

同位旋非对称核物质性质与扩展的 BHF 方法^{*}

(VII) 中子星物质中质子和中子的 1S_0 态超流性

李增花 陆广成 左维¹⁾

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 利用 Brueckner-Hartree-Fock 和 BCS 理论方法, 计算了 β 稳定中子星物质中处于 1S_0 态的质子和中子的对关联能隙, 着重研究和讨论了三体核力的影响. 结果表明三体核力对 β 稳定中子星物质中 1S_0 态中子超流性的影响相对较小, 但对 1S_0 态质子超流性具有重要影响, 而且其效应随核子数密度增大而迅速增强. 三体核力的主要作用是强烈地抑制了高密度 β 稳定中子星物质中的 1S_0 态质子超流性.

关键词 β 稳定中子星物质 BCS 理论 BHF 方法 三体核力 超流性

1 引言

中子核物质中超流性的研究是核天体物理中的一个重要课题. Migdal 指出^[1] 中子物质中超流相的存在可以导致一些有趣的宏观天体现象. 研究表明, 中子星中发生的许多物理过程(如中子星冷却^[2], 涡漩钉扎^[3], 前脉冲发射^[4] 等)对质子和中子超流相的存在以及超流性的强弱都非常敏感. 例如, 对于年龄小于 10^5 — 10^6 年的中子星, 通过各种 URCA 过程发射中微子而损失能量是其主要的冷却机制, 而质子超流相的存在将减少中子星内部核物质芯中发生的修正的 URCA 过程中的能量损失, 从而影响中子星的冷却率. Baldo 等^[5] 利用 BCS 理论和 Brueckner-Hartree-Fock (BHF) 方法计算了 β 稳定中子星物质中质子和中子的对关联能隙. 他们在计算中虽然采用了现代的两体现实核力, 但没有考虑三体核力的影响. Elgaroy 等^[6] 利用 Dirac-BHF (DBHF) 方法计算了 β 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 β 稳定中子星物质中超流性的影响, 结果表明相对论效应对中子和质子的 1S_0 态超流性的影响并不明显. 在文献[7]中, 我们仔细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. 因此有必要研究三体核力对于 β 稳定中子星物质中质子和中子超流性的影响.

本文在同位旋相关的 BHF 理论框架内, 计算了 β 稳定中子星物质中的质子数比例以及 1S_0 态中子和质子的对关联能隙, 着重研究和讨论三体核力的影响. 结果表明: 三体核力对 β 稳定中子星物质中 1S_0 态中子超流性的影响相对较小, 但对质子比例以及 1S_0 态质子超流性有重要影响, 其主要作用是大大增加了高密度 β 稳定中子星物质中的质子比例并明显减弱了 1S_0 态质子超流性.

2003-02-26 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 (KJ92-SW-N02), 国家重点基础研究发展规划 (G2000077400), 国家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 基本理论方法

与金属的超导性类似,核物质中的核子由于对关联在一定条件下形成核子对,这些核子对可以看作玻色子.当核物质中大量的核子对处于能量最低的同状态时,就称为核物质具有超流性.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问题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^[8-11].核物质中超流性的强弱是由费米面处对关联能隙 $\Delta_F \equiv \Delta(k_F)$ 的大小来描述的,在 BCS 理论框架内, 1S_0 态的对关联能隙由下述标准的能隙方程确定^[11],

$$\Delta(k) = - \frac{1}{\pi} \int k'^2 dk' \times \frac{V(k, k')}{\sqrt{[\epsilon(k') - \epsilon(k_F)]^2 + \Delta(k')^2}} \Delta(k'), \quad (1)$$

其中 $V(k, k')$ 是有效对相互作用, $\epsilon(k) = \hbar^2 k^2 / (2m) + U(k)$ 为单粒子能谱.研究表明^[11-14],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^[11].本文的主要目的是研究三体核力对 β 稳定物质中 1S_0 态质子和中子超流性的影响,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,这时 $V(k, k')$ 相应于核子-核子裸相互作用按分波展开的 1S_0 态分量.我们将采用文献[10]中的方法求解能隙方程.为了计算 β 稳定中子星物质中 1S_0 态质子和中子的对关联能隙,首先要知道任意给定核子数密度的 β 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,具体步骤如下:

1) 对于任意给定核子数密度 ρ_B 和同位旋非对称度 β 的非对称核物质,利用 BHF 方法^[15] 计算出其状态方程,在此基础上进而提取出对称能及其密度依赖关系.同位旋非对称度定义为 $\beta = (\rho_n - \rho_p) / \rho_B$, 其中 ρ_n, ρ_p 和 ρ_B 分别表示中子数密度、质子数密度和总核子数密度.计算中采用 Argonne $V_{18}(AV_{18})$ 势^[16] 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^[17] 作为三体核力.对于辅助势采用连续性选择,这时辅助势不但具有单粒

子平均场的物理意义,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^[18].

2) 对于任意给定核子数密度 ρ_B 的 β 稳定中子星物质,根据 β 稳定条件并利用上面得到的对称能及其密度依赖关系可以计算出相应的质子比例 $Y^p(\rho_B) \equiv \rho_p / \rho_B$.显然, Y^p 与同位旋非对称度 β 之间的关系为 $\beta = 1 - 2Y^p$.于是,我们就得到了 β 稳定中子星物质在 β - ρ_B 平面上所满足的曲线 $\beta(\rho_B)$.

3) 根据 $\beta(\rho_B)$ 可以计算出任意给定核子数密度的 β 稳定中子星物质中质子和中子的费米动量.同时再次利用 BHF 方法计算出 β 稳定中子星物质 $[\rho_n, \beta(\rho_B)]$ 中质子和中子的单粒子能谱.在此基础上求解能隙方程可以得到 β 稳定中子星物质中 1S_0 态的中子和质子对关联能隙.

3 计算结果与讨论

3.1 三体核力对 β 稳定中子星物质中的质子比例的影响

通常中子星的核物质芯部分可以看作是由中子、质子、电子和 μ 介子组成的处于零温度下的弱相互作用平衡的体系¹⁾,称为 β 稳定中子星物质. β 稳定中子星物质中各种粒子的含量由弱相互作用平衡条件及电中性条件决定^[19],即

$$\mu_n - \mu_p = \mu_e, \quad \mu_\mu = \mu_e, \quad (2)$$

$$\rho_p = \rho_e + \rho_\mu, \quad (3)$$

因此, β 稳定中子星物质中的质子比例由中子与质子的化学势之差 $\tilde{\mu} \equiv \mu_n - \mu_p$ 决定.在零温度下,中子和质子的化学势 μ_n 和 μ_p 对应于它们的费米能量.根据热统计力学,零温度下中子与质子的化学势之差由下式确定:

$$\tilde{\mu} = \mu_n - \mu_p = - \left. \frac{\partial [E_A(\rho_B, Y^p)]}{\partial Y^p} \right|_{\rho_B}, \quad (4)$$

其中 $E_A(\rho_n, Y^p) \equiv E(\rho_B, Y^p) / A$ 是非对称核物质的每核子能量(即状态方程).根据文献[20],非对称核物质的状态方程随非对称度 $\beta = 1 - 2Y^p$ 的变化在整个同位旋范围内满足二次方规律,即 $E_A(\rho_B, Y^p) = E_A(\rho_B, Y^p = 1/2) + E_{\text{sym}}(\rho_B)(1 - 2Y^p)^2$, 其中 $E_{\text{sym}}(\rho)$ 为对称能,因此 $\tilde{\mu}$ 可以表示为

$$\tilde{\mu} = 4E_{\text{sym}}(\rho_B)(1 - 2Y^p). \quad (5)$$

1) 中子星核物质芯的温度 $k_B T \approx 1\text{MeV}$ 远远小于其组分的费米温度(约 100MeV),详见文献[8]中讨论.

