

^{130}Ce 的电磁跃迁率和形变特性*

李广生¹ 杨利明² 戴征宇¹ 刘祥安¹ 张兰宽¹
温书贤¹ 吴晓光¹ 袁观俊¹ 翁培焜¹ 李生岗¹
朱胜江² 杨春祥¹ 竺礼华¹

1 (中国原子能科学研究院 北京 102413)

2 (清华大学物理系 北京 100084)

摘要 通过束流能量为 73 MeV 的 $^{116}\text{Sn}(^{16}\text{O}, 2n)^{130}\text{Ce}$ 重离子反应, 利用多普勒展宽峰的形状分析方法, 测量了轻稀土核 ^{130}Ce 激发态的寿命. 通过这些测量提取约化跃迁几率 $B(E2)$. 实验结果表明, 在本工作中没有观察到过去报道的 $B(E2)$ 异常高的值; 转晕带的跃迁四极矩随自旋而变化, 呈现 $\gamma \approx 7^\circ$ 的三轴形变.

关键词 寿命测量 $B(E2)$ 值 跃迁四极矩 三轴形变

1 引言

质量数 $A = 130$ 附近的轻稀土核处在形变区, 具有核质柔软, 容易产生三轴形变的特点. 对于该质量区偶 Ce 同位素高自旋态的寿命测量表明, 这些核的约化跃迁几率 $B(E2)$ 随自旋增大而减小, 并在回弯区达到最小^[1-3]. 包括粒子-转子模型在内的一些理论计算^[4,5] 都能很好地描述这些核的回弯特性, 并成功地预言了 $B(E2)$ 在回弯附近出现最小值. 然而 ^{130}Ce 却在 12^+ 态显示出异常高的 $B(E2)$ 值^[6]. 这一现象令人无法理解, 任何理论计算都不能再现这个极高 $B(E2)$ 值, 这向核结构理论提出了挑战. 因此, 重新测量这个核回弯区的能级寿命, 澄清这一异常现象是很有必要的. 基于这一目的, 本工作利用多普勒移动衰减(DSA)法测量 ^{130}Ce 高自旋转晕态的寿命, 提取约化跃迁几率和跃迁四极矩, 进而探讨核的形变特性.

2 实验

利用中国原子能科学研究院 HI-13 串列加速器提供的 73 MeV ^{16}O 束, 轰击 $970 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 厚的同位素靶 ^{116}Sn (浓缩度为 92.8%), 通过熔合-蒸发反应 $^{116}\text{Sn}(^{16}\text{O}, 2n)^{130}\text{Ce}$ 布居 ^{130}Ce

2001-08-15 收稿

* 国家自然科学基金(19975070)和国家重点基础研究发展规划(G2000077405)资助

的高自旋态. 反冲核 ^{130}Ce 在靶中慢化并最终被阻停在厚度为 $20\text{mg}/\text{cm}^2$ 的靶衬天然铅中. 蒸发剩余核发射的 γ 射线, 由 7 台 HPGe 探测器组成的探测阵列进行 γ - γ 符合测量. 为了提高光电峰的峰康比, 每台 HPGe 探测器都装备了一套 BGO 反康普顿抑制装置. 这些探测器距离靶中心 18cm , 因此, 立体角是比较小的, 从而减小了探测角度对多普勒效应的影响. 3 台探测器的位置相对于束流方向为 90° , 其余 4 台分别为 $\pm 30^\circ$ 和 $\pm 143^\circ$. HPGe 探测器的相对效率是 $15\% - 30\%$, 能量分辨率好于 2.2keV (对 ^{60}Co 的 1332.5keV γ 射线). 利用 ^{60}Co 和 ^{152}Eu 标准源进行能量和相对效率刻度. 只有当至少 2 个反康普顿 HPGe 探测器同时探测到的 γ - γ 符合事件才被记录, 总共积累了大约 6×10^7 个符合事件.

