

偶偶核转动三带的交叉混杂

顾金南 王正大

(中国科学院近代物理研究所)

摘 要

本文探讨了希土区偶偶核的超带与基态带、 β 带或 γ 带的交叉混杂。我们用“定本征值问题中特定参数”的方法定出参数后使哈密顿矩阵对角化,计算了十多个核的转动三带能谱,与现有实验值符合较好,给出了超带等三个转动带交叉混杂的一些信息。

一、引 言

通常人们认为^[1-3],原子核转晕态的 $\mathcal{E} \sim \omega^2$ 图上的回弯是由转动惯量 \mathcal{I} 大的超带 (\mathcal{I} , 接近刚体的 \mathcal{I}_r 值)与基态带 ($\mathcal{I}_g \approx \frac{1}{2} \mathcal{I}_r$ 到 $\frac{1}{3} \mathcal{I}_r$) 交叉混杂产生的。

产生超带的机制可能有三种: 对崩溃^[5] (CAP 效应)、转动排列效应^[4]和形状相变。

由于 β 或 γ 振动带的转动惯量 (\mathcal{I}_β 或 \mathcal{I}_γ) 与 \mathcal{I}_g 相近, 只要这种单声子振动带的带头能量 E_β 或 E_γ 低于超带的带头能量,超带就还可以先与 β 带 (或 γ 带) 发生交叉,当其混杂较小时,同样产生回弯。

实验上,转晕带和其它边带的数据日益丰富。支持这种多带交叉混杂的图象的有 ¹⁵⁴Gd, ¹⁵⁸Dy, ¹⁵⁴Dy, ¹⁶⁴Er 等核^[6-8]。

对于稀土区偶偶核,在中子数 $N = 90-100$ 附近,实验表明,一些核的超带先与 β 带 (或 γ 带) 交叉,交叉点 $I \approx 12\hbar$; 后与基态带交叉,交叉点 $I \approx 14-18\hbar$ 。

理论上,一些作者^[1-3] 开始了多带交叉混杂的计算和分析,但主要只限于对个别核的讨论。

本文试图从略为不同的角度,来讨论多带 (主要是三带) 交叉混杂问题。并将这种多带交叉混杂图象用到大变形核 Hf, Os 等上去。

我们先对三带交叉混杂简单叙述,再根据这种图象,分析实验数据,即可能得到混杂大小、超带与 β 带交叉点和超带的 K (核总角动量 I 在对称轴上的投影值) 等的信息。

我们对一些核的三带交叉混杂作了理论计算。首先,在所选择的空间中产生哈密顿矩阵表示。每个矩阵元中所含的特定参数,用与常用的最小二乘法不同的方法定出^[9],再使哈密顿矩阵对角化。计算了十多个希土区偶偶核的转动三带能谱,给出了超带的 E_s ,

\mathcal{J}_i 及其与 β 带、基态带混杂大小的信息，与实验值符合较好。最后，对计算结果作了分析讨论。

二、带交叉混杂图象

三带交叉混杂的图象^[10]见图 1。超带首先与 β 带(或 γ 带)，然后与基态带交叉。如带间没有混杂，即是图中实线所示。在交叉点处转晕带的 \mathcal{J} 突变， $\mathcal{J} \sim \omega^2$ (令 $\hbar = 1$) 图 2 上就出现急剧回弯。如带间有混杂，即是图中虚线所示，当混杂小时， $\mathcal{J} \sim \omega^2$ 图上

