

# 原子核的构成和性质

靳根明

(中国科学院近代物理研究所 730000)

## 1. 原子核概况

自然界万物都是由原子组成,原子又是由原子核和核外电子组成。而且,原子核几乎承载了原子的所有质量,换句话说,是原子核承载了自然界万物的质量。经过上百年的努力,现在已经知道原子核是由带正电荷的质子和不带电的中子构成的。最新的研究还发现,除质子和中子以外,某些介子——质量比质子和中子都轻的粒子,也可以参与原子核的组成。最轻的原子核是氢原子核,它只有一个质子,目前发现的最重的原子核是118号元素的一个原子核—— $^{295}\text{Og}$ (𨞰),它包含了118个质子和177个中子。

### 核素图

原子核的质子数通常用 $Z$ 表示,中子数常用 $N$ 表示。 $Z$ 和 $N$ 确定的一个原子核称为一种核素。每一种核素也有自己的名字,如由4个质子和5个中子组成的原子核称为铍-9( $^9\text{Be}$ ),由6个质子和6个中子组成的原子核称为碳-12( $^{12}\text{C}$ )等。核素的“姓”就是它的元素名,由质子数 $Z$ 决定;核素的“名”就是它的核子数总数 $A(A=Z+N)$ ,也称为质量数。这样一来,可以将核素用三个身份分类:(1)质子数相同、中子数不同的核素称为同位素(isotope);(2)中子数相同、质子数不同的称为同中子素(isotone);(3)质量数 $A$ 相同、但质子数和中子数都不同的核素称为同量异位素(isobar)。把所有核素按照其 $Z$ 和 $N$ 的数值,放在一张二维图上,这就是核素图(图1)。

原子核是一个极其微小的系统——微观系统,最大原子核的尺寸也只有约 $10^{-12}$  cm。描述其特性的词语有很多,例如自旋、宇称、半径、质量等。其中有些词语与描述宏观物体的含义略有不同。例

如自旋,它是原子核自旋角动量的简称。原子核由质子和中子组成,质子和中子都有确定的自旋角动量,它们在核内还有轨道运动,相应地有轨道角动量。所有这些角动量的总和就是原子核的自旋角动量。‘宇称’则是为了描述原子核状态空间反演(镜象反射)对称性相联系的物理量。原子核的宇称也是原子核内质子和中子宇称的乘积,只有奇(-)偶(+)-之分。由于原子核内质子和中子分布密度有一定的差别,其半径可分为电荷半径、物质半径。通常原子核半径与 $A^{1/3}$ 成比例,但是远离稳定线核素的半径会出现异常。

质子和中子的质量非常接近,统称为核子,都具有 $(1/2)$ 的自旋,称为费米子(自旋为半整数的粒子称为费米子,自旋为整数的称为玻色子)。质子和中子内部也有结构。多年的研究表明,质子和中子都是由所谓的上夸克、下夸克和胶子组成,质子由2个上(u)夸克和1个下(d)夸克组成,中子由1个上夸克和2个下夸克组成。上夸克带有 $+2/3$ 电荷,下夸克带有 $-1/3$ 电荷。上夸克和下夸克的质量略微不同。中子的质量也比质子的质量略大一点点。

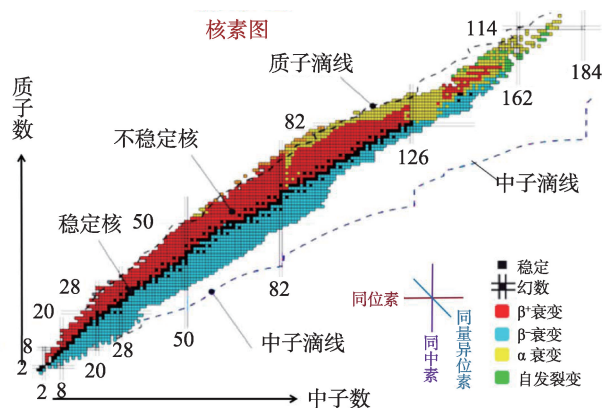


图1 核素图

在核内每个核子都感受到吸引力,好像是将它们放在一个井(用‘阱’代替)中,因此,它们的势能为负,距离核心越近,阱越深,势能越负。距离中心越远,越接近阱口,势能越接近零。在远处中子感受不到任何力,势能为零。由于质子带正电,其势阱存在库仑位垒。在处于最低能态的原子核内,中子和质子分别按能量从低到高的顺序依次填充各自的能级,直到所有核子都全部填满。最后一个质子/中子所占据能级的能量称为费米能(费米面),也就是说费米面以下的能级全部填满。

将最后一个中子从核中取走所需要的能量,称为最后一个中子的分离能,一般用 $S_n$ 表示,它等于费米面到零势能面的距离。同样,将最后一个质子取走所需要的能量,称为最后一个质子的分离能,用 $S_p$ 表示,等于费米面到零势能面的距离。在稳定核中,中子和质子的费米面几乎同样高,即 $S_n \approx S_p$ 。原子核最后一个或两个核子的分离能的大小,与原子核的稳定性有密切关系。如果在稳定核中不断加入中子(质子),中子(质子)分离能 $S_n(S_p)$ 逐渐变小,直至为零时,再也容不下更多的中子(质子),中子(质子)会自动滴出来。在所有元素中,都会出现一个处于这样临界状态的原子核,形象地称为中子(质子)滴线位置,这就是在丰中子(丰质子)一侧核素存在的极限。

稳定原子核中,质子数与中子数的比值有一个合适的范围,如果中子数过多,或者质子数过多,原子核系统由于能量过高而变得不稳定,从而发生 $\beta$ 衰变。稳定的原子核不发生 $\beta$ 衰变,因此,在核素图中它们连成的一条线称为 $\beta$ 稳定线。如果将核素图比作一座大山,那 $\beta$ 稳定线就可以形象地比喻为山

谷,在两边山坡上,核素是不稳定的,经过 $\beta$ 衰变落向谷底,变成稳定的核素。

在原子核质量数较小的核区(轻质量区),稳定核有相同的质子数和中子数。随质子数增加,需要额外的中子平衡越来越强的库仑排斥,所以稳定线逐渐偏向右方即丰中子一侧。

原子核的很多性质可以展示在核素图上,有利于发现全局性趋势或规律,如图3。图3(a)显示了核素基态的各种衰变模式,有关细节将在第4节中介绍。图3(b)显示了已知核素的半衰期,跨越了50个量级,最长的是宇宙年龄的数十亿倍。远离稳定线时核素半衰期越来越短,最短的寿命相当于单个核子在原子核内往返一次所需时间 $\sim 10^{-22}$ 秒。图3(c)显示了每个核素的比结合能(平均每个核子的结合能),无论沿同位素链( $Z$ 相同)、同中子素链( $N$ 相同)还是同量异位素链( $A$ 相同),比结合能在稳定线处都是极大。

