

$f_0(975)$ 和 $\phi(1020)$ 介子对 neutron 星物质的影响*

赵先锋^{1,2;1)} 王顺金¹ 张华¹ 贾焕玉³

1 (四川大学物理科学与技术学院 成都 610065)

2 (西南交通大学峨眉校区基础课部 峨眉山 614202)

3 (西南交通大学现代物理研究所 成都 610031)

摘要 利用相对论平均场理论, 考虑了 σ^* , ϕ 介子及重子八重态 $\{N, P, \Lambda, \Sigma^-, \Sigma^0, \Sigma^+, \Xi^-, \Xi^0\}$, 研究了中子星的性质. 发现当考虑了 σ^* , ϕ 介子的贡献时, 超子出现的临界重子数密度降低了, 超子数目增加了, 超子星的转变密度 ρ_{0H} 降低了, 物态方程变软, 最大质量变小而相应的中子星半径增大, 中子星的中心重子数密度、中心能量密度和中心压强均降低.

关键词 超子 中子星 物态方程

1 引言

众所周知, 中子星内含有中子和超子并且它们通过交换 σ , ω , ρ 介子而相互作用^[1, 2]. 多年来, $\sigma + \omega$ 模型被广泛应用于中子星研究的诸多领域^[3]. 然而, 这个中子星模型仍有其不尽人意之处. Schaffner 改进了这个模型, 他认为在超子之间还应该有利标量介子 $f_0(975)$ (记为 σ^*) 和矢量介子 $\phi(1020)$ 参与作用, 而且这两种介子仅在超子之间才有耦合作用^[4, 5].

迄今为止, 采用平均场近似方法并考虑了 σ^* , ϕ 介子的作用之后, 人们在对中子星性质的研究方面做了大量工作. 结果显示, σ^* , ϕ 介子对中子星物质的性质确有影响. 同样地, 这些工作也存在一些问题, 应该包括尽可能多的重子并研究它们对中子星的性质的影响, 虽然目前缺乏 Σ 超子的实验数据, 但是我们可以根据它的一些已知性质来推测它的一些未知性质, 从而选择一些较为合理的参数来进行研究. 因此, 我们选择了重子八重态 $\{N, P, \Lambda, \Sigma^-, \Sigma^0, \Sigma^+, \Xi^-, \Xi^0\}$ 来研究中子星的性质. 在考虑了 σ^* , ϕ 的贡献之后, 在已有的关于中子星的研究中计算所得的中子星的重子数密度太低, 一般在 $0-0.8\text{fm}^{-3}$. 但是, 在中子星的中心区域重子数密度是有可能高于这个数值范围的, 有

必要把中子星的有关计算扩展到较高重子数密度. 因此, 我们计算到 1.5fm^{-3} . 最后, 计算超子星的转变密度 ρ_{0H} 也是有意义的. 本文在考虑了新的介子之后对此也做了计算.

2 RMF 理论和 O-V 方程

从相对论平均场(RMF)模型出发. 对中子星物质, 拉氏量密度可写作

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & \sum_B \bar{\Psi}_B (i\gamma_\mu \partial^\mu \cdot m_B + g_{\sigma B} \sigma - g_{\omega B} \gamma_\mu \omega^\mu - \\ & g_{\rho B} \gamma_\mu \tau \cdot \rho^\mu) \psi_B + \frac{1}{2} (\partial_\mu \sigma \partial^\mu \sigma - m_\sigma^2 \sigma^2) - \\ & \frac{1}{4} \omega_{\mu\nu} \omega^{\mu\nu} + \frac{1}{2} m_\omega^2 \omega_\mu \omega^\mu - \frac{1}{4} \rho_{\mu\nu} \cdot \rho^{\mu\nu} + \\ & \frac{1}{2} m_\rho^2 \rho_\mu \cdot \rho^\mu - \frac{1}{3} g_2 \sigma^3 - \frac{1}{4} g_3 \sigma^4 + \\ & \sum_{\lambda=e, \mu} \bar{\Psi}_\lambda (i\gamma_\mu \partial^\mu - m_\lambda) \Psi_\lambda + \mathcal{L}^{YY[5]}, \end{aligned} \quad (1)$$

