

双奇核 ^{170}Re 高自旋态实验研究*

王华磊^{1,2} 张玉虎^{1;1)} 周小红¹ 郭应祥¹ 雷祥国¹
柳敏良¹ 骆鹏¹ 谢成营¹ 宋立涛¹ 于海萍¹ 郑勇¹
郭文涛¹ 刘忠¹ 竺礼华³ 温书贤³ 吴晓光³

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 100039)

3 (中国原子能科学研究院 北京 102413)

摘要 在 166MeV 的束流能量下,利用重离子熔合蒸发反应 $^{142}\text{Nd}(^{32}\text{S}, 1\text{p}3\text{n}\gamma)^{170}\text{Re}$ 布居了 ^{170}Re 的高自旋激发态. 用 12 套带 BGO 反康普顿抑制的高纯锗探测器阵列进行了在束 X- γ 和 γ - γ 符合测量. 基于对实验测量结果及周围邻近核已知信息的综合分析,首次建立了双奇核 ^{170}Re 的转动带能级纲图. 根据实验提取出的准粒子顺排、旋称劈裂等结构特征和 Re 双奇核同位素带结构系统学知识的比较分析,指出该带的准粒子组态是 $\pi h_{11/2} \otimes \nu i_{13/2}$.

关键词 在束 γ 谱学 形变双奇核 转动带 旋称反转

1 引言

近些年来,对形变双奇核的研究成了原子核高自旋态核结构研究中的前沿热门课题之一^[1]. 由于双奇核的两个未成对价核子可以处于费米面附近不同的尼尔逊轨道上,它们构成众多的耦合模式,从而导致转动带的半退耦、双退耦和压缩型带结构^[2]. 特别是在对 $A \approx 160$ 核区双奇核的研究中,系统地发现基于 $\pi h_{9/2} \otimes \nu i_{13/2}$, $\pi h_{11/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 两准粒子组态下的半退耦和压缩型转动带均在低自旋区能级出现旋称反转(signature inversion)^[3-5],这一反常现象引起了众多实验和理论物理学家的兴趣. 在此研究工作之前,Re 同位素缺中子方向上双奇核已经研究到了 ^{172}Re ^[6],奇 A 核已经研究到了 ^{169}Re ^[7]. 关于 ^{170}Re 核素,通过衰变研究,确定了 ^{170}Re 的基态寿命为 9.2s,发现了 ^{170}Re 的 10 个低位能级^[8-10],但其高自

旋的核谱学数据还未曾见过报道. 鉴于上述的研究现状,为了进一步拓展形变双奇核 Re 缺中子同位素的核结构知识,丰富和检验该核区能级结构的系统性,我们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}Re 的高自旋态进行了实验研究.

2 实验测量方法

实验是在中国原子能科学研究院 HI-13 串列加速器的在束 γ 实验终端上完成的. 用 ^{32}S 束流轰击同位素 ^{142}Nd 靶布居了 ^{170}Re 的高自旋态. 实验中共用了两块靶,质量厚度分别为 2.1 和 2.3mg/cm²,均附有 7mg/cm² 的 Pb 衬以阻止反应产物从靶中反冲出来而造成在束 γ 射线的多普勒位移. 由于在本实验之前,还没有关于 ^{170}Re 高自旋态的研究报道,以理论计算结果为参考,实验中选取了 155 和

2003-11-28 收稿

* 国家杰出青年科学基金(10025525),国家自然科学基金(1005012,19705011),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: yhzhang@ns.lzb.ac.cn

166MeV 两个束流能量点进行了测量. 图 1 给出了两个束流能量下得到的 γ 谱, 图中用不同的符号标出了强度相对较强的 γ 射线的主要来源. 经对比发现在 166MeV 束流能量下来自 ^{171}Re , ^{172}Os , ^{171}Os 和 ^{168}W 的 γ 射线相对来自 ^{170}Os , ^{170}W 和 ^{167}W 的 γ 射线的强度明显降低, 如 171.5, 199.0, 202.5, 228.0, 254.0, 355.0, 363.0 和 378.0keV 的 γ 射线相对于 156.5, 224.5, 286.5, 305.5, 386.0 和 413.0keV 的 γ 射线强度减弱. 结合激发函数的理论计算, 通过对图 1 的仔细分析研究可以得出: 在 166MeV 束流能量下蒸发 4 个粒子比蒸发 3 个粒子反应道的截面相对较大. 分析时还发现一些相对强度较强能量为 188.6, 210.0, 218.5, 267.4 和 279.1keV 的新 γ 射线与蒸发 4 粒子反应余核退激的 γ 射线相对强度的变化趋势相一致. 结合 KX 射线和周围核已知的能级信息, 我们建议它们是 ^{170}Re 激发态退激的 γ 射线. 另外, 来自 ^{170}W 核 γ 射线突出的强度信息说明 ^{170}W 不仅来自在束产生, 还可能来自于 ^{170}Re 的衰

