

CHƯƠNG 8

VẬT LÝ HẠT NHÂN

- 1. HẠT NHÂN NGUYÊN TỬ**
 - 1.1. Cấu trúc hạt nhân.**
 - 1.2. Lực hạt nhân. Năng lượng liên kết.**
- 2. HIỆN TƯỢNG PHÓNG XẠ**
 - 2.1. Cơ chế phóng xạ.**
 - 2.2. Định luật phóng xạ.**
- 3. PHẢN ỨNG HẠT NHÂN**
 - 3.1. Phản ứng hạt nhân.**
 - 3.2. Năng lượng hạt nhân.**
 - 3.2.1. Phản ứng phân hạch.**
 - 3.2.2. Phản ứng nhiệt hạch.**
- 4. HẠT CƠ BẢN**
 - 4.1. Tính chất hạt cơ bản.**
 - 4.2. Phân loại hạt cơ bản.**

1. HẠT NHÂN NGUYÊN TỬ

1.1. CẤU TRÚC HẠT NHÂN

- Hạt nhân nguyên tử được cấu tạo bởi hai loại hạt proton (p) và neutron (n), có tên gọi chung là nucleon.

- Ký hiệu: ${}_Z^A X$

X - kí hiệu nguyên tử

A - số khối lượng, $A = Z + N$

Z - số thứ tự, số electron, số proton

N - số neutron

- Đồng vị: là các hạt nhân có cùng số proton Z (${}_1^1H$, ${}_1^2D$, ${}_1^3T$).
- Đồng khối: là các hạt nhân có cùng số khối lượng A (${}_6^{14}C$, ${}_7^{14}N$).
- Đồng neutron: là các hạt nhân có cùng số neutron N (${}_{15}^{31}P$, ${}_{16}^{32}S$).
- Hạt nhân gương: số proton của hạt này bằng số neutron của hạt kia (${}_1^3H$, ${}_2^3He$).

- Kích thước (bán kính) hạt nhân: $R \approx R_o A^{1/3}$

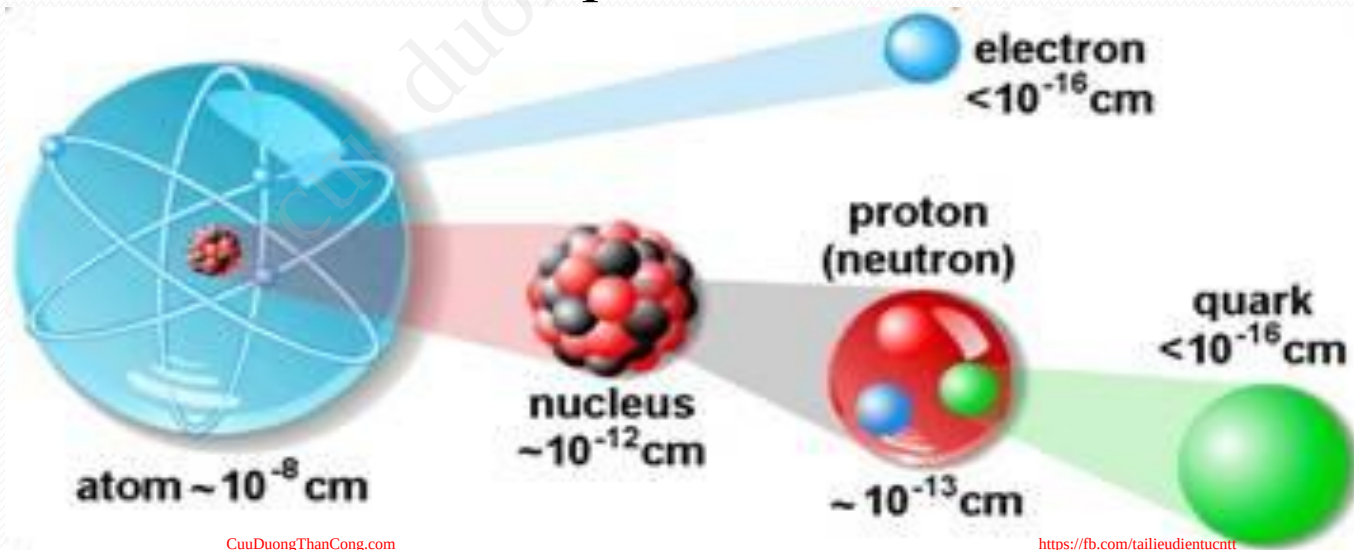
Với: $R_o = 1,2 \cdot 10^{-15} \text{ m}$

- Thể tích hạt nhân tỉ lệ với số khối A: $V = \frac{4}{3} \pi R^3 \approx \frac{4}{3} \pi (R_o A^{1/3})^3 = \left(\frac{4}{3} \pi R_o^3 \right) A$