图3(d)显示了所有核素的最后一个中子的分离能 $S_n$ ,奇 $N$ 核的中子分离能明显比偶 $N$ 核的中子分离能小,这揭示了中子的对效应,即中子成对存在时原子核更稳定。质子同样也有对效应。

图3(e)表示相邻核素的最后一个中子分离能( $S_n$ )之差的变化趋势。在大多数情况下,中子分离能随中子数 $N$ 的增加而平缓减小,但在某些中子数,如 $N=8,20,28,50,82,126$ 时,分离能之差会发生突变,说明在这些地方,中子能级间隔突然增大,这些核子数称为幻数,这可由后面介绍的壳模型解释。

如果将比结合能与质量数关联起来,可得图4。对 $A < 20$ 的轻核,比结合能较小,但上升很快,在 $A \sim 56$ 达到最大值。随着质子数的进一步增加,原

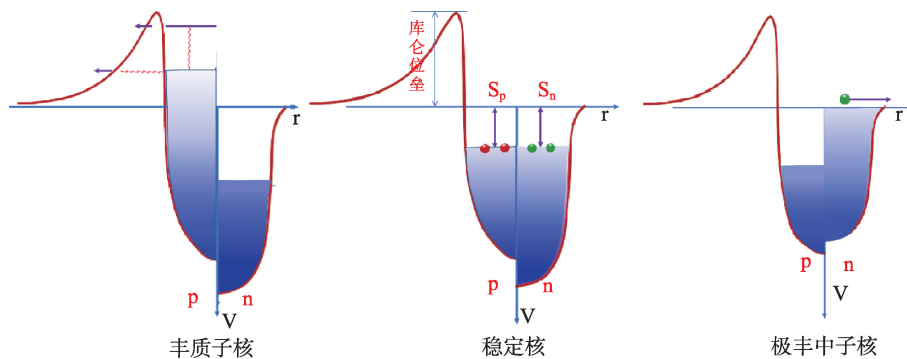


图2 稳定核、丰质子核、中子滴线核中质子费米面与中子费米面的相对位置及中子、质子分离能示意图

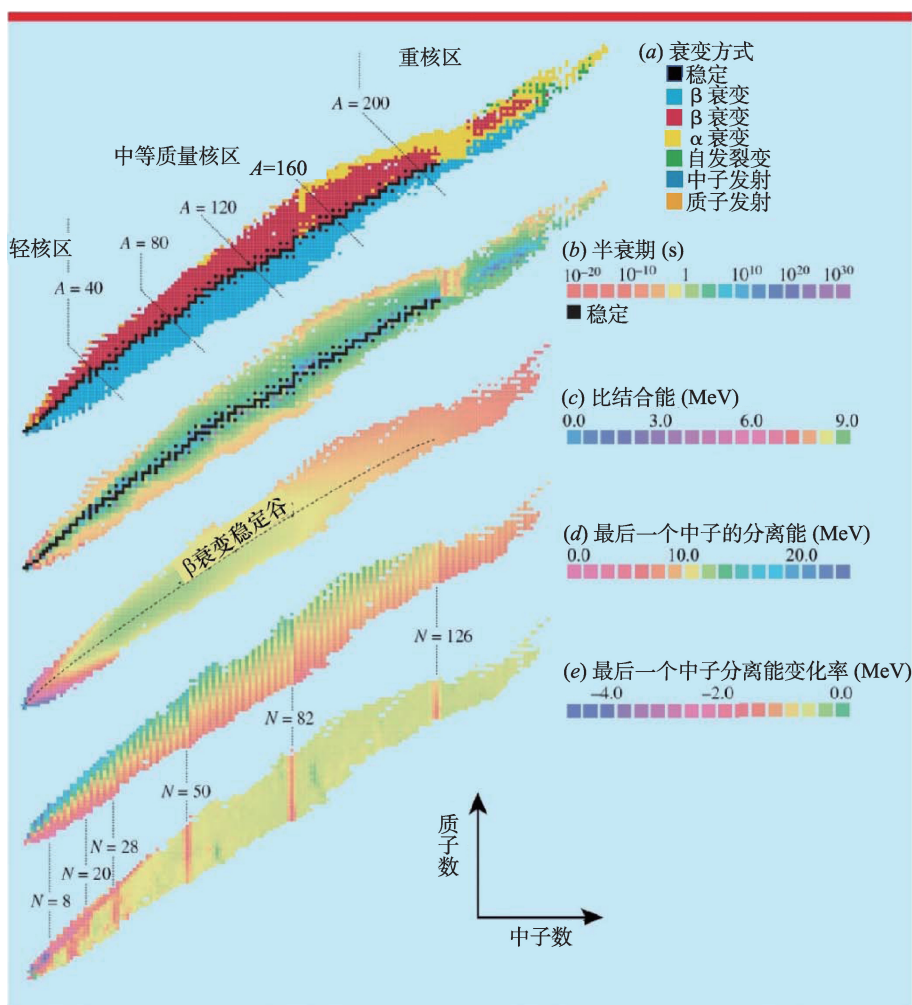


图3 核素图中表示的核素性质 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6552/aa811a#pedaa811as5>

子核的比结合能则缓慢下降,在很大范围内稳定核的比结合能接近常数,反映出—个核子只与周围—定范围内的有限数目的核子发生作用(核力的作用距离很短)。质子之间具有长程库仑排斥,抵消了一些核力,因此,比结合能随质子数增加而下降。

## 2. 核子是如何结合在一起形成原子核的——核力及其基本性质

实验测量证明,一个原子核的质量,总是比它所包含的等量自由质子和中子的总质量要小,这一差值称为原子核的质量亏损,也叫结合能。这意味着质子和中子组成原子核时放出了能量。反过来说,将原子核拆散时,需要输入与结合能相等的能

