

Tổng hợp kiến thức: Năng lượng liên kết và Độ bền vững của hạt nhân

Chuyên đề này cung cấp một cái nhìn toàn diện về các khái niệm cốt lõi liên quan đến cấu trúc và sự ổn định của hạt nhân nguyên tử, một phần quan trọng trong chương trình Vật lý hạt nhân lớp 12.

1. Lực hạt nhân

Lực hạt nhân là lực tương tác giữa các nucleon (proton và neutron) trong hạt nhân, giữ chúng liên kết lại với nhau để tạo thành hạt nhân bền vững.

Đặc điểm của lực hạt nhân:

- **Là lực tương tác mạnh:** Lực hạt nhân là lực mạnh nhất trong bốn loại lực cơ bản của tự nhiên, mạnh hơn lực tĩnh điện rất nhiều.
- **Chỉ tác dụng trong phạm vi ngắn:** Lực hạt nhân chỉ có tác dụng trong phạm vi kích thước hạt nhân (khoảng 10^{-15} m). Ngoài khoảng cách này, lực hạt nhân giảm nhanh về 0.
- **Không phụ thuộc vào điện tích:** Lực hạt nhân tác dụng như nhau giữa cặp proton-proton, neutron-neutron và proton-neutron.

Ví dụ: Hạt nhân Heli (${}^4_2\text{He}$) có 2 proton mang điện tích dương. Theo lực tĩnh điện, chúng sẽ đẩy nhau rất mạnh. Tuy nhiên, hạt nhân Heli vẫn rất bền vững do lực hạt nhân (lực hút) giữa các nucleon lớn hơn rất nhiều so với lực đẩy tĩnh

điện giữa các proton.

2. Độ hụt khối (Δm)

Độ hụt khối là sự chênh lệch giữa tổng khối lượng của các nucleon tạo thành hạt nhân và khối lượng thực tế của hạt nhân đó.

Công thức: $\Delta m = [Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n] - m_{hn}$

- **Δm :** Độ hụt khối (đơn vị: u hoặc kg)
- **Z :** Số proton
- **A :** Số khối (tổng số proton và neutron)
- **m_p :** Khối lượng của một proton (≈ 1.007276 u)
- **m_n :** Khối lượng của một neutron (≈ 1.008665 u)
- **m_{hn} :** Khối lượng của hạt nhân

Giải thích: Khối lượng của một hạt nhân luôn nhỏ hơn tổng khối lượng các nucleon riêng lẻ tạo nên nó. Phần khối lượng "hụt" đi này đã được chuyển hóa thành năng lượng liên kết để giữ các nucleon lại với nhau, theo hệ thức Einstein $E = mc^2$.

Ví dụ minh họa:

1. Ví dụ 1: Tính độ hụt khối của hạt nhân Heli (${}^4_2\text{He}$).

Cho biết: $m_p = 1.007276$ u, $m_n = 1.008665$ u, khối lượng hạt nhân Heli $m_{\text{He}} = 4.001506$ u.

Hạt nhân Heli có $Z = 2$ proton và $A - Z = 2$ neutron.

Tổng khối lượng các nucleon: $m_0 = 2 \cdot m_p + 2 \cdot m_n = 2(1.007276) +$

$$2(1.008665) = 4.031882 \text{ u.}$$

$$\text{Độ hụt khối: } \Delta m = m_0 - m_{\text{He}} = 4.031882 - 4.001506 = \mathbf{0.030376 \text{ u.}}$$

2. Ví dụ 2: Tính độ hụt khối của hạt nhân Sắt ($^{56}_{26}\text{Fe}$).

$$\text{Cho biết: } m_{\text{Fe}} = 55.934937 \text{ u.}$$

Hạt nhân Sắt có $Z = 26$ proton và $A - Z = 30$ neutron.

$$\text{Tổng khối lượng các nucleon: } m_0 = 26.m_p + 30.m_n = 26(1.007276) + 30(1.008665) = 56.449116 \text{ u.}$$

$$\text{Độ hụt khối: } \Delta m = m_0 - m_{\text{Fe}} = 56.449116 - 55.934937 = \mathbf{0.514179 \text{ u.}}$$

3. Năng lượng liên kết (W_{lk})

Năng lượng liên kết của một hạt nhân là năng lượng tối thiểu cần thiết để phá vỡ hạt nhân đó thành các nucleon riêng lẻ, hoặc là năng lượng tỏa ra khi các nucleon kết hợp lại tạo thành hạt nhân.

$$\text{Công thức: } W_{\text{lk}} = \Delta m \cdot c^2$$

Năng lượng liên kết càng lớn thì các nucleon liên kết với nhau càng chặt chẽ.

Đơn vị và công thức tính nhanh:

Trong vật lý hạt nhân, ta thường dùng đơn vị khối lượng là **u** và năng lượng là **MeV** (Mega-electron Volt).

$$\text{Với quy ước: } 1 \text{ u} \cdot c^2 \approx 931.5 \text{ MeV.}$$

$$\text{Công thức tính nhanh năng lượng liên kết là: } W_{\text{lk}} (\text{MeV}) = \Delta m (\text{u}) \times 931.5$$

Ví dụ minh họa:

1. Ví dụ 1: Tính năng lượng liên kết của hạt nhân Heli (${}^4_2\text{He}$).

Từ ví dụ trên, ta có độ hụt khối của Heli là $\Delta m = 0.030376 \text{ u}$.

Năng lượng liên kết: $W_{lk} = 0.030376 \times 931.5 \approx \mathbf{28.3 \text{ MeV}}$.

2. Ví dụ 2: Tính năng lượng liên kết của hạt nhân Urani (${}^{235}_{92}\text{U}$).

Cho biết khối lượng hạt nhân Urani $m_U = 235.04393 \text{ u}$.

