

# 同位旋非对称核物质性质与扩展的 BHF 方法<sup>\*</sup>

## (IV) 单粒子势与有效质量

左维<sup>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, 计算了同位旋非对称核物质中质子与中子的单粒子势和有效质量及其同位旋效应, 并详细研究和讨论了基态关联对单粒子势和有效质量及其同位旋依赖的影响。

**关键词** 单粒子势 有效质量 基态关联

### 1 引言

随着放射性次级束装置的相继建成和使用, 在实验室内产生同位旋高度非对称核物质提供了有利条件, 使人们能够在同位旋自由度范围内研究和提取核物质的性质<sup>[1]</sup>. 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>[2]</sup>. 理论研究表明<sup>[3]</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软硬程度及平均场的动量相关性. 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.

在文献[4]得到的同位旋相关的扩展的 Brueckner-Hartree-Fock (EBHF) 框架内, 采用完全的 Argonne  $V_{18}$  势<sup>[5]</sup>作为现实核力, 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, 并研究和讨论了基态关联的影响. 计算结果表明: 在质量算子的最低阶近似下, 质子和中子的平均场均线性地依赖于同位旋非对称度  $\beta = (\rho_n - \rho_p)/\rho$ , 这里  $\rho_n, \rho_p$  和  $\rho$  分别为非对称核物质中质

子密度、中子密度和总核子密度, 而且质子平均场的排斥性随  $\beta$  增大而减弱, 中子平均场的排斥性随  $\beta$  增大而增强. 基态关联对中子和质子的平均场的贡献为排斥作用, 大大减弱了 BHF 平均场的吸引力; 另外, 基态关联还将导致质子和中子平均场对同位旋线性依赖的偏离. 特别是对于质量算子虚部的计算结果表明: 在同位旋高度非对称核物质中或丰中子核表面, 中子的传播变得比质子更透明.

### 2 质量算子与单粒子势

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>[4,6]</sup>, 即

$$M^\tau(k, \omega) = M_1^\tau(k, \omega) + M_2^\tau(k, \omega) + \dots, \quad (1)$$

质量算子  $M^\tau(k, \omega)$  是一个复算子, 可以看作一个具有动量  $k$  和能量  $\omega$  的中子 ( $\tau = n$ ) 或质子 ( $\tau = p$ ) 在核物质中感受到的单粒子平均位势. 在质量算子展开式中, 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>[6]</sup>, 反映了核物质中基态粒子-空穴关联对单粒子性质的影响.  $M_1^\tau(k, \omega)$  和  $M_2^\tau(k, \omega)$  分别由下式计算<sup>[4]</sup>:

2002-07-22 收稿

<sup>\*</sup> 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 (KJ9X2-SW-N02), 国家重点基础研究发展规划 (G2000077400), 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

$$M_1^r(k, \omega) = \sum_r \sum_{k'} n^r(k') \langle kk' | G^r[\omega + \epsilon^r(k')] | kk' \rangle_A, \quad (2)$$

$$M_2^r(k, \omega) = \frac{1}{2} \sum_r \sum_{k_1 k_2} [1 - n^r(k')] \sum_{k_1 k_2} n^r(k_1) n^r(k_2) \frac{|\langle kk' | G^r[\epsilon^r(k_1) + \epsilon^r(k_2)] | k_1 k_2 \rangle_A|^2}{\omega + \epsilon^r(k') - \epsilon^r(k_1) - \epsilon^r(k_2) - i\eta}, \quad (3)$$

其中  $G^r$  为同位旋相关的有效相互作用矩阵, 包含无限梯形图求和, 由 Bethe-Goldstone(BG) 方程决定, 详见文献[4,6]中的讨论. BG 方程经过 5 次自洽迭代就可以达到合理的收敛. 计算中对于辅助势采用连续性选择<sup>[6]</sup>, 这时辅助势具有单粒子 BHF 平均场的物理意义<sup>[7]</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>[8]</sup>.

