

## Chủ đề 14. PHÓNG XẠ. PHÂN HẠCH. NHIỆT HẠCH

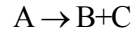
### BÀI TOÁN LIÊN QUAN ĐẾN NĂNG LƯỢNG PHÓNG XẠ, NĂNG LƯỢNG PHÂN HẠCH, NĂNG LƯỢNG NHIỆT HẠCH.

*Phương pháp giải*

Phóng xạ, phân hạch và nhiệt hạch là các phản ứng hạt nhân tỏa năng lượng.

#### 1) Năng lượng phóng xạ

Hạt nhân mẹ A đứng yên phóng xạ thành hai hạt B (hạt nhân con) và C (hạt phóng xạ):



Áp dụng định luật bảo toàn động lượng và định luật bảo toàn năng lượng toàn phần:

$$\begin{cases} \vec{0} = m_C \vec{v}_C + m_B \vec{v}_B \\ m_A c^2 = W_C + W_B + (m_C + m_B) c^2 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} m_C \vec{v}_C = -m_B \vec{v}_B \\ W_C + W_B = \Delta E \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} m_B W_B = m_C W_C \\ W_B + W_C = \Delta E \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} W_C = \frac{m_B}{m_C + m_B} \Delta E \\ W_B = \frac{m_C}{m_C + m_B} \Delta E \end{cases}$$

**Nhận xét:** Hai hạt sinh ra chuyển động theo hai hướng ngược nhau, có tốc độ và động năng tỉ lệ nghịch với khối lượng.

Nếu bỏ qua bức xạ gama thì năng lượng tỏa ra chuyển hết thành động năng của các hạt tạo thành.

**Ví dụ 1:** Hạt nhân A (có khối lượng  $m_A$ ) đứng yên phóng xạ thành hạt B (có khối lượng  $m_B$ ) và C (có khối lượng  $m_C$ ) theo phương trình phóng xạ:  $A \rightarrow B+C$ . Nếu phản ứng tỏa năng lượng  $\Delta E$  thì động năng của B là

- A.**  $\Delta E \cdot m_C / (m_B + m_C)$ .
**B.**  $\Delta E \cdot m_B / (m_B + m_C)$ .  
**C.**  $\Delta E \cdot (m_B + m_C) / m_C$ .
**D.**  $\Delta E \cdot m_B / m_C$ .

**Hướng dẫn:** Chọn đáp án A

**Ta có cách nhớ nhanh:** Động năng các hạt sinh ra tỉ lệ nghịch với khối lượng và tổng động năng của chúng bằng  $\Delta E$  nên: “toàn bộ có  $m_B + m_C$  phần trong đó  $W_B$  chiếm  $m_C$  phần và

$W_C$  chiếm  $m_B$  phần”:  $W_B = \frac{m_C}{m_B + m_C} \Delta E$

**Ví dụ 2(ĐH – 2008):** Hạt nhân A đang đứng thì phân rã thành hạt nhân B có khối lượng  $m_B$  và hạt  $\alpha$  có khối lượng  $m_\alpha$ . Tỉ số giữa động năng của hạt nhân B và động năng của hạt  $\alpha$  ngay sau khi phân rã bằng

- A.  $(m_\alpha/m_B)$ .      B.  $(m_B/m_\alpha)^2$ .      C.  $(m_\alpha/m_B)^2$ .      D.  $m_B/m_\alpha$ .

**Hướng dẫn: Chọn đáp án A**

$$A \rightarrow B + \alpha$$

**Cách 1:** Động năng các hạt sinh ra tỉ lệ nghịch với khối lượng:  $\frac{W_B}{W_\alpha} = \frac{m_\alpha}{m_B}$

**Cách 2:**  $\vec{0} = m_B \vec{v}_B + m_\alpha \vec{v}_\alpha \Rightarrow (m_B v_B)^2 = (m_\alpha v_\alpha)^2 \Rightarrow m_B W_B = m_\alpha W_\alpha \Rightarrow \frac{W_B}{W_\alpha} = \frac{m_\alpha}{m_B}$

**Ví dụ 3(ĐH – 2011):** Một hạt nhân X đứng yên, phóng xạ  $\alpha$  và biến thành hạt nhân Y. Gọi  $m_1$  và  $m_2, v_1$  và  $v_2, K_1$  và  $K_2$  tương ứng là khối lượng, tốc độ, động năng của hạt  $\alpha$  và hạt nhân Y. Hệ thức nào sau đây là đúng?

