

Phương pháp giải bài tập về Độ hụt khối và Năng lượng phản ứng hạt nhân

Tài liệu này tổng hợp toàn bộ kiến thức lý thuyết và các phương pháp giải bài tập quan trọng liên quan đến độ hụt khối, năng lượng liên kết và năng lượng của phản ứng hạt nhân trong chương trình Vật Lý 12.

I. Độ hụt khối (Δm)

1. Định nghĩa

Thực nghiệm cho thấy khối lượng của một hạt nhân (m_{hn}) luôn nhỏ hơn tổng khối lượng của các nuclôn tạo thành hạt nhân đó. Độ chênh lệch khối lượng này được gọi là **độ hụt khối** của hạt nhân, ký hiệu là Δm .

Độ hụt khối đặc trưng cho sự bền vững của hạt nhân. Độ hụt khối càng lớn, năng lượng liên kết càng lớn, hạt nhân càng bền vững.

2. Công thức

Xét hạt nhân A_ZX có Z prôtôn và $N = A - Z$ nơtron:

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

- **Z**: số prôtôn (số hiệu nguyên tử)
- **A**: số nuclôn (số khối)
- **m_p** : khối lượng của một prôtôn tự do

- m_n : khối lượng của một neutron tự do
- m_{hn} : khối lượng của hạt nhân đang xét

3. Ví dụ minh họa

Ví dụ 1: Tính độ hụt khối của hạt nhân Heli (${}^4_2\text{He}$). Cho biết khối lượng của prôtôn là $m_p = 1,00728 \text{ u}$, của neutron là $m_n = 1,00866 \text{ u}$ và của hạt nhân Heli là $m_{\text{He}} = 4,00150 \text{ u}$.

Phân tích:

- Hạt nhân Heli có $Z = 2$ prôtôn và $N = 4 - 2 = 2$ neutron.
- Tổng khối lượng các nuclôn khi đứng riêng lẻ là: $2.m_p + 2.m_n = 2(1,00728) + 2(1,00866) = 4,03188 \text{ u}$.
- Áp dụng công thức độ hụt khối:
- $\Delta m = (2.m_p + 2.m_n) - m_{\text{He}} = 4,03188 - 4,00150 = \mathbf{0,03038 \text{ u}}$.

Ví dụ 2: Tính độ hụt khối của hạt nhân Sắt (${}^{56}_{26}\text{Fe}$), biết khối lượng hạt nhân sắt là $m_{\text{Fe}} = 55,9349 \text{ u}$. (Sử dụng m_p và m_n từ ví dụ 1).

Phân tích:

- Hạt nhân Sắt có $Z = 26$ prôtôn và $N = 56 - 26 = 30$ neutron.
- Tổng khối lượng các nuclôn: $Z.m_p + N.m_n = 26(1,00728) + 30(1,00866) = 26,18928 + 30,2598 = 56,44908 \text{ u}$.
- Độ hụt khối của Sắt:
- $\Delta m = 56,44908 - 55,9349 = \mathbf{0,51418 \text{ u}}$.

II. Năng lượng liên kết (W_{lk}) và Năng lượng liên kết riêng

1. Năng lượng liên kết (W_{lk})

Theo thuyết tương đối của Anh-xtanh, năng lượng và khối lượng tương đương nhau theo hệ thức $E = mc^2$. Độ hụt khối Δm khi các nuclôn kết hợp tạo thành hạt nhân đã chuyển hóa thành năng lượng, gọi là năng lượng liên kết.

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

Công thức:

$$W_{lk} = \Delta m \cdot c^2 = \{[Z \cdot m_p + (A-Z) \cdot m_n] - m_{hn}\} \cdot c^2$$

Trong đó, c là tốc độ ánh sáng trong chân không ($c \approx 3 \cdot 10^8$ m/s). Để tính toán thuận tiện, ta thường dùng đơn vị MeV (Mega-electron Volt) và đơn vị khối lượng nguyên tử u . Ta có mối liên hệ:

$$1 u \cdot c^2 \approx 931,5 \text{ MeV}$$

Vậy, công thức tính nhanh năng lượng liên kết là:

$$W_{lk} (\text{MeV}) = \Delta m (u) \cdot 931,5$$

2. Năng lượng liên kết riêng

Định nghĩa: Năng lượng liên kết riêng là năng lượng liên kết tính trên một nuclôn. Nó là đại lượng đặc trưng cho mức độ bền vững của hạt nhân.

Hạt nhân có năng lượng liên kết riêng càng lớn thì càng bền vững.

Công thức:

$$\varepsilon = W_{lk} / A$$

Các hạt nhân bền vững nhất có số khối A trong khoảng từ 50 đến 80, với năng lượng liên kết riêng đạt cực đại khoảng 8,8 MeV/nuclôn.

3. Ví dụ minh họa

Ví dụ 1: Tính năng lượng liên kết và năng lượng liên kết riêng của hạt nhân Heli (${}^4_2\text{He}$) từ ví dụ trên ($\Delta m = 0,03038 \text{ u}$).

