

CHƯƠNG III PHẢN ỨNG HẠT NHÂN

I PHÂN LOẠI PHẢN ỨNG HẠT NHÂN

Hai hạt nhân hoặc hạt nhân và nuclon đi lại gần nhau đến khoảng cách của tầm lực hạt nhân thì tương tác với nhau hết sức mạnh mẽ, tương tác hạt nhân dẫn đến biến đổi hạt nhân. Quá trình đó là quá trình phản ứng hạt nhân, phản ứng hạt nhân dẫn đến phân phối lại năng lượng và xung lượng giữa hai hạt đồng thời phát ra các hạt mới.

Nếu dựa vào hạt bay đến, thường là hạt nhẹ người ta phân loại phản ứng hạt nhân gồm:

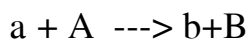
- Phản ứng hạt nhân dưới tác dụng của neutron
- Phản ứng hạt nhân dưới tác dụng của hạt tích điện như $p, e, \alpha, D, T, \dots$
- Phản ứng hạt nhân dưới tác dụng của lượng tử gamma.

Nếu dựa vào cơ chế phản ứng người ta phân loại:

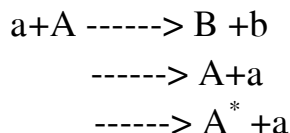
- Phản ứng hạt nhân trực tiếp
- Phản ứng hạt nhân hợp phần.

Các phản ứng hạt nhân đặc biệt như: phản ứng phân hạch hạt nhân nặng, phản ứng nhiệt hạt nhân hay phản ứng tổng hợp, phản ứng tạo thành các nguyên tố mới. . .

Thường hạt bay tới là hạt nhẹ a , hạt nhân bia đứng yên A . Sản phẩm của phản ứng cũng bao gồm một hạt nhẹ b và một hạt nặng B .



Đôi lúc người ta ký hiệu: $A(a, b)B$, nếu chỉ quan tâm đến hạt bay tới và hạt bay ra sau phản ứng người ta chỉ ghi (a, b) . ; a và b có thể là những hạt $p, n, \alpha, \gamma, D, \dots$. Quá trình phản ứng có thể xảy ra theo nhiều kênh cạnh tranh nhau phụ thuộc năng lượng của hạt bay tới.



Kênh $(A^* + a)$ gọi là *tán xạ không đàn hồi*, hạt nhân sau phản ứng ở trạng thái kích thích. Kênh $(A + a)$ là quá trình *tán xạ đàn hồi* trong đó trạng thái bên trong của hạt nhân không thay đổi.

Khi nghiên cứu các phản ứng hạt nhân ta cần xác định các kênh của phản ứng, xác suất tương đối của các kênh khác nhau tùy theo năng lượng và các hạt tham gia phản ứng, năng lượng và phân bố góc của các hạt bay ra, trạng thái bên trong hạt nhân (năng lượng kích thích, spin, độ chẵn lẻ. . .). Nhiều vấn đề của

phản ứng hạt nhân có thể được xác định nhờ áp dụng các định luật bảo toàn, kết quả là phản ứng hạt nhân chỉ có thể xảy ra theo những kênh nhất định nào đó mà thôi. Các định luật bảo toàn quan trọng trong phản ứng hạt nhân là: nuclon, năng lượng, xung lượng, chấn lẽ, spin đồng vị.

II CÁC ĐỊNH LUẬT BẢO TOÀN

1. Định luật bảo toàn điện tích và số nuclon

Nhiều nghiên cứu thực nghiệm chứng tỏ rằng: *Tổng đại số điện tích của các hạt tham gia phản ứng bằng tổng đại số điện tích các sản phẩm của phản ứng.* Ngoài ra trong các phản ứng thông thường (không sinh phản hạt) thì *số nuclon toàn phần được bảo toàn.*

2. Định luật bảo toàn năng lượng và xung lượng

Hạt nhân có kích thước rất nhỏ (cỡ 10^{-12} cm), liên kết hoá học giữa các nguyên tử lại rất nhỏ, vì vậy hệ hai hạt nhân tương tác với nhau có thể xem là một hệ cô lập, do đó: *Tổng năng lượng cũng như xung lượng của các hạt trong hệ được bảo toàn.*

a. Năng lượng phản ứng

Xét phản ứng $a + A \rightarrow B + b$ định luật bảo toàn năng lượng viết:

$$(m_a + m_A) c^2 + T_a + T_A = (m_b + m_B) c^2 + T_b + T_B \quad (3.2.1)$$

Trong đó T_i : là động năng của hạt i .

Đặt $E_{01} = (m_a + m_A) c^2$; $E_{02} = (m_b + m_B) c^2$ gọi là năng lượng nghỉ,

$T_1 = T_a + T_A$; $T_2 = T_b + T_B$ là động năng trước và sau phản ứng.

Thường hạt nhân bia A đứng yên, $T_1 = T_a$.

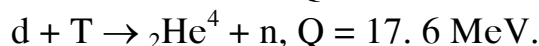
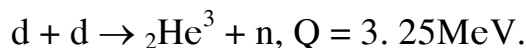
Nói chung $E_{01} \neq E_{02}$, ký hiệu $E_{01} - E_{02}$ được gọi là năng lượng của phản ứng.

Ký hiệu là Q : $Q = E_{01} - E_{02} = T_2 - T_1 \quad (3.2.2)$

* Nếu $Q > 0$: Thì phản ứng xảy ra kèm theo sự tỏa động năng nhờ năng lượng nghỉ giảm đi, gọi là *phản ứng tỏa năng*. Phản ứng tỏa năng có thể xảy ra với bất kỳ năng lượng nào của hạt tới (nếu năng lượng này đủ để vượt qua rào thế Coulomb của hạt nhân nếu hạt tới tích điện).

*. Nếu $Q < 0$: Thì phản ứng xảy ra kèm theo sự tăng năng lượng nghỉ nhờ việc giảm động năng, gọi là *phản ứng thu năng*. Phản ứng thu năng chỉ xảy ra khi năng lượng hạt tới đủ cao: Vì từ $Q = T_2 - T_1$ suy ra $T_1 = T_2 + |Q|$.

*. Nếu $Q = 0$: Ứng với trường hợp tán xạ đàn hồi, lúc đó $T_2 = T_1$, $E_{01} = E_{02}$, định luật bảo toàn không những đúng với năng lượng toàn phần mà đúng cả với năng lượng nghỉ và động năng của từng hạt tham gia phản ứng. (Nghĩa là cả khối lượng của từng hạt). Ví dụ: Phản ứng tỏa năng



Năng lượng tổng hợp hạt nhân nhẹ này $\sim 10^6$ lần lớn hơn năng lượng hóa học và chính là năng lượng trong phản ứng nhiệt hạt nhân. Phản ứng phân hạch hạt nhân uran (${}^{235}\text{U}$) cũng thuộc loại tỏa năng và cho năng lượng cỡ 200 MeV ở dạng chủ yếu là động năng của các mảnh.

Các phản ứng $\text{Li}^7(p, n){}_4\text{Be}^7$, ${}_4\text{Be}^9(\gamma, n){}_2\text{He}^4$, ${}_{16}\text{S}^{32}(n, p)$, ${}_7\text{N}^{14}(\alpha, p){}_8\text{O}^7$ đều có $Q < 0$,

$$Q \sim -(1 + 2)\text{MeV}.$$

b) Sơ đồ năng lượng của phản ứng hạt nhân

Từ $a + A \rightarrow B + b$, định luật bảo toàn xung lượng:

$$\mathbf{P}_a + \mathbf{P}_A = \mathbf{P}_b + \mathbf{P}_B, \quad (3.2.3)$$

thường thường $\mathbf{P}_A = 0$, $\mathbf{P}_a = \mathbf{P}_b + \mathbf{P}_B$. Theo giả thiết của N. Bohr có thể xem phản ứng xảy ra theo hai giai đoạn.

Giai đoạn 1:



Hạt nhân 0 có các tham số hạt nhân hoàn toàn xác định (điện tích, khối lượng, hệ thống các mức năng lượng, Spin. . .) có thời gian sống khá lâu cỡ $> 10^{-16}$ s.

Giai đoạn 2:



Chúng ta hãy xét giai đoạn đầu : $a + A \rightarrow 0$

Định luật bảo toàn xung lượng: $\mathbf{P}_a = \mathbf{P}_0$

Định luật bảo toàn năng lượng: $(m_a + m_A)c^2 + T_a = m_0^*c^2 + T_0 \quad (3.2.4)$

trong đó P_0 , $m_0^*c^2$, T_0 lần lượt là động lượng, năng lượng nghỉ, động năng của hạt nhân hợp phần 0 ở trạng thái kích thích.

