文章编号：1007－4627(2010)01－0032－06

双奇核 ^{172}Re 的高自旋态*

张 昕[1,2]，张玉虎[1,#]，周小红[1]，郭文涛[1]，郭 松[1]，郭应祥，M. Oshima[3]，Y. Toh[3]，M. Koizimi[3]，A. Osa[3]，A. Kimura[3]，Y. Hatsukawa[3]，T. Morikawa[4]，M. Nakamura[4]，M. Sugawara[5]，H. Kusakari[6]，T. Komatsubara[7]，K. Furuno[7]

(1 中国科学院近代物理研究所，甘肃 兰州 730000；
2 中国科学院研究生院，北京 100049；
3 Japan Atomic Energy Agency，Tokai，Ibaraki 319-1195，Japan；
4 Department of Physics，Kyushu University，Fukuoka 812-81，Japan；
5 Chiba Institute of Technology，Narashino，Chiba 275-0023，Japan；
6 Chiba University，Inage-ku，Chiba 263-8512，Japan；
7 Institute of Physics and Tandem Accelerator Center，University of Tsukuba，Ibaraki 305-0006，Japan)

摘 要：对^{149}Sm(^{27}Al，4n)^{172}Re 反应产生的^{172}Re 在束 γ 的实验数据进行了重新分析，新发现了可归属于^{172}Re 的 3 个转动带，由此建立了由 6 个转动带构成的^{172}Re 高自旋态能级纲图。依据相邻核的带结构知识和推转壳模型分析方法，对新发现的 3 个转动带的准粒子组态进行了指定，讨论了它们的转动特征。

关 键 词：转动带；二准粒子组态；准粒子顺排；双奇核^{172}Re

中图分类号：O572.33 **文献标识码**：A

1 引言

人们在 30 多年来对双奇核的研究中建立了许多有趣的现象。特别是 Kreiner 等人对双奇核转动带能级结构分类方法[1]的建立大大加深了人们对原子核内部两类运动[2]之间关系的认识。尽管目前的技术水平和探测手段与过去相比已有长足的进步，然而双奇核的谱学数据与偶偶核和奇 A 核相比仍然很缺乏。在本研究工作之前，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[3]，而高自旋态核谱学信息尚属空白。本课题组曾利用^{149}Sm(^{27}Al，4nγ)^{172}Re 反应布居研究了形变双奇核^{172}Re 的高自旋态，首次建立了^{172}Re 由 3 个转动带构成的高自旋态能级纲图[4]。最近我们对这一实验数据重新做了详细的数据分析，新发现了 3 个转动带。本文将报道这一新的实验结果，并结合相邻核的带结构知识和推转壳模型分析方法，对新发现的 3 个转动带的准粒子组态进行分析和指认，对其结构性质进行一些讨论。

2 实验和结果

实验是在日本原子力研究所串列静电加速器实验室完成的。用加速器提供的^{27}Al 束流轰击^{149}Sm 同位素靶，通过重离子熔合蒸发反应产生处于高自旋态的^{172}Re 核。为了鉴别来自于^{172}Re 的在束 γ 线，测量了 130，135，140 和 150 MeV 4 个束流能量下的激发函数。γ-γ 符合测量是在 130 MeV 束流能量下进行的，共记录了大约 2.5×10^8 个 γ-γ 符合事件。详细的实验和数据分析方法参见文献[4]，在此不再赘述。

由于双奇核的在束 γ 谱学实验数据非常复杂，

* **收稿日期**：2009－04－24；**修改日期**：2009－11－24

* **基金项目**：国家重点基础研究发展规划(2007CB815005)；国家自然科学基金资助项目(10825522，10735010)；中国科学院资助项目

作者简介：张昕(1981—)，男(汉族)，山西太原人，硕士研究生，从事原子核结构研究；E-mail：zhangxin@impcas.ac.cn

通讯联系人：张玉虎，E-mail：yhzhang@impcas.ac.cn

数据中有许多来自于^{171,173}Re(5n 和 3n 反应道)、^{171,172}W(p4n 和 p3n 反应道)、^{169}Ta(α3n 反应道)以及转移反应产物和不稳定核衰变产生的 γ 谱线，这些 γ 谱线对我们分析^{172}Re 的在束 γ 谱构成了一种“沾污”。通过仔细分析，排除上述“沾污”γ 谱线的误导，鉴别出了一条很弱但比较干净的 γ 谱线(245.5 keV)。对其激发函数的分析(见文献 4 中的图1)表明 245.5 keV 的 γ 谱线可以归属于^{172}Re。

