

# C 和 Ne 同位素的形变及电磁矩<sup>\*</sup>

周先荣<sup>1;1)</sup> H. Sagawa<sup>2</sup> 张锡珍<sup>3</sup>

1(厦门大学物理系, 理论物理与天体物理研究所 厦门 361005)

2(日本会津大学数理中心 日本 965-8650)

3(中国原子能科学研究院 北京 102431)

**摘要** 采用变形的 Skyrme-Hartree-Fock 模型和壳模型, 对 C 和 Ne 同位素的电磁矩和电四极跃迁进行了研究, 指出了 C 和 Ne 同位素的形变具有很强的同位旋依赖关系. 计算还表明, C 和 Ne 奇核同位素的四极矩和磁矩对组态有很明显的依赖关系, 只有依靠实验数据才能确定这些靠近滴线的原子核的基态形变. 采用同位旋相关的中心极化电荷的壳模型波函数, 再现了 C 和 Ne 偶核同位素的电四极跃迁对同位旋的依赖.

**关键词** 变形 Skyrme-Hartree-Fock 形变 电磁矩

## 1 引言

远离  $\beta$  稳定线原子核是当前的理论和实验研究的热点之一. 当前在  $A \sim (10-24)$  的轻核中发现了很多奇特的现象, 如晕和皮的存在<sup>[1]</sup>, 闭壳的修正<sup>[2]</sup>, 以及电偶极跃迁中的微共振 (Pygmy resonance) 现象<sup>[3]</sup>等.

形变的同位旋依赖关系和形变的演化有关, 因而可通过研究这种依赖关系来研究量子多体系统中的对称性自发破缺. 对称性自发破缺效应是在很多物理领域中普遍存在的现象. 在分子物理中, 对称性自发破缺在 1937 年被 Jahn 和 Teller 发现<sup>[4]</sup>. 在分子和原子核中, 引起基态形变的机制是非常相似的. 当前静态形变的主要起因是由于原子核中单粒子与四极振动的耦合<sup>[5]</sup>, 而对力却使原子核具有球对称的趋势. 因而在原子核中, 这种 Jahn-Teller 效应的独特特征将表现为粒子-振动耦合引起的形变和对力的球对称之间竞争<sup>[6]</sup>.

迄今为止, 关于形变对同位旋依赖的研究主要集中在稀土区的原子核, 然而对于重核来说, 很难研究形变在两个闭壳之间的系统的变化, 但是对于轻核来说却较容易做到这一点. 在未来几年内, 实验上有望在 C 和 Ne 核素上取得重要进展, 因而我们采用和密度相关的对相互作用, 对  $A \sim (10-30)$  的轻核做变形

Skyrme-Hartree-Fock (SHF) 计算, 将 C 和 Ne 同位素做为典型的开壳轻核来研究形变的同位旋依赖关系以及电磁矩特征.

## 2 C 和 Ne 同位素的形变

沿着 C 和 Ne 同位素链, 研究了形变对中子数的依赖关系. 计算中, 采用 SGII Skyrme 相互作用来做变形 SHF 计算, 并假定 HF 变形势是轴对称的. 对力采用 BCS 近似, 对相互作用取为

$$V(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = V'_0 \left( 1 - \frac{\rho(r)}{\rho_0} \right) \delta(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2), \quad (1)$$

其中  $\rho(r)$  是  $\mathbf{r} = (\mathbf{r}_1 + \mathbf{r}_2)/2$  处的 HF 密度,  $\rho_0 = 0.16 \text{fm}^{-3}$ , 中子和质子的对关联强度取为  $V'_0 = -410 \text{MeV} \cdot \text{fm}^3$ . BCS 近似中采用光滑的能量截断方法<sup>[7]</sup>.

