

稀土核区三轴超形变全同带

刘祖华 杨春祥

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

摘要 系统地考察了稀土核区三轴超形变带的跃迁能量、角动量增量顺排和动力学转动惯量. 研究表明这些三轴超形变带为全同带.

关键词 三轴超形变 全同带 角动量增量顺排 动力学转动惯量

1 引言

1990年 T. Byrski 及其英法两国合作者^[1]在分析¹⁵¹Tb 和¹⁵²Dy 的两条超形变带时, 发现其 γ 射线能量在相差 1—2keV 范围内一一对应相等. 50 多年来, 人们一直认为每一 γ 射线谱唯一地属于特定核. 在不同核中发现能带全同的确是一个令人非常惊奇的物理现象.

相等的能量意味着两能带具有相同的转动惯量. 而将一个或几个核子添加进另一个原子核时, 由于下列几方面的原因, 原子核的转动惯量会有不同程度的改变, 因而影响 γ 跃迁能量. 其中每个因素对跃迁能量的影响都要比 1—2keV 大几倍. 影响转动惯量的因素有: ①质量的变化引起转动惯量的改变. 当原子核增加一个核子后, 其转动惯量的变化会使跃迁能量相差至少 10keV; ②附加核子对原子核角动量的贡献; ③奇核子的存在导致对修正的减少, 使奇 A 核的转动惯量比相邻的偶-偶核增加 10%—15%; ④附加核子导致核芯极化, 引起原子核形状的改变. 然而几种因素互相抵消, 最终使两能带全同. 全同带现象的发现引起人们广泛关注. 利用大规模的 γ 射线探测器阵列, 实验上先后在 $A \approx 130, 150$ 和 190 质量区找到一系列超形变带和正常形变带的全同带^[2].

近几年来, 核结构研究的另一引人注目的进展是三轴超形变的发现. 1995年, 玻尔所和瑞典 Lund 大学合作研究了¹⁶⁵Lu 的高自旋态, 发现一个新的转动带与¹⁶³Lu 的 $i_{13/2}$ 质子 [660, 1/2] 是全同带. 他们的总位能面计算表明¹⁶³Lu, ¹⁶⁵Lu 的 [660, 1/2] 带都具有很大的四极形变和 γ 形变, 因而将它们定为三轴超形变带^[3]. 之后, 中国原子能科学研究院杨春祥等人利用¹⁵²Sm(¹⁹F, 4n)¹⁶⁷Lu 反应, 研究¹⁶⁷Lu 的能级结构, 发现¹⁶⁷Lu 的 [660, 1/2] 带同样是三轴超形变带^[4]. 此外, 他们通过对早期的¹⁷¹Ta 实验数据的分析, 指出¹⁷¹Ta 的 [660, 1/2] 带也是三轴超形变^[5]. 本文通过对^{163, 165, 167}Lu, ¹⁷¹Ta 和¹⁷³Re 的 $i_{13/2}$ 质子 [660, 1/2] 带

的跃迁能量、角动量增量顺排和动力学转动惯量 $\mathcal{J}^{(2)}$ 的系统分析,研究三轴超形变的全同带现象.

2 跃迁能量的比较

人们首先是从 $^{163,165,167}\text{Lu}$ [660,1/2]带的跃迁能量的比较中,观察到这3个带可能为全同带.表1和表2分别给出 $^{163,165,167}\text{Lu}$ 和 ^{171}Ta , ^{173}Re 的三轴超形变带的E2跃迁 γ 射线能量.由表1可见, ^{163}Lu 和 ^{165}Lu 两转动带除 $I=33/2$ 的跃迁能量差9.5keV外,其余能级对应的跃迁能量差的绝对值均小于5keV.可见 ^{163}Lu 和 ^{165}Lu 的 $i_{13/2}$ 质子[660,1/2]三轴超形变带应是全同带.而 ^{165}Lu 和 ^{167}Lu 的[660,1/2]带的对应跃迁能量,从 $I=33/2$ 时相差26.6keV,逐渐接近,到 $I=49/2$ 之后两者近乎相等.由两转动带的高能端比较来看,二者应是全同带.转动带低能端跃迁能量差异较大,是由于与其它带的带间相互作用所致.除带头外, ^{171}Ta 的[660,1/2]带的跃迁能量普遍比 ^{173}Re 的对应跃迁能量高4—6keV.因此仅从跃迁能量的比较难于断定二者是否是全同带.以下的讨论表明,由角动量增量顺排和转动惯量的考察,可以得出较肯定的结论.