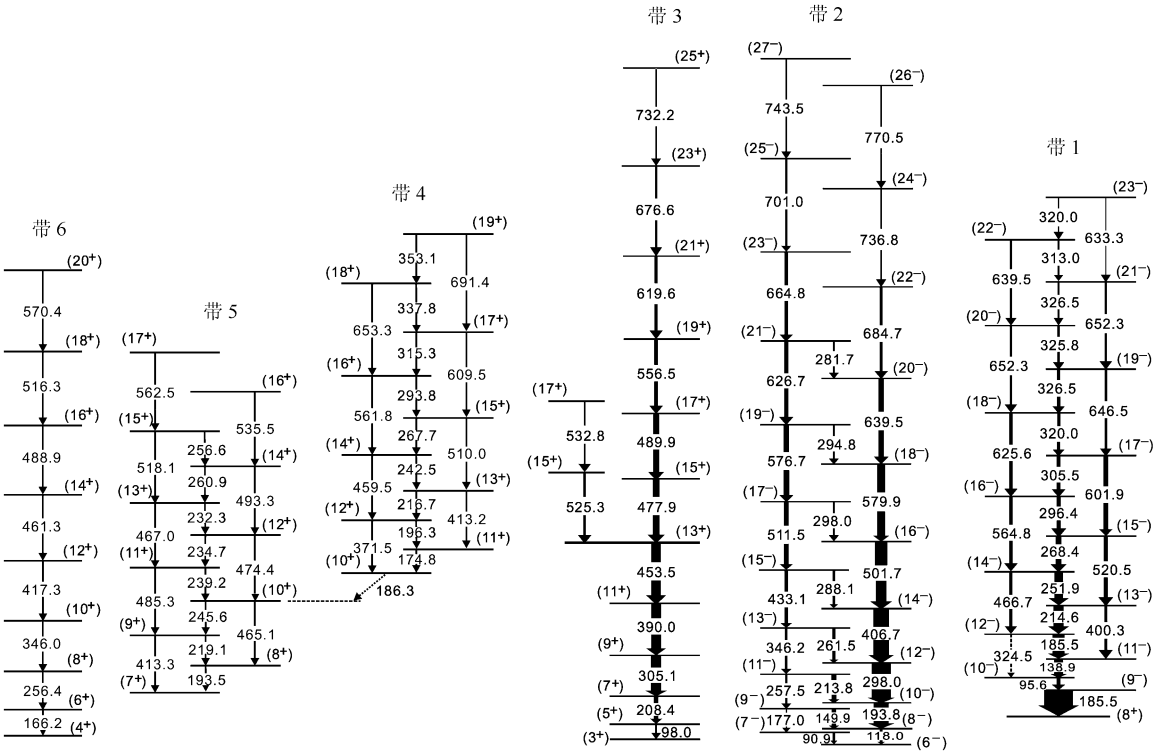

图 1　本工作建立的^{172}Re 的能级纲图

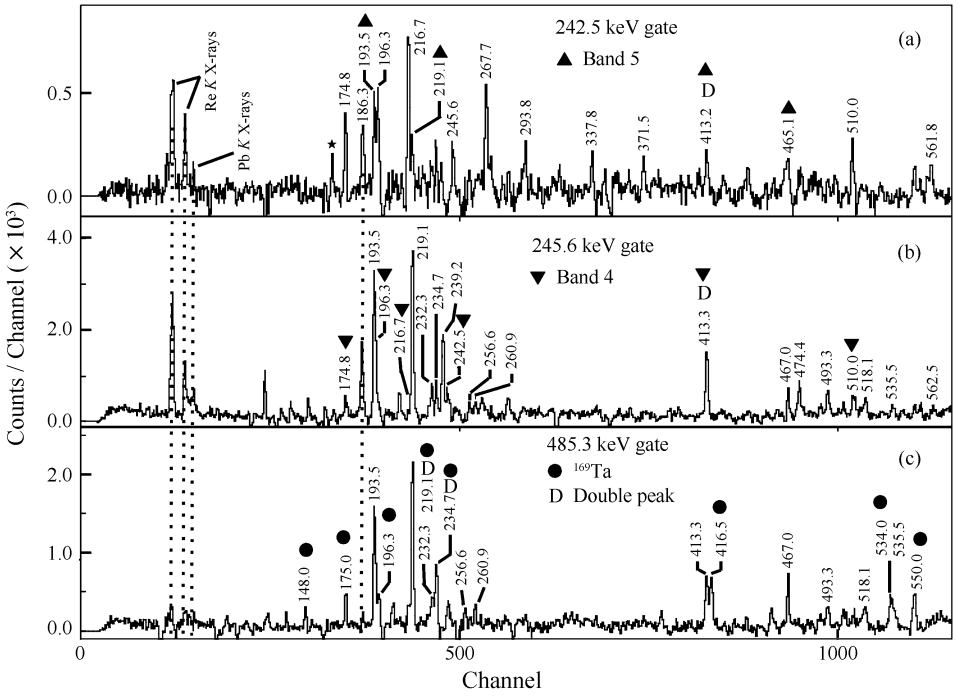

图 2　带 4 和带 5 典型的开窗符合谱

根据 γ-γ 符合关系，我们构建了^{172}Re 新的能级纲图，结果展示在图 1 中(能级的自旋-宇称值将在下面讨论)。典型的 γ 射线开窗符合谱展示在图 2 和图 3 中。带 4 与带 5 之间的连接线(186.3 keV)位置的指定是基于以下几点考虑：(1)在 242.5 和 245.5 keV 开窗谱中均看到了 186.3 keV 射线，而在 485.3 keV 开窗谱图 2(c)中却没有看到；(2)比较图 2(b)和图 2(c)中 413.3 和 219.1 keV γ 射线的强度之比(即 $I_{\gamma413}/I_{\gamma219}$)，发现在 485.3 keV 开窗谱中这个比值要小。这说明 413.3 keV 在 245.5 keV 开窗谱中是双线；(3)在 245.5 keV 开窗谱中可以看到 174.8，196.3，216.7 和 242.5 keV 等带 4 中的 γ 射线；(4)485.3 keV 开窗谱中的 174.8 keV 等 γ 线是由于^{169}Ta 的沾污。

