基于HIAF的超重元素和核素研究

周小红^{1*}, 张志远^{1*}, 甘再国¹, 许甫荣², 周善贵^{3,4,5}

1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;

2. 北京大学物理学院, 北京 100871;

3. 中国科学院理论物理研究所, 中国科学院理论物理前沿重点实验室, 北京 100190;

4. 中国科学院大学物理科学学院, 北京 100049;

5. 湖南师范大学, 量子效应及其应用协同创新中心, 长沙 410081

*联系人, 周小红, E-mail: zxh@impcas.ac.cn; 张志远, E-mail: zhangzy@impcas.ac.cn

收稿日期: 2020-07-28; 接受日期: 2020-08-18; 网络出版日期: 2020-09-27

国家自然科学基金(编号: 11735017, 11525524, 11621131001, 11647601, 11747601, 11711540016, 11961141004, 11835001, 11921006)、中国科学院前沿科学重点研究项目(编号: QYZDJ-SSW-SLH041, QYZDB-SSWSYS013)、中国科学院战略性先导科技专项(B类)(编号: XDB34010000)和国家重点基础研究发展计划(编号: 2018YFA0404402)资助

摘要 原子核是由质子和中子构成的量子多体系统. 超重核素是指考虑了壳效应才存在的原子核. 探索原子核存在的电荷数和质量数极限始终是核物理研究的前沿和热点. 迄今, 在实验上合成和鉴别了百余种超重核素, 将化学元素周期表从92号扩展至118号元素, 完成了周期表上第七周期元素的填充. 强流重离子加速器装置(High Intensity heavy-ion Accelerator Facility, HIAF)将于2025年建成并投入运行, 超重元素和核素研究是其重要研究目标之一. HIAF的超导直线加速器能够提供能量可调的强流重离子束流, 将为合成超重新元素和探索理论预言的超重核稳定岛提供重大机遇. 本文介绍了基于HIAF的超重元素和核素研究计划, 对超重核研究的现状和意义进行了综述, 重点描述了基于重离子诱发的熔合反应和多核子转移反应的电磁谱仪以及实验测量装置. 本文针对超重新元素和核素的合成研究、超重核结构和性质研究、超重核素产生机制研究、超重原子结构和元素化学性质研究分别进行了研究计划的介绍, 最后对超重核研究的发展规划进行了总结.

关键词 超重元素, 超重核稳定岛, 重离子物理, 强流重离子加速器装置

PACS: 27.90.+b, 25.60.Pj, 28.60.+s

1 研究现状和意义

原子核和原子是物质微观结构的两个基本层次. 顾名思义, 原子核是原子的核心. 原子核是由质

子和中子构成的量子多体系统, 其中质子数决定原子核的电荷数和相应原子的原子序数. 化学元素是具有相同核电荷数的一类原子的总称. 在地球上, 92号元素铀是天然存在的最重元素, 超铀元素都是

引用格式: 周小红, 张志远, 甘再国, 等. 基于HIAF的超重元素和核素研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 112002

Zhou X H, Zhang Z Y, Gan Z G, et al. Research program of superheavy elements and nuclides based on HIAF (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2020, 50: 112002, doi: [10.1360/SSPMA-2020-0288](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0288)

科学家利用核反应合成的. 学界普遍认为核电荷数大于103的原子核为超重核素, 对应的元素为超重元素. 产生超重元素的前提是合成超重核素. 在核物理研究领域, 通常将超重元素和超重核素研究统称为超重核研究. 超重核研究致力于解决和探索以下重大科学问题: 存在多少种化学元素? 超重元素的化学性质是否符合已知元素周期律的外推? 在极强库仑场下原子核的结构和性质如何变化? 质子数 $Z=82$ 和中子数 $N=126$ 之后的核幻数是什么? 是否存在稳定的或极长寿命的超重原子核? 等等^[1-5]. 在超重核研究领域, 合成新元素拓展化学元素周期表和探索超重核稳定岛是两个核心科学目标.

核反应是产生超铀核素和元素的唯一方法. 核反应产生原子核后, 大约需要 10^{-14} s, 原子核吸收周围环境中的电子并形成稳定的原子结构. 因此, 表征超铀原子(元素)存在的特征时间是 10^{-14} s. 自原子核物理这门学科创建以来, 科学家一直以巨大的热情探索元素存在的极限、原子核存在的电荷数和质量数极限.

量子电动力学是描述原子结构的基本理论, 如果假设原子核为点电荷, 该理论给出原子最内层轨道电子的动能为^[6,7]

$$E = m_e c^2 [(1 - (Z\alpha)^2)^{-1/2} - 1], \quad (1)$$

其中, m_e 为电子质量, Z 为核电荷数, α 为精细结构常数, c 为光速. $1 - (Z\alpha)^2 > 0$ 决定了原子存在的核电荷数极限为 $Z=137$. 当然, 原子核不是点电荷, 其电荷具有一定的空间分布. 考虑这个因素, 量子电动力学理论给出的元素存在极限为 $Z<173$ ^[6-8].

在原子核层次上, 裂变限制了原子核存在的电荷数和质量数上限^[9,10]. 如果把原子核看成是经典带电液滴, 当质子数大于103时, 原子核的裂变位垒趋近于零, 自发裂变寿命小于 10^{-14} s. 这样, 经典液滴模型预言不可能存在于原子序数大于104的元素^[9]. 然而, 原子核是由质子和中子构成的量子多体系统, 具有壳层结构^[11]. 壳结构效应能够增加重原子核的裂变位垒, 延缓其发生自发裂变. 因此, 在重原子核中, 壳效应、库仑排斥力和核力共同决定着裂变位垒的大小, 也决定了原子核电荷数和质量数存在的极限. 源于此, 历史上将考虑了壳效应

才存在的重原子核称为超重核素. 锕系元素正好终结于103元素, 现在, 人们普遍地将超锕系元素(核素)称为超重元素(核素). 超重原子核是一个复杂的量子多体系统, 理论上尚不能精确计算裂变位垒, 从而也无法准确预言原子核存在的电荷数和质量极限. 探索元素和原子核的存在极限极具挑战, 将是一项长期而艰巨的研究工作.

自20世纪40年代以来, 世界科技强国的核物理实验室一直致力于重元素合成研究工作, 并在激烈的国际竞争中不断取得重大突破^[3-5]. 回顾历史, 美国劳伦斯伯克利实验室(Lawrence Berkeley Laboratory, LBL)、俄罗斯Dubna和德国亥姆霍兹重离子研究中心(GSI)实验室交替引领元素合成研究工作, 每一次重大突破都是以核反应机制、实验测量技术和方法的突破为先导. 在1974年之前, 美国LBL和苏联Dubna等实验室利用中子俘获反应和重离子熔合反应合成了93–106号元素的多种同位素^[12]. 1973年, 俄罗斯的Oganessian^[13]提出了利用双幻核 ^{208}Pb 或 ^{209}Bi 为靶产生超重核素的“冷熔合”反应机制. 在“冷熔合”反应中, 由于靶核的结合能很大, 形成的复合核激发能大概在10–20 MeV, 复合核蒸发一个中子退激生成超重核. 此后, 德国GSI建造了强流重离子加速器, 研发了能够高效分离熔合产物的速度选择器^[14,15], 发展了基于超重核级联 α 衰变关联测量的单原子核鉴别技术^[16], 历经20余年, 利用“冷熔合”反应合成了从107–112号6种元素的一系列同位素^[5]. 2004年, 日本RIKEN在验证了110–112号元素存在的基础上, 成功合成了113号元素^[17]. 1999–2009年, 俄罗斯Dubna实验室采用双幻核 ^{48}Ca 束流轰击锕系元素靶的热熔合反应, 利用充气反冲核分离器和超重核级联 α 衰变关联测量技术, 合成了113–118号元素的若干同位素^[3,4]. 在 ^{48}Ca 束流诱发的热熔合反应中, 生成的复合核激发能大概在30–40 MeV, 复合核蒸发3–4个中子退激生成超重核. 至2016年, IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry)和IUPAP (International Union of Pure and Applied Physics) 联合确认了所有已合成的元素并给予了元素命名^[18-24]. 图1给出了根据IUPAC和IUPAP确定的元素符号以及我国科学技术名词审定委员会发布的元素中文名制作的最新中

IA		化学元素周期表																2He 氦																	
1H 氢		IIA										IIIa		IVA		VA		VIA		VIIA															
3Li 锂		4Be 铍		<div><div>92U 铀</div><div>← 元素符号 ← 元素序号 ← 元素名称</div></div>												5B 硼		6C 碳		7N 氮		8O 氧		9F 氟		10Ne 氖									
11Na 钠		12Mg 镁		VIIB		VIB		VB		VIB		VIIB		VIII		IB		IIB		13Al 铝		14Si 硅		15P 磷		16S 硫		17Cl 氯		18Ar 氩					
19K 钾		20Ca 钙		21Sc 钪		22Ti 钛		23V 钒		24Cr 铬		25Mn 锰		26Fe 铁		27Co 钴		28Ni 镍		29Cu 铜		30Zn 锌		31Ga 镓		32Ge 锗		33As 砷		34Se 硒		35Br 溴		36Kr 氪	
37Rb 铷		38Sr 锶		39Y 钇		40Zr 锆		41Nb 铌		42Mo 钼		43Tc 锝		44Ru 钌		45Rh 铑		46Pd 钯		47Ag 银		48Cd 镉		49In 铟		50Sn 锡		51Sb 锑		52Te 碲		53I 碘		54Xe 氙	
55Cs 铯		56Ba 钡		La-Lu 镧系		72Hf 铪		73Ta 钽		74W 钨		75Re 铼		76Os 锇		77Ir 铱		78Pt 铂		79Au 金		80Hg 汞		81Tl 铊		82Pb 铅		83Bi 铋		84Po 钋		85At 砹		86Rn 氡	
87Fr 钫		88Ra 镭		Ac-Lr 锕系		104Rf 钌		105Db 铪		106Sg 锿		107Bh 鰐		108Hs 鰐		109Mt 𬬻		110Ds 𬬻		111Rg 𬬻		112Cn 𬬻		113Nh 𬬻		114Fl 𬬻		115Mc 𬬻		116Lv 𬬻		117Ts 𬬻		118Og 𬬻	
La-Lu 镧系				57La 镧		58Ce 铈		59Pr 镨		60Nd 钕		61Pm 钷		62Sm 钐		63Eu 铕		64Gd 钆		65Tb 铽		66Dy 镝		67Ho 钬		68Er 铒		69Tm 铥		70Yb 镱		71Lu 镥			
Ac-Lr 锕系				89Ac 锕		90Th 钍		91Pa 镤		92U 铀		93Np 镎		94Pu 钚		95Am 镅		96Cm 镆		97Bk 锫		98Cf 锪		99Es 镱		100Fm 镎		101Md 钷		102No 锫		103Lr 镥			

图1 最新中文版元素周期表, 图中浅红色阴影区标记超重元素

Figure 1 The latest periodic table of elements, the shaded red region indicates the super-heavy elements.

