

超强磁场对中子星外壳层核素 ^{56}Fe , ^{56}Co , ^{56}Ni , ^{56}Mn 和 ^{56}Cr 电子俘获过程中微子能量损失的影响^{*}

刘晶晶[†]

(琼州学院理工学院, 三亚 572022)

(2009 年 9 月 15 日收到; 2009 年 10 月 27 日收到修改稿)

研究了超强磁场对中子星外壳层核素 ^{56}Fe , ^{56}Co , ^{56}Ni , ^{56}Mn 和 ^{56}Cr 电子俘获过程中微子能量损失的影响. 结果表明, 就大部分中子星表面的磁场 $B < 10^{13}$ G, 超强磁场对中微子能量损失率的影响很小. 对于一些磁场范围为 10^{13} — 10^{15} G 的超磁星, 超强磁场可使中微子能量损失率大大降低, 甚至超过 5 个数量级.

关键词: 强磁场, 中微子能量损失, 中子星

PACC: 9635P, 1460G, 9760J

1. 引 言

中微子天体物理已经进入了一个崭新的重要发展阶段. 最近几年, 研究恒星演化晚期的中微子相互作用和能量损失被很多天体物理学家和粒子物理学家所关注, 在中微子能量损失领域取得了很大的进步. 由于中微子与物质之间的作用太弱, 在光子能够被俘获的环境, 它却会毫无阻碍地逃逸并带走星体的大量能量和信息. 因此, 有关中微子和中微子能量损失的研究成为天体物理和粒子物理的研究热点和富有挑战性的前沿课题.

众所周知, 在恒星演化过程, 诸如红巨星阶段的演化、白矮星和中子星的冷却、X 射线爆模型研究和超新星坍塌爆发, 中微子能量损失至关重要, 那些来自弱核反应和纯轻子过程的中微子发射导致的能量损失率占有主要的贡献. 然而, 在恒星演化晚期高温高密环境, 纯轻子过程的中微子的发射将占主导优势. 如电子对湮没、光生中微子过程、等离子体衰变、核轫致辐射过程及其他弱相互作用过程(电子俘获和 beta 衰变等). 而强烈影响恒星演化的决定性的参数之一是冷却率, 因此更详细地研究星体演化路径分支, 精确地评估中微子的发射率是十

分必要的. 尤其在高质量恒星演化晚期, 这种冷却率的变化明显地影响着演化时标和那些一直以来缺乏理论支撑的超新星爆发机理下的铁核结构和成分.

恒星演化理论告诉我们, 电子俘获过程中的中微子能量损失对恒星晚期的冷却起着不可估量的重要意义. 这一非常有意义和富有挑战性的课题被很多学者所研究, 如 Fuller, Flower, Newman^[1], Liu 和 Luo 等^[2-6]. 然而大部分学者对强磁场环境下的中微子能量损失的影响有所忽略. 一些恒星内部存在强磁场(如中子星)已经被很多理论和实验所证实, 强磁场能够改变电子气体的分布和形状, 足够强的磁场使电子气体的量子效应明显, 这势必对恒星内部的热核反应产生重要影响.

我们知道, 大部分中子星的外壳层存在强度范围在 10^8 — 10^{13} G ($1\text{ G} = 10^{-4}\text{ T}$) 的磁场^[7], 理论计算和观察表明, 一些超磁星的磁场强度范围为 10^{13} — 10^{15} G^[8], 温度高达 10^9 K 数量级, 在高温环境下, 如此强的磁场对中子星的冷却机理、重元素的核合成和晚期演化模式将产生怎样的影响? 本文基于 p-f 壳模型, 对中子星外壳层强磁场环境典型核素 ^{56}Fe , ^{56}Co , ^{56}Ni , ^{56}Mn 和 ^{56}Cr 的电子俘获过程中微子能量损失进行了探讨.

^{*} 海南省自然科学基金(批准号: 109004)、海南省教育厅高等院校科研基金(批准号: Hjkj2010-42)和三亚高等院校专项基金(批准号: YD09047)资助的课题.

