

超形变带的唯象分析*

方向正^{3,1)} 阮图南^{1,2}

1 (中国高等科学技术中心 北京 100080)

2 (中国科学技术大学近代物理系 合肥 230027)

3 (安徽大学物理系 合肥 230039)

摘要 利用量子代数两种不同的表示和原子核软度系数的定义,给出了描述正常形变核和超形变核两个不同的转动谱公式.对 $A \sim 190, 150$ 区超形变转动带的分析结果表明,超形变带能谱公式不仅可以相当精确地描述 γ 跃迁能谱,而且可以复现动力学转动惯量的“反转”(turnover)现象.

关键词 超形变带 软度系数 量子代数 $E2\gamma$ 跃迁能量 反转

1 引言

原子核超形变(SD)带是近年来核结构领域最热门的前沿课题之一.由于SD带 $E2\gamma$ 跃迁能谱的规律性类似于正常形变(ND)带,唯象方案^[1-6]大多使用正常形变(ND)带能谱公式来描述SD带,并取得了一定的成功.大量的实验资料显示SD带与ND带存在较明显的差异^[7], (如SD核的刚性较强,动力学转动惯量随转动频率的“反转”、 $\Delta I = 4$ 分岔现象等),因此用正常形变(ND)带能谱公式来描述SD带是否合理,有待于进一步的研究.

最近,文献[8,9]唯象地提出用 q 变形转动惯量转子模型来整理原子核的转动谱.该模型认为固定形变、Stretching 效应和多体统计效应可能是描述原子核转动的3个主要因素,这3个自由度集中体现在转动惯量的表达式中

$$\mathcal{I}(I) = \mathcal{I}_0 \{1 + B[I]_q [I + 1]_q\}, \quad (1)$$

在转动的框架下,原子核的转动谱公式可以近似表示为

$$E(I) = \frac{I(I + 1)}{2\mathcal{I}_0 \{1 + B[I]_q [I + 1]_q\}} \hbar^2, \quad (2)$$

其中参数 \mathcal{I}_0 是带首转动惯量, B 是反映原子核转动惯量随角动量的变化快慢程度的参数, $[x]_q$ 为 q 数.在量子代数的表示理论中, q 数 $[x]_q$ 有两种不同形式的等价表示

2000-01-19 收稿, 2000-05-21 收修改稿

* 国家自然科学基金(19677102, 19775044), 高等学校博士学科点专项科研基金(97035807), 北京正负电子对撞机国家实验室, 兰州重离子加速器国家实验室原子核理论研究中心和安徽省教委自然科学基金(2000j106)资助

1) 通信地址

$$[x]_q = \frac{q^x - q^{-x}}{q - q^{-1}} = \frac{\sin(\tau x)}{\sin(\tau)} \quad (q = e^{\tau}, \tau \text{ 为实数}), \quad (3)$$

$$[x]_Q = \frac{Q^x - 1}{Q - 1} = \frac{e^{-\tau x} - 1}{e^{-\tau} - 1} \quad (Q = e^{-\tau}, \tau \text{ 为大于零的实数}). \quad (4)$$

相应的(1)式给出了两种转动惯量

$$\mathcal{I}_q(I) = \mathcal{I}_0 \left[1 + B \frac{\sin(\tau I) \sin(\tau I + \tau)}{\sin \tau \sin \tau} \right], \quad (5)$$

$$\mathcal{I}_Q(I) = \mathcal{I}_0 \left[1 + B \frac{(e^{-\tau I} - 1)(e^{-\tau(I+1)} - 1)}{(e^{-\tau} - 1)^2} \right], \quad (6)$$

值得提出的是,上两式之间不存在某种直接的变换.