Ta hãy tính $m_0^*c^2$ (trong trường hợp không tương đối nghĩa là $T_a \sim 10\text{MeV}$)

$$\begin{aligned} (m_a + m_A)c^2 + T_a &= m_0^*c^2 + T_0 & \text{Suy ra} \\ m_0^*c^2 &= (m_a + m_A)c^2 + T_a - T_0 \end{aligned} \quad (3.2.5)$$

$$\text{- Ta tính } T_0: T_0 = \frac{P_0^2}{2m_0^*} = \frac{P_a^2}{2M_0^*}, (\vec{P}_0 = \vec{P}_a) \quad (3.2.6)$$

$$\text{- Từ biểu thức (3.2.5)} \Rightarrow M_0^*c^2 = (m_a + m_A)c^2 + T_a \left(1 - \frac{m_a}{M_0^*}\right). \quad (3.2.7)$$

Ta thấy rằng $T_a (1 - m_a/M_0^*) < T_a \leq 10\text{MeV}$ số lượng này rất nhỏ thua số hạng: $(m_a + m_A)c^2 \sim 931A(\text{MeV})$ (A là số khối lượng tổng cộng của hai hạt $A+a$), vì vậy ở gần đúng bậc một có thể coi : $M_0^*c^2 \approx (M_A + m_a)c^2$.

Do đó biểu thức gần đúng bậc hai của M^*c^2 có thể viết thành :

$$\begin{aligned} M_0^*c^2 &= (m_A + m_a)c^2 + T_a(1 - m_a/m_{A+m_a}) \\ &= (m_A + m_a)c^2 + T_a(m_A/m_{A+m_a}) \end{aligned} \quad (3.2.8)$$

$$T_0 = (m_a/m_0^*)T_a \text{ có thể viết : } T_0 = (m_a/m_{A+m_a})T_a \quad (3.2.9)$$

Biết khối lượng của hạt nhân hợp phần kích thích (M_0^*) ta có thể xác định năng lượng kích thích của nó:

$$W = M_0^*c^2 - M_0c^2 = (m_A + m_a - M_0)c^2 + (m_a/m_{A+m_a})T_a \quad (3.2.10)$$

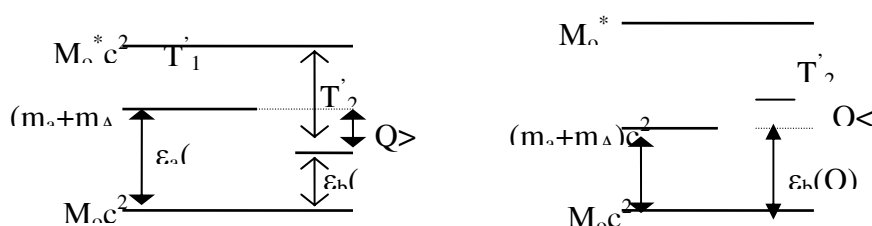
Trong biểu thức (3.2.10), số hạng thứ nhất là năng lượng liên kết của hạt nhân a đối với hạt nhân O ký hiệu $\varepsilon_a(o)$; số hạng thứ hai là động năng của các hạt nhân A và a trong hệ khối tâm ký hiệu T_1 còn gọi là động năng tương đối.

Năng lượng kích thích của hạt nhân hợp phần $W = \varepsilon_a(o) + T_1$

Nếu $W \neq 0$ ngay cả khi $T_1 = 0$ (nghĩa là $T_a=0$) ; còn nếu $T_a \neq 0$ thì T_a chia làm hai phần:

Phần $T_1 = (m_A/m_{A+m_a})T_a$ dùng để kích thích hạt nhân hợp phần.

Phần $T_0 = (m_a/m_{A+m_a})T_a$ dùng cho chuyển động của hạt nhân hợp phần: $T_1 + T_0 = T_a$ Chúng ta hãy biểu diễn quá trình tạo nên hạt nhân hợp phần kích thích theo sơ đồ năng lượng và quá trình phân rã ra hai hạt B và b trong hai trường hợp $Q > 0$ và $Q < 0$.



T_2 là động năng tương đối của b và B trong hệ khối tâm. Phản ứng tỏa năng $Q = T_2 - T_1 = \varepsilon_a - \varepsilon_b$. Trường hợp phản ứng thu năng $Q = T_2 - T_1 < 0$ do đó:

$$T_1 = |Q| + T_2 \text{ nghĩa là } T_1 \geq |Q| \quad (3.2.11)$$

Dấu bằng ứng với giá trị nhỏ nhất của động năng tương đối của các hạt A và a mà phản ứng có thể xảy ra được.

$$(T_1)_{\min} = |Q|$$

ta có $T_1 = (m_A/m_{A+m_a})T_a$, suy ra điều kiện năng lượng nhỏ nhất của hạt bay tới a mà phản ứng có thể xảy ra gọi là ngưỡng của phản ứng.

$$[(m_A/m_{A+m_a})T_a]_{\min} = |Q| \implies (T_a)_{\min} = \frac{m_A + m_a}{m_A}|Q| \quad (3.2.12)$$

$$\text{nghĩa là } (T_a)_{\min} = |Q| + (m_a/m_A)|Q| = |Q| + (m_a/m_{A+m_a})T_{a, \min} \quad (3.2.13)$$

$$T_{a, \min} = |Q| + (T_0)_{\min}$$

Ta thấy $T_{a, \min}$ lớn hơn $|Q|$ một lượng chính bằng động năng của hạt nhân hợp phần. Ta hãy xét vài thí dụ:

. Xét phản ứng hạt nhân



Động năng nhỏ nhất của neutron để xảy ra phản ứng :

$$(T_n)_{\min} = |Q|(m_A + m_a/m_A) = 0,92(32+1/32) \approx 0,95 \text{ MeV}$$

lúc này ở giá trị ngưỡng của phản ứng thì $T'_1 = Q$ còn $T'_2 = 0$ (nghĩa là các sản phẩm của phản ứng đứng yên trong hệ tâm quán tính - hệ khối tâm) và chuyển động trong hệ phòng thí nghiệm với cùng vận tốc (là vận tốc của hệ khối tâm trong hệ phòng thí nghiệm). Như vậy động năng của hạt nhân hợp phần:

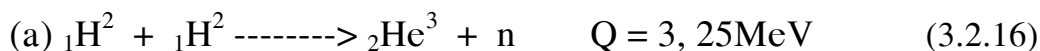
$$T_o = [m_a/(M_a + m_a)] \cdot T_a$$

$T_o = (1/33) \cdot 0,95 = 0,03 \text{ MeV}$ được phân chia đều cho các hạt nhân sản phẩm theo khối lượng của chúng nghĩa là:

$$T_p/T_{P32} = 1/32 \text{ nghĩa là } T_p = (1/33) \cdot T_o \approx 1 \text{ KeV}$$

Chú ý rằng động năng của proton tạo thành nhỏ nhất là 1 KeV, nghĩa là luôn luôn khác không (trong hệ phòng thí nghiệm) và không bao giờ nhỏ hơn 1 KeV.

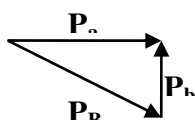
. Xét hai phản ứng tổng hợp hạt nhân nhẹ tỏa năng



Các phản ứng này cho ta thu được các neutron nhanh rất đơn năng. Chúng ta xét trường hợp đặc biệt, khi hạt b (là neutron) bay ra dưới một góc 90° so với phương của hạt tác dụng a (Deuteron).

Định luật bảo toàn động lượng : $\mathbf{P}_a = \mathbf{P}_b + \mathbf{P}_B$ (hạt A ban đầu đứng yên).

$$T_a = T_1; \quad T_b + T_B = T_2; \quad Q = T_2 - T_1; \quad T_a + Q = T_2 = T_b + T_B \quad (*)$$



$$P_a^2 + P_b^2 = P_B^2$$

$$P_a^2 + P_b^2 = P_B^2$$

$$\text{Từ công thức } P^2 = 2mT \text{ ta có : } (m_a/m_B)T_a + (m_b/m_B)T_b = T_B \quad (**)$$

Từ (*) và (**) ta có:

$$T_b = \frac{m_B}{m_b + m_B} Q + \frac{m_B - m_a}{m_b + m_B} T_a \quad (3.2.18)$$

Với giá trị động năng cỡ $T_a \approx 0,2 \text{ MeV}$, phản ứng xảy ra rất mạnh. Trong trường hợp này động năng của neutron bay ra dưới một góc 90° so với chùm deuteron tới là:

$$T_n = (3/4) \cdot 3,25 + (1/4) \cdot 0,2 \approx 2,5 \text{ MeV} \quad (\text{với phản ứng a})$$

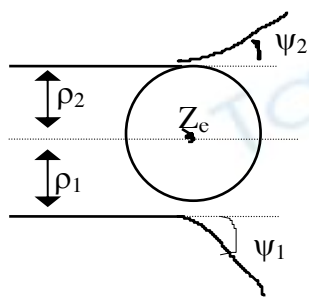
$$T_n = (4/5) \cdot 17,6 + (2/5) \cdot 0,2 \approx 14 \text{ MeV} \quad (\text{với phản ứng b})$$

Muốn có neutron đơn năng ta phải tạo được côlimatơ sao cho chùm neutron theo hướng vuông góc với chùm hạt đơteri tới và phải tạo được chùm đơteri thật đơn năng. Ống gia tốc có thể tạo được chùm đơterôn đơn năng tốt, tuy nhiên bề dày của bia làm giảm độ đơn năng (thường dày hơn nhiều lần quãng chạy của deuteri trong vật liệu bia) mặc dù vậy độ đơn năng trong thực nghiệm đạt cỡ $(1 \div 2) \%$.