文版元素周期表^[22-24]. 可见, 经过半个多世纪的不懈努力, 国际核物理界在元素合成领域取得了巨大成功, 已将元素周期表从92号扩展至118号元素.

自2009年以来,德国GSI、俄罗斯Dubna、日本RIKEN (RIKagaku KENkyusho/Institute of Physical and Chemical Research)等实验室利用热熔合反应持续开展了合成119号和120号元素的实验工作^[25-30]。然而,这些实验均未取得成功,仅给出了相关反应截面的上限。目前,合成118号以上元素极具挑战,最主要的困难是产生超重核的反应截面太小。113号元素是利用“冷熔合”反应合成的最重元素,反应截面仅为19 fb^[30]。随着目标核素电荷数的增加,“冷熔合”反应截面快速减小^[5]。利用⁴⁸Ca束流、通过热熔合反应合成114–118号元素的反应截面介于1–10 pb之间^[3,4]。然而,利用比⁴⁸Ca更重束流合成118号以上元素的反应截面可能为几十个fb^[25-29]。假如超重核素的产生截面为10 fb,利用目前最先进的重离子加速器设施,数月甚至数年才能产生一个目标核素。现有加速器装置的能力已无法继续支持超重新元素合

成实验工作. 为了在新元素合成研究领域取得突破, 一方面需要设计建造新一代强流重离子加速器, 提升束流强度, 增加超重核的产额; 另一方面需要研究核反应机制, 寻求新的能够有效产生超重核素的反应机制. 当前, 世界科技强国正在建造或计划建造新一代强流重离子加速器研究装置, 这将为新元素合成提供新机遇. 需要特别指出的是, 俄罗斯Dubna实验室将率先建成超重元素工厂(SHE Factory)^[3], 有望继续引领超重元素合成研究工作.

在超重原子中, 原子核对内壳层轨道电子的库仑吸引力极强, 导致电子运动速度接近光速^[6,7]. 这样, 相对论效应、电子关联、强场量子电动力学效应可能改变超重原子中轨道电子的排布, 特别是价电子的排布, 使超重元素的化学性质偏离周期律的外推预期. 在合成超重核素的过程中, 科学家建立了研究超重元素化学性质的气相热色谱和液相色谱方法, 确定了108号以下元素在周期表中的位置, 发现了112号和114号元素可能分别具有类汞和类铅的化学性质^[31-34].

20世纪60年代, 在一批杰出理论物理学家的共同努力下, 创新了核理论并预言以质子数 $Z=114$, 中子数 $N=184$ 为中心存在一片寿命较长、相对稳定的原子核, 这就是超重核稳定岛^[35-40]. $Z=82$, $N=126$ 的 ^{208}Pb 是已知的最重双幻数核. 稳定岛的中心应该位于 ^{208}Pb 之后的下一个双幻数核. 核幻数取决于核子单粒子能级能量的分布. 自超重核稳定岛预言以来, 发展了多种理论模型, 探索了可能存在的最大核幻数. 采用不同相互作用势的理论模型给出的核子能级的相对能量是不同的, 甚至能级次序也是不同的. 这样, 不同理论预言的稳定岛中心位置有差异. 综合各种理论模型计算结果^[19-21,41], 82之后的质子幻数可能为114, 120, 126, 138等; 126之后的中子幻数可能为184, 198, 228, 238等. 因此, 在超重核区, 可能存在 $(Z=114, N=184)$, $(Z=120, N=184)$, $(Z=126, N=184)$, $(Z=114, N=198)$ 等若干双幻数核. 在已知的3000余种核素中, 存在多个双幻数核, 但稳定的双幻数核均位于 β 稳定线上. 在核素图上, β 稳定线可用下列经验公式表示^[42]:

$$Z = \frac{A}{1.98 + 0.0155A^{2/3}}, \quad (2)$$

其中, Z 为核电荷数, A 为质量数. 只有 $Z=114$, $N=184$ 的双幻数核位于 β 稳定线的延伸线上, 其他的双幻数核在 β 稳定线的缺中子侧或丰中子侧. 如果要求稳定岛中心在 β 稳定线上, 超重核稳定岛的中心最可能位于 $Z=114$, $N=184$. 探索超重核稳定岛能够揭示在极强库仑场下原子核的结构和性质, 发现可能存在的最大核幻数. 此外, 合成位于超重核稳定岛上的长寿命核素, 将为精确确定超重元素的化学性质奠定物质基础, 并可能具有不可估量的重大应用

价值. 攀登超重核稳定岛是人类的科学梦想之一. 根据美国科学杂志在2005年发布的“125个有待解决的重大科学问题”, 关于超重元素研究的问题——“Are there stable high-atomic-number elements?”——被列为其中之一^[43].

目前, 利用重离子熔合反应已合成了逾百个超重核素. 然而, 这些已知的超重核素都位于超重核稳定岛缺中子一侧, 已知的最丰中子核素距稳定岛中心尚差7个中子^[3-5]. 尽管如此, 实验和理论研究工作极大地改变了人们对超重核稳定岛的认知. 早期, 人们普遍认为, 稳定岛周围核素的裂变位垒极低, 它们的自发裂变寿命小于表征核素存在的特征时间(10^{-14} s). 这样, 在核素图上, 以 $Z=114$, $N=184$ 为中心的核素构成一个“岛屿”, 孤立于核素版图大陆之外, 如图2(a)所示. 但是, 实验发现 $Z=108$, $N=162$ 都是形变亚壳, ^{270}Hs 周围存在一批相对稳定的形变超重核. Patyk和Sobiczewski^[44,45]指出十六极和三十二极形变能够显著改变质子和中子单粒子能级的相对能量分布, 导致存在 $Z=108$ 和 $N=162$ 的形变亚壳. 利用“冷熔合”反应产生的超重核素位于 $Z=108$ 和 $N=162$ 附近. 形变亚壳使其周围核素获得了额外稳定性, 这是利用“冷熔合”能够成功合成107–113号超重元素的根本原因. 以 ^{270}Hs 为中心, 在核素图上形成了一个超重核“浅滩”连接理论预言的超重核稳定岛与已知核素^[46]. 基于此, 把以 $Z=114$, $N=184$ 为中心的核素称为超重核稳定岛已不准确. 它们在核素图上不是构成了一个“岛屿”, 而是一个“半岛”, 如图2(b)所示. 沿袭历史, 人们仍然将其称为超重核稳定岛.

迄今, 尚未在实验上找到能够产生丰中子超重

图2 超重核区原子核壳修正能量等高图. 该图示意了对超重核稳定岛认知的变化. (a) 早期对稳定岛的认识; (b) 目前的认识
Figure 2 Diagrammatic sketch of shell correction energy in superheavy mass region, showing the landscape of superheavy island of stability as believed earlier (a), and expected presently (b).

核素的机制, 超重核稳定岛探索主要局限于不断深入的理论研究. 因此, 人类要登上超重核稳定岛任重而道远. 为了进入稳定岛, 必须解决以下两个重大问题: (1) 发现新的产生丰中子超重核素的反应机制. 利用丰中子放射性束流诱发的熔合反应是一个自然的选择. 但是, 运行中的放射性束流装置无法产生足够强的丰中子放射性束流. 在可以预期的将来, 在国际上只能利用丰中子束流开展熔合反应机制研究. 随着强流重离子加速器技术的发展, 人们认识到利用重靶核组合通过多核子转移反应可能是产生丰中子超重核素的突破口^[47-49]. (2) 建立新的鉴别方法. 目前, 超重核素的鉴别方法是基于单原子核 α 衰变链的时间、空间位置、能量关联测量技术. 对于超重核稳定岛上的核素, 其寿命可能很长且未必一定具有 α 放射性. 因此, 迫切需要研发超重核素质量数和电荷数的直接测量技术与方法.

中国科学院近代物理研究所于2001年开始了超重核素合成研究工作. 基于氢喷嘴和转轮实验装置, 合成了105和107号元素的新同位素²⁵⁹Db和²⁶⁵Bh^[50,51]; 研制了先进的充气反冲核分离器和单原子核鉴别测量系统, 验证性合成了110号元素的同位素²⁷¹Ds^[52]. 此外, 我国核物理理论工作者深入开展了超重核结构和产生机制研究^[19-21,53-55].

国家“十二五”重大科技基础设施——“强流重离子加速器装置(HIAF)”已于2018年12月23日开工建设, 计划总建设周期为8年. HIAF的超导直线加速器能够提供极强重离子束流, 将成为国际上利用熔合反应合成超重元素、利用多核子转移反应产生丰中子超重核素的重要装置之一. 科研人员将依托HIAF, 建造先进的实验装置, 合成超重新元素和新核素, 探索超重核稳定岛, 研究超重原子和原子核的结构和性质.

