

超重核质量与裂变位垒对合成超重新元素的关键影响

裴俊琛*, 李至博, 强雨, 管大为

北京大学物理学院, 核物理与核技术全国重点实验室, 北京 100871

* 联系人, E-mail: peij@pku.edu.cn

2025-09-02 收稿, 2025-11-18 修回, 2025-11-19 接受, 2025-11-20 网络版发表

国家自然科学基金(12475118, 12335007)资助

摘要 目前合成元素周期表第八周期开始的超重新元素成为国际上主要核物理实验室的重要科学目标. 实验上合成119号超重元素的截面极低, 可以选择的弹靶组合有限, 理论上需要准确地预估出最优碰撞能量. 精确的超重核质量对确定反应 Q 值十分关键, 同时有助于给出可靠的 α 衰变能量用于鉴别新元素和新同位素. 此外, 超重核裂变位垒高度及其能量依赖性对计算高激发超重复合核的存活概率与最优能量选取也十分重要. 我们在拟合Sk-SHE1能量密度泛函时考虑了超重核的 α 衰变能量实验值, 得到了一套高精度的微观超重核质量表. 我们还基于不同参数微观计算了能量相关的裂变位垒并研究了合成 $Z=115$ 与119超重核的生成截面. 这些工作为实验上合成超重新元素的束流能量选取这一关键问题提供了理论指引.

关键词 超重新元素, 超重核合成, 核质量, 裂变位垒

探索原子核存在的质量极限与元素周期表的尽头是一个重大的科学挑战. 目前核物理学家合成了118号超重元素, 填满了元素周期表的第七周期^[1]. 围绕着合成元素周期表第八周期开始的119, 120号超重新元素, 国际上形成了激烈的竞争. 合成114至118号元素可以采用 ^{48}Ca 作为弹核与铀系元素作为靶核, 但是合成119号元素需要采用更重的弹核, 因而反应机制存在很大差别. 到目前为止, 德国GSI、日本RIKEN、俄罗斯Dubna等主要实验室都没有成功合成新元素^[2]. 这对我们来说既是一个挑战也是一个机遇. 近年来, 俄罗斯升级了加速器装置, 建成了超重元素工厂(SHE Factory)^[3]. 美国Berkeley实验室采用 ^{50}Ti 弹核合成了Lv ($Z=116$)超重核^[4], 成为超重新元素合成的新势力. 中国科学院近代物理研究所近年来建成了高流强的重离子加速器CAFE2用于超重元素合成^[5], 成为超重新元素合成的有力竞争者.

超重核一般都是通过熔合蒸发反应合成, 可以分

为俘获、熔合、存活三个步骤^[6]. 其中, 俘获截面取决于两核之间库仑位垒的穿透概率. 熔合截面是穿过库仑位垒后粘在一起的弹靶形成复合核的概率, 可以由双核模型(dinuclear system model, DNS)描述^[6]. 双核模型考虑双核系统基于质量不对称度的位势面演化和准裂变的竞争, 在超重核合成理论中被广泛采用. 而存活概率取决于高激发复合核的裂变与多步中子蒸发之间竞争^[7,8]. 合成超重新元素的截面极其小, 达到飞巴(fb)量级. 选择合适的束流能量, 每年有可能观测1~2个事例. 但如果偏离最优束流能量2 MeV, 截面就可能下降一半^[3]. 合成超重新元素的弹靶组合选择有限, 因而理论上最关键的问题就是确定最优的束流能量. 目前超重核合成截面的计算还依赖较多的模型参数, 对外推到新的反应体系时存在很大的不确定度. 超重核由于强大的库仑排斥势而改变密度分布, 从而影响单粒子能级与壳结构. 从这个角度来说, 微观自治的密度泛函理论计算可以提供可靠的理论指引.

