

学校编码: 10384

分类号 _____ 密级 _____

学号: 19820130154229

UDC _____

厦 门 大 学

博 士 学 位 论 文

超强磁场对磁星外壳层热核反应的影响

The Influence of Superstrong Magnetic Fields on
Thermonuclear Reaction at the Outer Crust of Magnetar

刘晶晶

指导教师姓名: 顾为民 教授

专业名称: 理论物理

论文提交日期: 2016年4月

论文答辩时间: 2016年5月

学位授予日期: 2016年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2016年4月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文,并向主管部门或其指定机构送交学位论文(包括纸质版和电子版),允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索,将学位论文的标题和摘要汇编出版,采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于:

() 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文, 于
年 月 日解密, 解密后适用上述授权。

() 2. 不保密, 适用上述授权。

(请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文, 未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的, 默认为公开学位论文, 均适用上述授权。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

摘 要

核天体物理领域中超强磁场的相关研究表明：磁星外壳层热核反应都与磁场密切相关。磁星的超强磁场不仅影响热核反应率和最终元素丰度，而且还影响磁星的中微子能量损失率，最终影响其演化时标、演化进程和冷却机制。由于超强磁场的重要性，本文主要研究了磁星表面壳层超强磁场对一些典型核素的热核反应的影响。

首先，基于相对论性的超强磁场理论(Fushiki et al. 1989)，利用 Thomas-Fermi-Dirac 近似方法，我们研究分析了超强磁场环境电荷屏蔽难题，讨论了电荷屏蔽对热核反应 $^{23}\text{Mg}(\text{p}, \text{gamma})^{24}\text{Al}$ 的影响，我们的结果表明，磁星表面超强磁场电荷屏蔽对热核反应率影响明显，热核反应率可能增大二个数量级。

其次，基于相对论性的超强磁场理论(Peng et al. 2012; Gao et al. 2012, 2013)，利用壳模型蒙特卡洛方法与随机相位近似理论，我们研究了磁星壳层超强磁场对典型核素 ^{55}Co 与 ^{56}Ni 的电子俘获率的影响。我们发现超强磁场使电子俘获率大大增加，可能增加达五个数量级。

最后，基于相对论性平均场有效相互作用理论(Lalazissis et al. 1997, 2005)与赖东模型(Lai & Shapiro 1991; Lai 2001, 2015)，我们讨论研究了磁星表面壳层超强磁场对电子费米能和原子核结合能和单粒子能级结构的影响。利用壳模型蒙特卡洛方法与随机相位近似理论，我们详细分析了超强磁场环境典型的铁族核素的电子俘获中微子能量损失率。我们发现当 $B_{12} < 100$ 在相对低温(如 $T_9 = 0.233$)，超强磁场对中微子能量损失率影响很小，然而，在相对高温(如 $T_9 = 15.53$)，中微子能量损失率增加超过了四个数量级。当 $B_{12} > 100$ ，中微子能量损失率降低超过三个数量级(如 $T_9 = 15.53$ 对核素 $^{52-61}\text{Fe}$, $^{55-60}\text{Co}$, $^{56-63}\text{Ni}$)。另一方面，对于某个给定的磁场强度与温度，当 $\rho_7 \leq 10^3$ 中微子能量损失率增加超过四个数量级，然而，随着密度的递增(即当 $\rho_7 > 10^3$)，密度几乎对中微子能量损失率没有影响。(注： B_{12} , T_9 , ρ_7 分别是以 10^{12}G , 10^9K , 10^7g cm^{-3} 为单位)

关键词： 超强磁场；磁星；热核反应；电子俘获；中微子能量损失。

Abstract

The related researches on superstrong magnetic fields (SMFs) in nuclear astrophysics show that the thermonuclear reaction (e.g., weak interaction and the neutrino energy loss) is closely related to the magnetic field in the crust of magnetars. The SMF not only affect the nuclear reaction rate and the final element abundance, but also affect the neutrino energy loss rates of magnetars and finally influence the evolution time; evolution process and cooling mechanism. Due to the importance of SMFs, this paper mainly present the study of the effect of SMFs on some typical nuclear reaction in magnetars surface.