上式表明对于具有任意给定核子数密度 ρ_B 和质子比例 Y^p 的非对称核物质, $\tilde{\mu}$ 完全由对称能决定. 根据电子化学势和 μ 介子化学势与它们各自的粒子数密度 ρ_e 和 ρ_μ 的关系, 并利用弱相互作用平衡条件(2)式和电中性条件(3)式可以得到确定 β 稳定中子星物质中质子数比例的方程, 即

$$3\pi^2(\hbar c)^3 \rho_B Y^p = \tilde{\mu}^3 + [\tilde{\mu}^2 - (m_\mu c^2)^2]^{3/2} \theta(\mu_e - m_\mu c^2), \quad (6)$$

其中 $\theta(\mu_e - m_\mu c^2)$ 为阶梯函数, 表示当电子化学势大于 μ 子静止质量 ($\mu_e \geq m_\mu c^2 \approx 105.6 \text{ MeV}$) 时, 电子可通过弱相互作用过程转化为 μ 介子, μ 介子将参加平衡过程. 对于给定核子数密度的 β 稳定中子星物质, 利用方程(6)可以求出相应的质子数比例 Y^p . 在表 1 中给出了利用 BHF 方法预言的 β 稳定中子星物质中的质子比例随核子数密度的变化关系. 表中第一列表示 β 稳定中子星物质的核子数密度, 第二列和第三列分别是不考虑和考虑三体力两种情况下计算得到的质子比例. 从表中计算结果可以看到, β 稳定中子星物质中的质子比例随核子数密度的增大而增加. 当不考虑三体核力时, 在本文所考虑的密度区域内 ($\rho \leq 0.45 \text{ fm}^{-3}$), BHF 理论预言的 β 稳定中子星物质中的质子比例远远小于发生直接 URCA 过程的临界质子比例 Y_c^p (约为 $0.15^{[19]}$). URCA 过程是指中子(或质子)通过 β 衰变(或电子俘获)发射中

微子的弱相互作用过程^[19]. 由于三体核力的作用, 高密度 β 稳定中子星物质中的质子比例将大大增加. 考虑了三体核力后, 当核子数密度增大到 0.4 fm^{-3} 时, β 稳定中子星物质中会发生直接 URCA 过程, 其直接结果是导致中子星的冷却速度大大加快. 上述结果的主要原因是由于三体核力对原子核对称能的影响, 即三体核力效应使高密度对称能及其随密度而增大的速度大大增加^[20].

β 稳定中子星物质中的质子和中子的 1S_0 超流性

利用 BHF 方法计算出 β 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后, 就可以通过求解能隙方程(1)得到 β 稳定中子星物质中 1S_0 态中子和质子的对关联能隙. 在图 1 中给出了 β 稳定中子星物质中 1S_0 态中子对关联能隙 $\Delta_F \equiv \Delta(k_F)$ 随核子数密度的变化关系. 由图中可见, 在 β 稳定中子星物质中 1S_0 态中子超流相主要存在于低密度区域 ($\rho_B < 0.1 \text{ fm}^{-3}$), 而且对关联能隙的最大值所对应的核子数密度约为 0.02 fm^{-3} . 为了

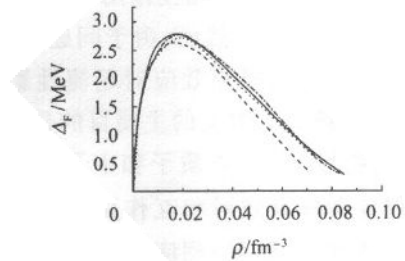


图 1 β 稳定中子星物质中 1S_0 态中子对关联能隙 Δ_F 随核子数密度的变化关系
 —采用 AV_{18} 核势, 不考虑三体核力; - - - 采用 AV_{18} 核势并考虑三体核力; - · - · 采用 AV_{14} 核势, 取自文献[10]; · · · · 采用 Paris 势, 取自文献[10].

