

高自旋超形变带的代数模型研究*

刘玉鑫

· (北京大学物理系 北京 100871)
(中国科学院理论物理研究所 北京 100080)
(兰州重离子加速器实验室原子核理论中心 兰州 730000)

摘要 介绍高自旋超形变带的研究现状,提出一种可以统一描述超形变带的 $\Delta I=4$ 分岔现象、全同带现象等的代数模型,计算结果表明 $\Delta I=4$ 分岔现象可能起因于具有 $SO(5)$ (或 $SU(5)$)对称的微扰,全同带现象可能是产生超形变态的平均场具有超对称性的结果.

关键词 高自旋超形变带 代数模型 超对称性 分岔现象 全同带现象

新一代 γ 射线探测谱仪的运行已经揭示出超形变转动带具有一些奇特的性质,例如:全同带现象^[1]、 $\Delta I=4$ 分岔(或 γ 射线能量摇摆)现象^[2]、动力学转动惯量($\mathcal{J}^{(2)}$)随转动频率变化出现“返转”现象^[3,4]、具有 $\Delta I=4$ 分岔的全同带现象^[5]等等.理论上,目前已经发展了一些微观理论和半唯象及唯象理论来解释这些现象^[6-12].然而,尚未有可以统一描述这些现象的理论的报道.尤其是,对于全同带现象,虽然微观理论计算表明相邻原子核具有相同的动力学转动惯量起因于使这些转动带建立于其上的平均场对转动惯量的贡献相互抵消,但该平均场是否具有确定的对称性却不清楚^[9].对于具有 $\Delta I=4$ 分岔的超形变带,直观地,这种分岔现象起因于具有 C_4 对称(或 Y_{44} 形变)的微扰^[12],然而,计算表明,由上述微扰引起的 γ 射线能量摇摆的幅度不足以与实验结果相比较^[7,13].再者,目前尚没有可以较好地描述既具有 $\Delta I=4$ 分岔又全同的超形变带的理论^[14].根据相互作用玻色子模型与壳模型及集体模型的关系,提出一种以相互作用玻色子模型为基础的代数模型探讨这些问题.

因为偶偶核、奇 A 核和奇奇核都具有超形变态,所以为利用代数方法统一描述超形变态,所用的代数模型应该具有超对称性.由于超形变态的单粒子组态通常由实验结合微观计算指定,则在超对称模型中,可以近似地仅考虑偶-偶核心部分的对称性.由于超形变带具有较好的转动性质,所以超形变带的能谱可以用破缺的 $SU(3)$ 模型来描述^[15].由于相当一部分超形变带都具有 $\Delta I=4$ 分岔现象,那么,我们的代数模型除了在描述转动等性质方面应该与 $SU(3)$ 模型等价外,还可以给出具有摇摆的 γ 射线能量.计算表明,对于偶偶核的正

* 国家自然科学基金资助

宇称带, s_{dg} 相互作用玻色子模型的 $SU(5)$ 极限可以与其 $SU(3)$ 极限一样较好地描述原子核的形变参数^[16,17], 能谱及跃迁性质以及双核子转移反应^[18]等. 并且, 从几何对应上看, $SU(5)$ 极限和 $C_4 \nu$ 对称都对应 Y_{44} 形变^[19]; 从能谱上看, $SU(5)$ 极限的能谱具有典型的 $\Delta I = 4$ 分岔现象^[20]. 再者, $SU(5)$ 极限的位能面关于十六极形变参数有两个不简并的极小. 因此, 偶-偶核心的正宇称态的对称性可以取为 s_{dg} 相互作用玻色子模型中 $SU(5)$ 极限, 而代替其 $SU(3)$ 极限. 另一方面, 对于偶偶核的负宇称超形变带, 计算表明, f 玻色子和 p 玻色子具有至关重要的作用, 并且由 f 和 p 玻色子构成的 $U(10)$ 群也具有 $SU(5)$ 极限^[21,22]. 因此, 偶偶核心的对称性可以取为下述群链标记的对称性.

$$U_{\text{sdgpf}}(25) \supset U_{\text{sdg}}(15) \otimes U_{\text{pf}}(10) \supset SU_{\text{sdg}}(5) \otimes SU_{\text{pf}}(5) \supset SU(5) \supset SO(5) \supset SO(3). \quad (1)$$

仔细考查上述对称性的谱生成规则后知道, 对一个超形变带内的各能级而言, $U_{\text{sdgpf}}(25)$, $U_{\text{sdg}}(15)$, $U_{\text{pf}}(10)$, $SU_{\text{sdg}}(5)$, $SU_{\text{pf}}(5)$, $SU(5)$ 的表示都贡献一个相同的量, 那么在描述一个超形变带时可以仅考虑 $SO(5)$ 和 $SO(3)$ 的贡献. 为描述动力学转动惯量随转动频率的变化, 在可变转动惯量模型^[23,24]的启示下, 引进参量 f_1 和 f_2 , 于是超形变转动带中角动量为 I 的态的能量可以表示为^[25-27]

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

其中 (τ_1, τ_2) 是产生 I 的 $SO(5)$ 表示, 它可以由群表示的约化规则给定^[28]. 由于某能级对应的 (τ_1, τ_2) 与其上下相邻的两能级对应的 (τ_1, τ_2) 有差别, 那么, 具有 $SO(5)$ 对称的项 $B[\tau_1(\tau_1 + 3) + \tau_2(\tau_2 + 1)]$ 使得能谱具有不均匀摇摆现象. 计算表明, 这一摇摆引起的 $\Delta E_\gamma(I)$ 与 I 成线性关系, 从而, (2) 式可以较好地描述具有无相位变化的 $\Delta I = 4$ 分岔现象的超形变带.

