

# 原子核转动惯量奇偶差的大幅度涨落与非相加性\*

刘树新<sup>1)</sup> 雷奕安<sup>2)</sup> 曾谨言<sup>3)</sup>

1 (北京大学物理学院 北京 100871)

2 (兰州重离子加速器国家实验室原子核理论研究中心 兰州 730000)

**摘要** 对关联对原子核的各种性质都有重要影响, 包括结合能、低激发谱和转动带的角动量顺排等. 系统观测到的原子核转动惯量奇偶差的大幅度涨落和转动惯量的非相加性, 不能用传统的处理原子核对关联的 BCS 方法来说明, 而用粒子数守恒方法则可给予满意的解释, 在此方法中 Pauli 堵塞效应已严格考虑.

**关键词** 对关联 粒子数守恒方法 堵塞效应 角动量顺排

20 世纪 50 年代末, Bohr, Mottelson & Pines 在系统分析了大量实验资料的基础上指出: 原子核内核子之间存在很强的对关联, 它导致原子核中的超导性<sup>[1]</sup>, 表现为原子核的一系列基本性质出现明显的奇偶差. 其中最主要的奇偶差为:

(a) 结合能的奇偶差

这是早在 20 世纪 30 年代已发现的现象, 即相邻原子核中, 偶偶核最稳定, 奇偶核次之, 奇奇核最不稳定, 往往通过  $\beta$  衰变而转化为偶偶核. 自然界中, 只有 4 个稳定的奇奇核, 即  ${}^2_1\text{H}_1$ ,  ${}^6_3\text{Li}_3$ ,  ${}^{10}_5\text{B}_5$  和  ${}^{14}_7\text{N}_7$ . 这表现在结合能半经验公式中有一项对能项  $P$ ,

$$P = \begin{cases} +\Delta & (\text{偶偶核}) \\ 0 & (\text{奇偶核}), \quad \Delta \sim 12/\sqrt{A}\text{MeV}. \\ -\Delta & (\text{奇奇核}) \end{cases}$$

(b) 低内部激发谱型的奇偶差

实验资料系统分析表明, 奇偶核的低内部激发谱的能级密度, 可以用壳模型(球形, 或变形)的粒子(空穴)激发大致说明, 而偶偶核的低内部激发谱则出现一个明显的“能隙”. 即基态与第一内部激发态之间存在一个明显能隙  $\sim 2\Delta > 1\text{MeV}$ , 它比壳模型能级系的单粒子能级平均间距大得多, 与低温超导金属激发谱中的能隙相似.

(c) 转动惯量值及奇偶差

实验资料表明: (1) 奇偶变形核的低激发转动带的转动惯量, 系统大于相邻偶偶核基态带的转动惯量. (2) 偶偶变形核基态带的转动惯量观测值,  $J_{\text{实}} \sim \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{3}\right)J_{\text{刚}}$ ,  $J_{\text{刚}}$  为刚体计算值. 而按 D.R. Inglis 的推转模型(不计及核子之间相互作用), 则转动惯量计算值  $J_{\text{计}} \approx J_{\text{刚}}$ . 在计及核子之间的对关联后,  $J_{\text{计}}$  将大幅度减小而与  $J_{\text{实}}$  接近.

20 世纪 50 年代中期, 正值金属超导性的 BCS 理论提出, 根据 Bohr, Mottelson & Pines 的思想<sup>[1]</sup>, S.T. Belyaev, L.S. Kisslinger & R. A. Sorensen, S.G. Nilsson & O. Prior 等随即把 BCS 方法以及准粒子概念移植到核结构理论中来, 较好地阐明了原子核一些性质的奇偶差现象<sup>[2]</sup>. 但此方法在处理原子核对关联时, 存在下列严重困难:

(a) D.J. Rowe 指出<sup>[3]</sup>, BCS 理论不能认真处理不配对核子的堵塞效应(blocking effect). 他指出, 尽管不配对核子的 Pauli 堵塞效应是直截了当的, 但 BCS 方法却很难处理它, 因为不同的堵塞会导致不同的准粒子基.

