

# 中子星的相对论平均场研究\*

孙宝玺 贾焕玉 孟杰 赵恩广

1(中国科学院理论物理研究所 北京 100080)

2(北京大学技术物理系 北京 100871)

3(国家重离子加速器重点实验室理论核物理中心 兰州 730000)

**摘要** 在相对论平均场框架内计算了不同超子耦合参数下中子星内部物质的状态方程,进一步求解 Oppenheimer - Volkoff 方程得到了中子星的各种性质. 结果表明,参数的变化对这些性质有明显的影响.

**关键词** 中子星内部核心物质 相对论平均场近似

由于天文观测难以确定中子星的内部核心物质的组成成分<sup>[1]</sup>,我们假定中子星核心是由八重态(n, p,  $\Lambda$ ,  $\Sigma^-$ ,  $\Sigma^0$ ,  $\Sigma^+$ ,  $\Xi^-$ ,  $\Xi^0$ )组成的致密物质. 通过粒子间的弱相互作用,组成中子星内部核心物质的粒子间实现了化学平衡,并且保证重子数守恒和整体电中性<sup>[2]</sup>,于是,组成中子星内部核心物质的粒子的化学势之间有以下关系:

$$\mu_b = q_b \mu_n - q_e \mu_e \quad (1)$$

其中  $q_b$  与  $q_e$  分别是粒子 b 所带重子数和电荷数,  $\mu_n$  与  $\mu_e$  表示中子与电子的化学势. 除中子、质子和电子外,随着中子星内部核心物质密度的增加,  $\mu^-$  轻子和超子  $\Sigma^-$ ,  $\Lambda$ ,  $\Xi^-$ ,  $\Sigma^0$  …… 将依次出现.

在相对论平均场框架内计算奇异强子物质的状态方程,假定重子间只通过  $\sigma, \omega, \rho$  介子传递相互作用,拉格朗日密度为

$$\begin{aligned} L = & \sum_B \bar{\Psi}^B (i\gamma_\mu \partial^\mu - m_B - g_\sigma(B)\sigma - g_\omega(B)\gamma_\mu \omega^\mu - g_\rho(B)\gamma_\mu T \cdot \rho^\mu) \Psi_B + \\ & \frac{1}{2} (\partial^\mu \sigma \partial_\mu \sigma - m_\sigma^2 \sigma^2) - \frac{1}{3} b m_N g_\sigma^3(N) \sigma^3 - \frac{1}{4} c g_\sigma^4(N) \sigma^4 - \\ & \frac{1}{4} \Omega_{\mu\nu} \Omega^{\mu\nu} + \frac{1}{2} m_\omega^2 \omega_\mu \omega^\mu - \frac{1}{4} \mathbf{R}_{\mu\nu} \cdot \mathbf{R}^{\mu\nu} + \frac{1}{2} m_\rho^2 \mathbf{P}_\mu \cdot \mathbf{P}^\mu + \\ & \sum_{e, \mu^-} \bar{\Psi}_\lambda (i\gamma_\mu \partial^\mu - m_\lambda) \psi_\lambda \end{aligned} \quad (2)$$

\* 国家重点基金研究发展规划(G200077407)和国家自然科学基金(10047001)资助

其中 B 表示对所有重子八重态求和。(2)式的量后一项是自由轻子的拉格朗日密度. 核子的耦合常为  $g_\sigma(N)/m_\sigma, g_\omega(N)/m_\omega, g_\rho(N)/m_\rho$  和  $b, c$  由正常核物质的饱和性质决定.

$$\left(\frac{g_\sigma(N)}{m_\sigma}\right)^2 = 9.148\text{fm}^2, \quad \left(\frac{g_\omega(N)}{m_\omega}\right)^2 = 4.820\text{fm}^2, \quad \left(\frac{g_\rho(N)}{m_\rho}\right)^2 = 4.791\text{fm}^2,$$

$$b = 0.003478, \quad c = 0.01328,$$

相应于正常核物质的饱和密度  $0.153\text{fm}^{-3}$ , 结合参  $16.3\text{MeV}$ , 压缩系数  $K = 300\text{MeV}$ , 对称能  $32.5\text{MeV}$ , 核子有效质量为  $0.78m_N$ ,  $m_N$  为真空中自由核子的质量<sup>[3]</sup>.