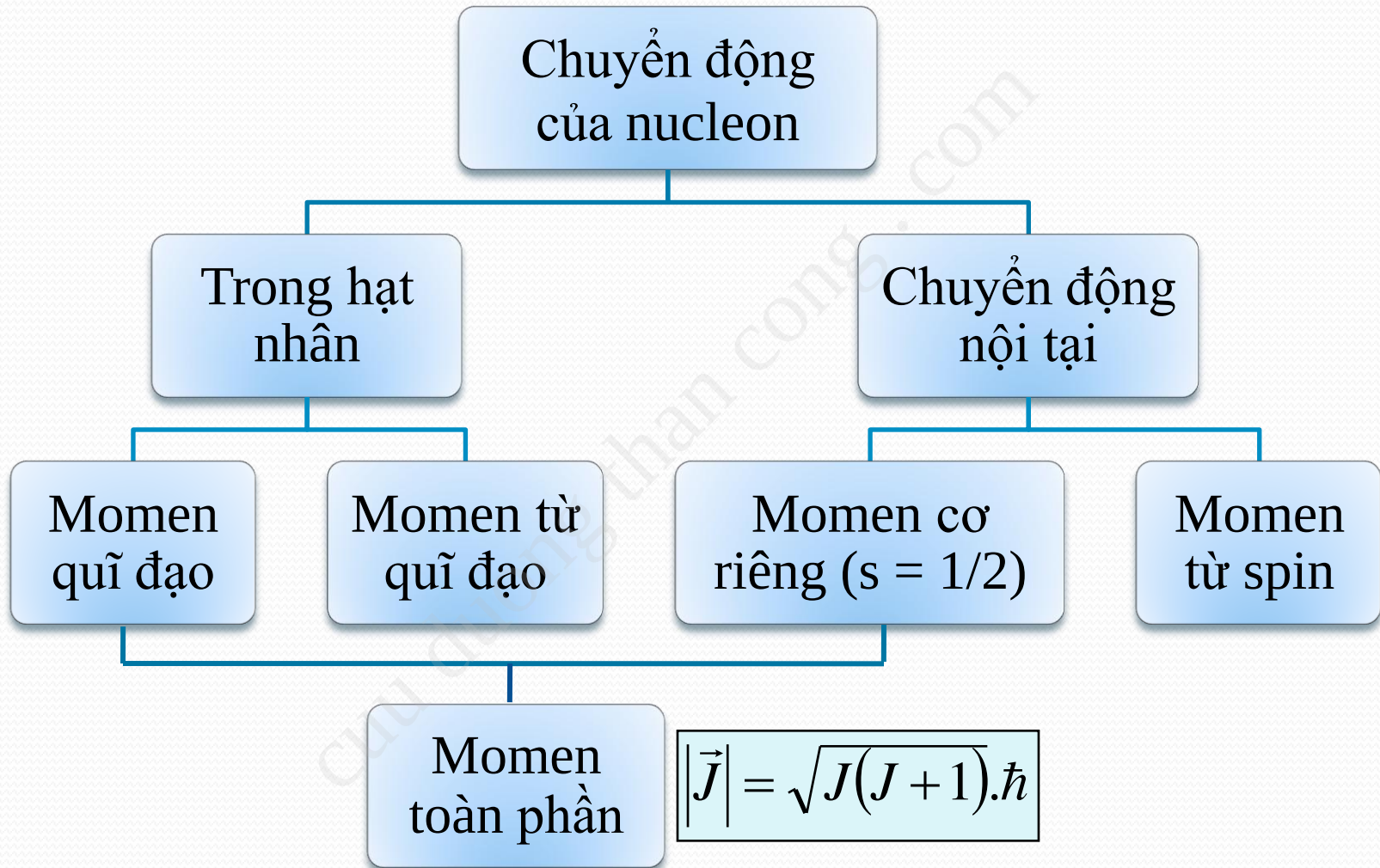
- Khối lượng riêng của tất cả các hạt nhân bằng nhau:

$$\rho = \frac{M}{\frac{4}{3} \pi R^3} \approx \frac{m_p A}{\frac{4}{3} \pi (1,1)^3 \cdot A \cdot 10^{-45}} \approx 2,3 \cdot 10^{17} \text{ kg/m}^3$$

→ ρ rất lớn → các nucleon xếp rất chặt.



CHUYỂN ĐỘNG CỦA CÁC NUCLEON



J – số lượng tử mômen toàn phần.

$J = 1, 2, 3, \dots$ nếu A chẵn; $J = 1/2, 3/2, 5/2, \dots$ nếu A lẻ.

1.2. LỰC HẠT NHÂN

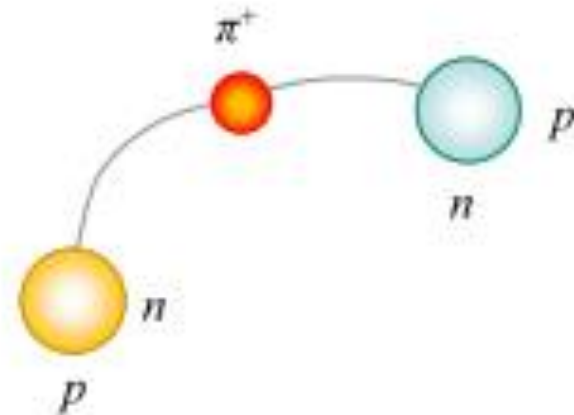
Lực hạt nhân là lực hút giữa các nucleon để giữ cho hạt nhân bền vững.

Tính chất của lực hạt nhân:

- Không phải là lực điện.
- Có tác dụng tầm ngắn: trong phạm vi $10^{-15} - 10^{-14}$ m.
- Có tính chất bão hòa: mỗi nucleon chỉ tương tác với một số nucleon lân cận nó.
- Phụ thuộc spin của các nucleon.
- Không phải là lực xuyên tâm.
- Là lực trao đổi: tương tác giữa hai nucleon được thực hiện bằng cách trao đổi với nhau các hạt mezon π^+, π^-, π^0 :

$$n + \pi^+ \leftrightarrow p, \quad p + \pi^- \leftrightarrow n, \quad n \leftrightarrow n + \pi^0, \quad p \leftrightarrow p + \pi^0$$

→ luôn có sự chuyển hóa lẫn nhau giữa các nucleon.



