

原子核能谱的 Staggering 现象与 四极相互作用

刘玉鑫 龙桂鲁

(清华大学物理系, 北京100084)

孙洪洲

(清华大学物理系, 中科院理论物理研究所, 北京 100080)

摘 要

本文描述了质子-中子相互作用玻色子模型 (IBM2) 中原子核能谱的 Staggering 现象的改善方案, 并利用这一方案对 Ru 和 Pt 同位素偶-偶核计算的结果, 分析和讨论了原子核能谱的 Staggering 现象与四极-四极相互作用的关系。

一、引 言

原子核能谱的 Staggering 现象是偶-偶核集体运动能谱的准 γ 带中奇自旋态能级靠近相邻的偶自旋态能级, 形成双重态 (3_2^+ , 4_2^+), (5_2^+ , 6_2^+), \dots 使得准 γ 带能谱的分布与基带能谱分布相比的不均匀现象。形成这一现象的原因是原子核结构理论中的一个重要问题。

在七十年代中期提出的相互作用玻色子模型 (IBM)^[1-5] 中, 原子核的许多性质得以很好的描述。然而, 对类 $O(6)$ 核, 理论计算有明显的 2_2^+ , (3_2^+ , 4_2^+), (5_2^+ , 6_2^+), \dots 序列, 但实验观察到的准 γ 带能谱却均匀得多^[6]。为解决这一问题并解释其物理机制, 已提出了几种方案^[7-11], 文献[7]认为这种现象是 γ 不稳定相互作用的结果, 文献[12]认为这是由对称性逐步破缺引起的。最近提出的方案^[13, 14]表明, 原子核能谱的 Staggering 现象与核子相干对间的四极相互作用有密切关系。本文简要介绍这一方案及其减弱 Staggering 现象的机制, 然后详细分析原子核能谱的 Staggering 现象与四极相互作用的关系, 最后进行讨论。

二、IBM2 中 Staggering 现象的改善方案及其机制

根据壳模型理论的分析, 原子核中同类核子间的相互作用主要是对力相互作用, 不同类核子间的相互作用主要是四极相互作用^[15, 16]。因此, 在质子-中子相互作用玻色子模型 (IBM2) 中, 哈密顿量通常取为^[15, 16]

$$H = \varepsilon(n_{d\pi} + n_{d\nu}) + \kappa Q_{\pi}^{(2)} \cdot Q_{\nu}^{(2)} + M_{\pi\nu}. \quad (1)$$

有些工作考虑同类核子相干对间的剩余相互作用,把哈密顿量表示为^[17,18,19,20]

$$H = \varepsilon(n_{d\pi} + n_{d\nu}) + \kappa Q_{\pi}^{(2)} \cdot Q_{\nu}^{(2)} + V_{\pi\pi} + V_{\nu\nu} + M_{\pi\nu} \quad (2)$$

其中,

$$n_{d\rho} = \sum_{\mu} d_{\rho\mu}^+ d_{\rho\mu}, \quad (\rho = \pi, \nu) \quad (3)$$

$$Q_{\rho}^{(2)} = (s_{\rho}^+ \tilde{d}_{\rho} + d_{\rho}^+ s_{\rho}) + \chi_{\rho} (d_{\rho}^+ \tilde{d}_{\rho})^{(2)}, \quad (\rho = \pi, \nu) \quad (4)$$

$$V_{\rho\rho} = \frac{1}{2} \sum_{L=0,2,4} \sqrt{2L+1} C_{\rho}^{(L)} [(d_{\rho}^+ d_{\rho}^+)^{(L)} (\tilde{d}_{\rho} \tilde{d}_{\rho})^{(L)}]^{(0)}, \quad (\rho = \pi, \nu) \quad (5)$$

$$M_{\pi\nu} = \xi_2 (s_{\nu}^+ d_{\pi}^+ - s_{\pi}^+ d_{\nu}^+)^{(2)} \cdot (s_{\nu} \tilde{d}_{\pi} - s_{\pi} \tilde{d}_{\nu})^{(2)} \\ + \sum_{\lambda=1,3} \xi_{\lambda} (d_{\pi}^+ d_{\nu}^+)^{(\lambda)} \cdot (\tilde{d}_{\pi} \tilde{d}_{\nu})^{(\lambda)}. \quad (6)$$

尽管从整体上说,利用这一哈密顿量计算的结果与实验结果符合得很好,但是对类 $O(6)$ 核,计算结果仍存在较实验结果明显得多的 Staggering 现象.

