

TRƯỜNG ĐẠI HỌC ĐÀ LẠT



GIÁO TRÌNH

VẬT LÝ HẠT NHÂN

NGUYỄN HỮU THẮNG

2002

MỤC LỤC

MỤC LỤC	2
CHƯƠNG I: CÁC ĐẶC TRƯNG CƠ BẢN CỦA HẠT NHÂN BỀN.....	4
I CẤU TẠO HẠT NHÂN	4
II. ĐIỆN TÍCH HẠT NHÂN.....	5
III KHỐI LƯỢNG HẠT NHÂN	8
1. Khối lượng và năng lượng.....	8
2. Khối phổ kế	9
IV. NĂNG LƯỢNG LIÊN KẾT CỦA HẠT NHÂN	11
V. KÍCH THƯỚC HẠT NHÂN	17
1 Phương pháp so sánh năng lượng liên kết hạt nhân gương	18
2. Phương pháp nhiễu xạ electron nhanh lên hạt nhân	19
VI. SPIN HẠT NHÂN	20
VII. MOMEN TỪ CỦA HẠT NHÂN	22
VIII. MOMEN TỪ CỰC ĐIỆN CỦA HẠT NHÂN	25
IX. LỰC HẠT NHÂN.....	27
CHƯƠNG II: PHÂN RÃ PHÓNG XẠ.....	29
I Các đặc trưng cơ bản của hiện tượng phóng xạ	29
1. Phương trình cơ bản của hiện tượng phóng xạ	29
2. Độ phóng xạ.....	30
3. Phương pháp xác định hằng số phân rã λ bằng thực nghiệm	31
II PHÂN RÃ ANPHA	32
III PHÂN RÃ BETA.....	45
1 Các loại phân rã beta	45
2.Các đặc điểm trong phân rã beta	48
a. Phổ beta	48
b. Phổ beta và sự tồn tại neutrino.....	49
3 Cơ sở lý thuyết của phân rã beta.....	53
a. Tìm phân bố theo năng lượng:	53
b. Số hiệu chính Coulomb	56
4. Hằng số phân rã beta λ_β	58
IV. Dịch chuyển GAMMA	60
1. Mở đầu.....	60
2. Xét chuyển dời bức xạ GAMMA	61
3 Hiện tượng biến hoán trong	63
V. PHÓNG XẠ TỰ NHIÊN.....	66
CHƯƠNG III PHẢN ỨNG HẠT NHÂN	69
I PHÂN LOẠI PHẢN ỨNG HẠT NHÂN.....	69
II CÁC ĐỊNH LUẬT BẢO TOÀN	70
1. Định luật bảo toàn điện tích và số nuclon.....	70

2. Định luật bảo toàn năng lượng và xung lượng	70
3. Giảm đồ xung lượng của phản ứng hạt nhân.....	74
4. Định luật bảo toàn momen động lượng.....	81
5. Định luật bảo toàn chấn lẻ	82
6: Định luật bảo toàn spin đồng vị.....	83
III. TIẾT DIỆN HIỆU DỤNG CỦA PHẢN ỨNG HẠT NHÂN	85
IV. PHẢN ỨNG PHÂN HẠCH HẠT NHÂN	87
1. Lịch sử phát minh và các tính chất cơ bản của phản ứng phân hạch.....	87
2. Lý thuyết cơ bản của hiện tượng phân hạch	88
3. Khả năng sử dụng năng lượng phân hạch(năng lượng nguyên tử)	94
4. Cấu tạo và nguyên tắc làm việc của lò phản ứng	96
V PHẢN ỨNG NHIỆT HẠCH	99
CHƯƠNG IV MẪU VỎ HẠT NHÂN	102
I. NHỮNG CƠ SỞ THỰC NGHIỆM CỦA MẪU VỎ HẠT NHÂN	103
II. LÝ THUYẾT MẪU VỎ.....	104
PHỤ LỤC	111
I. GIÁ TRỊ CỦA VÀI HẰNG SỐ CƠ BẢN.....	111
II GIÁ TRỊ CỦA VÀI BIỂU THỨC THƯỜNG DÙNG.....	111
III. KHỐI LƯỢNG CỦA MỘT SỐ HẠT SƠ CẤP	111
TÀI LIỆU THAM KHẢO.....	121

CHƯƠNG I: CÁC ĐẶC TRƯNG CƠ BẢN CỦA HẠT NHÂN BỀN

I CẤU TẠO HẠT NHÂN

Hạt nhân được cấu tạo từ các hạt cơ bản proton và neutron. Khối lượng của proton và neutron lớn gấp hơn 1.800 lần khối lượng của electron m_e : Khối lượng của electron ($m_e = 9,1 \cdot 10^{-28} \text{g}$), khối lượng của proton $m_p = 1836,15 m_e = 1,67265 \cdot 10^{-24} \text{g}$; khối lượng của neutron $m_n = 1838,69 m_e = 1,67495 \cdot 10^{-24} \text{g}$. Nếu lấy đơn vị khối lượng nguyên tử (atomic mass units) kí hiệu amu.

Theo định nghĩa, một đơn vị khối lượng nguyên tử có giá trị bằng một phần mười hai khối lượng của nguyên tử carbon ^{12}C

$$1 \text{ amu} = 1,660567 \cdot 10^{-24} \text{g} = 931,502 \text{ MeV}; (1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{J})$$

Khối lượng của proton : $m_p = 1,007276 \text{ amu}$

Khối lượng của neutron $m_n = 1,008665 \text{ amu}$

Proton mang điện tích dương, có độ lớn bằng điện tích của electron. Neutron có điện tích bằng không.

$$|e| = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} = 4,8 \cdot 10^{-10} \text{ CGSE}$$

Spin của proton và neutron bằng $1/2\hbar$ cả hai hạt đều tuân theo thống kê Fermi-Dirac, do đó thỏa mãn nguyên lý loại trừ Pauli.

Momen từ spin của proton : $\mu_{sp} = 2,792763 \mu_0$

Momen từ spin của neutron : $\mu_{sn} = -1,91348 \mu_0$

Trong đó μ_0 là đơn vị momen từ có giá trị $\mu_0 = e\hbar/2m_p c = \mu_B/1836$

với $\mu_B = e\hbar/2m_e c$ gọi là magneton Bo là đơn vị đo momen từ nguyên tử

μ_0 gọi là magneton nhân.

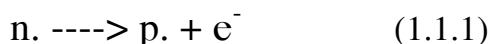
Ta thấy mặc dù neutron có điện tích bằng không, nhưng có momen từ khác không điều này chứng tỏ neutron có cấu trúc bên trong phức tạp.

Proton và neutron tương tác với nhau qua lực hạt nhân, lực này không phân biệt điện tích, khối lượng của proton và neutron xấp xỉ nhau, spin của chúng giống nhau vì vậy trong vật lý hạt nhân, proton và neutron thực chất là hai trạng thái của một hạt gọi chung là nuclon. Chúng có thể biến đổi qua lại lẫn nhau trong điều kiện nhất định.

Các biến đổi tương hỗ giữa neutron và proton.

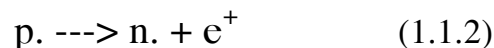
a) Neutron biến đổi thành proton :

Do khối lượng của neutron lớn hơn khối lượng của proton (xấp xỉ 0,14%) vì vậy ở trạng thái tự do neutron phân rã thành proton với chu kỳ bán rã $T_{1/2} = 11,7$ phút.