[†] E-mail: liujingjing68@126.com

2. 强磁场环境恒星内部的电子俘获过程中微子能量损失

通过求解均匀磁场的 Dirac 方程,在足够强的磁场中电子的能谱可表示为

$$\varepsilon_n = (p_z^2 + 1 + 2n\Theta)^{1/2}, \quad (1)$$

其中 p_z 为以 $m_e c^2$ 为单位的电子沿磁场方向的动量, ε_n 是以 $m_e c^2$ 为单位的电子能量, n 为相应的 Landau 能级量子数 ($n=0, 1, 2, 3, \dots$), 且满足 $\Theta = h_e B / m_e^2 c^2 = 0.0225 B_{12}$, B_{12} 是以 10^{12} G (相当于 10^8 T) 为单位的磁场强度 ($B = 10^{12} B_{12}$), 电子气体的数密度为

$$n_e = \frac{\rho}{\mu_e} = \frac{\Theta}{2\pi^2 \lambda_e^3} \sum_{n=0}^{\infty} q_{n0} \int_0^{\infty} (f_{-e} - f_{+e}) dp_z, \quad (2)$$

这里 ρ 是以 g/cm^3 为单位的质量密度, μ_e 为电子的平均分子权重, $\lambda_e = h/m_e c$ 为 Compton 波长, $q_{n0} = 2 - \delta_{n0}$ 是针对电子自旋的简并度 (基态是非简并的). $f_{-e} = \left[1 + \exp\left(\frac{\varepsilon_n - U_F - 1}{kT}\right) \right]^{-1}$, $f_{+e} = \left[1 + \exp\left(\frac{\varepsilon_n + U_F + 1}{kT}\right) \right]^{-1}$ 分别是电子和正电子的分布函数, k 为 Boltzman 常数, T 为温度, U_F 为电子气体化学势.

恒星内部某核俘获电子从初态 i 跃迁到终态 f 的电子俘获过程的中微子能量损失率为 λ_{if} , 考虑到初态对应所有的可能的终态贡献时, 与初态 i 对应的俘获率为 λ_i [9], 则

$$\lambda_k^v = \sum_i \frac{(2J_i + 1) e^{-E_i/kT}}{G(Z, A, T)} \sum_f \lambda_{if}^v, \quad (3)$$

其中 J_i 和 E_i 为母核自旋和激发态能级, $G(Z, A, T)$ 为核配分函数, 从初态到所有可能的终态电子俘获过程中微子能量损失率表示为 $\lambda_{if}^v, \lambda_{if}^v = \frac{\ln 2}{(ft)_{if}} f_{if}$, 而

且有关系 $\frac{1}{(ft)_{if}} = \frac{1}{(ft)_F} + \frac{1}{(ft)_{GT}^{CT}}$. ft 值与 Gamow-Teller (G-T) 和 Fermi 跃迁矩阵元有如下关系:

$$\frac{1}{(ft)_{if}^{GT}} = \frac{10^{3.596}}{|M_{GT}|_{if}^2}, \quad \frac{1}{(ft)_F} = \frac{10^{3.79}}{|M_F|_{if}^2}, \quad (4)$$

其中 $f_{if} = f(Q_{if})$ 为相空间因子. 强磁场下相空间因子由下式给出 [4, 5]:

$$f_{if}^B = \frac{\Theta}{2} \sum_{n=0}^{\infty} \theta_n, \quad (5)$$

$$\theta_n = q_{n0} \int_{q_n}^{\infty} (Q_{if} + \varepsilon_n)^3 \frac{F(z, \varepsilon_n)}{1 + \exp\left(\frac{\varepsilon_n - U_F - 1}{kT}\right)} dp_z, \quad (6)$$

其中 $Q_{if} = Q_{00} + E_i - E_f$ 为电子俘获阈能, E_i 和 E_f 分别为初、终态的激发态能, $F(z, \varepsilon_n)$ 是库仑校正因子 [7], $Q_{00} = M_p c^2 - M_d c^2$, M_d, M_p 分别为母核与子核的质量, q_n 满足如下关系: 当 $Q_{if} < -(1 + 2n\Theta)^{\frac{1}{2}}$, $q_n = (Q_{if}^2 - 1 - 2n\Theta)^{\frac{1}{2}}$; $Q_{if} \geq -(1 + 2n\Theta)^{\frac{1}{2}}$, $q_n = 0$.