表1 $^{163,165,167}\text{Lu}$ 的三轴超形变带的E2跃迁 γ 射线能量(单位:keV)

I/\hbar	29/2	33/2	37/2	41/2	45/2	49/2	53/2	57/2	61/2	65/2
^{163}Lu	450.0	514.9	587.1	638.7	697.0	752.0	805.2	857.7	908.4	961.9
^{165}Lu	445.3	524.4	582.4	641.0	696.1	750.7	803.5	855.3	907.5	962.3
^{167}Lu		551.0	602.1	654.1	705.9	752.1	804.8	855.2	904.0	

表2 ^{171}Ta 和 ^{173}Re 的 $i_{13/2}$ 质子[660,1/2]转动带的 γ 射线能量(单位:keV)

I/\hbar	37/2	41/2	45/2	49/2	53/2	57/2	61/2	65/2	69/2	73/2
^{171}Ta	530.4	586.4	636.1	687.2	738.1	789.7	841.2	891.3	943.4	
^{173}Re	529.9	580.6	630.6	681.0	732.0	783.4	835.3	886.7	939	990

I 是初态自旋

3 角动量增量顺排

Stephens⁶引入角动量增量顺排这一概念来描述两条全同带的关系.设有A,B两带,其中A为参考带,B带对A带的角动量相对顺排 $i=\Delta I+\Delta i$,其中 Δi 为增量顺排.在 $E_\gamma(I_B)<\frac{1}{2}[E_\gamma(I_A)+E_\gamma(I_A+2)]$ 的条件下, $\Delta I=I_B-I_A$,而

$$\Delta i = 2 \frac{E_\gamma(I_A) - E_\gamma(I_B)}{E_\gamma(I_A+2) - E_\gamma(I_A)}, \quad (1)$$

就我们所讨论的情况而言, $I_A=I_B$,所以增量顺排就是两带的角动量相对顺排.图1给

出¹⁶⁵Lu 相对于¹⁶³Lu, ¹⁶⁷Lu 相对于¹⁶⁵Lu 和¹⁷¹Ta 相对于¹⁷³Re 的[660, 1/2]带的角动量增量顺排. 图中两条水平虚线给出 Δi 的 $[-0.25, 0.25]$ 范围. 除 $I = 33/2$ 点外, ¹⁶⁵Lu 相对于¹⁶³Lu 的增量顺排都在此范围内, 其平均值 $\langle \Delta i \rangle = -0.011$. ¹⁶⁷Lu 有 8 个实验点, 后 4 个点都在两条虚线之内, 其平均增量顺排为 0.0075. ¹⁷¹Ta 相对于¹⁷³Re 的增量顺排均在虚线范围内, 其中 $\langle \Delta i \rangle = -0.02$. Stephens^[7] 指出, 两带的角动量增量顺排近乎为常数时, 两带为全同带. 对于^{163, 165, 167}Lu, 结论与上述讨论相同, 即它们是全同带. ¹⁷¹Ta 相对于¹⁷³Re 的增量顺排几乎不随转动频率变化. 因此根据 Stephens 的这一判据, 它们也应是全同带.

