

文章编号: 1007-4627(2017) 03-0318-14

超重原子核与新元素研究

周善贵^{1,2,3,4}

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

2. 中国科学院大学物理科学学院, 北京 100049;

3. 兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心, 兰州 730000;

4. 湖南师范大学量子效应及其应用协同创新中心, 长沙 410081)

摘要: 当前, 原子核物理研究的一个重要前沿是探索原子核的电荷与质量极限, 研究超重原子核与超重元素的性质, 以及合成超重原子核。20世纪60年代, 基于量子壳效应, 理论预言质子数为114、中子数为184的原子核及其相邻核具有较长的寿命, 甚至可能是稳定的, 形成一个超重稳定岛。这个理论预言促进了重离子加速器及相关探测设备的建造, 推动了重离子物理的发展。到目前, 已经合成到了118号元素, 填满了元素周期表的第7行。然而, 合成更重的超重元素或包含更多中子的超重原子核面临着很多挑战, 需要理论与实验密切结合, 探索超重原子核的性质与合成机制, 以登上超重稳定岛。文章概要评述超重原子核与新元素研究。首先介绍超重原子核与超重元素研究的背景及理论预言, 包括超重核存在的根源、理论预言的概况等。之后简要给出实验合成超重核取得的主要进展和新元素命名情况。关于合成更重的超重元素面临的挑战, 文章将针对利用重离子熔合蒸发反应合成超重核的截面低、所合成的超重核缺中子等情况展开讨论。最后评述近年来超重原子核结构性质、衰变、裂变与合成机制等方面的理论研究进展, 包括超重核区的幻数和超重岛的位置, 超重核的稳定性, 利用重离子熔合蒸发反应合成超重核的三步过程及其复杂性, 利用多核子转移合成超重核的探索, 等等。

关键词: 超重原子核; 新元素; 重离子物理

中图分类号: O571.21; O571.23; O571.6

文献标志码: A

DOI: 10.11804/NuclPhysRev.34.03.318

1 引言

探索原子核的电荷与质量极限(即原子核内能容纳多少个质子和中子)、研究超重原子核、合成新元素是当前核物理学研究的重要前沿领域^[1-3]。

从原子层次看, 若把原子核看成是一个点电荷, 由玻尔的量子论可知, 原子内层电子的运动速度 $v \approx \alpha Zc$, 其中 Z 为质子数, 即核电荷数, α 为精细结构常数, c 为光速。由 v 不能超过光速 c 可得, $Z < 1/\alpha \sim 137$ 。考虑到原子核的电荷具有一定的空间分布后, 给出元素存在的限制为 $Z < 173$ ^[4]。

从原子核的层次看, 原子核的电荷与质量极限主要取决于吸引的短程核力与排斥的长程库仑力之间的竞争。由于核力的饱和性, 核力的效应大致正比于核子数。库仑力的效应则近似与 Z^2 成正比。库仑力倾向于使原子核处于具有较大拉长形变的状态, 而核力则倾向于使原子核尽量保持球形。这个竞争导致在原子核的形

状势能曲面上可能出现一个位垒, 阻挡原子核发生裂变(参见文献[5]的图1)。质子数越大, 库仑排斥效应越显著, 裂变位垒就越低。如果把原子核看成是经典的带电液滴, 当质子数达到104左右时, 原子核的裂变位垒几乎消失, 无法阻挡原子核发生裂变。然而, 在原子核这个有限量子多体系统中, 量子效应起着非常重要的作用, 显著地影响原子核的性质, 包括其稳定性。

20世纪60年代中后期, 基于不同形式的唯象平均势场给出的核子单粒子能级, 定量计算量子壳效应, 并恰当考虑质子之间的库仑相互作用后, 很多理论家预言, $Z = 114$ 和 $N = 184$ 分别是 ^{208}Pb 之后的质子幻数和中子幻数。这两个幻数附近的壳效应足够强, 使得 $^{298}114$ 及其邻核存在足够高的裂变位垒, 阻挡这些原子核发生裂变。因此这些原子核比较稳定, 形成一个“超重稳定岛”, 岛上的原子核可能具有较长的寿命^[6-12]。当然, 壳效应对 α 衰变和 β 衰变(包含电子俘获)也有显著影响。超重原子核的稳定性和寿命是由

收稿日期: 2017-02-20; 修改日期: 2017-04-12

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(11525524); 国家重点基础研究发展规划资助项目(2013CB834400); 国家自然科学基金资助项目(11621131001、11647601和11711540016); 中国科学院前沿科学重点研究项目

作者简介: 周善贵(1971-), 男, 黑龙江讷河人, 研究员, 博士, 从事核物理理论研究; E-mail: sgzhou@itp.ac.cn。

自发裂变、 α 衰变和 β 衰变等共同决定的。

由于超重原子核的核电荷数非常大,核外电子运动速度很快,相对论效应非常重要。这可能导致核外电子排布不再遵循已知的元素周期性规律,进而影响到这些元素在周期表上的位置。因此,超重核研究不仅涉及到核物理,也涉及到原子物理、化学等学科或领域,具有重要的科学意义。此外,超重稳定岛上的同位素可能蕴含着巨大的应用价值。基于这些原因,2005年,美国《科学》杂志把是否存在稳定的超重元素列为125个有待解决的科学问题之一^[13]。

本文第2节将简要给出实验合成超重核取得的主要进展和新元素命名情况。当前,合成更重的超重元素面临着很多挑战,第3节将针对利用重离子熔合蒸发反应合成超重核的截面低、所合成的超重核缺中子等情况展开讨论。第4节综述近年来在超重原子核结构性质、衰变、裂变与合成机制方面的理论研究情况,包括超重核区的幻数和超重岛的位置、超重核的稳定性、利用重离子熔合蒸发反应合成超重核的三步过程及其复杂性,利用多核子转移合成超重核的探索,等等。第5节给出总结和展望。

2 超重核合成实验进展

如果在天体核合成过程中产生了超重原子核,并且其寿命很长,那么它们在自然界中可能还存在。因此,自20世纪60年代末起,人们就开始在自然界寻找超重元素^[14],但一直没有取得令人信服的结果。一直到近些年,这类探索仍在继续^[15, 16]。

虽然在自然界中尚未找到超重元素,科学家在人工合成超重元素方面却取得了重大进展。事实上,从20世纪20年代起,人们就开始在人造元素方面取得成功,先后合成了铀之前的人造元素锝(43号, Tc)、钷(61号, Pm)、砹(85号, At)和钫(87号, Fr)以及超铀元素镎(93号, Np)至镥(103号, Lr)^[17]。利用轻离子(质子、氘核、氚核、 α 粒子等)轰击靶核,在实验室里最重合成到了101号元素钔(Md)。对于更重的元素,主要利用重离子熔合蒸发反应来合成:用比 α 粒子重的重离子来做炮弹(弹核),轰击合适的靶(靶核),使弹核与靶核熔合,复合核的核电荷数等于弹核与靶核的核电荷数之和。

关于超重稳定岛的理论预言极大地促进了国际上重离子加速器和相关探测设备的建造以及重离子物理的发展。很多著名的实验室,包括德国重离子物理研究所(GSI)、俄罗斯Dubna联合核子研究所、美

国Livermore国家实验室和Berkeley国家实验室、法国国家重离子加速器实验室(GANIL)、日本理化学研究所(RIKEN)、我国的兰州重离子加速器国家实验室等,都投入了大量的人力物力,建造或改进重离子加速器和相关探测设备,探索超重稳定岛^[18]。

利用重离子熔合蒸发反应合成超重核的反应截面非常小,实验需要持续很长的时间,有时几个星期甚至几个月才能合成一个超重原子核。因此,科学家要设法寻找合适的弹核与靶核,并把弹核加速到合适的能量,以尽可能地使超重核的合成截面最大化。截止到目前,合成超重核的重离子熔合反应主要有两类:冷熔合反应与热熔合反应。Oganessian^[19]在20世纪70年代提出,利用双幻核 ^{208}Pb 或相邻的 ^{209}Bi 作为靶核,针对待合成的目标超重核,选择合适的弹核和入射能量,可以得到较大的超重核合成截面。用这类方法合成的超重复合核的激发能通常较低,发射一个或两个中子后,就可以生成超重核,所以称为冷熔合反应。热熔合反应是利用双幻核 ^{48}Ca 作为弹核,针对目标超重核,选择合适的超铀元素作为靶核。由于弹核与靶核的核电荷数乘积相对较小,库仑位垒较低,热熔合反应的熔合概率较大,从而导致较大的超重核合成截面。这种方法得到的超重复合核的激发能一般较高,存活概率相对较小,通常需要发射3或4个中子,才能退激到超重核的基态或能量较低的激发态,所以称为热熔合反应。

20世纪80年代以来,科学家利用重离子熔合蒸发反应合成了很多超重原子核。德国GSI利用冷熔合反应合成了107至112号超重元素^[1]。在Dubna联合核子研究所,科学家利用热熔合反应合成了113至118号元素^[2]。在经过长期探索和积累,验证了德国GSI利用冷熔合反应合成的110至112号元素之后,科学家利用冷熔合反应,在日本RIKEN成功合成了113号元素^[3]。

一个由国际纯粹与应用物理联合会和国际纯粹与应用化学联合会所任命的联合工作组负责考察新元素的实验发现工作。一旦该工作组最终确认了一个新元素的实验发现,即邀请发现者建议这个新元素的名称。到目前, $Z \leq 118$ 的元素都得到了命名。这样,元素周期表的第7行已经完全填满^[20],见图1。最近命名的四个新元素是113号(Nh)、115号(Mc)、117号(Ts)和118号(Og)^[21-23]。全国科学技术名词审定委员会也确定了这四个元素的中文名称^[24-27]。其中,113号元素是首个由亚洲国家的实验室RIKEN建议名字的元素。我国科学家赵宇亮、徐珊珊等曾先后在RIKEN参加113号元素的实验合成工作。在我国兰州重离子加速器国家实