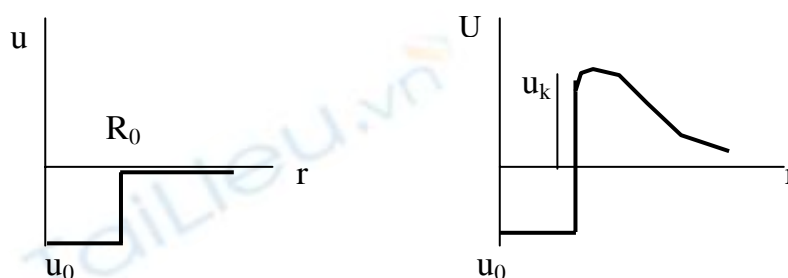
b) Proton biến đổi thành neutron:

Proton là hạt bền, tuy nhiên bên trong hạt nhân phóng xạ beta, proton có thể biến đổi thành neutron:



Hiệu khối lượng các hạt ở hai vế được bù trừ bằng năng lượng hạt nhân truyền cho proton.

Neutron và proton tương tác với nhau qua lực hạt nhân không có bản chất điện, nó liên quan đến sự trao đổi meson. Nếu mô tả sự phụ thuộc thế năng tương tác giữa hai nuclon năng lượng nhỏ và khoảng cách r giữa chúng, thì sự phụ thuộc đó có dạng như sau:



Hình (a): đối với cặp n. -n. hay n. -p.

Hình (b) : đối với cặp p. -p.

Hình vẽ chứng tỏ rằng khi proton và neutron (hoặc neutron và neutron) ở khoảng cách xa nhau $r \gg R_0$; (R_0 là bán kính tác dụng của lực hạt nhân) thì thế năng tương tác bằng không. Khi $r \leq R_0$ thì lực hút giữa các nuclon có tác dụng tạo thành hệ liên kết là hạt nhân. Độ sâu giếng thế khoảng 30MeV, còn R_0 cỡ 10^{-13} cm. Nói đúng hơn thì lực hạt nhân vẫn tồn tại ở $r \geq R_0$ nhưng rất yếu.

Trong trường hợp đối với hai proton tương tác nhau có dạng khác. Ở khoảng cách $r > R_0$ thì không có lực hạt nhân, nhưng thế năng trong trường lực coulomb giữa các proton lại tăng khi r giảm. Trong hạt nhân ở khoảng cách $r < R_0$ lực đẩy coulomb chỉ là một số hiệu chính nhỏ cho lực hạt nhân và có thể bỏ qua. Nếu kể cả hai loại lực đó thì thế năng tổng cộng là một hàm liên tục $U(r)$ với cực đại đặc trưng gọi là *rào thế coulomb* U_k . Muốn lực hạt nhân có tác dụng thì các hạt phải vượt qua rào thế đó. Thí dụ phản ứng nhiệt hạch năng lượng cung cấp phải thật lớn.

II. ĐIỆN TÍCH HẠT NHÂN

Do nguyên tử trung hòa về điện tích, nên tổng số proton trong hạt nhân bằng số electron ngoài vỏ nguyên tử và bằng số Z gọi là *nguyên tử số*. Tổng số các nuclon (Số proton và neutron) trong hạt nhân ký hiệu là A được gọi là *số khối*. Số Z và số A xác định hoàn toàn cấu tạo của một hạt nhân

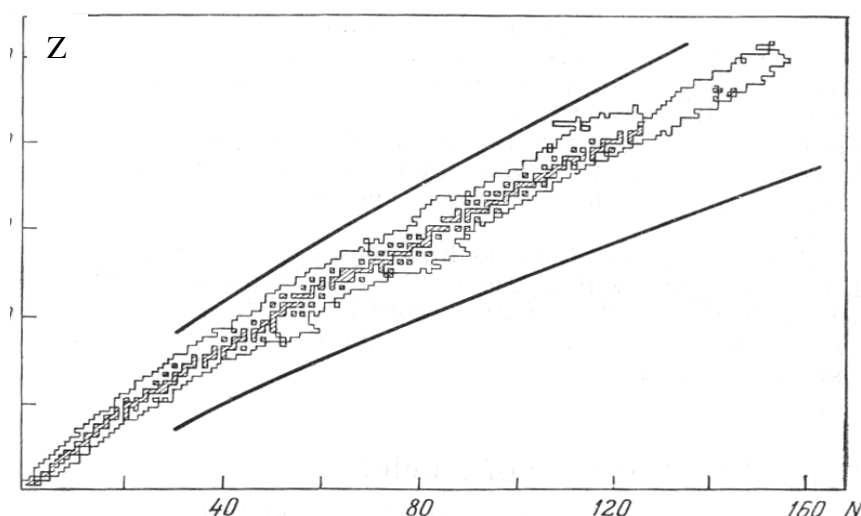
$$A = Z + N.$$

Người ta thường ký hiệu một hạt nhân dưới dạng ${}_Z X^A$; với X là tên hoá học của nguyên tố tương ứng với nguyên tử số Z . Ví dụ ${}_4\text{Be}^9$ là kí hiệu của nguyên tố

Berilium có 4 proton và 5 neutron. Vì tên hoá học phụ thuộc vào số Z , do đó đôi khi để đơn giản người ta không cần ghi số Z , ví dụ Be^9 là đủ nghĩa.

Các hạt nhân có cùng số Z nhưng khác số A (nghĩa là khác số neutron) chúng được gọi là các *hạt nhân đồng vị*. Ví dụ các hạt nhân ${}_{92}\text{U}^{238}$ và ${}_{92}\text{U}^{235}$ là những hạt nhân đồng vị của Uranium. Các hạt nhân có cùng số A nhưng khác số Z gọi là các *đồng khối*. Số nguyên tử Z bằng điện tích của hạt nhân nếu lấy điện tích của electron làm đơn vị. Sự liên hệ giữa số neutron và số proton đối với các hạt nhân bền đã được biết được biểu thị qua giản đồ thực nghiệm dưới đây.

Đường biểu diễn mô tả sự phân bố các hạt nhân bền theo số proton và neutron



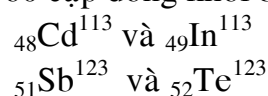
Các hạt nhân nằm trên đường biểu diễn tạo thành một đường gọi là đường bền trên giản đồ. Sau đây là các tính chất thu được từ thực nghiệm của số A và Z đối với các hạt nhân bền.

a. Các hạt nhân có số Z thay đổi từ 1 cho đến 114 đã được phát hiện. Các hạt nhân không có mặt trong tự nhiên có số Z lần lượt bằng: $Z=43$ (techneti), 61 (prometi); và $Z \geq 84$.

b. Các hạt nhân với số A biến thiên từ 1 đến 277 đã được phát hiện. Không có các hạt nhân bền với số $A=5$, 8 và $A \geq 210$.

c. Các tính chất của hạt nhân phụ thuộc mạnh vào các số Z và N là chẵn hay lẻ. Các hạt nhân chẵn - chẵn (số Z chẵn và số N chẵn) là rất bền vững. Ngược lại các hạt nhân lẻ - lẻ (số Z lẻ và số N lẻ) là kém bền vững. Trừ bốn hạt nhân tồn tại trong tự nhiên như những trường hợp ngoại lệ là: ${}_1\text{D}^2$; ${}_3\text{Li}^6$; ${}_5\text{B}^{10}$; và ${}_7\text{N}^{14}$.

d. Các đồng khối bền thường gặp dưới dạng từng cặp có số Z khác nhau hai đơn vị. Hiện nay đã biết hơn 60 cặp đồng khối bền. Nhưng chỉ có hai cặp:



là những đồng khối có số A lẻ và Z khác nhau một đơn vị. Các đồng khối còn lại có A và Z chẵn.

