

质量数在 160-180 核区形变双奇核 高自旋态实验研究*

张玉虎¹ 赵庆中¹ 张双全¹ 周小红¹ 徐珊珊¹ 黄文学¹
郭应祥¹ 雷祥国¹ 刘忠¹ 卢俊¹ 冯希臣¹ 苟全卜¹
徐啸¹ 朱少飞¹ 何建军¹ 金寒娟¹ 陈新峰¹ 王树金¹
孙相富¹ 罗亦孝¹ 诸永泰¹ 温书贤² 吴晓光² 刘祥安²
袁观俊² 杨春祥² M. Oshima³ T. Hayakawa³ Y. Toh³
J. Katakura³ Y. Hatsukawa³ M. Matsuda³ N. Shinohara³
T. Ishii³ H. Kusakari⁴ M. Sugawara⁵ T. Komatsubara⁶

1(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2(中国原子能科学研究院 北京 102413)

3(Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai, Ibaraki 319-1195, Japan)

4(Chiba University, Inage-ku, Chiba 263-8512, Japan)

5(Chiba Institute of Technology, Narashino, Chiba 275-0023, Japan)

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

摘要 基于在 160—180 核区形变双奇核高自旋态研究中所取得的研究结果和最近几年陆续发表的双奇核高自旋态核谱学数据,系统地考察和研究了 $\pi h_{11/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 强耦合带和 $\pi h_{9/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 半退耦带旋称反转的特征和规律. 指出 $^{182,184}\text{Au}$ 核素的 $\pi i_{13/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 半退耦带也可能出现旋称反转;有限的实验数据似乎支持这一观点. 首次在双奇核 $^{178,180}\text{Ir}$ 的 $\pi h_{11/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 强耦合带中发现了低转频下的逐渐顺排现象;在 ^{178}Ir 核中发现了回弯频率反常超前. 这些反常现象可能与核形变(或中子对力)的组态依赖性有关.

关键词 核结构 高自旋态 双奇核 旋称反转

1 引言

在原子核高自旋态核结构研究中,对形变双奇核的研究越来越引起实验和理论核物理

* 中国科学院近代物理研究所所长基金、中国科学院留学归国人员择优支持基金、国家教委留学归国人员科研启动基金、国家自然科学基金(19605008, 10025525, 19635030)、中国科学院百人计划和“九五”特别支持项目(KJ95T-03)资助

学家的重视,并已成为目前国际上的前沿热门课题之一^[1]. 在质量数为 $A = 160$ 核区的双奇核中,系统地发现准粒子组态为 $\pi h_{11/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 的转动带,在低自旋处能级发生旋称反转^[2,3]. 世界上许多研究小组对这一奇异现象作了大量的实验和理论研究工作,探索导致这一现象的物理原因. 初步认为,这一奇特现象可能与原子核的三轴形变、 $p-n$ 剩余相互作用、带交叉等因素有关. 但迄今为止,还没有形成一个统一的认识,而且,不同的解释还存在相互矛盾之处. 1997 年丹麦波尔所的科学家在对双奇核 $^{162,164}\text{Tm}$ 和 ^{174}Ta 半退耦带(组态为 $\pi h_{9/2} \otimes \nu i_{13/2}$)的研究中,发现在低自旋区旋称劈裂也是反转的^[4]. 这一发现不但迫使人们对众多半退耦带的自旋值进行重新审定^[5,6],而且对解释此核区著名的带交叉频率的反常推迟提供了定量的背景知识材料^[7]. 因此在更大的核区提供核谱学数据、系统地研究这些奇异现象是十分必要的. 从 1992 年至今,我们对 ^{162}Lu , ^{170}Ta , ^{174}Re , $^{176,178,180}\text{Ir}$, ^{182}Au 等一系列双奇核进行了在束 γ 谱学研究. 本文将对这些研究结果作一综述性报道和讨论,详尽的研究结果和实验细节可参考相关的文献[8—12].

