

天体物理学讲座

第二讲 活动星系核物理*

王 挺 贵

(中国科学技术大学天体物理中心 合肥 230026)

摘 要 星系的活动是星系核心大质量黑洞吸积周围的气体释放巨大的辐射功率的过程,它是强引力场物理、高能物理和辐射流体物理的天然实验室.文章介绍了活动星系核中黑洞吸积、发射线形成和外流的观测事实和基本物理过程等,指出了现有理论存在的一些问题.

关键词 星系,黑洞,吸积,辐射过程

PHYSICS OF ACTIVE GALACTIC NUCLEI

WANG Ting-Gui

(Center for Astrophysics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract Active galactic nuclei are among the most spectacular objects in the universe with huge energy output in a small volume. It is believed that the release of gravitational binding energy through accreting matter into super massive black holes is the basic force behind their activity. They are a natural laboratory for strong gravitation, high energy physics and radiative fluid dynamics. We review some basic physical processes in the accretion disk, emission line region and outflows from nuclei.

Key words galaxies, black hole, accretion, radiative process

1 引言

1947年,Seyfert发现一些星系蓝致密核的光度和整个星系相近,是今天称为Seyfert星系的最为常见的活动星系核.但其本质在1965年Schmidt发现类星体之后才得以认识.在证认射电源3C273的光学对应体时,Schmidt^[1]意外发现该天体的红移 $z=0.158$,如把这一红移解释为宇宙学红移,该天体的总的辐射光度高达 10^{40} W.目前已知类星体的最高光度为 10^{41} W,是整个银河系的光度的 10^4 倍.观测结果表明,类星体和Seyfert星系核一样,位于星系的中心,只是光度更高而已,核心的明亮使得星系本身很难观测.活动星系核从高光度的类星体到低光度的活动星系核,在辐射功率空间跨9个量级.

然而这些天体的中心引擎的尺度只有太阳系大小,很多活动星系核表现出较大幅度的光变,而这种

光变尤其在X射线波段更为突出:在一些活动星系核中,观测到 $10^2\sim 10^4$ s时间大幅度变化,由于发射区的不同部分信息交换速度不能超过光速,上述变化时间可被解读成光穿越发射区的上限,即发射区尺度应小于 10^{12} m.一些活动星系核表现出几百万个光年的大尺度的定向射电喷流,表明这些天体的寿命至少在百万年.高光度、小尺度和稳定是发展大质量黑洞吸积模型的一个重要出发点.

活动星系核又是从射电到高能辐射的全电磁波段几乎均匀辐射的天体,这使其成为每一个波段探测的重要对象;在目前大家能够普遍接受的机制——大质量黑洞吸积下,活动星系核的性质与极端的物理过程——相对论性强引力场——密切相关,可能是最为特殊的物理实验室;活动星系核的极端

* 国家杰出青年科学基金(批准号:19925313)资助项目
2000-11-23收到初稿,2001-02-26修回

高光度,使其成为到目前为止几乎是惟一的能够进行细致光谱研究的高红移天体,因而对早期宇宙结构的形成研究有重要的意义.由于这些重要性,活动星系核的研究已经成为现代天体物理研究的热点之一.

2 中心引擎——大质量黑洞吸积

依照现在的理解,活动星系核的中心为 10^{6-9} 太阳质量 (M_{\odot}) 的巨型黑洞,核区的气体在黑洞的引力作用下,慢慢地从远处下落到很深的黑洞的引力势阱中.在这一过程中,巨大的引力结合能就被释放出来^[2-4].

在经典牛顿力学的情况下,一个试验质点绕一大质量天体运动时,引力势能跟轨道半径成反比,稳定的轨道半径一直延伸到该天体的表面,因而最大结合能是试验质点贴近天体表面时的数值.在黑洞的强引力场中,广义相对论效应主要表现在两个方面:首先,最内的稳定轨道已经不是黑洞的几何边界(视界),而是在外面一些,具体与黑洞的内禀参数有关.对于没有自转的黑洞(Schwarzschild 黑洞)和极端自转的黑洞(Kerr 黑洞),这一半径分别为 6 个引力半径和 1.35 个引力半径($1 r_g = 0.75 M/M_{\odot} \text{ km}$),对应的轨道结合能分别为 0.08 和 0.42 物质的静质能,比太阳的热核聚变效率 0.008 高出 1—2 个量级.在这些轨道以内,物质以接近光的速度落入黑洞,没有时间产生可观的辐射.其次,黑洞的边界不是一个硬表面,只是因果关系几何界面,物质和能量通过该界面进入黑洞.在物质落入黑洞之后,所携带的能量、角动量等也带进黑洞,所以只有当物质在最后稳定轨道时大部分结合能都以一定的形式释放之后,上述效率才得以实现.