量,这时的能量称为分离能。

1936年开始,物理学家将原子核视为一个电荷均匀分布的球形液滴(液滴模型),并将其的结合能可分为几部分:体积能 $B_v$ (正值)、表面能 $B_s$ (负值)、电荷(库仑)能 $B_c$ 。其中,前两项与质子和中子无关,库仑能是排斥的,所以为负。这样,对于给定核子数目的原子核,最稳定的几乎全由中子组成,这与事实不符。所以,需要考虑额外的效应。实际上,较轻的原子核中,质子数和中子数相等时最稳定,中子数的增加或者减少,其结合能都会减小,也就是说原子核中,质子数和中子数有趋于相等的趋势。这需要增加与此有关的一项,称为对称能项 $B_a$ ,数值也应该是负的。随着质子数与中子数差别的增大,这一项的作用远比库仑项的大。这也是重



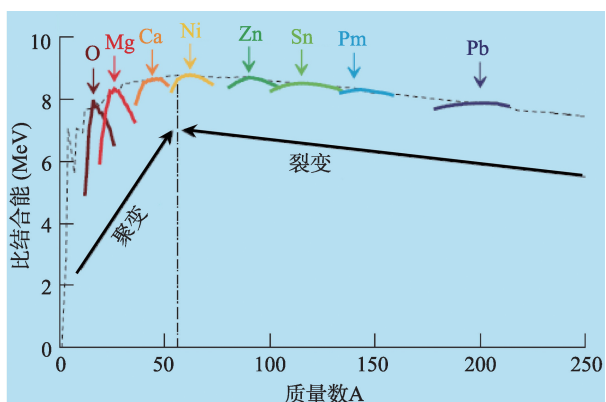


图4 比结合能随质量数变化。黑色虚线代表稳定核素,不同颜色的实线代表一些元素的同位素链

原子核中,中子数要比质子数多很多的原因。另外,实验数据显示,原子核中核子成对时,也比不成对时稳定些,所以还应该增加与对效应有关的一项  $B_p$ ,对偶偶核(质子数和中子数都是偶数)该项为正,对奇奇(质子数和中子数都是奇数)核,该项为负,其余情况为0。原子核最后一个质子/中子的结合能(分离能)的大小表示了这个核相对临近核的稳定性。质子数或/和中子数为幻数时,最后一个核子的分离能变化非常剧烈。近年来对原子核结合能(质量)进行了更加深入的理论和实验研究,在考虑了核的对称能、壳效应和残余效应等的修正后,理论

计算了2000多个寿命较长的原子核的质量,可精确到大约 350 keV。要知道原子核的总质量为  $931494.0 \times A$ (核子数)(keV)。原子核质量的实验测量最高精度可达到  $10^{-10}$ ,甚至更高。原子核质量的经验公式如下:

$$B(Z, A) = B_v + B_s + B_c + B_a + B_p。$$

总之,液滴模型初步解释了核子为什么能结合成原子核的问题。通过比结合能的变化趋势可以看出,非常重的一个原子核裂变成两个较轻的原子核时,或者是两个非常轻的原子核结合成一个原子核时,都会放出能量。这为核能的利用提供了理论基础。

通过分析各种实验数据,人们发现,当中子数和质子数为 2、8、20、28、50 和 82,或中子数为 126 时,相对邻近核更稳定。这使得人们想起原子中电子的壳层分布,从而认为原子核中质子和中子也是一层一层填充的,而且每个核子都是在其余核子产生的平均场中独立运动(平均场的分布形式有着不同的假设,但都是一个中心力场)。这就是早期的壳层结构模型概念。但是按照中心力场的假设进行理论计算,并不能重现出这些幻数。后来,M.G. 迈耶(Maria Goeppert-Mayer, 1906—1972)和 J.H.D. 詹森(J.H.D.Jensen, 1907~1973)独立地指出在平均

### 幻数和壳模型

- 一个核子在其余核子形成的共有势场中运动



**Maria Goeppert Mayer and Hans Jensen**  
Nobel Prize Physics 1963  
"for their discoveries concerning nuclear shell structure"

M.G. Mayer, Phys. Rev. 75, 1969 (1949)

number of nucleon particles in level	cumulative number of nucleon particles
184	
1/2 <sub>g</sub>	16
2d <sub>3/2</sub>	4
4s <sub>1/2</sub>	2
2d <sub>5/2</sub>	6
1/2 <sub>g</sub>	12
3d <sub>3/2</sub>	6
2g <sub>7/2</sub>	10
126	
1/2 <sub>g</sub>	14
3p <sub>3/2</sub>	2
3p <sub>1/2</sub>	4
2f <sub>7/2</sub>	6
2f <sub>5/2</sub>	8
1h <sub>11/2</sub>	10
82	
1/2 <sub>g</sub>	12
3s <sub>1/2</sub>	2
2d <sub>3/2</sub>	4
2d <sub>5/2</sub>	6
1g <sub>7/2</sub>	8
50	
1d <sub>3/2</sub>	10
1f <sub>7/2</sub>	2
1f <sub>5/2</sub>	4
2p <sub>3/2</sub>	4
28	
1f <sub>7/2</sub>	8
20	
1d <sub>3/2</sub>	4
2s <sub>1/2</sub>	2
1d <sub>5/2</sub>	6
8	
1p <sub>3/2</sub>	2
1p <sub>1/2</sub>	4
2	
1s <sub>1/2</sub>	2

©1994 Encyclopaedia Britannica, Inc.

图5 原子核壳模型与幻数



场中包含强的核子自旋-轨道(核子围绕原子核中心运行的轨迹)耦合力,这种耦合力可引起的能级分裂,导致某两个能级之间的差别明显变大,从而成功地解释了这些幻数的存在。他们利用壳模型还成功地解释了原子核的自旋、宇称、磁矩、 $\beta$ 衰变和同质异能核素岛(同质异能核素是原子核的一种激发态,由于此激发态的角动量与该核基态的角动量相差较大,使其具有较长的寿命。在幻数核附近会存在许多同质异能核素,由此得名同质异能素岛)等实验事实。由于原子核壳层结构模型所获得的成功,及其在核物理研究中的重要作用,迈耶和詹森共同获得1963年诺贝尔物理学奖。

虽然平均场的思想使壳模型取得了多方面的成功,但是它毕竟忽略了核子之间的剩余相互作用。所以,在20世纪50年代以后实验发现的一些新现象,如大电四极矩、磁矩、电磁跃迁几率,核激发的振动谱、转动谱,以及重偶核能谱中的能隙等,都不能用独立粒子壳模型解释。