引用格式: 裴俊琛, 李至博, 强雨, 等. 超重核质量与裂变位垒对合成超重新元素的关键影响. 科学通报, 2026, 71: 927–932

Pei J, Li Z, Qiang Y, et al. Theoretical issues for synthesizing new superheavy elements: nuclear masses and fission barriers (in Chinese). Chin Sci Bull, 2026, 71: 927–932, doi: [10.1360/CSB-2025-5470](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5470)

1 高精度超重核质量的关键作用

精确的超重核质量对计算反应的 Q 值十分重要. 最优的质心系束流能量等于最优激发能减去反应 Q 值, 因而精确的超重核质量直接影响束流能量的选取. 目前超重核质量的实验值很稀缺, 实验值最重到 $Z = 110$ 核, 这离合成119, 120号新元素的区域很远. 实验上已经有了直到 $Z = 118$ 号元素的 α 衰变能, 但是这些 α 衰变链并没有连接到已知质量区. 目前已有很多原子核质量模型, 如宏观-微观模型、半唯象模型、微观模型、机器学习推断等. 有些模型在已知区精度很好, 但是在未知区可能有很大不确定度. 如不同的宏观-微观模型对已知核的质量描述精度很高, 但是在最重的超重区却存在很大分歧(~ 4 MeV)^[9], 这么大的质量不确定度对预言超重核合成的束流能量是不可接受的.

为了得到高精度的微观超重核质量, 我们优化了一套新的Skyrme能量密度泛函参数Sk-SHE1^[10]. 在优化的过程中, 我们加入了超重核的 α 衰变能作为约束条件. 超重核的 α 衰变链虽然没有连接到已知质量核, 但是多条 α 衰变链可以对最重区的核质量提供一个约束和支撑. 即使 α 衰变链接到已知质量核的同位素核上也能构成支撑. 已有的Skyrme参数拟合都没有考虑这一约束信息. 此外, 我们还采用了考虑两体质心运动的修正并包括高阶密度扩展项. 我们基于Skyrme-Hartree-Fock+BCS计算进行了大规模拟合, 所得参数见文献^[10]. 这样, 我们所得的 $Z \leq 110$ 超重区的结合能偏差一般小于1 MeV, 系统偏小约0.6 MeV. 这对超重区来说是一个相当高精度的微观超重核质量表. 通过比较发现, 我们的超重核质量与AME2020^[11]的外推很接近. 相较于其他模型, 微观模型有更可靠的预言能力. 基于我们的微观质量, 可以得到合成119号超重元素的反应 Q 值. 如表1所示, 不同的理论模型, 包括Sk-SHE1、UNEDF1^[12]、WS4^[13]、FRDM2012^[14]等, 给出的合成119号元素的反应 Q 值存在较大分歧. 我们的结果与WS4模型较为接近, 而FRDM则明显低估了超重区的结合能.

精确的超重核质量可以给出 α 衰变能, 这对实验上鉴别超重核很关键. 有些模型对核质量描述较好, 但是对 α 衰变能描述不好^[15]. 而有些模型对系统的 α 衰变能描述较好, 但是对质量描述有较大偏差^[15]. 我们基于Sk-SHE1参数计算的 α 衰变能在 $Z = 100 \sim 118$ 区能很好地符合实验值^[10]. 所得的 α 衰变能的均方根偏差小于

表1 不同模型计算的超重核合成反应的 Q 值(MeV)^{a)}

Table 1 Calculated reaction Q -values (MeV) by different models

模型	$^{48}\text{Ca}+^{243}\text{Am}$	$^{54}\text{Cr}+^{243}\text{Am}$	$^{50}\text{Ti}+^{249}\text{Bk}$
Sk-SHE1	-171.602	-208.395	-192.381
Sk-SHE1c	-171.00	-207.79	-191.78
UNEDF1	-172.485	-208.887	-193.498
WS4	-168.590	-207.191	-192.035
FRDM2012	-165.404	-204.673	-189.400
AME2020	-171.295#	-	-

