
第二章 核能



主要内容

- 2.0 引言
- 2.1 核结合能
- 2.2 裂变核能
- 2.3 聚变核能

2.0 引言

- 聚变能的研究是从讨论核聚变反应开始：
 - 比较化石燃料燃烧时的**化学反应** VS. 核裂变电站/将来核聚变电站产生能量的**核反应**
 - 分析核裂变反应的基本反应机制，**?** 为什么这种机制不适合核聚变能 → 必须采用另一种能够提供大量核聚变反应能源的替代机制
 - 包括氘氚（D-T）反应在内的一些聚变反应过程
- 结论：
 - 无论是重原子的裂解（裂变）还是轻元素的结合（聚变），都会有效地产生核能。
 - 两种对立的能量机制是核力——将不同元素的原子核结合在一起的力——的性质的直接结果。核力的行为可通过“结合能”对原子序数的曲线方便地展现出来。
 - 一个简单的物理图像解释了结合能曲线的形状 → 轻元素或重元素是产生核能的理想来源，而位于中间的元素不行。

2.0 引言

- 不同种类燃料的能量当量的比较 → 为什么人类对产生核能的核反应有浓厚的兴趣：

化石燃料 裂变 聚变

10^6t 原油 = 0.8t 铀 = 0.14t 氘

- 核反应与化学反应 → 相同能量当量，核燃料质量比化石燃料少 10^6 倍 → 燃料节省且利于环保
- 化石燃料的燃烧过程属于化学反应。化石燃料含有复杂的碳氢化合物，在氧气中燃烧时释放出能量并产生新的分子和化合物，但每种元素（如氢、碳和氧）的原子数在反应前后并未发生改变，改变的是由氢、碳、氧的化合物构成的反应产物，它们不同于原初燃料的化学组成。
- 新分子的电子键结构不同，电子键的作用是使电子在适当位置上绕每个原子运动。控制电子行为主要是电磁力，它不改变原子核，但可重新排布电子结构。
- “燃烧反应”：燃料的一部分化学势能转化为反应产物的动能，另一部分转化为辐射能并以可见光的形式发出。因此，反应产物的化学势能比燃料的要低。
- 燃烧产生动能 → 粒子随机碰撞 → 热能 → 蒸汽驱动汽轮机 or 增压来推动汽车引擎活塞

2.0 引言

- 确定每次化学反应释放出的能量：
 - 化学反应的一种极端形式是电离，即原子或分子获得足够大的能量使其中的一个电子可以脱离原子核的束缚，由此估算这个能量的量级。
 - 化石燃料燃烧所释放出的能量一般要比电离能低，很少发生燃料被电离。例如，氢的电离势约为 13.6 eV （许多其他物质亦类似）。因为 $1\text{ eV} \approx 11600\text{ K}$ ，由此可知，在化石燃料形成的典型温度（约几千K）下，每次化学反应单位原子所释放的不到 1 eV 能量
 - 例子：汽油燃烧，汽油由多种碳氢化合物组成，假设其最主要的成分是 C_8H_{18} ，完全燃烧化学反应式为：



- 共有102个原子参与反应，平均每个原子释放 0.9 eV 的能量。宏观上看，每次反应放出的 94 eV 能量大约相当于 $40\text{ MJ/kg} \approx 100\text{ MJ/gal}$ 的汽油，1L 汽油就可以使汽车开出10 km。
- 这是比较化学反应与核反应的重要参考数据。

2.0 引言

- 核反应，包括裂变和聚变：参与反应的原子核的基本结构发生改变：
 - 参与反应的元素的原子变成了另外元素的原子（裂变反应，铀变成了氙和锶）。
 - 原子核内的基本粒子（通常称核子）守恒。假设只涉及质子和中子。在一些核反应中，质子数和中子数分别守恒。但在很多其他核反应中，一些中子会通过放出 β 粒子（即电子）而衰变成质子。所以，核反应守恒是指原子核内核子总数的守恒，而不是个别种类的核数守恒。
 - 能量的产生：与化学反应相比，核反应每次释放的能量是巨大的。原因是反应的是核力而不是电磁力。核力是一种短程力，其力程仅与原子核的直径相当，但强度要比同样距离下的电磁力强得多。

2.0 引言

- 核反应中能量的释放相当于核“势能”的减少或等效于原子核反应前后结合能的增加。反应末态原子核总质量的些微减少，但因为结合能的增加而变得更稳定。
- 根据爱因斯坦著名的质能关系 $E = mc^2$ ，这个质量差将转变成能量。释放出的能量表现为末态粒子的动能或 γ 射线。

- 裂变和聚变的核反应都可以写成：



- 释放的能量 E 为：

$$E = [(m_{A_1} + m_{A_2}) - (m_{A_3} + m_{A_4} + \cdots + m_{A_k})]c^2$$

- 通常，核反应的能量 E 为 $10 \sim 100 \text{ MeV}$ 。核反应与化学反应所释放的能量相差百万倍，解释了为什么两种能源的宏观能量当量会相差相应的量级。

