

# 超重核合成的新进展\*

张焕乔

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

摘 要 介绍了在充气分离器上用 $^{244}\text{Pu}(^{48}\text{Ca}, 3n)^{289}\text{114}$ 和 $^{208}\text{Pb}(^{84}\text{Kr}, n)^{293}\text{118}$ 反应分别合成超重核 $^{289}\text{114}$ 和 $^{293}\text{118}$ 的新发现.

关键词 超重核  $\alpha$ 级联衰变 自发裂变 充气分离器

分类号 O571.2

## 1 引言

自60年代中期以来,以不同形式的壳模型实现的计算均预言存在一个以 $Z=114$ 和 $N=184$ 为中心的超重核稳定岛,新近的计算预言,最稳定区域可能在 $Z=120$ 或 $Z=126$ 附近.这个预言一直是推动重离子核物理发展的主要动力之一.多年来科学家一直企图在自然界和实验室去寻找和合成超重核.过去15年里,GSI曾用重离子“热熔合”和“冷熔合”方法分别首家合成了重元素107~109和110~112.从外推合成重元素110~112的已有数据表明,要达到更重元素,需要成量级地增大加速器束流强度和采用新靶技术.近些年来,在重元素合成方面取得了飞快进展<sup>[1]</sup>,特别是最近有了新突破.

1999年1月和5月,在俄罗斯杜布纳联合核研究所和美国加州劳伦茨贝克莱国家实验室分别合成了 $^{289}\text{114}$ 和 $^{293}\text{118}$ 超重核.他们分别利用 $^{244}\text{Pu}(^{48}\text{Ca}, 3n)^{289}\text{114}$ 和 $^{208}\text{Pb}(^{84}\text{Kr}, n)^{293}\text{118}$ 反应在各自的充气分离器上配备飞行时间(TOF)和焦面探测系统实现在时间和位置上关联测量 $\alpha$ 级联衰变和自发裂变来鉴别合成的超重核 $^{289}\text{114}$ 和 $^{293}\text{118}$ .

## 2 $^{289}\text{114}$ 超重核的合成

$^{289}\text{114}$ 超重核是俄罗斯联合核研究所核反应实验室的研究组与美国利弗莫尔国家实

验室的研究组合作<sup>[2]</sup>在杜布纳U-400重离子回旋加速器上,用236 MeV  $^{48}\text{Ca}^{5+}$ 束流轰击 $^{244}\text{Pu}$ 靶,以3n蒸发道产生的.组合系统在位垒处的激发能约30 MeV.靶上束流平均强度 $4 \times 10^{12}$  pps,持续了40天.靶以 $\text{PuO}_2$ 形态的浓缩 $^{244}\text{Pu}$ (98.6%)沉积到1.5  $\mu\text{m}$ 厚的Ti箔上,靶厚0.37 mg/cm<sup>2</sup>.实验中将9块靶装在一个转盘上,以2 000 rpm的转速跨束.从靶上反冲出的蒸发余核(EVR)通过充气分离器<sup>[2]</sup>后,与束粒子和各种转移反应产物分开,穿过TOF系统并注入焦面探测器.探测系统总计数率15/s.用 $^{48}\text{Ca}$ 离子轰击天然Yb和浓缩 $^{204,206\sim 208}\text{Pb}$ 靶的测试实验来估计分离器的收集效率.推出靶上产生 $Z=114$ 反冲核的40%注入到焦面.TOF探测器(探测效率约99.7%)测量反冲核的飞行时间,由此区分通过分离器的粒子在焦面探测器上产生的信号与注入核衰变产生的信号.焦面探测器由3块40 cm $\times$ 40 cm Camberra硅半导体探测器组成,每块探测器有40 mm高 $\times$ 10 mm宽的4条硅带在垂直方向位置灵敏.为了对逃逸焦面探测器的 $\alpha$ 粒子增加探测效率,安装8块无位置灵敏的同类型探测器去包围焦面探测器.使 $\alpha$ 粒子的探测效率达 $4\pi$ 的87%.为了排除来自低电离的轻离子信号,在焦面探测系统的后面安装了3个类似的反符合探测器.