a) Sk-SHE1c表示考虑了约0.6 MeV的系统偏差修正, #表示采用AME质量表的推断值

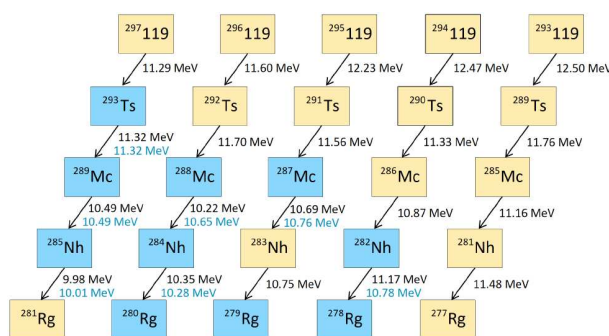


图1 基于Sk-SHE1参数计算的119同位素核的 α 衰变链的能量. 其中实验值为蓝色

Figure 1 Calculated alpha-decay chain energies (MeV) from $Z = 119$ isotopes using the Sk-SHE1 functional, and the experimental data are also shown in blue color

0.3 MeV, 见图1. 大部分的Skyrme参数给出的118的 α 衰变能比实验偏低1 MeV以上^[15], 而我们的结果既能很好地描述结合能又能很好地描述 α 衰变能. 但是相比于偶偶核, 对于奇奇核的 α 衰变能的描述整体偏差更大. 这是因为奇奇核的 α 衰变对单粒子能级结构更敏感. 一种半经验公式通过拟合 α 衰变能所预言的 $Z=119$ 超重核的 α 衰变能与我们的结果也很接近^[16]. 此外, 精确的核质量可以给出中子分离能. 中子分离能对计算复合核存活概率非常关键. 中子分离能有很强的奇偶效应, 所以需要拟合对关联强度参数. 我们所得的中子分离能与其他模型差别不大, 今后还可以调节对关联强度参数来进一步优化.

2 微观裂变位垒与多步存活概率

裂变是超重核合成中的一个主要阻碍因素. 裂变几率的计算十分依赖能量相关的裂变位垒, 所以基于微观密度泛函理论描述高激发复合超重核的裂变几率有重要意义. 微观计算可以自洽地描述原子核的量子

效应(对关联、壳效应等)随激发能增加而逐渐减弱的过程^[17]. 通过计算复合核自由能可以得到能量相关的裂变位垒, 包括位垒高度与曲率. 在2009年的工作中, 我们发现超重复合核的裂变位垒高度随激发能增加而降低的速度在不同核中很不一样^[17]. 相比于冷熔合核区, 热熔合核区的裂变位垒下降更慢, 从而增加高激发复合核的存活概率. 在2016年的工作中, 我们指出复合核裂变位垒的曲率也随激发能增加而减小, 有利于高激发核的存活^[18].

微观计算发现不对称裂变位垒下降很快, 从而解释了观测到的对称裂变模式在高激发裂变中的主导原因^[19]. 微观计算还发现, 在丰质子重核区某些核的裂变位垒比附近核下降更快, 因而实验上难以合成^[20]. 目前大部分超重核的裂变位垒计算主要依赖宏观-微观模型, 但是宏观-微观模型不能自治地处理裂变位垒的能量相关性, 所以需要采用阻尼因子参数来描述位垒下降的速度. 但是, 不同核区的位垒下降速度很不一样, 这对合成超重新元素也是一个很大的不确定度. 裂变位垒计算中, 非轴对称形变(γ 形变)与反射不对称形变(β_3 形变)的影响很大^[21,22]. γ 形变往往可以降低第一位垒高度2~3 MeV, 而 β_3 形变则可以显著降低外垒高度. 我们基于HFODD程序^[23]在三轴形变空间首次微观计算了能量相关的超重核裂变位垒, 但是计算量巨大.