3 结果

离线对获取的符合事件进行分类, 建成一个在 x 轴为 30° 探测到的 γ 射线、 y 轴为所有其他角度探测到的 γ 射线的能量关联矩阵. 投影得到的 30° 符合谱用于 DSA 测量. 为了消除重叠 γ 射线的干扰, 通过设置 ^{130}Ce 转晕跃迁的能量窗, 得到与其符合的 30° 开门谱, 对这个谱中的多普勒展宽峰进行形状分析以便测定能级寿命. 在峰形分析中, 对许多修正进行了考虑, 这些修正包括反冲核的速度分布、靶的厚度、探测器的有限立体角和能量分辨率、以及由级联馈入和边路馈入所引起的时间延迟等. 关于数据处理和峰形分析的具体方法已在我们近期发表的文献[3]中详述.

为了检验测量结果, 本实验通过 $^{116}\text{Sn}(^{16}\text{O}, \alpha 2n)^{126}\text{Ba}$ 反应同时测量了 ^{126}Ba 6^+ 和 8^+ 态寿命分别为 $\tau(6^+) = 1.47(30)\text{ps}$ 和 $\tau(8^+) = 2.02(35)\text{ps}$, 与过去用反冲距离多普勒移动 (RDDS) 法测得这两个能级的寿命分别为 $\tau(6^+) = 1.62(\frac{100}{50})\text{ps}$ 和 $\tau(8^+) = 2.14(\frac{35}{25})\text{ps}$ ⁷ 相一致. 我们测得的 ^{130}Ce 回弯区的能级寿命列在表 1 中, 并同时给出了过去用 RDDS 法测量的结果. 对于 16^+ 态, 由于没有该态以上的馈入信息, 因此只给出未作馈入修正的有效寿命. 至于 12^+ 能级的寿命下限则是基于这样一个事实得到的, 在 30° 的开门谱中,

表 1 ^{130}Ce 转晕态的寿命

E_x/keV	I^π	E_γ/keV	τ/ps		
			本工作	Husar 等 ¹¹	Todd 等 ⁶
253.0	2^+	253.0		209(15)	180(15)
709.0	4^+	456.0		7.2(6)	7.3(8)
1322.3	6^+	613.3		2.7(8)	2.6(2)
2050.8	8^+	728.5	1.6(4)	< 1.0	< 0.8
2807.3	10^+	756.5	1.8(5)	1.1(5)	0.9(2)
3310.0	12^+	502.7	> 3.5	7.2(13)	1.8(4)
3858.3	14^+	548.3	1.8(7)	$1.5(\frac{10}{15})$	1.2(3)
4550.8	16^+	692.5	< 2.5		1—1.5

$503\text{keV} 12^+ \rightarrow 10^+$ 跃迁的峰形没有显示出多普勒展宽效应, 这就表明 12^+ 态的寿命远大于阻停介质的特征慢化时间 α . 在本实验中, 阻停介质是铅衬, 利用下述关系式可以算得

$\alpha \approx 1\text{ps}$:

$$\alpha = MV_0/k_e\rho, \quad (1)$$

其中 $V_0 = c/137$, k_e 代表电子阻止本领参量, 表示为

$$k_e = 11.53(Z_2/A_2)Z_1^{7/6}/(Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})^{3/2}, \quad (2)$$

式中 M 是反冲核的质量, ρ 是阻停介质的密度, Z_1 是反冲核的原子序数, Z_2 是阻停介质的原子序数, A_2 是阻停介质的原子量. 通过对 ^{130}Ce 核在铅介质中用不同衰变时间计算得到的 503keV γ 跃迁的峰形与实验测量谱的比较, 即可推定 12^+ 态的寿命大于 3.5ps.

4 讨论

根据测得的寿命值, 利用公式

$$B(E2) = 8.156 \cdot 10^{-10} \cdot E_\gamma^{-5} \cdot \lambda(E2) \quad (3)$$

得到表 2 所示的约化跃迁几率 $B(E2)$. 为了便于探讨核的集体性, 将这些 $B(E2)$ 值归一到对称转子值, 该转子的形变由 $2^+ \rightarrow 0^+$ 转晕跃迁几率所表征. 这些归一化的 $B(E2)$ 值在表 2 中以比值 $B(E2)/B(E2)_{rot}$ 给出, 并同时列出了过去的结果. 对于 12^+ 态, 由 Todd 等^[6] 报道的 $B(E2)$ 异常高值在本实验中没有被观察到. 应当指出的是, 他们通过 76.5MeV 的 $^{117}\text{Sn}(^{16}\text{O}, 3n)^{130}\text{Ce}$ 反应, 利用 RDDS 法测量 ^{130}Ce 的能级寿命, 这时反冲核 ^{130}Ce 的反冲速度为 $v/c = 1.05\%$, 于是, 退激 12^+ 态的 503keV γ 跃迁的多普勒移动峰的能量是 508keV. 我们与 Todd 等关于 12^+ 态的 $B(E2)$ 值的分歧可能是由于 503keV $12^+ \rightarrow 10^+$ 跃迁的多普勒移动峰 508keV 与 511keV γ 峰相重叠, 导致他们在用 RDDS 法进行的 γ 单谱测量中难以分解这个重叠峰所产生的.