Các phương pháp xác định điện tích hạt nhân

1) Phương pháp xác định điện tích hạt nhân của Moseley:

Phương pháp này dựa vào phổ Roentgen đặc trưng của nguyên tử khi bị chiếu xạ bởi electron hay tia X từ ngoài làm bật các electron ở lớp sâu bên trong. Khi các electron ở các lớp ngoài dịch chuyển về vị trí của các electron đã bị bật ra, sẽ phát tia Roentgen đặc trưng. Tần số ν của bức xạ Roentgen đặc trưng phụ thuộc vào điện tích Z của hạt nhân theo biểu thức:

$$(\nu)^{1/2} = CZ - B \quad (1.2.1)$$

với C và B là hai hằng số cho mỗi dãy bức xạ cho trước, không phụ thuộc vào nguyên tố. Cụ thể, theo Moseley đối với vạch K_α :

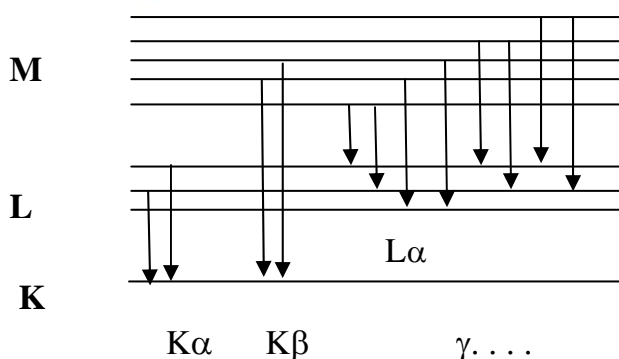
$$\nu_{K\alpha} = R(Z-1)^2 [1/1^2 - 1/n^2] \quad ; n. = 2, 3, \dots$$

$$\text{với dãy L: } \nu_L = R(Z - \sigma_L)^2 [1/2^2 - 1/n^2] \quad ; n. = 3, 4, \dots$$

$$\text{với dãy M: } \nu_M = R(Z - \sigma_M)^2 [1/3^2 - 1/n^2] \quad ; n. = 4, 5, \dots$$

R là hằng số Rydberg = $109676,576 \text{ cm}^{-1}$

σ là hằng số che chắn ít phụ thuộc Z ; $\sigma_K \approx 1$; $\sigma_L \approx 8$.



Sơ đồ các mức năng lượng nguyên tử và các dịch chuyển giữa chúng

2. Phương pháp xác định điện tích của Chadwich:

Năm 1920 Chadwich trực tiếp xác định điện tích Z bằng cách nghiên cứu sự tán xạ của hạt anpha trên lá kim loại mỏng với số Z biết trước. Sơ đồ thí nghiệm được mô tả như hình vẽ sau.

Theo Rutherford, số hạt anpha ghi được ở detector sẽ là:

$$\frac{dN}{N} = n \left(\frac{zZe^2}{2Mv^2} \right)^2 \cdot \frac{d\Omega}{\sin^4 \frac{\theta}{2}} \quad (1.2.2)$$

Trong đó : dN Số hạt anpha tán xạ trong góc khối $d\Omega$ ghi bởi detector

N số hạt anpha (diện tích này thẳng góc với chùm hạt anpha tới) ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)

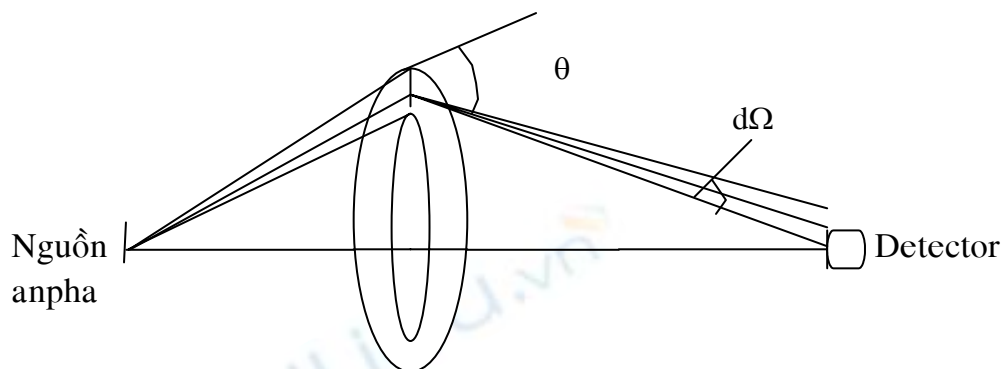
n : Mật độ hạt nhân bia của lá kim loại(/cm²)

Ze : điện tích của hạt nhân bia

M_α, v_α : khối lượng và vận tốc của anpha

Z : điện tích của hạt anpha

θ : góc lệch của anpha.



Sơ đồ thí nghiệm tán xạ anpha lên lá kim loại mỏng

Nếu so sánh số hạt anpha tới với số hạt anpha tán xạ trong góc $d\Omega$, là dN thì tỉ số dN/N sẽ là một hàm của điện tích hạt nhân bia (vận tốc anpha và góc θ không đổi).

Chadwich đã thực hiện thí nghiệm, bia tán xạ là một lá kim loại mỏng có dạng hình vành khăn đặt cách một nguồn phóng xạ anpha. Detector nhấp nháy đặt trên trục của hình vành khăn. Khi đặt một tấm chắn hấp thụ bên trong hình vành khăn, lúc này chỉ ghi được dN , khi không có vật chắn, detector ghi được N . Các giá trị của M và θ được xác định bằng thực nghiệm, qua đó Chadwich đã xác định được số Z của một số nguyên tố kim loại.

III KHỐI LƯỢNG HẠT NHÂN

1. Khối lượng và năng lượng

Theo Einstein, khối lượng và năng lượng có mối liên hệ: $E = mc^2$

Khi năng lượng thay đổi một lượng ΔE tương ứng khối lượng thay đổi $\Delta m = \Delta E/c^2$. một vật đứng yên có khối lượng m_0 tương ứng với năng lượng nghỉ m_0c^2 . Khi vật chuyển động với vận tốc và động năng E_d thì năng lượng toàn phần của vật chuyển động sẽ lớn hơn năng lượng nghỉ một giá trị bằng động năng của nó.

$$E = m_0c^2 + E_d \quad (1.3.1)$$

Do đó, khi vật chuyển động khối lượng của vật tăng lên một lượng $\Delta m = E_d/c^2$.

Theo lý thuyết tương đối thì khối lượng tương đối tính m của vật phụ thuộc vào vận tốc có dạng sau:

$$m = m_0 + \frac{E_d}{c^2} = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}} \quad (1.3.2)$$

$\beta=v/c$. do đó,

$$E = m_0c^2 + E_d = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1-\beta^2}} = mc^2 \quad (1.3.3)$$

thành thử động năng của vật có thể biểu thị theo:

$$E_d = E - m_0c^2 = mc^2 - m_0c^2 = m_0c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right) \quad (1.3.4)$$

khi $v \ll c \rightarrow \beta \ll 1 \rightarrow E_d = m_0v^2/2$

Theo công thức trên ta có:

$$\begin{aligned} E^2 &= m^2c^4 = \frac{m_0^2c^4}{1-\beta^2} = \frac{m_0^2c^4 + m_0^2\beta^2c^4 - m_0^2\beta^2c^4}{1-\beta^2} \\ &= \frac{m_0^2c^4(1-\beta^2) + m_0^2c^4\beta^2}{1-\beta^2} = m_0^2c^4 + p^2c^2 \end{aligned} \quad (1.3.5)$$

$$p = mv = \frac{m_0v}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{m_0v \frac{c}{c}}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{m_0\beta c}{\sqrt{1-\beta^2}} \quad (1.3.6)$$

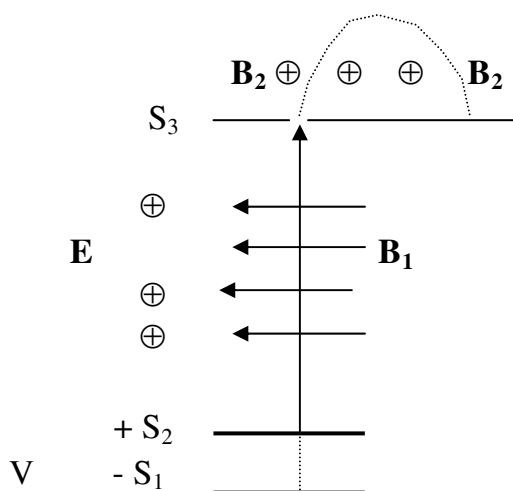
$$E = \sqrt{m_0^2c^4 + p^2c^2} \quad (1.3.7)$$

Trong mọi quá trình tương tác hạt nhân, năng lượng luôn luôn được bảo toàn.

