

登陆稳定岛

(中国原子能科学研究院 周书华 编译自 Yuri Ts.Oganessian, Krzysztof P. Rykaczewski.
Physics Today, 2015, (8): 32)

在20世纪60年代, William Myers 与 Wladyslaw, 以及 Victor Viola Jr 与 Glenn Seaborg 两个研究组独立地预言: 在核素图中所谓的稳定岛上存在着重核。

图1表示现在所了解的核地貌。已经确定的幻数有: 2, 8, 20, 28, 50 和 126(只是中子幻数)。在核的中子或质子数等于幻数处, 核壳层闭合, 壳层之间有较强的能量间隙, 核的稳定性增强。现代理论方法也指出, 在幻数中子数 $N=184$ 附近存在着长寿命的核。

理论预言下一个幻数原子序数 Z 在 114 和 126 之间。实际上, 在 $N=184$ 和 $Z=114$ 到 126 附近, 具有很高的中子与质子能级密度, 尽管没有很大的能量间隙, 核的稳定性仍会增强。

目前的实验结果与存在着延伸的超重核岛的预言一致。某些模型预言新的超重核的半衰期可达几百万年, 有的计算指出, 这些核的寿

命与地球年龄相当。

自从1938年发现原子核裂变以来, 研究人员通过核反应改变现有核的性质, 生成了26种新元素和数百种同位素。改变物质的核性质的企图并不是新的。历史上, 用普通金属如锡或铅来生成像金那样的贵金属的愿望驱动着炼金术的发展。

中世纪炼金术士们的梦想在现今加速器和核反应的时代几乎成真。例如, 可以将两种金属原子锗-74 ($^{74}_{32}\text{Ge}$) 与锡-124 ($^{124}_{50}\text{Sn}$) 熔合, 当作为炮弹的 $^{74}_{32}\text{Ge}$ 的动能为 300 MeV 时, 便生成 $^{198}_{82}\text{Pb}^*$ 核, 其质量数等于 $^{74}_{32}\text{Ge}$ 和 $^{124}_{50}\text{Sn}$ 的质量数之和。 $^{198}_{82}\text{Pb}^*$ 中的 * 号表示所生成的是温度高于 10^{10} K 的“热”的不完全束缚的复合核, 会立即通过蒸发几个中子而冷却。在这个过程中产生不同的 Pb 同位素(熔合—蒸发余核)。

在 $^{198}_{82}\text{Pb}^*$ 的例子中, 蒸发 4 个

中子而生成 $^{194}_{82}\text{Pb}^*$ 的概率约占蒸发余核的 60%。在零点几分钟的时间内, $^{194}_{82}\text{Pb}^*$ 发生 β 衰变成为铊-194 ($^{194}_{81}\text{Tl}^*$)。然后 $^{194}_{81}\text{Tl}^*$ 再经过 β 衰变成为半衰期为 520 年的汞-194 ($^{194}_{80}\text{Hg}$)。炼金术士必须等待相当长的时间才能通过下一次 β 衰变而生成金-194 ($^{194}_{79}\text{Au}$)。不幸的是, $^{194}_{79}\text{Au}$ 是不稳定的同位素, 半

衰期只有 38 小时。 $^{194}_{79}\text{Au}$ 的 β 衰变的确可以产生稳定的更珍贵的铂-194 ($^{194}_{78}\text{Pt}$), 但是在目前超重核实验所用的典型束流强度下, 用 $^{74}_{32}\text{Ge}$ 连续轰击 $^{124}_{50}\text{Sn}$, 大约 1 亿年将只产生 1 克的 $^{194}_{78}\text{Pt}$ 。所以, 核炼金术在原则上是可能的, 但不是一种聪明的投资。然而从科学求知的角度讲, 产生超重核的实验却是收获颇丰的。

上世纪 70 年代以来, 强大的重离子加速器的发展极大地促进了以产生新元素为目的的实验。通过使用 $^{208}_{82}\text{Pb}$ 和 $^{209}_{83}\text{Bi}$ 靶以及从 $^{54}_{24}\text{Cr}$ 直到 $^{70}_{30}\text{Zn}$ 的重离子炮弹核, 研究者们产生并鉴别出直到 $Z=112$ 的同位素鐾(Cn)。

