

$^{293, 294}_{119}$ 与 $^{294, 295}_{120}$ 超重核衰变性质 理论预言

王震¹ 任中洲^{1,2}

1(同济大学物理科学与工程学院 上海 200092)

2(同济大学先进微结构材料教育部重点实验室 上海 200092)

摘要 熔合蒸发反应 $^{243}\text{Am}(^{54}\text{Cr}, xn)^{297-x}_{119}$ 以及 $^{243}\text{Am}(^{55}\text{Mn}, xn)^{298-x}_{120}$ 是最近核物理学家提出的合成 Z 为119及120新元素的可能途径, α 衰变是实验上鉴定新元素或新核素合成的有力工具。利用改进的密度依赖集团模型(Improved Density-dependent Cluster Model, DDCM+),对于熔合蒸发反应 $^{243}\text{Am}(^{54}\text{Cr}, xn)^{297-x}_{119}$ 以及 $^{243}\text{Am}(^{55}\text{Mn}, xn)^{298-x}_{120}$ 蒸发3或4个中子得到的反应产物 $^{293, 294}_{119}$ 与 $^{294, 295}_{120}$ 的 α 衰变半衰期进行了理论预言。在此基础上,进一步分析了 $^{293, 294}_{119}$ 与 $^{294, 295}_{120}$ 核素 α 衰变过程与自发裂变以及 β 衰变等不同衰变模式之间的竞争关系。通过研究发现,对于绝大多数核, α 衰变模式占主导地位,但沿着 α 衰变链,随着质量数减少至 $A = 261$ 附近,自发裂变以及 β 衰变半衰期与 α 衰变半衰期逐渐相近。相关理论结果对于未来 Z 为119及120新元素的合成工作具有一定的参考意义。

关键词 α 衰变, 自发裂变, 超重核, 半衰期

中图分类号 O571.32[†]

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.080011

关联视频 DOI: 10.12351/ks.2207.1207



Predictions of the decay properties of the superheavy nuclei $^{293, 294}_{119}$ and $^{294, 295}_{120}$

WANG Zhen¹ REN Zhongzhou^{1,2}

1(School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

2(Key Laboratory of Advanced Micro-Structure Materials (MOE), Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract [Background] To date, various nuclides up to $Z = 118$ have been discovered and synthesized, raising the challenge of synthesizing nuclides with $Z \geq 119$. Recently, the fusion-evaporation reactions $^{243}\text{Am}(^{54}\text{Cr}, xn)^{297-x}_{119}$ and $^{243}\text{Am}(^{55}\text{Mn}, xn)^{298-x}_{120}$ have been suggested as methods for synthesizing new elements with $Z = 119$ and 120. As α -decay is a powerful tool for the identification of new elements or nuclides, accurate predictions of the α -decay properties of the reaction products could be a useful reference for future experiments. [Purpose] This study aims to provide quantitative predictions of the α -decay, spontaneous fission, and β -decay half-lives for the α -decay chains of

国家自然科学基金(No.12035011, No.12022517, No.11975167, No.11947211, No.11905103, No.11881240623, No.11961141003)、国家重点研发计划(No.2018YFA0404403)、中央高校基本科研业务费专项(No.22120200101)和澳门科学技术发展基金(No.0048/2020A1)资助

第一作者: 王震, 男, 1996年出生, 2018年毕业于同济大学, 现为博士研究生, 从事重核与超重核放射性衰变研究

通信作者: 任中洲, E-mail: zren@tongji.edu.cn

收稿日期: 2022-12-05, 修回日期: 2022-12-22

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 12035011, No. 12022517, No. 11975167, No. 11947211, No. 11905103, No. 11881240623, No. 11961141003), National Key R&D Program of China (No. 2018YFA0404403), Fundamental Research Funds for the Central Universities (No.22120200101), Science and Technology Development Fund of Macau (No.0048/2020A1)

First author: WANG Zhen, male, born in 1996, graduated from Tongji University in 2018, doctoral student, focusing on the radioactive decay of heavy and superheavy nuclei

Corresponding author: REN Zhongzhou, E-mail: zren@tongji.edu.cn

Received date: 2022-12-05, revised date: 2022-12-22

^{293, 294}119 and ^{294, 295}120 and to demonstrate the competition between the decay modes for these nuclei. **[Methods]** An improved density-dependent cluster model (DDCM+) is used to calculate the α -decay half-lives, taking the anisotropy of the surface diffuseness into account. The spontaneous fission half-lives are calculated using the Karpov formula, which is related to the fissility parameter and fission barrier height of the potential energy surface. The β -decay half-lives are determined using a finite-range droplet model (FRDM). **[Results]** The predictive α -decay half-lives for the α -decay chains of ^{293, 294}119 and ^{294, 295}120 are obtained using the DDCM+ model, and the theoretical half-lives of the spontaneous fission and β -decay for these nuclides are also presented. **[Conclusions]** For the α -decay chains of ^{293, 294}119 and ^{294, 295}120, α -decay is predicted to be the dominant decay mode for most of the nuclei, while the half-lives of spontaneous fission and β -decay are predicted to be comparable to those of the α -decay near the region of $A = 261$. We expect that these results will serve as a useful reference for the synthesis of new isotopes in the future.