变, 这也间接地证明了实验中 ^{170}Re 核的产生. 鉴于上述分析, 有理由认为在 166MeV 束流能量下对 ^{170}Re ($1p3n$ 反应道) 激发态能级的布居较强. 然后在此束流能量下用 12 台带 BGO 反康抑制的 HGPc 探测器进行了长时间的 $\gamma-\gamma-t$ 符合测量, 这里 t 是参与符合的两条 γ 射线到达探测器的相对时间差, 符合时间窗为 200ns. 探测器放置在与束流成 44.6° , 54.7° , 64° 和 90° 的角度上, 以便从 $\gamma-\gamma$ 符合数据中提取 γ 射线的方向角关联系数. 实验中共获得了约 1.5×10^8 个 $\gamma-\gamma$ 符合事件. 在离线数据处理时, 对每个 HGPc 探测器做了能量增益归一, 反演出了一个 4096×4096 的对称化 $\gamma-\gamma$ 符合总矩阵和一个 4096×4096 的非对称化 $\gamma-\gamma$ 符合矩阵, 分别用于分析 KX- γ , $\gamma-\gamma$ 符合关系和提取 γ 射线的方向角关联系数. 实验前后用 ^{60}Co , ^{133}Ba 和 ^{152}Eu 标准放射源对 HGPc 探测器进行了能量和效率刻度, 对 ^{60}Co 的 1332.5keV 的 γ 射线, 探测器的能量分辨在 1.9—3.1keV 之间.

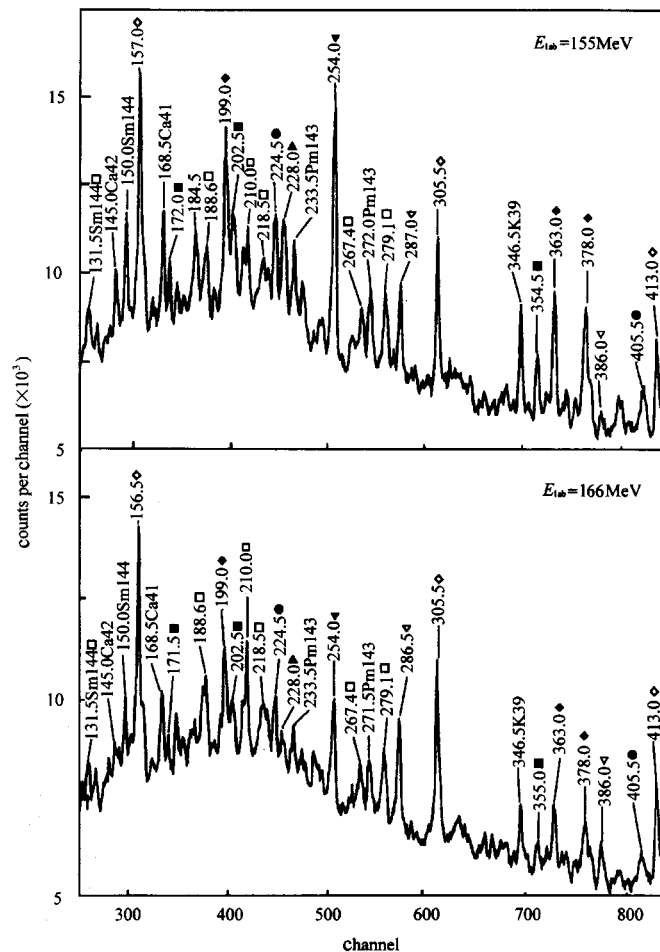


图 1 155MeV 和 166MeV 束流能量下的 γ 谱

■ ^{171}Re ^[11], □ ^{170}Re (本工作), ▲ ^{172}Os ^[12], ▼ ^{171}Os ^[13], ▽ ^{170}Os ^[14],
◇ ^{170}W ^[15], ◆ ^{168}W ^[16] 和 ● ^{167}W ^[16].

