

超重新核素合成研究进展^{*}

张丰收^{1,2,3)†} 张钰海¹⁾ 张明昊¹⁾ 唐娜¹⁾ 程诗慧¹⁾ 李静静²⁾ 程伟^{1,2)}

(1) 射线束技术教育部重点实验室, 北京师范大学核科学与技术学院, 100875, 北京;

2) 北京市科学技术研究院辐射技术研究所, 100875, 北京;

3) 兰州重离子加速器国家实验室原子核理论研究中心, 730000, 甘肃兰州)

摘要 随着重离子加速器和放射性核束装置的发展, 人们对于核物理的研究不再仅仅局限于稳定核, 更是将研究对象扩展到一些极限条件, 比如探索原子核高温高密极限、自旋极限、同位旋极限, 以及电荷和质量极限等。对于探索电荷和质量极限而言, 如何合成长寿命超重核、是否存在“超重稳定岛”以及如何研究超重原子核的性质, 成为当前核物理学研究的前沿领域。本文回顾了超重核的产生机制、定义和衰变模式, 详细介绍了国内外关于超重核合成的现状和研究进展, 其中包括理论上和实验上合成超重核素最新研究进展, 重点针对重离子熔合反应和多核子转移反应研究情况展开讨论, 并简介了国际上核科学大装置未来开展超重核研究的计划。同时, 对北京师范大学参与 93 号超铀核素^{223, 224}Np 的合成情况进行了评述, 并针对近年来合成 Z=119 和 120 超重核素的最新研究进行了总结展望。

关键词 超重新核素; 超重稳定岛; 重离子核物理; 重离子碰撞; 衰变模式

中图分类号 O562.1

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2022082

0 引言

20 世纪 60 年代, Myers 和 Swiatecki 基于原子核理论, 预言在 Z=114 和 N=184 附近可能存在一个“超重稳定岛”^[1]。而最新理论预言, 在²⁰⁸Pb 之后的下一个双满壳可能是 Z=120 或 126 及 N=184^[2-3]。由此, 探索超重原子核的性质与合成机制、研究原子核的电荷与质量极限、合成新放射性同位素, 便成为当前核物理的前沿研究领域。截止到 2021 年底, 核物理学家们已经发现了 3326 个核素, 包括 310 种超铀核素。理论预言核素的数量为 8000~10000, 未被发现的核素还有 5000~6000 种, 这些核素主要集中在超重区域和丰中子重核区域。

目前, 地球上天然存在 88 种元素, 最重的是 92 号元素铀^[4]。核反应是产生超铀元素的唯一方法。1940 年, McMillan 和 Abelson 在研究热中子轰击²³⁸U 产生的裂变产物中观察到了一种放射性产物²³⁹Np^[5]。此后, 核物理学家们在实验室里合成了 26 种超铀元素。在人工合成超铀元素的过程中, 对不同质量、不同性质的超铀元素所采用的产生机制及方法各不相同。

证实“超重稳定岛”是否存在是超重核实验的主要目标。近年来, 重离子加速器的建成和发展、放射

性束流的投入使用, 为科学家们在实验室内研究极端条件下原子核的自由度提供了可能。目前, 国际上已运行和建设中的大型重离子加速器有 30 余台。其中包括我国现有兰州 HIRFL(Heavy Ions Research Facility in Lanzhou)、惠州在建中的 HIAF(High Intensity Heavy-ion Accelerator Facility)以及建议在北京建设的在线同位素分离丰中子束流装置 BISOL(Beijing Isotope Separation On Line neutron-rich beam facility)。国外的大科学装置主要有俄罗斯 Dubna/FLNR -DRIBs(Dubna Radioactive Ion Beam accelerator complex)、DC-280(DC-280 cyclotron), 美国 Berkeley-88 英寸回旋加速(88-inch cyclotron complex)、MSU-NSCL(National Superconducting Cyclotron Laboratory accelerator system)、FRIB(Facility for Rare Isotope Beams)、Argonne-ATLAS(Argonne Tandem-Linac Accelerator System), 德国 GSI 重离子加速系统、FAIR(Facility for Antiproton and Ion Research), 日本 RIKEN-RARF(RIKEN Accelerator Research Facility)和法国 GANIL-SPIRAL2(Système de Production d'Ions Radioactifs en Ligne-2)^[6-7]。这些大科学装置计划的实现, 为人们研究原子核的结构及性质提供了条件, 推动了几千个放射性同位素的产生, 开创了核物理的新领域。

^{*} 国家自然科学基金资助项目(12135004, 11635003, 11961141004, 12105019, 12047513)

[†] 通信作者: 张丰收(1966—), 男, 博士, 教授。研究方向: 重离子核物理、重离子与物质相互作用微观机理、射线束技术及应用、材料辐射损伤和辐射育种。E-mail: fszhang@bnu.edu.cn

