

# 缺中子 $^{130}\text{Pm}$ 和 $^{128}\text{Pr}$ 核的EC/ $\beta$ 衰变研究\*

谢元祥 徐树威 李占奎 于涌 潘强岩 王春芳 张天梅  
(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

龙桂鲁 李岩松  
(清华大学现代应用物理系 北京 100084)

**摘要** 171MeV  $^{36}\text{Ar}$ 束轰击 $^{96}\text{Ru}$ 靶由熔合蒸发反应生成了 $^{130}\text{Pm}$ 和 $^{128}\text{Pr}$ 核. 由氦喷嘴快速带传输系统将反应产物送到低本底区. 基于X- $\gamma$ -t,  $\gamma$ - $\gamma$ -t符合测量, 首次建立了 $^{130}\text{Pm}$ 的(EC+ $\beta^+$ )衰变纲图. 重新研究了 $^{128}\text{Pr}$ 核的衰变, 订正和补充了 $\gamma$ 射线, 建立了新的(EC+ $\beta^+$ )衰变纲图.

**关键词** (EC+ $\beta^+$ )衰变 氦喷嘴带传输系统 衰变纲图

## 1 引言

轻稀土区的核素( $Z > 50, N < 80$ )处于过渡区, 理论预言这些核的基态有永久性的形变, 并预言其四极形变 $\epsilon_2 \approx 0.3$ . 为了研究这些核的形变, 实验物理学家在这个区域完成了大量的在束 $\gamma$ 谱学研究. 通常在束 $\gamma$ 谱学是研究核由很高的自旋态如何退激到低自旋态的. 而对于低激发能低位态的 $\beta$ 衰变研究却很少, 尤其是奇-奇核情况. 因而本文对 $^{130}\text{Pm}$ 和 $^{128}\text{Pr}$ 进行了EC/ $\beta^+$ 衰变的研究.

$^{130}\text{Pm}$ 和 $^{128}\text{Pr}$ 是 $\beta$ 延发质子先驱核, 实验测出它们的半衰期分别是2.2(6)和3.2(5)s<sup>[1]</sup>. 在束 $\gamma$ 谱学已给出它们的子核 $^{130}\text{Nd}$ 和 $^{128}\text{Ce}$ 的能级图<sup>[2,3]</sup>. 但 $^{130}\text{Pm}$ 的衰变以前从未研究过.  $^{128}\text{Pr}$ 的(EC+ $\beta^+$ )衰变纲图仅由6条 $\gamma$ 射线组成<sup>[4]</sup>, 其中3条 $\gamma$ 射线在 $^{128}\text{Ce}$ 在束 $\gamma$ 谱测量时未被观测到. 这促使我们重新研究 $^{128}\text{Pr}$ 衰变, 并建立它们的衰变纲图.

## 2 实验

实验是在中国科学院兰州重离子加速器国家实验室进行的. 由SFC加速器引出能量为220MeV的 $^{36}\text{Ar}^{11+}$ 重离子束, 穿过1.94mg/cm<sup>2</sup>厚的Havar窗, 进入充满一个大气压氮气的靶室, 再经过降能片使能量下降到171MeV, 轰击1.4mg/cm<sup>2</sup>厚的 $^{96}\text{Ru}$ (丰度94%)同位

1999-06-30 收稿

\* 国家自然科学基金(19775056, 19975057)和中国科学院基金资助

素靶,靶衬为 Al,厚度约  $300\mu\text{g}/\text{cm}^2$ . 在固定靶子的框架周围安装有水冷装置. 束流强度约为  $0.5\text{e}\mu\text{A}$ . 核反应产生的放射性产物在氦气中慢化,再经过氦喷嘴毛细管喷射到一个置于真空收集室内的传输带上. 毛细管长 6m,内径约为 2mm. 用  $\text{PbCl}_2$  做添加剂,工作温度为  $430^\circ\text{C}$ . 然后由快速带传输系统把吸附在传输带上的放射性产物周期性地送到屏蔽好的低本底区进行物理测量. 拉带时间短于 0.3s,测量时间为 4 和 8s,收集时间与测量时间相近. 一台  $\phi 30\text{mm}$  的平面型 HpGe 探测器放在带子一侧,作为 X( $\gamma$ )探测器,两台同轴型高纯锗(HpGe)-GMX 在带子另一侧,约  $90^\circ$  夹角,按这种方式进行 X( $\gamma$ )- $\gamma_1$ (X)- $\gamma_2$ (X)符合测量. 用一台微机数据获取系统记录 X( $\gamma$ )- $\gamma_1$ (X)- $\gamma_2$ (X)-t 事件谱和单谱,于实验后做离线分析,同时在实验过程中也可以进行在线监测.