Giải:

- Năng lượng liên kết: $W_{lk} = \Delta m \cdot 931,5 = 0,03038 \cdot 931,5 \approx \mathbf{28,3 \text{ MeV}}$.
- Năng lượng liên kết riêng: $\varepsilon_{\text{He}} = W_{lk} / A = 28,3 / 4 \approx \mathbf{7,075 \text{ MeV/nuclôn}}$.

Ví dụ 2: So sánh sự bền vững của hai hạt nhân Urani (${}^{235}_{92}\text{U}$) và Sắt (${}^{56}_{26}\text{Fe}$). Biết năng lượng liên kết của U-235 là 1786 MeV và của Fe-56 là 492 MeV.

Giải:

Để so sánh độ bền vững, ta cần tính năng lượng liên kết riêng:

- Năng lượng liên kết riêng của Urani: $\varepsilon_{\text{U}} = 1786 / 235 \approx \mathbf{7,6 \text{ MeV/nuclôn}}$.
- Năng lượng liên kết riêng của Sắt: $\varepsilon_{\text{Fe}} = 492 / 56 \approx \mathbf{8,79 \text{ MeV/nuclôn}}$.

Vì $\varepsilon_{\text{Fe}} > \varepsilon_{\text{U}}$ nên hạt nhân Sắt (${}^{56}_{26}\text{Fe}$) bền vững hơn hạt nhân Urani (${}^{235}_{92}\text{U}$).

III. Năng lượng của phản ứng hạt nhân (ΔE)

Một phản ứng hạt nhân tổng quát có dạng: $A + B \rightarrow C + D$.

Năng lượng của phản ứng hạt nhân, ký hiệu là ΔE , là năng lượng tỏa ra hoặc thu vào trong quá trình phản ứng.

- Nếu $\Delta E > 0$: Phản ứng tỏa năng lượng.
- Nếu $\Delta E < 0$: Phản ứng thu năng lượng (giá trị $|\Delta E|$ là năng lượng cần cung cấp cho phản ứng).

Có 3 phương pháp chính để tính ΔE .

1. Tính theo khối lượng các hạt trước và sau phản ứng

Năng lượng của phản ứng bằng độ chênh lệch khối lượng nghỉ của các hạt trước và sau phản ứng nhân với c^2 .

Công thức:

$$\Delta E = (m_{\text{trước}} - m_{\text{sau}}) \cdot c^2 = (m_A + m_B - m_C - m_D) \cdot c^2$$

Công thức tính nhanh (MeV):

$$\Delta E \text{ (MeV)} = (m_{\text{trước}} - m_{\text{sau}}) \text{ (u)} \cdot 931,5$$

Ví dụ: Cho phản ứng nhiệt hạch: ${}^2_1\text{D} + {}^3_1\text{T} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$. Tính năng lượng tỏa ra. Cho khối lượng các hạt: $m_{\text{D}} = 2,0136 \text{ u}$; $m_{\text{T}} = 3,0160 \text{ u}$; $m_{\text{He}} = 4,0015 \text{ u}$; $m_{\text{n}} = 1,00866 \text{ u}$.

Giải:

- Khối lượng trước phản ứng: $m_{\text{trước}} = m_{\text{D}} + m_{\text{T}} = 2,0136 + 3,0160 = 5,0296 \text{ u}$.

- Khối lượng sau phản ứng: $m_{\text{sau}} = m_{\text{He}} + m_n = 4,0015 + 1,00866 = 5,01016$ u.
- Năng lượng phản ứng: $\Delta E = (5,0296 - 5,01016) \cdot 931,5 = 0,01944 \cdot 931,5 \approx$
18,1 MeV.
- Vì $\Delta E > 0$, phản ứng tỏa ra năng lượng là 18,1 MeV.

2. Tính theo độ hụt khối của các hạt nhân

Năng lượng của phản ứng bằng độ chênh lệch độ hụt khối của các hạt nhân sau và trước phản ứng nhân với c^2 .

Công thức:

$$\Delta E = (\Delta m_{\text{sau}} - \Delta m_{\text{trước}}) \cdot c^2 = (\Delta m_C + \Delta m_D - \Delta m_A - \Delta m_B) \cdot c^2$$

Công thức tính nhanh (MeV):

$$\Delta E \text{ (MeV)} = (\Delta m_{\text{sau}} - \Delta m_{\text{trước}}) \text{ (u)} \cdot 931,5$$

Lưu ý: Độ hụt khối của các nuclôn tự do (prôtôn, nơtron) bằng 0.

Ví dụ: Cho phản ứng: ${}^{235}_{92}\text{U} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{95}_{38}\text{Sr} + {}^{139}_{54}\text{Xe} + 2({}^1_0\text{n})$. Tính năng lượng tỏa ra. Cho độ hụt khối của các hạt: $\Delta m_{\text{U}} = 1,91535$ u; $\Delta m_{\text{Sr}} = 0,82645$ u; $\Delta m_{\text{Xe}} = 1,19925$ u.

Giải:

- Độ hụt khối trước phản ứng: $\Delta m_{\text{trước}} = \Delta m_{\text{U}} + \Delta m_{\text{n}} = 1,91535 + 0 =$
1,91535 u.

