

① 99, 16(1)

超形变核态的相互作用玻色子模型研究

孙洪洲^{1,3} 刘玉鑫^{2,3}

1 (清华大学物理系 北京 100084)

2 (北京大学物理系 北京 100871)

3 (中国科学院理论物理研究所 北京 100080)

0571.211

摘要 概要介绍了超形变核态的相互作用玻色子模型研究的现状、理论框架及一些应用。

关键词 超形变核态 相互作用玻色子模型 动力学转动惯量 $\Delta I=4$ 分岔

分类号 O571.21

1 引言

自1986年第一条分立的超形变转动带(SD带)在¹⁵²Dy中发现^[1]以来,高自旋超形变核态的研究就成为核结构领域中具有挑战性的课题之一。十多年的大量实验研究^[2]揭示出超形变核态具有一些很有意义的性质,例如:多数SD带的动力学转动惯量($J^{(2)}$)随转动频率($\hbar\omega$)平缓变化,且有些具有“返转”现象^[3]、“全同带”现象^[4]、“ $\Delta I=4$ 分岔”现象^[3,5,6]等。理论上,目前普遍认为超形变核态的性质很强烈地依赖于单粒子高 N 侵入“轨道”。因此,在微观方面,密度依赖的Hartree-Fock方法^[7]和推转相对论平均场方法^[8]被应用于该研究。在这些理论中,大量的单粒子性质都需要进行自洽变分处理,从而增加了许多数值计算方面的困难。因此,这些理论尚未得到广泛应用。而半唯象的推转Nilsson-Strutinsky方法和推转Woods-Saxon-Strutinsky方法^[9]则被广泛应用^[10]。但由于超形变核态的性质还依赖于单粒子运动与集体运动的耦合,这些方法的计算工作量都很大,并且计算结果与实验的符合程度尚需要提高。再者,投影壳模型^[11]也被应用于超形变核态的研究^[12],虽然取得了一些较好的结果,但有待改善。同时,基于不同的微观模型或集体模型提出的许多唯象模型(例如文献[13]、[14])也已取得了相当的成功。由于相互作用玻色子模型(IBM)^[15]具有

丰富的物理内涵和简洁的计算,IBM也被推广应用于研究超形变核态^[16-19],sdg IBM可解决困扰玻色子模型的波函数减弱的困难^[20]。本文结合本研究小组的工作简要介绍超形变核态的相互作用玻色子模型及其应用。

2 超形变相互作用玻色子模型

众所周知,超形变核态是建立在位能面第二极小上的核态,这些核态以转动为其主要特征,其它模式仅相当于微扰。由于第二极小与第一极小明显分开,建立在其上的核子对(零极对、四极对等)与正常形变(ND)态的核子对明显分开。虽然其结构与正常形变态的对的结构可能有所不同,但都可以近似为玻色子,并且在不考虑二者之间的转化时可以简记为s、d、g、f等玻色子而不加区分。于是,相互作用玻色子模型(ND IBM)被直接推广到描述超形变核态^[16-19]。这一推广的IBM常被简称为超形变相互作用玻色子模型(SD IBM)。由于不区分SD态的对和ND态的对,那么SD IBM的群结构与ND IBM的群结构完全相同。

另一方面,由Nilsson模型知道,高自旋大形变核态只能在同时考虑几个大壳的情况下才能得到较好的描述,那么超形变态的玻色子数 N_B^{SD} 应大于正常形变态的玻色子数 N_B^{ND} 。考虑相互作用玻色子模型与集体模型

的关系, 仅包含 s、d 玻色子的 IBM 的内禀四极形变参数 β_2 和集体模型的四极形变参数 $\hat{\beta}_2$ 的关系可表示为^[14]

$$\hat{\beta}_2 \approx \frac{4}{3} \frac{e_B N_B}{e Z R_0^2} \frac{2\beta_2 - \sqrt{\frac{2}{7} \chi \beta_2^2}}{1 + \beta_2^2}, \quad (1)$$

