sáng là hiện tượng môi trường vật chất làm giảm cường độ (hay năng lượng) của dòng ánh sáng truyền qua nó. Phần quang năng bị hấp thụ sẽ biến thành nội năng của môi trường.

2. Kính màu

Mỗi môi trường hấp thụ các ánh sáng đơn sắc khác nhau một cách nhiều, ít khác nhau. Đặc điểm này đã được sử dụng để chế tạo các kính màu.

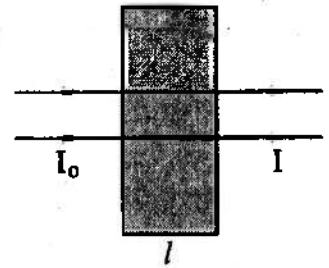
Người ta cho thêm vào thủy tinh, trong quá trình nấu chảy, những ôxit hoặc muối kim loại khác nhau để tạo thành thủy tinh có màu sắc khác nhau như đỏ, nâu, xanh,...

Tấm kính màu đỏ chẳng hạn, sẽ hấp thụ ít ánh sáng đỏ mà hấp thụ mạnh các ánh sáng màu khác.

3. Định luật Bu-gơ – Lăm-be (Bouger – Lambert)

Chắc chắn rằng sự hấp thụ ánh sáng phụ thuộc vào bước sóng ánh sáng, bản chất môi trường và độ dài của đường đi tia sáng trong môi trường.

Giả sử có một chùm sáng song song, đơn sắc (bước sóng λ), có cường độ I_0 , chiếu vuông góc vào mặt trước của một lớp môi trường có bề dày l (Hình 8.2). Khi đi qua lớp đó, cường độ của chùm sáng chỉ còn là I . Ta hãy tìm hệ thức giữa I và I_0 .



Hình 8.2

Giả sử sau khi truyền qua một lớp môi trường mỏng có độ dày dl , cường độ của chùm sáng giảm đi một lượng là dI . Người ta thừa nhận rằng độ giảm dI vừa tỉ lệ với chính cường độ I của chùm sáng tới vừa tỉ lệ với dl :

$$dI = -k_{\lambda} I dl \Rightarrow \frac{dI}{I} = -k_{\lambda} dl$$

$$\int_{I_0}^I \frac{dI}{I} = -k_{\lambda} \int_0^l dl$$

Vậy
$$I = I_0 e^{-k_{\lambda} l} \quad (8.1)$$

Hệ số k_{λ} , có giá trị dương, gọi là *hệ số hấp thụ ánh sáng đơn sắc (có bước sóng λ) của môi trường*. Hệ số k_{λ} có đơn vị là m^{-1} . Nó vừa phụ thuộc vào môi trường vừa phụ thuộc vào λ .

Công thức (8.1) biểu thị định luật Bu-gơ – Lăm-be :

Khi đi qua một môi trường hấp thụ ánh sáng thì cường độ của chùm sáng giảm theo định luật hàm mũ của độ dài đường đi tia sáng.

Trong công thức (8.1), I_0 là cường độ sáng lúc bắt đầu đi vào môi trường (không kể phần cường độ ánh sáng phản xạ) ; $(I_0 - I)$ là độ giảm của cường độ sáng thuần túy do hấp thụ (không kể phần cường độ sáng tán xạ ra xung quanh). Như vậy, việc đo hệ số hấp thụ ánh sáng của một môi trường không đơn giản.

Trước hết, phải đo hệ số phản xạ ánh sáng theo phương vuông góc với mặt phân cách. Sau đó, phải tìm cách giảm thiểu sự tán xạ ánh sáng. Môi trường phải hết sức đồng tính, không có các hạt vẩn, các tâm tán xạ. Cuối cùng là đo cường độ ánh sáng tới và ánh sáng truyền qua.

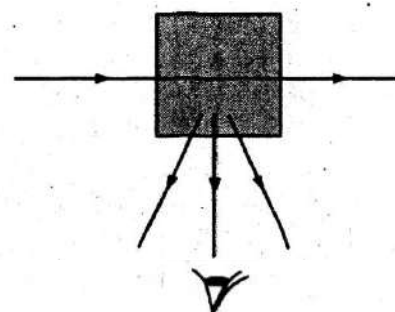
Trong công thức (8.1), nếu $l = \frac{1}{k_\lambda}$ thì $I = \frac{I_0}{e} = \frac{I_0}{2,72}$. Ánh sáng truyền qua quãng đường này thì cường độ giảm đi e lần.

Hệ số hấp thụ ánh sáng của không khí, dưới áp suất 1 atm là 10^{-3} m^{-1} ; của nước khoảng $0,25 \text{ m}^{-1}$; của thủy tinh vào cỡ 1 m^{-1} ; của kim loại vào khoảng 10^6 m^{-1} ; của chất bán dẫn vào cỡ 10^7 m^{-1} .

Như vậy, khi ánh sáng truyền trên một quãng đường khoảng 7 m trong thủy tinh, thì cường độ sáng chỉ còn bằng 0,001 cường độ ban đầu. Đó là một trở ngại lớn cho việc dẫn truyền tín hiệu bằng cáp quang.

4. Thí nghiệm về hiện tượng tán xạ ánh sáng

Chiếu một chùm sáng trắng qua một bình nước trong. Nhìn bình nước theo các phương lệch so với phương của chùm tia tới, ta không thấy có ánh sáng. Nhỏ một vài giọt sữa vào bình, ta sẽ thấy có ánh sáng chiếu theo các phương bên (Hình 8.3). Đó là hiện tượng tán xạ ánh sáng.



Hình 8.3

Vậy, sự tán xạ ánh sáng của một vật là hiện tượng vật đó hắt chùm tia sáng tới theo đủ mọi phương.

Có thể có sự tán xạ ánh sáng trên bề mặt của một vật như giấy, sứ không trắng men, cát..., hoặc sự tán xạ ánh sáng từ trong lòng một khối chất.

Dưới đây, ta chỉ xét sự tán xạ ánh sáng trong lòng một khối chất. Trong các hiện tượng tán xạ loại này, ta chỉ xét hiện tượng tán xạ Tin-đan và hiện tượng tán xạ phân tử.

5. Tán xạ Tin-đan (Tyndall)

Tán xạ Tin-đan là hiện tượng tán xạ xảy ra trong các môi trường có các hạt vẩn nhỏ khoảng dưới vài phần mười bước sóng ánh sáng tới, chẳng hạn như các hạt khói, hạt sương trong không khí, các hạt chất kết tủa trong chất lỏng... Các hạt nhỏ này đóng vai trò của các tâm tán xạ. Xét cho cùng thì ánh sáng tán xạ cũng do các electron trong các nguyên tử hoặc phân tử của các tâm tán xạ phát ra.

Tán xạ Tin-đan có những đặc điểm sau đây :

- a) Cường độ của ánh sáng tán xạ tỉ lệ nghịch với lũy thừa bốn của bước sóng ánh sáng tán xạ : $I \sim \frac{1}{\lambda^4}$.

Như vậy, ánh sáng có bước sóng ngắn bị tán xạ mạnh hơn ánh sáng có bước sóng dài. Do đó, khi chùm sáng trắng đi qua một khối chất tán xạ thì ánh sáng tán xạ ngả về màu xanh, còn ánh sáng truyền qua ngả về màu đỏ.

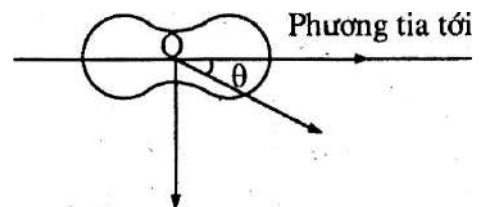
- b) Cường độ của ánh sáng tán xạ phụ thuộc vào góc tán xạ θ (góc tạo bởi phương của tia sáng tán xạ và phương của tia sáng tới).

Người ta đã tìm được công thức về cường độ của tia tán xạ :

$$I_{\theta} = I_{\frac{\pi}{2}} (1 + \cos^2 \theta) \quad (8.2)$$

$I_{\frac{\pi}{2}}$ là cường độ của tia tán xạ theo phương $\theta = \frac{\pi}{2}$.

Nếu biểu diễn cường độ của tia tán xạ bằng một vectơ có gốc tại tâm tán xạ O, có phương và chiều là phương và chiều của tia tán xạ và có môđun tỉ lệ với cường độ của tia tán xạ thì ngọn của các vectơ này sẽ nằm trên một đường cong gọi là *giản đồ chỉ thị tán xạ*. Giản đồ này có dạng như một cuộn len (Hình 8.4).



Hình 8.4

Ta thấy giản đồ này có tính đối xứng quanh phương của tia tới và quanh đường thẳng vuông góc với phương tia tới, tức là ánh sáng tán xạ về phía trước và phía sau là như nhau.

Với những hạt vẫn có kích thước lớn thì giản đồ chỉ thị tán xạ không còn đối xứng quanh trục vuông góc với tia tới nữa. Phần ánh sáng tán xạ về phía sau sẽ bị giảm mạnh, thậm chí mất hẳn.

6. Tán xạ phân tử

Trong một khối chất trong suốt, đồng tính, bao giờ cũng xuất hiện những chỗ thăng giáng về mật độ do có chuyển động nhiệt hỗn loạn của các phân tử. Tại một thời điểm nhất định, có chỗ tập trung nhiều phân tử, có chỗ tập trung ít phân tử ; vị trí những chỗ thăng giáng mật độ này luôn luôn thay đổi theo thời gian. Những chỗ thăng giáng này trở thành những tâm tán xạ ánh sáng. Sự tán xạ ánh sáng trong trường hợp này gọi là *tán xạ phân tử*.

Tán xạ phân tử cũng có những đặc điểm nói trên của tán xạ Tin-đan.

Màu xanh trong thâm thẳm của bầu trời chính là do sự tán xạ phân tử xảy ra trong khí quyển.



- 8.1.** Một chùm sáng song song có cường độ $0,25 \text{ W/m}^2$ chiếu vuông góc vào mặt của một chồng 10 bản thủy tinh giống nhau. Mỗi bản có chiều dày $0,5 \text{ cm}$. Hệ số hấp thụ ánh sáng của thủy tinh là $0,8 \text{ m}^{-1}$. Hệ số phản xạ ánh sáng theo phương vuông góc ở cả mặt trước và mặt sau của tấm thủy tinh đều bằng $0,04$. Tính cường độ của chùm tia ló cuối cùng, với độ chính xác cỡ 1% . Bỏ qua sự hấp thụ ánh sáng của không khí.
- 8.2.** Một chùm sáng song song, đơn sắc, chiếu qua một lớp chất lỏng dày 1 m . Cường độ của chùm sáng ở mặt trước và mặt sau của lớp chất lỏng lần lượt là $0,40 \text{ W/m}^2$ và $0,23 \text{ W/m}^2$. Hệ số hấp thụ ánh sáng của chất lỏng là $0,3 \text{ m}^{-1}$. Chất lỏng có khả năng tán xạ ánh sáng. Cường độ ánh sáng tán xạ theo phương vuông góc với phương của chùm tia tới là $0,015 \text{ W/m}^2$.
- Xác định tỉ lệ phần trăm năng lượng ánh sáng không bị hấp thụ so với năng lượng của chùm sáng tới.
 - Xác định tỉ lệ phần trăm năng lượng ánh sáng tán xạ so với năng lượng của chùm sáng tới.

Chương II

LƯỢNG TỬ ÁNH SÁNG

9

SỰ BỨC XẠ NHIỆT

1. Sự bức xạ nhiệt

Một vật được "nung nóng" sẽ bức xạ, tức là phát ra các sóng điện từ : tia hồng ngoại, ánh sáng nhìn thấy, tia tử ngoại,... Nếu không được bổ sung năng lượng thì năng lượng dự trữ của vật sẽ bị giảm dần, do đó, nhiệt độ của nó sẽ giảm, đồng thời, các thành phần bức xạ của nó sẽ bị thay đổi dần. Sự bức xạ của vật trong trường hợp này là sự bức xạ không cân bằng.

Ngược lại, nếu ta liên tục bù đắp cho vật phần năng lượng đã bị tiêu hao để giữ cho nhiệt độ (T) của vật không đổi thì các thành phần bức xạ của vật sẽ không bị thay đổi. Sự bức xạ của vật lúc đó gọi là *sự bức xạ nhiệt*.

Vậy, *sự bức xạ nhiệt là sự bức xạ của một vật được giữ ở một nhiệt độ không đổi, tức là ở trạng thái cân bằng nhiệt*.

2. Năng suất phát xạ đơn sắc và năng suất hấp thụ đơn sắc

a) Năng suất phát xạ đơn sắc

Xét một vật phát xạ, phát ra chùm sáng không đơn sắc. Tách trong chùm sáng này những ánh sáng gần đơn sắc, có bước sóng nằm trong khoảng từ λ đến $\lambda + d\lambda$, với $d\lambda$ rất nhỏ so với λ .

Gọi R_λ là dòng quang năng của chùm sáng gần đơn sắc nói trên, do một đơn vị diện tích của vật phát ra theo đủ mọi phía ; R_λ cũng là độ trung năng lượng của vật ứng với chùm sáng đó.

Đại lượng :
$$r_\lambda = \frac{R_\lambda}{d\lambda} \quad (9.1)$$

gọi là *năng suất phát xạ đơn sắc* của vật trong vùng ánh sáng có bước sóng λ .

Đơn vị của năng suất phát xạ đơn sắc là oát trên mét khối (W/m^3).

Ta hiểu năng suất phát xạ đơn sắc là độ trung năng lượng của vật ứng với một ánh sáng có bước sóng nhất định.

b) Năng suất hấp thụ đơn sắc

Giả sử độ rọi năng lượng của ánh sáng có bước sóng λ trên mặt vật là A_λ .

Năng suất phát xạ đơn sắc của vật đối với ánh sáng có bước sóng λ là r_λ .

Phần năng lượng ánh sáng có bước sóng λ bị một đơn vị diện tích của vật hấp thụ trong một giây là : $q_\lambda = A_\lambda - r_\lambda$.

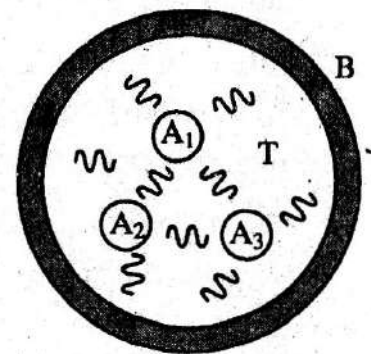
Năng suất hấp thụ đơn sắc của vật ở vùng bước sóng λ là :
$$a_\lambda = \frac{q_\lambda}{A_\lambda} \quad (9.2)$$

Năng suất hấp thụ đơn sắc được tính bằng phần trăm.

3. Định luật Kiếp-sốp về sự bức xạ nhiệt

Định luật này được thiết lập bằng con đường suy diễn lí thuyết, sau đó được nghiệm lại bằng thực nghiệm.

Giả sử có một bình kín B có thành bên trong và bên ngoài phản xạ lí tưởng, tức là vỏ bình hoàn toàn không hấp thụ năng lượng. Như vậy vỏ bình ngăn cách không cho phần bên trong và phần bên ngoài bình trao đổi năng lượng với nhau (Hình 9.1).



Hình 9.1

Giả sử trong bình có ba vật bức xạ nhiệt A_1 , A_2 và A_3 . Ngoài ba vật đó ra, trong bình là chân không. Đây không phải là chân không "trống rỗng", mà là chân không chứa đầy bức xạ (sóng điện từ) do ba vật phát ra.

Sau một thời gian trao đổi năng lượng bằng con đường bức xạ và hấp thụ năng lượng sóng điện từ thì hệ ba vật sẽ đến trạng thái cân bằng nhiệt. Lúc đó, ba vật sẽ có cùng nhiệt độ T.

Trạng thái cân bằng này xảy ra đối với mọi sóng điện từ có bước sóng khác nhau.

Như vậy, trong một giây, phần năng lượng của sóng điện từ có bước sóng λ mà một vật nào đó phát ra cũng phải bằng phần năng lượng của sóng điện từ có bước sóng λ mà vật đó hấp thụ.

Gọi năng suất phát xạ đơn sắc của các vật A_1 , A_2 và A_3 lần lượt là $r_{1\lambda}$, $r_{2\lambda}$ và $r_{3\lambda}$; năng suất hấp thụ đơn sắc của chúng là $a_{1\lambda}$, $a_{2\lambda}$ và $a_{3\lambda}$; diện tích của chúng là S_1 , S_2 và S_3 .

Dòng quang năng đơn sắc λ mà vật A_1 phát ra là: $E_{1\lambda} = S_1 r_{1\lambda}$.

Lượng năng lượng ánh sáng đơn sắc λ mà vật A_1 hấp thụ trong một giây là:

$$Q_{1\lambda} = q_{1\lambda} S_1 = a_{1\lambda} S_1 A_\lambda$$

Ở trạng thái cân bằng nhiệt, ta phải có: $E_{1\lambda} = Q_{1\lambda}$. Từ đó suy ra $\frac{r_{1\lambda}}{a_{1\lambda}} = A_\lambda$.

Độ rơi năng lượng đơn sắc A_λ là chung cho mọi vật trong bình B. Ta có thể coi nó bằng mật độ dòng năng lượng đơn sắc rơi đến các vật trong bình:

$$A_\lambda = u_\lambda c$$

u_λ là mật độ năng lượng đơn sắc trong bình; c là tốc độ ánh sáng trong chân không.

Như vậy, ta sẽ được:

$$\frac{r_{1\lambda}}{a_{1\lambda}} = \frac{r_{2\lambda}}{a_{2\lambda}} = \frac{r_{3\lambda}}{a_{3\lambda}} = \dots = f(\lambda, T) \quad (9.3)$$

Ta có định luật Kiếp-sốp về bức xạ nhiệt sau:

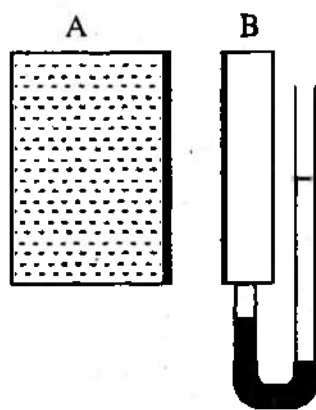
Tỉ số giữa năng suất phát xạ đơn sắc và năng suất hấp thụ đơn sắc của cùng một vật ở vùng bước sóng λ và ở nhiệt độ T không phụ thuộc bản chất của vật mà chỉ phụ thuộc bước sóng λ và nhiệt độ T của nó.

Theo định luật này, vật nào phát xạ mạnh thì cũng hấp thụ mạnh bức xạ; vật nào phát xạ yếu thì cũng hấp thụ yếu bức xạ.

Ta có thể dùng thiết bị sau đây để nghiệm lại định luật này. Thiết bị gồm một hộp rỗng bằng kim loại B, một mặt sơn đen, một mặt sơn trắng. Hộp B được nối với một áp kế nước (Hình 9.2). Ở nhiệt độ và áp suất của phòng thì mực nước trong hai nhánh của áp kế ngang nhau.

Hộp B được đặt đối diện và gần với một bình bằng kim loại đựng nước nóng A. Bình A cũng có một mặt sơn đen, một mặt sơn trắng.

Bạn hãy xây dựng phương án nghiệm lại một cách định tính định luật Kiéc-sốp về bức xạ nhiệt bằng thiết bị mô tả ở trên.



Hình 9.2

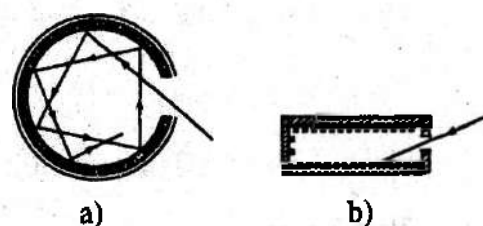
4. Vật đen tuyệt đối

Các vật có màu nào thì tán xạ tốt ánh sáng màu đó. Vật màu đen thì tán xạ kém tất cả các ánh sáng màu. Điều đó có nghĩa là vật màu đen hấp thụ tốt tất cả các ánh sáng màu.

Vật đen tuyệt đối là vật có khả năng hấp thụ hoàn toàn tất cả mọi ánh sáng. Năng suất hấp thụ đơn sắc a_λ của vật đen tuyệt đối bằng đơn vị ($a_\lambda = 1$) đối với mọi ánh sáng có bước sóng khác nhau và ở mọi nhiệt độ.

Cần chú ý rằng, vật đen tuyệt đối không chỉ hấp thụ bức xạ mà nó còn có thể phát ra bức xạ.

Những hốc kín có một lỗ thủng nhỏ, thành trong nhám và phủ bột hóng là những vật đen tuyệt đối lí tưởng (Hình 9.3).



Hình 9.3

Đó là vì những tia sáng đi qua lỗ nhỏ vào trong hốc sẽ bị phản xạ nhiều lần ở thành trong và bị hấp thụ hết. Thực ra chỉ có phần hờ của hốc đó mới là vật đen tuyệt đối.

Các vật rắn nóng sáng, các khối chất lỏng nóng sáng, các khối khí có khối lượng riêng lớn nóng sáng,... có thể coi như những vật đen tuyệt đối đang phát sáng. Mặt Trời, các vì sao cũng là những vật đen tuyệt đối đang phát sáng.

Đặc biệt, các hốc (lỗ) đen là các vật đen tuyệt đối hấp thụ rất mạnh tất cả các bức xạ chiếu đến chúng. Chúng là những thiên thể có khối lượng riêng cực kì lớn, đến nỗi các photon (hạt ánh sáng) mà chúng có thể phát ra đều bị hút trở lại.

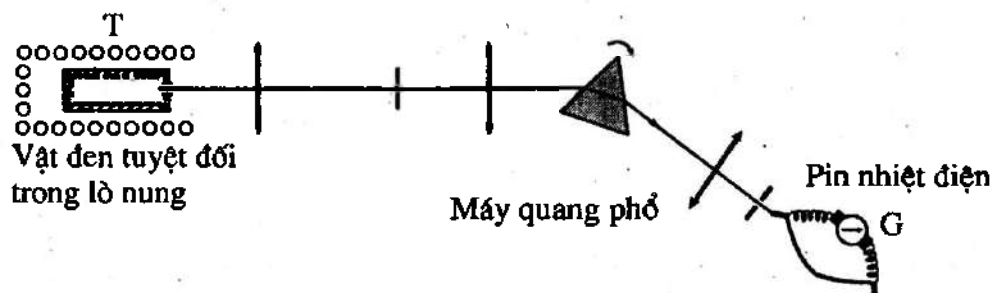
Một điều rất đặc biệt là : *Tất cả các vật đen tuyệt đối đều có cùng một năng suất phát xạ đơn sắc. Năng suất phát xạ đơn sắc của chúng là một hàm số chỉ của bước sóng và nhiệt độ.*

$$r_{1\lambda} = r_{2\lambda} = r_{3\lambda} = \dots = f(\lambda, T) = \rho(\lambda, T) \quad (9.4)$$

Vì vậy, ta chỉ cần nghiên cứu trên một vật đen tuyệt đối cụ thể. Kết quả thu được có thể đem áp dụng cho tất cả các vật đen tuyệt đối khác.

5. Quang phổ liên tục của vật đen tuyệt đối

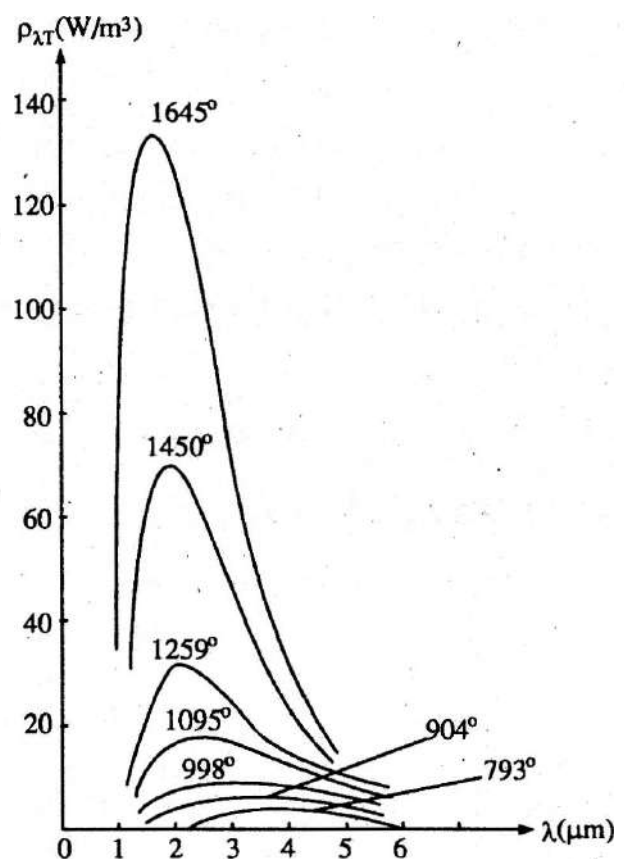
Đặt một vật đen tuyệt đối trong một lò nung, giữ ở một nhiệt độ T xác định. Cho chùm sáng do vật đen tuyệt đối đó phát ra chiếu vào khe của một máy quang phổ (Hình 9.4).



Hình 9.4

Ta sẽ thu được một quang phổ liên tục. Đó là một dải có màu sắc biến thiên liên tục từ đỏ đến tím, màu nọ sát màu kia. Quang phổ này còn kéo dài cả ở vùng tử ngoại và vùng hồng ngoại. Quang phổ này không phụ thuộc vào bản chất của vật phát xạ mà chỉ phụ thuộc vào nhiệt độ.

Dùng một pin nhiệt điện nhạy để đo độ rơi ở những phần khác nhau của quang phổ liên tục, đồ thị của hàm số $\rho(\lambda, T)$ biểu diễn sự phụ thuộc của năng suất phát xạ đơn sắc của vật đen tuyệt đối vào bước sóng λ ở nhiệt độ T . Thay đổi nhiệt độ T , ta sẽ thu được những đồ thị $\rho(\lambda, T)$ ở những nhiệt độ khác nhau (Hình 9.5).



Hình 9.5

Từ kết quả thực nghiệm trên, ta rút ra những kết luận sau :

a) Nhiệt độ T càng cao, vật bức xạ càng mạnh.

Ta gọi độ trung năng lượng toàn phần R_T của vật ở nhiệt độ T là tổng các độ trung đơn sắc R_λ của vật ở nhiệt độ T :

$$R_T = \sum R_\lambda = \int r_\lambda d\lambda = \int \rho(\lambda, T) d\lambda$$

Biểu thức của R_T cho thấy độ trung năng lượng toàn phần của vật đen tuyệt đối ở nhiệt độ T được biểu diễn bằng độ lớn của diện tích của phần nằm giữa đường cong $\rho(\lambda, T)$ và trục hoành.

Ta thấy R_T tăng rất nhanh theo nhiệt độ.

b) Ở nhiệt độ thấp, cực đại của năng suất phát xạ đơn sắc nằm trong vùng hồng ngoại. Vật chủ yếu phát ra tia hồng ngoại. Phần công suất của các tia sáng nhìn thấy được nhỏ không đáng kể.

Đến khoảng 900°C công suất của các tia đỏ đã đủ lớn để gây ra cảm giác sáng. Ta thấy vật có màu đỏ tối.

Nhiệt độ càng cao thì cực đại của năng suất phát xạ đơn sắc càng dịch dần về phía bước sóng ngắn. Do đó, màu của ánh sáng mà vật phát ra càng trắng.

Tất cả các nhận xét trên ta đều có thể thấy được một cách đơn giản trực tiếp từ việc quan sát một mẫu sắt nung đỏ trong một lò rèn.

6. Các định luật thực nghiệm về sự bức xạ nhiệt của vật đen tuyệt đối

Xuất phát từ việc nghiên cứu các đồ thị thực nghiệm về năng suất phát xạ đơn sắc của vật đen tuyệt đối, các nhà vật lí đã rút ra một số định luật sau :

a) Định luật Stê-fan – Bôn-xơ-man (Stefan – Boltzmann)

Độ trung năng lượng toàn phần R_T của vật đen tuyệt đối tỉ lệ thuận với lũy thừa bốn của nhiệt độ tuyệt đối T của vật :

$$R_T = \sigma T^4 \quad (9.5)$$

σ là một hằng số ; $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$.

Theo định luật này, ở nhiệt độ càng cao thì vật càng phát xạ mạnh.

b) Định luật dịch chuyển của Viên (Wien)

Bước sóng ứng với cực đại của năng suất phát xạ đơn sắc (kí hiệu là $\lambda_{\max}$) của vật đen tuyệt đối tỉ lệ nghịch với nhiệt độ tuyệt đối T của vật.

$$\lambda_{\max} = \frac{2896}{T} \quad (9.6)$$

Trong công thức này, $\lambda_{\max}$ phải tính theo đơn vị μm . Hệ số 2896 có đơn vị $\mu\text{m.K}$. Ở nhiệt độ càng cao thì cực đại của năng suất phát xạ đơn sắc càng dịch về phía bước sóng ngắn. Do đó, màu sắc của vật ngả dần sang trắng rồi sang xanh.

7. Sự khủng hoảng tử ngoại

Vào cuối thế kỉ thứ XIX, các nhà vật lí gặp khó khăn lớn trong việc giải thích hình dạng của đồ thị biểu diễn sự phụ thuộc của năng suất phát xạ đơn sắc của vật đen tuyệt đối vào bước sóng ánh sáng.

Dựa vào lí thuyết phát xạ cổ điển, người ta thấy rằng năng suất phát xạ đơn sắc của vật đen tuyệt đối phải tỉ lệ với lũy thừa hai của tần số (tức là tỉ lệ nghịch với lũy thừa hai của bước sóng). Như vậy, khi $\lambda \rightarrow 0$ thì $\rho(\lambda, T) \rightarrow \infty$. Điều này hoàn toàn mâu thuẫn với kết quả thực nghiệm. Người ta gọi sự bất lực của lí thuyết cổ điển trong trường hợp này là "sự khủng hoảng tử ngoại".

8. Thuyết lượng tử và công thức Plăng (Planck) về sự bức xạ nhiệt

Plăng cho rằng nguyên nhân cơ bản dẫn đến sự thất bại của lí thuyết phát xạ cổ điển trong việc giải thích các kết quả thực nghiệm về sự bức xạ của vật đen tuyệt đối, là quan niệm sai lầm về độ lớn của năng lượng mà một nguyên tử hay phân tử có thể trao đổi với bên ngoài, mỗi lần phát xạ hay hấp thụ bức xạ.

Theo Plăng, lượng năng lượng mà một nguyên tử hay phân tử trao đổi mỗi lần phát xạ hay hấp thụ bức xạ có giá trị hoàn toàn xác định, bằng :

$$\epsilon = hf \quad (9.7)$$

ϵ gọi là lượng tử năng lượng ; f là tần số của bức xạ được phát ra hay bị hấp thụ ; h là một hằng số.

Sau này người ta đặt tên hằng số đó là hằng số Plăng và đã xác định được chính xác giá trị của nó :

$$h = 6,625.10^{-34} \text{ J.s} \quad (9.8)$$

Đây là nội dung của thuyết lượng tử của Plăng.

Plăng đã tìm được công thức biểu diễn sự phụ thuộc của năng suất phát xạ đơn sắc $\rho(f, T)$ vào tần số f và nhiệt độ T :

$$\rho(f, T) = \left(\frac{2\pi f^2}{c^2} \right) \left(\frac{1}{e^{\frac{hf}{kT}} - 1} \right) (hf) \quad (9.9)$$

Công thức Plăng có ba thừa số :

- Thừa số thứ nhất là số nguyên tử hay phân tử (khi đó, người ta gọi là dao động tử) có khả năng phát ra bức xạ có tần số f . Các nhà vật lí cổ điển cũng đã tìm được thừa số này.
- Thừa số thứ hai là xác suất để một dao động tử nói trên có thể phát ra bức xạ. Đây cũng là một sáng tạo mới của Plăng.
- Thừa số thứ ba là lượng tử năng lượng của bức xạ.

Công thức Plăng phù hợp khá tốt với thực nghiệm. Từ công thức này, người ta có thể suy ra biểu thức của hằng số σ trong định luật Stê-fan – Bôn-xơ-man :

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15h^3 c^2} \quad (9.10)$$

Giá trị của hằng số σ tính theo công thức này phù hợp tốt với giá trị đo trong thực nghiệm.

Từ công thức (9.9), người ta suy ra công thức biểu diễn sự phụ thuộc của năng suất phát xạ đơn sắc $\rho(\lambda, T)$ vào bước sóng λ và nhiệt độ T :

$$\rho(\lambda, T) = 2\pi h c^2 \frac{\lambda^{-5}}{e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1} \quad (9.11)$$

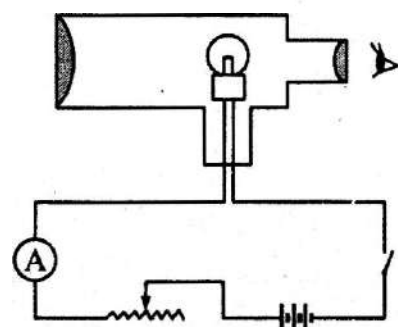
9. Phương pháp hoá kế quang học

Vì quang phổ liên tục của bức xạ mà vật đen tuyệt đối phát ra không phụ thuộc bản chất của vật phát sáng mà chỉ phụ thuộc nhiệt độ của vật, nên ta có thể căn cứ vào quang phổ liên tục để xác định nhiệt độ của vật.

- Người thợ rèn có kinh nghiệm có thể dựa vào màu của ánh sáng do miếng thép nung trong lò rèn phát ra để xác định một cách định tính xem miếng thép đã được nung đến mức độ nào.
- Trong thiên văn, người ta dựa vào màu của ánh sáng do ngôi sao phát ra để xác định nhiệt độ của ngôi sao. Những sao kênh đỏ có nhiệt độ cỡ 3000 K ; Những ngôi sao vàng như Mặt Trời có nhiệt độ khoảng 6000 K ; những sao màu trắng xanh có nhiệt độ hàng vạn độ.
- Phương pháp xác định nhiệt độ của các vật nóng sáng dựa vào các đặc điểm của chùm sáng do vật đó phát ra gọi là *phương pháp hoá kế quang học*.

Để xác định nhiệt độ của các lò cao, người ta thường dùng *hoả kế có đèn sợi đốt* (Hình 9.6).

Hoả kế này có cấu tạo gồm :



Hình 9.6

- Một ống ngắm ;
- Một đèn sợi đốt có dây tóc được bố trí trong mặt phẳng gần tiêu diện của vật kính ống ngắm ;
- Bộ phận dùng để điều chỉnh và đo cường độ dòng điện chạy qua dây tóc đèn.

Hướng ống ngắm vào miệng của lò cao. Điều chỉnh vật kính để ảnh của miệng lò hiện lên đúng mặt phẳng của dây tóc bóng đèn. Điều chỉnh thị kính để ngắm ảnh này. Lúc đó dây tóc hiện lên như một sợi dây màu đen trên một nền sáng. Đóng công tắc, cho dòng điện chạy qua đèn. Tăng dần cường độ dòng điện, cho dây tóc sáng dần lên. Khi độ chói của dây tóc bằng độ chói của ảnh thì dây tóc hình như biến mất trên nền sáng.

Có mối liên hệ nhất định giữa nhiệt độ của miệng lò với độ chói của ảnh và cường độ dòng điện qua dây tóc bóng đèn. Vì vậy, máy đo trong hoá kế được chia độ theo ngay nhiệt độ.



BÀI TẬP

- 9.1. Khi các tia sáng mặt trời chiếu vuông góc với mặt đất thì lượng năng lượng mà chúng tải đến diện tích 1 m^2 trên mặt đất trong mỗi giây là $1,35 \text{ kJ}$ (sau khi đã hiệu chỉnh sự hấp thụ của khí quyển). Đường kính góc của Mặt Trời nhìn từ Trái Đất là $30'$. Xác định nhiệt độ của lớp vỏ ngoài của Mặt Trời (quang cầu). Coi Mặt Trời như vật đen tuyệt đối.
- 9.2. Cho rằng Trái Đất bức xạ như một vật đen tuyệt đối và lượng năng lượng mà nó toả ra luôn bằng lượng năng lượng mà nó nhận được từ ánh sáng mặt trời. Xác định nhiệt độ trung bình trên Trái Đất. Biết nhiệt độ trên bề mặt Mặt Trời là 6000 K và đường kính góc của Mặt Trời nhìn từ Trái Đất là $30'$.
Bỏ qua nhiệt lượng mà Trái Đất nhận được từ các nguồn nhiệt từ ở trong lòng nó.
- 9.3. Dây tóc của một bóng đèn sợi đốt có chiều dài 10 cm và đường kính $0,03 \text{ mm}$, được quấn thành một lò xo có rất nhiều vòng, không chạm nhau. Hiệu điện thế giữa hai đầu dây tóc là 12 V . Coi dây tóc phát sáng như một vật đen tuyệt đối. Xác định nhiệt độ của dây tóc và bước sóng trong quang phổ liên tục mà tại đó năng suất phát xạ của dây tóc là cực đại.
Cho rằng bóng đèn bị mất 8% điện năng tiêu thụ vào các quá trình toả nhiệt khác. Điện trở suất của dây tóc là $5,5 \cdot 10^{-8} \Omega \text{m}$.
- 9.4. Từ công thức Plăng về năng suất phát xạ của vật đen tuyệt đối như một hàm số của tần số ánh sáng và nhiệt độ :

$$\rho(f, T) = \left(\frac{2\pi f^2}{c^2} \right) \left(\frac{1}{e^{\frac{hf}{kT}} - 1} \right) (hf)$$

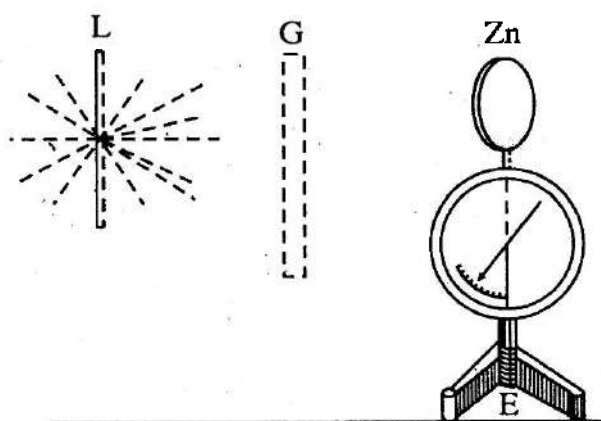
Hãy tìm công thức Plăng về năng suất phát xạ đơn sắc của vật đen tuyệt đối như một hàm số của bước sóng ánh sáng và nhiệt độ ($\rho(\lambda, T)$).

10

HIỆN TƯỢNG QUANG ĐIỆN

1. Thí nghiệm Héc

Năm 1887, nhà bác học người Đức, Héc (Heinrich Rudolf Hertz, 1857 – 1894) đã làm thí nghiệm sau : Chiếu một chùm ánh sáng do một hồ quang phát ra vào một tấm kẽm tinh điện âm, gắn trên một tĩnh điện kế (Hình 10.1). Ông thấy số chỉ của tĩnh điện kế giảm đi. Điều đó chứng tỏ tấm kẽm đã mất bớt điện tích âm.



Hình 10.1

Khi làm thí nghiệm với tấm kẽm tích điện dương thì không có hiện tượng gì xảy ra.

Hiện tượng cũng xảy ra tương tự nếu thay tấm kẽm bằng các tấm đồng, nhôm, bạc, niken,... tích điện âm.

Nếu dùng một tấm thủy tinh không màu chắn chùm tia hồ quang thì hiện tượng trên không xảy ra. Ta biết rằng thủy tinh hấp thụ mạnh các tia tử ngoại.

Nhiều thí nghiệm tương tự đã đưa ra kết luận : *Khi chiếu một chùm sáng thích hợp (có bước sóng ngắn) vào một tấm kim loại thì nó làm cho các electron ở mặt kim loại đó bị bật ra. Đó là hiện tượng quang điện.*

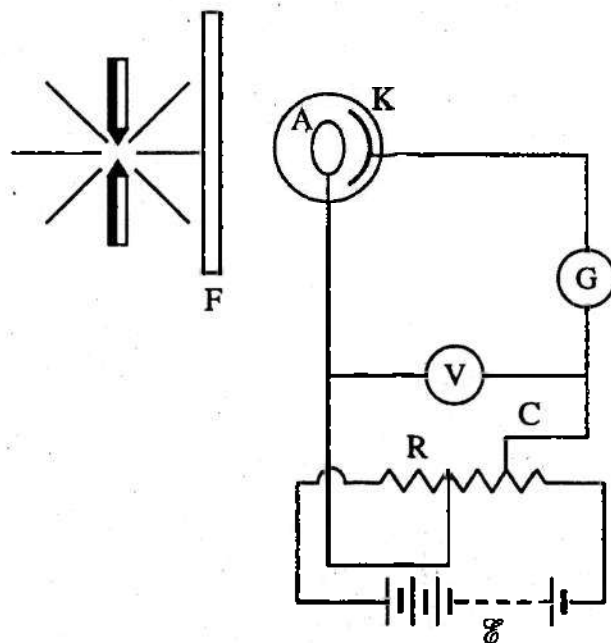
Các electron bị bật ra gọi là *quang electron*, hay còn gọi là *electron quang điện*.

Thực ra, khi chiếu ánh sáng tử ngoại vào tấm kẽm tích điện dương thì vẫn có các electron bật ra. Tuy nhiên, chúng lập tức bị hút trở lại, nên điện tích của tấm kẽm gần như không đổi.

2. Thí nghiệm với tế bào quang điện

a) Tế bào quang điện là một bóng chân không nhỏ trong đó có hai điện cực : anôt A và catôt K. Anôt là một vòng dây kim loại. Catôt có dạng một chòm cầu làm bằng kim loại (mà ta cần nghiên cứu) phủ ở thành trong của tế bào (Hình 10.2).

- Ánh sáng do một hồ quang phát ra, được chiếu qua một kính lọc F để lấy một thành phần đơn sắc nhất định, chiếu vào catôt K.
- Ta thiết lập giữa anôt và catôt một điện trường nhờ bộ nguồn $\mathcal{E}$. Hiệu điện thế U_{AK} giữa A và K, có thể thay đổi (cả về độ lớn và dấu) bằng cách thay đổi vị trí của chốt cắm C trên biến trở R.



Hình 10.2

Một vôn kế V dùng để đo hiệu điện thế U_{AK} và một micro ampe kế nhạy G để đo cường độ dòng điện chạy qua tế bào quang điện.

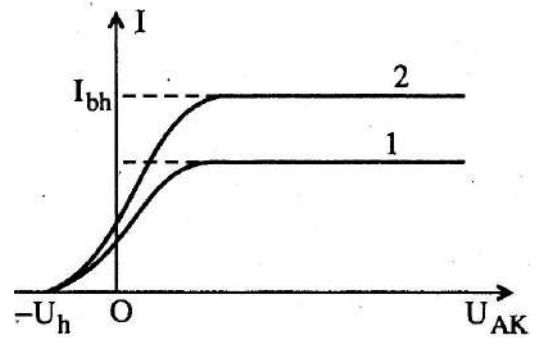
Điện trở của vôn kế V phải rất lớn so với điện trở của tế bào quang điện.

- Khi chiếu vào catôt ánh sáng có bước sóng ngắn thì trong mạch xuất hiện dòng điện, gọi là *dòng quang điện*.

Trong tế bào quang điện, dòng quang điện có chiều từ anôt sang catôt. Nó là dòng các electron quang điện bay từ catôt sang anôt dưới tác dụng của điện trường giữa anôt và catôt.

- b) Nghiên cứu sự phụ thuộc của hiện tượng quang điện vào bước sóng của ánh sáng kích thích (ánh sáng chiếu vào catôt) người ta thấy : *Đối với mỗi kim loại dùng làm catôt, ánh sáng kích thích phải có bước sóng nhỏ hơn một giới hạn λ_0 nào đó thì mới gây ra hiện tượng quang điện. Nếu ánh sáng kích thích có bước sóng lớn hơn λ_0 thì dù chùm sáng có mạnh cũng không gây ra hiện tượng quang điện.*

- c) Sau khi chiếu ánh sáng vào catôt để gây ra hiện tượng quang điện, người ta nghiên cứu sự phụ thuộc của cường độ dòng quang điện I vào hiệu điện thế U_{AK} giữa anôt và catôt. Kết quả nghiên cứu được biểu thị bằng đường cong 1 trên đồ thị hình 10.3. Đồ thị này gọi là đường đặc trưng vôn – ampe của tế bào quang điện.



Hình 10.3

Thoạt nhiên khi tăng U_{AK} thì dòng quang điện tăng. Khi U_{AK} tăng đến một giá trị nào đó thì cường độ dòng quang điện đạt đến giá trị bão hoà I_{bh} .

Sau đó, giá trị của cường độ dòng quang điện sẽ không đổi dù có tăng U_{AK} .

- d) Nghiên cứu sự phụ thuộc của cường độ dòng quang điện bão hoà phụ thuộc vào cường độ của chùm ánh sáng kích thích, ta thấy I_{bh} tỉ lệ thuận với cường độ của chùm ánh sáng kích thích (đường cong 2 trên hình 10.3 ứng với trường hợp tăng cường độ chùm ánh sáng kích thích lên 1,5 lần).
- e) Muốn cho cường độ dòng quang điện triệt tiêu hoàn toàn thì phải đặt giữa anôt và catôt một hiệu điện thế âm nào đó ($U_{AK} = -U_h < 0$), U_h được gọi là hiệu điện thế hãm (Hình 10.3).

Thí nghiệm cho thấy giá trị của hiệu điện thế hãm U_h ứng với mỗi kim loại dùng làm catôt hoàn toàn không phụ thuộc vào cường độ chùm ánh sáng kích thích mà chỉ phụ thuộc vào bước sóng của chùm sáng kích thích đó. Nếu hai chùm sáng kích thích 1 và 2, đơn sắc, có cùng bước sóng, thì các đường đặc trưng vôn – ampe 1 và 2 sẽ cắt trục hoành (trục U_{AK}) tại cùng một điểm U_h .

3. Các định luật quang điện

a) Định luật về giới hạn quang điện

Đối với mỗi kim loại có một bước sóng giới hạn λ_0 nhất định gọi là giới hạn quang điện. Hiện tượng quang điện chỉ xảy ra khi bước sóng λ của ánh sáng kích thích nhỏ hơn hoặc bằng giới hạn quang điện.

$$\lambda \leq \lambda_0 \quad (10.1)$$

GIỚI HẠN QUANG ĐIỆN CỦA MỘT SỐ KIM LOẠI

Chất		$\lambda_0 (\mu\text{m})$
Bạc	Ag	0,260
Đồng	Cu	0,300
Kẽm	Zn	0,350
Nhôm	Al	0,360
Canxi	Ca	0,430
Natri	Na	0,500
Kali	K	0,550
Xesi	Cs	0,580

Theo bảng trên, ta thấy ánh sáng nhìn thấy được chỉ có khả năng gây ra được hiện tượng quang điện ở canxi và các kim loại kiềm.

b) Định luật về dòng quang điện bão hoà

Với ánh sáng kích thích có bước sóng thích hợp ($\lambda \leq \lambda_0$) thì cường độ dòng quang điện bão hoà tỉ lệ thuận với cường độ của chùm ánh sáng kích thích.

c) Định luật về động năng ban đầu cực đại của quang electron

Sự tồn tại của hiệu điện thế hãm U_h chứng tỏ rằng khi bật ra khỏi mặt kim loại, các electron quang điện có một vận tốc ban đầu v_0 . Điện trường cản mạnh đến mức độ nào đó thì ngay cả những electron có vận tốc ban đầu lớn nhất $v_{0\text{max}}$ cũng không bay đến được anốt. Lúc đó dòng quang điện triệt tiêu hoàn toàn và công của điện trường cản có giá trị đúng bằng động năng ban đầu cực đại của electron quang điện.

$$eU_h = \frac{mv_{0\text{max}}^2}{2} \quad (10.2)$$

Từ sự nghiên cứu thực nghiệm giá trị của U_h , đã rút ra định luật về động năng ban đầu cực đại của quang electron :

Động năng ban đầu cực đại của các electron quang điện không phụ thuộc vào cường độ của chùm sáng kích thích, mà chỉ phụ thuộc vào bước sóng của ánh sáng kích thích và bản chất kim loại dùng làm catốt.

4. Thuyết phôtôn

Các định luật quang điện hoàn toàn mâu thuẫn với tính chất sóng của ánh sáng. Thực vậy, theo thuyết sóng, khi ánh sáng chiếu vào mặt catốt, điện

trường biến thiên trong sóng ánh sáng sẽ làm cho các electron trong kim loại dao động. Cường độ của chùm sáng kích thích càng lớn thì điện trường đó càng mạnh và nó làm các electron dao động càng mạnh. Đến mức độ nào đó thì electron sẽ bị bật ra, tạo thành dòng quang điện. Do đó, bất kì chùm sáng nào cũng có thể gây ra hiện tượng quang điện, miễn là nó có cường độ đủ lớn và động năng ban đầu cực đại của electron quang điện phải phụ thuộc vào cường độ của chùm sáng kích thích.