由原子核软度系数^[10]

$$S = \frac{1}{\mathcal{I}(I)} \left. \frac{d\mathcal{I}(I)}{dI} \right|_{I=0}, \quad (7)$$

可以得到(5)和(6)式所对应的原子核的软度:(分别以 S_q 和 S_Q 表示)

$$S_q = \frac{\tau B}{\sin \tau}, \quad S_Q = \frac{\tau B}{1 - e^{-\tau}}, \quad (8)$$

在参数值未确定时,可以取参数值相等. 考虑到 τ 的数值小于零,得到

$$\frac{S_q}{S_Q} = \frac{1 - e^{-\tau}}{\sin \tau} < 1. \quad (9)$$

由于 SD 核刚性较强,(5)式应为 SD 核的转动惯量,(6)式为 ND 核的转动惯量,相应的转动谱公式为

$$E(I) = \frac{I(I+1)\hbar^2}{2\mathcal{I}_0[1 + B_2(e^{-\tau I} - 1)(e^{-\tau(I+1)} - 1)/(e^{-\tau} - 1)^2]} \quad (\text{ND 核}), \quad (10)$$

$$E(I) = \frac{I(I+1)\hbar^2}{2\mathcal{I}_0[1 + B_1 \sin \tau I \sin \tau (I+1) / \sin^2 \tau]} \quad (\text{SD 核}), \quad (11)$$

文献[10]利用(10)式拟合了 29 个铜系和稀土偶偶形变核的基带转动谱,分析了参数值的合理性. 结果表明,(10)式能较精确地显示形变偶偶核转动谱规律,参数的取值明显体现了原子核的壳结构,支持了微观理论中的粒子-空穴理论. 本文将利用(11)式系统地分析 $A \sim 190$ 和 150 区 SD 带.

2 计算结果

根据(11)式,可得 SD 带 γ 跃迁能量

$$E_\gamma(I) = E(I+2) - E(I), \quad (12)$$

通过最小方均根差拟合实验数据,得到 E2 跃迁能量,同时指定出带首自旋值. 我们系统地拟合了 190 和 150 区近 80 条 SD 带,由于篇幅限制,在表 1 和 2 中仅列出拟合参数、带首自旋值和带首 γ 跃迁能量,其中 σ 为最小方均根差

$$\sigma = \left\{ \frac{1}{N} \sum_i [E_{\text{exp}}(i) - E_{\text{cal}}(i)]^2 \right\}^{1/2} \quad (13)$$

动力学转动惯量和转动频率既可以由定义式

$$\mathcal{I}^{(2)} = \hbar^2 \left(\frac{d^2 E}{dI_x^2} \right)^{-1}, \quad \hbar\omega = \frac{dE}{dI_x} \quad (14)$$

来计算,也可以从 γ 跃迁能量中直接提取

$$\mathcal{I}^{(2)} = 4\hbar^2 / [E_\gamma(I+2) - E_\gamma(I)]^{-1}, \quad \hbar\omega = [E_\gamma(I+2) + E_\gamma(I)]/4, \quad (15)$$

图 1—8 中显示了部分 SD 核的 $\mathcal{I}^{(2)}$ 随 $\hbar\omega$ 的变化情况.