元素 107—112 是在德国 GSI 的 Helmholtz 重离子研究中心的重离子产物分离器(SHIP)上发现的。在这些实验中, 使用低能量束流, 以生成的复合核 $^{278}_{112}\text{Cn}$ 具有低的激发能, 只能蒸发 1 个中子, 这就是冷熔合方法。虽然提高束流能量可使熔合截面增加, 但是具有高激发能的复合核会立刻裂变, 产生超重的蒸发余核的速率低得观测不到。

最近在日本 RIKEN 研究所进行的最具挑战性的冷熔合实验中, 使用 $^{209}_{83}\text{Bi}$ 靶和 $^{70}_{30}\text{Zn}$ 炮弹, 从 2003 年到 2012 年共运行 9 年, 束流打在靶上约 600 天。实验观测到同位素 $^{278}_{113}$ 的 3 条衰变链, 推算出通过冷熔合反应产生 $^{278}_{113}$ 的截面极小, 大约为 20 fb ($1 \text{ fb} = 10^{-39} \text{ cm}^2$), 是总反应截面的 $1/10^{12}$ 。

上世纪 90 年代末期, 俄罗斯联合核研究所(JINR)的研究人员成功地使用一种新技术生成了迄今为止最重的元素。他们从 $^{238}_{92}\text{U}$ 到 $^{249}_{98}\text{Cf}$ 的钢系

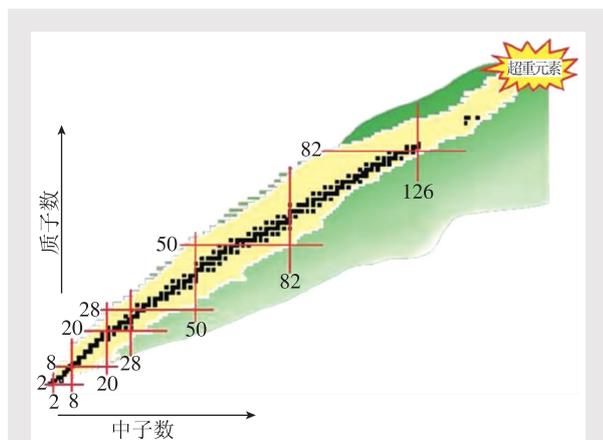


图1 核地貌(实验鉴别出的核在黄色区域, 仅预言可存在的核在绿色区域。黑色方块表示稳定同位素。核具有增强稳定性的幻数质子与中子数由红线标志。标有“超重元素”的星形表示超重元素区域)

核做靶，用质子数和中子数都是幻数的 $^{48}_{20}\text{Ca}$ 照射。由铜系靶核与 $^{48}_{20}\text{Ca}$ 炮弹核融合所生成的复合核一般通过蒸发3或4个中子冷却。用这种称作热熔合的新方法首次观测到元素113—118。2012年，国际纯粹与应用化学联合会(IUPAC)承认了元素114和116的发现，如今flerovium(Fl, 114)和livermorium(Lv, 116)已列入周期表中。

当用重离子束轰击靶时，各种反应产物都可能反冲出来，其中很少一部分是熔合一蒸发余核。需要使所有这些产物粒子和入射束粒子都通过电磁分离器，将感兴趣的粒子挑选出来，并注入探测器中。用于产生超重核的重离子束的强度在每秒 10^{13} 个粒子的数量级。而在靶上产生的超重元素事件的速率为几天到几个月1个事件。很明显，为超重核研究所设计的分离器的主要目的是有效地传输靶中产生的稀少的超重核，并去除大量的初始束粒子和其他不需要的反应产物。

两台最成功的分离器是GSI的SHIP和JINR的Dubna充气反冲分离器DGFRS，从Bh($Z=107$)到Cn($Z=112$)是在SHIP上发现的，而从 $Z=113$ 到118的6个元素是首先在DGFRS上探测到的。

入射离子与铜系靶原子融合生成处于基态的超重核的事件率极低。为将这样的事件从散射的多核子转移产物的本底中鉴别出来，研究人员要依赖对反冲蒸发余核自身产生的特征信号的测量和对其几个相继衰变信号的测量。

实验中，超重核触发飞行时间(TOF)探测器，产生1个有效的TOF信号，然后停止在注入探测器中。几秒钟甚至几毫秒后探测在同一位置出现的 α 粒子。如果该 α 粒子的能量与对超重核所预期的接近，该 α 信号便触发一个停束信号，阻挡住束流。这样可在没有束流引起的本底的情况下测量相继