2 实验和测量

兰州重离子加速器国家实验室和北京原子能研究院的 HI-13 串列静电加速器为此研究项目提供了不同种类和不同能量的重离子束流. 中国科学院近代物理研究所和北京原子能科学研究院各有 6—8 套带 BGO 反康抑制的高纯锗 γ 探测器. 将两家的探测器联合起来使用,可构成由 12 套高纯锗 γ 谱仪组成的在束 γ 探测装置. 如果每次实验的有效束流时间能达到 100h,用此联合在束 γ 探测装置可获得 100 个百万以上的符合数据,基本满足我们的要求. 最近,我们又与日本原子力研究所(JAERI)在高自旋态核结构研究领域建立了合作关系,能够利用日本的加速器和实验设备来研究双奇核的高自旋态能带结构,这提高了我们对束流能量和种类的可选择性.

对选定的某个目标核,通常要进行 γ 射线的激发函数测量(用于在束 γ 射线的 A 指定)、 $KX-\gamma$ 符合测量(用于在束 γ 射线的 Z 指定)和 $\gamma-\gamma-t$ 符合测量(用于建立目标核高自旋态能级纲图). 从实验数据中提取 γ 射线的 DCO 系数和带内跃迁的 $B(M1)/B(E2)$ 比值,用于指定 γ 射线的多级性和转动带的准粒子组态.

3 研究结果和讨论

本工作开展之前, ^{162}Lu , $^{176,178,180}\text{Ir}$ 和 ^{182}Au 的高自旋态核谱学数据还是空白, ^{170}Ta 和 ^{174}Re 的核谱学数据还很不完备^[13]. 经过多年的努力,我们首次建立了 ^{162}Lu , $^{178,180}\text{Ir}$ ^[10,11] 和 ^{182}Au 核素的高自旋态能级纲图,扩展并修正了 ^{170}Ta ^[6] 和 ^{174}Re ^[12] 的高自旋态能带结构. ^{176}Ir 和 ^{182}Au 的实验数据尚在进一步处理和分析. 下面结合这些研究结果和最近几年陆续发表的双奇核高自旋态核谱学数据,对一些有趣的现象做一些定性分析和讨论.

3.1 $\pi h_{11/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 组态下转动带能级的旋称反转

此项研究工作的主要目的之一是在更广的核区寻找基于 $\pi h_{11/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 组态下的转动

带,观测这个转动带能级是否在低自旋区发生旋称反转,研究反转自旋点和旋称劈裂的大小在同中子双奇核或同位素中的变化规律.我们在 ^{162}Lu , $^{178,180}\text{Ir}$ 核素中确实观测到了基于 $\pi h_{11/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 组态下转动带^[8,10],并发现这些转动带在低自旋区能级劈裂是反转的.对于 $Z=77$ 的Ir核素,其质子费米面处于 $h_{11/2}$ 子壳的上部,此时 $\pi h_{11/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 组态下的转动带也发生旋称反转.这一现象说明,质子费米面位置对发生旋称反转的影响不大;这与基于粒子-转子模型的理论预言^[14]相矛盾.通过系统学分析发现^[3,9],从Ho到Ta,基于 $\pi h_{11/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 组态下转动带能级的旋称劈裂幅度随质子数的增加而增大,对某一双奇核同位素,旋称劈裂幅度随中子数的增加而减小.另外发生旋称交叉的自旋值 I_c 随质子数、中子数的变化呈现出很好的规律性.然而, $^{178,180}\text{Ir}$ 的情况却偏离了上述这些规律^[10],即在 $^{178,180}\text{Ir}$ 核中,能级的旋称劈裂幅度要明显小于在 $^{176,178}\text{Re}$ 核中的劈裂幅度,而且发生旋称交叉的自旋值也没有明显的变化.这种现象可能与核的形状变化以及 $Z=76$ 时出现大的能隙有关.