3. Giải đồ xung lượng của phản ứng hạt nhân

a. Tán xạ đàn hồi của các hạt và giải đồ xung lượng trong tán xạ

Trong tán xạ đàn hồi, tổng động năng của hai hạt không thay đổi chỉ có sự phân phối lại động năng và thay đổi lại phương chuyển động của hai hạt. Trong vật lý hạt nhân, lực tương tác trong tán xạ đàn hồi là lực Coulông và lực hạt nhân.



Đặc trưng cho tán xạ là tham số va chạm, khoảng cách nhắm ρ (cổ điển) số lượng tử momen quỹ đạo l (lượng tử). Nếu $\rho_2 > \rho_1$ thì $\psi_1 > \psi_2$, ρ phải nhỏ hơn bán kính tác dụng của lực hạt nhân a .

Theo cơ học lượng tử thì hạt có xung lượng $\mathbf{P}$, với $\rho < a$ thì ρ cũng chỉ nhận những giá trị gián đoạn:

$$\rho_l = \frac{\hbar}{p} \sqrt{l(l+1)} = \lambda \sqrt{l(l+1)} < a, \quad l = 0, 1, 2, \dots \quad (3.2.19)$$

$$\text{Với momen động lượng của hạt } |\mathbf{M}| = p\rho = \hbar[l(l+1)]^{1/2} \quad (3.2.20)$$

Ta hãy xét giải đồ xung lượng của tán xạ.

Nếu phương chuyển động của hạt bị tán xạ được biết (từ thực nghiệm) thì ta sẽ có một phương pháp hình học đơn giản để xác định vận tốc và phương chuyển động của hạt bay tới, phương pháp này được gọi là phương pháp giải đồ xung lượng. Để thiết lập giải đồ này ta sử dụng hai hệ tọa độ: Hệ phòng thí nghiệm và hệ khối tâm.

Các đại lượng thực nghiệm như góc, khoảng cách, vận tốc. . . thường được đo trong hệ tọa độ gắn với mỗi thí nghiệm, phòng thí nghiệm. *Hệ tọa độ phòng thí nghiệm* tiện lợi trong việc mô tả cụ thể các kết quả thực nghiệm đo được.

Tuy nhiên, để phân tích tiện lợi các kết quả thực nghiệm thì người ta thường dùng *hệ tọa độ tâm quán tính*, trong đó điểm không chuyển động là khối tâm, hay trọng tâm của hai hạt, được chọn làm gốc tọa độ. Trong hệ tâm quán tính thì xung lượng của hai hạt luôn luôn bằng nhau về giá trị và ngược chiều.

Nếu hai hạt có khối lượng bằng nhau $M_1 = M_2 = M$ mà một hạt đứng yên còn hạt kia chuyển động với vận tốc $\vec{v}$, thì tâm quán tính của hệ luôn luôn nằm giữa khoảng cách giữa hai hạt và chuyển động trong hệ phòng thí nghiệm với vận tốc $v_{qt} = \frac{v}{2}$. Do đó, vận tốc v'_1 của hạt M_1 đối với hệ tâm quán tính sẽ là:

$$\begin{aligned} v'_1 &= v - v_{qt} = \frac{v}{2} \\ v'_2 &= 0 - v_{qt} = -\frac{v}{2} \end{aligned} \quad (3.2.21)$$

Xung lượng của hai hạt trong hệ quán tính:

$$\begin{aligned} p'_{M_1} &= M_1 v'_1 = M \frac{v}{2}, p'_{M_2} = M_2 v'_2 = -M \frac{v}{2} \\ \rightarrow |\vec{p}'_{M_1}| &= |\vec{p}'_{M_2}| \end{aligned} \quad (3.2.22)$$

Nếu khối lượng M_1 và M_2 khác nhau, thì tâm quán tính của hệ nằm giữa hai hạt và chia khoảng cách giữa hai hạt thành hai đoạn tỷ lệ nghịch với khối lượng.

$$\begin{array}{ccc} x & x_{yt} & O \\ \bullet & \bullet & \bullet \\ M_1 \rightarrow & O' & M_2 \end{array} \quad \frac{M_1 O'}{O' M_2} = \frac{M_2}{M_1}$$

Nếu M_2 đứng yên còn M_1 chuyển động vận tốc $\vec{v}$ thì ta đặt gốc tọa độ 0 phòng thí nghiệm ở M_2 , tọa độ M_1 trong hệ phòng thí nghiệm là x , tọa độ tâm quán tính O' là x'_{qt}

$$\begin{aligned} \frac{x_{qt}}{x - x_{qt}} &= \frac{M_1}{M_2} \quad \text{và} \quad x_{qt} = \frac{M_1}{M_1 + M_2} x \\ v_{qt} &= \frac{M_1}{M_1 + M_2} v \end{aligned} \quad (3.2.23)$$

Do đó vận tốc của các hạt M_1 và M_2 trong hệ tâm quán tính là:

$$\begin{aligned} v'_{M_1} &= v - v_{qt} = \frac{M_2}{M_1 + M_2} v \\ v'_{M_2} &= -v_{qt} = -\frac{M_1}{M_1 + M_2} v \end{aligned} \quad (3.2.24)$$

$\vec{v}_{qt} = \frac{M_1}{M_2 + M_1} \vec{v}$, trong chuyển động này cả hai hạt cùng tham gia vào, cho nên cả hai hạt đều có thêm những xung lượng phụ của chuyển động theo.

$$(\vec{P}_{M_1})_{theo} = M_1 v_{qt} = \frac{M_1^2}{M_1 + M_2} v = \frac{M_1}{M_1 + M_2} \vec{P}_{M_1} \quad (3.2.27)$$

$$(\vec{P}_{M_2})_{theo} = M_2 v_{qt} = \frac{M_2 M_1}{M_1 + M_2} v = \frac{M_2}{M_1 + M_2} \vec{P}_{M_1}$$

$(\vec{P}_{M_1})_{theo}$ và $(\vec{P}_{M_2})_{theo}$ được biểu diễn bằng các đoạn $A\vec{O}$ và $O\vec{B}$ trên hình vẽ.

Do đó xung lượng của hạt M_1 trong hệ quán tính sau va chạm là $\vec{P}'_{M_1} = O\vec{D}$, còn xung lượng phụ của nó để chuyển về hệ phòng thí nghiệm sẽ là $A\vec{O}$. Tổng hợp hai vectơ đó ta được vectơ: $A\vec{D} = O\vec{D} + A\vec{O}$, chính là $\vec{P}_{M_1}$ là xung lượng của M_1 sau khi va chạm trong hệ phòng thí nghiệm.

Tương tự tổng hợp hai vectơ $\vec{P}_{M_2} = O\vec{E}$ và $(\vec{P}_{M_2})_{theo} = O\vec{B}$ ta thu được vectơ: $D\vec{B} = O\vec{B} + O\vec{E} = O\vec{B} - O\vec{D}$, biểu diễn xung lượng giật lùi của hạt nhân sau va chạm trong hệ thí nghiệm.

