

# 同位旋非对称核物质性质与扩展的 BHF 方法\* (V) 三体核力对质子和中子单粒子势的影响

左维<sup>1;1)</sup> Lombardo U<sup>2</sup> 刘建业<sup>1</sup> 李君清<sup>1</sup>

1(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2(INFN-LNS, 44 Via S. Sofia, I-95123 Catania, Italy)

**摘要** 在扩展的同位旋相关的 Brueckner-Hartree-Fock 理论框架内,研究了三体核力对同位旋非对称核物质中质子与中子的单粒子势及其同位旋依赖性的影响.

**关键词** 单粒子势 三体核力效应 同位旋

## 1 引言

核物质中核子感受到的平均势场是重离子碰撞输运理论模型的基本输入量之一<sup>[1]</sup>. 中能区重离子碰撞中的集体流等物理观测量都灵敏地依赖平均场的密度相关性及其平均场的动量相关性<sup>[2]</sup>. 因而从现实核力出发,利用核微观多体理论方法较为精确地确定非对称核物质中质子和中子的平均场及其动量相关性就显得相当重要. 文献[3]在同位旋相关的扩展的 Brueckner Hartree-Fock (EBHF) 框架内<sup>[4]</sup>,通过对质量算子空穴线展开作不同等级的截断近似,在整个同位旋非对称度范围内计算了质子和中子在同位旋非对称核物质中感受到的平均势场及其动量依赖性,并讨论了基态关联的影响. 众所周知,从两体现实核力出发,非相对论微观多体理论不能正确预言对称核物质的经验饱和点位置<sup>[5]</sup>. 为了合理解释经验的核物质饱和性质,需要考虑相对论效应<sup>[6,7]</sup>或引进三体核力<sup>[8]</sup>. 理论研究<sup>[9]</sup>表明:在 BHF 计算中引入三体核力将大大改善对核物质饱和点性质的描述. 而且,随着核物质密度的增大,三体核力带来的排斥效应越来越强. 因此,为了在非相对论 EBHF 框架内合理地预言非对称核物质中质子和中子的平

均场并应用于中高能重离子碰撞理论研究,必须考虑三体核力效应. 本文计算结果表明:三体核力对质子和中子的平均场的贡献为排斥作用,这一贡献随核物质密度和同位旋非对称度的增大而增强. 当密度较低时,三体核力效应不明显;而随着密度的增大,三体核力对质子和中子平均场特别是对同位旋依赖关系的影响变得相当重要. 这表明要将非相对论微观多体理论的预言应用于重离子碰撞与核天体物理,必须考虑三体核力效应. 另外,还发现三体核力对基态粒子-空穴关联(质量算子展开中二阶项)的影响较小.

## 2 微观三体核力

本文采用的微观三体核力模型是文献[10]中根据介子交换流方法建立的,考虑了核力单玻色交换模型中最重要的 4 种玻色子  $\pi, \sigma, \omega$  和  $\rho$ , 其中  $\omega$  介子与核子具有强矢量耦合; $\rho$  介子与核子有强的张量耦合;而核力单玻色交换模型中  $\sigma$  介子的引进模拟了多  $\pi$  交换效应<sup>[7]</sup>, 提供了核子-核子强相互作用中的中程吸引部分. 关于上述三体核力模型的详细论述见文献[10].

2002-09-30 收稿

\* 中国科学院百人计划,中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KJ951-A1-01),国家重点基础研究发展规划(G2000077400),国家科技部重大前期研究专项基金(2002CCB00200)和国家自然科学基金重点项目(10235030)资助

1) E-mail: zuowei@impcas.ac.cn

为了避免求解三体 Bethe-Faddeev 问题,通常使用的方法是:通过对三体核力中第三个粒子自由度作平均而将其约化为一个密度相关的等效两体核力<sup>1)</sup>,即<sup>[9,10]</sup>

$$V_3^{\text{eff}}(r_1', r_2' | r_1, r_2) = \frac{1}{4} \text{Tr} \sum_n \int d\mathbf{r}_3 d\mathbf{r}_3' \phi_n^*(\mathbf{r}_3) \times [1 - \eta(r_{13})][1 - \eta(r_{23})] \times W_3(r_1', r_2', r_3' | r_1, r_2, r_3) \phi_n(\mathbf{r}_3) \times [1 - \eta(r_{13})] \times [1 - \eta(r_{23})], \quad (1)$$