3.2 $\pi h_{9/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 组态下半退耦带能级的旋称反转

在 $A=160-180$ 核区,实验上已经观测到许多基于 $\pi h_{9/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 组态下的半退耦带.早期的实验数据由于未能建立转动带与基态或低位已知 I^π 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^π 值.因此对能级 I^π 值的指定受到理论期望值的影响(或误导),很自然地将能量较低的 $\Delta I=2$ 转动系列指定为奇数自旋(旋称量子数 $\alpha_f=1$).最近在对 $^{162,164}\text{Tm}$ 和 ^{174}Ta 核的高自旋态研究中,不但将转动带推到很高的自旋态,而且建立了带间跃迁和(或)带头与基态或已知 I^π 值能态之间的联系,从而准确地测定了能级的 I^π 值^[4].由此人们发现基于 $\pi h_{9/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 组态下的半退耦带在低自旋处也发生旋称反转.我们在对双奇核 ^{170}Ta 的研究中^[6],曾发现了旋称反转的迹象,但是由于我们的实验数据统计不高,没能在较高自旋处观测到旋称交叉(较高自旋处能级的旋称交叉可视为低自旋发生旋称反转的间接实验证据^[10]).最近我们在对 $^{178,180}\text{Ir}$ 和 ^{182}Au 核的研究中首次观测到这3个核的半退耦带,发现它们在低自旋区发生旋称反转,特别是观测到了 ^{178}Ir 和 ^{182}Au 核素在较高自旋处发生了旋称交叉.

图1给出了此区15个双奇核半退耦带能级旋称劈裂 $E(I)-E(I-1)$ 随能级自旋 I 变化的系统性特征.在这种表示方法中,正常的旋称劈裂应该是黑点的连线在圆点连线的下面.从图1可以清楚地看到,在较低自旋区,旋称劈裂是反转的.在某一较高自旋值处,两个转动能级系列发生交叉,旋称劈裂才由反常变为正常.如果将发生交叉的自旋值称为旋称交叉自旋 I_c ,参考 I_c 在Ta同位素和 ^{178}Ir 同中子素中的变化趋势,可以得出下面的结论: I_c 随质子数(中子数)的增加而减小(增大),增加或减少两个核子而导致 I_c 的变化范围大约为 $2\sim 3(\hbar)$.但是 ^{182}Au 却偏离了这一规律,原因是什么还有待于进一步探讨.值得一提的是,在组态为 $\pi h_{11/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 的强耦合带中,同样存在着 I_c 随核子数的变化关系,但是变化趋势与半退耦带相反.考虑到两个组态的差别仅表现为质子所占据的轨道不同:占据 $h_{9/2}$ 和 $h_{11/2}$ 子壳的质子自旋取向相反,相应的Nilsson轨道具有不同的形变驱动作用. I_c 随核子数变化所呈现的相反变化趋势是否与此有关,值得进一步深入研究.

