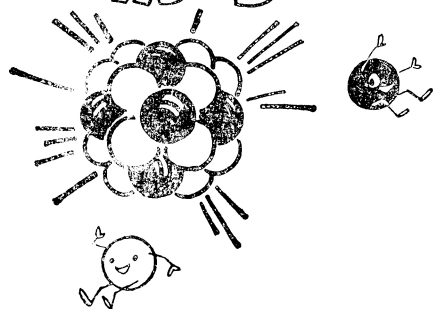


原子核的性质和核结构模型



吴慧芳

1911年卢瑟福用 α 粒子作为炮弹轰击金属薄箔发现了原子核。进一步又用 α 粒子轰击原子核，在1919年发现了原子核内部有质子。到1932年，恰德威克又发现了原子核内部还有中子。同年海森堡提出原子核是由质子和中子组成的。为了认识原子核的性质和结构，人们继续不断地用质子、电子、 π 介子等作炮弹去轰击各种原子核，发现原子核具有各种各样的奇特性。进入六十年代以后，由于高能加速器不断发展，炮弹的能量愈来愈高，又进一步揭示出原子核的许多新性质和原子核结构中的许多新形态，逐渐形成一个分支——高能原子核物理。

大家知道，原子的半径大约一亿分之一厘米（即 10^{-8} 厘米），已经很小了，然而原子核还要小得多，它的半径只有原子的十万分之一到万分之一。原子核在原子中虽然只占那么小的体积，它的质量却几乎是全部原子的质量。例如最轻的原子核是外面电子质量的一千八百多倍，最重的核则是电子的几十万倍。

在这样极小的体积内，质子、中子是紧紧地束缚在一起的，要使它们彼此分开，必须对原子核供给能量。从原子核中拉散组成它的全部粒子所需要的能量叫做核的结合能，用 B 表示。原子核中有 A 个核子（中子、

质子统称为核子），那么拉走每一个核子所需的能量就是 $f = B/A$ 。从实验上知道，稳定核的每个核子的结合能 f 与原子序数 A 的关系如图1。可以看到对中等核和重核来说，每个核子的结合能近似地不变，并且约为8 MeV。这种情况有些像固体或液体，它们汽化时所需的热量与被汽化的质量成正比。图1简单的曲线还可解释重原子核的裂变反应和轻原子核的聚变反应。

质子和中子是如何结合成原子核的？这牵涉到质子和中子间的相互作用性质。目前虽然知道它们之间的相互作用极强，作用范围极小，仅在原子核大小的范围内起作用，超出此范围就失去作用，然而对相互作用的详细性质以及处理方法还了解不多，因此，从核力的基本理论出发描述原子核，目前还有许多困难。从1932年以来，人们一直采用模型的方法来直观地描述原子核。这些模型都在一定程度上反映了原子核的结构，下面简单地介绍几种原子核结构的模型。

液滴模型

实验表明原子核的半径与原子核的核子数 A 的立方根成正比，如果它近似一个球状，那么它的体积就与核子数 A 成正比，整个原子核就可看成一个液滴，核子数愈多，液滴愈大。前面还提到核结合能与核内的核子数近似成正比，所以原子核可看成一个密度很大（ 10^{14} 克/厘米³）的几乎不可压缩的液体。这就是1936年由尼·玻尔首先提出的原子核的液滴模型。

根据原子核的液滴模

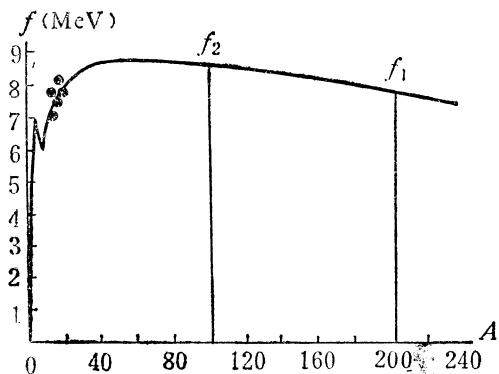


图1 稳定核的每个核子平均结合能 f 与 A 的关系

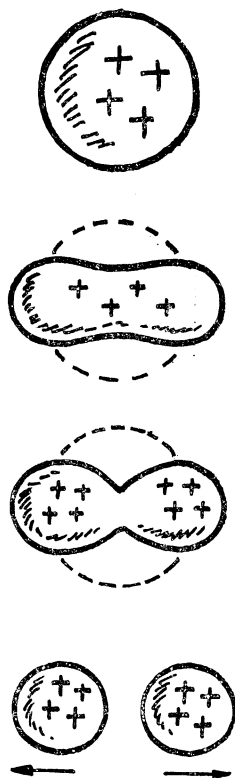


图2 液滴振荡变形—裂变变

型,给出了核基态的单个核子结合能 f 的半径经验公式,比较满意地解释了 $f \sim A$ 的关系的实验结果.液滴模型也用来解释非激发核和核反应的某些性质.