Các loại tương tác

Thế giới vĩ mô

Hấp dẫn: lực hấp dẫn

Điện từ: ma sát, đàn hồi

Thế giới vi mô

Tương tác mạnh giữa các nucleon trong hạt nhân

Tương tác yếu: giữa các hạt cơ bản

KHỐI LƯỢNG HẠT NHÂN VÀ NĂNG LƯỢNG LIÊN KẾT

Hạt	Kg	u
Proton p	$1,6726.10^{-27}$	1,007825
Neutron n	$1,6750.10^{-27}$	1,008665

Với: $1u = 1,6605402.10^{-27} \text{ kg} = 931,5 \text{ (MeV/c}^2\text{)}$

- Khối lượng hạt nhân **M** luôn nhỏ hơn tổng khối lượng của các nucleon tạo thành hạt nhân đó một lượng ΔM gọi là độ hụt khối hạt nhân:

$$\Delta M = Z m_p + (A - Z) m_n - M$$

- Năng lượng liên kết **W_{lk}** là năng lượng cần thiết để tách hạt nhân thành các nucleon riêng lẻ ở xa nhau.

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

- Năng lượng liên kết riêng tính cho một nucleon: đặc trưng cho độ bền vững của hạt nhân.

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

$$(7 \text{ MeV} < \varepsilon < 8,6 \text{ MeV})$$

BÀI TẬP VÍ DỤ 1

Hạt nhân Bery ${}^8_4\text{Be}$ có khối lượng 8,0053u. Tìm năng lượng liên kết riêng của hạt nhân.

Hướng dẫn giải

- Năng lượng liên kết của hạt nhân Be:

$$\begin{aligned}W_{lk} &= \Delta M . c^2 = \left[Z m_p + (A - Z) m_n - M \right] . c^2 \\&= (4.1,007825 + (8 - 4).1,008665 - 8,0053)u \\&\approx 0,061.931,5 \approx 56\text{MeV}\end{aligned}$$

- Năng lượng liên kết riêng của hạt nhân Be:

$$\varepsilon = \frac{W_{lk}}{A} = \frac{56}{8} = 7\text{MeV}$$

2. HIỆN TƯỢNG PHÓNG XẠ

2.1. CƠ CHẾ PHÓNG XẠ

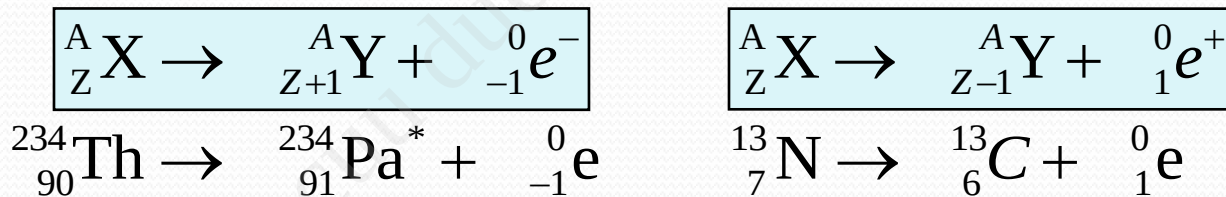
Hiện tượng phóng xạ là sự phân rã các hạt nhân không bền và phát ra tia phóng xạ (là phản ứng hạt nhân tỏa năng lượng).

a. Tia α : là hạt nhân ${}^4_2\text{He}$. Là sự phân rã của các hạt nhân nặng có $A > 200$, $Z > 82$.



- Cơ chế: các hạt α chui ngầm ra khỏi hàng rào thế năng của hạt nhân.
- Tia α có thể xuyên qua một tờ giấy.

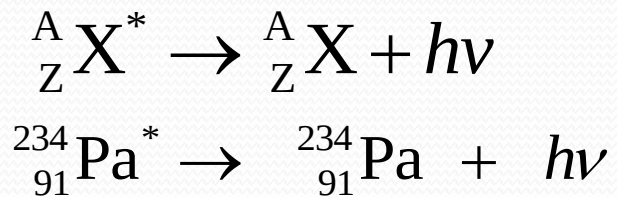
b. Tia β : là chùm electron (β^-) hay positron (β^+).



- Cơ chế: do sự biến đổi qua lại giữa proton và neutron $\begin{cases} n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e \\ p \rightarrow n + e^+ + \nu_e \end{cases}$
 Với ν_e và $\bar{\nu}_e$ là hạt neutrino và phản hạt neutrino
- Tia β có thể xuyên qua một lá nhôm dày vài mm.

c. Tia γ : là bức xạ điện từ có năng lượng cao. Phóng xạ γ luôn đi kèm theo phóng xạ α và β .

