

热核物质中单核子势的重排项贡献和 三体核力效应*

左维^{1,1)} 陆广成^{1,2} 李增花^{1,2} 罗培燕^{1,2}

1 (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2 (中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 在包含三体核力的有限温度 Brueckner-Hartree-Fock 理论方法基础上, 利用质量算子的空穴线展开, 研究了热核物质中基态关联所导致的对单核子势的重排修正项的密度和温度依赖性, 并讨论了三体核力对重排项的影响. 结果表明: 单核子势的重排项贡献具有较强的密度和温度相关性, 重排项贡献随密度增加而增强并随温度升高而减弱. 在计算中引入三体核力会在一定程度上抑制基态空穴关联效应, 从而导致单核子势的重排项贡献减小, 而且三体核力对重排项贡献的影响随密度增大而增强.

关键词 单核子势 微观三体核力 有限温度核物质 质量算子空穴线展开 重排贡献

1 引言

核物质状态方程不仅是核物理研究的一个前沿课题, 而且对于中子星的结构和演化性质的研究也是至关重要的^[1-3]. 利用原子核反应输运理论模型模拟重离子碰撞动力学过程, 并与实验观测量进行比较, 是通过中高能重离子碰撞实验提取有关极端条件下核物质状态方程信息的主要途径^[4-6]. 核子在核物质中所感受到的平均势场不仅是重离子碰撞输运理论模型的基本输入量之一, 而且是将核物质状态方程与重离子碰撞实验观测量相联系的一个关键物理量^[4]. 因此, 从现实核力出发, 利用原子核微观多体理论方法较为精确地确定热核物质中核子感受到的单核子势就显得尤为重要. 文献[7]中, Bombaci 等利用 Brueckner-Hartree-Fock (BHF) 方法研究了零温非对称核物质中核子的平均势及其同位旋相关性. 在文献[8]中, 我们进一步在有限温度 BHF 框架内计算了热核物质中核子感受到的单核子势及核子的有效质量, 特别是讨论了单核子势对温度的依赖关系以及三体核力对单核子性质的影响. 然而, 在上述这些研究中, 仅

仅计算和讨论了 BHF 近似下单核子势的最低阶贡献, 而没有考虑由于基态空穴关联所引起的对单核子势场的修正. 研究表明^[9-12]: 基态两空穴关联效应所导致的质量算子空穴线展开中的重排项对核物质中单核子性质(单核子势、核子有效质量和平均自由程等)有非常重要的影响, 而且在单核子势中计及重排项贡献能够在很大程度上改善 BHF 近似下得到的核物质整体性质(状态方程)与核物质中单核子性质之间的热力学自洽性, 因此在计算核物质中的单核子性质时, 仅仅考虑最低阶近似是不够的, 还需考虑基态空穴关联带来的修正. 在文献[10]中, Baldo 等研究了零温核物质中基态关联对单核子势的影响, 并讨论了基态关联效应的密度依赖性. 在文献[11]中, 我们进一步将质量算子的空穴线展开推广到非对称核物质情形, 并研究了零温非对称核物质中基态关联效应的同位旋依赖性. 在文献[12]中, Grange 等在 Brueckner 理论框架内研究了有限温度核物质中, 基态关联效应对单核子势与核子有效质量的修正, 并讨论了质量算子中重排项贡献随温度的变化关系, 然而他们只考虑了处于核物质经验饱和密度 $\rho_0 = 0.17 \text{ fm}^{-3}$ 的核物质, 而且在计算

2005-02-28 收稿

* 中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KJ951-A1-01-02), 国家重点基础研究发展规划项目(G2000077400), 国家自然科学基金重点基金(10235030)和国家科技部重大前期研究专项基金(2002CCB00200)资助

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

中采用了两体 Paris 核势, 没有考虑三体核力. 众所周知, 从两体现实核力出发, 非相对论微观多体理论方法不能正确描述核物质饱和点性质^[13, 14]. 为了改善对于核物质饱和点性质的微观理论预言, 需要在两体核子-核子相互作用的基础上考虑三体核力的贡献. 本文的目的是在包含三体核力的有限温度 BHF 理论框架内^[11], 利用质量算子的空穴线展开, 研究热核物质中基态关联效应所导致的对单核子势的重排项修正, 特别是讨论有限温度核物质中重排项贡献随密度的变化关系以及三体核力对基态关联效应的影响.

