

A=130 附近核谱结构相变的 IBM-2 描述*

赵晓凤 李先胤

(安徽大学物理系, 合肥 230039)

摘 要

在以玻色子展开为基础的 IBM 微观方案框架下, 本文研究了 Ba、Sm 同位素的低能核谱的相变, 表明该方案能够对相变给出统一的描述。

一、引 言

以玻色子展开和修正的 Jancovici-Schiff (MJS) 代换为基础的关于相互作用玻色子模型 (IBM) 的微观理论^[1-4], 在描述原子核的低能集体运动方面已取得了较大的成功。在以前的工作中均采用了最大 F 旋截断^[5], 取中子和质子自由度的对称近似。本文没有采取上述近似, 而是在对 NPBS^[6] 扩充后, 直接从 IBM-2 哈密顿量出发求解, 对 Ba 和 Sm 同位素系列进行了计算, 系统分析了该方案描写各种相变的能力。实验和唯象工作表明^[7,8], Ba、Sm 和 Xe 同位素系列的低能激发谱存在明显的相变。我们的计算发现, Ba 同位素的核谱结构具有从转动型到 γ 不稳型的相变, 而 Sm 同位素的核谱结构具有从振动型到转动型的相变。从新近完成的 Xe 同位素核谱的计算结果^[9]来看, Xe 同位素核谱结构呈现振动型到 γ 不稳型的相变。至此, 我们看到, 文献 [2] 中方法的推广, 可以对各种相变进行统一描述。

二、理论要点

本文所采用的微观方案的出发点是壳模型组态和核子-核子间的有效相互作用。设有 x 个价中子和 x' 个价质子分别处于 s 和 s' 单粒子能级上。壳模型组态为:

$$(i_1 i_2 \cdots i_s)^x (i'_1 i'_2 \cdots i'_{s'})^{x'},$$

核子-核子有效相互作用取为对力、四极对力和四极力^[10]:

对力:
$$-g_{\sigma} P^{(\sigma)} P^{(\sigma)+},$$

本文 1990 年 1 月 13 日收到。

* 本文得到国家教委博士点基金和安庆师院自然科学基金的部分资助。

四极对力:

$$-\frac{1}{2} G_{\sigma} \sum_{\mu} P_{\mu}^{(\sigma)} P_{\mu}^{(\sigma)+}, \quad (\mu = 0, \pm 1, \pm 2) \quad (2.1)$$

四极力:

$$-\frac{1}{2} K_{\sigma} \sum_{\mu i j} q_{\mu}^{(\sigma)}(i) q_{\mu}^{(\sigma)+}(j),$$

其中, $\sigma = n, p$ 分别标志价中子和价质子, $g_{\sigma}, G_{\sigma}, K_{\sigma}$ 是相互作用强度参量.

质子-中子间相互作用选为四极-四极力:

$$-\frac{1}{2} K_{np} \sum_{\mu} \left(\sum_i q_{\mu}^{(n)}(i) \right) \left(\sum_j q_{\mu}^{(p)}(j) \right)^+, \quad (2.2)$$

体系有效相互作用总哈密顿量为:

$$H_f = H_f^{(\sigma)} + H_f^{(np)}, \quad (2.3)$$

其中,

$$H_f^{(\sigma)} = \sum_a E_a^{(\sigma)} a_a^{(\sigma)+} a_a^{(\sigma)} + \sum_{\alpha\beta\gamma\delta} P_{\alpha\beta\gamma\delta}^{(\sigma)} a_{\alpha}^{(\sigma)+} a_{\beta}^{(\sigma)+} a_{\gamma}^{(\sigma)} a_{\delta}^{(\sigma)}, \quad (2.4)$$

$$H_f^{(np)} = \sum_{\alpha\beta\gamma\delta} P_{\alpha\beta\gamma\delta}^{(np)} a_{\alpha}^{(n)+} a_{\beta}^{(p)+} a_{\gamma}^{(p)} a_{\delta}^{(n)}, \quad (2.5)$$

式中 $P_{\alpha\beta\gamma\delta}^{(\sigma)}$ 和 $P_{\alpha\beta\gamma\delta}^{(np)}$ 为相互作用矩阵元.

