

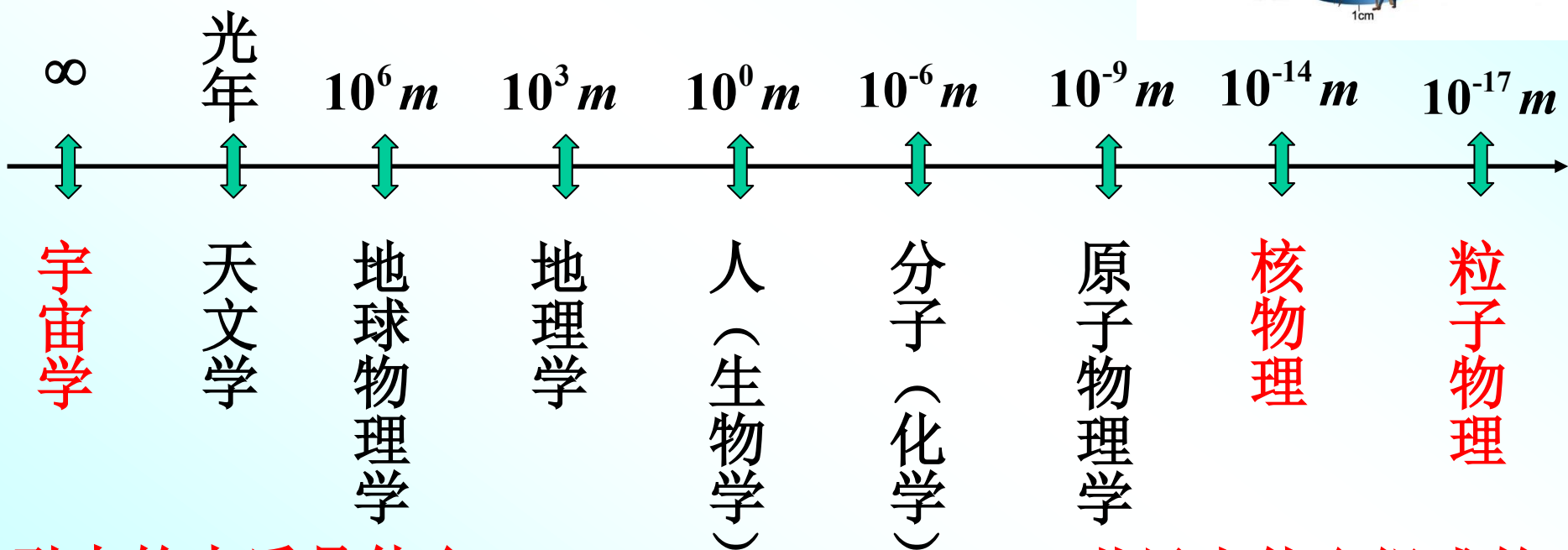
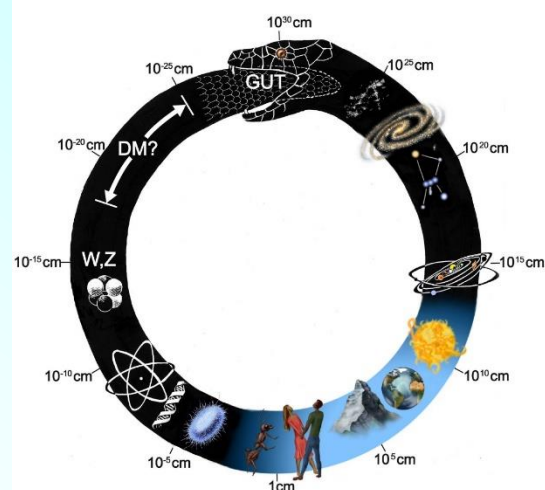


大学物理课程

邓维天

核物理与粒子物理的学科定义：

研究物质结构的最微观层次与最丰富的基本相互作用



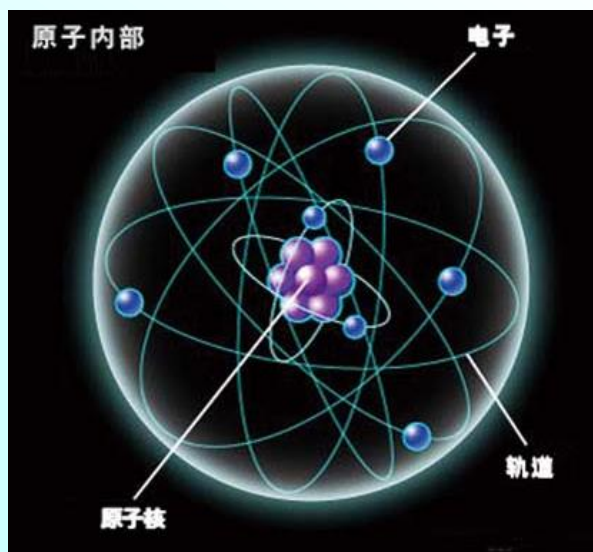
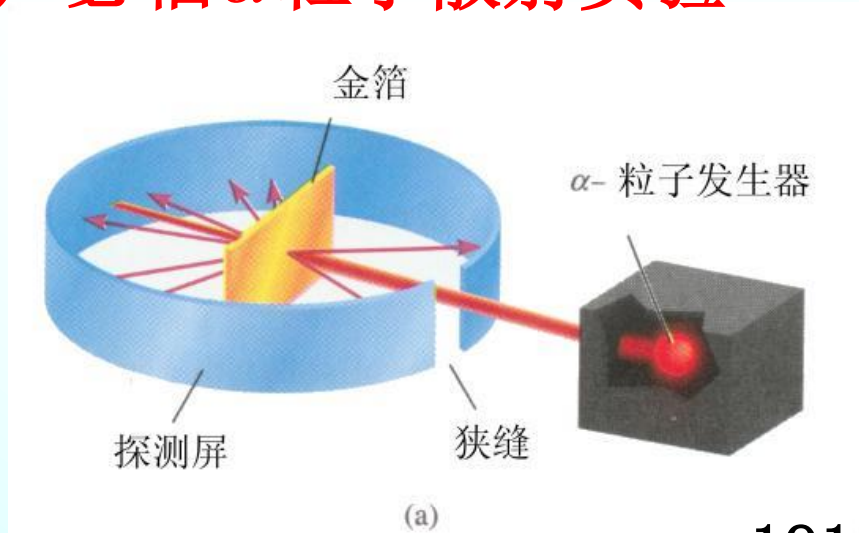
引力的本质是什么？
宇宙何去何从？

