

转动诱发原子核量子相变的一种可能途径^{*}

石筑一^{1)†} 童红¹⁾ 石筑亚²⁾ 张春梅²⁾ 赵行知¹⁾ 倪绍勇¹⁾

1) (贵州民族学院物理系, 贵阳 550025)

2) (西北第二民族学院基础部, 银川 750021)

(2006 年 7 月 27 日收到, 2006 年 9 月 5 日收到修改稿)

基于微观 IBM 理论, 提出转动诱导出玻色子量子相变的一种可能途径: 一旦原子核在受到高能激发或作快速旋转时, 假如外界提供的能量足以使玻色子完成拆对顺排, 则核处于集体相与单粒子态的共存相, 其特征是出现较密集的能谱, 假如能量不足以完成拆对或顺排, 可能发生两种情况之一: 当核旋转达到某个临界转动频率 ω_c 时, 或者一个高角动量的玻色子脱离“集体”而“游离”出来, 或者发生一个高角动量的玻色子转变为一个低角动量的玻色子, 核仍旧处于集体相, 均会伴随出现光辐射, 产生基态带的一条能级——相变信号. 正是这类玻色子相变导致了原子核的量子相变. 本物理图像统一了玻色子拆对顺排相变和退耦释放光子相变的描述. 以 ^{100}Pd 核的 14_1^+ , 14_2^+ 和 14_3^+ 态的产生机理为例, 对模型作了仔细说明.

关键词: 微观 sdgIBM-2 方案, 量子相变, g 玻色子, ^{100}Pd 核

PACC: 2110R, 2160E, 2320L

1. 引言

实验发现, 随着角速度的增加, 同一个原子核有从球形结构到轴对称变形结构的形状变化和过渡, 或者说有从一种谱激发模式到另一种谱激发模式的模式改变和变迁, 通常人们把这个现象简单地称为核形状相变^[1-4], 也有称为量子相变的^[5]; 这样, 人们又重新关注起唯象相互作用玻色子模型 (IBM)^[1-6]. 特别是在 $A \approx 110$, $Z < 50$ 的偶偶核素, 如 $^{98-108}_{42}\text{Mo}$, $^{100-110}_{44}\text{Ru}$, $^{102-112}_{46}\text{Pd}$, $^{104-114}_{48}\text{Cd}$ 的低能态中, 这种变化特别典型. 由于受转动解释的影响, 最初人们把它全部解释为拆对顺排. 最近, Regan 等^[7] 提出用简单的 γ 射线能量-自旋曲线 (γ -ray energy over spin curves, E-GOS) 法指认这种现象的属性, 分析它们到底是属于拆对顺排量子相变, 还是属于转动驱动球形到变形的量子相变.

2001 年, Perez 等^[8] 给出了联合 Nordball 和 Eurogam 实验数据的整合结果, 公布了 ^{100}Pd 核的新能谱. 它表现出有集体性的高角动量基态带和断断续续的 γ 态. 他们用推转壳模型方案计算了其能级, 指

认 8_1^+ 态以下没有两粒子态, 10_1^+ 态可能是质子顺排态, 但 $I-\omega$ 曲线再现不好. 接着, Zhu 等^[9] 提出用“反磁转动”去解释包括基态带在内的 4 条类转动带, 同样也没能给出好的基态带能谱结构. 这似乎意味着, 在角动量小于 16_1^+ 时, ^{100}Pd 核的 yrast 带中根本就不存在玻色子破对后的两粒子态. 那么 14_1^+ 态在能量上似乎是低了些的事实, 应该怎样理解和解释呢?

我们注意到, 类似于 ^{100}Pd 核 16_1^+ 的这种特殊态, 即少玻色粒子 (或少玻色空穴) 的偶偶核的高角动量的单纯组态, 当组态发生一个高角动量玻色子退耦, 或拆散后又重新组合成低角动量玻色子时, 将会辐射光子并产生一条新能级, 这在实验上是容易观察到并加以识别的.