(b) BCS 方法中粒子数不守恒<sup>[4, 5]</sup>. 原子核的低激发态性质主要取决于价核子所处的费米面附近的单

\* 国家自然科学基金(10375001, 10435010, 10575004)资助

1) E-mail: liusx@pku.edu.cn

2) E-mail: yalei@pku.edu.cn

3) E-mail: jyzeng@pku.edu.cn

粒子能级的性质和分布, 这些价核子的数目 $\sim 10$ , 并不很大. 因此, 粒子数不守恒带来的问题要认真对待. 用BCS方法来处理原子核的对关联, 人们发现难以说明如下重要事实:

(1) 用BCS方法不能很好说明实验观测到的转动惯量奇偶差的大幅度涨落(见图1)<sup>[6, 7]</sup>. 可以看出, 当奇中子所处轨道为高 $j$ 闯入态 $[642]5/2$ ,  $[633]7/2$ 和 $[624]9/2$ 时,  $\delta J/J$ 达到极大. 奇质子核也有类似情况. 锕系变形核的转动惯量的奇偶差也存在类似的大幅度涨落<sup>[8]</sup>.

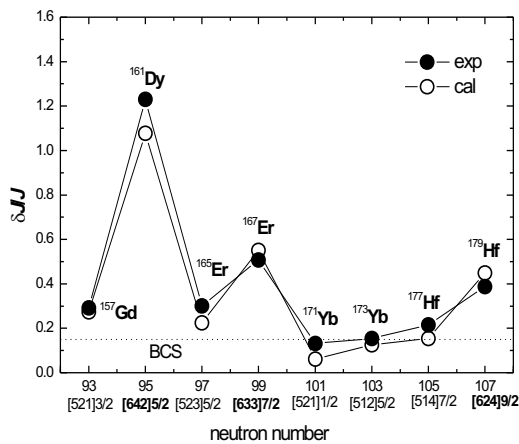


图1 原子核转动惯量奇偶差的大幅度涨落(取自文献[6])

(2) 转动惯量的相加性一般不成立. 设处于准粒子真空态 $|0\rangle$ 的原子核(例如偶偶变核基态)的转动惯量为 $J_0$ , 处于一准粒子态 $\alpha_\mu^+|0\rangle$ ,  $\alpha_\nu^+|0\rangle$ 和二准粒子态 $\alpha_\mu^+\alpha_\nu^+|0\rangle$ 的原子核转动惯量分别为 $J(\mu)$ ,  $J(\nu)$ 和 $J(\mu\nu)$ , 按BCS理论, 可得出如下转动惯量相加性<sup>[4]</sup>

$$R = \frac{[J(\mu) - J_0] + [J(\nu) - J_0]}{[J(\mu\nu) - J_0]} = 1$$

而实验观测表明,  $R$ 系统大于1(见图2).

按照处理原子核对关联的粒子数守恒(PNC)方法, 或称为多粒子组态截断的壳模型计算方法<sup>[4, 7, 9]</sup>, 上述困难都可以较好解决.

在正常变形核中观测到的转动带的转动惯量并不满足相加性<sup>[10]</sup>, 从图2可以看出,  $R$ 系统地大于1, 而且有些转动带的 $R$ 值与1偏离较大. 采用PNC方法所得的计算结果从整体上与实验结果符合得较好.

上面讨论的变形核, 其四极轴对称形变度 $\varepsilon_2 \leq 0.30$ , 称为正常变形核. 早在20世纪70年代, Bohr &

Mottelson就指出, 当变形原子核的长轴与短轴之比为2:1( $\varepsilon_2 \sim 0.60$ )时, 具有合适的中子数与质子数的原子核会很稳定, 形成超变形核(superdeformed nucleus). 而在20世纪60年代, 在锕系核中发现的裂变同质异能态(fission isomeric state), 就可以用超变形稳定核态来说明.

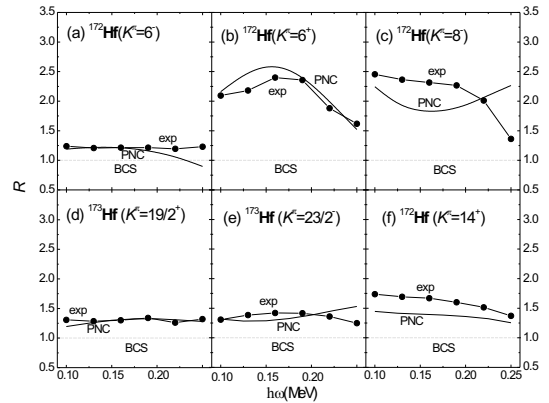


图2 原子核转动惯量的非相加性(取自文献[10])