表 1 A~190 区 SD 带跃迁能量 $E_\gamma = E(I+2) - E(I)$ 的拟合参数

SD 带	I_0	$E_\gamma(\text{Exp})/\text{keV}$	$\mathcal{I}_0/(\hbar^2/\text{MeV})$	$B \times 10^5$	τ	σ/keV	N	Ref
¹⁹⁰ Hg(1)	12	316.9	84.574	6.731	0.0123	0.801	14	[17]
¹⁹¹ Hg(1)	13.5	310.9	94.967	2.993	0.0095	0.399	14	[18]
¹⁹¹ Hg(2)	10.5	252.4	94.197	3.998	0.0145	0.159	16	[18]
¹⁹¹ Hg(3)	11.5	272.3	93.861	4.951	0.0171	0.190	15	[18]
¹⁹¹ Hg(4)	12	280.9	98.89	9.413	0.0549	0.583	14	[18]
¹⁹¹ Au(1)	9.5	229.5	94.561	3.986	0.0119	0.450	13	[19]
¹⁹² Hg(1)	8	214.4	87.819	7.877	0.0201	0.489	19	[20]
¹⁹³ Hg(2)	10.5	250.0	93.162	5.106	0.0164	0.188	19	[21]
¹⁹³ Hg(3)	9.5	233.5	93.145	5.162	0.0165	0.499	19	[21]
¹⁹⁴ Hg(1)	10	253.93	88.794	7.503	0.0191	0.307	20	[22]
¹⁹⁴ Hg(2)	8	200.79	93.642	4.892	0.0157	0.243	20	[22]
¹⁹⁴ Hg(3)	11	262.27	93.907	4.874	0.0164	0.125	19	[22]
¹⁹⁵ Hg(1)	12.5	294.00	92.975	6.141	0.0175	0.199	16	[23]
¹⁹⁵ Hg(2)	11.5	273.9	92.968	6.094	0.0172	0.316	18	[23]
¹⁹⁵ Hg(4)	15	341.9	94.548	4.280	0.0176	0.287	16	[23]
¹⁹¹ Tl(1)	15.5	358.9	92.593	3.893	0.0027	0.356	9	[24]
¹⁹¹ Tl(2)	18.5	377.8	106.067	9.420	0.1050	0.253	8	[24]
¹⁹² Tl(1)	13	283.0	103.762	-4.840	0.0821	0.158	12	[25]
¹⁹² Tl(2)	16	337.5	103.584	0.439	0.0012	0.291	11	[25]
¹⁹³ Tl(1)	9.5	227.3	95.632	4.005	0.0197	0.364	16	[26]
¹⁹³ Tl(2)	8.5	206.6	95.602	4.412	0.0169	0.473	17	[26]
¹⁹⁴ Tl(1)	12	268.0	99.649	2.826	0.0140	0.515	13	[27]
¹⁹⁴ Tl(2)	10	240.5	95.360	3.900	0.0150	0.646	14	[27]
¹⁹⁴ Tl(3)	8	187.9	100.843	3.932	0.0272	0.476	13	[27]
¹⁹⁴ Tl(4)	9	209.3	99.681	2.900	0.0146	0.181	14	[27]
¹⁹⁴ Tl(5)	9	220.3	94.877	4.943	0.0225	0.519	14	[27]
¹⁹⁴ Tl(6)	9	207.0	101.010	3.577	0.0117	0.466	18	[27]
¹⁹² Pb(1)	10.2	262.5	87.458	8.332	0.0202	0.385	11	[17]
¹⁹³ Pb(1)	11.5	277.2	96.456	1.651	0.0141	0.296	12	[28]
¹⁹³ Pb(3)	10.5	250.6	94.794	3.434	0.0176	0.239	13	[28]
¹⁹³ Pb(4)	11.5	273.0	93.519	5.484	0.0199	0.181	13	[28]
¹⁹³ Pb(5)	8.5	212.9	92.752	5.876	0.0233	0.266	13	[28]
¹⁹³ Pb(6)	9.5	234.1	92.644	5.922	0.0230	0.213	14	[28]
¹⁹⁴ Pb(1)	4	124.9	87.850	8.367	0.0245	0.290	16	[17]
¹⁹⁴ Pb(2)	10	241.2	94.518	4.480	0.0060	0.658	9	[29]
¹⁹⁴ Pb(3)	11	260.9	94.162	5.334	0.0200	0.398	9	[29]
¹⁹⁵ Pb(1)	7.5	182.13	98.565	2.181	0.0297	0.186	13	[30]
¹⁹⁵ Pb(2)	6.5	162.58	98.141	2.140	0.1114	0.159	13	[30]
¹⁹⁵ Pb(3)	7.5	198.19	95.969	3.567	0.0134	0.599	14	[30]
¹⁹⁶ Pb(1)	6	171.4	87.381	5.242	0.0107	0.380	16	[31]
¹⁹⁶ Pb(2)	8	204.5	87.704	9.998	0.0298	0.685	13	[31]

(续表)

