

# 奇 异 核 漫 谈

周 书 华

一八九六年放射性现象的发现，使人类第一次接收到来自原子核的信息。十五年以后，原子的有核模型出现了。到了一九三二年，发现了中子，这促使人们认识到原子核是由不带电的中子和带正电的质子所组成。

在核物理与核化学中，把由一定数目的质子与中子组成的原子核称为一种核素。至今已发现的核素约有二千七百种，其中仅有二百八十种左右是稳定的，也就是说，人们没有发现它们通过放射性衰变而转化为另一种核素的现象。还有很多核素，虽然能够通过放射 $\alpha$ 粒子（由两个质子和两个中子组成的氦原子核），或正、负 $\beta$ 射线（正电子或负电子），甚至通过自发裂变（重原子核自发地分裂成两个质量相近的碎片核）而变成其它的核素，但由于这些过程进行得非常缓慢，以至这些核素自它们在宇宙中形成到现在约 $8 \times 10^9$ 年的漫长时间里，还没有衰变完，仍然可以在自然界中找到它们。其余的更不稳定的核素在地壳中已不存在，只能人工地利用粒子加速器或反应堆通过原子核反应来生成。

对大量的核素所进行的研究表明，原子核的稳定性与组成该核素的中子数和质子数之比有很大关系。对于比较轻的核素，核中所含中子数与质子数相等或

接近相等时最稳定。随着核的加重，稳定核中的中子数与质子数之比越来越大。当质子数为100左右时，中子数比质子数多出百分之五十左右的核素才具有较高的稳定性。不稳定的核素，与稳定的核素相比，或者具有过多的中子（称富中子核），或者具有过多的质子（称缺中子核）。不稳定核素通常要发生正的或负的 $\beta$ 衰变而转变为中子数与质子数之比向稳定核靠近的核素。因为在 $\beta$ 衰变中，或者核中的一个质子变成中子（正 $\beta$ 衰变），或者核中的一个中子变成质子（负 $\beta$ 衰变），这样 $\beta$ 衰变就是原子核改变其中子数与质子数之比，从而向稳定的核素接近的最有效途径。中子数与质子数之比与稳定核素偏离不太大的核素，其 $\beta$ 衰变能量一般小于1MeV；半衰期以月或年为单位来度量。而这一比值与稳定核素相差较多的核素，其 $\beta$ 衰变能量一般为5--10MeV（对那些处在粒子稳定性极限上的核，可达20MeV）；而半衰期则要用秒和毫秒来度量。在粒子稳定性极限上的核，其最后一个中子（或质子）的结合能等于零，超过这一极限的核不能存在。具有不寻常的中子数与质子数之比的核素具有很多奇异的性质，又称做奇异核。如果把各种核素以其质子数为横坐标，而以其中子数为纵坐标，标在核素图上，那么就可看到，稳定核素大致上沿着一条线排列，该线

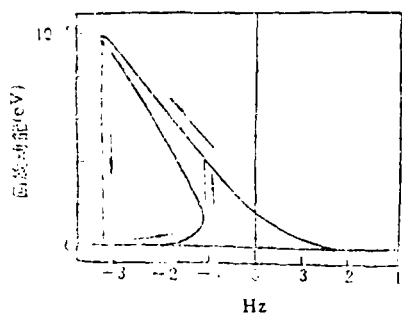


图3 回旋驱动频率漂移。

应地减少为  $\nu_r = \nu_0(1 - k/MOC^2)$ ， $k$  为电子动能。如果由于相对论引起的回旋频率的变化大于共振宽度时，通常的共振响应曲线就会被严重地破坏，呈现类似于磁滞特性的滞后效应。