利用上述测试反应生成核素衰变的 $\alpha$ 峰周期地进行了 $\alpha$ 能量刻度.裂变能量刻度是

\* 收稿日期: 1999-07-13.

通过探测<sup>252</sup>No 自发裂变碎片获得的. 利用焦面探测器探测 α 粒子的能量分辨≈ 45 keV; 边探测器探测逃逸 α 粒子的能量分辨≈ 180 keV. 焦面探测器的位置分辨: 对 α-α 级联衰变是± 0.8 mm (95% 可信水平); 对 EVR-α 信号是± 1.2 mm; 对 EVR-自发裂变(SF) 信号是± 1.1 mm. 利用测试实验对该系统关联测量反冲核的 α 级联衰变至自发裂变的可靠性进行了检验.

在数据分析中, 假定超重核稳定岛有较宽的核区, 这些核对自发裂变是不稳定的. 只要任何 α 链延迟至稳定岛的边缘, 应当以自发裂变终结. 图1(a) 给出了一个完整位置关联的衰变链. 在测定能量  $E_{EVR} = 6.1$  MeV 的反冲核注入第8条硅带中间后的30.4 s, 焦面探测器探测到1个 α 粒子, 相应的  $E_{EVR}$  值与 114 反冲核预期能量相符, TOF 信号与全熔合蒸发余核预期的一致. 第1个 α 粒子能量  $E_{\alpha} = 9.71$  MeV. 在15.4 min 后观测到了第2个 α 粒子能量,  $E_{\alpha} = 8.67$ . 1.6 min 后观测到了第3个 α 粒子, 它在逃逸焦面探测器留下能量  $E_{\alpha} = 4.04$  MeV, 在边探测器中被吸收, 能量  $E_{\alpha} = 4.79$  MeV, 总能量  $E_{\alpha} = 8.83$  MeV. 最后, 在16.5 min 后, 观测到了自发裂变事件. 因此, 这个级联事例全部信号 (EVR、α<sub>1</sub>、α<sub>2</sub>、α<sub>3</sub> 和 SF) 都在1.6 mm 位置区间出现[如图1(b) 所示]. 这强烈表示在观测的衰变中存在着关联. 通过蒙特卡罗模拟偶然符合或按实测的衰变能段和空间范围估算构成虚假事件的几率都是很小的, 可以排除本底干扰.

这个衰变链被认为是由母核经3个相继 α 衰变且持续到自发裂变发生的级联事件. 这相应于理论预言的超重核的衰变. 对整个衰变链, 就 α 衰变的基本规则, 满足给定的  $Q_{\alpha}$  对  $T_{\alpha}$  的关系. 从图(a) 可见, 这里给出了对特定原子序数的放射性同位素所预计的半衰期和相应测定的 α 粒子的能量. 半衰期计算采用 Viola 和 Seaborg 的公式, 参数取自 Smolanczuk 的工作<sup>[3]</sup>, 障碍因子取1和10. 从

实际测定级联衰变的  $T_{1/2}$  对  $E_{\alpha}$  的变化比已知, 放射性核有较大的值. 经过分析, 合作组认定这一事例母核的最佳候选者是偶奇同位素<sup>289</sup>114. 产生于3n 蒸发道, 截面约1 pb. 假定对奇中子原子核衰变有合理的障碍因子, 观测到原子核的衰变特性与 Smolanczuk 的计算<sup>[3]</sup>一致.

