

# 中子物质中的 $^3\text{PF}_2$ 态超流性和微观三体核力效应<sup>\*</sup>

崔常喜 左 维<sup>†</sup>

(中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

(中国科学院研究生院, 北京 100049)

(2006 年 11 月 9 日收到, 2006 年 12 月 10 日收到修改稿)

利用 Brueckner-Hartree-Fock (BHF) 和 BCS 理论方法, 计算了纯中子物质中处于 $^3\text{PF}_2$ 态的中子对关联能隙. 特别是研究并讨论了微观三体核力对 $^3\text{PF}_2$ 态中子超流性强弱的影响. 结果表明: 三体核力显著地增强了中子物质中 $^3\text{PF}_2$ 态中子超流性, 当采用 BHF 单粒子能谱时, 三体核力导致相应的对关联能隙峰值由 0.22 MeV 增大到 0.50 MeV.

关键词: 中子物质,  $^3\text{PF}_2$ 超流性, 三体核力, BCS 理论

PACC: 2165, 9760J, 6750F

## 1. 引 言

中子物质和核物质中核子超流性的理论研究和核物理和核天体物理中的一个重要的研究课题<sup>[1-9]</sup>. 理论研究表明<sup>[1-3]</sup>, 在中子星内壳( inner crust)中的中子可能处于 $^1\text{S}_0$ 态超流相, 而在中子星的外壳( outer core)内, 则可能存在质子的 $^1\text{S}_0$ 态超流性和中子的 $^3\text{PF}_2$ 态超流性. 在中子星物质中, 核子超流相的存在可以导致一些有趣的宏观天体现象<sup>[4]</sup>, 中子物质中超流性的研究已成为核天体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>[5-7]</sup>, 涡旋钉扎<sup>[8]</sup>, 前脉冲发射<sup>[9]</sup>等)对这些中子和质子超流相的存在以及超流性的强弱都非常敏感. 已有一些理论学家采用各种理论方法<sup>[10-16]</sup>研究了中子物质和中子星物质中 $^3\text{PF}_2$ 态中子超流性, 结果表明: 由于核子-核子相互作用的 $^3\text{PF}_2$ 态分量在较高能量具有较强的吸引力, 因而 $^3\text{PF}_2$ 态超流性主要存在于高密度区域. 但在这些理论研究中没有考虑三体核力的影响. 在文献[15]中利用 BCS 理论和 Brueckner-Hartree-Fock (BHF)方法, 在没有考虑三体核力的情况下计算了中子物质中 $^3\text{PF}_2$ 态中子的对关联能隙, 并着重讨论和比较了采用各种不同的现代的两体现实核力的结

果. Elgaroy 等<sup>[16]</sup>利用 Dirac-BHF (DBHF)方法计算了 $\beta$ 稳定中子星物质中的质子比例以及中子和质子的单粒子能谱, 进而讨论了相对论效应对 $\beta$ 稳定中子星物质中超流性的影响. 结果表明: 相对论效应对质子的 $^1\text{S}_0$ 态超流相的影响并不明显, 而 $^3\text{PF}_2$ 态中子超流性由于相对论效应对单粒子能谱的修正而大大减弱. 文献[17]分析了各种不同的基本微观过程所导致的三体核力对核物质状态方程的影响, 并定量讨论了三体核力与 DBHF 方法中相对论效应的联系, 结果表明三体核力能够定量给出 DBHF 方法中的主要相对论修正, 而且三体核力中还包含了 DBHF 中没有包含的其他效应. 因此三体核力对中子物质中超流性的影响是值得进一步研究的. 在文献[18]中已经研究了三体核力对中子物质和中子星物质中 $^1\text{S}_0$ 态超流性的影响, 发现三体核力对 $^1\text{S}_0$ 态超流性有一定的抑制作用. 由于 $^3\text{PF}_2$ 态超流性主要存在于中子物质和中子星的高密度区域, 因此三体核力效应对 $^3\text{PF}_2$ 态超流性的准确和可靠预言尤为重要.