3 能级纲图的建立

^{170}Re 核转动带能级纲图的建立主要基于对 KX- γ , γ - γ 符合及 γ 射线的相对强度、观测到的跨越跃迁和邻近核已知信息的综合分析. 本实验中 γ 射线的沾污主要来自于 $^{171}\text{Re}^{[11]}$ (1p2n 反应道), $^{172}\text{Os}^{[12]}$ (2n 反应道), $^{171}\text{Os}^{[13]}$ (3n 反应道), $^{170}\text{Os}^{[14]}$ (4n 反应道), $^{170}\text{W}^{[15]}$ (2p2n 反应道), $^{168}\text{W}^{[16]}$ (α 2n 反应道) 和 $^{167}\text{W}^{[16]}$ (α 3n 反应道) 核的退激发. 对这些反应产物的高自旋态已做了较充分的研究, 可以

作为鉴别 ^{170}Re 核新转动带的参考. 图 2 (a) 给出了 Re KX 射线的开门谱并标出了已知核 ^{171}Re 的部分 γ 射线, 在此没有发现 ^{172}Re 和 ^{169}Re 核退激的 γ 射线, 这应该与实验选取的束流能量有关. 图 2 (b) 给出了 210.0keV γ 射线的单门谱, 对 ^{170}Re 核相对强度较弱 γ 射线的指定主要基于它们与强线的符合关系. 为了更好地显示高能部分的 γ 跃迁, 图 2 (c) 给出了由 188, 218, 267, 279 开门的和门谱. 图 2 中带 “*” 的 γ 线为来自其他反应道的沾污线, 带 “d” 的 γ 线表示该 γ 射线是双射线.