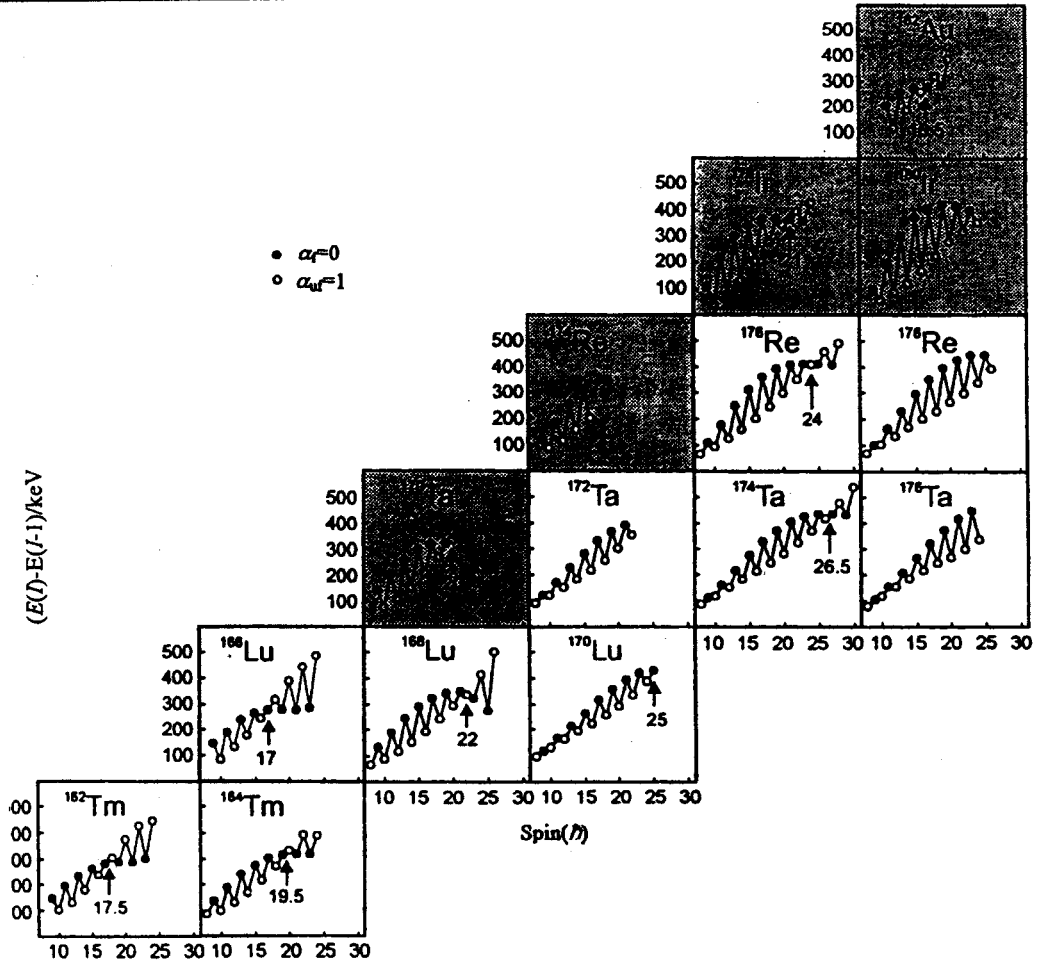


图 1 双奇核 $\pi h_{9/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 半退耦带旋称反转的系统性

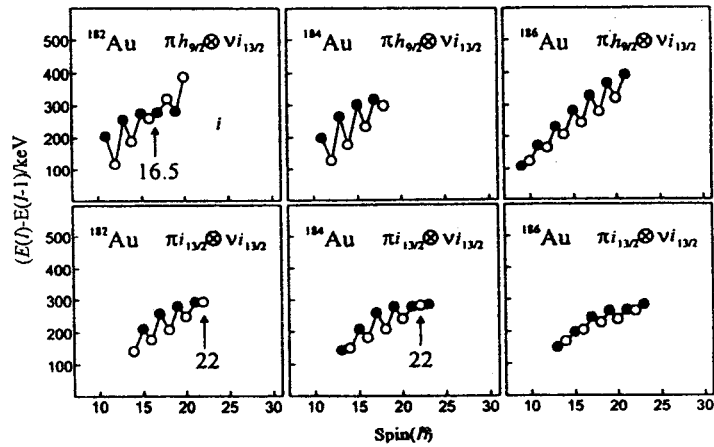


图 2 双奇核 $^{182,184,186}\text{Au}$ $\pi i_{9/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 和 $\pi h_{13/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 组态下的半退耦带旋称劈裂的系统性

3.3 关于 $^{182-186}\text{Au}$ 核 $\pi i_{13/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 组态下的半退耦带

