

中子星内部中微子辐射的相对论修正*

戚湛强^{1,2} 丁文波^{1†} 张承民² 侯佳为¹

(1 渤海大学数理学院 锦州 121013)

(2 中国科学院国家天文台 北京 100012)

摘要 通过相对论平均场理论和相关的弱相互作用冷却理论,在有、无超子两种情况下的中子星物质中研究含相对论效应的中子星冷却性质,并且与非相对论情况进行对比分析.考虑到极微小尺度上的引力会偏离牛顿引力,引入引力修正效应.结果表明中微子辐射的相对论效应降低了中微子发射率、发光度以及星体的冷却速度.在考虑引力修正的无超子的中子星物质中,相对论效应所引起的星体冷却速度降幅最大,对于两倍太阳质量的物质中子星可达56%,而超子物质中降幅最小,约为38%.

关键词 恒星: 中子, 恒星: 相对论效应, 恒星: 引力修正, 恒星: 超子

中图分类号: P145; **文献标识码:** A

1 引言

中子星的质量约为1–2倍太阳质量^[1–2],半径为10–20 km,这样高度致密的物质环境为研究致密物质的性质、中微子辐射、致密天体演化等提供了一个理想的天然载体.近几十年来,因为探测中子星温度的技术得以发展,所以中子星结构、冷却性质等方面的研究已经成为天体物理和核物理领域的研究热点.

中子星从诞生之初 10^{11} K的极高温下降到较低的 10^8 K主要是通过辐射中微子实现的,而冷却效率最高的中微子辐射机制当属核子的直接Urca过程(以下简称dUrca过程),其次是超子、反K介子、夸克等的直接Urca过程^[3–4].在中子星内部的中微子辐射过程中,中微子发射率是一个较为关键的物理量,它给出单位时间单位体积内中微子辐射所带走的能量.目前学者们使用较多的中微子发射率公式主要有两个: Lattimer等^[5]于1991年推导的不包含相对论效应的公式, Leinson等^[6]于2001年提出的考虑相对论效应的公式.显然,后者所得的结果更为可信,因为通常情况下, dUrca过程发生的临界密度在 $2\rho_0$ 附近(ρ_0 为饱和核密度),在这样高的密度下,参与dUrca过程的粒子的运动速度很高,需要考虑相对论效应.然而以前关于中微子辐射的讨论多数都采用不含相对论效应的公式,若重新计算则工作量较大.因此,定量地给出不同中子星物质组成

2016-06-15收到原稿, 2016-08-12收到修改稿

*国家自然科学基金项目(11173034, 11271055, 11265009, 11175077)、国家重点基础研究发展计划项目(2012CB821800)资助

[†]dingwenbo1980@163.com

下不同质量中子星的冷却性质在考虑相对论效应下的修正值将有助于前人科研成果的推广和精确应用,具有一定的现实意义.

近期的观测数据显示中子星的质量比人们预想的略大. 比如, 毫秒脉冲星PSR J1614-2230的质量被精确测定为 $(1.97 \pm 0.04) M_{\odot}$ ($M_{\odot}$ 表示太阳质量), 半径约为11–15 km^[7], 而2013年观测到的脉冲星PSR J0348+0432质量更大^[8], 为 $(2.01 \pm 0.04) M_{\odot}$. 如此大的质量与人们理论预测的中子星正则质量 $1.4 M_{\odot}$ 存在一定差距, 学者们猜测这主要是由两方面原因造成的: 一是中子星物质的物态方程(Equation of State, EoS)应该较硬, 而从前的理论结果偏软; 二是理论计算中可能忽略了某些需要考虑的因素, 比如引力修正^[9–11]、强磁场效应^[12]、电场效应^[13]等, 而其中的引力修正正逐渐被学者们认可. 引力虽然是人类认识最早的力, 但是至今仍未被完全研究清楚, 仍有一些现象是现在的引力理论所不能解释的^[14–16]. 而近年的实验和理论也表明在中子星这样的高密环境下, 研究极微小尺度下的物理问题时, 引力可能偏离牛顿的平方反比定律^[17–18]. 陈列文等人的研究表明, 引力修正效应可硬化物态方程, 并对中子星的结构产生显著影响^[9–11]. 因此, 本文也考虑了引力修正对中微子辐射所带来的影响.

