

# 黑洞证认的新进展

王 伟 赵永恒

(中国科学院国家天文台 北京 100012)

## 摘 要

黑洞是广义相对论的一个重要理论预测,它的存在与否一直是物理学家和天文学家关心的焦点。特别是由于近几年大量先进的观测设备投入使用和观测方法的改进,使得黑洞证认工作有了巨大的进展,成为当今天文学的一个热点。重点综述了恒星级黑洞和星系核的超大质量黑洞的各种天文观测证据,并介绍了与黑洞相关的天体物理学的一些重要前沿。讨论了正在开展的国际重大项目和探索原初黑洞的初步结果,并且展望了未来寻找黑洞天文观测证据的前景和对观测研究的建议。

**关键词** 黑洞物理学 — 双星 — 星系核 — 吸积盘

**分类号** P145.8

## 1 引 言

黑洞作为广义相对论的一个解,从理论上提出这个概念已近百年了。但它是否存在于宇宙之中,则一直是人们关心的问题。由于经典的黑洞本身不发光,寻找黑洞存在的天文观测证据十分困难,但 20 世纪 60 年代射电天文和 X 射线天文学的兴起以及观测技术的不断改进,使得我们对黑洞的证认工作取得了巨大的进展。今天,人们已经接近确认在大多数星系核中心都存在着一个超大质量的黑洞,银河系某些 X 射线双星系统中也存在着黑洞候选体。

现代物理学家和天文学家根据黑洞的不同起源和形成过程将黑洞分成 3 类:

- (1) 恒星级黑洞:它们主要是在大质量恒星死亡时的超新星爆发过程中诞生的;
- (2) 超大质量的黑洞 ( $10^6 \sim 10^9 M_{\odot}$ ):它们主要由于星系动力学,如超大质量或相对论性恒星集团的坍缩,或者是星系并合等原因在星系中心形成的;
- (3) 原初黑洞:在早期宇宙的密度扰动或相变过程中所形成的某些极端条件下,会形成一系列质量分布较广的黑洞<sup>[1]</sup>。

Hawking 在 1975 年一篇重要的文章<sup>[2]</sup>中考虑了在黑洞表面的量子效应,表明黑洞不再是黑的,而是具有辐射的(即著名的 Hawking 辐射或蒸发),并预测质量大约  $10^{15} \text{g}$  的原初黑洞与我们宇宙的寿命差不多。但是,由于目前观测水平的限制,还无法对这一理论进行验证,

因此本文将集中讨论前两种黑洞的观测证据。最近几年,众多先进的观测设备投入使用和开展多波段观测,使得黑洞证认工作取得了重大的进展。最近关于黑洞观测证据的综述可参见文献 [3~5]。

## 2 恒星级黑洞

对恒星级黑洞候选体的研究直接与 X 射线天文学的兴起密切相关。在银河系内和大小麦哲伦云中发现了大量的 X 射线双星系统,它们是由一颗致密星和一颗伴星组成,而这种致密星现在认为只能是中子星和黑洞两种候选体。因此从观测上区分这两种天体便成了天文学家寻找黑洞存在证据的关键。

### 2.1 双星系统的质量函数

因为中子星存在质量上限,而黑洞可以具有任何质量,所以当所测得双星系统中致密星质量大于中子星质量上限时,即可认定它是一个黑洞候选体,这是人们寻找恒星级黑洞最可靠的方法。根据中子星的状态方程和星体是否旋转,理论物理学家已经给出了中子星的质量范围,其上限被称为 TOV (the Oppenheimer-Volkoff) 极限。尽管还存在着一定的争议,但现在人们普遍认为当致密星质量大于  $3M_{\odot}$  时,它非常可能是黑洞。因此,在 20 多年的时间里,对 X 射线双星系统进行了长期观测,以测量致密天体的质量。然而,确定天体质量是很困难的,至今真正精确确定出质量并确认为黑洞候选体的还不多。

在 20 世纪七八十年代, Cygnus X-1 是天文学家共同关注的焦点,因为它最可能是黑洞的候选体。它已被证认是包括一个大质量 OB 型超巨星 HDE 226868 和一个致密天体组成的双星系统,其轨道周期为 5.6d。X 射线的观测表明其光变时标达到 1ms,说明致密天体只能是中子星或黑洞<sup>[6]</sup>。对 HDE 226868 进行长时间详细的观测,得到了其光谱的多普勒位移,从而可以画出该超巨星的视向速度曲线(图 1),由此便得到了双星的轨道周期  $P$ 、曲线(即视

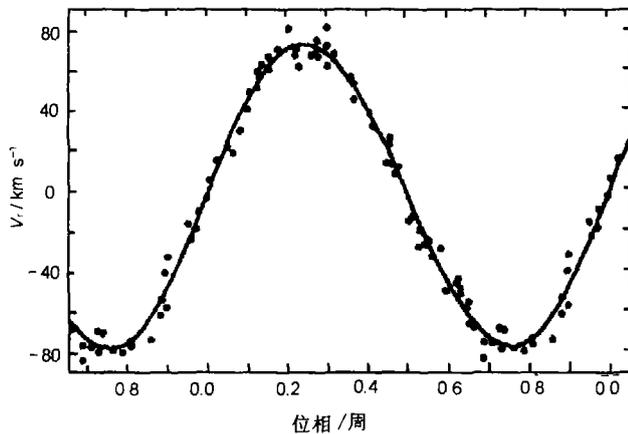


图 1 Cygnus X-1 系统中 HDE 226868 的视向的速度曲线<sup>[7]</sup>  
点是所有谱线测量得到的平均值,实线是圆轨道的拟合

向速度)的振幅  $K$  和轨道偏心率等重要参数<sup>[7]</sup>。然后对双星系统运用开普勒定律(图 2),可以得到  $K = 2\pi a_2 \sin i / P$ , 并且定出一个量:

$$f(M) = \frac{(M_1 \sin i)^3}{(M_1 + M_2)^2} = \frac{PK^3}{2\pi G},$$

$f(M)$  即双星系统的质量函数,具有质量的量纲,是致密星的质量下限。对于 Cygnus X-1,  $f(M) = 0.252M_{\odot}$ 。为了进一步获得致密星的质量,就必须知道 OB 型恒星的质量以及轨道倾角  $i$ 。

1986 年, Gies 和 Bolton<sup>[8]</sup> 对 Cygnus X-1 双星系统的大量观测数据进行了

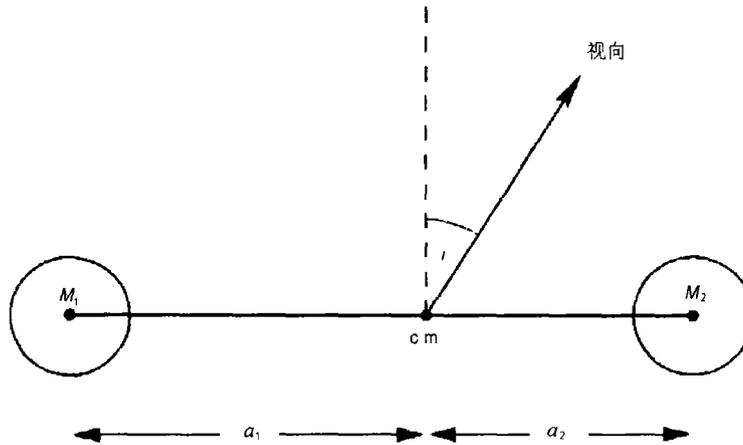


图 2 双星系统的平面示意图

$M_1$  是致密星,  $M_2$  是普通的恒星,  $a_1$ 、 $a_2$  则是各自到系统质心 (c.m.) 的距离,  $i$  是轨道倾角

详尽的分析, 得到了双星中两个天体的质量比  $q = M_1/M_2$ , 并获得了比较可靠的倾角值。他们最终得到致密星质量  $M_1$  的下限为  $7M_\odot$ 。1995 年, Herrero 等人<sup>[9]</sup> 更进一步定出  $M_1 = 10.1M_\odot$ ,  $M_2 = 17.8M_\odot$  以及轨道倾角  $i = 35^\circ$  (见表 1)。这些质量都远远大于中子星的质量上限, 基本上可以肯定 Cygnus X-1 就是黑洞双星系统。

