

文章编号: 1007-4627(2018) 04-0463-07

基于结团形成模型系统研究 $Z = 82$, $N = 126$ 闭壳附近原子核的 α 衰变

邓军刚, 程俊皓, 陈玖龙, 李小华[†]

(南华大学核科学技术学院, 湖南 衡阳 421001)

摘要: 基于结团形成模型(cluster-formation model, CFM)系统地研究了质子数 $Z = 82$, 中子数 $N = 126$ 闭壳附近的 α 衰变母核的 α 衰变预形成因子 P_α 。计算结果表明: 基于结团形成模型计算得到的 P_α 线性地依赖于价质子(空穴) N_p 和价中子(空穴) N_n 的乘积。这与前期工作[SUN X D, *et al.* Phys Rev C, 2016, **94**(2):024338; DENG J G, *et al.* Phys Rev C, 2017, **96**(2):024318]得到的结论是一致的, 其中, P_α 是唯象的且模型依赖的, 从 α 衰变半衰期的理论值和实验值的比值中提取。结合前期工作可以得到这样的结论: 对于 $Z=82$, $N=126$ 闭壳附近的 α 衰变母核, 其 P_α 与 $N_p N_n$ 呈线性关系, 且价质子-价中子相互作用在 α 结团预形成中起了很重要的作用。

关键词: α 衰变; α 衰变预形成因子; 结团形成模型

中图分类号: O571.32⁺1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.35.04.463

1 引言

1928年, Gurney和Condon^[1]以及Gamow^[2]分别独立提出了解释 α 衰变现象的量子隧穿理论。从那时起, α 衰变一直被用作研究不稳定核、缺中子核和超重核的有力工具之一, 并且一直是核物理研究的一个热点。

在Gamow的理论中, α 衰变过程被描述为一个预先形成的 α 粒子穿透库仑位垒的过程。因此, 应将表示 α 结团预形成概率的 α 预成因子 P_α 引入 α 衰变理论。微观地, α 预形成因子可以通过初始波函数和 α 衰变波函数之间的重叠来计算^[3]。在结团模型中, 对于某种类型的核, α 预形成因子是小于1的常数, 并且偶-偶核的 $P_\alpha >$ 奇-A核的 $>$ 奇-奇核的^[4]。Xu和Ren使用密度依赖的结团模型(density-dependent cluster model, DDCM)系统地研究了中等质量核的 α 衰变^[5]。他们的结果表明, 偶-偶核的 P_α 为0.43, 奇-A核的为0.35, 奇-奇核的为0.18。由于量子多体问题的复杂性, 唯象地, P_α 用 α 衰变半衰期的理论值和实验值的比值提取得到^[6-7]。然而, 这种方法计算得到的 α 预成型因子是模型依赖的。

最近, Ahmed等^[8]和Deng等^[9-10]基于量子力学理论提出了用结团形成模型(cluster-formation model, CFM)来计算 α 预形成因子 P_α ^[8-11]。这个理论认为母

核的初态应该是所有可能结团态的线性组合。Ahmed等^[8, 11]使用结团形成模型成功地确定了 ^{212}Po 的 $P_\alpha = 0.22$, 这可以很好地再现Varga等^[12]和Ni^[13]使用不同微观方式计算的 P_α 值。2011年, Seif等^[14]提出偶-偶核 α 衰变的 α 预成因子线性依赖于质子数 $Z=82$, 中子数 $N=126$ 闭壳附近原子核的价质子(空穴) N_p 和价中子(空穴) N_n 之积。在前期工作中发现: 对于奇-A核和奇-奇核从 α 衰变半衰期的理论值和实验值的比值中提取的唯象的 P_α 也满足这种关系^[15-16]。因此验证使用结团形成模型计算得到的 α 预形成因子是否也与 $N_p N_n$ 呈线性关系是很有意义的。

2 理论框架

在结团形成模型^[8-11]中, 总的结团态 Ψ 被假定是所有 n 种可能的结团态 Ψ_i 的线性组合。它可以表示为

$$\Psi = \sum_{i=1}^n a_i \Psi_i, \quad (1)$$

$$a_i = \int \Psi_i^* \Psi d\tau, \quad (2)$$

其中: a_i 表示 Ψ_i 的叠加系数, 基于正交条件

$$\sum_{i=1}^n |a_i|^2 = 1. \quad (3)$$

收稿日期: 2018-09-08; 修改日期: 2018-11-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11205083); 湖南省自然科学基金资助项目(2015JJ3103, 2015JJ2121); 湖南省教育厅重点资助项目(15A159); 湖南省研究生科研创新项目(CX2017B536); 南华大学研究生科学基金资助项目(2018KYY027)

作者简介: 邓军刚(1994-), 男, 陕西咸阳人, 硕士研究生, 从事原子核 α 衰变研究; E-mail: dengjungang1016@163.com

[†] 通信作者: 李小华, E-mail: lixiaohuaphysics@126.com。

总的波函数是总的哈密顿量 H 的特征函数。同样地, H 可以表示为

$$H = \sum_{i=1}^n H_i, \quad (4)$$

其中: H_i 是第 i 个结团态 Ψ_i 的哈密顿量。由于描述原子核的所有结团态被假定共有个总的能量 E 。因此,总的能量 E 可以表示为

$$E = \sum_{i=1}^n |a_i|^2 E = \sum_{i=1}^n E_{fi}, \quad (5)$$

其中: E_{fi} 表示第 i 个结团态 Ψ_i 的形成能。因此, α 预形成因子可以定义为

$$P_\alpha = |a_\alpha|^2 = \frac{E_{f\alpha}}{E}, \quad (6)$$

其中: a_α 表示 α 结团态的系数; $E_{f\alpha}$ 是 α 结团的形成能。 E 由 $E_{f\alpha}$ 以及 α 结团和子核之间的相互作用能组成。

在结团形成模型^[8-11]的框架中, α 结团形成能 $E_{f\alpha}$ 和所考虑系统的总能量 E 可以表示为4种不同的情况:

(a) 对于偶-偶核,

$$E_{f\alpha} = 3B(A, Z) + B(A-4, Z-2) - 2B(A-1, Z-1) - 2B(A-1, Z), \quad (7a)$$

$$E = B(A, Z) - B(A-4, Z-2); \quad (7b)$$

(b) 对于偶 Z -奇 N 核(也就是偶-奇核),

$$E_{f\alpha} = 3B(A-1, Z) + B(A-5, Z-2) - 2B(A-2, Z-1) - 2B(A-2, Z), \quad (7c)$$

$$E = B(A, Z) - B(A-5, Z-2); \quad (7d)$$

(c) 对于奇 Z -偶 N 核(也就是奇-偶核),

$$E_{f\alpha} = 3B(A-1, Z-1) + B(A-5, Z-3) - 2B(A-2, Z-2) - 2B(A-2, Z-1); \quad (7e)$$

$$E = B(A, Z) - B(A-5, Z-3), \quad (7f)$$

(d) 对于奇-奇核,

$$E_{f\alpha} = 3B(A-2, Z-1) + B(A-6, Z-3) - 2B(A-3, Z-2) - 2B(A-3, Z-1), \quad (7g)$$

$$E = B(A, Z) - B(A-6, Z-3). \quad (7h)$$

其中, $B(A, Z)$ 表示质量数为 A 、质子数为 Z 的原子核的结合能。

3 结果与讨论

本工作的目的是研究 $Z=82$, $N=126$ 闭壳附近 α 衰变原子核的 α 预形成因子。许多研究人员认为, α 预形成因子随价核子(空穴)的增大而增大^[6-7]。在2011年,Seif等^[14]已经提出,在 $Z=82$, $N=126$ 闭壳附近的偶-偶核 α 衰变的 P_α 线性依赖于母核的价质子(空穴)和价中子(空穴)之积 $N_p N_n$ 。此外,前期工作系统地研究了奇- A 和奇-奇核的允许 α 衰变(α 粒子带走的角动量 $l=0$)和禁戒 α 衰变(α 粒子带走的角动量 $l \neq 0$)的 P_α 。其中, P_α 用 α 衰变半衰期的理论值和实验值的比值提取,它是唯象的且模型依赖的^[15-16]。研究结果表明: P_α 与 $N_p N_n$ 线性相关。最近,结团形成模型^[8-11]被提出用结合能差异来计算 P_α 。这是一种简单、有效的方式。一旦已知母核和相邻原子核的结合能,就可以容易地计算出 P_α 。因此,验证结团形成模型计算得到的 α 预形成因子是否也线性依赖于 $N_p N_n$ 是很有意义的。

为了方便研究,图1给出了核素分布图。图中,核素按幻数($Z=82$, $N=126$)分为3个区域。在第一区域中,质子数高于 $Z=82$ 闭壳,中子数低于 $N=126$ 闭壳,因此 $N_p N_n$ 为负值。同样地,在第二区域和第三区域区, $N_p N_n$ 为正值。因此,第二区域和第三区域区中的核素可以统一研究。

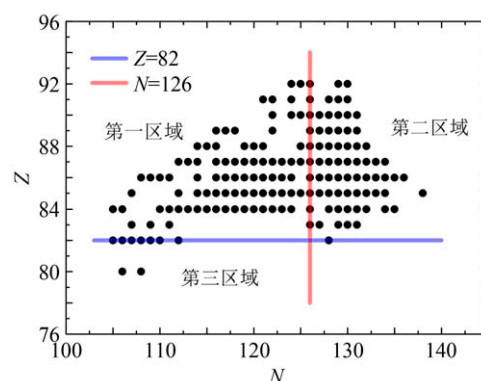


图1 (在线彩图) 核素分布图
蓝线和红线分别表示 $Z=82$ 和 $N=126$ 闭壳。

首先,基于结团形成模型^[8-11]系统地计算了 $Z=82$, $N=126$ 闭壳附近 α 衰变原子核的 P_α ,结果列在表1~5中。在这些表的左侧和右侧分别给出了位于第一区域和第二、三区域核素的 α 衰变的实验数据和 P_α 的计算结果。每一侧的第一到六列分别代表 α 衰变、 α 衰变能的实验值、自旋-宇称变化、被 α 粒子带走的最小角动量、 α 衰变半衰期的实验值及利用结团形成模型计算得到的 P_α 。从这些表中,可以发现偶-偶核的 $P_\alpha >$ 奇- A 核的 $>$ 奇-奇核的,这与各种模型得到的 P_α 的变化趋势是一致的^[4, 17-18]。

表 1 $Z=82$, $N=126$ 闭壳附近偶-偶核 α 衰变的实验数据和 P_α 的计算结果。 α 衰变半衰期, 自旋和宇称的实验值取自最新的原子核性质评价表 NUBASE2016^[19], α 衰变能取自最新的原子核质量表 AME2016^[20-21], 被 α 粒子带走的最小角动量由自旋-宇称守恒定则得到

