

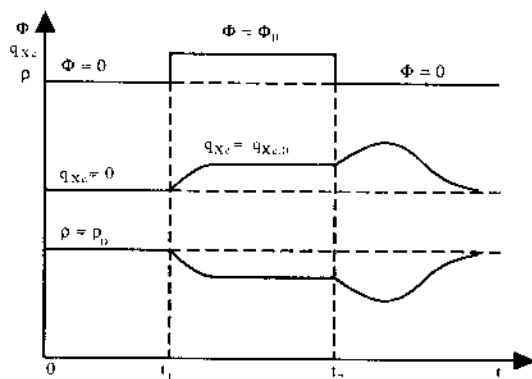
các giá trị  $q_{Xe,0}^{max}$  và  $q_{Sm,0}^{max}$  đối với nhiễm độc xenon và samarium đối với các độ giàu uranium khác nhau.

Bảng 6.7. Các giá trị  $q_{Xe,0}^{max}$  và  $q_{Sm,0}^{max}$  đối với các độ giàu  $U^{235}$  khác nhau.

Độ giàu	0,714%	2%	100%
$q_{Xe,0}^{max}$	0,0354	0,0478	0,0502
$q_{Sm,0}^{max}$	0,0068	0,0092	0,0096

Từ bảng 6.7 ta thấy rằng độ nhiễm độc xenon cực đại vào cỡ 5% và lớn hơn độ nhiễm độc samarium cực đại khoảng 5 lần. Hơn nữa độ nhiễm độc xenon đạt giá trị cân bằng nhanh hơn samarium, do đó ảnh hưởng của nhiễm độc xenon thể hiện rất rõ trong quá trình lò làm việc. Ảnh hưởng của độ nhiễm độc xenon lên độ phản ứng thể hiện ở hệ số sử dụng neutron nhiệt  $f$  vì khi đó nó xuất hiện thành phần hấp thụ mạnh neutron nhiệt. Tính toán cho độ phản ứng âm đưa vào lò là  $\rho_{Xe} \approx -q_{Xe}$ .

Ngoài ra, một hiệu ứng xảy ra do nhiễm độc xenon là sự xuất hiện hố iodine sau khi dừng lò. Khi thay đổi công suất lò, thể hiện qua sự thay đổi mật độ thông lượng neutron nhiệt, độ nhiễm độc xenon  $q_{Xe}$  và độ phản ứng  $\rho$  đưa vào lò được thể hiện trên hình 6.6.



Hình 6.6. Sự phụ thuộc của  $q_{Xe}$  và  $\rho$  vào mật độ thông lượng neutron  $\Phi$ .

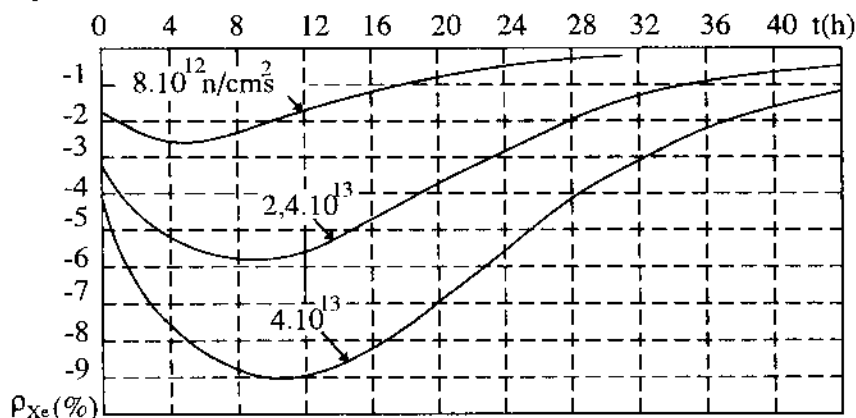
Ta hãy xét trường hợp dừng lò theo hình 6.6. Tại thời điểm  $t_2$ , công suất lò giảm đột ngột từ  $\Phi_0$  đến 0, nồng độ xenon thoát tiên tăng nhanh và có thể vượt quá giá trị cân bằng ban đầu, sau đó giảm do lượng iodine giảm

vì phân rã và lượng xenon cũng tiếp tục phân rã. Do đó độ nhiễm độc  $\rho_{Xe}$  tăng, đạt giá trị cực đại và giảm đến 0 như thể hiện trên hình 6.6. Ngược lại, độ phản ứng giảm đạt cực tiểu rồi mới bắt đầu tăng, sau một thời gian đạt đến giá trị  $\rho_0$  ban đầu. Hiệu ứng giảm độ phản ứng sau khi dừng lò do nhiễm độc xenon gọi là *hố iodine*.

