

文章编号: 1007-4627(2003)02-0076-15

超重核研究实验方法的历史和现状简介*

徐珊珊, 周小红, 肖国青, 詹文龙, 靳根明, 郭俊盛,
张玉虎, 诸永泰, 郭忠言, 段利敏, 孙志宇,
甘再国, 李松林, 李文飞, 李剑锋, 徐华根,
陈若富, 马越, 张雪荧, 贾飞
(中国科学院近代物理研究所, 甘肃兰州 730000)

摘要: 简单介绍了超重核合成的历史, 详细讨论了目前超重核合成最成功的技术路线, 包括产生方法、分离手段以及探测技术, 并就各种技术的优缺点进行了比较. 探讨了目前超重核研究所面临的困难以及介绍了国际上几个主要相关实验室的研究动态, 并对超重核研究的发展趋势做了简单展望.

关键词: 超重核; 冷熔合; 热熔合; 电磁反冲核分离器; 充气反冲核分离器

中图分类号: O571.6 **文献标识码:** A

1 引言

超重核是指处于“超重核素稳定岛”上的核素, “超重核素稳定岛”指的是最重的一批核素在核素图上的位置, 通常指的是比 ^{208}Pb 重的下一个双幻核附近的区域.

目前, 预言超重稳定核岛位置的主要理论有宏观-微观模型、Hartree-Fock 理论以及相对论平均场理论. 宏观-微观模型的计算给出的下一个双幻核的位置在 $Z=114$, $N=184$ ^[1]. 相对论平均场计算和 Hartree-Fock 计算, 则根据所选择的参数或处理方法的不同预言的下一个双幻核的位置有 $(Z=114, N=184)$ ^[2, 3], $(Z=120, N=172)$ ^[2-4], $(Z=120, N=184)$ ^[5], $(Z=124, N=184)$ ^[4], $(Z=126, N=184)$ ^[2, 3, 6], $(Z=114, N=164-172)$ ^[5] 和 $(Z=120, N=172-184)$ ^[7] 等. 各种计算预言的半衰期长的可达 10^9 年^[1], 短的则在微秒量级^[6]. 尽管不同的计算预言的超重核出现在核素图上的位置不同、寿命也不同, 但绝大部分计算均给出了一个共同的结论, 即超重核是存在的! 因此寻找、合成和研究超重核, 是检验现代核结构理论的最严格和最

有效的手段之一.

本文第 2 章介绍了超铀核合成的简史, 并简单总结了不同时期超铀核的合成技术以及分离和鉴别技术. 第 3 章介绍了目前超重核合成最流行的技术路线. 第 4 章探讨了超重核合成研究所面临的困难. 第 5 章介绍了目前国际上几个主要实验室超重核研究的动态.

2 超铀元素合成的历史简介

第一个人工合成的超铀元素——93 号元素 Np, 是 1940 年由美国的 McMillan 和 Abelson^[8] 在研究中子诱发 ^{238}U 裂变时发现的.

目前, 人工合成的超铀元素已有 22 个(包括 111, 112, 114 和 116 号元素). 算上另外 2 个比 U 轻的人工合成的元素 Tc ($Z=43$) 和 Pm ($Z=61$), 已发现的 114 个元素中约 20% 是由人工合成的(111, 112, 114 和 116 号元素的发现权还没有被确认). 表 1 列出了已发现的超铀元素的首次合成方法、合成者、合成的国家以及合成的时间.

收稿日期: 2003-02-17; 修改日期: 2003-04-07

* 基金项目: 中国科学院百人计划资助项目; 科技部重大项目前期研究专项基金资助项目(2001CCB012010); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(CKJCX2-SW-NO4); 国家自然科学基金重点课题基金资助项目(10235020)

作者简介: 徐珊珊(1964-), 男(汉族), 安徽潜山人, 博士, 研究员, 博士生导师, 从事原子核物理研究.

表 1 已发现的超铀元素

元素	生成反应	合成方法	发现者	发现国家	合成时间/a
Np (Z=93)	$^{238}\text{U}(n, \beta^-)^{239}\text{Np}^{[8]}$	化学分离	E. M. McMillan 等	美国	1940
Pu (Z=94)	$^{238}\text{U}(^2\text{H}, 2n)^{238}\text{Np}(\beta^-)^{238}\text{Pu}^{[9]}$	化学分离	G. T. Seaborg 等	美国	1941
Am (Z=95)	$^{239}\text{Pu}(2n, \beta^-)^{241}\text{Am}^{[10]}$	化学分离	A. Ghiorso 等	美国	1945
Cm (Z=96)	$^{239}\text{Pu}(^4\text{He}, n)^{242}\text{Cm}^{[11]}$	化学分离	G. T. Seaborg 等	美国	1944
Bk (Z=97)	$^{241}\text{Am}(^4\text{He}, 2n)^{243}\text{Bk}^{[12]}$	化学分离	S. G. Thompson 等	美国	1949
Cf (Z=98)	$^{242}\text{Cm}(^4\text{He}, n)^{245}\text{Cf}^{[13]}$	化学分离	S. G. Thompson 等	美国	1950
Es (Z=99)	$^{238}\text{U}(15n, 7\beta^-)^{253}\text{Es}^{[11]}$	化学分离(热核爆炸)	美国放射化学组	美国	1952
Fm (Z=100)	$^{238}\text{U}(17n, 8\beta^-)^{255}\text{Fm}^{[11]}$	化学分离(热核爆炸)	美国放射化学组	美国	1953
Md (Z=101)	$^{253}\text{Es}(^4\text{He}, n)^{256}\text{Md}^{[14]}$	反冲+化学	A. Ghiorso 等	美国	1955
No (Z=102)	$^{243}\text{Am}(^{15}\text{N}, 4n)^{254}\text{No}^{[15]}$	反冲+(He-jet+转轮)+ 母子 α 关联	E. D. Donets 等	苏联	1965
Lr (Z=103)	$^{249-252}\text{Cf}(^{10, 11}\text{B}, xn)^{258}\text{Lr}$ $^{243}\text{Am}(^{18}\text{O}, 5n)^{256}\text{Lr}$ $^{243}\text{Am}(^{16}\text{O}, 4n)^{255}\text{Lr}$ 等 ^[16]	反冲+带传输+ α 衰变	A. Ghiorso 等 E. D. Donets 等 K. Eskola 等	美国 苏联 美国	1961—1971
Rf (Z=104)	$^{238, 240, 242}\text{Pu}(^{22}\text{Ne}, xn)\text{Rf}$ $^{249}\text{Cf}(^{12}\text{C}, 4n)^{257}\text{Rf}$ $^{249}\text{Cf}(^{13}\text{C}, 3n)^{259}\text{Rf}^{[17]}$	反冲—化学分离 反冲+He-jet+转轮 +母子 α 关联	I. Zvara 等 A. Ghiorso 等	苏联 美国	1969
Db (Z=105)	$^{249}\text{Cf}(^{15}\text{N}, 4n)^{260}\text{Db}$ $^{243}\text{Am}(^{22}\text{Ne}, 4n)^{261}\text{Db}$ $^{243}\text{Am}(^{22}\text{Ne}, 5n)^{260}\text{Db}^{[18]}$	反冲+(He-jet+转轮)+ 母子 α 关联	A. Ghiorso 等 V. A. Druin 等	美国 苏联	1970 1971
Sg (Z=106)	$^{249}\text{Cf}(^{18}\text{O}, 4n)^{263}\text{Sg}$ $^{207}\text{Pb}(^{54}\text{Cr}, 1n)^{260}\text{Sg}^{[19]}$	反冲+He-jet+转轮+ α 衰变链 自发裂变	A. Ghiorso 等 Yu. Ts. Oganessian 等	美国 苏联	1974
Bh (Z=107)	$^{209}\text{Bi}(^{54}\text{Cr}, n)^{262}\text{Bh}^{[20]}$	速度选择器(SHIP)	G. Münzenberg 等	德国	1981
Hs (Z=108)	$^{208}\text{Pb}(^{58}\text{Fe}, n)^{265}\text{Hs}^{[21]}$	速度选择器(SHIP)	G. Münzenberg 等	德国	1984
Mt (Z=109)	$^{209}\text{Bi}(^{58}\text{Fe}, n)^{266}\text{Mt}^{[22]}$	速度选择器(SHIP)	G. Münzenberg 等	德国	1982
Ds (Z=110)	$^{208}\text{Pb}(^{62, 64}\text{Ni}, n)^{269, 271}\text{Ds}^{[23]}$ $^{244}\text{Pu}(^{34}\text{S}, 5n)^{273}\text{Ds}^{[24]}$	速度选择器(SHIP94) 充气谱仪(DGFRS)	S. Hofman 等 Y. A. Lazarov 等	德国 俄国	1994 1995
111(未确认)	$^{209}\text{Bi}(^{64}\text{Ni}, n)^{272}\text{111}^{[25]}$	速度选择器(SHIP94)	S. Hofman 等	德国	1994
112(未确认)	$^{208}\text{Pb}(^{70}\text{Zn}, n)^{277}\text{112}^{[26]}$	速度选择器(SHIP94)	S. Hofman 等	德国	1996
114(未确认)	$^{244}\text{Pu}(^{48}\text{Ca}, 5n)^{287}\text{114}^{[27]}$ $^{244}\text{Pu}(^{48}\text{Ca}, 4n)^{288}\text{114}^{[28]}$ $^{244}\text{Pu}(^{48}\text{Ca}, 3n)^{289}\text{114}^{[29]}$	电磁分离器(VASSILISSA) 充气谱仪(DGFRS) 充气谱仪(DGFRS)	Yu. Ts. Oganessian 等 Yu. Ts. Oganessian 等 Yu. Ts. Oganessian 等	俄国 俄国 俄国	1999 2000 1999
116(未确认)	$^{248}\text{Cm}(^{48}\text{Ca}, 4n)^{292}\text{116}^{[30]}$	充气谱仪(DGFRS)	Yu. Ts. Oganessian 等	俄国	2000

上表所收集的数据中, 93—101 号元素无可争议, 直接取自所引参考文献, 102—109 号元素的有关结论取自文献[31]. 110—116 号元素的合成直接取自表中所列参考文献. 下面, 就表 1 中所列的合成、分离与鉴别方法分别做一简单介绍.