### 3 结果和讨论

在 X- $\gamma$  符合的总谱中,在 X 谱上以 Nd-K $\alpha$ -X 和 Ce-K $\alpha$ -X 开门,在  $\gamma$  谱中就得到与 Pm, Pr 核素相关的衰变  $\gamma$  射线,除了已知 Pm, Pr 同位素的  $\gamma$  射线外,还有未知的一些  $\gamma$  射线. 由于  $^{130}\text{Pm}$  和  $^{128}\text{Pr}$  是奇-奇核,衰变的子核为偶-偶核  $^{130}\text{Nd}$  和  $^{128}\text{Ce}$ . 它们的在束  $\gamma$  谱学给出  $2^+ \rightarrow 0^+$ ,  $4^+ \rightarrow 2^+$ ,  $6^+ \rightarrow 4^+$  等  $\gamma$  射线的能量,因而在 X 开门谱中,很容易辨认出这些  $\gamma$  射线. 以这些已知  $\gamma$  射线开门,从  $\gamma$ - $\gamma$  符合关系中得到与这些  $\gamma$  射线符合的强度较弱的  $\gamma$  射线. 再用弱的  $\gamma$  射线开门,进一步证实这些符合关系的存在.

#### 3.1 $^{130}\text{Pm} \rightarrow ^{130}\text{Nd}$

图 1 给出最强的  $\gamma$  射线(158.9keV)开门谱. 除了在束  $\gamma$  谱已知的 326.3 和 454.2keV  $\gamma$

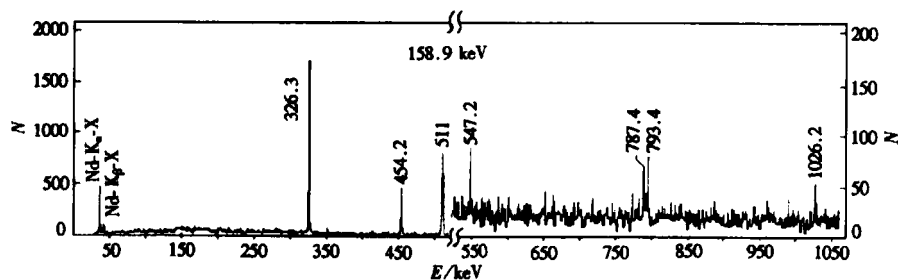


图 1 158.9keV  $\gamma$  射线开门得到的  $\gamma$  射线谱

表 1  $^{130}\text{Pm}(\text{EC} + \beta^+)$  衰变的  $\gamma$  射线的能量和强度以及它们的符合关系

$E_\gamma/\text{keV}$	$I_\gamma$	符合关系					
158.9(2)	100*	326.3	454.2	547.2	787.4	793.4	1026.2
326.3(3)	76(3)	158.9	454.2	547.2			
454.2(3)	44(3)	158.9	326.3				
547.2(4)	13(5)	158.9	326.3				
787.4(4)	7(6)	158.9					
793.4(4)	7(5)	158.9					
1026.2(4)	9(8)	158.9					

\* 包括内转换电子的修正.

射线外<sup>[2]</sup>, 还补充了 4 条  $\gamma$  射线, 能量分别为 547.2, 787.4, 793.4 和 1026.2keV, 这些  $\gamma$  射线的强度均较弱. 由 158.9 和 326.3keV  $\gamma$  射线定出了<sup>130</sup>Pm 的半衰期见图 2 所示  $T_{1/2} = 2.6(2)s$ , 与文献值<sup>[1]</sup> 相符. 这些  $\gamma$  射线的强度由测量的单谱给出. 表 1 给出这些  $\gamma$  射线的能量、强度及它们的符合关系.

