

第17章 原子核物理简介

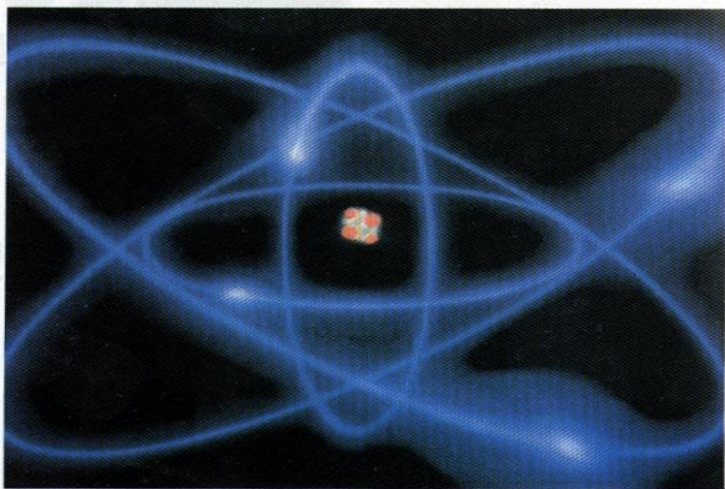
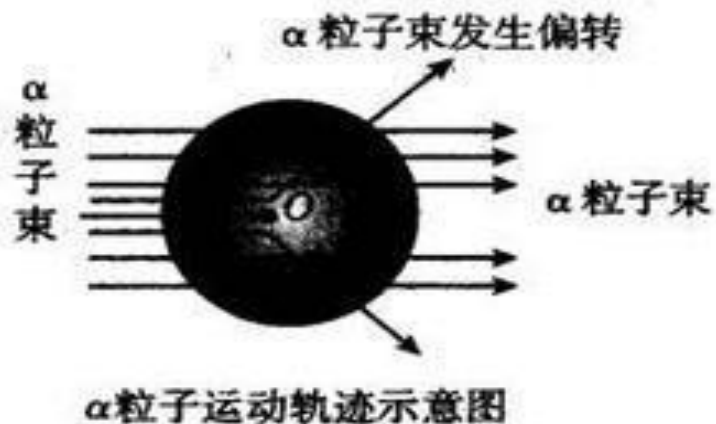
Introduction of Nuclear Physics

第1节 原子核的结构和基本性质

第2节 原子核的衰变

第3节 核反应与核能的利用

● 卢瑟福 α 粒子散射实验



卢瑟福, E.

卢瑟福1871年8月13日出生于新西兰, 1895年到英国剑桥大学学习, 成为J. J. 汤姆孙的研究生。1908年卢瑟福荣获诺贝尔化学奖, 同年在曼切斯特大学任教, 继续指导他的学生进行 α 粒子散射的实验研究。

第1节 原子核的结构和基本性质

1. 原子核的大小与组成

实验表明，原子核是由一定数目的质子和中子组成的一个复杂系统，对质子和中子而言，虽然带电情况不同，但质量、自旋等特性以及在核内的相互作用中，有许多性质是相近的，因此我们常把质子和中子统称为核子。

原子核半径：
$$R = R_0 A^{1/3}$$

A ：核子数， R_0 ：比例系数 $R_0 \approx 2.7 \times 10^{-15} \text{ m}$

原子核密度：
$$\rho = \frac{m}{4\pi R^3 / 3} = 2.29 \times 10^{17} \text{ kg/m}^3$$

从上述原子核密度近乎相同的事实表明，无论原子核中核子数目有多少，每一个核子在核内几乎都占有相同大小的体积。由此也证实了核力是短程力，具有饱和性。

2. 原子核的电荷与质量

质量与电荷是物质的固有属性，不同原子核有不同的质量和电荷，因而质量数与电荷数是表示原子核的特征参量。

原子核的电荷： $Q = Z \cdot e$

Z 表示质子数，又称原子核的电荷数，也等于元素的原子序数。

原子核的质量单位： $1u = 1.660566 \times 10^{-27} \text{ kg}$

中子的质量： $m_n = 1.008665 u$

质子的质量： $m_p = 1.007276 u$

以新单位表示核的质量，都近似为整数： A 称为质量数

原子核的表示： $\boxed{\begin{smallmatrix} A \\ Z \end{smallmatrix} \text{X}}$ ${}_1^1\text{H}, {}_2^4\text{He}, {}_6^{12}\text{C}, {}_8^{16}\text{O}$ 推广： ${}_{-1}^0\text{e}, {}_1^1\text{p}, {}_0^1\text{n}$



