

文章编号: 1007-4627(2009)04-0282-06

## 双奇核 $^{174}\text{Re}$ 中的准粒子形状驱动效应\*

郭松<sup>1,2</sup>, 张玉虎<sup>1, #</sup>, 周小红<sup>1</sup>, 强赞华<sup>1</sup>, 郭文涛<sup>1</sup>, 郭应祥<sup>1</sup>, 方永得<sup>1</sup>

(1 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000;

2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 对双奇核 $^{174}\text{Re}$  的在束  $\gamma$  谱学实验数据作了仔细分析, 提取出了带间与带内 E2  $\gamma$  跃迁分支比, 并导出了其约化跃迁概率的比值。用带混合理论对约化跃迁概率的比值进行了分析, 得到带间相互作用强度及转动带形变的信息。发现不同组态的转动带其跃迁电四极矩具有明显的差异。与相邻奇 A 核的结构特征类似, 这种跃迁电四极矩的差异很可能是由于  $1/2^- [541]$  准质子或  $1/2^- [521]$  准中子对原子核的形状驱动效应造成的。

**关键词:** 形状驱动效应; 尼尔逊能级; 跃迁电四极矩; 约化跃迁概率; 反常带交叉

**中图分类号:** O571.23

**文献标识码:** A

### 1 引言

在  $A \sim 170$  附近的缺中子稀土核区, 原子核比较软<sup>[1]</sup>, 如果准粒子布居在能量随形变参量变化趋势显著的轨道上(在尼尔逊能级图上表现为大斜率的曲线), 会使原子核的形状改变, 改变的趋势与单粒子轨道随形变参量的变化趋势, 以及准粒子的粒子或空穴特性相关<sup>[2]</sup>。

在  $A \sim 170$  核区的奇 Z 偶 N 核中, 普遍存在基于  $1/2^- [541]$  准质子组态的反常回弯频率推迟<sup>[3]</sup>。与相邻的偶偶核基态带相比,  $1/2^- [541]$  组态的第一次回弯频率有明显推迟, 回弯后的顺排增益也变小<sup>[4]</sup>。这一现象曾被定性解释为形状驱动效应<sup>[5]</sup>、质子-中子剩余相互作用<sup>[6]</sup>、四级对力<sup>[7]</sup>等机制的综合作用结果。在双奇核中, 准中子组态的存在也可能影响原子核的形状, 使形变情况更丰富, 同时对质子-中子剩余相互作用也会产生影响, 因此对双奇核中含有  $1/2^- [541]$  准质子的组态研究, 将有助于进一步探讨以上几种机制。

与  $1/2^- [541]$  质子组态相似, 准粒子在  $1/2^- [521]$  中子组态上的布居也有可能改变原子核形状。Dracoulis 和 Fabricius 在对 $^{175}\text{Os}$  的研究中<sup>[8]</sup>, 发现中子组态  $5/2^- [512]$  与  $1/2^- [521]$  之间的相互作用

小于计算值, 从而判断这两个组态之间存在形状差异, 并估计形变参量相差大约 25%。

为了分析不同组态下原子核形状的变化与其可能带来的影响, 最重要的是得到各转动带的形变信息。提取形变参量, 可以依据转动惯量与形变的经验关系<sup>[9]</sup>, 或基于组态的 Total Routhian Surface (TRS) 计算, 推出形变参量值。这些方法应用普遍, 有很强的指导意义, 但来自于实验的信息仍然无可取代。基于实验的最直接证据是根据多普勒效应对能级寿命进行测量, 从而导出 E2 跃迁的跃迁概率、电四极矩, 并最终得到形变参量。但对于形变双奇核, 由于能谱非常复杂使能级寿命测量变得异常困难。鉴于此, 人们常常通过对带间 E2 交叉跃迁的分析, 得到两条转动带的跃迁电四极矩比, 从而得到形变参量比<sup>[10]</sup>。这种方法不能得到各自的形变参量值, 但通过不同组态形变参量比, 仍然可以描述形状驱动的程度。这种方法的局限性在于带间交叉跃迁现象出现的偶然性——显著的带间交叉跃迁通常依赖于相同自旋宇称的能量相近的一对能级, 这并不能常常得到满足。我们对 $^{174}\text{Re}$  的实验数据加以分析, 看到了两对存在带间交叉跃迁的转动带, 也就得到了分析双奇核形状驱动效应的契机。

