

# 同位旋非对称核物质性质与扩展的 BHF 方法 (VI)\*

## 质子和中子平均自由程及其同位旋依赖性

左维<sup>1,1)</sup> U. Lombardo<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 Brueckner-Hartree-Fock 理论框架内,研究了同位旋非对称核物质中质子和中子的平均自由程,着重讨论了其同位旋依赖性. 结果表明:随核物质同位旋非对称度的增大,质子平均自由程减小而中子的平均自由程增大. 这表明中子滴线附近的原子核表面对中子比对质子更具透明度. 还简单讨论了基态关联效应对平均自由程的影响.

**关键词** 扩展的 BHF 方法 平均自由程 同位旋依赖性

### 1 引言

核物质中核子平均自由程(或核子-核子碰撞截面)是描述核物质中核子输运特性的一个重要物理量,也是决定重离子碰撞动力学过程的主要物理量之一<sup>[1,2]</sup>. 在经典极限下,核物质中核子的平均自由程与核子-核子碰撞截面直接相联系,即  $\lambda_{cl} = 1/(\rho\sigma)$ , 其中  $\rho$  为核子数密度、 $\sigma$  为核子-核子碰撞截面. 这一经典关系已被广泛地应用于重离子碰撞半经典输运模型(如 BUU 等)中碰撞项的数值模拟部分<sup>[1]</sup>. 另外,在局域密度近似<sup>[3]</sup>下,核介质中核子平均自由程直接与  $(e, e', p)$  反应<sup>[4]</sup> 或核子诱发的核子-核反应<sup>[5]</sup> 中核子的透明度相联系. 通过测量  $(e, e', p)$  反应中核子的透明度就可以获得有关核子平均自由程的知识. 已有许多核物理学家利用各种理论方法计算和讨论了对称核物质中核子的平均自由程及其能量依赖<sup>[6]</sup>. 上述这些研究都是针对同位旋对称核物质,我们将在本文重点讨论非对称核物质中质子和中子的平均自由程及其同位旋依赖性.

在文献[7]中,我们已经通过区分中子和质子自

由度并在质量算符中引进基态关联,得到了同位旋相关的扩展的 Brueckner-Hartree-Fock (EBHF)理论方法. 在文献[8]中,我们又利用 EBHF 方法系统地研究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. 本文将进一步在整个同位旋非对称度范围内利用 EBHF 方法计算质子和中子非对称核物质中传播的平均自由程及其同位旋依赖性,并简单讨论了基态关联的影响. 计算结果表明:在同位旋非对称核物质中,质子的平均自由程随同位旋非对称度<sup>2)</sup>  $\beta$  的增大而减小,中子的平均自由程随  $\beta$  增大而增大. 这意味着在同位旋高度非对称核物质中或丰中子核表面,中子传播的透射性要比质子强. 因而平均自由程及其同位旋依赖性可以作为提取滴线附近丰中子核的质子和中子密度分布的物理观测量之一.

### 2 计算结果与讨论

利用同位旋相关的 EBHF 方法<sup>[7]</sup>,采用 Argonne  $V_{14}$  势<sup>[9]</sup> 作为现实核力,在整个非对称度范围( $0 \leq \beta$

2002-12-20 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(KJCX2-SW-N02),国家重点基础研究发展规划项目(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

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

2) 同位旋非对称度定义为  $\beta = (\rho_n - \rho_p)/\rho$ , 这里  $\rho_n, \rho_p$  和  $\rho$  分别为非对称核物质中中子密度,质子密度和总核子密度.

≤1)内计算了非对称核物质中的中子与质子的平均自由程. 计算中考虑和选取了 3 个不同的密度, 分别为  $\rho = \rho_0/2 = 0.085\text{fm}^{-3}$ ,  $\rho = \rho_0 = 0.17\text{fm}^{-3}$  和  $\rho = 2\rho_0 = 0.34\text{fm}^{-3}$ , 其中  $\rho_0 = 0.17\text{fm}^{-3}$  是对称核物质的经验饱和密度. 对于上述考虑的每一个密度点, 通过自洽求解 Bethe-Goldstone 方程, 可以得到有效相互作用  $G$  矩阵, 进而可计算出质子和中子的质量算符. Bethe-Goldstone 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>[10]</sup>, 这时辅助势不但具有单粒子平均场的物理意义<sup>[11]</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>[12]</sup>.

在 EBHF 框架内, 质子和中子的质量算符由空穴线展开给出<sup>[7]</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>[10,13]</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.

