

# 外 来 核

Günter Herrmann\*

## 凝聚核物质的前沿

原子核是由两种核子，带电的质子和不带电的中子组成的。有两种力作用在原子核上：核子间的吸引核力和质子之间的静电排斥力。核内的质子数被称为原子序数 ( $Z$ )。这个数也确定了核外的电子数和原子的化学性质；元素由原子序数不同而区分。中子数由  $N$  表示，质量数  $A$  为核内粒子数  $Z + N$  的总和。在核素图中 (图1) 可以看到，在轻的稳定核中质子和中子是以一对一的比例相混合的。例如氧元素的最丰的稳定原子核包含有八个质子和八个中子 ( $Z = N = 8$ ,  $A = 16$ )。

在稳定核中与一定的质子数相结合的中子数是可以在一定的范围内变动的。氧可包含八、九或十个中子，组成的质量数为16、17和18。这些具有相同原子序数和不同质量的核称为元素的同位素。图1中稳定核用黑方块表示，同位素分布在同一水平线上。随着原子序数  $Z$  的增加，稳定同位素中相对于质子数的中子过剩也随之增加。例如在丰度最大的铅元素的同位素中有82个质子和126个中子。在图1中，中子过剩的增加趋势表现为向右延伸时的黑方块条的弯曲。为了中和原子序数增加时质子之间的破坏性的相互排斥力，就要求有这样的中子过剩。

我们对于原子核的认识不仅限于稳定核。用原子核反应可以产生质子—中子比与稳定核相差很大的核素。因为它们的一般组份是不稳定的，它们通过放射性跃迁或快或慢地向稳定核区衰变。图1中在稳定核右方的丰中子核通过  $\beta^-$  衰变减少它们的中子数，每次衰变质子数同时增加一个单位。在这种衰变模式中，核内的一个中子发射一个负电子 ( $\beta^-$  粒子) 而变为带正电的质子。如果终核仍不稳定，将发生另一次放射性跃迁，整个放射性跃迁链可继续延伸下去，直到最后达到稳定核为止。

对稳定核左方的丰质子核，所发生的放射性跃迁模式与此相反， $\beta^+$  衰变中一个质子发射一个正电子 ( $\beta^+$  粒子)，减小原子序数，而中子数增加一个单位。或者也可以从周围

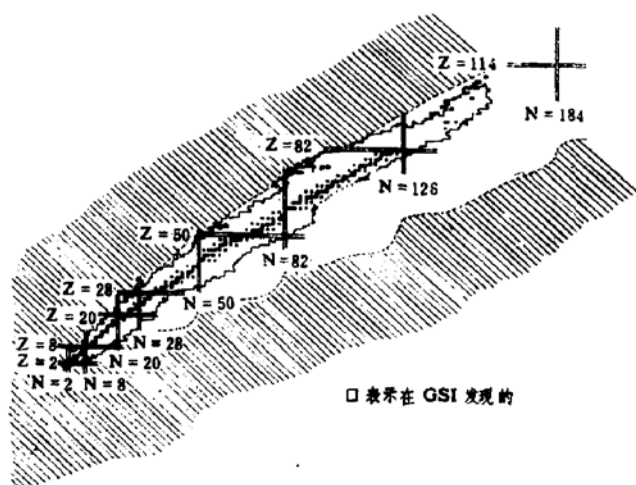


图1 核素图示意图。以中子数为横轴，质子数为纵轴，每个原子核在图中占一个小方格。黑方块表示自然存在的稳定核和长寿命核。粗的横的和纵的直线表示闭合的中子和质子壳层的原子核。外围的实线给出迄今已知核的边界，虚线表示预言的核稳定性的边界，这个极限以外的斜线区内不存在束缚核。在现在已经开发的区域以外，在图的右上方的两个壳层的交点是预言的超重核岛的中心。空心的小方块表示在UNILAC加速器上发现的近一百种新核。

\*GSI, Darmstadt 和梅茵茨大学，联邦德国

的壳层电子中俘获一个负电子（电子俘获，或称EC）。对重的丰质子核还能发生另外两种衰变模式： $\alpha$ 衰变和自发裂变。在 $\alpha$ 衰变中，通过发射一个氦原子核每次减少两个质子和两个中子。自发的核裂变是一个非常重的核分裂成为两块相近大小的碎片。