\* 收稿日期: 2009-03-10; 修改日期: 2009-04-07

\* 基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(2007CB815005); 国家自然科学基金资助项目(10825522, 10735010)

作者简介: 郭松(1984-), 男(汉族), 山东东平人, 在读博士生, 从事核结构物理研究; E-mail: gs153@sohu.com

# 通讯联系人: 张玉虎, E-mail: yhzhang@impcas.ac.cn

## 2 从带间交叉跃迁得到形变信息的一般性方法

自旋、宇称相同, 能量相近的两能级会发生相互作用<sup>[11]</sup>。由于两个能级的相互作用, 使描述这两个能量状态的波函数发生混杂。对于两个不同内禀结构的转动带, 如果没有带-带相互作用, 两带之间很难发生带间跃迁。但如果某一个能级的激发能与另一个带中具有相同自旋-宇称的一个能级靠得很近, 两能级的相互作用会较大, 导致波函数发生混杂程度明显, 在实验上会观测到带间交叉跃迁。

带间 E2 交叉跃迁至少涉及两对能级, 如图 1。考察上边一对能级, 在没发生相互作用前它们的能量和波函数分别用  $E_a, |1\rangle$  和  $E_b, |2\rangle$  表示, 发生相互作用后分别用  $E_1, |A\rangle$ , 和  $E_2, |B\rangle$  表示。则有:

$$\begin{aligned} |A\rangle &= a|1\rangle - b|2\rangle, \\ |B\rangle &= b|1\rangle + a|2\rangle. \end{aligned} \quad a^2 + b^2 = 1, a > b > 0 \quad (1)$$

对于下边一对能级, 也可以将其波函数写成相似的形式, 如图 1 中所示。

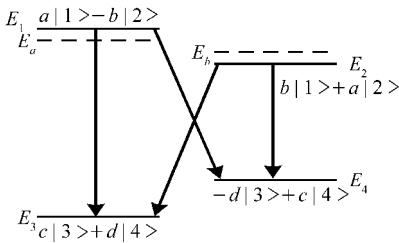


图 1 带间交叉跃迁的示意图

用  $\Delta E_1$  表示  $E_1$  与  $E_2$  的能量差 (也就是实验中看到的能级能量差),  $\Delta E_2$  表示  $E_3$  与  $E_4$  的能量差, 可推导出两能级间相互作用:

$$V = |ab\Delta E_1| = |cd\Delta E_2|. \quad (2)$$

在这里, 近似认为上下两对能级的能级相互作用相等, 也就是取同一个  $V$  值。实验中可以得到从上边两条能级向下退激的带间跃迁与带内跃迁的分支比  $\lambda$ , 对于 E2 跃迁, 可依据下式得到约化跃迁概率比

$$\frac{B(E2; \text{带间})}{B(E2; \text{带内})} = \frac{(E_\gamma; \text{带内})^5}{(E_\gamma; \text{带间})^5} \lambda, \quad (3)$$

对于 E2 跃迁, 约化跃迁概率的公式为

$$B(E2; I \rightarrow I - 2) = \frac{5}{16\pi} e^2 Q_i^2 \times |\langle IK 20 | I - 2K \rangle|^2. \quad (4)$$

从公式中看到, 约化跃迁概率只与各组态的跃迁电四极矩、跃迁的 C-G 系数有关, 将两组态的跃迁电四极矩比记为  $R$ , 跃迁 C-G 系数比记为  $r$ , 可以得到约化跃迁概率比

$$\frac{B(E2, 1 \rightarrow 4)}{B(E2, 1 \rightarrow 3)} = \frac{|adrR + bc|^2}{|acrR - bd|^2}, \quad (5)$$

$$\frac{B(E2, 2 \rightarrow 3)}{B(E2, 2 \rightarrow 4)} = \frac{|bcrR + ad|^2}{|ac - bdrR|^2}. \quad (6)$$