2 基于HIAF的实验测量装置

HIAF是新一代重离子加速器研究装置, 其结构布局见图3. HIAF主要由强流超导离子源、超导离子直线加速器(iLinac)、磁刚度为34 Tm的增强器(Booster Ring)、高能放射性束流线(HFRS)、磁刚度为13 Tm的高精度环形谱仪(Spectrometer Ring)以

及一批实验测量装置构成. HIAF是一台束流指标领先、多学科用途的重离子科学综合研究装置. iLinac可以产生从氢到铀、强度为1 mA的离子束流. 在国际上, iLinac将能够提供最强的中低能重离子束流. 在低能实验厅, 研究人员计划设计建造先进的充气反冲核谱仪、丰中子核素分离器以及相关的实验测量装置. 从iLinac引出能量精确可调的强流重离子束流, 利用熔合反应和多核子转移反应产生超重元素和核素, 开展超重核研究工作.

2.1 充气反冲核谱仪

重离子诱发的熔合反应是目前产生超重元素和缺中子超重核素的唯一方法. 充气反冲核谱仪能够高效分离熔合反应产物并具有良好的本底抑制能力, 是国际上超重核研究普遍使用的实验装置^[56-61]. 即将设计建造的充气反冲核谱仪构成如图4所示, 主要包括差分抽气系统、靶系统、主偏转磁铁、小角度偏转磁铁、三个四极磁铁、工作气体维持系统、收集测量系统. 差分抽气系统主要用于隔离加速器的高真空区和谱仪的充气区域; 靶系统主要由转靶、束流监测和靶厚监测装置构成; 主偏转磁铁能够对目标核进行高效率的分离; 其前后的四极透镜磁铁主要用于对反应产物进行聚焦, 以提高传输效率; 小角度偏转磁铁用于去除部分轻质量的反应本底粒子; 收集测量系统主要由飞行时间探测器、焦平面硅探测阵列以及电子学系统构成.

充气反冲核谱仪工作原理: 从iLinac引出的低能重离子束流轰击靶材料发生熔合蒸发反应, 产生感兴趣的目标核. 由于实验中采用的靶材料很薄, 厚度一般在300–500 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$, 而熔合产物具有30–50 MeV的反冲动量, 因此产物会从薄靶的后方延束流方向反冲出来. 从靶中反冲出的反应产物进入谱仪磁场时, 处于电离状态, 受到洛伦兹力的作用, 因此在二极磁铁中的偏转轨迹表示为

$$B\rho = \frac{mv}{Q} = 0.0227A \frac{v}{v_0 Q}, \quad (3)$$

其中, $B\rho$ 是带电离子的磁刚度, 单位是Tm; m 为离子质量; A 为离子的质量数; Q 为电荷数; v 是离子的飞行速度, 单位是m/s; v_0 为玻尔速度, 等于

图 3 HIAF总体布局. 图中浅红色标记的区域为低能实验厅. 在低能实验厅, 计划安装充气反冲核谱仪和丰中子核素分离器开展超重核研究

Figure 3 The layout of HIAF. The shaded red region indicates the low-energy experimental hall, in which we will install a gas-filled recoil separator and a spectrometer for the separation of neutron-rich isotopes produced in multi-nucleon transfer reactions.

图 4 充气反冲核谱仪系统构成. 在图中示意了靶位和焦平面探测装置

Figure 4 The layout of the gas-filled recoil separator. The detection systems at the target position and focal plane position are indicated.

2.19×10^6 m/s.由此可见, 核反应产物离子的磁刚度与其速度、电荷数和质量数有关. 谱仪的目的就是将融合反应的产物从束流粒子等大量本底中分离出来, 并进行收集和测量. 但遗憾的是, 由于反冲出的反应产物具有一定的动能分布和电荷态分布, 因此很难在真空条件下对飞行中的目标核进行高

效的分离和收集. 解决的方法是, 在谱仪磁场中填充稀薄的氢气或者氦气(气压一般小于100 Pa), 离子在飞行过程中不断地与气体分子碰撞, 频繁地发生电荷交换反应, 导致离子的电荷态处在不断的变化中. 由于气体很轻, 离子在碰撞过程中的能量损失很小, 电荷态会很快达到动态平衡且分布较为集中.

离子的平衡电荷态 Q_{eq} 与速度 v 成正比, 可以近似表示为^[62]

$$Q_{eq} = \frac{v}{v_0} Z^{1/3}, \quad (4)$$

其中, Z 为离子的核电荷数. 因此, 在充气谱仪中离子的运动轨道为

$$B\rho = 0.0227A \cdot Z^{-1/3}. \quad (5)$$

由此可见, 在充气谱仪中, 离子运动轨道与其初始速度和电荷态的分布无关, 只与选择目标核的 $A/Z^{1/3}$ 有关. 如果再进一步把原子核的质量数 A 近似看作与 Z 成正比, 那么离子的磁刚度就仅与 $A^{2/3}$ 成正比. 而对于熔合反应来说, 蒸发剩余产物的质量数是最大的, 与弹核和靶核的质量数相差也比较大, 因此, 充气反冲核谱仪按照质量数和核电荷数的不同, 能够将熔合反应产物从大量类弹和类靶反应产物中高效分离出来, 并传输到位于焦平面的探测装置中进行收集和测量.

在谱仪焦平面, 将配置单原子核灵敏的测量系统, 实现超重核素 α 衰变链的位置-时间-能量关联测量. 该系统由一块双面硅条注入探测器, 放置在其后且面积相同的反符合硅探测器, 围成桶状放置在注入探测器前以探测 α 粒子或裂变碎片的硅条探测器阵列组成. 研发基于Flash ADC的数字化电子学系统, 对探测器的前放输出脉冲波形进行数字化采样并实时记录, 实现无死时间的数据获取, 研究寿命短至微秒量级的超重核素(谱仪对目标核素的分离时间大约为1 μ s). 充气反冲核谱仪也可以用作预分离装置, 产生并分离超重核素, 在谱仪焦平面位置连接气相热色谱和液相色谱装置, 开展超重元素的化学性质研究; 连接气体单元、六极离子导向器、射频离子冷却聚束器, 制备低能、高品质离子束流, 利用多反射飞行时间谱仪、离子阱、共线激光谱仪测量超重核素的质量、电荷分布半径以及电磁多极矩. 此外, 在充气反冲核谱仪的靶位, 计划建造高纯锗探测阵列开展超重核的在束谱学研究.

拟建充气反冲核谱仪关键技术参数和性能指标如下:

分离和传输效率大于40%;

对于能量为10.0 MeV的 α 粒子探测效率~80%、能量分辨~1.0%;

对于能量为1.0 MeV的 γ 射线探测效率~10%、能量分辨~2.0 keV;

靶点束斑在水平和垂直方向的半高全宽为4 mm;

焦平面束斑在水平方向半高全宽为60 mm, 在垂直方向半高全宽为20 mm;

二极磁铁偏转角度是30°, 边缘聚焦, 入口和出口的边缘角为0°/-34°;

小角度偏转磁铁偏转角度是10°, 入口和出口的边缘角为-10°/10°;

二极磁铁最大磁刚度是2.5 Tm;

二极磁铁偏转半径为1.6 m, 最大磁场为1.6 T;

小角度偏转磁铁偏转半径为2.5 m, 最大磁场为1.1 T.

2.2 基于多核子转移反应的丰中子核素分离器

重核间多核子转移反应是介于少数核子转移和深部非弹性散射之间的一种核反应过程, 兼有准弹性散射和强阻尼耗散反应的特征^[47-49, 63-65]. 核反应过程中释放的能量, 称为反应能, 通常用符号 Q 表示. 对于低反应 Q 值的多核子转移反应, 重产物的激发能较低, 能够显著减小其裂变概率从而增加存活概率; 由于转移反应 Q 窗效应和壳结构效应, 反应产物基本上沿 β 稳定线分布. 这两个特征非常有利于产生相对丰中子的超重核素. 核理论物理学家建立了若干微观和半经验模型, 深入系统地研究了重核间多核子转移反应过程, 计算了产生丰中子超重核素的反应截面, 结果极其诱人, 为在实验上探索超重核稳定岛指出了一条可能途径^[47-49, 63-65].

HIAF能够提供极强重离子束流, 为利用铜系核素弹靶组合、通过多核子转移反应产生丰中子超重核素带来了新机遇. 以 $^{238}\text{U}+^{248}\text{Cm}$ 反应系统为例, 理论计算结果显示^[49], 在适当的入射能量下, 弹核 ^{238}U 向靶核转移核子, 逐步向双幻核 ^{208}Pb 演化, 相应的类靶产物为丰中子重核素和超重核素. 对于 $Z=104-108$ 的丰中子超重核素, 产生截面在nb-pb之间^[49]. 可见, 利用多核子转移反应可以产生靠

近超重核稳定岛的核素, 有望开辟一条通往超重核稳定岛的途径. 但是, 希望与挑战并存, 多核子转移反应机制非常复杂, 反应产物的角度、能量和电荷态分布广, 在实验上高效分离和鉴别目标核素极具难度.

目前, 利用多核子转移反应是产生丰中子超重核素的唯一方法. 研究人员将针对多核子转移反应的特点, 研发丰中子超重核素分离关键技术, 设计建造一台专用分离器, 为探索理论预言的超重核稳定岛奠定技术和装置基础. 拟建造分离器如图 5 所示, 主要包括转靶系统、气体单元、六极离子导向器、射频四极冷却聚束器、中性化池与激光共振电离装置、质量分析器. 该分离器将安装在图 3 所示的HIAF低能实验厅.