然而,在 IBM2 的 $SU^*(3)$ 极限下,哈密顿量为^[11,21]:

$$H = \kappa(Q_{\pi}^{(2)} + Q_{\nu}^{(2)}) \cdot (Q_{\pi}^{(2)} + Q_{\nu}^{(2)}) + \kappa'(L_{\pi} + L_{\nu}) \cdot (L_{\pi} + L_{\nu}). \quad (7)$$

其中,四极算符 $Q_{\rho}^{(2)}$ 如(4)式所示(其中 χ_{ρ} 取为 $\chi_{\pi} = -\frac{\sqrt{7}}{2}$, $\chi_{\nu} = \frac{\sqrt{7}}{2}$; 或 $\chi_{\pi} = \frac{\sqrt{7}}{2}$, $\chi_{\nu} = -\frac{\sqrt{7}}{2}$), 角动量算符 L_{ρ} 表示为

$$L_{\rho} = \sqrt{10} (d_{\rho}^+ \tilde{d}_{\rho})^{(1)}. \quad (\rho = \pi, \nu) \quad (8)$$

由(7)式可知,在这种极限情况下,同类核子相干对间的四极相互作用强度是不同类核子相干对间的四极相互作用强度之半,即

$$Q_{\pi}^{(2)} \cdot Q_{\pi}^{(2)} = Q_{\nu}^{(2)} \cdot Q_{\nu}^{(2)} = \frac{1}{2} Q_{\pi}^{(2)} \cdot Q_{\nu}^{(2)}.$$

其计算结果不存在 Staggering 现象,但某些态有较大的简并度.

比较这两种情况的哈密顿量和计算结果表明,利用哈密顿量

$$H = \varepsilon(n_{d\pi} + n_{d\nu}) + \kappa Q_{\pi}^{(2)} \cdot Q_{\nu}^{(2)} + \kappa' (Q_{\pi}^{(2)} \cdot Q_{\pi}^{(2)} + Q_{\nu}^{(2)} \cdot Q_{\nu}^{(2)}) + M_{\pi\nu}, \quad (9)$$

(其中, κ' 的取值范围满足 $|\kappa'| < \frac{1}{2} |\kappa|$) 可以减弱以前类 $O(6)$ 核能谱计算结果中

明显的 Staggering 现象.

比较(2)式和(9)式可知,两者的区别在于同类核子相干对之间的相互作用的选取不同。(2)式考虑保持角动量为2的核子相干对(近似为d玻色子)数守恒的相互作用,而(9)式考虑与原子核四极形变密切相关的核子相干对间的四极相互作用.为了说明同类核子相干对间的四极相互作用 $Q_{\pi}^{(2)} \cdot Q_{\pi}^{(2)}$ 和 $Q_{\nu}^{(2)} \cdot Q_{\nu}^{(2)}$ 在减弱相互作用玻色子模型的 Staggering 现象中的作用,利用(9)式所示的哈密顿量和一组固定的参数 $\varepsilon = 0.70\text{MeV}$, $\kappa = -0.11\text{MeV}$, $\chi_{\pi} = 0.80$, $\chi_{\nu} = -0.90$, $\xi_1 = 0.42\text{MeV}$, $\xi_2 = \xi_3 = 0.00$, 对不同的

κ' 值分别计算了 ^{104}Ru 的能谱, 观察各能级随 κ' 变化的规律. 准 γ 带各能级随 κ' 变化的规律如图 1 所示. 其结果表明:

- (1) $\kappa' = 0$ 时, 准 γ 带能谱存在明显的 Staggering 现象(事实上, 此时 (9) 式简化为 (1) 式).
- (2) 2_7^+ 态的能量基本上不随 κ' 的变化而变化.
- (3) $4_7^+, 6_7^+, \dots$ 偶自旋态的能级随 $|\kappa'|$ 的增大而升高.
- (4) 随着 $|\kappa'|$ 的增大, 有些奇自旋态(如 $3_7^+, 5_7^+$) 的能级有所下降, 而另一些奇自旋态(如 7_7^+ 等) 的能级却有所上升, 但上升幅度远小于其相邻的偶自旋态能级上升的幅度.

