

文章编号: 1007-4627(2005)02-0167-05

¹⁴²⁻¹⁶⁴Dy 核的低能谱和电磁跃迁的相互作用玻色子模型*

昭日格图, 白洪波, 张进富

(赤峰学院物理系, 内蒙古赤峰 024001)

摘要: 采用 IBM 模型研究了 ¹⁴²⁻¹⁶⁴Dy 核的低能正宇称态的能谱和电磁跃迁。应用 $U(5) \rightarrow SU(3)$ 的简化哈密顿量较好地描述了它们的能谱和电磁跃迁。研究表明, 该核基本属于 $U(5) \rightarrow SU(3)$ 的过渡核。

关键词: IBM 模型; 能谱; 电磁跃迁

中图分类号: O413.1 **文献标识码:** A

1 引言

目前, 对 Dy 同位素核的研究是核结构研究最活跃的领域之一。在早期的研究工作中, Bently^[1] 于 1986 年在实验上已观测到超变形核 ¹⁵²Dy。该核的内禀电四极矩 $Q_0 = 17.5$ b, 相当于 $\beta = 0.6$, 长短轴之比为 2 : 1。这对超变形态下研究原子核转动带提供了实验依据。桑建平等^[2] 从包括对力、四极对力及四极力的核子-核子有效相互作用出发, 依据广义的 Dyson 展开方法所建立的微观理论, 对 ¹⁵⁴Dy 的低能态和高激发态进行了研究, 证实 ¹⁵⁴Dy 为转动核, 并理论上复现了 ¹⁵⁴Dy 原子核的第一回弯现象。文献[3]通过反应 ¹⁶⁰Gd(α , 4n) ¹⁶⁰Dy 得到了 ¹⁶⁰Dy 高自旋态, 给出了转动惯量与角速度的关系, 证实了 ¹⁶⁰Dy 为典型的转动核, 并发现 ¹⁶⁰Dy 有回弯现象。文献[4-6]分别对 ¹⁶²Dy 进行了深入的讨论。本文采用 IBM-1 模型^[7-9] 分析了 ¹⁴²⁻¹⁶⁴Dy 同位素核的低能态特征和电磁跃迁。研究表明, Dy 同位素核基本上属于 $U(5) \rightarrow SU(3)$ 的过渡核。

2 哈密顿量

IBM-1^[10] 的普适哈密顿量包括七项, 在我们的计算中采用如下多级展开形式的简化哈密顿量

$$\hat{H} = \epsilon_d \hat{n}_d + K \hat{Q} \cdot \hat{Q} + K_L \hat{L} \cdot \hat{L}, \quad (1)$$

其中,

$$\hat{Q}_\mu = (\hat{s}^+ \hat{d} + \hat{d}^+ \hat{s})^2 + \chi (\hat{d}^+ \hat{d})_\mu^2, \\ \hat{L}_q = \sqrt{10} (\hat{d}^+ \hat{d})_q^{(1)}, \quad \chi = -\frac{\sqrt{7}}{2}.$$

上述符号的意义与通常的 IBM 文献相同。本文使用的计算程序是 PHINT^[11], 哈密顿量是在 $U(5)$ 基下进行对角化的。第一项为单粒子能量, 第二项为电四极相互作用, 第三项是单极相互作用。 ϵ_d , K 和 K_L 是反映各项作用强度的参数。如果 $\epsilon_d = 0$, 此哈密顿量简化为 $SU(3)$ 哈密顿量; 如果 $K = 0$, 则它成为描述集体振动的 $U(5)$ 哈密顿量。 $K_L (\hat{L} \cdot \hat{L})$ 项也是在 $U(5)$ 基下是斜对角的, 它对自旋 L 相同的能级的贡献是一样的, 只是对 L 能级的

表 1 计算能谱和电四极跃迁的参数值

Nucleus	ϵ_d/MeV	K/MeV	K_L/MeV	e_2/eb
¹⁶⁴ Dy	0.43	0.022	0.007	0.095
¹⁶² Dy	0.27	0.023 5	0.012	0.145
¹⁶⁰ Dy	0.25	0.024	0.013	0.095
¹⁵⁸ Dy	0.28	0.024	0.014	0.12
¹⁵⁶ Dy	0.3	0.025	0.015	0.15
¹⁵⁴ Dy	0.53	0.017 3	0.006	0.15
¹⁵² Dy	0.78	0.019	0.003 5	0.065
¹⁵⁰ Dy	0.78	0.02	0.001	
¹⁴⁴ Dy	0.386	0.001 81	0.032	
¹⁴² Dy	0.28	0.005 5	0.032	