在液滴模型里,原子核的基态描述为球形的.原子核的激发态可以相当于液滴的振荡运动,要发生形变,形变大到一定程度就分裂为两个液滴,这就是原子核的裂变(图 2).

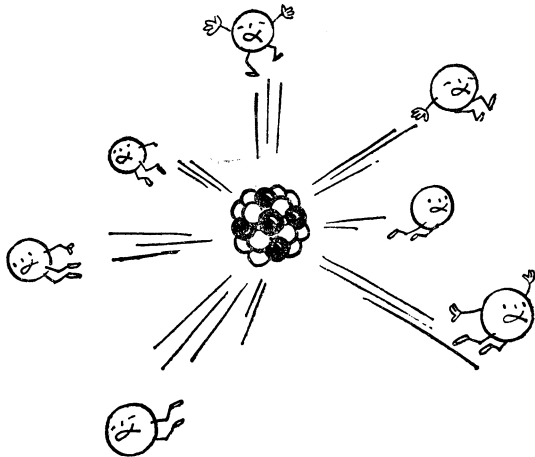


图 3 天然放射性的原子核放射 α 粒子

α 粒子模型

天然放射性的原子核会放射出 α 粒子,人们很自然地问道,在原子核中, α 粒子是否可成为一个坚固的集团而存在? α 粒子模型回答了这一问题,它假设两个中子和两个质子组成的 α 集团是比较坚固的,它们在核中作为一个整体运动着,原子核好像是由 α 粒子集团组成的“分子”,所以 α 粒子模型又叫集团模型.由 α 粒子模型可计算结合能和能谱,特别是对于 $N =$

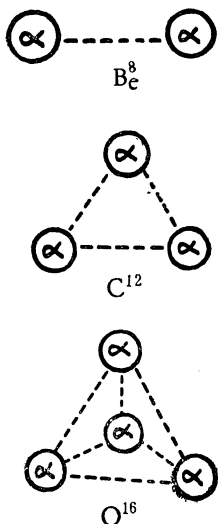


图 4 α -核.联系两个 α 粒子的线叫键

Z (N 为核中的中子数, Z 为核中的质子数)的偶偶核(N 和 Z 都是偶数)可以算得较好,它们是由整数个 α 粒子组成,叫做“ α -核”.例如: B_8^8 是由两个 α 粒子组成, C^{12} 是由三个 α 粒子所组成, O^{16} 是由四个 α 粒子所组成,如图 4. 由整数个 α 粒子组成的原子核的结合能之中,当忽略随 α 粒子而增加的静电能量时,大部分(在轻核中约占 90%)来自于 α 粒子本身的结合能,而余下的部分(约 10%)来源于 α 粒子之间的相互作用— α 粒子

之间的键的能量.除 B_8^8 以外(注意: B_8^8 是不稳定的,特别容易衰变成两个 α), α 粒子之间的键能几乎是一个常数(约为 2.4 MeV), C^{12} 有三个键, O^{16} 有六个键.另外,在不是整数个 α 粒子组成的原子核里面,不构成 α 粒子的多余的核子,给出较小的结合能,所以 α 核比邻近的核要稳定.

显然, α 粒子模型对于不是由整数个 α 粒子组成的原子核,尤其是奇 A 核(核子数 A 为奇数的核)的性质,不能很好地解释.对于轻核特别是 α 核,比较有用.

壳层模型

“壳层”的概念是从原子模型中借用来的.在原子壳层模型理论中,假设每个电子在其余电子和原子核的某种平均场(哈特里—福克自洽场)内运动,就可以得出电子所能占据的一系列分立的能量状态,即所谓电子的“轨道”.电子是费米子,服从费米统计,所以一个轨道上只能有两个自旋方向相反的电子.如果一个轨道已被二个自旋方向相反的电子占据,那末,其它的电子就只能在别的轨道上运动,这就是泡利不相容原理(图 5).按照泡利不相容原理,电子填满一定数目的轨道后,就构成一个壳层.原子的基态就是电子从最低的能级轨道顺次往上填所得到的最低的能量状态.电子完全填满一个或几个壳层的原子是最稳定的.我们知道,电子数目是 2、10、18、36、54 和 86 的情况气体原子就是这样填充的.