在实验中可以测得约化跃迁概率比, 而 C-G 系数的比值可以计算得到, 对于波函数各组态成分的因子  $a, b, c$  和  $d$ , 由式(2)可知, 与能级相互作用强度  $V$  相关, 因此每个式子中包含的未知量都是跃迁电四极矩比  $R$  与能级相互作用强度  $V$ 。根据每个式子, 变化  $R$  的值, 都有一个  $V$  值与其对应, 可以得到  $V$ - $R$  的关系曲线, 通过两个式子得到两条  $V$ - $R$  的曲线, 它们的交点就是实际的  $R$  和  $V$  值。

当然实验中测量约化跃迁概率比时, 误差不可避免, 因此得到的曲线, 并不是两条, 而应是两组, 作图时用 3 条曲线代表一组, 中间的是依据实验测得的最可能值计算得到的, 而另外两条依据考虑误差后的边界取值。这两组曲线的重叠区域, 就是  $V$ - $R$  可能取值的区域。在这区域中的任意一点取值, 都可以求得与实验结果在误差范围内符合的约化跃迁分支比。

通过(5)和(6)式可以看出, 当  $b=0$ , 也就是上边一对能级为纯态的时候, 式子可以约简成不含  $R$  的形式, 也就无法求得  $R$  的值。因此, 为了求出  $R$ , 选择的带间交叉跃迁相关能级中, 最好上边一对能级波函数混杂程度比较高, 实验上表现为上边一对能级的能量间隔较小。

根据公式  $Q_i = 2\sqrt{3/5\pi} ZeR_0^2\beta\cos(30^\circ + \gamma)$ <sup>[12]</sup>, 不同组态下跃迁电四极矩之比与其形变参量相关, 忽略  $\gamma$  形变的情况下,  $R$  等于四极形变参量  $\beta$  的比值。

需要指出的是, 以上的分析, 是建立在能级高低关系与图 1 相仿的基础上, 也就是对上边一对能级, 带一的高于带二; 对下边一对能级, 带二的高于带一。如果能级位置的排列与此不同, 得到的公

式形式也有差异。

### 3 对<sup>174</sup>Re 带间跃迁的分析

通过在束  $\gamma$  谱学实验, 扩展了<sup>174</sup>Re 的能级纲图, 新纲图包含 5 个转动带: 带一、 $\pi 1/2^- [541] \otimes \nu 5/2^- [512]$ ; 带二、 $\pi 1/2^- [541] \otimes \nu 1/2^- [521]$ ; 带三、 $\pi 9/2^- [514] \otimes \nu 7/2^- [633]$ ; 带四、 $\pi 1/2^- [541]$

$\otimes \nu 7/2^+ [633]$ ; 带五、 $\pi 9/2^- [514] \otimes \nu 5/2^- [512]$ 。图 2 展示了能级纲图中涉及带间交叉跃迁的部分, 详细纲图参看文献[13, 14]。

从图 2 可以看到, 带一与带二之间存在带间 E2 交叉跃迁。两条转动带在自旋值  $I=17$  处能级最接近, 故而看到了  $19^+ \rightarrow 17^+$  和  $17^+ \rightarrow 15^+$  的 4 条带间 E2 交叉跃迁, 见图 2 上图。