气体在黑洞的引力场中稳定地流入黑洞的过程被称为吸积.吸积与边界条件有关,现在发现的稳态解主要有四类,现分别介绍如下.

2.1 球对称吸积流

Schwarzschild 黑洞吸积整体角动量为零的气体,对称性决定了吸积必然是球对称的.气体在下落的过程中,不断被压缩,一部分引力势能转化为气体的热能,而部分热能通过电子和离子的碰撞或者其他过程会被转化为辐射.无辐射损失的球对称吸积的解完全由外边界条件给出.由于是稳态解,通过不同半径的球面物质流量是个定值,被称为吸积率(\dot{M}),这也是通过视界进入黑洞的物质流量.一般来说,球

对称吸积的辐射效率比较低,其具体数值强烈地依赖于磁场强度、吸积率的大小、是否存在激波等因素.辐射与物质的作用产生向外的压力,由于辐射的功率(因而辐射压)随吸积率增大而增大,很显然吸积率必然有一个上限,以保证中心黑洞的引力超过辐射压,使辐射过程能够顺利进行.辐射压与引力平衡下的吸积率,被称为 Eddington 吸积率(\dot{M}_{Edd}),而对应的辐射光度被称为 Eddington 光度 [$L_{\text{Edd}} = 1.5 \times 10^{31} (M/M_{\odot}) \text{ W}$].

2.2 薄盘

有一类辐射非常有效的解被称为薄盘解^[5,6].这类解适合于被吸积气体具有大的整体角动量和中等吸积率($0.01 \dot{M}_{\text{Edd}} < \dot{M} < 0.3 \dot{M}_{\text{Edd}}$)的情况.整个盘的辐射冷却非常有效,物质“较冷”,气体的压力跟中心黑洞的引力相比很小,因而盘的垂直高度远小于半径,几何薄.压力小的另一个推论是吸积流几乎作开普勒运动,圆周运动的速度远大于气体的声速或者吸积流的径向速度.径向下落的速度取决于通过粘滞损失角动量的速率,可通过粘滞系数 ν 来描述. Shakura 和 Sunyaev^[5]在其经典性的文章中指出,动力学张量的自然标度是压强 p ,因而可以把粘滞张力写成 $-\alpha p$ ($\alpha \leq 1$).在 α 为常数的假设下,吸积盘的结构主要由两个参数决定,即吸积率和黑洞的质量.在薄盘的外区,压强是以气体的压强为主;而到了盘的内区,辐射压超过气体压成为主导.在上述的粘滞加热假设下,吸积盘是热和粘滞不稳定的.但是目前还不清楚这些不稳定性的最后结果是使盘整个消失还是使盘成为非稳态的盘结构;另外,在更为实际地考虑盘在垂直方向上的结构之后,是不是会稳定也不得而知.

2.3 “苗条”盘

当吸积率更高时,辐射的压力增大,使得吸积盘的内区变厚,薄盘近似已经不再适用,而必须考虑吸积盘的垂直方向结构,此外也必须考虑径向的辐射转移.在中心区域,必须解二维的辐射流体力学方程.这种吸积盘被称为“苗条”盘^[7].“苗条”盘的特点是比薄盘更热,因而热辐射的峰值频率更高.其次,由于光学厚度的增加,在吸积盘内区,辐射向外扩散的时标可能比吸积物质向内运动的时标长,而被物质拖着向内,部分进入黑洞,降低了辐射效率.由于“苗条”盘的结构远比薄盘复杂,这一盘远没有薄盘研究得细致,许多问题还有待解决.