Điều kết luận trên là đúng với thực tế vì các vectơ xung lượng $A\vec{D}$ và $D\vec{B}$ cùng với xung lượng của hạt M_1 là $\vec{P}_{M_1} = A\vec{B}$ đã tạo nên một tam giác cho nên:

$$\vec{P}_{M_1} = \vec{P}_{M_1} + \vec{P}_{M_2} \text{ đúng với định luật bảo toàn động lượng.}$$

Tóm lại, chúng ta có thể nêu lên bản sau đây về xung lượng của các hạt tán xạ trong hệ tọa độ tâm quán tính và hệ tọa độ phòng thí nghiệm:

$\vec{P}$	M_1	M_2
$\vec{P}_{ptn}$	$\vec{P}_{M_1} = A\vec{B}$	$\vec{P}_{M_2} = 0$
$\vec{P}_{tqt}$	$\vec{P}'_{M_1} = \frac{M_2}{M_1 + M_2} \vec{P}_{M_1} = O\vec{B}$	$\vec{P}'_{M_2} = -\frac{M_2}{M_1 + M_2} \vec{P}_{M_1} = O\vec{C}$
$\vec{P}_{tqt}$	$\vec{P}'_{M_1} = O\vec{D}$	$\vec{P}'_{M_2} = O\vec{E} = -\vec{P}'_{M_1}$
$\vec{P}_{theo}$	$(\vec{P}_{M_1})_{theo} = M_1 v_{tqt} = \frac{M_1}{M_1 + M_2} \vec{P}_{M_1} = A\vec{O}$	$(\vec{P}_{M_2})_{theo} = M_2 v_{tqt} = \frac{M_2}{M_1 + M_2} \vec{P}_{M_1} = O\vec{B}$
$\vec{P}_{ptn}$	$\vec{P}_{M_1} = O\vec{D} + A\vec{O} = A\vec{D}$	$\vec{P}_{M_2} = O\vec{B} + O\vec{E} = O\vec{B} - O\vec{D} = D\vec{B}$

Như vậy để thu được xung lượng của hạt tán xạ và hạt nhân giật lùi ta cần phải làm những động tác sau đây trong giản đồ xung lượng:

a - Vẽ vectơ $A\vec{B}$ bằng xung lượng của hạt tán xạ tới, khối lượng M_1 $A\vec{B} = \vec{P}_{M_1}$.

b - Dùng điểm O chia đoạn AB theo tỷ số khối lượng $\frac{AO}{OB} = \frac{M_1}{M_2}$.

c - Từ A vẽ đường thẳng tạo thành một góc θ với phương AB (góc bay của hạt tới sau va chạm có thể xác định bằng thực nghiệm) cắt vòng tròn tại điểm D và nối DB.

d - Vẽ đường kính đi qua D.

Trên giản đồ này thì: $A\vec{D}$ biểu xung lượng của hạt tán xạ sau va chạm. Góc $B\hat{A}D = \theta$ là góc tán xạ của M_1

$D\vec{B}$ bằng xung lượng của hạt nhân dật lùi

Góc $D\hat{B}A = \varphi$ là góc tán xạ của hạt nhân giạt lùi M_2

Góc $D\hat{O}B = \theta$ Là góc tán xạ của M_1 trong hệ tâm quán tính trước và sau khi va chạm.

$O\vec{C}$ và $O\vec{E}$ là xung lượng của hạt M_2 trong hệ tâm quán tính trước và sau khi va chạm, chúng ta nêu lên những hệ thức sau đây thu được từ giản đồ xung lượng trên (không tính toán cụ thể).

e - Động năng tổng cộng của hai hạt trong hệ tâm quán tính (động năng tương đối) bằng:

$$T' = \left(\frac{M_1 M_2}{M_1 + M_2} \right) \frac{v^2}{2} = \frac{M_2}{M_1 + M_2} T = \frac{\mu v^2}{2}, \quad (3.2.28)$$

$$\mu = \frac{M_2 M_1}{M_1 + M_2}$$

μ : khối lượng rút gọn.

g- Động năng của chuyển động theo cả hai hạt bằng:

$$T_{igt} = \frac{(M_1 + M_2)^2}{2} V_{igt}^2 \quad \text{hoặc} \quad c \quad V_{igt} = \frac{M_1}{M_1 + M_2} v$$

$$\text{nên: } T_0 = T_{igt} = \frac{M_1^2}{M_1 + M_2} \frac{v^2}{2} = \frac{M_1}{M_1 + M_2} T \quad (2) \quad (3.2.29)$$

Do đó ta có: $T' + T_{igt} = T$ (T là động năng ban đầu của M_1 trong hệ phòng thí nghiệm $T = \frac{M_1 v^2}{2}$).

h- Động năng của các hạt M_1, M_2 trong hệ phòng thí nghiệm sau va chạm:

$$\tilde{T}_{M_1} = \frac{M_1^2 M_2^2 - M_1 M_2 \cos 2\psi}{(M_1 + M_2)^2} T; \quad (\tilde{T}_{M_1})_{min} = \left(\frac{M_1 - M_2}{M_1 + M_2} \right)^2 T; \quad (\tilde{T}_{M_1})_{max} = T$$

$$\tilde{T}_{M_2} = \frac{2 M_1 M_2}{(M_1 + M_2)^2} (1 + \cos 2\psi) T, \quad (\tilde{T}_{M_2})_{max} = \frac{4 M_1 M_2}{(M_1 + M_2)^2} T; \quad (\tilde{T}_{M_2})_{min} = 0 \quad (3.2.30)$$

Đồng thời, vì định luật bảo toàn năng lượng nên trong tán xạ đàn hồi thì:

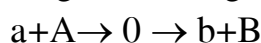
$$\tilde{T}_{M_1} + \tilde{T}_{M_2} = T \quad (3.2.31)$$

- Hệ thức giữa góc tán xạ của các hạt trong hệ tọa độ phòng thí nghiệm là:

$$\begin{aligned} \tan \theta &= \frac{\sin 2\psi}{\frac{M_1}{M_2} - \cos 2\psi} \\ \tan \theta &= \frac{\sin \theta'}{\frac{M_1}{M_2} + \cos \theta'} \end{aligned} \quad (3.2.32)$$

b. Giảm đồ xung lượng của phản ứng hạt nhân

Quá trình động học xảy ra phản ứng hạt nhân có thể được phân tích nhờ giảm đồ xung lượng. Chúng ta hãy xét phản ứng tỏa năng:



A đứng yên còn xung lượng của hạt a là $\vec{p}_a$.

Cũng giống như trong trường hợp tán xạ đàn hồi, xung lượng của hạt sản phẩm có thể thu được bằng cách tổng hợp vectơ xung lượng của chuyển động theo $\vec{p}_{theo}$ (với vận tốc tâm quán tính là v_{qt}) và xung lượng trong hệ quán tính $\vec{p}'$

$$\vec{p}' = \vec{p}_{theo} + \vec{p}'$$

Vì $\vec{p}_a = \vec{p}_0$ nghĩa là $m_a v_a = m_0 \vec{v}_0$ mà tâm quán tính đặt tại nhân trung gian 0 nên: $V_{iq} = V_0 = \frac{m_a}{M_0} v_a = \frac{p_a}{M_0}$

và xung lượng theo của hạt sản phẩm b và B sẽ là:

$$\begin{aligned} (p_b)_{theo} &= m_0 v_{iq} = \frac{m_b}{M_0} p_a \approx \frac{m_b}{M_B + m_b} p_a \\ (p_B)_{theo} &= M_B v_{iq} = \frac{M_B}{M_0} p_a \approx \frac{M_B}{m_b + M_B} p_a \end{aligned} \quad (3.2.33)$$

Hai vectơ này có thể thu được bằng cách chia xung lượng ban đầu $\vec{p}_a$ ra hai khoảng tỉ lệ với khối lượng của các hạt sản phẩm b và B.

Còn xung lượng của các hạt sản phẩm trong hệ tâm quán tính có thể được tính như sau:

$$+ \text{ Theo sơ đồ năng lượng thì: } T'_2 = T'_1 + Q = \frac{M_A}{M_A + M_a} T_a + Q \quad (3.2.34)$$

Từ công thức $P = (2mT)^{1/2}$ xung lượng $P'_2 = \sqrt{2\mu_{Bb}T'_2}$

$$\begin{aligned} P'_2 &= \sqrt{2\mu_{bB} \left(\frac{M_A}{M_A + m_a} \frac{P_a^2}{2m_a} + Q \right)} \\ P'_2 &= P_a \sqrt{\frac{M_{bB}}{m_a} \left(\frac{M_A}{M_A + m_a} + \frac{Q}{T_a} \right)} \end{aligned} \quad (3.2.35)$$

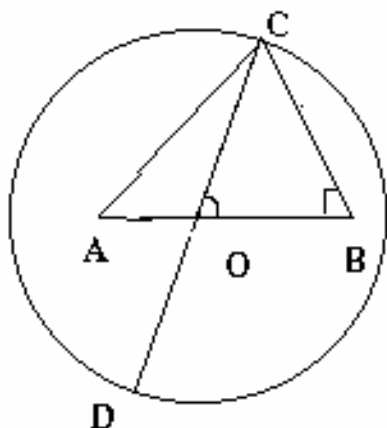
Như ta đã biết trong hệ tâm quán tính:

$$P'_2 = P'_b = P'_B = P_a \sqrt{\frac{\mu_{bB}}{m_a} \left(\frac{M_A}{M_A + m_a} + \frac{Q}{T_a} \right)} \quad (3.2.36)$$

Khác với tán xạ đàn hồi ở đây $P'_2 \neq P'_1$.

