

第七章 原子核物理概论

7.1 原子核的基本性质

7.2 核力和壳层模型

7.3 原子核衰变

7.4 原子核的结合能、核反应和核能

7.5 辐射剂量防护简述

- (1) 了解原子核的基本性质.
- (2) 了解原子核的结构模型.
- (3) 掌握放射性衰变规律及其应用.
- (4) 能计算原子核的结合能.
- (5) 掌握核反应的一般规律及核反应能的计算
- (6) 了解裂变、聚变反应, 了解原子能的利用
- (7) 了解辐射剂量防护的基本知识

早期核相关的研究

- 1896年,贝克勒尔发现铀盐的放射现象。这是人类历史上第一次在实验室里观察到原子核现象, **是核物理学的开端**

获1903年度诺贝尔物理学奖



A.H. 贝克勒尔
(法) 1852-1908



第一张铀辐射照片₂

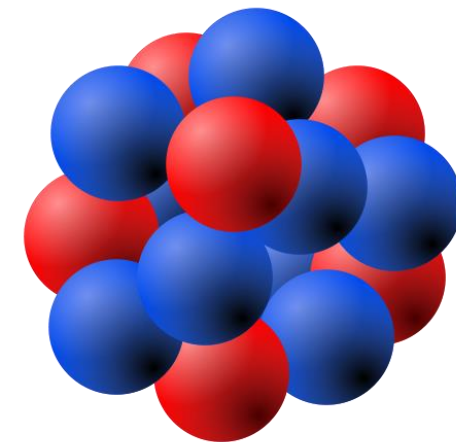
早期核相关的研究

- 居里夫妇发现放射性元素 钋(Po)和镭(Ra)



共同获1903年度诺贝尔物理学奖

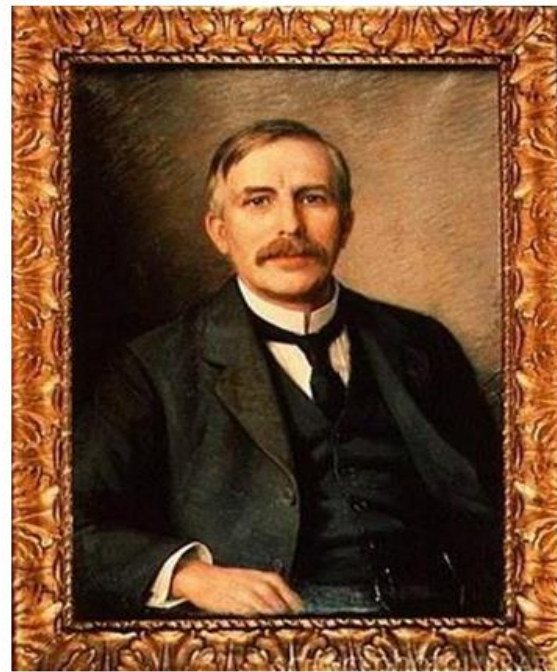
皮埃尔.居里（法）（1859-1906）
玛丽.居里（法籍波兰）（1867-1934）



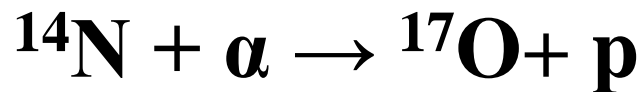
第一节 原子核的基本性质

质子的发现

- 1919年，卢瑟福做了用 α 粒子轰击氮原子核的实验
 - ✓ 放射性物质A射出的 α 粒子射到铝箔F上，适当选取铝箔的厚度，使容器抽成真空后， α 粒子恰好被F吸收而不能透过，在F后面放一荧光屏S，用显微镜册来观察荧光屏上是否出现闪光。
 - ✓ 通过阀门T往容器里通进氮气后，卢瑟福从荧光屏S上观察到了闪光，把氮气换成氧气或二氧化碳，又观察不到闪光，这表明**闪光一定是 α 粒子击中氮核后产生的新粒子透过铝箔引起的**
 - ✓ 卢瑟福把这种粒子引进电场和磁场中，根据它在电场和磁场中的偏转，测出了它的荷质比，确定它就是H原子核，称之为做质子(proton)



卢瑟福 (E.Rutherford)



原子核结构的探索-- α 粒子之谜

- 20世纪初，卢瑟福提出原子核式结构模型
- ✓ 当时人们认知的粒子包括 电子，质子（H原子核），光子
- ✓ 许多元素的原子量是H原子量的整数倍



原子核是由许多质子构成的

α 粒子（He核）的原子序数 $Z=2$ ，质量却几乎是H原子核的整4倍



原子核是由质子+电子构成的？
He原子核由4个质子+2个电子构成？

原子核能发生 β 衰变，放出电子

原子核结构的探索-- α 粒子之谜

He原子核由4个质子+2个电子构成？

卢瑟福散射实验给出，核的直径为 10^{-14}m ，由不确定关系可得

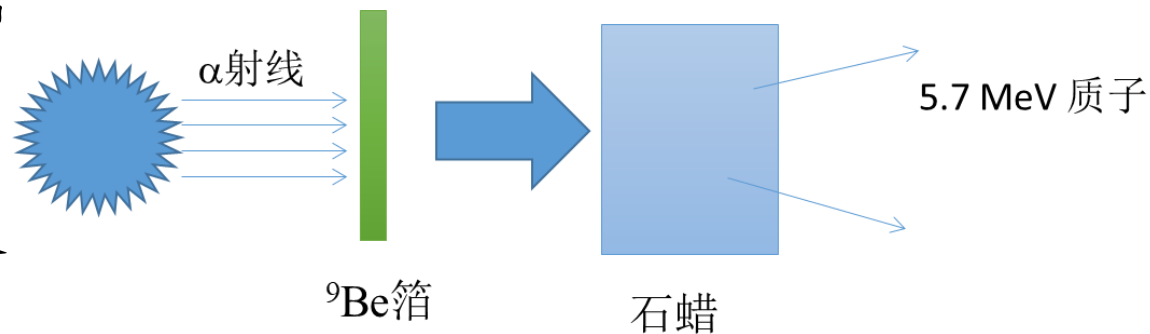
$$\begin{aligned} E &= \sqrt{p^2 c^2 + m_0^2 c^4} \sim pc \\ &= \frac{hc}{d} = \frac{1240\text{eV} \cdot \text{nm}}{10 \times 10^{-15}\text{m}} = 124\text{MeV} \end{aligned}$$

已知的 β 衰变放出的电子能量 $\sim 4\text{MeV}$ ，差2个数量级

卢瑟福于1920提出原子核内部可能含有一种与质子质量类似的中性粒子，但一直没有实验证据...

中子的发现——10多年之后

- 早在1928年，德国科学家玻特发现 α 粒子轰击铍时，会有一种穿透力极强的射线逸出，经过研究，他们认为这是高能 γ 射线，从而错失中子的发现



- 1932年，约里奥-居里夫妇利用更高精度的实验设备，也进行了类似的实验，利用钋源发射出的 α 粒子轰击铍。精确计算了射线能量，但是约里奥-居里夫妇也错误地认为这种射线是 γ 射线

铍发射出的射线穿透力很强，能把放在计数管前面含H物质中的质子轰击出来

推理即知，要求光子的能量超过50MeV，这很难想象

中子的发现——10多年之后

- 1932年，查德威克进行了一样的实验，以中子假设为模型
- 使该中性粒子通过H和N靶，并分别测出了H核和N核的反冲速度

$v_p=3\times 10^7\text{m/s}$, $v_N=4.7\times 10^6\text{m/s}$, 设该中性粒子质量为 m , 利用动量守恒有

$$\frac{v_p}{v_N} = \frac{m_N + m}{m_p + m}$$



$$m = 1.15 m_p$$

与卢瑟福预言一致

中子的发现被认为是原子核物理的诞生



查德威克 (J.Chadwick)
1935年因发现了中子获得诺贝尔奖

原子核的构成

1932年，Heisenberg立刻提出了原子核的质子中子模型。

原子核是由 Z 个质子和 N 个中子组成的，核子数 $A=Z+N$

原子是电中性的：质子数=核外电子数，中子不带电

- 原子内部电子的运动是主要的，原子核近似看作静止
原子的化学、物理和光谱性质主要归因于原子内电子的运动
- 原子核对原子性质起主要贡献的是核的质量和电荷
原子核对原子的影响比较弱：原子光谱超精细结构
- 核外电子的行为对原子核的影响甚微，可不予考虑



Werner Heisenberg
(1901 –1976)

原子核的基本性质：核素

通常把具有特定质子数 Z 和中子数 N 的一类原子，也即具有相同原子序数 Z 和质量数 A 的一类原子叫核素。

符号

A_ZX_N

A: 质量数 (核子数)

Z: 原子序数, 质子数

简写

A_ZX

N: $A-Z$, 中子数

AX

原子核	${}^{16}\text{O}$
	${}^{17}\text{O}$
n	${}^{18}\text{O}$
${}^1\text{H}$	${}^{39}\text{K}$
${}^2\text{H}$	${}^{40}\text{Ca}$
${}^3\text{H}$	${}^{60}\text{Co}$
${}^3\text{He}$	${}^{85}\text{Sr}$
${}^4\text{He}$	${}^{99}\text{Tc}$
${}^6\text{Li}$	${}^{127}\text{I}$
${}^7\text{Li}$	${}^{176}\text{Lu}$
${}^8\text{Be}$	${}^{197}\text{Au}$
${}^{12}\text{C}$	${}^{208}\text{Pb}$
${}^{13}\text{C}$	${}^{232}\text{Th}$
${}^{14}\text{C}$	${}^{235}\text{U}$
${}^{14}\text{N}$	${}^{238}\text{U}$
${}^{15}\text{N}$	${}^{239}\text{Pu}$

原子核的基本性质：核素的分类

只要 Z 相同，元素在周期表中的位置就相同，例如 ^{235}U 和 ^{238}U ，两者相差3 个中子，作为原子它们是同位素，其化学性质几乎完全相同；但核的性质完全不同，是不同的核素，前者是核燃料，后者是不能作为核燃料

核素的分类：

迄今为止发现的2000多个核素中，有300多个天然核素(280多个稳定核素，60多个放射性核素)，其余1600多个是自1934年以来人工合成的放射性核素。

(1)同位素：具有相同 Z ，不同 N ，例如 ^{235}U 和 ^{238}U

(2)同中子异荷素：具有相同 N ，不同 Z ，例如 $^{12}_{6}\text{C}_6$ $^{13}_{7}\text{N}_6$

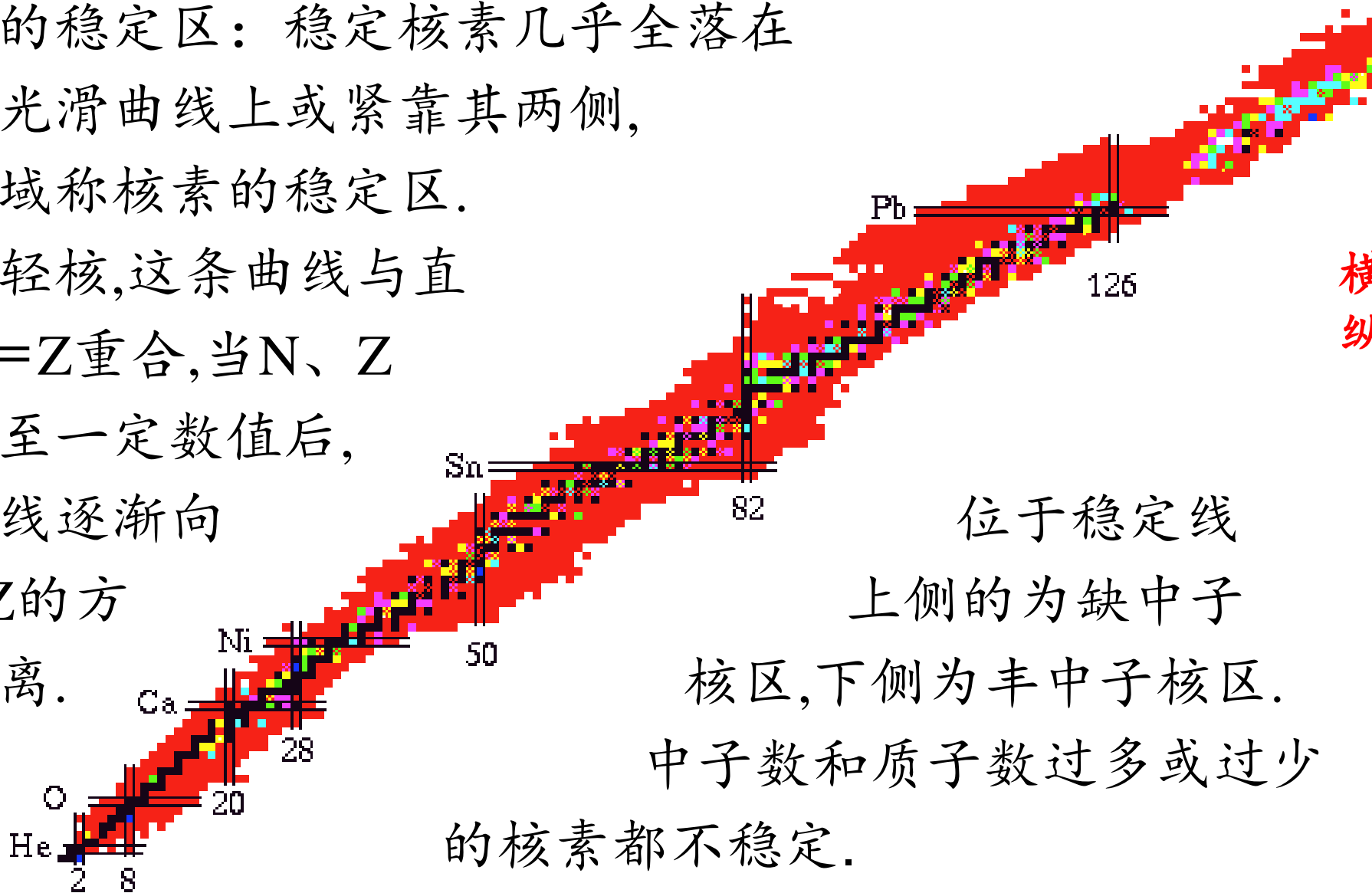
(3)同量异位素：具有相同 A ，不同 Z ，例如 $^{40}_{18}\text{Ar}$ $^{40}_{19}\text{K}$

(4)同质异能素：具有相同的 N 和 Z ，但内部状态不同的核素

例如： ^{137}Ba 有一个高出原子核基态 0.66 MeV的、平均寿命3.8min的同质异能素 $^{137\text{m}}\text{Ba}$

原子核的基本性质：核素图

核素的稳定区：稳定核素几乎全落在一条光滑曲线上或紧靠其两侧，此区域称核素的稳定区。对于轻核，这条曲线与直线 $N=Z$ 重合，当 N 、 Z 增大至一定数值后，稳定线逐渐向 $N>Z$ 的方向偏离。



横坐标： N
纵坐标： Z

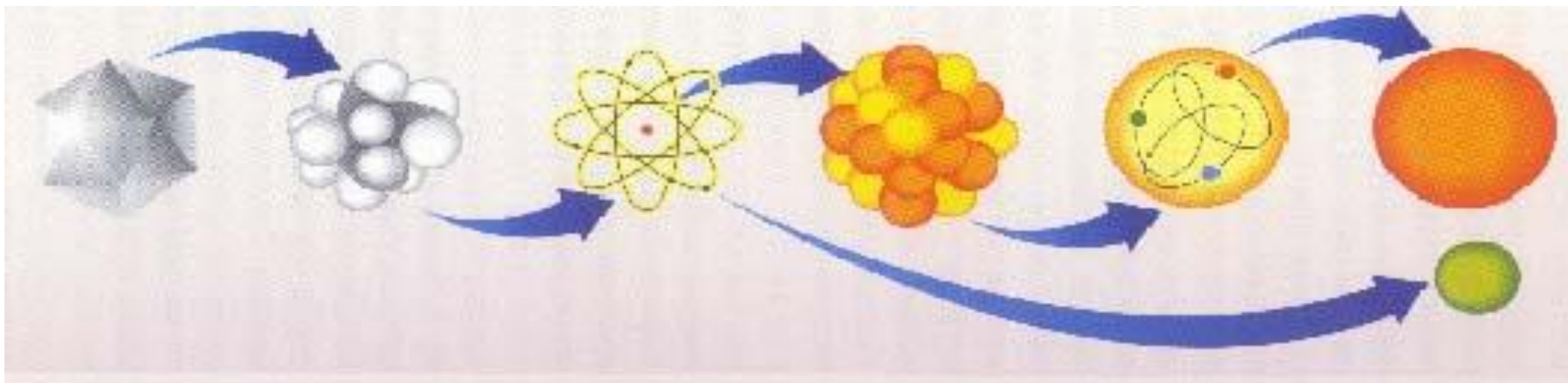
位于稳定线上侧的为缺中子核区，下侧为丰中子核区。中子数和质子数过多或过少的核素都不稳定。

原子核的基本性质：核素



近代物理所依托兰州重离子加速器首次合成25种新核素，特别是两种超重新核素，实现了我国新核素合成零的突破，并开始了超重新元素探索研究的征程

原子核的基本性质：核的大小



- 分子： 10^{-9} m 原子： 10^{-10} m 原子核： 10^{-14} m
- 核的线度只有原子的万分之一,但质量却占原子质量的99%以上.



质子和中子构成的原子核 10^{-14} m

原子核的基本性质：核的质量

中子的质量： $m_n = 1.008665u$

质子的质量： $m_p = 1.007227u$

u 为原子质量单位

同位素 ^{12}C 原子质量的1/12

$$1u = \frac{12}{6.022 \times 10^{23}} \times \frac{1}{12} g = 1.66 \times 10^{-27} kg$$

$$m_p + m_n = 2.015942u$$

氘核的质量： $m_D = 2.013552u$

差值： $m_p + m_n - m_D = 0.002390u = 2.225 \text{ MeV} / c^2$ **结合能**

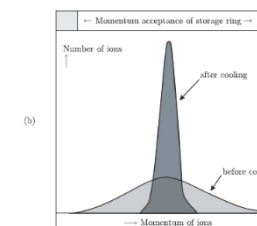
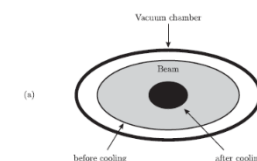
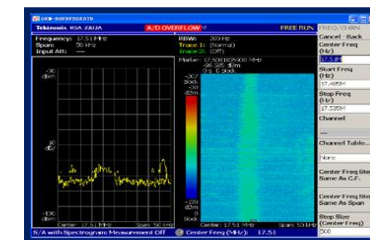
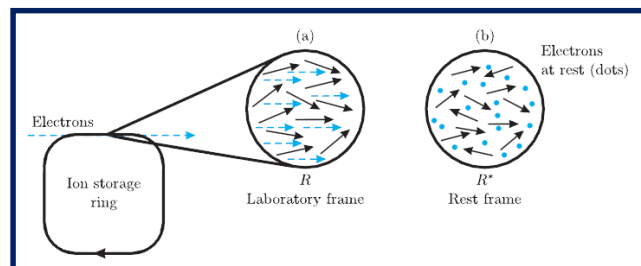
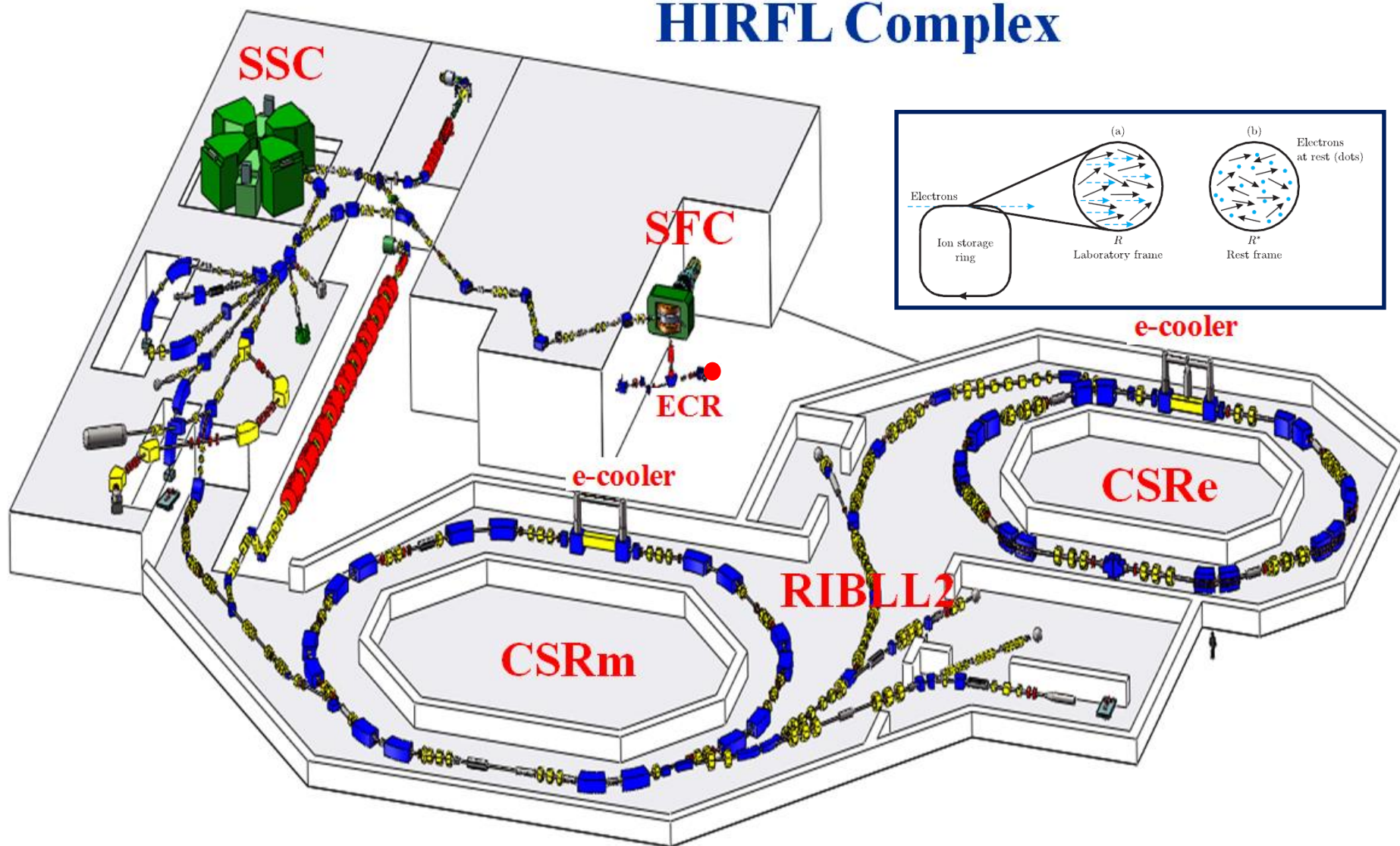


原子核的质量 = Z 个质子质量 + N 个中子质量 - 结合能

用质谱仪测量离子的质量 → 推测原子核的质量

原子核质量测量：重离子冷却储存环

HIRFL Complex



原子核的基本性质：核的密度

原子核的大小：

核的半径有一个经验公式：

$$R = r_0 A^{1/3}$$

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

原子核的密度近似为常数：

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{A / N_0}{4/3\pi R^3} = \frac{3}{4\pi r_0^3 N_0} \approx 2 \times 10^{17} \text{ kg/m}^3$$

铁的密度 $7.9 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$

1mm³不到的一粒米大小的原子核，其质量竟达20万吨！

可见核是质量高度集中的地方。

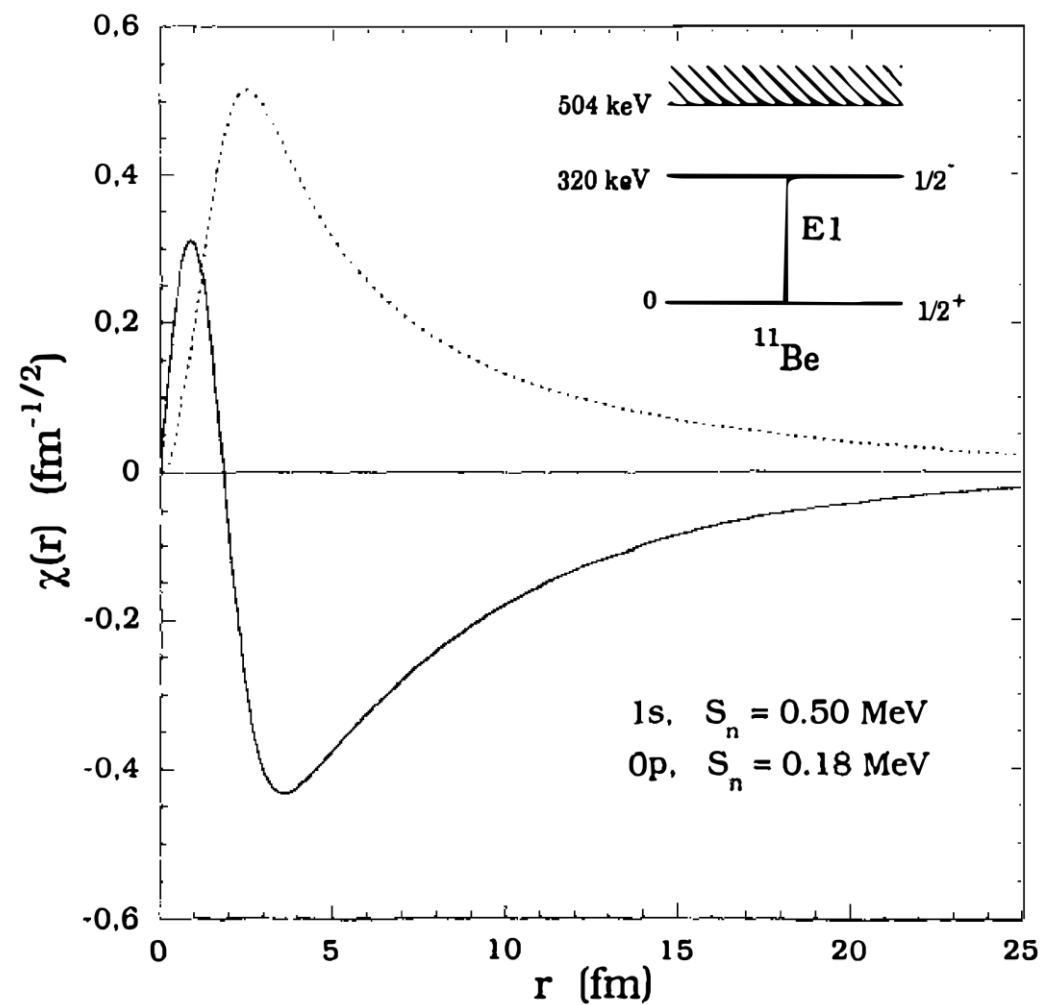
原子核的基本性质：核的密度

中子星：

当恒星演化到末期，经由引力坍塌发生超新星爆炸后，就有可能形成中子星。中子星形成的原因就在于恒星遭受剧烈的压缩使其组成物质中的电子并入质子，进而使质子转化成中子。这样，整个星球基本上都是由中子组成。中子星的密度在 8×10^{16} 至 $2 \times 10^{18} \text{kg/cm}^3$ 之间，与原子核的密度相当。

原子核的基本性质：核的密度

晕核：



$n+^{10}\text{Be}$

Figure 1 The levels scheme of ^{11}Be (inset) and the wavefunction $\chi(r) = rR(r)$ for the two bound states $1s$ and $0p$ (dashed line), which have rms radii of 6.0 and 5.7 fm, respectively. The core radius is 2.5 fm.

原子核的自旋和磁矩

泡利电子自旋假设提出(1924年)之前, 为解释原子光谱的超精细结构, 就提出了核自旋的假设。但只有在1932年查德威克发现中子以后, 人们才理解核自旋的起源。

- 每个核子与电子一样也具有内禀的角动量, 即自旋, 质子与中子的自旋均为 $1/2$ 。
- 核子在原子核内运动也有相应的轨道角动量。

核子的自旋和各种复杂相对运动的角动量总和就是核的自旋

核的自旋是核固有的, 与核的外部运动无关

原子核的自旋和磁矩

原子核基态的自旋规律

实验发现：

所有的偶偶核(中子数、质子数均为偶数)的自旋都为零；

所有的奇偶核(中子数、质子数有一个为奇数)的自旋是 \hbar 的半整数倍；

所有的奇奇核(中子数、质子数均为奇数)的自旋都为 \hbar 的整数倍。

核的自旋角动量

$$\begin{cases} L = \sqrt{I(I+1)}\hbar \\ L_z = m_I \hbar \end{cases}$$

原子核基态的总角动量 I

核的自旋量子数 I 为整数和半整数

磁量子数 $m_I = I, I-1, \dots, -I+1, -I$

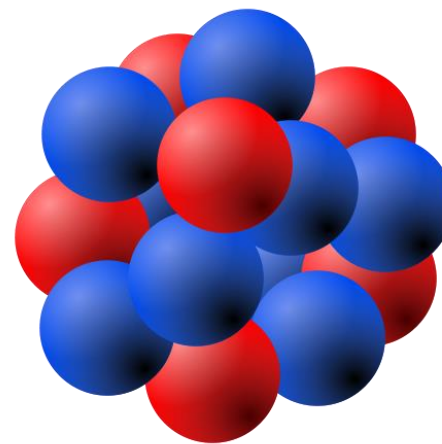
原子核的自旋和磁矩

$$\mu_I = g_I \mu_N \mathbf{I} / \hbar$$

核磁子（核的玻尔磁子）

$$\mu_N = \frac{e\hbar}{2m_p} = 3.152 \times 10^{-8} \text{ eV/T}$$

$$\frac{\mu_B}{\mu_N} = \frac{m_p}{m_e} = 1836$$



m_p 为质子的质量， g_I 为原子核的 g 因子。

$$z \text{ 分量 } \mu_{I_z} = g_I \mu_N m_I, \quad m_I = -I, \dots, +I$$

核磁矩通常用它在给定 z 方向的投影的最大值来量度

$$\mu_I = g_I \mu_N I$$

原子核的自旋和磁矩

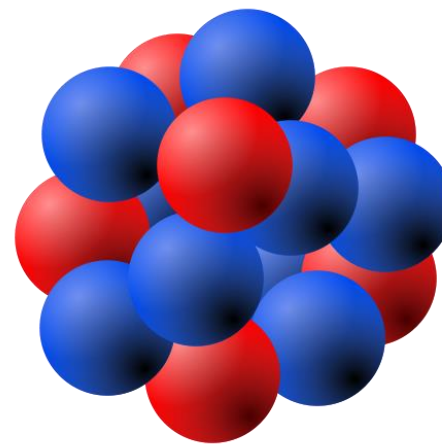
质子的磁矩

$$\vec{\mu}_p = g_p \frac{\mu_N}{\hbar} \vec{s}$$

理论预言 $g_p = 2 \rightarrow \mu_p = \mu_N$

Stern 实验测量 $g_p = 5.586$

精确实验测量值 $\mu_p = 2.792847386(63)\mu_N$

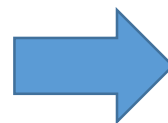


中子的磁矩

中子不带电，磁矩应该为零。

实验测量 $\mu_n = -1.91304275(45)\mu_N$

$$g_n = -3.8260854$$



中子存在内部电荷结构

原子核的电四极矩

从电磁理论知，当带电体的电荷分布呈球形对称时，在体外距球心 r 处的电势为：

$$\varphi = k \frac{q}{r} = \frac{k}{r} \int \rho dV$$

非球形对称分布带电体产生的电势一般表示为

$$\varphi = k \left[\frac{1}{r} \int \rho dV + \frac{1}{r^2} \int \rho z dV + \frac{1}{r^3} \int \frac{1}{2} \rho (3z^2 - r^2) dV + \dots \right]$$

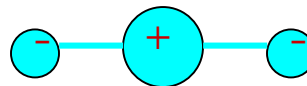
单电荷
的电势 $a_1 r^{-1}$



电偶极子
的电势 $a_2 r^{-2}$



电四极矩
的电势 $a_3 r^{-3}$



原子核的电四极矩

原子核是椭球型的，其电荷是轴对称分布的，电偶极矩恒为零，
但存在电四极矩，大小为：

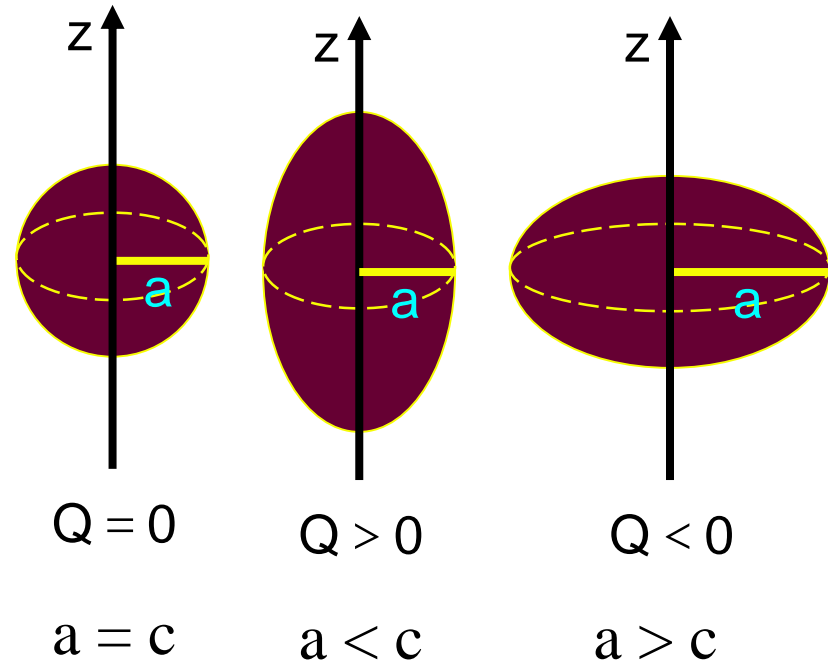
$$Q = \frac{1}{e} \int \rho (3z'^2 - r'^2) dV' = \frac{2}{5} Z (c^2 - a^2)$$

其中对称轴方向半轴为 c ，垂直对称轴的两个半轴为 a

$c > a$ 时， $Q > 0$ ，长椭球形原子核，具有正的电四极矩；

$c < a$ 时， $Q < 0$ ，偏椭球形原子核，具有负的电四极矩；

$c = a$ 时， $Q = 0$ ，球形原子核的电四极矩为零。



原子核的电四极矩

- (1) 原子核的电四极矩值 Q 一般是很小的;
- (2) 自旋 $I = 0$ 或 $1/2$ 的核的 $Q = 0$;
- (3) 仅对一些稀土原子核和超铀原子核才有显著大的 Q 值, 但形变也不大;

原子核	自旋 (\hbar)	磁矩 (μ_N)	电四极矩 (10^{-28}m^2)	原子质量 (u)
n	1/2	-1.91304	0	1.008665
^1H	1/2	2.79285	0	1.007825
^2H	1	0.85744	0.00286	2.014102
^3H	1/2	2.97896	0	3.016049
^3He	1/2	-2.12762	0	3.016029
^4He	0	0	0	4.002603
^6Li	1	0.82205	-0.0008	6.015122
^7Li	3/2	3.25644	-0.041	7.016004
^8Be	0	0	0	8.005305
^{12}C	0	0	0	12.000000
^{13}C	1/2	0.7024	0	13.00335
^{14}C	0	0	0	14.00324
^{14}N	1	0.40376	0.0200	14.00307
^{15}N	1/2	-0.28319	0	15.00011
^{16}O	0	0	0	15.99492
^{17}O	5/2	-1.8938	-0.026	16.99913
^{18}O	0	0	0	17.99916
^{39}K	3/2	0.39146	0.49	38.96371
^{40}Ca	0	0	0	39.96259
^{60}Co	5	3.799	0.44	59.93382

原子核的字称

- ✓ 质子和中子的内禀宇称为偶宇称
- ✓ 原子核的宇称由轨道波函数的宇称决定
- ✓ 原子核的波函数 Ψ 可表述为 $\Psi=\Psi_1\Psi_2\Psi_3\dots$

$$P = (-1)^{\sum_i l_i}$$

$${}^{17}_8\text{O}_9 : \frac{5}{2}^{+} \qquad {}^{229}_{83}\text{Bi}_{126} : \frac{9}{2}^{-}$$

偶偶核的宇称为正！

- 宇称为相乘量子数
- 宇称并非为一般守恒量，
弱作用中宇称破缺



李政道（左）和杨振宁（右）

1957年诺贝尔物理奖

第二节 核力和壳层模型

核力

核力：使核子紧密结合形成高密度核的力

核力强度约为库仑力的100倍.

核力的特征

1) 核力是具有饱和性的短程力

核力的两个重要特性：

短程性
饱和性

- ✓ 核力是一种短程强相互作用力, 只作用于相邻的核子.
- ✓ 核的结合能近似与 A 成正比, 比结合能 B/A 近似为常数, 表明核力是具有明显饱和性的交换力. 核的结合能正比于核的体积, 这与液体相像.

核力

2) 核力是与电荷无关的强相互作用

海森堡于1932年假设:

- a) 电荷对称性: 质子间、中子间的核力相等;
- b) 核力与电荷无关: 质子和中子间的核力相等.