1953年,著名物理学家玻尔(Aage Niels Bohr, 1922~2009)等人在壳模型的基础上,提出了原子核的集体模型,认为原子核内,除了核子在平均势场中的独立运动而形成壳层结构外,还存在一些核子的集体运动,而且,核子的独立运动与集体运动之间相互影响。核内一些核子的集体运动使得原子核发生了变形,从而产生了振动和转动。满壳核是球形的,满壳层外的核子有一定的运行轨道,因此,其分布就不会是球形的。这就会引起满壳内的核子分布形状发生变化。原因在于原子核内除平均场外,核子间还有剩余的相互作用,剩余作用引起核子之间关联。其中短程关联引起核子配对,描述这种关联的对模型可解释偶-偶核能谱中的能隙等现象。核子间的长程关联使核偏离球形、引起形变,从而原子核可以产生集体转动或振动;原子核大的电四极矩、电磁跃迁几率等就是这种集体运动的结果。集体模型解释了大量核转动能级的跃迁规律。为此,玻尔等人获得了1975年诺贝尔物理学奖。

核子到底为什么会结合能在一起?这还要从核子更深层次的结构说起。

原子核是由中子和质子两种费米子组成的微观量子体系。随着核物理,尤其是中高能核物理研究的深入,发现中子和质子并不是点状粒子,各自都有内部结构。它们是由夸克和胶子组成,夸克间通过交换胶子发生强相互作用(图6)。好像是胶子将夸克粘在一起而形成核子。这种强相互作用主要局限在夸克之间,但是,在核子之外也会有些残余,这就形成了核力。因此,核力不是一种基本的相互作用。弄清核子间相互作用即核力的性质,是核物理研究的终极目标之一。通过一个多世纪的持续努力,已对核力有了一些了解,但仍有很多不清楚的地方。

核力的有效力程约为3费米(1费米= $10^{-15}$ 米),主要是吸引的作用(见图7)。这一性质导致核力的饱和性,即原子核中某个核子只与临近的几个核子之间存在着核力的作用,与那些远离的核子之间没有核力作用。这可以解释平均结合能的饱和性,即每个核子的平均结合能最大只有8 MeV左右。另一方面,核力具有排斥芯,即当两核子的距离小于0.4费米时,相互之间出现排斥力,随着核子之间距离的进一步接近,排斥力急剧增加,从而阻止两核子继续接近,所以原子核具有不可压缩性,核密度接近常数。当然,如果施加更加巨大的外力,可以将核子间的距离进一步接近。两个核子重叠到一定程度后,就看不到独立的核子,会产生夸克-胶子等离子体。

大量实验数据表明,质子-质子、质子-中子、中子-中子之间的相互作用,除了电磁力不同之外,剩下的部分即核相互作用非常接近,可以说核力与核子带的电荷无关(电荷无关性)。

1935年汤川秀树提出,核子间相互作用是通过交换介子(由两个夸克组成)实现的,1947年发现了 $\pi$

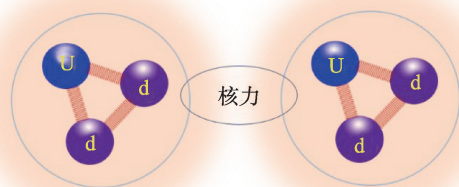


图6 夸克之间的强相互作用及核力的示意图

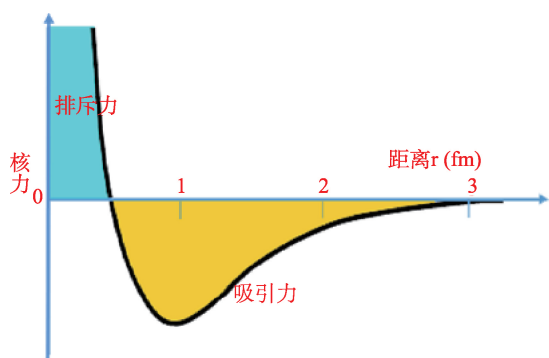


图7 核力与核子间距离的关系

介子,其性质恰好符合汤川的理论预言。这只是一  
种与实验结果一致的简单近似模拟。

### 3. 原子核的形状

原子核是由质子和中子组成的多体量子系统,每个核子都在不停地运动着,因此,原子核实际上没有像宏观物体那样的固定形状。

通过实验证明,中子、质子在核内有一定的密度分布,而且在绝大部分情况下,中子和质子的密度分布比较接近,如图8所示。由于核力的饱和性质,在内部核子密度接近常数,称为饱和密度。但是,在原子核的表面,核子分布的密度迅速下降,有的分布还不均匀,像地球表面那样具有一定形状,这就是所谓的原子核形状。

原子核基态形状变化展现出一定的周期性。核子数量和它们之间的相互作用决定了原子核的形状。质子和中子壳层完全被占满的原子核,即双幻核的基态是球形的,如 $^{40}\text{Ca}$ , $^{208}\text{Pb}$ 。像集体模型指出的那样,如果在满壳外的轨道上填充一些核子,或者将满壳内的核子激发到新的轨道,则会使核的形状偏离球形。满壳层外核子数目较少时,会变为橄榄型(长椭球);随填充的核子数越来越多,形变也逐渐增大,填满大壳的一半时,基态具有最大的形变,长、短轴之比可达1.3;继续填充更多价核子时,形变演化为三个轴长度都不同的椭球(三轴形变);在接近下一个满壳时,又变为轴对称的形状,但这时两长轴等长,即为扁椭球形状;该大壳填满时,核的形状又变为球形。原子核形变随核子数变化展现出某种周期性(图9)。

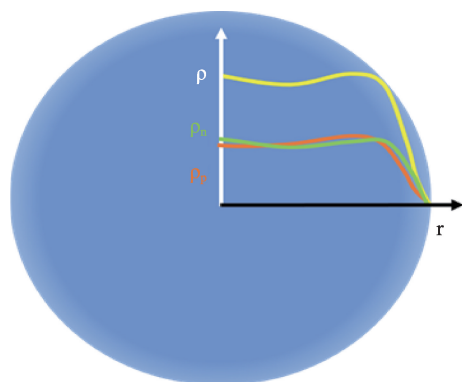


图8 原子核内核子密度分布示意图

任何三维形状,在数学上都可以用球谐函数 $Y_{lm}$ 展开,其中 $l=2,3\cdots$ 的成分分别叫做四极、八极形变……每种成分的幅度由 $\beta_{lm}$ 表示。这里说的椭球形状(包括长椭球、三轴椭球、扁椭球)均属于四极形变。

在某些核区,主要是在双幻核上方不远的中重( $Z\sim 56$ 、 $N\sim 88$ )和重核核区( $Z\sim 88$ 、 $N\sim 134$ ),原子核除了有四极形变成分,还会出现八极形变成分。原子的形变既有四极也有八极成分时,总体形状像梨一样,如图9最右下方所示。

