



重碎片放射性

——一种新发现的天然放射性

王世成

α 衰变和自发裂变

天然放射性现象的发现已经是上个世纪末的事情了，对它的研究从贝克勒耳和居里夫妇那时算起已经进行了九十年。已经十分清楚地知道，位于门捷列夫周期表中原子序数从 84 起的所有元素都具有天然放射性，原子序数比 84 小的某些元素也有天然放射性，这些放射性元素不断地自发地发射出各种不同的射线，如 α 射线、β 射线、γ 射线等。其中，组成 α 射线的粒子叫做 α 粒子，它是丢失了两个电子的氦原子，即氦原子核。它带两个正的电子电荷，它的质量是 4 个原子质量单位。α 粒子是放射性同位素衰变发射的粒子中最重的粒子。例如， ^{238}U 是一个天然放射性同位素，它发射出能量为 4.2 兆电子伏的 α 粒子。

到 1940 年，物理学家发现放射性同位素 ^{238}U 不仅能放射出 α 粒子，而且在没有任何外来粒子的轰击下，就可能自发地发生裂变，裂变成两个质量相近的碎片，这被称为自发裂变现象。实验测量表明，自发裂变的几率要比 α 衰变的几率小得多。在 1kg 铀中，每秒钟大约有 800 万个核放射出 α 粒子，同时只有 4 个核发生自发裂变。它们的比例是 $2 \times 10^6:1$ 。

学生们的疑问

多少年来，科学家们常常用液滴模型来解释这两种现象。液滴模型认为，一个重原子核内部的核子由于核力的作用紧密地排列在一起，形成一个呈球形的液滴，液滴的表面具有张力，它使原子核趋向于稳定。另一方面，原子核内有许多带正电荷的质子，它们有互相排斥的库仑力，这种力使原子核变形和分裂。这两种作用相反的力互相竞争、互相抑制。对于重原子核，核内质子数较多，因而库仑力较强，所以相对讲原子核结合得不那么紧密。原子核内的核子和某些核子集团，如 α 粒子，在核内不停地运动，相互进行着碰撞。这时，核的表面在不断地变换着形状，当表面张力不足以克服库仑斥力时，核内的“集团就可能跑出原子核，这就是 α 衰变现象。假如核被拉长，也有可能从中裂开，将重核分裂成两块大致相同质量的碎片，这就是自发裂变现象。

用液滴模型形象地解释 α 衰变和自发裂变现象是很成功的，但同时却给我们留下了一个难以解释的疑问、从液滴模型看，我们可以将 α 衰变和自发裂变看作是一种物理机制的两种不同情况，可以将 α 衰变看作是一种特殊的“裂变”，即原子核裂变成一个很重的核和一个 α 粒子，也可以将自发裂变看作是一种“衰变”，即原子核衰变出一个很重的离子。由此就提出了一个问题，重核能发射出轻的 α 粒子、又能衰变出很重的离子，那么，为什么不能衰变而发射出比 α 粒子重、比重核轻的中等质量的离子呢？譬如说，自然界是否存在能发射 ^{14}C 、 ^{24}Ne ……中等质量离子的放射性同位素。从裂变的观点看，重原子核能“裂变”出很轻的 α 粒子，又能裂变成两个重离子，那么，也就有可能裂变成一个中等质量的离子和一个重离子。但是，在实验上一直没有发现这种现象。多少年来这始终困惑着物理学家。爱思索的中学生和大学生们在学习物理学时也常常提出这个问题，他们从老师那里也常常得不到心悦诚服的回答。无论是物理学家还是学生，提出上面这个疑问都是凭着物理的直觉，很多人都相信自然界会存在这种新的放射性现象，某些重核会发射出中等质量的离子、基于这种想法，很多理论物理学家和实验物理学家进行着不懈的努力，不断地探索这种新的放射性现象的可能性，并在实验上寻找这种新现象。