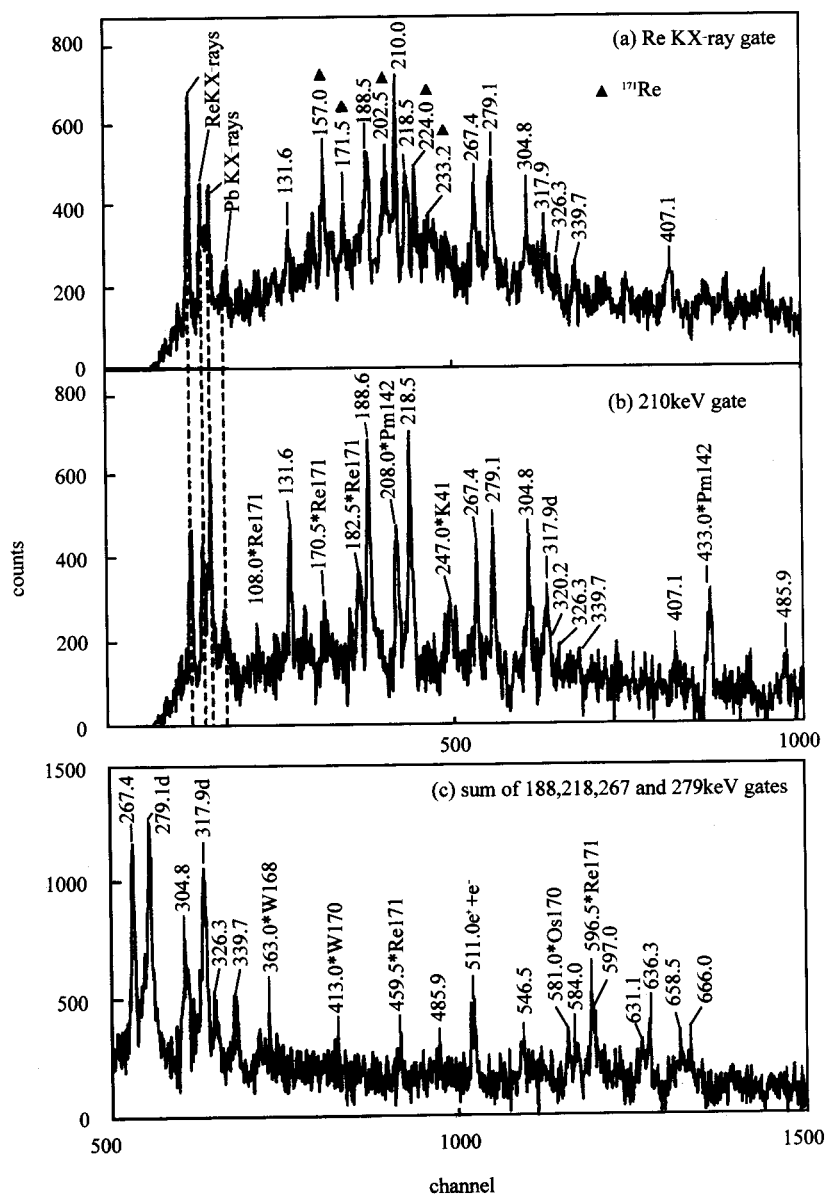


图 2 ^{170}Re 典型的实验开门谱

通过对 γ 射线符合关系的仔细分析, 图 3 给出了本工作建议的 ^{170}Re 核转动带的能级纲图. 由于本实验采用的反应对低自旋能级的布居率很低, 并且对于 ^{170}Re 这样的双奇核, 低位能级密度较高, 而且从带头能级向基态和低位激发态的跃迁很复杂, 可能会伴随一些低能的 γ 射线, 探测系统测不到从这些能级退激下来的 γ 射线, 所以图 3 给出的能级纲图没能将带头能级与基态联系起来.

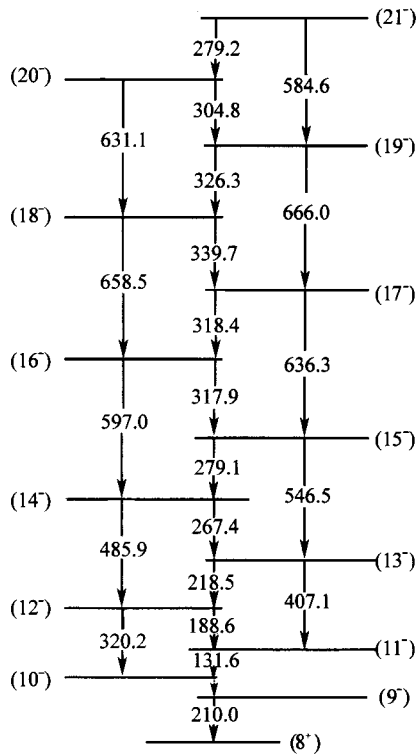


图 3 本工作建立的 ^{170}Re 转动带能级纲图

在对 $A \approx 160$ 核区双奇核的研究中, 人们系统地发现了基于不同两准粒子组态下的转动带能级结构(如双退耦带、半退耦带、强耦合带等). 这里没有看到 ^{170}Re 核更多的转动带, 本实验数据量的统计较低可能是一个原因, 但我们认为更重要的原因可能是本实验采用的重离子熔合蒸发反应易于布居原子核的晕态(yrast)能级或近晕态(yrare)能级, 而对于 ^{170}Re 双奇核基于其他组态下的转动带能级更加远离了晕线, 本实验布居不到或布居太弱. 文献[17]中给出了奇 A Re 同位素和同中子异位素基于几个常见组态下布居相对较强的转动带带头激发态能级位置的变化趋势: 随着中子数的递减, 基于 $\pi 1/2^-$ [541] 和 $\pi 5/2^+$ [402] 组态下的转动带带头位

置均在上升, 只有基于 $\pi 9/2^-$ [514] 组态下的转动带没有上升, 相反还有下降的趋势. 邻近的同中子异位素(如 ^{167}Hf [18], ^{169}W [15], ^{171}Os [13] 等)的转晕带组态均为 $i_{13/2}$, 所以一些两准粒子组态下的转动带由于激发态能级位置升高, 能级远离了晕线从而使得本实验没有观测到更多转动带. 这一实验现象还提示我们, ^{170}Re 转动带的准粒子组态可能正是 $\pi 9/2^-$ [514] $\otimes \nu i_{13/2}$, 下文的讨论也证实了这一点.

