

^{131}Ce 和 ^{131}Pr 价核子对形状变化的影响^{*}

李广生^{1;1)} 孟锐² 竺礼华¹ 张振龙² 吴晓光¹ 王月²
王治民¹ 温书贤¹ 陆景彬² 赵广义² 李险峰² 文立军²
郑永男¹ 刘运祚² 杨春祥¹

1 (中国原子能科学研究院 北京 102413)

2 (吉林大学物理学院 长春 130023)

摘要 利用 95MeV 的 ^{19}F 束轰击 ^{116}Sn 靶, 采用 11 台反康普顿 BGO-HPGe 探测器对蒸发剩余核退激发射的 γ 射线进行 γ - γ 符合测量. 通过对多普勒展宽峰的形状分析测定了 ^{131}Ce 和 ^{131}Pr 高自旋态的寿命. 根据寿命数据提取的跃迁四极矩显示, 在带交叉区发生形状变化. 通过与相邻偶-偶核芯 ^{130}Ce 的比较表明, 价中子对核芯形状变化的影响大于价质子的影响.

关键词 寿命测量 跃迁四极矩 形状变化

1 引言

质量数 $A \approx 130$ 的轻稀土核是高自旋态研究的热点核区之一. 这些核处在从球形向大形变的过渡区, 其中子和质子费米面分别位于 $h_{11/2}$ 高 j 壳的中上部和底部轨道, $h_{11/2}$ 中子驱使原子核朝向 $\gamma = -60^\circ$ 的扁椭形状; 而 $h_{11/2}$ 质子的形状驱动力则使核趋于 $\gamma = 0^\circ$ 的长椭形. 因此, 这些过渡核的基态组态存在长椭形变和扁椭形变共存的特点. 在高自旋时, 出现集体运动和粒子激发之间的剧烈竞争. 理论还预言^[1], 随着转动频率增大呈现由软 γ 趋于三轴形变, 发生形状变化. 所以, $A \approx 130$ 的轻稀土核蕴含着丰富的核结构信息. 通过对奇 A 核形变特性的研究, 可以揭示非配对核子对核芯的形状变化和转动惯量等核行为的影响, 从而有助于对核结构的深入了解.

我们在研究了偶-偶核 ^{130}Ce 形变特性的基础上^[2], 本工作测量了与其相邻的奇中子同位素 ^{131}Ce 和同中子异位素 ^{131}Pr 高自旋态的寿命, 通过提取跃

迁四极矩探讨价质子和价中子对原子核形状变化的影响.

2 实验

利用多普勒移动衰减法 (DSAM) 测量奇 A 核 ^{131}Ce 和 ^{131}Pr 高自旋态的寿命. 这两个核通过入射能量为 95MeV 的熔合-蒸发反应 $^{116}\text{Sn}(^{19}\text{F}, p3n)^{131}\text{Ce}$ 和 $^{116}\text{Sn}(^{19}\text{F}, 4n)^{131}\text{Pr}$ 产生. 利用中国原子能科学研究院 HI-13 串列加速器提供的 ^{19}F 束, 轰击厚度为 $1.05\text{mg}/\text{cm}^2$ 的同位素 ^{116}Sn 靶, 生成的反冲核最终被阻停在 $22.7\text{mg}/\text{cm}^2$ 厚的铅衬中. 由于靶材料的熔点较低, 束流强度控制在 15nA 左右, 以防止靶箔熔损. 另一方面, 在这个束流条件下, 还避免了因计数率效应而引起 γ 谱形的畸变. 产物核退激发射的 γ 射线由探测阵列进行 γ - γ 符合测量, 该阵列由 11 台抑制康普顿的 BGO-HPGe 探测器组成. 这些探测器分布在相对于束流方向的 3 个不同角度, 在 48° 和 132° 各有 4 台探测器, 其余 3 台位在 90° . 每台探测器与靶中心的距离为 25cm, 以致所张的立体角是比较小

2004-08-25 收稿

^{*} 国家自然科学基金(19975070), 国家重点基础研究发展规划项目(G2000077405)资助

1) E-mail: lig@iris.ciae.ac.cn

的. 因此,探测角度对于多普勒效应的影响是可忽略的. 在实验始末,用⁶⁰Co 和 ¹⁵²Eu 标准 γ 源对所有探测器进行能量和效率刻度. 测量期间,利用已知的不同能区的特征 γ 射线,监视在束 γ 谱的峰位和分辨率. 用事件记录法进行实验数据的在线获取,只有当至少 2 个反康 BGO-HPGe 探测器同时探测到的符合事件才被记录. 总共积累了大约 10^8 个符合事件.