收稿日期: 2022-04-12

图 3 实验上通过熔合反应 $^{48}\text{Ca}+^{249}\text{Cf}$ 识别 118 号元素 Og 的衰变链

利用推广液滴模型(GLDM)结合壳修正理论,预言^{280–283, 290–295, 297}Fl是 α 衰变的,^{300–305}Fl主要经历自发裂变,而^{296, 298, 299}Fl存在着2种衰变模式。

2 超重核的最新研究进展

2.1 理论研究进展 随着超重核质子数 Z 的增加,其产生截面变得极小,且寿命短,激发函数非常窄,实验上鉴别起来很困难。因此,对于合成超重核而言,寻找最佳弹靶组合和入射能量尤为重要。

重离子熔合反应和多核子转移反应是合成超重核的重要方法。超重核的合成可以分为3个过程,即俘获过程、熔合过程和存活过程。俘获过程是指2个碰撞的重离子克服库仑位垒后形成一个双核体系的过程;形成双核体系后,两核之间进行核子交换、转移并发生能量和角动量耗散等过程,这个过程是熔合过程;存活过程指的是处在激发态的复合核通过蒸发中子,退激到基态的过程。

目前描述超重核合成过程的模型主要有双核系统模型^[19–25]、多变量耦合的郎之万方程^[26]、宏观动力学模型^[27]、两步模型^[28]、核子集体化模型^[29]、核扩散模型^[30]等宏观模型,以及与时间相关的Hartree-Fock模型^[31]、改进的量子分子动力学模型^[32–35]等微观模型。这些模型可以比较可靠地描述已有的实验数据,但在预测未知的超重核时,尤其是对于 $Z > 118$ 号元素及更重元素产生截面存在一个量级的差别^[2]。

值得注意的是,文献[19–20]针对重离子熔合反应,分别给出了合成102号丰中子新核素^{261–263}No和114号丰中子新核素^{290–292}Fl的最佳弹靶组合和入射能量,文献[24]运用双核系统模型通过对2418种可能产生超重核素的反应体系进行预测,给出了 $Z=105\sim 118$ 丰中子新核素的反应截面,为超重核的实验研究提供了重要参考。而对于转移反应,文献[25]通过²³⁸U+²⁵²Cf反应在1.1倍的库仑位垒下产生了4个新的超重Rf同位素,即^{264, 266, 268, 269}Rf,产生截面分别是97.2、31.1、0.61和0.04 nb。

2.2 实验研究进展 人们利用加速器、反应堆甚至核爆,开展了大量关于超重核实验的研究。国际上合成超重核的主要技术流程是重核的产生、反冲核的分离和分离后余核的测量与鉴别。

2.2.1 熔合反应实验研究进展 对于超铀核素而言,电荷数较低的93~100号元素的一系列同位素的产生机制是采用轻带电粒子去轰击重核,通过化学分离的鉴别方法得到的。在合成101号元素Md时第一次采用了反冲技术。随后,从102号到目前最重的118号元素都是通过重离子熔合反应合成的。重离子熔合

反应合成超铀元素可以分为冷熔合和热熔合2种反应:冷熔合反应是基于双幻核²⁰⁸Pb或²⁰⁹Bi为靶核进行的熔合反应,蒸发1~2个中子退激,具有较低激发能,一般在20 MeV以下;热熔合反应主要是利用较轻弹核和锕系元素引起的反应,复合系统的激发能高达40~50 MeV,蒸发3~5个中子退激。

德国GSI利用⁵⁴Cr、⁵⁸Fe、⁶⁴Ni和⁷⁰Zn等作为弹核轰击²⁰⁸Pb和²⁰⁹Bi靶的冷熔合反应合成了107~112号元素,俄罗斯Dubna/FLNR实验室分别利用⁴⁸Ca与²⁴³Am、²⁴⁴Pu、²⁴⁸Cm、²⁴⁹Bk和²⁴⁹Cf的热熔合反应合成了113~118号一系列核素^[4]。此外,日本的RIKEN在2004年通过²⁰⁹Bi(⁷⁰Zn, n)²⁷⁸Nh冷熔合的方法也产生了113号新核素²⁷⁸Nh^[36]。至此,元素周期表的第7周期全部填满。

