

文章编号:1000-582X(2004)11-0141-04

¹⁰⁴Cd 核子顺排特征的微观研究*

童红,石筑一

(贵州民族学院物理系,贵阳 550025)

摘要:应用微观相互作用玻色子-费米子模型的形式体系,构造出唯象核芯+两准粒子模型的一个微观实现,微观 sdIBM-2+2q.p. 方案. 基于唯象模型和实现方案,导出原子核的一个 d 玻色子从退耦、拆散、占据闯入轨道,直到参加顺排所需的最小能量值;据此讨论了核高自旋态的微观结构及其拆对顺排次序. 对¹⁰⁴Cd 核的计算结果显示微观方案较满意地描述了该核的低自旋态和部分高自旋态;核的一个 d 玻色子的突然拆对不会引起前后状态的显著改变. 最后,本方案指认:这些高自旋态是构建于 $\nu(h_{11/2})^2$ 和 $\pi(g_{9/2})^2$ 上的顺排态;而实验上观测到的 8_{1+} 、 8_{2+} 和 8_{3+} 态则很可能分别属于两准质子顺排态、两准中子顺排态和基态.

关键词:微观 sdIBM-2+2q.p. 方案;高自旋态;玻色子拆对;核子顺排;¹⁰⁴Cd 核
中图分类号:O571.22 **文献标识码:**A

唯象 IBM 理论较成功地描述了中重核和重核的低角动量现象^[1]. 为了将其应用于高自旋态物理,被推广为 sdIBM-1+2q.p. (核芯+两准粒子)模型^[2]. 最近 G. de Angelis^[3] 和 G. A. Muller^[4] 报道了¹⁰⁴Cd 核的最新实验能谱,发现低能谱不规则:没有 0_{2+} 、 2_{2+} 态; 4_{+} 态、 6_{+} 态和 8_{+} 态却各观测到 3 个,而 10_{+} 态观测结果又彼此不一致. 他们在 sdIBM-1+2q.p. 模型下都较好地再现了部分实验能级,但前者指认 8_{1+} 态是两准中子顺排态,后者则指认它是两准质子顺排态. 人们普遍认为这个模型有两个物理细节还不甚清楚:一是玻色子的突然拆对顺排会使核的前后状态发生突变吗? 另一个是实验转动带应该是两准中子顺排态,还是两准质子顺排态,有判据吗? 核¹⁰⁴Cd 的价核子壳层结构比较简单,仅有 3 个中子玻色子和一个质子空穴玻色子,分析模型计算值与实验值的对应关系变得较为容易,是人们深入理解高自旋物理现象的一个好例子.

文献[5]借鉴唯象 sdIBM-1+2q.p. 模型的成功经验,应用微观 sdIBFM-2 形式体系理论,构造出偶偶核的微观 sdIBM-2+2q.p. 方案,较成功地描述了三个核区^[6,7]、偶⁶⁶⁻⁷⁰Ge^[8] 和偶¹¹⁶⁻¹²²Xe^[9] 的高自旋现

象. 尽管这些应用当时未能阐明上述物理细节,但它已为进一步解开这个谜提供了理论依据. 本文则在应用微观 sdIBM-2+2q.p. 方案计算¹⁰⁴Cd 核高自旋态能谱的过程中,试图揭示出拆对顺排过程的微观情况和能量关系,借以阐明这两个细节.