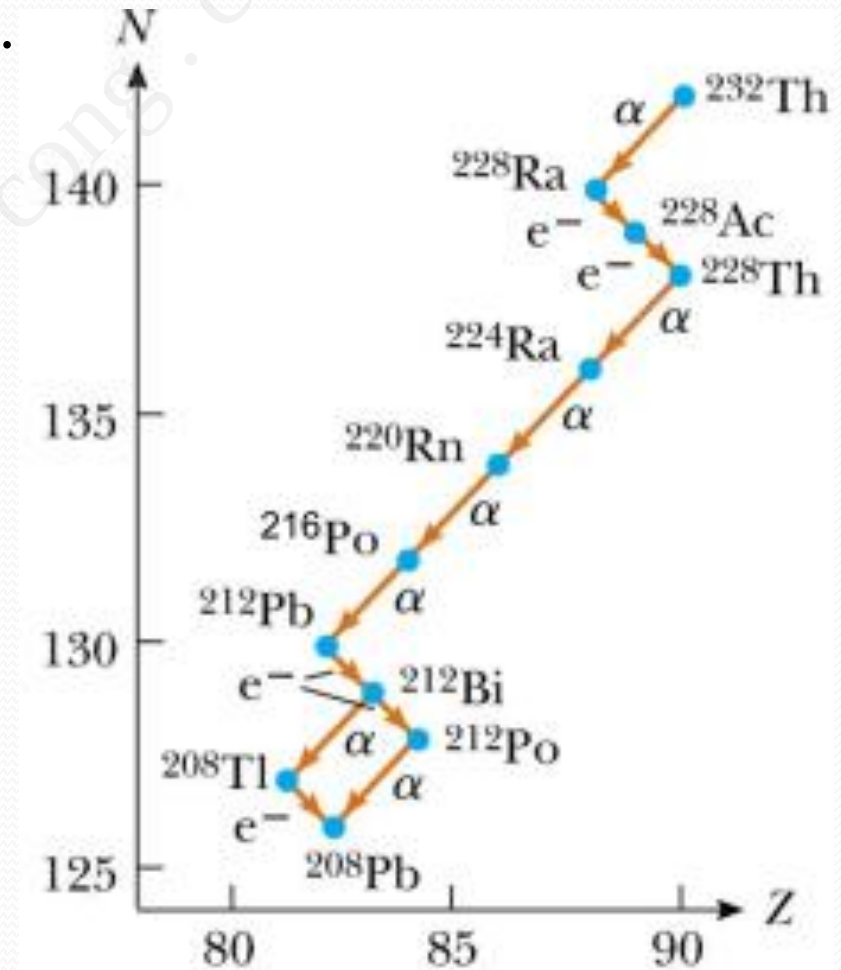
- Cơ chế: sau phân rã α hoặc β hạt nhân ở trạng thái kích thích, sau đó chuyển về trạng thái có năng lượng thấp hơn đồng thời phát ra photon năng lượng cao ($\lambda < 0,1 \text{ A}^0$).



- Tia γ có thể xuyên qua một bản chì dày vài cm.

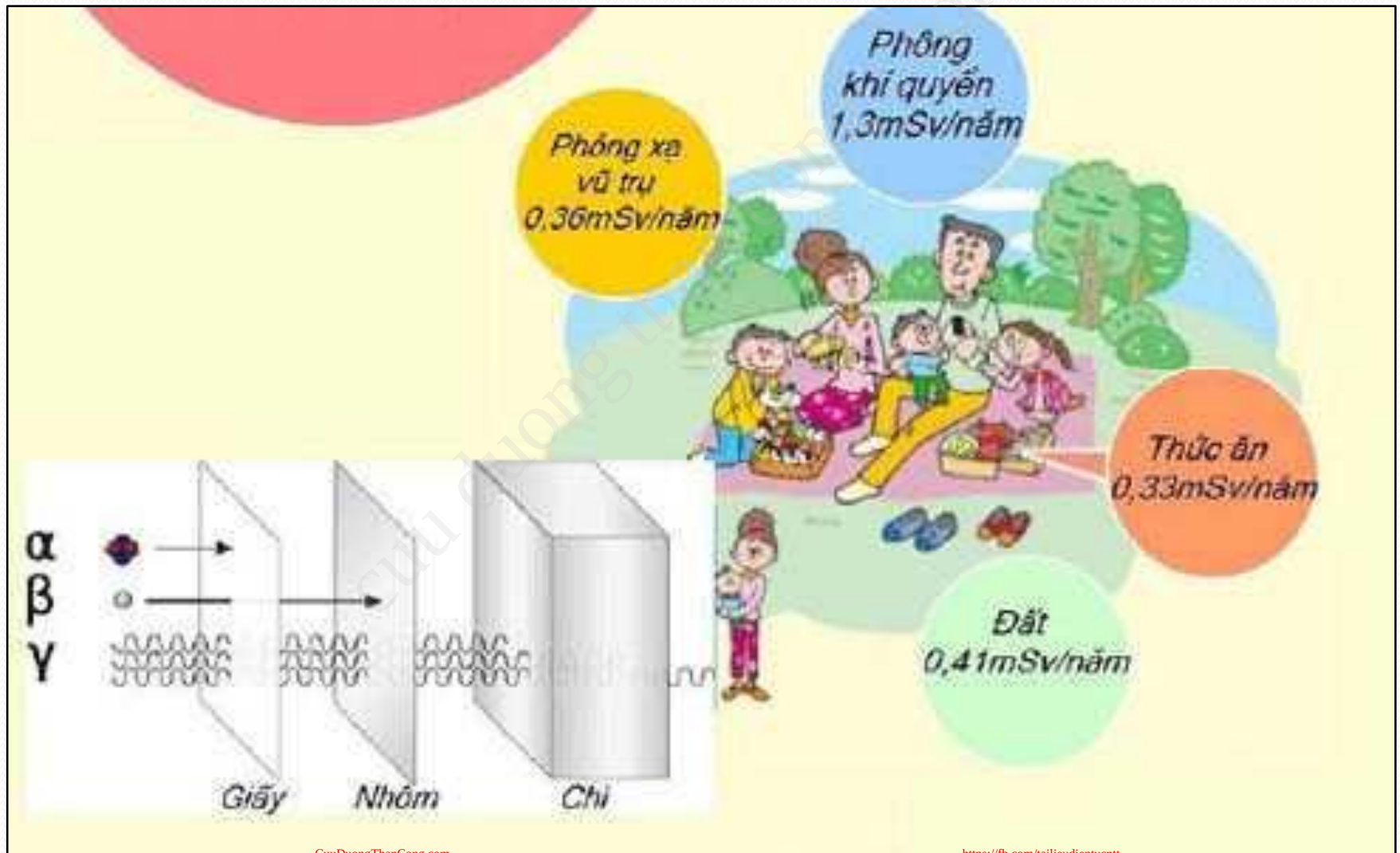
Sự phóng xạ tuân theo các định luật bảo toàn:

- Momen động lượng.
- Động lượng.
- Năng lượng.
- Điện tích
- Số khối.



