

同位素负宇称 Yrast 带的研究*

吴兴举^{1,2,4} 梁渝生³ 徐进章^{1,2} 陈星藻^{1,2,3} 邢正^{1,2,3}

1 (兰州重离子加速器国家实验室原子核理论研究中心 兰州 730000)

2 (兰州大学现代物理系 兰州 730000)

3 (中国科学院上海原子核研究所 上海 201800)

4 (六安师范专科学校物理系 安徽 237012)

摘要 利用粒子-转子模型研究了奇 A Lu 核负宇称 Yrast 态带交叉前后的能谱和跃迁几率,理论值和实验值符合得较好.研究表明,^{161,163,165,167}Lu 负宇称 Yrast 态是三轴形变的;ab 公式正确地描述了带交叉前后核心的转动惯量随角动量 I 的变化.

关键词 原子核结构 高自旋态 三轴形变 ab 公式

1 引言

稀土区奇 Z 核高自旋态的性质,在实验和理论上进行过广泛而深入的研究^[1],对 Z≈70 附近原子核高自旋态的研究,重点又集中在这些原子核是否存在三轴形变,其中对 Lu 同位素链的研究最为系统,实验上已测得^{161,163,165,167}Lu 负宇称 Yrast 态的能谱以及约化跃迁几率 B(M1; I→I-1)和 B(E2; I→I-2)之比,对¹⁶⁵Lu 还测量了两类动力学四极矩的比值 Q⁽¹⁾/Q⁽²⁾^[1-4],这为系统研究奇 A Lu 核高自旋态的性质提供了重要的实验数据.文献[5]对^{161,163,165}Lu 核的 π[514 9/2]带带交叉以前的区域进行了系统的理论研究,文献[6]又对¹⁶⁵Lu 的 π[514 9/2]带带交叉以后的区域(S带)进行了研究,指出^{161,163,165}Lu 在 π[514 9/2]带带交叉以前是三轴形变的,γ≈-20°,而¹⁶⁵Lu 在带交叉以后 γ≈-10°.由于下述原因:(1)在^{163,165,167}Lu 发现 π[660 1/2]带为三轴超形变带^[2,7,8],既然^{163,165}Lu 的 π[514 9/2]带为三轴形变的^[5],那么¹⁶⁷Lu 的 π[514 9/2]带是否也是三轴形变的.(2)对奇 A Lu 核除¹⁶⁵Lu 外,S带还未进行研究,不清楚在带交叉以后 π[514 9/2]带是否还是三轴形变的.(3)为了拟合能谱,在文献[5]的计算中采用流体力学形式的惯量矩

$$J_K = \frac{4}{3} J_0 \sin^2 \left(\gamma + K \frac{2\pi}{3} \right), \quad (1)$$

1999-01-26 收稿

* 国家自然科学基金(19575025)和核工业科学基金(Y7197AY103)资助

1) 参见 Hamamoto I, High Spin Yrast Spectroscopy, Lund-Mph-91/03

其中 J_0 随自旋 I 变化, 以使能谱尽可能符合实验值, J_0 和 I 的关系没有一个清晰的解析表达式, 而对 S 带还未进行能谱的计算; (4) 偶偶核基带转动谱的 ab 公式^[9] 已广泛地应用于正常形变和超形变核态的唯象研究, 其表达式可写为

$$E(I) = \frac{\hbar^2}{2J_0(I)} I(I+1),$$

其中转动惯量 J_0 是 I 的光滑函数^[10],

$$J_0(I) = J_{00} \frac{1 + \sqrt{1 + bI(I+1)}}{2}$$

也已应用于超形变核态的微观计算, 在正常形变核态, 这一转动惯量的表达式是否可同时应用于带交叉前后的区域, 这一点并不清楚. 为此我们用粒子-转子模型对奇 A Lu 核负宇称 Yrast 态进行计算, 并同实验数据进行了比较, 其主要目的是研究奇 A Lu 同位素链 $\pi[514 9/2]$ 带带交叉前后三轴形变的变化, 检验公式(3)是否也可以应用于带交叉以后的区域.

2 模型简述

本工作的目的是研究奇 A Lu 核负宇称 Yrast 态的性质, 在带交叉以前的区域, 一个 $h_{11/2}$ 子壳准质子和核心相耦合, 而在带交叉以后的区域, 一对 $i_{13/2}$ 中子自旋顺排, 因而形成 3 个准粒子态. 为避免三轴粒子-转子模型在处理 3 个准粒子态时出现大量的组态, 采用文献[6]的简化模型研究 S 带.