其中, e 、 Z 和 R_0 分别为质子电荷、质子数和原子核的平均半径. e_B 、 N_B 分别为 IBM 中的有效电荷和玻色子数; χ 为 E2 跃迁算符中的结构参数, 对转动核态(可由 $SU(3)$ 极限描述), χ 可取为 $-\sqrt{7}/2$. IBM 的内禀四极形变参数 β_2 可由位能面取极小的条件确定. 显然, 对一定的原子核, $\hat{\beta}_2 \propto N_B$. 在考虑 g 玻色子时, 上述关系保持不变, 并且还有十六极形变参数 $\hat{\beta}_4 \propto N_B$. 由于 SD IBM 是 ND IBM 的直接推广, 并且实验发现 $\hat{\beta}_2^{SD}(\hat{\beta}_4^{SD})$ 通常两倍甚至三倍于 $\hat{\beta}_2^{ND}(\hat{\beta}_4^{ND})$, 我们可得出结论 $N_B^{SD} = 2N_B^{ND} \sim 3N_B^{ND}$.

为了进行具体计算, 还需要确定模型空间和相互作用. 利用 IBM 的相干态技术^[15] 计算表明^[21], 仅考虑 s、d 玻色子的 IBM 的 $U(5)$ 、 $SU(3)$ 和 $O(6)$ 三种极限的位能面(以内禀四极形变参数 β_2 为宗量)都只有一个极小值, sdg IBM 的 $U_{sd}(6) \otimes U_g(9)$ 、 $U_{dg}(14)$ 、 $U_d(5) \otimes U_{sg}(10)$ 、 $SU_{sdg}(3)$ 、 $O_{sdg}(3)$ 极限的位能面(以 β_2 和内禀十六极形变参数 β_4 为宗量)也都只有一个极小, 其 $SU_{sdg}(6)$ 极限的位能面有三个简并的极小, 而其 $SU_{sdg}(5)$ 极限的位能面关于 β_4 有两个不简并的极小. 再者, 文献^[17, 18] 的计算分析表明, 描述超形变核态时 g 玻色子和 s、d 玻色子同样重要. 那么, 将这些计算结果与超形变态(建立在核位能面第二极小上的核态)的共识相结合, 我们可以得出结论: sdg IBM 的 $SU(5)$ 极限是一个可以合理地描述超形变核态的模型^[19, 22]. 于是有模型空间

$$|Y\rangle = |N_B [n_1 n_2 n_3 n_4] \alpha(\tau_1 \tau_2) \beta I\rangle, \quad (2)$$

和相互作用哈密顿量

$$H = H[SU_{sdg}(5)] = E_0 + AC_{2S\tau_{sdg}(5)} + BC_{2S0_{sdg}(5)} + CC_{2S0_{sdg}(3)}. \quad (3)$$

3 E2 跃迁能量谱和动力学转动惯量的描述

文献^[3]报导, 实验发现动力学转动惯量 ($J^{(2)}$) 随转动频率 ($\hbar\omega$) 变化出现“返转”现象后不久, Satula 等利用推转 Woods-Saxon-Strutinsky 方法, 在同时考虑对力和四极对力对形变依赖的情况下进行了自洽计算^[10], 尽管计算结果较原有结果有明显改善, 但在转动频率较高的区域仍不能与实验结果符合. 在 SD IBM 中, 文献^[17] 对 $A \sim 190$ 和 150 区偶-偶核 Yrast SD 带的计算也未能描述这一“返转”现象. 为解决这一问题, 我们根据上节的分析和可变转动惯量模型^[23] 的思想, 将相互作用哈密顿量(3)式推广为

$$H = E_0 + AC_{2S\tau_{sdg}(5)} + BC_{2S0_{sdg}(5)} + \frac{C_0}{1 + f_1 C_{2S0_{sdg}(3)} + f_2 C_{2S0_{sdg}(5)}} C_{2S0_{sdg}(3)}, \quad (4)$$

