

密度相关的相对论平均场理论对核物质 和中子星的描述*

李俊^{1,2} 班淑芳¹ 贾焕玉^{3,1} 桑建平² 孟杰^{1,4,5;1)}

1 (北京大学物理学院 北京 100871)

2 (武汉大学物理科学与技术学院 武汉 430072)

3 (西南交通大学现代物理研究所 成都 610031)

4 (中国科学院理论物理研究所 北京 100080)

5 (兰州重粒子加速器国家实验室原子核理论中心 兰州 730000)

摘要 基于密度相关有效相互作用的相对论平均场理论,研究了核物质和中子星的性质. 对核物质的饱和性质,密度相关的相互作用 DD-ME1 和 TW-99 给出了与 NL1, NL3, NLSH, TM1 基本一致的结果; NL2 和 TM2 主要用于计算轻核,与它们的结果差别较大. 对于中子星,在低密度区域,各种相互作用给出的介子势场差别不大;在高密度区域,相应的介子势场的差别随密度增加而增大. 密度相关的相互作用 DD-ME1 和 TW-99,与 NL1, NL3 和 NLSH 的结果相比,其物态方程明显偏软. 相应的中子星的最大质量也不同,不同有效相互作用给出的最大质量为 2.0—3.0 M_{\odot} ,从大到小的顺序依次是 NLSH, NL3, NL1, DD-ME1, TW-99, TM1 和 GL-97,对应的半径为 10—14km.

关键词 相对论平均场理论 密度相关的有效相互作用 核物质 中子星 物态方程

1 引言

有效相互作用的平均场理论被广泛应用于描述核物质和有限核系统的性质并且取得了很大的成功. 平均场理论包括 Skyrme 或者 Gogny 有效核子-核子相互作用的非相对论平均场理论和以有效重子介子耦合为出发点的更新甚至可能更基本的相对论平均场(RMF)理论^[1]. 它们不但可以成功地描述稳定谷附近核的性质^[2],而且也可以被用来预言丰中子或丰质子的奇特核的性质^[3,4]. 在平均场理论中,有效相互作用通过拟合核物质和有限核的各种性质进行参数化,而不考虑它们与 NN 散射之间的联系. 近年来,基于 RMF 理论发展了一系列的介子-核子耦合的有效相互作用,包括考虑了 σ (和 ω)非线性项的 NL1, NL2^[5], NL3^[6], NLSH^[7], TM1 和 TM2^[8]等. 但

是 σ (和 ω)介子场的非线性自相互作用近似,不仅存在高密度区的稳定性的问题,而且在物理上也无法给出合理可靠的解释. 为此,参照核物质的 Dirac-Brückner(DB)理论, Typel 和 Wolter 给出密度相关的相互作用 TM-99,并期望密度相关的有效相互作用可以可靠地外推到同位旋和密度的极端情况^[9]. 依据此思想, Nikšić 等人随后给出了另一组有效相互作用 DD-ME1^[10]. 为此,我们的目的就是用密度相关的 RMF 相互作用来描述对称核物质、纯中子物质和中子星的性质,并与采用其他相互作用(NL1, NL2, NL3, NLSH, TM1, TM2 和 GL-97^[11])的计算结果进行比较.

1932 年,中子被发现后, Landau 等人指出了存在完全由中子组成的星体的可能性. 1934 年, Baade 和 Zwicky 提出了中子星的概念,并指出中子星可以

2003-05-14 收稿

* 国家重点基础研究发展规划项目(G2000077407)和国家自然科学基金(10025522, 19935030, 10047001)资助

1) E-mail: mengj@pku.edu.cn

在超新星爆发中生成^[12]. 1967 年, Bell 和 Hewish 观测发现的脉冲星^[13] 被 Gold 证实是转动中子星^[14]. 对中子星结构的理论计算, 最早由 Oppenheimer, Volkoff 和 Tolman 完成^[15,16]. 他们在计算中忽略核子间的相互作用, 假设中子星物质是理想的相对论 Fermi 中子气体. 关于中子星, 一般认为其最外层是一个固体外壳, 密度约为 10^5 — 10^6 g/cm³, 厚度 1km, 主要由原子核和自由电子组成. 壳层内的大部分区域物质密度都大于核物质的饱和密度. 越靠近中心, 密度越高. 中子星是电中性的, 它几乎是纯中子物质, 根据反应 $n \leftrightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ 达到化学平衡. 随着中子密度的增加, 质子和电子的密度也在增加, 就会有 μ 子, π 和 K 介子以及其他重子(如超子等)出现. 基于这些特殊的结构和性质, 使得关于中子星的研究不仅在天体物理上相当重要, 而且对核物理和粒子物理理论的研究提供了一个天然的实验室, 使得中子星的研究正越来越成为核物理和天体物理中最活跃领域之一.

研究中子星的结构和性质时, 最关键的输入量就是高密度核物质的物态方程. 物态方程通常是把描述正常核物质性质的理论外推到高密度、高同位旋的极端情况而得到的, 这样的外推通常都是模型相关的. RMF 理论建立后, 在描述有限核和核物质性质方面取得了巨大成功^[2]. 被广泛应用于研究转动原子核、远离 β 稳定线的滴线核^[3] 和原子核的磁转动^[17] 等方面. 同时, 基于 RMF 理论, 利用考虑了 σ (和 ω) 非线性项的 NL1, NL2, NL3, NLSH, TM1 和 TM2 等有效相互作用, 对于中子星和奇异核物质的物态方程、中子星内部物质的组成和整体性质的描述, 也有一系列的工作^[11,18-29].

