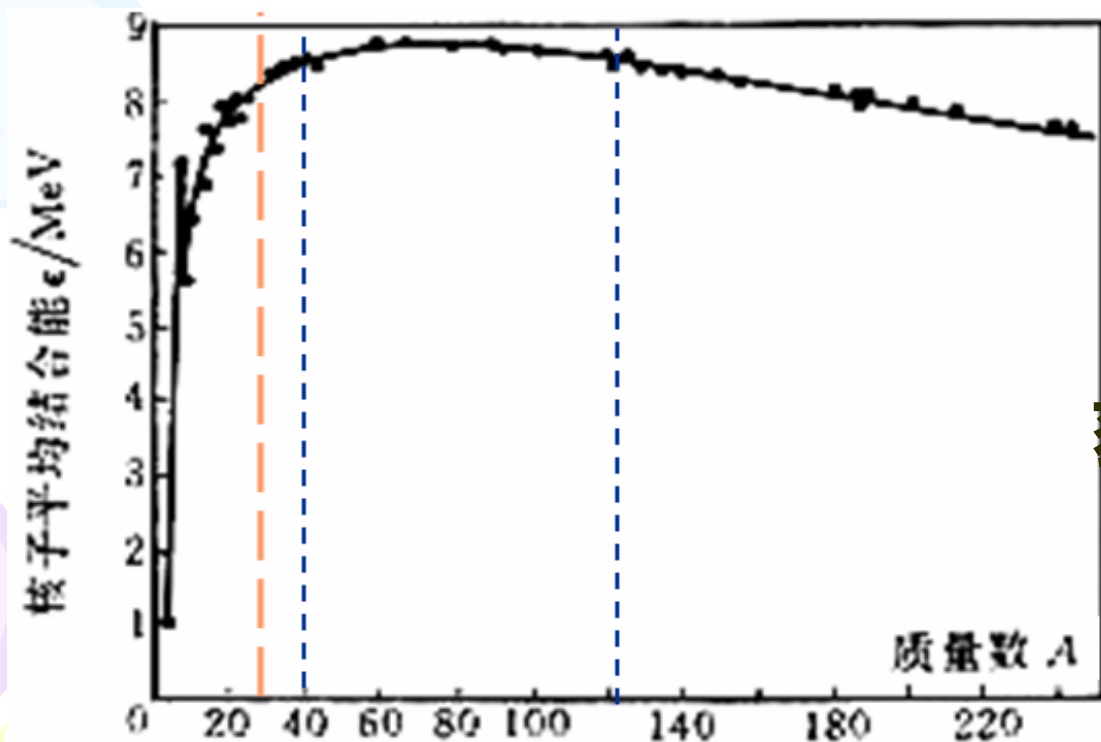


## § 11 裂变与聚变

原子能是指原子核的结合能发生变化时所释放出的能量，由比结合能曲线可以看到，轻核和重核的 $\epsilon$ 较中等核低(中高边低)。



原子能（核能）

原子核结合能发生变化时释放的能量

获得核能的两个途径

- 1) 重核裂变
- 2) 轻核聚变

## 1. 裂变的发现

在1932年发现了中子后，E.Fermi等人在1934年首先用中子照射包括 $U$ 在内的各种元素，在1939年，O.Hahn和F.Strassmann发现 $U$ 被撞击后，有钡 ( $^{137}Ba$ ) 产生；与此同时，居里等人发现中子照射过的 $U$  有镧 ( $^{139}La$ ) 产生，不久他们又从实验中找到了另一种较轻的物质 ( $A=101$ )，两者质量数之和刚好等于 $U$  的质量数。

物理学家梅特纳和弗里什对上述实验事实进行解释，他们指出 $U$  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。

1934年，费米小组用中子轰击 $U$ ，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。但他们作出了错误判断，猜想那是“第93号元素”，同时说明证据不足。但当时罗马大学物理研究所所长柯比诺却在国王出席的科学院会议上宣布发现第93号元素，引起新闻界的宣扬，吹捧这是法西斯主义在文化领域的胜利。

费米于1938年借领取诺贝尔奖之机由意大利迁居美国。在美军方支持下，于1941年12月开始领导“曼哈顿工程”。

1939年发现裂变时，世界上没有浓缩铀，当时还未发现钚 $^{239}\text{Pu}$ 。

1945年美国试爆的第一颗原子弹原料： $^{239}\text{Pu}$

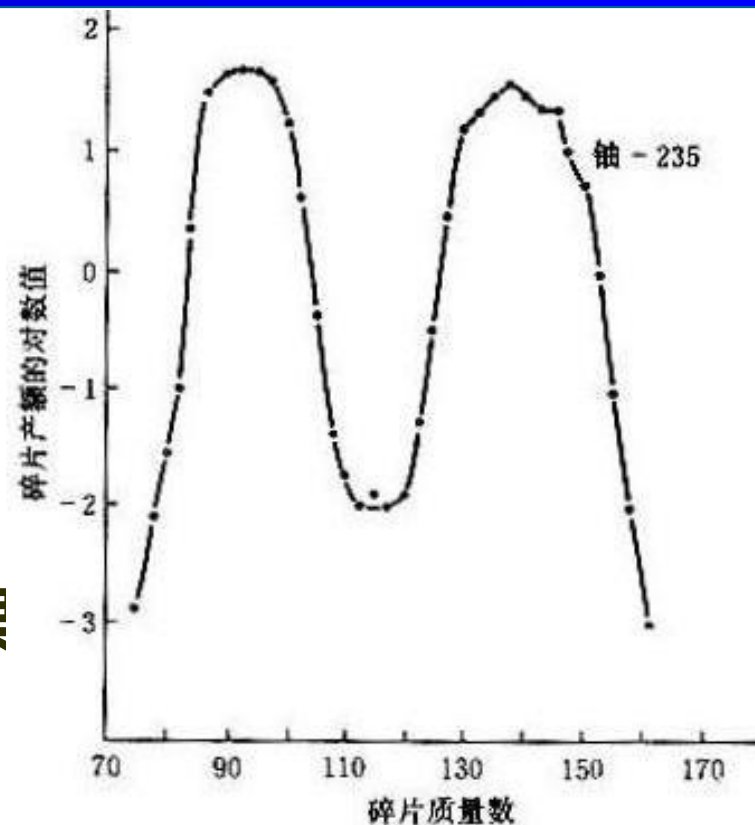
1947年钱三强和何泽慧夫妇发现三分裂现象(其中一块往往是 $\alpha$ 粒子)。三分裂的几率约为二分裂的千分之三；四分裂的几率就更小了，约为二分裂的万分之三。

## 裂变产物的分布

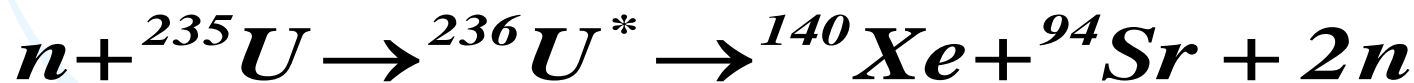
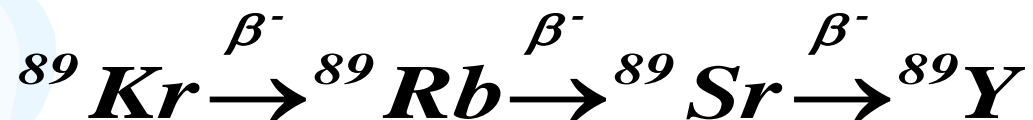
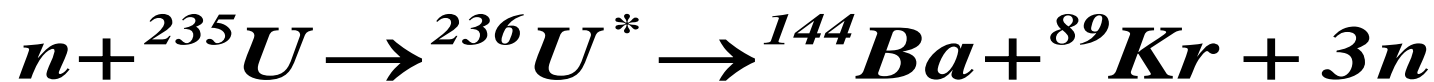
例如  ${}_0^1n + {}_{92}^{235}\text{U} \rightarrow {}_{92}^{236}\text{U} \rightarrow {}^AX + {}^{A'}Y$

反应过程是先形成“复合核” ${}^{236}\text{U}$ 进而裂为二块 $X$ 、 $Y$ 。生成物共有四十多种，质量数 $A$ 、 $A'$ 分别在70-160之间，如果裂变生成物 ${}^AX$ 、 ${}^{A'}Y$ 是放射性的，它还将连续衰变。

真正分裂成质量相等的两块的几率是很小的；几率最大的分裂是在质量数 $A=95$ 和 $139$ 处；质量数 $A<72$ 和 $A>162$ 的分裂的几率为零。裂变的碎块为丰中子素，故不可能以 $\beta^+$ 或EC方式衰变。



## ***U*分裂过程:**



一个铀核能提供的能量几乎是化学反应中一个原子所提供能量（一般不到10eV）的一亿倍。最重要的一点是铀核裂变平均要放出2.5个中子，而这些中子是维持链式反应所必需的，即“中子的再生率 $\geq 1$ ”。

平均来看，每个 $^{235}\text{U}$ 裂变时将释放的能量约为210 MeV。释放的能量表现为碎片、放出的中子及相伴发生的 $\beta$ 衰变产物的动能。

多种粒子(质子、中子、氘核、氦核和光子等)均能诱发裂变，但中子引起的裂变占重要地位。

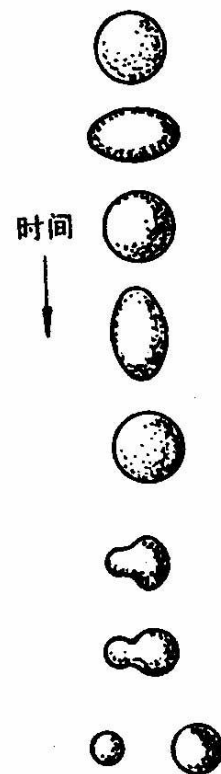
从发现裂变到链式反应堆的建立只花了不到4年的时间（空前的快速）。

液滴模型+  
(表面张力  
-库仑斥力)

