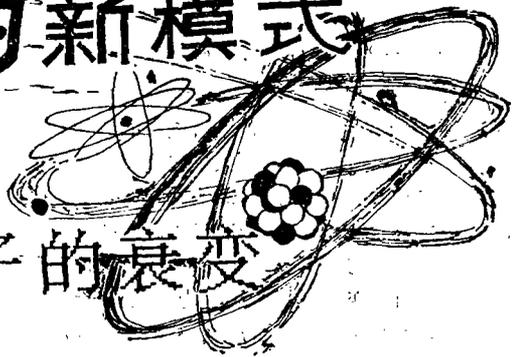


原子核自发表变的新模式

发射较重离子的衰变



施 义 晋

当 1984 年的日历刚刚开始启用,北半球依然一片白雪茫茫、大地封冻的时候,英国牛津大学的二位科学家罗斯和琼斯(H.J. Rose and G.A. Jones)在一贯以发表最新科学成果方面颇负盛名的“Nature”杂志上宣布了他们的新发现。他们宣告说,放射性同位素镭-223 不仅仅是大家熟知的 α 粒子放射源,而且也以一个很小的几率发射碳-14 粒子。就是说他们发现了一种新的原子核自发衰变模式。这个消息一下震动了许多核科学中心,如法国的奥赛(Osney)实验室,美国的加利福尼亚大学伯克利分校与伯克利劳伦斯实验室;阿贡实验室,苏联的杜布纳实验室,西欧的 CERN, …。许多科学家马上放下了手中的工作,着手验证罗斯和琼斯的新发现并开展寻找其他发射物的新模式。人们为什么会对此发生如此大的兴趣,并对这一新发现表示出极大的惊奇呢?这是有历史原因的。

大家知道,自 1896 年法国科学家贝克勒尔(Becquerel)发现了原子核的天然放射性,即铀盐的 α, β, γ 衰变,第一次揭示了元素是可以转化的事实以来,到 1984 年已将近一个世纪了。这 90 多年来经过科学家们一代继一代不懈的努力,截至 1983 年陆续发现了十多种衰变模式,其中包括 1940 年发现的铀-238 的自发裂变现象,即铀-238 原子核自发地分裂成几乎相等的二块碎片的质量分布集中在质量数为 60—180 之间,犹如一个驼峰。除此之外,所有放射性模式中发射的粒子都是质子、中子、电子、 γ 光子。如果将发射粒子质量列成一个表,很容易发现一个有趣的现象,即在质量数 4—60 之间(质量数 4 的发射粒子为 α 粒子,即氦原子核)是一片空白。

为什么会是这样的呢?当然,有的人会说,这容易理解。原子核本来就是由质子、中子组成的,因此某些放射性(天然的或人工的;实际上发射质子、中子的放射性核基本上都是人工产生的)原子核发射一个中子或质子,甚或一对中子或一对质子来进行衰变是理所当然的。而通过发射 α 粒子的 α 衰变的天然存在似乎也容易理解,因为 α 粒子就是由二个中子、二个质子组

成的氦-4 原子核,它们结合得非常紧,因此有的 α 衰变理论与核结构模型干脆假设原子核内的核子就是以结成 α 粒子的集团形式存在的企图以此来解释 α 衰变现象。但这种解释又过了头。因为这样计算出来的 α 衰变几率太大了,于是又引入了 α 集团的形成几率,就是说 α 集团并不稳定地存在在原子核中,而是不断分解、合成。由此推断,集团越大,存在在原子核中的几率越小,因此发射较重的粒子集团的衰变模式观察到的可能性就越小。这就是集团模型理论希望解释这一空白区的思路。

即使如此,集团模型理论还得回答各种重集团在核内存在的几率问题,这是一个困难的问题。

另一方面,对于铀、钍及超铀元素核的自发裂变,人们用核形状形变与内部激发而导致核分裂的以液滴模型为基础的宏观-微观模型理解已得到了比较好的结果,并不需要假定原子核中事先已存在二个相对独立的集团,因而也就不存在这种集团存在的几率问题。