新发现

1980 年，罗马尼亚的一个核理论小组和德国核理论家 Greenc 报告了他们的研究成果。他们提出了一个新的理论模型，改进了 α 衰变和自发裂变的理论计算结果和实验数据的一致性。并预言了重原子核可以发射象 ^{14}C 那样的中等质量的离子，虽然发射的几率很小，但是可以探测到。

四年以后，英国牛津大学的物理学家 Rose 和 Jones 于 1984 年宣布，他们发现了 ^{223}Ra 在每 10 亿次 α 衰变中有 1 次不是发射通常的 5 兆电子伏的 α 粒子，而是发射 30 兆电子伏的 ^{14}C 核。他们的发现第一次在实验上证明了在自然界确实存在着一种新的放射性，重的原子核能发射出比 α 粒子更重的离子。他们

的实验是利用 $\Delta E-E$ 硅面垒型探测器探测从 ^{223}Ra 放射源发射出的放射性,在 189 天中共收集到了 11 个发射 ^{14}C 的事例。在实验过程中,大量的 α 粒子的本底对硅面垒探测器造成了有害的辐射损伤。加上如此冗长的收集时间,使他们缺乏勇气再去寻找更稀有的其它重离子的衰变事例。

从 Rose 和 Jones 的发现中可以看出为什么物理学家长期以来没有能发现放射性同位素的这种新的衰变方式。放射性同位素 ^{223}Ra 每发射 10 亿次 α 粒子,才发射 1 次 ^{14}C 。它们的比例是 $10^9:1$ 。这相当于你有一个朋友,淹没在全中国 10 亿人口中,你要寻找这个朋友,必须走遍大江南北,历尽千山万水,这确实是一件十分困难的事情。

那么,这种重核发射 ^{14}C 的现象称为什么现象呢?是一种新的放射性衰变方式呢,还是一种新的自发裂变呢?目前物理学家们还没有取得统一的命名,有人称它为重离子放射性,或称为重碎片放射性,也有人称它为非对称自发裂变。为了叙述方便,这儿暂且称它为重碎片放射性现象吧。

寻找更多的新放射性

Rose 等人的新发现激起了世界各地物理学家的重视。很多实验室纷纷投入了寻找更多的重碎片放射性现象的研究。显然, Rose 等人的实验方法很不理想,必须寻找一种更加合适的探测器,它对重碎片要有好的灵敏度,又能尽可能多地减少 α 粒子的本底。很多物理学家想到了固体径迹探测器,它比较适合于这类实验。美国加州大学伯克利分校的 Price 教授领导的实验组采用塑料和玻璃作的径迹探测器发现了镭的另外两个同位素 ^{222}Ra 和 ^{224}Ra 也同样能发射 ^{14}C ,并且发现了 ^{232}U 可以发射 ^{24}Ne 。1987 年,他们又发现了放射性同位素 ^{234}U 不仅能发射 ^{24}Ne ,而且同时能发射 ^{28}Mg 。这是第一次发现可以发射两种重离子的重碎片放射性同位素。苏联杜布纳联合核子研究所的一个实验组用类似的固体径迹探测器发现了放射性同位素 ^{231}Pa 、 ^{230}Th 和 ^{233}U 也能发射 ^{24}Ne 。迄今为止,已经发现了 9 个重碎片放射性同位素,发射的重碎片种类已有 ^{14}C 、 ^{24}Ne 和 ^{28}Mg 三种。很多实验室仍在继续努力,改进探测器,寻找更多的重碎片放射性同位素,寻找更多的发射离子的种类,如 ^{30}Mg 、 ^{34}Si 、……等等。

固体径迹探测器

如上所述,重碎片放射性现象是指重核发射 ^{14}C 、 ^{24}Ne 、 ^{28}Mg 等中等质量离子的自发衰变的过程。它与 α 衰变和自发裂变相比有如下特点:

1. 衰变的分支比小。假如我们以重碎片衰变与 α 衰变几率之比表示它的分支比,目前已发现的 9 个放射性同位素的重碎片衰变分支比为 10^{-9} — 10^{-13} 。也就是说,在每 10^9 — 10^{13} 次 α 衰变中只有 1 次是重碎片衰变。