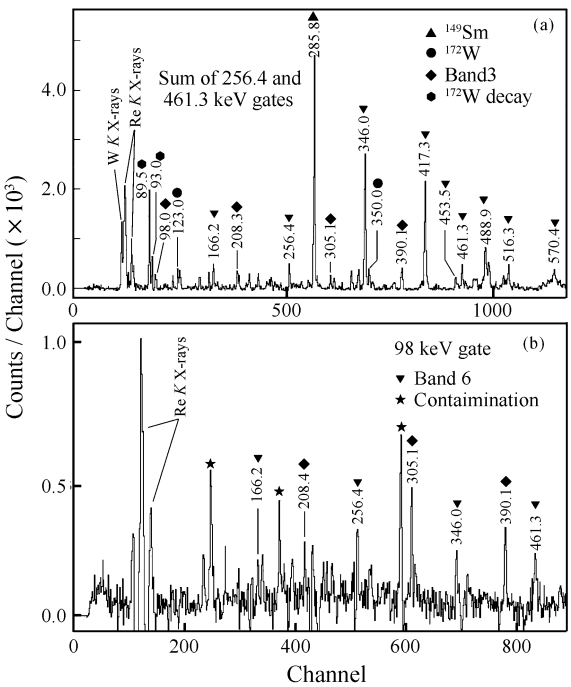

图 3 带 6 与带 3 的典型开门谱

(a) 用带 6 中的 256.4 和 461.3 keV γ 线开窗的和门的符合谱，(b) 用带 3 中的 98 keV γ 线开窗的符合谱。

带 6 的典型开窗谱见图 3(a)。从图中不仅可以看到带 6 中全部的 γ 射线，而且还存在部分属于带 3 的 γ 射线(208，305，390 和 453 keV)。事实上，在带 3 的开窗谱中同样也能看到部分属于带 6 的 γ 射线(346，417，461 和 488 keV)，正如图 3(b)所示，这种情况在^{176}Re 中也有出现[5]。在文献[5]中，作者发现了连接两条转动带的 γ 射线，并且测出 γ 射线的极性 $\Delta I=1$，属于 M1 跃迁。他们估算出产生这些 γ 射线的反应截面是总反应截面的 0.3%—1.3%。因为其产额很小，所以本次实验中没有发现两条转动带之间 M1 跃迁的原因可能是统计量不够。

3 讨论

3.1 带 4 和带 5 的准粒子组态

对于 $Z=75$，$N=97$ 的双奇核^{172}Re，假定它的四极形变 β_2 在 0.2—0.25 之间，靠近质子和中子费米面的 Nilsson 单粒子轨道分别为 $\pi1/2^-[541](h_{9/2})$，$\pi9/2^-[514](h_{11/2})$，$\pi5/2^+[402](d_{5/2})$，$\nu5/2^+[642](i_{13/2})$，$\nu1/2^-[521](f_{5/2}/p_{3/2})$，$\nu5/2^-[512](h_{9/2}/f_{7/2})$和 $\nu5/2^-[523](h_{9/2}/f_{7/2})$。双奇核^{172}Re 中的两个价核子可以占据费米面附近不同的 Nilsson 轨道，在较低的激发能区构成众多的 2-准粒子内禀态(2-qp intrinsic states)。如果探测器的灵敏度和实验数据的统计性较高，原则上可以观测到基于这些 2-准粒子内禀态之上的转动带。实际上，在相邻奇 A 核中，已经观测到基于这些单准粒子内禀态之上的转动带；在^{172}Re 中，我们也发现了基于 $\pi9/2^-[514]\oplus\nu5/2^+[642]$(带 1)，$\pi1/2^-[541]\otimes\nu i_{13/2}$(带 2)和 $\pi1/2^-[541]\otimes\nu1/2^-[521]$(带 3)之上的 2-准粒子转动带。

从图 2 和图 3 中可以看到，带 4 和带 5 具有较强的带内 M1(E2)跃迁，说明它们是一个高-K 带。在可能组合中，我们认为新鉴别出的带 4 和带 5 分别是基于 $\pi5/2^+[402]\otimes\nu5/2^+[642]$和 $\pi9/2^-[514]\otimes\nu5/2^-[512]$组态下的转动带。理由如下：

(1) 能量为 174.8，196.3 和 216.7 keV 的 γ 射线(属于带 4)与低能 γ 射线 166.5 keV(图 2(a)中已用五角星标记)存在较弱的符合关系，说明带 4 中的(10^+)态不是带头能级。在带 5 的典型开窗谱(见图 3(b))中，193.5 keV 射线非常强，再没有发现比 193.5 keV 能量更低的带内 M1(E2)跃迁，可以认为 193.5 keV γ 射线直接退激到带头能级。利用 Kreiner 建议的方法[1]提取了带 5 角动量在对称轴上的投影值 $K_{\rm eff}=6.56$。如此高的 $K_{\rm eff}$值表明科氏力对质子与中子的作用较弱，因而 $K_{\rm eff}\approx K=\Omega_{\rm p}+\Omega_{\rm n}$。与 $K_{\rm eff}$值最接近的组态是 $\pi9/2^-[514]\otimes\nu5/2^-[512]$或 $\pi9/2^-[514]\otimes\nu5/2^-[523]$($K=7$)。所以可以初步将带 5 的组态指定为 $\pi9/2^-[514]\otimes$

ν5/2⁻[512]或 π9/2⁻[514]⊗ν5/2⁻[523]，其带头的自旋值 $I_0^{\pi}=7^+$。

(2) 采用与文献[6]相同的方法，从带内 γ 跃迁强度比提取出相应的 B(M1)/B(E2)比值，并与理论计算比较(见图 4)。实验观察到的带内 M1 和 E2 约化跃迁概率比强烈依赖转动带的准粒子组态，以及对转动带能级的自旋指定。尽管对每个带只有一个实验数据，从实验值与理论值的比较中可得出结论：带 4 的组态可能是 π5/2⁺[402]⊗ν5/2⁺[642]，带 5 的组态为 π9/2⁻[514]⊗ν5/2⁻[512]。