此假设于1937年为实验初步证明, 1946-1955年间为更精确的实验确证

3_1H 由一个质子, 两个中子组成, 原子核的总结合能为 $E({}^3_1H) = 8.48MeV$

3_2He 由2个质子, 一个中子组成, 原子核的总结合能为 $E({}^3_2He) = 7.72MeV$

但它们中间有静电斥能0.72MeV; 若不存在静电斥能, 其结合能为

$(7.72 + 0.72)MeV = 8.44MeV$ 与3H结合能8.48MeV很接近

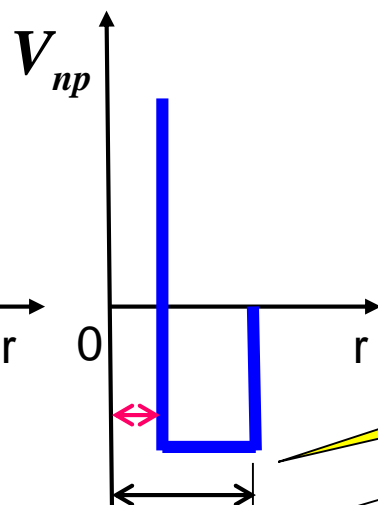
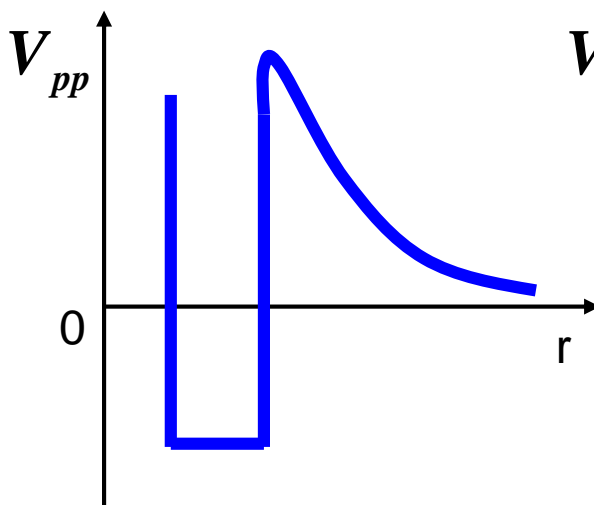
这说明核力与电荷无关

核力

3)核力在极短程表现为斥力

核子不能无限靠近，排斥心的半径 $0.5 \times 10^{-15} \text{ m}$

- $< 0.5 \text{ fm}$: 强斥力;
- $0.5 \text{ fm} - 2 \text{ fm}$: 强引力
- $> 2 \text{ fm}$: 急剧减小至消失



因无法制备纯中子靶而无法进行n-n散射实验,但间接实验证明有相似的大致规律)。

核子间距 $< 2 \text{ fm}$ 范围内, 还有很多问题有待解决。

核力表现为“强引力”

核力消失

核力表现为“斥力”

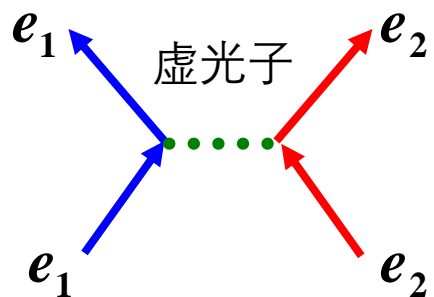
4)核力与自旋有关

两核子自旋平行时总自旋为1,此时作用力较强.
(核子自旋平行和自旋相反时散射截面也不同)

核力的介子理论

核力的介子理论

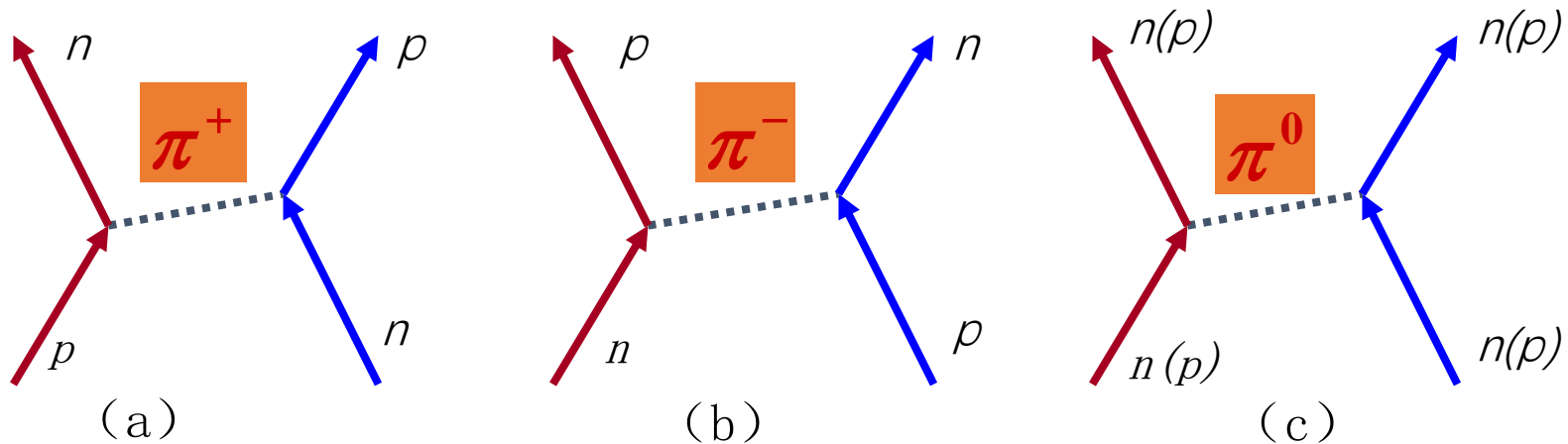
(汤川秀树于1935年提出的假设)



电磁相互作用的传播子为光子

粒子间的相互作用不是超距的，需要通过交换传播子完成

类比电磁相互作用，提出核力的介子场论，核子间的相互作用通过交换虚介子传播



1949年诺贝尔物理奖

核力的介子理论

π 介子的发现

汤川由力程预言介子的质量

假设虚介子以光速运动，传播 Δx 距离被吸收，用时 $\Delta t = \Delta x/c$

由不确定关系：

$$\Delta E \approx \frac{h}{2\pi\Delta t} = \frac{hc}{2\pi\Delta x} = mc^2 \approx 130\text{MeV} \quad m \text{ 为介子的质量}$$

- 1936年，安德森从宇宙线中找到质量接近的疑似 π 介子粒子，穿透力强，相互作用弱， μ 子，属于轻子，参与电磁相互作用
- 1947年，鲍威尔在宇宙线中找到了真正的 π 介子： π^+ ， π^- ， π^0

140 MeV 135 MeV

核模型

问题：原子核内各组分的运动规律如何？

在原子内，相互作用力是库仑力，电子是运动的主要承担者，电子与核之间的相互作用对运动的影响是决定性的，相对来说问题容易解决。

核内核子数较多，不可能象两体问题那样求解；

核子数不是很多，不能用统计方法；

核子间没有一个中心，无法用有效的近似方法。

到目前为止，无法从第一性原理出发来解决核内的核子运动问题。自1932年以来，人们提出各种核的结构模型，对核子的运动作近似的唯象的描述，但某个模型往往只能反映某一方面的特性。

核模型-壳层模型

核的壳层模型的起源

- 元素周期表中,每一惰性气体的出现意味着某特定壳层的闭合。 $Z=2,10,18,36,54 \dots$ 时元素最稳定。这些数(幻数)在原子的壳层结构中得到圆满的解释。
- 1930年后,有关原子核的实验事实不断显示,自然界存在着一系列**幻数核**,即当质子数 Z 或中子数 N 等于下列数之一时,原子核特别稳定: **2,8,20,28,50,82,126**。

类比原子的壳层结构,人们猜想核是否也表现为壳层结构

核模型-壳层模型

核的壳层模型的主要困难

- 1) 缺乏物理基础。原子内有一个相对固定中心即原子核,电子在以核为中心的势场中独立运动。由此出发,通过求解薛定谔方程并考虑到泡利原理后即得到壳层结构。但这一物理思想在核内却缺少根据
- 2) 有人曾假定核子在某些势阱中运动,并求解薛定谔方程,但却得不到与实验相符的幻数

核模型-壳层模型

1. 费米气体模型(最早的独立粒子模型)

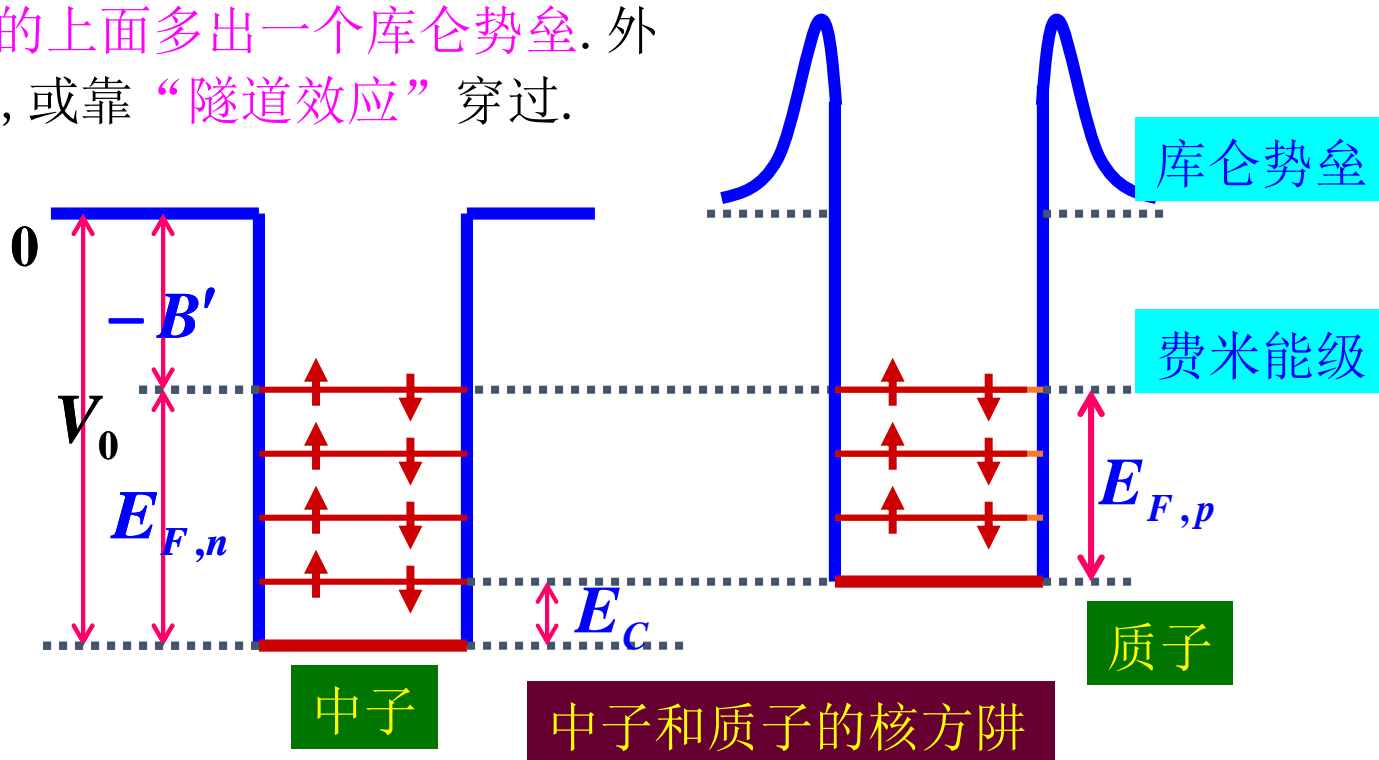
视核子为类似气体分子的费米子, 则核可视为费米气体. 由于质子与中子有电荷的差异, 它们的核势阱不相同.

图中 B' 为实验测得的结合能, 费米能级为基态时核子最高能级的位置).

质子阱的底比中子阱高出 E_c , 质子阱的上面多出一个库仑势垒. 外来质子要穿过这个势垒需要较高的能量, 或靠“隧道效应”穿过.

势阱内有一定的分立能级.

每个能级 上可有两个核子, 自旋方向一上一下.



核模型-壳层模型

此前知道, 质量为m的粒子在宽度为d的势阱中的能量为:

$$E_n = \frac{n^2 h^2}{8md^2}, n = 1, 2, 3 \dots$$

将上式推广到三维, 则边长为d的正方体势阱的能量为:

$$E_n = \frac{h^2}{8md^2} (n_1^2 + n_2^2 + n_3^2)$$

$$n_1、n_2、n_3 = 1, 2, 3 \dots$$

与一维相比较, 其简并度提高了.

三维势阱只有一个基态: (1, 1, 1); 但第一激发态(能量相同)却有三个: (2, 1, 1)、(1, 2, 1)、(1, 1, 2). 随着能量的增大, 简并度也随之增高.

核模型-壳层模型

核的壳层模型

- 幻数的存在使人们猜想，原子核内也可能存在着与原子类似的壳层结构，核内的质子和中子按泡利不相容原理和能量最低原理分别填充自己的壳层，当质子数和中子数均为幻数时正好填满一个壳层。
- 假设每一个核子处在其余A-1个核子的联合作用所造成的平均球对称中心势场中运动（短程势阱）

$$V(r) = \begin{cases} -V_0 & r < R \\ 0 & r \geq R \end{cases}$$

把上述势函数代入薛定谔方程中，并要求在 $r=R$ 处波函数等于零，就可得到以不同的径向量子数 ν 和角量子数 l 所表示的一系列能量状态。

核模型-壳层模型

核的壳层模型

- 对于核外电子，一般说来能量决定于主量子数 n 和角量子数 l ，而对原子核，核子能量决定于径向量子数 v 和角量子数 l ，且 $v=n-l$ 。
- 对于原子核，角量子数 $l=0,1,2,3,\dots$ 的能态仍然以s、p、d、f、 \dots 等符号表示。具体计算表明，核子能级从低到高的排列顺序是1s,1p,1d,2s,1f,2p,1g, \dots 这里左边的数字代表 v 而不是 n 。
- 然而，仅考虑中心力场最多只能给出2，8，20三个幻数，显然这种中心场近似不能完全表征核内的真实情况。
- 在此基础上，1949年迈耶尔(M Myer)和简森(A Jensen)加进了核子的自旋轨道耦合项，并引入总角动量量子数 $j=l\pm 1/2(l\neq 0)$ 或 $j=1/2(l=0)$ ，从而由同一 l 决定的能级将分裂成两个。

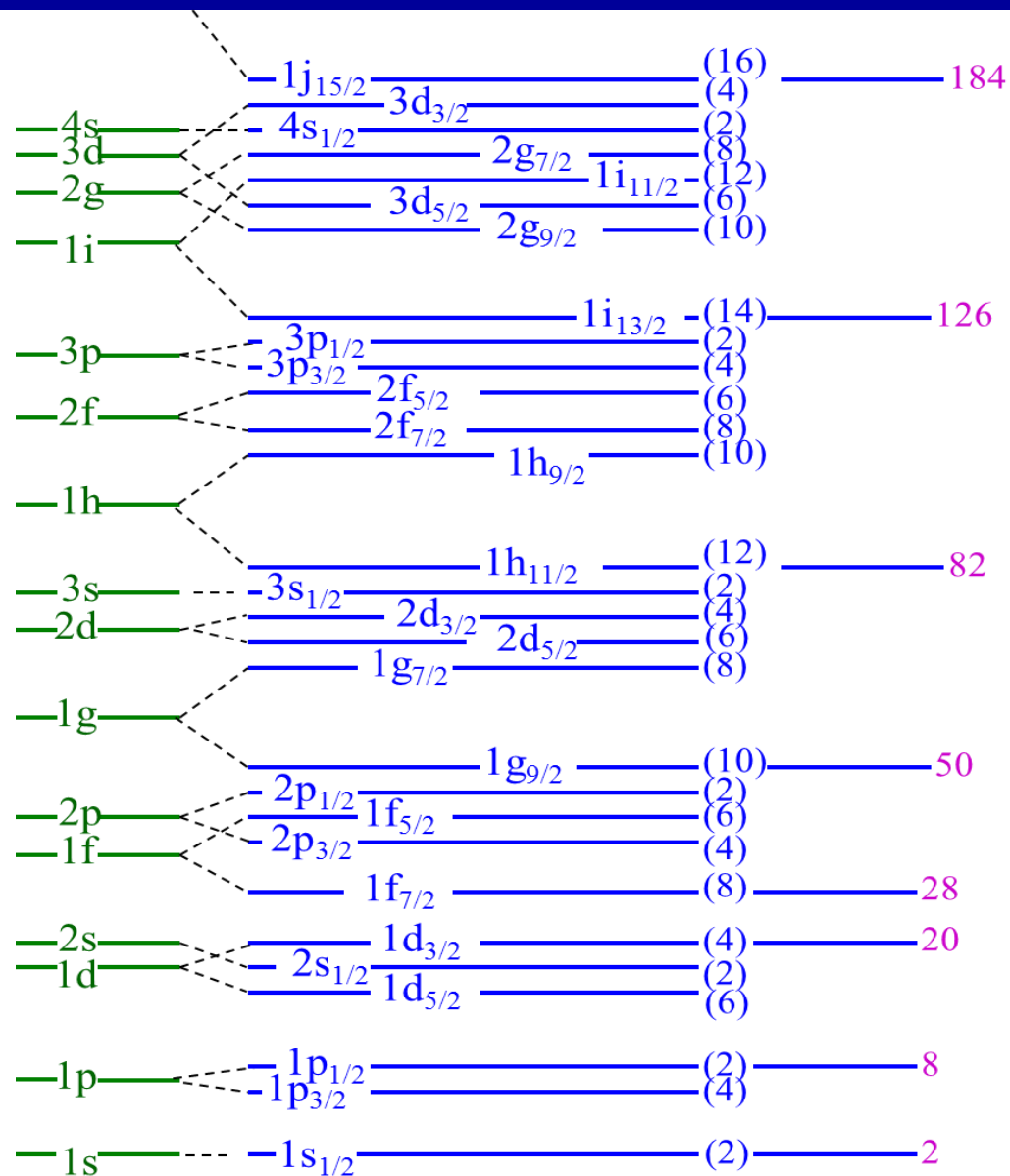
核模型-壳层模型

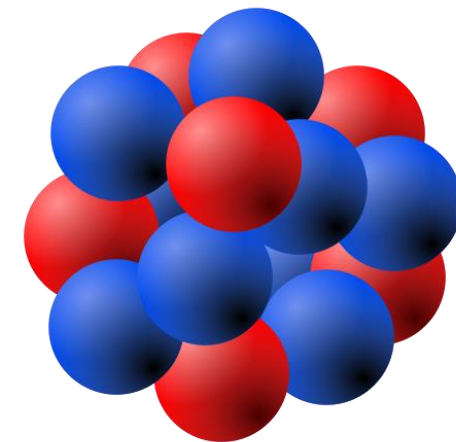
核的壳层模型

- 核子的自旋轨道耦合非常强，它所引起的能级分裂间距较大，以致可能改变由中心力场得到的能级顺序。
- 根据泡利不相容原理，对于给定的(v 、 l 、 j)，能级的支壳层最多可填充 $2j+1$ 个核子。另外，根据能量最低原理，核子由低能级向高能级逐步填充，从而形成原子核的壳层结构，而满壳层的同类核子数为2，8，20，28，50，82，126等，这正好是幻数。可见原子核的壳层模型完满地解释了幻数的形成。
- 迈耶尔和简森获得了1963年诺贝尔物理学奖。

核模型-壳层模型

壳层模型在解释幻数和原子核基态的许多性质(如自旋、磁矩、宇称等)方面比较成功,但该模型视核子为独立粒子在一个平均场中运动,这就大大地简化了,实际情况要比这复杂得多





第三节 原子核衰变

原子核的衰变

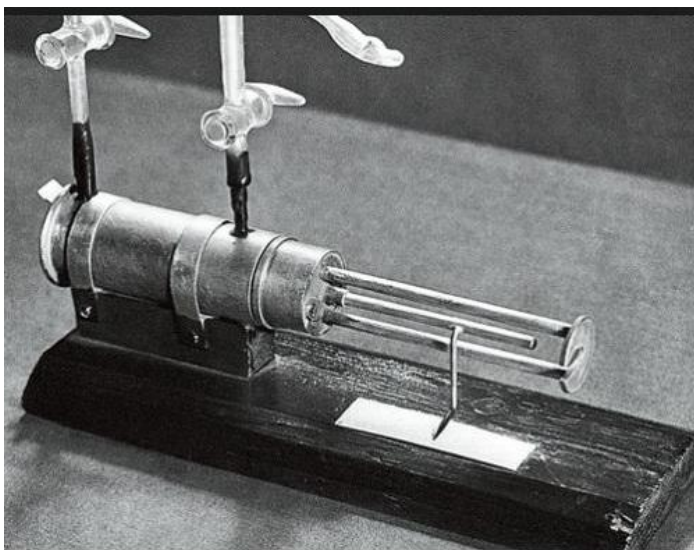
在迄今为止发现的2000多种核素中,绝大多数都不稳定,会自发地蜕变为另一种核素,同时放出各种射线.这种现象称为放射性衰变.

放射性衰变

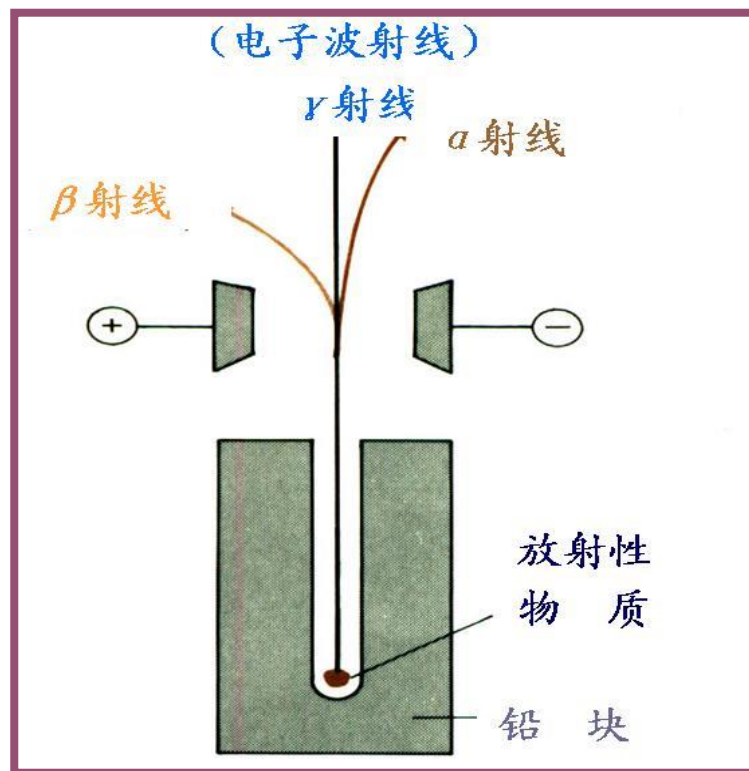
提供原子核内部的信息

用于为人类造福

放射性衰变过程中,原来的核素(母体)或者变为另一种核素(子体),或者进入另一种能量状态。

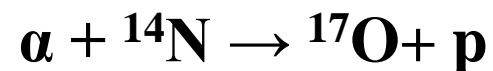


第一次实现原子核人工嬗变的装置

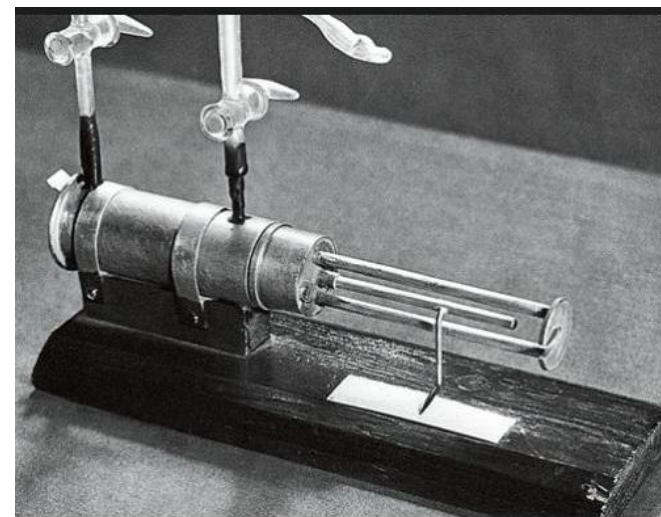


原子核的衰变—人工嬗变

- 1919年，卢瑟福做了用 α 粒子轰击氮原子核的实验，发现了质子



- 1924年，布莱克特用云室照片首次成功地验证了人工轻核转变，即氮-14核俘获 α 粒子变为氧-17
- 原子核的人工嬗变为人造新元素奠定了基础
- 自然界中最重的元素是放射性元素铀（92），92号以后的化学元素都是通过人工嬗变产生的



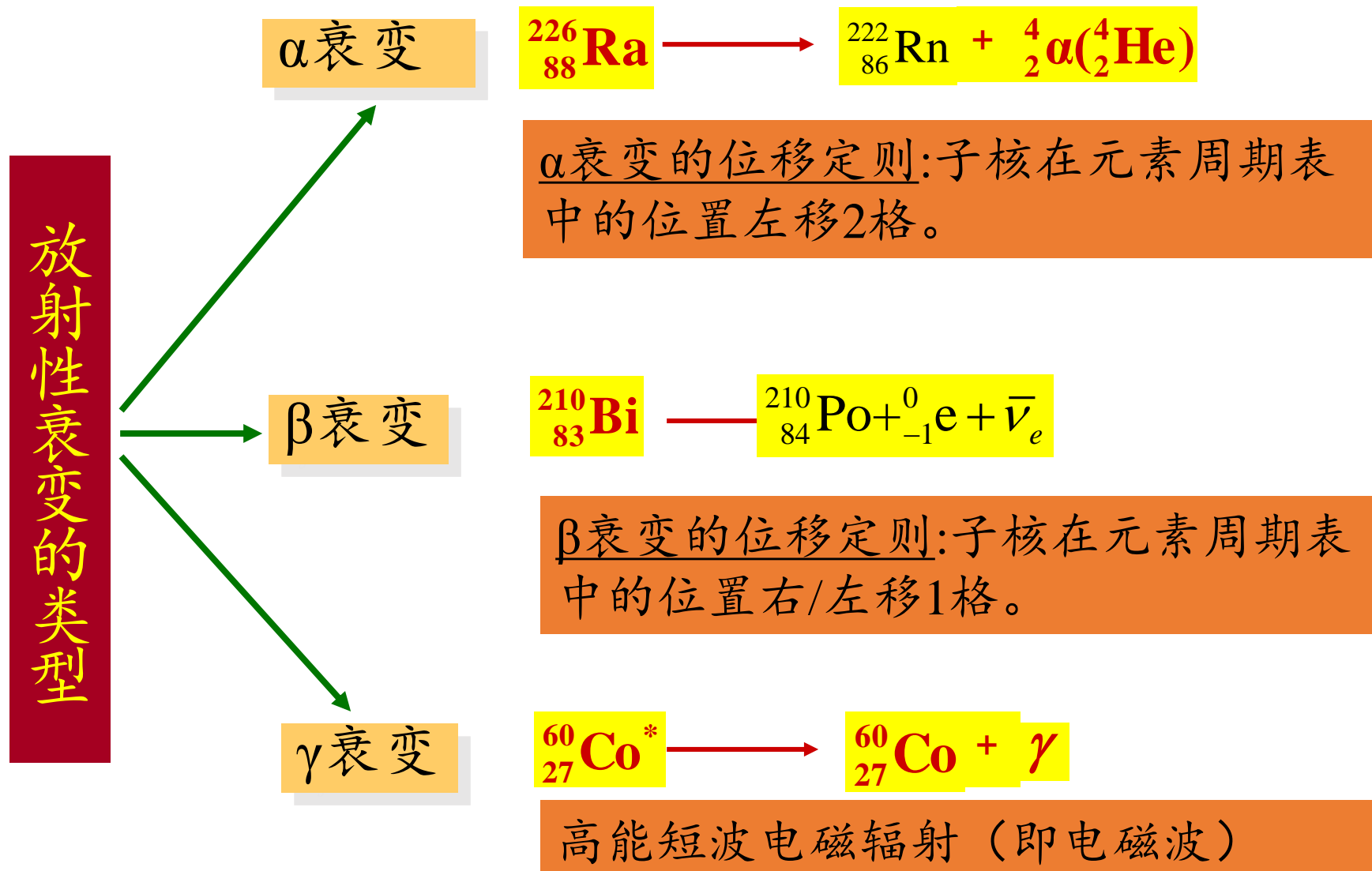
第一次实现原子核人工嬗变的装置



1948年诺贝尔
物理奖

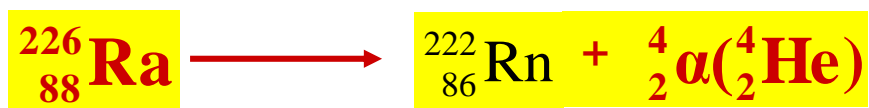
Patrick Blackett (1897-1974)

原子核的衰变-衰变类型



1、原子核的衰变- α 衰变

$${}^A_Z X = {}^{A-4}_{Z-2} Y + \alpha$$



1. α 衰变的条件

设衰变前母核X静止, 据能量守恒有: $m_X c^2 = m_Y c^2 + m_\alpha c^2 + E_\alpha + E_Y$

衰变能

$$E_0 \stackrel{\text{def}}{=} E_\alpha + E_Y$$

则

$$E_0 = [m_X - (m_Y + m_\alpha)]c^2$$

一般用原子质量M表示为: $M_X c^2 = M_Y c^2 + M_{He} c^2 + E_0$

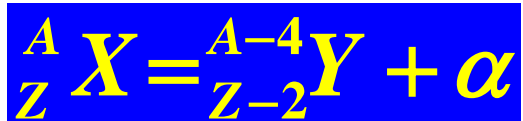
α 衰变的条件

$$E_0 > 0$$

即

$$M_X > M_Y + M_{He}$$

原子核的衰变- α 衰变




$$E_0 \stackrel{def}{=} E_\alpha + E_Y$$

2. α 衰变能 E_0 及核能级图

运用能量守恒 + 动量守恒

设初态粒子 m_X 静止, 故有 $m_Y v_Y = m_\alpha v_\alpha$

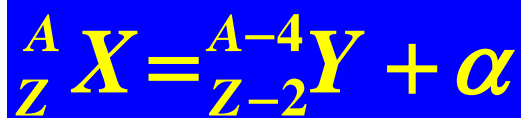
因此子核的反冲能:
$$E_Y = \frac{1}{2} m_Y v_Y^2 = \frac{1}{2} m_\alpha v_\alpha^2 \frac{m_\alpha}{m_Y} = \frac{m_\alpha}{m_Y} E_\alpha$$


$$E_0 = E_\alpha + E_Y = \left(1 + \frac{m_\alpha}{m_Y}\right) E_\alpha \approx \left(1 + \frac{4}{A-4}\right) E_\alpha = \frac{A}{A-4} E_\alpha$$

讨论:

- 衰变能不等于放出粒子的动能
- 只需测出 E_α 就能确定 E_0
- 用核的质量数之比代替核质量之比, 误差甚微

原子核的衰变- α 衰变

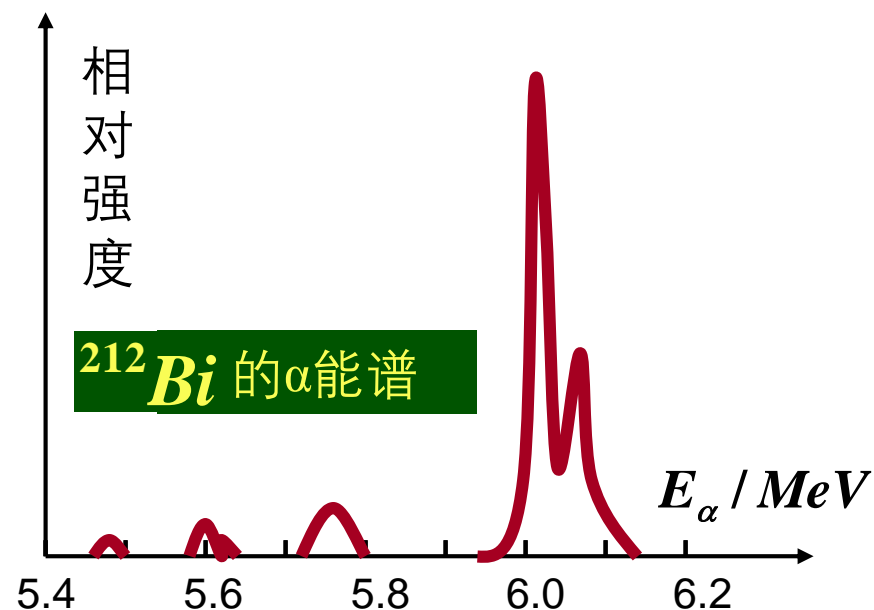


- 事实上,在 α 衰变中,大部分核素放出的 α 粒子往往有好几簇,每一簇粒子有确定的能量.

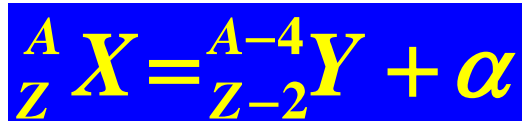


卢瑟福与盖革在实验室观测 α 粒子

- α 粒子能谱具有分立的、不连续的特征。预示着子核有分立的能态.



原子核的衰变- α 衰变

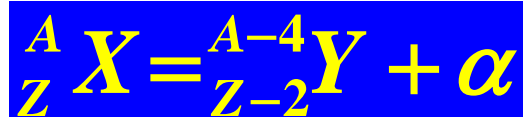


- 目前已知有400多种核素能发生 α 衰变
- 衰变出的 α 粒子能量一般在4-9个MeV
如Ra释放出的 α 粒子能量为4.78MeV和4.60MeV
Po释放出的 α 粒子能量为5.31MeV
- α 粒子为重带电粒子，电离损失很大，在物质中射程很短，在空气中大约能走2-9cm，用一层薄纸就可以挡住

α 粒子对人体的危害？

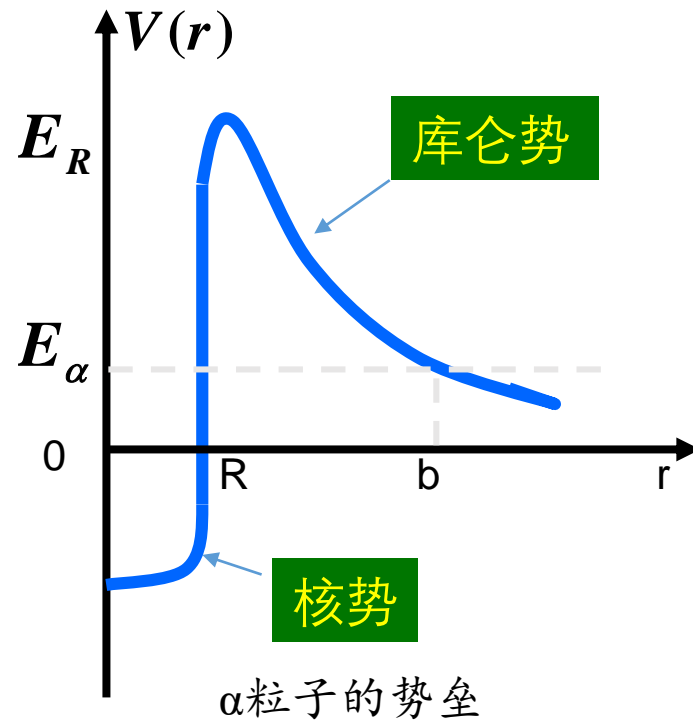
- α 粒子通常被人体外层坏死肌肤完全吸收
- 如果人类吸入或进食具有 α 粒子放射性的物质，譬如吸入了辐射烟雨， α 粒子就能直接破坏内脏细胞
- 穿透能力虽然弱，但电离能力很强，它对生物所造成的危害并不亚于其他辐射
- 世界卫生组织公布的致癌物清单， α 粒子放射在一类致癌物清单中

原子核的衰变- α 衰变



3. α 衰变的机制

- 核力是短程力, 而库仑斥力为长程力. 在多质子的核内, 核力几乎不能“补偿”质子间的相互排斥, 于是发生衰变, 以减少质子数来增加稳定性. 事实上, $Z > 83$ 的核素都不稳定。
- α 衰变产生的粒子来自核内, 核内的 α 粒子受核力吸引(负势能), 在核外, 粒子受到库仑力的排斥. 这样, 在核的表面形成一个势垒.
- 由于微观粒子的波动性, 能量小的 α 粒子也有一定的几率穿过势垒而从核内逸出(隧道效应). 1928年伽莫夫等人指出, α 粒子就是因量子隧道效应穿过势垒跑到核外的. 并证明: α 粒子每秒穿过势垒的几率等于它的衰变常数 λ .



R 约为 Y 与 α 粒子的半径和
 b 为库仑势下降到 E_α 的距离

2、原子核的衰变-β衰变

$${}^A_Z\text{X} = {}^A_{Z+1}\text{Y} + \text{e} + \bar{\nu}_e \quad \text{核电荷改变而核子数不变的衰变}$$

- β衰变的能谱是连续谱,与α粒子的分立截然不同.这使当时科学界面临两个难题

1)原子核是个量子体系,核衰变是不同核能态间的跃迁,释放的能量应该呈量子化.为什么β射线的能谱会是连续的呢?

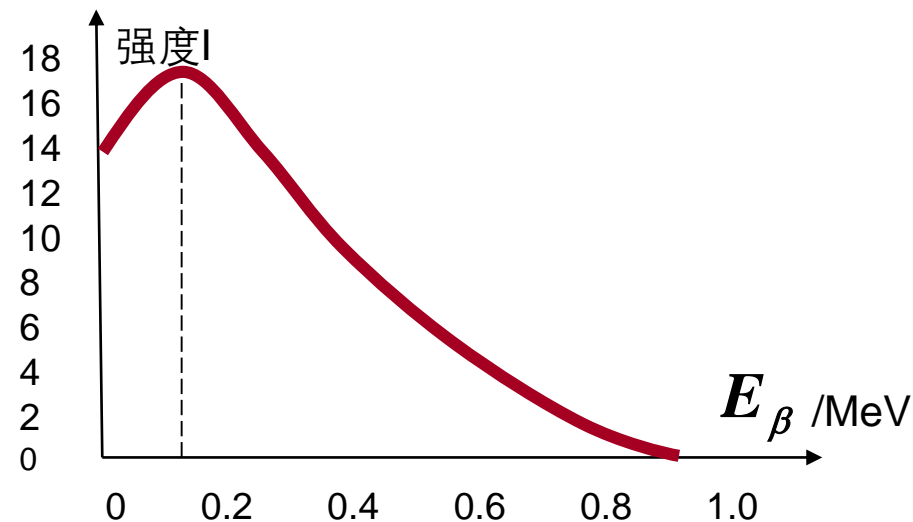
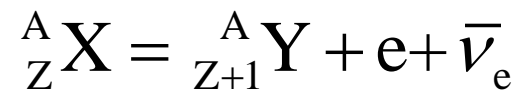
2)不确定关系不允许核内有电子,那么β衰变放出的电子从何而来?

2、原子核的衰变-β衰变

β衰变碰到的难题：连续谱

早期对β能谱的连续性很难理解

- 原子核的能量呈量子化,从这一点看能谱应当是离散的
- β衰变还表现出明显违背能量、动量和角动量守恒律.



${}^{210}_{83}\text{Bi}$ 核的β能谱

原子核的衰变-β衰变

β衰变碰到的难题：连续谱

泡利于1930年解决了第一个难题



中微子
假说

泡利：“只有假定在衰变过程中,伴随着每一个电子有一个轻的中性粒子(“中微子”)一起被发射出来,使中微子和电子的能量之和为常数,才能解释连续β谱。”换言之,衰变能应在电子、中微子和子核间进行分配,即:

由于子核质量远大于电子质量,故 $E_Y \approx 0$ $E_0 = E_e + E_\nu + E_Y$

当 $\begin{cases} E_\nu \approx E_0 \text{ 时, } E_e \approx 0 \\ E_\nu \approx 0 \text{ 时, } E_e \approx E_0 = E_{\beta m} \end{cases}$ (即电子能量取极大值).

因此,电子可取($0 \rightarrow E_{\beta m}$)间的任何能量值,即为连续谱

为使β衰变前后电荷、角动量均守恒,中微子的电量必为0,自旋必为 $\frac{1}{2}\hbar$

原子核的衰变- β 衰变

泡利的中微子假设引起不少怀疑, 但费米不仅接受且用于解决了第二个难题.

β 衰变碰到的难题: 电子从何而来

费米解决了第二个难题

费米认为电子和中微子是在衰变中产生的:

- β 衰变的本质是核内的中子和质子相互转换, 而质子和中子可视为核子的两个不同状态, 中子与质子的转变相当于量子态间的跃迁, 在跃迁过程中放出电子和中微子。
- 它们原本不存在核内, 好像光子是原子不同状态间的跃迁的产物一样. 区别在于电磁作用导致产生光子, 弱相互作用导致产生电子和中微子
- 1934年, 费米提出的弱相互作用的衰变理论, 并经受了长时期的考验。

原子核的衰变-β衰变

中微子假说解决了β衰变的两大难题,但人们希望从实验上证实中微子的存在.中微子无电荷,静止质量极小,与物质的相互作用极其微弱,易穿过物质,因此很难捕捉到它,1930年预言它的存在,1956年才通过实验探测到它.