2.1 超铀核的各种合成方法

超铀核的合成方法有: 俘获中子然后 β^- 衰变, 轻带电粒子的复合核过程, 轻带电粒子的直接反应过程, 重离子碰撞中的少数核子转移过程, 重离子碰撞中大质量转移过程(亦即深部非弹性碰撞过程)

以及重离子熔合反应。

中子俘获过程合成重核的优点是没有库仑位垒的限制,复合核的生成截面大。但是,中子俘获过程受靶核种类(93号以上的元素只能靠反应堆来生产)、中子通量(高通量反应堆的中子通量约 5×10^{15} neutrons/($\text{cm}^2 \cdot \text{s}$))和俘获衰变过程中核的寿命等的限制,在实验室中无法合成很重的核,一般只能到 100 号元素左右。

通过轻带电粒子的复合核过程、轻带电粒子的直接反应过程及重离子引起的少数核子转移过程来合成重核时主要限制也来自于靶材料,因弹核与靶核间仅交换几个核子,一般也只能合成到 100 号元素左右。对于通过重离子碰撞中的大质量转移来合成重核,虽然没有靶材料限制的问题,但由于生成重核的激发能一般均高于其裂变位垒,存活几率极低,仅那些分布在激发能分布低能尾巴上的极少量的核才有机会存活,因而不利于合成超重核^[32]。

在目前测量技术条件下,最合适的超重核合成反应是重离子的熔合蒸发过程。从 102—112 号元素的首次合成^[11, 15—26]以及 Dubna 近来对 114 号和 116 号元素的合成^[29—32],均是通过熔合蒸发反应实现的。关于这种反应机制的特点将在第 3 章中专门讨论。

2.2 超铀核的各种分离和鉴别方法

超铀核合成所采用的分离和鉴别技术随着目标核的产生截面变低和寿命变短,也逐渐由简单向复杂发展。

对 93—100 号元素的合成,被合成核不但产生截面大而且寿命较长,人们一般使用的是化学分离方法。在当时均采用中子俘获或轻粒子直接轰击超铀核素靶进行合成,化学分析也是对被轰击的靶材料直接进行的。这种方法的优点是可采用尽量厚的反应靶以提高产额;缺点是,昂贵的反应靶在化学分析过程中被破坏而不能重复使用。

到 101 号元素,采用类似的合成方法可用的靶材料越来越珍贵,人们开始考虑利用在轻粒子复合过程和重离子熔合过程中蒸发余核的运动学上前冲的特点,发展了反冲技术加化学分析方法。采用较薄的反应靶使得蒸发余核能够反冲出来,被放置于反应靶后面的收集膜所收集。通过对收集膜进行化学分析来鉴别被合成的目标核,而不破坏昂贵的反

应靶。

到 103 号元素时,被合成核的半衰期仅在 s 量级。为了提高效率,人们又发展了反冲技术结合诸如转带、转轮、转鼓等机械传输技术^[16, 33],或氦喷加机械传输技术^[11, 19, 34—38]将蒸发余核运送到远离束流的低本底区的方法,并通过测量衰变性质来对其鉴别。这种技术可以测量半衰期在 ms 量级的核,而且通过母子核相继 α 衰变到已知 α 衰变能的核的测量可对被合成核的 Z 和 A 进行明确指定(化学方法只能指定 Z)。但若被合成的核不具有 α 衰变性或其子核不具有 α 衰变性,就无法对其进行确切指定。另外,传输系统虽然将产物送到了远离束流的低本底区,但同时也将大量的其它反应产物传输到测量区,产生很强的本底。因此,这种方法对于很低产生截面的核是不适用的,一般只能适用于产生截面在 nb 量级及以上的核。该方法直到合成部分 106 号元素的核素时还是成功的。中国科学院近代物理所郭俊盛研究员领导的小组,于 2000 年就是利用这一技术实现了对所合成的新的重核素²⁵⁹Db ($Z=105$)的鉴别^[34]。

到 107 号元素,由于受产生截面和半衰期两个方面的限制,上面的各种方法均显得不适用了。为此,人们发展了电磁分离技术,利用该技术将反冲余核在飞行过程中在空间上与其它反应产物分离,并高效率地传输到低本底区的衰变性质测量探测系统上^[11, 39, 40]。该方法的分离时间一般在 μs 量级,而且注入到探测器上的其它产物的干扰也低得多,因此可用于研究产生截面在 pb 量级和半衰期短至 μs 量级的反冲核。从 107 号到 112 号以及 114 号和 116 号元素的首次合成均是采用这种方法分离和鉴别的^[20—30]。关于这种方法在下一章中将详细讨论。

3 目前超重核合成最成熟的技术路线

目前超重核合成研究最成功的途径是:用重离子熔合蒸发反应来产生它们,并在反冲余核的飞行过程中利用电、磁等相关技术进行分离,分离后的余核被具有单原子衰变测量能力的探测系统进行测量与鉴别。下面将目前最流行的技术路线按产生、分离和鉴别分别进行较为详细地介绍。

3.1 重核的产生

重离子熔合反应生成具有一定激发能的复合

核, 该复合核蒸发 1 个到若干个中子(也可能发射轻带电粒子, 取决于复合核激发能的大小)退激发后的余核即为目标核。目前, 人们根据两个重离子熔合时激发能的不同, 又将其分类为“热熔合”、“冷熔合”和“暖熔合”。

“热熔合”指的是以系元素作为靶(如: ^{232}Th , ^{238}U , ^{244}Pu , ^{248}Cm , ^{249}Bk 以及 ^{249}Cf 等)与较轻的弹核发生熔合生成复合核的过程。一般生成的复合核的激发能在 50 MeV 左右, 通过蒸发 4 个以上中子退激发。之所以被称为“热熔合”就是因为复合核的激发能相对较高。

图 1 给出了由 Armbruster^[40] 总结的由“热熔合”方法合成 102—108 号元素时, 弹靶组合、余核 Z 与产生截面之间的关系。图中 X 表示复合核的有效裂变度。由图可以看出, 合成同一个元素, 弹核靶核质量不对称度越高, 对应余核的生成截面就越高。至于“热熔合”过程中, 弹核的同位旋对生成截面有无影响以及影响有多大目前还没有系统的实验数据。从已有的 ^{18}O 和 ^{16}O 轰击 ^{248}Cm 通过 4n 道生成 Rf 的实验数据, 还给出肯定的结论^[41]。

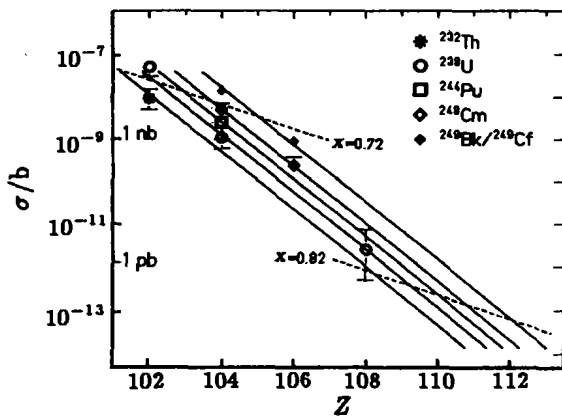


图 1 “热熔合”过程合成 102—108 号元素的截面与 Z 和弹靶组合间的关系^[40]

所谓“冷熔合”指的是以各种弹核与具有满壳(或近满壳)结构的 ^{208}Pb 和 ^{209}Bi 核作靶核的重离子熔合过程, 所形成的复合核的激发能一般在 20 MeV 以下, 通过蒸发 1 到 2 个中子达到目标核。例如: 在合成 112 号元素时复合核的激发能在 10 MeV 左右, 通过 1n 道退激^[26, 42]; 而对较低 Z 值的核, 由于复合核的生成截面大, 激发能也会高一些, 如在合成 104 号元素时, 也通过 3n 道退激, 复合核的激发能在 30 MeV 左右^[43]。该方法是上世纪 70

年代中期由 Dubna 的 Oganessian 等^[37] 首先提出来的。GSI 的 SHIP 小组利用该方法成功地合成了 107—112 号元素^[20—26]。

图 2 给出了实验测得的通过“冷熔合”过程合成 102—112 号元素的 1n, 2n 及 3n 道截面随余核 Z 的依赖关系的比较^[40]。可以看出, 在 102 号元素附近, 2n 和 3n 道的截面与 1n 道可比, 甚至更大, 而随着 Z 的变大, 1n 蒸发道变成了主要的末态道。

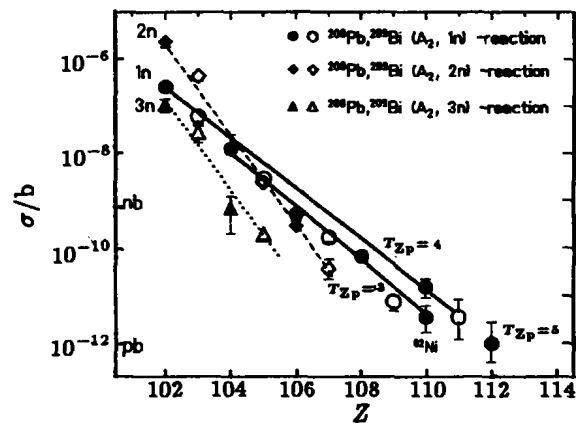


图 2 “冷熔合”的 1n, 2n 和 3n 蒸发道产生 102—112 号元素截面比较^[40]

T_{z_p} 表示弹核的同位旋, 为 $(N-Z)/2$ 。

图 3 给出了通过“冷熔合”合成各种重核通过 1n 衰变道退激发时, 不同重元素的生成截面与弹靶组合的关系^[44]。图中不同线条对应不同的弹核的同位旋值, 图中 $Z=118$ 处标有 BGS 的数据已被 LBL 撤回。可以看出, 对于具有相同同位旋值的弹核, 无论是 Pb 或者是 Bi 靶, 1n 蒸发道的截面随余核 Z 增加呈接近相同的指数关系下降。但对合成同一 Z 的核素, 截面随着弹核的中子丰度增大而增大, 如: 用 ^{64}Ni 作为炮弹比用 ^{62}Ni 作为炮弹产生 110 号元素的截面要约大 5 倍。但这一点有待进一步证实。 ^{64}Ni 作为弹核产生 110 号元素的截面比 ^{62}Ni 时的截面高, 也可能与所形成的复合核的结构相关(^{64}Ni 作为靶时产生的 $^{272}110$ 的中子数为 162, 正好是一个亚壳结构), 到底是哪种因素起作用, 有待进一步的实验测量来确认。

“暖熔合”指的是以双幻核 ^{48}Ca 为弹核的重离子熔合过程, 所形成复合核的激发能在 30 MeV 左右, 介于“冷熔合”和“热熔合”之间。一般所形成的复合核通过蒸发 3—4 个中子退激发。Dubna 小组发表的 114 号和 116 号元素的合成均是通过这一过程实

现的^[27-30]. 值得注意的是, 由 Dubna 的实验数据导出的 114 号和 116 号元素的生成截面在 1 pb 附近, 这远比由“热熔合”或“冷熔合”的系统性预言的截面值大得多.