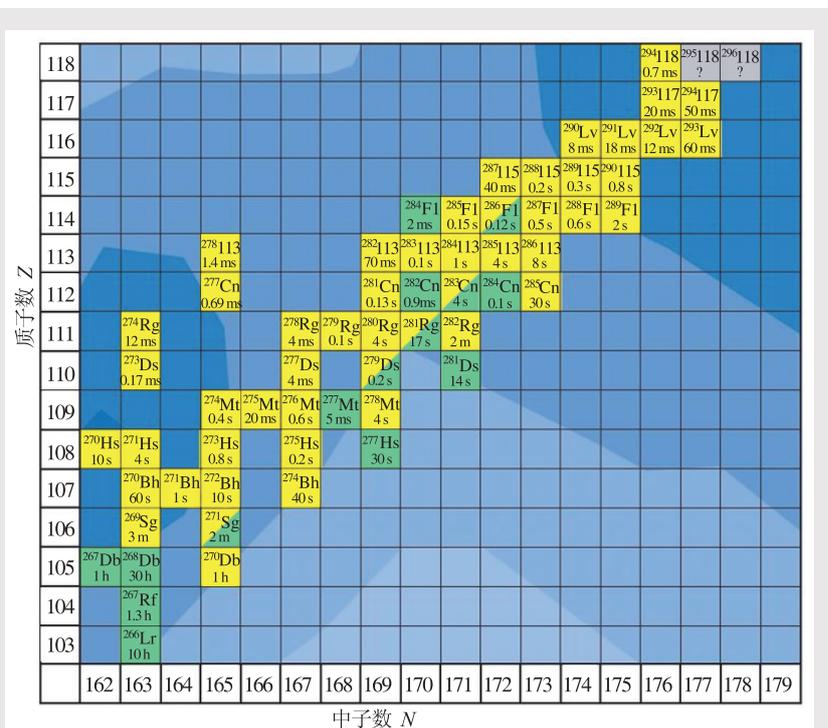


图2 核地貌的顶部(图中标有已鉴别出的最重的那些核及其半衰期和衰变模式。黄色表示 α 衰变,绿色表示自发裂变。彩色的背景表示所预言的核的稳定性,颜色越深,核越稳定。俄罗斯和美国的合作团队在研究用钙-48束流和同位素混合的铜靶合成新的同位素 $^{295}_{118}$ 和 $^{296}_{118}$ (见灰色方块))

的衰变。如果在同一位置观测到一个 α 衰变,停束时间便延长几分钟甚至几小时,直至探测到最终的衰变—自发裂变的信号。

在最近的从同位素 $^{288}_{115}$ 开始的衰变链的研究中,同时进行了 α 谱学和 γ 射线及X射线的测量。实验中,研究人员首次用高能量分辨的锗探测器观察到来自稳定岛的同位素激发态的 γ 跃迁。

在过去的15年内,在 $^{48}_{20}\text{Ca}$ 束与铜系靶的热熔合中合成了50多种超重核以及从 $Z=113$ 到118的6种新元素。具有增强的稳定性的超重核的存在和长期寻找的稳定岛的实验证实是这些研究的重要结果。新合成的稳定岛上的核如图2所示。

现在有几个研究组在直接测量热熔合岛上的核的质量数。从 $^{252}_{102}\text{No}$ 到 $^{254}_{102}\text{No}$, $^{256}_{103}\text{Lr}$ 和 $^{257}_{103}\text{Lr}$ 是已直接精确测量了质量的最重的核。

最近ORNL的研究人员为JINR生产了含有 $^{249}_{98}\text{Cf}$ (50%), $^{250}_{98}\text{Cf}$ (15%)和 $^{251}_{98}\text{Cf}$ (35%)的靶,可以用来寻找比已合成的核更重的 $^{295}_{118}$ 和 $^{296}_{118}$ 。将周期表扩展到超过118号元素需要原子序数大于20而且比 $^{48}_{20}\text{Ca}$ 更重的炮弹核。近来,使用 $^{50}_{22}\text{Ti}$ 和 $^{54}_{24}\text{Cr}$ 以及早些时候使用 $^{58}_{26}\text{Fe}$ 和 $^{64}_{28}\text{Ni}$ 合成更重的元素的工作没有成功。显然,为了合成稳定岛上的新元素,必须采用能使束流强度提高10倍,使打到靶上的束流粒子总数大于 10^{20} 的技术。

超重核物理中需要的新技术包括像正在JINR建造的超重元素工厂那样的下一代加速器装置、耐用的靶的生产工艺和先进的探测器阵列。新技术的进展将使生产大量的最重的核成为可能,从而增进我们对核结构特性和原子特性的认识。