这里 $\bar{\Psi}_B$ 代表重子 B 的 Dirac 旋量. 重子的种类包括重子八重态 $\{N, P, \Lambda, \Sigma^-, \Sigma^0, \Sigma^+, \Xi^-, \Xi^0\}$, 其相应的质量为 m_B . 最后一项代表标量介子 $f_0(975)$ 和矢量介子 $\phi(1020)$ 的作用. 这些新介子仅与超子耦合, 其形式为

2006-05-19 收稿, 2006-11-20 收修改稿

* 国家自然科学基金(10375039, 90503008), 教育部博士点基金和兰州重离子加速器国家实验室核理论中心基金资助

1) E-mail: zhaopioneer.student@sina.com

$$\begin{aligned} \mathcal{L}^{YY} = & \sum_B g_{\sigma^*B} \bar{\Psi}_B \Psi_B \sigma^* - \sum_B g_{\phi B} \bar{\Psi}_B \gamma_\mu \Psi_B \phi^\mu + \\ & \frac{1}{2} (\partial_\mu \sigma^* \partial^\mu \sigma^* - m_{\sigma^*}^2 \cdot \sigma^{*2}) - \\ & \frac{1}{4} S_{\mu\nu} S^{\mu\nu} + \frac{1}{2} m_\phi^2 \phi_\mu \phi^\mu. \end{aligned} \quad (2)$$

此处 $S_{\mu\nu} = \partial_\mu \phi_\nu - \partial_\nu \phi_\mu$.

采用相对论平均场近似下的场方程, 重子的 Dirac 方程为

$$\begin{aligned} (\gamma_\mu k^\mu - m_B + g_{\sigma B} \sigma + g_{\sigma^* B} \sigma^* - g_{\omega B} \gamma_0 \omega_0 - \\ g_{\phi B} \gamma_0 \phi_0 - g_{\rho B} \gamma_0 \tau_3 \rho_{03}) \psi_B(k, \lambda) = 0, \end{aligned} \quad (3)$$

这里 $\sigma, \sigma^*, \omega_0, \phi_0$ 和 ρ_{03} 代表静态期望值. 得到其能量本征值为

$$e_B(k) = g_{\omega B} \omega_0 + g_{\phi B} \phi_0 + g_{\rho B} \rho_{03} I_{3B} + \sqrt{k^2 + m_B^{*2}}, \quad (4)$$

其中 m_B^* 为重子 B 的有效质量

$$m_B^* = m_B - g_{\sigma B} \sigma - g_{\sigma^* B} \sigma^*. \quad (5)$$

相应的介子场方程为,

$$m_\sigma^2 \sigma = -g_2 \sigma^2 - g_3 \sigma^3 + \sum_B g_{\sigma B} \rho_{\phi B}, \quad (6)$$

$$m_{\sigma^*}^2 \cdot \sigma^* = \sum_B g_{\sigma^* B} \rho_{\phi B}, \quad (7)$$

