

doi: 103969/j. issn. 0490-6756. 2016. 01. 020

核子耦合参数对中子星中超子相的影响

母雪玲, 贾焕玉, 洪 斌, 周 霞

(西南交通大学现代物理研究所, 成都 610031)

摘 要: 中子星中超子的出现以及超子的比例对中子星的性质具有重要影响, 不同的核子相互作用模型如何影响中子星中的超子是一个重要物理问题. 从相对论平均场理论出发, 选取不同核子耦合参数, 计算了中子星中超子的数密度, 发现不同类核子耦合参数对中子星中超子出现和中子星向超子星转变的转变密度有不同影响, 而且核子相互作用的 σ 介子势和 ω 介子势影响显著, 而 ρ 介子势影响较小. 这些结果对大质量中子星性质的理论研究具有重要参考价值.

关键词: 中子星; 超子; 相对论平均场理论

中图分类号: O571 0572

文献标识码: A

文章编号: 0490-6756(2016)01-0118-06

Nuclear coupling parameters affect hyperon phase in the neutron star

MU Xue-Ling, JIA Huan-Yu, HONG Bin, ZHOU Xia

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

Abstract: Hyperon emergence and the proportion of hyperon have significant influence on the properties of the neutron star. How the different nuclear interaction models affect the neutron star is an important physical problems. In terms of the relativistic mean field theory, selecting different nucleon coupling parameters of neutron stars to calculate the density of hyperons. And we will find that the different nucleon coupling parameters have different extent influence in hyperon emergence and the transition of neutron star to hyperon star. The interaction potential of sigma meson and omega meson potential have a significant influence, but the influence of rho meson potential is small. These results have important reference value in researching the massive neutron star.

Key words: Neutron star; Hyperon; Relativistic mean field theory

1 引 言

超新星爆发后核心形成的中子星是已知物质密度最大的天体. 自天文观测发现以来, 中子星一直是天体物理和粒子物理及核物理交叉研究的热点^[1]. 一般认为, 中子星物质密度小于或接近饱和核物质密度时, 中子星物质主要由中子、质子、电子和 μ 子组成. 随着总重子数密度的增大, 中子会转变成

带有奇异数的超子, 密度再高, 中子星中的超子数密度可以超过中子, 这时中子星主要由超子组成, 中子星转变为超子星. 中子星中超子的出现使物质状态方程发生显著变化, 理论上强相互作用产生的抵抗强引力的压强比没有超子时变小, 使理论计算的最大中子星质量变小^[2]. 因此中子星的内部组成是中子星研究中一个重要的问题. 特别是近几年大质量中子星的发现^[3,4], 引起了人们对中子星内部组成

收稿日期: 2015-03-05

基金项目: 国家自然科学基金(11175147)

作者简介: 母雪玲(1991-), 女, 四川旺苍人, 硕士研究生, 主要研究领域为核天体物理.

通讯作者: 贾焕玉. E-mail: hjia@swjtu. cn

和结构的很大研究兴趣, 并进行了很多讨论^[5].

相对论平均场理论(RMF)在描述有限核和核物质性质方面取得了巨大成功. 在此基础上, RMF 被外推应用到中子星各种性质的计算研究中^[6]. 比如 Jia 等人利用 RMF 研究了超子耦合参数对中子星向超子星转变的影响^[7], 李俊等人讨论了不同核子相互作用对核物质和中子星物质的描述^[8], 喻孜等讨论了温度对前中子星物质的影响^[9], 武新慧等人计算了不同核子相互作用对有限温度中子星性质的影响^[10]. 不同的核子相互作用对于零温中子星中超子的生成, 尤其是中子星向超子星转变的影响是一个需要进一步仔细研究的问题.

本文基于相对论平均场理论, 研究不同核子耦合参数对零温中子星中超子的影响.

2 相对论平均场理论及中子星中的超子

在相对论平均场理论中, 通过矢量介子 ω 提供强子间短程排斥作用、标量介子 σ 提供中程吸引作用、带电矢量介子 ρ 描述中子和质子的区别.