- A.  $\frac{v_1}{v_2} = \frac{m_1}{m_2} = \frac{K_1}{K_2}$ .      B.  $\frac{v_2}{v_1} = \frac{m_2}{m_1} = \frac{K_2}{K_1}$ .  
 C.  $\frac{v_1}{v_2} = \frac{m_2}{m_1} = \frac{K_1}{K_2}$ .      D.  $\frac{v_1}{v_2} = \frac{m_2}{m_1} = \frac{K_2}{K_1}$ .

**Hướng dẫn: Chọn đáp án C**

Hai hạt sinh ra chuyển động theo hai hướng ngược nhau, có tốc độ và động năng tỉ lệ nghịch với khối lượng.

**Ví dụ 4:** Ban đầu hạt nhân  $^{210}\text{Po}$  đứng yên phóng xạ  $\alpha$  theo phản ứng:  $^{210}\text{Po} \rightarrow \alpha + X$ . Cho khối lượng của các hạt  $m_\alpha = 4,0015\text{u}; m_{\text{Po}} = 209,9828\text{u}; m_X = 205,9744\text{u}; 1\text{u}c^2 = 931(\text{MeV})$ ;

$1\text{MeV} = 1,6 \cdot 10^{-13}\text{J}$ . Biết năng lượng tỏa ra trong phản ứng chuyển hết thành động năng của các hạt tạo thành. Động năng của hạt X là

- A.  $1,94 \cdot 10^{-14}\text{J}$ .      B.  $1,95 \cdot 10^{-14}\text{J}$ .      C.  $1,96 \cdot 10^{-14}\text{J}$ .      D.  $1,97 \cdot 10^{-14}\text{J}$ .

**Hướng dẫn: Chọn đáp án C**

$$\Delta E = (m_{\text{Po}} - m_\alpha - m_X)c^2 = 6,4239(\text{MeV})$$

Động năng các hạt sinh ra tỉ lệ nghịch với khối lượng và tổng động năng của chúng bằng  $\Delta E$  nên: “toàn bộ có  $m_\alpha + m_X$  phần trong đó  $W_\alpha$  chiếm  $m_X$  phần và  $W_X$  chiếm  $m_\alpha$  phần”:

$$W_X = \frac{m_\alpha}{m_\alpha + m_X} \Delta E \approx 1,96 \cdot 10^{-14} \text{ (J)}$$

**Ví dụ 5:** Hạt nhân  $^{226}\text{Ra}$  đứng yên phóng xạ ra hạt  $\alpha$  theo phương trình sau:

$^{226}\text{Ra} \rightarrow \alpha + ^{222}\text{Rn}$ . Cho biết tỉ lệ khối lượng của hạt nhân Rn và hạt  $\alpha$  là 55,47. Biết năng lượng tỏa ra trong phản ứng chuyển hết thành động năng của các hạt tạo thành. Hỏi bao nhiêu % năng lượng tỏa ra chuyển thành động năng của hạt  $\alpha$ .

- A. 98,22 %                      B. 98,23 %                      C. 98,24 %                      D. 98,25 %.

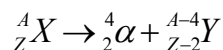
**Hướng dẫn:** Chọn đáp án B

$$\%W_\alpha = \frac{W_\alpha}{\Delta E} = \frac{m_{Th}}{m_{Th} + m_\alpha} \approx 98,23\%$$

**Ví dụ 6(ĐH – 2012):** Một hạt nhân X, ban đầu đứng yên, phóng xạ  $\alpha$  và biến thành hạt nhân Y. Biết hạt nhân X có số khối là A, hạt  $\alpha$  phát ra tốc độ v. Lấy khối lượng của hạt nhân bằng số khối của nó tính theo đơn vị u. Tốc độ của hạt nhân Y bằng

- A.  $\frac{4v}{A+4}$                       B.  $\frac{2v}{A-4}$                       C.  $\frac{4v}{A-4}$                       D.  $\frac{2v}{A+4}$ .

**Hướng dẫn:** Chọn đáp án C



$$\vec{0} = m_Y \vec{v}_Y + m_\alpha \vec{v}_\alpha \Rightarrow m_Y \vec{v}_Y = -m_\alpha \vec{v}_\alpha \Rightarrow v_Y = \frac{m_\alpha v_\alpha}{m_Y} = \frac{4v}{A-4}$$

**Ví dụ 7:** Hạt nhân U234 đứng yên phóng xạ ra hạt  $\alpha$  theo phương trình:  $^{234}\text{U} \rightarrow \alpha + ^{230}\text{Th}$ .