Hố iodine là hiệu số giữa độ mất độ phản ứng theo thời gian và độ mất độ phản ứng cân bằng trước khi dừng lò:

$$\Delta\rho_I(t) = \rho_{Xe}(t) - \rho_{Xe,0} \quad (6.51)$$

Trên hình 6.7 thể hiện các đường cong hố iodine theo thời gian sau khi dừng lò đối với các giá trị mật độ thông lượng neutron nhiệt khác nhau trước khi dừng lò. Từ hình 6.7 ta thấy rằng sau khi dừng lò hoặc có thể khởi động ngay hoặc phải chờ vài ngày mới khởi động trở lại. Đó là do trong hố iodine, độ phản ứng âm xuất hiện quá lớn, muốn cho lò hoạt động phải đưa vào lò độ phản ứng dương đủ lớn để bù trừ. Không nên khởi động lò sau khi lò dừng cỡ 10 giờ, tức là khi đạt cực đại của hố iodine.



Hình 6.7. Sự phụ thuộc thời gian của hố iodine sau khi dừng lò đối với các giá trị mật độ thông lượng neutron nhiệt khác nhau trước khi dừng lò.

#### 6.3.4.2. Sự cháy nhiên liệu

Sự cháy nhiên liệu thể hiện qua sự thay đổi nồng độ  $U^{235}$  theo thời gian như sau:

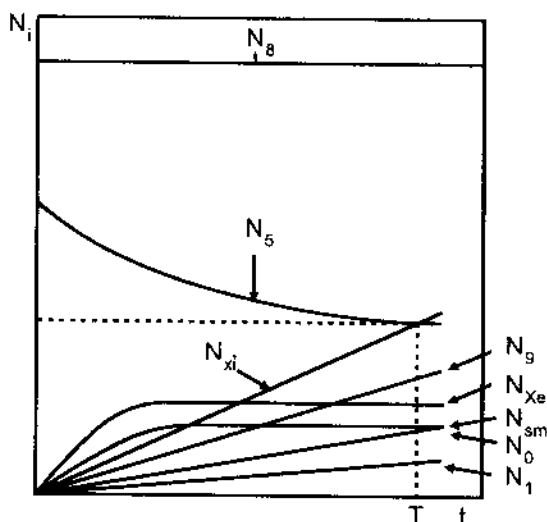
$$N_5(t) = N_5(0)e^{-s} \quad (6.52)$$

Trong đó  $s = \sigma_5 \int_0^t \Phi(t') dt'$ , được gọi là độ sâu cháy nhiên liệu. Khi  $s$  bé, biểu

thức (6.52) có thể viết gần đúng là  $N_5(t) = N_5(0)(1-s)$ , và do đó

$$s = \frac{N_5(0) - N_5(t)}{N_5(0)} = \frac{\Delta N_5(t)}{N_5(0)} \quad (6.53)$$

Trong nhiên liệu uranium, ngoài  $U^{235}$  còn có một lượng lớn  $U^{238}$ . Theo công thức (6.52) khi lò làm việc nhiên liệu cháy dần và số hạt nhân  $U^{235}$  giảm theo hàm số mũ. Đồng thời, do neutron tương tác với  $U^{238}$ , một số hạt nhân khác được sinh ra như  $Pu^{239}$ ,  $Pu^{240}$ ,  $Pu^{241}$ , các hạt nhân gây nhiễm độc  $Xe^{135}$ ,  $Sm^{149}$  và các hạt nhân xỉ của lò. Hình 6.8 minh họa sự giảm nhiên liệu  $U^{235}$  và sự tăng các hạt nhân sản phẩm, gọi chung là xỉ của lò. Thời gian  $T_c$  là thời điểm nồng độ các hạt nhân xỉ bằng nồng độ  $U^{235}$ , là chu kỳ thay nhiên liệu của lò phản ứng.



