

# $^{188}\text{Tl}$ 的 $\pi h_{9/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 扁椭球转动带的 旋称反转研究\*

马龙<sup>1</sup> 周小红<sup>1;1)</sup> 张玉虎<sup>1</sup> 郭应祥<sup>1</sup> M. Oshima<sup>2</sup> Y. Toh<sup>2</sup> M. Koizumi<sup>2</sup>  
A. Osa<sup>2</sup> Y. Hatsukawa<sup>2</sup> M. Sugawara<sup>3</sup>

1 (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2 (Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai, Ibaraki 319-1195, Japan)

3 (Chiba Institute of Technology, Narashino, Chiba 275-0023, Japan)

**摘要** 利用能量为170MeV的 $^{35}\text{Cl}$ 束流,通过 $^{157}\text{Gd}(^{35}\text{Cl},4n)$ 熔合蒸发反应研究了 $^{188}\text{Tl}$ 的高自旋态能级结构.依据实验结果建立了 $^{188}\text{Tl}$ 基于 $\pi h_{9/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 组态的转动带.根据双奇Tl核能级结构的相似性,指定了 $^{188}\text{Tl}$ 的 $\pi h_{9/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 扁椭球转动带的自旋值.结果表明在 $^{188}\text{Tl}$ 中, $\pi h_{9/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 扁椭球转动带在低自旋区具有旋称反转性质.利用包含了质子-中子剩余相互作用的准粒子-转子模型,定性地解释了 $\pi h_{9/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 扁椭球转动带的低自旋区旋称反转现象.

**关键词** 转动带 旋称反转 准粒子-转子模型 扁椭球形变

## 1 引言

在对不同质量区形变双奇核2准粒子转动带的实验研究中,系统地观测到了基于高 $j$ 组态 $\pi g_{9/2} \otimes \nu g_{9/2}$ ,  $\pi h_{11/2} \otimes \nu h_{11/2}$ ,  $\pi h_{11/2} \otimes \nu i_{13/2}$ ,  $\pi h_{9/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 和 $\pi i_{13/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 等转动带在低自旋区出现的旋称反转现象<sup>[1, 2]</sup>.这一实验现象受到实验和理论核物理学家的极大关注,并进行了深入研究<sup>[3]</sup>,指出质子-中子剩余相互作用和核的三轴形变等<sup>[1, 4, 5]</sup>可能是导致这一反常现象的主要因素.理论研究还表明,旋称反转的产生与核子费米面所处的位置<sup>[1]</sup>及转动带的组态<sup>[4]</sup>有着密切的关系.因此,非常有必要在更广泛的核区和新的2准粒子组态中研究双奇核转动带的旋称反转现象.近期,我们报道了 $^{190}\text{Tl}$ 核基于 $\pi h_{9/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 组态的扁椭球转动带在低自旋时旋称反转<sup>[6]</sup>,并重新建议了双奇核 $^{192-200}\text{Tl}$ 中基于 $\pi h_{9/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 组态的扁椭球转动带<sup>[7-11]</sup>的自旋.为了拓展双奇Tl核结构的系统性,本文在 $^{188}\text{Tl}$ 低位激发能级研究<sup>[12-14]</sup>的基础上对双奇核 $^{188}\text{Tl}$ 进行了在束 $\gamma$ 谱学研究.

## 2 实验和结果

实验是在日本原子力研究所(JAERI)串行加速器实验室完成的.用 $^{35}\text{Cl}$ 束流轰击 $^{157}\text{Gd}$ 同位素靶,产生处于高自旋态的 $^{188}\text{Tl}$ 核.靶的质量厚度约为 $2.0\text{mg}/\text{cm}^2$ ,并衬有约 $6.5\text{mg}/\text{cm}^2$ 的Pb,以阻滞反应余核.用16台带有BGO康普顿抑制的高纯锗探测器进行了在束 $\gamma$ 测量.实验前后均用 $^{152}\text{Eu}$ 和 $^{133}\text{Ba}$ 等标准放射源对高纯锗探测器做了能量和效率刻度.对 $^{60}\text{Co}$ 源的1332.5keV的 $\gamma$ 射线,探测器的能量分辨在2.0—2.8keV之间.本实验在170MeV的束流能量下进行了长时间的 $\gamma$ - $\gamma$ - $t$ 符合测量,这里 $t$ 是符合两条 $\gamma$ 射线到达探测器的相对时间差,符合窗为200ns. $\gamma$ - $\gamma$ - $t$ 符合数据以事件的方式记录到数据文件中,共获取了约 $270 \times 10^6$ 个符合事件.