- Thực nghiệm chứng tỏ rằng có thể tạo nên những chất phóng xạ không có trong tự nhiên, đó là những chất phóng xạ nhân tạo.

- Ví dụ: ${}_{11}^{23}\text{Na} + {}_0^1n \rightarrow {}_{11}^{24}\text{Na} + \gamma$

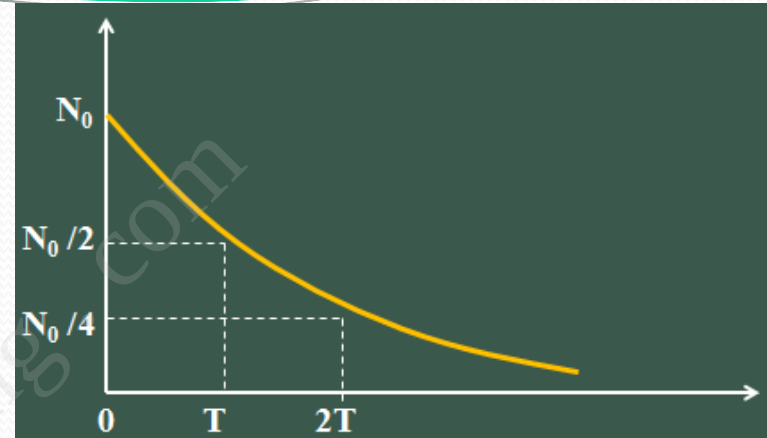


2.2. ĐỊNH LUẬT PHÓNG XẠ

- Trong quá trình phóng xạ, số hạt nhân của chất phóng xạ sẽ giảm theo thời gian theo qui luật:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

Với: N_0 - số hạt nhân ở thời điểm $t = 0$.
 λ - hằng số phân rã.



- Chu kỳ bán rã T là khoảng thời gian để số hạt nhân phóng xạ giảm đi một nửa:

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}$$

- Độ phóng xạ H xác định số phân rã trong một giây:

$$H = -\frac{dN}{dt} = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = H_0 e^{-\lambda t} = \lambda N$$

H_0 - độ phóng xạ ban đầu.

Đơn vị của H là Becquerel ($1Bq=1 \text{ pr/s}$) hoặc Curi ($1Ci= 3,7.10^{10}Bq$)

- Thời gian sống trung bình của hạt nhân phóng xạ: $\tau = 1/\lambda$

BÀI TẬP VÍ DỤ 2

Cho chu kỳ bán rã của $^{14}_6\text{C}$ là 5600 năm. Xét một tượng cổ bằng gỗ, người ta thấy độ phóng xạ β^- của nó chỉ bằng 0,77 lần độ phóng xạ của một khúc gỗ có cùng khối lượng vừa mới chặt. Xác định tuổi của tượng gỗ.

Hướng dẫn giải

- Độ phóng xạ của khúc gỗ mới chặt: $H_1 = H_0 e^{-\lambda t}$
- Độ phóng xạ của tượng gỗ: $H_2 = H_0 e^{-\lambda(t+\Delta t)}$

$$\rightarrow \frac{H_2}{H_1} = \frac{H_0 e^{-\lambda(t+\Delta t)}}{H_0 e^{-\lambda t}} = e^{-\lambda \Delta t} = 0,77$$

$$\rightarrow \Delta t = -\frac{\ln 0,77}{\lambda} = -\frac{\ln 0,77}{0,693/T} \approx 2112 \text{ năm}$$

3. 1. PHẢN ỨNG HẠT NHÂN

- Các quá trình biến đổi của hạt nhân được gọi là **phản ứng hạt nhân**.
- Trong một phản ứng hạt nhân các đại lượng sau đây phải bảo toàn: Số khối, Điện tích, Năng lượng, Động lượng, Momen động lượng.
- Xét phản ứng hạt nhân: ${}_{Z_1}^{A_1}X_1 + {}_{Z_2}^{A_2}X_2 \rightarrow {}_{Z_3}^{A_3}X_3 + {}_{Z_4}^{A_4}X_4$
có tổng khối lượng hạt nhân trước và sau phản ứng là M_1 và M_2 .

➤ Nếu $M_1 > M_2$: phản ứng tỏa năng lượng: $Q = (M_1 - M_2)c^2 > 0$
Năng lượng tỏa ra dưới dạng động năng các hạt sinh ra sau phản ứng, hoặc năng lượng photon tia γ

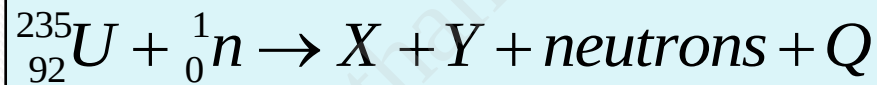
➤ Nếu $M_1 < M_2$: phản ứng thu năng lượng: $Q = (M_1 - M_2)c^2 < 0$
Năng lượng được cung cấp cho phản ứng dưới dạng động năng K của hạt (khối lượng m) đến bắn phá hạt nhân (khối lượng M):

$$K_{\min} = |Q| \left(1 + \frac{m}{M}\right)$$

3.2. NĂNG LƯỢNG HẠT NHÂN

- Năng lượng hạt nhân là năng lượng thu được trong phản ứng hạt nhân tỏa năng lượng.
- Để phản ứng tỏa năng lượng: phân chia hạt nhân lớn (phản ứng phân hạch) hoặc kết hợp các hạt nhân nhỏ (phản ứng nhiệt hạch).