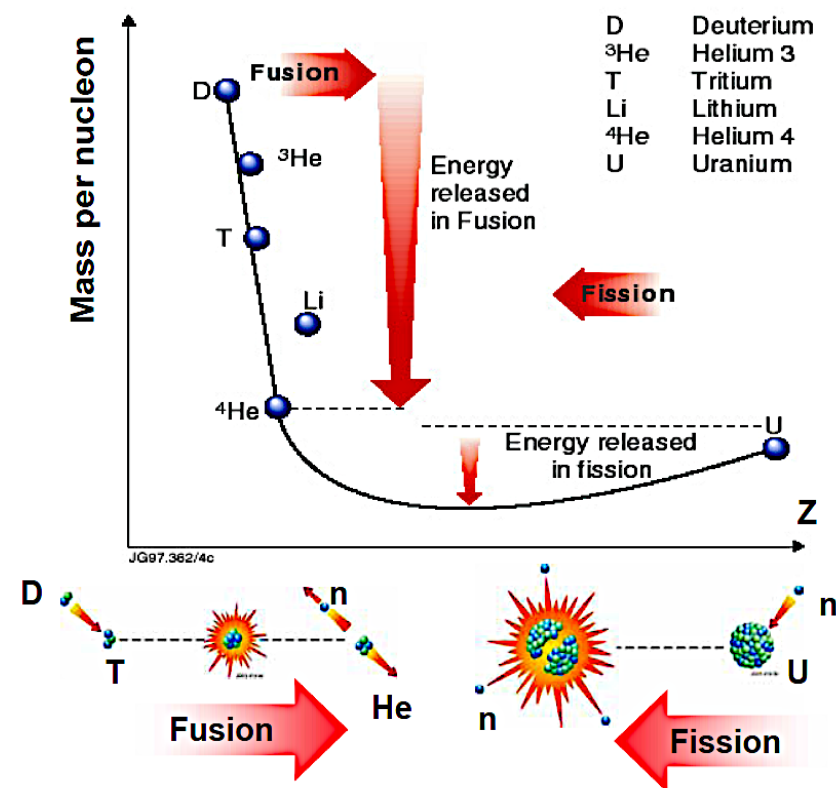
2.0 引言

著名的质能转化公式：



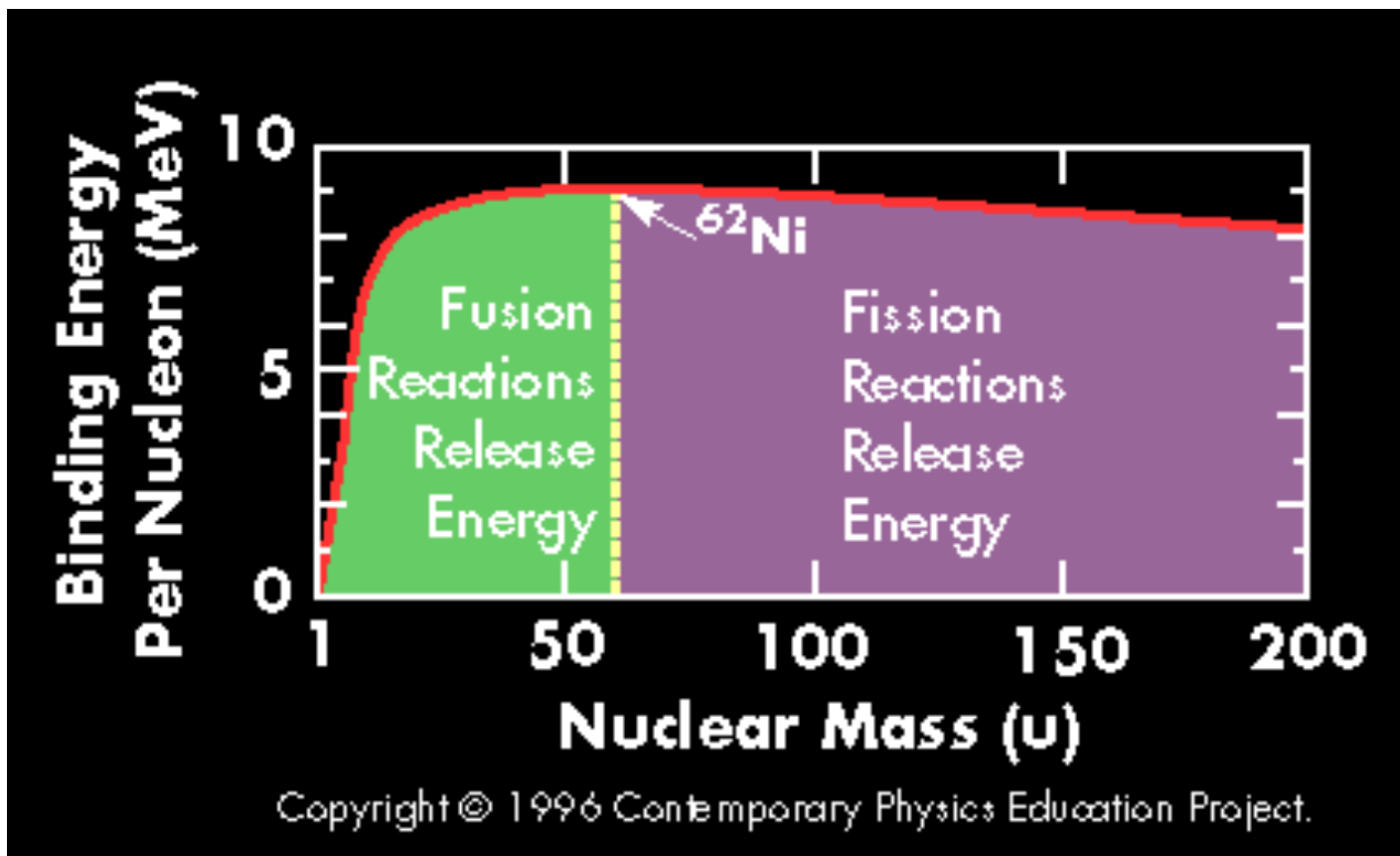
$$E = mc^2$$

爱因斯坦



不同核素的平均核子质量不尽相同，这就意味把**两个轻核合成一个重核**，或是一个**较重的核分裂成几个轻核**，质量都有剩余，这些多出来的质量就转化成了能量释放出来。