谱生成规则表明, $SU_{sdg}(5)$ 的表示 $[n_1 n_2 n_3 n_4]$ 对由其标记的带中的态的相对激发能并无贡献, 那么一个 SD 带中自旋为 I 的态的能量可表示为^[19]

$$E(I) = E_0 + B[\tau_1(\tau_1 + 3) + \tau_2(\tau_2 + 1)] + \frac{C_0}{1 + f_1 I(I + 1) + f_2 I^2(I + 1)^2} I(I + 1), \quad (5)$$

其中, $SO_{sdg}(5)$ 的不可约表示 (τ_1, τ_2) 由群表示的约化规则确定.

利用(5)式计算了 $A \sim 190$ 区和 $A \sim 150$ 区偶-偶核(Hg、Pb、Gd 和 Dy)的 Yrast SD 带和部分激发的 SD 带的 E2 跃迁能量谱 E_γ

(I)和动力学转动惯量 $J^{(2)}$. 计算结果表明, 除单粒子组态中明显有带交叉的SD带(如 ^{148}Gd 的 band2)外, 不论是 Yrast SD 带还是激发的 SD 带, 我们的计算结果都与实验符合很好. 作为例子, 图 1 和图 2 分别给出对 ^{194}Hg 的 band1 和 ^{148}Gd 的 band4 的 $J^{(2)}$ 的计算结果.

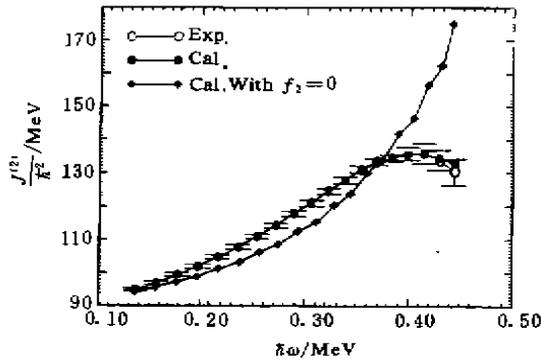


图 1 ^{194}Hg 的 Yrast SD 带的动力学转动惯量计算结果

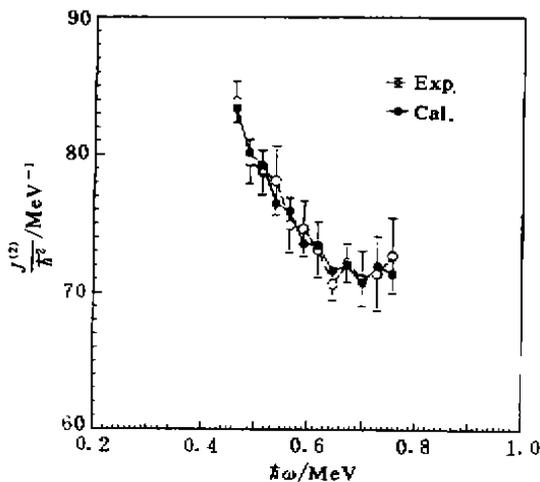


图 2 ^{148}Gd 的 SD band 4 的动力学转动惯量计算结果 ($f_2 \neq 0$)

对于 f_1 、 f_2 的物理意义, 推广文献[23]的讨论可以知道, 当 $f_1 > 0$ 、 $f_2 > 0$ 时, 由 Coriolis 力引起的拆对顺排效应得到很好考虑; 当 $f_1 < 0$ 、 $f_2 < 0$ 时, 配对效应得以反映; 当 $f_1 > 0$ 、 $f_2 < 0$ (或当 $f_1 < 0$ 、 $f_2 > 0$) 时, 拆对效应和配对效应同时在我们的模型中得到

考虑, 两者的竞争决定 $J^{(2)}$ 随 $\hbar\omega$ 的变化规律. 计算结果表明, 对 $A \sim 190$ 区都有 $f_1 > 0$ 、 $f_2 < 0$, 对大多数 $A \sim 150$ 区的 SD 带都有 $f_1 < 0$ 、 $f_2 > 0$. 这说明, 不论是 $A \sim 190$ 区还是 $A \sim 150$ 区的超形变核态中, 都存在对力 (包括四极对力等) 与拆对顺排的竞争, 甚至由一种模式起主导作用转变为另一种模式起主导作用[24]. 最近发现, 八极形变会引起 f_1 的变化[25].