带*为放射性元素。
其中，黑色为天然放射性元素，红色为人造元素。

图 1 (在线彩图) 元素周期表(制图: 孟旭)

实验室的重离子研究装置(HIRFL)上开展的关于 ^{266}Bh 的实验工作^[28]在113号元素的确认过程中也发挥了作用^[21]。

值得指出的是，我国科学家在HIRFL上开展的超重核合成实验也取得了重要的进展，先后合成了超重新核素 ^{259}Db ^[29]和 ^{265}Bh ^[30]，并于2011年利用反冲充气核谱仪(Spectrometer for Heavy Atom and Nuclear Structure, SHANS)^[31]成功进行了110号元素的一个同位素 ^{271}Ds 的合成实验^[32]。近年来，利用该谱仪，还先后合成了新核素 ^{205}Ac ^[33]， ^{216}U ^[34]， ^{215}U ^[35]和 ^{223}Np ^[36]。目前，兰州重离子加速器国家实验室的科学家一方面在继续开展超重核的合成实验工作，另一方面也在进行重离子熔合机制方面的研究^[37]。

3 超重核合成面临的困难

在德国GSI和俄罗斯Dubna联合核子研究所，都曾进行过合成119号和/或120号元素的实验^[38-42]。尽管看到了一些当前实验能力能够合成120号元素的迹象^[42]，但由于实验条件和科研环境的限制，这些合成核电荷数大于118的超重元素的尝试，都没有取得成功。当前，合成更重的超重元素或包含更多中子的超重原子核面临着很多困难。

困难之一源于合成超重核的反应截面非常小。目前，利用热熔合反应合成的核电荷数最大的超重元素是113号元素Nh，反应截面仅为 22^{+20}_{-13}fb ^[43]。如前所

述，利用热熔合反应合成 $Z > 118$ 的超重元素的实验尚未取得进展，仅有的几个实验探索给出的反应截面上限也只是在几十个飞靶量级^[39, 42]。这导致合成超重核的实验通常要持续很长的时间。为应对如此小的合成截面带来的挑战，一方面需要增大超重核的产生率，另一方面需要提高探测效率。为增大超重核的产生率，可以采用强流加速器和可耐强流的靶。为提高探测效率，需要建造更先进的探测设备。俄罗斯Dubna联合核子研究所正在建设的超重元素工厂(SHE Factory)有望于2017年底开始运行，将大幅提高超重核的产生率和探测效率。我国“十二五”期间优先安排的重大科技基础设施“强流重离子加速器(简称HIAF)”，也把增大超重核的产生率和提高探测效率作为重要的建设内容^[44]。这些装置投入使用后，将极大地促进超重核性质和合成机制的系统研究。

第二个困难是，实验室合成的这些超重原子核，包括114号元素的同位素，其中子数与理论预言的下一个中子幻数184还相差很多。到目前为止，中子数最多的核素是 ^{293}Lv 和 ^{294}Ts ，其中子数仅为177。这是由于，随着质子数的增加，对于 β 稳定线附近的原子核，中子数与质子数之比越来越大。因此，利用 β 稳定线附近的原子核作为弹核与靶核，合成的超重核一定是缺中子的。解决这一困难的可能途径有两个，一是利用丰中子的放射性核束轰击靶核，这样可以得到丰中子的复合核。但是，放射性核束的流强非常低，而合成超重核的反应截面又非常小，所以这会导致超重核的产生率极低，远低于目前的实验探测极限。二是利用多核子转移

反应合成超重核, 这仍处于探索阶段^[45-47]。基于前述强流重离子加速器, 我国科学家建立了一个包括实验家和理论家在内的“HIAF多核子转移反应讨论组”, 期望通过理论计算和分析, 为实验家进行产物分离系统和实验终端的设计提供参考。

第三个困难是, 利用热熔合反应合成更重的超重元素, 所需的靶材料难以制备, 非常稀少, 而且这些靶材料通常具有放射性。

此外, 若合成的超重核寿命非常长, 则无法利用目前所采用的追踪 α 衰变、建立 α 衰变链的方法鉴别, 需要探索新的鉴别方法^[48]。

4 超重核相关的理论研究

超重原子核研究是理论与实验相互结合、相互促进的一个典型例子; 理论研究对于探索超重稳定岛具有重要意义。一方面, 20世纪60年代关于超重稳定岛的理论预言推动了重离子物理的发展; 20世纪80年代起, 实验研究中取得的重要进展又为理论研究提供了更坚实的实验基础, 促进了理论的发展。另一方面, 理论研究对于未知超重元素的合成也具有重要的指导意义。例如, 在117号新元素合成实验之前, 很多理论家即针对弹靶组合、入射能量等进行了预言^[49-52]。又如, 为鉴别超重核, 需要测量 α 衰变谱, 通常也需要与理论结果进行比较。如前所述, 目前实验探索超重稳定岛面临很多问题, 这更凸显理论研究以及实验与理论结合的重要性。

与研究其他核区的原子核一样, 超重核的理论研究也包括结构、衰变与反应^[5, 53, 54], 这些研究可以归纳为以下几个方面: (1)与超重岛的位置相关: 壳层结构与超重核区的幻数; (2)与超重核的稳定性相关: 各种衰变模式、自发裂变和集团放射性; (3)与超重核的鉴别相关: α 衰变及自发裂变; (4)与超重核的合成相关: 重离子碰撞的俘获过程、熔合(准裂变、多核子转移)过程以及超重复合核的存活过程。通常有两类模型用于研究这些内容: 宏观(或唯象)模型与微观模型。针对核结构性质, 有宏观-微观模型和微观自治模型。前者是在宏观模型(通常是液滴模型)的基础上考虑微观修正(主要是量子壳效应), 处理问题相对简单, 可以做大规模的系统性计算。后者一般基于密度泛函理论, 有更好的微观基础, 但通常涉及复杂的数值计算。针对重离子碰撞, 有唯象和微观输运模型。唯象输运模型由于引入了很多近似, 数值计算相对容易。而微观输运模型则具有更好的微观基础, 虽然计算非常复杂, 但能够揭示熔合的微观机制。限于篇幅, 以下仅就与超重岛的位置、超

重核的稳定性以及合成机制相关的几个问题展开讨论。

4.1 壳层结构与超重核区的幻数

尽管超重核的实验和理论研究都取得了重要成果, 但相关研究中仍有很多问题没有解决。其中, 最重要的问题之一是超重岛的位置和超重核区的幻数问题。如何更好地预言稳定或者长寿命超重元素岛的中心位置, 仍是对理论工作者的极大挑战^[55]。

量子壳效应是超重核存在的根本原因。早期的核结构理论预言, $Z = 114$ 和 $N = 184$ 的原子核是 ^{208}Pb 之后的双幻核。近年来, 很多宏观-微观模型仍给出相同的预言^[57]。但微观模型给出的预言却不相同。例如, 采用不同的参数, Skyrme-Hartree-Fock模型预言的幻数除了 $Z = 114$ 和 $N = 184$ 以外, 还有 $Z = 120$ 和 $N = 172$, $Z = 126$ 和 $N = 184$ ^[58]。张炜等^[56]利用球形相对论连续谱Hartree-Bogoliubov模型, 采用多组有效相互作用, 详细考察 $Z = 100$ 至 140 、 $N = (Z+30)$ 至 $(2Z+32)$ 的原子核的双核子分离能、两核子能隙(分离能针对核子数的差分, 即结合能的二阶差分)、壳修正能量、对能、对能隙后, 预言质子幻数 $Z = 120, 132$ 和 138 以及中子幻数 $N = 172, 184, 198, 228, 238$ 和 258 。若考虑更多的物理因素, 例如形变、张量力、交换项等, 这些模型预言的超重核区壳层结构会有所不同^[59, 60]。例如, 利用包含交换项贡献的球形相对论连续谱Hartree-Fock-Bogoliubov模型, 李佳杰等^[60]预言质子幻数 $Z = 120$ 和 138 , 中子幻数 $N = 172, 184, 228$ 和 258 , 见图2。Patyk和Sobiczewski利用宏观-微观模型, 研究了高极形变(十六极、三十二极等)对原子核壳层结构的影响, 揭示出 ^{270}Hs 是形变双幻核, 指出在 $Z = 108$ 和 $N = 162$ 附近存在相对稳定的形变超重核, 这些超重核形成了一个超重“浅滩”^[61]。裴俊琛等利用Skyrme-Hartree-Fock + BCS模型也得到了类似的结果^[62]。目前, 实验上已经到达并跨过了这个浅滩, 这一方面证实了理论预言, 另一方面也增强了实验家继续探索超重岛的信心。

引言中提到, 从原子层次看, 原子核的核电荷数应该小于173。所以, 除了研究 $Z = 114, 120$ 等82之后的质子幻数以外, 还有很多理论工作探讨更重核区的壳层结构与核性质^[12, 63, 64]。例如, 20世纪60年代末, Mosel和Greiner曾讨论了质子幻数114和164^[12]。2013年, Koura和Chiba基于一个改进的Woods-Saxon势, 研究了超重核区和极端超重核区原子核的壳层结构^[63]。如图3所示, 他们除了给出 ^{208}Pb 之后的双幻核 $^{298}\text{Fl}_{184}$, 还预言了更重的双幻核 $^{310}126_{184}$ 、