在离线数据处理时,对各探测器进行增益匹配,并将 $\gamma$ - $\gamma$ 符合数据反演成一个对称化的总矩阵.按照探测器相对束流方向夹角的不同,还将实验数据反演成非对称化的一个DCO矩阵和两个ADO矩阵,以确

2005-09-30 收稿

\*国家自然科学基金(10475097, 10221003),中国科学院百人计划项目和中国科学院基金资助

1) E-mail: zxh@impcas.ac.cn

定  $\gamma$  射线跃迁的多极性, 进而指定相关能级的自旋值.

基于与已知的  $\gamma$  射线的符合, 本工作指定了源于  $^{188}\text{Tl}$  的  $\gamma$  射线. 通过仔细分析比较  $^{188}\text{Tl}$  各条  $\gamma$  射线的开窗谱, 建立了  $^{188}\text{Tl}$  的能级纲图, 结果如图 1 所示. 图 2 给出了典型的符合谱(图中标\*的  $\gamma$  射线源于  $^{157}\text{Gd}(^{35}\text{Cl}, \alpha\text{p}3\text{n})^{184}\text{Pt}$  的反应). 图 3 比较了双奇 Tl 核中  $\pi h_{9/2} \otimes \nu i_{13/2}$  转动带能级结构的系统性. 从图 3 可以看出, 如果我们建议在  $^{188}\text{Tl}$  核中新观测到的转动带的带头自旋值为 10, 则该转动带与双奇 Tl 核  $\pi h_{9/2} \otimes \nu i_{13/2}$  转动带的结构系统性符合得很好. 因此, 我们建议本工作所观测到的  $^{188}\text{Tl}$  核的转动带的组态为  $\pi h_{9/2} \otimes \nu i_{13/2}$ , 带头自旋值为 10. 通过分析  $\gamma$  跃迁的多极性(DCO 和 ADO 系数), 建议了其他相关能级的自旋, 结果见图 1.

