

稀土区高自旋三轴超形变及其形成机制*

杨春祥

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

摘要 通过 $^{152}\text{Sm}(^{19}\text{F}, 4n)^{167}\text{Lu}$ 反应观测到 ^{167}Lu 的一个新的转动带. 发现其高自旋 γ 跃迁能量与 ^{163}Lu 和 ^{165}Lu 三轴超形变的十分相近. 按基于推转壳模型的总转动位能面计算, ^{167}Lu 和前人工作中的 $^{171}\text{Ta}[660]1/2$ 转动带被指定为三轴超形变带. 讨论了该核区三轴超形变的形成机制.

关键词 高自旋态 三轴超形变 全同带

1 引言

原子核高自旋态超形变研究是当前核物理研究中一个十分活跃的前沿领域. 1986年 J. P. Twin等人发现第一个超形变带, 十余年来在质量数 $A \sim 60, 80, 130, 140, 150, 160$ 和 190 核区已发现近百个核的 250 余条超形变带. 然而, 这些高速转动的原子核绝大多数是轴对称的, 它们的长短轴之比接近于 2 比 1. 近年来高自旋超形变研究的一个重要的新进展是三轴超形变的发现. 1995年 H. Schnack-Petersen 等人^[1]首次报导了 ^{163}Lu 和 ^{165}Lu 的三轴超形变. 通过 $^{138}\text{Ba}(^{31}\text{p}, 4n)^{165}\text{Lu}$ 和 $^{150}\text{Sn}(^{19}\text{F}, 4n)^{165}\text{Lu}$ 反应研究 ^{165}Lu 高自旋能级结构时发现了 ^{165}Lu 的一个新的退耦带, 将其指定为建立在 $i_{13/2}$ 质子 $[660]1/2$ 的转动带. 还发现这个新的转动带与德国波恩大学合作组指定的 ^{163}Lu 的 $[660]1/2$ 带^[2, 3]是全同带. 基于推转壳模型的总位能面 (TES) 计算表明当 ^{165}Lu 的奇质子处于 $i_{13/2}$ $[660]1/2$ 尼尔逊组态时, 与 ^{163}Lu 的情况非常相近, 在 $\epsilon_2 \sim 0.389$, $\gamma \sim \pm 18^\circ$ 处出现位能面极小. 因而, ^{163}Lu 和 ^{165}Lu 的 $[660]1/2$ 转动带被指定为三轴超形变带.

2 ^{167}Lu 和 ^{171}Ta 的三轴超形变带

为了进一步寻找三轴超变, 在中国原子能科学研究院串列加速器核物理国家实验室的 HI-13 串列加速器上, 通过 $^{152}\text{Sm}(^{19}\text{F}, 4n)^{167}\text{Lu}$ 反应, 利用在束 γ 谱学技术研究了 ^{167}Lu 高自旋能级结构. 在前人工作^[4]的基础上, 找到了一个新的转动带. 这个新的退耦带电四极 γ

* 973 国家重点基础研究发展规划项目 (G20000774-051) 资助

跃迁能量依次为 551, 601, 653, 705, 753, 804, 854 和 904 keV. 它分别馈入¹⁶⁷Lu 的[411]1/2 和[402]5/2 正宇称转动带(见图 1). 按系统学规律这个新的退耦带被指定为建立在 $i_{13/2}$ 质子[660]1/2 尼尔逊组态上的转动带. 由¹⁶⁷Lu[660]1/2 带相邻能级间的电四极 γ 跃迁能量差 ΔE_γ 导出的动力学转动惯量 $J^{(2)} = 4\hbar^2/\Delta E_\gamma$ 与¹⁶³Lu 和¹⁶⁵Lu 三轴超形变带的动力学转动惯量十分相近(见图 2). 这表明这个新发现的¹⁶⁷Lu 的[660]1/2 带也具有相当大的四极形变. 基于推转壳模型的总转动位能面(TRS)计算^[5]在 $\epsilon_2 \sim 0.36, \gamma \sim 26^\circ$ 处呈现的位能面极小表明当¹⁶⁷Lu 的奇质子处于[660]1/2 尼尔逊组态时, 原子核不仅具有较大的四极形变, 而且也具有相当大的非轴对称形变(见图 3). 因而,¹⁶⁷Lu 的这个新退耦带被指定为三轴超形变带. 十分有趣的是¹⁶³Lu, ¹⁶⁵Lu 和¹⁶⁷Lu 的三轴超形变带都是建立在 $i_{13/2}$ 质子[660]1/2 尼尔逊组态上的. 此外, 它们的带内 γ 跃迁能量在较高自旋态处相近(见表 1). 这 3 个三轴超形变带很可能是全同带.