## 2. 裂变机制

玻尔和惠勒用液滴模型及复合核反应机制解释裂变过程：**中子被俘获后形成的复合核处于激发态，它将发生集体振荡并改变形状。表面张力力图使核恢复球形，而库仑力将使核增大形变，最终可能使其发生裂变。**

裂变的发生取决于复合核的激发能的大小及库仑能与表面能之比（**可裂变率**）



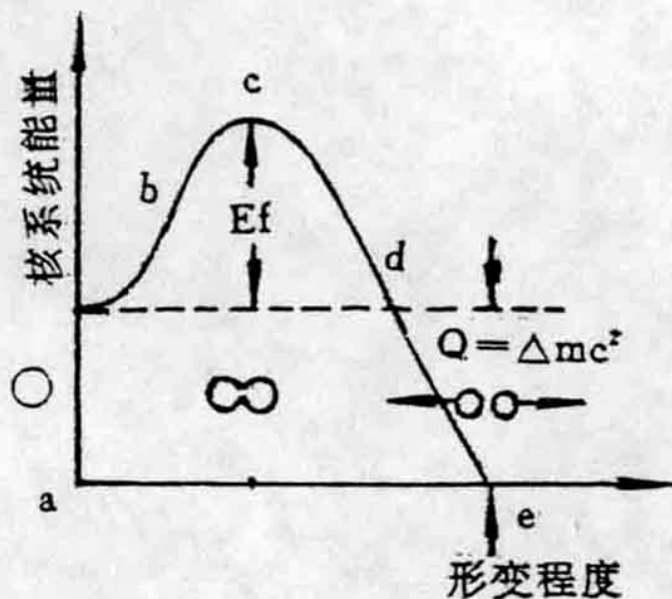
$$\chi \sim \frac{B_C}{B_S} \sim \frac{Z^2 / A^{1/3}}{A^{2/3}} = \frac{Z^2}{A} = \begin{cases} 35.9(n+^{235}\text{U}) \\ 36.8(n+^{239}\text{Pu}) \end{cases}$$



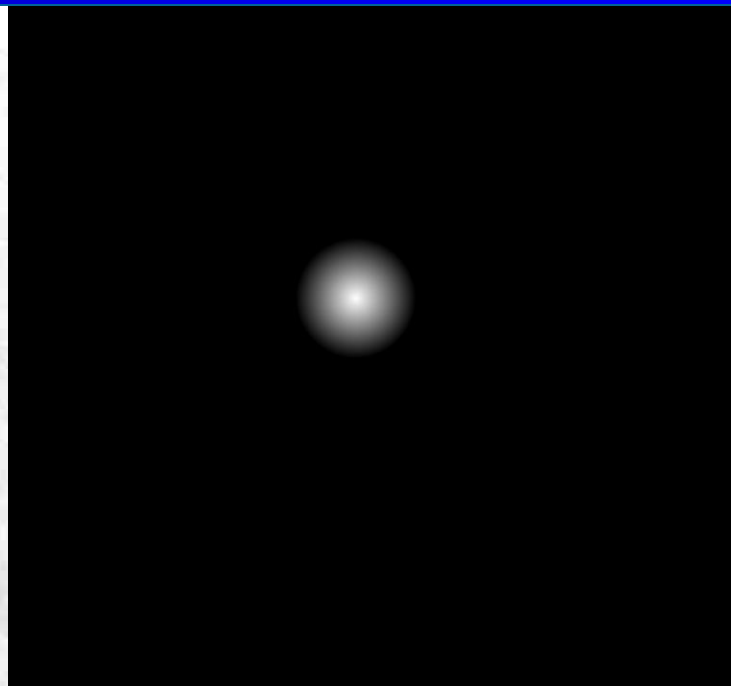
## 定量估计裂变前后表面能和库仑能的变化情况

$$\begin{aligned} E_f = \Delta B &= 2[-a_s \left(\frac{A}{2}\right)^{2/3} - a_c \left(\frac{Z}{2}\right)^2 \left(\frac{A}{2}\right)^{-1/3}] \\ &\quad - [-a_s A^{2/3} - a_c Z^2 A^{-1/3}] \\ &= a_s A^{2/3} (1 - \sqrt[3]{2}) + a_c Z^2 A^{-1/3} (1 - \frac{1}{\sqrt[3]{4}}) \end{aligned}$$

前项为负：表面能增加；后项为正：库仑能减小，要求 $\Delta B > 0$ 。所以，库仑能的减小 $>$ 表面能的增加。理论上， $A > 100$  的原子核裂变才能释放能量。



在不同形态下核系统的能量



裂变一般不能自发发生，那么外界必须提供多大的能量（激发能）才能发生裂变呢？定义激活能为 $E_f$ ，则发生裂变的条件是：激发能大于激活能。

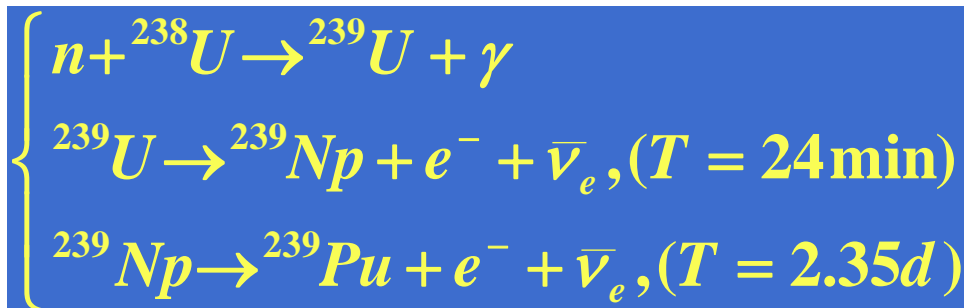
理论和实验都表明， $^{235}\text{U}$ 的激活能很低，热中子就足以使其裂变，而 $^{238}\text{U}$ 的激活能比较大，中子的能量至少大于1MeV时，裂变才有可能发生。

## 核裂变原料

$^{235}\text{U}$  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。

$^{238}\text{U}$  占天然铀的99.27%，只能由快中子 ( $>1\text{MeV}$ ) 诱发而裂变，其主要原因是 $^{238}\text{U}$ 是偶偶核，外来中子的结合能比较小。

$^{238}\text{U}$  可用来生产核原料：



◆  $U$ 分离技术是制造原子弹的关键技术

## 3. 自发裂变SF

当 $Z^2/A$ 大到一定程度时，核可以自发裂变，这与 $\alpha$ 衰变一样是势垒贯穿的结果。但此过程一般很慢，且与 $\alpha$ 衰变竞争，往往不是核衰变的主要方式，因此直到1940年人们才首次发现铀核的SF。

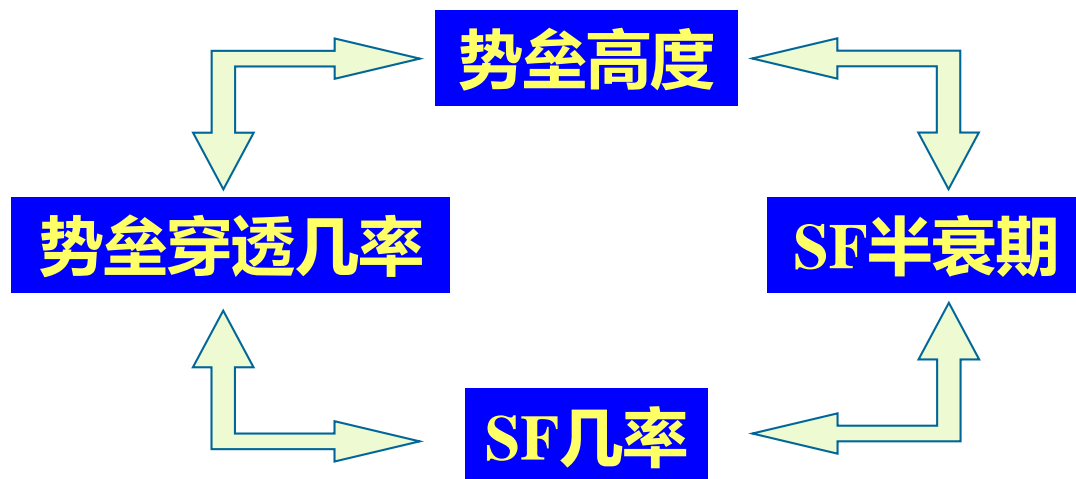
根据比结合能曲线，从能量角度考虑， $A > 90$ 的核就有可能发生核裂变，但能量释放只是自发裂变的必要条件，只有裂变几率达到一定时，实验上才能观测到。

对于 $A \approx 92$ 的核素，自发裂变的几率比 $\alpha$ 衰变的几率小很多，随着 $Z$ 和 $N$ 的增加，自发裂变分支比逐渐增加。随着新的核素的产生，SF的速度不断变快，且成为一些核素的主要衰变方式。例如， $^{252}\text{Cf}$ 的SF分支比虽然只占3%，但因其伴随着中子的发射，故成为很有用的不需加速器的中子源；而 $^{254}\text{Cf}$ 的SF分支比却占到99.69%。

通常铀系中较轻核素的SF半衰期都比较长；e-核的SF半衰期有素随 $Z^2/A$ 减少的趋势；同一种元素的各种同位素的半衰期差别很大；oA核的SF半衰期都比相邻e-e核的大。

右侧四者密切相关，有写些非常敏感，例如：

势垒高度相差1MeV，半衰期可相差 $10^5$ 倍。



	$^{235}\text{U}$	$^{238}\text{U}$	$^{240}\text{Pu}$	$^{242}\text{Am}$	$^{252}\text{Cf}$	$^{254}\text{Cf}$
$T_{\text{SF}}$	$3.5 \times 10^{17}\text{Y}$	$1.01 \times 10^{16}\text{Y}$	$1.45 \times 10^{11}\text{Y}$	$9.5 \times 10^{11}\text{Y}$	85.5Y	60.5d
$T_{\alpha}$	$7.038 \times 10^8\text{Y}$	$4.468 \times 10^9\text{Y}$	$6.57 \times 10^3\text{Y}$	50.8h	2.64Y	60.5d

