

学校编码：10384

分类号_____ 密级_____

学号：20051403022

UDC_____

厦 门 大 学

博 士 学 位 论 文

射线暴的中心能源机制：黑洞的中微子主导
吸积流模型

Central Engine of Gamma-Ray Bursts: Models of
Neutrino-Dominated Accretion Flows around Black Holes

刘 彤

指导教师姓名：卢炬甫教授 顾为民副教授

专 业 名 称：理论物理

论文提交日期：2008年 4月

论文答辩时间：2008年 5月

学位授予日期：2008年 月

答辩委员会主席：_____

评 阅 人：_____

2008年 4月

厦门大学学位论文原创性声明

兹呈交的学位论文，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的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文产生的权利和责任。

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人完全了解厦门大学有关保留、使用学位论文的规定。厦门大学有权保留并向国家主管部门或其指定机构送交论文的纸质版和电子版,有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆被查阅,有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索,有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

本学位论文属于

1. 保密 (), 在 年解密后适用本授权书。
2. 不保密 ()

(请在以上相应括号内打“ ”)

作者签名： 日期： 年 月 日

导师签名： 日期： 年 月 日

摘要

射线暴 (Gamma - Ray Burst, 本文统一简记为 GRB) 是一种来自宇宙空间的 射线在短时间内突然增强的现象, 是目前观测到的宇宙中最剧烈的爆发现象。在过去的十年间, GRBs 的观测和理论研究取得了很大的进展。用来解释 GRBs 及其余辉的火球 - 激波模型已经被普遍地接受, 但是相对论火球的中心能源机制仍不清楚, 相关的模型大多借助于黑洞的超吸积过程。

本文综述了 GRBs 到目前为止所取得的观测和理论成果, 并介绍了本人在攻读博士学位期间对超吸积模型之一——中微子主导吸积流 (neutrino-dominated accretion flow, 本文统一简记为 NDAF) 模型的研究成果。本文包括三部分: 综述部分 (第一章), 工作部分 (第二章到第四章) 和研究展望部分 (第五章)。

第一章介绍了黑洞的分类和形成; 对黑洞吸积理论的发展和现状做了简要论述, 并介绍了四种重要的吸积模型, 即 SSD, SLE 盘, Slim 盘和 ADAF。阐述了关于 GRBs 的观测和理论研究, 以及多种可能提供 GRBs 中心能源的模型。

在第二章中, 明确指出在黑洞吸积中, 应用牛顿势是不恰当的, 必须考虑广义相对论效应; 中微子光厚区域的中微子辐射是重要的, 不可忽略; 在中微子光厚区域, 径移不一定比中微子冷却更重要, 因为径移因子与几何厚度的相关性远高于光学厚度。

在第三章中, 计算了基于电子丰度、自由粒子丰度和电子简并的中微子光深, 并建立了适用于不同光深的电子丰度桥梁公式, 给出了自由质子丰度和自由中子丰度的精确定义。考虑电子简并的影响, 使得中微子的吸收光深增大, 加剧中子化过程, 电子丰度在内区降到低于 0.1。虽然计算得到的中微子湮灭光度低于简化电子简并和电子丰度取 0.5 的情况, 但是仍能满足 GRBs 所需, 中微子主要从内区发射出来, 在空间湮灭的分布是各向异性的。

在第四章中, 首先指出对于黑洞吸积盘, 如果在垂向平衡中精确地考虑引力作用, 那么适用于几何薄盘的关系 $c_s/\Omega_K H = constant$ (其中 c_s 指声速, Ω_K 表示开普勒角速度, H 是吸积盘的半厚度) 对于厚盘将不再成立。然后, 通过精确地计算垂向平衡中的引力, 建立了黑洞周围三类光学厚盘, 即 SSDs, Slim 盘和 NDAFs 的统一描述, 发现对于每个半径, NDAFs 存在最高和最低的可能吸积率, 这一结论可以为解释观测上 GRBs 的 X 射线耀发现象提供一种思路。

在第五章中，介绍了一些将要进行的研究设想。首先，我计划研究致密双星系统，通过内外拉格朗日点的物质流来分别解释 GRBs 和 X 射线耀发。另外，我计划研究比较困难且几乎尚无人触及的 NDAFs 的中微子转移问题。

关键词：吸积，吸积盘；黑洞物理； 射线暴

厦门大学博硕士论文摘要库

Abstract

The gamma-ray burst (GRB) is the most drastic burst in the universe known so far. In the past decade, lots of remarkable progresses have been made in observations and theoretical researches of GRBs. The fireball-shock model has been widely accepted to interpret the gamma-ray and afterglow radiation of GRBs, though the central engine of the relativistic fireball is not yet well understood, but most popular models for the energy source of GRBs are in common invoking a hyperaccreting black hole.