图 3 是首次建议的<sup>130</sup>Pm 的衰变纲图.  $Q_{EC}$  是 Audi 等<sup>[5]</sup> 给出的系统预言值. 在纲图右边列出了各个态的能量、边馈值  $I_{EC+\beta^+}$  及  $\log ft$  值. 计算中用了 Gove 和 Martin<sup>[6]</sup> 给出的值, 其中  $I_{EC+\beta^+}$  值是上限,  $\log ft$  是下限. 在所测能量范围内(约 2MeV), 大于 1.1MeV 属于<sup>130</sup>Pm 的  $\gamma$  射线未观测到. 但由于  $Q_{EC}$  值很大, 有可能落到较高的激发态上. 因此只能给出它们的上限和下限. 按照  $\beta$  衰变的选择定则, <sup>130</sup>Pm 基态的自旋和宇称可能是  $5^+$ . 然而高于 2MeV 的强  $\gamma$  射线可能退激到 485.2keV  $2^+$  态或 939.4keV  $6^+$  态, 但我们不可能观测到. 所以<sup>130</sup>Pm 基态的自旋和宇称也可指定为  $4^+$  或  $6^+$ , 而  $6^+$  的指定是与 Møller<sup>[7]</sup> 的宏观-微观模型所预言的值相符, 它是由  $\nu 7/2[523]$  和  $\pi 5/2[532]$  准粒子组成.

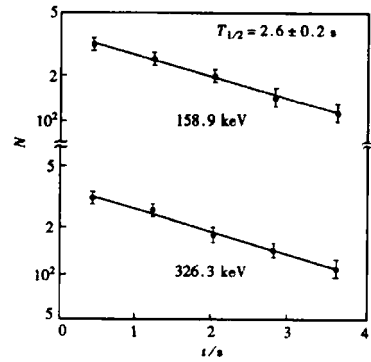


图 2 158.9 和 326.3keV  $\gamma$  射线的衰变曲线

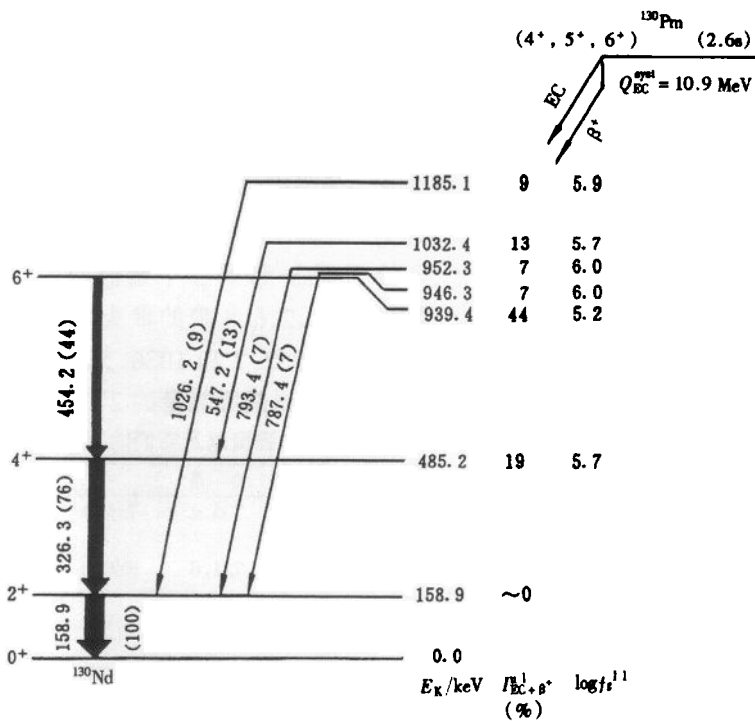


图 3 <sup>130</sup>Pm( $EC + \beta^+$ ) 衰变的衰变纲图(说明见正文)

