

手征带双重带候选核三轴形变的微观研究*

彭婧¹ 孟杰^{1,2,3;1)} 张双全¹

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中心 兰州 730000)

3 (中国科学院理论物理研究所 北京 100080)

摘要 利用三轴形变的相对论平均场(RMF)理论讨论了 $A \sim 100$ 核区手征双重带候选核的三轴形变. 检验了RMF计算结果对基展开主壳数的收敛性. 基于PK1有效相互作用的形变约束计算, 给出了该核区Rh, Ag和In等同位素原子核的基态形变, 预言了 $A \sim 100$ 核区可能存在手征双重带的原子核.

关键词 手征双重带 相对论平均场理论 粒子空穴组态 形变约束计算

1 引言

手征性在自然界中普遍存在, 例如宏观世界中的海螺壳、分子生物学的氨基酸和DNA分子, 粒子物理中的中微子等都具有手征性. 原子核中的手征对称性破缺则导致手征双重带的产生. 原子核的手征双重带于1997年由Frauendorf和孟杰从理论上预言^[1], 至今, 实验上已经在很多原子核中发现了手征带.

唯象的粒子转子模型(PRM)是目前研究手征双重带的重要手段^[1-4], 但是三轴形变是粒子转子模型的物理输入量. 因此, 正确给出原子核的三轴形变是研究手征双重带的基础. 理论上, 三轴形变可以通过唯象的全位能面(TES或TRS)计算、非相对论Hartree-Fock方法或相对论平均场理论等计算得到, 但实验上无法对原子核的三轴形变进行直接测量, 只能通过相关物理现象来判断, 如wobbling现象和手征带等.

自1997年手征双重带的理论预言以来, 实验上发现的手征双重带原子核绝大多数位于 $A \sim 130$ 区; 最近的实验发现在 $A \sim 100$ 核区 ^{104}Rh ^[5]和 ^{106}Rh ^[6]原子核中基于 $\pi g_{9/2}^{-1} \otimes \nu h_{11/2}$ 粒子空穴组态也存在手征双重带. 这对应于手征双重带的一个新核区. 在该核区有可能在更多的原子核中建立手征双重带. 理论预言对于手征带的实验研究具有非常重要的参考意义.

本文利用三轴形变的相对论平均场(RMF)理论对 $A \sim 100$ 区的手征双重带候选核的形变进行研究.

为了得到原子核的基态性质, 在哈密顿量中引入了对 β 的约束, 并以 ^{106}Rh 为例, 给出了用约束计算得到的位能曲线. 利用最新发展的PK1有效相互作用, 对 $A \sim 100$ 区Rh, Ag和In等奇奇核同位素进行了形变约束计算, 得到这些原子核的基态形变信息. 从手征双重带的形成条件这一角度, 预言了 $A \sim 100$ 区可能存在手征双重带的原子核.

2 理论框架

在RMF理论框架下, 核子之间的相互作用是通过交换 σ , ω 和 ρ 介子以及光子来描述, 其有效相互作用Lagrangian量可写为

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & \bar{\psi}(i\gamma^\mu \partial_\mu - m - g_\sigma \sigma - g_\omega \gamma^\mu \omega_\mu - g_\rho \gamma^\mu \tau \cdot \rho_\mu - \\ & e\gamma^\mu \frac{1 - \tau_3}{2} A_\mu)\psi + \frac{1}{2} \partial^\mu \sigma \partial_\mu \sigma - \frac{1}{2} m_\sigma^2 \sigma^2 - \\ & \frac{1}{3} g_2 \sigma^3 - \frac{1}{3} g_3 \sigma^4 - \frac{1}{4} \omega^{\mu\nu} \omega_{\mu\nu} + \frac{1}{2} m_\omega^2 \omega^\mu \omega_\mu + \\ & \frac{1}{4} c_3 (\omega^\mu \omega_\mu)^2 - \frac{1}{4} \rho^{\mu\nu} \cdot \rho_{\mu\nu} + \\ & \frac{1}{2} m_\rho^2 \rho^\mu \cdot \rho_\mu - \frac{1}{4} A^{\mu\nu} A_{\mu\nu}, \end{aligned}$$

由上述Lagrangian量可以得到核子和介子的运动方程. 关于相对论平均场理论的细节及其在核物理中的相关应用参见文献[7-10]. 这里采用三维谐振子基展开的方法求解核子和介子的运动方程. 为了得到原子核的位能曲线, 在Hamiltonian中引入

* 国家重点基础研究发展规划项目(G2000077407)和国家自然科学基金(10025522, 10221003, 10047001)资助

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

对 $\langle Q_{20}^2 + 2Q_{22}^2 \rangle$ 的约束,

$$\mathcal{H}' = \mathcal{H} + \frac{1}{2}C(\langle Q_{20} \rangle^2 + 2\langle Q_{22} \rangle^2 - \lambda)^2,$$

其中 $\langle Q_{20} \rangle^2 + 2\langle Q_{22} \rangle^2$ 正比于 β^2 . 有关细节将在文献[11]中给出.