本文将采用相对论平均场理论和相关弱相互作用理论对GM1参数下的无超子中子星物质(主要含中子、质子、电子、少量 μ 子, 即传统中子星物质)、含超子的中子星物质进行计算, 并考虑引力修正效应, 给出考虑相对论效应后中子星内部的中微子辐射性质、星体的冷却曲线等与未考虑相对论效应结果的具体差异. 本文第2部分介绍所用到的理论模型和计算方法; 第3部分给出相关的模型参数; 第4部分对计算结果进行细致的讨论; 第5部分总结本文的结论.

2 理论模型和计算方法

强相互作用下, 关于中子星物质方面的计算, 我们采用相对论平均场理论(RMFT), 拉氏量的表达式为:

$$\begin{aligned} L_B = & \sum_B \bar{\Psi}_B (i\gamma_{\mu} \partial^{\mu} - m_B) \Psi_B + \sum_B g_{\sigma B} \bar{\Psi}_B \sigma \Psi_B + \frac{1}{2} \partial^{\mu} \sigma \partial_{\mu} \sigma - \frac{1}{2} m_{\sigma}^2 \sigma^2 - \\ & \frac{1}{4} \omega^{\mu\nu} \omega_{\mu\nu} + \frac{1}{2} m_{\omega}^2 \omega^{\mu} \omega_{\mu} - \sum_B g_{\omega B} \bar{\Psi}_B \gamma_{\mu} \omega^{\mu} \Psi_B - \\ & \frac{1}{4} \rho_{\mu\nu} \cdot \rho^{\mu\nu} + \frac{1}{2} m_{\rho}^2 \rho_{\mu} \cdot \rho^{\mu} - \frac{1}{2} \sum_B g_{\rho B} \bar{\Psi}_B \gamma_{\mu} \boldsymbol{\tau}_B \cdot \boldsymbol{\rho}^{\mu} \Psi_B - U(\sigma), \end{aligned} \quad (1)$$

各字母的含义及相关细节见文献[19–20]. 通过求解由场方程、化学平衡、总重子数守恒、电中性条件等构成的非线性方程组, 可以得到各介子场的场量、质子、中子、电子等微观粒子的费米动量、数密度、化学势、体系的EoS等信息. 把EoS作为输入量, 求解Tolman-Oppenheimer-Volkoff (TOV)方程可以得到一系列静态的中子星序列, 给出中子星的质量-半径关系, 对于确定质量的中子星, 可以得到其核心密度以及密度、压强等随径向的变化规律.

关于引力修正, 我们考虑的是非牛顿引力所引起的修正效应. 早在1971年, Fujii^[21]就

指出在极微小的尺度下, 非牛顿引力势可写为:

$$V(r) = -\frac{Gm_1m_2}{r}(1 + \alpha e^{-r/\lambda}), \quad (2)$$

其中 G 和 λ 分别为引力常数和特征长度, α 代表无量纲的强度参数, m 代表重子质量. 按照矢量玻色子交换模型, 与核子弱耦合的矢量U玻色子是目前公认最适合传递相互作用的候选粒子. 在相对论平均场理论中, 引力修正(U玻色子)的引入使得能量密度和压强的公式中各需要加入一项^[22-24]:

$$\varepsilon_{\text{UB}} = P_{\text{UB}} = \frac{1}{2} \frac{g^2}{m_{\text{U}}^2} n_{\text{B}}^2, \quad (3)$$

其中 g 为耦合常数, m_{U} 和 n_{B} 分别代表U玻色子质量和总重子数密度. 因此, 考虑引力修正后中子星的EoS发生改变, 总能量密度 ε 和总压强 P 分别变为:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \varepsilon_0 + \varepsilon_{\text{UB}}, \\ P &= P_0 + P_{\text{UB}}, \end{aligned} \quad (4)$$

ε_0 和 P_0 是未考虑引力修正时的EoS. 从(4)式可以看出, 引力修正使得体系物态方程变硬, 进而增大中子星的最大质量.