表 2 ^{130}Ce 转晕态的 $B(E2)$ 值和跃迁四极矩 Q_2

E_x/keV	I^π	E_γ/keV	$B(E2)/(e^2\text{fm}^4)$	$B(E2)/B(E2)_{rot}$			Q_2/eb
				本工作	Husar 等 ^[1]	Todd 等 ^[6]	
253.0	2^+	253.0			1.0	1.00	4.68(20)*
709.0	4^+	456.0			$1.15(\frac{20}{13})$	0.95	4.47(24)*
1322.3	6^+	613.3			$0.64(\frac{28}{17})$	0.54(4)	3.40(13)*
2050.8	8^+	728.5	2484(621)	0.34(9)	> 0.7	> 0.72	2.76(35)
2807.3	10^+	756.5	1829(508)	0.24(7)	$0.50(\frac{53}{16})$	0.52(11)	2.33(32)
3310.0	12^+	502.7	< 7259	< 0.96	$0.59(\frac{16}{9})$	1.94(43)	< 4.61
3858.3	14^+	548.3	914(3556)	1.20(47)	$1.8(\frac{30}{10})$	1.88(48)	5.14(99)
4550.8	16^+	692.5	> 2048	> 0.26		0.45—0.7	> 2.42

* 根据文献^[6]的寿命数据计算.

值得提出的是, 在与 ^{130}Ce 相邻的偶 Ce 核 ^{128}Ce 和 ^{132}Ce 中也曾观察到 12^+ 态的 $B(E2)$ 高值^[1,8]. 但是后来又报道了完全相反的结果, 即很小的 $B(E2)$ 值^[2,3], 否定了此前的异常

行为. 这在一定程度上也增大了我们的测量结果的可信度.

跃迁四极矩 Q_i 是表征核形状的灵敏参量. 根据 $B(E2)$ 得到的 Q_i 列在表 2 的最后一栏中, 并在图 1 中显示出 Q_i 与自旋 I 的变化关系. ^{130}Ce 的平均跃迁四极矩为 $(3.73 \pm 1.05)\text{eb}$, 与 ^{129}Ce 的 $Q_i = (3.84 \pm 0.54)\text{eb}$ ^[9] 和 ^{128}Ce 的 $Q_i = (4.18 \pm 0.86)\text{eb}$ ^[3] 相比较, 可以看出, 随着中子数的增多和 Q_i 的减小, 即集体性降低. 这一变化过程定性上是可以理解的, 这 3 个核的中子数分别为 70, 71 和 72, 随着中子数增多就越接近 $N = 82$ 的满壳, 趋于球形.

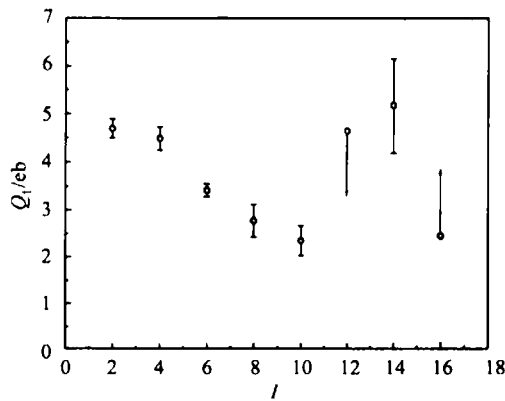


图 1 ^{130}Ce 转晕带的跃迁四极矩

Q_i 与自旋 I 的变化关系

壳模型的表达式 $Q_i(\beta_2, \gamma) = Q_i(\beta_2, \gamma = 0^\circ) \cos(\gamma + 30^\circ) / \cos 30^\circ$, 得到 $\gamma \approx 7^\circ$, 表明是一个近似轴对称的长椭圆形变.