按照 Dyson 玻色子展开,把价核子的壳模型空间映射到理想玻色子空间,则 H_f 的玻色子像为^[5]:

$$H_B = H_B^{(\sigma)} + H_B^{(np)}. \quad (2.6)$$

$A_{\alpha\beta}^{(\sigma)}$ 为理想玻色子算符,按下式进行线性组合:

$$Q_{\gamma\pi JM}^{(\sigma)+} = \sum_{\alpha < \beta} \chi_{\alpha\beta}^{\sigma\gamma\pi J}(M) A_{\alpha\beta}^{(\sigma)+}, \quad (2.7)$$

于是得到具有集体性的 Q 玻色子算符. (2.7) 式中的 γ 是相同 πJ 下能量值的编序, $\chi_{\alpha\beta}^{\sigma\gamma\pi J}$ 为组合系数. 在适当的有效相互作用下, $\gamma = 0$ 的 $Q_{0+00}^{(\sigma)+}$ 和 $Q_{0+2m}^{(\sigma)+}$ 有着最强的集体性,可用其作为主要成份构造出 s, d 玻色子:

$$\begin{aligned} s_{\sigma}^{+} &\sim Q_{0+00}^{(\sigma)+}, \\ d_{\sigma}^{+} &\sim Q_{0+2m}^{(\sigma)+}. \end{aligned} \quad (2.8)$$

经过了 s - d 截断,由 (2.6) 式就得到微观 IBM-2 哈密顿量:

$$h = h^{(\sigma)} + h^{(np)}, \quad (2.9)$$

可用来描述低能集体运动态.

在选定壳模型组态和给定单粒子能量以及相互作用参数后,对 h 进行对角化,算出本征值和相应的本征矢.

三、计算结果及讨论

Ba 同位素的中子和质子均处于 50—82 主壳内,计算中单粒子能级的能量见表 1.

图 1 给出了 Ba 偶同位素低能谱的计算结果与实验数据的比较. 为清楚起见,我们把激发谱分成准 β 带和准 γ 带三组. 可以看出: 在能谱结构方面两者定性相符,

表1 单粒子能级的能量 (MeV)

	$2d_{5/2}$	$1g_{7/2}$	$1h_{11/2}$	$2d_{3/2}$	$3s_{1/2}$
Neutron	4.00	4.88	5.70	6.24	7.24
Proton	4.54	4.00	5.80	7.47	6.54

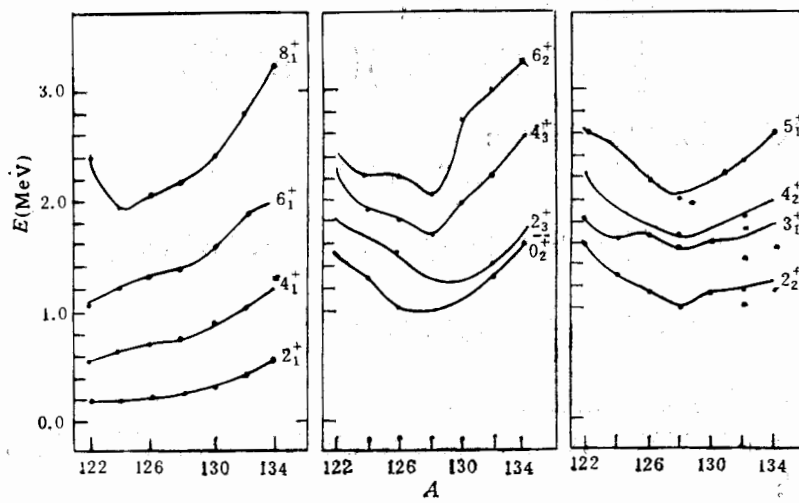


图1 Ba 同位素计算能谱与实验谱的比较
实验值取自文献 [11], 图中实线表示理论值.

