

文章编号: 1007-4627(2005)03-0238-05

## 稀土区奇质子 Lu 和 Ta 核旋称反转研究\*

王祥升<sup>1,4,5</sup>, 杨春祥<sup>2,1</sup>, 周宏余<sup>1,4,5</sup>, 叶小琴<sup>3,1</sup>

(1 北京师范大学射线束技术与材料改性教育部重点实验室, 北京 100875;

2 中国原子能科学研究院, 北京 102413;

3 山西大学物理电子工程学院, 山西 太原 030006;

4 北京师范大学低能核物理研究所, 北京 100875;

5 北京市辐射中心, 北京 100875)

**摘要:** 研究了奇质子核 Lu 和 Ta 同位素链  $h_{11/2}$  质子  $9/2[514]$  转动带旋称劈裂的系统规律, 并与同一核区奇奇核的  $\pi h_{11/2} \otimes \nu i_{13/2}$  两准粒子转动带低自旋区旋称劈裂规律进行了比较, 指出奇质子 Lu 和 Ta 核三准粒子带的旋称反转很可能是来源于  $h_{11/2}$  准质子和  $i_{13/2}$  准中子之间的相互作用。

**关键词:** 奇质子核; 旋称反转; 三准粒子转动带; p-n 相互作用

**中图分类号:** O571.23      **文献标识码:** A

### 1 引言

早在 20 世纪 80 年代初, 在奇质子核高自旋态研究中就在  $^{159}\text{Tm}^{[1]}$ ,  $^{157}\text{Ho}^{[2,3]}$ ,  $^{155}\text{Ho}^{[3]}$  和  $^{165}\text{Lu}^{[4]}$  等核的较高自旋态能谱中发现了旋称反转, 当时这一反常现象曾引起了人们的关注。后来, 奇奇核低自旋区的旋称反转引起了人们更多的关注。近年来, 奇奇核低自旋旋称反转研究已成为核结构研究的热门课题之一。10 多年来, 该领域的实验工作已经积累了大量成果, 理论工作也取得了重大进展。这些研究成果虽然深化了人们对旋称反转的理解, 然而对旋称反转形成机制的研究目前仍无定论。现在再来研究过去曾被人们关注的奇质子核较高自旋态的旋称反转, 也许是有益的。本文论述了奇质子 Lu 和 Ta 两同位素链  $h_{11/2}$  质子  $9/2[514]$  转动带的旋称反转规律, 并与该核区奇奇核低自旋旋称反转的规律进行了比较, 初步探讨了旋称反转的形成机制。

### 2 奇质子 Lu 核和 Ta 核 $\pi h_{11/2} (9/2 [514]) \otimes (\nu i_{13/2})^2$ 转动带旋称反转

关于  $^{161,163,165,167,169,171}\text{Lu}$  和  $^{165,167,169,171,173,175,177}\text{Ta}$  等 13 个奇质子 Lu 核 ( $Z = 71$ )<sup>[5-10]</sup> 和 Ta 核 ( $Z =$

73)<sup>[11-17]</sup>  $h_{11/2}$  质子  $9/2[514]$  转动带的实验结果见图 1 和图 2。为了更好地表示旋称能量劈裂随角动量变化的规律, 我们选用了近年来常用的旋称能量劈裂表达式

$$S(I) = \frac{E(I) - E(I-1) - [E(I+1) - E(I) + E(I-1) - E(I-2)]}{2}$$

来表示自旋为  $I$  的能级到自旋为  $I-1$  的能级间的旋称能量劈裂, 式中  $E(I)$  是自旋为  $I$  的能级的能量。图中实心点表示优惠能态, 空心点表示非优惠能态。这里优惠旋称的定义是  $\alpha_I = (-1)^{j_p - 1/2}$ <sup>[18]</sup>。由于  $9/2[514]$  奇质子处于  $h_{11/2}$  子壳 ( $j_p = 11/2$ ), 所以自旋为负的能态是优惠态。图中呈现出下列明显的规律性:

(1) 在低自旋区, 旋称能量劈裂随自旋值的升高而逐渐加大。这是来源于波函数中  $\Omega = 1/2$  分量的科氏混杂。虽然奇质子处于  $h_{11/2}$  的  $9/2[514]$  组态 ( $\Omega = 9/2$ ), 但随着转动的加快,  $\Omega = 1/2$  分量不断混入, 导致旋称能量劈裂逐渐加大, 这一现象是正常的。

(2) 在低自旋区, 另一规律性现象是旋称能量劈裂随中子数升高迅速减小, 并且在甚缺中子核素

收稿日期: 2005-02-03; 修改日期: 2005-04-07

\* 基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(1G2000077405); 国家自然科学基金重点基金资助项目(19675007, 19875021)

作者简介: 王祥升(1978-), 男(汉族), 山东滕州人, 硕士研究生, 从事核物理研究; E-mail: xiangshen wang@sohu.com

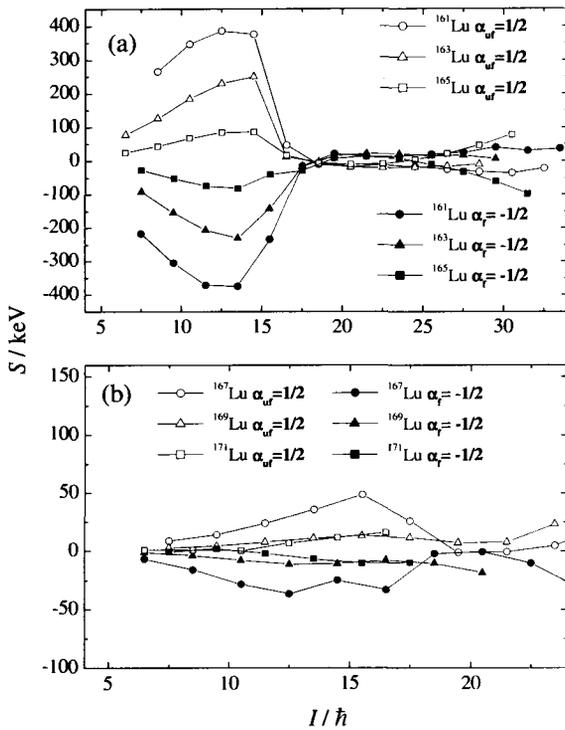


图 1 奇质子 Lu 核  $h_{11/2}$   $9/2[514]$  组态三准粒子转动带的旋称反转

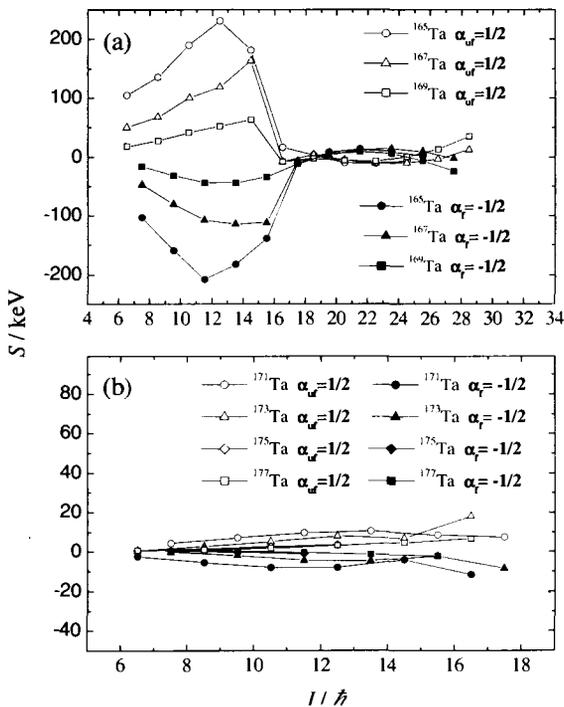


图 2 奇质子 Ta 核  $h_{11/2}$   $9/2[514]$  组态三准粒子转动带的旋称反转

92),  $^{167}\text{Ta}$  ( $N = 94$ ), 低自旋旋称能量劈裂很大。这一现象与一般规律相违背。我们所研究的这些核的组态是奇质子处于  $h_{11/2}$  的  $9/2[514]$  能级上, 质子费米面远离  $\Omega = 1/2$  的  $1/2[550]$ 。因而,  $\Omega = 1/2$  的科氏混杂不应达到这种程度。另外, 在 Lu 和 Ta 的同位素链上, 中子数的变化一般不影响质子的填充状态, 因而, 旋称能量劈裂不应随中子数而变。Roux 等<sup>[11]</sup>指出, 这一现象很可能来源于 $^{165}\text{Ta}$  等核具有一定程度的三轴形变, 且三轴形变随中子数的增加而减小。