基于 $\pi h_{9/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 组态下的半退耦带在低自旋区发生旋称反转已被普遍认可. 考虑到质子侵入轨道 $h_{9/2} - 1/2^- [541]$ 和 $i_{13/2} - 1/2^+ [660]$ 具有相似的性质, $\pi i_{13/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 组态下的半退耦带在低自旋区也可能发生旋称反转. 基于这一考虑,我们对 ^{182}Au 的高自旋态进行了实验研究,并发现了这一转动带. 在双奇核 $^{184,186}\text{Au}$ 中均观测到这一组态下的转动带^[15,16],但能级自旋还未确定. 结合我们对 ^{182}Au 研究中得到的核谱学数据,利用准粒子顺排角动量相加性规则和能级间隔的系统性,我们初步指定了 $^{182-186}\text{Au}$ 核素 $\pi i_{13/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 转动带能级自旋,发现它们在低自旋区能级也是反转的. 即:具有 favored 旋称量子数($\alpha_f = 1$)的能级比具有 unfavored 旋称量子数($\alpha_u = 0$)的能级要高. 图 2 给出了 $^{182-186}\text{Au}$ 核中两种半退耦带能级旋称劈裂的系统性变化. 可见其旋称劈裂的特征是非常相似的,特别是在 $^{182,184}\text{Au}$ 的 $\pi i_{13/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 转动带中,旋称交叉的趋势是很明显的($I_c = 22\hbar$). 当然是否在 $\pi i_{13/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 组态下的转动带中也发生旋称反转需要在实验上得到进一步证实.

3.4 $^{178,180}\text{Ir}$ 核 $\pi h_{11/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 组态下准粒子的逐渐顺排

图 3 给出了 ^{178}Ir 3 个转动带和 ^{176}Os 基态带准粒子顺排角动量 i_x 随转动频率的变化关系. 发现基于 $\pi h_{11/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 组态下的强耦合带,其准粒子顺排在回弯角频率之前呈现迅速增加的趋势. 在 ^{180}Ir 中也有类似的情况. 在相邻偶偶核和奇 A 核的某些转动带中也曾观测到这种奇特现象(称为低自旋顺排异常),但在双奇核的研究中这还是第一次. 这一现象是否具有普遍性? 是否与核形状(特别是 β 形变和 γ 形变)的组态依赖性有关? 或是由于其它什么原因引起的? 等等这些问题很值得我们做进一步的深入研究. 对此我们将在另一篇文章

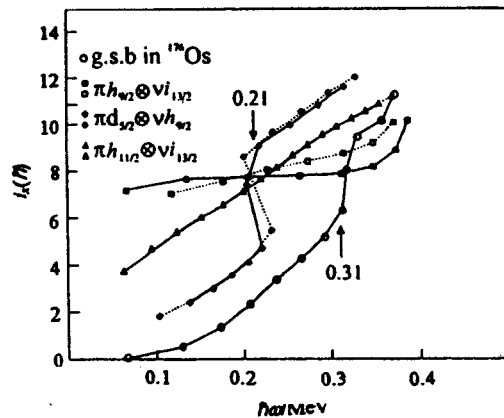


图 3 双奇核 ^{178}Ir 3 个转动带和 ^{176}Os 基态带准粒子顺排随转动频率的变化关系
计算中利用了相同的 Harris 参数 $J_0 = 21.5\text{MeV}^{-1}\hbar^2$; $J_1 = 80\text{MeV}^{-3}\hbar^4$

中做专门讨论.

3.5 ^{178}Ir 核中带交叉频率的反常超前

双奇核能级结构的复杂性来源于在低位激发能区它的能级密度就很高. 在费米面附近的准质子和准中子, 在轻度激发的情况下就可占据不同的 Nilsson 轨道, 处在不同轨道上的两个准粒子之间构成众多的耦合模式. 可想而知, 基于不同准粒子组态下的转动带将呈现出不同的核结构特征. 的确, 在我们最近研究的形变双奇核 ^{178}Ir 中, 新发现的 4 个转动带呈现出不同的核结构特征, 最奇特的是发现了回弯频率的反常超前(见图 3). 这种回弯频率异常超前现象在现有文献中还未曾见到过报道. 转动带的回弯现象是高自旋态研究中的重大发现之一, 通过它人们可以研究核内粒子的对关联和核形状的组态依赖性. 在本工作感兴趣的核区, 普遍认为偶偶核的基态带第一回弯(中子的 AB 交叉)发生在转动频率为 $\hbar\omega_c = 0.30\text{MeV}$ 处. 但是在 ^{178}Ir 中却发现了一个回弯频率很低($\hbar\omega_c = 0.21\text{MeV}$)的转动带. 分析相邻核的带结构特征表明, 仅考虑“阻塞效应”是不能解释这一奇异现象的; 所以必须考虑其它的因素, 如: p-n 剩余相互作用、核形变或对关联的组态依赖性等.