2. 理论方案

20 世纪 70 年代末, Arima 和 Iachello 提出 IBM 理论, 认为偶偶核的性质和低能激发态由价核子两两耦合成角动量为 0 或 2 的 s 玻色子或 d 玻色子的运动状态决定, 并假定这些玻色子间只存在有两体相互作用. 它成功地描述了一大类偶偶核的低能核

^{*} 贵州省高校自然科学类项目 (批准号: 黔教科 2004218 和黔教科 2004123) 资助的课题.

[†] E-mail: shizhuyi@sima.com.cn

现象^[6].

基于原子核的壳模型理论、Dyson 玻色子展开和修正的 Jacovici-Schiff(MJS)代换,构造出了唯象 IBM 理论的微观 IBM 方案^[10],以后又发展出 IBM 理论的一系列微观实现方案,从而形成了一整套微观 IBM 理论^[10-15].微观实现程序能直接算出 s-, d-, g- 玻色子的总能量、结构常数和波函数等若干微观信息.这样的微观 IBM 理论,能够作为深入描述和分析高角动量玻色子退耦、拆散后重新组合成低角动量玻色子的物理图像和能量关系的工具.

按照微观 IBM 理论^[10-15] 原子核处在低受激态和通常转速下,核子以对方式存在,核处于超流相;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没有集体性的、非耦合的费米子对,以后将出现下述两种情况之一.一种情况是,假如能量足以使玻色子拆散为两个核子,占据闯入轨道 $g_{9/2}, h_{11/2}, i_{13/2}$ 之一并进入顺排,则发生原子核由集体超流相到单粒子态的对相变,此时核处于集体相与单粒子态的共存相,其特征是出现较为密集的能谱^[12,13];另一种情况是,假如外界提供的能量不足以使玻色子完成拆对或顺排,那么在核转动达到某个临界转动频率 ω_c 时,要么出现一个高角动量的玻色子脱离“集体”而准“游离”出来,发生退耦激发,伴随出现由高激发态到较低激发态的 γ 辐射,整个核体系多余的结合能将以激发元的方式释放出来,产生一条能级.本过程始终保持角动量和能量守恒,在能量关系上,当忽略玻色子间的相干能时,应有关系式

$$2\omega_v \hbar = [E_i - E_f]; \tag{1}$$

要么,发生一个高角动量的玻色子,在拆对后又重新组合成低角动量的新玻色子,也伴随出现 γ 辐射,同样应有关系式

$$2\omega_v \hbar = [E_i - E_f] + [\epsilon_g - \epsilon_d]. \tag{2}$$

在这两个现象中,都同时满足能量关系

$$E_m = E_i - \omega_v \hbar = E_f + \omega_v \hbar. \tag{3}$$

这里下标 i, f, m 分别表示发生变化的玻色子的初态、末态和中间态.这样,在理论上就可以预言临界转动频率 ω_c 、光子频率 ω_v 和一条新能级的数值,并直接接受实验检验.

事实上,在微观 sdgIBM-2 方案中^[14,15],¹⁰⁰Pd核的中子和质子玻色子的两个最高角动量态的基矢是

$$|L, \sigma, \mu\rangle = |8\sigma\mu\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(g_\sigma^+ g_\sigma^+)_{8\mu} |0\rangle,$$

$$(\sigma = n, p = \text{中子, 质子}).$$

$$|6_1\sigma\mu\rangle = (d_\sigma^+ g_\sigma^+)_{6\mu} |0\rangle,$$

$$|6_2\sigma\mu\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(g_\sigma^+ g_\sigma^+)_{6\mu} |0\rangle.$$

其对应的能量矩阵是

$$E_{8\sigma} = 2\epsilon_{\sigma g} + \frac{2}{\sqrt{17}}f_{\sigma 8},$$

$$H_{6\sigma} = \begin{pmatrix} \epsilon_{\sigma d} + \epsilon_{\sigma g} + u_{\sigma 116}/\sqrt{13} & \sqrt{2/13}u_{\sigma 106} \\ \sqrt{2/13}u_{\sigma 106} & 2\epsilon_{\sigma g} + \frac{2}{\sqrt{13}}f_{\sigma 6} \end{pmatrix},$$

这里 f, u 是玻色子对相互作用能量,它们是组态中单粒子的量子数、能量和核子等效相互作用强度参数的函数(因与本文讨论无关,不再具体化),其值由再现能谱的参数值决定.