Để đo khối lượng hạt nhân người ta dùng khối phổ kế.

2. Khối phổ kế

Khối phổ kế là một thiết bị mà ngoài việc xác định khối lượng hạt nhân còn có thể tách các đồng vị cũng như xác định thành phần đồng vị của một nguyên tố. Ta biết rằng khối lượng hạt nhân bằng hiệu số của khối lượng nguyên tử đối với khối lượng của các electron (với độ chính xác đến năng lượng liên kết của các electron). Khối phổ kế có nhiều dạng khác nhau tùy theo mục đích và độ chính xác, tuy nhiên về nguyên tắc chúng có những bộ phận chính như sau:



Các ion xuất phát từ nguồn đi qua S_1 được tăng tốc qua một hiệu điện thế V . Sau khi thoát ra khe S_2 các ion đi vào vùng lựa chọn vận tốc. Chỉ những ion nào di chuyển với vận tốc đúng bằng E/B_1 là có thể đi qua khe S_3 trong đó E là một điện trường đều; B_1 là một từ trường đều (thẳng góc với mặt phẳng tờ giấy và có chiều như hình vẽ) giới hạn trong vùng lựa chọn vận tốc. Những ion đi qua được khe S_3 sẽ đi vào vùng từ trường đều B_2 , chúng sẽ đổi hướng, chuyển động trên một quỹ đạo tròn bán kính r . Theo lý thuyết điện từ, trong vùng lựa chọn vận tốc, muốn các ion chuyển động thẳng, ta phải có:

$$qE = qvB_1 \Rightarrow v = E/B_1 \quad (1.3.7)$$

Trong vùng từ trường đều B_2 , lực từ tác dụng vào hạt có quỹ đạo tròn thì:

$$qvB_2 = mv^2/r \Rightarrow mv = qB_2r \quad (1.3.8)$$

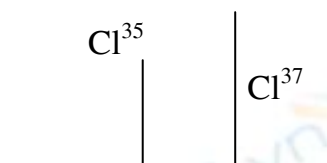
kết hợp hai phương trình trên ta có:

$$m/q = (B_2r)/v \quad (1.3.9)$$

trong đó $v = E/B_1$. Ta có thể tính trực tiếp tỉ số m/q của khối lượng trên điện tích bằng phương trình trên, nếu biết điện tích của ion, ta có thể tính được khối lượng tương ứng của chúng. Khối lượng m tỉ lệ thuận với bán kính r . Đo được trực tiếp khối lượng của ion ta có thể tính được khối lượng nguyên tử trung hoà. Phổ khối lượng của các ion sẽ được ghi lại khi các ion có khối lượng khác nhau rơi vào một bộ phận ghi nhận, ta thu được một phổ kế khối lượng. Ngược lại, nếu ta thu tập các ion vào một máy dò đặt sau S_3 một khoảng cố định $2r$ thì đường biểu diễn của dòng điện do các ion sinh ra theo từ trường B_2 sẽ tạo thành phổ khối lượng.

Có nhiều loại phổ kế khối lượng khác nhau. Năm 1912, J. J. Thomson là người đầu tiên tạo ra phổ kế khối lượng. Trong phổ kế này, Điện trường và từ trường cùng tác dụng trên một phương ở vùng có các ion đi qua. Dùng phổ kế khối lượng này, Thomson nhận thấy bất cứ một nguyên tố hóa học nào cũng đều gồm bởi những nguyên tử có nhiều trị số khối lượng nguyên tử gián đoạn. Những

nguyên tử này có cùng bậc số nguyên tử Z vì thế không thể phân biệt được về phương diện hoá học nhưng lại khác nhau về trị số của khối lượng nguyên tử, chúng là những đồng vị. Ví dụ, nguyên tố Clor (Cl) có khối lượng nguyên tử hoá học trong thiên nhiên là 35,457 amu. Phép đo bằng phổ kế khối lượng cho thấy rằng có hai đồng vị với khối lượng nguyên tử là: 34,980 amu và 36,978 amu. Hai đồng vị Cl^{35} và Cl^{37} với độ giàu tương đối là 5,53 và 24,47 phần trăm theo thứ tự có khối lượng nguyên tử gần bằng hai số nguyên 35 và 37. Hình dưới đây trình bày phổ khối lượng của Clor bằng phổ kế khối lượng.



IV. NĂNG LƯỢNG LIÊN KẾT CỦA HẠT NHÂN

Thực nghiệm cho thấy rằng đối với các hạt nhân bền, thì khối lượng hạt nhân luôn luôn nhỏ hơn tổng khối lượng của các nuclon tạo thành nó. Độ chênh lệch khối lượng đó gọi là độ hụt khối:

$$\Delta M = [Zm_p + (A-Z)m_n - M(A, Z)] \quad (1.4.1)$$

liên hệ với công thức Einstein, độ hụt khối ΔM tương ứng với một năng lượng gọi là năng lượng liên kết của hạt nhân, ký hiệu E_b .

$$E_b = \Delta M c^2$$

$$E_b = [Zm_p + (A-Z)m_n - M(A, Z)]c^2 \quad (1.4.2)$$

biểu thức (1.4.2) là năng lượng liên kết của hạt nhân có ý nghĩa là năng lượng cần thiết để tách hạt nhân ra từng nuclon riêng rẽ.

Một hạt nhân A, Z muốn tách một proton ra khỏi hạt nhân thì năng lượng cần thiết phải đưa vào hạt nhân là :

$$E_b(p) = [m_p + M(A-1; Z-1) - M(A, Z)]c^2 \quad (1.4.3)$$

Tương tự năng lượng cần thiết để tách một neutron ra khỏi hạt nhân là:

$$E_b(n) = [m_n + M(A-1; Z) - M(A, Z)]c^2 \quad (1.4.4)$$

Một hạt nhân A, Z có thể xem là bao gồm hai hạt nhân con A_1, Z_1 và A_2, Z_2

$$\begin{aligned} \text{Với : } A_1 + A_2 &= A \\ Z_1 + Z_2 &= Z \end{aligned} \quad (1.4.5)$$

Ta có năng lượng liên kết của hai hạt nhân con M_1 và M_2 trong hạt nhân $M(A, Z)$ là :

$$E_b(M_1, M_2) = [M_1(A_1, Z_1) + M_2(A_2, Z_2) - M(A, Z)]c^2 \quad (1.4.6)$$

Khối lượng của proton : $m_p = 1,007276 \text{ amu}$

Khối lượng của neutron $m_n = 1,008665 \text{ amu}$

Ví dụ: hạt nhân ${}^8\text{O}^{16}$ năng lượng liên kết theo công thức (1.4.1) ta có :

$$E_b({}^8\text{O}^{16}) = [8 \times 1,007276 + 8 \times 1,008665 - 16,0000]931,502 \approx 118,80 \text{ MeV}$$

