

奇奇核 ^{170}Ta 高自旋态及旋称反转研究*

邓富国^{1,5} 杨春祥^{2,4,1} 孙慧斌³ 吴晓光² 陆景彬⁴
赵广义⁴ 韩广兵² 彭朝华² 尹利长⁴ 温书贤²
李广生² 袁观俊² 周宏余^{1,5} 刘运祚⁴ 竺礼华²

1 (北京师范大学射线束技术与材料改性教育部重点实验室 北京 100875)

2 (中国原子能科学研究院 北京 102413)

3 (深圳大学核技术研究所 深圳 518060)

4 (吉林大学物理系 长春 130023)

5 (北京市辐射中心 北京 100875)

摘要 用 97MeV 的 ^{19}F 束通过 $^{155}\text{Gd}(^{19}\text{F}, 4n)^{170}\text{Ta}$ 反应布居了奇奇核 ^{170}Ta 的高自旋态, 将 ^{170}Ta 的 3 个转动带推向了更高的自旋态, 并观测到了半退耦带的旋称反转点, 将其自旋值定在了 19.5 \hbar . 首次比较系统地总结了稀土区半退耦带的旋称反转系统规律, 并比较了该核区半退耦带与晕带的系统性差异, 特别是这两个带在能量劈裂程度上存在着系统性差异. 从这一现象出发, 探讨了半退耦带与晕带旋称反转系统性差异的成因, 指出 p-n 剩余相互作用在这一现象中起着非常重要的作用.

关键词 奇奇核 高自旋态 半退耦带 旋称反转 能量劈裂

1 引言

旋称反转研究是近几年来高自旋态研究的热门课题之一. 旋称反转大多发生在奇奇核低自旋能谱中. 正常情况下, 优惠的旋称能态低于非优惠的旋称能态. 当非优惠的旋称能态低于优惠的旋称能态时, 即出现反常旋称劈裂, 这种现象称之为旋称反转. 随着自旋值升高, 旋称能量劈裂逐渐减小. 而刚刚从反常旋称劈裂状态恢复到正常旋称劈裂状态时, 其自旋值称为旋称反转点. 实验发现稀土区形变奇奇核的转动带普遍存在旋称反转现象. 1995 年, 刘运祚等^[1] 根据顺排角动量的相加性规则和激发能系统学的判据, 对 ^{156}Tb , ^{158}Ho , ^{166}Lu 和 ^{168}Ta 4 个奇奇核的晕带的自旋值进行了改正, 重新确定了它们的反转点, 并改正了后 3 个核旋称的上下顺序. 在此基础上总结了 $A \approx 160$ 核区奇奇核晕带旋称反转系统规律. 近几年来, 半退耦带的实验成果不断地增多, 在 $^{162,164}\text{Tm}$ ^[2], $^{166,170}\text{Lu}$ ^[3,4],

2001-07-05 收稿

* 国家自然科学基金重点基金(19635030, 19675007, 19875012)和 973 国家重点基础研究发展规划项目(G2000077405)资助.

$^{172,174}\text{Ta}^{[5,2]}$, $^{176}\text{Re}^{[6]}$ 和 $^{178}\text{Ir}^{[7]}$ 等奇奇核的实验成果中均已观测到半退耦带的旋称反转点.

张玉虎等^[8]最近发表了 ^{170}Ta 高自旋态的新成果,在纠正前人错误的基础上建立了 3 个高自旋转动带,观测到晕带的旋称反转点.由于半退耦带中优惠旋称能量远高于非优惠旋称能量,优惠旋称能态布居强度太弱,因而未观测到半退耦带的旋称反转点.文献 [8]指出从其趋势估计反转点自旋值大约为 $20\hbar$ 左右.本项工作的目的是将 ^{170}Ta 的能级纲图推向更高自旋态,试图寻找半退耦带的旋称反转点,并探讨其系统性规律和形成机制.