Hình 6.8. Sự giảm nồng độ các hạt nhân nhiên liệu  $U^{235}$  và sự tăng nồng độ các hạt nhân xỉ của lò phản ứng.  $N_i$  là nồng độ các hạt nhân, trong đó  $N_0$ ,  $N_1$ ,  $N_5$ ,  $N_8$ ,  $N_9$ ,  $N_{Xe}$  và  $N_{Sm}$  ứng với  $Pu^{240}$ ,  $Pu^{241}$ ,  $U^{235}$ ,  $U^{238}$ ,  $Pu^{239}$ ,  $Xe^{135}$  và  $Sm^{149}$ .

#### 6.3.4.3. Hiệu ứng nhiệt độ và hiệu ứng công suất

Khi lò phản ứng làm việc thì sinh ra một nhiệt lượng lớn làm nhiệt độ trong vùng hoạt tăng lên. Khi nhiệt độ vùng hoạt thay đổi thì hệ số nhân k của lò thay đổi, tức là sự thay đổi nhiệt độ đã đưa vào vùng hoạt một độ phản ứng nào đó. Tỷ số giữa gia số độ phản ứng  $\Delta \rho$  và gia số nhiệt  $dT$  được gọi là hệ số nhiệt độ của độ phản ứng.

$$\alpha_T = \frac{d\rho}{dT} \approx \frac{dk}{dT} \quad (6.54)$$

Sự thay đổi của hệ số nhân  $k$  khi thay đổi nhiệt độ vùng hoạt do hai thành phần, gồm hệ số nhiệt độ hạt nhân gây nên do sự thay đổi phổ năng lượng neutron và hiệu ứng Doppler đối với sự hấp thụ ở miền cộng hưởng, và hệ số nhiệt độ mật độ gây nên do sự thay đổi mật độ vật liệu của các thành phần vật liệu dẫn tới sự thay đổi quãng chạy trung bình của neutron và sự rò neutron.

Sự thay đổi công suất của lò phản ứng kéo theo sự thay đổi độ phản ứng. Đó là hiệu ứng công suất. Đại lượng đặc trưng cho hiệu ứng công suất là *hệ số công suất của độ phản ứng*:

$$\alpha_Q = \frac{d\rho}{dQ} \quad (6.55)$$

Mặc dù khi tăng công suất thì nhiệt độ vùng hoạt cũng tăng, song trong lò phản ứng không đồng nhất với sự tải nhiệt cưỡng bức, do sự phân bố nhiệt độ không giống nhau trong thanh nhiên liệu và trong chất tải nhiệt, các hệ số nhiệt độ và hệ số công suất không tỉ lệ với nhau.

Để bảo đảm an toàn lò phản ứng cần thiết kể sao cho các hệ số nhiệt độ và công suất của độ phản ứng có giá trị âm. Thật vậy, vì một lý do nào đó mà công suất lò tăng, khi đó nhiệt độ vùng hoạt tăng và trong lò được đưa vào một độ phản ứng âm và công suất lò giảm xuống. Nếu vì một lý do nào đó công suất lò giảm, nhiệt độ vùng hoạt giảm sẽ đưa vào lò một độ phản ứng dương và đưa công suất lò lên. Trong trường hợp ngược lại, khi hệ số nhiệt độ dương, sự tăng hay giảm công suất sẽ kéo theo sự tăng hay giảm nhiệt độ vùng hoạt và dẫn tới sự tăng hay giảm công suất lò hơn nữa. Quá trình tự kích đó làm cho lò làm việc không ổn định và nguy hiểm.

## 6.4. CÁC MÁY GIA TỐC HẠT TÍCH ĐIỆN

Máy gia tốc hạt tích điện là thiết bị sinh các hạt tích điện có năng lượng lớn, như các hạt electron, proton, alpha, deuteron và các ion nặng. Các hạt tích điện có năng lượng lớn được sử dụng y học, công nghiệp, môi trường, nghiên cứu khoa học, ...

Máy gia tốc có hai đặc trưng chính là năng lượng và cường độ chùm hạt. Cường độ chùm hạt là số hạt bay ra trong thời gian 1 giây, hoặc như người ta thường dùng, là dòng điện toàn phần tạo nên bởi chùm hạt.

Các máy gia tốc được chia thành hai loại là máy gia tốc liên tục và máy gia tốc xung. Máy gia tốc liên tục cho chùm hạt không thay đổi theo thời gian, còn máy gia tốc xung cho chùm hạt dưới dạng các xung. Mỗi loại máy có ưu điểm riêng của mình, máy gia tốc liên tục cho cường độ dòng hạt

cao còn máy gia tốc xung cho năng lượng hạt cao. Cường độ của máy gia tốc xung được đặc trưng bởi hai thông số là lượng xung trong 1 giây và lượng hạt trong 1 xung. Dòng trung bình trong máy gia tốc xung được xác định bởi công thức:

$$j = qnv \quad (6.56)$$

Trong đó  $q$  là điện tích của hạt được gia tốc,  $n$  là số hạt trong 1 xung còn  $v$  là số xung trong 1 giây.

