

文章编号: 1007-4627(2004)04-0320-04

双奇核 ^{172}Re 高自旋态实验研究*

张玉虎¹, 王华磊¹, 周小红¹, 柳敏良¹, M. Oshima², Y. Toh², M. Koizimi²,
A. Osa², A. Kimura², Y. Hatsukawa², T. Morikawa³, M. Nakamura³,
M. Sugawara⁴, H. Kusakari⁵, T. Komatsubara⁶, K. Furuno⁶

(1 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000;

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

3 Department of Physics, Kyushu University, Fukuoka 812-81, Japan;

4 Chiba Institute of Technology, Narashino, Chiba 275-0023, Japan;

5 Chiba University, Inage-ku, Chiba 263-8512, Japan;

6 Institute of Physics and Tandem Accelerator Center, University of Tsukuba,
Ibaraki 305-0006, Japan)

摘要: 利用 $^{149}\text{Sm}(^{27}\text{Al}, 4n\gamma)^{172}\text{Re}$ 反应布居了形变双奇核 ^{172}Re 的高自旋态, 用 12 套带有 BGO 反康普顿抑制的高纯锗探测器阵列进行了在束 γ 实验测量, 首次建立了 ^{172}Re 由 3 个转动带构成的高自旋态能级纲图. 研究和讨论了 3 个转动带的结构特征, 基于已有的高自旋态核结构知识并通过系统学比较和分析指出它们的准粒子组态分别为 $\pi h_{11/2} \otimes \nu i_{13/2}$, $\pi h_{9/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 和 $\pi 1/2^- [541] \otimes \nu 1/2^- [521]$. 发现前两个转动带在自旋小于 18 时其转动能级呈现反常的旋称劈裂.

关键词: 在束 γ 谱学; 双奇核 ^{172}Re ; 转动带; 旋称反转

中图分类号: O571.21 **文献标识码:** A

在原子核高自旋态核结构研究中, 针对形变双奇核的实验研究工作进展相对要慢一些. 例如对于 W 和 Re 同位素, 高自旋态核结构研究已分别作到了 $^{164}\text{W}^{[1]}$ 和 $^{169}\text{Re}^{[2]}$, 而对 Re 同位素双奇核的在束 γ 研究最近才进行到 $^{174}\text{Re}^{[3]}$. 双奇核转动带的能级结构特征取决于其价核子所处的 Nilsson 轨道. Kreiner 等^[4] 曾对价质子和价中子的耦合及相应转动带的特征进行了研究和分类, 这一工作有助于辨认实验观测到的 2 准粒子转动带的态. 在质量数 $A \approx 170$ 的缺中子核区, 质子费米面靠近 $9/2^- [514]$ ($h_{11/2}$), $1/2^- [541]$ ($h_{9/2}$) 和 $5/2^+ [402]$ ($d_{5/2}$), 中子质子费米处于 $i_{13/2}$ 子壳的中下部, 用重离子熔合蒸发反应布局最强也最容易观测到的是基于高 j 轨道的转动带: $\pi h_{11/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 和 $\pi h_{9/2} \otimes \nu i_{13/2}$, 这里 π 和 ν 分别表示质子和中子. 实际上, 在此核区已经系统地观测到基于这两个组态下的转动带, 并且发现它

们都有一个独特的能级结构特征: 两个自旋值相差 $2\hbar$ ($\Delta I=2$) 的转动能级系列在第一回弯之前的低自旋区发生旋称反转^[5, 6]. 这一反常现象吸引了众多实验和理论核物理学家对这一问题进行深入研究 (见文献[5]及文中的参考文献). 最近, 我们对 $A=170$ 核区的一系列双奇核进行了实验研究^[7]. 作为这一研究课题的最新进展, 本文将报道对 ^{172}Re 的研究结果. 到目前为止, 人们仅通过 ^{172}Os 的 β^+/EC 衰变研究, 识别出了一些 ^{172}Re 核的低自旋能级^[8], 而高自旋态核谱学信息尚属空白.