丰中子核素分离器工作原理: 能量略高于库仑位垒的弹核与靶核相互作用产生类弹和类靶核素, 未反应的初级束流被法拉第筒阻止, 反应产物离子进入充高纯度氦气的气体单元(Gas Cell). 不同电荷态的反应产物与氦原子连续碰撞, 逐渐损失能量并被停阻在气体中. 由于氦原子的第一电离能非常大, 反应产物最终处于 1^+ 电荷态. 在Gas Cell中, 静电场和射频电场把离子束缚在传输面, 并驱使离子沿特定方向运动. 离子从气体单元进入

六极离子导向器(SPIG)后, 在径向方向上被射频电场约束, 在氦气流的带动下传输到射频四极冷却聚束器(RFQCB). 在RFQCB中, 离子与高纯氦气作用, 逐渐减小动量分散、能量分散和束斑大小, 产生高品质束流. 在RFQCB末端, 利用Paul阱实现离子堆积和脉冲化. 气体单元、SPIG和RFQCB置于 30 kV 高压平台上, 后续设备处于地电位. 这样, 离子在RFQCB的出口被加速, 并被注入质量分析器. 质量分析器按照质量数选择目标核, 实现目标核素的质量数鉴别. 在质量分析器的焦平面上安装可移动狭缝, 选择同量异位素(质量数相同但核电荷数不同的离子). 在中性化池中, 离子首先俘获碱金属原子电子而中性化为原子, 然后与具有特定波长的激光作用, 被电离为一价离子, 从而实现元素鉴别. 将被激光电离选择后的离子传输到第二个质量分析器中, 进一步确定质量数. 最后, 利用分束器把目标核素传输到实验终端, 开展物理测量. 以下简要描述了谱仪核心部件的构成和性能指标.

气体单元的主要功能是高效、快速地收集核反应产物离子. 气体室: 充100–200 mbar高纯度氦气; 低温系统: 利用2–3台低温冷头维持工作气体处于 40 K低温状态, 凝结水分子等杂质, 提高离子存活率; 静电场: 驱使离子漂移到传输面, 同时驱使气

图 5 计划建造的基于多核子转移反应的丰中子核素分离器结构及核心部件

Figure 5 The configuration and key components of the planned spectrometer for the separation of neutron-rich isotopes produced in multi-nucleon transfer reactions.

体电离产生的电子沿相反方向运动, 减小等离子体效应; 射频电场: 由一组丝状电极构成离子传输面, 在相邻电极上加幅度相等、相位相差 180° 的射频信号, 形成垂直于传输面向外的平均场, 当该平均场与上述静电场达到平衡时, 离子被束缚在传输面; 高频系统: 产生沿束线方向的电场, 将离子快速传输到后续设备中. 气体单元对核反应产物的收集和传输效率为5%–10%, 传输时间小于100 ms.

SPIG从气体单元引出离子. 差分系统: 形成“氢喷”引导离子进入SPIG; 腔体: 真空度好于 10^{-7} mbar, 离子沿轴向方向运动, 在径向方向上被射频电场约束; 射频电极: 由均匀分布在同一个圆周上的6根圆柱形电极构成, 在相邻电极杆上加幅度相等、相位相差 180° 的射频信号, 形成赝势阱, 在径向上约束离子. SPIG具有大接受度, 传输效率约为90%.

RFQCB用于减小束流的动量分散、能量分散和束斑大小, 为后续设备提供高品质的离子束流, 并使束流脉冲化. 射频电极: 由均匀分布在同一个圆周上的4个双曲面电极构成, 射频电场形成赝势阱, 在径向约束离子; 缓冲气体: 高纯氦气, 离子与气体原子碰撞, 动能逐渐减小到热运动状态; 轴向电场: 克服缓冲气体的黏滞阻力, 驱使离子沿轴向运动; Paul阱: 在RFQCB末端形成一维势阱, 实现离子的堆积和脉冲化. RFQCB的传输效率为90%. 离子束流经过RFQCB后的能量分散为1 eV.

第一台质量分析器位于RFQCB之后, 按照质量数选择目标核, 也就是选择同量异位素, 实现目标核素的质量数直接鉴别. 第二台质量分析器位于激光共振电离装置之后, 选择具有特定质量数的同位素离子, 并将其传输到实验测量系统. 在焦平面上安装可移动狭缝和探测器, 选择目标核素, 实时监测谱仪运行状态. 质量分析器的传输效率接近100%, 质量分辨本领好于500.

中性化池与激光共振电离装置接收处于 1^+ 电荷态的同量异位素, 中性化离子并利用激光共振电离选择目标同位素. 离子束整形系统: 四极磁铁、六极磁铁以及四极杆系统约束离子束并使其与激光共线; 中性化系统: 在高压平台上加载碱金属蒸气池, 束流离子与碱金属原子作用, 吸收电子并中性化, 离子束中性化率超过50%; 激光系统: 全固态激光器配

合染料激光器组成宽波段高分辨激光系统, 激光覆盖230–1100 nm波段, 分辨率好于100 kHz, 激光功率大于1 W.

利用丰中子核素分离器, 能够从多核子转移反应产物中分离、鉴别出具有确定质量数和核电荷数的超重核素. 为了开展物理实验测量, 计划设计建造原子核衰变测量装置、多反射飞行时间质谱仪、彭宁离子阱、共线激光谱仪、气相和液相热色谱仪. 目前, 中国科学院近代物理研究所正在开展分离器和实验测量装置关键技术研发, 图6是已研制的多反射飞行时间质谱仪, 用于精确测量原子核质量. 将分离器与这些测量装置相结合, 在国际上形成独具特色、极具竞争力的丰中子超重新核素合成, 超重核结构研究, 超重元素化学性质研究, 超重原子结构研究的综合实验平台.

丰中子核素分离器关键技术参数和性能指标如下: 对于丰中子核素具有质量数和核电荷数鉴别能力; 谱仪整体收集和传输效率为0.1%–5%; 能够制备低能(~ 30 keV)、高品质、脉冲离子束流; 核素分离、传输时间小于100 ms;

3 研究目标和内容

3.1 研究目标

基于HIAF, 超重核研究的核心科学目标是: 合成新元素, 确定超重元素的化学性质, 拓展化学元素周期表, 产生丰中子超重核素并研究其结构和性质, 探索超重核稳定岛.

在超重元素研究领域, 研究人员将依托充气反冲核谱仪和单原子核灵敏测量装置, 利用极强低能

图6 用于原子核质量测量的多反射飞行时间质谱仪

Figure 6 Multi-reflection time-of-flight spectrometer dedicated to nuclear mass measurements.

重离子束流诱发的熔合反应, 合成、鉴别119–126号超重新元素. 此外, 利用强流离子束流产生 $Z=110$ – 118 元素的同位素, 采用气相和液相色谱方法, 研究超重元素的化学性质, 比较超重元素与相应同族元素化学性质的差别, 确定已知超重元素在周期表中的位置.

在探索超重核稳定岛这一重大科学问题上, 科研人员将通过多核子转移反应产生丰中子超重核素; 依托丰中子核素分离器, 分离、鉴别丰中子超重核素, 并将其制备成低能、高品质离子束流; 利用多种实验测量装置, 开展丰中子超重新核素合成、超重核衰变性质和结构、超重元素化学性质、超重原子结构研究工作.

3.2 研究内容

基于HIAF, 研究人员将利用强流重离子束诱发的熔合反应和多核子转移反应, 合成、鉴别超重新元素和新核素并研究其结构和性质, 图7给出了研究目标核素.

3.2.1 超重新元素和新核素合成

在过去的半个多世纪里, 元素合成取得了巨大进步, 从93号元素镅到118号元素Og都是人们利用人工核反应的方法首次合成的, 已经发现了周期表上第七周期的所有元素. 然而, 人们依然不知道存在多少种化学元素, 尚不知周期表的终结点. 目前, 熔合反应是产生超重新元素的唯一机制. 深入系统的理论和实验研究表明, 弹核和靶核的核电荷数乘积越小, 入射道库仑排斥效应越弱, 越能够增加弹核和靶核的熔合概率; 复合核的激发能越低、裂变概率越小, 越能够增加复合核的存活概率^[3–5]. 因此, 为了有效产生超重元素, 必须选择轻炮弹与重靶核组合的反应系统, 同时选择最稳定的同位素(双幻数核或其邻近核)使弹核或靶核形成激发能较低的复合核.

俄罗斯Dubna实验室利用双幻数核 ^{48}Ca 束流轰击锕系元素靶, 成功合成了113–118号元素的若干同位素, 部分研究结果得到了其他实验室的确认^[3,4]. 实验测量结果显示, 这些超重核素的产生截面在1–

10 pb之间^[3,4]. 然而, 在自然界中不存在重锕系元素材料. 基于高功率反应堆, 利用中子俘获反应和化学分离, 可以得到极少量的Cm, Bk, Cf, Es材料^[66]. 由于Es材料的库存量只有0.8 μg , 因此, 能够用作靶材料的最重元素为Cf. 118号元素就是利用 $^{48}\text{Ca}+\text{Cf}$ 反应合成的. 由此看来, 利用 ^{48}Ca 束流合成新元素已没有可用的靶材料. 为了合成118号以上元素, 必须探索新的核反应机制. 理论预言, 合成119号和120号元素的最佳反应分别为 $^{50}\text{Ti}+^{249}\text{Bk}\rightarrow^{299}119^*$ 和 $^{50}\text{Ti}+^{249-251}\text{Cf}\rightarrow^{299-301}120^*$, 生成截面约为几十到几百fb^[67–76]. HIAF能够提供极强的 ^{54}Cr , ^{50}Ti , ^{55}Mn 等重离子束流, 因此可以利用U–Cm锕系靶, 系统测量产生超重核素的激发函数, 研究核反应机制, 确定反应截面最大的反应道(复合核蒸发中子数)以及相应的束流能量. 在此基础上, 利用 $^{54}\text{Cr}+^{243}\text{Am}$ 或 $^{50}\text{Ti}+^{249}\text{Bk}$ 反应合成119号元素, 利用 $^{55}\text{Mn}+^{243}\text{Am}$ 或 $^{50}\text{Ti}+^{251}\text{Cf}$ 反应合成120号元素. 力争实现元素合成的重大突破, 并得到产生119或120号元素的反应截面或截面上限. 此外, 研究人员还计划利用低能强流 ^{51}V , ^{54}Cr , ^{55}Mn , ^{58}Fe 束流, 尝试性合成120–126号元素.