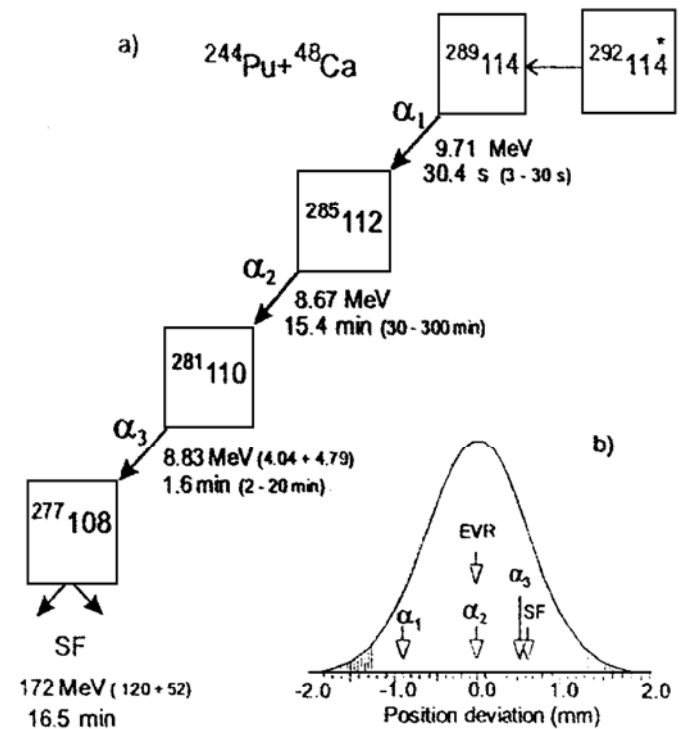


图1 (a) 观测衰变链的时间顺序和(b) 观测反冲核衰变事件的位置偏移

对给定同位素相应测量  $E_{\alpha}$  值预期的半衰期表示在测量寿命之后的括号内, 对奇中子数的原子核的 α 衰变假定障碍因子为1和10. 曲线表示对关联的 EVR-α 信号的位置分布, 空心面积相应 95% 可信水平.

新同位素的半衰期, 特别是<sup>285</sup>112 和<sup>281</sup>110, 似乎比已知核<sup>277</sup>112 和<sup>273</sup>110 将近长 $10^6$  倍, 而后者比前者少8个中子. 将观测的这些核素的衰变特性与他们早先得到的<sup>283</sup>112 数据结合在一起, 合作组认为这是在超重核区增强稳定性存在的第一个实验证明.

### 3 <sup>293</sup>118 超重核的合成

<sup>293</sup>118 超重核是 Ninov 等利用美国劳伦茨贝克莱国家实验室88英寸回旋加速器提供的459 MeV <sup>86</sup>Kr<sup>19+</sup> 离子 轰击<sup>208</sup>Pb 靶以 1n

蒸发道产生的. 熔合系统激发能为13 MeV. 实验以均流强约300 pA ( $1.9 \times 10^{12}$  ions/s) 的 $^{86}\text{Kr}$ 束穿过 $0.1 \text{ mg/cm}^2$ 厚的碳窗进入充气分离器<sup>[4]</sup>, 轰击与碳窗相距0.5 cm 的 $^{208}\text{Pb}$ 靶, 靶厚 $300 \sim 400 \text{ }\mu\text{g/cm}^2$ . 实验中9块铅靶装在一个转盘上以400 rpm 转速跨束. 靶中心束能为449 MeV. 在相对束流方向 $\pm 30^\circ$ 安装2块半导体探测器探测靶上弹性散射作束流监督. 在第1次实验期间(1999年4月), 靶上注入 $0.7 \times 10^{18}$ 离子剂量, 观测到2个关联的 EVR- $\alpha$  粒子衰变链. 在第2次实验期间(1999年5月初), 注入靶上 $1.6 \times 10^{18}$ 离子剂量, 观测到1个关联的 EVR- $\alpha$  衰变链.

蒸发余核在飞行中, 利用充气分离器磁刚度不同将其与束粒子和转移反应产物分开. 分离器充 $1.33 \times 10^2 \text{ Pa}$  的氦气. 磁刚度设在2.11 Tm. 最佳磁场设置是通过459 MeV  $^{86}\text{Kr} + ^{116}\text{Cd}$  类似反应估出  $B\rho \approx 1.50 \text{ Tm}$ , 从测量焦面 EVR 分布的刻度值来获得的.

分离器对 EVR 注入和传输的效率是通过研究 $^{86}\text{Kr} + ^{116}\text{Cd}$ 反应生成发射 $\alpha$ 粒子的 $^{194} \sim ^{198}\text{Po}$  同位素估计的. 从测量 Po 的注入率与预期 EVR 产生截面的比较, 估出分离器效率约75%. 该值与蒙等卡罗模拟值一致.