表 1 β 稳定中子星物质中的质子比例 Y^p

ρ_B/fm^{-3}	Y^p	
	BHF(AV_{18})	BHF($AV_{18} + TBF$)
0.002	1×10^{-6}	1×10^{-6}
0.005	0.0042	0.0042
0.009	0.0078	0.0077
0.020	0.0093	0.0091
0.030	0.0138	0.0132
0.050	0.0187	0.0181
0.070	0.0225	0.0218
0.085	0.0247	0.0252
0.100	0.0279	0.0280
0.140	0.0332	0.0353
0.170	0.0382	0.0432
0.210	0.0471	0.0570
0.250	0.0558	0.0731
0.300	0.0667	0.0944
0.340	0.0746	0.1162
0.400	0.0872	0.1499
0.450	0.0970	0.1785

理解这一结果, 让我们考虑具有相同中子数密度的 β 稳定中子星物质和纯中子物质中的 1S_0 态中子超流性. 在 BCS 理论框架内, 这两种物质中 1S_0 态中子对关联能隙之间的差别是由于这两种物质中中子的单粒子能谱的不同导致的^[11]. 由于 β 稳定中子星物质中的质子比例相当小(见表 1), 特别是当核子数密度较低时, 有 $Y^p \ll 1$, 因此 β 稳定物质中中子的单粒子能谱与具有相同中子密度的中子物质中的中子的单粒子能谱之间的差别相当小, 而且 β 稳定物质中的中子密度 $\rho_n = (1 - Y^p)\rho_B \approx \rho_B$. 综上所述, 可以粗略地认为具有相同核子数密度的 β 稳定中子

星物质和纯中子物质中的 1S_0 态中子超流性是相同的. 研究表明^[10] 中子物质中 1S_0 态超流相存在于低密度区域($\rho_N < 0.09\text{fm}^{-3}$), 而且能隙的最大值对应的核子数密度约为 0.019fm^{-3} . 这与我们上述的定性分析正好是一致的. 从图中还可以看出, 采用不同的两体现实核力得到的 1S_0 态中子对关联能隙略有差别, 这主要是由于不同的两体现实核力本身的差别以及不同的两体现实核力给出的 β 稳定中子星物质的状态方程之间的差别所导致的. 比较图中实线和虚线可知三体核力对 β 稳定中子星物质中 1S_0 态中子超流性的影响较小, 特别是当 $\rho_B < 0.01\text{fm}^{-3}$ 时, 三体核力几乎没有任何影响, 随着核子数密度的增大, 三体核力逐渐开始起作用, 而且其效应随核子数密度的增大而增强. 这是容易理解的, 因为三体核力体现了一种核介质效应^[21], 其作用随核密度增大而增强. 由图中可以看到, 由于三体核力的作用, β 稳定中子星物质中 1S_0 态中子超流性会减弱, 具体表现在两个方面: 一方面三体核力使能隙的峰值降低了约 5%; 另一方面, 三体核力使超流相存在密度范围由 $\rho_B < 0.1\text{fm}^{-3}$ 缩小到 $\rho_B < 0.08\text{fm}^{-3}$. 上述结果与我们关于三体核力对中子物质中超流性的影响的研究结果^[22] 是一致的.

图 2 显示的是 β 稳定中子星物质中费米面处 1S_0 态质子对关联能隙 $\Delta_p \equiv \Delta(k_F)$ 随核子数密度的变化关系. 由图中可见, 如果不考虑三体核力, 1S_0 态质子超流相存在的密度范围可以延伸到 $\rho_B = 0.45\text{fm}^{-3}$, 而且其对关联能隙的峰值约为 0.95MeV , 位于 $\rho_B \approx 0.2\text{fm}^{-3}$ 处. 一方面, 由于 β 稳定中子星物质中的质子比例很小 ($\rho_B = 0.45\text{fm}^{-3}$ 对应的质子密度仅为 $\rho_p \approx 0.04\text{fm}^{-3}$), 从而导致 1S_0 态质子超流相的存在范围延伸到核子数密度 ρ_B 很高的范围; 另一方面, 在同位旋高度非对称核物质中, 由于受到周围中子介质的强烈影响, 质子的单粒子势要比具有相同质子数密度的质子物质中质子的单粒子势深得多^[23], 或者说质子的有效质量要小得多, 因此 β 稳定中子星物质中 1S_0 态质子超流性与具有相同质子数密度的质子物质中 1S_0 态的质子超流性相比要弱得多. 我们得到的 β 稳定中子星物质中 1S_0 态质子对关联能隙的大小及其密度依赖性正是上述两种相反效应之间相互竞争的结果. 比较图中实线和虚线可知三体核力对 1S_0 态的质子超流性具有相当强的影响, 而且随着核子数密度的增大, 三体核力效应迅

