

TỔNG HỢP KIẾN THỨC: CẤU TẠO HẠT NHÂN & NĂNG LƯỢNG LIÊN KẾT

Chuyên đề này cung cấp một cái nhìn toàn diện và chi tiết về cấu trúc của hạt nhân nguyên tử, các khái niệm nền tảng về khối lượng, năng lượng và độ bền vững của hạt nhân, là nền tảng cho việc tìm hiểu các hiện tượng phóng xạ và phản ứng hạt nhân.

1. Cấu tạo hạt nhân nguyên tử

1.1. Các thành phần cấu tạo

Hạt nhân nguyên tử được cấu tạo từ hai loại hạt cơ bản, gọi chung là **nucleon**.

- **Proton (p)**: Mang điện tích dương, có giá trị bằng điện tích nguyên tố ($+e \approx 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$). Khối lượng của proton là $m_p \approx 1,67262 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$.
- **Neutron (n)**: Không mang điện. Khối lượng của neutron là $m_n \approx 1,67493 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$, lớn hơn khối lượng proton một chút.

1.2. Kí hiệu hạt nhân

Một hạt nhân của nguyên tố X được kí hiệu đầy đủ là ${}^A_Z\text{X}$, trong đó:

- **Z**: Số hiệu nguyên tử (hay số thứ tự trong bảng tuần hoàn), bằng số proton trong hạt nhân. Số Z quyết định tính chất hóa học của nguyên tố.
- **A**: Số khối, là tổng số nucleon trong hạt nhân (tổng số proton và neutron).

Công thức liên hệ:

$$A = Z + N$$

Trong đó, **N** là số neutron trong hạt nhân.

Ví dụ:

1. Hạt nhân Heli được kí hiệu là ${}^4_2\text{He}$. Điều này có nghĩa là hạt nhân Heli có $Z = 2$ proton và $A = 4$ nucleon. Suy ra số neutron là $N = A - Z = 4 - 2 = 2$ neutron.
2. Hạt nhân Urani-235 được kí hiệu là ${}^{235}_{92}\text{U}$. Hạt nhân này có $Z = 92$ proton và $A = 235$ nucleon. Suy ra số neutron là $N = 235 - 92 = 143$ neutron.

1.3. Đồng vị

Đồng vị là các nguyên tử mà hạt nhân của chúng có **cùng số proton (Z)** nhưng **khác nhau về số neutron (N)**, do đó chúng có số khối A khác nhau. Vì có cùng số Z, các đồng vị thuộc cùng một nguyên tố hóa học và có vị trí giống nhau trong bảng tuần hoàn.

Ví dụ:

- Nguyên tố Hydro có 3 đồng vị chính:
 - ${}^1_1\text{H}$ (Hydro thường hay protii): 1 proton, 0 neutron.
 - ${}^2_1\text{H}$ (Hydro nặng hay deuterium, kí hiệu D): 1 proton, 1 neutron.
 - ${}^3_1\text{H}$ (Hydro siêu nặng hay tritium, kí hiệu T): 1 proton, 2 neutron.
- Nguyên tố Carbon có các đồng vị như ${}^{12}_6\text{C}$ (phổ biến) và ${}^{14}_6\text{C}$ (đồng vị phóng xạ dùng trong định tuổi cổ vật).

2. Khối lượng và Năng lượng hạt nhân

2.1. Đơn vị khối lượng nguyên tử (u)

Trong vật lý hạt nhân, kg là đơn vị quá lớn. Người ta dùng đơn vị khối lượng nguyên tử, kí hiệu là 'u'.

1 u = (1/12) khối lượng của nguyên tử đồng vị Carbon $^{12}_6\text{C}$.

Giá trị quy đổi:

$$1 \text{ u} \approx 1,66055 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Khối lượng của proton và neutron theo đơn vị u:

- $m_p \approx 1,00728 \text{ u}$
- $m_n \approx 1,00866 \text{ u}$

2.2. Hệ thức Anh-xtanh giữa khối lượng và năng lượng

Theo Albert Einstein, khối lượng và năng lượng là hai đại lượng tương đương và có thể chuyển hóa lẫn nhau. Mọi vật có khối lượng m đều chứa một năng lượng nghỉ E_0 tương ứng.

Công thức:

$$E = mc^2$$

Trong đó:

- **E** là năng lượng (J)
- **m** là khối lượng (kg)
- **c** là tốc độ ánh sáng trong chân không ($c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$).

