核反应堆物理导论

施士元 編著

53
98

上海科学技术出版社

内 容 提 要

本书簡要、全面地介紹了核反应堆的物理理論，内容包括原子核基本特征、鏈式反应、中子减速、中子扩散、反应堆临界尺寸、反应堆参数計算、反应堆动力学、反射层及双組理論、点陣理論、微扰理論及迁移理論等，有較多的理論推导，但并不太深，讀者可以花較少的时間了解核反应堆物理的基本内容。

本书可供原子能工程技术人員及工程物理专业、核子物理专业人員参考。

核反应堆物理导論

施士元 編著

*

上海科学技术出版社出版

（上海瑞金二路450号）

上海市书刊出版业营业許可証出093号

新华书店上海发行所发行 各地新华书店經售

商务印书館上海厂印刷

* *

开本850×1168 1/32 印張4 字数99,000

1960年6月第1版 1960年6月第1次印刷

印数1—7,500

統一书号：13119·374

定 价：(十二)0.58元

目　录

第一章　原子核的特征及核反应

一、质子和中子 ……(1)
二、电荷数 Z 及质量数 A ……(2)
三、同位素 ……(3)
四、放射性 ……(4)
五、放射性衰变 ……(6)
六、結合能 ……(9)
七、結合分数 ……(12)
八、核半徑 ……(16)
九、核反应 ……(17)
十、核反应机构 ……(20)
十一、核能級 ……(23)
十二、截面 ……(28)
十三、截面随能量的变化 ……(33)

第二章　裂　变

一、裂变 ……(36)
二、裂变中子 ……(36)
三、衰变产物 ……(38)
四、γ 射綫及 β 射綫 ……(39)
五、裂变能量 ……(39)
六、裂变截面 ……(40)

第三章　鏈式反应

一、形成鏈式反应的必要条件 (41)
二、无穷增殖因数 ……(42)
三、热中子利用因数 ……(42)
四、η 值 ……(43)
五、快裂变因数 ϵ ……(43)
六、逃脫共振几率 p ……(44)

第四章　中子的减速过程

一、中子和原子核的碰撞 ……(44)
二、每次碰撞的平均能量損失 (48)
三、减速过程中的碰撞次数 …(49)
四、$\cos\theta$ 的平均值 ……(50)

第五章　中子扩散

一、中子路程 ……(51)
二、中子扩散 ……(53)
三、外推长度 ……(55)
四、扩散方程 ……(56)
五、不稳定且无源的情形 ……(57)
六、k_{eff} 的計算 ……(58)

第六章　裸体反应堆的临界尺寸

一、裸体反应堆 ……(60)
二、圓柱形反应堆 ……(60)
三、貝塞耳方程 ……(62)
四、徑向方程的解 ……(64)

第七章　反应堆参数計算

一、热中子利用因数 f 的計算 (66)
二、石墨中的中子密度 ……(68)
三、$\frac{1}{f}$ 的一般公式 ……(71)
四、共振逃脫几率 $p(E)$ ……(72)
五、快裂变因数 ϵ ……(74)
六、裂变因数 ……(77)
七、K_∞ 的計算 ……(78)
八、扩散长度 ……(78)
九、慢化长度——費米年龄 (79)
十、空气隙对于 L_S 的影响…(82)
十一、迁移面积及临界尺寸 …(82)

第八章　反应堆动力学

一、沒有迟发中子的理論 ……(83)
二、迟发中子的作用 ……(84)
三、只有一組迟发中子的情形 (85)
四、控制棒对于活性区所起的作用 ……(88)
五、裂变产物的毒效 ……(91)
六、氙毒随工作时間的关系 …(92)
七、停堆后氙毒的变化 ……(93)
八、积渣 ……(94)
九、溫度效应 ……(96)

第九章　反射层及两組理論

一、反射系数……(100)
二、单組理論……(101)
三、两組理論……(103)

第十章　反应堆的点陣理論、微扰理論及迁移理論

一、点陣方程……(106)
二、特征方程……(109)
三、微扰理論……(111)
四、微扰論的一般理論……(113)
五、稳定情态的微扰……(115)
六、快中子反应堆的临界尺寸(117)
七、对于临界反应堆的数值計算法……(119)
八、迁移理論……(120)
九、S_N 法 ……(122)
十、积分方程……(124)
参考文献……(126)

