

有效玻色子数及其应用*

赵玉民 顾金南

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

1992年4月30日收到

摘 要

本文用半经验方法给出了 $A \geq 70$ 的偶偶核的有效玻色子数, 收集了玻色子数饱和的有关证据, 并采用有效玻色子数概念, 处理了内禀电四极矩 Q_0 与 $N_\pi N_\nu$ ($A \geq 70$ 的偶偶核) 系统关系, 得到了 Q_0 的经验公式. 本文采用所给的有效玻色子数对 ^{142}Ce 和 ^{144}Nd 进行了数值计算, 结果较好.

关键词 有效玻色子数, 相互作用玻色子模型, 子壳, 四极矩.

1 引 言

有效玻色子数的概念起源于 $Z=40$ 和 $Z=64$ 质子子壳附近偶偶核性质的研究^[1-7]. 近年来, 人们发展了一些方法用来研究有效玻色子数, 如唯象的或经验的方法^[4,5,6,8], 也找到一些针对具体的核的微观计算或只考虑某一因素的普遍意义的微观计算方法^[7,9], 这些研究给出了一些有用的结果. 下面给出作者提出的有效玻色子数的半经验方法.

有效玻色子数的半经验方法^[10]在 IBM-2 中, 随着玻色子数的变化, 原子核的动力学对称性逐步演化, 与此相应, 哈密顿量的参数做光滑变化; 另外, IBM-2 数值计算表明, $Q_\pi Q_\nu$ 的矩阵元近似与 $N_\pi N_\nu$ 成正比^[18]. 可以这样定性理解: 在原子核残余相互作用中对力与四极四极力是主要的, 它们都随价核子数的变化很光滑地变化; 长程四极四极作用和质子质子相互作用都大致正比于 $N_\pi N_\nu$. 考虑两个偶偶核, 假设它们有相同的壳芯, 相同的中子玻色子数, 相同的或相近的低激发谱、电四极矩、电磁跃迁几率、基态形变等, 那么假定给这两个核素赋予相同的 N_π 值, 对数值计算来说是行得通的; 前面已经叙述, $\langle Q_\pi Q_\nu \rangle \propto N_\pi N_\nu$, 两个核的性质大体相同, 则 $N_\pi N_\nu$ 也基本相同, 又因为两者有相同的 N_ν , 所以它们的 N_π 值也一定基本相同. 为了使这种方法更准确, 可采用内插法. 以求 N_π^{eff} 为例说明, 选择多个 N_π 已知的核与 N_π^{eff} 待定的核比较, 直至 N_π^{eff} 待定的核的性质位于两个 N_π 值之间, 且这两个 N_π 形成的区间小于 2, 则 N_π^{eff} 就唯一确定了.

这种方法用于 $Z=40, 64$ 子壳附近偶偶核的有效玻色子数的研究, 是很有效的^[10]. 不久前, S. Raman 等完成了从轻到重的所有偶偶核性质的系统学研究^[11,12]. 此后, 关于

* 中国科学院重大课题基金和 LETZ-1298 经费资助.

偶偶核系统学研究工作很多^[13], 这些结果为上面所述的比较提供了很大方便。

把上述方法用于中重核和重核区, 即认为如果能谱、电磁跃迁等的性质完全一致, 而且 N_p^{eff} (或者 N_n^{eff}) 相同, 则 N_n^{eff} (或者 N_p^{eff}) 也相同。这样给出了部分 $A \geq 70$ 偶偶核的有效玻色子数(见表 1), 从中可以看出, 有效玻色子数存在饱和效应, 总的结果是, 对于同一大壳, 有效质子玻色子数和有效中子玻色子数的饱和值是相同的。对 50—82 大壳, 饱和值为 6; 对 82—126 大壳, 饱和值是 7; 对 126—184(?) 大壳, 饱和值是 8(见图 1, 这是一示意图)。玻色子数的饱和, 在物理上对应于 Pauli 阻塞效应^[7]。IBM 对此没有考虑(而 FDSM 考虑了此效应)。从另外的角度说, 玻色子数的饱和可以解释为核芯外部分核子自由度的冻结^[14]。