2.4 ADAF(advection dominated accretion flow) 盘

在吸积率很低时,由于物质不能很好地冷却,物

物理

射效率很低,因而粘滞产生的热主要加热气体并随气体的下落带入内区,因此气体的温度很高.由于相对论性电子的辐射能力比较强,能够很好地冷却,因此电子很难加热到极相对论的温度;而离子本身的辐射能力很低,再加上在低密度的气体中,离子和电子能量交换的时标长于物质内流的时标,离子和电子具有不同的温度.离子的热压力与引力的大小在一个数量级上,这时吸积盘表现为几何厚、光学薄的吸积盘.由于在这类盘中,热主要被带向吸积盘的内区,因此被称为 ADAF 盘.由于在 ADAF 的模型中,大部分的热被吸积流带入黑洞,因此辐射的效率很低,约为 $10^{-4} - 10^{-3}$.

在绝大多数 AGN 中,吸积过程不可能是球对称的,因为一般星系核心的气体都具有较大的角动量;其次在黑洞有自转的情况下,接近黑洞的区域吸积流也是非球对称的.其他形式的盘中,都允许有较大的角动量,但是由于整体的高效率的要求,活动星系核在其一生的主要吸积产能阶段,不可能由 ADAF 主导.在 AGN 一生最为活跃的阶段,可能是由薄盘和“苗条”盘主导.

在薄盘模型中,光学厚的盘物质的辐射近似为黑体辐射,由于引力能大部分在内区释放,其典型温度为 $10^5 - 10^6$ K 左右,因而在紫外产生一个大的辐射峰值.观测发现确实存在这样一个包,通常称为“大蓝包”.然而,薄盘模型预言的谱跟实际观测到的谱还存在很大的差别:在光学波段,观测到的谱比理论的热辐射模型预言的要陡;热辐射在高频有一很陡的下降,但观测谱在远紫外波段并不存在这一明显特征.事实上,只要活动星系核中有一大部分辐射由内区的光学厚物质产生,热辐射的光度与面积和温度的关系必然给出“大蓝包”这一特征,而跟具体的盘结构无关.“苗条”盘也是极光学厚的,所以也产生紫外“大蓝包”.由于“苗条”盘对应的吸积率更高,盘的温度也更高,因而热辐射的峰值频率更高.在热辐射盘模型中,由于不同频率的辐射来自于不同半径的区域,而这些区域之间以声速交换信息,因而它预言了不同波段的变化有较大的时间延迟,这与一些活动星系核的多波段监测结果不符.这些问题可以通过对薄盘模型的修改来实现,通过提高不同区域的能量交换速度或者通过非热谱等方式来解决,其中讨论最多的是内区产生的 X 射线照射外区,从而缩短时延.

目前认为 ADAF 这类吸积流在一些很低光度的活动星系核起作用,这些活动星系核并不呈现明显

的“大蓝包”辐射特征,被认为是由于缺乏热的光学厚气体的证据,而与 ADAF 性质一致.由于盘内气体很热,有可能很容易形成向外的风,因此有人认为一些射电强的活动星系核的射电喷流的形成可能与这有关^[8].但是有一点可以肯定,并不是所有射电强的活动星系核中心都是 ADAF 盘,因为他们当中的不少同样具有强的“大蓝包”.

在较高光度的活动星系核中,除了存在明显的“大蓝包”的热辐射成分之外,其中几乎有同等的能量均匀地分布在不同的波段,这一特征明显有别于热辐射,我们称之为非热部分辐射.在太阳这样的活跃恒星中,非热的输出只占 10^{-5} ,因而不会对基本结构产生影响;而在活动星系核中,非热部分与热辐射在同一量级上,非热辐射部分对结构有重要影响.在标准的薄盘和“苗条”盘模型中,都没有考虑到非热辐射是怎样产生的.在太阳中,这些非热现象与磁场过程紧密相关,但理论上模拟磁场的实际产生过程还是一个难题^[9].在吸积盘中,流体间的强剪切运动很容易产生比较强的磁场,而磁场也一直被认为是盘中粘滞的主要来源.在活动星系核的吸积盘研究中,由于热与非热的成分相近,如果非热与磁场过程相关,那么磁场就可能具有动力学上的重要性,因此必须在盘的动力学结构上同时考虑磁场.由于引入磁场会使本来就复杂的问题更加复杂,目前大多数的吸积盘模型只考虑流体问题.

3 发射线区

活动星系核的谱的另一大特征是具有丰富的发射线,包括了宇宙中几乎所有比较丰富的元素不同电离程度的离子的发射线(图 1).其谱线可以分为两大类:一类是窄线,典型的宽度是每秒几百公里¹⁾,以强的禁线²⁾发射为特征,其中 [O III]5007 为最强;另一类是宽发射线,典型宽度在每秒五千公里,其中最宽的可达每秒二万五千公里.宽发射线中只有允许线和部分半禁线.