收稿日期: 2004 - 10 - 28; 修改日期: 2005 - 03 - 10

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10047001, 10265001); 内蒙古教育厅高校教师基金资助项目(ZD01038)

作者简介: 昭日格图(1958-), 男(蒙古族), 内蒙古库化旗人, 副教授, 从事理论物理研究;

E-mail: hbbai@vip.sina.com

一个修正项。所以当给定系统的玻色子数, 上述哈密顿量主要由两个参数 ϵ_d 和 K 决定。因此, K/ϵ_d 决定了 $U(5)$ 到 $SU(3)$ 的变化趋势。 $K/\epsilon_d=0$ 和 $K/\epsilon_d=\infty$ 分别对应于振动和转动极限。一般情况下, 是介于两者的过渡核。在实际计算中, 这些参数是可调的, 使得理论值与实验值趋于一致。表 1 列出了每个核的哈密顿量中的有关参数。

3 计算结果与讨论

3.1 能谱

本文使用计算程序 PHINT^[11] 对¹¹²⁻¹⁶¹Dy 共 10 个核素的能谱和电磁跃迁进行了理论计算。图 1 列

出了¹⁴²⁻¹⁵⁶Dy 共 6 个同位素核的理论实验能谱^[12]。由图可以看出, 理论值和实验值在核基态 8^+ 以下符合很好。

每个核基态能谱无论实验值还是理论计算能带都证实该核为转动核。另外, 理论计算能谱中, 我们始终看到¹⁵⁰Dy γ 带的 3_1^+ 与 4_2^+ 、 5_1^+ 与 6_2^+ 、 7_1^+ 与 8_2^+ 有很强的简并, ¹⁵²⁻¹⁵¹Dy γ 带的 3_1^+ 与 4_2^+ 、 5_1^+ 与 6_2^+ 有很强的简并。¹⁵¹Dy 实验能谱和计算能谱 γ 带的 7_1^+ 与 8_2^+ 都存在简并。¹⁵⁶Dy 实验能谱 γ 带的 11_1^+ 与 12_2^+ 存在简并, 但理论计算未发现简并态。