α transition	Q_α /MeV	$j_p^\pi \rightarrow j_d^\pi$	$l_{\min}$	$T_{1/2}^{\text{expt}}/\text{s}$	P_α	α transition	Q_α /MeV	$j_p^\pi \rightarrow j_d^\pi$	$l_{\min}$	$T_{1/2}^{\text{expt}}/\text{s}$	P_α
第一区域的原子核						第二和第三区域的原子核					
$^{210}\text{Pb} \rightarrow ^{206}\text{Hg}$	3.793	$0^+ \rightarrow 0^+$	0	9.26×10^{16}	0.107	$^{186}\text{Hg} \rightarrow ^{182}\text{Pt}$	5.204	$0^+ \rightarrow 0^+$	0	5.02×10^5	0.247
$^{190}\text{Po} \rightarrow ^{186}\text{Pb}$	7.693	$0^+ \rightarrow 0^+$	0	2.46×10^{-3}	0.262	$^{188}\text{Hg} \rightarrow ^{184}\text{Pt}$	4.707	$0^+ \rightarrow 0^+$	0	3.33×10^9	0.239
$^{194}\text{Po} \rightarrow ^{190}\text{Pb}$	6.987	$0^+ \rightarrow 0^+$	0	3.92×10^{-1}	0.235	$^{188}\text{Pb} \rightarrow ^{184}\text{Hg}$	6.109	$0^+ \rightarrow 0^+$	0	2.68×10^2	0.222
$^{196}\text{Po} \rightarrow ^{192}\text{Pb}$	6.658	$0^+ \rightarrow 0^+$	0	5.67×10^0	0.222	$^{190}\text{Pb} \rightarrow ^{186}\text{Hg}$	5.697	$0^+ \rightarrow 0^+$	0	1.76×10^4	0.215
$^{198}\text{Po} \rightarrow ^{194}\text{Pb}$	6.310	$0^+ \rightarrow 0^+$	0	1.85×10^2	0.206	$^{192}\text{Pb} \rightarrow ^{188}\text{Hg}$	5.221	$0^+ \rightarrow 0^+$	0	3.52×10^6	0.210
$^{200}\text{Po} \rightarrow ^{196}\text{Pb}$	5.981	$0^+ \rightarrow 0^+$	0	6.2×10^3	0.187	$^{194}\text{Pb} \rightarrow ^{190}\text{Hg}$	4.738	$0^+ \rightarrow 0^+$	0	1.71×10^{10}	0.198
$^{202}\text{Po} \rightarrow ^{198}\text{Pb}$	5.700	$0^+ \rightarrow 0^+$	0	1.39×10^5	0.178	$^{212}\text{Po} \rightarrow ^{208}\text{Pb}$	8.954	$0^+ \rightarrow 0^+$	0	2.95×10^{-7}	0.221
$^{204}\text{Po} \rightarrow ^{200}\text{Pb}$	5.485	$0^+ \rightarrow 0^+$	0	1.88×10^6	0.158	$^{214}\text{Po} \rightarrow ^{210}\text{Pb}$	7.834	$0^+ \rightarrow 0^+$	0	1.64×10^{-4}	0.213
$^{206}\text{Po} \rightarrow ^{202}\text{Pb}$	5.327	$0^+ \rightarrow 0^+$	0	1.39×10^7	0.145	$^{216}\text{Po} \rightarrow ^{212}\text{Pb}$	6.907	$0^+ \rightarrow 0^+$	0	1.45×10^{-1}	0.205
$^{208}\text{Po} \rightarrow ^{204}\text{Pb}$	5.216	$0^+ \rightarrow 0^+$	0	9.15×10^7	0.135	$^{218}\text{Po} \rightarrow ^{214}\text{Pb}$	6.115	$0^+ \rightarrow 0^+$	0	1.86×10^2	0.196
$^{210}\text{Po} \rightarrow ^{206}\text{Pb}$	5.408	$0^+ \rightarrow 0^+$	0	1.20×10^7	0.105	$^{214}\text{Rn} \rightarrow ^{210}\text{Po}$	9.208	$0^+ \rightarrow 0^+$	0	2.70×10^{-7}	0.228
$^{194}\text{Rn} \rightarrow ^{190}\text{Po}$	7.862	$0^+ \rightarrow 0^+$	0	7.80×10^{-4}	0.262	$^{216}\text{Rn} \rightarrow ^{212}\text{Po}$	8.198	$0^+ \rightarrow 0^+$	0	4.50×10^{-5}	0.237
$^{196}\text{Rn} \rightarrow ^{192}\text{Po}$	7.617	$0^+ \rightarrow 0^+$	0	4.70×10^{-3}	0.257	$^{218}\text{Rn} \rightarrow ^{214}\text{Po}$	7.263	$0^+ \rightarrow 0^+$	0	3.38×10^{-2}	0.234
$^{200}\text{Rn} \rightarrow ^{196}\text{Po}$	7.043	$0^+ \rightarrow 0^+$	0	1.17×10^0	0.228	$^{220}\text{Rn} \rightarrow ^{216}\text{Po}$	6.405	$0^+ \rightarrow 0^+$	0	5.56×10^1	0.221
$^{202}\text{Rn} \rightarrow ^{198}\text{Po}$	6.773	$0^+ \rightarrow 0^+$	0	1.23×10^1	0.213	$^{222}\text{Rn} \rightarrow ^{218}\text{Po}$	5.591	$0^+ \rightarrow 0^+$	0	3.30×10^5	0.222
$^{204}\text{Rn} \rightarrow ^{200}\text{Po}$	6.547	$0^+ \rightarrow 0^+$	0	1.03×10^2	0.194	$^{216}\text{Ra} \rightarrow ^{212}\text{Rn}$	9.526	$0^+ \rightarrow 0^+$	0	1.82×10^{-7}	0.239
$^{206}\text{Rn} \rightarrow ^{202}\text{Po}$	6.384	$0^+ \rightarrow 0^+$	0	5.46×10^2	0.181	$^{218}\text{Ra} \rightarrow ^{214}\text{Rn}$	8.546	$0^+ \rightarrow 0^+$	0	2.52×10^{-5}	0.242
$^{208}\text{Rn} \rightarrow ^{204}\text{Po}$	6.260	$0^+ \rightarrow 0^+$	0	2.33×10^3	0.163	$^{220}\text{Ra} \rightarrow ^{216}\text{Rn}$	7.592	$0^+ \rightarrow 0^+$	0	1.79×10^{-2}	0.240
$^{210}\text{Rn} \rightarrow ^{206}\text{Po}$	6.159	$0^+ \rightarrow 0^+$	0	8.99×10^3	0.152	$^{216}\text{Th} \rightarrow ^{212}\text{Ra}$	8.072	$0^+ \rightarrow 0^+$	0	2.60×10^{-2}	0.159
$^{212}\text{Rn} \rightarrow ^{208}\text{Po}$	6.385	$0^+ \rightarrow 0^+$	0	1.43×10^3	0.121	$^{218}\text{Th} \rightarrow ^{214}\text{Ra}$	9.849	$0^+ \rightarrow 0^+$	0	1.17×10^{-7}	0.251
$^{202}\text{Ra} \rightarrow ^{198}\text{Rn}$	7.880	$0^+ \rightarrow 0^+$	0	4.10×10^{-3}	0.248	$^{220}\text{Th} \rightarrow ^{216}\text{Ra}$	8.953	$0^+ \rightarrow 0^+$	0	9.70×10^{-6}	0.247
$^{204}\text{Ra} \rightarrow ^{200}\text{Rn}$	7.637	$0^+ \rightarrow 0^+$	0	6.00×10^{-2}	0.237	$^{218}\text{U} \rightarrow ^{214}\text{Th}$	8.775	$0^+ \rightarrow 0^+$	0	5.50×10^{-4}	0.189
$^{208}\text{Ra} \rightarrow ^{204}\text{Rn}$	7.273	$0^+ \rightarrow 0^+$	0	1.27×10^0	0.199	$^{222}\text{U} \rightarrow ^{218}\text{Th}$	9.478	$0^+ \rightarrow 0^+$	0	4.70×10^{-6}	0.246
$^{214}\text{Ra} \rightarrow ^{210}\text{Rn}$	7.273	$0^+ \rightarrow 0^+$	0	2.44×10^0	0.139						
$^{212}\text{Th} \rightarrow ^{208}\text{Ra}$	7.958	$0^+ \rightarrow 0^+$	0	3.17×10^{-2}	0.205						
$^{214}\text{Th} \rightarrow ^{210}\text{Ra}$	7.827	$0^+ \rightarrow 0^+$	0	8.70×10^{-2}	0.196						
$^{216}\text{U} \rightarrow ^{212}\text{Th}$	8.530	$0^+ \rightarrow 0^+$	0	6.90×10^3	0.215						