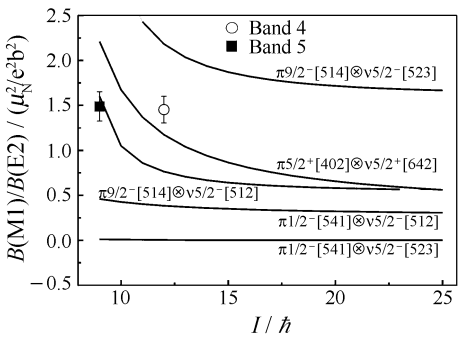

图 4　带 4 和带 5 B(M1)/B(E2)的实验值与理论值的比较

(3) 在^{172}Re 的同位素^{176}Re[7]，^{178}Re[8] 和^{180}Re[9]及其同中子异位素^{168}Lu[10]和^{170}Ta[6]中都观测到了基于π5/2⁺[402]⊗$\nu i_{13/2}$组态的转动带。我们将^{172}Re 及同中子异位素^{168}Lu 和^{170}Ta 基于π5/2⁺[402]⊗$\nu i_{13/2}$组态的转动带的能级间隔进行了比较(见图 5)，它们与^{172}Re 带 4 的能级间隔存在较好的系统性，支持我们对带 4 准粒子组态和能级自旋值的指定。另外对带 4 和带 5 转动顺排特征的分析也支持我们对其准粒子组态和能级自旋值的指定。

3.2　带 4 和带 5 准粒子的顺排与带交叉

在推转壳模型的理论框架中，顺排角动量 i_x 和带交叉(或回弯)频率两个物理量常用来表征转动带的特征。图 5 给出了带 4 与带 5 的实验顺排随转动频率的变化情况。准粒子顺排是按照下列公式从实验得出的能级纲图中提取的：

$$i_x = I_x - I_{\mathrm{ref}} \quad , \tag{1}$$

$$I_{\mathrm{ref}} = J_0\omega + J_1\omega^3 , \tag{2}$$

$$I_x = \sqrt{I(I+1)-K^2} \approx \left[\left(I+\frac{1}{2}\right)^2 - K^2\right]^{1/2} , \tag{3}$$

