

文章编号: 1007-4627(2006)04-0359-07

## 近代物理研究所超重核研究现状及计划\*

徐瑚珊<sup>1</sup>, 黄天衡<sup>1,2</sup>, 孙志宇<sup>1</sup>, 胡正国<sup>1,2</sup>, 詹文龙<sup>1</sup>, 周小红<sup>1</sup>, 黄文学<sup>1</sup>,  
张宏斌<sup>1</sup>, 章学恒<sup>1,2</sup>, 甘再国<sup>1</sup>, 郑川<sup>1,2</sup>, 李君清<sup>1</sup>, 马新文<sup>1</sup>, 秦芝<sup>1</sup>,  
肖国青<sup>1</sup>, 郭忠言<sup>1</sup>, 李智慧<sup>1</sup>, 张玉虎<sup>1</sup>, 靳根明<sup>1</sup>

(1 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000;

2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 简单描述了超重核合成的历史与国际现状, 详细地介绍了近代物理研究所已经开展的研究工作及取得的成果, 并对近代物理研究所未来在超重核研究方面的研究计划进行了介绍。

**关键词:** 超重核; 反冲核分离系统; 直线加速器

**中图分类号:** O571.5      **文献标识码:** A

### 1 引言

#### 1.1 超铀核合成的历史与国际现状

人们从自然界中寻找到的最重的元素是 92 号元素 U。自 1940 年人工合成了第一个超铀元素——93 号元素 Np<sup>[1]</sup> 至今, 人工合成的超铀元素已有 25 个(93—116 以及 118 号元素), 占已宣称被发现 117 个元素中的 21%。在这些超铀元素合成的历史过程中, 不同的阶段所采用的合成机制与鉴别技术是不同的。93 号到 100 号元素的首次合成与鉴别, 分别采用的是中子俘获及轻粒子轰击重核的复合核过程以及化学分离技术(99 和 100 号元素是在热核爆炸现场采集的尘埃中首次发现的<sup>[2]</sup>)。101 号是基于单原子测量和鉴别技术发现的第一个元素, 其首次合成仍然采用的是轻粒子复合核过程, 但在分离鉴别技术上采用了反冲技术<sup>[3]</sup>。从 1956 到 1964 年近 9 年的时间超铀元素合成的第一个间断期, 这是由于无法获得一定数量的靶材料用于中子俘获或轻粒子复合核过程合成更重的核。直到重离子加速器建成运行以后, 采用重离子弹核与锕系元素的靶核间的熔合反应才成功合成了 102 号到 106 号元素(“热熔合”)。在这期间, 由于被合成核的寿命越来越短, 分离技术上也进行了改进, 采用

了诸如“反冲 + He-jet + 转鼓/转带/转轮”等技术<sup>[2]</sup>。107 号到 109 号元素的合成采用的也是重离子熔合反应<sup>[4-6]</sup>。不同的是, 为了提高所形成复合核的存活几率, 人们以<sup>208</sup>Pb 和<sup>209</sup>Bi 这种球形或近球形核作为反应靶与具有近库仑位垒能量的入射弹核相熔合以降低复合核的激发能(“冷熔合”)。同时, 针对目标核生成截面的降低和寿命的变短, 在分离鉴别方法上采用了反冲余核飞行过程中的电磁分离技术, 并在焦平面上放置一套可进行单原子探测的相继  $\alpha$  衰变测量系统对余核进行测量与鉴别。无论是“热熔合”还是“冷熔合”, 其反应截面随着被合成核  $Z$  的变大均呈指数下降, 到 109 号元素时降为约 10 pb, 已达到了当时反冲核分离器能力的极限。合成更重的核, 截面更低, 以当时反冲核分离器的能力所测得的数据将不再可靠, 从而导致出现了长达约 6 年的超铀元素合成的第二个间断期。直到 1994 年, GSI 的 SHIP<sup>[7,8]</sup> 改造完毕, 大大降低了传输到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<sup>[9-11]</sup>。至此, 利用“冷熔合”合成超重核再一次达到当时实验条件的极限约 1 pb 的生成截面。为合成更高  $Z$  的核, 俄国 Dubna 提出了“暖熔合”的概念, 即利用<sup>48</sup>Ca 束流轰击相应的锕系靶核来合成超重核。利用该方法, 他

