

关于原子核与粒子 物理

§7.1 原子核的基本性质

1. 核质量

原子核的质量 m_A = 原子的质量 M_A - 核外电子的质量 Zm_e

$$m_A \approx M_A - Zm_e \quad \text{忽略电子的结合能}$$

通常采用质量单位 u

$$1u = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg} \quad 1u = 931.5016 \text{ MeV} / c^2$$

2. 核电荷

$$q = +Ze \quad \text{Z称核电荷数。}$$

3. 核的大小

实验表明核体积与核子数成正比

$$V \propto A \Rightarrow R = r_0 A^{1/3}$$

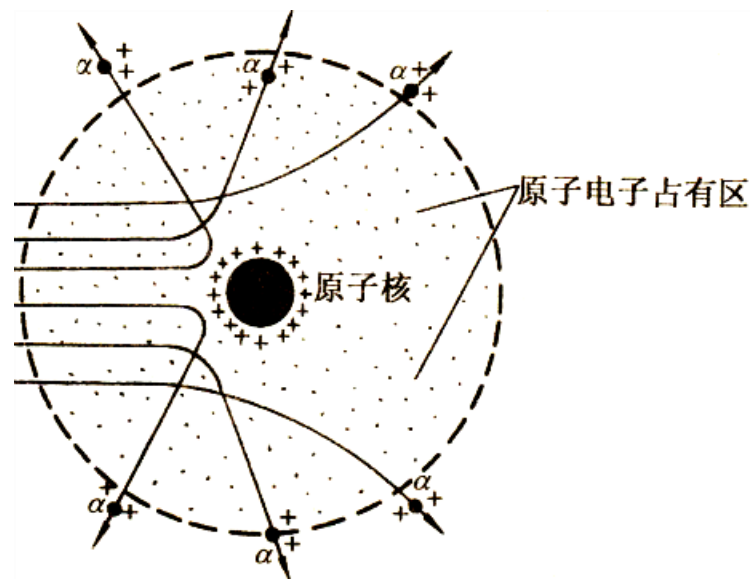
$$r_0 = 1.2 \times 10^{-15} \text{ m} = 1.2 \text{ fm}$$

核的密度

$$\rho = \frac{m_A}{V} = \frac{m_A}{\frac{4}{3}\pi R^3} = \frac{m_A}{\frac{4}{3}\pi r_0^3 A}$$

$$: \frac{1}{\frac{4}{3}\pi r_0^3 N} : 10^{14} \text{ g/cm}^3$$

$\rho : 10^4$ 万吨/厘米³ (某些星体物质如中子星等)。



一个^AX原子质量 $M_A = \frac{A}{N}$ (克)

N 为阿伏伽德罗常数

4. 核的组成—质子和中子

1919年, Rutherford用 α 粒子轰击 ^{14}N , 发现了质子。

人类首次实现原子核的人工转变（点金术）。



1932年, 查德威克发现了中子



原子核的符号表示: ${}^A_Z\text{X}_N$, $A=N+Z$ 为核子数

(i) Z 相同 N 不同的核素称为**同位素**

(ii) N 相同 Z 不同的核素称为**中子异核素**

(iii) A 相同 Z 不同的核素称为**同量异位素**

中子和质子统称为核子,可理解为核子的两个不同状态。

5. 原子核的自旋和磁矩

核自旋 $\overset{1}{P}_I$ $P_I = \sqrt{I(I+1)}h$ 量子数可以是整数或半整数

核自旋是所有核子的自旋角动量和轨道角动量的矢量和，
在空间某一方向的投影： $P_{Iz} = M_I h$

核自旋磁量子数 $M_I = I, I-1, \dots, -I$

1. A 为奇数的核(奇 A 核)
2. Z, N 都为偶数的核(偶-偶核)
3. Z, N 都为奇数的核(奇-奇核)

6. 原子核的磁矩

电子自旋磁矩： $\overset{r}{\mu}_s = -\frac{e}{m} \overset{r}{P}_s$ $\mu_s = \frac{e}{m} \sqrt{s(1+s)} = \sqrt{3} \mu_B$