表 1 一些黑洞候选体的质量及其双星系统的主要参数

黑洞	质量 / $M_\odot$	质量函数 / $M_\odot$	轨道倾角 / ( $^\circ$ )	轨道周期 / d	参考文献
Cygnus X-1	10.1	0.252	35	5.6	8, 9
GS 1124-683	6.3	3.01	60	0.43	10
GS 2000+25	8.5	4.97	65	0.4	11
LMC X-3	7	2.3	60	1.7	12
GRO 1655-40	7.02	3.24	69.5	2.6	13
V4.4 Cygni	12	6.08	56	6.5	14, 15
A 0620-003	7.3	3.18	55	0.32	16

现在虽然已经比较有把握地认为可能有近 30 个黑洞候选体, 但真正得到精确质量测量结果的黑洞候选体却还比较少。表 1 中列出了一些有精确质量测定的黑洞候选体及其双星系统的主要参数。

最近对 X 射线新星 XTE J1118+480 的观测发现其质量函数  $f(M) = 6.00M_\odot$ , 这已经说明这个系统的致密天体必定是一个黑洞, 使得黑洞 X 射线新星的数目增加到了 11 个<sup>[17]</sup> (表 1 中 V4.4 Cygni 便是其中之一), 他们并给出了这个黑洞的质量上限为  $10M_\odot$ 。

## 2.2 X-射线谱的特征

对于已知的银河系黑洞 X 射线双星和 X 射线脉冲星的 X 射线波段的观测分析表明, 其 X 射线谱的形状有明显的不同。图 3 中显示了 Cygnus X-1 在高 (软) 态和低 (硬) 态时的谱形。在

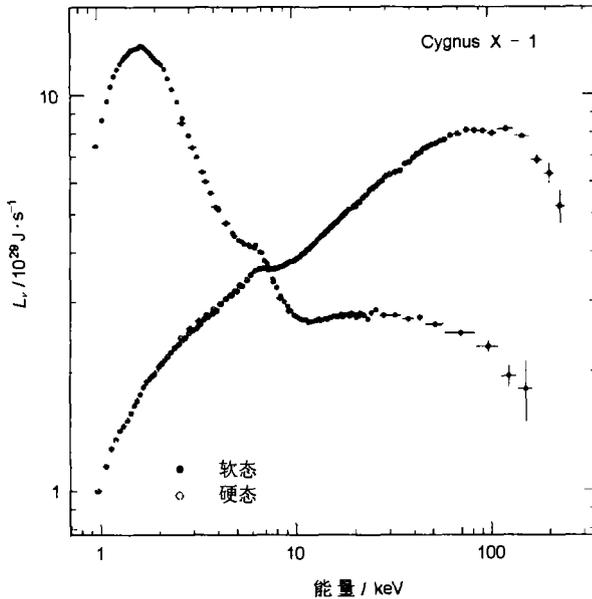


图3 Cyg X-1 在软 / 高态 (实心圆) 和硬 / 低态 (空心圆) 的能谱分布<sup>[18]</sup>

观测点来自 ASCA 和 RXTE 的观测数据

强度直接与黑洞的自转有关, 因而提供了一种探测克尔黑洞 (带有角动量) 的方法。他们按黑洞自转情况将已知的黑洞双星系统分成了三类 (这里用  $a = Jc/2GM^2$  ( $-1 \leq a \leq 1$ ) 来表征黑洞的角动量):

(1) 极端的共转 (prograde) 黑洞系统 ( $a \leq 1$ ): 黑洞自转方向与盘的旋转方向一致。目前只包括 GRO J1655-40 和 GRS 1915+105, 它们是银河系仅有的两个具有超光速喷流的源。

(2) 不旋转和慢转黑洞系统 ( $a \approx 0$ )。大多数黑洞双星系统属于这一类。

(3) 极端反转 (retrograde) 黑洞系统 ( $a \geq -1$ ): 黑洞自转方向与盘的旋转方向相反。

Zhang 等人认为现在我们观测到的高态 1 ~ 2keV 能段间探测不到超软成分的

低态, 大部分黑洞系统辐射的能量集中在几百 keV 范围内, 而中子星双星系统的能量则基本在较低的能量段里 (图 4)。在高态, 黑洞系统的谱有一个非常软的成分, 其特征温度 (0.5~2keV) 比相同光度的中子星双星相应地要低很多, 并且黑洞双星在高态时表现出一个硬的幂律形状的尾巴 (> 100keV), 而即使在光度很大的中子星双星系统里也从未发现这种谱形。因此, X 射线双星能谱的研究成了天文学家探索黑洞的重要手段之一。

超软的 X 射线谱的成分被认为是不存在强硬表面和存在强引力的证据, 但是在某些黑洞候选体 (甚至包括已有精确的质量测量者) 中, 未发现这种超软的成分, 这使许多天体物理学家感到十分困惑。在 1997 年, Zhang、Cui 和 Chen<sup>[20]</sup> 认为这种超软成分的

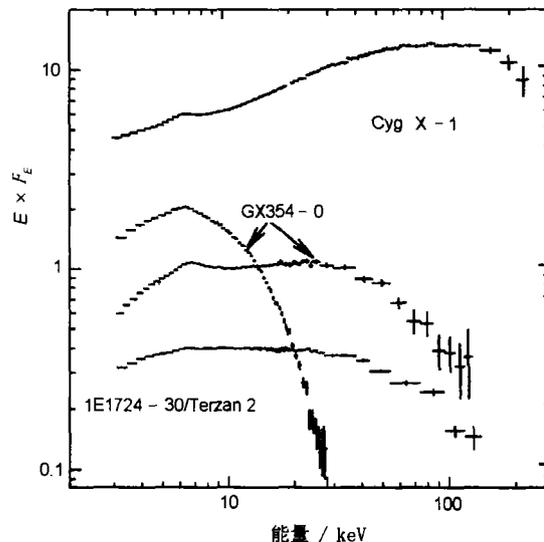


图4 一些黑洞双星和中子星双星系统的能谱<sup>[19]</sup>

GX354-0/4U1728-34 和 1E1724-30/Terzan 2 都是中子星系统, 图中并显示了 GX354-0 的低态和高态, 即使在低态 (硬的能谱), 中子星系统的能谱也要比 Cyg X-1 软很多

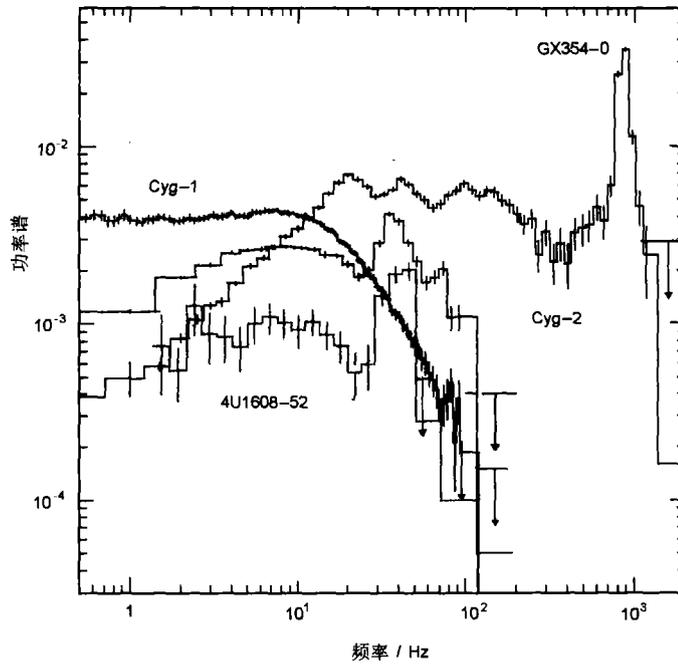


图 5 黑洞双星 (Cyg X-1) 和中子星双星 (GX354-0, Cyg X-2 和 4U1608-52) 在高态时的宽带功率谱<sup>[19]</sup>  
 中子星在高频段 (kHz) 也反映出很大的变化, 而黑洞在几百 Hz 处有一个截止

