

原子核重离子集团衰变的研究

潘强岩

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 从理论和实验两个方面综述了原子核的重离子集团衰变这一前沿领域的发展和现状. 考虑了在兰州重离子加速器国家实验室开展对 $Z=56\sim 64, N=58\sim 72$ 核区核素的 α 和重离子集团衰变研究的设想.

关键词 集团衰变 集团模型 统一模型

1 引言

$Z > 40$ 的核均有可能发生两体衰变的过程, 即

$$M(Z, A) = M_1(Z_1, A_1) + M_2(Z_2, A_2) + Q$$

其中, $A_2 = 4$ 和 $A_1 \sim A_2$ 的过程分别是 α 衰变和自发裂变的过程, 而 $4 < A_2 < A_1$, 即先驱核发射重离子集团的质量 A_2 介于 α 粒子和自发裂变碎片质量之间的衰变过程, 称为原子核的重离子集团衰变. 1980 年, Sandulescu 等人^[1]对于子核靠近双幻核²⁰⁸Pb 的先驱核发射重离子集团作了系统的估计, 并呼吁实验核物理学家应对此引起重视. 我国老一辈核物理学家也早就对核具有集团衰变模式作了预言, 并明确指出: 选择^{223, 224}Ra 作为对象, 研究其碳离子放射性是最有希望的^[2]. 果然, 1984 年英国牛津大学 Rose 与 Jones^[3]和前苏联 Aleksandrov 等人^[4]发现了²²³Ra 发射 α 粒子的同时又发射¹⁴C 重离子集团. 可惜的是后者仅仅是晚了几个月. 以此为开端, 世界上十多个著名的核物理实验室掀起了开展核的重离子集团衰变的实验研究热潮. 十年来, 均在 $Z = 82 \sim 104, N = 130 \sim 157$ 超镭核区发现了近二十种核素发射¹⁴C、²³F、^{24, 25, 26}Ne、^{28, 30, 32}Mg 和^{32, 34}Si 等重离子集团, 理论和实验研究十分活跃.

2 理论模型的研究

由重离子集团衰变的固有特征(集团的

质量介于 α 粒子和自发裂变碎片质量之间的衰变过程)自然决定了目前用于处理 α 衰变、集团衰变和自发裂变的两种不同的理论模型, 即集团模型和统一模型.

集团模型是从 α 衰变模型发展而来的. 量子力学位垒穿透理论成功地解释了 α 衰变过程. 集团模型认为, 重离子集团预先具有一定的几率存在于先驱核中, 其体积越大形成的几率越小, 并保持不变的体积或形状穿透势阱. 如图 1a 所示, 详见文献[5, 6, 7].

统一模型用平衡过程来处理 α 衰变、重离子集团衰变和自发裂变的, 并由自发裂变模型发展而来的. 它认为母核在保持两体过程中体积不变而分裂成二块碎片, 由于分裂过程中质量的不对称程度而导致了 α 衰变、重离子集团衰变和自发裂变的三种不同过程, 如图 1b 所示.

由于 D. N. Poenaru 等人^[8, 9, 10]的超非对称裂变模型分析(The analytical super-asymmetric fission model, ASAFM)的结果同 α 衰变、重离子集团衰变和自发裂变几率的实验数据符合得相当好, ASAFM 是统一模型中最成功的一个范例. 因此, 这里将它所用的计算方法和结果作一介绍.

从 1980 年开始, ASAFM 不断地加以改进和发展. 它首先证明了衰变可看作超非对称裂变, 发展了把液滴模型、有效力程模型和 Yukawa 指数势模型用于电荷和质量不对称的不相同形变系统, 并考虑了唯象的壳修正