本文主要是利用 BCS 方法计算了纯中子物质中处于 $^3\text{PF}_2$ 态的中子对关联能隙, 并分别在采用自由单粒子能谱近似和 BHF 自洽单粒子能谱情况下研究和讨论了三体核力的影响. 结果表明: 当采用 BHF 单粒子能谱时, 中子 $^3\text{PF}_2$ 态对关联能隙要比采用自由单粒子能谱近似得到的能隙小得多, 而在两

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号: 10575119, 10235030), 中国科学院知识创新工程重要方向性项目(批准号: KJ93-SYW-N2), 国家重点基础研究发展规划项目(批准号: G2000077400), 国家科技部重大前期研究专项基金(批准号: 2002CAB00200)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: zuowei@impcas.ac.cn

种情况下,三体核力对中子物质中 $^3\text{PF}_2$ 态超流性均有非常显著的增强作用.

## 2. 理论模型

由于核物质是由具有强相互作用的核子组成的强关联多体系统,因此核物质中超流性是一个非常复杂的多体问题,对这一问题的理论研究在微观上通常采用 BCS 方法<sup>[19-21]</sup>.中子物质和核物质中超流性的强弱可由费米面处对关联能隙  $\Delta_F \equiv \Delta(k_F)$  的大小来描述,在 BCS 理论框架内, $^3\text{PF}_2$  态的对关联能隙由下述标准的耦合态能隙方程确定<sup>[2,45]</sup>:

$$\begin{aligned} \left( \begin{array}{c} \Delta_L \\ \Delta_{L+2} \end{array} \right) (k) &= -\frac{1}{\pi} \int_0^\infty dk' k'^2 \frac{1}{E_k} \\ &\times \left( \begin{array}{cc} V_{L,L} & V_{L,L+2} \\ V_{L+2,L} & V_{L+2,L+2} \end{array} \right) (k, k') \left( \begin{array}{c} \Delta_L \\ \Delta_{L+2} \end{array} \right) (k') \chi(1) \\ \rho &= \frac{k_F^3}{3\pi^2} = 2 \sum_k \frac{1}{2} \left[ 1 - \frac{\epsilon(k) - \epsilon(k_F)}{E_k} \right], \quad (2) \end{aligned}$$

其中  $E_k^2 = [\epsilon(k) - \epsilon(k_F)]^2 + \Delta_L(k)^2 + \Delta_{L+2}(k)^2$ ;  $\epsilon(k) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} + U_{\text{BHF}}(k)$  是中子在中子物质中的单粒子能谱, $U_{\text{BHF}}(k)$  是中子在中子物质中感受到周围中子的单粒子势场.当采用自由单粒子能谱近似时,有  $\epsilon(k) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m}$ .  $\Delta_L(k)$  和  $\Delta_{L+2}(k)$  分别表示 P 态和

F 态的能隙大小,  $\left( \begin{array}{cc} V_{L,L} & V_{L,L+2} \\ V_{L+2,L} & V_{L+2,L+2} \end{array} \right)$  为角动量空间

中 $^3\text{PF}_2$ 态的有效对相互作用矩阵.研究表明<sup>[22,23]</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.然而,由于问题的复杂性,到目前为止,关于介质极化效应对超流性影响的具体程度还没有定论<sup>[1,2]</sup>.本文的主要目的是研究微观三体核力对中子物质中 $^3\text{PF}_2$ 中子超流性的影响,因此将仅仅考虑有效对相互作用微扰展开中的最低阶近似,这也是研究中子物质和核物质中核子超流性常用的一种近似<sup>[2,45]</sup>,这时有效对相互作用相应于核子-核子现实相互作用按分波展开的 $^3\text{PF}_2$ 态分量.计算中我们采用的核子-核子现实相互作用包含两部分,即两体现实核力和三体核力.我们采用 Argonne  $V_{18}(AV_{18})$  势<sup>[24]</sup>作为两体现实核力,并采用基于介子交换流方法的微观三体核力<sup>[25]</sup>作为三体核力.关于该三体核力模型的具体物理考虑

和分析,详见文献<sup>[25]</sup>中的论述.这一微观三体核力模型中的参数(包括介子相互作用常数,动量截断因子)是利用核势的单玻色子交换模型通过符合所采用的两体现实核力来确定的<sup>[17]</sup>.因而,我们所采用的三体核力是微观意义上的且完全由所采用的两体现实核力决定.