由于没有更重的靶核,Dubna/FLNR实验室试图利用⁵⁰Ti、⁵⁴Cr、⁵⁸Fe和⁶⁴Ni等更重的丰中子弹核轰击锕系靶核来合成 $Z=119$ 和120号元素,但是都没有取得成功。最近,该实验室在已有的DC-280重离子回旋加速器的基础上,引入了新的充气反冲分离器(DGFRS-2),且引用了主动关联法(Active Correlations)来鉴别目标核。Tsyganov等成功产生3~5 μ A的⁴⁸Ca束流,相比于原来的1 μ A,提高了2~4倍。预计在2023年初,Dubna/FLNR实验室将开展⁵⁰Ti或⁵⁴Cr轰击²⁴⁴Pu的实验工作,继续努力尝试产生更丰中子且流强足够高的弹核束流,以合成超重核素。

近些年,国内在超重核合成上也取得了重大突破:2001年,中国科学院近代物理研究所团队在HIRFL上利用氦气喷嘴技术结合转轮收集探测装置,通过²⁴¹Am(²²Ne, 4n)²⁵⁹Db成功合成我国第一个105号元素的新核素²⁵⁹Db^[37];2004年,利用该装置通过熔合反应²⁴³Am(²⁶Mg, 4n)²⁶⁵Bh合成107号元素的新核素²⁶⁵Bh,并测得其 α 衰变能和半衰期分别是 (9.24 ± 0.05) MeV和 $0.94^{+0.70}_{-0.31}$ s^[38];为了进一步研究截面更低且寿命更短的超重核,中国科学院近代物理研究所研制了充气反冲核谱仪(SHANS),并于2012年成功合成了110号核素²⁷¹Ds^[39];自2017年以来,中国科学院近代物理研究所利用SHANS装置致力于Np放射性同位素的合成和研究,通过熔合蒸发反应先后合成了超铀93号元素的新核素^{219, 220, 222–224}Np^[40–44]。

2.2.2 转移反应实验研究进展 由于稳定的弹靶体系很难通过熔合反应合成具有极大中质比的超重元素,迄今为止实验上合成的超重核素都位于缺中子一侧。为了产生重区丰中子新核素,近年来多核子转移反应引起了人们的关注。

2015年Watanabe等^[45]在法国GANIL用7.98 MeV·u⁻¹的¹³⁶Xe轰击¹⁹⁸Pt靶,成功测得了一系列 $N=126$ 附

近丰中子核素的产生截面,如图4所示.图中的实心圆(●)是反应体系 $^{136}\text{Xe}+^{198}\text{Pt}$ 在入射能量为 $7.98\text{ MeV}\cdot\text{u}^{-1}$ 的多核子转移反应实验结果,实心五角星(★)是反应体系 $^{208}\text{Pb}+^9\text{Be}$ 在入射能量为 $1\text{ GeV}\cdot\text{u}^{-1}$ 的多重碎裂的结果.发现多核子转移反应在产生丰中子重核中具有明显优势,产生 $N=126$ 核素的截面要比通过多重碎裂的高4个数量级左右^[45].

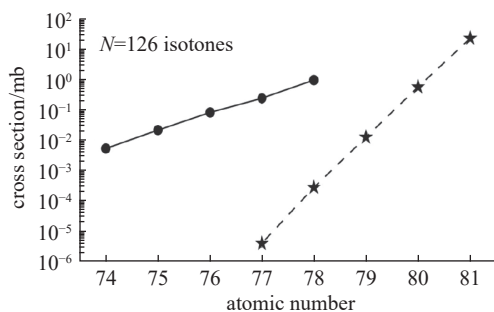


图4 $N=126$ 核素产生截面^[45]

2015年德国GSI利用UNLAC加速器加速平均强度为 2×10^{12} 个 $\cdot\text{s}^{-1}$ 的 ^{48}Ca 束轰击 ^{248}Cm 靶,利用速度分离器SHIP筛选出了 $Z=82\sim 100$ 大约100个类靶碎片,观察到 ^{216}U 、 ^{219}Np 、 ^{223}Am 、 ^{229}Am 和 ^{233}Bk 5个新的缺中子核素,但是并没有观测到 ^{219}Np 半衰期和 α 衰变^[46].

2018年,Wuenschel等^[47]利用Active Catcher探测阵列在得克萨斯农工大学的回旋加速器上开展了 $7.5\sim 6.1\text{ MeV}\cdot\text{u}^{-1}$ 的 $^{238}\text{U}+^{232}\text{Th}$ 反应测量,测量得到大量的 α 粒子发射,这些 α 粒子可能来自多核子转移产生的重元素^[47].该实验测得的 α 衰变数据暗示,多核子转移反应可以产生一定数量原子序数高达116的丰中子核素,为多核子转移反应合成超重核提供了巨大的信心.

2.3 未来国际上核科学大装置目标 尽管目前国际上已有的大科学装置,已经为人们认识和理解原子核的性质、鉴别新核素以及检验和发展现有的理论模型提供了重要实验条件,但是,对于合成 $Z=119$ 、120号元素和探索“超重稳定岛”方面,仍然要求装置具有非常高的传输效率和非常强的本底抑制能力,以产生更丰中子的稳定束流.

