

第十章 复习要点

By YJMa, 2017-06-28

一、 质量与结合能

质子质量 $m_p = 1.007277 \text{ u}$, 中子质量 $m_n = 1.008665 \text{ u}$

Z 个质子、 N 个中子结合成原子核时, 原子核的质量并不等于它们的质量之和, 而是会与原子、分子相比 出现更大程度的质量亏损

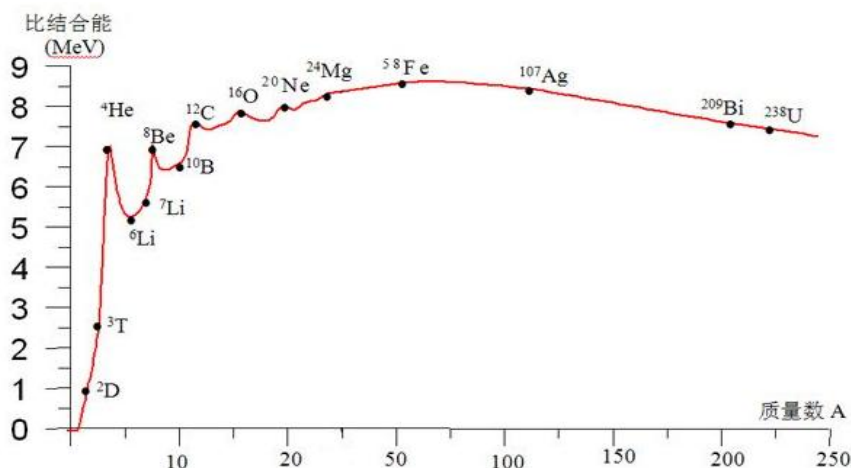
$$\Delta m = Z \times m_p + N \times m_n - M_{\text{核}} \approx Z \times M_H + N \times m_n - M_{\text{原子}} \quad (1)$$

质量亏损也意味着这些质子中子结合成原子核时会释放出能量

$$B = \Delta m c^2 \quad (2)$$

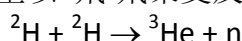
这就是原子核的结合能 (Binding energy)。同时也意味着, 要打破这个原子核回到这些质子中子独立自由的状态, 外界至少需要提供这些能量。

显然, 随着核子 (中子和质子的统称) 数增加, 原子核的结合能越大。为了更深刻地理解结合能, 人们定义了 “比结合能” (也称 每核子平均结合能) B/A 。这里 A 为核子总数。



上图给出了比结合能的变化特点。从该图看到, 中等质量数的原子核的比结合能总体较大。因此, 轻核聚变以及重核裂变可以放出能量, 它们也分别是氢弹和原子弹的基本原理。

这里以 氘-氘聚变反应为例做以演示。



设 $A=2$ 的 ${}^2\text{H}$ 核处以及 $A=3$ 的 ${}^3\text{He}$ 核处的比结合能分别为 X 和 Y 。2 个质子、2 个中子形成聚变反应方程的左端 会放出能量 $4X$, 形成方程右端会放出能量 $3Y$ 。那么由方程左端形成右端 将放出能量为 $3Y - 4X$ 。对比实验上测得的比结合能, $X \approx 1 \text{ MeV}$, $Y \approx 2.5 \text{ MeV}$, 可知 2 个氘核上述聚变会放出能量 3.5 MeV 。经计算 1 克 氘核聚变放出能量大约相当于 10 吨煤炭的燃烧值, 反映出核能的巨大潜力。

二 角动量和磁矩

构成原子核的质子和中子并非静止的, 它们的运动可划分为 轨道和自旋两类运动, 并因此形成对应的角动量, 全部核子的角动量之和构成了原子核的 (单粒子) 总角动量(其它原因也会有贡献, 例如原子核的整体转动)。质子和中子均为费米子, 自旋量子数均为 $S = 1/2$ 。

质子作为带电粒子, 因为轨道和自旋运动会形成对应的磁矩 (正带电粒子的磁矩方向与角动量方向一致)。中子作为电中性粒子, 其轨道运动不产生磁矩; 按照经典理论, 其自旋运动也不会产生磁矩。但事实是 中子有自旋磁矩, 其原因与中子内部夸克有关。全部核子的磁矩之和构成原子核的总磁矩。核磁矩的单位 $\mu_N = \frac{e\hbar}{2m_p}$ 远小于原子磁矩单位 $\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e}$ 。