$$\omega_0 = \sum_B \frac{g_{\omega B}}{m_\omega^2} \rho_B, \quad (8)$$

$$m_\phi^2 \phi_0 = 2 \sum_B g_{\phi B} \rho_B, \quad (9)$$

$$m_\rho^2 \rho_{03} = \sum_B g_{\rho B} I_{3B} \rho_B. \quad (10)$$

中子星的能量密度和压强分别为

$$\begin{aligned} \varepsilon = & \frac{1}{2} m_\sigma^2 \sigma^2 + \frac{1}{3} g_2 \sigma^3 + \frac{1}{4} g_3 \sigma^4 + \frac{1}{2} m_{\sigma^*}^2 \sigma^{*2} + \\ & \frac{1}{2} m_\omega^2 \omega_0^2 + \frac{1}{2} m_\phi^2 \phi_0^2 + \frac{1}{2} m_\rho^2 \rho_{03}^2 + \sum_B \frac{2J_B + 1}{2\pi^2} \times \\ & \int_0^{k_B} k^2 dk \sqrt{k^2 + m^{*2}} + \frac{1}{3} \sum_{\lambda=e,\mu} \frac{1}{\pi^2} \int_0^{k_\lambda} \sqrt{k^2 + m_\lambda^2} k^2 dk, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} p = & -\frac{1}{2} m_\sigma^2 \sigma^2 - \frac{1}{3} g_2 \sigma^3 - \frac{1}{4} g_3 \sigma^4 - \frac{1}{2} m_{\sigma^*}^2 \sigma^{*2} + \\ & \frac{1}{2} m_\omega^2 \omega_0^2 + \frac{1}{2} m_\phi^2 \phi_0^2 + \frac{1}{2} m_\rho^2 \rho_{03}^2 + \frac{1}{3} \sum_B \frac{2J_B + 1}{2\pi^2} \times \\ & \int_0^{k_B} \frac{k^4}{\sqrt{k^2 + m^{*2}}} dk + \frac{1}{3} \sum_{\lambda=e,\mu} \frac{1}{\pi^2} \int_0^{k_\lambda} \frac{k^4}{\sqrt{k^2 + m_\lambda^2}} dk, \end{aligned} \quad (12)$$

其中费米动量 k_B 和 k_λ 由以下方程决定

$$\mu_B = e_B(k), \quad \mu_e = \sqrt{k_e^2 + m_e^2}, \quad \mu_\mu = \mu_e = \sqrt{k_\mu^2 + m_\mu^2}. \quad (13)$$

由于中子星处于 β 衰变平衡, 得化学势的关系

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

另外, 中子星物质还应该满足重子数守恒和整体电中性条件:

$$\rho = \sum_B \rho_B = \sum_B (2J_B + 1) b_B k_B^3 / (6\pi^2) = \text{const.} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} Q = & \sum_B Q_B + \sum_\lambda Q_\lambda = \sum_B (2J_B + 1) q_B k_B^3 / (6\pi^2) + \\ & \sum_\lambda 2q_\lambda k_\lambda^3 / (6\pi^2) = 0. \end{aligned} \quad (16)$$

描述相对论性的球形静态星的方程是 Oppenheimer-Volkoff 方程 (O-V 方程),

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

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

通过 O-V 方程可以计算中子星的质量和半径.

在计算中, 核子的耦合参数 $g_\sigma, g_\omega, g_\rho, g_2, g_3$ 取自文献 [8]. 这些参数由饱和核物质的性质决定: 饱和核物质的密度 $\rho_0 = 0.153 \text{fm}^{-3}$, 束缚能 $B/A = -16.3 \text{MeV}$, 压缩模量 $M = 300 \text{MeV}$, 对称能 $a_{\text{sym}} = 32.5 \text{MeV}$, 以及有效质量 $m^* = 0.78 m_n$. 相应的超子矢量耦合参数由 $SU(6)$ 对称性决定,

$$\frac{1}{3} g_{\omega N} = \frac{1}{2} g_{\omega \Sigma} = \frac{1}{2} g_{\omega \Lambda} = g_{\omega \Xi}, \quad (19)$$

$$2g_{\rho N} = g_{\rho \Sigma}, \quad g_{\rho N} = g_{\rho \Xi}, \quad g_{\rho \Lambda} = 0.$$

超子的标量耦合参数由相应的超子在核物质中的势阱深度决定. 对 Λ 超子, 势阱深度为 $U_\Lambda^{(N)} = -30 \text{MeV}$, 两个耦合参数的取值满足^[9]

$$U_\Lambda^{(N)} = m_B \left(\frac{m_n^*}{m_n} - 1 \right) \left(\frac{g_{\sigma \Lambda}}{g_{\sigma n}} \right) + \frac{g_\omega^2}{m_\omega^2} \rho_0 \left(\frac{g_{\omega \Lambda}}{g_{\omega n}} \right). \quad (20)$$

对 Σ 超子和 Ξ 超子, 分别选择 $U_\Sigma^{(N)} = -30 \text{MeV}$ 和 $U_\Xi^{(N)} = -10 \text{MeV}$ ^[10-13].