在计算中采用PK1有效相互作用^[12]. 谐振子频率取为 $\hbar\omega_0 = 41A^{-1/3}$ MeV. 为了选取合适的谐振子基展开主壳数 $n_{0f(b)}$, 以 ^{104}Rh 为例, 对计算结果随 $n_{0f(b)}$ 的收敛性进行了检验. 在图1中给出了PK1得到的 ^{104}Rh 的总束缚能、 β 和 γ 形变随费米子基展开主壳数 n_{0f} 的变化关系. 基形变 β_0 取0.0, 0.2, 0.4和0.6时对应的计算结果分别用实心圆圈, 空心方块, 空心上三角和空心下三角表示. 可以看出, 随着基展开主壳数 n_{0f} 的增加, 总束缚能、 β 和 γ 形变等能够很好地收敛. 因此, 在后续计算中取 $n_{0f} = 12$ 和 $\beta_0 = 0$. 同时, 计算结果对玻色子基展开主壳数 n_{0b} 不敏感, 为了节约计算时间, 在计算中取 $n_{0b} = 10$.

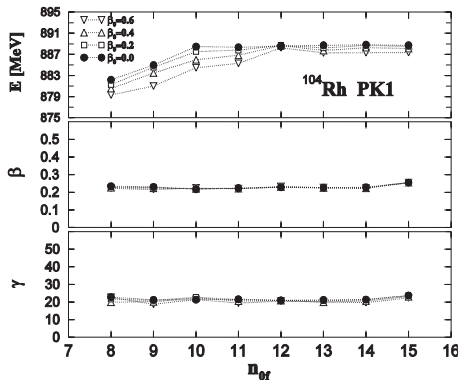


图1 ^{104}Rh 的束缚能, β 和 γ 形变随费米子基展开主壳数 n_{0f} 的变化关系

3 计算结果与讨论

为了得到原子核的基态性质, 我们用三轴形变的RMF理论对所选定的原子核进行了形变的二次约束计算. 图2给出了利用形变约束计算得到的 ^{106}Rh 的位能曲线. 曲线上的实心圆圈代表 ^{106}Rh 的能量极小点, 这对应于基态; 同时, 实心三角也标出了 ^{106}Rh 的其它极小点. 图中带括号的数组标记了极小点所对应的形变 (β, γ) . 从图2可以看到, ^{106}Rh 的基态所对应的形变为 $(0.27, 24.7^\circ)$, 其它几个极小点给出的形变分别为: $(0.25, 23.2^\circ)$, $(0.36, 11.9^\circ)$, $(0.42, 4.0^\circ)$.

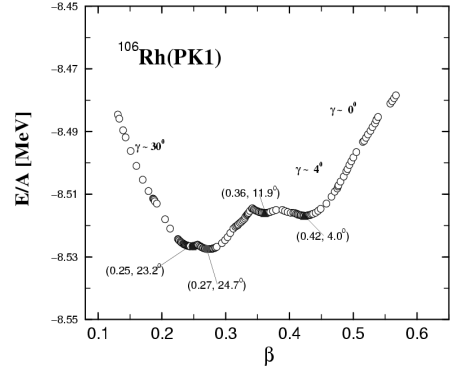


图2 三轴形变的RMF理论计算的 ^{106}Rh 的位能曲线

计算中采用PK1有效相互作用参数组.