(3) 在较高自旋态开始出现旋称反转, 即呈现非优惠态低于优惠态的现象。在 Ta 同位素链中的 $^{165,167,169}\text{Ta}$  ( $N = 92, 94, 96$ ) 3 核素中正常旋称劈裂在自旋值  $12 \hbar$  附近达到极值, 然后随自旋值上升而逐渐减小。当自旋值升至  $18 \hbar$  附近出现旋称反转, 即出现从旋称正常劈裂到反常劈裂的转变。此后, 反常旋称劈裂随自旋态升高而逐渐增大, 在  $I = 22 \hbar$  附近达到极值, 然后逐渐减小, 甚至出现从反常旋称劈裂到正常劈裂的转变, 见图 2(a)。在 Lu 同位素链中的 $^{161,163,165}\text{Lu}$  ( $N = 90, 92, 94$ ) 3 个核素也呈现了十分相似的规律(见图 1(a))。

(4) 在 Ta 同位素链中的 $^{171}\text{Ta}$  ( $N = 98$ ) 和 $^{173}\text{Ta}$  ( $N = 100$ ) 两核素中, 较高自旋态时没有出现旋称反转。值得注意的是, 与 $^{165-169}\text{Ta}$  相似之处是正常旋称劈裂在  $I = 12 \hbar$  附近达到极大值, 而后旋称劈裂也随自旋值上升而逐渐减小; 不同之处是没有出现旋称反转而是正常旋称劈裂继续增大。但是在 $^{175,177}\text{Ta}$  ( $N = 102, 104$ ) 中未观测到正常旋称劈裂减小(见图 2(b))。在 Lu 同位素链中也呈现了与上述规律性十分相似的现象(见图 1(b))。

### 3 讨论

从上述规律性现象中可以看出, 在低自旋区这 13 个核素都未出现旋称反转, 而在较高自旋态, Lu 和 Ta 两个同位素链中都有几个核呈现旋称反转。虽然旋称反转发生在  $I = 18 \hbar$  附近, 而在  $I = 12 \hbar$  附近正常旋称劈裂达到极大值后即随自旋值升高而逐渐减小。我们知道, 在此核区一对  $i_{13/2}$  中子拆对顺排通常发生在  $I = 14-16 \hbar$  右。看来旋称反转很可能与  $i_{13/2}$  中子拆对顺排有关。一对  $i_{13/2}$  中子拆对顺排可能会导致核形变的变化, 以致发生旋称劈裂

中, 如 $^{161}\text{Lu}$  ( $N = 90$ ),  $^{163}\text{Lu}$  ( $N = 92$ ) 和 $^{165}\text{Lu}$  ( $N =$