计算复合核存活概率, 除了裂变位垒外, 还需要能级密度. 复合核裂变一般采用唯象的能级密度模型^[24,25], 且位垒能级密度参数 a_f 一般要大于位谷能级密度参数 a . 能级密度可以由费米气体模型给出, 但是

依赖一个关键的能级密度参数. 在文献^[7]中, 我们综合考虑了虚自由能法与Bohr-Wheeler公式的优点, 给出了一个不需要算积分的复合核裂变几率公式. 通过激发能和熵, 原则上可以微观计算形变相关的能级密度参数^[18]. 但是, 由于存活概率对能级密度的指数敏感性, 微观计算的位垒与位谷的能级密度参数对实际计算效果不够好. 因此, 往往采用简单的能级密度参数 $a = A/12$, 其中 A 为原子核质量数. 实际上需要计算复合核蒸发多个中子后的多步存活概率, 所以需要计算一系列复合核的裂变位垒和存活概率. 复合核的存活概率往往呈现为一个拱形, 而俘获与融合概率一般随能量是单调上升的. 因此, 复合核存活概率的最高点可以看作是最优束流能量的下限. 基于我们计算的存活概率, 结合由中国科学院大学邓祥泉用双核模型计算的俘获-融合截面^[6], 我们得到最终的反应剩余截面.

在研究合成119号元素之前, 我们先对合成115号元素的 $^{48}\text{Ca}+^{243}\text{Am}$ 反应截面进行了研究. 该反应有较多的实验值可以提供约束模型参数. 如图2(a, b)所示, 我们基于两种不同的Skyrme密度泛函: UNEDF1与Sk-SHE1进行了能量依赖的裂变位垒计算. 我们采用的HFODD程序可以考虑 γ 形变与 β_3 形变对位垒的影响^[8]. 其中, UNEDF1能较好地描述锔系核的裂变位垒高度^[12], 对 $Z=115$ 同位素核的位垒高度描述与宏观-微观模型相比较合理. 采用Sk-SHE1参数可以得到很好的超重区结合能, 但是位垒比UNEDF1稍微偏高且随激发能增加下降更慢. 在图2(a)中, $N=172$ 核开始有较高的位垒高度, 是因为在UNEDF1计算中它的三轴形变影响较

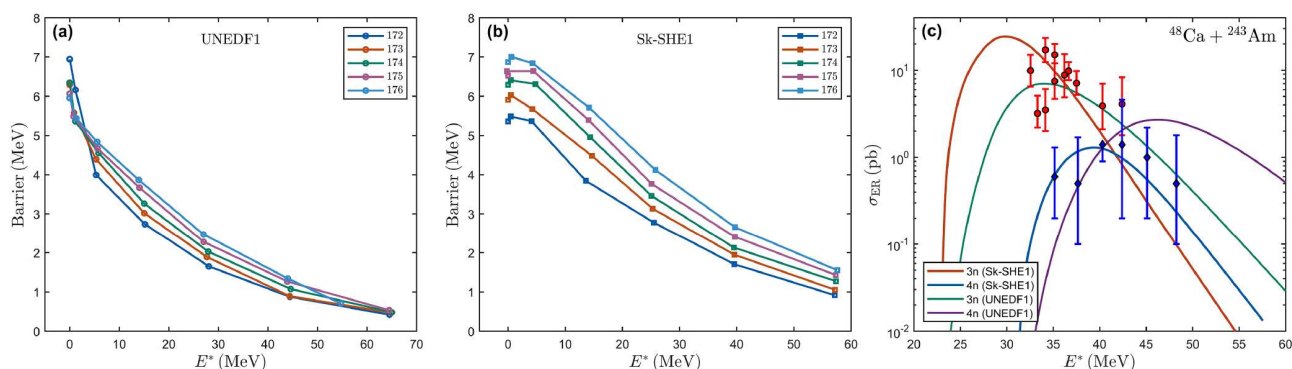


图2 (a, b) 采用UNEDF1与Sk-SHE1参数分别计算了质子数 $Z=115$, 中子数 $N=172\sim176$ 的超重核裂变位垒随激发能的变化. (c) 基于两种不同的裂变位垒计算了 $^{48}\text{Ca}+^{243}\text{Am}$ 反应生成超重核的截面, 并与实验值^[3]进行了比较

