

# 重核的结团放射性<sup>\*</sup>

任中洲<sup>1,2;1)</sup> 许昌<sup>2</sup> 王再军<sup>2</sup>

1(兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心 兰州 730000)

2(南京大学物理系 南京 210008)

**摘要** 对重核的结团放射性(<sup>14</sup>C—<sup>34</sup>Si)的实验数据进行了系统的分析和研究.提出了一个描述结团放射性寿命的新公式.理论计算结果与实验寿命在 5 倍以内符合.指出结团放射性的衰变能和结团内  $\alpha$  粒子数有一个新的线性关系,标志着重核表面有  $\alpha$  凝聚.

**关键词** 结团放射性 寿命新公式  $\alpha$  凝聚

## 1 引言

1984 年, Rose 和 Jones 观测到<sup>223</sup>Ra 有一种新放射性——<sup>14</sup>C 放射性<sup>[1]</sup>. 随后一系列实验证实了重核确实存在重的结团放射性(<sup>14</sup>C, <sup>20</sup>O, <sup>24</sup>Ne, <sup>28</sup>Mg, <sup>32</sup>Si 和 <sup>34</sup>Si)<sup>[2-5]</sup>. 虽然重核结团放射性的实验数据已有许多, 但系统的分析和研究工作仍比较少. 本文将对重核结团放射性的实验数据进行系统的分析和研究, 并指出实验数据清楚表明重核表面有  $\alpha$  凝聚现象.

## 2 理论框架

假定结团在重核表面形成, 结团和子核间有吸引的核势、排斥的库仑势及离心势<sup>[5-8]</sup>, 则衰变宽度可写为<sup>[5-8]</sup>

$$\Gamma = PF_c \exp\left[-2 \int_{R_3}^{R_2} dR k(R)\right], \quad (1)$$

这里  $P$  是预形成因子,  $F_c$  是描述结团运动的归一化因子, 指数因子为位垒穿透因子.  $R_2$  和  $R_3$  为第二和第三经典转折点. 仿照  $\alpha$  衰变的推导过程<sup>[9,10]</sup>, 假定  $R_2$  和  $R_3$  之间长程库仑势起主要作用, 并且结团衰变能明显小于位垒高度, 则指数因子可近似为

$\exp[-C_1 Z_1 Z_2 Q^{-1/2} - C_2]$ , 这里  $C_1$  和  $C_2$  为常数,  $Z_1$  和  $Z_2$  为结团和子核电荷数,  $Q$  为结团衰变能. 假定预形成因子及  $F_c$  近似写为  $\exp[-C_3 Z_1 Z_2 - C_4]$ , 利用  $T_{1/2} = \hbar \ln 2 / \Gamma$ , 可将衰变半衰期写为

$$\log_{10}[T_{1/2}] = aZ_1 Z_2 Q^{-1/2} + cZ_1 Z_2 + d + h, \quad (2)$$

这里  $a, c, d$  为待定常数,  $h$  为奇核子阻塞因子. 对偶偶核,  $h = 0$ ; 对奇  $A$  核,  $h$  为待定常数.

公式(2)为结团放射性半寿命的公式, 它是著名的 Geiger-Nuttall 定律对结团放射性的推广. 它类似于  $\alpha$  衰变的 Viola-Seaborg 公式:

$$\log_{10}[T_{1/2}] = (aZ + b)Q^{-1/2} + cZ + d + h, \quad (3)$$

公式(2)中的常数  $a, c, d$  通过拟合偶偶核结团放射性寿命定出,  $h$  由奇  $A$  核结团放射性寿命定出.  $a, c, d, h$  取值为:  $a = 1.51799, c = -0.053387, d = -92.91142, h = 0$  (对偶偶核),  $h = 1.402$  (对奇  $A$  核). 公式(2)中  $Q$  的单位为 MeV,  $T_{1/2}$  的单位为 s.

## 3 数据分析

公式计算出的寿命和实验寿命列在表 1 中, 在表中还列出了另两种理论寿命, 这是基于微观的密

2004-06-24 收稿

\* 国家杰出青年基金(10125521), 教育部博士点基金(20010284036), 国家重点基础研究发展规划项目(G2000077400), 中国科学院创新工程重点项目(KJCX2-SW-N02)资助

1) E-mail: zren@nju.edu.cn

度依赖的结团模型计算出的寿命. 密度依赖的结团模型中核势为重整化的 M3Y 核子-核子势

$$V_N = \lambda \int d\mathbf{r}_1 d\mathbf{r}_2 \rho(\mathbf{r}_1) \rho(\mathbf{r}_2) g(E, |s|), \quad (4)$$

