

用 $^{48}\text{Ca} + ^{248}\text{Cm}$ 反应合成 超重元素的最新尝试

G. Herrmann

人们认为,利用 $^{48}\text{Ca} + ^{248}\text{Cm}$ 的熔合反应是合成超重元素的最有效的方法之一,因为由此得到的复合核是 $Z=116$ 号元素的同位素(中子数 $N=180$),离双幻核 $Z=114, N=184$ 最近。理论预言,这个双幻核正是第一稳定岛的中心。如果没有壳效应,这个复合核将立即分裂为两块。实验和理论表明,试图利用熔合反应来合成超重核,要求靶越重越好,而炮弹越轻越好,且两者都应该是丰中子的。 ^{248}Cm 是目前采用的最重的丰中子靶,但是量很少,只有几毫克;而 ^{48}Ca 则被认为是最适合于同 ^{248}Cm 发生熔合反应的丰中子同位素;这两个核都是远离 β 稳定线的例外核,在自然界中, ^{48}Ca 的丰度只有0.19%,因此,要得到有用的 ^{48}Ca 束流,费用是很大的。美国和苏联也只有少量的 ^{248}Cm 。

几年前,伯克利和杜布纳几乎同时进行了 $^{48}\text{Ca} + ^{248}\text{Cm}$ 的熔合实验。当时选择的炮弹能量为20MeV,超过了两个核的库仑位垒;因为即使复合核具有40MeV的激发能,也不会完全洗掉它的壳效应,因此,选择上述轰击能量仍有足够大的几率形成超重核。但是,这两个实验都未曾得到肯定的结果,只预言了产生截面为 $10^{-34} \sim 10^{-35}\text{cm}^2$,半寿命为1秒到10年。近年来,关于这方面的知识又积累了不少,大部分工作都是在尤尼拉克(UNILAC)上作的。已经发现,球形核的壳效应对激发能的敏感程度比过去估计的要强得多。当激发能为30~40MeV时,壳效应已不复存在。当炮弹能量正好等于库仑位垒时,上述反应所得到的复合核的激发能为26

MeV左右,仅稍低于上面给出的临界值;另外,还有证据表明,对于重核的熔合反应可望在库仑位垒以下进行。

正是由于这些原因,人们对用熔合反应 $^{48}\text{Ca} + ^{248}\text{Cm}$ 来合成超重核的兴趣又越来越大,并进行了广泛的国际合作,比如GSI,伯克利,美因兹,洛斯·阿拉莫斯,伯尔尼和哥庭根等。为此,人们用了不同方法测量短寿命事件,估计了炮弹 $^{40}\text{Ca}, ^{48}\text{Ca}$ 和靶 ^{248}Cm 之间的转移截面对合成超重核的影响,但这里不打算报导。

第一个系列实验是去年10月在伯克利的超级重离子直线加速器(SuperHILAC)上进行的;第二个系列实验是今年3~4月份在达姆斯塔特的尤尼拉克上完成的。整个计划由若干独立的实验组成,其中包括:

1 薄靶实验。半寿命从几微秒到几天;进行这种实验的有伯克利和达姆斯塔特,前者采用了充气的质量分离器SASSY,后者采用了速度滤波器SHIP;

2 厚靶实验。半寿命从几秒到几年,采用的都是放射化学方法,进行这种实验的有伯克利,它们用了两种不同的离线方法;达姆斯塔特,它们采用了三种不同的在线方法;还有美因兹,它们首先对伯克利的样品进行化学处理,然后对瞬发裂变进行测量。

业已证明,把化学方法和物理方法结合起来是一种切实可行的途径,因为这些方法都有各自的优点和缺点,可以互相取长补短。迄今我们知道,当半寿命小于1秒时,用电磁方法分离反应产物是一种最有效的方法。

法, 虽然超重核所涉及的寿命范围很宽, 也可对它进行适当处理。但是, 该方法要求必须使用薄靶(比如 $0.3\text{mg}/\text{cm}^2$); 而且要是最佳炮弹能量不能正确估计的话, 必须对不同轰击能量逐个进行实验; 此外, 如果超重元素不是通过重离子反应而是通过复杂的衰变链来得到的话, 该方法就不再适用。