和非角动量的影响，导出了解析性的超对称裂变模型。

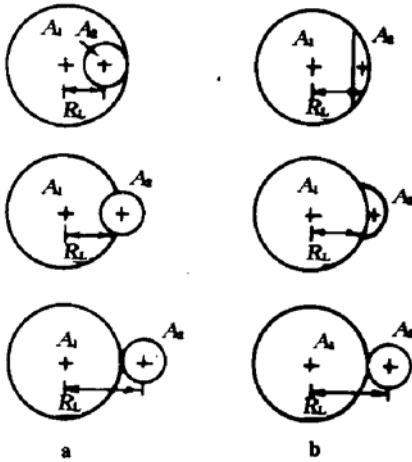


图 1 重离子集团衰变模型描述。a 集团模型，b 统一模型

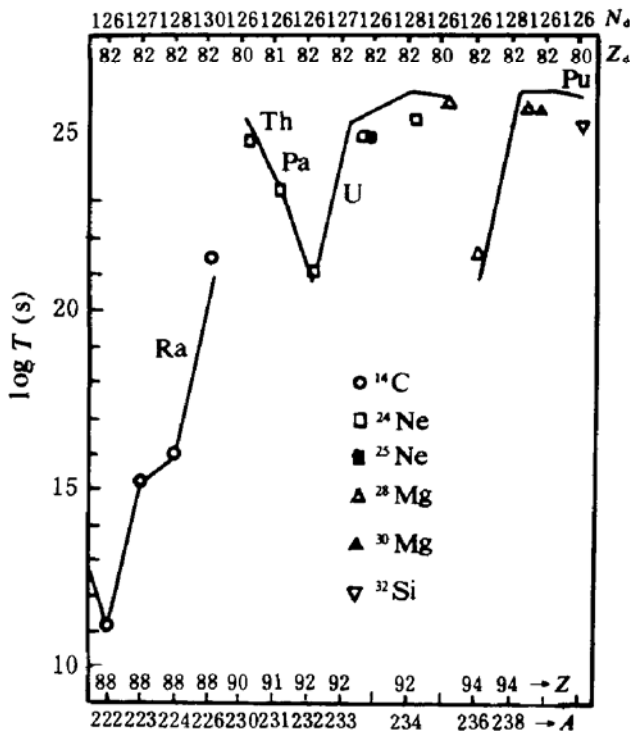


图 2 ASAFM 的计算值和理论值的比较

先驱核 (A, Z) 分裂成子核 (A_d, Z_d) 和重离子集团 (A_c, Z_c) 的部分寿命 T 为

$$T = \frac{h \ln^2}{2E_v} \exp(K)$$

$$K = \frac{2}{h} \int_{R_0}^{R_b} \{2\mu[(E(R) - E_{cor}) - Q]\}^{1/2} dR$$

其中， $\mu = mA_d A_c / A$ 为折合质量， m 为核子的质量， $E(R)$ 为子核和集团相距 R 时的相互作用能， E_{cor} 为静态和动态过程的修正能，用于修正液滴模型的过大裂变位垒值， R_0 和 R_b 为 WKB 积分的转折点的值， E_v 为零振动能， h 为普朗克常数。

他们对 $Z=52 \sim 122$ 等 2200 多个核素发射最可几的重离子集团 $Z \leq 28$ 的部分寿命，衰变 Q 值和相对于 α 衰变的分支比进行了计算。图 2 是 ASAFM 的计算值和实验值比较，符合得相当好。