黑洞系统应属于这种极端的克尔黑洞加上一个反转的盘。现在发现了 6 个这样的天体。

现在也可以利用另一方法即傅里叶功率谱来区分黑洞与中子星 X 射线双星系统 (图 5)。研究发现<sup>[19]</sup>, 中子星系统的功率谱比黑洞要宽许多, 甚至可以延伸到 kHz 以上, 因此一般认为观测到的准周期振荡 (QPO) 频率大于 500Hz 以上的 X 射线源应是中子星系统。但是至今我们尚未得到利用功率谱来证认黑洞双星系统的确切判据。

### 2.3 黑洞视界的证据

黑洞与其它天体的本质差别在于存在视界而没有坚硬的表面。黑洞没有表面, 当吸积物质到达黑洞视界附近时, 便会被直接吸了进去; 而吸积物质到达中子星坚硬的表面时, 会发生强烈的撞击, 形成一个温度很高的区域, 在成像时

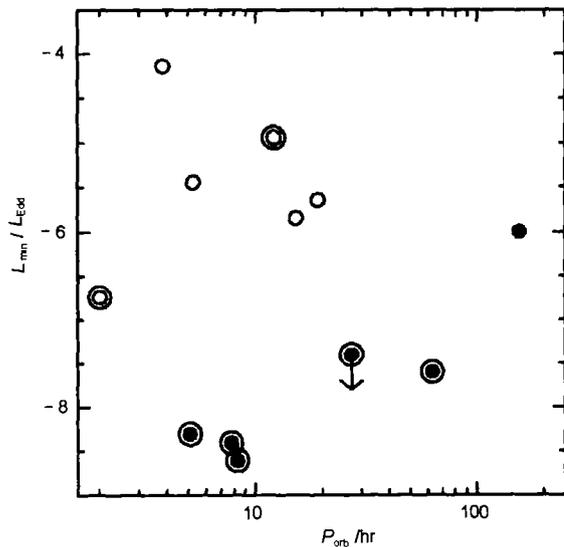


图 6 BHX N(实心圆) 和 NSXN(空心圆) 在宁静态的光度  
 有圈的数据点取自 Garcia et al. (2001)<sup>[22]</sup>, 其它的则来自 Menou et al. (1999)<sup>[23]</sup> 的观测。很明显, 黑洞系统在宁静态的光度比相应的中子星系统低很多 (平均约低两个量级)

会存在一个亮点。这一推测通过 Chandra 卫星 X 射线观测已被证实了<sup>[21]</sup>，中子星双星系统的中心是亮的，而黑洞系统的中心则很暗，这只是视界存在的可能迹象。正是它们不能提供有力的证明，人们不得不继续寻找黑洞视界存在的确切证据。

人们已经发现黑洞 X 射线新星 (BHXN) 在宁静状态时的光度非常低，比相应的中子星 X 射线新星 (NSXN) 要低好几个量级 (图 6)，如此低的光度无法用标准吸积盘模型来解释。在 20 世纪 90 年代，Narayan 等人<sup>[24~26]</sup> 提出用吸积过程的另一个解即径移吸积流 (advection-dominated accretion flow, ADAF) 来解释这种低光度的吸积过程。在 ADAF 模型中，吸积过程所产生的能量以热能的形式储存起来，形成辐射效率相对较低的吸积流。这种能量流穿过黑洞视界便消失了，无法被观测到；而当中心天体有固体表面时，这种流与表面相互作用，将能量释放出来，就可能被观测到，所以对于相同的吸积率，黑洞的光度将会比中子星暗很多<sup>[27]</sup>。

由于 BHXN 和 NSXN 具有许多相似的性质，更重要的一点是宁静状态时它们的吸积率几乎一样，但是如图 6 所示，利用 Chandra 卫星观测到 BHXN 在宁静状态时的 X 射线光度比 NSXN 低了许多。因此，上述 ADAF 的解释与黑洞无表面在观测上是一致的，吸积能流可能直接进入黑洞视界<sup>[22]</sup>。

#### 2.4 黑洞起源于超新星吗？

现代恒星理论预测大质量 ( $> 10M_{\odot}$ ) 的恒星死亡时会经历一次超新星爆发，外包层被抛掉，中心核则坍缩成中子星或黑洞。20 世纪 60 年代脉冲星的发现以及与超新星遗迹成协，证实了中子星确实起源于超新星爆发，但黑洞却一直未找到观测上的证据。

1999 年，Israellen 等人<sup>[28]</sup> 在黑洞 X 射线双星系统 GRO J1655-40 的伴星光谱中探测到了  $\alpha$  元素 (核子数为 He 的倍数且具有对称质子和中子数的稳定元素，如 O、Mg、Si、S、Ca)。GRO J1655-40 从双星轨道观测可以得到暗天体的质量范围为  $4.1 \sim 7.9M_{\odot}$ ，是黑洞候选体，并且其伴星的质量范围为  $1.6 \sim 3.1M_{\odot}$ <sup>[29,30]</sup>。因为一颗普通恒星不可能产生这些  $\alpha$  元素，所以最有可能的解释是这些元素来源于黑洞前身星的超新星爆发过程。为了形成黑洞，并考虑双星系统的动力学因素，可以定出 He 核质量下限应为  $5 \sim 7M_{\odot}$ ，最大值为  $10 \sim 16M_{\odot}$ ，这样通过现有的恒星模型估测出其前身星质量范围为  $25 \sim 40M_{\odot}$ 。

这个重要的发现为黑洞起源于超新星爆发过程的推测提供了依据。而且，他们的观测发现 Fe 的丰度没有很大的增加，这暗示着黑洞可能是由大质量恒星中心的铁核直接坍缩而成，即是一次“Hypernova”。这似乎也是对现代天文学家解释  $\gamma$  射线暴 (gamma-ray bursts, GRBs) 的 Hypernova 模型<sup>[31]</sup> 的支持。

### 3 超大质量黑洞

超大质量黑洞的想法起源于 20 世纪 60 年代类星体的发现。这类天体的光度极大，甚至高达  $10^{39} \sim 10^{41} \text{J/s}$ ，而根据其光变特征，人们发现其辐射区域应小于 1 光年。在如此致密的区域里，却释放出巨大的能量，用通常的物理机制都无法解释，因此认为其中心应为一个超大质量的黑洞。现在人们普遍认为这类称为活动星系核 (AGN，包括类星体、赛弗特星系等) 的天体都具有相同的能源机制：超大质量黑洞加上吸积盘。目前至少有两个事实说明 AGN 的能源机制与黑洞有关：(1) 吸积的能量转化率大约是 10%，比恒星内部的热核反应的效率 0.7%

要高出许多。(2)天文学家发现大约有 10% 的 AGN 都存在着相对论性的喷流(洛伦兹因子在 10 以上)。这种现象与黑洞旋转有关。当然上述想法已大大扩展了,认为大多数星系的中心都应存在着超大质量的黑洞。这个想法在观测上也不断地得到证实。

### 3.1 星系核区恒星的动力学

要观测星系中心的恒星的动力学状况是很困难的。星系中心的恒星很密,很难分辨开来,而对于遥远的星系,地面望远镜进行动力学观测的能力有限。这种状况在 20 世纪 90 年代哈勃空间望远镜(HST)上天以后有了重大的改善。由于 HST 具有高的角分辨本领和灵敏度,它能够精确测量附近一些星系的质光比、旋转速度、中心恒星的分布和速度弥散,再根据牛顿定律,便可以计算得到中心天体的质量。至今,利用此方法 HST 已经测量了附近 20 多个星系中心黑洞的质量,其质量范围为  $10^6 \sim 10^9 M_{\odot}$ <sup>[32]</sup>(见表 2)。