Figure 2 (a, b) Calculated energy dependent fission barriers using UNEDF1 and Sk-SHE1 parameters for superheavy nuclei $Z=115$ and $N=172\sim176$. (c) The residual cross sections of $^{48}\text{Ca}+^{243}\text{Am}$ reaction with two fission barriers, and the experimental data^[3] are also displayed

小. 图2(c)中展示了基于UNEDF1与Sk-SHE1的位垒给出的 $^{48}\text{Ca}+^{243}\text{Am}$ 反应截面. 其中, 位垒与位谷的能级密度比采用 $a_f/a = 1.085$. 可以看到Sk-SHE1给出的蒸发3个中子后的3n道最优能量比实验值有明显的偏低, 而UNEDF1给出的4n道能量比实验值要偏高一些. 因此, 不同的裂变位垒对合成截面的描述有显著影响.

为了研究裂变位垒对合成119号元素的影响, 我们研究了UNEDF1位垒随能量下降的速度进行改变后对反应截面的影响. 这相当于零温的裂变位垒高度不变, 但是对阻尼因子进行了调节. 图3(a, b)展示了我们关注的 $^{54}\text{Cr}+^{243}\text{Am}$ 与 $^{50}\text{Ti}+^{249}\text{Bk}$ 两个反应的3n与4n道的结果. UNEDF1参数给出的 $^{54}\text{Cr}+^{243}\text{Am}$ 反应的最大截面在3n道, 约12 fb, 对应的激发能在37 MeV. 而 $^{50}\text{Ti}+^{249}\text{Bk}$ 反应在3n道的最大截面约0.2 pb, 对应的激发能在34 MeV左右. 当减缓位垒下降后, 需要增大 a_f/a , 3n与4n道截面极大值对应的激发能都减小了. 而当位垒下降加速后, 需要调小 a_f/a , 截面极大值对应的激发能都在增加. 这里我们只关注了反应能量, 因而调节了 a_f/a 的值以便得到差不多的截面值. 同时, 我们发现位垒下降加速后, 4n道的截面相对3n道来说增加更明显. 3n道与4n道的截面可以为裂变位垒的能量相关性提供重要约束信息. 此外, 不同的能级密度对截面计算也有影响. 为了比较, 我们也采用了更复杂的能级密度参数公式^[26]. 该能级密度参数考虑了壳效应与能量相关性^[26]. 在图3(c)中, 可以看到复杂能级密度参数对截面有一定的增加, 但是最优能量对不同的能级密度参数并不敏感.

3 总结与展望

超重元素合成受到很大的关注. 实验上要考虑的是提高加速器流强和探测效率, 并寻找合适的弹靶材料. 目前美国在弹靶材料供给方面处于有利地位. 中国科学院近代物理研究所在实验装置方面取得了很大进展^[27], 达到了国际领先水平. 理论上的问题也非常关键, 需要可靠的预言合成新元素的最优束流能量. 在这方面, 国内有一批理论研究人员取得了丰富成果^[2]. 近年来, 国内理论与实验研究人员就合成119号新元素进行了密切的交流研讨.

需要认识到, 合成新元素具有极大的挑战性. 熔合反应过程非常复杂, 理论上还依赖较多的唯象模型参数, 存在很大的不确定度^[2,28,29]. 本文总结了超重核质量与裂变位垒对超重核合成截面的重要影响. 超重核质量直接决定了反应 Q 值与束流能量选取. 裂变位垒高度及其能量相关性对最优束流能量也有4~5 MeV的影响. 我们发展的能量密度泛函给出了高精度微观超重核质量表, 这将为超重核合成提供可靠的反应 Q 值以及 α 衰变能量. 但是, 微观裂变位垒的可靠性与能量相关性还需要进一步系统的约束与大规模分析检验. 此外, 在熔合截面计算中也存在很大不确定度, 涉及微观的准裂变动力学^[30], 这在本文中没有进行讨论. 由于存在较多的唯象模型参数, 不同物理效应在新反应体系可能存在抵消或者累积的效应. 今后, 一方面, 通过大规模微观理论计算可以减少唯象模型参数的不确定度, 另一方面, 通过累积更翔实的超重核实验数据可以为理论模型提供更好的检验与约束.

