

偶偶核高自旋态四带混杂探索

王正大 顾金南

(中国科学院近代物理研究所)

摘 要

本文提出了一个描述偶偶核高自旋态四带混杂的简化方法, 讨论了 Er^{164} 的多带交叉结构, 并对 Er^{164} 的四个偶宇称带交叉混杂进行了具体计算, 对于各带的能谱, 转动惯量与角速度关系曲线 ($J \sim \omega^2$), 理论计算值与实验值基本符合。

引 言

关于原子核转动惯量与角速度关系曲线回弯机理的研究, 理论上提出了科氏反对效应、转动重排效应和形状相变三种不同机制^[1-3]。这三种机制不是彼此孤立的, 而是存在着内在联系。虽然带交叉理论只是一种形式理论, 但是可以通过这种理论与实验数据拟合确定的参数, 讨论不同反弯机制之间的关系^[6-8]。带交叉与带混杂这两个概念是有区别的, 考虑到宇称守恒, 角动量守恒以及其它选择定则的限制, 两个带交叉并不一定产生混杂。一个只有偶自旋态的 β 型带与一个 γ 型的带交叉, 只需考虑偶自旋态之间的混杂。两个混杂的带在交叉点附近混杂几率急剧增加, 反映在两带各自的 $J \sim \omega^2$ 曲线上, 就会出现交叉点附近的点偏离曲线光滑变化。由于 $J \sim \omega^2$ 曲线比能谱曲线 $E \sim I(I+1)$ 灵敏得多, 这是判别两个交叉的带是否产生混杂的有效方法。 Er^{164} 的多带结构实验数据比较齐全, 实验上观察到六个带: 三个正宇称带, 两个负宇称带和一个宇称尚未确定的带^[9] (图 1)。三个正宇称带是基带、超带和 γ 振动带, 由于 γ 振动带 $J \sim \omega^2$ 曲线出现回弯, 可以认为存在一个 γ 超带 (图 2 b)。从 Er^{164} 各带的 $J \sim \omega^2$ 曲线可以看到, 负宇称带与基态带在角动量 $16\hbar$ 到 $18\hbar$ 之间交叉, 但各自的 $J \sim \omega^2$ 曲线没有在交叉点出现偏离光滑曲线的变化。特别值得注意的是, 未知宇称的带与 γ 振动带在角动量 $12\hbar-14\hbar$ 之间交叉, 各自 $J \sim \omega^2$ 曲线也没有偏离光滑变化, 这说明未知宇称的带很有可能是负宇称带, 当然也有可能是其它选择定则使这两个带相交而不混杂。考虑到带交叉与带混杂的差异, 可以简化多带理论。近年来由于实验技术的改进与重离子核反应工作广泛开展, 高自旋态实验数据在精度上和数量上有很大增加, 但对于多带混杂理论的探索工作, 还需要更多的实验数据, 特别是比较齐全的超带实验数据。本文提出了一个偶偶核四带混杂计算的简化方法, 对 Er^{164} 的四个正宇称带的交叉混杂进行了探索。