Năm 1905, nhà bác học người Đức, Anh-xtanh (Albert Einstein, 1879 – 1955, giải Nô-ben năm 1921) là người đầu tiên vận dụng thuyết lượng tử để giải thích các định luật quang điện. Ông coi chùm sáng như một dòng hạt và gọi mỗi hạt là một photon. Mỗi photon ứng với một lượng tử năng lượng. Các photon bay dọc theo các tia sáng với tốc độ $c = 3.10^8$ m/s. Đó là nội dung sơ lược của thuyết photon.

Theo Anh-xtanh, hiện tượng quang điện xảy ra do sự hấp thụ photon bởi các electron liên kết. Mỗi photon bị hấp thụ sẽ truyền toàn bộ năng lượng của nó cho một electron. Đối với các electron nằm ngay trên bề mặt kim loại thì phần năng lượng này sẽ được dùng vào hai việc :

- Cung cấp cho electron đó một công A để nó thắng được các lực liên kết trong tinh thể và thoát ra ngoài. Công này được gọi là công thoát.
- Cung cấp cho electron đó một động năng ban đầu. So với động năng ban đầu mà các electron nằm ở các lớp sâu bên trong thu được khi bứt ra thì động năng này là cực đại :

$$hf = A + \frac{mv_{0\max}^2}{2} \quad (10.3)$$

Đây là công thức Anh-xtanh về hiện tượng quang điện.

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 động năng ban đầu của các electron nằm ngay trên bề mặt kim loại khi bật ra khỏi bề mặt.

Công thức (10.3) cho thấy động năng ban đầu cực đại của các electron quang điện chỉ phụ thuộc vào tần số f (hay bước sóng λ) của ánh sáng kích thích và bản chất của kim loại dùng làm catốt mà không phụ thuộc vào cường độ của chùm sáng kích thích. Đó chính là nội dung của định luật về động năng ban đầu cực đại.

Công thức (10.3) còn cho thấy : nếu năng lượng của photon nhỏ hơn công thoát A thì nó không thể làm cho electron bật ra khỏi catôt và hiện tượng quang điện không thể xảy ra.

Ta có : $hf \geq A$ hay $h \frac{c}{\lambda} \geq A \Rightarrow \lambda \leq \frac{hc}{A}$

Đặt : $\frac{hc}{A} = \lambda_0 \Rightarrow \lambda \leq \lambda_0$

λ_0 chính là giới hạn quang điện của kim loại. Đây chính là nội dung của định luật về giới hạn quang điện.

Cuối cùng, ta giải thích định luật về cường độ dòng quang điện bão hoà như sau :

Với các chùm sáng có khả năng gây ra hiện tượng quang điện thì số electron quang điện bị bật ra khỏi catôt trong một đơn vị thời gian tỉ lệ thuận với số photon đến đập vào bề mặt catôt trong thời gian đó. Mặt khác, số photon này lại tỉ lệ thuận với cường độ của chùm sáng, còn cường độ dòng quang điện bão hoà lại tỉ lệ thuận với số electron quang điện bật ra khỏi catôt trong một đơn vị thời gian. Vì vậy, cường độ của dòng quang điện bão hoà sẽ tỉ lệ thuận với cường độ của chùm sáng kích thích.



BÀI TẬP

- 10.1. Giới hạn quang điện của natri là $0,50 \mu\text{m}$. Chiếu vào natri tia tử ngoại có bước sóng $0,25 \mu\text{m}$. Tính động năng ban đầu cực đại và vận tốc ban đầu cực đại của các electron quang điện.
- 10.2. Catôt của một tế bào quang điện làm bằng xesi (Cs) có giới hạn quang điện $0,58 \mu\text{m}$. Chiếu vào catôt ánh sáng tử ngoại có bước sóng $0,33 \mu\text{m}$. Tính hiệu điện thế hãm cần phải đặt giữa anôt và catôt của tế bào đó để cho dòng quang điện triệt tiêu hoàn toàn.
- 10.3. Catôt của một tế bào quang điện làm bằng kim loại có giới hạn quang điện là $0,35 \mu\text{m}$. Chiếu vào catôt ánh sáng tử ngoại có bước sóng $0,30 \mu\text{m}$.
 - a) Tính vận tốc ban đầu cực đại của quang electron.
 - b) Tính vận tốc cực đại của electron khi nó đến anôt, biết rằng hiệu điện thế giữa anôt và catôt là 80 V .
 - c) Tính hiệu điện thế hãm trong trường hợp này.
- 10.4. Tính bước sóng ngắn nhất của tia X mà một ống tia X có thể phát ra, biết hiệu điện thế giữa anôt và catôt là 10 kV .

11

HIỆN TƯỢNG QUANG DẪN. QUANG ĐIỆN TRỞ. PIN QUANG ĐIỆN

1. Hiện tượng quang dẫn

Một số chất bán dẫn là chất cách điện khi không bị chiếu sáng và trở thành chất dẫn điện khi bị chiếu sáng. *Hiện tượng giảm mạnh điện trở của chất bán dẫn khi bị chiếu sáng là hiện tượng quang dẫn.*

Trong hiện tượng quang điện, khi có ánh sáng thích hợp chiếu vào catôt của tế bào quang điện thì electron sẽ bị bật ra khỏi catôt. Vì vậy, hiện tượng này còn gọi là *hiện tượng quang điện ngoài*.

Trong hiện tượng quang dẫn, mỗi photon của ánh sáng kích thích khi bị hấp thụ sẽ giải phóng một electron liên kết để nó trở thành một electron tự do chuyển động trong khối bán dẫn đó. Các electron này trở thành các electron dẫn. Ngoài ra, mỗi electron liên kết khi được giải phóng, sẽ để lại một "lỗ trống" mang điện dương. Những lỗ trống này cũng có thể chuyển động tự do từ nguyên tử này sang nguyên tử khác và cũng tham gia vào quá trình dẫn điện.

Hiện tượng giải phóng các electron liên kết để cho chúng trở thành các electron dẫn gọi là *hiện tượng quang điện bên trong*.

Vì năng lượng cần thiết để giải phóng một electron liên kết thành electron dẫn không lớn lắm, nên để gây ra hiện tượng quang dẫn, không đòi hỏi photon phải có năng lượng lớn. Rất nhiều chất quang dẫn hoạt động được với ánh sáng hồng ngoại. Ví dụ, CdS có giới hạn quang dẫn là $0,9\text{ }\mu\text{m}$. Ta hiểu giới hạn quang dẫn là bước sóng dài nhất của ánh sáng có khả năng gây ra hiện tượng quang dẫn ở chất đó. Đây là một lợi thế của hiện tượng quang dẫn so với hiện tượng quang điện ngoài.

2. Quang điện trở (LDR^{*})

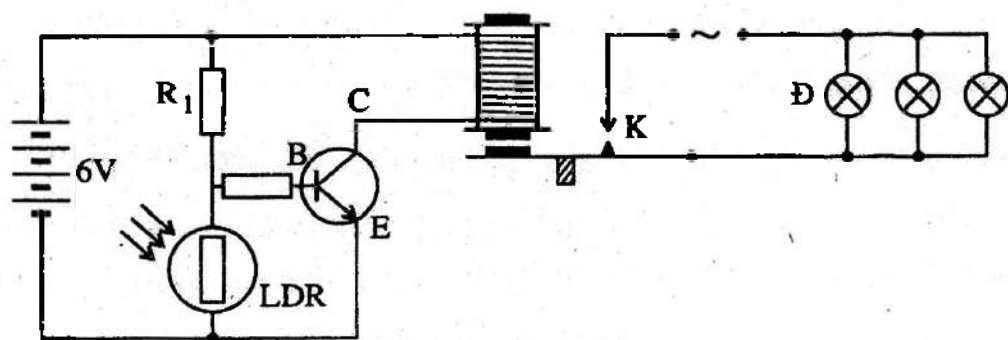
Cấu tạo của quang điện trở gồm một lớp bán dẫn (cadimi sunfua CdS chẳng hạn) (1) phủ trên một tấm nhựa cách điện (2). Có hai điện cực (3) và (4) gắn vào lớp bán dẫn đó (Hình 11.1).

Nối một nguồn khoảng vài vôn với quang điện trở thông qua một miliampe kế. Ta thấy khi quang điện trở được đặt trong tối thì trong mạch không có dòng điện. Khi chiếu quang điện trở bằng ánh sáng có bước sóng ngắn hơn giới hạn quang dẫn của quang điện trở thì sẽ xuất hiện dòng điện trong mạch.

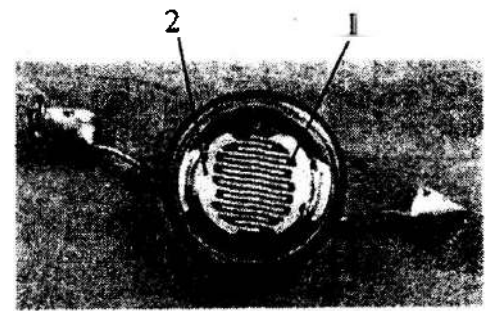
Điện trở của quang điện trở giảm đi rất mạnh khi bị chiếu sáng bởi ánh sáng nói trên. Đo điện trở của quang điện trở CdS, người ta thấy : khi không bị chiếu sáng, điện trở của nó vào khoảng $3 \cdot 10^6 \Omega$; khi bị chiếu sáng, điện trở của nó chỉ còn khoảng 20Ω .

Ngày nay, quang trở được dùng thay cho các tế bào quang điện trong hầu hết các mạch điều khiển tự động.

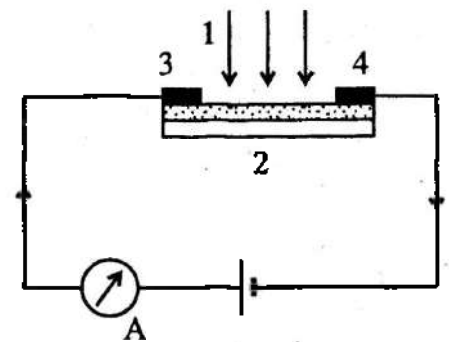
Ví dụ, mạch tự động đóng – ngắt các đèn đường (Hình 11.2).



Hình 11.2



a)



b)

Hình 11.1

(*) Trong tiếng Anh, LDR có nghĩa là điện trở phụ thuộc ánh sáng (Light Dependant Resistor).

Một quang điện trở (LDR) được mắc giữa cực bazơ B và êmitơ E của một tranzito T chẳng hạn loại n – p – n. Quang điện trở đóng vai trò chia hiệu điện thế với một điện trở R_1 (khoảng 10 k Ω) mắc giữa cực côlectơ C và cực bazơ B. Một nguồn 6 V vừa dùng để tạo hiệu điện thế U_{BE} , vừa dùng để tạo ra dòng côlectơ I_C ... Dòng I_C chạy qua một nam châm điện của một role điện từ, đóng ngắt mạch thấp sáng đèn đường. Nam châm điện nằm trong mạch côlectơ của tranzito.

Ban ngày, khi ánh sáng chiếu vào quang điện trở đủ mạnh thì điện trở của nó rất nhỏ so với R_1 . Hiệu điện thế U_{BE} cũng sẽ rất nhỏ. Dòng cực bazơ bằng không, và do đó, dòng côlectơ I_C sẽ bằng không. Nam châm điện không hoạt động.

Ban tối, khi ánh sáng chiếu vào quang điện trở yếu đến mức nào đó thì điện trở của nó sẽ đủ lớn. Hiệu điện thế U_{BE} tăng. Khi U_{BE} đạt đến một giá trị nào đó (khoảng 0,7 V) thì xuất hiện dòng cực bazơ (khoảng 0,3 mA) và do đó, xuất hiện dòng côlectơ I_C (khoảng 60 mA). Dòng I_C chạy qua nam châm điện làm cho nó hút cần ngắt điện và đóng mạch thấp sáng các đèn đường.

3. Pin quang điện

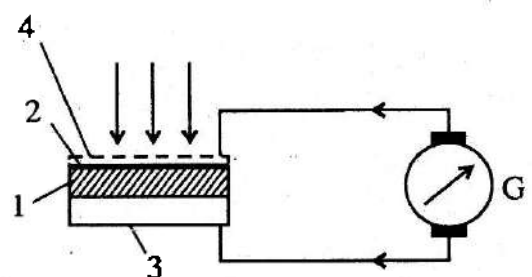
- a) Pin quang điện là một nguồn điện một chiều trong đó quang năng được biến đổi trực tiếp thành điện năng.
- b) Nguyên tắc hoạt động cơ bản của pin là dựa vào hiện tượng quang điện trong xảy ra bên cạnh một lớp tiếp xúc có tính chất chỉnh lưu (chẳng hạn lớp tiếp xúc p – n).

c) Cấu tạo của pin quang điện

Ta hãy phân tích cấu tạo và hoạt động của pin sêlen (Se), loại pin được sử dụng phổ biến nhất hiện nay (Hình 11.3).

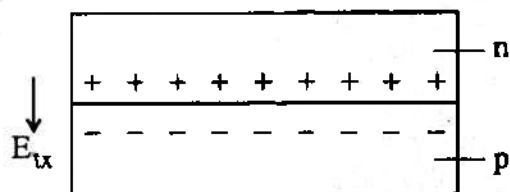
Pin có hai lớp cơ bản là :

- Lớp sêlen (1), sêlen là một chất bán dẫn loại p thuộc nhóm VI.
- Trên bề mặt của lớp sêlen người ta có đưa vào một tạp chất thuộc nhóm VII với nồng độ thích hợp để biến lớp sêlen này thành lớp bán dẫn loại n (2). Lớp này dày khoảng vài chục micrômet. Với hệ số hấp thụ cỡ 10^7 m^{-1} thì chùm sáng tới hầu như bị hấp thụ hết khi qua lớp này. Electron sẽ khuếch tán từ bán dẫn loại n sang bán dẫn loại p. Lỗ trống khuếch tán theo chiều ngược lại.



Hình 11.3

Trong bán dẫn loại n hình thành một lớp điện tích dương ; còn trong bán dẫn loại p hình thành một lớp điện tích âm. Do đó xuất hiện một điện trường $\vec{E}_{tx}$ hướng từ lớp điện tích dương sang lớp điện tích âm (Hình 11.4). Điện trường này ngăn cản sự khuếch tán của electron từ lớp n sang lớp p.



Hình 11.4

Vùng không gian giáp ranh giữa hai chất bán dẫn trong đó có điện trường $\vec{E}_{tx}$ gọi là lớp tiếp xúc p – n. Trong pin quang điện, người ta còn gọi lớp này là lớp chặn vì nó chỉ cho phép electron khuếch tán qua nó theo một chiều nhất định.

- + Selen được phủ trên một đế sắt (3), dùng làm điện cực.
- + Trên mặt lớp bán dẫn loại n có phủ một lớp vàng rất mỏng (4) dùng làm điện cực thứ hai. Lớp vàng này cho phép ánh sáng đi xuyên qua nó^(*).

d) Hoạt động của pin quang điện

Khi chiếu ánh sáng xuyên qua lớp vàng vào lớp bán dẫn loại n thì các photon sẽ giải phóng ra các cặp electron và lỗ trống do hiện tượng quang điện trong. Mỗi electron và lỗ trống trong một cặp vẫn còn liên kết tĩnh điện với nhau, nên cấu trúc này coi như trung hoà điện và có thể khuếch tán tự do trong chất bán dẫn. Khi cặp này khuếch tán vào vùng có điện trường $\vec{E}_{tx}$ thì điện trường này sẽ tách electron khỏi lỗ trống. Lỗ trống sẽ bị đẩy xuôi chiều điện trường $\vec{E}_{tx}$ sang lớp selen loại p ; còn electron sẽ bị đẩy ngược chiều điện trường sang lớp selen loại n. Kết quả là điện cực vàng sẽ nhiễm điện âm, điện cực sắt sẽ nhiễm điện dương. Nếu nối điện cực vàng với điện cực sắt bằng một mạch ngoài thì sẽ có dòng điện chạy theo chiều từ cực sắt sang cực vàng.



Hình 11.5

(*) Ngoài công nghệ pin quang điện đã trình bày ở trên, có thể có công nghệ phun selen lên vàng và tạo thành lớp chặn giữa vàng và selen.

Pin quang điện được sử dụng phổ biến trên các vệ tinh nhân tạo, tàu vũ trụ, máy tính bỏ túi, ... Trong trào lưu sử dụng năng lượng xanh, người ta đã dùng pin Mặt Trời để làm nguồn cung cấp điện sinh hoạt cho các gia đình (Hình 11.5).



BÀI TẬP

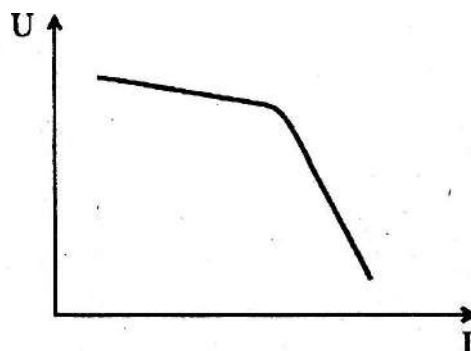
- 11.1 Một pin selen có độ nhạy là 400 mA/W . Cho rằng các electron được giải phóng trong hiện tượng quang điện trong đều tham gia quá trình dẫn điện. Bước sóng của ánh sáng là $\lambda = 0,60 \mu\text{m}$.

Hỏi cú bao nhiêu photon chiếu đến pin sẽ có một photon gây ra hiện tượng quang điện trong ?

Độ nhạy của pin quang điện là đại lượng đo bằng thương số giữa cường độ dòng quang điện và công suất của dòng ánh sáng chiếu đến pin khi nối tắt hai cực của pin.

- 11.2. Đặc tuyến vôn – ampe của các pin quang điện dưới một chế độ rọi sáng nhất định có dạng như hình 11.6. U là hiệu điện thế giữa hai cực của pin ; I là cường độ dòng điện chạy qua pin.

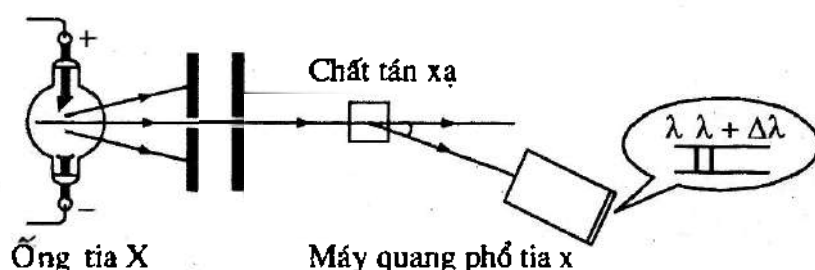
Hãy so sánh đặc tuyến này với đặc tuyến vôn – ampe của pin thường. Qua đó, nêu những đặc điểm về suất điện động và điện trở trong của pin quang điện.



Hình 11.6

12 HIỆU ỨNG COM-TON (COMPTON). ÁP SUẤT ÁNH SÁNG

1. Thí nghiệm Com-ten



Hình 12.1

Hiệu ứng Com-ten là một minh chứng rõ ràng cho tính chất hạt của ánh sáng.

Dùng một hệ thống màn chắn và màn lọc để tách một chùm tia X hẹp, đơn sắc, từ chùm tia do một ống tia X phát ra. Cho chùm tia X này chiếu vào một khối chất tán xạ (graphit, parafin,...). Tia X bị tán xạ theo mọi phương. Hứng tia X tán xạ theo phương θ (so với phương của tia tới) vào khe của một máy quang phổ tia X (Hình 12.1). Ta sẽ thu được phổ của tia X gồm hai vạch : một vạch ứng với bước sóng λ của tia X ban đầu ; vạch kia ứng với tia có bước sóng λ' dài hơn một chút ($\lambda' = \lambda + \Delta\lambda$).

Điều đặc biệt là độ tăng $\Delta\lambda$ của bước sóng không phụ thuộc vào bước sóng λ mà chỉ phụ thuộc góc tán xạ θ .

Như vậy, nếu chùm tia tới chứa một số tia X đơn sắc thì theo phương θ ta sẽ chụp được một quang phổ có nhiều vạch mà mỗi vạch lại bị tách ra làm hai với độ dịch $\Delta\lambda$ như nhau.

Tia X có bước sóng λ là các tia tán xạ bình thường. Sự xuất hiện của tia X có bước sóng $\lambda' > \lambda$ là đặc điểm của hiệu ứng Com-ten.

2. Bước sóng Com-ten của electron

Hiệu ứng Com-ten chỉ có thể giải thích được nếu thừa nhận chùm tia X là chùm hạt (phôtôn) đến va chạm đàn hồi với các electron tự do trong khối chất tán xạ.

Ta sẽ áp dụng định luật bảo toàn năng lượng và định luật bảo toàn động lượng để giải bài toán va chạm này.

Cho rằng, trước lúc va chạm, electron đứng yên. Năng lượng nghỉ của electron là m_0c^2 ; với m_0 là khối lượng nghỉ của electron ($m_0 = 9,1.10^{-31}$ kg); c là tốc độ ánh sáng. Năng lượng của photon tia X trước va chạm là hf . Sau va chạm, photon tán xạ có năng lượng hf' ; còn electron có năng lượng toàn phần mc^2 .

Theo định luật bảo toàn năng lượng, ta có :

$$hf + m_0c^2 = hf' + mc^2 \quad (12.1)$$

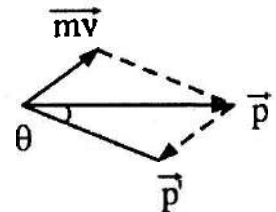
Động lượng của photon trước va chạm là $\vec{p}$, của photon tán xạ là $\vec{p}'$, của electron là $\vec{mv}$. Theo định luật bảo toàn động lượng, ta có :

$$\vec{p} = \vec{p}' + \vec{mv} \quad (12.2)$$

Phương trình vector (12.2) được biểu diễn bằng hình 12.2.

Động lượng của photon liên hệ với năng lượng của nó bằng hệ thức :

$$p = \frac{\varepsilon}{c} = \frac{hf}{c} \quad (*) \quad (12.3)$$



Hình 12.2

Căn cứ vào hình 12.2, ta có : $m^2v^2 = p^2 + p'^2 - 2pp'\cos\theta$.

$$m^2v^2 = \left(\frac{hf}{c}\right)^2 + \left(\frac{hf'}{c}\right)^2 - 2\left(\frac{h}{c}\right)^2 ff'\cos\theta \quad (12.4)$$

Phương trình (12.1) cho ta :

$$m^2c^2 - m_0^2c^2 = \left(\frac{hf}{c}\right)^2 + \left(\frac{hf'}{c}\right)^2 - \frac{2h^2}{c^2} ff' + 2m_0h(f - f') \quad (12.5)$$

Trừ vế với vế của hai phương trình (12.4) và (12.5), ta được :

$$m^2(c^2 - v^2) - m_0^2c^2 = -\frac{2h^2}{c^2} ff'(1 - \cos\theta) + 2m_0h(f - f') \quad (12.6)$$

(*) Tương tự như hệ thức giữa động lượng và động năng của một vật : $p = 2 \frac{W_d}{v}$.

Chú ý rằng theo thuyết tương đối thì $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$.

Do đó : $m^2(c^2 - v^2) = m_0^2 c^2$

Phương trình (12.6) thành ra : $\frac{c}{f'} - \frac{c}{f} = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos\theta) = \lambda' - \lambda$

Cuối cùng, ta được : $\Delta\lambda = \frac{2h}{m_0 c} \sin^2 \frac{\theta}{2}$. (12.7)

$\Delta\lambda$ chỉ phụ thuộc góc tán xạ θ mà không phụ thuộc bước sóng λ .

Đại lượng $\lambda_0 = \frac{h}{m_0 c} = 0,02426 \text{ \AA} = 2.426.10^{-12} \text{ m}$ gọi là *bước sóng Com-ton của electron*.

3. Hiệu ứng Com-ton và hiệu ứng quang điện

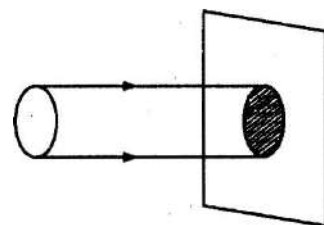
Hiệu ứng quang điện và hiệu ứng Com-ton đều là kết quả của sự tương tác của photon ánh sáng tới với các electron của nguyên tử. Tuy nhiên, giữa hai hiệu ứng đó có những sự khác biệt sau đây :

- Trong hiệu ứng quang điện, có sự truyền hoàn toàn năng lượng của photon tới cho electron. Photon bị hấp thụ và biến mất. Trong hiệu ứng Com-ton, chỉ có một phần năng lượng của photon tới truyền cho electron, phần còn lại chuyển hoá thành năng lượng của photon tán xạ. Chú ý rằng, trong hiệu ứng Com-ton, photon tới vừa bị đổi hướng, vừa bị biến thành photon khác.
- Trong hiệu ứng quang điện, năng lượng của photon tới vào cỡ năng lượng liên kết của electron với mạng tinh thể, còn trong hiệu ứng Com-ton, năng lượng của photon tới rất lớn so với năng lượng liên kết của electron. Có thể diễn đạt kết quả trên theo cách khác : hiệu ứng quang điện xảy ra khi có tương tác của photon với electron liên kết, còn hiệu ứng Com-ton xảy ra khi có sự tương tác của photon với electron tự do.

4. Áp suất ánh sáng

Một chùm sáng là một dòng hạt (photon). Mỗi hạt (photon) có một động lượng $p = \frac{hf}{c}$. Do đó, khi chùm sáng chiếu vào một vật thì các photon trong

chùm sẽ truyền động lượng cho vật đó, tức là chùm sáng đã tác dụng lên vật một áp suất. Đó là *áp suất ánh sáng*. Giả sử có một chùm sáng song song, đơn sắc, chiếu vuông góc vào một vật phẳng (Hình 12.3).



Hình 12.3

Gọi P là áp suất mà chùm sáng tác dụng lên vật ;
 S là tiết diện của chùm sáng. Ta có :

$$P = \frac{F}{S} = \frac{ma}{S} = \frac{m\Delta v}{S \cdot \Delta t} = \frac{\Delta(mv)}{S \cdot \Delta t} = \frac{\Delta p}{S \cdot \Delta t}$$

Vậy, áp suất có độ lớn bằng động lượng mà chùm sáng truyền cho một đơn vị diện tích của vật, trong một đơn vị thời gian.

Gọi E là dòng quang năng và I là cường độ của chùm sáng, ta có : $I = \frac{E}{S}$.

Cường độ của chùm sáng I (đơn vị W/m^2) là lượng năng lượng mà chùm sáng truyền cho một đơn vị diện tích của vật trong một đơn vị thời gian. Số photon đến đập vào một đơn vị diện tích của vật trong một đơn vị thời gian

là $N = \frac{I}{hf}$.

Gọi k là hệ số phản xạ ($k < 1$). Số photon phản xạ trên một đơn vị diện tích, trong một đơn vị thời gian là Nk ; số photon bị hấp thụ là $N(1 - k)$. Mỗi photon phản xạ truyền cho vật một động lượng là $2 \frac{hf}{c}$; mỗi photon bị hấp thụ truyền cho vật một động lượng là $\frac{hf}{c}$. Như vậy, áp suất ánh sáng tác dụng lên vật là

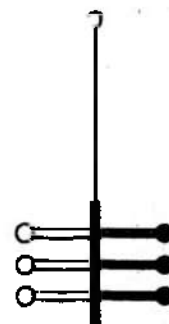
$$P = 2Nk \frac{hf}{c} + N(1 - k) \frac{hf}{c} = N \frac{hf}{c} (1 + k)$$

Do đó : $P = \frac{I}{c} (1 + k)$ (12.8)

Một chùm sáng có cường độ $5 W/m^2$, chiếu vào một vật phản xạ lí tưởng ($k = 1$) sẽ tác dụng lên vật đó một áp suất $6,7 \cdot 10^{-8} Pa$, đó là một áp suất rất nhỏ. Dựa vào thuyết sóng điện từ ánh sáng, người ta cũng đã tìm được công thức (12.8) về áp suất ánh sáng, trước khi thuyết lượng tử ra đời.

Người ta giải thích sự tạo thành đuôi sao chổi dựa vào tác dụng của áp suất ánh sáng. Khi bay đến gần Mặt Trời, các chất trong sao chổi bị bốc hơi. Đám hơi này vừa chịu tác dụng của lực hấp dẫn của Mặt Trời, vừa chịu tác dụng của áp suất ánh sáng mặt trời đẩy ra. Vì lực đẩy do áp suất ánh sáng lớn hơn lực hấp dẫn, nên đám khí này bị đẩy ra xa Mặt Trời, tạo thành đuôi sao chổi.

Sự nở ra và co lại của lớp vỏ các sao cũng được giải thích bằng hai tác dụng ngược chiều nhau của lực hấp dẫn và áp suất ánh sáng. Lê-bê-đép là người đầu tiên thực hiện được thí nghiệm đo áp suất ánh sáng. Ông làm một thiết bị gồm hai hệ thống cánh nhẹ : một hệ thống được mạ bóng, phản xạ tốt ánh sáng ; một hệ thống được bôi đen, hấp thụ tốt ánh sáng. Hai hệ thống này được gắn trên một trục thẳng đứng và được treo bằng một sợi dây thạch anh mảnh trong một bình chân không (Hình 12.4).



Hình 12.4

Khi chiếu một chùm sáng vào hai hệ thống cánh này thì các cánh trắng sẽ bị đẩy mạnh hơn làm cho hệ thống bị quay. Dựa vào góc quay và vào các đặc điểm cấu tạo của hệ thống, có thể tính được áp suất ánh sáng.



BÀI TẬP

- 12.1. Một photon tia X có bước sóng $0,5 \text{ \AA}$ tán xạ trên một electron tự do, đứng yên. Góc tán xạ là $\theta = 120^\circ$. Tính năng lượng của photon và động năng của electron sau khi tán xạ.

Cho $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$; $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$; $m_0 = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$; $1 \text{ \AA} = 1 \cdot 10^{-10} \text{ m}$.

- 12.2. Một hạt bụi nhôm, coi như một quả cầu, bay trong không gian vũ trụ. Hệ số phản xạ của nó là 0,9. Tính bán kính của hạt bụi, biết rằng lực hấp dẫn của Mặt Trời cân bằng với áp lực của các tia sáng mặt trời tác dụng lên nó. Mặt Trời coi như một vật đen tuyệt đối phát xạ với nhiệt độ bề mặt là 6000 K .

Khối lượng riêng của nhôm là $D = 2,7 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$; $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$; đường kính góc của Mặt Trời $\alpha = 30'$; khoảng cách Mặt Trời – Trái Đất là $d = 150 \cdot 10^6 \text{ km}$; khối lượng của Mặt Trời là $M_0 = 1,95 \cdot 10^{30} \text{ kg}$; hằng số hấp dẫn $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg} \cdot \text{s}^2$.

13

MẪU NGUYÊN TỬ BO (BOHR). QUANG PHỔ VẠCH CỦA NGUYÊN TỬ HIĐRÔ

1. Quang phổ vạch của nguyên tử hiđrô

a) Các dãy quang phổ

Quang phổ phát xạ của hiđrô là quang phổ vạch. Đó là những vạch đơn sắc nằm rời rạc trên một nền tối. Tuy nhiên, hệ thống các vạch đó được sắp xếp theo một quy luật nào đó. Trong mỗi vùng ánh sáng có một dãy vạch riêng. Các vạch nằm càng gần đầu bước sóng ngắn của quang phổ càng xít nhau.

Trong miền tử ngoại có một dãy, gọi là dãy Lai-man (Lyman). Dãy thứ hai, gọi là dãy Ban-me (Balmer), gồm các vạch nằm trong miền tử ngoại và một số nằm trong miền ánh sáng nhìn thấy là : vạch đỏ H_α ($\lambda_\alpha = 0,6563\mu\text{m}$), vạch lam H_β ($\lambda_\beta = 0,4861\mu\text{m}$), vạch chàm H_γ ($\lambda_\gamma = 0,4340\mu\text{m}$) và vạch tím H_δ ($\lambda_\delta = 0,4120\mu\text{m}$). Trong miền hồng ngoại, có dãy gọi là dãy Pa-sen (Paschen).

b) Các số hạng quang phổ

Trong nỗ lực tìm quy luật sắp xếp của các vạch quang phổ, vào cuối thế kỉ 19, Rít-bóc (Rydberg) đã tìm được quy luật sau :

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{i^2} - \frac{1}{j^2} \right) \quad (13.1)$$

Trong đó : $i = 1, 2, 3, 4, \dots$ và $j = i + 1, i + 2, i + 3, \dots$

R là một hằng số gọi là hằng số Rít-bóc : $R = 1,09678 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$.

Các số hạng $\frac{R}{i^2}$ và $\frac{R}{j^2}$ gọi là các số hạng quang phổ.

Đối với dãy Lai-man thì : $i = 1 ; j = 2, 3, 4, \dots$

Đối với dãy Ban-me thì : $i = 2 ; j = 3, 4, 5, \dots$

Đối với dãy Pa-sen thì : $i = 3 ; j = 4, 5, 6, \dots$

Dùng các số liệu của dãy Ban-me, ta có thể nghiệm lại dễ dàng quy luật quang phổ nói trên.

2. Mẫu nguyên tử Bo

a) Những thiếu sót của mẫu nguyên tử Rơ-dơ-pho (Rutherford)

Để giải thích các quy luật quang phổ, ta phải dựa vào các mẫu nguyên tử. Mẫu nguyên tử hiện đại nhất ở đầu thế kỉ 20 là mẫu hành tinh nguyên tử của Rơ-dơ-pho. Theo mẫu này, nguyên tử có cấu tạo gồm hạt nhân mang điện tích dương $+Ze$ và các electron chuyển động quanh hạt nhân trên các quỹ đạo tròn hoặc elip. Tổng điện tích của các electron là $-Ze$. Khối lượng của các nguyên tử hầu như tập trung ở hạt nhân. Hệ thống nguyên tử có cấu tạo giống như hệ thống Mặt Trời. Các electron chuyển động quanh hạt nhân dưới sự chi phối của lực hút Cu-lông và tuân theo các định luật của cơ học cổ điển và điện động lực học cổ điển.

Mẫu nguyên tử Rơ-dơ-pho có hai thiếu sót lớn sau đây :

- Nó không giải thích được sự bền vững của các nguyên tử. Thực vậy, theo điện động lực học cổ điển, một điện tích chuyển động có gia tốc thì sẽ phát ra sóng điện từ. Chuyển động của electron quanh hạt nhân luôn luôn có gia tốc (gia tốc hướng tâm), nên electron luôn luôn phát ra sóng điện từ. Năng lượng của electron sẽ giảm liên tục và cuối cùng electron sẽ rơi vào hạt nhân. Điều này mâu thuẫn với thực tế là các nguyên tử rất bền vững.
- Nó không giải thích được sự tạo thành các quang phổ vạch. Thực vậy, khi nguyên tử phát ra sóng điện từ thì năng lượng của nó phải giảm đi và electron phải chuyển động lại gần tâm. Tuy nhiên, theo cơ học cổ điển, electron chỉ có thể chuyển động theo quỹ đạo hình xoắn ốc vào tâm. Khi chuyển động như vậy, electron bắt buộc phải phát ra sóng điện từ có phổ liên tục, không thể là phổ vạch được.

b) Mẫu nguyên tử Bo. Các tiên đề Bo

Để khắc phục những thiếu sót của mẫu nguyên tử Rơ-dơ-pho, Bo đề ra mẫu nguyên tử bán cổ điển mà ta gọi là mẫu nguyên tử Bo.

Bo giữ nguyên mô hình hành tinh nguyên tử của Rơ-dơ-pho, nhưng cho rằng hệ thống này tuân theo những quy luật đặc biệt, không cổ điển, mà ông đưa ra dưới dạng các tiên đề, gọi là *các tiên đề Bo về cấu tạo nguyên tử*. Chú ý rằng, lí thuyết Bo chỉ áp dụng cho nguyên tử hiđrô và các ion tương tự nó như ion heli một lần ion hoá (He^+), ion liti hai lần ion hoá (Li^{++}),...

Tiên đề về các trạng thái dừng : Nguyên tử chỉ tồn tại trong các trạng thái gọi là các trạng thái dừng. Đó là những trạng thái ổn định, mặc dù thời gian tồn tại của nguyên tử trong các trạng thái đó có thể là rất ngắn. Khi đang ở trong trạng thái dừng thì nguyên tử có một năng lượng xác định và nó không bức xạ, dù nó có khả năng này.

Theo tiên đề này, nguyên tử không tồn tại trong các trạng thái chuyển tiếp, tức là không thể có thông tin về nguyên tử khi nó "đang" chuyển từ trạng thái dừng này sang trạng thái dừng khác. Trạng thái dừng có thể là trạng thái cơ bản, trong đó nguyên tử tồn tại lâu dài. Trạng thái dừng cũng có thể là trạng thái kích thích, tại đó, nguyên tử chỉ tồn tại trong thời gian rất ngắn, cỡ 10^{-8} s.

Tiên đề về quỹ đạo dừng : Mỗi trạng thái dừng của nguyên tử ứng với một quỹ đạo tròn có bán kính nhất định của electron quanh hạt nhân, gọi là quỹ đạo dừng. Bán kính của quỹ đạo dừng phải thoả mãn điều kiện sao cho momen động lượng của electron quanh hạt nhân là một bội số nguyên của

lượng tử năng lượng $\frac{h}{2\pi}$:

$$mvr = n \frac{h}{2\pi} \text{ với } n = 1, 2, 3, \dots$$

Về sau, trong Cơ học lượng tử, khi người ta đã hình thành khái niệm về bước sóng Đơ Broi (De Broglie) (xem Bài 25) của electron thì điều kiện về bán kính của quỹ đạo dừng trở nên dễ hiểu hơn : bán kính của quỹ đạo dừng phải thoả mãn điều kiện sao cho độ dài của quỹ đạo dừng phải bằng một số nguyên lần bước sóng Đơ Broi của electron^(*):

$$2\pi r = n\lambda \quad (13.2)$$

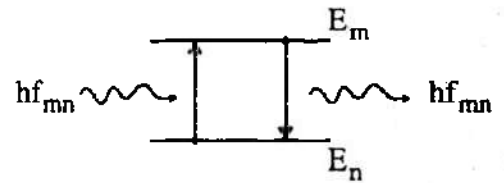
(*) Theo điều kiện này thì sẽ xuất hiện sóng dừng của sóng Đơ Broi của electron trên quỹ đạo. Thực vậy, giả sử có một sóng cơ xuất hiện trên một vòng dây tròn khép kín, trên vòng dây sẽ xuất hiện sóng dừng khi chiều dài của vòng dây bằng một số nguyên lần bước sóng.

Tiên đề về sự bức xạ và hấp thụ năng lượng của nguyên tử : Khi nguyên tử chuyển từ trạng thái dừng có năng lượng E_m sang trạng thái dừng có năng lượng E_n (với $E_m > E_n$) thì nguyên tử phát ra một photon có năng lượng đúng bằng hiệu $E_m - E_n$:

$$\varepsilon = hf_{mn} = E_m - E_n \quad (13.3)$$

Với f_{mn} là tần số của ánh sáng ứng với photon đó.

Ngược lại, nếu nguyên tử đang ở trạng thái dừng có năng lượng thấp mà hấp thụ một photon có năng lượng hf_{mn} đúng bằng hiệu $E_m - E_n$ thì nó chuyển ngay lên trạng thái dừng có năng lượng E_m cao hơn (Hình 13.1).



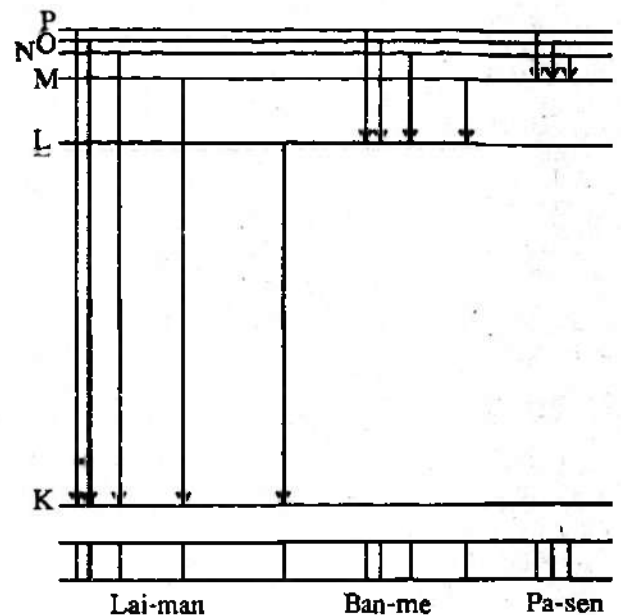
Hình 13.1

3. Giải thích quang phổ hiđrô

Dùng mẫu nguyên tử Bo, ta có thể giải thích được đầy đủ các quy luật của quang phổ hiđrô.

- a) Ở trạng thái bình thường (trạng thái cơ bản) nguyên tử hiđrô có năng lượng thấp nhất, mức này gọi là mức K. Khi đó, electron ở trên quỹ đạo gần hạt nhân nhất.

Khi nhận được năng lượng kích thích phù hợp, nguyên tử sẽ chuyển lên các trạng thái kích thích tương ứng, có mức năng lượng cao hơn, mà ta kí hiệu là mức L, mức M, mức N, mức O, mức P,... (Hình 13.2). Electron sẽ chuyển lên các quỹ đạo xa hạt nhân hơn, tương ứng các quỹ đạo : L, M, N, O, P,...



Hình 13.2

Nguyên tử sống ở trạng thái kích thích trong khoảng thời gian rất ngắn (cỡ 10^{-8} s). Sau đó, nó chuyển về các trạng thái có mức năng lượng thấp hơn và

cuối cùng về trạng thái cơ bản. Electron chuyển dần vào các quỹ đạo bên trong và cuối cùng về quỹ đạo K.

Mỗi khi electron chuyển từ một quỹ đạo có mức năng lượng cao xuống một quỹ đạo có mức năng lượng thấp hơn thì nó phát ra một photon có năng lượng đúng bằng hiệu mức năng lượng ứng với hai quỹ đạo đó :

$$hf = E_{\text{cao}} - E_{\text{thấp}}$$

Mỗi photon có tần số f lại ứng với một sóng ánh sáng đơn sắc có bước sóng λ :

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Mỗi sóng ánh sáng đơn sắc lại cho một vạch quang phổ có một màu nhất định. Vì vậy, quang phổ là quang phổ vạch.

Sự tạo thành các dãy quang phổ được giải thích như sau :

Các vạch trong dãy Lai-man được tạo thành khi electron chuyển từ các quỹ đạo bên ngoài về quỹ đạo K : $L \rightarrow K$; $M \rightarrow K$; $N \rightarrow K$;... Dãy Ban-me được tạo thành khi electron ở phía ngoài chuyển về quỹ đạo L : $M \rightarrow L$ (vạch đỏ H_{α}) ; $N \rightarrow L$ (vạch lam H_{β}) ; $O \rightarrow L$ (vạch chàm H_{γ}) ; $P \rightarrow L$ (vạch tím H_{δ}) ; ... Dãy Pa-sen được tạo thành khi electron từ các quỹ đạo phía ngoài chuyển về quỹ đạo M.

Sơ đồ chuyển mức năng lượng của nguyên tử hiđrô khi tạo thành các dãy quang phổ được biểu diễn trên hình 13.2.

b) Biểu thức của các bán kính quỹ đạo và của hằng số Rít-béc

Năng lượng của nguyên tử hiđrô gồm động năng của electron và thế năng tương tác giữa electron và hạt nhân.

Động năng của electron : $W_d = \frac{1}{2}mv^2$.

Thế năng tương tác giữa electron và hạt nhân : $W_t = -k \frac{e^2}{r}$.

Năng lượng của nguyên tử hiđrô : $E = \frac{1}{2}mv^2 - k \frac{e^2}{r}$.

Với m , e , r tương ứng là khối lượng, điện tích và bán kính quỹ đạo của electron ; $k = 9.10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$.

Lực hướng tâm tác dụng lên electron chính là lực Culông :

$$\frac{mv^2}{r} = k \frac{e^2}{r^2} \Rightarrow \frac{mv^2}{2} = k \frac{e^2}{2r} \quad (13.4)$$

Như vậy, năng lượng của nguyên tử hiđrô sẽ là :

$$E = -k \frac{e^2}{2r} \quad (13.5)$$

Theo tiên đề quỹ đạo lượng tử ta có : $2\pi r = n\lambda \Rightarrow \lambda = \frac{2\pi r}{n}$.

Công thức liên hệ giữa bước sóng Đơ Broi và động lượng của một hạt giống như công thức liên hệ giữa bước sóng và động lượng của photon^(*):

$$p = mv = \frac{h}{\lambda} \quad (13.6)$$

Các công thức (13.4) và (13.6) cho ta : $p^2 = k \frac{me^2}{r} = \frac{h^2}{\lambda^2} = \frac{n^2 h^2}{4\pi^2 r^2}$.

Do đó : $r = n^2 \frac{h^2}{4\pi^2 kme^2} \quad (13.7)$

Với $n = 1, 2, 3, \dots$ Bán kính của các quỹ đạo lượng tử tăng tỉ lệ với bình phương của các số nguyên liên tiếp.

Quỹ đạo K có bán kính nhỏ nhất (ứng với $n = 1$), bán kính này gọi là bán kính Bo và kí hiệu là r_0 :

$$r_0 = \frac{h^2}{4\pi^2 kme^2} \quad (13.8)$$

Với $h = 6,625 \cdot 10^{-34}$ J.s ; $k = 9 \cdot 10^9$ Nm²/C² ; $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg ; $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C thì $r_0 = 5,3 \cdot 10^{-11}$ m.

Bán kính của các quỹ đạo lượng tử khác là :

K	L	M	N	O	P	...
r_0	$4r_0$	$9r_0$	$16r_0$	$25r_0$	$36r_0$	...

(*) Theo thuyết tương đối, năng lượng của photon là : $hf = \frac{hc}{\lambda} = mc^2$.

Động lượng của photon là : $p = mc$. Từ đó ta có : $p = \frac{h}{\lambda}$.

Thay công thức của r vào công thức (13.4), ta được công thức của năng lượng của nguyên tử hiđrô :

$$E = -\frac{1}{n^2} \frac{2\pi^2 k^2 m e^4}{h^2} \quad (13.9)$$

Mức năng lượng thấp nhất của nguyên tử hiđrô là E_K , ứng với $n = 1$:

$$E_K = -21,72 \cdot 10^{-19} \text{ J} \approx -13,6 \text{ eV}$$

Để ion hoá nguyên tử hiđrô, tức là đưa electron từ quỹ đạo K (năng lượng $-13,6 \text{ eV}$) ra vô cực (năng lượng bằng 0), ta phải cung cấp cho electron một năng lượng là $13,6 \text{ eV}$. Đó chính là năng lượng ion hoá nguyên tử hiđrô. Những kết quả tính toán này rất phù hợp với các số liệu thực nghiệm.

Để tìm biểu thức của hằng số Rít-béc, ta xét ánh sáng đỏ trong dãy Ban-me. Theo công thức (13.1) :

$$\frac{1}{\lambda_d} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2} \right) = \frac{5R}{36} \quad (13.10)$$

Theo công thức (13.7) :

$$\frac{hc}{\lambda_d} = E_M - E_L = \frac{2\pi^2 k^2 m e^4}{h^2} \left(-\frac{1}{9} + \frac{1}{4} \right) = \frac{2\pi^2 k^2 m e^4}{h^2} \cdot \frac{5}{36} \quad (13.11)$$

So sánh hai công thức (13.10) và (13.11), ta được :

$$R = \frac{2\pi^2 k^2 m e^4}{h^3 c} \quad (13.12)$$

Thay số, ta được : $R = 1,09306 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$. Kết quả này phù hợp khá tốt với số liệu thực nghiệm.



BÀI TẬP

- 13.1. Cho biết bước sóng của bốn vạch quang phổ trong dãy Ban-me thuộc vùng ánh sáng nhìn thấy được (xem phần lí thuyết). Hãy tính bước sóng của ba vạch quang phổ đầu tiên trong dãy Pa-sen.
- 13.2. Tìm bước sóng của ánh sáng mà nguyên tử hiđrô phát ra khi electron trong nguyên tử chuyển từ quỹ đạo P về quỹ đạo K. Ánh sáng này phụ thuộc vùng ánh sáng nào trên thang sóng điện từ ?
- 13.3. Tìm biểu thức của năng lượng của electron trong ion heli He^+ .
- 13.4. Tìm bán kính quỹ đạo K của electron trong ion heli He^+ .

14 SỰ PHÁT QUANG. LƯỠNG TÍNH SÓNG – HẠT CỦA ÁNH SÁNG

1. Khái niệm về sự phát quang

Mỗi quá trình phát sáng của một vật thể có thể chia làm ba giai đoạn :

- Giai đoạn đầu : các nguyên tử và phân tử của vật hấp thụ năng lượng từ môi trường bên ngoài dưới dạng nào đó.
- Giai đoạn trung gian : các nguyên tử và phân tử của vật trao đổi năng lượng đã được hấp thụ cho nhau. Năng lượng có thể truyền từ nơi này đến nơi khác trên vật.
- Giai đoạn cuối : các nguyên tử và phân tử của vật phát ra sóng điện từ (ánh sáng) như tia hồng ngoại, ánh sáng nhìn thấy được, tia tử ngoại,...