惠州的强流重离子加速器(HIAF)已于2018年12月开工建设,计划于2025年建成并投入运行.HIAF的超导直线加速器能够提供极强重离子束流,将会是国际上开展超重研究的最佳装置之一^[48].此外,仍然处在建议中的北京在线同位素分离丰中子束流装置(BISOL)预计建成后,将会产生 $10^9\sim 10^{11}$ 个 $\cdot\text{s}^{-1}$ 量级的束流^[49].

俄罗斯Dubna/FLNR实验室从2013年起开始建造“超重元素工厂”,之前发现的 $Z=113\sim 118$ 号元素所用

的U-400回旋加速器最大束流约为 $1.2\text{ }\mu\text{A}$,而改进的DC-280回旋加速器束流可高达 $20\text{ }\mu\text{A}$.对于 $A<238$ 的核,束流能量可达 $10\text{ MeV}\cdot\text{u}^{-1}$,按照该设计超重核的产生率能够提高约2个数量级^[2].比较明确的是,该实验室的DC-280回旋加速器系统下一个研究目标就是合成元素周期表第8周期的119和120号元素.

美国MSU的FRIB将于2022年建成,该装置的目标是在核素图丰中子区域产生大约1000种新的核素^[50].德国GSI的FAIR预计在2023年建成,预计达到束流的最高能量强度分别是 $1\sim 2\text{ GeV}\cdot\text{u}^{-1}$ 重离子、 $29\text{ GeV}\cdot\text{u}^{-1}$ 质子和 $9.7\text{ GeV}\cdot\text{u}^{-1}$ 的 $^{238}\text{U}^{28+}$.法国GANIL的SPIRAL2设施建成后,将提供高强度的 40 MeV 氦核光束以及质量与电荷比等于3、能量高达 $14.5\text{ MeV}\cdot\text{u}^{-1}$ 的各种重离子光束.SPIRAL2设施将产生质量数 $A=60\sim 140$ 的放射性束核,其束流将超过世界上任何现有大型装置1~2个数量级^[7].

3 北京师范大学(BNU)参与超铀新核素 $^{223},^{224}\text{Np}$ 合成情况

图5给出截止到2021年底已知的超铀核素,2017—2018年BNU参加了在中国科学院近代物理研究所开展合成超铀新核素 $^{223},^{224}\text{Np}$ 的实验工作.其中,不同颜色的方块代表不同的衰变模式,实心圆(●)表示BNU参与合成超铀核素 $^{223},^{224}\text{Np}$.图中箭头表示未来人们对于超重核研究继续探索的方向.竖直向上箭头($\uparrow$)和水平向右箭头($\rightarrow$)分别表示核物理界未来继续向着合成 $Z=119$ 、120号元素和攀登“超重稳定岛”的方向努力.

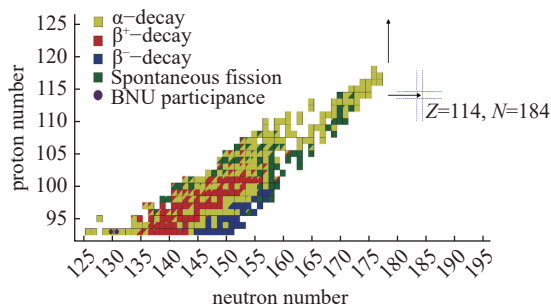


图5 截止到2021年底已知的超铀核素

2017年,该合作团队利用充气反冲核谱仪(SHANS)通过熔合反应 $^{40}\text{Ar}+^{187}\text{Re}$ 合成了中子数 $N=130$ 的短寿命同位素 ^{223}Np ,得出自旋宇称为 $9/2^-$,结合质子的分离能数据,否定了理论上认为的 $Z=92$ 子壳层的存在^[43].

2018年,该合作团队进行了合成 ^{224}Np 重离子核反应实验的尝试,采用 188 MeV 的 ^{40}Ar 束轰击 ^{187}Re 同位素靶,基于熔合蒸发反应机制在 $3n$ 蒸发道成功合成 ^{224}Np ^[44],并通过能量、位置、时间关联的鉴别方法

鉴别出半衰期为 38_{-11}^{+26} μs . 同时, 实验观测到 2 条 α 衰变链, 分别衰变到子核 ^{220}Pa 的 2 个激发态, 其 α 衰变能分别为 9137(20) 和 8868(62) keV. 由 BNU 参与的超铀新核素 $^{223}, ^{224}\text{Np}$ 的合成, 对于探测远离 β 稳定线未知新核素的合成及其衰变性质的研究有着深远意义.

