

壳稳定的最重元素

P. Armbruster 和 G. Münzenberg

原子序数为 107、108 和 109 的至今最重的化学元素的制备和发展其决定性意义在于证明了这些元素在量子力学序数效应基础上的稳定性。

至今已知的 109 个元素中有 80 个原子核是稳定的, 最后一个稳定元素是铼(Re)。元素的放射性是 1898 年从铀中首先发现的, 我们这一世纪的科学研究继续了对放射性元素的探索。

我们把 1981 年至 1984 年期间 Darmstadt 发现 $Z = 107$ 至 109 号元素以及研究元素制备极限的实验介绍如下。

原子核的极限世界

原子核与化学元素相似, 显示出周期性的特征结构。人们发现, 当核子数为 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 时特别稳定。由于壳结构的影响, 与相同核子数但不构成小滴的核物质比较, 核的结合能可以增加 11MeV (在 Pb-208 的情况下)。

稳定的重核几乎呈球形。它们相互吸引的核力刚好抵消静电斥力。但核的小小的形变就会使斥力占优势, 引起核裂变。在核力和库仑力几乎平衡的情况下, 由于壳结构而稍为高了几个兆电子伏的结合能就起着决定性的作用。铅后面几乎所有的核, 当壳结构影响到结合能时, 则呈现稳定的趋势。

人们预期, 当质子数为 114 和中子数为 184 时, 也会有一个像铅-208 那样的闭质子和中子壳结构。但是这些超重的壳稳定元素相对于铀-钷岛是不稳定的。最近 20 年来, 核物理研究的一个目的就是要发现这些元素。随着 107 至 109 号元素的发现, 我们悄悄地靠近了超重元素区。

从中子俘获到冷熔合

从 1941 年发现钷以来, 已经合成了 400 t 这种元素, 相当于 10^{30} 个原子。而 109 号元素只能得到几个原子。两种反应截面相差 10^{13} 倍(图 1)。

在生产钷时所用的靶厚为几 cm, 在生产 109 号元素的熔合反应中只有几百 μm 。在世界上众多的反应堆中, 许多吨的中子被铀-238 吸收。相反, 在生产 109 号元素时, 只能把仅仅 100 μg 的铁-58 引入反应。这就是为什么重离子加速器在相应的时间里每天只能生产少于一个原子的 109 号元素而却能生产多至 30 kg 的钷-239。

只有长寿命的同位素才能产生可称量级的元素, 但是从钷到 109 号元素, 半衰期下降了 17 个数量级。

图 1 给出了生成超铀元素的截面。元素钷($Z = 93$) 至钷($Z = 100$) 通过在反应堆中俘获热中子或在加速器中用 α 粒子得到。钷($Z = 101$) 以后的元素通过核熔合反应得到。首先用最重的人工放射性元素作为靶子, 炮弹是轻元素如硼、碳或氧。最重的元素通过稳定的铅或铋核和中等重量的元素如钛、铬或铁作为炮弹熔合得到。重元素的寿命非常短。因此, 这些原子必须在照射过程中证明和鉴定。它们的生成率从 102 号元素每秒 1 个原子降到 109 号元素每天少于 1 个原子。

为了得到 107 至 109 号元素, 我们利用了熔合核反应。与产生 102 至 106 号元素所用的反应相比较, 它在生成的熔合核中产生相对说来微不足道的热量, 靶子必须用中重离子而不是轻离子进行照射。

物理学家们揭示了利用这个反应合成元素的可能性。 ^{208}Pb 或 ^{209}Bi 和 ^{12}C 或 ^{16}O 熔合时, 生成核的激发能为 20MeV 左右, 而在重铀系(^{248}Cf , ^{249}Bk 或 ^{250}Cm) 和 ^{12}C , ^{15}N 或 ^{16}O