In this thesis, the observations and theoretical works of GRBs are reviewed, and my own studies of a hyperaccretion model, namely the neutrino-dominated accretion flow (NDAF) model are introduced. The thesis consists of three parts. The first chapter is the review, the second to the fourth chapter are my works, and the last chapter is the prospects.

The first chapter introduces the sorts and formation of black holes. It briefly reviews the current situation and progress of the theory of black hole accretion disks, including four known accretion models, namely SSDs, SLE disks, Slim disks and ADAFs. It also reviews the observations and theoretical researches of GRBs, and several models to explain the central engine of GRBs.

In the second chapter, I refine the fixed concept in the literature that the usage of the Newtonian potential in studies of black hole accretion is invalid and the general relativistic effect must be considered. I also show that the contribution to the neutrino radiation from the optically thick region of an NDAF is important and should not be ignored. In the optically thick region, advection does not necessarily dominate over neutrino cooling because the advection factor is relevant to the geometrical depth rather than the optical depth of the flow.

In the third chapter, it has been calculated that the neutrino optical depth which is dependent on the electron fraction, the free nucleon fraction, and the electron degeneracy. I construct a bridging formula for the electron fraction that works for various neutrino optical depths, and give exact definitions for the free proton fraction and free neutron fraction. The electron degeneracy has important effects, in the sense that it increases the absorption optical depth for neutrino and, along

with the neutronization processes favored by high temperature, causes the electron fraction to drop below 0.1 in the inner region of the disk. The resulting neutrino annihilation luminosity is considerably reduced in comparison with that obtained in previous works in which the electron degeneracy was not considered and the electron fraction was simply taken to be 0.5, but it is still likely to be adequate for GRBs, and it is ejected mainly from the inner region of the disk with an anisotropic distribution.

In the fourth chapter, I show that when the gravitational force is correctly calculated in dealing with the vertical hydrostatic equilibrium of black hole accretion disks, the relationship that is valid for geometrically thin disks, i.e., $c_s/\Omega_K H = \text{constant}$, where c_s is the sound speed, Ω_K is the Keplerian angular velocity, and H is the half-thickness of the disk, does not hold for NDAFs. By adopting the correct vertical gravitational force in studies of thermal equilibrium solutions, I present a unified description of all the three known classes of optically thick accretion disks around black holes, namely SSDs, Slim disks and NDAFs. It is found that NDAFs have both a maximal and a minimal possible mass accretion rate at their each radius. This may be suggestive of an interpretation for the origin of X-ray flares observed in GRBs.

The fifth chapter deals with some conceiving of the further research. First, I plan to study compact binary systems and expect to explain GRBs and their X-ray flares by inflows through the inner Lagrangian point and outflows through the outer Lagrangian point, respectively. Second, I plan to study the neutrino transfer of NDAFs, which is a difficult problem and has rarely been touched.

Keywords: accretion, accretion disk; black hole physics; gamma rays: bursts

第一章 绪论	1
一、黑洞的分类与形成	1
1. 黑洞的分类.....	1
2. 黑洞的形成.....	2
二、吸积理论	4
1. 吸积的概念.....	4
2. Eddington 光度.....	6
3. Bondi 吸积.....	6
4. 四种重要的吸积盘模型及统一描述.....	7
三、GRBs 观测事实	13
1. GRBs 的空间分布.....	13
2. GRBs 的分类.....	14
3. 光变曲线.....	15
4. 能谱.....	15
5. 余辉.....	16
6. X 射线耀发.....	17
四、火球 - 激波模型	18
五、中心引擎的物理模型	19
1. 巨塌缩星 (Collapsars) 模型.....	20
2. 超新星 (Supernovae 或 Hypernovae) 模型.....	20
3. 中子星相变.....	21
4. 致密双星.....	21
六、黑洞超吸积盘的研究进展	22
1. 电磁作用.....	23
2. 中微子辐射.....	23