2.0 引言



从束缚能的角度看，核裂变和核聚变都可以释放能量

主要内容

- 2.0 引言
- 2.1 核结合能
- 2.2 裂变核能
- 2.3 聚变核能

2.1 核结合能

- 最易触发的核反应不是发生在重元素上（裂变），就是发生在轻元素上（聚变），而中等元素则不行。
- 结合能对原子质量的曲线 → 轻元素和重元素原子核的结合力都比中等元素的要弱，所以位于原子质量两端的元素更容易发生核反应；
- 结合能曲线的形状是由强的短程核力与弱的长程库仑力在几何上的竞争造成的。

2.1 核结合能

■ 1. 结合能曲线

- 某一原子核由 N 个中子和 Z 个质子组成的基本化学元素： $N + Z$ 非常接近但却不完全等于实际质量数 A ，即 $N + Z \approx A$ 。核的质量 $m_A = Au$ 。核的实际质量与构成核的每类粒子质量的总和之间存在：

$$Nm_n + Zm_p > m_A$$

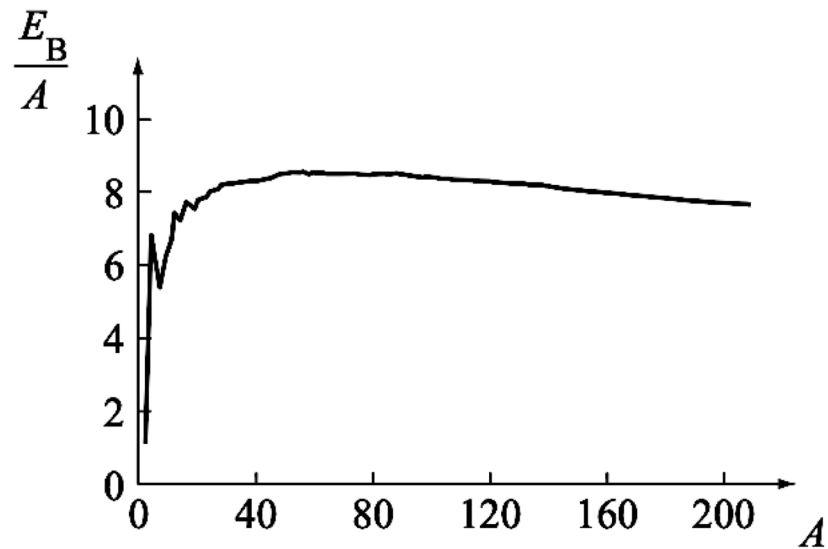
- 这个质量差被认为已转化为使原子核结合在一起的结合能，故结合能定义为：

$$E_B \equiv (Nm_n + Zm_p - m_A)c^2$$

- 换言之，给原子核加上等于 E_B 的能量可以把核分解成各类粒子的组成。单位核子的结合能定义为 E_B/A ，为原子核每个核子上的平均结合能的量度。
- 例子：氟每个核子的结合能：氟的 $N = 10$ ， $Z = 9$ ， $A = 18.99840$ 。 $m_n = 1.00866u$ ， $m_p = 1.00728u$ ， $m_A = 18.99840u$ 。质量差 $Nm_n + Zm_p - m_A = 0.154u$ ，则 $E_B = 143\text{MeV}$ ， $E_B/A = 7.5\text{MeV/核子}$ 。这里的原子质量单位 $1u = 1.660566 \times 10^{-27}\text{kg}$ 。
- 原子核内使粒子结合在一起的能量相当大。

2.1 核结合能

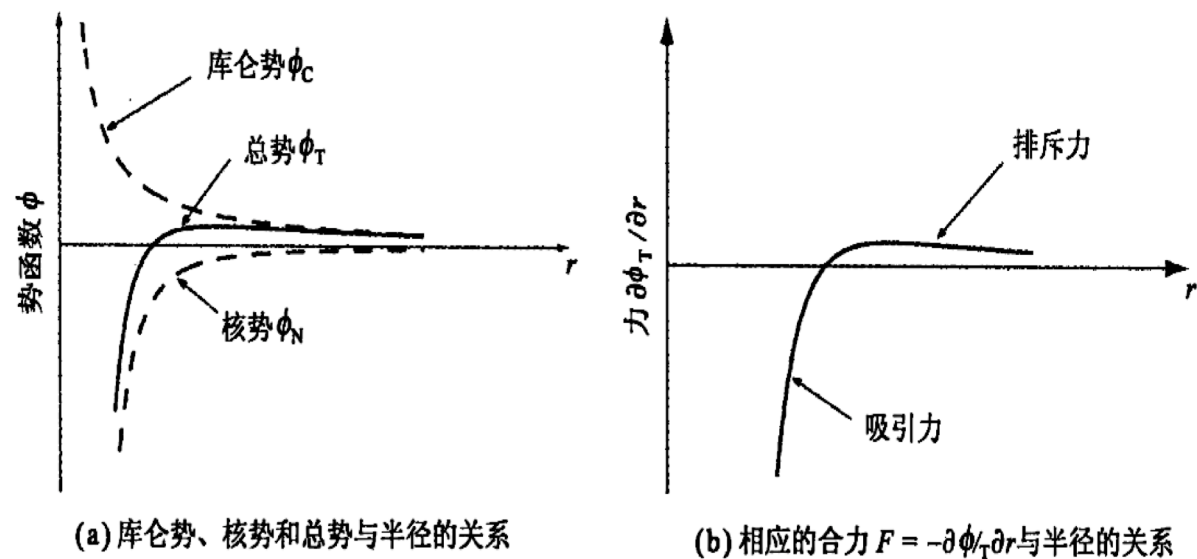
- 右图为所有元素的单位核子结合能关于原子质量数的曲线：轻元素和重元素 E_B/A 的都较小，而处在中间位置的铁元素（ $A \approx 56$ ）的 E_B/A 达到最大值。
- 相对于中间位置的元素，轻元素和重元素将核子结合在一起的核力均较弱。因此，轻元素和重元素更容易触发核反应。
 - 轻元素聚合成曲线上结合能较强的较重元素，意味着这种反应会有能量释放出来。
 - 重元素通过裂变裂解成曲线上结合能较强的较轻元素也会有能量释放出来。
- 结合能曲线的形状解释了为什么轻元素和重元素是产能核反应的主力。**？为什么 E_B/A 关于 A 的曲线形状会是这个样子。**