\* 收稿日期: 2006-09-30; 修改日期: 2006-11-15

\* 基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向性资助项目(KJXC2-SW-No4, KJXC2-SW-No18); 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(2001CCB01200); 国家自然科学基金资助项目(10221003, 10235020)

作者简介: 徐瑚珊(1964—), 男(汉族), 安徽潜山人, 研究员, 从事原子核物理研究; E-mail: hushan@impcas.ac.cn

们从 1999 年到 2005 年相继合成了 114<sup>[12]</sup>, 115<sup>[13]</sup>, 116<sup>[14]</sup> 和 118<sup>[15]</sup> 号元素, 并发现利用该机制合成的上述元素的核素生成截面均在 1 pb 左右。由于他们所合成的核经过级联  $\alpha$  衰变后最终均停止在未知核上, 其结果要得到完全认可还有大量的工作要做。此外, 日本 RIKEN 通过提高加速器的束流强度, 于 2004 年利用“冷融合”直接合成了 113 号元素(生成截面已低于 100 fb)<sup>[16]</sup>。RIKEN 的结果要得到认可也需要第二家实验室的实验来验证。

到目前为止, 得到国际纯化学和应用化学联合会(IUPAC)及国际纯物理和应用物理联合会(IUPAP)认可的元素合成工作到 111 号, 是以 X 射线发现者伦琴来命名的, 元素名为 Roentgenium, 元素符号为 Rg。

## 1.2 超重核合成面临的困难

虽然超重核合成的实验研究已经取得了长足的发展, 但其最终目标之一是要验证“超重核稳定岛”是否存在。要达到这一目标, 目前还面临两个短期内难以克服的困难。

其一, 预言“超重核稳定岛”位置的主要理论有各种宏观-微观模型<sup>[17]</sup>、Hartree-Fock 理论以及相对论平均场理论<sup>[18]</sup>。这些模型虽然由于其侧重点和所选择的参数或处理方法有所不同, 但其所预言的“超重核稳定岛”的位置均大约位于  $Z=114$ ,  $N=184$  附近, 而在目前, 合成的最重的超重核 <sup>293</sup>116, 离  $N=184$  还是差了 7 个中子。实际上采用融合反应, 即便是利用可能的放射性束流, 也无法抵达“超重核稳定岛”的中心<sup>[19]</sup>。因此, 需要寻找新的合成机制。

其二, 目前所采用的最成熟的测量和鉴别超重核的技术路线是通过目标核相继衰变到已知核来进行指认, 这就要求目标核必须具有  $\alpha$  放射性且寿命在  $\mu\text{s}$  到 min 的量级。若生成的超重核不具有  $\alpha$  衰变性或其寿命在小时量级以上时, 该方法就不适用。而“超重核稳定岛”上的核素极可能不具有  $\alpha$  衰变性且(或)寿命较长, 因此需要研发新的鉴别技术。

这些困难是挑战, 也是机遇。近代物理研究所基于上述分析, 结合已具备的一些条件和在新核素合成工作中的一些经验, 确定了超重核合成为今后若干年内的一个重要研究方向。

## 2 近代物理研究所的超重核研究现状

### 2.1 双核模型的发展

在超重核合成理论研究方面, 对双核模型<sup>[20]</sup>进行了发展, 即采用了直接数值求解主方程的方法来描述重离子的融合过程, 避免对驱动力做任何近似, 同时还采用了 Fokker-Planck 方程来处理重离子碰撞过程中的能量、角动量及形变的弛豫<sup>[21]</sup>, 因此更为真实地描述了重离子的融合过程。本工作是与中国科学院理论物理研究所及德国 Geissen 大学合作开展的, 详细介绍见文献<sup>[22]</sup>。

### 2.2 实验研究

在超重核合成实验上, 利用氦喷加转轮分离鉴别系统成功合成并鉴别了 <sup>259</sup>Db 以及 <sup>265</sup>Bh, 详情可参阅文献<sup>[23, 24]</sup>。

### 2.3 设备现状

#### 2.3.1 扇聚焦回旋加速器(SFC)

目前, 近代物理研究所的 1.7 m 扇聚焦回旋加速器, 经改造后  $K$  值可达 70, 结合即将投入使用的超导 ECR 离子源, 可提供的部分中重核束流的参数见表 1。基于此参数近代物理研究所目前具备冲击 110 号元素合成的束流条件。