在本文中, 将利用密度相关的核子-介子有效相互作用研究核物质和中子星内部物质的性质以及中子星的最大质量和半径等, 同时与采用其他有效相互作用计算的结果进行比较. 关于 RMF 理论的详细阐述及其对核物质和中子星中的描述在很多文章中^[11,25-29] 都可以找到, 为此在第 2 节只是给出 RMF 理论对核物质和中子星描述的大体框架; 在第 3 节给出计算细节和结果讨论; 最后是结论.

2 相对论平均场模型

相对论平均场模型的出发点是包含重子 B, 介子 σ, ω 和 ρ 及其相互作用的有效拉氏量密度.

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & \sum_B \bar{\psi}_B [i\gamma^\mu \partial_\mu - m_B + g_\sigma \sigma - g_\omega \gamma^\mu \omega_\mu - \\ & \frac{1}{2} g_\rho \gamma^\mu \tau_B \cdot \rho_\mu - e \frac{1 - \tau_3}{2} \gamma^\mu A_\mu] \psi_B + \\ & \frac{1}{2} \partial^\mu \sigma \partial_\mu \sigma - \frac{1}{2} m_\sigma^2 \sigma^2 - U(\sigma) - \frac{1}{4} \omega^{\mu\nu} \omega_{\mu\nu} + \\ & \frac{1}{2} m_\omega^2 \omega^\mu \omega_\mu + U(\omega) - \frac{1}{4} \rho^{\mu\nu} \cdot \rho_{\mu\nu} + \\ & \frac{1}{2} m_\rho^2 \rho^\mu \cdot \rho_\mu - \frac{1}{4} A^{\mu\nu} A_{\mu\nu}. \end{aligned} \quad (1)$$

在我们所研究的核物质和中子星中重子 B 只包括中子 n 和质子 p. ψ_B 是重子的 Dirac 旋量, 对应的质量是 m_B , τ_B 表示重子的同位旋算符. σ 介子和 ω 介子分别提供重子间中程的吸引作用和短程的排斥作用, 同位旋矢量介子 ρ 描述中子与质子的区别. 它们的质量分别表示为 $m_\sigma, m_\omega, m_\rho$, 与重子 B 的耦合常数分别表示为 $g_\sigma, g_\omega, g_\rho$. $U(\sigma)$ 和 $U(\omega)$ 分别表示 σ 介子和 ω 介子的非线性自耦合势.

$$U(\sigma) = \frac{1}{3} g_2 \sigma^3 + \frac{1}{4} g_3 \sigma^4,$$

$$U(\omega) = \frac{1}{4} c_3 (\omega^\mu \omega_\mu)^2. \quad (2)$$

其中 g_2, g_3 和 c_3 为自耦合常数. $\omega_{\mu\nu}, \rho_{\mu\nu}$ 为矢量介子的场张量. $A_{\mu\nu}$ 描述原子核的电磁场. 由于非线性的自耦合势存在高密度区的稳定问题, Typel 和 Wolter 考虑 DB 理论对核物质的描述结果, 建议用密度相关的有效相互作用:

$$g_i(\rho) = g_i(\rho_0) a_i \frac{1 + b_i(x + d_i)^2}{1 + c_i(x + d_i)^2}, \quad i = \sigma, \omega$$

$$g_\rho(\rho) = g_\rho(\rho_0) \exp[-a_\rho(x - 1)], \quad (3)$$

来替代介子场的非线性自相互作用, 其中 $x = \rho/\rho_0$, ρ 和 ρ_0 分别表示系统的重子矢量密度和核物质的饱和密度; 参数 a_ρ, a_i, b_i, c_i 和 d_i 受条件 $f_i(1) = 1$, $f_i''(0) = 0$ 和 $f_i''(1) = f_i''(1)$ 限制, 只有 4 个是独立变量^[9].

核物质是一个静态且均匀的理想系统, 引入平均场近似和无海近似, 介子场可以用它们的期望值代替, 介子场的空间和时间微商以及矢量介子场 ω 的空间分量都为零. 忽略电磁场, 考虑有效相互作用的密度依赖性, 重子的 Dirac 方程和介子场运动方程可以简化为

$$\begin{aligned} & \left[\gamma^\mu \left(i \partial_\mu - g_\omega \omega_\mu - \frac{1}{2} g_\rho \tau_B \cdot \rho_\mu - \Sigma_\mu^R \right) - m^* \right] \cdot \\ & \psi_B(k) = 0, \end{aligned} \quad (4)$$

$$m_\sigma^2 \sigma = \sum_B g_\sigma \rho_{\sigma B}, \quad (5)$$

$$m_\omega^2 \omega_0 = \sum_B g_\omega \rho_B, \quad (6)$$

$$m_\rho^2 \rho_{0,3} = \sum_B g_\rho I_{3B} \rho_B, \quad (7)$$

其中有效质量 $m^* = m_B - g_\sigma \sigma$, I_{3B} 表示重子的同位旋第三分量, Σ_μ^R 为有效相互作用的密度依赖所引起的重排项:

$$\Sigma_\mu^R = \frac{j_\mu}{\rho} \left(\frac{\partial g_\omega}{\partial \rho} \bar{\psi}_B \gamma^\nu \psi_B \omega_\nu + \frac{\partial g_\rho}{\partial \rho} \bar{\psi}_B \gamma^\nu \frac{\tau}{2} \psi_B \rho_\nu - \frac{\partial g_\sigma}{\partial \rho} \bar{\psi}_B \psi_B \sigma \right). \quad (8)$$

对于非线性自耦合有效相互作用其值为零,但是方程(5)和(6)中应有相应的自耦合项的贡献 $-U'(\sigma)$ 和 $-U'(\omega)$. 下面方程按照密度依赖的相互作用给出,不再一一说明.