原子核的质量 \neq 中子的质量 + 质子的质量

——原子核都有结合能。

3. 原子核的自旋与磁矩

实验表明，组成原子核的质子和中子都有内禀角动量，即自旋。质子和中子的自旋量子数均为 $1/2$ 。此外，核子在核内的空间运动有轨道角动量，核子自旋角动量与轨道角动量之和称总角动量。核自旋是指原子核基态的总角动量。实验发现，处于一定能态的核的总角动量具有确定的数值。

核自旋： $P_J = \sqrt{J(J+1)}\hbar$ ---- J 为原子核的自旋量子数。

核磁矩： $\mu_{Jz} = g_N \frac{e}{2m_p} J\hbar = g_N \mu_N J$ g_N : 原子核 g 因子。

核磁子： $\mu_N = \frac{e\hbar}{2m_p}$ ---- 描述核磁矩的一个新单位。

对比波尔磁子： $\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e}$ $\mu_B = 1836 \mu_N$

可见：原子核的自旋对原子能级的影响较小，但是根据原子光谱的超精细结构，是可以分析测定核自旋。

4. 原子核的核力与结合能

在核子之间一定还存在一种比静电斥力更强的相互作用力，以使质子和中子集结在一起，形成稳定的核，这种力称为**核力**。

- 任意两个核子之间均有核力作用，并且核力大致相等。
- 核力是一种短程力。
- 核力具有“饱和”的性质。

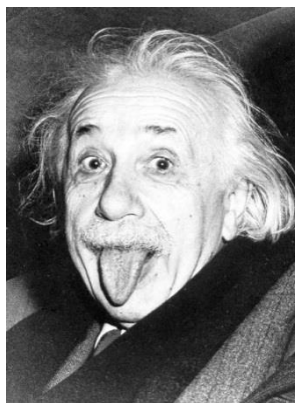
在核子之间的作用范围内，如核子之间的距离较大，核力表现为引力，而当核子间的距离小到 $0.4 \times 10^{-15}\text{m}$ 时，核力就由吸力变为强大的斥力，这种斥力的存在使得核子不可能非常接近。

核力的本质，目前认为是一种交换 π 介子的**交换力**。

实验测定的原子核的质量总是小于组成核的质子和中子的质量之总和，其差额称为**质量亏损**。

$$B = \Delta m = [Zm_p + (A - Z)m_n] - m \quad \text{----物质去哪儿?}$$

例如：氦核的质量亏损为 $B = \Delta m = 0.030377 u$



$$E = mc^2 \Rightarrow \Delta E = \Delta mc^2$$

$$\begin{aligned} \Delta E &= (3 \times 10^8)^2 \times 0.030377 \times 1.660566 \times 10^{-27} \\ &= 4.539871 \times 10^{-12} \text{ J} \end{aligned}$$

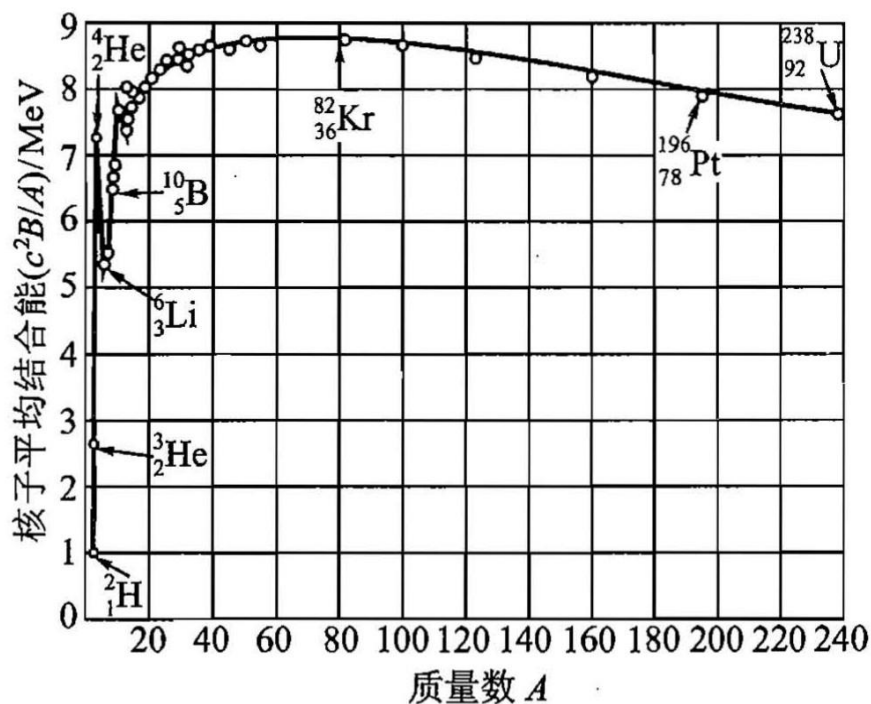
形成1 mol的氦原子核所放出的能量为： $2.73 \times 10^{12} \text{ J/mol}$

