

^{133}Sm 的 $(\text{EC} + \beta^+)$ 衰变和 ^{133}Pr 的 1.1s 同质异能态*

王旭东¹⁾ 谢元祥 徐树威 李占奎
郭斌 冷长庚 王春芳 于涌

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 通过 $^{96}\text{Ru}(^{40}\text{Ca}, \text{In}2\text{p})$ 反应, 采用氦喷嘴带传输系统和 X- γ 与 γ - γ 符合测量方法, 首次建议了 ^{133}Sm 的简单的 $(\text{EC} + \beta^+)$ 衰变纲图. 由于 Ru 靶中含有 $^{98-102}\text{Ru}$ 的成分, 同时产生了 ^{133}Pr , 并首次测定了 ^{133}Pr 的 $11/2^-$ 同质异能态的寿命为 $(1.1 \pm 0.2)\text{s}$. 用单粒子模型提取了 $^{131, 133, 135, 137}\text{Pr}$ 的 $11/2^-$ 同质异能态的约化跃迁几率的实验值, 并与 Weisskopf 近似估计进行了比较.

关键词 $(\text{EC} + \beta^+)$ 衰变纲图 同质异能态 半衰期 约化跃迁几率

1 引言

$A \approx 130$ 的核素位于 2 个原子核大壳 50 与 82 之间, 稀土区质子滴线附近的原子核正处于这一核区. 此核区内原子核往往具有很大的形变, 变化也比较复杂, 给出它们的低位态谱学信息是有意义的. 围绕这一核区人们做了大量的理论和实验工作. 到目前为止, ^{134}Sm 是曾发表过 $(\text{EC} + \beta^+)$ 衰变纲图的最轻的钐(Sm)缺中子核. 从 1977 年始, Bogdanov^[1] 和 Wilmarth^[2] 等曾先后观察到 ^{133}Sm 的 β 缓发质子衰变, 并初步给出其基态自旋宇称为 $5/2^+$. 之后, 它的半衰期也指定为 $(3.7 \pm 0.7)\text{s}$ ^[3,4]. 但是, ^{133}Sm 的 $(\text{EC} + \beta^+)$ 衰变的纲图始终未曾给出, 在本文报道之前, 关于 ^{133}Sm 的 $(\text{EC} + \beta^+)$ 衰变的研究仅有的已知信息是指认了 2 条能量分别为 156.8 和 369.7keV 的 γ 射线^[4]. 另外, Genevey 等人曾总结过 Pr 的奇 A 核的自旋宇称为 $11/2^-$ 的同质异能态的系统性^[5]. ^{133}Pr 的 $11/2^-$ 的同质异能态虽然多次在实验中被观测到^[6,7], 但由于所选取的实验条件的限制, 只得到了半衰期的上限和下限, 补充 $^{133}\text{Pr}11/2^-$ 的同质异能态的半衰期对于给出一套完整的 Pr 奇 A 核 $11/2^-$ 同质异能态的数据是必要的.

2001-10-26 收稿

* 国家重点基础研究发展规划(G2000077402), 国家自然科学基金(19975057, 10005011)和中国科学院计划局资助

1) E-mail: xdw@impcas.ac.cn

2 实验装置

实验是在中国科学院近代物理研究所兰州重离子加速器国家实验室进行的. 采用了“氦喷嘴带传输系统”+“ $X-\gamma_1-\gamma_2$ ”符合测量鉴别方法. 由分离扇聚焦回旋加速器(SFC)提供的 232MeV 的 $^{40}\text{Ca}^{12+}$ 束流轰击厚度为 $1.4\text{mg}/\text{cm}^2$, 富集度为 94% 的 ^{96}Ru 靶, 靶中含有 5.4% 的 $^{98-102}\text{Ru}$. 束流强度约为 $0.5\text{e}\mu\text{A}$. 重离子束穿过厚度 $1.89\text{mg}/\text{cm}^2$ 的 Havar 膜进入靶室(内充 1bar 的氦气)之后, 再穿过 2.5cm 的氦气层和厚度为 $0.3\text{mg}/\text{cm}^2$ 的铝质靶衬与 Ru 靶反应. 有两块靶安装在带有冷却装置的铜盘上, 圆盘每隔 10min 转动 180° 以轮流照射两块靶. 以 PbCl_2 作为氦气中的气溶胶载体, 加热炉温度 430° , 核反应产生的放射性产物在氦气中慢化并附着在胶体颗粒上. 在压差的作用下, 反应产物随氦气快速穿过长约 6m , 内径 2mm 的毛细管并喷射在真空收集室的传送带上, 从而放射性产物周期性地送到屏蔽好的低本底区进行符合测量. 在每一个测量周期内, 反应产物收集时间为 1.20s , 传送带将产物由真空收集室送至测量点所需时间 0.18s , 等待 0.02s 后探测器测量 1.18s , 产物收集与探测器的等待、测量同时进行. 采用两个同轴型 HPGe(GMX) 探测器作为 γ 探测器和一个平面型 HPGe 探测器作为 X 射线探测器做符合测量. 有时为了提高分辨率, 也采用另外一个平面型探测器代替同轴型探测器的方法来测量 γ 射线. 实验中对 γ 射线和 X 射线分别记录了能量和时间的单谱及符合谱. 实验布局见图 1.