3.2.1. Phản ứng phân hạch: là phản ứng tách hạt nhân nặng thành các hạt nhân nhẹ hơn. Độ hụt khối chuyển thành năng lượng tỏa ra.



Với: ${}_0^1\text{n}$ – neutron chậm (năng lượng < 1MeV).

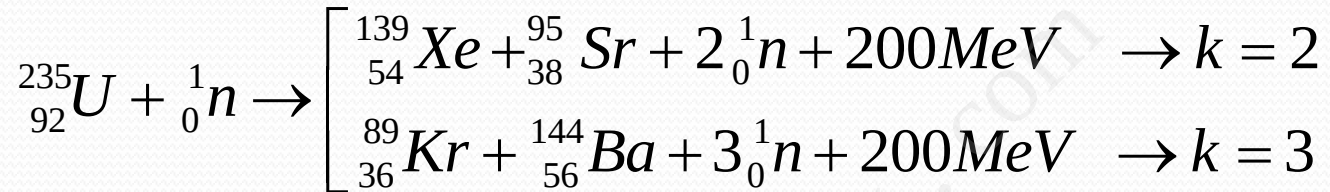
X, Y – hạt nhân kết quả. Có nhiều tổ hợp (X,Y) thỏa mãn định luật bảo toàn năng lượng, số khối và điện tích.

- Điều kiện phân hạch: $\frac{Z^2}{A} \geq 117$
- Sự phân hạch có thể xảy ra tự phát (không cần bắn phá hạt nhân bằng neutron) nhưng xác suất thấp.
- Nhiên liệu chủ yếu thực hiện phản ứng phân hạch: ${}_{92}^{235}\text{U}$, ${}_{92}^{239}\text{Pu}$.

Các loại phản ứng phân hạch

- Gọi k là tỷ số giữa số neutron tạo ra và số neutron hấp thụ.

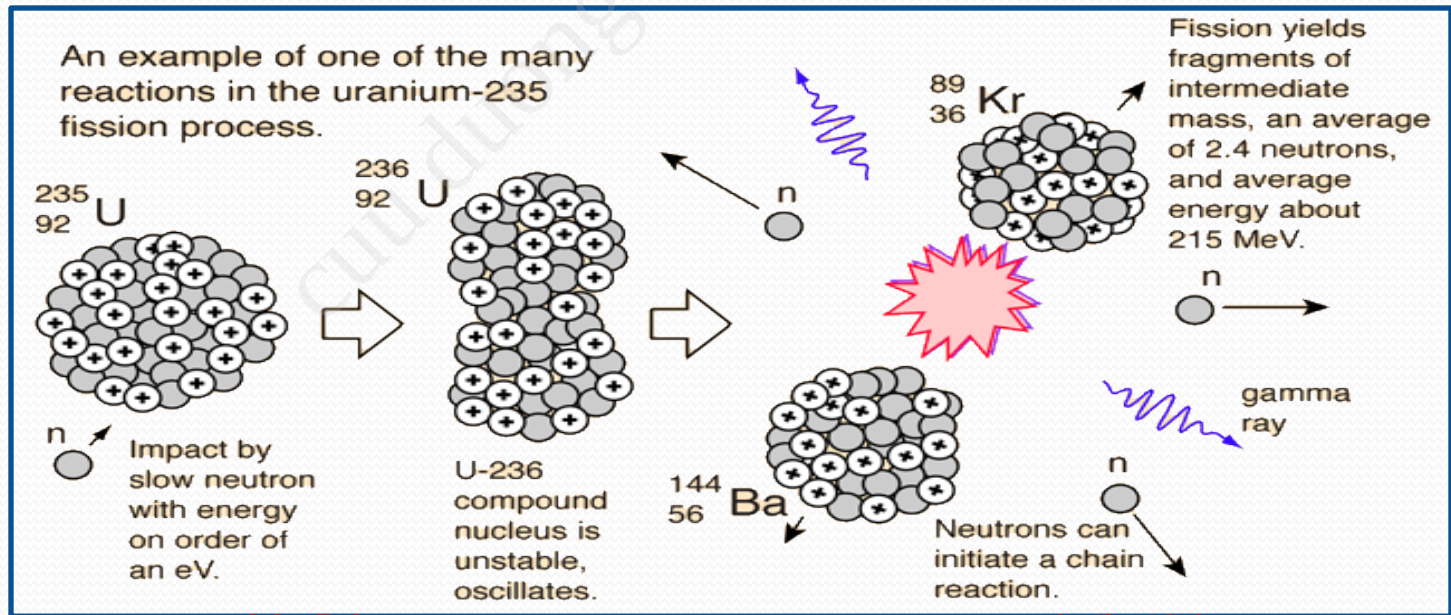
a. Phản ứng dây chuyền: $k > 1$ (bom nguyên tử).



b. Phản ứng điều khiển được: $k = 1$ (lò phản ứng hạt nhân).

c. Phản ứng tắt: $k < 1$.

- Khối lượng tối thiểu của ${}_{92}^{235}\text{U}$ nguyên chất để phản ứng dây chuyền tự phát xảy ra được gọi là khối lượng tới hạn $= 1 \text{ kg}$.



3.2.2. Phản ứng nhiệt hạch: là phản ứng tổng hợp các hạt nhân nhẹ thành hạt nhân nặng hơn.

- Để cho phản ứng tổng hợp xảy ra, cần phải truyền cho chúng năng lượng đủ để thắng hàng rào thế $\rightarrow$ các hạt nhân có thể tiến lại gần nhau tới các khoảng cách tại đó các lực hạt nhân bắt đầu tác dụng thắng lực đẩy Coulomb $\rightarrow$ phản ứng bắt đầu. Sau khi phản ứng phát triển, nó có thể tự duy trì do có sự tỏa năng lượng trong các phản ứng tổng hợp.