对于任意给定中子数密度  $\rho$  的中子物质,利用 BHF 方法<sup>[26]</sup>计算出单粒子势场  $U_{\text{BHF}}(k)$ ,进而可计算出中子的单粒子能谱. BHF 方法的基本出发点是有效相互作用  $G$  矩阵, $G$  矩阵满足下述 Bethe-Goldstone (BG) 方程<sup>[26-30]</sup>:

$$\begin{aligned} \mathcal{G}(\rho, \omega) &= V + V \sum_{k_1 k_2} \frac{|k_1 k_2 \mathcal{Q}(k_1, k_2) k_1 k_2|}{\omega - \epsilon(k_1) - \epsilon(k_2) + i\eta} \\ &\times \mathcal{G}(\rho, \omega), \quad (3) \end{aligned}$$

其中  $V$  是现实核子-核子相互作用; $\omega$  是起始能量; $\rho$  表示中子数密度; $\mathcal{Q}(k_1, k_2)$  是泡利算子; $\epsilon(k)$  是单粒子能量,即  $\epsilon(k) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} + U_{\text{BHF}}(k)$ . 自洽 BHF 单粒子势  $U_{\text{BHF}}(k)$  由反对称化  $G$  矩阵的实部通过下列关系给出<sup>[31]</sup>:

$$\begin{aligned} U(k) &= \sum_{k'} n(k') \text{Re} [kk' | \mathcal{G}(\epsilon(k) \\ &+ \epsilon(k')) | kk' ]_A. \quad (4) \end{aligned}$$

在 BCS 能隙方程和 BG 方程中,我们采用了相同的现实核子-核子相互作用.为了避免求解三体 Bethe-Faddeev 问题,通常采用的方法是通过对第三个粒子自由度作平均将三体核力约化为一个密度相关的等效两体核力<sup>[25,31]</sup>.这一等效两体核力由下式给出:

$$\begin{aligned} V_3^{\text{eff}}(r'_1, r'_2 | r_1, r_2) &= \frac{1}{4} \text{Tr} \sum_n \int d\mathbf{r}_3 d\mathbf{r}'_3 \phi_n^*(\mathbf{r}'_3) \\ &\times [1 - \eta(r'_{13})] [1 - \eta(r'_{23})] \\ &\times W_3(r'_1, r'_2, r'_3 | r_1, r_2, r_3) \\ &\times \phi_n(\mathbf{r}_3) [1 - \eta(r_{13})] \\ &\times [1 - \eta(r_{23})], \quad (5) \end{aligned}$$

其中  $\eta(r_{13})$  是关联函数,定义为  $\eta(r_{12}) = \varphi(r_{12}) - \varphi(r_{12})$ .  $\varphi(r_{12})$  是两个自由中子的相对运动波函数;而  $\varphi(r_{12})$  是核介质中两个关联中子的相对运动波函数.由于关联函数与 BHF 的解直接相联系,因此它包含了核子-核子间短程关联(即梯形图).在 BHF 自洽迭代求解过程每一步,都必须重新自洽地计算关联函数和等效两体核力  $V_3^{\text{eff}}$ <sup>[17]</sup>.因此,通过 BHF 自洽迭代过程,上述等效两体核力中正确计及了与第三个核子间的关联效应.在 BHF 近似下,对

于具有给定中子数密度的中子物质, 通过自洽求解方程(3),(4)和(5), 可以得到相应的  $G$  矩阵, 进而由  $G$  矩阵可计算出中子的单粒子能谱. 对于(1)式, 我们将采用文献[15]中的方法, 在动量空间中通过求解久期方程和本征值方程得到  $\Delta(k) = \sqrt{\Delta_L(k)^2 + \Delta_{L+2}(k)^2}$ , 然后与(2)式耦合迭代, 最终我们可以得到纯中子物质中 ${}^3\text{PF}_2$ 态中子对关联能隙的大小  $\Delta(k) = \sqrt{\Delta_L(k)^2 + \Delta_{L+2}(k)^2}$ .