3. 强磁场下电子俘获过程中微子能量损失的计算与分析

图 1 和图 2 分别给出了核素 ^{56}Fe , ^{56}Co , ^{56}Ni , ^{56}Mn 和 ^{56}Cr 在密度为 $\rho/\mu_e = 10^6 \text{ mol/cm}^3$ 和 $\rho/\mu_e = 5.86 \times 10^9 \text{ mol/cm}^3$, 温度为 $T = 1 \times 10^9, 3 \times 10^9, 5 \times 10^9, 7 \times 10^9, 9 \times 10^9 \text{ K}$ 时中微子能量损失率随磁场变化关系. 从图中可知, 当磁场强度 $B < 10^{13} \text{ G}$ 时, 磁场对电子俘获过程中微子能量损失率的影响很小. 当磁场强度 $B > 10^{13} \text{ G}$ 时, 中微子能量损失率由于强磁场影响而大大下降.

根据图 1, 在温度 $T = 5 \times 10^9, 7 \times 10^9 \text{ K}$ 强磁场使核素 ^{56}Co , ^{56}Ni , ^{56}Mn 和 ^{56}Cr 的中微子能量损失率减少接近 5 个数量级, 而在相对低温如 $T = 1 \times 10^9, 3 \times 10^9 \text{ K}$ 中微子能量减少量超过 5 个数量级. 图 2 表明, 在温度 $T = 5 \times 10^9, 7 \times 10^9, 9 \times 10^9 \text{ K}$ 强磁场使核素 ^{56}Co , ^{56}Ni , ^{56}Mn 和 ^{56}Cr 的中微子能量损失率减少量小于 5 个数量级, 而在低温情况下磁场对核素中微子能量损失减少量影响更大.

比较图 1, 图 2 中的结果可以看出, 由于磁场对低温下的电子气体的影响大, 势必大大影响电子俘获过程的中微子能量损失率. 在温度较高时, 电子俘获过程中微子能量损失率随磁场强度的增加, 下降程度变缓. 由于温度越高, 电子平均能量越大, 磁场对电子作用相对减弱, 一定磁场强度下高能范围 G-T 跃迁电子俘获过程占主要贡献. 由于强磁场能够改变电子气体的分布, 使电子成柱状并大部分占有低朗道能级, 使电子气体的量子效应明显, 因此在下降过程曲线出现了一些起伏.

从图 1 和图 2 可知, 在密度相同、温度不同的电子气体环境, 强磁场对电子俘获过程中微子能量损失率的影响不同. 在相对低温度低密度 (如 $\rho/\mu_e = 10^6$