Theo nguyên tắc hoạt động, các máy gia tốc được chia thành hai loại là máy gia tốc tác dụng trực tiếp, hay máy gia tốc cao thế, và máy gia tốc tác dụng bội. Trong máy gia tốc tác dụng trực tiếp, các hạt tích điện chuyển động trong chân không dưới tác dụng của trường tĩnh điện tạo nên bởi một hiệu điện thế không đổi. Trong máy gia tốc tác dụng bội, các hạt được gia tốc bởi điện trường biến thiên. Các máy gia tốc tác dụng bội lại được chia thành hai loại là máy gia tốc tuyến tính, trong đó các hạt chuyển động theo đường thẳng, và máy gia tốc tròn, trong đó các hạt chuyển động theo đường tròn.

Máy gia tốc tiêu biểu cho loại tác dụng trực tiếp là máy phát tĩnh điện Van de Graaf. Tất cả các loại máy gia tốc tuyến tính đều là máy gia tốc xung. Các máy gia tốc thuộc loại tròn là cyclotron, betatron và microtron. Các loại hoàn thiện hơn của máy gia tốc cyclotron là phasotron, synchrotron, synchrophasotron, isochron, ... Trong các máy gia tốc tròn thì cyclotron và isochron là các máy gia tốc liên tục, cho chùm hạt không thay đổi theo thời gian, máy gia tốc microtron có thể làm việc theo cả chế độ liên tục lẫn chế độ xung, còn tất cả các máy gia tốc tròn còn lại đều làm việc theo chế độ xung.

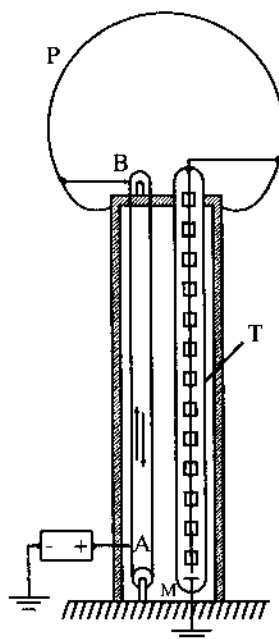
#### 6.4.1. Máy phát tĩnh điện Van de Graaf

Nguyên tắc chính trong việc gia tốc các hạt tích điện là cho các hạt này chuyển động giữa hai điện cực với hiệu điện thế  $U$ . Sau khi đi qua hai điện cực này, hạt có điện tích  $q$  sẽ nhận thêm một năng lượng:

$$E = qU \quad (6.57)$$

Trên hình 6.9 trình bày sơ đồ của máy phát tĩnh điện Van de Graaf. Việc gia tốc các hạt được thực hiện trong ống gia tốc T. Ống này gồm một ống làm từ chất cách điện như thủy tinh hoặc sứ, các nguồn ion và các điện cực hình ống. Các điện cực hình ống được đặt trên một đường thẳng và cách nhau không xa. Đầu trên của ống gia tốc đặt nguồn ion và đầu dưới đặt bia để chiếu, là vật liệu cần nghiên cứu. Không khí trong ống gia tốc được bơm hút ra để tạo chân không  $10^{-5}$  mm thủy ngân. Chân không có tác dụng giảm

thiếu quá trình va chạm của các ion được gia tốc với không khí và việc tạo ra điện tích khí giữa các điện cực.



Hình 6.9. Máy phát tĩnh điện Van de Graaf.

Một cao thế cỡ 8 triệu vôn đặt vào ống gia tốc. Qua hệ các điện trở mắc nối tiếp nhau, cao thế đó được phân bố đều giữa các điện cực.