描述中子星物质的拉氏量密度为^[11]:

$$l = \sum_B \bar{\Psi}_B (i\gamma_\mu \partial^\mu - m_B + g_{\sigma B} \sigma - g_{\omega B} \gamma_\mu \omega^\mu - \frac{1}{2} g_{\rho B} \gamma_\mu \tau \cdot \rho^\mu) \Psi_B + \frac{1}{2} (\partial_\mu \sigma \partial^\mu \sigma - m_\sigma^2 \sigma^2) - U(\sigma) + \sum_{\lambda=e, \mu} \bar{\psi}_\lambda (i\gamma_\mu \partial^\mu - m_\lambda) \psi_\lambda - \frac{1}{4} \omega_{\mu\nu} \omega^{\mu\nu} + \frac{1}{2} m_\omega^2 \omega_\mu \omega^\mu + U(\omega) - \frac{1}{4} \rho_{\mu\nu} \cdot \rho^{\mu\nu} + \frac{1}{2} m_\rho^2 \rho_\mu \cdot \rho^\mu \quad (1)$$

其中, B 代表重子八重态 $\{n, p, \Lambda, \Sigma^-, \Sigma^+, \Sigma^0, \Xi^-, \Xi^0\}$, Ψ_B 是重子 B 的 Dirac 旋量, m_B 为重子 B 的质量; σ, ω, ρ 分别表示 σ 介子、 ω 介子、 ρ 介子的场算符; $g_{\sigma B}, g_{\omega B}, g_{\rho B}$ 表示介子 σ, ω, ρ 与重子 B 的耦合常数. $U(\sigma)$ 和 $U(\omega)$ 分别表示 σ 介子和 ω 介子的非线性自耦合势:

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

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

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.

由上述拉氏量密度出发, 得到重子 B 和介子的运动方程, 采用平均场近似方法, 考虑中子星物质满足重子数守恒、整体电中性和化学平衡等条

件, 可以对运动方程进行迭代自洽求解, 给出重子 B 的矢量密度

$$\rho_B = \langle \Psi_B \gamma^\mu \Psi_B \rangle = 2(2J_B + 1) \int_0^{k_B} \frac{dk}{(2\pi)^3} = (2J_B + 1) k_B^3 / (6\pi^2) \quad (3)$$

其中 J_B 是重子 B 的自旋. 重子和轻子的费米动量 k_B 和 k_λ 由下列方程决定:

$$\begin{cases} \mu_B = e_B(k_B) \\ \sqrt{k_e^2 + m_e^2} = \mu_e \\ \sqrt{k_\mu^2 + m_\mu^2} = \mu_\mu = \mu_e \end{cases} \quad (4)$$

重子 B 的化学势 $\mu_B = \mu_n - q_B \mu_e$, 其中 q_B 是重子 B 的电荷, μ_n, μ_e 分别是中子和电子的化学势.

能量本征值为:

$$e_B(k) = g_{\omega B} \omega_0 + g_{\rho B} \rho_{03} I_{3B} + \sqrt{k^2 + (m_B - g_{\sigma B} \sigma)^2} \quad (5)$$

其中 I_{3B} 是重子 B 的同位旋 3 分量.

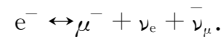
对冷中子星, 当费米子处于最低能态时, 反应



达到平衡, 用化学势表示为

$$\mu_p = \mu_n - \mu_e. \quad (6)$$

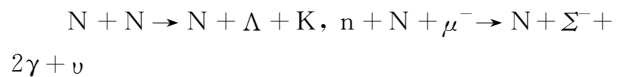
中子密度增加时, 电子密度也在增加, 当电子化学势 μ_e 等于大于 μ 子质量时, 就会有 μ 子出现, μ 子生成的反应为



化学势表示的平衡关系是

$$\mu_\mu = \mu_e. \quad (7)$$

随着密度的再升高, 中子可能会生成其它重子, 如超子等, 也存在相似的化学平衡. 比如



化学平衡关系是

$$\mu_\Lambda = \mu_n, \quad \mu_{\Sigma^-} = \mu_n + \mu_e \quad (8)$$

中子星中超子 H 出现要求其化学势

$$\mu_H = \mu_n - q_H \mu_e \geq m_H - g_{\sigma H} \sigma + g_{\omega H} \omega_0 + g_{\rho H} \rho_{03} I_{3H} \quad (9)$$

由此可知, 超子的电荷、质量大小及介子相互作用势场共同决定了超子的出现.