Biết năng lượng tỏa ra trong phản ứng là  $2,2 \cdot 10^{-12}$  J và chuyển hết thành động năng của các hạt tạo thành. Cho khối lượng các hạt:  $m_\alpha = 4,0015u$ ,  $m_{Th} = 229,9737u$ ,  $1u = 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ .  
Tốc độ của hạt alpha là:

- A.  $0,256 \cdot 10^8 \text{ m/s}$                       B.  $0,255 \cdot 10^8 \text{ m/s}$                       C.  $0,084 \text{ m/s}$                       D.  $0,257 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

**Hướng dẫn:** Chọn đáp án B

$$W_\alpha = \frac{m_{Th}}{m_{Th} + m_\alpha} \Delta E = \frac{229,9737}{229,9737 + 4,0015} \cdot 2,2 \cdot 10^{-12} \approx 2,1624 \cdot 10^{-12} \text{ (J)}$$

$$\Rightarrow v_\alpha = \sqrt{\frac{2W_\alpha}{m_\alpha}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 2,1624 \cdot 10^{-12}}{4,0015 \cdot 1,6605 \cdot 10^{-27}}} \approx 0,255 \cdot 10^8 \text{ (m / s)}$$

Chú ý: Để tính năng lượng do 1 phân rã tạo ra có thể làm theo 1 trong các cách sau:

$$* \Delta E = (m_A - m_B - m_C)c^2 = (\Delta m_B + \Delta m_C - \Delta m_A)c^2 = W_{ikB} + W_{ikC} - W_{ikA}$$

$$* \Delta E = W_B + W_C \text{ với } m_B W_B = m_C W_C$$

**Ví dụ 8(CĐ – 2010):** Pôlôni  ${}_{84}^{210}\text{Po}$  phóng xạ  $\alpha$  và biến đổi thành chì Pb. Biết khối lượng các hạt nhân Po;  $\alpha$ ; Pb lần lượt là: 209,937303 u; 4,001506 u; 205,929442 u và  $1 \text{ u} = 931,5 \text{ MeV}/c^2$ . Năng lượng tỏa ra khi một hạt nhân pôlôni phân rã xấp xỉ bằng

- A. 5,92 MeV.                      B. 2,96 MeV.                      C. 29,60 MeV.                      D. 59,20 MeV.

**Hướng dẫn:** Chọn đáp án A

$$\Delta E = (m_{Po} - m_{\alpha} - m_X)c^2 = 5,92(\text{MeV})$$

**Ví dụ 9:** Hạt nhân  ${}^{234}\text{U}$  đứng yên phóng xạ ra hạt  $\alpha$  theo phương trình sau:  ${}^{234}\text{U} \rightarrow \alpha + {}^{230}\text{Th}$ . Cho biết tỉ lệ khối lượng của hạt nhân Th và hạt  $\alpha$  là 57,47. Biết năng lượng tỏa ra trong phản ứng chuyển hết thành động năng của các hạt tạo thành. Động năng của hạt  $\alpha$  là 4 MeV. Tính năng lượng phản ứng tỏa ra.

- A. 4,06 MeV.                      B. 4,07 MeV.                      C. 4,04 MeV.                      D. 4,08 MeV.

**Hướng dẫn:** Chọn đáp án B

$$\Delta E = W_{\alpha} + W_{Th} \xrightarrow{m_{\alpha}W_{\alpha} = m_{Th}W_{Th}} \Delta E = W_{\alpha} + \frac{m_{\alpha}}{m_{Th}}W_{\alpha} = 4 + \frac{1}{57,47} \cdot 4 \approx 4,07(\text{MeV})$$

**Ví dụ 10:** Hạt nhân  ${}^{226}\text{Ra}$  đứng yên phóng ra một hạt  $\alpha$  và biến đổi thành hạt nhân X. Động năng của hạt  $\alpha$  phóng ra bằng 4,8 MeV. Coi tỉ lệ khối lượng xấp xỉ bằng tỉ số của số khối. Năng lượng một phân rã tỏa ra là

- A. 4,886 MeV.                      B. 4,885 MeV.                      C. 4,884 MeV.                      D. 0 MeV.

