

强磁场中修正 URCA 过程的中微子产能率*

张 洁¹⁾ 刘门全¹⁾ 魏丙涛^{2,3)} 罗志全^{1)†}

1) 西华师范大学理论物理研究所, 南充 637002)

2) 中国科学院国家天文台/云南天文台, 昆明 650011)

3) 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(2007 年 10 月 17 日收到, 2007 年 11 月 20 日收到修改稿)

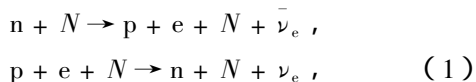
基于 n-p-e 模型并考虑修正 URCA 过程中的质子分支, 研究了强磁场对中子星核心区域修正 URCA 过程中中微子产能率的影响. 结果表明, 强磁场使修正 URCA 过程的中微子产能率产生明显振荡; 与中子分支相比, 强磁场对质子分支中微子产能率的影响偏弱, 但是它将提高总的中微子产能率. 所得结论将有助于进一步研究中子星的冷却机理.

关键词: 中子星, 强磁场, 修正的 URCA 过程

PACC: 2340, 8760D, 9760J

1. 引 言

URCA 过程是由 Gamow 和 Schönberg 在 1941 年首先引入的, 他们指出 URCA 过程的中微子发射会影响恒星的演化率^[1]. 1964 年, Chiu 和 Salpeter 提出, 如果有第三个粒子参与碰撞相互作用, 这个粒子在反应前后成分不变, 但可以参与反应粒子间的能量、动量分配, 这一过程称为修正的 URCA 过程^[2]. 对致密物质的中微子能量损失研究表明, URCA 反应中产生的中微子能量损失对年轻中子星的热演化有决定性的作用, URCA 反应的发生依赖于中子星核心的组成^[3]. ROSAT 对中子星表面热辐射的观测激发了人们对中子星冷却理论的研究^[4], 正如 Lattimer 所指出的, 中子星中最大的能量损失是由直接的 URCA 过程($n \rightarrow p + e + \bar{\nu}_e$, $p + e \rightarrow n + \nu_e$)引起的^[5]. 然而, 在大质量中子星的外核心区和质量小于 1.3—1.4 M_{\odot} 的中子星核心区直接的 URCA 反应是禁戒的^[6,7], 此时修正的 URCA 过程产生的能量损失对中子星的演化起重要作用. 修正的 URCA 过程有质子和中子两个分支:



这里 N 代表质子或中子, 是为了保证动量守恒而引入的, 不参与反应, 当 N 是质子时(1)式描述的是修正的 URCA 过程的质子分支, 当 N 是中子时就是修正的 URCA 过程的中子分支. 修正的 URCA 过程的中子分支是众所周知的, 质子分支的存在直到 1972 年才由 Itoh 和 Tsuneto 提出^[8]. 1987 年 Maxwell 研究中微子的能量损失率时指出, 质子分支的能量损失率与中子分支相比是可以忽略的^[9], 但是 Yakovlev 的研究发现, 修正的 URCA 过程质子分支的能量损失同中子分支产生的能量损失同样重要^[6].

中子星内部存在强磁场已被大量的观测和理论研究所证实, 一般认为, 中子星壳层的磁场强度范围是 10^9 G 到 10^{13} G ($1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T}$). 基于牛顿引力理论的维里定理的分析, 中子星内部磁场可高达 10^{18} G^[10,11]. 文献[12]中研究了强磁场对中子星核心区域修正的 URCA 过程的影响, 但是在他们的工作中忽略掉了修正 URCA 过程的质子分支. 正如文献[6]所指出修正的 URCA 过程质子分支的能量损失同中子分支产生的能量损失同样重要, 故在研究中子星冷却时, 修正 URCA 过程的质子分支的贡献是应当加以考虑的. 至今中子星强磁场环境下的修正 URCA 过程质子分支的中微子产能率还没有被研究, 本文详细计算并比较了修正 URCA 过程中子分支和质子分支中微子产能率受强磁场影响的程度,

* 国家自然科学基金(批准号: 10347008, 10778719), 四川省教育厅青年基金(批准号: 07ZB090)和西华师范大学科研基金(批准号: 07A004, 07A005)资助的课题.