柯恩、莱尼斯的中微子实验(1995年诺贝尔物理奖)简介

大量来自反应堆的反中微子流投射到含镅化合物溶液的水槽中,反中微子被水中的质子俘获,放出一个正电子和一个中子

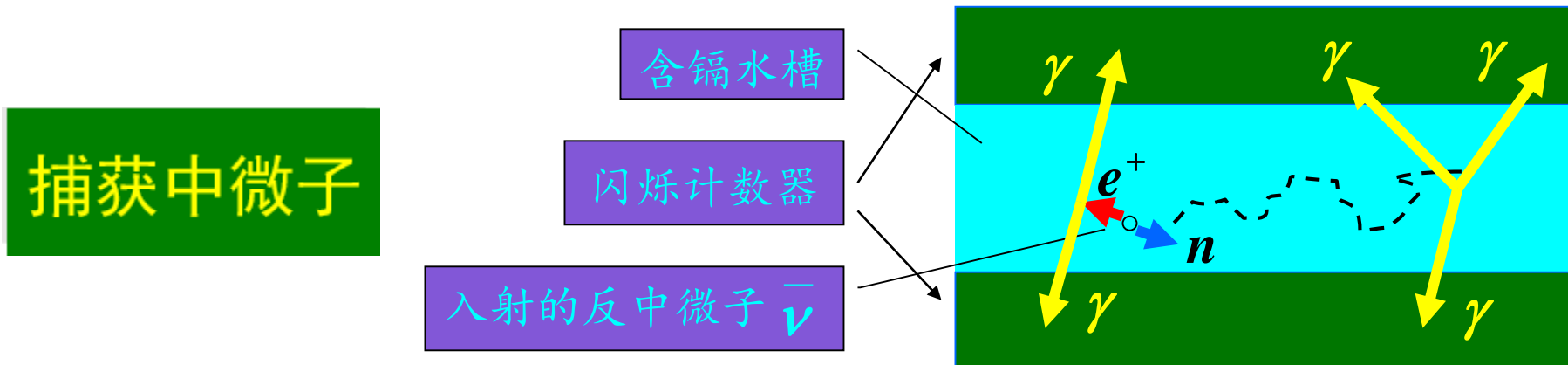


正电子与电子湮灭而产生一对γ光子.新产生的中子经几微秒的迁移后被镅核俘获,而受激镅核放出3至4个γ光子回到基态.记录下来的反应约每小时3次.

1928年狄拉克由相对论量子力学预言正电子的存在.

1932年安德逊在宇宙线中观察到正电子.

正电子与电子相遇会湮灭而产生一对0.51MeV的γ光子



原子核的衰变-β衰变

关于中微子的质量

标准模型理论认为中微子的静质量为0. 后来的研究表明 $m_\nu \neq 0$

中微子振荡：中微子味的转化

2015年“诺贝尔物理学奖”获奖名单，来自日本的梶田隆章（Takaaki Kajita）与加拿大的阿瑟·麦克唐纳（Arthur B. McDonald）获奖，以表彰他们发现中微子振荡现象，该发现表明中微子拥有质量。



原子核的衰变-β衰变

关于中微子的质量测量

- 观测β射线能谱接近 E_0 处的形状，不同的 m_ν 值对应此处能谱的形状不同
实验测量和数据处理比较困难
- 通过中微子振荡实验，观测两种中微子的转变几率
只能给出不同中微子的质量差

关于中微子质量的测量目前并无确定结果

$$m_{\nu e} > m_{\nu \mu} > m_{\nu \tau} ?$$

$$m_{\nu e} < m_{\nu \mu} < m_{\nu \tau} ?$$

原子核的衰变-β衰变的类型

β衰变的本质为中子和质子间的相互转化

根据质子和中子的转化方式不同，β衰变可分为3类

β⁻衰变: ${}_Z^AX = {}_{Z+1}^AY + e^- + \bar{\nu}_e$

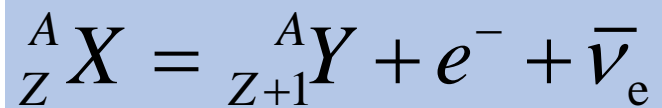
β⁺衰变: ${}_Z^AX = {}_{Z-1}^AY + e^+ + \nu_e$

电子俘获 (EC): ${}_Z^AX + e^- \rightarrow {}_{Z-1}^AY + \bar{\nu}_e$

另外还有一些稀有β衰变

原子核的衰变-β衰变的类型

1. β⁻衰变:



衰变能:

$$E_0 = [m_Z - (m_{Z+1}) - m_e]c^2 = (M_Z - M_{Z+1})c^2$$

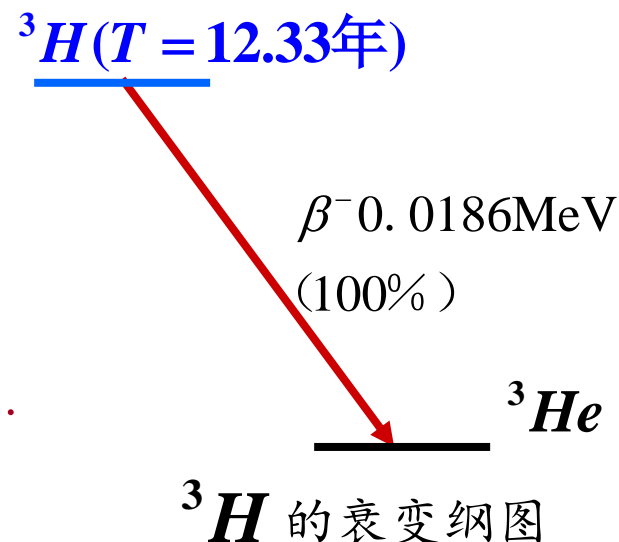
衰变纲图

产生 β^- 衰变的条件: $M_X(Z, A) > M_Y(Z + 1, A)$

例:



- β衰变即以从左上方方向右下方画的箭头表示.
- 图中β粒子的最大动能为0.0186MeV,此即为衰变能.
- 100%表示经衰变全部衰变到的基态.



原子核的衰变-β衰变的类型

2. β^+ 衰变: ${}_Z^AX = {}_{Z-1}^AY + e^+ + \nu_e$

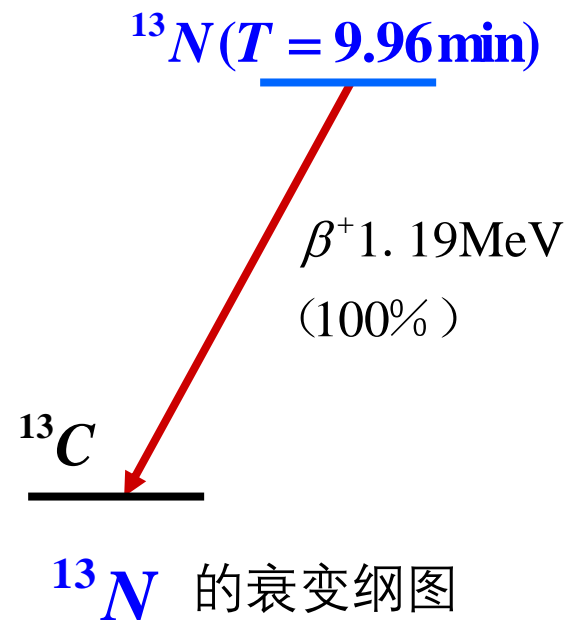
衰变能:

$$E_0 = (m_Z - m_{Z-1} - m_e)c^2 = (M_Z - M_{Z-1} - 2m_e)c^2$$

近似地等于放出的正电子的最大动能

产生 β^+ 衰变的条件:

$$M_X(Z, A) > M_Y(Z-1, A) + 2m_e$$



原子核的衰变-β衰变的类型

3.电子俘获 (EC) : ${}_Z^AX + e^- \rightarrow {}_{Z-1}^AY + \bar{\nu}_e$

- 母核俘获核外轨道的一个电子使母核中的一个质子转为中子, 过渡到子核同时放出一个中微子.
- 由于K层电子最靠近核,最易被俘获.
- 从i层俘获电子的衰变能为: $E_{0i} = (M_X - M_Y)c^2 - W_i$ W_i 为原子i壳层的结合能
- 发生EC的条件: $M_X(Z, A) - M_Y(Z-1, A) > W_i / c^2$

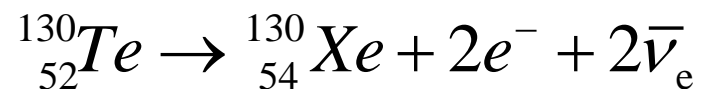
原子核的衰变-β衰变的类型

4. 其他稀有β衰变

- 中微子吸收: $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$

本质同β衰变,1956年科范和莱恩斯利用此过程直接证明了中微子的存在.

- 双β衰变: 产生一个电子必然产生一个中微子.



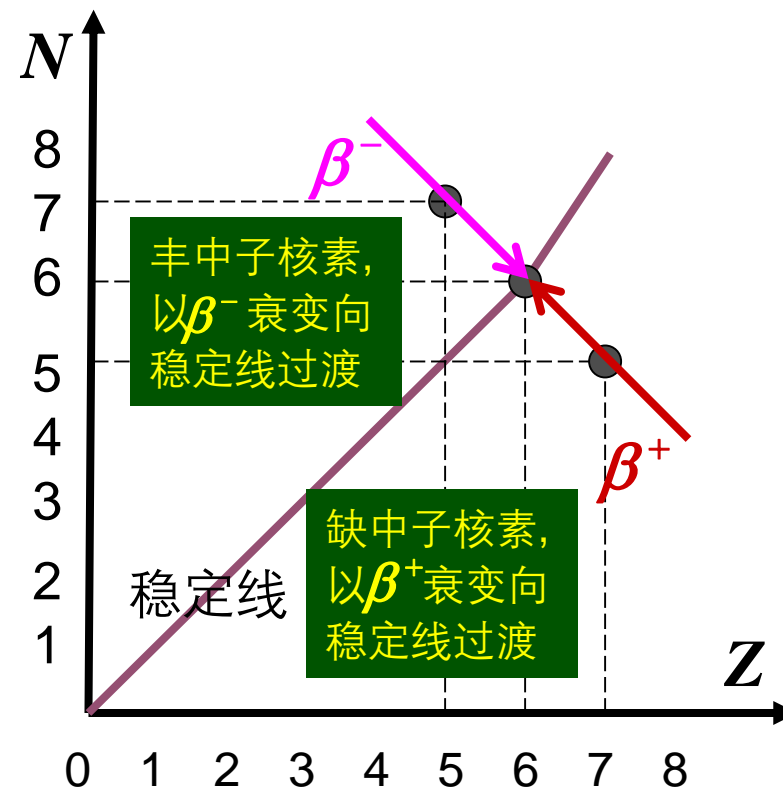
- 无中微子双β衰变

$$(A, Z) \rightarrow (A, Z + 2) + e^- + e^-$$

目前中微子实验的热门课题之一
轻子数被破坏

原子核的衰变- β 衰变的类型

- β 衰变的本质是质子和中子间的转换
- α 衰变较集中于重核， β 衰变几乎遍及整个周期系



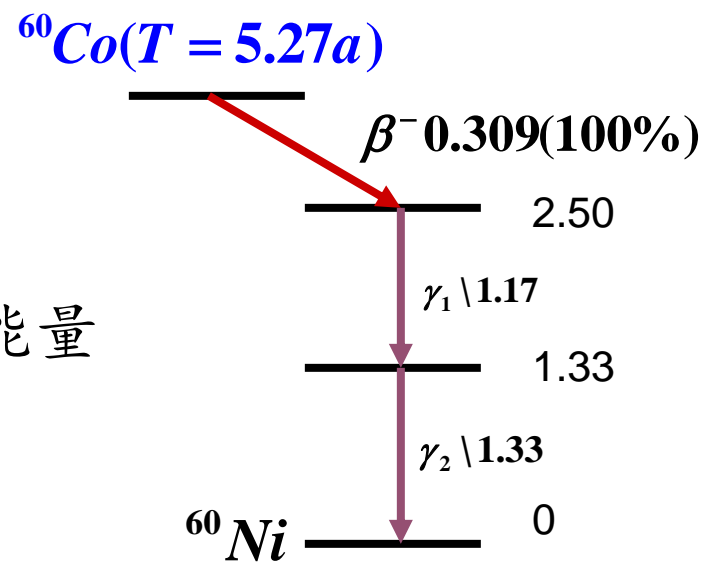
3、原子核的衰变— γ 衰变

1. 一般的 γ 衰变

原子核发生 α 、 β 衰变时往往衰变到子核的激发态.处于激发态的核不稳定,要向低激发态跃迁,同时往往放出 γ 光子,此即 γ 衰变.例如 ^{60}Co 的衰变.

$$E_{\gamma} = E_i - E_f$$

E_i 和 E_f 分别为跃迁前后能级的能量



^{60}Co 的衰变纲图

原子核的衰变- γ 衰变

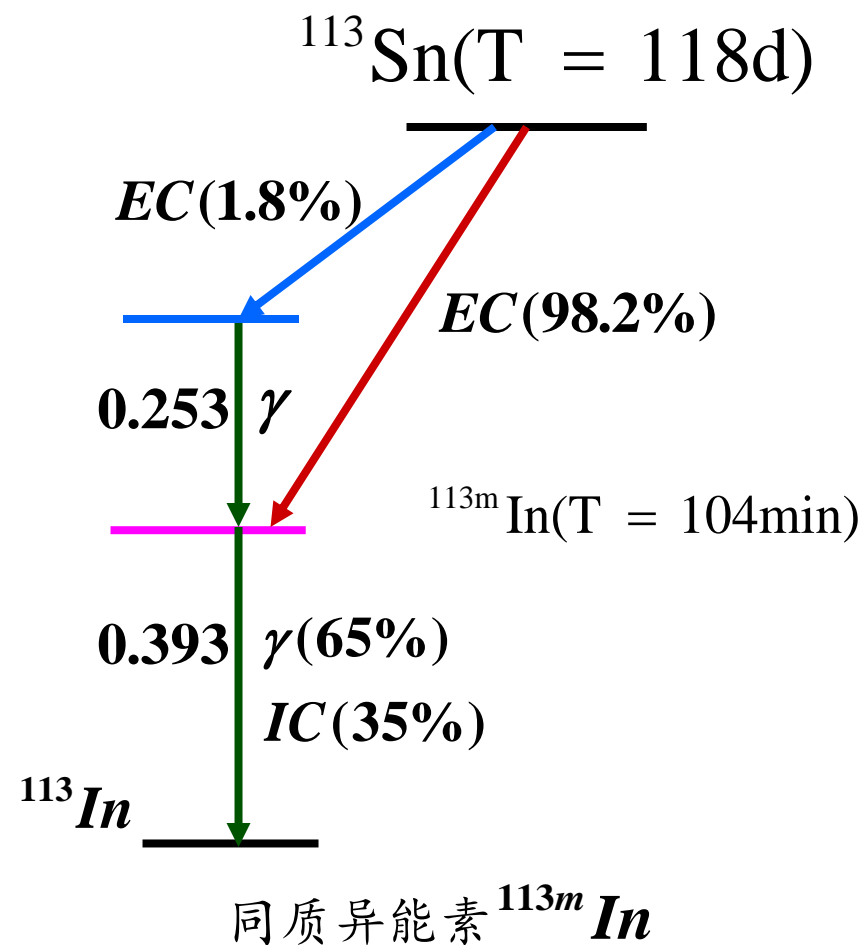
2. 内转换电子 (IC)

- 核从激发态向低能级跃迁时不一定放出 γ 光子,而是把这部分能量直接交给核外电子而使电子离开原子,此谓内转换,释放的电子称**内转换电子**.
- 若光子能量为 E_γ (不计核释放光子后的反冲), i层电子的结合能为 W_i , 则内转换电子的能量就是 **$E_e = E_\gamma - W_i$**
- 内转换电子的能谱是分立的
- 内转换电子和一般的 γ 跃迁, 同时存在, 相互竞争, 一般用内转换系数 **$\alpha = \frac{N_e}{N_\gamma}$** 表示转换和跃迁相对概率的大小:
- 一般地, 重核低激发态跃迁时发生内转换电子的概率较大.

原子核的衰变- γ 衰变

3. 同质异能跃迁(IT)

- 通常, 处于激发态的原子核寿命短暂, 典型值为 10^{-14} s
- “**同质异能素**”: 处于亚稳态的寿命较长的激发态.
- “**同质异能素**” 的表示: 一般在核素左上角质量数旁加 “m”.



原子核的衰变- γ 衰变

4. 穆斯堡尔效应

- 原子从激发态跃迁到基态时所发射的光子, 会被基态的同种原子吸收, 称为原子的共振吸收 (甚强)。(例如, 用钠灯照射钠蒸汽, 后者会强烈地吸收前者发出的黄光…)
- 人们认为原子核也应有共振吸收现象, 它可强烈吸收同类核素发出的 γ 射线. 然而长期观察不到此现象, 后来知道这是因为原子核发射和吸收 γ 光子时要受到反冲的影响, 部分能量被反冲核带走, 使 γ 光子的能量 (或说频率) 发生“漂移”。

核的质量与原子的质量相差不大, 为何原子共振吸收中原子的反冲影响不大, 但是在核共振吸收中, 核的反冲影响很大?

原子核的衰变- γ 衰变

问题：如何实现 γ 射线的共振吸收？

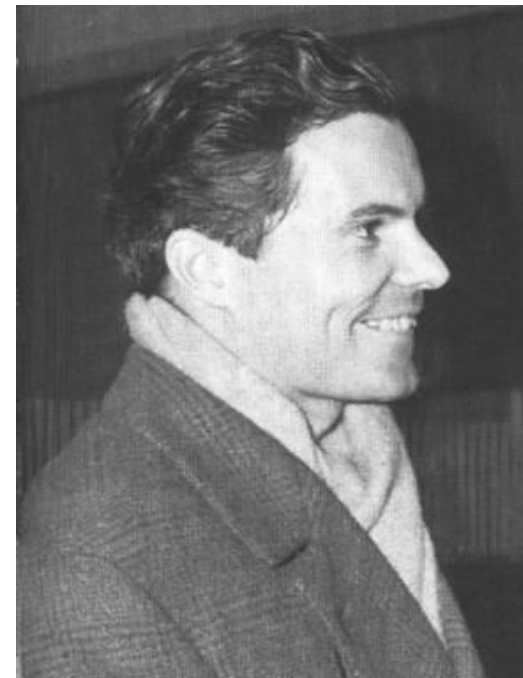
解决方案1：采取补偿能量损失的方法

如：使发射源以适当的速度运动可补偿反冲核损失的能量,但在技术上较困难.

解决方案2：避免能量损失的方法

穆斯堡尔效应：当原子核处于固体晶格中时，遭受反冲的就不是单个原子核，而可能是整块晶体，这时反冲能很小

无反冲共振吸收



R.L.Mossbauer
德 (1929-)

1958年发现穆斯堡尔效应
获1961年度诺贝尔物理学奖

原子核的衰变- γ 衰变

目前研究最多的是 $^{57}_{26}\text{Fe}$ 从第一激发态跃迁到基态时产生的14.4keV的谱线。示意图中，放射源和吸收体均由 $^{57}_{26}\text{Fe}$ 制成平板，其中放射源经技术处理后处于激发态， γ 光子将被吸收体无反冲地共振吸收。

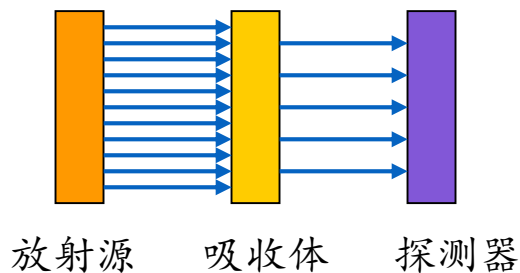
与14.4keV谱线对应的反冲能：
$$E_R = \frac{(h\nu)^2}{2mc^2} = \frac{(14.4\text{keV})^2}{2 \times 57u \times 931\text{MeV}/u} = 2 \times 10^{-3} \text{eV}$$

能级寿命 $\tau = 140\text{ns}$

由此得激发态能级宽度为：
$$\Gamma = \frac{\hbar}{\tau} = \frac{\hbar c}{\tau c} = 4.7 \times 10^{-9} \text{eV} \quad (\Gamma \text{远小于反冲能})$$

能级相对宽度（可测量到的）为：

$$\frac{\Gamma}{E_0} \approx 3 \times 10^{-13}$$



穆斯堡尔效应示意图

任何与此量级相当的微小扰动均可被“测量到”。这样高的分辨本领使得穆斯堡尔效应被广泛应用于基础研究和应用领域的精密测量中。

原子核的衰变- γ 衰变

Mossbauer效应在高精度测量中，得到广泛的应用

它对能量精度可以达到 10^{-13} 数量级，相当于测量地球到月亮之间的距离精确到0.01mm.

半径为R的某星球放出光子，因为飞离星球时要克服星球的引力势做功，因此在远处接收到的光子能量较飞离时要小，即发生红移，红移量一般小于 10^{-10} 量级，Mossbauer效应可对它作精确测量

Mossbauer效应物理、化学、生物学、地质学、冶金学等方面都得到了广泛的应用

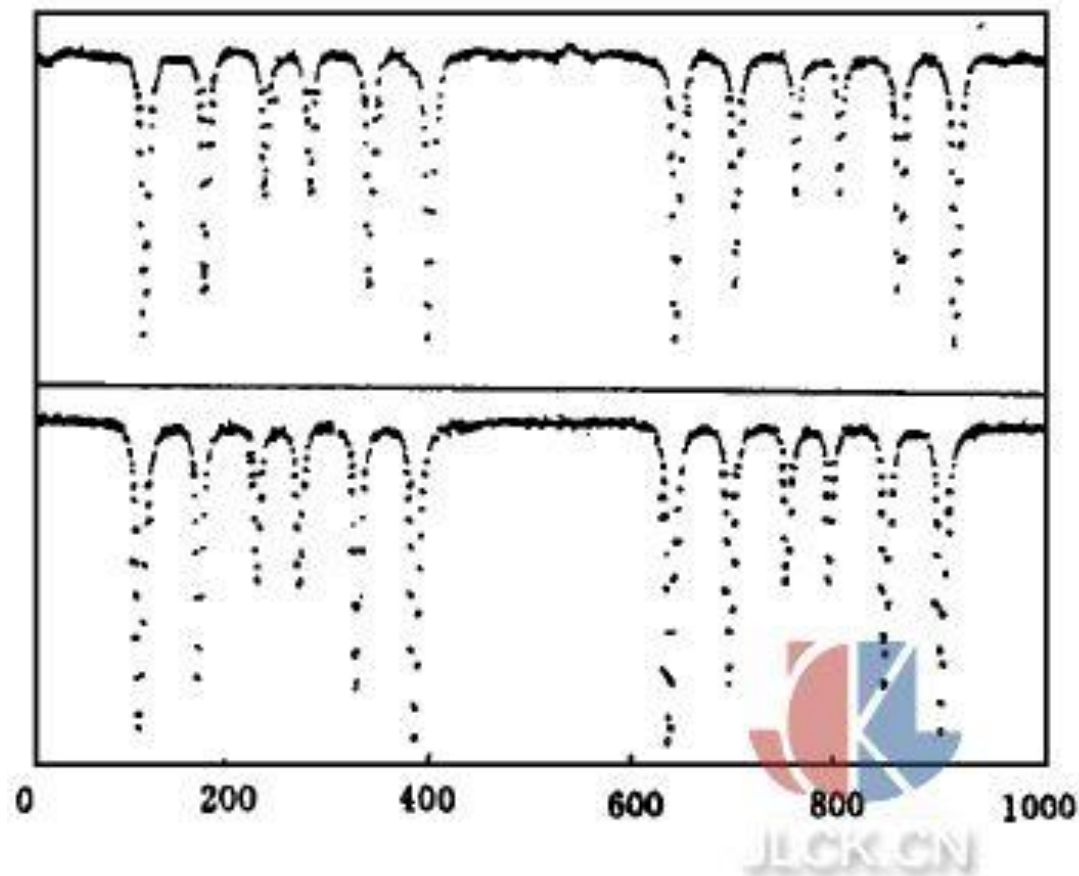
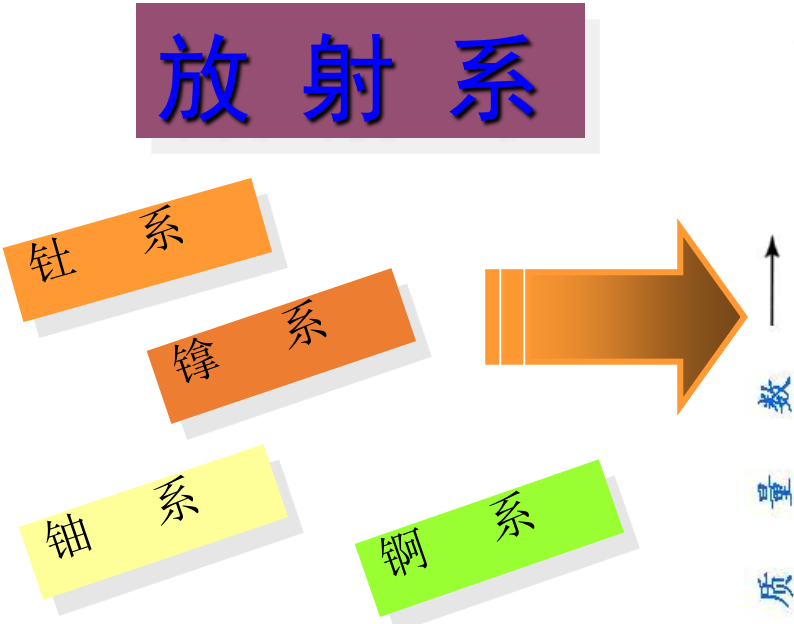


图5 利用原系统和本系统测量的 ^{57}Fe 谱

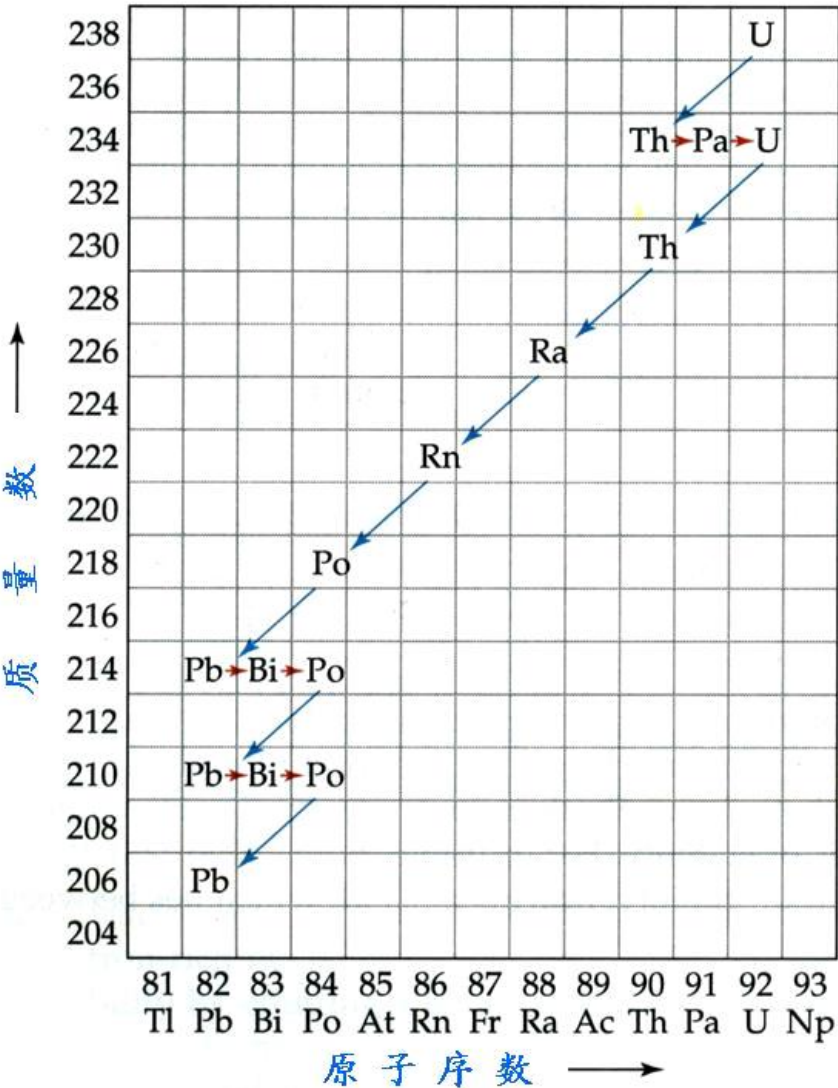
原子核的衰变-级联衰变

在自然界存在的放射性核素大多具有多代母子体衰变关系。母体放射性核素经多代子体放射性核素最后衰变生成稳定核素。即放射性核素衰变后的产物仍不稳定，继续衰变

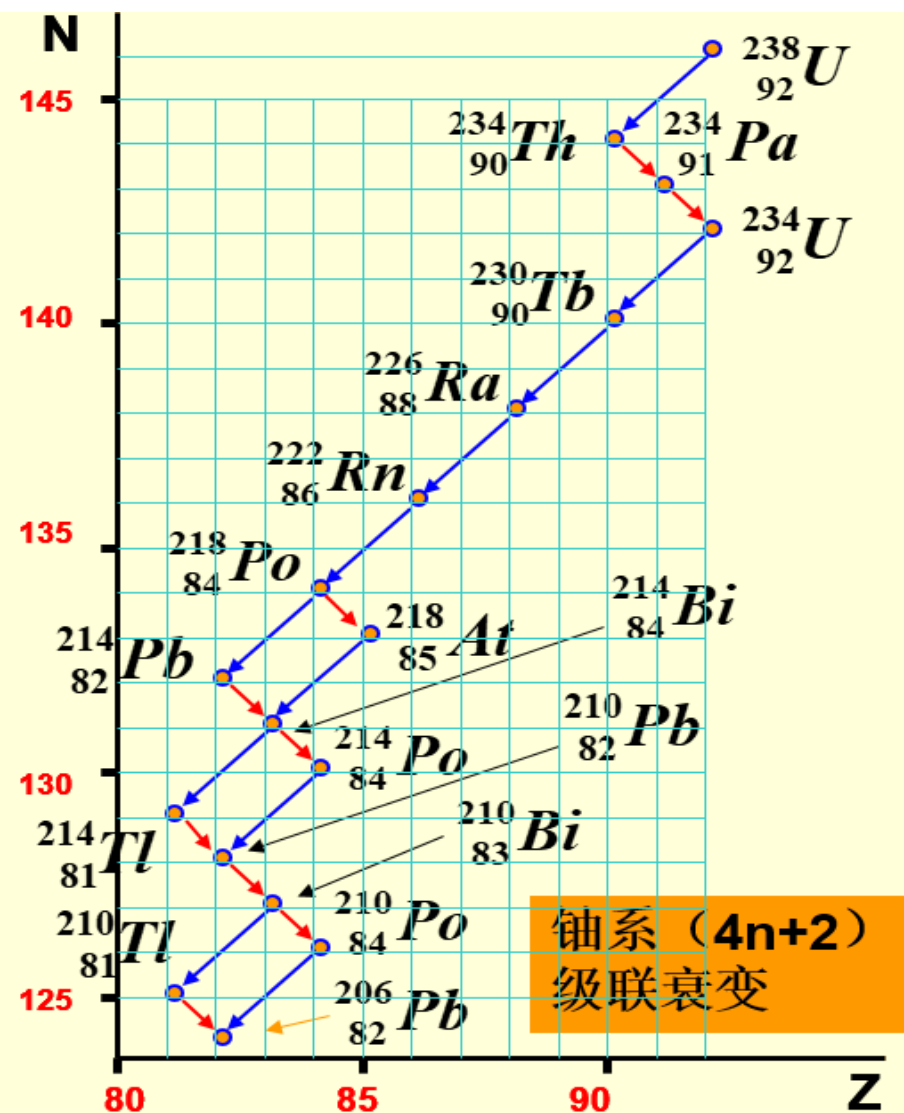
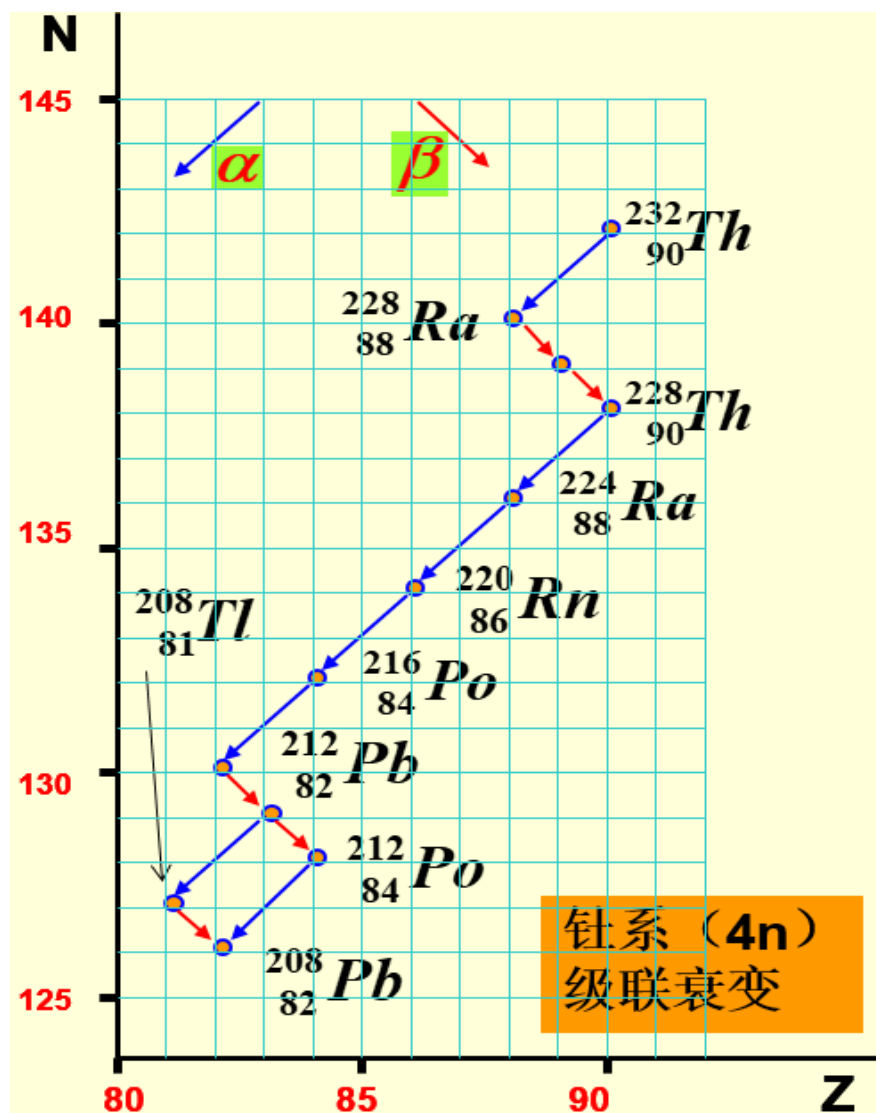


钍系：从 ^{232}Th 开始，经过10次连续衰变，最后到稳定核素 ^{208}Pb

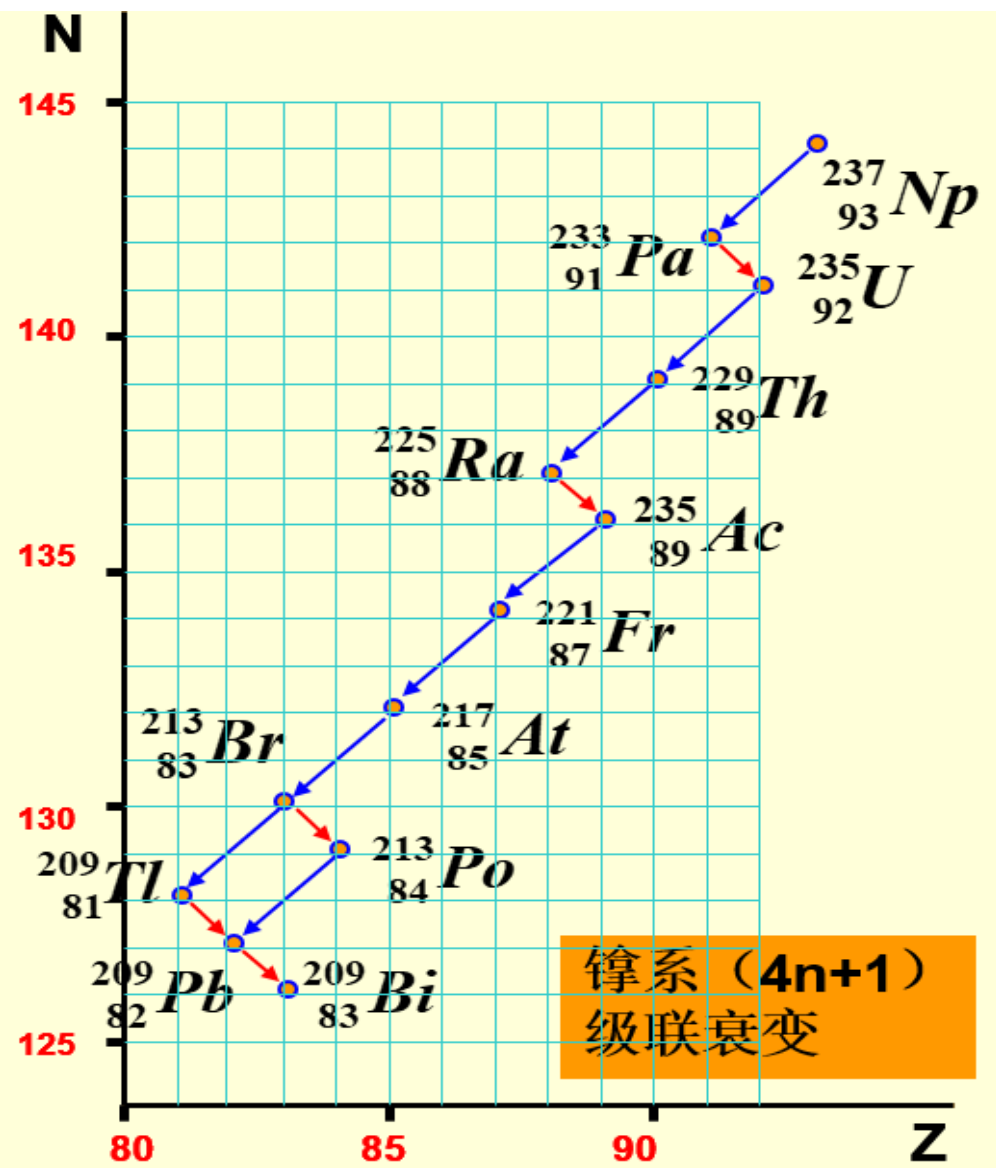
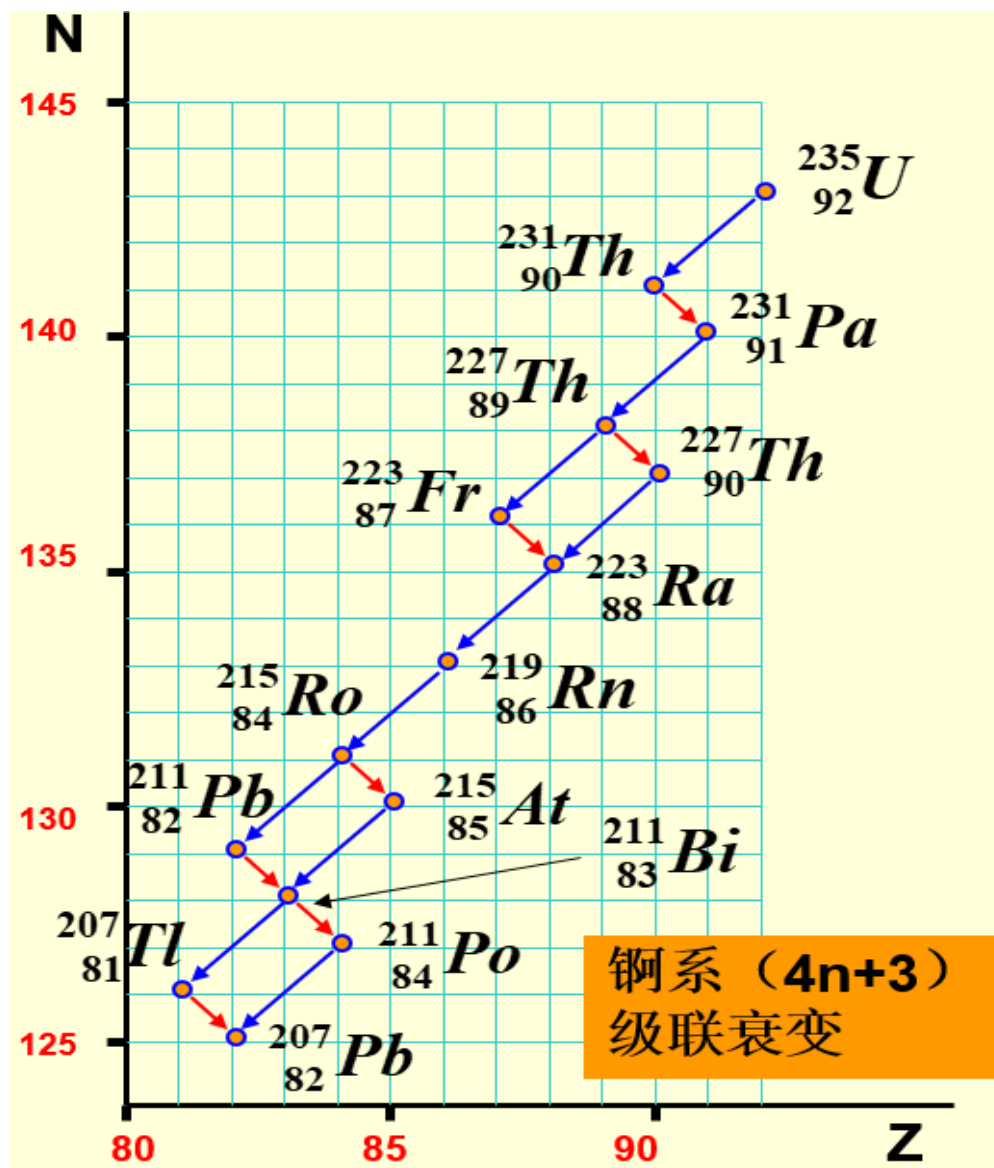
铀系：从 ^{238}U 开始，经过14次连续衰变，最后到稳定核素 ^{206}Pb



原子核的衰变-级联衰变



原子核的衰变-级联衰变



核放射性衰变的基本规律

1.衰变定律: $N = N_0 e^{-\lambda t}$

原子核是一个量子体系，核衰变是原子核自发产生的变化，是一个量子跃迁的过程。核衰变服从量子力学的统计规律。单一的一个放射性核素的衰变的精确时刻是不可预知的，但足够多的同种放射性核素的集合体的衰变是有规律的。

设放射性核素数目为 N_0 ($t=0$ 时)，在 dt 内发生衰变的数目 $-dN$ 为：

$$-dN = \lambda N dt$$

它必定正比于当时所存在的核数目 N

积分后即得 $N = N_0 e^{-\lambda t}$ (此式是一统计规律; λ 为衰变常数)

核放射性衰变的基本规律

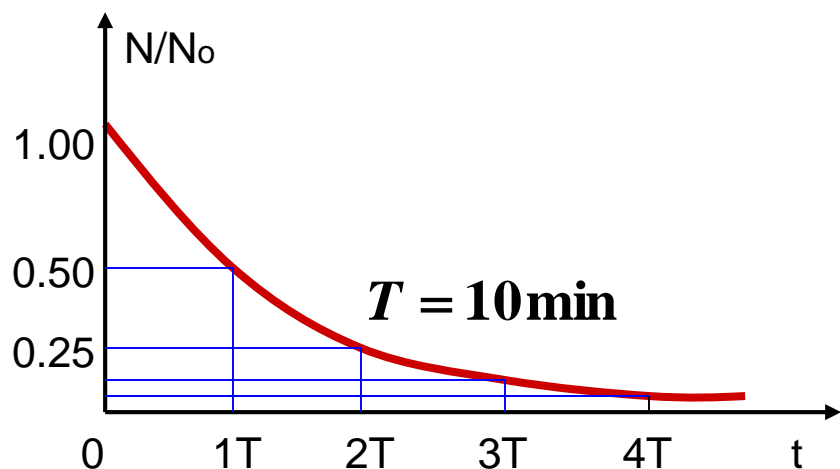
2.放射性核素的特征量

1)衰变常数: 表示一个核在单位时间内发生衰变的几率(衰变速率).

