

# 中子物质中超流性的自能色散效应\*

左 维

(兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心, 甘肃 兰州 730000)

(中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

**摘 要:** 利用扩展的 Brueckner-Hartree-Fock 理论与推广的 BCS 方法研究了自能的色散效应和基态关联对中子物质中超流性和能隙的影响. 研究表明, 自能的色散效应使中子物质中能隙减小; 考虑基态关联后, 超流性将进一步减弱.

**关键词:** 超流性; 自能效应; 基态关联; 扩展的 Brueckner-Hartree-Fock; 推广的 BCS

**中图分类号:** O414.12; O512.1; O571.35<sup>-1</sup>      **文献标识码:** A

## 1 引言

中子物质和核物质中超流性的研究一直是核天体物理(特别是中子星物理)中的一个重要课题. 研究表明, 中子星中发生的许多物理过程(如中子星冷却<sup>[1]</sup>、涡漩钉扎<sup>[2]</sup>和前脉冲发射<sup>[3]</sup>等)对超流相的存在都非常敏感. 由于中子物质和核物质是具有强相互作用的核子组成的强关联多体系统, 因此中子物质与核物质中超流性的研究是一个非常复杂的多体问题. 作为系统的微观方法的第一步, 在 BCS 能隙方程中忽略介质效应的影响, 即采用裸的现实核力作为对相互作用并对单粒子能谱采用有效质量近似. 这方面已有许多研究工作, 可参考近期综述文献[4]. 近期的研究表明<sup>[5-8]</sup>, 由于极化效应, 介质中的有效对相互作用将受到屏蔽, 从而对能隙产生强烈影响. 但是在这些研究中, 仍然没有考虑单粒子能谱的色散效应和自能中的基态关联效应, 即忽略了自能的能量依赖性和自能空穴线展开中二阶项的贡献. 本文的主要目的就是推广现有的中子物质中超流性微观理论计算, 初步探讨单粒子能谱色散效应(短程关联导致的自能的能量相关性)与自能中基态关联效应(长程关联)对中子物质超流性的影响.

## 2 理论模型

在 Brueckner 理论中, 单粒子自能  $\Sigma_p(\omega)$  可以按空穴线展开<sup>[9,10]</sup>,

$$\Sigma_p(\omega) = \Sigma_p^1(\omega) + \Sigma_p^2(\omega) + \dots, \quad (1)$$

其中,  $\omega$  为能量,  $p$  为动量. 自能同时依赖于能量和动量. 自能的最低阶近似  $\Sigma_p^1(\omega)$  的 on-shell 值给出 Brueckner-Hartree-Fock (BHF) 平均场. 而二阶近似  $\Sigma_p^2(\omega)$  称为重排项<sup>[9]</sup>, 它给出基态关联对自能的最大贡献. 准粒子能量可通过下列能量-动量关系解出<sup>[10,11]</sup>:

$$\omega_p = \frac{p^2}{2m} - \epsilon_F + \Sigma_p(\omega_p), \quad (2)$$

其中,  $\epsilon_F$  为费米能量. 这里略去了自能的虚部. 自能的能量和动量依赖性可通过引进下述不同的有效质量来描述<sup>[9,10,12]</sup>:

$$m_e(p) = m \left[ 1 - \left( \frac{\partial \Sigma(p, \omega)}{\partial \omega} \right) \right]_{\omega=\omega_p}, \quad (3)$$

$$m_p(p) = m \left[ 1 + \frac{p}{m} \left( \frac{\partial \Sigma(p, \omega)}{\partial p} \right) \right]_{\omega=\omega_p}, \quad (4)$$

其中,  $m_e$  和  $m_p$  分别为  $E$ -质量和  $P$ -质量.  $E$ -质量反映了自能的能量依赖(色散效应), 与准粒子强度相联系. 有效质量  $m^*$  可由  $E$ -质量和  $P$ -质量给出, 即  $m^* = m_e m_p$ . 有效质量  $m^*$  描述原子核平均场的

收稿日期: 2001-09-12; 修改日期: 2001-09-25

\* 基金项目: 中国科学院“百人计划”资助项目; 国家重点基础研究发展规划资助项目(G2000077400); 兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心课题基金资助项目

作者简介: 左 维(1966-), 男(汉族), 陕西宝鸡人, 研究员, 博士生导师, 从事原子核理论及理论物理研究.