4 讨论

4.1 转动带组态、自旋和宇称的指定

本实验之前, 人们已对 ^{170}Re 邻近奇 A 核及双奇核 $^{172-178}\text{Re}$ 的高自旋态进行了研究[6, 17, 19, 20]. 借鉴对这些核的研究结果, 可以预测在 ^{170}Re 中有可能观测到基于 $\pi h_{9/2} \otimes \nu 1/2^-$ [521], $\pi 5/2^+$ [402] $\otimes \nu i_{13/2}$ 和 $\pi h_{11/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 组态下的转动带. 考虑到在重粒子熔合蒸发反应中易于布居准粒子占据高 j 轨道的转动带, 参考 Nilsson 能级图, 我们建议本实验观测到的 ^{170}Re 转动带的组态为 $\pi 9/2^-$ [514] ($h_{11/2}$) $\otimes \nu 3/2^+$ [651] ($i_{13/2}$). 实验上 ^{170}Re 邻近奇 A 核中, $\pi h_{11/2}$ 和 $\nu i_{13/2}$ 组态下的转动带在重离子熔合蒸发反应中均有较强布居. 从图 2 (b) 可以清楚地看出此转动带具有较强的带内 M1/E2 跃迁, 这表明它是一个高 K 带(K 表示原子核总角动量在对称轴方向的投影), 并且能级具有大的回旋磁比率(g 因子). 比较这一核区双奇核转动带的系统性, 该带与 $\pi h_{11/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 组态下的转动带特征相符. 按照 Kreiner 等人[21]对双奇核转动带的分类方法, ^{170}Re 的这一转动带可以归类为压缩型转动带(compressed band). 指定了转动带的组态后, 我们可以由 $\pi = (-1)^{l_{\pi} + l_{\nu}} = (-1)^{5+6} = -1$ 确定转动带的宇称为负. 通常激发态能级的自旋值可以通过判断跃迁到已知 J^{π} 值能级的 γ 射线的多极性来确定. 但图 3 给出的能级纲图没能将带头能级与基态或已知的低位激发态能级连接起来, 这给指定双奇核转动带的能级自旋宇称带来很大的不便, 因此我们根据此核区带结构研究的系统学知识来解决这一问题. 图 4 给出了双奇核 $^{170-176}\text{Re}$ 基于 $\pi h_{11/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 组态下的能级的系统性, 可以看出采用图 3 的自旋值 ^{170}Re 转动带的能级间隔与系统性符合得很好. 图 3 中我们认为 $10^- \rightarrow 9^-$ 激发态间有一类似 ^{172}Re 核中 96.5 keV 的低能

γ 跃迁^[6], 但由于统计原因和大的内转换系数而没有被观测到, 因此图上画成了虚线. 另外, 由于本实验的数据统计有限, 实验没有能提取出各条 γ 射线的 DCO(Directional Correlation of γ rays Deexciting the Oriented States) 系数^[22] 和 γ 跃迁的分支比, 因此不能用 γ 跃迁的多极性和带内电磁跃迁性质对能级组态、自旋和宇称的指定做进一步的检验.

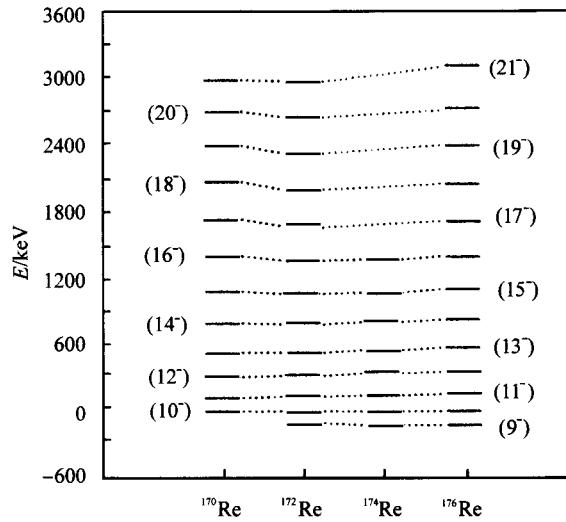


图 4 Re 同位素能级系统性

4.2 准粒子顺排

在推转壳模型的理论框架中, 实验顺排是指准粒子角动量在原子核转动轴上的投影量^[2], 它依赖于准粒子的组态. 为了进一步分析 ^{170}Re 转动带的特征和检验对其组态和自旋的指定, 图 5 给出了 ^{170}Re 转动带的实验顺排随转动频率变化的函数关系. 这里实验顺排 $i_x(\omega)$ 是按照 Bengtsson 等人^[23] 的方法由下列公式求出的.

$$i_x(\omega) = I_x(\omega) - \omega J_0 - \omega^3 J_1, \quad (1)$$

$$I_x(I) = \sqrt{\left(I + \frac{1}{2}\right)^2 - K^2}, \quad (2)$$

$$\omega(I) = \frac{E_i - E_f}{I_x(I_i) - I_x(I_f)}, \quad (3)$$

其中 $I_x(\omega)$ 为原子核总角动量在转动轴上的投影, J_0, J_1 是参考核的 Harris 参量, 可通过拟合相邻偶偶核基态带的能级给出:

$$E = \frac{1}{2} \left(J_0 + \frac{3}{2} J_1 \omega^2 \right) \omega^2. \quad (4)$$