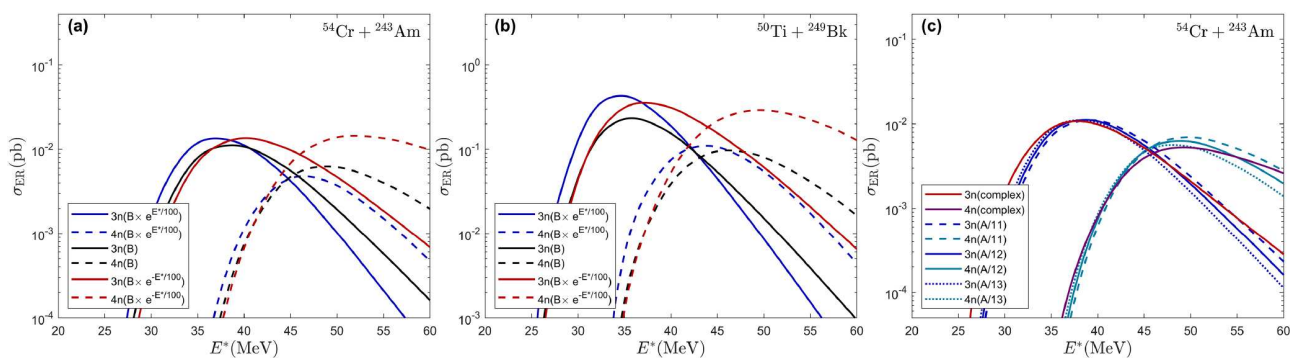


图3 (a, b) 基于UNEDF1参数计算的裂变位垒进行了能量相关性改变, 再计算 $^{54}\text{Cr}+^{243}\text{Am}$ 与 $^{50}\text{Ti}+^{249}\text{Bk}$ 反应生成119号元素的截面. (c) 通过采用不同的能级密度参数, 包括采用简单形式 $a = A/11, A/12, A/13$ 与复杂公式^[26], 所计算的 $^{54}\text{Cr}+^{243}\text{Am}$ 反应生成119号元素的截面

Figure 3 (a, b) Calculated cross sections to produce $Z=119$ element with $^{54}\text{Cr}+^{243}\text{Am}$ and $^{50}\text{Ti}+^{249}\text{Bk}$ reactions, based on the fission barriers from UNEDF1 functional as well as the modification of energy dependences. (c) The cross section of $^{54}\text{Cr}+^{243}\text{Am}$ to produce $Z=119$ element using different level density parameters, including the simple form $a = A/11, A/12, A/13$ and the complicated formula in Ref. [26]