在分离器焦面前, EVR 穿过 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$  二维位置灵敏平行板雪崩计数器 (PPAC), 记录粒子的时间、 $\Delta E$ 、 $X$  和  $Y$  位置信号. 在第1次和第2次实验中, PPAC 距焦面探测器分别为3和29 cm. 在第2次实验中, 测量了 EVR 在 PPAC 与焦面探测器之间的 TOF. 依此区分了轰击焦面探测器与束流相关的粒子和注入原子的衰变事件.

反冲核穿过 PPAC 后注入焦面探测器, 它是有效面积 $80 \text{ mm} \times 35 \text{ mm}$ 、厚 $300 \text{ }\mu\text{m}$  的硅带探测器, 有16条硅带在垂直方向位置灵敏. 对 $^{86}\text{Kr} + ^{116}\text{Cd}$  反应, 反冲核- $\alpha$  粒子关联每条带的位置分辨是 $0.58 \text{ mm}$ . 用注入反冲核刻度焦面探测器每条带的能量响应, 测量 $5 \sim 9 \text{ MeV}$   $\alpha$  粒子的平均能量分辨是 $30 \text{ keV}$ . 焦面探测器探测注入核的第一个衰变  $\alpha$

粒子效率约60%. 在焦面探测器的背后又装了另一块 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$  的硅带“Punch-through”器, 将穿过焦面探测器的粒子反符合掉.

实验中得到在几种条件下焦面探测器记录的低能粒子谱给予图2. 图(a) 显示不开窗

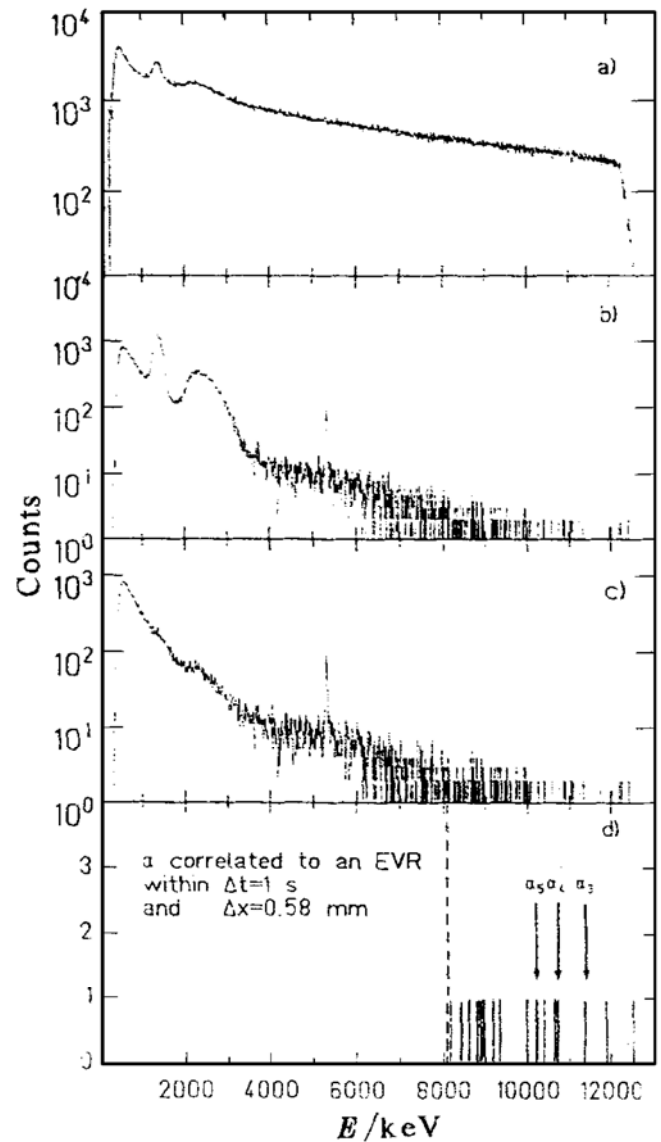


图2 在整个第2次实验期间焦面探测器记录的低能谱

(a) 不开窗的谱; (b) 加 PPAC 反符合的谱; (c) 加“Punch-through”探测器反符合的谱; (d) 在位置和时间(1 s 以内)与注入核关联能量在 $8.1 \leq E \leq 13.0 \text{ MeV}$  的全部事件的谱.