这些规律表明, $Q_{\pi}^{(2)} \cdot Q_{\pi}^{(2)}$ 和 $Q_{\nu}^{(2)} \cdot Q_{\nu}^{(2)}$ 相互作用使准 γ 带中偶自旋态能级上升, 奇自旋态能级下降, 减弱甚至消除了偶自旋态能级相对于其相邻的奇自旋态能级的压缩, 从而使明显的 Staggering 现象减弱.

应用这一方案对 Ru 同位素和 Pt 同位素的计算结果^[13,14]表明, 考虑同类核子相干对间的四极相互作用 $Q_{\pi}^{(2)} \cdot Q_{\pi}^{(2)}$ 和 $Q_{\nu}^{(2)} \cdot Q_{\nu}^{(2)}$ 不仅可以减弱以前计算结果中明显的 Staggering 现象^[19,20], 而且可以较好地描述电四极跃迁几率、第一激发态的电四极矩等电磁性质. 这说明原子核能谱的 Staggering 现象与原子核的同类核子相干对间的四极相互作用有密切关系.

三、Staggering 现象与四极相互作用的关系

自从原子核能谱的 Staggering 现象发现^[22]以来, 人们提出了多种方法描述这一现象^[23-25], 较方便的是利用奇自旋态能级相对于其相邻的偶自旋态能级的位移 $\delta E(I)$ ^[25] 来描述. 位移 $\delta E(I)$ 定义为

$$\delta E(I) = E(I) - \frac{(I+1)E(I-1) - IE(I+1)}{2I+1}, \quad (10)$$

即

$$\delta E(I) = \frac{2I(I+1)}{2I+1} \left[\frac{E(I) - E(I-1)}{2I} - \frac{E(I+1) - E(I)}{2(I+1)} \right]. \quad (11)$$

很显然, 如果 $\delta E(I) > 0$, 则 $E(I)$ 接近于 $E(I+1)$, 而远离 $E(I-1)$. 那么, 对奇自旋态 I_7^+ , 如果 $\delta E(I_7^+) > 0$, 而 $\delta E((I+1)_7^+) < 0$, 或者更一般地 $\delta E(I_7^+) >$

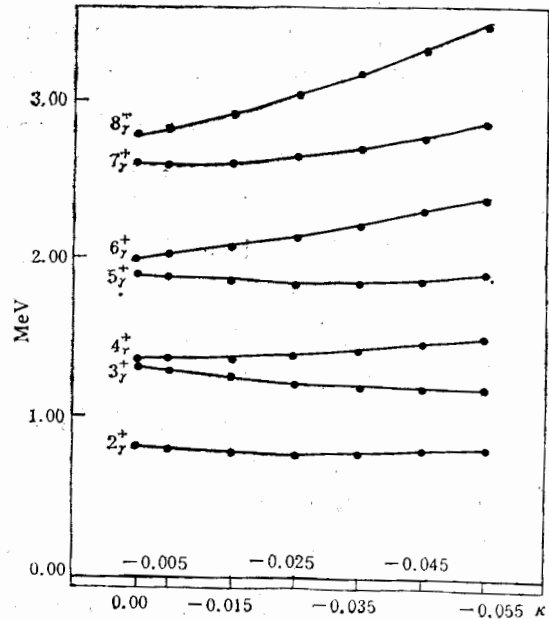


图 1 准 γ 带中各能级随 κ' 变化的规律

$\delta E((I+1)^\dagger)$, 则能谱的 Staggering 现象是由偶自旋态能级相对于奇自旋态能级的压缩造成的. 对大量原子核能谱的分析表明, 稀土区原子核能谱的 Staggering 现象正是由这种原因造成的. 考虑同类核子相干对间的四极相互作用 $Q_\pi^{(2)} \cdot Q_\pi^{(2)}$ 和 $Q_\nu^{(2)} \cdot Q_\nu^{(2)}$ 正好抵消了这种压缩, 从而较好地描述了原子核能谱的 Staggering 现象.