另一方面, 由于双奇核的能级密度很高, 不同准粒子组态下的转动带具有不同的核结构特征, 例如不同的形变、不同的顺排特征等. 因此, 有可能出现两个相同宇称的二准粒子带之间的带交叉. 这种带交叉与通常所指的中子 AB 交叉不同, 是二准粒子带之间发生的一种偶然现象, 而与中子拆配对无关. 如果用这种机制分析 $\pi d_{5/2} \otimes \nu i_{9/2}$ 带的在 $\hbar\omega_c = 0.21\text{MeV}$ 处发生回弯, 也就不足为奇了.

4 总结

通过对形变双奇核 ^{162}Lu , ^{170}Ta , ^{174}Re , $^{176, 178, 180}\text{Ir}$ 和 ^{182}Au 等核素的在束 γ 谱学研究, 获得了丰富的自旋态核谱学数据. 这些数据特别是成系统的实验数据可作为理论分析的基础, 有利于深入系统地研究双奇核的带结构特征并澄清与其相联系的物理原因. 基于 $\pi h_{11/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 和 $\pi h_{9/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 组态下的转动带能级在低自旋发生旋称反转应该是一个普遍存在的实验事实. 那么, 这种现象的存在是否有一定的区域限制? $^{178, 180}\text{Ir}$ 和 ^{182}Au 核中旋称反转的某些特征量为什么会偏离系统性? $\pi i_{13/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 组态下的转动带是否也发生旋称反转? 这些问题无疑需要在实验上和理论上做进一步探讨. 另外, 对于轻的 Re-Os-Ir-Pt 过度区核素, 原子核相对于 β 形变和 γ 形变是比较“软”的, 核结构以及与其相联系的带结构特征与准粒子组态密切相关, 本研究工作发现的低自旋顺排异常很可能与此有关.

参考文献(References)

- 1 Jain A K, Sheline R K, Headly D M et al. *Rev. of Mod. Phys.*, 1998, **70**:843—895
- 2 Bengtsson R, Frisk R H, May R F et al. *Nucl. Phys.*, 1984, **A415**:189—214
- 3 LIU Y Z, MA Y J, YANG H T et al. *Phys. Rev.*, 1995, **C52**:2514—2519
- 4 Bark R A, Espino J M, Reviol W et al. *Phys. Lett.*, 1997, **B406**:193—199
- 5 Cardona M A, Kreiner A J, Hojman D et al. *Phys. Rev.*, 1999, **C59**: 1298—1315
- 6 ZHANG Y H, ZHANG S Q, ZHAO Q Z et al. *Phys. Rev.*, 1999, **C60**: 044311-1—044311-12
- 7 Bark R A, Carlsson, Freeman S J et al. *Nucl. Phys.*, 1998, **A630**: 603—630
- 8 ZHANG Y H, ZHOU X H, ZHAO Q Z et al. *Chin. Jour. of Nucl. Phys.*, 1995, **17**:250—253; *Z. Phys.*, 1996, **A355**:335—336
- 9 ZHANG Y H, ZHAO Q Z, ZHOU X H et al. *High Energy Phys. and Nucl. Phys.*, 1997, **21**:393—401 (in Chinese)
(张玉虎, 赵庆中, 周小红等. *高能物理与核物理*, 1997, **21**:393—401)
- 10 ZHANG Y H, Hayakawa T, Oshima M et al. *High Energy Phys. and Nucl. Phys.*, 2000, **24**:1123—1130 (in Chinese)
(张玉虎, Hayakawa T, Oshima M et al. *高能物理与核物理*, 2000, **24**:1123—1130)
- 11 ZHANG Y H, Hayakawa T, Oshima M et al. *Eur. Phys. J.*, 1999, **A5**: 345—349
- 12 ZHANG Y H et al. *High Energy Phys. and Nucl. Phys.*, 2000, **24**:369—372 (in Chinese); *Euro. Phys. J.*, 2000, **A7**:19—22
(张玉虎等. *高能物理与核物理*, 2000, **24**:369—372)
- 13 Firestone R B, Shirley V S, Baglin C M et al. *Table of Isotopes*, 1996, **2**:2139
- 14 Hamamoto I. *Phys. Lett.*, 1990, **B235**:221—224
- 15 Ibrahim F, Hojman D, Kreiner A J et al. *Phys. Rev.*, 1996, **C53**:1547—1556
- 16 Janzen V P, LIU Z M, Carpenter M P et al. *Phys. Rev.*, 1996, **C45**:613—639