每种元素的单位核子结合能与质量数的关系曲线

2.1 核结合能

- **2. 结合能曲线的形状**
- 结合能曲线的形状是强的短程核力与弱的长程库仑力之间竞争的结果。
- 右图给出了一个带电粒子的核势与库仑势以及相应的受力情况。
- 一个简单的模型可以定性估计结合能曲线的形状：
 - 模型忽略所有的核效应和量子效应
 - 假设原子核由小的半径为 r_0 的硬球形质子和中子组成，粒子的行为符合经典牛顿力学

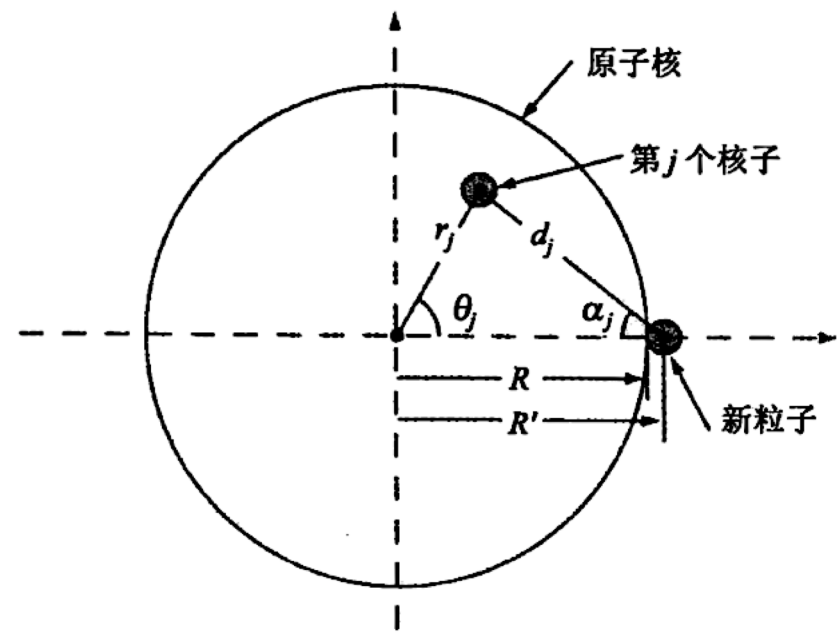


带电粒子的核势与库仑势及相应的受力示意图

2.1 核结合能

■ 模型的基本思想：

- 假设存在一个球形原子核，由 $N + Z \approx A$ 个核子组成。
- 计算放置在这个球体表面的新带电粒子受到的净的吸引力（核力减去库仑力）。力的大小是对新粒子受到核的束缚程度的量度。几何关系如图所示。
- 目的是要确定力对核子数 A 的依赖关系。因此，力与原子核 A 的函数关系定性上应当与结合能曲线的形态相似。



简单结合能模型的几何关系
(注意： $R' = R + r_0$)

2.1 核结合能

- 过程如下：先考虑新粒子受到原子核内第 j 个粒子的库仑排斥力（与 $1/r^2$ 成正比）。力沿 R 方向上的分量为

$$\mathbf{F}_j^{(C)} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{\cos \alpha_j}{d_j^2} \mathbf{e}_R$$

- 沿 R 方向的总的库仑力可通过对 j 求和得到（求和后，力的切向分量由于对称性抵消了）

$$\mathbf{F}_R^{(C)} = \frac{1}{2} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \sum_j \frac{\cos \alpha_j}{d_j^2} \mathbf{e}_R$$

- 系数 $1/2$ 反映了只有一半的核子是带电的。

2.1 核结合能

- 对所有粒子求和转化为积分，每个粒子所占体积必须近似等于微分体积元：

$$d\mathbf{r} \equiv r^2 \sin\theta dr d\theta d\phi \approx (4/3)\pi r_0^3$$

- 力的表达式变为：

$$\mathbf{F}_R^{(C)} \approx \left(\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0} \frac{3}{4\pi r_0^3} \int \frac{\cos\alpha}{d^2} d\mathbf{r} \right) \mathbf{e}_R$$

- 其中省略了所有粒子变量的下标 j ，因为现在这些变量是连续的，可以解析地求出这个积分。

2.1 核结合能

- 由于原子核的总体积近似等于每个核子体积的 A 倍，这样力的最终形式可以写成关于 A 而不是 R 的表达式：

$$\frac{4\pi}{3} A r_0^3 \approx \frac{4\pi}{3} R^3$$

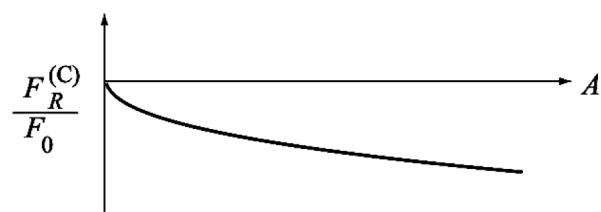
- 那么，库仑力沿 R 方向的分量的表达式为：

$$\mathbf{F}_R^{(C)} \equiv F_R^{(C)} \mathbf{e}_R = \frac{F_0}{2} \frac{A}{(A^{1/3} + 1)^2} \mathbf{e}_R$$

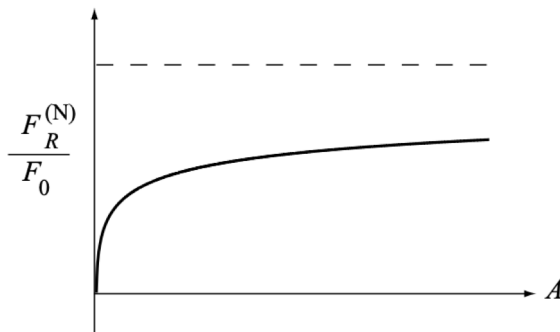
- 其中 $F_0 = e^2 / 4\pi\epsilon_0 r_0^2$ 。