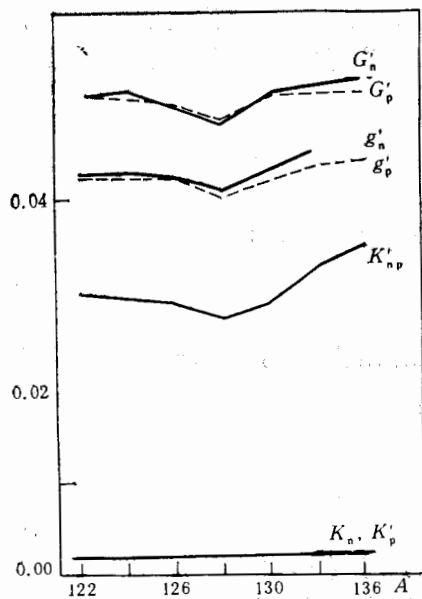


图2 相互作用参数与A的关系

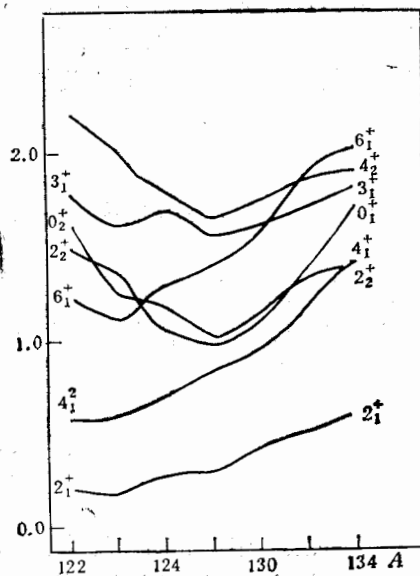


图3 Ba 同位素的相变

特别是对于实验资料丰富的准基带在定量上符合得很好, 而对于实验数据较少的准 β 带和准 γ 带, 也取得了与唯象工作^[8,10,12]一致的结果. 我们所取的 IBM-2 哈密顿量, 成功地描写了作为中子玻色子数的函数的 2_1^+ 明显下降 (其它态亦类似). 在 γ 带、 β 带中我们也看到了 staggering 效应^[13]. 图 2 给出计算中选取的有效相互作用参数.

为了考察 Ba 核素的相变, 我们把图 1 中的 2_1^+ 、 4_1^+ 、 2_2^+ 、 0_2^+ 、 4_2^+ 、 6_1^+ 和 3_1^+ 七个能级的计算值集中到图 3. 由该图可以明显看出: ^{122}Ba 核有 $E_{4_1^+}/E_{2_1^+} \approx 3.3$, $E_{6_1^+}/E_{4_1^+} \approx 2.09 \dots$, 即各能带的能级间距符合 $l(l+1)$ 规律, 是典型的转动谱结构. ^{134}Ba 的 $E_{4_1^+}/E_{2_1^+} \approx 2.31$, $E_{2_2^+}/E_{2_1^+} \approx 1.91^{[13]}$, 且 4_1^+ 、 2_2^+ 构成两重态. 0_2^+ 、 4_2^+ 、 3_1^+ 、 6_1^+ 构成四重态 (quartet). 而且 0_2^+ 态果然低于 3_1^+ 态 (实验上它们是靠近的或者 0_2^+ 稍高于 3_1^+)^[14], 呈现 γ 不稳谱的特征. 这表明: Ba 同位素的能谱存在的从转动型到 γ 不稳型的相变结构在我们的方案中得到相当好的再现.