图 1 给出了 C 和 Ne 偶同位素的结合能随形变的变化. 计算中, 对 C 同位素, 取自旋-轨道相互作用的强度为原来的 60%. 从图 1(a) 中可以看出,  $^{12}\text{C}$  位能面的最小值出现在扁椭球  $\beta_2 = -0.32$  处. 由于中子的闭壳效应,  $^{14}\text{C}$  呈球形. 对稍重一些的 C 同位素,  $^{16}\text{C}$  位能面最小值出现在长椭球处, 而  $^{18}\text{C}$  在形变  $\beta_2 = 0.36$  和  $\beta_2 \sim -0.3$  处的结合能的差仅为  $0.1 \text{MeV}$ .  $^{20}\text{C}$  和  $^{22}\text{C}$  都

\* 国家自然科学基金(10605018)资助

1) E-mail: xrzhou@xmu.edu.cn

呈扁椭球形状. Ne同位素的形变在图1(b)中给出,从中可以看到与C同位素类似的中子数依赖关系. 与C同位素相比, Ne同位素的位能面都较浅. 由于 $N=8$ 的闭壳,  $^{18}\text{Ne}$ 呈近球形的形状. 而计算发现 $^{20}\text{Ne}$ 和 $^{22}\text{Ne}$ 呈长椭球,  $^{24}\text{Ne}$ 位能面最小值出现在扁椭球处.  $^{26}\text{Ne}$ 的球形和扁椭球的位能面近简并, 而 $^{28}\text{Ne}$ 的位能面呈扁平形状, 和所采用的相互作用有关. 由于另一个 $N=20$ 闭壳的出现,  $^{30}\text{Ne}$ 呈球形, 我们还注意到 $^{30}\text{Ne}$ 的在长椭球处的结合能与球形基态近简并. 在靠近闭壳核处,  $^{32}\text{Ne}$ 呈长椭球的典型特征.

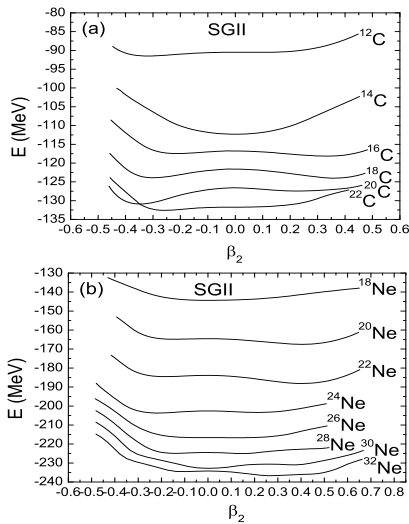


图1 采用SGII相互作用的变形SHF计算的结合能随形变的变化

(a) C同位素; (b) Ne同位素.

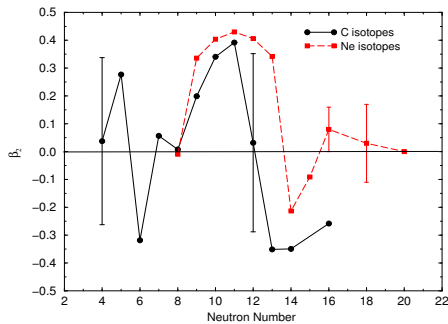


图2 采用SGII相互作用计算的C和Ne形变的同位旋依赖

其中误差棒表示存在两个能量最小点, 相差不到0.1MeV.

图2给出了C和Ne同位素在结合能为最小值处四极形变参数 $\beta_2$ 的同位旋依赖关系. 正如原子核的Jahn-Teller效应所期待的那样, 图2中 $^{12}\text{C}$ 具有扁椭球的形状. 由于 $N=8$ 的闭壳效应,  $^{14}\text{C}$ 和 $^{18}\text{Ne}$ 呈球形, 对于 $11 \geq N > 8$ , 两个同位素都具有较大的长椭球形变. 在 $N=12$ 和14之间的C和Ne同位素的位能面最

小值处的形变从长椭球到扁椭球发生了很大的变化, 而当靠近 $N=20$ 的Ne同位素时, 原子核的形状呈近球形. 因而, 通过变形SHF计算, 图中可以很清晰地看到由于原子核对称性自发破缺而产生的Jahn-Teller效应<sup>[4]</sup>.