### 3.2 $^{128}\text{Pr} \rightarrow ^{128}\text{Ce}$

已知 $^{128}\text{Pr}$ 的衰变纲图<sup>[4]</sup>由 6 条  $\gamma$  射线组成.  $2^+ \rightarrow 0^+$ ,  $4^+ \rightarrow 2^+$ ,  $6^+ \rightarrow 4^+$  态发射的  $\gamma$  射线为 207.3, 399.6, 550.6keV, 这 3 条  $\gamma$  射线在 $^{128}\text{Ce}$ 在束  $\gamma$  谱学中已给出<sup>[3]</sup>; 其余 3 条为 592, 799, 873keV, 其中 799keV  $\gamma$  射线在纲图上是一条虚线. 我们在 Ce-K $\alpha$ -X 开门的  $\gamma$  谱中没有找到它们. 与这两条  $\gamma$  射线符合的是 207.3keV 的  $\gamma$  射线. 图 4 给出了所测的 207.4keV 开门的  $\gamma$  谱. 除了 511keV 外, 一共有 11 条  $\gamma$  射线与它符合. 但 592, 873keV 的  $\gamma$  射线并未出现在此符合谱上. 这与在束  $\gamma$  谱学的观测一致<sup>[3]</sup>. 由 207.4keV  $\gamma$  射线定出的 $^{128}\text{Pr}$ 的半衰期(见图 5)  $T_{1/2} = 2.8(1)\text{s}$ , 在实验误差范围内与以前的报道一致<sup>[2,4]</sup>.

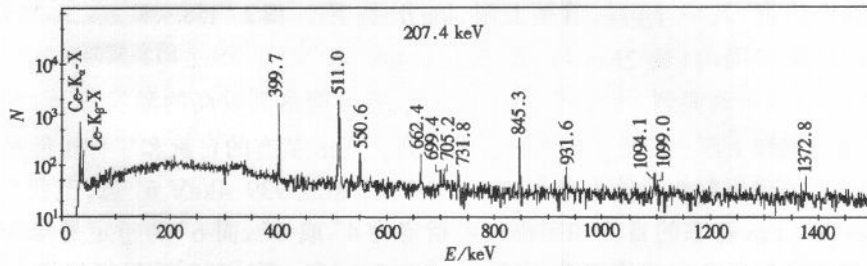


图 4 207.4keV  $\gamma$  射线开门得到的  $\gamma$  射线谱  
图中数字为  $\gamma$  射线的能量(keV).

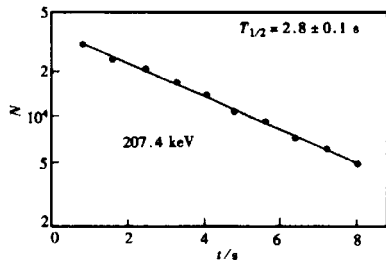


图 5 207.4keV  $\gamma$  射线的衰变曲线  
中强的 845.3keV  $\gamma$  射线是由 1052.7keV 的态退激到最低能量的  $2^+$  态. 基于  $\beta$  衰变的

表 2 列出 $^{128}\text{Pr}$ 衰变得到的  $\gamma$  射线的能量、强度和  $\gamma$ - $\gamma$  符合关系. 在图 6 中建议了 $^{128}\text{Pr}(\text{EC} + \beta^+)$ 的衰变纲图. 在图中右侧给出了各能级的能量及相对 ( $\text{EC} + \beta^+$ ) 的强度, 以及  $\log ft$  值. 其中  $Q_{\text{EC}}$  值是取自文献[5]. 计算中  $\log f$  值取自文献[6]. 在 $^{128}\text{Ce}$ 的低能区, 除了 yrast 带的 3 个最低的成员外, 在束  $\gamma$  谱中观测到的 1, 2, 6, 8 带的带头均已看到. 此外还观测到能量为 1052.7 和 1036.5keV 的新低位态. 其