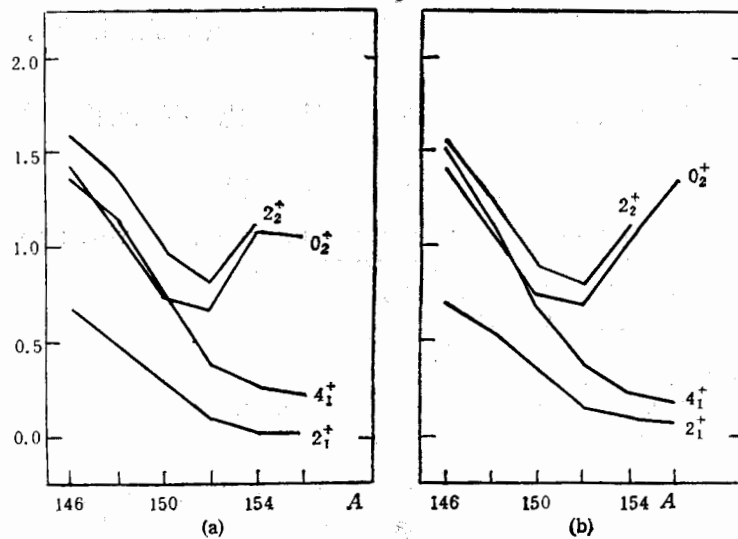


图 4 Sm 同位素的相变
(a)实验值^[11], (b)本文计算值

$^{146-156}\text{Sm}$ 同位素能谱如图 4. 由图能清楚看出 Sm 核谱相变的 2_1^+ 、 4_1^+ 、 2_2^+ 和 0_2^+ 四个能量的本文计算值和实验值. 当核子数较少时 ($^{146,148}\text{Sm}$) 4_1^+ 、 2_2^+ 和 0_2^+ 的能量大约是 2_1^+ 能量的 2 倍, 这是 Bohr 模型中所解释的两个四极振动声子形成的三重态, 是振动谱的典型特征. 2_2^+ 和 0_2^+ 态的能量随核子数的增加先象 2_1^+ 、 4_1^+ 那样下降直到 ^{152}Sm , 它是过渡核. A 再增大时, 2_2^+ 和 0_2^+ 突然上升, 分别形成 γ 、 β 转动带带头, 即 Sm 同位素核谱存在由振动型到转动型的相变. 最近的工作表明^[9]: Xe 同位素核谱具有从振动型向 γ 不稳型的相变. 上述的三种相变和唯象 IBM 所说的三种典型极限, 可用一个对称三角图予以描绘, 见图 5. 三角形的三个顶点分别代表振动型、转动型和 γ 不稳型的典型谱结构, 而三条边分别代表两种典型谱之间 (不包括第三种结构) 的相变. 显然, 使用我们的方案是可以对各种相变做出统一协调的解释.

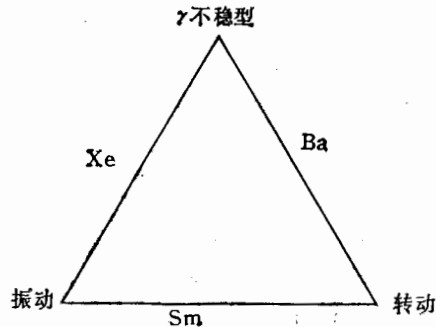


图5 IBM 对称三角形

综上所述,我们证实 $A = 130$ 附近的核是可以由(2.9)式的哈密顿量来描写,特别是中子玻色子数比较少的同位素,IBM-2 是较好的近似。对于两主壳中间核素 0_1^+ 和 2_1^+ 间隔大大减小,这可能是由于中子和质子间强吸引四极相互作用所致。

作者感谢刘庸副教授的建议和帮助,并对王玉成同志的有益讨论表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Interacting Boson-Fermi System in Nuclei, ed. F. Iachello, (Plenum, New York, 1981).
- [2] T. S. Yang, Y. Liu and H. Qi, *Nucl. Phys.*, **A421**(1984), 297c.
- [3] 杨泽森、刘庸、田晓岭,高能物理与核物理,**6**(1982),472.
- [4] 杨泽森,高能物理与核物理,**9**(1985),341.
- [5] 刘庸,博士论文,北京大学,1984.
- [6] T. Otsuka and N. Yoshida, JAERI-M Report, 85-094.
- [7] R. F. Casten and P. Von Brentano, *Phys. Lett.*, **152**(1985), 22.
- [8] G. Puddu, O. Scholten and T. Otsuka, *Nucl. Phys.*, **A384**(1980), 109.
- [9] 王玉成、刘庸,高能物理与核物理,**14**(1990),247.
- [10] O. Castanos, P. Federman, A. Frank and S. Pittel, *Nucl. Phys.*, **A379**(1982), 61.
- [11] M. Saika and Y. Gono, Quasi-ground, Quasi-bata, Quasi-gamma Bands, INS-J160, (July, 1979).
- [12] P. Von Brentano, A. Gelberg, S. Harissopolos and R. F. Casten, *Phys. Rev.*, **c38**(1988), 2386.
- [13] R. F. Casten et al., *Nucl. Phys.*, **A439**(1985), 289.
- [14] A. Novoselsky and I. Talmi, *Phys. Lett.*, **B172**(1986), 139.

Microscopic IBM-2 Description of the Phase Transition of Nuclear Spectra Near $A=130$

ZHAO XIAOFENG LI XIANYIN

(Anhui University, Hefei 230039)

ABSTRACT

The phase transition of low-lying energy spectrum structure for Ba isotopes and Sm isotopes are studied in the framework of microscopic IBM-2 based on the boson expansion. It seems possible to describe the phase transition in a unified way within the approach.