

# 双奇核 $^{170}\text{Re}$ 中 $\pi h_{11/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 带的实验 观测及其系统学分析\*

王华磊<sup>1,2;1)</sup> 张玉虎<sup>1,2</sup> 周小红<sup>1</sup> 郭应祥<sup>1</sup> 雷祥国<sup>1</sup> 柳敏良<sup>1</sup> 骆鹏<sup>1</sup> 谢成营<sup>1</sup>  
宋立涛<sup>1</sup> 于海萍<sup>1</sup> 郑勇<sup>1</sup> 郭文涛<sup>1</sup> 刘忠<sup>1</sup> 竺礼华<sup>3</sup> 温淑贤<sup>3</sup> 吴晓光<sup>3</sup>

1 (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2 (中国科学院研究生院 北京 100049)

3 (中国原子能研究院 北京 102413)

**摘要** 通过束流能量为166MeV的重离子熔合蒸发反应  $^{142}\text{Nd}(^{32}\text{S}, 1\text{p}3\text{n}\gamma)^{170}\text{Re}$ , 用在束  $\gamma$  谱学方法研究了  $^{170}\text{Re}$  的高自旋激发态, 首次观测到了双奇核  $^{170}\text{Re}$  的转动带能级纲图. 应用推转壳模型的基本理论, 进行了简要讨论. 在系统学上发现该转动带与  $A=170$  核区双奇核中  $\pi h_{11/2} \otimes \nu i_{13/2}$  组态带的旋称劈裂特征及规律相符.

**关键词** 在束  $\gamma$  谱学 形变双奇核 旋称反转

实验和理论表明高速旋转的形变原子核不仅具有非集体特征, 更重要的是表现出了许多集体特征, 如转动、振动等. 稀土区缺中子形变双奇核的高自旋态核结构研究是当前核物理研究中的一个前沿热门课题<sup>[1]</sup>. 由于双奇核的两个未成对价核子在原子核高速旋转时可以处于费米面附近不同的尼尔逊轨道上而构成众多的耦合模式, 进而导致了不同的带结构<sup>[2]</sup>. 近些年来在对  $A=170$  核区双奇核的研究中, 系统地发现基于  $\pi h_{11/2} \otimes \nu i_{13/2}$  两准粒子组态下的压缩型转动带在低自旋区能级出现旋称反转<sup>[3-5]</sup>. 本工作之前, 人们已通过  $^{170}\text{Re}$ <sup>[6]</sup>,  $^{170}\text{Os}$ <sup>[7]</sup> 和  $^{174}\text{Ir}$ <sup>[8]</sup> 的衰变研究, 确定了  $^{170}\text{Re}$  的基态寿命为9.2s, 发现了  $^{170}\text{Re}$  的10个低位能级, 关于  $^{170}\text{Re}$  高自旋的核谱学知识还未曾见过报道. 本工作利用重离子熔合蒸发反应  $^{142}\text{Nd}(^{32}\text{S}, 1\text{p}3\text{n}\gamma)$  对  $^{170}\text{Re}$  的高自旋态进行了实验研究.

实验是在中国原子能研究院HI-13串列静电加速器的在束  $\gamma$  实验终端上进行的. 用能量为166MeV的  $^{32}\text{S}$  束流轰击同位素  $^{142}\text{Nd}$  靶布居了  $^{170}\text{Re}$  的高自旋态. 实验用的靶厚度约为  $2.2\text{mg}/\text{cm}^2$ , 附有  $7\text{mg}/\text{cm}^2$  的Pb衬. 实验中用12台带BGO反康抑制的高纯

锗(HPGe)探测器进行了长时间的  $\gamma$ - $\gamma$  符合测量, 共获得了约  $1.5 \times 10^8$  个符合事件. 实验前后用  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{133}\text{Ba}$  和  $^{152}\text{Eu}$  标准放射源对高纯锗探测器进行了能量和效率刻度, 对  $^{60}\text{Co}$  的1332.5keV的  $\gamma$  射线, 探测器的能量分辨在1.9—3.1keV之间. 更详细的实验描述见文献[9].