$Z=114$ – 118 的超重核衰变链终结于未知核素的自发裂变^[3,4], 它们“孤悬”于核素图的缺中子一侧, 如图7所示. 为了确认114–118号元素的存在, 需要在实验上独立合成这些衰变链上的核素. 研究人员将利用丰中子 ^{36}S , ^{37}Cl , ^{40}Ar , ^{44}Ca , ^{41}K , ^{48}Ca 束流, 合成图7中红色圆点所示的核素, 建立114–118号元素衰变链与已知核素之间的联系. 结合已知的超重核 α 衰变能和寿命实验数据, 研究超重核素结构随中子数的演化.

超重核稳定岛的中心 $Z=114$, $N=184$ 应该位于已知 β 稳定线在超重核区的延伸线上. 随着质子数的增加, 为了平衡质子之间的库仑排斥效应, β 稳定线上原子核的中子数与质子数之比越来越大. 因此, 利用稳定的原子核作为弹核和靶核, 通过熔合反应产生的超重核一定是缺中子的, 位于超重核稳定岛缺中子一侧. 已知的最丰中子核素 ^{293}Lv 和 ^{294}Ts 距离理论预言的稳定岛中心尚差7个中子^[3,4]. 尽管如此, 现有实验数据显示, 对于 $Z=112$ – 117 同位素链, 随着中子数的增加, 原子核的寿命会逐渐变长、衰变能

图 7 基于HIAF的超重核研究目标核素. 图中灰色区域代表超重核稳定岛可能存在的位置. 红色星形标志表示可以利用左上角的反应道合成的新元素. 实心圆形表示可以利用左侧标记的反应道来合成的核素

Figure 7 The HIAF physics goals in the superheavy mass region. The shaded area shows schematically the superheavy island of stability. The red stars are the new elements produced using the reactions given in the top-left corner. The filled circles with different colors indicate the nuclides produced by the corresponding reactions.

逐渐减小, 预示着超重核稳定岛是存在的^[3,4]. 研究人员将利用 $^{238}\text{U}+^{243}\text{Am}$, ^{248}Cm 和 ^{251}Cf 反应, 通过多核子转移反应产生丰中子超重核素, 研究目标如图7右下方圆点所示, 并依托丰中子核素分离器, 鉴别丰中子超重新核素, 研究其结构和性质, 在实验上开拓未知的丰中子超重核区.

如果超重核稳定岛的中心位于 $Z=114$, $N=184$, 利用稳定核素之间的熔合反应产生的超重核太缺中子, 难以企及稳定岛; 利用多核子反应可以产生较轻的丰中子超重核, 但难以产生 $Z\sim 114$ 的超重核. 因此, 攀登超重核稳定岛的唯一出路是设计建造强流丰中子放射性束流装置, 利用丰中子束流诱发的熔合反应产生稳定岛上核素, 例如, 利用 $^{45-50}\text{Ar}+^{248}\text{Cm}$ 和 ^{251}Cf 反应系统可以产生超重核稳定岛上的核素. 国家“十二五”重大科技基础设施——“加速器驱动嬗变研究装置(CiADS)”已于2019年开工建造. HIAF和CiADS共享基础设施, 建于同一场址. 在工程设计中, 设计人员已经充分考虑了将来HIAF的升级改造. 计划以CiADS的高功率超导质子直线加速器作为驱动器, 利用高能质子束轰击重锕系靶, 通过靶核散裂反应产生丰中子核素, 与HIAF相结合, 建

造国际上先进的在线同位素分离装置(ISOL), 产生高流强、高品质丰中子束流, 利用熔合反应合成丰中子超重新核素, 攀登超重核稳定岛.

3.2.2 超重核素结构和性质研究

不稳定超重原子核的主要衰变模式为 β 衰变、 α 衰变或裂变, 其中 β 衰变可细分为 β 缓发伽马衰变、 β 缓发中子衰变以及 β 缓发裂变. 依托充气反冲核谱仪和丰中子核素分离器以及相关实验测量装置, 研究人员计划系统测量超重原子核基态的质量、自旋、磁矩、电四极矩、电荷分布半径; 建立超重核素的衰变纲图, 提取寿命、衰变分支比、低位单粒子态和集体激发态的能量和自旋宇称值; 寻找同核异能态, 测量它们的寿命, 确定组态. 利用系统的实验数据, 研究超重核结构和性质及其随中子数或质子数的演化.

库仑排斥力、核力、量子壳效应决定了超重原子核存在的电荷数和质量数极限. 其中, 壳效应是超重核素存在的根本原因. 精确测量超重原子核的质量, 构建质量面, 提取单核子分离能、双核子分离

能、两核子能隙、 α 分离能、对能、对能隙等,考察原子核的壳层结构及其随核子数的演化,为发展理论模型提供基础实验数据.

对于球形原子核,价核子单粒子态决定原子核的结构和性质,单粒子态能量的相对分布决定了核幻数.在理论上,人们已经深入开展了超重原子核的壳层结构研究.采用各种相互作用势的理论模型给出了差异显著的单粒子能谱,各种模型预言的单粒子能级相对位置不同,甚至能级次序不同^[19-21].图8示意了 $Z=82$ 闭壳之上可能的质子单粒子能级分布.可见,这些单粒子能级能量的不同分布可能导致不同的质子幻数,82之后的质子幻数可能为114, 120, 126, 138等.因此,开展超重核谱学研究极其重要.科研人员将系统开展超重核衰变谱学研究,如 α - γ , β - γ , γ - γ 符合测量,得到单粒子态能量和它们之间的能量间隔随核子数的演化规律;针对产生截面较大的超重核素,计划利用衰变示踪技术,开展超重核的在束伽马谱学实验,确定球形超重核的单粒子激发态,建立形变超重核的转动带结构,研究超重核的单粒子能级性质、形变性质、激发机制等.利用超重核谱学实验数据,检验和发展理论模型,以期能够准确地预言超重核稳定岛的中心位置.

3.2.3 产生超重核素的核反应机制研究

目前,合成超重核素面临的最大困难是反应截

面太小.因此,深入开展核反应机制研究,确定合成超重核素的最佳反应系统和束流能量极其重要.另一方面,核反应能够改变原子核的内部状态,诱发各种核过程,产生种类丰富的非稳定原子核,核反应机制研究本身也具有非常重要的科学意义.

当前,合成新元素的唯一途径是重离子熔合反应.理论上,熔合反应可被看作三步过程^[19-21,48](图9). (1) 俘获过程: 弹核克服与靶核之间的库仑势垒和离心势垒,两核表面重叠、粘贴在一起,形成一个双核体系.该过程本质上是一个量子多维势垒穿透过程,考虑了球形核表面振动、形变核转动、中子转移的反应道耦合模型能够相当准确地计算俘获截面 σ_{cap} (参见参考文献^[67]及其中的相关引用文献); (2) 复合核形成过程: 亦被称为熔合过程.熔合与准裂变和深部非弹性散射主导着双核体系的演化,以极小的概率形成复合核.熔合动力学机制非常复杂,目前尚不完全清楚^[68].入射道准裂变位垒高度是决定熔合概率 P_{fus} 大小的关键因素.理论上,采用多种模型和方法计算 P_{fus} .多维Langevin-type动力学方法假设,当弹核和靶核接触后,摩擦力使炮弹动能很快转化为整个体系的内部激发能,弹核和靶核失去各自特征,形成一个双中心大形变体系,在多维势能面上演化,利用Monte-Carlo模拟计算各反应道发生概率及其产物分布.双核模型假设弹核与靶核在接触点形成双核系统,弹核和靶核保持原有特征和一定距离,轻核向重核转移核子,熔合与准裂变和深部

图8 超重核区质子单粒子能级分布,示意了在 $Z=82$ 闭壳之上的质子单粒子态以及它们的不同分布可能造成的质子幻数.灰色区域示意了各种理论模型预言的质子闭壳间隙,红色数字是相应的114, 120, 126, 138质子幻数

Figure 8 Schematic distribution of proton single-particle energy levels in the superheavy nuclei region, showing the proton levels above the $Z=82$ closed shell predicted by various models, as well as the appearance of proton magic numbers resulting from the different proton level distributions. The gray areas indicate the shell gaps predicted theoretically and the red numbers, 114, 120, 126 and 138, show the corresponding proton magic numbers.

图9 利用重离子熔合反应合成超重核的三步过程. 其中 σ_{cap} 为俘获截面, P_{fus} 为熔合概率, W_{sur} 为复合核存活概率

Figure 9 Scenario of superheavy nucleus formation in fusion reactions. σ_{cap} is the capture cross section, P_{fus} is the fusion probability of projectile and target, and W_{sur} is the survival probability of the compound nucleus.

非弹性散射竞争. 此外, 还建立了其他模型和经验或半经验公式计算 P_{fus} . (3) 存活过程: 复合核具有较大的激发能, 在裂变与蒸发核子和发射伽马射线的竞争中退激, 最终形成处于基态的超重核. 利用统计模型可以计算复合核的存活概率 $W_{\text{sur}}(E^*)$, 但是采用的核结构信息具有很大的不确定性^[69,70]. 综上所述, 利用熔合反应产生超重核素的反应截面可表示为^[19,20,46]

$$\sigma_{\text{xn}}(E^*) = \sigma_{\text{cap}}(E) \cdot P_{\text{fus}}(E) \cdot W_{\text{sur}}(E^*), \quad (6)$$

其中, E^* 是复合核激发能, E 是弹核能量. 为了预言超重核产生截面, 需要准确计算未知核的基态质量、入射道准裂变位垒、复合核裂变位垒和核子分离能, 构建双核系统的多维形变势能面, 评估高激发能条件下壳效应等.