非定域性(动量相关), 对研究重离子碰撞动力学输运过程具有重要性<sup>[13]</sup>. 本文利用扩展的 BHF 方法<sup>[10,14]</sup>, 通过自洽求解 Bethe-Goldstone 方程得到有效相互作用  $G$  矩阵, 进而计算单粒子自能. 计算中考虑了自能的两种近似: 一种是到自能空穴线展开的最低阶近似(即自能的 BHF 近似); 另一种是考虑了自能空穴线展开式中的二阶项(即重排项)贡献. 在 Bethe-Goldstone 方程的自洽求解中, 采用了 Argonne  $V_{14}$ <sup>[15]</sup> 作为现实核力, 辅助势的计算采用连续选择<sup>[9]</sup>.

能隙的计算采用推广的 BCS 方法<sup>[16-18]</sup>, 它满足推广的能隙方程(即 Gorkov 方程)

$$\Delta_p = - \int \frac{d^3 p'}{(2\pi)^3} \int \frac{d\omega'}{2\pi} v_{pp'}(\omega, \omega') \cdot \Gamma_p(\omega') \Delta_p(\omega'), \quad (5)$$

积分核  $\Gamma_p(\omega)$  定义为

$$\Gamma_p(\omega) = G_p(-\omega) G_p^*(\omega) = [G_p^{-1}(\omega) G_p^{-1}(-\omega) + \Delta_p^2(\omega)]^{-1}, \quad (6)$$

其中  $G_p(\omega)$  和  $G_p^*(\omega)$  分别为中子物质中正常态和超流态的核子的传播子. 有效对相互作用  $v_{pp'}$  是相互作用所有不可约图形的求和<sup>[16]</sup>. 由于能隙方程本身已经包含了短程关联(梯形图), 故在不可约有效对相互作用  $v_{pp'}$  中不出现梯形图部分(详见文献[16]中的讨论). 文献[7,8]中利用诱导相互作用方法研究了有效对相互作用中的长程关联效应. 本文为了突出自能色散效应和自能中基态关联效应, 将仅仅考虑不可约对相互作用  $v_{pp'}$  的微扰展开中的最低阶近似, 即裸相互作用  $v_{pp'}$ . 在这种情况下, 能隙不依赖于能量, 即静态极限  $\Delta_p(\omega) = \Delta_p$ . 在这一极限下, 自能修正将不影响积分核  $\Gamma_p(\omega)$  的解析结构. 对于每一个动量  $p$ , 在能量  $\omega$  的复平面存在两个对称的奇点  $\pm \Omega_p$ . (5) 式中对  $\omega$  的积分可根据下式完成:

$$\int \frac{d\omega}{2\pi} \Gamma(\omega) = - \frac{Z_p^2}{2\Omega_p}. \quad (7)$$

其中,  $Z_p^2$  是积分核在奇点  $\Omega_p$  处的残数. 因为对积分的最大贡献来自两个 Green 函数的极点部分, 可将单粒子传播子在极点附近展开并取到一阶近似, 即  $G_p(\omega) \approx Z_p(\omega - \omega_p)$ . 在这一近似下, 推广的能隙方程变为

$$\tilde{\Delta}_p = - \frac{1}{2} \int \frac{d^3 p'}{(2\pi)^3} \frac{Z_p V_{pp'} Z_p}{\sqrt{\omega_p^2 + \tilde{\Delta}_p^2}} \tilde{\Delta}_p, \quad (8)$$