表 1 SFC 的一些束流参数

离子	$E / (\text{MeV}/u)$	$I_{\text{source}} / e\mu\text{A}$	$I_{\text{SFC}} / e\mu\text{A}$
<sup>40</sup> Ca <sup>12+</sup>	6.0	100—150	8—15
<sup>58</sup> Ni <sup>17+</sup>	5.5—6.0	20—50	2—6
<sup>70</sup> Zn <sup>19+</sup>	5.0	20—30	2—4
<sup>74</sup> Ge <sup>20+</sup>	5.0	10—30	1—4
<sup>86</sup> Kr <sup>23+</sup>	5.0	30—50	3—6
<sup>129</sup> Xe <sup>34+</sup>	5.0	10—30	1—4

#### 2.3.2 “氦喷+转轮”分离鉴别系统

该系统采用的是传统的技术, 详情可参阅文献<sup>[23, 24]</sup>。利用这套系统已成功合成了超重核区的新核素 <sup>259</sup>Db 以及 <sup>265</sup>Bh。该系统适合于研究具有  $\alpha$  衰变性、寿命在 ms 量级以上、截面在 nb 量级以上的超重核。因此, 该系统不具备研究  $Z$  在 108 以上目标核的能力。

#### 2.3.3 基于速度选择的反冲核分离器

为了开展对于较短寿命目标核的研究, 我们在

原有的兰州放射性次级束流线(RIBLL)系统的基础上改造建成了采用飞行中电磁分离的反冲核分离器。其技术路线为：利用 Wien-filter 对目标核进行

第一次选择，再通过 RIBLL 线上的 D1 和 D2 磁铁进一步降低传输到焦平面探测器上的本底。图 1 为其结构示意图。

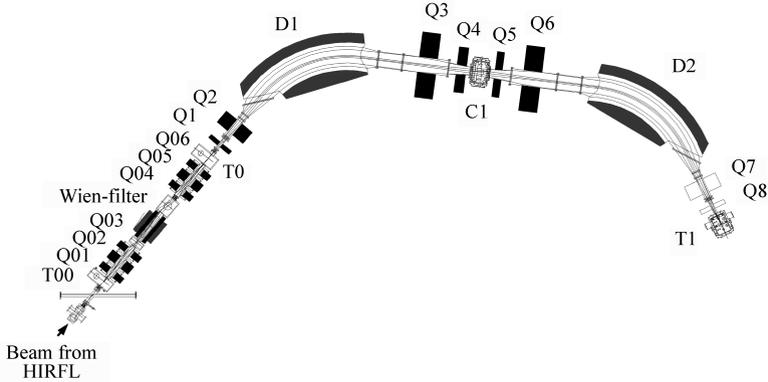


图 1 基于速度选择技术的反冲核分离器结构示意图

图中 T00 为反应靶室，其内部安装有转靶系统、束流及靶监测系统。Q01—Q03 及 Q04—Q05 为两个 3 组合四极透镜组。Q03 与 Q04 之间为 Wien-filter，通过正交的电场和磁场来实现对荷电粒子的速度选择。T0—T1 段为 RIBLL 线原有的磁

铁，主要利用这段的 D 铁来进一步降低本底。目标核的鉴别在位于 T1 的真空室中完成，包括飞行时间探测器、注入衰变测量探测器。目前该系统还在调试中，表 2 列出了 Wien-filter 段的一些初步的调试结果。

表 2 Wien-filter 的初步调试结果

测试内容	$^{239}\text{Pu}$ 源 $\alpha$ 粒子	$88\text{ MeV }^{14}\text{N} + ^{197}\text{Au} \rightarrow ^{206}\text{Rn}$	$85\text{ MeV }^{12}\text{C} + ^{197}\text{Au} \rightarrow ^{203}\text{At}$
几何立体角	1.5 msr	—	—
传输效率	~ 45%	~22% ( $V_{\text{WF}} = \pm 10\text{ kV}$ )	—
动量接收度	$\pm 3\%$	—	—
本底抑制能力	—	—	$> 10^9$ ( $V_{\text{WF}} = \pm 15\text{ kV}$ 达到坪区)