表 2 恒星动力学方法测得的星系中心超大质量黑洞

星系	星系类型	黑洞质量 / $M_{\odot}$	速度弥散 / $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	距离 / Mpc	参考文献
Galaxy	Sbc	$2.6 \times 10^6$	75	0.008	37,38
M 31	Sb	$4.5 \times 10^7$	160	0.76	39,40
M 32	E2	$3.9 \times 10^6$	75	0.81	41,42
M 81	Sb	$6.8 \times 10^7$	143	3.9	43
NGC 821	E4	$3.9 \times 10^7$	209	24.1	44
NGC 1023	S0	$4.4 \times 10^7$	205	11.4	45
NGC 2778	E2	$1.3 \times 10^7$	175	22.9	44
NGC 3115	S0	$1.0 \times 10^9$	230	9.7	46
NGC 3377	E5	$1.1 \times 10^8$	145	11.2	47
NGC 3379	E1	$1.0 \times 10^8$	206	10.6	48
NGC 3384	S0	$1.4 \times 10^7$	143	11.6	44
NGC 3608	E2	$1.1 \times 10^8$	182	23.0	44
NGC 4291	E2	$1.9 \times 10^8$	242	26.2	44
NGC 4342	S0	$3.0 \times 10^8$	225	15.3	49
NGC 4473	E5	$0.8 \times 10^8$	190	15.7	44
NGC 4486B	E1	$5.0 \times 10^8$	185	16.1	50
NGC 4564	E3	$5.7 \times 10^7$	162	15.0	44
NGC 4594	Sa	$1.0 \times 10^9$	240	9.8	51
NGC 4649	E1	$2.0 \times 10^9$	375	16.8	44
NGC 4697	E4	$1.7 \times 10^8$	177	11.7	44
NGC 4742	E4	$1.4 \times 10^7$	90	15.5	52
NGC 5845	E	$2.9 \times 10^8$	234	25.9	44
NGC 7457	S0	$3.6 \times 10^6$	67	13.2	44

银河系中心是否也存在超大质量的黑洞呢?这是大家都感兴趣的问题。Lynden-Bell 和 Rees<sup>[33]</sup>早在 1971 年就预见银河系中心也应该存在一个大质量黑洞。今天,通过多年详尽的观测,人们得到了银河系中心三维的恒星动力学情况并由此提供了很强烈的证据表明银心确实存在一个超大质量的黑洞<sup>[34~37]</sup>。

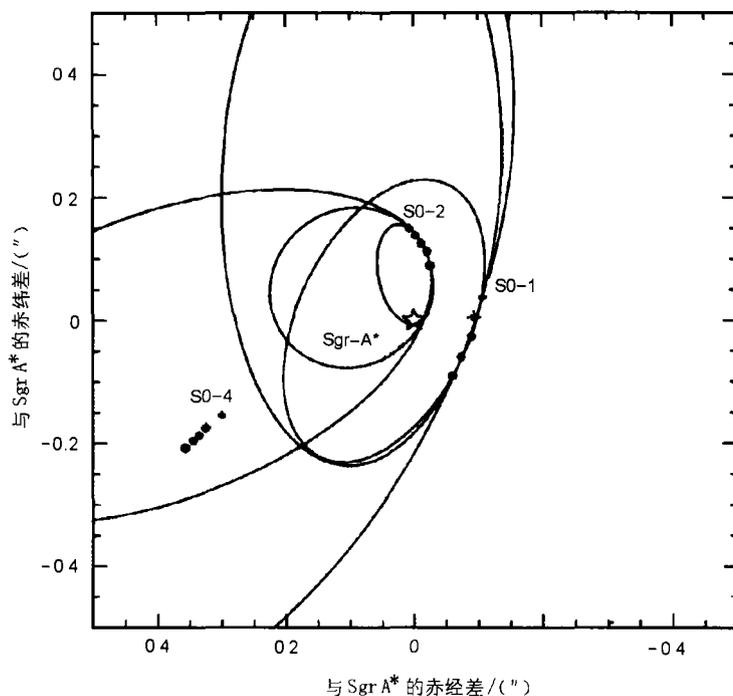


图 7 银心三颗恒星 S0-1、S0-2 和 S0-4 测量的运动数据和允许的一些轨道形状<sup>[38]</sup>

S0-1 和 S0-2 绕 Sgr A\* 作顺时针运动, 而 S0-4 则向外作径向运动。通过轨道分析, 可获得中心质量为  $2.6 \times 10^6 M_{\odot}$ , Sgr A\* 的真实位置也可得到 (图中的五角星)

因为银心方向的星际消光非常厉害, 可见光观测很困难, 但近红外波段的观测却可以进行, 能提供更新更有力的证据。银河系中心附近 Sgr A\* 的 0.01 pc 范围内单星的运动已经在近几年得到了十分精确的测量, 确定银河系中心黑洞质量范围为  $(2.3 \sim 3.3) \times 10^6 M_{\odot}$ <sup>[36,37]</sup>。Ghez 等人<sup>[38]</sup> 在 2000 年利用 Keck 望远镜得到银心恒星集团  $2.2 \mu\text{m}$ (K 波段) 高分辨率的图像, 并且测量在中心 0.005 pc 内三颗恒星的加速度, 因此获得了更为精确的中心黑洞质量, 而且对黑洞位置进行了一定限制 (图 7), 他们将黑洞质量定为  $2.6 \times 10^6 M_{\odot}$ 。

### 3.2 星系核心区物质开普勒运动盘

星系中心区域开普勒运动盘的存在也是黑洞存在的重要证据, 并且能由此精确定出中心黑洞的质量。

现代天文学家利用 HST 的观测得到了附近一些星系中心 100 pc 左右气体盘的动力学行为。通过测量盘上电离气体的发射线 (如  $\text{H}\alpha$  线) 的特征, 可以找到气体作开普勒运动轨道的证据, 这也说明了应存在由中心质量引起的引力场。对室女座星系团的巨椭圆星系 M87 的观测是一个非常好的例子。Maccletto 等人<sup>[53]</sup> 在 1997 年得到了 M87 中心电离气体盘  $\text{H}\alpha$  发射线云的速度场, 分析其谱线轮廓和旋转曲线, 发现与开普勒轨道运动符合得很好。他们测量了在 M87 中心 3pc 范围内大约有  $3.2 \times 10^9 M_{\odot}$  的质量。最近, 利用 HST 对 NGC 4203 的观测<sup>[54]</sup>

也证实星系中心存在黑洞和吸积盘。

另一个独立的观测手段是观测星系中心存在水脉泽辐射的盘。水脉泽的发射线是  $1.3\text{ cm}$ ，在射电波段，并且其射电辐射流量很强，比较容易观测。一个著名的例子是利用甚长基线阵 (VLBA) 对旋涡星系 NGC 4258 的观测<sup>[55]</sup>。因为 VLBA 的射电观测的角分辨率比 HST 还要高两个量级，达  $0.001''$ ，它能观测到在中心  $0.1\text{ pc}$  范围内一些小的水脉泽的分布情况，并发现它们几乎在同一平面上。VLBA 的谱分辨率也很高，得到的旋转速度与圆轨道开普勒运动在小于 10% 精度上保持一致 (图 8)。最后，VLBA 确定在核心  $0.13\text{ pc}$  内的质量为  $3.6 \times 10^7 M_{\odot}$ ，这不可能是恒星集团，因此强烈地支持了 NGC 4258 中心存在超大质量黑洞的观点。

在表 3 中，我们列出了目前利用上面两种方法获得的所有超大质量黑洞的质量和其宿主星系的一些性质。综合表 2 和表 3 可知目前已经精确地测定了 38 个星系中心的黑洞质量，这为我们进一步研究中心黑洞的性质、黑洞与星系核或星系的关系以及整个星系形成和动力学演化提供了很好的样本。

### 3.3 Fe 线

对恒星和气体动力学的测量都是在远离几十个黑洞引力半径之外，因此我们仅仅在牛顿框架下证实了在星系中心存在大质量的暗天体为黑洞，而不能对黑洞最本质的特征——强引力场的广义相对论效应进行直接检验。但是 X 射线观测为我们提供了重要的途径，特别是发现在 X 射线波段存在  $6 \sim 7\text{ keV}$  的发射线轮廓，一般认为是 Fe  $K\alpha$  线。通过研究 Fe 线的形状可以证实中心存在吸积盘和黑洞，又因为 Fe 线的发射区只有几个引力半径，它能进一步检验广义相对论的观测效应——引力红移，并且可以对中心黑洞的性质进行一定的限制。