世界由什么组成的？
如何组成的？

物理学的两个前沿

原子核物理简介

卢瑟福 α 粒子散射实验



1911年，卢瑟福提出原子正电荷必定集中在半径 10^{-15} 米的范围内。

而原子半径却有 10^{-10} 米，因此原子内部绝大部分是空虚的。

从而证明“原子行星模型”比汤姆逊的“西瓜模型”更接近于物理真实

卢瑟福预言中子

如果原子核完全由质子组成，那么原子核所带的正电荷，在数值上应该等于元素的原子量。而这无法解释元素电荷是质量数值的一半。

在1920年，卢瑟福提出了**中子假说**：原子核里存在一种“中子”微粒，它不带电，质量与质子相当。



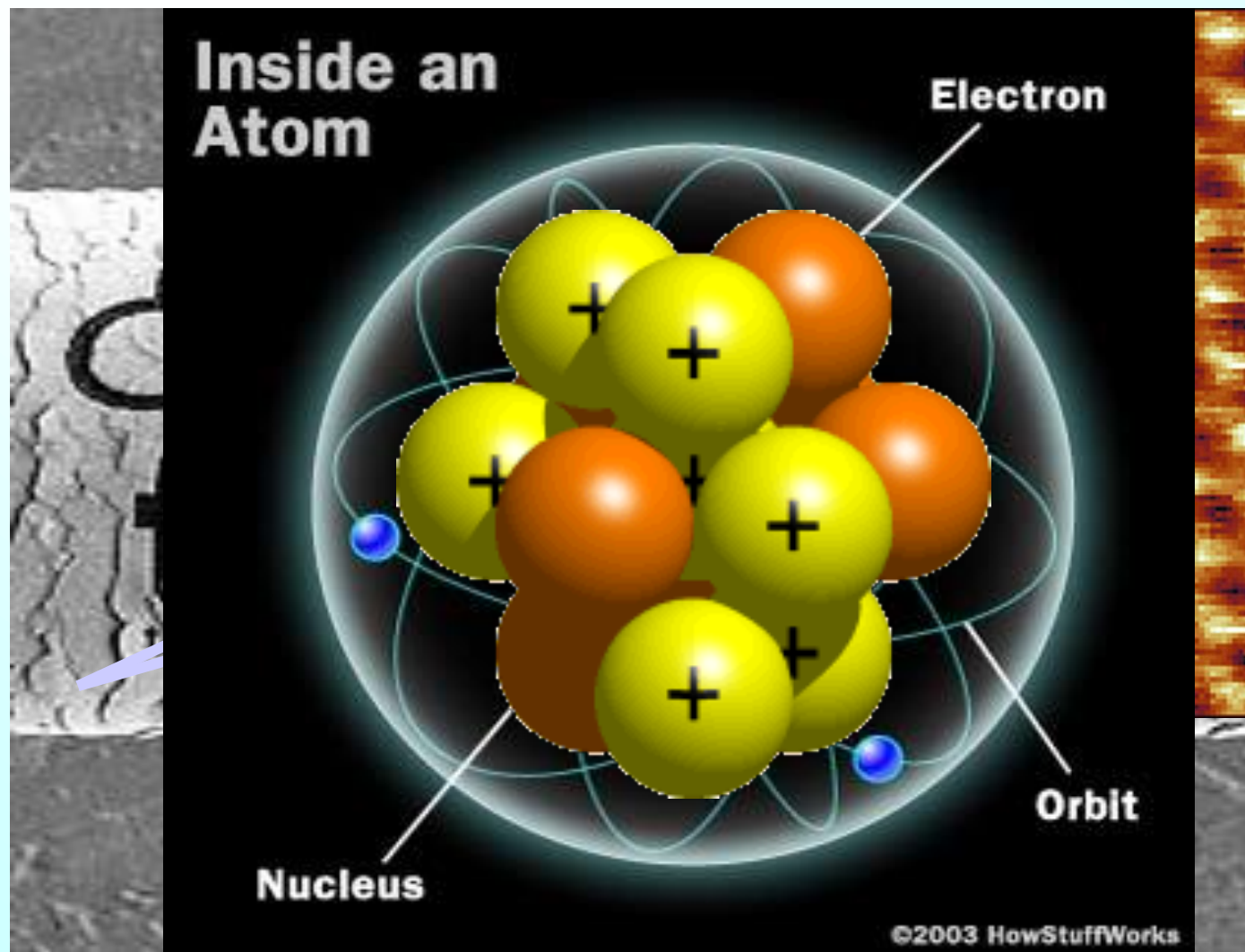
查德威克



查德威克发现中子

1932年，物理学家查德威克在卡文迪许实验室发现了质量同质子相当的中性粒子。
(1935年诺贝尔物理学奖)

现代原子结构



发丝: 0.06 mm

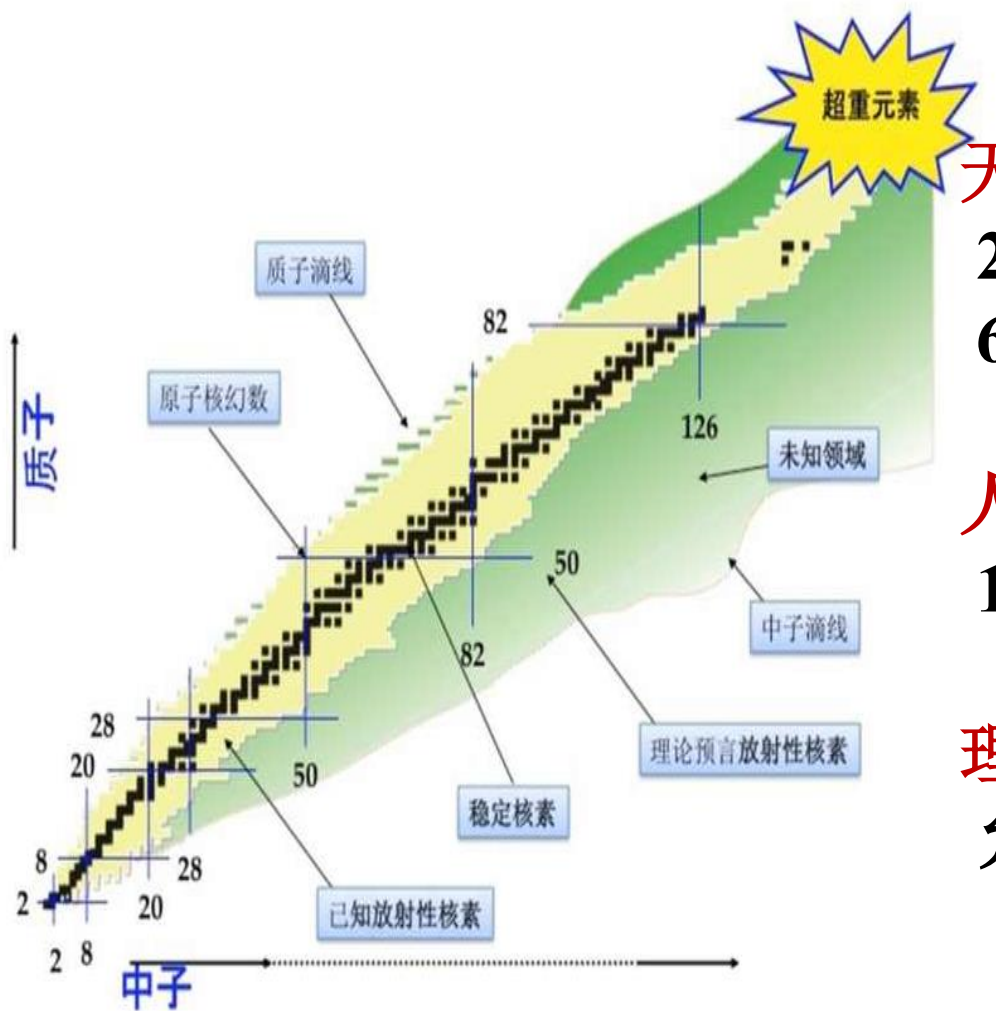
原子: 0.2 nm
(nm=10⁻⁹m)

原子核, 核子:
10⁻¹ fm
(fm=10⁻¹⁵m)