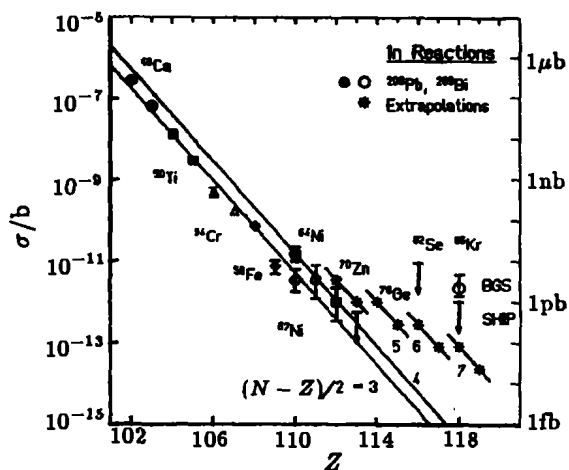


图 3 “冷熔合”过程的 1n 蒸发道产生截面与弹靶系统间的组合的关系^[44]

●对应的是²⁰⁸Pb 为靶核的数据, ○对应的是²⁰⁹Bi 为靶核的数据, * 给出的是根据系统性外推的值.

102—106 号元素的首次合成是通过“热熔合”实现的, 107—112 号元素是通过“冷熔合”过程首次合成的, 而 114 号和 116 号元素则是通过“暖熔合”过程首次合成的.

3.2 反冲核的分离

用于分离反冲核的设备常称为反冲核分离器, 这一设备主要利用了蒸发余核运动学上集中在前方向上的特点.

反冲核分离器一般包括 3 个部分: 反应靶系统、基于电磁及相关技术的反冲余核飞行中的分离系统和反冲余核的测量与鉴别系统. 由于目标核的产生截面太低, 对用于超重核研究的反冲核分离器有一些特殊要求. 靶及靶室系统一般包括可承受高流强(1—5 pμA)轰击的靶装置、束靶监测装置以及束流监测装置; 其分离系统要求能对反冲余核在飞行中高效率地、快速地传输到探测区, 同时尽量将来自诸如转移反应产物、反冲靶核、弹核以及轻带电粒子等分离出去; 探测与鉴别系统的功能是清楚地鉴别目标核, 并尽量准确地获取其衰变性质方面的信息. 目前, 已成功地用于超重核研究的反冲核分离器根据其所采用技术的不同可分为两类: 电

磁反冲核分离器和充气反冲核分离器. 在本小节中, 我们将主要介绍这两类反冲核分离器的技术特点, 反应靶系统及测量和鉴别系统在 3.3 节中专门讨论.

(1) 电磁反冲核分离器

电磁反冲核分离器主要是利用磁偏转和静电偏转技术, 根据不同反应产物或速度 v , 或 M/q , 或 E_k/q 的不同将反冲出来的蒸发余核从其它各种产物中分离出来. 目前已成功地用于超重核合成研究的这类设备主要有德国 GSI 的 SHIP^[45, 46]、俄国 Dubna 的 VASSILISSA^[47, 48] 和法国 GANIL 的 LISE III^[49, 50]. 表 2 总结了上述 3 个设备的主要特点.

表 2 3 种电磁分离器特点比较

分离器	构型	选择量	传输效率 %	适用范围
SHIP	$Q_2ED_2D_2EQ_2D$	v	30—60	冷熔合
VASSILISSA	Q_2EEEQ_2D	E_k/q	<30	冷、暖、热
LISE III	Q_3WWQ_3D	v	30—70	冷、热熔合

GSI 的 SHIP 和 GANIL 的 LISE III 是利用了反冲余核具有较为确定的速度这一特点, 采用正交的电、磁场对各种产物进行速度选择以达到分离的目的. 其基本原理如下:

当带电荷 q 的粒子垂直通过一个相互正交的电场 E 和磁场 B 时, 会受到分别来自于电场的作用力 F_e 和磁场的作用力 F_m ,

$$F_e = q \cdot E, \quad (1)$$

$$F_m = q \cdot v \times B, \quad (2)$$

式中 v 为带电粒子的运动速度. 该带电粒子在垂直于其运动的平面内, 沿电场作用的方向受到来自于电场和磁场的合力为

$$F_{\text{合}} = qE + qvB. \quad (3)$$

如果调节电场和磁场的作用强度使得合力 $F_{\text{合}} = 0$, 则有

$$v = -\frac{E}{B}. \quad (4)$$

由(4)式可以看出, 通过调节电、磁场的相对强度能够实现具有特定速度的粒子的选择. 这种利用正交电磁场对荷电粒子的速度进行选择的装置称为 Wien filter.

SHIP 是德国 GSI 于 1978 年建成的用于超重核合成的反冲核分离器. 在合成了 107—109 号元素后, 又进行了一系列改造, 1994 年改造完毕, 称为 SHIP94. 目前, SHIP 的电磁元件的构型为 $Q_2ED_2D_2EQ_2D$ ^[44, 45], 其中, Q 表示四极磁铁, D 表示二极磁铁, E 表示静电偏转. SHIP 实现分离的关键部分是中间的 ED_2D_2E . 两个 Q_2 磁四极透镜组合主要用来聚焦. 这里, 没有采用标准的 Wien filter 设计, 而是将电、磁场在空间上分开. 这种设计对于选择来自于熔合过程的反冲余核有明显的优点. 由于静电偏转系统没有放置在二极磁铁的极缝中, 在对蒸发余核进行选择时, 由于束流粒子的速度要快得多, 经过第一个静电偏转电镜时被偏转得较少, 从而不会轰击到电镜的极板上. 即使静电极的高压因某种原因在实验过程中退掉了, 束流粒子也不会轰击到电极的极板上. 这一点对于高流强 (如 $1 \mu\text{A}$ 以上) 的实验尤其重要. 否则, 不仅会损坏静电偏转板, 散射的束流粒子还可能被传输到焦平面而损坏那里的 Si 探测器. 最后一个磁铁是一个偏转 7.5° 的二极磁铁, 其目的是在探测器前将各种本底与余核进行再一次分离. 目前 SHIP 工作在 $1 \mu\text{A}$ 的束流强度时, 来自于高能弹核和转移反应产物的干扰为每分钟 1 个, 来自于低能弹核的干扰为每秒钟 30 个. 在这种本底情况下, 若平均流强为 $0.5 \mu\text{A}$, 可以可靠地测量 1 pb 产生截面的反应产物. 换句话说, 可以可靠地测量每 5 天出现一个衰变链的情况^[46].

LISE III^[47, 48] 原为法国 GANIL 设计的 Wien filter 系统, 置于 LISE 后作为速度选择器来进一步提高对 LISE 所产生的放射性核素的分离能力. 鉴于其在分离反冲余核方面的优越性能, 经过适当改造后, 被用于超重核的研究. 对 LISE III 的改造包括: 增加了 Wien filter 前半部分的静电偏转板间的距离, 使得用于反冲余核研究时在其中偏转的束流粒子不会轰击到偏转板上; 在第一个静电偏转系统后加了通过水来冷却的 beam stop; 在两个静电偏转系统的中间加入了一个 slit 系统; 在探测系统前加了一个二极偏转磁铁以进一步降低本底. 第一个测试性实验是 2000 年 11 月进行的, 研究了 $^{54}\text{Cr} + ^{208}\text{Pb}$ 生成 106 号元素的反应, 得到 LISE III 对束流的抑制本领为 2×10^{10} , 与已知激发函数^[44] 比较后得到 LISE III 的传输效率好于 60%.

对 SHIP 和 LISE III 这类采用速度选择的分离器, 由工作原理可知, 在一级近似下它们对反应产物的选择与电荷态无关, 因此它们的传输效率较高. 传输效率与反应道相关, 对于弹核靶核对称性小的反应道, 传输效率可达 70%. 影响这类分离器传输效率的主要因素是立体角和接收度.