其 16^+ 态的 IBM 组态是 $(g_n^+ g_n^+)_{8} \cdot (g_p^+ g_p^+)_{8}$, 一个单纯组态.而核的 14^+ 态的组态是 $(g_n^+ g_n^+)_{8} \cdot (g_p^+ g_p^+)_{6} \oplus (g_n^+ g_n^+)_{6} \cdot (d_p^+ g_p^+)_{8}$ 与 $(g_n^+ g_n^+)_{8} \cdot (g_p^+ g_p^+)_{6} \oplus (d_n^+ g_n^+)_{6} \cdot (g_p^+ g_p^+)_{8}$, 一个混合组态,可以把它看成是 16^+ 组态发射两粒光子后,组态的重新组合.这里有两种变化模式:一组 g 玻色子配对从 $l=8$ 退耦到 $l=6$ 的模式,与一个 g 玻色子拆对后重新耦合成 d 玻色子的模式.假如物理条件,如中子与质子的不对称性、激发能量的上限值等,限制了这种组合模式的同时发生,而只允许其中一种模式出现时,都会产生一个新的组态,若此改变显著,应该能在实验上观察到这种效应.

例如,若只发生某一类(如中子) g 玻色子配对退耦并发射两粒光子时,有能量关系:

$$E_f = E_{16} - 2\omega_v \hbar, \tag{1'}$$

会在基态带出现一条新能级 E_f .

又若只发生 $g_n \rightarrow d_n$ 时,由于总玻色子数为 4,玻色子对相互作用能量不会大,相应的改变亦可以忽略(计算也表明这种假定是可靠的),其对应能量应有

$$E_{16} = E_{8n} + E_{8p} + E_{8-8np} \\ \approx \mathcal{X}(\epsilon_{ng} + \epsilon_{pg}) + \frac{2}{\sqrt{17}}(f_{n8} + f_{p8}),$$

即有

$$E_{16} \rightarrow E_{14} \approx E_{16} - (\epsilon_{ng} - \epsilon_{nd}) \\ = \epsilon_{ng} + 2\epsilon_{pg} + \epsilon_{nd} + \frac{2}{\sqrt{17}}(f_{n8} + f_{p8}), \tag{3'}$$

而方案中正常的 14^+ 态的能量矩阵应该是

$$E_{14\sigma} = E_{8\sigma} + E_{6\sigma} + E_{8-6np} \approx \left(\begin{array}{l} 3\epsilon_{\sigma g} + \epsilon_{\sigma d} + \frac{2}{\sqrt{17}}f_{\sigma 8} + \frac{1}{\sqrt{13}}\mu_{\sigma 16} \quad \sqrt{\frac{2}{13}}u_{\sigma 106} \\ \sqrt{\frac{2}{13}}u_{\sigma 106} \quad 4\epsilon_{\sigma g} + \frac{2}{\sqrt{17}}f_{\sigma 8} + \frac{2}{\sqrt{13}}f_{\sigma 6} \end{array} \right)$$

当 $\Delta\epsilon = \epsilon_{ng} - \epsilon_{nd}$ 和 $2\omega_c \hbar$ 能区分这四条谱线时,即可确认对应类型的相变发生了。

由于本文的上述揭示,就把描述玻色子拆对顺排相变和玻色子降低角动量的退耦释放 γ 光子相变的物理图像统一了。

3. 计算结果和讨论

当我们试图用微观 sdgIBM-2 方案^[14, 15]再现¹⁰⁰Pd 核的能谱和跃迁,¹⁰⁰Pd核的价核子组态为

$$(2p_{3/2}, 1f_{5/2}, 2p_{1/2}, 1g_{9/2})^{\bar{1}}$$

表 1 实验单粒子能量值¹⁶¹/MeV

nj	$1g_{7/2}$	$2d_{5/2}$	$2d_{3/2}$	$3s_{1/2}$	$1h_{1/2}$	nj	$2p_{3/2}$	$1f_{5/2}$	$2p_{1/2}$	$1g_{9/2}$
中子	0.000	0.962	2.440	2.6972	2.792	质子	0.00	0.77	1.04	3.51