利用 (2) 式计算了 $A = 190, 150$ 等区的偶偶核和奇 A 核的部分超形变带的 E2 跃迁能谱和动力学转动惯量^[25-27]. 计算结果与实验数据符合得很好, 并且还给出了 ^{194}Hg (1), ^{148}Gd (6) 和 ^{149}Gd (1) 等典型的具有 $\Delta I = 4$ 分岔的超形变带的 $\Delta I = 4$ 分岔现象.

由于最典型的全同带出现在偶-偶核和奇 A 核之间, 并且全同带之间几乎完全相同的 E_γ 谱表明这些超形变带的能量是简并的, 考虑单核子能级的影响及单核子能级随转动频率的变化, (2) 式又可以进一步改写为^[29,30]

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

其中 $I' = I + 1$, $i = \frac{G_L S}{C_L + C_1}$, C_L 为由玻色子核心和单核子的膺轨道组成的有效核心的相互作用强度, C_1 是总自旋 $\hat{I} = \hat{L} + \hat{S}$ (S 为单核子的膺自旋) 的相互作用强度. 显然, 如果 $C_L = 0$, 则 $i = S$, 上式即膺自旋模型. 如果 $C_L = 0$, 则 $i = 0$, 上式即强耦合极限. 在强耦合极限下 (即 $I' = I$), 先利用 (3) 式 $N_F = 0$ 在的情况下计算 $^{152}\text{Dy}(1)$ 的 E_γ 谱, 然后利用所得参数计算 $^{151}\text{Tb}(2)$, $^{151}\text{Dy}(4)$, $^{153}\text{Dy}(2)$ 和 $^{153}\text{Dy}(3)$ 中与 $^{152}\text{Dy}(1)$ 具有超对称性的能谱, 再考虑微观计算给出的 $\epsilon_F(\hbar\omega)$ 计算出这些带的能谱及 E_γ 谱, 计算结果与实验结果也符合得很好 (绝大多数 E_γ 与实验之差都在 0.5 keV 以下), 进而可以很好描述全同带的动力学转动惯量^[29,30]

实验表明,在 $A = 130$ 质量区也存在一些全同超形变带. 并且,在 $A = 150$ 区,存在具有 $\Delta I = 4$ 分岔的全同超形变带 $^{149}\text{Gd}(1) - ^{148}\text{Gd}(6) - ^{148}\text{Eu}(1)$. 利用该超对称代数模型计算了这些超形变带的 E_γ 谱和动力学转动惯量. 计算得到的动力学转动惯量如图 1,2 所示. 由图可知,计算结果也与实验结果较好符合.