原子核那么小,如何判断它的形状呢?一个办法就是实验测量原子核的电多极矩。电四极矩是表征核电荷分布偏离球对称程度的重要参数。原子核的电势可以用一个单极子电势(球形)与四极子电势及八极子的电势(常被忽略)等之和来描述,所以原子核的电势分布会随其形状而变化。球形核的电多极矩为零,具有四极形变的核,它的电四极矩不为零,而且形变越大,电四极矩越大。另外,早期通过电子散射实验,测量了稳定核内的电荷分布,也能推测核的形状。近来也利用更高能量的重离子碰撞,来确定碰撞核的核子密度分布,从而确定核的形状。

再者,球形核与形变核的激发态表现出明显的差异。球形核只能激发出看起来不规则的单粒子态;而有四极形变的核可以发生转动,它们的激发态具有非常规则的转动能级带结构;近球形核有围绕球形的振动激发态。

#### 形状共存

在一个原子核内,少数核子从一个壳层被激到

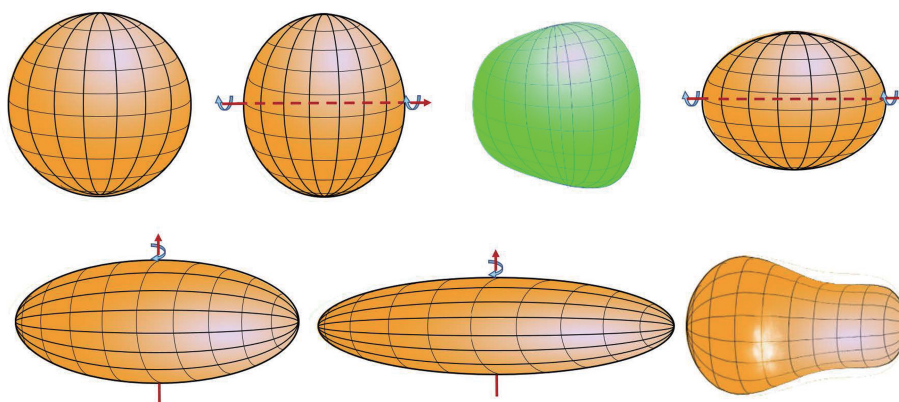


图9 球形、长椭球、三轴椭球、扁椭球 2:1长椭球,3:1长椭球,八极形变

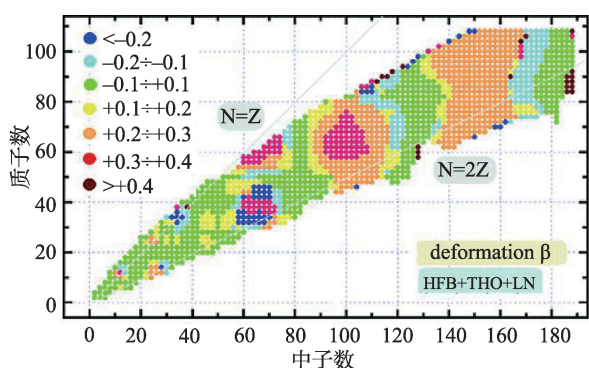


图10 理论计算的核素四极形变大小一览表

另一个壳层,由于占据的量子轨道不同,这个核会出现能量也较低的不同形状,这种现象叫做形状共存。一个典型的例子是 $^{186}\text{Pb}$ ,实验上观测到的三个自旋都为 $0^+$ 的低位态,它们对应三种不同形状:基态(第一个 $0^+$ 态)为球形,第二个 $0^+$ 态为扁椭球,第三个 $0^+$ 态为长椭球,如图12所示。

六十多年前理论上就预言了,在某些极端条件下,如高激发能、高角动量量子态,某些原子核可能呈现出非常奇异的形状,如棒形、环形等(图13),但目前尚无确凿的实验证据支持这些预言。例如 $^{12}\text{C}$ 具有三 $\alpha$ 结构,基态时三个 $\alpha$ 在同一平面内呈三角形,而在非常高激发状态时,三个 $\alpha$ 会排成一条。 $^{28}\text{Si}$ 处

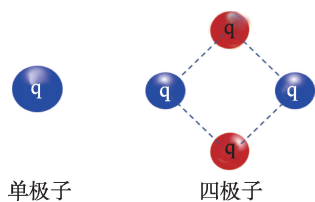


图11 电单极子和电四极子

在高激发状态时,组成它的7个 $\alpha$ 可以形成一个环形结构。目前实验上正在探寻这些理论预言的结构。

### 晕核

随实验技术的发展,研究对象向远离稳定线的核区逐渐扩展,在轻质量核的滴线附近,发现了一种具有晕结构的原子核,即由核芯与其外围的晕核子组成的核。例如 $^6\text{Li}$ 是由核芯 $^4\text{He}$ 和外围的2个晕中子组成。早期利用弹原子核与稳定的靶原子核碰撞的几率大小(总截面—指以两个原子核半径之和( $R=r_0(A_1^{1/3}+A_2^{1/3})$ 为半径的圆面积)判断一个弹原子核是否具有晕结构。从碰撞几率可以推知弹原子核的半径,如果弹核半径出现异常大的情况,就认