原子核也有磁矩，核磁矩比电子的磁矩小得多，因此产生的超精细结构谱线也比精细结构谱线间距小得多。测量原子核磁矩的重要方法之一是核磁共振

§7.2 原子核力和结合能

在认识原子核之前人们只知道自然界有两种相互作用力：引力和电磁力。是什么力使核子竟然不顾库仑斥力紧密结合？

1. 核力的基本性质

(i) 强相互作用

核力的强度比库仑力大 100 倍

| | 强 | 电磁 | 弱 | 万有引力 |
|-------|------------|-----------|-------------------|------------|
| 相对强度 | 1 | 10^{-2} | 10^{-13} | 10^{-38} |
| 力程(m) | 10^{-15} | ∞ | 10^{-17} | ∞ |
| 场量子 | 介子 | 光子 | W^{\pm} 、 Z^0 | 引力子 p |

(ii) 短程性

$$\left\{ \begin{array}{l} 0.8 \text{ fm} < r < 2 \text{ fm} \quad \text{吸引力} \\ r < 0.8 \text{ fm} \quad \text{斥力} \\ r > 10 \text{ fm} \quad \text{基本消失} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 0.8 \text{ fm} < r < 2 \text{ fm} \quad \text{有一点认识} \\ r < 0.8 \text{ fm} \quad \text{认识还很差} \\ r > 2 \text{ fm} \quad \text{核力较清楚} \end{array} \right.$$

(iii) 电荷无关性和饱和性

$$F_{pp} \approx F_{nn} \approx F_{pn}$$

实验表明每个核子只与它相邻的几个核子有相互作用。

2. 原子核的结合能

核由中子和质子组成，但核质量不等于核内中子和质子质量之和。

例如，氘核 2H 由一个中子和一个质子组成

中子 $m_n = 1.008665u$

质子 $m_p = 1.007277u$

2H $m_d = 2.013552u$

$$\Delta m = m_n + m_p - m_d = 0.002390u = 2.225MeV / c^2$$

说明中子和质子组成氦核时会释放2.225MeV的能量。逆过程也成立，用同样的能量辐照氦核，将一分为二飞出中子和质子。事实上，自然界中物体总质量比组成它的个别质量之和小是普遍现象。例如，一个电子和一个质子组成氢原子时会释放13.6eV。原子结合能 \sim eV，原子核结合能 \sim MeV

核的结合能——核子结合成原子核时释放的能量

核的质量亏损

$$\Delta m = Zm_p + Nm_n - m_A$$

原子质量 M_A ； $m_A + Zm_e$

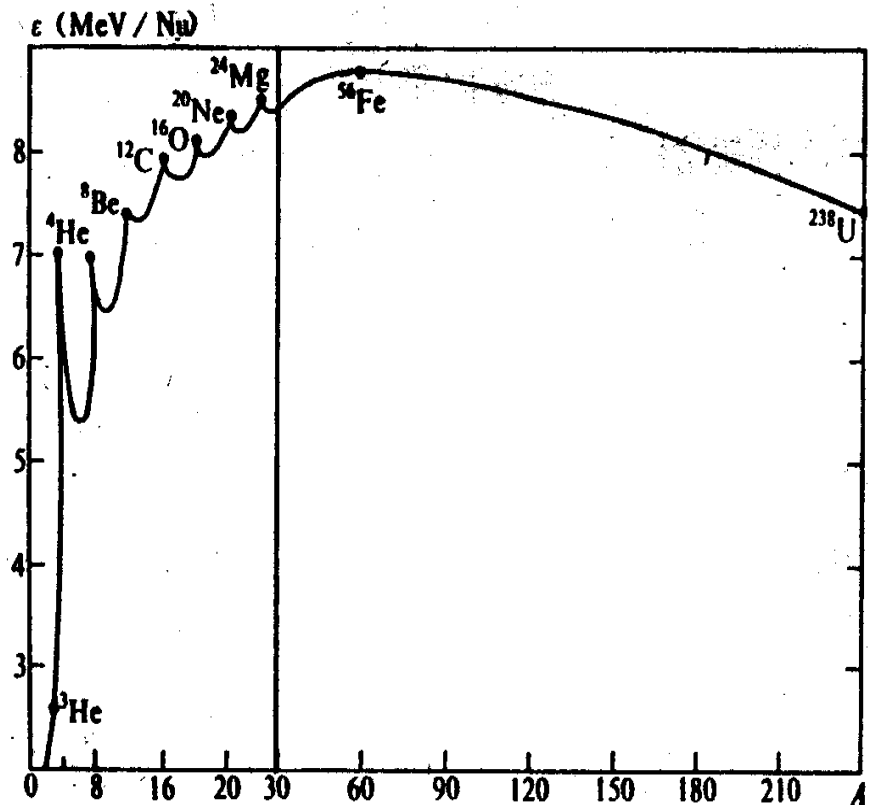
(忽略电子结合能)