从理论上可以计算出被观测到的 Fe 线轮廓<sup>[67,68]</sup>。图 9 显示了分别对应于施瓦西黑洞和克尔黑洞两种不同情形时 Fe 线的发射轮廓，在施瓦西吸积盘中还画出了不同轨道倾角对应的轮廓。我们所观测到的宽的 Fe 线轮廓是由于多普勒效应 (盘的运动) 和引力红移的共同作用的结果，其中蓝端对轨道倾角最敏感 (多普勒致宽)，而红翼则直接依赖盘内半径大小 (引力红

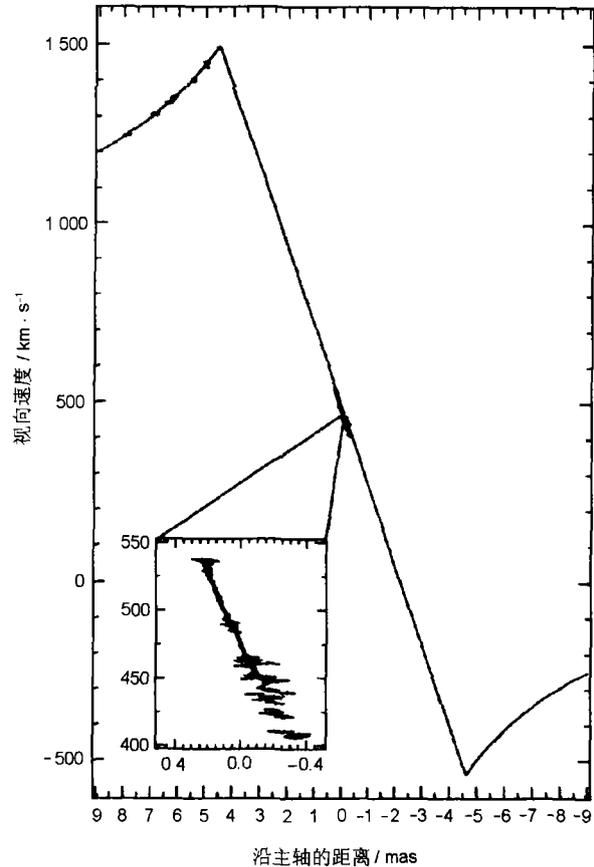


图 8 水脉泽的速度相对离主轴距离的曲线<sup>[55]</sup>

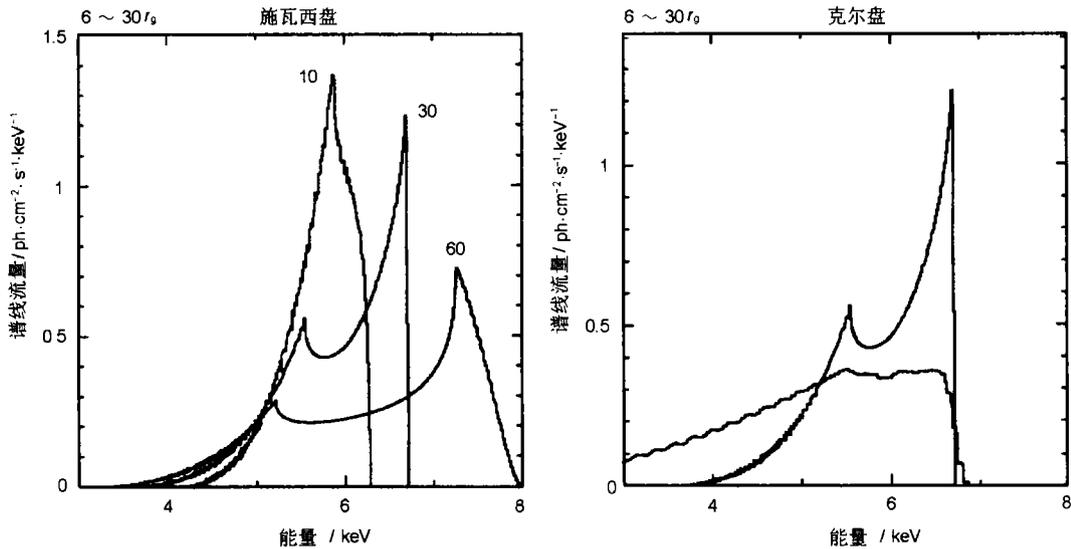
实线是利用开普勒轨道运动计算得到的，它与 VLBA 的观测结果吻合得非常好

表 3 利用吸积盘方法得到的星系核区超大质量黑洞

星系	星系类型	黑洞质量 / $M_{\odot}$	速度弥散 / $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	距离 / Mpc	参考文献
NGC 2787	SB0	$4.1 \times 10^7$	185	7.5	56
NGC 3245	S0	$2.1 \times 10^8$	205	20.9	57
NGC 4261	E2	$5.2 \times 10^8$	315	31.6	58
NGC 4374	E1	$4.3 \times 10^8$	296	18.4	59
NGC 4459	SA0	$7.0 \times 10^7$	167	16.1	56
M 87	E0	$3.2 \times 10^9$	375	16.1	53,60
NGC 4596	SB0	$0.8 \times 10^8$	136	16.8	56
NGC 5128	S0	$2.4 \times 10^8$	150	4.2	61
NGC 6251	E2	$6.0 \times 10^8$	290	106	62
NGC 7052	E4	$3.3 \times 10^8$	266	58.7	63
NGC 4203	S0	$6.0 \times 10^6$	124	9.7	54
IC 1459	E3	$2.0 \times 10^8$	323	29.2	66
NGC 4258	Sbc	$3.7 \times 10^7$	120	7.2	55
NGC 1068	Sb	$1.7 \times 10^7$	151	15	65
NGC 4945	Scd	$1.4 \times 10^6$		3.7	66

注：上半部分的质量是由气体盘的动力学获得的，下面则是水脉泽观测的结果。

移)，而且克尔黑洞的红端会被拉得更长。这是因为施瓦西黑洞吸积盘的内半径（即最小稳定圆轨道）只能是  $3r_g$  ( $r_g = GM/c^2$ ，即施瓦西半径)，而克尔黑洞吸积盘在赤道面的最小稳定轨道半径甚至可以小于  $r_g$ 。

图 9 理论预测的 Fe K $\alpha$  线 (6.7keV) 的轮廓

左图对应于施瓦西黑洞的吸积盘从  $6 \sim 30r_g$  的辐射，并画出了不同轨道倾角的情形<sup>[67]</sup>。右图则是一个极端克尔黑洞的盘从  $6 \sim 30r_g$  (窄) 和  $1.25 \sim 30r_g$  (宽) 发射的轮廓<sup>[68]</sup>。

第一个清晰的宽的 Fe 线是 1994 年由 ASCA 卫星在对赛弗特星系 MGC-6-30-15 的观测中发现的<sup>[69]</sup>(图 10)。其观测数据可以通过一个从  $6r_g$  至  $40r_g$ 、倾角为  $30^\circ$  的吸积盘的辐射来拟合<sup>[70]</sup>。同样清晰的 Fe 线轮廓在 NGC 3516 也被观测到<sup>[71]</sup>(图 10)，它的形状与十分接近黑洞作开普勒运动的盘的发射十分吻合。ASCA 对 MGC-6-30-15 的不断观测发现, Fe 线偶尔会改变其轮廓<sup>[72,73]</sup>, 而且被拉向更红的一端, 这似乎提供了该星系中心存在一个快速旋转的克尔黑洞候选体的可能证据<sup>[74]</sup>。