2.1 核结合能

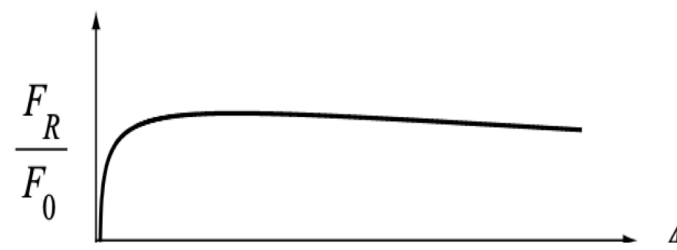
- 由于力的“吸引”方向是沿着 $-R$ 方向，因此“吸引性”库仑力是 $-F_R^{(C)}$ ，图 (a) 给出了库仑力关于 A 的函数关系。
- 库仑力的大小随 A 的增大而单调增加。电荷越多，产生的力就越大
- 对于较大的 A ，力与 $A^{1/3}$ 成正比。因为原子核的总电荷随 R^3 增长，而力的几何行为随 R^{-2} 递减。因此，考虑所有这些因素后的净效果是 $R \sim A^{1/3}$ 。



(a) 库仑力 $-F_R^{(C)}$



(b) 核力 $-F_R^{(N)}$



(c) 总的吸引力 $F_R = -\left(F_R^{(C)} + F_R^{(N)}\right)$

归一化吸引力与原子质量数 A 的关系

2.1 核结合能

- 核力：短程强作用力，与 $-K/r^4$ 成正比的中心力。 K 的值是通过假定核力与库仑力在临界位置 $r = r_c$ 相等来确定的，为 $K = e^2 r_c^2 / 4\pi\epsilon_0$ 。 r_c 的典型值为几个核子半径，即 $r_c = k r_0$ 。其中 k 是量级为1的已知无量纲数。在 $r < r_c$ 时，核力超过库仑力占主导；而当 $r > r_c$ 时，情况则相反。
- 核力的 R 分量可以写成：

$$\mathbf{F}_R^{(N)} \equiv F_R^{(N)} \mathbf{e}_R \approx - \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{3}{4\pi r_0^3} \int \frac{k^2 r_0^2 \cos\alpha}{d^4} d\mathbf{r} \right) \mathbf{e}_R$$

- 负号意味着核力在 R 的反方向（即吸引力方向）上。
- 解析获得核力关于 A 的函数表达式为：

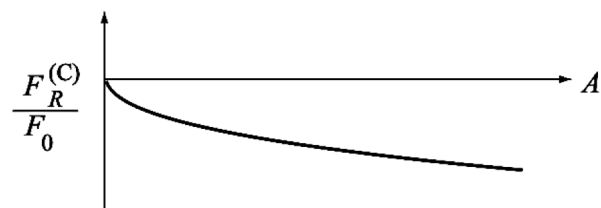
$$F_R^{(N)} = -F_0 \frac{k^2 A}{(A^{1/3} + 1)^2 (2A^{1/3} + 1)}$$

2.1 核结合能

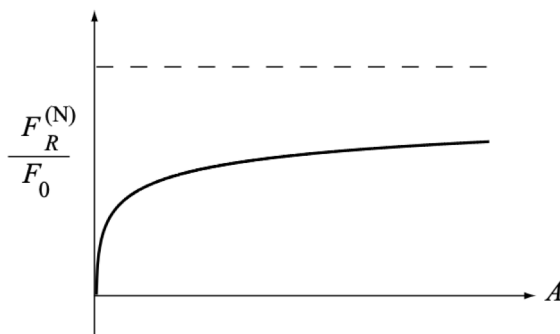
- 图 (b) 给出“吸引力”核力 ($-F_R^{(N)}$)，其中 $k = 3.4$ 。

- A 小时，力随 A 增长， A 大，曲线趋于水平。

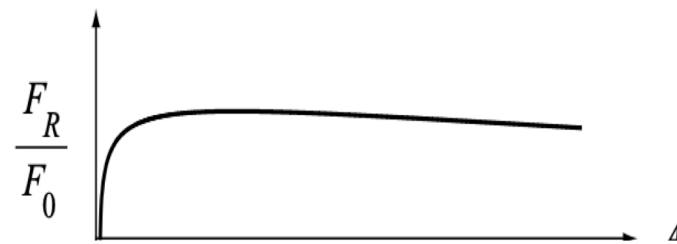
- 物理图像：对于小的原子核，相应的 A 较小，每增加一个新的核子，核力的吸引强度就会增加。当增加到足够多的核子后，原子核变得很大，而核力又是短程力，所以新加入的粒子将不再感受到远处核子的作用。即，不管原子核内可能的核子数目有多少，核力的短程性质使得新粒子只能受到有限数目核子（即那些处于距离 r_c 范围内的核子）的作用。