其中  $\eta(r_{13})$  是关联函数,定义为  $\eta(r_{12}) = \varphi(r_{12}) - \psi(r_{12})$ .  $\varphi(r_{12})$  是两个自由核子的相对运动波函数;而  $\psi(r_{12})$  是核介质中两个关联核子的相对运动波函数. 本文计算采用标准的 BHF 自洽方案,即通过自洽迭代求解同位旋相关的 Behte-Goldstone (BG) 方程,得到有效相互作用  $G$  矩阵. 由于有效三体核力  $V_3^{\text{eff}}$  依赖于核子间关联,因此在求解 BG 方程的每一次迭代过程中,都必须与  $G$  矩阵相互自洽地确定. 就是说,在每一次迭代中,通过求解 BG 方程得到  $G$  矩阵,再根据  $G$  矩阵可计算关联函数  $\eta(r_{12})$ ,进一步利用(1)式计算出  $V_3^{\text{eff}}$ ;用两体现实核力加上得到的  $V_3^{\text{eff}}$  作为下一次迭代的核子-核子相互作用,重复上述过程直到计算收敛到给定精度. 由于  $\psi(r_{12})$  是 BG 方程的解<sup>[8]</sup>,因此关联函数  $\eta(r_{12})$  包含了核子-核子间短程关联(即梯形图). 在自洽求解 BG 方程的每一步迭代中,关联函数  $\eta(r_{12})$  和有效三体核力  $V_3^{\text{eff}}$  都重新自洽地计算<sup>[9]</sup>. 因此,通过 BHF 自洽迭代过程,这一有效三体核力中正确计及了与第三个核子关联效应.

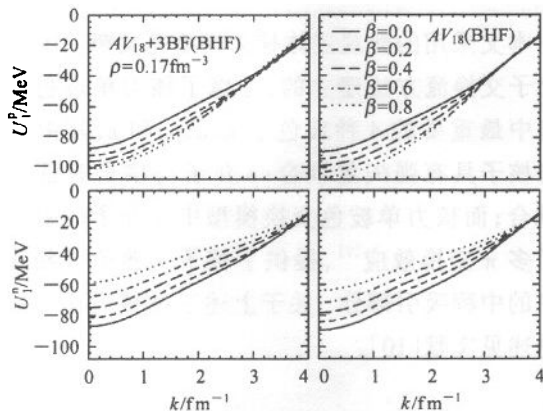


图 1 密度为  $\rho = 0.17 \text{fm}^{-3}$  时,不同的同位旋非对称度  $\beta$  下,非对称核物质中质子和中子平均场的最低阶近似  $U_1^p$  随动量的变化关系

计算中采用完全的 Argonne  $V_{18}$  势<sup>[11]</sup> 作为微观两体现实核力,对于辅助势采用连续性选择<sup>[12]</sup>,这时辅助势不但具有单粒子 BHF 平均场的物理意义<sup>[13]</sup>,而且与间隙性选择相比较,核物质能量空穴线展开的收敛速度快得多<sup>[14]</sup>.

众所周知,非相对论 BHF 计算中必须引进三体核力才能解释经验的核物质饱和和性质<sup>[7,8]</sup>. 我们在文献[15]中已经计算了考虑三体核力和不考虑三体核力时对称核物质的状态方程,并讨论了三体核力效应与相对论效应的联系以及核物质饱和和机制问题;在文献[16]中进一步研究了三体核力对同位旋非对称核物质状态方程及其同位旋依赖性的影响. 这些研究表明:引进上述微观三体核力能够大大改善 BHF 理论预言的核物质饱和和性质;而且在整个同位旋非对称度范围内,三体核力对状态方程都贡献一个随密度增大而增强的额外排斥作用,使高密度核物质状态的不可压缩性增强,这与相对论性 Dirac-BHF 理论预言的结果<sup>[17]</sup> 在总体上相一致.