三、 核电四极矩

核电四极矩描述着原子核的质量（或电荷）的空间分布。设想原子核的初始形状为球形，然后将其拉伸或压扁，可以想象会有一个轴是对称轴，垂直于该轴的横截面是圆。核电四极矩的定义式为 $Q = \frac{2}{5}Z(a^2 - b^2)$ ，其中 a 为对称轴半长， b 为横截面圆的半径。 Q 可实验测量，其值小于 0 意味着原子核形状为扁椭球， Q 越负 形状越扁，而 Q 值大于 0 意味着原子核具有长椭形状。核电四极矩可以描述原子核形状偏离球对称的程度。

四、核衰变的统计性和半衰期

自由质子是稳定不衰变的，自由中子则是衰变的。而对于原子核，其内质子之间存在着强库仑斥力，为了保障原子核的整体存在，必然有引力抵消着这个斥力，这个引力是核力，是核子-核子之间的吸引力，属于强相互作用范畴。给定质子数及各质子的位置，核内中子数增加时，斥力不变而引力增强。一个稳定的原子核体系，斥力与引力是平衡的，中子和质子的数量比例是协调的。如果这个比例不协调，那么原子核就不稳定，可以自发地发生衰变，向平衡比例的稳定核方向演变。一个不稳定的原子核何时发生衰变是不确定的，但是大量原子核的衰变则呈现出统计性。设时间 $t=0$ 时刻原子核的数量为 N_0 ，而 t 时刻未衰变的原子核的数量为 N 。显然，给定核素种类时， t 时刻 单位时间内原子核的衰变数 $-dN/dt$ 应正比于 N ，比例常数为 λ 。容易得到

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (3)$$

前述比例常数 λ 称为衰变常数，因核素的种类而不同， λ 越大意味着原子核越容易发生衰变。习惯上定义半衰期 $T_{1/2}$ ，当 $t = T_{1/2}$ 时， $N = N_0/2$ ；另外上式又可变为

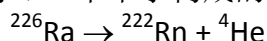
$$N = N_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{T_{1/2}}}$$

五 衰变能及衰变条件

衰变能 E_d = 衰变前体系（母核）的质量能 - 衰变后体系（子核及出射粒子）质量能
这个差值成为衰变产物的动能。显然，衰变能不少于 0 是衰变发生的必要条件。

六、 α 衰变

2 个质子、2 个中子构成的 α 粒子团 从母核中放出。实例



衰变前，母核可近似视为静止。因此有如下动能、动量守恒方程（非相对论方程）。

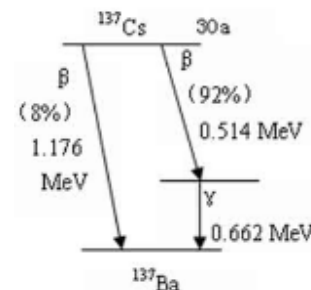
$$Mc^2 = M'c^2 + mc^2 + \frac{1}{2}M'V^2 + \frac{1}{2}mv^2$$

$$M'V = mv$$

这里 M M' m 分别代表 母核、子核、 α 粒子的静止质量， V 和 v 分别代表子核和 α 粒子的速度。共有两个未知数，所以 v 唯一确定， α 粒子能量唯一确定， α 粒子能谱是分立谱。另外，衰变后，子核可以处在多个不同的激发态上，对应地， α 粒子能量有多个唯一确定值。

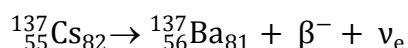
七-1、 β^- 衰变

一个负电子从母核中放出，如右图实例。



根据前述对 α 衰变的介绍，可以预期， β 粒子能谱应为分立谱，而事实上 β 粒子谱是连续谱，该连续谱存在一个能量最大值，对应 β 粒子的最大可能动能。这样的特点已经通过中微子给予了解释。在 β 衰变中伴有电中性的质量微小的中微子同时放出，分立的能量（近似对应于 β 粒子连续谱中的能量最大值）在 β 粒子和中微子之间随机分配，形成了 β 粒子的连续谱特征。中微子不参与强相互作用，因此在实验上捕捉其痕迹很难。