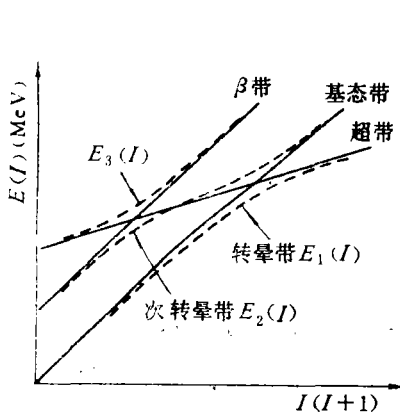


图 1 三带交叉混杂示意图

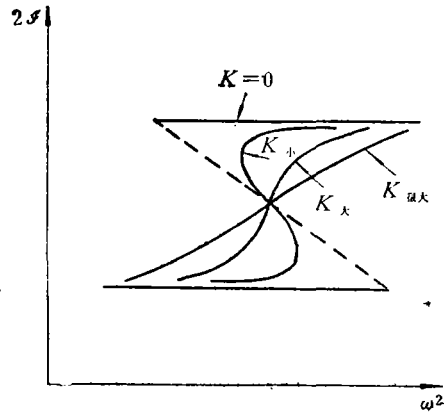


图 2 示意图

的曲线也出现回弯；当混杂大时，则 $\mathcal{J} \sim \omega^2$ 曲线平缓，无回弯。但 $E(I)$ 的二级差分 $\Delta^2 E(I) \sim I$ 的曲线仍有极小(参看 Dy¹⁵⁸ 图)。在转晕带中，交叉点以下的主要是基态带的成分，交叉点以上的主要是超带的成分。次转晕带 $E_2(I)$ 中，低 I 处(超带与 β 带的交叉点以下)主要是 β 带成分，中间区域主要是超带成分，高 I 处(超带与基态带交叉点以上)主要是基态带成分。现有的实验能谱数据说明了这点。

约化 $E2$ 跃迁几率之比^[11]也说明了这一点，¹⁵⁴Gd 核的 $B(E2, I' \rightarrow I-2)/B(E2, I' \rightarrow (I-2)')$ 值从 10^{-3} (在 $I' = 12'$ 处) 到 1.4 ($I' = 18'$ 处)，表明次转晕带 $E2(I')$ 中主要是带内 ($I' \rightarrow (I-2)'$) 跃迁，而不是带间 ($I' \rightarrow I-2$) 跃迁，只是在交叉点 $18'$ 附近例外，说明 $18'$ 已经主要是基态带的成分。所以是转晕带(而不是基带)发生回弯现象。

基态带、 β 带、超带的能谱大致可以用 I^2 ($I^2 = I(I+1)$) 描述，特别是对大变形区，对转变核 ($N = 88$ 附近)，偏离较大些，但是 $E_1(I)$, $E_2(I)$, $E_3(I)$ 都不遵循 I^2 规则。

依据这种带交叉图象，如果不考虑其它带的影响，则可以与模型无关地求出带间混杂在交叉点 I_c 处的大小(参看(14)式)

$$K_{12}(I_c) = \frac{1}{2} (E_2(I_c) - E_1(I_c)).$$

显然，这是很有用的，它可以检查理论结果。特别是 ¹⁵⁶Dy 核，其 $K_{12}(I_c)$ 很小，只有 12 KcV.，值得探讨。

由 $K_{12}(I_c)$ 的大小可以知道 $\mathcal{J} \sim \omega^2$ 图 2 上的曲线是否发生回弯，图 2 所示的四种

情况, $K=0$ 与 K 很大是两种极端情况. 对 K 大的情况, 我们根据 $\mathcal{J} \sim \omega^2$ 图无法判别是否发生了带交叉, 这时可以由转晕带的二级差分 $\Delta^2 E_1(I)$ 的极小值点判明^[12].

表1 ^{154}Gd 的 $\Delta^3 E_1(I)$ 和 $\Delta^2 E_2(I)$ 值

	4+	6+	8+	10+	12+	14+	16+	18+
$\Delta^3 E_1(I)$	124.9	98.7	80.1	66.2	54.8	45.2	34.2	-16.5
$-\Delta^3 E_1(I)$	26.2	18.6	13.9	11.4	9.6	11.0	50.7	
$\Delta^3 E_2(I)$	97.3	86.2	72.4	47.0	-9.7	-22.4	48.4	

对转晕带的三级差分 $\Delta^3 E_1(I)$, 在低 I 处, 我们发现有个次极大, 差不多对应于次转晕带 $E_2(I)$ 的二级差分 $\Delta^2 E_2(I)$ 的极小值.

^{156}Dy 的数据也与之类似. 当然, 这里还有 γ 带的影响, 因为这两个核的 β 带和 γ 带靠得很近.

已经确知, $\Delta^2 E_1(I)$ 在 I_{c_1} 处有极小值是由于在这里发生了 \mathcal{J} 的突变. 同样, 超带与 β 带交叉处 I_{c_2} 也发生 \mathcal{J} 的突变, 所以 $\Delta^2 E_2(I)$ 在 I_{c_2} 处有极小值, 这种突变可能会反映到转晕带的三级差分中来, 有待于进一步探索.

