

远离稳定线原子核及其产生

周春梅

苏宗涤

一 远离稳定线的原子核

在我们的世界中究竟存在多少种原子核呢？它们的分布规律怎样？这些是大家关心的。人们从自然界中已找到了原子序数 $Z = 1-94$ 的原子核约 300 种，大部分是稳定的，少数是寿命很长的放射性原子核。此外，人们还用人工方法产生各种放射性原子核约 1300 种。随着科学技术的发展，还会继续用人工方法产生许多新的原子核。

一个原子核含有 Z 个质子和 N 个中子，它的质量数 $A = Z + N$ 。不同的质子数 Z 和不同的中子数 N 组成不同的原子核，又称为核素。相同 Z 而不同 N 的原子核称为同位素，它们在元素周期表中位置相同。然而，相同质量数 A 而质子数 Z 不同的原子核称为同质异位素。原子核的性质是与组成原子核的质子数和中子数有密切的关系。为搞清这些关系，我们把这许多原子核按其质子数 Z 和中子数 N 的大小分别画在核素 $Z-N$ 分布图上，如图 1。在 $Z-N$ 分布图上把稳定原子核连成一条线，叫原子核的稳定性。上面提到的约 1600 种原子核就分布在这条稳定线及其邻近，并形成一条很窄的带。当原子核较轻 ($A \leq 40$) 时，稳定线基本上和 $Z = N$ 线重合。随着核质量数 A 的增大，稳定线就逐渐离开 $Z = N$ 线，而向着中子数 N 较大的方向偏离，这是因为稳定原子核内核子同时受核力和库仑斥力的作用，质子数增加时，其库仑斥力也增大，为保持原子核的稳定，就必须增加中子。

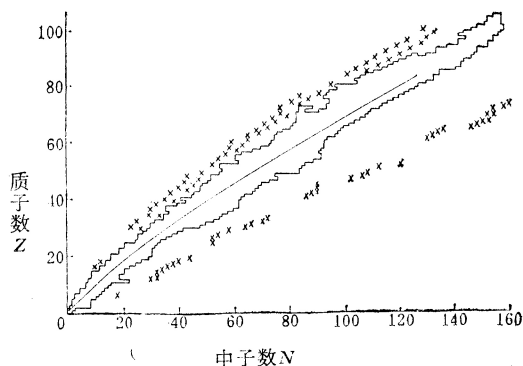


图 1 原子核种类分布图

——原子核稳定线； w 线之间是目前已知的原子核区； \times 是中子结合能(下方)和质子结合能(上方)为零的原子核；在 \times 线之外的范围按现有理论认为不存在原子核。

在稳定线的下方，中子数目过多，这个区域的原子

核称为丰(超额)中子核，属于中子不稳定区。原子核进行 β^- 衰变 ($n \rightarrow p + \beta^- + \nu$)。在这个丰中子区，远离稳定线的原子核还会进行中子衰变，发射中子，甚至可能同时发射两个中子。在稳定线的上方，质子数目过多，这个区域的原子核称为缺中子原子核，属于质子不稳定区，原子核进行 β^+ 衰变 ($p \rightarrow n + \beta^+ + \nu$)，或者发生轨道电子俘获。后者是质子数为 $(Z + 1)$ 的原子核吸收一个轨道电子后变成质子数为 Z 的核。远离稳定线的缺中子原子核，还会发生质子衰变，发射质子，有时也会发生 α 衰变。由于在稳定线两侧的原子核可能发生 β^- (或者 β^+) 衰变，所以稳定线又称为 β 稳定线，稳定原子核分布的窄带称为稳定半岛，它的周围是不稳定“海洋”。沿稳定线往前，当原子核质量加重时，发生 α 衰变以及自发裂变的几率逐渐增大，半衰期变小，即寿命变短。因此， β 稳定线到 Pb (铅) 附近终止了，而比 Pb 更重的原子核基本上是属于不稳定的范围，如钷系，镱系，铀系和钍系原子核放射性衰变系列最后形成的稳定原子核都是铅同位素。目前，人工产生的最重原子核是 $Z = 106, N = 157, A = 263$ ，其半衰期约 1 秒。

根据现有理论估计，沿稳定线再往前延伸，在 $Z = 114$ 附近存在一个稳定核区 (在图 1 没有画出)。由于这个核区被不稳定“海洋”所包围，而其质量数又超过现有原子核的质量数，所以通常称之为“超重核稳定岛”。理论上还指出，在沿稳定线的远方可能存在超密度的不平常原子核。这种原子核的质子数和中子数可大到几千，而其核半径要比现有原子核小，结合能要大 10 倍左右。理论上认为要用能量很高的 (约几百 GeV) 铀核与铀核相碰撞时，才有可能产生这种超密度的不平常原子核。