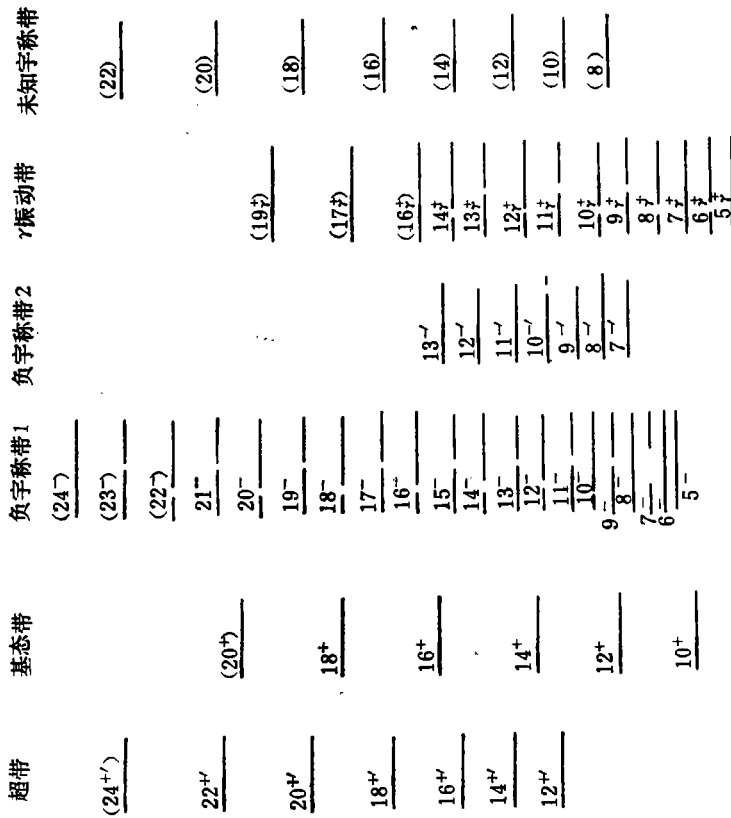


图1 Er¹⁶⁶ 实验能谱

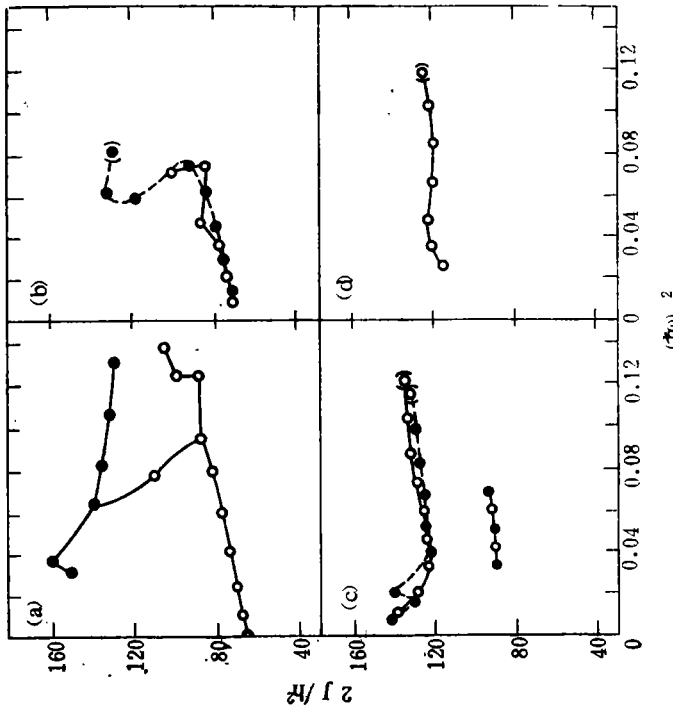


图2

(a) 基态带与超带 $2J \sim \omega^2$ 实验曲线;
 (b) γ 振动带 $2J \sim \omega^2$ 实验曲线;
 (c) 两个负宇称带 $2J \sim \omega^2$ 实验曲线;
 (d) 未知宇称带 $2J \sim \omega^2$ 实验曲线.

四带混杂形式理论

研究多带混杂物理图象, 首先需要选择两组基矢空间, 一组表示混杂前各带波函数 $\varphi(I)$, 另一组表示混杂之后的各带波函数 $\psi(I)$. 原子核转动系统哈密顿量 H 可以写成两部分

$$H = H_0 + H'$$

H' 是微扰项, $\varphi(I)$ 是 H_0 的本征波函数, $\psi(I)$ 是系统总哈密顿量 H 的本征波函数. 由于混杂之后的波函数与混杂前的波函数之间满足么正变换, 于是有

$$\psi_i(I) = \sum_{n=1}^4 U_{in}(4I)\varphi_n(I) \quad i = 1, 2, 3, 4.$$

$$U(4I)U^+(4I) = 1$$

选取变换矩阵与矩阵元具有如下形式:

$$U(4I) = \begin{pmatrix} C_1(I) & C_2(I) & C_3(I) & C_4(I) \\ -C_2(I) & C_1(I) & -C_4(I) & C_3(I) \\ C_3(I) & -C_4(I) & -C_1(I) & C_2(I) \\ C_4(I) & C_3(I) & -C_2(I) & -C_1(I) \end{pmatrix}$$

$$C_i^2(I) = e^{-aH_{ii}(I)} / \sum_{j=1}^4 e^{-aH_{jj}(I)} \quad i = 1, 2, 3, 4.$$