3 耦合参数的选取

要讨论中子星中的超子成份, 我们需要求解得到介子势场, 为此首先需要给定 RMF 理论中的耦合常数. 对核子之间的相互作用, 人们在研究有限核、核物质和中子星物质过程中, 已经总结出很多

不同参数组,比如 DDMEI [12]、NL1 [13]、NL2 [13]、TM2 [14]、TW99 [15]、GL85 [6] 和 GL97 [2] 等. 这些核子耦合参数的数值存在着较大差别,如表 1 所示. 这些差别对 neutron star 中超子的出现以及超子的比例有何影响是一个很有意义的问题. 超子的耦合常数用核子耦合常数比值表示为 $x_{\sigma H} = \frac{g_{\sigma H}}{g_{\sigma N}}$, $x_{\omega H} = \frac{g_{\omega H}}{g_{\omega N}}$ 和 $x_{\rho H} = \frac{g_{\rho H}}{g_{\rho N}}$. 这些比值至今仍然存在

着巨大的不确定性,在中子星研究中也有各种不同取法. 在这里为了研究不同核子耦合参数对 neutron star 中超子的影响,我们按照文献[16]研究 neutron star 质量时给出的 $x_{\sigma H}$ 取值范围在 1/3 与 1 之间的结果,取 $x_{\sigma H} = 2/3$;再根据超子夸克组成的 SU(6) 对称性 [17],不考虑 Λ, Σ 和 Ξ 的区别,取 $x_{\omega H} = 2/3$;考虑超子的不同电荷态,取 $x_{\rho\Lambda} = 0, x_{\rho\Sigma} = 2, x_{\rho\Xi} = 1$.

表 1 相对论平均场理论核子耦合参数

Tab. 1 Nuclear coupling parameters of relativistic mean field theory

	DDMEI	NL1	NL2	TM2	TW99	GL85	GL97
g_{σ}	10.4434	10.138	9.111	11.469	10.7285	7.9955	7.9835
g_{ω}	12.8939	13.285	11.493	14.638	13.2902	9.1698	8.7
g_{ρ}	3.8053	4.976	5.507	4.6783	3.661	9.7163	8.5411
g_2	0	12.172	-2.304	-4.444	0	10.07	20.966
g_3	0	-36.265	13.784	4.607	0	29.262	-9.3835
C_3	0	0	0	84.532	0	0	0

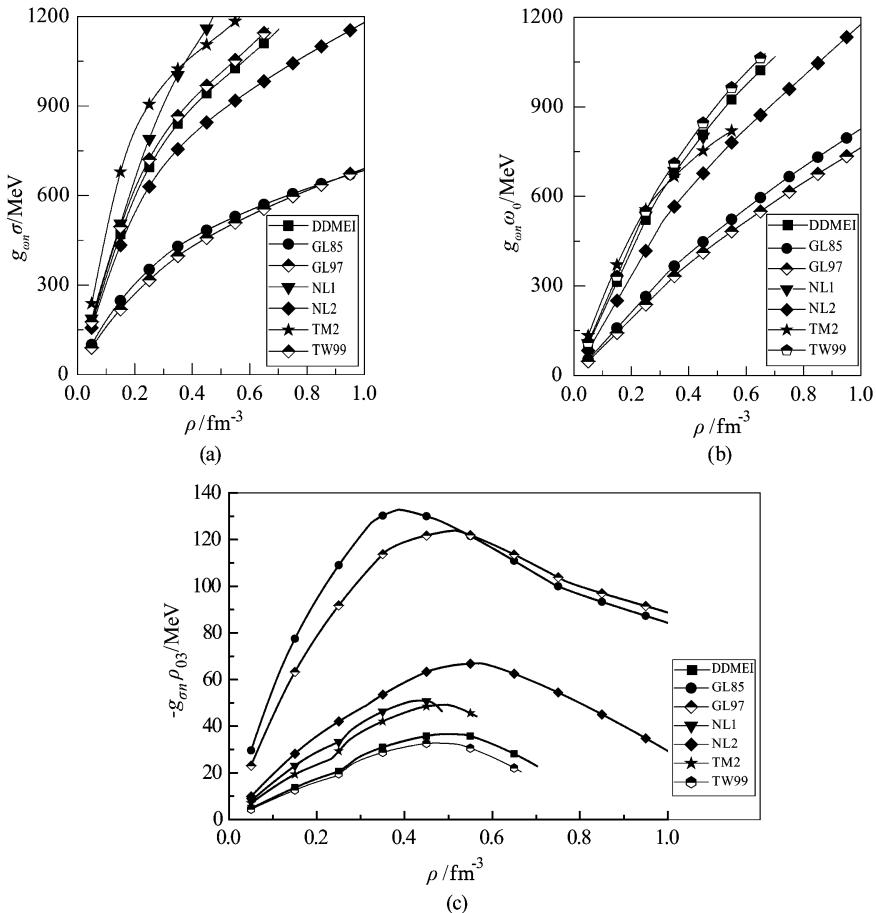


图 1 不同核子耦合参数的 σ 介子势(a)、 ω 介子势(b)和 ρ 介子势(c)