其中,  $\tilde{\Delta}_p \equiv Z_p \Delta_p$  可理解为准粒子能谱的对关联修

正. 上述推广的能隙方程(8)与 BCS 方程相比, 主要区别在于积分中出现了准粒子强度  $Z_p$ . 如果令  $Z_p = 1$ , 则得到通常的 BCS 能隙方程, 这里称为 BCS 极限. 由于  $Z_p$  小于 1, 有效对相互作用将被抑制, 这表明自能色散效应将使能隙减小. 对于自能效应, 上式是相当一般性的, 其中自能修正可以取到任意阶近似. 进一步将对  $\omega$  的积分限制在费米面附近, 将自能在费米面附近展开, 则能隙方程简化为

$$\tilde{\Delta}_p = - \frac{1}{2} Z_p^2 \int \frac{d^3 p'}{(2\pi)^3} \frac{V_{pp'}}{\sqrt{p_p^2 (p' - p_F)^2 / m^{*2} + \tilde{\Delta}_p^2}} \tilde{\Delta}_p, \quad (9)$$

其中,  $Z_F$  是费米面处的准粒子强度.

### 3 结果与讨论

由于中子物质中同位旋  $T=1$  的  $^1S_0$  道超流性占主要成分<sup>[4]</sup>, 本文将考虑  $^1S_0$  道超流性的自能效应. 利用扩展的 BHF 理论方法计算能量相关的单粒子自能. 文中考虑的密度范围为  $0.0042 \text{ fm}^{-3} \leq \rho \leq 0.074 \text{ fm}^{-3}$ , 相应的费米动量从 0.5 到  $1.3 \text{ fm}^{-1}$ . 因为中子物质在这一密度范围内  $^1S_0$  道能隙最大. 图 1 给出了得到的有效质量和  $E$ -质量. 图中实线是在自能(或质量算子)中考虑了基态关联(即重排贡献,  $\Sigma_p(\omega) \approx \Sigma_p^*(\omega) + \Sigma_p^*(\omega)$ )的结果; 而虚线是不考虑自能项中基态关联(质量算子空穴线展开的最低阶近似, 即自能的 BHF 近似  $\Sigma_p(\omega) \approx \Sigma_p^*(\omega)$ ). 从图中可以看出, 由于在费米面附近粒子-空穴激发具有高的几率幅度, 有效质量出现一个峰<sup>[9]</sup>. 基态关联对单粒子性质的影响在于使有效质量在费米面附近有一个强烈的增大, 这主要是由于自能二阶贡献的能量依赖引起的, 与我们以前的研究结果相符合<sup>[12]</sup>. 利用计算出的动量能量相关的单粒子自能, 可通过迭代数值求解推广的能隙方程(8)和(9). 图 2 是几种情况下的计算结果. 图中实线是在标准的 BCS 极限(能隙方程中令  $Z_p = 1$ )下, 采用了自由的单粒子能谱(即取  $\omega_p = p^2/2m$ )得到的能隙; 点线是用核子有效质量取代了裸质量( $\omega_p = p^2/2m^*$ )但仍然保持  $Z_p = 1$  的计算结果; 带+号和带-号的长虚线是在不考虑自能中基态关联情况下, 分别求解方程(8)及其近似方程(9)得到的能隙, 与实线比较反映了中子物质超流性的单粒子