核介质中核子的平均自由程描述了一个在核物

质中运动的核子与周围其它核子发生碰撞前所能够传播的平均距离, 由光学势或质量算符的虚部决定. 当核子的动量  $k \geq k_F$  时, 它能够与处于费米海中的质子或中子发生碰撞, 将其激发到费米面以上的粒子态; 而当核子的动量  $k \leq k_F$  时, 它能够与处于费米面以上的中子或质子发生相互作用, 使其跃迁到费米面以下的空穴态上. 上述第一种过程与  $M_1$  的虚部相联系; 而第二种过程与  $M_2$  的虚部有关. 在同位旋非对称核物质中, 质子和中子的平均自由程是不同的. 根据质子和中子的质量算符的虚部可分别计算出它们在非对称核物质中的平均自由程  $\lambda_\tau$ , 即

$$\lambda_\tau(E) = \frac{\hbar^2 k(E)}{2\tilde{m}_\tau} \frac{1}{|\text{Im}M^\tau[k(E), E]|}, \quad (2)$$

其中  $E$  表示准粒子能量<sup>[7]</sup>,  $\tilde{m}_\tau$  是  $k$  质量<sup>[10]</sup>, 定义为

$$\frac{\tilde{m}_\tau}{m} = \left\{ 1 + \frac{m}{k} \left[ \frac{\partial}{\partial k} \text{Re}M^\tau(k, E) \right] \right\}^{-1} \quad (3)$$

它反映了平均场的动量非定域性.

我们在图 1 中给出了 3 种不同的密度( $\rho_0/2, \rho_0$  和  $2\rho_0$ )下, 同位旋非对称度参数  $\beta$  分别取 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 和 0.95 时, 利用 EBHF 方法计算得到的质子平均自由程  $\lambda_p$  和中子平均自由程  $\lambda_n$  随准粒子能量  $E$  的变化. 由图中可见, 随着核物质  $\beta$  的增

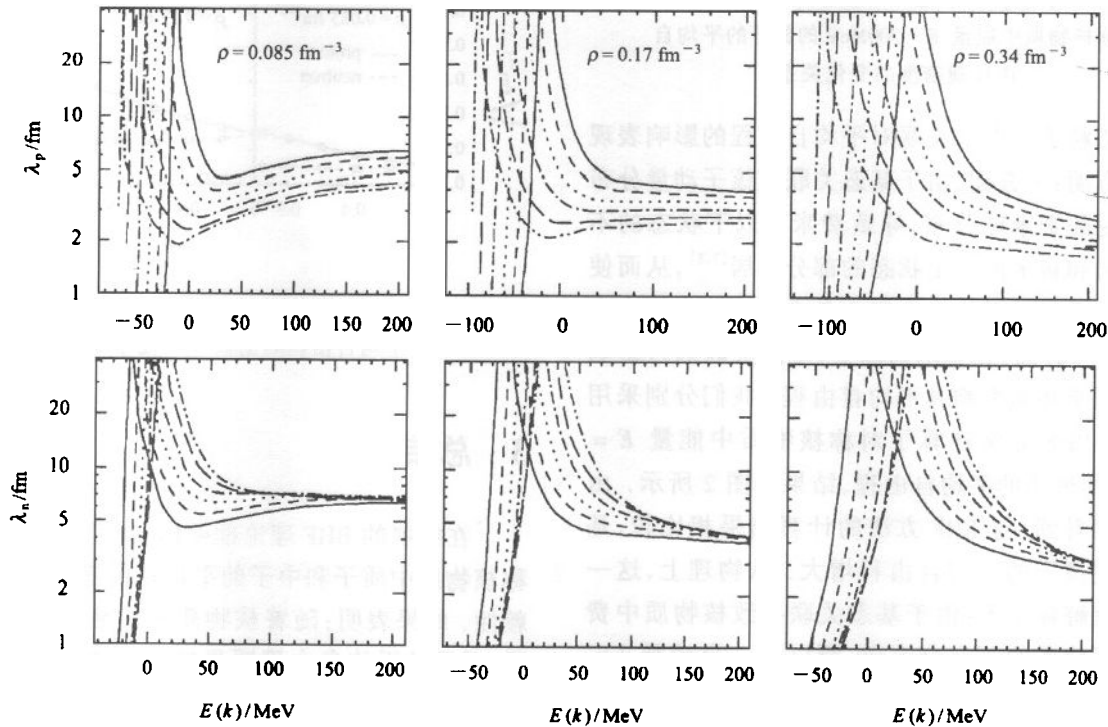


图 1 具有不同密度  $\rho$  和不同  $\beta$  的非对称核物质中  $\lambda_p$  和  $\lambda_n$  随准粒子能量的变化

—  $\beta = 0.0$ , - - -  $\beta = 0.2$ , ····  $\beta = 0.4$ , - · - ·  $\beta = 0.6$ , - - -  $\beta = 0.8$ , - - -  $\beta = 0.95$ .

