

学校编码: 10384
学号: B200424004

分类号 _____ 密级 _____
UDC _____

厦 门 大 学

博 士 学 位 论 文

活动星系核的喷流进动

The Jet Precession in Active Galactic Nuclei

周博颜

指导教师姓名: 卢炬甫 教授

专 业 名 称: 理论物理

论文提交日期: 2007 年 5 月

论文答辩时间: 2007 年 6 月

学位授予日期: 2007 年 月

答辩委员会主席: _____

评阅人: _____

2007 年 5 月

厦门大学学位论文原创性声明

兹提交的学位论文，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

活动星系核研究领域是天文学最活跃的分支之一，本文对活动星系核喷流的进动做了一点探讨。着重论述了单黑洞—吸积盘进动模型或盘致进动模型；提出两个关系，即进动周期—绝对星等的关系和黑洞质量—进动锥角的关系；并对盘致黑洞进动和双黑洞之测地进动做了适当的比较，意在查看在一定的情况下，哪一种进动模型起主要作用。

第一章是绪论部分，首先介绍课题背景，然后介绍跟本课题有关的基本概念和基础知识。最后，试介绍进动物理方面的基本知识，以进动机制分类对进动做了总结。

第二章首先介绍盘致进动模型的背景、思想和理论公式的推导，并对临界半径的尺度以及与其它物理量的关系问题做了适当的讨论。然后，利用观测数据对盘致进动模型进行了验证。接着，讨论了黑洞质量对盘致进动模型的影响。最后，从观测和理论两个角度对弥散做了初步的分析。

第三章主要讨论进动锥角的问题。由观测数据发现黑洞质量与进动锥角是有关系的，文章试给出理论解释。并对进动锥角是否有独立性做了一点讨论。

第四章总结了各种进动模型。本章以进动模型分类，分别对各种进动做了总结。然后，从进动快慢的角度，对单黑洞—吸积盘的进动和双黑洞的测地进动做了比较。

第五章展望对黑洞作实心球体处理的疑问及对短周期的一点看法。

关键词：盘致进动；周期与锥角；黑洞质量

Abstract

The study of active galactic nuclei (AGN) is one of the most active branches in the field of astrophysics. This thesis gives a investigation on the jet precession of AGN. The single black hole-accretion disk precession model or disk-driven precession model is discussed carefully; Two correlations have been raised and sustained by observational values, which are precession period – absolute magnitude correlation and black hole mass – precession cone semi-angle correlation; A comparison between disk-driven black hole precession and geodetic precession of binary black holes has been performed to check which model plays the leading role in certain circumstances.

In the beginning of thematic background, interrelated basic words and fundamental principle are introduced in the first chapter. Finally, physics about precession sorted by precession mechanism are presented curtly.

In the second chapter, first, the background, the idea and the formula derivation of the disk-driven precession model are introduced. And some problems on the scale of critical radius and relation with other parameters are discussed aptly. Second, a test with observational values on the disk-driven precession model is done. Then, the impact of black hole masses on disk-driven precession model is discussed. Finally, from two views of observation and theory, the dispersion is analyzed primarily.

In the third chapter, precession cone semi-angle is discussed. We found from observational data that there is a correlation between the black hole mass and precession cone semi-angle, we try to explain it theoretically. Then, a simple discussion on solitary precession cone semi-angle follows.

In the fourth chapter, different precessions sorted by the models have been summarized. Then, in the view of the precession speed, a comparison is performed between disk-driven precession model and geodetic precession of binary black holes model.

In the fifth chapter, first, regarding black hole as solid sphere is doubted. Second, a brief view is given about short period precession.

Key words: disk-driven precession; period and cone angle; black hole mass

目 录

第一章 绪论	1
§ 1.1 课题背景	1
§ 1.2 AGN简介	2
§ 1.3 Kerr 黑洞	3
§ 1.4 吸积盘.....	4
§ 1.5 喷流	11
§ 1.6 射电天文观测.....	19
§ 1.7 视超光速运动.....	20
§ 1.8 Doppler 增亮	21
§ 1.9 光变	22
§ 1.10 星等	22
§ 1.11 色指数	23
§ 1.12 进动物理理论基本知识	24
§ 1.12.1 牛顿进动	24
§ 1.12.2 相对论效应进动	26
§ 1.13 Lense-Thirring 效应	30
§ 1.14 Bardeen-Petterson 效应	34
第二章 盘致进动模型	36
§ 2.1 引言	36
§ 2.2 盘致进动模型	36
§ 2.3 临界半径 r_p 的讨论.....	41
§ 2.4 观测验证	44
§ 2.5 黑洞质量对盘致进动模型的影响	50
§ 2.6 实际数据弥散的分析	52
§ 2.7 理论模型弥散的分析	53
§ 2.7.1 黑洞质量 M_{BH} 对弥散的影响	53
§ 2.7.2 比角动量 a 对弥散的影响	54