其中  $g(E, |s|) = 7999 \exp(-4s)/4s - 2134 \exp(-2.5s)/2.5s - 276(1 - 0.005E_1/A_1) \delta(s)^{[11,12]}$ , 库仑势把子核看成均匀带电的球体, 将结团近似看成点电荷:

$$V_c(r) = Z_1 Z_2 e^2 / r, \quad (r \geq R), \quad (5)$$

$$V_c(r) = Z_1 Z_2 e^2 / 2R [3 - (r/R)^2], \quad (r \leq R),$$

该模型最近成功给出了核的  $\alpha$  衰变寿命<sup>[13]</sup>, 详细计算在文献[14]中列出. 表 1 中第 1 列为衰变模式, 第 2 列为衰变能, 第 3 列为实验寿命, 第 4 列为公式计算出的寿命, 第 5 列和第 6 列为两组密度依赖的结团模型的计算结果, 其中第 5 列的计算中预形成因子取  $10^{-(0.4 \times A_1 - 2)}$ , 第 6 列的计算中预形成因子取  $10^{-(0.011674 \times Z_1 \times Z_2 - 2.035446)}$ .

表 1 结团放射性实验寿命和理论寿命的比较

Decay	$Q/\text{MeV}$	$\log_{10} T^{\text{expt}}$	$\log_{10} T^{\text{Formula}}$	$\log_{10} T^{\text{RM3Y(1)}}$	$\log_{10} T^{\text{RM3Y(2)}}$
$^{221}\text{Fr} \rightarrow ^{207}\text{Tl} + ^{14}\text{C}$	31.29	14.52	14.43	14.82	14.86
$^{221}\text{Ra} \rightarrow ^{207}\text{Pb} + ^{14}\text{C}$	32.40	13.37	13.43	13.68	13.79
$^{222}\text{Ra} \rightarrow ^{208}\text{Pb} + ^{14}\text{C}$	33.05	11.10	10.73	11.08	11.19
$^{223}\text{Ra} \rightarrow ^{209}\text{Pb} + ^{14}\text{C}$	31.83	15.05	14.60	14.77	14.88
$^{224}\text{Ra} \rightarrow ^{210}\text{Pb} + ^{14}\text{C}$	30.54	15.90	15.97	15.91	16.02
$^{226}\text{Ra} \rightarrow ^{212}\text{Pb} + ^{14}\text{C}$	28.20	21.29	21.46	21.05	21.16
$^{228}\text{Th} \rightarrow ^{208}\text{Pb} + ^{20}\text{O}$	44.72	20.73	20.98	21.46	21.09
$^{230}\text{Th} \rightarrow ^{206}\text{Hg} + ^{24}\text{Ne}$	57.76	24.63	24.17	24.67	24.38
$^{231}\text{Pa} \rightarrow ^{207}\text{Tl} + ^{24}\text{Ne}$	60.41	22.89	23.44	23.09	23.91
$^{232}\text{U} \rightarrow ^{208}\text{Pb} + ^{24}\text{Ne}$	62.31	20.39	21.00	20.41	20.34
$^{233}\text{U} \rightarrow ^{209}\text{Pb} + ^{24}\text{Ne}$	60.49	24.84	24.76	24.30	24.24
$^{234}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Hg} + ^{28}\text{Mg}$	74.11	25.74	25.12	25.42	25.39
$^{236}\text{Pu} \rightarrow ^{208}\text{Pb} + ^{28}\text{Mg}$	79.67	21.65	21.90	20.94	21.20
$^{238}\text{Pu} \rightarrow ^{206}\text{Hg} + ^{32}\text{Si}$	91.19	25.30	25.33	25.80	26.04
$^{242}\text{Cm} \rightarrow ^{208}\text{Pb} + ^{34}\text{Si}$	96.51	23.11	23.19	23.28	23.04

从表中可看出, 公式计算出的寿命与实验数据非常好地符合. 一般情况下两者在 3 倍以内符合, 最大偏差为  $|\log_{10}[T_{\text{exp}}] - \log_{10}[T_{\text{cal}}]| = 0.6$ , 对应实验

和公式寿命相差一个因子 4. 从表 1 第 3 列和第 5, 6 列比较可看出, 密度依赖的结团模型也与实验符合得比较好, 结果在 5 倍以内符合.