电子—没有内部结构，是“基本”粒子

原子核物理的研究对象：原子核，也叫核素

核素图



天然存在的核素：

280多种稳定核素，
60多种长寿命放射性核素。

人工制作的核素：

1600多种带放射性

理论预言：

允许存在的核素至少5000多个

一、原子核的结构和基本性质

组成：原子核是由一定数目的质子和中子组成的，
质子和中子统称为核子

核子数： $A = Z + N_n$ 原子核内质子数 Z 与中子数 N_n 之和

大小：原子核的体积与其核子数成正比

原子核的半径： $R = R_0 A^{1/3}$ $R_0 \approx 1.20 \times 10^{-15} \text{m}$ (实验值)
——轻、重核半径量级都在 10^{-15} m

电荷：正比于原子核中的质子数

原子核的电荷： $Q = +Ze$ Z 表示质子数，又称原子核的
电荷数，也是元素的原子序数。

原子核的表示： ${}_Z^A \text{X}$

例如： ${}_1^1\text{H}$, ${}_2^4\text{He}$, ${}_6^{12}\text{C}$ 推广： ${}_0^1\text{n}$, ${}_{-1}^0\text{e}$

原子核的质量：等于所有核子的质量之和？ 略小于

$$\text{例: } \begin{cases} m_{\text{He}} = 6.644763 \times 10^{-27} \text{ kg} \\ 2m_p + 2m_n = 6.695206 \times 10^{-27} \text{ kg} \end{cases}$$

$$\Rightarrow m_{\text{He}} < Z \cdot m_p + N_n \cdot m_n$$

$$m_A < Z \cdot m_p + N_n \cdot m_n$$

(原子核都有**结合能**)

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

$$\Rightarrow m_n = 1.008665 \text{ u} \quad m_p = 1.007276 \text{ u} ;$$

以此单位所表示的核素质量，都**近似为整数**，
即核子数 A 。所以 A 又称为**质量数**

核的质量密度：

$$\rho = \frac{m}{4\pi R^3 / 3} \approx 2.29 \times 10^{17} \text{ kg/m}^3$$

这表明无论原子核中核子数目有多少，每个核子在核内
各种原子核的密度近乎相同 几乎都**占有相同的体积**。

原子核的结合能

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，其差额为称为**质量亏损**。

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta m = [Zm_p + (A - Z)m_n] - m \\ E = mc^2 \end{array} \right. \quad \text{——物质去哪里啦？}$$

$$\Rightarrow \Delta E = \Delta mc^2 \quad \text{——结合能}$$

即质子和中子形成原子核时所放出的能量。

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

以He原子核为例：

形成一个He原子核：

$$\begin{aligned}\text{质量亏损: } \Delta m &= 4.031882\text{u} - 4.001505\text{u} \\ &= 0.030377\text{u}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{结合能: } \Delta E &= \Delta mc^2 = 4.539871 \times 10^{-12} \text{ J} \\ &\approx 28.34 \text{ MeV}\end{aligned}$$

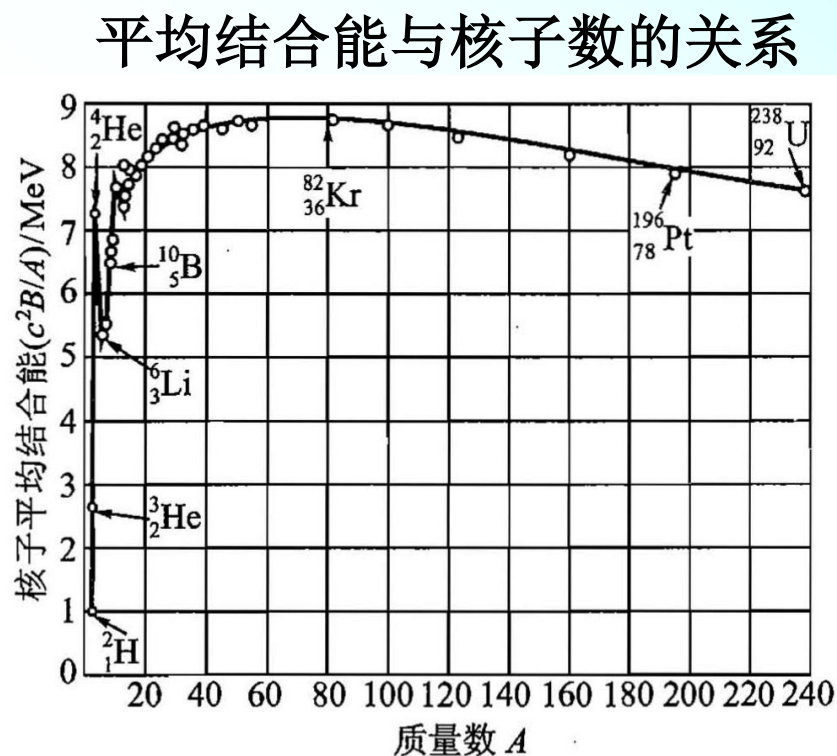
形成 1 mol 的氦原子核所放出的能量为

$$\begin{aligned}\Delta E_{\text{mol}} &= N_{\text{A}} \cdot \Delta E = 2.73 \times 10^{12} \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \\ &\quad (\text{相当于燃烧100吨煤})\end{aligned}$$

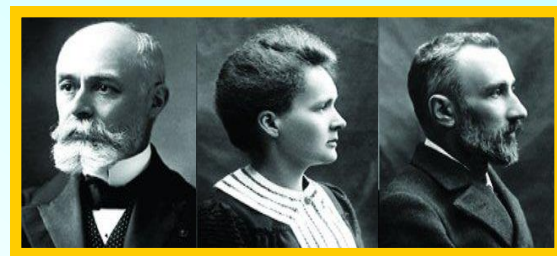
原子核的结合能与它包含的核子数有关，核子数多则结合能大，为比较不同原子核的结合能，需要定义**平均结合能**：

$$\text{平均结合能: } \frac{\Delta E}{A} = \frac{\Delta mc^2}{A}$$

- 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**。
- 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**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**。



二、原子核的衰变



1903年诺贝尔物理奖

(一) 天然放射性现象

1896年**贝克勒尔** (H. Becquerel) 发现铀盐(铀化钾)不断地放出一些射线。

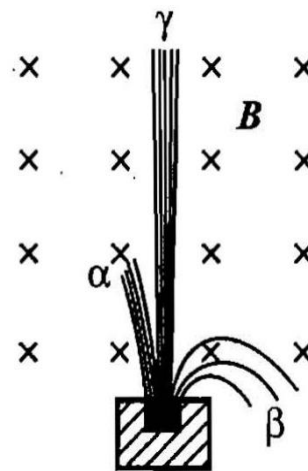
接着**居里夫妇**发现镭和钋也都能够放出类似的射线，而且强度比铀放出的更强。

人们后来又发现位于门捷列夫元素周期表末尾的一些其它重元素都具有放射性。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**。

天然放射线主要有三种： α ， β 和 γ 射线

- α 射线是高速运动的氦原子核（又称 α 粒子）组成的。所以，它在磁场中的偏转方向与正离子流的偏转相同。它的电离作用大，贯穿本领小。
- β 射线是高速运动的电子流，它的电离作用较小，贯穿本领较大。
- γ 射线是波长很短的电磁波。它的电离作用小，贯穿本领大。