在原子核内也有很类似于原子壳层效应的实验现象.1934 年已从原子核的丰度及稳定性发现了原子核性质的周期性.当原子核内中子数或质子数为 2、8、20、50、82、126 时,这些核比较稳定,这些奇特的数就

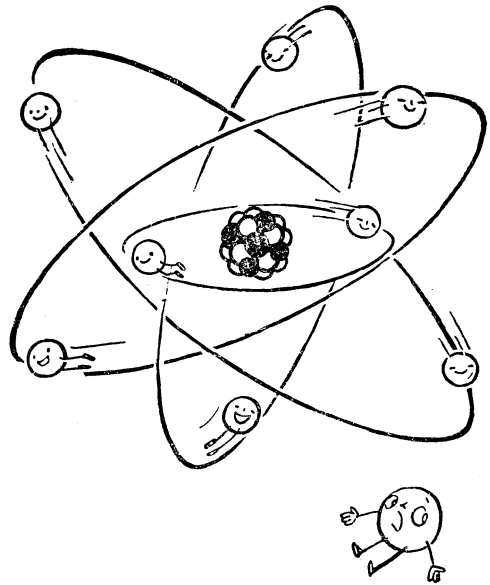


图 5

叫做“幻数”。直至1948年,整理分析了大量的实验材料后,才肯定了幻数的存在。中子数、质子数均为幻数的核叫做双幻核,它们特别稳定,例如: H_2^2 , O_8^8 , Ca_{20}^{40} , Pb_{82}^{208} , 其中,每个元素右上角的数字指出原子序数 A , 右下角标出质子数 Z 。这些幻核类似惰性气体,在这些实验事实基础上提出了原子核的壳层模型。

核壳层模型假定核子在核内的运动可近似地看成是它在某种核平均自洽场中的运动。在最低级近似中,可以把核平均场看作是固定的,并在这样一个场中研究单个核子的运动,所以核壳层模型又叫独立粒子运动模型。1949年梅逸-凉孙用包含有自旋-轨道耦合相互作用的一个平均自洽场计算了核内核子的运动,得到了中子、质子在核内的能级的壳层分布,幻数则是填满核的各个壳层所需的粒子数目。

壳层模型是研究核结构的基础,根据壳层模型,可以解释中子、质子数目均为偶数的偶偶核的自旋与宇称,也可以基本上解释奇 A 核的基态自旋与宇称,对于中子、质子数目均为奇数的奇奇核的自旋和宇称,也给出了一些有用的规则。在双满壳层附近,壳层模型能解释核能谱。虽然壳层模型已有了不少成就,但是由于壳层模型实际上是一个单粒子运动的模型,忽略了核子之间的剩余相互作用(即平均场以外的核子之间的相互作用),过于简单,所以它本身也有很大的局限性。1951年以后逐渐出现了不少新的实验事实是壳层模型无能为力的,例如:大的电四极矩,磁矩以及 γ 跃迁几率,某些能级系的简单规律,总结合能等,都不能用壳层模型很好地解释。尤其是对满壳层以外的核,需要考虑除了单粒子运动形态以外的其它运动形态。

集体模型

从经典电动力学我们知道,电偶极矩和电四极矩的存在,反映了电荷的分布偏离球对称。在原子核中,由于波函数的对称性,不可能有电偶极矩,因此原子核的球形不对称由电四极矩来度量。原子核具有电四极矩,尤其是在稀土元素中巨大的电四极矩说明原子核不是球形的,和球对称有很大的偏离。很难设想,这样大的形变可以由一个质子或几个质子波函数的非球形性质来说明,核波函数的变形可能要涉及一切质子或至少涉及大多数质子,也就是说,原子核具有集体运动的特征。 $A \sim 24$, $150 \leq A \leq 190$, $A > 225$ 的远离满壳层的核有比较大的永久形变。在这种区域内偶偶核的低激发态能谱有很强的规律性,由基态而上的能级的自旋与宇称总是 0^+ , 2^+ , 4^+ , 6^+ , 8^+ , 而且能级间距离之比是:

$$E_0 : E_2 : E_4 : E_6 : E_8 = 0 : 1 : 3 : 3 : 7 : 12$$

这些能级的比例,正好像原子核作为一个整体在转动,其转动能量经量子化后就给出这些能级比。例如,分子的转动谱就有这个特点。所以原子核并不能简单地

看作单个粒子填充的图象,它还具有集体运动的特点。

此外,在离满壳层不太远的 $60 < A < 50$ 及 $195 < A < 220$ 区域中,发现第二激发态多半是 2^+ , 有时是 4^+ 或 0^+ , 而且 $E_2/E_1 \approx 2.2$ 。这种情况有点类似于分子中的振动能谱,也是一种集体运动的特点。