† 通讯联系人, E-mail: lzq_sc@tom.com

相信这对进一步研究中子星的冷却是有意义的.

2. 无强磁场时修正的 URCA 过程

文献 [6] 给出了无磁场时修正的 URCA 过程中子分支的中微子能量产生率

$$Q = \frac{1}{(2\pi)^4} T^8 A S \sum_{\text{spins}} |M|^2, \quad (2)$$

$$A = 4\pi \left[\prod_{j=1}^5 \int d\Omega_j \right] \delta \left(\sum_{j=1}^5 p_j \right), \quad (3)$$

$$I = \int_0^\infty dx_\nu x_\nu^3 \left[\prod_{j=1}^5 \int_{-\infty}^{+\infty} dx_j f_j \right] \delta \left(\sum_{j=1}^5 x_j - x_\nu \right), \quad (4)$$

$$S = \prod_{j=1}^5 p_{Fj} m_j^*, \quad (5)$$

其中 p_j ($j=1-4$) 是核子的动量, p_5 是电子的动量, p_{Fj} 是相应的粒子的 Fermi 动量, $|M|^2$ 是 URCA 反应的跃迁矩阵元的平方, $s=2$ 是反应的对称因子, T 是 $n-p-e$ 平衡系统的温度, $x_\nu = p_\nu/T$ 是中微子的无量纲动量, $x_j = v_{Fj}(p - p_{Fj})/T$ 是其他粒子的无量纲动量, 这里的 v_{Fj} 是 Fermi 速度, m_j^* 是有效质量, $f_j = [\exp(x_j) + 1]^{-1}$ 是 Fermi-Dirac 函数. 根据文献 [12] 当 $p_{Fn} > p_{Fe} + p_{Fp}$ 时, A, I 的积分结果满足关系式

$$A_{n0} = \frac{2\pi(4\pi)^4}{p_{Fn}^3},$$

$$I_{n0} = \frac{11513}{120960} \pi^8, \quad (6)$$

下脚标 $n0$ 表示 A 和 I 在中子分支的修正 URCA 过程中的数值. 当 $p_{Fn} \leq p_{Fe} + p_{Fp}$ 时, 则

$$A_{n0} = \frac{2\pi(4\pi)^4}{4p_{Fn}^2 p_{Fe}^2} (4p_{Fe} - p_{Fn}). \quad (7)$$

此时直接的 URCA 过程占据主导地位, 修正 URCA 过程是可以忽略的(直接 URCA 过程的中微子产能率要比修正 URCA 过程高约 10^4-10^5 倍)^[13].

1979 年, Friman 和 Maxwell 考虑到核子间的相互作用得到修正的 URCA 过程中子分支的产能率为^[14, 15]

$$Q_{n0} = \frac{11513}{30240} \frac{G^2 g_A^2 m_n^{*2} m_p^*}{2\pi} \left(\frac{f_\pi}{m_\pi} \right)^4 \frac{p_{Fe}(k_B T)^8}{\hbar^{10} c^8} \alpha_n \beta_n$$

$$\approx 8.55 \times 10^{21} \left(\frac{m_n^*}{m_n} \right)^3 \left(\frac{m_p^*}{m_p} \right) \left(\frac{n_e}{n_0} \right)^{1/3}$$

$$\times T_9^8 \alpha_n \beta_n \text{ erg} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}, \quad (8)$$

其中 $G = 1.436 \times 10^{-49} \text{ erg cm}^3$ 是弱耦合常数 ($1 \text{ erg} = 10^{-7} \text{ J}$), $g_A = 1.26$ 是轴矢量归一化常数, m_n^*, m_p^* 分