3 结果

为了进行 DSAM 分析,在线记录的符合事件被分类,建成一个一条 γ 射线是由 132° 探测器测量、另一条 γ 射线则由其余所有角度的探测器测量的 γ - γ 符合二维矩阵,由这个矩阵投影生成 132° 符合谱. 为了消除能量相近的重叠峰的干扰,通过设置合适的 γ 跃迁能量窗得到便于 DSAM 分析的开门谱. 在确认已知的¹³¹Ce 和 ¹³¹Pr 能级纲图的基础上,本寿命测量采用的有关能级纲图如图 1 所示.

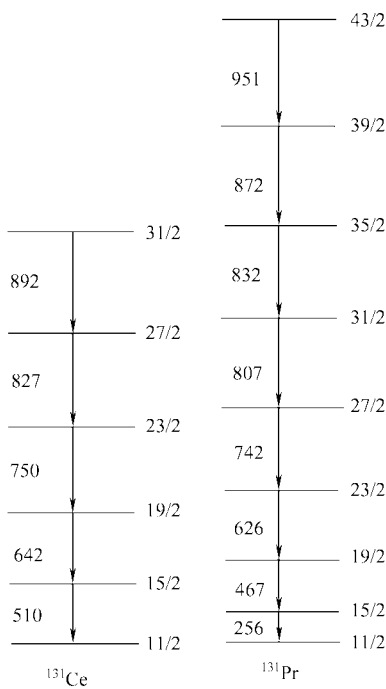


图 1 本工作采用¹³¹Ce 和 ¹³¹Pr 的部分能级纲图

对于多普勒展宽峰的形状分析是借助于计算机程序进行的. 在计算中对一系列修正进行了考虑,这些包括束流在靶中的能量损失、反冲核的速度分布、探测器的分辨率和几何位置、来自已知能级的级联馈入以及未观察到的边馈入等的影响. 反冲核在

慢化过程中因核碰撞引起的角度离散是按照 Blaugrund^[3] 近似方法处理的. 关于数据处理和峰形分析的具体步骤已在文献[4]中详述. 图 2 给出¹³¹Ce 827keV $27/2^- \rightarrow 23/2^-$ 跃迁和¹³¹Pr 807keV $31/2^- \rightarrow 27/2^-$ 跃迁的实验观测谱和理论计算谱. 这两个核高自旋态的寿命测量结果和相应的 $B(E2)$ 值分别汇集在表 1 和表 2 中. 对于¹³¹Ce 的 $31/2^-$ 态和¹³¹Pr 的 $43/2^-$ 态,只能得到未做馈入修正的有效寿命,也即寿命的上限值. 这是因为位于它们上面的更高自旋态的弱布居而缺少馈入信息的缘故. 而对于¹³¹Ce 的 $19/2^-$ 态,仅给出寿命的下限值. 因为在¹³¹Ce 的开门谱中,没有观察到退激 $19/2^-$ 能级的 642keV 跃迁的多普勒展宽效应,表明 $19/2^-$ 能级的寿命远长于作为阻停介质的铅衬的特征慢化时间 $\alpha \approx 1\text{ps}^{[2]}$. 根据多普勒衰减因子 $F(\tau)$ 的定义

$$F(\tau) = \frac{\Delta E_\gamma}{\Delta E_\gamma^{\max}} \quad (1)$$

可以通过以下分析得到 $F(\tau)$ 的上限值. 上式中 ΔE_γ 表示峰形矩心的移动, ΔE_γ^{\max} 表示峰形矩心的最大多普勒移动. 在本实验条件下,由反应运动学得到 $\Delta E_\gamma^{\max} \approx 6.3\text{keV}$. 鉴于 642keV γ 跃迁的峰形没有显示出多普勒移动,即 ΔE_γ 是非常小的. 即使 $\Delta E_\gamma = 1.3\text{keV}$,这在谱中相应于 3 道的多普勒移动,