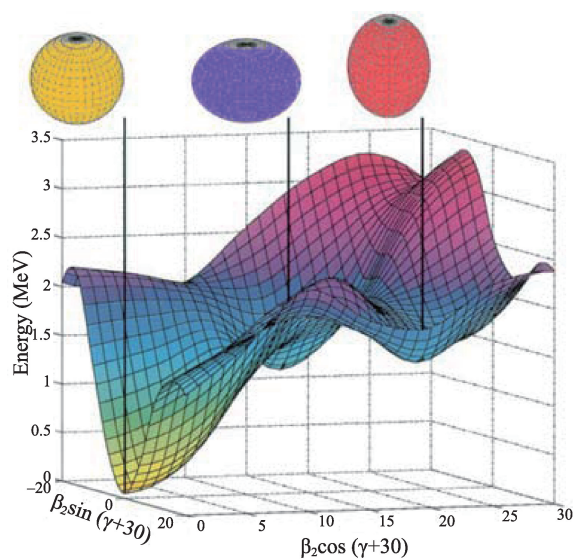


图12  $^{186}\text{Pb}$ 中三个 $0^+$ 态对应的形状分别为球形、扁椭球和长椭球(Nature 405, (2000))p430



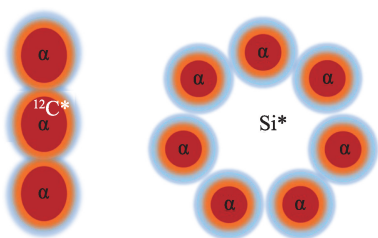


图13 原子核的极端形状 (a)棒形,(b)环形

为该原子核有晕结构,如图14中 ${}^6,8\text{He}$ 、 ${}^{11}\text{Li}$ 、 ${}^{11,12,14}\text{Be}$ 、 ${}^{17}\text{B}$ 、 ${}^{17}\text{Ne}$ 等。后来又发展了其他实验方法来确定一个原子核是否有晕结构。目前已经在实验上观察到了一批原子核具有质子晕或中子晕结构。理论研究认为,在距离核芯较远的轨道上,存在一些单粒子共振态,处于这些共振态上的核子会与核芯束缚在一起形成具有晕结构的一个原子核,尽管束缚的力量非常弱。

### 轻原子核内核子的聚集-集团结构

大量的实验结果都表明,原子核内,特别是在比较轻的原子核,如从Li到Si等,其内部都存在明显的d、 ${}^3\text{He}$ 、 $\alpha$ 集团。如 ${}^6\text{Li}$ 可分为d+ $\alpha$ , ${}^{12}\text{C}$ 可看作由3个 $\alpha$ 组成, ${}^{24}\text{Mg}$ 由6个 $\alpha$ 组成,等等。由于 $\alpha$ 集团结合得比较紧密,在核内出现的几率就更大些,因此,理论上核内对 $\alpha$ 集团的形成研究得比较多。在很重的原子核中, $\alpha$ 衰变是常见的一种衰变方式,这也表明重核中也有 $\alpha$ 集团的存在,不过都出现在原子核的表面范围。理论研究指出,在核子密度为核内饱和密度的1/3时,更有利于核子集团的生成。原子核内核子集团的存在,对原子核结构和原子核反应都有重要的影响。

总之,尽管原子核是一个非常非常小的体系,但是,正如常说的麻雀虽小五脏俱全,它不但是由一定比例的质子和中子组成。质子和中子比例合适的原子核非常稳定,中子过多或过少的原子核都是不稳定的,会发生衰变。质子和中子总数过多的原子核也是不稳定的。在原子核内,核子都在不停的运动,使得从整体上看,随核子数的变化和外部能量的输入,不仅可以改变其结构,外貌,也可以改变其能量状态。现在,对原子核的结构和性质有了很多的

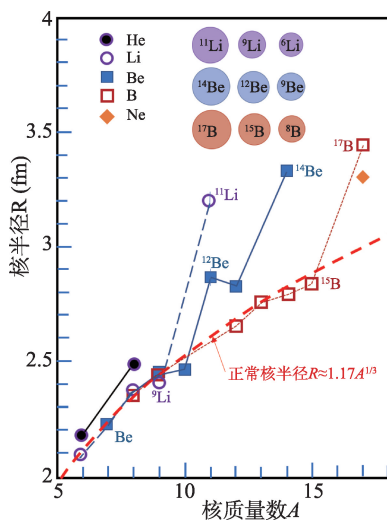


图14 一些同位素的核作用半径的变化 (I. Tanihata et al., J.Phys.G 22 (1996)157-198)

了解,但是还有很多细致的内容不是完全清楚。还需要进一步研究和探索,以便更好地掌握和利用它。

## 4. 不安分的原子核—核的衰变方式

目前核素图上已有3400多种核素(理论预言一共存在约7000~9000种),其中只有近250种是稳定的。其余都是不稳定的,处于基态的不稳定核可经 $\beta$ 衰变、 $\alpha$ 衰变、自发裂变、质子放射性等方式转化成其他核素,最终变为稳定的核素(见图15)。

发生衰变的原子核,称为母核,衰变后产生的原子核称为子核。原子核的能量最低的状态称为基态,能量比基态高的统称为激发态。

### 4.1 $\beta$ -衰变

前面介绍了核素图和核素图上的 $\beta$ 稳定线。对于 $A < 40$ 的原子核, $\beta$ 稳定线近似为直线,即中子数N与质子数Z之比(中质比), $N/Z \approx 1$ 。对于重核,核内质子数增多,库仑排斥作用增大了,就需要有更多的中子,才能使原子核稳定下来。如对于 ${}^{208}\text{Pb}$ ,它的中质比 $N/Z = 1.54$ ,即 ${}^{208}\text{Pb}$ 中的中子数比质子数多出一半多。

在核素图的丰中子一侧,核素具有 $\beta$ 放射性,即核内的一个中子变成质子,同时放出电子和电子反中微子的过程,如图16所示。

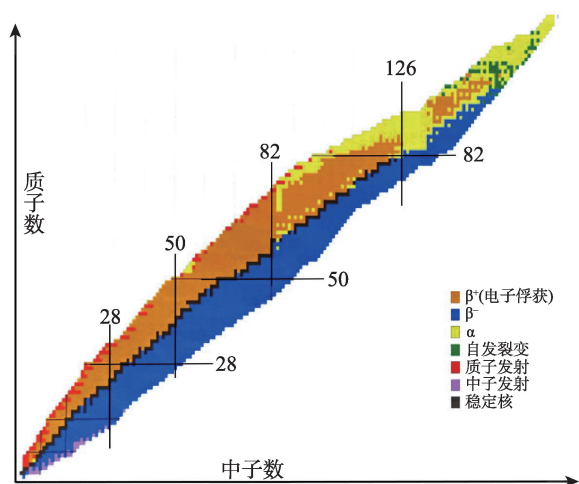


图15 原子核的各种放射性

核素图中丰质子一侧的核素会发生 $\beta^+$ 衰变：一个质子变成中子，同时放出正电子和电子中微子的过程，如图17所示；或俘获电子：一个核外电子被一个核内质子俘获变为中子并放出电子中微子，如图18所示。当然，距离原子核最近的内层轨道电子被俘获的几率最大，它被俘获后出现的空位，则由外层电子来填充，同时发射X射线，以带走两层轨道电子之间的能量差。

### $\beta$ -缓发质子(中子)衰变

离 $\beta$ 稳定线比较远的丰质子(丰中子)核素，其母核基态与子核基态在能量上差别很大，母核可能会衰变到子核的某个激发态。如果这个激发态的能量很高，甚至高于子核的质子分离能 $S_p$  (中子分离能 $S_n$ )，这时，子核就有可能直接发射质子(中子)。这种连续的衰变方式被称为 $\beta$ 缓发质子(中子)。