原子核的结合能

$$E_B = \Delta mc^2 = [(ZM_H + Nm_n) - M_A]c^2$$

平均结合能

$$\bar{\varepsilon} = E_B / A : 8MeV$$



特点:

(1) $A < 30$ 的轻核, 平均结合能表现出周期性的变化, 凡 A 等于 4 的倍数的核, 平均结合能有最大值。

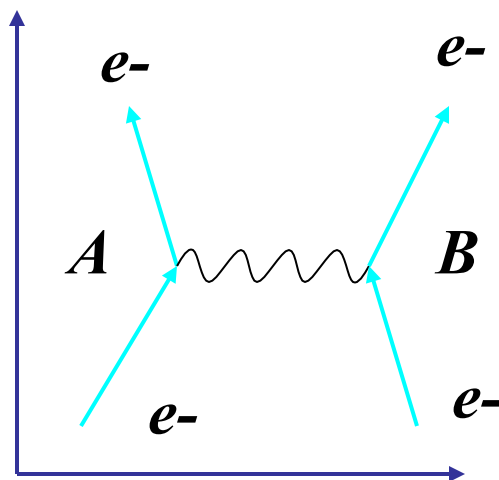
(2) 中等核 ($A=30-120$) 的平均结合能较大, 轻核和重核的平均结合能较小

获得核能的途径有两个: 重核裂变和轻核聚变

3. 核力的介子理论

现代物理学认为: 电磁相互作用是带电粒子间交换“虚光子”而产生的交换力。

1947年发现 π 介子



§7.3原子核结构模型

1. 液滴模型

实验依据:

(1) 核力具有饱和性，核子只与它周围几个核子作用，如同液体中的分子。

(2) 核密度不随核子数变化，核具有不可压缩性，如同液体密度是常数一样。

2. 壳层模型

在自然界中， Z 或 N ($=2,8,20,28,50,82,126$ -幻数)的核特别稳定，含量明显比其附近核素的含量多， Z 或 N 显示周期变化。

1949年，Mayer和Jensen在势阱中加入了自旋-轨道耦合项，从而成功地解释了幻数的存在，1965年获诺贝尔奖。

3. 集体模型

1952年Bohr和Mottelson提出描述核集体振动和转动的“几何模型”，1975年获诺贝尔奖。

§7.4 原子核放射衰变

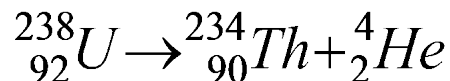
1. 放射性衰变规律

1896年，法国物理学家**贝克勒尔**发现铀矿物能**自发地**发射穿透力很强并能使照相底版感光的不可见射线。

1898年，居里夫妇又发现了钋和镭

放射性衰变：

核素自发地放射出某种射线而变成另一种核素的过程



放射性物质放出的射线主要有三种：

1. α 射线：氦核
2. β 射线：正负电子
3. γ 射线：光子

放射性衰变遵守：

电荷守恒、质量数守恒、质量和能量守恒、动量守恒等。

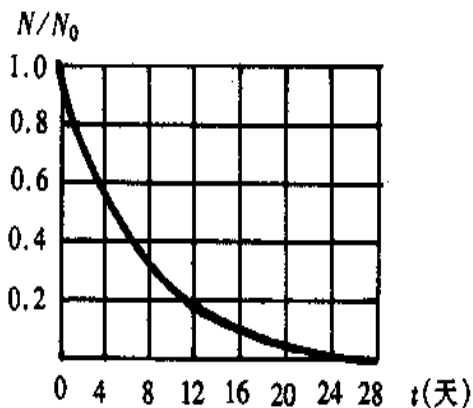
(1). 指数衰变规律

$$-dN \propto Ndt$$

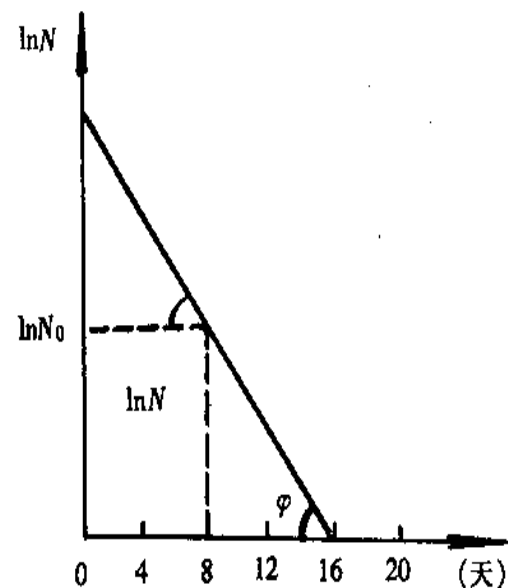
$$dN = -\lambda Ndt$$

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

$$\lambda = \frac{-dN/dt}{N}$$



(a)