第一章　原子核的特征及核反应

一、质子和中子

一般的原子核都是由质子和中子构成的。

根据质譜仪的实驗結果，氫原子的质量是：

$$M_H=1.00814\ \text{a. m. u.}$$

式中 a. m. u. 是原子质量单位，原子质量单位是以氧的最丰富同位素 O^{16} 的质量为依据，把 O^{16} 质量的 $\frac{1}{16}$ 作为計算单位。

1.00814 克的氫中含有 6.025×10^{23} 个氫原子，6.025×10^{23} 叫做亚伏伽特罗数，用 N 代表。因此单独一个氫原子的质量是：

$$m_H=\frac{M_H}{N}=\frac{1.00814}{6.025\times10^{23}}\text{克}=1.6727\times10^{24}\ \text{克。}$$

另外，一个电子的质量是：

$$M_e=0.00055\ \text{a.m.u.}$$

因此一个质子的质量是：

$$M_p=M_H-M_e,\ \text{即}\ M_p=1.00759\ \text{a.m.u.}$$

中子不带电，它的质量比质子稍大，用克計算是：

$$m_n=1.6749\times10^{-24}\ \text{克，}$$

用原子质量单位計算是：

$$M_n=1.00898\ \text{a.m.u.}$$

由此可見中子质量和质子质量之差是：

$$M_n-M_p=0.00139\ \text{a.m.u.}$$

从这个数字看出，中子质量减质子质量之差比电子质量还大，即

$$M_n-M_p>M_e。$$

质子和中子統称为核子。一个核子的质量，在不太精确的計

试读结束：需要全本请在线购买： www.ertongbook.com

算中，可以說等于：

$$m=1.67\times10^{-24}\text{ 克。}$$

自由的质子是稳定的，自然界中质子可以长期存在，在星际空間中存在着很多自由质子。

中子是不稳定的，自由中子衰变为质子及負电子，同时放出一个中微子。自由中子的半衰期是12分鈡。即

$$n\longrightarrow p+e^{-}+\nu,$$

式中 n 指中子，p 指质子，e^{-} 指負电子，ν 指中微子。中微子是一种不带电的、质量比电子小得多的粒子。

二、电荷数 Z 及质量数 A

两个核子相距小于 $(2\sim3)\times10^{-13}$ 厘米时，核子之間有一种很强的吸引力起着作用，这种作用力称为核力。核力和普通經典物理学上的力、万有引力、静电力或电磁力等有着本质上的不同。核力是核子之間的一种短程力；不論中子和中子之間、中子和质子之間、质子和质子之間都有核力作用。

核子間由于核力的作用，使核子結合成为原子核。

Z 个质子和 N 个中子結合成的原子核带有 Z 个单位的正电荷。Z 就是那个原子核所属的原子的电荷数，也就是它所属的元素的原子序数。

$Z+N=A$，A 就是那个原子核中的核子数，A 被称为那个原子核的质量数。

一个含有 A 个核子及 Z 个质子的原子核 X 用符号 ${}_ZX^A$ 来表示。这个符号的左边下标代表原子序数，右边上标代表质量数。在 ${}_ZX^A$ 核中有 Z 个质子和 $(A-Z)$ 个中子。

${}_ZX^A$ 核所含有的核子的总质量为

$$G=NM_n+ZM_p\doteq AM,$$

Z、N、A 依定义应当都是整数。

三、同 位 素

元素的化学性质决定于它核外电子的数目及其分布，核外电子数及其分布决定于核上的电荷。因此，Z的数目相同而A的数目不同的核所构成的元素化学性质一样，不过质量不同，它們构成同一元素的同位素。