2 实验与数据获取

实验是在中国原子能科学研究院(CIAE)串列加速器核物理国家实验室进行的.由 HI-13 串列加速器产生的 97MeV 重离子 ^{19}F 束经准直后打在金属 ^{155}Gd 靶上,通过 $^{155}\text{Gd}(^{19}\text{F}, 4n)^{170}\text{Ta}$ 反应布居了 ^{170}Ta 的高自旋态.金属靶 ^{155}Gd 浓缩同位素的纯度为 91.61%.靶的厚度约为 $1.8\text{mg}/\text{cm}^2$,在靶的背面蒸发一层厚为 $3.5\text{mg}/\text{cm}^2$ 的 ^{208}Pb 作为衬底.实验中共使用了 10 台 HPGe-BGO 反康谱仪和一台平面 HPGe 探测器进行 γ - γ 符合测量.其中有 4 台在接近 90° 方向(相对于束流方向),3 台在接近 45° 方向,3 台在接近 135° 方向.本次实验数据在线获取共收集了大约 28×10^7 个 γ - γ 符合事件.在离线处理时,通过反演把在束实验获取的 γ - γ 符合数据建立成 E_γ - E_γ 二维能谱矩阵.通过开窗投影并考虑跃迁强度自洽等各种因素来建立奇奇核 ^{170}Ta 的高自旋态能级纲图.

3 实验结果

1985 年, J. C. Bacelar 等^[9]发表了 ^{170}Ta 高自旋态实验成果,他们建立了 3 个转动带.1997 年,张玉虎等^[10,8]利用 $^{159}\text{Tb}(^{16}\text{O}, 5n)^{170}\text{Ta}$ 反应,重新研究了 ^{170}Ta 的高自旋态能级结构,建立了一个由 3 个转动带组成的高自旋能级纲图,并指出 Bacelar 等建立的正宇称带实际上是其邻核 $^{170}\text{Hf}^{[11]}$ 的晕带.在这个新能级纲图中,3 个转动带仍然是浮动的,因为未观测到它们与 ^{170}Ta 的基态和低激发态之间的连接跃迁.

我们的实验通过 $^{155}\text{Gd}(^{19}\text{F}, 4n)^{170}\text{Ta}$ 反应布居了 ^{170}Ta 的 3 个已知的转动带.通过对 γ - γ 符合实验的大量开窗投影谱分析,验证了张玉虎等^[8,10]建立的能级纲图,对其结果做了部分修改,将 3 个转动带推向了更高自旋态,见图 1.图 2 是 3 个转动带的部分较典型的开窗投影谱.

如图 1 所示,在新建的能级纲图的带 A(晕带)中,增加了能量分别为 311.5, 319.5 和 680.9keV 的 3 条 γ 跃迁;并用能量为 637.6keV 的 γ 跃迁取代了原来的能量为 647keV 的 γ 跃迁^[8].我们做这种取代的理由是:在晕带的能量分别为 552 和 609keV 的 γ 跃迁的开窗投影谱中看不到能量为 647keV 的 γ 射线峰;而且在晕带低自旋态之间的 γ 跃迁的开窗投影谱中,637.6keV 的 γ 射线峰比 647keV 的 γ 射线峰更强,从跃迁强度自洽看 637.6keV 比 647keV 更合理.图 2(a)给出了能量为 552keV 的 γ 跃迁的开窗投影谱.