### 3. 计算结果与讨论

#### 3.1. 采用自由单粒子能谱时三体核力对能隙大小的影响

为了清楚地显示三体核力对中子物质中 ${}^3\text{PF}_2$ 态中子超流性的影响, 我们首先讨论在 BCS 能隙方程中采用自由单粒子能谱近似  $\epsilon(k) = \hbar^2 k^2 / (2m)$  时得到的结果. 在图 1 中, 我们给出了当采用自由单粒子能谱近似时, 在 BCS 方程中考虑三体核力(实心方形符号)和不考虑三体核力(空心方形符号)两种情况下计算得到的费米面处 ${}^3\text{PF}_2$ 态的中子对关联能隙  $\Delta_F$  随中子物质费米动量  $k_F$  的变化关系. 我们在图中可见, 当不考虑三体核力时, 中子物质中 ${}^3\text{PF}_2$ 态中子超流相主要存在于中子费米动量为  $1.2 \text{ fm}^{-1} \leq k_F \leq 3.0 \text{ fm}^{-1}$  的区域(对应的中子数密度范围为  $0.06 \text{ fm}^{-3} \leq \rho \leq 0.9 \text{ fm}^{-3}$ ); 而对关联能隙的最大值所对应的费米动量约为  $2.1 \text{ fm}^{-1}$ (相应的中子数密度约为  $0.32 \text{ fm}^{-3}$ ), 其峰值约为  $0.64 \text{ MeV}$ . 上述结果与文献[2, 15]中的研究结果相一致. 而当我们加入三体核力后, 中子对关联能隙的大小变化如图中实心方形符号所示: 当中子数密度较小( $k_F \leq 1.4 \text{ fm}^{-1}$ )时, 三体核力对能隙大小的影响很小; 随着中子数密度的增大, 三体核力逐渐开始起作用, 而且其效应随中子数密度的增大而迅速增强, 三体核力的作用是大大增强了中子物质中 ${}^3\text{PF}_2$ 态中子超流性; 中子对关联能隙在  $k_F = 2.18 \text{ fm}^{-1}$ (相应的中子数密度约为  $0.35 \text{ fm}^{-3}$ )附近达到最大值, 约为  $1.13 \text{ MeV}$ , 达到峰值后, 随着  $k_F$  的继续增大, 三体核力对中子 ${}^3\text{PF}_2$ 态超流性的增强作用逐渐减弱. 总之, 由于三体核力的作用, 中子物质中 ${}^3\text{PF}_2$ 态中子超流性会显著增强, 三体核力使能隙的峰值增加了大约 77%.

上述结果可以通过三体核力 ${}^3\text{PF}_2$ 态分量的密度

依赖性加以解释. 在图 2 中, 我们给出了在中子数密度分别为  $\rho = 0.12, 0.17, 0.32$  和  $0.45 \text{ fm}^{-3}$  的中子物质中, 微观三体核力 ${}^3\text{P}_2$  和 ${}^3\text{F}_2$  态分量随两个相互作用中子间距离的变化关系. 由图中可以看到, 三体核力的 ${}^3\text{P}_2$  和 ${}^3\text{F}_2$  态分量主要具有吸引力, 因而导致中子物质中 ${}^3\text{PF}_2$ 态超流性的增强. 当密度较低时, 三体核力较小, 因而对超流性的影响较弱; 而随着密度的增大, 三体核力增大, 其 ${}^3\text{P}_2$  和 ${}^3\text{F}_2$  态分量的吸引力均显著增强, 这是因为三体核力体现了一种核介质效应<sup>[31, 32]</sup>, 其作用随核密度增大而增强. 值得注意的是: 尽管三体核力 ${}^3\text{P}_2$  和 ${}^3\text{F}_2$  态分量的短程部分(相对而言)的吸引力随密度单调增强, 但当密度足够高(如  $\rho = 0.45 \text{ fm}^{-3}$ )时, 它们的中程部分( $r = 1 \text{ fm}$  附近区域)的排斥性也开始随密度的增加有较显著的增强, 而且我们还发现密度越高, 这一排斥性随密度增强的速度越快, 这一排斥性与上述吸引力之间的竞争正是在足够高的密度区域三体核力对 ${}^3\text{PF}_2$ 态超流性的增强效应逐渐减弱的主要原因.

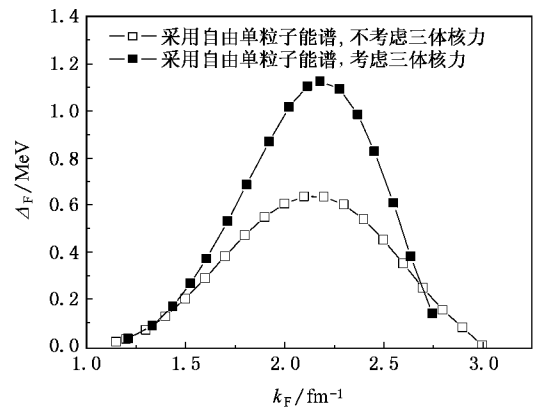


图 1 当采用自由单粒子能谱近似时, 在考虑和不考虑三体核力两种情况下, 中子物质中费米面处 ${}^3\text{PF}_2$ 态中子对关联能隙随费米动量(密度)的变化关系