利用日本原子力研究所串列静电加速器提供的 ^{27}Al 束流轰击 ^{149}Sm 同位素靶, 产生处于高自旋态的 ^{172}Re 核. 靶的质量厚度约为 2.1 mg/cm^2 , 丰度为 98%, 并衬有约 5.5 mg/cm^2 的 Pb 以阻止反应产物从同位素靶中反冲出来, 造成在束 γ 射线的多普勒位移. 由 12 个带有 BGO 反康普顿抑制的高纯

* 收稿日期: 2004 - 08 - 16

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10025525, 10375077, 10221003); 国家重大基础研究发展规划资助项目(G2000077400); 中国科学院基金资助项目

作者简介: 张玉虎(1962-), 男(汉族), 河北高邑人, 研究员, 博士, 从事实验核物理研究; E-mail: yhzhang@ns.lzb.ac.cn

锆探测器阵列进行了在束 γ 测量. 用¹⁵²Eu, ¹³³Ba 和⁶⁰Co 标准放射源对高纯锆探测器做了能量和效率刻度. 对⁶⁰Co 源 1 332 keV 的 γ 谱线, 探测器的能量分辨在 2.0—2.5 keV 之间. 探测器放置在与束流成 32°(148°), 58°(122°)和 90°的角度上, 以便从 γ - γ 符合数据中提取 γ 射线的方向角关联或各项异性系数. 由于在本工作之前, 还没有关于¹⁷²Re 核高自旋态的实验研究报告, 我们在束流能量为 130, 135, 140 和 150 MeV 的条件下进行了 γ 射线激发函数测量. 由于双奇核的在束 γ 射线非常多而且复杂, 特别是还有许多其它反应道产生的在束 γ 射线, 在单谱中很难发现或识别来自于目标核¹⁷²Re 的在束 γ 射线. 因此激发函数测量是在符合模式下进行的, 并在实验中采用了改进的数据获取系统, 此数据获取系统在收集记录实验数据的同时还可以在线产生一个 γ - γ 符合矩阵. 通过对此矩阵的现场分析, 特别是对特征 X 射线开窗谱的分析, 极大地增强了对在束 γ 射线的现场鉴别能力. 在每一个束流能量下, 均积累约 10 个百万左右的数据统计量用于在线数据分析. 最后选定在 130 MeV 的束流能量下对¹⁷²Re 进行 γ - γ 符合测量. 本实验中 γ 射线的沾污主要来自于¹⁷¹, ¹⁷³Re (5n 和 3n 反应道)^[9], ¹⁷¹, ¹⁷²W (p4n 和 p3n 反应道)^[10] 和¹⁶⁹Ta (α 3n 反应道)^[11] 等核素的退激发. 这些反应产物的高自旋态已经做了较充分的研究, 可以作为鉴别¹⁷²Re 核新转动带的参考. 以诸事件的方式通过计算机在磁带上记录了大约 2.5×10^8 个 γ - γ 符合事件. 在离线数据处理时, 对每个高纯锆探测器做了能量刻度, 建立了大小为 4096×4096 对称化和非对称化的 γ - γ 符合矩阵. 对称化矩阵用于分析 γ 射线的符合关系和带内电磁跃迁性质, 非对称化矩阵用于分析 γ 射线的跃迁多级性.

通过对 γ 射线符合关系的仔细分析, 图 1 给出了本工作建立的¹⁷²Re 核转动带的能级纲图. 图中箭头的粗细表示相应跃迁 γ 射线的强度.

带 1 很可能是基于 $\pi 9/2^- [514](h_{11/2}) \otimes \nu 5/2^+ [633](i_{13/2})$ 组态下的一个转动带, 宇称为负. 用重离子熔合蒸发反应, 邻近奇 A 核中基于 $\pi h_{11/2}$ 和 $\nu i_{13/2}$ 组态以及双奇核中基于 $\pi h_{11/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 组态下的转动带均得到较强的布居. 所以在¹⁷²Re 核中发现这个转动带是与系统性实验观测相一致的. 认定带 1 的准粒子组态后, 依据能级间隔的系统性^[5], 给

出如图 1 所标示的能级自旋值.