别是中子和质子的有效质量, n_e 是电子的数密度, m_π 是 π 介子的质量, k_B 是 Boltzman 常数, T 为温度, \hbar 为 Plank 常数, $f_\pi \approx 1$ 是 P 波 πN 耦合常数. 由文献 [6] 知 $\alpha_n = 1.76 - 0.63(n_0/n_n)^{2/3}$, $\beta_n = 0.68$, 这里 $n_0 = 0.16 \text{ fm}^{-3}$ 是核物质中标准核数密度, n_n 是中子的数密度. 文献 [4] 将 (8) 式经约化近似简化为

$$Q_{n0} = (7.4 \times 10^{20} \chi \rho/\rho_0) T_9^8 \text{ erg} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}. \quad (9)$$

分析了修正 URCA 过程的中子分支的中微子产能率后, 很容易能够计算出质子分支的产能率, 跃迁矩阵元 $|M|^2$ 和相空间积分 I 是完全相同的, 其区别是由态密度 S 和角积分 A 引起的. 当修正 URCA 过程的质子分支发生反应时 A 为

$$A_{p0} = \frac{2\pi(4\pi)^4}{p_{Fp}^2 p_{Fn}} \left(1 - \frac{p_{Fe}}{4p_{Fp}} \right) \Theta. \quad (10)$$

当 $p_{Fn} < 3p_{Fp} + p_{Fe}$ 时(修正 URCA 过程的质子分支反应进行), $\Theta = 1$, 否则 $\Theta = 0$. 运用上面的结果可以得到质子分支的中微子产能率为

$$Q_{p0} = \frac{11513}{30240} \frac{G^2 g_A^2 m_n^* m_p^{*3}}{2\pi} \left(\frac{f_\pi}{m_\pi} \right)^4$$

$$\times \frac{p_{Fe}(k_B T)^8}{\hbar^{10} c^8} \alpha_p \beta_p \left(1 - \frac{p_{Fe}}{4p_{Fp}} \right) \Theta$$

$$\approx 8.55 \times 10^{21} \left(\frac{m_n^*}{m_n} \right) \left(\frac{m_p^*}{m_p} \right)^3 \left(\frac{n_e}{n_0} \right)^{1/3}$$

$$\times T_9^8 \alpha_p \beta_p \left(1 - \frac{p_{Fe}}{4p_{Fp}} \right) \Theta \text{ erg} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}. \quad (11)$$

鉴于跃迁矩阵元来源的不确定性, 令 $\alpha_p = \alpha_n$, $\beta_p = \beta_n$, 文献 [4] 已经详细地分析了无磁场时修正 URCA 过程的产能率 (11) 式可进一步表示为

$$Q_{p0} = (5.6 \times 10^{20} \chi \rho/\rho_0) T_9^8 \text{ erg cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}. \quad (12)$$

(9) 式和 (12) 式分别是修正的 URCA 过程中子分支和质子分支的中微子产能率.

3. 强磁场中修正的 URCA 过程

中子星内部物质组成非常复杂, 目前还不能完全确定. 通常认为中子星核心超流区物质是磁化的 $n-p-e$ 平衡系统构成^[16]. 1997 年 Chakrabarty 等发现当磁场达到 10^{20} G 时处于 β 平衡的核物质将转变成稳定的丰质子物质, 直接的 URCA 过程会进行^[17]. 由于本文讨论的磁场范围低于 10^{20} G , 故强磁场对中子星核心区物质的相变的影响可以忽略, 此时只有修正的 URCA 反应进行. 中子星内部的强磁场势必将改变电子在相空间的分布, 当然修正

URCA 过程中微子产能率将发生变化. 强磁场作用下修正 URCA 过程的质子分支中微子的产能率将变为

$$Q_{p0}^B = Q_{p0} \frac{J_p}{A_{10} I_{10}}, \quad (13)$$

其中

$$J_p = 4\pi \sum_e \mathcal{K}(x_e) \sum_p \mathcal{K}(x_p) \int \prod_{j=1}^3 d\Omega_j \int_0^\infty dx_\nu \cdot x_\nu^3 \times \left[\prod_{j=1}^3 \int dx_{ij} \mathcal{K}(z_j) \right] \delta(x_\nu - \prod_{j=1}^5 z_j) \times \delta \left(\sum_{j=1}^5 p_j \right). \quad (14)$$

将(14)式代入(13)式即可得到强磁场下修正 URCA 过程的质子分支的中微子产能率的计算公式.