VASSILISSA^[49, 50] 是俄罗斯 Dubna 的 JINR 核反应实验室设计的专门用于超重核研究的静电反冲核分离器. 从结构上看, VASSILISSA 与 SHIP 的主要差别在于其用一个静电偏转系统代替了 SHIP 中间位置上 4 个二极磁铁, 是一种 $Q_3E_3Q_3D$ 结构. 由于没有采用磁分析技术, 其分离原理与 SHIP 有很大的不同. 该设备是通过产物的能量 E_k 和电荷态 q 之比的不同来实现它们的空间分离. 容易导出, 带电粒子在静电场中的偏转角 θ 是正比于 q/E_k 的. 因此, 复合核与弹核的偏转角之比为

$$\frac{\theta}{\theta_1} \propto \frac{A_1 + A_2}{A_1} \frac{q}{q_1}, \quad (5)$$

其中, θ 和 θ_1 分别为复合核和弹核的偏转角, q 和 q_1 分别为复合核和弹核的电荷数, A_1 和 A_2 分别为弹核和靶核的质量数. 我们知道, 带电粒子在磁场中的偏转角是正比于 q/P , 其中 P 为离子的动量. 对全熔合反应的复合核和弹核, 它们的动量是基本相等的. 因此, 利用磁偏转复合核与弹核的偏转角之比为

$$\frac{\theta}{\theta_1} \propto \frac{q}{q_1}. \quad (6)$$

由(5)和(6)式我们可以比较静电偏转与磁偏转对复合核与弹核的分离能力. 例如, 对 $E_1 = 200 \text{ MeV}$ 的 ^{40}Ar 轰击 ^{208}Pb 通过蒸发两个中子生成 ^{246}Fm 的反应, 反冲核的能量约为 $E_k = 33 \text{ MeV}$, 反冲余核的平均电荷态在 $q = 20$, 弹核的平均电荷态为 $q_1 = 16$. 在这种情况下, 静电偏转和磁偏转所导致的反冲余核与弹核偏转角之比分别约为 8 和 1.25^[47]. VASSILISSA 的优势就在于对束流的抑制本领高, 对来自于满能量的束流离子的本底的抑制能力达 10^{10} . 同时, 对来自于多核子转移过程的本底粒子的抑制能力为 10^4 . 在第二个 Q_3 后的 8° 偏转的二极磁铁又将本底降低了 10—50 倍^[48].

由于 VASSILISSA 所选择的是产物的 E_k/q , 传输效率与产物的电荷也相关, 因此, 传输效率比

采用速度选择的 SHIP 和 LISE III 要低,一般低于 30%。

(2) 充气反冲核谱仪

充气式反冲核分离器的工作原理与电磁反冲核分离器有较大的不同。充气反冲核谱仪主要由一个大型二极磁铁构成,工作时在其中充满稀薄的工作气体,利用反冲余核与气体的相互作用使其电荷态分布处于一种围绕平衡电荷态的动态平衡中来提高传输效率,其原理简述如下:

众所周知,当一个带电荷 q 的粒子,进入真空中强度为 B 的磁场空间,有如下关系式^[51]:

$$B\rho = 0.0227 \times A \times \left(\frac{v/v_0}{q} \right) (\text{T} \cdot \text{m}), \quad (7)$$

式中 $B\rho$ 为粒子磁刚度, v 为粒子运动速度, $v_0 = c/137 = 2.19 \times 10^6$ m/s 为 Bohr 速度。如果在该磁场空间中充有一定压力的气体,粒子在其中运动时,由于与气体原子发生碰撞,其电荷态不再是一个固定的值,而是围绕某一平均值变化。这种情况下,上式应写为

$$B\rho = 0.0227 \times A \times \frac{v/v_0}{\bar{q}} (\text{T} \cdot \text{m}), \quad (8)$$

\bar{q} 为粒子的平均电荷态。根据 Thomas-Fermi 模型计算,在粒子的速度满足关系式 $1 < v/v_0 < Z^{2/3}$ 时,有

$$\bar{q} = \frac{v}{v_0} Z^{1/3}, \quad (9)$$

这里 Z 为运动粒子的核电荷数。结合(8)和(9)式可以得到

$$B\rho = 0.0227 \times \frac{A}{Z^{1/3}} (\text{T} \cdot \text{m}). \quad (10)$$

上式给出了充气反冲核分离器在一级近似下的两个主要性质: 1) $B\rho$ 与反冲核的初始速度无关; 2) $B\rho$ 与反冲核的初始电荷态分布无关。虽然实际情况 $B\rho$ 不是严格满足上述关系式,而是对不同的 Z 和不同的气体, $B\rho$ 围绕上式的计算值有一定的涨落,但这足以决定充气反冲核分离器高的传输效率。影响充气反冲核分离器的传输效率的主要因素来自于立体角和与工作气体的多次散射造成的传输过程中的丢失。

目前,国际上用于超重核合成研究的充气反冲核分离器有俄罗斯 Dubna 的 DGFRS^[52]、日本

RIKEN 的 GARIS^[53]、美国 LBNL 的 BGS^[54] 和芬兰 Jyväskylä 大学加速器实验室的 RITU^[55]。表 3 给出了上述几台充气反冲核谱仪的主要性质。

表 3 几个充气反冲核谱仪特点比较

分离器	构型	选择量	传输效率	适用范围	工作气体
DGFRS	DQ _v Q _h	$A/Z^{1/3}$	~40%	冷、暖、热	H ₂
GARIS	DQ _v Q _h D	$A/Z^{1/3}$	~70%	热熔合	He
BGS	Q _h D _v D	$A/Z^{1/3}$	~75%	热熔合	He
RITU	Q _v DQ _h Q _v	$A/Z^{1/3}$	~25%	热熔合	He

DGFRS 是 Dubna 的另一台用于超重核研究的设备,全称是 Dubna Gas-Filled Recoil Separator^[52], 1989 年开始投入运行。其构型为 DQ_vQ_h, Q_v和 Q_h分别表示垂直方向和水平方向聚焦的四极磁铁。该设备是针对“热熔合”过程中出射的反冲余核的分离而设计的。因为“热熔合”中弹核相对较轻,反冲余核能量相对于“热熔合”要低,为了减小因反冲余核与工作气体分子间的碰撞造成的动量及角度分散(因而会引起传输效率的降低),所用的工作气体是 H₂气。另外,由于基于“热熔合”产生的余核的能量低,平均电荷态也相对低些,因而反冲余核的粒子磁刚度比“热熔合”反应的大得多。因此, DGFRS 的最大磁刚度设计为 3.08 T·m。DGFRS 的传输效率因反应道而异,通过对一些已知截面的“热熔合”反应道的测量,其最高传输效率达 45%。1999—2000 年, Oganessian 等^[28-30]先后在 DGFRS 上合成 114 号和 116 号元素。

GARIS 的全称是 GAs-filled Recoil Isotope Separator, 为 DQ_vQ_h构型。其最初的目的是与 RIKEN 的 RRC(RIKEN Ring Cyclotron)加速器系统上的 ISOL 结合起来,构成 RIKEN 的 ISOL 型次级束流产生装置^[53]。上世纪 90 年代末期,经改造后逐渐变成了超重核合成的专用设备。2001 年底到 2002 年初,为了加强超重核的研究,RIKEN 将 GARIS 移至 RIKEN 的强流直线加速器 Linac 的实验区,同时在探测器系统前加入了一个二极磁铁以降低转移反应产物的干扰。GARIS 工作时,从靶室到第二个二极磁铁的出口均充有 He 气,气压值根据选择的产物不同在 40—80 Pa 之间选一最佳值。GARIS 的最大磁刚度为 2.25 T·m,因此只适合

于对“冷融合”反应的反冲余核的分离. 通过对已知截面的“冷融合”反应道的测量得到过 70% 的传输效率.

BGS 是 Berkeley 充气反冲核分离器 (Berkeley Gas-filled Recoil Separator) 的简称^[54]. BGS 的设计思路与标准的充气反冲核分离器有些不同. 主要特点是增大了垂直方向上的接收度, 采用了 Q, D_h, D 构型. Q 具有强的垂直方向的聚焦能力, D_h 在完成偏转的同时还具有水平方向强聚焦的能力, D 实现进一步偏转以提高分离能力. BGS 对各种本底的总抑制能力约 10^{15} , 传输效率为 30%—70%, 对于反冲余核测量的灵敏度为 1 pb 截面下每星期一个事件. 在该设备上开展的最具轰动效应的工作是 116 号和 118 号元素的发现^[56], 但最终证明这不是一个成功的实验, 其结果被收回.

RITU 是芬兰 Jyväskylä 大学加速器实验室的一台充气反冲核分离器, 是 Recoil Ion Transport Unit 的简称^[55]. 该设备为 Q, DQ_h, Q 型, 1993 年投入使用. 为使反冲产物与二极磁铁的接收能力更高效地匹配, 在二极磁铁前加了一个垂直方向强聚焦的四极磁铁. 另外, 在二极磁铁的出口处还加了一个六极磁铁, 目的是对像差进行一些修正. 该分离器的优势在于角接收度大: 水平方向 ± 30 mrad, 垂直方向 ± 80 mrad, 比标准模式下的充气反冲分离器高近 30%. 在 RITU 上开展的工作主要集中在 W 到 Db 间的元素的缺中子同位素的衰变及在束研究和一些重核的衰变性质研究.

(3) 电磁反冲核分离器与充气反冲核分离器主要性能的比较

传输效率: 从已有的测量数据来看, 一般采用速度选择技术的电磁分离器要比充气反冲核分离器高, 前者可达 70%, 而后者一般约在 45% 左右. 但由于电磁分离器一般研究的对象来自于“冷融合”, 而充气反冲核分离器研究的对象来自于“热融合”或“暖融合”, 这两个数据不能直接比较. 就原理来说两者的传输效率应该是可比的. 最近, RIKEN 的 K. Morita 小组用 GARIS 研究 $^{64}\text{Ni} + ^{208}\text{Pb}$ 反应生成 $^{281}110$ 时, 得到的传输效率也达到了 70%. 由于 VASSILISSA 选择的是 E_k/q , 它的传输效率要比上述两种设计低.

本底抑制能力: 除 VASSILISSA 对本底的抑制本领特别高外, 一般电磁分离器对本底的抑制能

力与充气反冲核分离器的在同一水平上.

其它能力: 充气反冲核分离器由于其选择只与产物的 Z 相关, 而与产物的速度和电荷态均无关, 因此可同样用于选择诸如转移或深部非弹性碰撞所生成的目标核. 这是电磁分离器无法做到的.