**Hướng dẫn:** Chọn đáp án A

$$\Delta E = W_{\alpha} + W_{Rn} = W_{\alpha} + \frac{m_{\alpha}}{m_{Th}}W_{\alpha} = 4,886(\text{MeV})$$

Chú ý: Nếu năng lượng do 1 phân rã tạo là  $\Delta E$  thì năng lượng do N phân rã tạo ra là  $Q = N\Delta E$ .

Số phân rã luôn bằng số hạt nhân mẹ bị phân rã: 
$$\left[ \begin{aligned} N &= \frac{m}{A_{me}} N_A \\ N &= \frac{H}{\lambda} = \frac{HT}{\ln 2} \end{aligned} \right.$$

**Ví dụ 11:** Pôlôni  ${}_{84}^{210}\text{Po}$  phóng xạ  $\alpha$  và biến đổi thành chì Pb. Mỗi phân rã tỏa ra 6,3 MeV. Biết số Avôgađrô  $6,02 \cdot 10^{23}/\text{mol}$ , khối lượng mol của  ${}_{84}^{210}\text{Po}$  là 210 g/mol,  $1 \text{ MeV} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J}$ . Ban đầu có 1 g nguyên chất, sau khi phân rã hết năng lượng tỏa ra là

- A.  $1,81 \cdot 10^{20} \text{ MeV}$ .      B.  $28,896 \cdot 10^9 \text{ J}$ .      C.  $28,896 \cdot 10^8 \text{ J}$ .      D.  $1,81 \cdot 10^{21} \text{ MeV}$ .

**Hướng dẫn:** Chọn đáp án C

$$Q = N\Delta E = \frac{m}{A_{me}} N_A \Delta E = \frac{1}{210} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \cdot 6,3 \cdot 1,6 \cdot 10^{-13} = 28,896 \cdot 10^8 \text{ (J)}$$

**Ví dụ 12:** Hạt nhân  ${}^{226}\text{Ra}$  đứng yên phóng ra một hạt  $\alpha$  và biến đổi thành hạt nhân X. Tốc độ của hạt  $\alpha$  phóng ra bằng  $1,51 \cdot 10^7 \text{ m/s}$ . Coi tỉ lệ khối lượng xấp xỉ bằng tỉ số của số khối. Biết số Avôgađrô  $6,02 \cdot 10^{23} / \text{mol}$ , khối lượng mol của Ra226 là 226 g/mol và khối lượng của hạt  $\alpha$  là  $4,0015 \text{ u}$ ,  $1 \text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ . Khi phân rã hết  $0,1 \mu\text{g}$  Ra226 nguyên chất năng lượng tỏa ra là

- A. 100 J.      B. 120 J.      C. 205 J.      D. 87 J.

**Hướng dẫn:** Chọn đáp án C

$$\Delta E = W_\alpha + W_{Rn} = W_\alpha + \frac{m_\alpha}{m_{Rn}} W_\alpha \xrightarrow{W_\alpha = \frac{m_\alpha v_\alpha^2}{2}}$$

$$\Delta E = \left(1 + \frac{4}{222}\right) \frac{4,0015 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \cdot (1,51 \cdot 10^7)^2}{2} \approx 7,71 \cdot 10^{-13} \text{ (J)}$$

$$Q = N\Delta E = \frac{m}{A_{me}} N_A \Delta E = \frac{10^{-7}}{226} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \cdot 7,71 \cdot 10^{-13} \approx 205 \text{ (J)}$$

**Ví dụ 13:** Pôlôni  ${}_{84}\text{Po}^{210}$  là chất phóng xạ  $\alpha$  thành hạt nhân chì  ${}^{206}\text{Pb}$  với chu kì bán rã là 138 (ngày). Độ phóng xạ ban đầu của một lượng chất phóng xạ  $1,5 \cdot 10^{11} \text{ (Bq)}$ . Cho khối lượng:  $m_\alpha = 4,0015 \text{ u}$ ;  $m_{\text{Po}} = 209,9828 \text{ u}$ ;  $m_{\text{Pb}} = 205,9744 \text{ u}$ ,  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ ;  $1 \text{ u}^2 = 931 \text{ (MeV)}$ . Tìm năng lượng tỏa ra khi lượng chất trên phân rã hết.