例如氢有三种同位素：

氢 $_1H^1$，

氘 $_1H^2$，

氚 $_1H^3$。

天然含氢化合物中，平均每6000个氢原子中含有一个氘原子。$_1H^3$不稳定，其中中子太多，因之会进行β衰变：

$$_1H^3 \longrightarrow {}_2He^3 + e^- + \nu。$$

又如铀，天然铀中含有三种同位素：

U^{234} 占 0.006%，

U^{235} 0.712%，

U^{238} 99.282%。

自然界存在的元素，大都含有两种或两种以上的同位素，其中283种是稳定的。稳定的同位素中，依照N及Z是偶数或奇数的分布情况如下：

N \ Z	偶	奇
偶	167	52
奇	56	8

自然界中不稳定的同位素有50多种。人工制造的同位素有700多种，它們全是不稳定的。

四、放 射 性

稳定同位素的原子核中，中子数对质子数的比，是在一个較小的有限范圍內。中子数对质子数的比超过这个范圍，核就变为不稳定，不稳定的核就会进行衰变，会衰变的原子核称为具有放射性的。如果中子数太多就发生 β^- 衰变。在 β^- 衰变过程中，衰变的原子核放射出一个負电子。这种負电子也称为負 β 粒子。負 β 粒子用 β^- 这个符号来表示。例如 ${}_1H^3$，其中中子数太多，${}_1H^3$ 进行自发的 β^- 衰变。自由中子的衰变也是一种 β^- 衰变。进行 β^{-1} 衰变时，原子核中有一个中子轉变成为质子，因之核內减少一个中子而增加一个质子。于是，原子核的原子序数也增加一个单位，它的质量数則不改变。例如 ${}_1H^3$ 进行 β^- 衰变时变为 ${}_2He^3$，这样的衰变过程可以用以下的公式来表示：

$$ {}_1H^3 \longrightarrow {}_2He^3 + \beta^- + \nu + Q, $$

式中 ν 仍代表中微子，Q 代表衰变中释放出来的能量。这个能量由 β^- 粒子，中微子 ν 及反冲的 ${}_2He^3$ 核分担。${}_2He^3$ 的质量比較大，它的反冲运动所取的能量很小，因之 Q 主要由中微子及 β^- 粒子分担。当中微子取的能量很小可以不計时，β^- 粒子的能量最大，这个最大值写作 E_{max}。中微子取一定能量时，β^- 粒子的能量就比較小。当能量集中在中微子上时，β^- 粒子能量最小。由此可見，在 β^- 衰变过程中，β^- 粒子的能量連續地从将近等于零的最小变到最大的极大值 $E_{max}=Q$（如果原子核反冲能量不算）。

$Z=84$（釙）以上的元素都有放射性，这些具有天然放射性的同位素中，有一部分衰变时放出 α 粒子，有的則放出 β^- 粒子。比較輕的元素中，只有少数的同位素例如 K^{40}（鉀）等，才具有天然放射性。

α 粒子实际上就是氦原子核，它带有两个单位正电荷，它的质量数 $A=4$。一个原子核放出一个 α 粒子后，质量数减少 4，电荷

数則減少 2。例如鐳 ${}_{88}Ra^{226}$ 放出 α 粒子后变为氡 ${}_{86}Rn^{222}$，写成核反应式是：

$$ {}_{88}Ra^{226} \longrightarrow \alpha + {}_{86}Rn^{222} + Q, $$

Q 为在 α 衰变中发出的能量。这个能量大部分为 α 粒子的动能，小部分变为原子核 Rn 反冲的能量。重的天然放射性同位素在放射后常常一个接一个成为一連串的放射性同位素，例如：

$$ U^{238} \xrightarrow[\alpha]{} U\,X_1 \xrightarrow[\beta]{} U\,X_2 \xrightarrow[\beta]{} U^{234} \xrightarrow[\alpha]{} I_0 \xrightarrow[\alpha]{} Ra^{226} $$

$$ \xrightarrow[\alpha]{} Rn \xrightarrow[\alpha]{} Ra\,A \xrightarrow[\alpha]{} Ra\,B \xrightarrow[\beta]{} Ra\,C \begin{cases} \xrightarrow{\beta} Ra\,C' \xrightarrow{\alpha} \\ \xrightarrow{\alpha} Ra\,C'' \xrightarrow{\beta} \end{cases} Ra\,D $$

$$ \xrightarrow[\beta]{} Ra\,E \xrightarrow[\beta]{} Ra\,F \xrightarrow[\alpha]{} Ra\,G。 $$