的反转。早在 1984 年 Bengtsson 等<sup>[19]</sup>就用基于推转壳模型理论计算解释了<sup>157</sup>Ho 等奇质子核的旋称反转。他们指出,中子数在 90 附近奇质子核的一对  $i_{13/2}$  中子顺排导致原子核  $\gamma$  形变由负到正的变化,这种变化正好解释了旋称由正常劈裂转变到反常劈裂。不久, Matsuzaki 等<sup>[20]</sup>的计算结果表明,<sup>157</sup>Ho 和<sup>161</sup>Lu 等核的  $5^\circ$  和  $9^\circ$  的  $\gamma$  形变不足以导致旋称反转。Ikeda 和 Aberg<sup>[21]</sup>的粒子-三轴转子模型的计算结果表明,旋称反转至少在  $\gamma$  形变大于  $18^\circ$  时才会发生,而在此核区一对中子顺排一般不可能导致这么大的形变。Hamamoto<sup>[18]</sup>的粒子-转子计算结果表明旋称反转与  $\gamma$  形变无关。

一对中子拆对顺排导致的另一变化是从一准粒子带到三准粒子带的转变,其差别是多了两个准中子。我们知道,在奇  $A$  核中,一准粒子带和偶偶核的基态带(零准粒子带)中从来没有观测到旋称反转。旋称反转常常发生在奇奇核低自旋区的两准粒子带和某些奇质子核的三准粒子带中。这一事实表明旋称反转很可能与 p-n 相互作用有关。近年来,基于粒子-转子模型和推转壳模型的一些理论计算结果表明,奇奇核低自旋区的旋称反转很可能与 p-n 相互作用有关<sup>[22,23]</sup>。值得研究的是为什么在三准粒子带中有些核出现旋称反转,而有些核没有观测到旋称反转。在我们论述的 Lu 和 Ta 两个同位素链中中子数较少的<sup>161,163,165</sup>Lu ( $N = 90, 92, 94$ ) 和<sup>165,167,169</sup>Ta ( $N = 92, 94, 96$ ) 等核的三准粒子带中出现了旋称反转。<sup>167,169</sup>Lu ( $N = 96, 98$ ) 和<sup>171,173</sup>Ta ( $N = 98, 100$ ) 4 个核中的三准粒子带没有出现旋称反转,但出现了旋称反转的趋势,正常旋称劈裂没有减小到反转的程度,而后又出现劈裂加大。在<sup>171</sup>Lu ( $N = 100$ ) 和<sup>175,177</sup>Ta ( $N = 102, 104$ ) 3 个核中没有观测到三准粒子带的旋称反转,也没有观测到旋称反转的趋势。看来,导致旋称反转的因素随中子数的增加而减弱。很有趣的是这一规律与此核区奇奇核  $\pi h_{11/2} \otimes \nu i_{13/2}$  转动带低自旋旋称反转十分相似。两者不同之处是在奇质子核三准粒子带中只有中子数较少的核才出现旋称反转,在中子数较多的核中甚至都未观测到反转的趋势,而在奇奇核  $\pi h_{11/2} \otimes \nu i_{13/2}$  两准粒子带中却普遍出现旋称反转,无一例外<sup>[24]</sup>。这里应该指出刘运祚等<sup>[25]</sup>将奇奇核<sup>158</sup>Ho, <sup>166</sup>Lu 和<sup>168</sup>Ta 的  $\pi h_{11/2} \otimes \nu i_{13/2}$  转动带的带头自旋由 6, 7, 10  $\hbar$  改为 9, 8, 9  $\hbar$ , 使这 3 个核由