Theo trên, muốn phá vỡ hạt nhân ${}^8\text{O}^{16}$ ra thành từng nuclon riêng rẽ, cần phải cung cấp một năng lượng 118,80 MeV. Trong lúc đó, muốn tách một proton ra khỏi hạt nhân ${}^8\text{O}^{16}$ thì năng lượng cần thiết, theo công thức (1.4.3) ta có:

$$E_b(p, {}^7\text{N}^{15}) = [m_p + M(A=15, Z=7) - M(A, Z)]c^2$$

Hạt nhân ${}^7\text{N}^{15}$ có khối lượng 15, 004902 amu. do đó:

$$E_b(p, {}^7\text{N}^{15}) = [1, 007276 + 15, 004902 - 16, 0000]931, 02 \approx 11, 34 \text{ MeV}$$

Năng lượng liên kết của neutron trong hạt nhân O^{16} được tính theo công thức (1. 4. 4).

$$E_b(n, \text{O}^{15}) = [m_n + M(A=15, Z=8) - M(A, Z)]c^2$$

trong đó hạt nhân ${}^8\text{O}^{15}$ có khối lượng 15, 0078 amu, do đó:

$$E_b(n, \text{O}^{15}) = [1, 008665 + 15, 0078 - 16, 0000]931, 502 \approx 15, 33 \text{ MeV}.$$

Trong hạt nhân ${}_{92}\text{U}^{238}$, ta có thể xem gồm hai hạt nhân con ${}^4_2\text{He}$ và ${}_{90}\text{Th}^{234}$, ta hãy tính năng lượng cần thiết để tách hạt anpha ra khỏi hạt nhân U^{238} .

Khối lượng của $\text{U}^{238} = 238,13232 \text{ amu}$; $\text{He}^4 = 4,001523 \text{ amu}$; $\text{Th}^{234} = 234,12394 \text{ amu}$. theo công thức (1. 4. 6) ta có:

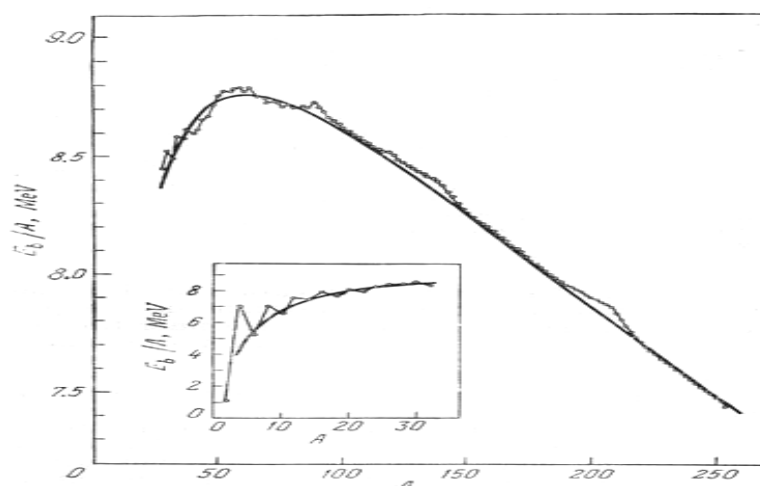
$$E_b(\alpha, \text{Th}^{234}) = [4,001523 + 234,12394 - 238,13232]931,502 \approx -6,39 \text{ MeV}$$

Ta nhận thấy năng lượng liên kết trong trường hợp này có giá trị âm, tức là hạt nhân U^{238} không bền, mà phóng xạ anpha.

Việc nghiên cứu năng lượng liên kết của hạt nhân cho ta nhiều thông tin về tính chất bền vững của hạt nhân, tính phóng xạ và kiểm chứng lý thuyết của các mẫu hạt nhân.

Để đặc trưng cho độ bền vững của hạt nhân người ta đưa ra đại lượng năng lượng liên kết trung bình của hạt nhân được định nghĩa là năng lượng liên kết trung bình tính cho mỗi nuclon trong hạt nhân kí hiệu ε ;

$$\varepsilon = E_b/A \quad (1.4.7)$$



Nghiên cứu giá trị năng lượng liên kết trung bình của các hạt nhân bền trong tự nhiên, qua số liệu thực nghiệm người ta xây dựng đường cong biểu diễn sự phụ thuộc của ϵ theo số khối A có dạng như sau:

Đường biểu diễn sự phụ thuộc năng lượng liên kết trung bình theo số khối A

Trong vùng hạt nhân nhẹ ϵ tăng nhanh theo số khối A , sau đó trong vùng hạt nhân trung bình $20 < A < 50$, khi số khối A tăng, năng lượng liên kết trung bình ϵ hầu như không đổi, khi A tiếp tục tăng, trong vùng hạt nhân nặng giá trị ϵ giảm chậm. Đường biểu diễn có một cực đại tại giá trị $\epsilon \approx 8,8 \text{ MeV}$ tại $A \approx 56$. Từ đường cong thực nghiệm của sự phụ thuộc năng lượng liên kết vào số khối Z ta thấy hạt nhân càng nặng càng khó bền vững.

Việc xác định chính xác năng lượng liên kết của hạt nhân có vai trò quan trọng trong lĩnh vực nghiên cứu, thông thường đo khối lượng của hạt nhân thông qua các máy khối phổ kế. Tuy nhiên dựa vào các công thức xây dựng từ lý thuyết người ta cũng có thể thu được giá trị của năng lượng liên kết hạt nhân khá chính xác.

Công thức bán thực nghiệm của Weizsacker

Thực nghiệm cho thấy tương tác của các nuclon trong hạt nhân có tính chất bão hoà, nghĩa là nuclon chỉ tương tác một số nuclon giới hạn chung quanh nó mà không tương tác với toàn bộ các nuclon có mặt trong hạt nhân. Ngoài ra, nếu xem hạt nhân có dạng hình cầu, nhiều số liệu thực nghiệm cho thấy bán kính hạt nhân tỉ lệ với căn bậc ba số khối A của hạt nhân :

$$R = r_0 A^{1/3} \quad ; r_0 \text{ là một hằng số } r_0 \approx 10^{-13} \text{ cm}$$

Mật độ khối của hạt nhân:

$$\rho = A/V = A/(4/3\pi R^3) \approx 2 \cdot 10^{17} \text{ kg/m}^3 \quad (1.4.8)$$

Mật độ khối của hạt nhân rất lớn. Điều đó có thể xem hạt nhân có hình ảnh như một giọt chất lỏng, hình cầu, mang điện dương và không chịu nén. Dựa

vào mẫu giọt này, Weizsacker Đã đưa ra công thức bán thực nghiệm về năng lượng liên kết như sau:

$$E_b = a_1 A - a_2 A^{2/3} - a_3 Z^2 A^{-1/3} - a_4 (A/2 - Z)^2 / A \pm \delta(A, Z) \quad (1.4.9)$$

trong đó các hằng số a_1, a_2, a_3, a_4 được cho bởi thực nghiệm

$$a_1 = 15,75 \text{ MeV}$$

$$a_3 = 0,710 \text{ MeV}$$

$$a_2 = 17,8 \text{ MeV}$$

$$a_4 = 23,7 \text{ MeV}$$

$\delta(A, Z) = \pm 34 \cdot A^{-3/4} \text{ MeV}$; biểu thức lấy dấu cộng nếu là hạt nhân (chẵn-chẵn), dấu trừ nếu là hạt nhân (lẻ-lẻ).