表 2 $Z = 82$, $N = 126$ 闭壳附近奇- A 核允许 α 衰变的实验数据和 P_α 的计算结果。‘()’ 表示不确定的自旋和/或宇称值, ‘#’ 表示根据邻近核素的趋势估计的值, 它们都取自 NUBASE2016^[19]

α transition	Q_α /MeV	$j_p^\pi \rightarrow j_d^\pi$	$l_{\min}$	$T_{1/2}^{\text{expt}}/\text{s}$	P_α	α transition	Q_α /MeV	$j_p^\pi \rightarrow j_d^\pi$	$l_{\min}$	$T_{1/2}^{\text{expt}}/\text{s}$	P_α
第一区域的原子核						第二和第三区域的原子核					
$^{195}\text{Po} \rightarrow ^{191}\text{Pb}$	6.745	$(3/2^-) \rightarrow (3/2^-)$	0	4.92×10^0	0.170	$^{191}\text{Pb} \rightarrow ^{187}\text{Hg}$	5.463	$(3/2^-) \rightarrow 3/2(-)$	0	1.55×10^4	0.160
$^{197}\text{Po} \rightarrow ^{193}\text{Pb}$	6.405	$(3/2^-) \rightarrow (3/2^-)$	0	1.20×10^2	0.162	$^{213}\text{Po} \rightarrow ^{209}\text{Pb}$	8.536	$9/2^+ \rightarrow 9/2^+$	0	3.71×10^{-6}	0.180
$^{199}\text{Po} \rightarrow ^{195}\text{Pb}$	6.075	$(3/2^-) \rightarrow 3/2^-$	0	4.36×10^3	0.152	$^{215}\text{Po} \rightarrow ^{211}\text{Pb}$	7.527	$9/2^+ \rightarrow 9/2^+$	0	1.78×10^{-3}	0.177
$^{201}\text{Po} \rightarrow ^{197}\text{Pb}$	5.799	$3/2^- \rightarrow 3/2^-$	0	8.26×10^4	0.139	$^{219}\text{Po} \rightarrow ^{215}\text{Pb}$	5.916	$9/2^+ \# \rightarrow 9/2^+ \#$	0	2.19×10^3	0.167
$^{205}\text{Po} \rightarrow ^{201}\text{Pb}$	5.325	$5/2^- \rightarrow 5/2^-$	0	1.53×10^7	0.120	$^{213}\text{At} \rightarrow ^{209}\text{Bi}$	9.254	$9/2^- \rightarrow 9/2^-$	0	1.25×10^{-7}	0.187
$^{207}\text{Po} \rightarrow ^{203}\text{Pb}$	5.216	$5/2^- \rightarrow 5/2^-$	0	9.85×10^7	0.111	$^{215}\text{At} \rightarrow ^{211}\text{Bi}$	8.178	$9/2^- \rightarrow 9/2^-$	0	1.00×10^{-4}	0.178
$^{197}\text{At} \rightarrow ^{193}\text{Bi}$	7.105	$(9/2^-) \rightarrow (9/2^-)$	0	4.04×10^{-1}	0.220	$^{217}\text{At} \rightarrow ^{213}\text{Bi}$	7.202	$9/2^- \rightarrow 9/2^-$	0	3.26×10^{-2}	0.168
$^{199}\text{At} \rightarrow ^{195}\text{Bi}$	6.778	$9/2(-) \rightarrow 9/2(-)$	0	7.83×10^0	0.200	$^{219}\text{At} \rightarrow ^{215}\text{Bi}$	6.342	$(9/2^-) \rightarrow (9/2^-)$	0	5.98×10^1	0.158
$^{201}\text{At} \rightarrow ^{197}\text{Bi}$	6.473	$(9/2^-) \rightarrow (9/2^-)$	0	1.19×10^2	0.177	$^{215}\text{Rn} \rightarrow ^{211}\text{Po}$	8.839	$9/2^+ \rightarrow 9/2^+$	0	2.30×10^{-6}	0.182
$^{203}\text{At} \rightarrow ^{199}\text{Bi}$	6.210	$9/2^- \rightarrow 9/2^-$	0	1.42×10^3	0.167	$^{217}\text{Rn} \rightarrow ^{213}\text{Po}$	7.888	$9/2^+ \rightarrow 9/2^+$	0	5.40×10^{-4}	0.192
$^{205}\text{At} \rightarrow ^{201}\text{Bi}$	6.019	$9/2^- \rightarrow 9/2^-$	0	1.99×10^4	0.146	$^{215}\text{Fr} \rightarrow ^{211}\text{At}$	9.541	$9/2^- \rightarrow 9/2^-$	0	8.60×10^{-8}	0.201
$^{207}\text{At} \rightarrow ^{203}\text{Bi}$	5.873	$9/2^- \rightarrow 9/2^-$	0	6.52×10^4	0.132	$^{217}\text{Fr} \rightarrow ^{213}\text{At}$	8.470	$9/2^- \rightarrow 9/2^-$	0	1.68×10^{-5}	0.204
$^{209}\text{At} \rightarrow ^{205}\text{Bi}$	5.757	$9/2^- \rightarrow 9/2^-$	0	4.70×10^5	0.121	$^{219}\text{Fr} \rightarrow ^{215}\text{At}$	7.449	$9/2^- \rightarrow 9/2^-$	0	2.00×10^{-2}	0.198
$^{211}\text{At} \rightarrow ^{207}\text{Bi}$	5.983	$9/2^- \rightarrow 9/2^-$	0	6.21×10^4	0.093	$^{217}\text{Ra} \rightarrow ^{213}\text{Rn}$	9.161	$(9/2^+) \rightarrow 9/2^+ \#$	0	1.63×10^{-6}	0.185
$^{195}\text{Rn} \rightarrow ^{191}\text{Po}$	7.694	$3/2^- \rightarrow (3/2^-)$	0	7.00×10^{-3}	0.183	$^{215}\text{Ac} \rightarrow ^{211}\text{Fr}$	7.746	$9/2^- \rightarrow 9/2^-$	0	1.70×10^{-1}	0.130
$^{197}\text{Rn} \rightarrow ^{193}\text{Po}$	7.410	$(3/2^-) \rightarrow (3/2^-)$	0	5.40×10^{-2}	0.182	$^{217}\text{Ac} \rightarrow ^{213}\text{Fr}$	9.832	$9/2^- \rightarrow 9/2^-$	0	6.90×10^{-8}	0.218
$^{203}\text{Rn} \rightarrow ^{199}\text{Po}$	6.629	$3/2^- \# \rightarrow (3/2^-)$	0	6.58×10^1	0.155	$^{219}\text{Ac} \rightarrow ^{215}\text{Fr}$	8.827	$9/2^- \rightarrow 9/2^-$	0	1.18×10^{-5}	0.216