1 理论方案

唯象 IBM 理论认为,原子核在低激发和通常转速下,核子以对方式存在,核处于超流态. 一旦核受到高能激发或作快速旋转,至少会有一个玻色子从强耦合的集体态中退耦为缺少集体性的非耦合的费米子对,随即拆散为两个核子. 以后,核子占据闯入轨道, $g_{9/2}$, $h_{11/2}$, $i_{11/2}$, 之一,余下的核子构成一个仍可用唯象 sdIBM-2 近似描述的集体核芯,即所谓的唯象 sdIBM-2+2q.p. 模型^[2]. 将其纳入微观 sdIBFM-2 形式体系后,便得到描述偶偶核高自旋态的核芯+两准粒子模型的一个微观实现,微观 sdIBM-2+2q.p. 方案. 更详尽的内容请参阅文献[5,8,9]. 如果玻色子拆对原因来自核受到高能激发或作快速旋转,则可能发生对相变或相共存现象;而如果拆对原因是属于对于热的响应,那么将引发能谱的热激发模式相变. 因

* 收稿日期:2004-09-01

基金项目:贵州省科技基金资助(黔基合计字[2002]305)

作者简介:童红(1963-),女,贵州贞丰人,贵州民族学院副教授,主要研究方向为理论物理和医学物理.

此,本方案既可用于描述核的零温度对相变或相共存现象^[6-12],也可用于描述核的有限温度行为^[14-15]。

根据唯象模型及其本微观实现方案,一个 d 玻色子从退耦、拆散、占据闯入轨道直到参加顺排,所需要的最低能量值应该是:

$$E_{align} = (E'_d(\sigma) - E_d(\sigma)) - E'_d(\sigma) + 2E_{intruder}^{(\sigma)} = 2E_{intruder}^{(\sigma)} - E_d(\sigma) \quad (1)$$

式中 $E_{align}^{(\sigma)}$ 为核子的拆对顺排能量阈值; $E'_d(\sigma)$ 和 $E_d(\sigma)$ 为 d 玻色子的非扰动能量和对关联能量; $E_{int}^{(\sigma)}$ 为核子占据的闯入轨道的能量; $E_d(\sigma)$ 为 d 玻色子的总能量。这些量都可以在执行微观 sdIBM - 2 + 2q. p. 程序中自然得到。毫无疑问,所需能量小的玻色子应当先拆对顺排,这就是决定核子对拆散顺排顺序的判据。需注意,在空穴方案中需按公式 $E_i^{(c)} = -E_i + (2G - K) \sum_i (q_{iv})^2 / (2j + 1)$ ^[16] 将单粒子能级能量转换为空穴能级能量。

2 计算结果和讨论

¹⁰⁴Cd 核的价核子组态是 $(2p_{3/2}, 1f_{5/2}, 2p_{1/2}, 1g_{9/2})^2 (2d_{5/2}, 1g_{7/2}, 3s_{1/2}, 2d_{3/2}, 1h_{11/2})^6$, 2 表示 2 个质子空穴。与过去一样,参数 $g_{0(\sigma)}, G_{2(\sigma)}, K^{(\sigma)}$ ($\sigma = n, p$) 以及 $K^{(np)}$ 分别表示同类价核子间的对力、四极对力、四极-四极力、以及中子-质子四极-四极力相互作用强度参数^[18]。本文计算时选用的开壳单粒子能级取自文献[9,10],列于表1;其核子-核子等效相互作用强度参数列于表2。与本文研究有关的某些参数值列于表3和表4。

表1 价核子的单粒子能级^[9,10] MeV

nlj	2p _{3/2}	1f _{5/2}	2p _{1/2}	1g _{9/2}	nlj	2d _{5/2}	1g _{7/2}	3s _{1/2}	2d _{3/2}	1h _{11/2}
α	1	2	3	4	1	2	3	4	5	
质子	0.00	1.10	2.20	3.05	中子	4.00	4.90	5.90	6.30	7.30

表2 核子-核子等效相互作用强度参数 (MeV)

$g_{0(n)}$	$G_{2(n)}$	$K^{(n)}$	$g_{0(p)}$	$G_{2(p)}$	$K^{(p)}$	$K^{(np)}$
0.058 9	0.076 5	0.001 0	0.043 6	0.035 5	0.001 0	0.029 0