§ 2.7.3 粘滞系数 α 对弥散的影响	55
§ 2.8 小结	56
第三章 进动锥角	58
§ 3.1 引言	58
§ 3.2 盘致进动模型中黑洞质量与进动锥角的关系	58
§ 3.3 黑洞质量与进动锥角关系的初步验证	60
§ 3.4 关于进动锥角的讨论	62
§ 3.5 小结	65
第四章 进动模型的比较	66
§ 4.1 概述	66
§ 4.2 长周期双黑洞测地进动模型.....	66
§ 4.3 盘进动模型	70
§ 4.3.1 双黑洞之盘进动机制	70
§ 4.3.2 磁驱动进动	71
§ 4.3.3 辐射驱动进动	72
§ 4.3.4 Bardeen-Petterson 效应致盘进动	73
§ 4.4 模型特点比较	75
§ 4.4.1 双黑洞模型的特点	75
§ 4.4.2 单黑洞-吸积盘模型的特点	76
§ 4.5 双黑洞测地进动模型与盘致进动模型试比较.....	76
§ 4.5.1 Lense-Thirring 进动机制与测地进动机制之快慢比较.....	76
§ 4.5.2 进动周期~绝对星等关系的比较	78
§ 4.5.3 双黑洞测地进动模型与盘致进动模型试比较	80
§ 4.6 小结	81
第五章 总结和展望	82
§ 5.1 总结	82
§ 5.2 展望	83
参考文献	87
附录 攻读博士学位期间发表的论文.....	98
致 谢.....	99

Contents

Chapter 1	Introduction.....	1
§1.1	Thematic background.....	1
§1.2	About AGN.....	1
§1.3	Kerr black hole.....	3
§1.4	Accretion disk.....	4
§1.5	Jets.....	11
§1.6	Radio observation.....	19
§1.7	Apparent superluminal motion.....	20
§1.8	Doppler boosting.....	21
§1.9	Light curve.....	22
§1.10	magnitude.....	22
§1.11	Colour index.....	23
§1.12	Fundamental principle about precession.....	24
§1.12.1	Newtonian precession	24
§1.12.2	Relativistic effect precession	26
§1.13	Lense-Thirring effect	30
§1.14	Bardeen-Petterson effect	34
Chapter 2	Disk-driven precession model.....	36
§2.1	Introduction	36
§2.2	Disk-driven precession model	36
§2.3	Discussion about critical radius	41
§2.4	Observational tests	44
§2.5	Impact of black hole masses on disk-driven precession model	50
§2.6	Analysis of dispersion of observation data	52
§2.7	Analysis of dispersion of theoretical model	53
§2.7.1	Impact on the dispersion by M_{BH}	53
§2.7.2	Impact on the dispersion by a	54
§2.7.3	Impact on the dispersion by α	55

§2.8	Conclusions	56
Chapter 3	Precession cone semi-angle ψ	58
§3.1	Introduction	58
§3.2	Correlation between M_{BH} and ψ in Disk-driven precession model	58
§3.3	Test for correlation between M_{BH} and ψ	60
§3.4	Discussion about ψ	62
§3.5	Conclusions	65
Chapter 4	Comparison between models	66
§4.1	Introduction	66
§4.2	Geodetic precession model with long period in binary black holes.....	66
§4.3	Disk precession models	70
§4.3.1	Disk precession in binary black holes	70
§4.3.2	Magnetically driven precession	71
§4.3.3	Radiation-driven precession	72
§4.3.4	Bardeen-Petterson effect	73
§4.4	Comparison of models attributes	75
§4.4.1	Attributes of binary black hole model	75
§4.4.2	Attributes of single black hole and disk model	76
§4.5	Comparison of precession models	76
§4.5.1	Lense-Thirring precession \sim geodetic precession	76
§4.5.2	Comparison of correlation between precession period and absolute magnitude	78
§4.5.3	Comparison between geodetic precession in binary black hole model and disk-driven precession model	80
§4.6	Conclusions	81
Chapter 5	Summary and prospects	82
References	87
Appendix	Publications	98
Acknowledgements	99