(b)

λ 代表一个原子核在单位时间内发生衰变的几率，称为**衰变常数**

$$\ln N = -\lambda t + \ln N_0$$

(2). 半衰期

核衰变到原来数目一半时所需时间称**半衰期**

$$\frac{N}{N_0} = \frac{1}{2} = e^{-\lambda T} \quad T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}$$

例如: ${}_{34}^{212}\text{Po}$ $T: 0.3 \times 10^{-7}$ 秒; ${}_{92}^{238}\text{U}$ $T: 4.5 \times 10^9$ 年

(3). 平均寿命

一个原子核在衰变前存在的时间叫寿命，所有原子核寿命的平均值称为**平均寿命**。

$t: t + dt$ 内有 $-dN$ 个核衰变，其寿命为 t

$-dN$ 个核的总寿命为 $t dN = \lambda N t dt$

N_0 个核的总寿命为 $\int_0^{\infty} \lambda N t dt$

$$\text{平均寿命 } \tau = \frac{\int t(-dN)}{\int (-dN)} = \frac{\int_0^{\infty} \lambda N t dt}{N_0} = \frac{1}{\lambda}$$

例1: 某核的衰变常数为 $2.097 \times 10^{-6} s^{-1}$, 试求它的半衰期和平均寿命。

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = 330472s \quad \tau = \frac{1}{\lambda} \approx 476872s$$

放射性活度 $A = -dN / dt$

放射性活度的单位为Bq(贝克), $1\text{Bq}=1\text{次衰变/秒}$

$$1\text{居里(Ci)} = 3.7 \times 10^{10} \text{ 次衰变/秒} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

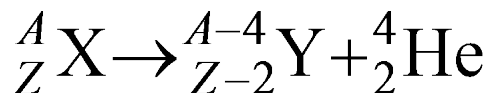
例2: 估算地球年龄

天然铀矿含量: $^{238}\text{U} : 99.2\%$ $^{235}\text{U} : 0.72\%$

假定地球形成时两者含量大体相当: $N_0^{235} \approx N_0^{238}$

$$\frac{N_{235\text{U}}}{N_{238\text{U}}} = \frac{N_0^{235} e^{-\lambda_{235}t}}{N_0^{238} e^{-\lambda_{238}t}} = \frac{N_0^{235}}{N_0^{238}} e^{-0.836t} \Rightarrow t \approx 59(\text{亿年})$$

2. α 衰变



$$\Delta m = (m_X - m_Y - m_\alpha)$$

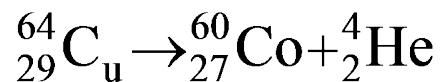
$$m_X = M_X - Zm_e \quad m_Y = M_Y - (Z-2)m_e \quad m_\alpha = M_{\text{He}} - 2m_e$$

$$\text{衰变能} \quad E_\alpha = (m_X - m_Y - m_\alpha)c^2 = (M_X - M_Y - M_{\text{He}})c^2$$

衰变条件

$$E_\alpha > 0 \quad \rightarrow \quad M_X > M_Y + M_{\text{He}}$$

例：判断 ${}^{64}_{29}\text{Cu}$ 是否发生 α 衰变。



$$M_{\text{Cu}} = 63.9298u \quad M_{\text{Co}} = 59.9338u \quad M_{\text{He}} = 4.0026u$$