**同质异能素<sup>Am</sup>X:**

退激 ( $\gamma$ ) ; 自旋 (I) 与基态的差异很大;

**裂变 (形状) 同质异能素<sup>Af</sup>X:**

退激 (SF) ; 形状 (长短半轴比较) 与基态的差异很大;

**裂变 (形状) 同质异能素<sup>242f</sup>Am的T (SF) =14ms**

## 4. 裂变能与利用

裂变能：每个 $^{235}\text{U}$ 裂变释放约200MeV

碎片的动能：170MeV

中子的动能：5MeV

$\beta, \gamma$ 的能量：15MeV

中微子能量：10MeV

一个U核可以提供约185MeV的能量，几乎是化学反应中一个原子提供能量(一般不到10eV的能量)的一亿倍，比一般核反应能也要大十几倍。最重要的一点是铀核裂变平均要放出2.5个中子，而这些中子是维持链式反应所必需的，即“中子的再生率 $\geq 1$ ”。



## 问题1——“临界体积”

在体积不大的纯铀中，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。实际上，原子弹是把丰度为90%以上的铀做成不到临界体积的两块，引爆时用普通炸药将两块铀合为一整块达到或超过临界体积而发生链式反应的。

对于大块的天然铀，如裂变产生的中子不是热中子，不可能产生链式反应。

## 问题2——“热中子”

**对于大块的天然铀能否产生链式反应？** 裂变中子的能量有一个分布，峰值在1MeV附近，所以裂变中子大都是快中子。

对于热中子，发生 $^{235}\text{U}(\text{n}, \text{f})$ 的几率比 $^{238}\text{U}(\text{n}, \gamma)$ 的大200多倍；当中子能量增大时，发生 $^{235}\text{U}(\text{n}, \text{f})$ 的几率减少，而发生 $^{238}\text{U}(\text{n}, \gamma)$ 的几率却增大。

## 问题3——“中子慢化”

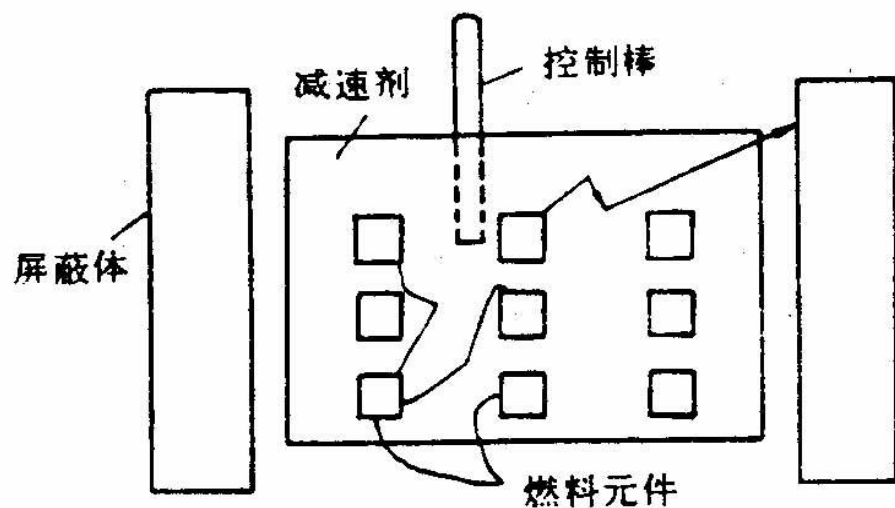
欲使裂变反应持续，关键在于使中子减速。快中子与 $^{238}\text{U}$ 相碰发生弹性散射可使中子减速，但二者质量相差太大，碰撞一次中子的能量损失很小，能量为1MeV的快中子减速到热中子至少要碰撞2000次，而在这过程中，它可能被吸收而中断裂变过程，所以要使中子减速应选用合适的轻元素。

氢与中子碰撞18次就可使1MeV的快中子变为热中子，但氢的 $(n, \gamma)$ 截面太大而不适宜。

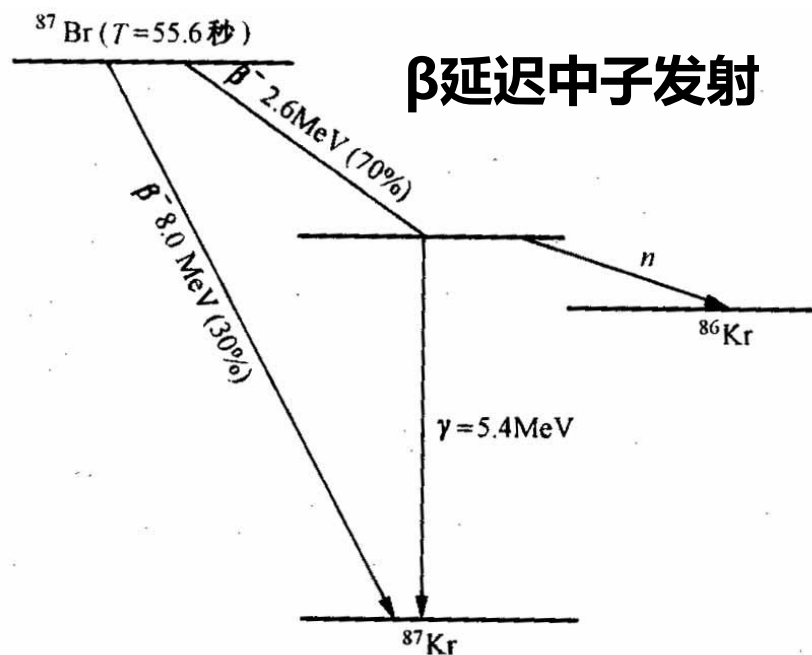
目前常用的减速剂是重水和石墨。1942年世界第一个反应堆用天然铀为原料，石墨为减速剂。我国1958年建成的反应堆用丰度为2%的 $^{235}\text{U}$ 为原料，用重水为减速剂。

# 原子核物理概论 § 11 裂变与聚变

反应堆是可控的链式反应装置，其控制棒用吸收中子很强的镉或硼制成。因链式反应很快，大约1秒钟可产生1000代中子，解决的办法是靠“**缓发中子**”（约占裂变中子数的千分之几，要几秒或几分钟后才从碎片中产生，而不象“**瞬发中子**”在裂变后毫秒内就产生）。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。



裂变反应堆



## 用手阻止核爆炸的人

二战期间的一天，加拿大著名的核物理学家斯罗达博士正在实验室里主持着原子弹引爆临界试验工作。

要从亚临界到高超临界状态的转变，可以采用两种方法，一是积木式的拼凑法，二叫压紧法（利用普通炸弹的爆炸力量把分散的浓缩铀积压到一块，使它超过临界体积而爆炸）。斯罗达博士的试验，就是在探索 and 解决这种引爆的难题。

那天，斯罗达正与同事们研究两块放在轨道上的浓缩铀对合的临界体积。意外发生了，拨动铀块的螺丝刀突然滑落，两块铀在轨道上相向滑动，就在两块铀即将滑到一起的关键时刻，斯罗达奋不顾身地用双手把它们阻隔开了，避免了一起极其可怕的核爆炸。斯罗达受到高剂量的致命辐射，出事之后的第九天，他就离开了人世。加拿大政府和人民为了表彰这位优秀科学家对人类所做的贡献，把他誉为“**用双手掰开原子弹的人**”。

“那个意大利航海家已登上了新大陆。”



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。



## 反应堆的主要用途：

1.作为核动力：载热剂通过反应堆，将裂变放出的热量带出，通过热交换器将热量传给工作介质，由工作介质做功推动汽轮机发电（核电站）或作为船用动力（核动力舰船），这一类的反应堆称为动力反应堆。