Experimental Study of High-spin States in Odd-Odd Nuclei around 160—180 Mass Region *

ZHANG Yu-Hu¹ ZHAO Qing-Zhon¹ ZHANG Shuang-Quan¹ ZHOU Xiao-Hong¹
 XU Hu-Shan¹ HUANG Wen-Xue¹ GUO Ying-Xiang¹ LEI Xiang-Guo¹ LIU Zhong¹
 LU Jun¹ FENG Xi-Chen¹ GOU Quan-Bu¹ XU Xiao¹ ZHU Shao-Fei¹ HE Jian-Jun¹
 JIN Han-Juan¹ CHEN Xin-Feng¹ WANG Shu-Jin¹ SUN Xiang-Fu¹ LUO Yi-Xiao¹
 ZHU Yong-Tai¹ WEN Shu-Xian² WU Xiao-Guang² LIU Xiang-Ar² YUAN Guan-Jun²
 YANG Chun-Xiang² M. Oshima³ T. Hayakawa³ Y. Toh³ J. Katakura³ Y. Hatsukawa³
 M. Matsuda³ N. Shinohara³ T. Ishii³ H. Kusakari⁴ M. Sugawara⁵ T. Komatsubara⁶

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

2(*China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China*)

3(*Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai, Ibaraki 319-1195, Japan*)

4(*Chiba University, Inage-ku, Chiba 263-8512, Japan*)

5(*Chiba Institute of Technology, Narashino, Chiba 275-0023, Japan*)

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

Abstract In recent years, high-spin states in a series of deformed odd-odd nuclei ^{162}Lu , ^{170}Ta , ^{174}Re , $^{176,178,180}\text{Ir}$ and ^{182}Au have been studied in corporation with the researchers in the IMP (Institute of Modern Physics, CAS), CIAE (China Institute of Atomic Energy) and JAERI (Japan Atomic Energy Research Institute). The experimental results are reviewed in this report. The interesting phenomenon of low-spin signature inversion in both the $\pi h_{11/2} \otimes \nu i_{13/2}$ and $\pi h_{9/2} \otimes \nu i_{13/2}$ configurations has been systematically studied and discussed for the nuclei in this mass region. A possible low-spin signature inversion is suggested for the $\pi i_{13/2} \otimes \nu i_{13/2}$ structure in $^{182,184}\text{Au}$ and the limited experimental data seem to support such a suggestion. The gradual alignment gains with rotation are reported, for the first time, in the $\pi h_{11/2} \otimes \nu i_{13/2}$ bands of odd - odd $^{178,180}\text{Ir}$. An unexpected smaller band crossing frequency is observed in ^{178}Ir (most probably in the $\pi d_{5/2} \otimes \nu h_{9/2}$ configuration). These anomalies may be associated with the configuration-dependent deformations and/or neutron pairing.

Key words nuclear structure, high spin states, odd-odd nucleus, signature inversion

* Supported by Director's Research Fund of IMP, Research Funds of CAS and State's Education Committee of China for Oversea Chinese Students, NSFC (19605008, 10025525, 1635030), One Hundred Talents Project of CAS, and 95 Significant Project for Basic Research of CAS (KJ95T-03)