应该指出的一点是,从结合能、反应能观点来看,凡是 α 衰变反应能大于零的母核,以发射重离子方式进行衰变的反应能也大于零,反过来则不是这样。这意味着,从能量观点看,发射重离子的衰变方式应是一种比 α 衰变更普遍的原子核衰变模式。但实际情况并不如此,实验上已观察到的 α 衰变放射性元素从钫-148 起到镭-257 共有 164 个,而直至 1983 年底人们尚没有发现过一个放射性核是发射重离子进行衰变的。此外在超铀元素中自发裂变也是大量观察到的。

因此人们一直在探询:究竟存在不存在发射重离子的原子核自发衰变模式?或者更确切地说究竟原子核以这种方式进行衰变的几率有多大?

很显然,这种衰变新模式的几率一定很小。就拿罗斯与琼斯发现的镭-223 发射碳-14 模式来说,它与镭-223 的 α 衰变的几率之比为 6×10^{-10} ,就是说每发生 16 亿次 α 衰变事件,才有一次的可能发生发射碳-14 的衰变。而且迄今为止,不仅从实验观察上或理论预言上,这是几率比最大的一个例子。

为什么几率相比于 α 衰变与自发裂变是如此之小?现在理论上已有了一个初步的解释,而且在定量上也与实验事实符合得很好。这个解释是,自发裂变, α 衰变,重离子发射的衰变本质上都是相同的物理过程,都是由于原子核的形状变形运动所造成的结果;而裂变由于涉及到核整体的大变形来生成重碎片,因此由大变形引起的核内核子内部运动的强烈激发也必须作为一个因素考虑在内。因而一般来讲,在统一解释 α 衰变,发射重离子的衰变及裂变时,原子核的总能量包含三部分:由形变的形状所确定的能量——形变势能,由形变运动所包含的形变动能,及内部运动激发能(后一部分相当于摩擦产生的热能)。原子核由于是一个处于不停运动着的许多核子组成的体系,它不断地发生各种形变,然后又以一定几率回到平衡形状。在这过程中,形变势能发生相应的变化。很显然,平衡形状(通常为球形或椭球形)应该对应形变势能最低点,其他任何对平衡形状的偏离均会使形变势能升高。当形变继续加大,形变势能会发生更复杂的变化,可能升高或降低。形象地说形变引起的势能的变化很类似于大地的地貌,平衡形变对应一个谷底周围升起高低不同的峰峦。如果体系碎裂成二块的结合能低于体系平衡形状时的能量(亦即反应能大于零),那么体系是亚稳定的,谷底之外还存在更低的底地。体系的亚稳性由谷底盆地四周的峰峦叠嶂的高度,广度来确定的。这就好比人爬山,山越高越厚,人越不易翻山越出盆地。因此形变势能形貌确定了亚稳体系的寿命。或者说核衰变几率(寿命越长,衰变几率越小)。由于谷底四周的山不会一样高,一样宽,总可能存在一个或几个相对平坦,低矮的山口峡谷。那么这些山口峡谷就是人们出盆地最愿意选择的道路, α 衰变,重离子发射衰变及裂变就是对应各种不同形变方式所形成的形变势能形貌图上的山口峡谷。

形变势能主要来源于以下四个方面,1.反应能,它是衰变前的母核体系结合能与衰变后二个产物子体系的结合能之差,它必须大于零否则体系不可能发生衰变。2.核力产生的表面能,它正比于体系的表面积。因此当形变使表面积增加时,表面能增加。3.核体系的静电库伦能。显然核体系作为一个整体的库伦能比分为二部分的库伦能大。一般而言,偏离球形,库伦能降低。因此对形变的影响来讲,库伦能要使形变变大,而表面能要使形变恢复到平衡形状,二者作用相反。4.由于核形变引起核内部结构的调整所导致的结合能随形变的改变。从粗的来讲,2,3二个因素对确定形变势能曲面形貌最重要。总之,这四项一起造成了形变势能曲面上的高矮起伏、峰谷峡道。