由于 γ 带具有奇偶自旋, 我们从对它的分析中可以获得更多的信息, 其中之一就是可以判别超带的 K 值. ^{164}Er 的数据^[7,8] (可能有五带交叉) 表明, 超带只与 γ 带的偶自旋部分发生交叉 ($I_c \approx 10$) 混杂, 所以超带显然不是 $K=1$ 或奇值的带. 而 γ 带与另一 K 为奇值的带交叉 ($I_c \approx 13, 12$) 在较高 I 处, 参看图 3.

但是, 要在多带混杂的计算中来得到超带的 K 值, 象对 ^{156}Dy 所作的计算那样, 可能会得到不同的结果^[2,3].

超带 K 值的确定有助于判明超带是那种机制产生的^[3].

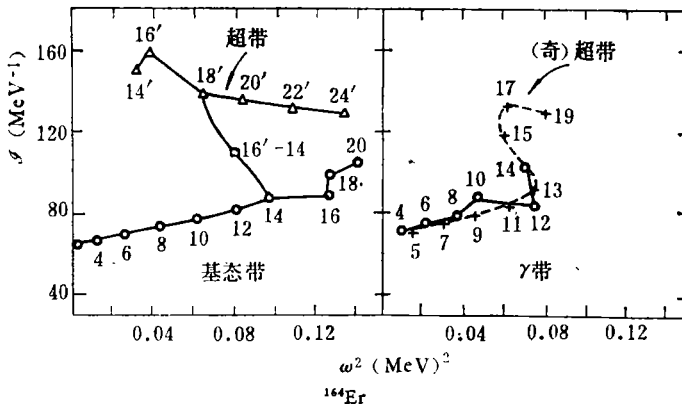


图3 基态带和 γ 带的 $\mathcal{J} \sim \omega^2$ 图

三、三带混杂和参数的确定

设原子核转动的薛定谔方程为

$$H\Psi = E^T\Psi, \quad (1)$$

H , $E^T(I)$ 和 Ψ 为原子核转动系统的哈密顿量、本征值和相应于确定本征值 E^T 时的本征态. 设 $H = H_0 + H'$, H' 为微扰哈密顿量; φ 为 H_0 的本征态, Ψ 即可展开

$$\Psi = \sum_n C_n \varphi_n, \quad (2)$$

代入(1)式, 考虑三带交叉混杂, 截断后得到

$$\begin{pmatrix} h_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & h_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & h_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{pmatrix} = E^T \begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

或写为 $\mathcal{H}^{(3)}C = E^TC$. \mathcal{H} 是实对称矩阵, 如令 $K_{13} = K_{31} = 0$, 它也可以用 Lanczos 代数产生^[13].

矩阵元 $h_{ii} = \langle \varphi_i | H | \varphi_i \rangle$, 非对角矩阵元 $K_{lm} = \langle \varphi_l | H | \varphi_m \rangle, l \neq m$; h_{11} 是基态带, h_{33} 是 β 带, h_{22} 是超带. K_{lm} 是带间相互作用, 即带间混杂.

设

$$h_{11} = a_1 \hat{I}^2 - a_6 \hat{I}^4, \quad h_{22} = a_3 \hat{I}^2 + a_4, \quad h_{33} = a_\beta \hat{I}^2 + E_\beta, \quad (4)$$

$$K_{12} = a_2; a_2 \hat{I}; a_2 \hat{I}^2, \quad K_{23} = a_5; a_5 \hat{I}; a_5 \hat{I}^2, \quad K_{13} = 0, \quad (5)$$

这里 a_1, a_2, \dots, a_6 为待定参数, 以 a_i 记之. K_{lm} 有三种形式. 这种矩阵元的假设相当于图 1 所示实线, 虚线为经过带间混杂 K_{lm} 后所成的转晕带等三个带.