4 $\Delta I = 4$ 分岔现象的讨论

$\Delta I = 4$ 分岔 (又称为 $\Delta I = 2$ 颤动) 现象是超形变核态研究中最具挑战性的现象之一. 所谓 $\Delta I = 4$ 分岔现象即相邻能级自旋差为 $\Delta I = 2$ 的转动带分裂成两个分支, 每个分支中相邻能级的自旋差都是 $\Delta I = 4$. 这一现象在 SD 态中刚一发现[3,5], 就提出这可能是 SD 态具有 C_{4v} 对称性[26] 或 Y_{44} 对称性[27] 的反映, 但随后的研究对之提出了质疑[28,29]. 另一方面, 这一现象被认为是带交叉所致[28].

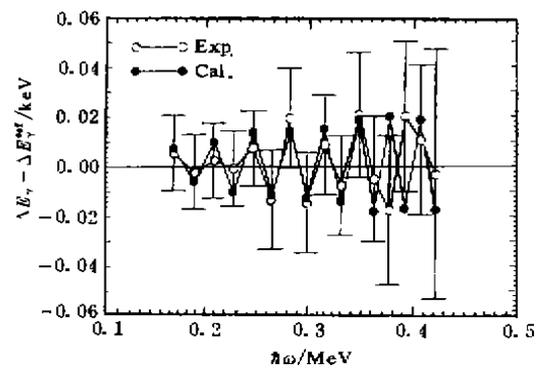


图 3 ^{194}Hg 的 Yrast SD 带中的相邻跃迁能量差的计算结果

再者, 文献[18]说明, 在 SD IBM 中存在合适的基底和相互作用, 由之可以得出与文献[26,27]相同的结果. 但非常遗憾, 这些方法都未能给出与实验定量符合的结果. 文献[19]根据前述分析取 $SU_{sdq}(5)$ 极限的波函数为基底, (4) 式所示的哈密顿量作为相互作用

用, 导出了(5)式所示的能谱公式. 利用(5)式所得的 E_{γ} 谱, 进而讨论了 ^{194}Hg 的 Yrast SD 带和 ^{148}Gd 的激发 SD 带 (band 6) 的 $\Delta I=4$ 分岔现象. 对相邻跃迁能量差 $\Delta E_{\gamma}-\Delta E_{\gamma}^{mf}$ 的计算结果分别如图 3、图 4 所示.

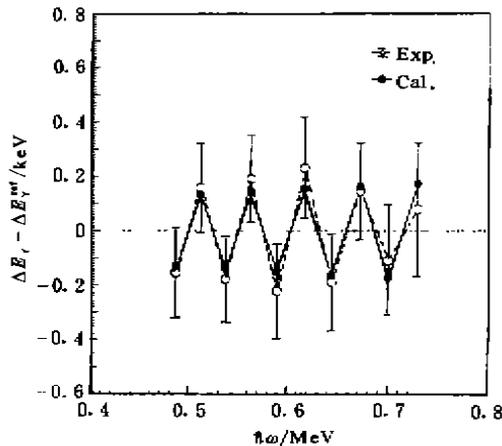


图 4 ^{148}Gd 的 SD band 6 的相邻跃迁能量差的计算结果

由图可知, 理论计算的 $\Delta E_{\gamma}-\Delta E_{\gamma}^{mf}$ 与实验结果定量符合得相当好. 通过分析计算过程知道, 我们的方法之所以能很好地描述 $\Delta I=4$ 分岔现象, 是因为在转动起主导作用的相互作用中引进了具有 $SO_{sdg}(5)$ 对称的微扰

($B < C_0/1000$). 理论结果与实验数据的很好符合说明, 引起 $\Delta I=4$ 分岔现象的微扰可能具有 $SO_{sdg}(5)$ 对称性.