在熔合反应中, 俘获截面 $\sigma_{\text{cap}}(E) \sim 100$ mb量级, 而 $Z > 110$ 的超重核素的产生截面普遍小于10 pb. 因此, 为了得到对实验具有指导意义的反应截面, 要求理论能够处理 $P_{\text{fus}}(E) \cdot W_{\text{sur}}(E^*) \sim 10^{-10}$ 这么小的概率, 极具挑战. 理论物理学家发展和建立了用于描述熔合反应的多种模型^[70-76]. 对于“热熔合”反应和基于 ^{48}Ca 束流的热熔合反应, 利用系统的反应截面实验数据可以合理地约束模型参数. 这样, 现有理

论一般能够较好地描述已有实验结果, 并具有可信的预言能力^[3-5]. 尽管各种理论模型可以给出大致相同的超重核产生截面, 但不同模型计算的熔合概率和复合核存活概率差异显著, 分歧可能高达1-2个数量级^[19-21,48,70-76]. 因此, 迫切需要开展核反应机制实验研究, 系统测量准裂变和裂变反应产物的产额、元素分布、同位素分布以及反应产物的角度和能量分布等, 提取熔合概率和复合核存活概率, 揭示熔合反应的动力学机制, 为改进和发展理论模型提供关键数据. 当前, 合成 $Z > 118$ 的新元素是实验焦点. 如前所述, 合成超重新元素最有前景的方法是利用比 ^{48}Ca 更重束流诱发的热熔合反应. 为此, 理论上已深入开展了研究工作, 但预言的反应截面存在极大差别. 例如, 对于合成119号元素的 $^{50}\text{Ti} + ^{249}\text{Bk}$ 反应, 理论预言的最大产生截面在35-570 fb之间; 对于合成120号元素的 $^{50}\text{Ti} + ^{249}\text{Cf}$ 反应, 理论计算的产生截面为6-150 fb^[70-76]. 因此, 为了合成新元素, 需要先期开展 ^{50}Ti , ^{51}V , ^{54}Cr , ^{55}Mn , ^{58}Fe 等束流打较轻锕系靶的核反应机制实验研究, 系统测量产生超重核素的激发函数, 研究核反应机制, 确定最佳反应道以及相应的束流能量.

利用多核子转移反应能够产生丰中子超重核素. 在适当的能量下, 弹核克服库仑位垒与靶核接

触, 形成具有一定寿命的双核系统. 首先, 弹核与靶核之间交换大量的核子和能量, 但两核并未完全熔合, 基本保持各自的特征; 然后, 双核系统分裂、产生类弹和类靶产物. 因此, 多核子转移反应机制类似深部非弹性散射, 是一种强阻尼耗散过程^[47-49, 63-65]. 在多核子转移反应过程中, 反应 Q 值和壳结构效应显著. 对于低反应 Q 值的多核子转移反应, 复合核激发能较低, 抑制了裂变, 从而以较大概率蒸发中子和发射伽马射线退激存活. 同时, 由于壳结构效应, 弹核和/或靶核向邻近的位于 β 稳定线上的双幻数核演化. 这样, 反应产物基本上沿 β 稳定线分布, 有利于产生相对丰中子的核素^[47-49, 63-65]. 弹核或靶核向邻近的质子和中子幻数演化, 壳效应决定着弹核与靶核之间的核子转移方向. 选择合适的反应系统, 例如, ^{238}U 束流轰击 ^{248}Cm 靶, ^{238}U 向双幻核 ^{208}Pb 演化, 转移核子给靶核, 产生丰中子的类靶产物. 重核间多核子转移反应机制非常复杂, 反应产物的元素分布和同位素分布宽, 对于特定的核素, 其角度、能量和电荷态分布广. 目前, 实验上极度缺乏锕系核素间多核子转移反应的相关实验数据. 为了利用多核子转移反应合成超重核素, 需要先期开展反应机制研究, 测量类弹和类靶产物的产额, 反应产物的元素和同位素分布以及反应产物的能量、角度和电荷态分布, 为设计实验分离装置和制定研究计划提供依据.

3.2.4 超重原子结构和超重元素化学性质研究

量子电动力学是描述原子结构和性质的经典成熟理论, 能够非常精确地计算各种物理量. 理论研究指出^[6, 7], 在核电荷数为 Z 的原子中, 电子的结合能 $\propto Z^2$ 、电子的自旋轨道耦合效应 $\propto Z^4$ 、原子核有限尺度效应 $\propto Z^5$ 、处于 $1s$ 轨道电子的量子电动力学效应 $\propto Z^4$. 在超重原子中, 原子核对核外电子的电磁作用极强, 处于 $1s$ 轨道的电子感受到的平均电场强度约为 10^{17} V/cm, 比氢原子中原子核对电子的作用强一千万倍. 因此, 在超重原子中, 应该存在强场量子电动力学效应. 如前所述, 原子内层轨道上电子的运动速度 $v \propto Z\alpha c$. 这样, 在超重原子中, 内层轨道上电子的运动速度接近光速, 存在显著的相对论效应. 超重原子是一个由百余个电子构

成的量子多体系统, 相对论效应、强场量子电动力学效应、电子关联效应可能导致超重原子中电子内层轨道收缩、外层电子轨道膨胀, 改变电子的轨道排布, 特别是价电子的排布, 进而影响超重元素的化学性质. 量子电动力学计算指出^[6, 7], $Z=111$ 原子基态的电子组态是 $6d^9 7s^2$, 同族较轻Cu–Au原子的基态是 $(n-1)d^{10} ns^1$; $Z=121$ 原子的基态是 $8s^2 8p_{1/2}^1$, 同族Ac原子的基态是 $7s^2 6d_{3/2}^1$; $Z=122$ 原子的基态是 $7d_{3/2} 8s^2$, 同族Th原子的基态是 $6d_{3/2}^2 7s$. 最近的理论研究还揭示, 相对论效应可能会削弱 $Z=118$ 的原子电子壳层结构, 导致核外价电子近似均匀分布^[77]. 可见, 随着原子序数的增加, 超重元素与相应的同族元素的价电子组态差异愈来愈大.

核化学与核物理学家合作, 确定了108号以下元素在周期表中的位置, 104–108号超重元素的化学性质符合元素周期率的外推预期; 利用单原子灵敏的测量装置, 发现112和114号元素分别具有类汞和类铅的化学性质^[31-34]. 迄今, 原子结构和性质实验研究局限于重锕系元素, $Z=102$ 的No是已知原子激发能谱的最重元素^[78], $Z=103$ 的Lr是已知原子电离势的最重元素^[79], $Z=105$ 的Db是已知特征X射线能量的最重元素^[80]. 由于在实验上难以产生足够数量且具有一定寿命的超重原子, 目前, 尚不具备开展超重原子结构和性质研究的实验条件.

新一代强流加速器装置为超重原子结构和性质研究以及超重元素化学性质研究提供了新的机遇. 依托HIAF, 利用熔合反应和多核子转移反应, 能够产生一定数量的超重原子、特别是具有较长寿命的丰中子同位素. 科研人员将利用原子谱学和激光光谱学实验技术, 系统开展 $Z>100$ 的原子谱学实验, 测量重原子和超重原子的电离势、特征X射线、电子亲和势等, 研究重原子和超重原子的基态和激发态结构和性质以及强场量子电动力学效应. 在超重元素化学性质研究方面, 将设计建造气相热色谱和液相色谱实验装置. 首先, 通过核反应产生超重元素和同族不稳定较轻的同位素; 然后, 利用化学反应产生同族元素的各种化合物和配合物; 最后, 基于色谱测量装置, 精确测量超重元素与同族元素的相似化合物和配合物在特定材料表面的吸附焓. 比较超重元素与同族元素化学性质的差别, 研究相对论效应、强

场量子电动力学效应、电子关联效应对超重元素化学性质的影响, 检验超重元素的化学性质是否符合周期率的预期, 确定超重元素在周期表中位置. 此外, 研究人员还计划发展激光溅射和高质量分辨质谱技术, 鉴定超重元素的化合物和配合物的组成成分, 研究超重元素的化学性质.

4 总结与展望

HIAF已于2018年开工建设, 预计2025年建成并投入运行^[81]. 基于HIAF, 超重核研究计划是: (1) 在2019–2025年期间, 研发新一代高效率充气反冲核分离器和单原子核灵敏的测量装置; 针对重铀系核间多核子转移反应特点, 解决丰中子超重核素分离关键技术, 发展超重核素质量数和电荷数鉴别方法, 设计建造一台丰中子超重核素分离器. (2) 在2025–2035年期间, 依托HIAF, 以超重新元素合成为重点, 相应开展超重新核素合成、超重核素质量精确测量、超重元素化学性质、超重原子和超重核素结构研究, 力争取得超重核研究的重大突破. 在此期间, 将CiADS超导质子直线加速器作为驱动器, 利用高能、强流离子束轰击铀靶, 通过靶核散裂反应产生丰中子核素, 与HIAF相结合, 建造新一代ISOL型装置, 形成在国际上性能优异的放射性束装置. (3) 在2035–2050年期间, 打造国际上高水平的研究团队, 改进或新建实验测量装置, 以攀登超重核稳定岛为重点, 并持续开展超重新元素合成、超重元素化学性质等研究工作.

在超重核研究领域, 合成新元素扩展化学元素周期表和攀登超重核稳定岛是两个核心科学目标. 自1939年发现铀核裂变现象以来, 世界科技强国持续投入极大的人力和物力, 以巨大的热情开展原子核电荷数和质量数存在极限的探索, 在激烈的国际竞争中不断取得重大突破, 合成了 $Z=93\text{--}118$ 的25种元素和它们的数百种同位素, 极大地拓展了元素周期表和重核素存在版图, 研究成果产生了巨大的科学和社会影响^[1–5]. 然而, 尽管取得了如此重大的进展, 在超重核研究领域仍然存在以下重大科学问题:

化学元素周期表是否存在终结点? 超重元素的化学性质是否符合已建立的元素周期律? 是否存在稳定或者寿命与宇宙年龄相近的超重原子核? 存在一个还是若干个超重核稳定岛? 最大的核幻数是什么? 超重原子核是否具有奇特的结构和性质? 等. 如果能够合成一定数量的超重元素同位素、特别是长寿命的同位素, 将有望在原子物理、化学、材料等研究领域开辟新的研究方向, 形成新的前沿交叉学科. 此外, 在超重核研究的驱动下, 发展的强流加速器技术, 研发的先进实验技术和方法, 建立的核理论能够为未来核能开发, 核安全及核技术应用提供理论、方法、技术支撑.