加,  $\lambda_n$  增大, 而  $\lambda_p$  减小. 这表明在同位旋高度非对称核物质中, 质子的透射性要比中子弱. 上述结果主要来自两个原因: 一方面, 随着  $\beta$  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. 对于质子, 由于泡利阻塞效应减弱, 费米面以上的质子与周围处于费米面以下的核子相互作用引起的质子的激发变得更容易; 另一方面, 随着  $\beta$  的增大, 核物质中质子所占比例减小而中子所占比例增大, 从而使得中子受到来自周围核介质中质子的  $SD$  同位旋  $T=0$  道的强张量作用减弱, 而质子受到来自周围中子的  $SD$  道强张量作用增强. 在费米面以上, 质子和中子的平均自由程均随能量迅速减小, 在能量  $E \approx 150\text{MeV}$  时, 达到高能渐近饱和值.

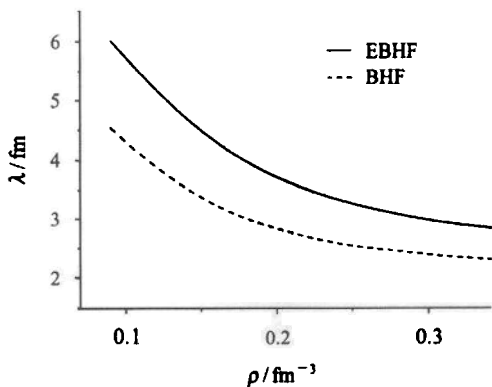


图 2 利用 EBHF 方法和 BHF 方法计算得到的对称核物质中能量  $E = 200\text{MeV}$  的核子的平均自由程随密度的变化关系

基态粒子-空穴关联对平均自由程的影响表现在两个方面: 一方面, 由于基态关联使核子动量分布偏离尖锐的费米球分布, 导致费米面以下状态的不完全占居和费米面以上状态的部分占居<sup>[7,8]</sup>, 从而使得中子和质子的平均自由程在各自费米面之下为有限值. 另一方面, 在费米面以上, 基态关联通过影响核子的光学势而影响其平均自由程. 我们分别采用 EBHF 和 BHF 方法计算了对称核物质中能量  $E = 200\text{MeV}$  的核子的平均自由程, 结果如图 2 所示. 由图中可以看到, 与 BHF 方法的计算结果相比较, 基态关联使核子的平均自由程增大. 从物理上, 这一结果可以解释如下: 由于基态关联导致核物质中费米面以下状态的不完全占居, 所以当一一个动量  $k \geq k_F$  的质子或中子在核物质中传播时, 它与核物质中处于费米海中的核子发生碰撞的几率将减小; 同时, 基态关联导致费米面以上状态的部分占居, 由于泡利阻塞效应, 上述质子或中子与费米海中的核子发

生相互作用后将其激发到费米面以上的几率也将减小. 这意味着质子或中子在核物质中平均自由程将由基态关联效应而变长. 我们利用 EBHF 方法得到的处于经验饱和密度  $\rho_0 = 0.17\text{fm}^{-3}$  的对称核物质中核子的平均自由程的高能渐近饱和值约为  $4\text{fm}$ , 与其实验值<sup>[14]</sup>  $(5 \pm 1)\text{fm}$  符合得很好.

为了更清楚地讨论平均自由程的同位旋依赖性, 在图 3 中给出了在固定的能量 ( $E = 200\text{MeV}$ ) 下, 质子和中子平均自由程的倒数  $1/\lambda$  随同位旋非对称度的变化曲线. 由图中显而易见, 中子的平均自由程随  $\beta$  的增大而减小; 质子的平均自由程随  $\beta$  增大而增大. 同位旋非对称度最显著的影响是在高度非对称情况下质子平均自由程的明显减小. 上述结果表明: 在同位旋高度非对称核物质中或丰中子核表面, 与中子相比, 质子的传播具有较低的透明度. 在高密度情况下这种效应更加明显. 另外, 与质量算符  $\text{Im}M_i^*$  随  $\beta$  线性变化<sup>[8]</sup> 不同,  $1/\lambda$  随  $\beta$  的变化明显偏离线性关系. 这种对线性关系的偏离主要来自于  $k$  质量的影响(见方程(2)和(3)). 比较不同密度核物质中核子平均自由程还可知, 质子和中子的平均自由程均随密度的增加而减小. 相应地, 对于核子诱发的核子-原子核反应过程, 核子在原子核表面比在其中心具有更强的穿透性.