假定 S 带中子自旋顺排角动量 j_n ($\sim 10\hbar$) 平行于核心的集体角动量 R , 准质子角动量为 j_p , 则总角动量 I 为

$$I = R + j_n + j_p \equiv R' + j_p. \quad (4)$$

由于跃迁算子的单粒子特征, 准粒子数的变化不影响同旋称(Signature)量子数有关的矩阵元, 因此可以冻结顺排中子对的内禀自由度, 从而使 3 个准粒子的问题简化为一个准粒子的问题^[6]. 粒子-转子模型哈密顿量为

$$\begin{aligned} H &= \sum_{K=1}^3 \frac{\hbar^2}{2J_K} R_K^2 + H_{\text{intr},p} + H_{\text{intr},n} \\ &= \sum_{K=1}^3 \frac{\hbar^2}{2J_K} [(I_K - j_{nK}) - j_{pK}]^2 + H_{\text{intr},p} + H_{\text{intr},n}, \end{aligned}$$

这里 $H_{\text{intr},p}$, $H_{\text{intr},n}$ 分别为准质子和准中子的内禀哈密顿量, J_K 取流体力学形式的惯量矩(1)式, 而 J_0 采用 ab 公式的惯量矩(3)式. 由于在研究 S 带的自旋范围内, 中子顺排角动量基本为常数, 因而中子内禀哈密顿量 $H_{\text{intr},n}$ 的贡献为一常数, 这样粒子-转子模型哈密顿量对 S 带简化为

$$H_{\text{pr}} = \sum_{K=1}^3 \frac{\hbar^2}{2J_K} [(I_K - j_{nK}) - j_{pK}]^2 + H_{\text{intr},p}. \quad (6)$$

定义角动量

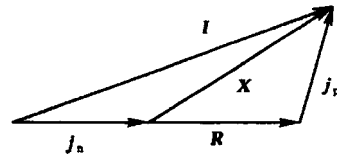


图1 各个角动量之间耦合的几何关系

$$\mathbf{X} = \mathbf{I} - \mathbf{j}_n, \quad (7)$$

则(6)式简化为通常的粒子-转子模型哈密顿量

$$H_{pr} = \sum_{K=1}^3 \frac{\hbar^2}{2J_K} (\mathbf{X} - \mathbf{j}_p)_K^2 + H_{int,r,p}. \quad (8)$$

详细计算公式和方法见文献[6,10], 对带交叉以前的区域只需在(8)式中设 $j_n = 0$ 即可.

3 结果和讨论

图2给出了粒子-转子模型计算的 $^{161,163,165,167}\text{Lu}$ 负宇称 Y_{rast} 态带交叉前后的能量差 $E(I) - E(I-1)$, 使用参数: 带交叉前(后) ^{161}Lu , ^{163}Lu , ^{165}Lu , ^{167}Lu 分别为 $\gamma = -21^\circ (+14^\circ)$, $-18^\circ (+14^\circ)$, $-15^\circ (+9^\circ)$, $-14^\circ (-10^\circ)$, $\Delta/\kappa = 0.55 (0.55)$, $0.45 (0.45)$, $0.40 (0.40)$, $0.40 (0.40)$, $\lambda/\kappa = 0.40 (0.40)$, $0.40 (0.40)$, $0.40 (0.40)$, $0.50 (0.50)$, $J_{00}\kappa = 35 (66)$, $50 (65)$, $55 (58)$, $68 (68)$, $10^3 b = 5.5 (2.3)$, $4.5 (1.5)$, $8.5 (5.5)$, $5.0 (2.5)$. κ 是能量单位, 由计算的 γ 跃迁能量规格化到某一能级 γ 跃迁能量的实验值决定. 图3给出了约化跃迁几率之比 $B(M1; I \rightarrow I-1)/B(E2; I \rightarrow I-2)$, 使用参数: $^{161,163,165,167}\text{Lu}$ 内禀四极矩的平方分别为 $Q_0^2 = 20, 25, 30.3, 36 (e^2 b^2)$, 其余参数同图2. 另外涉及的参数均为: $g_1 = 1.0$, $g_3 = 3.91$, $g_r = 0.42$, 等效电荷 $e_{\text{eff}} \langle j | r^2 | j \rangle / Q_0 = 0.2e$, 带交叉前 $j_n = 0$, 带交叉后 $j_n = 10\hbar$, $g_n = -0.2$. 图4给出了 ^{165}Lu 负宇称 Y_{rast} 带两类动力学四极矩之比 $Q^{(1)}/Q^{(2)}$, 其定义为