的谱; 图(b) 显示加 PPAC 反符合的谱; 图(c) 显示加“Punch-through”探测器反符合的谱; 图(d) 显示满足在位置和时间(1 s 以内)与注入反冲核关联条件下, 在 $8.1 \leq E \leq 13.0 \text{ MeV}$  能区的全部事件的谱.

对  $449 \text{ MeV } ^{86}\text{Kr} + ^{208}\text{Pb}$  反应已观测到注入重原子在位置和时间上与 6 个级联  $\alpha$  衰变关联的 3 个衰变链, 产生截面  $2.2^{+2.6}_{-0.8} \text{ pb}$ . 将观测到的关联(在时间和位置)用预言的  $^{293}118$  核的衰变顺序画在图 3 上. 对第 3 观测链, 表明存在“丢失” $\alpha$  粒子. 由于第 1 个衰变  $\alpha$  粒子出现在数据获取系统  $120 \mu\text{s}$  死时间之内, 造成丢失. 基于图 3 给出的顺序, 衰变链各成员的半衰期分别为  $120^{+180}_{-60} \mu\text{s}$  ( $^{293}118$ )、 $600^{+860}_{-300} \mu\text{s}$  ( $^{289}116$ )、 $580^{+870}_{-290} \mu\text{s}$  ( $^{285}114$ )、

$890^{+1300}_{-450} \mu\text{s}$  ( $^{281}112$ )、 $3.0^{+4.7}_{-1.5} \text{ ms}$  ( $^{277}110$ )、和  $1.2^{+1.7}_{-0.8} \text{ s}$  ( $^{273}\text{Hs}$ ). 每个链各成员的位置与刻度预示值在误差范围内一致. 图 2(d) 给出了感兴趣能区的小数目事件, 由这些衰变链引起的偶然关联几率完全可以忽略.

测得的  $\alpha$  粒子能量和它们的寿命与 Smolanczuk 的预言<sup>[5]</sup>相当一致, 这支持了上面提出的指定. 这里指定的母核和它的衰变产物全部是未知核. 因此这个结果应当作为很高原子序数新核形成的证明. 研究者们还