巴方在共振回旋频率中引进了依赖于电子能量的

非线性效应，人们在驱动频率低于静止质量时的共振频率 $\nu_0$ 的区域内得到三个不同的响应曲线如图3所示。中间一个的响应明显地呈现不稳定，取决于从哪个方向扫过驱动频率。如果驱动频率从高到低调节，周期运动的电子从近共振的场中吸取很多的能量，在共振响应的峰值处突然降到零。相比之下，当从低频扫到高频时，人们只看到对驱动频率很小的响应。因此明显地呈现一个双稳的滞后现象。轨道电子对驱动频率的响应完全取决于驱动过程。实验中陷阱要浸在液氦中，以保持 $10^{-14}$ 托的高真空陷阱区。电子的轴向谐振频率为60MHz，回旋频率为164GHz。技术的关键是配制一个高信噪比，窄带宽的微波驱动源，使得其信号带宽小于相对论性所引起的回旋频率变化的宽度。他们用了一年半的时间才准备好以石英晶体振荡为基波的信号源，信噪比可达 $10^{14}$ 。1985年他们首次观察到在电子能量不超过10eV时的相对论性单电子滞后效应。实验结果与理论预言完全一致。

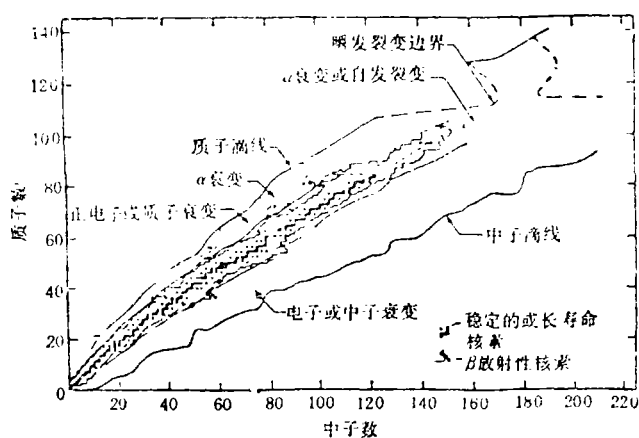


图1 示意性核素图

就是所谓的 $\beta$ 稳定线。由于位于这条线上的核素与它们的同位素相比,其基态的质量最低,所以这条线有时又叫做 $\beta$ 稳定谷。粗略地讲,奇异核位于离开 $\beta$ 稳定线 $\pm 4-10$ 个中子以外的区域,因而又称为远离 $\beta$ 稳定线的核素。中子数与质子数之比处于粒子稳定性极限上的核,在远离 $\beta$ 稳定线的两侧组成所谓的质子滴线(不增加中子时这些核的质子数不能再增加)和中子滴线(不增加质子时中子数不能再增加)。图1是一个示意性的核素图。

人类对核现象的研究是从稳定线附近的核逐步向奇异核区域扩展的。虽然在个别区域人们已经达到了粒子稳定性极限,例如: $^{26}\text{Al}$ 、 $^{31}\text{P}$ 和 $^{39}\text{Ca}$ 是这三种元素可能存在的最缺中子的同位素,即位于质子滴线上的核素,然而进行过较多研究的核素不到四百种。按照不同的理论预计,尚待发现的核素还有3,000—5,000种之多。近些年来,每年约有30—40种新核素被鉴别出来。此外,新的衰变方式的发现以及奇异的核形状的出现使得奇异核性质的研究成为信息丰富的领域之一。

这里,我们先介绍一下奇异核所特有的衰变方式。普通的放射性衰变类型: $\alpha$ 衰变、 $\beta$ 衰变(包括电子俘获过程)、 $\gamma$ 衰变(包括内转换过程)和自发裂变现象是人们早已熟知的了。对于奇异核来说,除上述这些方式外,还存在着一些奇异的衰变方式。这主要是由于奇异核 $\beta$ 衰变过程中可释放的能量高,如果某一奇异核(这里称先驱核)发生 $\beta$ 衰变后处于末态核(这里称发射体)的较高的激发态上,而这激发态的能量又高于某种核子或核子集团在该发射体中的结合能时,该发射体就可能以放射出相应的核子或核子集团的方式退激发,变成另外一种核(称子核)。这种由三代核素参与的两阶段的放射性过程中,第一阶段的 $\beta$ 衰变过程是较慢的过程,第二阶段的粒子发射是非常快的过程,但受到第一阶段 $\beta$ 衰变过程的延迟作用。实验上观测