与文献[9]中类似,只考虑重排项时间分量的贡献,Dirac 方程的解为

$$\epsilon_B(k) = g_\omega \omega_0 + \frac{1}{2} g_\rho \tau_{3B} \cdot \rho_{0,3} + \sqrt{k^2 + m^{*2}} + \Sigma_0^R. \quad (9)$$

重子的矢量密度 ρ 和标量密度 ρ_s 为

$$\rho = \sum_B \rho_B = \sum_B \frac{k_B^3}{3\pi^2},$$

$$\rho_s = \sum_B \rho_{sB} = \langle \bar{\psi} \psi \rangle = \sum_B \frac{1}{\pi^2} \int_0^{k_B} k^2 dk \frac{m^*}{\sqrt{k^2 + m^{*2}}}, \quad (10)$$

其中 k_B 代表重子的费米动量, ρ_B 和 ρ_{sB} 分别表示重子 B 的矢量密度和标量密度.

能量和压强:

$$\epsilon = \frac{1}{2} m_\sigma^2 \sigma^2 + \frac{1}{2} m_\omega^2 \omega_0^2 + \frac{1}{2} m_\rho^2 \rho_{0,3}^2 + \frac{1}{\pi^2} \sum_B \int_0^{k_B} k^2 dk \sqrt{k^2 + m^{*2}}, \quad (11)$$

$$P = -\frac{1}{2} m_\sigma^2 \sigma^2 + \frac{1}{2} m_\omega^2 \omega_0^2 + \frac{1}{2} m_\rho^2 \rho_{0,3}^2 + \rho \cdot \Sigma_0^R + \frac{1}{3\pi^2} \sum_B \int_0^{k_B} \frac{k^4}{\sqrt{k^2 + m^{*2}}} dk. \quad (12)$$

根据中子星整体电中性的要求,中子星物质中除了含有中子和质子外,还应包含与质子等量的带负电荷的轻子物质(主要是电子 e 和少量的 μ 子). 同样对中子星引入平均场和无海近似,重子和介子场的运动方程可以进行与核物质类似的简化,从而得到相应的重子矢量密度,标量密度以及能量本征值的表达式. 在不考虑电磁相互作用的情况下,电子和 μ 子满足自由粒子的 Dirac 方程,轻子的费米动量和轻子密

度满足: $\rho_\lambda = k_\lambda^3/(3\pi^2)$. 重子和轻子的费米动量 k_B 和 k_λ ($\lambda = e, \mu$) 由其能量本征值和化学平衡条件决定:

$$\mu_B = \epsilon_B(k_B), \sqrt{k_\lambda^2 + m_\lambda^2} = \mu_\lambda, \mu_\mu = \mu_e, \quad (13)$$

其中 $\mu_B, \mu_\lambda, \mu_\mu$ 和 μ_e 分别为重子、轻子、 μ 子和电子的化学势. 对于零温中子星物质,重子 B 的化学势满足化学平衡条件:

$$\mu_B = b_B \mu_n - q_B \mu_e, \quad (14)$$

其中 b_B 为重子荷, q_B 为电荷(以质子电荷为单位), μ_n 为中子的化学势. 重子数守恒和整体电中性条件可以表示为

$$\rho = \sum_B \rho_B = \sum_B (2J_B + 1) \frac{b_B k_B^3}{6\pi^2}, \quad (15)$$

$$Q = \sum_B Q_B + \sum_\lambda Q_\lambda = \sum_B (2J_B + 1) \cdot$$

$$\frac{q_B k_B^3}{6\pi^2} - \sum_\lambda \frac{k_\lambda^3}{3\pi^2} = 0. \quad (16)$$

其中 J_B 表示粒子的自旋.

3 计算细节和结果讨论

具体计算中,本文中采用了密度相关的有效相互作用 DD-ME1 和 TW-99,和考虑 σ 介子(和 ω 介子)非线性自相互作用的 NL1, NL2, NL3, NLSH, TM1, TM2 和 GL-97 进行计算,并将它们的结果进行了比较. 具体的计算步骤为:对于给定总的费米动量 k_F 和非对称系数 $t = (\rho_n - \rho_p)/\rho$ (对于纯中子物质和对称核物质, t 的值分别为 1 和 0)的核物质系统,对 Dirac 方程和介子场方程组进行迭代求解,可以求出能量密度和压强,进而可以得到饱和和密度(费米动量),饱和点的压缩系数和对称能系数等. 对于中子星物质,给定重子数总密度 ρ ,联立重子和介子场的运动方程组,同时考虑化学平衡条件和整体的电中性条件迭代求解可以得到相应的解和物态方程.