目前有人估计，总原子核约 6000—7000 种，现在已知的仅有 1600 种，只占总原子核的一小部分。如果我们能开拓到更广阔的原子核区域，肯定会得到更多

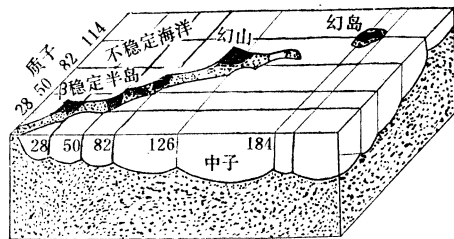


图 2 各种原子核的分布特性

新的核知识。当前,由于受种种条件的限制,远离稳定线原子核的研究主要集中在稳定线两侧的丰中子和缺中子区以及沿稳定线延伸的 α 衰变和自发裂变区的原子核。

为便于了解这些原子核的分布特性,我们用地球表面的山峰,山脉,海洋以及半岛作比拟,见图2。山脉的高峰对应于中子和质子都为幻数的原子核,这类核都属于中子和质子的满壳层核,因而最稳定,称为幻山。而“超重核稳定岛”称为幻岛。

二、产生远离稳定线原子核的方法

产生远离稳定线原子核的方法较多,除了用中子,质子和重离子以外,还可用 μ^- , π^- 和 π^+ 等粒子轰击原子核,通常后者的产额低。高产额的方法主要有核裂变以及质子和重离子核反应。

(一)核裂变 原子核裂变的产物分布在一个很宽的区域,其中不少产物属于丰中子核素。例如,热中子诱发 ^{235}U 裂变,能产生约几百种裂变产物,有稳定的,也有放射性的,放射性原子核中子超额可达十个之多。

裂变产物的产额分布如图3所示,在 $A=140$ 和 95 附近有双峰。热中子诱发 ^{235}U 裂变的缺点是对称裂变的产额特别低。但是,采用快中子或中能带电粒子诱发的核裂变便能克服这个缺点,如图3。

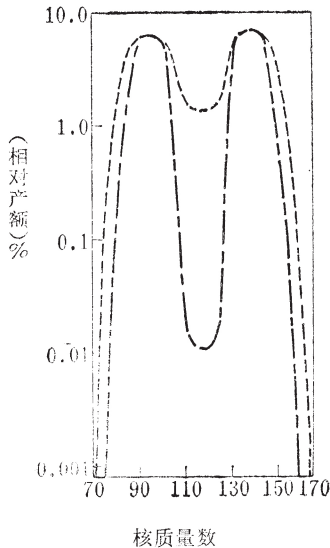


图3 中子诱发 ^{235}U 裂变的产物产额分布

—·—热中子; ----14MeV中子

(二)核反应 以重离子作“炮弹”轰击靶原子核的反应是近年来发展很快的产生远离稳定线原子核的重要方法之一。重离子是指比 α 粒子更重的离子,最重的离子有 ^{238}U 。当入射离子能量低于库仑位垒时,由于库仑斥力起作用,重离子打不到靶原子核上,主要是库仑激发和弹性散射。随入射离子能量的提高,核力逐渐起主要作用。在离子能量高于库仑位垒时,离子与靶原子核相互融合的过程逐渐变为主要过程。由于融合形成的复合核处于相当高的激发能上,它通过发射粒子退激发,因此,复合核发射各种粒子之间的相互竞争也变得复杂起来:当复合核发射带电粒子比发射中子的几率小时,主要产生缺中子原子核;当复合核

发射带电粒子比发射中子的几率大时,主要产生丰中子原子核。当入射离子能量较高时,会发生深部非弹反应。入射离子和靶原子核粘在一起转动,并且两者交换粒子。重离子深部非弹反应实际上是人工合成超重核时发现的新的反应机制。由于“炮弹”核和靶原子核有许多粒子相互转移,因而能产生远离稳定线原子核。当入射离子平均每个核子能量为几百MeV时,重离子能直接把靶原子核打碎,这叫重离子散裂反应。同样,当入射质子的能量很高时(500—800MeV),也能发生质子散裂反应。散裂反应也是产生远离稳定线原子核的重要反应。

三、研究远离稳定线原子核的意义

远离稳定线原子核研究是原子核物理研究的前沿领域之一,在核物理基础研究和核能技术应用方面有着重要意义。

天然放射性原子核是历史上最早发现的放射性原子核,一般说来,其寿命相当长,它们基本上处于邻近稳定线范围,人们对它们的研究打开了原子核科学的大门,获得了原子核的 α 、 β 和 γ 衰变以及原子核内部结构的知识。当把研究领域扩展到人工产生的短寿命的远离稳定线原子核区时,可以研究原子核衰变的一系列新现象,如质子和中子发射,双质子和双中子发射,高能 β 衰变,缓发粒子发射等。这将大大丰富原子核的衰变知识。放射性是研究远离稳定线原子核的重要手段,能提供核特性的重要信息,能了解原子核的性质,相互作用和变化。

人们从稳定的球形原子核(如 $^{16}\text{O}_8$, $^{40}\text{Ca}_{20}$, $^{208}\text{Pb}_{126}$)的研究中得到了原子核的壳层结构模型和独立粒子运动的知识。当中子或质子高度超量时,原子核的形状会发生什么变化?原子核形变与中子数和质子数有什么关系?核内粒子又怎样运动呢?此外,研究远离稳定线原子核也还能提供关于原子核结构,结合能和核质量等基本特性的丰富知识。因此,远离稳定线原子核研究将会大大开拓和丰富原子核的知识,检验并发展现有原子核理论。

另一方面,通过远离稳定线原子核研究也许可能找到某些新的同位素和核燃料,为核能应用和核技术应用提供新的资源。