Chúng ta hãy vẽ giản đồ xung lượng để minh họa phản ứng hạt nhân.

Vectơ $\vec{AB}$ biểu diễn $\vec{P}_a$, dùng điểm O chia AB ra hai đoạn tỷ lệ với khối lượng của các hạt sản phẩm được tạo thành: $\frac{AO}{OB} = \frac{m_b}{M_B}$ lấy O làm



tâm, vẽ vòng tròn bán kính

$$R = P'_2 = P_a \sqrt{\frac{\mu_{Bb}}{M_A + m_a} \left(\frac{M_A}{M_A + m_a} + \frac{Q}{T_a} \right)} \quad (3.2.37)$$

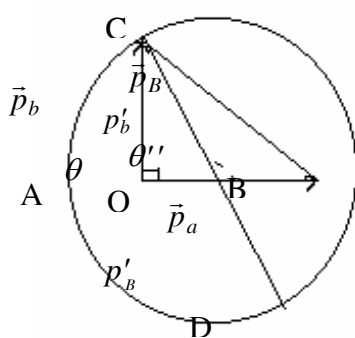
Các xung lượng của hạt b và B trong hệ quán tính được biểu diễn bằng các bán kính đối nhau, ví dụ: $\vec{OC}$ và $\vec{OD}$ làm một góc θ' với $\vec{AB}$

$$A\vec{O} = \frac{m_b}{M_B + m_b} \vec{P}_a, \quad O\vec{B} = \frac{M_b}{M_b + m_b} \vec{P}_a \quad (3.2.38)$$

là xung lượng trong chuyển động theo của hạt b và B.

Do đó $\vec{AC} = \vec{OC} + \vec{AO}$ là xung lượng của b trong hệ phòng thí nghiệm.

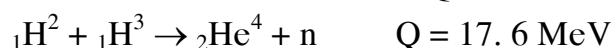
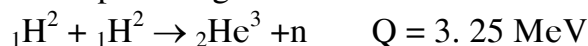
$\vec{CB} = \vec{OB} + \vec{OD} = \vec{OB} - \vec{OC}$ là xung lượng của hệ B trong hệ phòng thí nghiệm. Các góc bay của hạt b và B trong hệ phòng thí nghiệm là θ và Ψ , còn góc bay của hạt b trong hệ tâm quán tính là θ' .



Giản đồ xung lượng trên vẽ trong trường hợp $Q > 0$.

*. Tuy nhiên cũng đúng trong trường hợp $Q < 0$. Nhờ giản đồ xung lượng ta có thể xác định bằng đồ thị có thể có về năng lượng và góc bay của các hạt sản phẩm phản ứng.

Để minh họa ta hãy xây dựng giản đồ xung lượng của các phản ứng.



Ở đây neutron được tạo ra ở góc 90° so với phương của deuteron tới

Từ đồ thị, ta thấy xung lượng neutron có thể tính được từ tam giác vuông OAC mà trên đây ta có:

$$OA = \frac{m_b}{M_B + m_b} P_a \quad (\text{xung lượng trong chuyển động theo của hạt b})(3.2.39)$$

$$OC = P_a \sqrt{\frac{\mu_{bB}}{m_a} \left(\frac{M_A}{M_A + m_a} + \frac{Q}{T_a} \right)} \quad (\text{xung lượng b trong hệ khối tâm})$$

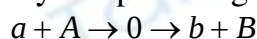
Nếu xây dựng giản đồ xung tỷ lệ đúng, ta có thể dùng thước đo để xác định xung lượng và năng lượng của neutron phát ra :

$$\Rightarrow P_b = \left\{ P_a^2 \left[\frac{\eta_{bB}}{m_a} \left(\frac{M_A}{M_A + m_a} + \frac{T_A}{Q} \right) \right] - P_a^2 \left[\frac{m_b}{m_B + m_b} \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} = P_a \left\{ \frac{\eta_{bB}}{m_a} \left(\frac{m_a}{m_A + m_a} + \frac{T_a}{Q} \right) - \left(\frac{m_b}{m_B + m_b} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

4. Định luật bảo toàn momen động lượng

Trong các quá trình phản ứng hạt nhân thì tổng momen động lượng toàn phần của các hạt tương tác, cũng như hình chiếu của tổng momen động lượng toàn phần lên một phương nào đó được bảo toàn.

Chúng ta hãy xét phản ứng tổng quát:



$$\vec{I} = \vec{I}_0 = \vec{I}_2$$

(3.2.42)

$$\text{ở đây } \vec{I}_1 = \vec{I}_A + \vec{I}_a + \vec{I}_{aA}; \vec{I}_2 = \vec{I}_B + \vec{I}_b + \vec{I}_{bB}$$

Với I_1 là spin của hạt nhân I ; I_{ij} là momen động lượng quỹ đạo trong chuyển động tương đối của hạt I và j.

Chúng ta biết rằng spin của proton và neutron đều bằng 1/2, spin của mọi hạt nhân chẵn chẵn bằng không, spin của các hạt nhân có số khối A chẵn là số nguyên, A lẻ có spin bán nguyên, . . . vì momen động lượng của các hạt nhân không chỉ phụ thuộc vào spin của các nuclon, mà còn phụ thuộc chuyển động nội tại của các hạt nhân (momen quỹ đạo) nên momen động lượng của mỗi hạt nhân phụ thuộc trạng thái của nó. Spin hạt nhân được xem là momen động lượng ở trạng thái cơ bản.

Các vectơ $\mathbf{I}_{aA}, \mathbf{I}_{bB}$ xác định momen động lượng quỹ đạo của các cặp hạt Aa, Bb và đặt trưng cho chuyển động tương đối của từng cặp hạt một. Các momen quỹ đạo này lấy những giá trị nguyên (0, 1, 2, . . .) và chính các giá trị này đặc trưng cho tính chất chuyển động của các hạt.

Khi nghiên cứu các phản ứng hạt nhân loại $a + A \rightarrow b + B$ thì người ta thường chú ý đến các trạng thái ban đầu và cuối của phản ứng, khi mà cả hai hạt tương tác đã nằm cách nhau trên một khoảng lớn đến nỗi ta có thể xem chúng chuyển động tự do không liên kết, trong trường hợp này trạng thái ban đầu và cuối của hệ thống có thể được mô tả bằng các hàm sóng ψ_d và ψ_c , chúng đều là tích của ba hàm sóng: $\psi_d = \psi_a \cdot \psi_A \cdot \psi_{I_{aA}}$, $\psi_c = \psi_b \cdot \psi_B \cdot \psi_{I_{bB}}$

Hai hàm sóng đầu tiên mô tả chuyển động nội tại, còn hàm thứ ba mô tả chuyển động tương đối của chúng.

Chú ý rằng: Tất cả các vectơ $\mathbf{I}_1, \mathbf{I}_0, \mathbf{I}_2, \mathbf{I}_B, \mathbf{I}_a, \mathbf{I}_A, \mathbf{I}_{aA}, \mathbf{I}_{bB}$ đều là các vectơ cơ học lượng tử, chúng tuân theo các tính chất và phép tính đặc biệt trong Cơ học lượng tử.

5. Định luật bảo toàn chắn lẻ

Trong các tương tác mạnh và tương tác điện từ, độ chắn lẻ được bảo toàn. các biến đổi hạt nhân xảy ra chính là dưới dạng tương tác này nên trong các phản ứng hạt nhân độ chắn lẻ được bảo toàn.

Xét phản ứng: $a+B \rightarrow B+b$

Định luật bảo toàn độ chắn lẻ được viết như sau:

$$p_a p_A (-I)^{I_{aA}} = p_B p_b (-I)^{I_{Bb}} \quad (3.2.43)$$

p_a, p_A và p_b, p_B là độ chắn lẻ nội tại của các hạt nhân tương tác và hạt nhân sản phẩm.

I_{aA}, I_{Bb} là momen quỹ đạo của các cặp tương ứng.

Cũng giống như các quy luật bảo toàn khác, định luật bảo toàn chắn lẻ dẫn ta tới những quy tắc lọc lựa, hạn chế một số loại tương tác có thể xảy ra được. Trong các phản ứng hạt nhân cụ thể ta thường gặp việc ứng dụng định luật bảo toàn chắn lẻ.

Ta hãy xét định luật bảo toàn chắn lẻ và quy tắc lọc lựa trong trường hợp tán xạ đàn hồi của các hạt ví dụ: các nucleon trên hạt nhân. Vì trong tán xạ đàn hồi thì trạng thái của các hạt tán xạ cũng như trạng thái của các hạt nhân không thay đổi, nên l chỉ có thể thay đổi đi một số chắn mà thôi. Chỉ có một điều có thể xảy ra là có sự định hướng lại spin nhưng điều đó không làm thay đổi độ chắn lẻ. Độ chắn lẻ của hàm sóng mô tả chuyển động tương đối của các hạt phải được bảo toàn. Vì vậy l chỉ có thể thay đổi đi một số chắn C tất nhiên nằm trong giới hạn cho phép của định luật bảo toàn momen động lượng.