这些发射线是活动星系核区附近的气体被中心的连续谱照射之后产生的.线产生的主要过程有两

- 1) 在活动星系核中,谱线的宽度被认为是由于发射气体的运动多普勒移动引起的,因而一般用气体的运动速度来表示谱线宽度参数
- 2) 原子或者离子的亚稳激发态,其向下能级的自发跃迁系数很小,在地面即使是最好的实验室真空条件,粒子之间的二次碰撞时间短于其能级的寿命,因此这些能级主要是靠碰撞退激发的,在实验室的条件下,产生不了这些线

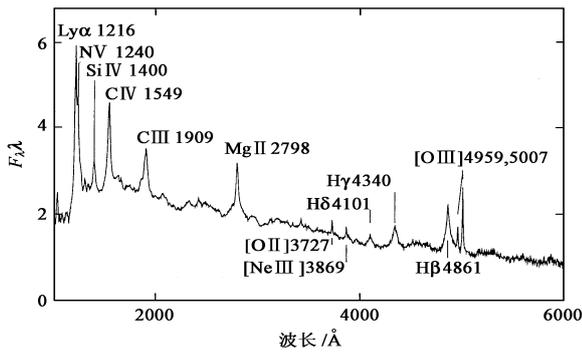


图1 类星体的平均光学-紫外波段谱

(图中展示了非常丰富的发射线,主要发射线已在图中标出.图中有很多小的局部鼓包和峰,它们是由一些重叠的线形成的)

步:第一步,能量高于原子或者离子外层电子结合能的光子把外层电子打跑,从而形成必要的离子,这一过程被称为光致电离.光致电离过程不只产生离子,而且往气体中注入能量.第二步是复合过程,即自由电子被离子俘获到某一能态,多余的能量以光子的形式发出,形成复合连续谱.由于氢是宇宙中最为丰富的元素,活动星系核中最为明显的复合连续谱是氢的巴耳末连续谱.在3000 Å左右形成了一个“小包”.复合到激发态的电子再通过级联过程落到基态,从而产生一系列的谱线,这些线被称为复合线.最为突出的复合线是氢的Ly α 和巴耳末线系列.与复合线形成不同,还存在另外一个激发过程,就是原子或者离子通过与电子碰撞而使外层的电子到激发态(碰撞激发过程).碰撞激发对一些碰撞截面比较大,而能级又与电子平均能量差得不多的重元素特别有效,它是发射线气体冷却的一个主要因素.几乎所有强的禁线都是通过碰撞激发的,而像CIV 1549这样的强的允许线也是以碰撞激发的贡献为主.

由于活动星系核的连续谱在频率空间宽分布,具有能电离各种离子的光子,因而可以允许同一元素与不同电离程度的离子共存,形成了与碰撞电离气体截然不同的光谱.由光致电离和复合平衡可以确定出平衡气体的电离程度.由于复合速率正比于离子和电子数密度的乘积,而电离速率正比于离子和电离光子数密度的乘积,因而电离光子数和粒子数密度的比(电离参数)基本上刻画了气体的电离程度.由加热和冷却平衡方程确定出气体的温度大约在 10^4 K,这与观测到的碰撞激发线的能量一致.由禁线和半禁线强度可以估计出发射线气体的粒子数密度,窄线区在 $10^3 - 10^6 \text{ cm}^{-3}$,宽线区在 $10^9 - 10^{11} \text{ cm}^{-3}$.

精确计算发射线谱是一件很复杂的事,其中主要的困难在于谱线的辐射转移的处理.在电离程度不太高时,需要同时考虑上万条线辐射转移问题,而原子的每个能级的分布并不处在热平衡状态,必须求解能级的布居方程.现有大部分计算用了一种称为逃逸几率的近似,但对于一些光学厚的谱线,这种近似有多好依然是个疑问.其次是很多输入参量(例如电离连续谱的形状)都无法直接观测.事实上,现有的模型计算结果跟观测到结构最简单的元素氢的线谱还有很大的差别^[10],这一差别疑为辐射转移近似处理引起的.这些困难阻止了更为雄心勃勃的计划,即通过测量发射线来确定气体的元素丰度,从而得出星系核心的早期化学演化历史.