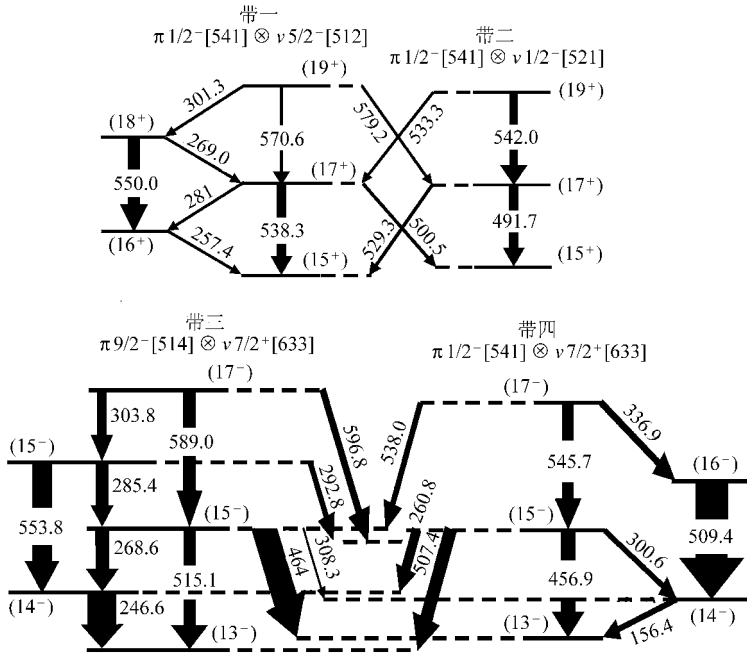


图 2 <sup>174</sup>Re 的部分纲图以及跃迁强度

这里只画出有关带间交叉跃迁部分, 完整版本参看文献[13, 14]。

从上边的能级开门求带间跃迁与带内跃迁的分支比, 并求出约化跃迁概率比(见表 1)。通过公式(5)和(6), 分析从  $17^+$  到  $15^+$  的两对带间跃迁, 得到的结果如图 3(a)所示。图中的交叉部分表示  $V-R$  的可能取值区域, 可从图上读出:  $V \approx 3.4 \text{ keV}$ ;  $R = 0.87 \pm 0.10$ 。

在带三与带四之间, 也存在带间 E2 交叉跃迁。两条转动带在自旋值  $I=15$  处能级最接近(见图 2 下图), 由此得到了  $15^- \rightarrow 13^-$  的跃迁约化跃迁概率比(见表 1)。通过公式(5)和(6), 作图可以得到  $V-R$  的可能取值区域(见图 3(b)), 可从图上读出:  $V \approx 3.8 \text{ keV}$ ;  $R = 0.87 \pm 0.12$ 。

表 1 带间交叉跃迁相关能级, 实验中提取的分支比  $\lambda$ , 以及通过分支比得到的约化跃迁强度  $B(E2)$  之间的约化跃迁概率比  $\lambda_B$

相关能级	带间跃迁能量/keV	带内跃迁能量/keV	$\lambda$	$\lambda_B$
带一、带二	500.5	538.3	$0.36 \pm 0.07$	$0.52 \pm 0.10$
$17^+ \rightarrow 15^+$	529.3	491.7	$0.38 \pm 0.09$	$0.26 \pm 0.06$
带三、带四	464.7	515.1	$2.0 \pm 0.5$	$3.3 \pm 0.8$
$15^- \rightarrow 13^-$	507.4	456.9	$0.88 \pm 0.25$	$0.52 \pm 0.15$