进行 α 或 β 衰变的核，釋放出 α 或 β 粒子时，同时有 γ 射綫发射出来。

γ 射綫和 X 射綫一样是一种电磁波。不过波长比 X 射綫短，γ 射綫的波长在 $10^{-8}\sim10^{-11}$ 厘米范圍內。

γ 射綫能量集中在光子上。一个光子的能量是 $h\nu$，h 是蒲朗克常数，$h=6.625\times10^{-27}$ 尔格·秒。

原子核經 α 粒子或其他高能量的粒子裏击时会引起核反应。例如硼的同位素 ${}_5B^{10}$ 經 α 粒子裏击时可以轉变成氮 ${}_7N^{13}$ 及一个中子，写成核反应式是：

$$ {}_5B^{10} + {}_2He^4 \longrightarrow {}_0n^1 + {}_7N^{13}, $$

${}_0n^1$ 代表中子。这样的变化过程称为原子核的反应，或簡称为核反应。在核反应中形成的新的原子核有时具有放射性，这种放射性称为人工放射性。例如以上核反应中形成的 ${}_7N^{13}$ 本身并不稳定，它会发出正电子而衰变成 ${}_6C^{13}$。正电子是带正电的电子，电荷量和质量都与負电子相同，发出正电子的 β 衰变称为 β^+ 衰变。${}_7N^{13}$ 的 β^+ 衰变可以用下式表示：

$$_7N^{13} \longrightarrow \beta^+ + {}_6C^{13} + Q。$$

同样，鋁和鎂經 α 粒子轰击时，会发生以下的两种核反应：

$$_{13}Al^{27} + {}_2He^4 \longrightarrow {}_0n^1 + {}_{15}P^{30},$$

$$_{12}Mg^{24} + {}_2He^4 \longrightarrow {}_0n^1 + {}_{14}Si^{27};$$

其中 $_{15}P^{30}$ 和 $_{14}Si^{27}$ 都具有放射性：

$$_{15}P^{30} \longrightarrow \beta^+ + {}_{14}Mg^{30},$$

$$_{14}Si^{27} \longrightarrow \beta^+ + {}_{13}Al^{27}。$$

β^+ 衰变中，正电子的能量有大有小，也分布在連續譜上。在发出正电子时，同时也发出一个中微子。以上反应式中，中微子的发射沒有表示出来。

五、放射性衰变

設有 N 个完全相同的放射性原子核，这些原子核并不是同时一下子衰变，它們有的在这一时間衰变，有的在另一时間衰变。实驗証明：在单位时間內衰变的原子核数，正和原子核总数 N 成正比，即

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

λ 为比例常数，因为 N 随时間减少，所以用負号。比例常数 λ 称为那种原子核或所属同位素的放射性衰变常数，λ 决定于放射性同位素的原子核本身的性質，它和核外的条件例如温度、压力、磁場或电場等无关。以上的关系是放射性的基本关系。这个关系也可以写成以下的形式：

$$-\frac{1}{N}\frac{dN}{dt} = \lambda。$$

这样写时意味着 λ 代表一个放射性原子核在单位时間內的衰变几率。因此每一种放射性同位素都有一定的单位时間的衰变几率。这个基本关系也可以写成积分形式

$$\int_{N_0}^{N}\frac{dN}{N}=-\int_0^t\lambda dt,$$

这个衰变規律經积分后得

$$N=N_0e^{-\lambda t},$$

N_0 为 $t=0$ 时的放射性同位素的原子核数，t 代表时間，N 为 t 秒鈡时的原子核数。

最初 $t=0$ 时有 N_0 个原子核，衰变掉一半所需的时間 T 称为半衰期：

$$T=\frac{\ln 2}{\lambda}=\frac{0.693}{\lambda}。$$

指数形式的衰变規律曾經实驗証实，所有放射性同位素都严格遵守这一指数規律。实驗証明，虽然經过很长时間，天然放射性同位素的衰变常数 λ 恒定不变。

每一种放射性同位素有它一定的衰变常数。各种放射性同位素的衰变常数大小不等，幅度相差很大；最大的 $\lambda=3\times10^{6}$ 秒$^{-1}$(对于 ThC″)，最小的 $\lambda=1.58\times10^{-18}$ 秒$^{-1}$(对于鈾)，最大最小之間的比例为 10^{24}。在現在已知的 800 多种放射性同位素中，沒有两种同位素的衰变常数是完全相等的。