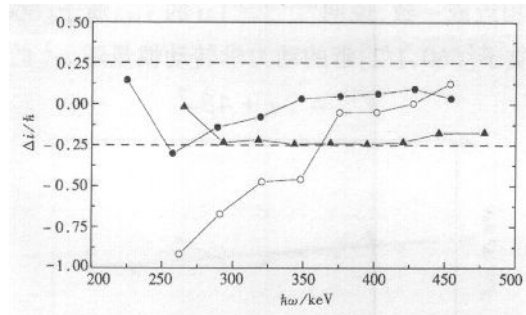


图 1 ¹⁶⁵Lu(相对于¹⁶³Lu), ¹⁶⁷Lu(相对于¹⁶⁵Lu)和 ¹⁷¹Ta(相对于¹⁷³Re)的角动量增量顺排
● |¹⁶⁵Lu, ¹⁶³Lu|, ○ |¹⁶⁷Lu, ¹⁶⁵Lu|, ▲ |¹⁷¹Ta, ¹⁷³Re|.

4 动力学转动惯量

动力学转动惯量近似相等是全同带最常用的判据. 图 2 给出^{163, 165, 167}Lu 的动力学转动惯量随转动频率的变化. 由图可见^{163, 165}Lu 的 $\mathcal{J}^{(2)}$ 实验值除最低频率点略有差别外, 其余点两者相当一致. 因此它们无疑是全同带. ¹⁶⁷Lu 的 $\mathcal{J}^{(2)}$ 的第 1 点和第 4 点与¹⁶⁵Lu 有 10%—15% 的差别, 其余实验点与^{163, 165}Lu 的 $\mathcal{J}^{(2)}$ 值相接近. 我们曾经用吴崇试、曾谨言的二参量转动谱公式^[8] 对^{163, 165, 167}Lu 的跃迁能量作过最小二乘法拟合^[9]. 其中对于¹⁶⁷Lu 只有略去前 3 个跃迁时, 由拟合求得的自旋值才与实验指定值一致. 吴崇试、曾谨言给出动力学转动惯量与 a, b 两参数的关系^[8],

$$\mathcal{J}^{(2)} = \mathcal{J}_0 \left[1 - \frac{(\hbar \omega)^2}{a^2 b} \right]^{-3/2}, \quad (2)$$

其中 $\omega = 0$ 时的值 $\mathcal{J}_0 \approx \hbar^2/(ab)$. a, b 是最佳拟合时的参数值, 列于表 3.^{163, 165, 167}Lu 的计算值 $\mathcal{J}^{(2)}$ 在低转动频率时完全一致, 到高转动频率时有 5% 的差异. 理论计算结果代表了

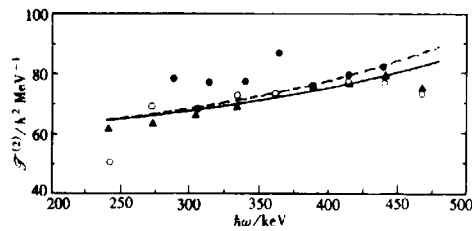


图 2 ^{163, 165, 167}Lu 的 $i_{13/2}$ 质子 [660, 1/2] 带的动力学转动惯量
▲ ¹⁶³Lu, ○ ¹⁶⁵Lu, ● ¹⁶⁷Lu. 曲线是按公式(2) 的计算值.

动力学转动惯量 $\mathcal{J}^{(2)}$ 随转动频率 ω 的平均走向.

表3 用吴崇试、曾谨言的二参量转动谱公式对 $^{163,165,167}\text{Lu}$ 的跃迁能量的最小二乘法拟合所得的参数

SD	a ($\times 10^4$)/keV	b ($\times 10^{-4}$)	f_0 / $\hbar^2 \cdot \text{MeV}^{-1}$	$a^2 b$ ($\times 10^4$)/keV 2
^{163}Lu	6.8154	2.4553	59.7595	114.0473
^{165}Lu	5.7149	2.9636	59.0430	96.7927
^{167}Lu	5.7488	2.9482	59.0020	97.4340