Giai đoạn đầu và giai đoạn cuối của các quá trình phát sáng đều giống nhau. Chúng chỉ khác nhau ở giai đoạn trung gian. Dựa vào sự khác nhau này, ta có thể phân ra ba hình thức phát sáng dưới đây :

- Sự phản xạ, tán xạ, khúc xạ ánh sáng là hình thức phát sáng hầu như không có giai đoạn trung gian. Các nguyên tử và phân tử của vật hấp thụ ánh sáng tới và ngay lập tức phát ra ánh sáng phản xạ, tán xạ, khúc xạ,... Khoảng thời gian ngắn cách giữa giai đoạn đầu và giai đoạn cuối ngắn hơn chu kỳ dao động của sóng ánh sáng (10^{-15} s).
- Sự bức xạ nhiệt là hình thức bức xạ cân bằng. Các nguyên tử và phân tử của vật hấp thụ năng lượng từ bên ngoài, sau đó có sự phân bố lại năng lượng giữa chúng theo quy luật thống kê sao cho đảm bảo được sự cân bằng giữa năng lượng hấp thụ và năng lượng bức xạ, nhiệt độ của vật không thay đổi trong quá trình bức xạ.

- Sự phát quang là hình thức phát xạ không cân bằng. Các nguyên tử và phân tử của vật hấp thụ năng lượng kích thích dưới dạng nào đó. Sau đó, chúng có thể trao đổi một phần hoặc toàn bộ năng lượng kích thích cho các nguyên tử và phân tử khác. Đây không phải là sự phân bố lại năng lượng như trong sự bức xạ nhiệt. Cuối cùng, chính nguyên tử hay phân tử đó (hay nguyên tử và phân tử đã nhận được năng lượng trao đổi) sẽ phát ra ánh sáng, đó là ánh sáng phát quang. Trong quá trình phát quang, không có sự cân bằng năng lượng giữa vật phát sáng và môi trường xung quanh. Sự phát sáng của con đom đóm, của miếng photpho khi bị cháy, của màn hình vô tuyến, của đèn bút thử điện, của bút laze,... là những sự phát quang.

2. Các dạng phát quang

Dựa vào các cách kích thích phát quang khác nhau, người ta phân ra các dạng phát quang dưới đây :

- a) **Dạng quang – phát quang** : chất phát quang hấp thụ năng lượng ánh sáng kích thích. Ví dụ : sự phát quang của đèn ống.
- b) **Dạng điện phát quang** : chất phát quang hấp thụ năng lượng kích thích của điện trường. Ví dụ : sự phát quang của đèn LED.
- c) **Dạng hoá phát quang** : chất phát quang hấp thụ năng lượng kích thích từ các phản ứng hoá học. Ví dụ : sự phát quang của con đom đóm.
- d) **Dạng phát quang âm cực** : chất phát quang hấp thụ năng lượng từ một dòng electron có động năng lớn. Ví dụ : sự phát quang của màn hình vô tuyến.
- e) **Sự phát quang do va đập** : ví dụ đập mạnh hai hòn sỏi vào nhau thì chỗ va đập có thể loé sáng.

3. Huỳnh quang và lân quang

Trong hiện tượng quang – phát quang, người ta đưa ra khái niệm thời gian phát quang. Đó là khoảng thời gian từ lúc tắt ánh sáng kích thích đến lúc tắt ánh sáng phát quang. Các chất quang – phát quang được chia làm hai loại là *chất huỳnh quang* và *chất lân quang*.

Các chất huỳnh quang có thời gian phát quang cỡ 10^{-6} s trở xuống. Các chất lân quang có thời gian phát quang cỡ 10^{-6} s trở lên. Tuy nhiên, sự phân loại này không triệt để, vì thời gian phát quang của các chất biến thiên liên tục từ chất huỳnh quang đến chất lân quang.

Phần lớn các chất phát quang ở thể lỏng và thể khí là các chất huỳnh quang. Sự phát quang của chúng hầu như tắt ngay sau khi tắt ánh sáng kích thích. Mỗi nguyên tử của chất huỳnh quang hấp thụ một photon ánh sáng kích thích (hf). Chúng có thể trao đổi năng lượng với các nguyên tử khác và mất một phần năng lượng. Cuối cùng, chúng phát ra một photon ánh sáng phát quang (hf'). Như vậy, trong các chất huỳnh quang, "tâm hấp thụ" cũng chính là "tâm phát quang".

Phần lớn các chất phát quang ở dạng kết tinh là chất lân quang. Thời gian phát quang của chúng có thể kéo dài đến vài giờ.

Khi chế tạo các tinh thể phát quang, người ta đưa vào mạng tinh thể một lượng nhỏ các nguyên tử ngoại lai, đóng vai trò các "tâm phát quang". Chẳng hạn, trong chất tinh thể phát quang kẽm sunfua (ZnS), người ta đưa các nguyên tử đồng (Cu) vào để làm "tâm phát quang". Ta nói ZnS được kích thích bằng Cu . Màu của ánh sáng phát quang phụ thuộc vào bản chất của tâm phát quang. Với tâm phát quang là Cu thì ZnS phát quang màu lục, với tâm phát quang là Fe thì ZnS phát quang màu đỏ.

Ngoài ra, người ta còn chủ động đưa vào mạng một lượng rất nhỏ các nguyên tử đóng vai trò của các "bẫy electron". Các electron tự do khi chuyển động đến gần các bẫy sẽ bị hút vào đó. Trong ZnS kích hoạt bằng Cu , người ta tạo ra các bẫy electron bằng Cl . Do đó, ta có chất phát quang tinh thể $ZnS - Cu, Cl$.

Ta hãy xét cụ thể sự phát quang của $ZnS - Cu, Cl$. Khi nguyên tử Cu hấp thụ một photon ánh sáng kích thích, có năng lượng thích hợp hf (photon ánh sáng tử ngoại), thì nó bị ion hoá, giải phóng ra một electron tự do và để lại một ion dương liên kết. Electron tự do này, chuyển động trong tinh thể có thể gặp một bẫy electron Cl , rơi vào đó và bị giam lại. Tuy nhiên, năng lượng cần thiết để giải phóng electron khỏi bẫy rất nhỏ (vào cỡ năng lượng của chuyển động nhiệt). Sau một thời gian, nhờ dao động nhiệt của mạng tinh thể, electron lại được giải phóng ra khỏi bẫy. Cứ như thế, cho đến khi electron gặp một nguyên tử Cu đã bị ion hoá (một tâm phát quang khác) thì nó sẽ tái hợp với ion này và phát ra một photon phát quang hf' .

Cơ chế trên cho ta hiểu tại sao thời gian phát quang của các tinh thể phát quang lại rất dài. Các bẫy Cl nói trên là "bẫy nông". Có thể tăng thời gian phát quang của tinh thể bằng cách đưa vào tinh thể các "bẫy sâu".

4. Định luật Xtốc (Stokes)

Nghiên cứu mối quan hệ giữa ánh sáng phát quang và ánh sáng kích thích trong hiện tượng quang – phát quang, Xtốc đã đưa ra định luật sau : Bước sóng của ánh sáng phát quang λ' dài hơn bước sóng của ánh sáng kích thích λ : $\lambda' > \lambda$.

Thực vậy, năng lượng của photon bị hấp thụ hf phải lớn hơn năng lượng của photon ánh sáng phát quang hf' vì có một phần năng lượng bị tiêu hao trong quá trình va chạm : $hf > hf' \Rightarrow \lambda' > \lambda$.

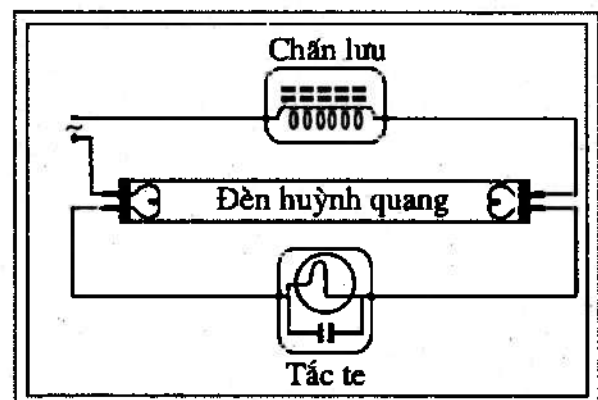
Nếu không bị mất mát năng lượng thì $\lambda' = \lambda$ ta có sự phát quang cộng hưởng. Vì vậy, để kích thích sự phát quang ánh sáng nhìn thấy được của các chất, người ta phải dùng ánh sáng kích thích là các tia tử ngoại.

5. Một vài ứng dụng của hiện tượng phát quang

- a) Sơn phát quang được phủ lên các cọc chỉ giới ở các đường, các biển báo giao thông,... để vào ban đêm, có ánh đèn ô tô, xe máy, chiếu vào chúng sẽ phát quang màu lục, màu xanh, màu đỏ. Dải vải phát quang được gắn vào ngang lưng áo của các công nhân quét đường, gắn vào cặp của học sinh, miếng nhựa phát quang được gắn ở các nút bấm công tắc điện,... tất cả đều nhằm giúp ta phát hiện ra đối tượng trong đêm nhờ ánh sáng phát quang.

Màn hình vô tuyến, màn hình LCD, màn hình của máy chụp X-quang... đều là các màn phát quang. Không thể kể hết được những ứng dụng muôn màu, muôn vẻ của hiện tượng phát quang trong đời sống và kĩ thuật.

- b) Đèn ống (hay đèn huỳnh quang) là một ống thủy tinh dài, kín, ở hai đầu có hai dây tóc nóng đỏ, dùng làm nguồn phát electron. Trong ống có chứa hơi thủy ngân ở áp suất thấp. Ở thành trong của ống có một lớp bột phát quang. Đèn được mắc vào mạch điện theo sơ đồ hình 14.1, gồm đèn, cuộn chấn lưu và tắc te. Tắc te là một bóng neon nhỏ có hai điện cực, với một điện cực là lưỡng kim.



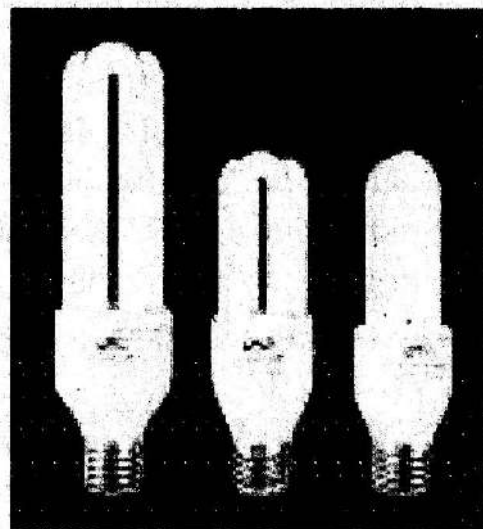
Hình 14.1

Thoạt nhiên, khi mới đặt điện áp thì cả mạch đèn và mạch tắc te đều hở. Điện áp 220 V, chẳng hạn, không đủ để tạo ra sự phóng điện qua đèn, nhưng đủ để tạo ra sự phóng điện qua bóng neon của tắc te. Sự phóng điện này làm nóng các điện cực của tắc te. Điện cực lưỡng kim sẽ dẫn nở, cong lại và chạm vào điện cực kia. Lúc đó, hai dây tóc của bóng đèn coi như được mắc nối tiếp với cuộn chấn lưu vào mạch 220 V. Hai dây tóc được nung đỏ và phát ra electron. Trở lại với tắc te, khi hai điện cực của tắc te chạm nhau thì không có sự phóng điện, hai điện cực nguội đi và rời nhau ra. Mạch đèn bị ngắt điện đột ngột làm cho trong cuộn chấn lưu xuất hiện một suất điện động cảm ứng rất lớn, tạo ra sự phóng điện qua hơi thủy ngân trong đèn. Sự phóng điện này tiếp tục tạo thêm các phân tử dẫn điện trong đèn vì sự ion hoá do va chạm. Khi có dòng điện xoay chiều ổn định chạy qua đèn thì điện áp giữa hai đầu đèn, và cũng chính là điện áp giữa hai điện cực của tắc te không đủ lớn để tạo ra sự phóng điện qua khí neon trong tắc te. Lúc đó có thể tháo tắc te ra mà đèn vẫn hoạt động.

Khi có sự phóng điện qua hơi thủy ngân, thì các nguyên tử thủy ngân được kích thích phát ra ánh sáng giàu tia tử ngoại. Các tia tử ngoại này chiếu vào lớp bột phát quang ở thành trong của đèn sẽ kích thích cho lớp bột này phát ra ánh sáng nhìn thấy được. Màu của ánh sáng do lớp bột này phát ra phụ thuộc vào thành phần cấu tạo của bột. Người ta đã pha chế sao cho ánh sáng phát quang của lớp bột này có màu trắng.

Đèn com-pắc (compact) có cấu tạo và nguyên tắc hoạt động tương tự như đèn ống nói trên nhưng bóng đèn có đường kính nhỏ hơn nhiều và được uốn cong cho gọn. Bộ phận khởi động được dùng là bộ phận khởi động điện tử có kích thước rất nhỏ và được lắp ngay dưới đế của bóng đèn (Hình 14.2).

Các đèn có sợi tóc nóng đỏ chỉ có thể biến được khoảng 2% năng lượng tiêu thụ thành năng lượng của ánh sáng nhìn thấy được, trong khi đó, tỉ lệ này ở các đèn huỳnh quang có thể lên đến 22%.



Hình 14.2

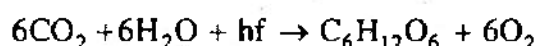
- c) Các đèn LED, bút laze, laze khí,... đều là các nguồn phát quang.
- d) Một ứng dụng quan trọng của hiện tượng phát quang là *phép phân tích phát quang*. Đó là phương pháp nhận biết sự có mặt của chất này hay chất khác trong một hỗn hợp phức tạp, dựa vào ánh sáng phát quang của chúng. Phép phân tích phát quang được ứng dụng, chẳng hạn, để phân tích các thành phần của dầu hoả, để phân tích các quặng uran và quặng của một số nguyên tố hiếm, để phân loại thủy tinh, các nguyên liệu cao su, để kiểm tra phẩm chất của một số vitamin, đồ hộp, rau tươi, sữa, khoai tây, hạt giống,...
- e) Hiện tượng phát quang còn được sử dụng để phát hiện các vết nứt nhỏ trên bề mặt các vật đúc, để tìm các sinh vật trong ngành cổ sinh vật học, để tìm dấu vân tay của tội phạm,...

6. Các phản ứng quang hoá

Các phản ứng quang hoá là các phản ứng hoá học xảy ra dưới tác dụng của ánh sáng.

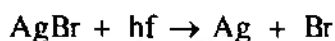
Có nhiều loại phản ứng quang hoá, ví dụ như phản ứng phân tích, phản ứng tổng hợp, phản ứng pôlime hoá,...

Ví dụ 1 : Hiện tượng quang hợp. Đó là một phản ứng hoá học biến đổi cacbon đioxit (CO_2) thành các chất hữu cơ, đặc biệt là đường, dưới tác dụng của ánh sáng Mặt Trời. Có thể biểu diễn một trong các phản ứng :



Phản ứng quang hợp là phản ứng rất quan trọng đối với các cây xanh, với con người. Nhờ nó mà tỉ lệ ôxi trong khí quyển luôn được duy trì ở mức cần thiết.

Ví dụ 2 : Phản ứng phân tích AgBr. Đây là phản ứng được dùng trong phim ảnh. Dưới tác dụng của photon ánh sáng kích thích, một số phân tử AgBr trong những hạt AgBr bị phân tích thành bạc và brom :

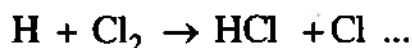


Những phân tử AgBr đã bị ánh sáng phân tích sẽ trở thành những mầm để từ đó toàn bộ hạt AgBr bị phân tích hoá học trong thuốc hiện hình. Những hạt AgBr không chứa các phân tử AgBr bị ánh sáng phân tích thì không bị thuốc hiện hình tác dụng.

Ví dụ 3 : Phản ứng tổng hợp HCl. Chiếu ánh sáng có bước sóng ngắn vào một bình đựng hỗn hợp Cl và H thì Cl sẽ tổng hợp với H thành HCl. Phản ứng xảy ra mãnh liệt và gây ra sự nổ, làm vỡ bình chứa. Người ta cho rằng phản ứng xảy ra theo hai quá trình kế tiếp nhau :

– Quá trình sơ cấp : $\text{Cl}_2 + h\nu \rightarrow \text{Cl} + \text{Cl}$

– Các quá trình thứ cấp : $\text{Cl} + \text{H}_2 \rightarrow \text{HCl} + \text{H}$



7. Lượng tính sóng – hạt của ánh sáng

- a) Chúng ta đã biết ánh sáng là sóng điện từ và chúng ta đã thiết lập được một thang sóng điện từ liên tục từ tia gamma đến sóng vô tuyến.

Tùy thuộc vào độ dài của bước sóng (hoặc độ lớn của tần số) mà tính chất sóng của ánh sáng hay tính chất hạt của ánh sáng sẽ thể hiện rõ : sóng có bước sóng càng dài thì tính chất sóng càng thể hiện rõ rệt (sóng vô tuyến, tia hồng ngoại, ánh sáng nhìn thấy được) ; sóng có bước sóng càng ngắn thì càng thể hiện rõ tính chất hạt (tia tử ngoại, tia X, tia gamma). Người ta nói, *ánh sáng có lưỡng tính sóng hạt*.

Tính chất sóng của ánh sáng thể hiện trong các hiện tượng : giao thoa, nhiễu xạ, phân cực, tán sắc,... Tính chất hạt của ánh sáng thể hiện trong các hiện tượng : bức xạ nhiệt, quang điện trong, quang điện ngoài, Compton, khả năng đâm xuyên,... Một số hiện tượng còn lại có thể giải thích được theo cả tính chất sóng lẫn tính chất hạt : hiện tượng phản xạ, tán xạ, áp suất ánh sáng,...

- b) Hai tính chất sóng tính chất hạt là hai tính chất trái ngược nhau.

Sóng hình sin là một quá trình tuần hoàn trong không gian và thời gian. Năng lượng sóng được phân bố trên toàn mặt sóng. Khi sóng truyền đến đâu thì nó tác động đồng thời lên nhiều điểm khác nhau của môi trường.

Hạt không có tính chất tuần hoàn. Tại mỗi thời điểm, mỗi hạt có một vị trí và vận tốc xác định. Một hạt không thể tồn tại đồng thời ở nhiều vị trí khác nhau trong không gian.

Hai tính chất trái ngược nhau đó tồn tại như thế nào trong cùng một thực thể là ánh sáng ? Để hiểu sơ bộ vấn đề này, ta hãy xét sự phát sáng của một nguyên tử. Theo thuyết điện từ ánh sáng, mỗi lần nguyên tử phát sáng thì nó phát ra một đoàn sóng điện từ (Hình 14.3) theo một phương nhất định và có một phương phân cực nhất định. Thời gian phát sóng cỡ $\Delta t \approx 10^{-8} \text{ s}$; vận tốc truyền sóng là $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$. Như vậy, chiều dài của đoàn sóng cỡ $\Delta l = c \cdot \Delta t \approx 3 \text{ m}$. Nếu coi sóng điện từ đơn sắc này có bước sóng $0,6 \mu\text{m}$ thì đoàn sóng này chứa đến $5 \cdot 10^6$ bước sóng.

Theo thuyết lượng tử, mỗi lần nguyên tử phát sáng thì nó phát ra một photon. Như vậy, mỗi photon ứng với một đoàn sóng.



Hình 14.3

Đoàn sóng này không phải là một sóng hình sin. Vì sóng hình sin phải có tính tuần hoàn vô hạn trong không gian và thời gian. Người ta đã chứng minh được là có thể phân tích một đoàn sóng thành vô số sóng hình sin có bước sóng nằm trong khoảng từ λ đến $\lambda + d\lambda$ (hoặc có tần số nằm trong khoảng từ f đến $f + df$). Như vậy, ánh sáng mà mỗi nguyên tử phát ra không tuyệt đối đơn sắc mà rất gần đơn sắc. Điều này thể hiện trong thực tế là các vạch quang phổ bao giờ cũng có một chiều rộng nhất định, gọi là chiều rộng tự nhiên của nó.

Khi đoàn sóng tương tác với một nguyên tử đứng yên khác, theo thuyết

tương đối, chiều dài của nó đối với nguyên tử này sẽ là $l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$. Với $v = c$ thì $l = 0$, tức là đoàn sóng này tương tác với nguyên tử như một hạt.

Trong cơ học lượng tử, người ta gọi tập hợp các sóng hình sin có tần số nằm trong khoảng từ f đến $f + df$ là một *bó sóng*. Như vậy, mỗi photon cũng là một bó sóng.

Trong chân không, các sóng hình sin truyền với cùng vận tốc c . Như vậy, khi truyền trong chân không, đoàn sóng không bị biến dạng. Do đó, vận tốc của đoàn sóng cũng là c , đó cũng là vận tốc của photon.

Trong các môi trường vật chất, các sóng đơn sắc hình sin sẽ truyền đi với các vận tốc khác nhau, đó là hiện tượng tán sắc. Do đó, đoàn sóng vừa truyền đi, vừa bị biến dạng (ta thấy hiện tượng tương tự khi quan sát sóng truyền trên biển, nhất là gần bờ). Lúc đó, vận tốc của đoàn sóng sẽ khác vận tốc của các sóng đơn sắc thành phần. Vận tốc của đoàn sóng sẽ là vận tốc nhóm của bó sóng. Đó là vận tốc của chỗ tập trung năng lượng sóng, của chỗ có biên độ dao động tổng hợp cực đại. Đó cũng là vận tốc của photon, vận tốc này có giá trị $v = \frac{c}{n}$ (n là chiết suất của môi trường).



BÀI TẬP

14.1. Sự phát sáng của những vật dưới đây thuộc dạng phát quang nào ?

- a) Sự phát sáng của các biển báo giao thông vào ban đêm.
- b) Sự phát sáng của đèn LED.
- c) Sự phát sáng của xác tôm, cá biển chết vào ban đêm.
- d) Sự phát sáng của màn hình dao động kí điện tử.
- e) Sự phát sáng của màn hình điện thoại di động.

14.2. Chiếu một chùm ánh sáng tử ngoại, hẹp, song song vào một bình nhỏ đựng một dung dịch huỳnh quang thì thấy dung dịch phát quang màu xanh lục. Chùm tử ngoại có bước sóng $0,30 \mu\text{m}$, cường độ $2,5 \cdot 10^4 \text{ W/m}^2$ và đường kính là 1 cm . Bước sóng của ánh sáng huỳnh quang là $0,55 \mu\text{m}$. Cường độ của ánh sáng huỳnh quang đo tại một điểm cách bình 1 m là 6 mW/m^2 . Khoảng cách này coi như rất lớn so với kích thước của bình và bình đựng chất huỳnh quang coi như phát sáng đều theo mọi phương.

- a) Tính hiệu suất của quá trình phát quang này.
- b) Tính xem cứ bao nhiêu photon ánh sáng kích thích lại cho một photon ánh sáng huỳnh quang (tỉ lệ này gọi là hiệu suất lượng tử của quá trình phát quang).

Cho $h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$; $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.

15

SƠ LƯỢC VỀ LAZE (LASER)

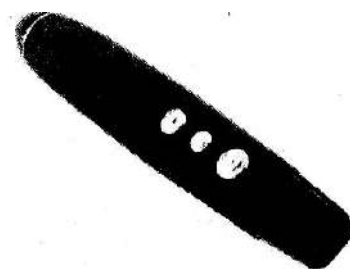
1. Laze là gì ?

Laze là từ phiên âm của tiếng Anh Laser. Thuật ngữ Laser được ghép bằng những chữ cái đứng đầu của cụm từ Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, có nghĩa là : *Sự khuếch đại ánh sáng bằng sự phát xạ cảm ứng.*

Có thể nói laze là một nguồn sáng phát ra một chùm sáng có tính đơn sắc, tính định hướng, tính kết hợp rất cao và cường độ lớn.

Chùm sáng phát ra cũng được gọi là tia laze.

Ta sẽ hiểu tất cả những đặc điểm trên khi nghiên cứu các nguyên tắc hoạt động của laze.



Hình 15.1
Laze bán dẫn
(bút laze)

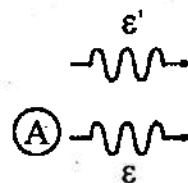
2. Các nguyên tắc hoạt động của laze

a) Sự phát xạ cảm ứng

Năm 1917, khi nghiên cứu lí thuyết phát xạ, Anh-xanh đã chứng minh rằng : Ngoài hiện tượng phát xạ tự phát của nguyên tử còn có hiện tượng phát xạ mà ông gọi là *hiện tượng phát xạ cảm ứng.*

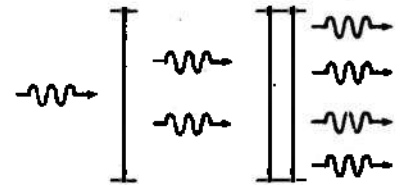
Hiện tượng đó như sau :

Nếu một nguyên tử đang ở trong trạng thái kích thích, sẵn sàng phát ra một photon có năng lượng $\varepsilon = hf$, bắt gặp một photon có năng lượng ε' đúng bằng hf , bay lướt qua nó, thì lập tức nguyên tử này cũng phát ra photon ε . Photon ε có cùng năng lượng và bay cùng phương với photon ε' . Ngoài ra, sóng điện từ ứng với photon ε hoàn toàn cùng pha với sóng điện từ ứng với photon ε' (Hình 15.2).



Hình 15.2

Như vậy, nếu có một photon ban đầu bay qua một loạt nguyên tử đang ở trong trạng thái kích thích nói trên, thì số photon sẽ tăng lên theo cấp số nhân (Hình 15.3).



Hình 15.3

Các photon này có cùng năng lượng (ứng với các sóng điện từ có cùng bước sóng), do đó tính đơn sắc của chùm sáng rất cao. Chúng bay theo cùng một phương, nghĩa là tính định hướng của chùm sáng rất cao. Tất cả các sóng điện từ do các nguyên tử phát ra đều cùng pha, như vậy tính kết hợp của chùm sáng rất cao.

Ngoài ra, vì số photon bay theo cùng một phương rất lớn, nên chùm sáng có cường độ rất mạnh.

b) Sự đảo lộn mật độ

Bình thường, tuyệt đại đa số nguyên tử của môi trường ở trạng thái cơ bản. Do đó, khi một photon có năng lượng phù hợp bay qua, nó sẽ bị hấp thụ ngay. Muốn quá trình khuếch đại ánh sáng xảy ra, phải làm cho số nguyên tử ở trạng thái kích thích nhiều hơn hẳn số nguyên tử ở trạng thái cơ bản, tức là tạo ra sự đảo lộn mật độ trong môi trường.

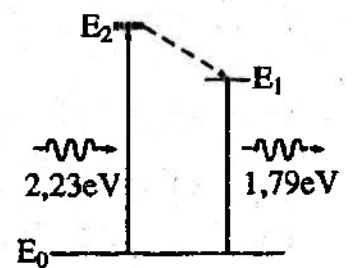
Lúc đó, môi trường có khả năng khuếch đại ánh sáng.

Ở mỗi loại laser có một cách tạo ra sự đảo lộn mật độ riêng. Dưới đây là cách làm ở laser rubi.

Rubi (hồng ngọc) là tinh thể Al_2O_3 có pha Cr_2O_3 .

Màu đỏ của rubi do ion Cr tạo ra. Ta hãy quan tâm đến ba mức năng lượng E_0 , E_1 và E_2 của Cr (Hình 15.4).

E_0 là mức cơ bản; E_1 là mức năng lượng kích thích nằm trên mức cơ bản 1,79 eV. Mức năng lượng E_1 ứng với trạng thái kích thích giả-bền; thời gian sống



Hình 15.4

trung bình của Cr ở trạng thái này vào cỡ $5 \cdot 10^{-3}$ s, dài hơn hẳn thời gian sống trung bình ở các trạng thái kích thích khác (cỡ 10^{-8} s). Mức kích thích E_2 , nằm trên mức cơ bản 2,23 eV. Mức này tương đối rộng, nghĩa là ion Cr có thể hấp thụ các photon có năng lượng lân cận 2,23 eV.

Người ta dùng ánh sáng xanh ($0,556 \mu\text{m}$), ứng với năng lượng của photon $2,23 \text{ eV}$, của một đèn xenon chiếu vào khối rubi để làm cho phần lớn nguyên tử Cr chuyển từ trạng thái cơ bản lên trạng thái kích thích E_2 . Sau khoảng thời gian cỡ 10^{-8} s , chúng chuyển một cách tự phát về trạng thái E_1 và sống trong trạng thái đó trong khoảng $5 \cdot 10^{-3} \text{ s}$. Trong khoảng thời gian này, có sự đảo lộn mật độ ở khối rubi.

Khi chuyển từ trạng thái E_1 về trạng thái cơ bản thì nguyên tử Cr phát ra ánh sáng đỏ ($0,694 \mu\text{m}$), ứng với photon có năng lượng $1,79 \text{ eV}$.

c) Buồng cộng hưởng

Để có sự khuếch đại mạnh ánh sáng, phải cho chùm sáng đi qua lại nhiều lần khối chất có tính khuếch đại ánh sáng theo cùng một phương.

Muốn vậy, người ta đặt khối chất nói trên giữa hai gương phẳng song song với nhau, có mặt phản xạ quay vào nhau (Hình 15.5).



Hình 15.5

Gương G_1 phản xạ tốt, còn gương G_2 là gương bán mạ. Nó phản xạ khoảng 50% ánh sáng chiếu tới và cho khoảng 50% ánh sáng truyền qua. Chùm tia laze được lấy ra từ gương G_2 .

Sóng tới và sóng phản xạ là các sóng kết hợp nên sẽ tạo thành sóng dừng. Tại các gương G_1 và G_2 là các nút sóng. Như vậy, khoảng cách giữa hai gương phải thoả mãn điều kiện :

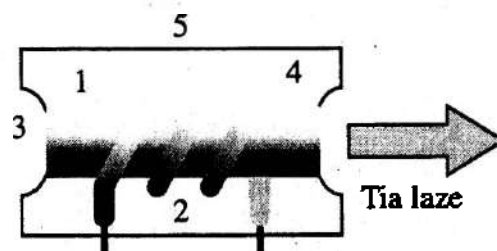
$$G_1 G_2 = n \cdot l = k \frac{\lambda}{2} \quad (15.1)$$

Với n là chiết suất của thanh Rubi.

Hai gương phẳng G_1 và G_2 tạo thành một buồng cộng hưởng.

3. Cấu tạo của laze

Ta xét cấu tạo của laze rubi (Hình 15.6) : Laze này gồm một thanh rubi hình trụ (1) có chiều dài thoả mãn hệ thức (15.1). Hai mặt của thanh rubi được mài nhẵn và



Hình 15.6

vuông góc với trục của thanh. Mặt (3) được mạ bạc ; mặt (4) là mặt bán mạ. Một đèn phóng điện xenon (2) được quấn quanh thanh rubi. Khi lazer hoạt động thì thanh rubi sẽ rất nóng, nên người ta phải gắn vào nó những cánh tỏa nhiệt (5).

Tuy vậy, lazer rubi cũng chỉ hoạt động được dưới chế độ xung, lúc phát, lúc nghỉ.

4. Các loại lazer

Có ba loại lazer chính :

- Lazer khí như lazer heli – neon (Hình 15.7), lazer CO_2 , ...
- Lazer rắn như lazer rubi.
- Lazer bán dẫn như lazer Ga-Al-As.



Hình 15.7

5. LED và lazer bán dẫn

- a) LED là một danh từ được ghép bởi ba chữ đầu của cụm từ tiếng Anh : Light Emitting Diode, có nghĩa là điốt phát sáng.

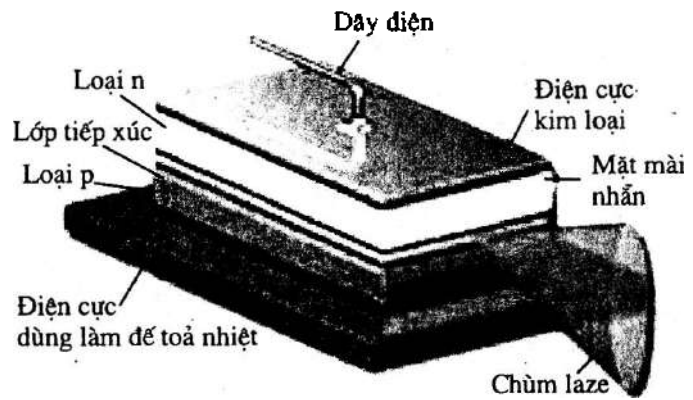
LED có cấu tạo đơn giản là một lớp tiếp xúc p – n mà người ta cho dòng điện chạy qua theo chiều thuận.

Trong các điốt chỉnh lưu bán dẫn, khoảng cách năng lượng ΔE giữa năng lượng của electron dẫn trong bán dẫn loại n và năng lượng của lỗ trống trong bán dẫn loại p là rất nhỏ (ΔE gọi là bề rộng vùng cấm). Do đó, khi có dòng điện chạy qua lớp tiếp xúc p – n trong điốt theo chiều thuận, electron dẫn và lỗ trống sẽ gặp nhau trong lớp đó, tái hợp với nhau và phát ra một photon có năng lượng $\epsilon = hf = \Delta E$. Năng lượng này nhỏ, ứng với tần số f trong vùng hồng ngoại, nên chỉ làm đốt nóng điốt.

Trong các LED, cơ chế cũng xảy ra như thế, nhưng "bề rộng vùng cấm" ΔE lớn, nên khi electron dẫn tái hợp với lỗ trống sẽ phát ra photon có tần số nằm trong vùng ánh sáng nhìn thấy được.

Màu của ánh sáng do LED phát ra phụ thuộc vào độ lớn của ΔE , tức là phụ thuộc vào bản chất của các bán dẫn loại n và loại p.

- b) Laze bán dẫn có cấu tạo như LED, chỉ có điều khác là : hai mặt đối diện, chỗ phát ra tia laze, được mài phẳng nhẵn, song song với nhau ; một mặt bán mạ, mặt kia mạ bạc. Tia laze được phát ra từ khe chứa lớp tiếp xúc p – n (Hình 15.8).



Hình 15.8

Hiện tượng phát xạ cảm ứng cũng xảy ra đối với cặp electron – lỗ trống khi tái hợp.

Laze bán dẫn được sử dụng trong các bút laze.

6. Ứng dụng của laze

Ngày nay, laze có rất nhiều ứng dụng trong khoa học kĩ thuật và đời sống.

- a) Do tia laze có tính định hướng cao, nên laze được ứng dụng trong các thiết bị hướng dẫn, điều khiển các vệ tinh, tàu vũ trụ trong không gian. Tia laze được dùng để đo chính xác khoảng cách, chẳng hạn từ Trái Đất đến Mặt Trăng, từ máy bay phản lực đến các đối tượng trên không và trên mặt đất. Người ta cũng sử dụng la bàn laze thay cho các la bàn thông thường.
- b) Do các tia laze có độ kết hợp cao, nên tia laze có thể mang một trữ lượng thông tin lớn. Tia laze được dùng trong các ống dẫn sóng, sợi quang,...
- c) Do tia laze có tính định hướng cao và có cường độ lớn, nên người ta có thể dùng nó để tập trung năng lượng rất lớn trong một vùng không gian rất nhỏ. Tia laze được dùng để khoan, cắt kim loại một cách chính xác, dùng trong phẫu thuật như phẫu thuật mắt. Và trong tương lai, chắc chắn nó được dùng để làm vũ khí chống tên lửa đạn đạo tầm xa, cỡ vài nghìn kilômét.
- d) Tia laze được dùng để tạo các vệt sáng trên bầu trời trong đêm dạ hội, dùng trong các bút chỉ bảng trong các buổi thuyết trình khoa học, dùng trong các bộ phận đọc đĩa của các đầu đĩa CD,...



BÀI TẬP

- 15.1. a) Thanh rubi trong một laze rubi có chiều dài $d = 6$ cm. Hai đầu thanh được mài nhẵn, phẳng và vuông góc với trục của thanh. Đầu phát tia laze thì bán mạ, đầu kia thì mạ bạc với hệ số phản xạ là $R = 0,99$. Cho rằng thanh rubi hấp thụ ánh sáng theo định luật :

$$I = I_0 e^{-\alpha d}$$

Trong đó, α là hệ số hấp thụ, I_0 là cường độ của chùm sáng lúc bắt đầu đi vào thanh, dọc theo trục của nó, I là cường độ của chùm sáng lúc bắt đầu đi ra khỏi thanh. Tìm điều kiện về α để laze này có thể phát được tia laze.

- b) Cho biết chiết suất của thanh rubi là $n = 1,90$, bước sóng của tia laze là $\lambda = 0,694 \mu\text{m}$.

Hãy tính độ đơn sắc của tia laze ($\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$).

- 15.2. Một laze phát ra một chùm tia có công suất 10 W, đường kính 1 mm. Chùm tia được hướng vuông góc với một tấm sắt có chiều dày 2 mm. Nhiệt độ ban đầu của tấm sắt là 20°C .

- a) Tính thời gian cần thiết để chùm tia laze trên khoan thủng tấm sắt.

- b) Tại sao ta lại nói kết quả trên chỉ cho ta biết bậc độ lớn của thời gian khoan ?

Cho nhiệt dung riêng của sắt $448 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$; nhiệt nóng chảy của sắt 270 kJ.kg^{-1} ; điểm nóng chảy của sắt 1535°C ; khối lượng riêng của sắt 7800 kg.m^{-3} .

16

CÁC TIÊN ĐỀ ANH-XTANH. MỘT SỐ KẾT QUẢ CỦA THUYẾT TƯƠNG ĐỐI HẸP

1. Hạn chế của cơ học cổ điển

- Từ khi được Niu-tơn xây dựng hoàn chỉnh đến cuối thế kỉ XIX, Cơ học cổ điển được áp dụng rộng rãi trong khoa học và kĩ thuật. Một thành công tiêu biểu là năm 1846, nhà bác học Pháp Lơ-ve-riê (Le Verrier, 1811 – 1877) chỉ bằng tính toán dựa vào Cơ học cổ điển, đã phán đoán rằng các nhiễu loạn trong chuyển động của Thiên Vương Tinh (hành tinh thứ 7 tính từ Mặt Trời) là do một hành tinh chưa biết gây ra. Ông tính toán quỹ đạo của hành tinh này và ngay sau đó người ta đã tìm thấy, đặt tên là Hải Vương Tinh (hành tinh thứ 8).
- Trên cơ sở của cơ học Niu-tơn, trong một thời gian dài đã hình thành các quan niệm cổ điển về không gian, thời gian và vật chất. Theo quan niệm đó, không gian, thời gian là tuyệt đối, không phụ thuộc vào chuyển động, còn khối lượng là bất biến. Cụ thể là : khoảng thời gian của một hiện tượng xảy ra, kích thước và khối lượng của một vật có trị số như nhau trong mọi hệ quy chiếu đứng yên hay chuyển động.
- Tuy nhiên, đến cuối thế kỉ XIX, có những hiện tượng mà Cơ học cổ điển không giải thích được, liên quan đến tốc độ truyền ánh sáng. Theo quan điểm cổ điển, ánh sáng là sóng điện từ truyền với tốc độ c trong một môi trường đặc biệt đứng yên tuyệt đối, gọi là *ête*. Trái Đất chuyển động đối với *ête* với tốc độ $u \approx 30 \text{ km/s}$ (tốc độ của chuyển động quanh Mặt Trời). Nếu vậy thì, theo công thức cộng vận tốc của Cơ học cổ điển, tốc độ của ánh sáng mà quan sát viên (gắn với Trái Đất) đo được khi ánh sáng truyền

ngược chiều chuyển động của Trái Đất, phải là $c + u$, lớn hơn tốc độ đo được khi ánh sáng truyền cùng chiều $c - u$. Năm 1881, Mai-ken-son (Michelson 1852 – 1931) dùng phương pháp giao thoa ánh sáng để cố gắng phát hiện sự khác nhau giữa hai tốc độ ấy. Độ chính xác của giao thoa kế rất cao, tới 10^{-7} , thừa đủ để phát hiện vì $\frac{u}{c} \approx 10^{-4}$. Những thí nghiệm lặp lại nhiều lần như vậy đã không phát hiện được sự khác nhau giữa hai tốc độ ấy. Điều ấy có nghĩa là *tốc độ ánh sáng có cùng một giá trị đối với các hệ quy chiếu quán tính khác nhau*.

2. Các tiên đề Anh-xtanh

- Năm 1905, Anh-xtanh đã vứt bỏ *giả thuyết về ête* và thừa nhận rằng, ánh sáng truyền trong chân không, không cần có môi trường truyền sóng nào. Ông đã xây dựng một lí thuyết mới gọi là *thuyết tương đối*. Thuyết này có hai phần. Phần một chỉ xét các hệ quy chiếu quán tính, gọi là *thuyết tương đối hẹp*, đã hoàn chỉnh. Phần sau xét các hệ quy chiếu bất kì và gọi là *thuyết tương đối rộng*, đang tiếp tục phát triển.
- Anh-xtanh nêu hai tiên đề sau đây, gọi là các tiên đề của thuyết tương đối hẹp, hoặc *tiên đề Anh-xtanh*.

a) Tiên đề 1 mở rộng nguyên lí tương đối của Ga-li-lê

Theo nguyên lí này thì *mọi hiện tượng cơ học xảy ra như nhau trong các hệ quy chiếu quán tính*, hay nói cách khác, *các định luật cơ học có cùng một dạng toán học trong các hệ ấy*. Nhưng nếu xét các hiện tượng điện từ thì

sao ? Tốc độ ánh sáng có giá trị không đổi $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$ theo thuyết điện từ

của Mắc-xoen, thuyết này được xây dựng từ các định luật điện từ. Thí nghiệm Mai-ken-xon khẳng định tốc độ ánh sáng không phụ thuộc vào việc chọn hệ quy chiếu quán tính. Như vậy các định luật điện từ cũng không phụ thuộc vào việc chọn này. Anh-xtanh đã mở rộng nguyên lí tương đối Ga-li-lê cho mọi hiện tượng vật lí.

Tiên đề 1 phát biểu như sau : "Các hiện tượng vật lí xảy ra như nhau đối với mọi hệ quy chiếu quán tính". Nói cách khác, *các phương trình diễn tả các hiện tượng vật lí có cùng một dạng trong mọi hệ quy chiếu quán tính*. Các hệ này hoàn toàn bình đẳng, không có cái nào là tuyệt đối đứng yên.

b) Tiên đề 2

Vận dụng tiên đề 1 vào sự lan truyền của ánh sáng, Anh-xtanh nêu tiên đề 2, phát biểu như sau : *"Tốc độ của ánh sáng trong chân không có cùng độ lớn c trong mọi hệ quy chiếu quán tính"*, không phụ thuộc vào phương truyền ánh sáng, vào tốc độ của nguồn sáng hay máy thu. c là một hằng số vũ trụ, một cái tuyệt đối trong thuyết tương đối.

$$c = 299792458 \text{ m/s} \approx 300000 \text{ km/s}$$

Tiên đề này mặc nhiên phủ nhận Cơ học cổ điển. Thật vậy, khi đặt một đèn pha lên máy bay bay với tốc độ v đối với mặt đất thì, theo Cơ học cổ điển, nếu đèn pha chiếu sáng theo chiều bay, tốc độ của ánh sáng đối với mặt đất là $c + v$, còn nếu đèn pha chiếu sáng ngược chiều bay thì tốc độ ánh sáng là $c - v$. Nhưng theo tiên đề 2, tốc độ ấy luôn luôn là c .

- Lí thuyết và thực nghiệm còn chứng tỏ rằng, c là giới hạn của tốc độ vật lí. Không một đối tượng vật chất nào có thể có tốc độ lớn hơn c . Điều đó có nghĩa là *không có tác dụng tức thời từ xa*.

Sự giới hạn này không áp dụng cho tốc độ có tính chất thuần túy toán học, hoặc các tín hiệu không mang theo năng lượng. Ví dụ, trong thí nghiệm dùng tia laze để đo khoảng cách Trái Đất – Mặt Trăng, người ta đã chiếu một tia laze rất mảnh lên Mặt Trăng. Nếu quay máy phát với tốc độ đủ lớn thì vết sáng trên Mặt Trăng có thể chuyển động với tốc độ lớn hơn c . Nhưng không có năng lượng nào đi theo chuyển động này.

- Chú ý rằng : *tốc độ của ánh sáng trong chân không c mới là tốc độ giới hạn, còn tốc độ c' của ánh sáng trong các môi trường thì nhỏ hơn c , $c' = \frac{c}{n}$* ($n > 1$ là chiết suất của môi trường). Vì vậy, một hạt vẫn có thể chuyển động trong môi trường với tốc độ v lớn hơn c' : $c' < v < c$.

Hai tiên đề của Anh-xtanh là cơ sở của thuyết tương đối hẹp. Chúng là đúng vì toàn bộ kết quả suy ra là đúng.

Thuyết lượng tử và thuyết tương đối hẹp đã trở thành hai "trụ cột" của Vật lí học hiện đại. Nhưng điều đó không có nghĩa là phải vứt bỏ Cơ học cổ điển. Bởi vì *khi tốc độ các vật rất nhỏ so với c thì các kết quả của Cơ học tương đối tính (phần cơ học của thuyết tương đối hẹp) rút về kết quả của Cơ học cổ điển*, khi đó sự sai lệch là rất nhỏ, không thể phát hiện được với các dụng cụ đo thông thường. Trong đời sống kĩ thuật thông thường, chúng ta chỉ gặp các tốc độ rất nhỏ so với c , nên ta vẫn dùng được các định luật của Cơ học cổ điển. Chỉ trong nghiên cứu khoa học (hạt sơ cấp, vũ trụ học,...) chúng ta mới gặp các tốc độ rất lớn, khi đó đòi hỏi phải dùng thuyết tương đối.

3. Công thức biến đổi Lo-ren-xơ

Công thức cộng vận tốc được suy từ *phép biến đổi Ga-li-lê*, phép biến đổi này bao gồm các công thức biến đổi toạ độ và thời gian khi chuyển từ hệ quy chiếu quán tính này sang hệ quy chiếu quán tính khác. Kết quả áp dụng công thức cộng vận tốc đó đã mâu thuẫn với tiên đề Anh-xtanh. Nói cách khác, phép biến đổi Ga-li-lê không thoả mãn được các yêu cầu của thuyết tương đối Anh-xtanh.

Lo-ren-xơ (Lorentz) đã tìm được công thức biến đổi toạ độ và thời gian khi chuyển từ hệ quán tính này sang hệ quán tính khác, đảm bảo thoả mãn được các yêu cầu của thuyết tương đối Anh-xtanh. Các công thức này được gọi là *công thức biến đổi Lo-ren-xơ*.

- Để thiết lập các công thức đó, ta xét hai hệ quán tính Oxyz và O'x'y'z', gọi tắt là hệ K và K'. Giả sử ban đầu hai gốc O và O' của hai hệ trùng nhau, hệ K đứng yên, còn hệ K' chuyển động với vận tốc v theo phương Ox đối với hệ K. Theo thuyết tương đối Anh-xtanh, thời gian không có tính chất tuyệt đối mà phụ thuộc vào hệ quy chiếu. Nói khác đi, thời gian trôi trong hai hệ sẽ khác nhau: $t \neq t'$. Giả sử toạ độ x' liên hệ với x và t theo phương trình:

$$x' = f(x, t) \quad (16.1)$$

Để tìm dạng của $f(x, t)$, ta viết phương trình chuyển động của các gốc toạ độ O và O' ở trong hai hệ K và K'. Đối với hệ K, gốc O' chuyển động với vận tốc v , ta có:

$$x - vt = 0, \quad (16.2)$$

trong đó x là toạ độ của gốc O' xét với hệ K. Còn đối với hệ K', thì gốc O' là đứng yên, và toạ độ x' của nó trong hệ K' bao giờ cũng bằng 0 ($x' = 0$). Muốn cho phương trình (16.1) áp dụng đúng cho hệ K' (nghĩa là khi thay $x' = 0$ vào (16.1) ta phải thu được (16.2)), thì $f(x, t)$ chỉ có thể khác $(x - vt)$ một hệ số nhân γ nào đó. Điều đó có nghĩa:

$$x' = \gamma(x - vt) \quad (16.3)$$

Đối với hệ K', gốc O chuyển động với vận tốc $-v$, nhưng đối với hệ K thì gốc O lại đứng yên. Lập luận tương tự như trên, ta có:

$$x = \alpha(x' + vt') \quad (16.4)$$

trong đó α là hệ số nhân.