2 有限温度下质量算子的空穴线展开

在 Brueckner-Bethe-Goldstone (BBG) 理论框架内, 可以按照空穴线的数目对质量算子进行微扰展开^[9-12, 15, 16], 即

$$M(k, \omega) = M_1(k, \omega) + M_2(k, \omega) + M_3(k, \omega) + \dots, \quad (1)$$

其中 k 和 ω 分别表示核子的动量和能量. 质量算子 $M(k, \omega)$ 是一个复算子, 可表示为 $M(k, \omega) = V(k, \omega) + iW(k, \omega)$. 当能量 ω 在能壳上取值时, ω 和 k 满足下述能量-动量关系:

$$\omega = \varepsilon(k) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} + \text{Re}M(k, \omega), \quad (2)$$

这时我们称质量算子 $M(k) \equiv M(k, \varepsilon(k))$ 为在能壳上(on-shell)的质量算子. 能壳上质量算子的实部 $V(k) \equiv V(k, \varepsilon(k))$ 描述核物质中核子所感受到的平均势场, 而其虚部 $W(k) \equiv W(k, \varepsilon(k))$ 与核子在核介质中传播的平均自由程相联系^[9, 17]. 质量算子的空穴线展开可写为:

$$\begin{aligned} V(k, \omega) &= V_1(k, \omega) + V_2(k, \omega) + V_3(k, \omega) + \dots, \\ W(k, \omega) &= W_1(k, \omega) + W_2(k, \omega) + W_3(k, \omega) + \dots. \end{aligned} \quad (3)$$

在质量算子的空穴线展开式中, 最低阶贡献 $M_1(k, \omega)$ 对应于通常的 BHF 近似下的质量算子; 二阶贡献 $M_2(k, \omega)$ 被称为重排项^[9-12], 反映了两空穴关联对单核子性质的影响; 三阶贡献 $M_3(k, \omega)$ 被称为重整项, 是由于多体关联导致的核子数占居情况对于有限温度费米分布的偏离(零温时表现为费米面以下状态的非完全占居效应)所带来的对 $M_1(k, \omega)$ 的修正^[9-12, 16]. 质量算子的空穴线展开式中的二阶和高阶修正起源于核物质中有效相互作用 G 矩阵的密度依赖性, 可以在朗道费米流体理论框架内, 根据有效相互作用 G 矩阵对准粒子占据数分布的泛函依赖来加以理解^[9]. 在核介质中, 由于 G 矩阵方程中泡利算子和能量分母对

于粒子数分布的依赖, 能量密度对粒子数分布的函数变分除了包含质量算子的最低阶近似 $M_1(k, \omega)$ 外, 还将给出质量算子空穴线展开式中的所有高阶修正^[9]. 因此, 核子在核物质中感受到的真实平均势场除了最低阶 BHF 项外, 还应包括由于核介质中基态关联效应所导致的修正, 即质量算子中的二阶以及二阶以上的贡献. 研究表明^[9-12]: 基态关联效应所导致的对单核子势最重要的修正来自于重排项贡献, 与最低阶贡献 $M_1(k, \omega)$ 和重排项 $M_2(k, \omega)$ 的贡献相比, 重整修正 $M_3(k, \omega)$ 对质量算子的贡献要小得多, 因此在本文我们将重点讨论质量算子中重排项贡献及其温度、密度和动量相关性. 在有限温度情形下, 重排项由下式给出^[12]:

$$M_2(k, \omega, T) = \frac{1}{2} \sum_{k' k_1 k_2} [1 - f(k', T)] f(k_1, T) \times f(k_2, T) \frac{|\langle k k' | G | k_1 k_2 \rangle_A|^2}{\omega + \varepsilon(k') - \varepsilon(k_1) - \varepsilon(k_2)}, \quad (4)$$

其中 G 是利用有限温度 BHF 方法^[8, 18] 得到的有效相互作用 G 矩阵; 下标 A 表示反对称化; k 和 ω 分别表示核子具有的动量和能量; $f(k, T)$ 是有限温度下的费米分布

$$f(k, T) = \left[1 + \exp\left(\frac{\varepsilon(k) - \mu}{T}\right) \right]^{-1}, \quad (5)$$