到的这种粒子衰变的半衰期实际上是在第一阶段中 $\beta$ 衰变的半衰期。因此这种放射性现象又称 $\beta$ 延迟的粒子(中子、质子、 $\alpha$ 粒子等)发射或缓发粒子发射。大规模地寻找发射 $\alpha$ 粒子先驱核,并利用这类衰变方式研究奇异核的性质仅是近二十年来的事,但有趣的是,早在1916年卢瑟福和伍德在研究 $^{214}\text{Bi}$ 引起的荧光现象时,就已经探测到了 $\beta$ 延迟的 $\alpha$ 粒子发射。然而当时他们只是注意到,所探测到的大量的具有一定能量的 $\alpha$ 粒子中,混有少量的具有较高能量的(长射程的) $\alpha$ 粒子这一现象,并未理解其成因。直到1930年,伽莫夫才对这一现象做出正确的解释: $^{214}\text{Bi}$ 先发生 $\beta$ 衰变到 $^{214}\text{Po}$ ,如果 $^{214}\text{Po}$ 处在激发态,那么它可以放出一个带有该激发态能量的

$\alpha$ 粒子,由于这部分激发态能量转化成 $\alpha$ 粒子的动能,因而它的能量较高,这就是长射程的那部分 $\alpha$ 粒子。 $^{214}\text{Po}$ 也可能先发射 $\gamma$ 到基态,再发射一个具有较低能量的 $\alpha$ 粒子。换言之,这里指出了长射程的 $\alpha$ 粒子就是 $\beta$ 延迟的 $\alpha$ 粒子, $^{214}\text{Bi}$ 就是缓发 $\alpha$ 粒子的先驱核,处在激发态的 $^{214}\text{Po}$ 是发射体,而发射 $\alpha$ 粒子之后的末态核 $^{210}\text{Pb}$ 即是子核。1937年,列维森第一次人工地产生了 $\beta$ 延迟的 $\alpha$ 发射先驱核 $^7\text{Li}$ 。1939年,罗伯茨等人又在用中子轰击铀的实验中首次探测到了 $\beta$ 延迟的中子发射。又经过二十多年以后,卡尔诺克霍夫首次观测和鉴别出了 $\beta$ 延迟的质子发射先驱核。此后,先驱核的数量增加得很快。缓发粒子发射成为人们研究的主要放射性类型。利用这种放射性可以鉴别新生成的先驱核素并测量其半衰期和确定其质量。对于重核,可提供能级宽度和能级密度的平均性质以及到高激发区的 $\beta$ 衰变强度函数。对于轻核,分析缓发粒子谱是研究复杂的 $\beta$ 衰变的唯一方法。此外,缓发中子发射对于反应堆控制有重要的意义。

$\beta$ 延迟的裂变现象是首先在 $^{240}\text{Np}$ 中观测到的。这种奇异的放射性使人们可以将普通的自发裂变的研

究扩展到远离 $\beta$ 稳定线的区域。由于 $\beta$ 延迟的效应使这些核的寿命足够长,便于实验测量。关于远离稳定线的核的裂变位垒的知识,对于理解天体中核合成的主要机制之一的 $\gamma$ 过程是很有用的。近十多年来,实验技术的发展使人们能够研究位于粒子稳定性边缘的核,并发现了 $\beta$ 衰变后发射二个或三个核子的新的奇异衰变方式。位于富中子一边的 $^{11}\text{Li}$ 和位于缺中子一边的 $^{26}\text{Al}$ 是两个很好的例子。 $^{11}\text{Li}$ 由三个质子和八个中子组成,半衰期只有8.7毫秒。它的 $\beta$ 衰变能大于20MeV,很多种衰变方式都开放了。1979年9月欧洲核研究中心的一个研究组首先观测到它具有 $\beta$ 延迟的二个中子放射性,以后 $\beta$ 延迟的三个中子放射性也被观测到了。 $^{26}\text{Al}$ 具有13个