3.3 测量与鉴别技术

目前, 对合成的超重核进行指定的依据是目标核具有 α 衰变性, 且经过相继 α 衰变抵达已知 α 衰变的核素. 如果目标核 (Z_0, A_0) 是经过 n 次 α 衰变抵达已知核 (Z, A) 的, 那么由 $Z_0 = Z + 2n, A_0 = A + 4n$ 就可以清楚地实现对目标核的指定. 这要求实验上必须在测量反冲余核的同时, 尽量高效率地和高精度地测量起始于该余核的所有相继衰变的 α 粒子. 目前, 人们是通过时间和位置的关联测量来实现的, 一个典型的测量与鉴别系统见图 4.

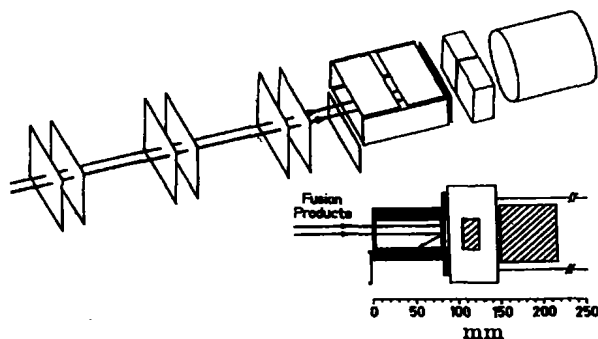


图 4 SHIP94 上探测器系统示意图

该探测系统由 3 个飞行时间探测器、7 个 16 分条的 Si 探测器和 3 个 Ge 探测器组成. 在 Si 探测器前还有一个插入降能膜和能量刻度用的放射源的装置. 降能膜为 Mylar 膜, 可以以 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 改变厚度, 其目的主要是吸收低能本底核的能量以减小其在注入探测器上信号的低能尾巴. Si 探测器的有效面积为 $35 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$, 每条宽为 5 mm 且其纵向上的位置分辨对于衰变 α 为 $150 \mu\text{m}$ (FWHM). 由 ^{241}Am 源的 α 粒子测得的能量分辨为 14 keV. 在注入探测器面向束流的一面放置的 6 个 Si 探测器覆盖了 2π 立体角的 80%, 用来探测逃逸出注入探测器的衰变 α 和裂变碎片. 在注入探测器后面放置有一个 veto 探测器和用来测量与 Si 探测器信号符合的 X 射线和 γ 射线的 Ge 探测器. 所有 Si 探测器均冷却到 263 K.

利用这样一套探测系统时, 一个余核注入到注

入探测器中将给出一个能量在几十 MeV 的信号, 结合飞行时间测量和 veto 探测器的信息, 可对其进行初步认定. 如果余核具有 α 放射性, 其发生 α 衰变时, 自身在注入探测器中的位置基本不动. 也就是说, 在注入信号的同一地点, 一段时间后会出 α 衰变信号. 同理, 相继衰变的 α 粒子也将出现在同一地点. 因此, 通过时间和位置的关联测量就可以发现相应的 α 衰变链.

关于这套探测系统的其他技术细节, 感兴趣的读者请参见文献[44]. 所有用于超重核的合成的反冲核谱仪上的测量与鉴别探测器系统均采用了类似的构型, 只是细节上有一些差别.

3.4 其他关键技术

在反冲核分离器上还有以下几个因素将直接影响实验的质量, 这些因素包括反应靶系统的设计、电子学与获取系统以及一些降低本底的各种技术. 下面分别作以简单介绍.

由于利用熔合反应合成重核, 随着被合成核 Z 的增大, 其产生截面有指数下降的趋势. 用“冷熔合”合成 112 号元素时, 目标核的生成截面已经降到 pb 量级. 因此, 要在合理的时间内(如几十天)完成实验测量, 或增加靶厚, 或提高束流强度. 考虑到后续分离设备的传输效率, 靶厚的增加是极其有限的(一般在 $200 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 左右), 因此人们只能通过提高束流强度来缩短实验时间. 如何使得反应靶能承受 $1 \mu\text{A}$ 以上的束流的轰击而不熔化, 这就对靶系统的设计提出了新的要求. 目前, 所有用于超重核合成的反冲核分离器上, 均采用了转靶装置. 以 GSI 的 SHIP 上的靶为例, 反应靶安装在转盘上, 靶心到转盘轴的距离为 155 mm, 转盘的转速为每分钟 1 125 转. 而且在反应靶附近还放置了一个低温冷端, 以通过热辐射来降低靶上的温度. 即便如此, 这套靶系统在“冷熔合”实验中, 由于 Pb 靶的熔点为 327.46°C , Bi 靶的熔点为 270.40°C , 也只能承受低于 $1 \mu\text{A}$ 的束流强度. 同样研究“冷熔合”, 充气反冲核谱仪的转靶系统, 由于靶室中有工作气体在流动, 在不加附加冷却装置的情况下, 能承受的束流强度要高得多. 如 RIKEN 的 GARIS 上的靶系统, 在靶心距转轴 150 mm 的设计下, 转速为每分钟 3 000 转时, $200 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 的 Bi 靶可承受 Zn 束流的流强可高达近 $5 \mu\text{A}$.

为了了解实验过程中反应靶的状况, 还需要对反应靶状况进行实时监测. 或采用热敏照像机, 或通过监测弹性散射粒子的能量. 前者, 价格昂贵, 而且在强辐射本底下易损坏, 不易用来做长时间监测. 后者简单易行, 是一个好的选择.

在合成超重核的实验中, 对电子学与获取系统的要求来自于两个方面. 一是系统的长时间工作的稳定性要高; 另一个是信号的处理周期要短, 系统的死时间要小. 第一个要求是由超重核合成的实验常需要连续运行几十天, 第二个要求是因为系统必须具有处理寿命在 μs 量级的 α 衰变的能力.

对于合成超重核这种反应截面低到 pb 甚至 fb 量级的过程, 如何降低测量区的本底将直接影响到实验数据的可信度. 这方面的技术涉及到整个系统的各个方面, 因而所采用的分离技术不同, 侧重点也不一样. 例如, 对于电磁反冲核分离器, 束流的品质(束流的晕分布)和反应靶的均匀性(包括靶上的针孔)都将在很大程度上影响测量区的本底. 这就是为什么在电磁反冲核分离器上的实验要求去除束流晕结构, 以及在反应靶后再加碳膜以平衡反冲余核电荷载的原因. 无论是哪种分离器, 为了进一步降低来自于转移反应的本底, 一般都在焦平面探测器前加了一个偏转约 7° 的二极磁铁. 另外, 精心设计分离器中停止主束流的 beam dump, 减少散射的束流粒子, 会大大降低探测区来自于低能高电荷载的束流粒子的本底.

4 超重核研究面临的困难

到目前为止, 超重核的研究已经取得了一系列令人可喜的成果. 但是, 超重核合成的最终目标是找到“超重元素稳定岛”的位置, 因此必须合成“超重元素稳定岛”中心附近的核素. 而要达到这一目标, 却正面临着两个短期内难以逾越的困难: (1) 如何抵达 $Z=114, N=184$ 的位置? 在目前, 利用稳定的束流, 最靠近的位置离 $N=184$ 还差 8 个中子; (2) 如何鉴别 $Z=114, N=184$ 附近的核素? 目前流行的技术路线能测量和鉴别的核素必须具备两个条件: 具有 α 衰变性(最好是相继衰变到已知核)和寿命在 μs 到分钟的量级. 当合成的核接近 $Z=114, N=184$ 时, 其寿命和衰变方式均能满足上述两个要求是困难的. 因此必须寻找新的技术路线, 目前国际上就此还没有一个合适的答案.

针对第一个困难, Hofmann 在文献[57]中进行了较全面的讨论. 图 5 给出了利用各种可能的弹靶组合通过重离子熔合蒸发中子反应可能合成的最丰中子的核素. 上图给出的是以²⁰⁸Pb 或²⁰⁹Bi 为靶核合成的最丰中子核素的位置. 由线连起来的以圆点表示的系列为弹核为稳定核素的情形, 图中右边的第一列给出了所对应的弹核的元素符号. 由线连起来的方块表示的系列为弹核为流强达每秒 10⁹ 个的最丰中子的放射性束合成的最丰中子核素. 可以看出, 如果“超重元素稳定岛”的中心位置在 Z=114, N=184 处, 无论是使用最丰中子的稳定弹核还是

流强达每秒 10⁹ 个的最丰中子的放射性弹核, 利用熔合反应均无法抵达“稳定岛”. 利用放射性弹核在 Z=114 处可将中子数向“稳定岛”推进约 6 个中子, 离“稳定岛”依然有约 8 个中子之遥. 如果“稳定岛”出现在 Z=120, N=184 处, 利用稳定核束流无法合成, 但利用放射性核束是可能的. 如果“稳定岛”出现在 Z=126, N=184 处, 则无论利用稳定还是放射性的核为弹核与²⁰⁸Pb 或²⁰⁹Bi 熔合均可以合成. 对于后两种情况, 将受到来自反应截面的限制.