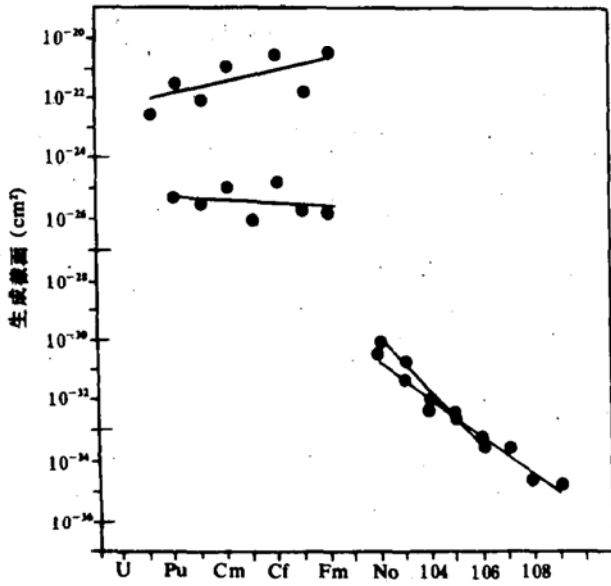


图 1

熔合时的激发能约为 45 MeV。在这种情况下,生成核在退激时发射 4 个中子。而新的反应类型可以只发射一个中子。冷熔合反应的优点之一是在复合核的冷却过程中只有很小的损失率。但是这两种反应在开始时生成截面的差别很小(图 1),从 106 号元素起,显示出冷熔合的优越性来。我们的实验解释了为什么:两个重核在熔合时的库仑斥力越来越阻碍了越过熔合位垒。由相对动能转化成的复合核激发能不再用来越过熔合位垒。为了抵消损失,往往提高相应的人射能量。这样一来,由于相对高的激发能而使残存的核数减少。生成重元素的最大截面在熔合位垒左右约 5 MeV 的一个窄的能量范围内。穿透熔合位垒几率的下降使生成截面随之下降。从 106 号元素开始,总是把人射道的阻滞效应计算在内。更重元素的生成截面继续下降。冷熔合反应继续保持退激过程中损失较小的优点。因此,这种反应类型将最有成功的希望得到 110 和 111 号元素,其生成截面应在 10^{-36}cm^2 的范围内,生成率为每个月一个原子。

107 至 109 号元素

用达姆施达特 UNILAC - SHIP 和衰变

级联的三结合方法确切地证明了 107 至 109 号元素。首先用重离子加速器 UNILAC 从丰中子稳定同位素铬 - 54 和铁 - 58 产生 $3 \times 10^{12} \text{ n/s}$ 的束流,能量达到 300 MeV。当能量精确度为 5×10^{-3} 时,有可能达到约 10^{18} 粒子的照射剂量。被照射的靶子是 $400 \mu\text{g/cm}^2$ 的 ^{208}Pb 或 ^{209}Bi 薄层蒸发在 $50 \mu\text{g/cm}^2$ 厚的碳膜上。在通过 SHIP 和关联分析分类以后把衰变链进行确定同位素的单个鉴定。

1981 年在 ^{54}Cr 和 ^{209}Bi 反应中得到了 $^{262}107$ 同位素。图 2 的左边举出了一个少见的例子。它是从现在的 38 条链中找出来的。这条链有几代 α 衰变。

109 号元素是在 1982 年 8 月 29 日 16 时 10 分从 ^{58}Fe 和 ^{209}Bi 的反应的一个单一衰变链中鉴定的(图 2 右)。在这个链中,我们只观察到了 $^{262}107$ 的一部分能量的 α 衰变。40% 的 α 粒子没有完全把能量消耗在探测器中。 $^{258}105$ 同位素通过电子俘获衰变到自发裂变的 $^{258}104$ 。我们观察到的裂变是在 10 天的测量时间中确证的唯一的裂变。由一条链确定衰变能量,半衰期和截面误差很大。第二条衰变链是在 1988 年初(在鉴定了 109 号元素后的六年)观察到的。它确认了 1982 年测得的事件。

1984 年在 ^{58}Fe 和 ^{208}Pb 的反应中鉴定了 $^{265}108$ 同位素的三条衰变链(图 2 中)。107 和 109 号元素的两个同位素中有双奇同位素,其裂变几率猛烈下降。在 108 号元素中发现了一个偶 - 奇同位素,其裂变几率明显地大,但它也有 α 衰变。