第一章 绪论

这部分内容首先介绍课题背景，然后介绍跟本课题有关的基本概念以及天文和物理特别是关于进动的基础知识。

§ 1.1 课题背景

天文工作者经常观测到呈 S 形或 Z 形喷流，特别是大尺度的河外喷流，参考图 1.1.1。

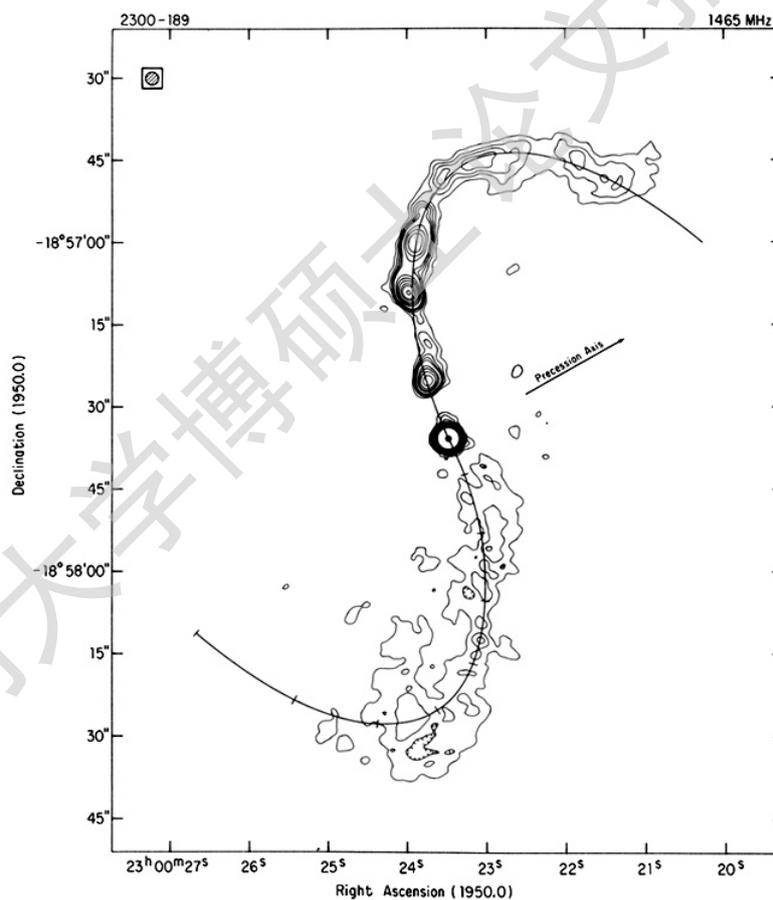


图 1.1.1 活动星系核 2300-189
(取自 Hunstead, R. W., et al. 1984)

人们用进动机制来解释这种喷流弯曲现象。1980 年 Begelman et al. 提出双黑洞进动模型；直至今日，诸多文章借用这种模型解释喷流进动，并且又做了发展，

其中一种观点认为是次黑洞驱动主黑洞进动,另一种观点认为是驱动主黑洞的吸积盘进动;前者主要采用测地进动机制—纯相对论效应进动;后者既有牛顿进动的概念,又加入了后牛顿的知识;并且,近年来,许多作者用盘进动模型来解释光变(light curve)或闪(flare)现象。虽然光变或闪的周期很短(比如10年),但是,这些作者仍然认为,光变或闪现象是由喷流或盘的进动造成的,即喷流或盘的进动周期就是观测到的光变或闪的周期。

1990年Lu又提出活动星系核的单黑洞—吸积盘进动模型,关于这种模型本文第二章将详细叙述。

§ 1.2 AGN (活动星系核) 简介

利用造父变星的周光关系测量天体的距离是今天人们熟悉的方法。1924年,美国天文学家哈勃(Edwin Hubble, 1889~1953)首先使用了这个方法测出了我们银河系的近邻—仙女座大星云M31、M33和NGC 6822的距离,确认三者是银河系以外的星系。人们从此开始了研究河外星系的新纪元。二战后期,射电天文兴起,天文学家应用了新的测光技术又相继发现了一系列有激烈活动的河外天体,如赛弗特星系(Seyfert galaxy)、N星系、类星体、BL Lac天体和射电星系等(许梅2002)。这些河外天体后来都泛称为活动星系核(Active Galactic Nucleus, 缩写为AGN)。