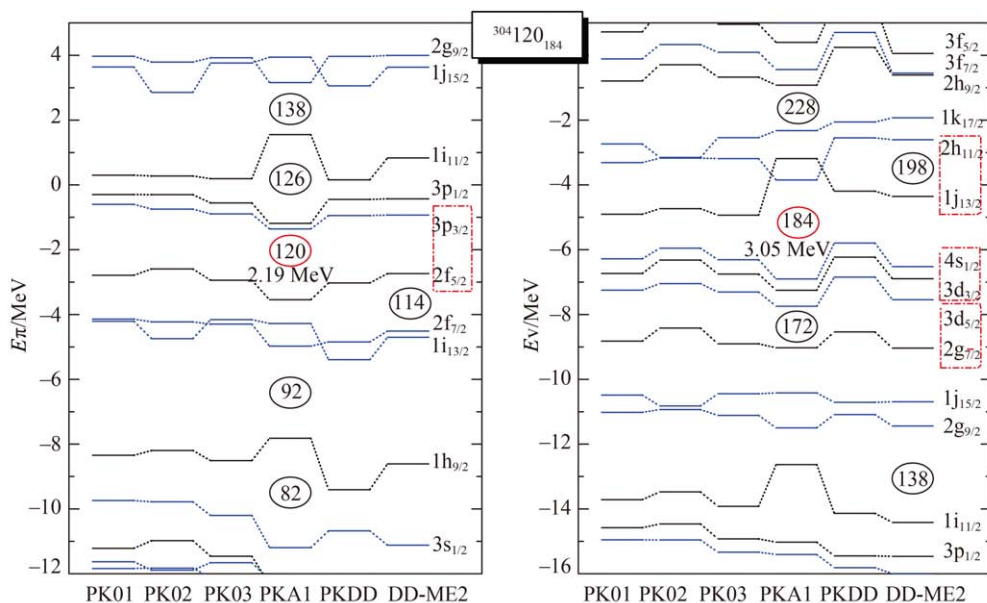


图 2 (在线彩图) 球形相对论连续谱 Hartree-Fock-Bogoliubov 模型预言的超重核区质子和中子幻数, 取自文献[60]

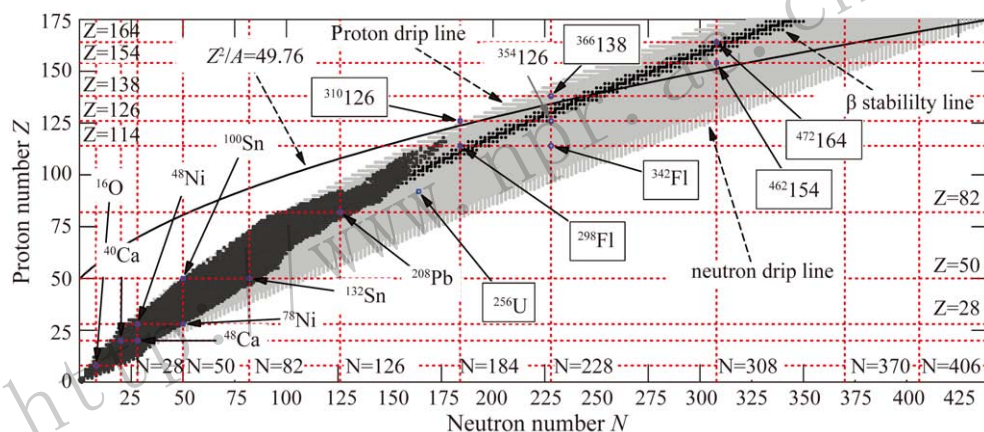


图 3 (在线彩图) 基于改进的 Woods-Saxon 势预言的超重核区质子和中子幻数, 取自文献[63]

$^{342}\text{Fl}_{228}$, $^{366}\text{138}_{228}$, $^{462}\text{154}_{308}$ 和 $^{472}\text{164}_{308}$ 。其中, $^{298}\text{Fl}_{184}$ 和 $^{472}\text{164}_{308}$ 位于 β 稳定线上。此外, 也有很多工作研究“巨核”[65–68]; 当然, 这些“核”不是普通意义上的“原子核”, 除了引力效应微乎其微外, 更接近于微型的“中子星”或“奇异星”, 或者说, 它们是介于“原子核”与致密星之间的“核”。最近, 夏铨君[65–67]等提出了一个夸克集团统一模型, 研究了从奇异子(strangelet)到奇异星(strange star)各类不同大小的奇异夸克物质集团。这个模型预言了重子数从几、几十到几十亿的奇异子。图 4 展示了一个核芯半径为 1000 fm 的奇异“巨核”的内部情况。在“核芯”表面部分有丰富的电荷分布结构, 而在“核芯”外部则包裹了一层电子气, 厚度约为 1 Å。该奇异“巨核”的质量约为 1.22×10^9 GeV, 它包含 1.37×10^9 个上夸克、 1.48×10^9 个下夸克和 1.26×10^9 个奇异夸克, 即, 重子

数约为 1.37×10^9 。

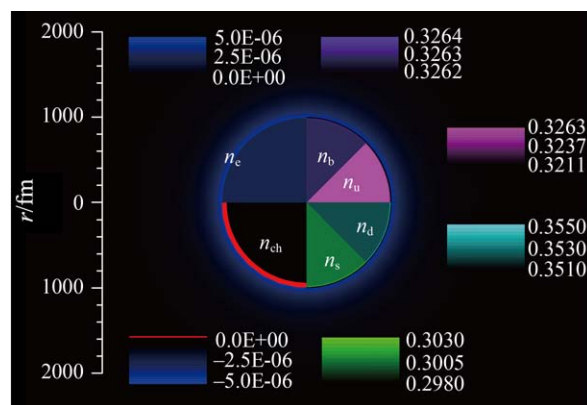


图 4 (在线彩图) 夸克集团统一模型预言的一个核芯半径为 1000 fm 的奇异“巨核”的内部结构, 取自文献[66]

除了前述的双核子分离能、两核子能隙、壳修正能量、对能、对能隙等, 考察原子核的 α 衰变能和衰变寿命, 也可以得到关于原子核幻性(magicity)的信息^[69, 70]。需要指出的是, 归根结底, 这些物理量中体现的幻性都源于原子核的壳层结构, 在很多情况下, 由某对或某几对单粒子能级的劈裂行为决定。例如, 质子 $2f_{5/2}$ 和 $2f_{7/2}$ 自旋伙伴态之间的劈裂较大时, 超重核区质子幻数很可能为114; 该劈裂较小时, 这个幻数则更可能为 $Z = 120$ 。如果原子核的壳层结构中能隙不明显, 讨论幻性也就失去了意义。特别是, 对于超重核, 其单粒子能级密度很大, 与轻核相比, 壳效应可能要弱一些。

在近期研究奇特原子核中壳层结构的演化时发现, 个别幻数的幻性可能具有“局域性”, 即, 在原子核的某些性质中表现出幻性, 但在其它性质中则没有表现出来^[71]。一个例子是Ca同位素链中的 $N = 32$ 这个可能的新的幻数。 ^{52}Ca 的双中子分离能较大, 第一个 $J^\pi = 2^+$ 激发态能量较高, 预示着 $N = 32$ 可能是一个幻数^[72, 73]。但是, ^{52}Ca 的电荷半径却比相邻的 ^{50}Ca 大, 这与双幻核的性质不符^[74]。在研究超重核区的幻性时, 也可能遇到类似的情况。

由于 $Z \geq 110$ 超重核的合成截面非常小, 目前尚无法通过实验获得其单粒子谱, 因此实验上无法直接研究超重核的壳层结构信息^[53]。得到超重核区单粒子能级信息的一个间接方法是研究质量数相对较轻的超锿原子核的能谱。近年来, 实验上在 $Z \approx 100$ 的原子核中观测到许多高自旋转动带。这些原子核都具有稳定的形变, 例如, ^{252}No 的四极形变 $\beta_2 \approx 0.28 \pm 0.02$ 。由于形变效应, 对于超重核区出现幻数比较关键的单粒子能级, 例如前面提到的质子能级 $2f_{5/2}$ 和 $2f_{7/2}$, 降低到 $Z \approx 100$ 的原子核的质子费米面附近。研究这些核的低激发转动谱可以揭示其组态结构、壳层结构以及稳定性等诸多信息, 从而一方面对现有的理论模型进行检验, 另一方面有助于深入认识超重核性质。在理论方面深入研究超锿核谱学性质, 一方面可以加深对这个核区原子核性质的理解, 另一方面有助于将理论模型扩展到超重核区, 进而有助于了解超重核的单粒子能级结构等信息。用来研究超锿原子核的理论模型很多, 主要包括: 包括ab公式在内的一些经验公式^[75]、宏观微观模型^[76–84]、组态约束的Total Routhian Surface计算方法^[85–87]、自洽的平均场模型^[83, 84, 88–91]、准粒子-声子耦合模型^[92]、粒子-转子模型^[93]、投影壳模型^[94–96]、重核壳模型^[97]、推转壳模型^[98–105]等。关于这方面的研究背景和进展, 请参考文献^[53, 102]。

4.2 超重核的稳定性

如引言中所述, 若把原子核看成是经典带电液滴, 当质子数达到104时, 原子核的裂变位垒几乎消失, 因此, 不可能存在104号以上的元素和相应的原子核。

但是, 量子壳效应导致在一些超重原子核中出现足够高的裂变位垒, 能够有效阻挡它们发生裂变, 因而其裂变寿命很长。我们知道, 考察某个原子核的稳定性, 除了考虑裂变, 还要考虑其它衰变模式, 包括 α 衰变、 β 衰变(包括电子俘获), 以及质子发射、中子发射和重离子集团发射等。这对于超重原子核, 也不例外^[11, 12, 106–109]。也正因为如此, 通过考察壳层结构得到的超重核区双幻核未必是最稳定或寿命最长的超重核。