(a) 库仑力 $-F_R^{(C)}$



(b) 核力 $-F_R^{(N)}$



(c) 总的吸引力 $F_R = -(F_R^{(C)} + F_R^{(N)})$

归一化吸引力与原子质量数 A 的关系

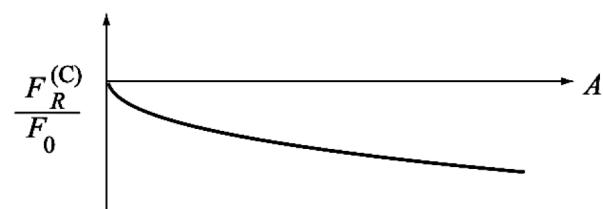
2.1 核结合能

- 图 (c) 给出了总的吸引核力，为：

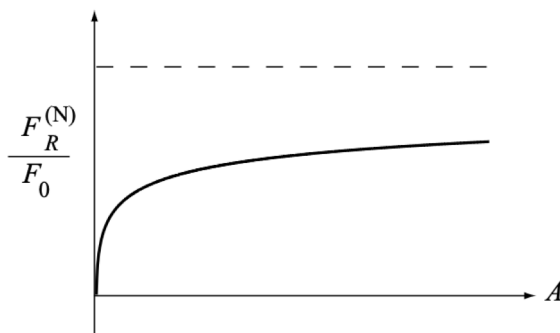
$$F_R = - \left(F_R^{(C)} + F_R^{(N)} \right)$$

- 曲线的性态与结合能曲线定性一致：

- 对于较小的原子核，结合能曲线的形状由吸引力逐渐增强的强的核力决定；但对于较大的原子核，核力逐渐达到饱和，曲线最终由弱的但持续增加的排斥性库仑力主导。
- 所以，很轻和很重的元素的结合能比中等质量元素的要弱。这就解释了为什么原子质量谱两端发生核反应产能是最有效的。



(a) 库仑力 $-F_R^{(C)}$



(b) 核力 $-F_R^{(N)}$



(c) 总的吸引力 $F_R = - \left(F_R^{(C)} + F_R^{(N)} \right)$

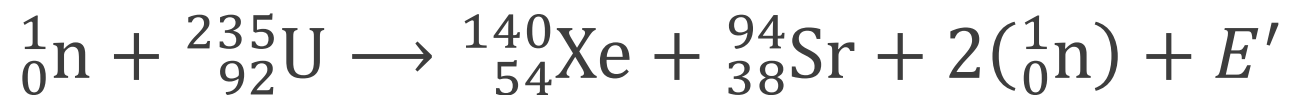
归一化吸引力与原子质量数A的关系

主要内容

- 2.0 引言
- 2.1 核结合能
- 2.2 裂变核能
- 2.3 聚变核能

2.2 裂变核能

- 产生裂变能的方法是用慢中子（即能量近似于室温能量 0.025 eV 的中子）轰击相对稀缺的铀同位素 $^{235}_{92}\text{U}$ 原子。
- 注意到，有多种 $^{235}_{92}\text{U}$ 裂变的方式，但从反应产物和能量释放方面看，典型反应为：



- 氙和锶本身就是不稳定的同位素，大约经过两周的时间，会通过若干次 β 衰变而变成稳定的元素。最终的反应式可写成：



2.2 裂变核能

- 从标准的核反应数据表可以得到，每一次核反应前后元素的总质量分别为236.053u和235.832u。
- 根据爱因斯坦的质能关系，每次核反应的质量差可释放出 $E = 206\text{MeV}$ 的能量，亦或是每个 ${}^{235}_{92}\text{U}$ 核子释放出0.88MeV的能量， $E = 206\text{MeV}$ 的能量等同于 $84 \times 10^6 \text{MJ/kg}$ ，与燃烧汽油相比，能量增益大约要大 10^6 倍。
- 裂变反应能够转变成实用电能的原因主要有两个：
 - 触发裂变反应只需要一个中子，但反应产物中包含两个中子。，将事实上所有可能的反应路径都考虑进来，每次反应大约产生2.4个中子。中子倍增使得链式反应得以维持，好处就是裂变反应堆更新一次，燃料可以自持燃烧好几年。只需保证充足的燃料使中子损失减至最小。

2.2 裂变核能

- 裂变反应能够转变成实用电能的原因主要有两个：
 - 其次，与触发核反应的中子的电中性有关。中子的电中性使之可以穿过包围在原子周围的电子云，从而近距离接触到原子核本身。原子核的电磁库仑力对中子不起作用，无法将其从原子核相互作用区域排开。结果，低能中子相对来说更容易地与 $^{235}_{92}\text{U}$ 产生裂变反应。无论是从能量平衡、经济效益，还是从反应堆运行上看，这都有明显的优点，亦即反应堆可以在燃料保持固态的足够低的温度范围内运行。
- 这就是裂变反应产生的核能够利于发电的两个主要原因。

主要内容

- 2.0 引言
- 2.1 核结合能
- 2.2 裂变核能
- 2.3 聚变核能

2.3 聚变核能

■ 1. 中子触发的轻元素的核反应

- 重原子裂变 → 轻元素是否也存在通过慢中子轰击触发链式反应来实现大部分的裂变和聚变反应途径呢？

- 考察两种假设性的核反应,分别对应中子驱动下的轻元素裂变反应或聚变反应:

- 轻元素的裂变以中子轰击氘核 (${}^2_1\text{H}$) 为例,相关的反应为:



- 实现了所希望的中子增殖。但从下表中的数据计算出,所释放的能量为 $E = -2.23\text{MeV}$ 。负号意味着需要输入能量才能发生。很显然,这个反应不能作为能量的来源。其他轻元素的裂变反应也都一样 → 反应产物的结合能更低了。

2.3 聚变核能

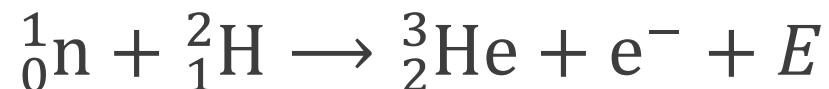
聚变反应中主要轻元素原子核的性质

元 素	符 号	质量数A	电荷数Z
电子	e ⁻ 或 e	0. 000 549	- 1
中子	${}_0^1\text{n}$ 或 n	1. 008 665	0
氢 (质子)	${}_1^1\text{H}$ 或 p	1. 007 276	1
氘	${}_1^2\text{H}$ 或 D	2. 013 553	1
氚	${}_1^3\text{H}$ 或 T	3. 015 501	1
氦-3	${}_2^3\text{He}$	3. 014 933	2
氦-4 (α 粒子)	${}_2^4\text{He}$ 或 α	4. 001 503	2
锂~6	${}_3^6\text{Li}$	6. 013 470	3
锂-7	${}_3^7\text{Li}$	7. 014 354	3