由图 2 可知, ¹⁵⁸⁻¹⁶⁴Dy 4 个同位素核的理论实验能谱基态带在 14^+ 以下符合得特别好, γ 带和 β 带也有较好的符合。

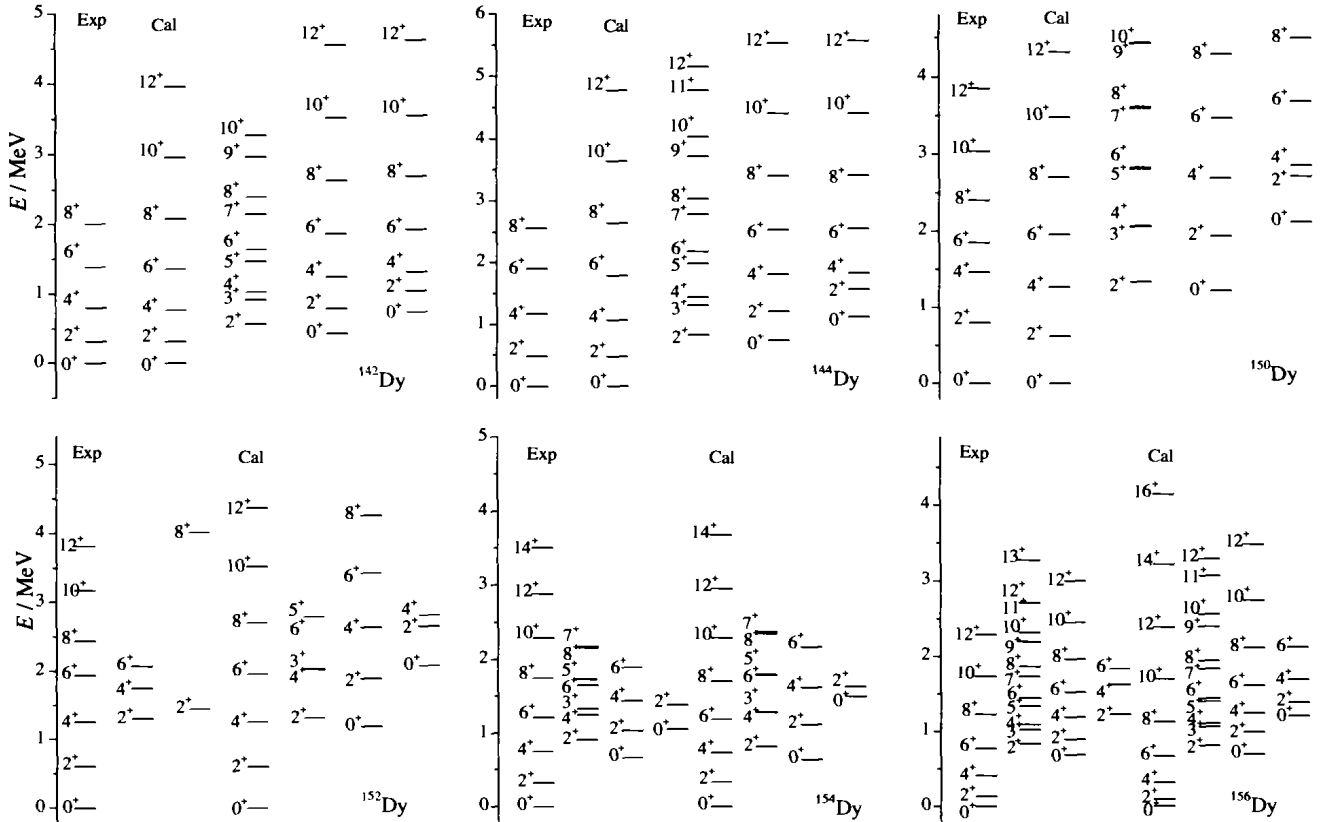


图 1 ¹¹²Dy, ¹¹¹Dy, ¹⁵⁰Dy, ¹⁵²Dy, ¹⁵¹Dy 和 ¹⁵⁶Dy 实验能谱与理论能谱的比较

表 2 给出了 Dy 同位素核的 $R, R_1, R_2, R_{1,2}$ 和 $R_{6,2}$ 的实验和理论计算值, 其中 $R = E(2_2^+)/E(2_1^+)$, $R_{1,2} = E(4_1^+)/E(2_1^+)$, $R_{6,2} = E(6_1^+)/E(2_1^+)$, $R_1 = B(E2; 4_1^+ \rightarrow 2_1^+)/B(E2; 2_1^+ \rightarrow 0_1^+)$, $R_2 = B(E2; 2_2^+ \rightarrow 0_1^+)/B(E2; 2_2^+ \rightarrow 2_1^+)$ 。具有振动特征核的 $R_{1,2}$ 在 2—2.4 之间^[13]。由表 2 可知:¹¹¹⁻¹⁵⁴Dy 4 个核的 $R_{1,2}$ 的理论值在 2.01—2.42 之

间, 特别是¹⁵⁰⁻¹⁵⁴Dy 同位素核的能级有明显的 0_2^+ , 2_2^+ 和 4_1^+ 三重态振动特征, 说明这些核具有 $U(5)$ 极限核特征。具有转动特征核的 $R_{1,2}$ 在 3—3.33 之间^[13]; ¹⁵⁶⁻¹⁶⁴Dy 5 个核的 $R_{1,2}$ 的理论值在 3.31—3.34 之间, 并且这些核的 $E(3_1^+)/(E(2_1^+) + E(2_2^+))$ 比值在 $SU(3)$ 动力学极限值 1 附近, 说明这些核具有 $SU(3)$ 极限核特征, 而以上各核的 $R_{1,2}$