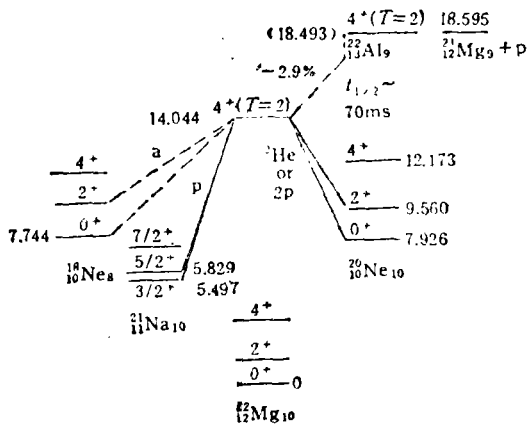


图2  $^{22}\text{Al}$ 的衰变纲图

质子和9个中子，半衰期为70毫秒，衰变能大于18MeV，也同时存在着几种衰变方式。1984年初，范伦兹-伯克利实验室在88英寸回旋加速器上工作的一小组发现了 $^{22}\text{Al}$ 的 $\beta$ 延迟的二质子发射现象。在这种衰变过程中，一个特殊的 $\beta$ 衰变道产生末态核 $^{22}\text{Mg}$ ，它发射两个质子，可被同时探测到。这种衰变有两种可能的机制：一是两个质子相继发射的非常快的二步过程，另一个是理论曾预言的双质子( $^2\text{He}$ )发射。对所发射的两个质子之间角关联的测量表明，所涉及的机制是复杂的，绝大部分事件表现为两步级联过程，但不能排除少量 $^2\text{He}$ 成分的存在。图2画出了 $^{22}\text{Al}$ 的衰变纲图。

最近在欧洲核研究中心的在线同位素分离器上又发现了 $^{11}\text{Li}$ 的 $\beta$ 延迟的 $^2\text{He}$ 和 $^2\text{H}$ 衰变。理论还预言，某些处在粒子稳定性边界的缺中子核可能通过直接发射一个质子而衰变，这与 $\alpha$ 衰变很相似。这种直接的质子放射性，最初是在 $^{20}\text{Co}$ 的一个长寿命同质异能态中观察到的。近来在两个稀土核 $^{147}\text{Tm}$ 和 $^{147}\text{Lu}$ 中观察到了基态质子放射性。实验工作者们正在努力寻找另一种为理论所预言的衰变方式——从基态直接发射两个质子的放射性。

在奇异衰变方式研究中的另一个重要进展是重离子放射性的发现。1984年，牛津大学的一个研究小组发现，通常以11.4天的半衰期进行 $\alpha$ 衰变的 $^{223}\text{Ra}$ ，偶尔会发射一个能量在30MeV左右的 $^{14}\text{C}$ 离子。这种发射的几率很小，大约在 $10^9$ 个衰变中只有一次。以后科学家们又发现了 $^{223}\text{Ra}$ 、 $^{224}\text{Ra}$ 和 $^{226}\text{Ra}$ 的 $^{14}\text{C}$ 衰变， $^{230}\text{Th}$ 、 $^{231}\text{Pa}$ 、 $^{232}\text{U}$ 、 $^{233}\text{U}$ 和 $^{234}\text{U}$ 的 $^{14}\text{C}$ 衰变以及 $^{234}\text{U}$ 的 $^{22}\text{Mg}$ 衰变。由于这种放射性和所发射的是组成了集团核子，从而反映着核内核子组合的方式，它又像在 $\alpha$ 衰变与自发裂变之间搭起了一座桥，因而对这一现象的理论解释工作及寻找新的重离子发射核的实验研究都进行得十分活跃。

现在我们来介绍一下研究奇异核过程中，另外一方面的发现——原子核的形状共存与超形变现象。在很长的一段时期内，人们曾认为所有的原子核都是球形的。后来了解到，某些核是形如橄榄球那样的长椭球。用新一代的粒子加速器和探测器系统所进行的实验表明，原子核还可以是扁椭球形的(像铁饼那样)，或三轴形的(像跑了一部分气的足球)，以及八极形的(像梨子一样)。各种形变共同作用的结果还可以使原子核具有更复杂的形状。最近发现的一些原子核，其形变比原来想像的原子核可能具有的形变要大得多。此外某些核竟可以有不同的形状。