Firstly, based on the theory of relativistic SMFs (Fushiki et al. 1989), by using the method of the Thomas-Fermi-Dirac approximations, we investigate the problem of strong electron screening (SES) in SMFs, and the influence of SES on the nuclear reaction of ^{23}Mg (p, gamma) ^{24}Al . Our calculations show that the nuclear reaction will be markedly effected by the SES in SMFs in the surface of magnetars. Our calculated screening rates can increase by two orders of magnitude due to SES in SMFs.

Secondly, based on the theory of relativistic SMFs (Peng et al. 2012; Gao et al. 2012, 2013) and Random Phase Approximation (RPA), by using the Shell-Model Monte Carlo (SMMC) method, the influence of SMFs on electron capture (EC) of nuclides ^{55}Co and ^{56}Ni is investigated in the surface of magnetars. We find that the EC rates can be increased greatly by more than five orders of magnitude by SMFs.

Finally, based on the relativistic mean-field effective interactions theory (Lalazissis et al. 1997, 2005), and Lai dong model (Lai & Shapiro 1991; Lai. 2001, 2015), we discuss the influences of SMFs on electron Fermi energy, nuclear binding energy, and single-particle level structure in magnetars surface. By using the method of SMMC, and RPA theory, we detailed analyze the neutrino energy loss rates (NELRs) by EC for typical iron group nuclei in SMFs. When $B_{12} < 100$, we find that the SMFs has a slight influence on the NELR for most nuclides at relativistic low temperature (e.g., $T_9 = 0.233$), nevertheless, the NELRs increases by more than four orders of magnitude at relativistic high temperature (e.g.,

$T_9 = 15.53$). When $B_{12} > 100$, the NELRs decreases by more than three orders of magnitude (e.g., at $T_9 = 15.53$ for $^{52-61}\text{Fe}$, $^{55-60}\text{Co}$, and $^{56-63}\text{Ni}$). On the other hand, for a certain value of magnetic field and temperature, the NELRs increases by more than four orders of magnitude when $\rho_7 \leq 10^3$. However, the density has almost no influence on NELRs as the density increases (i.e. when $\rho_7 > 10^3$). (note B_{12} , T_9 , and ρ_7 are in unit of 10^{12}G , 10^9K , and 10^7g cm^{-3} , respectively)

Keywords: superstrong magnetic fields; magnetar; thermonuclear reaction; electron capture; neutrino energy loss rates.

目录

第一章 绪论	1
1.1 研究的背景与意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.3 研究的主要内容	4
1.4 论文结构.....	5
参考文献.....	6
第二章 中子星与磁星外壳层物理与状态方程	11
2.1 研究的背景与意义	11
2.2 中子星与磁星壳层与内核的物理结构	14
2.3 中子星与磁星壳层超强磁场环境下物质状态方程	18
2.4 本章小结.....	26
参考文献.....	27
第三章 磁星外壳层 $^{23}\text{Mg}(p, \gamma)^{24}\text{Al}$ 共振热核反应	33
3.1 研究的背景与意义	33
3.2 超强磁场电荷屏蔽的理论模型	35
3.3 热核反应的理论计算与分析	38
3.4 数值结果与讨论	40
3.5 本章小结.....	44
参考文献.....	44
第四章 超强磁场对磁星外壳层电子俘获热核反应的影响	48
4.1 研究的背景与意义	48
4.2 超强磁场电子俘获热核反应的理论模型与分析研究	50
4.3 数值结果与讨论	56

4.4 本章小结.....	59
参考文献.....	60
第五章 超强磁场对磁星外壳层电子俘获中微子能量损失的影响	63
5.1 研究的背景与意义	63
5.2 磁星外壳层核能级结构与电子气体状态方程	66
5.3 电子俘获过程中微子能量损失理论模型与分析	70
5.4 数值结果与讨论	75
5.5 本章小结.....	91
参考文献.....	98
第六章 总结与展望.....	103
附录 1. 博士期间发表的论文	105
致 谢.....	107