气体的热运动速度只有10 km/s,远小于观测到的发射线宽度.现在认为,谱线宽度是由于产生谱线的气体的各个部分作相对的高速运动而形成的.目前有几类模型,其中一类模型是发射线区由很多的小云团组成,它们各自在作高速运动.在活动星系核的辐射场中的气体由于热不稳定性,产生二相平衡结构,一相是冷的、较高密度的物质,产生发射线气体(小云团),另一相是热的稀薄介质.但具体的计算发现,从现在观测到的连续谱,根本达不到二相平衡的温度,因而必须有其他的云团约束机制,磁场是其中的一种选择.在云团模型中,线宽的起因可以是云团在黑洞的引力场中运动引起的,也可能是辐射压加速引起的.由于辐射压和引力在大小上同一个量级,因此很难从理论上判断哪个因素主导.另一类模型是发射线气体是从吸积盘中吹出来的风,在辐射压下加速,但在靠近吸积盘的底部,以转动为主^[12].

窄发射线区的尺度为 $10^{16} - 10^{19} \text{ m}$,邻近活动星系核的窄发射线区能够用望远镜分辨,直接研究其结构;宽发射线区离中心黑洞的距离为 $10^{13} - 10^{15} \text{ m}$,其结构研究必须通过一些间接的办法.由于活动星系核的连续谱大都有较大幅度的变化,谱线是由连续谱激发的,这种变化同时也会引起谱线的变化,测量谱线对连续谱的响应能够给出宽发射线区的结构信息.这一方法需要消耗大量的望远镜观测时间,国际上已经组织过一系列的联测活动,结果表明宽发射线区是几何厚的,高电离度谱线的产生区远小于低电离度谱线的形成区.由于高电离度谱线比低电离发射线宽,因而得出离中心近的气体速度快的结果,与引力束缚模型的期望相一致.若谱线的宽度确实反映了维里化的速度场,那么测量宽线区的尺度和谱线宽度就能给出中心黑洞的质量.这一质量在

低光度的 Seyfert 星系核中为 $10^7 M_{\odot}$ 左右. 观测发现, 对于同一条谱线, 其发射区的尺度与光度的平方根成正比, 这一结果可能反映了不同活动星系核中宽线区的物理参数类似这一特征. 但由于已经进行过光变监测的大部分活动星系核光度较低, 而且射电辐射弱, 这些结论是否适用于高光度的类星体和射电强的活动星系核, 目前还是个疑问.

随着观测技术的提高, 活动星系核在 X 射线波段谱线研究也已经开始. 这些线的产生区域比一般的光学、紫外线更靠近黑洞, 携带着黑洞周围时空和气体的运动信息. 在引力场中, 气体高速运动的狭义相对论多普勒效应和黑洞的广义相对论效应相结合, 产生了很奇特的不对称谱线轮廓, 这与观测到的 6.4 keV 的 Fe K α 谱线轮廓 (见图 2) 相一致^[13]. 同时, 来自 Chandra 的新观测结果也包括来自延展的热相气体的谱线^[14], 从而有可能直接检验宽线区的二相模型. 随着大面积、高分辨率的空间 X 射线项目的实施, X 射线谱线研究最有希望获得活动星系核中大质量黑洞吸积的基本观测证据.

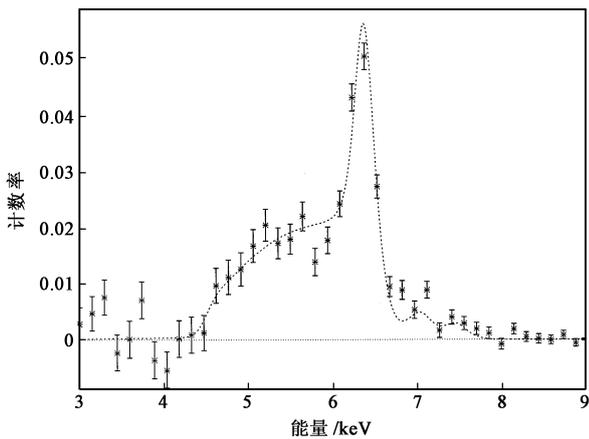


图 2 Seyfert 星系 NGC 4151 的奇特的不对称 Fe K 线轮廓以及来自黑洞的相对论性吸积盘的理论线轮廓比较

4 外流

除了吸积之外, 活动星系核存在着相对论性和非相对论性外流. 相对论性的外流表现在一类射电强的活动星系核的射电喷流中, 因为这类喷流最先而且最容易在射电波段测量到¹⁾, 因而通常被称为射电喷流. 随着观测技术的发展, 它们在光学波段和 X 射线波段的对应的喷流^[15] 也已经被观测到. 对内区的高分辨率的射电观测发现, 这些射电源经常会产生一些新的子成分, 这些子成分的表现运动速度