的理论值与实验值基本符合。

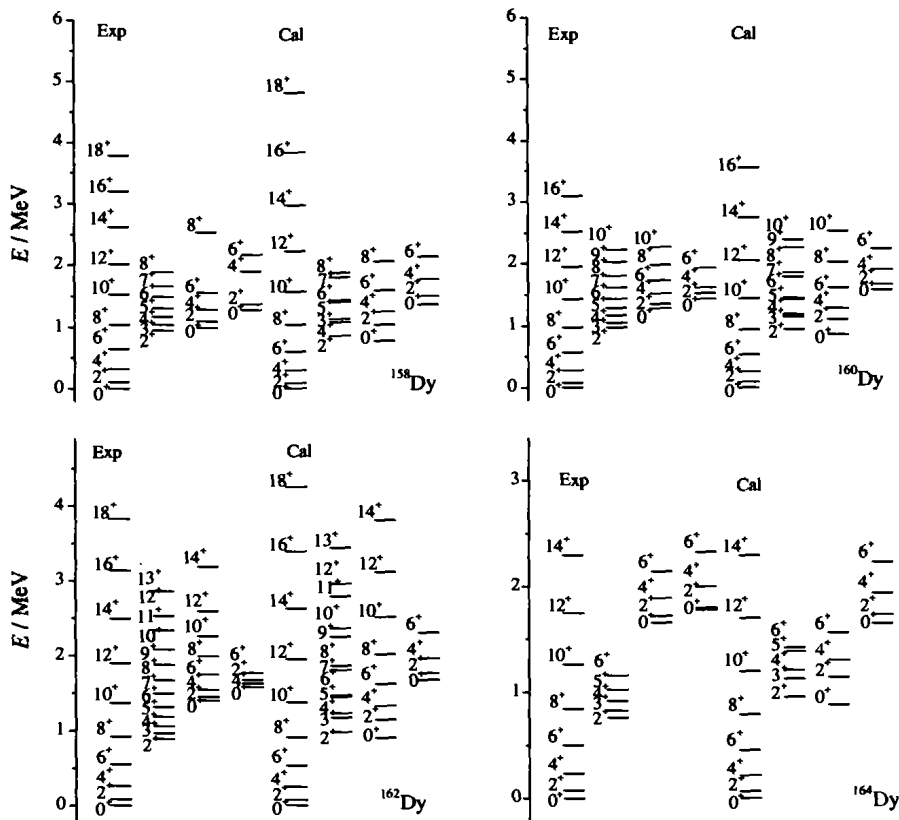


图 2 ^{158}Dy , ^{160}Dy , ^{162}Dy 和 ^{164}Dy 核实验能谱与理论能谱的比较

表 2 实验与理论值的比较

Nucleus	R		$R_{4/2}$		$R_{6/2}$		R_1		R_2	
	exp.	cal.	exp.	cal.	exp.	cal.	exp.	cal.	exp.	cal.
^{164}Dy	10.36	8.78	3.30	3.33	6.83	6.98	1.3	1.41	0.5	0.6
^{162}Dy	11.02	12.89	3.29	3.32	7.3	6.94	1.44	1.41		0.045
^{160}Dy	11.14	11.89	3.27	3.33	6.75	6.97		1.4	0.52	0.61
^{158}Dy	9.55	9.91	3.20	3.33	6.5	6.98	1.45	1.42		0.53
^{156}Dy	6.04	8.51	2.93	3.31	5.62	6.92	1.76	1.41		0.042
^{154}Dy	2.70	2.41	2.23	2.22	3.66	3.5	1.61	1.89		0.035
^{152}Dy	2.14	2.41	2.05	2.06	3.17	3.2				
^{150}Dy	2.23	2.16	1.81	2.05	2.99	3.16				
^{144}Dy		1.80	2.37	2.28	3.87	3.84				
^{142}Dy		1.78	2.53	2.42	4.4	4.40				

由表1可知, $^{144-154}\text{Dy}$ 4个核的 ϵ_d 在 0.39—0.78 之间, 取值偏大, 而 K 较小, ϵ_d 大的核更接近于振动极限, 所以会一直存在 staggering 效应, 这也可以通过引入三体势对哈密顿量进行修正或引入同类核子间的电四极矩相互作用而得到改善^[14]。哈密顿量中的参数 ϵ_d 反映激发态能量变化和形状共存。从

表 1 中 ϵ_d 取值范围的变化来看, $^{142-164}\text{Dy}$ 同位素核的形状大体上显示出由扁椭球到长椭球再由长椭球到扁椭球变化的趋势。

3.2 电磁跃迁

通过计算能谱及得到的相应波函数, 对电磁跃迁进行计算。例如 E2 跃迁算符:

$\hat{T}(E2)_{\mu}^2 = e_2 [(\hat{s}^+ \hat{d} + \hat{d}^+ \hat{s})_{\mu}^2 + \chi(\hat{d}^+ \hat{d})_{\mu}^2]$, (2)
 式中符号的意义与通常的 IBM 文献相同。运用表 1