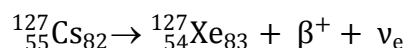
一个 β^- 衰变实例如右上图。方程式为



β^- 衰变过程可理解为一个中子释放出一个负电子后转换成质子。

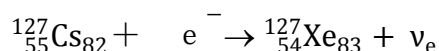
七-2、 β^+ 衰变

与上述 β^- 衰变原理相同，不过是从原子核中放出一个正电子。 β^+ 衰变过程可理解为一个质子释放出一个负电子后转换成中子。实例：



七-3、电子俘获（Electron Capture）

原子核俘获一个核外电子，与核内的一个质子中和，中子数伴随着增加一个。K 层电子俘获概率最大，称 K 电子俘获。电子俘获过程同样有中微子放出（但其能量确定，分立谱）实例：



通过衰变条件的考察，容易知道，能发生 β^+ 衰变时必然能发生电子俘获。

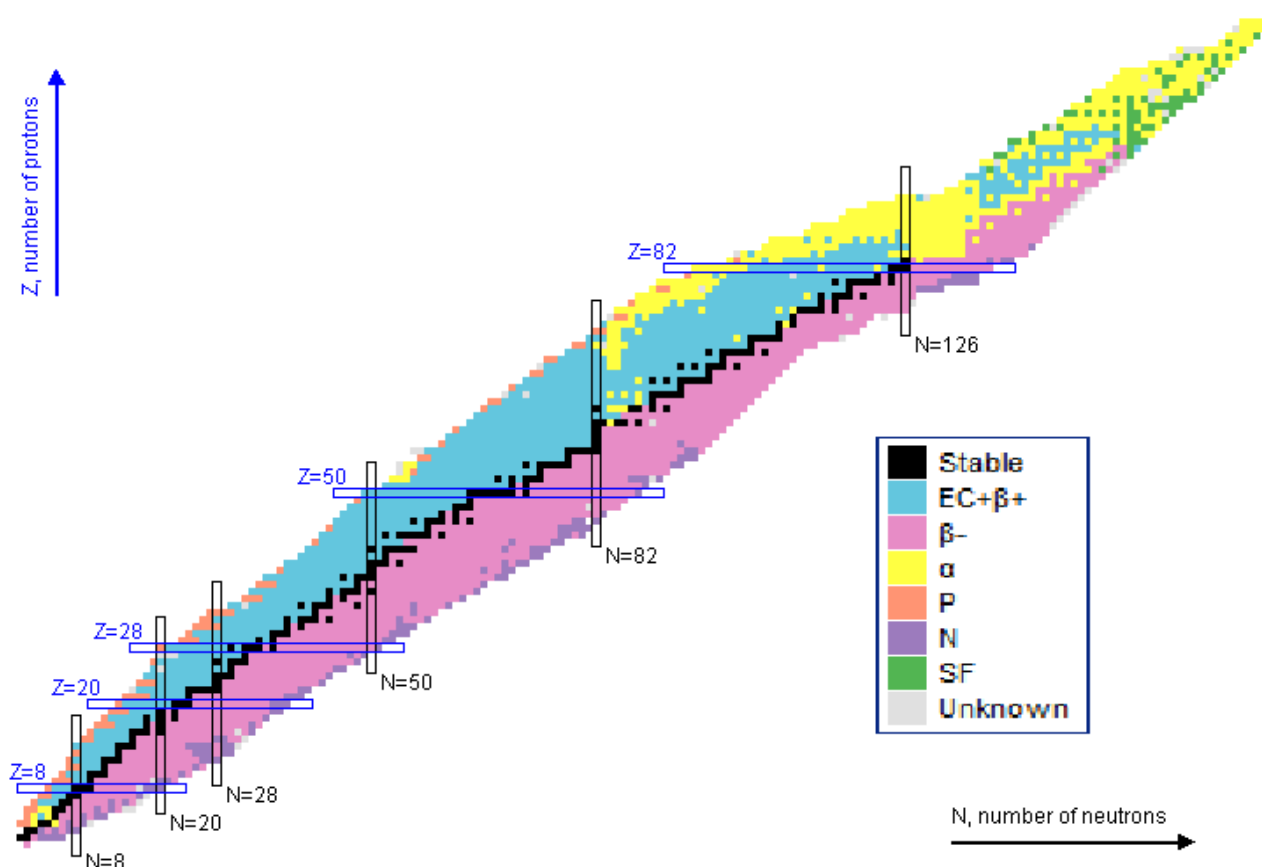
八、 γ 衰变与内转换

如同原子，原子核的内部能量也是量子化的。原子核从高能级向低能级退激时，其间的能量差可以有 γ 射线来承载。显然，这样的 γ 射线能谱，必然是分立谱。

存在与上述 γ 衰变相竞争的另一种退激方式，称为内转换。在这种效应中，能量差直接传给核外电子，核外电子获得能量后脱离原子核的束缚。从过程上看，如同“内光电效应”。