参考文献

- 1 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. *Phys Rev C*, 2006, 74: 044602
- 2 Zhang M H, Zhang Z Y, Gan Z G, et al. Progress on the synthesis of superheavy nuclei. *Nucl Sci Tech*, 2025, 36: 204
- 3 Oganessian Y T, Utyonkov V K, Kovrizhnykh N D, et al. New isotope ^{286}Mc produced in the $^{243}\text{Am} + ^{48}\text{Ca}$ reaction. *Phys Rev C*, 2022, 106: 064306
- 4 Gates J M, Orford R, Rudolph D, et al. Toward the discovery of new elements: production of livermorium ($Z=116$) with ^{50}Ti . *Phys Rev Lett*, 2024, 133: 172502
- 5 Lu W, Ma H Y, Qian C, et al. Production of highly charged metallic ion beams with a room temperature ECR ion source-LECR5 for the CAFE2 facility at IMP. *Nucl Instruments Methods Phys Res Sect A-Accelerators Spectrometers Detectors Associated Equipment*, 2024, 1062: 169207
- 6 Deng X Q, Zhou S G. Examination of promising reactions with ^{241}Am and ^{244}Cm targets for the synthesis of new superheavy elements within the dinuclear system model with a dynamical potential energy surface. *Phys Rev C*, 2023, 107: 014616
- 7 Qiao C Y, Pei J C. Modeling survival probabilities of superheavy nuclei at high excitation energies. *Phys Rev C*, 2022, 106: 014608
- 8 Qiang Y, Deng X Q, Shi Y, et al. Survival probabilities of compound superheavy nuclei towards element 119. *Phys Lett B*, 2024, 858: 139057
- 9 Kayumov B M, Ganiev O K, Nasirov A K, et al. Analysis of the fusion mechanism in the synthesis of superheavy element 119 via the $^{54}\text{Cr} + ^{243}\text{Am}$ reaction. *Phys Rev C*, 2022, 105: 014618
- 10 Guan D, Pei J. High quality microscopic nuclear masses of superheavy nuclei. *Phys Lett B*, 2024, 851: 138578
- 11 Wang M, Huang W J, Kondev F G, et al. The AME 2020 atomic mass evaluation (II). Tables, graphs and references. *Chin Phys C*, 2021, 45: 030003
- 12 Kortelainen M, McDonnell J, Nazarewicz W, et al. Nuclear energy density optimization: large deformations. *Phys Rev C*, 2012, 85: 024304
- 13 Wang N, Liu M, Wu X, et al. Surface diffuseness correction in global mass formula. *Phys Lett B*, 2014, 734: 215–219
- 14 Möller P, Sierk A J, Ichikawa T, et al. Nuclear ground-state masses and deformations: FRDM(2012). *Atomic Data Nucl Data Tables*, 2016, 109-110: 1–204
- 15 Olsen E, Nazarewicz W. α -decay energies of superheavy nuclei: systematic trends. *Phys Rev C*, 2019, 99: 014317
- 16 Wang Z, Ren Z, et al. Exploring α -decay chains and cluster radioactivities of superheavy $^{293-295}_{119}$ isotopes. *Eur Phys J A*, 2024, 60: 74
- 17 Pei J C, Nazarewicz W, Sheikh J A, et al. Fission barriers of compound superheavy nuclei. *Phys Rev Lett*, 2009, 102: 192501
- 18 Zhu Y, Pei J C. Thermal fission rates with temperature dependent fission barriers. *Phys Rev C*, 2016, 94: 024329
- 19 Zhu Y, Pei J C. Towards microscopic studies of survival probabilities of compound superheavy nuclei. *Phys Scr*, 2017, 92: 114001
- 20 Ma L, Yang H B, Zhang Z Y, et al. Attempts to produce new americium isotopes near $N=126$. *Phys Rev C*, 2022, 106: 034316
- 21 Lu B N, Zhao J, Zhao E G, et al. Multidimensionally-constrained relativistic mean-field models and potential-energy surfaces of actinide nuclei. *Phys Rev C*, 2014, 89: 014323
- 22 Chai Q Z, Zhao W J, Liu M L, et al. Calculation of multidimensional potential energy surfaces for even-even transuranium nuclei: systematic investigation of the triaxiality effect on the fission barrier. *Chin Phys C*, 2018, 42: 054101
- 23 Schunck N, Dobaczewski J, Satuła W, et al. Solution of the Skyrme-Hartree-Fock-Bogolyubov equations in the Cartesian deformed harmonic-oscillator basis. (VIII) hfodd (v2.73y): a new version of the program. *Comput Phys Commun*, 2017, 216: 145–174
- 24 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
- 25 Feng Z Q, Jin G M, Fu F, et al. Production cross sections of superheavy nuclei based on dinuclear system model. *Nucl Phys A*, 2006, 771: 50–67
- 26 Zubov A, Adamian G, Antonenko N, et al. Survival probability of superheavy nuclei. *Phys Rev C*, 2002, 65: 024308
- 27 Zhang M M, Wang J G, Ma L, et al. Discovery of the α -emitting isotope ^{210}Pa . *Nat Commun*, 2025, 16: 5003
- 28 Zhang M H, Zhang Y H, Zou Y, et al. Predictions of synthesizing elements with $Z=119$ and 120 in fusion reactions. *Phys Rev C*, 2024, 109: 014622
- 29 Fang Y, Gao Z, Zhang Y, et al. Bayesian uncertainty quantification for synthesizing superheavy elements. *Phys Lett B*, 2024, 858: 139069
- 30 Guo L, Shen C, Yu C, et al. Isotopic trends of quasifission and fusion-fission in the reactions $^{48}\text{Ca} + ^{239,244}\text{Pu}$. *Phys Rev C*, 2018, 98: 064609