### 3 计算结果及讨论

#### 3.1 中子和质子单粒子势

核子在核物质中的平均场由质量算子的实部给出, 而质量算子的虚部与核子的平均自由程相联系<sup>[6]</sup>. 在非对称核物质中, 质子与中子具有不同的质量算子, 感受到不同的平均场. 质子和中子的质量算子均可以分为两部分, 即

$$M^p = M^{pp} + M^{pn}, \quad M^n = M^{nn} + M^{np}, \quad (4)$$

$M^{pp}$  和  $M^{nn}$  ( $M^{np}$  和  $M^{pn}$ ) 分别为非对称核介质环境中质子和中子对质子(中子)质量算子的贡献. 图 1 给出了密度为  $\rho = 0.17\text{fm}^{-3}$  处, 同位旋非对称度参数分别取  $\beta = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$  和  $0.95$  时, 质量算子的最低阶近似  $M_1^r$  的实部  $V_1^r$  和虚部  $W_1^r$  随动量的变化关系. 由图中可见, 随着同位旋非对称度  $\beta$  的增大, 质子受到的平均场  $V_1^p(k) \equiv \text{Re}M_1^p(k)$  具有越来越强的吸引力, 而中子的平均场  $V_1^n(k) \equiv \text{Re}M_1^n(k)$  排斥性越来越强. 这是因为在非对称核物质中, 随着  $\beta = (\rho_n - \rho_p)/\rho$  的增大, 中子数所占比例增大而质子比例减小, 质子受到来自周围中子的同位旋  $T = 0$  的  $SD$  张量道强吸引作用增强, 而中子受到来自周围质子的  $SD$  张量道强吸引作用减弱. 质量算子的虚部与核子在核物质中的平均自由程相联系, 其最低阶近似  $M_1^r$  的虚部  $W_1^r$  描述了处于费米面下的一个核子与周围环境中的一个质子或中子发生虚碰撞而被激发到一个粒子态. 由于泡利原理的限制, 在费米面以下  $W_1^r$  为零. 从图 1 还可以看到,

随着非对称度  $\beta$  的增加, 质子受到的泡利阻塞效应减弱而中子受到的泡利阻塞增强, 从而使得核物质中的质子比中子更容易与周围核子发生碰撞. 表现为  $W_1^p$  的绝对值随  $\beta$  的增加而增大,  $W_1^n$  的绝对值随  $\beta$  的增加而减小. 这意味着在同位旋高度非对称核物质中, 中子的传播变得比质子更透明. 这一结果表明: 原子核表面, 特别是丰中子核表面, 对中子将比对质子更为透明.

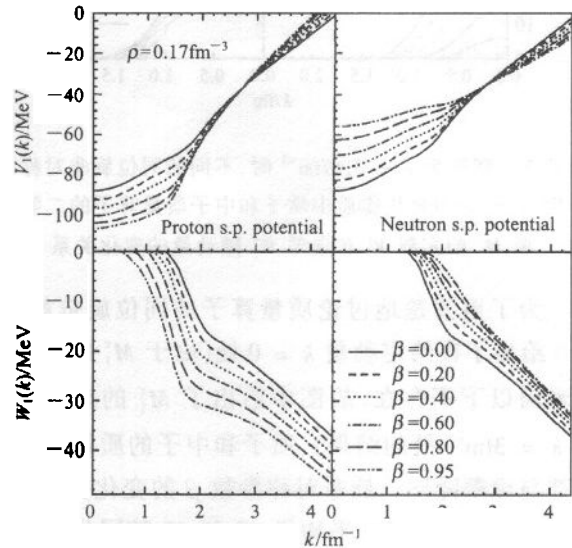


图 1 密度为  $\rho = 0.17\text{fm}^{-3}$  时, 不同的同位旋非对称度  $\beta$  下, 非对称核物质中质子和中子质量算子的最低阶近似  $M_1^r$  的实部  $V_1^r$  和虚部  $W_1^r$  随动量的变化关系