本工作建立的能级纲图如图1所示, 其中关于  $\gamma$  射线及转动带组态的指定已在文献[9]中详细讨论, 为了便于能级间隔的系统性比较图1一起给出了  $^{172}\text{Re}$ <sup>[10]</sup> 同组态下的转动带. 需要强调的一点是, 这里建议本纲图中的210keV  $\gamma$  射线正是  $^{174}\text{Ir}$ <sup>[8]</sup> 衰变时所观测到的  $^{170}\text{Re}$  核  $(7^+) \rightarrow (5^+)$  退激的  $\gamma$  射线, 衰变研究时得到的强度信息也与本实验相一致. 在此由于  $^{170}\text{Re}$  这样的形变双奇核, 低位能级密度较高且低位激发态间的跃迁很复杂, 而本实验也没有低能的  $\gamma$  探测器, 可能有一些低能的  $\gamma$  跃迁没有被观测到, 所以图1中没能将该负宇称带与  $7^+$  态相连接. 这样本纲图就缺乏与已知  $J^\pi$  值的低位能级间的跃迁连接, 这一悬空特征给指定其各能级的自旋宇称带来了很大的困难和不确定性, 从而使得系统学分析成了暂时解决和检验该问题

\* 国家自然科学基金(10375077,10221003), 国家重点基础研究发展规划项目(TG2000077400)和中国科学院资助

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

的一个重要手段. 众多的实验数据表明, 在同一核区具有相同激发或耦合模式的原子核, 其自旋相同的激发态能级间隔具有很好的系统学特征. 鉴于此我们建议了 $^{170}\text{Re}$ 这一转动带的宇称和自旋值如图1. 另外, 本实验没有观测到基于他组态下转动带的原因也在文献[9]中做了解释说明.

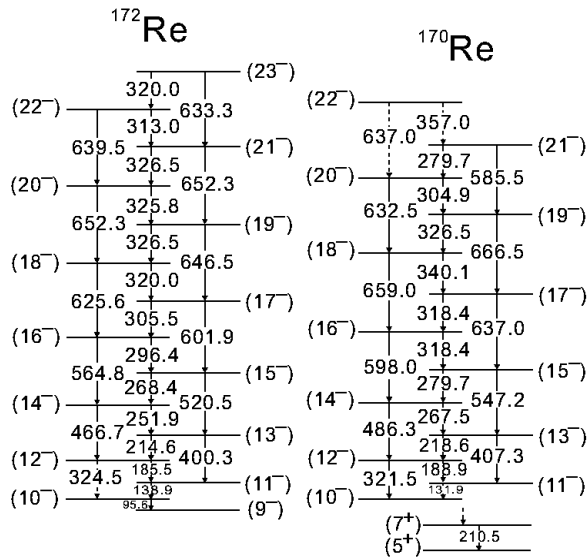


图 1  $^{172}\text{Re}$  和  $^{170}\text{Re}$  (本工作)  $\pi h_{11/2} \otimes \nu i_{13/2}$  带能级纲图

图2给出了 $^{169}\text{Re}^{[11]}$ 基于 $\pi h_{11/2}$ 和 $^{169}\text{W}^{[12]}$ 基于 $\nu i_{13/2}$ 组态带及本实验观测到的 $^{170}\text{Re}$ 基于 $\pi h_{11/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 组态带的准粒子顺排随转动频率的变化曲线. 在推转壳模型的理论框架内, 这3个核可以看作是由一个 $^{168}\text{W}^{[13]}$ 核芯外加一个或两个价核子耦合而成, 从图2可以看出在不考虑n-p剩余相互作用的前提下, 准粒子顺排很好地满足相加性规则. 在该核区中子顺排通常发生在0.23—0.26MeV处, 可以看出 $^{170}\text{Re}$ 在约0.30MeV处才出现顺排上弯, 这表明此转动带的中子已经占据 $\nu i_{13/2}$ 轨道, AB交叉被阻塞, 此处的顺排上弯是中子的BC交叉所致, 这与 $^{169}\text{W}^{[12]}$ 核 $\nu i_{13/2}$ 带BC交叉频率是相一致的.