(3) 式有非零解的充要条件是特征多项式(或特征行列式)值为零

$$\det|\mathcal{H}^{(3)} - E^T\mathbf{1}| = 0, \quad (6)$$

$\mathbf{1}$ 是单位矩阵, \det 表示特征行列式. 对任意的 a_i , 由式(6)可解出 $E^T = E_j^T(I, a_i)$, 这里 T 代表计算值, $j = 1, 2, 3$, 即对于一个确定的 I 值有 3 个 E^T 值: E_1^T, E_2^T, E_3^T . 如对任意的 a_i , 要 $E_j^T(I, a_i)$ 同实验值 $E_j^e(I)$ 比较, 则必然偏离很大. 为此, 我们考虑用下述方法^[9]定出 a_i 的最佳值 \bar{a}_i , 如用 $E_j^T(I, a_i)$ 代式(6)中 E^T ,

$$\det|\mathcal{H}^{(3)} - E_j^T(I, a_i) \cdot \mathbf{1}| = F(E_j^T, I, a_i) \equiv 0; \quad (7)$$

如用 $E_j^e(I)$ 代入(6)式, 有

$$\det|\mathcal{H}^{(3)} - E_j^e(I) \cdot \mathbf{1}| = F(E_j^e, I, a_i). \quad (8)$$

定义

$$Q_F = \sum_{I,j} |F(E_j^e, I, a_i) - F(E_j^T, I, a_i)|^2 = \sum_{I,j} |F(E_j^e, I, a_i)|^2, \quad (9)$$

$F(E_j^e, I, a_i)$ 一般不为零. 显然, 只有在 $F(E_j^e, I, a_i)$ 中的 $E_j^e(I)$ 等于选定 a_i 时的 $E_j^T(I, a_i)$ 值时才为零, 这在一般情况下是不可能的.

用类似于最小二乘法的方法, 对 Q_F 求极值

$$\frac{\partial Q_F}{\partial a} = 0, \quad (10)$$

即可定出一组最佳参数值 \bar{a}_i .

将 \bar{a}_i 代入式(6)得到 $E_j^T(I, \bar{a}_i)$, 或 $\mathcal{H}^{(3)}$ 对角化得到 $E_j^T(I, \bar{a}_i)$ 与 $C(I, \bar{a}_i, E_j^T)$.

四、计算结果

我们用上述方法计算了表2所列的核

表 2

核	$^{154}_{64}\text{Gd}$	$^{156}_{66}\text{Dy}$	$^{158}_{68}\text{Er}$	$^{158}_{66}\text{Dy}$	$^{164}_{68}\text{Er}$	$^{170}_{70}\text{Yb}$	$^{172}_{72}\text{Hf}$	$^{176}_{72}\text{Hf}$	$^{184}_{76}\text{Os}^{(14)}$
$E_1(4^+)/E_1(2^+)$	3.014	2.934	2.745	3.207	3.277	3.292	3.247	3.285	3.204
能级数	19	22	15	14	19	11	13	16	16
$2\Delta_n^{(15)}$	2.211	2.467	2.49	2.236	2.201	1.851	2.140	1.708	2.187

$2\Delta_n$ 是根据文献[15]的质量表计算的奇偶质量差。

表中前三个核的中子数 $N = 90$ ，为转变区核，其余为形变核， $\frac{E_1(4^+)}{E_1(2^+)} \geq 3.20$ 。所用的实验能级^[6]数见表，一般都比参数个数大得多。中子实验对能列在表中最后一行。