由于传输效率和本底的抑制能力是反应系统相关的，随着弹核质量数的增加，传输效率会升高，但本底的抑制能力会有所下降。整体性能有待进一步的测试，加入 T0—T1 段后，目前的初步结果是：(1) 本底的抑制能力将再提高  $10^3$  量级以上；(2) 由于 RIBLL 线上 D 铁的分析能力太强，对目前所测的反应系统 T0—T1 段的传输效率仅为约 10%。

根据设计指标，该系统主要用于对具有  $\alpha$  衰变、寿命在  $\mu\text{s}$  量级以上且生成截面大于几个 pb 的目标核的合成。从初步测试来看，本底的抑制能力达到了设计要求，但整体的传输效率远低于设计要求。为此，我们拟在适当的时期，将 Wien-filter 段移至一个新的束流线位置，在其后增加一个约  $7^\circ$  偏

转的二极磁铁，组成一个独立的反冲核分离器。届时，该系统将不仅可用于  $Z \leq 110$  的超重核素的研究，而且也可用于中重核区滴线核的研究。

### 3 近代物理研究所超重核研究计划

要想在超重核合成方面有所作为，仅靠上述的设备是远远不够的，必须使针对超重核合成所面临的困难有所突破。为此，近代物理研究所计划：(1) 建造一台新型反冲核分离器；(2) 建造一台强流直线加速器。同时，在理论研究的指导下积极开展新合成机制的探索。下面重点介绍正在建造中的新型超重核谱仪和简单介绍预研中的强流直线加速器。

### 3.1 新超重核谱仪的设计与建造

面对超重核合成对新分离鉴别技术的要求，世界上几个主要开展超重核合成研究的实验室均在开展相应的探索。例如，GSI 正在建造 SHIPTRAP，Dubna 正在建造 MASHA。这两台设备均是基于通

过精确的质量测量来鉴别目标核的思路，但不能给出  $Z$  鉴别。我们设计的新超重核谱仪试图同时实现对目标核  $Z$  和  $A$  的直接鉴别，图 2 给出了其工作原理框图。

该谱仪由靶前的差分抽气系统、反应靶室、充

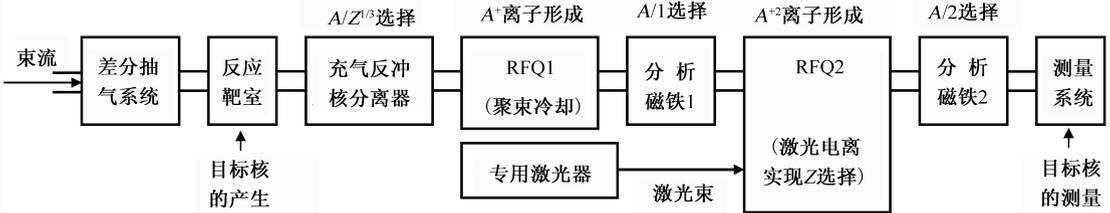


图 2 新超重核谱仪原理框图

气反冲核分离器、冷却聚束器 RFQ1、分析磁铁 1、冷却聚束器 RFQ2、原子多步电离激光器、分析磁铁 2 以及目标核测量系统构成。其工作原理为：反应产生的目标核经充气反冲核分离器进行初步分离 → 传输到 RFQ1 中进行冷却和脉冲化，并通过与其中所充 He 气的分子碰撞变成  $1+$  态，然后引出 → 利用分析磁铁 1 对  $A$  进行初步选择 → 被选择的原子核进入 RFQ2，并将其约束在其中与激光发生相互作用，激光的能量按目标核的第二电离能设置，使得仅目标核可被电离到  $2+$  态 → 引出的原子核进入分析磁铁 2，通过  $A/2$  的设置让仅被电离到  $2+$  态的目标核进入最终的测量系统。