关于电子的核子Urca过程(dUrcae过程)的反应式为:

$$n \Leftrightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e, \quad (5)$$

其中 n 、 p 、 e^- 和 $\bar{\nu}_e$ 分别表示中子、质子、电子和反电子中微子. 与反应式(5)式对应的非相对论的中微子发射率公式^[5]为:

$$I = \frac{457\pi}{10080} G_{\text{F}}^2 \cos^2 \theta_{\text{C}} (C_{\text{V}}^2 + 3C_{\text{A}}^2) m_{\text{nL}}^* m_{\text{pL}}^* \mu_{\text{e}} T^6 \Theta(p_{\text{F}_e} + p_{\text{F}_p} - p_{\text{F}_n}), \quad (6)$$

公式中的 G_{F} 为弱相互作用的耦合常数, θ_{C} 为Cabibbo角, T 表示星体内部温度, Θ 为阶跃函数. $C_{\text{V}} = 1$, $C_{\text{A}} = 1.26$, 它们分别是矢量耦合常数和轴矢量耦合常数. μ_{e} 为电子化学式, 而 p_{F_p} 、 p_{F_e} 、 p_{F_n} 分别为质子、电子和中子的费米动量. (6)式中的 m_{nL}^* 和 m_{pL}^* 分别代表中子和质子的朗道有效质量, 在相对论平均场理论中, 它们的表达式为:

$$m_{i\text{L}}^* = \sqrt{p_{\text{F}_i}^2 + (m_i - g_{\sigma i} \sigma)^2}, \quad (7)$$

其中 i 代表核子, m_i 为核子裸质量, $g_{\sigma i}$ 为核子与 σ 场的耦合常数, 而 σ 代表 σ 场的场量. 实际上(6)式中的 Θ 给出的是电子dUrca过程的发生条件, 即

$$p_{\text{F}_e} + p_{\text{F}_p} \geq p_{\text{F}_n}. \quad (8)$$

而考虑相对论效应的中微子发射率(关于电子)的公式^[6]为:

$$I_R = \frac{457\pi}{10080} G_F^2 \cos^2 \theta_C T^6 \Theta(p_{F_e} + p_{F_p} - p_{F_n}) \times \\ \left\{ C_V C_A \left[(m_{nL}^* + m_{pL}^*) p_{F_e}^2 - (m_{nL}^* - m_{pL}^*) (p_{F_n}^2 - p_{F_p}^2) \right] + \right. \\ \left. 2C_A^2 \mu_e m_n^* m_p^* + (C_V^2 + C_A^2) \left[\mu_e (2m_{nL}^* m_{pL}^* - m_n^* m_p^*) + \right. \right. \\ \left. \left. m_{nL}^* p_{F_e}^2 - \frac{1}{2} (p_{F_n}^2 - p_{F_p}^2 + p_{F_e}^2) (m_{nL}^* + m_{pL}^*) \right] \right\}, \quad (9)$$

其中 m_n^* 、 m_p^* 分别为中子和质子的狄拉克有效质量, $m_i^* = m_i - g_{\sigma i} \sigma$. μ 子的Urca过程对应的中微子发射率与电子类似, 只要把电子相关的物理量变为 μ 子的即可, 所以实际上若 μ 子的Urca过程发生, 则总的中微子发射率增加1倍.

中子星的冷却曲线通过计算冷却方程

$$-(L_v + L_\gamma) = C_v \frac{dT}{dt} \quad (10)$$

得到. (10)式中的 t 代表时间, 即中子星的年龄, C_v 是体系的热容. L_v 代表星体的中微子发光度, 通过把中微子发射率按星体体积积分计算得到, 而 L_γ 是星体的光子发光度, 我们采用经验公式

$$L_\gamma = 7 \times 10^{36} \left(\frac{R}{10 \text{ km}} \right)^2 T_{e,7}^4 \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1} \quad (11)$$

来进行近似计算. 上式中 $T_{e,7} = T_e/(10^7 \text{ K})$, 而 T_e 代表星体的表面有效温度, 它与星体内部温度 T 的关系为:

$$T_e = 10^{-2} \alpha T, \quad 0.1 \leq \alpha \leq 1. \quad (12)$$

3 耦合常数

相对论平均场理论(Relativistic Mean-Field Theory, RMFT)框架下的核子-介子耦合常数是通过饱和核物质的5大性质来确定的, RMFT发展至今已经拥有多套成熟的核物质参数组, 本文采用EoS偏硬的一组参数—GM1, 相关细节请参见文献[25]. 本文考虑了全部的重子八重态, 为了全面地考察超子所带来的影响, 只考虑 Λ 、 Σ 和 Ξ 超子在对称核物质中均表现为吸引势的情况, 且设它们与 σ 场的耦合常数与核子- σ 耦合常数相同, 即 $\chi_{\sigma H} = g_{\sigma H}/g_{\sigma N} = 1$ (H 代表超子, N 代表核子). 而超子与 ω 场耦合不敏感, 因此设 $\chi_{\omega H} = g_{\omega H}/g_{\omega N} = 1$, 超子与 ρ 介子的耦合常数可通过SU(6)对称模型获得 $\chi_{\rho \Lambda} = 0$, $\chi_{\rho \Sigma} = 2$, $\chi_{\rho \Xi} = 1$ ($\chi_{\omega H}$ 的定义与 σ 和 ω 场的超子耦合常数类似).