参考文献.....	27
第二章 广义相对论效应和中微子不透明度对 NDAFs 的影响.....	32
一、PW 势.....	32
二、基本方程和假设.....	33
1. 流体力学.....	34
2. 动力学.....	34
三、中微子光深.....	38
1. 散射光深.....	38
2. 吸收光深.....	39
四、中微子光度和湮灭光度.....	41
1. 中微子辐射.....	41
2. 中微子湮灭.....	41
五、主要结果.....	42
1. 相对论效应的影响.....	43
2. 中微子光深的影响.....	45
3. 径移能量.....	48
4. 中心黑洞质量、粘滞系数的影响.....	49
5. 小结.....	50
参考文献.....	51
第三章 NDAFs 的结构和光度.....	53
一、基本方程.....	53
1. 流体力学和热力学.....	53
2. 微观物理.....	53
二、主要结果.....	58
1. 密度、温度和电子简并参数.....	59
2. 粒子丰度.....	61
3. 压强.....	62
4. 中微子光深.....	63
5. 电子丰度.....	65

6. 能量.....	66
7. 中微子辐射和湮灭.....	67
8. 小结.....	70
参考文献.....	71
第四章 对 NDAFs 吸积率的限制.....	72
一、垂向引力.....	72
二、方程组.....	75
三、主要结果.....	76
1. SSDs、Slim 盘和 NDAFs 的统一描述.....	76
2. 小结.....	80
四、GRBs 中 X 射线耀发的起源.....	81
1. X 射线耀发模型.....	81
2. 我们的设想.....	83
参考文献.....	85
第五章 研究展望.....	87
一、致密双星并合.....	87
1. 双星和 Roche 瓣.....	87
2. 致密双星并合.....	90
二、NDAFs 中的中微子转移.....	91
1. 辐射转移.....	91
2. NDAFs 的中微子转移.....	94
参考文献.....	96
发表文章.....	97
发表文章被他人引用目录.....	98
致谢.....	99

Contents

Chapter One	Introduction	1
Section One	Sorts and Formation of Black Holes	1
Item One	Sorts of Black Holes.....	1
Item Two	Formation of Black Holes.....	2
Section Two	Accretion Theory	4
Item One	Concept of Accretion.....	4
Item Two	Eddington Luminosity.....	6
Item Three	Bondi Accretion.....	6
Item Four	Four Important Accretion Disk Models and Their United Description.....	7
Section Three	Observational Review	13
Item One	The Sky Distribution of GRBs.....	13
Item Two	The Sorts of GRBs.....	14
Item Three	Light Curve.....	15
Item Four	Spectra of GRBs.....	15
Item Five	Afterglow.....	16
Item Six	X-Ray Flares.....	17
Section Four	The Fireball Shock Model	18
Section Five	The Physical Models of the Central Engine of GRBs	19
Item One	Collapsars Model.....	20
Item Two	Supernovae Model.....	20
Item Three	Phase Transitions of Neutron Stars.....	21
Item Four	Compact Object Binaries.....	21
Section Six	Research Progress of NDAFs	22
Item One	Electromagnetic Effect.....	23
Item Two	Neutrino Radiation.....	23

References.....	27
Chapter Two Effects of General Relativity and Neutrino Opacity	
in NDAFs.....	32
Section One PW potential.....	32
Section Two Assumptions and Equations.....	33
Item One Hydrodynamics.....	34
Item Two Thermodynamics.....	34
Section Three Neutrino Optical Depth.....	38
Item One Scattering Optical Depth.....	38
Item Two Absorption Optical Depth.....	39
Section Four Neutrino Radiation and Annihilation Luminosity.....	41
Item One Neutrino Radiation.....	41
Item Two Neutrino Annihilation Luminosity.....	41
Section Five Results.....	42
Item One Relativistic Effect	43
Item Two Effect of Neutrino Optical Depth.....	45
Item Three Energy Advection.....	48
Item Four Effects of The Central Black Hole Mass and Viscosity	
Parameter.....	49
Item Five Summing-up.....	51
References.....	51
Chapter Three Structure and Luminosity of NDAFs.....	53
Section One Basic Equations.....	53
Item One Hydrodynamics and Thermodynamics.....	53
Item Two Microphysics.....	53
Section Two Results.....	58
Item One Density, Temperature and Electron Degeneracy	59
Item Two Particle Fraction.....	61
Item Three Pressure.....	62