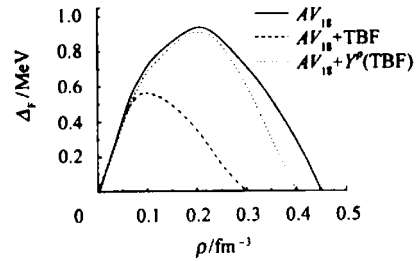


图 2 β 稳定中子星物质中 1S_0 态质子对关联能隙 Δ_p 随核子数密度的变化关系

速增强. 可以看到三体核力强烈地抑制了高密度 β 稳定中子星物质中的 1S_0 态质子超流性. 一方面, 由于三体核力的作用, 能隙的峰值由 0.94MeV 减小到 0.55MeV , 减小了约 40%; 另一方面, 三体核力的作用使得超流相存在的范围由 $\rho_B < 0.45\text{fm}^{-3}$ 缩小到 $\rho_B < 0.3\text{fm}^{-3}$. 由于三体核力对质子有效对相互作用的贡献不仅来自周围环境中的质子, 而且还来自周围的中子, 这一贡献的强弱直接 j β 稳定中子星物质中的总核子数密度 ρ_B 相联系. 因此尽管 β 稳定中子星物质中的质子比例很小, 但三体核力对质子有效对相互作用的贡献却随着总核子数密度的增大迅速增强^[20], 从而强烈地抑制了高密度 β 稳定中子星物质中的 1S_0 态质子超流性. 三体核力可能通过 3 个因素影响 β 稳定中子星物质中 1S_0 态质子超流性, 即有效对相互作用、 β 稳定中子星物质中的质子比例和质子的单粒子能谱. 为了澄清这 3 种因素的相对重要程度, 我们就下述情况进行了计算: 在能隙方程(1)式中, 考虑三体核力对 β 稳定中子星物质中的质子比例和质子的单粒子能谱的影响, 但不考虑三体核力对有效对相互作用 $V(k, k')$ 的贡献, 结果如图 2 中点线所示. 比较图中实线和点线可知, 三体核力通过影响质子比例和质子单粒子能谱对 β 稳定物质中 1S_0 态质子超流性有一定的影响, 但在上述 3 个因素中, 三体核力通过改变质子有效对相互作用产生的影响占主导作用, 相比而言, 三体核力通过 β 稳定中子星物质中的质子比例和质子的单粒子能谱对 1S_0 态质子的超流性的影响要相对弱得多.

4 总结

在 BHF 和 BCS 理论框架内, 研究了 β 稳定中子星物质中 1S_0 态中子和质子超流性, 着重讨论了三体核力的影响. 结果表明: 三体核力的作用使 β 稳定物质中的质子比例增加并减弱了 1S_0 态中子和质

子超流性. 由于 1S_0 态中子超流相仅存在于低密度 β 稳定物质中, 因此受三体核力的影响相对较小. 当不考虑三体核力时, β 稳定物质中的 1S_0 态质子超流相存在的范围可以延伸到相当高的核子数密度. 三

体核力则极大地抑制了高密度 β 稳定中子星物质中的 1S_0 态质子超流性, 使相应的对关联能隙峰值减小约 40% 并使相应超流相存在的密度范围由 $\rho_B < 0.45\text{fm}^{-3}$ 缩小到 $\rho_B < 0.3\text{fm}^{-3}$.

