

Eu 超形变带的自旋指定*

吴崇试¹⁾ 李中华

(兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心 兰州 730000)

(北京大学物理系 北京 100871)

摘要 系统分析了^{142,143,144,147}Eu 中的 8 条超形变带. 在对跃迁能量进行光滑化处理, 采用 *ab* 拟合或改进的 *ab* 拟合, 确切地指定了其中 7 条超形变带的自旋值. 首次指出了¹⁴⁷Eu 的 1,5 两带和 2,3 两带可能都分别构成旋称伙伴带, 且均为 $K=1/2$ 带, 脱耦合常数约为 -1. 讨论了它们可能的组态结构.

关键词 超形变带 原子核转动惯量 自旋指定 *ab* 拟合和改进的 *ab* 拟合 旋称伙伴带

在我们的一系列文章中, 系统地研究了 $A \approx 190$ 区超形变带^[1-3]. 并且针对 $A \approx 150$ 区超形变带的具体特点, 特别提出了将跃迁能量光滑化的方法^[1,2,4]. 采用这种方法, 在实用上, 可以明显提高 *ab* 拟合(或改进的 *ab* 拟合)的精度, 从而提高自旋指定的精度; 而在理论上, 则更可以将核谱中的集体转动和内部运动分离, 为核结构研究提供更进一步的信息. 我们已经采用这种方法, 对 $A \approx 150$ 区的超形变带进行了系统的研究. 文献[5,6]已对此作过概括性的介绍. 作为对这些超形变带的详细分析, 本文将对 Eu 的超形变带作一个全面的讨论.

到目前为止, 在 Eu 中已测到了 12 条超形变带, 即¹⁴²Eu, ¹⁴³Eu, ¹⁴⁴Eu(A, B, C), ¹⁴⁷Eu(1-5)及¹⁴⁸Eu(1,2). 它们的跃迁数据都收录在文献[7]中. 和 $A \approx 190$ 区不同的是, 对这些超形变带自旋指定的系统工作还不太多. 由于我们已对¹⁴⁴Eu(B,C)和¹⁴⁸Eu(1,2)在文献[8,9]中作过讨论, 所以本文将只讨论其余的 8 条超形变带. 此外, 文献[10]中还测到了一组弱的级联跃迁, 怀疑是¹⁴⁷Eu 的第 6 带, 但尚待进一步确认. 本文暂不作讨论.

首先需要考察一下 Eu 超形变带的第二类转动惯量 $\mathcal{J}^{(2)}$, 因为它们可以直接由实验测得的级联跃迁能量提取, 而不依赖于自旋值的指定. 图 1 给出了 Eu 诸超形变带的第二类转动惯量. 其中对¹⁴⁴Eu(A)和¹⁴⁷Eu(2,3,4)诸带作光滑化处理时, 均先略去低自旋端或高自旋端的几条不规则的跃迁能量, 光滑化后再作外推. 从图 1 可以清楚地看到, 这些超形变带的 $\mathcal{J}^{(2)}$ 表现出很大的起伏. 因此可以预料, 如果采用任何能谱公式直接对它们的跃迁

2000-01-04 收稿

* 国家自然科学基金(19677203)资助

1)中国科学院理论物理研究所客座

能量进行拟合,都不可能得到满意的结果. 针对这种状况,我们可以采用文献[1,2]中提出的方法,恰当地分离出跃迁能量中的振荡起伏部分(有关结果见图 2),而后根据光滑化后的跃迁能量提取 $\mathcal{J}^{(2)}$. 这些结果也列在图 1 中. 可以看到,跃迁能量的光滑化,也正是转动惯量的光滑化.