自发裂变和 α 衰变寿命以及它们之间的竞争决定了超重原子核的稳定性以及超重岛以何种形式存在, 因此相关研究一直是超重核研究的重要课题。在理论预言可能存在超重稳定岛的初期, Nilsson等^[11, 107, 108]就曾系统研究 β 稳定线附近的超重原子核相对于 α 衰变和自发裂变的稳定性。他们基于Nilsson模型, 考虑对修正和壳修正后给出原子核的形状和结合能, 预言114和184分别为质子和中子幻数。因而, ^{298}Fl 及相邻原子核的自发裂变寿命很长, 达到 10^{13} 年。随着质子数和中子数偏离114和184, 原子核的自发裂变寿命迅速减小。若不考虑壳修正, α 衰变的寿命与 α 衰变路径(即 $\Delta N = \Delta Z = 2$ 这条线)相对于 β 稳定线的位置和倾斜度相关。考虑壳修正后, 对于 $Z < 114$ 和 $N < 184$ 的原子核, α 衰变的寿命增长, 对于 $Z > 114$ 和 $N > 184$ 的原子核, α 衰变的寿命变短。综合考虑上述因素, 他们预言 ^{294}Ds 的寿命最长, 有望在地球上找到。Nilsson及其合作者还分析了他们的计算中, 自发裂变寿命和 α 衰变寿命的不确定性, 对于前者, 不确定度可达6个数量级。在文献^[12]中, Mosel和Greiner除了研究 ^{298}Fl 及相邻原子核外, 还讨论了对应于 $Z = 164$, $A \sim 430\text{--}480$ 的另一个可能的超重岛上原子核的稳定性。在自发裂变和 α 衰变的竞争研究方面, 近期也有一些系统的工作^[110–116]。例如, 钱以斌和任中洲在文献^[113]中, 利用密度相关的集团模型研究 α 衰变, 利用经验公式给出自发裂变寿命, 讨论了 $Z \leq 121$ 的超重核的寿命, 计算结果与已有实验符合, 相关研究对于合成下一个新元素具有重要参考价值。

除了前面提到的 α 衰变在表征超重核稳定性方面的意义, 目前实验上还主要通过测量特征 α 射线谱来鉴别所合成的超重核, 所以, α 衰变在超重核研究中具有举足轻重的地位。相应地, α 衰变的理论研究也非常多,

感兴趣的读者可参考近期的两篇文章^[70, 117]和其中的文献。在文献^[70]中, 张闪等提出了一个改进的经验公式, 计算了包括超重核在内的 421 个原子核的 α 衰变寿命, 并针对 $Z = 118$ – 121 的超重核给出了理论预言。文献^[117]则给出了从 $^{296}_{119}$ 到 ^{268}Db 这个 α 衰变链上的超重核的半衰期。这些理论预言对于将来的实验具有重要的参考价值。

4.3 超重核合成机制

研究超重原子核的合成机制, 直接关系到如何登上超重稳定岛, 因而在超重核相关的研究中占据重要的地位^[118]。目前, 实验上一方面利用重离子熔合蒸发反应合成超重原子核, 另一方面在探索合成超重原子核的新途径, 其中之一是多核子转移反应。

4.3.1 重离子熔合蒸发反应

如第 2 节所述, 利用重离子熔合蒸发反应合成超重核主要有两大类机制——冷熔合和热熔合。不论是热熔合还是冷熔合, 都可分成三个阶段, 看成是一个三步过程, 如图 5 所示: (1) 俘获过程——弹核与靶核克服它们之间的库仑位垒, 形成一个双核体系; (2) 复合核形成过程(熔合过程)——这个双核体系以很大的概率发生准裂变, 但仍有很小的概率形成超重复合核; (3) 存活过程——超重复合核具有一定的激发能, 有很大的概率发生裂变, 但它也有一定的概率通过发射一个或多个中子退激发, 因而保持电荷数不变, 在这个意义上, 超重核存活下来。发射中子后, 超重核或处于基态, 或处于能量较低的激发态, 再通过发射一系列 α 粒子而进一步衰变。实验上可以测量这一系列特征 α 射线谱, 结合 α 衰变链末端子核的鉴别来确定所合成的超重核。

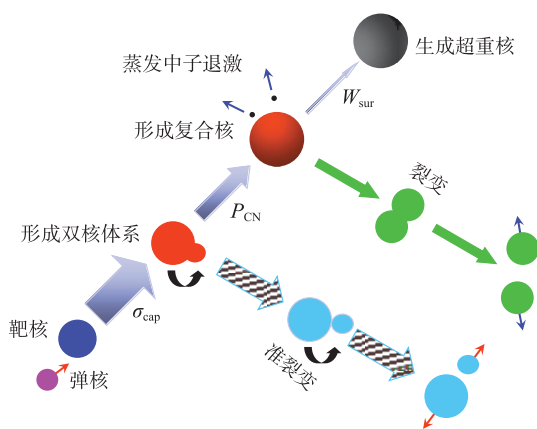


图 5 (在线彩图) 利用重离子熔合蒸发反应合成超重核的三个阶段, 取自文献^[53]

描述利用重离子熔合反应合成超重核的模型有很多, 利用这些模型开展了很多理论工作, 研究合成超重

核的过程, 并给出合成截面^[119–134]。这些模型一般能够较好地描述已有实验, 但对于未知核区的预言, 通常有较大的分歧。目前, 基于冷熔合机制合成的核电荷数最大的超重元素是 113 号, 如前所述, 该合成截面仅为 22^{+20}_{-13} fb。对于利用冷熔合反应合成 113 号以上的超重元素, 理论预言截面的结果有两类。一类是随着 Z 增大, 合成截面可能继续指数下降^[51], 低于目前的实验探测极限。另一类是在 $Z > 113$ 时, 合成截面不随核电荷数指数下降, 而是保持在 0.1 pb 左右^[135]; 这样, 实验上还可能利用冷熔合反应合成更重的超重元素。

当前, 合成比 118 号元素更重的超重元素是实验关注的焦点。如前所述, 已经进行的一些实验尚未取得进展。理论上, 关于利用热熔合反应合成 118 号之后的新元素, 截面的预言也存在很大的差别^[51, 121, 136–139]。例如, 对于 $^{50}\text{Ti} + ^{249}\text{Bk}$ 这个反应体系, 理论预言的合成 119 号元素的最大截面分别是 35 fb^[139], 50 fb^[51], 110 fb^[121] 和 570 fb^[138]。

因此, 不论是对于冷熔合反应, 还是对于热熔合反应, 不同的模型之间存在着严重的分歧。这些分歧主要源于以下两个方面: (1) 针对前述合成超重核的三步过程, 不同的模型基于不同的假设, 尤其是描述复合核形成过程时所采用的假设差别很大, 因而导致不同的模型给出的熔合概率 P_{CN} 可以相差几个数量级^[119, 140], 如图 6 所示; (2) 在计算反应截面, 尤其是计算复合核存活概率时, 所采用的核结构信息具有很大的不确定性。因此, 在超重核合成机制研究中, 一方面需要恰当地描述重离子反应机制, 另一方面, 需要大量可靠的核结构信息^[53]。

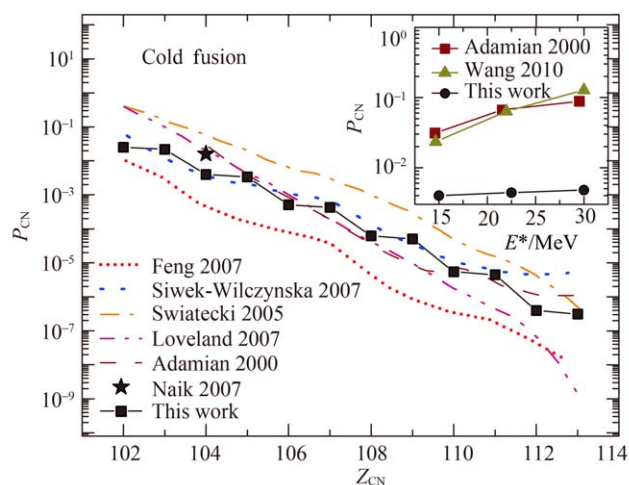


图 6 (在线彩图) 针对重离子熔合蒸发反应合成超重核的熔合过程, 不同的理论模型给出的熔合概率 P_{CN} , 取自文献^[119]

同国内外很多研究组一样,多年来,我们针对上述问题,对合成超重核的三个阶段的每一个阶段都开展了深入、系统的研究。针对俘获过程,我们发展了一个经验耦合道模型,用于描述近库仑位垒重离子熔合反应中的俘获截面,系统地研究了二百多个反应体系的俘获激发函数,结果表明,这个经验耦合道模型能够较好地描述近库仑位垒能区的俘获截面^[142–145]。我们期望,这个模型将对合成超重核的反应体系的俘获激发函数提供理论预言。我们还系统地研究了破裂反应道对垒上俘获截面的影响,研究表明,只有立即型破裂会影响到俘获过程,而且破裂效应对俘获的影响可能是一个阈效应^[146, 147]。