$$\hbar\omega(I_a) = (E_i - E_f)/[I_x(I_i) - I_x(I_f)] 。 \tag{4}$$

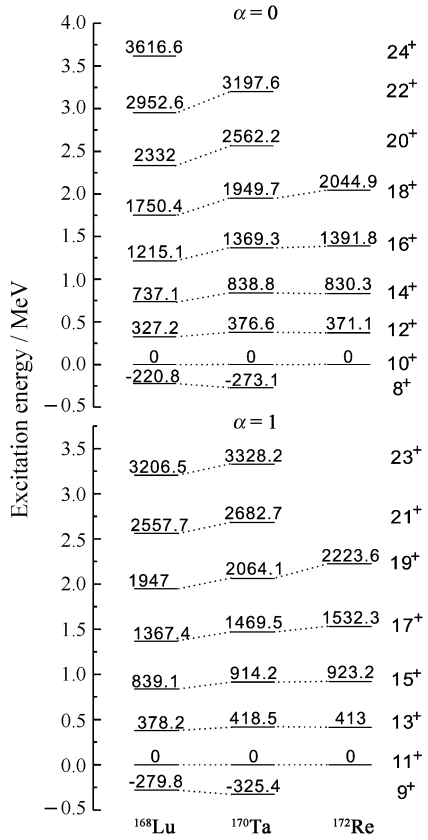

图 5　基于 $\pi d_{5/2}\otimes\nu i_{13/2}$组态的转动带能级间隔的系统性

为了便于比较，图中同时给出奇质子核^{171}Re[11]与奇中子核^{171}W[12]，^{175}W[13]等基于 π5/2⁺[402]，π9/2⁻[514]，ν5/2⁺[642]，ν5/2⁻[523]和 ν5/2⁻[512]组态下的转动带的准粒子顺排角动量，计算中采用同一组 Harris 参量 $J_0=23.05\ \hbar^2\ \mathrm{MeV}^{-1}$和 $J_1=106.00\ \hbar^4\ \mathrm{MeV}^{-3}$。从图 6(a)中可以看出，准粒子顺排在低转动频率处基本是一个常量，在不考虑 p-n 相互作用的前提下，两准粒子顺排角动量满足相加性规则，即：$i_x(\mathrm{p+n})=i_x(\mathrm{p})+i_x(\mathrm{n})$。从图中可以读出 $i_x(\mathrm{p+n})\approx 5.5+0.2=5.7\ \hbar$，与带 4 的实验提取值 6.0 ħ 很接近。另外，相邻奇 A 核^{171}Re 的 $d_{5/2}$ 转动带在 0.2 MeV 处发生回弯。在文献[11]中，作者通过三带混合模型所得的理论值与实验值基本相符。对于^{171}W，$i_{13/2}$带的两个分支的回弯频率分别是 0.31 和 0.35 MeV，这分别对应于 $i_{13/2}$BC 交叉和 AD 交叉[12]。带 4 一直到 $\hbar\omega\approx 0.35$ MeV，依然没有发生回弯的迹象，这是因为它的价中子已占据了 $i_{13/2}$轨道，中子的 AB 交叉被堵塞所致。对于带 5，从图 6(b)中可以看出，质子与中子在回弯前顺排值分别是 1.0 和 0.8 ħ，

两者之和 1.8 ħ 与带 5 的实验顺排值 2.3 ħ 也较相近。带 5 的回弯频率 $\hbar\omega_c \approx 0.22$ MeV 比偶偶核芯 ^{170}W 基态带的回弯频率 $\hbar\omega_c \approx 0.25$ MeV 略小，仍然可认为源于 $i_{13/2}$ 中子的 AB 交叉。上述分析也支持我们将带 4 与带 5 的组态分别指定为 $\pi 5/2^+[402] \otimes \nu 5/2^+[642]$ 与 $\pi 9/2^-[514] \otimes \nu 5/2^-[512]$。

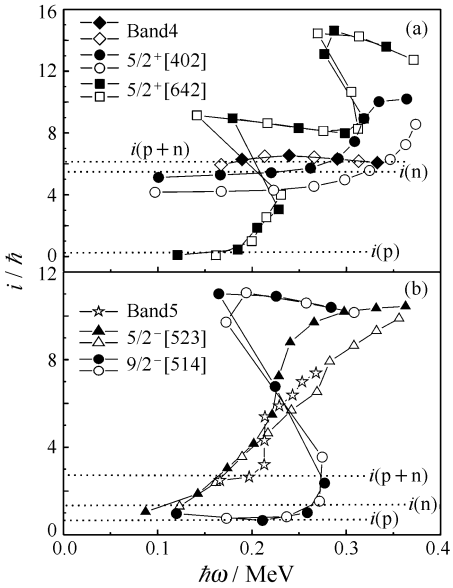

图 6 带 4 与带 5 的准粒子顺排随转动频率的变化关系

3.3 关于带 6

按照 Kreiner 对双奇核转动带的分类[1]，带 6 属于双退耦带，它由一系列 $\Delta I=2$ 的能级构成，在实验上较容易观测到退激这些能级的一系列电四极 γ 跃迁。^{172}Re 中的带 3 已被指定为基于 $\pi 1/2^-[541] \otimes \nu 1/2^-[521]$ 组态的双退耦带[4]，它的旋称量子数(signature)为 $\alpha=1$，准质子和准中子均为优惠旋称量子数(favored signature) $\alpha_f=1/2$。新发现的带 6 中的 γ 射线与带 3 中的 γ 射线存在符合关系(见图 3)，因此，带 6 很可能是基于相同组态的一个双退耦带。与带 3 不同的是准质子旋称量子数为 $\alpha=1/2$(favored signature)，准中子的旋称量子数为 $\alpha=-1/2$(非优惠旋称量子数，unfavored signature)，构成的带 6 其旋称量子数为 $\alpha=0$。从能级间隔的系统性上分析，带 6 最低的一条能级自旋应为 4。基于 $\pi 1/2^-[541] \otimes \nu 1/2^-[521]$ 组态的两个旋称分支($\alpha=0$，1)在 ^{176}Re 中已观测到[5]，这也间接支持了我们对带 6 组态指定的合理性。