Fig. 1 σ meson potential(a), ω meson potential(b) and ρ meson potential(c) of different nucleon coupling parameter groups

图 1 分别给出了上述核子耦合参数组下 σ 介子势、 ω 介子势和 ρ 介子势随总重子数密度的变化. 从图中可以看出, 根据三种介子势的大小可以明显将上述 7 组核子耦合参数分为两类, 一类是 GL97 和 GL85 参数组, 给出了较弱的短程排斥势和中程吸引势以及较大的同位旋相互作用势; 另一类是 DDMEI、NL1、NL2、TM2、TW99 等五组参数组, 给出较强的短程排斥势和中程吸引势以及较小的同位旋相互作用势. 实际上 GL97 和 GL85 参数组是只考虑饱和核物质的密度 ρ_0 、束缚能 B/A 、压缩系数 K 、核子有效质量 m^* 和对称能系数 a_{sym} 的数值来拟合定出的, 也就是用一个特殊密度处的性质来决定 5 个耦合参数; 而其它 5 组参数主要由有限核的性质数据进行拟合, 再考虑饱和核物质的性质做一些调整得到. 后一类参数组中 DDMEI 和 TW99 是密度相关的有效相互作用, NL1、NL2 考虑 σ 非线性自相互作用, TM2 即考虑 σ 介子也考虑 ω 介子的非线性自相互作用.

4 结果与讨论

选定参数后就可以对中性星的各种粒子组成进行计算与分析.

图 2 给出了利用 GL85 参数组计算的中性星各种粒子相对数密度随总重子数密度的变化结果. 当总重子数密度较小时, 中子占绝大部分, 还有少量的质子和电子. 随着总重子数密度的增大, 质子和电子比例快速上升, 中子的相对数密度减小, 但核子(中子和质子之和)数密度保持不变(重子数守恒). 当电子数密度达到一定数值时, 中性星中开始

出现 μ 子. 总重子数密度继续增大, Λ 和 Σ^- 等超子相继开始出现, 并且相对数密度快速增大, 核子相对数密度减小. 当总重子数密度达到一定值时, 总的超子相对数密度超过核子相对数密度, 我们将此时的重子数密度称为中性星向超子星转变的转变密度(图 2 中虚线与横坐标的交点). 也就是说当总重子数密度大于转变密度后, 中性星的组成以超子为主.

如前所述, 超子的质量、电荷大小及介子相互作用势场大小共同决定了超子的出现. 图 3 给出了不同的核子耦合参数组, 对 Λ 和 Σ^0 超子出现的影响. 对于中性的 Λ 、 Σ^0 , 出现密度 NL1 最小, 依次为 TM2, TW99, DDMEI, NL2, GL85, GL97. 计算考虑的超子出现时的总重子数密度结果列于表 2 中. 可以看到, GL85 和 GL97 参数, Λ 、 Σ 和 Ξ 超子出现时的总重子数密度比余下的 DDMEI 等五组

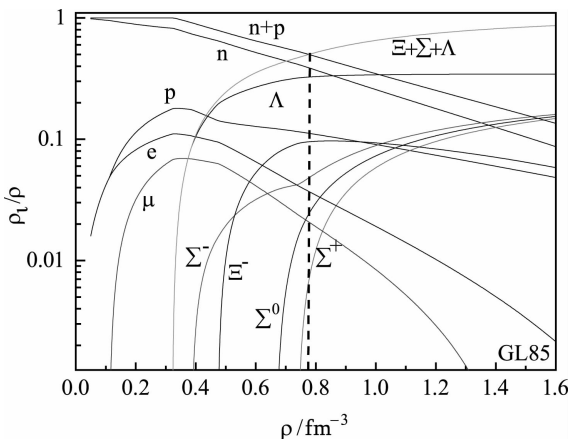


图 2 各种粒子的相对数密度随总重子数密度的变化
Fig. 2 The relative densities of various particles relative to the total baryon number density