表 1 $A \geq 70$ 的偶偶核的有效玻色子数

核素	N_p^{eff}	N_n^{eff}	核素	N_p^{eff}	N_n^{eff}	核素	N_p^{eff}	N_n^{eff}
¹⁵⁸ Yb]	5	3	¹⁴² Ba	3	2	⁸⁸ Zr	5	1
¹⁶⁰ Yb	5	4	¹⁴⁴ Ba	3	3	⁸⁶ Kr	4	0
¹⁶² Yb	5	5	¹⁴⁶ Ba	3	4	⁸⁸ Sr	5	0
¹⁶⁴ Yb	6	6	¹⁴² Nd	2	0	⁹⁰ Sr	1	1
¹⁴² Ce	3	1	¹⁴⁴ Nd	2	1	⁹² Sr	1	2
¹⁴⁴ Ce	3	2	¹⁴⁶ Nd	3	2	⁹⁰ Zr	0	0
¹⁴⁶ Ce	3	3	¹⁴⁸ Nd	3	3	⁹² Zr	1	1
¹⁴⁸ Ce	4	4	¹⁵⁰ Nd	5	4	⁹⁴ Zr	1	2
¹⁵⁰ Ce	4	5	¹⁵² Nd	5	5	⁹⁶ Zr	0	3
¹⁴⁶ Sm	2	1	¹⁵² Gd	4	3	⁹⁸ Zr	1	4
¹⁴⁸ Sm	2	2	¹⁵⁴ Gd	5	4	¹⁰⁰ Zr	3	5
¹⁵⁰ Sm	3	3	¹⁵⁸ Gd	6	5	¹⁰² Zr	5	6
¹⁵² Sm	5	4	¹⁵⁸ Gd	6	6	⁹² Mo	2	1
¹⁵⁴ Sm	6	5	¹⁶⁰ Gd	6	7	⁹⁴ Mo	2	2
¹⁵² Dy	2	2	¹⁵⁶ Er	4	3	⁹⁶ Mo	2	3
¹⁵⁴ Dy	3	3	¹⁵⁸ Er	6	4	⁹⁸ Mo	2	4
¹⁵⁶ Dy	6	4	¹⁶⁰ Er	6	5	¹⁰⁰ Mo	3	5
¹⁵⁸ Dy	6	5	¹⁶² Er	6	6	¹⁰² Mo	4	6
¹⁶⁰ Dy	6	6	¹⁶⁴ Er	6	7	¹⁰⁴ Mo	4	6
¹⁶² Dy	6	6	¹⁶⁶ Er	6	7	¹⁰⁶ Mo	4	6
¹⁶⁴ Dy	6	7	¹⁶⁸ Er	6	7	¹⁰⁸ Mo	4	6

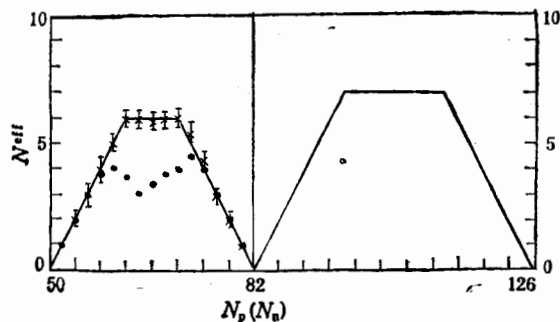


图 1 有效玻色子数 N^{eff} 随质子 N_p (或中子 N_n) 数的变化关系

×文献[7] ●文献[9].

2 玻色子数饱和的证据

上面的半经验方法处理有效玻色子数时,提出了玻色子数饱和的概念,下面把它与其它结果作一比较.