原子核自发地放射出粒子而发生的转变称为原子核衰变



(二) 原子核衰变的规律

原子核的放射性及其衰变方式，取决于核内的**强相互作用**和**弱相互作用**。

与日常温度、压强、电场或磁场等**低能标**外界条件无关。

衰变规律: 在核衰变的过程中，原子核的数目 N 随时间按指数规律而减少。

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

λ : **衰减常数**

放射性活度: 物体放射性的强弱，即单位时间内发生核衰变的次数，以 A 表示。

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

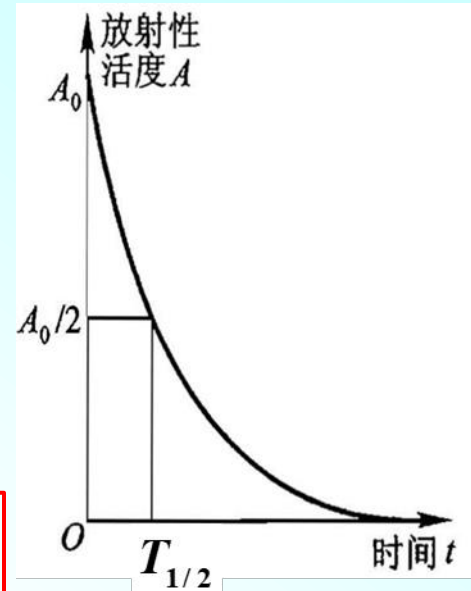
单位: 贝克勒尔 (Bq) 1 Bq = 一次核衰变/秒
居里 (Ci) 1 Ci = 3.7×10^{10} Bq

半衰期:

放射性活度减弱为原来的一半时所需要的时间 $T_{1/2}$ 称为放射性元素的半衰期。

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

$$\Rightarrow \frac{A_0}{2} = A_0 e^{-\lambda T_{1/2}} \Rightarrow T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \approx \frac{0.693}{\lambda}$$



各种放射性元素半衰期的长短相差很大。

铀 (${}^{238}_{92}\text{U}$) —— $4.5 \times 10^9 \text{ a}$ (年)

镭 (${}^{226}_{88}\text{Ra}$) —— 1600 a

锡 (${}^{118}_{50}\text{Sn}$) —— 118 d

钋 (${}^{212}_{84}\text{Po}$) —— $3 \times 10^{-7} \text{ s}$

例： $^{226}_{88}\text{Ra}$ 的半衰期为1600a。10g纯的 $^{226}_{88}\text{Ra}$ 活度是多少？

这一样品经过400a和6000a时的活度又分别是多少？

(a表示以年为单位)

解：活度满足指数方程：

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

半衰期为：

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

10g纯 $^{226}_{88}\text{Ra}$ 的原子数为：

$$\begin{aligned} N_0 &= \frac{10}{226} \times 6.022 \times 10^{23} \\ &= 2.66 \times 10^{22} \end{aligned}$$

$$\Rightarrow A = \frac{0.693}{T_{1/2}} N_0 \cdot \text{Exp}\left(-\frac{0.693}{T_{1/2}} t\right)$$

10g纯 $^{226}_{88}\text{Ra}$, 即起始活度为：

$$\begin{aligned} A_0 &= \frac{0.693}{T_{1/2}} N_0 = \frac{0.693 \times 2.66 \times 10^{22}}{1600 \times 3.1536 \times 10^7} \\ &= 3.65 \times 10^{11} \text{ (Bq)} \\ &\approx 10 \text{ (Ci)} \end{aligned}$$

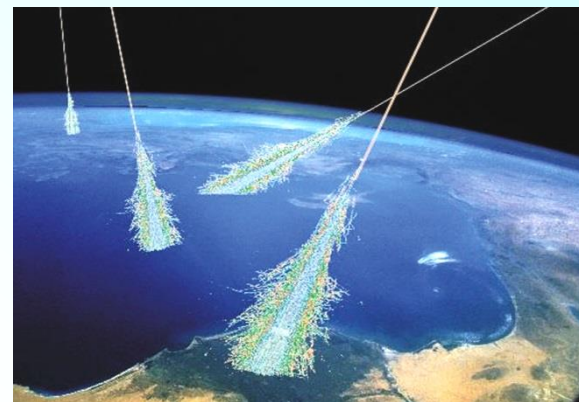
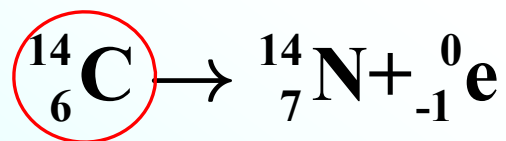
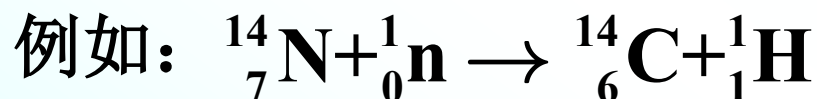
$$\begin{aligned} A_{400} &= A_0 \times \text{Exp}\left(-\frac{0.693 \cdot 400}{1600}\right) \\ &= 3.07 \times 10^{11} \text{ (Bq)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{6000} &= A_0 \times \text{Exp}\left(-\frac{0.693 \cdot 6000}{1600}\right) \\ &= 2.71 \times 10^{10} \text{ (Bq)} \end{aligned}$$

^{14}C 放射性鉴年法

威拉德·利比（Willard Frank Libby，美国）发展了使用碳14同位素进行年代测定的方法。（1960年诺贝尔化学奖）

宇宙射线不停的轰击地球大气层，产生宇宙射线广延大气簇射。其中发生很多原子核反应，形成放射性同位素



宇宙射线

^{14}C 是放射性同位素，半衰期约为5730a。

由于宇宙射线的强度非常稳定，而且地球生物固化碳的能力也相对稳定，所以千万年以来，**地球大气中的 ^{14}C 已达到了恒定的丰度**，约为 $1.3 \times 10^{-10} \%$ ，即 1.3×10^{-12} 。

所以，活的生物体中 ^{14}C 的丰度与大气一致。

而**死的生物体中 ^{14}C 将不停的衰变，丰度按指数减少**。

例：2003年，河北某地在考古遗迹中发现有古时候的粟，其中含有1g碳，它的活度经测定为 $2.8 \times 10^{-12} \text{Ci}$ 。
求这些粟距今的年代。

解：活度满足指数衰减规律：

$$A = A_0 e^{-\lambda t} = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$$

^{14}C 的半衰期为5730 a: $T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{0.693}{T_{1/2}}$

粟中 ^{14}C 的初始丰度就是大气中的恒定丰度 1.3×10^{-12} ，则1g碳中 ^{14}C 初始原子数为：

$$N_0 = \frac{1}{12} \times 6.022 \times 10^{23} \times 1.3 \times 10^{-12} = 6.5 \times 10^{10}$$

$$\Rightarrow A = \frac{0.693}{T_{1/2}} N_0 \cdot \text{Exp}\left(-\frac{0.693}{T_{1/2}} t\right)$$