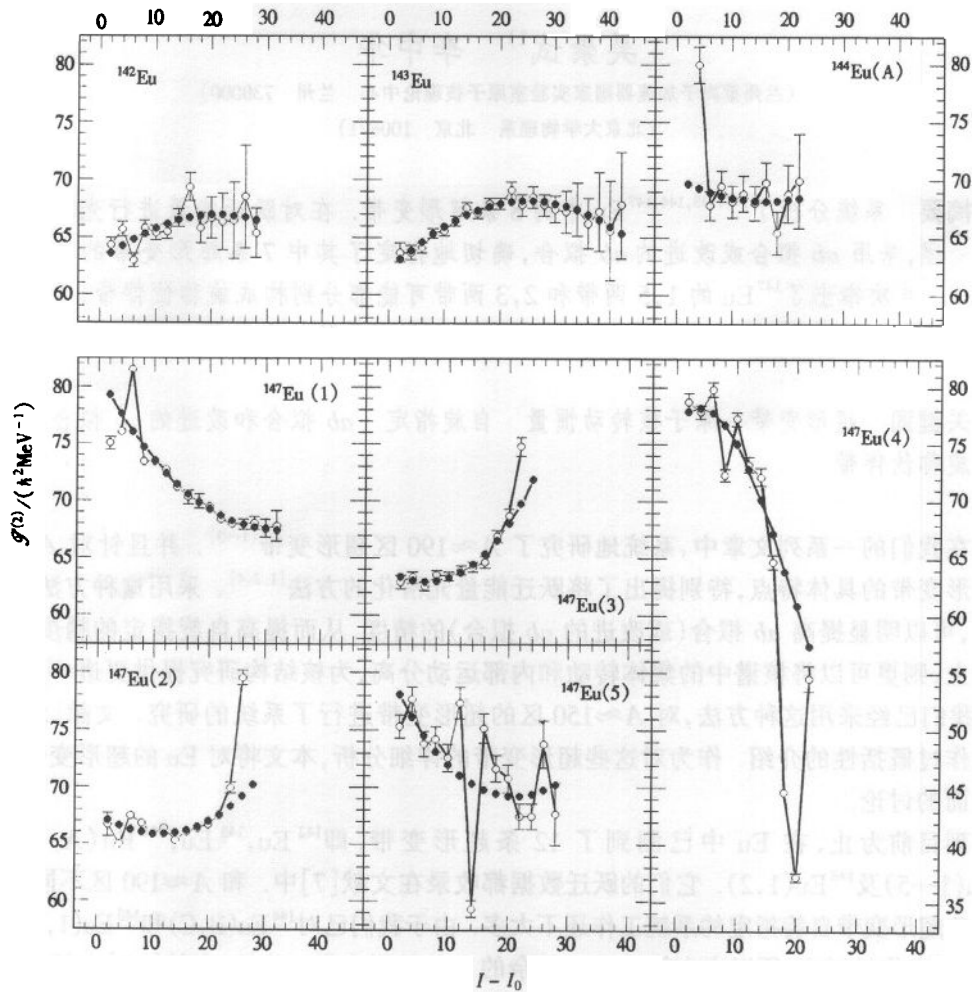


图 1 Eu 诸超形变带的第二类转动惯量

○和●分别是根据原始测得的跃迁能量(转引自文献[7]及光滑化后的跃迁能量得到的提取值. I_0 是已测得的超形变带最低能级的自旋值(参见表 1).

将跃迁能量光滑化以后,就可以方便地进行自旋指定. 本文仍然采用 ab 公式

$$E(I) = a[\sqrt{1 + bI(I + 1)} - 1] \tag{1}$$

或改进的 ab 公式(适用于一对旋称伙伴带)

$$E(I) = a[\sqrt{1 + bI(I + 1)} - 1] + (-)^{I+1/2} \left(I + \frac{1}{2} \right) A [a_1 - b_1 I(I + 1)], A = ab/2$$