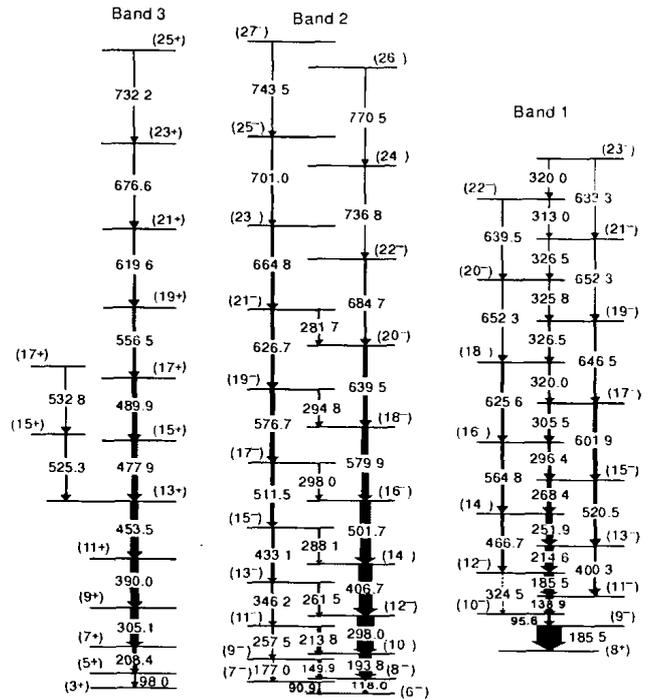


图 1 本工作首次建立的¹⁷²Re 转动带的能级纲图

带 2 是一个典型的半退耦带结构^[4], 其准粒子组态为 $\pi h_{9/2} \otimes \nu i_{13/2}$. 准质子主要占据 $1/2^- [541](h_{9/2})$ 轨道, 具有很强的退耦效应. 准中子处在 $i_{13/2}$ 子壳的下部 (主要成分为 $i_{13/2}-5/2^+ [652]$), 由于科里奥利力的作用, 能级具有较大的奇偶摆动 (或称为旋称劈裂). 处于这两个轨道上的准粒子构成的二准粒子带, 也呈现出科氏力扭曲带的特征. 反应在能级间隔上, 则表现为 $\Delta I=1$ 带内 γ 跃迁能量呈不规则变化. 在此地区从 Tm 到 Au 的双奇核中, 已发现了许多类似的半退耦带^[6], 它们与¹⁷²Re 的带 2 极为相似. 所以, 有理由相信带 2 是基于 $\pi h_{9/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 组态上的半退耦带, 宇称为负. 基于相同组态能级间隔的系统性^[5], 我们建议如图 1 所标示的能级自旋.

带 3 与人们熟悉的偶偶核的基态带结构类似, 它由一系列 $\Delta I=2$ 的能级构成. 按照 Kreiner 等^[4] 对双奇核转动带的分类方法, 带 3 可以归类为双退耦带. 在双奇核中出现双退耦带的条件是两个价核子均占居 $\Omega=1/2$ 的 Nilsson 轨道. 对于 $Z=75, N=97$ 的双奇核¹⁷²Re, 假定它的四极形变在 $\beta_2 = 0.2-0.25$ 之间, 靠近费米面且满足上述条件的 Nilsson 轨道只有 $\pi 1/2^- [541](h_{9/2})$ 和 $\nu 1/2^- [521](p_{3/2})$. 因此我们认为带 3 是基于 $\pi 1/2^- [541] \otimes$

$\nu 1/2^- [521]$ 组态上的一个双退耦带. 在相邻 $^{174-178}\text{Re}^{[3, 12, 13]}$ 和 $^{178-186}\text{Ir}^{[14]}$ 中均观测到基于这一组态下的双退耦带. 同样根据能级间隔的系统学规律, 给出如图 1 所标示的能级自旋值.

基于上述对转动带准粒子组态、自旋、宇称的指定, 下面对带 1 和带 2 的旋称劈裂特征作进一步的分析讨论. 按照通常的做法, 我们用参量 $S(I) = E(I) - E(I-1) - [E(I+1) - E(I) + E(I-1) - E(I-2)]/2$ 随自旋值 I 的变化关系来展示转动带的旋称劈裂. 这个参量实际上近似等于两列 $\Delta I=2$ 转动能级在自旋值为 I 时激发能差值(即旋称劈裂值)的两倍. 图 2 给出了 ^{172}Re 中带 1 和带 2 旋称劈裂 $S(I)$ 随自旋值 I 的变化关系. 图中实心符号对应于具有优先旋称量子数的能级, 空心符号对应于具有非优先旋称量子数的能级. 在这种表示方法中, 正常的旋称劈裂应该是实心符号连线(优先带)在空心符号连线(非优先带)的下面. 从图 2 可以清楚地看到: (1)带 1 的旋称劈裂幅度很小, 带 2 的旋称劈裂是带 1 的 10 倍以上; (2)带 1 和带 2 在较低自旋区能级的旋称劈裂是反转的. 只有在较高自旋能级, 转动能级的旋称劈裂才由反常恢复到正常.

