

用玻色子组态混合和玻色子表面 δ 相互作用研究核谱*

张庆营

符力平

(湖南大学物理系 长沙 410082) (中国科技大学物理系 合肥 230026)

摘要 用玻色子组态混合波函数和玻色子表面 δ 相互作用研究了三玻色子核 ^{46}Ti 和 ^{54}Cr 的sdgIBM1的能谱和E2跃迁概率,理论计算结果令人满意,比sdIBM1拟合出更多的能级和E2跃迁概率,而且它们的误差更小.说明g玻色子在振动区也起着重要的作用,同时进一步证明了这种玻色子组态混合模型是成功的.

关键词 核结构 能谱 E2跃迁 玻色子组态混合 玻色子表面 δ 相互作用

众所周知,唯象的相互作用玻色子模型(IBM)的相互作用参量是作为可调参数由实验数据确定的^[1],sd玻色子有9个参数,sdg有32个参数,为了解释更多的实验数据,引进了越来越多的玻色子:p、f、s'、d'...,可调参数也随着大量增加,失去了IBM能以少数可调参数拟合很多实验数据的优点.已有一些理论能解决这个问题.例如,1/N展开技术的理论^[2],能得到IBM的能谱和电磁跃迁概率的解析表达式,只有很少的自由参数,而且即使玻色子的自由度增多了,可调参数也增加得极少,仍然可以用少量的可调参数来拟合大量的实验数据.

现在介绍另一种理论.即组态混合相互作用玻色子模型(CMIBM).其基本出发点仍然是相互作用玻色子模型,不过不是用动力学对称性,而是引入唯象的具体形式的玻色子之间的两体有效相互作用.用玻色子的波函数计算玻色子两体相互作用矩阵元,再用组态混合波函数算出能谱.可调参数只有单玻色子能量和玻色子相互作用中的相互作用强度两种.前者对于一种玻色子只有一个参数,后者与玻色子自由度无关.因此,增加一种新类型的玻色子,只增加一个参数.当玻色子自由度较多时,仍然可以用很少量的参数拟合大量实验数据,并保持了IBM用不多的参数解释很多实验数据的优点.

文献[3,4]曾经用这种模型研究过sdIBM1的三玻色子核和四玻色子核的核谱.现在进一步推广到增加一个g玻色子的sdgIBM1.在三玻色子的情形下,sdgIBM1有3个独立的可调参数,理论能级有70条,sdIBM1有两个独立的可调参数,理论能级只有10条.前者比后者只多了一个可调参数,而理论预言的能级却多得多了.这种推广是否成功,还要通过计算具体的核谱来进行检验.

1996-12-26收稿, 1997-6-31收修改稿

* 国家自然科学基金资助项目(19375017号)

和以前一样, 采用玻色子表面 δ 力作为玻色子的有效相互作用力

$$V_{12}^{\text{BSDI}} = -g\delta(r_1 - r_2)\delta(r_1 - R_0)\delta(\Omega_{12}), \quad (1)$$

其中 g 是相互作用强度. 用这种形式的有效相互作用力计算了一些三玻色子核和四玻色子核的能谱和 $E2$ 跃迁概率, 结果也相当好. 这种有效力适合于离封闭壳层不远的区域. 当离封闭壳层较远时, 参与混合的组态增多了, 计算更为麻烦, 而且核的形变较大, 这样简单的有效相互作用往往不很适用, 必须加以修正. 但也不容易找到满意的新形式的有效相互作用, 所以这种理论适合于满壳层外玻色子数不多的情形, 而 $1/N$ 展开的方法适用于玻色子数 N 越多越好. 所以, 上述这两种理论正好可以互为补充.

用玻色子的波函数算出 (1) 式的 V_{12}^{BSDI} 的两玻色子有效相互作用矩阵元为

$$\langle l_1 l_2 L | V_{12}^{\text{BSDI}} | l_3 l_4 L \rangle = G(2L+1)^{-1} [(2l_1+1)(2l_2+1)(2l_3+1)(2l_4+1)]^{1/2} \cdot \langle l_1 0 l_2 0 | L 0 \rangle \langle l_3 0 l_4 0 | L 0 \rangle, \quad (2)$$

上面的强度参数 G 是径向矩阵元和 (1) 式的相互作用强度 ($-g$) 之积, 与 L 无关. 我们假定不同玻色子的径向矩阵元都相同.