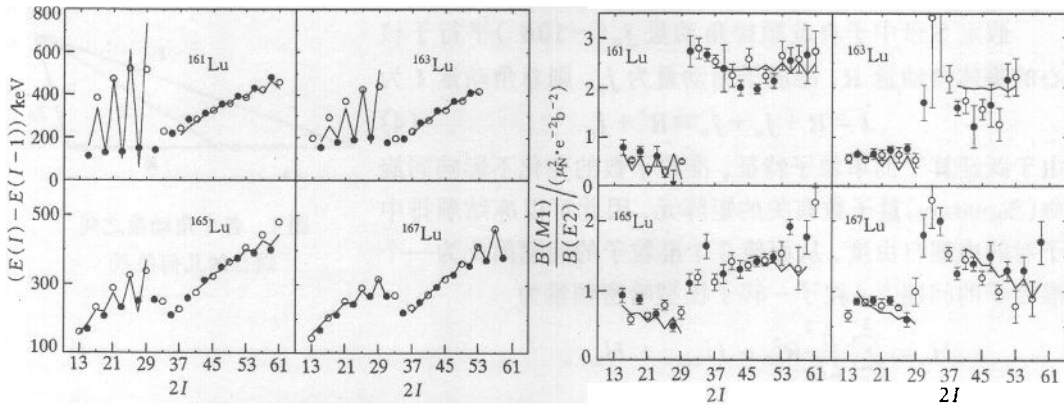


图2 Lu负宇称 Y_{rast} 态带交叉前后的能量差 $E(I) - E(I-1)$ 同角动量 I 的关系

—理论值; \circ 、 \bullet 实验值^[1-4], 表示旋称

$$\alpha = -\frac{1}{2} \left(+\frac{1}{2} \right) \text{的态到}$$

$$\alpha = +\frac{1}{2} \left(-\frac{1}{2} \right) \text{的态.}$$

图3 Lu负宇称 Y_{rast} 态带交叉前后的

$$B(M1; I \rightarrow I-1)/B(E2; I \rightarrow I-2)$$

同角动量 I 的关系

图中说明同图2.

$$B(E2; I \rightarrow I-p) = \frac{5}{16\pi} \langle IK20 | I-p K \rangle^2 Q^{(p)^2}, \quad p=1,2. \quad (9)$$

由于在带交叉区涉及强烈的组态混合,我们的模型不能应用到这一区域,因此没有给出计算结果.对 S 带选取中子顺排角动量 $j_n = 10\hbar$, 中子 g 因子 $g_{j_n} = -0.20^{[6]}$.

由图可以得到下述结论:

(1) 在带交叉前,随着中子数的增加,能量的旋称分离减小,而带交叉以后的区域,能量的旋称分离不大,在适当地选取模型参数后,理论值重现了实验值.利用同样的参数,约化跃迁几率之比 $B(M1)/B(E2)$ 以及 ^{165}Lu 的 $Q^{(1)}/Q^{(2)}$ 也同实验值较好地符合,因此参数的选取是合理的.对 ^{161}Lu , ^{163}Lu , ^{165}Lu , ^{167}Lu 带交叉前(后)的三轴形变 γ 分别为: $-21^\circ(+14^\circ)$, $-18^\circ(+14^\circ)$, $-15^\circ(+9^\circ)$ 和 $-14^\circ(-10^\circ)$, 表明随着中子数的增加 Lu 同位素负宇称 Yrast 态带交叉以前,三轴形变 $|\gamma|$ 逐渐减小,而带交叉以后,对 $^{161,163,165}\text{Lu}$ γ 形变为正值,而对 ^{167}Lu γ 则为负值.因此 $^{161,163,165}\text{Lu}$ 带交叉前后 γ 形变有明显的改变,而 ^{167}Lu 则变化不大,这同 ^{167}Lu 有最大的刚性是一致的. γ 值的符号主要是为重现跃迁几率而设定的.

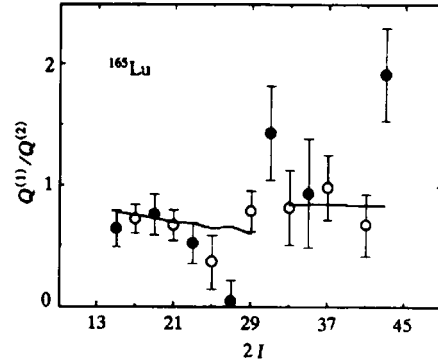


图4 ^{165}Lu 负宇称 Yrast 带的 $Q^{(1)}/Q^{(2)}$ 同角动量 I 的关系

—理论值,使用参数同图3; \circ 、 \bullet 实验点^[3].

(2) 理论值和实验值较好的符合表明,核心(偶偶核)的转动惯量随角动量 I 的变化在带交叉前后都能很好地由(3)式描述.由于带交叉前后涉及不同的转动带,因此 J_{00} 和 b 值会发生变化,在我们计算的情况下,带交叉以后区域的 b 值都小于带交叉以前区域的 b 值,表明在带交叉以前转动惯量随角动量 I 的变化较快.