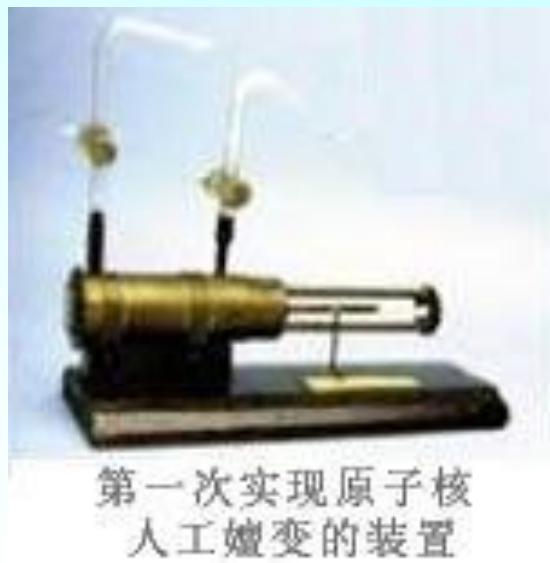
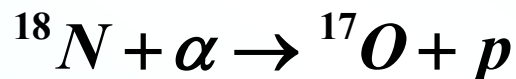
$$\Rightarrow t = \frac{T_{1/2}}{0.693} \ln\left(\frac{0.693}{T_{1/2}} \frac{N_0}{A}\right) = 7300 \text{ a}$$

据考证，这些粟是世界上发现的最早的粟。

三、核反应与核能的利用

(一) 核反应

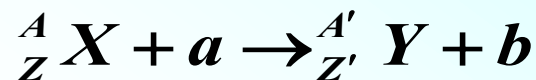
1919年，卢瑟福



这是人类历史上第一次实现原子核的人工衰变。

古代炼金术士梦寐以求的把一种元素变成另一种元素的空想变成现实。

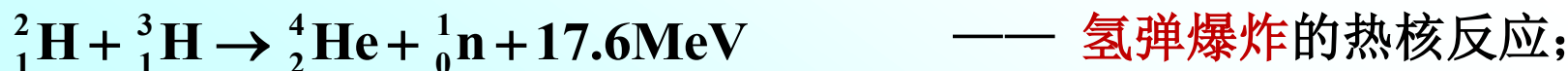
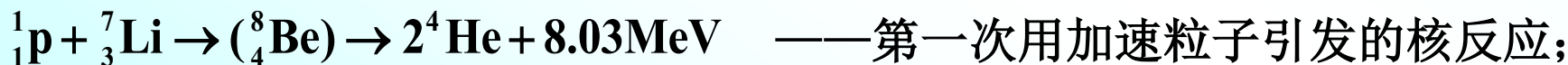
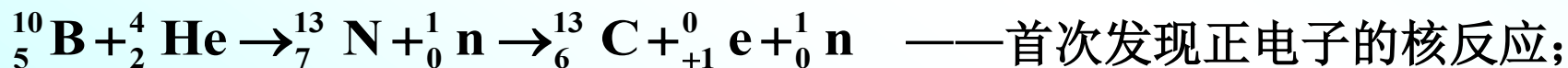
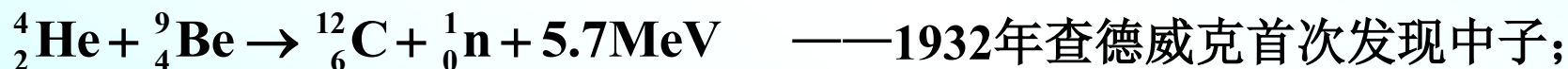
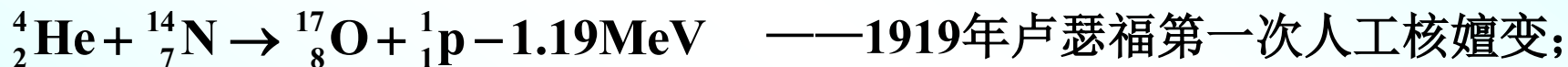
当时卢瑟福写了一本书就取名为《新炼金术》



这种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**。

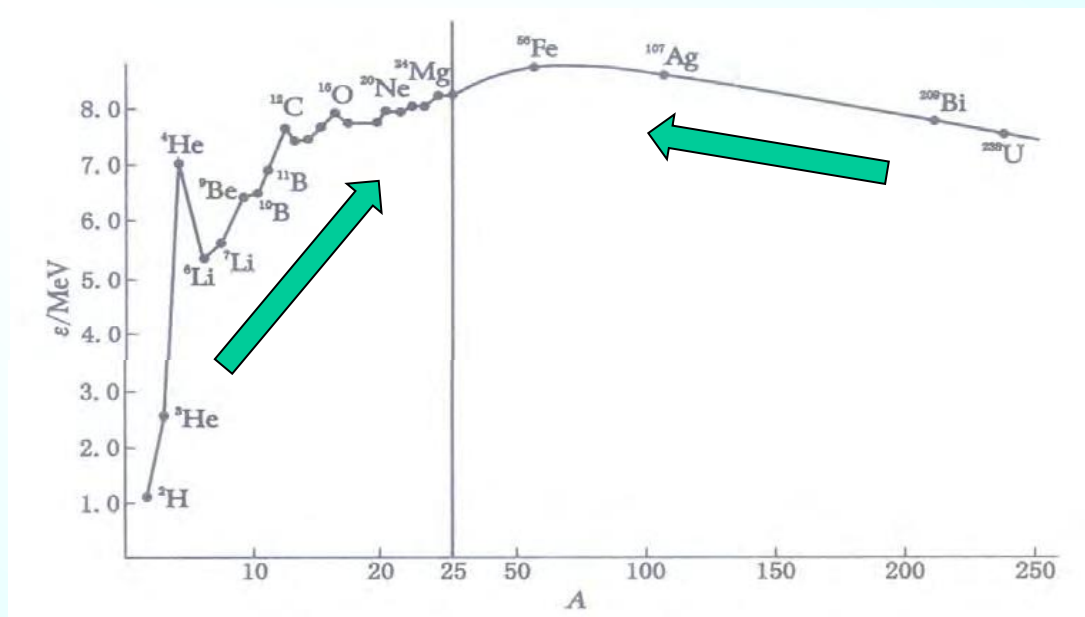
其中： a 是入射粒子， X 是被轰击的原子核，称为**靶核**； Y 是形成的新核，称为**反冲核**， b 是反应后放出的粒子。

基本规律：能量守恒，电荷守恒，角动量守恒，...



(二) 核能的利用

核素的平均结合能：



轻核聚变：把轻核聚合成较重的中等质量的原子核。

重核裂变：重核分裂成两个中等质量的原子核。

都会放出大量能量，这是获得原子核能的两种途径。

原子核的裂变

1.裂变的发现

1932年，在核反应 $\alpha + {}^9\text{Be} \rightarrow {}^{12}\text{C} + \text{n}$ 中发现了中子。

之后，费米等人首先开始用中子照射包括U (铀)在内的各种元素。

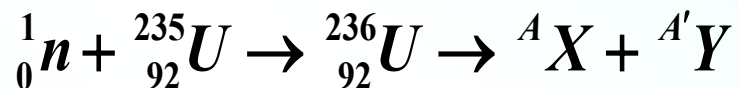
1938年， 哈恩发现铀被撞击后，有 ${}^{137}\text{Ba}$ (钡)产生；

与此同时小居里等人发现：中子照射过的铀有 ${}^{139}\text{La}$ (镧)产生，不久他们又从实验中找到了另一种较轻的物质，两者质量数之和刚好等于铀的质量数