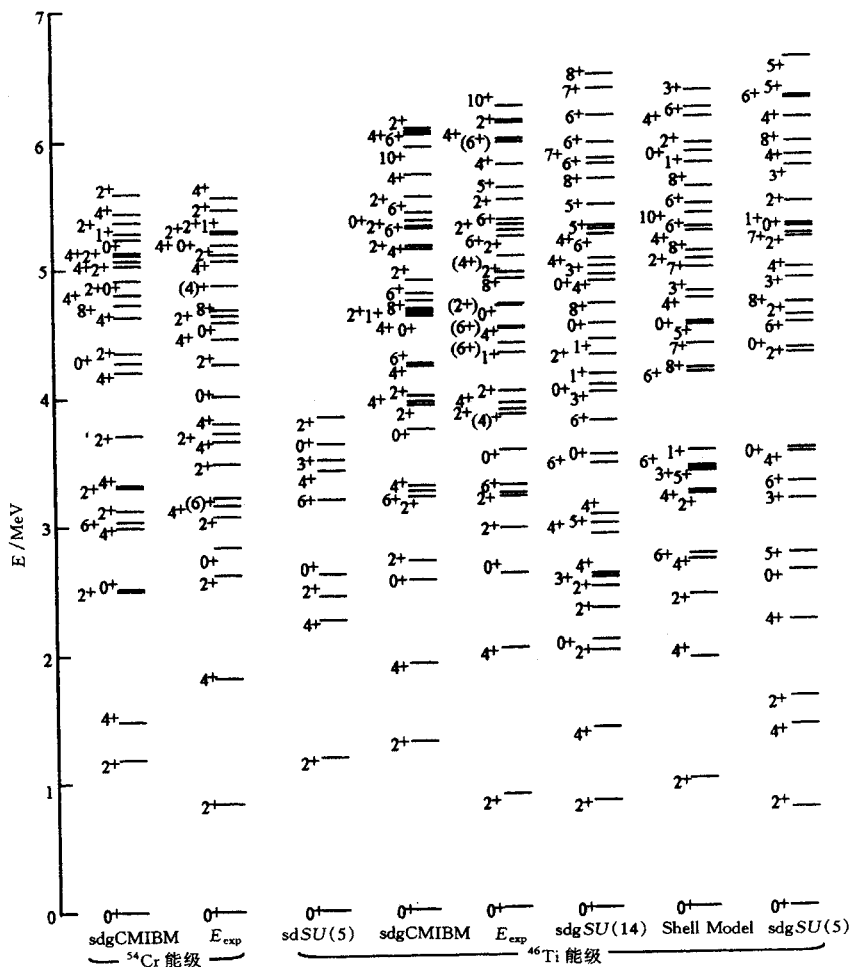


图 1 ^{54}Cr 和 ^{46}Ti 的理论计算能级与实验的比较

不同的三玻色子的组态共有 10 种: s^3 、 s^2d 、 s^2g 、 sdg 、 sd^2 、 sg^2 、 d^3 、 d^2g 、 dg^2 和 g^3 . 总共有 70 个独立的态, 也就是可算出 70 条理论能级. 我们把 s^3 ($L=0$) 态的能量作为能级计算的零点, 这样, 独立的可调参数就只有两个玻色子能量差 $\Delta_d = \epsilon_s - \epsilon_d$, $\Delta_g = \epsilon_s - \epsilon_g$ 和强度参数 G . 这里只算了 ^{46}Ti 和 ^{54}Cr 两个核的能谱. 这两个核有较多可利用的实验测出的能级和 $E2$ 跃迁概率, 而其它三玻色子核的实验数据较少, 不足以说明问题. 理论计算值和实验值^[5,6]的比较示于图 1. 这两个核的能级的理论计算值和实验值的总均方根差分别为 158keV 和 208keV. 相应的拟合能级数分别为 32 和 28 个. 文献 [3] 曾用 sdIBM1 计算过 ^{46}Ti 和 ^{54}Cr 两个核, 一共有 10 个理论能级, 总均方根差分别为 229keV 和 217keV. 虽然 sdIBM1 比 sdgIBM1 少一个参数, 但是后者能拟合出更多的能级, 而且均方根偏差更小. 特别是 sdgCMIBM1 出现奇自旋 1^+ , 3^+ , 5^+ , \dots 和高于 6^+ 的能级, 而这些是 sdIBM1 不可能有的.