Ví dụ thứ hai là ví dụ về các quá trình của hai hạt đồng nhất tham gia. đơn giản nhất là quá trình phân rã của hệ hợp phần ra hai hạt đồng nhất có spin bằng không.

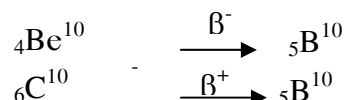
Một hệ A chắn có thể biến đổi thành hai hạt đồng nhất A lẻ không có thể có spin bằng không, thật vậy ta hãy viết định luật bảo toàn độ chắn lẻ cho hệ phức hợp có hai hạt đồng nhất:

$$p_A = p_a p_a (-I)^l = (-I)^l$$

Nghĩa là độ chắn lẻ của hệ thống phân rã được xác định bằng độ chắn lẻ của momen quỹ đạo l trong chuyển động tương đối của các hạt được tạo thành. Người ta chứng minh được rằng hệ hai hạt đồng nhất với spin bằng không luôn luôn có l chắn. thế thì chỉ có hệ A chắn mới có thể phân rã ra hai hạt có spin bằng không, còn hệ A lẻ sẽ không có khả năng ấy.

6: Định luật bảo toàn spin đồng vị

Ta biết rằng tính chất của các hạt nhân đồng khối (A như nhau, Z khác nhau) phụ thuộc vào tỉ số Z/N chứa trong hạt nhân. chỉ với một tỉ số hoàn toàn xác định thì hạt nhân mới có khối lượng nhỏ nhất và các hạt nhân bền mà thôi. Còn nếu dư thừa hoặc thiếu proton thì từ hạt nhân sẽ phóng xạ β^+ hoặc β^- ví dụ từ hai hạt nhân Isobar ${}_1\text{H}^3$ và ${}_2\text{He}^3$ thì ${}_1\text{H}^3$ có khối lượng lớn hơn và phóng xạ β^- để trở thành ${}_2\text{He}^3$. Trong ba hạt nhân ${}_4\text{Be}^{10}$, ${}_5\text{B}^{10}$ và ${}_6\text{C}^{10}$ thì ${}_5\text{B}^{10}$ có khối lượng nhỏ nhất nên bền còn.



mới nhìn ta tưởng như rằng sự khác nhau về khối lượng và tính chất của các Isobar này sẽ thay đổi hẳn nếu ta thay một hoặc một số các proton thành nơtron (hoặc ngược lại). Tuy nhiên thực tế không phải như vậy, khi nghiên cứu chi tiết các hạt nhân Isobar người ta thấy rằng chúng có một số nhóm hạt nhân có những tính chất như nhau.

Ta hãy xét ví dụ hai hạt nhân ${}_1\text{H}^3$ và ${}_2\text{He}^3$ trong phân rã β của ${}_1\text{H}^3$ thì năng lượng giải phóng: $\Delta E_{\beta}({}_1\text{H}^3) = 0,019\text{MeV}$.

Năng lượng liên kết của hạt nhân nguyên tử (A, Z) là:

$$\Delta W(A, Z) = ZM_a({}_1\text{H}^1) + (A - Z)m_n - M_a(A, Z).$$

Hiệu năng lượng liên kết của hai hạt nhân ${}_1\text{H}^3$ và ${}_2\text{He}^3$ là:

$$\Delta W({}_1\text{H}^3) = M_a({}_1\text{H}^1) + 2m_n - M_a({}_1\text{H}^3)$$

$$- \Delta W({}_2\text{He}^3) = 2M_a({}_1\text{H}^1) + m_n - M_a({}_2\text{He}^3)$$

$$\begin{aligned} \Delta W({}_1\text{H}^3) - \Delta W({}_2\text{He}^3) &= \{m_n - M_a({}_1\text{H}^1)\} - \{M_a({}_1\text{H}^3) - M_a({}_2\text{He}^3)\} \\ &= \Delta m - \Delta E_{\beta}({}_1\text{H}^3) \end{aligned}$$

Δm và $\Delta E_{\beta}({}_1\text{H}^3)$ được xác định bằng thực nghiệm:

$$\Delta W({}_1\text{H}^3) - \Delta W({}_2\text{He}^3) = \Delta m - \Delta E_{\beta}({}_1\text{H}^3) = 0,782 - 0,019 = 0,763\text{MeV}$$

Hiệu năng lượng liên kết này có giá trị khá lớn, tuy nhiên ta có thể thấy rằng năng lượng toả ra hoàn toàn do lực đẩy Coulomb của hai proton trong hạt nhân He^3 nếu chúng đứng cách nhau một khoảng $r = 1,9 \cdot 10^{-13}\text{cm}$.

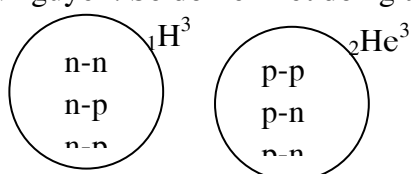
$$\frac{e^2}{r} = \frac{(4,8 \cdot 10^{-10})^2}{1,9 \cdot 10^{-13} (1,6 \cdot 10^{-6})} \approx 0,76\text{MeV}$$

Như vậy, với độ chính xác đến tương tác Coulomb thì có thể xem rằng năng lượng liên kết của hai hạt nhân ${}_1\text{H}^3$ và ${}_2\text{He}^3$ là như nhau. Hai hạt nhân đó được gọi là hai hạt nhân gương. Kết luận trên cũng vẫn đúng cho các hạt nhân gương khác. Các hạt nhân đó là (A, Z) và (A, A-Z).

Các hạt nhân gương không những có năng lượng liên kết giống nhau (với độ chính xác Coulomb) mà còn giống nhau cả những đặc trưng của các mức kích thích thấp (năng lượng, momen, độ chẵn lẻ. ...) Những hạt nhân nhẹ nhất ${}_1\text{H}^2$, ${}_1\text{H}^3$, ${}_2\text{He}^3$ không có các trạng thái kích thích, còn các hạt nhân nặng hơn như: ${}_3\text{Li}^7$, ${}_4\text{Be}^7$ có các giá trị momen và độ

chấn lẻ như nhau ở trạng thái cơ bản $\frac{3^-}{2}$ và ở trạng thái kích thích đầu tiên $\frac{I^-}{2}$, năng lượng ở mức kích thích cũng gần như nhau (0,48 và 0,43 MeV) năng lượng kích thích ở mức thứ hai như nhau (4,6 MeV).

Có thể nói các hạt nhân gương khác nhau ở chỗ muốn chuyển từ hạt nhân này sang hạt nhân kia ta chỉ việc thay các liên kết p - p thành n - n, còn các liên kết n - p thì giữ nguyên. Sơ đồ liên kết đơn giản nhất của ${}_1\text{H}^3$ và ${}_2\text{He}^3$.



Trong hạt nhân ${}_1\text{H}^3$ không có liên kết p-p nào, có một liên kết n-n và hai liên kết n-p.

Trong hạt nhân ${}_2\text{He}^3$ cũng có hai liên kết n-p như cũ, chỉ có khác về liên kết p-p.

Việc phát hiện bằng thực nghiệm của sự giống nhau trong cấu tạo mức của các hạt nhân gương, có thể giải thích được nếu ta giả thiết rằng: Có sự đồng nhất trong các hạt cơ bản p-p và n-n. Giả thiết này được gọi là giả thiết về tính đối xứng điện tích của các lực hạt nhân. Trong trường hợp của ba hạt nhân ${}_4\text{Be}^{10}$, ${}_5\text{B}^{10}$, ${}_6\text{C}^{10}$ người ta nhận thấy: nếu kể đến hiệu chỉnh tương tác Coulomb, có sự giống nhau về các đặt trưng các trạng thái cơ bản ${}_6\text{C}^{10}$ và ${}_4\text{Be}^{10}$ với các đặt trưng của một trong các trạng thái kích thích ${}_5\text{B}^{10}$. Trong nhiều trường hợp tương tự người ta nhận thấy rằng: Sự giống nhau trong cấu trúc các mức hạt nhân có thể được giải thích nếu: Giả thiết rằng tất cả ba tương tác cơ bản (n-n), (n-p), (p-p) là đồng nhất như nhau. Giả thiết này là giả thiết về tính độc lập điện tích của các lực hạt nhân.