续表2

α transition	Q_{α}/MeV	$j_p^{\pi} \rightarrow j_d^{\pi}$	$l_{\min}$	$T_{1/2}^{\text{expt}}/\text{s}$	P_{α}	α transition	Q_{α}/MeV	$j_p^{\pi} \rightarrow j_d^{\pi}$	$l_{\min}$	$T_{1/2}^{\text{expt}}/\text{s}$	P_{α}
第一区域的原子核						第二和第三区域的原子核					
$^{207}\text{Rn} \rightarrow ^{203}\text{Po}$	6.251	$5/2^{-} \rightarrow 5/2^{-}$	0	2.61×10^3	0.135	$^{219}\text{Th} \rightarrow ^{215}\text{Ra}$	9.511	$9/2^{+} \# \rightarrow 9/2^{+} \#$	0	1.02×10^{-6}	0.189
$^{209}\text{Rn} \rightarrow ^{205}\text{Po}$	6.155	$5/2^{-} \rightarrow 5/2^{-}$	0	1.00×10^4	0.122	$^{217}\text{Pa} \rightarrow ^{213}\text{Ac}$	8.488	$9/2^{-} \# \rightarrow 9/2^{-} \#$	0	3.48×10^{-3}	0.155
$^{199}\text{Fr} \rightarrow ^{195}\text{At}$	7.816	$1/2^{+} \# \rightarrow 1/2^{+}$	0	6.60×10^{-3}	0.247	$^{219}\text{Pa} \rightarrow ^{215}\text{Ac}$	10.084	$9/2^{-} \rightarrow 9/2^{-}$	0	5.30×10^{-8}	0.236
$^{201}\text{Fr} \rightarrow ^{197}\text{At}$	7.519	$(9/2^{-}) \rightarrow (9/2^{-})$	0	6.28×10^{-2}	0.231	$^{221}\text{Pa} \rightarrow ^{217}\text{Ac}$	9.251	$9/2^{-} \rightarrow 9/2^{-}$	0	5.90×10^{-6}	0.229
$^{203}\text{Fr} \rightarrow ^{199}\text{At}$	7.274	$9/2^{-} \rightarrow 9/2^{-}$	0	5.50×10^{-1}	0.211	$^{221}\text{U} \rightarrow ^{217}\text{Th}$	9.889	$(9/2^{+}) \rightarrow 9/2^{+} \#$	0	6.60×10^{-7}	0.186
$^{205}\text{Fr} \rightarrow ^{201}\text{At}$	7.054	$9/2^{-} \rightarrow 9/2^{-}$	0	3.82×10^0	0.188						
$^{207}\text{Fr} \rightarrow ^{203}\text{At}$	6.894	$9/2^{-} \rightarrow 9/2^{-}$	0	1.55×10^1	0.174						
$^{209}\text{Fr} \rightarrow ^{205}\text{At}$	6.777	$9/2^{-} \rightarrow 9/2^{-}$	0	5.66×10^1	0.153						
$^{211}\text{Fr} \rightarrow ^{207}\text{At}$	6.662	$9/2^{-} \rightarrow 9/2^{-}$	0	2.13×10^2	0.140						
$^{213}\text{Fr} \rightarrow ^{209}\text{At}$	6.905	$9/2^{-} \rightarrow 9/2^{-}$	0	3.43×10^1	0.110						
$^{203}\text{Ra} \rightarrow ^{199}\text{Rn}$	7.735	$(3/2^{-}) \rightarrow (3/2^{-})$	0	3.60×10^{-2}	0.175						
$^{209}\text{Ra} \rightarrow ^{205}\text{Rn}$	7.143	$5/2^{-} \rightarrow 5/2^{-}$	0	4.71×10^0	0.144						
$^{205}\text{Ac} \rightarrow ^{201}\text{Fr}$	8.096	$9/2^{-} \# \rightarrow (9/2^{-})$	0	8.00×10^{-2}	0.247						
$^{207}\text{Ac} \rightarrow ^{203}\text{Fr}$	7.849	$9/2^{-} \# \rightarrow 9/2^{-}$	0	3.10×10^{-2}	0.225						
$^{211}\text{Ac} \rightarrow ^{207}\text{Fr}$	7.619	$9/2^{-} \rightarrow 9/2^{-}$	0	2.13×10^{-1}	0.184						
$^{213}\text{Pa} \rightarrow ^{209}\text{Ac}$	8.395	$9/2^{-} \# \rightarrow (9/2^{-})$	0	7.00×10^{-3}	0.207						
$^{215}\text{Pa} \rightarrow ^{211}\text{Ac}$	8.235	$9/2^{-} \# \rightarrow 9/2^{-}$	0	1.40×10^{-2}	0.195						