3.1 核物质的性质

利用密度相关的有效相互作用 DD-ME1 和 TW-99,图 1 给出了纯中子物质(a)和对称核物质(b)的单核子能量随费米动量的变化. 为了比较,图中还包括了 NL1, NL2, NL3, NLSH, TM1, TM2 和 GL-97 的结果. 从图中可以看出,对于纯中子物质,单核子能量恒大于零(没有饱和点). 随着费米动量的增加,单核子能量也在增加. 不同有效相互作用所给出曲线分为五组,第一组为 NL2,给出最大的单核子能量;第二组为 NL1 和 TM2;第三组为 NL3, NLSH 和

TM1, 它们的结果非常接近; 第四组为 GL-97, 与前三组曲线几乎平行, 给出相对较小的单核子能量; 第五组为 DD-ME1 和 TW-99.

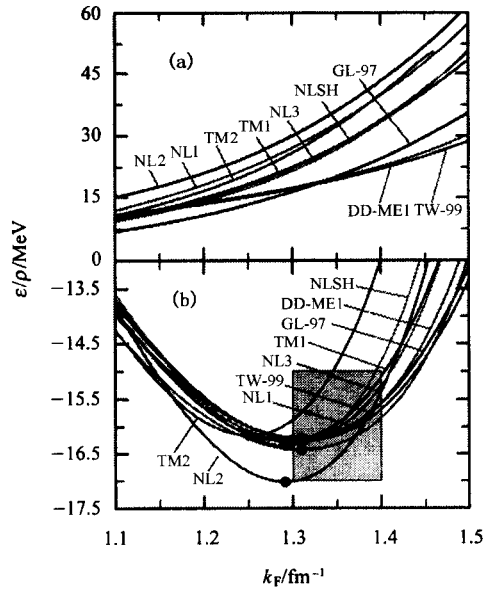


图 1 不同有效相互作用给出的纯中子物质(a)和对称核物质(b)的单核子能量随费米动量的变化 (b)中圆点对应有效相互作用所计算的对称核物质的饱和点; 阴影部分对应饱和点的经验值(费米动量 $k_F = 1.35 \pm 0.05 \text{fm}^{-1}$, 单核子能量 $\epsilon/\rho = -16.0 \pm 1.0 \text{MeV}$).

对称核物质中, TM2 和 NL2 给出的结果与经验值相差较大, 它们主要用于轻核的计算. 其他七组有效相互作用的结果比较接近, 所计算的饱和点 ($k_F = 1.302 \pm 0.012 \text{fm}^{-1}$, $\epsilon/\rho = -16.33 \pm 0.10 \text{MeV}$) 基本都在经验值的范围内. 随着费米动量的增加, 不同有效相互作用得到的单核子能量的差别也在增大, 在费米动量 $k_F = 1.45 \text{fm}^{-1}$ 时, 单核子能量的差别

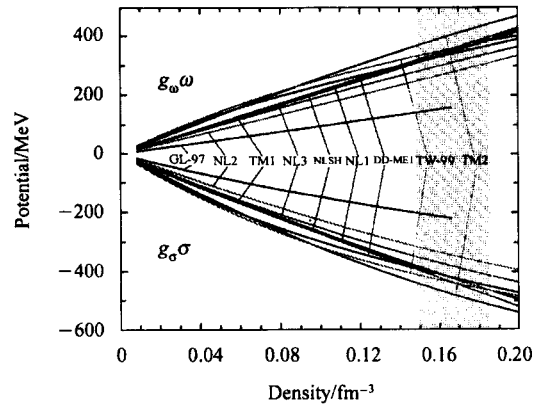


图 2 对称核物质中标量势 $g_\sigma \sigma$ 和矢量势 $g_\omega \omega$ 随密度的变化
不同曲线对应的有效相互作用已由内向外图中标出. 阴影部分对应饱和点的经验值(费米动量 $k_F = 1.35 \pm 0.05 \text{fm}^{-1}$ 或密度 $\rho = 0.166 \pm 0.018 \text{fm}^{-3}$).

表 1 相对论平均场理论中的不同有效相互作用给出的对称核物质饱和点的性质

相互作用	费米动量 k_F/fm^{-1}	密度 ρ_0/fm^{-3}	单核子能 $(\epsilon/\rho)/\text{MeV}$	有效质量 m^*/MeV	有效质量 (m^*/m)	压缩系数 K/MeV	对称能系数 $a_{\text{sym}}/\text{MeV}$
TW-99 ^[9]	1.313	0.153	-16.25	521.0724	0.555	240.00	32.77
DD-ME1 ^[10]	1.310	0.152	-16.23	542.7899	0.578	244.50	33.06
NL1 ^[5]	1.310	0.152	-16.42	537.2949	0.573	211.15	43.47
NL2 ^[5]	1.292	0.146	-17.02	628.3138	0.670	399.17	45.12
NL3 ^[6]	1.300	0.148	-16.25	558.6835	0.595	271.73	37.42
NLSH ^[7]	1.293	0.146	-16.35	560.7559	0.598	355.34	36.12
TM1 ^[8]	1.291	0.145	-16.265	595.0626	0.634	281.17	36.89
TM2 ^[8]	1.251	0.132	-16.16	535.9376	0.571	343.83	35.98
GL-97 ^[11]	1.313	0.153	-16.32	732.6145	0.780	240.00	32.50

达到 2MeV. 表 1 中列出了相对论平均场的不同有效相互作用所计算的核物质饱和点的费米动量, 密度, 单核子能量, 有效质量, 压缩系数和对称能系数的比较.