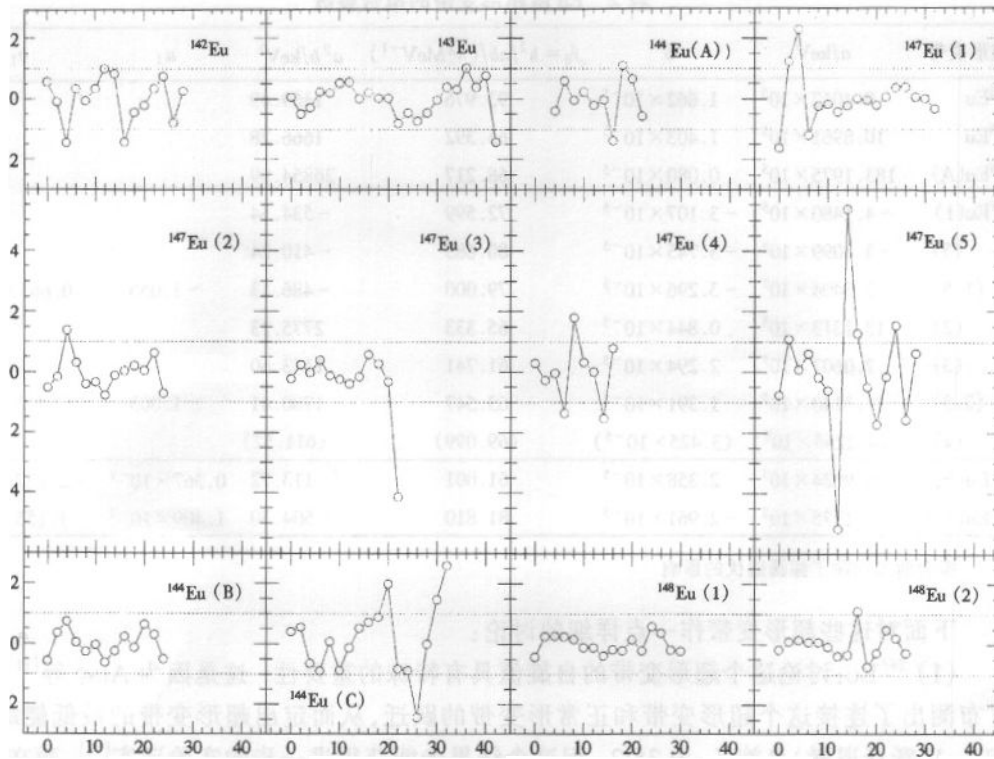


图 2 Eu 诸超形变带跃迁能量中的振荡起伏部分
 $f_{\gamma}^{osc}(I)$ 的定义见文献[1,2]. 为了完整起见, 图中也给出了 $^{144}\text{Eu}(\text{B,C})$
 和 $^{148}\text{Eu}(1,2)$ 的结果.

对光滑化后的跃迁能量进行拟合, 再根据最佳拟合来作出超形变带的自旋指定. 所得的结果列在表 1 中. 为了便于确认起见, 表中所列的跃迁能量仍是光滑化以前的数值. 拟合中得到的参数见表 2. 为了完整起见, 表 2 中也列出了 $^{144}\text{Eu}(\text{B,C})$ 和 $^{148}\text{Eu}(1,2)$ 的结果.

表 1 Eu 超形变带的自旋指定

超形变带	$E_{\gamma}(I_0 + 2 \rightarrow I_0)/\text{keV}$	指定的自旋值 I_0		
		本 文	周善贵等 ^{a)}	吴成礼等 ^[7] 收录
^{142}Eu	699.7	21	21	27
^{143}Eu	483.5	29/2	29/2	35/2
$^{144}\text{Eu}(\text{A})$	878.6	28		36
$^{147}\text{Eu}(1)$	737.3	53/2		49/2
(2)	703.2	43/2		49/2
(3)	708.1	41/2		51/2
(4)	944.0	(63/2)		63/2
(5)	835.9	63/2		55/2

a) 周善贵, 郑春开, 胡济民. 中国高等科学技术中心(CCAST), WL workshop series, 1997, 79: 67—78

表 2 Eu 诸超形变带的拟合参数

超形变带	a/keV	b	$f_0 = \hbar^2/ab/(\hbar^2\text{MeV}^{-1})$	a^2b/keV^2	a_1	b_1
^{142}Eu	9.4012×10^5	1.662×10^{-5}	93.976	1469.49		
^{143}Eu	10.8961×10^5	1.403×10^{-5}	65.392	1666.28		
$^{144}\text{Eu}(\text{A})$	183.1975×10^5	0.080×10^{-5}	68.217	26854.99		
$^{147}\text{Eu}(1)$	-4.1480×10^5	-3.107×10^{-5}	72.599	-534.54		
(5)	-3.3099×10^5	-3.745×10^{-5}	80.683	-410.24		
(1,5)	-3.8404×10^5	-3.296×10^{-5}	79.000	-486.13	-1.055	0.665×10^4
(2)	18.1313×10^5	0.844×10^{-5}	65.333	2775.23		
(3)	7.0607×10^5	2.294×10^{-5}	61.741	1143.60		
(2,3)	11.3140×10^5	1.391×10^{-5}	63.547	1780.41	1.003	1.679×10^{-4}
(4)	(4.2255×10^5)	(3.425×10^{-5})	(69.099)	(611.52)		
$^{144}\text{Eu}(\text{B,C})$	6.9524×10^5	2.358×10^{-5}	61.001	113.72	0.367×10^{-2}	-2.227×10^{-6}
$^{148}\text{Eu}(1,2)$	-4.1275×10^5	-2.961×10^{-5}	81.810	504.30	1.409×10^{-2}	1.155×10^{-6}

拟合前先扣除了振荡起伏的影响.