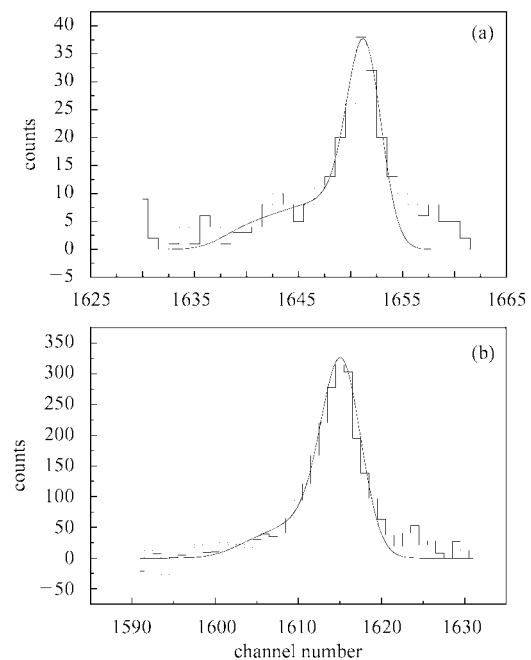


图 2 (a)¹³¹Ce 827keV $27/2^- \rightarrow 23/2^-$ 跃迁和(b)¹³¹Pr 807keV $31/2^- \rightarrow 27/2^-$ 跃迁的多普勒展宽谱
光滑曲线是对实验谱的拟合峰形.

也应该是显而易见的. 因此, $F(\tau)$ 的值至少小于 0.2. 利用特征慢化时间与衰减因子之间的近似关系式

$$F(\tau) \approx \frac{\alpha}{\alpha + \tau} \quad (2)$$

可以推定 $19/2^-$ 能级的寿命 $\tau > 4.0\text{ps}$.

表 1 ^{131}Ce 转晕态的寿命、 $B(E2)$ 值和跃迁四极矩 Q_t

I^π	E_γ/keV	τ/ps	$B(E2)/(e^2 \cdot \text{fm}^4)$	Q_t/eb
$19/2^-$	642	> 4.0	< 1880	< 3.81
$23/2^-$	750	1.44 (54)	2416 (906)	3.55 (67)
$27/2^-$	827	1.23 (23)	1723 (322)	2.72 (25)
$31/2^-$	892	< 1.04	> 1396	> 2.31

表 2 ^{131}Pr 转晕态的寿命、 $B(E2)$ 值和跃迁四极矩 Q_t

I^π	E_γ/keV	τ/ps	$B(E2)/(e^2 \cdot \text{fm}^4)$	Q_t/eb
$23/2^-$	626	1.73 (15)	4930 (427)	5.08 (22)
$27/2^-$	742	0.86 (10)	4239 (493)	4.27 (25)
$31/2^-$	807	0.90 (8)	2661 (236)	3.19 (14)
$35/2^-$	832	1.56 (27)	1318 (218)	2.16 (19)
$39/2^-$	872	0.51 (4)	3189 (250)	3.28 (13)
$43/2^-$	951	< 0.55	> 1916	> 2.50

4 讨论

跃迁四极矩 Q_t 是表征核形状的重要参量. 根据 $B(E2)$ 值, 利用转动公式

$$Q_t^2 = \frac{16\pi}{5} \frac{B(E2, I \rightarrow I-2)}{\langle IK20 | I-2K \rangle^2}, \quad (3)$$

即可得到 ^{131}Ce 和 ^{131}Pr 的 Q_t 值, 计算结果分别列在表 1 和表 2 的最后一栏. Q_t 与四极形变参量 β_2 和非轴对称形变参量 γ 之间的关系可以表示为

$$Q_t(\beta_2, \gamma) = Q_t(\beta_2, \gamma = 0^\circ) \cos(\gamma + 30^\circ) (2/\sqrt{3}). \quad (4)$$

显然, 当非轴对称形变发生从 $\gamma < 0^\circ$ 到 $\gamma > 0^\circ$ 的变化时, Q_t 减小. 因此, 实验观察到的 Q_t 减小可能与 γ 形变增大有关.