在重大科学目标的牵引下, 俄罗斯、美国、德国、法国、日本等科技强国制定了超重核研究规划, 正在建造新一代强流加速器装置, 研制高效率电磁分离器, 研发高效率、高灵敏度、高精度超重核鉴别和测量实验技术. 随着俄罗斯Dubna实验室的SHE Factory (Super Heavy Elements Factory)、美国MSU国家实验室的FRIB (Facility for Rare-isotope Beams)、德国GSI的FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research)、法国GANIL的SPIRAL2 (Système de Production d'Ions Radioactifs en Ligne-2)等强流重离子加速器装置陆续建成并投入运行, 必将引发新一轮超重核研究的国际竞争, 有望在超重新元素合成、超重新核素合成、超重核产生机制、超重元素化学性质、超重核结构和性质等研究领域取得重大突破.

在21世纪初期, 依托兰州重离子加速器装置, 中国科学院近代物理研究所部署了超重核实验研究计划, 研制了充气反冲核分离器和单原子核鉴别测量装置, 取得了以合成两种超重新核素和若干缺中子重新核素为代表的研究成果. 然而, 受制于国内加速器装置束流条件限制, 我国尚不具备合成超重新元素的实验条件, 未能进入超重核研究的国际主流竞争行列. HIAF的超导直线加速器能够提供极强重离子束流, 有望成为世界上利用熔合反应合成超重元素、利用多核子转移反应产生丰中子超重核素的最佳装置之一.

参考文献

- 1 Münzenberg G. From bohrium to copernicium and beyond SHE research at SHIP. *Nucl Phys A*, 2015, 944: 5–29
- 2 Oganessian Y T, Utyonkov V K. Superheavy nuclei from ^{48}Ca -induced reactions. *Nucl Phys A*, 2015, 944: 62–98
- 3 Oganessian Y T, Sobiczewski A, Ter-Akopian G M. Superheavy nuclei: From predictions to discovery. *Phys Scr*, 2017, 92: 023003
- 4 Oganessian Y T, Utyonkov V K. Super-heavy element research. *Rep Prog Phys*, 2015, 78: 036301
- 5 Hofmann S, Münzenberg G. The discovery of the heaviest elements. *Rev Mod Phys*, 2000, 72: 733–767
- 6 Eliav E, Fritzsche S, Kaldor U. Electronic structure theory of the superheavy elements. *Nucl Phys A*, 2015, 944: 518–550
- 7 Schwerdtfeger P, Pašteka L F, Punnett A, et al. Relativistic and quantum electrodynamic effects in superheavy elements. *Nucl Phys A*, 2015, 944: 551–577
- 8 Indelicato P, Karpov A. Theoretical physics: Sizing up atoms. *Nature*, 2013, 498: 40–41
- 9 Hahn O, Strassmann F. Über den Nachweis und das Verhalten der bei der Bestrahlung des Urans mittels Neutronen entstehenden Erdalkalimetalle. *Naturwissenschaften*, 1939, 27: 11–15
- 10 Bohr N, Wheeler J A. The mechanism of nuclear fission. *Phys Rev*, 1939, 56: 426–450
- 11 Mayer M G, Jensen J H D. Elementary Theory of Nuclear Shell Structure. New York: John Wiley & Sons, 1955
- 12 Thoennessen M. The Discovery of Isotopes: A Complete Compilation. Heidelberg: Springer, 2016
- 13 Oganessian Y T. Fusion and fission induced by heavy ions. *Lecture Notes Phys*, 1975, 33: 221–252
- 14 Münzenberg G, Faust W, Hofmann S, et al. The velocity filter ship, a separator of unsloved heavy ion fusion products. *Nucl Instrum Methods*, 1979, 161: 65–82
- 15 Armbruster P, Münzenberg G. An experimental paradigm opening the world of superheavy elements. *Eur Phys J H*, 2012, 37: 237–309
- 16 Hofmann S, Münzenberg G, Hesseberger F P, et al. Detector system for investigation of proton radioactivity and new elements at ship. *Nucl Instrum Methods Phys Res*, 1984, 223: 312–318
- 17 Morita K, Morimoto K, Kaji D, et al. Experiment on the synthesis of element 113 in the reaction $^{209}\text{Bi}(^{70}\text{Zn}, n)^{278}113$. *J Phys Soc Jpn*, 2004, 73: 2593–2596
- 18 Luo Y X. The recommended naming for the 113, 115, 117 and 118 elements and the studies of superheavy nuclei (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2016, 61: 2326–2330 [罗亦孝. 113, 115, 117和118号超重元素的推荐命名和超重原子核的研究. 科学通报, 2016, 61: 2326–2330]
- 19 Li L L, Lv B N, Wang N, et al. Theoretical study of structure and synthesis mechanism of superheavy nuclei (in Chinese). *Nucl Phys Rev*, 2014, 31: 253–272 [李璐璐, 吕炳楠, 王楠, 等. 超重核性质与合成机制的理论研究. 原子核物理评论, 2014, 31: 253–272]
- 20 Zhou S G. Study on superheavy nuclei and superheavy elements (in Chinese). *Nucl Phys Rev*, 2017, 34: 318–331 [周善贵. 超重原子核与新元素研究. 原子核物理评论, 2017, 34: 318–331]
- 21 Zhou S G. Superheavy nuclei and superheavy elements (in Chinese). *Physics*, 2014, 43: 817–825 [周善贵. 超重原子核与超重元素. 物理, 2014, 43: 817–825]
- 22 National Committee for Terms in Sciences and Technologies. Announcement of the Chinese Names of Elements 113, 115, 117 and 118 (in Chinese). *China Terminol*, 2017, 19: 25 [全国科学技术名词审定委员会. 公布113号、115号、117号、118号元素的中文名称. 中国科技术语, 2017, 19: 25]
- 23 Cai L. Chinese name work about the elements with atomic numbers $Z = 113, 115, 117, 118$ (in Chinese). *China Terminol*, 2017, 19: 38–45 [才磊. 113号、115号、117号、118号元素的中文命名工作. 中国科技术语, 2017, 19: 38–45]
- 24 Zhou S G. Comments on the Chinese names of the elements with atomic numbers 113, 115, 117 and 118 (in Chinese). *China Terminol*, 2017, 19: 35–37 [周善贵. 113号、115号、117号和118号元素中文名之管见. 中国科技术语, 2017, 19: 35–37]
- 25 Hofmann S, Heinz S, Mann R, et al. Remarks on the fission barriers of super-heavy nuclei. *Eur Phys J A*, 2016, 52: 116–127
- 26 Düllmann C E, Yakushev A, Khuyagbaatar J, et al. Upgrade of the gas-filled recoil separator TASCA and first search experiment for the new element 120 in the reaction $^{50}\text{Ti}+^{249}\text{Cf}$. GSI Scientific Report. PHN-NUSTAR-SHE-02, 2012
- 27 Hofmann S, Heinz S, Ackermann D, et al. Attempts for the Synthesis of New Elements at SHIP. GSI Scientific Report (2011), PHN-NUSTAR-SHE-01, 2012
- 28 Hofmann S, Ackermann D, Antalic S, et al. Probing Shell Effects at $Z=120$ and $N=184$. GSI Scientific Report (2008), NUSTAR-SHE-01, 2009
- 29 Oganessian Y T, Utyonkov V K, Lobanov Y V, et al. Attempt to produce element 120 in the $^{244}\text{Pu}+^{58}\text{Fe}$ reaction. *Phys Rev C*, 2009, 79: 024603
- 30 Morita K. SHE research at RIKEN/GARIS. *Nucl Phys A*, 2015, 944: 30–61
- 31 Backe H, Lauth W, Block M, et al. Prospects for laser spectroscopy, ion chemistry and mobility measurements of superheavy elements in buffer-gas traps. *Nucl Phys A*, 2015, 944: 492–517
- 32 Pershina V. Electronic structure and properties of superheavy elements. *Nucl Phys A*, 2015, 944: 578–613