下面对这些超形变带作一点详细的讨论:

(1) ^{147}Eu : 讨论这个超形变带的自旋值具有特殊的重要性. 这是因为 Ataç 等^[11] 曾经宣布测出了连接这个超形变带和正常形变带的跃迁, 从而定出超形变带的最低能级(由 484keV 跃迁退激)自旋 I_0 为 35/2. 但这个结果未能获得进一步的实验证实^[12], 而在有些文献中往往又被当作基准, 用来确定其它超形变带的自旋值^[7]. 从超形变带中的实验数据看, 已经测得 22 条跃迁, 并且延伸到较低的能量, 因此, 应当可以比较准确地根据能谱公式作出自旋指定. 我们发现, 无论是对原始的跃迁能量或是光滑化后的跃迁能量进行 ab 拟合, 当 $I_0 = 29/2$ 时都可以获得最佳结果. 而若取 $I_0 = 35/2$, 则拟合误差要增大 6 倍. 而且, 如果进一步分析两类转动惯量之间的关系^[13], 也支持 $I_0 = 29/2$ 的自旋指定. 限于篇幅, 本文从略. 这里还值得提到, 周善贵等用具有指数衰减对力的转动模型, 也得到和我们相同的结果.

当然, 即使 $I_0 = 29/2$, 拟合的结果也并不理想. 最大的偏差达到 4keV 以上. 这是可以预料到的. 因为根据 ab 公式, 第二类转动惯量一定是单调变化的, 与实验提取的 $\mathcal{J}^{(2)}$ 的变化趋势(见图 1)并不一致. 为了提高拟合的精度, 不妨采用改进的 ab 公式(2). 这样拟合误差的确都可以降低到 1keV 以下. 但由于缺少旋称伙伴带, 拟合结果对自旋指定的敏感性降低. 另一方面, 纯粹从跃迁能量值来看, $I_0 = 35/2$ 反而要略优于 $I_0 = 29/2$ (标准相对偏差分别为 2.5×10^{-4} 和 3.7×10^{-4}). 但前者给出脱耦合常数为 -7.70, 后者给出的为 0.85 (若 I_0 为 33/2 或 31/2 则分别为 5.42 或 -3.13). 因此, 如果要在两者之间作一选择, $I_0 = 29/2$ 看来要更合理些. 另外也有文献认为这个超形变带的旋称应为 1/2 (但取 I_0 为 37/2). 取 $I_0 = 29/2$, 自然也符合这个要求.

(2) ^{142}Eu : 采用 ab 公式, 则当最低能级自旋取为 $I_0 = 21$ 时有最佳拟合, 标准相对偏差为 0.1%. 但如果 I_0 值增减 1, 标准相对偏差就将增大约 3 倍. 这个 I_0 值也和周善贵

等的结果相同. 这增加了这个结果的可信度. 这个结果明显低于 Mullins 等^[14] 提出的 $I_0 = 27$ (这正是文献[7]中收录的数值). 但实际的差别并不像表面上那么严重, 因为 Mullins 等给出的是 ^{142}Eu 与 ^{143}Eu 的自旋值之差, 并且假设 ^{143}Eu 的 $I_0 = 37/2$.

(3) $^{144}\text{Eu}(A)$: 从图 1 可以看到, 在低自旋端, 这个超形变带的第二类转动惯量有急剧的变化, 反映出它的内部结构发生明显的改变. 因此本文在分析这个超形变带时, 就需要排除最低的两条跃迁, 对其余的跃迁能量进行光滑化的处理, 而后再作 ab 拟合. 这样得到的第二类转动惯量 (包括它在低自旋端的外推) 呈现光滑的单调下降, 因此可以预料, 这时肯定可以容易地根据 ab 拟合作出自旋指定. 这样得到的 $I_0 = 28$, 大大低于文献[7]所列数值 ($I_0 = 36$), 但与旋称为 0 的要求并不矛盾.