5 讨论

本文在简要介绍超形变核态的相互作用玻色子模型研究现状的同时, 介绍了本研究小组提出的一种 SD IBM 的基本框架和部分结果. 利用该模型我们可以同时考虑对作用 (零极对、四极对、十六极对等) 和拆对顺排效应对超形变核态的影响. 计算结果表明, 我们的方案不仅可以很好地描述超形变核态的 E2 跃迁能量谱和动力学转动惯量 (尤其是解决了 $J^{(2)}$ 随 $\pi\omega$ 增大出现“返转”现象的问题), 还可以很好地描述 $\Delta I=4$ 分岔现象. 这说明不论是 $A \sim 190$ 区还是 $A \sim 150$ 区的超形变核态都受到配对和拆对顺排的共同作用, 只不过某些 SD 态下配对作用占主导地位, 另一些 SD 态下拆对作用占主导地位, 并且引起 $\Delta I=4$ 分岔现象的微扰可能具有 $SO_{sdg}(5)$ 对称性. 再者, 利用这一方法原则上还可以确定 SD 带中的电磁跃迁几率和多极矩 (目前这一工作正在进行). 同时, 这一方法将被应用于描述其它核的超形变态.

参 考 文 献

- 1 Twin P J. Observation of a Discrete-line Superdeformed Band up to 60π in ^{152}Dy . *Phys Rev Lett*, 1986, 57, 811~814
- 2 Han Xiaolong, Wu Chengli. Nuclear Superdeformed Data Table. *Atomic Data & Nucl Data Tables*, 1996, 63, 117
- 3 Cederwall B, Janssens R V F, Brikman M J *et al.* New Features of Superdeformed Band in ^{194}Hg . *Phys Rev Lett*, 1994, 72, 3150~3153
- 4 Baktash C, Haas H, Nazareicz W. Identical Bands in Deformed and Superdeformed Nuclei. *Annu Rev Nucl Part Sci*, 1995, 45, 485~541
- 5 Flibotte S, Andrews H R, Ball G C *et al.* $\Delta I=4$ Bifurcation in a Superdeformed Band; Evidence for a C_4 Symmetry. *Phys Rev Lett*, 1993, 71, 4299~4302
- 6 Haslip D S, Flibotte S, France G de *et al.* $\Delta I=4$ Bifurcation in Identical Superdeformed Bands. *Phys Rev Lett*, 1997, 78, 3447~3450
- 7 Bonche P, Krieger S J, Quentin P *et al.* Superdeformation for Two Nuclear Transfer Spectroscopic Factors in sdg Interacting Boson Model. *Nucl Phys*, 1989, A500, 308~322
- 8 Afanasjev A V, Kong J, Ring P. Superdeformed Rotational Bands in the $A \approx 140 \sim 150$ Mass Region - A Cranked Relativistic Mean-field Description. *Nucl Phys*, 1996, A608, 107~175
- 9 Aberg S, Flocard H, Nazarewicz W. Nuclear Shapes in Mean Field Theory. *Annu Rev Nucl Part Sci*, 1990, 40, 439~527
- 10 Satula W, Wyss R. Coherence of Nucleonic Motion in