### 3 四极矩、磁矩及 $B(E2)$ 跃迁

用变形的SHF研究了C和Ne的电磁矩和 $B(E2)$ 跃迁<sup>[8]</sup>, 并与壳模型的结果进行了比较<sup>[9]</sup>.

图3(a)给出了C和Ne奇核同位素四极矩的计算值与实验值, 它们磁矩的计算值和实验值在图3(b)中给出. 从中可以看出, 壳模型和SHF基本上能得到相近的计算结果, 与实验值也符合得较好, 尤其是壳模型. 从中注意到, 对 $^{17}\text{C}$ 的 $\frac{3}{2}^+$ 和 $\frac{5}{2}^+$ 态, SHF和壳模型计算得到的 $g$ 因子几乎相同, 而它们计算得到的 $Q$ 值却相差很大, 甚至反号, 说明这两个态的形变不同.

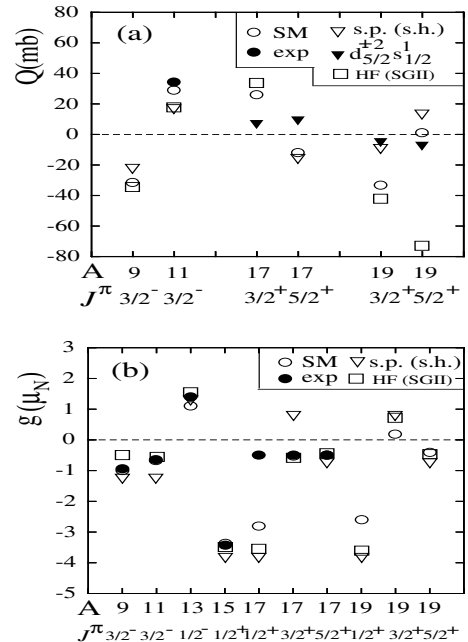
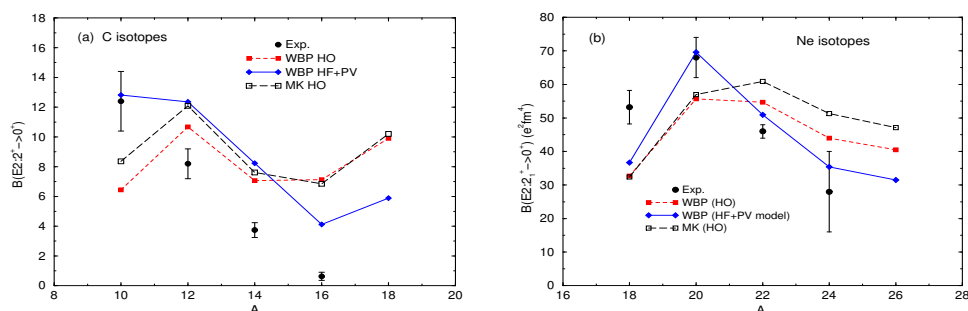


图3 C同位素奇核的四极矩及磁矩

(a) 空心三角表示单粒子或空穴的四极矩, 而实心三角表示 $0d_{5/2}^{\pm 2} 1s_{1/2}$ 组态的四极矩; (b) 空心圆圈表示采用WBP相互作用壳模型计算得到 $g$ 因子, 而空心方块表示SHF计算得到的结果. 实心圆圈表示实验值.

$B(E2)$ 的计算值和实验值在图4中给出. 从图中可以看出, 除了 $^{10}\text{C}$ , 采用极化电荷 $e_{\text{pol}}$ , 用壳模型计算得到 $B(E2)$ 值比实验值大. 对 $^{12}-^{16}\text{C}$ , 观测值的同位旋依赖通过 $e_{\text{pol}}$ 得到了很好的解释<sup>[10, 11]</sup>, 但是, 它们的值都比计算值小, 尤其是 $^{16}\text{C}$ , 它的 $B(E2)$ 值非常小.