由上面的叙述,如果某种原子核当平衡形状发生一微小形变时引起的库伦能改变大于相应的表面能改变。这样,核体系就一直形变发展下去到破裂。因此

核素表不会无限延伸,据估计约在 $Z^2/A \sim 49$ 处结束(其中 Z 为原子序数, A 为原子核质量数)。如铀-238, Z^2/A 为35.5,对镭-241为36.5,铷-244为39.3。都是比较接近49。

而对于 α 衰变来讲,由于 α 粒子结合得很紧,它是少有的几个结合得很紧的原子核体系(通常称之为幻数核,如氦-4,氧-16,钙-40,铅-208等)中最轻的一个。这就是说对凡是具有自发裂变倾向的亚稳核,放射 α 粒子是形变位能曲面上最易翻越的一条峡谷通道。因此自发裂变一定伴随有强烈的 α 衰变与之竞争。

而对于重离子发射方式来讲,它不仅要求母核应接近不稳定条件,还与 α 衰变一样,要求衰变后的产物中至少有一个是幻数核,由于重核一般中子数大大超过质子数,例如铀-238,中子数为146,质子数只有92。因此除了残余核多带几个中子外,其余的中子应由出射重离子带走。由于二者都必须偏离结合能最佳条件,因此放射重离子的位能曲面通道要比 α 衰变高得多,宽得多,因而与 α 衰变相比放射重离子的衰变几率要小得多。据结合能推测,考虑到母核中子的丰度,最可能的重离子发射衰变方式是放射碳-14,氧-18,氖-24,25,26,镁-30,硅-34之类的衰变模式。

发射重离子衰变比 α 衰变几率小10个数量级以至更高,使它成为稀有事件,而且强烈的 α 衰变本底也使重离子的探测成了一件困难的事。例如最强的碳-14发射源镭-223,它每发射16亿个 α 粒子中才可能伴随发射一个碳-14粒子。因此要想在合理的时间内记录到足够多的重离子发射事件,必须制备很强的放射源。此外一般带电粒子探测器都存在一个分辨时间,如果有多个 α 粒子(3到4个)在分辨时间之内一起到达探测器,就会被当作一个大粒子记录下来,这就可能与真正的重离子相混淆,因此必须设法将此类偶然事件出现的几率降到真正重离子发射几率以下。限制源强度当然是一个办法,但显然不是好办法,缩短仪器分辨时间更是一个困难的问题。

因此在证实了镭-223是碳-14的发射源之后,对寻找其他更小几率的碳-14发射源,或发射更重离子的新模式变成了一场对实验物理学家的聪明才智与能力的挑战。

天无绝人之路。美国加利福尼亚大学伯克利分校的帕雷史(P.B.Price)教授多年潜心研究的固体径迹探测器此时已得到了长足的进展,积累了丰富的经验。固体径迹探测器是以运动带电粒子在固体中产生电离损伤而留下痕迹为原理发展起来的。不同能量,不同质量,不同电荷的带电粒子所形成的痕迹亦不同。它的最突出的优点是一定材料的固体径迹探测器具有一定的电荷阈值,只有当带电粒子的电荷大于某一值之后,探测器上才会有明显的痕迹。例如一种化学上叫

磁粉的性能及其应用

罗河烈

磁粉一般是指颗粒尺寸在 $1\mu\text{m}$ 以下的单畴铁磁或亚铁磁性粉末。

铁磁材料为了能处于最低的能量状态,在退磁状态下会分裂成许多磁畴。随着其尺寸的减小,不仅磁畴的数目减少,而且畴壁的厚度也小于大块材料的。由于畴壁厚度减小,其内部相邻电子自旋之间的夹角增大,使畴壁能量密度比大块材料的畴壁能量密度变大。因此,铁磁小颗粒为了减少总能量,就需要减少畴壁的数目。当磁粉尺寸小于某一临界尺寸以下,其内部所有原子的自旋方向都相互平行而成为单畴。单畴的临界尺寸主要决定于它的退磁能、各向异性能和交换能等的相互平衡。对一定的材料而言,它主要决定于颗粒的形状。一般铁磁单畴的临界尺寸在 $10-100\text{nm}$ 范围。由于铁磁单畴具有和大块材料不同的特性,近年来被较广泛地应用工业生产及日常生活等方面,引起了人们的极大重视。