Item Four	Neutrino Optical Depth.....	63
Item Five	Electron Fraction.....	65
Item Six	Energy.....	66
Item Seven	Neutrino Radiation and Annihilation Luminosity.....	67
Item Eight	Summing-up.....	70
References.....		71
Chapter Four Constraints on the Mass Accretion Rate of		
NDAFs.....		72
Section One	Vertical Gravitational Force.....	72
Section Two	Equations.....	75
Section Three	Results.....	76
Item One	Unified Description of SSDs, Slim Disks, and NDAFs.....	76
Item Two	Summing-up.....	80
Section Four	On the Origin of X-Ray Flares in GRBs.....	81
Item One	Models of X-Ray Flares.....	81
Item Two	Our Model.....	83
References.....		85
Chapter Five Research Prospect.....		
Section One Merger of Compact Object Binaries.....		87
Item One	Binary and Roche Lobe.....	87
Item Two	Merger of Compact Object Binaries.....	90
Section Two	Neutrino Transfer in NDAFs.....	91
Item One	Radiative Transfer.....	91
Item Two	Neutrino Transfer in NDAFs.....	94
References.....		96
Publication list.....		97
Citation.....		98
Acknowledgements.....		99

第一章 绪论

在本章中,我们首先讨论一下黑洞和吸积的概念;再来介绍一下 GRBs 的观测事实和被广泛接受的火球 - 激波模型,并且对 GRBs 中心能源机制的几种模型做简要论述。

一 黑洞的分类与形成

1. 黑洞的分类

黑洞是广义相对论预言的一种具有强大引力的特殊天体。1969 年美国科学家 Wheeler 首先给出了“黑洞 (Black Hole)”这一名称。

早在 1783 年,剑桥的学监 John Michell 基于光的粒子说指出,一个质量和密度足够大的恒星的引力场可以强到使任何从恒星表面发出的光,还没到达远处即被恒星的引力吸引回来。1798 年,法国科学家 Laplace 提出类似的观点。他的计算结果是,一个直径比太阳大 250 倍而密度与地球相当的恒星,其引力场足以捕获它所发出的所有光线,而成为暗天体。

1915 年, Einstein 提出了著名的广义相对论。同年 12 月,德国学者 Schwarzschild 得出了爱因斯坦引力场方程的一个精确解。Schwarzschild 解所描述的黑洞是指引力场强到任何物质或辐射都无法从中逃逸出来的特殊时空,这个区域的边界称为视界。视界半径(又称引力半径、Schwarzschild 半径) R_g 与其所包围的质量 M 之间的关系是 $R_g = 2GM/c^2$, 式中 G 为万有引力常数, c 为光速, M 为球体的总质量。

在形成黑洞以前的恒星物质可以有各种不同的属性,但是当形成稳定黑洞后,几乎所有属性都不再能被观测到。只需要用三个参量就可以完全表征黑洞的性质,即质量 M 、角动量 J 和电荷 Q 。由此,黑洞在理论上可以分为四种(见表 1-1)

$M > 0, J = Q = 0$	Schwarzschild 黑洞
$M > 0, J > 0, Q = 0$	Kerr 黑洞
$M > 0, J = 0, Q > 0$	Reissner-Nordstrom 黑洞
$M > 0, J > 0, Q > 0$	Kerr-Newman 黑洞

表 1-1 按照质量 M 、角动量 J 和电荷 Q 对黑洞的分类

黑洞的一个重要物理参量是其视界的面积。在物质掉入黑洞，或黑洞之间并合时，它的面积总不减少，这称为面积不减定理。这一定理类似于热力学中孤立系统的熵不减原理，因此，黑洞的面积可以相当于黑洞的熵，人们在这个基础上建立了黑洞热力学。黑洞热力学的一个结论是，黑洞具有一定的温度，其值与黑洞的质量成反比。1974 年，Hawking 证明，如果考虑到黑洞周围空间中的量子涨落，则黑洞的确具有与它的温度相对应的热辐射。计及量子效应后，黑洞不再是完全“黑”的了，它也会发射，甚至出现剧烈的爆发。