对带 B(半退耦带),增加了能量分别为 88, 136.7, 147, 190.8, 203.6, 265.5, 319.6, 326,

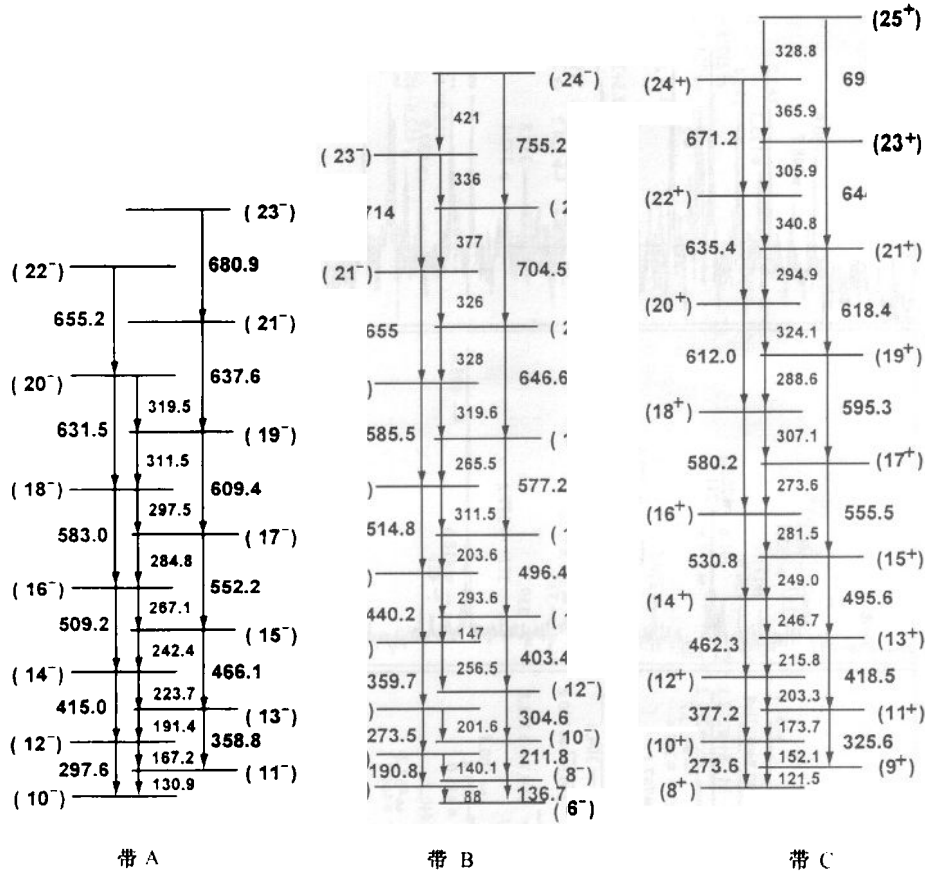


图 1 奇奇核¹⁷⁰Ta 能级纲图

328, 336, 377, 421, 655 和 714keV 等 14 条 γ 跃迁. 图 2(b) 是半退耦带能量为 304 和 496keV 的 γ 跃迁的开窗投影谱的加合谱. 从图中可以比较清楚地看到新增加的能量分别为 655 和 714keV 的两条 γ 跃迁. 在这两条 γ 跃迁的开窗投影谱中, 也都能看到半退耦带的主要 γ 跃迁. 图 2(c) 给出了能量为 655keV 的 γ 跃迁的开窗投影谱. 将 655keV 的 γ 跃迁放在 585.5keV 的 γ 跃迁之上, 是因为在 655keV 的 γ 跃迁的开窗投影谱中看不到 646.6 和 704.5keV 的 γ 射线峰. 类似的原因, 把 714keV 的 γ 跃迁放在了 655keV 的 γ 跃迁之上. 增加 655 和 714keV 的 γ 跃迁的重要意义在于由此我们首次观测到了奇奇核¹⁷⁰Ta 半退耦带的旋称反转点.

对带 C, 增加了能量分别为 305.9, 328.8, 340.8, 365.9, 671.2 和 695keV 等 6 条 γ 跃迁. 图 2(d) 是带 C 的几条低自旋态之间的 γ 跃迁对应开窗投影谱的加合谱, 在该图中新增加的跃迁清晰可见. 对于 3 个转动带中的其它新增加的跃迁, 均是通过大量开窗, 综合级联关系和跃迁强度自洽等各种因素确定的, 在此不一一详细说明.

在开窗投影分析过程中, 还看到能量分别为 98, 212.5, 672.5, 699, 721 和 764keV 等 γ 跃迁与晕带存在着级联, 但目前还不能确定它们在能级纲图中的位置.