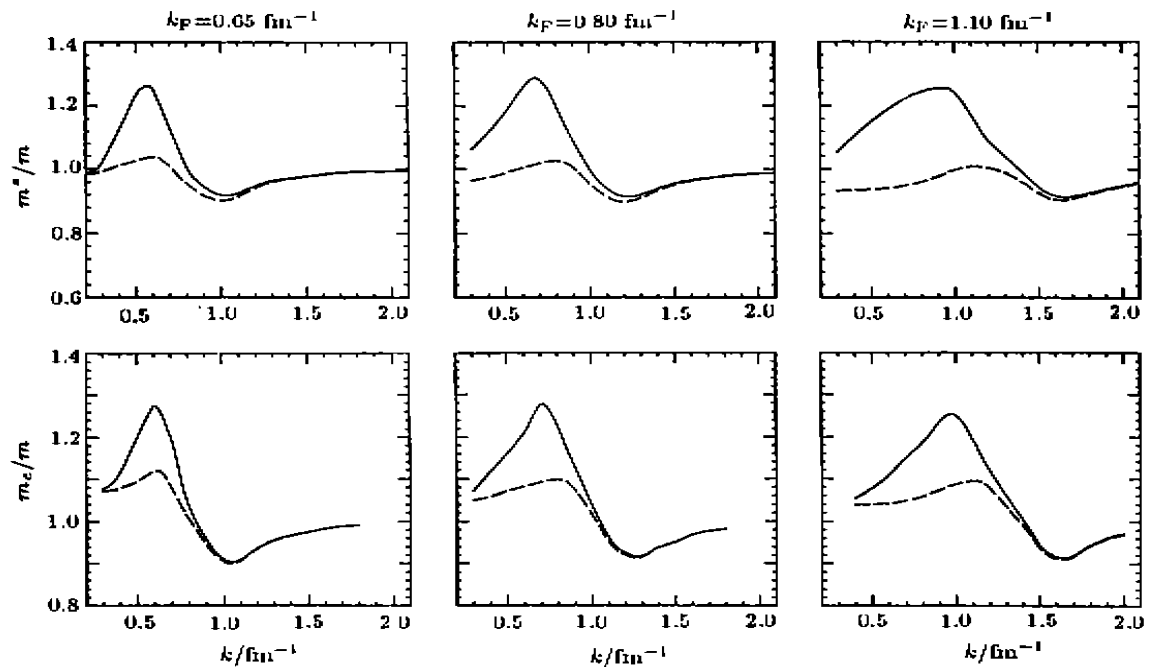


图 1 三个不同密度下有效质量和 L-质量随动量的关系

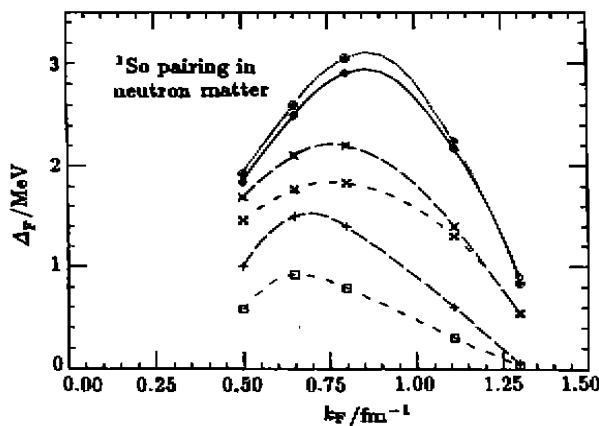


图 2 不同近似下, 中子物质中能隙(文中的  $\Delta_F$ )随费米动量(即密度)的关系

能谱色散效应; 短虚线是相应地考虑了自能展开式中二阶项贡献的结果, 与长虚线比较, 可以看到基态关联对能隙的影响. 比较图中由方程(8)和方程(9)得到的结果(带×号和带+号的长虚线)可以看出, 方程(9)虽然能够定性给出自能效应对能隙的影响, 但不能给出正确的定量描述, 这是因为自能修正主要集中在费米面附近, 而在方程(9)中采用

费米面处的准粒子强度来近似费米面以外的值, 因而它过分估计了自能效应的影响. 从计算结果可以得到下述结论: 自能的色散效应(能量相关性)使中子物质中的能隙减小(最大值由 3 到 2 MeV, 减小约三分之一), 而考虑自能中的基态关联使中子物质超流性进一步减弱. 因而, 强关联的费米系统超流性需要在推广的 BCS 理论框架内描述, 而且为了得到可靠的微观理论预言, 需要完整地考虑关联效应. 本文仅仅考虑了单粒子自能中的色散效应和基态关联效应对中子物质超流性的影响, 而忽略了介质极化对于有效对相互作用产生的顶点修正效应. 本文结果可以看作是在强关联费米系统超流性研究中自洽计及自能效应和有效对相互作用介质效应的微观方法的一个中间步骤. 由于以上两种效应之间将相互耦合、相互影响<sup>[9]</sup>, 因而应当在同一理论框架内同时加以自洽考虑, 这是一项艰巨的任务, 不仅对精确决定对关联能隙, 而对于原子核及中子星中超流性的微观理解具有重要性, 进一步的研究在进行中.