近50年来，在实验室中形成了大量的新核素，其中包括质子和中子数的混合比非常不一般的外来核，这大大地拓广了核素图。例如对53号元素碘，已知有33种同位素，其质量从110到142，与稳定同位素 $^{127}\text{I}$ 的中子数74相比，复盖了-17至+15的中子数区。能否达到任意的混合比，还是有一定的极限？正象实验所观察到的那样，随着离稳定核区的距离的增加，核变得越来越不稳定。这是由衰变中能量释放的增加和衰变寿命减小所证明的。凝聚核物质的理论预言，在一定的质子过剩下，核不能再多结合一个质子了。因此，如果在反应中能形成这样的核，这个多余的质子会立即被发射出来。同样，在一定的中子过剩之下，最后的一个中子也会被立即发射出来。

在图1中以两条虚点线表示了预言的稳定性的极限区。质子滴线比中子滴线更靠近稳定核区，这是因为质子之间有破坏稳定的排斥力。图1中的实线是已知核的边界，比较靠近质子滴线而离中子滴线较远。我们想通过对大的质子过剩或中子过剩的外来核的研究来回答两个问题：表明凝聚核物质最后边界的滴线的确切位置在什么地方，对外来核有没有在通常的核中所观察不到的奇特的核性质？

特别的兴趣在于用产生以前没有达到的质子数和中子数的核素来将核素图延伸到它的上限。对质子数来说就是要产生新的元素。我们早已知道，由于破坏性的静电排斥力，在核素图上限附近的核是束缚得很松的。这意味着它们对裂变是不稳定的，在很小的激发之下，这样的核马上会裂成两个碎片。因此，可以预料在比至今所达到的原子

序数更高的某个地方，会完全丧失相对于裂变而言的稳定性，这里就是周期表的终点。可是，这并不一定正确。按照理论的预言，在原子序数为114和中子数为184的附近，稳定性还会增加，因为这时质子和中子达到满壳。对分裂成两个碎片而言，核的硬度预期会增大。重离子核反应使人们能开发这个区域。从而我们预言这个世纪以内可以得到二千年来的问题的答案：世界上存在多少种元素，是什么力量使周期表终止在它的上限处。

## 如何产生和研究外来核

两重核之间的熔合是合成外来核的有效方法。两个相互作用核的质子数之和直接给出终核的原子序数。因为新形成的核会蒸发出几个中子，所以其所能达到的中子数则稍小于两个反应核的总中子数。由两个稳定的丰质子核可以达到或者接近质子滴线，因此在UNILAC加速器上的外来核研究主要集中在丰质子核。正如图1中所显示的，绝大多数新发现的同位素都落在这个区内。

可惜，对丰中子核的产生是并不那样有效。重核的裂变仍然是进入非常丰中子核区的唯一的途径，可是这种方法只能产生中等质量的核。在相互作用的两个重核之间的少数质子和中子的转移中，最近发现了一些裂变产物区以外的丰中子核<sup>[1]</sup>。在进一步的研究中要开发这种方法的潜力。为了认识自然界中通过中子多重俘获（增加质量数）和 $\beta^-$ 衰变（增大原子序数）在超新星的爆炸中比铁重的元素的合成，拓广我们对丰中子核方面的知识领域是很有意义的。

因为外来核的寿命很短而且产额很低，因此对外来核的研究要求有专门的实验技术。 $\beta$ 衰变的外来核典型的半寿命为秒级或零点几秒级，而 $\alpha$ 衰变或自发裂变其半寿命可能要小几个数量级。速度过滤器SHIP<sup>[2]</sup>和在线质量分离器<sup>[3]</sup>是为研究外来核而安装

在UNILAC加速器上的主要设备。

在速度过滤器中，利用了从轰击靶中反冲出来的熔合产物具有较小的速度和狭小的发射角的特点。通过一种电场磁场的组合，SHIP可以从每秒穿过靶的 $10^{12}$ 的束流粒子中分离出单个产物核。在在线质量分离器中，反冲原子在保持高温的收集膜中被减速。从膜中反应产物再蒸发出来，然后在离子源中被电离。所产生的单电荷离子再在磁场中按它们的质量被分离开。因为蒸发和电离过程与化学性质有关，所以在线质量分离器无论在原子序数还是质量数方面都是有选择性的，因而可以产生干净的单一同位素束。这种技术并不只限于熔合反应。

