

IBM-2 有效玻色子数和它在 系统学中的应用*

赵玉民 顾金南

(南京大学物理系 南京 210008) (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)
1993-12-13 收稿

摘 要

总结并讨论了中重核区域偶偶核 IBM-2 有效玻色子数随质子数和中子数变化的情况,并利用这一结果给出稀土区和铜系区偶偶核 E_{2+} 随 N_{π}^{eff} 、 N_{ν}^{eff} 变化的系统学结果,注意到这两个区域 E_{2+} 随 $N_{\pi}^{\text{eff}} \times N_{\nu}^{\text{eff}}$ 变化的特点,并给以定性解释。此外,本文还采用有效玻色子数的概念,对铜系区的 $B(M1)$ 系统学性质作了预言。

关键词 有效玻色子数, IBM-2, $B(M1)$ 强度,子壳。

本文将给出 $E_{2+} \sim N_{\pi}^{\text{eff}} \times N_{\nu}^{\text{eff}}$ (N_{π}^{eff} 和 N_{ν}^{eff} 分别是有效质子玻色子数和有效中子玻色子数的标记)的系统学结果。而对于一个偶偶核性质系统学研究的评价,主要看选取变量时取值是否合理,是否揭示了新的规律性以及能否从最基本的微观理论予以解释它。因此我们首先考察变量的取值。已经知道,考虑到子壳的存在和 Pauli 效应等因素,简单使用 IBM 玻色子数(即价核子数之半)并不好^[1-6],于是人们求助于有效玻色子数的概念。结果表明,引入有效玻色子数的概念可以更有效地使用 IBM-2 这一简单实用的系统学分析工具^[1,11],对简化数值计算参数^[1,12](计算结果也很好)亦有较大的帮助。

考虑到 IBM 的微观基础研究关于有效玻色子数推导的各种问题及困难,以及已有的关于有效玻色子数的各种唯象方法的局限性和不确定性,我们找到一种简单的半经验方法,唯一地给出了 $Z = 40, 64$ 子壳附近的偶偶核有效质子玻色子数(记为 N_{π}^{eff}),并同样处理了 $A \geq 70$ 的偶偶核(已列成表见文献[1])。这种方法本质上与文献[5]是一样的,即把玻色子数也作为参数时,可以找到某一个值用它作为有效玻色子数,而且仅用简单的参数就可以使结果与实验数据很好地吻合(文献[1]),特别是我们这样给出的有效玻色子数,除了几个子壳及大变形区域外,其它区域都与 IBM 关于玻色子数为价核子数之半的假定一致,而不一致处均有各自的微观基础。

为了直观的方便,我们绘制了 $A \geq 70$ 的偶偶核 N_{π}^{eff} 、 N_{ν}^{eff} 在不同大壳中随质子数 Z 和中子数 N 的变化情况(如图1所示)。需要说明的是,图1中的每一点与核素并不是一一对应的。同一个 Z, N 不同的 N_{π}^{eff} 可能不一样;另一方面同样的 N ,也可能因 Z 的