九、 β 稳定线

理论预期自然界可存在的原子核有约 6 0 0 0 种，人类已经发现了约 3 0 0 0 种。地球上稳定核约近 3 0 0 种（2 7 7 种，不一定正确哦）。把这些稳定核画在一张图上（纵轴质子数\横轴中子数），将得到一条稳定核汇聚而成的轮廓线，称 β 稳定线。如下图所示。图中黑色方框代表稳定核。稳定线截止于 $Z=82$ 的铅（Pb）。从 $Z=83$ 开始向上，不再存在稳定核。到 $Z=92$ 的铀（U）为止的元素是地球上天然存在的元素。从 $Z=93$ 开始（包含 93），均为实验室里才能合成的核素，即在地球上不是天然存在的。在稳定线的上方，质子偏多，可能发生 β^+ 衰变、电子俘获 EC。在极度远离稳定线时，甚至发生质子发射（Proton emission）。由于绝大多数原子核内中子数多于质子数，所以 α 衰变起着降低核内质子数占比的作用，再所以，它一般也发生于稳定线上方，特别是重核以及远离稳定线的区域。在稳定线下方，中子偏多， β^- 衰变是重要的方式；在极度远离稳定线区域，还可能发生中子发射（Neutron emission）。在非常重的核区，原子核可以直接自发裂变（Spontaneous Fission）。而在稳定线内部，有些核既可以发生 β^- 衰变，又可以发生 EC/ β^+ 衰变。



十、带电粒子（质子、电子、 α 粒子、重离子）与物质的相互作用

库仑相互作用类属于长程力，它将导致带电粒子在靶物质中主要发生如下可能的相互作用：1、与核外电子（包含内层电子和价电子）的非弹性碰撞而导致其激发或电离；2、与原子核的非弹性碰撞，而导致其激发；3 核反应；4 与原子核的弹性碰撞导致其反冲移位

十一、中子与物质相互作用

不带电的中子当然比带电粒子有着更强的穿透力，可能在物质中什么也不发生就原样穿过了。而发生事情时，则主要可能发生：1、弹性碰撞 致使原子核反冲移位（核外电子跟随）；2 非弹性碰撞致使电子激发或电离，或者致使原子核激发；3 被原子核俘获 或者引起核反应；4 展示出波动性。

由于弹性碰撞截面相对很大，所以为了防护中子，要从有利于弹性碰撞来耗取中子能量的角度考虑，因此常用质量数比较小的原子、分子物质作为防护材料，例如石蜡和水等。

十二、 γ 射线与物质的相互作用（电子对效应及湮灭辐射）。

γ 射线的 静止质量为 0、具有波粒二象性，不带电。这些特性决定了它同样具有很强的穿透力，有一定概率在物质中不受任何影响地通过。而同样有一定概率将与物质发生相互作用。它有理由展示其波动性，发生折射、衍射、反射等。与可见光比， γ 射线通常能量较高，以至于它更喜欢在物质中展示其粒子性。这时主要可能发生：光电效应、康普顿效应、电子对效应（甚至于低概率的光核反应等）。前两大效应，之前已有论述。这里介绍电子对效应。

有理由把静止质量为 0 的光子假想成正负电子的结合体，在库仑场中二者受力不同 会发生分离。总之吧，光子在库仑场作用下转化成一正一负电子，这种效应称为 电子对 效应。显然，1 能量不低于两个电子的静止质量能（ $2m_e c^2$ ）、2 外电场的存在 这两条是 γ 光子可以发生电子对效应的前提。（并且如果没有第 2 条，则动量守恒和能量守恒不能同时满足。）

人类目前视程范围内的宇宙是正物质宇宙，正反粒子相遇就会发生湮灭。正电子作为常见负电子的反粒子，同样如此。当二者速度接近 0 时，它们将湮灭转化成光子。最大概率是转化成一正一负光子，也有小的概率转化成三个光子。而对于最大概率的双光子湮灭，容易根据能量守恒、动量守恒得到以下推论：1 两个光子的运动方向相反(方向夹角为 180°)；2 两个光子的能量相同，均为 一个电子的静止质量能（ $m_e c^2 \approx 511 \text{ keV}$ ）。