- Theo tiên đề 1 của Anh-xtanh, mọi hệ quán tính đều tương đương nhau. Điều đó có nghĩa là, từ (16.3) ta có thể suy ra (16.4), bằng cách thay thế v

bằng $-v$; x' bằng x , t' bằng t , và ngược lại. Do đó, ta dễ dàng rút ra $\alpha = \gamma$. Hơn nữa, theo tiên đề 1 ta có: trong hệ K và K' , nếu $x = ct$ thì $x' = ct'$. Thay các biểu thức đó vào (16.3) và (16.4) ta tìm được:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (16.5)$$

Từ đó, ta có công thức biến đổi Lo-ren-xơ sau đây:

$$x' = \gamma(x - vt) = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (16.6); \quad x = \gamma(x' + vt') = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (16.7)$$

và

$$t' = \gamma\left(t - \frac{v}{c^2}x\right) = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (16.8); \quad t = \gamma\left(t' + \frac{v}{c^2}x'\right) = \frac{t' + \frac{v}{c^2}x'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (16.9)$$

Ngoài ra, vì hệ K' chuyển động dọc theo trục x , nên rõ ràng là:

$$y' = y; \quad z' = z \quad (16.10) \quad \text{hay} \quad y = y'; \quad z = z' \quad (16.11)$$

Các công thức (16.6), (16.8), (16.10) cho phép biến đổi tọa độ và thời gian từ hệ K sang hệ K' . Còn các công thức (16.7), (16.9), (16.11) cho phép biến đổi tọa độ và thời gian từ hệ K' sang hệ K . Qua các công thức đó, ta thấy được mối liên hệ mật thiết giữa không gian và thời gian.

Chú ý: Ta nhận thấy rằng, khi $\frac{v}{c} \rightarrow 0$, thì các công thức biến đổi Lo-ren-xơ chuyển thành:

$$\begin{aligned} x' &= x - vt; & y' &= y; & z' &= z; & t' &= t \\ x &= x' + vt; & y &= y'; & z &= z'; & t &= t' \end{aligned}$$

Điều đó nghĩa là các công thức của phép biến đổi Lo-ren-xơ chuyển thành công thức biến đổi Ga-li-lê, khi tốc độ chuyển động của vật rất nhỏ so với c .

4. Một số kết quả của thuyết tương đối hẹp

a) Khái niệm về tính đồng thời và quan hệ nhân quả

Giả sử trong hệ quán tính K có hai hiện tượng, còn gọi là hai *biến cố*, $A_1(x_1, y_1, z_1, t_1)$ và $A_2(x_2, y_2, z_2, t_2)$, với $x_1 \neq x_2$. Ta tìm khoảng thời gian $(t_2 - t_1)$ giữa hai hiện tượng đó trong hệ quán tính K' (K' chuyển động với

vận tốc v so với K dọc theo trục x). Từ các công thức biến đổi Lo-ren-xơ ta thu được :

$$t'_2 - t'_1 = \frac{t_2 - t_1 - \frac{v}{c^2}(x_2 - x_1)}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (16.12)$$

- Theo (16.12), nếu $t_2 = t_1$, thì vẫn có $t'_2 \neq t'_1$. Điều đó có nghĩa là : *hai biến cố xảy ra đồng thời trong hệ K , nói chung, sẽ là không đồng thời trong hệ K'* . Chỉ có một trường hợp ngoại lệ, đó là khi cả hai biến cố đó xảy ra đồng thời tại hai điểm có cùng toạ độ x ($x_1 = x_2$) (còn toạ độ y có thể khác nhau). Điều đó có nghĩa là, *theo thuyết tương đối, khái niệm đồng thời chỉ là một khái niệm tương đối* : Hai biến cố có thể xảy ra đồng thời trong một hệ quy chiếu, nhưng nói chung có thể là không đồng thời ở trong một hệ quy chiếu khác.
- Ngoài ra công thức (16.12) còn chứng tỏ rằng, đối với các biến cố đồng thời trong hệ K , dấu của $(t'_2 - t'_1)$ tùy thuộc vào dấu của biểu thức $(x_2 - x_1)$.
Nhu vậy, trong các hệ quy chiếu quán tính khác nhau, hiệu $t'_2 - t'_1$ sẽ không những khác nhau về độ lớn (vì v khác nhau) mà còn khác nhau về dấu. Điều đó có nghĩa là : thứ tự các biến cố A_1 và A_2 trong hệ K' có thể là bất kì (A_1 có thể xảy ra trước A_2 , hoặc ngược lại).
- Cần nhấn mạnh rằng, kết luận nói trên không áp dụng cho các biến cố có *liên hệ nhân quả với nhau*, nghĩa là nguyên nhân bao giờ cũng xảy ra trước kết quả, quyết định sự ra đời của kết quả. Để làm ví dụ, ta xét một viên đạn được bắn ra (nguyên nhân), viên đạn trúng đích (kết quả). Kí hiệu $A_1(x_1, t_1)$ là biến cố "viên đạn được bắn ra", và $A_2(x_2, t_2)$ là biến cố "viên đạn trúng đích" ; cả hai biến cố đều xảy ra trên trục x . Trong hệ K , hiển nhiên là $t_2 > t_1$. Kí hiệu v_d là vận tốc viên đạn và giả sử $x_2 > x_1$, ta có : $x_1 = vt_1$, $x_2 = vt_2$. Thay vào (16.12) ta thu được :

$$t'_2 - t'_1 = \frac{(t_2 - t_1) \left(1 - \frac{v \cdot v_d}{c^2}\right)}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (16.13)$$

Ta luôn có $v \cdot v_d < c^2$. Do đó, theo (16.13), nếu $t_2 > t_1$ thì ta cũng có $t'_2 - t'_1 > 0$, nghĩa là thứ tự nhân quả vẫn được tôn trọng đối với hệ K' .

b) Sự co độ dài

Dựa vào các công thức biến đổi Lo-ren-xơ ta hãy so sánh độ dài của một vật trong hai hệ K và K'.

- Xét một cái thước đứng yên trong hệ K' đặt dọc theo trục x', độ dài của thước trong hệ K' bằng : $l_0 = x'_2 - x'_1$

(l_0 được gọi là chiều dài riêng của thước)

- Để tìm độ dài l của thước trong hệ K, ta phải xác định vị trí x_1, x_2 của hai đầu thước trong hệ K tại cùng một thời điểm : $l = x_2 - x_1$

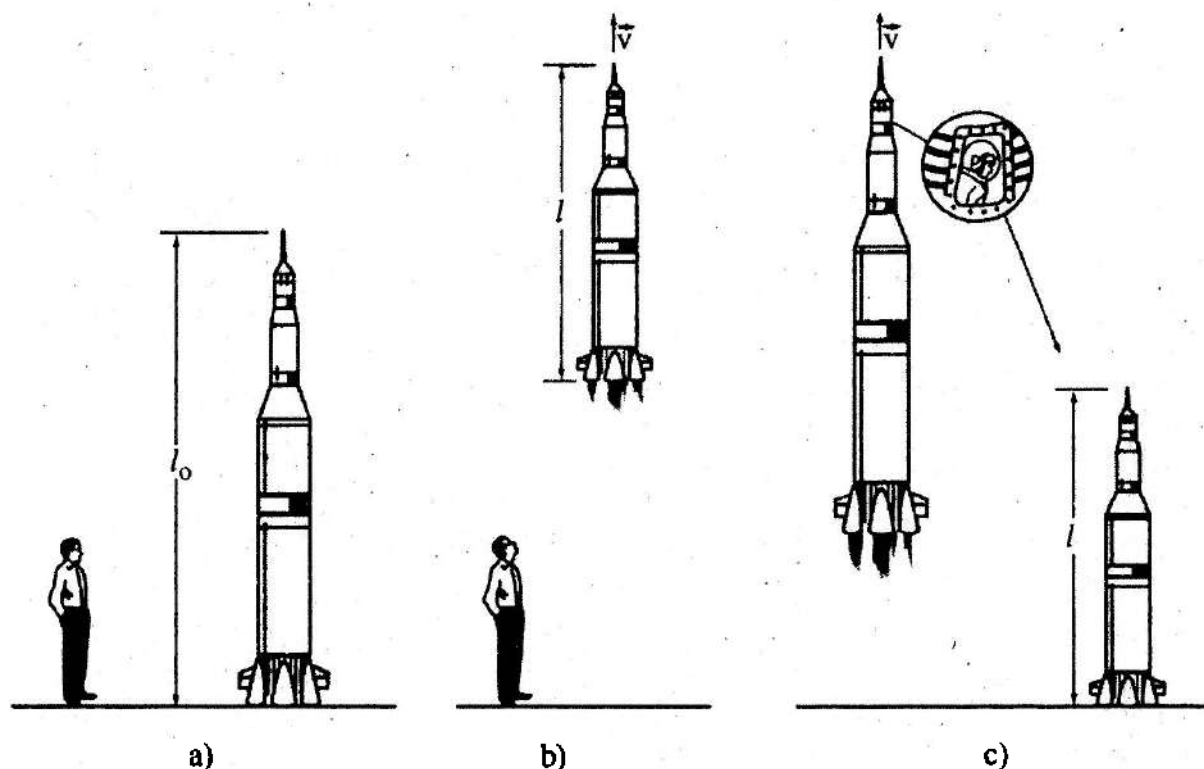
Áp dụng công thức biến đổi Lo-ren-xơ, ta có (chú ý $t_2 = t_1 = t$) :

$$x'_2 = \frac{x_2 - \frac{v}{c^2}t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} ; \quad x'_1 = \frac{x_1 - \frac{v}{c^2}t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$\text{Từ đó suy ra : } x'_2 - x'_1 = \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \text{ hay } l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{l_0}{\gamma} < l_0 \quad (16.14)$$

- Như vậy, độ dài (dọc theo phương chuyển động) của một cái thước trong hệ quy chiếu mà thước chuyển động ngắn hơn độ dài của thước trong hệ mà thước đứng yên. Nói cách khác, khi vật chuyển động, kích thước của nó bị co ngắn theo phương chuyển động, và mức co ngắn tùy thuộc vào tốc độ chuyển động của vật. Chẳng hạn, khi Trái Đất chuyển động quanh Mặt Trời (với tốc độ khoảng 30 km/s) thì đường kính của nó (≈ 12700 km) chỉ co ngắn 6,5 cm ! Nhưng nếu một vật có tốc độ gần bằng tốc độ ánh sáng, $v = 260000$ km/s, thì $l' \approx 0,5 l_0$, nghĩa là kích thước của vật bị co ngắn đi một nửa. Nếu quan sát một hình hộp vuông chuyển động với tốc độ lớn như vậy, ta thấy nó có dạng một hình hộp chữ nhật. Còn khi một khối cầu chuyển động nhanh như vậy, ta sẽ thấy nó có dạng một elipxoit tròn xoay ! Các kết quả nói trên chứng tỏ tính tương đối của không gian. Trong trường hợp thông thường, tốc độ chuyển động của vật là nhỏ ($v \ll c$), công thức (16.14) trở thành $l \approx l_0$, khi đó ta trở lại kết quả trong Cơ học cổ điển : không gian là tuyệt đối, không phụ thuộc chuyển động.

Hình 16.1 dưới đây minh họa sự co độ dài của tàu vũ trụ theo phương chuyển động. Các hình a, b, c mô tả như sau :



Hình 16.1

a) Quan sát viên và tàu vũ trụ đứng yên trên mặt đất. Quan sát viên thấy tàu có độ dài l_0 ;
b) Tàu vũ trụ chuyển động với tốc độ v . Quan sát viên đứng trên mặt đất thấy tàu có độ

dài $l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$; c) Quan sát viên chuyển động với tốc độ v , con tàu vũ trụ đứng yên

trên mặt đất. Quan sát viên thấy tàu có độ dài $l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$.

c) Sự trôi chậm của thời gian trong hệ chuyển động

- Bây giờ ta xét khoảng thời gian của cùng một quá trình trong hai hệ K và K' . Để cho cụ thể, giả sử có một đồng hồ đứng yên trong hệ K' và ta xét hai biến cố xảy ra tại cùng một điểm A có tọa độ x' trong hệ K' . Khoảng thời gian giữa hai biến cố trong hệ K' là $\Delta t' = t'_2 - t'_1$ (gọi là *thời gian riêng*). Ta tìm khoảng thời gian $\Delta t = t_2 - t_1$ giữa cùng hai biến cố đó ở hệ K . Áp dụng công thức biến đổi Lo-ren-xơ, với chú ý rằng $x'_1 = x'_2 = x'$, ta suy ra :

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{t'_2 - t'_1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

$$\text{hay} \quad \Delta t' = \Delta t \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{\Delta t}{\gamma} < \Delta t \quad (16.15)$$

- Như vậy khoảng thời gian $\Delta t'$ của một quá trình trong hệ quy chiếu chuyển động K' bao giờ cũng nhỏ hơn khoảng thời gian Δt xảy ra của cùng quá trình đó trong hệ quy chiếu đứng yên K . Nếu ta gắn một đồng hồ vào hệ quy chiếu K và một đồng hồ vào hệ K' thì khoảng thời gian của cùng một quá trình xảy ra được ghi trên đồng hồ của hệ K' sẽ nhỏ hơn khoảng thời gian ghi trên đồng hồ của hệ K . Vì vậy, ta có thể nói : *Đồng hồ chuyển động chạy chậm hơn đồng hồ đứng yên*. Điều đó nói lên tính tương đối của thời gian. Trong trường hợp tốc độ chuyển động là rất nhỏ $v \ll c$, thì, theo (16.15) ta có $\Delta t \approx \Delta t'$, nghĩa là ta trở lại kết quả của Cơ học cổ điển, coi khoảng thời gian là tuyệt đối. Nhưng, nếu tốc độ chuyển động là rất lớn, thì $\Delta t'$ sẽ nhỏ hơn Δt rất nhiều. Để minh họa, ta xét một nhà du hành vũ trụ ngồi trên một con tàu chuyển động với tốc độ $v = 299960 \text{ km/s}$ (gần bằng tốc độ ánh sáng) trong thời gian 5 năm (tính theo đồng hồ trên con tàu). So với đồng hồ trên mặt đất khoảng thời gian tương ứng đã trôi qua bằng $\Delta t = 2\Delta t' = 10$ năm. Có một điểm cần chú ý là, để đạt được tốc độ lớn như vậy, phải tốn rất nhiều năng lượng mà hiện nay con người chưa thể đạt được. Thế nhưng, sự trôi chậm của thời gian do hiệu ứng của thuyết tương đối thì đã được thực nghiệm xác nhận.

d) Định lý cộng vận tốc trong thuyết tương đối

- Giả sử $u_x = \frac{dx}{dt}$ là vận tốc của một chất điểm đối với hệ K , $u'_x = \frac{dx'}{dt'}$ là vận tốc của cùng chất điểm đó đối với K' . Ta tìm công thức liên hệ giữa u_x và u'_x . Áp dụng công thức biến đổi Lo-ren-xơ, lấy vi phân toạ độ và thời gian để tính u_x và u'_x ta tìm được :

$$u'_x = \frac{u_x - v}{1 - \frac{v}{c^2} u_x} \quad \text{và} \quad u_x = \frac{u'_x + v}{1 + \frac{v}{c^2} u'_x} \quad (16.16)$$

$$\text{Tương tự, ta thu được :} \quad u'_y = \frac{u_y \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 - \frac{v}{c^2} u_x} ; \quad u'_z = \frac{u_z \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 - \frac{v}{c^2} u_x} \quad (16.17)$$

Các công thức (16.16), (16.17) biểu thị định lý cộng vận tốc trong thuyết tương đối.

- Từ các công thức trên, ta có thể suy tính bất biến của tốc độ ánh sáng trong chân không đối với các hệ quy chiếu quán tính. Thực vậy, nếu $u_x = c$, thì từ (16.16) ta tìm được $u'_x = c$.

Trong trường hợp thông thường, tốc độ chuyển động là rất nhỏ ($v, u_x \ll c$), từ (16.16) ta tìm được $u'_x \approx u_x - v$, hay $u_x = u'_x + v$. Khi đó ta trở lại với công thức cộng vận tốc của Cơ học cổ điển.



BÀI TẬP

- 16.1. Khi nguồn sáng chuyển động, tốc độ truyền ánh sáng trong chân không có giá trị
- A. nhỏ hơn c .
 - B. lớn hơn c .
 - C. lớn hơn hoặc nhỏ hơn c , phụ thuộc vào phương truyền và tốc độ của nguồn.
 - D. luôn bằng c , không phụ thuộc phương truyền và tốc độ của nguồn.
- 16.2. Khi một cái thước chuyển động dọc theo phương chiều dài của nó, độ dài của thước đo trong hệ quán tính K
- A. không thay đổi.
 - B. co lại, tỉ lệ nghịch với tốc độ của thước.
 - C. dãn ra, phụ thuộc vào tốc độ chuyển động của thước.
 - D. co lại theo tỉ lệ $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$.
- 16.3. Tính độ co độ dài của một cái thước có độ dài riêng bằng 30 cm, chuyển động với tốc độ $v = 0,8c$.
- 16.4. Một đồng hồ chuyển động với tốc độ $v = 0,8c$. Hỏi sau 30 phút (tính theo đồng hồ đó) thì đồng hồ này chạy chậm hơn đồng hồ gắn với quan sát viên đứng yên bao nhiêu giây?

17

HỆ THỨC ANH-XTANH GIỮA KHỐI LƯỢNG VÀ NĂNG LƯỢNG

1. Phương trình cơ bản của chuyển động chất điểm trong thuyết tương đối

- Để mô tả chuyển động trong thuyết tương đối, người ta dùng phương trình tổng quát cơ học :

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F} \quad (17.1)$$

Trong đó

$$\vec{p} = m\vec{v} = \frac{m_0 \vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (17.2)$$

là *động lượng tương đối tính* của chất điểm ; m là khối lượng của chất điểm đó trong hệ quy chiếu quán tính mà nó chuyển động với vận tốc v , còn m_0 là khối lượng của chất điểm đó trong hệ mà nó đứng yên. m được gọi là *khối lượng tương đối tính* của chất điểm, còn m_0 gọi là *khối lượng nghỉ* của chất điểm. Như vậy, *theo thuyết tương đối, khối lượng của một vật không còn là một hằng số nữa* :

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (17.3)$$

Khối lượng của vật tăng lên khi vật chuyển động và có giá trị nhỏ nhất khi vật đứng yên. Điều đó chứng tỏ : *khối lượng có tính tương đối*, nó phụ thuộc vào hệ quy chiếu.

Chú ý : Phương trình (17.1) bất biến đối với phép biến đổi Lo-ren-xơ, nghĩa là có cùng dạng đối với hệ K và đối với hệ K' , thoả mãn tiên đề 1. Trong trường hợp $v \ll c$, ta có $m \approx m_0 = \text{const}$, $\vec{p} = m_0 \vec{v}$ và phương trình (17.1) trở thành phương trình biểu diễn định luật II Niu-ơn.

2. Năng lượng trong thuyết tương đối

a) Hệ thức Anh-xtanh giữa khối lượng và năng lượng

- Theo định luật bảo toàn năng lượng, độ tăng năng lượng dE của vật bằng công của ngoại lực tác dụng lên vật :

$$dE = dA$$

Để đơn giản, giả sử ngoại lực $\vec{F}$ cùng phương với độ dời $\vec{ds}$ của vật. Khi đó :

$$dE = dA = \vec{F}d\vec{s} = Fds$$

Theo (17.1) và (17.2) ta có :

$$dE = \frac{d}{dt} \left(\frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right) ds$$

$$\text{hay} \quad dE = \left(\frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \frac{dv}{dt} + \frac{m_0 v^2}{c^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{\frac{3}{2}}} \frac{dv}{dt} \right) ds = \frac{m_0 v dv}{\left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{\frac{3}{2}}}$$

$$\text{với} \quad \frac{dv}{dt} ds = dv \cdot \frac{ds}{dt} = v dv$$

Mặt khác, từ (17.3) ta có :

$$dm = \frac{m_0 v dv}{c^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{\frac{3}{2}}}$$

- So sánh hai biểu thức vừa tìm được của dE và dm ta rút ra : $dE = c^2 dm$, hay : $E = mc^2 + C$, trong đó C là hằng số tích phân. Từ điều kiện $m = 0$ thì $E = 0$, ta rút ra $C = 0$. Vậy :

$$E = mc^2 \quad (17.4)$$

Hệ thức (17.4) giữa năng lượng và khối lượng thường được gọi tắt là *hệ thức Anh-xtanh*.

b) Một số hệ quả rút ra từ hệ thức Anh-xtanh

- **Biểu thức của động năng.** Từ hệ thức Anh-xtanh ta tìm được năng lượng nghỉ E_0 của vật, nghĩa là năng lượng lúc vật đứng yên ($m = m_0$), là :

$$E_0 = m_0 c^2$$

Lúc vật chuyển động, vật có thêm động năng W_d và năng lượng toàn phần là $E = mc^2$. Từ đó, ta tìm được *biểu thức của động năng của vật trong thuyết tương đối* :

$$W_d = mc^2 - m_0 c^2 = m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right) \quad (17.5)$$

Biểu thức này có dạng khác với biểu thức của động năng của vật trong Cơ học cổ điển.

Tuy nhiên, trong trường hợp $v \ll c$ thì : $\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \approx 1 + \frac{v^2}{2c^2}$. Do đó, ta có :

$$W_d \approx m_0 c^2 \left(1 + \frac{v^2}{2c^2} - 1 \right) = \frac{m_0 v^2}{2},$$

nghĩa là ta lại tìm được biểu thức động năng trong Cơ học cổ điển.

- **Hệ thức giữa năng lượng và động lượng của vật**

Bình phương biểu thức $E = mc^2 = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} c^2$, ta được :

$$m_0 c^4 = E^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) = E^2 - \frac{E^2 v^2}{c^2}$$

Thay vào biểu thức trên $E = mc^2$ và chú ý $\vec{p} = m\vec{v}$ ta được :

$$E^2 = m_0^2 c^4 + p^2 c^2 \quad (17.6)$$

Đó là *hệ thức liên hệ giữa năng lượng và động lượng của vật*. Hệ thức này thường được sử dụng khi khảo sát các hạt chuyển động với tốc độ lớn trong lĩnh vực vật lí hạt nhân và các hạt sơ cấp.

- c) Ta cần nhấn mạnh rằng, hệ thức Anh-xtanh không có ý nghĩa là một hệ thức biểu thị sự đồng nhất vật chất với năng lượng, mà chỉ là hệ thức mô tả quan hệ giữa hai tính chất của vật chất : quán tính và mức độ vận động. Hệ thức đó cho ta thấy rõ, trong điều kiện nhất định một vật có khối lượng nhất định thì cũng có năng lượng nhất định tương ứng với năng lượng đó.

Thuyết tương đối hẹp của Anh-xtanh đã đẩy khoa học vật lí tiến lên một bước mới. Các công thức, phương trình của thuyết tương đối hẹp của Anh-xtanh đã giúp giải thích được nhiều hiện tượng mới và mở đường cho nhiều thành tựu mới của vật lí học trong thế kỉ XX. Về sau, năm 1915 Anh-xtanh đã phát triển thuyết tương đối hẹp sâu thêm một bước nữa và đưa ra thuyết tương đối rộng (còn gọi là *thuyết hấp dẫn* của Anh-xtanh), thuyết này áp dụng cho các hệ quy chiếu chuyển động có gia tốc, giúp ta nghiên cứu trường hấp dẫn và các vấn đề của vũ trụ học. Chính vì vậy, người ta đã nói rằng thuyết tương đối của Anh-xtanh cùng với thuyết lượng tử là hai học thuyết vĩ đại nhất của thế kỉ XX.

- *Chú ý* : Người ta thường tính năng lượng theo đơn vị MeV, tính động lượng theo đơn vị $\frac{\text{MeV}}{c}$ và tính khối lượng theo đơn vị $\frac{\text{MeV}}{c^2}$.

d) Áp dụng cho photon

- Ta đã biết năng lượng của photon ứng với bức xạ điện từ đơn sắc tần số f là :

$$\epsilon = hf$$

Từ đó, theo hệ thức Anh-xtanh, *khối lượng của photon* là :

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

Theo thuyết tương đối, khối lượng phụ thuộc vận tốc theo hệ thức :

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \text{ hay } m_0 = m\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}, \text{ trong đó } m_0 \text{ là khối lượng nghỉ.}$$

$$\text{Đối với photon } v = c, \text{ suy ra } m_0 = 0 \quad (17.7)$$

Vậy photon có khối lượng nghỉ bằng 0.

- Photon luôn luôn chuyển động với tốc độ c , do đó nó có xung lượng bằng :

$$p = mc = \frac{hf}{c} \quad (17.8)$$

hay
$$p = \frac{h}{\lambda} \quad (17.9)$$

Vậy *xung lượng của photon tỉ lệ thuận với tần số (hoặc tỉ lệ nghịch với bước sóng) của bức xạ điện từ tương ứng.*



BÀI TẬP

17.1. Theo thuyết tương đối, khối lượng tương đối tính của một vật có khối lượng nghỉ m_0 chuyển động với tốc độ v là

A. $m = m_0 \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{-1}$

B. $m = m_0 \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{-\frac{1}{2}}$

C. $m = m_0 \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{\frac{1}{2}}$

D. $m = m_0 \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)$

17.2. Hệ thức Anh-xtanh giữa khối lượng và năng lượng là

A. $E = \frac{m}{c^2}$

B. $E = mc$

C. $E = \frac{m}{c}$

D. $E = mc^2$

17.3. Một hạt có động năng bằng năng lượng nghỉ của nó. Tính tốc độ của hạt đó.

1. Phương trình sóng ánh sáng

a) Ta đã biết ánh sáng là sóng điện từ có bước sóng ngắn và được đặc trưng bởi vector cường độ điện trường $\vec{E}$, vector cảm ứng từ $\vec{B}$ vuông góc với nhau, và vuông góc với vector vận tốc truyền sóng $\vec{v}$ (xem *Chương IV, Bài 25, Tài liệu chuyên vật lí. Vật lí 12, tập một*). Vì vậy, dao động của vector $\vec{E}$ được gọi là *dao động sáng* và để đặc trưng cho sóng ánh sáng ta sẽ chỉ dùng vector $\vec{E}$.

– Xét sóng ánh sáng đơn sắc, tần số góc ω , truyền dọc theo trục Ox. Tương tự như trường hợp sóng cơ, giả sử tại điểm O, phương trình dao động sáng là :

$$E = E_0 \cos \omega t \quad (E_0 \text{ là biên độ dao động})$$

thì tại điểm M trên trục Ox cách O một khoảng x, phương trình dao động sáng là :

$$E = E_0 \cos \left(\omega t - \frac{\omega x}{v} \right) = E_0 \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} x \right),$$

với v là tốc độ ánh sáng trong môi trường ($v = \frac{c}{n}$, n là chiết suất môi trường), λ là bước sóng ánh sáng.

Ta gọi đại lượng $\frac{2\pi}{\lambda}$ là *số sóng*. Kí hiệu $\vec{n}$ là vector đơn vị hướng theo phương truyền sóng ánh sáng, thì vector $\vec{k} = \frac{2\pi}{\lambda} \vec{n}$ được gọi là *vector truyền sóng*, hay gọn hơn là *vector sóng*.

– Phương trình sóng ánh sáng phẳng đơn sắc có dạng

$$E = A \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r}) \quad (18.1)$$

với $\vec{r} \equiv \overline{OM}$ (M là một điểm bất kì trên mặt sóng) là vectơ có các toạ độ x, y, z ;

$$\vec{kr} = k_x x + k_y y + k_z z \quad (k_x, k_y, k_z \text{ là các toạ độ của vectơ } \vec{k}) \quad (18.2)$$

Trong trường hợp sóng cầu, biên độ A phụ thuộc vào khoảng cách r tới nguồn.

- b) Tương tự như trong trường hợp dòng điện xoay chiều, ta có thể dùng số phức trong biểu thức của sóng ánh sáng. Do đó, phương trình sóng ánh sáng đơn sắc có dạng :

$$E = Ae^{j(\omega t - \vec{k}\vec{r})} \quad (18.3)$$

với j là đơn vị ảo (xem Bài 32, Tài liệu chuyên vật lí. Vật lí 12, tập một) và $(\omega t - \vec{k}\vec{r})$ là pha của sóng ánh sáng.

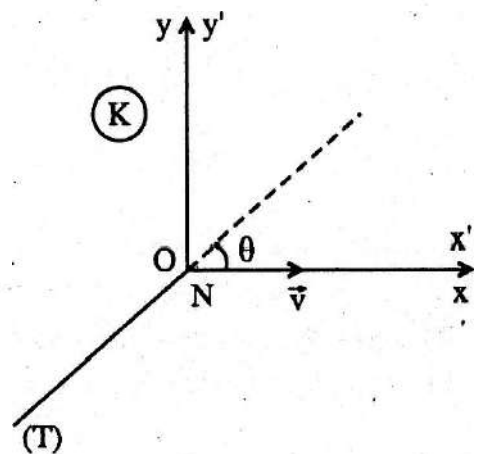
2. Hiệu ứng Dopp-ple tương đối tính

a) Hiệu ứng Dopp-ple

Xét một nguồn sóng điện từ N và một máy thu T, cả hai cùng đứng yên trong hệ K. Khi đó, máy thu ghi được sóng phát ra từ nguồn N với tần số f_0 và bước sóng

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_0}, \quad (\text{Hình 18.1}).$$

Nếu máy thu T vẫn đứng yên đối với hệ K, còn nguồn N thì chuyển động với vận tốc $\vec{v}$ đối với hệ K (ra xa hoặc lại gần máy thu) thì máy thu sẽ ghi được sóng phát ra từ nguồn N với tần số $f \neq f_0$. Hiện tượng này gọi là hiệu ứng Dopp-ple tương đối tính.



Hình 18.1

b) Sự thay đổi của tần số

- Để khảo sát định lượng hiệu ứng Dopp-ple ta dùng hệ quy chiếu K (Oxyz) gắn với máy thu T và hệ quy chiếu K' (O'x'y'z') gắn với nguồn N. Các trục toạ độ tương ứng của hai hệ này song song với nhau : $O'x' // Ox$, $O'y' // Oy$, $O'z' // Oz$. Trục Ox song song với vận tốc $\vec{v}$ của nguồn N đối với hệ K.

Vào thời điểm $t = 0$, gốc tọa độ O' của K' trùng với nguồn N , và trùng với gốc tọa độ O của hệ K . Mặt phẳng xOy chứa máy thu T (Hình 31.1). Góc giữa $\overline{TN}$ và $\vec{v}$ đo trong hệ K là θ .

- Trong hệ K' , nguồn N đứng yên ở gốc tọa độ, sóng điện từ phát ra là sóng cầu, có tần số ω_0 , số sóng $k' = \frac{\omega_0}{c}$ (18.4)

Xét trong mặt phẳng $x'O'y'$ (trùng với mặt phẳng xOy) thì phương trình của sóng cầu có thể viết dưới dạng phức như sau :

$$E' = A(r') \exp[j(\omega_0 t' + k'x' \cos \theta' + k'y' \sin \theta' + \delta')] \quad (18.5)$$

với θ' là góc giữa vectơ vận tốc $\vec{v}$ và $\overline{TN}$ đo trong hệ K' .

Theo tiên đề 1, trong hệ K sóng điện từ cũng phải là sóng cầu có tâm ở O , có tần số góc ω và số sóng $k = \frac{\omega}{c}$. Như vậy, xét trong mặt phẳng xOy thì phương trình của sóng cầu, viết dưới dạng phức sẽ là :

$$E = A(r) \exp[j(\omega t + kx \cos \theta + ky \sin \theta + \delta)] \quad (18.6)$$

- Theo thuyết tương đối, mối liên hệ giữa tọa độ và thời gian xảy ra một biến cố trong hai hệ quy chiếu quán tính khác nhau được xác định nhờ phép biến đổi Lo-ren-xơ :

$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \beta^2}}; \quad y = y'; \quad z = z'; \quad t = \frac{t' + \frac{vx'}{c^2}}{\sqrt{1 - \beta^2}}; \quad \text{với } \beta = \frac{v}{c} \quad (18.7)$$

Nếu thực hiện phép biến đổi Lo-ren-xơ (18.7) thì phương trình (18.6) phải dẫn đến (18.5). Chú ý đến biểu thức pha của sóng, ta có :

$$\begin{aligned} & \omega \left(\frac{t' + \frac{vx'}{c^2}}{\sqrt{1 - \beta^2}} \right) + k \left(\frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \beta^2}} \right) \cos \theta + ky \sin \theta + \delta \\ &= \omega' t' + k' x' \cos \theta' + k' y' \sin \theta' + \delta' \end{aligned} \quad (18.8)$$

Muốn phương trình (18.8) luôn luôn được thỏa mãn thì các hệ số của x' , y' , z' , t' ở hai vế phải bằng nhau, cụ thể ta có :

$$\omega_0 = \frac{\omega}{\sqrt{1 - \beta^2}} \left(1 + \frac{v}{c} \cos \theta \right) \quad (18.9)$$

$$k' \cos \theta' = \frac{k}{\sqrt{1 - \beta^2}} \left(\cos \theta + \frac{v}{c} \right) \quad (18.10)$$

$$k' \sin \theta' = k \sin \theta \quad (18.11)$$

$$\delta = \delta' \quad (18.12)$$

– Từ (18.9) ta suy ra :

$$\omega = \frac{\omega_0 \sqrt{1 - \beta^2}}{1 + \frac{v}{c} \cos \theta} \quad (18.13)$$

Hay :

$$f = \frac{f_0 \sqrt{1 - \beta^2}}{1 + \frac{v}{c} \cos \theta} \quad (18.14)$$

Đó là công thức cho biết sự thay đổi tần số sóng khi nguồn phát sóng N chuyển động với vận tốc $\vec{v}$ (hợp với phương quan sát góc θ) ra xa máy thu T, gọi là *công thức hiệu ứng Dopp-ple tương đối tính*.

– Ta thấy nếu $v \ll c$ (hay $\beta \ll 1$) và chỉ tính gần đúng bậc nhất (giữ lại số hạng $\frac{v}{c}$, bỏ qua $\left(\frac{v}{c}\right)^2$ so với 1, thì ta được công thức :

$$f = \frac{f_0}{1 + \frac{v}{c} \cos \theta} \quad (18.15)$$

Công thức này có dạng giống như trường hợp hiệu ứng Dopp-ple đối với sóng âm (Xem *Chương III, Tài liệu chuyên vật lí. Vật lí 12, tập một*).

– **Các trường hợp riêng :**

+ Nếu *nguồn và máy thu (quan sát viên) chuyển động ra xa nhau*, $\theta = 0$, ta có :

$$f = f_0 \frac{\sqrt{1 - \beta^2}}{1 + \frac{v}{c}} = f_0 \gamma (1 - \beta) \quad \text{hay} \quad f = f_0 \sqrt{\frac{c - v}{c + v}} < f_0 \quad (18.16)$$

+ Nếu *nguồn và máy thu (quan sát viên) chuyển động lại gần nhau*, $\theta = 180^\circ$, ta có :

$$f = f_0 \frac{\sqrt{1 - \beta^2}}{1 - \frac{v}{c}} = f_0 \gamma (1 + \beta) \quad \text{hay} \quad f = f_0 \sqrt{\frac{c + v}{c - v}} > f_0 \quad (18.17)$$

3. Hiệu ứng Đốp-ple ngang

Nếu tốc độ v của nguồn không quá nhỏ so với tốc độ ánh sáng c thì ta phải tính đến cả số hạng $\beta^2 = \frac{v^2}{c^2}$ so với 1. Khi đó có sự khác nhau quan trọng giữa hiệu ứng Đốp-ple của sóng điện từ và hiệu ứng Đốp-ple của sóng âm. Cụ thể là, đối với sóng điện từ khi $\cos\theta = 0$ ($\theta = \frac{\pi}{2}$, nguồn N chuyển động theo hướng vuông góc với phương quan sát) thì :

$$f = f_0 \sqrt{1 - \beta^2} \neq f_0 \quad (18.18)$$

Còn đối với sóng âm khi $\cos\theta = 0$ thì $f = f_0$.

Vì vậy, người ta nói rằng, ở sóng điện từ có hiệu ứng Đốp-ple ngang. Đó là hiệu ứng tương đối tính liên quan đến sự trôi chậm của thời gian trong hệ quy chiếu chuyển động. Gọi $T = T_0$ và T là chu kỳ dao động của điện từ trường trong hệ K' (chuyển động so với máy thu) và trong hệ K (đứng yên so với máy thu). Ta sẽ có : $T = \frac{T_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}$.

Từ đó ta suy ra hệ thức giữa $f = \frac{1}{T}$ và $f_0 = \frac{1}{T_0}$:

$$f = f_0 \sqrt{1 - \beta^2}, \text{ đúng như hệ thức (18.18) nêu ở trên.}$$

Hiệu ứng Đốp-ple ngang (tỉ lệ với $\frac{v^2}{c^2}$) yếu hơn hiệu ứng Đốp-ple thông thường (tỉ lệ với $\frac{v}{c}$) một cách đáng kể.

4. Ứng dụng của hiệu ứng Đốp-ple tương đối tính

Hiệu ứng Đốp-ple tương đối tính có ứng dụng rộng rãi trong khoa học kĩ thuật, đặc biệt là trong thiên văn học.

- Khi nguồn phát sóng điện từ đi ra xa máy thu thì tần số của sóng ghi bởi máy thu sẽ giảm, quang phổ vạch phát xạ sẽ bị dịch chuyển về phía đỏ (phía có tần số thấp hơn). Nhà thiên văn học Mĩ Hốp-bon (Hubble) đã dựa vào sự dịch chuyển về phía đỏ của quang phổ phát xạ của các sao ngoài

thiên hà mà phát hiện ra (năm 1929) rằng, các sao đi ra xa chúng ta, tốc độ ra xa tỉ lệ với khoảng cách đến Trái Đất. Từ đó đã dẫn đến giả thuyết là vũ trụ đang trong giai đoạn nở ra, điều này cũng phù hợp với kết quả tính toán về lí thuyết Frit-man (Fridman) (1922) trên cơ sở thuyết tương đối.

- Những vật chuyển động, khi phản xạ sóng điện từ (phát ra từ các rada hoặc máy phát laze) cũng tạo nên hiệu ứng Đốp-ple. Do đó, dựa vào sự biến đổi tần số của sóng phản xạ, người ta đo được tốc độ chuyển động của các vật ấy (máy đo tốc độ xe chạy của cảnh sát giao thông).
- Hiệu ứng Đốp-ple còn gây ra sự mở rộng vạch quang phổ. Nguyên tử của một số nguyên tố hoá học bị kích thích, khi đứng yên phát ra bức xạ có tần số xác định. Các nguyên tử đứng yên bức xạ tạo nên trong máy quang phổ một vạch quang phổ mảnh, ứng với một tần số xác định f_0 . Nếu các nguyên tử bức xạ tham gia chuyển động nhiệt (hỗn loạn), thì tại một thời điểm có những nguyên tử lại gần máy thu, lại có những nguyên tử đi ra xa. Do hiệu ứng Đốp-ple nên bức xạ của nguyên tử lại gần được ghi với tần số cao hơn f_0 , và bức xạ của nguyên tử ra xa được ghi với tần số thấp hơn f_0 . Kết quả là vạch quang phổ được mở rộng ra (xem thêm Bài 26). Bề rộng của vạch phụ thuộc vào nhiệt độ của khí nguyên tử bức xạ. Như vậy, đo bề rộng của vạch có thể tính được nhiệt độ của khí.



BÀI TẬP

- 18.1.** Một ngôi sao chuyển động ra xa Trái Đất với tốc độ $5 \cdot 10^{-3} c$. Tìm độ dịch chuyển bước sóng gây bởi hiệu ứng Đốp-ple đối với vạch D_2 của natri ($5890 \text{ \AA}$).
- 18.2.** Khi quan sát ánh sáng phát ra từ một ngôi sao ở xa, người ta phát hiện rằng dịch chuyển Đốp-ple đối với vạch D_2 của natri ($5890 \text{ \AA}$) là $100 \text{ \AA}$.
Tính tốc độ chuyển động ra xa Trái Đất của ngôi sao đó.
- 18.3.** Một tên lửa rời bệ phóng để thực hiện một chuyến bay với vận tốc $0,6c$. Một nhà du hành trên tên lửa cho phát ra một chùm sáng có bước sóng $5000 \text{ \AA}$ về phía bệ phóng.
- a) Tìm tần số ánh sáng quan sát được ở bệ phóng.
 - b) Tìm tần số ánh sáng quan sát được bởi nhà du hành của một tên lửa thứ hai rời bệ phóng với vận tốc $0,8c$ ngược hướng với tên lửa thứ nhất.

Chương IV

HẠT NHÂN NGUYÊN TỬ

19

CẤU TẠO CỦA HẠT NHÂN. ĐỘ HỤT KHỐI

1. Cấu tạo của hạt nhân. Nuclôn

- a) Ta đã biết hạt nhân có kích thước rất nhỏ so với nguyên tử. Nếu đường kính của nguyên tử có cỡ nanômét (10^{-9} m) thì đường kính của hạt nhân nhỏ hơn hàng chục vạn lần và thường đo bằng đơn vị féc-mi (Féc-mi, nhà vật lí học I-ta-li-a, 1901 – 1954) ($1 \text{ fermi} = 10^{-15}$ m). Nhưng hạt nhân lại được cấu tạo từ những hạt nhỏ hơn gọi là *nuclôn*. Có hai loại *nuclôn* : *prôtôn*, kí hiệu p, mang một điện tích nguyên tố dương, và *notron*, kí hiệu n, không mang điện.

Prôtôn chính là hạt nhân của nguyên tử hiđrô, do Rơ-dơ-pho phát hiện năm 1911. Notron do nhà vật lí Anh Chat-uych phát hiện năm 1932.

- b) Nếu số thứ tự của một nguyên tố trong bảng tuần hoàn Men-đe-lê-ép là Z (Z gọi là *nguyên tử số*), thì nguyên tử của nó có Z electron ở các lớp ngoài, và hạt nhân của nó có Z prôtôn và N notron, với $N \geq Z$. Lớp electron có điện tích $-Ze$, hạt nhân có điện tích $+Ze$, nên nguyên tử là trung hoà về điện.

Tổng $A = Z + N$ gọi là *số khối*.

Đường kính D của hạt nhân tăng chậm cùng với số khối A.

$$D \approx 2R_0 A^{\frac{1}{3}}, \quad R_0 = 1,2 \text{ fermi} \quad (19.1)$$

- c) Một hạt nhân được kí hiệu bằng cách ghi bên cạnh kí hiệu hoá học : nguyên tử số (ở phía dưới) và số khối (ở phía trên).

Ví dụ : ${}_{11}^{23}\text{Na}$ là kí hiệu của hạt nhân natri, có Z prôtôn và $N = A - Z = 23 - 11 = 12$ notron.

Nhiều khi chỉ cần ghi số khối, vì kí hiệu hoá học đã xác định nguyên tử số rồi.

Ví dụ : ${}^{238}\text{U}$ (ta đã biết urani có $Z = 92$). Cũng có thể ghi U238.

2. Đồng vị

- Đồng vị là những nguyên tử mà hạt nhân chứa cùng số prôtôn Z (có cùng vị trí trong bảng tuần hoàn) nhưng có số notron N khác nhau.

Hiđrô có 3 đồng vị : hiđrô thường ${}_1^1\text{H}$, đơteri ${}_1^2\text{H}$ (hay ${}_1^2\text{D}$) và triti ${}_1^3\text{H}$ (hay ${}_1^3\text{T}$) (Đơteri kết hợp với ôxi thành nước nặng D_2O , là nguyên liệu của công nghệ hạt nhân).

- Hầu hết các nguyên tố đều là hỗn hợp của nhiều đồng vị. Urani có hai đồng vị chính là U235 và U238, trong đó đồng vị U238 chiếm tới 99,3% uranium thiên nhiên. Cacbon có đồng vị : C11, C12, C13, C14, trong đó đồng vị C12 chiếm 99% cacbon thiên nhiên.

Các nguyên tố trong thiên nhiên có khoảng gần 300 đồng vị bền, ngoài ra người ta còn tìm thấy vài nghìn đồng vị phóng xạ tự nhiên và nhân tạo.

Chú ý : Một hạt nhân nguyên tử đặc trưng bởi số prôtôn Z và số nuclôn A còn được gọi là *nuclit*. Từ này tương đương với từ *đồng vị*, nhưng "đồng vị" chú ý đến Z nhiều hơn. Chẳng hạn đồng vị của hiđrô ($Z = 1$), đồng vị của cacbon ($Z = 6$).

3. Đơn vị khối lượng nguyên tử

- a) Theo định nghĩa, *đơn vị khối lượng nguyên tử*, kí hiệu là u, bằng $\frac{1}{12}$ khối lượng của đồng vị cacbon ${}_{6}^{12}\text{C}$ (vì vậy, đôi khi đơn vị này còn gọi là *đơn vị cacbon*).

$$1\text{u} = \frac{1}{12} \cdot \frac{12}{6,022 \cdot 10^{23}} \text{ g} \approx 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \quad (19.2)$$

Đồng vị $^{12}_6\text{C}$ có 12 nuclôn, nên khối lượng của 1 nuclôn xấp xỉ bằng u. Ví dụ, prôtôn có khối lượng $m_p = 1,007276 \text{ u}$; notron có khối lượng $m_n = 1,008665 \text{ u}$. Nói chung, một nguyên tử có số khối A thì khối lượng xấp xỉ bằng A u.

- b) Hệ thức Anh-xtanh $E = mc^2$, hay $m = \frac{E}{c^2}$, chứng tỏ rằng, khối lượng còn có thể đo bằng đơn vị của năng lượng chia cho c^2 , cụ thể là có thể đo bằng eV/c^2 hay MeV/c^2 .

Ta có :

$$1\text{MeV}/c^2 = 1,7827 \cdot 10^{-30} \text{ kg} = 1,07356 \cdot 10^{-3} \text{ u}; 1\text{u} = 931,5 \text{ MeV}/c^2. \quad (19.3)$$

4. Độ hụt khối. Năng lượng liên kết

a) Lực hạt nhân

Trong thể tích rất nhỏ của hạt nhân, các nuclôn tương tác với nhau bằng lực hút rất mạnh, có tác dụng liên kết các nuclôn với nhau. Lực hạt nhân biểu thị *tương tác mạnh* giữa các nuclôn. Một trong các đặc điểm quan trọng của lực hạt nhân là : nó không phụ thuộc điện tích của nuclôn và chỉ có tác dụng khi khoảng cách giữa hai nuclôn bằng hoặc nhỏ hơn kích thước của hạt nhân. Điều đó có nghĩa là, *bán kính tác dụng* của lực hạt nhân vào khoảng 10^{-15} m . Như vậy, muốn tách nuclôn ra khỏi hạt nhân, cần tốn năng lượng để thắng lực hạt nhân.

b) Độ hụt khối. Năng lượng liên kết

- Các phép đo chính xác đã chứng tỏ rằng, khối lượng m của hạt nhân ^A_ZX bao giờ cũng nhỏ hơn tổng khối lượng của các nuclôn tạo thành hạt nhân đó, một lượng bằng :

$$\Delta m = [Zm_p + (A - Z)m_n - m] \quad (19.4)$$

Δm được gọi là *độ hụt khối* của hạt nhân.

- Theo thuyết tương đối, hệ các nuclôn ban đầu có năng lượng $E_0 = [Zm_p + (A - Z)m_n]c^2$, và hạt nhân được tạo thành từ chúng có năng lượng $E = mc^2 < E_0$. Vì năng lượng toàn phần được bảo toàn, nên đã có một lượng $W_{lk} = E_0 - E = \Delta m \cdot c^2$ toả ra.

Ngược lại, nếu muốn tách hạt nhân đó thành các nuclôn riêng rẽ, có tổng khối lượng $Zm_p + (A - Z)m_n > m$, thì phải tốn năng lượng $W_{lk} = \Delta m.c^2$ để thắng lực hạt nhân liên kết giữa chúng. Năng lượng W_{lk} càng lớn thì liên kết giữa các nuclôn càng mạnh, càng phải tốn nhiều năng lượng để phá vỡ liên kết giữa các nuclôn. Vì vậy, đại lượng $W_{lk} = \Delta m.c^2$ được gọi là *năng lượng liên kết các nuclôn trong hạt nhân*, gọi tắt là *năng lượng liên kết của hạt nhân*.

- Năng lượng liên kết tính cho một nuclôn, $\frac{W_{lk}}{A}$; gọi là *năng lượng liên kết riêng*, đặc trưng cho độ bền vững của hạt nhân.

Ví dụ, với hạt nhân $^{16}_8\text{O}$, $\frac{W_{lk}}{A} = 8 \text{ MeV/nuclôn}$; đối với hạt nhân

^4_2He , $\frac{W_{lk}}{A} = 7 \text{ MeV/nuclôn}$. Hạt nhân có năng lượng liên kết riêng càng

lớn thì càng bền vững. Năng lượng liên kết riêng có giá trị lớn nhất, vào cỡ 8,9 MeV/nuclôn, ở các hạt nhân có số khối A trong khoảng từ 50 đến 80.



BÀI TẬP

19.1. Hạt nhân nguyên tử được cấu tạo bởi

- A. prôtôn
- B. notron.
- C. prôtôn và notron.
- D. prôtôn, notron và êlectron.