¹⁷⁰Ta 的这 3 个转动带的组态和能级自旋宇称都采用了文献[8]中的结果. 即带 A 为

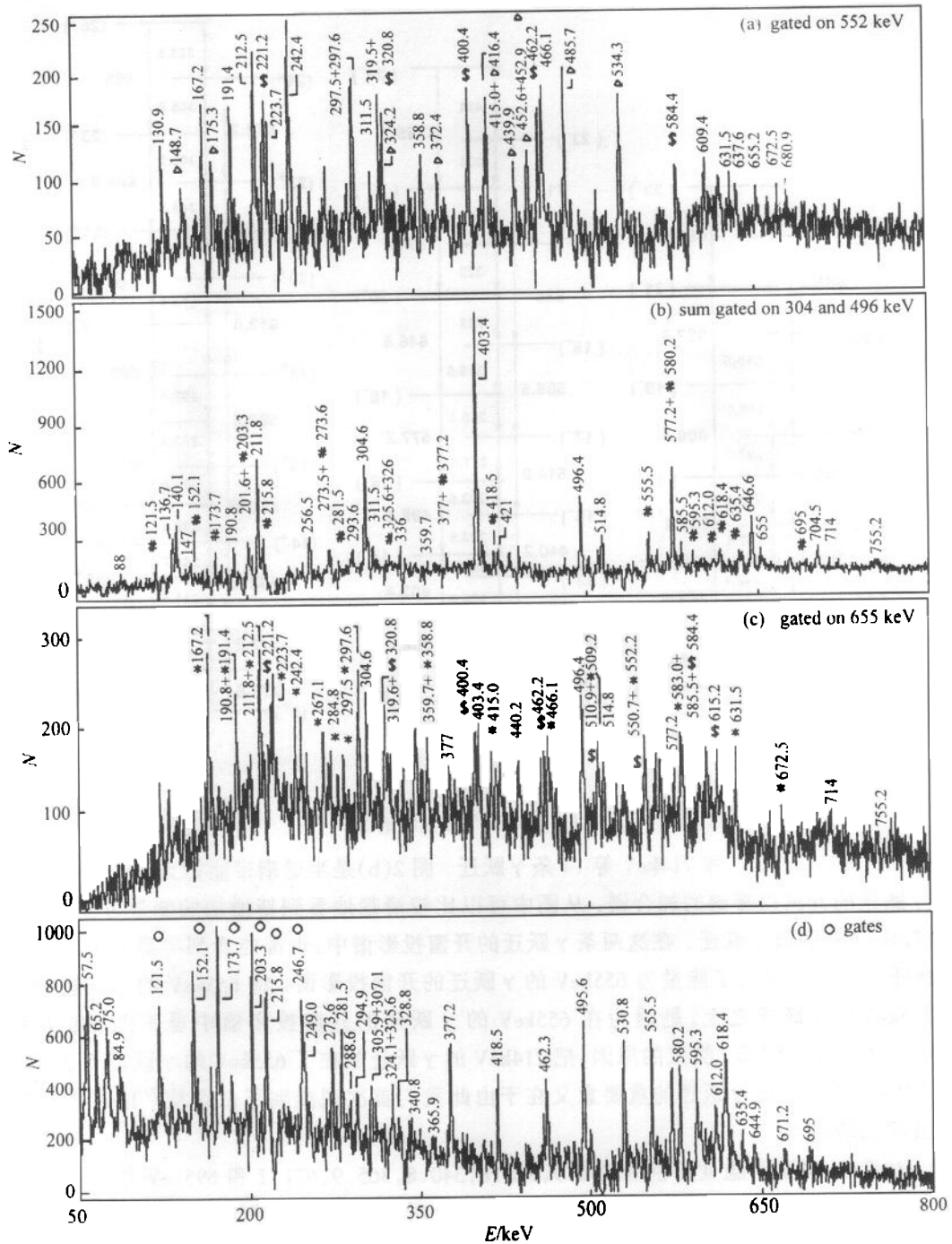


图 2 奇奇核¹⁷⁰Ta 的部分开窗谱图

△ γ 射线属于¹⁶⁰Ta, □ 属于¹⁷⁰Hf, * 属于带 C, × 属于带 A.

晕带 (yrast band), 它是负宇称带, 是建立在 $\pi h_{11/2} 9/2^- [514] \otimes \nu i_{13/2} 5/2^+ [642]$ 尼尔逊组态之上的强耦合带. 带 B 为半退耦带 (semidecoupled band), 它也是负宇称带, 是建立在 $\pi h_{9/2} 1/$

2⁻ [541] ⊗ νi_{13/2} 5/2⁺ [642] 尼尔逊组态之上的转动带. 带 C 是一个正宇称带, 是建立在 π5/2⁺ [402] ⊗ ν5/2⁺ [642] 尼尔逊组态之上的强耦合带. 在本项研究过程中, 我们根据各带的布居强度、邻核的系统规律以及实验 Routhian 和顺排角动量 (alignment) 等各个因素进行一些验证, 觉得他们的指定是比较合理的. 由于这 3 个转动带能级的自旋和宇称都是按系统性规律指定的, 所以在我们给出的能级纲图中, 能级的自旋和宇称保留了前人能级纲图^[8]中的括号. 能级纲图中的各 γ 跃迁的能量是以偶偶核¹⁷⁰Hf 的晕带为基准进行刻度的.