2.1 与实验结果相吻合

早在1987年,Raman等就注意到 $B(E2)$ 和 Q_0 的饱和性^[12].但是用IBM-2来解释就出现了困难,因为随着 N_π, N_ν 的增加,根据IBM-2公式, $B(E2)$ 和 Q_0 增大(e_B 基本不变).因此按照IBM-2, $B(E2)$ 和 Q_0 应当是两边小,中间最大,然而实际情况是在中间出现了一个平台.不久前,人们又注意到稀土区偶偶核同位素的 $B(E2)$ 和 $B(M1)$ 之间存在强烈的饱和性及关联性^[13],所谓关联性指的是两者趋向饱和时的转变点是一致的.同样,IBM-2又遇到了困难.而如果引入玻色子数饱和的概念,则以上所有困难都可以很容易地得到圆满的解释. $B(E2)$ 和 $B(M1), Q_0$ 的饱和性与玻色子数的饱和相对应, $B(E2)$ 和 $B(M1)$ 的关联性可以解释为 $B(E2)$ 和 $B(M1)$ 只是 $N_\pi^{\text{eff}}, N_\nu^{\text{eff}}$ 的函数,而 $N_\pi^{\text{eff}}, N_\nu^{\text{eff}}$ 对稀土区偶偶核分别饱和于6和7^[10].取 e_B 和 g_π, g_ν 为典型值($e_B \sim 0.2$, $g_\pi \sim 1.0, g_\nu \sim 0.1$),估计它们 $B(E2)$ 和 $B(M1)$ 在稀土区的饱和值,利用IBM-2SU(3)极限下 $B(E2)$ 和 $B(M1)$ 的表达式,容易给出 $B(E2) \sim 200 \text{W.u.}$, $B(M1) \sim 2.3 \mu_N^2$,与文献[15]的结果完全一致.

2.2 与有效玻色子数计算结果的比较

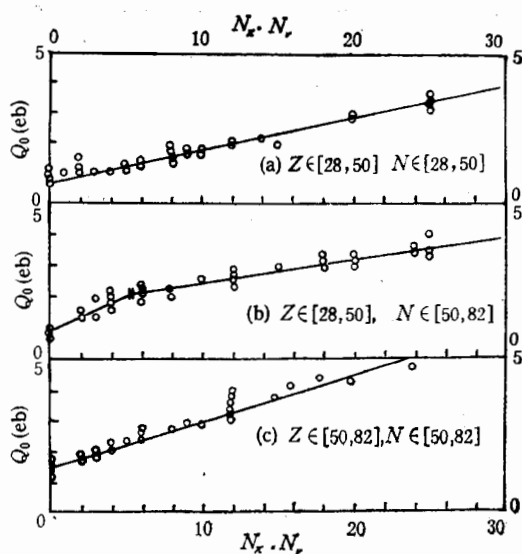
至今关于有效玻色子数的计算已有不少结果,尽管还没有提出有效玻色子数饱和概念,然而还是为此提供了重要依据,文献[7]的图13是用李数守恒的准粒子方法计算的结果.那里仅指出,根据这个结果可知,超过半满壳后, N^{eff} 应当取为价空穴数之半.然而,仔细比较一下就会发现,无论取价核子数之半还是取价空穴数之半,在靠近半满壳处都会出现一个平台.

早在1983年,Scholton就用去掉不活泼的核子对的方法^[9],分析了 $Z=64$ 子壳,所得的结果与玻色子数饱和的概念也是相容的^[10].

3 Q_0 与 $(N_\pi^{\text{eff}} N_\nu^{\text{eff}})$ 的经验关系

由于实验技术的发展和核数据的增加,人们有可能仔细地考察核的性质随着质子数、中子数增减的系统变化.关于偶偶核性质的系统学研究,已经成为近年来IBM应用的一个重要方向^[13].

F 旋多重态研究需要找出 Q_0 与 $(N_\pi^{\text{eff}} N_\nu^{\text{eff}})$ 的关系^[17],但是目前还没有找到.在标准的IBM-2中, Q_0 不是用 $(N_\pi^{\text{eff}} N_\nu^{\text{eff}})$ 来表达的,本节利用已经获得的有效玻色子数给出 Q_0 与 $(N_\pi^{\text{eff}} N_\nu^{\text{eff}})$ 的经验关系(图2).这里 Q_0 采用文献[11]的定义.(虽然不计子壳异常、半壳附近玻色子数饱和的系统学也能给出不错的结果,但是采用有效玻色子数的系统学比仅用价核子数之半的系统学结果有明显的改善^[6].这里的系统学结果则比其它的“有效玻色子数”系统学结果更好).