Key words α -decay, Spontaneous fission, Superheavy nuclei, Half-life

超重核的合成与研究是原子核物理领域的热门课题^[1-7]。近半个多世纪以来,随着大型重离子加速器装置的陆续建成,以及实验探测技术水平的不断提升,各国核物理实验室在超重核的合成领域取得了一系列重大的突破。例如,通过“冷熔合”反应机制,德国亥姆霍兹重离子研究中心(GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung)首先合成了 Z 为107~112号元素^[8]。随后,利用“热熔合”反应,俄罗斯杜布纳(Dubna)联合原子核研究所进一步合成了 Z 为112~118号元素^[9-10]。依托兰州重离子加速器装置(Heavy Ion Research Facility in Lanzhou, HIRFL),我国也在超重核合成方面作出了许多贡献,合成了²⁵⁹Db、²⁶⁵Bh等超重核素^[11]。这些实验成果不仅扩展了已知核素的范围,同时也极大程度加深了人们对于超重核结构性质的理解。

近年来,实验学家们开始尝试合成 $Z > 118$ 的新元素,一个可能的设想是通过融合蒸发反应²⁴³Am(⁵⁴Cr, xn)^{297-x}119以及²⁴³Am(⁵⁵Mn, xn)^{298-x}120来合成 Z 为119和120的新元素^[12]。然而受设备条件及反应机制等因素的影响,目前成功进行相关合成实验还存在着较大困难。 α 衰变是超重核重要的衰变模式之一,也是实验上鉴定新核素的有力工具,因此理论研究超重核的 α 衰变性质对未来超重新核素的合成实验有重要指导意义^[13-21]。密度依赖结团模型(Density-dependent Cluster Model, DDCM)是研究 α 衰变较为成功的模型之一,该模型考虑了原子核密度分布以及核子-核子相互作用的低密度行为,能够对 $Z \geq 52$ 区域内大部分核素的 α 衰变性质给出合理的描述^[22-23]。最近,我们进一步考虑了原子核形变对核子表面弥散度的影响,在原始DDCM模型基础上,引进了形变依赖的弥散参数,提出了改进的密度依赖结团模型(DDCM+)^[24-25],进一步提升了理论计算结果的精度。本文利用DDCM+模型,对未知核素^{293, 294}119与^{294, 295}120的 α 衰变性质进行了系统

计算,同时系统分析了这些核素 α 衰变、自发裂变以及 β 衰变等不同衰变道之间的竞争关系,以供未来相关实验参考。

1 理论模型

1.1 改进的密度依赖结团模型(DDCM+)

在DDCM+模型中,母核被认为是一个由球形的 α 结团与具有轴对称形变的子核所构成的两体系统。 α 结团与子核之间的相互作用可以表示为:

$$V(r, \xi) = V_N(r, \xi) + V_C(r, \xi) + \frac{\hbar^2 L(L+1)}{2\mu r^2} \quad (1)$$

式中: r 表示 α 粒子与子核质心之间的距离; $V_N(r, \xi)$ 表示核势; $V_C(r, \xi)$ 表示库仑势; L 代表 α 粒子携带的角动量,本文中,由于所预言的核素能级信息未知,因此, L 的值均取为0; μ 代表 α 粒子与子核的约化质量; ξ 代表 α 粒子发射方向与子核对称轴之间的夹角。核势与库仑势均由微观双折叠势给出^[26]:

$$V_N(r, \xi) = \lambda \int d\vec{r}_\alpha \int d\vec{r}_c [\rho_\alpha^p(\vec{r}_\alpha) + \rho_\alpha^n(\vec{r}_\alpha)] \times [\rho_c^p(\vec{r}_c) + \rho_c^n(\vec{r}_c)] \times v(s = |\vec{r}_c + \vec{r} - \vec{r}_\alpha|) \quad (2)$$

$$V_C(r, \xi) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int d\vec{r}_\alpha \int d\vec{r}_c \frac{e^2}{s = |\vec{r}_c + \vec{r} - \vec{r}_\alpha|} \rho_\alpha^p(\vec{r}_\alpha) \rho_c^p(\vec{r}_c) \quad (3)$$

式中: λ 为归一化因子,可以通过求解准束缚态薛定谔方程,使对应本征能量等于 α 衰变能 Q_α 来确定。 $\rho_\alpha^{p,n}(\vec{r}_\alpha)$ 和 $\rho_c^{p,n}(\vec{r}_c)$ 分别代表 α 粒子与子核中的核子密度分布(上标 p 代表质子, n 代表中子)。 α 粒子中的核子密度 $\rho_\alpha^i(\vec{r}_\alpha)$ 通常取为标准的高斯分布形式,而子核的核子密度分布 $\rho_c^i(\vec{r}_c)$ 则通常采取费米型分布,如式(4.5)所示:

$$\rho_\alpha^i(\vec{r}_\alpha) = \rho_\alpha^{i_0} \exp\left(-0.7024|\vec{r}_\alpha|^2\right) \quad (4)$$

$$\rho_c^r(\vec{r}_c) = \frac{\rho_c^0}{1 + \exp\left[\frac{|\vec{r}_c| - R^r(\theta)}{a^r(\theta)}\right]} \quad (5)$$