### 3 计算结果及讨论

在扩展的 BHF 框架内,质量算子可根据空穴线的数目来展开<sup>[4,12]</sup>,即

$$M^\tau(k, \omega) = M_1^\tau(k, \omega) + M_2^\tau(k, \omega) + \dots, \quad (2)$$

$\tau = n, p$  分别表示中子和质子. 在上述展开式中,最低阶贡献  $M_1^\tau(k, \omega)$  对应于通常的 BHF 近似下的质量算子;而二阶贡献  $M_2^\tau(k, \omega)$  被称为重排项<sup>[12]</sup>,反映了核物质中基态粒子-空穴关联的影响. 核子在核物质中受到的平均场由能壳上质量算子的实部给

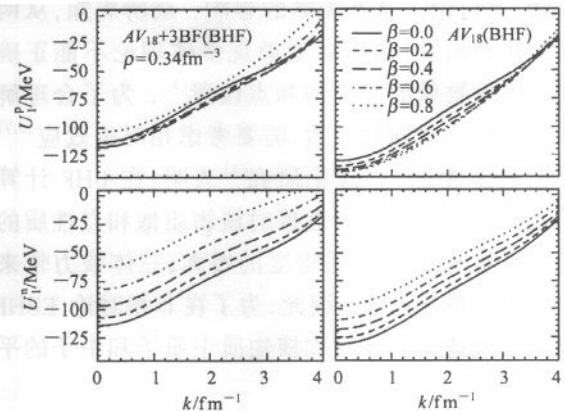


图 2 密度为  $\rho = 0.34 \text{fm}^{-3}$  时,不同的同位旋非对称度  $\beta$  下,非对称核物质中质子和中子平均场的最低阶近似  $U_1^p$  随动量的变化关系

1) 详见文献[8,10]中对这一方法合理性的论述. 后文中将称这一等效两体核力为有效三体核力.

出,即

$$U^{\prime}(k) = \text{Re}M^{\prime}(\omega, k) \Big|_{\omega = \epsilon^{\prime}(k)}, \quad (3)$$

其中  $\epsilon^{\prime}(k)$  为中子或质子的单粒子能量, 详见文献 [4].

在图 1 中给出了密度  $\rho = 0.17\text{fm}^{-3}$ 、同位旋非对称度参数  $\beta$  分别为 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 时, 非对称核物质中质子和中子平均场的最低阶近似  $U_1^{\prime}(k)$  随动量  $k$  的变化关系. 同位旋非对称度参数定义为  $\beta = (\rho_n - \rho_p) / \rho$ , 其中  $\rho_n, \rho_p$  和  $\rho$  分别表示中子数密度、质子数密度和总核子数密度. 右图显示的是没有考虑三体核力的计算结果, 左图则是在计算中包含了三体核力得到的结果. 通过比较可以看出: 在整个同位旋非对称范围内, 三体核力对中子和质子的平均场的贡献都是排斥的. 值得注意的是, 在这一密度下三体核力效应不是很明显, 这与我们关于核物质状态方程中的三体核力效应的研究结果 [9] 是一致的. 由于三体核力对于高密度的核物质性质具有特别的重要性, 而且中能重离子碰撞中能够产生最大压缩密度为  $\rho \approx 0.34\text{fm}^{-3}$  的核物质, 因此进一步计算了密度  $\rho = 0.34\text{fm}^{-3}$  时, 非对称核物质中质子和中子平均场的最低阶近似  $U_1^{\prime}$ , 结果如图 2 所示. 与图 1 比较可以看到, 随着密度的增大, 三体核力效应明显增强; 而且三体核力的作用随着同位旋非对称度的增大而增强, 甚至改变了质子平均场随同位旋的变化趋势. 由于中子星内部可能存在高密度的极端丰中子的核物质, 因而上述结果表明三体核力对中子星的性质和演化会有重要影响.

进一步讨论三体核力对平均场的同位旋依赖性

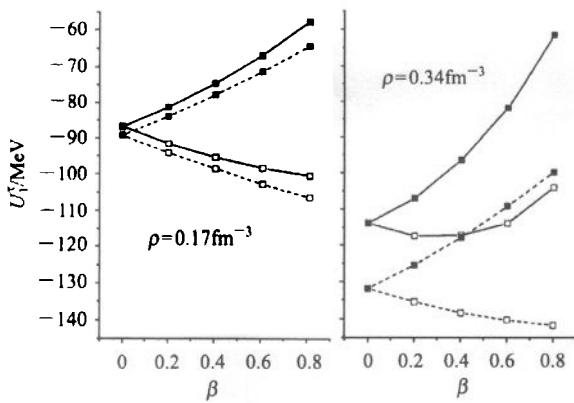


图 3 密度分别为  $\rho = 0.17\text{fm}^{-3}$  和  $\rho = 0.34\text{fm}^{-3}$  时, 对于给定动量  $k = 0$ , 质子和中子平均场  $U_1^{\prime}$  和  $U_1^{\prime}$  随同位旋非对称度的变化关系