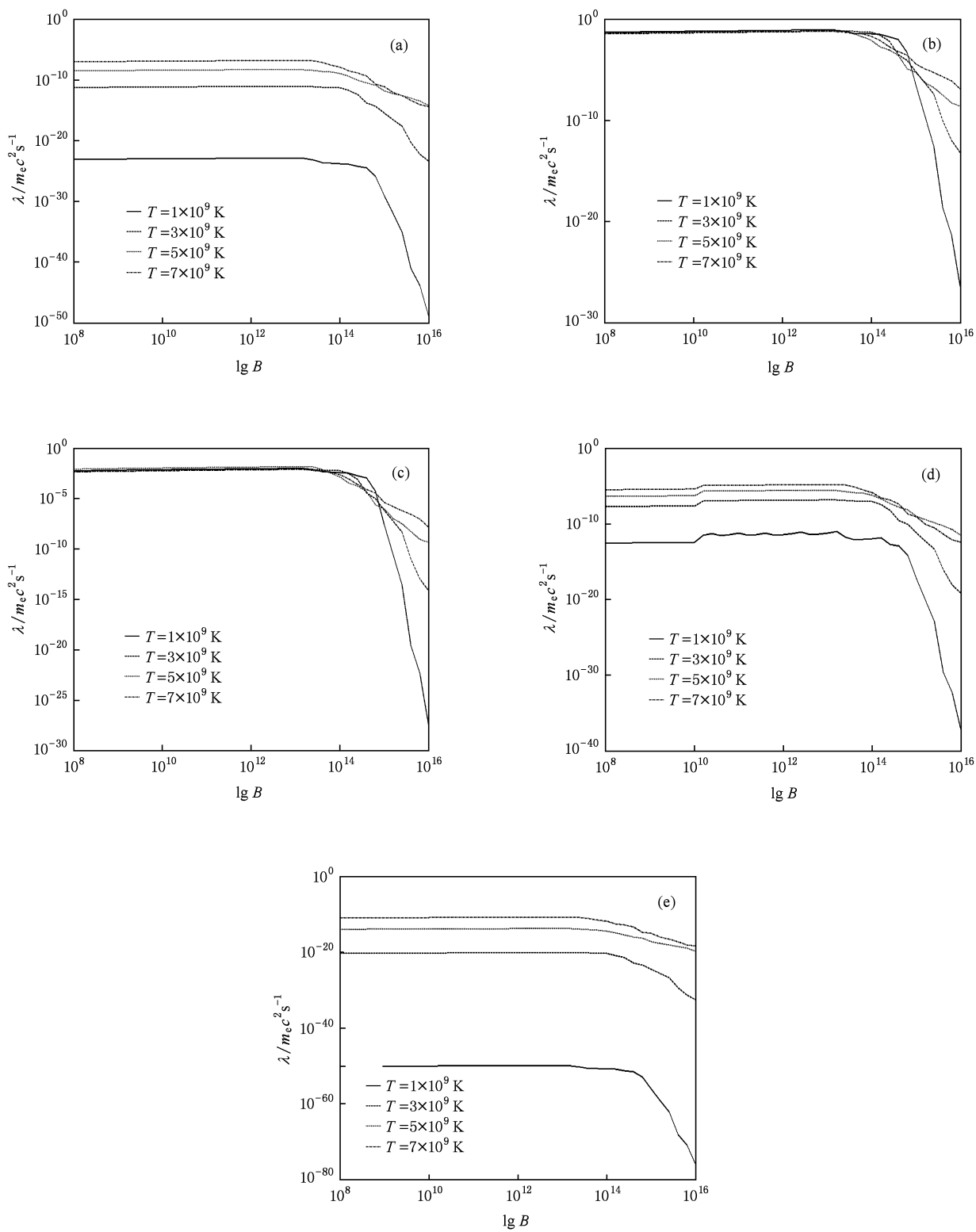


图 1 $\rho/\mu_e = 10^6 \text{ mol/cm}^3$ 时各核素中微子能量损失率随磁场的变化关系 (a) ^{56}Fe , (b) ^{56}Co , (c) ^{56}Ni , (d) ^{56}Mn , (e) ^{56}Cr