为了定量地描述 Staggering 现象的明显程度, 定义一个量 $I_{sp}(I)$

$$I_{sp}(I) = \delta E(I) - \delta E(I+1). \quad (12)$$

显然, 对准 γ 带中的奇自旋态 I_7^\dagger , $I_{sp}(I_7^\dagger)$ 越大, Staggering 现象越明显; 对偶自旋态 I_7^\dagger , $I_{sp}(I_7^\dagger)$ 越小, Staggering 现象越明显.

为进一步说明 Staggering 现象与核子相干对间的四极相互作用的关系, 利用最近提出的改善 IBM2 中的 Staggering 现象的方案对 Ru 和 Pt 同位素计算的结果, 分别把 Ru 同位素和 Pt 同位素的 $I_{sp}(I)$ 的实验值^[26]随其 κ'/κ 的计算值 (分别如表 1、2 所示)^[13,14]变化的规律绘于图 2 和图 3 中. 其结果表明, 对奇自旋态 I_7^\dagger , κ'/κ 越小, $I_{sp}(I_7^\dagger)$ 越大. 而对偶自旋态 I_7^\dagger , κ'/κ 越小, $I_{sp}(I_7^\dagger)$ 越小. 由此可知, Staggering 现象随着 κ'/κ 值的增大而越来越不明显. 也就是说, 随着同类核子相干对间的四极相互作用 $Q_\pi^{(2)} \cdot Q_\pi^{(2)}$ 和 $Q_\nu^{(2)} \cdot Q_\nu^{(2)}$ 相对于不同类核子相干对间的四极相互作用 $Q_\pi^{(2)} \cdot Q_\nu^{(2)}$ 逐渐增强, 原子核能谱的 Staggering 现象逐渐减弱, 当其达到最大值

$$Q_\pi^{(2)} \cdot Q_\pi^{(2)} = Q_\nu^{(2)} \cdot Q_\nu^{(2)} = \frac{1}{2} Q_\pi^{(2)} \cdot Q_\nu^{(2)}$$

时, 即 $\kappa'/\kappa = 1/2$ 时, Staggering 现象消失. 另一方面, Staggering 现象越明显,

$$Q_\rho^{(2)} \cdot Q_\rho^{(2)} (\rho = \pi, \nu)$$

相互作用相对于 $Q_\pi^{(2)} \cdot Q_\nu^{(2)}$ 相互作用越弱.

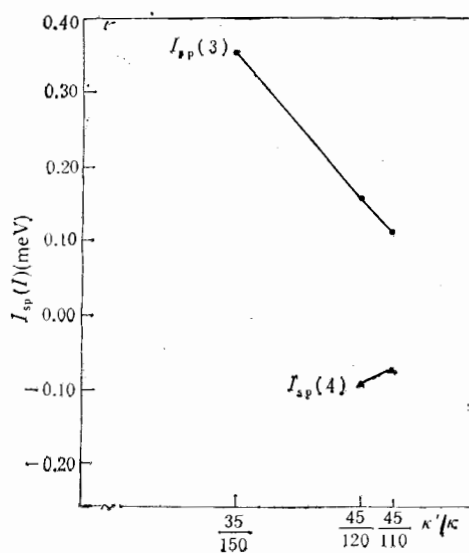


图 2 Ru 同位素的 $I_{sp}(I)$ 随 κ'/κ 变化的关系

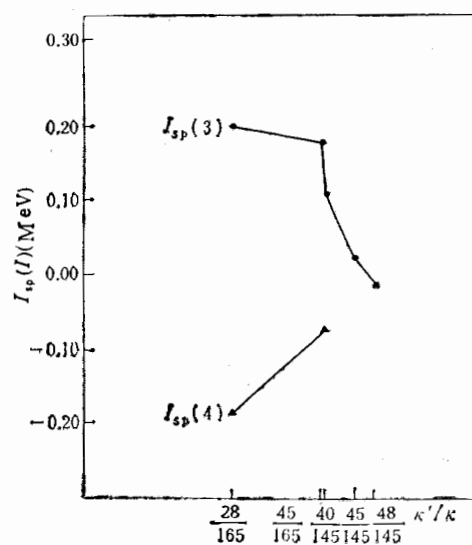


图 3 Pt 同位素的 $I_{sp}(I)$ 随 κ'/κ 变化的关系

表 1 计算 Ru 同位素能谱所用参数^[13]