往往超过光速. 这一现象可以在狭义相对论的框架下得到解释: 这些子成分以接近光速几乎朝着观测者运动, 喷流的洛伦兹因子在 10 左右. 与吸积盘的辐射不同, 射电喷流的辐射几乎是纯的非热辐射, 即可很好地用幂律谱来描述, 同时这些辐射也具有较高的偏振度. 这些特征可以用相对论性电子在磁场中的同步辐射来很好解释; 由于同步辐射产生的光子不可避免地被相对论电子散射到更高的能量, 这被称为同步自康普顿辐射. 在电子动量各向同性的情况下, 同步辐射和逆康普顿辐射功率之比等于辐射区的磁场和辐射场的能量密度之比, 若同步辐射产生的辐射场能量密度超过磁场能量密度, 一次逆康普顿辐射超过同步辐射场, 二次的超过一次……, 这样电子很快就损失掉所有的能量, 压低了辐射场的能量密度. 由这一限制, 给出了同步辐射的亮温度应小于 10^{12} K. 在不少射电源中, 核心区域的亮温度超过 10^{12} K, 在这些源中同时观测到视超光速运动, 说明了相对论性放大效应起作用, 但这也不排除可能的相干辐射机制在起作用.

在一类称为 Blazar 的喷流对着观测者的射电源中, 空间 γ 射线天文台 (GRO) 测量到很强的高能 (10 GeV) γ 射线辐射, 而地面的更高能探测器已经在几个邻近的这类天体中测量到了 10 TeV 的极高能 γ 辐射^[16]. γ 射线辐射显然是在喷流中产生的, 一般认为它是通过高能电子散射低能光子而产生, 现在争议较大的是软光子究竟是在喷流中的同步辐射光子还是外光子场. 产生辐射电子的能量必定大于 γ 光子能量, 相对论电子的能量应在 10 TeV 以上. 电子的同步或者逆康普顿辐射能量损失速率正比于电子能量, 因而这些高能电子很快就损失掉能量, 这需要非常高的电子加速效率来实现. 在相对论性流体中, 电子如何加速到这么高的能量是一个没有解决的问题. 在激波加速机制中, 由于离子加速效率比电子高得多, 而离子的辐射损失要小得多, 所以有学者提出高能 γ 光子是由重子过程产生的, 而另一些学者提出甚高能宇宙线的产生可能与此有关.

喷流的产生、准直和加速是一个悬而未决的问题. 有几种喷流产生和加速的方案, 一种是辐射压加速模型, 这主要是 80 年代初发现高吸积率的厚盘解, 该解中在对称轴上有一个漏斗状的辐射锥, 被认

1) 因为射电波段采用了长和甚长基线干涉技术, 分辨率达到亚毫角秒, 比一般光学的角秒分辨率高得多

为是形成和约束喷流的自然管道,同时强大的辐射压加速物质到高速.后来发现,首先,这种盘在动力学上是不稳定的;其次,除非喷流以正负电子对为主,否则辐射不可能加速喷流到观测到的相对论性.现在讨论得比较多的是磁加速模型,由 Blandford 和其合作者^[17,18]提出的,其中又有两种:一种是通过磁场来提取快速转动黑洞的转动能,将其转化为电磁能,从而加速物质;另一种是吸积盘的磁流体力学风,如果有整体的磁场冻结在吸积盘上,而磁力线向外,物质在沿着磁力线向外运动的过程中就得到了加速.磁场本身也起到约束和准直作用,但是由于在弯曲空间下的磁流体力学是个很复杂的问题,现在这些都只是猜测.此外,现在还不清楚喷流里的物质是以轻子(正、负电子对)为主还是正常的等离子体(质子-电子).