Các ion từ nguồn ion đập vào điện cực đầu tiên. Trong không gian giữa nguồn và điện cực đầu, các ion nhận được một phần năng lượng theo công thức (6.56). Bên trong ống điện cực đầu, các ion chuyển động theo quán tính vì trong đó không có điện trường. Sau đó các ion chuyển động trong không gian giữa điện cực thứ nhất và điện cực thứ hai, nhận thêm một phần năng lượng nữa. Bên trong ống điện cực thứ hai, các ion lại chuyển động theo quán tính, để rồi lại nhận thêm một phần năng lượng nữa khi chuyển động từ điện cực thứ hai đến điện cực thứ ba. Quá trình gia tốc phát triển tương tự qua các điện cực tiếp theo. Các ion đập vào bia sau khi đã gia

tốc đến năng lượng  $E = qU$  eV, trong đó  $q$  là điện tích của ion theo đơn vị  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  C còn  $U$  là điện thế đặt trên ống gia tốc, tính theo đơn vị vôn.

Cách tạo ra cao thế như sau. Các điện tích sinh từ máy phát điện thế thấp được đưa vào điểm A trên một dây curoa làm từ vật liệu cách điện. Các điện tích theo dây curoa này chuyển đến điểm B ở đầu trên và chuyển sang thanh dẫn điện P. Các điện tích tích tụ tại mặt ngoài thanh này nâng điện thế lên đến  $(5 - 8) \cdot 10^6$  vôn và được đưa vào ống gia tốc. Năng lượng của hạt được gia tốc phụ thuộc vào điện thế của thanh dẫn và bản thân điện thế này bị giới hạn bởi sự phóng điện từ thanh dẫn điện vào không khí. Với các máy phát tĩnh điện Van de Graaf tốt nhất, thế phóng điện không vượt quá chục triệu vôn và chùm ion điện tích một đơn vị có năng lượng không vượt quá 20 MeV, thông thường có năng lượng 2 – 5 MeV. Dòng của chùm hạt khá lớn, đạt đến vài trăm  $\mu$ A.

Máy gia tốc hoàn thiện hơn của máy phát tĩnh điện Van de Graaf là máy tandem. Trong máy gia tốc tandem đã sử dụng hiện tượng thay đổi dấu điện tích của các ion. Chẳng hạn, các ion âm của hydrogen  $H^-$  được gia tốc theo phương đến điện cực cao thế dương. Tại điện cực này, các ion  $H^-$  tán xạ lên một bia mỏng, một số lớn các ion mất 2 electron và chuyển thành các proton mang điện tích dương. Các proton này được điện cực dương đẩy ngược lại, nghĩa là được gia tốc thêm một lần nữa và năng lượng được tăng gấp đôi. Hiện nay đã có các máy tandem chuyển điện tích các ion hai lần, do đó năng lượng của chúng tăng gấp ba.

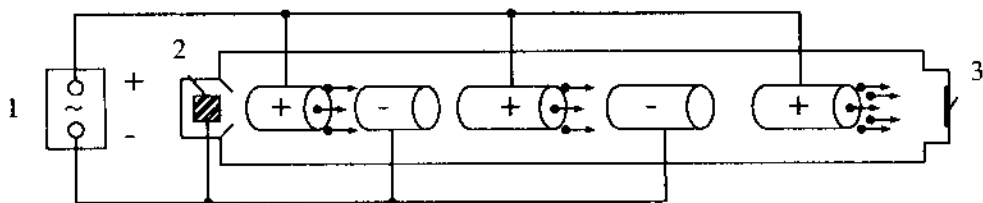
Hạn chế lớn nhất của máy phát tĩnh điện Van de Graaf là năng lượng chùm hạt thấp. Nhưng máy này có nhiều ưu điểm, trong đó ưu điểm chính là độ đơn năng rất cao của chùm hạt, có thể đạt đến  $10^{-6}$  hay cao hơn nữa, và việc điều chỉnh năng lượng dễ dàng. Chính nhờ máy phát tĩnh điện Van de Graaf, người ta đã đo được tiết diện tán xạ proton-proton ở vùng năng lượng thấp với độ chính xác cao và ngày nay máy gia tốc này vẫn được sử dụng rộng rãi trong nghiên cứu khoa học.

#### 6.4.2. Các máy gia tốc tuyến tính

Hình 6.10 trình bày một loại máy gia tốc tuyến tính, gọi là máy gia tốc cộng hưởng tuyến tính. Sự gia tốc các ion xảy ra khi chúng chuyển động nhiều lần qua điện thế không lớn của máy phát cao tần. Độ dài của các điện cực ống tăng theo phương chuyển động của các hạt tích điện. Thời gian chuyển động quán tính của các hạt tích điện trong các điện cực ống là giống nhau và bằng nửa chu kỳ thay đổi điện thế của máy phát cao tần. Các điện

cực ống chắn mắc vào một cực của máy phát còn các điện cực ống lẻ nối vào cực kia của máy phát.