Hạt nhân Urani có $Z = 92$ proton và $A - Z = 143$ neutron.

Độ hụt khối: $\Delta m = [92(1.007276) + 143(1.008665)] - 235.04393 = 1.864363 \text{ u}$.

Năng lượng liên kết: $W_{lk} = 1.864363 \times 931.5 \approx \mathbf{1736.7 \text{ MeV}}$.

4. Năng lượng liên kết riêng (ϵ) và Độ bền vững của hạt nhân

Năng lượng liên kết riêng là năng lượng liên kết tính trên một nucleon. Đây là đại lượng đặc trưng cho mức độ bền vững của hạt nhân.

Công thức: $\epsilon = W_{lk} / A$

- ϵ : Năng lượng liên kết riêng (đơn vị: MeV/nucleon)
- W_{lk} : Năng lượng liên kết (MeV)
- A : Số khối

Ý nghĩa: Hạt nhân có năng lượng liên kết riêng càng lớn thì càng bền vững. Để phá vỡ hạt nhân đó, ta cần cung cấp một năng lượng trung bình lớn hơn để tách một nucleon ra khỏi nó.

Ví dụ minh họa:

1. Ví dụ 1: So sánh độ bền vững của Heli (${}^4_2\text{He}$) và Urani (${}^{235}_{92}\text{U}$).

- Năng lượng liên kết riêng của Heli:

$$\varepsilon_{\text{He}} = W_{\text{lk(He)}} / A_{\text{He}} = 28.3 / 4 \approx \mathbf{7.075 \text{ MeV/nucleon}}.$$

- Năng lượng liên kết riêng của Urani:

$$\varepsilon_{\text{U}} = W_{\text{lk(U)}} / A_{\text{U}} = 1736.7 / 235 \approx \mathbf{7.39 \text{ MeV/nucleon}}.$$

2. Ví dụ 2: Tính năng lượng liên kết riêng của Sắt (${}^{56}_{26}\text{Fe}$).

Từ ví dụ trên, $\Delta m_{\text{Fe}} = 0.514179 \text{ u}$.

$$W_{\text{lk(Fe)}} = 0.514179 \times 931.5 \approx 478.9 \text{ MeV}.$$

$$\varepsilon_{\text{Fe}} = 478.9 / 56 \approx \mathbf{8.55 \text{ MeV/nucleon}}.$$

Kết luận: So sánh 3 hạt nhân trên, ta thấy $\varepsilon_{\text{Fe}} > \varepsilon_{\text{U}} > \varepsilon_{\text{He}}$. Do đó, hạt nhân Sắt bền vững hơn hạt nhân Urani, và hạt nhân Urani bền vững hơn hạt nhân Heli.

5. Mối liên hệ giữa độ bền vững và các phản ứng hạt nhân

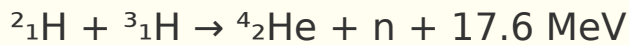
Các hạt nhân có số khối A trong khoảng từ 50 đến 80 có năng lượng liên kết riêng lớn nhất (khoảng 8.8 MeV/nucleon), do đó chúng là các hạt nhân bền vững nhất. Các hạt nhân nhẹ ($A < 50$) và các hạt nhân nặng ($A > 80$) kém bền vững hơn.

Xu hướng của các phản ứng hạt nhân là dịch chuyển từ trạng thái kém bền vững sang trạng thái bền vững hơn, đồng thời giải phóng năng lượng.

a. Phản ứng nhiệt hạch (Tổng hợp hạt nhân)

Là quá trình trong đó hai hay nhiều hạt nhân nhẹ hợp lại thành một hạt nhân nặng hơn và bền vững hơn. Vì hạt nhân sản phẩm có năng lượng liên kết riêng lớn hơn, phản ứng sẽ tỏa ra năng lượng rất lớn.

Ví dụ: Phản ứng tổng hợp Heli từ Deuterium (^2_1H) và Tritium (^3_1H).

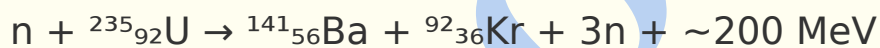


Hạt nhân sản phẩm ^4_2He bền vững hơn các hạt nhân ban đầu, do đó năng lượng được giải phóng.

b. Phản ứng phân hạch (Phân chia hạt nhân)

Là quá trình một hạt nhân nặng vỡ thành hai (hoặc nhiều) hạt nhân nhẹ hơn, bền vững hơn. Các hạt nhân sản phẩm có tổng khối lượng nhỏ hơn khối lượng hạt nhân ban đầu, phần khối lượng hụt đi đó chuyển hóa thành năng lượng tỏa ra.

Ví dụ: Phản ứng phân hạch Urani-235 khi hấp thụ một neutron.



Các hạt nhân sản phẩm Ba và Kr có số khối trung bình, bền vững hơn hạt nhân nặng U-235, do đó năng lượng được giải phóng.

Tiêu chí	Phản ứng phân hạch (Fission)	Phản ứng nhiệt hạch (Fusion)
Bản chất	Một hạt nhân nặng vỡ thành các hạt nhân nhẹ hơn, bền vững hơn.	Hai hay nhiều hạt nhân nhẹ hợp lại thành một hạt nhân nặng hơn, bền vững hơn.
Xu hướng	Xảy ra với các hạt nhân nặng ($A > 80$).	Xảy ra với các hạt nhân rất nhẹ ($A < 10$).
Năng lượng	Tỏa năng lượng.	Tỏa năng lượng lớn hơn nhiều so với phân hạch (tính trên cùng khối lượng).
Ví dụ ứng dụng	Nhà máy điện hạt nhân, bom nguyên tử.	Năng lượng Mặt Trời và các ngôi sao, bom hydro.