特别有趣的是,我们没有证明 107 至 109 号元素的自发裂变同位素。并且偶 - 偶同位素 $^{266}104$ 、 $^{260}106$ 和 $^{264}108$ 对自发裂变显示出几乎同样的稳定性。

图 2 是生成 107、108 和 109 号元素反应的衰变链示意图。新元素产生的时间列于上方。衰变能量(MeV)和衰变时测得的关联时间是指测定的单个成分而言,不是指半衰

期。给出的链利用了已知子体核的衰变特性。有可能明确地鉴定 $^{262}_{107}$ 、 $^{265}_{108}$ 和 $^{266}_{109}$ 的原子核。在达姆施达特,到目前为止,观察

到107号元素的38条链,108号元素的4条链和109号元素的3条链。

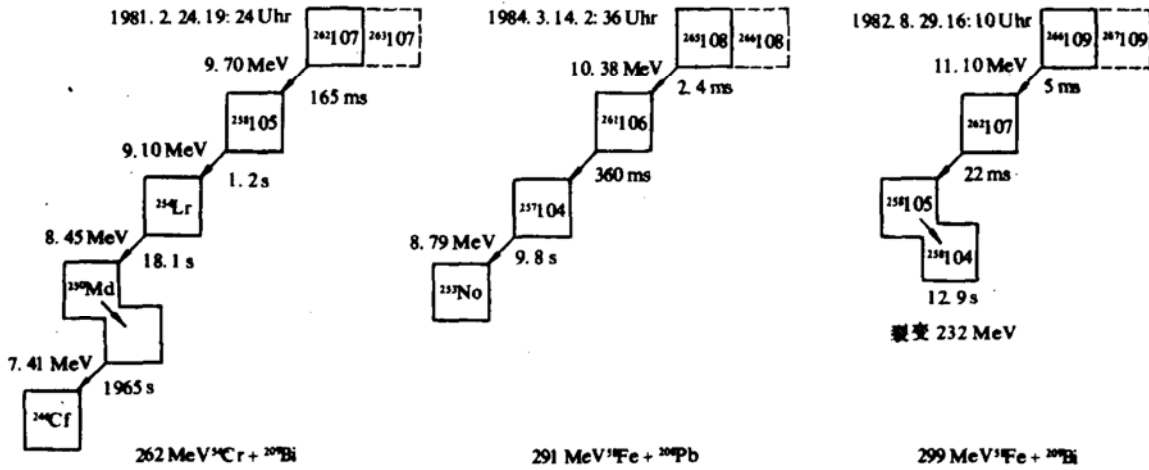


图 2

壳稳定性的证明

从铀-232至 $^{264}_{108}$ α 衰变链的所有同位素其壳效应是往上生长的;其相应的值从1到2MeV升高至6到7MeV。一个核对自发裂变的衰变稳定性是通过它的裂变位垒来决定的。带电核滴理论有可能计算裂变位垒。由此得到,从铀-232的位垒为6MeV降到106号元素以上位垒消失。有一些核作为液滴本来对裂变是不稳定的,但通过壳结构变成了稳定的(超重元素就建立在此基础上)。

由测量质量亏损得到的裂变位垒示于图3。从铀到108号元素,其位垒高度都一样,约为 6 ± 1 MeV。由Adam Sobiezwski(华沙)和Peter Möller(隆特)理论计算得到的裂变位垒与我们的测量值符合得很好。

另外一个可以接受的测量值是自发裂变的半衰期,它由裂变位垒的宽度和高度决定。我们把测量值和计算值进行比较,得出106和108号元素的寿命通过壳结构提高了

15个数量级。

从半衰期和裂变位垒高度有可能估计裂变位垒的宽度。与铀元素相比,重元素具有狭的位垒。与钽和铷之间的铷系元素的特征的双峰位垒相反,超铷系元素是单个的狭的位垒。由于狭的位垒容易被穿透,从而使裂变具有短半衰期。