Giả sử các ion dương chuyển động vào khoảng không giữa các điện cực thứ nhất và thứ hai. Trong thời gian này trên các điện cực lẻ có thể dương còn trên các điện cực chẵn có thể âm. Tại thời điểm các ion thoát ra khỏi điện cực thứ hai thì trên các điện cực chẵn có thể dương và trên các điện cực lẻ có thể âm. Các ion dương được gia tốc giữa điện cực thứ hai và thứ ba. Quá trình tương tự như vậy tiếp diễn khi các ion chuyển động qua các điện cực tiếp theo. Sự chuyển động của các ion và sự thay đổi điện thế trên các điện cực cộng hưởng với nhau, do đó máy gia tốc này gọi là máy gia tốc cộng hưởng. Năng lượng các ion được gia tăng cỡ 10 - 15 MeV/m chiều dài. Dòng trung bình vào khoảng 20 - 30  $\mu\text{A}$  còn dòng xung cỡ 50 mA. Về mặt lý thuyết, nếu máy gia tốc làm càng dài thì chùm hạt có năng lượng càng lớn. Tuy nhiên trong thực tế năng lượng chùm hạt của máy gia tốc loại này chỉ đạt 20 - 30 MeV do sự phức tạp về kỹ thuật và giá thành quá cao.



Hình 6.10. Máy gia tốc cộng hưởng tuyến tính.

1. Nguồn phát cao tần; 2. Nguồn ion; 3. Bìa

Các ưu điểm chính của máy gia tốc cộng hưởng tuyến tính là dòng lớn, sự đơn giản trong việc nạp chùm hạt vào cũng như lấy chùm hạt ra. Ngoài ra, máy gia tốc tuyến tính không phát bức xạ hãm do chùm hạt chuyển động theo đường thẳng. Hiệu ứng này không quan trọng lắm đối với các ion nặng nhưng rất quan trọng đối với chùm electron năng lượng cao từ một vài trăm MeV trở lên. Do đó máy gia tốc tuyến tính thường được xây dựng cho các electron.

### 6.4.3. Các máy gia tốc tròn gia tốc các hạt nặng

#### 6.4.3.1. Cyclotron

Hạt tích điện chuyển động theo đường tròn trong từ trường thuần nhất nếu vận tốc của nó không đổi và vuông góc với phương của từ trường.



Do khối lượng của hạt tương đối tính bằng  $\frac{m}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$  nên bán kính quỹ đạo của hạt tích điện bằng:

$$R = \frac{mv}{Bq} \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \quad (6.58)$$

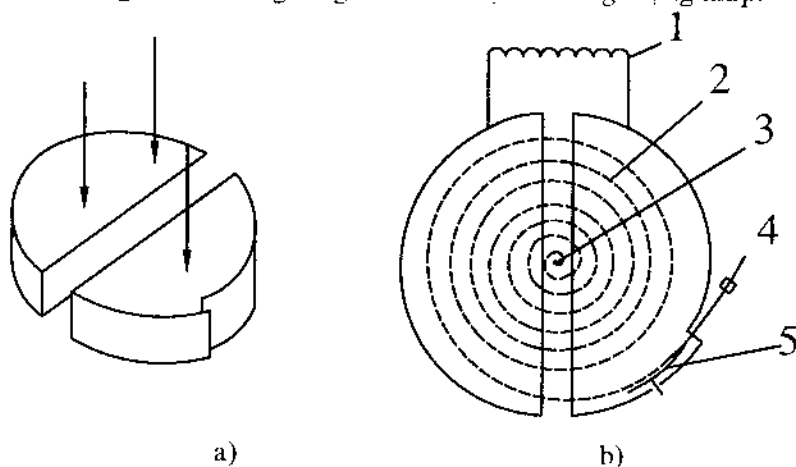
Trong đó  $v$  là vận tốc của hạt;  $m$  và  $q$  là khối lượng và điện tích của hạt;  $B$  là cảm ứng từ. Cảm ứng từ  $B$ , đơn vị đo là Tesla, liên hệ với từ trường  $H$  theo công thức  $B = \mu_0 \mu H$ , trong đó  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Henry/m còn  $\mu$  là độ từ thẩm của môi trường. Tuy nhiên chúng ta sử dụng khái niệm từ trường để chỉ cả hai đại lượng này. Chu kỳ quay, là thời gian hạt chuyển động được một vòng, bằng:

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{Bq} \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \quad (6.59)$$

Tần số quay  $f$ , tức là số vòng quay của hạt trong 1 giây, bằng:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{Bq}{2\pi m} \sqrt{1-v^2/c^2} \quad (6.60)$$

Trong trường hợp không tương đối tính có thể coi  $\sqrt{1-v^2/c^2} \approx 1$  và tần số  $f$  không phụ thuộc vào vận tốc hạt. Máy gia tốc cyclotron làm việc với tần số  $f$  không đổi và dùng để gia tốc các hạt có năng lượng thấp.



Hình 6.11. Sơ đồ nguyên lý của máy cyclotron

a. Dạng chung ; b. Dạng từ trên nhìn xuống:

1. Nguồn điện cao tần; 2. Quỹ đạo của các ion;

3. Nguồn ion; 4. Bìa; 5. Điện cực lệch.

Hình 6.11a trình bày sơ đồ nguyên tắc của máy gia tốc cyclotron. Nó gồm hai điện cực rỗng cách điện, gọi là các duant, đặt giữa hai cực một nam châm. Trên các duant đặt nguồn điện thế của máy phát cao tần còn ở khe giữa các duant đặt nguồn ion dương. Toàn bộ hệ thống gồm các duant và nguồn ion được đặt trong buồng chân không với áp suất  $10^{-6}$  mm thủy ngân.

Giả sử từ trường hướng từ ngoài vào trang giấy còn duant bên phải có điện thế dương cực đại. Các ion dương từ nguồn ion phát ra được gia tốc trong khe và chuyển động sang duant bên trái và trong duant đó chúng chuyển động với vận tốc không đổi theo một quỹ đạo tròn trong từ trường. Tần số máy phát trùng với tần số quay của các ion, vì vậy khi các ion sau khi đã chuyển động được nửa vòng tròn, lại rơi vào khe, còn trên duant bên trái có điện thế dương cực đại. Các ion được gia tốc trong khe và chuyển động sang duant bên phải. Quá trình như vậy tiếp diễn. Sau mỗi lần được gia tốc trong khe, vận tốc các ion tăng lên, do đó bán kính quỹ đạo của chúng cũng tăng và các ion chuyển động tròn theo đường xoắn ốc với bán kính tăng dần (Hình 6.11b). Hiệu điện thế giữa hai duant vào cỡ 100 kV, do đó sau một vòng quay, hạt được gia tăng một năng lượng cỡ 100 keV. Như vậy, trong máy gia tốc cyclotron với năng lượng hạt 20 MeV, các hạt chuyển động khoảng 200 vòng. Cuối quá trình gia tốc chùm ion được lấy ra nhờ một thiết bị làm lệch khỏi buồng chân không và đập lên bia cần nghiên cứu.

Cyclotron có ưu điểm là giảm kích thước so với máy gia tốc tuyến tính và dùng điện thế tương đối thấp. Tuy nhiên nhược điểm của cyclotron là không gia tốc được các ion lên năng lượng cao do khối lượng các ion tăng lên khi tốc độ chuyển động lớn theo thuyết tương đối Einstein. Khi khối lượng các ion tăng thì tần số quay của các ion giảm và thời gian xuất hiện các ion trong khe muộn hơn thời gian máy phát thay đổi điện thế cho duant. Do đó các ion sẽ nhận được năng lượng ít dần khi vận tốc càng lớn và hạn chế việc tăng năng lượng của ion. Cyclotron có thể gia tốc các proton đến năng lượng 25 MeV còn hạt alpha đến 50 MeV. Máy gia tốc này không thể gia tốc các hạt electron đến năng lượng vài chục MeV vì mất năng lượng do bức xạ hãm.

Một ưu điểm nữa của máy gia tốc cyclotron là cho dòng khá lớn, đạt đến 1 mA. Do đó hiện nay máy gia tốc loại này vẫn được sử dụng rộng rãi để nghiên cứu phản ứng hạt nhân năng lượng thấp và sản xuất các đồng vị phóng xạ nghèo neutron, mà không thể sản xuất trong các lò phản ứng hạt nhân. Ngoài ra máy gia tốc cyclotron còn được dùng để gia tốc các hạt deuteron, alpha và các ion nặng khác như carbon, nitrogen, oxygen, ..., đối với