表 3 $Z = 82$, $N = 126$ 闭壳附近奇- A 核禁戒 α 衰变的实验数据和 P_{α} 的计算结果

α transition	Q_{α}/MeV	$j_p^{\pi} \rightarrow j_d^{\pi}$	$l_{\min}$	$T_{1/2}^{\text{expt}}/\text{s}$	P_{α}	α transition	Q_{α}/MeV	$j_p^{\pi} \rightarrow j_d^{\pi}$	$l_{\min}$	$T_{1/2}^{\text{expt}}/\text{s}$	P_{α}
第一区域的原子核						第二和第三区域的原子核					
$^{209}\text{Bi} \rightarrow ^{205}\text{Tl}$	3.138	$9/2^{-} \rightarrow 1/2^{+}$	5	6.34×10^{26}	0.094	$^{187}\text{Pb} \rightarrow ^{183}\text{Hg}$	6.393	$3/2^{-} \rightarrow 1/2^{-}$	2	1.60×10^2	0.166
$^{189}\text{Po} \rightarrow ^{185}\text{Pb}$	7.694	$(5/2^{-}) \rightarrow 3/2^{-}$	2	3.80×10^{-3}	0.191	$^{189}\text{Pb} \rightarrow ^{185}\text{Hg}$	5.915	$3/2^{-} \rightarrow 1/2^{-}$	2	9.75×10^3	0.163
$^{203}\text{Po} \rightarrow ^{199}\text{Pb}$	5.496	$5/2^{-} \rightarrow 3/2^{-}$	2	1.97×10^6	0.134	$^{213}\text{Bi} \rightarrow ^{209}\text{Tl}$	5.988	$9/2^{-} \rightarrow 1/2^{+}$	5	1.31×10^5	0.092
$^{205}\text{Rn} \rightarrow ^{201}\text{Po}$	6.386	$5/2^{-} \rightarrow 3/2^{-}$	2	6.88×10^2	0.143	$^{223}\text{At} \rightarrow ^{219}\text{Bi}$	4.723	$3/2^{-} \# \rightarrow 9/2^{-} \#$	4	6.25×10^5	0.161
$^{207}\text{Ra} \rightarrow ^{203}\text{Rn}$	7.269	$5/2^{-} \# \rightarrow 3/2^{-} \#$	2	1.60×10^0	0.160	$^{213}\text{Rn} \rightarrow ^{209}\text{Po}$	8.245	$9/2^{+} \# \rightarrow 1/2^{-}$	5	1.95×10^{-2}	0.098
$^{213}\text{Ra} \rightarrow ^{209}\text{Rn}$	6.862	$1/2^{-} \rightarrow 5/2^{-}$	2	2.03×10^2	0.126	$^{219}\text{Rn} \rightarrow ^{215}\text{Po}$	6.946	$5/2^{+} \rightarrow 9/2^{+}$	2	3.96×10^0	0.193
$^{215}\text{Th} \rightarrow ^{211}\text{Ra}$	7.665	$(1/2^{-}) \rightarrow 5/2^{-}$	2	1.20×10^0	0.142	$^{221}\text{Rn} \rightarrow ^{217}\text{Po}$	6.162	$7/2^{+} \rightarrow (9/2^{+})$	2	6.98×10^3	0.185
$^{217}\text{U} \rightarrow ^{213}\text{Th}$	8.425	$1/2^{-} \# \rightarrow 5/2^{-} \#$	2	8.00×10^{-4}	0.152	$^{221}\text{Fr} \rightarrow ^{217}\text{At}$	6.457	$5/2^{-} \rightarrow 9/2^{-}$	2	2.88×10^2	0.182
						$^{215}\text{Ra} \rightarrow ^{211}\text{Rn}$	8.864	$9/2^{+} \# \rightarrow 1/2^{-}$	5	1.67×10^{-3}	0.109
						$^{219}\text{Ra} \rightarrow ^{215}\text{Rn}$	8.138	$(7/2)^{+} \rightarrow 9/2^{+}$	2	1.00×10^{-2}	0.190
						$^{217}\text{Th} \rightarrow ^{213}\text{Ra}$	9.435	$9/2^{+} \# \rightarrow 1/2^{-}$	5	2.47×10^{-4}	0.122
						$^{221}\text{Th} \rightarrow ^{217}\text{Ra}$	8.625	$7/2^{+} \# \rightarrow (9/2^{+})$	2	1.78×10^{-3}	0.190

表 4 $Z = 82$, $N = 126$ 闭壳附近奇-奇核允许 α 衰变的实验数据和 P_{α} 的计算结果

α transition	Q_{α}/MeV	$j_p^{\pi} \rightarrow j_d^{\pi}$	$l_{\min}$	$T_{1/2}^{\text{expt}}/\text{s}$	P_{α}	α transition	Q_{α}/MeV	$j_p^{\pi} \rightarrow j_d^{\pi}$	$l_{\min}$	$T_{1/2}^{\text{expt}}/\text{s}$	P_{α}
第一区域的原子核						第二和第三区域的原子核					
$^{192}\text{At} \rightarrow ^{188}\text{Bi}$	7.696	$3^{+} \# \rightarrow 3^{+} \#$	0	1.15×10^{-2}	0.190	$^{214}\text{At} \rightarrow ^{210}\text{Bi}$	8.987	$1^{-} \rightarrow 1^{-}$	0	5.58×10^{-7}	0.154
$^{200}\text{At} \rightarrow ^{196}\text{Bi}$	6.596	$(3^{+}) \rightarrow (3^{+})$	0	8.26×10^1	0.147	$^{216}\text{At} \rightarrow ^{212}\text{Bi}$	7.950	$1^{-} \rightarrow 1^{-}$	0	3.00×10^{-4}	0.150
$^{202}\text{At} \rightarrow ^{198}\text{Bi}$	6.353	$3^{+} \rightarrow 3^{+}$	0	1.45×10^3	0.133	$^{218}\text{At} \rightarrow ^{214}\text{Bi}$	6.874	$1^{-} \# \rightarrow 1^{-}$	0	1.50×10^0	0.144
$^{204}\text{At} \rightarrow ^{200}\text{Bi}$	6.071	$7^{+} \rightarrow 7^{+}$	0	1.43×10^4	0.126	$^{216}\text{Fr} \rightarrow ^{212}\text{At}$	9.175	$(1^{-}) \rightarrow (1^{-})$	0	7.00×10^{-7}	0.161
$^{206}\text{At} \rightarrow ^{202}\text{Bi}$	5.886	$(5^{+}) \rightarrow 5^{+} \#$	0	2.02×10^5	0.112	$^{218}\text{Fr} \rightarrow ^{214}\text{At}$	8.014	$1^{-} \rightarrow 1^{-}$	0	1.00×10^{-3}	0.166
$^{208}\text{At} \rightarrow ^{204}\text{Bi}$	5.751	$6^{+} \rightarrow 6^{+}$	0	1.06×10^6	0.102	$^{218}\text{Ac} \rightarrow ^{214}\text{Fr}$	9.374	$1^{-} \# \rightarrow (1^{-})$	0	1.00×10^{-6}	0.169
$^{200}\text{Fr} \rightarrow ^{196}\text{At}$	7.615	$(3^{+}) \rightarrow (3^{+})$	0	4.75×10^{-2}	0.173	$^{220}\text{Pa} \rightarrow ^{216}\text{Ac}$	9.651	$1^{-} \# \rightarrow (1^{-})$	0	7.80×10^{-7}	0.178
$^{204}\text{Fr} \rightarrow ^{200}\text{At}$	7.170	$3^{+} \rightarrow (3^{+})$	0	1.82×10^0	0.153						
$^{206}\text{Fr} \rightarrow ^{202}\text{At}$	6.924	$3^{+} \rightarrow 3^{+}$	0	1.81×10^1	0.139						
$^{208}\text{Fr} \rightarrow ^{204}\text{At}$	6.784	$7^{+} \rightarrow 7^{+}$	0	6.62×10^1	0.129						
$^{206}\text{Ac} \rightarrow ^{202}\text{Fr}$	7.959	$(3^{+}) \rightarrow 3^{+}$	0	2.50×10^{-2}	0.172						