引力修正方面引入U玻色子来传递相互作用, 通常认为(3)式中的 g^2/m_U^2 (简称U玻色子有效耦合常数)应小于 200 GeV^{-2} , 而对于中子星, 其值应在 50 GeV^{-2} 附近或略大于此值. 本文为了研究引力修正所带来的一般影响, U玻色子有效耦合常数选取 30 GeV^{-2} . 值得指出的是, 在拟合参数时, 引力修正在饱和核密度处也将产生影响, 但是此影响与同位旋极度不对称的中子星物质相比较为微弱, 因此我们暂时将其忽略.

4 结果与讨论

采用上述理论和参数进行计算, 通过求解TOV方程可得传统中子星物质(简称np物质)和超子物质(简称npH物质)中子星的质量-半径关系, 见图1. 从图中可以看出考虑引力修正后, 中子星的质量和半径均增大, 而超子的引入则降低了星体的质量, 参见表1. 观察图中的阴影部分, 可以发现中子星PSR J0348+0432可以很好地存在于本文计算的4种情况之下, 即组成PSR J0348+0432的物质不仅可以是传统中子星物质, 超子也可能存在, 并且引力修正效应也适用于PSR J0348+0432. 但是, 对于中子星PSR J1614-2230, 含引力修正效应的传统中子星物质就不适合了, 这是因为修正的引力使得中子星的半径变大, 而对于传统中子星物质, 半径增大的幅度最大, 致使理论计算的星体半径大于PSR J1614-2230的观测半径. 中子星PSR J1614-2230中完全可能存在超子(无论是否考虑引力修正), 而这与文献[7]的结论不同.

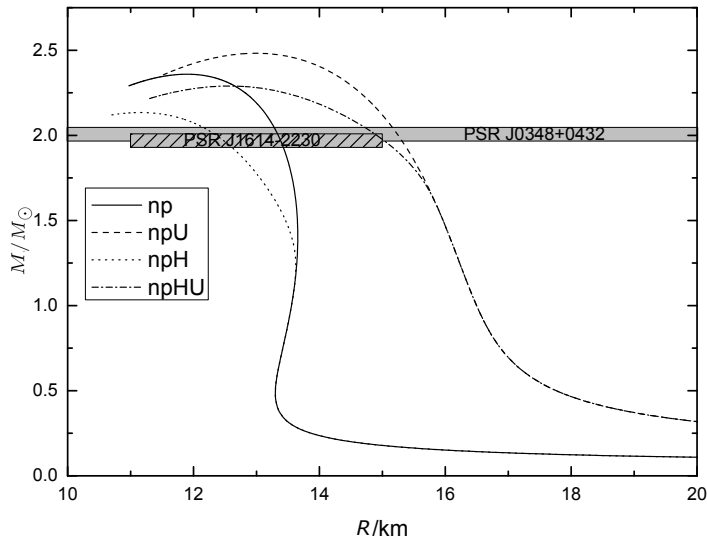


图 1 中子星的质量-半径关系. “np”和“npH”分别代表传统中子星物质和超子物质, “npU”代表传统中子星物质下考虑了引力修正的情况, 而“npHU”表示含引力修正效应的超子物质. 阴影部分表示中子星PSR J0348+0432和PSR J1614-2230.

Fig. 1 The relation between the mass and radius of neutron stars. “np” and “npH” represent the conventional and hyperonic neutron star matter, respectively. “npU” and “npHU” denote the conventional and hyperonic neutron star matter with the consideration of gravitational correction. The shadows correspond to pulsars PSR J0348+0432 and PSR J1614-2230.

根据(8)式进行计算, 可得到不同的中子星物质下dUrca过程发生的密度范围, 如表1所示. 引力修正对费米子的费米动量不产生影响, 因此电子和 μ 子的dUrca过程(简称dUrca μ 过程)发生的临界密度不受U玻色子影响. 从表1可以看出超子的出现使dUrca过程发生的临界密度降低, 密度范围增大, 以 μ 子的dUrca过程最为明显.