Khi nghiên cứu kỹ hơn ta thấy rằng tính độc lập điện tích của các lực hạt nhân được thực nghiệm xác nhận trong các thí nghiệm trực tiếp so sánh các tương tác cơ bản (p-p), (n-n), (n-p) cũng như trong nhiều thí nghiệm kiểm tra hệ quả rút ra từ giả thuyết này.

Như vậy, nếu chỉ xét tương tác hạt nhân (không xét tương tác Coulomb) thì tương tác giữa bất kỳ nucleon nào (p-p), (n-p), (n-n) ở cùng những trạng thái spin và không gian thì ba dạng tương tác trên là đồng nhất.

Ta nhấn mạnh rằng: tính độc lập điện tích của lực hạt nhân là đúng với chính xác tương tác điện từ, tương tác điện từ sẽ phá tính độc lập điện tích của lực hạt nhân.

Để nói lên tính đồng nhất về tính chất lực hạt nhân của n và p người ta dùng một vectơ cơ học lượng tử có tính hình thức, vectơ Spin đồng vị **T**. **T** có giá trị giống nhau cho cả p và n và bằng 1/2. **T** được xác định trong một không gian phụ (không gian hình thức) là không gian đồng vị.

Một hình chiếu của vectơ **T** là mô tả proton, và hình chiếu kia mô tả neutron. Số lượng hình chiếu có thể có là $2T+1 = 2$ chính là số nucleon có tính chất hạt nhân đồng nhất.

Vì tính chất tương tác không phụ thuộc loại nucleon (nghĩa là vào hình chiếu. . .) nên tương tác hạt nhân của nucleon được xác định chỉ bằng giá trị của vectơ **T** mà không bằng hình chiếu của nó (hình chiếu này đặt trưng cho sự khác nhau trong tính chất điện từ). Như vậy tương tác hạt nhân là bất biến đối với phép quay trong không gian đồng vị. Tính chất này được gọi là tính bất biến Spin đồng vị. Người ta thấy rằng bất biến này

cũng giống bất biến của tương tác đối với phép quay trong không gian ba chiều thông thường, chính tính bất biến này dẫn tới định luật bảo toàn momen động lượng. Người ta cũng nói rằng trong các tương tác hạt nhân thì Spin đồng vị được bảo toàn.

Các toán tử tác dụng lên vectơ $\mathbf{T}$ cũng giống hệt như lên các vectơ cơ học lượng tử thông thường. Ví dụ tương tác p-p được đặc trưng bởi vectơ $|\mathbf{T}| = 1$ vì $(T_\xi)_p = 1/2$; $(T_\xi)_{2p} = 1$, còn $\mathbf{T}_1 + \mathbf{T}_2 = 0; 1$ thì chỉ có giá trị 1 là có ý nghĩa. Tương tác n-n cũng được đặc trưng bởi vectơ $|\mathbf{T}| = 1$ nhưng có hình chiếu $(T_\xi)_{2n} = -1$ và tương tác n-p có thể đặc trưng bằng vectơ $\mathbf{T} = 0$ và $\mathbf{T} = 1$ vì trong trường hợp này $T_\xi = 0$ do đó có thể có hai giá trị của tổng $\mathbf{T}_1 + \mathbf{T}_2 = 0; 1$. Phép phân tích chứng tỏ rằng giá trị $T = 1$ đồng nhất với các tương tác p-p và n-n còn giá trị $\mathbf{T} = 0$ ứng với trường hợp deuteri.

Như vậy hệ thống gồm hai nuclon có thể ở ba trạng thái có các tính chất hạt nhân đồng nhất đặc trưng bằng cùng một giá trị của vectơ $\mathbf{T} = 1$ ($2T+1=3$), và một trạng thái có tính chất hạt nhân khác (Deuteri) đặc trưng bằng giá trị $\mathbf{T} = 0$; ($2T+1=1$).

Khái niệm spin đồng vị được mở rộng cho trường hợp hạt nhân nguyên tử.

$$\text{Đối với hạt nhân thì hình chiếu } T_\xi = \left| \frac{Z - N}{2} \right| = \left| \frac{2Z - A}{2} \right|$$

$$|\vec{T}| \geq \left| \frac{Z - N}{2} \right| \quad \left(\vec{T}_{\max} = \frac{A}{2}, \quad \vec{T}_{\min} = \frac{Z - N}{2} \right)$$

Nghiên cứu các hạt nhân nhẹ mà tương tác điện từ tương đối nhỏ và bất biến đồng vị rất rõ, thì thường xuất hiện giá trị nhỏ nhất của tổng $|\vec{T}| = \left| \frac{2Z - A}{2} \right|$

$$\text{Spin đồng vị của } {}_2\text{He}^3 \text{ bằng } |\vec{T}| = \frac{4 - 3}{2} = \frac{1}{2}$$

Số lượng hình chiếu của vectơ $T = 1/2$ bằng $2T+1 = 2$. $1/2$. $+1 = 2$; như vậy còn phải có một hình chiếu nữa với các tính chất hạt nhân tương tự đó là hạt nhân ${}_1\text{H}^3$ với cùng giá trị $T = 1/2$, nhưng với hình chiếu khác $T_\xi({}_2\text{He}) = +1/2$ còn $T_\xi({}_1\text{H}^3) = -1/2$.

Các hạt nhân ${}_4\text{Be}^{10}$ và ${}_6\text{C}^{10}$ có các hình chiếu T_ξ bằng -1 và $+1$. Vì vậy vectơ $\mathbf{T}$ phải thỏa điều kiện $|\mathbf{T}| \geq 1$ nếu $T = 1$ thì $2T+1 = 3$. Ngoài hạt nhân ${}_4\text{Be}^{10}$ và ${}_6\text{C}^{10}$ phải có hạt nhân isobar có tính chất tương tự đó là ${}_5\text{B}^{10}$ (ở trạng thái kích thích, vì nếu ở trạng thái cơ bản thì $T = (2Z-A)/2 = 0$) người ta không tìm thấy hạt nhân có $T > 1$ nên thực ra chỉ có $T = 1$ và ba hạt nhân ${}_4\text{Be}^{10}$; ${}_5\text{B}^{10}$; ${}_6\text{C}^{10}$ tạo thành một tam tuyến đồng vị (triplet đồng vị). Ngoài các nhị tuyến (doublet) và các đa tuyến (multiplet) điện tích, ta cũng gặp các đơn tuyến (singlet), ví dụ đơn tuyến đơn giản nhất là ${}_1\text{H}^2$ và ${}_2\text{He}^3$.

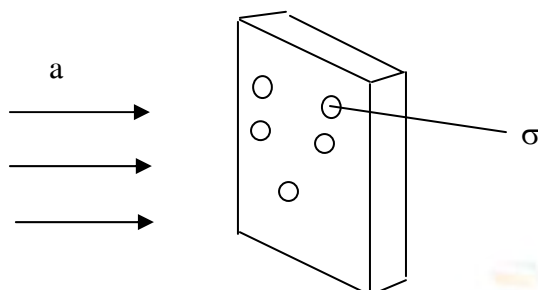
Định luật bảo toàn spin đồng vị trong các phản ứng hạt nhân dẫn tới quy tắc lựa chọn theo spin đồng vị. Do đó các mức hạt nhân không phải chỉ đặc trưng bằng năng lượng, momen động lượng, độ chẵn lẻ mà còn bằng spin đồng vị.

III. TIẾT DIỆN HIỆU DỤNG CỦA PHẢN ỨNG HẠT NHÂN

Khi ta dùng một chùm hạt bắn phá bia nhằm thực hiện một phản ứng hạt nhân thì ta không thể nói trước có một hạt nào sẽ va chạm vào hạt nhân bia để gây ra phản ứng. Ta chỉ có thể nói tới xác suất xảy ra phản ứng. Đại lượng đo

xác suất xảy ra phản ứng gọi là tiết diện hiệu dụng của phản ứng hạt nhân hay đơn giản hơn gọi là tiết diện hiệu dụng.

Giả sử có một chùm hạt a bắn tới bia X . Ta hãy tưởng tượng mỗi hạt nhân X được gắn với một tiết diện σ gọi là *tiết diện hiệu dụng*, theo phương vuông góc với phương tới của hạt a .



Bia được xem là đủ mỏng để không có một hạt nhân nào bị che lấp theo phương tới của chùm hạt. Diện tích σ được chọn sao cho nếu một hạt đạn nào lọt vào đó thì chắc chắn phản ứng xảy ra. Ngược lại, nếu hạt đạn đi ra ngoài σ thì không có phản ứng xảy ra.