	$\varepsilon(\text{MeV})$	$\kappa(\text{MeV})$	$\kappa'(\text{MeV})$	χ_ν	χ_π	$\xi_1(\text{MeV})$	$\xi_2 = \xi_3(\text{MeV})$
⁹⁸ Ru	0.825	-0.150	-0.054	-0.100	0.800	0.300	0.000
¹⁰⁰ Ru	0.800	-0.150	-0.035	-0.100	0.800	0.350	0.000
¹⁰² Ru	0.750	-0.120	-0.045	-0.500	0.800	0.400	0.000
¹⁰⁴ Ru	0.700	-0.110	-0.045	-0.900	0.800	0.420	0.000

表 2 计算 Pt 同位素能谱所用参数^[14]

	$\varepsilon(\text{MeV})$	$\kappa(\text{MeV})$	$\kappa'(\text{MeV})$	χ_ν	χ_π	$\xi_1(\text{MeV})$	$\xi_2 = \xi_3(\text{MeV})$
¹⁸⁸ Pt	0.480	-0.165	-0.028	0.500	-0.900	0.285	-0.085
¹⁹⁰ Pt	0.460	-0.145	-0.040	0.535	-0.900	0.285	-0.085
¹⁹² Pt	0.460	-0.145	-0.045	0.600	-0.900	0.285	-0.085
¹⁹⁴ Pt	0.460	-0.145	-0.048	0.750	-0.900	0.285	-0.085
¹⁹⁶ Pt	0.460	-0.165	-0.045	0.800	-0.900	0.285	-0.085
¹⁹⁸ Pt	0.460	-0.165	-0.040	0.500	-0.900	0.285	-0.085

四、讨 论

以上根据 IBM2 中引入同类核子相干对间的四极-四极相互作用 $Q_\pi^{(2)} \cdot Q_\pi^{(2)}$ 和 $Q_\nu^{(2)} \cdot Q_\nu^{(2)}$ 对 Ru 和 Pt 偶-偶同位素应用的结果, 分析了原子核能谱的 Staggering 现象与四极-四极相互作用的关系. 分析结果表明, 原子核能谱的 Staggering 现象是由原子核内同类核子相干对间的四极-四极相互作用与不同类核子相干对间的四极-四极相互作用的竞争决定的, 随着 $Q_\rho^{(2)} \cdot Q_\rho^{(2)}$ ($\rho = \pi, \nu$) 相互作用相对于 $Q_\pi^{(2)} \cdot Q_\nu^{(2)}$ 相互作用的逐渐增强, 原子核能谱的 Staggering 现象逐渐减弱. 并且, 原子核能谱的 Staggering 现象是核子相干对间的四极-四极相互作用模式的反映.

本文的分析表明, 引入 $Q_\pi^{(2)} \cdot Q_\pi^{(2)}$ 和 $Q_\nu^{(2)} \cdot Q_\nu^{(2)}$ 相互作用可以较好地描述原子核的能谱、电四极跃迁几率及电四极矩. 利用这种方案能否同时使原子核的其它性质(如相互作用玻色子模型中尚未很好解决的磁偶极跃迁等)得以较好地描述有待进一步研究.

在本文工作进行过程中, 韩其智教授、张玫教授、赵恩广、王淮淮研究员及王稼军同志进行了许多有益的讨论, 在此表示感谢.