Giải thích các số hạng trong công thức (1.4.9)

*** Số hạng thứ nhất : $a_1 A$**

Ta biết rằng năng lượng liên kết phụ thuộc vào số nuclon trong hạt nhân, số nuclon càng nhiều thì năng lượng liên kết càng lớn. Nhưng do tương tác giữa các nuclon có tính chất bão hoà, trong vùng hạt nhân trung bình năng lượng liên kết trung bình tính cho mỗi nuclon chỉ cỡ 8MeV/nuclon. Giống như giọt chất lỏng, năng lượng liên kết giữa các phân tử tỉ lệ với thể tích của giọt chất lỏng. Vì vậy số hạng $a_1 A$ còn được gọi là năng lượng thể tích.

*** Số hạng thứ hai : $a_2 A^{2/3}$**

Các phân tử bên trên mặt ngoài của giọt chất lỏng chỉ tương tác với các phân tử ở phía trong làm giảm năng lượng tương tác thể tích. Tương tự như vậy, diện tích mặt ngoài của hạt nhân càng lớn, năng lượng liên kết càng giảm, diện tích mặt ngoài lại tỉ lệ với bình phương bán kính, ($R = r_0 A^{1/3}$) do đó cần phải đưa vào số hiệu chỉnh bề mặt hạt nhân $a_2 A^{2/3}$

*** Số hạng thứ 3: $a_3 Z^2 A^{-1/3}$**

Hạt nhân càng nặng số proton càng nhiều, do đó lực đẩy tĩnh điện hay năng lượng Coulomb càng làm giảm năng lượng liên kết của hạt nhân. Mỗi proton tương tác với $(Z-1)$ proton còn lại, nghĩa là phụ thuộc vào $Z(Z-1)/R \sim Z^2/R$, do đó số hạng hiệu chỉnh cho năng lượng Coulomb sẽ là $a_3 Z^2 A^{-1/3}$

*** Số hạng thứ tư: $a_4 (A/2 - Z)^2 / A$**

Thực nghiệm chứng tỏ rằng đối với các hạt nhân nhẹ và trung bình, các hạt nhân có số proton $Z = A/2$, nghĩa là số proton bằng số neutron thì chúng rất bền vững, tính chất này được mô tả qua nguyên lý loại trừ Pauli, và lực tương tác giữa proton và neutron lớn hơn lực tương tác giữa hai hạt cùng loại số hạng này được gọi là năng lượng đối xứng, tỉ lệ với $(A/2 - Z)^2$. Nhưng với hạt nhân nặng tính chất đối xứng này không còn có ảnh hưởng lớn đến tính bền vững của hạt nhân. Do đó cần phải đưa vào số hiệu chỉnh năng lượng đối xứng:

$$a_4 (A/2 - Z)^2 / A$$

***Số hạng thứ năm $\delta(A, Z)$** : thực nghiệm cho thấy rằng, các hạt nhân chẵn- chẵn có năng lượng liên kết lớn, các hạt nhân lẻ - lẻ năng lượng liên kết yếu, chúng kém bền vững. Vì vậy cần phải đưa vào công thức số hạng hiệu chỉnh $\delta(A, Z)$.

$\delta(A, Z) > 0$ đối với hạt nhân chẵn- chẵn ; $\delta(A, Z) < 0$ đối với hạt nhân lẻ-lẻ

$\delta(A, Z) = 0$ đối với các hạt nhân chẵn-lẻ hoặc lẻ-chẵn.

* Cách tính a_3 : Giả thiết điện tích Ze phân bố đều trong hạt nhân hình cầu, bán kính R . Năng lượng coulomb do sự đẩy nhau của Z proton trong hạt nhân:

$$(a_3 Z^2)/A^{1/3} = [(3/5)(Ze)^2]/R \quad \text{với } R = r_0 A^{1/3}$$

$$\text{suy ra: } a_3 = (3/5)e^2/r_0$$

* Cách tính a_4 : Lấy đạo hàm

$$\left. \frac{\partial M}{\partial Z} \right|_{A=\text{const}} = 0$$

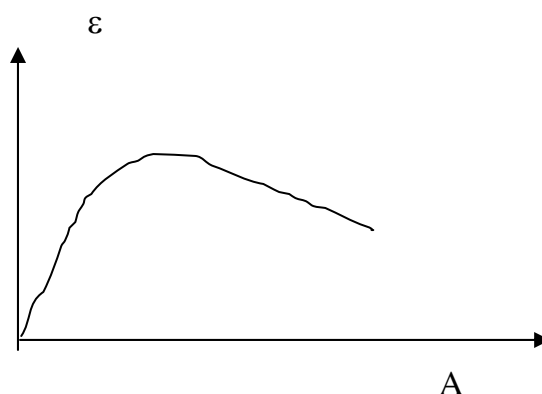
$$\text{Với } M(A, Z) = Zm_p + (A-Z)m_n - E_b/c^2.$$

Ứng dụng công thức Weizsacker

Công thức Weizsacker cho phép ta tính khối lượng hạt nhân tương đối chính xác so với thực nghiệm, ví dụ:

Hạt nhân	Theo công thức	Thực nghiệm
${}_{24}\text{Cr}^{52}$	51, 956	51, 959
${}_{42}\text{Mo}^{98}$	97, 942	97, 949
${}_{92}\text{U}^{238}$	238, 12	238, 12

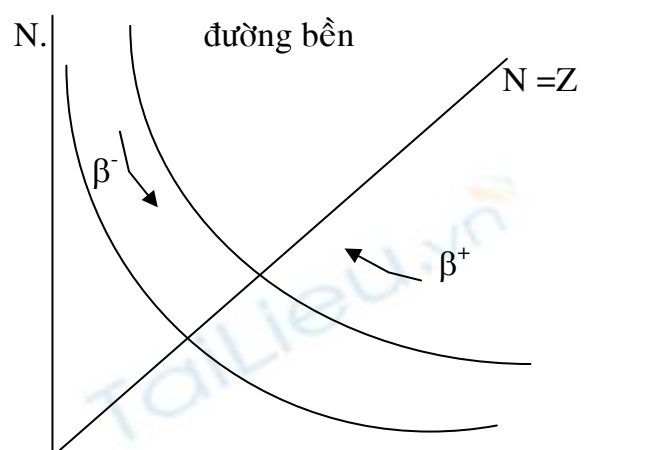
- Công thức Weizsacker cho phép giải thích được dạng tổng quát của đường cong $\varepsilon = f(A)$.



Ở phía trái, các hạt nhân nhẹ, khi A giảm, thể tích V giảm nhanh hơn diện tích mặt ngoài, do đó hiệu ứng bề mặt tăng làm giảm năng lượng liên kết.

Khi A lớn, lực đẩy coulomb tăng (Z^2 : bậc hai) trong lúc năng lượng thể tích tăng tỉ lệ bậc nhất với A làm giảm năng lượng liên kết, nếu A lớn đến một mức nào đó, lực đẩy coulomb tăng, hạt nhân sẽ không bền vững và kết quả về phía trái ε giảm.

Ta thấy năng lượng liên kết có thể xem là hàm của A và Z : $E_b = f(A, Z)$ hay $E_b = f(Z, N)$. Nếu bỏ qua số hạng $\delta(A, Z)$ và coi số proton Z , neutron N . Tăng một cách liên tục thì E_b sẽ ứng với các mặt mô tả nhờ các đường *đẳng năng*. Mặt đẳng năng tạo thành một *thung lũng* mà dọc theo thung lũng đó, sắp xếp các hạt nhân bền nhất. Xem hình vẽ dưới đây.