图 2 $A \geq 70$ 偶偶核的 Q_0 与 $(N_{\pi}^{\text{eff}} N_{\nu}^{\text{eff}})$ 的关系

图中的 $(N_{\pi}^{\text{eff}} N_{\nu}^{\text{eff}})$ 值取自附录, Q_0 取自文献

[11], 图中未标明实验误差。

与图 2 相对应, Q_0 与 $(N_{\pi}^{\text{eff}} N_{\nu}^{\text{eff}})$ 的关系可以用以下几个公式描述:

$$Q_0 = 0.110(N_{\pi}^{\text{eff}} N_{\nu}^{\text{eff}}) + 0.700 \pm 0.400; \quad (1)$$

$$Q_0 = 0.167(N_{\pi}^{\text{eff}} N_{\nu}^{\text{eff}}) + 1.000 \pm 0.400, \text{ 如果 } (N_{\pi}^{\text{eff}} N_{\nu}^{\text{eff}}) \leq 6, \\ = 0.083(N_{\pi}^{\text{eff}} N_{\nu}^{\text{eff}}) + 1.500 \pm 0.400, \text{ 如果 } ((N_{\pi}^{\text{eff}} N_{\nu}^{\text{eff}}) \geq 6); \quad (2)$$

$$Q_0 = 0.150(N_{\pi}^{\text{eff}} N_{\nu}^{\text{eff}}) + 1.400 \pm 0.800; \quad (3)$$

$$Q_0 = 0.135(N_{\pi}^{\text{eff}} N_{\nu}^{\text{eff}}) + 2.330 \pm 0.800, Z \in [50, 82], N \in [82, 126]; \quad (4)$$

$$Q_0 = 0.365(N_{\pi}^{\text{eff}} N_{\nu}^{\text{eff}}) + 0.600 \pm 0.500, \text{ 如果 } (N_{\pi}^{\text{eff}} N_{\nu}^{\text{eff}}) \leq 20, \\ = 0.130(N_{\pi}^{\text{eff}} N_{\nu}^{\text{eff}}) + 5.300 \pm 0.500, \text{ 如果 } (N_{\pi}^{\text{eff}} N_{\nu}^{\text{eff}}) \geq 20, \\ Z \geq 82, N \geq 126. \quad (5)$$

从以上可以看出, Q_0 与 $(N_{\pi}^{\text{eff}} N_{\nu}^{\text{eff}})$ 呈单调关系。若 $(N_{\pi}^{\text{eff}} N_{\nu}^{\text{eff}})$ 很接近, 则 Q_0 也接近。这与文献[17]的猜测是一致的。由于 Q_0 与 $B(E2)$ 有密切关系, 所以可以预料, 采用有效玻色子数对 $B(E2)$ 做系统学研究, 结果肯定比以前有改善。

4 用有效玻色子数计算 ^{144}Nd 和 ^{142}Ce [16,18]

本文给出了 ^{144}Nd 和 ^{142}Ce 的 N_{π}^{eff} 值, 它们与过去经验方法给出的值^[4,5]相差很大, 因

表 2 ^{144}Nd 和 ^{142}Ce 的数值计算参数

Nuol.	N_{π}	ε_d	κ	χ_{π}	χ_{ν}	ξ_i
^{144}Nd	2	0.70	-0.05	1.10	-1.20	0.70
^{142}Ce	3	0.65	-0.05	0.80	-1.20	0.50