的影响. 图 3 中分别给出了密度  $\rho = 0.17\text{fm}^{-3}$  和  $\rho = 0.34\text{fm}^{-3}$  时, 质子平均场  $U_1^{\prime}$  (空心方形符号) 和中子平均场  $U_1^{\prime}$  (实心方形符号) 在动量  $k = 0$  处的值随同位旋非对称参数  $\beta$  的变化关系. 在图中同时给出了考虑三体核力 (实线) 和不考虑三体核力 (虚线) 两种情况下的计算结果, 以便比较. 由图中可见, 当不考虑三体核力时, 质子和中子平均场  $U_1^{\prime}$  和  $U_1^{\prime}$  随同位旋非对称参数  $\beta$  的变化都近似满足线性关系. 当密度较低 ( $\rho = 0.17\text{fm}^{-3}$ ) 时, 三体核力对  $U_1^{\prime}$  和  $U_1^{\prime}$  的贡献表现为微弱的排斥作用, 而且对  $U_1^{\prime}$  和  $U_1^{\prime}$  的同位旋依赖关系影响也很小. 当密度较高 ( $\rho = 0.34\text{fm}^{-3}$ ) 时, 三体核力效应变得相当重要, 而且三体核力的作用随着  $\beta$  的增大而增强, 结果使  $U_1^{\prime}$  和  $U_1^{\prime}$  随  $\beta$  的变化明显地偏离线性关系. 特别是, 在同位旋非对称度足够高的区域 ( $\beta \geq 0.3$ ) 内, 三体核力的作用甚至导致质子平均场  $U_1^{\prime}$  的吸引力随  $\beta$  增大而减弱.

质量算子空穴线展开中二阶项  $M_2$  反映了核物质中基态粒子 - 空穴关联效应, 对核物质中核子感受到的平均势场有相当重要的影响 [13, 12]. 下面简单讨论一下三体核力对平均场的二阶项  $U_2(k) = \text{Re}M_2(k)$  的影响. 我们计算了密度  $\rho = 0.17\text{fm}^{-3}$  和  $\rho = 0.34\text{fm}^{-3}$  时, 对称核物质中  $U_2(k)$  随动量  $k$  的变化, 结果如图 4 所示, 其中实线表示考虑了三体核力的计算结果, 而虚线则对应于不考虑三体核力的计算结果. 从图中可明显看到, 三体核力对基态关联的影响较小. 这表明三体核力并不能明显减弱基态关联对质子和中子平均场的影响, 因而, 在考虑了三体核力之后, 仍然需要在平均场中考虑基态关联效应.

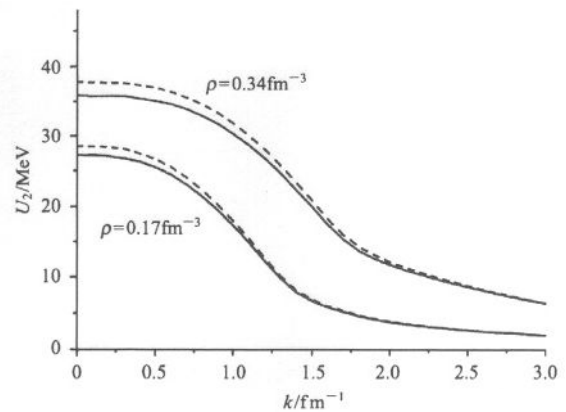


图 4 三体核力对质子和中子平均场二阶项的影响

## 4 小结

利用同位旋相关的 EBHF 理论方法,通过在两体现实核力基础上引进微观三体核力,研究了三体核力对非对称核物质中质子和中子平均场及其同位

旋依赖关系的影响.结果表明:三体核力减弱了平均场的吸引力;密度较低时,三体核力效应较小,随着密度的增大,三体核力的影响越来越重要;而且,在同一密度下,三体核力的作用随着同位旋非对称度的增大而增强.另外,三体核力对平均场的二阶项(基态关联的贡献)的影响较小.