图 3 给出同量异位素 ^{131}Ce 和 ^{131}Pr 的跃迁四极矩 Q_t 与自旋 I 的变化关系. 可以看出, 这两个核的 Q_t 在带交叉之前都随自旋增大而逐渐减小. 这个变化反映了低自旋时长椭形状与扁椭形状之间的竞争

过程. 不过, ^{131}Pr 相对于 ^{131}Ce 有较大的 Q_t 值, 预示着 ^{131}Pr 的形变大于 ^{131}Ce 的形变. 这个差别可能归因于这两个核不同的 γ 形变所致. 因为 ^{131}Pr 的未配对质子处在 $h_{11/2}$ 壳底部附近的 $[550]1/2^-$ 和 $[541]3/2^-$ 轨道之间, 产生朝向 $\gamma = 0^\circ$ 的驱动力, 使核趋向于长椭圆形; 而 ^{131}Ce 的价中子位于 $h_{11/2}$ 壳中部的 $[514]9/2^-$ 轨道, 对核产生朝向 $\gamma = -60^\circ$ 的驱动力, 使之优惠于扁椭圆形. 图 3 还清晰地显示, ^{131}Pr 的 Q_t 值在回弯区急剧下落. 这是因为与带交叉相关的粒子顺排效应导致核芯极化, 引起非轴对称的三轴形变, 发生形状变化, 致使四极形变和跃迁四极矩减小. 值得指出的是, ^{131}Pr 的 Q_t 值在 $I = 35/2$ 处, 即在转动频率 $\hbar\omega \approx 0.42\text{MeV}$ 时陡然下落, 如图 4 所示, 是与动力学转动惯量 $J^{(2)}$ 在同一频率处所显示的标志带交叉的尖锐峰相对应的. 这一结果为由于带交叉引起形状变化提供了实验证据.

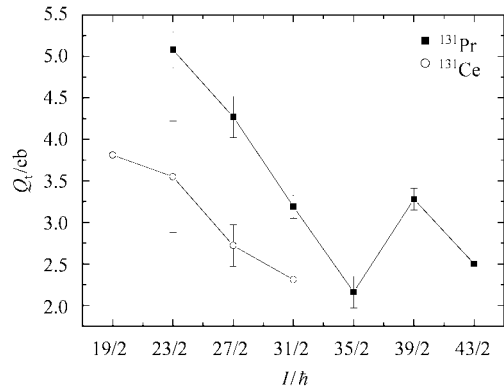


图 3 ^{131}Ce 和 ^{131}Pr 的跃迁四极矩 Q_t 与自旋 I 的变化关系

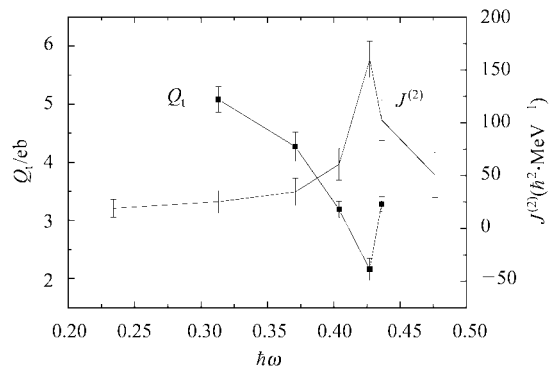


图 4 ^{131}Pr 的动力学转动惯量 $J^{(2)}$ 和跃迁四极矩 Q_t 与转动频率 $\hbar\omega$ 的关系

为了探讨价质子对核芯形状的影响, 比较奇质

子核¹³¹Pr 与比其少一个质子的偶-偶同中子异位素¹³⁰Ce 的 Q_t 值是灵敏有效的方法. 本实验得到¹³¹Pr 的平均 Q_t 值为 (3.41 ± 1.00) eb, 略小于¹³⁰Ce 的平均 $Q_t = (3.73 \pm 1.05)$ eb^[2], 二者基本相当. 这表明, 增加的这个未配对质子对于核芯形状变化的影响是比较小的.

同样, 通过比较奇中子核¹³¹Ce 与相邻偶-偶同位素¹³⁰Ce 的 Q_t 值可以了解价中子对于核形变的影响. 本工作测得的¹³¹Ce 的平均 Q_t 值为 (3.09 ± 0.61) eb, 明显小于¹³⁰Ce 的平均 Q_t 值, 也就是说, ¹³¹Ce 的集体性相对于¹³⁰Ce 大为降低. 这意味着, 附加的价中子对于核的形状变化产生较大的影响.