同时, 该图中还给出了放射性的核素⁹⁶Kr 或⁹⁸Rb 为弹核(通过裂变产生的), 与对应的最丰中子

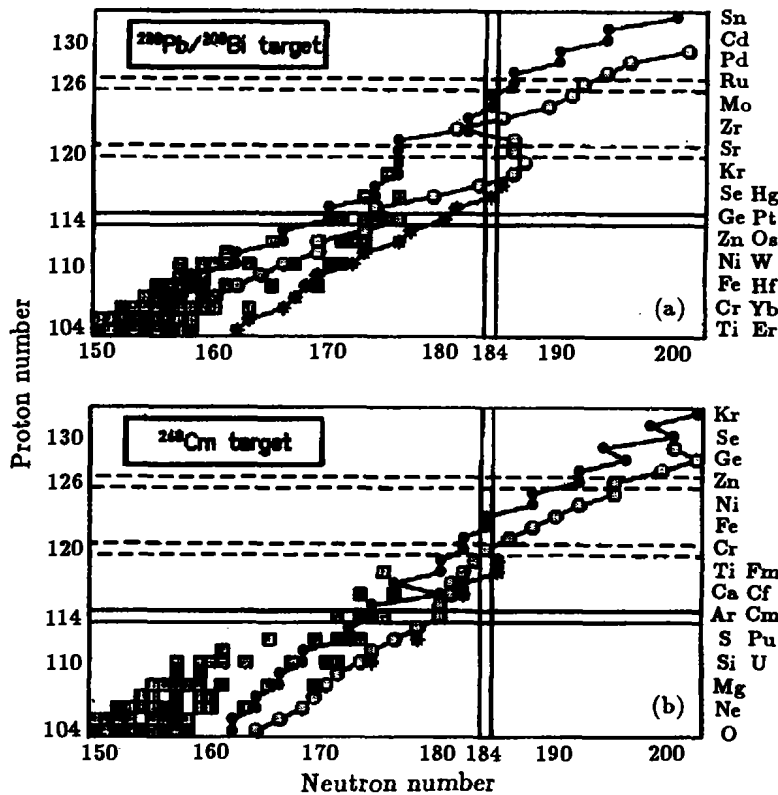


图 5 利用重离子熔合反应可能的弹靶组合所能合成的最丰中子的核素^[57]

的稳定核素(对应的靶核元素标在图右边的第二列)合成的最丰中子的核素(为图中用线连起来的星号组成的系列). 此时, 在 Z=114 处, 可以将复合核的中子数增加到 180, 但依然与“稳定岛”还差 4 个中子.

下图给出了以²⁴⁸Cm 为靶核与各种可能的弹核组合, 能合成的最丰中子的复合核的位置. 图中右边第一列标出了对应的弹核, 圆点符号为以最丰中子的稳定核为弹核的情况, 方块符号为流强达每秒 10⁹ 个的最丰中子的放射性核的情形, 星号给出的

是用⁴⁶Ar 和⁴⁷K 作为束流与相应的最丰中子的锕系核素(图右边第二列给出了对应的靶核)熔合时生成的复合核. 可以看出, 与基于²⁰⁸Pb 和²⁰⁹Bi 为靶核的情形相比, 对于合成“稳定岛”上的核素没有明显的优势, 只是合成机制上有所差别, 如果仅使用稳定的束流, 通过“热熔合”合成的超重核(Z<120)的中子丰度普遍要高.

由上述讨论可见, 在目前可以预见的各种可能下, 如果“超重元素稳定岛”的中心位置在 Z=114, N=184 处, 通过重离子熔合反应无法合成“稳定

岛”中心的核素。只有“稳定岛”的中心位置在 $Z=120$ 或 126 处时,才能用此方法抵达,否则必须寻找新的反应机制。

对于第二个困难,其中包含两个因素。其一是,被合成核的寿命可能在小时以上甚至达到年的量级;其二是,即使被合成核的寿命不是很长,仍然在目前的技术路线所能测量的范围(μs 到 min),但其不具有 α 放射性或 α 衰变分支比很小。这两个因素存在一个,现行的鉴别手段就受到了限制。例如,由于后一因素的存在, Dubna 发表的 114 号和 116 号元素合成的结果在国际上难以得到普遍认可。因此,要实现“稳定岛”中心附近核素的确切鉴别必须发展新的技术,或者能研究出从其它衰变方式的测量中获得母核 Z 和 A 的精确信息的技术,或是能对目标核的 Z 和 A 进行直接测量。

5 各主要实验室的研究动态

目前,国际上在超重核研究方面处于前列的各大实验室在面临上述两个困难的情况下,均在调整着各自的研究策略,并在继续以前研究路线的同时,积极探索新的技术路线。下面将我们收集的相关实验室的动态简介如下。

GSI 一面继续开展 113 号元素合成的工作,一面研制 SHIPTRAP 以实现长寿命核素的测量与鉴别。在 113 号元素的合成上,由于 SHIP 上的靶系统无法承受 $1 \text{ p}\mu\text{A}$ 以上的束流轰击,因此,他们正在研制化合物靶,以提高反应靶的熔点,从而使得在使用 Pb 和 Bi 这样的低熔点靶时,可以承受更高的流强。同时,为了提高束流的强度和加强超重核研究的力度, GSI 还提出了一个专用于超重核合成研究的超导强流直线加速器的计划。

在开发新技术方面, GSI 小组正在建造 SHIPTRAP。该设备是将 SHIP 分离出来的反冲余核先用 50 mb 的 He 气进行慢化,进入一个引出 RFQ,再通过一个聚束 RFQ 将余核传输到一个纯化离子阱,然后经过一个高精度离子阱进行质量测量。在高精度离子阱后还跟有其它测量系统,以对余核进行衰变性质测量、激光谱学测量和化学性质研究。

Dubna 的研究小组在继续考虑充气分离器,利用他们的 ^{48}Ca 束流和可用于“热熔合”产物研究的 DGFRS 的优势开展相关研究的同时,正在考虑建

造一台可以进行高精度质量测量的大型磁谱仪。

2002 年 6 月 25 日, Dubna 的 Yu. Ts. Oganessian 在德国 GSI 的一次学术报告会上首次报告了他们合成 118 号元素的新结果。所用的反应道是 $^{249}\text{Cf}(^{48}\text{Ca}, 3\text{n})^{294}118$, ^{48}Ca 束流的能量为 5.1 MeV/u , 对应复合核的激发能为 29 MeV , 束流强度为 $0.8 \text{ p}\mu\text{A}$, 靶为 $230 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 厚的、纯度为 97.3% 的 ^{249}Cf 。总束流时间为 75 天,对应的总照射量为 2×10^{19} 个束流粒子。整个实验过程中观察到两个可能的事件。一个是 $^{294}118$ 相继 α 衰变到 $^{286}114$, 然后发生自发裂变的衰变链,其中 $^{290}116$ 和 $^{286}114$ 均是第一次被观察到。另一个是寿命为 3.2 ms 的 $^{294}118$ 自发裂变事件。结果没有正式发表。

为解决目标核的鉴别问题,他们在考虑建造一个新的分离鉴别设备。基本思想是,用束流轰击厚靶,反应产物被 ECR 离子源收集并使其只带一个正电荷,从离子源引出的产物先经过一个质量分辨能力约 250 的二级磁铁将 He 和初始束流分开,然后再进入高质量分辨的大型分析磁铁系统进行精确的质量选择,然后被放置在焦平面上的探测系统所收集。

GANIL 拟在 LISE III 上开展的超重核研究的计划包括 3 个方向:逆运动学方法、 $^{76}\text{Ge}_{32}$ 作为弹核以及超重核结构研究。

采用逆运动学时要获得常规运动学下相同质心系有效能量,初始束流的速度要比通常运动学下的高。因此,靶厚可以从几百 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 增加到几个 mg/cm^2 , 即相当于束流强度提高了 3 个量级。此时,束流在其中的能损对应的激发能范围达约 10 MeV , 而通常运动学下仅为 $(3 \text{ 到 } 4) \text{ MeV}$, 这对于激发函数的宽度仅为几个 MeV 的“热熔合”反应来说,即使在计算最佳激发能时所用的复合核的质量与实际情况偏差几个 MeV, 依然有较大可能被覆盖。另外,由于反冲余核的速度高,其从靶中出来后在运动学上更向前集中,有利于分离器的收集,而且此时余核在焦平面探测器中的注入深度也深,仅用一个焦平面探测器就可以同时记录余核和衰变产物的信号,同时余核能量的探测也准确些。缺点是,逆运动学下弹核与余核的速度更接近,分离上困难要大些,会增加焦平面探测器的本底,同时也要求更高强度的电磁场等。

利用 $^{76}\text{Ge}_{32}$ 作为束流主要针对两个问题开展研

究。(1) 拟通过 $^{76}\text{Ge} + ^{198}\text{Pt}$ 来合成 $^{273}110$, 原因是通过 $^{277}112$ 的 α 衰变得到的 $^{273}110$ 的 α 衰变能以及寿命与通过“热熔合”反应 $^{34}\text{S} + ^{244}\text{Pu} \rightarrow ^{273}110 + 5\text{n}$ 得到的结果相差很大, 有必要对此进行较为精细的谱学测量。(2) 可以进行一些反应机制的研究, 利用 ^{76}Ge 作为束流, 以 $^{192}\text{Os}_{76} - ^{205}\text{Tl}_{81}$ 间的核素作为靶可以产生比用 $^{48}\text{Ca} - ^{70}\text{Zn}$ 间的束流轰击 $^{208}\text{Pb}/^{209}\text{Bi}$ 靶通过“冷熔合”过程得到的核素要多 2 个中子(110 号元素除外)。从被产生核素的稳定性角度来看, 所产生的复合核相对存活几率大, 因而生成截面大。另一方面, 反应系统的对称度变高, 从入射道效应看因动力学效应使得复合核的形成截面降低。因此, 这方面的研究有助于揭示超重核合成机制方面的一些性质。

重核衰变谱学方面, 准备在增加相应的探测设备(Ge Clover 探测器)后, 测量如 ^{251}Md 和 ^{251}Fm 的 α , β 以及 γ 衰变性质。

RIKEN 的超重核研究小组在将改造后的 GARIS 移到强流直线加速器 Linac 的实验区后, 相应地对 Linac 进行了改造, 使其可直接提供能量达约 6 MeV/u、流强达约 5 pA 的重离子束流。在近两三年中, Linac 的束流可基本全部用于超重核合成研究。在 2002 年上半年, RIKEN 小组已经在改进后的 GARIS 上开展了一系列性能测试实验, 并成功地测量了 $^{64}\text{Ni} + ^{208}\text{Pb}$ 反应生成 $^{271}110$ 的激发函数, 相关结果可以在 2002 年 RIKEN Accel. Prog. Rep. 上查到。下一步计划是在测量了利用“冷熔合”生成 111 号和 112 号元素的激发函数后, 进行 113 号元素的合成实验。