图3给出了在铀-232和 $^{264}_{108}$ 之间中子过剩 $N - Z = 48$ 的偶质子和中子数的同位素的裂变位垒高度对所有的同位素大致上都在6MeV左右。这是由比较质量亏损和相应的带电核物质小滴的裂变位垒测得的质量亏损得到的。裂变位垒的计算值与测得的实验值符合得很好。如超重元素所要求的那样, $^{264}_{108}$ 是一个壳稳定核。

我们发现 α 发射岛是通过壳结构呈现稳定趋势的直接结果。在七十年代曾经预言为稳定球形的类铅-208的超重元素在114号元素附近,实际上比预期的要早得多。

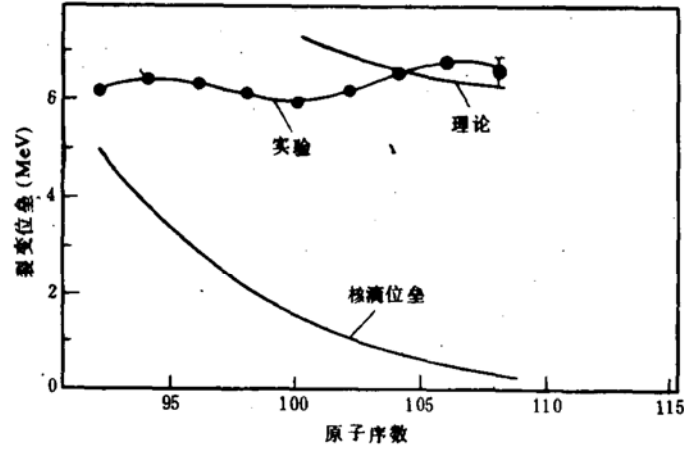


图 3

与铅后面的 83 号和 90 号元素之间的窄的不稳定沟相反, 在 $Z=92$ 与 $Z=114$ 之间其寿命的变化是缓慢而稳定的。

在超重元素岛外, 将有一个通过浅滩和核滴大陆相连的低岛, 它的堤岸将通过费米系统的量子力学序数变得稳定(图 4)。新的同位素在浅滩上。只是, 它属于大陆还是属于低岛? 无论如何, 由于其基态的壳稳定性, 它们也将是可以证明的。

图 4 通过质子 - 中子平面表示给出了对结合能的校正。由于闭壳层提高核的结合, 1966 年人们曾预言在 $^{298}114$ 处有一个重元素岛。根据新的计算, 通过 7.3 和 9.4 MeV 的壳校正, 仅仅在 $^{273}109$ 和 $^{291}115$ 显示出两个峰。从铀至 114 号元素, 壳校正逐渐提高, 达到目前已证明的 $^{266}109$ 同位素的 5.8 MeV, 与我们对 $(N - Z = 48)$ 的同位素的 α 衰变能的分析符合得很好。可达到的同位素