表3 Q 玻色子结构常数 $X_{op}^{(nm)}$

(α, β)	s 玻色子					d 玻色子									
	(1, 1)	(2, 2)	(3, 3)	(4, 4)	(5, 5)	(1, 1)	(1, 2)	(1, 3)	(1, 4)	(2, 2)	(2, 3)	(2, 4)	(3, 4)	(4, 4)	(5, 5)
正常态 n-	.8290	-.4546	-.1443	-.1774	-.2320	-.8287	.1683	.3001	-.1444	-.2878	—	.2110	.1315	-.0892	-.1466
p+	.0922	+.1634	+.1437	+.9717	—	+.0164	-.0153	.0337	—	.0332	-.0460	—	—	.9976	—
高自旋态 n-	.8290	-.4546	-.1443	-.1774	-.2320	-.8883	.1347	.2295	-.1092	-.2686	—	.1490	.0922	-.0833	-.1356
p+	.0922	+.1634	+.1437	+.9717	—	.0161	-.0150	.0330	—	.0328	-.0449	—	—	.9977	—

这里 (α, β) 中的数字 α, β 分别是表1 的能级序号。

表4 玻色子总能量 E, 非扰动能量 E' 和结合能 E_{BE}

状态	$E_s^{(n)}$	$E_d^{(n)}$	$E_s^{(p)}$	$E_d^{(p)}$	$E_s'^{(n)}$	$E_d'^{(n)}$	$E_s'^{(p)}$	$E_d'^{(p)}$	E_{BE}
正常态	6.362	7.241	-6.784	-5.913	8.945	8.781	-4.696	-5.354	11.750
高自旋态	6.362	7.420	-6.784	-5.913	8.945	8.526	-4.696	-5.399	31.010

从上面的图1和表3、表4可以做出如下4条结论:

1) 尽管¹⁰⁴Cd核的实验低能谱中没有 $0_{2+}, 2_{2+}$ 态, 而 6^+ 态就出现两个两准粒子顺排态, 到 8^+ 态时两者之一变成了 yrast 态, 本文的计算结果仍相当满意地再现了最新实验能谱^[3,4], 其中包括部分顺排态(即高自旋态)和文献[4]处理有困难的 $4_{2+} (1.992)$ 和 $4_{3+} (2.1616)$ 态(见图1)。由表4看到, 玻色子结合能 E_{BE} 较高, 确保低能集体激发态描述成功^[17]。

2) 由表3和表4看到, 中子、质子的 s 玻色子都不拆对, 而总是 d 玻色子拆对; 而且一旦一个 d 玻色子突然拆对, 拆对前后能量和结构常数都只有少许变化。这就是第一个疑问的答案。将其与文献[9]的结果相

比较发现: 总玻色子数较多的改变较小, 而较少者则改变稍大, 这是情理中的事。

3) 按照判据(1), 闯入轨道的位置在决定拆对顺排次序时显得特别重要。对于某些核^[9,15], 质子的 E_{align} 仅比中的小 0.16~0.25 MeV, 在不同方案中出现不同的推断就很自然。据此检查过去的工作[6~10], 再一次确认了它们的正确性。

¹⁰⁴Cd 核的一个中子玻色子拆对需要提供 $E_{align} = 7.359$ MeV 能量, 而一个质子空穴玻色子只需要 $E_{align} = [2 \times (-2.843) - (-5.913)] = 0.227$ MeV 能量(本文质子空穴的闯入轨道能量是 $E_{p_{3/2}} = -2.843$ MeV), 显然在能量上非常有利于拆散一个质子空穴玻色子, 这正是人们在 Cd 同位素中经常观测

到质子跨壳激发态的原因。当拆散的核子参与沿集体转动方向顺排时,会释放出能量,也有利于玻色子拆对。粗略地讲,原子核的高自旋激发手段本身就确保核具有较高的角动量,并提供了足够的拆对能量。这不难从核子对的拆散顺排图象中了解到:行将拆对的质子对已经填充到了“闯入轨道”,它们进入闯入轨道所需的能量自然最小。本文的计算结果指认: 8_{1+} 、 8_{2+} 和 8_{3+} 态分别是两准质子、两准中子顺排带和基态带成员,支持文献[4]的结论。回答了第二个质疑。从能量角度看,不排除质子空穴玻色子拆对后,还存在另一个玻色子拆对,并激发出相应的转动谱的可能。