- Các hạt nhân nằm trên sườn gần trục N , dư thừa neutron vì vậy có khuynh hướng phân rã β^- để tiến về đáy thung lũng.
- Các hạt nhân nằm trên sườn gần trục Z , dư thừa proton vì vậy có khuynh hướng phân rã β^+ để tạo hạt nhân bền gần đáy thung lũng.
- Các hạt nhân nhẹ nhất nằm gần mặt phẳng $N = Z$
- Khi Z tăng thì đáy thung lũng uốn cong, đáy tiến gần trục Neutron, sự uốn cong đó tương ứng với sự tăng dần "nồng độ" các neutron trong hạt nhân khi tăng số khối lượng.
- Các hạt nhân nằm dọc theo một mặt phẳng $Z + N = A = \text{const}$ là các hạt nhân đồng khối, năng lượng liên kết E_b phụ thuộc số Z , theo dạng $f(Z^2)$ vì vậy được mô tả bởi một đường cong parabol:

Với $A = \text{const}$. (các hạt nhân đồng khối)

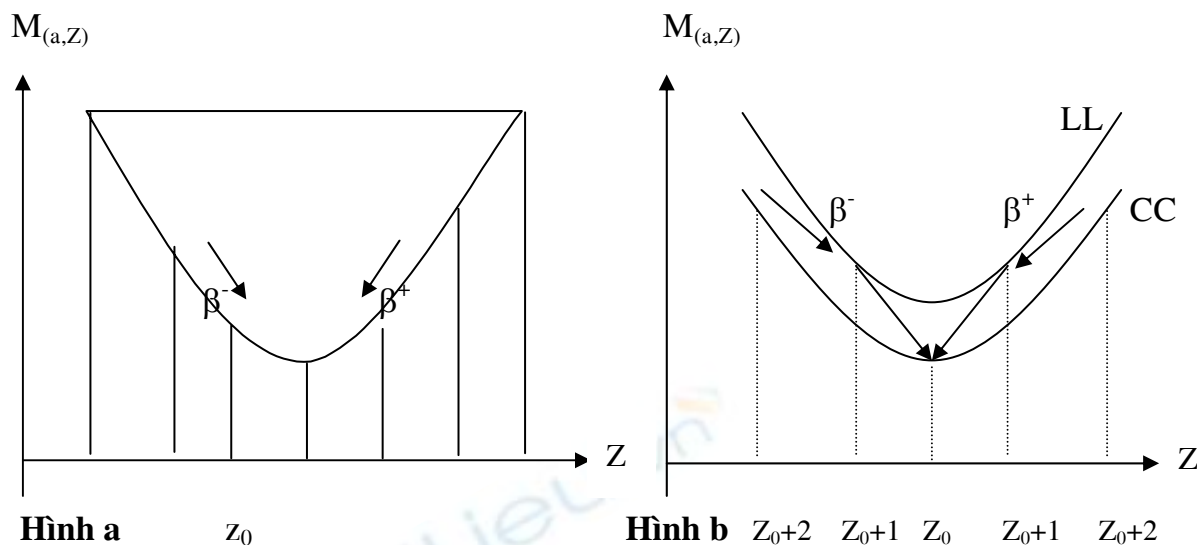
$$E_b = a_1 A - a_2 A^{2/3} - a_3 Z^2 A^{-1/3} - a_4 \frac{(A/2 - Z)^2}{A} \pm \delta(A, Z)$$

* Với các đồng khối có A lẻ: ($\delta(A, Z) = 0$)

Mọi hạt nhân đồng khối đều nằm trên một parabol.

Ta thấy các hạt nhân ở bên nhánh trái phân rã β^- để tiến về hạt nhân bền nằm ở cực tiểu năng lượng (lưu ý không trùng với cực tiểu của parabol). Các hạt nhân ở nhánh phải phân rã β^+ và tiến gần về cực tiểu năng lượng. Hạt nhân bền vững nhất có khối lượng cực tiểu, giá trị Z_0 tương ứng có thể tìm được bằng đạo hàm: $(\partial M / \partial Z)_{A=\text{const}} = 0$ ta thu được giá trị của Z_0

$$Z_0 = A / (1,98 + 0,015A^{2/3}) \quad (1.4.10)$$



Công thức này khá phù hợp với thực nghiệm, giá trị thực không vượt quá $\Delta Z=1$. Do đó nếu A là hàm $M(Z)$ là đơn trị, ứng với mỗi giá trị của A có một giá trị Z_0 ứng với hạt nhân bền (hình vẽ a).

* Đối với hạt nhân có số A chẵn: $(\delta(A, Z) \neq 0)$

Các hạt nhân chẵn- chẵn nằm trên một parabol, các hạt nhân lẻ- lẻ nằm trên một parabol cao hơn parabol của hạt nhân chẵn- chẵn.

Các hạt nhân thuộc parabol trên, ứng với năng lượng liên kết nhỏ hơn, điều đó phản ánh tình hình là các hạt nhân lẻ- lẻ kém bền vững hơn so với các hạt nhân chẵn- chẵn. Mặt khác thực nghiệm cho thấy các hạt nhân lẻ- lẻ kém bền, thường phân rã β để trở thành hạt nhân chẵn- chẵn, do đó $M(A, Z)$ không đơn trị, Parabol trên ứng với Z lẻ, parabol dưới ứng với Z chẵn.

Theo hình vẽ b, các hạt nhân kề nhau cùng trên một parabol khác nhau hai đơn vị về Z , nên đối với hạt nhân Chẵn-Chẵn có thể có vài đồng khối bền, nguyên nhân là về mặt năng lượng không thể có sự chuyển dời của hạt nhân có $Z_0 + 2$ hay $Z_0 - 2$ sang $Z_0 + 1$ hay $Z_0 - 1$ cũng không thể có xác suất phân rã kép β (nếu có thì rất nhỏ) để chuyển trực tiếp từ $Z_0 + 2$ hay $Z_0 - 2$ sang Z_0 .

Tóm lại, đối với mỗi hạt nhân nằm trên parabol có Z lẻ lại có một hạt nhân có khối lượng nhỏ hơn, nhưng điện tích khác nhau một đơn vị nằm ở parabol dưới, mà mọi hạt nhân lẻ lẻ đều không bền ngoại trừ bốn hạt H^2 , Li^6 , B^{10} , N^{14} .

V. KÍCH THUỐC HẠT NHÂN

Theo cơ học lượng tử coi hạt nhân như một hệ hạt ở trạng thái chuyển động và tuân theo nguyên lý bất định Heisenberg:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar$$

Do đó bề mặt hạt nhân bị *nhòe*, khó xác định được ranh giới chính xác kích thước hạt nhân. Có nhiều phương pháp xác định kích thước hạt nhân và cùng đạt được độ lớn như nhau, chỉ sai khác về hệ số. Ta hãy xét vài trường hợp.