Từ hệ thức này, ta có thể tính năng lượng tương ứng với $1u$:

$$1 \text{ u}c^2 \approx 931,5 \text{ MeV (Mega-electronVolt)}$$

Đây là hệ số quy đổi cực kỳ quan trọng trong các bài toán vật lý hạt nhân. ($1 \text{ MeV} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J}$).

2.3. Lực hạt nhân

Lực hạt nhân là lực tương tác giữa các nucleon trong hạt nhân, giữ chúng liên kết với nhau để tạo thành một cấu trúc bền vững. Đặc điểm của lực hạt nhân:

- Là loại lực tương tác mạnh nhất trong tự nhiên (mạnh hơn lực điện từ rất nhiều).
- Chỉ có tác dụng trong phạm vi rất ngắn, cỡ kích thước hạt nhân (khoảng 10^{-15} m).
- Không phụ thuộc vào điện tích (lực tương tác giữa p-p, n-n, p-n là như nhau nếu chúng ở cùng khoảng cách).

3. Độ hụt khối và Năng lượng liên kết

3.1. Độ hụt khối (Δm)

Thực nghiệm cho thấy khối lượng của một hạt nhân (m_x) luôn **nhỏ hơn** tổng khối lượng của các nucleon tạo thành nó. Độ chênh lệch khối lượng này được gọi là độ hụt khối.

Công thức tính độ hụt khối của hạt nhân A_ZX :

$$\Delta m = [Z \cdot m_p + (A-Z) \cdot m_n] - m_x$$

Trong đó:

- **$Z.m_p$** : Tổng khối lượng của các proton.
- **$(A-Z).m_n$** : Tổng khối lượng của các neutron.
- **m_x** : Khối lượng thực tế của hạt nhân X.

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

Giải:

Hạt nhân ${}^4_2\text{He}$ có 2 proton và 2 neutron.

Tổng khối lượng các nucleon tạo thành:

$$m_0 = 2.m_p + 2.m_n = 2 * 1,00728 + 2 * 1,00866 = 4,03188 \text{ u}.$$

Độ hụt khối:

$$\Delta m = m_0 - m_{\text{He}} = 4,03188 - 4,00150 = \mathbf{0,03038 \text{ u}}.$$

3.2. Năng lượng liên kết (W_{lk})

Năng lượng liên kết của một hạt nhân là năng lượng tối thiểu cần cung cấp để tách hạt nhân đó thành các nucleon riêng lẻ, hoặc là năng lượng tỏa ra khi các nucleon riêng lẻ kết hợp lại tạo thành hạt nhân. Năng lượng này chính là năng lượng tương ứng với độ hụt khối Δm .

Công thức:

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

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

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

Giải:

Độ hụt khối $\Delta m = 0,03038 \text{ u}$.

Sử dụng hệ số quy đổi $1 \text{ u}c^2 = 931,5 \text{ MeV}$:

$$W_{lk} = \Delta m \cdot c^2 = 0,03038 \text{ u}c^2 = 0,03038 \cdot 931,5 \approx \mathbf{28,3 \text{ MeV}}.$$

3.3. Năng lượng liên kết riêng (ϵ)

Để so sánh mức độ bền vững giữa các hạt nhân khác nhau, người ta dùng đại lượng năng lượng liên kết riêng. Đây là năng lượng liên kết tính trên một nucleon.

Công thức:

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

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

Ví dụ:

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

$$\epsilon(\text{He}) = W_{lk} / A = 28,3 \text{ MeV} / 4 = \mathbf{7,075 \text{ MeV/nucleon}}.$$

2. So sánh với hạt nhân Urani (${}^{235}_{92}\text{U}$) có năng lượng liên kết $W_{lk} \approx 1785 \text{ MeV}$.

$$\epsilon(\text{U}) = 1785 \text{ MeV} / 235 \approx \mathbf{7,6 \text{ MeV/nucleon}}.$$

3. So sánh với hạt nhân Sắt (${}^{56}_{26}\text{Fe}$) có năng lượng liên kết $W_{lk} \approx 492 \text{ MeV}$.

$$\epsilon(\text{Fe}) = 492 \text{ MeV} / 56 \approx \mathbf{8,8 \text{ MeV/nucleon}}.$$

Từ ví dụ trên, ta thấy $\epsilon(\text{Fe}) > \epsilon(\text{U}) > \epsilon(\text{He})$. Do đó, hạt nhân Sắt ^{56}Fe bền vững hơn hạt nhân Urani ^{235}U và Heli ^4He .