表 1 np和npH物质下, U玻色子有效耦合常数分别取0和30 GeV^{-2} 时中子星的最大质量 $M_{\text{max}}/M_{\odot}$ 、对应半径 R 、核心密度 $\rho_{\text{cent}}/\rho_0$, 以及分别发生电子和 μ 子的dUrca (dUrca μ)过程的密度范围.

Table 1 The maximum mass of neutron stars $M_{\text{max}}/M_{\odot}$, the corresponding radius R , central density $\rho_{\text{cent}}/\rho_0$, the density ranges where dUrcae and dUrca μ processes are allowed in conventional neutron star matter and hyperonic neutron star matter when the effective coupling constants of U bosons equal to 0 GeV^{-2} , and 30 GeV^{-2} , respectively.

	$M_{\text{max}}/M_{\odot}$	R/km	$\rho_{\text{cent}}/\rho_0$	$\rho_{\text{dUrcae}}/\rho_0$	$\rho_{\text{dUrca}\mu}/\rho_0$
np	2.3593	11.897	5.648	1.800–5.648	2.232–5.648
npU	2.4823	12.991	4.926	1.800–4.962	2.232–4.962
npH	2.1340	11.153	6.642	1.799–6.642	2.153–6.642
npHU	2.2898	12.572	5.759	1.799–5.759	2.153–5.759

通过中微子发射率公式(6)式和(9)式可以算得不同质量中子星内部中微子辐射的性质, 其中(6)式对应的结果不含相对论效应, (9)式考虑了相对论修正. 图2给出了两颗质量分别为 $1.4 M_{\odot}$ (a)和 $2.0 M_{\odot}$ (b)中子星内部中微子发射率随径向距离的变化关系, 图中标记“R-”对应考虑相对论效应的结果(采用(9)式进行计算). 总地来看, 相对论效应降低了中微子发射率, 但是对于不同的星体质量、不同的物质, 以及是否考虑引力修正, 降低的幅度明显不同. 图2 (a)中, 对于 $1.4 M_{\odot}$ 的中子星, 不含引力修正的传统中子星物质(np)和超子物质(npH)能够发生dUrca过程, 但是考虑引力修正之后dUrca过程在 $1.4 M_{\odot}$ 星体中则未开启. 这是因为引力修正降低了中子星的核心密度, 使得 $1.4 M_{\odot}$ 中子星的核心密度低于dUrca过程发生的临界密度, 见表1和表2. 而对于图2 (a)中的4条曲线, 我们很容易发现在径向距离约小于4.3 km (中高密度下)时, npH物质的中微子发射率曲线明显高于np物质, 这主要是因为np物质构成的中子星内部只发生了电子的dUrca过程, 而含超子的npH物质中子星中dUrcae和dUrca μ 过程都发生了(参见表2), μ 子dUrca过程的加入使得总中微子发射率加倍. 经过计算, 我们发现对于np物质, 相对论效应使中微子发射率降低了约34.7%, 而npH物质降低了约32.4%. 对于大质量中子星, 由于其核心密度较大, 即使是对于考虑引力修正的中子星, 其内部电子和 μ 子的dUrca过程也都发生了, 见图2 (b). 从图2 (b)可以看出, 在较高密度的核心处, np物质和npU物质(含引力修正的传统中子星物质)对应的中微子发射率最高, 而含超子的npH物质的中微子发射率则最低, 这说明超子实际上降低了中微子发射率, 尤其是在高密度处, 超子的种类和数量较多, 中微子发射率降低的幅度也较大. 引力修正效应没有降低中微子发射率, 反而略微起增加作用. 关于相对论与非相对论中微子发射率的差异, 我们进行了计算, 发现对于 $2.0 M_{\odot}$ 中子星, 在其密度较高的核心处, np物质中相对论效应使中微子发射率降低了33.2%, 考虑引力修正效应后(npU)降低了36.1%, 超子物质(npH)降低了15.5%, 考虑引力修正后(npHU)降低了27.9%. 由此可见引力修正使得中微子辐射的相对论效应加强, 而超子则明显弱化了相对论效应所带来的影响, 并且密度越高, 星体质量越大, 超子的这种弱化影响越显著, 而引力修正所带来的影响对密度不敏感. 结合图2的(a)和(b), 可以发现对于有dUrca过程发生的中子星, 除npH物质外的各种情况下中微子发射率相

对论与非相对论的差值相差不大, 相对论所引起的发射率降幅均在30%左右, 而npH物质的降幅最小, 约为16%.