宇宙中只有 10% 的活动星系核具有强的射电辐射,而其他的射电辐射要弱得多.一个更为基本的问题是为什么只有这部分活动星系核表现出强的射电辐射.观测表明,所有的射电强源都在大质量的巨椭圆星系中,而射电弱源在旋涡星系和椭圆星系中都有可能.最近的研究揭示这种差别可能出于这两类星系中心的黑洞质量不同,即射电强源中的黑洞质量较大^[19],这在理论上有点出乎所料,需要有进一步的观测支持.另外有些研究者提出,射电的起因可能不在于中心吸积盘,而在于外面有没有介质束缚喷流.这一点与射电源的核区环境通常有弥漫的热 X 射线辐射气体一致.

在活动星系核中还存在着另外一种非相对论性外流,速度为 $10^2 - 10^4$ km/s.这类外流主要通过蓝移了的紫外吸收线观测到,因而外流的速度可以很好地确定.这类外流跟射电性质没有关系,在射电强和弱的活动星系核中都可观测到.产生吸收线的物质离中心的距离在 $10^{15} - 10^{18}$ m 之间,但没有一个很好的准确估计距离的办法.然而这一距离对估计总的物质外流的速率非常重要.最近,更高电离度的吸收线也在 X 射线波段观测到^[20],因此人们希望对紫外和 X 射线吸收的细致测量和理论比较能够给出离中心的距离和吸收物质的总量.外流的速度和吸收物质的柱密度随光度的增大而增大,几乎可以肯定外流是由辐射加速的.至于外流的起源,现在还没有定论,可能是吸积盘的热风,也可能是更外面的物质被中心辐射场吹出.

5 结束语

毫无疑问,活动星系核是一个研究极端强引力场中物理过程的天然实验室.虽然大多数研究人员都接受现有基本理论框架——大质量黑洞吸积周围的气体,但大质量黑洞还有待于进一步从观测上证实,这可能是今后几年观测的一个重点.在黑洞的引力场中,气体吸积的具体细节是具有挑战性的流体和磁流体力学问题,但随着观测手段和计算技术的提高,对这方面问题的认识将会进一步加深,同时观测会提出更多的问题.星系活动的起源问题的研究也已经提到日程上来,如大质量黑洞的形成,气体的供给等问题,这些又与星系的形成和演化过程紧密相关.这些问题无疑将成为未来天体物理研究的重点问题之一.

参 考 文 献

- [1] Schmidt M. *Nature*, 1963, 197: 1040
- [2] Zeldovich Y B, Novikov I D. *Dokl. Acad. Nauk. SSSR*, 1964, 158: 811
- [3] Rees M J. *Ann. Rev. Astron. & Astrophys.*, 1984, 22: 507
- [4] Lynden-Bell D. *Nature*, 1969, 223: 690
- [5] Shakura N I, Sunyaev R A. *Astron. & Astrophys.*, 1973, 24: 337
- [6] Novikov I D, Thorne K S. In: De Witt C, De Witt B eds. *Black Holes*. New York: Gordon and Breach, 1973
- [7] Abramowicz M A, Czerny B, Lasota J P *et al.* *Astrophys. J.*, 1988, 332: 646
- [8] Blandford R D, Begelman M C. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 1999, 303: L1
- [9] Parker E N. *Physics Today*, 2000(6): 26
- [10] Francis P J, Hewett P C, Foltz C B *et al.* *Astrophys. J.*, 1999, 373: 465
- [11] Ferland G. In: *Quasars and Cosmology*. San Francisco: ASP, 1999, 147
- [12] Murray N, Chiang J. *Astrophys. J.*, 1997, 474: 91
- [13] Wang J X, Zhou Y Y, Wang T G. *Astrophys. J.*, 1999, 519: L35
- [14] Ogle P M, Marshall H L, Lee J C *et al.* *Astrophys. J.*, 2000, 545: 810
- [15] Chartas G *et al.* *Astrophys. J.*, 2000, 542: 655
- [16] Aharonian F A *et al.* *Astron. & Astrophys.*, 2000, 353: 847
- [17] Blandford R D, Znajek R L. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 1977, 179: 433
- [18] Blandford R D, Rayne D G. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 1982, 199: 883
- [19] Laor A. *Astrophys. J.*, 2000, 543: L111
- [20] Kaspi S *et al.* *Astrophys. J.*, 2000, 535: L17