目前，充气反冲核分离器、RFQ1 和专用激光器均在研制中，下面就其原理和主要性能给以简单介绍。

#### 3.1.1 充气反冲核分离器

充气反冲核分离器所基于的基本原理是，在二极磁铁中充入稀薄 He(或 H) 气，反冲余核进入其中后与气体分子发生碰撞，其电荷态分布将围绕一与  $Z$  值相关的平衡电荷  $q_{eq}$  变化，从而可以按  $A/Z^{1/3}$  来设置二极磁铁的磁刚度以达到对反冲余核选择的目的。具体说来，当一个质量为  $A$ ，带电荷  $q$  的离子进入二极磁铁磁场中，其磁刚度  $B\rho$  与离子的速度有如下关系，

$$B\rho = \frac{0.0227 A(v/v_0)}{q}, \quad (1)$$

其中  $v_0$  为 Bohr 速度，为光速的  $1/137$ ，磁刚度的单

位为  $T \cdot m$ 。如果有效场区内充有稀薄气体，则该离子的电荷态将围绕一平衡电荷态  $q_{eq}$  变化。按 Bohr 理论，当满足  $1 < v/v_0 < Z^{2/3}$  时，近似地  $q_{eq}$  仅与离子的速度相关，而与离子的初始电荷态无关，即

$$q_{eq} = \left(\frac{v}{v_0}\right) Z^{1/3}. \quad (2)$$

因此，对于一团具有不同初始电荷态的反冲余核进入充有稀薄气体的磁场区后，则有

$$B\rho = \frac{0.0227 A}{Z^{1/3}}. \quad (3)$$

由此可见，在理想情况下，充气反冲核分离器将按  $A/Z^{1/3}$  来对被传输核进行选择，而与其初始电荷态分布和速度无关。参照国际上已运行的多台充气反冲核分离器的优缺点，选用了 QDQ 构型。目前该分离器正在制造中，其主要设计指标如表 3 所示。

表 3 充气反冲核分离器的主要设计指标

指标名称	指标参数或形状
构型	QDQ
中心轨道长度	6.5 m
接收度	280 $\pi$ mm · mrad (水平); 450 $\pi$ mm · mrad (垂直)
D 铁中心轨道半径	1.8 m
D 铁偏转角	52°
D 铁最大磁刚度	2.88 Tm

### 3.1.2 冷却聚束器 RFQ1

该冷却聚束器采用射频四极透镜实现对来自于充气反冲核分离器的反冲余核进行冷却和聚束。该设备包含 5 个功能：入射离子的减速、RFQ 约束、缓冲气体冷却、Paul 离子阱聚束和冷束流的提取。目前该设备正在加工中，表 4 列出了其主要设计指标，详情参见文献[25]。

表 4 RFQ1 的主要设计指标

指标名称	指标参数或形状
特征半径	60 mm
长度	1 610 mm
极棒形状	双曲面
RF 电压	2 000 V
RF 频率	100—400 kHz
注入离子能量	$1 \times 10^6$ eV
缓冲气体压力	$5 \times 10^2$ Pa

### 3.1.3 专用激光器

该激光器是一台可输出蓝紫光波长的可调谐高能 ps 激光器。该激光装置由 ps 激光振荡器、预放大器、主放大器、倍频及参量激光等部分组成，具有激光脉冲窄、输出波长自动可调和能量等特点，并分 3 路输出。各路输出的主要参数指标为：第 1 路，输出激光为固定波长，中心波长约为 200 nm，能量约为 70 mJ；第 2 路，输出激光波长可调，调谐范围约为 230—450 nm，最高能量约为 5 mJ；第 3 路，输出激光波长可调，调谐范围约为 230—450 nm，最高能量约为 10 mJ。以上各激光的脉宽约为 50—500 ps，重复频率约为 10—30 Hz，且具有外触发功能。该激光器由中国科学院物理研究所

(魏志义研究员小组)和近代物理研究所联合研制，预计 2006 年底将投入实验运行，详见文献[26]。

### 3.2 强流直线加速器的预研

由于 SFC 无论是束流强度还是束流能量均不能很好地满足超重核合成实验研究发展的需要，因此近代物理研究所开展了强流直线加速器的预研。该加速器由 ECR 离子源、低能传输段 LEBT、RFQ 加速器、中能传输段 MEBT 以及一系列 IH 结构的加速段组成。