由质子和中子形成原子核时所放出的能量，称为**结合能**。
相反，使原子核分裂为单个的质子和中子时，外界就必须供给与结合能等值的能量或做这样多的功。

原子核的结合能与它包含的核子数有关，重核比轻核的结合能大，为比较不同原子核的结合能，需要定义平均结合能。

平均结合能： $\Delta E / A = \Delta mc^2 / A$ ----描述原子核结合的紧密

平均结合能为纵坐标，核子数为横坐标，可得两者的关系：



从左图可以看出，对应于中等原子量元素的核，核子的平均结合能最大，且近似地均等于8.6MeV，因此最稳定。而对于轻核和重核，每个核子的平均结合能都比上述数值小，因此当轻核聚合成中等质量的核或重核分裂成中等质量的核时，都有大量能量放出，这种能量称为原子核能，简称**原子能**。

5. 原子核的结构与模型

质子和中子是如何结合组成原子核的呢？目前只能利用一些模型来近似说明。简单介绍核的液滴模型和壳层模型，它们在裂变能量和能级的计算中给出了重要的结果。

▲ 液滴模型：

液滴模型设想核是一滴“核液”，核力在核子间距离很小时变为巨大的斥力使核液具有“不可压缩性”，核子间距较大时，核力又表现为引力。斥力和引力的平衡使得核子之间保持一定的平衡间距，而使核液有一恒定的密度。

核的液滴模型提出了一个核的结合能的拟合公式：

韦塞克半经验公式：
$$E_b = a_1 A - a_2 A^{2/3} - a_3 Z^2 / A^{1/3} - a_4 (A - 2Z)^2 / A + a_5 A^{-1/2}$$

—— 式中的5个常量要通过用最小二乘法对实验结果进行拟合来求得。人们利用这一公式曾成功地计算过重核的裂变能。

▲ 壳层模型:

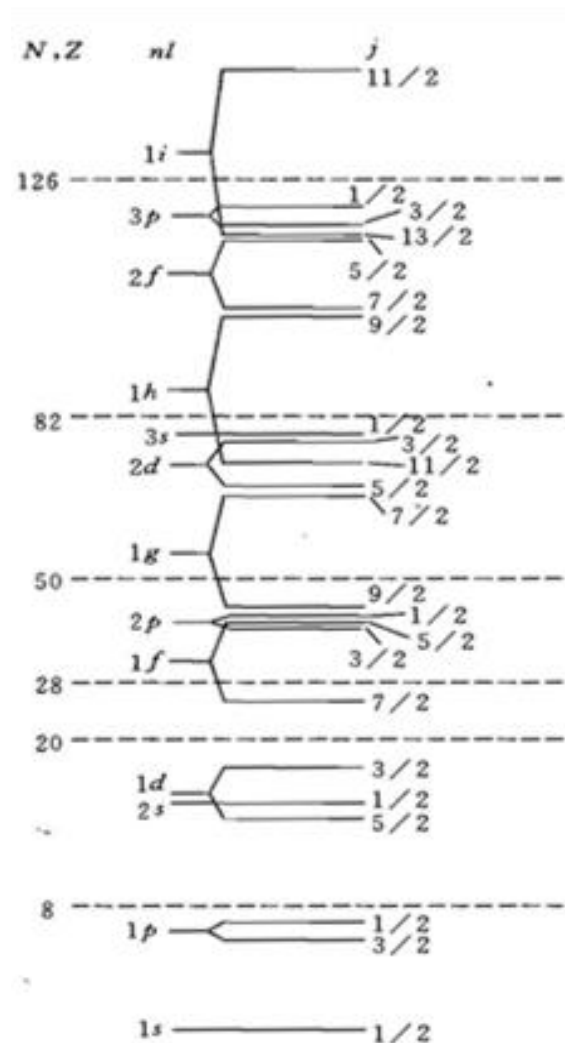
迈耶 (M.G.Mayer) 和金森 (H.D.Jensen) 提出了类似于原子能级那样的壳层模型。