为了便于比较, 图 5 同时给出了邻近的双奇核

^{172}Re 、奇质子核 ^{171}Re 和奇中子核 ^{169}W 分别基于 $\pi h_{11/2} \otimes \nu i_{13/2}$, $\pi h_{11/2}$ 和 $\nu i_{13/2}$ 组态下的转动带的准粒子顺排角动量 i_x , 并采用同一组 Harris 参量 $J_0 = 15\hbar^2 \text{MeV}^{-1}$ 和 $J_1 = 90\hbar^4 \text{MeV}^{-3}$. 从图 5 中可以看出, 实验顺排值在低转动频率处基本是一个常量, 在不考虑 p-n 剩余相互作用的前提下两准粒子顺排满足相加性规则, 即 $i_x(\text{p-n}) = i_x(\text{p}) + i_x(\text{n})$. 相邻奇 A 核 ^{171}Re 的 $h_{11/2}$ 带在 $\hbar\omega \approx 0.23 \text{MeV}$ 处出现回弯^[11], 偶偶核 ^{170}W 的回弯出现在 $\hbar\omega \approx 0.26 \text{MeV}$ ^[15], 均对应于中子的 AB 交叉, 它们回弯频率的不同主要是由于原子核的形变不同引起的. 本工作建立的转动带的顺排角动量 i_x 在 $\hbar\omega \approx 0.30 \text{MeV}$ 处有一个明显增大的趋势, 这表明在此处发生了带交叉. 它的价中子已占据了 $i_{13/2}$ 中子轨道, 中子的 AB 交叉被阻塞, 这里实验上观测到的顺排量在 $\hbar\omega \approx 0.30 \text{MeV}$ 处的增加应该对应于中子的 BC 交叉, 这与相邻奇中子核 ^{169}W 的 $i_{13/2}$ 带 BC 交叉频率 $\hbar\omega \approx 0.30 \text{MeV}$ 相一致^[15]. 上述这些特征均可以用推转壳模型很好地解释, 也进一步支持了我们对该转动带组态和自旋的指定.

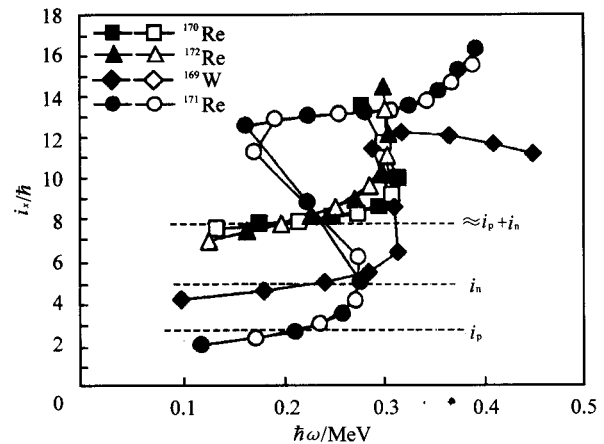


图 5 角动量顺排

4.3 转动带能级的旋称劈裂和反转

在双奇核研究中, 对于一个 $\Delta I = 1$ 的转动带其自旋为奇数的能级系列与自旋为偶数的能级系列分别具有不同的旋称(Signature). 这里旋称定义为绕原子核转动轴旋转 180° 的旋转算子的本征值^[2]. 在某一组态下 $\Delta I = 1$ 的转动带中, 旋称劈裂是指在某一转动频率处两个 $\Delta I = 2$ 的能级系列的能量差. 一

般认为旋称劈裂的本质是由于相应转动带的波函数中混进了低 Ω 的成分. 由于 Coriolis 力正比于转动频率, 所以随着角动量(自旋)的增加, 波函数的混杂越来越强, 能级的旋称劈裂也就越来越大. 通常用 $E(I) - E(I - 1)$ 或 $S(I) = E(I) - E(I - 1) - [E(I + 1) - E(I) + E(I - 1) - E(I - 2)]/2$ 随自旋 I 的变化关系表示旋称劈裂, $E(I)$ 表示自旋为 I 的能级激发能. 对于一个给定组态下的转动带, 能量较低的 $\Delta I = 2$ 的能级系列称为优先带 (favoured band), 其旋称量子数 $\alpha_f = 1/2 \times (-1)^{j_p - 1/2} + 1/2 \times (-1)^{j_n - 1/2}$; 另一个能量较高的 $\Delta I = 2$ 的能级系列称为非优先带 (unfavoured band), 其旋称量子数 $\alpha_{uf} = 1/2 \times (-1)^{j_p - 1/2} + 1/2 \times (-1)^{j_n + 1/2}$ 或 $\alpha_{uf} = 1/2 \times (-1)^{j_p + 1/2} + 1/2 \times (-1)^{j_n - 1/2}$. 正常的旋称劈裂应该是优先带低于非优先带, 当优先带高于非优先带时, 称之为旋称反转^[2]. 早在 1981 年人们就发现了这一现象^[24], 近些年来许多作者在对 $A = 160$ 核区的众多双奇核的研究中, 发现了基于 $\pi h_{9/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 和 $\pi h_{11/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 组态的转动带低自旋区的旋称反转. 随着转动频率的升高, 在某一自旋值后旋称劈裂恢复正常.