现根据黄克谅著《类星体与活动星系核》把AGN的主要观测特征和分类简要地总结如下。

AGN的主要观测特征:

- 1) 明亮的致密核区,从中发射出巨大的能量,光度在 $10^{43} \sim 10^{48} \text{erg s}^{-1}$ (太阳的光度是 $10^{33} \text{erg s}^{-1}$),比正常星系高得多;且致密核的尺度很小,一般认为小于0.1pc。
- 2) 在某些波段存在非热连续辐射,并为幂律谱,且辐射是偏振的。
- 3) 存在强的原子和离子发射线。
- 4) 连续辐射的强度,发射线的强度、轮廓、偏振等可能随时间变化。
- 5) 具有比正常星系更强的发射高能光子的能力。

当然不是所有AGN同时具有上面所有特征，有的天体如类星体（Quasar），具有上面所有特征，是活动性最强的AGN；但更多的AGN则只具有上面部分特征。

天文学家们根据AGN的不同观测特征，已经将AGN做了分类。

- ① Seyfert星系：具有低光度、大量高电离发射线等特征；又分两个次型，Seyfert I，具有窄线和宽线；Seyfert II，只有窄线。
 - ② 类星体：多数形状类星，具有大红移、高光度、光变、强发射线等特征。
 - ③ 射电星系：射电光度通常大于 $10^{41} \text{erg s}^{-1}$ ；射电形态有致密型、双瓣型和头尾型，经常能看到喷流从光学星系中心连接到射电瓣；谱为幂律谱，谱指数一般在0.5~1之间，有偏振。
 - ④ 低电离核发射线区（LINER）：有低光度核，光谱中低电离线很强，而高电离线观测不到。
 - ⑤ Blazar：是BL Lac天体和光学激变星系OVVs的总称；有快速光变等特征。
- 上面只是粗略地分类，AGN当然还有其它类型和观测特征。

§ 1.3 Kerr 黑洞

本段内容主要参考了俞允强著《广义相对论引论》和王永久著《广义相对论和宇宙学》。

黑洞被分为几种，不自转不带电的为 Schwarzschild 黑洞；有自转不带电的为 Kerr 黑洞；如果带电还有其它黑洞。我们最关心的是 Kerr 黑洞，其自转对吸积和进动都有决定性影响。

Schwarzschild 解是球对称无转动的场源的引力场，是非常特殊的情况。但是各种天体都具有角动量，所以，一般的引力塌缩不可能是完全球对称的。

不带电的 Kerr 黑洞只含有两个物理量—质量和角动量（或比角动量），这两个量是各自独立的，在研究进动的时候是必须考虑而不能替换的。

1962 年 Kerr 给出真空场方程的一个轴对称解，它的不变线元公式或 Kerr 度规为

$$ds^2 = -\frac{\Delta}{\mathfrak{R}^2}(dt - a \sin^2 \theta d\varphi)^2 + \frac{\sin^2 \theta}{\mathfrak{R}^2}[(r^2 + a^2)d\varphi - a_* dt]^2 + \frac{\mathfrak{R}^2}{\Delta}dr^2 + \mathfrak{R}^2 d\theta^2,$$

其中

$$\Delta \equiv r^2 - 2GMr + a^2$$

$$\mathfrak{R}^2 \equiv r^2 + a^2 \cos^2 \theta.$$

G 是引力常数，上面度规中所含的光速 c 已经设为 1，计算时如需要具体数值可根据量纲加入 c ， M 为 Kerr 黑洞质量。Kerr 度规还可写为

$$ds^2 = \left(1 - \frac{2Mr}{r^2 + a^2 \cos^2 \theta}\right) dt^2 - \frac{r^2 + a^2 \cos^2 \theta}{r^2 + a^2 - 2Mr} dr^2 - (r^2 + a^2 \cos^2 \theta) d\theta^2 \\ - \left[(r^2 + a^2) \sin^2 \theta + \frac{2Mr a^2 \sin^4 \theta}{r^2 + a^2 \cos^2 \theta} \right] d\varphi^2 + \frac{4Mr a \sin^2 \theta}{r^2 + a^2 \cos^2 \theta} dr d\varphi$$