参 考 文 献:

[1] Pethick C J, Ravenhall D G. Matter at Large Neutron Excess

and Physics of Neutron Star Matter[J]. Annu Rev Nucl Part

- Sci, 1995, 45: 429-484.
- [2] Pines D, Alpar M A. Superfluidity in Neutron Stars[J]. Nature, 1985, 316: 27-32.
- [3] Shapiro S L, Teukolsky S A. Black Holes, White Dwarfs and Neutron Stars[M]. New York: John Wiley, 1983.
- [4] Lombardo U. In Nuclear Methods and Nuclear Equation of State [M]. In: Baldo M ed. Singapore: World Scientific, 1999, Chap 9.
- [5] Babu S, Brown G E. Quasiparticle Interaction in Liquid  $^3\text{He}$  [J]. Ann Phys (N. Y.), 1973, 78: 1-38.
- [6] Clark J W, Kallman C G, Yang C H, *et al.* Effect of Polarization on Superfluidity in Low Density Neutron Matter [J]. Phys Lett, 1976, B61: 331-334.
- [7] Ainsworth T L, Wambach J, Pines D. Effective Interactions and Superfluid Energy Gaps for Low Density Neutron Matter [J]. Phys Lett, 1989, B222: 173-178.
- [8] Schulze H J, Cugnon J, Lejeune A, *et al.* Medium Polarization Effects on Neutron Matter Superfluidity [J]. Phys Lett, 1996, B375: 1-8.
- [9] Jeukenne J P, Lejeune A, Mahaux C. Many-body Theory of Nuclear Matter [J]. Phys Rep, 1976, 25C: 83-174.
- [10] Zuo Wei, Bombaci I, Lombardo U. Asymmetric Nuclear Matter from an Extended Brueckner-Hartree-Fock Approach [J]. Phys Rev, 1999, C60: 024605-1-024605-13
- [11] Brown G E, Landau, Brueckner-Bethe, and Midal Theories of Fermi Systems [J]. Rev Mod Phys, 1971, 43: 1-14.
- [12] Zuo Wei, Giansiracusa G, Lombardo U, *et al.* Single-particle Properties in Neutron Matter from Extended Brueckner theory [J]. Phys Lett, 1998, B421: 1-7.
- [13] Insolia A, Lombardo U, Sandulescu N, *et al.* Nuclear Dynamics for Heavy Ion Collisions with a Momentum Dependent Potential [J]. Phys Lett, 1994, B334: 12-17.
- [14] Baldo M, Bombaci I, Giansiracusa G, *et al.* Nuclear Matter Properties from a Separable Representation of the Paris Interaction [J]. Phys Rev, 1990, C41: 1748-1761.
- [15] Wiringa R B, Smith R A, Ainsworth T L. Nucleon-nucleon Potentials with and without Delta(1232) Degrees of Freedom [J]. Phys Rev, 1984, C29: 1207-1221.
- [16] Migdal A B. Theory of Finite Fermi Systems and Applications to Atomic Nuclei [M]. London: Interscience, 1967.
- [17] Nozieres P. Theory of Interacting Fermi Systems [M]. New York: W. A. Benjamin, 1966.
- [18] Abrikosov A A, Gorkov L P, Dzyaloshinski I E. Methods of Quantum Field Theory in Statistical Physics [M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1963.
- [19] Garrido E, Sarriguren P, Moya de Guerra E, *et al.* Effective Density-dependent Pairing Forces in the  $T=1$  and  $T=0$  Channels [J]. Phys Rev, 1999, C60: 064312-1-604312-6

## Self-energy Dispersion Effects on Neutron Matter Superfluidity\*

ZUO Wei

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

(Institute of Modern Physics, the Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The effects of the dispersion and ground state correlation of the single particle self-energy on neutron matter superfluidity have been investigated in the framework of the Extended Brueckner-Hartree-Fock and the generalized BCS approaches. A sizable reduction of the energy gap is found due to the energy dependence of the self-energy. And the inclusion of the ground state correlations in the self-energy suppresses further the neutron matter superfluidity.

**Key words:** superfluidity; self-energy effect; ground state correlation; extended Brueckner-Hartree-Fock; generalized BCS

\* Foundation item: "One Hundred Person Project" of the Chinese Academy of Science; the Major State Basic Research Development Program (G2000077400); Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator of Lanzhou