4 关于 $Z=119$ 和 120 超重核最新研究进展

核物理学家们为接近超重岛, 努力合成 $Z=119$ 、

120 号元素, 仍不断地在理论和实验上进行调整, 以期突破难关. 理论上, 人们对不同模型进行改进与探索, 以便更好地描述超重核熔合反应机制^[51-53]. 其中, 文献[51]给出利用热熔合反应分别计算 119 和 120 号超重元素的产生截面可参考的反应体系及入射能量, 如图 6 所示. 并预言, 对于 $Z=119$, 体系 $^{48}\text{Ca}+^{252}\text{Es}$ 提供了足够大的蒸发剩余截面(图 6-a). 对于 $Z=120$, 通过反应 $^{50}\text{Ti}+^{249}\text{Cf}$ 合成的最佳入射能为 $E_{\text{c.m.}}=240$ MeV, 所对应的最大蒸发剩余截面为 0.029 pb(图 6-b).

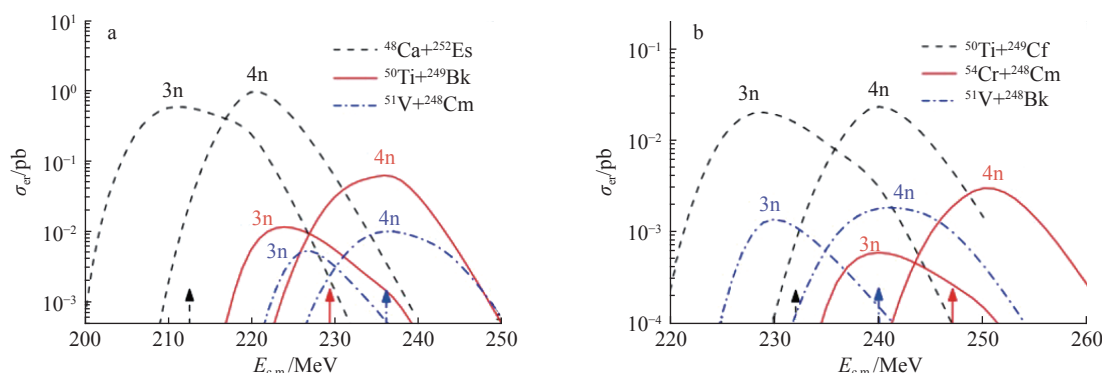


图 6 理论计算 119 号元素 (a) 和 120 号元素 (b) 的蒸发剩余截面^[51]

值得注意的是, 文献[53]着重对比了不同模型预言产生 $Z=119$ 和 120 超重核的产生截面, 并指出不同模型预言的截面值相差几倍甚至 1~2 个量级. 同时, 还分别给出合成 $Z=119$ 和 120 超重核预言的最佳反应体系.

实验上, 俄罗斯 Dubna 在 2009 年首次尝试利用 $^{58}\text{Fe}+^{244}\text{Pu}$ 反应合成 120 号超重元素, 但是没有成功^[54]. 2016 年德国 GSI 也曾试图通过 $^{54}\text{Cr}+^{248}\text{Cm}$ 反应合成 $Z=120$ 超重元素, 但是只观察到了 $^{299}120$ 相关 α 衰变的随机事件, 并不能够证明 120 号元素的产生^[55]. 2020 年德国 GSI 通过熔合蒸发反应 $^{50}\text{Ti}+^{249}\text{Bk}$ 和 $^{50}\text{Ti}+^{249}\text{Cf}$, 利用充气反冲分离器 (TASCA) 探测寻找新元素 119 和 120^[56], 但是并没有观察到相应超重核素的任何 α 衰变链.

5 结论与展望

超重新核素的合成是核物理的前沿领域之一, 对于扩展核素版图、研究奇异核结构和衰变性质、探索天体核合成中的快中子俘获过程等具有重要意义. 世界各国在合成 $Z=119$ 和 120 号元素, 攀登“超重稳定岛”上付诸了巨大努力, 并在过去几十年不断取得重大突破.

本文通过对超重核的研究背景、产生机制和衰变模式, 国内外超重核的最新研究进展, 超铀新核素

$^{223}, ^{224}\text{Np}$ 合成情况, 以及 $Z=119$ 和 120 超重元素最新研究进展进行了概述, 并给出建议:

1) 国内外合成超重新核素大多是通过重离子熔合蒸发反应, 且合成的多是缺中子一侧的. 因此, 未来多核子转移反应或可成为一种合成丰中子区超重核素的有效方法.

2) 对于合成 $Z=119$ 和 120 超重元素, 实验物理学家们仍然在进行探索, 目前并未确切地观察到超重核素的任何 α 衰变链.