* 国家攀登计划、国家自然科学基金、国家教委博士点基金和中国科学院重大课题基金资助。

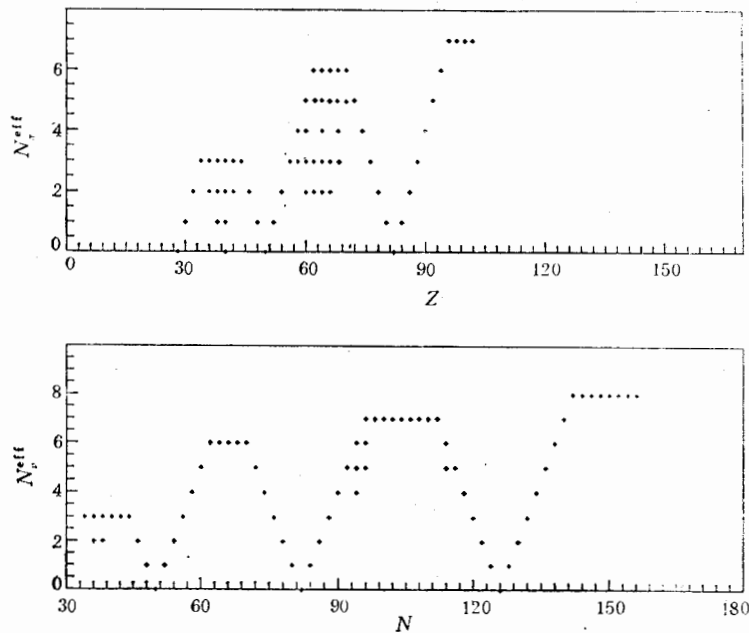


图 1

不同 N_p^{eff} 而有所不同。这是由于质子(中子)子壳的影响与中子(质子)不同的轨道占据有非常密切的关系。基于同样的理由, N_p^{eff} 、 N_n^{eff} 相同,也不一定对应同一个核素,如大变形下 N_p^{eff} 、 N_n^{eff} 的饱和性使这个区域的一个 N_p^{eff} 、 N_n^{eff} 对应多个核素。

从图 1 可以看到, N_p^{eff} 、 N_n^{eff} 在价核子数较少时,与 IBM-2 的简单假定 (N_p^{eff} 、 N_n^{eff} 分别为价质子数价中子数的一半)基本一致。而在 $Z = 40, 64$ 子壳附近的 N_p^{eff} 的数值抖动得很厉害,故此,有效玻色子数的研究最早起源于这两个区域偶偶核性质的研究^[2-6]。除了这两个区域外,在 $N = 38, 56, 96, 114$ 附近, N_n^{eff} 也有几个模糊区域,但是其子壳效应对有效玻色子数的影响小得多,这与文献[7]是一致的。在每一大壳中间,有效玻色子数均有一个平台。表明 N_p^{eff} 、 N_n^{eff} 在大壳中间存在着饱和性质。

我们在此对有效玻色子数作一个说明: ($Z=40$ 和 64 子壳的微观基础已有很多解释说明,我们的结果与这方面文献的所有结果均不矛盾,见文献[1]这里不再赘述。) IBM-2 的有效玻色子数在大变形下的饱和,现在也有了一定的微观基础。从已有的理论结果可以认定: N_p^{eff} 、 N_n^{eff} 之所以会出现饱和,是由于泡里原理的限制。IBM 没有考虑全部的 Pauli 效应,在大变形情况下需要用此来约束之^[9,10]。从费米子动力学对称性模型(简称为 FDSM)来看: IBM 是 FDSM 在忽略 Pauli 效应的极限情况。而在大变形区域,大壳内的价核子数很多,忽略 Pauli 效应是不合适的。根据 FDSM, IBM 的玻色子数应当由过去的 $1/2$ 价核子数代替为正常宇称态(normal parity state)上的价核子数之半,反常宇称态(abnormal parity state)上填充的核子数将不贡献玻色子数,这样给出的有效玻色子数会有一个饱和值,50—82 大壳,该值为 5(6);82—126 大壳,该值为 7—8(7);126—?该值为 10(8)(括号内的数值是图 1 的饱和值),两者是可比的。我们也注意到了

Casten 等的工作^[2],他们认为大变形偶偶核的波函数重叠较小, np 作用强度相对降低, 等效地引入有效玻色子数, 这个有效玻色子数的值比通常的价核子数之半要小一些。而根据 IBM 的玻色子数的取值及 IBM-2 的解析结果, 达到半满壳之前不可能出现饱和如 $B(E2)$ 的饱和。我们还注意到最近 Yoshinaga^[5] 关于 IBM 微观基础的报告中提到的 Nakata 和 Arima 的一篇未发表的工作, 他们计算给出的 50—82 大壳有效玻色子数也因 Pauli 原理的限制出现了明显的饱和。他们给出的饱和值(≈ 6)与图 1 是一样的。在上述有效玻色子数的概念下, $B(E2)$ 和 $B(M1)$ 的饱和自然出现, 并且它们的饱和值转变点是相同的。在稀土区这个推论与实验数据^[6] (称为稀土区大变形偶偶核 $B(M1)$ 和 $B(E2)$ 的饱和性及强关联性) 完全一致, 饱和值也可以在数值上拟合^[1]。到目前为止, 我们所掌握的资料都支持上面的结论。因此我们的半经验方法是有意义的, 给出的有效玻色子数及其结论是可靠的。它不仅细致、系统, 而且克服了已往工作在方法上(粗糙)和结果上(误差范围太大)的欠缺。把它用于偶偶核系统学是完全可以的。