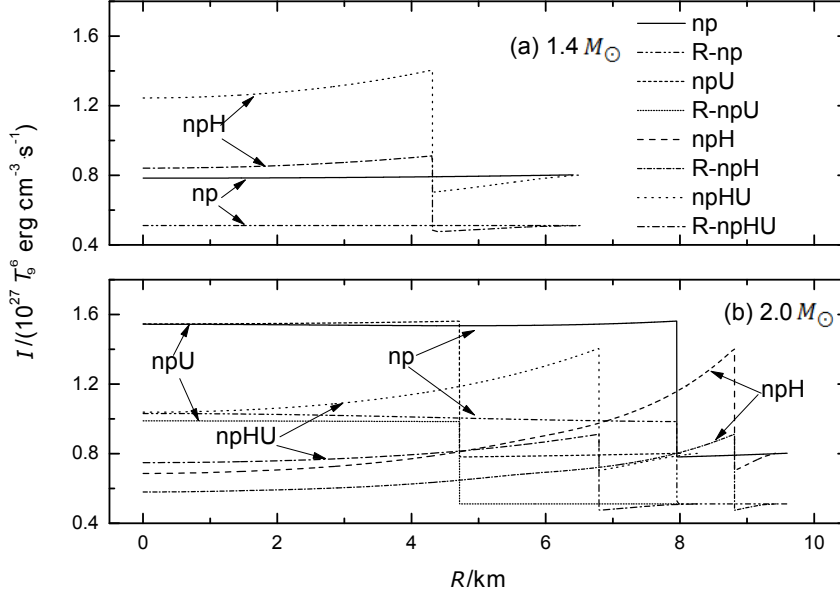


图2 $1.4 M_{\odot}$, $2.0 M_{\odot}$ 中子星内部中微子发射率随径向距离的变化关系. “R-” 对应考虑相对论效应的结果.

Fig. 2 The relation between neutrino emissivity and radial distance in neutron stars with masses of $1.4 M_{\odot}$ and $2.0 M_{\odot}$. “R-” denotes the relativistic results.

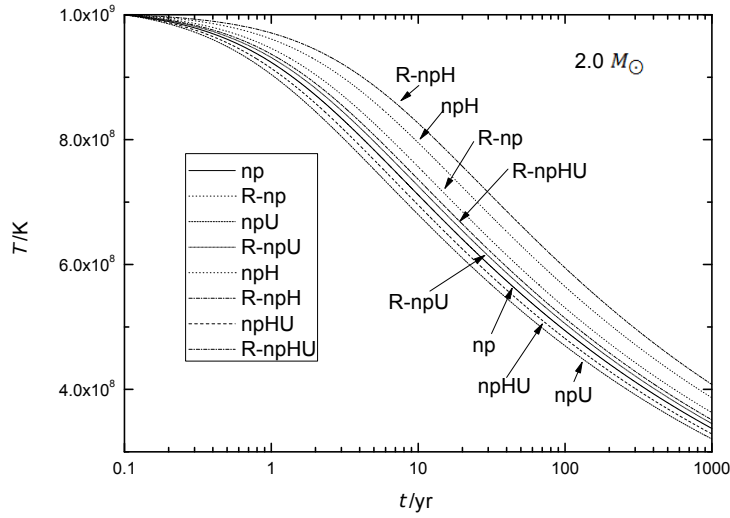
表2给出 $1.4 M_{\odot}$ 和 $2.0 M_{\odot}$ 中子星的核心密度、半径、dUrcae和dUrca μ 过程发生的临界径向距离, 以及星体的中微子发光度. 可以看出超子促进dUrca过程发生, 并且拓宽星体内部dUrca过程发生的范围. 所以虽然超子降低了中微子发射率, 但是由于dUrca过程发生的范围较广, 星体整体中微子发光度却并不是最低的($2.0 M_{\odot}$ 时, npHU情况最低). 而引力修正的作用与超子正好相反, 虽然引力修正提高了中微子发射率, 但是却减小了星体内部dUrca过程发生的范围, 因此考虑引力修正效应后, 中微子发光度降低. 对于 $2.0 M_{\odot}$ 中子星, np、npH物质中相对论效应引起中微子发光度降低率依次为35.4%和27.6%, 而考虑引力修正后, 对应的中微子发光度降低率依次为35.6%和32.9%, 说明引力修正放大了中微子辐射的相对论效应, 而超子所起的作用正好相反, 这一结论主要是由中微子发射率决定的(见图2). 需要说明的是, 表2中“npU”和“npHU”的 $1.4 M_{\odot}$ 中子星实际上是相同的, 因为考虑引力修正后 $1.4 M_{\odot}$ 中子星的核心密度小于超子出现的临界密度, 即“npHU”实际上并无超子存在.