图 2 给出了对称核物质的标量势 $g_\sigma \sigma$ 和矢量势 $g_\omega \omega$ 随着密度的变化. 从图中可以看出, GL-97 给出最弱的势场 ($|g_\sigma \sigma|_{\rho=0.16} \approx 215 \text{MeV}$, $|g_\omega \omega|_{\rho=0.16} \approx 155 \text{MeV}$), 与其他有效相互作用的计算结果(以 NLSH 为例, $|g_\sigma \sigma|_{\rho=0.16} \approx 420 \text{MeV}$, 最大的矢量势

$|g_\omega \omega|_{\rho=0.16} \approx 350 \text{MeV}$) 差别较大. 除开 GL-97, 低密度时 ($\rho < 0.04 \text{fm}^{-3}$), 不同有效相互作用的标量矢势和矢量势差别为 50MeV; 随着密度的增加, 总体的差别在增加, 即使在饱和密度区域 ($0.148 < \rho < 0.185 \text{fm}^{-3}$), 标量势的差别 $\Delta g_\sigma \sigma$ 达 120MeV, 矢量势的差别 $\Delta g_\omega \omega$ 达 130MeV. 对于矢量势 $g_\omega \omega$, NL1, NL2, NL3 和 NLSH 等对密度的依赖是线性的, TM1, TM2, TW-99 和 DD-ME1 对密度的依赖是非线性的; 对于标量势 $g_\sigma \sigma$, 所有有效相互作用对密度的依赖都是

非线性的. TW-99 和 DD-ME1 计算结果的弯曲程度要大一些,也就是说随着密度的增大,势场增加的趋势变缓,这与核子-介子耦合常数的密度相关性有关.

3.2 中子星物质的性质

类比核物质的研究方法,下面将用密度相关的有效相互作用来研究中子星物质. 图 3 给出了中子星的标量势 $g_\sigma\sigma$ 、矢量势 $g_\omega\omega$ 以及两者之和 $g_\omega\omega + g_\sigma\sigma$ 随着密度的变化. 为了比较,还包括了 NL1, NL3, NLSH, TM1 和 GL-97 的计算结果. 考虑到 NL2 和 TM2 主要用于计算轻核,并且在核物质的饱和点附近,所计算的每核子结合能与经验值差别很大(见图 1),因此在中子星的相关计算中不予考虑.

图 3 中,矢量势 $g_\omega\omega$ 提供短程的排斥作用,它们随着密度的增加而增加(见图 3(a));标量势 $g_\sigma\sigma$ 提供中程的吸引作用,在密度 $\rho < 0.3\text{fm}^{-3}$ 时,增加的比较快;然后增加趋势变缓,在密度 $\rho > 0.4\text{fm}^{-3}$ 的时候,趋于饱和(见图 3(b)). 由于 ρ 介子的作用比较小, $g_\omega\omega + g_\sigma\sigma$ 近似为总的相互作用. 在低密度时,总的相互作用为微弱的吸引势;密度比较高时,总的相互作用为排斥势,中子星靠引力吸引结合在一起(见图 3(c)). 不同有效相互作用给出矢量势 $g_\omega\omega$ 、标量势 $g_\sigma\sigma$ 以及两者之和不同,它们的差别随着密度的增大而增加. 低密度区不同相互作用给出势场的变化规律与核物质的情况一致. 高密度区 GL-97 同样给出最弱的势场;NLSH, NL1 和 NL3 的结果比较接近,给出最大的势场;DD-ME1, TW-99 和 TM1 给出的结果,处于它们之间. 因为 TM1 考虑了标量场和矢量场的自相互作用,随着密度的增加,自

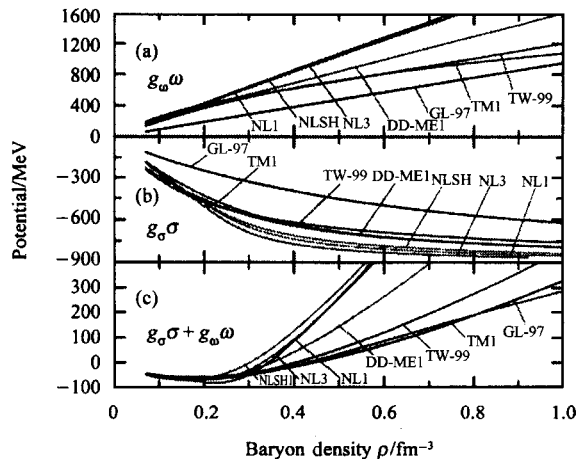


图 3 中子星中矢量势 $g_\omega\omega$ (a)、标量势 $g_\sigma\sigma$ (b)和这两者之和 $g_\omega\omega + g_\sigma\sigma$ (c)随密度的变化
不同曲线对应的有效相互作用已经在图中标出.

相互作用增强,就会使得矢量势和标量势的增加趋势变缓,从而使总的相互作用比 NL1 等的结果要小;DD-ME1 和 TW-99 的相互作用是密度相关的,随着密度的增加,核子-介子的耦合强度减小,从而使得矢量势和标量势的增加趋势变缓,总的相互作用也相应比较小. 虽然都是密度相关的相互作用,但是 DD-ME1 与 TW-99 在 $\rho \geq 0.3\text{fm}^{-3}$ 时,随密度的增加其势场的差别也变得极为显著.