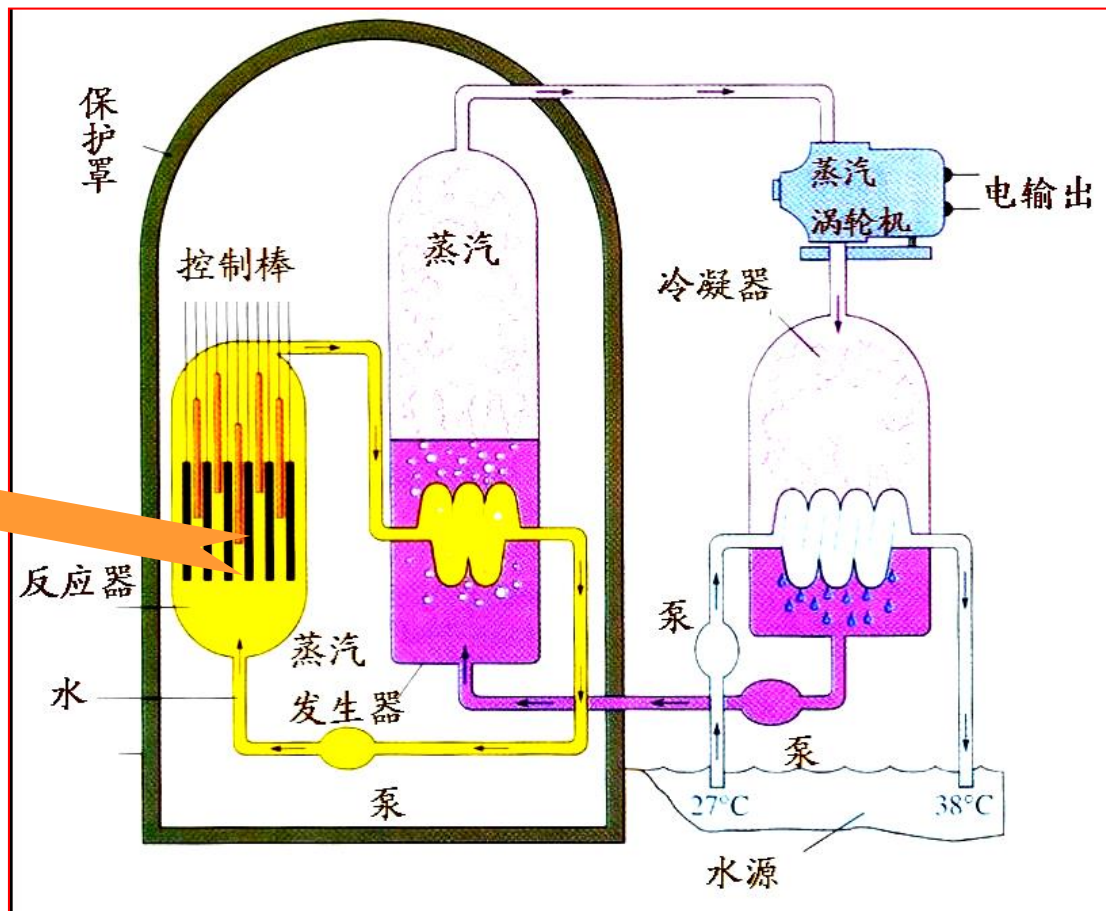
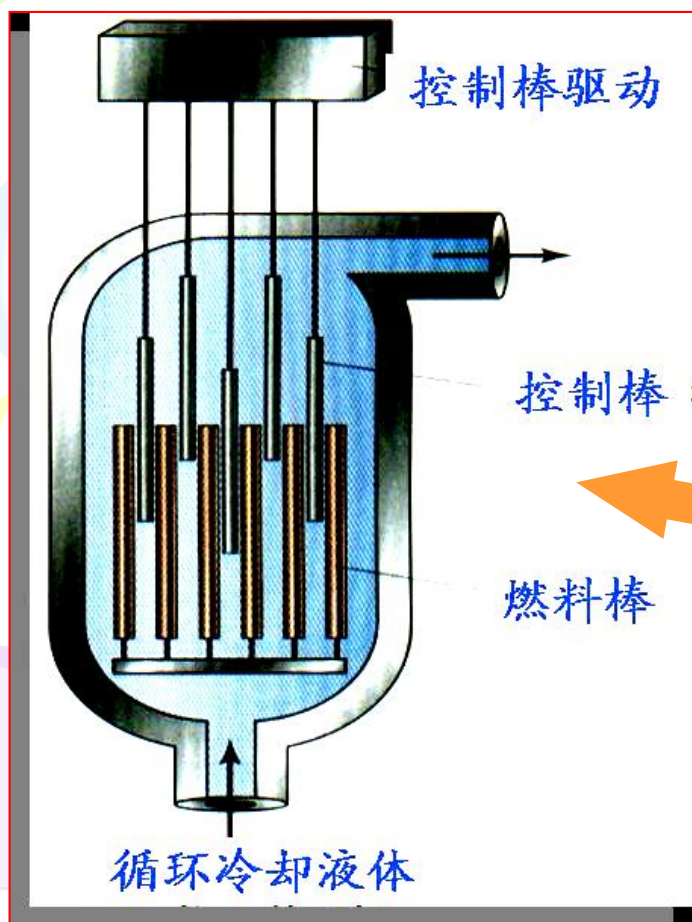
2.产生放射性同位素：反应堆中核分裂产生的碎片本身就是放射性同位素。