超子与 ϕ 介子的耦合参数也由 $SU(6)$ 对称性得出,

$$2g_{\phi \Lambda} = 2g_{\phi \Sigma} = g_{\phi \Xi} = -\frac{2\sqrt{2}}{3} g_{\omega N}, \quad g_{\phi N} = 0, \quad (21)$$

而超子与标量介子 σ^* 的耦合参数由如下势阱深度决定^[5]

$$U_\Xi^{(\Xi)} \approx U_\Lambda^{(\Xi)} \approx -40 \text{MeV}, \quad (22)$$

这里 $\rho_{\Xi} \approx \rho_0$, $\rho_{\Lambda} \approx \rho_0/2$. 由于没有 $U_{\Sigma}^{(\Xi)}$ 的实验数据, 考虑到 Σ 超子和 Λ 超子的一些性质, 选择 $U_{\Sigma}^{(\Xi)} = -40\text{MeV}$ ^[7, 14-18].

3 计算结果

首先, 考虑 σ^* , ϕ 的贡献并取重子八重态 $\{N, P, \Lambda, \Sigma^-, \Sigma^0, \Sigma^+, \Xi^-, \Xi^0\}$, 计算了 σ_0 , ω_0 , ρ_{03} , σ^* , ϕ 介子的场强(图 1) 和重子的相对粒子数密度(图 2). 实曲线没考虑 σ^* , ϕ 的贡献, 虚曲线则考虑了其贡献.

由图 1 可以看到, 当重子数密度大约为 0.40fm^{-3} 时, 出现了 σ^* , ϕ 介子. 与不考虑 σ^* , ϕ 介子时的结果相比较, 可以看出 σ , ω_0 , ρ_{03} 介子场的场强降低了.

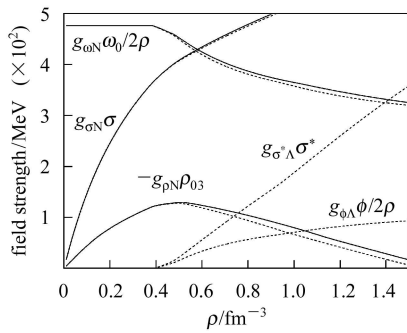


图 1 以重子数密度为自变量的 σ , ω_0 , ρ_{03} , σ^* , ϕ 的场的强度
实曲线不考虑 σ^* , ϕ 介子的贡献, 虚曲线考虑了新介子的贡献.

图 2 绘出了中子星的相对粒子数密度. 重子数密度较低时, 中子星几乎仅由中子、质子和电子构成. 随着重子数密度的升高, 当电子的费米能超过 μ^- 子的质量时, μ^- 子就出现了. 同时, 由于电中性的要求, 质子数增加了. 当达到 Λ 超子的阈值时, Λ 超子出现了. 此后, 当达到各自的阈值时, 一系列超子相继出现. 由图 2 可见, 考虑或不考虑 σ^* , ϕ 的贡献, 各种超子的阈

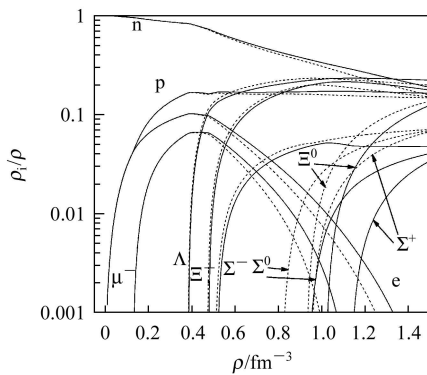


图 2 中子星物质中的各种粒子的相对数密度
实曲线为没有考虑 σ^* , ϕ 的作用的结果, 虚线曲线包括了其贡献.