Giả sử có n_i hạt đạn tới đập vào bia, trong đó chỉ có n_σ hạt đi vào các tiết diện hiệu dụng (tức là có n_σ phản ứng hạt nhân). Khi đó xác suất P để xảy ra một phản ứng là:

Xác suất này cũng bằng tỉ số giữa tiết diện hiệu dụng toàn phần (tức là

$$P = \frac{n_\sigma}{n_i} \quad 3.3.1$$

tổng tiết diện hiệu dụng của tất cả các hạt nhân) chia cho diện tích toàn phần của bia. Gọi S là diện tích bia, d là bề dày bia và N là số hạt nhân bia trong một đơn vị thể tích. Tiết diện hiệu dụng toàn phần bằng σNSd .

Xác suất P :

$$P = \frac{n_\sigma}{n_i} = \frac{\sigma NSd}{S} = \sigma Nd \quad 3.3.2$$

Như vậy xác suất của phản ứng P tỉ lệ với tiết diện hiệu dụng.

Tiết diện hiệu dụng có thứ nguyên diện tích [L^2]. đơn vị là barn

$$1 \text{ barn} = 10^{-28} \text{ m}^2$$

Tiết diện hiệu dụng không trùng với tiết diện hình học của hạt nhân. Thí dụ bắn phá urani U^{235} bằng neutron có năng lượng 0,025eV. Tiết diện phản ứng là 705barn trong khi tiết diện hình học của hạt nhân U^{235} là 2,5 barn. Đối với các phản ứng tán xạ ta có tiết diện tán xạ hiệu dụng. Các tiết diện hiệu dụng rất khác nhau tùy theo loại phản ứng và đối với một phản ứng nhất định nó phụ thuộc vào năng lượng của hạt nhẹ bay tới.

Đối với phản ứng tán xạ ta có công thức sau đây liên hệ giữa số hạt bị tán xạ và tiết diện tán xạ σ :

$$N_t = N_0(1 - e^{-\sigma n \cdot d}) \quad (3.3.3)$$

Trong đó N_t là số hạt tới bị tán xạ ; N_0 là số hạt tới đập vào bia; n số hạt nhân trong một đơn vị thể tích; d bề dày của bia.

Thí dụ: Tính tiết diện hiệu dụng của bia. Biết số neutron bị tán xạ trên bia thí nghiệm bằng $10^{-6}\%$ chùm neutron tới. Bia có khối lượng riêng là $4,1.10^3 \text{ kg/m}^3$ số khối $A = 30$ và bề dày $d=10^{-8} \text{ m}$.

Theo công thức trên ta có:

$$N_t/N_0 = 10^{-6}\% = 10^{-8} = 1 - e^{-\sigma n \cdot d}$$

Suy ra $n\sigma d = 10^{-8}$ thay các số liệu đã cho vào công thức trên, ta được:

$$\sigma = \frac{30.10^{-8}}{4,1 \times 6,02.10^{26} \times 10^{-8}} = 1,213.10^{-29} \text{ m}^2$$

$$\sigma = 0,121 \text{ barn}$$

IV. PHẢN ỨNG PHÂN HẠCH HẠT NHÂN

1. Lịch sử phát minh và các tính chất cơ bản của phản ứng phân hạch

Năm 1934, E. Fermi khi nghiên cứu hiện tượng phóng xạ nhân tạo sinh ra dưới tác dụng của neutron. Khi chiếu neutron lên bia Uran, hạt nhân Uran bị kích thích phóng xạ beta, sau khi phóng xạ hạt nhân sẽ có điện tích tăng lên một đơn vị, nhưng bên cạnh đó ông lại thấy xuất hiện một vài sản phẩm phóng xạ có số Z nhỏ hơn Uran. Nghiên cứu kỹ các sản phẩm phóng xạ đó, O. Hahn và Strassmann thấy rằng chúng ở giữa bảng tuần hoàn.

Sau đó Frish và Meitner giải thích hiện tượng kỳ lạ này với giả thuyết rằng, hạt nhân Uran khi bắt neutron sẽ bị kích thích, hạt nhân bị biến dạng phân thành hai mảnh có khối lượng gần bằng nhau (Z_1, A_1) ; (A, Z_2).

$$Z_1 + Z_2 = Z_U = 92$$

$$A_1 + A_2 = A_U + 1 \approx A_U \quad (3.4.1)$$

Thừa nhận những giả thuyết này, có thể tiên đoán những tính chất cơ bản của phản ứng phân hạch sau:

a) Khi hạt nhân nặng phân hạch thì năng lượng giải phóng lớn

Đặt Q là năng lượng phân hạch (theo đơn vị khối năng lượng) ta có:

$$Q = M_U - (M_1 + M_2) \quad (3.4.2)$$

Với M_U là khối lượng của hạt nhân Uran;

M_1, M_2 là khối lượng của các mảnh.

Khối lượng của hạt nhân được tính bằng :

$$M = Zm_p + (A-Z)m_n - \epsilon A \quad (3.4.3)$$

Với ϵ là năng lượng liên kết trung bình tính cho một nuclon. Như vậy ta có:

$$Q = \epsilon_1 A_1 + \epsilon_2 A_2 - \epsilon A = (\epsilon_{TB} - \epsilon) A \quad (3.4.4.)$$

Với:

$$\epsilon_{TB} = (\epsilon_1 A_1 + \epsilon_2 A_2) / A$$

là năng lượng liên kết trung bình của các mảnh tính cho một nuclon. Vì ϵ_{TB} đối với các hạt nhân nằm giữa bảng tuần hoàn lớn hơn ϵ của Uran cỡ 0,8 MeV, do đó:

$$Q = 0,8. A \approx 238 \times 0,8 \approx 200 \text{ MeV}$$

b) Hầu hết năng lượng phân hạch được giải phóng ở dạng động năng của các mảnh phân hạch

Vì các mảnh phân hạch tạo thành do quán tính phân chia hạt nhân thành hai phần nhất định phải bay ra hai phía dưới tác dụng của lực đẩy Coulomb khá lớn, do điện tích của các mảnh khá lớn.

Giá trị năng lượng Coulomb của hai mảnh nằm cách nhau một khoảng δ là:

$$V_c = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{\delta}, \quad \delta = R_1 + R_2 \quad (3.4.5)$$

R có thể tính theo công thức:

$$R = r_0 A^{1/3} = 1,3 \cdot 10^{-13} \cdot A^{1/3} \text{ cm} \quad (3.4.6)$$

tạm cho rằng: $Z_1 = Z_2 = 92/2 = 46$.

$$R_1 = R_2; \quad A_1 = A_2 = 238/2 = 119$$

$$\text{Ta có: } V_c = \frac{(46)^2 \cdot (4,8 \cdot 10^{-10})^2}{2,14 \cdot 10^{-13} \cdot \sqrt[3]{119 \cdot 1,6 \cdot 10^{-6}}} \approx 200 \text{ MeV} \text{ nghĩa là đúng vào cỡ giá trị}$$

năng lượng phân hạch Q.

c) Các mảnh phân hạch được tạo thành phải phóng xạ β và có thể phát neutron

Kết luận này là hiển nhiên khi nghiên cứu tỉ số giữa số neutron và số proton trong các hạt nhân bền khác của bảng phân hạng tuần hoàn.

Hạt nhân	${}^8\text{O}^{16}$	${}_{47}\text{Ag}^{108}$	${}_{56}\text{Ba}^{137}$	${}_{92}\text{U}^{238}$
N/Z	1,0	1,3	1,45	1,6

(3.4.7)

Từ các số liệu trên ta thấy, các mảnh phân hạch lúc mới hình thành phải dư thừa neutron, vì chúng được tạo thành từ Uran. $N/Z = 1,6$. Tất nhiên các hạt nhân này phát xạ β , song vì độ dư neutron rất lớn nên sản phẩm phóng xạ β lại tiếp tục phóng xạ β nữa... nghĩa là các mảnh phân hạch tạo nên một dãy phóng xạ β liên tiếp khá dài, mà thí nghiệm Fermi đã quan sát thấy.

Như vậy, một phần năng lượng phân hạch được giải phóng dưới dạng năng lượng phân rã β - Q_β .

Ngoài ra cần giả thiết rằng một phần trong số các neutron dư có thể trực tiếp phát ra từ mảnh ở dạng các neutron phân hạch hoặc neutron thứ cấp, các neutron này mang theo một phần năng lượng phân hạch Q_n .

Tất cả các tính chất phân hạch nêu trên đã được phát hiện ngay trong những thí nghiệm đầu tiên, thực hiện năm 1939 ở nhiều phòng thí nghiệm.

2. Lý thuyết cơ bản của hiện tượng phân hạch

Lý thuyết phân hạch được xây dựng từ năm 1939 bởi: N. Bohr, Willer và nhà vật lý Xô Viết Ja. I. Trenkel. Họ phân tích giả thuyết của Frish và Meitner về tính không bền của hạt nhân nặng khi thay đổi hình dạng nhờ mẫu giọt hạt nhân.