3.产生大量中子：比用其它方法获得的中子多得多，这些中子可用于各种研究工作，如用中子源探矿，用中子源制备各种同位素，用中子源产生中子核反应，研究核结构等。

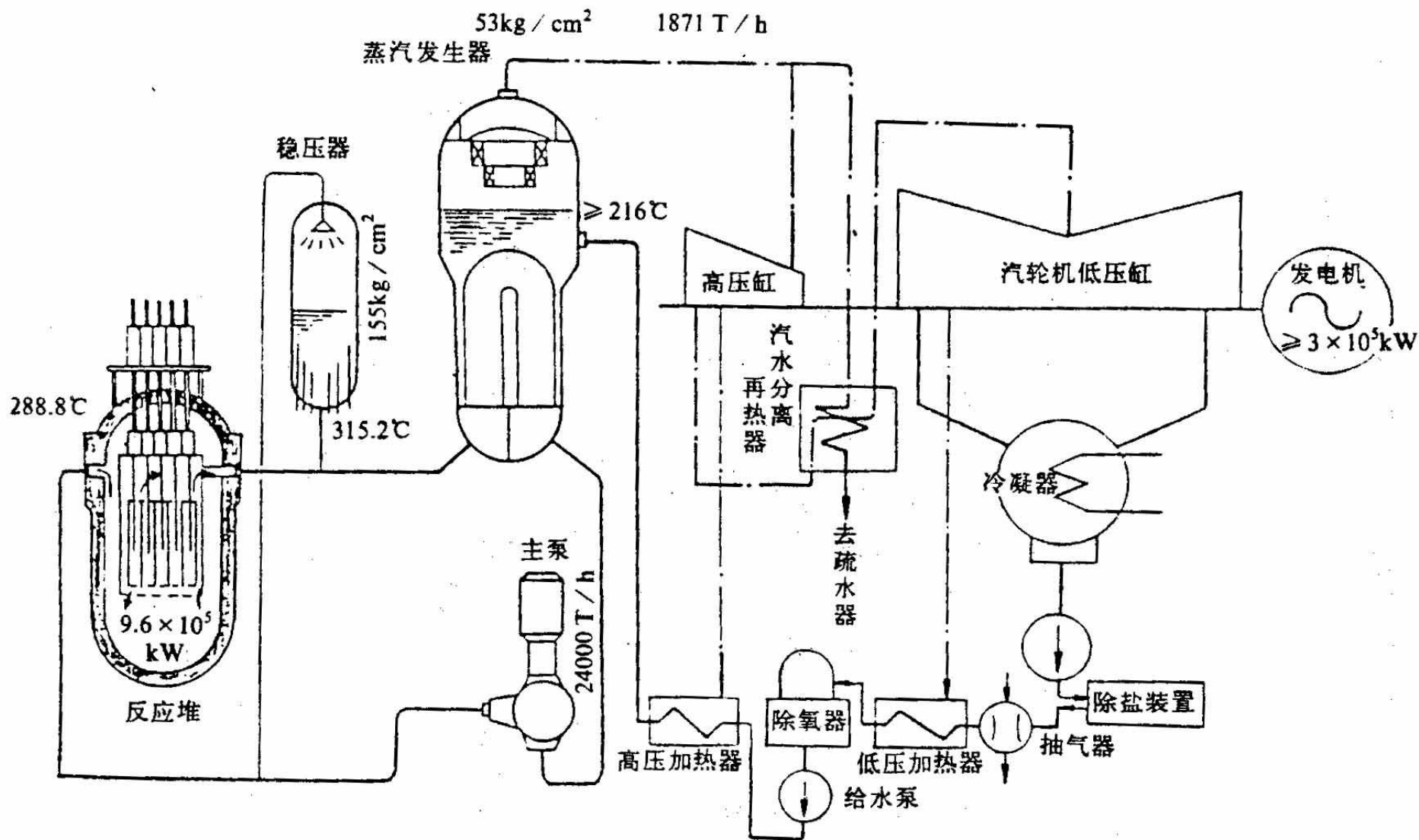
4.产生核燃料

## 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.

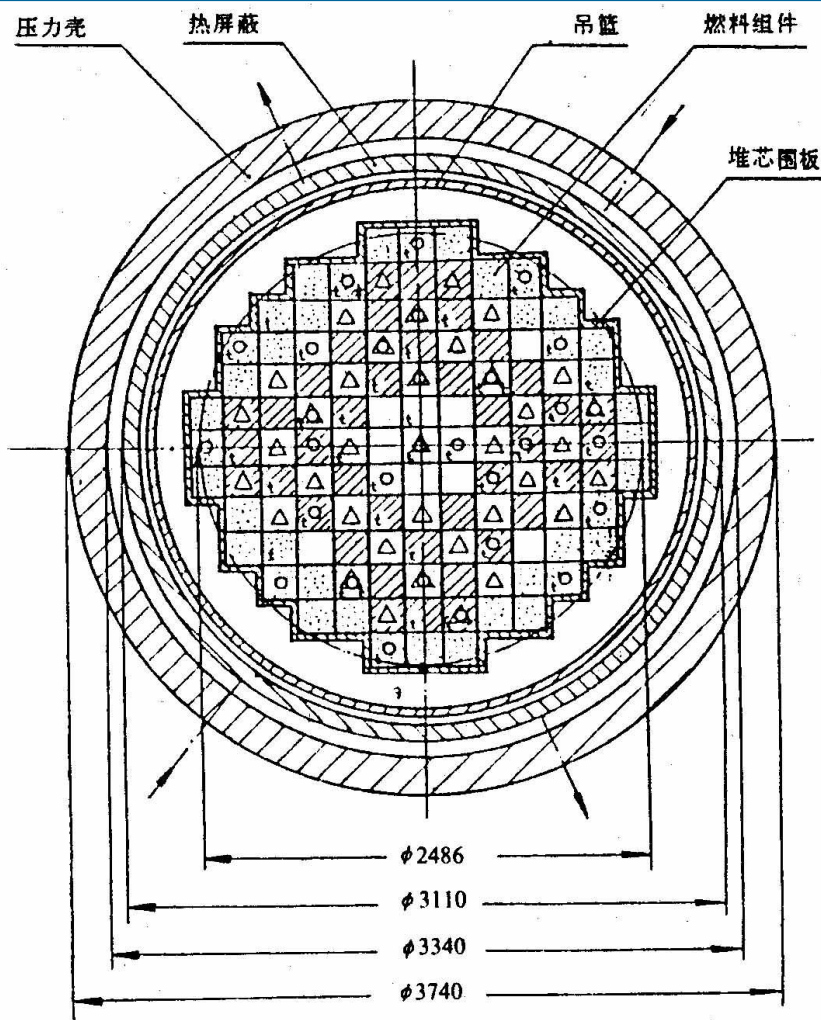
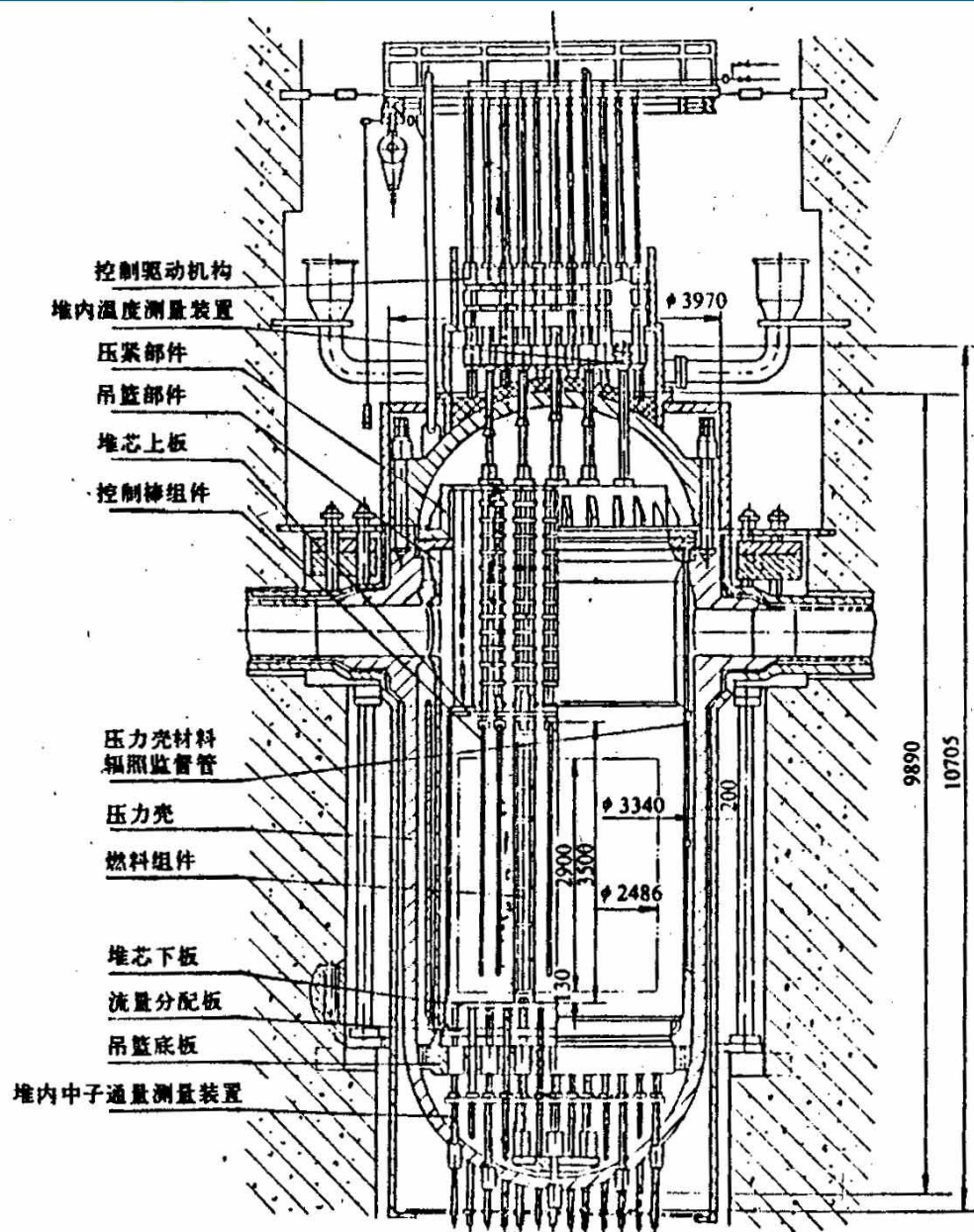


# 原子核物理概论 § 11 裂变与聚变





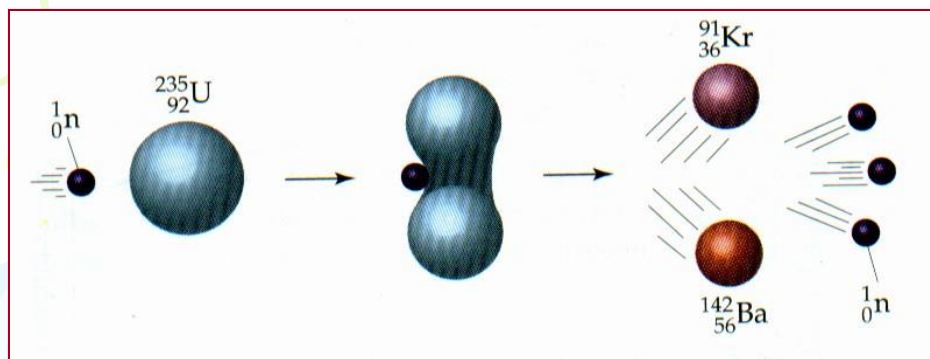
# 原子核物理概论 § 11 裂变与聚变



- I区燃料组件 40
- II区燃料组件 40
- III区燃料组件 41

- 控制棒组件 37
- 中子探测器 30
- t 燃料组件出口水温测点 41

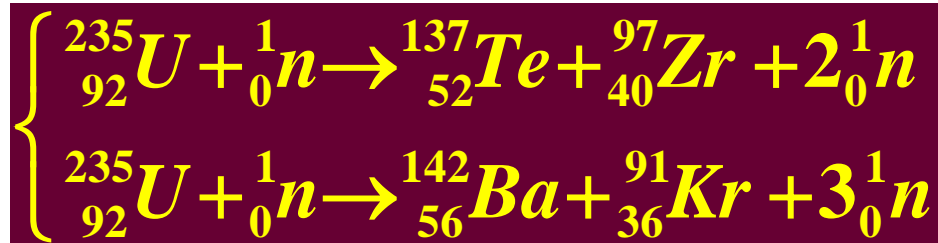
## 原子弹



35种元素的  
200多种核素

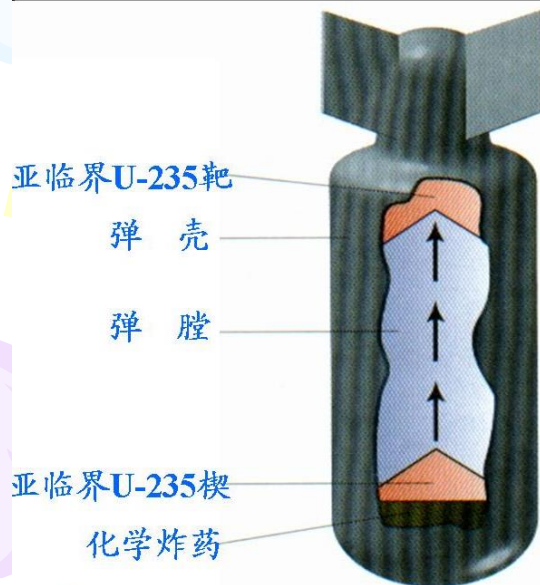
发生链式反应

爆炸

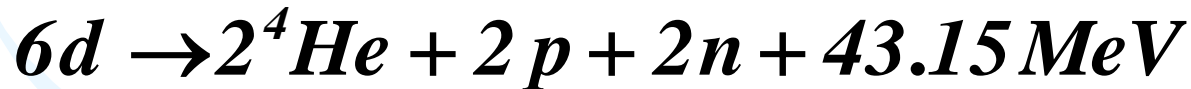
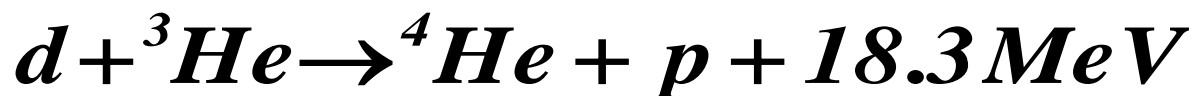
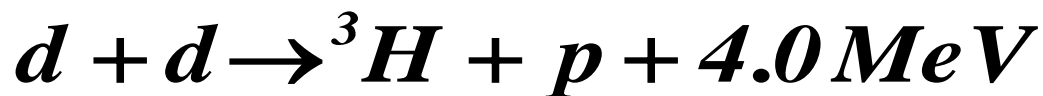


铀-235 的临界质量约为1kg.

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。



## 5. 轻核聚变



轻核聚变中，每个核子贡献的能量是3.6MeV，大约是 ${}^{235}\text{U}$ 裂变时每个核子贡献能量的4倍。

库仑势垒： $144\text{KeV} \rightarrow 2 \times 72\text{keV} \rightarrow 5.6 \times 10^8\text{K}$

聚变温度： $\sim 10^8\text{K}$ ，等离子体状态

实现聚变反应须满足三个条件：

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

Lawson判据 (dt) :

$$n\tau = 10^{14}\text{s/cm}^3$$

$$T = 10\text{keV}$$

如何获得并维持具有一定密度的高温 $^2\text{H}$ 等离子体是利用聚变能的根本问题。我们需要有个“容器”，它不仅能忍耐 $10^8\text{K}$ 的高温，而且不能导热，不能因等离子体与容器碰撞而降温，目前世界上还没有这样的容器。