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

(分子表示单位时间内发生衰变的核数目,dN 代表N的减少量,为负值,故在它前面加一负号)

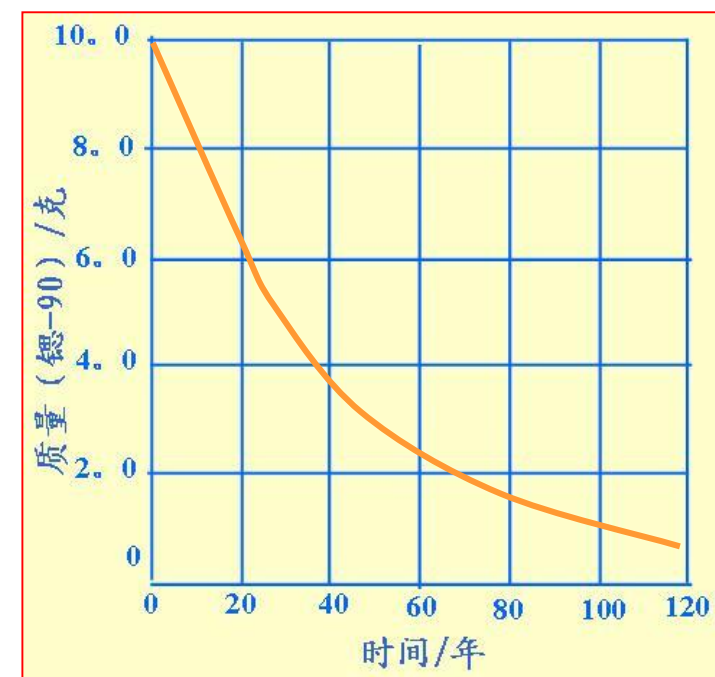
2)半衰期: 放射性核素衰变掉原有核素一半所需的时间.



^{13}N 衰变

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}$$

放射性衰变中常用
半衰期 T 而不是 λ



$^{90}_{38}\text{Sr}$ 衰变

核放射性衰变的基本规律

2.放射性核素的特征量

3)平均寿命:

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = 1.44T$$

导出要点: 在 $t \rightarrow t+dt$ 内,发生衰变的核数为 $-dN=\lambda Ndt$,这些核的寿命为 t ,则所有核素的总寿命为

$$\int_0^{\infty} \lambda N t dt$$

于是任一核素的平均寿命为:

$$\tau = \frac{\int_0^{\infty} \lambda N t dt}{N_0} = \frac{1}{\lambda} = \frac{T}{\ln 2} = 1.44T$$

可见 τ 比半衰期长一点.将上式代入衰变规律还可得到:

$$N = N_0 e^{-1} \approx 37\% N_0$$

表示: 经过时间 τ 后,余下的核素数目约为原来的37%.

核放射性衰变的基本规律

3.放射性活度A：放射性物质在单位时间内发生衰变的原子核数.

$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$

(A也称“放射性强度”,or“放射率”、“衰变率”)

[注意：只描述放射源每秒发生核衰变的次数,并不表示放射出的粒子数.]

导出要点：

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

A的单位(1975年规定)：贝克勒(或贝可)(Bq). 1Bq=1次核衰变/秒.

A的辅助单位：居里(Ci);毫居(mCi)、微居(μ Ci)

(早期定义：1g ^{226}Ra 1s内的放射性衰变数.)

$$1\text{Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{Bq} \quad (\text{即 } 3.7 \times 10^{10} \text{ 次核衰变/秒})$$

核放射性衰变的基本规律

4.长半衰期的测定

半衰期是放射性核素的指纹,测定半衰期是确定放射性核素的重要方法.

测出放射性强度A,算出产生A的核素数目N,据 $A=\lambda N$ 求出 λ ,求出

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

为保证足够的计数以降低统计误差,必须增大N.

核放射性衰变的基本规律

4.长半衰期的测定

例1. 对于 ^{238}U ，测它的半衰期

取 $1\text{mg}^{238}\text{U}$ ，可得 $A = 740\text{次衰变/min} = 12.33\text{Bq}$

$$A = \lambda N$$

可得 $\lambda = 4.87 \times 10^{-18} \text{s}^{-1}$

故 $T_{\frac{1}{2}} = \frac{0.693}{\lambda} = 4.5 \times 10^9 \text{年/y/a}$

核放射性衰变的基本规律

4. 长半衰期的测定

例2. 质子的半衰期为 $T=10^{30}$ 年，假设想要每个月观测到一个质子衰变，需要多少水？

解： $\lambda = \frac{0.693}{T_{1/2}} = \frac{0.693}{10^{30} \times 365 \times 24 \times 3600} (s^{-1})$

依题意 $A = 1 \text{ 次衰变/月} = 1 \text{ 次衰变} / (30 \times 24 \times 3600) \text{ 秒}$

$$N = \frac{A}{\lambda} = \frac{1}{30 \times 24 \times 3600} \times \frac{10^{30} \times 365 \times 24 \times 3600}{0.693} \approx 173.32 \times 10^{30} (\text{个})$$

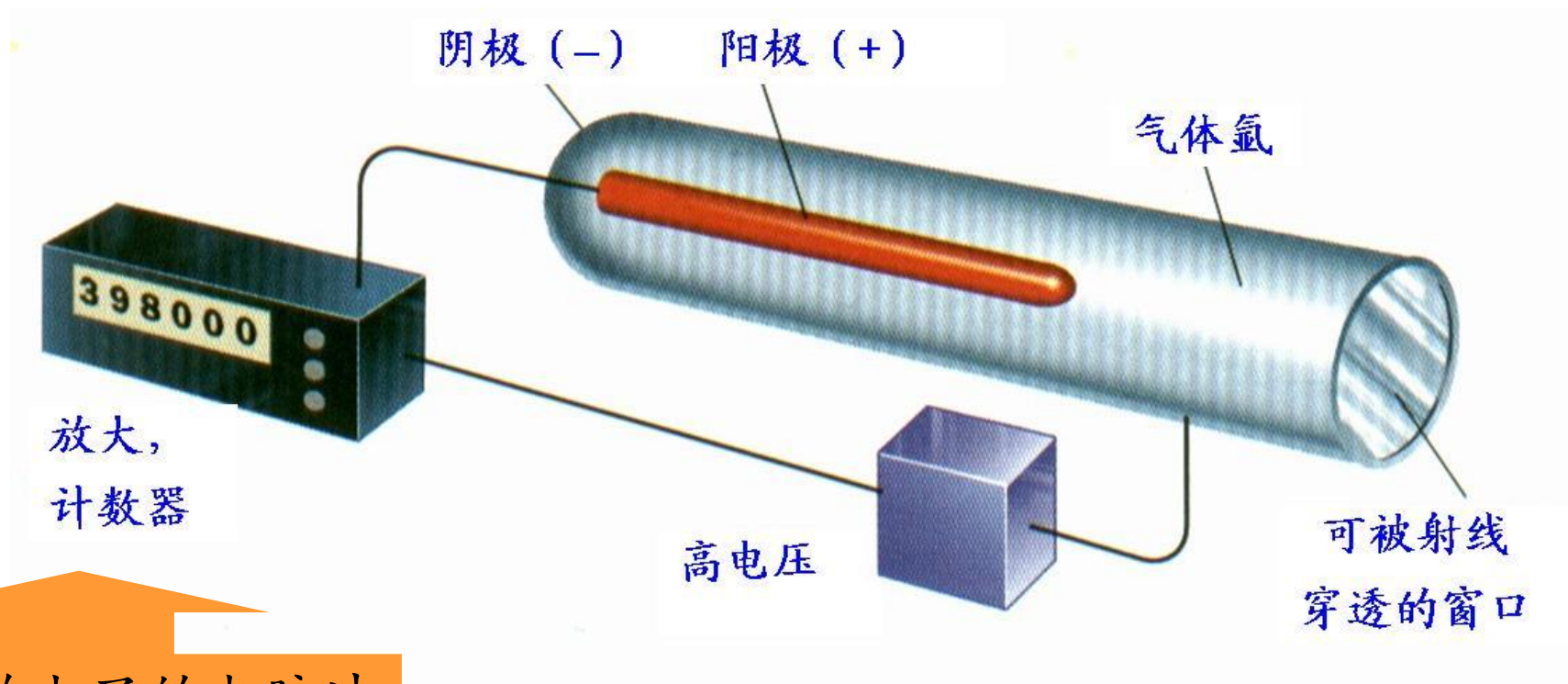
每18克水含 N_A 个水分子，每个水分子含10个质子 $\Rightarrow m = \frac{18 \times 173.22 \times 10^{30}}{6.02 \times 10^{24}} \approx 51.78 (\text{吨})$

可见，要50多吨水，每月才能观察到1次核衰变。

检测核放射性的方法

检测放射性的方法

盖革计数器是根据受辐射气体发生电离而产生的离子和电子能传导电流的原理设计的。



每个被放大的电脉冲
即代表一次放射性计数

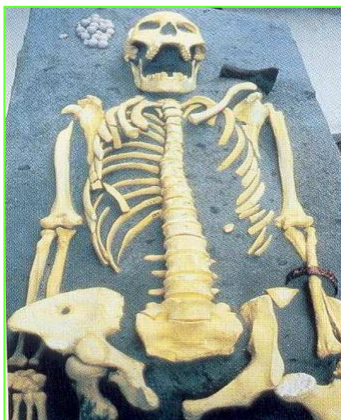
核放射性的应用

一、放射性 ^{14}C 鉴年法

方法：放射性 ^{14}C 测定年代法

依据：半衰期与反应物的起始浓度无关

假定：大气中 $^{14}_6\text{C}$ 、 $^{12}_6\text{C}$ 的比值是恒定的



获1960年度
诺贝尔化学奖



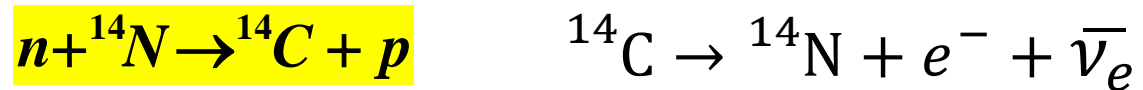
W.F.Libby(利比)

^{14}C 鉴年法的先驱

核放射性的应用

一、放射性 ^{14}C 鉴年法

宇宙射线中的大量质子与大气中原子核反应产生许多次级中子，这些次级中子与大气中的 ^{14}N 反应而产生 ^{14}C 而 ^{14}C 自发地进行 β 衰变：



由于宇宙射线的质子流、大气组分相对恒定，故上述次级中子流也相对恒定，使得 ^{14}C 的产生率保持恒定，经相当时间后产出与衰变达平衡，其数目保持不变。而大气中的 ^{12}C 是稳定核素。

研究表明：

$$\begin{cases} ^{14}\text{C} \text{ 的半衰期: } T_{1/2} = 5730a \\ \text{大气中 } N_{^{14}\text{C}}/N_{^{12}\text{C}} = 1.3 \times 10^{-12} \end{cases}$$

生命体

存活时：通过新陈代谢保持体内 ^{14}C 和 ^{12}C 的比例

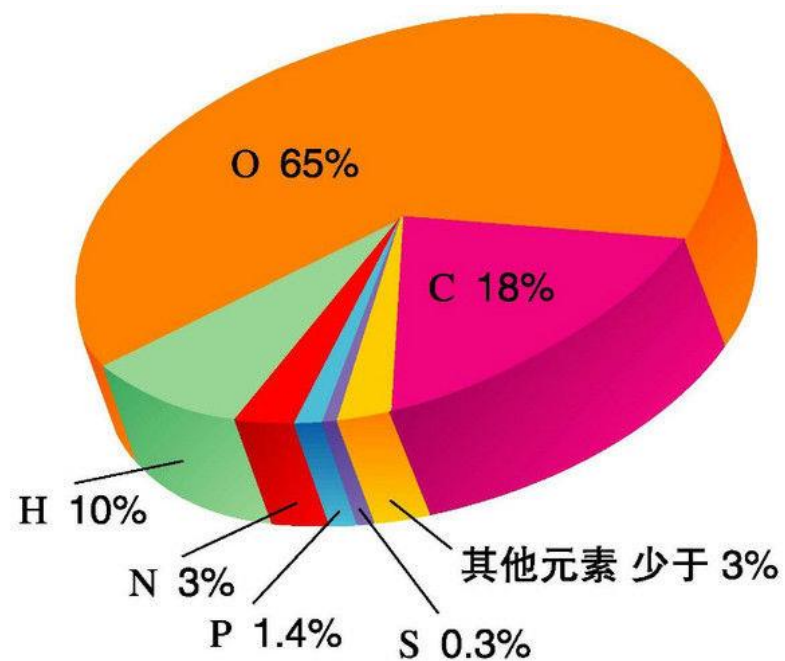
死亡后： ^{14}C 衰变，遗骸中 ^{14}C 和 ^{12}C 的比例下降



通过测遗骸中 ^{14}C 的比例含量即可测出生物死亡时间

核放射性的应用

一、放射性 ^{14}C 鉴年法



组成人体细胞的主要元素 (占细胞鲜重的百分比)

人体60kg, ^{14}C 个数:

$$\frac{1.3 \times 10^{-12} \times 60 \times 10^3 \times 0.18}{12} \times 6.02 \times 10^{23} = 7.0 \times 10^{14}$$

放射性活度:

$$\frac{\ln 2}{5730 \times 365 \times 24 \times 3600} \times 7.0 \times 10^{14} = 2.7 \times 10^3 \text{ Bq}$$

人一生体内 ^{14}C 衰变次数:

$$N = 2.7 \times 10^3 \times 80 \times 365 \times 24 \times 3600 = 6.8 \times 10^{12}$$

核放射性的应用

例1

埃及一法老古墓发掘出来的木质遗物样品中,放射性碳-14的比活度为 0.143Bq g^{-1} [即 $\text{s}^{-1} (\text{g})^{-1}$],而地球上活体植物组织相应的比活度则为 0.25Bq g^{-1} ,试计算该古墓建造的年代.

解: 衰变反应是: $^{14}\text{C} \rightarrow ^{14}\text{N} + e^{-} + \bar{\nu}_e$

根据一级反应的速率方程和半衰期公式:

$$\ln N(^{14}\text{C}) = -\lambda t + \ln N_0(^{14}\text{C})$$

$$T_{1/2} = 0.693/\lambda$$

$$\text{得: } \lambda = 0.693/t_{1/2} = 0.693/5730 \text{ a} = 1.21 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1} = 3.835 \times 10^{-12} \text{ s}^{-1}$$

$$t = \ln[0.25\text{Bq g}^{-1}/0.143\text{Bq g}^{-1}]/(1.21 \times 10^{-4}\text{a}^{-1}) = 4630 \text{ a}$$

如以上数据系2005年所得, 则 $4630 - 2005 = 2625$

即该古墓大约是公元前2625年建造的。

$$t = -\frac{1}{\lambda} \ln \frac{N}{N_0} = -\frac{T}{\ln 2} \ln \frac{N}{N_0} = -\frac{T}{\ln 2} \ln \frac{A}{A_0}$$

核放射性的应用

例2

测得古墓100g骸骨碳的 β^- 衰变率为900/min, 求此墓年代。

解: 据衰变定律和半衰期公式 $\begin{cases} N = N_0 e^{-\lambda t} \\ T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \end{cases} \Rightarrow t = -\frac{1}{\lambda} \ln \frac{N}{N_0} = -\frac{T}{\ln 2} \ln \frac{N}{N_0}$

墓主死亡时100g骸骨碳中含 ^{14}C 原子的数目为:

$$N_0 = 1.3 \times 10^{-12} \times \frac{100}{12} \times 6.022 \times 10^{23} = 6.5 \times 10^{12}$$

当前100g骸骨中 ^{14}C 的数目为N,

$$\therefore \frac{dN}{dt} = 900/\text{min} = 900 \times 60 \times 24 \times 365/a = 4.73 \times 10^8/a$$

$$\therefore N = \frac{1}{\lambda} \frac{dN}{dt} = \frac{T}{\ln 2} \frac{dN}{dt} = \frac{5730a}{0.693} \times 4.73 \times 10^8/a = 3.91 \times 10^{12}$$

$$\Rightarrow t = -\frac{T}{\ln 2} \ln \frac{N}{N_0} = -\frac{5730a}{0.693} \ln \frac{3.91 \times 10^{12}}{6.5 \times 10^{12}} = 4200a$$

结论: 古墓年代约为公元前2200年

核放射性的应用

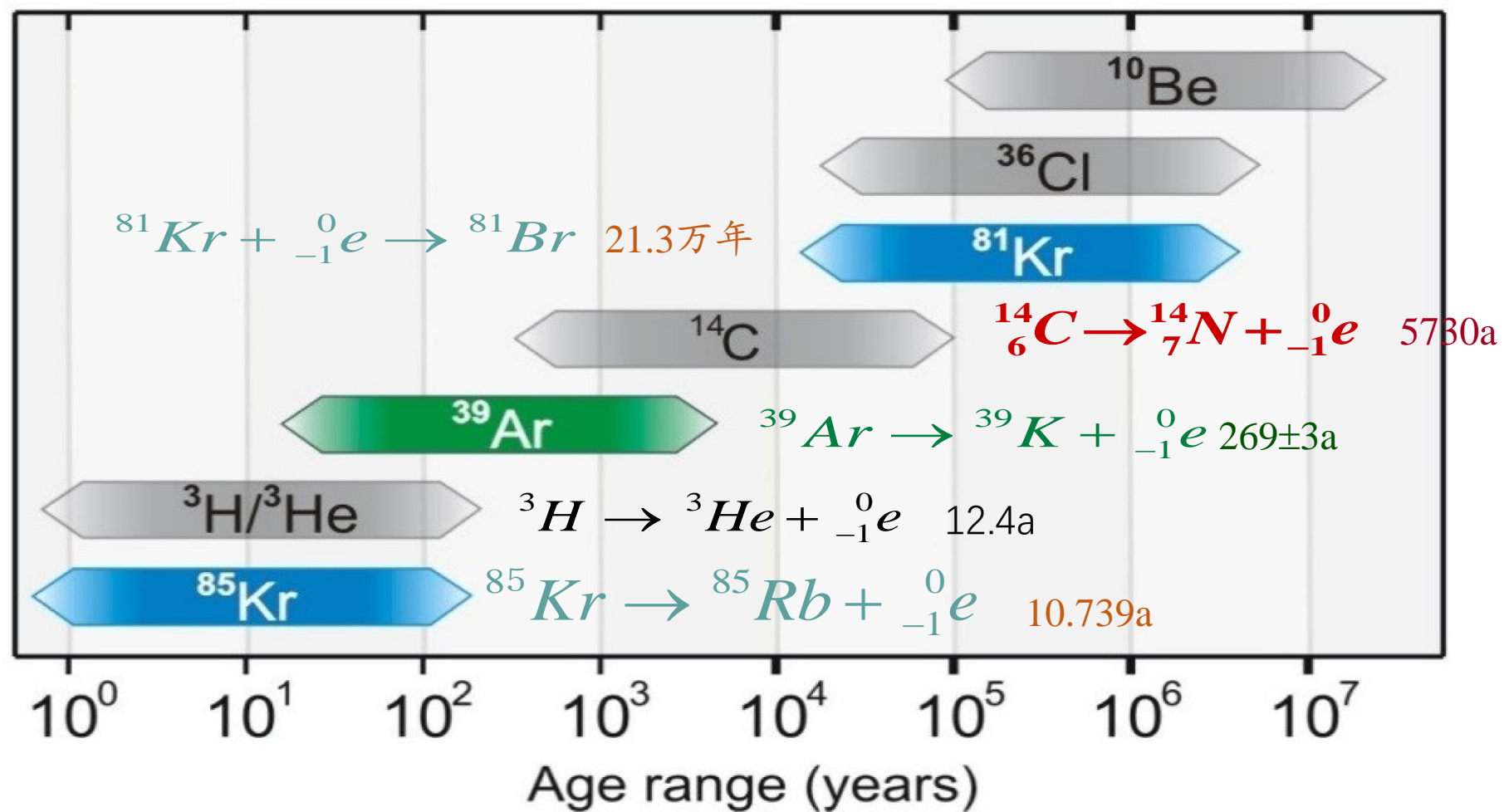


图 1.1: 常用测年方法的测年范围

核放射性的应用

^{85}Kr 的监测

- 一般认为自然界的氪中不含 ^{85}Kr
- 在核工业排出的放射性物质中，以惰性气体的放射性最大，特别是 ^{85}Kr ，它占核燃料后处理厂排出的放射性的90%以上
- 惰性气体的其他放射性核素的半衰期都很短，对环境具有长期影响的也只有 ^{85}Kr ，所以，有关放射性惰性气体的排放，特别是 ^{85}Kr 的排放已引起人们越来越大的关注。
- 监控核泄漏、秘密核实验的理想标记物

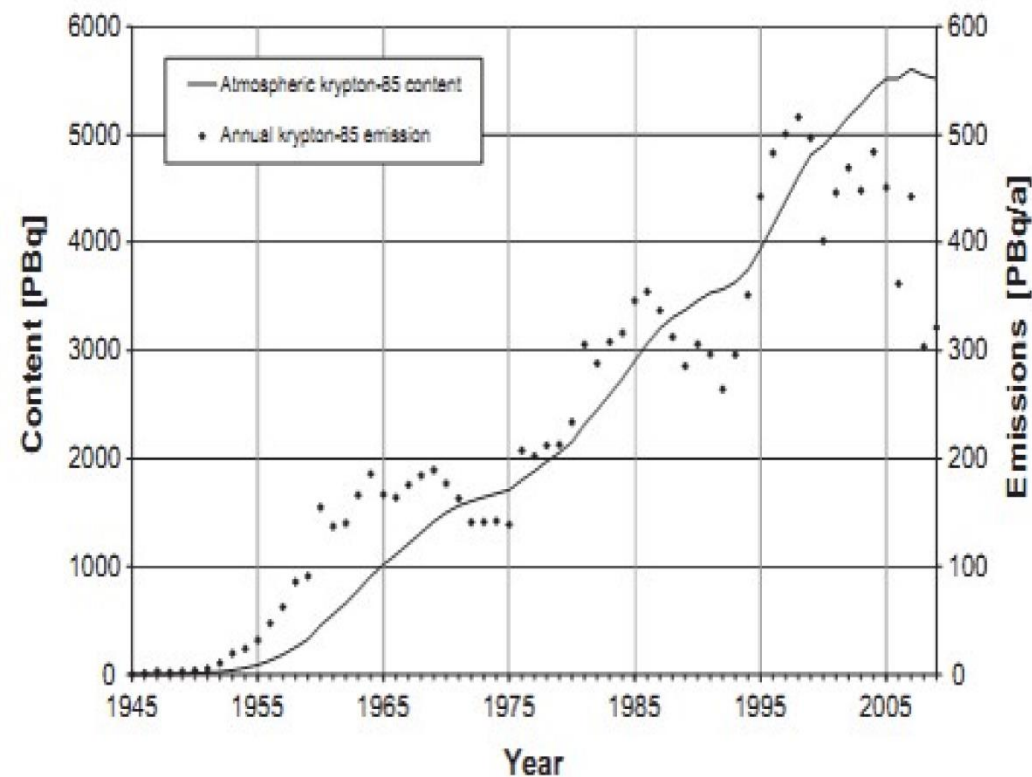


图 1.3: 全球大气中 ^{85}Kr 总量（实线）和每年 ^{85}Kr 的排放量^[40]。

核放射性的应用

ATTA (Atom Trap Ti
目前唯一可对环境

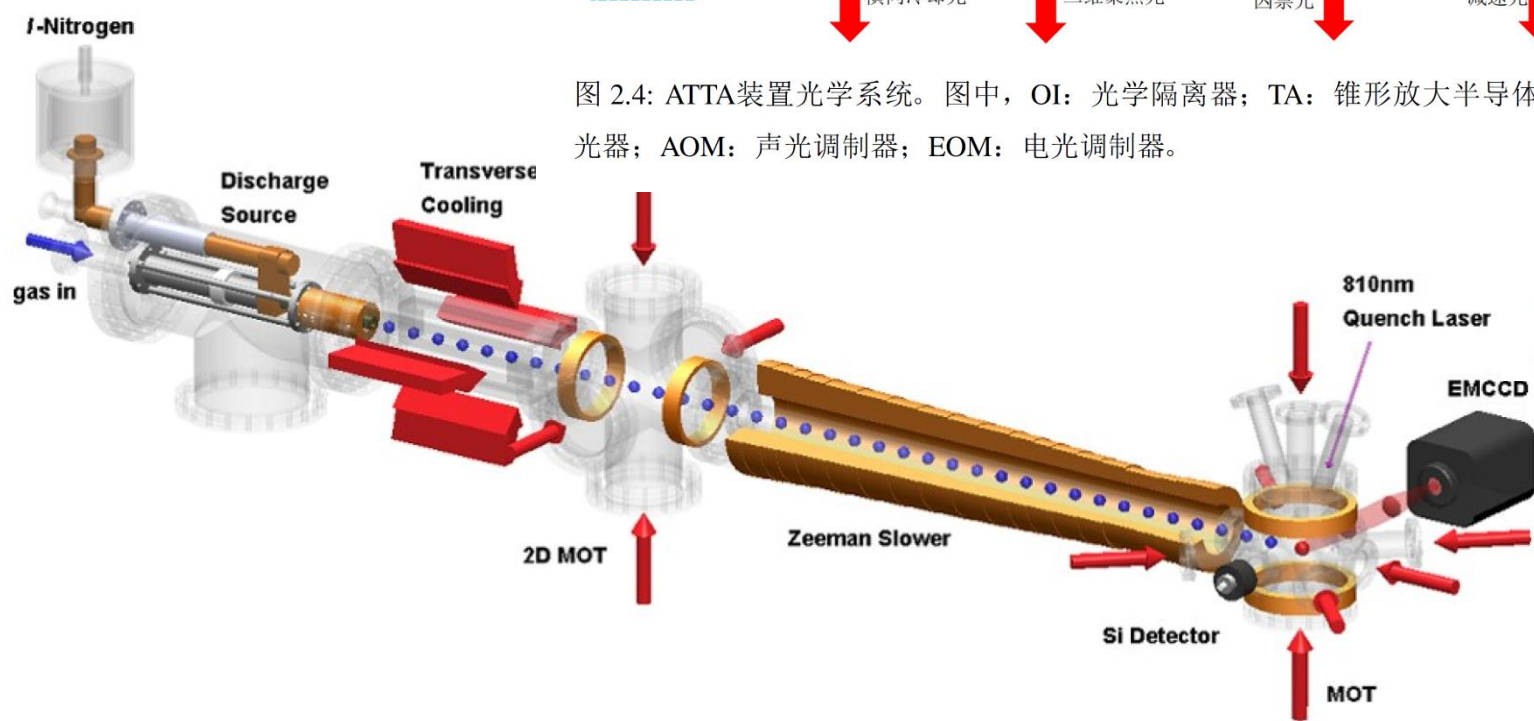


图 2.5: 科大的ATTA装置示意图

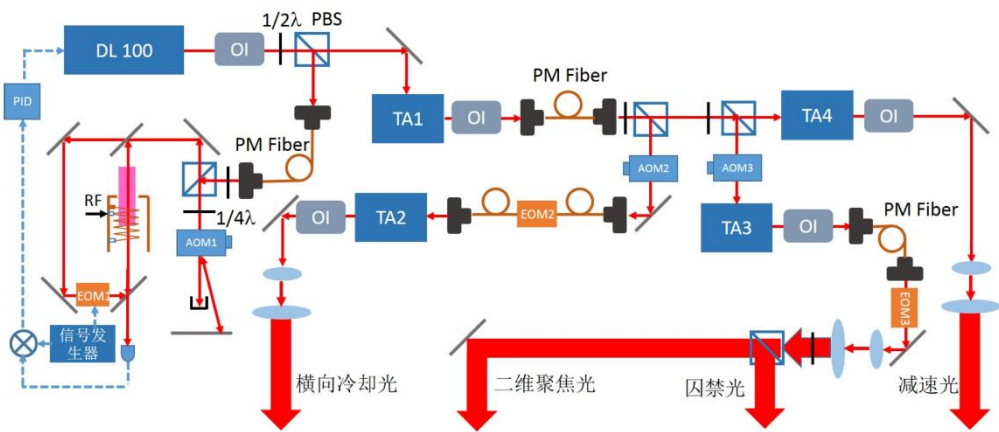


图 2.4: ATTA装置光学系统。图中，OI：光学隔离器；TA：锥形放大半导体激光器；AOM：声光调制器；EOM：电光调制器。

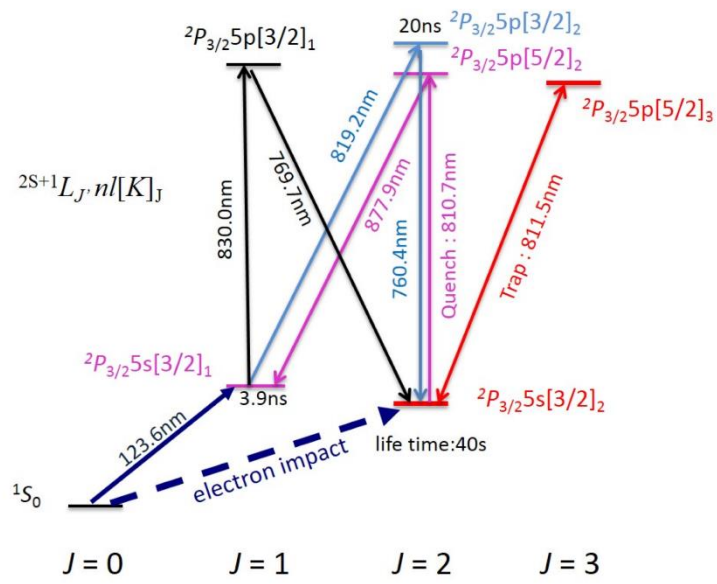


图 1.7: 氮原子能级结构示意图。图中只画出了部分能级，能级间隔大小未按比例制作。

核心部件：三维磁光阱

通过改变三维磁光阱中激光的频率将不同同位素原子捕获（与其跃迁频率匹配）

核放射性的应用

二、级联衰变及其应用

连续衰变规律, 以两代衰变 ($A \rightarrow B \rightarrow C$) 为例

A的衰变服从衰变律:

$$N_A = N_{A_0} e^{-\lambda_A t}$$

B一方面衰变为C, 一方面又不断从A处获得补充, B的衰变规律与 λ_A 和 λ_B 有关:

$$N_B = N_{A_0} \frac{\lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A} (e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t})$$

若 $\lambda_B \gg \lambda_A$, 当 $t \gg \tau_B$ 时

$$N_B \approx N_{A_0} \frac{\lambda_A}{\lambda_B} e^{-\lambda_A t}$$

这时子核将按母核的衰变规律衰变。这一个重要结论启示人们保存短寿命核素的一个方法。

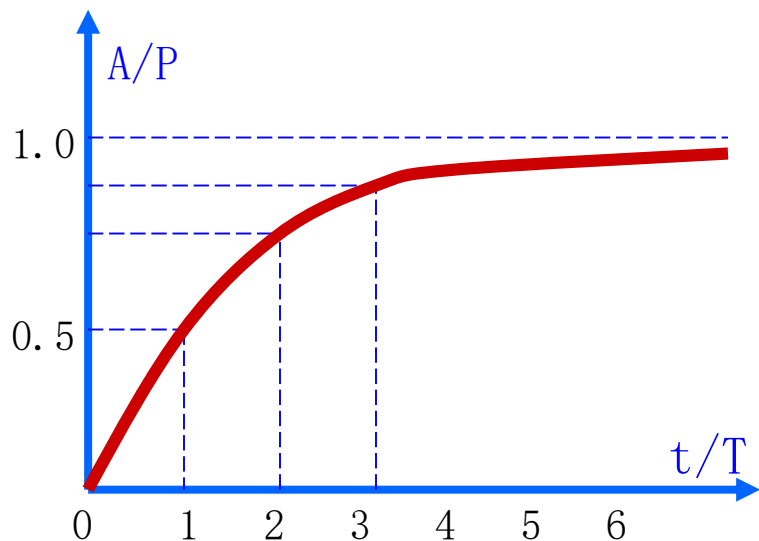
核放射性的应用

在2000多种核素中,只有60多种是天然的,其余均是靠人工核反应产生的.在其产生的同时即在发生衰变,设核素的产生率为P,则它的变化率为:

$$\rightarrow \frac{dN}{dt} = P - \lambda N$$

以上的一阶非齐次微分方程的解为:

$$\rightarrow N = \frac{P}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t})$$



同位素生产图示

可表示为放射性活度:

$$A = \lambda N = P(1 - e^{-\lambda t}) = P(1 - e^{-\frac{\ln 2 t}{T_{1/2}}})$$

显然,当经过1个T时,A可达到P的50%,经过2个T时,A可达到P的75%...(见左图).从图中可知,无论工作时间多长,最大的A不超过P.

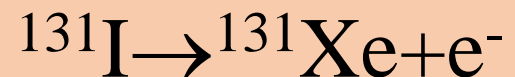
三、放射性核素的治疗

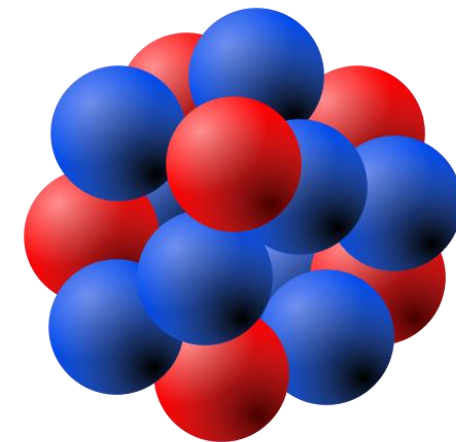
肿瘤的治疗手段：手术、化疗和放疗

放射性核素治疗：
系统特异性的靶向治疗
选择寿命短的核素

^{131}I 治疗甲状腺癌：人体约20%的碘贮存在甲状腺中

^{131}I 的半衰期只有8天





第四节 原子核的结合能、核反应和核能

原子核的结合能

质量亏损: 原子核的质量与组成它的核子质量之和的差值

$$\Delta m = (Zm_p + Nm_n) - m$$

用原子质量可表示为

$$\Delta M = (ZM_H + Nm_n) - M$$

结合能: 核子结合为某种核时释放的能量.

$$B = (ZM_H + Nm_n - M)c^2$$

表明: 亏损的质量转化为能量的释放.
或 核能的释放以质量亏损为代价.

平均结合能
(比结合能)

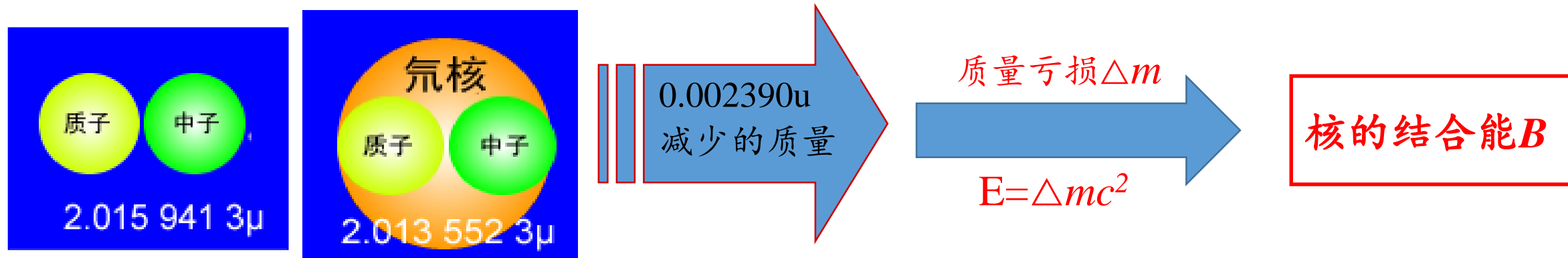
$$\varepsilon = \frac{B}{A}$$

原子核中每个核子结合能的贡献, 标志核子结合的松紧程度.

通过实验测出原子的质量M, 即可由上式求出各种核素的结合能, 反之亦然.