早期的理论把原子核模型化为一个均匀带电的液滴，它的能量最低的状态是球形。1949年，梅耶提出了原子核的球形壳模型。这个模型用类似于处理原子中电子绕原子核转动的方法来处理原子核内核子的运动。这样中子和质子在核内各有一套分立的状态，对应着一套分立的能量和运动方式。这些状态的分布不是均匀的，而是结成组的，组与组之间有较大的能量间隙，形成所谓的壳层结构。我们知道，在原子中，填满一个电子壳层的原子对应于一种惰性化学元素；在核中，填满一个壳层的核是形状很难改变的硬的核。与各壳层对应的有一套填满这些壳层所需的中子数和质子数：2、8、20、28、40、50、82、126和184。这些数称为幻数。当一个核中的中子数和质子数都为幻数时，也就是说中子和质子都刚好填满各自的某一壳层时(如由8个中子和8个质子组成的 $^{16}\text{O}$ 或由126个中子与82个质子组成的 $^{208}\text{Pb}$ )，球形壳模型认为核将具有特殊的稳定性，是硬的球形核。而只具有一个幻数的核有较强的稳定性，形状接近球形。当中子和质子的壳层都处于半填满状态时，也就是距离幻数最近的核，是具有稳定变形的硬核。位于球形核与变形核之间的那些核，属于有轻度变形的软核，其形状易于改变。

玻尔和莫特逊于1952年提出了原子核的集体模型。用这一模型可以计算核液滴在各种形状下的能量。某些核在一特定的变形处能量最低，略微偏离这种变形时，能量便很快上升，这种核就是硬的变形核；另一些核在一定的变形范围内能量变化很小，这种核是软的。按照这一模型，除了每个核子在核内可以相对于其余的核子运动外，原子核作为一个整体还可以发生振动与转动。处于不同运动状态的核具有不同的能量和角动量，并且具有特定的形状。这些能量不是连续的，而是分立的，形成所谓的能级。当核由高能级向低能级跃迁时，能量通常以 $\gamma$ 射线的形式释放出来。通过对大量的稳定线附近的核的研究，人们已总结出了根据核的能级分布来确定其形状的规律。比如，对于一个球形核，第一激发态与基态之间的能量差为1MeV左右，而使一变形核产生转动所需要的能量一

量小于 0.2MeV; 只有变形核才有转动能级。按照量子力学, 围绕对称轴的转动是观测不到的, 对一长椭球形的核来说, 只有围绕其短轴的转动, 而没有围绕其长轴(对称轴)的转动。一个球形核的所有轴都是对称轴, 因而探测不到球形核的转动。此外, 转动能是和转动惯量的倒数与角动量平方的乘积成正比的, 核的形状固定时, 转动惯量不变, 随着角动量的增加, 相邻转动能级之间的间隔越来越大。如果核的形状发生了变化, 转动惯量也要发生相应的改变, 因而导致转动能级分布情况的变化。这样一些规律也是研究奇异核形状的基础。在向奇异核开拓时, 人们很自然会想到这样一些问题: 稳定核附近的幻数及其所决定的核性质, 在远离稳定线区域是否仍旧成立? 是否有新的幻数出现? 是否有新变形区出现? 等等。具体来讲, 例如, 由 50 个质子和 50 个中子组成的  $^{100}\text{Sn}$  或 50 个质子和 82 个中子组成的  $^{132}\text{Sn}$  是否如预计的那样是硬球形核?

实验上已发现, 某些核居然可以具有一种以上的形状。汞的同位素是个很好的例子。它有 80 个质子, 比球形幻数少二个, 预计是近球形核, 低激发态能级间隔较宽。对于  $^{180-184}\text{Hg}$  的研究证实了这一预计。但对于  $^{196}\text{Hg}$ 、 $^{198}\text{Hg}$  和  $^{200}\text{Hg}$ , 在低能级处它们的形状有所变化, 在较高的能级处, 每一种核又表现出两种完全不同的形状, 这反映在它们的能级分布上, 每种核同时存在着两组能级: 一组是建立在球形基态上的间隔较宽的能级; 另一组是开始间隔很小, 然后越来越大的能级——标志着硬的变形核的转动与振动。有时近球形那一组能级中的某一能级在能量上十分接近变形组中的一个能级(参见图 3)。这些观测结果表明, 不同形状的状态可以在核中同时存在。这就是在 50 年代曾经预言而在 70 年代发现的形状共存现象。现在已经知道, 形状共存是普遍地分布在周期表内的许多元素所具有的现象。这种现象在球形核与变形核这两种曾被认为截然不同类型的核之间建立了联系, 这对于发展对核物质的统一描述是很有意义的。

