

A~110 核区手征双重带寻找

贺创业¹, 竺礼华^{1,2}, 吴晓光¹, 温书贤¹, 李广生¹, 王治民¹, 刘颖¹, 崔兴柱^{1,3},
张振龙^{1,3}, 孟锐^{1,3}, 李雪琴¹, 郑云¹, 马瑞刚¹, 孙慧斌², 杨春祥¹

(1. 中国原子能科学研究院核物理研究所, 北京 102413;

2. 深圳大学理学院, 广东深圳 518060; 3. 吉林大学物理系, 吉林长春 130023)

摘要:用重离子熔合蒸发反应布居 A~110 核区缺中子奇奇核^{106,108}Ag 的高自旋态, 分别在这两个核中找到了类似¹⁰⁴Rh 中基于 $\pi g_{9/2} \otimes \nu h_{11/2}$ 组态的手征双带结构。它们的能级能量、旋称及 $B(M1)/B(E2)$ 随角动量的变化关系符合手征带的特征。然而, 进一步分析发现, ¹⁰⁶Ag、¹⁰⁸Ag 双带之间的转动惯量及准粒子角动量顺排存在较大差别, 说明两者的晕带和伴带所基于的核芯形变与角动量耦合模式并不一致。

关键词:能级纲图; 手征性; 转动惯量; 旋称

中图分类号: O571.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2011)02-0129-05

Quest for Chiral Doublet Bands in A~110 Mass Region

HE Chuang-ye¹, ZHU Li-hua^{1,2}, WU Xiao-guang¹, WEN Shu-xian¹, LI Guang-sheng¹,
WANG Zhi-min¹, LIU Ying¹, CUI Xing-zhu^{1,3}, ZHANG Zhen-long^{1,3}, MENG Rui^{1,3},
LI Xue-qin¹, ZHENG Yun¹, MA Rui-gang¹, SUN Hui-bin², YANG Chun-xiang¹

(1. China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-10, Beijing 102413, China;

2. School of Science, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;

3. Department of Physics, Jilin University, Changchun 130023, China)

Abstract: High spin states of ^{106,108}Ag were studied by using fusion evaporation reaction on Beijing HI-13 Tandem Accelerator. The negative-parity bands were updated for both nuclei. Doublet bands similar to chiral bands in ¹⁰⁴Rh were indentified in ^{106,108}Ag respectively. But there is much difference of the moment of inertia and alignment between the yrast and yrare bands in both of them. It may result from the different deformations of the core and angular momentum coupling mode between valence particles and the inner-core for the yrast and yrare bands.

Key words: level scheme; chirality; moment of inertia; signature

手征转动是近几年来基于倾斜轴推转模型 理论^[1]预言原子核存在的一种新的转动模式,

收稿日期: 2010-05-13; 修回日期: 2010-11-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10927507, 10675171, 10105015, 10175070, 10375092, 10575133); 国家重点基础研究发展计划资助项目(2007CB815000)

作者简介: 贺创业(1978—), 男, 河北邯郸人, 副研究员, 博士, 粒子物理与原子核物理专业

对帮助人们认识原子核转动对称性及转动对称性自发破缺具有重要意义。实验开展手征双重带的寻找,将更好地推动原子核转动机制研究及相关理论模型的发展与完善。理论预言指出,在 $A\sim 110, 130, 190$ 的过渡区核^[1-2]均有可能存在手征转动。目前, $A\sim 130$ 核区的 $N=75, 73, 71$ 的同中子素链中已找到多例手征双重带^[3-4],但在 $A\sim 110$ 核区的实验报道相对较少。因此,本实验将目标锁定在 $A\sim 110$ 核区。

在 $A\sim 110$ 核区,处在不同高 j 轨道支壳中的价质子和价中子的形状驱动效应对原子核的形状与能级结构有很大的影响。其中,价中子位于 $1h_{11/2}$ 侵入轨道的底部,而价质子位于 $1g_{9/2}$ 轨道的上部。前者具有很强的长椭驱动效应,使原子核被拉长;后者具有扁椭的驱动效应,使原子核具有圆盘的质量分布。在这种情况下,原子核呈现一定的 γ 形变,使得集体核芯、价中子与价质子三者的角动量两两垂直耦合,这样就构成了原子核手征转动的基本条件。

2004年,Vaman等^[5]报道了 $A\sim 110$ 核区第1例手征双重带;随后,在¹⁰⁶Rh^[6]中也发现手征对称性结构。理论^[7]指出,不仅在Rh的同位素中存在手征性,在¹⁰⁴Rh周围的同位素奇奇核中也广泛存在手征对称性。本实验选定¹⁰⁴Rh和¹⁰⁶Rh的同中子素¹⁰⁶Ag和¹⁰⁸Ag为目标核。