一个原子核的实际寿命有长有短，可以有从 0 到 ∞ 之間的任一个值。但是許多原子核的平均寿命却是一定的，而且是重要的量。

如果最初有 N_0 个原子核，則在任何一霎时 t 的原子核数为 $N=N_0e^{-\lambda t}$，这些原子核的寿命都比 t 长，其中在 t 与 $t\lambda dt$ 期間衰变的寿命为 t，因此寿命 t 的原子核为

$$\lambda Ndt=\lambda N_0e^{-\lambda t}dt。$$

所有原子核总共的寿命是：

$$\int_0^\infty t\lambda Ndt=\int_0^\infty tN_0\lambda e^{-\lambda t}dt=\frac{N_0}{\lambda}。$$

于是一个原子核的平均寿命为：

试读结束：需要全本请在线购买： www.ertongbook.com

$$t_m=\frac{1}{\lambda}。$$

于是平均寿命比半衰期长

$$t_m=\frac{T}{0.693}=1.44T\,(T\text{ 是半衰期})。$$

代入 $N=N_0e^{-\lambda t}$ 的式子中得

$$N=N_0e^{-\lambda t_m}=N_0e^{-1}。$$

从此式看出，平均寿命是那样一个时間，在这样的时間內，原子核的数目减少到原数的 $\frac{1}{e}$，卽原数乘 0.368。放射性与原子核数成正比，于是經过平均寿命那样长的时期后，放射性下降到原值的 $\frac{1}{e}(=0.368)$。

例如 U^{238} 进行 α 衰变的半衰期为 4.5×10^9 年，平均寿命則为 6.39×10^9 年；U^{235} 进行 α 衰变的半衰期則为 7.1×10^8 年，平均寿命則为 10.2×10^8 年。这两种同位素虽都有 α 放射性，但它們的半衰期都很长，在反应堆的問題中，这种衰变可以不考虑。

放射性的单位为居里。居里这个单位最初是指一克鐳的放射性，現在用来作任何放射性核类的放射性单位，它代表任何放射性核类每秒作 3.700×10^{10} 次衰变的量。核类指有一定的 Z 及 A 的原子核。如果一种核类含有那样多的量，它在一秒鐘內衰变 3.7×10^{10} 次，我們就說这种核类有一居里。核类的量普通意味着这种核类的总的放射性。

1 居里＝1000 毫居里＝1,000,000 微居里。

1 居里的鐳，意味着有那么多的鐳，它每秒鐘能放出 3.7×10^{10} 个 α 粒子（因为每次衰变放出一个 α 粒子）。

有許多核类可以有几种不同的衰变方式。例如 Cu^{64}，它可以通过 β^+ 衰变，也可以通过 β^- 衰变，有时也可以把核外的一个电子吸收到原子核內来代替 β^+ 衰变。最接近原子核的电子称为 K 电子，将一个 K 电子吸收到原子核內的过程称为 K 捕。一个原子

核发出 β^+ 粒子时，Z 减少 1 而 A 不变；一个原子核作 K 捕时，Z 也减少 1 而 A 不变。如果一种原子核由于能量方面的考虑，发射 β^+ 粒子不是最有利，則它会进行 K 捕来代替 β^+ 衰变，但这时候 β^+ 衰变不是完全不可能的。于是同时可以发生 β^+ 衰变及 K 捕。Cu^{64} 可以发生 β^+ 衰变或 K 捕或 β^- 衰变。1 居里的 Cu^{64} 意味着 1 秒鈡內各种衰变方式合起来共有 3.7×10^{10} 次。所发生的 β^+ 粒子，β^- 粒子及 K 捕的电子总共每秒有 3.7×10^{10} 个，这样多的 Cu^{64} 我們說它具有放射性 1 居里。

六、結 合 能

核子所結合成的原子核的质量常比核子总的质量小。例如 Z 个质子和 $(A-Z)$ 个中子結合成的一个 ${}_ZX^A$ 原子核的质量 M，常比 Z 个质子的质量及 $(A-Z)$ 个中子的质量之和小。即

$$M<ZM_p+(A-Z)M_n,$$

差額

$$\Delta M=ZM_p+(A-Z)M_n-M,$$

称为质量亏損。

例如质子及中子結合成为氘核后，氘核质量比质子及中子质量之和小。

中子质量	$M_n=1.00898$ a.m.u.
质子质量	$M_p=1.00814$ a.m.u.
	2.01712 a.m.u.