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 The research background and significance	1
1.2 The research situation at home and abroad	2
1.3 The main content of the research	4
1.4 Thesis structure.....	5
References.....	6
Chapter 2 Physical structure and equation of state at the outer crust of neutron star and magnetar	11
2.1 The research background and significance	11
2.2 The physical structure of the outer crust of neutron star and magnetar	14
2.3 The equation of state of electron gas in superstrong magnetic fields.....	18
2.4 Summary.....	26
References.....	27
Chapter 3 Resonance thermonuclear reaction $^{23}\text{Mg}(p, \gamma)^{24}\text{Al}$ at the outer crust of magnetar.....	33
3.1 The research background and significance	33
3.2 Theoretical model of electron screening in superstrong magnetic fields	35
3.3 Theoretical analysis and calculation of thermonuclear reaction.....	38
3.4 Numerical results and discussions	39
3.5 Summary.....	44
References.....	44
Chapter 4 Influences of superstrong magnetic fields on weak interaction at the outer crust of magnetar.....	48
4.1 The research background and significance	48

4.2	Theoretical model of electron capture in superstrong magnetic fields	50
4.3	Numerical results and discussions	56
4.4	Summary	59
	References	60
Chapter 5 Influences of superstrong magnetic fields on neutrino energy loss at the outer crust of magnetar..... 63		
5.1	The research background and significance	63
5.2	Nuclear energy level structure and equation of electron states in magnetar	66
5.3	Theoretical model and analysis of neutrino energy loss by electron capture	70
5.4	Numerical results and discussions	75
5.5	Summary	91
	References	98
Chapter 6 Conclusions and prospects..... 103		
Appendix I		105
Appendix II		106
Acknowledgments		107

厦门大学博硕士学位论文摘要库

第一章 绪论

1.1 研究的背景与意义

中子星(中子星)超强磁场的相关研究在当今核天体物理研究领域是一个非常重要而活跃的方面。近来的观测发现,软伽玛射线重复暴(SGRs)和反常 X 射线脉冲星 (AXPs) 均可能起源于表面大于 10^{14}G 量级的超强磁场的中子星, 这类中子星(中子星)在物理上被称之为“磁星”。对磁星的观测与理论研究已成为许多天体物理学家和理论物理学家关注的焦点。研究表明中子星表面的最大磁场强度大约为 $10^{12}-10^{15}\text{G}$ 的量级[1-4]。磁星表面磁场远高于量子电动力学(QED)的极限磁场, 磁星内的热核反应、持续高 X 射线暴和中微子暴都与磁场密切相关。超强磁场将影响核反应率, 进而影响磁星壳层的热核产能率和最终元素丰度; 影响磁星的中微子能量损失率, 最终影响其演化时标、演化进程和冷却机制。

持续 X 射线光度($L_x \sim 10^{34-35} \text{ erg s}^{-1}$)大大超过其自转能损率, 且均未发现双星特征。这一热点课题在核天体物理与高能天体物理领域被广泛研究[5, 6, 7]。关于这种现象的本质, 一种看法认为它们是具有数量级 $10^{14}-10^{16}\text{G}$ 的偶极磁场的中子星, X 射线的辐射来源于磁能的释放[8]; 另一种看法是 X 射线辐射的能量源于吸积(吸积释放能量产生的光子一般在 X 射线或 γ 射线波段)[7, 9]。我们认为对中子星而言, X 射线爆发的机制可能是其表面上的热核爆炸。如白矮星, 引力作用是引发热核反应的重要因素, 中子星的引力强得多, 它能使其表面物质被加热到高得多的温度。在 X 射线源的“宁静态”, 被吸积的氢逐渐在中子星表面堆积成高温高密的壳层, 然后氢会迅速地转变成氦, 但不是以爆发的方式, 于是氦覆盖了中子星表面, 当氦层厚度达到 1 米时, 发生爆发式聚变, 成为 X 射线暴。另一方面, 超强磁场加速了吸积物质的热核反应, 提高了核能产生率, 从而改变了 X 射线的能谱特征。观测表明, 大多数中子星的吸积物质丰度基本上和太阳丰度类似, 主要是 H 元素(也有少量的 He 元素)。它们在较低温度时通过静力学燃烧转化为 He, 在较高温度时通过快质子俘获(即 rp)过程将其它元素转化为更重元素。中子星壳层的 rp 过程 H 燃烧是 X 射线暴能量的主要来源[10, 11]。我们对超强磁场中的热