(4) $^{147}\text{Eu}(1)$: 这个超形变带的前 3 条跃迁能量也呈现出不规则的变化, 因此也必须排除在 ab 拟合之外. 这样定出的最低能级 (由 737.3keV 退激) 自旋为 $I_0 = 53/2$. 在文献[7]中, 采用与 ^{143}Eu 相比较的办法, 建议的数值为 $I_0 = 49/2$, 低于我们用 ab 拟合定出的数值. 正如我们在文献[1,2]曾经指出的, 采用和基准带 (这里就是 ^{143}Eu) 作比较而确定自旋, 必须具有两个条件: (1) 基准带的自旋已知, 至少能无争议地定出; (2) 两个带的 $\mathcal{J}^{(2)}$ 相同. 姑且撇开第一个条件, 单就 $^{147}\text{Eu}(1)$ 和 ^{143}Eu 的 $\mathcal{J}^{(2)}$ 而言, 无论是它们的绝对数值, 还是变化趋势, 显然都极不相同 (见图 1). 所以, 我们认为, 文献[7]中建议的数值是值得商榷的.

这里还要提到, $^{147}\text{Eu}(1)$ 和 $^{148}\text{Gd}(1)$ 是一对全同带^[10]. 它们的跃迁能量在很大范围内几乎相等 (相差约在 3keV 以内). 但按照文献[7], $^{147}\text{Eu}(1)$ 中 1112.5, 1056.3 和 1001.3keV 诸跃迁的自旋值为 $81/2 \rightarrow 77/2 \rightarrow 73/2 \rightarrow 69/2$, 而 $^{148}\text{Gd}(1)$ 中相应的 1110.7, 1057.1 和 1003.8keV 诸跃迁的自旋值为 $43 \rightarrow 41 \rightarrow 39 \rightarrow 37$, 二者相去甚远. 而按照我们的指定, $^{147}\text{Eu}(1)$ 中上述 3 条跃迁的自旋值为 $85/2 \rightarrow 81/2 \rightarrow 77/2 \rightarrow 73/2$, 正好符合和 $^{148}\text{Gd}(1)$ 构成全同带的要求.

(5) $^{147}\text{Eu}(2,3)$: 在讨论这两条超形变带时, 首先也必须摒弃第 2 带中最高的 6 条跃迁能量和第 3 带中最高的 1 条跃迁能量. 这里要特别提到, 在第 2 带中观测到两条能量完全相同 (1497keV) 的跃迁, 而且这个超形变带中各个跃迁的次序也并未能完全确定 (目前只是按照能量和强度的高低排序)^[10]. 所以, 对于那些能量变化极不规则的跃迁, 有必要等待进一步的实验确认.

根据我们的分析, 这是一对旋称伙伴带, 最低能级的自旋分别为 $43/2$ 和 $41/2$ (均低于文献[7]的建议值 $49/2$ 和 $51/2$). 脱耦合常数 $a_1 = -1.003$, 说明它们应当也是一对 $K = 1/2$ 带. 我们定出的自旋值均低于文献[7]的建议值, 这个差异主要来源于基准带 (^{143}Eu) 的自旋指定. 另外, 文献[10]也认为这两个带具有相同的 (主要) 组态结构, 但并未明确指出它们是一对旋称伙伴带.

(6) $^{147}\text{Eu}(4)$: 这个带的跃迁能量既不规则, 变化幅度又特别大. 即使在扣除了振荡起伏部分后, 由于已测得的跃迁条数较少, 采用 ab 拟合也不能惟一作出自旋指定. 拟合的误差在 I_0 的相当大范围内变化不大, 难以作出确切的指定. 但如果考虑到第 4 带与第 2 带之间存在带交叉^[10], 并且假设和第 2 带 1423.8, 1474.1, 1497keV 等跃迁对应的是 1313.4, 1375.2, 1464.7keV 等跃迁, 则第 4 带的最低能级 (由 944.0keV 跃迁退激) 为

$I_0 = 63/2$, 和文献[7]中的建议值相同. 当然, 这个结果依赖于二带交叉的进一步确认, 依赖于交叉能级的确认, 特别依赖于第2带中跃迁次序(也就是能级次序)的准确认定. 因此, 本文对于这个带的自旋指定只是尝试性的.

这里需要指出, 文献[7]对于第2带和第4带自旋的建议值($I_0 = 49/2$ 和 $63/2$), 恰恰违反了带交叉的基本要求, 因为它们对应于不同的旋称, 因而根本不可能发生带交叉.