#### 3.2. 采用自洽 BHF 单粒子能谱时三体核力对能隙大小的影响

在中子物质中, 由于周围中子的作用, 中子的单粒子能谱要受到单粒子势的修正, 而单粒子势对中子能谱的修正会对中子超流性产生强烈的影响<sup>[2, 45]</sup>, 因此, 为了较为可靠地预言中子物质中的中子超流性, 需要采用更为真实的 BHF 单粒子能谱  $\epsilon(k) = \hbar^2 k^2 / (2m) + U_{\text{BHF}}(k)$ . 在图 3 中, 我们给出

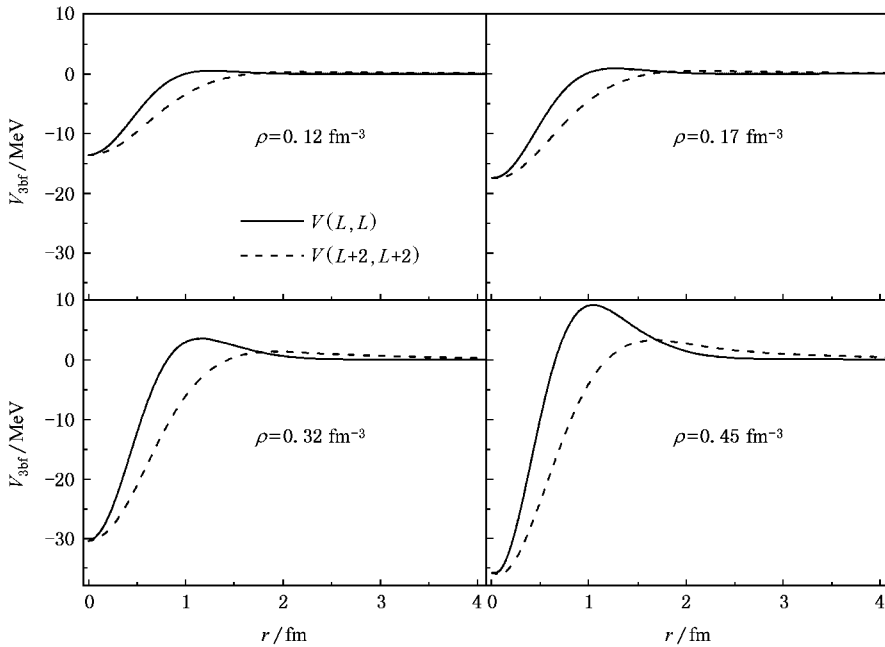


图2 不同密度的中子物质中,坐标空间中微观三体核力的 ${}^3P_2$ 和 ${}^3F_2$ 态分量随两相互作用核子间距离的变化关系

了当采用自洽 BHF 单粒子能谱时,在考虑三体核力(实心方形符号)和没有考虑三体核力(空心方形符号)的情况下中子物质中 ${}^3PF_2$ 态中子对关联能隙 $\Delta_F$ 随中子物质费米动量的变化关系.由图中可见,当不考虑三体核力时,中子物质中 ${}^3PF_2$ 态中子超流相主要存在于费米动量为 $1.2 \text{ fm}^{-1} \leq k_F \leq 2.5 \text{ fm}^{-1}$ 的区域(对应的中子数密度范围为 $0.06 \text{ fm}^{-3} \leq \rho \leq 0.52 \text{ fm}^{-3}$ )内,而对关联能隙的最大值所对应的费米动量约为 $1.9 \text{ fm}^{-1}$ (相应的中子数密度约为 $0.24 \text{ fm}^{-3}$ ),其峰值约为 $0.22 \text{ MeV}$ ,要比采用自由单粒子能谱近似时得到的能隙峰值 $0.64 \text{ MeV}$ 小得多,这表明核介质效应带来的对中子能谱的修正强烈地削弱了中子 ${}^3PF_2$ 态超流性,与文献[2,15]中的研究结果相一致.而当我们加入三体核力后,计算得到的中子 ${}^3PF_2$ 态对关联能隙如图中实心方形符号所示.三体核力对能隙的影响同采用自由单粒子能谱近似时类似,当中子物质密度较低( $k_F < 1.4 \text{ fm}^{-1}$ )时,三体核力的影响很小,几乎可以忽略;随着中子数密度的增大,三体核力逐渐开始起作用,而且其效应随中子数密度的增大而迅速增强;在 $k_F = 2.1 \text{ fm}^{-1}$ (对应的中子数密度约为 $\rho = 0.32 \text{ fm}^{-3}$ )左右达到最大值,约为 $0.50 \text{ MeV}$ .随 $k_F$ 的继续增大,三体核力对能隙的增强作用逐渐减弱.由于三体核力的作用,一方面,中子