## 等离子体约束方法

1. 引力约束（引力）
2. 惯性约束（聚变材料自身惯性，激光）
3. 磁约束（磁场）

康德的“星云”假说认为天体是由炽热风云冷却时形成的。近十年来的研究表明，天体是由一些星际尘埃在引力作用下聚集起来，在引力压缩下不断热起来的。

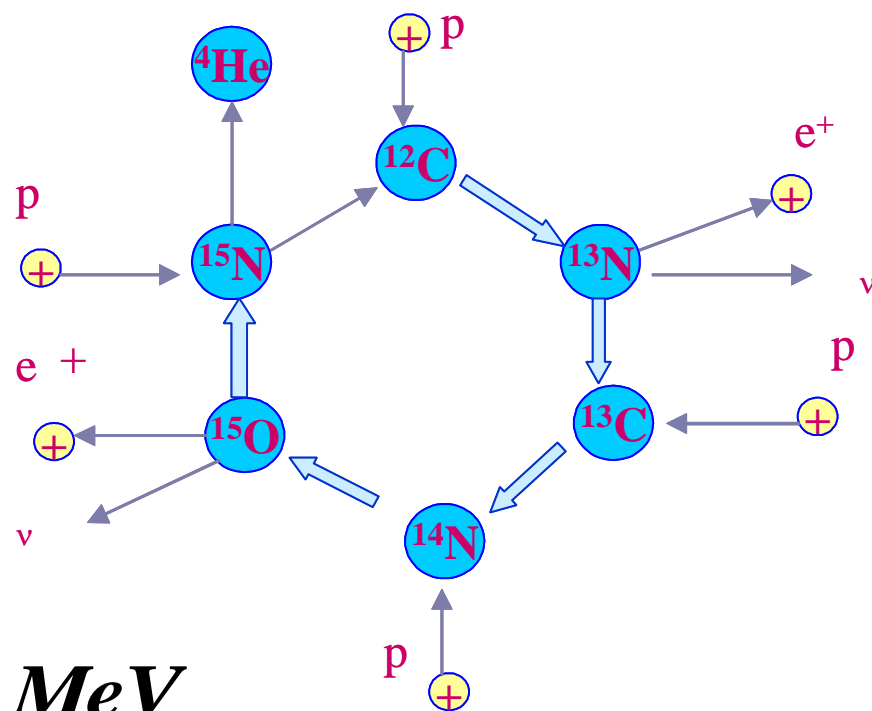
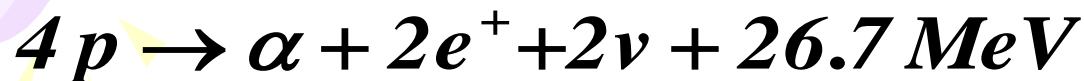
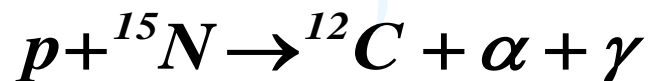
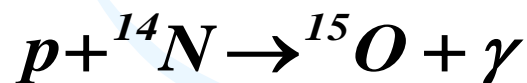
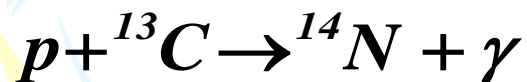
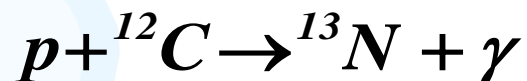


## 6. 太阳能——引力约束聚变

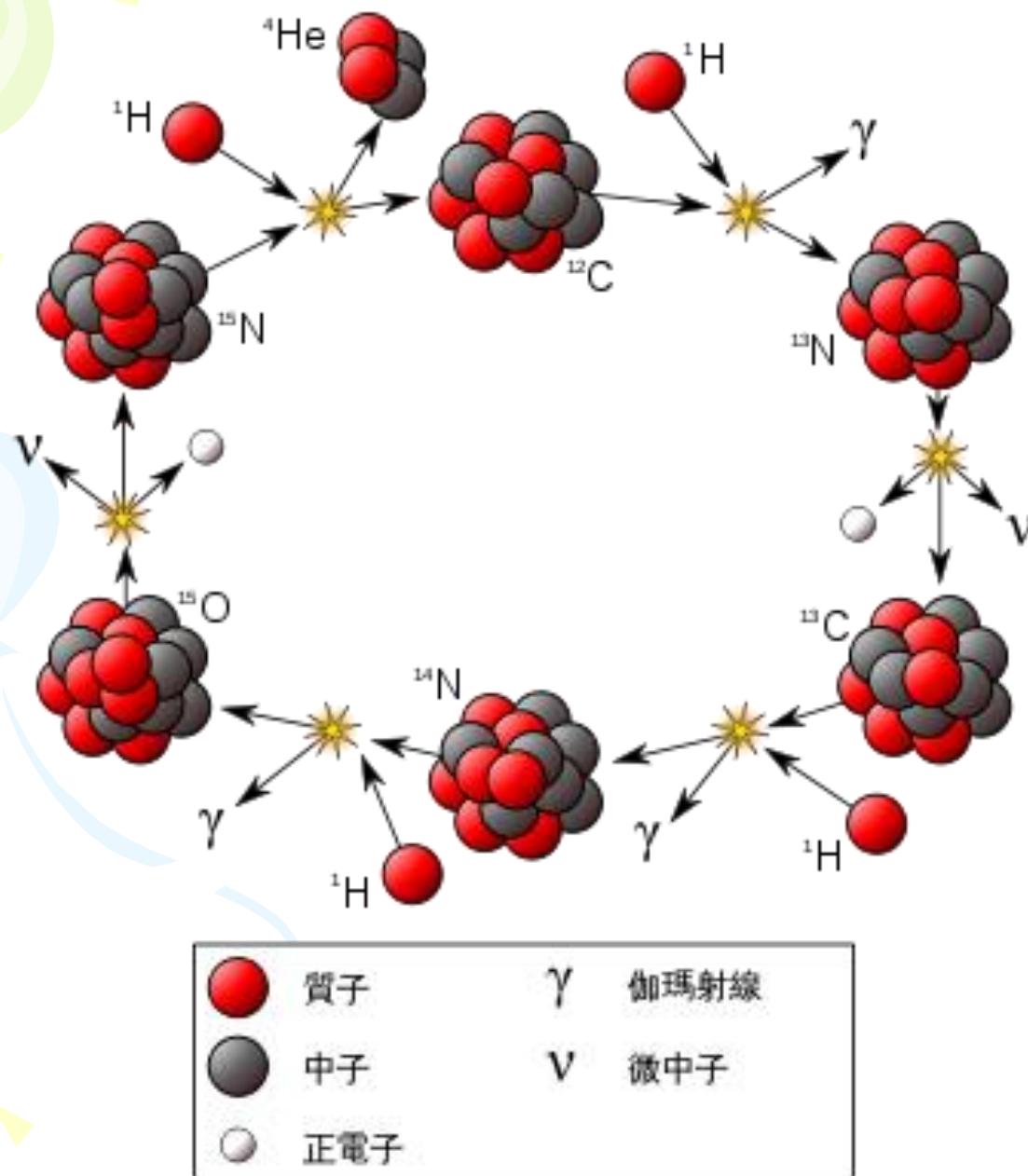
宇宙中主要的能源由核聚变提供,太阳发生的是轻核聚变,太阳内部主要有两个反应:

### 1. 碳循环 (贝蒂循环):

H.A.Bethe 1938年提出, 碳核起催化剂作用, 不增减。



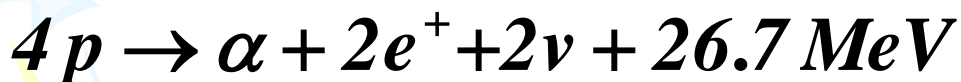
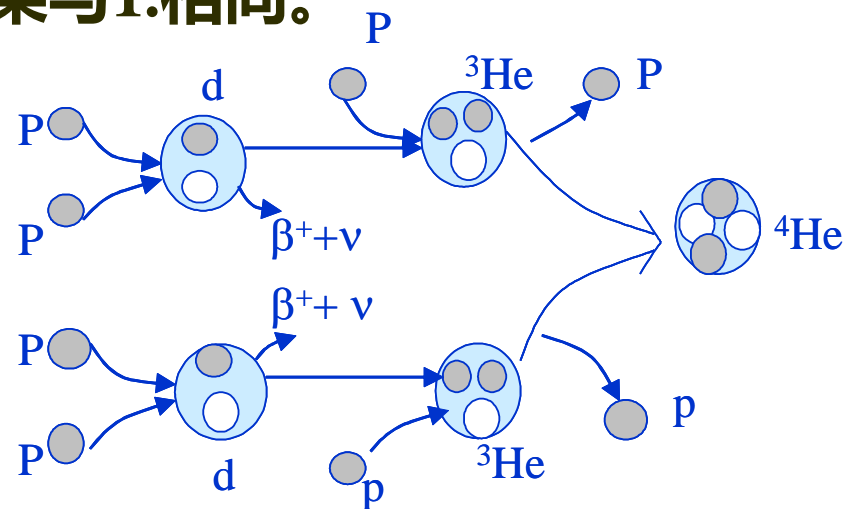
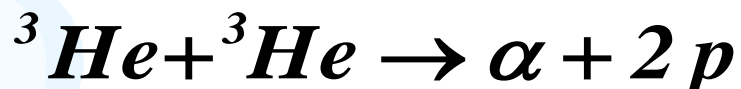
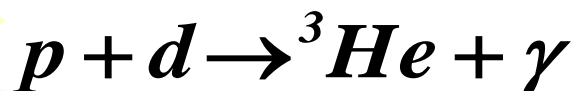
# 原子核物理概论 § 11 裂变与聚变