1 实验方法与结果

实验是在中国原子能科学研究所的串列加速器核物理国家实验室完成的。通过重离子熔合蒸发反应¹⁰⁰Mo(¹¹B,5n)¹⁰⁶Ag和¹⁰⁰Mo(¹²C,1p3n)¹⁰⁸Ag布居了^{106,108}Ag的高自旋态。采用的¹⁰⁰Mo靶的质量厚度分别为2.5和1.1 mg/cm²,各带有11 mg/cm²的天然Pb衬和6.5 mg/cm²的Au衬。根据统计模型程序CASCADE^[8]计算,并结合激发函数的测量结果,选取¹¹B与¹²C的束流能量分别为60与65 MeV。用14台带BGO反康谱仪的HPGe探测器组成的探测阵列对反应产物的退激 γ 射线进行 γ - γ 符合测量,其中4台放置在与束流线成90°位置,4台放置于45°位置,4台放置于135°位置,其余2台分别放置于55°和125°位置。这些探测器对⁶⁰Co标准源1332.5 keV γ 射线的能量分辨率为1.9~2.2 keV,相对效率

为20%~40%。

在对实验数据离线处理时,对各探测器进行了增益匹配,将 γ - γ 符合数据反演生成对称化的 E_γ - E_γ 二维矩阵,此外还按照探测器相对束流方向夹角的不同,将实验数据反演成非对称化的DCO矩阵,用于确定 γ 跃迁的多极性,进而指定相关能级的自旋值。采用基于PC-Linux的RADWARE软件^[9]对上述二维矩阵进行开窗谱分析,根据 γ 射线间的级联关系、跃迁强度平衡原则及能量匹配关系,更新了已有的^{106,108}Ag负宇称带的能级纲图^[10-11]。在¹⁰⁶Ag中找到9条新的 γ 跃迁;而在¹⁰⁸Ag中,根据DCO比值及临近核系统学分析,对带2的能级自旋进行重新指定。新建的能级纲图示于图1。

2 讨论

2.1 ^{106,108}Ag带1与带2的结构分析

图1中新建的^{106,108}Ag负宇称带能级结构与在¹⁰⁴Rh中已找到的手征双重带极为相似,因此,^{106,108}Ag的带1和带2也很可能为一对手征双重带。文献^[5]指出,手征双重带具有以下3个特征:1)两带具有相同宇称,且相同自旋的能级能量非常接近;2)不发生旋称劈裂或很小,且旋称随自旋平缓变化;3) $B(M1)/B(E2)$ 随自旋呈奇偶摇摆效应,且晕带与伴带具有相同的相位。下面根据这3个特征分别对^{106,108}Ag进行分析。

1) ¹⁰⁶Ag手征性分析

图2示出¹⁰⁶Ag手征性分析。图2a为¹⁰⁶Ag带1和带2的激发能与自旋的关系,与文献^[5]中的¹⁰⁴Rh结果相比,它们具有相同的变化趋势。在 $10\hbar$,带1与带2的能级能量具有较大的劈裂,随着自旋升高,到 $14\hbar$ 时,它们的能级能量劈裂非常小,仅为39 keV,且在更高的自旋态一直保持了较小的劈裂。出现此现象的原因可能是由于具有三轴形变的原子核在转动频率较低时,核芯集体角动量很小,总角动量基本位于价质子和价中子角动量所确定的平面内,这种平面转动导致双带之间存在较大的能级劈裂。随着自旋增加,核芯集体角动量也随之增大,总角动量逐渐移出价核子角动量所确定的平面,使得平面转动成分越来越少,因此,这种非平面转动就形成了原子核出现手征对称性的