式中:核子的中心密度 ρ_c^0 以及 ρ_c^0 可以通过对核子密度分布函数在全空间积分,使积分值等于对应的核子数目来确定。半径参数 $R^r(\theta)$ 的表示形式为:

$$R^r(\theta) = R_0^r \left[1 + \sum_{i=2,4,6} \beta_i Y_{i0}(\theta) \right] \quad (6)$$

其中: $\beta_i(i=2,4,6)$ 为形变参数,其数值取自文献[27]。而弥散参数 $a^r(\theta)$ 的表达式则为:

$$a^r(\theta) = a_{\perp}^r(\theta) \sqrt{1 + \left[\frac{1}{R^r(\theta)} \frac{dR^r(\theta)}{d\theta} \right]^2} \quad (7)$$

式中: R_0^r 和 $a_{\perp}^r(\theta)$ 具体形式可参见文献[24-25]。核势中核子-核子相互作用 $v(s)$ 采取M3Y-Reid型核子-核子有效相互作用[28]:

$$v(s) = 7999.00 \frac{\exp(-4s)}{4s} - 2134.25 \frac{\exp(-2.5s)}{2.5s} - 276 \left[1 - 0.005 \left(\frac{E_{\alpha}}{A_{\alpha}} \right) \right] \delta(s) \quad (8)$$

式中: E_{α}/A_{α} 表示放射的 α 粒子中,平均每个核子具有的动能。

对于形变核来说, α 衰变总的衰变宽度可以通过对不同方位角 ξ 下的衰变宽度进行平均得到。在DDCM+模型中,某一方位角 ξ 下的 α 衰变宽度表示为[29-30]:

$$\Gamma(\xi) = \frac{4\mu}{\hbar^2 k} \left| \int_0^{\infty} F_L(kr) \left[V_N(r, \xi) + V_C(r, \xi) - \frac{Z_{\alpha} Z_C e^2}{4\pi \epsilon_0 r} \right] \varphi_L(r, \xi) dr \right|^2 \quad (9)$$

$$\log_{10}(T_{1/2}^{SF}) = 1146.44 - 75.3153 \frac{Z^2}{A} + 1.63792 \left(\frac{Z^2}{A} \right)^2 - 0.0119827 \left(\frac{Z^2}{A} \right)^3 +$$

$$B_f \left(7.23613 - 0.0947022 \frac{Z^2}{A} \right) + \begin{cases} 0, & \text{even - even nuclei} \\ 1.53897, & \text{odd - A nuclei} \\ 0.80822, & \text{odd - odd nuclei} \end{cases} \quad (13)$$

式中: B_f 表示裂变位垒高度,具体数值取自文献[38]。Karpov公式将裂变参数与势能面的裂变位垒高度结合了起来,可以很好地重现出重核与超重核的自发裂变为行[36-37]。

2 结果与讨论

利用DDCM+模型,对 $^{293, 294}119$ 与 $^{294, 295}120$ 及其 α 衰变链上核素的 α 衰变半衰期进行了预言。由于 α

其中: $F_L(kr)$ 是正则库仑波函数; $k = \sqrt{2\mu Q_{\alpha}}/\hbar$ 为波数; $\varphi_L(r, \xi)$ 表示方位角 ξ 下对应的径向波函数。径向波函数 $\varphi_L(r, \xi)$ 内部节点的数目 N 由Wildermuth-Tang条件近似确定[31]:

$$G = 2N + L \quad (10)$$

式中: G 代表总量子数。由于泡利阻塞效应的影响,本文中 G 的值取为22。在求得各方向上的 α 衰变宽度之后,我们可得总的 α 衰变宽度为:

$$\Gamma = \int_0^{\pi/2} \Gamma(\xi) \sin \xi d\xi \quad (11)$$

最后, α 衰变半衰期可以表示为:

$$T_{1/2} = \frac{\hbar \ln 2}{P_{\alpha} \Gamma} \quad (12)$$

式中: P_{α} 为预形成因子,它衡量了 α 结团在母核体内的预形成概率。研究表明,在远离闭壳层区域, P_{α} 的值变化较为缓慢[32],因此,为减少模型中自由参数的数目,本文中 P_{α} 的值取为常数。对于偶-偶核来说, P_{α} 的值取0.1521[24],而对于奇-A核及奇-奇核, P_{α} 的值分别取0.0926和0.0712[25]。

1.2 Karpov公式

自发裂变是超重核的另一个重要的衰变模式之一,理论研究自发裂变对于理解超重核的稳定性质也有着重要意义。相比于 α 衰变,自发裂变的发生机制更加复杂,同时在裂变过程中也存在着极大的不确定性。在前人的工作中,已经提出了一些理论方法对自发裂变半衰期进行理论计算,如文献[33-37]。本文采用Karpov公式对相关核素的自发裂变半衰期进行预言[36],其具体形式如下:

衰变半衰期对于 α 衰变能具有较强的敏感性,因此在本文中, α 衰变能分别采用文献[39]中的 α 衰变能公式以及有限液滴模型(Finite-range Droplet Model, FRDM)给出的数据[27],相关计算结果列于表1,其中: Q_{α}^{th1} 和 Q_{α}^{th2} 分别表示文献[39]以及FRDM模型给出的 α 衰变能; T_{α}^{th1} 和 T_{α}^{th2} 分别代表利用DDCM+模型结合 Q_{α}^{th1} 和 Q_{α}^{th2} 计算得到的结果; T_{SF} 代表利用Karpov公式预言的自发裂变半衰期。Möller等[40]利用FRDM模型同样给出了 α 衰变、 β 衰变能以及 β 衰

变半衰期的预测值,作为对照,这些预测结果也列于表1,分别用 T_{α}^{th3} 、 Q_{β} 以及 T_{β} 表示。值得注意的是,表1中的 β 衰变数据主要为 β^+ 衰变模式对应的结果^[40]。

从表1可以看出, Q_{α}^{th1} 和 Q_{α}^{th2} 给出了两组不同的 α 衰变能数据。由于理论模型对 α 衰变能的依赖性与敏感性,对于这两组不同的 α 衰变能,DDCM+模型同样给出了两组不同的半衰期。可以看到,对于

表1 $^{293, 294}119$ 与 $^{294, 295}120$ 及其 α 衰变链核素 α 衰变、自发裂变以及 β 衰变半衰期预测结果
Table 1 Predictions of half-lives of α -decay, spontaneous fission, and β -decay for α -decay chains of $^{293, 294}119$ and $^{294, 295}120$

核素 Nuclide	$Q_{\alpha}^{\text{th1}} / \text{MeV}$	$T_{\alpha}^{\text{th1}} / \text{s}$	$Q_{\alpha}^{\text{th2}} / \text{MeV}$	$T_{\alpha}^{\text{th2}} / \text{s}$	$T_{\alpha}^{\text{th3}} / \text{s}$	T_{SF} / s	Q_{β} / MeV	T_{β} / s
$^{293}119$ 核素 α 衰变链 α -decay chain of $^{293}119$								
$^{293}119$	12.30	1.51×10^{-4}	12.92	7.88×10^{-6}	2.75×10^{-5}	1.75×10^1	6.24	1.01×10^2
^{289}Ts	11.83	4.49×10^{-4}	11.98	2.07×10^{-4}	8.13×10^{-4}	1.21×10^3	5.65	4.94×10^2
^{285}Mc	11.47	7.74×10^{-4}	10.30	6.90×10^{-1}	3.12×10^0	5.38×10^3	4.77	1.39×10^3
^{281}Nh	11.16	7.19×10^{-4}	10.76	6.84×10^{-3}	4.53×10^{-2}	1.15×10^1	3.91	2.64×10^3
^{277}Rg	10.78	1.43×10^{-3}	11.49	3.20×10^{-5}	2.07×10^{-4}	2.02×10^1	3.40	2.10×10^2
^{273}Mt	10.21	9.10×10^{-3}	9.78	1.35×10^{-1}	1.03×10^0	8.51×10^5	2.48	1.53×10^2
^{269}Bh	9.47	2.22×10^{-1}	8.24	2.09×10^3	1.57×10^4	2.94×10^7	2.18	4.49×10^4
^{265}Db	8.68	1.25×10^1	7.70	3.90×10^4	2.73×10^5	2.13×10^6	1.80	5.46×10^5
^{261}Lr	7.96	6.28×10^2	7.72	5.02×10^3	3.69×10^4	7.13×10^5	1.17	7.59×10^2
$^{294}119$ 核素 α 衰变链 α -decay chain of $^{294}119$								
$^{294}119$	12.15	3.82×10^{-4}	12.85	1.35×10^{-5}	8.41×10^{-5}	4.38×10^1	6.91	1.10×10^2
^{290}Ts	11.62	1.63×10^{-3}	11.85	4.97×10^{-4}	3.52×10^{-3}	5.08×10^3	6.43	3.20×10^2
^{286}Mc	11.21	4.07×10^{-3}	10.21	1.53×10^0	1.22×10^1	2.35×10^4	5.64	1.57×10^3