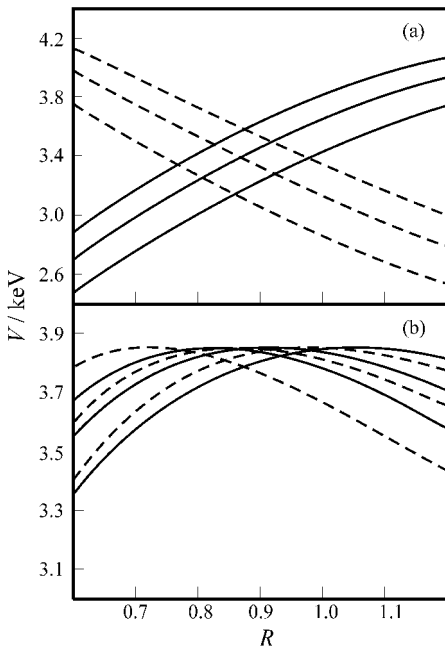


图 3 根据约化跃迁概率比得到的 V-R 图

(a)对带一—带二的分析, R 为带一的跃迁电四极矩与带二的电四极矩之比; (b)对带三—带四的分析, R 为带三的跃迁电四极矩与带四的电四极矩之比。

### 4 讨论

通过对<sup>174</sup>Re 的两组带间 E2 交叉跃迁的分析, 得到了不同转动带间内禀电四极矩的比值, 从而确认了相关转动带间形变的差异。

带一与带二处于同样的准质子轨道, 不同之处在于准中子轨道。从尼尔逊图上可以看到, 在这个核区的典型形变区域( $\beta \approx 0.2$ ),  $\nu 5/2^- [512]$ 有一个随形变缓慢上升趋势, 而  $\nu 1/2^- [521]$ , 则是显著下降。按照形状驱动效应的图像,  $\nu 5/2^- [512]$ 将使原子核形变变小, 相反地,  $\nu 1/2^- [521]$ 将使它变大。按照我们的分析结果, 带二的形变比带一的大约有 15% 的增加, 定性地符合这一图像。

Dracoulis 与 Fabricius 曾经分析过<sup>174</sup>Re 的另一个同中子邻核<sup>175</sup>Os<sup>[8]</sup>中  $\nu 1/2^- [521]$ 组态与  $\nu 5/2^- [512]$ 组态的相互作用强度。由于实验中得到的相互作用强度( $\approx 4$  keV)比采用粒子—转子模型的计算结果( $\approx 39$  keV)小了一个量级, 仅仅考虑其他粒子轨道波函数掺入的影响, 不足以解释这么大的差别, 于是他们推断这两个组态间存在形状差异, 并估计出  $\beta(1/2^- [521])/\beta(5/2^- [512]) \approx 1.25$ 。由于他们提供的纲图中存在带间 E2 交叉跃迁, 并附有

明确的分支比, 使我们得以用前文描述的手段加以分析, 得到  $\beta(1/2^- [521])/\beta(5/2^- [512]) = 1.09 \pm 0.13$ 。这与他们的估计基本相符。与<sup>175</sup>Os 相比, <sup>174</sup>Re 的带一与带二之间相互作用强度也在 4 keV 左右, 形变的差异与<sup>175</sup>Os 相似。

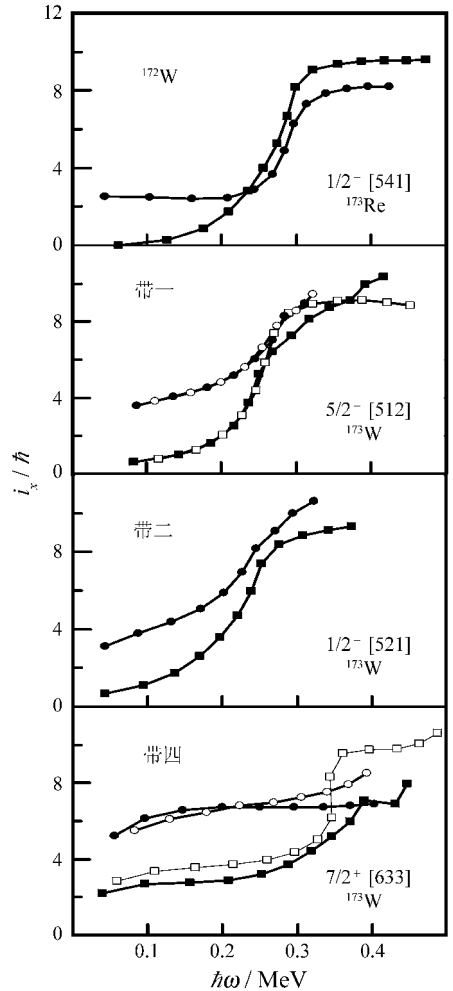


图 4 含有  $\pi 1/2^- [541]$  质子成分的转动带顺排图

• 表示含有  $\pi 1/2^- [541]$  质子成分转动带的优先分支, ○ 表示其非优先分支; ■ 表示除去  $\pi 1/2^- [541]$  质子成分后邻核中对应组态的优先分支, 而 □ 表示其非优先分支。同一幅图中的两个转动带采用同一组 Harris 参量。<sup>172, 173</sup>W, <sup>173</sup>Re 的数据分别取自文献<sup>[16—18]</sup>。