图 4 给出了不同有效相互作用给出的重子密度为 $0.065\text{--}1.0\text{fm}^{-3}$ (即: $0.425 \leq \rho_B/\rho_0 \leq 6.58$, 其中饱和密度 $\rho_0 = 0.153\text{fm}^{-3}$) 时,中子星中的粒子密度随总重子密度的变化. 由于在低密度区域,不同相互作用的结果在普通坐标下不好区分,在左图中给出了相应的对数坐标图. 低密度时,中子星基本上是纯中子物质. 随着密度的增加,高能的中子发生 β 衰变($n \leftrightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$),生成质子和电子. 对于冷的中子星,费米子处于最低的能态,当上述反应达到平衡时,用化学势表示即为 $\mu_p = \mu_n - \mu_e$. 随着中子密度增加,电子密度也增加,当电子化学势大于 μ 子质量,则会有 μ 子出现: $e^- \leftrightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu + \nu_e$, 化学势的平衡关系为 $\mu_e = \mu_\mu$. 在上述两个反应中,重子数和电荷守恒. 采用不同有效相互作用, μ 子的阈值有所不同(见图 4(d)), NL1 所计算的 μ 子阈值最小, TM1, NL3, NLSH, DD-ME1 和 TW-99 次之, GL-97 的 μ 子阈值最大,但所有阈值在 $\rho = 0.11 \pm 0.01\text{fm}^{-3}$ 的范围内,比核物质的饱和密度稍低. 应该指出的是,虽然在图 3 中, DD-ME1 和 TW-99 的矢量势与标量势随密度变化有很大的差别,但在图 4 中两者几乎相

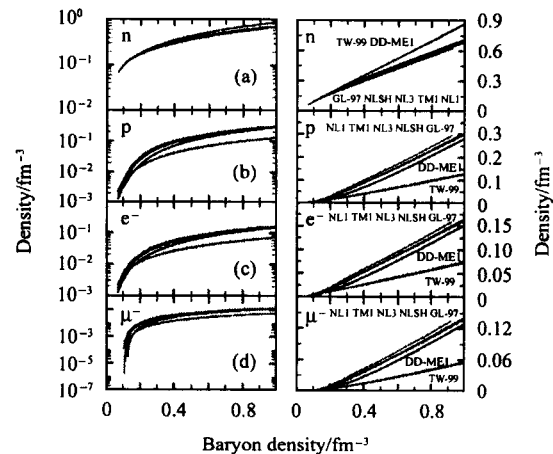


图 4 不同有效相互作用给出的中子星的粒子密度随总重子密度的变化
所有有效相互作用按照对应曲线从高到低的顺序在右图中从左到右标出.

同,这是由于他们的 ρ 介子几乎完全相同所决定的(见方程(7)式).

不同有效相互作用得到的中子密度不同(见图 4(a)). 低密度时,计算结果差别很小,当重子密度 $\rho_B = 0.1 \text{ fm}^{-3}$ 时,中子比例约为 99%. 随着重子密度增加,中子密度也增加,不同有效相互作用的计算结果的差别也增加,但是中子比例在下降. DD-ME1 和 TW-99 给出最大的中子密度比例,且结果比较接近. 当在 $\rho_B = 0.9 \text{ fm}^{-3}$ 时,中子比例为 93%. 比它们略低的曲线由 GL-97 给出,当 $\rho_B = 0.9 \text{ fm}^{-3}$ 时,中子比例为 72%. TM1, NL3, NLSH 和 NL1 的结果较为接近, NL1 给出最低中子比例,当 $\rho_B = 0.9 \text{ fm}^{-3}$ 时,中子比例约为 68.5%. 由重子数守恒,如果中子密度比较大,质子密度就比较小(见图 4(b)). 根据电中性条件,电子 e 和 μ 子的密度之和等于质子的密度,不同有效相互作用所得结果的变化规律与所求得的质子的变化规律相同(见图 4(c), (d)). 当重子密度小于 μ^- 的阈值时,电子密度和质子密度相等;当重子密度大于 μ^- 的阈值时,随着重子密度的增加, μ^- 子密度渐渐接近电子密度.

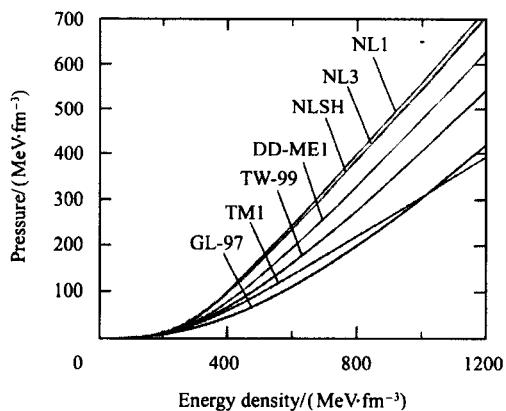


图 5 不同有效相互作用给出的中子星的物态方程
不同曲线对应的有效相互作用已经在图中按照从高到低的顺序标出.

为了描述中子星的结构,必须知道中子星的物态方程. 它应当限制在两个极端情况之间,一是自由气体,其中粒子不受相互作用;另一个极端是物质具有最大刚性的状态,其中声速等于光速. 所有允许的物质状态方程都处在这两个极端状况之间. 在这里,我们用有效相互作用 DD-ME1 和 TW-99 计算了中子星的物态方程(见图 5),研究密度相关的核子-介子相互作用对中子星物态方程的影响. 从图中可以看出,最硬的物态方程是由 NL1 给出,并且它与 NL3, NLSH 的结果比较接近. 再下面是 DD-

ME1 和 TW-99 所给出的两条曲线,可见考虑了密度相关的核子-介子相互作用以后,相对于只考虑标量场的自相互作用,物态方程明显地变软. TM1 的结果与 GL-97 给出的曲线最接近,并在能量密度 $\epsilon \approx 1020 \text{ MeV fm}^{-3}$ 时有交叉.