计算结果：这两类核都能符合实验转动能谱，见图4。图4(a)为转变区核的能谱，图4(b)图4(c)分别为形变核谱。

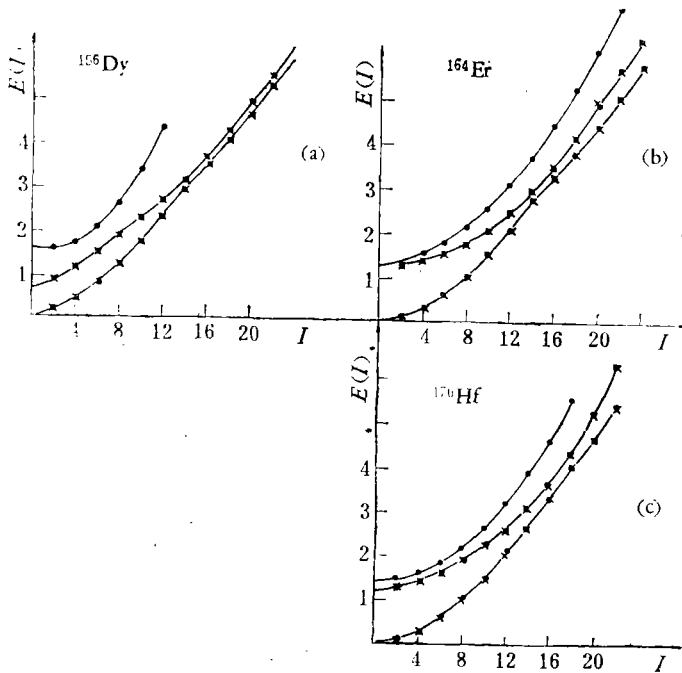


图4 转动三带能谱(光滑曲线为计算值, ×实验值)

目前, $E_1(I)$ 转晕带上实验数据较多, $E_2(I)$ 上有一些实验数据, 对于 $E_3(I)$, 除 ^{156}Dy 外^[6], 尚无实验值与之比较。

定义^[6] \mathcal{I} 和 ω 为

$$2\mathcal{J} = (4I - 2)/\Delta E_1(I), \tag{11}$$

$$\omega^2 = (2I - 1)(\Delta E_1)^2 \left[\frac{27}{64} \times \{(\hat{I}^2)^{2/3} - [(I - 2)(I - 1)]^{2/3}\}^3 \right]^{-1}.$$

这里 $\Delta E_1(I) = E_1(I) - E_1(I - 2)$, 为一级差分. 又定义

$$Q_E = \sum_{i,I} |E_i^T(I) - E_i^T(I, \bar{a}_i)|^2, \tag{12}$$

以便于和 Q_F 作比较, Q_E 也比 Q_F 更直接地反映出计算结果与实验符合的程度.

表 3 计算的三带能谱的参数和均方差

	$^{154}\text{Gd}_{90}$	$^{156}\text{Dy}_{90}$	$^{158}\text{Er}_{90}^{(1)}$	$^{160}\text{Er}_{96}$	$^{170}\text{Yb}_{100}$	$^{174}\text{Yb}_{104}$
Q_F	0.596^{-2}	0.203^{-1}	0.253	0.278^{-2}	0.141^{-4}	0.210^{-2}
Q_E	0.183^{-1}	0.820^{-1}	0.234^{-1}	0.264^{-1}	0.401^{-3}	0.565^{-2}
a_1	0.170^{-1}	0.178^{-1}	0.283^{-1}	0.144^{-1}	0.140^{-1}	0.187^{-1}
a_2	-0.139^{-2}	-0.286^{-2}	0.312^{-2}	0.279^{-3}	0.295^{-2}	0.173^{-3}
a_3	0.873^{-2}	0.782^{-2}	0.851^{-2}	0.747^{-2}	0.660^{-2}	0.832^{-1}
a_4	1.450	1.476	1.496	1.265	1.582	1.541
a_5	0.427^{-1}	-0.284^{-1}	0.610^{-1}	0.137^{-1}	0.182^{-2}	0.182^{-1}
a_6	0.200^{-4}	0.202^{-4}	0.117^{-3}	0.652^{-3}	0.798^{-3}	0.138^{-4}

1) $h_{11} = a_1 \hat{I}^2 - a_6 \hat{I}^4 + a_7 \hat{I}^6$; a_7 由 $h_{11}(I_c) = h_{21}(I_c)$ 确定, I_c 取 $(\Delta^2 E_1(I))$ 极小) 实验值, 仍是六个可调参数.
 2) $0.596^{-2} = 0.596 \times 10^{-2}$ 余皆类同.

表中单位: $Q_F, (\text{MeV})^6$; $Q_E, (\text{MeV})^2$; 其余都是 (MeV) ; 表中 K 为混杂矩阵元 $K_{12} = a_2 \hat{I}$, $K_{23} = a_5 \hat{I}$ 的计算结果.

表 4 原子核的三带能谱和转晕带的 \mathcal{J} 和 ω .