由于两个相互作用核子的总动量 P 、总角动量 j 、总自旋 s 和总同位旋 t 守恒, 因而通常是按照角动量分波展开在 $|jstl\rangle$ 表象中对有限温度 BHF 方程进行数值计算, 详见文献[19]. 利用有限温度 BHF 方法得到 G 矩阵在 $|jstl\rangle$ 表象中的矩阵元后, 可通过下式计算重排项^[12]:

$$M_2(k, \omega, T) = \frac{2}{\pi^2 k} \sum_{jstl'} (2j+1)(2t+1) \times \iint dq dP dP' \left[1 - f(\sqrt{P^2/2 + 2q^2 - k^2}, T) \right] \times \int q'^2 dq' \langle R(q', P) \rangle \times \frac{|G_{ll'}^{jst} [q, q', P, e_{12}(q', P)]|^2}{\omega + \varepsilon(\sqrt{P^2/2 + 2q^2 - k^2}, P) - e_{12}(q', P)}, \quad (6)$$

其中 $\mathbf{q} = (\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2)/2$ 和 $\mathbf{P} = \mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2$ 分别是两个核子的相对运动动量和总动量; $e_{12}(q', P) \equiv \langle \varepsilon(k_1) + \varepsilon(k_2) \rangle$ 是能量分母的角平均; $\langle R(q', P) \rangle$ 表示反泡利算符的角平均, 即

$$\langle R(q', P) \rangle = \frac{1}{2} \int_0^\pi \sin \theta d\theta f(k_1, T) f(k_2, T), \quad (7)$$

其中 θ 是相对运动动量 \mathbf{q} 和总动量 \mathbf{P} 之间的夹角.

对于任意给定温度 T 和密度 ρ , 利用包含三体核力的有限温度 BHF 方法^[11]可以计算出有效相互作用 G 矩阵, 进而利用(6)式即可计算出质量算子空穴线展开中的二阶项, 即重排项. 计算中我们采用 Argonne V_{18} 势 (AV_{18})^[20] 或 Argonne V_{14} 势 (AV_{14})^[21] 作为两体现实核子-核子相互作用势; 我们采用的三体核力模型是根据介子流交换理论方法建立的微观三体核力模型, 详见文献[8, 14, 22].

3 结果与讨论

图 1 给出的是不同温度下具有正常核物质密度 $\rho = \rho_0 = 0.17\text{fm}^{-3}$ 的核物质中单核子势的重排修正项 $V_2(k)$ 随动量的变化关系. 图 1 的计算结果表明: 无论是否考虑三体核力, 基态空穴关联效应对单核子势及其动量依赖关系均有显著影响, 基态关联导致的二阶贡献具有较强的排斥性, 将在很大程度上减弱 BHF 单核子势的吸引力, 从而能够大大改善零温条件下 BHF 理论预言的光学势与唯象光学势的符合程度^[9]. 由图中显而易见, 基态关联仅在低动量区域 ($k \leq k_F$) 有明显贡献, 在高动量区域基态关联导致的重排修正 $V_2(k)$ 迅速减小并接近于零, 这一结果与文献[9—11]中关于零温核物质的结论相一致. 重排项贡献具有很强的温度相关性, 随着核物质温度的升高, 基态空穴关联效应减弱, 从而导致单核子势中重排项贡献迅速减小, 而且随温度升高, 重排项随核子动量的变化明显变缓.

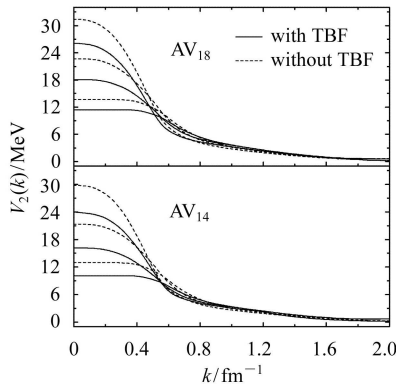


图 1 不同温度下具有正常核物质密度 $\rho = \rho_0 = 0.17\text{fm}^{-3}$ 的核物质中, 单核子势的重排项贡献 $V_2(k)$ 随核子动量 k 的变化关系
图中由上至下的 3 条实线或虚线所对应的温度分别为 $T = 0, 10, 20\text{MeV}$.