^{282}Nh	10.88	3.80×10^{-2}	10.02	7.23×10^0	9.55×10^0	6.32×10^1	4.91	1.22×10^3
^{278}Rg	10.54	6.66×10^{-3}	11.26	1.28×10^{-4}	1.53×10^{-3}	2.27×10^0	4.32	6.16×10^1
^{274}Mt	10.07	2.72×10^{-2}	10.01	3.95×10^{-2}	5.21×10^{-1}	3.94×10^4	3.37	3.36×10^2
^{270}Bh	9.40	4.00×10^0	8.33	1.18×10^4	1.66×10^4	2.40×10^7	2.90	4.50×10^5
^{266}Db	8.61	2.68×10^1	7.45	4.99×10^5	5.93×10^6	1.42×10^7	2.80	7.02×10^5
^{262}Lr	7.83	2.39×10^3	7.39	1.30×10^5	1.59×10^6	2.71×10^6	2.25	3.73×10^3
$^{294}120$ 核素 α 衰变链 α -decay chain of $^{294}120$								
$^{294}120$	12.71	2.32×10^{-5}	13.49	7.15×10^{-7}	6.21×10^{-7}	7.62×10^{-4}	5.69	1.65×10^1
^{290}Og	12.25	6.27×10^{-5}	12.67	8.47×10^{-6}	8.31×10^{-6}	1.81×10^{-1}	5.05	8.05×10^1
^{286}Lv	11.90	1.07×10^{-4}	11.68	3.35×10^{-4}	3.47×10^{-4}	5.10×10^0	4.23	3.82×10^2
^{282}Fl	11.60	9.30×10^{-5}	9.96	1.30×10^0	2.30×10^0	7.51×10^0	2.76	6.93×10^0
^{278}Cn	11.22	1.56×10^{-4}	12.17	1.38×10^{-6}	2.22×10^{-6}	2.91×10^{-3}	2.82	3.78×10^1
^{274}Ds	10.66	8.55×10^{-4}	10.38	4.38×10^{-3}	8.61×10^{-3}	2.75×10^2	1.91	5.57×10^2
^{270}Hs	9.93	1.59×10^{-2}	8.79	3.93×10^1	8.09×10^1	1.48×10^4	1.54	8.67×10^2
^{266}Sg	9.14	6.31×10^{-1}	8.12	1.56×10^3	3.00×10^3	1.62×10^3	1.08	1.49×10^3
^{262}Rf	8.43	2.17×10^1	8.10	3.07×10^2	6.12×10^2	2.26×10^2	0.42	1.25×10^4
$^{295}120$ 核素 α 衰变链 α -decay chain of $^{295}120$								
$^{295}120$	12.57	7.29×10^{-5}	13.46	1.31×10^{-6}	8.27×10^{-6}	3.12×10^{-1}	6.38	2.43×10^1
^{291}Og	12.05	2.77×10^{-4}	12.55	2.38×10^{-5}	1.73×10^{-4}	1.29×10^2	5.86	1.01×10^2
^{287}Lv	11.64	6.25×10^{-4}	11.20	6.69×10^{-3}	5.61×10^{-2}	4.26×10^3	5.07	6.24×10^2
^{283}Fl	11.32	6.76×10^{-4}	9.83	5.17×10^0	6.38×10^1	6.06×10^2	4.08	8.94×10^2
^{279}Cn	10.99	8.61×10^{-4}	11.65	2.67×10^{-5}	3.44×10^{-4}	2.97×10^{-1}	3.71	1.54×10^1
^{275}Ds	10.52	3.09×10^{-3}	10.78	7.12×10^{-4}	9.73×10^{-3}	1.65×10^3	2.85	5.05×10^2
^{271}Hs	9.86	3.86×10^{-2}	8.85	3.95×10^1	6.00×10^2	4.80×10^6	2.18	2.83×10^4
^{267}Sg	9.07	1.61×10^0	7.93	1.25×10^4	1.76×10^5	2.20×10^6	2.05	5.60×10^3
^{263}Rf	8.31	9.14×10^1	7.71	1.37×10^4	1.97×10^5	2.63×10^5	1.39	2.04×10^5