SD 带	I_0	$E_\gamma(\text{Exp})/\text{keV}$	$\bar{E}_0/(\hbar^2/\text{MeV})$	$B \times 10^5$	τ	σ/keV	N	Ref
$^{196}\text{Pb}(3)$	9	226.7	91.895	5.561	0.0204	0.388	13	[31]
$^{197}\text{Pb}(1)$	7.5	184.4	97.620	1.689	0.0159	0.372	17	[32]
$^{197}\text{Pb}(2)$	8.59	205.5	98.058	3.252	0.1053	0.480	15	[32]
$^{198}\text{Pb}(1)$	12.2	305.1	88.873	3.222	0.0159	0.692	15	[32]
$^{195}\text{Bi}(1)$	10.5	261.5	89.638	9.790	0.0336	0.483	7	[33]
$^{196}\text{Bi}(1)$	6.2	166.2	92.804	3.628	0.0297	0.403	13	[33]
$^{197}\text{Bi}(1)$	7.5	186.7	95.602	2.444	0.0043	0.427	9	[33]
$^{198}\text{Po}(1)$	6	175.91	84.459	11.54	0.0300	0.258	10	[34]

$E(I)$ 为(11)式, $E_\gamma(\text{Exp})$ 为带首跃迁能量的实验值, N 为跃迁能谱条数, σ 是拟合精度

表 2 A~150 区 SD 带跃迁能量 $E_\gamma = E(I+2) - E(I)$ 的拟合参数

SD 带	I_0	$E_\gamma(\text{Exp})/\text{keV}$	$\bar{E}_0/(\hbar^2/\text{MeV})$	$B \times 10^5$	τ	σ/keV	N	Ref
$^{148}\text{Gd}(1)$	32	699.2	103.989	-4.067	0.01476	0.417	19	[12]
$^{148}\text{Gd}(2)$	29	790.2	78.018	-2.498	0.04970	1.131	16	[12]
$^{148}\text{Gd}(3)$	35	853.8	85.063	-0.4135	0.02895	0.660	16	[12]
$^{148}\text{Gd}(4)$	50	899.0	144.550	-5.250	0.01347	0.546	13	[12]
$^{148}\text{Gd}(5)$	43	891.1	112.867	-3.505	0.01270	0.359	13	[12]
$^{148}\text{Gd}(6)$	42	830.3	116.686	-3.943	0.01350	0.339	14	[12]
$^{149}\text{Gd}(1)$	27.5	617.8	97.905	-0.699	0.01345	0.354	22	[13]
$^{150}\text{Gd}(2)$	43	770.0	130.212	-3.447	0.01273	0.571	14	[14]
$^{148}\text{Eu}(1)$	36	848.4	95.147	-3.045	0.01550	0.202	14	[15]
$^{148}\text{Eu}(2)$	33	844.1	84.398	-1.400	0.01340	0.890	14	[15]
$^{149}\text{Tb}(1)$	32.5	847.1	83.056	-1.704	0.01656	0.500	12	[15]
$^{149}\text{Tb}(2)$	29.5	837.4	74.627	-2.243	0.05232	0.718	11	[15]
$^{150}\text{Tb}(1)$	23	596.8	83.250	-4.244	0.01500	0.189	16	[16]
$^{150}\text{Tb}(2)$	24	662.5	78.206	-1.609	0.02741	0.432	16	[16]
$^{151}\text{Tb}(1)$	42.5	728.0	137.552	-3.765	0.01250	0.228	16	[17]
$^{151}\text{Tb}(2)$	27.5	602.1	94.985	-1.435	0.01530	0.385	20	[17]
^{152}Dy	26	602.4	92.835	-1.131	0.01481	0.255	21	[17]
^{154}Dy	32	701.7	104.086	-9.475	0.02597	0.533	17	[17]

表注同表 1

3 结果的分析与讨论

从表 1 和 2 中可以看出, 拟合误差最大的是 $^{148}\text{Gd}(2)$ 带 (1.131keV), 最小的是 $^{194}\text{Hg}(3)$ 带 (0.125keV). 190 区的平均系统误差为 0.376keV, 150 区的平均系统误差仅为 0.487keV, 因此公式(11)式可以精确地描述 SD 带 γ 跃迁能谱的规律.