$^{156}\text{Dy}_{92}$	$E_1^T(I) (\text{KeV})$	$\mathcal{J}^e (\text{MeV}^{-1}, \omega e^2)$	$(\omega e)^2$	$E_1^T(I)$	\mathcal{J}^T	$(\omega^T)^2$	$E_1^T(I) (\text{keV})$	$E_1^T(I) (\text{KeV})$
2+	98.94	60.6	0.0019	95.54	62.8	0.0018	1084.5	1130
4+	317.26	64.1	0.0118	312.28	64.6	0.0016	1237.0	1300
6+	637.88	68.6	0.0256	636.25	67.9	0.0261	1411.2	1650
8+	1044.0	73.9	0.0411	1047.8	72.9	0.0422	1648.8	2110
10+	1519.9	79.8	0.0565	1524.9	79.6	0.0568	1949.7	2710
12+	2049.2	86.9	0.0700	2047.3	88.1	0.0681	2314.0	3420
14+	2612.3	95.9	0.0793	2601.8	97.4	0.0768	2741.6	4260
16+	3190.5	107.3	0.0835	3189.6	105.5	0.0863	3232.7	5230
18+	3781.5	118.4	0.0873	3786.9	117.2	0.0892	3833.0	6320
20+	4407.3	124.6	0.0979	4404.6	126.3	0.0954	4584.9	7540
22+	5085.4	126.8	0.1149	5085.7	126.3	0.1159	5538.9	8880
24+	5820.0			5830.1	126.3	0.1385	6840.2	10340

这里只举 1 个核为例, 列表 4 示之.

图 5 列出了两个核的 $\mathcal{J} \sim \omega^2$ 图, 以及 $\Delta^2 E(I) \sim I$ 二级差分图.

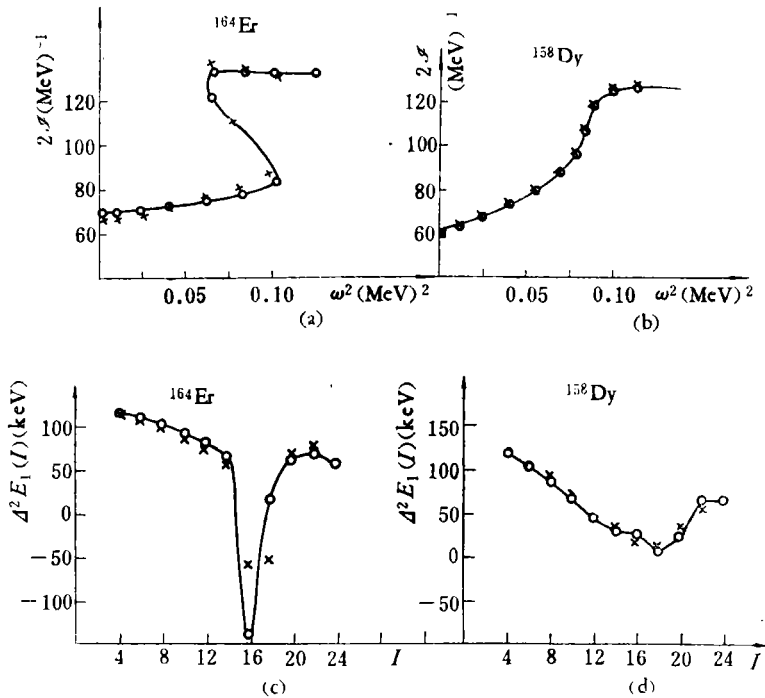


图5 × 实验值 ○ 理论值

五、分析讨论

1. 这两类核都符合实验能谱, 见图及表.

对变形核, 符合好, Q_E 小. 这主要是形变核的基态带等较近于刚性转子带, 而 $N=90$ 的三个转变核则偏离较大.

对变形核, 能较好地再现观测的 $J \sim \omega^2$ 图和二级差分图.

从表 3 可见, 符合程度 (用 Q_E, Q_F 表示) 与表 2 中所列的 $E_1(4^+)/E_1(2^+)$ 有关, 这个值大, 就符合得很好.