低能传输段用于连接 ECR 离子源和 RFQ 加速器，主要完成两个任务：(1) 对 ECR 离子源引出的束流进行电荷分辨，挑选出具有所需要电荷态的离子，并将其它电荷态的离子分离掉，以保证进入 RFQ 的离子为单一电荷态所需要的离子，减少 RFQ 的无用负载；(2) 将来自 ECR 离子源的束流匹配到 RFQ 加速器中。第一个任务主要由两块 45° 的分析磁铁完成，第二个任务由一组三组合四极透镜、一个螺线管及两个扫描磁铁完成。RFQ 加速器用来将来自 ECR 离子源的直流束流从约 7 keV/u 加速到 300 keV/u，同时对束流进行纵向聚束，将直流束流变为可以被 IH 加速段接收的束团。中能传输段主要用于 RFQ 和 IH 结构束流的六维相空间匹配。由于束流横向有 4 个自由度，所以它一般包含至少 4 个磁四极透镜及 1 个聚束器。相比于传统的 DTL 结构，IH 结构具有更高的并联阻抗，可以得到更高的加速梯度，特别在加速重离子时具有优势。本台装置设计有 10 个 IH 腔体，1 个工作在基频，其它 9 个都工作在倍频。

图 3 和表 5 分别给出了设计中的强流直线加速器的结构示意图和主要参数。

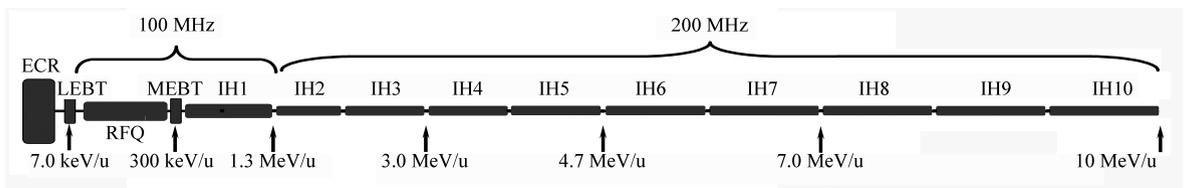


图 3 强流直线加速器的结构示意图

表 5 强流直线加速器的设计主要参数

指标名称	参数指标或结构
最高能量	10 MeV/u
束流强度	>0.5 pμA
离子源	ECR
RFQ	4-rod
DTL	IH 结构
设计离子	<sup>238</sup> U <sup>28+</sup>
总长度	<30 m

### 4 结束语

基于所具备的束流条件和分离鉴别设备的状态,近代物理研究所在今后的 5 年中超重核合成实验研究的重点将集中在合成并鉴别原子序数  $Z \leq$

110 的区域,在开展该区域新核素合成及 109 和 110 号元素的验证实验的同时,还计划通过  $\alpha$ - $\gamma$  符合测量研究  $Z = 100$  附近核的性质以及开展  $Z = 103$  和 104 号元素的化学性质的研究。理论研究方面,继续改进双核模型并利用该模型进行熔合蒸发过程合成超重核的系统性研究,同时开展新合成机制的探索。设备建造方面,完善基于速度选择的反冲核分离技术,完成对超重谱仪的建造,并开展强流直线加速器关键技术的研发。经过这一阶段的发展,近代物理研究所将在超重核合成研究方面形成具有自己特色的、较成熟的技术路线。一旦能完成强流直线加速器的建造将具备冲击 112 号以上元素合成的能力,从而进入国际超重核合成实验研究的前沿。

### 参 考 文 献:

[1] Mcmillan E T, Abelson P H. Phys Rev, 1940, **57**: 1 185.

[2] Seaborg G T, Loveland W D. The Elements Beyond Uranium. John Wiley & Sons, Inc, 1990 and the references therein.

[3] Ghiorso A, Harvey B G, Choppin G R, *et al.* Phys Rev, 1955, **98**: 1 518.

[4] Münzenberg G, Hofmann S, Hesßberger F P, *et al.* Z Phys, 1981, **A300**: 107.

[5] Münzenberg G, Armbruster P, Folger H, *et al.* Z Phys, 1984, **A317**: 235.

[6] Münzenberg G, Armbruster P, Hesßberger F P, *et al.* Z Phys, 1982, **A309**: 89.

[7] Münzenberg G, Faust W, Hofmann S, *et al.* Nucl Instr and Meth, 1979, **161**: 65.

[8] Hofmann S. Rep Prog Phys, 1998, **61**: 639.

[9] Hofmann S, Ninov V, Hesßberger F P, *et al.* Z Phys, 1995, **A350**: 277.

[10] Hofmann S, Ninov V, Hesßberger F P, *et al.* Z Phys, 1995, **A350**: 281.

[11] Hofmann S, Ninov V, Hesßberger F P, *et al.* Z Phys, 1996, **A354**: 229.