有了有效玻色子数, 当然可以用它作数值计算, 只要很少几个相当“规则”的参数, 就可以给出很不错的结果(特别是有些核, 不用有效玻色子数作 IBM 数值计算, 结果与实验结果拟合不好)。而其更重要的应用是, 根据实际需要给出各物理量的系统学结果, 对已有的系统学做进一步的补充和完善。如文献 [1] 对内禀电四极矩的系统学研究。图 2 给出了采用有效玻色子数的 $E_{2_1^+}$ 随 $N_{\pi}^{\text{eff}} \times N_{\nu}^{\text{eff}}$ 的变化关系, 与过去的结果^[11] 相比简单得多, 两个区域内 $E_{2_1^+}$ 随 $N_{\pi}^{\text{eff}} \times N_{\nu}^{\text{eff}}$ 的变化可以用一条曲线描述得很好。从图 2 可以看到两点新的特征: (1) $E_{2_1^+}$ 随 $N_{\pi}^{\text{eff}} \times N_{\nu}^{\text{eff}}$ 趋向饱和比 $B(E2)$ 或 $B(M1)$ 趋向饱和快得多; (2) $E_{2_1^+}$ 随 $N_{\pi}^{\text{eff}} \times N_{\nu}^{\text{eff}}$ 的饱和值转变点对稀土区和铜系区基本相同。两者都出现在 $N_{\pi}^{\text{eff}} \times N_{\nu}^{\text{eff}} \approx 10$ 左右。

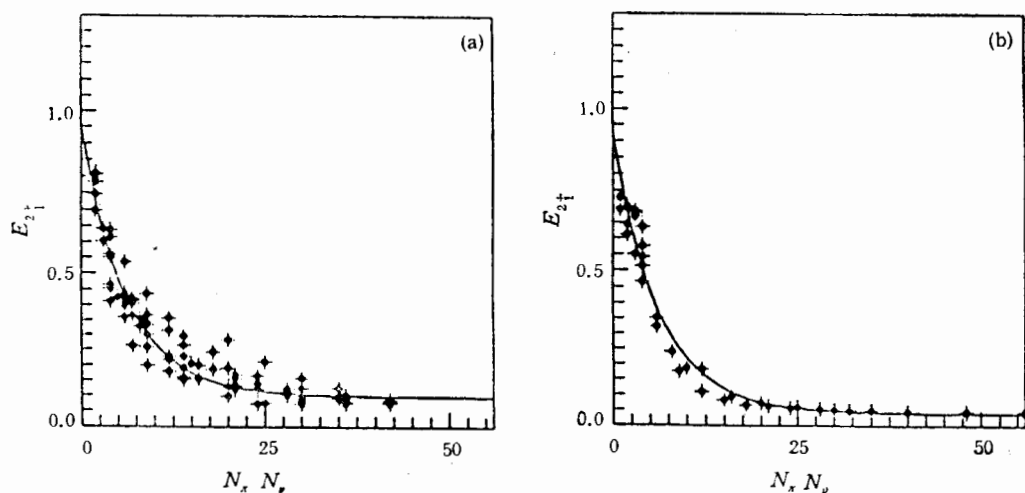


图 2

显然, $E_{2_1^+}$ 随 $N_{\pi}^{\text{eff}} \times N_{\nu}^{\text{eff}}$ 的饱和不能用 Pauli 原理解释。现在我们先分析一下这两个特征为什么这么久没有被注意到以及这里系统学结果的合理性, 然后简单地说明一下这两个特征的物理意义。