4 讨论

在前人的工作中, 稀土区奇奇核晕带的旋称反转研究已经积累了较多的实验成果, 刘运祚等^[1]对其系统规律已做过研究. 张玉虎等观测到了¹⁷⁰Ta 晕带的旋称反转点, 在参考文献^[8]中张玉虎等结合¹⁷⁰Ta 对稀土区晕带旋称反转的系统性规律进行了总结, 这里不再做讨论.

4.1 ¹⁷⁰Ta 半退耦带旋称反转现象

如前所叙, 奇奇核¹⁷⁰Ta 半退耦带是基于 πh_{9/2} 1/2⁻ [541] ⊗ νi_{13/2} 5/2⁺ [642] 尼尔逊组态的转动带^[8]. 优惠的旋称量子数 α_f = α_f^p + α_fⁿ = 1/2 + 1/2 = 1, 非优惠的旋称量子数 α_{uf} = α_f^p + α_{uf}ⁿ = 1/2 - 1/2 = 0^[8,21].

图 3 给出了¹⁷⁰Ta 半退耦带能级能量摆动 E(I) - E(I - 1) 随自旋 I 的变化曲线. 从图中可以看到, 在 I < 19ħ 时, α_{uf} = 0 的能态序列比 α_f = 1 的能态序列低, 处于反常旋称劈裂; 当 I > 20ħ 时, 恢复到 α_f = 1 的能态序列比 α_{uf} = 0 的能态序列低的状态, 即恢复到正常旋称劈裂. 在 19 ~ 20ħ 之间, 发生了从反常旋称劈裂到正常旋称劈裂的转换, 即¹⁷⁰Ta 半退耦带大约在自旋值 I = 19.5ħ 处发生了旋称反转, 图 3 中箭头标出的是反转点.

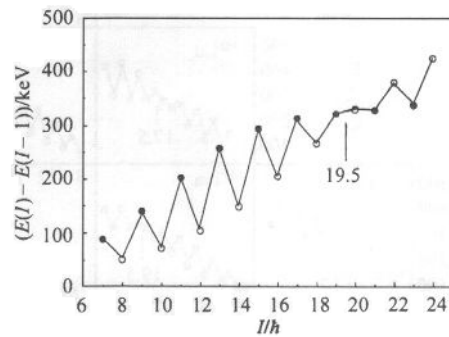


图 3 ¹⁷⁰Ta 半退耦带旋称能级劈裂图
● 优惠的能态 α_f = 1, ○ 非优惠的能态 α_{uf} = 0.

4.2 稀土区奇奇核半退耦带旋称反转系统性分析

稀土区奇奇核半退耦带旋称反转的实验成果虽然远没有晕带那么丰富, 但也已有一些系统性研究^[7,8,12]. 现结合本次实验结果, 对稀土区半退耦带旋称反转规律做进一步分析研究.

根据最新的实验成果, 对^{162,164}Tm^[2], ¹⁶⁶Lu^[3], ¹⁶⁸Lu^[13], ¹⁷⁰Lu^[4], ¹⁷⁰Ta, ¹⁷²Ta^[5], ¹⁷⁴Ta^[2], ¹⁷⁶Ta^[14], ¹⁷⁴Re^[15], ¹⁷⁶Re^[15], ¹⁷⁸Re^[16], ¹⁷⁸Ir^[7] 和 ¹⁸⁰Ir^[12] 等稀土区奇奇核的旋称反转做了系统比较, 见图 4. 其中, 文献^[16]中的¹⁷⁸Re 的半退耦带和晕带各能级的自旋值已根据顺排角动

量相加规则和能量系统学对应加 $1\hbar$ ^[3]. 从图 4 中可以总结出下面一些主要的系统性规律: (1)同晕带一样,半退耦带在低自旋区都呈现出反常旋称劈裂;在高自旋区恢复到正常旋称劈裂;在某一个自旋值(反转点)发生从反常旋称劈裂到正常旋称劈裂的转化. (2)半退耦带旋称反转点的自旋值随质子数的增加而减小,随中子数的增加而增大. 相邻奇奇核之间大约相差 $2-4\hbar$ 不等. (3)在 N-Z 相等的链上,反转点的自旋值并不像晕带那样基本相等^[1],而有随质量数 A 增加而增大的趋势. (4)能量的摆动幅度在反转点之前先由小变大,而后由大变小,直到反转点. 反转之后,能量的摆动幅度逐渐增大,且其摆动幅度比晕带的能量摆动大很多.