LBNL 在 BGS 上开展的超重核合成研究因 116 号和 118 号元素合成的挫折, 现将方向转到了重核化学性质研究上。在原 BGS 的焦平面上重新设计了一个 RTC (Recoil Transfer Chamber)。从 BGS 中出来的重余核经过一个薄 Mylar 膜(1.5 μm , 由投射率为 94% 的丝网支撑)后进入 RTC, 由 1 个大气压的气体将其停止, 然后利用毛细管(2 mm 直径)通过 KCl/He-jet 系统将其传输到化学分离设备或衰变探测器系统。衰变性质探测系统是一个 MG 转轮装置, 化学性质测量使用的是一个低温热色谱系统或一个被称为 SISAK 化学性质分析系统。

另外, 除芬兰的 Jyväskylä 大学加速器实验室外, 还有几个实验室也在超重核合成方面一直开展

着各种研究, 如瑞士的 PSI、日本的 Jaeri 和美国的 ANL 等。

6 结束语

图 6 给出了 93—116 号元素合成的年代的分布。由图可以明显看出, 在超铀元素的合成过程中, 出现了两个间断期: 1956—1964 年和 1985—1993 年。出现第一个间断期的原因是 93—101 号元素的合成所采用的利用中子俘获或轻粒子复合核过程的合成方法对合成更重的核不再合适, 因为获得一定数量的靶材料越来越难。例如: 在合成 101 号元素时, 利用的反应是 $^{253}\text{Es} (^4\text{He}, \text{n}) ^{256}\text{Md}$, 当时只获得了约 10^9 个 ^{253}Es 作为靶材料。因此, 人

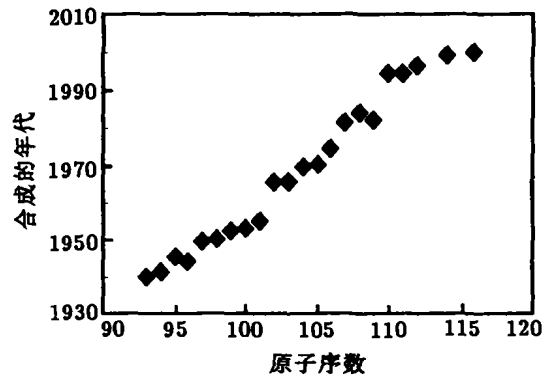


图 6 超铀元素合成的年代分布

们必须发展新的方法。直到出现重离子加速器后, 采用了重离子熔合过程才使得超铀元素的合成又继续向前迈进。但重离子熔合反应的截面随着被合成核 Z 的变大呈指数下降的趋势, 到 109 号元素时降为约 7 pb, 已达到了当时反冲核分离器能力的极限。截面再低, 测得的数据将不再可靠。因此在 1985—1993 年间出现了第二个间断期。直到 1994 年 GSI 的 SHIP 改造完毕, 大大降低了焦平面探测器上的各种本底后, 才又先后合成了 110, 111 和 112 号元素。同时 Dubna 在利用 ^{48}Ca 束流合成超重核方面也取得了长足的进展, 于 1999 年和 2000 年相继合成了 114 和 116 号元素。不过, Dubna 的结果要得到确认还需要大量的工作, 最主要的原因是测量到的相继 α 衰变停止在未知核上, 这大大降低了他们对 114 号和 116 号元素指认的可信度。

现在的情况如何呢? 沿用目前成熟的技术路线, 利用“冷熔合”可能在近期内合成 113 号元素。

按照系统性, $^{209}\text{Bi}(^{70}\text{Zn}, n)^{278}113$ 的合成截面应在 10^{-1} pb 的量级. 在现阶段的实验条件下(靶厚约 $200 \mu\text{g}/\text{cm}^2$, 流强约 $1 \text{ p}\mu\text{A}$, 收集、传输及探测的总效率约 40%), 如果截面为 0.3 pb , 约 27 天能观察到一个事件; 如果截面为 0.1 pb , 则约 80 天能观察到一个事件. 因此, 如果加速器的流强能提高 3 倍以上, 而反应靶装置的冷却速率又跟得上, 合成 113 号元素是完全可能的. 如果 Dubna 利用“暖熔合”合成的 114 号和 116 号元素的结果是正确的, 那么以 ^{48}Ca 作为束流来合成 114 号和 116 号元素的截面在 pb 量级, 远比“冷熔合”的系统性要高, 因而在近期内合成 113 号和 115 号元素是可能的. 如果 Dubna 的 118 号元素的合成也是正确的, 则 117 号元素的合成也是可能的. 再往上就非常困难了. 至此, 超重元素的合成将再进入一个停顿期, 以待

上述的两个近期内难以解决的问题(至少其中的一个)得到解决才会进一步向前迈进.

中国科学院近代物理研究所在超重核研究方面的最终目标当然是合成“超重核稳定岛”上的核素. 因此, 我们将探讨各种可能的方案以试图解决超重核研究所面临的两个困难. 与此同时, 结合已有的工作积累我们可能开展的研究有: (1) 合成机制的研究及重核结构性质的研究, 包括在理论指导下进行近库仑位垒和垒下熔合截面与弹靶组合的质量不对称性、系统的同位旋、弹核或靶核的形变等的关系, 新的反应机制, 合成一些重核新核素并研究重核衰变的系统性等; (2) 108 号以上元素的化学性质研究; (3) 探讨建立在 β 衰变、内电子转换及自发裂变等衰变模式下母核指定方法的可能性; 等等.

参 考 文 献:

- [1] Müller P, Nix J R. Stability of Heavy and Superheavy Elements [J]. J Phys, 1994, G20: 1 681 and the references therein.
- [2] Rutz K, Bender M, Bürvenich T, *et al.* Superheavy Nuclei in Self-consistent Nuclear Calculations [J]. Phys Rev, 1997, C56: 238.
- [3] Bender M, Rutz K, Reinhard P-G, *et al.* Shell Structure of Superheavy Nuclei in Self-consistent Mean-field Models [J]. Phys Rev, 1999, C60: 034304.
- [4] Kruppa A T, Bender M, Nazarewicz W, *et al.* Shell Corrections of Superheavy Nuclei in Self-consistent Calculations [J]. Phys Rev, 2000, 61: 034313.
- [5] Patra S K, Wu Ch-L, Prahara C R, *et al.* A Systematic Study of Superheavy Nuclei for $Z=114$ and Beyond Using the Relativistic Mean Field Approach [J]. Nucl Phys, 1999, A651: 117.
- [6] Cwiok S, Dobaczewski J, Heenen P-H, *et al.* Shell Structure of the Superheavy Elements [J]. Nucl Phys, 1996, A611: 211.
- [7] Bender M, Nazarewicz W, Reinhard P-G. Shell Stabilization of Super- and Hyperheavy Nuclei Without Magic Gaps [J]. Phys Lett, 2001, B515: 42.
- [8] McMillan E T, Abelson P H. Radioactive Element 93 [J]. Phys Rev, 1940, 57: 1 185.
- [9] Seaborg G T, McMillan E T, Kennedy J W, *et al.* Radioactive Element 94 from Deuterons on Uranium [J]. Phys Rev, 1946, 69: 366.
- [10] Ghiorso A, James R A, Morgan L O, *et al.* Preparation of Transplutonium Isotopes by Neutron Irradiation [J]. Phys Rev, 1950, 78: 472.
- [11] Seaborg G T, Loveland W D. The Elements beyond Uranium (M). John Wiley & Sons, Inc, 1990 and the references therein.
- [12] Thompson S G, Ghiorso A, Seaborg G T. Element 97 [J]. Phys Rev, 1950, 77: 838.
- [13] Thompson S G, Street K Jr, Ghiorso A, *et al.* Element 98 [J]. Phys Rev, 1950, 78: 298.
- [14] Ghiorso A, Harvey B G, Choppin G R, *et al.* New Element Mendelevium, Atomic Number 101 [J]. Phys Rev, 1955, 98: 1 518.
- [15] Dontes E D, Shchegolev V A, Ermakov V A. The Properties of the Isotope $^{102}254$ [J]. At En, 1966, 20: 233 (in Russian); Zager B A, Miller M B, Mikheev V L, *et al.* The Properties of the Isotope $^{102}254$ [J]. At En, 1966, 20: 230 (in Russian).
- [16] Ghiorso A, Sikkeland T, Larsh A E, *et al.* New Element, Lawrencium, Atomic Number 103 [J]. Phys Rev Lett, 1961, 6: 473; Dontes E D, Shchegolev V A, Ermakov V A. Synthesis of the Isotope of Element 103 with Mass Number 256 [J]. At En, 1965, 19: 109 (in Russian); Flerov G N, Korotkin Yu S, Mikheev V L, *et al.* On the Nuclear Properties of the Isotope $^{256}103$ and $^{257}103$ [J]. Nucl Phys, 1968, A106: 476; Druin V A. Radioactive Properties of Element 103 [J]. Yad Fiz, 1970, 12: 268 (in Russian); Eskola K, Eskola P, Nurmi M, *et al.* Studies of Lawrencium Isotopes with Mass Number 255 Through 260 [J]. Phys Rev, 1971, C4: 632.