低自旋不反转更改为低自旋反转。上述差异很可能来源于奇奇核旋称反转发生在低自旋区,而奇质子核的三准粒子带发生在较高自旋态。我们知道,旋称能量劈裂来源于低  $\Omega$  分量的科氏混杂,随着自旋态的上升,奇质子  $h_{11/2}$  中  $1/2[550]$  分量的混入使旋称劈裂逐渐加大,一对  $i_{13/2}$  中子拆对顺排的三准粒子带出现在正常旋称劈裂已经很大的较高自旋区,如果导致旋称反转的 p-n 相互作用较弱,它将不能抵消较强的正常旋称劈裂而使旋称反转。在图 1(b) 中<sup>167</sup>Lu 旋称劈裂随自旋态升高的变化展现了两者正好抵消,旋称劈裂随自旋态升高逐渐减小,在  $I = 20 \hbar$  附近有两个实验点  $S(I)$  几乎降至零,其后又逐渐增大,但始终是正常旋称劈裂。至于如何理解 p-n 相互作用导致旋称反转还是一个值得探讨的问题。虽然在 20 世纪 80 年代后期人们就开始认识到旋称反转的形成机制很可能与 p-n 相互作用有关,然而一些理论计算不能解释实验观测到的旋称反转,或者不能再现实验观测到的旋称反转程度。如 Hamamoto 等<sup>[26]</sup>在计算<sup>157</sup>Ho 三准粒子带的旋称反转时,应用标准的  $Q_p \cdot Q_n$  剩余相互作用无法再现旋称反转,必须将  $Q_p \cdot Q_n$  剩余相互作用的强度增大一个数量级才能再现实验观测到的旋称反转。基于推转壳模型的一些理论计算也出现类似的困难,以致 Tajima<sup>[23]</sup>指出推转壳模型不足以解释旋称反转现象。这种困难很可能来源于平均场理论的缺陷。基于平均场理论的核结构理论计算将 p-n 相互作用看成剩余相互作用,因此往往不能充分体现其对旋称反转的影响。过去我们在基于推转壳模型的 TRS/CSM 计算来解释奇质子核  $h_{9/2} 1/2[541]$  转动带交叉推迟时也出现类似的困难<sup>[27]</sup>。近年来,理论工作出现了一些可喜的进展,如 Xu 等<sup>[28]</sup>在基于推转壳模型自洽的平均场理论计算中特别考虑了四极对相互作用和形变的影响,很好地解释了稀土区 Tb, Ho 和 Tm 一些奇奇核  $\pi h_{11/2} \otimes \nu i_{13/2}$  转动带的低自旋旋称反转。

在研究  $A \approx 160$  核区奇奇核  $\pi h_{11/2} \otimes \nu i_{13/2}$  转动带低自旋旋称反转时,本文两位作者(杨,周)曾指出这一核区的旋称反转可能来源于优惠能态的定义。奇奇核优惠旋称定义为核中奇质子和奇中子优惠旋称之和,即  $\alpha_i = [(-1)^{j_p} - 1/2] + (-1)^{j_n - 1/2} \cdot 1/2$ 。这一定义实质上是忽视了奇奇核中  $h_{11/2}$  准质子与  $i_{13/2}$  准中子之间的 p-n 相互作用。在奇奇核

$\pi h_{11/2} \otimes \nu i_{13/2}$  两准粒子带中普遍出现旋称反转, 说明能量较低的态并不是  $h_{11/2}$  准质子和  $i_{13/2}$  准中子都处于优惠态, 而是一个处于优惠态, 另一个处于非优惠态, 这一点类似于偶偶核基态带中分别配对的质子和中子。现在再来考查奇质子核三准粒子带的旋称反转。如前所述, 这里优惠态的定义是  $\alpha_f = (-1)^{j_p-1/2} \cdot 1/2$ , 由于准质子处于  $h_{11/2}$  壳 ( $j = 11/2$ ), 所以  $\alpha_f = -1/2$ , 以此作旋称劈裂图, 在某些核的三准粒子带中出现了旋称反转。这一事实说明三准粒子带中优惠旋称定义是沿用一准粒子带, 忽视了一准粒子带和三准粒子带的差异。换言之, 实际上是忽视了  $h_{11/2}$  准质子和  $i_{13/2}$  准中子之间的相互作用。这再一次表明在某些情况下, 这种 p-n 相互作用是不能忽视的。这一观点是否正确还有待检验。