针对不同的模型给出的熔合概率 P_{CN} 相差非常大的问题,既需要系统研究,通过与实验比较来约束唯象模型,也需要利用微观输运模型(包括时间相关的Hartree-Fock理论^[148–151]、多体关联动力学模型^[152, 153]以及量子分子动力学模型^[154–156]等)研究熔合机制^[141, 157–165]。重离子熔合是一个典型的非平衡过程,研究熔合机制,不仅有助于深入了解超重核合成过程,而且对于探索非平衡过程 also 具有重要意义。理论上,为描述重离子熔合,往往需要引入很多近似;基于不同的近似,发展了很多描述原子核熔合的唯象模型。然而,重离子熔合的微观机制,特别是相对运动的集体动能如何耗散到内禀自由度,依然是一个有待解决的关键问题。利用微观模型,数值模拟熔合这一量子多体过程,可以获得熔合反应过程中的耗散机制、涨落行为等微观信息。我们利用微观的多体动力学模型——改进的量子分子动力学(ImQMD)模型,数值模拟了低能重离子熔合过程,提取出了刻画朗之万动力学的宏观输运参数,包括随机力的强度与关联函数、摩擦系数等^[141, 157, 158]。这些研究揭示出,在熔合过程中,当两核跨越它们之间的库仑位垒时,体系的每一侧感受到的随机力会出现非高斯分布,见图7。随机力的非高斯分布与两核之间相对运动的集体动能向内禀自由度的耗散过程密切相关。进一步,该工作揭示出,在两核跨越库仑位垒时,摩擦系数特别大,随机力的时间关联非常强。考察随机力的时间关联函数还揭示出,在熔合过程中,存在明显的记忆效应。

针对存活过程,我们系统研究了激发态超重复合核存活概率,揭示出壳效应对激发态超重核的稳定性和存活概率的重要影响^[166, 167]。我们还针对复合核存活过程中的关键参量——裂变位垒,发展了同时包括非轴对称形变与八极形变等形状自由度、多维形变约束(Multidimensionally-constrained,

简称MDC)的协变密度泛函理论^[168–170],包括相对论平均场(MDC-RMF)模型^[168]及相对论Hartree-Bogoliubov(MDC-RHB)模型^[169]。为检验上述模型,我们首先研究了锕系核的多维形变势能曲面。结果表明,上述理论可以自洽描述与裂变过程相关的形状自由度,包括非轴对称形变、八极形变等,除了八极形变,非轴对称形变也在第二个裂变位垒(外垒)处起重要作用^[171]。

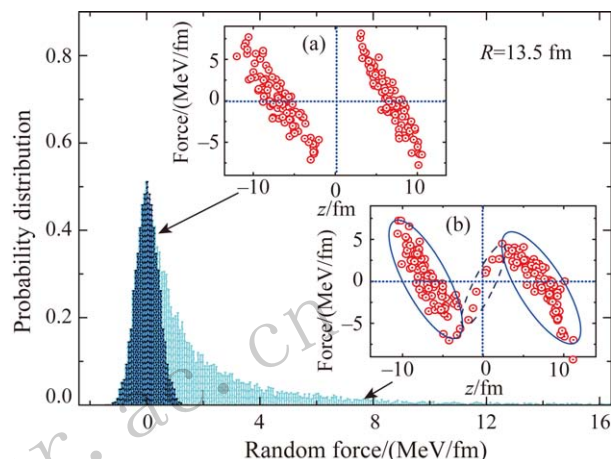


图7 (在线彩图) ^{90}Zr 与 ^{90}Zr 对心碰撞,质心距离为13.5 fm时整个体系的每一侧感受到的随机力的分布。蓝色区域为对称的高斯分布,插图(a)显示了其中的一个典型碰撞事例;绿色区域为非对称分布,插图(b)显示了其中的一个典型碰撞事例。取自文献^[141]

4.3.2 多核子转移反应

在第3节讨论合成超重核遇到的困难时提到,解决利用重离子熔合蒸发反应只能合成缺中子的超重核这一困难的一个可能途径是通过多核子转移来合成超重核。实验上,利用这种方法只合成到了 $Z = 100$ 附近的原子核,离超重核区还有一定的距离^[45–47]。近年来,理论上的相关探索越来越多^[129, 164, 172–180]。在文献^[164]中,王宁和郭璐利用ImQMD模型和时间相关的Hartree-Fock理论,研究了质心系入射能量为440 MeV下 $^{154}\text{Sm} + ^{160}\text{Gd}$ 这个反应体系的熔合过程。虽然两个模型给出的熔合概率均为0,但是却得到了40多个质子数介于58和76之间、丰中子的多核子转移产物,而且生成这些丰中子核的截面相当可观,在 μb 到 mb 之间,见图8。

5 总结与展望

本文评述了超重原子核与新元素研究进展。引言部分介绍了超重原子核与超重元素研究的背景及理论预

言, 给出了超重核存在的根源、理论预言的基本情况等。第 2 节讨论了实验合成超重核取得的进展以及 113, 115, 117 和 118 号新元素的命名情况。针对合成更重的超重元素面临的困难, 第 3 节主要讨论了利用重离子熔合蒸发反应合成超重核的截面极小以及所合成的超重核

都分布在缺中子区等情况。第 4 节综述了近年来国内外同行在超重原子核结构性质、衰变、裂变以及合成等方面的理论研究中取得的进展, 包括超重核区的幻数和超重岛的位置、超重核的稳定性以及利用重离子熔合蒸发反应和多核子转移反应来合成超重核的机制。

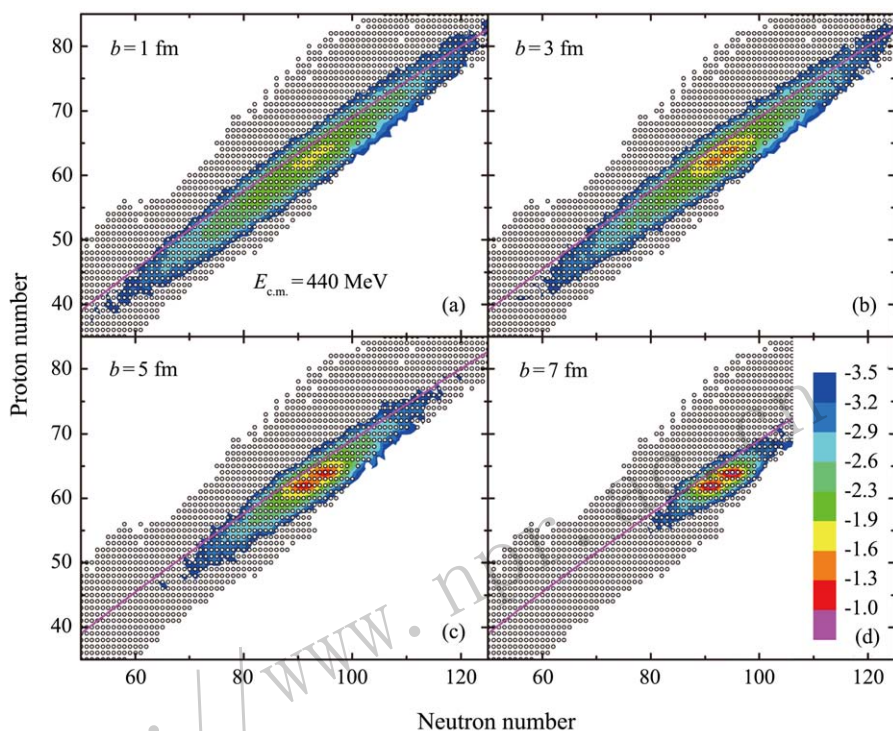


图 8 (在线彩图) $^{154}\text{Sm} + ^{160}\text{Gd}$ 反应 (质心系入射能量 440 MeV) 的多核子转移产物分布, 取自文献[164]

超重稳定岛的探索涉及一系列基本的科学问题。例如, 元素存在的上限在哪里? 超重元素的化学性质是否仍然符合现有元素周期律? 超重核区的幻数有哪些? 是否存在稳定或者寿命与地球年龄相近的超重原子核? 是否存在奇特形状的超重原子核? 是否存在多个超重岛? 如何登上超重岛? 等等。除了上述科学意义以外, 由于合成超重核具有极大的技术难度, 相关研究也是人类认识自然的能力和—个国家科技水平的最好展示。此外, 超重稳定岛的探索可能具有重大的应用前景。

到目前, 科学家利用重离子熔合蒸发反应, 已经合成到了 118 号元素, 这些元素填满了元素周期表的第 7 行。正如国际纯粹与应用物理联合会前主席 Cecilia Jarlskog 教授所说, 103 号及之后的元素都是在实验室里利用物理的手段和设备生成并鉴别的, 具体地, 是通过原子核反应合成并利用核探测器鉴别的, 118 号之后的元素也极有可能如此[181]。

然而, 合成更重的超重元素或包含更多中子的超重原子核, 核物理学家面临着很多困难和挑战, 包括: 利

用重离子熔合蒸发反应合成超重核的截面极小且只能合成缺中子超重核, 利用多核子转移反应尚无法到达超重核区, 如何鉴别长寿命的超重核, 等等。为解决这些困难, 需要理论家与实验家密切结合, 深入研究超重原子核结构性质、衰变、裂变以及合成机制。具体地, 在超重核结构性质方面, 发展能够更可靠外推的理论模型, 研究超重核区原子核的壳层结构、基态性质, 等; 在衰变和裂变方面, 重点关注 α 粒子的预形成机制, 微观研究裂变势能面和位垒, 探索裂变动力学、断点后过程, 等; 在合成机制方面, 系统研究合成超重核的三步过程, 微观研究重离子熔合机制, 探索多核子转移合成超重核的途径, 等。

致谢 作者感谢 D. Ackermann、G. G. Adamian、N. V. Antonenko、坂田文彦、包景东、陈列文、陈永寿、戴高峰、A. Diaz-Torres、冯兆庆、甘再国、N. V. Giai、郭璐、S. Heinz、贺晓涛、S. Hofmann、靳根明、李璐璐、李君清、李庆峰、李祝霞、刘玉鑫、刘忠、刘祖华、吕炳楠、孟杰、孟旭、G. Müzenberg、A. Nasirov、Yu.