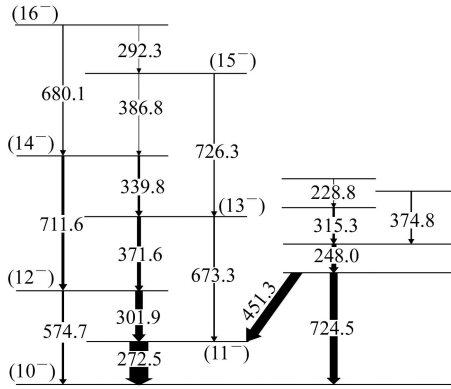


图 1 本工作建立的  $^{188}\text{Tl}$  能级纲图

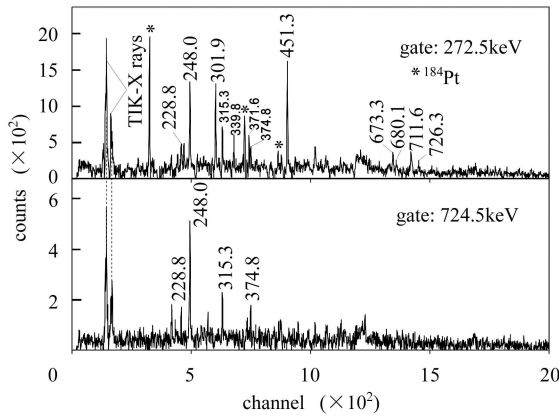


图 2 用 272.5keV 和 724.3keV  $\gamma$  射线开窗的符合谱

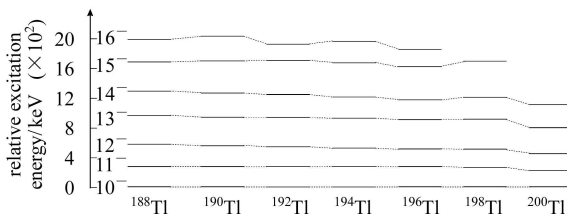


图 3 双奇核  $^{188}\text{--}^{200}\text{Tl}$  扁椭球转动带能级结构的系统性

### 3 讨论

图 4 给出按照标准方法<sup>[15]</sup>提取的  $^{188}\text{Tl}$  转动带的顺排角动量随转动频率的变化关系. 为了比较, 图 4 同时给出了采用同一组 Harris 参量  $J_0 = 8.0\text{MeV}^{-1}\hbar^2$  和  $J_1 = 40\text{MeV}^{-3}\hbar^2$ <sup>[16]</sup> 提取的相邻奇 A 核  $^{187}\text{Hg}$  的  $\nu i_{13/2}$  带<sup>[16]</sup> 和  $^{187}\text{Tl}$  的  $\pi h_{9/2}$  带<sup>[17]</sup> 的准粒子顺排量  $i_x$ . 从图 4 可以看出,  $^{188}\text{Tl}$  转动带的顺排角动量在低转动频率处大约等于  $^{187}\text{Hg}$  的  $\nu i_{13/2}$  带和  $^{187}\text{Tl}$  的  $\pi h_{9/2}$  带的准粒子顺排角动量之和. 这支持我们对该转动带组态和自旋的指定. 本工作建立的  $^{188}\text{Tl}$  核转动带的顺排量在  $\hbar\omega \approx 0.33\text{MeV}$  处有一个明显增大的趋势, 说明可能发生了带交叉.  $^{188}\text{Tl}$  的  $\pi h_{9/2} \otimes \nu i_{13/2}$  转动带已经占据了  $i_{13/2}$  中子轨道, 中子的 AB 交叉被阻塞, 本实验观测到的在  $\hbar\omega \approx 0.33\text{MeV}$  处的带交叉可能是中子的 BC 交叉<sup>[18]</sup>.

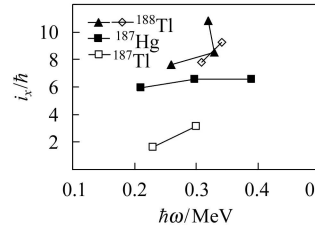


图 4 角动量顺排

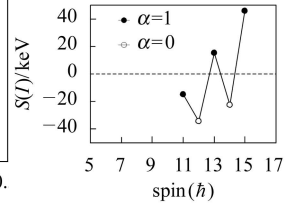


图 5 旋称劈裂  $S(I)$  随自旋  $I$  的变化情况

对于双奇核中的转动带, 其自旋为奇数的能级序列与自旋为偶数的能级序列分别具有不同的旋称量子数. 旋称劈裂是指在某一角动量下两个  $\Delta I = 2$  的能级序列的能量差. 对于一个给定组态的转动带, 其旋称量子数  $\alpha_f = 1/2 \times (-1)^{j_p-1/2} + 1/2 \times (-1)^{j_n-1/2}$  的能级序列称为优惠带; 非优惠带的旋称量子数  $\alpha_{uf} = 1/2 \times (-1)^{j_p+1/2} + 1/2 \times (-1)^{j_n-1/2}$  或  $\alpha_{uf} = 1/2 \times (-1)^{j_p-1/2} + 1/2 \times (-1)^{j_n+1/2}$ . 当优惠带能量高于非优惠带时, 则称之为旋称反转<sup>[1, 19]</sup>. 旋称劈裂  $S(I)$  定义为

$$S(I) = E(I) - [E(I+1) + E(I-1)]/2.$$

这里,  $E(I)$  表示自旋为  $I$  的能级激发能.  $S(I)$  可以很好地描述旋称劈裂.

图 5 用参量  $S(I)$  显示了双奇核  $^{188}\text{Tl}$  基于  $\pi h_{9/2} \otimes \nu i_{13/2}$  组态的转动带的旋称劈裂. 实心符号和空心符号分别代表优惠带和非优惠带. 可见, 利用我们所建议的能级自旋值,  $^{188}\text{Tl}$  核转动带在低自旋区发生了

旋称反转, 即旋称  $\alpha=1$  的优惠带 (奇自旋序列) 的能量高于旋称  $\alpha=0$  的非优惠带 (偶自旋序列) 的能量. 根据 Kreiner 建议的包含了质子-中子剩余相互作用的 2 准粒子-转子模型, 如果在双奇核  $^{188}\text{Tl}$   $\pi h_{9/2} \otimes \nu i_{13/2}$  转动带中, 全顺排态  $J = j_p + j_n = 11$  的 p-n 剩余相互作用是很强的排斥作用, 那么在  $11^-$  态及更高自旋态的波函数中  $J = 10$  的成分则起主要作用<sup>[20]</sup>. 结果导致角动量  $I = R + J = R + 10$  为偶数的态是能量优惠态, 而角动量  $I - 1 = R + 10 - 1$  是奇数的态成为非优惠态 ( $R$  为偶数, 是集体转动角动量). 因此, 在低自旋时就发生旋称反转.

对于图 1 中右边部分的能级, 其能级间隔不遵从

$I(I+1)$  规则. 这些能级可能是单粒子激发形成的.