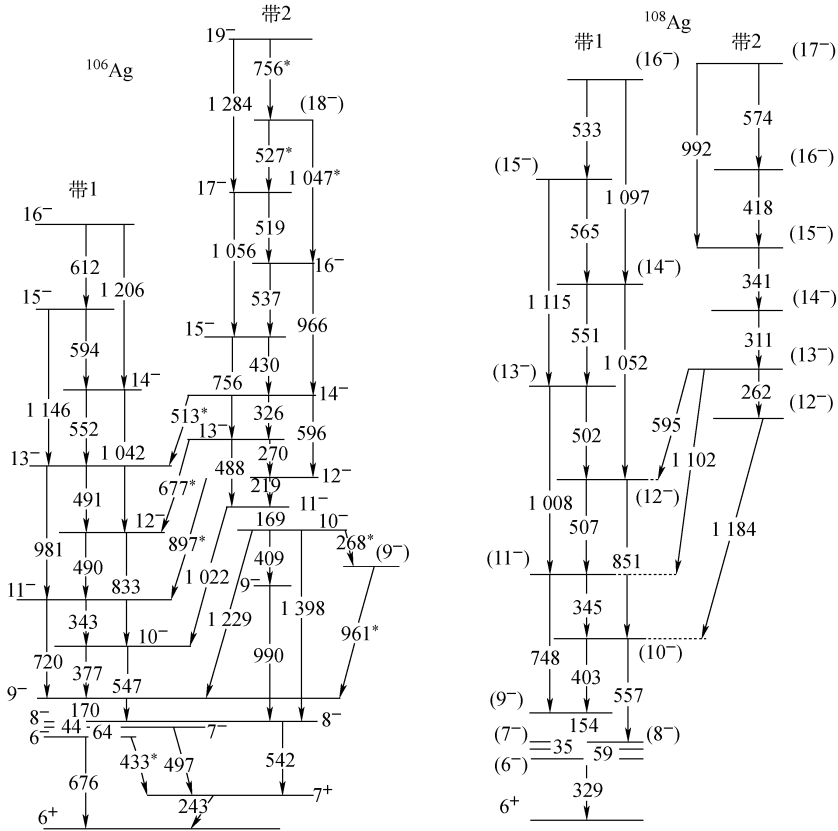


图 1 ^{106}Ag 、 ^{108}Ag 的部分能级纲图

Fig. 1 Partial level scheme of ^{106}Ag and ^{108}Ag

标 * 者为本工作新发现的 γ 跃迁

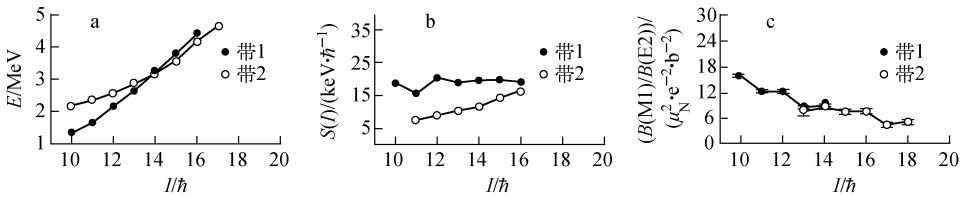


图 2 ^{106}Ag 手征性分析

Fig. 2 Chiral fingerprints for ^{106}Ag

a——激发能和自旋的关系; b——旋称劈裂 $S(I)$ 和自旋的关系; c—— $B(M1)/B(E2)$ 和自旋的关系

条件,致使带 1 和带 2 在高自旋态时一直保持较为接近的能级能量。

图 2b 示出 ^{106}Ag 带 1 和带 2 的旋称劈裂 $S(I) = [E(I) - E(I)]/2I$ 与自旋 I 的函数关系。可看出, $S(I)$ 随着自旋增加呈现平滑变化。在 $12h$ 以上,带 1 与带 2 不发生旋称劈裂或很小。这是由于处在高 j 轨道的价中子与价质子的角动量都与集体转动轴近似相互垂直,所以价核子所处的相应 Ω 轨道不会受到集体转动的影响,即不发生能量劈裂。这就像轴对称

转子的强耦合带一样,价核子的角动量垂直于集体转动轴而无旋称劈裂。

图 2c 为本工作提取的 ^{106}Ag 带 1 和带 2 的 $B(M1)/B(E2)$, 它与 ^{104}Rh 手征双重带的 $B(M1)/B(E2)$ 一样,两者具有相同的相位,这可能是由于三轴形变核非平面的手征转动结构所致^[12]。需要指出的是,在 $A \sim 110$ 核区,手征二重带 $B(M1)/B(E2)$ 的相位与 $A \sim 130$ 核区相反,这可能归结于价中子与价质子粒子态与空穴态的变化。 $A \sim 130$ 核区,价中子为处于 $1h_{11/2}$ 轨

道的空穴态,价质子为处在 $1h_{11/2}$ 轨道的粒子态;而 $A \sim 100$ 核区,价中子为处于 $1h_{11/2}$ 轨道的粒子态,价质子为处在 $1g_{9/2}$ 轨道的空穴态,正好与 $A \sim 130$ 核区相反,这就可能导致 $A \sim 110$ 核区 $B(M1)/B(E2)$ 的相位与 $A \sim 130$ 核区相反。