另外，黑洞按质量可以分为：星系核中的巨型黑洞、中等质量黑洞、恒星级黑洞和原初（微型）黑洞。巨型黑洞是超重星、星团或星系核塌缩所形成的，质量大约是 $10^6-10^{10}M$ （下文中均使用 M 表示太阳质量）；中等质量黑洞的形成机制还不是很确定，其质量大约是 10^3M ；恒星级黑洞是正常恒星演化至晚期的一种可能的产物，这种黑洞的质量大约是几个至几十个 M ；最后一种原初（微型）黑洞是早期宇宙中的高密度介质由于密度涨落而造成的，质量约为 $10^{-17}M$ 。

2. 黑洞的形成

我们可以这样简单地描述恒星的形成：大量的气体（大部分为氢）受自身的引力作用而开始收缩，粒子越来越频繁地以越来越大的速度互相碰撞导致气体温度不断上升，最终触发核反应，释放出来的热使得恒星发光。巨大的热能又使气体的压力升高，直到它足以平衡引力而不再收缩。

按照质量大小，恒星可分为三类：低质量恒星、中等质量恒星和大质量恒星。

在恒星演化理论中，不同质量的恒星，有不同的内部结构性质和演化过程。

低质量恒星的演化时标长于宇宙年龄，因而其演化终点还没有被直接观察到。当前的理论都是基于计算机模型。一些恒星演化后期会在核心触发氦聚变，在这种情况下，恒星不会爆发产生行星状星云，而只会耗尽燃料演化为红矮星。质量小于 $0.5M_{\odot}$ 的恒星甚至在氢耗尽之后都不会在核心产生氦聚变反应。像比邻星这样的红矮星，寿命长达数千亿年。在核心的反应终止之后，红矮星仅剩余红外线和微波波段的辐射。

中等质量恒星达到红巨星阶段时，质量为 $0.4M_{\odot}$ 到 $3.4M_{\odot}$ 的恒星的外壳会向外膨胀，而核心向内压缩，发生氦聚变反应。聚变所产生能量，暂时缓解恒星的死亡过程。对于太阳大小的恒星，此过程大约持续十亿年。氦燃烧对温度极其敏感，这种不稳定性会使得外壳获得足够的动能脱离恒星，成为行星状星云。星云中心留下的核心会逐渐冷却，成为致密的白矮星。在引力和电子互斥力平衡时，白矮星是相对稳定的。在没有能量来源的情况下，恒星在漫长的岁月中释放出剩余的能量，逐渐暗淡下去。

在双星或者多星系统中，恒星际质量交流可能改变演化过程。因为一部分质量被其他恒星获得，系统中质量较大的恒星的红巨星阶段演化会被加速，而质量较小的恒星会吸收一部分红巨星的质量，在主星序停留更长时间。例如天狼星是一颗大约 $2.3M_{\odot}$ 的主序星，其伴星就是一颗约 $1M_{\odot}$ 的白矮星。对于白矮星和一颗恒星组成双星系统，白矮星可能使用来自恒星的氢进行核反应并且将周围的物质加热抛出，这样的爆炸称为新星。如果白矮星的质量超出 Chandrasekhar 极限，简并压不足以抵抗引力，会继续坍缩下去，形成中子星。

强大的星风损失、对流以及金属丰度等因素对大质量恒星后期演化的影响很大。质量大于 $5M_{\odot}$ 的恒星的外壳膨胀成为红超巨星之后，其核心开始被引力压缩，温度和密度的上升，触发一系列聚变反应。这些聚变反应会生成越来越重的元素，释放的能量会暂时延缓恒星的坍缩，直到聚变到达元素周期表的下层，即硅开始聚变成铁。铁不能通过聚变释放能量，相反，铁聚变需要吸收能量。在没有能量来对抗引力的情况下，核心几乎立刻产生坍缩，在几分之一秒内造成一次剧烈的超新星爆发，抛出的轻于铁的元素吸收中微子形成一些比铁重的放射性元素，其中最重的是铀。如果没有超新星爆发的话，比铁重的元素不会存在。

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts 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.

厦门大学博硕士学位论文摘要库