1. 磁记录材料方面的应用

磁记录可以记录一切能转换成电信号的信息。而磁粉为制作磁记录部件(磁带、磁盘等)的重要材料之一。它的价格便宜,既可作模拟又可作数字记录,无需特殊处理就可读出。信号抹去可反复使用。记录和读出的时标可以不同,此外还有记录密度和信噪比高、对机械的冲击或振动不灵敏等优点。是全面性能优良

做双酚A聚碳酸酯塑料(主要成份为 $\text{C}_{16}\text{H}_{14}\text{O}_3$)它对 $Z>4$ 的带电粒子有响应,可分辨范围为 $5\leq Z\leq 8$ (Z 为带电粒子所带的电荷数)。这正好可用于探测碳(碳的 $Z=6$),而克服了强 α 本底的困难。又如聚乙二醇对酞酸酯塑料(主要成份为 $\text{C}_8\text{H}_8\text{O}_7$),它对 $Z>6$ 的粒子有响应,可分辨范围为 $8\leq Z\leq 12$,这正好用于探测氦($Z=10$)的放射性模式。

固体径迹探测器需借助人力在显微镜下识别与测量径迹,因此工作极不方便,只适用小几率事件。这本是它的一大缺点,但在探测重离子发射衰变事件场合下,英雄正有其用武之地。

因此面对重离子发射衰变这种小几率事件,又加上强 α 的竞争本底,其它探测器一筹莫展,望而却步的

的记录介质。因此广泛用于广播、电视、电子计算机、资料数据保存和票证等方面。是目前应用最广和产值最高的磁性材料。按现在磁记录方面磁粉品种的用量来排列,其顺序为: $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, $\text{Co-}\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, CrO_2 和铁粉。若按用途分,则以录音和录像的用量最大。据统计,全世界磁粉用量逐年增大。以计算机、视频、音频所用磁粉为例,在1979—1985年期间,其用量每年比上一年多40%。由此可见磁性应用的重要性和广泛性。

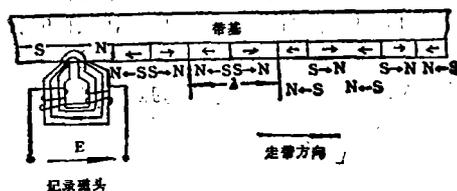


图1 磁带上的剩磁

现在我们来了解一下磁记录的原理。将声音、图象、数字等信号电压加在磁头绕组的两端。绕组中便产生与信号电压的幅度和频率对应的电流使磁头磁化,磁头的杂散磁通又使磁记录介质(磁带、磁盘等)磁化,将信号不失真地记录下来。这个过程称为记录过程。以磁带为例,在这个过程中,磁带以恒定速度经过

时候,固体径迹探测器一枝独秀,几乎独霸了这个领域。1988年,所发现的十七个重离子发射衰变模式中除了一个以外,全部是由固体径迹探测器来完成的。

重离子发射自发衰变模式的发现,不仅填补了放射性衰变质量谱上的一大段空白,而且使人们对 α 衰变过程有了更深刻的理解,加深了对原子核运动形态的多样性的印象。它必将推动核科学的深入发展,提供更多的核形变运动知识。在这种新类型的自发衰变模式的发现过程中,人们更能体会到“水到渠成”这句俗语所包含的哲学含义。没有一代继一代的不懈努力,没有相应的实验方法、探测仪器的进步,没有相应的理论知识积累,一个新发现是不会轻而易举地呈现在眼前的。