1 Phương pháp so sánh năng lượng liên kết hạt nhân gương

Trong các hạt nhân đồng khối nhẹ, có những cặp hạt nhân mà số proton của hạt nhân này bằng số neutron của hạt nhân kia, ta gọi đó là các hạt nhân gương. Ví dụ:

${}_1\text{H}^3$ và ${}_2\text{He}^3$; ${}_3\text{Li}^7$ và ${}_4\text{Be}^7$; ${}_5\text{B}^{11}$ và ${}_6\text{C}^{11}$ là những hạt nhân gương

Người ta đã tìm được gần 40 hạt nhân gương. Năng lượng liên kết của các hạt nhân gương khác nhau, năng lượng liên kết của hạt nhân có nhiều proton hơn phải nhỏ hơn năng lượng liên kết của hạt nhân có nhiều neutron hơn, ví dụ:

$$\Delta E({}_1\text{H}^3) = 8,482 \text{ MeV}$$

$$\Delta E({}_2\text{He}^3) = 7,718 \text{ MeV}$$

Giả thiết lực hạt nhân không có bản chất điện. Tính chất không phụ thuộc nuclon có tính điện hay không có thể giải thích sự giảm của năng lượng liên kết là do lực đẩy coulomb giữa các proton và hiệu năng lượng liên kết bằng năng lượng tĩnh điện E_c của Z proton.

$$\Delta E(A, Z) - \Delta E(A, Z+1) = E_c \quad (1.5.1)$$

E_c phụ thuộc vào sự phân bố điện tích bên trong hạt nhân và kích thước hạt nhân. Giả thiết hạt nhân hình cầu, bán kính R , trong đó điện tích các proton phân bố đều trong toàn thể tích, ta hãy tính E_c :

gọi ρ là mật độ điện tích của hạt nhân do proton gây ra thì:

$$\rho = e/V = e/(4/3\pi R^3) \quad (1.5.2)$$

Xét lớp cầu, bán kính ξ có bề dày $d\xi$, thể tích $4\pi\xi^2 d\xi$ và điện tích:

$$\rho 4\pi\xi^2 d\xi = (e/V) 4\pi\xi^2 d\xi \quad (1.5.3)$$

lớp cầu này gây ra tại $r > \xi$ một điện thế:

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{e}{Vr} \right) 4\pi\xi^2 d\xi \quad (1.5.4)$$

và gây ra tại $r < \xi$ một điện thế:

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e}{V} 4\pi\xi d\xi \quad (1.5.5)$$

Do đó tại điểm r điện thế $U(r)$ do điện tích e phân bố đều theo toàn thể tích V bằng:

$$U(r) = \frac{e}{V\epsilon_0} \left\{ \int_0^r \frac{\xi^2 d\xi}{r} + \int_r^R \xi d\xi \right\} = \frac{e}{2\epsilon_0 V} \left(R^2 - \frac{1}{3}r^2 \right) \quad (1.5.6)$$

với R là bán kính hạt nhân ; r là khoảng cách từ tâm đến điểm bên trong hạt nhân mà tại đó ta xác định điện thế U(r).

Nếu coi hạt nhân có Z+1 proton và điện tích phân bố đều trong toàn thể tích thì năng lượng tương tác của một proton với Z proton còn lại sẽ bằng:

$$E_c = \frac{Ze}{V} \int_0^R U(r) 4\pi r^2 dr = \frac{6}{5} \frac{Ze^2}{R} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \quad (1.5.7)$$

Theo thực nghiệm, năng lượng liên kết của các hạt nhân gờng theo (1.5.1) ta tính được bán kính hạt nhân gờng:

$$\Delta E(A, Z) - \Delta E(A, Z+1) = (6Ze^2/5R)(1/4\pi\epsilon_0) \quad (1.5.8)$$

Nhờ đó ta tính được bán kính hạt nhân R khá phù hợp với công thức thực nghiệm:

$$R = r_0 A^{1/3} \quad (1.5.9)$$

với $r_0 = 1,465 \cdot 10^{-13} \text{cm}$.

2. Phương pháp nhiễu xạ electron nhanh lên hạt nhân

Xuất phát từ quan điểm: nếu electron có bước sóng vào cỡ kích thước hạt nhân, thì khi tán xạ đàn hồi của electron lên hạt nhân phải có hiện tượng nhiễu xạ. Có thể giải thích hiện tượng nhiễu xạ nếu giả thiết electron tán xạ trên quả cầu tích điện đều bán kính R, giá trị R để lý thuyết và thực nghiệm phù hợp nhau là bán kính hạt nhân, đúng hơn là bán kính điện của hạt nhân.

Muốn thế electron phải có năng lượng tương ứng với $\lambda = 10^{-12} \text{cm}$. Khi đạt tốc độ tương đối tính thì $p = E_d/c$;

$$\lambda = h/p = hc/E_d \approx (6.10^{-27} \cdot 3.10^{10}) / (1,6.10^{-6} E_d) \approx 10^{-10} / E_d$$

với $\lambda = 10^{-12} \text{cm}$ thì $E_d \approx 100 \text{MeV}$

Như vậy electron phải có động năng cỡ 100MeV thì có thể quan sát được hiện tượng nhiễu xạ. Bằng phương pháp này người ta đã xác định bán kính của nhiều hạt nhân kể cả bán kính proton.

Giả thiết hạt nhân có dạng cầu bán kính R, người ta tìm được sự phụ thuộc giữa bán kính R và số khối A.

$$R = r_0 A^{1/3}$$

với $r_0 = (1,2 \div 1,3) 10^{-13} \text{cm}$.

Hofstader đã nghiên cứu phân bố điện tích trong hạt nhân bằng phương pháp tán xạ electron nhanh lên hạt nhân, cho phép xác định kích thước trung bình của vùng choán bởi các proton và xác định sự phân bố mật độ điện trong hạt nhân (còn gọi là phân bố Fermi) có dạng:

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{1 + \exp\left(\frac{r - C_0}{a}\right)} \quad (1.5.10)$$

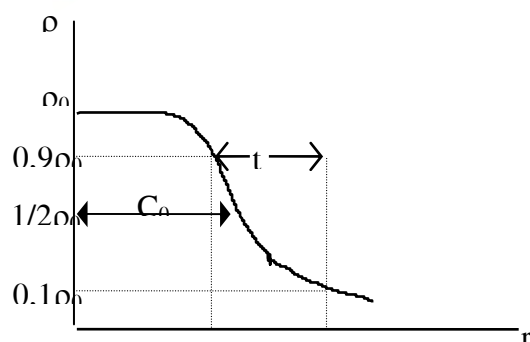
C_0 : khoảng cách tới tâm mà ρ giảm đi một nửa

a : đặc trưng cho độ giảm mật độ điện tích khi ra xa tâm hạt nhân.

Mật độ $\rho(0) = \rho_0$ nếu $C_0 \gg a$.

Gọi t là khoảng cách mà mật độ giảm từ $0,9\rho_0$ đến $0,1\rho_0$. Khi Z giảm, mật độ điện giảm. Khi $Z < 6$ thì vùng đó biến mất hoàn toàn, lúc này bề dày của lớp mặt ngoài đó $\approx 4,4a$.

Còn với hạt nhân có A : 40 đến 208 thì t có cùng một giá trị khoảng 2,4 fermi, do đó $a \approx 0,55$ fermi. Mật độ neutron xấp xỉ mật độ proton với cùng các thông số sai khác nhau không nhiều. Vì vậy, thực tế có thể coi kích thước hạt nhân được xác định với độ chính xác cao bởi phân bố điện tích trong hạt nhân.



Phân bố mật độ điện tích trong hạt nhân

Ngoài các phương pháp trên, còn có thể kể đến phương pháp tán xạ neutron nhanh lên hạt nhân. Neutron nhanh, tiết diện tán xạ tỉ lệ với bán kính $\sigma \approx 2\pi R^2$ do đó, nếu xác định được tiết diện tương tác, ta có thể thu được bán kính hạt nhân. Với phương pháp này công thức thực nghiệm $R = r_0 A^{1/3}$ vẫn nghiệm đúng. Trong đó $r_0 = (1,3 \div 1,4) 10^{-13}$ cm.

VI. SPIN HẠT NHÂN

Momen động lượng toàn phần của hạt nhân gọi là spin hạt nhân, đây là một đặc trưng rất quan trọng của hạt nhân vì ta có thể xem hệ toàn bộ giống như một hạt duy nhất.