表 5 $Z = 82, N = 126$ 闭壳附近奇-奇核禁戒 α 衰变的实验数据和 P_α 的计算结果

α transition	Q_α / MeV	$j_p^\pi \rightarrow j_d^\pi$	$l_{\min}$	$T_{1/2}^{\text{expt}} / \text{s}$	P_α	α transition	Q_α / MeV	$j_p^\pi \rightarrow j_d^\pi$	$l_{\min}$	$T_{1/2}^{\text{expt}} / \text{s}$	P_α
第一区域的原子核						第二和第三区域的原子核					
$^{190}\text{Bi} \rightarrow ^{186}\text{Tl}$	6.862	$(3^+) \rightarrow (2^-)$	1	8.16×10^0	0.163	$^{210}\text{Bi} \rightarrow ^{206}\text{Tl}$	5.037	$1^- \rightarrow 0^-$	2	4.13×10^{11}	0.082
$^{192}\text{Bi} \rightarrow ^{188}\text{Tl}$	6.381	$(3^+) \rightarrow (2^-)$	1	2.77×10^2	0.157	$^{212}\text{Bi} \rightarrow ^{208}\text{Tl}$	6.207	$1^- \rightarrow 5^+$	5	1.01×10^4	0.079
$^{194}\text{Bi} \rightarrow ^{190}\text{Tl}$	5.918	$(3^+) \rightarrow (2^-)$	1	2.05×10^4	0.152	$^{214}\text{Bi} \rightarrow ^{210}\text{Tl}$	5.621	$1^- \rightarrow 5^+ \#$	5	5.66×10^6	0.081
$^{210}\text{At} \rightarrow ^{206}\text{Bi}$	5.631	$(5^+) \rightarrow 6^+$	2	1.66×10^7	0.095	$^{212}\text{At} \rightarrow ^{208}\text{Bi}$	7.817	$(1^-) \rightarrow 5^+$	5	3.14×10^{-1}	0.077
$^{210}\text{Fr} \rightarrow ^{206}\text{At}$	6.672	$6^+ \rightarrow (5)^+$	2	2.67×10^2	0.115	$^{214}\text{Fr} \rightarrow ^{210}\text{At}$	8.588	$(1^-) \rightarrow (5)^+$	5	5.18×10^{-3}	0.089
$^{212}\text{Fr} \rightarrow ^{208}\text{At}$	6.529	$5^+ \rightarrow 6^+$	2	2.78×10^3	0.107	$^{220}\text{Fr} \rightarrow ^{216}\text{At}$	6.800	$1^+ \rightarrow 1^-$	1	2.74×10^1	0.163
$^{212}\text{Pa} \rightarrow ^{208}\text{Ac}$	8.415	$7^+ \# \rightarrow (3^+)$	4	7.50×10^{-3}	0.167	$^{216}\text{Ac} \rightarrow ^{212}\text{Fr}$	9.235	$(1^-) \rightarrow 5^+$	5	4.40×10^{-4}	0.103
						$^{220}\text{Ac} \rightarrow ^{216}\text{Fr}$	8.348	$(3^-) \rightarrow (1^-)$	2	2.64×10^{-2}	0.171

为了方便更深入地研究 P_α , 图 2~4 给出了 $Z=82, N=126$ 闭壳附近偶-偶核, 奇- A 核 (包括允许 α 衰变情况和禁戒 α 衰变情况) 和奇-奇核 (包括允许 α 衰变情况和禁戒 α 衰变情况) 的 P_α 与 $N_p N_n I$ 之间的关系, I 是母核的同位旋。在这些图中, 红色圆圈和蓝色三角形分别代表允许 α 衰变情况和禁戒 α 衰变情况。红色虚线和蓝色实线分别表示基于结团模型计算得到的对应 α 衰变情况的 α 预形成因子的线性拟合, 它可以表示为

$$P_\alpha = a N_p N_n I + b, \quad (8)$$

其中: a 和 b 是可调参数, 可从图 2~4 中 P_α 的拟合中提取, 数值列在表 6 中 (左侧为允许 α 衰变情况, 右侧为禁戒 α 衰变情况)。如图 2~4 所示, 可以清楚地看到对于偶-偶核, 奇- A 核和奇-奇核, 所有的 P_α 都线性依赖于 $N_p N_n I$ 。它表明价质子-价中子相互作用在 α 预形成中起到关键作用, 并且质子-中子对对 α 结团的影响在同一区域基本上保持不变。另外, 在图 3 中, 可以清楚地发现偶-奇核和奇-偶核的 P_α 与 $N_p N_n I$ 之间的线性关系没有明显差异。它表明在 $N_p N_n$ 框架下, 未配对的奇

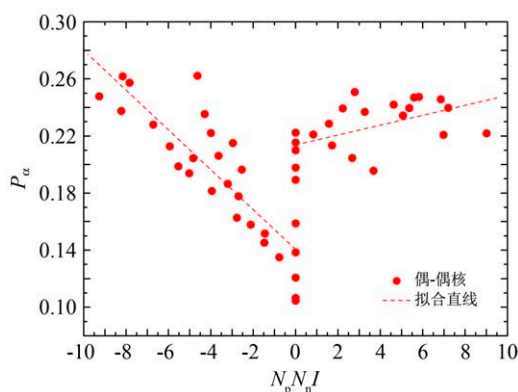


图 2 (在线彩图) 偶-偶核的 α 预形成因子和 $N_p N_n I$ 之间的线性关系
红色虚线表示 α 预形成因子的线性拟合。

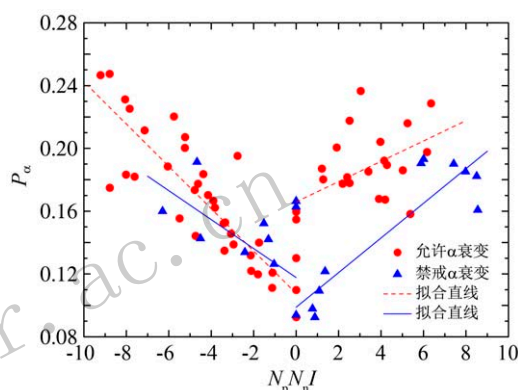


图 3 (在线彩图) 奇- A 核的 α 预形成因子和 $N_p N_n I$ 之间的线性关系
红色虚线和蓝色实线分别表示允许 α 衰变 (包括偶-奇核和奇-偶核) 和禁戒 α 衰变 (包括偶-奇核和奇-偶核) 的 α 预形成因子的线性拟合。