对于带三与带四, 它们的准中子轨道相同, 却有不同准质子轨道, 其中,  $\pi 9/2^- [514]$  随形变增大能量明显增高, 而  $\pi 1/2^- [541]$ , 作为典型的高  $j$  闯入轨道, 随形变增大能量急剧降低。也就是说  $\pi 9/2^- [514]$  将使形变减小, 而  $\pi 1/2^- [541]$  将使形变变大。这也与我们的分析结果相似: 与带三相比, 带四的形变有了约 15% 的增加。Chamoli 等<sup>[15]</sup>通过反冲

距离测量, 得到 $^{177}\text{Re}$ 中 $\pi 1/2^- [541]$ 单粒子组态与 $\pi 9/2^- [514]$ 单粒子组态的形变参量比约为 15%。相似的形变参量值说明, 在 $^{174}\text{Re}$ 的带三与带四中, 处在 $\nu 7/2^+ [633]$ 轨道的准中子对形变的影响相似或微弱。

在这个核区, 奇质子核中的 $\pi 1/2^- [541]$ 组态普遍表现出反常回弯频率推迟, 因此我们观察了 $^{174}\text{Re}$ 中包含 $\pi 1/2^- [541]$ 质子组态的 3 个转动带(带一、带二、带四)的顺排情况。通过比较它们与相邻奇中子核 $^{173}\text{W}$ 对应组态, 发现回弯频率略有推迟(见图 4)。 $^{173}\text{Re}$ 的 $\pi 1/2^- [541]$ 轨道与 $^{172}\text{W}$ 的基态带相比, 回弯频率增加了约 30 keV, 顺排增益减少了约  $4\hbar$ 。 $^{174}\text{Re}$ 的这 3 个转动带, 由于缺乏回弯后的纲图信息, 无法得到回弯频率和顺排增益的准确数值。但从图上估计, 带一和带二, 回弯频率的变化量与邻近奇质子核相似, 略有延迟, 而带四, 回弯频率的推迟量进一步增大, 应在 50 keV 以上。这可能与 $i_{13/2}$ 上准中子的堵塞效应, 形变的进一步增大, 质子-中子剩余相互作用的改变等有关系。

## 5 结论

通过对转动带间交叉 E2 跃迁的分析, 确认了 $^{174}\text{Re}$ 不同转动带间原子核形状的差异, 不同转动带间原子核形变参量的大小关系与准粒子形状驱动效应的图像一致。

组态 $\pi 1/2^- [541] \otimes \nu 5/2^- [512]$ 与 $\pi 1/2^- [541] \otimes \nu 1/2^- [521]$ 间存在形状差异, 后者比前者的形变参量高 15% 左右, 二者相互作用强度约为 4 keV, 这与邻近奇中子核 $^{175}\text{Os}$ 对应组态的情况相似。

组态 $\pi 9/2^- [514] \otimes \nu 7/2^+ [633]$ 与 $\pi 1/2^- [541] \otimes \nu 7/2^+ [633]$ 之间也存在形状差异, 后者比前者的形变参量高大约 15%, 这与周围奇质子核 $^{177}\text{Re}$ 的 $\pi 1/2^- [541]$ 组态相似。

在质子处于 $\pi 1/2^- [541]$ 的 3 个转动带中, 相对于同中子邻核 $^{173}\text{W}$ 的对应中子组态, 回弯频率都有所推迟, 这与这个区域奇质子核中 $\pi 1/2^- [541]$