在图 1 中还绘出了 ^{46}Ti 的各种模型的计算能谱. 由图中可看出, 传统的 sdIBM 的 $SU(5)$ 极限算出的能级太少, 大量的实验能级无法重现. 图 1 还给出了传统的 sdgIBM1 的 $SU(15)$ 群的 $SU(14)$ 和 $SU(5)$ 两个极限以及用壳模型的 $f_{7/2}$ 壳层纯组态算出的理论能级^[7]. 在 3MeV 以下的低伏态, 这 3 种模型的能级都比实验能级多, 其中前两种模型比壳模型的能级更多. 而我们的 sdgCMIBM1 比前 3 种模型都好, 没有多余的能级. 就是对 3MeV 以上和约 6MeV 以下的较高的能级, sdgCMIBM1 也比前 3 种模型都好. sdgIBM1 的 $SU(5)$ 和 $SU(14)$ 极限, 都没有 10^+ 态, 而在实验中有一个 10^+ 态, 壳模型和 sdgCMIBM 都能再现这个态, 但壳模型的 10^+ 能级偏低. 实验能谱中, 稍高于 4MeV 处有一个 1^+ 态, 而 $SU(14)$ 和壳模型都出现两个 1^+ 态, sdgSU(5) 的 1^+ 态的能量太高, sdgCMIBM 更符合

表 1 理论 $B(E2)_{th}$ 值和实验 $B(E2)_{exp}$ 值的比较

(单位: W. u.)

核	$J_i^+ \rightarrow J_f^+$	$B(E2)_{exp}$	$B(E2)_{sdg}$	$B(E2)_{sd}$	$B(E2)_{sdSU(5)}$
^{46}Ti	$2_1^+ \rightarrow 0_1^+$	20.4	18.1	16.1	19.5
	$4_1^+ \rightarrow 2_1^+$	20	11	21.3	25.5
	$0_2^+ \rightarrow 2_1^+$	50	30	19.5	13.0
	$2_2^+ \rightarrow 0_1^+$	0.064	0.010	0.21	0.0
	$2_2^+ \rightarrow 2_1^+$	5.2	21.6	28.8	25.9
	$2_3^+ \rightarrow 2_1^+$	11.8	0.6		
	$2_3^+ \rightarrow 0_1^+$	0.89	0.002		
	$6_1^+ \rightarrow 4_1^+$	16.4	12.3	6.9	19.4
	$0_3^+ \rightarrow 2_1^+$	2.05	1.3		
	$8_1^+ \rightarrow 6_1^+$	12.3	28.1		
^{54}Cr	$2_1^+ \rightarrow 0_1^+$	14.6	15.4	16.8	19.4
	$4_1^+ \rightarrow 2_1^+$	29	21	22.6	25.9
	$2_2^+ \rightarrow 2_1^+$	5	13		
	$2_2^+ \rightarrow 0_1^+$	0.9	1.5		
	$2_3^+ \rightarrow 2_1^+$	<0.23	0.58		
	$6_1^+ \rightarrow 4_1^+$	18	12	14.4	25.9
	$2_4^+ \rightarrow 2_1^+$	<0.35	0.32		
	$8_1^+ \rightarrow 6_1^+$	12.9	19.2		

实际情形. 壳模型算出的 0_2^+ 和 0_3^+ 能级, 都比实验值高约 2MeV, 严重偏离实验结果. 引进核心激发以后^[7], 壳模型的 0_2^+ 能级虽然下降了许多, 但仍然比实验的 0_2^+ 能级高约 1MeV. 而 sdgCMIBM 算出的 0_2^+ 和 0_3^+ 能级, 与实验的相应能级进行比较, 误差分别只有 16keV 和 61keV, 计算结果符合得很好. 总之, 本文的 sdgCMIBM 比传统的 sdIBM 的 $SU(5)$ 极限、sdgIBM 的 $SU(5)$ 极限、 $SU(14)$ 极限和壳层模型都更符合实验测量的结果, 能满意地拟合约 6MeV 以下的能级.

用 sdgCMIBM 算出的 ^{46}Ti 和 ^{54}Cr 两个核的低伏态跃迁的理论 $B(E2)$ 值和实验测量数据的比较列于表 1 中. 实验数据见文献 [5, 6]. 计算 $B(E2)$ 所用的波函数是用前面计算能谱时所确定的组态混合波函数, 因而只需要一个有效电荷作为可调参数.