[12] Oganessian Yu Ts, Yeremin A V, Popeko A G, *et al.* Nature, 1999, **400**: 242; Oganessian Yu Ts, Utyonkov V K, Lobanov Yu V, *et al.* Phys Rev, 2000, **C62**: 041 604(R); Phys Rev, 2004, **C69**: 054 607; Phys Rev, 2004, **C70**: 064 609; Nucl Phys, 2004, **A734**: 109.

[13] Oganessian Yu Ts, Utyonkov V K, Lobanov Yu V, *et al.* Phys Rev, 2004, **C69**: 021 601 (R); Oganessian Yu Ts, Utyonkov V K, Dmitriev S N, *et al.* Phys Rev, 2005, **C72**: 034 611.

[14] Oganessian Yu Ts. Nucl Phys, 2001, **A685**: 17c; Oganessian Yu Ts, Utyonkov V K, Lobanov Yu V, *et al.* Nucl Phys, 2004, **A734**: 109; Phys Rev, 2000, **C63**: 011 301(R); Phys Rev, 2004, **C69**: 054 607; Phys Rev, 2004, **C70**: 064 609.

[15] Oganessian Yu Ts, Utyonkov V K, Lobanov Yu V, *et al.* Phys Rev, 2006, **C47**: 044 602.

[16] Morita K, Morimoto K, Kaji D, *et al.* J Phys Soc Japn, 2004, **73**: 2 593.

[17] Müller P, Nix J R. J Phys, 1994, **G20**: 1 681 and the references therein.

[18] Rutz K, Bender M, Bürvenich T, *et al.* Phys Rev, 1997, **C56**: 238.

[19] Hofmann S. Prog Part and Nucl Phys, 2001, **46**: 293.

[20] Adamian G G, Antonenko N V, Scheid W, *et al.* Nucl Phys, 1998, **A633**: 409.

[21] Li W F, Wang N, Li J F, *et al.* Euro Phys Lett, 2003, **64**: 750.

[22] Li Junqing, Zuo Wei, Feng Zhaoqing, *et al.* Nuclear Physics Review, 2006, **23**(4): 387.

[23] Gan Z G, Qin Z, Fan H M, *et al.* Euro Phys J, 2001, **A10**: 21.

[24] Gan Z G, Guo J S, Wu X L, *et al.* Euro Phys J, 2004, **A20**: 385.

[25] 黄文学, 王 玥, 朱志超等. 原子核物理评论, 2006, **23**(4): 383.

[26] 马新文, 詹文龙, 张大成. 原子核物理评论, 2006, **23**(4): 414.

# Status and Prospect of Super-heavy Nuclei Research at IMP<sup>\*</sup>

XU Hu-shan<sup>1</sup>, HUANG Tian-heng<sup>1, 2</sup>, SUN Zhi-yu<sup>1</sup>, HU Zheng-guo<sup>1, 2</sup>, ZHAN Wen-long<sup>1</sup>,  
ZHOU Xiao-hong<sup>1</sup>, HUANG Wen-xue<sup>1</sup>, ZHANG Hong-bin<sup>1</sup>, ZHANG Xue-heng<sup>1, 2</sup>,  
GAN Zai-guo<sup>1</sup>, ZHENG Chuan<sup>1, 2</sup>, LI Jun-qing<sup>1</sup>, MA Xin-wen<sup>1</sup>, QIN Zhi<sup>1</sup>,  
XIAO Guo-qing<sup>1</sup>, GUO Zhong-yan<sup>1</sup>, LI Zhi-hui<sup>1</sup>,  
ZHANG Yu-hu<sup>1</sup>, JIN Gen-ming<sup>1</sup>

(1 *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*

2 *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract:** The history and the international status of the super-heavy nuclei synthesis are briefly described. The related research work carried out at the Institute of Modern Physics (IMP) has been reviewed. The prospect of the super-heavy nuclei research at IMP has been introduced.

**Key words:** super-heavy nuclei; recoil separator; linear accelerator

---

\* **Foundation item:** Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences (KJCX2-SW-No4, KJCX2-SW-No18); One Hundred Person Project of Chinese Academy of Sciences; National Key Program for Basic Research of Ministry of Science and Technology (2001CCB01200); National Natural Science Foundation of China(10221003,10235020)