$$63.9298 < 59.9338 + 4.0026$$

3. β 衰变

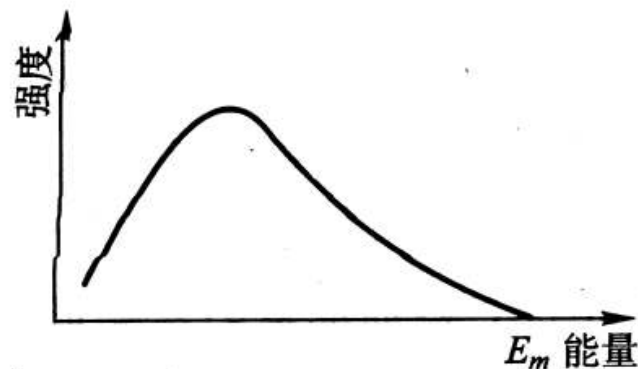
β 衰变连续能谱引发的困难

当衰变物只有两个时，能量可由动量守恒完全确定，而衰变物有三个时，能量可以任意分配。

是守恒定律的问题还是存在第三者？

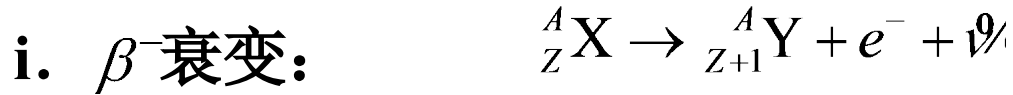
1930年，泡利（Pauli）指出：“只有假定在 β 衰变过程中，伴随每一个电子有一个轻的中性粒子（中微子）一起被发射出来，才能解释连续 β 谱。”——**中微子假说**

1956年，从实验上发现了中微子。



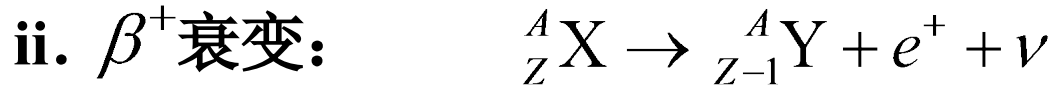
β 射线能谱

β 衰变的三种类型及衰变条件



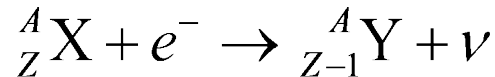
衰变能
$$E_{\beta^-} = (m_X - m_Y - m_e)c^2 = (M_X - M_Y)c^2$$

衰变条件
$$M_X > M_Y$$



$$E_{\beta^+} = (m_X - m_Y - m_e)c^2 = (M_X - M_Y - 2m_e)c^2$$

iii. 电子俘获 (K俘获, L俘获)

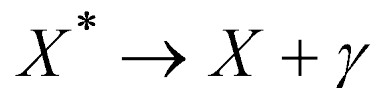


原子核俘获一个核外轨道上的电子转变为另一个核的过程

β 衰变的本质: 衰变时一个中子转变为质子或反之, 而轨道俘获其本质就是俘获轨道电子而转变为中子。

4. γ 衰变

原子核通过发射 γ 光子
从激发态跃迁到较低能态
的过程



$$E_\gamma = E_i - E_j = h\nu$$

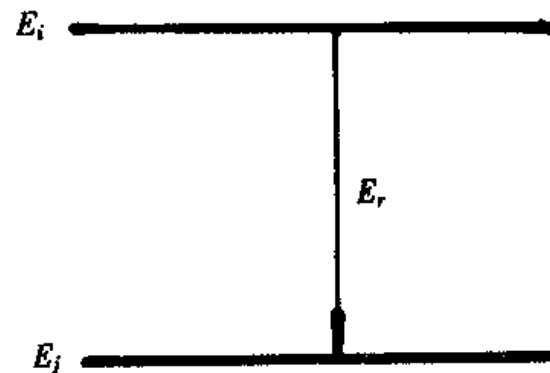
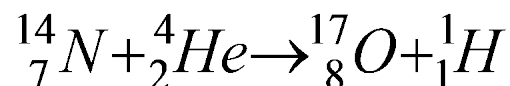


图 7.4.1 γ 衰变与
核能级的关系

§7.5 原子核反应

原子核反应：用具有一定能量的粒子**轰击**一个原子核，使其放出某种粒子而转变为新原子核的过程。

(1) 历史上第一个人工核反应

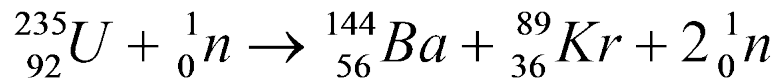
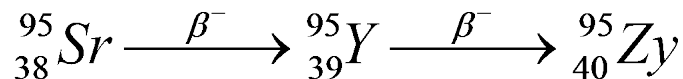
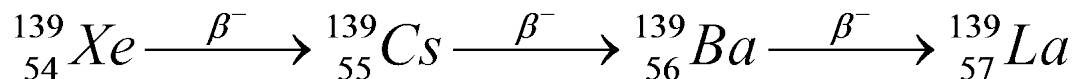
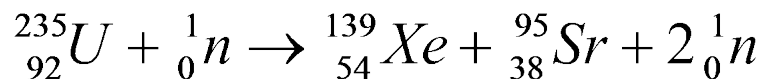