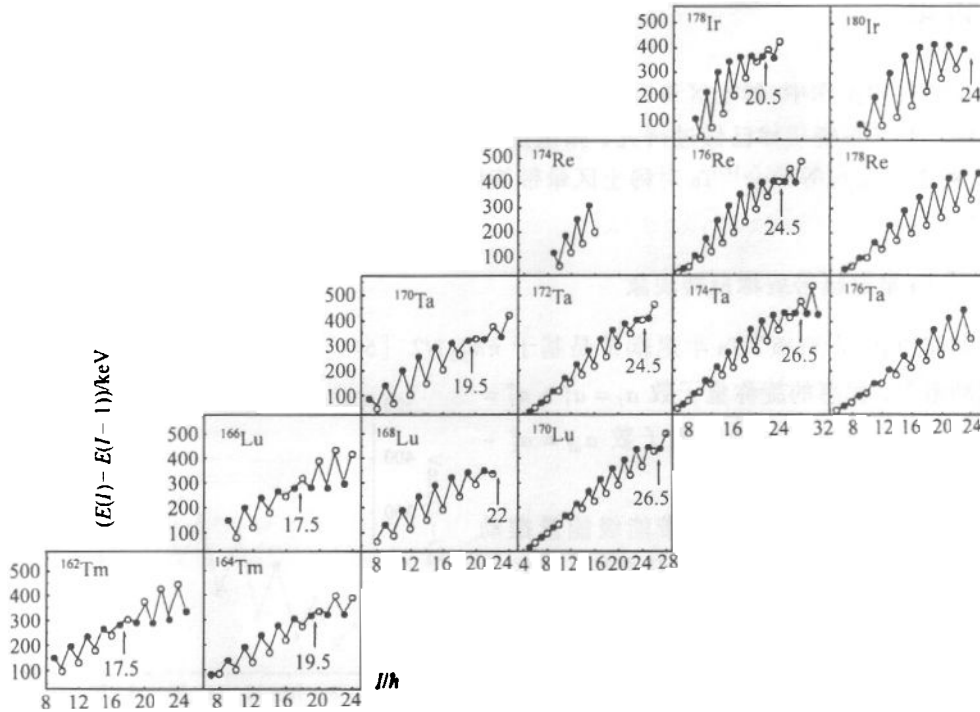


图 4 稀土区奇奇核半退耦带旋称能量劈裂比较图

● 优惠的能态 $\alpha_i = 1$, ○ 非优惠的能态 $\alpha_i = 0$.

4.3 稀土区奇奇核半退耦带与晕带旋称反转差异系统比较

从半退耦带的系统规律可以看出,稀土区奇奇核半退耦带与晕带旋称反转存在着一些明显的差异. 图 5 给出了稀土区已观测到晕带和半退耦带的^{162,164}Tm^[17,2],¹⁶⁶Lu^[3],¹⁶⁸Lu^[13],¹⁷⁰Lu^[4],¹⁷⁰Ta,¹⁷²Ta^[5],¹⁷⁴Ta^[2],¹⁷⁶Ta^[14],¹⁷⁶Re^[16],¹⁷⁸Re^[16]和¹⁷⁸Ir^[7]等 12 个奇奇核的晕带和半退耦带旋称反转的系统比较. 为了便于描述两个转动带的差异,同一个奇奇核的晕带和半退耦带画在了一起,由于两个带的质子组态不同,因而两个带的优惠的旋称量子数不同. 对晕带优惠旋称量子数 $\alpha_i = 0$;对半退耦带 $\alpha_i = 1$.