19.2. Đồng vị là những nguyên tử hạt nhân chứa

- A. cùng số prôtôn Z, nhưng số notron N khác nhau.
- B. cùng số notron N, nhưng số prôtôn Z khác nhau.
- C. cùng số nuclôn A, nhưng số prôtôn Z và số notron N khác nhau.
- D. cùng số prôtôn Z và số notron N.

19.3. Đơn vị khối lượng nguyên tử là

- A. khối lượng của hạt nhân nguyên tử hiđrô.
- B. khối lượng của một nguyên tử hiđrô.
- C. khối lượng bằng $\frac{1}{12}$ lần khối lượng của đồng vị $^{12}_6\text{C}$ của nguyên tử cacbon.
- D. khối lượng bằng $\frac{1}{12}$ lần khối lượng của đồng vị nguyên tử ôxi.

19.4. Năng lượng liên kết riêng của một hạt nhân

- A. có thể âm hoặc dương.
- B. càng lớn, thì hạt nhân càng bền
- C. càng nhỏ, thì hạt nhân càng bền.
- D. có thể triệt tiêu, đối với một số hạt nhân đặc biệt.

19.5. Hạt nhân đơteri có khối lượng 2,0136 u. Tính năng lượng liên kết của nó.

19.6. Hạt nhân α có khối lượng 4,0015 u. Tính năng lượng toả ra khi tạo thành 1 mol heli.
Cho biết số A-vô-ga-đrô $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$.

1. Hiện tượng phóng xạ

- Năm 1896, khi nghiên cứu các hợp chất phát lân quang, nhà bác học Béc-cơ-ren đã tình cờ phát hiện thấy rằng, miếng urani sunfat, đã phát ra một loại bức xạ không nhìn thấy, nhưng tác dụng mạnh lên các tấm kính ảnh bọc kĩ trong giấy đen dày đặt dưới miếng đó. Ông gọi hiện tượng này là *sự phóng xạ*, urani là *chất phóng xạ* và bức xạ phát ra là *tia phóng xạ*. Tiếp theo đó, Pi-e Quy-ri và Ma-ri Quy-ri đã tìm ra hai chất phóng xạ mới là pôlôni và radi (radi có tính phóng xạ cao hơn nhiều so với urani). Và đến năm 1934, ông bà Jô-li-ô Quy-ri tìm ra *hiện tượng phóng xạ nhân tạo*.

Sự phóng xạ là hiện tượng một hạt nhân không bền vững tự phát phân rã, phát ra các tia phóng xạ và biến đổi thành hạt nhân khác.

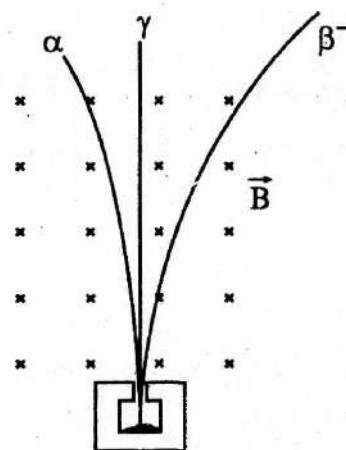
- Các kết quả nghiên cứu cho thấy, quá trình phân rã phóng xạ chỉ do các nguyên nhân bên trong gây ra và hoàn toàn không phụ thuộc vào các tác động bên ngoài. Dù nguyên tử của chất phóng xạ có nằm trong các hợp chất khác nhau, dù có làm thay đổi nhiệt độ của mẫu phóng xạ, làm tăng áp suất tác dụng lên nó,... thì mẫu phóng xạ cũng không hề chịu ảnh hưởng gì, mà vẫn phân rã, phát ra các tia phóng xạ. Như vậy, *quá trình phân rã phóng xạ chính là quá trình dẫn đến sự biến đổi hạt nhân*.
- Người ta quy ước gọi hạt nhân phóng xạ là *hạt nhân mẹ* và hạt nhân sản phẩm phân rã là *hạt nhân con*.

2. Các tia phóng xạ

a) Các loại tia phóng xạ

- Tia phóng xạ không nhìn thấy được, nhưng có những tác dụng như : kích thích một số phản ứng hoá học, ion hoá không khí, làm đen kính ảnh, xuyên thấu lớp vật chất mỏng, phá huỷ tế bào,...

Khảo sát tia phóng xạ do các chất phóng xạ phát ra, người ta thấy có 3 loại tia phóng xạ có bản chất khác nhau : tia anpha (kí hiệu α), tia beta (kí hiệu β) và tia gamma (kí hiệu γ). Như vậy, ta có thể phân loại các quá trình phân rã phóng xạ thành 3 loại, tương ứng với sự phóng ra 3 loại tia phóng xạ đó : *phóng xạ α* (hay *phân rã α*), *phóng xạ β* (hay *phân rã β*) và *phóng xạ γ* . Cho tia phóng xạ phát ra từ một mẫu chất phóng xạ, đi qua điện trường giữa hai bản tụ điện, hoặc đi qua từ trường, và đập vào tấm kính ảnh P, ta thấy các tia α , β , γ bị lệch khác nhau trong điện trường và từ trường (Hình 20.1).



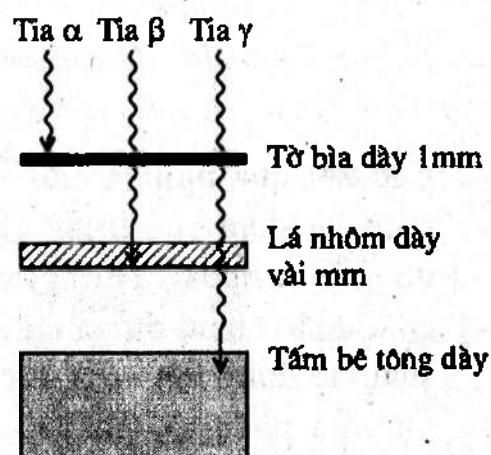
Hình 20.1

b) Bản chất các loại tia phóng xạ

• Tia α

Tia α chính là các hạt nhân của nguyên tử heli (kí hiệu ${}^4_2\text{He}$, gọi là hạt α), được phóng ra với tốc độ khoảng $2 \cdot 10^7$ m/s. Trên đường đi của mình, tia α làm ion hoá nhiều phân tử môi trường và mất dần năng lượng. Vì vậy, tia α chỉ đi được tối đa khoảng vài xentimét trong không khí và không xuyên qua được tờ bìa dày 1 mm.

Có khoảng 25 đồng vị phóng xạ tự nhiên và 100 đồng vị phóng xạ nhân tạo (được chế tạo trong phòng thí nghiệm) phân rã α (trong số đó có urani, radi).



Hình 20.2

Hình 20.2 minh hoạ khả năng xuyên thấu của tia phóng xạ qua vật chất.

• Tia β

Tia β là các hạt phóng ra với tốc độ rất lớn, có thể đạt xấp xỉ bằng tốc độ ánh sáng. Tia β cũng làm ion hoá môi trường, nhưng yếu hơn so với tia α . Vì vậy, tia β có thể đi được quãng đường dài hơn, tới vài mét trong không khí và có thể xuyên được qua lá nhôm dày cỡ milimét.

Có hai loại tia β :

- Loại phổ biến, là tia β^- , đó chính là các electron (kí hiệu ${}^0_{-1}e$). Đồng vị phóng xạ cacbon ${}^{14}_6C$ phân rã β^- .
- Loại hiếm hơn, là tia β^+ , đó chính là các pôzitron, hay electron dương (kí hiệu ${}^0_{+1}e$), có cùng khối lượng electron, nhưng mang điện tích nguyên tố dương. Đồng vị phóng xạ ${}^{11}_6C$ phân rã β^+ .

Ngoài ra, nhà vật lí Pao-li, người Áo, đã tiên đoán sự tồn tại của hạt sơ cấp mới trong phân rã β là *notrinô* (kí hiệu ν) và *phản notrinô* (kí hiệu $\bar{\nu}$) ; các hạt này không mang điện, có khối lượng nghỉ gần bằng 0, chuyển động với tốc độ xấp xỉ bằng tốc độ ánh sáng. Thực nghiệm đã xác nhận giả thuyết này. Hạt notrinô được phát ra trong phân rã β^+ , còn hạt phản notrinô được phát ra trong phân rã β^- (xem mục 3, Bài 21).

• Tia γ

Tia γ là sóng điện từ có bước sóng rất ngắn (dưới 10^{-11} m), cũng là hạt phôtôn có năng lượng cao. Vì vậy, tia γ có khả năng xuyên thấu rất lớn, lớn hơn nhiều so với tia α và β . Tia γ có thể xuyên qua lớp chì dày vài xentimét, có tác dụng sinh lí rất mạnh và nguy hiểm đối với con người. Trong phân rã α và β , hạt nhân còn có thể ở trạng thái kích thích và phóng xạ tia γ để trở về trạng thái cơ bản.

Vì các tia phóng xạ đều có năng lượng, nên sự phân rã phóng xạ toả ra năng lượng (một phần năng lượng này biến thành nhiệt làm nóng bình đựng chất phóng xạ). Như vậy, chất phóng xạ là một nguồn năng lượng.

Người ta đã dùng các đồng vị phóng xạ Pu238 và Cm242 để chế tạo các pin nhiệt điện trực tiếp biến đổi nhiệt lượng toả ra do quá trình phân rã α thành điện năng.

3. Định luật phóng xạ. Độ phóng xạ

a) Định luật phóng xạ

- Giả sử ở một thời điểm nào đó, mà ta chọn làm thời điểm ban đầu $t = 0$, khối lượng của mẫu phóng xạ là m_0 và số hạt nhân là N_0 . Trong quá trình phân rã phóng xạ, số hạt nhân của mẫu phóng xạ sẽ giảm theo thời gian.

Thực nghiệm đã chứng tỏ rằng, cứ sau một khoảng thời gian xác định T , thì một nửa số hạt nhân hiện có bị phân rã, biến đổi thành hạt nhân khác ; T được gọi là *chu kì bán rã* của chất phóng xạ. Điều đó có nghĩa là : sau các khoảng thời gian $T, 2T, 3T, \dots, kT$ (k là số nguyên dương), số hạt nhân (số nguyên tử) N của mẫu phóng xạ còn lại chưa bị phân rã bằng $\frac{N_0}{2}, \frac{N_0}{4}, \frac{N_0}{8}, \dots, \frac{N_0}{2^k}$, tức là ta có thể viết : $N(kT) = N_0 2^{-k}$ (20.1)

- Đồ thị biểu diễn sự biến thiên theo thời gian t của số hạt nhân N của chất phóng xạ cho trên hình 20.3. Do tính liên tục của quá trình phân rã (của $N(t)$), ta có thể viết (20.1) dưới dạng :

$$N(t) = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}} \text{ hay } N(t) = N_0 e^{-\frac{0,693}{T}t} = N_0 e^{-\lambda t} \quad (20.2)$$

(bởi vì $2 = e^{\ln 2} = e^{0,693}$)

Đại lượng : $\lambda = \frac{0,693}{T}$ (20.3)

gọi là *hằng số phóng xạ*, đặc trưng cho từng chất phóng xạ.

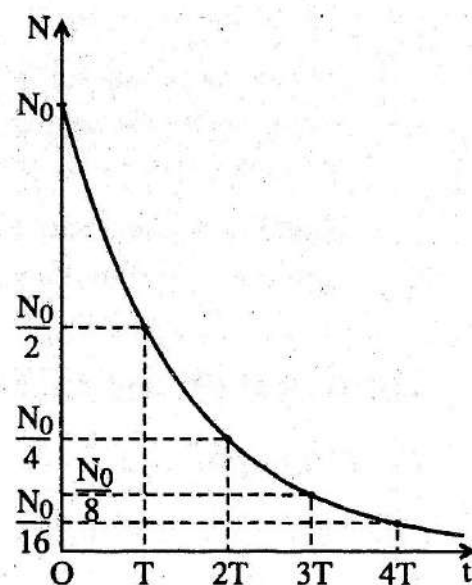
Trên hình 20.3 là đồ thị biểu diễn sự biến thiên của số hạt nhân N của chất phóng xạ theo thời gian t .

- Vì khối lượng tỉ lệ với số hạt nên khối lượng m của chất phóng xạ cũng giảm theo thời gian, với cùng quy luật như số hạt nhân N :

$$m(t) = m_0 e^{-\lambda t} \quad (20.4)$$

Các công thức (20.2) và (20.4) biểu thị định luật phóng xạ :

Trong quá trình phân rã, số hạt nhân phóng xạ giảm theo thời gian theo định luật hàm số mũ.



Hình 20.3

CHU KÌ BÁN RÃ CỦA MỘT SỐ CHẤT PHÓNG XẠ

Chất phóng xạ	Chu kì bán rã T
Cacbon $^{14}_6\text{C}$	5730 năm
Iôt $^{131}_{53}\text{I}$	8,9 ngày
Ôxi $^{15}_8\text{O}$	122 giây
Pôlôni $^{210}_{84}\text{Po}$	138,4 ngày
Rađi $^{226}_{88}\text{Ra}$	1620 năm
Rađôn $^{219}_{86}\text{Rn}$	4 giây
Urani $^{235}_{92}\text{U}$	$7,13 \cdot 10^8$ năm

b) Độ phóng xạ

- Để đặc trưng cho tính phóng xạ mạnh hay yếu của một lượng chất phóng xạ, người ta dùng đại lượng gọi là *độ phóng xạ* (hay *hoạt độ phóng xạ*), được xác định bằng số hạt nhân phân rã trong một giây. Độ phóng xạ đặc trưng cho tốc độ phân rã. Đơn vị đo độ phóng xạ có tên gọi là *becoren*, kí hiệu Bq, bằng 1 phân rã/giây. Trong thực tế, người ta còn dùng một đơn vị khác, có tên là *curi*, kí hiệu Ci : $1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$, xấp xỉ bằng độ phóng xạ của một gam rađi.

Người ta hay dùng các ước của curi :

$$1 \text{ mCi (milicuri)} = 10^{-3} \text{ Ci}$$

$$1 \text{ } \mu\text{Ci (micrôcuri)} = 10^{-6} \text{ Ci}$$

Trong thăm dò địa chất, người ta còn dùng đơn vị picôcuri ($1 \text{ pCi} = 10^{-12} \text{ Ci}$) để so sánh độ phóng xạ rất nhỏ của đất đá tự nhiên.

- Vì số hạt nhân của một lượng chất phóng xạ giảm dần, nên độ phóng xạ H của chất phóng xạ cũng giảm theo thời gian. Nếu ΔN là số hạt nhân bị phân rã trong khoảng thời gian Δt , ta có :

$$H = -\frac{\Delta N}{\Delta t} = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = \lambda N_0 2^{-\frac{t}{T}}$$

$$H = \lambda N \quad (20.5)$$

Độ phóng xạ của một lượng chất phóng xạ tại thời điểm t bằng tích của hằng số phóng xạ và số lượng hạt nhân phóng xạ chứa trong lượng chất đó ở thời điểm t .

Độ phóng xạ ban đầu bằng :

$$H_0 = \lambda N_0 \quad (20.6)$$

Như vậy, ta có :

$$H = H_0 e^{-\lambda t} \quad (20.7)$$

Độ phóng xạ của một lượng chất phóng xạ giảm theo thời gian theo cùng quy luật hàm số mũ giống như số hạt nhân (số nguyên tử) của nó.

Cơ thể chúng ta có tính phóng xạ (do ta hít các bụi phóng xạ, như hít khí radon có trong không khí và nuốt các nguyên tố phóng xạ chứa trong nước và thực phẩm). Các phép đo cho thấy một người "cân nặng" 70 kg có độ phóng xạ trung bình $1,2 \cdot 10^4$ Bq (phần lớn do các mô trong cơ thể hấp thụ). Trong đó chủ yếu là ở kali (K40) ($4,5 \cdot 10^3$ Bq) và ở cacbon (C14) ($3,7 \cdot 10^3$ Bq). Cần lưu ý rằng độ phóng xạ cho phép để tuỷ xương không bị phá huỷ là $7,4 \cdot 10^4$ Bq (0,002 mCi).

4. Đồng vị phóng xạ và ứng dụng

a) Đồng vị phóng xạ

Ngoài các đồng vị phóng xạ có sẵn trong thiên nhiên, gọi là *đồng vị phóng xạ tự nhiên*, người ta cũng đã chế tạo được nhiều đồng vị phóng xạ, gọi là *đồng vị phóng xạ nhân tạo*. Chẳng hạn, khi bắn nơtron vào đồng vị natri $^{23}_{11}\text{Na}$, ta thu được đồng vị $^{24}_{11}\text{Na}$ có tính phóng xạ β^- . Hoặc khi bắn hạt α vào đồng vị $^{10}_5\text{B}$, ta thu được đồng vị $^{13}_7\text{N}$ có tính phóng xạ β^+ . Các đồng vị phóng xạ nhân tạo chủ yếu phân rã β và γ và hiếm khi gặp phân rã α . Người ta đã tạo ra được nhiều đồng vị phóng xạ mới cho nguyên tố hoá học trong Bảng tuần hoàn Men-đê-lê-ép. *Đặc điểm của các đồng vị phóng xạ nhân tạo của một nguyên tố hoá học là chúng có cùng tính chất hoá học như đồng vị bền của nguyên tố đó.*

b) Các ứng dụng của đồng vị phóng xạ

Các đồng vị phóng xạ tự nhiên hoặc nhân tạo, có những ứng dụng rất đa dạng. Dưới đây là một số ứng dụng quan trọng.

- Trước hết, phải kể đến ứng dụng của chúng trong y học. Người ta đưa các đồng vị phóng xạ khác nhau vào trong cơ thể để theo dõi sự thâm nhập và di chuyển của các nguyên tố nhất định trong cơ thể người. Chúng được gọi là *nguyên tử đánh dấu*. Ta sẽ nhận diện được chúng nhờ các thiết bị ghi bức xạ. Nhờ *phương pháp nguyên tử đánh dấu*, người ta có thể biết được chính xác nhu cầu của cơ thể về các nguyên tố khác nhau trong từng thời kì phát triển của cơ thể và tình trạng bệnh lí của các bộ phận cơ thể khác nhau, khi thừa hoặc thiếu những nguyên tố nào đó. Chẳng hạn, người ta biết rằng, nguyên tố iốt được sử dụng trước hết ở tuyến giáp, và thừa hay thiếu iốt đều gây ra bệnh ở tuyến này. Để xác định tình trạng bệnh, người ta cho bệnh nhân uống một liều thuốc có chứa đồng vị phóng xạ iốt $^{131}_{51}\text{I}$, và iốt sẽ tập trung ở tuyến giáp của người đó. Số lượng tổng cộng iốt thu giữ bởi tuyến giáp là số đo khả năng làm việc của tuyến này.
- Tia phóng xạ của đồng vị coban $^{60}_{27}\text{Co}$ được dùng để chữa bệnh ung thư, bởi vì các tế bào ung thư dễ bị diệt bởi tia phóng xạ hơn các tế bào bình thường. Khi chữa trị bằng tia phóng xạ (*phép xạ trị*), người ta dùng một liều bức xạ thích hợp để diệt tế bào ung thư mà không gây tổn thương cho tế bào lành.
- Các chất phóng xạ cũng được dùng trong các nghiên cứu biến đổi di truyền. Tác động của các bức xạ vào các phân tử ADN có thể tạo ra những biến dị trong mã di truyền. Nhờ đó, có thể tạo ra các giống cây mới (như các giống lúa mới chịu được mặn và chịu được hạn) và cả các vật nuôi mới. Dĩ nhiên, các biến đổi di truyền nhờ chất phóng xạ phải được nghiên cứu cẩn trọng, vì không loại trừ khả năng là những giống cây, con mới sẽ chịu ảnh hưởng đến sự phát triển của con người và vật nuôi khi sử dụng chúng làm thức ăn.

- Các nhà khoa học sử dụng *phương pháp xác định tuổi* theo lượng cacbon 14 để xác định niên đại của các cổ vật khai quật được. Cacbon C14 được tạo ra trong khí quyển chiếm một tỉ lệ rất nhỏ so với đồng vị cacbon bền và phổ biến, là C12. Đồng vị C14 có chu kỳ bán rã 5600 năm. Các đồng vị C14 và C12 đều kết hợp với ôxi của khí quyển, tạo thành khí cacbon điôxít và được cây cối hấp thụ. Mọi loài thực vật đều có chứa một lượng nhỏ C14. Mọi loài động vật ăn thực vật, hoặc ăn thịt các động vật ăn thực vật, cũng đều chứa một lượng nhất định đồng vị phóng xạ C14. Nếu một cây hoặc một động vật còn sống (và tiếp tục ăn), thì lượng C14 được bổ sung và tỉ lệ giữa C14 và C12 không đổi. Nhưng, nếu cây hoặc con vật bị chết, thì không có sự bổ sung này nên lượng C14 ở chúng giảm, và do đó, độ phóng xạ giảm đi (theo định luật phóng xạ). Khoảng thời gian kể từ lúc chết càng dài, thì lượng C14 và độ phóng xạ còn lại càng ít. Đo độ phóng xạ và áp dụng công thức (20.7), ta xác định được thời gian kể từ khi cơ thể hoặc cây chết cho đến thời điểm đo.

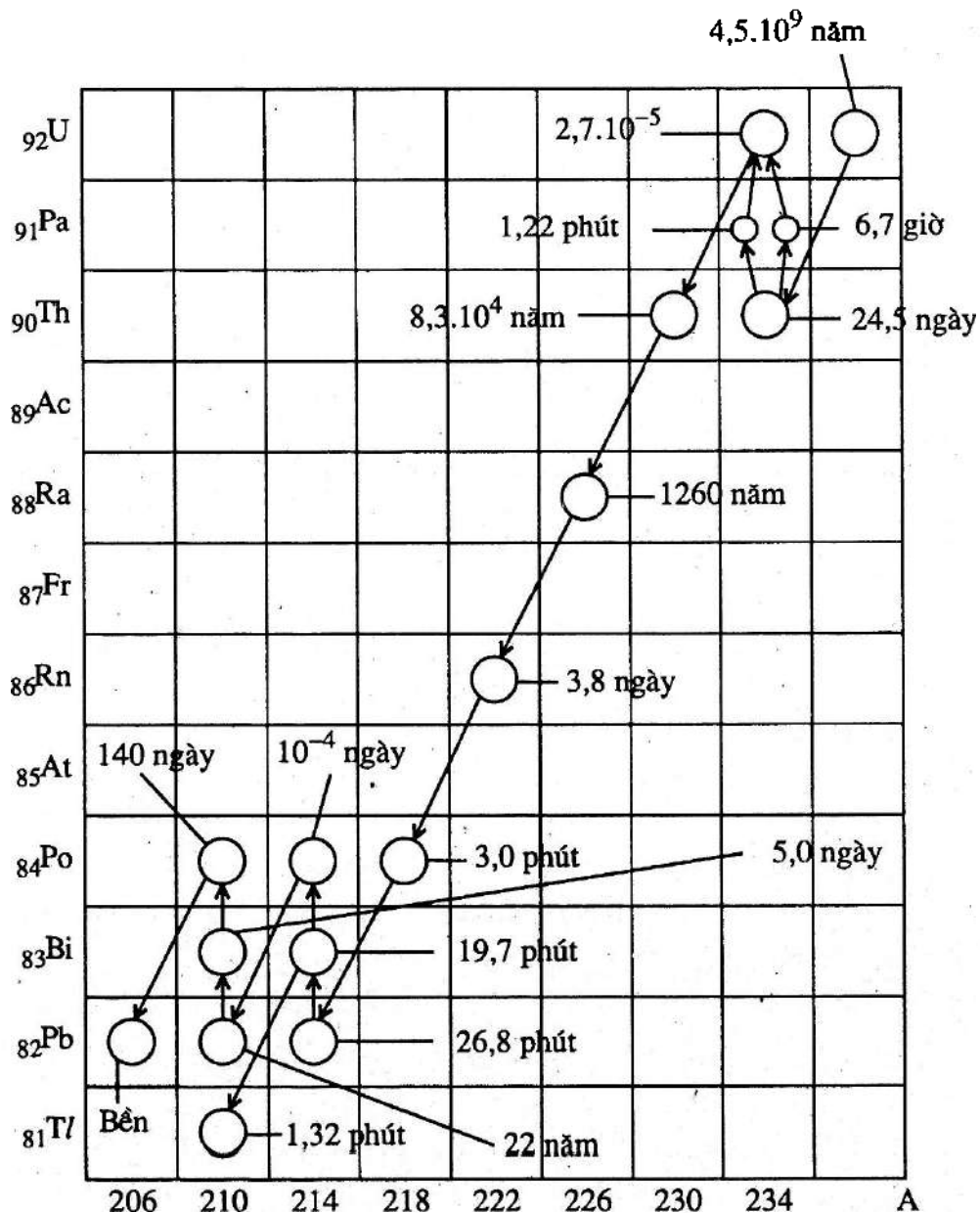
5. Họ phóng xạ

a) Các họ phóng xạ

- Thông thường một hạt nhân phóng xạ sau khi phân rã trở thành một hạt nhân mới cũng là hạt nhân phóng xạ. Sau một thời gian, hạt nhân mới này lại phân rã trở thành hạt nhân thứ ba. Hạt nhân tiếp theo có thể cũng là một hạt nhân phóng xạ và quá trình lại tiếp diễn. Cuối cùng, ta có một dãy liên tiếp các hạt nhân phóng xạ, lập thành một *họ phóng xạ*.
- Với các hạt nhân nặng, có *ba họ phóng xạ* có trong tự nhiên mà các hạt nhân đứng đầu họ là : thori ${}_{90}^{232}\text{Th}$, urani ${}_{92}^{238}\text{U}$ và actini ${}_{92}^{235}\text{U}$. Các hạt nhân cuối cùng tương ứng là : ${}_{82}^{208}\text{Pb}$, ${}_{82}^{206}\text{Pb}$ và ${}_{82}^{207}\text{Pb}$.

Hình 20.4 là sơ đồ phân rã của họ phóng xạ U238. Hạt nhân bền cuối cùng của họ này là Pb206. Ở đây có cả phân rã α lẫn phân rã β . Chu kỳ phân rã được ghi ở bên cạnh. Mũi tên đi xuống chỉ phân rã α ; mũi tên đi lên chỉ phân rã β .

Các họ khác cũng có sơ đồ tương tự, không nêu ra ở đây.



Hình 20.4

- Sự thay đổi số khối A của mỗi họ phóng xạ chỉ do phân rã α ; mỗi lần phân rã α , số khối A giảm đi 4 đơn vị. Do đó, số khối của các hạt nhân trong họ phóng xạ thoả mãn hệ thức: $A = 4n + C$, trong đó n và C là các số tự nhiên. Ta thấy họ phóng xạ thori ứng với $C = 0$, các hạt thành phần có số khối $A = 4n$; họ urani ứng với $C = 2$, các hạt nhân thành phần có số khối $A = 4n + 2$; họ actini ứng với $C = 3$, các hạt nhân thành phần có số khối $A = 4n + 3$. Từ công thức trên suy ra rằng còn phải có một họ phóng xạ thứ tư mà các hạt thành phần có $A = 4n + 1$. Người ta tạo ra các thành phần của họ này từ các phản ứng hạt nhân. Họ này có tên là họ neptuni với $^{237}_{93}\text{Np}$ là hạt nhân đứng đầu họ, có chu kỳ bán rã $2,14 \cdot 10^6$ năm. Các hạt nhân thành

phần của họ này có chu kì bán rã nhỏ so với tuổi của vũ trụ nên không tồn tại trong tự nhiên.

- Dưới đây là Bảng Các họ phóng xạ (kèm theo các đặc trưng của từng họ)

Họ phóng xạ	Hạt nhân đầu họ	Chu kì bán rã T (năm)	C	$n_1 \leq n \leq n_2$	$A = 4n + C$	Số hạt thành phần	Hạt nhân bền cuối cùng
Thôri	$^{232}_{90}\text{Th}$	$1,41 \cdot 10^{10}$	0	$42 \leq n \leq 58$	$4n$	12	$^{208}_{82}\text{Pb}$
Neptuni	$^{237}_{93}\text{Np}$	$2,41 \cdot 10^6$	1	$52 \leq n \leq 59$	$4n + 1$	13	$^{209}_{83}\text{Bi}$
Urani	$^{238}_{92}\text{U}$	$4,51 \cdot 10^9$	2	$51 \leq n \leq 59$	$4n + 2$	18	$^{206}_{82}\text{Pb}$
Actini	$^{235}_{92}\text{U}$	$7,07 \cdot 10^8$	3	$51 \leq n \leq 58$	$4n + 3$	15	$^{207}_{82}\text{Pb}$

b) Cân bằng phóng xạ

- Ta xét dãy phóng xạ gồm hạt nhân A (hạt nhân mẹ) phân rã thành hạt nhân B (hạt nhân con) và hạt nhân B cũng phân rã để chuyển thành hạt nhân khác. Giả sử lúc $t = 0$ ta chỉ có hạt nhân A với số hạt là $N_A(0) = N_{0A}$. Ta có các phương trình sau :

$$\frac{-dN_A}{dt} = \lambda_A N_A$$

$$\frac{dN_B}{dt} = \lambda_A N_A - \lambda_B N_B \quad (20.8)$$

Công thức (20.8) có nghĩa là : trong một đơn vị thời gian, số hạt nhân B biến đổi một lượng $\left(\frac{dN_B}{dt}\right)$ bằng hiệu số hạt nhân B tạo thành (chính bằng $\lambda_A N_A$) trừ số hạt nhân B bị phân rã (bằng $\lambda_B N_B$). Thay $\lambda_A N_A = \lambda_A N_{0A} \cdot e^{-\lambda_A t}$ vào (20.8) ta có phương trình vi phân cho N_B :

$$\frac{dN_B}{dt} = \lambda_A N_{0A} \cdot e^{-\lambda_A t} - \lambda_B N_B$$

Phương trình này có nghiệm : $N_B(t) = C \cdot e^{-\lambda_B t} + \frac{\lambda_A \cdot N_{0A}}{\lambda_B - \lambda_A} \cdot e^{-\lambda_A t}$,

trong đó C là hằng số tích phân.

Với $N_B(0) = N_{0B}$, ta có :

$$N_B(t) = N_{0B} \cdot e^{-\lambda_B t} + \frac{\lambda_A \cdot N_{0A}}{\lambda_B - \lambda_A} \cdot (e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t}) \quad (20.9a)$$

Với $N_B(0) = 0$ ta có :

$$N_B(t) = \frac{\lambda_A \cdot N_{0A}}{\lambda_B - \lambda_A} \cdot (e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t}) \quad (20.9b)$$

• Có thể có hai trường hợp sau đây :

- Trường hợp $\lambda_A \ll \lambda_B$: Hằng số λ tỉ lệ nghịch với thời gian sống, nên trường hợp này có nghĩa là thời gian sống của hạt nhân A rất lớn so với thời gian sống của hạt nhân B.

Công thức (20.9) trở thành :

$$N_B(t) = \frac{\lambda_A N_{0A}}{\lambda_B} \cdot e^{-\lambda_A t} \quad \text{hay} \quad \lambda_B N_B(t) = \lambda_A N_A(t) \quad (20.10)$$

Công thức (20.10) có ý nghĩa là : trong một đơn vị thời gian, có bao nhiêu hạt nhân mẹ (hạt nhân A) phân rã thì có bấy nhiêu hạt nhân con (hạt nhân B) phân rã. Như vậy, số lượng hạt nhân B là không đổi. Hệ các hạt nhân A và B nằm trong trạng thái *cân bằng phóng xạ*.

Nếu các hạt nhân con nằm trong hệ nằm trong trạng thái cân bằng phóng xạ, ta có :

$$\lambda_A N_A = \lambda_B N_B = \lambda_C N_C = \dots = \lambda_i N_i$$

hay

$$\frac{N_A}{T_A} = \frac{N_B}{T_B} = \dots = \frac{N_i}{T_i} \quad (20.11)$$

Ví dụ, trong họ urani thì U238, (có $T(\text{U238}) = 4,5 \cdot 10^9$ năm) nằm cân bằng phóng xạ với hạt nhân nguyên tố U234 (có $T(\text{U234}) = 2,48 \cdot 10^5$ năm). Công thức (20.11) cho :

$$\frac{N_B(t)}{N_A(t)} = \frac{T(\text{U234})}{T(\text{U238})} = 0,54 \cdot 10^{-4}$$

Công thức này xác định tỉ lệ U234 có trong urani tự nhiên là $5,4 \cdot 10^{-3} \%$.

- Trường hợp $\lambda_A \gg \lambda_B$: Hạt nhân mẹ hầu như hoàn toàn biến đổi sang hạt nhân con sau một thời gian ngắn, trong khi đó số hạt nhân con tạo thành hầu như không thay đổi. Do đó, có thể coi gần đúng $N_{0A} \approx N_{0B}$. Định luật biến

đổi của $N_B(t)$ sẽ là : $N_B(t) = N_{0A} \cdot e^{-\lambda_B t}$. Ví dụ, trong hệ urani (xem hình 20.4) từ hạt nhân U238 sang U234 phải qua hai trạng thái, đó là hạt nhân thori Th234 và hạt nhân radi Ra234 đều có thời gian sống rất ngắn so với hai hạt nhân kia. Như vậy, có thể coi như U238 biến đổi ngay sang U234.



BÀI TẬP

20.1. Phóng xạ là hiện tượng một hạt nhân

- A. phát ra một bức xạ điện từ.
- B. tự phát phóng ra các tia α , β , γ , nhưng không thay đổi hạt nhân.
- C. tự phát phóng ra các tia phóng xạ và biến đổi thành một hạt nhân khác.
- D. phóng ra các tia phóng xạ, khi bị bắn phá bằng những hạt chuyển động với tốc độ lớn.

20.2. Cho các tia anpha, beta và gamma bay qua khoảng không gian giữa hai bản cực của một tụ điện thì

- A. tia anpha lệch nhiều hơn cả, sau đến tia beta và tia gamma.
- B. tia anpha lệch về phía bản dương, tia gamma lệch về phía bản âm của tụ điện.
- C. tia gamma không bị lệch.
- D. tia beta không bị lệch.

20.3. Chu kì bán rã của một chất phóng xạ là khoảng thời gian để

- A. quá trình phóng xạ lặp lại như lúc ban đầu.
- B. một nửa số nguyên tử chất ấy biến đổi thành chất khác.
- C. khối lượng chất ấy giảm một phần nhất định, tùy thuộc vào cấu tạo của nó.
- D. một nửa số nguyên tử chất ấy hết khả năng phóng xạ.

20.4. Chất phóng xạ pôlôni $^{210}_{84}\text{Po}$ phóng ra tia α và biến đổi thành chì $^{206}_{82}\text{Pb}$. Hỏi trong 0,168 g pôlôni có bao nhiêu nguyên tử bị phân rã sau 414 ngày đêm và xác định lượng chì được tạo thành trong khoảng thời gian nói trên. Cho biết chu kì bán rã của pôlôni là 138 ngày.

20.5. Tính khối lượng pôlôni ^{210}Po có độ phóng xạ 1 Ci.

21

PHẢN ỨNG HẠT NHÂN

1. Phản ứng hạt nhân

a) Thí nghiệm của Rơ-dơ-pho

- Năm 1909, nhà bác học Rơ-dơ-pho đã có một phát minh nổi tiếng, đó là tạo ra được sự biến đổi hạt nhân. Ông cho chùm hạt α , phóng ra từ nguồn phóng xạ pôlôni, ^{210}Po , bắn phá nitơ có trong không khí (Hình 21.1). Kết quả là, nitơ bị phân rã và biến đổi thành ôxi và hiđrô. Quá trình dẫn đến sự biến đổi hạt nhân như vậy, gọi là *phản ứng hạt nhân*.

Phản ứng hạt nhân là mọi quá trình dẫn đến sự biến đổi hạt nhân.

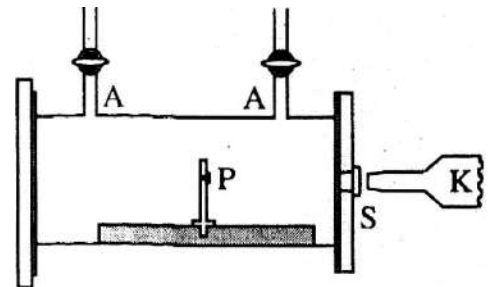
Hình 21.1. Sơ đồ thí nghiệm của Rơ-dơ-pho

P là nguồn phóng xạ pôlôni (^{210}Po) ;

A là đường nạp và hút khí vào trong bình chứa P ;

S là màn kẽm sunfua để phát hiện và ghi hạt ;

K là kính hiển vi để quan sát màn S.



Hình 34.1

- Phản ứng hạt nhân thường được chia làm hai loại :
- + Phản ứng tự phân rã của một hạt nhân không bền vững thành các hạt khác. Ví dụ : sự phóng xạ (đã xét ở Bài 20).
- + Phản ứng trong đó các hạt nhân tương tác với nhau, dẫn đến sự biến đổi chúng thành các hạt khác. Ví dụ : phản ứng xảy ra trong thí nghiệm Rơ-dơ-pho.
- Thông thường, phản ứng hạt nhân có thể viết dưới dạng phương trình tổng quát sau đây :



trong đó A, B là các hạt tương tác, còn C, D là các hạt sản phẩm.

- Trong trường hợp phóng xạ, phương trình có dạng :



trong đó A là hạt nhân mẹ, B là hạt nhân con và C là hạt α hoặc β .

- Phản ứng hạt nhân phổ biến nhất là phản ứng trong đó có một hạt nhẹ a (gọi là *dạn*) tương tác với hạt nhân B (gọi là *bia*) và sản phẩm cũng là một hạt nhẹ d và một hạt nhân C.



Các hạt C và d có thể là nuclôn, photon,...

Nếu các hạt sản phẩm đồng nhất với các hạt ban đầu, thì phản ứng gọi là *tán xạ đàn hồi* của hạt a lên hạt B.

Nếu hạt sản phẩm B ở trạng thái kích thích, kí hiệu B^* tức là : $a + B \rightarrow a + B^*$ thì ta có *sự tán xạ không đàn hồi*.

- Trong thiên nhiên có những phản ứng hạt nhân xảy ra. Chẳng hạn, do tác dụng của các tia vũ trụ ở các tầng thấp của khí quyển Trái Đất, có một lượng nhỏ cacbon phóng xạ C^{14} được tạo ra.

b) Phản ứng hạt nhân tạo nên đồng vị phóng xạ nhân tạo

Năm 1934, hai ông bà Giô-li-ô Quy-ri (Frédéric và Irène Joliot Curie) dùng hạt α bắn phá một lá nhôm, lần đầu tiên đã tạo ra được đồng vị phóng xạ nhân tạo photpho $^{30}_{15}\text{P}$ có tính phóng xạ β^- . Từ đó đến nay, người ta đã tạo ra được hàng nghìn đồng vị phóng xạ nhân tạo nhờ các phản ứng hạt nhân.

2. Các định luật bảo toàn trong phản ứng hạt nhân

Phản ứng hạt nhân là một quá trình vật lí, trong đó hệ các hạt tương tác $A + B$ được xem là hệ kín, nên ta có các định luật bảo toàn sau đây :

a) Định luật bảo toàn số nuclôn (số khối A)

Trong phản ứng hạt nhân, tổng số nuclôn của các hạt tương tác bằng tổng số nuclôn của các hạt sản phẩm.

Bảo toàn số nuclôn cũng là bảo toàn số khối A.

b) Định luật bảo toàn điện tích (nguyên tử số)

Tổng đại số các điện tích của các hạt tương tác bằng tổng đại số các điện tích của các hạt sản phẩm.

Bảo toàn điện tích cũng là bảo toàn nguyên tử số Z (quy ước electron có $Z = -1$).

c) **Định luật bảo toàn năng lượng toàn phần** (bao gồm động năng và năng lượng nghỉ)

Tổng năng lượng toàn phần của các hạt tương tác bằng tổng năng lượng toàn phần của các hạt sản phẩm.

Như vậy, ở đây không có định luật bảo toàn khối lượng (nghỉ) của hệ như trong Cơ học cổ điển.

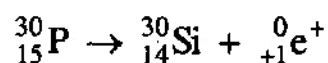
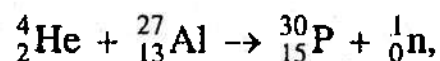
d) **Định luật bảo toàn động lượng**

Vector tổng động lượng của các hạt tương tác bằng vector tổng động lượng của các hạt sản phẩm.

Nếu các hạt chuyển động với tốc độ rất lớn, thì ta phải xét sự bảo toàn của động lượng tương đối tính.

Các định luật bảo toàn trên đây đã được kiểm nghiệm là hoàn toàn đúng.

- Để làm ví dụ vận dụng các định luật này, ta có thể viết phương trình đầy đủ của phản ứng hạt nhân nhân tạo, đã được hai ông bà Giô-li-ô Quy-ri thực hiện năm 1934 như sau :



3. Quy tắc dịch chuyển trong sự phóng xạ

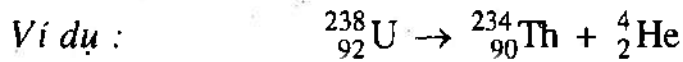
Vận dụng các định luật bảo toàn nói trên vào hiện tượng phóng xạ, ta có thể suy ra các *quy tắc dịch chuyển*, giúp ta xác định hạt nhân con, khi biết loại phân rã của hạt nhân mẹ.

a) **Phân rã α**

Hạt nhân mẹ ${}^A_Z\text{X}$ phóng ra hạt α , tức là ${}^4_2\text{He}$, và biến đổi thành hạt nhân con ${}^{A'}_{Z'}\text{Y}$. Ta có phương trình :



Các định luật bảo toàn số khối và bảo toàn điện tích cho ta : $A' = A - 4$, và $Z' = Z - 2$. Như vậy : "So với hạt nhân mẹ thì hạt nhân con "lùi" hai ô trong Bảng tuần hoàn Men-dê-lê-ép". ("lùi" có nghĩa là đi về phía đầu Bảng tuần hoàn). Đó là *quy tắc dịch chuyển của phân rã α* .

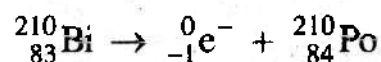


b) Phân rã β^-

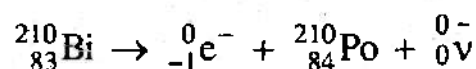
Ta có phương trình :



Áp dụng các định luật bảo toàn số khối và bảo toàn điện tích ta có : $A' = A$, $Z' = Z + 1$. Vậy *quy tắc dịch chuyển của phân rã β^-* là : "So với hạt nhân mẹ thì hạt nhân con "tiến" một ô trong Bảng tuần hoàn". Thế nhưng, khi nghiên cứu phân rã β^- của đồng vị bitmút ${}_{83}^{210}\text{Bi}$, người ta thấy rằng, nếu phương trình phân rã là (theo 21.5) :



thì sự phân rã không thoả mãn định luật bảo toàn năng lượng toàn phần. Để khắc phục khó khăn này, năm 1933, nhà vật lí học Pao-li (Wolfgang Pauli người Thụy Sĩ, 1900 – 1958), đã nêu lên giả thuyết là : Trong phân rã β^- , hạt nhân bismút còn phát ra một hạt nữa, gọi là hạt *phản notrinô*, kí hiệu là $\bar{\nu}$ (đọc là nuy). (Hơn hai mươi năm sau, thực nghiệm đã xác nhận giả thuyết này). Hạt $\bar{\nu}$ không mang điện, có khối lượng nghỉ gần bằng không, chuyển động với tốc độ xấp xỉ bằng tốc độ ánh sáng. Vì vậy, hạt này hầu như không tương tác với vật chất, do đó, rất khó phát hiện. Như vậy, phương trình đầy đủ của phân rã β^- cho bismút là :



c) Phân rã β^+

Ta có phương trình :



Áp dụng các định luật bảo toàn số khối và bảo toàn điện tích, ta có : $A' = A$, $Z' = Z - 1$. Vậy quy tắc dịch chuyển của phân rã β^+ là : "So với hạt nhân mẹ thì hạt nhân con lùi một ô trong Bảng tuần hoàn".

Ví dụ : ${}^{13}_7\text{N} \rightarrow {}^{13}_6\text{C} + {}^0_{+1}\text{e}^+$

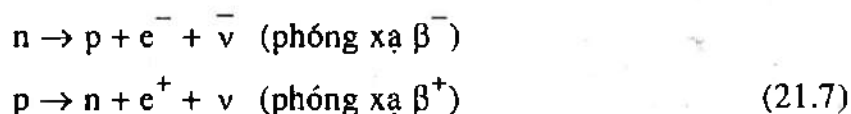
Tương tự như phân rã β^- , trong phân rã β^+ hạt nhân còn phát ra một hạt nữa, gọi là *hạt notrinô*, kí hiệu ν , hạt này không mang điện, có khối lượng nghỉ gần bằng không và chuyển động với tốc độ xấp xỉ bằng tốc độ ánh sáng, rất khó phát hiện.

d) Phóng xạ γ

Phóng xạ này không làm biến đổi hạt nhân, mà đi kèm các phân rã α , β . Nếu hạt nhân con sinh ra ở trong trạng thái kích thích, thì nó chuyển từ mức kích thích E_2 xuống mức thấp hơn E_1 , đồng thời phóng ra một photon có tần số f xác định bởi hệ thức $E_2 - E_1 = hf$. (Nếu mức E_1 chưa phải là mức cơ bản, thì còn có thêm photon khác phát ra nữa). Bởi vì, đối với hạt nhân, hiệu $E_2 - E_1$ có trị số rất lớn (lớn hơn của electron hàng triệu lần), nên photon γ phát ra có tần số rất lớn và bước sóng rất nhỏ ($\lambda < 10^{-11}$ m).

e) Chú ý

Như vậy, các phân rã β thực chất là sự biến đổi của prôtôn thành nơtron, và ngược lại :



4. Năng lượng trong phản ứng hạt nhân

Trong mỗi phản ứng hạt nhân, năng lượng có thể bị hấp thụ hoặc được giải phóng, mặc dù năng lượng toàn phần (bao gồm năng lượng nghỉ và động năng) được bảo toàn.

Xét phản ứng hạt nhân $A + B \rightarrow C + D$ và giả thiết các hạt A và B đứng yên. Tổng số nuclôn trong phản ứng được bảo toàn. Nhưng vì các hạt A, B, C, D có độ hụt khối khác nhau, nên tổng khối lượng nghỉ $m_0 = m_A + m_B$ của các hạt nhân A + B không bằng tổng khối lượng nghỉ $m = m_C + m_D$ của các hạt nhân sinh ra C + D. Có hai trường hợp có thể xảy ra :

a) $m < m_0$

Giả sử các hạt nhân A và B có động năng không đáng kể. Bởi vì năng lượng toàn phần được bảo toàn, nên theo hệ thức Anh-xtanh, phản ứng sẽ toả một lượng năng lượng, bằng :

$$W = (m_0 - m)c^2 \quad (21.8)$$

dưới dạng động năng của các hạt C và D, hoặc năng lượng của photon γ . Năng lượng toả ra này thường gọi là *năng lượng hạt nhân*.

Trường hợp $m < m_0$ xảy ra, khi các hạt sinh ra có độ hụt khối lớn hơn các hạt ban đầu, nghĩa là các hạt sinh ra bền vững hơn các hạt ban đầu.

b) $m > m_0$

Trong trường hợp này, tổng năng lượng nghỉ của các hạt A + B, cũng tức là tổng năng lượng toàn phần của hệ A + B, nhỏ hơn tổng năng lượng nghỉ của các hạt sinh ra C + D. Do đó, theo định luật bảo toàn năng lượng, phản ứng không thể tự nó xảy ra được. Muốn cho phản ứng có thể xảy ra, ta phải cung cấp cho các hạt A và B một năng lượng W dưới dạng động năng (bằng cách bắn hạt A vào hạt B chẳng hạn). Đây là *phản ứng thu năng lượng*.

Vì các hạt sinh ra có tổng động năng là W_d , nên năng lượng cần cung cấp W phải thoả mãn điều kiện :

$$W = (m - m_0)c^2 + W_d \quad (21.9)$$

Năng lượng nhỏ nhất cần thiết để gây ra phản ứng thu năng lượng gọi là *năng lượng ngưỡng*, được tính theo công thức :

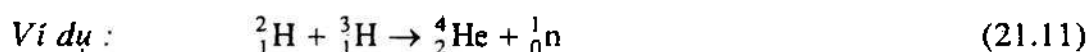
$$W_{ng} = \left(1 + \frac{m_A}{m_B}\right)(m - m_0)c^2 \quad (21.10)$$

5. Hai loại phản ứng hạt nhân toả năng lượng

Ta đã biết, phản ứng hạt nhân toả năng lượng xảy ra khi các hạt sinh ra bền vững hơn (tức là có năng lượng liên kết riêng lớn hơn) so với các hạt tương tác ban đầu.