- 33 Nagame Y, Kratz J V, Schädel M. Chemical studies of elements with $Z \geq 104$ in liquid phase. *Nucl Phys A*, 2015, 944: 614–639
- 34 Türler A, Eichler R, Yakushev A. Chemical studies of elements with $Z \geq 104$ in gas phase. *Nucl Phys A*, 2015, 944: 640–689
- 35 Myers W D, Swiatecki W J. Nuclear masses and deformations. *Nucl Phys*, 1966, 81: 1–60
- 36 Wong C Y. Additional evidence of stability of the superheavy element 310126 according to the shell model. *Phys Lett*, 1966, 21: 688–690
- 37 Sobiczewski A, Gareev F A, Kalinkin B N. Closed shells for $Z > 82$ and $N > 126$ in a diffuse potential well. *Phys Lett*, 1966, 22: 500–502
- 38 Meldner H. Predictions of new magic regions and masses for super-heavy nuclei from calculations with realistic shell model single particle Hamiltonian. *Arkiv Fysik*, 1967, 36: 593–598
- 39 Strutinsky V M. Shell effects in nuclear masses and deformation energies. *Nucl Phys A*, 1967, 95: 420–442
- 40 Nilsson S G, Tsang C F, Sobiczewski A, et al. On the nuclear structure and stability of heavy and superheavy elements. *Nucl Phys A*, 1969, 131: 1–66
- 41 Sobiczewski A, Pomorski K. Description of structure and properties of superheavy nuclei. *Prog Particle Nucl Phys*, 2007, 58: 292–349
- 42 Lu X T. Nuclear Physics (in Chinese). Beijing: Atomic Energy Press, 2000 [卢希庭. 原子核物理(修订版). 北京: 原子能出版社, 2000]
- 43 Seife C A. So Much More to Know. *Science*, 2005, 309: 78–102
- 44 Patyk Z, Sobiczewski A. Ground-state properties of the heaviest nuclei analyzed in a multidimensional deformation space. *Nucl Phys A*, 1991, 533: 132–152
- 45 Patyk Z, Sobiczewski A. Main deformed shells of heavy nuclei studied in a multidimensional deformation space. *Phys Lett B*, 1991, 256: 307–310
- 46 Patyk Z, Skalski J, Sobiczewski A, et al. Potential energy and spontaneous-fission half-lives for heavy and superheavy nuclei. *Nucl Phys A*, 1989, 502: 591–600
- 47 Kratz J V, Loveland W, Moody K J. Syntheses of transuranium isotopes with atomic numbers $Z \leq 103$ in multi-nucleon transfer reactions. *Nucl Phys A*, 2015, 944: 117–157
- 48 Zagrebaev V I, Greiner W. Cross sections for the production of superheavy nuclei. *Nucl Phys A*, 2015, 944: 257–307
- 49 Zagrebaev V I, Greiner W. Production of heavy trans-target nuclei in multinucleon transfer reactions. *Phys Rev C*, 2013, 87: 034608
- 50 Gan Z G, Qin Z, Fan H M, et al. A new alpha-particle-emitting isotope ^{259}Db . *Eur Phys J A*, 2001, 10: 21–25
- 51 Gan Z G, Guo J S, Wu X L, et al. New isotope ^{265}Bh . *Eur Phys J A*, 2004, 20: 385–387
- 52 Zhang Z Y, Gan Z G, Ma L, et al. Observation of the superheavy nuclide ^{271}Ds . *Chin Phys Lett*, 2012, 29: 012502
- 53 David B, Bartholome C, Lu H L, et al. How accurately can we predict synthesis cross-sections of superheavy elements? *Nucl Sci Tech*, 2018, 29: 172(1–6)
- 54 Chen P H, Niu F, Guo Y F, et al. Nuclear dynamics in multinucleon transfer reactions near Coulomb barrier energies. *Nucl Sci Tech*, 2018, 29: 185
- 55 Naderi D, Alavi S A. Influence of the shell effects on evaporation residue cross section of superheavy nuclei. *Nucl Sci Tech*, 2018, 29: 161
- 56 Ghiorso A, Yashita S, Leino M E, et al. Sassy, a gas-filled magnetic separator for the study of fusion reaction products. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A*, 1988, 269: 192–201
- 57 Subotic K, Oganessian Y T, Utyonkov V K, et al. Evaporation residue collection efficiencies and position spectra of the Dubna gas-filled recoil separator. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A*, 2002, 481: 71–80
- 58 Leino M. Gas-filled separators—An overview. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect B*, 2003, 204: 129–137
- 59 Morita K, Morimoto K, Kaji D, et al. Production and decay of the isotope ^{271}Ds ($Z=110$). *Eur Phys J A*, 2004, 21: 257–263
- 60 Semchenkov A, Brüche W, Jäger E, et al. The trans actinide separator and chemistry apparatus (TASCA) at GSI optimization of ion-optical structures and magnet designs. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect B*, 2008, 266: 4153–4161
- 61 Zhang Z Y, Ma L, Gan Z G, et al. A gas-filled recoil separator, SHANS. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect B*, 2013, 317: 315–318
- 62 Oganessian Y T, Utyonkov V K, Lobanov Y V, et al. Average charge states of heavy atoms in dilute hydrogen. *Phys Rev C*, 2001, 64: 064309
- 63 Li C, Wen P, Li J, et al. Production mechanism of new neutron-rich heavy nuclei in the $^{136}\text{Xe} + ^{198}\text{Pt}$ reaction. *Phys Lett B*, 2018, 776: 278–283
- 64 Zhu L, Su J, Xie W J, et al. Production of neutron-rich transcalifornium nuclei in ^{238}U -induced transfer reactions. *Phys Rev C*, 2016, 94: 054606
- 65 Wang N, Guo L. New neutron-rich isotope production in $^{154}\text{Sm} + ^{160}\text{Gd}$. *Phys Lett B*, 2016, 760: 236–241
- 66 Roberto J B, Alexander C W, Boll R A, et al. Actinide targets for the synthesis of super-heavy elements. *Nucl Phys A*, 2015, 944: 99–116
- 67 Wang B, Wen K, Zhao W J, et al. Systematics of capture and fusion dynamics in heavy-ion collisions. *Atomic Data Nucl Data Tables*, 2017, 114: 281–370
- 68 Wen K, Sakata F, Li Z X, et al. Non-gaussian fluctuations and non-markovian effects in the nuclear fusion process: Langevin dynamics emerging from quantum molecular dynamics simulations. *Phys Rev Lett*, 2013, 111: 012501
- 69 Xia C J, Sun B X, Zhao E G, et al. Systematic study of survival probability of excited superheavy nuclei. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2011, 54:

109–113

- 70 Nasirov A K, Mandaglio G, Giardina G, et al. Effects of the entrance channel and fission barrier in the synthesis of superheavy element $Z=120$. [Phys Rev C](#), 2011, 84: 044612
- 71 Zagrebaev V, Greiner W. Synthesis of superheavy nuclei: A search for new production reactions. [Phys Rev C](#), 2008, 78: 034610
- 72 Siwek-wilczyńska K, Cap T, Wilczyński J. How can one synthesize the element $Z=120$? [Int J Mod Phys E](#), 2010, 19: 500–507
- 73 Siwek-Wilczyńska K, Cap T, Kowal M, et al. Predictions of the fusion-by-diffusion model for the synthesis cross sections of $Z=114$ –120 elements based on macroscopic-microscopic fission barriers. [Phys Rev C](#), 2012, 86: 014611
- 74 Wang N, Tian J, Scheid W. Systematics of fusion probability in “hot” fusion reactions. [Phys Rev C](#), 2011, 84: 061601
- 75 Wang N, Zhao E G, Scheid W, et al. Theoretical study of the synthesis of superheavy nuclei with $Z=119$ and 120 in heavy-ion reactions with trans-uranium targets. [Phys Rev C](#), 2012, 85: 041601
- 76 Liu Z H, Bao J D. Calculation of the evaporation residue cross sections for the synthesis of the superheavy element $Z=119$ via the $^{50}\text{Ti}+^{249}\text{Bk}$ hot fusion reaction. [Phys Rev C](#), 2011, 84: 031602
- 77 Jerabek P, Schuettrumpf B, Schwerdtfeger P, et al. Electron and nucleon localization functions of oganesson: Approaching the Thomas-Fermi limit. [Phys Rev Lett](#), 2018, 120: 053001
- 78 Laatiaoui M, Lauth W, Backe H, et al. Atom-at-a-time laser resonance ionization spectroscopy of nobelium. [Nature](#), 2016, 538: 495–498
- 79 Sato T K, Asai M, Borschevsky A, et al. Measurement of the first ionization potential of lawrencium, element 103. [Nature](#), 2015, 520: 209–211
- 80 Heßberger F P, Hofmann S, Streicher B, et al. Decay properties of neutron-deficient isotopes of elements from $Z = 101$ to $Z = 108$. [Eur Phys J A](#), 2009, 41: 145–153
- 81 Zhou X. Construction of the high intensity heavy-ion accelerator facility (HIAF). [AAPPS Bull](#), 2019, 29: 6–12

Research program of superheavy elements and nuclides based on HIAF

ZHOU XiaoHong^{1*}, ZHANG ZhiYuan^{1*}, GAN ZaiGuo¹, XU FuRong² & ZHOU ShanGui^{3,4,5}

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

²*School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China;*

³*CAS Key Laboratory of Theoretical Physics, Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;*

⁴*School of Physical Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

⁵*Synergetic Innovation Center for Quantum Effects and Application, Hunan Normal University, Changsha 410081, China*

Atomic nuclei are many-body quantum systems composed of protons and neutrons. The nuclides, whose existence is attributed to the nuclear shell effects, are referred to as superheavy nuclides. The exploration of the limit to the existence of nuclides with regard to the proton and mass numbers is at the frontier of nuclear physics research. So far, superheavy elements with an atomic number of up to 118 and hundreds of superheavy nuclides have been experimentally synthesized and identified in various laboratories, resulting in the completion of the seventh period of the periodic table of elements. The High Intensity heavy-ion Accelerator Facility (HIAF) is now under construction and is scheduled to be commissioned in 2025. The study on superheavy elements and nuclei is one of the main research goals of HIAF. Intense heavy-ion beams can be extracted from around the middle point of linac, and the beam energies can be finely adjusted around the Coulomb barriers of nuclear reactions. Therefore, HIAF will provide great opportunities for the synthesis of new superheavy elements and to explore the superheavy island of stability, which was theoretically predicted long ago via fusion and multi-nucleon transfer reactions, respectively. This paper presents the research program of superheavy elements and nuclides based on HIAF, provides an overview of the research on superheavy nuclei, and describes the electromagnetic spectrometers and experimental measurement systems associated with fusion and multi-nucleon transfer reactions. The HIAF physics goals, including the synthesis of new superheavy elements and nuclides, the study on the nuclear structure of superheavy nuclei, the reaction mechanism of producing superheavy nuclides, and the atomic structure and chemical properties of the heaviest elements, are illustrated in detail. Lastly, the future research plan for superheavy elements and nuclides is summarized.

superheavy elements, island of stability for superheavy nuclei, heavy-ion physics, High Intensity heavy-ion Accelerator Facility

PACS: 27.90.+b, 25.60.Pj, 28.60.+s

doi: [10.1360/SSPMA-2020-0288](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0288)