我们考虑 Casten, Frank^[11] 的稀土区 $E_{2_1^+}$ 随 $N_{\pi}^{\text{eff}} \times N_{\nu}^{\text{eff}}$ 变化的系统学结果, 他们的结果分为 $Z \leq 64$, $N < 90$ 和其它情况两种类型. 其中第二种情况 $E_{2_1^+}$ 随 $N_{\pi}^{\text{eff}} \times N_{\nu}^{\text{eff}}$ 的饱和相当慢, 几乎和 $B(E2)$ 的饱和“速度”差不多, 因此特征(1)很难观察到. 通过我们对于有效玻色子数的分析, 现在已经知道, 过去给出的有效玻色子数的方法太粗略. 虽然 Casten, Frank 等的 $E_{2_1^+}$ 的系统结果也很光滑, 但是同一个大壳内的两组曲线的系统学是不能令人满意的. 而且由于稀土区 $E_{2_1^+}$ 两种饱和速度的存在, 它与铜系区的饱和值转变点无法比较, 因此也就给不出特征(2). 但是从他们的系统学结果中仍然可以看到, 稀土区偶偶核在 $Z \leq 64$, $N < 90$ 的情况下 $E_{2_1^+}$ 随 $N_{\pi}^{\text{eff}} \times N_{\nu}^{\text{eff}}$ 的饱和相当快, 与本文 $E_{2_1^+}$ 的饱和速度差不多. 也就是说, 即使 $N_{\pi}^{\text{eff}} \times N_{\nu}^{\text{eff}}$ 不取上面的值, 稀土区 ($Z \leq 64$, $N < 90$) 的情况和铜系区仍然在几乎相同的饱和值转变点处趋于饱和, 并且在各自的大壳内都比 $B(E2)$ 和 $B(M1)$ 趋向饱和快得多, 因此本文给出的系统学结果都是有意义的.

设 J 为转动惯量, β 为形变参数, B 为惯性参量, 对大变形核 $J = \alpha B \beta^2$, 因为 $E_{2_1^+} = \frac{6\hbar^2}{J}$, 所以 $E_{2_1^+} = \frac{\alpha'}{B\beta^2}$, α 和 α' 都是常数. 由于 $B(E2) \propto \beta^2$, $B(E2)$ 的饱和仅与 β^2 相联系, 而 $E_{2_1^+}$ 的饱和不仅与 β^2 相联系, 并且与 B 有关, B 不是常数, 所以 $E_{2_1^+}$ 与 $B(E2)$ 或 $B(M1)$ 的变化不会一样. 下面采用 np 四极相互作用与同类核子之间的对力竞争关系, 对 $E_{2_1^+}$ 在稀土区和铜系区的饱和值转变点的特点作一简单的解释. 设 V_{np} 为四极 np 相互作用强度, V_q 为 np 相互作用总的强度; V_{nn} 为同类核子间的对力强度, V_p 为对力的总的强度, 采用有效玻色子数, 给出

$$\frac{V_q}{V_p} = \frac{2N_{\pi}^{\text{eff}} \times N_{\nu}^{\text{eff}}}{(N_{\pi}^{\text{eff}} + N_{\nu}^{\text{eff}})} \times \left(\frac{V_{np}}{V_{nn}} \right) \quad (1)$$

取 $V_{nn} \simeq 1\text{MeV}^{[15]}$, $V_{np} \simeq 0.3\text{MeV}^{[16]}$ (注意: 这两个强度比值对稀土区和铜系区偶偶核基本不变^[17]), 当 $V_q > V_p$ 时, np 相互作用占优势, 原子核从振动区演化为转动区, $E_{2_1^+}$ 趋向饱和. 把 V_{np} 和 V_{nn} 的值代入(1)中, 取 $N_{\pi}^{\text{eff}} = N_{\nu}^{\text{eff}}$ 的简单情况, 容易给出 $N_{\pi}^{\text{eff}} \times N_{\nu}^{\text{eff}} \approx 10$ 左右.

采用 IBM-2 的有效玻色子数不仅能对系统学结果进行整理和完善, 解释 IBM 以前不能解释的系统学结果, 还可以预言未有的结果. 如目前铜系区的 $B(M1)$ 结果还很少, 我们可以利用以上的结果对 $B(M1)$ 的饱和值及其转变点作简单估计. 因为在 IBM 的 $SU(3)$ 极限情况下,

$$B(M1) = \frac{3g^2 N_{\pi} \times N_{\nu}}{\pi(N_{\pi} + N_{\nu})}, \quad (2)$$

其中 $g = g_{\pi} - g_{\nu}$, 即 g 因子之差, 根据我们对 g 因子的取值^[4], g^2 在稀土区和铜系区 $SU(3)$ 极限下分别取 0.85 和 0.95^[1], 把 $B(M1)$ 表达式中的 N_{π} 和 N_{ν} 换成有效玻色

1) 有些文献如[12]中 $\frac{g^2(\text{铜系区})}{g^2(\text{稀土区})}$ 的值比本文所取的值大一些(为 $\frac{0.85}{0.75}$); 文献[4]中, 该值更大(不小于 $\frac{0.50}{0.32}$),

这样给出的 $B^{IBM}(M1, \text{铜系区})$ 的预言值将比本文的结果大一些. 此外, 也有人把这两个区域的 g 因子均取为 1, 那么其预言结果将比本文结果略小.