(7) $^{147}\text{Eu}(5)$: 对于 ^{147}Eu 的第5带, 跃迁能量的不规则变化要比第1带还激烈. 在这个带的中部, 跃迁能量急剧增大, 使得第二类转动惯量形成一个凹陷. 但是, 按照我们在文献[1,2]中描述的方法, 也并不难从跃迁能量中分离出振荡起伏的部分. 它在转动带的中部达到 $\pm 5\text{keV}$ 左右, 其余大小不等, 最大不超过 1.7keV (见图2). 根据这样得到的光滑化的跃迁能量, 可以利用 ab 拟合定出最低能级的自旋 $I_0 = 63/2$, 高于文献[7]中的建议值 $55/2$.

从第二类转动惯量来看, 这个超形变带和 $^{147}\text{Eu}(1)$ 表现出大体相同的变化趋势和幅度, 这表明它们有可能构成旋称伙伴带. 实际计算支持这种看法. 采用改进的 ab 拟合, 仍然可以得到和上面相同的自旋指定, 而脱耦合常数 $a_1 = -1.055$. 这进一步说明它们应当是一对 $K = 1/2$ 带. 可能正是由于有如此大的脱耦合项, 使得存在于这一对超形变带之间的旋称伙伴关系, 至今尚未为人认识. 例如, 在文献[10]中, 对这两个带就指定了不同的组态结构.

这样, 我们在 ^{147}Eu 中找到了两对旋称伙伴带, 即第1,5带与第2,3带. 它们可能都是 $K = 1/2$ 带, 脱耦合常数几乎相等, 且非常接近于 -1 从 $Z = 63, N = 84$ 附近 $\Omega = 1/2$ 的Nilsson能级来看, 最接近费米面的有中子 $[651]\downarrow$ 能级, 脱耦合常数的确在 -1 上下(见图3). 所以, 作为奇质子核 ^{147}Eu 中的 $K = 1/2$ 带, 可能都有一个中子填充在 $[651]\downarrow$ 能级上, 其余的一个(或更多个)奇质子和一个(或更多个)奇中子共同耦合成 $K = 0$. 而且, 考虑到这两对旋称伙伴带的带首转动惯量明显不同(见表2), 转动惯量的升降趋势也不相同(见图1), 说明它们应当具有不同的内部结构, 例如, $[651]\downarrow$ 之外的奇中子和奇质子填充在不同轨道上. 就(2,3)带而言, 这样的分析和文献[10]并不矛盾. 当然也不能完全排除另一种可能, 即这两对旋称伙伴带涉及不同的 $\Omega = 1/2$ 能级. 例如, 其中一对旋称伙伴带的奇质子处在 $[530]\uparrow$ 态(它的耦合常数也接近于 -1), 而其余的质子和中子耦合成 $K = 0$. 按照常规的Nilsson参数 κ, μ 值, $[530]\uparrow$ 能级距费米面较远.

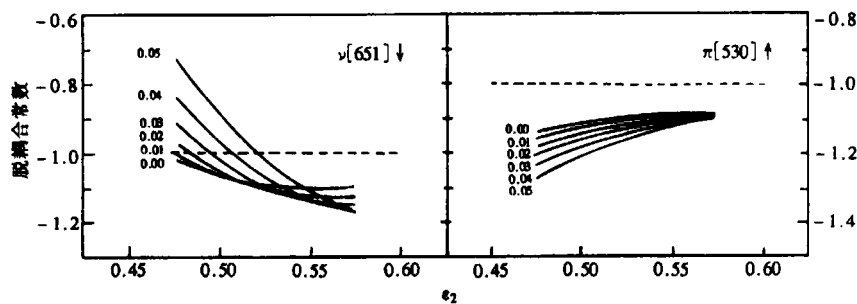


图3 单粒子态 $\nu[651]\downarrow$ (左)和 $\pi[530]\uparrow$ (右)的脱耦合常数
曲线旁的数字为 ϵ_4 值, 虚线表示 $a_1 = -1$.