动力学转动惯量的相近或一致,说明 $^{163,165,167}\text{Lu}$ 的 $i_{13/2}$ 质子[660,1/2]是全同带.图3给出 ^{171}Ta , ^{173}Re 的 $i_{13/2}$ 质子[660,1/2]带的动力学转动惯量随 ω^2 的变化,直线是按^[10]

$$\mathcal{J}^{(2)} = 2\alpha + 4\beta\omega^2 \quad (3)$$

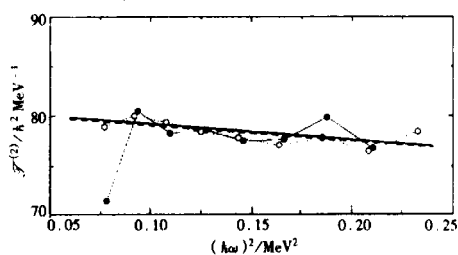


图3 ^{171}Ta , ^{173}Re 的 $i_{13/2}$ 质子[660,1/2]

带的动力学转动惯量随 ω^2 的变化

直线是最小二乘法拟合;

—●— $^{171}\text{Ta}(\text{exp})$, —○— $^{173}\text{Re}(\text{exp})$,

—— $^{171}\text{Ta}(\text{th})$, - - - $^{173}\text{Re}(\text{th})$.

对实验值进行最小二乘法拟合的结果.其中 α , β 是二个参量.除最低能量点外, ^{171}Ta 和 ^{173}Re 的实验值非常接近,且两条拟合的直线几乎重叠,说明两者是全同带.

5 小结

对稀土区的三轴超形变带的跃迁能量、角动量增量顺排和动力学转动惯量作了系统考察.研究证明 $\{^{163}\text{Lu}, ^{165}\text{Lu}, ^{167}\text{Lu}\}$, $\{^{171}\text{Ta}, ^{173}\text{Re}\}$ 的 $i_{13/2}$ 质子[660,1/2]分别是三轴超形变全同带. ^{167}Lu 比 ^{165}Lu , ^{165}Lu 比 ^{163}Lu 分别多两个中子, ^{173}Re 比 ^{171}Ta 多两个质子.全同带现象表明:在较高角动量态,有时中子对和质子对似乎是旁观者,它们的存在既没有使核芯的形状极化,也不影响其转动运动.全同带和三轴超形变是低能核物理研究最新的发现.相信随着相关核结构领域研究的深入,对于全同带,尤其是三轴超形变全同带的起因和物理内涵会有更深刻的理解.

参考文献(References)

- 1 Byrski T, Beck F A, Curien D et al. Phys. Rev. Lett., 1990, **64**(14):1650—1653
- 2 Baktash C, Haas B, Nazarewicz W. Ann. Rev. Nucl. Part. Sci., 1995, **45**:485—541

- 3 Schnack - Petersen H, Bengtson R, Bark R A. Nucl. Phys. , 1995, **A594**(2):175—202
- 4 YANG C X, WU X G, ZHENG H et al. Eur. Phys. J. , 1998, **A1**:237—239
- 5 WU X G, YANG C X, ZHENG H et al. Chin. Phys. Lett. , 1997, **14**:17—19
- 6 Stephens F S. Nucl. Phys. , 1990, **A520**:91c—104c
- 7 Stephens F S, Deleplanque M A, Diamond R M et al. Phys. Rev. Lett. , 1992, **64**(22):2623—2626
- 8 WU C S, ZENG J Y, XING Z et al. Phys. Rev. , 1992, **C45**(1):261—274
- 9 LIU ZhuHua, YANG ChunXiang. Journal of Ningxia University (in Chinese). 1998, **19**(4):309—310
(刘祖华, 杨春祥. 宁夏大学学报, 1998, **19**(4):309—310)
- 10 Becker J A, Henry F A, Kuhnert A et al. Phys. Rev. , 1992, **C46**(3):889—903

Triaxial Superdeformed Identical Bands in Rare - Earth Nuclei

LIU ZhuHua YANG ChunXiang

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

Abstract Transition energies, incremental alignments of angular momentum, dynamic moments of inertia of triaxial superdeformed bands in rare-earth nuclei have been examined systematically. It is found that the incremental alignments are nearly constant and their dynamic moments of inertia are quite similar. Therefore these triaxial superdeformed bands in rare-earth nuclei are identical bands.

Key words triaxial superdeformation, identical band, incremental alignment of angular momentum, dynamic moment of inertia