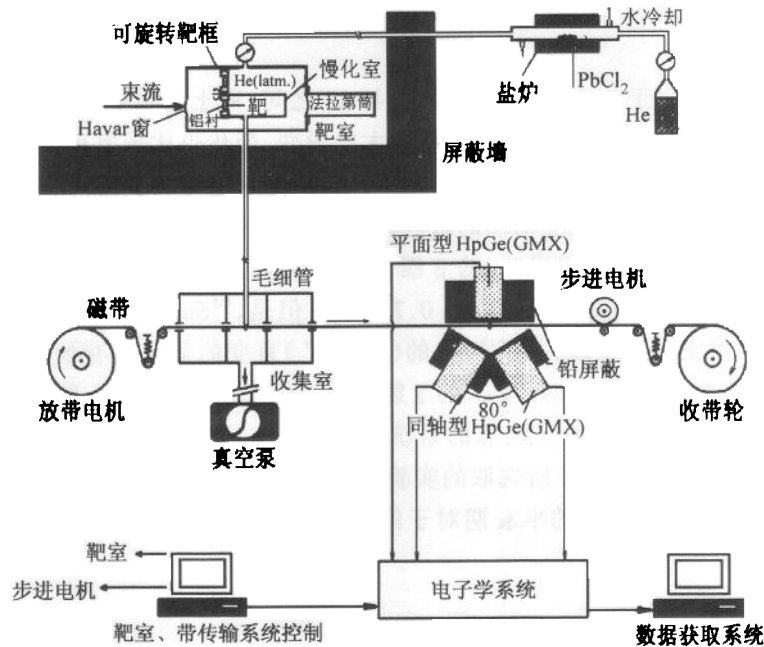


图 1 实验布局图

3 结果分析

在获取的 X 射线谱中,伴随 EC 衰变而发射的不同元素的特征 X 射线可以清楚地分辨开来. 图 2 即是由 Pm 的 Kα-X 射线开窗得到的 γ 射线谱,与 Sm 同位素的 (EC + β⁺) 衰变相关的 β 缓发 γ 射线被筛选出来. 排除其中已知的^{134,135}Sm 的 γ 射线以及其他干扰核素的 γ 射线之后,对未知的较强的 γ 射线开窗,由此得到了表 1 所示的 γ 射线符合关系. 对有符合关系的较弱的 γ 射线开窗后进一步证明了这些符合关系的存在. 其中,两条较强的 γ 射线被指定来源于¹³³Sm 的衰变,能量分别为 369.6, 84.5keV;半衰期分别为 (3.4 ± 0.5), (2.8 ± 0.5)s. 图 3 给出了 84.5keV 的半衰期. 按照表 1 所示的符合关系,在图 4 中给出了¹³³Sm 简单的 (EC + β⁺) 衰变的纲图. 图中的 γ 跃迁能量误差为 ±0.5keV, γ 射线的相对强度是从 γ 单谱中提取并参考 γ-γ 符合谱得到的. 在这里没有考虑内转换电子的修正. 图中左边的部分包括了 Breitenbach 给出的¹³³Sm 衰变的 156.8 和 369.6keV 的两条 γ 射

表 1 ¹³³Sm EC/β⁺ 衰变得 γ 射线的能量 E_γ, 相对强度 I_γ, 以及它们的符合关系

E _γ /keV	I _γ	符合关系
32.7 ^{c1}	194(25)	96.9, 369.6
84.5	72(9)	121.1, 130.0
96.9 ^{c1}	22(4)	32.7, 156.8
121.1 ^{c1}	6.9(13)	84.5
130.0 ^{c1}	8.6(14)	84.5
156.8 ^{c1}	13(2)	96.9
369.6	100	32.5

* 能量误差为 ±0.5keV, c) 该强度参考 γ-γ 符合谱给出.