3) 放射性束核引起的熔合蒸发反应和铜系核之间的多核子转移反应是现如今最有可能攀登“超重稳定岛”的先决反应机制.

4) 随着新一代强流重离子加速器装置的陆续建成, 多核子转移反应机制的深入研究, 超重新核素和超重核产生机制领域有望取得新进展.

核物理学家们在研究超重核的产生机制、基态性质、衰变模式和寿命等方面仍然面临严峻的挑战. 比如利用重离子熔合蒸发合成超重核的截面极小, 多核子转移反应尚无法达到超重核区, 超重核极低的产生率使得实验上无法鉴别短寿命的超重核等. 因此, 为了更进一步进行超重核研究, 不仅需要理论与实验密切结合, 还需要国内外多种核科学大装置进一步增大自身产生的放射性束流, 为合成 $Z=119$ 、120 超重元素和攀登“超重稳定岛”创造条件.

6 参考文献

- [1] MYERS W D, SWIATECKI W J. Nuclear masses and deformations[J]. Nuclear Physics, 1966, 81(1): 1
- [2] 马余刚. 原子核物理新进展[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2020: 211-242
- [3] 张丰收, 葛凌霄. 原子核多重碎裂[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 85-127
- [4] THOENNESSEN M. The discovery of isotopes [M]. Switzerland: Springer Int Publ, 2016: 67-82
- [5] MCMILLAN E, ABELSON P H. Radioactive element 93[J]. Physical Review, 1940, 57(12): 1185
- [6] 张丰收, 明照宇, 靳根明. 超重核合成进展[J]. 物理学进展, 2001, 21(1): 29
- [7] 张钰海, 张根, 李静静, 等. 基于大科学装置的放射性新核素产生进展[J]. 同位素, 2022, 35(2): 104
- [8] 周善贵. 超重原子核与新元素研究[J]. 原子核物理评论, 2017, 34(3): 318
- [9] THOENNESSEN M. Discovery of nuclides project [EB/OL]. [2022-04-10]. <https://people.nsl.msui.edu/~thoennes/isotopes/2018-Isotope-Movie.mp4>
- [10] LI B, TANG N, ZHANG F S. Isospin effects of projectile fragmentation in a Boltzmann-Langevin approach[J]. Chinese Physics C, 2021, 45(8): 084103
- [11] PYYKKÖ P. A suggested periodic table up to $Z \leq 172$, based on Dirac-Fock calculations on atoms and ions[J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2011, 13(1): 161
- [12] HABA H. A new period in superheavy-element hunting[J]. Nature Chemistry, 2019, 11(1): 10
- [13] 周小红, 徐珊珊. 合成和发现超铀化学元素、探索超重核稳定岛[J]. 物理, 2019, 48(10): 640
- [14] OGANESSIAN Y T, UTYONKOV V K, LOBANOV Y V, et al. Synthesis of the isotopes of elements 118 and 116 in the ^{249}Cf and $^{245}\text{Cm} + ^{48}\text{Ca}$ fusion reactions[J]. Physical Review C, 2006, 74(4): 520
- [15] GE Z S, LI C, LI J J, et al. Effect of shell corrections on the α -decay properties of $^{280-305}\text{Fl}$ isotopes[J]. Physical Review C, 2018, 98(3): 034312
- [16] GE Z S, ZHANG G, CHENG S H, et al. Calculations of the α -decay properties of $Z = 120, 122, 124, 126$ isotopes[J]. Chinese Physics C, 2020, 44(10): 104102
- [17] GE Z S, ZHANG G, CHENG S H, et al. Theoretical predictions for α -decay properties of $^{283-339}\text{Og}$ using a shell-effect induced generalized liquid-drop model[J]. The European Physical Journal A, 2019, 55(9): 166
- [18] CHENG S H, GE Z S, CAO L G, et al. Theoretical calculations of the nuclear deformation effects on α -decay half-lives for heavy and super-heavy nuclei[J]. Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, 2021, 48(9): 095106
- [19] LI J J, LI C, ZHANG G, et al. Production cross sections of neutron-rich $^{261-263}\text{No}$ isotopes[J]. Physical Review C, 2017, 95(5): 054612
- [20] LI J J, LI C, ZHANG G, et al. Theoretical study on production of unknown neutron-deficient $^{280-283}\text{Fl}$ and neutron-rich $^{290-292}\text{Fl}$ isotopes by fusion reactions[J]. Physical Review C, 2018, 98(1): 014626
- [21] LI J J, ZHANG G, ZHANG X R, et al. Production of unknown neutron-rich transuranium isotopes $^{245-249}\text{Np}$, $^{248-251}\text{Pu}$, $^{248-254}\text{Am}$, and $^{252-254}\text{Cm}$ in multinucleon transfer reactions[J]. Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, 2022, 49(2): 025106
- [22] ZHANG X R, ZHANG G, LI J J, et al. Effects of nucleus orientation on transfer process and production of unknown neutron-rich isotopes with $Z=62-75$ in $^{204}\text{Hg} + ^{232}\text{Th}$ based on the dinuclear system model[J]. Physical Review C, 2021, 103(2): 024608
- [23] ZHANG G, LI J J, ZHANG X R, et al. Role of the quasifission yields in the multinucleon transfer reactions of $^{136}\text{Xe} + ^{208}\text{Pb}$ [J]. Physical Review C, 2020, 102(2): 024617
- [24] WU Z H, ZHU L, LI F, et al. Synthesis of neutron-rich superheavy nuclei with radioactive beams within the dinuclear system model[J]. Physical Review C, 2018, 97(6): 064609
- [25] ZHANG G, SOKHNA C A T, LIU Z, et al. Production of neutron-rich isotopes $^{264, 266, 268, 269}\text{Rf}$ by multinucleon transfer reactions based on ^{238}U beam[J]. Physical Review C, 2019, 100(2): 024613
- [26] ZAGREBAEV V, GREINER W. Unified consideration of deep inelastic, quasi-fission and fusion-fission phenomena[J]. Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, 2005, 31(7): 825
- [27] BLOCKI J P, FELDMIEIER H, SWIATECKI W J. Dynamical hindrance to compound-nucleus formation in heavy-ion reactions[J]. Nuclear Physics A, 1986, 459(1): 145
- [28] LIU L, SHEN C W, LI Q F, et al. Residue cross sections of ^{50}Ti -induced fusion reactions based on the two-step model[J]. The European Physical Journal A, 2016, 52(2): 35
- [29] ZAGREBAEV V I. Synthesis of superheavy nuclei: nucleon collectivization as a mechanism for compound nucleus formation[J]. Physical Review C, 2001, 64(3): 034606
- [30] CAP T, SIWEK-WILCZYŃSKA K, WILCZYŃSKI J. No chance for synthesis of super-heavy nuclei in fusion of symmetric systems[J]. Physics Letters B, 2014, 736: 478
- [31] WU Z J, GUO L, LIU Z, et al. Production of proton-rich