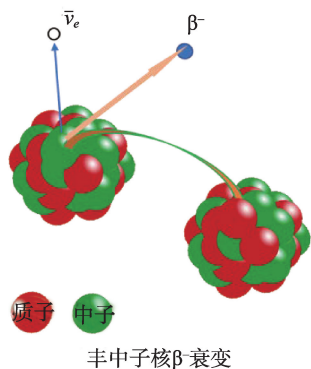


图16  $\beta^-$ 衰变示意图

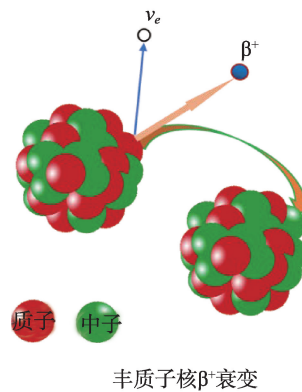


图17  $\beta^+$ 衰变示意图

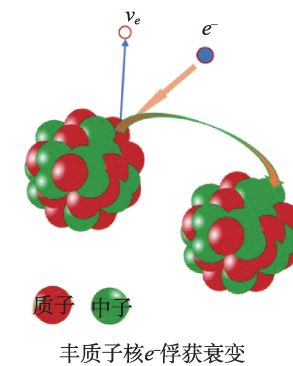


图18 丰质子核电子俘获

## 4.2 带电粒子放射性

原子核从基态或寿命较长的激发态(同核异能态)自发放出质子、 $\alpha$ 粒子或重离子的过程统称为带电粒子放射性。

### $\alpha$ 衰变

$\alpha$ 衰变是原子核自发地放射出 $\alpha$ 粒子( $^4\text{He}$ 离子)而发生的转变。 $\alpha$ 粒子是一种特别稳定的轻原子核，在 $A < 12$ 核区，它的比结合能最大。伽莫夫(George Gamow 1904~1968)提出， $\alpha$ 衰变可以看作是一个两步过程，首先在母核内先形成一个 $\alpha$ 粒子(当然几率非常小)，并自由地在势阱内高速运动；然后这个 $\alpha$ 粒子偶然会穿过库仑势垒跑出核外，成为自由的粒子，如图21所示。从经典观点看，在势阱中的 $\alpha$ 粒子，能量没有势垒高，是不可能跳出阱外的。但根据量子力学原理， $\alpha$ 粒子具有波动性，在与位垒碰撞时，就会有一定的几率穿过位垒，从而发射出去。这种现象称为“隧穿效应”。

自然界中有几个天然 $\alpha$ 衰变链,其中一个从 $^{238}\text{U}$ 开始的,经过一系列的 $\alpha$ -衰变和 $\beta$ -衰变,直到稳定的 $^{206}\text{Pb}$ 为止(见图22)。还有一个是由 $^{232}\text{Th}$ 开始的,一直衰变到 $^{208}\text{Pb}$ 为止。通常在地下水中和空气中偶然测到的极少量的 $\alpha$ 粒子一般是Rn衰变产生的。

### 质子衰变

一般来讲,原子核内质子的结合能都比较高,只有到达“质子滴线”附近时,最后一个质子的结合能才变得很小,甚至为零。但是由于库仑势垒的存在,质子也不会立刻跑出原子核,因此,具有一定的半衰期。只有在质子滴线外的原子核,其最后一个质子的分离能小于零,才可能发生滴出核外的情况,即直接质子发射。与 $\alpha$ 衰变相比,质子衰变的半衰期对质子带走的角动量敏感得多,因此从直接质子放射性测量可以提取衰变前质子在母核中所处量子态信息。

还有一个奇怪的现象,一个质子滴线外的原子核,不能直接发射一个质子,却能同时发射两个质

子,称为双质子发射。其原因是,由于对能的影响,核中质子(中子)成对时结合能更大,更稳定。元素的质子数为偶数时,其质子滴线的位置是最后一对质子的结合能 $S_{2p}$ 为零的那些同位素,称为双质子滴线,它比单质子滴线离稳定线更远。

### 重离子放射性

1981年,北京大学卢希庭老师在他编写的《原子核物理》一书中,就预言重原子核,如 $^{223,224}\text{Ra}$ 中,可能存在重离子放射性。1984年,英国物理学家在实验中观察到 $^{223}\text{Ra}$ 原子核自发地放射出 $^{14}\text{C}$ 。随后许多实验都观测到原子核发射更重的离子, $^{232}\text{U}$ 可以发射 $^{24}\text{Ne}$ , $^{234}\text{U}$ 可以发射 $^{24}\text{Ne}$ 和 $^{28}\text{Mg}$ , $^{237}\text{Np}$ 可以发射 $^{30}\text{Mg}$ , $^{240}\text{Pu}$ 和 $^{241}\text{Am}$ 可以发射 $^{34}\text{Si}$ ,等等。这称为重离子放射性。放射出的重离子能量大约分布在30至80 MeV范围。重离子放射性也可以看作是一个两步过程。由于重离子在核内形成的概率小得多、需要穿透很高的库仑位垒。因此,与 $\alpha$ 衰变相比,重离子放射性的几率极低。

实验测得的重离子衰变相对于 $\alpha$ 衰变的分支比大多在 $10^{-9}$ 至 $10^{-13}$ 范围,有的甚至小于 $10^{-15}$ 。

### 4.3 重核的自发裂变

重原子核发生大的变形,并像 $\alpha$ 衰变一样能够穿透一个势垒,分裂为两个碎片,同时放出几个中子和150~200 MeV能量,这一过程被称为原子核自发裂变(图24)。一个原子核的自发裂变几率的大小与它裂变时需要穿越的势垒高度关系密切。势垒