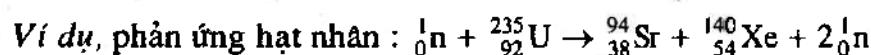
Kết quả tính toán năng lượng liên kết riêng của các hạt nhân có số nuclôn A khác nhau đã cho thấy có thể xảy ra hai loại phản ứng hạt nhân toả năng lượng như sau :

- Hai hạt nhân rất nhẹ (có số khối $A < 10$), như hiđrô, heli,... hợp lại thành hạt nhân nặng hơn. Vì sự *tổng hợp hạt nhân* chỉ có thể xảy ra ở nhiệt độ cao, nên phản ứng này gọi là *phản ứng nhiệt hạch*.



toả năng lượng khoảng 18 MeV. Ở đây, các hạt nhân ${}^2_1\text{H}$ và ${}^3_1\text{H}$ có năng lượng liên kết riêng tương ứng bằng 1,11 MeV/nuclôn và 2,83 MeV/nuclôn ; còn hạt nhân ${}^4_2\text{He}$ có năng lượng liên kết riêng lớn hơn, bằng 7,04 MeV/nuclôn.

- Một hạt nhân nặng vỡ thành hai mảnh nhẹ hơn (có khối lượng cùng cỡ). Phản ứng này gọi là *phản ứng phân hạch*. Chẳng hạn, hạt nhân urani, plutoni,... hấp thụ neutron và vỡ thành hai hạt nhân có số khối A vào loại trung bình.



toả năng lượng 185 MeV. Ở đây, hạt nhân ${}^{235}_{92}\text{U}$ có năng lượng liên kết riêng bằng 7,59 MeV/nuclôn, còn các hạt nhân ${}^{94}_{38}\text{Sr}$ và ${}^{140}_{54}\text{Xe}$ có năng lượng liên kết riêng lớn hơn, tương ứng bằng 8,59 MeV/nuclôn và 8,29 MeV/nuclôn.

Chú ý : Vì năng lượng trong phản ứng hạt nhân thường thể hiện dưới dạng nhiệt, nên người ta còn kí hiệu năng lượng đó là Q.



BÀI TẬP

21.1. Trong một phản ứng hạt nhân, tổng khối lượng của các hạt tham gia

- A. được bảo toàn.
- B. tăng.
- C. giảm.
- D. tăng hoặc giảm tùy theo phản ứng.

21.2. Trong dãy phân rã phóng xạ ${}^{235}_{92}\text{X} \rightarrow {}^{207}_{82}\text{Y}$ có bao nhiêu hạt α và β được phát ra ?

- A. 3α và 4β .
- B. 7α và 4β .
- C. 4α và 7β .
- D. 7α và 2β .

21.3. Xác định hạt X trong các phản ứng sau đây :



21.4. Cho phản ứng hạt nhân : ${}^{37}_{17}\text{Cl} + \text{X} \rightarrow {}^{37}_{18}\text{Ar} + \text{n}$.

- a) Xác định số khối, nguyên tử số và tên gọi hạt nhân X.
- b) Phản ứng đó toả ra hay thu năng lượng ? Tính độ lớn của năng lượng toả ra hay thu đó theo đơn vị jun.

Cho biết : $m_{\text{Ar}} = 36,956889 \text{ u}$; $m_{\text{Cl}} = 36,956563 \text{ u}$; $m_{\text{n}} = 1,008665 \text{ u}$; $m_{\text{p}} = 1,007276 \text{ u}$.

22

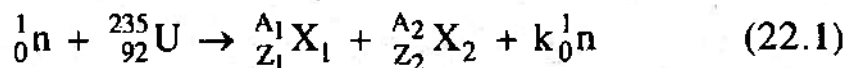
PHẢN ỨNG PHÂN HẠCH

1. Sự phân hạch

a) Sự phân hạch của urani

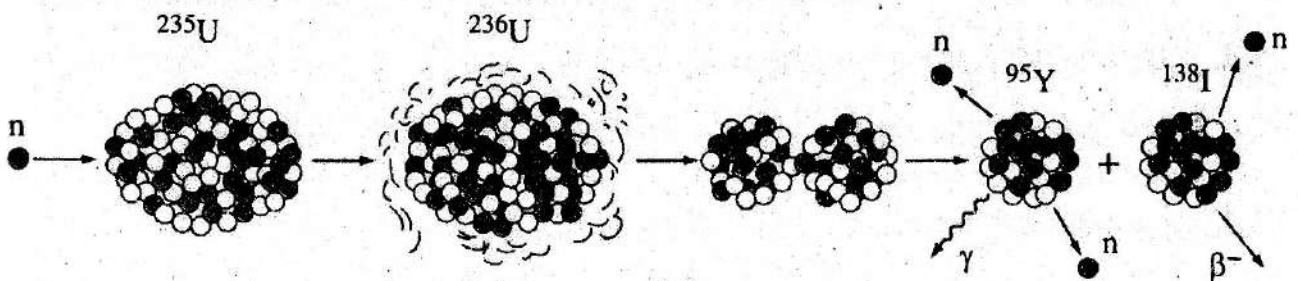
Năm 1939, hai nhà hoá học người Đức là Han và Xơ-ra-xman (Otto Hann, Fritz Strassman) đã làm thí nghiệm dùng neutron bắn vào urani. Kết quả cho thấy hạt nhân urani vỡ thành hai hạt nhân có khối lượng nhỏ hơn. Kèm theo quá trình phân hạch này có một số neutron được giải phóng, bay ra. Các thí nghiệm tiếp theo đã cho thấy rằng phản ứng phân hạch có thể xảy ra theo nhiều cách vỡ khác nhau.

- Dùng neutron nhiệt (còn gọi là neutron chậm) có năng lượng cỡ 0,01 eV bắn vào ^{235}U , ta có phản ứng phân hạch :



X_1 và X_2 là các hạt nhân có số khối A thuộc loại trung bình (từ 80 đến 160) và hầu hết là các hạt nhân phóng xạ ; k là số hạt neutron trung bình được sinh ra. Phản ứng này sinh ra 2 hoặc 3 (trung bình 2,5) neutron và toả ra năng lượng khoảng 200 MeV dưới dạng động năng của các hạt.

Khi hấp thụ ("bắt") neutron, hạt nhân ^{235}U chuyển sang trạng thái kích thích (thành ^{236}U), trạng thái này không bền vững, và kết quả là xảy ra phân hạch, như ở ví dụ nêu trên hình 22.1.



Hình 22.1

Từ hình vẽ ta thấy :

- Phương trình phân hạch : ${}_0^1\text{n} + {}_{92}^{235}\text{U} \rightarrow {}_{92}^{236}\text{U} \rightarrow {}_{39}^{95}\text{Y} + {}_{53}^{138}\text{I} + 3{}_0^1\text{n}$.
- Hạt nhân ytri ^{95}Y phóng xạ γ và hạt nhân iốt ^{138}I phân rã β^- .

- Urani thiên nhiên rất giàu U238 (khoảng 99,3%), chỉ có một lượng nhỏ U235 (khoảng 0,7%). Đồng vị U235 dễ dàng phân hạch khi hấp thụ neutron nhiệt. Còn đồng vị U238 khi hấp thụ neutron nhiệt thì biến đổi thành plutoni $^{239}_{94}\text{Pu}$. Đồng vị U238 chỉ phân hạch khi hấp thụ neutron nhanh, có động năng lớn hơn 1 MeV.
- Các hạt nhân nặng khác như $^{239}_{94}\text{Pu}$, $^{251}_{98}\text{Cf}$,... cũng có thể bị phân hạch. Khi hấp thụ neutron chậm, hạt nhân $^{239}_{94}\text{Pu}$ bị vỡ tương tự như U235, và có trung bình 2,89 neutron được giải phóng.

b) Đặc điểm chung của các phản ứng phân hạch

Sau mỗi phản ứng phân hạch đều có hơn 2 neutron được phóng ra, và mỗi phân hạch đều giải phóng ra năng lượng lớn, thường được gọi là *năng lượng hạt nhân*.

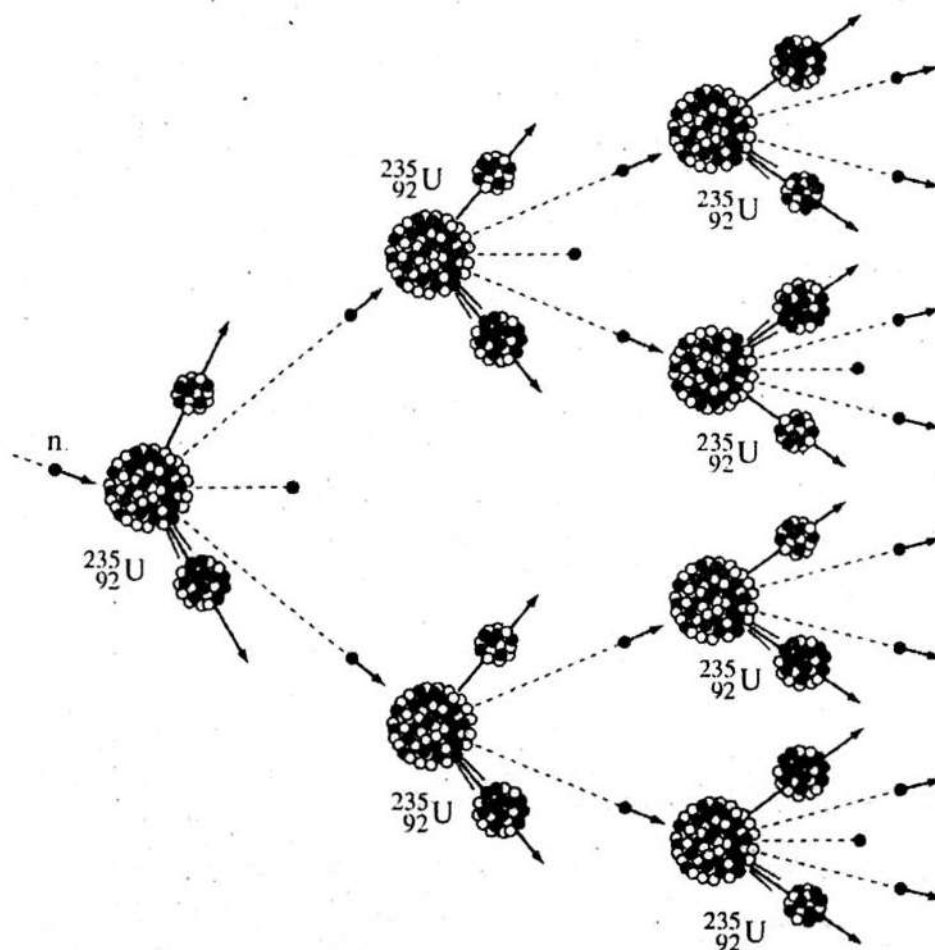
2. Phản ứng phân hạch dây chuyền

- a) Các neutron sinh ra sau mỗi phân hạch của urani (hoặc plutoni...) lại có thể bị hấp thụ bởi các hạt nhân urani (hoặc plutoni...) khác ở gần đó, và cứ thế, sự phân hạch tiếp diễn thành một dây chuyền. Số phân hạch tăng lên rất nhanh trong một thời gian rất ngắn. Khi đó, ta có *phản ứng phân hạch dây chuyền*.

b) Điều kiện xảy ra phản ứng phân hạch dây chuyền

Trên thực tế không phải mọi neutron sinh ra đều gây ra sự phân hạch, bởi vì có nhiều neutron bị mất đi do nhiều nguyên nhân khác nhau : bị hấp thụ bởi các tạp chất trong nhiên liệu hạt nhân (khối urani hoặc plutoni...), hoặc bị U238 hấp thụ mà không xảy ra phân hạch, hoặc bay ra ngoài thể tích khối urani hoặc plutoni... Thành thử, muốn có phản ứng dây chuyền ta phải xét tới *hệ số nhân neutron k*. Hệ số này phụ thuộc vào số neutron sinh ra và số neutron mất mát đi do các nguyên nhân đã nêu trên, đặc trưng cho *số neutron sinh ra sau mỗi phân hạch gây ra được phân hạch tiếp theo*.

- Nếu $k < 1$ thì *phản ứng dây chuyền không thể xảy ra* (hệ thống gọi là *dưới hạn*).
- Nếu $k = 1$ thì phản ứng dây chuyền xảy ra với mật độ neutron không đổi. Đó là *phản ứng dây chuyền điều khiển được* (kiểm soát được) trong các lò phản ứng hạt nhân (hệ thống gọi là *tới hạn*).
- Nếu $k > 1$ thì dòng neutron tăng liên tục theo thời gian, dẫn tới vụ nổ nguyên tử. Đó là *phản ứng dây chuyền không điều khiển được* (hệ thống gọi là *vượt hạn*).



Hình 22.2

Hình 22.2 là sơ đồ minh họa phản ứng dây chuyền trong trường hợp $k = 2$.

Để giảm thiểu số neutron bị mất vì thoát ra ngoài nhằm đảm bảo có $k \geq 1$, thì khối lượng nhiên liệu hạt nhân phải đạt tới một giá trị tối thiểu, gọi là *khối lượng tới hạn* m_{th} .

Đối với urani U235 nguyên chất thì $m_{th} = 1 \text{ kg}$; đối với plutoni Pu239 nguyên chất thì $m_{th} = 1,235 \text{ kg}$. Việc tách riêng U235 rất phức tạp và tốn kém, nên các lò phản ứng hạt nhân thường dùng nhiên liệu urani thiên nhiên đã làm giàu U235, tăng tỉ lệ U235 đến vài hoặc vài chục phần trăm. Khi đó, khối lượng tới hạn của nhiên liệu này phải có trị số lớn hơn.

3. Lò phản ứng hạt nhân

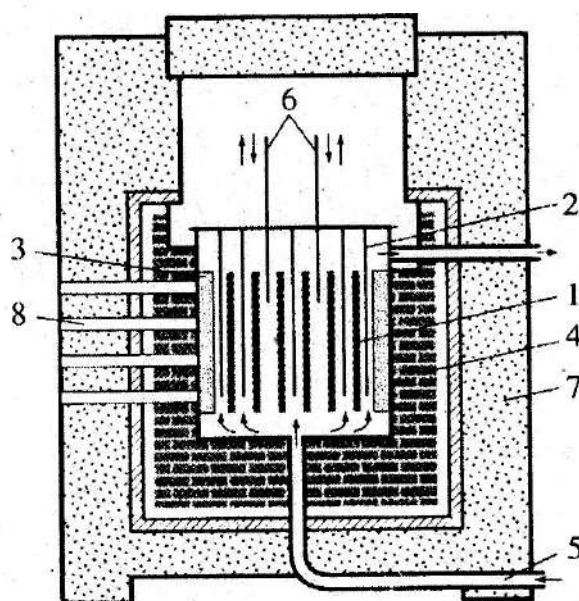
Phản ứng phân hạch dây chuyền tự duy trì có điều khiển, được thực hiện trong lò phản ứng hạt nhân. Lần đầu tiên, năm 1942, Féc-mi (Enrico Fermi) và các cộng sự của ông đã thực hiện thành công phản ứng này trong lò phản ứng hạt nhân ở trường đại học Chicago (Mĩ). Tất cả các lò phản ứng hạt nhân đều có nhiều bộ phận chức năng giống nhau.

Trên hình 22.3 là sơ đồ lò phản ứng hạt nhân nơtron nhiệt. Phần lớn các lò phản ứng đều dùng urani làm nhiên liệu hạt nhân.

Nhiên liệu hạt nhân thường được chế tạo dưới dạng các thanh dài. Việc bố trí các thanh nhiên liệu trong lò phải được tính toán rất cẩn thận. Thanh nhiên liệu và chất làm chậm nơtron (nước nặng D_2O , than chì, berili,...) phải được sắp đặt sao cho sau mỗi lần phân hạch bao giờ cũng có ít nhất một nơtron tiếp tục gây ra một phân hạch khác. Ngoài ra, cũng phải có cách điều khiển tốc độ các phân hạch xảy ra. Yêu cầu đặt ra là : nhất thiết phải có khả năng khởi động từ từ phản ứng dây chuyền, phải điều chỉnh được nó trong quá trình tiến triển, và có thể làm phản ứng dừng lại khi cần. Việc điều khiển này được thực hiện với các thanh điều khiển chế tạo bằng vật liệu hấp thụ nơtron, như cadimi... Khi các thanh điều khiển được thả xen hoàn toàn vào vùng các thanh nhiên liệu, thì rất nhiều nơtron bị hấp thụ và phản ứng dây chuyền sẽ bị dừng lại. Khi rút từ từ các thanh điều khiển ra khỏi vùng hoạt động của lò phản ứng (gọi là vùng tâm lò phản ứng), thì phản ứng phân hạch lại bắt đầu và tiến triển dần đến mức tạo nên phản ứng dây chuyền tự duy trì. Động năng của các mảnh phân hạch và nơtron được biến đổi thành nhiệt năng. Thành thử, lò phản ứng là một nguồn nhiệt khổng lồ, có thể tạo ra những nhiệt độ rất cao. Nhiệt lượng toả ra được một chất lỏng làm nguội (chất tải nhiệt) tải đi theo các ống dẫn chạy qua vùng tâm lò. Có trường hợp người ta dùng nước để làm chậm, đồng thời làm chất tải nhiệt.

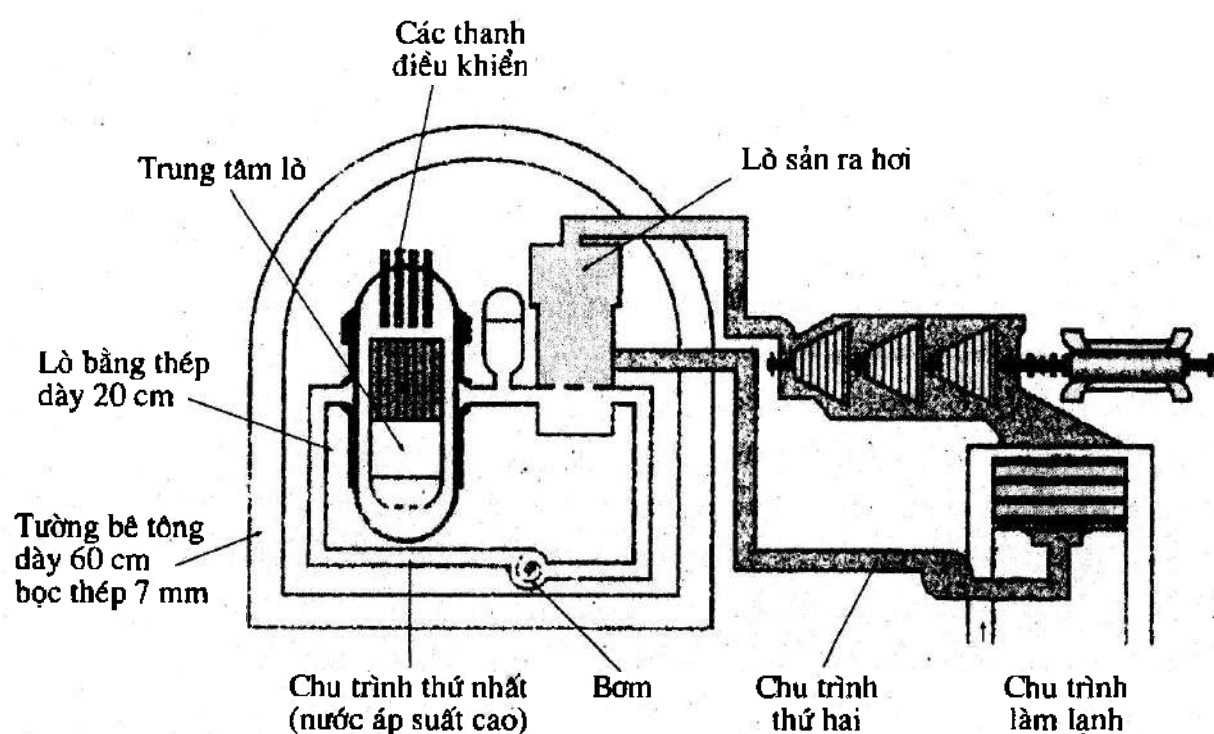
Hình 22.3. Sơ đồ lò phản ứng nơtron nhiệt.

1. Thanh nhiên liệu (urani) ;
2. Chất làm chậm ;
3. Vỏ kim loại ;
4. Lớp phản xạ nơtron bằng graphit ;
5. Ống làm lạnh và tải nhiệt ;
6. Thanh điều khiển ;
7. Thành bảo vệ phóng xạ ;
8. Đường ống làm thí nghiệm (dùng cho lò nghiên cứu).



Hình 22.3

Hiện nay người ta chế tạo nhiều loại lò phản ứng khác nhau với nhiên liệu, chất tải nhiệt, chất làm chậm khác nhau, tùy theo mục đích sử dụng : để nghiên cứu khoa học, để cung cấp năng lượng hạt nhân hay sản xuất nhiên liệu hạt nhân, để sản xuất đồng vị phóng xạ... Trên hình 22.4 là sơ đồ phản ứng PWR (Pressurized - water reactor, lò phản ứng áp lực). Trong lò phản ứng PWR, nhiên liệu sử dụng là urani đã làm giàu (urani tự nhiên chỉ chứa 0,7% ^{235}U , được "làm giàu" nghĩa là tăng hàm lượng đến 3% ^{235}U). Các phản ứng phân hạch chỉ xảy ra với các neutron chậm. Muốn làm chậm các neutron phát ra phải đưa vào giữa các tấm nhiên liệu (urani ôxít) một "chất làm chậm", ở đây là nước áp suất cao (155 atm/290°C).



Hình 22.4

Các thanh điều khiển (thanh B hay Cd có đặc tính hấp thụ neutron) có thể cắm sâu xuống hay rút lên tùy trường hợp muốn cho công suất lò giảm hay tăng.

Lò có các chu trình sau :

- Chu trình thứ nhất khép kín chứa *nước áp suất cao*.
- Chu trình thứ hai nhận nhiệt do chu trình thứ nhất chuyển sang. Lò này chứa nước ở 1270°C và áp suất 56 atm, nước này được chuyển thành hơi làm quay tuabin của máy phát điện.
- Chu trình thứ ba là chu trình làm lạnh có tác dụng biến đổi hơi nước thành nước. Trung tâm của lò cùng với chu trình thứ nhất đều có phóng xạ cao, vì vậy được bảo vệ rất chắc chắn.

Nước ta trước đây đã có một lò phản ứng hạt nhân nhỏ ở Đà Lạt, dùng để nghiên cứu khoa học và sản xuất đồng vị phóng xạ (lò này có công suất 500 kW, có 89 thanh nhiên liệu là hợp kim chứa urani đã làm giàu tới 36% U235).

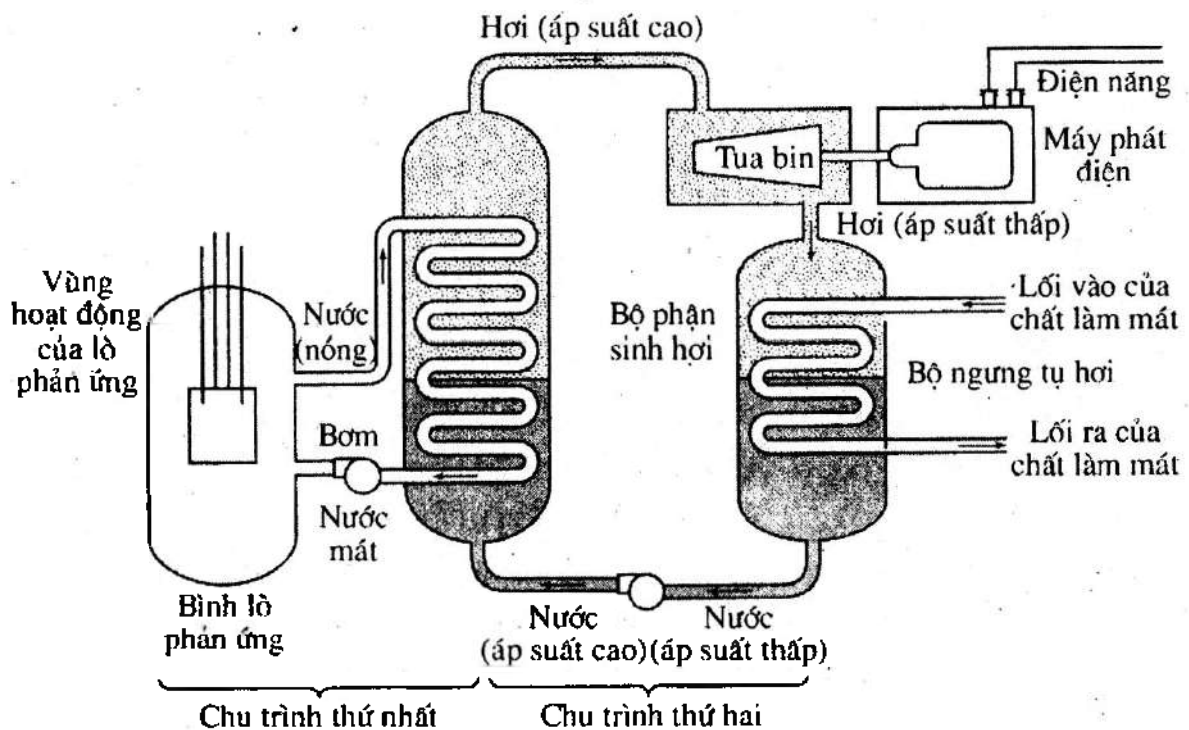
Lò phản ứng hạt nhân là bộ phận chính của các nhà máy điện nguyên tử. Lò phản ứng hạt nhân cũng đã được đặt trên các tàu thủy, tàu ngầm. Chỉ cần một lần nạp nhiên liệu, các tàu này có thể hoạt động liên tục vài năm.

Cần chú ý rằng, mặc dù quá trình phân hạch có điều khiển, nhưng các sản phẩm phân hạch đều có tính phóng xạ cao, và phần lớn là các chất phóng xạ γ sống lâu, rất nguy hiểm cho sức khỏe con người.

4. Nhà máy điện hạt nhân

Bộ phận chính của nhà máy điện hạt nhân là lò phản ứng hạt nhân. Chất tải nhiệt sơ cấp, sau khi chạy qua vùng tâm lò, sẽ chảy qua bộ trao đổi nhiệt, cung cấp nhiệt cho lò sinh hơi. Hơi nước làm chạy tuabin phát điện giống như trong nhà máy điện thông thường.

Hình 22.5 là sơ đồ đơn giản hoá của một nhà máy điện hạt nhân.



Hình 22.5

Các nhà máy điện hạt nhân là nguồn điện năng có hiệu suất hợp lí. Thế nhưng, ít nhất cũng còn lại hai vấn đề chính mà ta cần giải quyết. Một là, vấn đề an toàn của chính lò phản ứng. Phản ứng dây chuyền phải luôn được điều khiển. Nếu không, nhiên liệu nóng chảy, hoặc áp suất tăng cao đến mức làm vỡ thành bảo vệ quanh lò. Khi đó, các chất phóng xạ sẽ rò rỉ ra môi trường xung quanh.

Với trình độ công nghệ tiên tiến hiện nay, người ta đã có nhiều biện pháp tốt giải quyết vấn đề này. Tuy nhiên, sự cố xảy ra ở một vài nhà máy điện hạt nhân trên thế giới đã buộc các nước phải tính toán kỹ việc đảm bảo an toàn khi xây dựng nhà máy điện hạt nhân. *Vấn đề thứ hai*, còn nghiêm trọng hơn và lâu dài hơn, đó là việc chôn cất thải phóng xạ từ nhiên liệu hạt nhân đã bị tiêu hao hết. Giải pháp cho vấn đề này hiện nay chưa được giải quyết thoả đáng.

Cho đến nay, nhiều nhà máy điện hạt nhân đã được xây dựng ở các nước công nghiệp phát triển và đã cung cấp một lượng điện năng đáng kể. Có một số nước, như Pháp, Thụy Điển,... điện năng do các nhà máy điện hạt nhân sản xuất ra chiếm 30% tổng số điện năng sản xuất hằng năm. Nước ta đã có một dự án xây dựng nhà máy điện hạt nhân trong những năm tới.



BÀI TẬP

22.1. Sự phân hạch là sự vỡ một hạt nhân nặng

- A. thường xảy ra một cách tự phát thành nhiều hạt nhân nhẹ hơn.
- B. thành hai hạt nhân nhẹ hơn, do hấp thụ một neutron.
- C. thành hai hạt nhân nhẹ hơn và vài neutron, sau khi hấp thụ một neutron chậm.
- D. thành hai hạt nhân nhẹ hơn, thường xảy ra một cách tự phát.

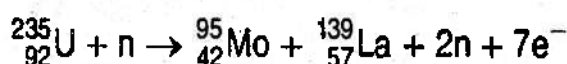
22.2. Đồng vị có thể phân hạch khi hấp thụ một neutron chậm là

- A. ${}_{92}^{238}\text{U}$. B. ${}_{92}^{234}\text{U}$. C. ${}_{92}^{235}\text{U}$. D. ${}_{92}^{239}\text{U}$.

22.3. Gọi k là hệ số nhân neutron, thì điều kiện cần và đủ để phản ứng dây chuyền có thể xảy ra là

- A. $k < 1$. B. $k = 1$. C. $k > 1$. D. $k \geq 1$.

22.4. Xét phản ứng phân hạch urani ${}_{92}^{235}\text{U}$ có phương trình :



Tính năng lượng mà một phân hạch toả ra.

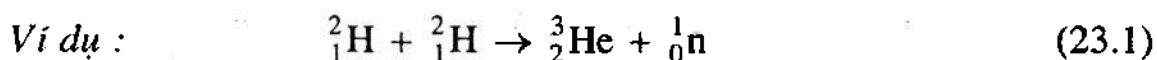
Cho biết : $m_{\text{U}} = 234,99 \text{ u}$; $m_{\text{Mo}} = 94,88 \text{ u}$; $m_{\text{La}} = 138,87 \text{ u}$.

Bỏ qua khối lượng của electron.

1. Phản ứng nhiệt hạch

a) Sự tổng hợp các hạt nhân nhẹ

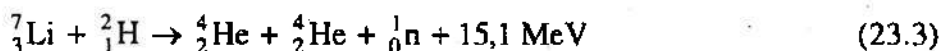
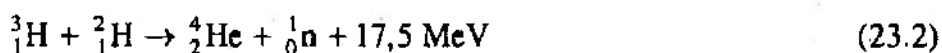
Ngoài hiện tượng toả năng lượng khi phá vỡ hạt nhân nặng, còn có hiện tượng toả năng lượng khi kết hợp các hạt nhân nhẹ. Quá trình kết hợp hai hạt nhân nhẹ để tạo nên một hạt nhân nặng hơn gọi là *sự tổng hợp hạt nhân*.



trong đó ${}^2_1\text{H}$ là đồng vị nặng của hiđrô có sẵn trong thiên nhiên và được gọi là đơteri (D). Đơteri có thể chiết từ nước biển để thu gom những lượng lớn. Phản ứng toả ra năng lượng rất lớn, gần 4 MeV. Một đặc điểm hấp dẫn của phản ứng này là sản phẩm ${}^3_2\text{He}$ bền vững và không có tính phóng xạ.

Nếu tính theo khối lượng nhiên liệu, thì năng lượng nhiệt hạch lớn hơn năng lượng phân hạch nhiều lần. Ví dụ, 1 kg hỗn hợp đồng vị hiđrô nặng toả ra năng lượng $9,2 \cdot 10^7$ kWh, gấp 4 lần năng lượng do 1 kg U235 bị phân hạch toả ra ($2,3 \cdot 10^7$ kWh).

Ngoài phản ứng nhiệt hạch nêu trên, người ta cũng quan tâm đến các phản ứng sau :



b) Điều kiện xảy ra quá trình tổng hợp hạt nhân

Vì các hạt nhân đều là những hạt tích điện dương, nên muốn tạo ra phản ứng nhiệt hạch, phải cung cấp cho chúng một động năng đủ lớn để thắng lực đẩy Cu-lông giữa chúng, và cho chúng tiến lại gần nhau đến mức mà lực hạt nhân phát huy tác dụng, làm chúng kết hợp với nhau. Phép tính chứng tỏ rằng, muốn có được động năng lớn như vậy, thì đơteri phải có nhiệt độ cỡ 10^9 K. Thực ra, chỉ cần nhiệt độ vào khoảng $10^7 \div 10^8$ K là phản ứng nhiệt hạch đã có thể xảy ra rồi. Chính vì sự tổng hợp hạt nhân chỉ

xảy ra ở nhiệt độ rất cao, nên phản ứng này gọi là *phản ứng nhiệt hạch*. Như vậy *phản ứng nhiệt hạch* là phản ứng trong đó hai hạt nhân nhẹ kết hợp lại thành hạt nhân nặng hơn, xảy ra ở nhiệt độ rất cao.

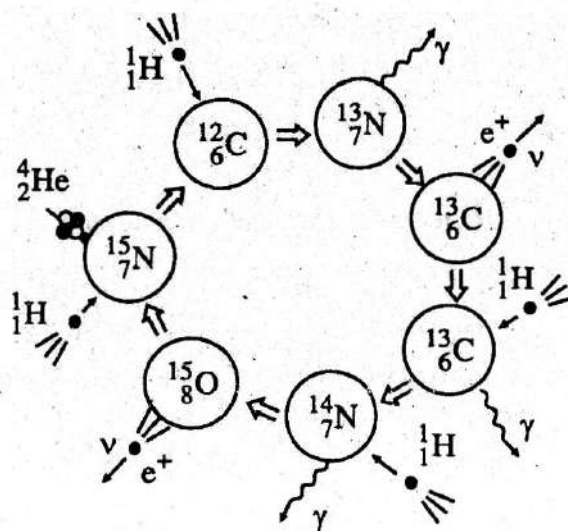
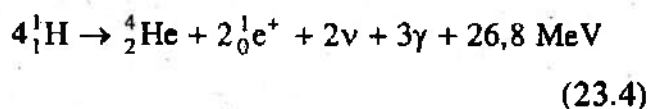
Cần chú ý rằng, ngoài điều kiện phải có nhiệt độ cao, thì còn phải thoả mãn hai điều kiện để phản ứng tổng hợp hạt nhân có thể xảy ra. Đó là : mật độ hạt nhân n (số hạt nhân trong một đơn vị thể tích) phải lớn ; đồng thời, thời gian Δt duy trì nhiệt độ cao (cỡ 10^8 K) cũng phải đủ dài. Lo-sơn (Lawson) đã chứng minh rằng hai điều kiện đó được thể hiện bằng hệ thức, gọi là *tiêu chuẩn Lo-sơn* : $n \cdot \Delta t \leq 10^{14} \text{ s/cm}^3$.

2. Phản ứng nhiệt hạch trong vũ trụ

Phản ứng nhiệt hạch trong lòng Mặt Trời và các ngôi sao là nguồn gốc năng lượng của chúng.

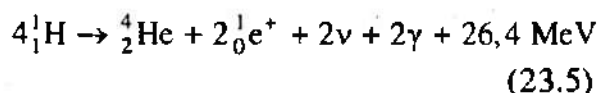
Các phép đo cho biết : nhiệt độ trong lòng Mặt Trời cỡ vài chục triệu độ, mật độ vật chất của Mặt Trời (chủ yếu là đồng vị hiđrô) là 10^5 kg/m^3 . Với mật độ và nhiệt độ này, vật chất trong lòng Mặt Trời (và các ngôi sao) ở trạng thái plasma (đó là trạng thái tạo bởi các hạt nhân và các electron tự do). Vì những lí do đó, người ta giải thích nguồn gốc năng lượng Mặt Trời và các ngôi sao như sau. Do có một chuỗi các phản ứng nhiệt hạch xảy ra liên tiếp (gọi là *chu trình cacbon – nitơ*, hoặc *chu trình prôtôn*), mà kết quả là 4 hạt nhân hiđrô tạo thành 1 hạt nhân heli, và có một năng lượng toả ra bằng 26,8 MeV (Hình 23.1). Mỗi mol heli được tạo thành thì toả ra năng lượng 700000 kWh (!). Vì khối lượng Mặt Trời và các ngôi sao rất lớn, nên khối lượng của chúng (khối lượng nhiên liệu hiđrô) giảm đi do bức xạ hàng năm là không đáng kể.

Năm 1938, nhà vật lí Be-tơ (Bethe, người Mỹ gốc Đức) đã nêu lên *chu trình cacbon – nitơ* (Hình 23.1) gồm 6 phản ứng nối tiếp nhau, với sự tham gia của cacbon và nitơ như là chất xúc tác và trung gian ; nhưng, xét tổng hợp lại, thì cả chu trình rút về sự tạo thành một hạt nhân heli từ 4 hạt nhân hiđrô :



Hình 23.1

Ngoài ra, còn có *chu trình prôtôn* gồm 3 phản ứng tiếp nối nhau, mà tóm tắt lại là :



Đối với Mặt Trời, phần đóng góp của hai chu trình là như nhau. Các sao có nhiệt độ thấp hơn nhiệt độ Mặt Trời thì chu trình prôtôn đóng góp nhiều hơn. Còn các sao có nhiệt độ cao hơn nhiệt độ Mặt Trời thì chu trình cacbon – nitơ đóng góp trội hơn.



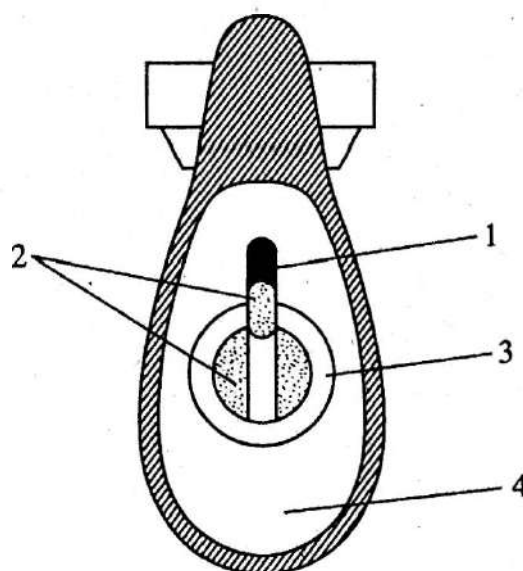
Hình 23.2

Hình 23.2 mô tả một vụ nổ nhiệt hạch ở bề mặt Mặt Trời.

3. Thực hiện phản ứng nhiệt hạch trên Trái Đất

- a) Trên Trái Đất con người đã thực hiện được phản ứng nhiệt hạch dưới dạng không kiểm soát được, đó là sự nổ của bom nhiệt hạch hay bom H (còn gọi là bom khinh khí).

Sơ đồ nguyên lí của bom H như ở hình 23.3. Nhiên liệu nhiệt hạch là liti hiđrua (LiH), hoặc liti hiđrua nặng (LiD) ở trạng thái rắn. Nhiên liệu nhiệt hạch này dễ sản xuất, bởi vì liti có nhiều trong thiên nhiên, còn đơteri thì có thể lấy ở nước biển bằng điện phân. Ban đầu, kíp nổ làm bom nguyên tử (nhiên liệu urani) nổ, tạo ra nhiệt độ hàng trăm triệu độ, nhờ đó phản ứng nhiệt hạch xảy ra. Như vậy, ở đây có cả năng lượng nhiệt hạch lẫn năng lượng phân hạch. Vì vậy, mỗi quả bom khinh khí có sức tàn phá ghê gớm, tương đương vài chục triệu tấn thuốc nổ TNT (trong khi một quả bom hạt nhân (bom A) chỉ tương đương với vài chục nghìn tấn thuốc nổ TNT). Hiện nay, đã có Hiệp ước cấm thử và sử dụng các loại bom này.



Hình 23.3. Sơ đồ nguyên lí bom H.

1. Chất nổ ;
2. Urani ;
3. Đơteri và triti ;
4. Liti ; đơteri và hiđrô.

- b) Vì năng lượng toả ra trong phản ứng nhiệt hạch lớn hơn năng lượng toả ra trong phản ứng phân hạch rất nhiều, và vì nhiên liệu nhiệt hạch có thể coi là vô tận trong thiên nhiên, nên một vấn đề quan trọng đặt ra là : làm thế nào thực hiện được *phản ứng nhiệt hạch dưới dạng kiểm soát được*, để có thể đảm bảo cung cấp lâu dài năng lượng cho nhân loại.

Vấn đề cơ bản phải giải quyết trong phản ứng nhiệt hạch là phải thực hiện được nhiệt độ cao, hàng chục triệu độ, trong một thể tích giới hạn chứa đầy đơteri, hoặc hỗn hợp đơteri – liti. Ở nhiệt độ cao, chất khí hoàn toàn bị ion hoá, ở trạng thái gọi là trạng thái plasma. Muốn giữ plasma ở nhiệt độ cao hàng chục triệu độ, phải giữ cho plasma không tiếp xúc với thành bình. Các nhà bác học đã và đang nghiên cứu các biện pháp hữu hiệu để thực hiện được sự cách nhiệt đó và đã cho thấy có khả năng thực hiện được phản ứng nhiệt hạch trong thiết bị mang tên Tokamak. Tuy nhiên, hiện nay người ta cũng dự báo là phải có thời gian nhiều năm nữa để tiếp tục nghiên cứu, thì năng lượng nhiệt hạch mới có thể sử dụng phục vụ cho con người.

Mặc dù có nhiều ưu việt, các lò phản ứng nhiệt hạch vẫn không thể là những nguồn năng lượng hoàn hảo. Lí do là việc xây dựng rất tốn kém và những lò phản ứng đó cũng có tính phóng xạ mạnh (bởi vì từ lò có thoát một thông lượng neutron rất cao). Ngoài ra, lò phản ứng nhiệt hạch cũng là nguồn ô nhiễm nhiệt. Do đó, cần khắc phục các nhược điểm này để đảm bảo các điều kiện an toàn khi sử dụng năng lượng nhiệt hạch phục vụ cho con người.



BÀI TẬP

- 23.1. Phản ứng nhiệt hạch là phản ứng hạt nhân
- A. có thể xảy ra ở nhiệt độ phòng.
 - B. cần một nhiệt độ cao mới thực hiện được.
 - C. hấp thụ một nhiệt lượng lớn.
 - D. trong đó, hạt nhân của các nguyên tử bị nung chảy thành các nuclôn.
- 23.2. Phản ứng nhiệt hạch và phản ứng phân hạch là hai phản ứng hạt nhân trái ngược nhau vì
- A. một phản ứng toả và một phản ứng thu năng lượng.
 - B. một phản ứng xảy ra ở nhiệt độ thấp, phản ứng kia ở nhiệt độ cao.
 - C. một phản ứng là tổng hợp hai hạt nhân nhẹ thành một hạt nhân nặng hơn, phản ứng kia là sự vỡ một hạt nhân nặng thành hai hạt nhẹ hơn.
 - D. một phản ứng diễn biến rất chậm, phản ứng kia rất nhanh.

Chương V

HẠT SƠ CẤP.

KHÁI NIỆM VỀ CƠ HỌC LƯỢNG TỬ

24 CÁC HẠT SƠ CẤP

1. Hạt sơ cấp

Vào những năm 30 của thế kỉ XX, có nhiều người nghĩ rằng vấn đề cấu trúc cuối cùng của vật chất đã sắp được giải quyết, bởi vì khi đó, người ta đã biết các nguyên tử đều được cấu tạo bởi electron, prôtôn, notron và từ năm 1905 đã phát hiện được sự tồn tại của phôtôn (lượng tử ánh sáng). Khi nghiên cứu phân rã phóng xạ beta người ta lại phát hiện thêm hạt notrinô. Tiếp theo, người ta lại phát hiện trong tia vũ trụ còn có các hạt khác có khối lượng lớn hơn electron hàng trăm lần, gọi là các hạt mêzon. Nhờ có các máy gia tốc hạt ngày càng hiện đại, bằng thực nghiệm, người ta lại đã phát hiện được rất nhiều hạt mới có tên và kí hiệu như : myon (μ), piôn (π), kaôn (K), xicma (Σ),...

Người ta quy ước gọi các hạt nhỏ hơn hạt nhân nguyên tử là các hạt sơ cấp (đôi khi còn gọi là hạt cơ bản).

Không thể coi hạt sơ cấp là hạt nhỏ nhất tạo nên vật chất. Bởi vì, như sẽ thấy dưới đây, một số hạt vẫn thường được coi là hạt sơ cấp, thì đến nay, các kết quả nghiên cứu lại cho thấy chúng được cấu tạo từ những hạt khác nhỏ hơn.

2. Các đặc trưng của hạt sơ cấp

Hạt sơ cấp có những đặc trưng chính sau đây :

- a) **Khối lượng (nghỉ) m_0** : Phôtôn có khối lượng nghỉ bằng không. Ngoài phôtôn, trong tự nhiên còn có thể có các hạt khác có khối lượng nghỉ gần bằng không, như hạt nơtrino, hạt gravitôn. Thay cho m_0 người ta còn thường dùng đại lượng đặc trưng là **năng lượng nghỉ** E_0 tính theo hệ thức Anh-xtanh $E_0 = m_0 c^2$. Chẳng hạn, electron có $m_0 = 9,1.10^{-31}$ kg và $E_0 = 0,511$ MeV ; prôtôn có $m_0 = 1,0726.10^{-27}$ kg và $E_0 = 938,3$ MeV.
- b) **Điện tích** : Hạt sơ cấp có thể có điện tích $Q = +1$ (Q tính theo đơn vị e , e là điện tích nguyên tố) hoặc $Q = -1$ hoặc $Q = 0$ (hạt trung hoà). Q được gọi là **số lượng tử điện tích**, biểu thị tính gián đoạn của độ lớn điện tích các hạt.
- c) **Spin s** : Spin là một đặc trưng lượng tử tương tự như momen động lượng. Chẳng hạn electron, prôtôn, nơtron có spin $s = \frac{1}{2}$ (tính theo $\hbar = \frac{h}{2\pi}$; h là hằng số Plăng), nhưng phôtôn có spin bằng 1, piôn có spin bằng 0.
- d) **Momen từ riêng** : Đó là một đặc trưng lượng tử về từ tính.
- e) **Thời gian sống trung bình T** : Trong số các hạt sơ cấp có một số rất ít hạt không phân rã thành các hạt khác, gọi là các **hạt bền**, như prôtôn, electron, phôtôn, nơtrino. Còn tất cả các hạt khác là các **hạt không bền** và phân rã thành các hạt khác. Trừ nơtron có thời gian sống dài, cỡ 932 s, còn các hạt không bền khác đều có thời gian sống rất ngắn, cỡ từ 10^{-24} s đến 10^{-6} s.

Ngoài ra, các hạt sơ cấp còn có các đặc trưng khác, biểu thị bằng các đại lượng, gọi là các "**số lượng tử**" (hay các "**tích**"), như số lạ S , số bariôn B , số leptôn L ,... Giống như điện tích Q , các đại lượng này (các "**tích**" này) cũng có giá trị gián đoạn và cũng được bảo toàn trong các quá trình phân rã, sinh nhiều hạt do va chạm...

- **Số lạ S** đặc trưng cho các hạt "lạ" như các hạt kaôn (K^+ , K^0 , K^-), lamda (Λ^0), xicma (Σ^+ , Σ^0 , Σ^-),... Các hạt "lạ" có đặc điểm là : chúng được sinh ra trong quá trình rất nhanh (khoảng 10^{-23} s) và phân rã trong quá trình chậm (khoảng 10^{-8} s). Hạt K^+ , K^0 có $S = 1$, còn hạt K^- , Λ^0 có $S = -1$,... Đối với các hạt khác, không phải hạt "lạ" như prôtôn, nơtron thì có $S = 0$.

Bảng 1

Các số lượng tử mới của một số hạt sơ cấp			
Hạt	S	B	L
Êlectron	0	0	1
Pôzitron	0	0	1
Kaôn K^+	+1	0	0
Kaôn K^-	-1	0	0
Prôtôn	0	1	0
Nơtron	0	1	0

- *Số bariôn B* đặc trưng cho các hạt có khối lượng lớn hơn hoặc bằng khối lượng prôtôn, chẳng hạn các hạt prôtôn, nơtron có $B = 1$. Còn các hạt có khối lượng nhỏ hơn, như êlectron, thì có $B = 0$.
- *Số leptôn L* đặc trưng cho hạt nhẹ, như êlectron, pôzitron, nơtrino,... Êlectron, nơtrino có $L = -1$. Các hạt có khối lượng lớn hơn như prôtôn, nơtron thì có $L = 0$.

Bảng 2
Đặc trưng một số hạt sơ cấp

Tên hạt	Năng lượng ϵ_0 (MeV)	Điện tích Q (e)	Spin s	Thời gian sống T
Phôtôn	0	0	1	bền
Êlectron	0,511	-1	1/2	bền
Pôzitron	0,511	+1	1/2	bền
Nơtrino ν	0	0	1/2	bền
Piôn π^+	139,6	+1	0	$2,6 \cdot 10^{-8}$ s
Kaôn K^0	497,7	0	0	$8,8 \cdot 10^{-11}$ s
Prôtôn	938,3	+1	1/2	bền
Nơtron	939,6	0	1/2	932 s
Xicma Σ^+	1189	+1	1/2	$8,0 \cdot 10^{-11}$ s
Ômêga Ω^+	1672	-1	3/2	$1,3 \cdot 10^{-10}$ s

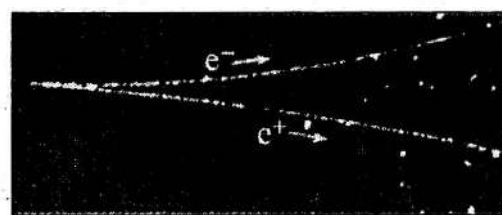
Như vậy, ngoài các định luật bảo toàn đã biết, các quá trình phân rã, tương tác của các hạt còn tuân theo các định luật bảo toàn mới : định luật bảo toàn số lạ, định luật bảo toàn số leptôn.