2. 计算定出的参数值较合理(表 3)

a_1 为基态带的转动惯量参数, $a_1 = \frac{1}{2J_g}$, 与实验值相近.

a_2, a_5 为混杂矩阵元 K_{12} 和 K_{23} 中的参数反映带间相互作用的大小, 与实验值差几倍或甚至差数量级.

a_3, a_4 为超带的转动惯量参数 ($a_3 = \frac{1}{2J_s}$) 和带头能量. 我们计算的 $^{156}\text{Dy}, ^{154}\text{Gd}$ 的 $a_4 \approx 1.5 \text{ MeV}$ 与其它作者的计算结果相近^[2,3], 目前还无完整的实验值与之比较. 只有几条超带实验能级的外推值, 但由于产生超带的机制不清楚, 这种外推有多大可靠性, 很难确定.

a_6 为基态带偏离刚性转子带的量度参数有实验值可资比较.

在计算中, a_1, a_3, a_4, a_6 的值变化很小, 不管混杂矩阵元为何种形式。但 a_2, a_5 可变化很大范围, 而均方差 Q_F, Q_E 变化不大, 这些都是可以理解的。

3. 关于带间相互作用

如考虑双带交叉, 带间相互作用为 K_{12} , 则混杂以后的 $E_1(I)$ 与 $E_2(I)$ 为

$$E_{1,2}(I) = \frac{1}{2} \{ (h_{11} + h_{22}) \pm \sqrt{(h_{11} - h_{22})^2 + 4K_{12}^2} \}, \quad (13)$$

在交叉点 I_c 处, $h_{11}(I_c) = h_{22}(I_c)$ 。所以

$$\Delta E(I_c) = E_2(I_c) - E_1(I_c) = 2K_{12}(I_c), \quad (14)$$

这结果与模型无关。第三带的存在(见图 1)对这种结果(只要 $h_{33}(I_c)$ 离交叉点较远)影响很小。

从实验上得到的 $^{164}\text{Er}(I_c \approx 16)$ 的 $K_{12}(I_c) < 74\text{KeV}$; $^{156}\text{Dy}(I_c \approx 16)$ 的 $K_{12}(I_c) \approx 12.5\text{KeV}$ 等。这种超带与基态带的混杂, 从现有实验值看, 一般较小。

我们在计算中用了三种 K_{lm} 相互作用(式(5))第一种 K_{12}, K_{23} 为常数; 第二种 $K_{lm} \approx \hat{I}$ (相当于柯氏力效应); 第三种 $K_{lm} \approx \hat{I}^2$ (相当于离心拉长效应)。

前两种计算结果相近, 结果都比较好, 所定的参数值较合理(见表 3), Q_F, Q_E 较小。第三种计算结果较差。表明混杂主要是前两种形式。这个区域核的超带的产生可能是由于柯氏力转动重排效应^[4]。带间混杂就可能是第二种形式。在计算 $B(E2)$ 约化跃迁几率时, 曾有人^[7,11]用第一种形式的混杂。所以, 为什么前二种结果相近, 有待于进一步探讨。

4. 关于 $N = 90$ 的三个核

中子数 $N = 90$ 的三个转变核 $^{154}\text{Gd}, ^{156}\text{Dy}, ^{158}\text{Er}$, 计算的超带的带头能量 a_4 和转动惯量 \mathcal{J}_2 ($\mathcal{J}_2 = \frac{1}{a_3}$) 相近(表 3), $a_4 \approx 1.5\text{MeV}$, $a_3 \approx 8\text{KeV}$ 。这说明, 这里是中子对超带的产生作出了贡献, 且是由相同机制产生超带的。这和认为这三个核的超带是由同一轨道上的 $i_{13/2}$ 中子对所贡献^[10]相符合。

这三个核的实验中子对能 $2\Delta_n$ 也相近(表 2)。

Hf 的三个同位素 $^{172}\text{Hf}, ^{174}\text{Hf}, ^{176}\text{Hf}$ 的超带性质相差很大, a_3, a_4 值各不相同。表明这三个核的超带不可能是由质子、及其由同一种机制所产生, 而可能是中子的转动激发所产生。

综上所述, 我们简单的讨论和分析了带交叉图象, 表明可以用它来解释 $\mathcal{J} \sim \omega^2$ 图上的回弯现象, 并用转动三带交叉混杂作了计算。