3.3 中子星的质量和半径

描述相对论球形静态星的 Oppenheimer-Volkoff (OV) 方程为^[15,16]

$$\frac{dp}{dr} = - \frac{[p(r) + \epsilon(r)][M(r) + 4\pi r^3 p(r)]}{r(r - 2M(r))}, \quad (17)$$

$$M(r) = 4\pi \int_0^r \epsilon(r) r^2 dr. \quad (18)$$

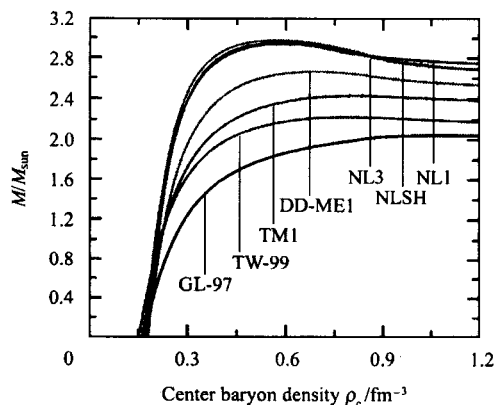


图 6 不同有效相互作用给出的中子星的质量(以太阳质量为单位)随中心密度的变化
各曲线对应的有效相互作用已在图中标出.

由前面得到的物态方程的结果,可以定义中子星的边界:在边界处压强为零,即 $p(R) = 0$. 此时,依赖于单一的参数——中子星物质的中心密度,OV

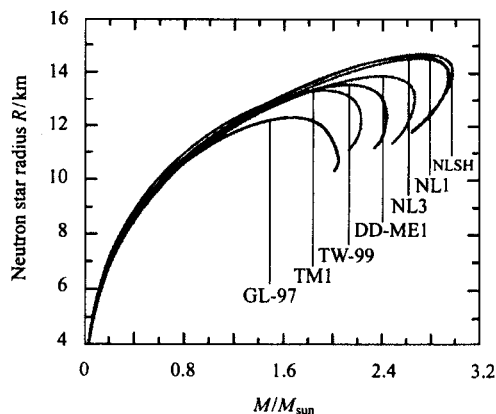


图 7 不同有效相互作用给出的中子星半径(以太阳质量为单位)随质量的变化
各曲线对应的有效相互作用已在图中标出.

方程有惟一的解. 中心密度选为重子数密度或能量密度, 我们可以得到中子星的质量和所对应的半径. 图 6 给出了中子星的质量随星的中心密度的变化.

表 2 相对论平均场理论中不同有效相互作用给出的中子星最大质量和相应的半径

相互作用	中心密度/ fm^{-3}	中心能量 密度/ $(\times 10^{15} \text{ g}/\text{cm}^3)$	中心压 强/ $(\times 10^{35} \text{ dyne}/\text{cm}^2)$	最大质量/ $(\times M_{\odot})$	半径/ km
TW-99 ^[9]	0.9573	2.117	8.0569	2.2325	11.24
DD-ME1 ^[10]	0.7409	1.577	5.774	2.563	12.552
NL1 ^[5]	0.589	1.2633	5.0024	2.9406	13.88
NL3 ^[6]	0.5882	1.264	4.9329	2.9497	13.864
NLSH ^[7]	0.5713	1.2283	4.7115	2.975	14.039
TM1 ^[8]	0.7912	1.7086	4.623	2.2259	12.227
GL-97 ^[11]	1.0752	2.4042	7.9874	2.0425	10.732

利用各种有效相互作用计算的曲线的共同特征是:(a)在低密度区域($0.15-0.3 \text{ fm}^{-3}$)中子星的质量都随着中心密度的增大而迅速增加;(b)在高密度区域($0.9-1.2 \text{ fm}^{-3}$)中子星的质量都几乎不再随中心密度而变化;(c)随着中心密度的增加,质量增加一直到达一个最大值,就是 OV 质量极限,超过这个极限质量由于引力塌缩使星不稳定. 利用密度相关的有效相互作用 DD-ME1 和 TW-99 计算的中子星质量极限分别为 $2.563M_{\odot}$ 和 $2.2325M_{\odot}$. 相对于 NL1, NL3, NLSH 给出的质量极限 $2.9406M_{\odot}$, $2.9497M_{\odot}$ 和 $2.975M_{\odot}$, 密度相关的有效相互作用给出的结果有明显的压低. GL-97 给出最小的质量极限, $2.0425M_{\odot}$.

图 7 给出了随着中心密度的增加,中子星的质量和半径之间的变化. 从图中可以看出,中子星的半径也存在一个最大值,随后由于引力的作用随着中子星质量的增加而减小,直到中子星的最大质量,即 OV 质量极限. 对于不同有效相互作用给出的物态方程,计算得到的中子星的最大质量和对应的半径也不同. 表 2 给出了各种有效相互作用下中子星的最大质量,所对应的中心密度和半径等.