- Superdeformed Nuclei; Towards an Understanding of Identical Bands. *Phys Rev*, 1994, C50; 2 888~2 892
- 11 Hara K, Sun Y. Studies of High-spin States in Rare-earth Nuclei Using the Angular Momentum Projection Method; (I) Back-bend and Plateau of Moments of Inertia. *Nucl Phys*, 1991, A529; 445~466
- 12 Sun Y, Guidry M. Quantitative Description of Superdeformed Bands with the Projected Shell Model. *Phys Rev*, 1995, C52; R2 844~R2 847
- 13 Wu C S, Zeng J Y, Xing Z *et al.* Spin Determination and Calculation of Nuclear Superdeformed Bands in $A \sim 190$ Region. *Phys Rev*, 1992, C45; 261~274
- 14 Hu Jimin, Xu Furong. Coupling between Rotational and Vibrational Motions with the Cranking Bohr-Mottelson Hamiltonian. *Phys Rev*, 1993, C48; 2 270~2 276
- 15 Iachello F, Arima A. *The Interacting Boson Model*. Cambridge; Cambridge University Press, 1987
- 16 Iachello F. Physics of High-spin States in the Interacting Boson Model. *Nucl Phys*, 1991, A522; 83c~97c
- 17 Kuyucak S, Honma M, Otsuka T. Description of Superdeformed Nuclei in the Interacting Boson Model. *Phys Rev*, 1996, C53; 2 194~2 200
- 18 Kota V K B. Interacting Boson Model Basis and Hamiltonian for $\Delta I=4$ Staggering. *Phys Rev*, 1996, C53; 2 550~2 553
- 19 Liu Y X, Song J G, Sun H Z *et al.* Description of Superdeformed Nuclear States in the Interacting Boson Model. *Phys Rev*, 1997, C56; 1 370~1 379
- 20 Long G L, Ji H Y. Spin Dependence of the Intra-ground-state Band E2 Transition in the $SU(3)$ Limit of the sdg-IBM. *Phys Rev*, 1998, C57; 1 686~1 691
- 21 Devi Y D, Kota V K B. Geometric Shapes with g-Bosons in the Interacting Boson Model. *Z Phys*, 1990, A337; 15~22
- 22 Liu Y X, Sun H Z, Zhao E G. $\Delta I=4$ Bifurcation and the sdg Interacting Boson Model. *Commun Theor Phys*, 1997, 27; 71~76
- 23 Yoshida N, Sagaa H, Otsuka T *et al.* Spin Dependence of the Moment of Inertia and the IBM. *Phys Lett*, 1991, B256; 129~133
- 24 Liu Y X, Song J G, Sun H Z *et al.* Competition between Pairing and Anti-pairing Correlations in the Superdeformed Nuclear States in $A \sim 190$ And $A \sim 150$ Ranges. *Chin Phys Lett*, 1997, 14; 641~644
- 25 Long G L, Zhang W L, Ji H Y *et al.* $SU(3)$ Limit of the sdgf-IBM. *Science in China*, 1998, A41; 1 296~1 301
- 26 Macchiavelli A O, Cederwall B, Clark R M *et al.* G_4 Symmetry Effects in Nuclear Rotational Motion. *Phys Rev*, 1995, C51; R1~R4
- 27 Hamamoto I, Mottelson B R. Superdeformed Rotational Bands in the Presence of Y_{44} Deformation. *Phys Lett*, 1994, B333; 294~298
- 28 Luo W D, Bougueffoucha A, Dobaczewski J *et al.* Microscopic Study of a G_4 Symmetry Hypothesis in $A \sim 150$ Superdeformed Nuclei; Deformed Woods-Saxon Mean Field. *Phys Rev*, 1995, C52; 2 989~3 001
- 29 Sun Y, Zhang J Y, Guidry M. $\Delta I=4$ Bifurcation without Explicit Fourfold Symmetry. *Phys Rev Lett*, 1995, 75; 3 398~3 401

Investigation of Superdeformed Nuclear States in Interacting Boson Model

Sun Hongzhou^{1,3} Liu Yuxin^{2,3}

1 (Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084)

2 (Department of Physics, Peking University, Beijing 100871)

3 (Institute of Theoretical Physics, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract The present status, the framework and some applications of the investigation on the superdeformed nuclear states in the scheme of the interacting boson model are described.

Key words superdeformed nuclear state interacting boson model dynamical moment of inertia $\Delta I=4$ bifurcation

Classifying number O571.21