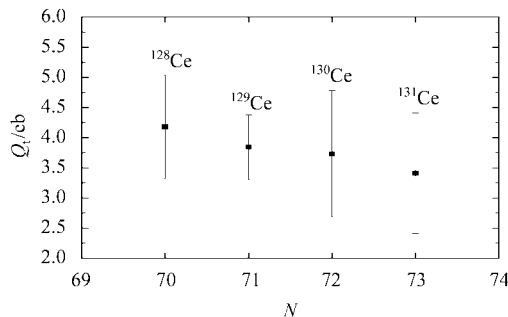


图5 同位素¹²⁸Ce, ¹²⁹Ce, ¹³⁰Ce 和¹³¹Ce 的跃迁四极矩 Q_t 与中子数 N 的变化关系
¹²⁸Ce, ¹²⁹Ce 和¹³⁰Ce 的数据分别取自文献[2,4,5].

综合比较奇质子核¹³¹Pr 和奇中子核¹³¹Ce 相对于核芯¹³⁰Ce 的形变特性, 不难推断, 中子的形状驱动效应似乎强于质子的形状驱动效应, 或者说, 中子对核的形状变化起着主要作用. 这个论断也通过系统比较¹²⁸Ce^[4], ¹²⁹Ce^[5], ¹³⁰Ce^[2] 和¹³¹Ce 同位素的 Q_t 值得到证实. 从图5清楚看到, Ce 同位素的集体性随着中子数的增加而减小, 这是与中子数趋于 $N = 82$ 闭壳而逐渐显现球形核的形变特征相一致的.

5 小结

通过束流能量为 95 MeV 的重离子反应¹¹⁶Sn (¹⁹F, p3n)¹³¹Ce 和¹¹⁶Sn(¹⁹F, 4n)¹³¹Pr 布居¹³¹Ce 和¹³¹Pr 的高自旋态. 采用 11 台反康普顿 BGO-HPGe 探测器以 γ - γ 符合技术对退激 γ 射线进行探测. 利用多普勒展宽峰的形状分析方法测定¹³¹Ce 和¹³¹Pr 高自旋态的寿命. 实验结果为回弯区发生形状变化提供了直接证据. 相对于核芯¹³⁰Ce, 这两个核的集体性都有降低, 但是, 奇质子核¹³¹Pr 的形变大于奇中子核¹³¹Ce 的形变, 表明价中子比价质子对核芯的形状变化有更大的影响.

感谢许国基同志为我们提供了优质实验用靶. 对中国原子能科学研究院 HI-13 串列加速器运行人员为本实验付出的辛勤劳动表示感谢.

参考文献 (References)

- 1 Åberg S. Phys. Scr., 1982, **25**: 23—27
- 2 Li Guang-Sheng, YANG Li-Ming, DAI Zheng-Yu et al. HEP & NP, 2002, **26**(8): 809—813 (in Chinese)
(李广生, 杨利明, 戴征宇等. 高能物理与核物理, 2002, **26**(8): 809—813)
- 3 Blaugrund A E. Nucl. Phys., 1966, **88**: 501
- 4 LI G S, DAI Z Y, WEN S X et al. Z. Phys., 1996, **A356**(2): 119—123
- 5 LI Guang-Sheng, DAI Zheng-Yu, LIU Xiang-An et al. Chin. Phys. Lett., 1998, **15**(8): 564—565

Influence of Valence Nucleon on Shape Change in ^{131}Ce and ^{131}Pr *

LI Guang-Sheng^{1;1)} MENG Rui² ZHU Li-Hua¹ ZHANG Zhen-Long² WU Xiao-Guang¹
WANG Yue² WANG Zhi-Min¹ WEN Shu-Xian¹ LU Jing-Bin² ZHAO Guang-Yi²
LI Xian-Feng² WEN Li-Jun² ZHENG Yong-Nan¹ LIU Yun-Zuo² YANG Chun-Xiang¹

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

2 (Department of Physics, Jilin University, Changchun, 130023, China)

Abstract The 95MeV ^{19}F beam projects on an enriched ^{116}Sn target with backing. The γ -ray emitted from evaporation-residual nuclei were detected in γ - γ coincidence measurement by using 11 BGO Compton suppressed HPGe detectors. Lifetimes of the high spin states for ^{131}Ce and ^{131}Pr were determined through analysis of the Doppler broadened line shapes. The transition quadrupole moments extracted from the measured lifetimes demonstrate that change in nuclear shape occurs in the band crossing region. From a comparison with the neighbouring even-even nucleus ^{130}Ce it follows that influence of the valence neutron is stronger than that of the valence proton on shape change of the core.

Key words lifetime measurement, transition quadrupole moment, shape change

Received 25 August 2004

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

1)E-mail:ligs@iris.ciae.ac.cn