迈特纳对上述实验事实进行解释，指出铀核只有很小的稳定性，在俘获中子后，**本身分裂为质量差别不大的两个核**，这种新型的核反应称之为**核裂变(Fission)**。

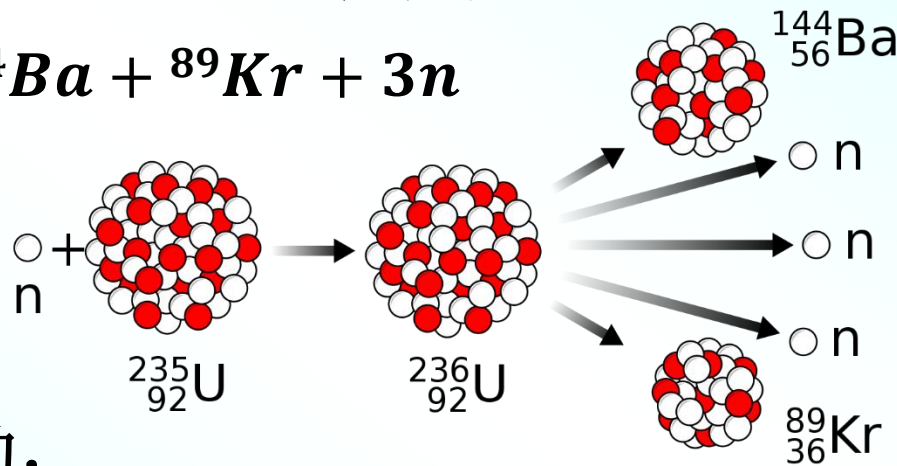
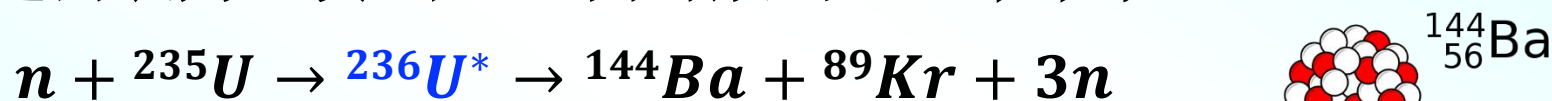
2. 裂变产物和裂变能

以中子轰击 ^{235}U 为例：



反应过程是先形成复合核 ^{236}U ，

进而裂为二块 X 和 Y ，同时放出2~3个中子。



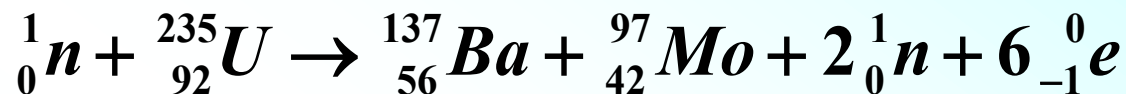
X 和 Y 可以是多种多样的，

有时裂变为 氙(${}^{140}\text{Xe}$) 和 锶(${}^{94}\text{Sr}$)，

有时裂变为 钡(${}^{144}\text{Ba}$) 和 氪(${}^{89}\text{Kr}$)，

或者裂变为 锑(${}^{121}\text{Sb}$) 和 铌(${}^{93}\text{Nb}$)，

裂变能：



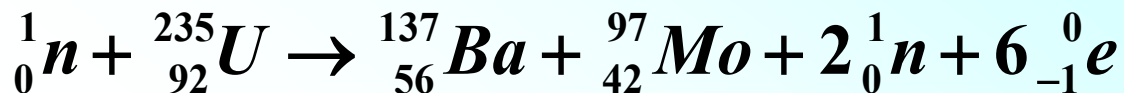
将上式中各核素的质量代入可得裂变过程中放出的能量为：

$$\begin{aligned} Q &= \Delta Mc^2 \\ &= (235.043915 - 136.905500 - 96.90621 - 1.008665)c^2 \\ &\approx 208MeV \end{aligned}$$

而化学反应释放能量为10eV的量级，
所以裂变能比化学能高7个量级

平均每核子释放能量为0.88MeV

这些能量通常以碎片动能、裂变中子动能、电子、中微子和 γ 光子的能量等形式放出



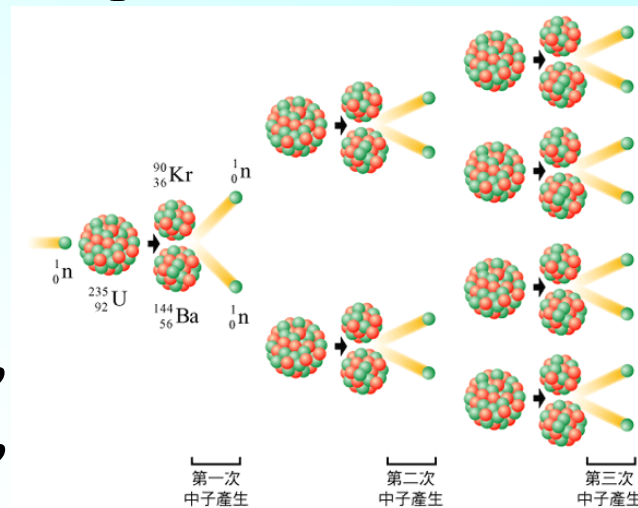
一个中子引发 ${}^{235}\text{U}$ 发生裂变时，可放出2~3个中子，这些中子有**可能**再次引起其他 ${}^{235}\text{U}$ 核裂变产生下一代中子。

这个过程使得裂变不断成倍增长十分迅猛，能量释放也十分剧烈。反应成为爆炸性的，就是**链式反应**

要发生链式反应，铀要到达一定的体积和质量（称为**临界体积**、**临界质量**）。

当几块质量小于临界质量的铀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。



爱因斯坦于1939年8月2日给时任美国总统罗斯福的信

Albert Einstein
Old Grove Rd.
Massau Point
Peconic, Long Island
August 2nd, 1939

F.D. Roosevelt,
President of the United States,
White House
Washington, D.C.

Sir:

Some recent work by E. Fermi and L. Szilard, which has been communicated to me in manuscript, leads me to expect that the element uranium may be turned into a new and important source of energy in the immediate future. Certain aspects of the situation which has arisen seem to call for watchfulness and, if necessary, quick action on the part of the Administration. I believe therefore that it is my duty to bring to your attention the following facts and recommendations:

In the course of the last four months it has been made probable - through the work of Joliot in France as well as Fermi and Szilard in America - that it may become possible to set up a nuclear chain reaction in a large mass of uranium, by which vast amounts of power and large quantities of new radium-like elements would be generated. Now it appears almost certain that this could be achieved in the immediate future.

This new phenomenon would also lead to the construction of bombs, and it is conceivable - though much less certain - that extremely powerful bombs of a new type may thus be constructed. A single bomb of this type, carried by boat and exploded in a port, might very well destroy the whole port together with some of the surrounding territory. However, such bombs might very well prove to be too heavy for transportation by air.

Because of the danger that Hitler might be the first to have the bomb, I signed a letter to the President which had been drafted by Szilard.

Had I known that the fear was not justified, I would not have participated in opening this Pandora's box, nor would Szilard. For my distrust of governments was not limited to Germany.



1939年当爱因斯坦知道德国人有可能研制核武器的消息后，出于对人类命运的关注，写信给美国总统罗斯福，促使罗斯福批准美国研制原子弹的“曼哈顿计划”。

A black and white photograph of a massive mushroom cloud from an atomic bombing. The cloud has a dense, billowing base that tapers into a long, vertical column of smoke and debris rising into the sky. The top of the cloud is very bright and appears to be breaking apart or dispersing. The background is a clear, light blue sky.