从图 5 可以看出晕带与半退耦带旋称反转主要存在下面一些系统性差异: (1)半退耦带的旋称能量劈裂的程度比晕带的旋称能量劈裂程度大很多. 对半退耦带而言,优惠的

4.4 稀土区奇奇核半退耦带和晕带旋称反转系统差异的探讨

稀土区奇奇核半退耦带与晕带的系统差异是怎样形成的呢?从两个带的组态来看,对于同一个奇奇核而言,这两个带的奇中子都处于同一中子组态,而它的奇质子处于不同的组态.可见晕带和半退耦带表现在旋称反转方面的系统差异很可能来源于质子组态的差异.从尼尔逊单粒子能级图上可以看出在这一核区($Z = 69-77$),质子费米面处于 $h_{11/2}$ 壳的上部和 $h_{9/2}$ 壳的下部.当奇奇核的那一个奇质子处于 $h_{9/2}$ 壳上时,它有很大的几率填充 $h_{9/2}$ 壳的 $1/2[541]$ 态.事实上,目前在此核区所观测到的半退耦带的奇质子都是基于 $h_{9/2}$ 质子 $1/2[541]$ 尼尔逊组态的,而在此核区质子 $1/2[541]$ 尼尔逊单粒子态的一个显著的核谱学特征是, $1/2[541]$ 是来自费米面之上的 $h_{9/2}$ 壳的一个侵入态.在稀土区奇质子核 $1/2[541]$ 带带交叉反常推迟研究中,人们把质子 $1/2[541]$ 态的侵入态特征看成是这一反常现象的生成原因.众所周知,稀土区第一带交叉是由于一对 $i_{13/2}$ 中子转动顺排所致(所谓中子 AB 交叉).由于稀土区原子核中的质子和中子的数目相差较多,其价核子填充的是不同的壳层,因而稀土区奇质子核第一带交叉频率与相邻偶偶核相当接近.只是当奇质子核的那个奇质子处于 $h_{9/2} 1/2[541]$ 尼尔逊组态时,该转动带的第一带交叉才显著推迟.这一现象表明稀土区奇质子核中的奇质子在一般情况下对一对 $i_{13/2}$ 中子的转动顺排并不产生多大的影响,它好像是一个旁观者.只有当那个奇质子基于 $h_{9/2} 1/2[541]$ 组态时,才对该核的一对 $i_{13/2}$ 中子的转动顺排产生显著的影响.这意味着只有当那个奇质子基于 $1/2[541]$ 尼尔逊组态时,它与拆对顺排的 $i_{13/2}$ 中子间的 p-n 相互作用才相当大,以致不容忽视.

上述分析给予我们的一个重要的启示是在稀土区奇奇核中基于 $\pi h_{9/2} 1/2^- [541] \otimes \nu i_{13/2}$ 组态的半退耦带与基于 $\pi h_{11/2} \otimes \nu i_{13/2}$ 组态的晕带的系统性差异很可能来源于奇质子与奇中子之间的 p-n 相互作用.半退耦带与晕带最显著的系统性差异是半退耦带的旋称能量劈裂程度比晕带的大很多.这一系统性规律很可能是由于半退耦带中的基于 $h_{9/2} 1/2[541]$ 组态的奇质子与 $i_{13/2}$ 奇中子间的 p-n 相互作用比晕带的 $h_{11/2}$ 奇质子与 $i_{13/2}$ 奇中子的 p-n 相互作用大而产生的.

此核区观测到半退耦带旋称劈裂反转点自旋值随质子数增加而减小,这一规律现象很可能也是来源于基于 $h_{9/2} 1/2[541]$ 组态的奇质子和 $i_{13/2}$ 奇中子间的相互作用.杨春祥等¹⁸在研究稀土区奇质子核 $1/2[541]$ 带带交叉反常推迟与 p-n 相互作用时,从实验 Routhian 提取了 ^{167}Lu , ^{169}Ta , ^{171}Re 和 ^{173}Ir 4 个同中子素的 $1/2[541]$ 奇质子与拆对的 $i_{13/2}$ 中子间的 p-n 相互作用.结果表明对这 4 个同中子素而言,随着质子数的增加, p-n 相互作用在逐渐减小.这一现象其实正是随着质子数的增加,费米面逐渐上升,以致 $1/2[541]$ 态的侵入特征逐渐减弱的结果.可见 $h_{9/2} 1/2[541]$ 态的侵入态特征与 p-n 相互作用密切相关.