迄今为止, 绝大多数实验上观测到的 SD 带, 其带首自旋值未能测定. 自旋指定的合理性和可靠性成为描述 SD 带的一个重要标志. 目前众多的自旋指定方法, 可以归纳为以下 3 类:

1) 最佳拟合法: 实验直接测定的是带内 E2 跃迁产生的一系列均匀排列的 γ 谱线, 测量结果相当精确. 如果一个公式对带内 γ 跃迁能量拟合结果与实验值的方均根差很小, 并且带首自旋值改变 ± 1 时, 方均根差急剧增大, 即拟合精度对自旋指定很敏感, 则与方均根差最小所对应的 I_0 就可以指定为带首自旋值.

2) 图解法:根据不同的自旋指定,利用理论公式计算出某一物理量与实验观测值进行比较,均方根差最小所对应的 I_0 为自旋值. 通常取两类转动惯量随角动量的变化关系曲线,判定自旋指定的正确性^[11]. 由某种方法给出的自旋值 I_0 ,能使两类转动惯量同时满足:a)当 $I \rightarrow 0$ 时, $\mathcal{J}^{(1)}$ 和 $\mathcal{J}^{(2)}$ 趋于同一个常数 \mathcal{J}_0 ; b) $\mathcal{J}^{(1)}$ 和 $\mathcal{J}^{(2)}$ 随角动量的变化曲线决不相交;c)当 $I \rightarrow 0$ 时, $d\mathcal{J}^{(1)}/d\xi$ 和 $d\mathcal{J}^{(2)}/d\xi$ 趋于零,则定出的自旋值是可靠的.

3) 带首转动惯量(\mathcal{J}_0)系统学. 利用正常形变核转动带 \mathcal{J}_0 系统学中呈现出的规律,作为指定 SD 带的自旋的参考.

我们采用的是最佳拟合法. 结果显示,(11)式的计算值与实验值仅存在一个最小方均根差,并且拟合精度对自旋值非常敏感. 由此定出¹⁹⁴Pb(1)和¹⁹⁴Hg(1)带的自旋值 I_0 分别为 4 和 10,与实验测定的结果完全一致. 其余带的自旋值,基本上与众多方案指定的结果相同.

图 1—8 是部分 SD 核的 $J^{(2)}$ 随 $\hbar\omega$ 的计算结果与实验值的比较. 由图 1—8 可以看出,190 区 SD 带的动力学转动惯量基本上随转动频率单调上升,而 190 区 SD 带的动力学转动惯量随转动频率单调下降. 除个别的点外,计算结果几乎与实验值完全重合,¹⁵²Dy(1)和¹⁹⁴Hg(1)带中的“返转”现象也得到重现.

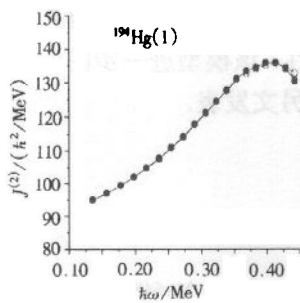


图 1

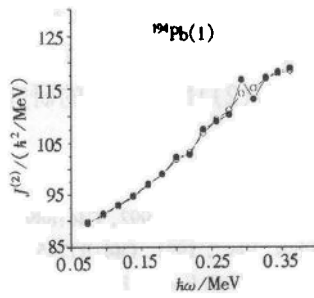


图 2(图示同图 1)

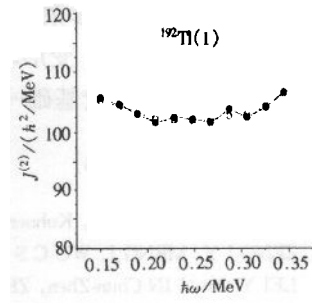


图 3(图示同图 1)