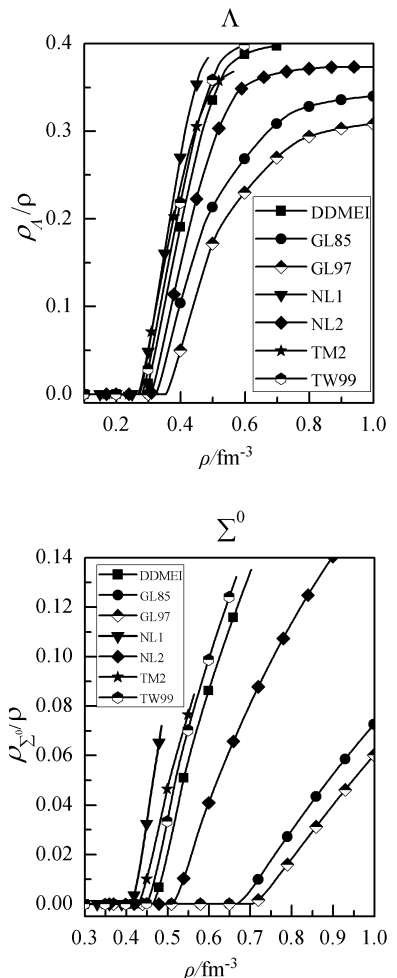


图 3 起子相对数密度与核子耦合参数的关系
Fig. 3 The relationship between the nucleon coupling parameter groups and densities of the relative abundance of hyperon

参数组中超子出现时的总重子数密度都大,也就是说这类核子参数组抑制了中子星中超子的生成. 另外, DDMEI 等这五组参数组由于给出的中程吸引势、短程排斥势、以及同位旋相互作用都不尽相同,

同一超子出现的密度也有所差别. 对于质量相同的不同电荷态的 Σ^- , Σ^0 , Σ^+ , 总是负电荷态出现的重子数密度小. 由于 Ξ^0 质量较大, 在我们的计算中没有出现.

表 2 不同核子耦合参数组中子星中超子出现时对应的总重子数密度(单位为 fm^{-3})

Tab. 2 The total baryon density of hyperon emergence under the different nucleon coupling groups

	NL1	TM2	TW99	DDMEI	NL2	GL85	GL97
Λ	0.271	0.268	0.279	0.288	0.307	0.322	0.353
Σ^-	0.254	0.232	0.240	0.250	0.310	0.385	0.516
Σ^0	0.412	0.428	0.448	0.463	0.510	0.665	0.703
Σ^+	0.459	0.497	0.518	0.537	0.573	0.738	0.764
Ξ^-	0.449	0.471			0.452	0.473	0.493

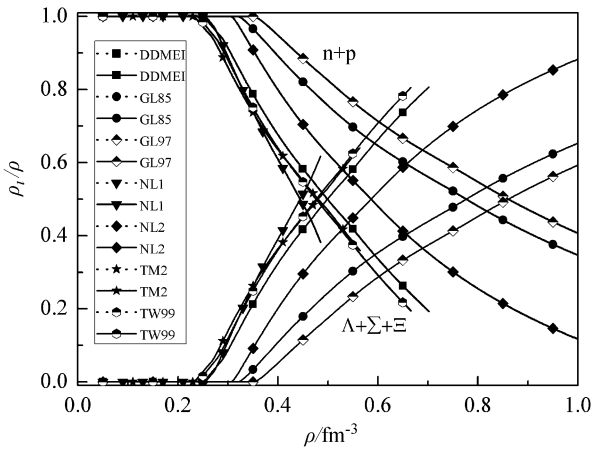


图 4 转变密度与核子耦合参数的关系

Fig. 4 The relationship between the nucleon coupling parameter groups and the transition densities

其中 ρ_i 分别代表核子和超子的数密度, 下降曲

线是核子的数密度, 上升曲线是超子数密度.

图 4 给出了不同的核子耦合参数组, 核子相对数密度和总的超子相对数密度随总重子数密度的变化. 同一组核子耦合参数的两条曲线在一定密度处会发生交叉, 这个密度就是我们前面定义的转变密度. 从图可以看出, GL85 和 GL97 参数组的转变密度比另一类参数组的转变密度大. 所有核子参数组的转变密度列于表 3 中. 表 3 显示, NL1 参数组的转变密度最小, GL97 参数组的转变密度最大. 对于 DDMEI 等这类五组参数组来说, 转变密度大小的顺序和 σ 介子势的大小排序相同, 而且 $g_{\omega n} \omega - g_{\sigma n} \sigma < 0$, 即 σ 介子势大于 ω 介子势, 说明 σ 介子势的大小对转变密度有最重要的影响. 而对于 GL85, GL97 这类参数组, 在转变密度处, ω 介子势大于 σ 介子势, ω 介子势对转变密度影响更为重要. 而 ρ 介子势本身数值较小, 故对转变密度的影响不大.