轨道的反常回弯现象一致。对于 $\pi 1/2^- [541] \otimes \nu 7/2^+ [633]$ 组态, 回弯频率的推迟尤其显著。

## 参考文献 (References):

- [1] Bondarenko V, Tomandl I, Wirths H F, *et al.* Nucl Phys, 2008, **A811**: 28.
- [2] Chen Y S, Frauendorf S, Leander G A. Phys Rev, 1983, **C28**: 2437.
- [3] Wen S X, Zheng H, Li S G, *et al.* Phys Rev, 1996, **C54**: 1015.
- [4] Jensen H J, Bark R A, Tjom P O, *et al.* Nucl Phys, 2001, **A695**: 3.
- [5] Yang C X, Wen S, Li S G, *et al.* Chin J Nucl Phys, 1994, **16**: 223.
- [6] Yang C X, Li S G, Liu X A. Chin J Nucl Phys, 1994, **16**: 217.
- [7] Sun Yang, Wen Shuxian, Feng Dahsuan. Phys Rev Lett, 1994, **72**: 3483.
- [8] Dracoulis G D, Fabricius B. Phys Rev, 1990, **C41**: 2933.
- [9] Hojman D, Cardona M A, Napoli D R, *et al.* Phys Rev, 2003, **C67**: 024368.
- [10] Jensen H J, Hagemann G B, Tjom P O, *et al.* Z Phys, 1991, **A340**: 351.
- [11] Casten R F. Nuclear Structure from a Simple Perspective. Oxford: Oxford University Press, 1990, 16—27.
- [12] Emling H, Grosse E, Kulesa R, *et al.* Nucl Phys, 1984, **A419**: 187.
- [13] Zhang Y H, Guo S, Zhou X H, *et al.* Chin Phys Lett, 2005, **22**: 2788.
- [14] Zhang Y H, Guo S, Zhou X H, *et al.* Chin Phys Lett, 2007, **24**: 1203.
- [15] Chamoli S K, Joshi P, Kumar A, *et al.* Phys Rev, 2002, **C66**: 024307.
- [16] Dracoulis G D, Walker P M, Johnston A. J Phys (London), 1978, **G4**: 713.
- [17] Cromaz M. High-spin States in  $^{167}\text{Hf}$  and  $^{173,174}\text{W}$ , Dissertation for the Doctoral Degree. Toronto: University of Toronto, 1997, 142—143.
- [18] Shirley V S. Nucl Data Sheets, 1995, **75**: 377.

## Quasi-particle Shape Driving Effects in Odd-odd $^{174}\text{Re}$ \*

GUO Song<sup>1, 2</sup>, ZHANG Yu-hu<sup>1, #</sup>, ZHOU Xiao-hong<sup>1</sup>, QIANG Yun-hua<sup>1</sup>,

GUO Wen-tao<sup>1</sup>, GUO Ying-xiang<sup>1</sup>, FANG Yong-de<sup>1</sup>

(1 *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*

2 *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract:** By analyzing carefully the in-beam  $\gamma$  spectroscopy data of odd-odd  $^{174}\text{Re}$ , we have extracted the branching ratios of the interband and intraband E2  $\gamma$  transitions from the two rotational bands of different configurations in  $^{174}\text{Re}$ . The ratios of the reduced transition probabilities  $B(\text{E}2)$  have been deduced and analyzed using a band mixing theory. Information on the band interaction and deformation have been obtained. Apparent differences of transition quadrupole moments are found in the two configurations. A likely reason for the differences in the transition quadrupole moments is the shape driving effects of  $1/2^- [541]$  quasi-proton or  $1/2^- [521]$  quasi-neutron, which has been proposed in the odd- $A$  neighbors of  $^{174}\text{Re}$ .

**Key words:** shape driving effect; Nilsson diagram; transition quadrupole moment; reduced transition probability; anomalous backcrossing

---

\* **Received date:** 10 Mar. 2009; **Revised date:** 7 Apr. 2009

\* **Foundation item:** Major State Basic Research Development Program of China(2007CB815005); National Natural Science Foundation of China(10825522,10735010)

# **Corresponding author:** Zhang Yu-hu, E-mail: yhzhang@impcas.ac.cn