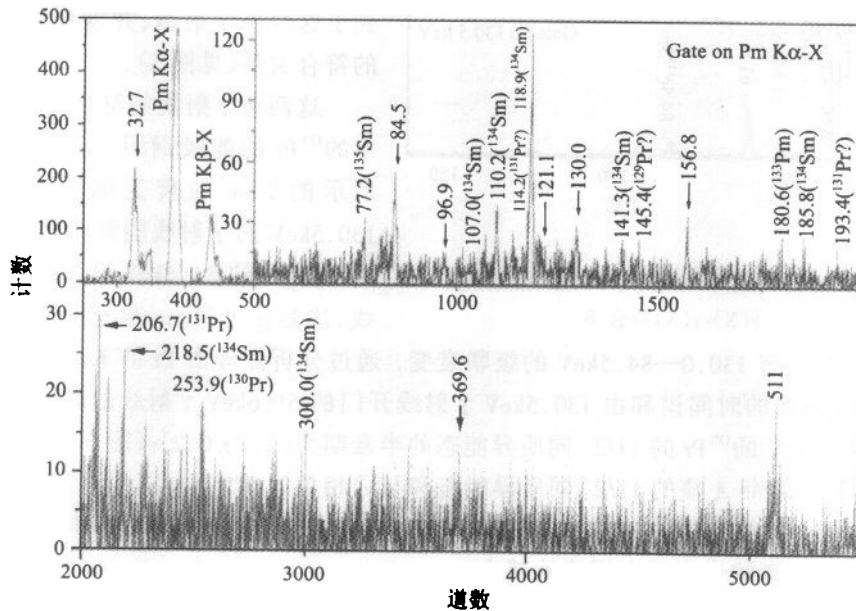


图 2 Pm 的 Kα-X 射线开窗得到的 γ 射线谱

线^[4], 半衰期在误差范围内与参考文献一致. 图 4 右边所示的能级结构与¹³³Pm 的在束 γ 研究给出的能级是一致的, 其低位态的自旋宇称也是由在束 γ 研究给出的^[8]. 由参考文献[4]中图 3 所示的系统性可以看出, 图 4 左边所示¹³³Pm 的低位态很可能具有负的宇称并与 $h_{11/2}$ 的退耦带结构相关.