- A.  $1,844 \cdot 10^{19} \text{ (MeV)}$       B.  $6,42 \text{ (MeV)}$   
 C.  $1,845 \cdot 10^{19} \text{ (MeV)}$       D.  $1,66 \cdot 10^{19} \text{ (MeV)}$

**Hướng dẫn:** Chọn đáp án D

$$\Delta E = (m_{\text{Po}} - m_\alpha - m_{\text{Pb}}) c^2 \approx 6,4239 \text{ (MeV)}$$

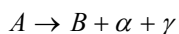
$$Q = N\Delta E = \frac{HT}{\ln 2} \Delta E = \frac{1,5 \cdot 10^{11} \cdot 138,86400}{\ln 2} \cdot 6,4239 \approx 1,66 \cdot 10^{19} \text{ (MeV)}$$

Chú ý: Trong phóng xạ alpha nếu viết phương trình phóng xạ:  $A \rightarrow B + \alpha$  thì động năng của

$$\text{hạt } \alpha \text{ là } W_\alpha = \frac{m_B}{m_B + m_\alpha} \Delta E.$$

Thực tế, đo được động năng của hạt  $\alpha$  là  $W'_\alpha < W_\alpha$ ! Tại sao vậy?

Điều này được giải thích là trong phóng xạ alpha còn có cả bức xạ gama:



Do đó, năng lượng của bức xạ gama:  $\varepsilon = W_\alpha - W'_\alpha$  với  $\varepsilon = hf = \frac{hc}{\lambda}$ .

**Ví dụ 14:** Radon  ${}_{86}\text{Rn}^{222}$  là chất phóng xạ  $\alpha$  và chuyển thành hạt nhân X. Biết rằng sự phóng xạ này tỏa ra năng lượng 12,5 (MeV) dưới dạng động năng của hai hạt sinh ra. Cho biết tỉ lệ khối lượng của hạt nhân X và hạt  $\alpha$  là 54,5. Trong thực tế người ta đo được động năng của hạt  $\alpha$  là 11,74 MeV. Sự sai lệch kết quả tính toán và kết quả đo được giải thích là do có phát ra bức xạ  $\gamma$ . Tính năng lượng của bức xạ  $\gamma$ .

- A. 0,51 (MeV).      B. 0,52 (MeV).      C. 0,53 (MeV).      D. 0,54 (MeV).

**Hướng dẫn: Chọn đáp án C**

$$\varepsilon = W_\alpha - W'_\alpha = \frac{m_{Th}}{m_{Th} + m_\alpha} \Delta E - W'_\alpha = \frac{54,5}{55,5} 12,5 - 11,74 = 0,53 \text{ (MeV)}$$

Chú ý: Khi cho chùm tia phóng xạ chuyển động vào trong từ trường đều thì cần phân biệt các trường hợp sau:

1) Trường hợp  $\vec{v}_0 \perp \vec{B}$

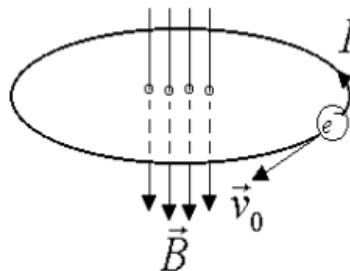
+ Lực Loren tác dụng lên hạt phóng xạ ( $\alpha, \beta$ ), có phương luôn luôn vuông góc với phương của vận tốc, vì vậy hạt chuyển động tròn đều với bán kính quỹ đạo R.

+ Lực Loren tác dụng lên (có độ lớn  $F_L = qv_0B$ ) đóng vai trò là lực hướng tâm (có độ lớn

$$F_n = \frac{mv_0^2}{R}), \text{ tức là } qv_0B = \frac{mv_0^2}{R}.$$

$$\text{- Bán kính quỹ đạo: } R = \frac{mv_0}{qB}$$

$$\text{- Tần số góc: } \omega = \frac{v_0}{R} = \frac{qB}{m}$$



- Chu kì quay:  $T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi m}{qB}$

- Chiều quay được xác định bởi quy tắc bàn tay trái.

