

Chuyên đề: Phản ứng phân hạch và Lò phản ứng hạt nhân

Đây là phần kiến thức quan trọng trong chương Vật lý hạt nhân, giải thích cơ sở của năng lượng hạt nhân và ứng dụng của nó trong thực tế.

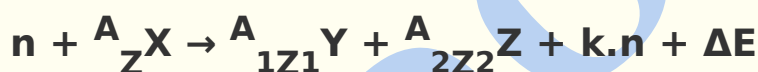
1. Phản ứng phân hạch

a. Định nghĩa

Phản ứng phân hạch là phản ứng trong đó một hạt nhân rất nặng (như Urani, Plutoni) hấp thụ một neutron chậm và vỡ ra thành hai hạt nhân trung bình, kèm theo sự giải phóng một vài neutron và một năng lượng rất lớn.

b. Phương trình tổng quát

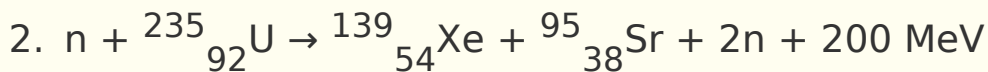
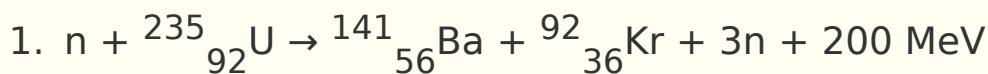
Phương trình của phản ứng phân hạch có dạng:



- **X**: Hạt nhân nặng ban đầu (vật liệu phân hạch).
- **Y, Z**: Các mảnh vỡ sau phân hạch (hạt nhân trung bình).
- **n**: Neutron.
- **k**: Số neutron được giải phóng (thường từ 2 đến 3).
- **ΔE** : Năng lượng tỏa ra từ phản ứng (khoảng 200 MeV).

c. Ví dụ minh họa

Phản ứng phân hạch của hạt nhân Urani-235 (^{235}U) là ví dụ điển hình:



Lưu ý: Các sản phẩm Y và Z có thể là nhiều cặp hạt nhân khác nhau, không cố định.

2. Năng lượng phân hạch

a. Nguồn gốc và công thức tính

Năng lượng tỏa ra trong phản ứng phân hạch (ΔE) xuất phát từ sự hụt khối. Tổng khối lượng của các hạt trước phản ứng lớn hơn tổng khối lượng của các hạt sau phản ứng. Năng lượng này được tính bằng hai cách:

- Dựa vào độ hụt khối:

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

Trong đó: $m_{\text{trước}} = m_n + m_X$ và $m_{\text{sau}} = m_Y + m_Z + k.m_n$.

- Dựa vào năng lượng liên kết:

$$\Delta E = W_{\text{lk, sau}} - W_{\text{lk, trước}} = W_{\text{lk}(Y)} + W_{\text{lk}(Z)} - W_{\text{lk}(X)}$$

Vì các hạt nhân sản phẩm bền vững hơn hạt nhân ban đầu, nên tổng năng lượng liên kết sau lớn hơn tổng năng lượng liên kết trước.

b. Đặc điểm

- Năng lượng tỏa ra trong một phân hạch là rất lớn, khoảng 200 MeV.

- Năng lượng này chủ yếu tồn tại dưới dạng động năng của các mảnh vỡ, phần còn lại là động năng của các neutron và năng lượng của các tia gamma.

c. Ví dụ tính toán

Xét phản ứng: $n + {}^{235}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{95}_{38}\text{Sr} + {}^{139}_{54}\text{Xe} + 2n$. Cho khối lượng các hạt: $m_{\text{U}} = 234,9933 \text{ u}$; $m_{\text{Sr}} = 94,89 \text{ u}$; $m_{\text{Xe}} = 138,89 \text{ u}$; $m_n = 1,0087 \text{ u}$. Biết $1\text{u} = 931,5 \text{ MeV}/c^2$. Tính năng lượng tỏa ra.

Giải:

- Tổng khối lượng trước phản ứng: $m_{\text{trước}} = m_n + m_{\text{U}} = 1,0087 + 234,9933 = 236,002 \text{ u}$.
- Tổng khối lượng sau phản ứng: $m_{\text{sau}} = m_{\text{Sr}} + m_{\text{Xe}} + 2.m_n = 94,89 + 138,89 + 2 * 1,0087 = 235,7974 \text{ u}$.
- Độ hụt khối: $\Delta m = m_{\text{trước}} - m_{\text{sau}} = 236,002 - 235,7974 = 0,2046 \text{ u}$.
- Năng lượng tỏa ra: $\Delta E = \Delta m \cdot c^2 = 0,2046 * 931,5 \approx 190,57 \text{ MeV}$.