- [17] Zvara I, Chuburkov Yu T, Tsalctka R, *et al.* Experiments on Chemistry of Element 104-Kurchatovium; II. Chemical Investigation of the ¹⁰⁴ isotope which Undergoes Spontaneous Fission with a Half-life of 0.3 Sec [J]. Radiokhimiya, 1969, 11: 163 (in Russian); Zvara I, Chuburkov Yu T, Belov V Z, *et al.* Experiments on Chemistry of Element 104-Kurchatovium; V. Adsorption of Kurchatovium Chloride from the Gas Stream on Surface of Glass and Potassium Chloride [J]. J Inorg Nucl Chem, 1970, 21: 1 885; Ghiorso A, Nurmia M, Harris J, *et al.* Positive Identification of Two Alpha-particle-emitting Isotopes of Element 104 [J]. Phys Rev Lett, 1969, 22: 1 317.
- [18] Ghiorso A, Nurmia M, Eskola K, *et al.* New Element Hahnium, Atomic Number 105 [J]. Phys Rev Lett, 1970, 24: 1 498; Druin V A, Demin A G, Kharitonov Yu P, *et al.* Study of the α -decay Isotopes of Element 105 [J]. Yad Fiz, 1971, 13: 251.
- [19] Ghiorso A, Nitschke J M, Alonso J R, *et al.* Element 106 [J]. Phys Rev Lett, 1974, 33: 1 490; Oganessian Yu Ts, Tret'yakov Yu P, Il'iuov A S, *et al.* Synthesis of Neutron-deficient Isotopes of Fermium, Kurchatovium and Element 106 [J]. Pism Zh Eksp Teor Fiz, 1974, 20: 580 (in Russian).
- [20] Münzenberg G, Hofmann S, Hesßberger F P, *et al.* Identification of Element 107 by α Correlation Chains [J]. Z Phys, 1981, A300: 107.
- [21] Münzenberg G, Armbruster P, Folger H, *et al.* The Identification of Element 108 [J]. Z Phys, 1984, A317: 235.
- [22] Münzenberg G, Armbruster P, Hesßberger F P, *et al.* Observation of One Correlated α -decay in the Reaction $^{58}\text{Fe} + ^{209}\text{Bi} \rightarrow ^{267}109$ [J]. Z Phys, 1982, A309: 89.
- [23] Hofmann S, Ninov V, Hesßberger F P, *et al.* Production and Decay of $^{269}110$ [J]. Z Phys, 1995, A350: 277.
- [24] Lazarev Yu A. Extremes of Nuclear Structure; Discovery of the Shell Closures $N=162$ and $Z = 108$ [R]. JINR Report, 1996, JINR-E7-96-82.
- [25] Hofmann S, Ninov V, Hesßberger F P, *et al.* The New Element 111 [J]. Z Phys, 1995, A350: 281.
- [26] Hofmann S, Ninov V, Hesßberger F P, *et al.* The New Element 112 [J]. Z Phys, 1996, A354: 229.
- [27] Oganessian Yu Ts, Yeremin A V, Popeko A G, *et al.* Synthesis of Nuclei of the Superheavy Element 114 in Reactions Induced by ^{48}Ca [J]. Nature, 1999, 400: 242.
- [28] Oganessian Yu Ts, Utyonkov V K, Lobanov Yu V, *et al.* Synthesis of Superheavy Nuclei in the $^{48}\text{Ca} + ^{244}\text{Pu}$ Reaction: $^{288}114$ [J]. Phys Rev, 2000, C62: 041604.
- [29] Oganessian Yu Ts, Utyonkov V K, Lobanov Yu V, *et al.* Synthesis of Superheavy Nuclei in the $^{48}\text{Ca} + ^{244}\text{Pu}$ Reaction [J]. Phys Rev Lett, 1999, 83: 3 154.
- [30] Oganessian Yu Ts, Utyonkov V K, Lobanov Yu V, *et al.* Observation of the Decay of $^{292}116$ [J]. Phys Rev, 2001, C63: 011301.
- [31] Barber R C, Greenwood N N, Hryniewicz A Z, *et al.* Discovery of the Transfermium Elements [J]. Prog Part Nucl Phys, 1992, 29: 453; Karol P J, Nakahara H, Petley B W, *et al.* On the Discovery of the Elements 110—112 [J]. Pure Appl Chem, 2001, 73: 959.
- [32] Gäggeler H, Trautman N, Brüche W, *et al.* Search for Superheavy Elements in the $^{238}\text{U} + ^{238}\text{U}$ Reaction [J]. Phys Rev Lett, 1980, 45: 1 824; Kratz J V, Brüche W, Folger H, *et al.* Search for Superheavy Elements Indamped Collisions Between ^{238}U and ^{248}Cm [J]. Phys Rev, 1986, C33: 504.
- [33] Oganessian Yu Ts, Demin A G, Danilov N A, *et al.* On Spontaneous Fission of Neutron-deficient Isotopes of Elements 103, 105 and 107 [J]. Nucl Phys, 1976, A273: 505.
- [34] Gan Z G, Qin Z, Fan H M, *et al.* A New Alpha-particle Emitting Isotope ^{259}Db [J]. Eur Phys J, 2001, A10: 21.
- [35] Bemis C E Jr, Dittner P F, Silva R J, *et al.* Production, L X-ray Identification, and Decay of the Nuclide $^{260}105$ [J]. Phys Rev, 1977, C16: 1 146 and the references therein.
- [36] Flerov G N, Oganessian Yu Ts, Lobanov Yu V, *et al.* Synthesis and Physical Identification of the Isotope of Element 104 with Mass Number 260 [J]. Phys Lett, 1964, 13: 73.
- [37] Oganessian Yu Ts, Demin A G, Danilov N A, *et al.* Experiments on the Synthesis of Neutron-deficient Kurchatovium Isotopes in Reactions Induced by ^{50}Ti ions [J]. Nucl Phys, 1975, A239: 157 and the references therein.
- [38] Flerov G N, Oganessian Yu Ts, Lobanov Yu V, *et al.* On the Synthesis of Element 105 [J]. Nucl Phys, 1971, A160: 181.
- [39] Armbruster P. On the Production of Heavy Elements by Cold Fusion: The element 106 to 109 [J]. Ann Rev Nucl Part Sci, 1985, 35: 135 and the references therein.
- [40] Armbruster P. On the Production of Superheavy Elements [J]. Ann Rev Nucl Part Sci, 2000, 50: 411 and the references therein.
- [41] Somerville L P, Nurmia M J, Nitschke J M, *et al.* Spontaneous Fission of Rutherfordium Isotopes [J]. Phys Rev, 1985, C31: 1 801.
- [42] Münzenberg G. Superheavy Elements — Discoveries and Challenges [J]. Nucl Phys, 2001, A690: 175c.
- [43] Hesßberger F P, Hofmann S, Ninov V, *et al.* Spontaneous Fission and Alpha-decay Properties of Neutron Deficient Isotopes $^{257-253}104$ and $^{258}106$ [J]. Z Phys, 1997, A359: 415.
- [44] Hofmann S, Münzenberg G. The Discovery of the Heaviest Elements [J]. Rev Mod Phys, 2000, 72: 733.
- [45] Münzenberg G, Faust W, Hofmann S, *et al.* The Velocity

- Filter SHIP, a Separator of Unslowed Heavy Ion Fusion Products [J]. Nucl Instr and Meth, 1979, 161, 65.
- [46] Hofmann S. New Elements — Approaching $Z = 114$ [J]. Rep Prog Phys, 1998, 61, 639.
- [47] Yerebin A V, and reyev A N, Bogdanov D D, *et al.* The VASSILISSA Facility for Electrostatic Separation and Study of Complete Fusion Reaction Products [J]. Nucl Instr and Meth, 1989, A274, 528.
- [48] Malyshev O N, Chelnokov M L, Chepigin V I, *et al.* Modernization of the Detector System at the Recoil Separator Vassiliassa [J]. Nucl Instr and Meth, 2000, A440, 86.
- [49] Péter J, the Fulis Collaboration. Super-heavy Nuclei Production at GABIL [R]. LPCC 01-13, 2001.
- [50] Grévy S, the Fulis Collaboration. Production of Super Heavy Elements at GANIL: Present status and perspectives [R]. LPCC 02-01, 2002.
- [51] Ghiorso A, Yashita S, Leino M E, *et al.* SASSY, a Gas-filled Magnetic Separator for the Study of Fusion Reaction Products [J]. Nucl Instr and Meth, 1988, A269, 192.
- [52] Subotic K, Oganessian Yu Ts, Utyonkov V K, *et al.* Evaporation Residue Collection Efficiencies and Position of the Dubna Gas-filled Recoil Separator [J]. Nucl Instr and Meth, 2002, A481, 71 and the references therein.
- [53] Morita K, Yoshida A, Inamura T T, *et al.* RIKEN Isotope Separator On-line GARIS/IGISOL [J]. Nucl Instr and Meth, 1992, B70, 220.
- [54] Ninov V, Gregorich K E, Ginter T N, *et al.* Production and Structure of the Heaviest Elements [J]. Nucl Phys, 2001, A682, 98c and the references therein.
- [55] Leino M, Äystö J, Enqvist T, *et al.* Gas-filled Recoil Separator for Studies of Heavy Elements [J]. Nucl Instr and Meth, 1995, B99, 653.
- [56] Ninov V, Gregorich K E, Loveland W, *et al.* Observation of Superheavy Nuclei Produced in the Reaction of ^{86}Kr with ^{208}Pb [J]. Phys Rev Lett, 1999, 83, 1 104.
- [57] Hofmann S. Synthesis of Superheavy Elements Using Radioactive Beams and Targets [J], Prog Part and Nucl Phys, 2001, 46, 293.

Brief Introduction to History and Present Status of Experimental Research on Super-heavy Nuclei*

XU Hu-shan, ZHOU Xiao-hong, XIAO Guo-qing, ZHAN Wen-long, JIN Gen-ming, GUO Jun-sheng, ZHANG Yu-hu, ZHU Yong-tai, GUO Zhong-yan, DUAN Li-min, SUN Zhi-yu, GAN Zai-guo, LI Song-lin, LI Wen-fei, LI Jian-feng, XU Hua-gen, CHEN Ruo-fu, MA Yue, ZHANG Xue-ying, JIA Fei

(Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The history of the synthesis of the transuranium nuclei is briefly introduced. The most successful techniques currently used for synthesizing super-heavy nuclei are surveyed and discussed in detail. The drawbacks and the problems for reaching the stability island of super-heavy nuclei with the techniques currently used are discussed. The present status and perspectives of the super-heavy nuclei research at different laboratories are also introduced. Finally, a brief prospect on the trends of the super-heavy nuclei research is given.

Key words: super-heavy nuclei; cold fusion; hot fusion; electromagnetic recoil separator; gas-filled recoil separator

* **Foundation Item:** One Hundred Person project of Chinese Academy of Sciences; National Key Program for Basic Research, Ministry of Science and Technology (2001CCB01200); Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences (KJ951-A1-01-01); National Natural Science Foundation of China (10235020)