2.3 聚变核能

- 考察两种假设性的核反应,分别对应中子驱动下的轻元素裂变反应或聚变反应:

- 中子轰击轻元素的聚变反应。同样假设中子是与氘核发生碰撞,反应式为:



- 反应释放出的能量为 $E = +6.27\text{MeV}$ 。产能可以但需消耗中子,聚变之后没有剩余的中子。
- 中子没有来源,反应就不能自持。因此难于作为能量来源。其他轻元素的中子驱动聚变反应也是一样的结果。

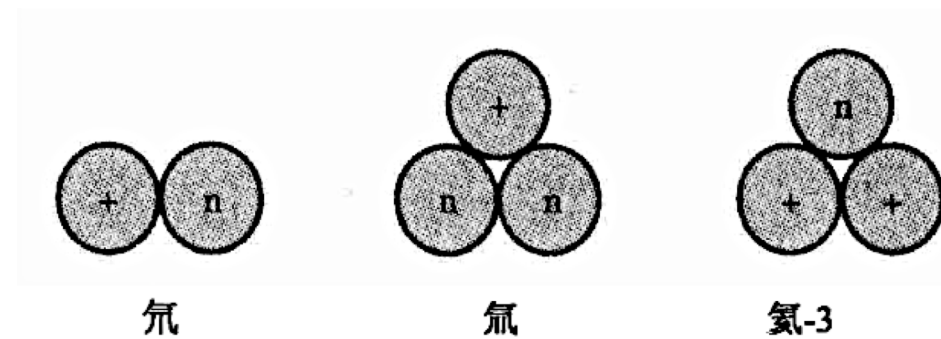
2.3 聚变核能

■ 2. 轻元素聚变反应

- 设想中的中子驱动轻元素的裂变或聚变并不直接具有重核裂变的好处，但带来了两点结论：
 - 第一，从产能角度说，应考虑轻元素的聚变而不是裂变反应；
 - 第二，不能依赖中子来触发聚变反应，因为没有外在可用的中子来源。
- 结论是用另一种轻元素原子来代替中子，即两个轻元素原子之间的碰撞，如用两个氘核相互碰撞来产生核反应：
 - 优点：持续供给氘原子而非中子来克服缺乏链式反应带来的困难，简单可行且成本低。
 - 缺点：两个氘原子的距离要在原子核直径的尺度范围内，足够近，但排斥力很强，粒子的运动轨迹将改变，核反应可能性大幅降低。只有氘核的能量足够高才可克服库仑力，
→ 聚变研究的出发点。

2.3 聚变核能

- 轻元素聚变中的三类反应产生的核能是最多的，涉及的原子包括氕、氘和氚的一种同位素—氦-3。
- 图中给出了这三种核的原子结构图。
- 简化后的标注为：中子 ${}^1_0\text{n}$ 为n；氢原子核（质子） ${}^1_1\text{H}$ 为p；氘原子核（氘核） ${}^2_1\text{H}$ 为D；氚原子核（氚核） ${}^3_1\text{H}$ 为T；氦原子核（ α 粒子） ${}^4_2\text{He}$ 为 α ；氦-3原子核 ${}^3_2\text{He}$ 为 ${}^3\text{He}$ 。



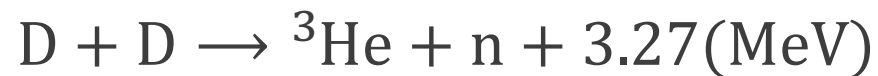
氕、氘及氦-3的原子结构图

2.3 聚变核能

■ A. D_D反应

- D-D反应是通过两个氘核之间的核反应来产生聚变能。反应所需的低成本的燃料可以很容易从海水中提取，燃料供应几乎是用之不竭的，因此这个反应产能是最理想的。

- D-D反应实际上有两个分支，二者发生反应的概率差不多相等， 相关的反应式：



- 两个反应中每个核子的产能分别为0.82MeV和1.01MeV。宏观上相当于每千克氘产能 $78 \times 10^6 \text{ MJ}$ 和 $96 \times 10^6 \text{ MJ}$ 。
- D-D反应很难发生，所以不是目前研究的重点。

2.3 聚变核能

■ B. D-³He反应

- 这个反应写为：



- 反应是将氘核与氦-3原子核聚合在一起，很难实现，但相对D-D反应容易一些。
- 地球上并不存在天然的氦-3，燃料来源困难。加上反应很难实现 → 不是聚变研究重点。
- 值得研究的，反应产物全是带电粒子。没有中子，意味着材料活化和放射性损伤等方面给工程带来的问题要小得多；从带电粒子上获取能量更有效率，因为可以直接将核能转化为电能而无需借助于效率很低的蒸汽循环系统。
- 每次反应释放出的能量非常巨大。每个核子产能3.66MeV，宏观上相当于每千克D-³He混合燃料产能 $351 \times 10^6 \text{ MJ}$ 。
- 注意：反应并非完全与中子无关，因为一些D-D反应和下一代的D-T反应也会发生。