3.4. Sự phụ thuộc của năng lượng liên kết riêng vào số khối A

Đồ thị biểu diễn sự phụ thuộc của năng lượng liên kết riêng (ϵ) vào số khối (A) cho thấy:

- Năng lượng liên kết riêng tăng nhanh đối với các hạt nhân nhẹ ($A < 20$).
- Đạt giá trị cực đại khoảng 8,8 MeV/nucleon đối với các hạt nhân có số khối trung bình ($50 < A < 80$). Các hạt nhân trong vùng này là bền vững nhất (ví dụ: ^{56}Fe).
- Giảm dần đối với các hạt nhân nặng ($A > 80$).

Điều này giải thích cho các hiện tượng:

- **Phản ứng phân hạch:** Một hạt nhân nặng (kém bền) vỡ thành các hạt nhân trung bình (bền hơn), giải phóng năng lượng.
- **Phản ứng nhiệt hạch:** Hai hạt nhân rất nhẹ (kém bền) kết hợp lại thành một hạt nhân nặng hơn (bền hơn), giải phóng năng lượng rất lớn.

4. Sơ lược về Phản ứng hạt nhân

4.1. Định nghĩa và Phương trình

Phản ứng hạt nhân là quá trình các hạt nhân tương tác với nhau và biến đổi thành các hạt nhân khác.

Phương trình tổng quát: $\mathbf{A + B \rightarrow C + D}$

Trong đó A, B là các hạt nhân ban đầu (trước phản ứng), C, D là các hạt nhân sản phẩm (sau phản ứng).

4.2. Các định luật bảo toàn

Trong một phản ứng hạt nhân, có bốn định luật bảo toàn cơ bản:

1. **Bảo toàn điện tích (Z):** Tổng điện tích của các hạt trước phản ứng bằng tổng điện tích của các hạt sau phản ứng.
2. **Bảo toàn số khối (A):** Tổng số nucleon của các hạt trước phản ứng bằng tổng số nucleon của các hạt sau phản ứng.
3. **Bảo toàn năng lượng toàn phần:** Năng lượng toàn phần (bao gồm năng lượng nghỉ và động năng) được bảo toàn.
4. **Bảo toàn động lượng:** Tổng động lượng của các hạt trước phản ứng bằng tổng động lượng của các hạt sau phản ứng.

Lưu ý: Số proton (Z) và số neutron (N) riêng lẻ có thể không được bảo toàn.

4.3. Năng lượng của phản ứng hạt nhân

Năng lượng tỏa ra hoặc thu vào của một phản ứng hạt nhân được tính bằng công thức:

$$\Delta E = (m_{\text{trước}} - m_{\text{sau}}) \cdot c^2$$

Trong đó:

- **m_{trước}**: Tổng khối lượng của các hạt trước phản ứng.
- **m_{sau}**: Tổng khối lượng của các hạt sau phản ứng.

Trường hợp	Điều kiện	Loại phản ứng
$\Delta E > 0$	$m_{\text{trước}} > m_{\text{sau}}$	Phản ứng tỏa năng lượng (exothermic)
$\Delta E < 0$	$m_{\text{trước}} < m_{\text{sau}}$	Phản ứng thu năng lượng (endothermic)

Ví dụ: Xét phản ứng nhiệt hạch: ${}^2_1\text{D} + {}^3_1\text{T} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$.

Cho khối lượng: $m_{\text{D}} = 2,0136 \text{ u}$; $m_{\text{T}} = 3,0160 \text{ u}$; $m_{\text{He}} = 4,0015 \text{ u}$; $m_{\text{n}} = 1,00866 \text{ u}$.

Giải:

$$m_{\text{trước}} = m_{\text{D}} + m_{\text{T}} = 2,0136 + 3,0160 = 5,0296 \text{ u}.$$

$$m_{\text{sau}} = m_{\text{He}} + m_{\text{n}} = 4,0015 + 1,00866 = 5,01016 \text{ u}.$$

Vì $m_{\text{trước}} > m_{\text{sau}}$, đây là phản ứng tỏa năng lượng.

Năng lượng tỏa ra:

$$\Delta E = (5,0296 - 5,01016) \cdot 931,5 \text{ MeV} \approx \mathbf{18,1 \text{ MeV}}.$$