碳氮氧循环  
是比太阳重  
的恒星主要  
产能方式

## 2. 质子-质子循环(克里齐菲尔德循环):

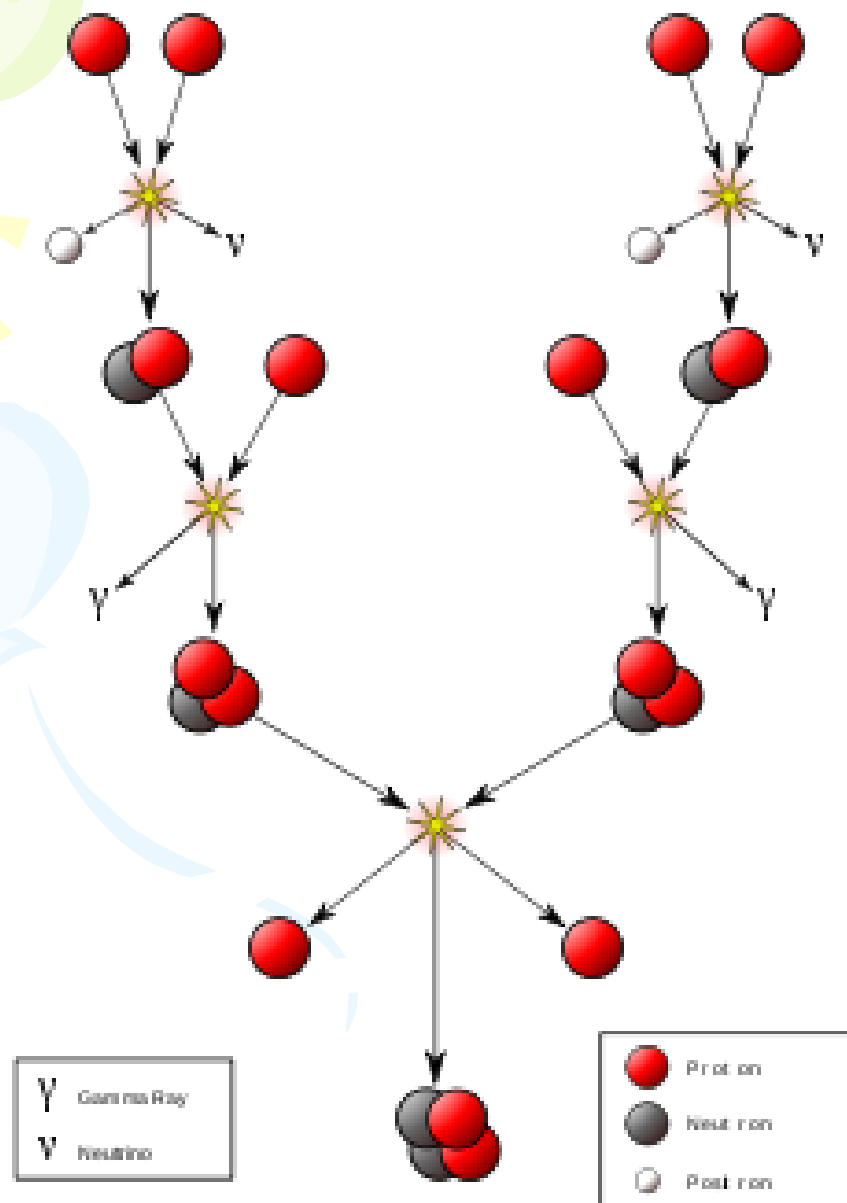
C.L.Critchfield提出, 总结果与1.相同。



4个质子的聚变过程中每个质子贡献6.7MeV, 比<sup>235</sup>U裂变时每个质子的贡献大八倍, 比化学能大一亿倍。

当温度低于 $1.8 \times 10^7 \text{ K}$ 时以p-p循环为主 (太阳中心温度为 $1.5 \times 10^7 \text{ K}$ ), 在产生能量的机制中, p-p循环占96%。在许多比较年轻的热星体中, 情况相反, 碳循环更重要。





质子-质子链反应  
是太阳和比太阳  
轻的恒星产生能  
量的主要方式

# 原子核物理概论 § 11 裂变与聚变

- 每天燃烧 $5 \times 10^{13}$ 吨氢，相当于 $3.5 \times 10^{11}$ 吨的质量转化为能量；
- 所释放的能量相当于每秒爆炸900亿颗百万吨级的氢弹；
- 太阳的质量： $2 \times 10^{27}$ 吨；
- 太阳核巨变反应：引力约束等离子体；
- 碳循环周期： $6 \times 10^6$ 年；
- 质子-质子循环周期： $3 \times 10^9$ 年；
- 太阳的外层温度：6000K；
- 太阳的中心温度：15,000,000K；
- 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.

## 7. 氢弹——惯性约束聚变

巴索夫（前苏诺贝尔奖得主）于20世纪60年代提出惯性约束聚变。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。

**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  ${}^6\text{Li}$  反应产生氦，发生d+T聚变反应。**

**1. d+T反应截面比d+d反应大两个数量级**



2.  $T$ 的制备  $n + {}^6\text{Li} \rightarrow \alpha + T + 4.9\text{MeV}$

3. 氢弹方案：高效炸药+裂变原料+氘化锂

4. 氢弹是不可控的热核反应

5. 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%

6. 中子弹：聚变的贡献远远大于裂变，使爆震、冲击波与热辐射部分的能量增加5-10倍。纯聚变不产生剩余辐射。

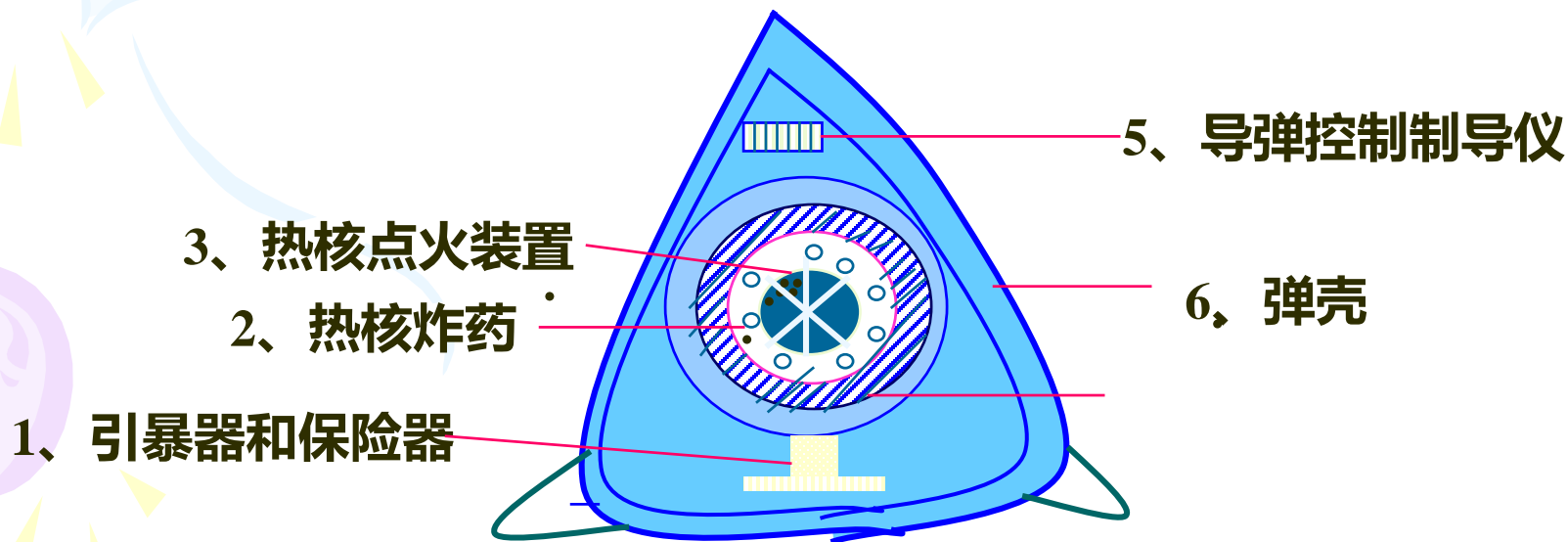
**7.激光惯性约束聚变：**在直径为0.4mm的小球内充以30-100大气压的氘氚混合气体，用强激光 ( $10^{12}$ - $10^{14}$ W)均匀照射，使氘氚混合气体的密度达到液体密度的一千到一万倍，温度达到 $10^8$ K而引发聚变。

**8.其它惯性约束方案：**电子束、重离子束惯性约束

### 中子弹：

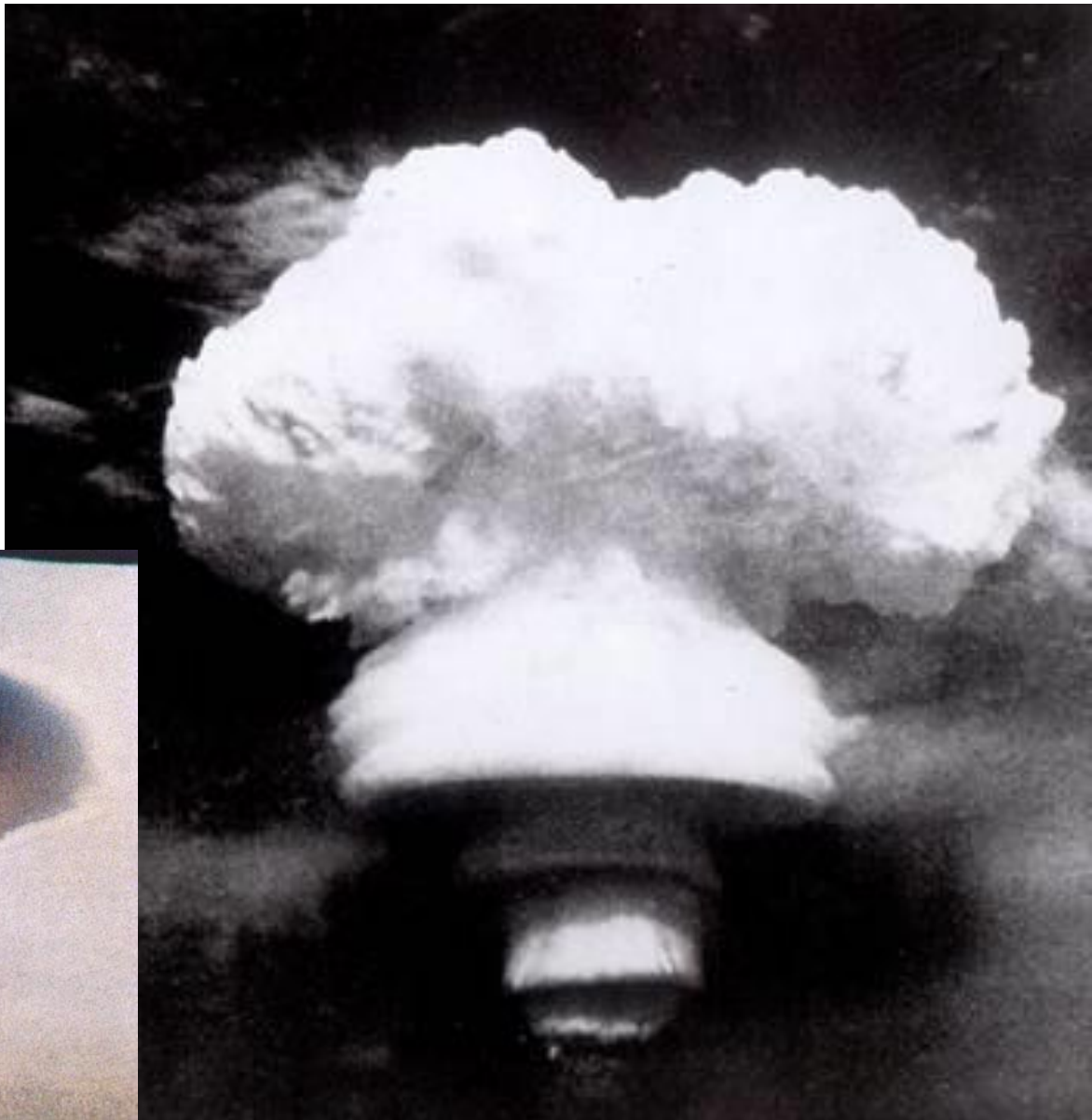
纯聚变弹又称为“干净的核弹”，因为聚变反应的产物是非放射性的，不产生剩余辐射，但早期核辐射部分则大为增加，特别是其中的中子。由于无法实现聚变反应所需需的超高温，非用裂变引爆不可，因此至今尚未有纯聚变弹。目前的聚变弹，实际上是聚变、裂变的混合物体。如果能设法使核武器中的聚变贡献大大超过裂变的贡献，就可以大大增加核武器中产生的中子数，同时爆震与冲击波、热辐射、剩余辐射等部分相对的减少。根据这个原理制造的核武器叫做中子弹，也被称做“增强辐射武器”，是近十年来发展起来的一种新的核武器——第三代核武器。