(2) 第一个在加速器上实现的核反应



核反应中的守恒定律：电荷数、质量数、动量、能量守恒。
此外，还有角动量、宇称、统计性、同位旋等量守恒。

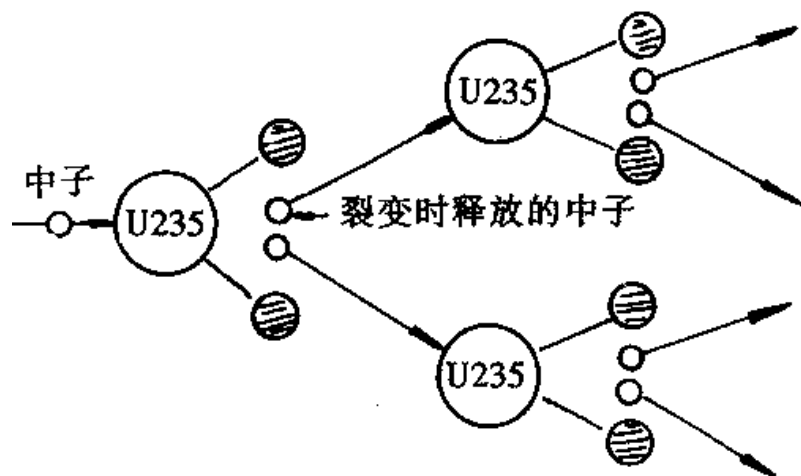
核裂变：1939年，哈恩和史特拉斯曼发现：利用中子轰击U时，产物中存在Ba。随后，梅特纳和弗里什指出：U在中子的轰击下，裂变为两个中等质量核素。1947年，钱三强和何泽惠发现了核裂变的三分裂现象，其发生几率约为二分裂的千分之三。