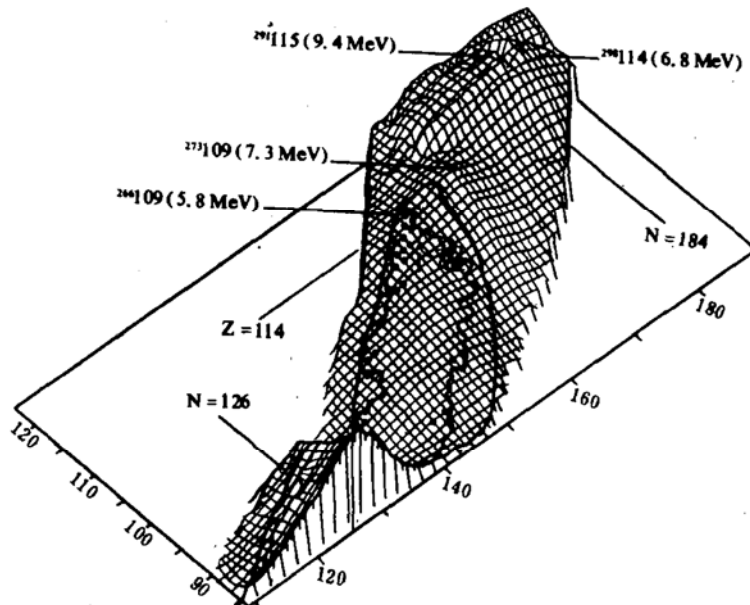


图 4

区的终点不是由同位素的基态稳定性, 而是由它们的可合成性来决定, 用冷熔合的方法

发现了 107 至 109 号元素, 应该也可能得到 110 和 111 号元素。

可实现的极限

当壳结构对结合能理论的新预言在实验可提供的范围内得到很好证明的同时,可以看到从 106 至 126 号元素,有一个包含 400 个超重核的区域,其裂变位垒超过 4MeV。所有这些同位素的半衰期都可能超过 10^{-6} s。在 $^{273}109$ 和 $^{291}115$ 附近预期会有一个特别稳定的区域。在中子数 166 附近,基态形变有所变化。轻同位素是形变的,而重同位素则呈球形。

最近 20 年来企图达到稳定中心(在 $^{288}114$) 同位素的所有努力都遭到失败,从而冷却了人们在七十年代曾寄予的厚望。

制备这个脆弱的产物何以受到了限制? 从我们对熔合的深入研究,得出了有关这个限制的重要结论。

具有球形基态的壳稳定核总是在 15MeV 的激发能时发生衰变。相反,形变核直至 40MeV 仍可存在。要想得到中子数大于 166 的球形超重同位素,只有在具有极小的激发能的反应中才能成功。在 ^{48}Ca 和 ^{248}Cm 的反应中,其激发能约为 30MeV。我们所知道的成功试验是制备形变核的超重元素;至今其原子序数总是被限制在 110 以下。

重于 106 号元素的复合核(总是在开始阶段受到阻碍)必须克服熔合位垒。当终态核是不对称结合的出射道核时,这个阻碍达到最小;最重的靶子应该提供最合适的出射道状态。另一方面在刚刚达到克服熔合位垒的最小入射能时,在熔合时终态核的激发对这个体系来说又是最大的,因此在熔合核退激时发生裂变的损失最大。所选择的结合不对称性很小时,在冷却过程中损失也少。在终态的最小损失和复合核的最大生成几率之间,铅靶附近的对称体系协调得最好。

以铅和铋作靶子充分地利用了这些核的壳结构。通过这些双闭壳层核的强烈结合使终态核的激发降低 10MeV 以上。这样,裂变损失减小许多。利用球形强结合、相对硬的核

配对时,可以观察到在入射道其阻碍要小得多。

壳稳定元素的概念与熔合过程动力学相符合。在液滴动力学适用的范围内有可能制得原子序数大约到 105 的元素。但是在诸多因素的综合作用下,如核对冷熔合中的壳结构、动力学中的壳效应和充分利用复合核体系中激发时形变的壳稳定核的高稳定性等,使我们只可能制得第一个超重元素中的少数几个同位素,并且开始懂得为什么很难制得更重的元素。

下一步 110 和 111 号元素用这种方法只能在 ^{62}Ni 和 ^{208}Pb 或 ^{209}Bi 的反应中以 10^{-36}cm^2 的截面生成。我们对这个结果完全有把握,但需要时间和耐心。

我们通过由天然同位素熔合合成只有一个原子核的衰变来鉴定一个同位素的方法打开了一条走向超重元素的通路。过去对于制备超重元素所推荐的概念完全颠了个倒:可合成的元素是形变核,而不是如 1966 年所假定的球形核。自然界中存在的丰富的球形原子核和相应的重入射弹核的熔合才是稳定的,而不是用最重的人工制造的放射性的形变原子核和相应的轻入射弹核进行熔合。只有在尽可能最低的人射能量下,尽可能地缓和的熔合才能成功,而不是如早先所推荐的应该借助于附加的能量进行强制性地熔合。

(范我摘译自 *Spektrum der Wissenschaft*, 1988 年 9 月号)