稀土区奇质子核三准粒子转动带旋称反转与奇核两准粒子转动带低自旋旋称反转的另一明显差别是, 当准质子处于高  $j$  低  $\Omega$  组态时, 后者普遍出现旋称反转, 而前者没有观测到旋称反转。例如, 在许多奇奇核  $\pi h_{9/2} (1/2 [541]) \otimes \nu i_{13/2}$  和  $\pi i_{13/2} (1/2 [660]) \otimes \nu i_{13/2}$  转动带中普遍观测到旋称反转<sup>[29-33]</sup>, 而奇质子核  $h_{9/2} 1/2 [541]$  和  $i_{13/2} 1/2 [660]$  一准粒子转动带都是强退耦带, 一对中子顺排之后的三准粒子转动带都没有观测到旋称反转。

## 参 考 文 献:

- [1] Larabee J A, Waddington C J. Phys Rev, 1981, **C24**: 2 367.
- [2] Hagemann B G, Garrett D J, Herskind B, et al. Phys Rev, 1982, **C25**: 3 224.
- [3] Hagemann B G, Herskind B, Garrett D J, et al. Nucl Phys, 1984, **A424**: 365.
- [4] Jonsson S, Lyttkens J, Carlen L, et al. Nucl Phys, 1984, **A422**: 397.
- [5] Yu C H, Riley A M, Garrett D J, et al. Nucl Phys, 1988, **A489**: 477.
- [6] Jensen R D, Hagemann B G, Hamamoto I, et al. Nucl Phys, 2002, **A703**: 3.
- [7] SchonwaBer G, Nenoff N, Hubel H, et al. Nucl Phys, 2004, **A735**: 393.
- [8] Yu C H, Hagemann B G, Espino M J, et al. Nucl Phys, 1990, **A511**: 194.
- [9] Ogaza S, Kownacki J, Carpenter P M, et al. Nucl Phys, 1993, **A559**: 100.
- [10] Bark A R, Carlsson H, Freeman J S, et al. Nucl Phys, 1998, **A644**: 29.
- [11] Roux G D, Fetea S M, Gueorguieva E, et al. Phys Rev, 2001, **C63**: 024303.
- [12] Theine K, Yang C X, Byrne P A, et al. Nucl Phys, 1992, **A536**: 418a.
- [13] Li S G, Wen S Y, Yuan G J. Nucl Phys, 1993, **A555**: 435.
- [14] Wen S X, Zhu L H, Li S G, et al. Z Phys, 1991, **A339**: 417.
- [15] Carlsson H, Ekstron D L, Nordlund, et al. Nucl Phys, 1995, **A592**: 89.
- [16] Kondev G F, Dracoulis D G, Byrne P A, et al. Nucl Phys, 1996, **A601**: 195.
- [17] Archer E D, Riley A M, Brown B T, et al. Phys Rev, 1995, **C52**: 1 326.
- [18] Hamamoto I. Phys Lett, 1990, **B235**: 221.
- [19] Bengtsson R, Frisk H, May F R, et al. Nucl Phys, 1984, **A415**: 189.

这说明在  $\Omega = 1/2$  组态的转动带中正常旋称劈裂很大, 在三准粒子带中 p-n 相互作用不足以抵消这么大的正常旋称劈裂。奇质子核的旋称反转不仅发生在某些核奇质子处于高  $j$  组态的三准粒子带中, 在奇质子处于低  $j$  组态的三准粒子带中也观测到旋称反转, 如<sup>167</sup>Ta 的  $d_{5/2}$  质子  $5/2 [402]$  带 ( $j = 5/2$ )<sup>[12]</sup> 和<sup>173</sup>Ta 的  $d_{3/2}$  质子  $1/2 [411]$  带 ( $j = 3/2$ )<sup>[34]</sup>。这一问题也值得研究。

我们注意到, 在某些奇中子核负宇称带一对  $i_{13/2}$  中子拆对顺排的三准粒子带中也观测到了旋称反转, 如<sup>165</sup>Yb 和<sup>171</sup>Hf。显然, 这种旋称反转不是来源于 p-n 相互作用, 也许是来源于那个处于负宇称态的准中子与  $i_{13/2}$  准中子之间的 n-n 相互作用。这个问题也是值得研究的。