综上所述, ^{106}Ag 带 1 与带 2 具有手征双重带的特征。

2) ^{108}Ag 手征性分析

在新建的 ^{108}Ag 能级纲图中,由于伴带 2 在本反应中布居较弱,未能给出 $B(M1)/B(E2)$ 。但其晕带 1 与伴带 2 能级能量以及旋称分别随自旋的变化关系与 ^{106}Ag 相同(图 3),即晕带与伴带的能级能量在 $14\hbar$ 附近接近兼并,随后伴

带的能级变为晕态;旋称随自旋也呈现平缓变化。 ^{108}Ag 负宇称晕带与其伴带的这些特征也与手征对称结构的特征相一致。

2.2 $^{106,108}\text{Ag}$ 转动惯量与角动量顺排分析

如果两条转动带被指定为手征双重带,那么这两条带就应基于相似的核芯形状和角动量耦合模式,即两带应具有相似的转动惯量和准粒子顺排角动量 i_x ^[13]。转动惯量从一定程度上可预示原子核的形变,而准粒子顺排角动量的大小可很好地反映准粒子顺排角动量与集体转动角动量的耦合模式。图 4 示出 $^{106,108}\text{Ag}$ 晕带和伴带的转动惯量和准粒子顺排角动量。

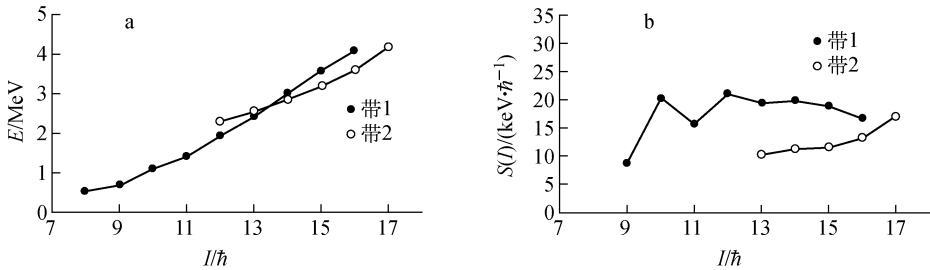


图 3 ^{108}Ag 手征性分析

Fig. 3 Chiral fingerprints for ^{108}Ag

a——激发能和自旋的关系;b——旋称劈裂和自旋的关系

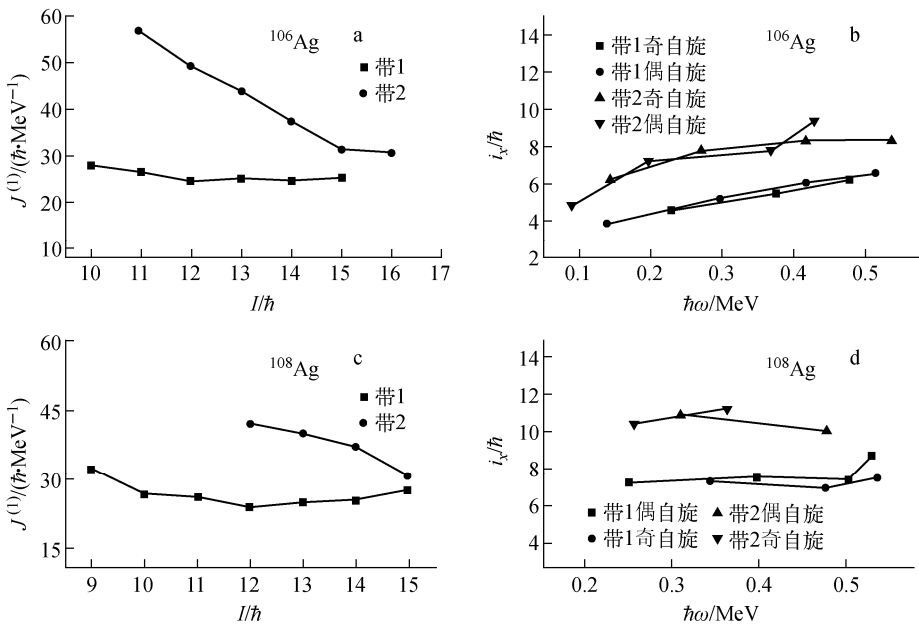


图 4 ^{106}Ag 、 ^{108}Ag 带 1 与带 2 的转动惯量(a,c)和角动量顺排(b,d)

Fig. 4 Momentum of inertia (a, c) and quasiparticle alignments (b, d) for band 1 and 2 in ^{106}Ag and ^{108}Ag