核反应的初步研究表明，磁场可以增加热核反应率高达几个量级。

外壳层中的热核反应对中子星的研究起着非常重要的作用：一方面，热核反应率的增加势必会提高中子星外壳层的热核产能率，进而增加了所释放的 X 射线光度；另一方面，核反应率的改变将会引起核反应网络中元素反应路径的改变，从而改变了中子星外壳层最终的元素丰度。中子星的外壳层元素丰度对其内部物理的研究非常重要，比如元素丰度的改变将会影响中子星壳层的电阻系数；在较低温度时，还会影响中子星磁场的演化和壳层的热传导性。热传导性将影响中子星的冷却，从而影响对中子星内部物理的研究，例如内部超流、直接或对流 Urca 过程等。对中子星冷却的研究可以和观测相比较，测量中子星的年龄，解释其大气的发射光谱。同时，它们对以后测量中子星的转动惯量和中子星双星合并时产生的引力波的测量也有很大帮助。

中微子暴与天体环境的弱相互作用密不可分。弱相互作用，尤其是电子俘获、Beta 衰变、Urca 过程的中微子能量的损失在恒星晚期的演化、超新星爆发和诸多核合成过程中处于举足轻重的地位。中子星壳层的超强磁场无疑要影响弱相互作用及其中微子的过程，改变原有物质的物态方程，直接影响中子星的热演化、内部结构和整体性质。特别是在双中子星系统中，由于引力波的辐射导致轨道角动量的损失，双中子星最终将合并成为大质量中子星或黑洞，更重要的是弱相互作用对双星合并事件中核合成的最终产物起决定性作用。中微子很高的生成率在中子星的冷却过程中起着非常重要的作用。中微子携带能量很快地逃离星体，加快了磁星演化的进程和缩短了演化时标，直接影响到中子星的冷却速率。

1.2 国内外研究现状

磁星表面磁场高达 10^{15}G [2]，远高于量子电动力学 (QED) 的极强磁场，强磁场使得壳层元素的电子云被压缩为垂直磁场方向和平行磁场方向，磁星表面物质的物理化学性质因超强磁场将发生显著变化。强磁场对 H 和 He 元素核反应的影响被广泛研究，各种研究主要集中于分子和分子链的形成以及它们的熔融反应。1989 年，Fushiki et al.(1989)[12] 就研究过磁场对屏蔽势的影响非常显著。1996 年，Heyl & Hernquist

(1996)[13]用量子力学方法研究了强磁场对 H 核和 D 核熔融反应的影响,表明强磁场 ($B > 10^{12} \text{ G}$)能够增加反应率几个量级。同年,罗志全和彭秋和教授[14, 15]用另一种方法讨论了强磁场对 neutron star 外壳层热核反应率的影响,研究了强磁场对非零温 neutron star 外壳层元素电子俘获反应的影响。结果表明,足够强的磁场使电子俘获率显著降低。后来 Liolios (2000, 2001)[16, 17]在 Heyl 和 Hernquist 基础上讨论了强磁场对 H 核和 D 核熔融反应率的影响,表明强磁场能够增加 pp 反应截面一个量级、增加 dd 反应截面两个量级。2003 年, Liolios (2003)[1]研究了超强磁场对较重元素 α 衰变率的影响,表明超强磁场可以使得衰变率增加几个量级。最近,我们讨论了超强磁场对 neutron star 外壳层元素热核反应率和核产能率的影响[18, 19],初步研究表明磁场可以增强热核反应率和相应的核产能率好几倍甚至一个量级以上。这将导致 neutron star 外壳层温度的快速上升从而加速热核反应进程,这种正反馈机制有可能解决磁星的持续高 X 射线光度的理论困难。纵观以上学者的研究,他们都没有详细讨论超强磁场的相对论环境的电子能级和超强磁场相对论环境电荷屏蔽效应对核反应率,热核产能率的影响。