表 2 核子-核子等效相互作用参数/MeV

$G_0^{(n)}$	$G_2^{(n)}$	$G_4^{(n)}$	$K^{(n)}$	$G_0^{(p)}$	$G_2^{(p)}$	$G_4^{(n)}$	$K^{(p)}$	$K^{(np)}$
0.0578	0.0705	0.000209	0.0743	0.0695	0.1000	0.000132	0.0650	0.0710

表 3 sdgIBM-2 算出的 s-, d-, g-玻色子的总能量/MeV

玻色子	s-型	d-型	g-型
中子玻色子	5.507	6.689	6.988
质子玻色子	-15.802	-14.653	-14.131

中子型 d-玻色子和 g-玻色子的激发能分别为 1.182 MeV 和 1.481 MeV ;

质子型 d-玻色子和 g-玻色子的激发能量别为 1.149 MeV 和 1.671 MeV.

$(1g_{7/2}, 2d_{5/2}, 2d_{3/2}, 3s_{1/2}, 1h_{1/2})^{\bar{1}}$, $\bar{4}$ 表示质子空穴数;单粒子能量取新近测定的实验值^[16],见表 1.核子-核子等效相互作用参数见表 2.程序直接计算给出 s-, d-, g-玻色子的总能量(见表 3).

方案成功地再现了其较复杂的基态带和 γ 带的高角动量态能谱(见图 1),并计算出 $E_{16_1^+}^{calc} = 6.898$ MeV, $E_{14_1^+}^{calc} = 6.149$ MeV 和 $E_{12_1^+}^{calc} = 4.802$ MeV.令玻色子真空态为价玻色子基态 $\epsilon_s = 0.000$ MeV,从而直接计算出 d-, g-玻色子的激发能.

若取 $E_i = E_{16_1^+}^{calc}$, $E_f = E_{12_1^+}^{calc}$, $\epsilon_g = \epsilon_{ng} = 1.48$ MeV 和 $\epsilon_d = \epsilon_{nd} = 1.182$ MeV 时,分别将(2)式和(1)式代入(3)式,立即得到 $E_{n1} = 5.071$ MeV 和 $E_{n2} = 5.850$ MeV.它们与¹⁰⁰Pd核的实验观测值 $E_{14_1^+}^{exp} = 5.707$ MeV 和 $E_{14_2^+}^{exp} = 5.918$ MeV^[8, 9]符合得非常好.按照微观 sdgIBM-2 方案,实验观测到的 14_1^+ 态正好是当 16_1^+ 态的一个中子 g-玻色子转变为一个中子 d-玻色子

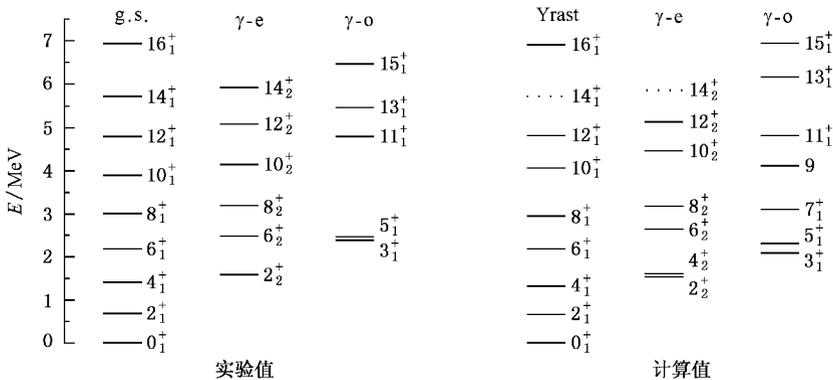


图 1 微观 sdgIBM-2 方案计算出的能谱与实验能谱^[8, 9, 17]的比较

时,伴随出现光辐射而形成的基态带中的一条能级,而 14_2^+ 态正好是 16_1^+ 态退耦的中间态(图 1 中已用虚线标出);而理论方案自身算出的 14^+ 第一激发态 6.149 MeV ,则变成了实验能谱中观测到的第三激发态,与实验观测值 6.135 MeV ^[8]相符合(图 1 中没有标出)。