在没有形状变化和带交叉的情况下, Q_i 应当不随 I 变化而保持不变. 从图 1 可以看到, 在带交叉之前 Q_i 随 I 增大而减小, 在同弯区达到最小, 然后又开始增大, 恢复到转子值附近. 这是由于一对质子顺排引起核芯极化, 导致核的形状变化所造成的. ^{130}Ce 的正宇称中子费米面位在低 j 壳 $d_{5/2}$ 的 $[402]5/2$ 轨道, 所以 γ 驱动效应是非常小的. 而一对顺排质子位在高 j 壳 $h_{11/2}$ 底部的 $[550]1/2$ 和 $[541]3/2$ 轨道之间, 因此产生一个 $\gamma \geq 0^\circ$ 的强驱动力. 也就是说, Q_i 的变化主要来自 γ 形变. 根据推转

5 总结

利用入射能量为 73 MeV 的 $^{116}\text{Sn}(^{16}\text{O}, 2n)^{130}\text{Ce}$ 反应布居 ^{130}Ce 的高自旋态, 通过多普勒展宽峰的形状分析测定了 ^{130}Ce 回弯区的能级寿命. 过去报道的 $B(E2)$ 异常高值在本工作中没有被观察到. 实验表明, 转晕带的跃迁四极矩随自旋而变化, 并在回弯区附近出现最小. 这是因为一对 $h_{11/2}$ 质子的顺排, 引起核的形状变化所致, 呈现为 $\gamma \approx 7^\circ$ 的三轴形变.

感谢许国基同志为本实验制备了优质实验用靶, 同时对加速器运行人员的密切合作和提供良好的束流条件, 表示真诚的谢意.

参考文献 (References)

- 1 Husar D, Mills S J, Garf H et al. Nucl. Phys., 1977, **A292**(2): 267—280
- 2 Kirwan A, Bishop P J, Love D J C et al. J. Phys., 1989, **G15**(1): 85—92
- 3 LI G S, DAI Z Y, WEN S X et al. Z. Phys., 1996, **A356**(2): 119—123
- 4 Reinecke M, Rude H. Z. Phys., 1977, **A282**(4): 407—416
- 5 Hammaren E, Schmid K W, Grümmer F et al. Nucl. Phys., 1986, **A454**(2): 301—337

- 6 Todd D M, Aryaeinejad, Love D J G et al. J. Phys., 1984, G10(10): 1407—1433
- 7 Seiler-Clark, Husar D, Novotny R et al. Phys. Lett., 1979, 80B(4,5): 345—347
- 8 Wells J C, Johnson N R, Hattula J et al. Phys. Rev., 1984, C30(5): 1532—1537
- 9 LI Guang-Sheng, DAI Zheng-Yu, LIU Xiang-An et al. Chin. Phys. Lett., 1998, 15(8): 564—565

Electromagnetic Transition Rates and Deformation Feature in $^{130}\text{Ce}^*$

LI Guang-Sheng¹ YANG Li-Ming² DAI Zheng-Yu¹ LIU Xiang-An¹
ZHANG Lan-Kuan¹ WEN Shu-Xian¹ WU Xiao-Guang¹
YUAN Guan-Jun¹ WENG Pei-Kun¹ LI Sheng-Gang¹
ZHU Sheng-Jiang² YANG Chun-Xiang¹ ZHU Li-Hua¹

1 (China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

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

Abstract Lifetimes of the excited states in light rare-earth nucleus ^{130}Ce have been measured using heavy ion reaction $^{116}\text{Sn}(^{16}\text{O}, 2n)^{130}\text{Ce}$ at beam energy of 73 MeV through analyzing the Doppler-broadened line shapes. The reduced transition probabilities $B(E2)$ are extracted from these measurements. The experimental results show that the previously reported anomalously high $B(E2)$ value has not been observed in the present work. The transition quadrupole moment for the yrast band varies with spin and corresponds to a triaxial deformation with $\gamma \approx 7^\circ$.

Key words lifetime measurement, $B(E2)$ value, transition quadrupole moment, triaxial deformation

Received 15 August 2001

* Supported by National Natural Science Foundation of China(19975070) and Major State Basic Research Development Program (G2000077405)