列出的 e_2 参数计算了 $^{154} \text{ } ^{164} \text{ Dy}$ 核的电四极跃迁值
 所得到的数据列于表 3。

表 3 Dy 同位素核电磁跃迁的 $B(E2)$ 理论值和相应的实验值

Nucleus	J_i	J_f	$B(E2)_{exp}$ / $e^2 \text{fm}^4$	$B(E2)_{cal}$ / $e^2 \text{fm}^4$	Nucleus	J_i	J_f	$B(E2)_{exp}$ / $e^2 \text{fm}^4$	$B(E2)_{cal}$ / $e^2 \text{fm}^4$	
$^{164} \text{ Dy}$	2_1^+	0_1^+	1.114 4	1.116 6		4_1^-	2_1^+	1.349 6	1.540 5	
	4_1^+	2_1^+	1.450 3	1.583 4		6_1^+	4_1^+	1.725 1	1.664 5	
	6_1^+	4_1^+	1.732 9	1.720 5		8_1^+	6_1^+	1.725 1	1.691 2	
	8_1^+	6_1^+	1.653 0	1.764 4		10_1^+	8_1^+	1.623 6	1.664 7	
	10_1^+	8_1^+	1.887 6	1.761 4		12_1^+	10_1^+	1.572 8	1.599 3	
	12_1^+	10_1^+	1.898 3	1.726 7		14_1^+	12_1^+	1.369 9	1.500 6	
	14_1^+	12_1^+	1.738 3	1.666 0		16_1^+	14_1^+	1.369 9	1.371 2	
	2_2^+	2_1^+	0.042 66	0.009 0		18_1^+	16_1^+	1.420 7	1.212 5	
	2_2^+	4_1^+	$5.118 9 \times 10^{-3}$	0.022 6		20_1^+	18_1^+	1.471 4	1.025 3	
	2_2^+	0_1^+	0.021 33	0.005 4		22_1^+	20_1^+	1.164 9	0.810 2	
	0_2^+	2_1^+		0.037 4		2_2^+	4_1^+	$1.548 8 \times 10^{-3}$	0.027 8	
	$^{162} \text{ Dy}$	2_1^+	0_1^+	1.043 9	1.073 6	$^{156} \text{ Dy}$	0_2^+	2_1^+		0.044 3
		4_1^+	2_1^+	1.510 8	1.519 3		2_1^+	0_1^+	0.675 6	0.871 8
		6_1^+	4_1^+	1.573 7	1.644 5		4_1^-	2_1^+	1.184 1	1.231 1
8_1^+		6_1^+	1.820 3	1.677 4	6_1^+		4_1^+	0.906 8	1.325 6	
10_1^+		8_1^+	1.836 0	1.663 3	8_1^+		6_1^+	1.305 7	1.338 7	
12_1^+		10_1^+	1.678 6	1.617 0	10_1^+		8_1^+	1.659 4	1.305 4	
14_1^+		12_1^+	1.731 1	1.545 1	12_1^+		10_1^+	1.731 9	1.237 1	
2_2^+		4_1^+	1.731×10^{-5}	0.000 8	14_1^-		12_1^+	1.133 5	1.138 6	
2_2^+		0_1^+	$1.264 2 \times 10^{-1}$	0.000 4	16_1^+		14_1^+	1.496 2	1.012 3	
0_2^+		2_1^+		0.001 3	18_1^+		16_1^+	1.355 6	0.859 6	
$^{160} \text{ Dy}$		2_1^+	0_1^+	1.000 1	1.073 5		20_1^+	18_1^+	1.237 7	0.859 6
		4_1^+	2_1^+		1.519 7		22_1^+	20_1^+	0.997 5	0.478 5
		6_1^+	4_1^+	1.227 9	1.645 9		24_1^-	22_1^+	0.816 1	0.251 2
		8_1^+	6_1^+	1.857 4	1.680 2		2_2^+	0_1^+	0.029 92	0.040 7
	10_1^+	8_1^+	1.692 3	1.667 7	2_2^+	4_1^+	0.038 1	0.005 6		
	12_1^+	10_1^+	1.604 6	1.623 0	0_2^+	2_1^+		0.007 5		
	14_1^+	12_1^+	1.651 1	1.552 3	$^{154} \text{ Dy}$	2_1^+	0_1^+	0.475 6	0.382 9	
	4_1^+	4_2^+	$5.314 3 \times 10^{-1}$	0.012 3		4_1^+	2_1^+	0.769 3	0.725 9	
	4_1^+	3_1^+	$8.771 3 \times 10^{-1}$	0.000 3		6_1^+	4_1^+	0.975 1	0.950 5	
	2_2^+	4_1^+	$3.224 7 \times 10^{-3}$	0.018 2		8_1^+	6_1^+	1.078	1.079	
	2_2^+	2_1^+	0.043 9	0.007 3		10_1^-	8_1^+	0.882	1.131	
	2_2^+	0_1^+	0.023 2	0.004 5		12_1^+	10_1^+	0.833	1.119	
	2_2^+	4_1^+	$9.287 2 \times 10^{-3}$	0		14_1^+	12_1^+	0.98	1.049	
	2_2^+	0_1^+	$3.663 3 \times 10^{-3}$	0.000 4		2_2^+	0_1^-		0.023	
0_2^+	2_1^+		0.032 1	2_2^+		2_1^+		0.361		
$^{158} \text{ Dy}$	2_1^+	0_1^+	0.928 5	1.089 2		0_2^+	2_1^+		0.727 2	