另外,当取中子和质子的等效电荷分别为 $0.660e$ 和 $0.340e$ 时,可计算出 ^{100}Pd 核的跃迁 $B(E2)$ 的分枝比。目前仅有两组可靠的实测验结果,列出为

$$\frac{B(E2; 2_2^+ \rightarrow 0_2^+)}{B(E2; 2_2^+ \rightarrow 2_1^+)} = \frac{0.3736}{0.5447} = \frac{1.000}{1.458}$$

(新近的实验结果^[17] $1:1.300-1.530$),

$$\frac{B(E2; 5_1^+ \rightarrow 4_1^+)}{B(E2; 5_1^+ \rightarrow 6_1^+)} = \frac{0.1250}{0.0738} = \frac{1.694}{1.000}$$

(新近的实验结果^[17] $1.626-1.706:1$)。

明显地,其理论值与实验结果符合得很好。

然而,质子玻色子的量子相变属于高能量的跨壳激发,不属本方案的讨论对象。至此,模型满意地解释了与 14^+ 态相关的实验结果。正是这两类玻色子量子相变导致了原子核的量子相变。尽管这里的 ^{100}Pd 核是一个特例,但是原子核量子相变的这种可能途径应该是普遍存在的,只是可能由于能谱间距太小不易分辨,或者是不易指认发生相变的量子状

态,而对某些实验结果无从仔细加以研究而已。

4. 结 论

基于微观 IBM 理论,本文提出了转动诱导出玻色子量子相变的一种可能途径。它表明:一旦原子核受到高能激发或作快速旋转,当原子核的价玻色子脱离“集体”而“准游离”出来后,或退耦到中间态,或在拆对后重新组合成低角动量的新玻色子时,将出现新的一类量子相变,给出了统一描述玻色子拆对顺排相变和退耦释放 γ 光子相变的物理图像。正好是这两类玻色子量子相变导致了原子核的量子相变。理论上,本图像可以预言临界转动频率 ω_c 、光子频率 ω_γ 和一条新能级的数值,它们成为确认相变的信号,并能直接接受实验的检验。以 ^{100}Pd 核为例,本图像满意地解释了其三个 14^+ 态的疑惑: 14_1^+ 态是当 16_1^+ 态的一个中子 g -玻色子转变为一个中子 d -玻色子时,伴随 γ 辐射形成的基态带中的一条新能级,是 14^+ 态的 γ -rast 态; 14_2^+ 态正好是 16_1^+ 态退耦时发生 γ 辐射后形成的中间态,而 14_3^+ 态是正常的基态。

感谢与华中师范大学刘庸教授的有益讨论。感谢中国原子能研究院苏宗涤研究员向我们提供了 ^{100}Pd 核新近报道的实验结果。

- [1] Rowe D J, Bahri C, Wijssundera W 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 4394
 [2] Iachello F, Zamfir N V, Casten R F 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 1191
 [3] Casten R F, Kusnezov D, Zamfir N V 1999 *Phys. Rev. Lett.* **82** 5000
 [4] Jolip J, Cejnar P, Dobes J 1999 *Phys. Rev. C* **60** 01303
 [5] Garcia-Ramos F E, Arias J M, Barea J, Frank A 2003 arXiv:nucl-th/0304008-V1
 [6] Iachello F, Arima A 1985 *The Interacting Boson Model* (Cambridge: Cambridge University Press) p109
 [7] Regan P H, Beausang C W, Zamfir N V, Casten R F, Jing-ye Zhang, Yamamoto A D, Caprio M A, Gurdal G, Hecht C, Hutter C, Krucken R, Langdown S D, Meyer D A, Ressler J J 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 152501
 [8] Perez G E, Sohler D, Algorta A, Dombtrüdi Zs, Nyakó B M, Timúr J, Zolnai L, Wyss R, Cederkäll J, Johnson A, Kerek A, Klamra W, Norlin L O, Lipoglavšek M, Fahlander C, Likar A, Palacz M, Atac A, Nyberg J, Persson J, Gizon A, Gizon J, Boston A J, Paul E S, Grawe H, Schubart R, Joss D T, Juutinen S, Mäkelä E,