同一个核素, α 衰变能每变化 1 MeV, DDCM+模型给出的 α 衰变半衰期大约变化 3 个数量级。因此, 发展精确的 α 衰变能(或质量)模型, 对于未来相关未知核素 α 衰变半衰期的预言至关重要。此外, 从表 1 还可以看到, $^{293, 294}119$ 与 $^{294, 295}120$ 及其 α 衰变链上核素的 α 衰变半衰期预言值在 $10^{-7} \sim 10^6$, 现有的实验技术手段已经可以很精确地测量到这个范围内的半衰

期数据。因此, 在未来的相关合成实验中, α 衰变依然可以作为很好的鉴定手段来鉴定这些新核素的合成。

为了更加直观地分析 $^{293, 294}119$ 与 $^{294, 295}120$ 及其 α 衰变链上 α 衰变、自发裂变以及 β 衰变等不同衰变模式的竞争关系, 将这些衰变链上不同衰变模式的半衰期展示在图 1 中。

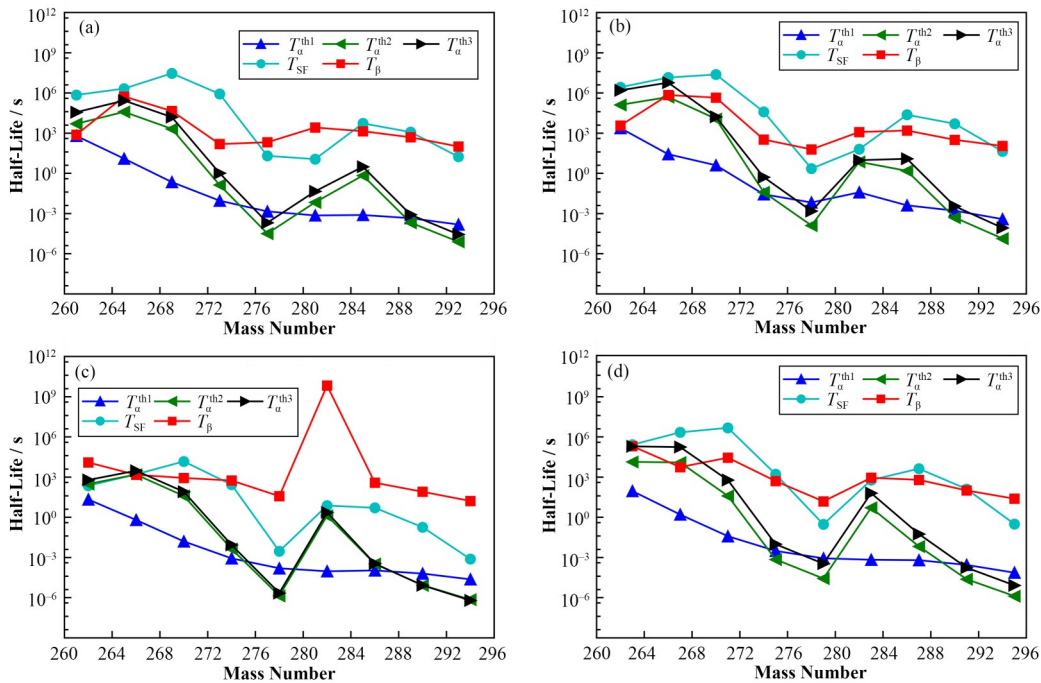


图 1 新核素 $^{293, 294}119$ (a), $^{294, 295}120$ (b), $^{294, 295}120$ (c), $^{295}120$ (d) 及其 α 衰变链上核素 α 衰变、自发裂变以及 β 衰变等不同衰变模式之间的竞争关系

Fig.1 Competition between α -decay, spontaneous fission, and β -decay for α -decay chains of $^{293, 294}119$ (a), $^{294, 295}120$ (b), $^{294, 295}120$ (c) and $^{295}120$ (d)

从图 1 可以看出, 沿同一条 α 衰变链, T_{α}^{th2} 和 T_{α}^{th3} 表现出了相同的变化趋势, 且结果比较接近, 而 T_{α}^{th1} 则展现了与之不同的变化趋势。这是因为 T_{α}^{th1} 采用了与 T_{α}^{th2} 和 T_{α}^{th3} 不同的 α 衰变能。这一变化趋势的差异也再次表明了发展精确的 α 衰变能(或质量)模型对于 α 衰变半衰期预言的必要性。通过对比 4 条衰变链上 α 衰变、自发裂变以及 β 衰变的半衰期可以发现, 对于新核素 $^{293, 294}119$ 与 $^{295}120$, α 衰变模式占主导地位, 而自发裂变和 β 衰变相对来说稳定性更强一些, 且二者半衰期相近。相对而言, 对于新核素 $^{294}120$, 虽然其 α 衰变依然占主导地位, 但与 $^{293, 294}119$ 与 $^{295}120$ 不同的是: $^{294}120$ 的自发裂变半衰期与 α 衰变寿命更接近一些。而沿着 α 衰变链, 随着子核质量数的不断减少, α 衰变模式所占分支比逐渐减少, 其半衰期逐渐与另外两种衰变模式靠近。甚至对于 $^{293, 294}119$ 衰变链上的核素 $^{261, 262}\text{Lr}$ 来说, β 衰变已占相对主导地位, 因此, 对于这些衰变链上 $A = 261$ 附近的核素来说, 实验鉴别时则需要注意考虑

其他衰变产物的影响。

3 结语

本文利用改进的密度依赖结团模型, 结合两组不同的 α 衰变能预言值, 对 $^{293, 294}119$ 与 $^{294, 295}120$ 及其 α 衰变链上核素的 α 衰变半衰期进行了预言, 同时对这些核素的不同衰变模式如 α 衰变、自发裂变以及 β 衰变之间的竞争关系进行了讨论。分析发现, 对于未知核素 $^{293, 294}119$ 与 $^{294, 295}120$ 来说, α 衰变为主要衰变模式。而沿着 α 衰变链, 当质量数逐渐减少时, α 衰变模式分支比逐渐减少, 其半衰期逐渐向自发裂变以及 β 衰变半衰期靠近。希望本文的预测结果能对未来相关新核素合成实验提供一定的参考。