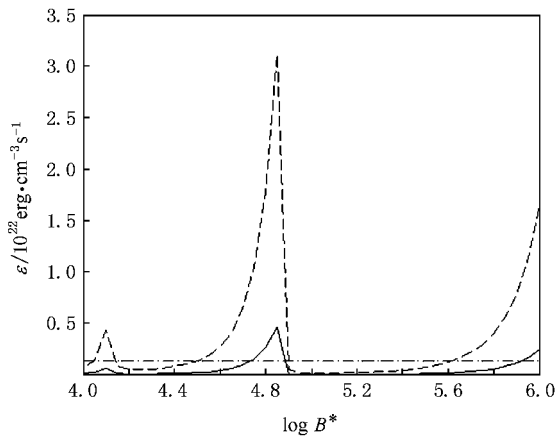


图 1 修正 URCA 过程的产能率随磁场的变化($\rho = 10^{15} \text{ g/cm}^3$, $T = 10^9 \text{ K}$, B^* 以临界磁场为单位)

图 1 中实线是磁场中修正 URCA 质子分支的产能率, 虚线是磁场中修正 URCA 过程中子分支的产能率, 点画线是无磁场时质子分支的产能率. 从图中可以看出随磁场的增加修正 URCA 过程的质子分支和中子分支的产能率的变化都是呈锯齿形变化, 其原因是 URCA 过程由电子俘获和 β 衰变这两个过程交替进行的; 由文献 [18—20] 得到的结论是强磁场急剧的降低了电子俘获率, 而强磁场下的 β 衰变率

可以显著增加. 两者的竞争导致中微子的产能率随磁场强度的变化有时增大有时减小呈锯齿形变化, 并且磁场越强, 波动幅度越大, 总体随磁场变化非常复杂. 同时从图中也可以发现质子分支受磁场强度的影响程度相对于中子分支来说要小些, 在某些条件下二者相差较大, 如在 $\log B^* = 4.8$ (即 $B = 2.785 \times 10^{18} \text{ G}$) 时, 质子分支的产能率为 $2.662 \times 10^{21} \text{ ergcm}^{-3} \cdot \text{s}$, 中子分支的产能率为 $1.779 \times 10^{22} \text{ ergcm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$, 它们相差 6.68 倍. 这是由于 URCA 过程的质子分支中参与碰撞相互作用并吸收衰变中子多余动量的粒子为质子, 与中子情形不同的是质子本身要受磁场的影响, 强磁场下质子更倾向于集中到 Landau 柱面上, 磁场降低了反应粒子与质子碰撞的概率, 相对于中子分支的反应而言, 整体的中微子产能率降低.

4. 结 论

中微子产能率对于中子星的冷却有着至关重要的作用. 中子星核心区域如此强的磁场使得电子仅仅占据比较低的 Landau 能级, 强磁场对中微子产能率有非常明显的影响. 中子星内部的弱相互作用过程产生的中微子是中子星能量损失的主要途径, 它们决定年轻中子星的热演化^[21]. 尽管当前在天文观测和理论上人们都取得了许多进展, 但是中子星的冷却仍然是一个还未完全解决的问题^[22, 23]. 中子星强磁场环境下修正 URCA 过程质子分支的产能率虽然对总的发射率的影响相对偏低(特别是磁场小于 $1 \times 10^{15} \text{ G}$ 时), 但作为一个实际的物理过程在研究中子星的演化和冷却时予以考虑是必要的. 特别是当满足发生条件 $1/64 < n_p/n_n < 1/4$ (n_p, n_n 分别为质子和中子数密度) 时, 质子分支和中子分支同时存在, 总的中微子出射率有较大增加, 考虑质子分支影响尤其必要. 按照文献 [12] 的分析, 增加的中微子出射率将会使冷却曲线下移, 即理论的有效温度和光度将会降低, 这有助于解释观测光度比原来计算偏低的中子星, 对此我们将做进一步研究.