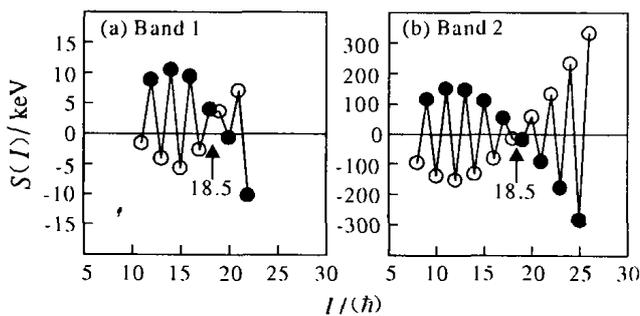


图 2 ^{172}Re 核中带 1 和带 2 转动能级的旋称劈裂 $S(I)$ 随自旋值的变化关系

上述第一点是由于在两个带中, 决定旋称劈裂大小的准粒子轨道不同而引起的. 在推转壳模型的理论框架中, 一个 2 准粒子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. 对于带 1, 这一准粒子轨道为 $\pi 9/2^- [514] (h_{11/2})$; 对于带 2, 相对于质子侵入轨道 $\pi 1/2^- [541] (h_{9/2})$, 旋称劈裂较小的轨道则为 $\nu 5/2^+ [652] (i_{13/2})$. 的确, 在相邻奇 A 核中, 基于 $\pi 9/2^- [541] (h_{11/2})$ 和 $\nu 5/2^+ [652] (i_{13/2})$ 组态的单准粒子带的旋称劈裂分别与 $\pi h_{11/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 和 $\pi h_{9/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 带相当, 并且二者的劈裂幅度相差也在一个数量级以上.

上面提到的第二点是著名的低自旋旋称反转现象^[15]. 早在 1981 年这一现象最先在 ^{152}Eu 的晕带(组态为 $\pi h_{11/2} \otimes \nu i_{13/2}$)中被发现^[16], 继而又在从 Eu 到 Ir 众多双奇核的 $\pi h_{11/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 带中发现了旋称反转现象. 利用不同的理论模型, 许多作者对 $\pi h_{11/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 带中出现的旋称反转现象进行了理论研究, 但就其物理机制而言, 还没有形成一个共识. 有兴趣的读者可参考文献^[17, 18]及文中的参考文献.

Bark 等^[19]于 1997 年首次在双奇核 $^{162, 164}\text{Tm}$ 和 ^{174}Ta 中发现基于 $\pi h_{9/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 组态上的所谓半退耦带在低自旋也出现旋称反转现象. 目前看来在从 Tm 到 Au 众多双奇核中观测到的半退耦带($\pi h_{9/2} \otimes \nu i_{13/2}$)其能级的旋称劈裂在低自旋区似乎都是反转的^[6]. 本工作为这一现象存在的普遍性提供了又一实验证据. 需要强调说明的是, 在 $A=160-180$ 核区, 实验上观测到的许多基于 $\pi h_{9/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 组态下的半退耦带均未能建立转动带与基态或低激发已知 I^* 值能态之间的联系, 不能通过核谱学方法直接测量能级的 I^* 值. 因此在较高自旋态观测到两个 $\Delta I=2$ 转动能级系列的交叉为低自旋区出现旋称反转现象提供了有利的实验证据. 因为旋称劈裂从本质上讲是由于科里奥利力导致的波函数混杂引起的. 转动频率越高, 波函数中混入的低 Ω 成分越多, 如果原子核的内禀结构不发生变化, 旋称劈裂在高自旋区应该是正常的, 正如 ^{172}Re 的带 1 和带 2 的情况一样, 当自旋大于 18.5 时旋称劈裂才恢复到正常. 另一方面, 确认低自旋出现旋称反转反过来又对转动带能级自旋的指认有一定的指导意义. 例如, 为了保持低自旋出现旋称反转, 带 1 和带 2 能级的自旋值只能增减一个偶数, 而自旋值改变 2 会使能级间隔和运动学转动惯量的系统性发生较大的变化. 而一般均认为这两个量随原子核质子数或中子数的改变应该是光滑变化的^[5, 18]. 也正是基于这些考虑, 我们给出了如图 2 所示的转动带能级自旋值.

本工作对双奇核 ^{172}Re 进行了高自旋态在束 γ 实验研究, 首次建立了 3 个转动带的能级纲图. 根据此核区带结构研究中所获得的系统学知识, 对转动带的准粒子组态、自旋和宇称进行了讨论和指定. 分析了两个转动带的旋称劈裂特征, 发现它们在低自旋区均出现旋称反转. 本工作将形变双奇核的高自旋态实验研究延伸到了迄今为止最缺中子的一个双奇 Re 同位素.