作者贡献声明 王震负责计算程序设计, 数据分析, 文章撰写; 任中洲负责论文指导、审阅与修改, 研究项目经费支持。

参考文献

- 1 Niu F, Chen P H, Feng Z Q. Systematics on production of superheavy nuclei $Z=119-122$ in fusion-evaporation reactions[J]. Nuclear Science and Techniques, 2021, **32** (10): 103. DOI: [10.1007/s41365-021-00946-3](https://doi.org/10.1007/s41365-021-00946-3).
- 2 Ma C W, Wei H L, Liu X Q, *et al.* Nuclear fragments in projectile fragmentation reactions[J]. Progress in Particle and Nuclear Physics, 2021, **121**: 103911. DOI: [10.1016/j.ppnp.2021.103911](https://doi.org/10.1016/j.ppnp.2021.103911).
- 3 Xin Y Q, Ma N N, Deng J G, *et al.* Properties of $Z=114$ super-heavy nuclei[J]. Nuclear Science and Techniques, 2021, **32**(6): 55. DOI: [10.1007/s41365-021-00899-7](https://doi.org/10.1007/s41365-021-00899-7).
- 4 Manjunatha H C, Sowmya N, Damodara Gupta P S, *et al.* Investigation of decay modes of superheavy nuclei[J]. Nuclear Science and Techniques, 2021, **32**(11): 130. DOI: [10.1007/s41365-021-00967-y](https://doi.org/10.1007/s41365-021-00967-y).
- 5 Ye Y L, Zhou X H, Ma Y G, *et al.* Outline of the progress in the study of radioactive nuclear physics and super-heavy nuclei[J]. Chinese Physics C, 2008, **32**(S2): 1-7.
- 6 Ma Y G. New type of double-slit interference experiment at Fermi scale[J]. Nuclear Science and Techniques, 2023, **34**(1): 16. DOI: [10.1007/s41365-023-01167-6](https://doi.org/10.1007/s41365-023-01167-6).
- 7 Wang X N. Vector meson spin alignment by the strong force field[J]. Nuclear Science and Techniques, 2023, **34** (1): 15. DOI: [10.1007/s41365-023-01166-7](https://doi.org/10.1007/s41365-023-01166-7).
- 8 Hofmann S, Münzenberg G. The discovery of the heaviest elements[J]. Reviews of Modern Physics, 2000, **72**(3): 733 - 767. DOI: [10.1103/revmodphys.72.733](https://doi.org/10.1103/revmodphys.72.733).
- 9 Oganessian Y T, Utyonkov V K, Dmitriev S N, *et al.* Synthesis of elements 115 and 113 in the reaction $^{243}\text{Am} + ^{48}\text{Ca}$ [J]. Physical Review C, 2005, **72**(3): 034611. DOI: [10.1103/physrevc.72.034611](https://doi.org/10.1103/physrevc.72.034611).
- 10 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 - Nuclear Physics, 2006, **74**(4): 044602.
- 11 Gan Z G, Guo J S, Wu X L, *et al.* New isotope ^{265}Bh [J]. The European Physical Journal A - Hadrons and Nuclei, 2004, **20**(3): 385 - 387. DOI: [10.1140/epja/i2004-10020-2](https://doi.org/10.1140/epja/i2004-10020-2).
- 12 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[J]. Physical Review C, 2022, **105**(1): 014618. DOI: [10.1103/physrevc.105.014618](https://doi.org/10.1103/physrevc.105.014618).
- 13 Sâmark-Roth A, Cox D M, Rudolph D, *et al.* Spectroscopy along flerovium decay chains: discovery of ^{280}Ds and an excited state in ^{282}Cn [J]. Physical Review Letters, 2021, **126**(3): 032503. DOI: [10.1103/PhysRevLett.126.032503](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.126.032503).
- 14 Qian Y B, Ren Z Z. Model-independent trend of α -preformation probability[J]. Science China Physics, Mechanics and Astronomy, 2013, **56**(8): 1520 - 1524. DOI: [10.1007/s11433-013-5159-5](https://doi.org/10.1007/s11433-013-5159-5).
- 15 甘再国, 郭俊盛, 秦芝. 母子体衰变测量的一种简单方法[J]. 核技术, 2002, **25**(3): 198 - 200. GAN Zaiguo, GUO Junsheng, QIN Zhi. A simple apparatus for measuring α -decay of mother-daughter nuclei[J]. Nuclear Techniques, 2002, **25**(3): 198 - 200.
- 16 Yuan Z Y, Bai D, Ren Z Z, *et al.* Theoretical predictions on α -decay properties of some unknown neutron-deficient actinide nuclei using machine learning[J]. Chinese Physics C, 2022, **46**(2): 024101. DOI: [10.1088/1674-1137/ac321c](https://doi.org/10.1088/1674-1137/ac321c).
- 17 Wan N, Xu C, Ren Z Z. Exploring the sensitivity of α -decay half-life to neutron skin thickness for nuclei around ^{208}Pb [J]. Nuclear Science and Techniques, 2016, **28** (2): 22. DOI: [10.1007/s41365-016-0174-7](https://doi.org/10.1007/s41365-016-0174-7).
- 18 Egidio J L, Jungclaus A. Low-energy nuclear excitations along the α -decay chains of superheavy ^{292}Lv and ^{294}Og [J]. Physical Review Letters, 2021, **126**(19): 192501. DOI: [10.1103/PhysRevLett.126.192501](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.126.192501).
- 19 Zhang Z Y, Yang H B, Huang M H, *et al.* New α -emitting isotope ^{214}U and abnormal enhancement of α -particle clustering in lightest uranium isotopes[J]. Physical Review Letters, 2021, **126**(15): 152502. DOI: [10.1103/physrevlett.126.152502](https://doi.org/10.1103/physrevlett.126.152502).
- 20 Yang H B, Gan Z G, Zhang Z Y, *et al.* New isotope ^{207}Th and odd-even staggering in α -decay energies for nuclei with $Z>82$ and $N<126$ [J]. Physical Review C, 2022, **105** (5): L051302. DOI: [10.1103/physrevc.105.1051302](https://doi.org/10.1103/physrevc.105.1051302).
- 21 Huang M H, Gan Z G, Zhang Z Y, *et al.* α decay of the new isotope ^{204}Ac [J]. Physics Letters B, 2022, **834**: 137484. DOI: [10.1016/j.physletb.2022.137484](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2022.137484).
- 22 Xu C, Ren Z Z. Systematical calculation of α decay half-lives by density-dependent cluster model[J]. Nuclear Physics A, 2005, **753**(1 - 2): 174 - 185. DOI: [10.1016/j.nuclphysa.2005.02.125](https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2005.02.125).
- 23 Xu C, Ren Z Z. Global calculation of α -decay half-lives with a deformed density-dependent cluster model[J]. Physical Review C, 2006, **74**: 014304. DOI: [10.1103/](https://doi.org/10.1103/)