比较图中实线与相应的虚线可以看到: 三体核力的作用是使单核子势中的重排项贡献减小, 这主要是由于三体核力具有很强的短程排斥性, 在一定程度上抑制

了基态两空穴关联效应. 随着温度的升高, 三体核力对重排项的影响有所减弱. 例如, 当 $T = 0\text{MeV}$ 时, 三体核力的引入导致 $V_2(k = 0)$ 的值下降了大约 6MeV , 而当 $T = 20\text{MeV}$ 时, 三体核力的影响使 $V_2(k = 0)$ 的值仅下降了大约 3MeV . 这主要是因为当温度较高时, 重排项贡献本身较小, 相应地三体核力的影响也就较小. 另外, 比较图 1 中上下两部分可以发现, 当采用不同的两体现实核力 AV_{18} 势和 AV_{14} 势时, 计算得到的结果之间差别不大, 这表明单核子势的重排项贡献对于本文选取的两种不同的两体相互作用核势并不十分敏感.

下面简单讨论一下质量算子空穴线展开中二阶项的虚部 $W_2(k)$. 图 2 给出了不同温度下具有正常核物质密度 $\rho = \rho_0 = 0.17\text{fm}^{-3}$ 的核物质中 $W_2(k)$ 随核子动量 k 的变化关系. 可以看出, 对于零温度核物质, 由于 Pauli 阻塞效应的限制, $W_2(k)$ 仅在费米动量以下区域不为零; 当 $k > k_F$ 时, $W_2(k) = 0$, 这与文献[9—11]中的结果一致; 但是当温度 $T \neq 0$ 时, 由于 Pauli 阻塞效应减弱, $W_2(k)$ 的值会延伸到费米动量以上区域; 温度越高, $W_2(k)$ 也就延伸到费米动量以上更高的动量区域. 三体核力的贡献使 $W_2(k)$ 减小.

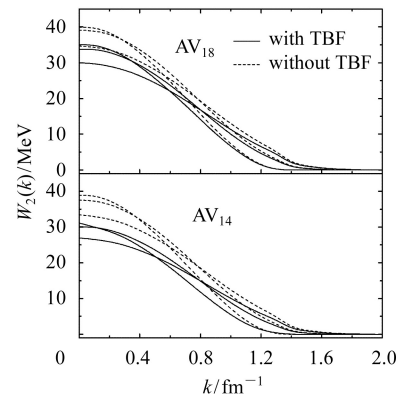


图 2 不同温度下具有正常核物质密度 $\rho = \rho_0 = 0.17\text{fm}^{-3}$ 的核物质中, 质量算子空穴线展开中二阶项虚部 $W_2(k)$ 随核子动量 k 的变化关系
图中曲线说明同图 1.

图 3 显示了质量算子中重排项贡献的密度依赖性. 图中计算结果表明, 无论在计算中是否包含三体核力, 重排项贡献均随核物质密度的增加而单调增大; 随温度的升高基态关联效应减弱, 基态关联所引起的对单核子势的重排修正项 V_2 也相应减小, 但与零温度情形相比, 当 $T \neq 0$ 时 V_2 随密度而增大的速度有所加快. 三体核力的作用是削弱了基态空穴关联效应, 导致重排修正减小. 由图中计算结果可以明显看出: 当密度较低时, 三体核力对重排项的影响较小; 随着核物质密度

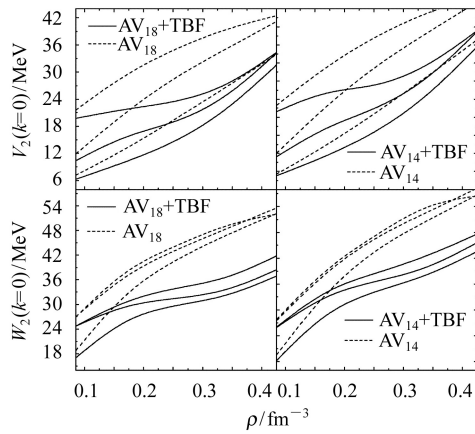


图 3 考虑三体核力和不考虑三体核力两种情况下, 在核子动量 $k=0$ 时, 质量算子空穴线展开中二阶项(即重排项贡献)的密度依赖性
图中由上至下的 3 条实线或虚线对应的温度分别为 $T=0, 10, 20\text{MeV}$.

的增加, 三体核力的影响变得越来越显著, 这是由于三体核力体现了一种核介质效应, 在密度较高时才变得重要, 其效应随密度增大而增强^[23]. 另外, 比较图中左右两部分可以看到, 虽然采用了不同的现实两体

相互作用势, 但重排贡献项的密度相关性几乎没有改变, 这进一步表明基态两空穴关联效应对两体相互作用核势并不敏感.