Summary for “超重核质量与裂变位垒对合成超重新元素的关键影响”

Theoretical issues for synthesizing new superheavy elements: nuclear masses and fission barriers

Junchen Pei^{*}, Zhibo Li, Yu Qiang & Dawei Guan

State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China

^{*} Corresponding author, E-mail: pei@pku.edu.cn

Currently, the synthesis of superheavy elements starting from the eighth row of the periodic table has become an important scientific issue in major international nuclear physics laboratories. The cross-section to produce $Z=119$ superheavy element by experiments is extremely low, and the available combinations of projectiles and targets are limited. Therefore, theoretically, it is essential to accurately estimate the optimal collision energy. The accurate calculation of high-quality nuclear masses is crucial for determining the reaction Q values and obtaining reliable alpha decay energies for identifying new elements and new isotopes. The existing nuclear masses in the heaviest region estimated by different models have large uncertainties about 4 MeV, which is a serious problem. In addition, the height and energy dependence of the fission barriers of highly excited superheavy nuclei are also crucial for calculating the survival probabilities and estimating optimal beam energies. In this respect, we can provide theoretical guidance for the synthesis of superheavy elements based on accurate energy density functional theory calculations. We took into account the experimental values of the alpha decay energy of superheavy nuclei in the fitting of the Sk-SHE1 energy density functional, and obtained a high-quality microscopic superheavy nucleus mass table. The systematic alpha-decay energies in the superheavy region can be well described, with deviations less than 0.3 MeV. The estimated binding energies of superheavy nuclei are surprisingly close to the AME2020 evaluation. The predicted reaction Q -values of $^{54}\text{Cr}+^{243}\text{Am}$ and $^{50}\text{Ti}+^{249}\text{Bk}$ to synthesize 119 element are -207.79 and -191.78 MeV, respectively. We also calculated energy-dependent fission barriers based on different parameters and studied the production cross-sections of $Z=115$ and 119 superheavy nuclei. The energy-dependent (or temperature-dependent) fission barriers are calculated using the HFODD code, which has taken into account the triaxial deformation and octupole deformation in finite-temperature Hartree-Fock+BCS calculations. The residual cross sections are obtained by combining fusion probabilities from dinuclear system models and our results of survival probabilities. We find that fission barriers with UNEDF1 and Sk-SHE1 lead to very different cross sections and optimal beam energies. The different fission barriers could result in ~ 4 MeV differences in the optimal beam energies. The fission barriers by UNEDF1 force decrease faster with increasing excitation energies compared to Sk-SHE1. The $3n$ channel can be well described by UNEDF1, and the $4n$ channel can be well described by Sk-SHE1. In this respect, further systematic studies on microscopic fission barriers and uncertainties are still needed. In addition, the dependence on level densities has also studied. The results with a complex level density parameter formula, including shell effects, are not very different from those using a simple level density parameter formula. The cross sections are not sensitive to the forms of level densities. In the future, both large-scale microscopic calculations and more experiments on other reactions are needed for better estimations of reaction beam energies.

new superheavy elements, synthesis of superheavy nuclei, nuclear mass, fission barriers

doi: [10.1360/CSB-2025-5470](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5470)