(3) 理论值和实验值较好的符合表明,对 S 带的处理方法是一个好的近似,即在 S 带假定一对顺排粒子的角动量为常数,且平行于核心的集体角动量,冻结一对顺排准粒子的自由度,使 3 个准粒子问题简化为一个准粒子的问题,是一个好的近似.

(4) 仔细比较 $B(M1)/B(E2)$ 理论值和实验值,发现 ^{163}Lu 的 S 带理论值比实验值大,而 ^{165}Lu S 带在 $I > 53/2$ 时实验值明显增大,理论值未能重现这一特征.由于带交叉前后核的形状发生变化,因而内禀四极矩 Q_0 应有所区别,而我们使用了统一参数,因此适当加大 Q_0 的数值, ^{163}Lu S 带的理论值可和实验值较好地符合.而 ^{165}Lu S 带 $B(M1)/B(E2)$ 的上升,可能是由于集体性的减小引起的^[3],因此引入随 I 增加而减小的内禀四极矩,可能重现这一特征.

4 小结

利用粒子-转子模型研究了奇 A Lu 核同位素负宇称 Yrast 态的能谱、跃迁几率.由理论值和实验值较好的符合可以推出下述结论:

(1) 由 ^{161}Lu 到 ^{167}Lu 奇 A Lu 核负宇称 Yrast 态是三轴形变的,随着中子数 N 增加,在带交叉以前 γ 形变从 -21° 变到 -14° ,而带交叉以后 γ 形变从 $+14^\circ$ 变为 -10° .

(2) 对 S 带, 冻结一对顺排中子自由度, 把 3 个准粒子的复杂问题简化为一个准粒子的问题, 是一个好的近似.

(3) 两参数的 ab 公式很好地描述了轴对称偶核的基带能谱, 正确地给出了转动惯量随角动量 I 的变化关系, 这一关系也正确地描述了奇 A Lu 核 S 带的核心转动惯量随角动量 I 的变化.

参考文献(References)

- 1 YU C H, Riley M A, Garrett J D et al. Nucl. Phys., 1988, **A489**(3):477—507
- 2 Schmitz W, YANG C X, Hübel H et al. Nucl. Phys., 1992, **A539**(1):112—136
- 3 Frandsen P, Chapman R, Garrett J D et al. Nucl. Phys., 1988, **A489**(3):508—524
- 4 YU C H, Hagemann G B, Espino J M et al. Nucl. Phys., 1990, **A511**(1):157—194
- 5 Hamamoto I, Sagawa H. Phys. Lett., 1988, **B201**(4):415—419
- 6 Hamamoto I, Mottelson B. Phys. Lett., 1986, **B167**(4): 370—374
- 7 Schnack-Petersen H, Bengtsson R, Bark R A et al. Nucl. Phys., 1995, **A594**(2):175—202
- 8 WU X G, YANG C X, ZHENG H et al. Chin. Phys. Lett., 1997, **14**(1):17—19
- 9 WU C S, ZENG J Y. High Energy Physics and Nuclear Physics (in Chinese), 1984, **8**(2):219—226;**8**(4):445—452
(吴崇试, 曾谨言. 高能物理与核物理, 1984, **8**(2):219—226;**8**(4):445—452)
- 10 CHEN X Q, XING Z. J. Phys., 1993, **G19**(11):1869—1877

Study of the Negative-Parity Yrast States in Odd-A Lu-Isotopes*

WU XingJu^{1,2,4} LIANG YuSheng³ XU JinZhang^{1,2}
CHEN XingQu^{1,2,3} XING Zheng^{1,2,3}

1 (Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator, Lanzhou 730000, China)

2 (Department of Modern Physics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

3 (Shanghai Institute of Nuclear Research, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

4 (Physics Department, Liu'an Teacher's College, Anhui 237012, China)

Abstract Using Particle-Rotor Model, the energy spectra and electromagnetic transitions of the negative-parity yrast states, before and after the band-crossing in odd-A Lu isotopes, are investigated and compared with the experimental data. It is noted that before and after the band-crossing the moment of inertia of the core is a smooth function of the total angular momentum I and can be described by the ab formula; The triaxial deformation before and after the band-crossing determined from the calculations is appreciably different for ^{161,163,165}Lu, while it is more or less similar for ¹⁶⁷Lu.

Key words nuclear structure, high spin states, triaxial deformation, ab formula

Received 26 January 1999

* Supported by National Natural Science Foundation of China 19575025 and China Nuclear Industry Science Foundation (Y7197AY103)