4) 遵照[3,4]对能级的指认,本方案把 6_{3+} 和 8_{1+} 解释为两质子转动带;把 6_{2+} 和 8_{2+} 解释为两中子转动带,与文献[4]的结论一致。但与文献[3]不同,笔者没有把全都的两准粒子态解释为两中子转动带。如图 1 所示。

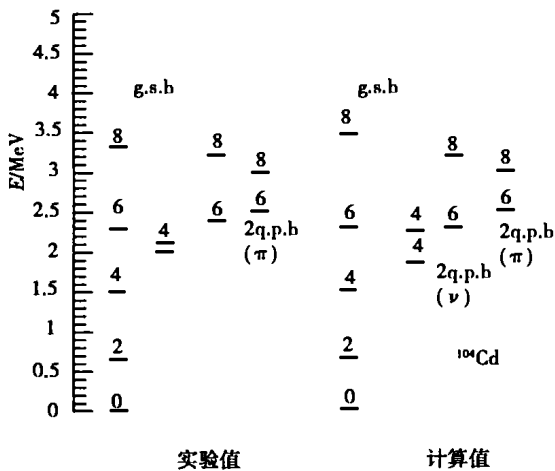


图 1 ^{104}Cd 能谱计算值与实验值的比较^[3,4]

3 结论

综上所述,在微观 sdIBM - 2 + 2q. p. 方案的框架内,较好地再现了 ^{104}Cd 的低自旋态和部分高自旋态。计算结果表明:原子核在拆对顺排中,s 玻色子总不拆对,且一个 d 玻色子的突然拆对,不会造成状态突变;从能量角度看, ^{104}Cd 核的质子玻色子应该先发生拆对顺排,当然不排除紧接着另一个玻色子,如本文的中子玻色子拆对顺排的可能;本文指认 8_{1+} 、 8_{2+} 和 8_{3+} 态很可能分别属于两准质子顺排态、两准中子顺排态和基态。由于核的高速旋转带来的 Coriolis 作用,使得具有两粒子激发带与基态带交叉的原子核只要出现一个玻色子拆对,拆对核子参与转动顺排后释放的能量能会部分补偿拆对所需能量,这有利于核体系的拆对顺排。

参考文献:

- [1] IACHELLO F, ARIMA A. The Interacting Boson Model [M]. Cambridge, England; Cambridge University Press, 1987.
- [2] IACHELLO F. Physics of high - spin states in the Interacting Boson Model [J]. Nuclear Physics, 1991, A522 (1): 83c - 98c.
- [3] DE ANGELIST G, FAHLANDER C, VRETENAR D, et al. Excited states in ^{104}Cd described with the Interacting Boson Model plus broken pairs [J]. Phys Rev, 1999, C60:014313.
- [4] M ÜLLER G A, JUNGCLAUS A, YORDANOV O, et al. High - spin structure and electromagnetic transition strengths in ^{104}Cd [J]. Phys Rev, 2001, C64: 014305.
- [5] 桑建平, 刘庸. 偶偶核高自旋态的微观研究(I)理论方案[J]. 高能物理与核物理, 1994, 18 (10): 936 - 942.
- [6] 桑建平, 刘庸. 偶偶核高自旋态的微观研究(II)对同中子异荷素 ^{154}Dy 、 ^{156}Er 和 ^{158}Yb 的应用[J]. 高能物理与核物理, 1994, 18 (11): 1 020 - 1 026.
- [7] 桑建平, 刘庸. 偶偶核高自旋态的微观研究(III)对同中子异荷素 ^{126}Ba 、 ^{128}Ba 和 ^{1308}Ba 的应用[J]. 高能物理与核物理, 1995, 19(1): 87 - 92.
- [8] SANG J P, SHI Z Y, ZHANG Z J and LIU Y. Structure of Ge isotopes the microscopic Interacting Boson Model with two - quasi - particle states [J]. Chinese Journal of Nuclear Physics, 1997, 19 (1): 12 - 15.
- [9] SHI Z Y, LIU Y, SANG J P. Microstructure on collectivity in $^{116-122}\text{Xe}$ isotopes[J]. Chinese Physics, 2000, 9(1): 9 - 12.
- [10] 童红, 石筑一. 微观 sdIBM - 2 + 2q. p 中核 ^{138}Ce 正宇称能谱结构[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2002, 25(10): 136 - 138.
- [11] SHI Z Y, ZHAO X Z, TONG H. Spectral property and its shape transition on $^{72-84}\text{Kr}$ isotopes in microscopic - core plus two - quasi - particle approach [J]. Chinese Physics, 2003, 13(7): 732 - 737.
- [12] SHI Z Y, LIU Y, SANG J P. The nuclear structure and backbending phenomenon for $^{114-130}\text{Xe}$ isotopes [J]. Chinese Physics, 10(4): 282 - 285.
- [13] 石筑一. ^{20}Ne 能谱的微观研究及其有限温度比热容[J]. 原子能科学技术, 2000, 34 (1): 69 - 73.
- [14] JI S Y, SHI Z Y. Thermodynamical properties of microscopic IBM and applications to Fe nuclei [J]. Nuclear Science and Techniques, 2001, 12(1): 1 - 8.
- [15] 石筑一, 吉世印. 微观核芯 + 两准粒子模型中热核 $^{148-158}\text{Sm}$ 的比热容及其相变[J]. 物理学报, 2003, 52(1): 42 - 47.
- [16] 刘庸. 相互作用玻色子模型与原子核集体能谱的微观研究[D]. 北京: 北京大学, 1984. 34.

Microscopic Approach of the Nucleonic Aligned Property on ^{104}Cd Nucleus

TONG Hong, SHI Zhu-yi

(Department of Physics, Guizhou Institute for Nationalities, Guiyang 550025, China)

Abstract: With the formalism of the microscopic interacting boson - fermion model, which is a microscopic realization of the phenomenological core plus two-quasi-particle model, the microscopic sdIBM - 2 + 2q. p. model approach, has been formed. Based on this phenomenological model and the microscopic realization, the aligned minimum energy that it is necessary to a d-boson in the nucleus has been deduced which occurs in the process from the decoupling, broken up, occupying the intruder orbits, and passing into the alignment. The microstructure in high-spin states and the sequence of bosons broken pair is discussed. The calculated results for ^{104}Cd nucleus show this approach is used successfully to describe the low - spin and partial high-spin states on that nucleus. When the broken pair of a boson takes place suddenly, no significant change of states between foremost state and latter state is caused by the broken pair. Finally, this approach identifies that those high - spin states are the states built on the $\nu(h_{11/2})^2$ and $\pi(g_{9/2})^2$ aligned states. And the 8_{1+} , 8_{2+} and 8_{3+} states in the experiment belong to two-quasi-proton aligned, two-quasi-neutron aligned, and ground states band, respectively.

Key words: microscopic sdIBM - 2 + 2q. p. approach; high-spin states; boson broken pair; nucleonic alignment; ^{104}Cd nucleus

(编辑 张小强)

(上接第 136 页)

Measurement and Analysis of Industrial Productivity of Chongqing

YANG Jun, XIA Shao-mo, QIU Rang

(College of Economics and Business Administration, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: Productivity is the most basic index to measure efficacy of a production system in industrial economy. The measurement of productivity is the first step of its management. With the huge push of Reform and Opening, industrial economy of Chongqing is keeping a steady growth. The authors use production function to measure the industrial productivity of Chongqing from 1979 to 1999, and analyze its developing trend.

Key words: industry; TFP; Chongqing

(编辑 刘道芬)