与原子能级不同的是: 能级差变大 (MeV 量级), 很好的解释了对于质子或中子数为 **8,20,28,50,82,126** 的核 (幻数核) 都特别稳定, 这一结果与实验相符。

Nobel Prize in Physics 1963



Maria Goeppert Mayer J. Hans D. Jensen



第2节 原子核的衰变

1. 天然放射性现象

1896年贝克勒尔发现铀盐可以不断地放出一些射线。接着居里夫妇发现镭和钋也都能够放出类似的射线，而且强度比铀放出的更强。

这些元素不用人工处理，就会自发地放出上述射线，故称为**天然放射性**。

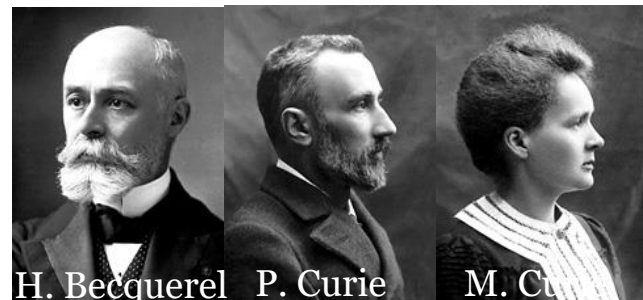
天然放射性元素的衰变方式有下列三种：

α 衰变——从核中放出 α 粒子的过程；

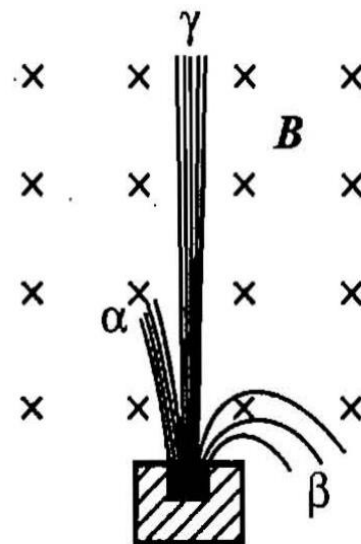
β 衰变——核中放出电子的过程；

γ 衰变——从核中放出光子的过程。

α 射线的电离本领最强， γ 射线的电离本领最弱；
 γ 射线贯穿物体的本领最强，而 α 射线贯穿物体的本领最弱；
 β 射线的电离本领和贯穿本领都介于 α 和 γ 射线之间。



1903 Nobel Price



2. 原子核衰变规律

原子核是否具有放射性及其衰变方式，取决于核的内在性质，与温度、压强、电场或磁场等外界条件无关。理论和实验证明，在核衰变的过程中，原子核的数目随时间按指数规律而减少。

衰变规律： $dN = -\lambda N dt \Rightarrow N = N_0 e^{-\lambda t}$ ---- λ ：**衰减常数**

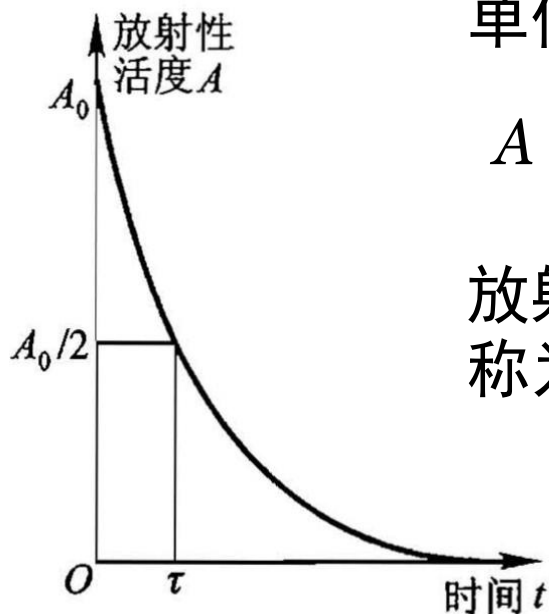
放射性活度：以单位时间内发生核衰变的次数来表示物体放射性的强弱，称为放射性活度，以 A 表示。