质量算子空穴线展开中二阶项  $M_2^r$  称为重排项<sup>[6]</sup>, 反映了基态关联对单粒子性质的影响.  $M_2^r$  的实部  $V_2^r$  描述了核物质中基态粒子-空穴激发对质子或中子受到的平均场的贡献, 而它的虚部  $W_2^r$  则描述了一个处于激发态的质子或中子与周围介质中的核子发生虚碰撞而退激到一个空穴态. 图 2 给出了密度  $\rho = 0.17\text{fm}^{-3}$  时, 具有不同非对称度  $\beta = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$  和  $0.95$  的核物质中,  $M_2^r$  的实部  $V_2^r$  和虚部  $W_2^r$  随动量  $k$  的变化关系. 可以看到, 在整个同位旋非对称度范围内, 二阶项对平均场的贡献  $V_2^r$  都是一个相当强的排斥作用, 从而在很大程度上减弱了 BHF 平均场的吸引力, 改善了与唯象光学势的符合程度. 这表明基态关联对于非对称核物质的单粒子性质(这里指核子在核物质中所具有的性质, 如感受到的平均场、准粒子能谱、平均自由程等)有相当重要的影响. 另外, 由于泡利阻塞效应,  $M_2^r$  的虚部  $W_2^r$  在费米面以上不存在, 这与其物理含义是一致的.

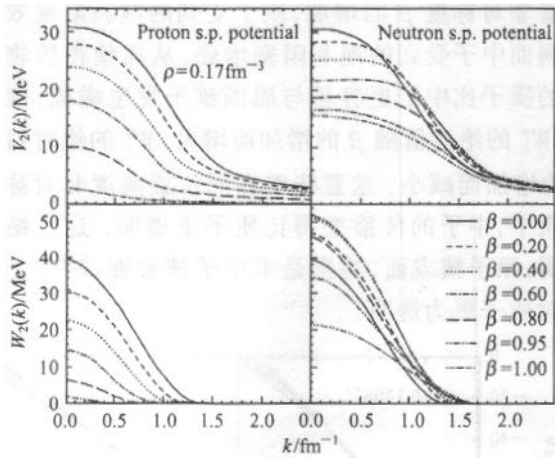


图 2 密度为  $\rho = 0.17\text{fm}^{-3}$  时, 不同的同位旋非对称度  $\beta$  下, 非对称核物质中质子和中子质量算子的二阶项  $M_2^i$  的实部  $V_2^i$  和虚部  $W_2^i$  随动量的变化关系

为了更清楚地讨论质量算子的同位旋依赖性, 图 3 给出了在给定动量  $k = 0$  处(由于  $M_1^i$  的虚部在费米面以下不存在, 故图中给出了  $M_1^i$  的虚部在动量  $k = 3\text{fm}^{-1}$  处的结果), 质子和中子的质量算子的实部与虚部随同位旋非对称参数  $\beta$  的变化关系. 由图中可以看到, BHF 平均场  $V_1^p$  和  $V_1^n$  随同位旋非对称度  $\beta$  的变化几乎是线性的, 这从微观上肯定了 Lane 势的合理性<sup>9</sup>. 而且, 我们还检验了对于任意给定的动量值, 上述线性相关性都成立. 与  $M_1^i$  对  $\beta$  的简单线性依赖关系不同, 二阶项  $M_2^i$  对  $\beta$  的依赖关系要复杂得多. 由于核子空穴态与基态粒子-空穴激发的相互耦合, 使得质量算子二阶项的混合分量  $M_2^{pn}$  和  $M_2^{np}$  随同位旋自由度的变化偏离线性关系. 因而, 基态关联将在一定程度上导致平均场对  $\beta$  线性依赖关系的偏离, 这进一步表明基态粒子-空穴关联的重要性.

### 3.2 中子与质子的有效质量

核物质中核子的有效质量描述了核子在核介质中受到的平均场的非定域部分, 反映了平均势场的动量相关性. 这一动量相关性使平均势场中定域部分的吸引性减弱. 在非对称核物质中, 中子和质子感受到不同的平均势场作用, 因而具有不同的有效质量. 中子与质子的有效质量定义为

$$\frac{m_i^*(k)}{m} = \frac{k}{m} \left[ \frac{dE^i(k)}{dk} \right]^{-1}, \quad (5)$$