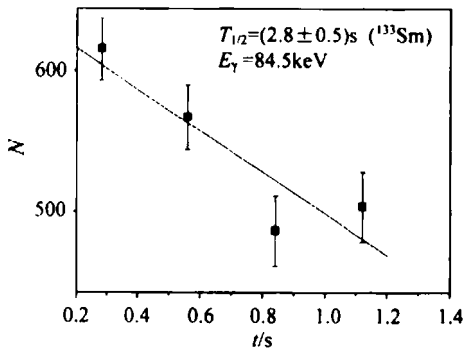


图 3 ¹³³Sm 的 EC/ β^+ 衰变所发射的 γ 射线的衰变曲线

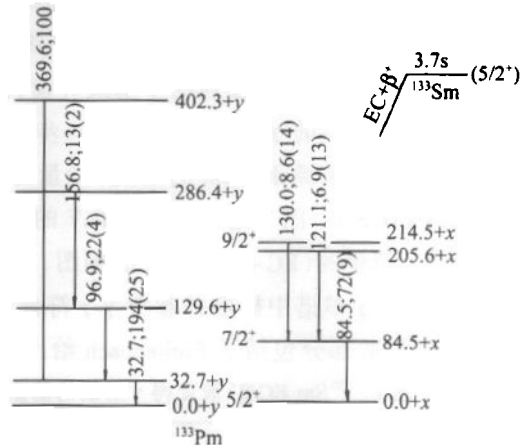


图 4 建议的¹³³Sm 的衰变纲图

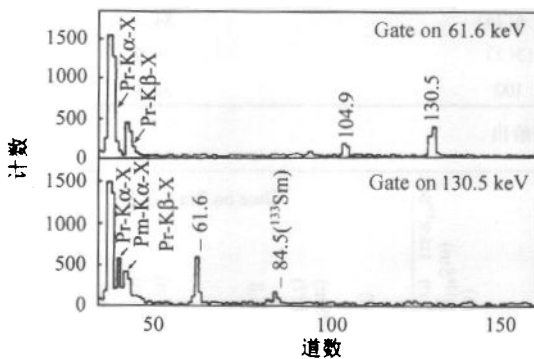


图 5 ¹³³Pr 的 $11/2^-$ 同质异能态衰变的 $\gamma(X)$ - $\gamma(X)$ 符合谱

根据 Liang 等人的工作,¹³³Pr 的低位态 $11/2^-$ 同质异能态是通过 130.5 和 61.7keV 的级联衰变到基态的⁷. 在 Pr 的 $K\alpha$ -X 射线开门的 γ 谱中, 的确观察到了这两条 γ 射线, 并发现了它们之间的符合关系(见图 5).

这两条 γ 射线的符合关系与图 6 所示的¹³³Pr 的能级纲图一致, 也是与图 4 所示的¹³³Sm 的衰变纲图一致的. 在 130.5keV 的 γ 射线的开门谱中, 我们看到了¹³³Sm 的 84.5keV 和 Pm 的 $K\alpha$ -X 射线, 这是由于¹³³Sm 也有一条 130.0keV

的 γ 射线, 并具有 130.0—84.5keV 的级联衰变. 通过分析处理由 Pr 的 $K\alpha$ -X 射线开门的 130.5keV γ 射线的时间谱和由 130.5keV γ 射线开门的 61.6keV γ 射线的时间谱, 得到了能级为 192.1keV 的¹³³Pr 的 $11/2^-$ 同质异能态的半衰期为 $(1.1 \pm 0.2)s$ (图 6 中的插图). 图 6 还给出了 Pr 的奇 A 核的 $11/2^-$ 同质异能态和与之相关的 $3/2^+$, $5/2^+$ 和 $7/2^+$ 能级的系统性. 可以看到, 随着质量数的增加, $11/2^-$ 态到 $5/2^+$ 态之间的跃迁 γ 能量在规律地增加, 而 $11/2^-$ 同质异能态的半衰期在规律地减小.

依据单粒子模型从^{131, 133, 135, 137}Pr 的同质异能态的半衰期实验数据中提取其约化跃迁几率 $B^{\pi}(E3)$, 与采用 Weisskopf 近似^[9]得到的理论计算值 $B^{\pi}(E3)$ 进行了比较(见表 2).

其中，¹³³Pr, ¹³⁵Pr 和 ¹³⁷Pr 的实验值与理论值符合得较好。对于 ¹³¹Pr 而言，实验值明显偏大，可能是其形变相对较大，偏离了单粒子模型的球形核近似的原因。

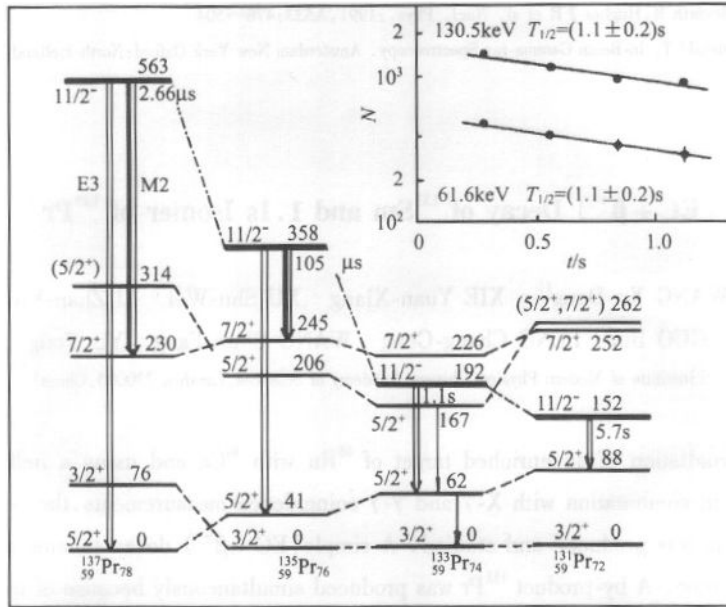


图 6 Pr 的奇 A 核的 11/2⁻ 同质异能态和与之相关的 3/2⁺, 5/2⁻ 和 7/2⁻ 能级的系统性
11/2⁻ 同质异能态的半衰期由本次实验结果给出，除插图外，其他内容来自参考文献[5]及其引用文献。