- [1] Gamow G, Schönberg M 1941 *Phys. Rev.* **59** 539
 [2] Chiu H Y, Salpeter E E 1964 *Phys. Rev. Lett.* **12** 413
 [3] Yakovlev D G, Pethick C J 2004 *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **42** 169Y
 [4] Anderson S B, Cordova F, Pavlov G G, Robinson C R,

Thompson R J 1993 *ApJ* **414** 867

- [5] Lattimer J M, Pethick C J, Prakash M, Haensel P 1991 *Phys. Rev. Lett.* **66** 2701
 [6] Yakovlev D G, Levenfish K P 1995 *A&A* **297** 717
 [7] Haensel P, Levenfish K P, Yakovlev D G 2001 *A&A* **372** 130

- [8] Itoh I , Tsuneto T 1972 *Prog. Theor. Phys.* **48** 1849
- [9] Maxwell O V 1987 *ApJ* **316** 691
- [10] Bandyopadhyay D , Chakrabarty P S 1997 *Phys. Rev. Lett.* **79** 2176
- [11] Lai D , Shapiro S L 1991 *ApJ* **383** 745
- [12] Yuan Y F , Zhang J L 1998 *A&A* **335** 969
- [13] Xu R X 2006 *Introduction to astrophysics*(Beijing :Peking University Press [in Chinese] 徐仁新 2006 天体物理导论(北京 :北京大学出版社))
- [14] Shapiro S L , Teukosky S A 1984 *Black Holes , White Dwarfs , and Neutron Stars* (A Wiley Interscience Publication)
- [15] Friman B L , Maxwell O V 1979 *ApJ* **232** 671
- [16] Baym G , Pethick C , Sutherland P 1971 *ApJ* **170** 299
- [17] Chakrabarty S , Bandyopadhyay D , Pal S 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 2898
- [18] Zhang J , Liu M Q , Luo Z Q 2006 *Chin. Phys.* **15** 1477
- [19] Luo Z Q , Peng Q H 1997 *ChA&A* **21** 254
- [20] Liu J J , Luo Z Q , Liu H L , Lai X J 2007 *Chin. Phys.* **16** 2671
- [21] Duan H Y , Qian Y Z 2004 *Phys. Rev. D* **67** 123004
- [22] Tong H , Peng Q H 2007 *CJAA* **7** 809
- [23] Tsuruta S 2006 *IAUJD* **2E** 25T

The effect of strong magnetic field on proton branch of modified URCA process *

Zhang Jie¹⁾ Liu Men-Quan¹⁾ Wei Bing-Tao^{2)B)} Luo Zhi-Quan^{1)†}

1 [Institute of Theoretical Physics , China West Normal University , Nanchong 637002 , China)

2 [National Observatory/ Yunnan Observatory , Chinese Academy of Sciences , Kunming 650011 , China)

3 [Graduate School , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100049 , China)

(Received 17 October 2007 ; revised manuscript received 20 November 2007)

Abstract

The neutrino energy loss rate of modified URCA process in strong magnetic field of neutron star core is investigated based on the n-p-e model. Both neutron and proton branches of modified URCA process are considered. The result shows that a strong magnetic field makes the neutrino energy loss rate of modified URCA process to oscillate intensively. Compared with the neutron branch , neutrino energy loss rate of the proton branch is weaker. But the total neutrino energy loss rate will increase due to the proton branch of modified URCA processes. The result will contribute to the research of cooling mechanism of neutron stars.

Keywords : neutron star , magnetic field , modified URCA process

PACC : 2340 , 8760D , 9760J

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10347008 , 10778719) , the Science Foundation of Sichuan Provincial Education Department (Grant No. 07ZB090) and the Science and Technological Foundation of China West Normal University (Grant Nos. 07A004 , 07A005).

† Corresponding Author. E-mail : lzq_sc@tom.com