其中  $E^i(k)$  是质子或中子的准粒子能谱, 其定义见文献[4]. 由于费米面附近高的粒子-空穴激发几

率, 有效质量的动量分布在费米动量附近存在一个峰值<sup>6</sup>. 而质量算子空穴线展开中高阶项的贡献(基态关联效应)使有效质量在费米面附近的峰大大加

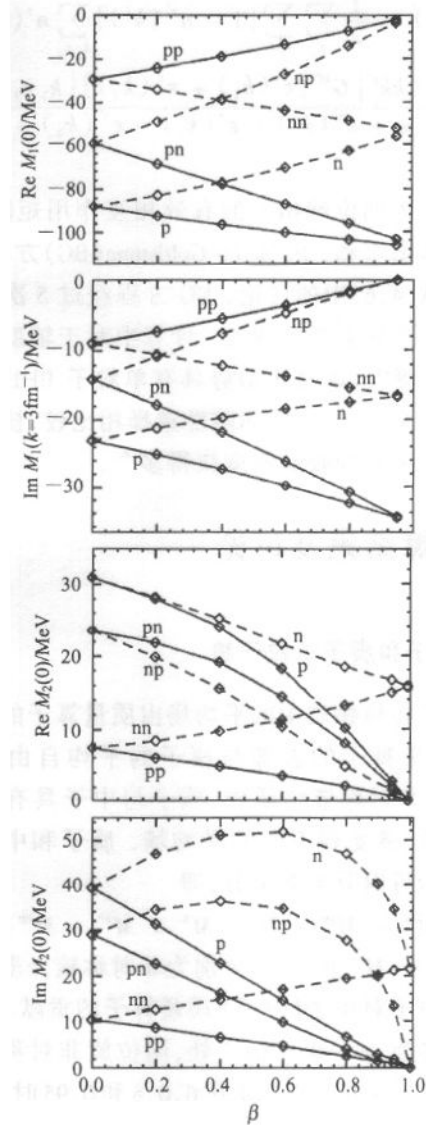


图 3 对于给定动量, 质子和中子质量算子一阶项  $M_1^i$  和二阶项  $M_2^i$  的实部和虚部的各分量随同位旋非对称度的变化关系

强<sup>6</sup>. 图 4 给出了中子和质子在各自费米面处的有效质量随非对称核物质的同位旋非对称度  $\beta$  的变化关系. 由图中可以看到, 无论是否考虑基态关联效应, 中子的有效质量  $m_n^*$  都随着  $\beta$  的增大而增大, 而质子的有效质量  $m_p^*$  随  $\beta$  的增大而减小. 比较图中 BHF 与 EBHF 的计算结果可知, 基态关联使费米面附近中子和质子的有效质量增大(对于对称核物质  $\beta = 0$ , 在密度  $\rho = 0.17\text{fm}^{-3}$  处, 基态关联使有效质量由 0.8 增大到 0.92). 这一结果可以根据基态关联效应引起中子和质子的费米面弥散, 从而使费米面

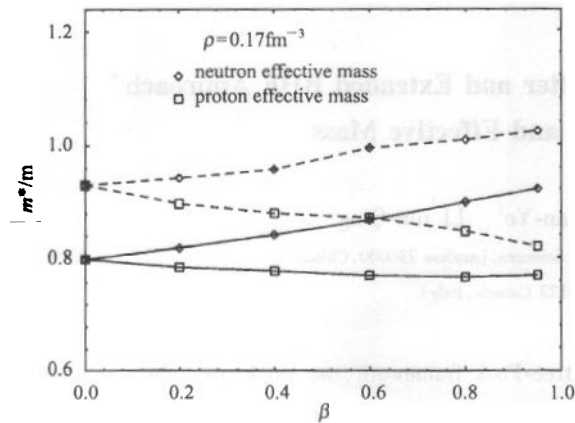


图4 密度为  $\rho = 0.17 \text{ fm}^{-3}$  时, 在 EBHF(---) 和 BHF(—) 近似下, 非对称核物质中质子和中子有效质量随同位旋非对称度的变化关系

附近中子和质子态密度减少来加以理解. 从图中还可以看出, 随着  $\beta$  的增大由于关联效应减弱, EBHF 预言的有效质量逐渐接近相应的 BHF 预言值.