${}^3PF_2$ 态对关联能隙的峰值由 $0.22 \text{ MeV}$ 增大到 $0.5 \text{ MeV}$ ,增大了 $127\%$ 左右;另一方面,超流相存在的费米动量范围由 $k_F \leq 2.5 \text{ fm}^{-1}$ 扩大到了 $k_F \leq 2.7 \text{ fm}^{-1}$ 左右.

三体核力主要通过2个因素影响 ${}^3PF_2$ 态的中子超流性:一方面,三体核力通过直接对有效对相互作用 $\begin{pmatrix} V_{L,L} & V_{L,L+2} \\ V_{L+2,L} & V_{L+2,L+2} \end{pmatrix}$ 的修正而影响中子超流性;另一方面,三体核力通过对单粒子势 $U_{\text{BHF}}(k)$ 的影响从而导致单粒子能谱的变化.为了澄清这两个因素的相对重要性及其对能隙大小的影响程度,我们在图3中同时给出了针对下述情况的计算结果:仅在单粒子能谱中考虑三体核力效应而不考虑三体核力对有效对相互作用的贡献,或者说,在通过BHF方法计算 $U_{\text{BHF}}(k)$ 时考虑三体核力而在BCS方程中的有效对相互作用中只考虑两体现实核力 $AV_{18}$ ,结果如图中实心三角形符号所示.由图中可见,三体核力通过影响单粒子能谱所导致的效应在一定程度上增强了中子物质中 ${}^3PF_2$ 态超流性,使能隙的峰值增大了约 $25\%$ (由 $0.22 \text{ MeV}$ 增大到了 $0.27 \text{ MeV}$ ),同时也使超流相存在的费米动量范围由 $k_F \leq 2.5 \text{ fm}^{-1}$ 扩大到了 $k_F \leq 2.7 \text{ fm}^{-1}$ 左右.通过对图中三条线的比较可知,三体核力主要通过通过对中子有效对相互作用的贡

献从而增大了中子物质中 $^3\text{PF}_2$ 态的中子超流性, 三体核力通过改变中子有效对相互作用产生的影响占主导作用, 而三体核力通过对中子的单粒子能谱的改变对超流性产生的影响相对而言要弱得多.

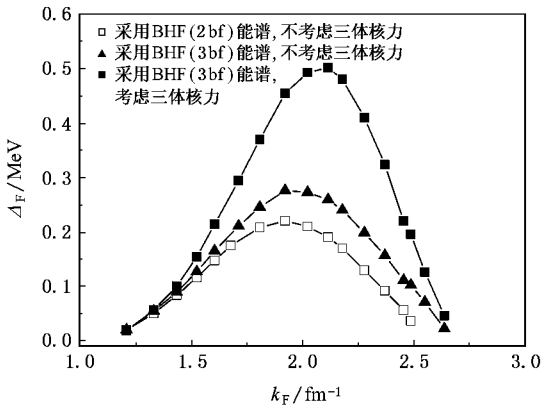


图3 当在BCS方程中采用BHF单粒子能谱时,在三种不同情况(见正文)下,中子物质中 $^3\text{PF}_2$ 态的中子对关联能隙随费米动量(中子数密度)的变化关系

我们进一步检验了三体核力对中子星物质中 $^3\text{PF}_2$ 超流性的影响. 结果表明: 三体核力的作用明显地增强了中子星物质中处于 $^3\text{PF}_2$ 态的中子超流性. 而且我们还发现: 在中子星物质中, 由于三体核力的同位旋依赖性, 三体核力对 $^3\text{PF}_2$ 超流性的增强作用

随中子星物质总核子数密度的增大而单调增强. 关于三体核力对中子星物质和中子星中 $^3\text{PF}_2$ 超流性的影响, 我们还将另文加以仔细深入地讨论和研究.