单位：1Bq=1s⁻¹ 1Ci=3.7×10¹⁰Bq

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N_0 e^{-\lambda t} \Rightarrow A = A_0 e^{-\lambda t}$$

放射性活度减弱为原来的一半时所经历的时间，称为放射性元素的**半衰期**。

$$\frac{A_0}{2} = A_0 e^{-\lambda \tau} \Rightarrow \tau = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}$$

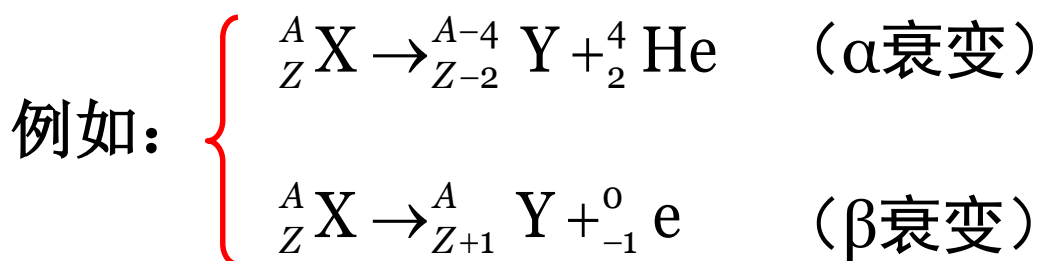


各种放射性元素半衰期的长短相差很大，例如，铀²³⁸的半衰期为 $4.5 \times 10^9 \text{a}$ (a表示以年为单位)，镭的半衰期为1600a, 钋的半衰期为 $4.5 \times 10^{-7} \text{s}$ 。

平均寿命：

$$T = \frac{\int_0^{\infty} t(-dN)}{N_0} = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} \lambda N_0 t e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} = 1.44\tau$$

此外，和其它物理过程一样，原子核的衰变过程也要遵从电荷守恒、动量守恒和能量守恒等自然界的普遍规律。衰变前各原子核的电荷数与质量数的总和应分别等于衰变后的总和。



——这两个公式通常称为核衰变过程中的**位移定则**。

3. 放射性的防护

因为不同放射线的性质不同，采取的防护措施也不一样。 α 射线的电离能力很强，但射程短，穿透能力小。 α 射线不可能由体表深入体内，故对 α 射线照射只要戴上手套即可。

β 射线和 γ 射线穿透能力强，外照射不容忽视。对 β 射线常用含有中等原子序效的物质作屏蔽材料，如各种塑料和有机玻璃。 β 射线对重原子序数物质易引起辐射（高速带电粒子急剧减速时发出的电磁辐射），后者对人体健康亦不利，故不宜采用。 γ 射线不存在这一问题，故多用重原子序数物质如铅、混凝土等来屏蔽。

第3节 核反应与核能利用

1. 核反应

用高能粒子轰击原子核使原子核发生改变的过程叫做**核反应**。

例如 ${}^A_Z X + a \rightarrow {}^{A'}_{Z'} Y + b$ 简写成 ${}^A X(a, b){}^{A'} Y$

其中：a是入射粒子，b是反应后放出的粒子；X是被轰击的原子核，称为**靶核**；Y是形成的新核，称为**反冲核**。

${}^4_2\text{He} + {}^{14}_7\text{N} \rightarrow {}^{17}_8\text{O} + {}^1_1\text{p} - 1.19\text{MeV}$ --1919年卢瑟福第一次人工核嬗变

${}^4_2\text{He} + {}^9_4\text{Be} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + {}^1_0\text{n} + 5.7\text{MeV}$ --1932年居里与查德威克首次发现中子

${}^1_1\text{p} + {}^7_3\text{Li} \rightarrow ({}^8_4\text{B}) \rightarrow 2{}^4_2\text{He} + 8.03\text{MeV}$ --第一次用加速粒子引发的核反应

${}^{10}_5\text{B} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{13}_7\text{N} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{13}_6\text{C} + {}^0_{-1}\text{e} + {}^1_0\text{n}$ --首次发现正电子的核反应

${}^{235}_{92}\text{U} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{144}_{56}\text{Ba} + {}^{89}_{36}\text{Kr} + 3{}^1_0\text{n} + 200\text{MeV}$ --一种可能的铀核裂变反应

${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n} + 17.6\text{MeV}$ --氢弹爆炸的热核反应