以上的实验事实说明了核内核子的运动除单粒子运动方式外,还存在某些集体运动的方式。1953年阿·玻尔提出了原子核的集体模型。集体模型考虑了处在满壳层以外的核子运动,它引起了核“实”(即满壳层)壳层结构的变形,因此集体模型中所考虑的核子的自洽场可以是非球对称的,而核实的形变引起了和液滴类似的集体振荡。核实的形变随着满壳外核子数的增加而很快地变大,大约在核内核子填到一个壳层的 $2/3$ 时达到极大值。然后,在接近下一个满壳层时,某些核子的运动将阻碍其余核子所引起的形变,总的形变又开始减少。待到壳层填满,形变就完全消失,自洽场又是球形的,从而再次过渡到壳层模型。集体模型既反映了壳层模型所不能反映的集体运动的一面,又与壳层模型相关,所以有时把它叫做综合模型。

集体模型可以给出与实验相符合的低激发态的转动能谱和振动能谱,它也成功地解释了核的大的电四极矩、磁矩及 γ 跃迁几率。

超导模型

在五十年代以后,有关核能谱的实验材料愈来愈多。观察到奇 A 核的第一激发态的能量(取基态能量为0) $\xi = 50 \times A^{-1} \text{MeV}$, 若取 $A \approx 200$, 则 $\xi = 0.25 \text{MeV}$ 。显然, ξ 即单粒子能级间距。若用独立粒子运动图象来描述原子核,则激发中子和质子的可能性是相同的,估计偶偶核第一激发态能量也为 δ 的数量级。然而实验观察到重的偶偶核第一激发态能量是 1MeV , 比单粒子能级间距 δ 大许多,这样一个大的能量间隔通常叫做“能隙”。偶偶核的第一激发态能量总比相邻的奇 A 核以及奇奇核的高,这是和实验上早已知道的奇 A 核的质量比相邻的偶偶核的质量大 $2\Delta \approx 12A^{-1/2} \text{MeV}$ (这叫做奇偶质量差)有关的。这些实验事实都说明了偶偶核比奇 A 核稳定得多,因而表明核子在核内两两成对时结合得非常牢固。偶偶核基态的粒子两两全配成对,奇 A 核基态有一个粒子不配成对,奇奇核基态有两个粒子不配成对。成对的两个核子强有力地相互吸引着,这个力叫做对偶力,它是除了平均场以外的一种剩余相互作用。从配对的图象出发,可以算出奇偶质量差 $B = 2\Delta$ 。对偶力导致大量的独立粒子运动状态之间的耦合,即所谓的组态混合,产生了集体相干效应,压低了基态的能量,产生了能隙。但是这样大量的组态混合在数学处理上是很复杂的,需要找一个比较简单的近似处理方法。由于原子核中的这个能隙和超导金属电子激发中所观察到的能隙相似,所以在

1957年巴丁、库珀、徐弗瑞等人提出了处理超导金属的著名的超导理论以后,1958年阿·玻尔和摩特利逊就很快地将这种超导理论首先应用于原子核来处理核子之间的对偶相互作用,这就是原子核的超导模型,也叫做对关联模型。这个模型不但成功地解释了能隙,而且给出了与实验符合的原子核的转动惯量。

除了上面所介绍的几种模型外,还有一些描述原子核的模型,例如为了描述原子核反应,人们提出了光学模型,复合核模型等。所有这些模型,都是随着核物理实验的进展,随着对原子核性质认识的深入而逐步地提出来的。在三十年代,人们从结合能的实验中认识到原子核内密度几乎是不变的,原子核的体积与核子数 A 成正比,于是提出了液滴模型;从原子核的 α 衰变,提出了 α 粒子模型;在实验上积累了较多的原子核的基态数据,特别是肯定了幻数的存在以后,人们又在1949年提出原子核的单粒子运动的壳层模型;然后,由于实验揭示出原子核的激发态性质,特别是转动能谱和振动能谱,认识到原子核集体运动的特点,提出

了集体模型;由于实验上对重偶核能谱的特点的分析,又在1958年提出了超导模型。这样,随着实验的向前发展,人们从一个方面到多方面,从片面到全面,逐步深入地对原子核的结构有所认识。每一种模型都在一定的条件和范围内是正确的,又各自有它的局限性,但它们彼此之间互相补充。原子核的每一种模型只是抓住了一定条件下的主要矛盾,反映了原子核的某些侧面。所有这些侧面总和就构成了对原子核结构的一个相对正确的认识。然而,人们并不满足将现有的原子核模型简单地汇总起来,去解释各种实验现象。六十年代以后,人们引入了唯象的核子之间的结合力,在自洽场方法的基础上,考虑剩余相互作用,发展了一套多体方法,给出了不同情况下的各种不同模型所描述的运动形态,朝着给出原子核的一个统一模型方向,取得了可喜的进展。随着实验现象的不断增加,尤其是高能核物理实验技术的发展,高能核物理的实验现象越来越多,最终地提出一个统一的模型来反映原子核是完全可能的。(题图、插图:吴文渊)