3. Phản hạt

- a) Phần lớn các hạt sơ cấp đều tạo thành cặp, mỗi cặp gồm hai hạt có khối lượng nghỉ m_0 và spin s như nhau, nhưng điện tích Q và các "tích" khác (S, B, L) bằng nhau về độ lớn và trái dấu. Chẳng hạn, êlectron và pôzitron có cùng khối lượng nghỉ bằng m_0 và spin bằng $\frac{1}{2}$, nhưng có điện tích tương ứng bằng +1 và -1, tạo thành một cặp. Hạt K^+ (có điện tích Q = +1 và số lạ S = +1) và hạt K^- (có điện tích Q = -1 và số lạ S = -1) tạo thành một cặp.

Trong mỗi cặp, có *một hạt* và *một phản hạt* của hạt đó. Chẳng hạn, pôzitron là phản hạt của electron, hạt K^- là phản hạt của K^+ . Phản hạt của prôtôn là phản prôtôn (antiprôtôn, kí hiệu $\bar{p}$) có $Q = -1$ và $B = -1$.

- b) Trong các quá trình tương tác của các hạt sơ cấp, có thể xảy ra hiện tượng *huỷ một cặp "hạt + phản hạt"* thành hạt khác, hoặc, cùng một lúc *sinh ra một cặp "hạt + phản hạt"*. Ví dụ như quá trình huỷ cặp hoặc sinh cặp : "electron + pôzitron".



Hình 24.1

Hình 24.1 là ảnh chụp vết đường đi trong từ trường của cặp electron – pôzitron được sinh ra do sự sinh cặp.

$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma; \quad \gamma + \gamma \rightarrow e^+ + e^- \quad (24.1)$$

4. Phân loại hạt sơ cấp

Người ta thường sắp xếp các hạt sơ cấp đã biết thành các loại sau (theo khối lượng nghĩ tăng dần) :

- Phôtôn** (lượng tử ánh sáng), có $m_0 = 0$.
- Lepton**, gồm các hạt nhẹ như electron, muyôn (μ^+ , μ^-), hạt tau (τ),...
- Mêzôn**, gồm các hạt có khối lượng trung bình trong khoảng $200 \div 900 m_e$, gồm hai nhóm : mêzôn π (π^+ , π^0 , π^-) và mêzôn K (K^+ , K^- , K^0).
- Barion**, gồm các hạt nặng có khối lượng bằng hoặc lớn hơn khối lượng prôtôn. Có hai nhóm barion là : *nuclôn* (p, n) và *hipêrôn* (Λ , Σ , Ξ). Năm 1964, người ta đã tìm ra một hipêrôn mới là hạt ômega trừ (Ω^-).

Tập hợp các mêzôn và các barion có tên chung là các *hadrôn*.

Cần chú ý thêm rằng, căn cứ vào đặc trưng spin người ta còn phân các hạt sơ cấp thành hai loại lớn là : *bôzôn* (gồm các hạt có spin bằng 0, 1,...) và *fermion* (gồm các hạt có spin bằng $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{2}$,...). Hai loại hạt này có những đặc tính khác biệt nhau.

5. Tương tác của các hạt sơ cấp

Các hạt sơ cấp tương tác với nhau như thế nào để tạo nên cấu trúc vật chất, tạo nên vũ trụ ? Có bốn loại tương tác cơ bản đối với các hạt sơ cấp :

- a) **Tương tác hấp dẫn.** Đó là tương tác giữa các hạt vật chất có khối lượng. Bán kính tác dụng của lực hấp dẫn lớn vô cùng, nhưng so với các tương tác khác thì cường độ của tương tác hấp dẫn là rất nhỏ.
- b) **Tương tác điện từ,** là tương tác giữa các hạt mang điện. Cơ chế tương tác điện từ là sự trao đổi photon giữa các hạt mang điện. Bán kính tác dụng của tương tác điện từ xem như lớn vô hạn. Cường độ tương tác điện từ lớn hơn tương tác hấp dẫn khoảng 10^{37} lần.
- c) **Tương tác yếu.** Đó là tương tác giữa các hạt trong phân rã β . Chẳng hạn phân rã β^- là do tương tác yếu giữa bốn hạt notron, prôtôn, electron và phản notrinô theo phương trình :



Tương tác yếu có bán kính tác dụng cỡ 10^{-18} m và cường độ nhỏ hơn tương tác điện từ 10^{12} lần.

- d) **Tương tác mạnh,** là tương tác giữa các hadrôn, như tương tác giữa các nuclôn trong hạt nhân, tạo nên *lực hạt nhân*, cũng như tương tác dẫn đến sự sinh hạt hadrôn trong các quá trình va chạm của các hadrôn. Tương tác mạnh có cường độ lớn hơn tương tác điện từ trên 100 lần và có bán kính tác dụng cỡ 10^{-15} m (tương đương kích thước hạt nhân).

6. Hạt quac (quark)

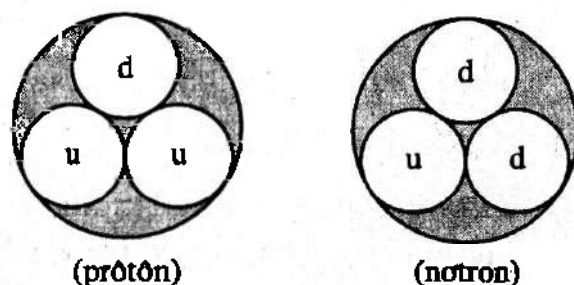
- a) Liệu các hạt sơ cấp có được cấu tạo bởi các hạt nhỏ hơn không ? Năm 1964, nhà vật lí học Ghen – Man (Murray Gell – Mann, người Mỹ) đã nêu ra giả thuyết : *Tất cả các hadrôn đều cấu tạo từ các hạt nhỏ hơn, gọi là quac* (tiếng anh : quark).
- b) Có 6 hạt quac (xem *Bảng 3*). Cùng với các quac có 6 *phản quac* với điện tích có dấu ngược lại. *Điều kì lạ là : điện tích của các hạt quac và phản bằng $\pm \frac{e}{3}, \pm \frac{2e}{3}$, ngược với các quan niệm trước đây cho rằng điện tích nguyên tố e là điện tích nhỏ nhất.* Các hạt quac đã được quan sát thấy trong

các thí nghiệm, nhưng đều ở trạng thái liên kết. Người ta chưa quan sát được hạt quac tự do.

Bảng 3
Một số đặc trưng của hạt quac

Kí hiệu	Khối lượng (m_e)	Điện tích (e)	S	B
u (up – lên)	10	+ 2/3	0	+1/3
d (down – xuống)	20	-1/3	0	+1/3
s (strange – lạ)	200	-1/3	1	+1/3
c (charm – duyên)	3000	+2/3	0	+1/3
b (bottom – đáy)	9000	-1/3	0	+1/3
t (top – đỉnh)	60000	+ 2/3	0	+1/3

- c) Các bariôn là tổ hợp của ba quac. Chẳng hạn, prôtôn được tạo nên từ 3 quac (u, u, d); nơtron được tạo nên từ 3 quac (u, d, d) (Hình 24.2). Các mezôn được tạo bởi một cặp quac – phản quac. Chẳng hạn, mezôn π^+ được tạo bởi quac u và phản quac $\bar{d}$.



Hình 24.2

- d) Một trong những thành công của giả thuyết về hạt quac là đã dự đoán được sự tồn tại của hạt ômega trừ (Ω^-) (s, s, s), mà sau đó đã tìm ra được bằng thực nghiệm với đầy đủ đặc trưng như dự đoán.

Chú ý : Những tính toán lí thuyết và sự kiện thực nghiệm đã chứng tỏ rằng, trong nhiều trường hợp, đặc biệt là ở giới hạn năng lượng rất cao, bốn tương tác cơ bản của các hạt sơ cấp có những thể hiện giống nhau. Vì vậy, về mặt lí thuyết, nhiều nhà vật lí cho rằng, có thể diễn tả bốn loại tương tác đó trong cùng một hệ hình thức luận. Điều đó có nghĩa là có thể thống nhất bốn loại tương tác trên với nhau. Lí thuyết thống nhất bốn tương tác này được gọi là *thuyết thống nhất vĩ đại* (Grand Unification Theory – GUT) hay thuyết về mô hình chuẩn. Theo thuyết này, mặc dù các tương tác có bản chất khác nhau nhưng bao giờ chúng cũng được thực hiện bằng cách trao đổi các hạt truyền tương tác (còn gọi là hạt trường hay hạt trung gian).

Các hạt truyền tương tác này đều là các bôzôn. Cụ thể là, prôtôn là hạt truyền tương tác của tương tác điện từ ; gluôn là hạt truyền tương tác của tương tác mạnh giữa các quac ; các hơzôn ($W^{\pm}$) và Z (đã phát hiện được bằng thực nghiệm) là hạt truyền tương tác của tương tác yếu ; gravitôn (chưa phát hiện được bằng thực nghiệm) là hạt truyền tương tác của tương tác hấp dẫn.

Cho đến nay, hầu hết các nhà vật lí đều thừa nhận sự tồn tại của hạt quac, và như vậy các hạt thực sự là sơ cấp (hiểu theo nghĩa là hạt không thể tách được thành các phần nhỏ hơn) chỉ gồm các quac, các leptôn và các hạt truyền tương tác.

Các nhà vật lí đã và đang xây dựng các lí thuyết khác nhau về hạt sơ cấp và đã thu được những kết quả mới ; các kết quả này đang được kiểm chứng nhờ các máy gia tốc lớn.



BÀI TẬP

24.1. Các hạt sơ cấp là

- A. phôtôn, leptôn, mēzôn và hadrôn.
- B. phôtôn, leptôn, mēzôn và barion.
- C. phôtôn, leptôn, barion và hadrôn.
- D. phôtôn, leptôn, nuclôn, hipêron.

24.2. Điện tích của mỗi quac, hay phản quac là một trong số các giá trị nào sau đây ?

- A. $\pm e$.
- B. $\pm \frac{e}{3}$.
- C. $\pm \frac{2e}{3}$.
- D. $\pm \frac{e}{3}$ và $\pm \frac{2e}{3}$.

24.3. Hạt K^0 đứng yên phân rã thành myon μ và phản myon $\bar{\mu}$. Khối lượng nghỉ của K^0 là $498 \text{ MeV}/c^2$ và của mỗi hạt μ là $106 \text{ MeV}/c^2$. Tính vận tốc của các hạt μ . Trong trường hợp này có dùng được công thức cổ điển hay không ?

1. Lương tính sóng – hạt của ánh sáng

Năm 1905, nhà bác học Anh-xtanh, người Đức, là người đầu tiên vận dụng giả thuyết về lượng tử năng lượng của Plăng để giải thích các định luật quang điện. Ông coi chùm sáng như một dòng hạt và gọi mỗi hạt là một photon, một photon ứng với một lượng tử năng lượng (Xem Bài 10, Chương II).

Như vậy, ánh sáng và bức xạ điện từ nói chung, có lương tính sóng – hạt. Trong các hiện tượng như giao thoa, nhiễu xạ thì ánh sáng biểu hiện như một sóng. Nhưng ta phải gán cho ánh sáng các tính chất hạt để giải thích một số quan sát thực nghiệm như hiện tượng quang điện, hiệu ứng Côm-ton (Xem Bài 12, Chương II). Cần nhận thức rõ ràng rằng, sự phân biệt giữa sóng và hạt chỉ ở trong chừng mực mà sóng và hạt cũng chỉ là hai dạng truyền năng lượng mà thôi. Hạt cổ điển là một đối tượng vật chất có vị trí, xung lượng, động năng, khối lượng và điện tích ; còn sóng lại có bước sóng, tần số, vận tốc, biên độ, cường độ, năng lượng. Sự khác nhau chủ yếu giữa sóng và hạt ở chỗ : một hạt có thể được định xứ trong không gian, còn sóng thì lại trải dài và lan rộng, do đó nó choán một khoảng không gian rộng lớn.

2. Thuyết Bo

Năm 1913, khi vận dụng giả thuyết lượng tử của Plăng để giải thích sự tạo thành quang phổ vạch của nguyên tử đơn giản nhất, là nguyên tử hiđrô, nhà vật lí Bo đã bổ sung vào mẫu nguyên tử của Rơ-dơ-pho (mẫu hành tinh) các giả thuyết gọi là *các tiên đề Bo*, trong đó, ngoài tiên đề về trạng thái dừng và tiên đề về sự bức xạ và hấp thụ năng lượng của nguyên tử đã trình bày ở Bài 13, Chương II, Bo còn nêu lên giả thuyết sau :

Trong trạng thái dừng, electron chuyển động trên các quỹ đạo tròn (gọi là quỹ đạo dừng) sao cho momen động lượng L của nó bằng một số nguyên lần hằng số Plăng rút gọn $\hbar$ ($\hbar = \frac{h}{2\pi}$) : $L = mvr = n\hbar$, với $n = 1, 2, 3, \dots$

Từ đó, ông đã tính được *bán kính của quỹ đạo dừng*, có biểu thức $r_n = n^2 \frac{\hbar^2}{kme^2} = n^2 r_0$, với $k = 9.10^9 \frac{Nm^2}{C^2}$; e và m tương ứng là điện tích và khối lượng electron; $r_0 = 5,3.10^{-11} m$ gọi là *bán kính Bo*.

Hơn nữa, ông cũng đã tìm được biểu thức của *năng lượng nguyên tử hiđrô* (bao gồm động năng của electron và thế năng tương tác giữa electron và hạt nhân):

$$E_n = -\frac{1}{n^2} \frac{k^2 me^4}{2\hbar^2} = -\frac{Rhc}{n^2} = -\frac{13,6}{n^2} \text{ (eV)} \quad (25.1)$$

c là tốc độ ánh sáng; $R = \frac{2\pi^2 mk^2 e^4}{ch^3}$ là một hằng số, gọi là *hằng số Ritbec* ($R = 1,09737.10^7 m^{-1}$). (Số dĩ năng lượng của nguyên tử hiđrô có giá trị âm là do quy ước chung về năng lượng của hai vật hút nhau).

Từ biểu thức của năng lượng nguyên tử hiđrô, đã tìm được *bước sóng λ của các vạch quang phổ nguyên tử hiđrô* phù hợp với thực nghiệm, tính theo công thức:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) \text{ với } m = n + 1, n + 2, \dots \quad (25.2)$$

Với $n = 1$; $m = 2, 3, \dots$ ta có dãy Lai-man.

Với $n = 2$; $m = 3, 4, \dots$ ta có dãy Ban-me.

Với $n = 3$; $m = 4, 5, \dots$ ta có dãy Pa-sen.

• *Tuy nhiên, mẫu nguyên tử Bo có những nhược điểm.*

Nhược điểm dễ thấy là mẫu này không nhất quán, vừa thừa nhận các tiên đề có tính chất lượng tử, vừa tiếp tục sử dụng cơ học cổ điển để tính toán các đại lượng. Mẫu này sử dụng tương tác Cu-lông của thuyết điện từ cổ điển nhưng lại bác bỏ quy luật bức xạ của thuyết này. Nhưng nghiêm trọng hơn là nó không giải thích được đầy đủ quang phổ của các nguyên tố có nhiều electron hơn. Để khắc phục các nhược điểm và hạn chế của mẫu nguyên tử Bo, cần xây dựng một thuyết vật lý mới, "cách mạng" hơn.

3. Giả thuyết Đơ Bơri

a) Giả thuyết Đơ Bơri

Thành công và hạn chế của mẫu nguyên tử Bo đã làm cho các nhà bác học cảm thấy rằng để giải thích thế giới vi mô cần xây dựng một lí thuyết mới, trong đó tính chất lượng tử của đối tượng vi mô được khai thác triệt để hơn, nhất quán hơn.

Một hướng đi tới lí thuyết mới là của nhà vật lí học Pháp Đơ Bơri (De Broglie, 1891 – 1987), ông chú ý đến tính chất đối xứng của vật chất. Vật chất có hai dạng là *chất* (các hạt) và *trường* (sóng). Ánh sáng mà trước đây ta cho là có bản chất sóng, đặc trưng bởi bước sóng λ hoặc tần số $f = \frac{c}{\lambda}$, thì nay ta biết rằng nó cũng có bản chất hạt (phôtôn). Phôtôn có năng lượng $E = hf$ (h là hằng số Plăng) và có xung lượng (động lượng) $p = \frac{E}{c} = \frac{h}{\lambda}$.

Nếu vậy thì các hạt vi mô (nguyên tử, hạt nhân, electron,...) cũng đồng thời phải có tính chất sóng. Nói cách khác, *vật chất nói chung có lưỡng tính sóng – hạt*.

Từ đó, Đơ Bơri nêu lên giả thuyết sau đây :

Một hạt (chất) tự do có động lượng $\vec{p}$ và năng lượng E luôn luôn gắn với một sóng phẳng có bước sóng : $\lambda = \frac{h}{p}$ (25.3) lan truyền theo hướng $\vec{p}$ và

có tần số $f = \frac{E}{h}$. (25.4)

Hệ thức (25.3) đã kết hợp bước sóng λ , đặc trưng của sóng, với động lượng p , đặc trưng của hạt. Sự kết hợp này được thực hiện nhờ hằng số Plăng là đặc trưng của thế giới vi mô.

Bước sóng λ xác định bởi (25.3) được gọi là *bước sóng Đơ Bơri*.

Các công thức (25.3) và (25.4) chính là các công thức về phôtôn nay được mở rộng cho hạt vi mô.

Chú ý : Sóng Đơ Bơri khác hẳn sóng điện từ. Sóng điện từ là thực thể từ vật lí, thể hiện bằng điện trường $\vec{E}$ và từ trường $\vec{B}$ có thể đo được bằng các dụng cụ đo lường vật lí. Còn bản chất của sóng Đơ Bơri thì sau nhiều năm

tranh luận đến nay vẫn chưa rõ. Các dụng cụ đo chỉ phát hiện được dụng hạt của electron nguyên vẹn, không phát hiện được gì về sóng của nó. Tuy vậy, sự tồn tại của sóng này đã được khẳng định bởi nhiều thí nghiệm.

Sự khác nhau giữa sóng điện từ và sóng Đơ Broi còn ở chỗ : Với sóng điện từ, ta có $\lambda f = c$, nên từ một đặc trưng sóng λ (hoặc f) ta suy ra cả hai đặc trưng của hạt photon là $E = hf$ và $p = \frac{h}{\lambda}$. Nhưng với hạt (tốc độ nhỏ hơn c),

nếu chỉ biết E thì suy ra được đặc trưng sóng $f = \frac{E}{h}$, nhưng chưa biết λ ;

còn nếu chỉ biết p thì suy ra được bước sóng $\lambda = \frac{h}{p}$, nhưng chưa biết f .

b) *Cỡ của bước sóng Đơ Broi*

Hạt nào cũng gắn với một sóng Đơ Broi, nhưng bước sóng các hạt khác nhau rất khác nhau.

- *Hạt vi mô.* Hằng số Plăng rất nhỏ ($h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ J.s) nhưng hạt vi mô có khối lượng cũng rất nhỏ, ví dụ khối lượng của electron là $m = 9,11 \cdot 10^{-31}$ kg. Nếu electron chuyển động với tốc độ cỡ 10^7 m/s thì bước sóng Đơ Broi của electron có cỡ $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \approx \frac{10^{-34}}{10^{-31} \cdot 10^7} = 10^{-10}$ m. Đây là cỡ bước sóng

của tia X, nghĩa là có thể phát hiện được. Tốc độ 10^7 m/s tuy rất lớn, nhưng là phổ biến với hạt vi mô.

- *Hạt vĩ mô.* Dù là hạt nhỏ nhất, ví dụ một hạt cát, nhưng cũng có khối lượng tương đối lớn, chẳng hạn, hạt cát có khối lượng $m = 10^{-6}$ kg. Hạt vĩ mô chỉ có thể có tốc độ nhỏ. Tốc độ bằng 10^3 m/s đã là tốc độ khó đạt được. Ngay cả với tốc độ này, bước sóng Đơ Broi của hạt cát cũng chỉ có cỡ :

$$\frac{h}{mv} \approx \frac{10^{-34}}{10^{-6} \cdot 10^3} = 10^{-31} \text{ m.}$$

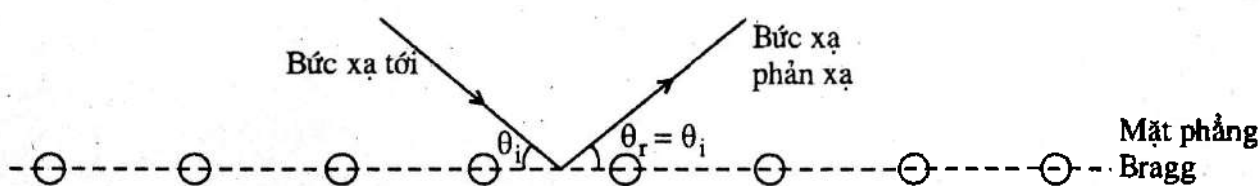
Bước sóng này quá nhỏ, không có dụng cụ nào có thể phát hiện được. Với các vật vĩ mô lớn hơn như viên đạn, ô tô... thì bước sóng Đơ Broi còn nhỏ hơn nữa. Như vậy, thực tế sóng Đơ Broi chỉ có ý nghĩa đối với hạt vi mô ; nói khác đi, sóng Đơ Broi gắn với vật vĩ mô là không tồn tại.

4. Kiểm chứng thực nghiệm giả thuyết Đơ Broi

a) Nhiều xạ tia X. Định luật Bra-gơ (Bragg)

Năm 1912, Lau-e đã nêu vấn đề có thể dùng các tinh thể (coi như gồm các nguyên tử sắp xếp đều đặn theo một trật tự nào đó) để làm cách tử nhiễu xạ đối với tia X. Bởi vì, các tia X là các bức xạ điện từ có bước sóng khoảng $1 \text{ \AA}$, vào cỡ khoảng cách giữa các nguyên tử trong tinh thể.

Năm 1913, Bra-gơ đã xây dựng được lí thuyết nhiễu xạ tia X (Xem Bài 3, Chương I). Ông đã chứng tỏ rằng, mỗi mặt phẳng nguyên tử trong tinh thể, gọi là mặt phẳng Bra-gơ, đều phản xạ bức xạ tới, giống hệt như một gương phẳng phản xạ ánh sáng (Hình 25.1).

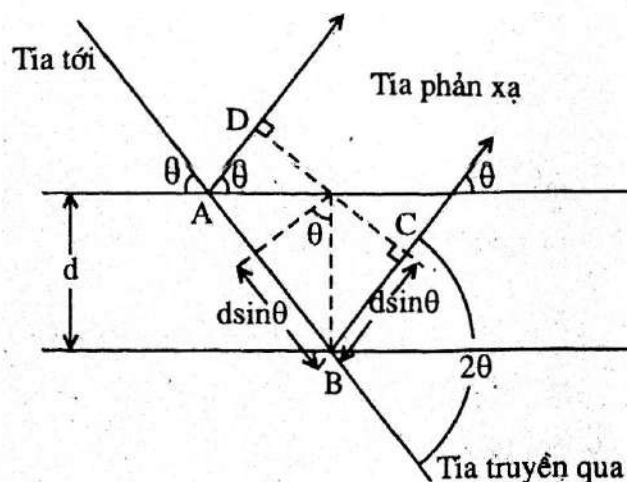


Hình 25.1

Nếu ta xét các tia phản xạ từ các mặt phẳng Bra-gơ song song và cách đều nhau một khoảng d (Hình 25.2) thì các tia phản xạ đó có thể cho cực đại giao thoa. Định luật Bra-gơ phát biểu như sau : Điều kiện để có cực đại giao thoa là hiệu đường đi $2d\sin\theta$ giữa hai tia kế tiếp nhau phải bằng một số nguyên lần bước sóng :

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (25.5)$$

Nếu biết n và d thì có thể xác định bước sóng của bức xạ tới bằng cách đo góc 2θ giữa các phương của tia tới và tia phản xạ.



Hình 25.2

Trong bất kì tinh thể nào, người ta đều có thể tạo nên nhiễu xạ tia X khác nhau bằng cách dùng nhiễu xạ khác nhau trên tinh thể. Vì vậy, mỗi nhiễu xạ có một khoảng cách riêng biệt. Nếu ta có một chùm tia X đi xuyên qua một vật liệu dạng bột hay lá mỏng gồm nhiều tinh thể định hướng hỗn loạn và đặt một phim ảnh ở phía sau, thì ta sẽ thấy một ảnh nhiễu xạ gồm các vòng tròn đồng

tâm. Mỗi vòng tròn tương ứng với một bậc nhiễu xạ, xác định bởi một họ mặt phẳng Bra-gơ riêng biệt. Thông thường ta chỉ xét nhiễu xạ do các mặt phẳng Bra-gơ chính gây ra (có khoảng cách bằng khoảng cách giữa các mặt mạng).

b) Thí nghiệm nhiễu xạ electron

Lần đầu tiên, năm 1927, ở phòng thí nghiệm Ben (Bell) thuộc Công ty điện thoại Hoa Kỳ, Davitxon và Giecme (C. J Davisson và L. H Germer) đã thực hiện thành công các thí nghiệm nhiễu xạ electron. Hai ông cho một chùm electron 54 eV đi qua một đơn tinh thể niken có khoảng cách giữa các mặt mạng 2,15 Å (đo được bằng nhiễu xạ tia X) và nghiên cứu sự phụ thuộc vào góc tán xạ của cường độ electron tán xạ. Nếu không có nhiễu xạ thì cường độ electron tán xạ phải giảm đơn điệu theo các góc tán xạ. Nhưng trái lại, vì có nhiễu xạ, nên Davitxon và Giecme quan sát thấy cường độ electron tán xạ có một đỉnh cực đại (pic) ở góc 50° . Bước sóng tính theo các kết quả trên phù hợp với giá trị của bước sóng Đơ Broi. Như vậy, kết quả này đã nghiệm đúng giả thuyết của Đơ Broi.

Năm 1927, Tôm-xơn (G.P. Thomson) nghiên cứu sự truyền electron qua một màng mỏng kim loại. Trong thí nghiệm này, nếu electron biểu hiện như các hạt, thì ta phải thấy một ảnh mờ do chùm electron ló gây ra. Nhưng thay vào đó, Tôm-xơn đã thu được một ảnh nhiễu xạ tròn mà ta chỉ có thể lí giải nếu coi electron biểu hiện như các sóng. Do đó, kết quả của thí nghiệm Tôm-xơn cũng lại nghiệm đúng giả thuyết của Đơ Broi.

Sau đó, việc nghiên cứu hiện tượng nhiễu xạ neutron năng lượng thấp (neutron nhiệt) lại một lần nữa khẳng định thêm tính đúng đắn của giả thiết Đơ Broi.



BÀI TẬP

- 25.1. Tìm bước sóng Đơ Broi kết hợp với một viên bi khối lượng 0,01 kg chuyển động với tốc độ 10 m/s.
- 25.2. Tính hiệu điện thế cần thiết làm tăng tốc electron để sóng kết hợp với nó có bước sóng 1 Å (vào cỡ khoảng cách giữa các nguyên tử trong một tinh thể).
- 25.3. Tính bước sóng Đơ Broi kết hợp với một neutron có năng lượng 0,05 eV (neutron nhiệt).
- 25.4. Tính động năng của một prôtôn có bước sóng Đơ Broi là 0,5 fm ($1 \text{ fm} = 10^{-5} \text{ Å} = 10^{-15} \text{ m}$). Biết năng lượng nghỉ của prôtôn là 938 MeV.

1. Ý nghĩa xác suất thông kê của sóng Đơ Bơri

Giả thuyết Đơ Bơri là khởi đầu cho một giai đoạn mới của Vật lí học. Những công trình của các nhà vật lí Sơ-rô-đin-gơ (Schrodinger), Pao-li (Pauli), Đê-rắc (Dirac),... đã dẫn tới việc xây dựng một môn cơ học mới gọi là *Cơ học sóng* hay *Cơ học lượng tử*.

Cơ học lượng tử là một bộ phận của lí thuyết lượng tử. Cơ học cổ điển (Cơ học Niu-ơn) chỉ đúng cho thế giới vĩ mô. Đối với thế giới vi mô (các đối tượng như phân tử, nguyên tử, hạt nhân, hạt sơ cấp,...), phải áp dụng các định luật của Cơ học lượng tử, trong đó hằng số Plăng đóng vai trò chủ yếu. Nhưng, nếu cho hằng số này tiến tới 0, thì các công thức của Cơ học lượng tử chuyển thành các công thức của Cơ học cổ điển. Như vậy *Cơ học cổ điển là trường hợp riêng của Cơ học lượng tử*.

Vấn đề đặt ra cho chúng ta bây giờ là tìm hiểu để biết "điều gì sẽ xảy ra" khi một hạt vật chất (như electron chẳng hạn) lại biểu hiện của tính chất sóng. Việc giải thích các tính chất sóng của hạt vật chất theo ý nghĩa xác suất thống kê thoát tiên có vẻ kì lạ. Nhưng thực ra, việc lí giải đó cho đến nay vẫn được công nhận là đúng, tuy vấn đề này còn gây tranh cãi. Mặc dù vậy, nhờ ý nghĩa xác suất thống kê đó mà người ta đã có thể giải thích được nhiều hiện tượng thực nghiệm, mà nếu không có nó thì không sao hiểu nổi.

a) Ý nghĩa xác suất thống kê của sóng ánh sáng

Giả sử có một hình ảnh giao thoa của ánh sáng (bức xạ điện từ) qua hai khe nằm sát nhau. Theo quan điểm sóng, thì cường độ sáng I (năng lượng trên đơn vị diện tích trong đơn vị thời gian) tại một điểm trên màn quan sát có dạng :

$$I = \epsilon_0 c E^2 \quad (26.1)$$

Trong đó, E là cường độ điện trường tại điểm đó, ϵ_0 là hằng số điện, còn c là tốc độ ánh sáng.

Mặt khác, theo quan điểm hạt, thì cường độ I là :

$$I = hf.N \quad (26.2)$$

Trong đó, hf là năng lượng của một photon và N là thông lượng photon (số photon tới một đơn vị diện tích trong đơn vị thời gian) tới điểm đó.

Ta không có cách nào để đoán trước được nơi mà một photon cho trước sẽ rơi vào để sinh ra một chớp sáng. Nếu ta xét hình ảnh giao thoa gồm các vân sáng, vân tối xen kẽ nhau thì mỗi photon sẽ có xác suất lớn để rơi vào chỗ vân sáng và có xác suất bằng không để rơi vào chỗ vân tối. Như vậy, ta có thể nói rằng thông lượng photon tới mỗi điểm trên màn hình cho ta số đo xác suất để tìm được một photon ở lân cận điểm đó.

$$\text{Vì } I = \epsilon_0 c E^2 = hfN \text{ nên suy ra : } N \sim E^2 \quad (26.3)$$

Theo quan điểm lượng tử, thì đại lượng dao động (ở đây là điện trường E) phải là một hàm mà bình phương của nó cho ta xác suất tìm thấy photon tại một điểm cho trước.

b) Ý nghĩa xác suất thống kê của sóng Đơ Broi. Hàm sóng

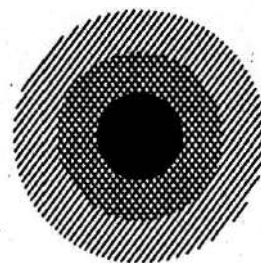
Hình ảnh giao thoa ánh sáng nói trên cũng có thể là hình ảnh giao thoa của sóng Đơ Broi. Khi đó, ý nghĩa xác suất thống kê dựa trên lưỡng tính sóng – hạt của ánh sáng được mở rộng cho lưỡng tính sóng – hạt của vật chất.

Tiếp tục nghiên cứu sóng Đơ Broi, các nhà bác học đã thấy rằng, có thể diễn tả nó bằng một hàm phức $\psi(x, y, z, t)$, gọi là *hàm sóng*. Hàm sóng này không trực tiếp có ý nghĩa vật lí, mà chỉ *bình phương môđun của nó, tức là đại lượng* $|\psi|^2 = \psi\psi^*$ (ψ^* là liên hợp phức của ψ), mới có ý nghĩa là đại lượng biểu thị xác suất X để thấy electron ở điểm x, y, z vào thời điểm t . (Nói chung hàm sóng ψ có biểu thức tương tự như biểu thức của sóng điện từ dưới dạng phức (xem công thức (18.3) Bài 18, với biên độ A phụ thuộc x, y, z, t)).

Có thể minh họa cụ thể điều này như sau.

Giả sử tại điểm M , $X = 0,5$ chẳng hạn. Điều đó có nghĩa là, nếu xét một số rất lớn trường hợp giống nhau thì khoảng $\frac{1}{2}$ trường hợp ta tìm thấy hạt ở điểm M .

Nghiên cứu hàm sóng của electron trong nguyên tử H, ta có thể vẽ quanh proton một hình như hình 26.1, có dạng đám mây bao gồm các điểm có $X \geq \frac{9}{10}$



Hình 26.1

(trên hình 26.1 chỗ sẫm hơn là chỗ có xác suất lớn hơn). Hình đó trong hoá học gọi là *orbitan* và có các dạng khác nhau tùy theo trạng thái của electron. Electron chủ yếu nằm trong orbitan đó. Nhưng cần nhớ rằng, vẫn có khả năng ($\approx \frac{1}{10}$ số trường hợp) electron không ở đó. Nếu gọi một cách hình ảnh orbitan là "đám mây electron", thì chú ý rằng, *ta không bao giờ phát hiện được một mẫu mây ấy mà chỉ phát hiện được electron toàn vẹn.*

2. Sự lượng tử hoá các đại lượng vật lí

Xuất phát từ khái niệm hàm sóng nêu trên các nhà vật lí đã xây dựng nên Cơ học lượng tử, mà kết quả của nó là đã dẫn một cách tự nhiên đến việc lượng tử hoá các đại lượng vật lí trong thế giới vi mô. Ta xét một số ví dụ.

- a) Trong mẫu nguyên tử Bo, sự lượng tử hoá của momen động lượng L của electron, (tức là L chỉ có những giá trị gián đoạn) là một tiên đề không giải thích được mà phải chấp nhận. Cụ thể là ta có : $L = n \frac{h}{2\pi} = n\hbar$, trong đó n

là một số nguyên dương $n = 1, 2, 3, \dots$, $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ gọi là hằng số Plăng rút gọn (Xem Bài 25).

Cơ học lượng tử giải thích sự lượng tử hoá này như sau :

Electron là sóng chuyển động quanh proton. Ở trạng thái ổn định, thì sóng này phải là *sóng dừng*, nghĩa là chiều dài của bán kính Bo, $2\pi r$, phải chứa một số nguyên lần bước sóng De Broie của electron :

$$2\pi r = n\lambda = n \frac{h}{mv}$$

Suy ra : $L = mvr = n \frac{h}{2\pi} = n\hbar$ (26.4)

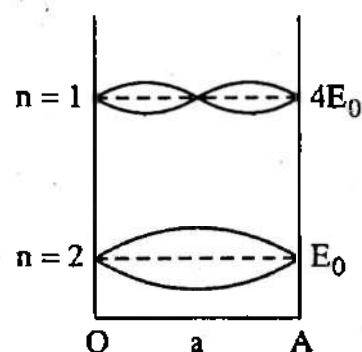
b) Một số ví dụ khác về sự lượng tử hoá năng lượng

Nếu một hạt tự do (có năng lượng $E = \text{const}$, và thế năng lấy bằng 0) chuyển động giới hạn trong phạm vi $OA = a$, thì ta nói rằng nó chuyển động trong một giếng thế có bề rộng a và thành cao vô cùng (Hình 26.2).

Theo Cơ học cổ điển thì năng lượng E của hạt có thể có bất kì giá trị nào và ta nói *năng lượng E có phổ liên tục.*

Theo Cơ học lượng tử thì khác. Hạt còn là sóng, sóng phản xạ lên hai thành giếng (Hình 26.2) và chỉ ổn định nếu là sóng dừng (tương tự như sóng trên dây đàn có hai đầu cố định là nút).

Điều kiện để có sóng dừng là : $a = n \frac{\lambda}{2}$, λ là bước sóng, n là số nguyên dương 1, 2,...



Hình 26.2

Thay $\lambda = \frac{h}{p}$ (vì $p = \sqrt{2mE}$) vào biểu thức

nói trên của a , ta có các giá trị khả dĩ của E :

$$E_n = n^2 \frac{h^2}{8ma^2}, \text{ hay } E_n = n^2 E_0, \text{ với } E_0 = \frac{h^2}{8ma^2} \quad (26.5)$$

Một lần nữa ta thấy *năng lượng bị lượng tử hoá*, n gọi là *lượng tử số chính*. Mức năng lượng thấp nhất là E_0 , chứ không phải là 0. Bước sóng bị lượng tử hoá theo công thức : $\lambda = \frac{1}{n} \lambda_0 = \frac{1}{n} 2a$.

Khoảng cách giữa hai mức liên kế là : $\Delta E = E_{n+1} - E_n = (2n + 1)E_0$

Suy ra tỉ số :
$$\frac{\Delta E}{E_n} = \frac{2n + 1}{n^2} \quad (26.6)$$

Với n rất lớn thì tỉ số này rất nhỏ, nghĩa là các mức năng lượng xít gần nhau, hầu như liên tục như trong Cơ học cổ điển. Suy rộng điều này, Bo đã phát biểu *nguyên lý tương ứng* : Với các giá trị rất lớn của lượng tử số, thì kết quả của Cơ học lượng tử tương ứng (phù hợp) với kết quả của Cơ học cổ điển.

3. Hệ thức bất định Hai-xen-béc (Heisenberg)

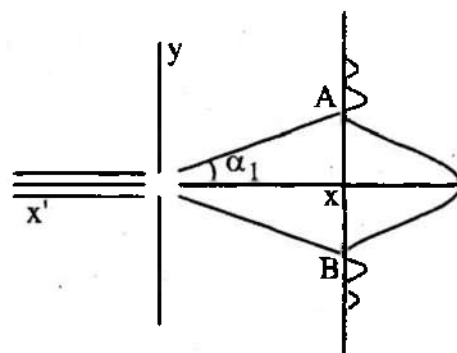
Trong Cơ học cổ điển, về nguyên tắc, bao giờ cũng có thể xác định chính xác đồng thời cả vị trí lẫn vận tốc (hoặc động lượng) của một hạt. Nếu độ chính xác chưa cao thì chỉ là do dụng cụ chưa hoàn hảo, nếu cải tiến dụng cụ thì sẽ nâng được độ chính xác.

Nhưng trong thế giới vi mô, *phép đo bao giờ cũng ảnh hưởng đến đối tượng vi mô*, làm biến đổi trạng thái của nó, nên phép đo có những bất định mà,

về nguyên tắc, không thể khử hết được. Người ta cố gắng tìm một giá trị gần đúng của những độ bất định ấy.

a) Hệ thức bất định liên hệ tọa độ và động lượng

Ta nhắc lại thí nghiệm về nhiễu xạ ánh sáng. Cho một chùm sáng song song đi qua một khe hẹp thì ánh sáng bị nhiễu xạ (Hình 26.3). Trên màn ta thấy phần lớn ánh sáng tập trung ở dải AB, nhưng khoảng 15% ánh sáng tạo thành các vân sáng ở hai bên. Dải sáng ở giữa được giới hạn bởi góc $2\alpha_1$,



Hình 26.3

với $\alpha_1 \approx \frac{\lambda}{a}$, λ là bước sóng ánh sáng và a

là bề rộng của khe.

Nếu thay chùm sáng bằng chùm electron, thì hình nhiễu xạ trên màn hình huỳnh quang giống hệt như hình nhiễu xạ ánh sáng. Điều này một lần nữa chứng tỏ electron cũng có tính sóng. Nhưng khi đập vào màn thì electron là hạt toàn vẹn.

Electron ban đầu đi theo hướng $x'x$. Sau khi đi qua khe, phương chuyển động của electron lệch với $x'x$ một góc nhỏ α . Điều đó có nghĩa là động lượng của nó có cả thành phần p_x và thành phần p_y , trong đó :

$$p_y = p \sin \alpha \approx p \alpha \quad (26.7)$$

Ở đây α và p_y có những giá trị khác nhau với các electron khác nhau, nói chúng có những độ bất định $\Delta \alpha$ và Δp_y . Lấy gần đúng giới hạn dưới của α là góc α_1 ứng với mép của dải sáng, ta có : $\Delta \alpha \approx \alpha_1$ ($\Delta \alpha$ tiến đến gần bằng α_1).

Suy ra : $\Delta \alpha \approx \frac{\lambda}{a}$, λ ở đây là bước sóng De Broglie của electron. Thay vào (26.7)

ta có : $\Delta p_y = p_y = p \Delta \alpha \approx p \frac{\lambda}{a}$. Thay $p = \frac{h}{\lambda}$ và nhận xét rằng bề rộng a của

khe chính là độ bất định Δy về tọa độ y , ta đi tới hệ thức liên hệ Δy và Δp_y :

$$\Delta y \cdot \Delta p_y \approx h \quad (26.8)$$

Với các tọa độ x và z ta có tương tự :

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \approx h \quad (26.9)$$

$$\Delta z \cdot \Delta p_z \approx h \quad (26.10)$$

Các hệ thức (26.8), (26.9), (26.10) gọi là *các hệ thức bất định Hai-xen-béc*, các hệ thức này có ý nghĩa rất lớn trong Cơ học lượng tử.

Cần nhấn mạnh rằng ta không đo được đồng thời y , p_y thật chính xác, không phải vì dụng cụ chưa đủ chính xác mà do bản chất vi mô của đối tượng. Cụ thể là, muốn đo y của electron chẳng hạn, thì ta phải cho electron đi qua khe bề rộng a . Nhưng động tác này lại làm cho p_y của electron thay đổi một cách bất định : a càng nhỏ (Δy càng nhỏ) thì góc α_1 lại càng lớn (Δp_y càng lớn):

Với đối tượng vĩ mô thì hệ thức Hai-xen-béc không có ảnh hưởng gì, vì hằng số Plăng có giá trị quá nhỏ so với kích thước vĩ mô.

b) Hệ thức bất định liên hệ năng lượng và thời gian

Cơ học lượng tử cũng đã thiết lập được một hệ thức bất định khác, *liên hệ năng lượng E của một trạng thái của hệ vi mô và thời gian tồn tại t của trạng thái ấy* :

$$\Delta E \cdot \Delta t \approx h \quad (26.11)$$

Theo hệ thức này, chỉ có trạng thái cơ bản có thể tồn tại rất lâu ($\Delta t \rightarrow \infty$) mới có năng lượng xác định. Còn với các trạng thái kích thích, vì chúng chỉ tồn tại một thời gian τ hữu hạn, nên nếu lấy $\Delta t \approx \tau$, ta có : $\Delta E \approx \frac{h}{\tau}$. Điều

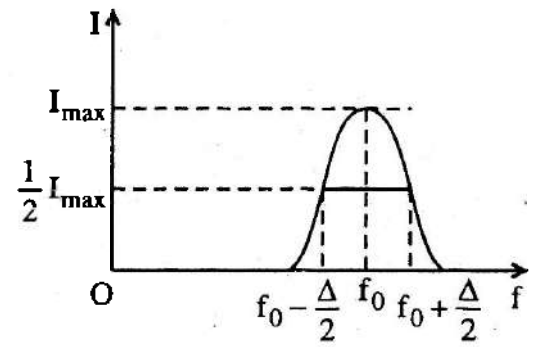
này giúp chúng ta giải thích bề rộng tự nhiên của các vạch quang phổ. Thật vậy ta đã biết *vạch quang phổ* thể hiện sự chuyển của hệ vi mô giữa hai mức năng lượng, mà theo tiên đề Bo ta có : $W = E_2 - E_1 = hf$.

Vì cả E_2 , E_1 đều có độ bất định ΔE_2 , ΔE_1 nên W có độ bất định $\Delta W = \Delta E_2 + \Delta E_1 > \frac{h}{\tau}$. Từ đó dẫn đến độ bất định về tần số $f = \frac{W}{h}$, cụ thể là ta có :

$$\Delta f = \frac{\Delta W}{h} > \frac{1}{\tau} \quad (26.12)$$

Vì lẽ đó các vạch quang phổ đều có bề rộng, gọi là *bề rộng tự nhiên*. Bề rộng này thường rất hẹp. Ví dụ : với nguyên tử H, $\tau = 10^{-8}$ s, ta có $\Delta f \approx 10^8$ Hz, trị số này rất nhỏ so với tần số các vạch quang phổ, có cỡ 10^{15} Hz. Nhưng còn nhiều nguyên nhân khác làm cho vạch quang phổ có bề rộng đáng kể (chẳng hạn hiệu ứng Đốp-ple, xem *Bài 18*).

Thực tế, cường độ sáng của một vạch quang phổ biến thiên theo tần số như trong hình 26.4. Cực đại $I_{\max}$ ứng với tần số f_0 . Người ta quy ước lấy bề rộng của vạch quang phổ là khoảng tần số Δ ứng với $\frac{1}{2}I_{\max}$ và thay thế điều kiện về tần số nêu trên :



Hình 26.4

$$hf = E_2 - E_1 \quad (26.13)$$

$$\text{bằng một điều kiện thoáng hơn : } f_0 - \frac{\Delta}{2} < f < f_0 + \frac{\Delta}{2} \quad (26.14)$$

với f_0 thỏa mãn (26.13).

c) *Chú ý*

Hệ thức bất định còn cho phép ta tính gần đúng một số đại lượng. Chẳng hạn, nếu coi độ bất định về vị trí Δx của electron trong nguyên tử là khoảng biến thiên của vị trí ấy, thì có thể lấy $\Delta x = a$, với a là đường kính của nguyên tử. Tương tự, có thể lấy $\Delta p_x \approx p_x$. Áp dụng hệ thức bất định ta có :

$$p_x a = h \quad (26.15)$$

Như vậy, biết một trong hai đại lượng p_x hoặc a có thể tính được gần đúng đại lượng kia.

4. Nguyên tử hiđrô theo Cơ học lượng tử

Cơ học lượng tử đã thành công trong việc giải thích cấu trúc của các nguyên tử. Áp dụng cho nguyên tử hiđrô nó đã dẫn một cách tự nhiên đến sự lượng tử hoá nhiều đại lượng vật lí, và năng lượng nói riêng của nguyên tử hiđrô.

a) *Lượng tử hoá năng lượng và momen động lượng*

Các phép tính cơ học lượng tử cho ta biểu thức sau đây của *năng lượng của nguyên tử hiđrô*

$$E_n = - \frac{k^2 m e^4}{2n^2 \hbar^2} \quad (26.16)$$

với n gọi là *lượng tử số chính* ($n = 1, 2, \dots$), và biểu thức của momen động lượng của electron trong nguyên tử :

$$L = \sqrt{l(l+1)}\hbar \quad (26.17)$$

với l gọi là *lượng tử số quỹ đạo*.

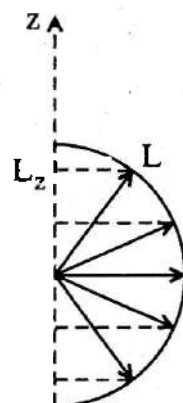
Theo Cơ học lượng tử, với một giá trị của n , thì l có n giá trị khả dĩ là :

$$l = 0, 1, 2, 3, \dots, n - 1 \quad (26.18)$$

Có thể có trường hợp $n = 1, l = 0$, nghĩa là momen quỹ đạo bằng 0. Điều này không thể hiểu nổi nếu coi electron chỉ là một hạt quay quanh hạt nhân.

Như vậy, với quan điểm của Cơ học lượng tử, ta cũng lại tìm được biểu của năng lượng E_n của nguyên tử hiđrô của thuyết Bo (công thức (25.1)), từ đó giải thích được quang phổ của nguyên tử hiđrô là phù hợp với thực nghiệm.

Theo Cơ học lượng tử nếu đặt nguyên tử trong một từ trường có phương z thì momen động lượng $\vec{L}$ của nó bị lượng tử hoá không gian, tức là vectơ $\vec{L}$ có những hướng khác nhau. Hình 26.5 minh hoạ trường hợp $n = 2$. Hơn nữa hình chiếu của momen động lượng của electron xuống phương z cũng bị lượng tử hoá, cụ thể là :



Hình 26.5

$$L_z = m \hbar \quad (26.19)$$

với m là một số nguyên dương hoặc âm, gọi là *lượng tử số từ*. Với một giá trị của l , thì m có $2l + 1$ giá trị : $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$. Điều này giúp ta giải thích được hiện tượng tách vạch quang phổ hiđrô thành nhiều vạch sát nhau khi đặt nguyên tử hiđrô bức xạ trong từ trường (*hiệu ứng Zeeman*) (vì vậy m được gọi là lượng tử số từ).

b) Spin

Nhờ các máy quang phổ tinh vi người ta đã phát hiện thấy rằng, phần lớn các vạch quang phổ đều là vạch kép, ví dụ vạch vàng D của natri thực ra gồm hai vạch có bước sóng rất gần nhau 589,0 nm và 589,6 nm.