上面度规所含的 G 和 c 都设为 1 了；Kerr 度规描述的是转动的引力源的引力场。

Kerr 黑洞的外视界面坐标为

$$r_+ = GM + \sqrt{G^2 M^2 - a^2},$$

所以视界面存在的条件是 $G^2 M^2 \geq a^2$ ，即无量纲的比角动量(即单位质量的角动量) $a \leq 1$ ，这说明 Kerr 黑洞的自转不能无限地快，Kerr 黑洞的角动量有个上限

$$J_{\text{BH}}^{\text{max}} = \frac{GM^2}{c}.$$

关于黑洞还有一个面积不减定理，它的一般证明是霍金 (Hawking) 于 1972 年给出的。黑洞合并或吸入物质是可以的，而黑洞分裂是不可能的，喷流不是直接从黑洞喷出的。

§ 1.4 吸积盘

(这部分内容主要参考文献 Frank et al. 2002; 李启斌等 1996; 卢炬甫 2001; 林一清 2004) 19 世纪，人们以为太阳发出的能量是由引力能提供的，

$$E_{\text{grv}} = \frac{GMm}{R}.$$

但是,利用上式经过计算之后发现,按照太阳的光度、质量和几何尺度,太阳的寿命只能有 $\sim 10^7$ 年,远远短于太阳的现在的年龄,所以,引力能不可能是太阳的主要能量来源。后来,在Einstein发现质能关系之后,人们求诸核能才基本解决了太阳及恒星的能量来源问题。

但是,20世纪60年代,人们发现核反应远远不足以给宇宙中的高能天体提供能量。比如,明亮的类星体的典型光度为 $10^{47} \text{ erg s}^{-1}$,如果是由热核反应提供能量的话,每年大约有 $250M_{\odot}$ 的氢被燃烧掉。以这个速率,一个质量大约为 $10^{11}M_{\odot}$ 的普通星系至多可以维持 10^9 年,即10亿年,比太阳的年龄还要小,更远远短于宇宙的年龄,这当然是不对的。

人们开始考虑把引力能作为高能天体的能量来源。由上面方程可以看出,要把引力能作为高能天体的能量来源,就要求天体必须具有大质量小尺度的特性。而早在这之前,人们就已经理论预言存在这样的天体。

1930年钱德拉塞卡(Chandrasekhar)用电子简并压来平衡自引力,完成了白矮星的理论模型,求得其质量小于 $1.4M_{\odot}$,成功地解释了之前对白矮星的观测现象;1934年巴德(Baade)和兹维基(Zwicky)理论预言中子星的存在,1939年奥本海默(Oppenheimer)和沃尔科夫(Volkoff)用中子简并压来平衡自引力,完成了中子星的理论模型,其质量约在 $2\sim 3 M_{\odot}$;1967年惠勒(Wheeler)将广义相对论预言的塌缩天体—引力塌缩到中子简并无法支持后形成的天体—命名为黑洞(Black Hole),其质量范围极大。(李宗伟 肖兴华 2000)

1967年发现脉冲星,并立即确认是中子星。中子星的发现让科学家们兴奋不已,因为除白矮星外又一个具有大质量小尺度的特性的天体被证实。而这种特性是高效的释放引力能所必须的。由上式可以看出,这时引力能的释放效率则远远大于核能的释放效率了。所以人们开始重新认识引力能,把引力能看作各种致密天体的重要能量来源。

当然,接下来必须解决的问题就是引力能是如何释放的。人们启用吸积这个概念,即天体由于引力作用而吸引和积聚周围气体、尘埃等物质的过程。关于吸积盘如何形成本文略去。1969年Lynden-Bell首次使用吸积盘理论解释了类星体的能源机制问题,这一开创性的工作为解释天文中大量观测现象提供了一种强有力的依据。从位形研究到能源机制的研究是一个重要的飞跃。随后吸积盘理论在