3. Phản ứng phân hạch dây chuyền

a. Khái niệm

Các neutron sinh ra từ một phản ứng phân hạch có thể tiếp tục kích thích các hạt nhân nặng khác phân hạch, tạo ra một chuỗi các phản ứng liên tiếp. Quá trình này được gọi là phản ứng phân hạch dây chuyền.

b. Hệ số nhân neutron (k)

Hệ số nhân neutron (k) là tỉ số giữa số neutron gây ra phân hạch ở thế hệ sau và số neutron gây ra phân hạch ở thế hệ trước.

$k = (\text{Số neutron gây phân hạch thế hệ } n+1) / (\text{Số neutron gây phân hạch thế hệ } n)$

Dựa vào giá trị của k, ta có các trường hợp sau:

Giá trị của k	Trạng thái phản ứng	Mô tả và Ứng dụng
$k < 1$	Phản ứng tắt dần	Số phân hạch giảm dần và phản ứng nhanh chóng dừng lại. Đây là trạng thái an toàn khi muốn dừng lò phản ứng.
$k = 1$	Phản ứng dây chuyền có điều khiển	Số phân hạch không đổi theo thời gian, công suất phát ra ổn định. Đây là trạng thái hoạt động của các lò phản ứng hạt nhân để sản xuất điện.
$k > 1$	Phản ứng dây chuyền không điều khiển	Số phân hạch tăng theo cấp số nhân, năng lượng giải phóng cực nhanh và lớn, gây ra vụ nổ. Đây là cơ chế của bom nguyên tử.

c. Điều kiện xảy ra phản ứng dây chuyền

- Hệ số nhân neutron $k \geq 1$:** Lượng neutron sinh ra phải đủ để duy trì phản ứng.
- Khối lượng tới hạn (m_{th}):** Khối lượng của chất phân hạch phải đạt một giá trị tối thiểu, gọi là khối lượng tới hạn. Nếu khối lượng nhỏ hơn giá trị này, số neutron thoát ra ngoài bề mặt sẽ lớn, khiến $k < 1$ và phản ứng không thể duy trì.

4. Lò phản ứng hạt nhân

a. Định nghĩa và công dụng

Lò phản ứng hạt nhân là thiết bị dùng để tạo ra và duy trì phản ứng phân hạch dây chuyền có điều khiển ($k=1$). Công dụng chính là sản xuất năng lượng điện, tạo ra các đồng vị phóng xạ và phục vụ nghiên cứu khoa học.

b. Cấu tạo cơ bản

Một lò phản ứng hạt nhân gồm các bộ phận chính sau:

- **Lõi phản ứng (Vùng hoạt):**

- **Thanh nhiên liệu:** Chứa chất phân hạch, thường là Urani-235 (được làm giàu) hoặc Plutoni-239. Đây là nơi diễn ra phản ứng phân hạch và sinh nhiệt.
- **Chất làm chậm neutron (Moderator):** Dùng để giảm tốc độ của các neutron nhanh sinh ra từ phân hạch thành neutron chậm (neutron nhiệt). Neutron chậm có khả năng gây phân hạch U-235 hiệu quả hơn. Các chất thường dùng là nước nặng (D_2O), than chì (graphite).

- **Hệ thống điều khiển:**

- **Thanh điều khiển:** Chứa các vật liệu hấp thụ neutron mạnh (như Bo, Cadmi). Các thanh này có thể được đẩy sâu vào hoặc rút ra khỏi lõi phản ứng để điều chỉnh số lượng neutron, qua đó kiểm soát hệ số k và duy trì công suất của lò ổn định.

- **Hệ thống làm mát (Chất tải nhiệt):**

- Chất lỏng hoặc khí (nước, kim loại lỏng) chảy qua lõi phản ứng để hấp thụ nhiệt lượng tỏa ra và truyền nó đến bộ phận sinh hơi nước.

- **Vỏ lò và lớp bảo vệ sinh học:**

- Một lớp vỏ bằng thép dày chịu được nhiệt độ và áp suất cao, bao bọc lõi phản ứng. Bên ngoài là một lớp bê tông rất dày để ngăn chặn sự rò rỉ của các bức xạ gamma và neutron ra môi trường.

c. Nguyên tắc hoạt động của nhà máy điện hạt nhân

1. Trong lõi lò phản ứng, các thanh nhiên liệu U-235 thực hiện phản ứng phân hạch, tỏa ra nhiệt lượng khổng lồ.
2. Chất tải nhiệt (ví dụ: nước) được bơm qua lõi, bị đun nóng lên đến nhiệt độ rất cao.
3. Nước nóng này được dẫn đến một thiết bị trao đổi nhiệt, nơi nó đun sôi một lượng nước khác trong một vòng tuần hoàn thứ cấp để tạo ra hơi nước.
4. Hơi nước dưới áp suất cao làm quay tuabin của máy phát điện, tạo ra điện năng.
5. Hơi nước sau khi qua tuabin được làm nguội để ngưng tụ thành nước và quay trở lại chu trình.