3 重离子集团衰变的实验研究

从实验上首先发现原子核集团衰变现象是 Rose 和 Jone^[3] 提出的衰变形式，他们利用处于放射性平衡状态的 $3.3 \mu\text{Ci } ^{227}\text{Ac}$ 源，即 $^{227}\text{Ac}(\beta^-) \rightarrow ^{227}\text{Th}(\alpha) \rightarrow ^{223}\text{Ra}(\alpha) \rightarrow ^{219}\text{Rn}(\alpha) \rightarrow ^{215}\text{Po}(\alpha) \rightarrow ^{211}\text{Pb}(\beta^-) \rightarrow ^{211}\text{Bi}(\alpha) \rightarrow ^{207}\text{Tl}(\beta^-) \rightarrow ^{207}\text{Pb}$ (稳定) 和粒子鉴别金硅面垒 $\Delta E-E$ 望远镜，探测到 $Z=6$ 并具有约 30MeV 的重离子集团共 11 个事件数，实验历时了 189 天。虽然他们没有就重离子集团的 A 值进行鉴别，但根据实验结果和重离子集团的 Gamow 因子的计算，RJ 得到的正确结论是， ^{223}Ra 具有 α 放射性的同时，发射 ^{14}C 重离子集团，相对于 α 衰变的分支比为 $(8.5 \pm 2.5) \times 10^{-10}$ 。此结果报导后不久，法国 S. Gales 等人^[11] 利用磁谱仪装置和更强的 ^{227}Ac 源 ($247 \mu\text{Ci}$)，使实验时间大大缩短和 α 本底大大降低，仅利用 5 天时间就探测到 12 个 ^{14}C 事件数和相对于 α 衰变的分支比为 $(5.5 \pm 2.0) \times 10^{-10}$ 。

随后，Berkeley、Argonne、CERN、Orsay 和 Dubn 等诸多著名的核物理实验室开展了寻找其它集团衰变模式的工作。理论和实验研究十分活跃。迄今在 $Z=82 \sim 104, N=130 \sim 157$ 核区已发现了近二十种先驱核素发射 $^{14}\text{C}, ^{23}\text{F}, ^{24,25,26}\text{Ne}, ^{28,30,32}\text{Mg}$ 和 $^{32,34}\text{Si}$ 等重离子集团。依据现有资料，表 1 列出了所有的实验结果。