文献 [7, 8] 没有计算 ^{46}Ti 和 ^{54}Cr 两个核的 sdgIBM 的 $SU(5)$ 极限、 $SU(14)$ 极限和壳层模型的 $B(E2)$ 值, 表 1 只列出 sdgCMIBM、sdCMIBM 和 sdIBM 的 $SU(5)$ 极限算出的理论 $B(E2)$ 值. 可以看到, sdgCMIBM 比 sdCMIBM 和 $SU(5)$ 极限能拟合更多的实验数据. 而且与实验值相当符合. 其中 $SU(5)$ 极限的 $2_2^+ \rightarrow 0_1^+$ 跃迁是禁止的, 由于 CMIBM 的组态混合波函数中混进了其它的态, 所以 $B(E2)$ 值不等于零, 算出的值和实验值相当接近. 对于 sdCMIBM 和 sdIBM 的 $SU(5)$ 极限, ^{46}Ti 和 ^{54}Cr 两个核共计算了 9 种跃迁的理论 $B(E2)$ 值, 与实验值比较, 总的均方根差分别为 13.5 和 14.6. 在 sdgCMIBM 中, 相应的这 9 种跃迁的均方根差为 9.8, 比前两种模型的均方根差都小很多, 如果再加上前两种模型不能出现的其他跃迁, 一共有 18 种跃迁, 多出一倍, 但总的均方根差却更小了, 只有 8.6. 由此可见 sdgCMIBM 比 sdCMIBM 和 sdIBM 能拟合更多的 $E2$ 跃迁, 甚至还与实验值符合得更好. 有力地说明了 g 玻色子不但对大形变区很重要, 而且对形变小的振动区, 也起着重要的作用.

总之, 我们的 CMIBM 理论能满意地描述 sd 体系的三玻色子核和四玻色子核^[3, 4]. 加上 g 玻色子后, 不但能满意地拟合比 sd 体系多得多的能级, 也能满意地算出更多的 $E2$ 跃迁概率, 而且理论值还更接近实验值, 不但表明了 g 玻色子对形变小的区域的核谱十分重要, 同时再次说明这种组态混合相互作用玻色子模型是成功的. 其原因就在于这种模型混进了传统的 sdgIBM 用群论分类所没有的态, 从而改善了理论的计算结果.

参 考 文 献

- [1] Iachello F, Arima A. The interacting boson model. Cambridge; Cambridge University Press, 1987. 1—250
- [2] Wang Baolin, Zhang Qingying et al. Journal of Hunan University (in Chinese), 1993, 20(2):121—123
(王保林, 张庆营, 阙建中. 湖南大学学报, 1993, 20(2):121—123)
- [3] Zhang Qingying et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 1994, 18(4):353—360
(张庆营, 陈小林, 冯 芒等. 高能物理与核物理, 1994, 18(4):353—360)
- [4] Zhang Qingying, Feng Mang. Study of A study of spectra of four boson Nuclei. In: Zhang Qingying, Zhao Engguang. ed. Proceeding of the 4th National conference an Nuclear Structure. Beijing: Atomic Energy Press, 1992. 165—167
(张庆营, 冯 芒. 第四届全国核结构学术讨论会论文集, 主编: 张庆营, 赵恩广. 北京, 原子能出版社, 1992. 165—167)
- [5] Peker L K. Nucl. Data Sheets, 1993, 68(2):271—310
- [6] Hou Junde, Zhou Weihong, Sun Huibin et al. Nucl. Data Sheets, 1993, 68(4):887—934

- [7] Liao Jizhi. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 1979, 3(6):734—748
(廖继志. 高能物理与核物理, 1979, 3(6):734—748)
- [8] Liao Ji-Zhi. Chin. Phys., 1987, 7(1):164—167

Study of Spectra with Boson Configuration Mixing and Surface Delta Interaction *

Zhang Qingying

(Department of Physics, Hunan University, Changsha 410082)

Fu Liping

(Department of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

Abstract The energy spectra and $E2$ transition probabilities of three-boson nuclei ^{46}Ti and ^{54}Cr are studied by using the configuration mixing wave function in sdgIBM1 and the boson surface delta interaction. The theoretical result in sdgIBM1 is satisfactory, it can fit much more levels and $E2$ transition probabilities, and their deviations are even smaller than those in sdIBM1. It is shown that the g boson also plays important role in the vibration region.

Key words nuclear structure, energy spectra, $E2$ transition, boson configuration mixing, boson surface delta interaction

Received 26 December 1997, Revised 31 Jun 1997

* Supported by the National Natural Science Foundation of China project No. 19375017