图 7 给出了带 3、带 6 和相邻核 ^{173}W 中 $\nu 1/2^-[521]$ 带的动力学转动惯量 $J^{(2)}$ 随转动频率变化的关系图。为了清楚显示，带 3 和带 6 的 $J^{(2)}$ 值均抬高了 100 $\hbar^2$ MeV^{-1}。从图中可以看出，带 3 和带 6 具有相同的动力学转动惯量，在 $\hbar\omega \approx 0.24$ MeV 附近，动力学转动惯量发生突变，这表明其内禀结构发生了变化(即带交叉)。发生带交叉的频率与 $\nu 1/2^-[521]$ 带带交叉的频率相同，说明图中这 3 个带的带交叉均源于 $i_{13/2}$ 中子对的顺排。

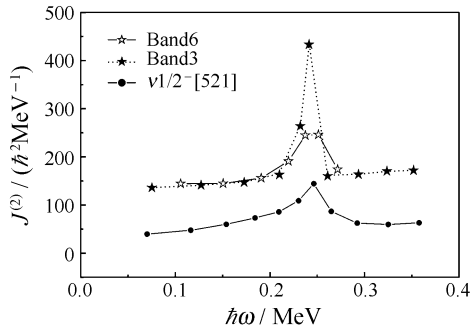

图 7 动力学转动惯量随转动频率的变化关系图

为了便于比较，图中带 6 抬高了 100$\hbar^2$MeV^{-1}。$J^{(2)}=4/\Delta E\gamma(I)$(其中 $\Delta E\gamma(I)=E\gamma(I\to I-2)-E\gamma(I-2\to I-4)$)，$\hbar\omega=E\gamma(I\to I-2)/2$。

另外还分析了带 3 和带 6 的退耦合系数。对于一个双退耦带，其退耦合系数的理论期望值为 $a=a_p-(-1)^1 a_n$(对 $K=1$)，$a=-(-1)^1 a_p a_n$(对 $K=0$)[14]。这里 a_p 和 a_n 是相应准质子(p)和准中子(n)退耦合带的退耦合系数。实验上可根据下式提取：

$$a(I)=\frac{(2I-1)x-(2I+3)}{x-1} \quad , \tag{5}$$

$$x=\frac{E_\gamma(I)}{E_\gamma(I-2)}=\frac{E_{I+2}-E_I}{E_I-E_{I-1}} \quad 。 \tag{6}$$

上式中 E_γ 是转动带低位的两条 γ 射线的能量。从 ^{171}Re 和 ^{173}W 的 $\pi 1/2^-[541]$[11] 和 $\nu 1/2^-[521]$[13] 退耦合带中，提取的质子与中子的退耦合系数分别为 $a_p=5.12$，$a_n=0.45$。因此 $\pi 1/2^-[541] \otimes \nu 1/2^-[521]$ 带的退耦合系数应为 $a=3.67$($K=1$)，$a=-2.3$ ($K=0$)。从本工作给出的能级纲图中得到带 3 和带 6 的退耦合系数分别为 a(带 3)$=3.63$，a(带 6)$=4.5$，与理论期望值 $a=4.67$($K=1$)相符合。

4 结论

本工作对 ^{149}Sm(^{27}Al，4n)^{172}Re 反应产生的 ^{172}Re 在束 γ 的实验数据进行了重新分析，排除了来自“沾污产物”γ 谱线的干扰，鉴别出可归属于 ^{172}Re 的新 γ 谱线。通过 γ-γ 符合关系的分析，新建立了

^{172}Re核 3 个转动带能级纲图。依据相邻核的带结构知识和推转壳模型分析方法，包括准粒子顺排，带内 B(M1)/B(E2)值与理论计算值的比较，动力学转动惯量和退耦合系数分析，带头激发能估计和转动带的系统性特征等，指出新发现的 3 个转动带分别是基于的 $\pi 5/2^+[402]\otimes\nu 5/2^+[642]$(带 4)和 $\pi 9/2^-[514]\otimes\nu 5/2^-[512]$(带 5)二准粒子组态下的耦合带，和基于 $\pi 1/2^-[541]\otimes\nu 1/2^-[521]$(带 6)组态下的非优先旋称($\alpha=0$)分支。

参考文献(References)：

[1] Kreiner A J, Davidson J, Davidson M, *et al*. Phys Rev, 1987, **C36**: 2309.