- Độ hụt khối sau phản ứng: $\Delta m_{\text{sau}} = \Delta m_{\text{Sr}} + \Delta m_{\text{Xe}} + 2 \cdot \Delta m_n = 0,82645 + 1,19925 + 2(0) = 2,0257 \text{ u}$.
- Năng lượng phản ứng: $\Delta E = (2,0257 - 1,91535) \cdot 931,5 = 0,11035 \cdot 931,5 \approx \mathbf{102,8 \text{ MeV}}$.
- Phản ứng tỏa ra năng lượng 102,8 MeV.

3. Tính theo năng lượng liên kết của các hạt nhân

Năng lượng của phản ứng bằng hiệu tổng năng lượng liên kết của các hạt nhân sau và tổng năng lượng liên kết của các hạt nhân trước phản ứng.

Công thức:

$$\Delta E = W_{\text{lk_sau}} - W_{\text{lk_trước}} = (W_{\text{lk(C)}} + W_{\text{lk(D)}}) - (W_{\text{lk(A)}} + W_{\text{lk(B)}})$$

Lưu ý: Năng lượng liên kết của các nuclôn tự do (prôtôn, notron) bằng 0.

Ví dụ: Tính năng lượng tỏa ra khi tổng hợp được 1 mol Heli từ phản ứng: $^2_1\text{D} + ^2_1\text{D} \rightarrow ^4_2\text{He}$. Biết năng lượng liên kết riêng của D là 1,11 MeV/nuclôn và của He là 7,075 MeV/nuclôn. Số Avogadro $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$.

Giải:

- Năng lượng liên kết của hạt nhân D: $W_{\text{lk(D)}} = \varepsilon_D \cdot A_D = 1,11 \cdot 2 = 2,22 \text{ MeV}$.
- Năng lượng liên kết của hạt nhân He: $W_{\text{lk(He)}} = \varepsilon_{\text{He}} \cdot A_{\text{He}} = 7,075 \cdot 4 = 28,3 \text{ MeV}$.
- Năng lượng tỏa ra trong một phản ứng:
- $\Delta E = W_{\text{lk_sau}} - W_{\text{lk_trước}} = W_{\text{lk(He)}} - (W_{\text{lk(D)}} + W_{\text{lk(D)}}) = 28,3 - (2,22 + 2,22) = \mathbf{23,86 \text{ MeV}}$.

- Một mol Heli chứa N_A hạt nhân He. Từ phương trình, để tạo ra 1 hạt nhân He cần 1 phản ứng. Vậy để tạo ra 1 mol He cần N_A phản ứng.
- Tổng năng lượng tỏa ra: $E_{\text{tổng}} = N_A \cdot \Delta E = 6,022 \cdot 10^{23} \cdot 23,86 \approx 1,437 \cdot 10^{25}$ MeV.

IV. Bảng tổng hợp công thức

Đại lượng	Công thức	Ghi chú
Độ hụt khối (Δm)	$\Delta m = [Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n] - m_{\text{hạt}}$	Đơn vị thường dùng là u.
Năng lượng liên kết (W_{lk})	$W_{\text{lk}} = \Delta m \cdot c^2 = \Delta m \text{ (u)} \cdot 931,5 \text{ MeV}$	Đặc trưng cho độ bền vững của hạt nhân.
Năng lượng liên kết riêng (ϵ)	$\epsilon = W_{\text{lk}} / A$	Đặc trưng cho MỨC ĐỘ bền vững. ϵ càng lớn, hạt nhân càng bền.
Năng lượng phản ứng (ΔE)	$\Delta E = (m_{\text{trước}} - m_{\text{sau}}) \cdot c^2$	Cách 1: Tính theo khối lượng.
	$\Delta E = (\Delta m_{\text{sau}} - \Delta m_{\text{trước}}) \cdot c^2$	Cách 2: Tính theo độ hụt khối.
	$\Delta E = W_{\text{lk_sau}} - W_{\text{lk_trước}}$	Cách 3: Tính theo năng lượng liên kết.

V. Lưu ý quan trọng khi giải bài tập

- **Thứ tự tính toán:** Nhớ quy tắc "Khối lượng thì **trước trừ sau**, còn Năng lượng liên kết/Độ hụt khối thì **sau trừ trước**".
- **Đơn vị:** Luôn kiểm tra và thống nhất đơn vị trong suốt quá trình tính toán. Thường chuyển tất cả về u và MeV để tiện lợi.
- **Hạt cơ bản:** Năng lượng liên kết và độ hụt khối của các nuclôn tự do (prôtôn, nơtron) bằng 0.
- **Khối lượng nguyên tử và hạt nhân:** Đề bài có thể cho khối lượng nguyên tử thay vì khối lượng hạt nhân. Khối lượng nguyên tử $m_{nt} = m_{hn} + Z.m_e$. Trong các phản ứng không có sự tham gia của positron (β^+), khối lượng electron sẽ tự triệt tiêu khi tính ΔE theo khối lượng, nên có thể dùng khối lượng nguyên tử thay cho khối lượng hạt nhân. Tuy nhiên, cần đọc kỹ đề để tránh nhầm lẫn.