表示进行一种核反应的概率时，常用到**反应截面**这一概念，核反应的反应截面 σ 是单位时间内一个靶粒子的反应次数和入射粒子流强 I （单位时间内通过单位面积的入射粒子数）的比值，即： $\sigma = \frac{R}{NI}$ 式中： R 是反应速率，即单位时间内的反应次数， N 是入射粒子流射中的靶核数。

单位：靶恩，符号为b， $1\text{b} = 10^{-28} \text{ m}^2$



核反应入射粒子不是经典粒子，要考虑波动性和量子化。反应截面并不等于靶核的横截面积。

反应能： 典型核反应 $X(x, y)Y$ 的反应能为：

$$Q = (m_X + m_x - m_y - m_Y)c^2$$

$Q > 0$ ，放能反应； $Q < 0$ ，吸能反应。

阈能： 引发吸能核反应所需的入射粒子的最小能量叫该反应的阈能。

$$E_{th} = \left(1 + \frac{m_x}{m_X}\right) |Q|$$

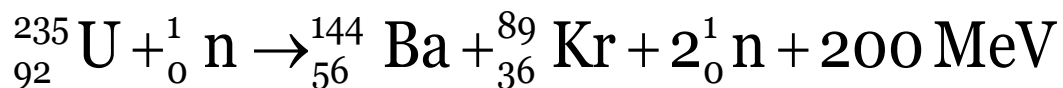
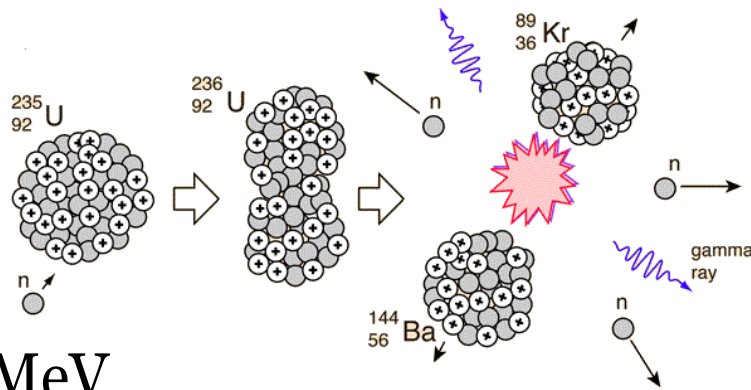
2. 核能的开发与利用

把轻核聚合成较重的中等质量的原子核，或把重核分裂成两个中等质量的原子核，都会放出大量能量。前者叫做轻核聚变，后者叫做重核裂变，这是获得原子核能的两种途径。

(1) 重核的裂变

重核分裂的过程相对较易产生，实际上，天然放射性元素就在自发地进行这种过程，但是这种过程不容易用人工的方法加以控制；另一方面由于功率太低，所以不能加以大量利用。

利用重核裂变时释放的原子核能，只是在1938年开始发现用中子轰击 ${}_{92}^{235}\text{U}$ 等几种重核时的分裂现象后，才成为可能。



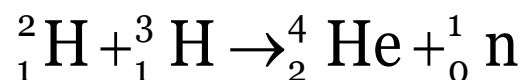
一个 ${}_{92}^{235}\text{U}$ 核分裂时放出约200MeV的能量，而且分裂时放出的再生中子又能够引起另外的 ${}_{92}^{235}\text{U}$ 核的分裂。依次滚雪球似的扩大，可使反应继续进行下去，并不断释放出大量原子核能。这种反应称为链式反应。

如果用纯净的 ${}_{92}^{235}\text{U}$ ，要使它发生链式反应，必须使铀块有足够大的体积，因为体积太小时，少量 ${}_{92}^{235}\text{U}$ 核分裂时所发生的再生中子，大部分将在没有与别的铀核碰撞之前就飞出铀块之外，链式反应就不能产生。能够发生链式反应的最小体积，叫做临界体积。临界体积中所含 ${}_{92}^{235}\text{U}$ 的质量，称为临界质量。

当几块质量小于临界质量的 ${}_{92}^{235}\text{U}$ 很快的合拢起来而总质量超过临界质量时，就会发生极猛烈的链式反应而引起爆炸。原子弹的构造就是根据这个原理制成的。