- nuclei in the vicinity of ^{100}Sn via multinucleon transfer reactions[J]. *Physics Letters B*, 2022, 825: 136886
- [32] LI C, XU X X, LI J J, et al. Production of new neutron-rich heavy nuclei with $Z = 56-80$ in the multinucleon transfer reactions of $^{136}\text{Xe} + ^{198}\text{Pt}$ [J]. *Physical Review C*, 2019, 99(2): 024602
- [33] LI C, TIAN J L, ZHANG F S. Production mechanism of the neutron-rich nuclei in multinucleon transfer reactions: a reaction time scale analysis in energy dissipation process[J]. *Physics Letters B*, 2020, 809: 135697
- [34] XU X X, ZHANG G, LI J J, et al. Production of exotic neutron-deficient isotopes near $N, Z = 50$ in multinucleon transfer reactions[J]. *Chinese Physics C*, 2019, 43(6): 064105
- [35] LI C, WEN P W, LI J J, et al. Production mechanism of new neutron-rich heavy nuclei in the $^{136}\text{Xe}+^{198}\text{Pt}$ reaction[J]. *Physics Letters B*, 2018, 776: 278
- [36] MORITA K, MORIMOTO K, KAJI D Y, et al. Experiment on the synthesis of element 113 in the Reaction $^{209}\text{Bi}(^{70}\text{Zn}, n)^{278}\text{113}$ [J]. *Journal of the Physical Society of Japan*, 2004, 73(10): 2593
- [37] GAN Z G, QIN Z, FAN H M, et al. A new alpha-particle-emitting isotope ^{259}Db [J]. *The European Physical Journal A*, 2001, 10(1): 21
- [38] GAN Z G, GUO J S, WU X L, et al. New isotope ^{265}Bh [J]. *The European Physical Journal A*, 2004, 20(3): 385
- [39] ZHANG Z Y, GAN Z G, MA L, et al. Observation of the superheavy nuclide ^{271}Ds [J]. *Chinese Physics Letters*, 2012, 29(1): 012502
- [40] YANG H B, MA L, ZHANG Z Y, et al. Alpha decay properties of the semi-magic nucleus ^{219}Np [J]. *Physics Letters B*, 2018, 777: 212
- [41] ZHANG Z Y, GAN Z G, YANG H B, et al. New Isotope ^{220}Np : probing the robustness of the $N=126$ shell closure in neptunium[J]. *Physical Review Letters*, 2019, 122(19): 192503
- [42] MA L, ZHANG Z Y, GAN Z G, et al. Short-lived α -emitting isotope ^{222}Np and the stability of the $N=126$ magic shell[J]. *Physical Review Letters*, 2020, 125(3): 032502
- [43] SUN M D, LIU Z, HUANG T H, et al. New short-lived isotope ^{223}Np and the absence of the $Z=92$ subshell closure near $N=126$ [J]. *Physics Letters B*, 2017, 771: 303
- [44] HUANG T H, ZHANG W Q, SUN M D, et al. Identification of the new isotope ^{224}Np [J]. *Physical Review C*, 2018, 98(4): 044302
- [45] WATANABE Y X, KIM Y H, JEONG S C, et al. Pathway for the production of neutron-rich isotopes around the $N=126$ shell closure[J]. *Physical Review Letters*, 2015, 115(17): 172503
- [46] DEVARAJA H M, HEINZ S, BELIUSKINA O, et al. Observation of new neutron-deficient isotopes with $Z \geq 92$ in multinucleon transfer reactions[J]. *Physics Letters B*, 2015, 748: 199
- [47] WUENSCHHEL S, HAGEL K, BARBUI M, et al. Experimental survey of the production of α -decaying heavy elements in $^{238}\text{U} + ^{232}\text{Th}$ reactions at 7.5–6.1 MeV/nucleon[J]. *Physical Review C*, 2018, 97(6): 064602
- [48] 杨建成, 曾钢, 肖国青, 等. 强流重离子加速器, 肩负探索未知世界新使命[J]. *科学通报*, 2020, 65(1): 8
- [49] YE Y L. Proposed BISOL facility-a conceptual design[J]. *Europe Physics Journal Web of Conferences*, 2018, 178: 01005
- [50] THOENNESSEN M. Exploring new neutron-rich nuclei with the facility for rare isotope beams[J]. *Nuclear Data Sheets*, 2014, 118: 85
- [51] ZHU L, XIE W J, ZHANG F S. Production cross sections of superheavy elements $Z=119$ and 120 in hot fusion reactions[J]. *Physical Review C*, 2014, 89(2): 024615
- [52] ADAMIAN G G, ANTONENKO N V, LENSKE H, et al. Predictions of identification and production of new superheavy nuclei with $Z=119$ and 120 [J]. *Physical Review C*, 2020, 101(3): 034301
- [53] 杨秀秀, 张根, 李静静, 等. 不同理论模型预言合成超重核 $Z=119\sim 122$ 研究进展[J]. *原子核物理评论*, 2020, 37(2): 151
- [54] 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[J]. *Physical Review C*, 2009, 79(2): 024603
- [55] HOFMANN S, HEINZ S, MANN R, et al. Review of even element super-heavy nuclei and search for element 120[J]. *The European Physical Journal A*, 2016, 52(6): 180
- [56] KHUYAGBAATAR J, YAKUSHEV A, DÜLLMANN C E, et al. Search for elements 119 and 120[J]. *Physical Review C*, 2020, 102(6): 064602