表 3 不同参数组的转变密度及对应的介子势

Tab. 3 The transition density and meson potential of different parameter groups

	NL1	TM2	TW99	DDMEI	NL2	GL85	GL97
转变密度 (fm^{-3})	0.445	0.477	0.481	0.498	0.587	0.777	0.861
$g_{\omega n} \omega$ (MeV)	1152.058	1125.604	995.506	983.379	942.772	615.082	640.307
$g_{\sigma n} \sigma$ (MeV)	794.412	772.744	884.542	865.274	815.742	683.353	682.329
$-g_{\rho n} \rho_3$ (MeV)	50.869	49.077	32.740	36.620	66.454	98.084	96.413

5 总结

利用相对论平均场理论, 选取 DDMEI、NL1、NL2、TM2、TW99、GL85 和 GL97 等不同的七组核子耦合参数, 对零温中子星中超子的出现及转变

密度进行了分析研究. 结果表明, 核子耦合参数对中子星中的超子有重要影响. GL85 和 GL97 这类参数组给出较大的超子出现密度和转变密度, DDMEI 等这类参数组给出的超子出现密度和转变密度相对较小.

另外核子相互作用中不同的介子势对超子也有不同的影响, σ 介子势和 ω 介子势有重要影响, ρ 介子势由于相对较弱, 因此影响相对较小. 这些结果对于中子星性质的描述研究具有重要参考价值.

参考文献:

- [1] Lattimer J M, Prakash M. The Physics of Neutron Stars[J]. Science, 2004, 304: 536.
- [2] Glendenning N K. Compact stars nuclear physics, particle physics, and general relativity[M]. New York: Springer-Verlag, 1997: 257.
- [3] Demorest P B, Pennucci T, Ransom S M, *et al.* A two-solar-mass neutron star measured using Shapiro delay[J]. Nature, 2010, 467: 1081.
- [4] John A, Paulo C C F, Nornert W, *et al.* A massive pulsar in a compact relativistic binary[J]. Science, 2013, 340: 1233232.
- [5] Zhao X F, Jia H Y. Transition density of the large mass hyperon star[J]. Chinese Physics C, 2014, 38: 015101.
- [6] Glendenning N K. Neutron stars are giant hypernuclei[J]. Astrophys J, 1985, 293: 470.
- [7] Jia H Y, Sun B X, Meng J, *et al.* How and when will a neutron star become a hyperon star [J]. Chinese Physics Letter, 2001, 18: 1517.
- [8] 李俊, 班淑芳, 贾焕玉. 密度相关的相对论平均场理论对核物质和中子星的描述[J]. 高能物理与核物理, 2004, 28: 140.
- [9] 喻夜, 张贵清, 李小华, 等. 温度对前中子星物质的影响[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2012, 1: 141
- [10] 武新慧, 霍建立, 张华, 等. RMF 中有效相互作用对有限温度中子星性质的影响[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2008, 45: 131.
- [11] Bednarek I, Mańka R. A neutron star model in the nonlinear relativistic mean field theory [J]. Nucl Phys A, 1987, 469: 600.
- [12] Typel S, Wolter H H. Relativistic mean field calculations with density-dependent meson-nucleon coupling[J]. Nucl Phys A, 2003, 719: C322.
- [13] Lee S, Fink J, Balantakin A B, *et al.* Relativistic hartree calculations for axially deformed nuclei[J]. Phy Rev Lett, 1986, 57: 2916.
- [14] Barranco M, Buchler J R. Thermodynamic properties of hot nucleonic matter[J]. Phys Rev C, 1980, 22: 1729.
- [15] Niksic T, Vretenar Finelli D P, *et al.* Relativistic Hartree-Bogoliubov model with density-dependent meson-nucleon couplings [J]. Phys Rev C, 2002: 024306.
- [16] Glendenning N K, Moszkowski S A. Reconciliation of neutron-star masses and binding of the Λ in hypernuclei[J]. Phys Rev Lett., 67(1991)2414.
- [17] Schaffner J, Mishustin I N. Hyperon-rich matter in neutron stars[J]. Phys Rev C, 1996, 53: 1416.