而氘核质量是

$$M_D=2.01474 \text{ a.m.u.}$$

$$M_D<M_p+M_n$$

$$\Delta M=0.00238 \text{ a.m.u.}$$

依照特殊相对論，一个靜止质量为 m_0 的质点以速度 v 运动时，它的质量 m 和速度有关，这个关系为

$$m=\frac{m_0}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}},$$

其中 c 是真空中的光速。实驗曾用高速电子直接証实了这个公式。这个公式表示:速度愈接近光速,則其质量越大。

依照相对論,质点的动能为

$$K=m_0c^2\left[\frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}}-1\right]=mc^2-m_0c^2=(m-m_0)c^2$$

$$=\Delta mc^2,$$

其中 m_0c^2 称为静止能,而 mc^2 称为总能。于是动能 K 相当于质量增加 Δm, $\Delta m=\frac{K}{c^2}$。当一个质点的速度从 0 增加到一个值 v, 那个质点的质量增加 Δm,它的能量增加 K, 而 $K=\Delta mc^2$, 于是一般情形下能量 E 和质量 m 之間有下列关系:

$$E=mc^2。$$

依照这个关系,和能量 E 相等的质量

$$m=\frac{E}{c^2};\quad m[\text{克}]=\frac{E[\text{电子伏}]\times1.6\times10^{-12}}{9\times10^{20}}$$

$$=1.78\times10^{-32}\,E[\text{电子伏}]。$$

在原子核物理中,电子伏这个能量单位一般嫌太小,所以常用 10^6 电子伏作为能量单位。10^6 电子伏即 1 百万电子伏。写作 1Mev

$$1\text{ 百万电子伏}=1.602\times10^{-6}\text{ 尔格。}$$

当 O^{16} 的质量为 16.0000 时,O^{16} 的质量的 $\frac{1}{16}$ 称为 1 个原子质量单位(a.m.u.)。

如果有一种粒子,N 个的质量恰好等于 1 克(这是一种假想的情形),則每一个粒子的质量为 $\frac{1}{N}$ 克,这个质量等于

$$\frac{1}{N}c^2\text{ 尔格}=\frac{1}{N}\ \frac{c^2}{1.60\times10^{-6}}=931.162\text{ 百万电子伏。}$$

所以平常說1个原子質量单位相当于931.162百万电子伏或粗略地等于931百万电子伏的能量。即

$$1\,\text{a.m.u.}=931.162\text{ 百万电子伏}\doteq 931\text{ 百万电子伏。}$$

反过来

$$1\text{ 百万电子伏}=0.001074\quad\text{a.m.u.}\doteq 0.0011\,\text{a.m.u.。}$$

一个电子的靜止質量 m_0 是質子質量的 $\frac{1}{1836.13}$ 倍，或等于0.00054876 a.m.u.，它相等于能量

$$m_0c^2=0.51098\text{ 百万电子伏，}$$

或粗略地等于

$$m_0c^2\doteq 0.51\text{ 百万电子伏。}$$

实驗証明，結合成氘核时放出2.231±0.007百万电子伏的能量。

从2.231百万电子伏，得

$$\Delta M=0.00238\,\text{a.m.u.}$$

在实驗誤差范圍內，这就等于实驗所得的氘核的質量亏損。

从核子結合成为一个原子核所釋放出来的能量的数值，就等于将那核中的核子完全分开时所需的能量，这个能量称为結合能。因之結合能为：

$$B=\Delta MC^2=(ZM_p+[A-Z]M_n-M)C^2。$$

質量和能量的关系，在原子核反应过程中，得到大量的实驗証据。許多核反应过程中都証明这个关系是准确的。在原子核衰变过程中也証实了这种关系。質量和能量的等效关系是近代物理完全肯定的原理。用了这个原理，可以反过来从大量核反应过程中的核反应能量确定反应中有关的原子核的質量。

七、結合分数

我們說过核子結合成为一个原子核时发出能量。将那原子核中的核子完全分开就需要供給它以一定的能量，这个能量称为那个原子核的結合能。平均每一个核子分摊到的結合能为$f=\frac{B}{A}$，f称为結合分数。結合分数$f=\frac{B}{A}$是平均每一粒子所貢献的結合能。下表列出几种最輕的核类的結合能和結合分数。