表 2 U 玻色子有效耦合常数分别取 0 和 30 GeV^{-2} 时, np 和 npH 物质下 $1.4 M_{\odot}$ 和 $2.0 M_{\odot}$ 中子星的核心密度 $\rho_{\text{cent}}/\rho_0$ 、半径 R 、电子和 μ 子的 dUrca 过程发生的临界径向距离 R_{cde} 、 $R_{\text{cd}\mu}$, 以及星体的中微子发光度 $L_{\nu\text{R}}$ (含相对论效应) 和 L_{ν}

Table 2 The central density $\rho_{\text{cent}}/\rho_0$, radius R , the critical radial distances of dUrcae and dUrca μ processes R_{cde} and $R_{\text{cd}\mu}$, and the neutrino luminosities $L_{\nu\text{R}}$ (including relativistic effect) and L_{ν} in stars with masses of $1.4 M_{\odot}$ and $2.0 M_{\odot}$ in conventional neutron star matter and hyperonic neutron star matter when the effective coupling constants of U bosons equal to 0 GeV^{-2} and 30 GeV^{-2}

	M / $M_{\odot}$	ρ_{cent} / ρ_0	R /km	R_{cde} /km	$R_{\text{cd}\mu}$ /km	$L_{\nu\text{R}}$ / $(10^{45} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1})$	L_{ν} / $(10^{45} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1})$
np	1.4	2.175	13.657	6.408	—	0.516	0.802
npU	1.4	1.642	16.073	—	—	—	—
npH	1.4	2.436	13.561	6.540	4.312	0.652	0.993
npHU	1.4	1.642	16.073	—	—	—	—
np	2.0	3.158	13.347	9.597	7.952	2.257	3.493
npU	2.0	2.459	15.252	8.038	4.714	1.143	1.782
npH	2.0	4.407	12.362	9.428	8.813	1.659	2.292
npHU	2.0	2.907	14.912	8.276	6.793	1.356	2.021

图3给出 $2.0 M_{\odot}$ 中子星的冷却曲线. 可以看出“npU”曲线在最下方, 说明考虑引力修正的传统中子星物质构成的中子星冷却速度最快, 其次是“npHU”、“np”等, 而冷却最慢的是考虑相对论效应的超子星(R-npH), 其次是不考虑相对论效应的超子星(npH)、考虑相对论效应的传统中子星(R-np)等. 这说明引力修正加速中子星冷却, 而相对论效应则减缓星体的冷却速度. 为了仔细探究相对论效应的影响, 我们以 $4 \times 10^8 \text{ K}$ 的温度为考察点来进行说明. np 物质从起始温度降到 $4 \times 10^8 \text{ K}$ 需要的时间约为 359 yr, 而加入相对论效应后约为 555 yr; 考虑引力修正后(npU), 分别需要 264 yr 和 412 yr; 超子物质(npH)分别需要 814 yr 和 1124 yr; 考虑引力修正后(npHU), 分别需要 307 yr 和 457 yr. 也就是说, 对于 $2.0 M_{\odot}$ 中子星, 若构成物质为传统中子星物质, 则考虑中微子辐射的相对论效应后, 星体冷却速度下降了 54.9%, 而考虑引力修正后, 下降了 56.1%; 若星体由超子物质构成, 则相对论的效应导致冷却速度下降了 38.1%, 考虑引力修正后变为 48.9%. 实际上, 上述结果是由中微子辐射特性和星体的热容共同作用产生的. 需要说明的是, 由于小质量中子星的冷却曲线区分度不大, 相对论效应不十分显著, 因此文章对 $1.4 M_{\odot}$ 中子星的冷却曲线未做详细讨论.