参 考 文 献

- [1] A. Arima and F. Iachello, *Ann. Phys. (N. Y.)*, **99**(1976), 253.
- [2] A. Arima and F. Iachello, *Ann. Phys. (N. Y.)*, **111**(1978), 201.
- [3] A. Arima and F. Iachello, *Ann. Phys. (N. Y.)*, **123**(1979), 468.
- [4] A. Arima, T. Otsuka, F. Iachello and I. Talmi, *Phys. Lett.*, **66B**(1977), 205.
- [5] T. Otsuka, A. Arima, F. Iachello and I. Talmi, *Phys. Lett.*, **76B**(1978), 139.
- [6] R. F. Casten, *International Symposium on Nuclear Shell Model*, edited by M. Vallieres and B. H. Wildem-

- thal, (World Science, 1985).
- [7] R. F. Casten and P. Van Brentano, *Phys. Lett.*, **152B**(1985), 22.
R. F. Casten and P. Van Brentano, *Nucl. Phys.*, **A439**(1985), 289.
- [8] H. Z. Sun, M. Zhang and D. H. Feng, *Phys. Lett.*, **163B**(1985), 7.
- [9] P. Van Isacher, K. Heyde, M. Waroquier and G. Wenes, *Nucl. Phys.*, **A380**(1982), 383.
P. Van Isacher, K. Heyde, M. Waroquier and G. Wenes, *Nucl. Phys.*, **A398**(1983), 235.
- [10] G. V. Berghe, H. E. De Meyer and P. Van Isacker, *Phys. Rev* **C32**(1985), 1049.
- [11] A. E. L. Dieperink and R. Bijker, *Phys. Lett.*, **116B**(1982), 77.
- [12] 曾谨言、孙洪洲, 原子核结构理论(上海科学技术出版社, 1987年), 235.
- [13] G. L. Long, Y. X. Liu and H. Z. Sun, Staggering in Nuclear Spectrum and the Proton-Neutron Interacting Boson Model, To be published on *J. Phys. G*.
- [14] Y. X. Liu, G. L. Long and H. Z. Sun, The IBM2 description of the Pt isotopes, Submitted to *Nucl. Phys. A*.
- [15] T. Otsuka, A. Arima and F. Iachello, *Nucl. Phys.*, **A309**(1978), 1.
- [16] T. Otsuka, Ph. D. Thesis, University of Tokyo, 1979.
- [17] F. Iachello, G. Puddu, O. Scholten, A. Arima and T. Otsuka, *Phys. Lett.*, **89B**(1979), 1.
- [18] O. Scholten, Ph. D. Thesis, University of Groningen, 1980.
- [19] R. Bijker, A. E. L. Dieperink, O. Scholten and R. Spanhoff, *Nucl. Phys.*, **A344**(1980), 207.
- [20] P. Van Isacker and G. Puddu, *Nucl. Phys.*, **A343**(1980), 125.
- [21] A. E. L. Dieperink and I. Talmi, *Phys. Lett.*, **131B**(1983), 1.
- [22] A. Bohr and B. R. Mottelson, Nuclear Structure, Vol.2, (Benjamin, New York, 1975)
- [23] C. A. Fields, K. H. Hicks, R. A. Ristinen, F. W. N. de Boer, P. M. Walker, J. Borggreen and L. K. Peker, *Nucl. Phys.*, **A389**(1982), 218.
- [24] C. A. Fields, K. H. Hicks, R. A. Ristinen, F. W. N. de Boer, L. K. Peker, R. J. Peterson and P. M. Walker, *Nucl. Phys.*, **A422**(1984), 215.
- [25] D. Bonatsos, *Phys. Lett.*, **200B**(1988), 1.
- [26] M. Sakai, *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, **31**(1984), 399.

Staggering Phenomenon in Nuclear Energy Spectrum and Quadrupole-Quadrupole Interaction

LIU YUXIN LONG GUILU

(Department of Physics, Qinghua University, Beijing 100084)

SUN HONGZHOU

(Department of Physics, Qinghua University, Beijing 100084)(Institute of Theoretical
Physics, Academia Sinica, Beijing 100080)

ABSTRACT

An improved treatment on staggering phenomenon in nuclear energy spectrum in the framework of IBM2 is described in this paper. The $\kappa Q_{\pi}^{(2)} \cdot Q_{\nu}^{(2)} + \kappa'(Q_{\pi}^{(2)} \cdot Q_{\pi}^{(2)} + Q_{\nu}^{(2)} \cdot Q_{\nu}^{(2)})$ hamiltonian is introduced to treat the even-even isotopes of Ru and Pt. The relation between the staggering phenomenon and the quadrupole-quadrupole interaction is discussed.