[2] Stephens F S. Nucl Phys, 1983, **A396**: 307c.

[3] Hild T, Schmidt-Ott W D, Kunze V, *et al*. Phys Rev, 1995, **C51**: 1736.

[4] Zhang Y H, Oshima M, Toh Y, *et al*. Phys Rev, 2003, **C68**: 054313.

[5] Kreiner A J, Cardona M A, Somacal H, *et al*. Phys Rev, 1994, **C50**: R530.

[6] Zhang Y H, Zhang S Q, Zhao Q Z, *et al*. Phys Rev, 1999, **C60**: 044311.

[7] Cardona M A, Kreiner A J, Hojman D, *et al*. Phys Rev, 1999, **C59**: 1298.

[8] Kreiner A J, Vanin V R, Beck F A, *et al*. Phys Rev, 1989, **C40**: R487.

[9] El-Masri H M, Walker P M, Dracoulis G D, *et al*. Phys Rev, 2005, **C72**: 054306.

[10] Ha J H, Kim J C, Lee C S, *et al*. J Phys Soc Jpn, 2002, **71**: 1663.

[11] Carlsson H, Bergstrom M, Bröckstedt A, *et al*. Nucl Phys, 1993, **A551**: 295.

[12] Espino J, Garrett J D, Hagemann G B, *et al*. Nucl Phys, 1994, **A567**: 377.

[13] Walker P M, Dracoulis G D, Johnston A, *et al*. J Phys, 1978, **G4**: 1655.

[14] Emery G T, Hochel R, Daly P J, *et al*. Nucl Phys, 1973, **A211**: 189.

High Spin States in Odd-odd ^{172}Re*

ZHANG Xin[1,2], ZHANG Yu-hu[1,#], ZHOU Xiao-hong[1], GUO Wen-tao[1], GUO Song[1,2], GUO Ying-xiang[1], M. Oshima[3], Y. Toh[3], M. Koizimi[3], A. Osa[3], A. Kimura[3], Y. Hatsukawa[3], T. Morikawa[4], M. Nakamura[4], M. Sugawara[5], H. Kusakari[6], T. Komatsubara[7], K. Furuno[7]

(1 *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou* 730000, *China*;
2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*;
3 *Japan Atomic Energy Agency, Tokai, Ibaraki* 319-1195, *Japan*;
4 *Department of Physics, Kyushu University, Fukuoka*, 812-81, *Japan*;
5 *Chiba Institute of Technology, Narashino, Chiba* 275-0023, *Japan*;
6 *Chiba University, Inage-ku, Chiba* 263-8512, *Japan*;
7 *Institute of Physics and Tandem Accelerator Center, University of Tsukuba, Ibaraki* 305-0006, *Japan*)

Abstract: We have re-analyzed the experimental data of in-beam γ spectroscopy for ^{172}Re via the ^{149}Sm(^{27}Al, 4n)^{172}Re reaction. Three rotational bands have been newly found and assigned to ^{172}Re. A new level scheme of ^{172}Re, consisting of 6 bands, is thus presented. Based on the existing knowlegde from the neighboring nuclei and the cranked shell model, the quasiparticle configurtions have been assigned to the 3 newly observed bands and their structure properties have been dicussed.

Key words: rotational band; two-quasiparticle configuration; quasiparticle alignment; odd-odd nucleus ^{172}Re

* **Received date**: 24 Apr. 2009; **Revised date**: 24 Nov. 2009

* **Foundation item**: Major State Basic Research Development Program of China(G2000077400); National Natural Sciences Foundation of China(10025525, 1005012); Chinese Academy of Sciences

\# **Corresponding author**: Zhang Yu-hu, E-mail: yhzhang@impcas.ac.cn