化学方法可用于厚靶。正因为靶厚, 在一次轰击下, 炮弹能量可以在很宽的范围内变化, 但该方法的灵敏度与蒸发过程无关。实验采用了厚度为 $1.7\text{mg}/\text{cm}^2$ 的Cm的氧化物作靶; 在如此厚的靶内, 轰击能量可展宽15 MeV。这个方法的主要问题是要求对未知核的化学性质作出准确的估计, 为此必须对基态的电子结构进行量子化学计算, 准确给出这些元素在周期表中的位置。虽然任何一种化学方法均可同时分离几种元素, 但是没有一种方法可以把稳定岛附近的所有元素分离出来, 为了尽可能分离更多的元素, 我们采用了三种不同的分离方法; 我们用探测器可以测到瞬发裂变碎片; 如果在产物中不包括锕系或轻的超锕系元素的话, 超重元素的衰变方式是完全确定的, 这样就要求我们把这元素有效地分离出去, 特别是当靶核本身伴随自发裂变而不断衰变时, 更要仔细处理。

利用SHIP方法可以测量极稀少的事件, 在寻找107号元素时就曾用过这个方法; 至于放射化学的离线方法在过去也曾介绍过, 这里只对放射化学的在线技术作一简单介绍。正如离线方法一样, 在线技术也是基于如下考虑:

1 元素112~117都是在温度 1000°C 情况下易挥发的元素;

2 即使在室温下, 其中某些元素, 比如112, 114和118也是易挥发的;

3 在元素108~116的水溶液中, 应当形成溴化物的络合物。

可见116号元素应该既具有1和3的特征, 也具有2的特征。

图1—3给出了GSI和美因兹采用的三种不同方法的工作原理。图中标明了能测到的最短寿命, 这是用在线实验测定短寿命同位素得到的; 这些方法的一个共同点是都采用了气体喷射传输技术。从 ^{248}Cm 靶中反冲出来的反应产物, 被气体中少量的KCl微粒吸附, 同时被快速流动的气流带到化学分离器和探测器。三种方法虽然都采用了这种技术, 但具体结构也是稍有不同的。

在温度 1000°C 情况下, 易挥发元素的在线气相化学原理如图1所示, 携带反应产物的KCl微粒, 在温度为 1000°C 的石英纤维塞子内部分解, 不挥发的元素沉积在石英粉末柱上, 喷射气体再携带着这些挥发元素穿过这些柱状物, 沉积在He冷却的镍箔上。收集箔可在两个面垒探测器之间步进转动, 借此测量 α 粒子和瞬发裂变碎片。

图2给出了低温气相化学原理, 不挥发元素同样沉积在 1000°C 的石英粉末柱上。易挥发元素通过一根毛细管穿过一块环形面垒探测器, 而后凝聚在冷却的太阳电池上。计数系统可对裂变碎片的能量进行符合测量。

图3给出了水解化学原理。看得出来整个过程是循环工作的。喷射气体携带的反应产物被玻璃过滤器收集, 截断喷射气体, 用稀释的溴酸溶液进行冲洗, 即可溶解喷射气体所携带的元素, 再把它送到阳离子交换柱进行离子交换, 锕系元素将被树脂吸附, 仅让超重元素通过。只要用碳膜收集那些从交换柱出来的液滴, 经过蒸发干燥就可进行测量; 与此同时再将喷嘴接通, 准备收集下一次样品。

结果表明, 这次实验还不足以证明超重核确实存在。 ^{43}Ca 的累积剂量大约为 $10^{16}\sim 10^{17}$ 粒子, 复合核的激发能为 $16\sim 40\text{MeV}$, 实验结果如封面图所示。纵坐标是截面上限, 横坐标是半寿命。注意每一种方法都存在一个最佳寿命区域, 超出这个区域, 这个方法就不灵敏了。不同曲线是用不同方法得

(下转20页)

(上接12页)

到的, 例如

- 1 小角度分离系统SASSY,
- 2 速度滤波器SHIP,
- 3 高温在线气相化学,
- 4 低温在线气相化学,
- 5 准在线溶解化学,
- 6 离线化学。

从封面图可以看出, 实验所涉及到的半寿命从微秒到十年, 相差13个量级; 在如此宽的寿命范围内, 测量的灵敏度仍然很高。为了比较, 图中用虚线给出了在高轰击能量下截面上限的包络。这些结果已在最近召开

的一次国际核物理会议上作过介绍。

下一步计划是打算选择 ^{254}Es 作靶, 利用 $^{43}\text{Ca} + ^{254}\text{Es}$ 的熔合反应来合成超重元素, 其复合核是 $Z = 119$, $N = 183$ 。这个中子数很接近 $N = 184$ 的中子壳, 它的稳定性比 $Z = 114$ 的质子壳要强得多。但是, 这个反应能否在库仑位垒以下进行仍是一个尚待解决的问题。在超铀元素的研究计划中, 上述计划已名列前茅。

(插图和参考文献略)

(罗诗裕, 邵明珠译自“GSI Nachrichten, 1983, 第10期, 5—9页”)