表 2 Pr 的奇 A 核的 11/2⁻ 同质异能态的约化跃迁几率 B(E3)

	B ^{**} (E3)	B [*] (E3)	B ^{**} (E3)/B [*] (E3)
¹³⁷ Pr	4.09 × 10 ³	1.11 × 10 ³	3.7
¹³⁵ Pr	6.77 × 10 ³	1.08 × 10 ³	6.3
¹³³ Pr	1.77 × 10 ³	1.05 × 10 ³	1.7
¹³¹ Pr	4.88 × 10 ⁴	1.02 × 10 ³	48

感谢兰州重离子加速器国家实验室 SFC 加速器运行维护人员为本次实验所付出的辛勤劳动。

参考文献 (References)

- 1 Bogdanov D D, Demyanov A V, Karnaukhov V A et al. Nucl. Phys., 1977, **A275**: 229—236
- 2 Wilmarth P, Nitschke J M, Lemmert P K et al., Z. Phys. 1985, **A321**: 179—180
- 3 Rab S. Nucl Data Sheets, 1995, **75**: 656
- 4 Breitenbach J, Braga R A, Wood J L et al. Deformation Studies in the Extremely Neutron-Deficient Praseodymium, Neodymium and Promethium Isotopes. In: Ed. R Neugart, A Wöhr. Nuclei Far From Stability and Atomic Masses and Fundamental Constants 1992: The Proceedings of the 6th International Conference on Nuclei Far From Stability and the 9th International Conference on Atomic Masses and Fundamental Constants, held in Mainz, Germany, 19—24 July 1992 (Institute of Physics Conference Series 132). Bristol, UK: IOP Publishing Ltd, 1993, 575—580

- 5 Genevey J, Gizon A, Foin C et al. Nucl. Phys., 1996, **A611**:247—269
- 6 Hildingsson I, Beausang C W et al. Phys. Rev., 1988, **C37**(3):985—997
- 7 Liang C F, Paris P, Bucurescu D et al. Phys. Rev., 1989, **C40**:2796—2803
- 8 Regan P H, Wadsworth R, Hughes J R et al. Nucl. Phys., 1991, **A533**:476—504
- 9 Morinaga H, Yamazaki T. In-Beam Gamma-ray Spectroscopy. Amsterdam New York Oxford: North-Holland Publishing Company, 1976. 65—75

(EC + β^+) Decay of ^{133}Sm and 1.1s Isomer of $^{133}\text{Pr}^*$

WANG Xu-Dong¹⁾ XIE Yuan-Xiang XU Shu-Wei LI Zhan-Kui
GUO Bin LENG Chang-Geng WANG Chun-Fang YU Yong
(Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract By irradiation of an enriched target of ^{96}Ru with ^{40}Ca and using a helium-jet fast tape transport system in combination with X- γ and γ - γ coincidence measurements, the very neutron-deficient isotope ^{133}Sm was produced and studied. A simple (EC + β^+) decay scheme of ^{133}Sm is proposed for the first time. A by-product ^{133}Pr was produced simultaneously because of the $^{98-102}\text{Ru}$ contents of the ruthenium target. The half-life of an $11/2^-$ low-lying isomeric state in ^{133}Pr has been measured to be $(1.1 \pm 0.2)\text{s}$. Using single-particle model, the reduced transition probabilities of the $11/2^-$ isomers in $^{131,133,135,137}\text{Pr}$ are extracted from their experimental half-lives and compared with the Weisskopf estimate.

Key words (EC + β^+) decay scheme, isomer, half-life, reduced transition probabilities

Received 26 November 2001

* Supported by Major State Basic Research Development Program(G2000077402), National Natural Science Foundation of China (19975057, 10005011), and Chinese Academy of Sciences

1) E-mail: xdw@impcas.ac.cn