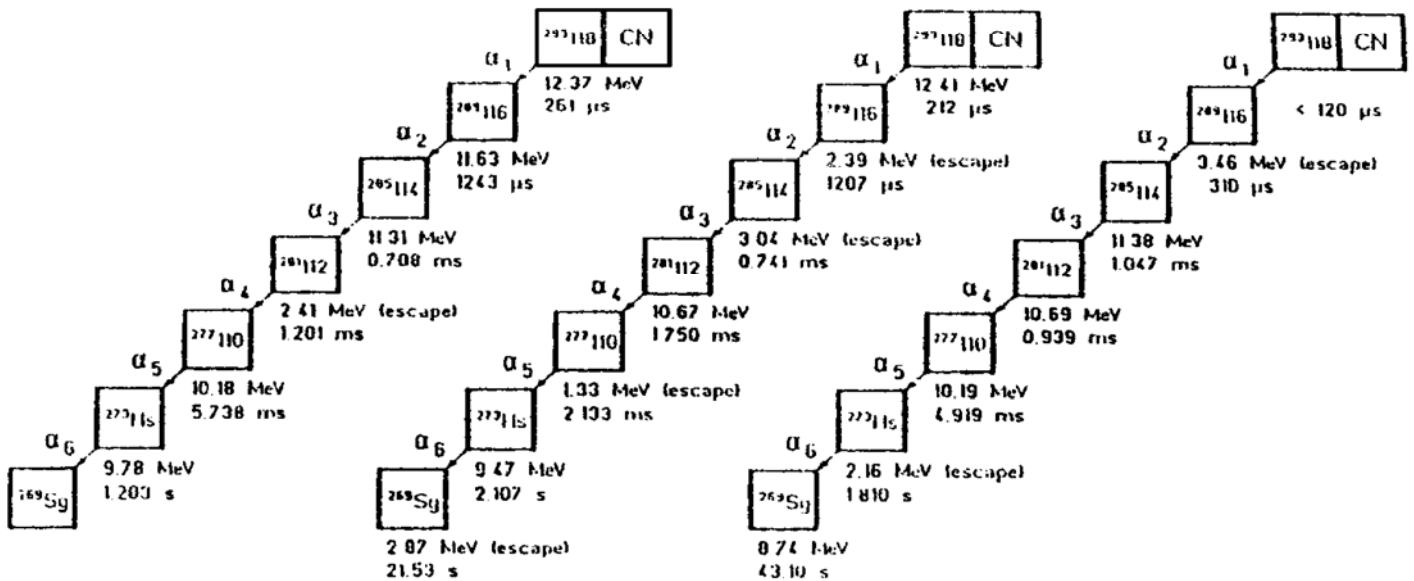


图 3 用实验观测指定  $^{293}118$  核的 3 个  $\alpha$  级联衰变链给出测定  $\alpha$  粒子能量和半衰期

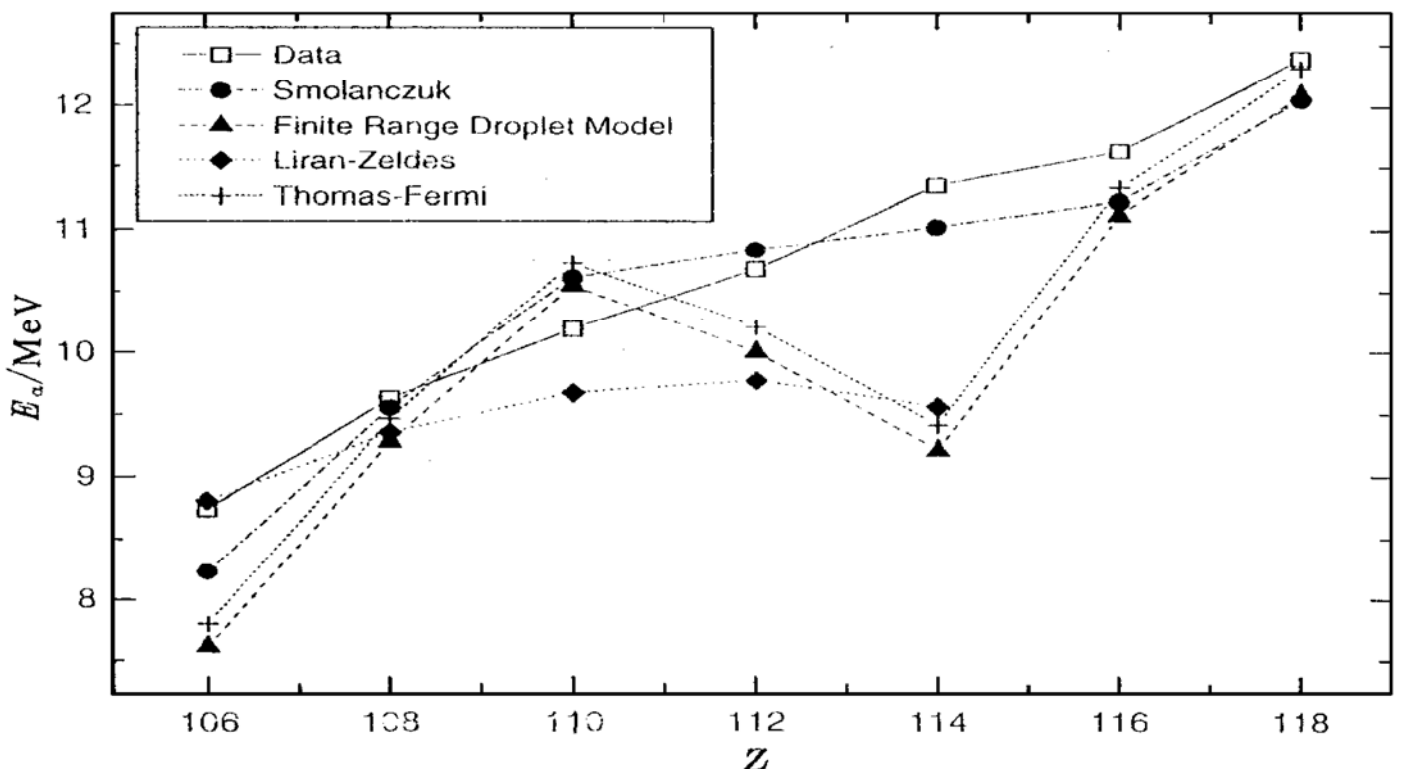


图 4 测定  $\alpha$  粒子能量与几个质量公式预言值作比较

计算了全熔合系统通过发射  $\alpha$  粒子或质子代替发射中子退激的可能性. 得出  $\Gamma_n/\Gamma_\alpha \approx 60$  和  $\Gamma_n/\Gamma_p \approx 2\,000$ , 而且熔合系统的激发能仅为 13 MeV, 发射 2 个中子在能量上是禁戒的, 表明 1 个中子发射是最可几退激途径.

将测量的  $\alpha$  粒子能量与现有几个质量公式计算值作比较(图 4). Smolanczuk 的预言与实验观测最好一致. 有限液滴模型和 Thomas-Fermi 模型对  $^{293}118$ 、 $^{289}116$  和  $^{273}\text{Hs}$  衰变预言了恰当的衰变能量, 但对  $Z=106$ , 特别是  $Z=114$  核不成功. Liran 和 Zeldes 的半经验质量公式对解释这区域不合适.

这是实验上首次提出合成新超重核  $^{293}118$  及其衰变产物  $^{289}116$ 、 $^{285}114$ 、 $^{281}112$ 、 $^{277}110$ 、 $^{273}\text{Hs}$  和  $^{269}\text{Sg}$  的证明. 结果表明, 用比  $^{70}\text{Zn}$  重的炮弹以“冷熔合”方式合成超重核是

十分有效的. 这里, 用较重炮弹对  $1n$  蒸发道退激的最佳轰击能量在库仑位垒之上.

应当指出, 最近实现  $^{289}114$  和  $^{293}118$  超重核的合成是多年来在探索超重核增强稳定性的一大突破, 由于这两个超重核及其衰变产物全部是未知核, 人们还企图进一步去证实. 无疑, 这一飞速的发展将极大地推动人类在下一世纪全面进入多年梦寐以求的超重核稳定岛.

附注: 文章送出后, Oganessian 等人发表文章报道用  $^{242}\text{Pu}(^{48}\text{Ca}, n)$  反应合成了超重核  $^{287}114$  [Nature, 400(1999)242]. 他们测到一个  $\alpha$  粒子和衰变子核  $^{283}112$  的自发裂变, 共观察到二个事件.