超子与核子耦合参数之比为, 设  $x = x_\sigma = x_\omega = x_\rho$ , 我们将讨论中子星的性质随  $x$  变化的情况.

图 1 给出了不同  $x$  时单位重子平均能量  $\epsilon/\rho_B - m_N$  随重子密度  $\rho_B$  变化的情景,  $x$  越大, 即超子之间的相互作用越强, 中子星内部核心物质的状态方程曲线越陡, 表明中子星内部核心物质的压缩系数越大. 当密度超过 4 倍正常核物质密度时, 即  $\rho_B \geq 4\rho_0$ , 由图 1 可以看出, 单位重子平均能量  $\epsilon/\rho_B - m_N$  近似与重子密度  $\rho_B$  呈线性关系.

中子星内部核心物质是由高度简并的重子与轻子组成的相对论费密气体, 其状态方程可以在相对论平均场理论的框架内求得. 远离中子星中心的物质密度远小于正常核物质的密度, 其状态方程引用文献[4]中 Bethe - Baym - Pethick - Sutherland - Siemens 状态方程的结果. 进一步求解 Oppenheimer - Volkff 方程得到了中子星的各种性质.

图 2 给出了中子星质量与其中心密度的关系. 对于  $x = 0.9, 1.0$  情景, 由于我们的程序不能计算到更高的密度, 所以相应的曲线不能达到中子星的最大质量极限. 当超子与核子耦合参数之比  $x$  由 0.5 增加到 0.8 时, 中子星的最大质量极限由  $1.43M_\odot$  增加到  $1.74M_\odot$ , 中心密度约为  $(2.1 \times 10^{15}) - (2.5 \times 10^{15})\text{g/cm}^3$ , 约为 8—10 倍正常核物质的密度. 显然, 越“硬”的物质能支持更强的引力, 从而导致更大的中子星质量.

中子星半径随其质量的变化见图 3. 由于不同超子与核子耦合参数之比  $x$  的曲线几乎相互重合, 所以图 3 中只给出了  $x = 0.6$  时中子星半径的变化. 当中子星的质量大于  $0.2M_\odot$  时, 中子星半径约为 15—11km, 大于其 Schwarzschild 半径, 所以星体不全塌缩为黑洞. 当中子星的质量增加时, 中子星半径不断减少, 直到中子星的质量达到最大极限, 此时中子星半径约为 11km.

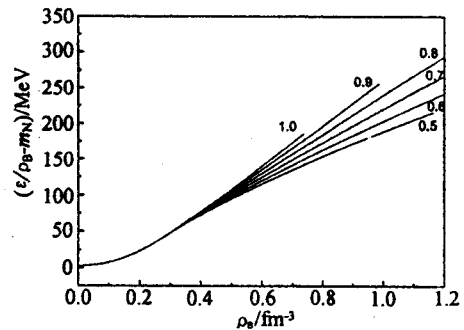


图 1 中子星内部核心物质中单位重子能量  $\epsilon/\rho_B - m_N$  随重子密度  $\rho_B$  的变化

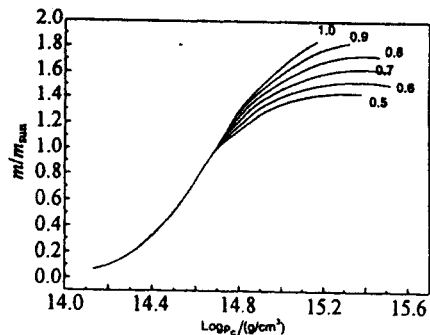
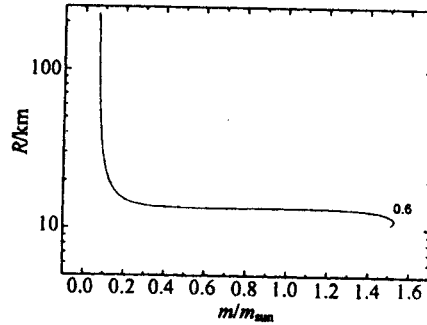