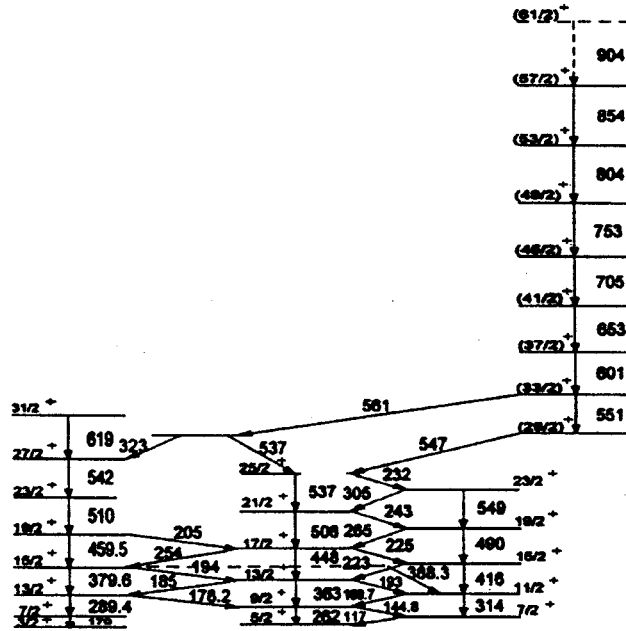


图 1 ¹⁶⁷Lu 部分能级纲图

表 1 ^{163,165,167}Lu 三轴超形变带带内 γ 跃迁能量(keV)

I	29/2	33/2	37/2	41/2	45/2	49/2	53/2	57/2	61/2	65/2
¹⁶³ Lu	450	515	578	639	697	752	805	858	908	962
¹⁶⁵ Lu	445	524	582	641	696	751	804	855	907	962
¹⁶⁷ Lu		551	601	653	705	753	804	854	904	

注: I 是初态自旋

作者在早期工作^[6-8]中发现¹⁷¹Ta的 $i_{13/2}$ 质子[660]1/2转动带的动力学转动惯量与¹⁶³, ¹⁶⁵, ¹⁶⁷Lu的三轴超形变带的动力学转动惯量十分相近(见图2). 这表明当¹⁷¹Ta的奇质子处于[660]1/2尼尔逊组态时, 原子核具有相当大的四极形变. 基于推壳模的TRS计算表明¹⁷¹Ta的奇质子处于[660]1/2尼尔逊组态时, 原子核不仅具有很大的四极形变 $\epsilon_2 \sim 0.38$, 而且具有相当大的非轴对称形变 $\gamma \sim 36^\circ$ (见图4).

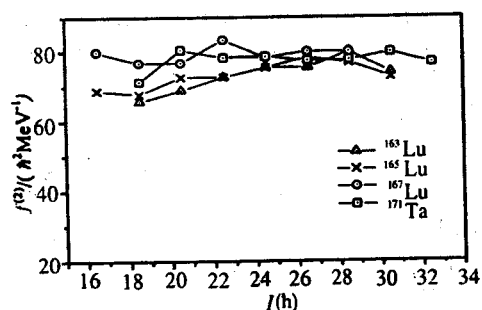


图2 ¹⁶³Lu, ¹⁶⁵Lu, ¹⁶⁷Lu和¹⁷¹Ta的 $i_{13/2}$ 质子[660]1/2带动力学转动惯量($J^{(2)}$)与自旋(I)的关系

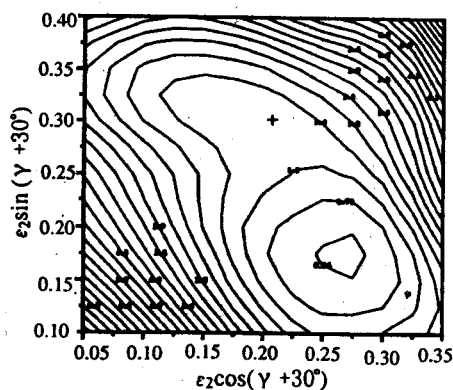


图3 ¹⁶⁷Lu $i_{13/2}$ [660]1/2尼尔逊组态总转动位能面计算结果
+: $\epsilon_2 \sim 0.36$, $\gamma \sim 26^\circ$ 的区域极小表明原子核具有较大四极形变和非轴对称形变.

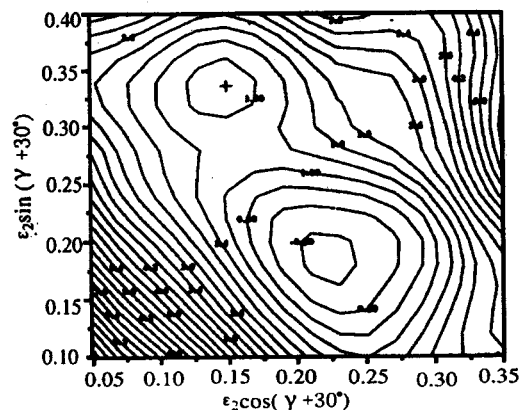


图4 ¹⁷¹Ta $i_{13/2}$ [660]1/2尼尔逊组态总转动位能面计算结果
+: $\epsilon_2 \approx 0.38$, $\gamma \approx 36^\circ$ 的区域极小表明, 原子核具有较大四极形变和非轴对称形变.