图 3 np物质和npH物质下 $2.0 M_{\odot}$ 中子星的冷却曲线Fig. 3 Cooling curves of neutron stars with the mass of $2.0 M_{\odot}$ in np and npH matter

5 结论

通过相对论平均场理论和相关弱作用理论, 我们在考虑引力修正的情况下, 对传统中子星物质和超子物质下的中子星结构、含相对论修正的中微子发射率、发光度、冷却曲线等, 进行了计算, 并且把结果与非相对论的情况进行对比分析, 所得主要结论如下: (1)引力修正增大中子星的最大质量和其对应半径, 却减小星体核心密度; (2)相对论的中微子发光度总是低于非相对论的情况, 两者的差异在超子物质中最小, 相对论效应使中微子发射率下降了约16%, 而考虑引力修正的传统中子星物质中, 两者的差异最大, 下降了约36% (此结论主要通过 $2.0 M_{\odot}$ 中子星的相关图像得出), 中微子发光度也有类似结论; (3)引力修正放大了中微子辐射的相对论效应, 而超子却明显弱化了相对论与非相对论结果的差异; (4)引力修正加速中子星冷却; (5)中微子辐射的相对论效应减慢星体的冷却速度, 对于 $2.0 M_{\odot}$ 的中子星, 超子物质中冷却速度的降幅约为38%, 而在含引力修正的传统中子星物质中这种降幅可达56%.

参考文献

- [1] Zhang C M, Wang J, Zhao Y H, et al. A&A, 2011, 527: A83
- [2] Cheng Z, Zhang C M, Zhao Y H, et al. ChA&A, 2014, 38: 294
- [3] Gangopadhyay T, Ray S, Li X D, et al. MNRAS, 2013, 431: 3216
- [4] Xu R X. arXiv: astro-ph/0211348, 2002
- [5] Lattimer J M, Pethick C J, Prakash M, et al. PhRvL, 1991, 66: 2701
- [6] Leinson L B, Perez A. PhLB, 2001, 518: 15

- [7] Demorest P B, Pennucci T, Ransom S M. *Nature*, 2010, 467: 1081
- [8] Antoniadis J, Freire P C C, Wex N. *Science*, 2013, 340: 448
- [9] Wen D H, Li B A, Chen L W. *PhRvL*, 2009, 103: 211102
- [10] Zheng H, Chen L W. *PhRvD*, 2012, 85: 043013
- [11] Zhang D R, Yin P L, Wang W, et al. *PhRvC*, 2011, 83: 035801
- [12] Das U, Mukhopadhyay B. *PhRvL*, 2013, 110: 071102
- [13] Ghezzi C R. *PhRvD*, 2005, 72: 104017
- [14] Hoyle C D. *Nature*, 2003, 421: 899
- [15] Geraci A A, Papp S B, Kitching J. *PhRvL*, 2010, 105: 101101
- [16] Lucchesi D M, Peron R. *PhRvL*, 2010, 105: 231103
- [17] Adelberger E G, Heckel B R, Nelson A E. *ARNPS*, 2003, 53: 77
- [18] Krivoruchenko M I, Simkovic F, Faessler A. *PhRvD*, 2009, 79: 125023
- [19] Pal S, Bandyopadhyay D, Greiner W. *NuPhA*, 2000, 674: 553
- [20] Ding W B, Liu G Z, Zhou M F, et al. *ChPhL*, 2008, 25: 458
- [21] Fujii Y. *Nature*, 1971, 234: 5
- [22] Long J C, Chan H W, Churnside A B, et al. *Nature*, 2003, 421: 922
- [23] Zhang D R, Yin P L, Wang W, et al. *PhRvC*, 2011, 83: 035801
- [24] Yan J, Wen D H. *CoTPh*, 2013, 59: 47
- [25] Ding W B, Yu Z, Mi G, Wang C Y. *ChPhC*, 2013, 27: 055101

Relativistic Correction on Neutrino Emission from Neutron Stars

QI Zhan-qiang^{1,2} DING Wen-bo¹ ZHANG Cheng-min² HOU Jia-wei¹

(¹ College of Mathematics and Physics, Bohai University, Jinzhou 121013)

(² National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012)

ABSTRACT Through the relativistic mean field theory and relevant weak interactional cooling theories, the relativistic cooling properties in conventional and hyperonic neutron star matter are studied. Also a comparison between relativistic and non-relativistic results with the consideration of the gravity correction is performed. Results show that the correction of relativistic effect in neutrino emission makes the neutrino emissivity, neutrino luminosity, and cooling rate be lower, in comparison with the non-relativistic case. Due to the correction of relativistic effect in neutrino emission, the cooling rate of neutron star has the largest decline, for the conventional neutron star matter with the consideration of gravity correction. The rate of decline reaches 56% for the conventional neutron star with a mass of two solar masses, however, the decline in hyperonic matter is the smallest, about 38%.

Key words stars: neutron, stars: relativistic effect, stars: gravity correction, stars: hyperon