## 4. 结 论

在BHF和BCS理论框架内, 计算了中子物质中处于 $^3\text{PF}_2$ 态的中子对关联能隙, 特别是研究和讨论了微观三体核力的影响. 结果表明三体核力对中子物质中 $^3\text{PF}_2$ 态中子超流性有强烈的增强效应. 当在BCS能隙方程中采用自由单粒子能谱近似时, 三体核力使相应的对关联能隙峰值增加了77%(由0.64 MeV增大到1.13 MeV); 当采用自洽BHF单粒子能谱时, 三体核力导致相应的对关联能隙峰值由0.22 MeV增大到0.50 MeV, 增加了约127%; 而且使超流相存在的费米动量范围由 $k_F \leq 2.5 \text{ fm}^{-1}$ 扩大到 $k_F \leq 2.7 \text{ fm}^{-1}$ 左右. 三体核力对中子物质中 $^3\text{PF}_2$ 态超流性的增强作用主要是由三体核力对中子有效对相互作用的贡献导致的. 到目前为止, 中子星内部 $^3\text{PF}_2$ 态中子超流性的强弱仍是一个悬而未决的问题, 我们的研究结果对于确定中子星中 $^3\text{PF}_2$ 态超流性的强弱并为中子星冷却模型提供可靠的对关联能隙输入数据具有一定的参考价值.

- [ 1 ] Dean D J, Hjorth-Jensen M 2003 *Rev. Mod. Phys.* **75** 607
- [ 2 ] Lombardo U, Schulze H J 2001 *Lecture Notes in Physics* **578** 30
- [ 3 ] Pines D 1980 *J. de Phys.* C **2** 111
- [ 4 ] Migdal A B 1960 *Sov. Phys. JETP* **10** 176
- [ 5 ] Pethick C J, Ravenhall D G 1995 *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* **45** 429
- [ 6 ] Blaschke D, Grigorian H, Voskresensky D N 2004 *Astron. & Astrophys.* **424** 979
- [ 7 ] Kaminker A D, Yakovlev D G, Gnedin O Y 2002 *Astronomy & Astrophysics* **383** 1076  
Gusakov M E, Kaminker A D, Yakovlev D G and Gnedin O Y 2005 *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **363** 555  
Kaminker A D, Gusakov M E, Yakovlev D G, Gnedin O Y 2006 *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **365** 1300
- [ 8 ] Pines D, Alpar M A 1985 *Nature* **316** 27
- [ 9 ] Shapiro S L, Teukolsky S A 1983 *Black Holes, White Dwarfs and Neutron Stars* (New York: John Wiley)
- [ 10 ] Baldo M, Cugnon J, Lejeune A, Lombardo U 1992 *Nucl. Phys. A* **536** 349
- [ 11 ] Hoffberg M, Glassgold A E, Richardson R W, Ruderman M 1970 *Phys. Rev. Lett.* **24** 775  
Takatsuka T 1972 *Prog. Theor. Phys.* **48** 1517
- [ 12 ] Bedaque P F, Rupak G, Savage M J 2003 *Phys. Rev. C* **68** 065802
- [ 13 ] Kodel V A, Kodel V V, Clark J W 1996 *Nucl. Phys. A* **598** 390  
Khodel V V, Khodel V A, Clark J W 2001 *Nucl. Phys. A* **679** 827  
Zverev M V, Clark J W, Khodel V A 2003 *Nucl. Phys. A* **720** 20
- [ 14 ] Elgaroy O, Engvik L, Hjorth-Jensen M, Osnes E 1996 *Nucl. Phys. A* **607** 425
- [ 15 ] Baldo M, Elgaroy O, Engvik L, Hjorth-Jensen M, Schulze H J 1998 *Phys. Rev. C* **58** 1921
- [ 16 ] Elgaroy O, Engvik L, Jensen M H, Osnes E 1996 *Phys. Rev. Lett.* **77** 1428
- [ 17 ] Zuo W, Lejeune A, Lombardo U, Mathiot J F 2002 *Nucl. Phys. A* **706** 418  
Zuo W, Lejeune A, Lombardo U *et al* 2002 *Euro. Phys. J.* **A14** 469
- [ 18 ] Zuo W, Lombardo U, Schulze H J, Shen C W 2002 *Phys. Rev. C* **66** 037303