Người ta đã giải thích điều đó bằng cách cho rằng, electron không chỉ có chuyển động trên quỹ đạo quanh hạt nhân (chính vì vậy, lượng tử số momen động lượng l mới gọi tắt là lượng tử số quỹ đạo), mà electron còn có chuyển động tự quay (tiếng Anh là *spin*). Do đó, electron còn có momen động lượng tự quay S , cũng bị lượng tử hoá, nhưng hình chiếu S_z của nó xuống phương của từ trường chỉ có hai hướng, cùng chiều hoặc ngược chiều :

$$S_z = s \hbar \quad (26.20)$$

với s , gọi là *lượng tử số spin* chỉ có hai giá trị bán nguyên là :

$$s = \pm \frac{1}{2} \quad (26.21)$$

ứng với hai hướng spin ngược chiều nhau.

Giả thiết về spin đã được thí nghiệm Stéc – Ghéc-lắc khẳng định. Chú ý rằng, khi nói "electron chuyển động trên quỹ đạo hay chuyển động tự quay", thì đó chỉ là cách nói có hình ảnh, vì ta đã biết rằng electron không chỉ là hạt.

Về sau, các kết quả nghiên cứu đã cho thấy *tất cả các hạt sơ cấp đều có spin*. Electron, prôtôn, notron,... có spin bán nguyên gọi là *fermion* (vì chúng tuân theo thống kê Féc-mi – Dirac và nguyên lí loại trừ nói dưới đây). Một số hạt khác có spin nguyên (như photon có $s = 1$, mēzôn có $s = 1 ; 0$) gọi là *bôzôn* (vì chúng tuân theo thống kê Bô-zơ – Anh-xtanh).

Chú ý : Cùng với spin, electron và các hạt sơ cấp nói chung còn có momen từ riêng (còn gọi là momen từ spin).

c) Nguyên lí loại trừ Pao-li

Như vậy trạng thái của electron trong nguyên tử được đặc trưng bởi 4 lượng tử số : n, l, m, s .

Để giải thích cấu trúc các nguyên tử có nhiều electron, năm 1925, nhà vật lí Thụy Sĩ Pao-li (Pauli 1900 – 1958) đã nêu lên *nguyên lí loại trừ đối với các electron* :

Trong một nguyên tử, không thể có hai electron ở trong cùng một trạng thái, nghĩa là không thể có hai electron có bốn lượng tử số giống nhau. Ví dụ, nếu hai electron trong cùng một trạng thái đã có n, l, m giống nhau thì chúng phải có spin ngược chiều nhau.

Nguyên lí loại trừ Pao-li đã góp phần giải thích tính chất tuần hoàn và sự giống nhau về hoá học của các nguyên tố trong một họ (họ kiềm, họ kiềm thổ, họ halogen, họ khí trơ,...), từ đó đã góp phần giải thích được sự sắp xếp các nguyên tố trong Bảng tuần hoàn Men-đê-lê-ép.



BÀI TẬP

- 26.1. Giả sử ta có thể đo được xung lượng của một hạt với độ chính xác đến phần nghìn. Xác định độ bất định cực tiểu về vị trí hạt :
 - a) nếu hạt có khối lượng 5 mg và tốc độ 2 m/s.
 - b) hạt là electron có tốc độ $1,8 \cdot 10^8$ m/s.
- 26.2. Xác định độ bất định cực tiểu về vị trí của một photon 3000 Å nếu biết bước sóng chính xác đến phần triệu.
- 26.3. Xác định độ bất định cực tiểu về năng lượng của một nguyên tử khi một electron ở trạng thái đó trong 10^{-8} s.

Chương VI

SƠ LƯỢC VỀ THIÊN VĂN VẬT LÝ

27 SAO. THIÊN HÀ

Ngắm nhìn bầu trời ban đêm với dải Ngân Hà mờ ảo, những ngôi sao lấp lánh, ta có thể đặt ra biết bao câu hỏi : "Các sao có gì khác biệt nhau ?", "Liệu quanh mỗi sao có các hành tinh chuyển động ?", "Dải Ngân Hà mờ ảo có bao nhiêu sao ?".

1. Sao

Sao là một khối khí nóng sáng, giống Mặt Trời. Vì các sao ở xa nên ta thấy chúng như những điểm sáng. Ngôi sao gần nhất (sao Cự Tinh trong chòm Bán Nhân Mã) cũng đã cách ta đến hàng chục tỉ kilômét. Còn ngôi sao ở xa nhất hiện nay đã biết được cách xa ta đến 14 tỉ năm ánh sáng. (Năm ánh sáng là một đơn vị đo khoảng cách trong thiên văn. Nó bằng quãng đường mà ánh sáng truyền đi được trong một năm – 1 năm ánh sáng $\approx 9,46 \cdot 10^{12}$ km). Xung quanh một số sao còn có các hành tinh chuyển động, giống như hệ Mặt Trời. Khối lượng của các sao có giá trị nằm trong khoảng từ 0,1 lần khối lượng Mặt Trời đến vài chục lần (đa số khoảng 5 lần) khối lượng Mặt Trời. Bán kính của các sao có giá trị nằm trong một khoảng rất rộng, từ khoảng một phần nghìn bán kính Mặt Trời (ở sao Trắc) đến gấp hàng nghìn lần bán kính Mặt Trời (ở sao Kênh).



Hình 271.
Thiên hà NGC2997

2. Các loại sao

- a) Đa số các sao tồn tại trong trạng thái ổn định, có kích thước, nhiệt độ,... không đổi trong một thời gian dài. Mặt Trời là một trong số các sao này.

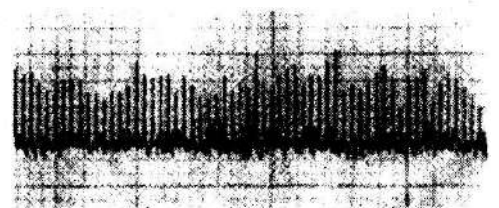
Ta thấy các sao sáng khác nhau. Độ sáng mà ta nhìn thấy của một ngôi sao thực chất là độ rọi sáng lên con người của mắt ta, phụ thuộc vào khoảng cách và độ sáng thực của mỗi sao. Độ sáng thực của mỗi sao lại phụ thuộc vào công suất bức xạ của nó.

Độ sáng của các sao rất khác nhau. Sao Thiên Lang (sao nhìn thấy sáng nhất trên bầu trời) có công suất bức xạ lớn hơn của Mặt Trời trên 25 lần. Sao kém sáng nhất có công suất bức xạ nhỏ hơn của Mặt Trời hàng vạn lần.

- b) Ngoài ra, người ta đã phát hiện thấy có một số sao đặc biệt.

- Sao biến quang là sao có độ sáng thay đổi. Có hai loại :
 - Sao biến quang do che khuất là một hệ sao đôi (gồm sao chính và sao vệ tinh), mỗi sao có độ sáng không đổi, nhưng do sao vệ tinh chuyển động quanh sao chính, nên khi quan sát trong mặt phẳng chuyển động của sao vệ tinh, thì lần lượt sao vệ tinh che khuất sao chính hoặc bị khuất sau sao chính. Vì vậy, độ sáng tổng hợp mà ta thu được sẽ biến thiên có chu kì.
 - Sao biến quang do nén dãn có độ sáng thay đổi thực sự theo một chu kì xác định.
- Sao mới là sao có độ sáng tăng đột ngột lên hàng ngàn, hàng vạn lần, hoặc hàng triệu lần (sao siêu mới), sau đó từ từ giảm. Lí thuyết cho rằng sao mới, sao siêu mới là một pha đột biến trong quá trình tiến hoá của một hệ sao.
- Punxa, sao nơtron là sao bức xạ năng lượng dưới dạng những xung sóng điện từ rất mạnh (Hình 27.2).

Sao nơtron được cấu tạo bởi các hạt nơtron với mật độ cực kì lớn (10^{14} g/cm³). Nguồn gốc hình thành sao nơtron là như sau : Các sao có khối lượng (bằng khoảng 10 lần khối lượng Mặt Trời, thường chỉ "sống" được độ 100 triệu năm, rồi nổ tung thành "sao siêu mới". Sau đó trong lõi sao chỉ còn toàn là các hạt nơtron với mật độ cực lớn.



Hình 27.2
Xung sóng điện từ ghi được
từ punxa 0329 + 54,
thu ngày 22/6/1993

Punxa (pulsar) là lõi sao neutron (với bán kính 10 km) tự quay với tốc độ có thể tới 640 vòng/s và phát ra sóng điện từ mạnh. Bức xạ thu được trên Trái Đất có dạng từng xung sóng giống như ánh sáng của một ngọn hải đăng mà tàu biển nhận được.

- c) Ngoài ra, trong hệ thống các thiên thể trong vũ trụ còn có *lỗ đen* và *tinh vân*.

Lỗ đen là một thiên thể được tiên đoán bởi lý thuyết, cũng được cấu tạo bởi các neutron, có trường hấp dẫn lớn đến nỗi thu hút mọi vật thể, kể cả ánh sáng. Vì vậy, thiên thể này tối đen, không phát ra bất kỳ sóng điện từ nào. Người ta chỉ phát hiện được một lỗ đen nhờ tia X phát ra, khi lỗ đen đó hút một thiên thể gần đó.

Tinh vân là những "đám mây sáng". Đó là các đám bụi khổng lồ được rọi sáng bởi các ngôi sao ở gần đó, hoặc là các đám khí bị ion hoá được phóng ra từ một ngôi sao mới hay sao siêu mới.

3. Khái quát về sự tiến hoá của các sao

Tất cả các sao đều có lịch sử hình thành và phát triển của chúng.

Các kết quả nghiên cứu thiên văn cho biết các sao được cấu tạo từ một đám "mây" khí và bụi. Đám mây này vừa quay vừa co lại do tác dụng của lực hấp dẫn và sau vài chục nghìn năm, vật chất dần dần tập trung ở giữa, tạo thành một *tinh vân* dày đặc và dẹt như một cái bánh dày. Ở trung tâm tinh vân, nơi mật độ cao nhất, một ngôi sao nguyên thủy được tạo thành. Vì mới "ra đời", sao chưa nóng nên chỉ phát ra bức xạ ở miền hồng ngoại. Sao tiếp tục co lại và nóng dần (trong lòng sao bắt đầu xảy ra phản ứng nhiệt hạch), trở thành một ngôi sao sáng tỏ. Trong trường hợp sao là Mặt Trời thì vật chất ở phía ngoài đám bụi khí ngưng tụ và đọng lại thành một vòng đai, nơi những hành tinh sẽ được tạo ra và quay xung quanh Mặt Trời. Trong "thời gian tồn tại" của sao, các phản ứng nhiệt hạch xảy ra trong lòng ngôi sao làm tiêu hao dần hiđrô có trong sao, tạo thành heli và các nguyên tố (cacbon, ôxi, sắt,...).

Nhiệt độ bề mặt T_s của các sao rất khác nhau do cường độ phản ứng nhiệt hạch ở mỗi sao một khác. Sao "nóng" nhất có $T_s = 50000\text{ K}$, sao này có màu xanh lam khi ta nhìn từ Trái Đất. Sao "nguội" nhất có $T_s = 3000\text{ K}$, có màu đỏ. Mặt Trời có $T_s = 6000\text{ K}$, có màu vàng.

Khi "nhiên liệu" trong sao cạn kiệt, sao biến thành các thiên thể khác. Lý thuyết cho thấy các sao có khối lượng cỡ Mặt Trời có thể "sống" tới

10 tỉ năm, sau đó biến thành sao trắ trắng (hay sao lùn), là sao có bán kính chỉ bằng một phần trăm hay một phần nghìn lần bán kính Mặt Trời nhưng lại có nhiệt độ bề mặt tới 50000 K. Còn các sao có khối lượng lớn hơn Mặt Trời (từ năm lần trở lên) thì chỉ "sống" được khoảng 100 triệu năm, nhiệt độ của sao giảm dần và sao trở thành sao kênh đỏ, sau đó sao tiếp tục biến hoá và trở thành một sao notron (punxa), hoặc một lỗ đen.

4. Thiên hà

Các sao tồn tại trong vũ trụ thành những hệ thống tương đối độc lập với nhau. Hệ thống sao gồm nhiều loại sao và tinh vân gọi là *thiên hà*.

a) Các loại thiên hà

Qua các kính thiên văn, các thiên hà hiện ra dưới nhiều dạng. Tuy nhiên, về đại thể có ba loại thiên hà chính :

- Thiên hà có hình dạng dẹt như cái đĩa có những cánh tay xoắn ốc, chứa nhiều khí, gọi là *thiên hà xoắn ốc*.
- Thiên hà hình elip, chứa ít khí và có khối lượng trải ra trên *một dải rộng*, gọi là *thiên hà elip*. Có một loại thiên hà elip lớn là nguồn phát sóng vô tuyến điện rất mạnh.
- Thiên hà không có hình dạng, trông như những đám mây, gọi là *thiên hà không định hình* (hay *thiên hà không đều*), ví dụ hai thiên hà Ma-gien-lăng.

Đường kính của các thiên hà vào khoảng 100 000 năm ánh sáng.

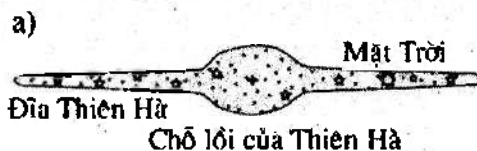
Toàn bộ các sao trong mỗi thiên hà đều quay xung quanh trung tâm thiên hà.

b) Thiên Hà của chúng ta. Ngân Hà

- Thiên Hà của chúng ta (*Thiên Hà viết hoa*) là loại thiên hà xoắn ốc, có đường kính khoảng 100 nghìn năm ánh sáng và có khối lượng bằng khoảng 150 tỉ lần khối lượng Mặt Trời. Nó là một hệ phẳng giống như một cái đĩa, dày khoảng 330 năm ánh sáng, chứa vài trăm tỉ ngôi sao (xem Hình 27.4a, b).



Hình 27.3
Thiên hà NGC5102



Hình 27.4

Ảnh Thiên Hà của chúng ta (a) và mô hình phác họa Thiên Hà của chúng ta (nhìn ngang) (b).

Hệ Mặt Trời nằm trong một cánh tay xoắn ở rìa Thiên Hà, cách trung tâm trên 30 nghìn năm ánh sáng và quay quanh tâm Thiên Hà với tốc độ khoảng 250 km/s. Giữa các sao có bụi và khí. Phần trung tâm Thiên Hà có dạng một hình cầu dẹt, gọi là vùng lõi trung tâm (đầy khoảng 15 000 năm ánh sáng), được tạo bởi các sao "già", khí và bụi. Ngay ở trung tâm Thiên Hà có một nguồn phát xạ hồng ngoại và cũng là nguồn phát xạ sóng vô tuyến điện ; nguồn này phát ra năng lượng tương đương với độ sáng của chừng 20 triệu ngôi sao như Mặt Trời và phóng ra một luồng gió mạnh.

- Từ Trái Đất, chúng ta chỉ nhìn được hình chiếu của Thiên Hà trên vòm trời, như một dải sáng trải ra trên bầu trời đêm, thường được gọi là *dải Ngân Hà*. Mặt phẳng trung tâm của dải Ngân Hà trở nên tối do một làn bụi dài. Vào đầu đêm mùa hè, ta thấy dải Ngân Hà nằm trên nền trời sao theo hướng Đông Bắc – Tây Nam.

c) *Nhóm thiên hà. Siêu nhóm thiên hà*

- Vũ trụ có hàng trăm tỉ thiên hà, các thiên hà thường cách nhau khoảng mười lần kích thước của chúng. Các thiên hà có xu hướng hợp lại với nhau thành *nhóm thiên hà* (hay *đám thiên hà*) gồm từ vài chục đến hàng vài nghìn thiên hà. Thiên Hà của chúng ta và các thiên hà lân cận khác thuộc về *Nhóm thiên hà địa phương*, gồm khoảng 20 thành viên, chiếm một thể tích không gian có đường kính gần một triệu năm ánh sáng. Nhóm này bị chi phối chủ yếu bởi ba thiên hà xoắn ốc lớn. Một là thiên hà Tiên Nữ (còn gọi là Tinh vân Tiên Nữ, kí hiệu M31 hay NGC224), là thành viên có khối lượng tương đương với khối lượng của Thiên Hà của chúng ta (bằng khoảng 200 tỉ lần khối lượng Mặt Trời) (xem Hình 27.5).



Hình 27.5
Nhóm thiên hà địa phương.

Hai là, Thiên Hà của chúng ta. Ba là Thiên hà Tam giác, kí hiệu M33. Các thành viên còn lại của Nhóm là các thiên hà elip và các thiên hà không định hình *tí hon* với khối lượng nhỏ hơn nhiều. Một số thiên hà của nhóm địa phương đã được phát hiện nhờ sự phát bức xạ vô tuyến của chúng.

- Khoảng năm chục nhóm nhỏ các thiên hà đã được phát hiện ở xung quanh Nhóm thiên hà địa phương. Ở xa hơn, ở khoảng cách cỡ 50 triệu năm ánh sáng, là Nhóm Trinh Nữ (Virgo) chứa hàng nghìn thiên hà trải rộng trên bầu trời trong chòm sao Trinh Nữ. Các nhóm thiên hà lại tập hợp thành *Siêu nhóm thiên hà* hay *Đại thiên hà*. Chẳng hạn *Siêu nhóm thiên hà địa phương* có tâm nằm ở Nhóm Trinh Nữ và chứa tất cả các nhóm bao quanh, trong đó có Nhóm thiên hà địa phương của chúng ta (Hình 27.6).



Hình 27.6
Nhóm Trinh Nữ nằm
ở trung tâm của Siêu nhóm
thiên hà địa phương.

- Một thiên hà có thể va chạm với thiên hà láng giềng trong nhóm thiên hà. Đặc biệt là ở trong các nhóm thiên hà khoảng cách giữa các thiên hà nhỏ nên xác suất tương tác giữa các thiên hà khá lớn. Có thuyết cho rằng, các thiên hà elip được tạo ra do sự va chạm giữa hai thiên hà xoắn ốc trong nhóm thiên hà. Sau khi va chạm, khí trong thiên hà bị thoát ra ngoài nên thiên hà elip ít chứa khí.

Việc tìm hiểu sự hình thành của thiên hà vẫn đang là một vấn đề nghiên cứu có tính thời sự. Nhiều giả thuyết cho rằng, trong vũ trụ nguyên thủy không đồng đều có hình thành những đám mây vật chất nguyên thủy có khối lượng bằng vài trăm triệu lần khối lượng Mặt Trời, đó là các thiên hà *tí hon*, là mầm mống của những thiên hà sau này. Cả hệ thiên hà quay xung quanh trục thẳng góc với mặt phẳng thiên hà.

Có nhiều bằng chứng cho thấy, trong vũ trụ còn có nhiều loại vật chất không phát bức xạ và không quan sát thấy, gọi là "*vật chất tối*". Có lí thuyết cho rằng, trên 90% khối lượng của vũ trụ là "*vật chất tối*" không phát hiện được.

Một trong những thành phần nhỏ của "vật chất tối" có thể là những "sao lùn nâu". Đó là loại thiên thể ở trong trạng thái nửa hành tinh, có khối lượng bằng một phần nghìn khối lượng Mặt Trời, nhưng có kích thước bằng Mộc tinh. Vì khối lượng sao quá nhỏ nên trong sao lùn nâu không xảy ra được phản ứng nhiệt hạch, và sao chỉ phát một ít bức xạ vùng hồng ngoại.

Một số nhà thiên văn khác lại cho rằng những đám khí rất lạnh, ở nhiệt độ 3 K, trong đó chủ yếu chỉ có phân tử hiđrô, cũng có thể là những "vật chất tối" trong vòng cầu bao quanh các thiên hà. Đây cũng là một phần rất nhỏ của vật "vật chất tối".

Quaza (quasar, chuẩn sao), được phát hiện vào những năm 1960, là một loại thiên thể ở xa bên ngoài Thiên Hà của chúng ta, có hình ảnh không trải rộng ra như hình ảnh của một thiên hà mà có dạng gần tròn, làm ta liên tưởng tới các ngôi sao thông thường trong dải Ngân Hà. Mặc dù các quaza hiện ra như những vật thể rất mờ trên bầu trời, nhưng thực tế, chúng sáng gấp hàng ngàn lần các thiên hà sáng và thuộc vào loại những thiên thể sáng nhất trong vũ trụ. Các quaza là những nguồn phát xạ tia X và sóng vô tuyến điện rất mạnh. Điều khá kì lạ là công suất phát xạ của các quaza lớn đến mức mà người ta cho rằng các phản ứng nhiệt hạch không đủ để cung cấp năng lượng trong quá trình phát xạ này. Ở khoảng cách càng xa Thiên Hà của chúng ta thì mật độ quaza càng lớn. Sự kiện này được dùng làm cơ sở thực hiện cho thuyết Big Bang.



BÀI TẬP

27.1. Mặt Trời thuộc loại nào sau đây ?

- A. Sao trắng
- B. Sao neutron.
- C. Sao khổng lồ (hay sao kênh đỏ).
- D. Sao trung bình giữa sao trắng và sao khổng lồ.

27.2. Đường kính của một thiên hà vào cỡ

- A. 10 000 năm ánh sáng.
- B. 100 000 năm ánh sáng.
- C. 1000 000 năm ánh sáng.
- D. 10 000 000 năm ánh sáng.

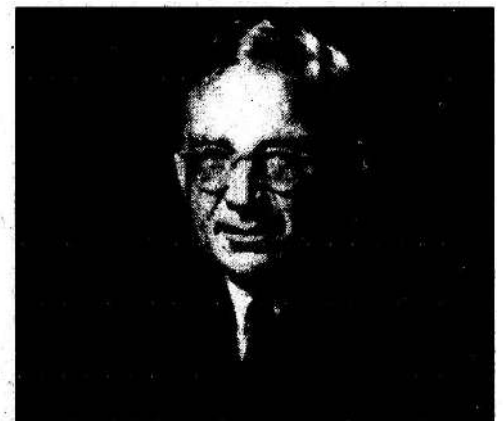
28

THUYẾT BIG BANG

1. Các thuyết về sự tiến hoá của vũ trụ

Khi nghiên cứu nguồn gốc và sự tiến hoá của vũ trụ (vũ trụ luận), đã có hai trường phái khác nhau.

- a) Một trường phái do nhà vật lí người Anh Hoi-lơ (Fred Hoyle, 1915 – 2000) khởi xướng, cho rằng vũ trụ ở trong "trạng thái ổn định", vô thuỷ vô chung, không thay đổi từ quá khứ đến tương lai. Vật chất được tạo ra một cách liên tục.
- b) Trường phái khác lại cho rằng vũ trụ được tạo ra bởi một vụ nổ "cực lớn, mạnh" cách đây khoảng 14 tỉ năm, hiện nay đang tiếp tục giãn nở và loãng dần. Vụ nổ nguyên thuỷ này được đặt tên là Big Bang (Vụ nổ lớn). Năm 1948, các công trình nghiên cứu lí thuyết của nhà vật lí người Mỹ gốc Nga Ga-mốp đã tiên đoán vết tích của bức xạ vũ trụ nguyên thuỷ, lúc đầu nóng ít nhất hàng triệu tỉ độ, ngày càng nguội dần vì vũ trụ giãn nở.



GA-MỐP
(George Gamow, 1904 – 1968,
nhà vật lí người Mỹ, gốc Nga)

Để khẳng định xem, "trong số hai thuyết nêu trên, thuyết nào miêu tả sự tiến hoá của vũ trụ đúng hơn", cần phải căn cứ vào các kết quả nghiên cứu và quan sát thiên văn nhờ các phương tiện và thiết bị hiện đại.

2. Các sự kiện thiên văn quan trọng

a) *Vũ trụ giãn nở*

Quan sát được các thiên hà càng xa bao nhiêu, chúng ta càng thăm dò được trạng thái của vũ trụ trong quá khứ xa xưa bấy nhiêu. Khi nhận được một

tín hiệu từ một thiên hà cách ta 10 tỉ năm ánh sáng thì điều đó có nghĩa là ánh sáng đã phải mất 10 tỉ năm để đi từ thiên hà đó tới ta. Nói khác đi, thông tin mà ta nhận được là thông tin của 10 tỉ năm về trước !

Các quan sát thiên văn dựa vào các phương tiện và dụng cụ ngày càng hiện đại cho thấy, số các thiên hà trong quá khứ nhiều hơn hiện nay. Điều đó chứng tỏ rằng, vũ trụ không ở trong trạng thái ổn định mà đã có biến đổi : Vũ trụ trong quá khứ "đặc" hơn bây giờ. Năm 1929, nhà thiên văn học người Mĩ Hóp-bon (Edwin Powell Hubble, 1889 – 1953), dựa vào hiệu ứng Đốp-ple đã phát hiện thấy rằng, các thiên hà xa xăm rải rác khắp bầu trời đều chạy ra xa hệ Mặt Trời của chúng ta.

Theo hiệu ứng Đốp-ple với bức xạ điện từ thì nếu một nguồn phát ra một bức xạ đơn sắc bước sóng λ , chuyển động với tốc độ u đối với máy thu thì bước sóng bức xạ mà máy thu nhận được sẽ thay đổi một lượng $\Delta\lambda$, với $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{u}{c}$, với $u > 0$ nếu nguồn ra xa máy thu, và $u < 0$ nếu nguồn lại gần máy thu. Do đó, so với khi nguồn đứng yên thì vạch quang phổ mà máy thu nhận được, khi nguồn ra xa máy thu, bị dịch chuyển một giá trị $\Delta\lambda > 0$, tức là về phía màu đỏ của quang phổ.

Hơn nữa, ông còn tìm thấy rằng, *tốc độ chạy ra xa của thiên hà tỉ lệ với khoảng cách d giữa thiên hà và chúng ta* (định luật Hóp-bon) :

$$v = Hd \quad (28.1)$$

với H là một hằng số, gọi là *hằng số Hóp-bon* có trị số $H = 1,7.10^{-2}$ m/(s.năm ánh sáng) (1 năm ánh sáng = $9,46.10^{12}$ km).

Điều phát hiện của Hóp-bon đã chứng tỏ các thiên hà dịch chuyển ra xa nhau, đó là bằng chứng của sự kiện thiên văn quan trọng : vũ trụ đang dãn nở.

b) Bức xạ "nền" vũ trụ

Năm 1965, hai nhà vật lí thiên văn người Mĩ, Pen-di-át và Uyn-xơn, đã tình cờ phát hiện ra một bức xạ "lạ" khi họ đang thử máy thu tín hiệu trên bước sóng 3 cm. Sau đó, họ đã khẳng định được rằng, bức xạ này được phát đồng đều từ phía trong không trung và tương ứng với bức xạ phát ra từ vật có nhiệt độ khoảng 3 K (chính xác là 2,735 K) ; bức xạ này được gọi tắt là *bức xạ 3 K*. Kết quả thu được đã chứng tỏ bức xạ đó là bức xạ được phát ra từ mọi phía trong vũ trụ (nay đã nguội) và được gọi là *bức xạ "nền" vũ trụ*.

c) **Kết luận**

Hai sự kiện thiên văn quan trọng nêu trên và một số sự kiện thiên văn khác đã minh chứng cho tính đúng đắn của thuyết Big Bang.

3. **Thuyết Big Bang**

Chúng ta hãy xem điều gì đã xảy ra ở các khoảng thời gian khác nhau, kể từ thời điểm bắt đầu Vụ nổ lớn (Big Bang).

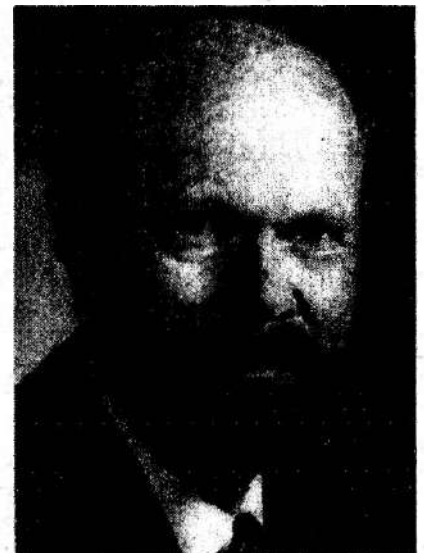
Theo thuyết Big Bang, vũ trụ bắt đầu dãn nở từ một "điểm kì dị". Muốn tính tuổi của vũ trụ, ta phải lập luận để đi ngược thời gian đến "điểm kì dị", lúc tuổi và bán kính của vũ trụ là số không để làm mốc (gọi là *điểm zero Big Bang*). Tại điểm này các định luật vật lí đã biết và thuyết tương đối rộng (thuyết hấp dẫn) không áp dụng được. Vật lí học hiện đại dựa vào vật lí hạt sơ cấp đã giúp ta trở lại quá khứ, nhưng chỉ ước đoán được những sự kiện xảy ra bắt đầu từ thời điểm $t_p = 10^{-43}$ s sau Vụ nổ lớn; thời điểm này được gọi là *thời điểm Plăng*. Ở *thời điểm Plăng*, kích thước vũ trụ là 10^{-35} m, nhiệt độ là 10^{32} K và khối lượng riêng là 10^{91} kg/cm³ ! Các trị số cực nhỏ và cực lớn này, được gọi là *trị số Plăng* (vì chúng được tính ra từ *hằng số cơ bản Plăng h*). Các trị số này được coi là đã miêu tả đầy đủ và đúng những điều kiện vật lí, hoá học ban đầu của vũ trụ nguyên thủy. Từ thời điểm này, vũ trụ dãn nở rất nhanh, nhiệt độ của vũ trụ giảm dần. Tại thời điểm Plăng, vũ trụ bị tràn ngập bởi các hạt có năng lượng cao như electron, neutrino và quac. Năng lượng của vũ trụ vào thời điểm Plăng ít nhất phải bằng 10^{15} GeV.

Các nuclôn được tạo ra sau Vụ nổ một giây.



PEN-DI-ÁT

(Arno Penzias, sinh năm 1933, nhà vật lí thiên văn người Mỹ, phát hiện bức xạ "nền" vũ trụ, giải Nô-ben năm 1978)



UYN-XƠN

(Robert Woodrow Wilson, sinh năm 1936, nhà vật lí thiên văn người Mỹ, phát hiện bức xạ "nền" vũ trụ, giải Nô-ben năm 1978)

Ba phút sau đó mới xuất hiện các hạt nhân nguyên tử đầu tiên.

Ba trăm nghìn năm sau mới xuất hiện các nguyên tử đầu tiên.

Ba triệu năm sau mới xuất hiện các sao và thiên hà.

Tại thời điểm $t = 14$ tỉ năm, vũ trụ ở trạng thái hiện nay, với nhiệt độ trung bình $T = 2,7$ K.

Những sự kiện và những số liệu đã nêu trên đây chưa phải là hoàn toàn chính xác, còn có những chỗ sẽ phải bổ sung hoặc hiệu chỉnh. Tuy nhiên, về đại thể, quá trình trên đây được coi là đáng tin cậy.

Thuyết Big Bang chưa giải thích được hết các sự kiện quan trọng trong vũ trụ và đang được các nhà vật lý thiên văn phát triển và bổ sung.



HO-KING

(Stephen Hawking, sinh năm 1942, nhà thiên văn người Anh, giải thưởng An-be Anh-xanh năm 1978, tác giả cuốn sách nổi tiếng "Lược sử thời gian - từ Vụ nổ lớn đến các lỗ đen")



BÀI TẬP

28.1. Theo thuyết Big Bang, các nguyên tử đầu tiên xuất hiện vào thời điểm nào sau đây ?

- A. $t = 3\ 000$ năm.
- B. $t = 30\ 000$ năm.
- C. $t = 300\ 000$ năm.
- D. $t = 3\ 000\ 000$ năm.

28.2. Các vạch quang phổ của các thiên hà

- A. đều bị lệch về phía bước sóng ngắn.
- B. đều bị lệch về phía bước sóng dài.
- C. hoàn toàn không bị lệch về phía nào cả.
- D. có trường hợp bị lệch về phía bước sóng ngắn, có trường hợp lệch về phía bước sóng dài.



BÀI ĐỌC THÊM

Một thế kỉ trước, một số nhà thiên văn khi quan sát Hoả tinh qua kính thiên văn đã có cảm tưởng là đã nhìn thấy những đường mảnh, hẹp trên Hoả tinh. Họ cho rằng những đường này là những con kênh đào. Họ cũng có cảm tưởng là đã nhìn thấy màu lục ở gần các cực màu trắng. Họ giải thích màu lục này là màu thực vật. Tất cả những đường và màu sắc đã đánh lừa con mắt và trí óc của chúng ta. Trên Hoả tinh không có các kênh đào và thực vật. Nhưng do sự gợi ý (sai lầm) về các kênh đào và thực vật trên Hoả tinh, nhiều cuốn tiểu thuyết đã được viết, kể về cuộc sống trên Hoả tinh và vấn đề sự sống trên Hoả tinh vẫn thu hút sự quan tâm của đông đảo quần chúng.

Vậy, hiện nay liệu có sự sống ở trên Hoả tinh hay không ?

Bức xạ tử ngoại của Mặt Trời đã giết chết mọi vi khuẩn ở trên bề mặt Hoả tinh, nhưng chúng ta có thể hi vọng là có những vi khuẩn sống trong lòng đất. Năm 1976, hai tàu vũ trụ mang tên Viking đã đổ bộ xuống Hoả tinh. Một cánh tay dài vươn ra từ con tàu, xúc một ít "đất" và đã đưa vào con tàu. Nhưng đáng tiếc là đã không tìm thấy bằng chứng về vi khuẩn đã chết hoặc còn sống.

Năm 1996, có một bài báo nói rằng, một thiên thạch có nguồn gốc từ Hoả tinh được tìm thấy ở châu Nam Cực có chứa nhiều dấu hiệu của sự sống nguyên thủy trên Hoả tinh vào thời xa xưa. Điều này đã gây ra một dư luận quốc tế rất mạnh mẽ. Nhờ những nghiên cứu tiếp theo, kết luận nêu trên không còn được mọi người tin nữa. Nhưng sự quan tâm của mọi người về khả năng có sự sống trên Hoả tinh vẫn còn. Nó dẫn đến các kế hoạch phóng tiếp một con tàu vũ trụ tới Hoả tinh trong những năm tới. Năm 2004, NASA (cơ quan nghiên cứu vũ trụ của Mỹ) đã phóng các tàu vũ trụ với rôbot tự hành Spirit và Opportunity, nhờ đó đã khám phá được nhiều bằng chứng hơn về khả năng có nước trên Hoả tinh hay không.

ĐÁP ÁN

Bài 1

1.1. Cầu Vồng được tạo ra do tán sắc ánh sáng mặt trời qua các giọt nước mưa hình cầu và sự phản xạ ánh sáng ở thành trong của giọt nước.

Để tính bán kính góc của cầu vồng, phải tính góc lệch của tia ló so với tia tới. Bán kính góc của cầu vồng ứng với góc lệch cực tiểu.

Bán kính góc của cầu vồng đỏ : $42^{\circ}18'$; của cầu vồng tím : $40^{\circ}40'$.

Nếu lấy chiết suất trung bình của nước là $\frac{4}{3}$ thì bán kính góc trung bình của cầu vồng là $41^{\circ}48'$.

1.2. $1^{\circ}52'$.

Bài 2

2.1. Khoảng vân tăng 1,3 lần.

2.2. $0,6 \mu\text{m}$; $0,555 \mu\text{m}$; $0,454 \mu\text{m}$; $0,416 \mu\text{m}$.

2.4. Nhìn vào cùng một chỗ trên váng dầu theo những phương khác nhau sẽ thấy những màu khác nhau vì : ngoài sự phụ thuộc vào bề dày của bản, hiệu quang trình giữa hai tia giao thoa còn phụ thuộc vào góc tới.

2.5. $0,094''$; $0,825 \text{ cm}$.

2.6. $0,162 \cdot 10^{-4} \text{ rad} \approx 3,3''$.

2.7. $60 \mu\text{m}$.

2.8. 1,00036.

2.9. $0,5 \mu\text{m}$.

2.10. $0,6 \mu\text{m}$.

Bài 3

3.1. Điểm tối, vì vẽ được 3333 đới Fré-nel.

3.2. $l \approx 1,67 \text{ m}$.

3.3. 2,5 cm.

3.4. $0,7 \mu\text{m}$.

3.5. $2 \mu\text{m}$; $0,41 \mu\text{m}$.

3.6. 8,7 cm ; 30,3 cm ; Không có quang phổ bậc 3.

3.7. Trước tiên, phải tính hằng số mạng tinh thể của NaCl ($a = 5,64 \text{ \AA}$). Chú ý rằng trong một ô sơ cấp của NaCl có 4 phân tử NaCl. Khoảng cách giữa hai mặt phẳng nguyên tử là $d = \frac{a}{2}$. Bước sóng của tia X sẽ là : $\lambda = 2d (\sin 60^{\circ} - \sin 25,66^{\circ}) = 2,44 \text{ \AA}$.

Bài 4

4.2. Chú ý đặc biệt đến sự phụ thuộc của biên độ dao động sáng trong tia phản xạ vào góc giữa mặt phẳng dao động của tia tới và mặt phẳng tới.

Bài 5

- 5.2. Ta bắt đầu phân giải được hai vạch λ_1 và λ_2 (với $\lambda_1 < \lambda_2$) trong quang phổ bậc k khi cực đại bậc k của λ_2 ($\sin \varphi_2 = k \frac{\lambda_2}{b}$) trùng với cực tiểu bằng 0 nằm cạnh cực đại bậc k của λ_1 ($\sin \varphi_1 = (kN + 1) \frac{\lambda_1}{bN}$), với b là hằng số cách tử và N là tổng số vạch của cách tử $\Rightarrow 10 \text{ mm}$.

Bài 6

- 6.1. Thay toàn bộ thấu kính và lăng kính thủy tinh bằng thấu kính và lăng kính thạch anh.
6.2. Khả năng phân giải của máy quang phổ cách tử trong vùng hồng ngoại thì lớn hơn trong vùng tử ngoại.

Bài 7

- 7.1. Để chỉ cho những tia X có khả năng đâm xuyên mạnh chiếu vào người bệnh. Nếu không thì người bệnh sẽ bị đốt nóng.
7.2. Muốn đo được bước sóng tia X thì cách tử phải có đến 10 triệu vạch trên một milimét. Điều này không thực hiện được trong thực tế.

Bài 8

- 8.1. $I = I_0(1 - R)^{20}(e^{-kd})^{10} = 0,106 \text{ W/m}^2$. Với R là hệ số phản xạ; k là hệ số hấp thụ.
8.2. a) 50%; b) 24%.

Bài 9

- 9.1. $T = \sqrt[4]{\frac{4A}{\sigma \cdot \alpha^2}} = 5950 \text{ K}$. Với $A = 1,35 \text{ kJ/m}^2$; $\alpha = 30^\circ$; $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$.
9.2. $T = \frac{T_0}{2} \sqrt{\alpha} = 280 \text{ K} = 7^\circ \text{C}$ với $T_0 = 6000 \text{ K}$ và $\alpha = 30^\circ$.
9.3. 2237 K ; $1,294 \mu\text{m}$.
9.4. $\rho(\lambda, T) = \left(\frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \right) \left(\frac{1}{e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1} \right)$.

Bài 10

- 10.1. $1,99 \cdot 10^{-9} \text{ J}$; $0,66 \cdot 10^6 \text{ m/s}$.
10.2. $-1,62 \text{ V}$.
10.3. a) $0,456 \cdot 10^6 \text{ m/s}$; b) $5,32 \cdot 10^6 \text{ m/s}$; c) $-0,59 \text{ V}$.
10.4. $1,24 \cdot 10^{-10} \text{ m}$.

Bài 11

11.1. $1,2 \cdot 10^4$ photon tới mới có 1 photon gây ra hiện tượng quang điện trong.

11.2. Đặc tuyến vôn-ampe của pin quang điện có hai đoạn mà U phụ thuộc tuyến tính vào I tương tự như sự phụ thuộc của U vào I của một pin thường. Ở chế độ tải nhỏ (I nhỏ) thì pin quang điện "giống như" một pin có suất điện động nhỏ và điện trở trong nhỏ. Ở chế độ tải lớn (I lớn) thì pin quang điện "giống như" một pin có suất điện động lớn và điện trở trong lớn.

Bài 12

12.1. $\varepsilon = 3,7 \cdot 10^{-15} \text{ J} = 2,31 \cdot 10^4 \text{ eV}$; $W_d = 0,27 \cdot 10^{-15} \text{ J}$.

12.2. $\rho = \frac{\varepsilon \sigma T^4 R_0 (1+k)}{4GcDM_0} = 0,426 \text{ } \mu\text{m}$; $R_0 = \frac{1}{2} \alpha d$ là bán kính của Mặt Trời.

Bài 13

13.1. $1,8744 \text{ } \mu\text{m}$; $1,2813 \text{ } \mu\text{m}$; $1,1068 \text{ } \mu\text{m}$.

13.2. $9,4 \cdot 10^{-8} \text{ m}$ thuộc vùng tử ngoại xa.

13.3. $-\frac{ke^2}{r}$.

13.4. $r = n^2 \frac{h^2}{8\pi^2 kme^2} \Rightarrow r_K = \frac{h^2}{8\pi^2 kme^2} = 2,65 \cdot 10^{-11} \text{ m}$.

Bài 14

14.1. a) Quang phát quang; b) Điện phát quang; c) Hoá phát quang.
d) Phá quang âm cực; e) Điện phát quang.

14.2. a) 3,84%;
b) 7%: Cứ 100 photon ánh sáng kích thích thì có 7 photon ánh sáng phát quang.

Bài 15

15.1. a) $\alpha \leq \frac{\ln R}{2d} \Rightarrow \alpha \leq -0,083$; b) $\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = 3 \cdot 10^{-6}$.

15.2. a) $t = 0,83 \text{ s}$.

b) Vì ta chưa kể đến sự toả nhiệt cho cả tấm sắt và cho môi trường.

Bài 16

16.1. D; 16.2. D; 16.3. 12 cm; 16.4. 20 phút.

Bài 17

17.1. B; 17.2. D; 17.3. $2,6 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.

Bài 18

18.1. 30 Å; 18.2. 0,017c; 18.3. 1) $3 \cdot 10^{14} \text{ Ha}$; 2) $1,0 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$.

Bài 19

19.1. C ; 19.2. A ; 19.3. C ; 19.4. B ; 19.5. 2,3 MeV ; 19.6. $2,7 \cdot 10^{12}$ J.

Bài 20

20.1. C ; 20.2. C ; 20.3. B ; 20.4. $4,21 \cdot 10^{20}$ nguyên tử ; 0,144 g ; 20.5. 0,22 mg.

Bài 21

21.1. D ; 21.2. B ; 21.3. ${}^4_2\text{He}$ và ${}^1_1\text{H}$;

21.4. a) $A = 1$; $Z = 1$; prôtôn ; b) Thu năng lượng ; $2,56 \cdot 10^{13}$ J.

Bài 22

22.1. C ; 22.2. C ; 22.3. D ; 22.4. 214 MeV.

Bài 23

23.1. B ; 23.2. C.

Bài 24

24.1. B ; 24.2. D ; 24.3. $2,71 \cdot 10^8$ m/s ; không dùng được.

Bài 25

25.1. $6,63 \cdot 10^{-23}$ Å ; 25.2. 151 V ; 25.3. 1,28 Å ; 25.4. 1712 MeV.

Bài 26

26.1. a) $\geq 5,28 \cdot 10^{-20}$ Å ; b) $\geq 2,57$ Å ; 26.2. 23,9 mm ; 3. $\Delta E \geq 0,329 \cdot 10^{-7}$ eV.

Bài 27

27.1. D ; 27.2. B.

Bài 28

28.1. C ; 28.2. B.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Vũ Thanh Khiết (Chủ biên), *Chuyên đề bồi dưỡng học sinh giỏi Vật lí THPT*, tập 6, NXB Giáo dục Việt Nam, 2004.
2. SGK Vật lí 12, Nâng cao, NXB Giáo dục Việt Nam, 2008.
3. Vũ Thanh Khiết, *Vật lí hiện đại* (Bồi dưỡng học sinh giỏi Vật lí THPT), NXB Giáo dục Việt Nam, 2009.
4. Vũ Thanh Khiết (Chủ biên), *Chuyên đề bồi dưỡng học sinh giỏi Vật lí THPT*, tập 7, NXB Giáo dục Việt Nam, 2005.
5. Dương Trọng Bái, Vũ Thanh Khiết, Phạm Việt Trinh, *Bài tập Vật lí 12* (Dùng cho học sinh chuyên Vật lí), NXB Giáo dục Việt Nam, 2004.
6. Vũ Quang, *Quang học 2* (Bồi dưỡng học sinh giỏi Vật lí THPT), NXB Giáo dục Việt Nam, 2009.

MỤC LỤC

	<i>Trang</i>
Lời nói đầu.....	3
Chương I – SÓNG ÁNH SÁNG	
1. Sự tán sắc ánh sáng	5
2. Sự giao thoa ánh sáng	12
3. Sự nhiễu xạ ánh sáng	27
4. Sự phân cực ánh sáng	38
5. Các loại quang phổ	45
6. Tia hồng ngoại. Tia tử ngoại.....	49
7. Tia X. Thang sóng điện từ.....	52
8. Hiện tượng hấp thụ ánh sáng	56
Chương II – LƯỢNG TỬ ÁNH SÁNG	
9. Sự bức xạ nhiệt	61
10. Hiện tượng quang điện	71
11. Hiện tượng quang dẫn. Quang điện trở. Pin quang điện	77
12. Hiệu ứng Com-pton (Compton). Áp suất ánh sáng.....	82
13. Mẫu nguyên tử Bo (Bohr). Quang phổ vạch của nguyên tử hiđrô.....	87
14. Sự phát quang. Lượng tính sóng – hạt của ánh sáng	94
15. Sơ lược về Laze (laser)	103
Chương III – THUYẾT TƯƠNG ĐỐI HẸP	
16. Các tiên đề Anh-xanh. Một số kết quả của thuyết tương đối hẹp.....	109
17. Hệ thức Anh-xanh giữa khối lượng và năng lượng	119
18. Hiệu ứng Dopp-ple tương đối tính.....	124
Chương IV – HẠT NHÂN NGUYÊN TỬ	
19. Cấu tạo của hạt nhân. Độ hụt khối.....	130
20. Phóng xạ.....	135
21. Phản ứng hạt nhân	147
22. Phản ứng phân hạch	154
23. Phản ứng nhiệt hạch	161
Chương V – HẠT SƠ CẤP. KHÁI NIỆM VỀ CƠ HỌC LƯỢNG TỬ	
24. Các hạt sơ cấp.....	165
25. Lượng tính sóng – hạt của hạt vi mô. Giả thuyết Đơ Bơri	172
26. Khái niệm cơ học lượng tử	178
Chương VI – SƠ LƯỢC VỀ THIÊN VĂN VẬT LÝ	
27. Sao. Thiên hà	187
28. Thuyết Big Bang	194

Chịu trách nhiệm xuất bản:

Chủ tịch Hội đồng Thành viên NGUYỄN ĐỨC THÁI
Phó Tổng Giám đốc phụ trách HOÀNG LÊ BÁCH
Phó Tổng Giám đốc kiêm Tổng biên tập TS. PHAN XUÂN THÀNH

Tổ chức bản thảo và chịu trách nhiệm nội dung:

Phó Tổng biên tập NGUYỄN HIỀN TRANG
Giám đốc CTCP Dịch vụ xuất bản Giáo dục Hà Nội PHẠM THỊ HỒNG

Biên tập lần đầu:

PHẠM ĐÌNH LƯỢNG

Biên tập tái bản:

ĐINH THỊ THÁI QUỲNH

Thiết kế sách:

NGUYỄN KIM TOÀN

Trình bày bìa:

LƯU CHÍ ĐỒNG

Sửa bản in:

ĐINH THỊ THÁI QUỲNH

Chế bản:

PHÒNG CHẾ BẢN - CTCP DỊCH VỤ XUẤT BẢN GIÁO DỤC HÀ NỘI

Công ty cổ phần Dịch vụ xuất bản Giáo dục Hà Nội -
Nhà xuất bản Giáo dục Việt Nam giữ quyền công bố tác phẩm

TÀI LIỆU CHUYÊN VẬT LÍ. VẬT LÍ 12
TẬP HAI

Mã số: TZL48h7 - CPH

In 2.000 bản (QĐ in số: 48/STK), khổ 17 x 24 cm.

Đơn vị in: Công ty Cổ phần In Gia Định.

9D Nơ Trang Long, Quận Bình Thạnh, TP.HCM.

Số ĐKXB: 196-2017/CXBIPH/54-83/GD.

Số QĐXB: 1222TK/QĐ-GD-HCM ngày 5 tháng 9 năm 2017.

In xong và nộp lưu chiểu tháng 9 năm 2017.

ISBN: 978-604-0-04316-0.