在远离  $\beta$  稳定线区域检验球形壳模型的过程中, 另一个惊人的发现是质子数和中子数都接近幻数 40 的核(如 36 个质子与 38 个中子组成的  $^{74}\text{Kr}$ 、36 个质子与 40 个中子组成的  $^{76}\text{Kr}$  和 38 个质子与 62 个中子组成的  $^{100}\text{Sr}$ ) 具有非常大的变形。核的变形程度通常用一个参数  $\beta$  来描写, 它大致等于核的长轴与短轴长

(上接第 21 页)

移率大大提高。上述结构通常称为二维电子气结构, 基于这一物理过程, 科学家已研制成功超高速电子迁移率晶体管或称调制掺杂场效应晶体管。

半导体超晶格量子阱的研究是一个崭新而富有成果的领域。从基础到应用, 它所开辟的领域之广、之深、之新都是惊人的。著名物理学家黄昆教授称半导体超晶格量子阱研究是目前半导体领域中最大、最有

度之差被这两个轴的平均长度除。近球形核的  $\beta$  值很小; 典型变形核的  $\beta$  值在 0.2 到 0.25 范围内, 而上述的几种核基态的  $\beta$  值在 0.35—0.4 范围内, 因而又称为超变形核。超变形核的另一个判据是它们第一激发态的能量, 这个能量越低, 形变越大。实际上, 为了在不同质量的核素间进行比较, 常要用标度化的第一激发态能量。对于原子序数在 90 左右的铀系变形核, 标度化的第一激发态能量在 43keV 到 45keV 之间。在发现超变形核之前, 已知的最低的标度化第一激发态值为 42.8keV ( $^{240}\text{Pu}$  的第一激发态)。而超变形核  $^{100}\text{Sr}$  的标度化第一激发态的能量值为 30keV, 而  $^{74}\text{Kr}$  为 28keV。超变形原子核的发现有力地支持了摩勒和尼克斯在 1981 年所做的理论预言。他们根据计算指出, 中子数与质子数在 38 附近的核属于自然界中最强变形的核。哈密尔顿曾指出, 中子数 60 是一个变形幻数, 这一点为  $^{100}\text{Sr}$  (38 个质子, 62 个中子) 所证实。此外, 理论还预言了中子数与质子数为 35 的核位于具有扁变形的超变形区域的中心, 因此,  $^{71}\text{Br}$  (35 个质子, 36 个中子) 是非常重要的研究对象。

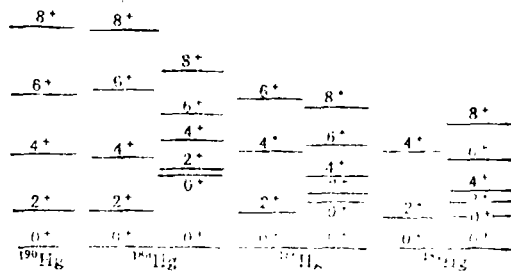


图 3 汞同位素的低激发态能级图

以上我们介绍了奇异核研究中的两个重要方面——奇异的放射性衰变方式和奇异的核形状。应指出的是我们仅涉及了奇异核基态或低激发态的情况; 当原子核处于高激发或高角动量状态时, 普通的核也会表现出许多奇异的性质, 这方面的讨论超出了本文的范围。目前对奇异核的研究方兴未艾, 特别是近年来, 人们开始用中高能重离子束通过弹核碎裂的反应机制来合成新的奇异核素, 并通过对核素分离产生所谓次级的奇异核束流, 用来研究奇异核所引起的反应及奇异核本身的性质, 甚至开展某些应用研究。可以预期, 在奇异核研究的领域中会有更惊人的发现在等待我们。

前途, 内容最丰富的一个生长点。在我国, 自行设计和研制的分子束外延和金属有机化合物汽相沉积设备已投入使用, 用国产分子束外延设备生长的材料已制成了高迁移率晶体管及室温连续干的多量子阱激光器, 并在超晶格量子阱基础物理研究上取得了可喜的成果。这种应用和理论工作的平行开展, 必将大大推进这一新兴领域的蓬勃发展。