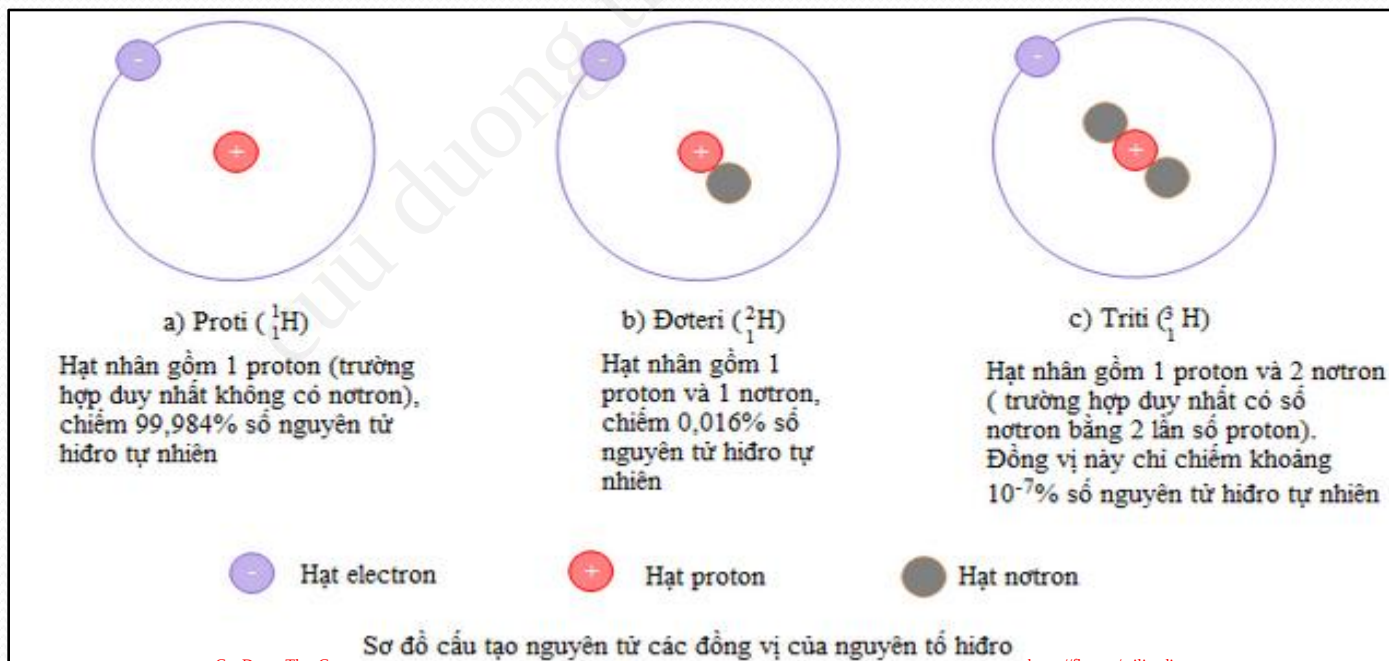
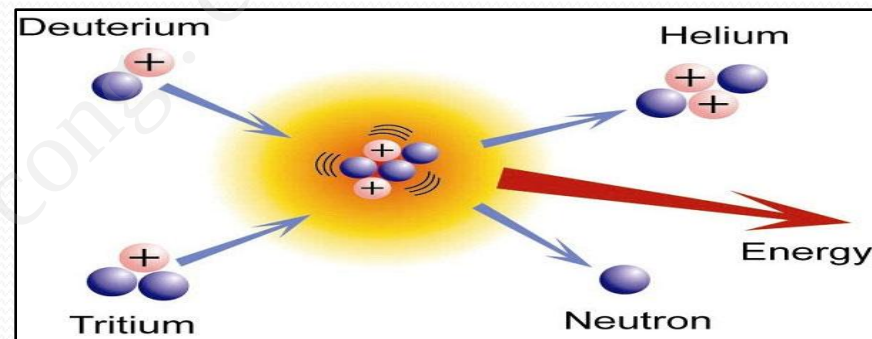
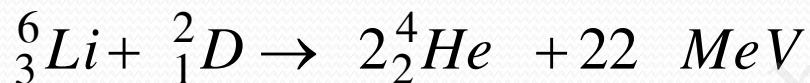
- Năng lượng truyền cho các hạt nhân nhẹ dưới dạng nhiệt khoảng 10^8 K nên gọi là phản ứng nhiệt hạch.

- Phản ứng nhiệt hạch không điều khiển được $\rightarrow$ dùng làm vũ khí nhiệt hạch.

- Trong tự nhiên, phản ứng tổng hợp hạt nhân nhẹ xảy ra trong các ngôi sao làm chúng phát sáng (ví dụ mặt trời), còn tổng hợp hạt nhân nặng xảy ra trong các vụ nổ siêu sao.

Nhiên liệu nhiệt hạch

Nhiên liệu thường dùng trong phản ứng tổng hợp hạt nhân heli là từ các đồng vị của Hydro: 1_1H , 2_1D , 3_1T . Các đồng vị này có thể trích lấy từ nước biển hoặc tổng hợp từ nguyên tử Hydrogen.



4. HẠT CƠ BẢN

4.1. CÁC TÍNH CHẤT CƠ BẢN CỦA HẠT CƠ BẢN

a. Khối lượng nghỉ.

- Photon: $m_\gamma = 0$
- Các hạt khác: $m \neq 0$
- Hạt nặng nhất: hạt bodon trung gian $m \approx 100m_p$

b. Thời gian sống trung bình τ .