$H_{ii}(I)$, $i = 1, 2, 3, 4$. 表示混杂前四带能谱. 求解薛丁格方程

$$H\psi(I) = E(I)\psi(I)$$

可以得到十六个方程

$$\sum_{n=1}^4 U_{in}(4I)H_{mn}(I) = E_i(I)U_{im}(I)$$

$$i = 1, 2, 3, 4; \quad m = 1, 2, 3, 4.$$

这里

$$H_{mn}(I) = \langle \varphi_m(I) | H | \varphi_n(I) \rangle$$

$$m = 1, 2, 3, 4; \quad n = 1, 2, 3, 4.$$

从这十六个方程消去非对角项 $H_{mn}(I)$ 可以得到四个方程:

$$C_1^2(I)E_1(I) + C_2^2(I)E_2(I) + C_3^2(I)E_3(I) + C_4^2(I)E_4(I) = H_{11}(I)$$

$$C_2^2(I)E_1(I) + C_1^2(I)E_2(I) + C_3^2(I)E_3(I) + C_4^2(I)E_4(I) = H_{22}(I)$$

$$C_3^2(I)E_1(I) + C_4^2(I)E_2(I) + C_1^2(I)E_3(I) + C_2^2(I)E_4(I) = H_{33}(I)$$

$$C_4^2(I)E_1(I) + C_3^2(I)E_2(I) + C_2^2(I)E_3(I) + C_1^2(I)E_4(I) = H_{44}(I)$$

根据线性方程组的标准解法, 可以得到混杂后的四带能谱为

$$E_i(I) = \Delta_i(I) / \Delta(I) \quad i = 1, 2, 3, 4.$$

各带转动惯量 $J(I)$ 与转动角速度 $\omega^2(I)$ 为^[7]

$$J_i(I) = (2I - 1) / [E_i(I) - E_i(I - 2)]$$

$$\omega_i(I) = (I^2 - I + 1) / J_i^2(I)$$

$$i = 1, 2, 3, 4.$$

对于 Er^{164} 我们假定 $H_{11}(I)$ 、 $H_{22}(I)$ 、 $H_{33}(I)$ 和 $H_{44}(I)$ 分别表示混杂前基态带、 γ 基态带、超带与 γ 超带能谱

$$H_{11}(I) = \frac{1}{2J_g} I(I+1) + C_{g1}[I(I+1)]^2 + C_{g2}[I(I+1)]^3$$

$$H_{22}(I) = E_\gamma^0 + \frac{1}{2J_{\gamma g}} I(I+1) + C_{\gamma g}[I(I+1)]^2$$

$$H_{33}(I) = E_s^0 + \frac{(I - K_s)(I - K_s + 1)}{2J_s}$$

$$H_{44}(I) = E_{\gamma_s}^0 + \frac{(I - K_{\gamma_s})(I - K_{\gamma_s} + 1)}{2J_{\gamma_s}}$$