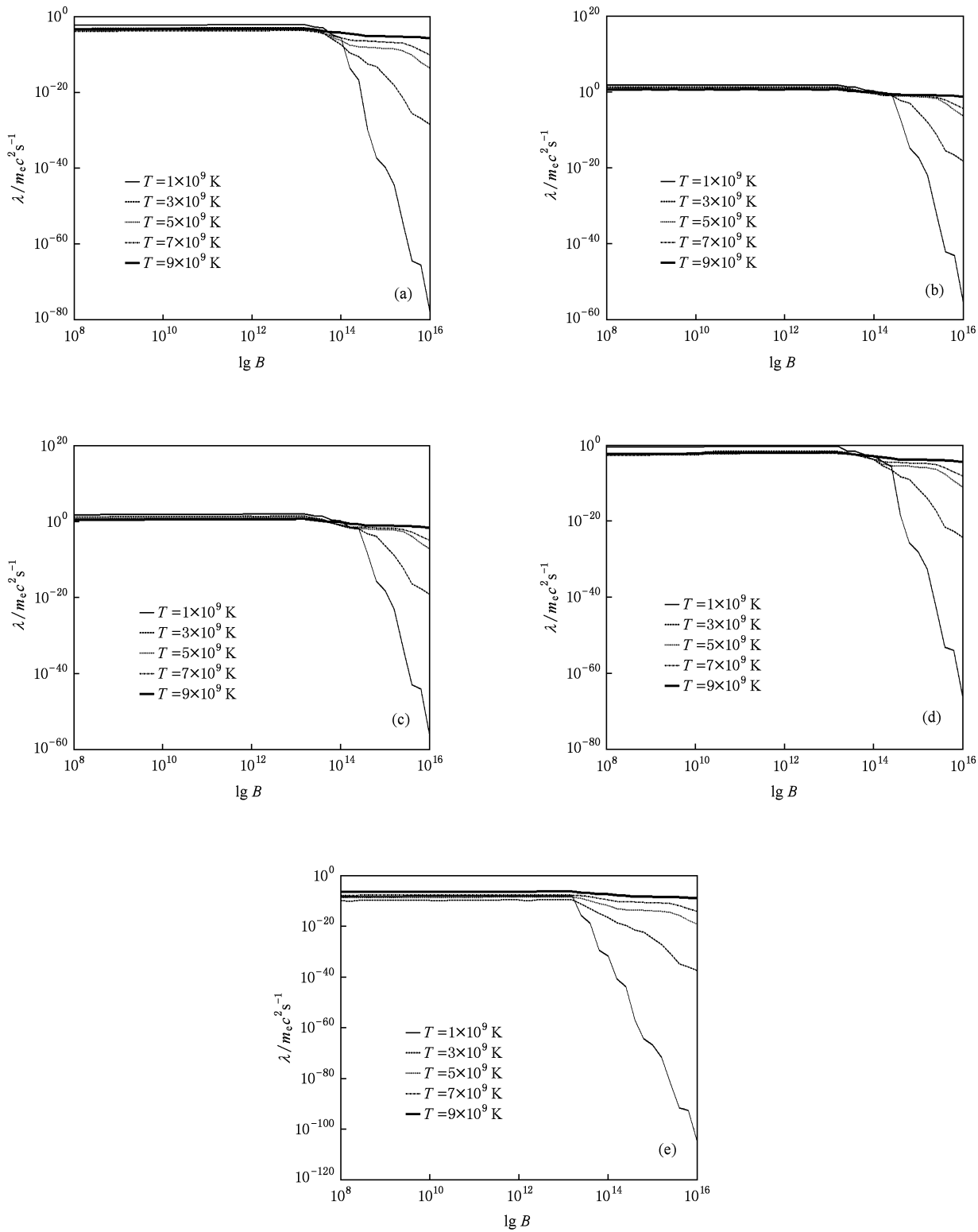


图2 $\rho/\mu_e = 5.86 \times 10^9 \text{ mol/cm}^3$ 时各核素中微子能量损失率随磁场的变化关系
(a) ^{56}Fe , (b) ^{56}Co , (c) ^{56}Ni , (d) ^{56}Mn , (e) ^{56}Cr

mol/cm^3 , $T = 1 \times 10^9, 3 \times 10^9 \text{ K}$ 和 $B < 10^{13} \text{ G}$ 的条件下, 温度的变化对核素 ^{56}Co , ^{56}Ni 电子俘获过程中微子能量损失率几乎没有影响, 而相对核素 ^{56}Fe , ^{56}Mn 和 ^{56}Cr 温度的变化强磁场对电子俘获过程中微子能量损失相差很大. 这是由于此时电子气体处于强简并状态, 不同核素的发生电子俘获反应的有效 Q 值不同, 其中核素 ^{56}Co , ^{56}Ni 低能跃迁的有效 Q 值大于 0 为放热反应, 而核素 ^{56}Fe , ^{56}Mn 和 ^{56}Cr 低能跃迁的有效 Q 值小于 0 为吸热反应. 但是磁场强度的增强将导致对低密度低温下电子气体的电子俘获率过程中微子能量损失影响变大. 因为低密度时电子的 Fermi 能较低, 低温时电子的平均能量较小, 电子处于弱简并状态, 电子气体的状态处于弱势, 磁场大大改变电子气体的有效分布, 从而影响电子气体的核俘获反应.