### 3.4 $\gamma$ 射线暴作为黑洞的探针

X 射线的辐射已经有了引力红移的效应, 但还不十分明显, 因为盘离黑洞仍然有一定的距离, 引力场并不是足够强, 并且还受到多普勒效应的影响。Wang 和 Zhao<sup>[75]</sup> 在 2001 年提出了一种探测来自超强引力场辐射的可能途径。他们认为能十分靠近黑洞才发生潮汐作用并能产生辐射的天体只可能是致密星, 中子星的可能性最大。黑洞与中子星并合是一个极高能的过程, 产生大量的  $\gamma$  射线光子, 其时标短, 光变非常快, 与此对应的已知天体物理过程只有  $\gamma$  射线暴<sup>[76]</sup>。

Wang 和 Zhao 提出了一个新的  $\gamma$  射线暴和余辉的模型: 黑洞仅仅俘获一颗孤立中子星, 则只会产生  $\gamma$  射线暴而无余辉; 当黑洞俘获一个中子星双星系统, 普通恒星被拉碎形成吸积盘, 将同时可观测到  $\gamma$  射线暴及其余辉。当然, 若黑洞只俘获一颗普通恒星, 我们则会观测到一次光学或 X 射线的耀发 (flare), 这种现象在一些星系中心已经观测到了<sup>[77~81]</sup>。他们将模型应用到 20 个已知宇宙学红移的  $\gamma$  射线暴, 发现有几个暴源的  $\gamma$  射线辐射的引力红移非常大 ( $z_g > 0.5$ , 见图 11)。因为对于任何其它已知的致密天体, 包括中子星甚至奇异星, 其表面引力红移不可能超过 0.5, 因此他们认为这几个暴源应该是非常好的黑洞候选体。

他们在文中还提出通过对  $\gamma$  射线暴的  $\gamma$  射线能谱的分析, 可找到可靠的发射线或吸收线轮廓, 并且认为正负电子对的湮灭线将是检验黑洞引力红移的最好途径。从 20 世纪 70 ~ 90 年代, 已经探测到一些  $\gamma$  射线的吸收线和发射线, 其中前苏联的 Venera 11 和 12<sup>[84]</sup> 及康普顿

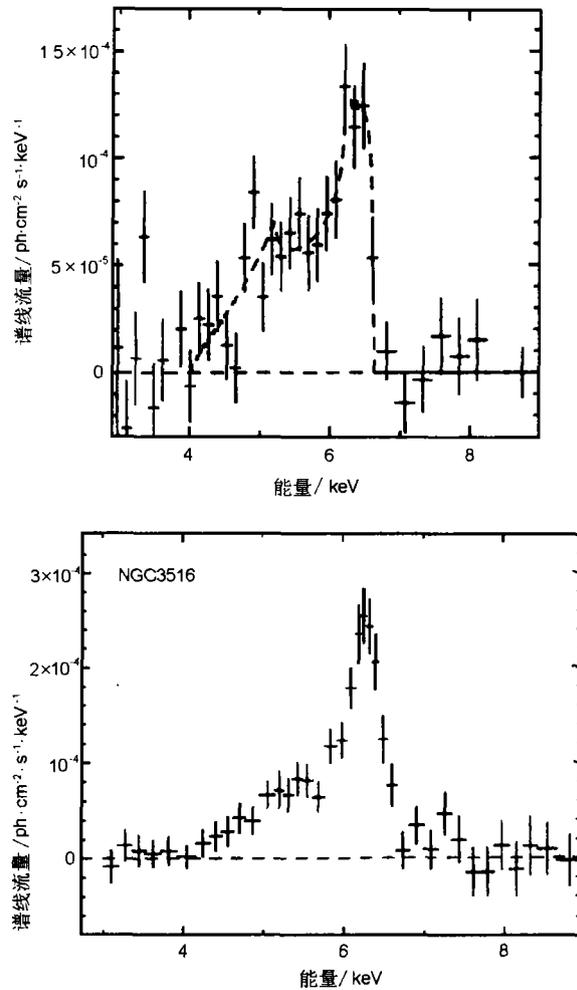


图 10 观测到的宽的 Fe 线轮廓  
MCG-6-30-15<sup>[69]</sup>(上图) 和 NGC 3516<sup>[71]</sup>(下图)

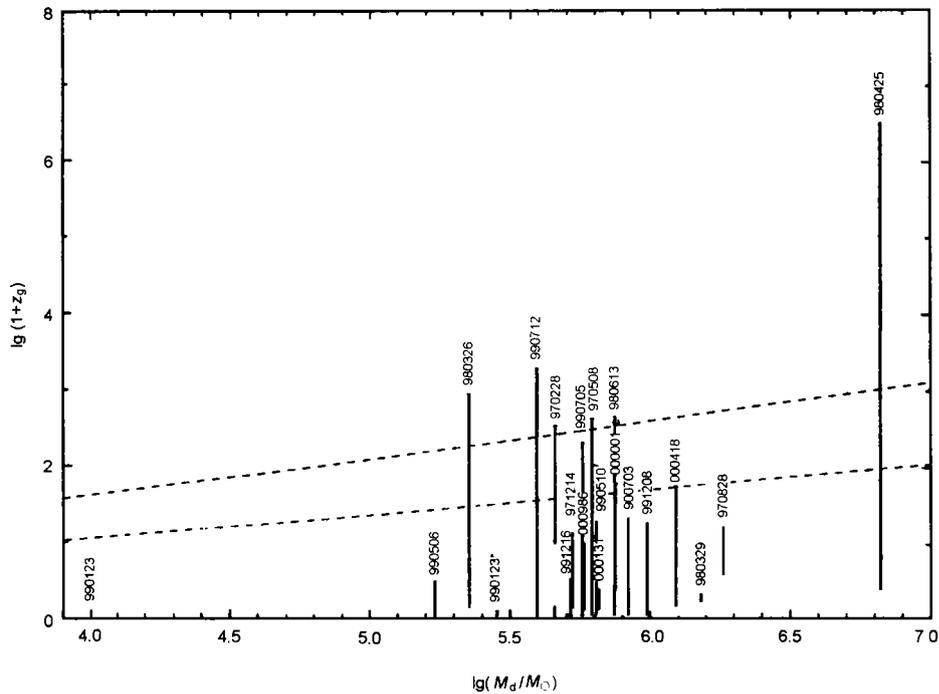


图 11 将模型用于 20 个已知宇宙学红移的  $\gamma$  射线暴时, 所得到的引力红移的范围 [75]

$M_d$  是他们获得黑洞质量的下限, 两条虚线分别对应于朗道势 (上) 和伪牛顿势 (下), 计算中子星被撕碎时的引力红移值。由于 GRB 990123 存在一个很强的光学闪 [82], 使得其黑洞质量下限过小, 当去掉光学闪的影响后, 它在图中的位置 (GRB 990123\*) 与其它暴便相仿。GRB 990425 的光学观测受到 SN 1998sw 的影响 [83], 偏差也较大。大多数源的中心质量在  $10^6 M_\odot$  左右, 相当于一些普通星系中心黑洞的大小

表 4  $\gamma$  射线暴探测器获得的四条比较可信的发射线

$\gamma$ 射线暴	探测器	谱线中心值 /keV	参考文献
GRB 790526	Venera 11/12	45	84
GRB 930916	BASTE	45	85
GRB 940703	BASTE	44	86
GRB 941017	BASTE	43	87

卫星上的 BASTE<sup>[85~87]</sup> 探测到 4 条比较明显地分布在 (40 ~ 50)keV 的发射线 (表 4), 而这些线是什么机制产生的, 至今还是一个谜。GRB 790526 的一条 45keV 的发射线曾经被认为是中子星表面的回旋发射线 [84], 并且将其作为  $\gamma$  射线暴起源于中子星表面的一个重要证据。但是到了 1997 年,  $\gamma$  射线暴的余辉被观测到 [88], 并定出了其宇宙学红移 (如 GRB 970508 的  $z \approx 0.835$ <sup>[89]</sup>), 因此人们普遍认为  $\gamma$  射线暴应该起源于宇宙学尺度上, 不可能是中子星表面的局部爆发过程。Wang 和 Zhao 则认为这些发射线极其可能是正负电子对湮灭产生的 511keV 的发射线经过黑洞表面的强引力红移和宇宙学红移共同作用而形成的, 并且假设宇宙学红移  $z \approx 1$ , 可以估算出发射线的引力红移  $z_g \approx 4$ , 与他们的模型相吻合。因为目前运行的高能天