另一方面,中微子暴是来自超新星爆发的第一信号,在超新星爆发过程中伴随着大量的中微子的泄漏和逃逸,能量将大量损失。而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制。因此,研究有关中微子和中微子能量损失以及密切相关的弱作用过程(包括电子俘获、Beta 衰变和 Urca 过程)在天体物理和粒子物理领域成为热点和前沿课题。八十年代初, Fuller et al. (FFN) [20]采用核壳层模型讨论了 Gamow-Teller (GT)跃迁的共振能量和共振强度,并详细计算恒星内部 226 种核素的电子俘获率和 β 衰变率。九十年代后, Aufderheide et al. (AFWH) [21]扩展了 FFN 的工作到重核领域,考虑淬灭效应的影响讨论了对电子丰度影响较大的核素的电子俘获和 Beta 衰变率。Kar et al. [22]用平均强度函数讨论了前身星阶段 $A > 60$ 核素的电子俘获和 Beta 衰变率。Langanke et al. [23]对大量核素弱相互作用率进行了大规模的壳层计算。基于 Weinberg-salam 理论, Itoh 等人[24]对中微子能量损失进行了大量的数据计算和讨论,近年来, Nabi et al. [25]也对中微子能量损失进行了讨论,然而他们都忽

略了超强磁场对中微子能量损失的影响。

脉冲星环境下的超强磁场对弱相互作用及中微子能量损失的影响很早就被关注, 70—80 年代典型的代表有 Canuto, V.; Chiuderi, C.; Chou, C. K 等[26, 27],他们详细讨论了强磁场下同步加速器中微子; 电子对湮没中微子; 等离子体中微子; 光激中微子发射过程和来自 Beta 衰变中微子发射过程, 九十年代, 戴子高、陆焱、彭秋和[28]分析了强磁场环境吸积中子星壳层电子俘获过程, 近年来, Duan & Qian [29]也详细讨论了强磁场超新星爆发环境的中微子过程; 刘学文和郑小平等[30] 详细讨论了强磁场夸克物质的 Urca 过程中微子能量损失。我们在这一相关领域做了一些工作并取得了一些成果 [31-36]。但磁星超强磁场相对论电子能谱和电荷屏蔽效应以及 GT 跃迁的共振能量和共振强度对核反应率与中微子能量损失的影响, 依然是一个国际上至今尚待解决的难题。

1.3 研究的主要内容

根据 Fushiki et al. (1989, 1991, 1992) [37-39]中子星“超强磁场理论”探索超强磁场相对论电子能谱, 并结合最新的核反应相关数据, 利用“固体物理方法”, 详细分析超强磁场下电荷屏蔽效应, 计算电荷屏蔽势。分析超强磁场磁星环境电荷屏蔽屏蔽效应对典型核反应 $^{23}\text{Mg}(p, \gamma)^{24}\text{Al}$ 的热核反应的影响。

基于核的壳模型, 根据彭秋和教授和高志福等磁星的相对论性“超强磁场理论” [2, 40-42] 探索超强磁场相对论电子能谱, 根据 Random Phase Approximation (RPA)理论, 利用 Shell-Model Monte Carlo (SMMC)方法[43, 44], 从电子俘获反应截面的角度, 对磁星超强磁场环境内部典型核素的弱相互作用过程和电子丰度变化率进行讨论。同时, 采用 Aufderheide 等人(AFWH) [21] 的“边缘假设”思想, 分析弱相互作用的核反应率与中微子能量损失率。同时根据上述 2 种思想对比分析超强磁场对磁星壳层弱相互作用过程的影响。我们主要分析了两个典型核素的电子俘获过程。分析了这两个典型核素的电子俘获率受超强磁场的影响, 同时我们也详细地讨论了电子丰度随时间的变化率。

在讨论分析原子核内 GT 跃迁的共振能量和共振强度分布难题时, 基于核的壳模型, 根据 Random Phase Approximation (RPA)理论, 利用 Shell-Model Monte Carlo (SMMC)

Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.