Oganessian, P. R. S. Gomes、秦芝、任中洲、P. Ring、W. Scheid、C. Simenel、沈彩万、孙宝玺、孙向向、孙扬、H. Toki、温凯、王兵、王琨、王楠、王宁、王顺金、D. Vretenar、吴锡真、夏铨君、肖国青、许甫荣、徐瑚珊、杨华彬、叶沿林、叶巍、曾谨言、张丰收、张焕乔、张双全、张玉虎、张肇西、张振华、张志远、赵恩广、赵杰、赵维娟、赵宇亮、赵玉民、周小红、朱胜江、邹冰松、A. S. Zubov、左维等的讨论或合作。感谢中国科学院理论物理研究所孟旭同学制作了本文的图1。本文部分计算工作得到中国科学院理论物理研究所及理论物理国家实验室高性能计算平台和中国科学院计算机网络信息中心超级计算中心的支持。

参考文献:

- [1] HOFMANN S, MÜNZENBERG G. *Rev Mod Phys*, 2000, **72**: 733.
- [2] OGANESSION Y T, SOBICZEWSKI A, TER-AKOPIAN G M. *Phys Scr*, 2017, **92**: 023003
- [3] MORITA K. *Nucl Phys A*, 2015, **944**: 30.
- [4] INDELICATO P, KARPOV A. *Nature*, 2013, **498**: 40.
- [5] ZHOU S G. *Phys*, 2014, **43**: 817. (in Chinese)
(周善贵. 物理, 2014, **43**: 817.)
- [6] MYERS W D, SWIATECKI W J. *Nucl Phys*, 1966, **81**: 1.
- [7] WONG C Y. *Phys Lett*, 1966, **21**: 688.
- [8] SOBICZEWSKI A, GAREEV F, KALINKIN B. *Phys Lett*, 1966, **22**: 500.
- [9] STRUTINSKY V M. *Yad Fiz*, 1966, **3**: 614.
- [10] MELDNER H. *Arkiv Fysik*, 1967, **36**: 593. *Proceedings of the Lysekil Symposium: Nuclides far off the Stability Line*, Aug. 21–27, 1966, Sweden.
- [11] NILSSON S G, TSANG C F, SOBICZEWSKI A, *et al.* *Nucl Phys A*, 1969, **131**: 1
- [12] MOSEL U, GREINER W. *Z Phys A*, 1969, **222**: 261.
- [13] SEIFE C A. *Science*, 2005, **309**: 78.
- [14] HERRMANN G. *Nature*, 1979, **280**: 543.
- [15] DELLINGER F, KUTSCHERA W, FORSTNER O, *et al.* *Phys Rev C*, 2011, **83**: 015801.
- [16] TER-AKOPIAN G M, DMITRIEV S N. *Nucl Phys A*, 2015, **944**: 177.
- [17] CAI S Y. *Man-made elements*[M]. Shanghai Popular Science Press, 2006. (in Chinese)
(蔡善钰. 人造元素[M]. 上海科学普及出版社, 2006.)
- [18] XU H S, ZHOU X H, XIAO G Q, *et al.* *Nucl Phys Rev*, 2003, **20**: 76. (in Chinese)
(徐瑚珊, 周小红, 肖国青, 等. 原子核物理评论, 2003, **20**: 76.)
- [19] OGANESSION Y. Fusion and fission induced by heavy ions. In BRAUN-MUNZINGER P, GELBKE C K, HARNEY H L, editors, *Proceedings of Symposium on Classical and Quantum Mechanical Aspects of Heavy Ion Collisions*, Heidelberg, Germany, Oct. 2-5, 1974, volume 33 of *Lecture Notes in Physics*. Springer-Verlag, 1975: 221.
- [20] WANG Y. *China Terminology*, 2017, **19**(2): 46. (in Chinese)
(王颖霞. 中国科技术语, 2017, **19**(2): 46.)
- [21] KAROL P J, BARBER R C, SHERRILL B M, *et al.* *Pure Appl Chem*, 2016, **88**: 139.
- [22] KAROL P J, BARBER R C, SHERRILL B M, *et al.* *Pure Appl Chem*, 2016, **88**: 155.
- [23] LUO Y X. *Chin Sci Bull*, 2016, **61**: 2326. (in Chinese)
(罗亦孝. 科学通报, 2016, **61**: 2326.)
- [24] China National Committee for Terms in Sciences and Technologies. *China Terminology*, 2017, **19**(2): 25. (in Chinese)
(全国科学技术名词审定委员会. 中国科技术语, 2017, **19**(2): 25.)
- [25] ZHANG H Q. *China Terminology*, 2017, **19**(2): 26. (in Chinese)
(张焕乔. 中国科技术语, 2017, **19**(2): 26.)
- [26] ZHOU S G. *China Terminology*, 2017, **19**(2): 35. (in Chinese)
(周善贵. 中国科技术语, 2017, **19**(2): 35.)
- [27] CAI L. *China Terminology*, 2017, **19**(2): 38. (in Chinese)
(才磊. 中国科技术语, 2017, **19**(2): 38.)
- [28] QIN Z, WU X L, DING H J, *et al.* *Nucl Phys Rev*, 2006, **23**: 404.
- [29] GAN Z G, QIN Z, FAN H M, *et al.* *Eur Phys J A*, 2001, **10**: 21.
- [30] GAN Z G, GUO J S, WU X L, *et al.* *Eur Phys J A*, 2004, **20**: 385.
- [31] ZHANG Z Y, MA L, GAN Z G, *et al.* *Nucl Instr Meth B*, 2013, **317**, Part B: 315.
- [32] ZHANG Z Y, GAN Z G, MA L, *et al.* *Chin Phys Lett*, 2012, **29**: 012502.
- [33] ZHANG Z Y, GAN Z G, MA L, *et al.* *Phys Rev C*, 2014, **89**: 014308.
- [34] MA L, ZHANG Z Y, GAN Z G, *et al.* *Phys Rev C*, 2015, **91**: 051302(R).
- [35] YANG H B, ZHANG Z Y, WANG J G, *et al.* *Eur Phys J A*, 2015, **51**: 88.
- [36] SUN M D, LIU Z, HUANG T H, *et al.* 2017, **771**: 303.
- [37] GAN Z G, JIANG J, YANG H B, *et al.* *Chin Sci Bull*, 2016, **61**: 2502. (in Chinese)
(甘再国, 姜舰, 杨华彬, 等. 科学通报, 2016, **61**: 2502.)
- [38] 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.
- [39] OGANESSION Y T, UTYONKOV V K, LOBANOV Y V, *et al.* *Phys Rev C*, 2009, **79**: 024603.
- [40] 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.
- [41] 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 (2011)