表 2  $^{128}\text{Pr}(\text{EC} + \beta^+)$  衰变的  $\gamma$  射线的能量和强度以及它们的符合关系

$E_\gamma/\text{keV}$	$I_\gamma$	符合关系							
207.4(2)	100*	399.7	550.6	662.4	699.4	705.2	731.8	845.3	931.6
		1094.1	1099.0	1372.8					
399.7(3)	26(1)	207.4	550.6	699.4	705.2	731.8	1094.1	1372.8	
550.6(3)	3.4(3)	207.4	399.7	731.8					
662.4(4)	4.8(2)	207.4							
699.4(4)	1.1(5)	207.4	399.7						
705.2(4)	1.5(4)	207.4	399.7						
731.8(4)	1.8(4)	207.4	399.7	550.6					
845.3(3)	11.2(2)	207.4							
931.6(4)	4.0(3)	207.4							
1094.1(4)	1.4(4)	207.4	399.7						
1099.0(4)	2.9(4)	207.4							
1372.8(4)	2.4(4)	207.4	399.7						

\* 包括内转换电子的修正.

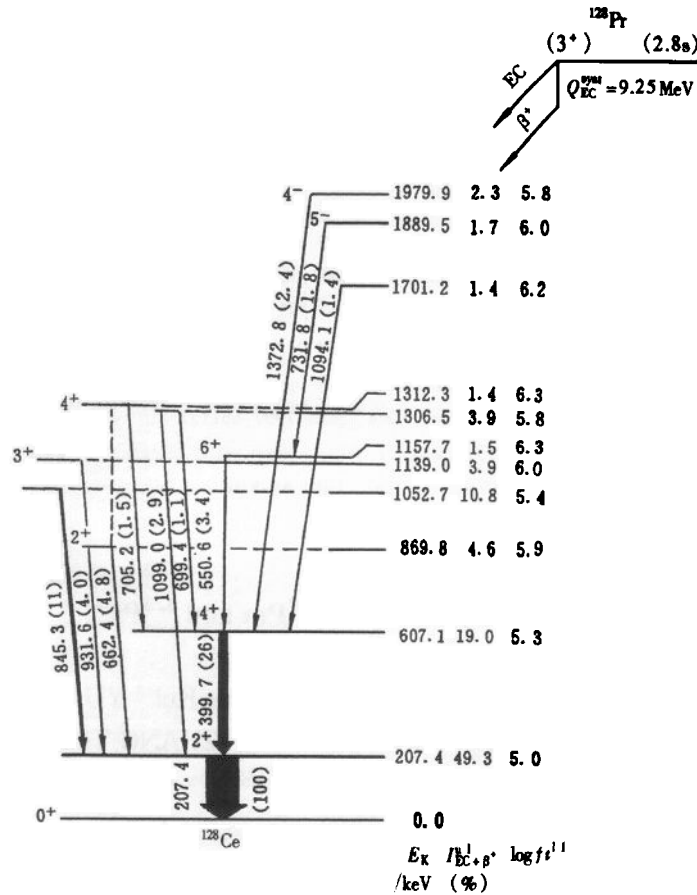


图 6 <sup>128</sup>Pr(EC +  $\beta^+$ ) 衰变的衰变纲图

选择定则, 我们不能把<sup>128</sup>Pr 基态的自旋和宇称指定为 5<sup>+</sup>. Møller 等<sup>[7]</sup>曾预言了这个值, 并认为<sup>128</sup>Pr 基态是  $\nu 7/2[523]$  和  $\pi 3/2[541]$  准粒子组成的. 因为 2<sup>+</sup>, 3<sup>+</sup> 态或 607.1keV 的 4<sup>+</sup> 态的  $\log ft$  的值均小于 6.00, 所以<sup>128</sup>Pr 基态的自旋和宇称可能被指定为 3<sup>+</sup>.