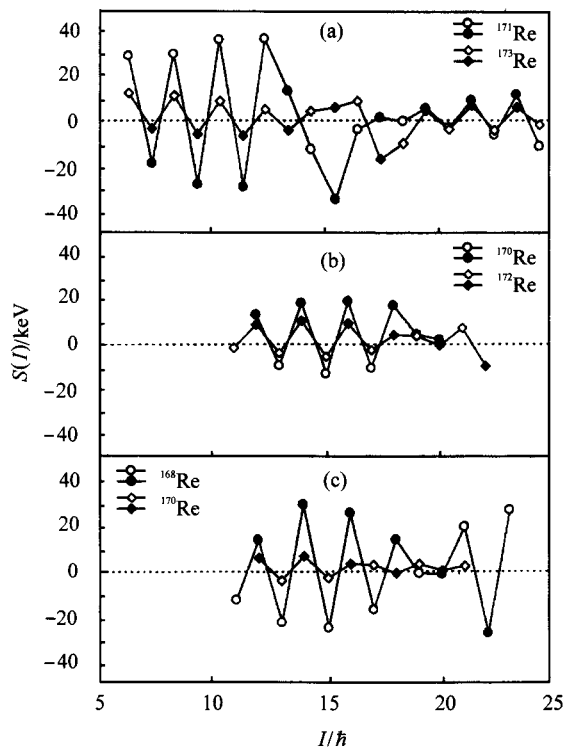


图 6 旋称劈裂

基于上述知识和我们所建议的组态自旋值, 图 6 用随自旋变化较敏感的参量 $S(I)$ 展示了奇 A 核 $^{171, 173}\text{Re}$ ^[11, 25] 基于 $\pi h_{11/2}$ 组态下的转动带和双奇核

^{170}Re (本工作), ^{172}Re ^[6], $^{168, 170}\text{Ta}$ ^[26, 27] 基于 $\pi h_{11/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 组态下的转动带的旋称劈裂情况. 实心符号和空心符号分别代表优先带和非优先带. 从图中可以清晰地看出采用能级间隔系统性指定的能级自旋值 ^{170}Re 转动带同其他双奇核一样在低自旋区发生了旋称反转. 在高自旋处旋称劈裂有恢复正常的趋势, 并且 ^{170}Re 转动带的旋称交叉点比 ^{172}Re 和 ^{168}Ta 分别推迟和提前了 1—2h, 这与该区双奇核的系统性是相一致的^[28]. 另外在旋称劈裂幅度上, 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 ^{170}Re 转动带这一轨道为 $\pi 9/2^- [514] (h_{11/2})$, 此转动带的旋称劈裂幅度也与相邻奇 A 核中基于 $\pi 9/2^- [514] (h_{11/2})$ 单粒子组态下的转动带的旋称劈裂幅度在一个量级上. 从图 6 中还可以看出, 中子数较大的 ^{172}Re 比 ^{170}Re 的旋称劈裂幅度要小, 这与 ^{173}Re 比 ^{171}Re 基于 $\pi 9/2^- [514] (h_{11/2})$ 下的转动带劈裂幅度小相一致, 也与相邻的双奇核的旋称劈裂相一致.

多年来的研究已积累了不少的实验数据, 通过对旋称劈裂幅度、旋称交叉(反转)频率等随核子数的变化关系系统的分析比较, 已得出了一些实验规律^[28]. 基于所观测到的实验现象, 人们利用不同的理论模型对双奇核转动带中出现的旋称反转现象进行了研究, 比如壳模型^[5]、粒子—转子模型^[29]、角动量投影模型^[30]、相互作用玻色—费米模型^[31]等, 但就其物理机制而言, 还没有形成一个共识. 本工作为旋称劈裂的理论研究又提供了一组实验数据, 在延拓系统性的同时也进一步检验了我们对转动带能级组态和自旋的指定.