参考文献 (References)

- 1 Migdal A B et al. Sov. Phys. JETP, 1960, **10**:176
- 2 Pethick C J et al. Annu. Rev. Nucl. Part. Sci., 1995, **45**:429
- 3 Pines D, Alpar M A. Nature, 1985, **316**:27
- 4 Shapiro S L, Teukolsky S A. Black Holes, White Dwarfs and Neutron Stars. New York: John Wiley, 1983
- 5 Baldo M, Cugnon J, Lejeune A et al. Nucl. Phys., 1992, **A536**:349
- 6 Elgaroy O et al. Phys. Rev. Lett., 1996, **77**:1428
- 7 ZUO Wei et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2002, **26**:1134 (in Chinese)
(左维等. 高能物理与核物理, 2002, **26**:1134)
- 8 Migdal A B. Theory of Finite Fermi Systems and Applications to Atomic Nuclei, London: Interscience Publisher, 1967
- 9 Ring P, Schuck P. The Nuclear Many-body Problem, New York: Springer-Verlag, 1980
- 10 Baldo M, Cugnon J, Lejeune A et al. Nucl. Phys., 1990, **A515**:409
- 11 Lombardo U, Schulze H J. Lecture Notes in Physics, 2001, **578**:30
- 12 Clark J W, Kallman C G, Yang C H et al. Phys. Lett., 1976, **B61**:331
- 13 Ainsworth T L, Wambach J, Pines D. Phys. Lett., 1989, **B222**:173
- 14 Schulze H J, Cugnon J, Lejeune A et al. Phys. Lett., 1996, **B375**:1
- 15 Day B D. Rev. Mod. Phys., 1967, **39**:719; Jeukenne J P et al. Phys. Rep., 1976, **25**:83; ZUO Wei et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2002, **26**:703 (in Chinese)
(左维等. 高能物理与核物理, 2002, **26**:703)
- 16 Wiringa R B, Stoks V G J, Schiavilla R. Phys. Rev., 1995, **C51**:28
- 17 Grange P et al. Phys. Rev., 1989, **C40**:1040
- 18 SONG H Q et al. Phys. Rev. Lett., 1998, **81**:1584
- 19 Lattimer J M, Pethick C J, Prakash M et al. Phys. Rev. Lett., 1991, **66**:2701; Pethick C J. Rev. Mod. Phys., 1992, **64**:1133
- 20 ZUO Wei et al. HEP&NP, 2002, **26**:1238 (in Chinese)
(左维等. 高能物理与核物理, 2002, **26**:1238)
- 21 Machleidt R. Adv. Nucl. Phys., 1989, **16**:189
- 22 ZUO Wei et al. Phys. Rev., 2002, **C66**:037303
- 23 Bombaci I, Lombardo U. Phys. Rev., 1991, **C44**:1892

Properties of Isospin Asymmetric Nuclear Matter and Extended BHF Approach*

(VI) Proton and Neutron 1S_0 Superfluidity in Neutron Star Matter

LI Zeng-Hua LU Guang-Cheng ZUO Wei¹⁾

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

Abstract The proton and neutron 1S_0 pairing gaps in β -stable neutron star matter have been studied by using the isospin dependent Brueckner-Hartree-Fock approach and the BCS theory. We have concentrated on investigating and discussing the effect of three-body force. The calculated results indicate that the three-body force has only a small effect on the neutron 1S_0 superfluidity in β -stable neutron matter, i. e., it leads to a small reduction of the neutron 1S_0 pairing gap. However the three-body force not only suppresses strongly the strength of the proton 1S_0 superfluidity in β -stable neutron star matter but also reduces largely the density domain for the proton 1S_0 superfluidity phase from $\rho_B < 0.45\text{fm}^{-3}$ to $\rho_B < 0.3\text{fm}^{-3}$. It is also shown that the three-body force enhances largely the proton fraction in β -stable neutron star matter at high densities.

Key words β -stable neutron star matter, Bardeen-Cooper-Schrieffer theory, Brueckner-Hartree-Fock approach, three-body force, superfluidity

Received 26 February 2003

* Supported by One Hundred Person Project of Chinese Academy of Science, Chinese Academy of Science Knowledge Innovation Project (KJ951-A1-002), Major State Basic Research Development Program (G2000077400), the Important Pre-research Project of the Chinese Ministry of Science and Technology (2002CCB00200), and the National Natural Science Foundation of China (10235030)

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