2. 重碎片衰变所发射的重离子能量约为 $2\text{MeV}/N$, 其中 N 为发射离子的质量数。它对不同的发射离子基本上是一个常数。

3. 半衰期很长。除 ^{222}Ra 以外,已发现的重碎片放射性的衰变半衰期都大于 10^7 年。随母核原子序数增大,半衰期有增长的趋势。

4. 重碎片衰变发射的离子为偶 Z 核,留下的母核接近于双幻数核 ^{208}Pb 。

由于以上的特点,决定了探测上的困难。由于分支比小,不仅要求探测器具有很高的收集效率和长时间的稳定性,而且要能排除大量的 α 粒子本底。探测器还要求有很好的重离子分辨能力,并在强辐射本底下很好地工作。显然,常用的电子学探测器,如丝室、闪烁计数器、半导体探测器都很难适应这些要求,目前认为最合适的探测器是固体径迹探测器。

固体径迹探测器是六十年代末发展起来的一种核探测器,多种绝缘固体,如矿物、玻璃、塑料等都可以用作固体径迹探测器材料。当带电粒子进入这些绝缘固体时,在所经路径上因电离和激发造成辐射损伤。辐射损伤区比较容易被化学试剂腐蚀,所以用某种化学试剂处理后,材料表面将出现蚀刻坑。通过蚀刻参数,如体蚀刻速度、径迹蚀刻速度和灵敏度,测量出带电离子的射程,从而确定离子的电荷和能量。目前已经发展了一套比较成熟的定量测量技术。加州大学伯克利分校 Price 教授领导的实验组经过近年来的研究指出,用聚碳酸酯材料作的径迹探测器适用于研究 ^{14}C 衰变,聚酯和磷酸盐玻璃作的径迹探测器适用于研究 ^{24}Ne 衰变。磷酸盐玻璃可承受的 α 辐射注量最大,在 $9 \leq Z \leq 14$ 范围内具有很好的电荷分辨,它的讯号噪声比很高,测量中可使用自动扫描技术,因此在研究重碎片放射现象中将很有前途。

对核理论的挑战

重碎片放射性现象的发现对核理论学家提出了严峻的挑战。实验事实表明, α 衰变和自发裂变之间确实存在着重碎片放射性现象,说明三者之间存在着某种内在的联系。以往的 α 衰变理论和自发裂变理论是分别进行考虑的,它们在解释新的重碎片放射现象时都遇到了困难。按照基础 α 衰变理论,认为 α 粒子是早已存在于核内的核子集团,它不停地撞击着位垒,有着一定的穿透位垒的几率。然而,当核子集团的大小超过 4 个核子时,该理论就陷入困境。基于液滴模型的自发裂变理论,只能用于解释裂变成两个接近对称碎片的情况,而对于裂变成很不对称的两个碎片时,计算很复杂。因此,迫切需要发展一个既不同于基础 α 衰变理论、又不同于常规的自发裂变理论的新的理论模型。从而对重碎片放射性作出解释,对 α 衰变、重碎片放射性和自发裂变三者之间的联系作出解释。

(下转第32页)

近年来,核理论学家作了一些初步的尝试,提出了一些理论模型,可以将它们归结为两类.第一类称为统一模型,它是以原有的自发裂变理论为基础,将 α 衰变、重碎片放射性和自发裂变看作是相同的过程.第二类称为集团模型,它以原有的基础 α 衰变理论为基础,把重离子也看作象 α 粒子一样的核子集团,在母核内部以一定的几率形成,并以某一特征频率撞击位垒,按一定的穿透位垒的几率而发射.尽管这两类理论模型各有所解释,但总的说,它们与实验数据的符合程度并不满意.

目前,对于重碎片放射性现象的理论研究仅仅是初步的,实验上还需要积累更多的数据,以便更加深入地了解原子核内部的结构.