- PHN-NUSTAR-SHE-02, 2012.
- [42] HOFMANN S, HEINZ S, MANN R, *et al.* Eur Phys J A, 2016, **52**:116.
- [43] MORITA K, MORIMOTO K, KAJI D, *et al.* J Phys Soc Jpn, 2012, **81**: 103201.
- [44] ZHOU X H. High Intensity Heavy Ion Accelerator Facility (HIAF) and its Physics Goals, 2016. Talk given at the CUSTIPEN-IMP-PKU Workshop on Physics of Exotic Nuclei, Dec. 12-15, 2016, Huizhou, China.
- [45] DEVARAJA H M, HEINZ S, BELIUSKINA O, *et al.* Phys Lett B, 2015, **748**: 199.
- [46] BARRETT J S, LOVELAND W, YANEZ R, *et al.* Phys Rev C, 2015, **91**: 064615.
- [47] HEINZ S, DEVARAJA H M, BELIUSKINA O, *et al.* Euro Phys J A, 2016, **52**: 278.
- [48] XU H S, HUANG T H, SUN Z Y, *et al.* Nucl Phys Rev, 2006, **23**: 359. (in Chinese)
(徐珊珊, 黄天衡, 孙志宇, 等. 原子核物理评论, 2006, **23**: 359.)
- [49] FENG Z Q, JIN G M, HUANG M H, *et al.* Chin Phys Lett, 2007, **24**: 2551.
- [50] SHEN C, ABE Y, BOILLEY D, *et al.* Int J Mod Phys E, 2008, **17**: 66.
- [51] ZAGREBAEV V, GREINER W. Phys Rev C, 2008, **78**: 034610.
- [52] LIU Z H, BAO J D. Phys Rev C, 2009, **80**: 034601.
- [53] LI L L, LU B N, WANG N, *et al.* Nucl Phys Rev, 2014, **31**: 253. (in Chinese)
(李璐璐, 吕炳楠, 王楠, 等. 原子核物理评论, 2014, **31**: 253.)
- [54] LU B N, ZHAO J, ZHAO E G, *et al.* Superheavy nuclei and fission barriers. In MENG J, editor, Relativistic Density Functional for Nuclear Structure, volume 10 of International Review of Nuclear Physics, chapter 5. Superheavy nuclei and fission barriers, 171–217. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2016.
- [55] SOBICZEWSKI A, POMORSKI K. Prog Part Nucl Phys, 2007, **58**: 292.
- [56] ZHANG W, MENG J, ZHANG S, *et al.* Nucl Phys A, 2005, **753**: 106.
- [57] MO Q, LIU M, WANG N. Phys Rev C, 2014, **90**: 024320.
- [58] RUTZ K, BENDER M, BURVENICH T, *et al.* Phys Rev C, 1997, **56**: 238.
- [59] ZHOU X R, QIU C, SAGAWA H. Effect of Tensor Interaction on the Shell Structure of Superheavy Nuclei. In BAI H B, MENG J, ZHAO E G, *et al.* editors, Nuclear Structure in China 2010 - Proceedings of the 13th National Conference on Nuclear Structure in China, Chi-Feng, Inner Mongolia, China, 24 - 30 July 2010. World Scientific, 2011: 259.
- [60] LI J J, LONG W H, MARGUERON J, *et al.* Phys Lett B, 2014, **732**: 169.
- [61] PATYK Z, SOBICZEWSKI A. Nucl Phys A, 1991, **533**: 132.
- [62] PEI J C, XU F R, WU Z Y, *et al.* Nucl Phys Rev, 2003, **20**: 116. (in Chinese)
(裴俊琛, 许甫荣, 吴哲英, 等. 原子核物理评论, 2003, **20**: 116.)
- [63] KOURA H, CHIBA S. J Phys Soc Jpn, 2013, **82**: 014201.
- [64] ISMAIL M, ELLITHI A Y, ADEL A, *et al.* Chin Phys C, 2016, **40**: 124102.
- [65] XIA C J. Sci China-Phys Mech Astron, 2016, **46**: 023021. (in Chinese)
(夏铨君. 中国科学: 物理学力学天文学, 2016, **46**: 023021.)
- [66] XIA C J, PENG G X, ZHAO E G, *et al.* Science Bulletin, 2016, **61**: 172.
- [67] XIA C J, PENG G X, ZHAO E G, *et al.* Phys Rev D, 2016, **93**: 085025.
- [68] RUEDA J A, WU Y B, XUE S S. Surface tension of compressed, superheavy atoms. arXiv:1701.08146 [nucl-th], 2017.
- [69] ZHANG H F, GAO Y, WANG N, *et al.* Phys Rev C, 2012, **85**: 014325.
- [70] ZHANG S, ZHANG Y, CUI J, *et al.* Phys Rev C, 2017, **95**: 014311.
- [71] ZHOU S G. Structure of Exotic Nuclei: A Theoretical Review[C]//KIBEDI T, LEINWEBER D, SIMENEL C, *et al.* ed. PoS(INPC2016), 2017: 373.
- [72] WIENHOLTZ F, BECK D, BLAUM K, *et al.* Nature, 2013, **498**: 346.
- [73] STEPPENBECK D, TAKEUCHI S, AOI N, *et al.* Nature, 2013, **502**: 207.
- [74] GARCIA RUIZ R F, BISSELL M L, BLAUM K, *et al.* Nat Phys, 2016, **12**: 594.
- [75] WEN K, ZHANG Z H, ZHAO E G, *et al.* Sci Sin-Phys Mech Astron, 2012, **42**: 22. (in Chinese)
(温凯, 张振华, 赵恩广, 等. 中国科学: 物理学力学天文学, 2012, **42**: 22.)
- [76] ĆWIOK S, HOFMANN S, NAZAREWICZ W. Nucl Phys A, 1994, **573**: 356.
- [77] MUNTIAN I, PATYK Z, SOBICZEWSKI A. Phys Rev C, 1999, **60**: 041302(R).
- [78] SOBICZEWSKI A, MUNTIAN I, PATYK Z. Phys Rev C, 2001, **63**: 034306.
- [79] PARKHOMENKO A, SOBICZEWSKI A. Acta Phys Pol B, 2004, **35**: 2447.
- [80] PARKHOMENKO A, SOBICZEWSKI A. Acta Phys Pol B, 2005, **36**: 3115.
- [81] ADAMIAN G G, ANTONENKO N V, SCHEID W. Phys Rev C, 2010, **81**: 024320.
- [82] ADAMIAN G G, ANTONENKO N V, KUKLIN S N, *et al.* Phys Rev C, 2010, **82**: 054304.
- [83] ADAMIAN G G, ANTONENKO N V, MALOV L A, *et al.* Phys Part Nucl, 2010, **41**: 1101.
- [84] ADAMIAN G G, ANTONENKO N V, KUKLIN S N, *et al.* Phys Rev C, 2011, **84**: 024324.
- [85] XU F R, ZHAO E G, WYSS R, *et al.* Phys Rev Lett, 2004, **92**: 252501.
- [86] LIU H L, XU F R, WALKER P M, *et al.* Phys Rev C, 2011, **83**: 011303.
- [87] LIU H L, XU F R, WALKER P M. Phys Rev C, 2012, **86**:

- 011301(R).
- [88] BENDER M, RUTZ K, REINHARD P G, *et al.* Phys Rev C, 1998, **58**: 2126.
- [89] AFANASJEV A V, KHOO T L, FRAUENDORF S, *et al.* Phys Rev C, 2003, **67**: 024309.
- [90] BENDER M, BONCHE P, DUGUET T, *et al.* Nucl Phys A, 2003, **723**: 354.
- [91] DELAROCHE J P, GIROD M, GOUTTE H, *et al.* Nucl Phys A, 2006, **771**: 103.
- [92] JOLOS R V, MALOV L A, SHIRIKOVA N Y, *et al.* J Phys G: Nucl Part Phys, 2011, **38**: 115103.
- [93] ZHUANG K, LI Z B, LIU Y X. Commun Theor Phys, 2012, **57**: 271.
- [94] SUN Y, LONG G L, AL-KHUDAIR F, *et al.* Phys Rev C, 2008, **77**: 044307.
- [95] CHEN Y S, SUN Y, GAO Z C. Phys Rev C, 2008, **77**: 061305(R).
- [96] AL-KHUDAIR F, LONG G L, SUN Y. Phys Rev C, 2009, **79**: 034320.
- [97] CUI J W, ZHOU X R, CHEN F Q, *et al.* Phys Rev C, 2014, **90**: 014321.
- [98] EGIDO J L, RING P. J Phys G: Nucl Phys, 1982, **8**: L43.
- [99] EGIDO J, RING P. Nucl Phys A, 1984, **423**: 93.
- [100] HE X T, REN Z Z, LIU S X, *et al.* Nucl Phys A, 2009, **817**: 45.
- [101] ZHANG Z H. Theoretical investigation of the spectroscopy of the transfermium and the super-heavy nuclei[D]. Beijing: Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2012. (in Chinese)
(张振华. 超锕核以及超重核谱学的理论研究[D]. 北京: 中国科学院理论物理研究所, 2012.)
- [102] ZHANG Z H, WEN K, HE X T, *et al.* Nucl Phys Rev, 2013, **30**: 268. (in Chinese)
(张振华, 温凯, 贺晓涛, 等. 原子核物理评论, 2013, **30**: 268.)
- [103] ZHANG Z H, ZENG J Y, ZHAO E G, *et al.* Phys Rev C, 2011, **83**: 011304(R).
- [104] ZHANG Z H, HE X T, ZENG J Y, *et al.* Phys Rev C, 2012, **85**: 014324.
- [105] ZHANG Z H, MENG J, ZHAO E G, *et al.* Phys Rev C, 2013, **87**: 054308.
- [106] PIERCE T E, BLANN M. Nucl Phys A, 1967, **106**: 14.
- [107] NILSSON S G, NIX J R, SOBICZEWSKI A, *et al.* Nucl Phys A, 1968, **115**: 545.
- [108] NILSSON S G, THOMPSON S G, TSANG C F. Phys Lett B, 1969, **28**: 458.
- [109] FISET E O, NIX J R. Nucl Phys A, 1972, **193**: 647.
- [110] XU C, REN Z, GUO Y. Phys Rev C, 2008, **78**: 044329.
- [111] KIREN O V, GUDENNAVER S B, BUBBLY S G. Rom J Phys, 2012, **57**: 1335.
- [112] STASZCZAK A, BARAN A, NAZAREWICZ W. Phys Rev C, 2013, **87**: 024320.
- [113] QIAN Y, REN Z. Phys Rev C, 2014, **90**: 064308.
- [114] SANTHOSH K P, PRIYANKA B. Nucl Phys A, 2015, **940**: 21.
- [115] BAO X J, GUO S Q, ZHANG H F, *et al.* J Phys G: Nucl Part Phys, 2015, **42**: 085101.
- [116] MÖLLER P. EPJ Web Conf, 2016, **131**: 03002.
- [117] SUN X D, DENG J G, XIANG D, *et al.* Phys Rev C, 2017, **95**: 044303.
- [118] JIN G M. Nucl Phys Rev, 2003, **20**: 71. (in Chinese)
(靳根明. 原子核物理评论, 2003, **20**: 71.)
- [119] ZHU L, XIE W J, ZHANG F S. Phys Rev C, 2014, **89**: 024615.
- [120] ADAMIAN G, ANTONENKO N, SCHEID W. Clustering Effects Within the Dinuclear Model. In BECK C, editor, Lecture Notes in Physics, volume 848, 165–227. Berlin Heidelberg: Springer, 2012.
- [121] WANG N, ZHAO E G, SCHEID W, *et al.* Phys Rev C, 2012, **85**: 041601(R).
- [122] SIWEK-WILCZYNSKA K, CAP T, KOWAL M, *et al.* Phys Rev C, 2012, **86**: 014611.
- [123] LIANG Y J, ZHU M, LIU Z H, *et al.* Phys Rev C, 2012, **86**: 037602.
- [124] WONG C Y. Phys Rev C, 2012, **86**: 064603.
- [125] LIU Z H, BAO J D. Phys Rev C, 2013, **87**: 034616.
- [126] ZHANG J, WANG C, REN Z. Nucl Phys A, 2013, **909**: 36.
- [127] NASIROV A, KIM K, MANDAGLIO G, *et al.* Euro Phys J A, 2013, **49**: 147.
- [128] BAO X J, GAO Y, LI J Q, *et al.* Phys Rev C, 2015, **91**: 011603(R).
- [129] ZHU L, FENG Z Q, ZHANG F S. J Phys G: Nucl Part Phys, 2015, **42**: 085102.
- [130] BAO X J, GAO Y, LI J Q, *et al.* Phys Rev C, 2015, **92**: 034612.
- [131] LIU L, SHEN C, LI Q, *et al.* Eur Phys J A, 2016, **52**: 35.
- [132] BAO X J, GAO Y, LI J Q, *et al.* Phys Rev C, 2016, **93**: 044615.
- [133] HONG J, ADAMIAN G, ANTONENKO N. Phys Lett B, 2017, **764**: 42.
- [134] ZHU L, SU J, HUANG C Y, *et al.* Chin Phys C, 2016, **40**: 124105.
- [135] FENG Z Q, JIN G M, LI J Q, *et al.* Phys Rev C, 2007, **76**: 044606.
- [136] LIU Z H, BAO J D. Phys Rev C, 2009, **80**: 054608.
- [137] NASIROV A K, MANDAGLIO G, GIARDINA G, *et al.* Phys Rev C, 2011, **84**: 044612.
- [138] LIU Z H, BAO J D. Phys Rev C, 2011, **84**: 031602(R).
- [139] WANG N, TIAN J, SCHEID W. Phys Rev C, 2011, **84**: 061601(R).
- [140] NAIK R S, LOVELAND W, SPRUNGER P H, *et al.* Phys Rev C, 2007, **76**: 054604.
- [141] WEN K, SAKATA F, LI Z X, *et al.* Phys Rev Lett, 2013, **111**: 012501.
- [142] WANG B. Systematic study of the heavy-ion fusion dynamics at energies near the Coulomb barrier[D]. Zhengzhou University, 2016. (in Chinese)
(王兵. 近库仑位垒重离子熔合反应动力学的系统研究[D]. 郑州大学, 2016.)