—●—为实验值, —○—为(15)式的计算结果

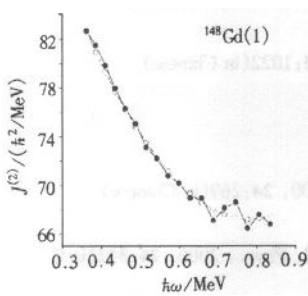


图 4(图示同图 1)

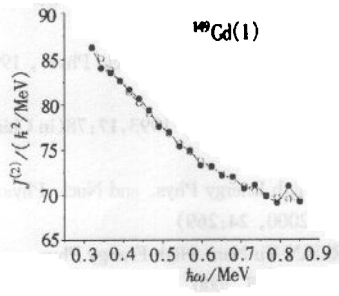


图 5(图示同图 1)

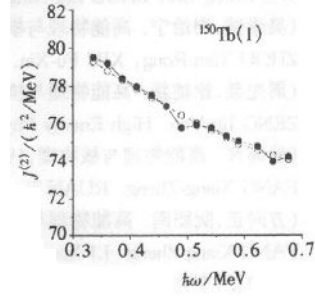


图 6(图示同图 1)

对拟合参数的分析表明,带首的转动惯量 \mathcal{J}_0 在 80—140 \hbar^2/MeV 范围,相当于正常形变偶核 \mathcal{J}_0 值的几倍^[10]. 由量子力学的结论可知,球对称分布系统对转动没有贡献,因此 \mathcal{J}_0 的数值可以理解为形变大小的度量,这说明从 \mathcal{J}_0 数值的大小就可以分辨 SD 核和

ND 核. SD 核的 B 值比 ND 核大一个量级, 而 τ 值的量级相同, 由 (8) 式可知, SD 核的刚性比 ND 核强.

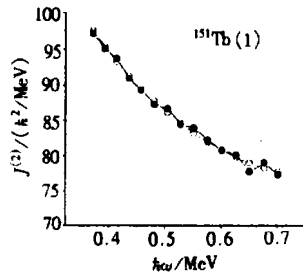


图 7(图示同图 1)

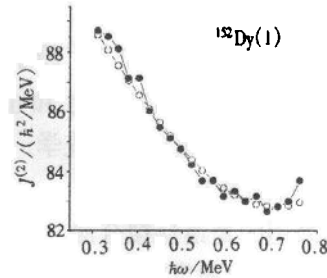


图 8(图示同图 1)

4 小结

本文用 q 变形转动惯量转子模型的 SD 带能谱公式, 拟合了 190 和 150 区近 80 条 SD 带. 结果表明, 作为三参数公式, (11) 式能精确地显示 SD 带的规律, 较精确的复现了动力学转动惯量的性质, 参数的取值可以体现超形变核的基本特征, 带首自旋指定值也具有一定的可靠性. 因此, q 变形转动惯量转子模型具有一定的合理性. 该模型进一步的应用以及该模型建立的理论基础—— $F(SU(2))$ 代数模型的研究, 将另文发表.

参考文献 (References)

- 1 Becker J A, Henry E A, Kuhnert A et al. Phys. Rev., 1992, C46:889
- 2 ZENG J Y, MENG J, WU C S et al. Phys. Rev., 1991, C44:R1745
- 3 LEI Yi-An, LIN Chun-Zhen, ZENG Jin-Yan. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1997, 21:648(in Chinese)
(雷奕安, 林纯镇, 曾谨言. 高能物理与核物理, 1997, 21:648)
- 4 WU Chong-Shi. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1998, 22:71(in Chinese)
(吴崇试. 高能物理与核物理, 1998, 22:71)
- 5 WU Chong-Shi, ZHOU Zhi-Ning. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1999, 23:1209(in Chinese)
(吴崇试, 周治宁. 高能物理与核物理, 1999, 23:1209)
- 6 ZHOU Xian-Rong, XIU Fu-Xin. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1999, 23:1022(in Chinese)
(周先荣, 徐辅新. 高能物理与核物理, 1999, 23:1022)
- 7 ZENG Jin-Yan. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1993, 17:78(in Chinese)
(曾谨言. 高能物理与核物理, 1993, 17:78)
- 8 FANG Xiang-Zheng, RUAN Tu-Nan. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2000, 24:269(in Chinese)
(方向正, 阮图南. 高能物理与核物理, 2000, 24:269)
- 9 FANG Xiang-Zheng, LI Xian-Yin, RUAN Tu-Nan. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2000, 24:312(in Chinese)
(方向正, 李先胤, 阮图南. 高能物理与核物理, 2000, 24:312)
- 10 FANG Xiang-Zheng, RUAN Tu-Nan. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2001, 25:212—219(in Chinese)
(方向正, 阮图南. 高能物理与核物理, 2001, 25:212—219)
- 11 MENG Jie, WU Chong-Shi, ZENG Jin-Yan. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1992, 16:90(in Chinese)
(孟杰, 吴崇试, 曾谨言. 高能物理与核物理, 1992, 16:90)
- 12 LIU Yu-Xin. Phys. Rev., 1998, C58:237
- 13 Flibotte S et al. Phys. Rev. Lett., 1995, 71:4299
- 14 ZENG Jin-Yan et al. Phys. Rev., 1991, C45:R1745