文望远镜的谱分辨率还很差, 不能很精确地证认这些发射线, 因而寄希望于刚升空的  $\gamma$  射线卫星 HETE- II 和未来的高能卫星能够找到并证认这些谱线, 最终来确定黑洞的存在。

## 4 未来的发展

本文主要描述了目前寻找两类黑洞: 恒星级黑洞和星系中心的超大质量黑洞的途径及其当前寻找黑洞天文证据的状况。由于天文学家们的努力, 已经有了很强的证据证明黑洞确实存在, 特别是对于活动星系核中心, 除了超大质量的黑洞外, 还没有任何其它天体可以对其作出合理的解释。然而黑洞存在的争议依然继续着, 这也促使不断改进观测技术、使用各种观测方法和途径, 来进一步证认黑洞, 寻找更有力的证据。因此, 现在黑洞的证认依然是国际天文学最前沿和活跃的一个领域, 许多问题等待着人们去探索。

我们在银河系内发现两个黑洞双星系统 GRS 1915+105 和 GRO 1655-40 具有类似于活动星系核的超光速喷流现象<sup>[90]</sup>, 这个发现同时暗示了两种不同尺度上的黑洞存在某些相似之处。这类天体虽然至今只发现两个, 但其研究在最近几年却越来越热, 并将这类天体称为“微类星体”(microquasar)<sup>[90]</sup>, 目前还在不断努力寻找新的微类星体候选者。因为微类星体是恒星量级的黑洞系统, 却具有类似活动星系核的许多性质, 然而其特征时标要短许多, 而且离我们较近, 因此观测它们比活动星系核更容易, 这种联系提供了一个观测和研究遥远活动星系核物理机制的新窗口。

目前在研究和寻找原初黑洞方面已取得了一定的进展。根据银河系的旋转曲线的测量, 人们认为银河系大部分物质是分布在银晕里的暗物质, 而这些暗物质中有一部分极有可能是由于早期宇宙密度扰动形成的原初黑洞。由于微引力透镜 (microlensing) 现象的发现<sup>[91]</sup>, 可以利用这一重要现象来研究银晕中暗物质的某些性质 (如质量分布)。正在开展之中的大质量致密晕天体 (MACHO) 计划<sup>[92~94]</sup> 已经获得了大量关于暗天体质量分布的信息, 它们可以对理论上早期宇宙夸克-强子相变过程中产生的原初黑洞质量谱的峰值<sup>[95]</sup> 进行一定的限制。MACHO 的工作人员经过几年的连续观测, 得到暗物质天体的质量范围仅分布在  $0.1 \sim 1M_{\odot}$  内<sup>[96]</sup>。但是对质量更小的天体, 由于观测上的困难, 只能给出一个限制:  $10^{-2} \sim 10^{-4}M_{\odot}$  范围的天体质量应小于暗晕天体总质量的 25%<sup>[92]</sup>。至今还未发现存在更大质量的微引力透镜事件, 进一步的数据分析则在 95% 的置信度给出原初黑洞质量谱的一个上限: 约  $30M_{\odot}$ <sup>[92]</sup>。

恒星级黑洞和超大质量黑洞已被广泛接受了, 因为这两类黑洞相差甚大, 因此人们一直在思考是否还存在着介于两者之间的黑洞, 比如在球状星团的中心。20 世纪 80 年代, 爱因斯坦卫星首次在一些旋涡星系核球外面观测到许多光度很大的 X 射线源 ( $L_X \approx 10^{31} \sim 10^{33} \text{J} \cdot \text{s}^{-1}$ )<sup>[97]</sup>, 后来 ROSAT 和 ASCA 的观测也证实了这一点<sup>[98~100]</sup>。最近, Chandra 卫星对星暴星系 M82 的观测<sup>[101,102]</sup> 不仅发现在核球外存在大量高光度的 X 射线源, 并且观测到一个光度更大的 X 射线变源 ( $L_X \approx 10^{33} \sim 10^{34} \text{J} \cdot \text{s}^{-1}$ )。对其中一些源的谱分析发现这些源可以很好地用黑洞周围光学厚标准薄盘的黑体谱来拟合<sup>[103]</sup>。如果这些源的中心是黑洞, 则应存在新的一类黑洞即中等 (intermediate) 质量黑洞 ( $M \approx 10^2 \sim 10^4 M_{\odot}$ )<sup>[104]</sup>, 从理论上人们也探讨了这类黑洞形成的可能性<sup>[105,106]</sup>, 并且它们很可能存在于球状星团中心。当然, 某些源可能类似我们银河系中的微类星体, 但是喷流方向正好对着我们的几率却是非常小的, 因此

这些高光度的 X 射线源极有可能是中等质量黑洞候选体。为了进一步验证这种观点, 一种可行的办法是利用高分辨率的望远镜 (如 HST) 来研究银河系和附近星系中球状星团中心的恒星动力学情况来确定黑洞的存在。

从理论上的推测开始, 黑洞的存在与否就引起了人们的兴趣, 成为关注的焦点。从天文观测上证认黑洞, 更是天文学家们追求的目标。从现在大量的观测证据来看, 我们可以很乐观地说, 黑洞确实存在于宇宙中。目前人们还在不懈地努力, 利用现在先进的观测设备, 不断改进和提出新的证认方法来寻找黑洞存在的证据, 特别是全波段天文学的到来, 为探索黑洞带来了新的生机。VLBA 的射电观测、HST、Keck 和 VLT 等大型光学望远镜、还有最近升空的 Chandra 和 XMM 两颗高分辨率的 X 射线卫星、在  $\gamma$  射线波段有 HETE- II 和将在 2003 年发射的 Swift 探测器, 这些多波段高精度的观测必将会给黑洞证认工作带来革命性的进展。

### 参 考 文 献

- 1 Carr B J, Hawking S W. *M.N.R.A.S.*, 1974, 168: 399
- 2 Hawking S W. *Commun. Math. Phys.*, 1975, 43: 199
- 3 Ho L C. In: Chakrabarti S K ed. *Observational Evidence for Black Holes in the Universe*, Dordrecht: Kluwer, 1999: 157
- 4 Kormendy J, Richstone D. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 1995, 33: 581
- 5 Celotti A, Miller J C, Sciamia D W. *Classical and Quantum Gravity*, Millennium Issue, 2000, 16: A3
- 6 Rothchild R E E et al. *Ap. J.*, 1974, 189: 213
- 7 Gies D R, Bolton C T. *Ap. J.*, 1982, 260: 240
- 8 Gies D R, Bolton C T. *Ap. J.*, 1986, 304: 371
- 9 Herrero A et al. *Astron. Astrophys.*, 1995, 297: 556
- 10 Orosz J A et al. *Ap. J.*, 1996, 468: 380
- 11 Callanan P J et al. *Ap. J.*, 1996, 470: L57
- 12 Cowley A P et al. *Ap. J.*, 1983, 272: 118
- 13 Orosz J A, Bailyn C D. *Ap. J.*, 1997, 477: 876
- 14 Casares J, Charles P A. *M.N.R.A.S.*, 1994, 271: L5
- 15 Shahbaz T et al. *M.N.R.A.S.*, 1994, 271: L10
- 16 Kato S, Fukue J, Mineshige S. *Black-hole Accretion Disks*, Kyoto: Kyoto Univ. Press, 1998: 30
- 17 McClintock J E et al. *Ap. J.*, 2001, 551: L147
- 18 Gilfanov M, Churazov E, Revnivtsev M. *M.N.R.A.S.*, 2000, 316: 923
- 19 Sunyaev R, Revnivtsev M. *Astron. Astrophys.*, 2000, 358: 617
- 20 Zhang S N, Cui W, Chen W. *Ap. J.*, 1997, 482: L155
- 21 Garcia M R et al. *American Astron. Society*, 2000, 197, 118.04
- 22 Garcia M R et al. *Ap. J.*, 2001, 553: L47
- 23 Menou K et al. *Ap. J.*, 1999, 520: 276
- 24 Narayan R, Yi I. *Ap. J.*, 1994, 428: L13
- 25 Narayan R, Yi I. *Ap. J.*, 1995, 444: 231
- 26 Narayan R, McClintock J E, Yi I. *Ap. J.*, 1996, 457: 821
- 27 Narayan R, Garcia M R, McClintock J E. *Ap. J.*, 1997, 478: L79
- 28 Israellan G et al. *Nature*, 1999, 401: 142
- 29 ver der Hooft F et al. *Astron. Astrophys.*, 1998, 329: 538
- 30 Shahbaz T et al. *M.N.R.A.S.*, 1999, 306: 89
- 31 Paczyński B. *Ap. J.*, 1998, 494: L45
- 32 Richstone D D et al. *Nature*, 1998, 395: 14