- Kownacki J, de Poli M, Bednarczyk P, de Angelis G, Seweryniak D, Foltescu D, Roth H A, Skeppstedt Ö, Jerrestam D, Shizuma T, Sletten G, Törmänen S 2001 *Nuclear Physics A* **686** 41
 [9] Zhu S, Garg U, Afanasjev A V, Frauendorf S, Kharraja B, Ghugre S S, Chintalapudi S N, Janssens R V F, Carpenter M P, Kondev F G, Lauritsen T 2001 *Phys. Rev. C* **64** 041302
 [10] Yang Z S, Liu Y, Qi H 1984 *Nucl. Phys. A* **421** 297
 [11] Sang J P, Liu Y 1994 *High Energy Phys. & Nucl. Phys.* **18** 407 (in Chinese) [桑建平、刘庸 1994 高能物理与核物理 **18** 407]
 [12] Shi Z Y, Liu Y, Sang J P 2000 *Chinese Physics (Acta Physica Sinica (Overseas Edition))* **9** 9
 [13] Shi Z Y, Zhao X Z, Tong H 2003 *Chinese Physics* **12** 732
 [14] Zhang Z J, Shi Z Y, Liu Y, Sang J P 1998 *High Energy Phys. & Nucl. Phys.* **22** 169 (in Chinese) [张建军、石筑一、刘庸、桑建平 1998 高能物理与核物理 **22** 169]
 [15] Shi Z Y, Liu Y, Sang J P 1999 *Nuclear Science and Techniques* **10** 235
 [16] Sarkar S, Sarkar M S 2001 *Phys. Rev. C* **64** 014312.

[17] The Sub-Library of Discrete Level Schemts (CENPL-DLS 2) (Data file , the updated edition , Nov. 2003) [布鲁克海国立实验

室(BNL)管理的《评价核结构数据库 ENSDF》中的中国评价核参数库-分离能级子库 DLS]

A possible route of nuclear quantum phase transition induced by rotation *

Shi Zhu-Yi^{1,2)†} Tong Hong¹⁾ Shi Zhu-Ya²⁾ Zhang Chun-Mei²⁾ Zhao Xing-Zhi¹⁾ Ni Shao-Yong¹⁾

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

2) (Department of Base Science , The Second Northwest Institute for Minority , Yinchuan 750021 , China)

(Received 27 July 2006 ; revised manuscript received 5 September 2006)

Abstract

Based on the microscopic IBM-theory , a possible route of boson quantum phase transition induced by rotation is put forward . Once the nucleus is in a high-energy excited or high-speed rotating state , the nucleus would occupy the coexist-phase of collective superfluid phase with single-particle phase , if the energy is enough to realize the boson 's breaking up and aligning in the nucleus , characterized by a more dense spectrum . If the energy is not enough , either of following two cases will happen . When the rotating state of nucleus arrives at critical rotating-frequency ω_c , one case is that a higher-momentum boson may be decoupled from the ' collective state ' as a quantum ' free boson ' , the other case is that the transition from a higher-momentum boson to a lower-momentum boson takes place , and the nucleus remains in a collective state . Both cases are accompanied by the light-emission from the transition from higher excited-state to lower excited-state , and the total superfluous band energy of nuclear system is released by means of excited element , and an energy level appears in the ground-state band , which signifies a quantum phase transition . Just owing to these boson quantum phase transition , nuclear quantum phase transition could happen . Descriptions of boson phase transitions on breaking up and aligning as well as on decoupled and released photons have been united in this physical picture . As an example , this model has been expounded with the mechanism of producing 14_1^+ , 14_2^+ , and 14_3^+ states on the ^{100}Pd nucleus .

Keywords : microscopic sdgIBM-2 approach , quantum phase transition (QPT) , g-boson , ^{100}Pd nucleus

PACC : 2110R , 2160E , 2320L

* Project supported by the Science Foundation of the Education Department of Guizhou Province China (Grant No. QJK2004218 and QJK2004123) .

† E-mail : shizhu yi@ sima . com . cn