3 讨论

¹⁶³, ¹⁶⁵, ¹⁶⁷Lu和¹⁷¹Ta三轴超形变的一个共同特征是这4个核的超形变带都是建立在奇质子处于 $i_{13/2}$ [660]1/2尼尔逊组态之上的转动带. 从尼尔逊单粒子能级图上可以看出, 对质

子数 $Z=71$ 和 73 的 Lu 和 Ta 核而言, $i_{13/2}$ 是来自主量子数 $N=6$ 的大壳的侵入态, 而 $[660]1/2$ 单粒子能级随四极形变增大而迅速下降. 这个很陡的负斜率表明随四极形变的增大, 原子核将更趋稳定. 借助于这种经典的物理图像, 可以帮助理解处于 $i_{13/2}[660]1/2$ 尼尔逊组态的质子的四极形状驱动作用. 这种四极形状驱动作用很可能是这 4 个奇质子核超形变带形成的主要原因, 一些实验现象也证实这一推论. 例如文献[2]的图 13 所给出的 $^{163}\text{Lu}[660]1/2$ 转动带的动力学转动惯量比它的其它转动带, 如 $[404]7/2$ 和 $[514]9/2$ 转动带的动力学转动惯量大得多. 更直接的实验证据是 ^{163}Lu 的能级寿命测量. 文献[3]给出了以反冲距离法和 Doppler 位移衰减法所作的能级寿命的测量结果, 见该文表 1. 从能级寿命导出的跃迁四极矩 Q_i 表明, $^{163}\text{Lu}[660]1/2$ 转动带的 Q_i 比其晕带和临核 ^{163}Yb 晕带的 Q_i 大了近一倍, 详见该文图 3. 总之, 基于 $i_{13/2}[660]1/2$ 尼尔逊组态的奇质子的四极形状驱动作用很可能是形成超形变的主要原因.

此核区的非轴对称形变, 一般认为主要来源于中子壳效应. 文献[1]指出在中子数 $N=94$ 处, 对应于高度非轴对称形变处有一个很大的能隙, 该能隙的大小接近于近球形形变中子数 $N=64$ 处的能隙. 目前稀土区发现的几个三轴超形变带, 其非轴对称形变参量 γ 都是由基于推转壳模型的 TES 或 TRS 计算给出的. 由于目前在实验上尚不能直接测定非轴对称形变参量, 模型相关的理论计算是否可靠也无法检验. 作者意外地发现了 I. Hamamoto 和 H. Sagawa 1988 年的一项工作^[9], 该文利用粒子-转子模型研究了轻稀土区奇质子核的三轴形变. 他们将粒子-转子模型中所用参量选定在合理的数值, 拟合实验的负宇称晕带能谱, 得出的 ^{163}Lu 和 ^{165}Lu 的非轴形变参量 γ 分别为 18° 和 19° , 这与文献[1]基于推壳模型的 TES 计算结果(两者均为 18°)十分相近. 两种不同的模型给出不谋而合的结果, 至少说明这种模型相关的理论计算在一定程度上是可信的. 值得注意的是基于推转壳模型的 TES 和 TRS 计算算的是 $i_{13/2}$ 质子 $[660]1/2$ 转动带(即超形变带)的非轴对称性, 而粒子-转子模型是通过拟合负宇称晕带能谱来确定非轴对称参量. 两种理论模型得到的结果十分相近, 说明在此核区三轴形变与奇质子所处的组态无关. 这一事实表明, 此核区的非轴对称形变很可能主要来源于中子的壳模型.

参考文献(References)

- 1 Schnack-Petersen H, Bengtsson R, Bark R A et al. Nucl. Phys., 1995, A594:75—202
- 2 Smitz W, YANG C X, Hubel H et al. Nucl. Phys., 1992, A539:112136
- 3 Smitz W, Hubel H, YANG C X et al. Phys. Lett., 1993, B303:230235
- 4 YU C H, Hagemann G B, Espino J M et al. Nucl. Phys., 1990, A511:157194
- 5 YANG C X, WU X G, ZHANG H et al. Eur. Phys. J. 1998, A1:237239
- 6 YANG C X, Kownack J, Gorratt J D et al. Phys. Lett., 1983, 133B:3943
- 7 Bacelar J C, Chapmann J R, Leslie J R et al. Nucl. Phys. 1985, A442:547—577
- 8 WU X G, YANG C X, ZhENG H. Chin. Phys. Lett. 1997, 14:17—19
- 9 Hamamoto I, Sagawa H et al. Phys. Lett., 1988, 201B:415—419

Superdeformed Triaxial Band and its Formation Mechanism in Rare Earth Region *

YANG Chun-Xiang

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

Abstract A new rotational band has been observed in ^{167}Lu by $^{152}\text{Sm}(^{19}\text{F}, 4n)^{167}\text{Lu}$ reaction. The high spin transition energies of the new band are almost identical to the triaxial superdeformed bands recently discovered in ^{163}Lu and ^{165}Lu . This new band and the [660] band in ^{171}Ta are assigned as triaxial superdeformed bands by total routhian surface calculations based on cranked shell model. The formation mechanism of the superdeformed triaxial band in this region is discussed.

Key words high spin, triaxial superdeformed, band