值是不同的. 当不考虑 σ^* , ϕ 的贡献时, 超子出现时的重子数密度大约如下: $\Lambda \sim 0.38\text{fm}^{-3}$, $\Xi^- \sim 0.48\text{fm}^{-3}$, $\Sigma^- \sim 0.52\text{fm}^{-3}$, $\Sigma^0 \sim 0.96\text{fm}^{-3}$, $\Xi^0 \sim 1.04\text{fm}^{-3}$, $\Sigma^+ \sim 1.15\text{fm}^{-3}$. 当考虑 σ^* , ϕ 的贡献时相应的重子数密度变为: $\Lambda \sim 0.38\text{fm}^{-3}$, $\Xi^- \sim 0.479\text{fm}^{-3}$, $\Sigma^- \sim 0.518\text{fm}^{-3}$, $\Sigma^0 \sim 0.82\text{fm}^{-3}$, $\Xi^0 \sim 0.93\text{fm}^{-3}$, $\Sigma^+ \sim 0.96\text{fm}^{-3}$. 对 Σ^0 , Ξ^0 , Σ^+ 这些超子来说, σ^* , ϕ 的作用使得超子出现时的重子数密度降低了很多. 另外, 随着重子数密度的增加, Λ , Ξ^- , Σ^- , Σ^0 , Ξ^0 , Σ^+ 等超子的相对数密度也增加了, 而 e , μ^- , p 的相对数密度则降低. 同时也发现, 随着超子的出现, 中子数密度也降低了, 这是因为 σ^* , ϕ 使得更多的中子蜕变为超子.

当重子中各种超子的密度之和超过中子的密度时(即 $\sum \rho_H > \rho_n$), 这时最低的重子数密度 $\rho = \sum_B \rho_B$ 定义为超子星的转变密度 ρ_{0H} ^[19]. 其中, ρ_H 为各种超子数密度, ρ_n 为中子数密度. 在图 3 中, 对考虑或不考虑 σ^* , ϕ 的作用这两种情况, 我们分别计算了超子星的转变密度 ρ_{0H} . 由图 3 可见, 不考虑 σ^* , ϕ 时 ρ_{0H} 大约为 0.696fm^{-3} , 当考虑 σ^* , ϕ 时 ρ_{0H} 大约降为 0.668fm^{-3} . σ^* , ϕ 介子的参与使得更多的核子衰变为超子, 从而使中子星较早地转变为超子星.

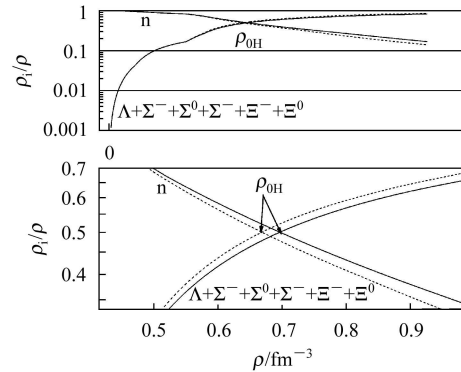


图 3 超子星的转变密度
两条实线交点为不考虑 σ^* , ϕ 介子时的 ρ_{0H} , 两条虚线曲线的交点为考虑了 σ^* , ϕ 的作用时的 ρ_{0H} .

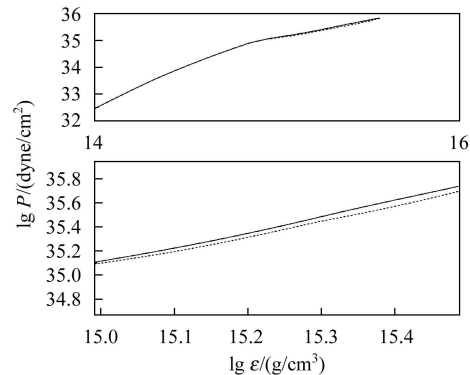


图 4 中子星的 $\lg P$ 与 $\lg \epsilon$ 的关系
虚线曲线包括了 σ^* , ϕ 的贡献.