几种最輕的核类的結合能B及其結合分数表

核　类	H^2	H^3	He^3	He^4	Li^6	Li^7
B(百万电子伏)	2.22	8.48	7.72	28.3	32.0	39.2
$f=\frac{B}{A}$ (百万电子伏/核子)	1.11	2.83	2.57	7.07	5.33	5.60

最輕的核类中，一般傾向于質量数越大，則f越大。但显然f的起伏是比較大的。

依照每一核子平均結合能的定义：

$$f=\frac{B}{A}=M_n-\frac{Z}{A}(M_n-M_H)-\frac{M}{A}$$
$$=(M_n-1)-\frac{Z}{A}(M_n-M_H)-\frac{M-A}{A}。$$

对于从Ca^{40}到Sn^{120}的核类，$\frac{Z}{A}$变化很少，只从0.50变到0.42，其平均值約为$\frac{Z}{A}\doteq 0.46$。在这个区域中$\frac{M-A}{A}$的变化也很少，平均約为-6×10^{-4} a.m.u./核子。于是在这个区域中f的数值为

$$f=\frac{B}{A}\doteq 0.008982-0.46(0.000840)+0.0006$$
$$=0.0092\text{ a.m.u./核子}=8.5\text{ 百万电子伏/核子。}$$

各种核类的結合分数和質量数A之間的变化如图1。

从图上可見，f 先随 A 增加而很快地增加，对于 A 从 30 到 150 之間 f 很平稳，約为 8.5 百万电子伏；对于重元素，f 逐步下降到 7.5 百万电子伏左右。

結合分数的这种变化提供两种利用原子能的方式：

(1) 輕原子核相結合可以释放出原子能。例如两个氘核相結合可以变为一个 $_2He^3$ 核和一个中子。在这个反应中发出 4 百万电子伏的能量。

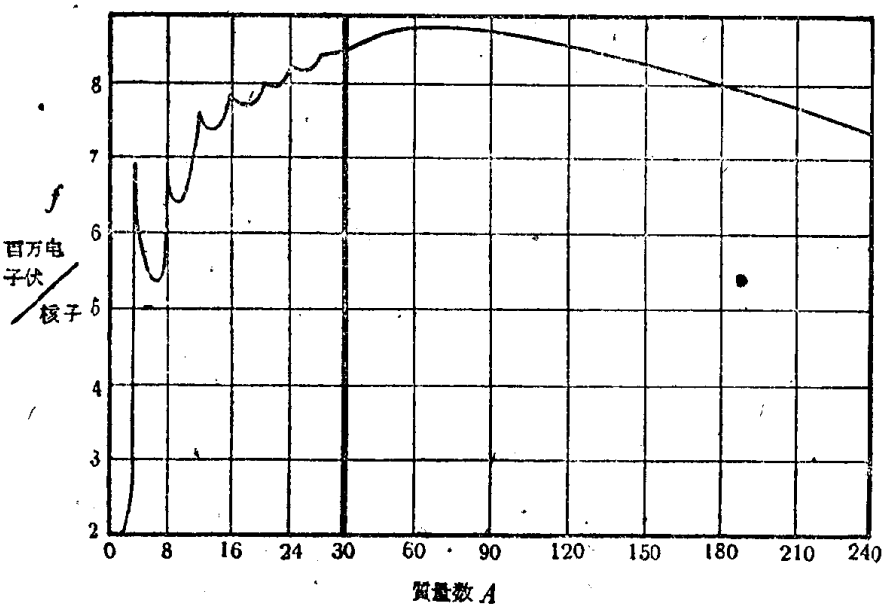

图 1　天然核类的每一核子的平均結合能随质量数 A 的变化情形。注意这个图左边($A<30$)和右边($A>30$)的 A 的标度不同。

为什么在这个反应中会释放出这么多的能量呢？这可以从同位素的质量来理解。从同位素表上可以看到

氘核质量 $M_D=2.014735$ a.m.u.

$_2He^3$ 的质量 $M_{He^3}=3.016977$ a.m.u.

中子质量 $M_n=1.008982$ a.m.u.

于是在反应之前两个氘核的总质量为：

$$2M_D=4.029470 \text{ a.m.u.}$$

试读结束：需要全本请在线购买： www.ertongbook.com