图3中给出了采用PK1有效相互作用的三轴形变的RMF约束计算得到的Rh, Ag和In等同位素原子核的基态形变. 图3中的上, 中, 下三幅图分别对应于Rh, Ag和In的计算结果. 由于实验上已经在 ^{104}Rh 和 ^{106}Rh 发现了手征双重带^[5,6], 因此, 在图中用黑色实心圆圈着重标记了这两个原子核的计算结果. 可以看到, 计算得到的 ^{104}Rh 和 ^{106}Rh 的基态形变分别为 $(0.23, 20.9^\circ)$ 和 $(0.27, 24.5^\circ)$, 这说明 ^{104}Rh 和 ^{106}Rh 的基态具有较大的三轴形变, 满足形成手征双重带的条件, 这与最近在这两个核中找到手征带的实验结果相契合. 另外, 计算表明, $^{102,106,108}\text{Rh}$, $^{108,110,112}\text{Ag}$, ^{112}In 等原子核也具有很强的三轴形变, 也就是说, 在这些核中也可能找到手征双重带. 值得注意的是, 计算得到 ^{112}In 的 β 形变为 0.08, 对应于这种情况下的手征伙伴带之间存在较大的能级差别^[3].

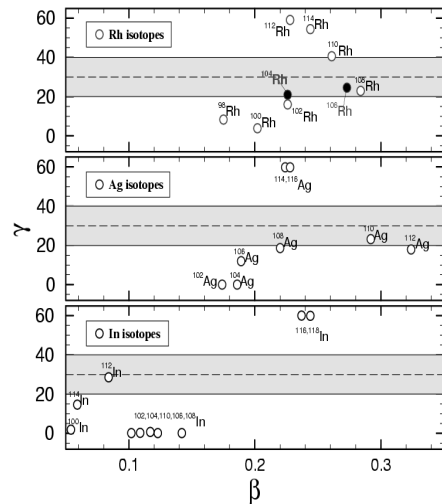


图3 三轴形变的RMF理论计算的 $A \sim 100$ 核区Rh, Ag和In同位素原子核的基态形变 (β, γ) 横坐标对应于 β 形变, 纵坐标是 γ 形变, 计算中采用PK1有效相互作用.

4 结论

本文首次利用三轴形变的RMF理论对手征双重带候选核的三轴形变进行了微观、自洽的研究. 基于PK1有效相互作用的RMF形变约束计算表明,

^{104}Rh 和 ^{106}Rh 的基态具有很强的三轴形变, 能够在两个原子核中建立手征双重带, 该结论与实验结果一致. 另外, $^{102,106,108}\text{Rh}$, $^{108,110,112}\text{Ag}$ 的基态同样具有很强的三轴形变, 有望在这些原子核中找到手征双重带.

参考文献(References)

- 1 Frauendorf S, MENG J. Nucl. Phys., 1997, **A617**: 131
- 2 Frauendorf S, MENG J. Z. Phys., 1996, **A365**: 263
- 3 PENG J, MENG J, ZHANG S Q. Phys. Rev., 2003, **C68**: 044324
- 4 ZHANG Shuang-Quan, PENG Jing, MENG Jie. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2004, **28**(2): 161(in Chinese) (张双全, 彭婧, 孟杰. 高能物理与核物理, 2004, **28**(2): 161)
- 5 Vanman C, Fossan D B et al. Phys. Rev. Lett., 2004, **92**: 032501
- 6 Joshi P et al. Phys. Lett., 2004, **B595**: 135
- 7 Ring P. Prog. Part. Nucl. Phys., 1996, **37**: 193
- 8 MENG J, Ring P. Phys. Rev. Lett., 1996, **77**: 3963
- 9 MENG J. Nucl. Phys., 1998, **A635**: 3
- 10 MENG J, Ring P. Phys. Rev. Lett., 1998, **80**: 460
- 11 MENG J, PENG J, ZHANG S Q. to be published
- 12 LONG W H et al. Phys. Rev., 2004, **C69**: 0343

Triaxial Deformation in Candidate Nuclei of the Chiral Doublet Bands*

PENG Jing¹ MENG Jie^{1,2,3;1)} ZHANG Shuang-Quan¹

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

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

³ (Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract The triaxial deformations of candidate nuclei of the chiral doublets bands in $A \sim 100$ mass region are investigated in a microscopic and self-consistent triaxial relativistic mean field (RMF) approach. The convergence of results is examined. Based on the constraint RMF calculation with effective interaction PK1, the deformations of ground state in Rh, Ag and In isotopes have been obtained. Large triaxial deformation necessary for chiral doublets band is predicted in several nuclei.

Key words chiral doublets bands, relativistic mean field theory, configuration, constraint calculation

* Supported by Major State Basic Research Development Program (G2000077407) and National Natural Science Foundation of China(10025522, 10221003, 10047001)

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