2) Trường hợp véc tơ vận tốc hợp với véc tơ cảm ứng từ một góc  $\varphi \neq 90^\circ$  :

+ Ta phân tích:  $\vec{v}_0 = \vec{v}_t + \vec{v}_n$  ( $\vec{v}_t // \vec{B}, \vec{v}_n \perp \vec{B}$ )  $\Rightarrow \begin{cases} v_t = v_0 \cos \varphi \\ v_n = v_0 \sin \varphi \end{cases}$

+ Thành phần  $\vec{v}_n$  gây ra chuyển động tròn, Lực Loren tác dụng lên hạt (có độ lớn  $F_L = qv_n B$ )

đóng vai trò là lực hướng tâm (có độ lớn  $F_{ht} = \frac{mv_n^2}{R}$ ), tức là:  $qv_n B = \frac{mv_n^2}{R}$

+ Bán kính:  $R = \frac{mv_n}{qB} = \frac{mv_0 \sin \varphi}{qB}$

+ Tần số góc:  $\omega = \frac{v_n}{R} = \frac{qB \sin \varphi}{m}$

+ Thời gian cần thiết để hạt chuyển động

hết 1 vòng tròn là:  $T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi m}{qB \sin \varphi}$

+ Thành phần  $\vec{v}_t$  gây ra chuyển động quán tính theo

phương song song với  $\vec{B}$ . Trong thời gian  $T$ , chuyển

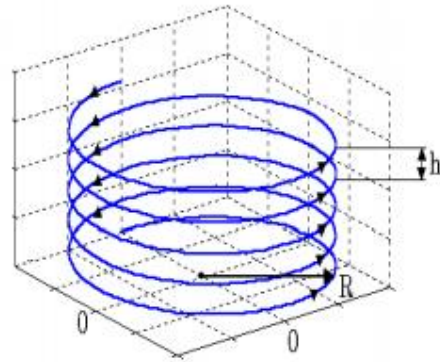
động tròn đi hết 1 vòng thì đồng thời nó cũng tiến được theo phương song song với  $\vec{B}$  một

đoạn – gọi là bước ốc:  $h = v_t T$ .

+ Hạt tham gia đồng thời hai chuyển động: chuyển động tròn do  $\vec{v}_n$  gây ra và chuyển động

quán tính theo phương song song với  $\vec{B}$  do  $\vec{v}_t$  gây ra. Vậy chuyển động của hạt là sự tổng

hợp của hai chuyển động nói trên, kết quả là nó chuyển động theo đường đing ốc, với bán kính và bước ốc lần lượt là  $R$  và  $h$ .



**Ví dụ 15:** Hạt  $\alpha$  có khối lượng  $4,0015u$ , điện tích  $3,2 \cdot 10^{-19}$  chuyển động vào trong một môi trường đều có cảm ứng  $10^{-2}$  (T) vuông góc với tốc độ  $10^6$  (m/s), coi  $1u = 1,66 \cdot 10^{-27}$  (kg).

Bán kính quỹ đạo là

A. 2,1 m

B. 2,0 m

C. 3,2 m

D. 3,3 m

**Hướng dẫn: Chọn đáp án A**

$$F_L = F_{ht} \Rightarrow qvB = \frac{mv^2}{R} \Rightarrow R = \frac{mv}{qB} = \frac{4,0015 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \cdot 10^6}{3,2 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{-2}} \approx 2,1(m)$$

**Ví dụ 16:** Có 3 hạt mang động năng bằng nhau là: hạt proton, hạt đơteri, và hạt  $\alpha$ , cùng đi vào một từ trường đều và đều chuyển động tròn đều trong từ trường. Gọi bán kính quỹ đạo của quỹ đạo của chúng lần lượt là:  $R_H, R_D, R_\alpha$

- A.  $R_H < R_\alpha < R_D$     B.  $R_H = R_\alpha < R_D$     C.  $R_\alpha < R_H < R_D$     D.  $R_H < R_D = R_\alpha$

**Hướng dẫn: Chọn đáp án C**

$$qvB = \frac{mv^2}{R} \Rightarrow R = \frac{\sqrt{2m \frac{mv^2}{2}}}{qB} = \frac{\sqrt{2W}}{B} \cdot \sqrt{\frac{m}{q^2}}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} R_\alpha = \frac{\sqrt{2W}}{B} \cdot \sqrt{\frac{m_\alpha}{4} \cdot \frac{1}{e^2}} \\ R_H = \frac{\sqrt{2W}}{B} \cdot \sqrt{m_H \cdot \frac{1}{e^2}} \\ R_D = \frac{\sqrt{2W}}{B} \cdot \sqrt{m_D \cdot \frac{1}{e^2}} \end{cases} \xrightarrow{\frac{m_\alpha < m_H < m_D}{4}} R_\alpha < R_H < R_D$$