- Hạt e, p, ν_e , γ : $\tau = \infty$
- Hạt n: $\tau \sim 900s$ ($n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$)
- Một số hạt cộng hưởng: $\tau \sim 10^{-24}s$

c. Spin.

- hạt bodon: s là số nguyên.
- hạt fermion: s là số bán nguyên.

Hạt	e, p, n...	γ	π
s	1/2	1	0

d. Điện tích: điện tích các hạt phân bố không đều trong không gian.

Hạt	n, γ, π^0	e	p	Quarks
Điện tích	0	$-e$	$+e$	$\pm e/3, \pm 2e/3$

e. Phản hạt.

- Hầu như mỗi hạt đều có phản hạt của nó.
- Hạt và phản hạt có khối lượng, thời gian sống và spin giống nhau. Các đặc trưng còn lại như điện tích, mômen từ của hạt và phản hạt có độ lớn bằng nhau nhưng ngược dấu: (e^-, e^+) , $(p, \bar{p})$, $(n, \bar{n})$, $(\nu_e, \bar{\nu}_e)$.
- Có một số hạt trùng với phản hạt của nó: $\gamma \equiv \bar{\gamma}$, $\pi^0 = \bar{\pi}^0$
- Hạt và phản hạt gặp nhau sẽ bị hủy diệt và sinh ra photon.

$$e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma$$

- Hạt π^0 là hạt trung hòa, nó rất kém bền nên phân rã thành hai photon sau thời gian $\tau = 10^{-16}$ s:

$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma$$

4.2. PHÂN LOẠI CÁC HẠT CƠ BẢN

- **Boson:** có spin nguyên, là những hạt truyền tương tác. Có 4 loại:
 1. Photon: truyền tương tác điện từ.
 2. Gluon: truyền tương tác mạnh.
 3. W boson và Z boson: truyền tương tác yếu.
 4. Graviton: tương tác hấp dẫn?
- **Fermion:** có spin bán nguyên, là những hạt cấu tạo nên vật chất. Chia làm 2 nhóm:
 1. Hạt nhẹ lepton: 6 hạt lepton.
 2. Hạt nặng quark: 6 hạt quark.
 Những hạt cấu tạo nên vật chất đều có phản hạt (phản vật chất).

Ba thể hệ của vật chất (Fermion)

	I	II	III	
khối lượng	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV	0
điện tích	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
tên	u up	c charm	t top	γ photon
Quark	4,8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	104 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	4,2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom	0 0 1 g gluon
	<2,2 eV 0 $\frac{1}{2}$ ν_e electron neutrino	<0,17 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ muon neutrino	<15,5 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ tau neutrino	91,2 GeV 0 1 Z^0 weak force
	0,511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e electron	105,7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ muon	1,777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ τ tau	80,4 GeV ± 1 1 $W^\pm$ weak force
	Lepton			Boson (Force)

HẠT LEPTON

- Lepton là các hạt nhẹ gồm 6 hạt tồn tại theo cặp (e^- , ν_e), (μ^- , ν_μ), (τ^- , ν_τ).
- Tương ứng với 6 lepton có 6 phản lepton.

Hạt	Spin	Điện tích (e)	Khối lượng (MeV/c ²)	Tương tác điện từ	Tương tác yếu
Electron e^-	1/2	-1	0,511	Có	Có
Electron neutrino ν_e	1/2	0	10^{-6}	Không	Có
Muon μ^-	1/2	-1	105,7	Có	Có
Muon neutrino ν_μ	1/2	0	<0,19	Không	Có
Tau τ^-	1/2	-1	1777	Có	Có
Tau neutrino ν_τ	1/2	0	<18	Không	Có

HẠT QUARK

- Hạt quark là những hạt nặng bao gồm 6 loại: u (up), d (down), s (strange), c (charm), b (bottom), t (top).

Quark	Spin	Điện tích (e)	Khối lượng (MeV/c ²)
u	1/2	2/3	2,4
d	1/2	-1/3	4,8
s	1/2	-1/3	104
c	1/2	2/3	1270
b	1/2	-1/3	4200
t	1/2	2/3	171000

- Mỗi quark có phản quark tương ứng.
- Các hạt quark kết hợp với nhau tạo thành các hạt nặng **Hadron** là hạt tham gia tương tác mạnh và các loại tương tác khác.

Có 2 nhóm hadron:

a. Meson: Là các hạt có khối lượng trung bình khoảng $(200 \div 900 m_e)$ có spin nguyên.

- Các nhóm meson: K, π , D, B, ...
- Meson được tạo thành từ cặp quark – phản quark

Hạt	Thành phần	Điện tích	Spin	Khối lượng (MeV/c ²)
π^+	$u \bar{d}$	+1	0	140
π^-	$d \bar{u}$	-1	0	140
K^+	$u \bar{s}$	+1	0	493,7
K^-	$s \bar{u}$	-1	0	493,7
K^0	$d \bar{s}$	0	0	497,7
η_c	$c \bar{c}$	0	0	2980

b. Baryon: là hạt nặng ($m > m_p$) có spin bán nguyên.

- Gồm các nhóm: nucleon (p, n), hyperon (Λ , Σ , Ξ , Ω), barion duyên và barion đẹp.
- Barion được tạo thành từ ba quark.

Hạt	Thành phần	Điện tích	Spin	Khối lượng (MeV/c ²)
p	uud	+1	1/2	938
n	udd	0	1/2	939
Σ^+	uus	+1	1/2	1189.4
Λ^0	uds	0	1/2	1115.7
Δ^-	ddd	-1	3/2	1232