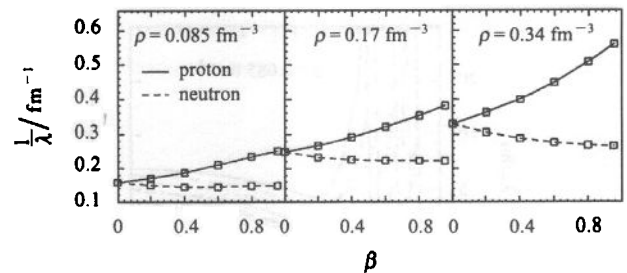


图 3 给定的准粒子能量  $E = 200\text{MeV}$  下, 质子和中子平均自由程的倒数  $1/\lambda$  随  $\beta$  的变化

### 3 总结

在扩展的 BHF 理论框架内, 研究了同位旋非对称核物质中质子和中子的平均自由程及其同位旋依赖性. 结果表明: 随着核物质同位旋非对称度的增强, 质子的平均自由程明显减小而中子的平均自由程增大. 因而, 对于中子滴线附近的原子核, 核表面对中子比对质子具有更高的透明度. 这一效应可以通过核子诱发中子滴线核发生的核子-核反应实验进行观测. 而且, 通过理论预言与实验观测的比较,

可以提取有关滴线附近丰中子核性质的知识,例如中子分布半径、中子皮厚度、中子密度分布等。或者说平均自由程及其同位旋依赖性可以作为提取滴线附近丰中子核的质子和中子密度分布的一个物理观

测量。另外本文结果还表明对于核子诱发的核子-原子核反应过程,核子在原子核表面比在其中心具有更强的穿透性。

## 参考文献 (References)

- 1 Bonasera A, Gulminelli F, Molitoris J. *Phys. Rep.*, 1994, **243**:1
- 2 LI B A. *Phys. Rev.*, 1993, **C48**:2415
- 3 Ring P, Schuck P. "The Nuclear Many-body Problem", New York: Springer-Verlag, 1980
- 4 Pandharipande V R, Pieper S C. *Phys. Rev.*, 1992, **C45**:791
- 5 Avrigeanu M et al. *Phys. Rev.*, 1996, **C54**:2535
- 6 Schiffer J P. *Nucl. Phys.*, 1980, **A335**:348; Negele J W, Yazaki. *Phys. Rev. Lett.*, 1981, **47**:71; Meyer H O, Schwadt P. *Phys. Lett.*, 1981, **B107**:353; Mahaux C. *Phys. Rev.*, 1983, **C28**:1848; Blin A H et al. *Phys. Lett.*, 1985, **B161**:211; Cooper E D et al. *Phys. Rev.*, 1993, **C47**:297; LI G Q et al. *Phys. Rev.*, 1993, **C48**:2443; Tomohiro Mitsumori et al. *Prog. Theor. Phys.*, 1996, **96**:179; ZUO Wei, Lombardo U, Schulze H J. *Phys. Lett.*, 1998, **B432**:241
- 7 ZUO Wei, Lombardo U, LI ZengHua 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)
- 8 ZUO Wei, Lombardo U, LIU Jian-Ye et al. *High Energy Phys. and Nucl. Phys.*, 2003, **27**(5):416  
(左维等. *高能物理与核物理*, 2003, **27**(5):416)
- 9 Wiringa R B et al. *Phys. Rev.*, 1984, **C29**:1207
- 10 Mahaux C. *Phys. Rev.*, 1983, **C28**:1848; Jeukenne J P, Lejeune A, Mahaux C. *Phys. Rep.*, 1976, **25**:83
- 11 Sartor R. Chapter 6 in *Nuclear Methods and the Nuclear Equation of State*, Ed. Baldo M. Singapore: World Scientific, 1999
- 12 SONG Hong-Qiu et al. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, **81**:1584
- 13 Grange P, Cugnon J, Lejeune A. *Nucl. Phys.*, 1987, **A473**:365
- 14 Nadasen A et al. *Phys. Rev.*, 1981, **C23**:1023

## Properties of Isospin Asymmetric Nuclear Matter and Extended BHF Approach \* (VI) Proton and Neutron Mean Free Paths and Their Isospin Dependence

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

1 (Institute of Modern Physics, CAS, Lanzhou 730000, China)

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

**Abstract** Within the isospin dependent extended Brueckner-Hartree-Fock framework, the proton and neutron mean free paths in isospin asymmetric nuclear matter and their isospin dependence have been investigated. It is shown that as increasing the isospin asymmetry, the proton mean free path decreases while the neutron one increases. This implies that the surface of a neutron-rich nuclei near drip-line will be much more transparent for neutrons than for protons. The density dependence of the mean free paths and the effect of the ground-state correlations on the mean free paths have also been discussed.

**Key words** Extended Brueckner-Hartree-Fock approach, mean free path, isospin dependence

Received 20 December 2002

\* Supported by "One Hundred Person Project" of Chinese Academy of Science, Chinese Academy of Science Knowledge Innovation Project (KJCX2-SW-N02), Major State Basic Research Development Program (G2000077400), the Important Pre-research Project (2002CCB00200) of the Chinese Ministry of Science and technology, and the National Natural Science Foundation of China (10235030)

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