X 射线双星、激变双星、星系核、类星体、黑洞物理等方面得到了广泛的应用。随着吸积盘理论的发展，迄今已经被公认的吸积盘模型有四种。

后文将要介绍的关于进动周期与绝对星等关系的工作要用到吸积盘的模型之一——标准盘模型，所以这里把吸积盘模型做一个概述，其中重点介绍标准盘模型。

§ 1.4.1 标准薄盘

吸积盘的建立和发展总是被盘中的粘滞性问题所困扰。一般认为，吸积流体内部的粘滞作用造成角动量的向外转移和物质的向内运动，同时将引力能转变为热能，再转变为辐射。这是吸积盘中最主要的物理图像。较容易想到的粘滞的具体物理机制可能是湍流和无序磁场，但对这两种机制都很难做精确描述。1973 年 Shakura & Sunyaev 回避了对粘滞过程的具体研究，而引入了一个 α 参数去描写粘滞。他们改进的这种模型的吸积盘后来被称为标准薄盘，或简称为 SSD (Shakura-Sunyaev Disk)。SSD 标志着现代吸积理论的诞生。

标准薄盘的特性总结如下：

引力场完全由中心天体决定，吸积物质的自引力可忽略；

吸积流是定常态和轴对称的；

没有宏观尺度的磁场；

吸积流是几何薄的，即垂向几何厚度 H 与到中心天体的距离 r 之比处处都远小于 1，即 $\frac{H}{r} \ll 1$ ；

吸积物质所受的引力与惯性离心力平衡，即转动是 Kepler 的， $v_{\phi} = \left(\frac{GM_{\text{BH}}}{r} \right)^{1/2}$ ，而由粘滞造成的径向内移速度 v_r 远小于转动速度 v_{ϕ} ， $v_r \ll v_{\phi}$ ；

吸积流在垂向上处于流体静力学平衡状态；

吸积流是光学厚的，主要的能量转移和冷却机制是辐射；

粘滞应力张量的唯一非零分量是 $t_{r\phi}$ ，其大小正比于吸积流中的总压强 P ，

即 $t_{r\phi} = -\alpha P$ 。正是由于比例常数 α 的引入，SSD 又被称为 α 盘。

一般说来，吸积流应当有三维空间结构和含时行为。但有了上述假定，吸

积流动力学就简化为径向一维问题，运用质量、动量、能量守恒定律所写出的是代数方程和常微分方程。给定边界条件（通常取吸积流内边界上粘滞力矩为零），常微分方程就被积分为代数方程。补充了吸积流的物态方程和不透明度式后，就得到一组完备的代数方程。

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho = \frac{\Sigma}{H}; \\ H = \frac{c_s r^{3/2}}{(GM)^{1/2}}; \\ c_s^2 = \frac{P}{\rho}; \\ P = \frac{\rho k T_c}{\mu m_p} + \frac{4\sigma}{3c} T_c^4; \\ \frac{4\sigma T_c^4}{3\tau} = \frac{3GM\dot{M}}{8\pi r^3} \left[1 - \left(\frac{r_*}{r} \right)^{1/2} \right]; \\ \tau = \Sigma \kappa_r(\rho, T_c) = 5 \times 10^{24} \Sigma (\rho T_c^{-7/2} \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}); \\ \nu \Sigma = \frac{\dot{M}}{3\pi} \left[1 - \left(\frac{r_*}{r} \right)^{1/2} \right]; \\ \nu = \alpha c_s H; \end{array} \right.$$

由于技术原因（例如，总压强中气体压与温度成正比，而辐射压与温度的4次方成正比），对这组方程仍难以求得解析解。于是，SSD模型又人为地将吸积流划分为三个区，即外区（压强以气体压为主，不透明度机制以自由-自由吸收为主）、中区（与外区不同的只是不透明度主要由电子散射贡献）和内区（与中区不同的是压强以辐射压为主），从而分别求出各区结构，即几个厚度 H 、密度 ρ 、面密度 Σ 、中心面温度 T_c 、径向速度 v_r 、垂向光学厚度 τ 对三个给定参量（中心天体质量 M 、吸积率 \dot{M} 、粘滞常数 α ）和自变量 r 的依赖关系的解析表达式。

需要注意的是在解 v_r 时需要用到代数式 $\dot{M} = 2\pi r \Sigma v_r$ ， v_r 方向向里。

SSD外区的解是：

$$\Sigma = 5.2 \alpha^{-4/5} \dot{M}_{16}^{7/10} m_1^{1/4} r_{10}^{-3/4} f^{14/5} \text{ g cm}^{-2},$$

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.

厦门大学博硕士论文摘要库