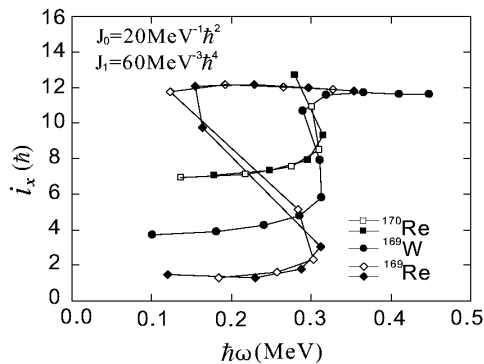


图 2 角动量顺排

为了更好地展示 $A=170$ 核区 $\pi h_{11/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 带旋称劈裂的系统性特征, 图3给出了随自旋 $I$ 变化较敏感的参量 $S(I) = E(I) - E(I-1) - [E(I+1) - E(I) + E(I-1) - E(I-2)]/2$ 的变化曲线. 从图3可以看出这些核基于该组态下的转动带在低自旋区均发生了旋称反转, 随着转动频率的升高旋称劈裂恢复正常或有此趋势, 反转点随质子数的增加而增加, 随中子数的增加而减小. 另外图3还表明该带的旋称劈裂幅度随中子数的增加而减小, 随质子数的增加有先增后减的趋势. 我们知道一个2准粒子转动带旋称劈裂的大小取决于两个准粒子轨道中旋称劈裂较小的轨道, 这里对于 $\pi h_{11/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 转动带这一轨道为 $h_{11/2}$ 质子轨道. 通过对该核区奇质子核 $\pi h_{11/2}$ 组态下的转动带旋称劈裂幅度变化趋势的考察, 发现它确实与图3中旋称劈裂幅度的变化趋势相一致. 但是 $\pi h_{11/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 转动带的旋称劈裂在低自旋区是反转的. 关于旋称劈裂的本质一般认为是由于克力奥利力的作用使得相应转动带的波函数中混入了 $\Omega = 1/2$ 的成份, 旋称劈裂幅度的变化可能是由于价质子费米面位置的不同或原子核的形变导致低 $\Omega$ 成分混杂程度不同引起的. 而旋称反转的原因和机制近些年来虽然一直是一个讨论的热点, 但还没有形成一个共识.

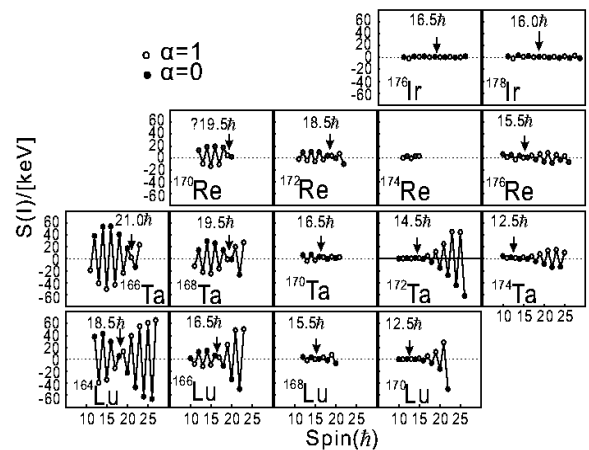


图 3 旋称劈裂

本工作首次对双奇核 $^{170}\text{Re}$ 的高自旋态进行了实验研究, 发现了一条基于 $\pi h_{11/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 组态上的转动带. 根据该核区带结构研究中的系统学知识, 对转动带的准粒子组态, 自旋和宇称进行讨论和指定. 对比邻近核的信息分析了转动带的实验顺排和旋称劈裂特征, 发现低自旋区出现旋称反转, 这些现象与该核区旋称反转及劈裂的系统性非常一致. 本工作将形变双奇核的高自旋态实验研究在 $^{172}\text{Re}^{[10]}$ 的基础上又推进了一步, 迄今为止它是最缺中子的一个双奇Re同位素.