总之,稀土区奇奇核半退耦带与晕带旋称反转现象中呈现出的一系列规律性差异是很值得深入探讨的.

感谢中国原子能科学研究院串列加速器运行组和制靶组为实验所做出的贡献;本文

第一作者感谢北京师范大学低能核物理研究所汪新福、谢立青、董悦安、陆挺、朱光华和温琛林等老师给予的帮助。

参考文献 (References)

- 1 LIU Yun-Zuo et al. Phys. Rev., 1995, **C52**:2514
- 2 Bark R A et al. Phys. Lett., 1997, **B406**:193
- 3 ZHAO G Y et al. Eur. Phys. J., 2000, **A9**:299
- 4 Levinton G et al. Phys. Rev., 1999, **C60**:044309
- 5 Hojman D et al. Phys. Rev., 2000, **C61**:064322
- 6 Cardona M A et al. Phys. Rev., 1999, **C59**:1298
- 7 ZHANG Y H et al. Eur. Phys. J., 2000, **A8**:439
- 8 ZHANG Y H et al. Phys. Rev., 1999, **C60**:044311
- 9 Bacelar J C et al. Nucl. Phys., 1985, **A442**:547
- 10 ZHANG Y H et al. Chin. Phys. Lett, 1997, **14**:409; Eur. Phys. J., 1998, **A1**:119
- 11 Lisle J C et al. Nucl. Phys., 1981, **A366**:281
- 12 ZHANG Y H et al. Eur. Phys. J., 1999, **A5**:345
- 13 Katoch S K et al. Eur. Phys. J., 1999, **A4**:307
- 14 Kondev F G et al. Nucl. Phys., 1998, **A632**:473
- 15 ZHANG Y H et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2000, **24**:369 (in Chinese)
(张玉虎等. 高能物理与核物理, 2000, **24**:369)
- 16 Kreiner A J et al. Phys. Rev., 1989, **C40**:R487
- 17 Drissi S et al. Nucl. Phys., 1986, **A451**:313
- 18 YANG Chun-Xiang et al. Chin. J. Nucl. Phys., 1994, **16**:223;217

Study on the High-Spin States and Signature Inversion of Odd-Odd Nucleus $^{170}\text{Ta}^*$

DENG Fu-Guo^{1,5} YANG Chun-Xiang^{2,4,1} SUN Hui-Bin³ WU Xiao-Guang² LU Jing-Bin⁴
ZHAO Guang-Yi⁴ HAN Guang-Bing² PENG Zhao-Hua² YIN Li-Chang⁴ WEN Shu-Xian²
LI Guang-Sheng² YUAN Guan-Jun² ZHOU Hong-Yu^{1,5} LIU Yun-Zuo⁴ ZHU Li-Hua²

1 (The Key Laboratory of Beam Technology and Materials Modification of Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

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

3 (Institute of Nuclear Technique, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

4 (Department of Physics, Jilin University, Changchun 130023, China)

5 (Beijing Radiation Center, Beijing 100875, China)

Abstract The high-spin states of odd-odd nucleus ^{170}Ta were populated via the $^{155}\text{Gd}(^{19}\text{F}, 4n)^{170}\text{Ta}$ reaction with beam energy of 97 MeV provided by the HI-13 tandem accelerator of China Institute of Atomic Energy. Three rotational bands have been pushed to higher spin states and the signature inversion point of the semidecoupled band based on the $\pi h_{9/2} 1/2^- [541] \otimes \nu i_{13/2}$ configuration has been observed to be $19.5 \hbar$. The systematic features of the signature inversion in semidecoupled bands in odd-odd rare earth nuclei were summarized. The systematic differences of signature inversion, especially the difference in the energy splitting between the yrast bands and the semidecoupled bands in odd-odd rare earth nuclei are pointed out and discussed for the first time. It seems that p-n interaction between the odd proton and odd neutron in the odd-odd nuclei plays an important role.

Key words odd-odd nucleus, high-spin state, semidecoupled band, signature inversion, energy splitting

Received 5 July 2001

* Supported by National Natural Science Foundation of China (19635030, 19675007, 19875012) and Major State Basic Research Development Program (G2000077405)