- physrevc.74.014304.
- 24 Wang Z, Bai D, Ren Z Z. Improved density-dependent cluster model in α -decay calculations within anisotropic deformation-dependent surface diffuseness[J]. Physical Review C, 2022, **105**(2): 024327. DOI: [10.1103/physrevc.105.024327](https://doi.org/10.1103/physrevc.105.024327).
- 25 Wang Z, Ren Z Z. Favored α -decay half-lives of odd-A and odd-odd nuclei using an improved density-dependent cluster model with anisotropic surface diffuseness[J]. Physical Review C, 2022, **106**(2): 024311. DOI: [10.1103/physrevc.106.024311](https://doi.org/10.1103/physrevc.106.024311).
- 26 Satchler G R, Love W G. Folding model potentials from realistic interactions for heavy-ion scattering[J]. Physics Reports, 1979, **55**(3): 183 - 254. DOI: [10.1016/0370-1573\(79\)90081-4](https://doi.org/10.1016/0370-1573(79)90081-4).
- 27 Möller P, Sierk A J, Ichikawa T, *et al.* Nuclear ground-state masses and deformations: FRDM(2012)[J]. Atomic Data and Nuclear Data Tables, 2016, **109 - 110**: 1 - 204. DOI: [10.1016/j.adt.2015.10.002](https://doi.org/10.1016/j.adt.2015.10.002).
- 28 Khoa D T, von Oertzen W, Ogloblin A A. Study of the equation of state for asymmetric nuclear matter and interaction potential between neutron-rich nuclei using the density-dependent M3Y interaction[J]. Nuclear Physics A, 1996, **602**(1): 98 - 132. DOI: [10.1016/0375-9474\(96\)00091-7](https://doi.org/10.1016/0375-9474(96)00091-7).
- 29 Ni D D, Ren Z Z. Effects of differences between neutron and proton density distributions on α -decay half-lives[J]. Physical Review C, 2015, **92**(5): 054322. DOI: [10.1103/physrevc.92.054322](https://doi.org/10.1103/physrevc.92.054322).
- 30 Davids C N, Esbensen H. Decay rates for spherical and deformed proton emitters[J]. AIP Conference Proceedings, 2000, **518**(1): 200 - 208. DOI: [10.1063/1.1306013](https://doi.org/10.1063/1.1306013).
- 31 Wildermuth K, Tang Y C. A unified theory of the nucleus [M]. New York: Academic Press, 1977.
- 32 Buck B, Merchant A C, Perez S M. α decay calculations with a realistic potential[J]. Physical Review C, Nuclear Physics, 1992, **45**(5): 2247 - 2253. DOI: [10.1103/physrevc.45.2247](https://doi.org/10.1103/physrevc.45.2247).
- 33 Swiatecki W J. Systematics of spontaneous fission half-lives[J]. Physical Review, 1955, **100**(3): 937 - 938. DOI: [10.1103/physrev.100.937](https://doi.org/10.1103/physrev.100.937).
- 34 Xu C, Ren Z Z. Systematical law of spontaneous fission half-lives of heavy nuclei[J]. Physical Review C, 2005, **71**(1): 014309. DOI: [10.1103/physrevc.71.014309](https://doi.org/10.1103/physrevc.71.014309).
- 35 Ren Z Z, Xu C. Spontaneous fission half-lives of heavy nuclei in ground state and in isomeric state[J]. Nuclear Physics A, 2005, **759**(1 - 2): 64 - 78. DOI: [10.1016/j.nuclphysa.2005.04.019](https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2005.04.019).
- 36 Karpov A V, Zagrebaev V I, Martinez Palenzuela Y, *et al.* Decay properties and stability of heaviest elements[J]. International Journal of Modern Physics E, 2012, **21**(2): 1250013. DOI: [10.1142/s0218301312500139](https://doi.org/10.1142/s0218301312500139).
- 37 Qian Y B, Ren Z Z. Predictions on properties of α decay and spontaneous fission in superheavy odd-Z nuclei[J]. Physical Review C, 2014, **90**(6): 064308. DOI: [10.1103/physrevc.90.064308](https://doi.org/10.1103/physrevc.90.064308).
- 38 Zagrebaev V I, Denikin A, Alekseev A, *et al.* Nuclear Reaction Video(NRV)[EB/OL]. 2022-12-1. <http://nrv.jinr.ru/nrv/>.
- 39 Dong T K, Ren Z Z. α -decay energy formula for superheavy nuclei based on the liquid-drop model[J]. Physical Review C, 2010, **82**(3): 034320. DOI: [10.1103/physrevc.82.034320](https://doi.org/10.1103/physrevc.82.034320).
- 40 Möller P, Mumpower M R, Kawano T, *et al.* Nuclear properties for astrophysical and radioactive-ion-beam applications (II) [J]. Atomic Data and Nuclear Data Tables, 2019, **125**: 1 - 192.