从图 4 可看出, $^{106,108}\text{Ag}$ 两带之间的转动惯量和准粒子顺排角动量均存在较大差别, 暗示两带分别基于不同的核芯形变和角动量耦合模式。在这两个核中, 伴带的转动惯量和准粒子顺排角动量都相对较高, 说明伴带的形变较大, 准粒子角动量更趋向于顺排在集体角动量方向。在本实验的同时, Joshi 等^[14] 也对 ^{106}Ag 进行了研究, 并将其晕带和伴带推高到更高自旋, 发现只有伴带在更高自旋处存在旋称劈裂, 更好地说明了伴带为不同于晕带的三轴转子而更接近于长椭的平面转动行为所致。据此, $^{106,108}\text{Ag}$ 晕带与伴带不能被称为典型的手征双带。此外, 在 Joshi 等^[14] 的工作中, 除了在本实验中找到的两带之间的 M1 连接跃迁, 还发现了很多的 E2 跃迁, 说明两带还是基于相同的组态^[7]。

3 结论

利用重离子熔合蒸发反应, 在北京 HI-13 加速器上对 A~110 核区缺中子奇奇核 $^{106,108}\text{Ag}$ 进行研究, 找到了 ^{106}Ag 、 ^{108}Ag 核中类似 ^{104}Rh 中基于 $\pi g_{9/2} \otimes \nu h_{11/2}$ 组态的手征双带结构。然而两者的晕带和伴带所基于的核芯形变与角动量耦合方式并不相同, 说明它们的负宇称晕带与伴带并非典型的手征结构。对于两核负宇称带的转动机制, 还需进一步研究。

感谢中国原子能科学研究院串列加速器运行组的工作人员为本实验提供稳定的束流, 同时感谢制靶组的许国基研究员和樊启文工程师为本工作提供实验用靶。

参考文献:

[1] FRAUENDORF S, MENG J. Tilted rotation of triaxial nuclei[J]. Nuclear Physics A, 1997, 617(2): 131-147.

[2] FRAUENDORF S. Spontaneous symmetry-breaking in rotating nuclei[J]. Review of Modern Physics, 2001, 73(2): 463-514.

[3] STAROSTA K, KOIKE T, CHIARA C J, et al. Chiral doublet structures in odd-odd $N=75$ isotopes: Chiral vibrations[J]. Physics Review

Letter, 2001, 86(6): 971-974.

- [4] HECHT A A, BEAUSANG W C, AMRO H, et al. Evidence for chiral symmetry breaking in ^{140}Eu [J]. Physics Review C, 2003, 68(5): 054310.
- [5] VAMAN C, FOSSAN D B, KOIKE T, et al. Chiral degeneracy in triaxial ^{104}Rh [J]. Physics Review Letter, 2004, 92(3): 032501.
- [6] JOSHI P, JENKINS D G, RADDON P M, et al. Stability of chiral geometry in the odd-odd Rh isotopes: Spectroscopy of ^{106}Rh [J]. Physics Letter B, 2004, 595(1-4): 135-142.
- [7] MENG J, PENG J, ZHANG S Q, et al. Possible existence of multiple chiral doublets in ^{106}Rh [J]. Physics Review C, 2006, 73(3): 037303.
- [8] PHULHOFER F. On the interpretation of evaporation residue mass distributions in heavy-ion induced fusion reactions[J]. Nuclear Physics A, 1977, 280(1): 267-284.
- [9] RADFORD D C. ESCL8R and LEVIT8R: Software for interactive graphical analysis of HPGe coincidence data sets[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 1995, 361(1-2): 297-305.
- [10] JERRESTAM D, KLAMRA W, GIAON J, et al. Collective bands in ^{106}Ag and ^{107}Ag [J]. Nuclear Physics A, 1994, 577(3-4): 786-812.
- [11] ESPINOZA-QUINONES F R, CYBULSKA E W, EMEDIATO G R, et al. Band structures in ^{108}Ag [J]. Physics Review C, 1995, 52(1): 104-112.
- [12] KOIKE T, STAROSTA K, HAMAMOTO I. Chiral bands, dynamical spontaneous symmetry breaking, and the selection rule for electromagnetic transitions in the chiral geometry[J]. Physics Review Letter, 2004, 93(17): 172502.
- [13] PETRACHE C M, HAGEMANN B G, HAMAMOTO I, et al. Risk of misinterpretation of nearly degenerate pair bands as chiral partners in nuclei[J]. Physics Review Letter, 2006, 96(11): 112502.
- [14] JOSHI P, CARPENTER M P, FOSSAN D B, et al. Effect of γ softness on the stability of chiral geometry: Spectroscopy of ^{106}Ag [J]. Physics Review Letter, 2007, 98(10): 102501.