图 4  $2_1^+ \rightarrow 0_{g.s.} B(E2)$  跃迁的值

(a) C 同位素; (b) Ne 同位素. 实心 and 空心方块表示壳模型的计算结果, 实心圆圈表示实验值<sup>[10, 11]</sup>.

## 4 结论

采用变形 SHF, 我们研究了 C 和 Ne 同位素四极矩  $Q$  和  $B(E2)$  的同位旋依赖关系. 这种依赖关系很好地展现了原子核的 Jahn-Teller 效应. 由于形变效应,

计算中发现 C 和 Ne 的奇核同位素的四极矩和磁矩与组态有关. 利用这个特征, 可以给出同位素基态的自旋宇称. C 和 Ne 偶核同位素的  $B(E2)$  值的同位旋依赖关系通过计算可以较好地再现, 但是  $^{12-16}\text{C}$  的计算值要比实验值大, 尤其是  $^{16}\text{C}$  的  $B(E2)$  值几乎消失, 这表明  $^{16}\text{C}$  可能存在奇异结构.

## 参考文献(References)

- 1 Tanihata I et al. Phys. Rev. Lett., 1985, **55**: 2676
- 2 Ozawa A et al. Phys. Rev. Lett., 2000, **84**: 5493
- 3 Leistenschneider A et al. Phys. Rev. Lett., 2001, **86**: 5442
- 4 Jahn H A, Teller E, Proc. R. Soc. London, Ser., 1997, **A 161**: 220
- 5 Reinhard P G, Otten E W. Nucl. Phys., 1984, **A420**: 173
- 6 Nazarewicz W. Int. J. Mod. Phys. E., 1995, **2**: 51; Nucl. Phys., 1994, **A574**: 27c
- 7 Bender M, Rutz K, Reinhard P G et al. Eur. Phys. J., 2000, **A8**: 59
- 8 Sagawa H, ZHOU X R, ZHANG X Z. Phys. Rev., 2004, **C70**: 054316
- 9 Warburton E K, Brown B A. Phys. Rev., 1992, **C46**: 923
- 10 Raman S et al. Atomic Data Nucl. Data Tables, 1987, **36**: 1
- 11 Imai N et al. Phys. Rev. Lett., 2004, **92**: 062501

## Static and Dynamical Deformations in Carbon and Neon Isotopes<sup>\*</sup>

ZHOU Xian-Rong<sup>1;1)</sup> H. Sagawa<sup>2</sup> ZHANG Xi-Zhen<sup>3</sup>

1(Department of Physics and Institute of Theoretical Physics and Astrophysics, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

2(Center for Mathematical Sciences, University of Aizu, Aizu-Wakamatsu, Fukushima 965-8560, Japan)

3(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102431, China )

**Abstract** Static and dynamic quadrupole ( $Q$ ) moments of C and Ne isotopes are investigated by using Skyrme Hartree-Fock and shell model wave functions. We point out that the deformation of C isotopes have a strong isotope dependence as a manifestation of nuclear Jahn-Teller effect. It is shown at the same time that the  $Q$  moments and the magnetic moments of the odd C isotopes depend clearly on assigned configurations, and their experimental data will be useful to determine the spin-parities and the deformations of the ground states of these nuclei. Electric quadrupole (E2) transitions in even C and Ne isotopes are also studied by using the polarization charges obtained by the particle-vibration coupling model for shell model wave functions.

**Key words** deformed Hartree-Fock, deformation, electromagnetic

<sup>\*</sup> Supported by National Natural Science Foundation of China (10605018)

1) E-mail: xrzhou@xmu.edu.cn