## 参 考 文 献

- 1 Armbruster P. Nuclear Structure in Cold Rearrangement Processes in Fission and Fusion. Rep Prog Phys, 1999, 62: 465~ 525
- 2 Ninov V, Gregorich K E, Loveland W. Observation of Superheavy Nuclei Produced in the Reaction of  $^{86}\text{Kr}$  with  $^{208}\text{Pb}$ . Phys Rev Lett, 1999, 83: 1 104~ 1 107
- 3 Smolanczuk R. Properties of the Hypothetical Spherical Superheavy Nuclei. Phys Rev, 1997, C56: 812~ 824
- 4 Ghiorso A, Yashita S, Leino M E *et al.* SASSY, A Gas-filled Magnetic Separator for the Study of Fusion Reaction Products. Nucl Instr and Meth, 1988, A269: 192~ 201
- 5 Smolanczuk R. Production Mechanism of Superheavy Nuclei in Cold Fusion Reactions. Phys Rev, 1999, C59: 2 634~ 2 639

# New Progress of Synthesis of Superheavy Nuclei

Zhang Huanqiao

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413)

**Abstract** Introduction of the first synthesis of new superheavy nuclei  $^{289}114$  and  $^{293}118$  in reactions of  $^{48}\text{Ca}+^{244}\text{Pu}$  and  $^{86}\text{Kr}+^{208}\text{Pb}$ .

**Key words** superheavy nucleus subsequent alpha-decays spontaneous fission gas-filled separator

**Classifying number** O571.