另一方面, 从图 2 可知, 当 $B < 10^{13} \text{ G}$ 时磁场强度对不同温度下相对高密度的各核素的电子俘获过程中微子能量损失率的影响相差不大. 因为密度越高, 电子气体的 Fermi 能越大, 处于高朗道能级上的电子数目相应增多, 磁场的作用相对减小, 对中微子能量损失率的影响也弱.

4. 结 论

研究了中子星表面强磁场对核素 ^{56}Fe , ^{56}Co , ^{56}Ni , ^{56}Mn 和 ^{56}Cr 电子俘获过程中微子能量损失的影响. 结果表明: 在磁场强度 $B < 10^{13} \text{ G}$ 的范围内, 磁场对电子俘获过程中微子能量损失率几乎没有影响. 在磁场强度 $B > 10^{13} \text{ G}$ 范围的超磁星, 中微子能量损失率受磁场影响很大, 一些核素的电子俘获过程中微子能量损失率大大降低, 甚至超过 5 个数量级.

众所周知, 冷却率是强烈影响恒星演化的参量之一. 在恒星的生命过程, 能量的损失一直扮演着重要的角色, 它们一般以电磁辐射、引力波和不稳定的中微子流的形式出现. 一些研究表明在恒星演化晚期尤其是白矮星、中子星和超新星, 中微子能量损失是主要的冷却机理, 强磁场对恒星晚期能量损失如何影响? 强磁场对高温高密度的电子气体的结构和化学势如何影响? 强磁场对恒星晚期演化过程的状态方程和中子星的超强磁场环境的结构和核物理模型如何影响? 这些富有挑战性的课题将有待于我们下一步去探讨和研究.

[1] Fuller G M, Fowler W A, Newan M J 1980 *Astrophysical Journal Supplement* **42** 447

[2] Liu J J, Luo Z Q, Liu H L, Lai X J 2007 *Inter. J. Modern Phys. A* **22** 3305

[3] Liu J J, Luo Z Q 2007 *Chin. Phys. Lett.* **7** 1861

[4] Liu J J, Luo Z Q 2007 *Chin. Phys.* **16** 3624

[5] Liu J J, Luo Z Q 2008 *Chin. Phys. C* **32** 108

[6] Liu J J, Luo Z Q 2008 *Chin. Phys. C* **32** 617

[7] Lai D R 2001 *Rev. Mod. Phys.* **73** 629

[8] Peng Q H, Tong H 2007 *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **1** 159

[9] Pruet J J, Fuller G M 2003 *Astrophysical Journal Supplement* **149** 189

Effect of superstrong magnetic field on neutrino energy loss of the nuclide ^{56}Fe , ^{56}Co , ^{56}Ni , ^{56}Mn and ^{56}Cr by electron capture in the crust of neutron stars^{*}

Liu Jing-Jing[†]

(*College of Science and Technology, Qiongzhou University, Sanya 572022, China*)

(Received 15 September 2009; revised manuscript received 27 October 2009)

Abstract

We investigated the neutrino energy loss by electron capture of the nuclide ^{56}Fe , ^{56}Co , ^{56}Ni , ^{56}Mn and ^{56}Cr in superstrong magnetic field at the crusts of neutron stars. The results showed that the superstrong magnetic field has only a slight effect on the neutrino energy loss rates when $B < 10^{13}$ G on surfaces of most neutron stars. Whereas for some magnetars, the range of the magnetic field is 10^{13} — 10^{15} G, the neutrino energy loss rates would be lowered greatly and may be even decreased more than five orders of magnitude by superstrong magnetic field.

Keywords: strong magnetic field, neutrino energy loss, neutron star

PACC: 9635P, 1460G, 9760J

^{*} Project supported by the Natural Science Foundation of Hainan Province, China (Grant No. 109004), the Scientific Research Fund of Higher Education of the Education Department of Hainan Province, China (Grant No. Hjkj2010-42), and the Special Fund of Higher Education of Sanya, China (Grant No. YD09047).

[†] E-mail: liujingjing68@126.com