表 1 实验所发现的重离子集团衰变

| 重离子集团 衰变模式 | 先驱核寿命 | 重离子集团 动能(MeV) | 实验测量值 $\log T_{1/2}(s)$ | 实验测量值 $\log B(B=\lambda_c/\lambda_\alpha)$ | 参考文献 |
|--|---------------------------------|------------------|----------------------------|---|------------|
| $^{221}\text{Fr} \rightarrow ^{14}\text{C} + ^{207}\text{Tl}$ | 4.9m | 29.28 | >15.77 | >13.33 | [5,18] |
| $^{221}\text{Ra} \rightarrow ^{14}\text{C} + ^{207}\text{Pb}$ | 28s | 30.34 | >14.35 | >12.9 | [5,18] |
| $^{222}\text{Ra} \rightarrow ^{14}\text{C} + ^{208}\text{Pb}$ | 38s | 30.97 | 11.02 ± 0.06 | 9.43 ± 0.06 | [5,19] |
| $^{223}\text{Ra} \rightarrow ^{14}\text{C} + ^{209}\text{Pb}$ | 435d | 29.85 | 15.2 ± 0.05 | 9.21 ± 0.05 | [3,11~13] |
| $^{224}\text{Ra} \rightarrow ^{14}\text{C} + ^{210}\text{Pb}$ | 3.66d | 28.63 | 15.9 ± 0.12 | 10.37 ± 0.12 | [5] |
| $^{225}\text{Ac} \rightarrow ^{14}\text{C} + ^{211}\text{Bi}$ | 10.0d | 28.57 | >18.34 | >12.4 | [18] |
| $^{226}\text{Ra} \rightarrow ^{14}\text{C} + ^{212}\text{Pb}$ | 1600a | 26.46 | 21.33 ± 0.2 | 10.6 ± 0.2 | [18,19] |
| $^{231}\text{Ra} \rightarrow ^{23}\text{F} + ^{208}\text{Pb}$ | $3.28 \times 10^4 \text{a}$ | 46.68 | >24.6 | >12.74 | |
| $^{230}\text{Th} \rightarrow ^{24}\text{Ne} + ^{206}\text{Hg}$ | $7.7 \times 10^4 \text{a}$ | 51.75 | 24.64 ± 0.07 | 12.25 ± 0.07 | [21] |
| $^{232}\text{Th} \rightarrow ^{26}\text{Ne} + ^{206}\text{Hg}$ | $1.405 \times 10^{10} \text{a}$ | 49.70 | >27.94 | >10.3 | |
| $^{231}\text{Pa} \rightarrow ^{24}\text{Ne} + ^{208}\text{Pb}$ | $3.28 \times 10^4 \text{a}$ | 54.14 | 23.38 ± 0.08 | 11.37 ± 0.08 | |
| $^{232}\text{U} \rightarrow ^{24}\text{Ne} + ^{208}\text{Pb}$ | 68.9a | 55.86 | 21.06 ± 0.1 | 11.7 ± 0.1 | [15] |
| $^{233}\text{U} \rightarrow ^{24}\text{Ne} + ^{209}\text{Pb}$ | $1.59 \times 10^5 \text{a}$ | 54.27 | 24.82 ± 0.15 | 12.12 ± 0.15 | [22] |
| $^{233}\text{U} \rightarrow ^{25}\text{Ne} + ^{208}\text{Pb}$ | | 54.32 | | | |
| $^{234}\text{U} \rightarrow ^{24}\text{Ne} + ^{210}\text{Pb}$ | $2.45 \times 10^5 \text{a}$ | 52.81 | 25.25 ± 0.05 | 12.36 ± 0.05 | [17] |
| $^{234}\text{U} \rightarrow ^{26}\text{Ne} + ^{208}\text{Pb}$ | | 52.87 | | | |
| $^{234}\text{U} \rightarrow ^{28}\text{Mg} + ^{206}\text{Hg}$ | $2.45 \times 10^5 \text{a}$ | 65.26 | 25.75 ± 0.06 | 12.86 ± 0.06 | [17] |
| $^{237}\text{Np} \rightarrow ^{30}\text{Mg} + ^{207}\text{Tl}$ | $2.14 \times 10^6 \text{a}$ | 65.52 | >27.27 | >13.4 | [21] |
| $^{238}\text{Pu} \rightarrow ^{28}\text{Ne} + ^{210}\text{Pb}$ | 87.74a | 67.32 | 25.7 ± 0.25 | 16.25 ± 0.25 | [23] |
| $^{238}\text{Pu} \rightarrow ^{30}\text{Mg} + ^{208}\text{Pb}$ | | 67.00 | | | |
| $^{238}\text{Pu} \rightarrow ^{32}\text{Si} + ^{206}\text{Hg}$ | 87.74a | 78.95 | 25.3 ± 0.16 | 15.86 ± 0.16 | [23] |
| $^{241}\text{Am} \rightarrow ^{34}\text{Si} + ^{207}\text{Tl}$ | 432.1a | 80.60 | $>25.3; >24.2$ | $>15.1; >14.1$ | [21,24,16] |

4 开展对 $Z = 56 \sim 64, N = 58 \sim 72$ 核区核素的 α 和集团衰变研究的设想

此核区是 ASAFM 最新版所预言的一个全新的重离子集团衰变的先驱核岛^[8]存在着部分寿命 $T \leq 10^{-10} \text{a}$ 和相对于 α 衰变的分支比 $B = \lambda_c/\lambda_\alpha > 10^{-18}$ 近 200 个先驱核. 此核区较已发现的超锕核区的最大优点是完全不存在裂变碎片对量的干扰, 本底将更低和更大的分支比. 但在选择目标核时应牢记四点: (1) 由于集团动能一般只有 $2 \sim 3 \text{MeV/u}$ 在物质(如铀)中的射程为 $\leq 15 \text{mg/cm}^2$, 源的厚度必须小于 $1 \sim 2 \text{mg/cm}^2$; (2) 衰变的几率须足够大, 一般为 $> 10^{-29}/\text{a}$; (3) 集团衰变的分支比 $B = \lambda_c/\lambda_\alpha > 10^{-18}$; (4) 须有足够强的源和较长寿命的先驱核.