因此, 核的质量亏损和结合能两词经常可等价使用

原子核的结合能



例1: 氘(2H)为氢的同位素,在海水中每100万个氢原子中约有150个氘原子,它由1个质子和1个中子组成. 计算氘原子的结合能、比结合能.

$$\left. \begin{array}{l} m_n = 1.008665u \\ m_p = 1.007277u \\ m_{(^2H)} = 2.013552u \end{array} \right\} B = \Delta mc^2 = [(m_p + m_n) - m_{(^2H)}]c^2 = 0.002390u \times 931MeV / u = 2.225MeV$$

$$\text{氘: } \varepsilon = \frac{2.225}{2} \approx 1.1MeV$$

原子核的结合能

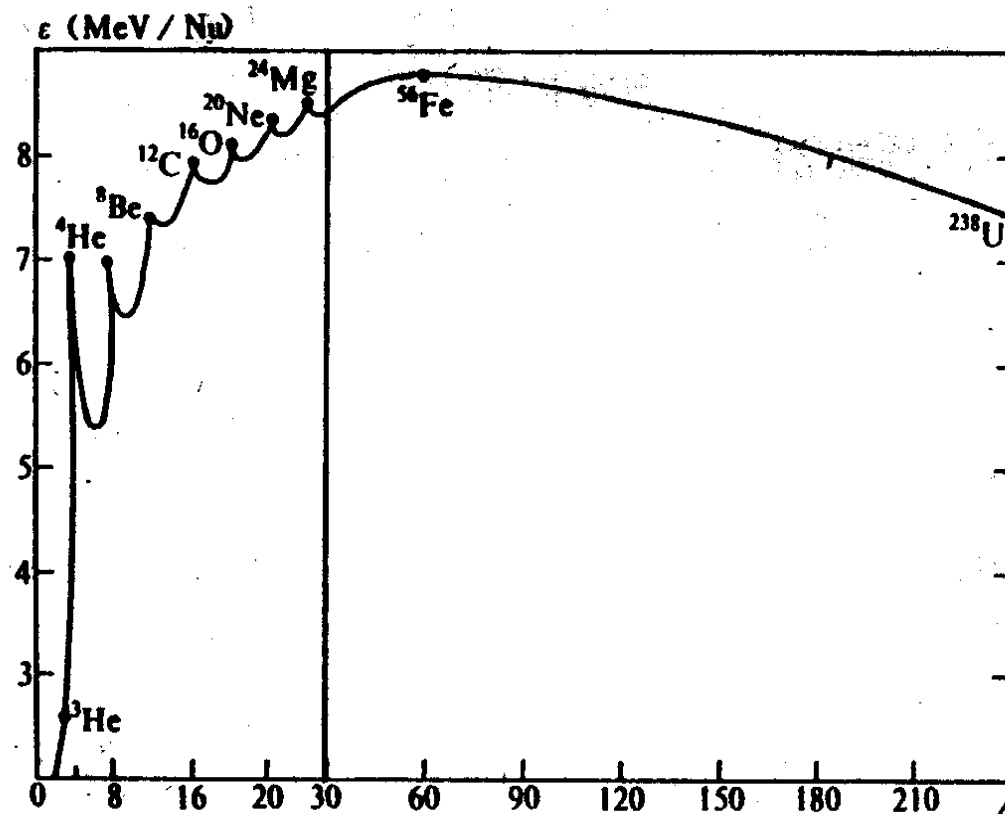
核的结合能图： 原子核物理学中最重要的两个图之一

- 当 $A < 30$ 时, 曲线有起伏的上升. 其中, 偶偶核 (奇奇核) 的 ϵ 有极大 (小) 值, 具有较高 (低) 的稳定性。

偶偶核: Z 、 N 均为偶数

奇奇核: Z 、 N 均为奇数

- $A=40--120$ 的中等核 ϵ 较高, 几乎为一常量, 约为 8.6MeV .
- 轻核和重核的 ϵ 较中等核低 (不稳定)
- 重核会发生裂变, 产生中等 A 的核; 轻核会发生聚变生成更稳定的重核



核的比结合能图

原子核的结合能

核结合能的液滴模型

比结合能曲线完全由实验测量，目前尚无完整理论相对应。

液滴内分子之间的力是一种短程的饱和力，并具有不可压缩性。而所有核素的密度也几乎是一个常数，不可压缩，且核子间的核力也是一种短程的饱和力。从这个意义上来说，可以把核看做一种荷电液滴。由此出发来设计核结合能的表达式。

将核视为荷电液滴，Weizsacker（魏茨泽克）指出，其结合能应该由五部分构成即

$$B = B_v - B_s - B_c - B_{sym} - B_\gamma$$

Weizsacker 公式 → 半经验公式

原子核的结合能

核结合能的液滴模型

$$B = B_v - B_s - B_c - B_{sym} - B_\gamma$$

1) B_v 体积能

描述核力对结合能的贡献实验表明 $B_v \sim V \sim r^3$ ，而核的大小 $r \sim A^{1/3}$ ，故 $B_v \sim A$ ，引入比例常数 a_v ，则有 $B_v = a_v A$

2) B_s 表面能

对表面核子的体积能给出修正

体积能是核力引起的，而核力是短程力，只与周围几个粒子有作用，因此表面核子受到的核力作用强度将小于内部粒子，由此引起的对体积能的修正。类比表面张力，为负值项， $B_s \sim 4\pi r^2 \sim A^{2/3}$ ，引入比例常数 a_s ，则有 $B_s = a_s A^{2/3}$

原子核的结合能

核结合能的液滴模型

$$B = B_v - B_s - B_c - B_{sym} - B_\gamma$$

3) B_c 库仑能

质子间库仑斥力使结合能减小(负值)

核中Z个质子的每一个都与其他 (Z-1) 个有相互作用, 因此库仑能将正比于核内的相互作用对数,

$$B_c \sim Z(Z-1) \sim Z^2$$

另一方面, 每个质子间的相互作用能为 $\frac{e^2}{R} \sim \frac{e^2}{A^{1/3}}$

故 $B_c \sim \frac{e^2 Z^2}{R} \sim \frac{Z^2}{A^{1/3}}$ 引入比例常数 a_c , 则 $B_c = a_c Z^2 A^{-1/3}$

原子核的结合能

核结合能的液滴模型

$$B = B_v - B_s - B_c - B_{sym} - B_\gamma$$

4) B_{sym} 非对称能

$Z \neq N$ 时, 使得结合能减小

实验表明, $Z=N$ 时, 即质子和中子相等的核最稳定, 亦即放出的结合能最大, $Z < N$ 或 $Z > N$ 时, 核相对地不稳定, 使得核放出的结合能减小(负值), 并且这一项在 $(Z-N)$ 一定时与 A 成反比, 亦即

$$B_{sym} \sim \frac{(Z-N)^2}{A} \quad \text{引入比例系数 } a_{sym}, \text{ 则有 } B_{sym} = \alpha_{sym} \frac{(Z-N)^2}{A}$$

5) B_γ 对能/奇偶能

Z 、 N 取奇、偶数进行不同搭配时, 结合能各不相同

研究表明, 对于不同的核, Z , N 的搭配可以分为偶-偶核、奇 A 核(奇-偶+偶-奇两种)、奇奇核三种, 前者最稳定, 相应的结合能较大; 奇-奇核最不稳定, 相应的结合能较小。引入比例系数 a_p , B_γ 可表示为

$$B_\gamma = \begin{cases} +a_p A^{-1/2} & \text{偶偶核} \\ 0 & \text{奇 } A \text{核} \\ -a_p A^{-1/2} & \text{奇奇核} \end{cases}$$

原子核的结合能

核结合能的液滴模型

$$B = B_v - B_s - B_c - B_{sym} - B_\gamma$$

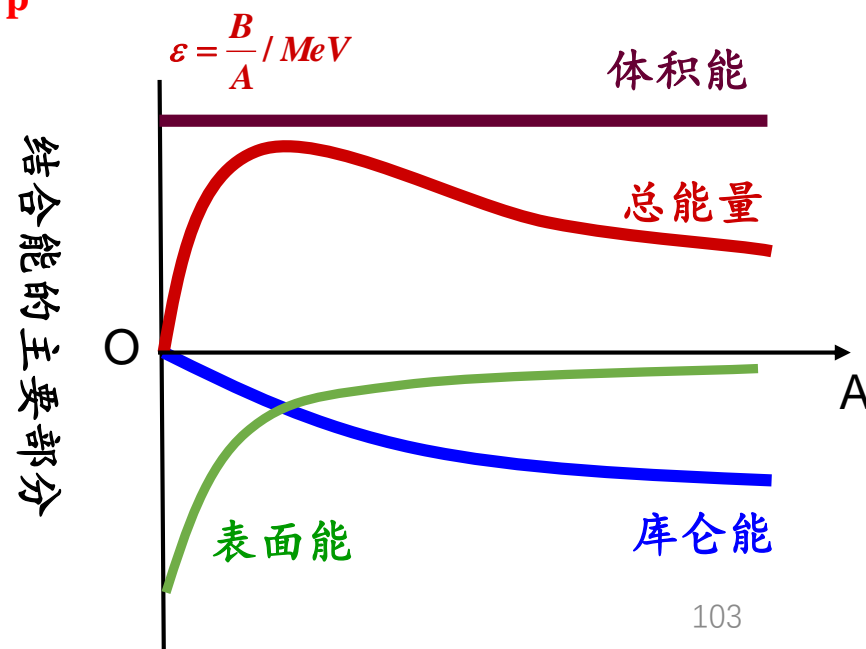
综合以上考虑，Weizsacker 公式可以表示为

$$B = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c Z^2 A^{-1/3} - a_{sys} (Z-N)^2 A^{-1} + \begin{cases} +a_p A^{-1/2} \\ 0 \\ -a_p A^{-1/2} \end{cases}$$

Weizsacker公式的计算结果与实验结果吻合的很好。

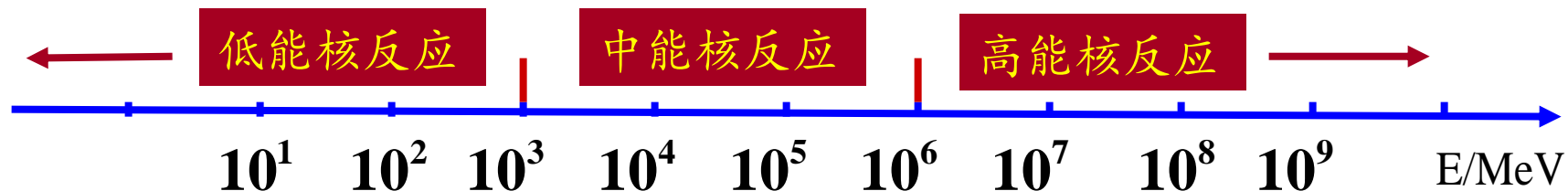
在Weizsacker半经验质量公式中，起主导作用的是前三项中。相关系数可由实验或计算得出。分别为：

$$\begin{cases} a_v = 15.8 \text{ MeV} \\ a_s = 18.3 \text{ MeV} \\ a_c = 0.72 \text{ MeV} \end{cases}$$



核反应

高能粒子轰击下核素发生的变化



核反应与核衰变

- 核衰变是原子核自身不稳定而发生的核变化
- 核反应是入射粒子与稳定核相互作用而造成的核变化

1) 第一个人工核反应(1919, 卢瑟福): $\alpha + {}^{14}\text{N} \rightarrow {}^{17}\text{O} + \text{p}$

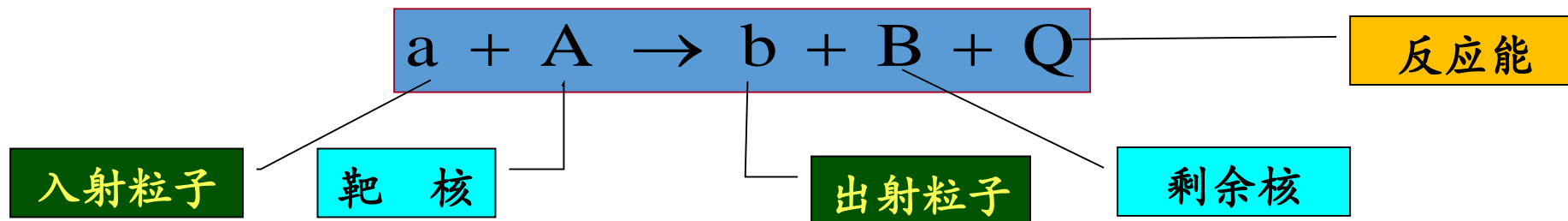
2) 第一次在加速器上实现的核反应(1932, 考克拉夫, 瓦尔顿): ${}^1\text{H} + {}^7\text{Li} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}$

3) 第一个人工放射性核素的反应(1934, 法, 居里夫妇): $\alpha + {}^{27}\text{Al} \rightarrow \text{n} + {}^{30}\text{P}$

4) 导致发现中子的核反应(1932, 查德威克): $\alpha + {}^9\text{Be} \rightarrow \text{n} + {}^{12}\text{C}$

核反应

核反应的一般表示:



$$Q \equiv [(M_a + M_A) - (M_b + M_B)]c^2 = (E_b + E_B) - (E_a + E_A)$$

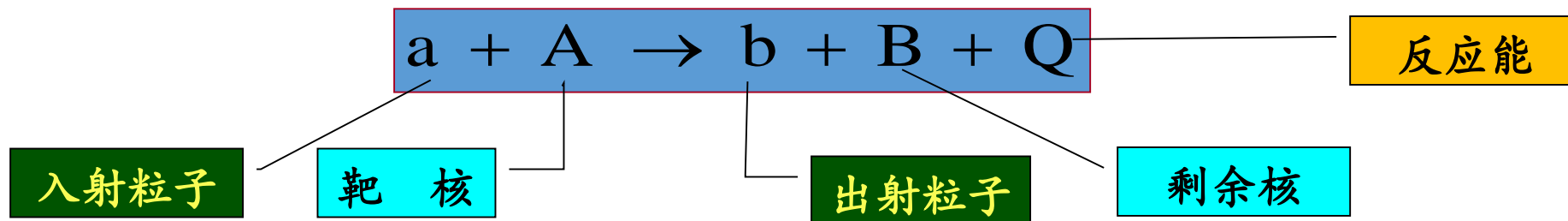
即反应能定义为反应前后粒子总质量之差(以能量表示);
或反应后与反应前粒子的总动能之差.

还可利用核的结合能表示为: $Q = (B_b + B_B) - (B_a + B_A)$

在实验时,靶核一般处于静止状态,即 $E_A=0$,故 $Q = E_b + E_B - E_a$

核反应

核反应的一般表示:



$$Q = [(M_a + M_A) - (M_b + M_B)]c^2 = (E_b + E_B) - (E_a + E_A)$$

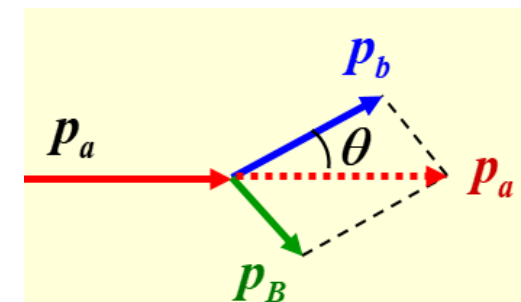
利用动量守恒律得出Q的另一种表示式

如图示, 入射粒子的动量应为出射粒子的动量和剩余核动量的矢量和. 写为分量式为

$$p_a^2 = p_b^2 + p_B^2 - 2p_a p_b \cos \theta$$

改写上式并与反应能公式合并消去 E_B (低能近似 $P^2=2mE$)

$$\Rightarrow Q = \left(1 + \frac{M_b}{M_B}\right)E_b - \left(1 - \frac{M_a}{M_B}\right)E_a - \frac{2\sqrt{M_a M_b E_a E_b}}{M_B} \cos \theta$$



核反应

吸能反应与放能反应



$Q > 0$: 放能反应

$Q < 0$: 吸能反应

对放能反应，原则上入射粒子没有动能也可以发生

对吸能反应，入射粒子需要具有最小能量 E_{th} ，成为阈能

$$E_{\text{th}} = -Q \frac{M_A + M_a}{M_A}$$

为简便起见，反应能和阈能表达式中的原子质量之比可用相应的核质量数之比代替（~1%）

$$E_{\text{th}} = -Q \frac{A_A + A_a}{A_A}$$

核反应中的守恒定律

1. 质量数 A 守恒，即反应前后总的质量数保持不变；
2. 电荷数 Z 守恒，即反应前后总的电荷数保持不变；
3. 动量守恒，即反应前后各粒子动量的矢量和保持不变；
4. 能量守恒，即反应前后粒子的能量之和保持不变(按相对论质能关系确定)。
5. 角动量守恒（总，内禀+相对运动）
6. 宇称守恒
7. 强相互作用，同位旋守恒

核反应

核反应截面

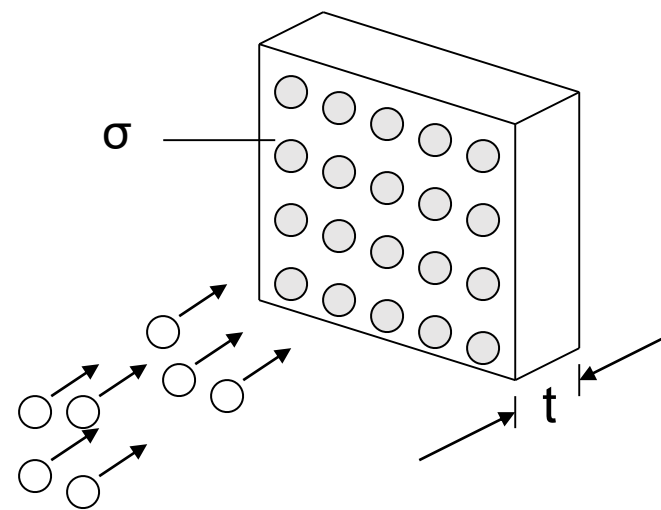
σ 有面积的量纲, 单位为靶 (b).

$$\rightarrow \begin{cases} 1b = 10^{-24} \text{ cm}^2 \\ 1mb = 10^{-27} \text{ cm}^2 \end{cases}$$

一个典型原子核的半径为6fm,,经典截面

$$\pi R^2 = 1.1 \times 10^{-24} \text{ cm}^2 = 1.1b$$

由此知反应截面的单位与核的几何大小同数量级.



截面的概念

核反应

核反应截面

例 核反应 $^{27}\text{Al}(n,\gamma)^{28}\text{Al}$ 已知反应截面、靶厚和入射中子数分别为分别为，试求出射的 γ 光子数。

$$\sigma = 2\text{mb}, t = 0.2\text{mm}, n_i = 10^{10} / \text{s}$$

解：单位体积的靶核数

$$N = \frac{\rho}{A} N_0 = \frac{2.7}{27} \times 6.022 \times 10^{23} = 6.022 \times 10^{22} / \text{cm}^3$$

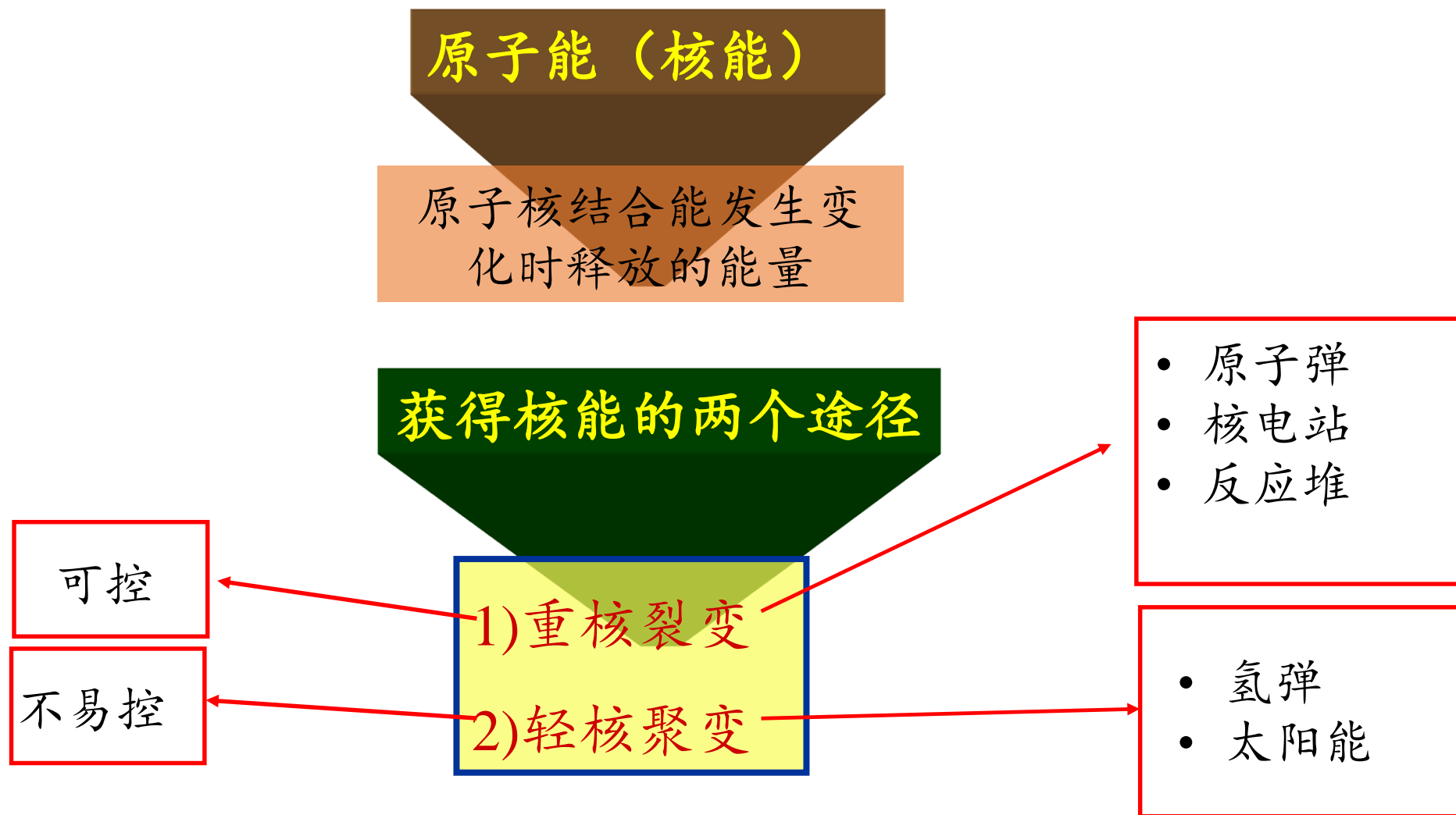
$$\text{则 } n_1 = \sigma N t n_i = 2.4 \times 10^4 / \text{s}$$

可知,打进1百万个中子, 只有2.4个 γ 光子释出。可见反应几率甚小。

卢瑟福曾认为不可能从原子中获取能量：“任何相信能从原子中获取能量的人，都是在说梦话……”

???

核反应—裂变和聚变



核反应—裂变

重核裂变

- 自发裂变：

核素自身能够裂变

在天然核素中几乎不存在

重的人造核素的主要衰变方式

- 诱发裂变：

入射粒子与重原子核作用发生的一个反应道

入射粒子可以是中子或高能带电粒子

通常产生两碎片，偶尔3-4碎片(钱三强, 何泽慧)

1934年，费米小组用中子轰击 ^{238}U ，对得到的放射性产物半衰期的测定表明它不属于其它重元素！这其实是重核裂变的最早证据。但他们作出错误判断，猜想那是“第93号元素”同时说明证据不足。

核反应—裂变



E.Fermi,意大利, 1901-1954

获1938年度
诺贝尔物理学奖

费米的主要贡献：
用中子辐照产生新
放射性元素以及用
慢中子引起核反应
的有关发现

- 玻恩的学生
- 原子能之父
- 中子物理之父
- 发现100号元素金属镧
- 建立人类第一台可控核反应堆
- 提出宇宙线起源理论
- 领导曼哈顿工程
- 美国费米实验室
- 费米子
- 长度单位费米
- ...

核反应—裂变

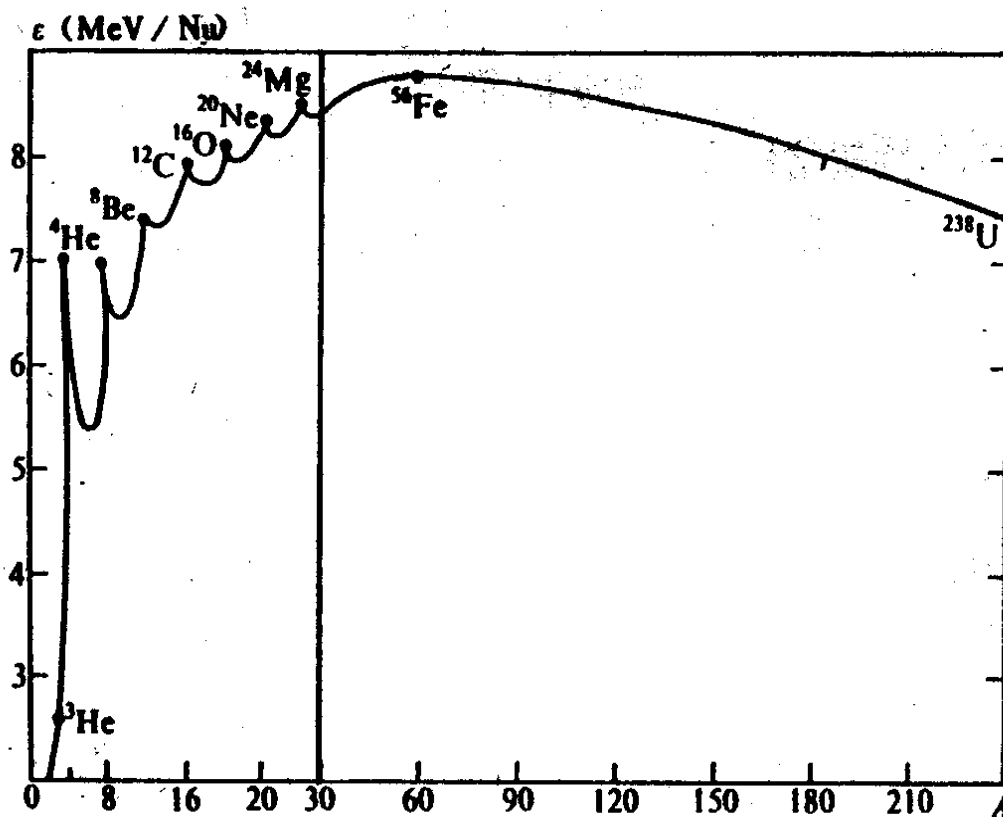
重核裂变

从结合能图知,重核裂变为两个中等核时,平均结合能将增加1MeV左右,即每个核子平均贡献增加1MeV左右的能量.

一个铀核能提供的能量几乎是化学反应是铀核裂变平均要放出2.5个中子,而这

平均来看,每个 ^{235}U 裂变时将释放的约为200 MeV。释放的能量表现为释放出的中子及相伴发生的 β 衰变产物的

碎片的动能:170MeV
放出中子的动能:5MeV
 β^- 粒子和 γ 能量:15MeV
与 β^- 相伴的 $\bar{\nu}$:10MeV



重要的一点

$\epsilon \geq 1$

ϵ 约为

10^8 (J)

核反应—裂变

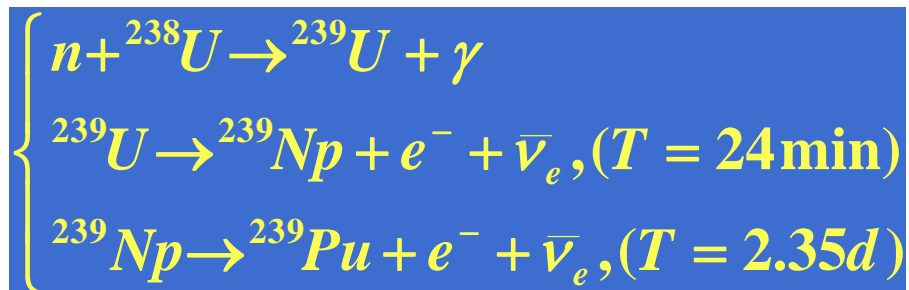
重核裂变

^{235}U 占天然铀的0.72%，自然界仅有的能由热中子引起裂变的核素

^{238}U 占天然铀的99.27%

^{238}U 可用来生产核原料：

核裂变原料



1939年发现裂变时,世界上没有浓缩铀,当时还未发现钚 ^{239}Pu

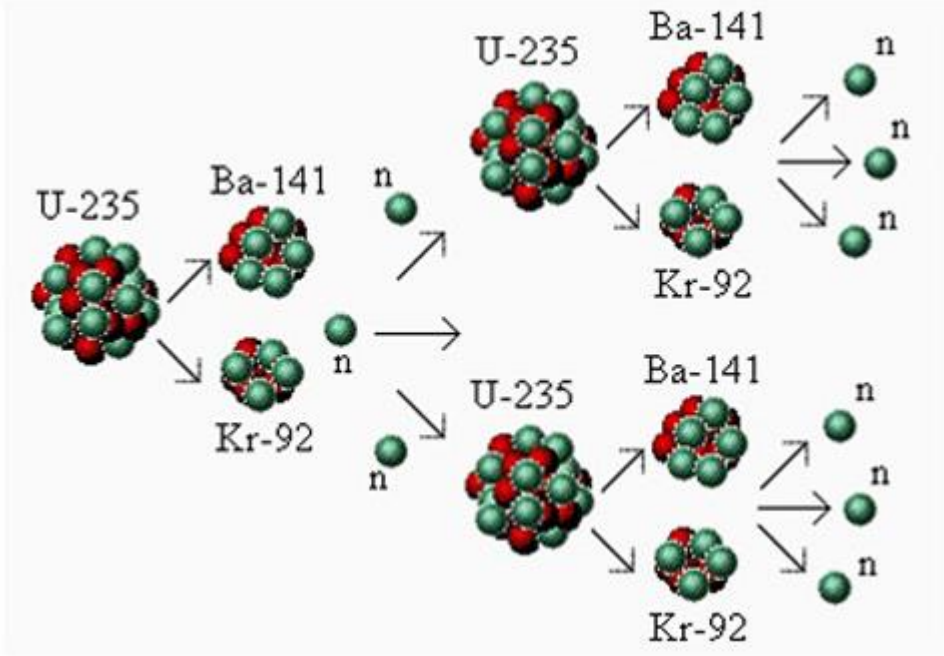
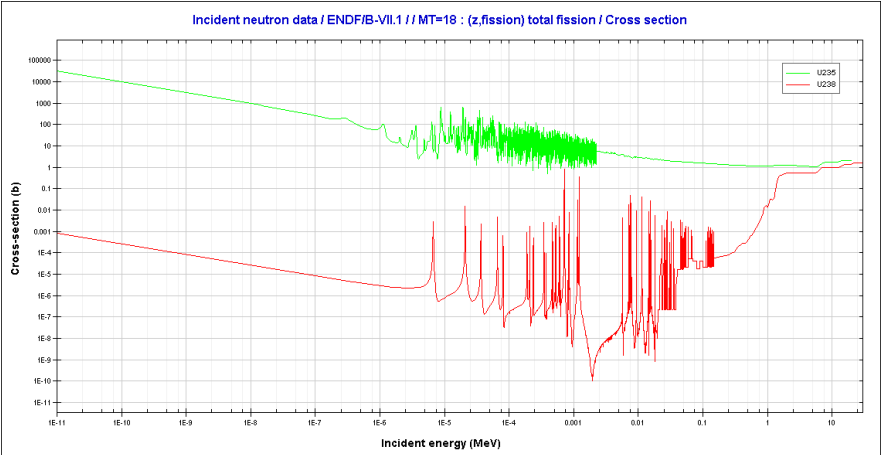
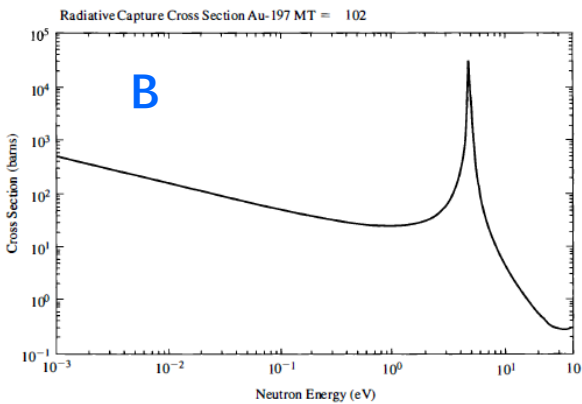
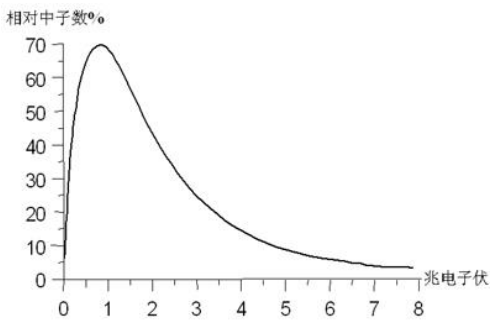
1945年美试爆的第一颗原子弹原料: ^{239}Pu

核反应—裂变

重核裂变

链式反应

^{235}U 每次裂变除了放出大量的能量,还会放出大量中子



临界体积

在纯铀中,中子易从其表面逃逸而使反应中止。只有当其体积大于“临界体积”时才能发生链式反应。

受控核裂变

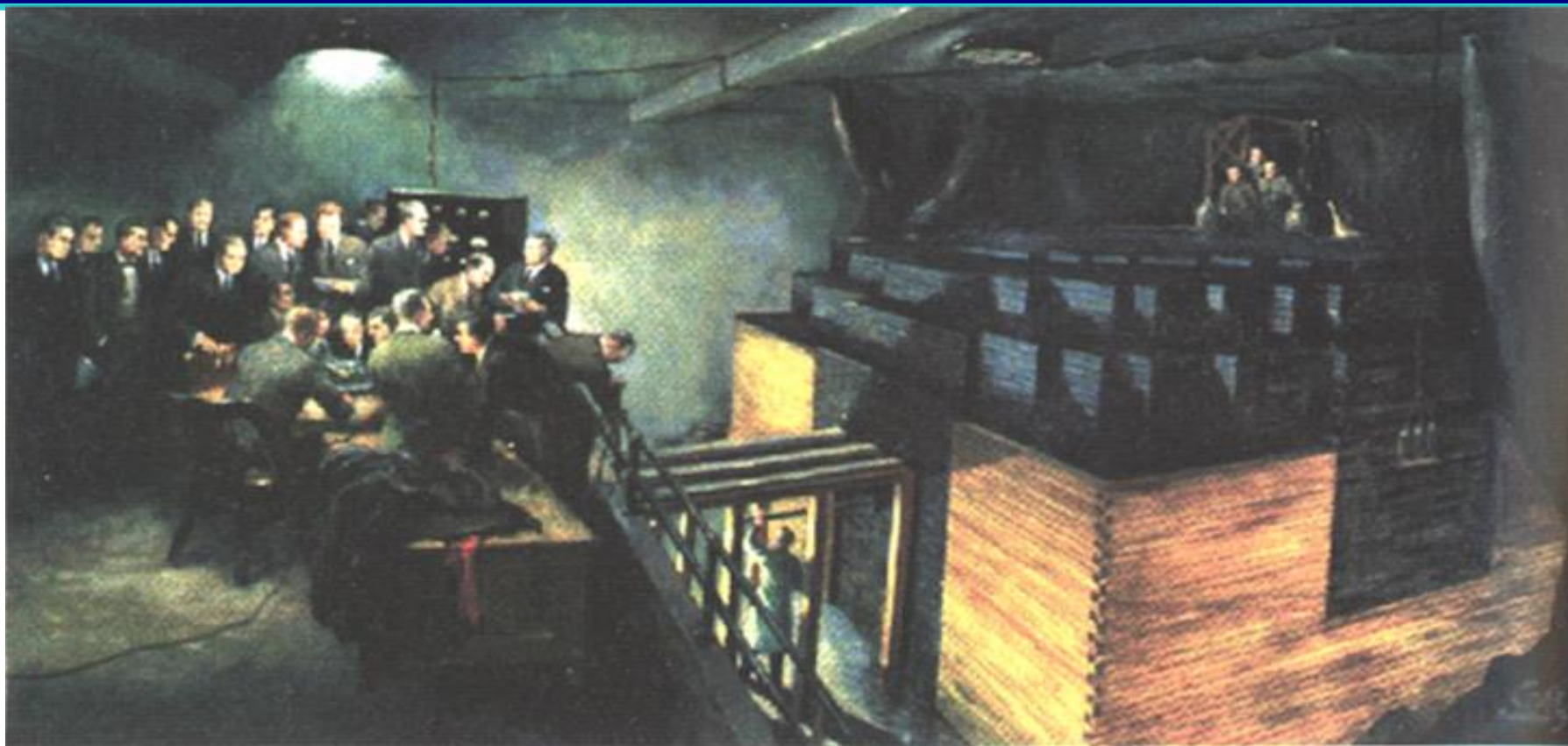
欲使裂变反应持续,关键在于使中子减速.

目前常用的减速剂是重水和石墨.1942年世界第一个反应堆用石墨为减速剂.我国1958年建成的反应堆用重水为减速剂。

反应堆的控制棒用吸收中子很强的镉或硼制成。

链式反应大约1秒钟可产生1000代中子，解决的办法是靠“缓发中子”。在设计反应堆时，要使缓发中子放出后才达到临界,才能使链式反应进行.因此有足够的时间来控制反应速度.