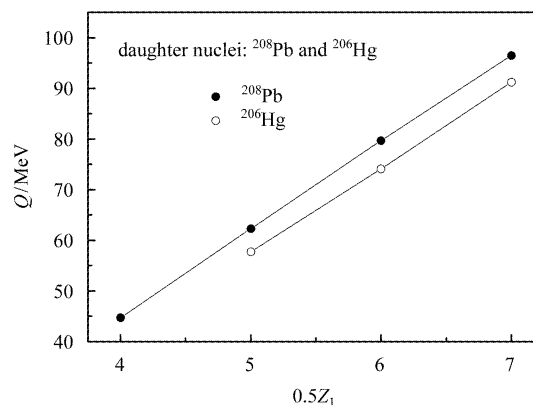


图 1 结团放射性衰变能随结团内  $\alpha$  粒子数目变化的关系

图 1 给出了衰变能和结团内  $\alpha$  粒子数的关系. 从图中可看出, 衰变能和  $\alpha$  粒子数成正比, 近似地用  $Q = (Z - 2) Q_c / 2$  表示,  $Q_c = 15 - 17 \text{ MeV}$ . 这表示重核表面  $\alpha$  粒子凝聚成大的结团, 凝聚能为 15—17 MeV. Brink 等对核物质计算表明重核表面有  $\alpha$  结团效应<sup>[15]</sup>. Takemoto 等的计算也表明低密度核物质有  $\alpha$  结团和  $^{16}\text{O}$  结团效应<sup>[16]</sup>. 这与凝聚态物理中的 Bose-Einstein 凝聚非常类似. 这种大的结团 ( $^{14}\text{C}$  等) 的运动也与凝聚态物理中的 Josephson 效应非常相似. 说明重核的结团放射性有与 Josephson 效应共同之处<sup>[17,18]</sup>. 但原子核是有限量子多体系统, 母核基态有确定的自旋和宇称. 对  $\alpha$  衰变我们知道, 衰变保持宇称守恒. 对结团放射性尚不知道宇称是否守恒, 但我们认为, 结团放射性开始于母核基态, 受强作用和电磁作用支配, 宇称应守恒. 目前初步实验数据表明, 奇  $A$  核  $^{14}\text{C}$  放射性有强的奇核子阻塞效应, 这是结团放射性中宇称守恒的初步证据.

## 4 结论

我们用一个简单公式和微观的密度依赖结团模型系统地研究了重核的结团放射性, 理论结果和实验数据很好地在 5 倍以内符合. 进一步研究发现衰变能和结团内的  $\alpha$  粒子数有一个新的线性关系, 标志着重核表面有  $\alpha$  凝聚现象, 这类似于 Bose-Einstein 凝聚, 我们也指出, 重核的结团放射性和凝聚态物理中的 Josephson 效应有共同之处.

## 参考文献 (References)

- 1 Rose H J, Jones G A. *Nature*, 1984, **307**: 245
- 2 Gales S et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1984, **53**: 759
- 3 Price P B et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1985, **54**: 2975
- 4 Audi G, Wapstra W. J. *Nucl. Phys.*, 2003, **A729**: 3
- 5 Gurvitz S A, Kalbermann. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **59**: 262
- 6 Buck B et al. *Phys. Rev.*, 1996, **C53**: 2841
- 7 XU Chang, REN Zhong-Zhou. *Phys. Rev.*, 2003, **C68**: 034319
- 8 XU Chang, REN Zhong-Zhou. *Phys. Rev.*, 2004, **C69**:024614
- 9 Gallagher C J, Rasmussen J O. J. *Inorg. Nucl. Chem.*, 1957, **3**: 333
- 10 Viola V E, Seaborg G T. J. *Inorg. Nucl. Chem.*, 1966, **28**: 741
- 11 Satchler G R, Love W G. *Rhys. Repts.*, 1979, **55**:183
- 12 Kobos A M et al. *Nucl. Phys.*, 1982, **A 384**:65
- 13 XU Chang, REN Zhong-Zhou. to be published
- 14 XU Chang, REN Zhong-Zhou. to be published
- 15 Brink D M, Castro J J. *Phys. Lett.*, 1982, **B108**:151
- 16 Takemoto H et al. *Phys. Rev.*, 2004, **C69**:035802
- 17 Josephson B D. *Phys. Lett.*, 1962, **1**:251
- 18 Anderson P W, Rowell J M. *Phys. Rev. Lett.*, 1963, **10**:230

## Cluster Radioactivity of Heavy Nuclei\*

REN Zhong-Zhou<sup>1,2;1)</sup> XU Chang<sup>2</sup> WANG Zai-Jun<sup>2</sup>

1 (Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator of Lanzhou, Lanzhou 730000, China)

2 (Department of Physics, Nanjing University, Nanjing 210008, China)

**Abstract** Experimental data of complex cluster radioactivity ( $^{14}\text{C}$ — $^{34}\text{Si}$ ) are systematically analyzed and investigated with different models. Experimental half-lives are well reproduced with a factor of 5. A new linear relationship between the decay energy of cluster radioactivity and the number of  $\alpha$ -particle in the cluster is found. This shows that the data of cluster radioactivity provide the first experimental evidence of  $\alpha$ -condensation near the surface of heavy nuclei.

**Key words** cluster radioactivity, new relationship of life,  $\alpha$ -condensation

---

Received 24 June 2004

\* Supported by National Natural Science Found for Outstanding Young Scientists of China (10125521), Fund of the Education Ministry (20010284036), Major State Basic Research Development in China (G2000077400), Chinese Academy of Sciences Knowledge Innovation Project (KJ CX2-SW-N02)

1) E-mail: zren@nju.edu.cn