## 4 结论

本工作利用重离子熔合蒸发反应  $^{157}\text{Gd}(^{35}\text{Cl}, 4n)$  研究了  $^{188}\text{Tl}$  高自旋态, 建立了  $^{188}\text{Tl}$  基于  $\pi h_{9/2} \otimes \nu i_{13/2}$  组态的扁椭球转动带. 基于双奇核 Tl 能级结构的系统性, 建议了该转动带的自旋. 结果表明  $^{188}\text{Tl}$   $\pi h_{9/2} \otimes \nu i_{13/2}$  扁椭球转动带在低自旋时旋称反转. 利用考虑了 p-n 剩余相互作用的 2 准粒子-转子理论模型可以解释  $^{188}\text{Tl}$   $\pi h_{9/2} \otimes \nu i_{13/2}$  转动带在低自旋区出现的旋称反转现象.

## 参考文献(References)

- Bengtsson R et al. Nucl. Phys., 1984, **A415**: 189
- ZHANG Y H et al. Science in China, 2003, **G33**(1): 69 (in Chinese)  
(张玉虎等. 中国科学, 2003, **G33**(1): 69)
- ZHANG Y H, Oshima M, Toh Y et al. Phys. Rev., 2003, **C68**: 054313
- Plettner C et al. Phys. Rev. Lett., 2000, **85**: 933
- Cardona M A et al. Phys. Rev., 1999, **C51**: 1298
- ZHOU X H, XIE C Y et al. J. Phys. G: Nucl. Part. Phys., 2005, **31**: S1985—S1988
- Kreiner A J et al. Phys. Rev., 1980, **C21**: 933
- Kreiner A J et al. Phys. Rev., 1979, **C20**: 2205
- Kreiner A J et al. Nucl. Phys., 1978, **A308**: 147
- Kreiner A J et al. Nucl. Phys., 1977, **A282**: 243
- Kreiner A J et al. Phys. Rev., 1981, **C23**: 748
- Van Duppen P et al. Nucl. Phys., 1981, **A529**: 268
- Huyse M et al. Phys. Lett., 1988, **B201**: 293
- Kreiner A J et al. Phys. Lett., 1981, **47**: 1709
- Bengtsson R, Frauendorf S. Nucl. Phys., 1979, **A327**: 139
- Hannachi F, Bastin G et al. Nucl. Phys., 1979, **A481**: 135
- Revoil W et al. Phys. Rev., 1994, **C49**: R587
- Bearden I G, Janssens R V F et al. Nucl. Phys., 1994, **A576**: 441
- ZHANG Yu-Hu, Oshima M, Morikawa T et al. HEP & NP, 2003, **27**(4): 313 (in Chinese)  
(张玉虎, Oshima M, Morikawa T 等. 高能物理与核物理, 2003, **27**(4): 313)
- Kreiner A J et al. Phys. Rev., 1980, **C22**: 748

## Signature Inversion in $\pi h_{9/2} \otimes \nu i_{13/2}$ Oblate Band of $^{188}\text{Tl}^*$

MA Long<sup>1</sup> ZHOU Xiao-Hong<sup>1;1)</sup> ZHANG Yu-Hu<sup>1</sup> GUO Ying-Xiang<sup>1</sup> M. Oshima<sup>2</sup> Y. Toh<sup>2</sup>  
M. Koizumi<sup>2</sup> A. Osa<sup>2</sup> Y. Hatsukawa<sup>2</sup> M. Sugawara<sup>3</sup>

<sup>1</sup> (Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

<sup>2</sup> (Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai, Ibaraki 319-1195, Japan)

<sup>3</sup> (Chiba Institute of Technology, Narashino, Chiba 275-0023, Japan)

**Abstract** High-spin Level structure of  $^{188}\text{Tl}$  has been studied via  $^{157}\text{Gd}(^{35}\text{Cl}, 4n)$  fusion-evaporation reaction at beam energy of 170 MeV. A rotational band built on the  $\pi h_{9/2} \otimes \nu i_{13/2}$  configuration with oblate deformation has been established. Spin values have been proposed to the  $\pi h_{9/2} \otimes \nu i_{13/2}$  oblate band based on the similarities between the oblate band of  $^{188}\text{Tl}$  and those in odd-odd  $^{190-200}\text{Tl}$ . With the spin assignments, the low-spin signature inversion has been revealed for the  $\pi h_{9/2} \otimes \nu i_{13/2}$  oblate band of  $^{188}\text{Tl}$ . The low-spin signature inversion can be interpreted qualitatively in the framework of the quasi-particles plus rotor model including a  $J$  dependent p-n residual interaction.

**Key words** rotational band, signature inversion, quasi-particles plus rotor model, oblate deformation

Received 30 September 2005

\*Supported by National Natural Sciences Foundation of China (10475097, 10221003), 100 Talents Programme of the Chinese Academy of Sciences and Science Foundation of the Chinese Academy of Sciences

1) E-mail: zzh@impcas.ac.cn