这些条件将大大限制其可研范围, 而且它又是一个远离核区, 必须采用快速分离和传输装置(如同位素分离器和在线 He 喷技

术), 最大的难题是目前还没有一个强有力的产生方法. 中科院近物所将根据 HIRFL 的近期(如 $^{36}\text{Ar}, ^{40}\text{Ca}, ^{54}\text{Fe}, ^{58}\text{Ni}$)和远期(如次级束流线的 O、F、P、S、As 和 Se 等)所能提供的束流同缺中子同位素靶(例如 $^{58}\text{Ni}, ^{92}\text{Mo}, ^{96}\text{Ru}$ 和 ^{102}Cd 等)作用产生这些先驱核素以及同位素分离器和在线 He 喷嘴技术和粒子鉴别金硅面垒 $\Delta E-E$ 望远镜和固体薄膜径迹探测器等鉴别所发射的重离子集团. 文献[20]详述了近物所选定的目标核及其产生方法.

参 考 文 献

- 1 Sandulescu, et al. Sov. J. Part. Nucl. 1980,11:528
- 2 卢希庭主编, 高等学校使用教材, 《原子核物理》, 北京: 原子能出版社, 第 1 版, 1981, 92
- 3 Rose H J, Jones G A. Nature, 1984, 307: 245
- 4 Aleksandrov D V, et al. JETP Lett., 1984, 40: 909
- 5 Price P B, et al. Phys. Rev. Lett., 1985, 54: 297
- 6 Blendowske R, et al. Phys. Rev. Lett., 1988, 61: 1930
- 7 Buck B, et al. Dept. Theor. (下转第 23 页)

- 11 Martinson I. Rep. Prog. in Phys., 1989,52:157
 12 Beyer H F, et al. GSI Scientific Report, 1994,133

- 13 Ulrick A, et al. Appl. Phys. Lett., 1983,42:782

Recent Progress of Study of High Ionized Heavy Ions

Wang Youde

(*Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000*)

Abstract The recent progress of study of high ionized heavy ions in the world are presented briefly by using heavy ion cooling stored ring. Especially, the recent status of study of high ionized heavy atoms, as well as the application of study of high ionized heavy ions in cross subject of nuclear physics, astrophysics and atomic physics are described.

Key Words high ionized heavy ion heavy ion cooling stored ring atomic physics

(上接第12页)

- | | |
|---|---|
| Phys., Oxford Univ., 1988,88:88 | 17 Shicheng Wang, et al. Phys. Rev., 1987,C36:2710 |
| 8 Poenare D N, et al. Phys. Rev., 1993,C47:2030 | 18 Barwick S W, et al. Phys. Rev., 1986,C34:362 |
| 9 Poenare D N, et al. Phys. Rev., 1985,C32:572 | 19 Hourani E, et al. Phys. Lett., 1985,160B:375 |
| 10 Poenare D N, et al. At. Data Nucl. Data Tables, 1991, 48:231 | 20 潘强岩. 1994年国家自然科学基金申请书, "Z=56~64, N=58~72核区核素的 α 和集团衰变的研究" |
| 11 Price P B, et al. Phys. Rev. Lett., 1985,54:297 | 21 Tretyakova S P, et al. JINR Rapid Commun., 1985, 13:34 |
| 12 Gales S, et al. Phys. Rev. Lett., 1984,53:759 | 22 Tretyakova S P, et al. JINR Rapid Commun., 1985, 7:23 |
| 13 Kutschera W, et al. Phys. Rev., 1985,C32:2036 | 23 Shicheng Wang, et al. Phys. Rev., 1989,C42:2750 |
| 14 Shicheng Wang, et al. Phys. Rev., 1987,C36:2717 | 24 Moody K J, et al. Phys. Rev., 1987,C36:2710 |
| 15 Banwick S W, et al. Phys. Rev., 1985,C31:1984 | |
| 16 Paul M, et al. Phys. Rev., 1986,C34:1980 | |

Study of Heavy-particle Radioactive Decay

Pan Qiangyan

(*Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000*)

Abstract The theoretical and experimental decay studies of heavy-particle radioactivity are reviewed. The experimental studies of α and heavy-particle radioactivity in the region of $Z=56\sim 64$ and $N=58\sim 72$ is proposed at HIRFL.

Key Words cluster decay cluster model unitized model