2.3 聚变核能

■ C. D-T反应

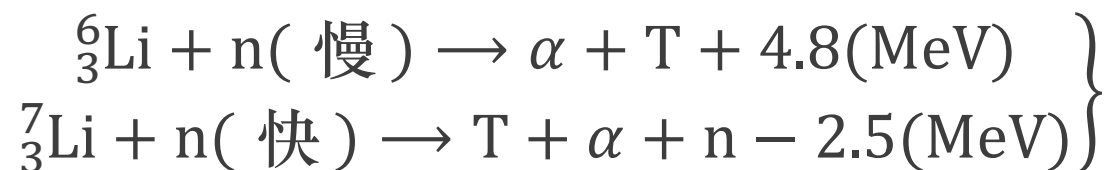
- 氘核与氚核之间的聚变反应，反应式为：



- 所有聚变反应类型中最容易发生的（尽管与 $^{235}_{92}\text{U}$ 的裂变反应相比要困难得多）。但地球上不存在天然的氚，而且氚有放射性，半衰期为12.26年。
- 能产生巨大的核能，产能具有吸引力，宏观上相当于每千克燃料产能 $338 \times 10^6 \text{ MJ}$ ，每个中子产能3.52MeV。
- 问题：D-T反应产生大量中子，同时又需要供给氚来使反应得以持续。
- 但它是最容易发生的聚变反应，因此成为目前国际上聚变研究的重点。

2.3 聚变核能

- 选择了 D-T反应，就要处理氘和中子的问题。
- 多年的裂变研究基本知道了该如何处理高能中子带来的材料活化和放射性损伤等问题的规律。对氘的放射性处理也是如此。解决方法虽然相当复杂，但技术成熟。
- 氘的供给：解决方法是在D-T聚变反应区周围的包层内增殖氘。最适合用来产生氘的化学元素是锂。产氘的主要核反应如下：












- 第一个反应是放能的，第二个耗能的。天然存在的锂有7.4%是 ${}^6_3\text{Li}$ ，92.6%是 ${}^7_3\text{Li}$ 。尽管 ${}^7_3\text{Li}$ 占了绝大部分，但 ${}^6_3\text{Li}$ 的反应更容易发生，在氘的增殖过程中占主导。

2.3 聚变核能

- 考虑 ${}^6_3\text{Li}$ 的反应，如果不存在中子的损失，那么聚变过程中每消耗一个中子就能产生一个新的氦原子，中子来自于聚变反应，故增殖比为1.00。但事实上，中子总不可避免有损失，需要有一些增殖中子的方法，且还需慢化高能中子，因为慢速的低能中子更容易发生反应。
- 因此，通过 ${}^6_3\text{Li}$ 来增殖氦就能够解决氦的持续供给问题，只要锂的供给充足即可。而已知的锂储量足够使用几千年，因此，燃料的获取不是问题。
- 长远来看，还是开发D-D聚变反应堆更为理想。

2.3 聚变核能

Reaction		Ignition Temperature		Output Energy	
Fuel	Product	(millions of °C)	(keV)	(keV)	
$D + T$ 	${}^4\text{He} + n$	45	4		17,600
$D + {}^3\text{He}$ 	${}^4\text{He} + p$	350	30		18,300
$D + D$ 	${}^3\text{He} + n$ 	400	35		~4,000
	$T + p$ 	400	35		~4,000

- 迄今为止，在地球上我们可能实现的聚变反应有以上三种；
- 氘氘反应较易，氘氦3次之，氘氚最难，主要是温度和容器材料问题。

2.3 聚变核能

■ 3. 聚变反应的能量分配

- 聚变反应释放出的能量大部分是以反应产物的动能形式出现的。对于D-T反应来说，确定两种反应产物的能量分配尤为重要，因为它的反应产物中一种是带电的，而另一种不带电。
- 假设每种反应产物的能量和动量均远远大于反应前聚变核的能量和动量，很容易就能确定这个分配。
- 计算过程：两种反应产物分别以下标1和2标示出来。假设聚变前粒子是静止的（相对于反应产物的速度而言），聚变反应前后的能量和动量的守恒关系只与反应产物有关：

$$\frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2 = E$$

$$m_1v_1 + m_2v_2 = 0$$

2.3 聚变核能

- v_1 和 v_2 及其相对应的动能为：

$$\frac{1}{2}m_1v_1^2 = \frac{m_2}{m_1 + m_2}E$$
$$\frac{1}{2}m_2v_2^2 = \frac{m_1}{m_1 + m_2}E$$

- 动能与质量成反比，较轻的粒子携带了大部分能量。
- 对于D-T反应，释放的能量 $E = 17.6\text{MeV}$ 。反应产物为一个 α 粒子和一个中子，质量比 $m_\alpha/m_n = 4$ 。那么 α 粒子的动能为 $E/5 = 3.5\text{MeV}$ ，中子的为 $4E/5 = 14.1\text{MeV}$ 。中子的能量是 α 粒子的4倍。故可把D-T聚变反应重新写成稍微方便的形式：



- 至此，我们讨论了聚变反应的基本性质。

总结

- 化石燃料燃烧过程中发生的化学反应与反应分子的电子结构的重新排布有关，但每种元素的化学性质保持不变，它由电磁力支配，每次反应中每个原子所释放的能量在几分之一eV量级；核反应与原子核内部核子的裂解或聚合有关，核反应使得最初的燃料元素转变为新的化学元素。在这些反应中，核力占主导，所释放能量的典型值为每次反应每个核子产能兆电子伏。所以，核反应每次释放的能量通常是化学反应的百万倍。
- 核反应主要有两种：裂变和聚变。
 - 裂变主要发生在重元素情形下，尤其是 $^{235}_{92}\text{U}$ ，由慢中子触发，每次反应平均产生2.4个新的中子，形成链式反应，反应可以持续自持地进行。
 - 聚变反应由两个带正电的原子核直接相互作用，中子不能有效地触发轻元素的聚变反应，反应需克服库仑排斥力，所以聚变反应的发生要比裂变反应困难得多。不存在链式反应，所以为使反应能够持续进行，就必须不断加入新的燃料。
- 最容易发生的聚变反应是D-T反应，反应释放出17.6 MeV的能量，中子占14.1MeV， α 粒子占3.5MeV。目前，国际上聚变能研究都集中在D-T反应上，因为这一反应很容易触发。



谢谢！