本文已给出的电磁跃迁算符中的有关参数, 计算了 $^{154-164}\text{Dy}$ 同位素核的电磁跃迁的 $B(E2)$ 的理论值, 并与相应的实验值进行了比较, 发现理论值与现有的实验值符合得很好。 $^{160-164}\text{Dy}$ 同位素核其 $B(E2, 2_2^+ \rightarrow 0_1^+)$ 跃迁几率不为零的事实可能暗示存在着一定程度的对称破缺。

通过应用相互作用玻色子模型研究了 $^{142-164}\text{Dy}$ 同位素的能谱和电磁跃迁。结果表明 $^{142-164}\text{Dy}$ 同位

素核可以用 $U(5) \rightarrow SU(3)$ 的哈密顿量来描述, $^{142-164}\text{Dy}$ 核是振动到转动的过度核。同时我们也发现理论和实验结果还存在一定的偏差, 说明哈密顿量中必须考虑其他的作用项, 如对作用、四极对力及四极力, 考虑角动量的玻色子作用, 或者应用 IBM2 模型等, 但总体上用 IBM1 能很好地分析 Dy 核的特征。

参 考 文 献:

- [1] 程檀生, 钟毓澍. 低能及中高能原子核物理学. 北京: 北京大学出版社, 1997, 174.
- [2] 桑建平, 刘庸. 高能物理与核物理, 1994, **18**(11): 1 020.
- [3] 程檀生, 钟毓澍. 低能及中高能原子核物理学. 北京: 北京大学出版社, 1997, 164.
- [4] Zamfir N V, Casten R F, Benyuan Liu, *et al.* Phys Rev, 1999, **C60**: 054319-1.
- [5] Wu C Y, Cline D, Simon M W, *et al.* Phys Rev, 2001, **C64**: 064317-1.
- [6] Brandolini F, De Poli M, Pavan P, *et al.* Eur Phys J, 1999, **A6**: 149.
- [7] Arima A, Iachello F. Ann Phys(N, Y), 1976, **99**: 253.
- [8] Arima A, Iachello F. Ann Phys(N, Y), 1978, **111**: 201.
- [9] Arima A, Iachello F. Ann Phys(N, Y), 1979, **123**: 468.
- [10] Zhang Jinfu, Pak Jaeyon, Liu Fengying. HEP & NP, 2000, **24**: 1 066.
- [11] Scholten O. The Program Package PHINT. Kernfysisch Versneller Institute, Zernikelaan 25 9747 AA Groningen Netherlands.
- [12] Chu S Y, Nordberg H, Firestone R B, *et al.* Isotopes Explorer 2, 00, 1998.
- [13] 廖继志. 近代原子核模型. 成都: 四川大学出版社, 1990, 296.
- [14] Heyde K, Tsackler P Van, Waroquier M, *et al.* J Phys, 1990, **G16**: 813.

Low-lying Spectra and E2 Transition Rates in Even-even $^{142-164}\text{Dy}$ Isotopes in Interaction Boson Model^{*}

Zhaorigetu, BAI Hong-bo, ZHANG Jin-fu

(Department of Physics, Chifeng College, Chifeng 024001, Neimenggu, China)

Abstract: Spectra and E2 transition rates for the even-even $^{142-164}\text{Dy}$ isotopes are studied in the framework of the interacting boson model. A schematic Hamiltonian capable of describing their spectra and transition is used. It is found that the even-even $^{142-164}\text{Dy}$ isotopes are in the transition from $U(5)$ to $SU(3)$ dynamical symmetry.

Key words: interacting boson model; spectra; electromagnetic transition

* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(10047001, 10265001); Key Scientific Research Fund of Inner Mongolian Educational Bureau (ZD01038)