实验上, Twin 等人(1986)利用加速到205MeV的 $^{48}\text{Ca}$ 离子轰击靶核 $^{108}\text{Pd}$ , 即 $^{108}\text{Pb}(^{48}\text{Ca}, 4n)^{152}\text{Dy}$ 反应, 首次观测到超变形核中转动带的19条离散的 $\gamma$ 谱线<sup>[11]</sup>, 其分布的规律性, 令人惊叹不已. 目前仅在 $A \sim 190$ 区就已观测到近百条高自旋超变形(SD)带. 很快人们就在超变形转动带发现了一个引人注目的现象——“全同带现象”, 随后在正常变形核中也发现这种现象. 对于正常变形和超变形核中的全同带现象, 粒子数守恒方法也可提供一个较为满意的解释<sup>[12, 13]</sup>.

$A \sim 190$ 区的超变形转动带比较有规律, 绝大多数转动带, 特别是偶偶核中的晕SD带, 转动惯量随角动量 $I$ 的增加而平滑地增大. 现在大家已经取得共识: 这种平滑的增大来源于, 在对关联影响下Coriolis力所导致的粒子角动量沿转动方向顺排的结果. 对于 $A \sim 190$ 区的超变形转动带, 不论是晕带还是激发带(包括发生带交叉的情况), 转动惯量随角动量变化的规律可以用粒子数守恒方法给出满意的解释, 详细的分析可查阅相关文章<sup>[14]</sup>.

总之, 粒子数守恒方法是处理原子核中对关联一个实际可行的方法, 它能够定量分析在正常变形和超变形核中与对关联有关的一系列奇偶差现象.

## 参考文献(References)

- 1 Bohr A, Mottelson B R, Pines D. Phys. Rev., 1958, **110**: 936
- 2 Belyaev S T. Mat. Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk., 1959, **31**: 11; Kisslinger L S, Sorensen R A. Mat. Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk., 1960, **32**: 12; Nilsson S G, Prior O. Mat. Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk., 1960, **32**: 16
- 3 Rowe D J. Nuclear Collective Motion (Methuen, London, 1970)
- 4 ZENG J Y, CHENG T S. Nucl. Phys., 1983, **A405**: 1
- 5 WU C S, ZENG J Y. Phys. Rev. Lett., 1991, **66**: 1022
- 6 ZENG J Y, LEI Y A, JIN T H et al. Phys. Rev., 1994, **C50**: 746
- 7 ZENG J Y, JIN T H, ZHAO Z J. Phys. Rev., 1994, **C50**: 1338
- 8 YU L, GONG L X, LIU S X et al. Commu. Theor. Phys., 2005, **43**: 287
- 9 XIN X B, LEI Y A, LIU S X et al. Chin. Phys. Lett., 2000, **17**: 94
- 10 LIU S X, ZENG J Y. Phys. Rev., 2002, **C66**: 067301
- 11 Twin P J et al. Phys. Rev. Lett., 1986, **57**: 811
- 12 ZENG J Y, LIU S X, LEI Y A et al. Phys. Rev., 2001, **C63**: 024305
- 13 LIU S X, ZENG J Y, ZHAO E G. Phys. Rev., 2002, **C66**: 024320
- 14 LIU S X, ZENG J Y. Nucl. Phys., 2004, **A736**: 269

## Large Fluctuation in Odd-Even Differences and Nonadditivity of Nuclear Moments of Inertia<sup>\*</sup>

LIU Shu-Xin<sup>1)</sup> LEI Yi-An<sup>2)</sup> ZENG Jin-Yan<sup>3)</sup>

1 (School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

2 (Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator, Lanzhou 730000, China)

**Abstract** Pairing correlation strongly influences various nuclear properties, including the binding energy, low-lying excited spectrum, and angular momentum alignment of a rotational band etc. The systematically observed large fluctuation in odd-even differences of moments of inertia and their nonadditivity can't be accounted for by the traditional BCS method for treating nuclear pairing correlations, instead, can be explained satisfactorily by the Particle-number conserving method, in which blocking effect is treated strictly.

**Key words** pairing correlation, particle-number conserving method, blocking effect, angular momentum alignment

---

<sup>\*</sup> Supported by National Natural Science Foundation of China(10375001, 10435010, 10575004)

1) E-mail: liusx@pku.edu.cn

2) E-mail: yalei@pku.edu.cn

3) E-mail: jyzeng@pku.edu.cn