在计算 Er^{164} 中我们选用的参数值如下

$$\begin{aligned} 2J_g &= 65.72(\hbar^2/\text{MeV}); \\ C_{g1} &= -1.1425 \times 10^{-5}(\text{MeV}/\hbar^4); \\ C_{g2} &= 1.781 \times 10^{-11}(\text{MeV}/\hbar^8); \\ E_\gamma^0 &= 0.7754(\text{MeV}); \\ C_{\gamma g} &= -8.8407 \times 10^{-6}(\text{MeV}/\hbar^4); \\ E_{\gamma_s}^0 &= 2.5156(\text{MeV}); \\ 2J_s &= 106.00(\hbar^2/\text{MeV}); \\ 2J_{\gamma g} &= 70.707(\hbar^2/\text{MeV}); \\ K_s &= 4.0175(\hbar); \\ E_{\gamma_s}^0 &= 2.5156(\text{MeV}); \\ 2J_{\gamma_s} &= 87.258(\hbar^2/\text{MeV}); \\ K_{\gamma_s} &= 6.040(\hbar); \\ a &= 17.00(\text{MeV}^{-1}). \end{aligned}$$

计算结果和讨论

通过计算混杂后四带能谱,可以得到混杂之后的基态带、超带、 γ 基态带与 γ 超带的能谱,并计算各带的 $J(I) \sim \omega^2(I)$ 曲线,与实验进行比较. 我们的计算表明,各带能谱理论值与实验值基本符合,各带 $J_s(I) \sim \omega_s^2(I)$ 理论曲线再现了实验曲线特征,有趣的是这些曲线能反映出在交叉点附近偏离光滑变化的特征(表 1)(图 3)和(图 4)特别需要说明的是,我们计算得到的 γ 基态带与超带在自旋为 $10\hbar$ 附近交叉,因此在 γ 基态带的 $J \sim \omega^2$ 曲线上,出现了偶自旋点 $10\hbar$ 和 $12\hbar$ 明显偏离曲线的光滑变化. 由于超带是 β 型,只存在偶自旋态, γ 基态带的奇自旋态不会有来自超带的混杂,因此在交叉点附近,奇自旋态并不偏离曲线的光滑变化,这证实了我们以前分析这个问题时的一种想法^[6]. 分析我们计算得到的参数,对于 Er^{164} 超带的性质有了进一步了解, Er^{164} 的超带是一个完成转动重排的带,重排角动量 $K_s = 4\hbar$,超带的带头能量与对能 2Δ 差不多,超带的转动惯量比基态带几乎大一倍,这说明转动重排与科氏反对两种效应是一起发生的. 单纯从转动重排提取的重排角动量要大一倍($K_s = 8\hbar$),这可能是把科氏反对效应等效过去了^[5].