图 2 中子星质量  $m$  与其中心密度  $\rho_c$  的关系

图3  $x=0.6$  时中子星半径  $R$  随其质量  $m$  的变化

在我们的模型中,  $x=0.6$  时中子星的质量下限为  $0.069M_{\odot}$ , 中心密度约为  $1.354 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$ , 约 0.546 倍正常核物质的密度. 中子星质量大于质量下限时, 星体质量主要由中心附近简并强子气体提供, 接近质量下限时, 中子星半径迅速增加. 我们还计算了中子星的转动惯量和引力红移随  $x$  的变化, 发现超子耦合数的变化对它们均有明显的影响. 结果列在表 1 中.

表 1 超子与核子耦合参数之比  $x$  取不同值时中子星的性质.

$x$	$\rho_c / (\text{g/cm}^3)$	$m_{\text{max}} / M_{\odot}$	$R / \text{km}$	$I / (\text{g} \cdot \text{km}^2)$	$z$	$R_{\text{sch}} / \text{km}$
0.5	$2.091 \times 10^{15}$	1.4347	11.556	$1.4239 \times 10^{35}$	1.2564	4.235
0.6	$2.292 \times 10^{15}$	1.5275	11.297	$1.4488 \times 10^{35}$	0.2901	4.509
0.7	$2.409 \times 10^{15}$	1.6304	11.142	$1.5190 \times 10^{35}$	0.3268	4.813
0.8	$2.464 \times 10^{15}$	1.7362	11.057	$1.6165 \times 10^{35}$	0.3653	5.025

$\rho_c$  为中心密度,  $m_{\text{max}}$  为最大质量,  $R$  为中子星半径,  $I$  为转动惯量,  $z$  表示引力红移量,  $R_{\text{sch}}$  为 Schwarzschild 半径

总之, 我们在相对论平均场框架内计算了不同超子与核子耦合参数之比时中子星内部物质的状态方程, 结果发现耦合参数的变化, 对中子星的最大质量极限、半径、转动惯量、引力红移量等性质均有明显的影响. 因此, 在研究中子星的性质时, 应注意由此带来的不确定性.

### 参考文献(References)

- 1 Heiselberg H, Hjorth-Jensen M. Phys. Rep., 2000, 328:237
- 2 Pradash M, Bombaci I, Prakash M et al. Phys. Rep., 1997, 280:1
- 3 Glendenning N K, Moszkowski S A. Phys. Rev. Lett., 1991, 67:2414
- 4 Glendenning N K. Compact Star: Nuclear Physics, Particle Physics, and General Relativity, (Springer-Verlag, New York, 1997)

## Neutron Star in Relativistic Mean-field Approximation \*

SUN Bao-Xi<sup>1,2</sup> JIA Huan-Yu<sup>2</sup> MENG Jie<sup>1,2</sup> ZHAO En-Grang<sup>1,3</sup>

1(*Institute of Theoretical Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

2(*Department of Technology Physics, Peking University, Beijing 100871, China*)

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

**Abstract** The equations of state of the neutron star matter are calculated in the relativistic mean-field approximation with different couplings of the hyperons . The properties of neutron stars are studied by solving the Oppenheimer-Volkoff equation . It shows that these properties change distinctly as different couplings of hyperons are concerned .

**Key words** neutron star matter, relativistic mean mean-field approximation

---

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