Synthesis of new superheavy nuclei

ZHANG Fengshou^{1, 2, 3)} ZHANG Yuhai¹⁾ ZHANG Minghao¹⁾ TANG Na¹⁾
CHENG Shihui¹⁾ LI Jingjing²⁾ CHENG Wei^{1, 2)}

(1) The Key Laboratory of Beam Technology and Energy Material, College of Nuclear Science and Technology, 100875, Beijing, China;

2) Institute of Radiation Technology, Beijing Academy of Science and Technology, 100875, Beijing, China;

3) Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator of Lanzhou, 730000, Lanzhou, Gansu, China)

Abstract With heavy ion accelerators and radioactive ion beam facilities readily available, nuclear physics is no longer limited to stable nuclei, but extends rather to some limiting conditions such as high-temperature and high-density limits, spin limit, isospin limit, charge and mass limits. To explore charge and mass limits, the following are at the forefront of nuclear physics research: how to synthesize long-lived superheavy nuclei, whether an “island of stability” exists, how to study the properties of superheavy nuclei. In this paper, mechanisms, definitions and decay modes of superheavy nuclei are reviewed. Synthesis of superheavy nuclei are reviewed, including theory and experimental synthesis of superheavy nuclei, future plans for large-scale facilities. The study of synthesis mechanism of superheavy nuclei is carried out in heavy-ion fusion reactions and multinucleon transfer reactions. Synthesis of new trans-uranium nuclei $^{223, 224}\text{Np}$ and participation of Beijing Normal University personnel are reviewed. Recent progresses in the synthesis of $Z=119$ and 120 superheavy nuclei are summarized.

Keywords new superheavy nuclei; island of stability; heavy ion nuclear physics; heavy ion collision; decay modes

【责任编辑: 武 佳】