减速
剂



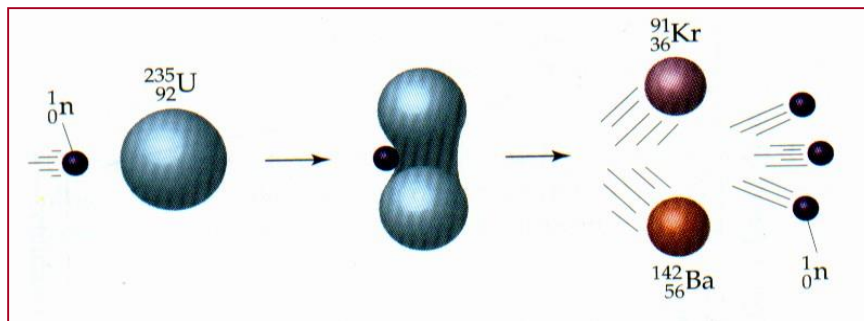
1942年世界上第一个核反应堆运行成功。由于战争时期保密，不允许拍照，这是一张油画。图中右上方是由三位青年物理学家组成的“敢死队”，他们手握大罐，万一发生意外，随时准备将吸收中子的镉溶液注入反应堆。站在下面的那位科学家正按照费米的指令，一点一点地往外抽最后一根镉棒，将链式反应启动。下午15:45

“那个意大利航海家已登上了新大陆。”

核反应—核能

重核裂变

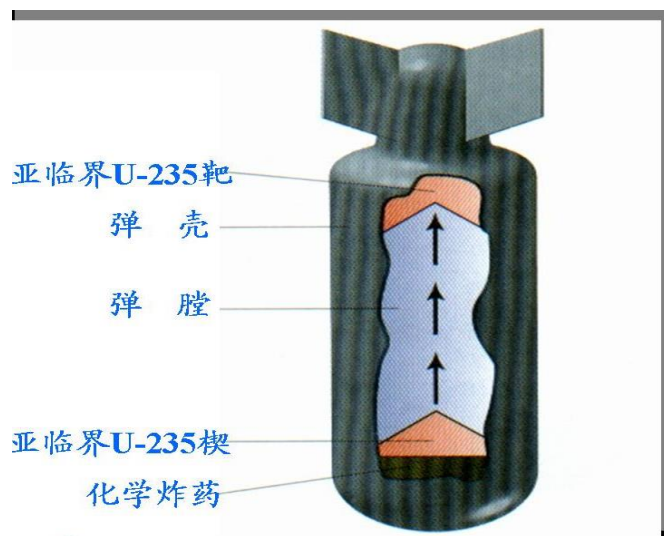
原子弹



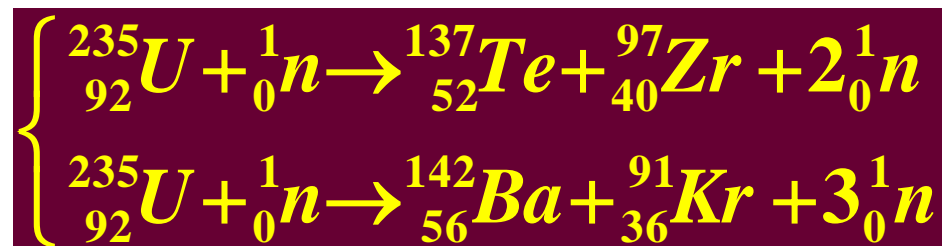
35种元素的
200多种核素

发生链式反应

爆炸



“原子弹之父” 奥本海默



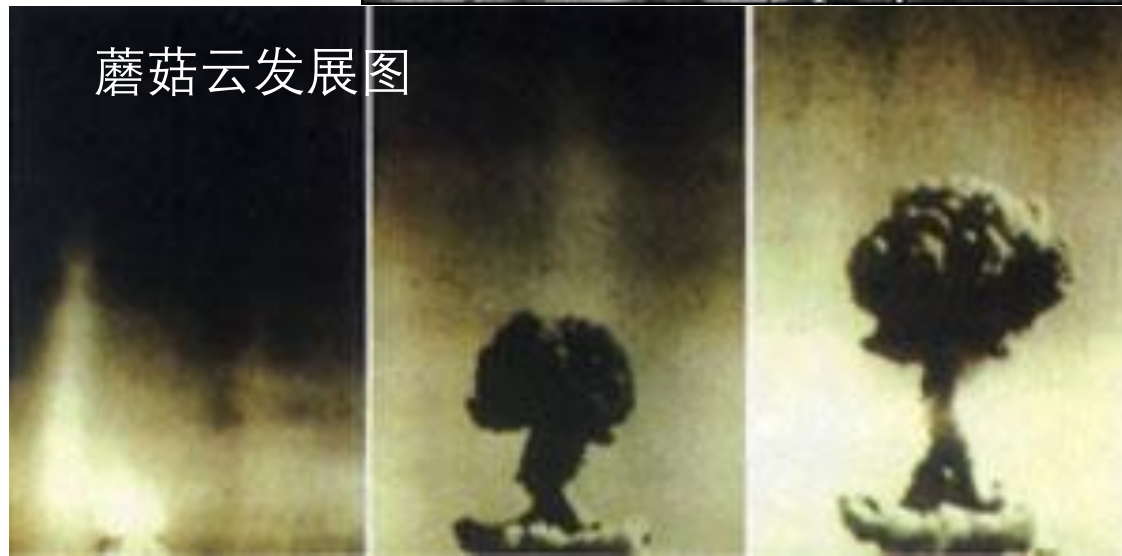
铀-235 的临界质量约为1kg.

任何有核反应堆的国家都不难得到爆炸级的裂变材料，原子弹的基本设计又如此简单，从而为防止核武器扩散带来了困难。

1964年10月
16日15时,中
国在本国西
部地区试爆
成功一颗原
子弹



蘑菇云发展图



“小玩意儿”钚装药重6.1千克，TNT当量2.2万吨，试验中产生了上千万度的高温和数百亿个大气压，致使一座30米高的铁塔被熔化为气体，并在地面上形成一个巨大的弹坑。

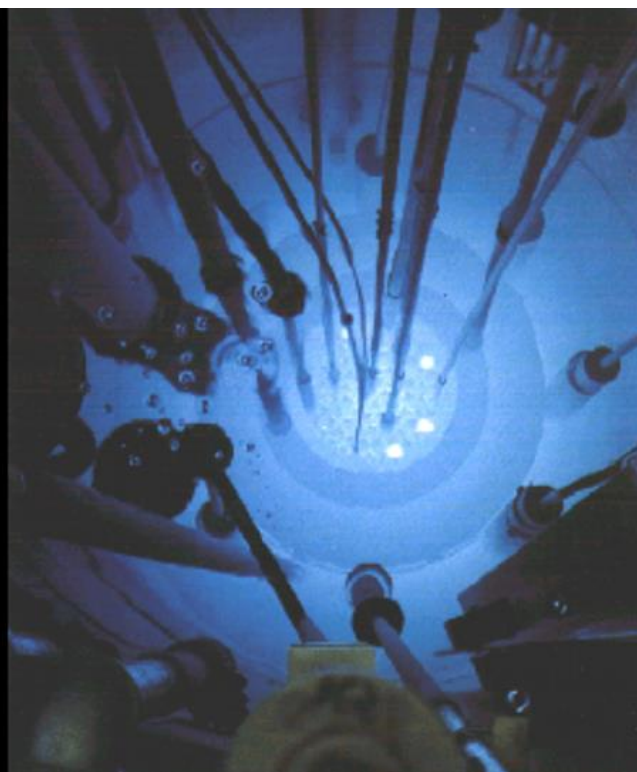
在半径为400米的范围内，沙石被熔化成了黄绿色的玻璃状物质，半径为1600米的范围内，所有的动物全部死亡。

“原子弹之父”奥本海默在核爆观测站里感到十分震惊，他想起了印度一首古诗：

“漫天奇光异彩，
有如圣灵逞威，
只有一千个太阳，
才能与其争辉，
我是死神，
我是世界的毁灭者。”

核裂变 反应堆

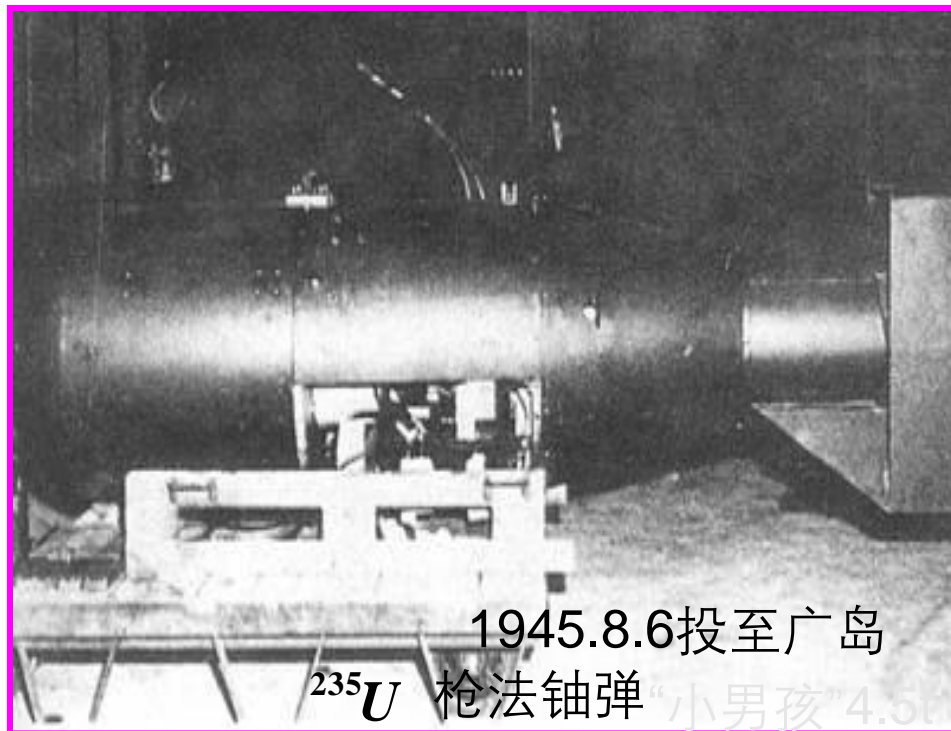
淡蓝色的辉光
是粒子运动速
度超过水中光
速而发出的切
连柯夫辐射。



在长崎投掷的原子弹爆炸后形成的蘑菇状云团，爆炸产生的气流、烟尘直冲云天，高达12英里多。

美国原子弹突袭广岛和长崎造成了巨大的毁伤。广岛市区80%的建筑化为灰烬，6.4万人丧生，7.2万人受伤，伤亡总人数占全市总人口的53%。长崎市60%的建筑物被摧毁，伤亡8.6万人，占全市总人口的37%。

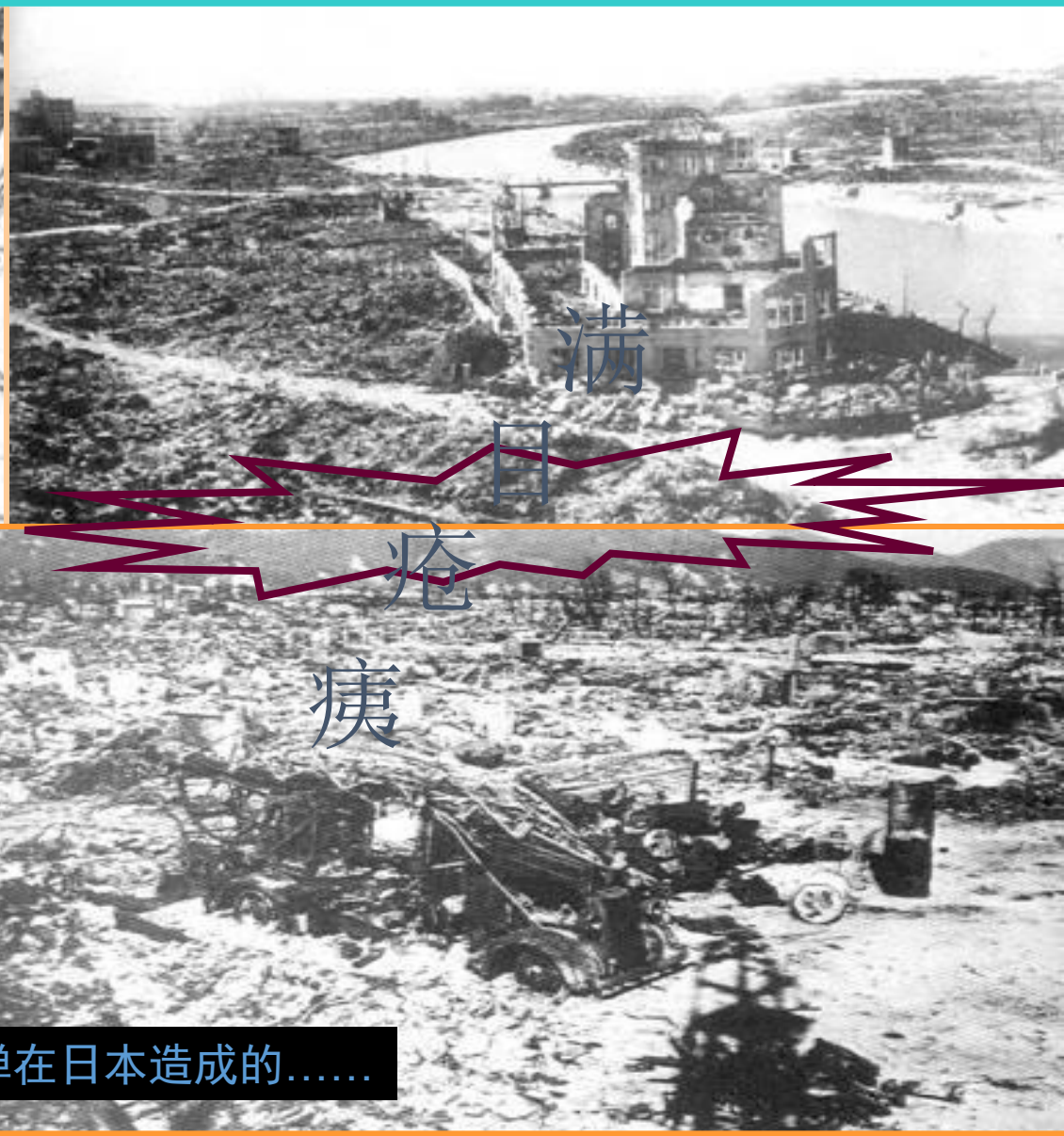
这是美国在日本投掷的两颗原子弹



1945.8.6投至广岛
 ^{235}U 枪法铀弹 “小男孩” 4.5t



1945.8.8投至长崎
 ^{239}Pu 内爆钚弹 “胖子” 5t



满

日

疮

痍

原子弹在日本造成的.....

核反应—核能

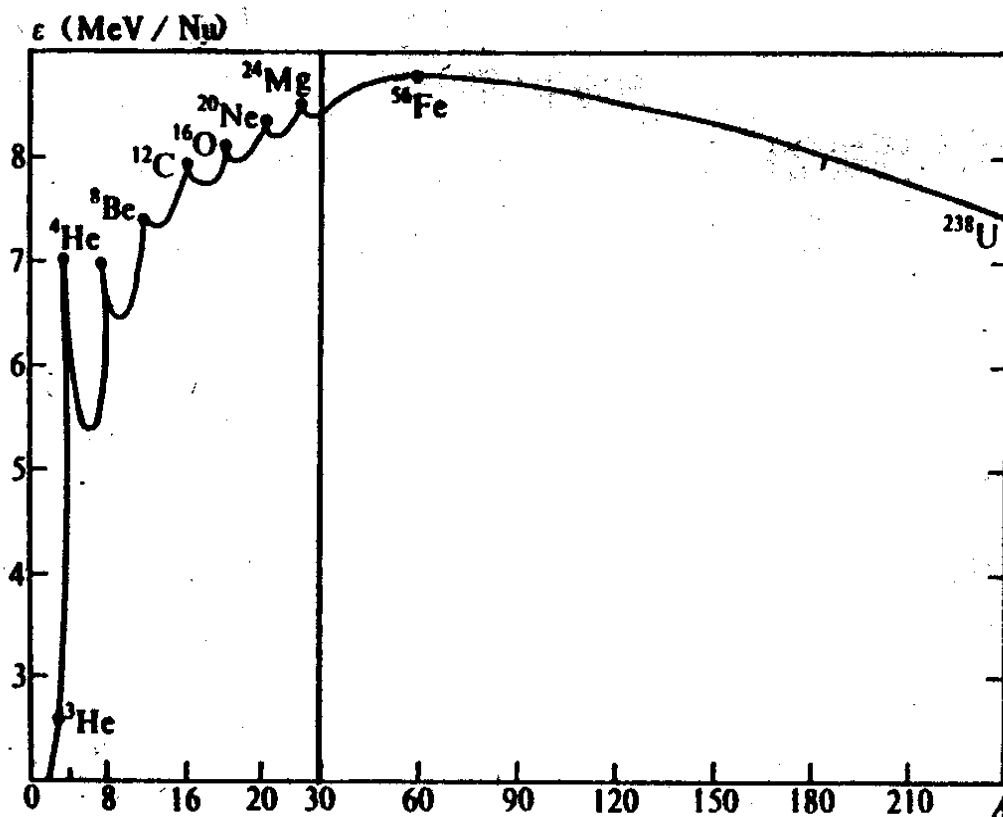
轻核聚变

优势:

- 轻核聚变中,每个核子贡献的能量是化石燃料的4倍
- 能源充足,化石燃料 ~100年,天水提取D ~100亿年

困难:

- 轻核聚变材料为带电粒子,不容



页
每

轻核聚变

氘核靠短程核力聚合在一起，核子间距 $r < 10\text{fm}$ 才会有核力作用， $r = 10\text{fm}$ 时的库仑势垒高度为：

$$E_c = k \frac{e^2}{r} = 144\text{keV}$$

两个氘核的聚合必须克服这个势垒，即每个氘核至少需要 72keV 的动能。

假如视其为平均动能，由 $E_k = \frac{3}{2}kT$ 可得出相应的温度为 $T = 5.6 \times 10^8\text{K}$

从理论上估计，聚变温度约为 10^8K ，因此聚变反应又叫热核反应

在此温度下所有原子均电离而形成等离子态。

核反应—核能

轻核聚变

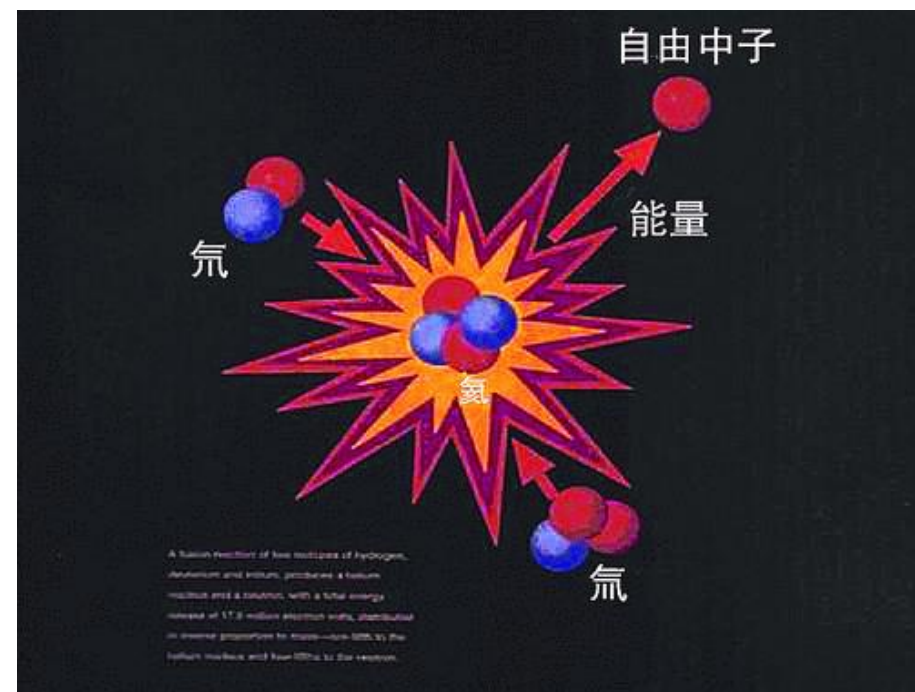
实现聚变反应的三个条件

- 1) 等离子体的温度足够高;
- 2) 等离子体的密度足够大;
- 3) 所需的高温 and 密度须维持足够长的时间.

1957年,劳逊将以上三个条件定量化(对dt反应)形成劳逊判据,这是实现聚变反应并获得能量增益的必要条件.

劳逊判据

$$\begin{cases} n\tau = 10^{14} s / cm^3 \\ T = 10keV \end{cases}$$



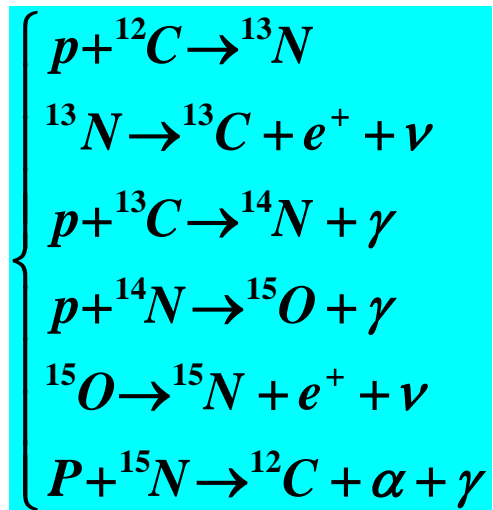
核反应—核能

轻核聚变

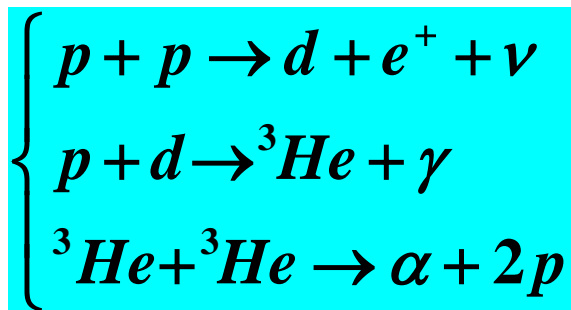
太阳能：引力约束聚变

太阳发生的是两种轻核聚变反应。

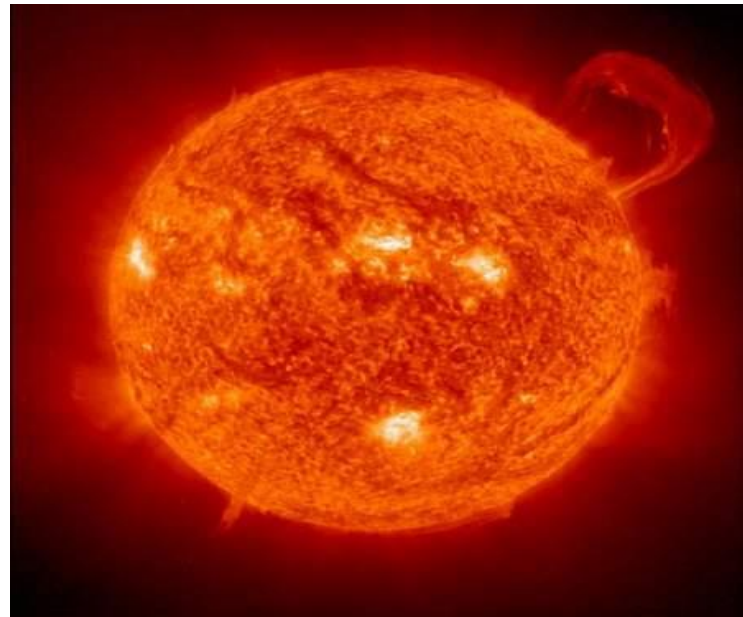
C循环
(贝蒂循环)



p-p循环
(克里齐菲尔德循环)



两种循环总的效果相同,均为:



天文研究表明,按太阳总质量的75%为氢计算,其热核反应可维持750亿年.

4个质子的聚变过程中每个质子贡献6.7MeV,比 ${}^{235}\text{U}$ 裂变每个质子的贡献大八倍,太阳释放的能量相当于每秒种爆炸900亿枚百万吨级的氢弹.

核反应—核能

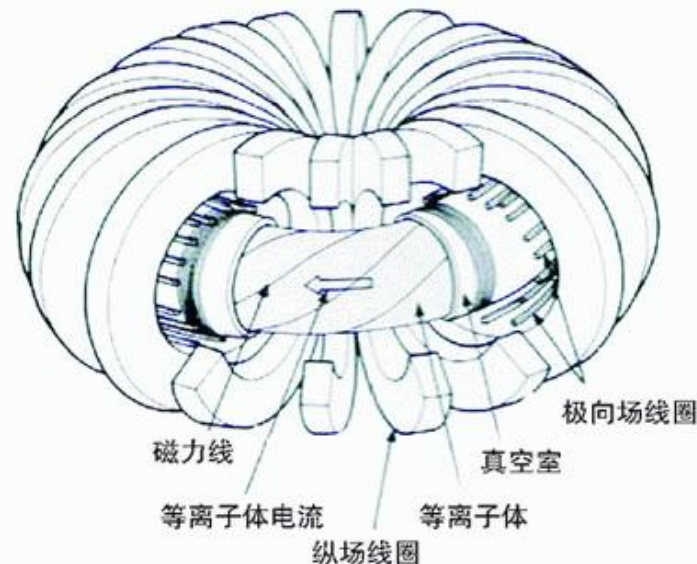
轻核聚变

在地球上实现受控核聚变的约束方式

磁约束

太阳的热核聚变由万有引力约束，这不仅在地球上做不到，

磁约束



大的质量，也不能实现。

带电粒子在磁场中绕B线作拉莫旋进，横越B线的运动受到限制，此为磁场能够约束等离子体的基本原理。但在磁场中等离子体不稳定，难于长时间将粒子约束在等离子体内，这就是磁约等离子体的基本困难。

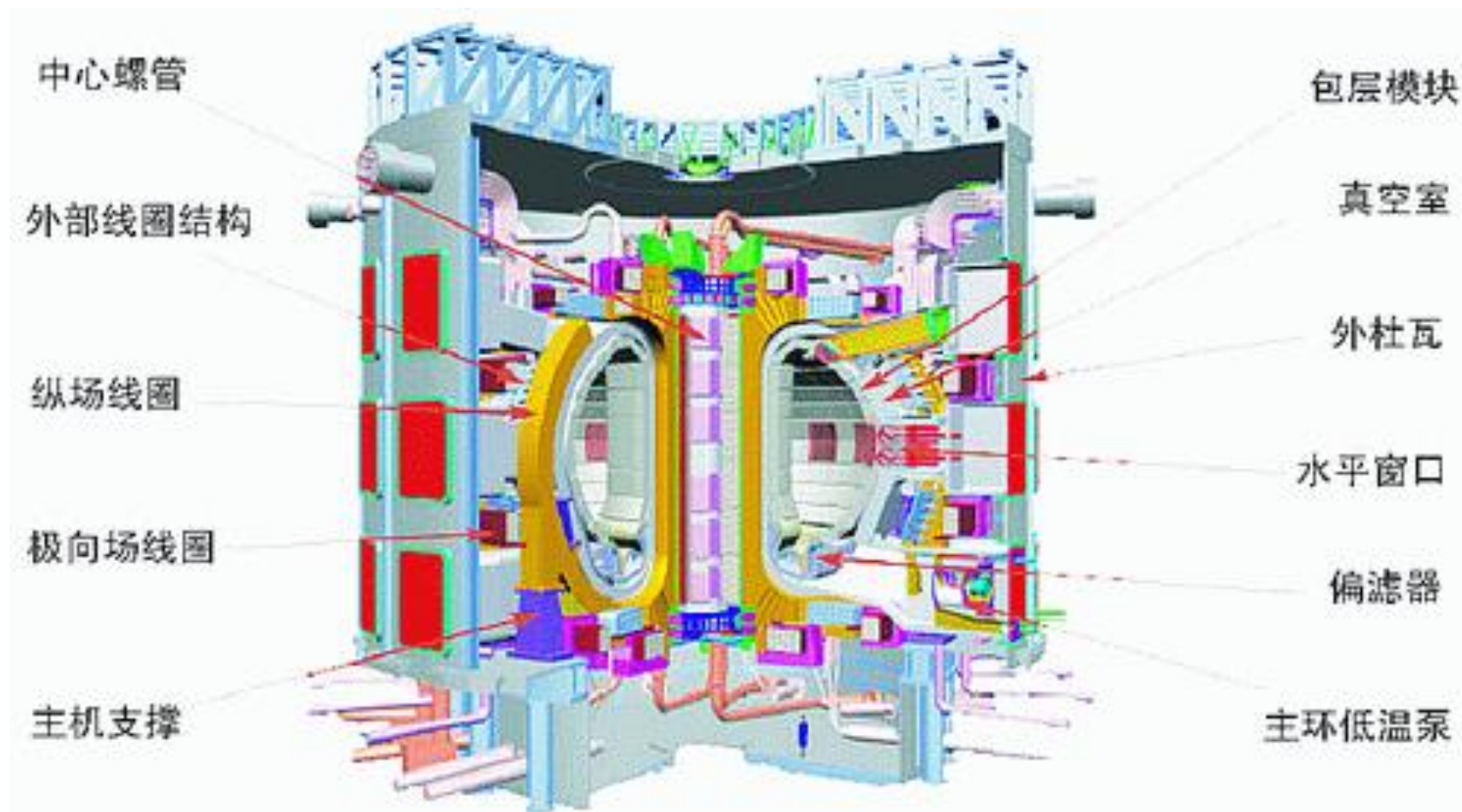
惯性约束聚变

巴索夫（前苏诺贝尔奖得主）于20世纪60年代提出。不加外力而依靠聚变燃料自身惯性，在高温高压下短时间内完成聚变反应。氢弹实现的就是惯性约束。而可控的惯性约束必须在mm量级的靶内实现才不会产生灾难性后果，在技术上的难点很多。

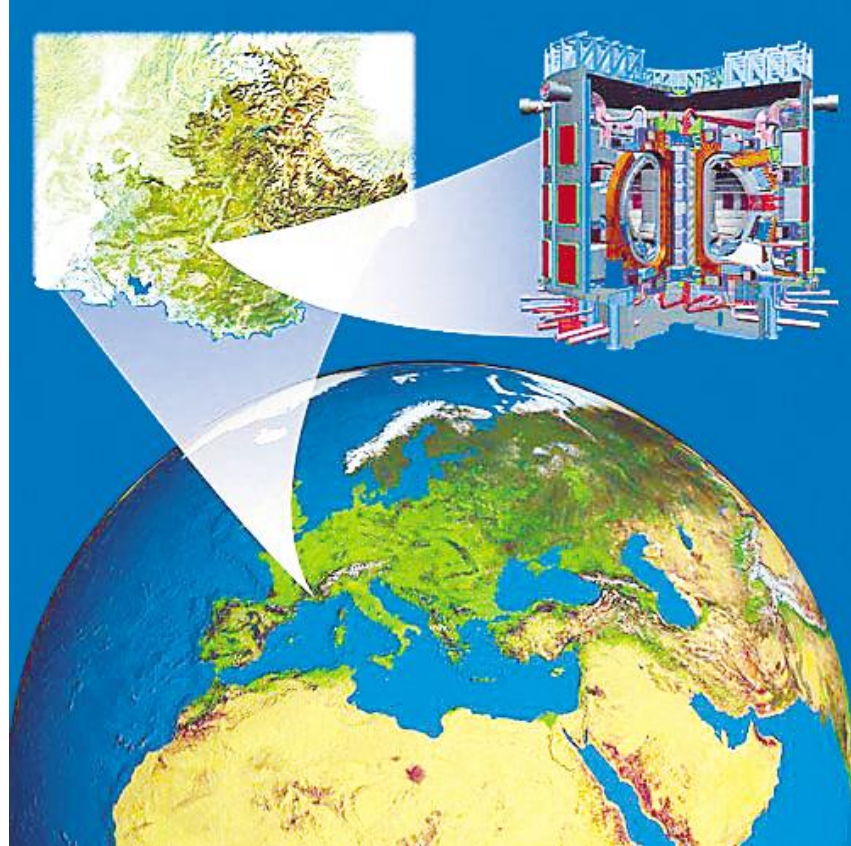
核反应—核能

轻核聚变

2006.11.21, 中国, 欧盟, 俄罗斯, 印度, 日本, 韩国, 美国决定将其建在法国南部. 这项计划花费128亿美元, 目的是研究清洁而且无限的能源. 建设过程预计超过十年, 工程从2008年开始.



国际热核聚变实验堆 (ITER) 装置示意图.



建造地点：法国卡达拉舍

生产约500兆瓦的聚变功率，持续时间为1000秒





设施概貌

核反应—核能

轻核聚变

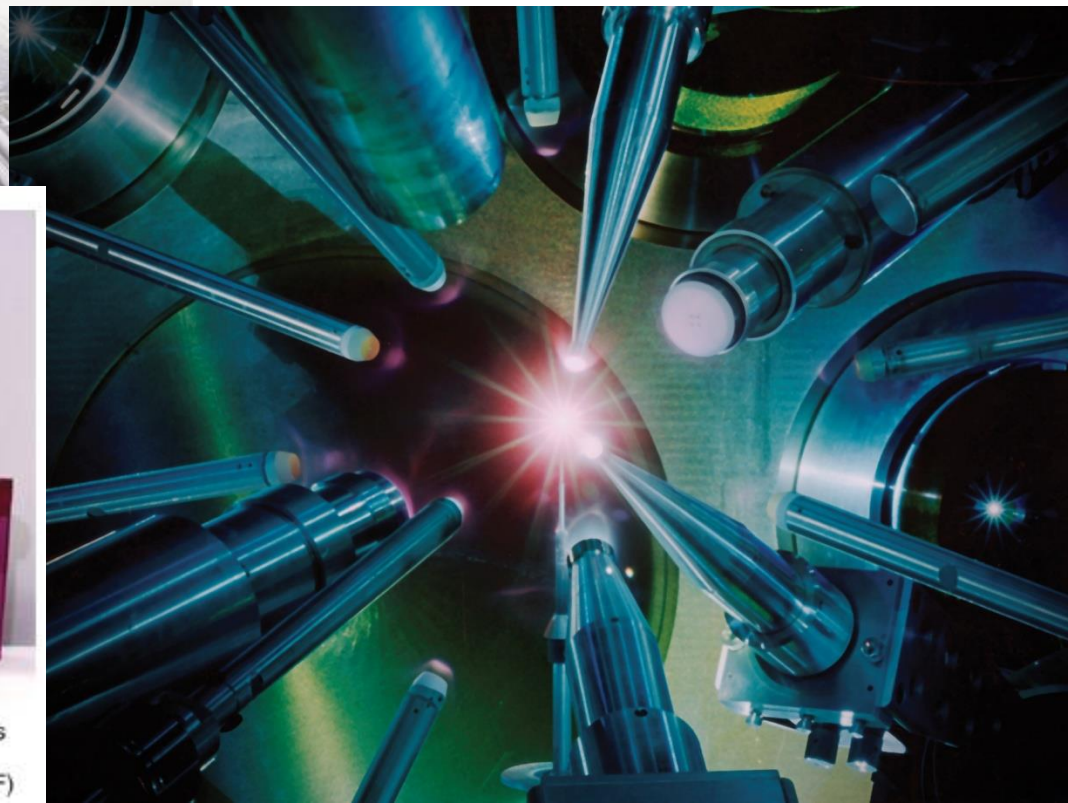
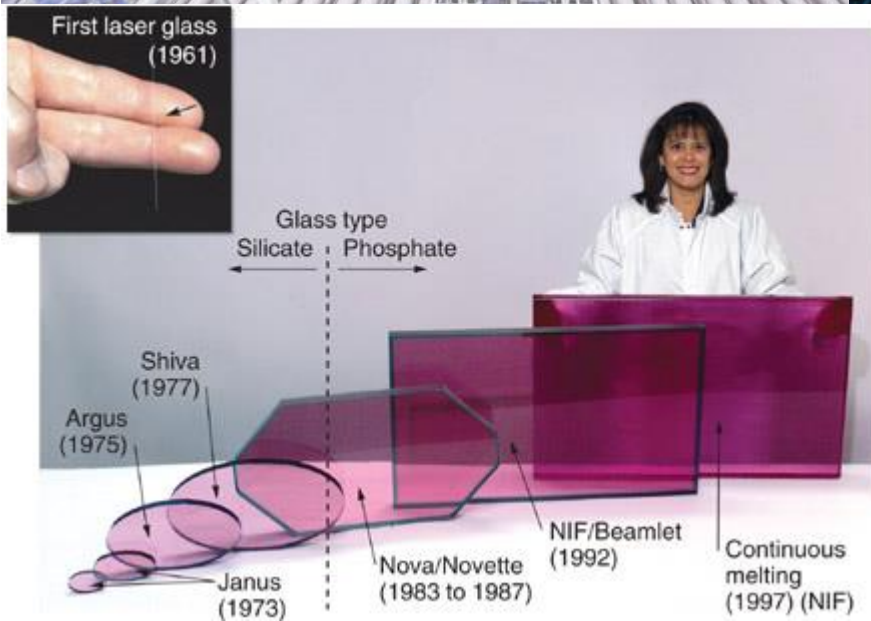
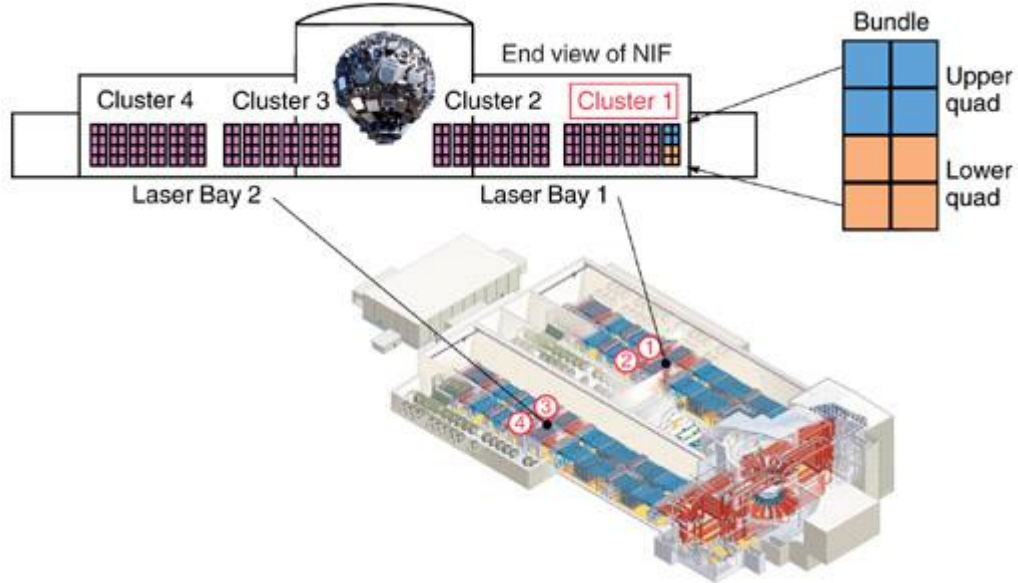
2006.9.28,中国耗时8年、耗资2亿元人民币自主设计、自主建造而成的新一代热核聚变装置EAST首次成功完成放电实验,获得电流200千安、时间接近3秒的高温等离子体放电.EAST成为世界上第一个建成并真正运行的全超导非圆截面核聚变实验装置.