4 总结

本文在相对论平均场理论框架下,利用密度相关的有效相互作用 DD-ME1 和 TW-99,研究了核物质和中子星物质的性质以及中子星的质量和半径,并与 NL1, NL3, NLSH, TM1 和用于研究中子星的 GL-97 的结果进行比较,我们发现 DD-ME1, TW-99 与 NL1, NL3, NLSH, TM1, 以及 GL-97 在描述核物质饱和性质时结果非常接近, NL2 和 TM2 主要用于计算轻核,与他们的结果差别较大. DD-ME1, TW-99 和 TM1 给出的中子星的势场介于最弱的 GL-97 与 NL1, NL3 和 NLSH 之间. 密度相关的相互作用给出最大的中子比例,其次是 GL-97, NLSH, NL3, TM1 和 NL1; μ 子的阈值,从大到小依次为: GL-97, TW-99, DD-ME1, NLSH, NL3, TM1 和 NL1, 差别不大,都在 $\rho = 0.11 \pm 0.01 \text{ fm}^{-3}$ 的范围内. DD-ME1 和 TW-99 给出了比 NL1, NL3 和 NLSH 明显偏软的物态方程,从而由 OV 方程计算出的最大质量的半径从大到小的顺序为 NLSH, NL3, NL1, DD-ME1, TW-99, TM1 和 GL-97.

参考文献 (References)

- Walecka J D. Ann. Phys., 1974, **83**:491
- Ring P. Prog. Part. Nucl. Phys., 1996, **37**:193
- MENG J. Nucl. Phys., 1998, **A635**:3; MENG J, Ring P. Phys. Rev. Lett., 1996, **77**:3963
- MENG J, Ring P. Phys. Rev. Lett., 1998, **80**:460; MENG J, Tanihata I, Yamaji S. Phys. Lett., 1998, **B419**:1; MENG J et al. Phys. Rev., 2002, **C65**:041302
- Lee Suk-Joon et al. Phys. Rev. Lett., 1986, **57**:2916
- Lalazissis G A, Konig J, Ring P. Phys. Rev., 1997, **C55**:540
- Sharma M M, Nagarajan M A, Ring P. Phys. Lett., 1993, **B312**:377
- Sugahara Y, Toki H, Ring P. Theor. Phys., 1994, **92**:803
- Typel S, Wolter H H. Nucl. Phys., 1999, **A656**:331
- Nikšić T et al. Phys. Rev., 2002, **C66**:024306
- Glendenning N K. COMPACT STARS. New York: Springer-Verlag, 1997. 232
- Baade W, Zwicky F. Proc. Nat. Acad. Sci., 1934, **20**:255
- Bell J et al. Nature, 1968, **217**:709
- Gold T. Nature, 1969, **221**:25
- Oppenheimer J R, Volkoff G M. Phys. Rev., 1939, **55**:374
- Tolman R C. Phys. Rev., 1939, **55**:364
- Madokoro H, MENG J et al. Phys. Rev., 2000, **C62**:061301
- Kaplan D B, Nelson A E. Phys. Letts., 1986, **B175**:57
- Fujii H et al. Nucl Phys., 1996, **A597**:645
- Glendenning N K, Schaffner-Bielich J. Phys. Rev. Letts., 1998, **81**:4564
- Glendenning N K, Schaffner-Bielich J. Phys. Rev., 1999, **C60**:025803
- Pons J A et al. Phys. Rev., 2000, **C62**:035803
- Norsen T, Reddy S. Phys. Rev., 2001, **C63**:065804
- Norsen T. Phys. Rev., 2002, **C65**:045805

- 25 JIA H Y et al. Chin. Phys. Lett., 2001, **18**:1517
- 26 JIA H Y et al. Acta Astronomica Sinica, 2002, **43**:160(in Chinese)
(贾焕玉等. 天文学报, 2002, **43**:160)
- 27 JIA H Y, LÜ H F, MENG J. HEP & NP, 2002, **26**:1050(in Chinese)
(贾焕玉, 吕洪凤, 孟杰. 高能物理与核物理, 2002, **26**:1050)
- 28 SUN B X et al. Commun. Theor. Phys., 2001, **36**:446
- 29 JIA H Y, MENG J, ZHAO E G et al. HEP & NP, 2003, **27**:200(in Chinese)
(贾焕玉, 孟杰, 赵恩广等. 高能物理与核物理, 2003, **27**:200)

Description of the Nuclear Matter and Neutron Star in Relativistic Mean Field Theory with Density-Dependent Interactions*

LI Jun^{1,2} BAN Shu-Fang¹ JIA Huan-Yu^{3,1} SANG Jian-Ping² MENG Jie^{1,4,5;1)}

1 (School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

2 (College of Physics and Technology, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

3 (College of Science, Southwest Jiaotong University, Chengdou 610031, China)

4 (Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China)

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

Abstract Properties of nuclear matter and neutron star are described in relativistic mean field theory with density-dependent effective interactions. The difference of saturated properties for nuclear matter between different effective interactions is subtle except for NL2 and TM2 which are mainly used for light nucleus. For neutron star matter, the meson field potentials calculated from different effective interactions have short odds at low-density, while the difference becomes large at high-density and increases with density. The equations of state (EOS) of neutron star given by density-dependent effective interactions DD-ME1 and TW-99 are softer than those of the other effective interactions such as NL1, NL3 and NLSH. The maximum masses calculated from different EOS are $2.0\text{--}3.0M_{\odot}$, and the corresponding radius are 10—14km.

Key words relativistic mean field, density-dependent effective interaction, nuclear matter, neutron star, equation of state

Received 14 May 2003

* Supported by Major State Basic Research Development Program (G2000077407) and National Natural Science Foundation of China (10025522, 19935030, 10047001)

1) E-mail: mengj@pku.edu.cn