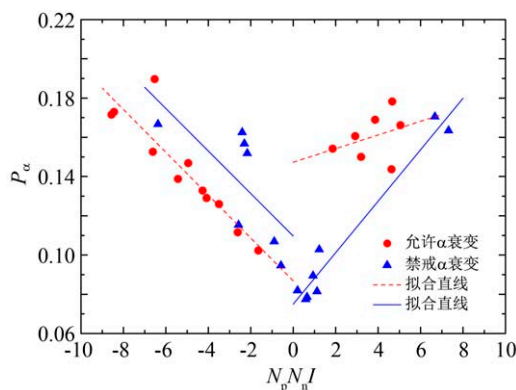


图 4 (在线彩图) 奇-奇核的 α 预形成因子和 $N_p N_n I$ 之间的线性关系
红色虚线和蓝色实线分别表示允许 α 衰变和禁戒 α 衰变的 α 预形成因子的线性拟合。

质子或奇中子对 P_α 的影响可以统一处理。它还验证了结团形成模型使用不同的方法来计算偶-奇核和奇-偶核的 P_α 是合适的。结合前期工作^[15-16], 可以得出这样的结论: $Z=82, N=126$ 闭壳附近 α 衰变原子核的 P_α 与 $N_p N_n$ 呈线性关系。

表 6 Eq. (8) 的参数值

区域	允许 α 衰变		禁戒 α 衰变	
	a	b	a	b
偶-偶核				
第一	-0.013 96	0.140 49	-	-
第二、三	0.003 46	0.213 72	-	-
奇-A核				
第一	-0.013 49	0.107 67	-0.009 23	0.117 7
第二、三	0.006 47	0.165 9	0.011 05	0.098 77
奇-奇核				
第一	-0.010 92	0.086 84	-0.010 83	0.109 66
第二、三	0.003 47	0.147 33	0.013 11	0.074 98

4 结论

综上所述, 基于结团形成模型系统地研究了质子数 $Z=82$, 中子数 $N=126$ 闭壳附近的 α 衰变原子核的 α 衰变预形成因子 P_α 。研究结果表明: 基于结团形成模型计算得到的 P_α 与 $N_p N_n$ 呈线性关系。结合前期工作, 证实了价质子-价中子在 α 结团形成中起着重要作用。本文的计算结果可以为将来的 α 衰变研究过程中的实验测量和理论研究提供一定的指导。

参考文献:

- [1] GURNEY R W, CONDON E U. *Nature*, 1928, **122**(3073): 439.
- [2] GAMOW G. *Z Phys*, 1928, **51**(3): 204.
- [3] LOVAS R G, LIOTTA R J, INSOLIA A, *et al.* *Phys Rep*, 1998, **294**(5): 265.
- [4] XU C, REN Z. *Phys Rev C*, 2006 **73**(4): 041301.
- [5] XU C and REN Z. *Nucl Phys A*, 2005, **760**(3-4): 303.
- [6] ZHANG H F, ROYER G and LI J Q. *Phys Rev C*, 2011, **84**(2): 027303.
- [7] ZHANG G L, LE X Y, ZHANG H Q. *Phys Rev C*, 2009, **80**(6): 064325.
- [8] AHMED S M S, YAHAYA R, RADIMAN S, *et al.* *J Phys G*, 2013, **40**(6): 065105.
- [9] DENG D, REN Z, NI D, *et al.* *J Phys G*, 2015, **42**(7): 075106.
- [10] DENG D, REN Z. *Phys Rev C*, 2016, **93**(4): 044326.
- [11] AHMED S M S. *Nucl Phys A*, 2017, **962**(0375-9474): 103.
- [12] VARGA K, LOVAS R G, LIOTTA R J. *Phys Rev Lett*, 1992, **69**(1): 37.
- [13] NI D, REN Z. *Nucl Phys A*, 2009, **825**(3-4): 145.
- [14] SEIF W M, SHALABY M, ALRAKSHY M F. *Phys Rev C*, 2011, **84**(6): 064608.
- [15] SUN X D, GUO P, LI X H. *Phys Rev C*, 2016, **94**(2): 024338.
- [16] DENG J G, ZHAO J C, XIANG D, *et al.* *Phys Rev C*, 2017, **96**(2): 024318.
- [17] DENG J G, ZHAO J C, CHU P C, *et al.* *Phys Rev C*, 2018, **97**(4): 044322.
- [18] BUCK B, MERCHANT A C, PEREZ S M. *Phys Rev C*, 1992, **45**(5): 2247.
- [19] AUDI G, KONDEV F, WANG M, *et al.* *Chin Phys C*, 2017, **41**(3): 030001.
- [20] HUANG W, AUDI G, WANG M, *et al.* *Chin Phys C*, 2017, **41**(3): 030002.
- [21] WANG M, AUDI G, KONDEV F, *et al.* *Chin Phys C*, 2017, **41**(3): 030003.

Systematic Study of α Decay of Nuclei Around $Z = 82$, $N = 126$ Shell Closures within the Cluster-formation Model

DENG Jungang, CHENG Junhao, CHEN Jiulong, LI Xiaohua[†]

(School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang 421001, Hunan, China)

Abstract: In the present work, the α decay preformation factors P_α are systematically studied within the cluster-formation model (CFM) for nuclei around $Z=82$, $N=126$ closed shells. The calculations show that the P_α calculated by CFM is linearly dependent on the product of valance protons (holes) and valance neutrons (holes) $N_p N_n$. It is consistent with our previous works [SUN X D, *et al.* Phys Rev C, 2016, **94**(2):024338; DENG J G, *et al.* Phys Rev C, 2017, **96**(2):024318], which P_α are model-dependent and extracted from the ratios of calculated α decay half-lives to experimental data. Combining with our previous works, we confirm that the P_α is linearly dependent on the $N_p N_n$ for nuclei around $Z=82$, $N=126$ shell closures. In addition, the valance proton-neutron interaction plays a key role in the α preformation.

Key words: α decay; α preformation factor; cluster-formation model

Received date: 8 Sep. 2018; **Revised date:** 11 Nov. 2018

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (11205083); Natural Science Foundation of Hunan Province, China (2015JJ3103, 2015JJ2121); Research Foundation of Education Bureau of Hunan Province, China (15A159); Hunan Provincial Innovation Foundation For Postgraduate (CX2017B536); University of South China Science Foundation for Postgraduate (2018KYY027)

[†] **Corresponding author:** LI Xiaohua, E-mail: lixiaohuaphysics@126.cn.