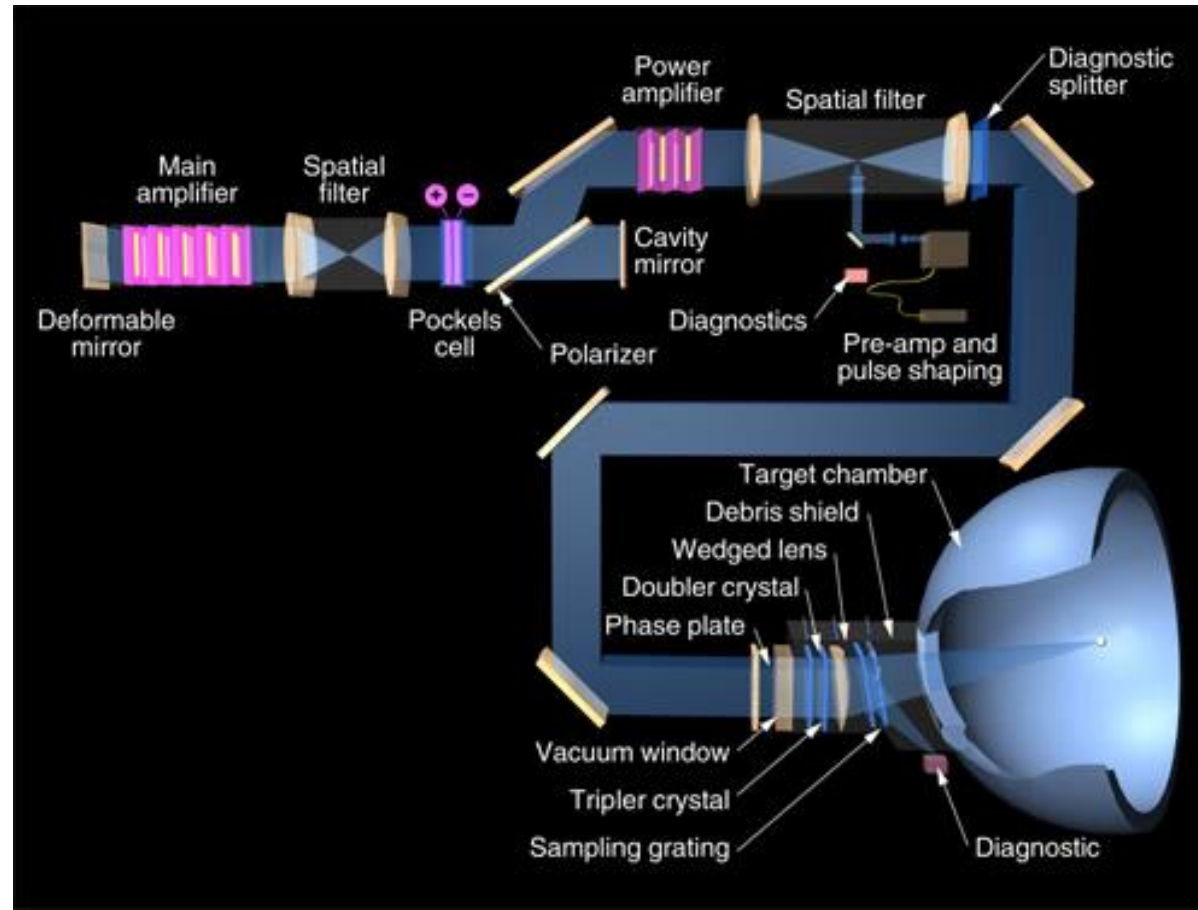
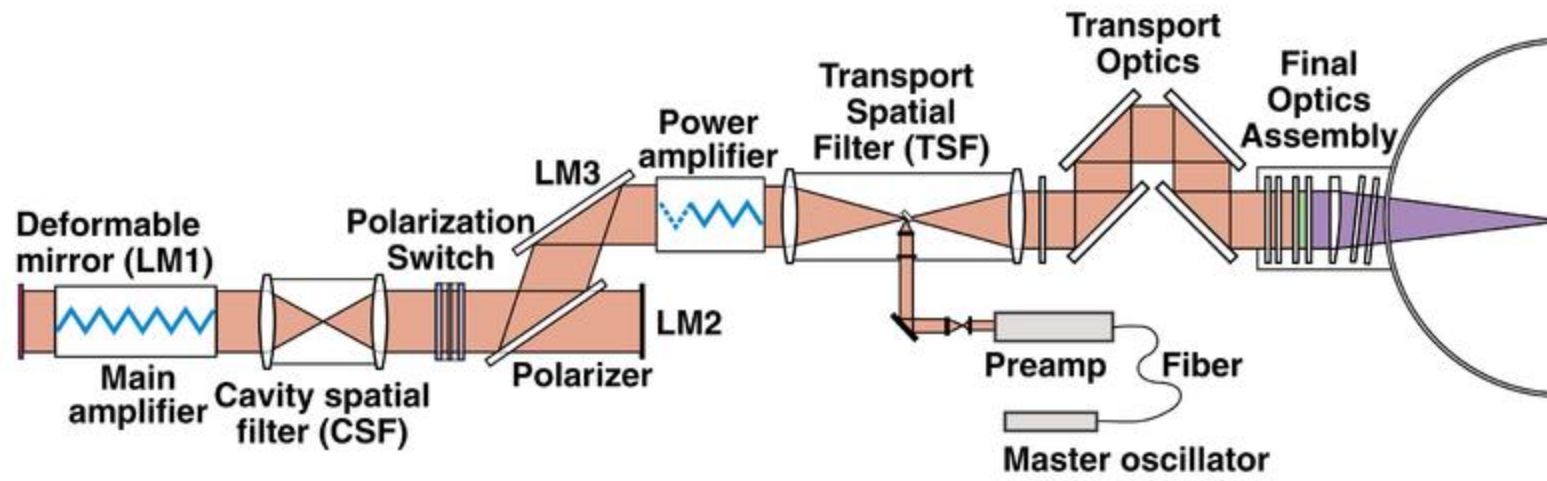


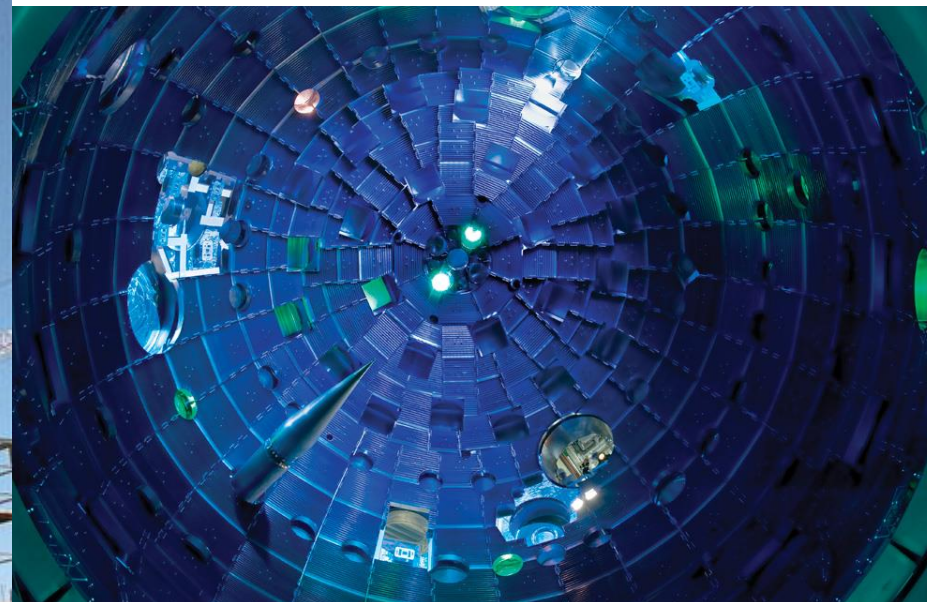
美国国家点火装置

位于加州的利弗莫尔市，由劳伦斯利弗莫尔国家实验室建造。它同时（230亿分之一秒之内）用192束高功率的激光（500万亿瓦，比同瞬间美国全国电能消耗总和的1000倍还多）照射靶丸，以期实现受控核聚变。该装置从1994年开工，计划建造和运行费用超过35亿美元。2012年该装置开始投入实验运行。

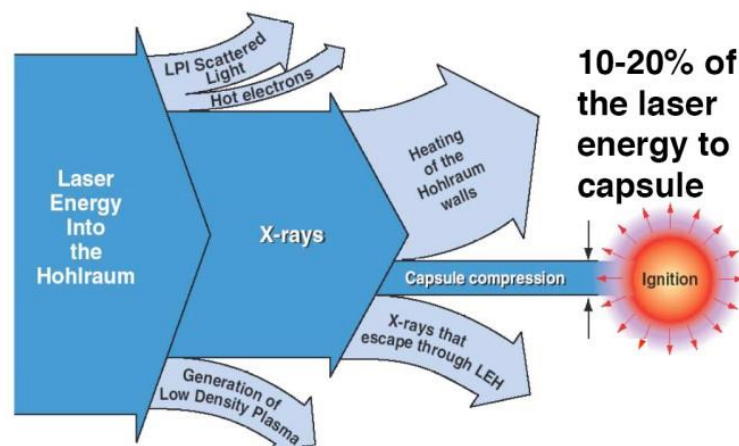


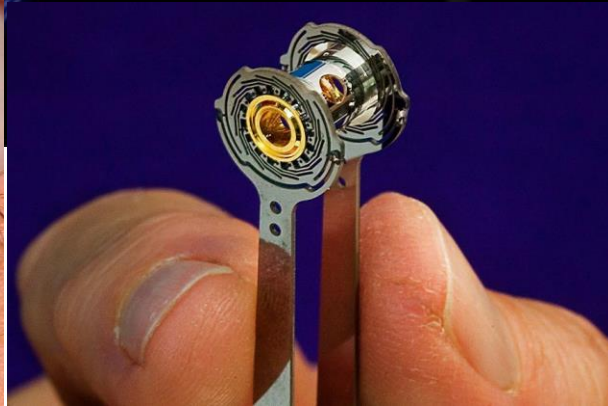
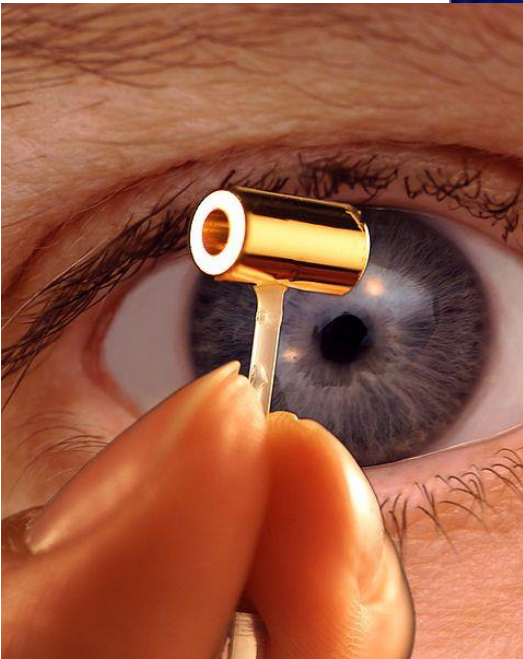
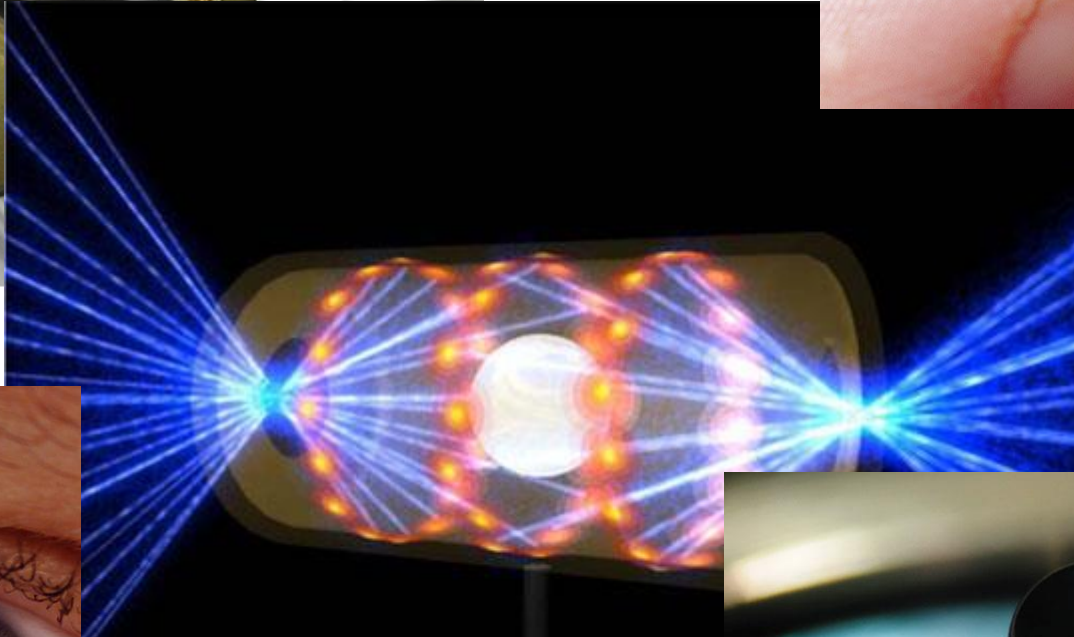
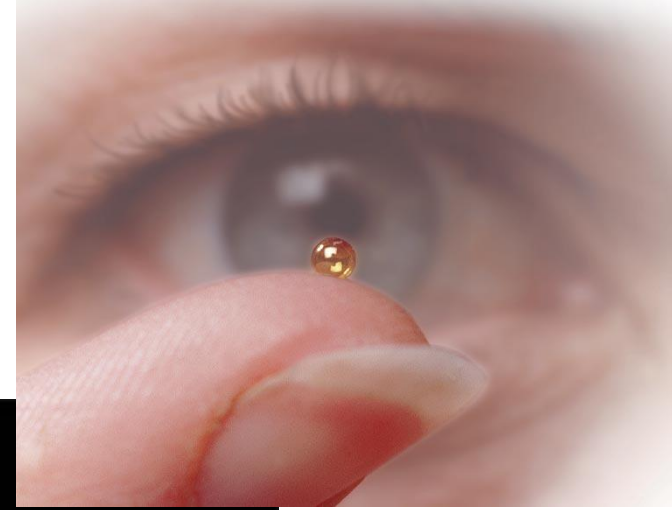
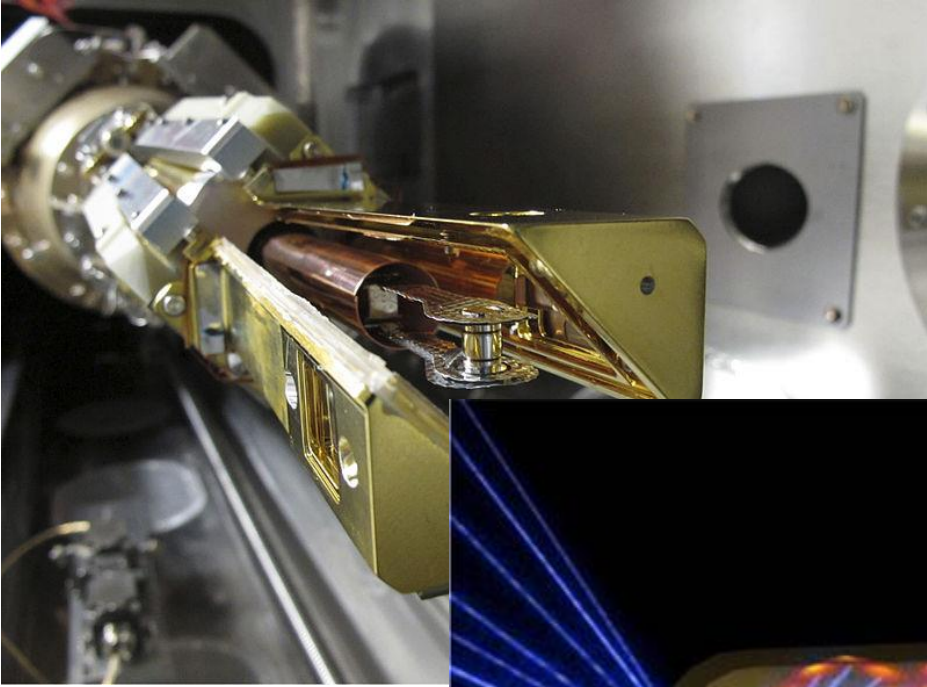






直径10m的靶室





1



激光束快速加
热黑体辐射空
腔结构的内表
面

2

间接驱动照明



黑体辐射空腔中
的 X 射线在空腔
表面产生类似火
箭的喷气物，对
空腔的内部燃料
产生压力

3

燃料腔压缩



在内爆的最后
阶段，燃料核
的密度达到铅
的 20 倍并在
100,000,000
摄氏度下点火

4

核聚变点火



热核燃烧快速
通过整个压缩
燃料，产生的
能量是输入能
量的很多倍

5

核聚变燃烧



氢弹： 惯性约束聚变

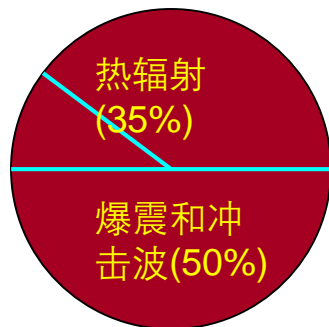
轻核聚变反应中,氘(d)与氚(T)的反应截面最大而释放能量最多:



氘化 ${}^6\text{Li}^2\text{H}$)可作为氢弹的原料

氢弹的原理：引爆普通炸药引发裂变反应,产生高温高压同时放出大量中子,中子与 ${}^6\text{Li}$ 反应产生氘,发生d+T聚变反应.

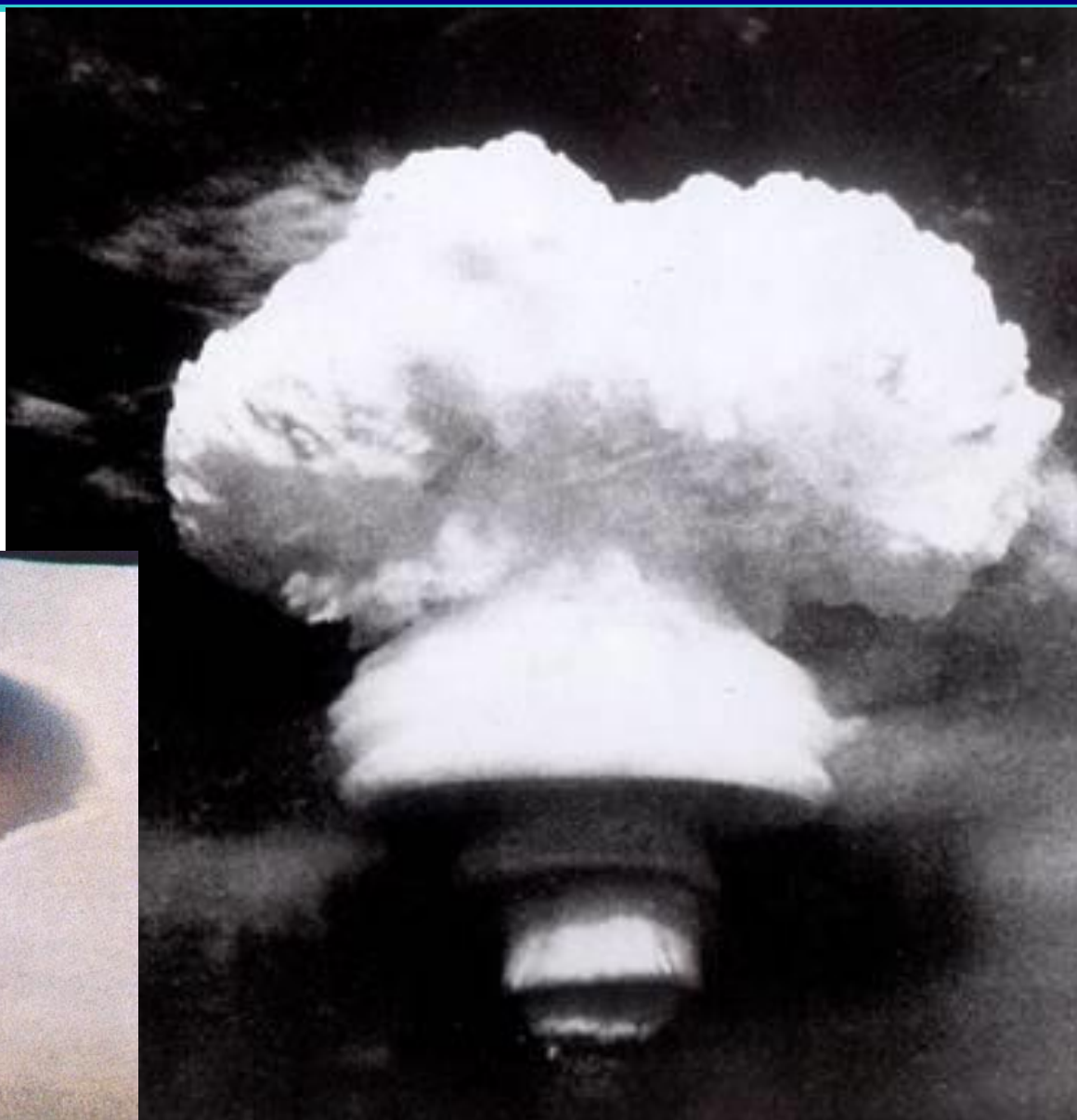
典型氢弹
(裂变弹)
的能量



欲使这两部分能量相对减少,就要增加产生的中子数量,使聚变的贡献大于裂变贡献,这使人们进一步研究中子弹.但纯聚变弹至今仍实现不了.

氢弹的本质是利用惯性力约束高温等离子体(动力性约束).

1967.6.17, 中国第一颗氢
弹在西部地区上空试爆成功
(比1000个太阳还亮)
(距中国第一颗原子弹试爆
成功不到3年)



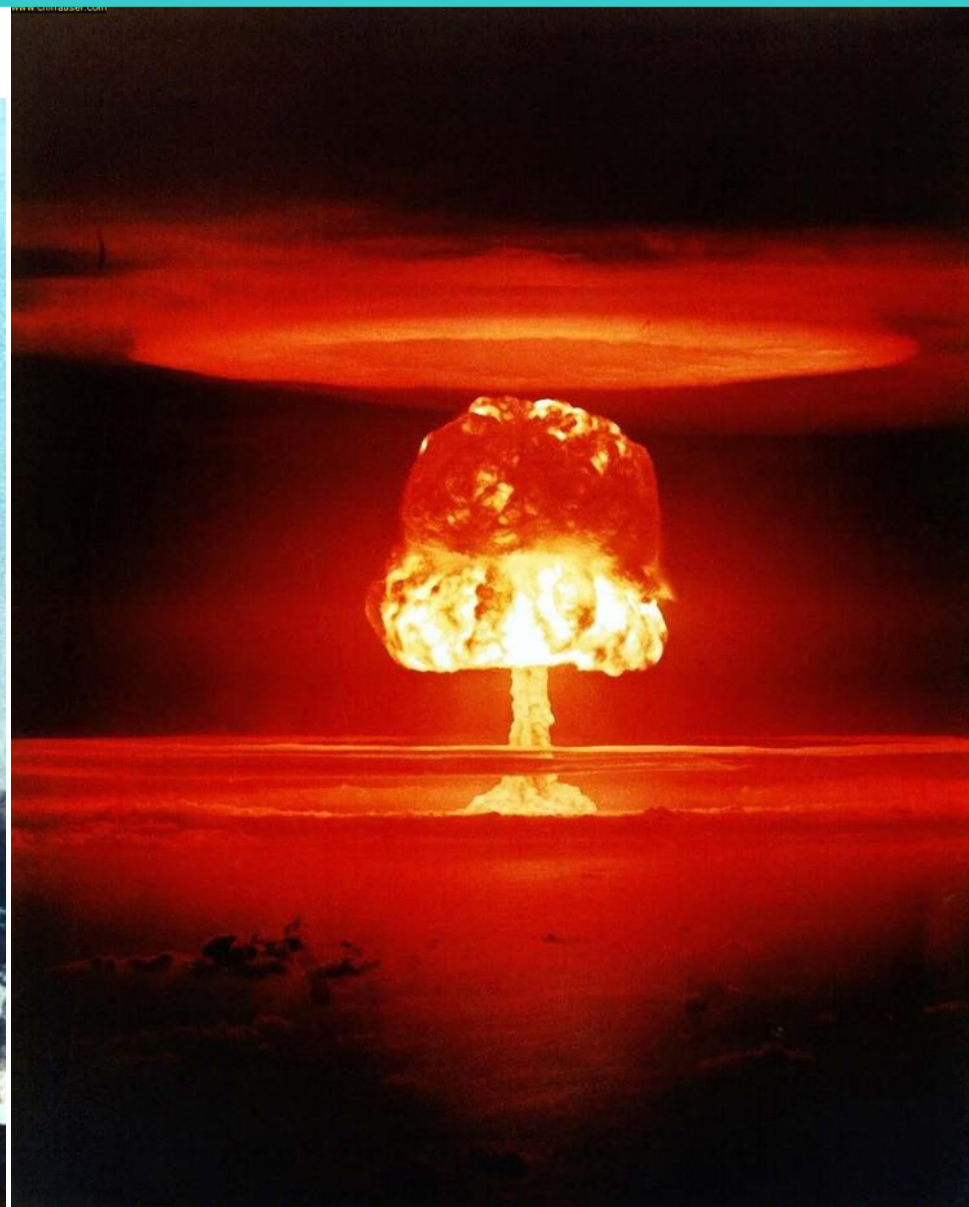
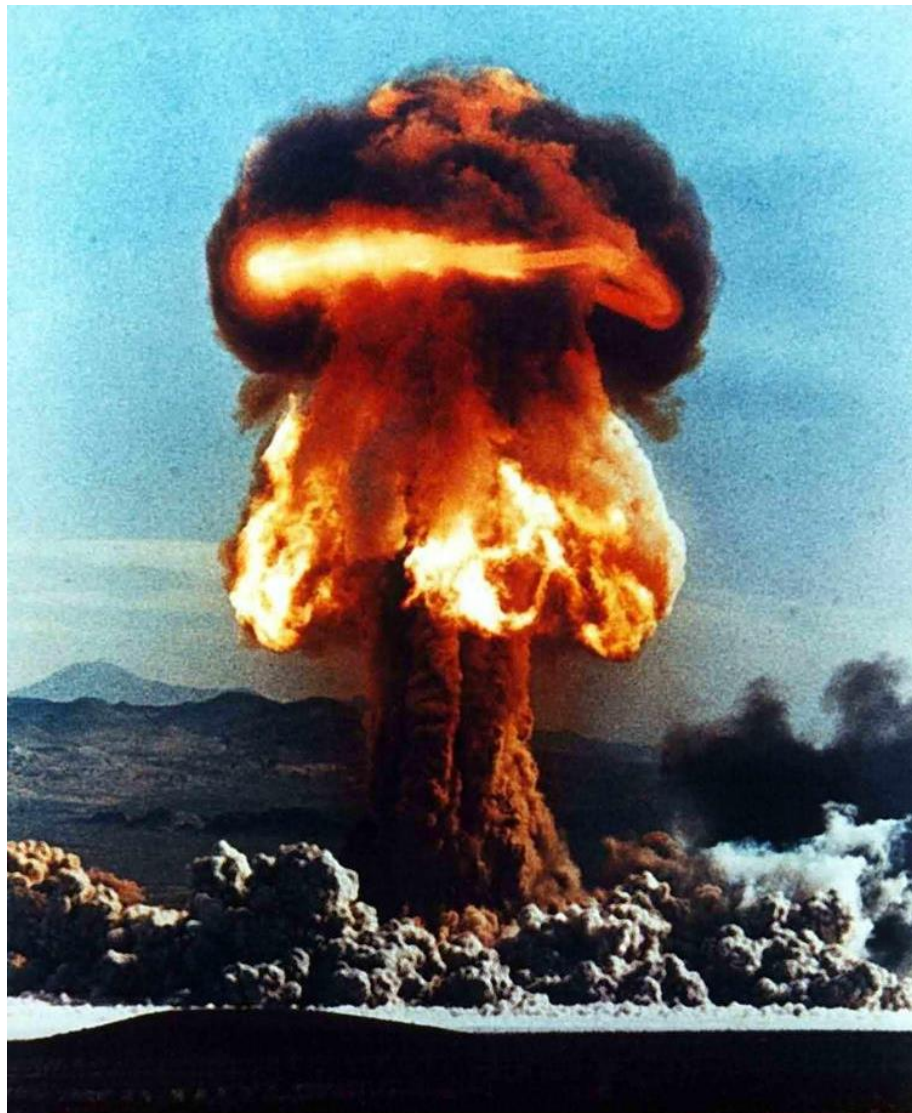


1946年7月25日(二战结束之后将近一年)，**史上第一场水下原子弹试爆**释出了一团一英里高的蒸汽云，最顶部是一道道上升的水柱。在基部的地方，爆炸风扩散的震波看起来像个白色的圆圈，吞噬了一支无人的海军船队。这场试爆是“十字路口行动”（美国军队在太平洋马绍尔群岛进行的一系列核子试爆）的一部分，是地球上引爆过的**第五颗原子弹**。



1952年11月1日，世界的第一颗氢弹在太平洋的埃尼托威克环礁上方引爆，震撼了天际。这场美国的试爆行动代號「艾薇麦克」，把附近岛屿的植被全部连根拔起、造成了一个直径超过一英里的坑，並把大块大块受到放射线污染的珊瑚炸到50公里以外的地方。

核弹爆炸的瞬间



令人恐怖的美丽

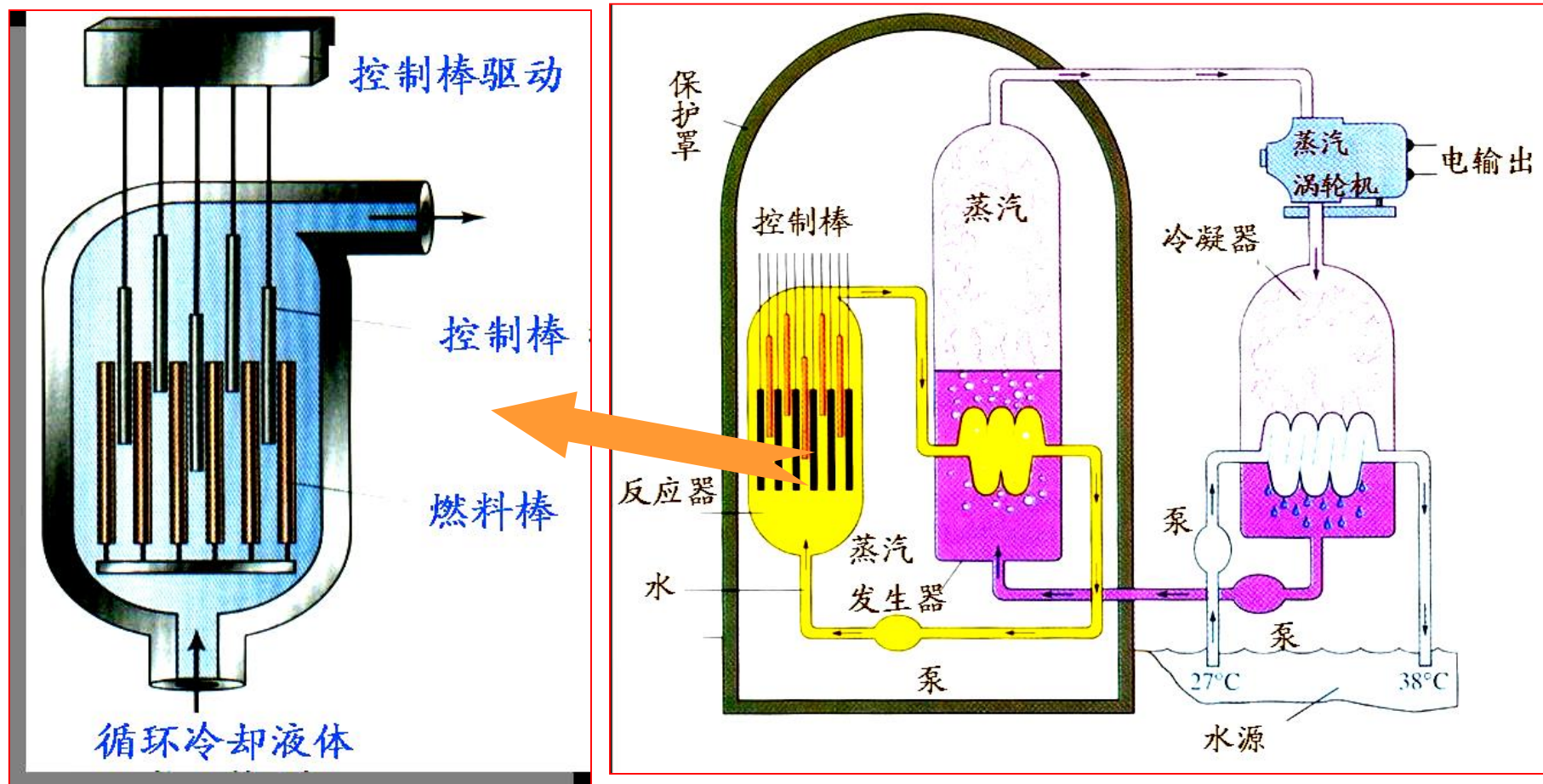


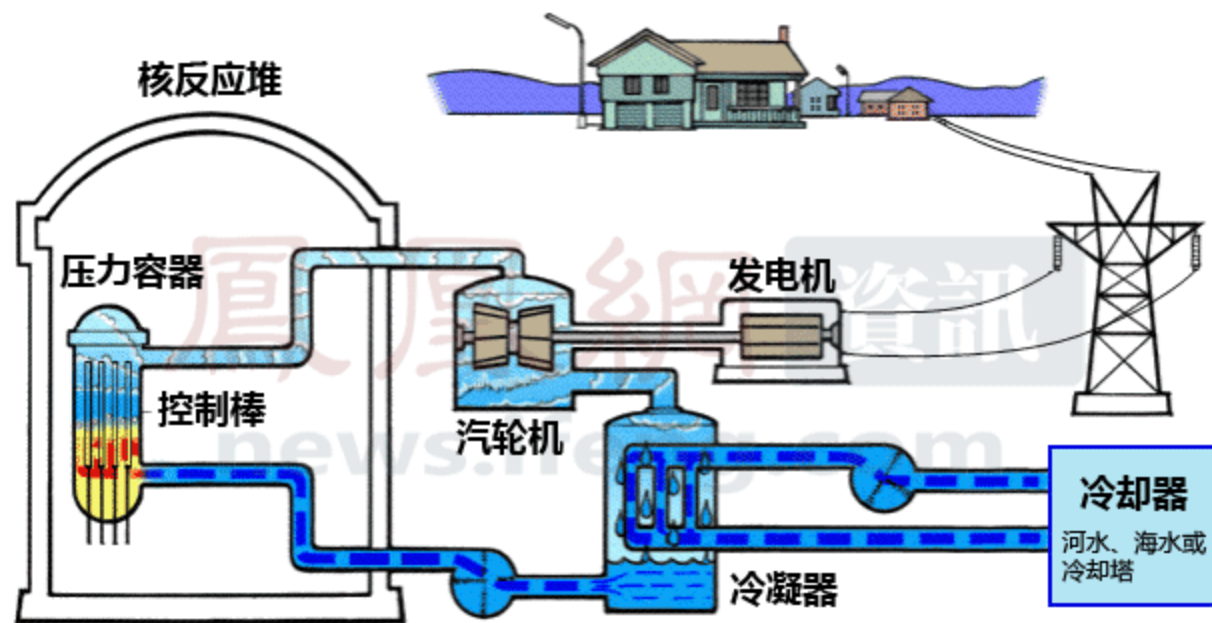


核反应堆

通过受控核裂变反应获得核能的装置, 可使裂变产生的中子数等于各种过程消耗的中子数, 以形成所谓的**自持链式反应**.

压水堆、沸水堆、重水堆、石墨气冷堆





核电是一种清洁能源



秦山核电站



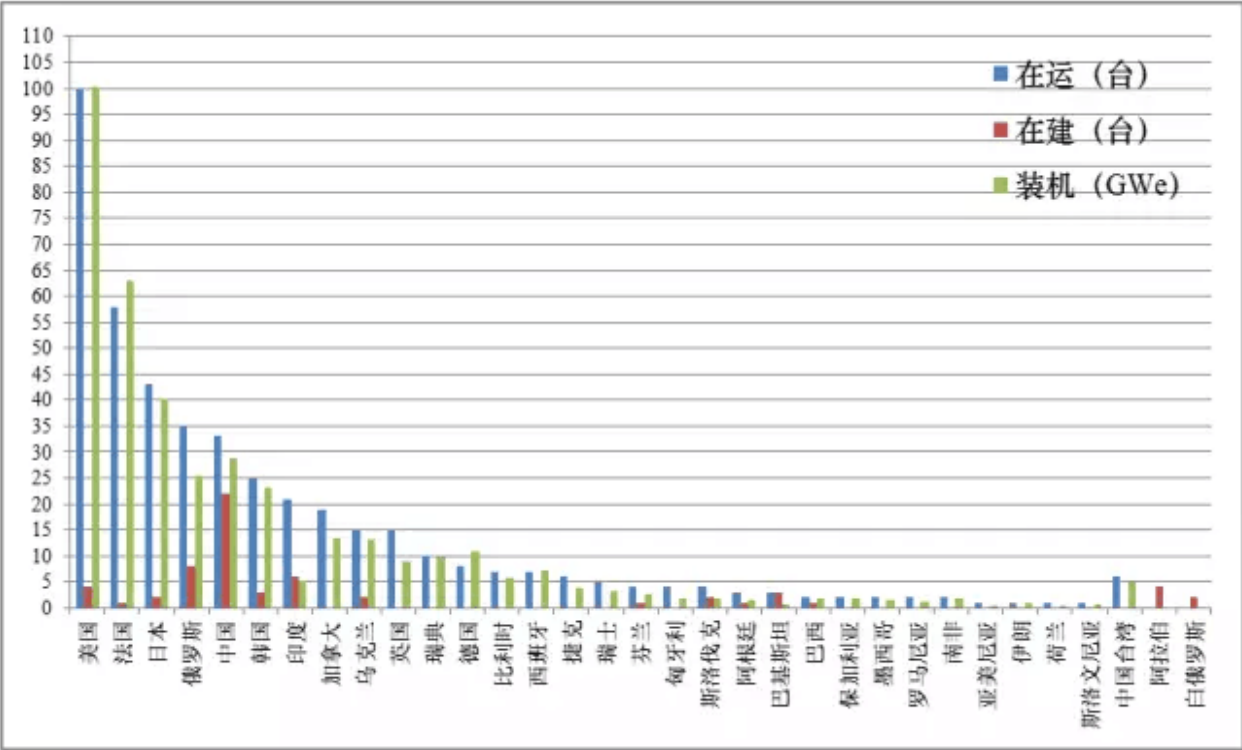
反应堆

核反应—核能

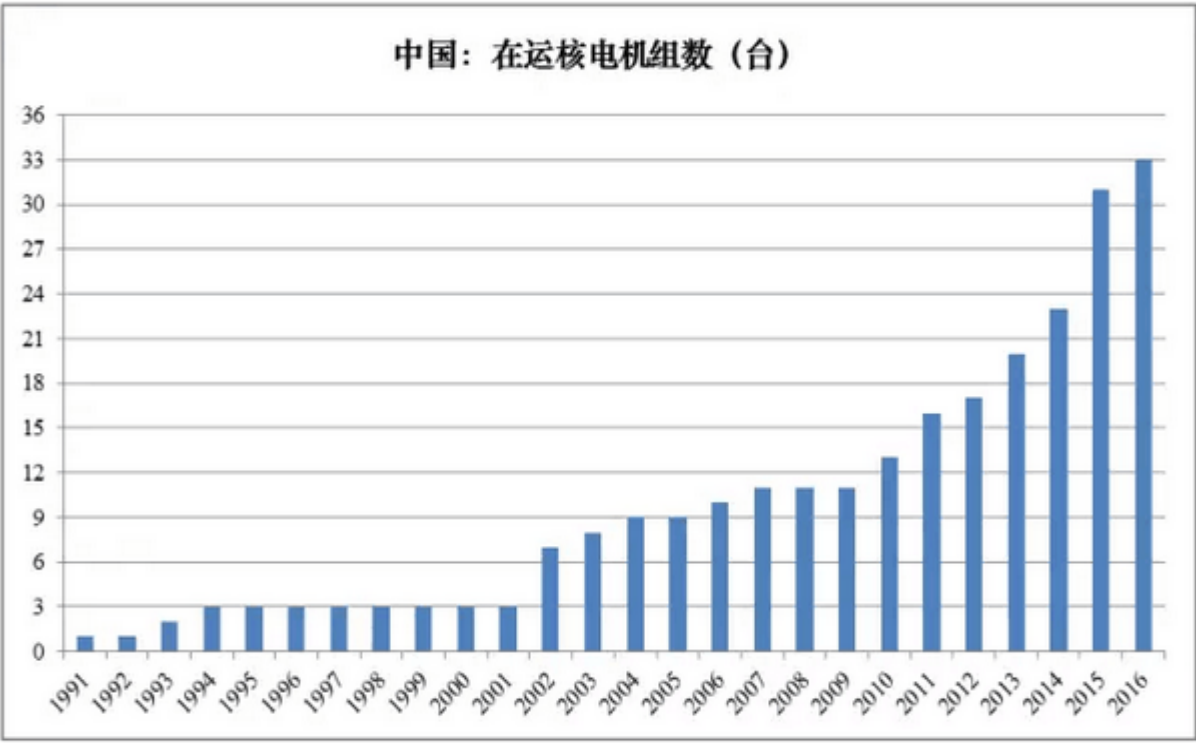
核能利用：核电

中国已是全球第三大核电国家

2022年：商运54台，5682万千瓦，世界第三。在建24台，2681万千瓦，在建世界第一。发电量占比约5%。

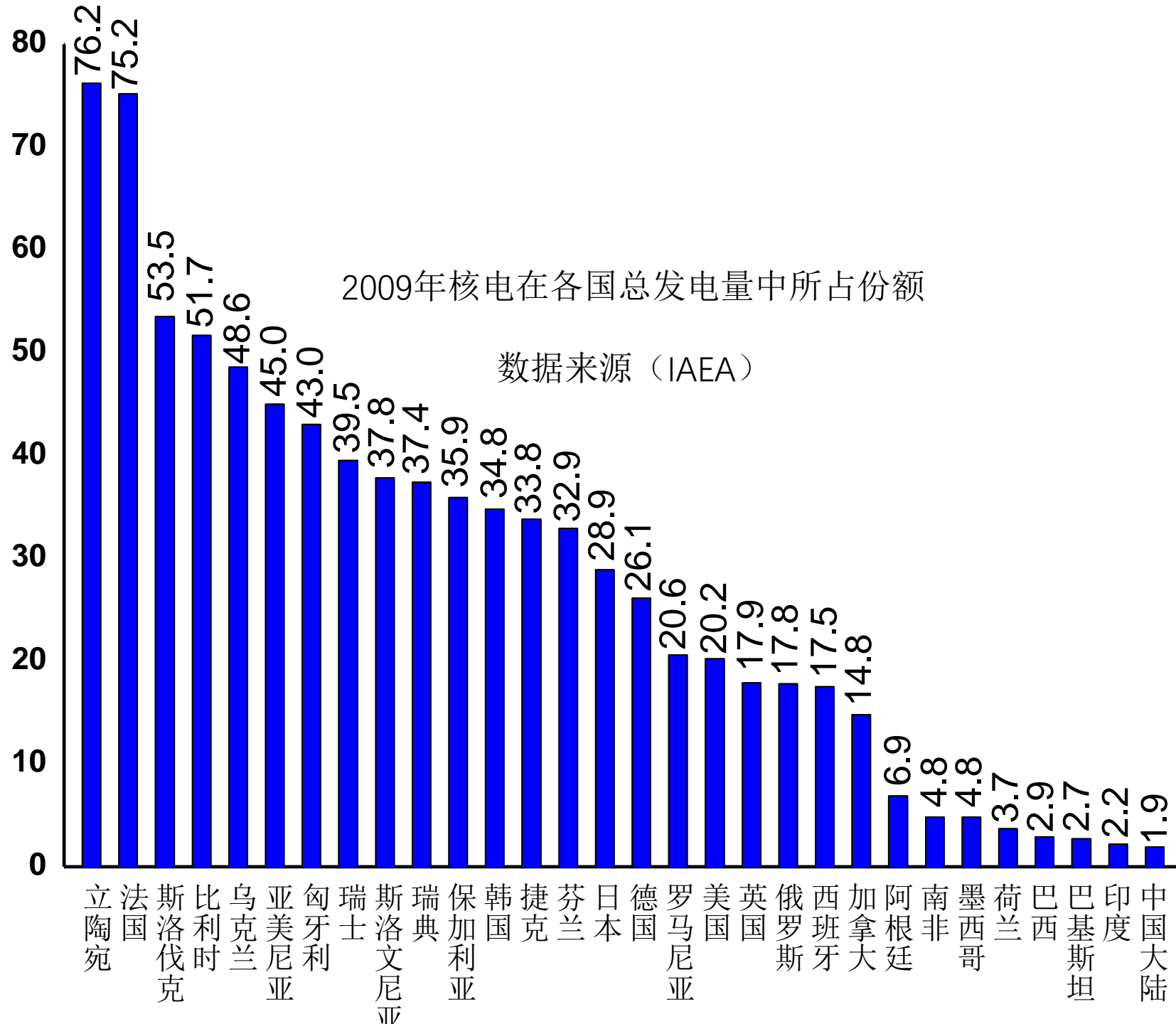


全球核电在运及在建数量一览 (来源：中国核网)