## 4 小结

利用同位旋相关的 EBHF 方法, 在整个同位旋自由度范围内计算了非对称核物质中质子和中子的

质量算子及其同位旋依赖性, 并研究和讨论了基态关联效应对质子和中子平均势场和有效质量的影响. 结果表明: 在质量算子的最低阶近似(BHF 近似)下, 随着同位旋非对称度  $\beta$  的增大, 质子受到的平均场作用的吸引力增强, 而中子平均场的排斥性增强, 而且对于任意给定动量, 质子和中子的平均场均线性地依赖于  $\beta$ . 另外, 质子和中子质量算子的虚部对同位旋的不同依赖性还表明在同位旋高度非对称核物质中, 中子的传播要比质子更透明. 基态关联对质子和中子的平均场产生一个额外的排斥作用, 从而改善了与唯象光学势的符合程度. 基态关联还使质子和中子的平均场的同位旋依赖性在一定程度上偏离线性关系. 这些结果表明了基态关联效应对非对称核物质中质子和中子的单粒子性质及其同位旋依赖性的重要性. 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>[10]</sup>. 为了正确描述核物质的饱和性质, 需要考虑相对论效应或引进三体核力<sup>[11]</sup>. 文献[12]的研究结果表明: 在 BHF 计算中引入三体核力将大大改善对饱和点性质的描述. 因此, 有必要讨论三体核力对核物质中单粒子特性的影响, 这一问题将另文讨论.

## 参考文献 (References)

- Nazarewicz W, Sherrill B, Taniguchi I et al. Nucl. Phys. News, 1996, 6: 17; Oyamatsu K, Taniguchi I, Sugahara Y et al. Nucl. Phys., 1998, A634: 3; Li B A, Ko C M, Bauer W. Inter. J. Mod. Phys., 1998, E7: 147
- 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
- Insolia A, Lombardo U, Sandulescu N. Phys. Lett., 1994, B334: 12
- 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)
- Wiringa R B, Smith R A, Ainsworth T L. Phys. Rev., 1984, C29: 1207
- 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
- Sartor R. Chapter 6 in Nuclear Methods and the Nuclear Equation of State, Ed. Baldo M, Singapore: World Scientific, 1999
- SONG H Q, Baldo M, Giansiracusa G et al. Phys. Rev. Lett., 1998, 81: 1584
- Lane A M. Nucl. Phys., 1962, 35: 676
- Goestor et al. Phys. Rev., 1970, C1: 765; Baldo M. Chapter 1 in Nuclear Methods and the Nuclear Equation of State, Ed. Baldo M, Singapore: World Scientific, 1999
- Brown G E, Weise W, Baym G. Comments Nucl. Phys., 1987, 17: 39; Machleidt R. Adv. Nucl. Phys., 1989, 16: 189
- ZUO Wei, Lombardo U, LIU Jian-Ye et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2002, 26(12): 1238 (in Chinese)  
(左维, Lombardo U, 刘建业等. 高能物理与核物理, 2002, 26(12): 1238)

Properties of Isospin Asymmetric Nuclear Matter and Extended BHF Approach\*  
(IV) Single-Particle Potential and Effective Mass

ZUO Wei<sup>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 single particle potentials and effective masses of a neutron and a proton in isospin asymmetric nuclear matter as well as their isospin dependence have been investigated. The effects of ground state correlations are also studied and discussed. It is found that the neutron mean field becomes more repulsive while the proton one becomes more attractive as increasing asymmetry parameter  $\beta$ , and both display a linear dependence on  $\beta$  at the lowest order approximation. The ground state correlations lead to a repulsive and nonlinear  $\beta$ -dependent contribution to both the neutron and proton single particle potentials.

**Key words** single particle potential, effective mass, ground state correlation

Received 22 July 2002

\* Supported by One Hundred Person Project of Chinese Academy of Science, Chinese Academy of Science Knowledge Innovation Project (KJ951-A1-01-01), Major State Basic Research Development Program (G2000077400), Important Pre-research Project (2002CCB00200) of Chinese Ministry of Science and Technology, and National Natural Science Foundation of China (10235030)