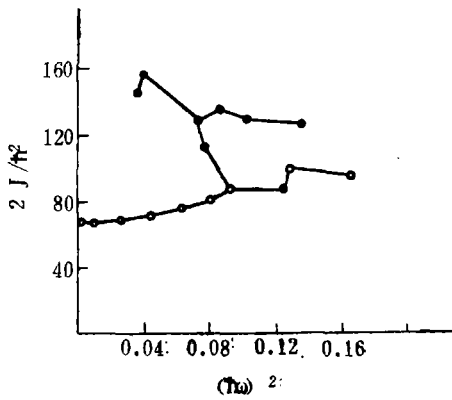


图 3 理论计算基态带与超带 $2J \sim \omega^2$ 曲线

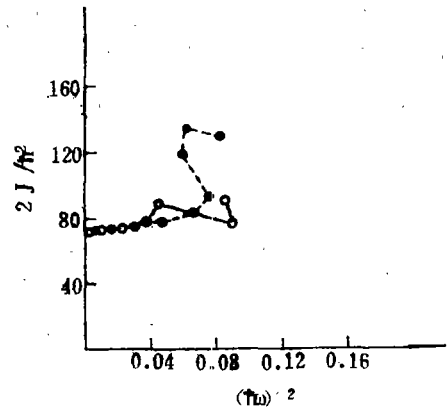


图 4 理论计算 r 振动带 $2J \sim \omega^2$ 曲线

表 1 Er^{164} 各偶宇称带能谱理论计算值与实验值比较

I	E_0^{+h}	E_0^{+x}	E_2^{+h}	E_2^{+x}	E_4^{+h}	E_4^{+x}	E_6^{+h}	E_6^{+x}
2	0.0909	0.0913	1.8664	—	0.8600	—	2.6563	—
3	—	—	—	—	0.9439	—	2.8566	—
4	0.2998	0.2994	1.8468	—	1.0548	1.0583	2.5398	—
5	—	—	—	—	1.1918	1.1973	2.5160	—
6	0.6190	0.6143	1.9028	—	1.3538	1.3582	2.5151	—
7	—	—	—	—	1.5397	1.5447	2.5371	—
8	1.0368	1.0245	2.0364	—	1.7457	1.7448	2.5821	—
9	—	—	—	—	1.9767	1.9767	2.6499	—
10	1.5382	1.5179	2.2919	—	2.1734	2.1841	2.7407	—
11	—	—	—	—	2.4882	2.4790	2.8543	—
12	2.1063	2.0825	2.5196	2.5190	2.7730	2.7332	2.9961	—
13	—	—	—	—	3.0327	3.0266	3.1744	—
14	2.7143	2.7022	2.8933	2.8744	3.4038	3.2669	3.2847	—
15	—	—	—	—	3.6780	—	3.5208	3.5183
16	3.4197	3.4112	3.2859	3.2626	3.9759	—	3.7598	—
17	—	—	—	—	4.2786	—	4.0145	4.0178
18	4.1137	4.1215	3.8212	3.7681	4.5800	—	4.2897	—
19	—	—	—	—	4.8754	—	4.5867	4.5890
20	4.9300	4.8682	4.4076	4.3453	5.1560	—	4.9089	—
21	—	—	—	—	—	—	—	—
22	5.9244	—	5.0673	4.9993	—	—	—	—
23	—	—	—	—	—	—	—	—
24	7.3253	—	5.8026	5.7281	—	—	—	—
25	—	—	—	—	—	—	—	—
26	—	—	6.6132	—	—	—	—	—

为了大致说明超带转动惯量 J_r 值的合理性，可以大致与同一个 Er^{164} 的负宇称带转动惯量比较，由于负宇称带是破坏了对关联的带，这一点与超带是类似的，比较得到超带与负宇称带在转动惯量大小上是差不多的，都明显大于基态带转动惯量，这有可能是由于对关

联破坏原子核形变增大的原因造成的。我们计算还表明 γ 超带也适用一个完成转动重排的带, $K_{\gamma} = 6\hbar$, 可惜 γ 超带实验点太少, 不能作出比较肯定的分析。我们期待进一步的实验证实或修正我们以上的分析和讨论。

参 考 文 献

- [1] B. R. Mottelson, J. G. valatin, *Phys. Rev. Lett.*, **5** (1960), 511.
- [2] F. S. Stephens, R.S. Simon, *Nucl. Phys.*, **A138** (1972), 257.
- [3] C. K. Ross, v. Nogami, *Nucl. Phys.*, **A211** (1973), 1450.
- [4] 徐躬耦, 张敬业, 高能物理与核物理, **Vol. 3**(1979), 232.
- [5] 王正大, 顾金南等, 高能物理与核物理, **3** (1979), 348.
- [6] 顾金南, 王正大, 高能物理与核物理, **5** (1980), 652.
- [7] 朱耀银等, 原子核物理 (1974 年会议资料选编).
- [8] 廖继志, 高能物理与核物理, **4** (1980), 652.
- [9] O. C. Kistener, A. W. Sunyar and E. der Mateasian, *Phys. Rev.*, **C17** (1978), 1417.

A EXPLORATION OF FOUR BAND MIXTURE DESCRIBING THE HIGH SPIN STATES OF EVEN-EVEN NUCLEI

WANG ZHENG-DA GU JIN-NAN

(*Institute of Modern Physics, Academia Sinica*)

ABSTRACT

A simple method of four band mixture describing the high spin states of even-even nuclei is proposed. Multi-band structure is discussed. The spectra and $2J \sim \omega^2$ curves of four even parity bands in Er^{164} is calculated in this model. The results are found to be in a reasonable agreement with experimental data.