- 33 Lynden-Bell D, Rees M J. *M.N.R.A.S.*, 1971, 152: 462
- 34 Eckart A, Genzel R. *M.N.R.A.S.*, 1997, 284: 576
- 35 Genzel R *et al.* *M.N.R.A.S.*, 1997, 291: 219
- 36 Genzel R *et al.* *M.N.R.A.S.*, 2000, 317: 348
- 37 Glez A M *et al.* *Ap. J.*, 1998, 509: 678
- 38 Genzel R *et al.* *Nature*, 2000, 407: 349
- 39 Dressler A, Richstone D O. *Ap. J.*, 1988, 324: 701
- 40 Kormendy J. *Ap. J.*, 1988, 325: 128
- 41 Tonry J L. *Ap. J.*, 1984, 283: L27
- 42 Tonry J L. *Ap. J.*, 1987, 322: 632
- 43 Bower G A *et al.* 2001, in preparation
- 44 Kormendy J, Gebhardt K. *AIP conf. proc.*, 2001, in press,
- 45 Bower G A *et al.* *Ap. J.*, 2001, 550: 75
- 46 Kormendy J, Richstone D O. *Ap. J.*, 1992, 393: 559
- 47 Kormendy J *et al.* *A. J.*, 1998, 115: 1823
- 48 Gebhardt K *et al.* *A. J.*, 2000, 119: 1157
- 49 Cretton N, van den Bosch F C. *Ap. J.*, 1999, 514: 704
- 50 Kormendy J *et al.* *Ap. J.*, 1997, 482: L139
- 51 Kormendy J. *Ap. J.*, 1988, 335: 40
- 52 Kaiser M E *et al.* 2001, in preparation
- 53 Macchetto F *et al.* *Ap. J.*, 1997, 489: 579
- 54 Shields J C *et al.* *Ap. J.*, 2000, 534: L27
- 55 Miyoshi M *et al.* *Nature*, 1995, 373: 127
- 56 Sarzi M *et al.* *Ap. J.*, 2001, 550: 65
- 57 Barth A J *et al.* *Ap. J.*, 2001, 555: 685
- 58 Ferrarese L, Ford H C, Jaffe W. *Ap. J.*, 1996, 470: 444
- 59 Bower G A *et al.* *Ap. J.*, 1998, 492: L111
- 60 Harms R J *et al.* *Ap. J.*, 1994, 435: L35
- 61 Marconi A *et al.* *Ap. J.*, 2001, 549: 915
- 62 Ferrarese L, Ford H C. *Ap. J.*, 1999, 515: 583
- 63 van der Marel R P, van den Bosch F C. *A. J.*, 1998, 116: 2220
- 64 Verdoes Kleijn G A *et al.* *A. J.*, 2001, 120: 1221
- 65 Greenhill L J *et al.* *Ap. J.*, 1996, 481: L23
- 66 Greenhill L J, Moran J M, Hernstein J R. *Ap. J.*, 1997, 481: L23
- 67 Fabian A C *et al.* *M.N.R.A.S.*, 1989, 238: 729
- 68 Laor A. *Ap. J.*, 1991, 376: 90
- 69 Tanaka Y *et al.* *Nature*, 1995, 375: 659
- 70 Fabian A C *et al.* *M.N.R.A.S.*, 1995, 277: L11
- 71 Nandra K *et al.* *Ap. J.*, 1999, 523: L17
- 72 Iwasawa K *et al.* *M.N.R.A.S.*, 1996, 282: 1038
- 73 Iwasawa K *et al.* *M.N.R.A.S.*, 1999, 306: L19
- 74 Dabrowski Y *et al.* *M.N.R.A.S.*, 1997, 288: L11
- 75 Wang W, Zhao Y. *Chin. J. Astron. Astrophys.*, 2001, 1: 487
- 76 Janka H T *et al.* *Ap. J.*, 1999, 527: L39
- 77 Brandt W N, Pounds K, Fink H. *M.N.R.A.S.*, 1995, 273: L47
- 78 Bade N, Komossa S, Dahlem M. *Astron. Astrophys.*, 1996, 309: L35
- 79 Komossa S, Bade N. *Astron. Astrophys.*, 1999, 343: 775
- 80 Grupe D, Thomas H C, Leighly K M. *Astron. Astrophys.*, 1999, 350: L31

- 81 Greiner J *et al.* *Astron. Astrophys.*, 2000, 362: L25  
82 Akerlof K *et al.* *Nature*, 1999, 398: 400  
83 Galama T J *et al.* *Nature*, 1998, 395: 670  
84 Mazets E P *et al.* *Nature*, 1981, 290: 378  
85 Briggs M S *et al.* *proc. of the 3rd INTEGRAL Workshop*, 1999, in proess  
86 Briggs M S. *AIP Conf. Proc.*, 1994, 384: 133  
87 Briggs M S. *AIP Conf. Proc.*, 1998, 428: 299  
88 van Paradijs J *et al.* *Nature*, 1997, 386: 686  
89 Matzger R *et al.* *Nature*, 1997, 387: 878  
90 Mirabel I F, Rodriguez L F. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 1999, 37: 37  
91 Inwin M J *et al.* *A. J.*, 1989, 98: 1989  
92 Alcock C *et al.* *Ap. J.*, 1998, 499: L9  
93 Alcock C *et al.* *Ap. J.*, 2000, 542: 281  
94 Lasserre T *et al.* *Astron. Astrophys.*, 2000, 355: L39  
95 Jedamzik K. *Phys. Rev. D*, 1997, 55: 5871  
96 Alcock C *et al.* *Ap. J.*, 2001, 550: L169  
97 Fabbiano G *et al.* *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 1989, 87: 27  
98 Immler S, Pietsch W, Aschenbach B. *Astron. Astrophys.*, 1998, 331: 601  
99 Reynolds C S *et al.* *M.N.R.A.S.*, 1997, 286: 349  
100 Roberts T P, Warwick R S. *M.N.R.A.S.*, 2000, 315: 98  
101 Kaaret P *et al.* *M.N.R.A.S.*, 2001, 321: L29  
102 Matsumoto H *et al.* *Ap. J.*, 2001, 547: L25  
103 Makishima K *et al.* *Ap. J.*, 2000, 535: 632  
104 Colbert E J M, Mushotzky R F. *Ap. J.*, 1999, 519: 89  
105 King A R *et al.* *Ap. J.*, 2001, 552: L109  
106 Miller M C, Hamilton D P. 2001, submitted to *M.N.R.A.S.*

## Evidence for Black Holes

Wang Wei    Zhao Yongheng

(*National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012*)

### Abstract

As an important test for General Relativity, the existence of a black hole is always the focus of physicists and astronomers. Particularly in these years, since a large number of advanced observational facilities are put into use and the techniques improved, the search for the evidence for black holes have made great progress, becoming one of astronomical researching hotspots. In this paper, evidence for stellar black holes and super-massive black holes in galactic nuclei is reviewed, and the great advances in black hole astrophysics are also introduced. Finally, we discuss some great developing projects and the primary results of pursuing primordial black holes. The suggestions for observations and the respect of astronomical evidence for black holes are put forward.

**Key words** black hole physics—binaries—galaxies: nuclei—accretion disks