## 参考文献(References)

- 1 Jain A K, Sheline R K, Sood P C et al. Rev. of Mod. Phys., 1998, **70**: 843
- 2 Headly D M, Sheline R K, Sood P C et al. Atomic Data and Nuclear Data Tables, 1998, **69**: 239
- 3 Kreiner A J, Gregorio D Di, Fendrik A J et al. Nucl. Phys., 1985, **A432**: 451
- 4 Kreiner A J, Davidson J, Davidson M et al. Phys. Rev., 1987, **C36**: 2309
- 5 Bengtsson R, Frisk H, May F R et al. Nucl. Phys., 1984, **A541**: 189
- 6 Sterna L L, Haustein P E, Ansaldo E J et al. Phys. Lett., 1975, **53B**: 432
- 7 Hild T, Schmidt-Ott W D, Kunze V et al. Phys. Rev., 1995, **C51**: 1736
- 8 Schmidt-Ott W D, Salewski H, Meissner F et al. Nucl. Phys., 1992, **A545**: 646
- 9 WANG H L, ZHANG Y H, ZHOU X H et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2004, **28(7)**: 699(in Chinese)  
(王华磊, 张玉虎, 周小红等. 高能物理与核物理, 2004, **28(7)**: 699)
- 10 ZHANG Y H, Oshima M, Toh Y et al. Phys. Rev., 2003, **C68**: 054313
- 11 ZHOU X H, Oshima M, Toh Y et al. Eur. Phys. J., 2002, **A15**: 285
- 12 Recht J, Agarwal Y K, Blume K P et al. Nucl. Phys., 1985, **A440**: 366
- 13 Theine K, Byrne AP, Hubel H et al. Nucl. Phys., 1992, **A548**: 71

## Observation of $\pi h_{11/2} \otimes \nu i_{13/2}$ Band in Doubly-Odd $^{170}\text{Re}$ and Its Systematic Analysis\*

WANG Hua-Lei<sup>1,2;1)</sup> ZHANG Yu-Hu<sup>1,2</sup> ZHOU Xiao-Hong<sup>1</sup> GUO Ying-Xiang<sup>1</sup> LEI Xiang-Guo<sup>1</sup>  
LIU Min-Liang<sup>1</sup> LUO Peng<sup>1</sup> XIE Cheng-Ying<sup>1</sup> SONG Li-Tao<sup>1</sup> YU Hai-Ping<sup>1</sup> ZHENG Yong<sup>1</sup>  
GUO Wen-Tao<sup>1</sup> LIU Zhong<sup>1</sup> ZHU Li-Hua<sup>3</sup> WEN Shu-Xian<sup>3</sup> WU Xiao-Guang<sup>3</sup>

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

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

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

**Abstract** High-spin states in doubly odd  $^{170}\text{Re}$  have been populated and investigated using  $^{142}\text{Nd}(32\text{S}, 1\text{p}3\text{n}\gamma)$   $^{170}\text{Re}$  reaction at 166MeV bombarding energy. One rotational band in  $^{170}\text{Re}$  has been identified for the first time in the present study. The band has been assigned to be built on the  $\pi h_{11/2} \otimes \nu i_{13/2}$  configuration according to their quasiparticle alignment, signature splitting, level spacing systematics, as well as the existing knowledge in neighboring nuclei. The result extends the high-spin studies of  $A=170$  odd-odd nuclei to the currently lightest rhenium isotope.

**Key words** in-beam  $\gamma$ -spectroscopy, deformed odd-odd nucleus, signature inversion

\* Supported by NSFC(10375077, 10221003), Major State Basic Research Development Program (G2000077400) and The Chinese Academy of Sciences

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