美国曼哈顿计划

1945年7月16日凌晨

第一颗试验原子弹

(代号：小玩意儿)

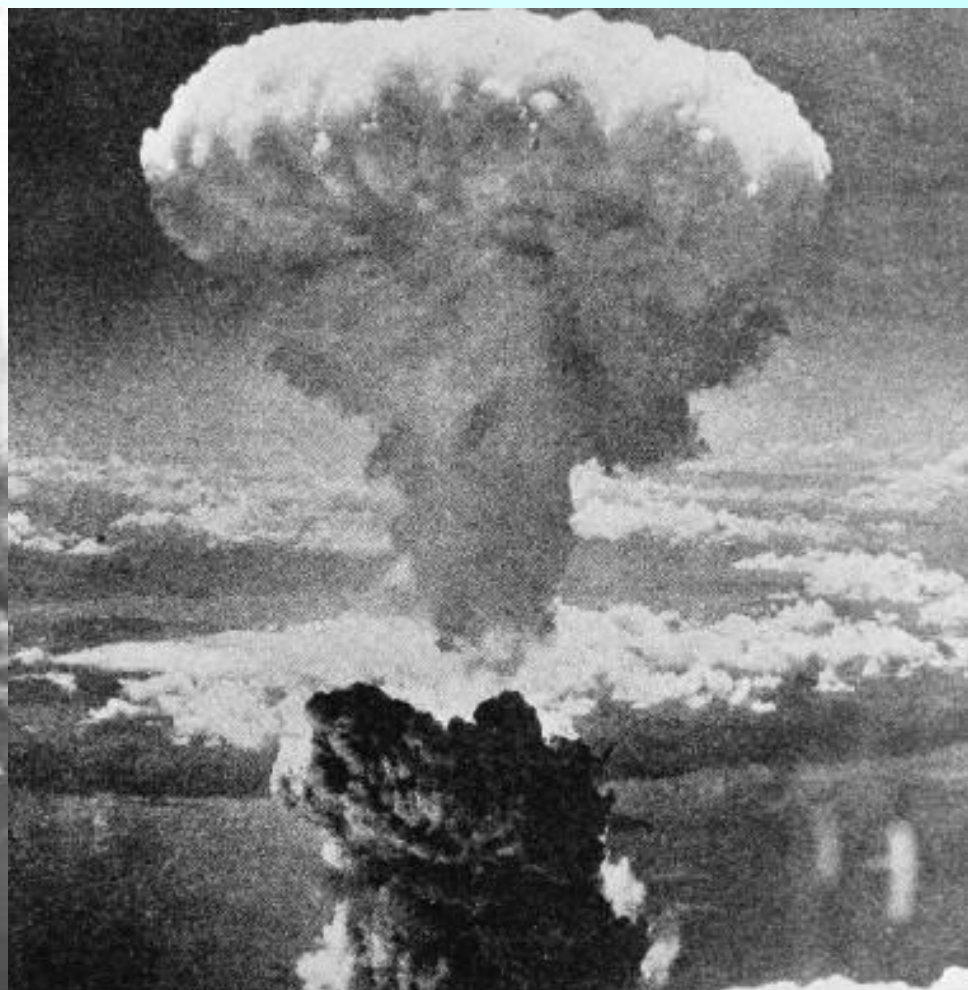
在美国 新墨西哥州 Los Alamos阿拉

默多尔空军基地的沙漠地区爆炸成功

它的爆炸威力相当于二万吨TNT炸药



1945年8月6日，美国向日本广岛投下第一颗原子弹（代号：小男孩），浓烟笼罩广岛上空。广岛死于原子弹爆炸以及核辐射的人数已超过了24万人。



1945年8月9日，美国空军向日本长崎投下第二颗原子弹（代号：胖子），蘑菇云直冲云霄。爆炸当日使10万余人死伤和失踪，60%—70%的建筑物被毁。

人民日报

1964年10月16日

号外

加强国防建设的重大成就,对保卫世界和平的重大贡献 我国第一颗原子弹爆炸成功

我国政府发表声明,郑重建议召开世界各国首脑会议,
讨论全面禁止和彻底销毁核武器问题。

新华社北京十六日电 新闻公报

一九六四年十月十六日十五时(北京时间),中国在本国西部地区爆炸了一颗原子弹,成功地进行了第一次核试验。

中国核试验成功,是中国人民加强国防,保卫祖国的重大成就,也是中国人民对于保卫世界和平事业的重大贡献。

中国工人、工程技术人员、科学工作者和从事国防建设的一切工作人员,以及全国各地区和各部门,在党的领导下,发扬自力更生、奋发图强的精神,辛勤劳动,大力协作,使这次试验获得了成功。

中共中央和国务院向他们致以热烈的祝贺。

新华社北京十六日电 中华人民共和国政府声明

一九六四年十月十六日

一九六四年十月十六日十五时,中国爆炸了一颗原子弹,成功地进行了第一次核试验。这是中国人民在加强国防力量,反对美帝国主义的核讹诈和核威胁政策的斗争中所取得的重大成就。

保护自己,是任何一个主权国家不可剥夺的权利。保卫世界和平,是一切爱好和平的国家的共同职责。面对着日益增长的美国的核威胁,中国不能坐视不理。中国进行核试验,发展核武器,是被迫而为之。

中国政府一贯主张全面禁止和彻底销毁核武器。如果这个主张能够实现,中国本来用不着发展核武器。但是,我们的这个主张遭到美帝国主义的顽固拒绝。中国政府早已指出,一九六三年七月美苏两国在莫斯科签订的部分禁止核试验条约,是一个违背世界人民的大敌。这个条约企图巩固三个大国的垄断地位,把一切爱好和平的国家的手脚束缚起来。它不仅没有减少美帝国主义的核威胁,反而加重了这种威胁。美国政府当时甚至不隐讳地声明,签订这个条约,决不意味着美国不进行地下核试验,不使用、生产、储存、输出和扩散核武器。一年多来的事实,也充分证明了这一点。

一年多来,美国没有停止在它已经进行的核试验的基础上生产各种核武器。美国还精益求精,在一年多的时间内,进行了几十次地下核试验,使它生产的核武器更趋完备。美国的核潜艇驶往日本,直接威胁着日本人民、中国人民和亚洲各国人民。美国正在通过所谓多边核力量控制武器扩散到西德、法国、日本等手中,威胁着意大利、民主德国和东欧社会主义国家的安全。美国的核舰,携带着带有核弹头的北极星导弹,游荡在太平洋、北冰洋、地中海、大西洋、印度洋,到处威胁着爱好和平的国家和一切反美帝国主义和新老殖民主义的各国人民。在这种情况下,怎么能要求由于美国曾对不进行大气层核试验的承诺,就认为它对世界人民的核威胁和核威胁不存在了呢?