- Zuo W, Li Z H, Lu G C, Li J Q, Scheid W, Lombardo U, Schulze H J, Shen C W 2004 *Phys. Lett. B* **595** 44
- Zuo W, Lu G C 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3873 ( in Chinese ) [ 左 维、陆广成 2007 物理学报 **56** 3873 ]
- [ 19 ] Migdal A B 1967 *Theory of Finite Fermi Systems and Applications to Atomic Nuclei* ( London : Interscience Publisher )
- [ 20 ] Ring P, Schuck P 1980 *The Nuclear Many-body Problem* ( New York : Springer-Verlag )
- [ 21 ] Baldo M, Cugnon J, Lejeune A, Lombardo U 1990 *Nucl. Phys. A* **515** 409
- [ 22 ] Schulze H J, Cugnon J, Lejeune A, Baldo M, Lombardo U 1996 *Phys. Lett. B* **375** 1
- Lombardo U, Schuck P, Zuo W 2001 *Phys. Rev. C* **64** 021301
- Bozek P 2003 *Phys. Lett. B* **551** 93
- Rabhi A, Bennaceur R, Chanfray G, Schuck P 2002 *Phys. Rev. C* **66** 064315
- Schwenk A, Friman B, Brown G E 2003 *Nucl. Phys. A* **713** 191
- Schwenk A, Friman B 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 082501
- [ 23 ] Lombardo U, Shen C, Schulze H J, Zuo W 2005 *Inter. J. Mod. Phys. E* **14** 513
- [ 24 ] Wiringa R B, Stoks V G J, Schiavilla R 1995 *Phys. Rev. C* **51** 28
- [ 25 ] Grange P, Lejeune A, Martzoff M, Mathiot J F 1989 *Phys. Rev. C* **40** 1040
- [ 26 ] Day B D 1967 *Rev. Mod. Phys.* **39** 719
- Day B D 1978 *Rev. Mod. Phys.* **50** 495
- [ 27 ] Zuo W, Bombaci I, Lombardo U 1999 *Phys. Rev. C* **60** 024605
- [ 28 ] Li Z H, Zuo W, Lu G C 2004 *Chinese Phys.* **13** 1848
- [ 29 ] Lu G C, Li Z H, Zuo W, Luo P Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 84 ( in Chinese ) [ 陆广成、李增花、左 维、罗培燕 2006 物理学报 **55** 84 ]
- [ 30 ] Zuo W, Xu Z F 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 129 ( in Chinese ) [ 左 维、徐忠锋 2007 物理学报 **56** 129 ]
- [ 31 ] Baldo M 1999 *Nuclear Methods and the Nuclear Equation of State* ( Singapore : World Scientific ) p1
- [ 32 ] Machleidt R 1989 *Adv. Nucl. Phys.* **16** 189

## Neutron ${}^3\text{PF}_2$ superfluidity in neutron matter and the effect of microscopic three-body force <sup>\*</sup>

Cui Chang-Xi Zuo Wei<sup>†</sup>

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

( Graduate School of Chinese Academy of Sciences , Beijing 100049 , China )

( Received 9 November 2006 ; revised manuscript received 10 December 2006 )

### Abstract

The neutron  ${}^3\text{PF}_2$  pairing gap in pure neutron matter has been studied by using the Brueckner-Hartree-Fock ( BHF ) approach and the BCS theory. We have concentrated our attention on investigating the three-body force effect on the neutron superfluidity in the  ${}^3\text{PF}_2$  channel. The calculated results indicate that the three-body force enhances remarkably the  ${}^3\text{PF}_2$  superfluidity in neutron matter. When adopting the BHF single-particle spectrum, the three-body force turns out to increase the maximum value of the pairing gap from about 0.22 MeV to about 0.5 MeV.

**Keywords** : neutron matter,  ${}^3\text{PF}_2$  superfluidity, three-body force, BCS theory

**PACC** : 2165, 9760J, 6750F

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant Nos. 10575119, 10235030 ), the Chinese Academy of Sciences Knowledge Innovation Project ( Grant No. KJCX3-SYW-N2 ), the Major State Basic Research Development Program ( Grant No. G2000077400 ) of China and the Chinese Ministry of Science and Technology ( Grant No. 2002CAB00200 ).

<sup>†</sup> E-mail : zuowei@impcas.ac.cn