在最重元素的区内，也采用了放射化学技术。在重离子轰击后，包含感兴趣元素的部份与靶子在化学上是分离的，而且可以用灵敏到能探测几个原子的计数系统来检验<sup>[4]</sup>。虽然与速度过滤器和质量分离器的分离时间相比它花时更多，但现在放射化学技术已能在半寿命为几秒的量级区内进行核的研究<sup>[6]</sup>。

## 新的放射性衰变模式：质子发射

在GSI的特别丰质子核的系统开发中找到了将近100种新核素。在原子序数为50至56和68至82的两个区域内（图1），已经达到甚至超过了预言的质子滴线。对更重的丰质子核来说，稳定性的极限决定于自发裂变。在90号元素和100到109号元素附近达到了这个极限。大部份的新核素是通过发射强电离粒子—质子、 $\alpha$ 粒子或裂变碎片—的衰变模式发现的。可以用很高的灵敏度来探测这些粒子，能够以很高的精度来测量它们的特征能量。为了鉴别新核素，就要测量原子序数和质量数，还要用已知核的放射性衰变来建立与原始产物之间的关系。

在丰质子核的全面开发中最有趣的结果发现了一种放射性衰变的新型模式：质子

发射。在早已知道的 $\alpha$ 衰变、 $\beta$ 衰变和自发裂变以外的两元素之间自发跃迁的第四种模式。质子发射早就存在于许多实验中，可是由于其他衰变模式的竞争，只有在非常有利的条件下才能有效地观察到质子衰变。

图2给出了在UNILAC加速器上发现的两种质子发射核素的能谱图。一个是在速度过滤器上 $^{58}\text{Ni}$ 与 $^{90}\text{Ru}$ 熔合中所产生的 $^{151}\text{Lu}$ 同位素<sup>[6]</sup>，另一个是在质量分离器上 $^{58}\text{Ni}$ 与 $^{92}\text{Mo}$ 熔合中生成的 $^{147}\text{Tm}$ 同位素<sup>[7]</sup>。这些能谱明确显示出能量为1231KeV和1059KeV的单质子谱线。相对地长的半寿命可以用从 $^{151}\text{Lu}$ 至 $^{160}\text{Yb}$ 和从 $^{147}\text{Tm}$ 至 $^{148}\text{Er}$ 之间的质子衰变中要越过的大的自旋差来进行解释。

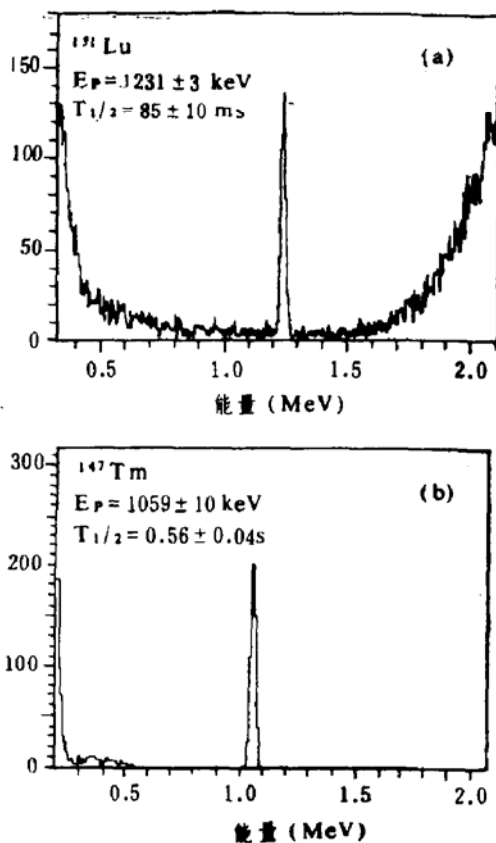


图2 元素之间的放射性跃迁新模式—质子衰变的发现中<sup>[6,7]</sup>所得到的能谱。给出了强电离放射性的强度与放射性能量的关系。峰表明了UNILAC上的重离子反应研究中产生的(a) $^{151}\text{Lu}$ （半寿命为85 ms）和(b) $^{147}\text{Tm}$ （0.56s）的衰变中发射的单能质子。

（未完待续）