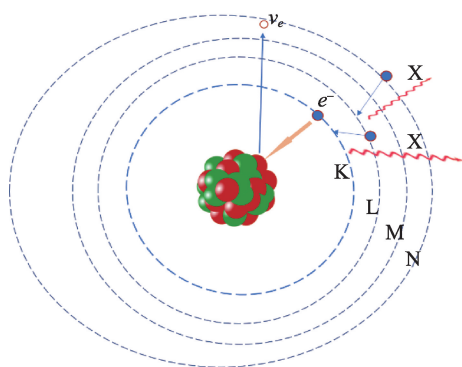


图19 电子俘获(EC)过程伴随发射X射线

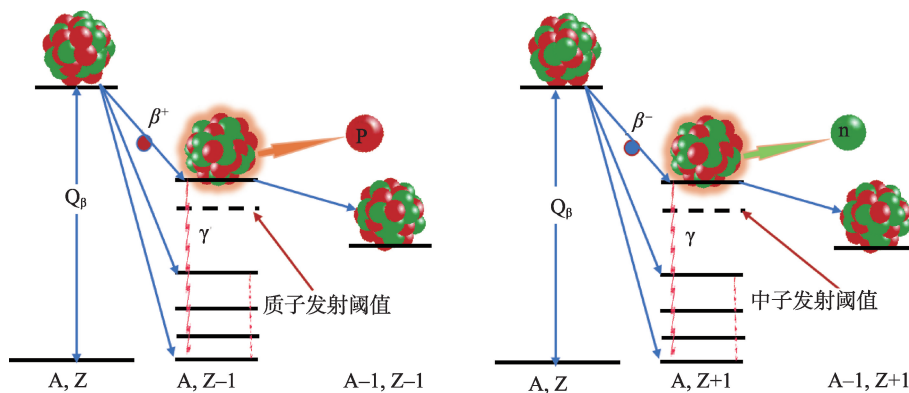


图20  $\beta$ 缓发中子衰变示意图



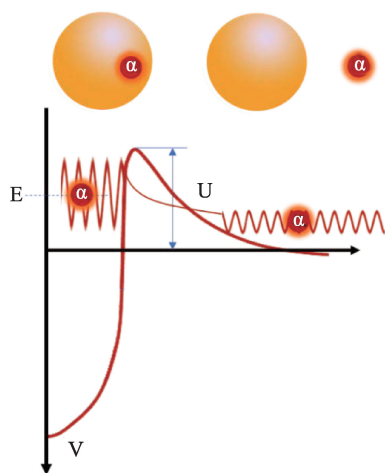


图21 α衰变的‘量子隧穿’效应示意图

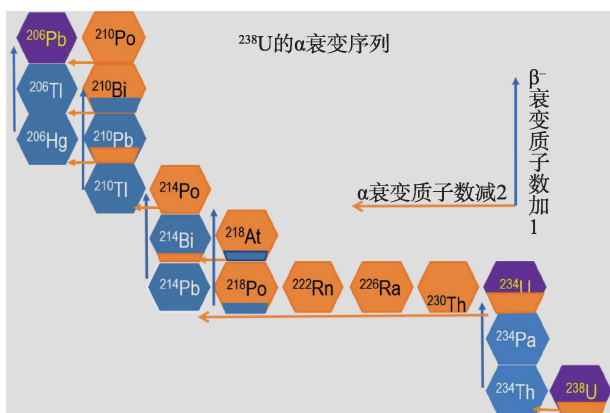


图22 <sup>238</sup>U天然α衰变链

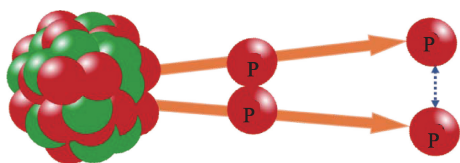


图23 双质子放射性

越高,几率越小。原子核液滴模型给出了势垒高度的近似表达式:  $E_b = 0.83(1 - 0.219Z^2/A)^3 E_s$ , 其中  $E_s$  时表面能。由此可以看出,随着  $Z^2/A$  的增加,自发裂变几率迅速上升。例如 <sup>235</sup>U ( $Z=92$ ) 的自发裂变比例只占2.8%,而 <sup>252</sup>Cf ( $Z=98$ ) 的自发裂变份额占到99.7%。

由于重核的中子数远大于质子数,所以,裂变碎片都是丰中子核素,会经过一系列β衰变最终变成稳定核。自发裂变发生的难易程度取决于裂变势垒的高度。天然元素的自发裂变仅见于铀和钚的同位素。与α衰变相比,铀和钚的自发裂变的几率小得

多,如 <sup>238</sup>U 的α衰变几率是自发裂变的  $10^8$  倍。而一些人造超铀重同位素的自发裂变的几率会大得多,如 <sup>254</sup>Cf ( $Z=98$ ) 的α衰变只占0.31%,自发裂变占99.69%。

原子核的自发裂变时会放出大量的能量,主要来源于两个碎片的库仑能。

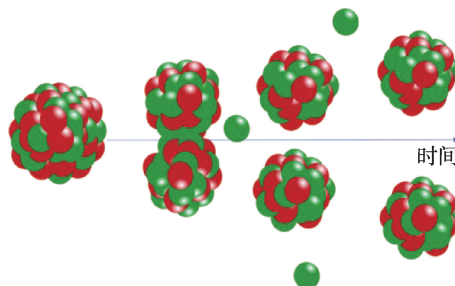


图24 自发裂变示意图

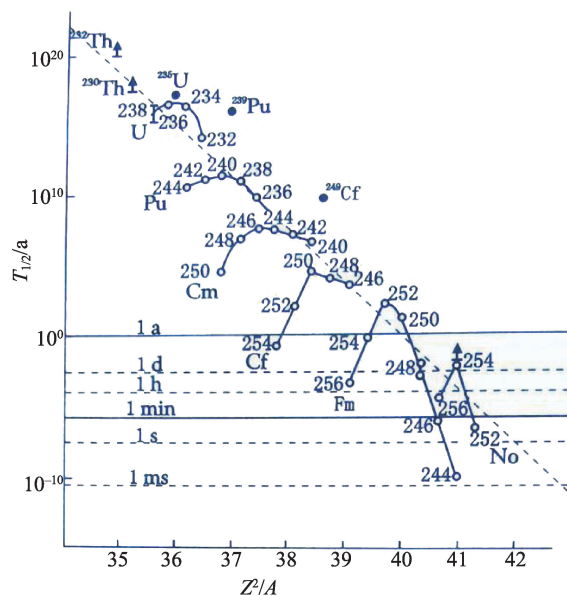


图25 一些核的自发裂变半衰期

总之,原子核是由一定比例的质子和中子组成的一个非常非常小的体系,质子和中子比例合适的原子核非常稳定,中子过多或过少,或者质子和中子总数过多的原子核都是不稳定的,会发生各种形式的衰变。在原子核内,核子都在不停地运动,使得从整体上看,随核子数的变化和外部能量的输入,不仅可以改变其结构,形状,也可以改变其能量状态。现在,对原子核的结构和性质有了很多的了解,但是还有很多细致的内容不是完全清楚。还需要进一步研究和探索,以便更好地掌握和利用它。