在投影壳模型计算中<sup>[8]</sup>, 选取大的形变参数  $\epsilon_2 = 0.370$  和  $\epsilon_4 = 0.0228$  以及稍微弱的对参数  $G_1 = 19.24\text{MeV}$  和  $G_2 = 13.86\text{MeV}$ . 计算给出<sup>128</sup>Pr 基态的自旋和宇称值为 3<sup>+</sup>, 它由  $\nu 1/2[541]$  和  $\pi 5/2[532]$  准粒子组成. 对<sup>130</sup>Pm 核, 若取  $\epsilon_2 = 0.385$ ,  $\epsilon_4 = 0.0247$ , 计算给出<sup>130</sup>Pm 基态的自旋和宇称值为 5<sup>+</sup>, 是由  $\nu 1/2(411)$  和  $\pi 9/2(404)$  准粒子组成. 它与已观测到的  $\gamma$  射线确定的<sup>130</sup>Pm 的基态的自旋和宇称值 5<sup>+</sup> 符合.

Lister 等<sup>[9]</sup>在研究轻稀土区的形变时, 曾指出第一个 4<sup>+</sup> 态与 2<sup>+</sup> 的激发能的比, 可以用来了解原子核形变的大小和类型. 如果是完美的轴对称的转子, 这个值是 3.33. 如果是不稳定的形变核, 则为 2.5. 而对球形振子则是 2.0. <sup>128</sup>Pr, <sup>130</sup>Pm 的子核是<sup>128</sup>Ce 和<sup>130</sup>Nd. 这两个核素具有相同的中子数 ( $N = 70$ ) 和不同的质子数 ( $Z = 58, 60$ ), 均是偶-偶核. 它们的第一个 4<sup>+</sup> 和 2<sup>+</sup> 态的能量比分别为  $607.1/207.4 = 2.93$  (<sup>128</sup>Pr),  $485.2/158.9 = 3.05$  (<sup>130</sup>Pm). 由上面的比值可以看出随着质子数减小, 比值是增大的. 比值均在 3.0 左

右,说明它们具有大的形变.

### 参考文献 (References)

- 1 Wilmarth P A, Nitschke J M, Lemmertz P K et al. *Z. Phys.*, 1985, **A321**:179;  
Nitschke J M, Wilmarth P A, Gilat J et al. *Proc. of 5th Inter. Conf. on Nuclei Far From Stability, Rosseau Lake*, edited by I. Towner, 1988, 697
- 2 Moscrop R, Campbell M, Gelletly W et al. *Nucl. Phys.*, 1989, **A499**:565
- 3 LU J, Mukai J, Komatsubara T et al. *Nucl. Phys.*, 1996, **A607**:327
- 4 Barneoud D, Blachot J, Genevey J et al. *Z. Phys.*, 1988, **A330**:341
- 5 Audi G, Bersillon O, Blachot J et al. *Nucl. Phys.*, 1997, **A624**:1
- 6 Gove N B, Martin M J. *Nucl. Data Tables*, 1971, **10**:206
- 7 Moller P, Nix J R, Kratz K L. *At. Data and Nucl. Data Tables*, 1997, **66**:131
- 8 Hara K, SUN Yang. *Int. J. Mod. Phys.*, 1995, **E4**:637
- 9 Lister C J, Varley B J, Moscrop R et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1985, **55**:810

### (EC + $\beta^+$ ) Decay of $^{130}\text{Pm}$ and $^{128}\text{Pr}$ \*

XIE YuanXiang XU ShuWei Li ZhanKui YU Yong  
PAN QiangYan WANG ChunFang ZHANG TianMei

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

LONG GuiLu LI YanSong

(*Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

**Abstract**  $^{130}\text{Pm}$  and  $^{128}\text{Pr}$  were produced by irradiation of  $^{96}\text{Ru}$  with 171 MeV  $^{36}\text{Ar}$  beam, and a He-jet recoil tape transport system transported radioactivities to shielded region. Based on X- $\gamma$ -t and  $\gamma$ - $\gamma$ -t coincidence measurements, the (EC +  $\beta^+$ ) decay scheme of  $^{130}\text{Pm}$  was proposed for the first time and the (EC +  $\beta^+$ ) decay scheme of  $^{128}\text{Pr}$  was revised.

**Key words** EC/ $\beta^+$  decay, He-jet recoil tape transport system, decay scheme

---

Received 30 June 1999

\* Supported by National Natural Science Foundation of China(19775056, 19975057) and The Chinese Academy of Sciences