大家知道,毛泽东主席有一句名言:原子弹是纸老虎。过去我们这样看,现在仍然这样看。中国发展核武器,不是由于中国相信核武器的万能,要使用核武器,恰恰相反,中国发展核武器,正是为了打破帝国主义的核垄断,要消灭核武器。

中国政府忠于马克思主义列宁主义,忠于无产阶级国际主义。我们愿意人民,决定战争胜负的是人,而不是任何武器。中国的命运决定于中国人民,世界的命运决定于世界人民,而不决定于核武器。中国发展核武器,是为了防御,为了保卫中国人民免受美国发动核战争的威胁。

中国政府和人民宣布:

中国人民坚决支持

一切可以争取到的

的援助。在核武器问题

上,中国政府完全贯彻

社会主义原则所主张

了。核战争和核威胁的

生。我们相信,只要全

中国政府和世界各

国政府达成协议,共同

禁止,不对无核国家使

用核武器,如果已经解

释,就不采取可能和必

要。中国政府和中国

人民相信,核武器

1964年10月16日
《人民日报》号外
中国第一颗原子弹
爆炸成功

加上互相威慑,是

不现实,是一个巨大

的障碍。核武器越

多,他们就不那么神

气了。战争将永远不

会发

生。第一步,各国首脑

会议或国家使用核武

器,相信它们的和平

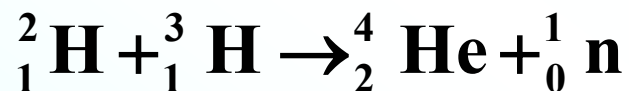
使用。在这一天没有到



核聚变反应

轻核聚变是利用原子核能的另一种方法。

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：



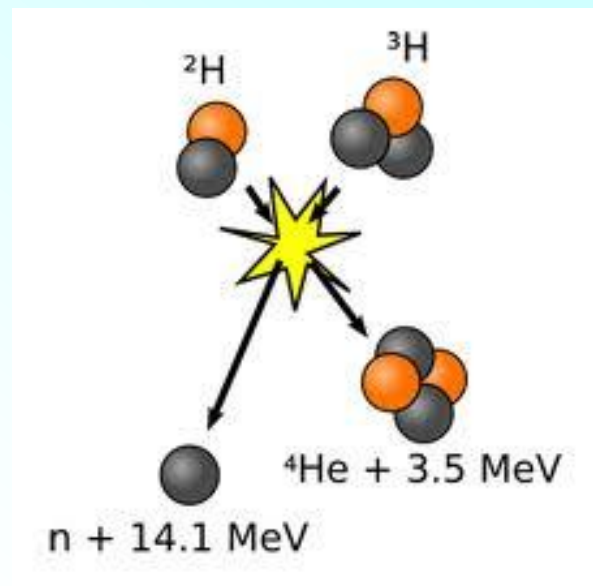
聚变释放的能量比铀核裂变大10倍。

但是，轻核聚变需要巨大的能量克服带电粒子靠近时的静电斥力。

在高温下，热运动使轻核克服静电斥力，聚合而放出大量原子核能的反应称为**热核反应**

氢弹中，**通过引爆原子弹**，产生几百万度的高温，引发热核反应。

太阳和恒星的能量来自它中心的热核聚变



太阳

中国城市经济出版社 出版

我国第一颗氢弹爆炸成功

[illegible]

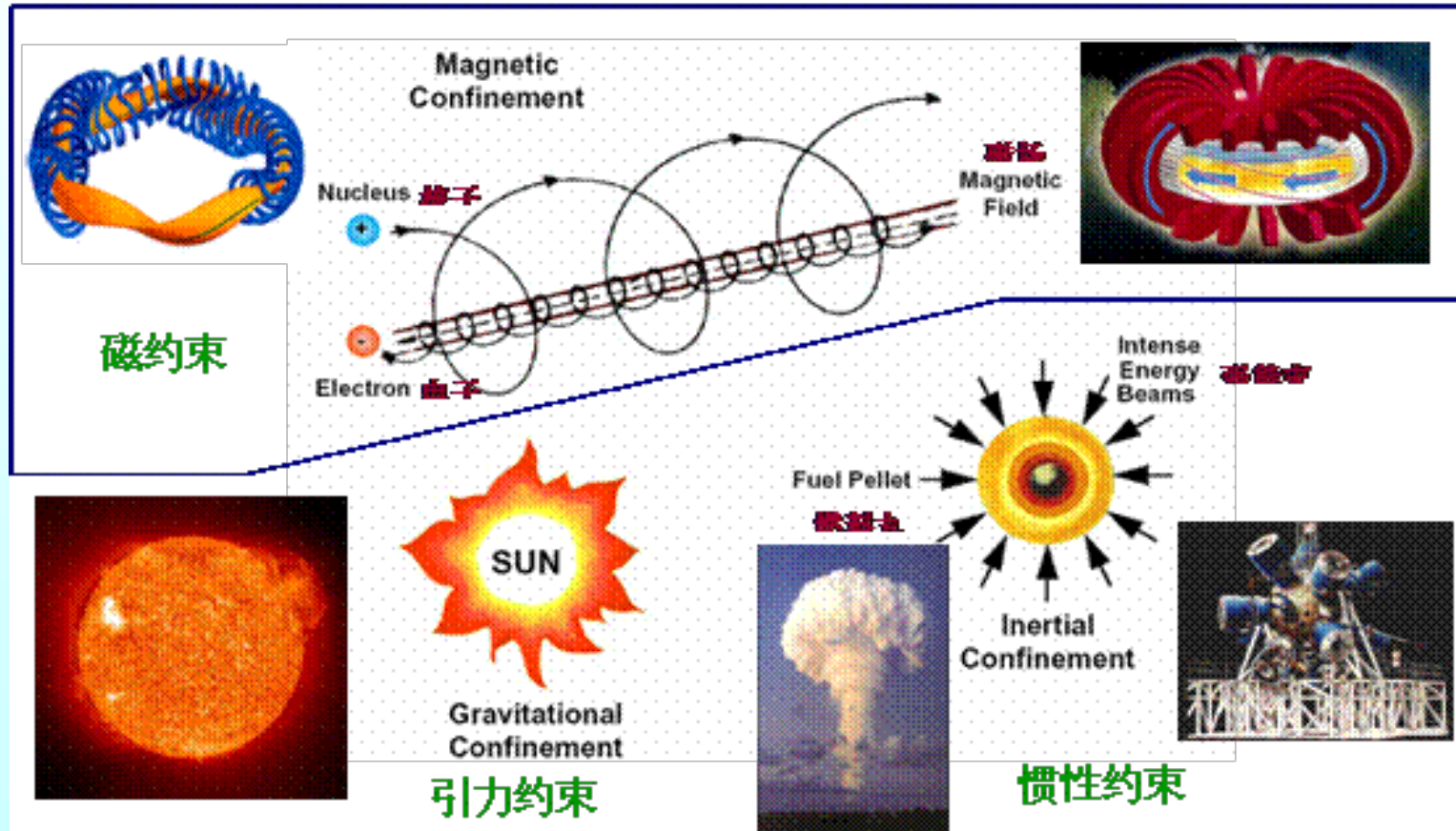
1967年6月17日
《人民日报》喜报
中国第一颗氢弹
爆炸成功



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。

实现聚变的三种途径



作业：17— T1-T4

作业要求

1. 独立完成作业。
2. 图和公式要有必要的标注或文字说明。
3. 作业纸上每次都要写姓名以及学号(或学号末两位)。
4. 课代表收作业后按学号排序，并装入透明文件袋。
5. 每周一交上周的作业。迟交不改，早交也不改。
6. 作业缺交三分之一及以上者综合成绩按零分计。