## 参考文献 (References)

- 1 Bertsch G F, Gupta S D. *Phys. Rep.*, 1988, **160**:189; Aichelin J, Rosenhauer A, Peilert G et al. *Phys. Rep.*, 1991, **202**:233; Cugnon J, Lejeune A, Grange P. *Phys. Rev.*, 1987, **C35**:861; LI B A. *Phys. Rev.*, 1993, **C48**:2415; LI B A, Ko C M, Bauer W. *Inter. J. Mod. Phys.*, 1998, **E7**:147
- 2 Insolia A, Lombardo U, Sandulescu N. *Phys. Lett.*, 1994, **B334**:12
- 3 ZUO Wei et al. *High Energy Phys. and Nucl. Phys.*, 2003, **27**:416 (in Chinese)  
(左维等. 高能物理与核物理, 2003, **27**:416)
- 4 ZUO Wei, Lombardo U, LI Zeng-Hua et al. *High Energy Phys. and Nucl. Phys.*, 2002, **26**:703 (in Chinese)  
(左维, Lombardo U, 李增花等. 高能物理与核物理, 2002, **26**:703)
- 5 Coestor. *Phys. Rev.*, 1970, **C1**:765
- 6 Brown G E, Weise W, Baym G et al. *Comments Nucl. Phys.*, 1987, **17**:39
- 7 Machleidt R. *Adv. Nucl. Phys.*, 1989, **16**:189
- 8 Baldo M. Chap. 1 in *Nuclear Methods and the Nuclear Equation of State*, Ed. Baldo M, Singapore: World Scientific, 1999
- 9 Lejeune A, Lombardo U, ZUO W. *Phys. Lett.*, 2000, **B477**:45
- 10 Grange P, Lejeune A, Martzoff M. *Phys. Rev.*, 1989, **C40**:1040
- 11 Wiringa R B, Smith R A, Ainsworth T L. *Phys. Rev.*, 1984, **C29**:1207
- 12 Hufner J, Mahaux C. *Ann. Phys.*, 1972, **73**:525; Jeukenne J P, Lejeune A, Mahaux C. *Phys. Rep.*, 1976, **25**:83; Grange P, Cugnon J, Lejeune A. *Nucl. Phys.*, 1987, **A473**:365
- 13 Sartor R. Chapter 6 in *Nuclear Methods and the Nuclear Equation of State*, Ed. Baldo M, Singapore: World Scientific, 1999
- 14 SONG H Q, Baldo M, Giansiracusa G et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, **81**:1584
- 15 ZUO Wei, Lombardo U. *High Energy Phys. and Nucl. Phys.*, 2002, **26**:1134 (in Chinese)  
(左维, Lombardo U. 高能物理与核物理, 2002, **26**:1134)
- 16 ZUO Wei, Lombardo U, LIU Jian-Ye et al. *High Energy Phys. and Nucl. Phys.*, 2002, **26**:1238 (in Chinese)  
(左维, Lombardo U, 刘建业等. 高能物理与核物理, 2002, **26**:1238)
- 17 MA Zhong-Yu, LIU Ling. *Phys. Rev.*, 2002, **C66**:024321

## Properties of Isospin Asymmetric Nuclear Matter and Extended BHF Approach<sup>\*</sup> ( V ) Three -Body Force Effect on Single-Particle Potential

ZUO Wei<sup>1,1)</sup> Lombardo U<sup>2</sup> LIU Jian-Ye<sup>1</sup> LI Jun-Qing<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

<sup>2</sup>(INFN-LNS, 44 Via S. Sofia, I-95123 Catania, Italy)

**Abstract** Within the isospin dependent Extended Brueckner-Hartree-Fock framework, the three-body force effects on the single particle potentials of a neutron and a proton in isospin asymmetric nuclear matter and their isospin dependence have been investigated. It is shown that the contribution of the three-body force is repulsive. At low density, i. e., around and below the empirical saturation density, the effect of the three-body force is rather small, while as increasing density, it becomes more and more pronounced. It is also found that at a given density, the three-body effect increases with isospin asymmetry.

**Key words** single particle potential, three-body force effect, isospin

---

Received 30 September 2002

<sup>\*</sup> Supported by One Hundred Person Project of Chinese Academy of Sciences, Chinese Academy of Sciences Knowledge Innovation Project (KJ92-SW-N02), Major State Basic Research Development Program (G2000077400), Important Pre-research Project of the Chinese Ministry of Science and (2002CCB00200) Technology and National Natural Science Foundation of China (10235030)

1) E-mail: zuowei@impcas.ac.cn