- [143] WANG B, ZHAO W, ZHAO E, *et al.* Sci China-Phys Mech Astron, 2016, **59**: 642002.
- [144] WANG B, WEN K, ZHAO W J, *et al.* Chinese Science Bulletin, 2017, **62**: 2480. (in Chinese)
(王兵, 温凯, 赵维娟, 等. 科学通报, 2017, **62**: 2480.)
- [145] WANG B, WEN K, ZHAO W J, *et al.* At Data Nucl Data Tables, 2017, **114**: 281.
- [146] WANG B, ZHAO W J, GOMES P R S, *et al.* Phys Rev C, 2014, **90**: 034612.
- [147] WANG B, ZHAO W J, DIAZ-TORRES A, *et al.* Phys Rev C, 2016, **93**: 014615.
- [148] NEGELE J W. Rev Mod Phys, 1982, **54**: 913.
- [149] GUO L, MARUHN J A, REINHARD P G. Phys Rev C, 2007, **76**: 014601.
- [150] GUO L, MARUHN J A, REINHARD P G, *et al.* Phys Rev C, 2008, **77**: 041301(R).
- [151] SIMENEL C. Eur Phys J A, 2012, **48**: 152.
- [152] WANG S J. Phys Lett B, 1983, **133**: 27.
- [153] WANG S J, CASSING W. Ann Phys, 1985, **159**: 328.
- [154] AICHELIN J. Phys Rep, 1991, **202**: 233.
- [155] WANG N, LI Z, WU X. Phys Rev C, 2002, **65**: 064608.
- [156] WANG N, LI Z, WU X, *et al.* Phys Rev C, 2004, **69**: 034608.
- [157] WEN K. A Study on the Microscopic Mechanism of Heavy Ion Fusion Reactions Based on the Quantum Molecular Dynamics Simulations[D]. Beijing: Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
(温凯. 基于量子分子动力学模型研究重离子熔合的微观机制[D]. 北京: 中国科学院理论物理研究所, 2014.)
- [158] WEN K, SAKATA F, LI Z X, *et al.* Phys Rev C, 2014, **90**: 054613.
- [159] DAI G F. Dissipation dynamics in time-dependent Hartree-Fock theory[D]. Beijing: Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
(戴高峰. 基于时间相关的Hartree-Fock 理论研究重离子碰撞中的能量耗散机制[D]. 北京: 中国科学院理论物理研究所, 2014.)
- [160] DAI G F, GUO L, ZHAO E G, *et al.* Sci China-Phys Mech Astron, 2014, **57**: 1618.
- [161] DAI G F, GUO L, ZHAO E G, *et al.* Phys Rev C, 2014, **90**: 044609.
- [162] WASHIYAMA K. Phys Rev C, 2015, **91**: 064607.
- [163] JIANG X, YAN S, MARUHN J A. Phys Rev C, 2013, **88**: 044611.
- [164] WANG N, GUO L. Phys Lett B, 2016, **760**: 236.
- [165] TOHYAMA M, UMAR A S. Phys Rev C, 2016, **93**: 034607.
- [166] XIA C J. Systematic Study of Survival Probability of Excited Superheavy Nuclei[D]. Beijing University of Technology, 2011. (in Chinese)
(夏铖君. 激发态超重核存活几率的系统研究[D]. 北京工业大学, 2011.)
- [167] XIA C J, SUN B X, ZHAO E G, *et al.* Sci China-Phys Mech Astron, 2011, **54** (Suppl. 1): s109.
- [168] LU B N, ZHAO J, ZHAO E G, *et al.* Phys Rev C, 2014, **89**: 014323.
- [169] ZHAO J, LU B N, ZHAO E G, *et al.* Phys Rev C, 2017, **95**: 014320.
- [170] ZHOU S G. Phys Scr, 2016, **91**: 063008.
- [171] LU B N, ZHAO E G, ZHOU S G. Phys Rev C, 2012, **85**: 011301(R).
- [172] ZHAO K, LI Z, WANG N, *et al.* Phys Rev C, 2015, **92**: 024613.
- [173] LI C, ZHANG F, LI J, *et al.* Phys Rev C, 2016, **93**: 014618.
- [174] ZHAO K, LI Z, ZHANG Y, *et al.* Phys Rev C, 2016, **94**: 024601.
- [175] ZHU L, SU J, XIE W J, *et al.* Phys Rev C, 2016, **94**: 054606.
- [176] LI C, WEN P, LI J, *et al.* Nucl Sci Tech, 2017, **28**: 110.
- [177] WEN P W, FENG Z Q, ZHANG F, *et al.* Chin Phys C, 2017, **41**: 064102.
- [178] WEN P W, FENG Z Q, ZHANG F, *et al.* Chin Phys Letters, 2017, **34**: 042501.
- [179] YAO H, WANG N. Phys Rev C, 2017, **95**: 014607.
- [180] ZHU L, ZHANG F S, WEN P W, *et al.* Phys Rev C, 2017, **96**: 024606.
- [181] JARLSKOG C. EPJ Web Conf, 2016, **131**: 06004.

Study on Superheavy Nuclei and Superheavy Elements

ZHOU Shangui^{1,2,3,4,1)}

(1. CAS Key Laboratory of Frontiers in Theoretical Physics, Institute of Theoretical Physics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. School of Physical Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator, Lanzhou 730000, China;

4. Synergetic Innovation Center for Quantum Effects and Application, Hunan Normal University,
Changsha 410081, China)

Abstract: The exploration of charge and mass limits of atomic nuclei and the synthesis of long-lived or stable superheavy nuclei (SHN) are at the frontier of modern nuclear physics. In the 1960s, based on the stability originating from quantum shell effects, the possible existence of an island of stability around $^{298}114$ was predicted. This prediction advanced the construction of heavy ion accelerators and detectors and the development of heavy ion physics. So far, superheavy elements (SHE) with Z up to 118 have been synthesized via heavy ion fusion reactions in laboratories. Recently the IUPAC/IUPAP Joint Working Party (JWP) concluded that criteria for the discovery of new elements have been met for those with $Z = 113, 115, 117$ and 118 . Therefore the seventh period of the periodic table of elements is completed. To synthesize even heavier elements or more neutron-rich SHN by using heavy ion fusion reactions, one confronts many challenges. More efforts should be made to study the properties of SHN both experimentally and theoretically. In this short review on the study on SHN and SHE, we will first introduce the background and theoretical predictions of SHN, including the origin of the possible existence of SHN and the predicted island of stability of SHN, *etc.* Then we will present progresses made up to now concerning the synthesis of SHN and the naming of the four new elements. As for the challenges nuclear physicists confront in synthesizing even heavier SHEs, we will detail those connected with heavy ion fusion-evaporation reactions, namely, the tiny cross sections to produce SHN and the fact that only neutron-deficient SHNs can be synthesized. Finally we will discuss some theoretical progresses on the study of SHN, including the structure of SHN and proton and neutron magic numbers after ^{208}Pb , the stability and the synthesis mechanism of SHN as well as what we should focus on in the future.

Key words: superheavy nuclei; new element; heavy-ion physics

Received date: 20 Feb. 2017; **Revised date:** 12 Apr. 2017

Foundation item: National Science Fund for Distinguished Young Scholars (11525524); National Key Basic Research Program of China (2013CB834400); National Natural Science Foundation of China (11621131001, 11647601 and 11711540016); Key Research Program of Frontier Sciences of CAS

1) E-mail: sgzhou@itp.ac.cn.