此对这两个核采用本文的结果进行计算,结果的好坏对本文的半经验方法是个检验。所用参数见表2,结果如图3。

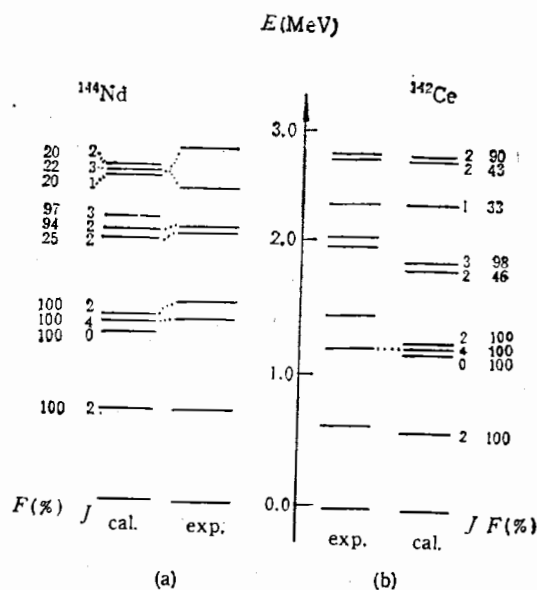


图3 (a) ^{144}Nd 的计算结果 (b) ^{142}Ce 的计算结果

这里采取 $N_p^{eff}(\rho = \pi, \nu)$ 值, 仅用几个参数就较好地描述了这两个核的能谱, 并再现了它们的混合对称态。

5 小 结

本文对有效玻色子数研究的已有成果予以简要评述, 详细说明了求有效玻色子数的半经验方法; 给出 $A \geq 70$ 偶偶核的 N_p^{eff} 和 N_n^{eff} , 并用此给出内禀电四极矩 Q_0 与 $(N_p^{eff} N_n^{eff})$ 的系统关系, 结果比过去好, 而且简单。对 ^{142}Ce 和 ^{144}Nd 的数值计算表明, 这种方法给出的 N_p^{eff} 值是有意义的。

作者感谢与孙洪洲教授和刘玉鑫同志的有益讨论, 感谢徐躬耦教授的有益指教。

参 考 文 献

- [1] R.F. Casten et al., *phys. Rev. Lett.*, **47**(1981)1433.
- [2] R.L.Gill et al., *Phys. Lett.*, **118B**(1982)251.
- [3] A. Wolf et al., *Phys. Lett.*, **123B**(1983) 165.
- [4] A. Wolf et al., *Phys. Lett.*, **158B**(1985)7.
- [5] A. Wolf et al., *Phys. Lett.*, **190B**(1987)19.
- [6] W. Frank et al., *J. Phys. G: Nucl. Part.*, **16**(1990)17.
- [7] N. Yoshinaga, *Nucl. Phys.*, **A522**(1991)99.
- [8] C.S. Han et al., *Phys. Rev.*, **C42**(1990)230.
- [9] O. Scholten, *Phys. Lett.*, **127B** (1983)144.

- [10] 赵玉民, 顾金南, 高能物理与核物理, **16**(1992)950.
- [11] S.Raman et al., Nucl. Data Table, (1987) P1—96.
- [12] S.Raman et al., *Phys. Rev.*, **C37**(1987)805.
- [13] 赵玉民等, 偶偶核系统学研究现状, 核物理动态, 待发表.
- [14] 刘玉鑫, 私人通讯.
- [15] C.Rangacharyulu et al., *Phys. Rev.*, **C43**(1991)R949.
- [16] 顾金南, 文万信, 赵玉民, 高能物理与核物理, **16**(1992)564.
- [17] B.R. Barrett et al., *Phys. Rev.*, **C43**(1991) R926.
- [18] R.F. Casten, *Phys. Lett.*, **152B**(1985) 145; *Phys. Rev. Lett.*, **54**(1985) 1991.

Effective Boson Number and Its Application

Zhao Yumin Gu Jinnan

(*Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou 730000*)

Received on April 30, 1992

Abstract

The methods to obtain effective boson numbers are reviewed briefly, and the evidence for the existence of the saturation phenomenon of effective boson numbers is collected. With the effective boson numbers presented by a semi-empirical method, formula of intrinsic quadrupole moment Q_0 as a function of $N_x N_y$, for even-even nuclei with $A \geq 70$ are presented, and ^{142}Ce and ^{144}Nd are calculated numerically. These results are satisfactory.

Key Words Effective boson number, Interacting boson model (IBM), Subshell, Quadrupole moment.