中子弹所使用的聚变材料是氘和氚。氘和氚在极高温下聚变成氦，并生快中子，并释放出聚变能，其中20%聚变能由氦核带走，成为热核爆炸的能量。第三代核武器它是利用高速中子流作为主要杀伤因素的。通过中子辐射，穿过坦克杀害驾驶员等有生力量，而对坦克的破坏很小。因放射性污染轻，所以在爆炸后几小时，就可以进入被袭击区，利用原有的建筑物和设施等。



# 原子核物理概论 § 11 裂变与聚变

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)





# 原子核物理概论 § 11 裂变与聚变



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**。

# 原子核物理概论 § 11 裂变与聚变

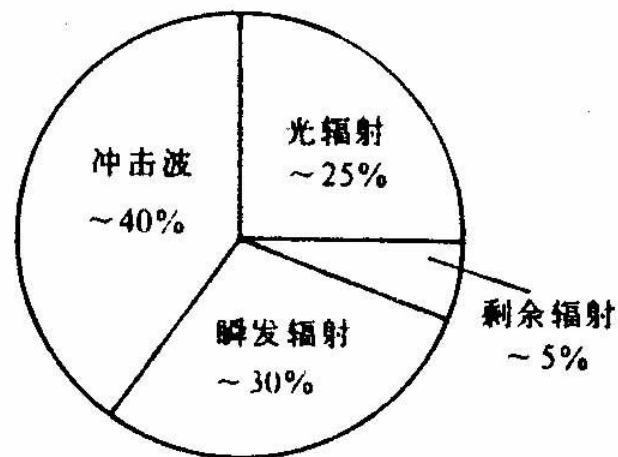
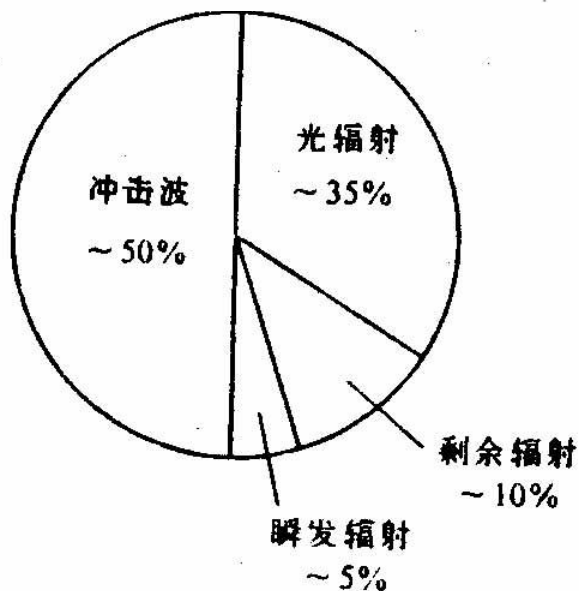


1952年11月1日，世界的第一颗氢弹在太平洋的埃尼托威克环礁上方引爆，震撼了天际。这场美国的试爆行动代號「艾薇麦克」，把附近岛屿的植被全部连根拔起、造成了一个直径超过一英里的坑，並把大块大块受到放射线污染的珊瑚炸到50公里以外的地方。

# 原子核物理概论 § 11 裂变与聚变

裂变和聚变反应的能量分配

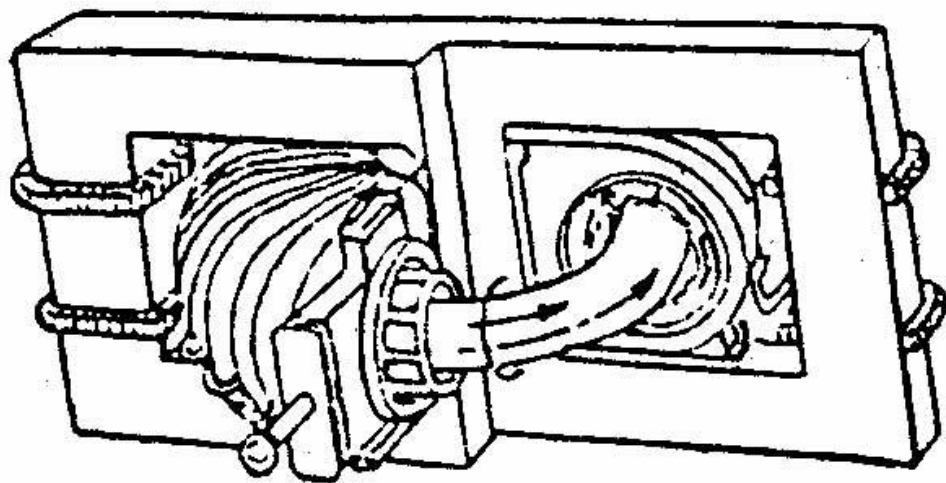
反应类型	裂 变	聚 变
反应式	$^{235}\text{U} + n \rightarrow X + Y + n + 200\text{MeV}$	$d + T \rightarrow {}^4\text{He} + n + 17.6\text{MeV}$
瞬时释放总能量 $E(\text{MeV})$	180	17.6
原子核动能(MeV, 占 总能量%)	168(93.2%)	3.5(20%)
瞬时核辐射能(MeV)	12.3(6.8%)	14.1(80%)
中子平均动能(MeV)	2	14.1
每放 1 个中子释放 的核动能(MeV)	$\sim 100$	3.5



## 8. 可控聚变反应堆——磁约束聚变

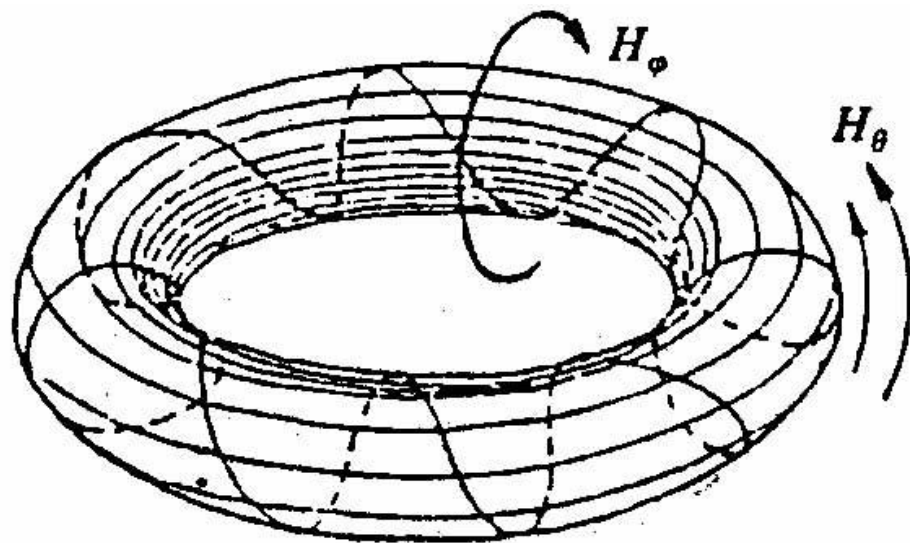
带电等离子体在磁场中绕 $B$ 线作拉莫旋进，横越 $B$ 线的运动受到限制，电磁场同时对等离子体加热，这种约束是靠增大约束时间来达到“点火”条件的，这就是磁约束等离子体的基本原理。但在磁场中等离子体不稳定，难于长时间将粒子约束在等离子体内，这就是磁约束等离子体的基本困难。

1958年以来形成大规模国际交流合作，1992年在最大一代托卡马克（译为“环流器”）装置上成功地进行了DT放电，聚变功率从7.5MW提高到10MW。2006年国际热核聚变实验堆（ITER）项目正式启动…



(a)

托卡马克（环流器）装置



(b)

磁场的螺旋形结构