5 总结

本工作首次对双奇核 ^{170}Re 的高自旋态进行了实验研究, 发现了一条基于 $\pi 9/2^- [514] \otimes \nu 3/2^+ [651]$ 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}Re 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 et al. Rev. of Mod. Phys., 1998, **70**:843
- 2 Headly D M et al. Atomic Data and Nuclear Data Tables, 1998, **69**: 239
- 3 Kreiner A J et al. Nucl. Phys., 1985, **A432**:451
- 4 Kreiner A J et al. Phys. Rev., 1987, **C36**:2309
- 5 Bengtsson R et al. Nucl. Phys., 1984, **A541**:189
- 6 ZHANG Y H et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2003, **27**(7):574(in Chinese)
(张玉虎等. 高能物理与核物理, 2003, **27**(7):574)
- 7 ZHOU X H et al. Eur. Phys. J., 2002, **A15**:285
- 8 Sterna L L et al. Phys. Lett., 1975, **53B**:432
- 9 Schmidt-Ott W D et al. Nucl. Phys., 1992, **A545**:646
- 10 Baglin C M. Nucl. Data Sheets, 2002, **96**:611
- 11 Carlsson H et al. Nucl. Phys., 1993, **A551**:295
- 12 Wells J C et al. Phys. Rev., 1989, **C40**:725
- 13 Bark R A et al. Nucl. Phys., 1999, **A646**:399
- 14 Dracoulis G D et al. Nucl. Phys., 1988, **A486**:414
- 15 Recht J et al. Nucl. Phys., 1985, **A440**:366
- 16 Theine K et al. Nucl. Phys., 1992, **A548**:71
- 17 Cardona M A et al. Phys. Rev., 1999, **C59**:1298
- 18 Cromaz M et al. Phys. Rev., 1999, **C59**:2406
- 19 ZHANG Yu-Hu, ZHANG Shuang-Quan, HUANG Wen-Xue et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2000, **24**(4):369 (in Chinese)
(张玉虎, 张双全, 黄文学等. 高能物理与核物理, 2000, **24**(4):369)
- 20 Santos D et al. Phys. Rev., 1989, **C39**:902
- 21 Kreiner A J et al. Phys. Rev., 1987, **C36**:2309
- 22 LI Guang-Sheng. Chin. Phys. Lett., 1999, **16**(11):796
- 23 Bengtsson R, Frauendorf S. Nucl. Phys., 1979, **A327**:139
- 24 Pinston J A et al. Nucl. Phys., 1981, **A361**:464
- 25 Hildingsson L et al., Nucl. Phys., 1990, **A513**:394
- 26 Theine K et al. Nucl. Phys., 1992, **A536**:418
- 27 ZHANG Y H et al. Phys. Rev., 1999, **C60**:044311
- 28 LIU Yun-Zuo et al. Phys. Rev., 1995, **C52**:2514
- 29 Hamamoto I. Phys. Lett., 1990, **B235**:221
- 30 Hara K, Sun Y. Nucl. Phys., 1991, **A531**:221
- 31 Yoshida N, Sagawa H, Otsuka J. Nucl. Phys., 1994, **A567**:17

Experimental Study of High-Spin States in Odd-Odd ^{170}Re *

WANG Hua-Lei^{1,2} ZHANG Yu-Hu^{1,1)} ZHOU Xiao-Hong¹ GUO Ying-Xiang¹
 LEI Xiang-Guo¹ LIU Min-Liang¹ LUO Peng¹ XIE Cheng-Ying¹
 SONG Li-Tao¹ YU Hai-Ping¹ ZHENG Yong¹ GUO Wen-Tao¹
 LIU Zhong¹ ZHU Li-Hua³ WEN Shu-Xian³ WU Xiao-Guang³

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

2(Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

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

Abstract High-spin states in doubly odd ^{170}Re have been populated and investigated using $^{142}\text{Nd} (^{32}\text{S}, 1p3n\gamma)^{170}\text{Re}$ reaction at 166MeV bombarding energy. X- γ and γ - γ - t coincidence measurements have been carried out in the experiment. Based on the coincidence relationships, a rotational band in ^{170}Re has 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 band has been assigned to be built on the $\pi h_{11/2} \otimes \nu i_{13/2}$ configuration according to their rotational properties in quasiparticle alignment, signature splitting, level spacing systematics, as well as the existing knowledge in neighboring nuclei. Low-spin signature inversion has been suggested for the $\pi h_{11/2} \otimes \nu i_{13/2}$ band in ^{170}Re .

Key words in-beam γ -spectroscopy, deformed odd-odd nucleus, rotational band, signature inversion

Received 28 November 2003

* Supported by Natural Science Foundation of China for Distinguished Young Scholar (10025525), NSFC(1005012, 19705011), Major State Basic Research Development Program (G2000077400) and The Chinese Academy of Sciences

1) E-mail: yhzhang@ns.lzb.ac.cn