中国核电发展历程 (来源：中国核网)

截至2016年数据



中国核电站分布图

时间：2010年10月21日 作者：中国自动化招聘网

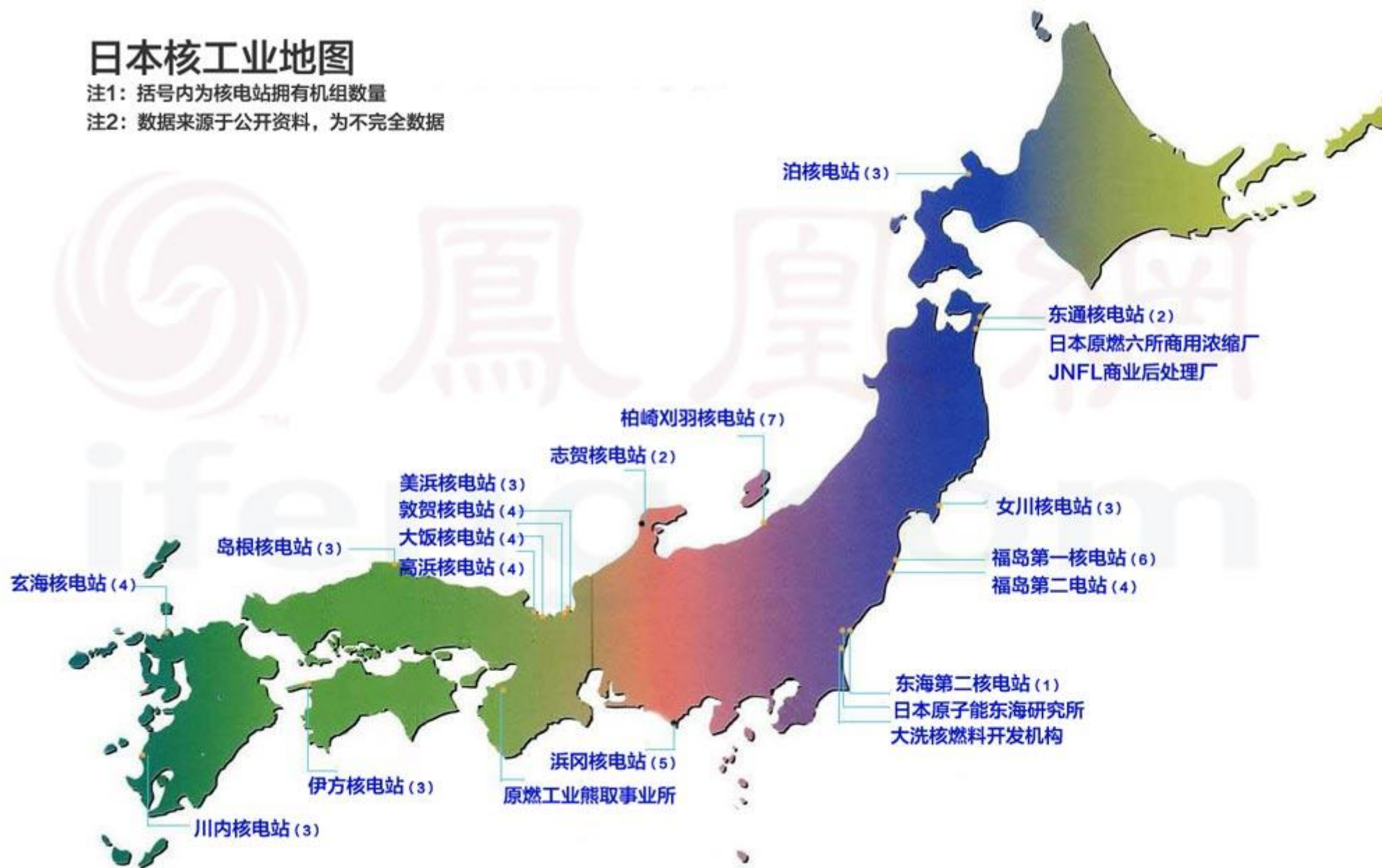
截止今日，中国核电站：目前6个投入运营的核电，12个在建的核电站，25个筹建中的核电站，中国核电站分布图，由中国自动化招聘网倾力打造。



日本核工业地图

注1：括号内为核电站拥有机组数量

注2：数据来源于公开资料，为不完全数据



人工核反应

人工核反应的实现使科学家在实验室合成已知元素的新核素和新的化学元素成为可能

我国科学家合成的19种新核素：

人工核反应是指原子核受中子、质子、 α 粒子、重粒子（例如原子核）等轰击而形成新核的核嬗变过程。



${}^{90}\text{Ru}$ (1991)和 ${}^{202}\text{Pt}$ (1992) 分别由中国原子能科学研究院（北京）和上海原子核研究所合成。

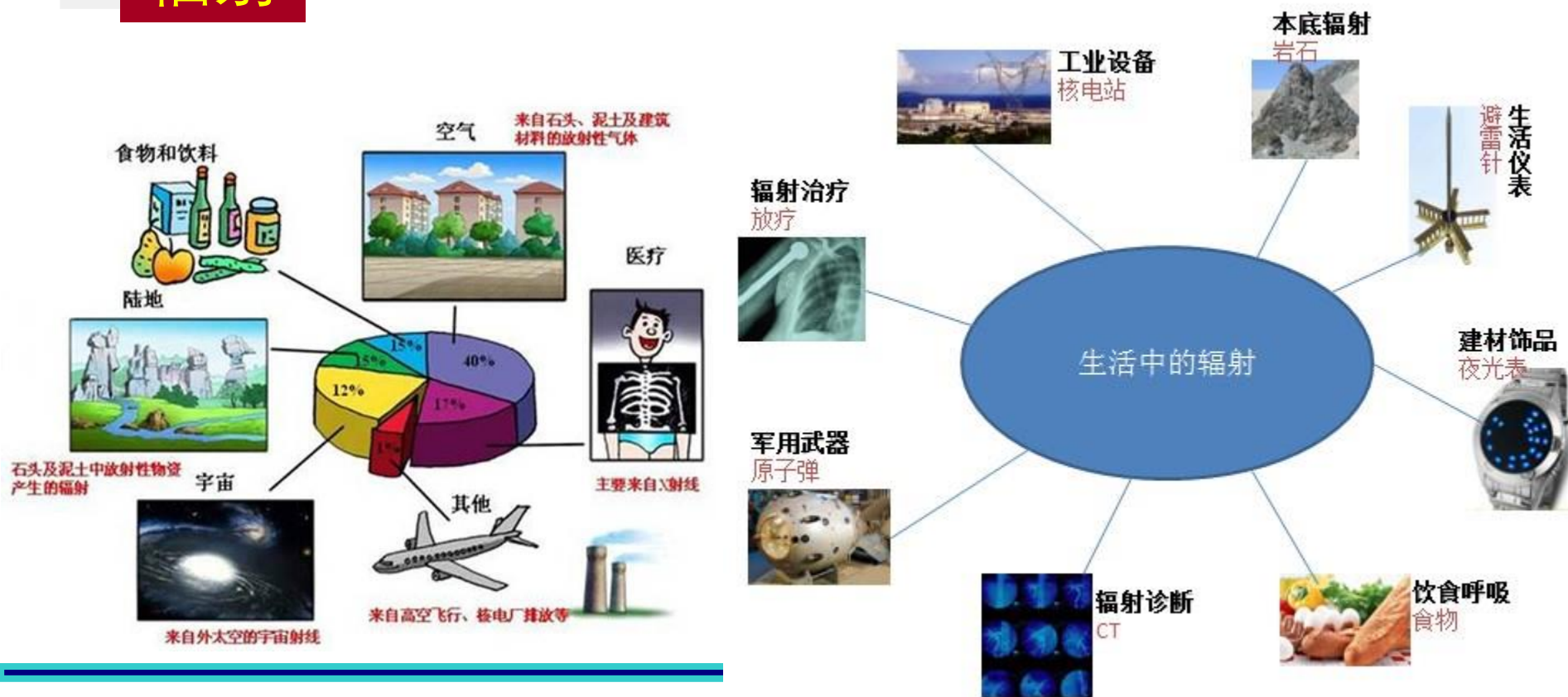
${}^{185}\text{Hf}$ (1992)、 ${}^{208}\text{Hg}$ (1992)、
 ${}^{237}\text{Th}$ (1993)、 ${}^{239}\text{Pa}$ (1995)、
 ${}^{175}\text{Er}$ (1996)、 ${}^{235}\text{Am}$ (1996)、
 ${}^{135}\text{Gd}$ (1996)、 ${}^{121}\text{Ce}$ (1997)、
 ${}^{186}\text{Hf}$ (1998)、 ${}^{209}\text{Hg}$ (1998)、
 ${}^{238}\text{Th}$ (1999)、 ${}^{125}\text{Nd}$ (1999)、
 ${}^{128}\text{Pm}$ (1999)、 ${}^{129}\text{Sm}$ (1999)、
 ${}^{139}\text{Dy}$ (1999)、 ${}^{139}\text{Tb}$ (1999)和
 ${}^{137}\text{Gd}$ (1999)。

§7.5 辐射剂量防护简述

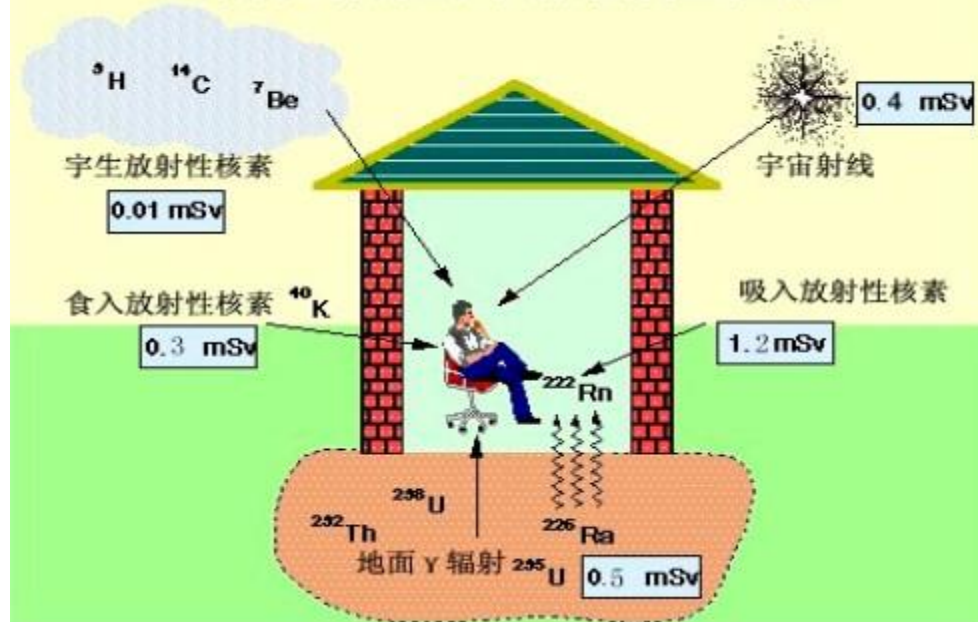
电离
辐射

能够将原子分子电离的辐射： α 、 β 、 γ 或X射线。

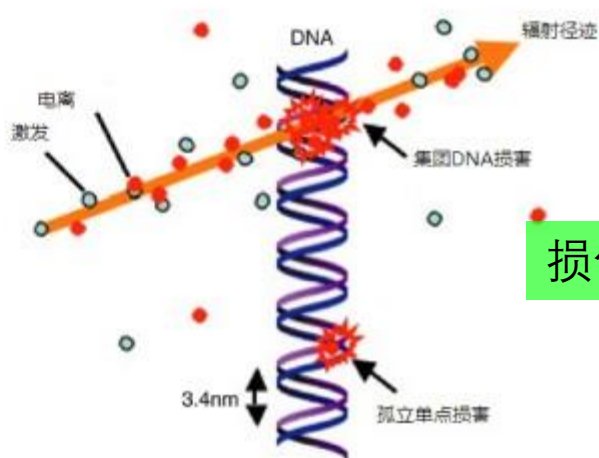
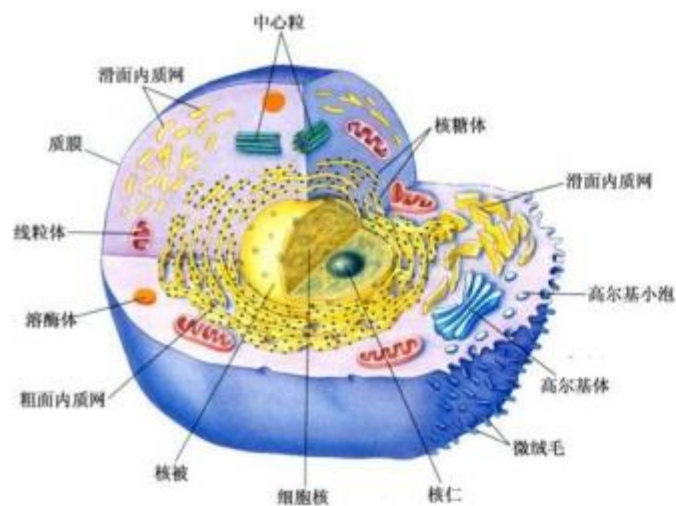
辐射：放射性、核武器、核电站



天然辐射源的年有效剂量贡献



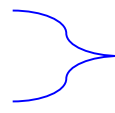
电离辐射是有害的→损伤人体的正常细胞



损伤与修复：矛与盾

急性损伤：
全身短时间受到大剂量的照射

慢性损伤：
长期受到超过容许水平的低剂量辐射



永久性的损伤甚至死亡

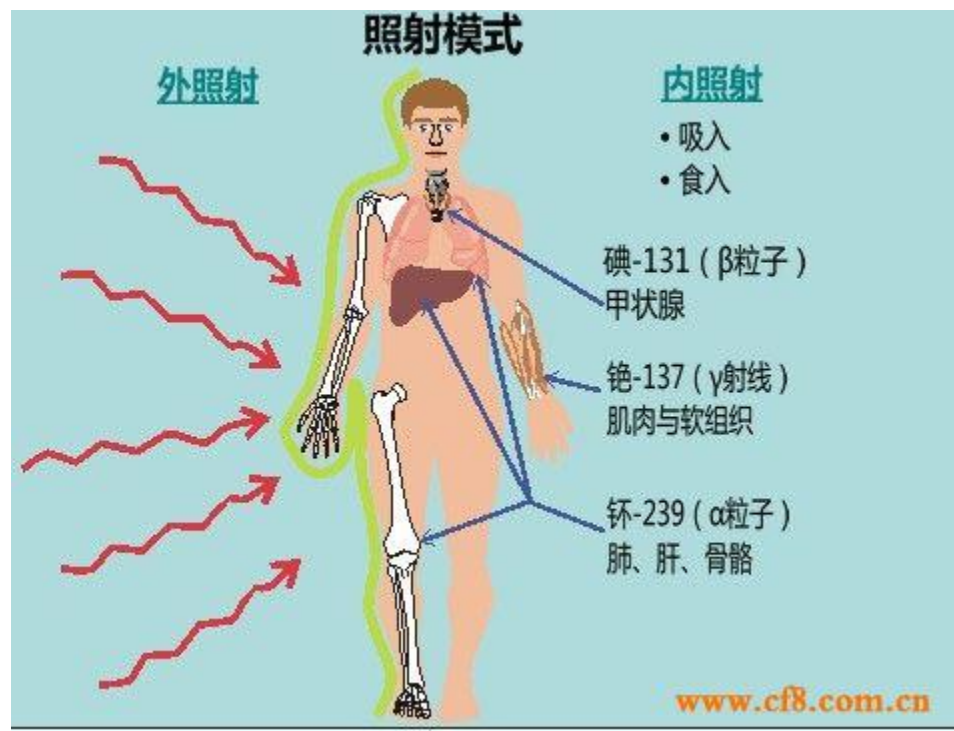
急性损伤：
中枢神经系统、造血系统、消化系统、性腺及皮肤等的损伤

症状（三个阶段）：
前驱期约1-2天，出现恶心、呕吐等症状；
潜伏期持续数日或数周，一切症状消失；
发症期，表现出辐射损伤的各种症状，例如呕吐、腹泻、出血、嗜睡及毛发脱落，严重者死亡。

慢性损伤：
受照数年甚至数十年后出现辐射生物效应（白血病、癌症、再生障碍性贫血和白内障）

遗传损伤：
体现在受照者后裔身上

正确认识辐射及其危害



辐射测量的系统:

照射量的单位伦琴 (R)、吸收剂量的单位戈瑞 (Gy) 和拉德 (rad)、RBE (相对生物有效性) 剂量霍姆 (rem) 和剂量当量希沃特 (Sv)

照射量:

$$x = dQ / dm$$

质量为dm的空气体积元

X射线或者γ射线电离产生的电子或正离子的电荷量之和

$$1R = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

吸收剂量:

$$D = d\varepsilon / dm$$

单位质量dm的物质

从辐射中吸收的平均能量

$$1\text{Gy} = 1\text{J/kg}$$

$$1\text{rad} = 100\text{erg/g} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

辐射测量的系统:

照射量的单位伦琴 (R)、吸收剂量的单位戈瑞 (Gy) 和拉德 (rad)、RBE (相对生物有效性) 剂量霍姆 (rem) 和剂量当量希沃特 (Sv)

RBE剂量:吸收剂量与RBE的乘积

相对生物有效性常数RBE:

给定生物在给定的条件下的照射产生与标准辐射照射相等的特定效应时, 其吸收剂量是与标准辐射的吸收剂量之比

剂量当量:

$$H = DQN$$

吸收剂量

品质因数

其它一切修正因子的乘积

$$1\text{Sv} = 100\text{rem}$$

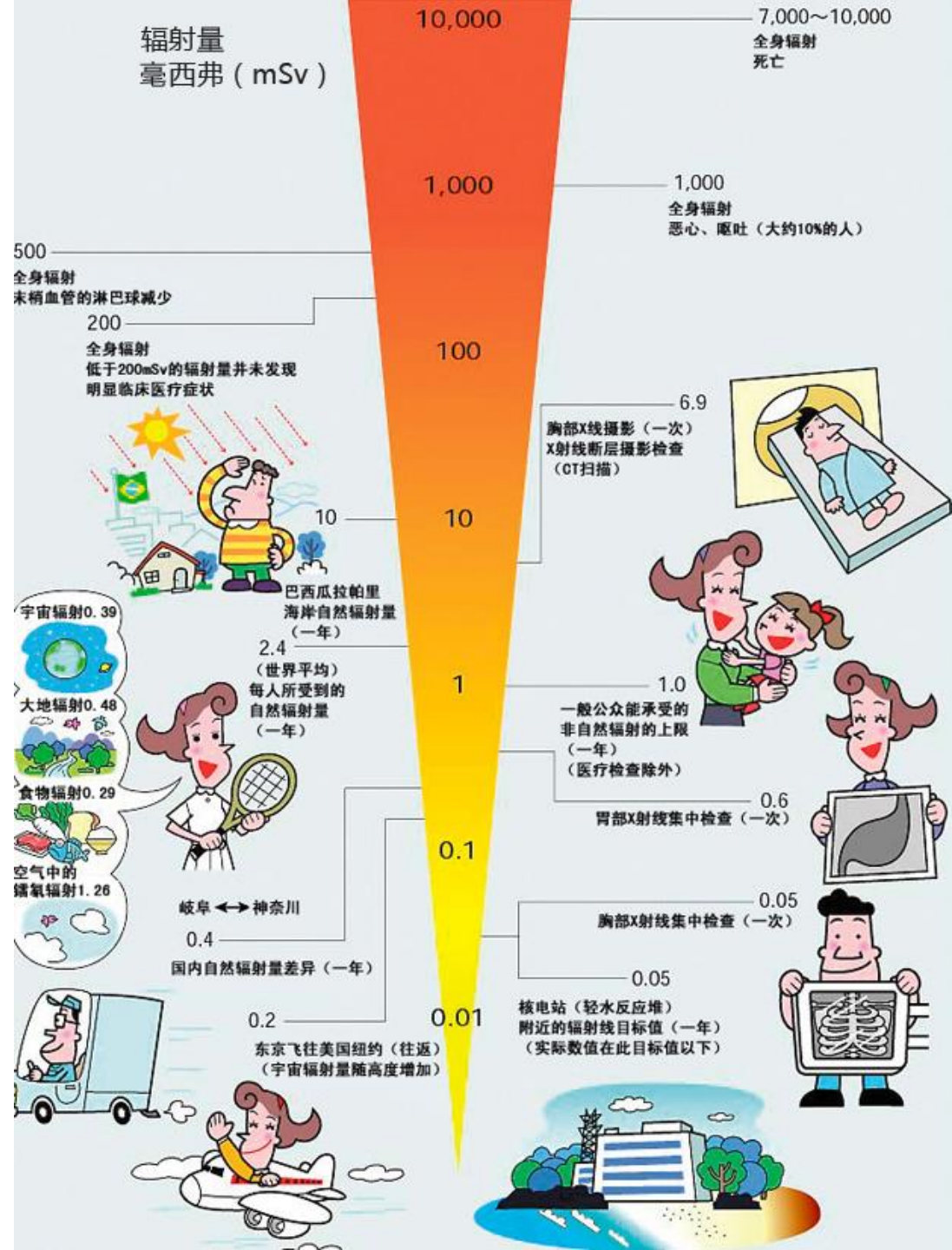
对于辐射工作人员，年有效剂量当量限值为50mSv，眼晶体的年剂量当量限值为150mSv，其它单个器官或组织的年剂量当量值限值为500mSv。辐射工作人员一次事件中所受的有效剂量当量值不得超过100mSv，在一生中不得超过250mSv

公众人员的年有效剂量当量值不得超过1mSv，终生剂量平均的年有效剂量当量值不超过1mSv。某些年份允许以每年5mSv作为剂量限制。公众的皮肤及眼晶体的年剂量当量限值为50mSv。

只有大量的超常的核辐射才会对人体造成损害

注：1希伏(Sv)=1000毫希伏(mSv) 1毫希伏=1000微希伏(μ Sv)

- ★ 0-0.25希伏 没有显著的伤害
- ★ 0.25-0.50希伏 可以引起血液的变化，但无严重伤害
- ★ 0.50-1.0希伏 血球发生变化且有一些损害，但无疲劳感
- ★ 1.0-2.0希伏 有损伤，而且可能感到全身无力
- ★ 2.0-4.0希伏 有损伤，全身无力，体弱者可能死亡



日本大地震中福岛核辐射的问题

2011年3月11日13时46分（北京时间）\日本当地时间14时46分，发生在西太平洋国际海域的里氏9.0级地震，震中位于北纬38.1度，东经142.6度，[震源深度](#)约10公里。据统计，自有记录以来，此次的9.0级地震是全世界第三高，1960年发生的[智利](#)9.5级地震和1964年[阿拉斯加](#)9.2级地震分别排第一和第二。





该图由 世界王 上 提供 Tiesue-Net 图片版权归作者所有



福岛第一核电站4号反应堆

福岛核电站的反应堆属于“沸水反应堆”

最外层：厂房结构

反应堆最外层是常规结构的厂房，这也是在爆炸中被毁坏的部分。

氢气爆炸

最内层：压力容器

这是核能与工质——

高压热水

汽轮机

热水热能转化为动能，动能转化为电能发电的地方

初步结论：

氢气爆炸发生在安全壳和厂房之间。虽有一定程度的核泄漏，但总体仍处可控范围，核燃料仍在安全壳和压力容器内，安全壳和压力容器总体尚完好，不会发生切尔诺贝利式的大规模扩散整个欧洲的严重跨国事故。

資訊

外层：安全壳

沸水堆有安全壳，但形制与我们熟悉的压水堆不同。这也成为爆炸后公众恐慌的主要原因。

附属的应急柴油机在海啸中进水损坏，导致反应堆停堆后缺乏强制散热手段。成为核事故的起源。

鳳凰網

資訊

news.ifeng.com





3月12日，日本时事社援引东京电力公司的消息说，日本[福岛县第一核电站](#)1号机组15时6分爆炸后释放大量[核辐射](#)造成重大二次灾害。日本当局建议核电站附近居民应迅速撤离，不要在撤离过程中吃喝任何东西，尽量不要让皮肤暴露在外。到安全场地后要更换衣物。应该扩大疏散区域，如不能马上疏散，应提醒居民关闭门窗，关闭空调。

[日本经济产业省](#)原子能安全保安院12日宣布，福岛第一核电站1号机组周边检测出放射性物质[铯](#)和[碘](#)，铯和碘都是堆芯的燃料铀发生核分裂的产物，这表明反应堆堆芯燃料熔化进一步加剧。不过，1号机组的反应堆容器内的蒸汽已被释放，容器内的气压已经开始下降。原子能安全保安院官员在当天的记者招待会上说：“可以认为堆芯的燃料正在熔化。”目前堆芯的具体温度还不明确，但设计能够耐1200度高温的燃料包壳已经熔解。这表明，自地震发生后核电站反应堆自动关闭约1天以来，放射性物质的扩散仍然持续，核电站事故已经达到了非常严重的状态。

3月18日 福岛第一核电站核泄漏事故等级从4级提高为5级。

3月26日，福岛核泄漏放射量达到6级“重大事故”水平。

3月26日，福岛核泄漏放射量达到6级“重大事故”水平。日本原子能安全委员会近日启用“紧急状态放射能影响快速预测系统”（**SPEEDI**），以近期各地的放射能测定值为依据，对福岛核泄漏的放射性物质扩散量的数值进行了推算。结果显示，从事故发生的12日上午6时至24日零时止，福岛第一核电站外泄放射性碘的总量约为3万万亿~11万万亿**贝克勒尔**。这个数值已经超过美国三里岛核事故（5级），相当于国际评价机制的6级“重大事故”水平。而部分地区的土壤核污染水平，已与**切尔诺贝利事故**相当。有分析称，核泄漏依然在持续，核电站周边的土地很可能无法再继续使用。根据国际原子能现象评价机制（**INES**），1986年的**切尔诺贝利核事故**被定性为最高等级7级的“特大事故”。官方说法是，**切尔诺贝利**释放的放射性物质总量达到“几万万亿贝克勒尔”，也有说法认为，那次事故的放射总量实际为180万万亿贝克勒尔。

4月13日，调整为最高的7级核泄漏事故。

日本文部科学省16日表示，在福岛核一电厂西北方约20公里处，侦测到最高每小时330毫西弗辐射量，是平常值的6600倍。这表示有致人于死的超高辐射量，如果核一厂反应炉完全失控，后果将不可想像。

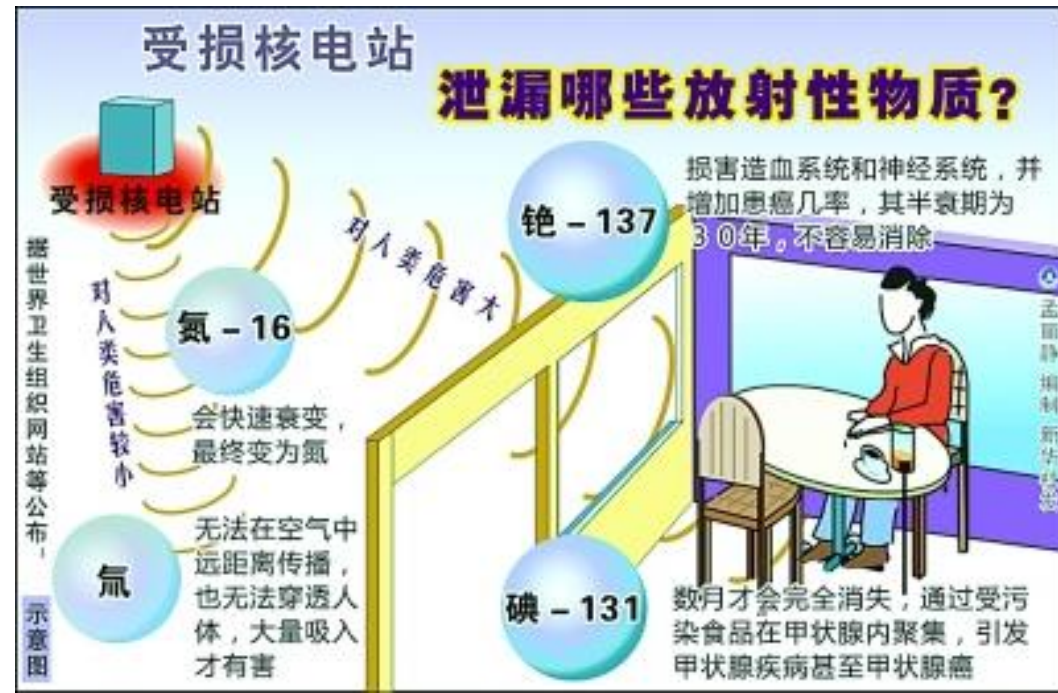
一般人一年接受的辐射量为2400毫西弗。

东京电力公司当天发表声明说，3月21日下午，该公司从第一核电站排水口以南约100米处采集了0.5升海水样本。检测发现，其中碘-131浓度是法定限度的126.7倍，铯-134浓度是法定限度的24.8倍，铯-137浓度是法定限度的16.5倍，此外还检测出了微量的钴-58、碘-132和铯-136。如果每天饮用这样浓度的海水，一年受到的辐射量相当于1000微西弗，这是人体每年可承受的安全核辐射量。

日本经济产业省原子能安全保安院30日说，福岛第一核电站排水口附近海域的放射性碘浓度已达到法定限值的**3355**倍，这是迄今日本方面在这一水域检测到的最高相关数值。据原子能安全保安院介绍，海水样本是29日下午从福岛第一核电站1号至4号机组排水口南**330**米处所采集，经检测发现放射性碘—**131**的浓度达到法定限值的**3355**倍。此外，同一天在5号和6号机组排水口北**50**米处采集到的海水样本显示，放射性碘—**131**的浓度也达到法定限值的**1262**倍。

碘-131
铯-137

碘-131的半衰期约为8天，铯-137为30年

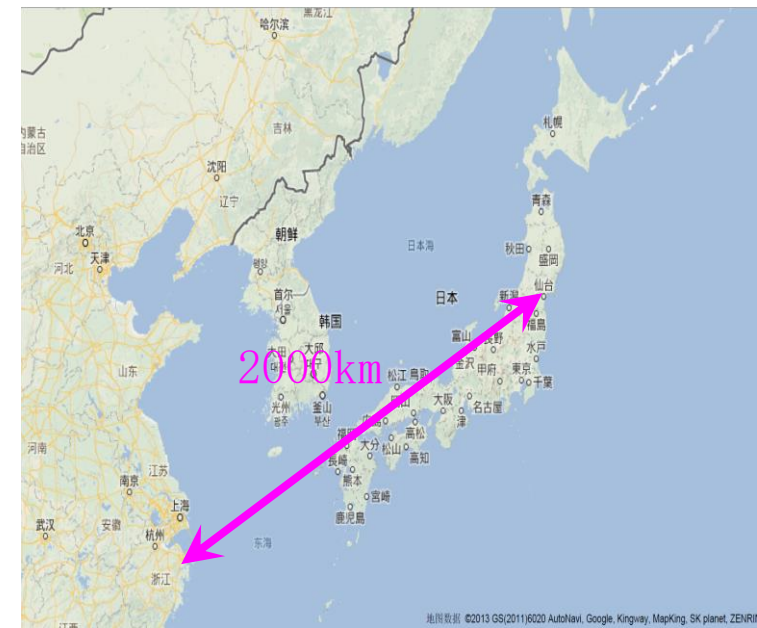


例7.5.1 2011年3月11日14时46分，日本东北发生9.0级地震，随即引发海啸，导致福岛核电站发生泄漏。经过不断调整，4月13日认定福岛核电站泄漏为7级，与1986年前苏联的切尔诺贝利的核事故等级相同。已知3月30日监测到福岛第一核电站距排水口330m处海域的放射性 ^{131}I 浓度为法定值的3355倍，试分析我国沿海是否要采取防范放射性 ^{131}I 污染的措施？

解： ^{131}I 的浓度与辐射源的距离平方成反比，可知传播到中国沿海的 ^{131}I 浓度值与法定值相比为：

$$\frac{3355}{(2000/0.33)^2} = 9.1 \times 10^{-5}$$

考虑到 ^{131}I 的半衰期为8天，则上述比例要更低，完全可以忽略不计





7级 特大事故	大型核装置（如动力堆堆芯）的大部分放射性物质向外释放，典型地应包括长寿命和短寿命的放射性裂变产物的混合物（数量上，等效放射性超过1016BqI-131）。这种释放可能有急性健康影响；在大范围地区（可能涉及一个以上国家）有慢性健康影响；有长期的环境后果。	1986年前苏联切尔诺贝利核电站（现属乌克兰）事故。
6级 重大事故	放射性物质向外释放数量上，（等效放射性超过1015~1016BqI-131），这种释放可能导致需要全面执行地方应急计划的防护措施，以限制严重的健康影响。	1957年苏联基斯迪姆后处理装置（现属俄罗斯）事故。
5级 具有厂外风险的事故	放射性物质向外释放（等效放射性超过1014~1015BqI-131）。这种释放可能导致需要部分执行应急计划的防护措施，以降低健康影响的可能性。核装置严重损坏，这可能涉及动力堆的堆芯大部分严重操作，重大临界事故或者引起在核设施内大量放射性释放的重大火灾或爆炸事件。	1957年英国温茨凯尔反应堆事故、1979年美国三哩岛核电站事故
4级 没有明显厂外风险的事故	放射性向外释放，使受照射最多的厂外个人受到几毫希沃特量级剂量的照射。由于这种释放，除当地可能需要采取食品管制行动外，一般不需要厂外保护性行动。核装置明显损坏。这类事故可能包括造成重大厂内修复困难的核装置损坏。	1973年英国温茨凯尔后处理装置事故、1980年法国圣洛朗核电站事故、1983年阿根廷布宜诺斯艾利斯临界装置事故。
3级 重大事件	放射性向外释放超过规定限值，使用权受照射最多的厂外人员受到十分之几毫希沃特量级剂量的照射。无需厂外保护性措施。导致工作人员受到足以产生急性健康影响剂量的厂内事件和/或导致污染扩散的事件。安全系统再发生一点问题就会变成事故状态的事件，或者如果出现某些始发事件，安全系统已不能阻止事故发生的状况。	
2级 事件	安全措施明显失效，但仍具有足够纵深防御，仍能处理进一步发生的问题。导致工作人员所受剂量超过规定年剂量限值的事件和/或导致在核设施设计未预计的区域内存在明显放射性，并要求纠正行动的事件。	
1级 异常	超出规定运行范围的异常情况，可能由于设备故障，人为差错、或规程有问题引起	
0级 偏差	安全上无重要意义	

1. 锌原子基态的电子组态是 $4s^2$ ，若其中一个电子被激发到 $5s$ 或 $4p$ 态时，（1）写出LS耦合下这些电子组态所形成的原子态，画出相应的能级图（三重态为正常次序）及可能的光谱跃迁。（2） $^3S_1 \rightarrow ^3P_2$ 的跃迁谱线在弱磁场中如何变化，沿磁场方向能观察到多少条谱线？垂直于磁场方向又能观察到多少条谱线？
2. 实验观测到 H^{35}Cl 分子的若干波数(cm^{-1})为83.03、103.73、124.30、145.03、165.51和185.86的远红外吸收谱，试问：这些谱线是来自振动还是转动跃迁？如果是振动，特征频率是什么？如果是后者，各谱线相应于什么 J 值？ H^{35}Cl 分子的转动惯量是多大？并估算一下两个核之间的距离？
3. 实验观测到 $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ 分子基频带的谱线间隔近似为常数 3.86 cm^{-1} ，谱带中心缺失的谱线波数为 2170.21 cm^{-1} ，试求CO分子的转动惯量 I 、核间距 R_0 和振动力常数 k 。



80年代我国建成的三大高能物理研究装置

上左：北京正负电子对撞机.1988.10建成。包括北京谱仪、北京同步辐射装置

上右：兰州重离子加速器.1989.11建成。系当时仅次于法、日的大型回旋加速器

上右：合肥同步辐射装置1989.4建成。主要用于粒子光谱的研究



北京正负电子对撞机（外景）

Beijing, China



(大型通用探测器)

重核裂变

链式反应的控制 反应堆

1. 增加中子减速剂使中子减速.

目前常用的减速剂是重水和石墨.1942年世界第一个反应堆用石墨为减速剂.我国1958年建成的反应堆用重水为减速剂。

2. 反应堆控制棒的使用

吸收中子很强的镉或硼制成。

3. 利用缓发中子

使反应堆处于次临界, 只有计入缓发中子链式反应才得以进行

核反应—核能

核能利用：核电

核电是一种清洁能源



秦山核电站

核反应—核能

核能利用：核电