子数,可以得到,

$$\frac{B^{sat}(M1, \text{钢系区})}{B^{sat}(M1, \text{稀土区})} = \frac{g^2(\text{钢系区})}{g^2(\text{稀土区})} \times \frac{7 \times 8}{7 + 8} \times \frac{6 + 7}{6 \times 7}, \quad (3)$$

(取 $B(M1)$ 在稀土区的值为 $2.66\mu_N^2$ [8]) 得到 $B^{sat}(M1, \text{钢系区}) \approx 3.435\mu_N^2$. 这个结果与不久前的预言 [12] 一致. $B(M1 \text{ 钢系区})$ 的饱和值转变点为

$$P = \frac{2N_{\pi}^{eff} \times N_{\nu}^{eff}}{N_{\pi}^{eff} + N_{\nu}^{eff}} \rightarrow 2 \times 56/15 = 7.47, \quad (4)$$

与钢系区的 $B(E2)$ 的饱和值转变点一致 [13].

作者感谢陈金全教授、孙洪洲教授、王凡教授和徐躬耦教授的热情指导.

参 考 文 献

- [1] 赵玉民等, 高能物理与核物理, **16**(1992)950; **18**(1994)68.
- [2] R. F. Casten et al., *Phys. Rev. Lett.*, **47** (1981) 1433; R. F. Casten et al., *Phys. Lett.*, **B208** (1988) 33.
- [3] A. Wolf et al., *Phys. Lett.*, **B158**(1985) 7; **B190**(1987) 19.
- [4] C. S. Han et al., *Phys. Rev.*, **C42**(1990) 280.
- [5] O. Scholten, *Phys. Lett.*, **B127**(1983) 144; N. Yoshinaga, *Nucl. Phys.*, **A522**(1991) 99.
- [6] Zhao Yumin et al., Unified Description of Systematics for the $A \geq 70$ Even-even Nuclei, *Comm. theo. Phys.*, accepted; Systematics for medium-heavy Even-even Nuclei *Phys. Rev.*, accepted.
- [7] «Nuclear Structure, reaction and Symmetry» edi. by R. A. Meyer (1986) World Scientific.
- [8] C. Rangacharyulu et al., *Phys. Rev.*, **C43**(1991) R949.
- [9] 冯达旋, 南京大学物理系内部资料.
- [10] Wu Chengli et al., *Phys. Rev.*, **C36**(1987) 1157; Chen Jinquan et al., *Phys. Rev.*, **C40**(1989)2844.
- [11] W. Frank et al., *J. Phys.*, **G16**(1990) L7.
- [12] J. Margraf et al., *Phys. Rev.*, **C45**(1992) R521.
- [13] S. Raman et al., *Phys. Rev.*, **C37**(1988) 805.
- [14] Zhao Yumin et al., *Chin. J. Nucl. Phys.*, **15**(1993) 172.
- [15] K. Kummar, M. Baranger, *Nucl. Phys.*, **A110**(1968) 490; 529.
- [16] D. S. Brenner et al., *Phys. Lett.*, **B243**(1990) 1.
- [17] Zhao Yumin et al., *Chin. Phys. Lett.*, **12**(1995) 68; The Systematics in the V_{Np} Scheme, *Phys. Rev.*, **C**, in Press.

Effective Boson Number in IBM-2 and its Application in Even-Even Nuclear Systematics Study

Zhao Yumin

(Department of Physics, Nanjing University, 210003)

Gu Jinnan

(Institute of Modern Physics, The Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, 730000)

Received 13 December 1993

Abstract

The results of the effective boson numbers in IBM-2 for $A \geq 70$ even-even nuclei are reviewed, and the systematics of the E_{2^+} v.s. $N_{\pi}^{\text{eff}} \times N_{\nu}^{\text{eff}}$ in rare earth and actinide regions is presented. Here some properties of E_{2^+} systematics are discussed and simple explanation is given. Furthermore, by the use of effective boson numbers, the properties of summed $B(M1)$ strengths for even-even nuclei in the actinide region are predicted.

Key words effective boson number, IBM-2, $B(M1)$ strength, subshell.