综上所述,我们采用 ab 公式或改进的 ab 公式,分析了 Eu 核中的全部超形变带(包括另文讨论的两对旋称伙伴带)。在本文讨论的 8 个超形变带中,比较确切地定出了其中 7 个超形变带的自旋值。它们和现有文献给出的建议值有明显的差别。考虑到在这些超形变带的跃迁能量中表现出相当大的振荡起伏,给自旋指定工作带来很大困难,因此,不同方法就可能得出不同的结果。但这种状况正好可以用来检验各种模型。本文运用扣除振荡起伏的处理方法,提取光滑化的跃迁能量,而后进行自旋指定,应该说,得到的结果是比较协调一致的,和邻近的形变带间不存在明显的矛盾。有关 Gd, Tb, Dy 等超形变带的结果,我们将陆续发表。惟一不足的是 ^{147}Eu 的第 4 带的结果。由于已测得的跃迁条数较少,能量变化和起伏的幅度又特别大,还存在带交叉,所以本文给出的只是尝试性的结果。本文把 ^{147}Eu 中的其余 4 条超形变带解释为旋称伙伴带,特别是它们可能是 $K=1/2$ 带,脱耦常数非常接近于 -1 ,或许这可能有助于全同带及自旋问题的研究。

参考文献(References)

- 1 WU Chong-Shi. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1998, 22:71—77(in Chinese)
(吴崇试. 高能物理与核物理, 1998, 22:71—77)
- 2 WU Chong-Shi, LI Zhong-Hua. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1999, 23:797—802(in Chinese)
(吴崇试, 李中华. 高能物理与核物理, 1999, 23:797—802)
- 3 WU Chong-Shi, ZHOU Zhi-Ning. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1999, 23:1209—1215(in Chinese)
(吴崇试, 周治宁. 高能物理与核物理, 1999, 23:1209—1215)
- 4 WU Chong-Shi. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1998, 22:48—53(in Chinese)
(吴崇试. 高能物理与核物理, 1998, 22:48—53)
- 5 WU Chong-Shi. J. Ningxia Univ., (Nat. Sci. edition), 1998, 19:297—299(in Chinese)
(吴崇试. 宁夏大学学报(自然科学版), 1998, 19:297—299)
- 6 LI Zhong-Hua, WU Chong-Shi. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2000, 24:71—76(in Chinese)
(李中华, 吴崇试. 高能物理与核物理, 2000, 24:71—76)
- 7 HAN X L, WU C L. At. Data Nucl. Data Tables, 1999, 73:43—150
- 8 WU Chong-Shi. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2000, 24:66—70(in Chinese)
(吴崇试. 高能物理与核物理, 2000, 24:66—70)
- 9 LI Z H, WU C S. Commun. Theor. Phys., 2000, 33:397—404
- 10 Haslip D S, Kintz N, Flibotte S et al. Phys. Rev., 1998, C57:2196—2204
- 11 Ataç A, Piiparinen M, Herskind B et al. Phys. Rev. Lett., 1993, 70:1069—1072
- 12 Lerma F, LaFosse D R, Devlin M et al. Phys. Rev., 1997, C56:R1671—1674
- 13 WU C S, CHENG L, LIN C Z et al. Phys. Rev., 1992, C45:2507—2510
- 14 Mullins S M, Flibotte S, Hackman G et al. Phys. Rev., 1995, C52:99—103

Spin Assignments of Superdeformed Bands in Europium

WU Chong-Shi¹⁾ LI Zhong-Hua

(Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator, Lanzhou 730000, China)

(Department of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract A comprehensive investigation of the superdeformed bands observed in $^{142,143,144,147}\text{Eu}$ was given. The fluctuation in the transition energies has been removed. The smoothed transition energies were fitted by the *ab*-expression or its modification. The spins of these bands, except for band 4 of ^{147}Eu , have been assigned conclusively. The exit spin in ^{143}Eu was proposed to be $29/2$, different from that asserted to be determined experimentally but remains to be confirmed. The corresponding values in ^{142}Eu and $^{144}\text{Eu}(a)$ are 21 and 28, lower than those proposed in the literature by 6 and 8 units, respectively. Two pairs of superdeformed bands in ^{147}Eu , i. e. bands 1,5 and bands 2,3 were proposed to be signature partners. The exit spins are $53/2$ and $63/2$ for the former pair, and $43/2$ and $41/2$ for the latter pair. In addition, both of them have a rather large de-coupling constant (≈ -1), implying they are of $K=1/2$ and built on the single particle level $\nu[651]\downarrow$ or $\pi[530]\uparrow$. This assignment may be helpful for the studies of the so-called identical bands and pseudo-spin problem. The signature partner pairs observed in $^{144,148}\text{Eu}$ are not included in the investigation.

Key words superdeformed band, nuclear moments of inertia, spin assignment, *ab*-expression and its modification, signature partners

Received 4 January 2000

* Supported by National Natural Science Foundation of China (19677203)

1) Guest Researcher of the Institute of Theoretical Physics, The Chinese Academy of Science