我们还计算了中子星的物态方程. 图4绘出了压强与能量的关系曲线. 图4表明, 考虑 σ^* , ϕ 的贡献(虚线)时, 压强随能量的升高而降低, 也就是说, 物态方程变软了. 原因是在费米海的极大值附近的质子和中子的费米压强释放给了超子.

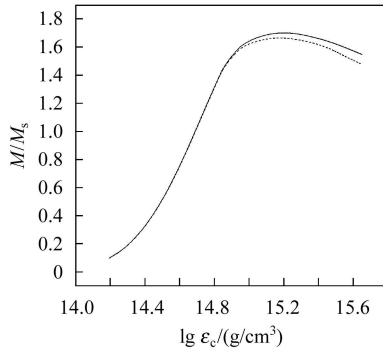


图5 中子星的质量随中心能量密度的变化
实线曲线为没有考虑 σ^* , ϕ 的作用的结果, 虚线曲线包括了 σ^* , ϕ 的贡献.

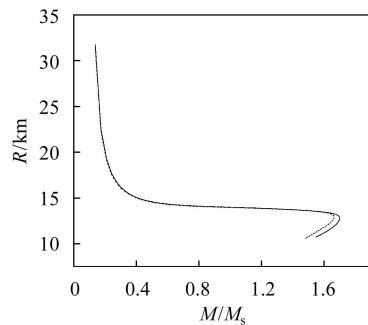


图6 中子星半径和质量的关系
实线曲线为没有考虑 σ^* , ϕ 介子的作用的结果, 虚线曲线包括了 σ^* , ϕ 介子的贡献.

最后, 计算了中子星的质量和半径(图5, 图6). 由

图5和图6可见, 考虑到 σ^* , ϕ 的贡献, 由于物态方程变软, 中子星的质量也降低了.

中子星各种性质的计算结果示于表1. 这里 ρ_c , ε_c , p_c , M_{\max} , R 分别为中子星的中心重子数密度、中心能量密度、中心压强、最大质量和半径. 考虑到介子 σ^* , ϕ 的贡献, 中子星的最大质量由 $1.7002M_{\odot}$ 降低为 $1.6643M_{\odot}$, 同时, 最大质量所对应的半径由 12.775km 增大为 12.920km . 另外, 当 σ^* , ϕ 介子存在时中心重子数密度由 0.7938fm^{-3} 降低为 0.7588fm^{-3} , 并且中心能量密度、中心压强也都降低了.

表1 中子星的性质

	ρ_c / fm^{-3}	$10^{15} \times \varepsilon_c$ / (g/cm^3)	$10^{35} \times p_c$ / $(\text{dyne}/\text{cm}^2)$	M_{\max} / M_{\odot}	R / km
without σ^* , ϕ	0.7938	1.5889	2.2196	1.7002	12.775
with σ^* , ϕ	0.7588	1.5037	1.9224	1.6643	12.920

注: ρ_c , ε_c , p_c , M_{\max} , R 分别为中子星的中心重子数密度、中心能量密度、中心压强、最大质量和半径. $U_{\Lambda}^{(N)} = U_{\Sigma}^{(N)} = 3U_{\Xi}^{(N)} = -30\text{MeV}$, $U_{\Lambda}^{(\Xi)} = U_{\Sigma}^{(\Xi)} = U_{\Xi}^{(\Xi)} = -40\text{MeV}$.