参 考 文 献:

- [1] Simpson J, Riley M A, Alderson A, *et al.* J Phys (London), 1991, **G17**: 511.
- [2] Zhou X H, Oshima M, Xu F R, *et al.* Eur Phys J, 2004, **A19**: 11.
- [3] Zhang Y H, Zhang S Q, Huang W X, *et al.* Eur Phys J, 2000, **A7**: 19.
- [4] Kreiner A J, Davidson J, Davidson M, *et al.* Phys Rev, 1987, **C36**: 2 309.
- [5] Liu Y, Ma Y J, Yang H T, *et al.* Phys Rev, 1995, **C52**: 2 514.
- [6] Zhang Y H, Hayakawa T, Oshima M, *et al.* Eur Phys J, 2000, **A8**: 439.
- [7] 张玉虎, 赵庆中, 张双全等. 高能物理与核物理, 2000, **24**(增刊): 21.
- [8] Hild T, Schmidt-Ott W D, Kunze V, *et al.* Phys Rev, 1995, **C51**: 1 736.
- [9] Bark R A, Dracoulis G D, Stuchbery A E, *et al.* Nucl Phys, 1989, **A501**: 157.
- [10] Espino J, Garrett J D, Hagemann G B, *et al.* Nucl Phys, 1994, **A567**: 377.
- [11] Li S G, Wen S, Yuan G J, *et al.* Nucl Phys, 1993, **A555**: 435.
- [12] Cardona M A, Kreiner A J, Hojman D, *et al.* Phys Rev, 1999, **C59**: 1 298.
- [13] Kreiner A J, Vanin V R, Beck F A, *et al.* Phys Rev, 1989, **C40**: R487.
- [14] Zhang Y H, Hayakawa T, Oshima M, *et al.* Chin Phys Lett, 2001, **18**: 27.
- [15] Bengtsson R, Frisk R H, May R F, *et al.* Nucl Phys, 1984, **A415**: 189.
- [16] Pinston J A, Bengtsson R, Monnard E, *et al.* Nucl Phys, 1981, **A361**: 464.
- [17] Xu F R, Satula W, Wyss R. Nucl Phys, 2000, **A669**: 119.
- [18] Zheng R R, Zhu S Q, Pu Y W. Phys Rev, 1997, **C56**: 175.
- [19] Bark R A, Espino J M, Reviol W, *et al.* Phys Lett, 1997, **B406**: 193.

Experimental Study of High-spin States in Odd-odd $^{172}\text{Re}^*$

ZHANG Yu-hu¹, WANG Hua-lei¹, ZHOU Xiao-hong¹, LIU Min-liang¹, M. Oshima², Y. Toh², M. Koizumi², A. Osa², A. Kimura², Y. Hatsukawa², T. Morikawa³, M. Nakamura³, M. Sugawara⁴, H. Kusakari⁵, T. Komatsubara⁶, K. Furuno⁶

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

2 *Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai, Ibaraki 319-1195, Japan;*

3 *Department of Physics, Kyushu University, Fukuoka 812-81, Japan;*

4 *Chiba Institute of Technology, Narashino, Chiba 275-0023, Japan;*

5 *Chiba University, Inage-ku, Chiba 263-8512, Japan;*

6 *Institute of Physics and Tandem Accelerator Center, University of Tsukuba, Ibaraki 305-0006, Japan)*

Abstract: High-spin states in the odd-odd ^{172}Re have been investigated via the $^{149}\text{Sm}(^{27}\text{Al}, 4n\gamma)^{172}\text{Re}$ reaction through excitation functions, X- γ and γ - γ coincidence measurements. A level scheme consisting of three rotational bands have been identified for the first time extending the high-spin studies of $A\approx 160$ odd-odd nuclei to the currently lightest rhenium isotope. The three bands have been assigned to be built on the $\pi h_{11/2} \otimes \nu i_{13/2}$, $\pi h_{9/2} \otimes \nu i_{13/2}$ and $\pi 1/2^- [541] \otimes \nu 1/2^- [521]$ configurations according to their rotational properties in quasiparticle alignments, signature splitting, in-band $B(M1)/B(E2)$ ratios, level spacing systematics, band crossing frequencies, as well as the existing knowledge in neighboring nuclei. Low-spin signature inversion has been confirmed in the first two bands due to observation of signature crossing at high-spin states.

Key words: in-beam γ -spectroscopy; deformed odd-odd ^{172}Re ; rotational band; signature inversion

* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(10025525, 10375077, 10221003); Major State Basic Research Development Program of China (G2000077400); Chinese Academy of Sciences