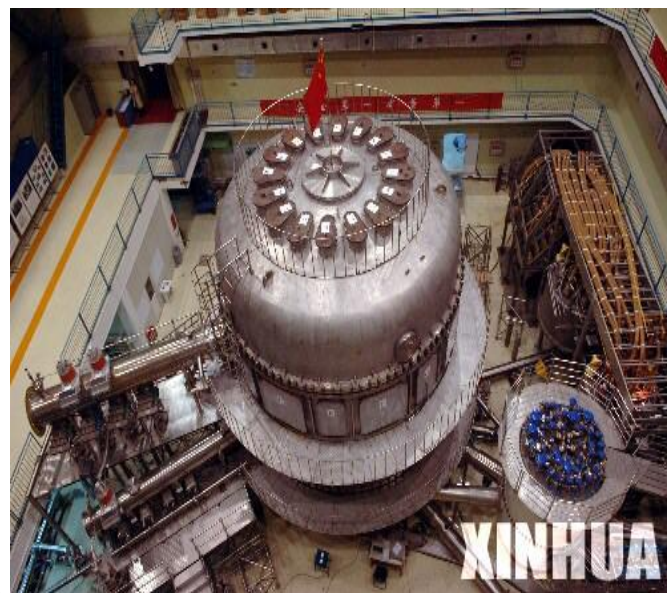
(2) 轻核的聚变

轻核聚变是利用原子核能的另一种方法，在高温下，使轻核聚合而放出大量原子核能的反应称为热核反应。氢同位素氘 ${}^2_1\text{H}$ 和氚 ${}^3_1\text{H}$ 聚合形成氦核 ${}^4_2\text{He}$ 是一个比较容易产生的热核反应，它的反应式是：



氢弹爆炸是一种不可控制的热核反应。在人工控制下进行的热核反应叫做**受控热核反应**，它能够根据需要控制热核反应的速度，使之缓慢而均匀地进行，以能适应在生产实践中的应用。

国际热核聚变实验堆（ITER）计划是当今世界最大的大科学工程国际科技合作计划之一，也是迄今我国参加的规模最大的国际科技合作计划。



大学物理考试时间：1月4日

答疑时间 (月、日，起止时间， 如 14:00 至 01:00)	地点 (教学楼、房间 号)
12 月 27 日	东九楼 AT201
15:00 ~ 17:00	
12 月 29 日	东九楼 AT201
15:00 ~ 17:00	

第9章 气体动理论

Kinetic Theory of Gases

第1节 热力学系统和平衡态

第2节 理想气体状态方程与微观模型

第3节 理想气体的压强与温度

第4节 能均分定理 理想气体的内能

第5节 气体分子的速度和能量分布

第6节 范德瓦尔斯方程

第7节 分子的平均碰撞次数 平均自由程

第8节 偏离平衡态

第10章 热力学基础

Fundamentals of Thermodynamics

第1节 热力学第一定律

第2节 理想气体的热容量

第3节 热力学第一定律对理想气体的应用

第4节 循环过程 卡诺循环

第5节 热力学第二定律

第6节 熵

第7节 玻尔兹曼熵

第11章 振动与波动

Oscillations and Waves

第1节 谐振动

第2节 振动的合成与分解

第3节 阻尼振动、受迫振动和共振

第4节 机械波

第5节 波的衍射与波的干涉

第6节 多普勒效应

第7节 电磁振荡与电磁波

第13章 波动光学

Wave Optics

第1节 光波

第2节 光波的叠加 光程

第3节 分波阵面干涉

第4节 分振幅干涉

第5节 光波的偏振

第6节 双折射

第7节 偏振光的干涉

第8节 旋光效应



1927年第五次索尔维会议（Conseils Solvay）

第14章 早期量子论

Quantum Theory of Light

第1节 黑体辐射 普朗克量子

第2节 光电效应

第3节 康普顿效应

第4节 波尔量子理论

第15章 量子力学基础

Fundamentals of Quantum Mechanics

第1节 德布罗意波

第2节 微观粒子的状态描述 波函数

第3节 波函数的概率解释

第4节 不确定关系

第5节 薛定谔方程

第6节 一维定态薛定谔方程的应用

第7节 用量子力学处理氢原子问题

第8节 电子自旋

第9节 原子的电子壳层结构

第16 半导体与激光简介

Semiconductor and Laser

第1节 半导体

第2节 激光

第17原子核物理简介

Introduction of Nuclear Physics

第1节 原子核的结构和基本性质

第2节 原子核的衰变

第3节 核反应与核能的利用