4 总结

在包含微观三体核力的有限温度 BBG 理论框架内, 利用质量算子的空穴线展开, 研究了基态关联效应导致的对单核子势的重排修正项及其密度和温度依赖性, 并详细讨论了三体核力的影响. 我们的研究结果表明: (1) 重排项对单核子势的贡献具有排斥性, 因而将使核物质中单核子势的深度变浅; (2) 单核子势中重排项贡献对核物质密度和温度具有较强的依赖性, 随密度增大重排项贡献增强, 而核物质温度的升高则导致基态空穴关联效应的减弱, 结果使得重排项贡献减小; (3) 三体核力的贡献在一定程度上抑制了基态空穴关联, 结果导致重排项贡献的减弱; (4) 三体核力对单核子势中重排修正项的影响随密度增大而增强.

参考文献(References)

- Prakash M, Bombaci I, Prakash M et al. Phys. Rep., 1997, **280**: 1
- Strobel K, Sohaab C, Weigel M K. Astron. Astrophys., 1999, **350**: 497
- Marranghello G F, Vasconcellos C A Z, Dilling M. Int. J. Mod. Phys., 2002, **E11**: 83
- Bertsch G F, Gupta S D. Phys. Rep., 1988, **160**: 189
- Danielewicz P, Lacey R, Lynch W G. Science, 2002, **298**: 1592
- LI B A, Ko C M, Bauer W. Int. J. Mod. Phys., 1998, **E7**: 147
- Bombaci I, Lombardo U. Phys. Rev., 1991, **C44**: 1892
- ZUO W, LI Z H, LI A et al. Phys. Rev., 2004, **C69**: 064001
- Brown G E. Rev. Mod. Phys., 1971, **43**: 1; Jeukenne J P, Lejeune A, Mahaux C. Phys. Rep., 1976, **25C**: 83
- Baldo M, Bombaci I, Ferreira L S et al. Phys. Lett., 1988, **B209**: 135
- ZUO W, Bombaci I, Lombardo U. Phys. Rev., 1999, **C60**: 024605
- Grangé P, Cugnon J, Lejeune A. Nucl. Phys., 1987, **A473**: 365
- Fuchs C. Lect. Notes Phys., 2004, **641**: 119
- ZUO W, Lejeune A, Lombardo U et al. Nucl. Phys., 2002, **A706**: 418
- Day B D. Rev. Mod. Phys., 1967, **39**: 719; 1978, **50**: 495
- 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)
- ZUO W, Lombardo U, Schulze H J. Phys. Lett., 1998, **B432**: 241
- Bombaci I, Kuo T T S, Lombardo U. Phys. Rep., 1994, **242**: 165
- Baldo M. Nuclear Methods and the Nuclear Equation of State. Ed. Baldo M. Singapore: World Scientific, 1999. 1
- Wiringa R B, Stoks V G J, Schiavilla R. Phys. Rev., 1995, **C51**: 28
- Wiringa R B, Smith R A, Ainsworth T L. Phys. Rev., 1984, **C29**: 1207
- Grangé P, Lejeune A, Martzolff M et al. Phys. Rev., 1989, **C40**: 1040
- Machleidt R. Adv. Nucl. Phys., 1989, **19**: 189

Rearrangement Contribution to Single Nucleon Potential in Hot Nuclear Matter and Three-Body Force Effect^{*}

ZUO Wei^{1;1)} LU Guang-Cheng^{1,2} LI Zeng-Hua^{1,2} LUO Pei-Yan^{1,2}

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

2 (Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Based on the finite temperature Brueckner-Hartree-Fock approach including a microscopic three-body force, the rearrangement correction to the single nucleon potential in hot nuclear matter, and its density and temperature dependence have been investigated by using the hole-line expansion for the mass operator. It turns out that the rearrangement contribution due to ground state correlations is repulsive and it depends sensitively on both density and temperature. The rearrangement contribution becomes larger as the density increases and becomes smaller as the temperature rises up. The three-body force affects considerably the rearrangement contribution of the single nucleon potential and its effect increases with density. Inclusion of the three-body force in the calculation reduces the ground state correlations especially in the high density region and consequently makes the rearrangement contribution smaller.

Key words single-nucleon potential, microscopic three-body force, finite temperature nuclear matter, hole-line expansion of mass operator, rearrangement contribution

Received 28 February 2005

^{*}Supported by Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences (KJCX2-SW-N02), Major State Basic Research Development Program (G2000077400), Major Program of National Natural Science Foundation of China (10235030) and Important Pre-research Project of the Chinese Ministry of Science and Technology (2002CCB00200)

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