4 小结与讨论

总之, 本文利用相对论平均场理论, 考虑了 σ^* , ϕ 介子及重子八重态 $\{N, P, \Lambda, \Sigma^-, \Sigma^0, \Sigma^+, \Xi^-, \Xi^0\}$, 研究了中子星的性质, 发现由于介子 σ^* , ϕ 的贡献, 出现超子时的重子数密度降低了, 超子的相对数密度增大, 超子星的转变密度 ρ_{0H} 降低, 物态方程变软, 中子星的最大质量降低而相应的半径增大, 中心重子数密度、中心能量密度和中心压强也相应降低. 应当指出, 我们的计算是在零温下进行的, 下一步的工作应该研究有限温度下介子 σ^* , ϕ 对中子星性质的影响.

参考文献(References)

- Lattimer J M, Prakash M. Science, 2004, **304**: 536
- Glendenning N K. Astrophys. J., 1985, **293**: 470
- Glendenning N K. Compact Stars: Nuclear Physics, Particle Physics and General Relativity. New York: Springer-Verlag, New York, Inc, 1997. 180—246
- Schaffner J, Dover C B, Gal A et al. Phys. Rev. Lett., 1993, **71**: 1328
- Schaffner J, Dover C B, Gal A et al. Ann. Phys.(N.Y.), 1994, **235**: 35
- Takahashi H et al. Phys. Rev. Lett., 2001, **87**: 212502-1.0
- TAN Yu-Hong, SUN Bao-Xi, LI Lei et al. Commun. Theor. Phys., 2004, **41**: 441
- Glendenning N K, Moszkowski S A. Phys. Rev. Lett., 1991, **67**: 2414
- Schaffner J, Greiner C, Stöcker H. Phys. Rev., 1992, **C46**: 322
- Schaffner J, Mishustin I N. Phys. Rev., 1996, **C53**: 1416
- Dover C B, Gal A. Ann. Phys. (N.Y.), 1983, **146**: 309
- Fukuda T et al. Phys. Rev., 1998, **C58**: 1306
- Ellis J, Kapusta J I, Olive K A. Nucl. Phys., 1991, **B348**: 345
- Glendenning N K, Von-Eiff D, Haft M et al. Phys. Rev., 1993, **C48**: 889
- Mareš J, Friedman E, Gal A et al. Nucl. Phys., 1995, **A594**: 311
- Bart S et al. Phys. Rev. Lett., 1999, **83**: 5238
- Dabrowski J. Phys. Rev., 1999, **C60**: 025205
- Harada T. Nucl. Phys., 2000, **A672**: 181
- JIA Huan-Yu, SUN Bao-Xi, MENG Jie et al. Chin. Phys. Lett., 2001, **18**(12): 1571

Effect of $f_0(975)$ and $\phi(1020)$ Mesons on Neutron Star Matter*

ZHAO Xian-Feng^{1,2;1)} WANG Shun-Jin¹ ZHANG Hua¹ JIA Huan-Yu³

1 (College of Physics Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

2 (Department of Basic Courses of Emei Campus, Southwest Jiaotong University, Emeishan 614202, China)

3 (Institute for Modern Physics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract In the RMF approach, considering the contributions of the σ^* and ϕ mesons and the hyperons in the baryon octet $\{N, P, \Lambda, \Sigma^-, \Sigma^0, \Sigma^+, \Xi^-, \Xi^0\}$, the properties of neutron star matter have been investigated. It is found that with the contributions of the σ^* and ϕ mesons, the critical baryon density of hyperon appearance decreases, the number of hyperons increases, the transition density ρ_{0H} of hyperon stars decreases, the equation of state turns soft, the maximum mass of neutron star decreases and the corresponding radius increases, the central density, the central energy density and the central pressure are all reduced.

Key words hyperons, neutron star, equation of state

Received 19 May 2006, Revised 20 November 2006

* Supported by National Natural Science Foundation of China (10375039, 90503008), Doctoral Fund of Ministry of Education of China and Center of Theoretical Nuclear Physics and National Laboratory of Heavy Ion Accelerator of Lanzhou

1) E-mail: zhaopioneer.student@sina.com