计算中主要的近似是矩阵元的假设, 例如 h_{11} 含有 \hat{I}^2 的高次项, 但 $h_{33}(\beta$ 带) 却是刚性转子, 这是不够的。这就使 $^{154}\text{Gd}, ^{156}\text{Dy}$ 等核的 Q_E 较大。当然这是唯象分析的缺点, 要增加 \hat{I}^2 的高次项, 就要增加可调参数。

我们所用的定可调参数的方法也与常用的方法不同。

一般说来, “基”带 h_{11} 的变化, 立即影响计算结果, 但仍是 K_{lm} 为常数和 $K_{lm} \approx \hat{I}$ 时计算结果与实验值符合好。因为假设了 $K_{\beta\beta}$, 即 $K_{13} = 0$, 就不可能给出转晕带的 $\Delta^3 E_1(I)$ 中那个次极大。

计算结果给出了转动三带的一些信息。例如：超带的带头能量、转动惯量，超带与基态带、 β 带(或 γ 带)的交叉点、混杂大小等。

这里给出的 $E_3(I)$ 值，因无实验值比较，未加讨论。

对于 K_{lm} ，一般在估计的实验值的量级内。进一步的探讨要考虑电磁跃迁的约化几率以及 γ 带的影响等问题。

参 考 文 献

- [1] A. Molinari, T. Regge, *Phys. Lett.*, **41B** (1972), 93.
- [2] R. A. Broglia et al., *Phys. Lett.*, **57B** (1975), 113; *Phys. Lett.*, **50B** (1974), 295.
- [3] Y. EL. Masri, J. Vervier, *Nucl. Phys.*, **A279** (1977), 223.
- [4] F. S. Stephens, R. S. Simon, *Nucl. Phys.*, **A138** (1972), 257; F. S. Stephens. *Rev. Mod. Phys.*, **47** (1975), 43. 王正大等, 高能物理与核物理, **3**(1979), 348.
- [5] B. R. Mottelson, J. G. Valatin, *Phys. Rev. Lett.*, **5** (1960), 511.
- [6] R. O. Sayer et al., *Atom. Data. and Nucl. Data Table*, **15** (1975), 85; M. Sakai, *Atom. Data and Nucl. Data. Table*, **15** (1975), 513.
- [7] O. C. Kistner et al., *Phys. Rev.*, **C17** (1978), 1417.
- [8] N. R. Johnson et al., *Phys. Rev. Lett.*, **40** (1978), 151.
- [9] 顾金南, “数学的实践与认识”, 待发表.
- [10] J. Vervier, *Nucl. Spectro and Nucl. Reaction with HI* (1976), 442.
- [11] T. L. Khoo et al., *Phys. Lett.*, **31** (1973), 1146; R. M. Lieder et al., *Phys. Lett.*, **49B** (1974), 161.
- [12] L. K. Peker et al., *Proc. Int. Conf. on Nucl. Struc.*, (Tokyo, 1977), p. 110.
- [13] R. R. Whitehead, *Nucl. Phys.*, **A182** (1972), 290; T. Sebe et al., *Ann. Phys.*, **51** (1969), 100.
- [14] A. Neskakis et al., *Nucl. Phys.*, **A261** (1976), 189.
- [15] A. H. Wapstra et al., *Atom. Data and Nucl. Data Table*, **19** (1977), 175.
- [16] F. W. De boer et al., *Nucl. Phys.*, **A290** (1977), 173.
- [17] F. Kearns et al., *Nucl. Phys.*, **A278** (1977), 109. I. Y. Lee et al., *Phys. Rev. Lett.*, **37** (1976), 420.
- [18] L. K. Peker et al., *Proc. of Int. Conf. on Nucl. Struc.*, (Tokyo, 1977), p. 397.

THE ROTATIONAL THREE-BAND INTERACTION FOR EVEN-EVEN NUCLEI

GU JIN-NAN WANG ZHENG-DA

(*Institute of Modern Physics, Academia Sinica*)

ABSTRACT

The interaction of the rotational three-band, the superband, the g band and the β band (or γ band), for even-even Nuclei is discussed.

The Hamiltonian matrix is diagonalized after solving the secular equation by which the parameters in the matrix elements are determined. The three-band spectra for more than ten nuclei have been calculated. The calculated results are found to be in reasonable agreement with experimental data, and some informations of three-band mixing are obtained.