## 4 结 论

通过对奇质子 Lu 和 Ta 两个同位素链中 13 个核的  $h_{11/2}$  质子  $9/2 [514]$  转动带的旋称劈裂随自旋变化规律的研究, 并通过与该核区奇奇核  $\pi h_{11/2} \otimes \nu i_{13/2}$  转动带低自旋区旋称反转的比较, 初步探讨了旋称反转的形成机制。看来, 在奇质子 Lu 和 Ta 核的三准粒子带中出现的旋称反转很可能是来源于  $h_{11/2}$  准质子和  $i_{13/2}$  准中子之间的 p-n 相互作用。

- [20] Matsuzaki M, Shimizu Y R, Matsuyanagi K. *Prog Theor Phys*, 1988, **A480**: 836.
- [21] Ikeda A, Aberg S. *Nucl Phys*, 1988, **A480**: 85.
- [22] Semmes B P, Ragmarsson I. *Proc Int Conf on High-spin Phys and Gamma-soft Nuclei*, Pittsburgh, 1990, Singapore: World Scientific, 1991, 500.
- [23] Tajima N. *Nucl Phys*, 1994, **A572**: 365.
- [24] Yang C X, Zhou H Y. *Chin Phys Lett*, 2003, **20**(12): 2140.
- [25] Liu Y Z, Ma Y J, Yang H T, *et al.* *Phys Rev*, 1995, **C52**(4): 2514.
- [26] Hamamoto I, Mottelson B. *Phys Lett*, 1986, **B179**: 327.
- [27] Yang C X, Wen S X, Li S G, *et al.* *Chin J Nucl Phys*, 1994, **16**: 223.
- [28] Xu F R, Satula W, Wyss R. *Nucl Phys*, 2000, **A669**: 119.
- [29] Zhang Y H, Zhang S Q, Zhao Q Z, *et al.* *Eur Phys J*, 1998, **A1**: 119.
- [30] 张玉虎, 温书贤, 竺礼华等, *高能物理与核物理*, 2002, **26**(5): 445.
- [31] 张玉虎, Oshima M, Morikawa T, *et al.* *高能物理与核物理*, 2003, **27**(4): 313.
- [32] Ma Y J, Liu Y Z, Sun H B, *et al.* *Eur Phys J*, 1998, **A3**(1): 21.
- [33] Deng F G, Yang C X, Sun H B, *et al.* *Chin Phys Lett*, 2001, **18**: 888.
- [34] Joshi P, Mukherjee G, Kumar A, *et al.* *Phys Rev*, 2001, **C64**: 034303.

## Study on Signature Inversion of Odd-proton Nuclei in Rare-earth Region \*

WANG Xiang-sheng<sup>1,4,5</sup>, YANG Chun-xiang<sup>2,1</sup>, ZHOU Hong-yu<sup>1,4,5</sup>, YE Xiao-qin<sup>3,1</sup>

(1 *The Key Laboratory of Beam Technology and Materials Modification of Ministry of Education Beijing Normal University, Beijing 100875, China;*

2 *China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;*

3 *Physics and Electronic Engineering College, Shanxi University, Taiyuan 030006, China;*

4 *Institute of Low-Energy Nuclear Physics, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;*

5 *Beijing Radiation Center, Beijing 100875, China)*

**Abstract:** The systematic features of signature splitting of the  $h_{11/2} 9/2 [514]$  rotational band in Lutetium and Tantalum isotope chains have been investigated and compared with that of  $\pi h_{11/2} \otimes \nu i_{13/2}$  2-quasiparticle band in odd-odd nuclei of the same nuclear region. It is shown that signature inversion of 3-quasiparticle band of some odd- $Z$  Lutetium and Tantalum nuclei most probably caused by the p-n interaction of  $h_{11/2}$  quasiproton and  $i_{13/2}$  quasineutron.

**Key words:** odd-proton nuclei; signature inversion; three-quasiparticle rotational band; p-n interaction

\* **Foundation item:** Major State Basic Research Development Program (TG2000077405); National Natural Science Foundation of China (19675007, 19875012)