- 15 Kharraja B, Grag U. Phys. Rev. Lett., 1998, **80**:1845
- 16 Fallon P et al. Phys. Rev., 1995, **C51**:R1609
- 17 HAN Xiao-Ling, WU Cheng-Li. Atomic Data and Nucl. Data Tables, 1996, **63**:117
- 18 Carpenter M P et al. Phys. Rev., 1995, **C53**:2400
- 19 Vo D T et al. Phys. Rev. Lett., 1993, **71**:340
- 20 Fallon P et al. Phys. Rev., 1995, **C51**:R1609
- 21 Joyce M J et al. Phys. Lett., 1994, **B340**:150
- 22 KrÜchen R et al. Phys. Rev., 1996, **C54**:R2109
- 23 Hackman G et al. Phys. Rev., 1997, **C55**:148
- 24 Pilote S et al. Phys. Rev., 1994, **C49**:718
- 25 Fischer S M et al. Phys. Rev., 1996, **C53**:2126
- 26 Bouneau S et al. Phys. Rev., 1996, **C53**:R9
- 27 Azaiez F et al. Phys. Rev. Lett., 1991, **66**:1030
- 28 Ducroux L et al. Phys. Rev., 1996, **C53**:2701
- 29 Hughes J R et al. Phys. Rev., 1994, **C51**:R1265
- 30 Faris L P et al. Phys. Rev., 1995, **C51**:R2288
- 31 Severen van U. J. Z. Phys., 1995, **A353**:15
- 32 Hilbert I M et al. Phys. Rev., 1996, **C54**:2253
- 33 Clark R M et al. Phys. Rev., 1996, **C53**:117
- 34 McNabb D P et al. Phys. Rev., 1996, **C53**:R541

Phenomenological Description of Superdeformed Bands

FANG Xiang-Zheng^{3,1)} RUAN Tu-Nan^{1,2)}

1 (CCAST (World Lab), Beijing 100080, China)

2 (Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

3 (Department of Physics, Anhui University, Hefei 230039, China)

Abstract Two different rotational formulae for description of normal deformed and superdeformed nuclei are submitted by the definition of the softness and by two different representations of quantum algebra. With SD formula, near 80 SD bands in $A \sim 190$ and 150 regions are calculated. The results show that the E2 γ -ray energies are fitted in high quality, and the phenomena of the turnover in dynamical moment of inertia can be also reproduced well.

Key words superdeformed band, softness coefficient, quantum algebra, E2 γ -ray energies, turnover

Received 19 January 2000, Revised 21 May 2000

* Supported by National Natural Science Foundation of China (19677102, 19775044), Doctoral Unit Research Program Foundation of the State Education Committee of China (97035807), National Laboratory of Beijing Electron Positron Collision, Lanzhou Center of Theoretical Nuclear Physics National Laboratory of Heavy Ion Accelerator and by Natural Science Foundation of Anhui Education Committee (2000j106)

1) Mailing Address