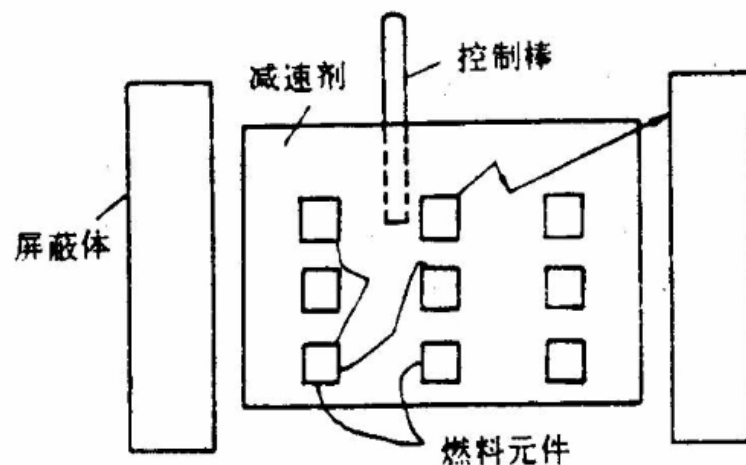
一个铀核： $E : 210\text{MeV}$

一克铀： $E : 5.38 \times 10^{23} \text{MeV}$ 相当**2.5吨煤完全燃烧放出的能量**

U分离技术是制造原子弹的关键技术，一个U原子可以提供2.5中子，可以维持链式反应！



链式反应示意图

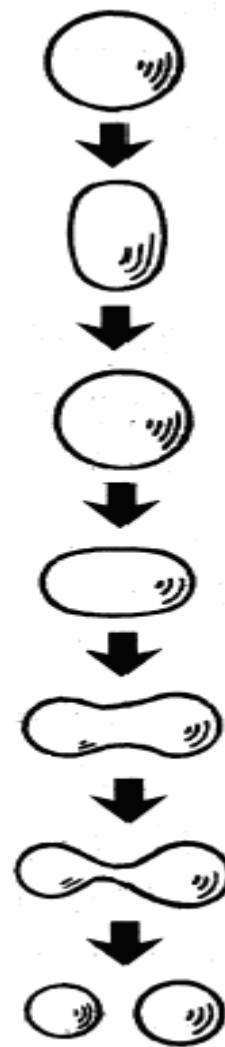


裂变反应堆

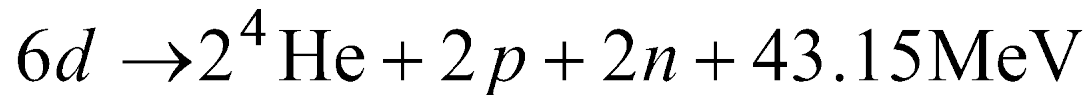
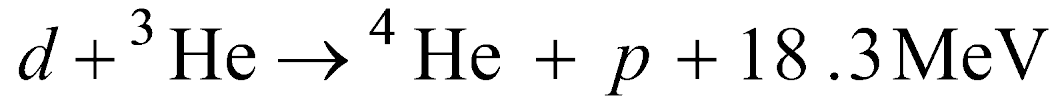
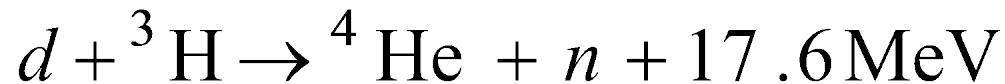
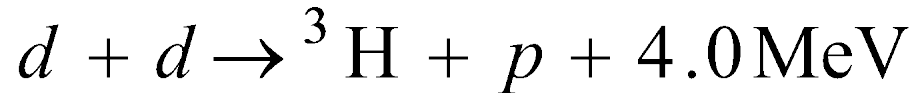
临界质量： 体积太小中子容易逃逸，无法维持反应。

二、裂变机制—液滴模型

核内的质子、中子在不停地运动。核子之间有核力，质子之间有库仑斥力。当哑铃形的两端之间的库仑斥力大于中间收缩部分核子间总的核力时，形变不能恢复，原子核分裂成两块，放出中子，同时释放能量。



原子核聚变



库仑势垒：144KeV→5.6 ×10⁸K

聚变温度：约10⁸K（1亿度），等离子体状态

| | 聚变 2_1H | 裂变 ${}^{235}_{92}U$ |
|------|---------------------------|----------------------------|
| 一个核 | $7.2MeV$ | $211.5MeV$ |
| 一个核子 | $3.6MeV$ | $0.9MeV$ |
| 一千克 | $21.6 \times 10^{26} MeV$ | $5.418 \times 10^{26} MeV$ |

1.聚变能约为裂变能的**四**倍

2.聚变的原料是氘. 裂变的原料是铀

氢弹方案： 高效炸药+裂变原料+氘化锂

氢弹是不可控的热核反应 裂变弹的能量分配：

爆震与冲击波： 50% 热辐射： 35%

剩余辐射： 10% 早期辐射： 5%

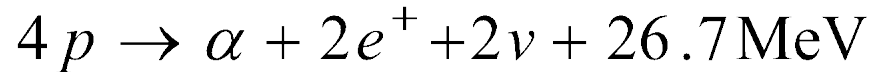
纯聚变不产生剩余辐射。

引力约束聚变

关于太阳：

引力约束等离子体。每天燃烧的氢，相当于每秒爆炸900亿颗百万吨级的氢弹。碳循环周期 6×10^6 年，质子循环周期 3×10^9 年。太阳外层温度6000K，中心温度15,000,000K。

太阳内部主要有两种热核反应：



1. 氢链反应:



周期: 3×10^9 年



总效果: $4 {}^1_1H \rightarrow {}^4_2He + 2 {}^0_1e + 2 \nu + 28MeV$

2. 碳氢循环



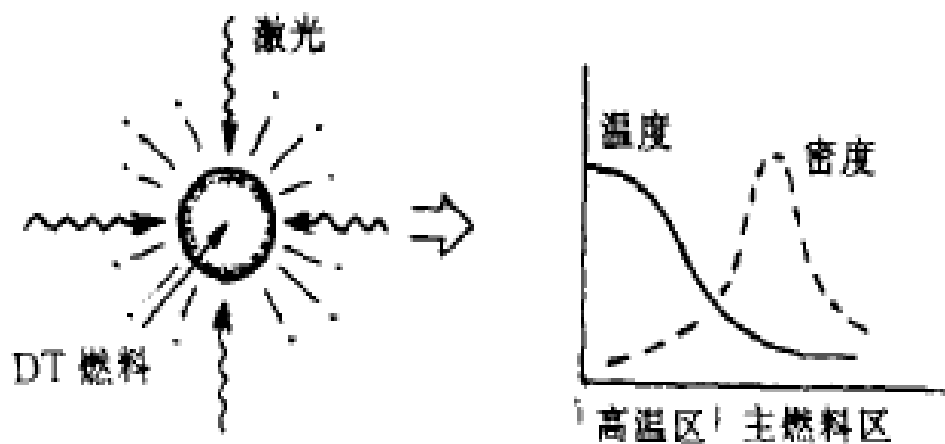
周期: 6×10^6 年



总效果: $4 {}^1_1H \rightarrow {}^4_2He + 2 {}^0_1e + 2 \nu + 28MeV$

激光约束聚变—受控核聚变

在直径为0.4mm的小球内充以30-100大气压的氘氚混合气体，用强激光（ 10^{12} - 10^{14} W）均匀照射，使氘氚混合气体的密度达到液体密度的一千到一万倍，温度达到 10^8 K而引发聚变。

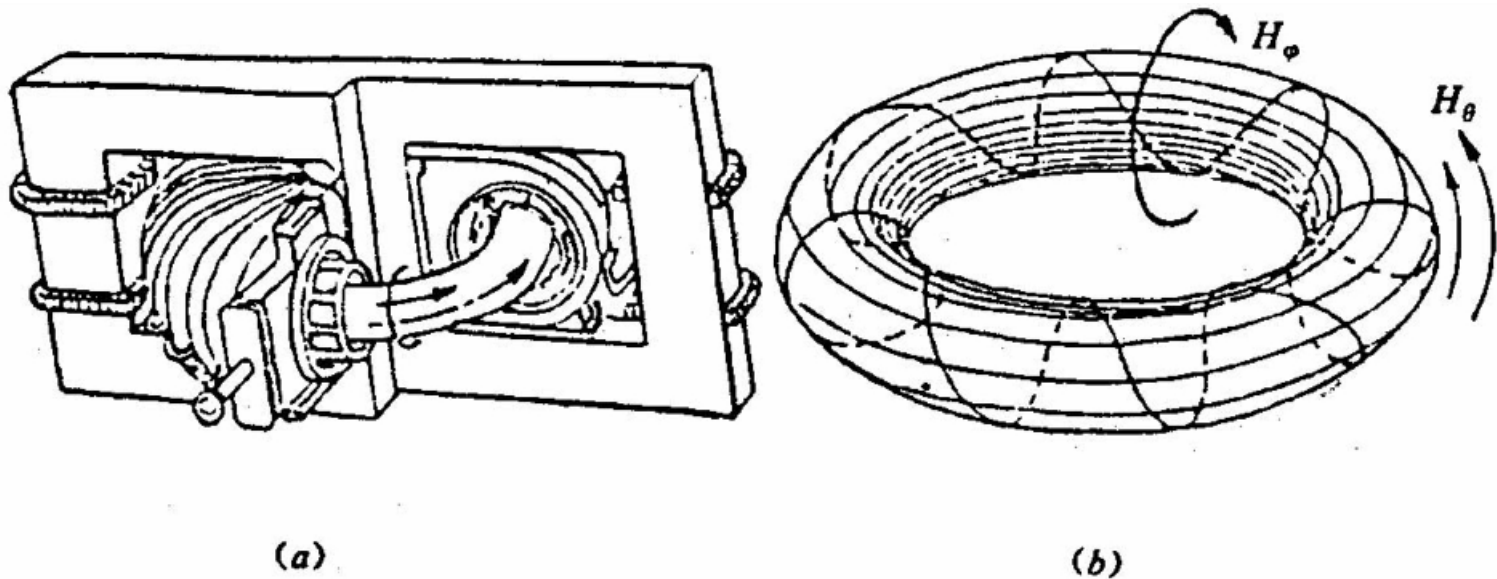


激光聚爆示意图

磁约束聚变

超过万度以上的气体是不能用任何材料所构成的容器约束。具有闭合磁力线的磁场是一种可能的选择。设计“磁笼”成为难点。70年代，苏联科学家发明的“托克马克”方案逐渐显示出优点，成为聚变能研究的主流途径。

托克马克装置又称环流器，“磁笼”由环形封闭磁场组成。



以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/337010164144006103>