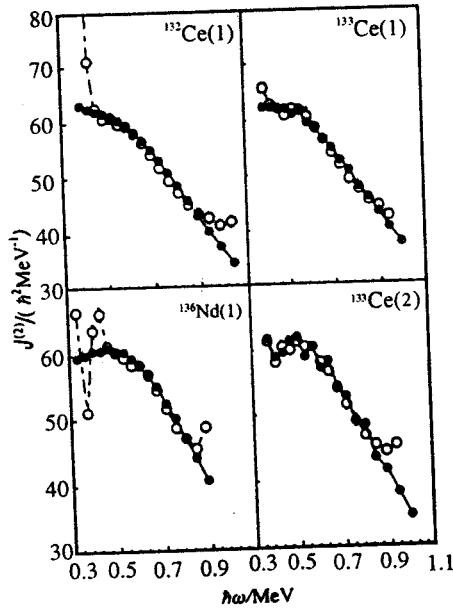


图 1 $A = 130$ 区全同超形变带的动力学、动力学转动惯量的计算结果及与实验结果的比较

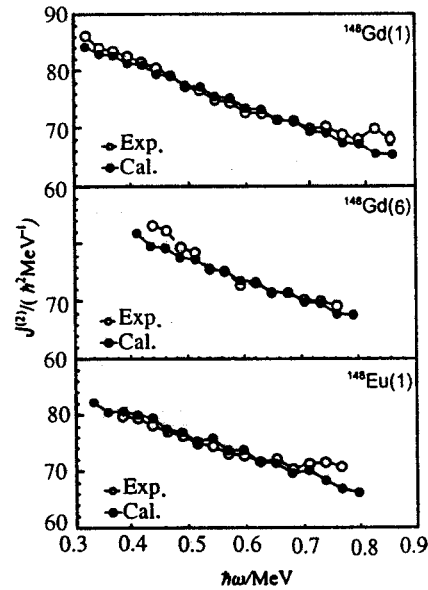


图 2 具有 $\Delta I = 4$ 分岔的全同带的动力学、动力学转动惯量的计算结果及与实验结果的比较

综上所述,我们提出了一个具有 $SO(5)$ (或 $SU(5)$)超对称性的代数模型,并在此模型下,给出一个 4 参数能谱公式. 利用该公式不仅可以描述超形变带的整体性质,而且可以很好地给出超形变带的动力学转动惯量随转动频率变化出现“返转”的现象和 $\Delta I = 4$ 分岔现象. 进一步考虑单粒子能级的影响,还可以描述全同超形变带及具有 $\Delta I = 4$ 分岔的全同超形变带. 计算所得带首自旋对于已有的实验结果都符合很好,因此该模型还可以很好地指定超形变带的带首自旋. 这些结果说明具有 $SO(5)$ (或 $SU(5)$)对称的相互作用对超形变转动的微扰可能是引起 $\Delta I = 4$ 分岔现象的原因,并且超对称可能是出现全同带的原因,但单粒子能级对全同带中具体能谱细节有很大影响.

参考文献 (References)

- 1 Baktash C, Haas B, Nazarewicz W. Annu. Rev. Nucl. Part. Sci., 1995, 45:485
- 2 Flibotte S et al. Phys. Rev. Lett., 1993, 71:4299
- 3 Cederwall B et al. Phys. Rev. Lett., 1994, 72:3150
- 4 HAN Xiao-Ling, WU Cheng-Li. At. Data Nucl. Data Tables, 1999, 73:43
- 5 Haslip D S et al. Phys. Rev. Lett., 1997, 78:3447
- 6 Nazarewicz W, Wyss R, Johnson A. Nucl. Phys., 1989, A503:285
- 7 LUO W D et al. Phys. Rev., 1995, C52:2989

- 8 Konig J, Ring P. Phys. Rev. Lett., 1993, 71:3079;
Afanajev A V, Konig J, Ring P. Nucl. Phys., 1996, A608:107
- 9 Rigollet C et al. Phys. Rev., 1999, C59:3120
- 10 WU C S et al. Phys. Rev., 1992, C45:261; HU Ji-Min et al. Phys. Rev., 1993, C48:2270; 1995, C52:431
- 11 Nazarewicz W et al. Phys. Rev. Lett., 1990, 64:1654; Bahri C, Draayer J D, Moszkowski S A. Phys. Rev. Lett., 1992, 68:2133
- 12 Mamamoto I, Mottelson B R. Phys. Lett., 1994, B333:294; Macchiavelli A O. Phys. Rev., 1995, C51:R1; Pavlichenkov I M, Flibotte S. Phys. Rev., 1995, C51:R460
- 13 Donau F, Fauendrof S, MENG J. Phys. Lett., 1996, B387:667
- 14 Haslip D S et al. Phys. Rev., 1998, C58:R1893
- 15 Otsuka T, Honma M. Phys. Lett., 1991, B268:305; Kuyucak S, Honma M, Otsuka T. Phys. Rev., 1996, C53:2194
- 16 Devi Y D, Kota, V K S. Z. Phys., 1991, A337:15
- 17 LIU Y X et al. Chin. Phys. Lett., 15:252
- 18 Devi Y D, Kota V K S. Phys. Rev., 1992, C46:370
- 19 Kota V K S. Phys. Rev., 1996, C53:2550
- 20 LIU Y X, SUN H Z, ZHAO E G. Commun. Theor. Phys., 1997, 27:71
- 21 Kusnezov D. J. Phys., 1990, A23:5673
- 22 LIU Y X, SUN H Z, ZHAO E G. J. Phys., 1994, G20:407
- 23 Bonatsos D, Klein A. Phys. Rev., 1984, C29:1879
- 24 Yoshida N et al. Phys. Lett., 1991, B256:129
- 25 LIU Y X et al. Phys. Rev., 1997, C56:1370.
- 26 LIU Y X et al. J. Phys., 1998, G24:117
- 27 LIU Y X. Phys. Rev., 1998, C58:237; Chin. Phys. Lett., 1998, 15:561
- 28 SUN H Z et al. Kinam, 1983, 5:135; Kota V K B et al. J. Math. Phys., 1987, 28:1644
- 29 LIU Y X. Phys. Rev., 1998, C58:900
- 30 LIU Y X et al. Phys. Rev., 1999, C59:2511

Algebraic Model Description of High Spin Superdeformed Bands *

LIU Yu-Xin

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

(Institute of Theoretical Physics, CAS, Beijing 100080, China)

(Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator, Lanzhou 730000, China)

Abstract Status of the investigation on superdeformed nuclear bands are surveyed briefly. An algebraic model which can describe the $\Delta I = 4$ bifurcation and the identical bands is proposed. The calculated results indicate that the $\Delta I = 4$ bifurcation may come from the perturbation holding the $SO(5)$ (or $SU(5)$) symmetry. Meanwhile the identical bands result from that the mean field for the superdeformed bands to build upon may possess supersymmetry.

Key words high spin superdeformed bands, algebraic model, supersymmetry, bifurcation, identical bands

* Supported by NSFC