

黑洞的搜寻和证认 (I): 现状

张 冰^{1,2} 乔国俊^{1,2,3} 韩金林⁴

- (1. 北京大学地球物理系 北京 100871)
- (2. 中国科学院 - 北京大学联合北京天体物理中心 北京 100871)
- (3. 中国科学院高能物理研究所宇宙线和高能天体物理开放实验室 北京 100039)
- (4. 中国科学院北京天文台 北京 100012)

摘 要

简要介绍有关黑洞的理论及其表现形式, 详细综述在星系中心及 X 射线双星中搜寻和证认黑洞的原理、方法及现状。在星系层次, 除活动星系核中心可能存在的黑洞外, 在邻近星系中已找到至少 11 个黑洞候选者, 但观测所及的最小尺度仍比黑洞视界高几个量级。在恒星层次, 利用动力学判据, 人们已在大质量 X 射线双星和软 X 射线暂现源中找到至少 10 个强候选者, 并利用辐射判据找到更多的候选者, 但目前仍然没有找到黑洞双星区别于中子星双星的决定性判据。所有这些说明, 迄今尚未找到充足的证据证明黑洞的存在。

关键词 相对论天体物理学: 黑洞 — 星系中心 — X 射线双星

分类号: P145.8

黑洞作为物理学理论的预言已经有了很详尽的理论并被广泛接受。尽管人们在茫茫宇宙中的不同尺度搜寻黑洞并找到一些候选者, 但它的存在仍然没有得到确认。

1 黑洞理论

1.1 物理学中的黑洞

黑洞概念的形成来源于两个独立的思路。第一个思路是, 对于某种质量、半径的天体, 当其逃逸速度达到光速时, 外界观测者将探测不到由该天体发出的光。这是 Laplace 早在 1795 年就思考的问题^[1]。第二个思路来源于恒星结构和演化理论。1931 年, Chandrasekhar 发现, 完全简并费米气体构成的天体存在一个质量上限, 质量大于此上限的天体没有与引力维持平衡的力, 将无限坍缩下去^[2]。1939 年, Oppenheimer 和 Snyder 用广义相对论详细计算了理想气体各向同性球的坍缩, 这是探讨黑洞存在可能性的第一次严格计算^[3]。到了 50 年

国家自然科学基金资助项目 中国博士后科学基金资助项目

国家教委博士点基金资助项目 国家科委攀登计划资助项目

1997 年 10 月 8 日收到

代末期, Wheeler 等人对黑洞问题做了一系列严肃的探索。1968 年, Wheeler 正式为“黑洞”命名^[4]。以后经过许多人的工作, 形成了比较完善的黑洞理论。关于黑洞物理学的详尽描述可参见文献 [5—8]。这里只简要引述一些重要结论。

1.1.1 黑洞的定义

Chandrasekhar 将黑洞的定义总结为^[9]: “黑洞将三维空间分为两个区域: 一个是以称之为视界的二维光滑曲面为边界的内区域; 一个是视界以外的渐进平直的外区域; 而且内区域中的点不能与外区域中的点交换讯息”。

1.1.2 无毛发定理和黑洞的分类

开始人们猜想对黑洞的描述可能会非常复杂。后来发现, 一旦形成黑洞, 天体的特征就可以完全由三个参量来表征, 即黑洞的质量 M , 角动量 J 和电量 Q 。这就是“黑洞无毛发定理”。

根据包含参量的多少, 黑洞的外部引力场可用不同的度规来描述, 据此可将黑洞分为四类(见表 1)。Kerr-Newman 解是黑洞的一般解, Kerr 解 ($Q = 0$), Reissner-Nordstrom 解 ($J = 0$) 和 Schwarzschild 解 ($J = 0, Q = 0$) 是其特殊解。一般情况下, 带电天体会由于周围等离子体而中性化, 而几乎所有天体都在旋转, 因而 Kerr 解是最常用的描述黑洞的解。Schwarzschild 解最简单, 更易揭示黑洞的许多特点。

表 1 黑洞的分类

度规	质量	角动量	电量
Schwarzschild	M	0	0
Reissner-Nordstrom	M	0	Q
Kerr	M	J	0
Kerr-Newman	M	J	Q

1.1.3 视界和奇点

Schwarzschild 解描述的是静态球对称外部引力场解, 在 $r = r_s$ 和 $r = 0$ 处具有奇异性。这里 $r_s = 2GM/c^2$ 是 Schwarzschild 半径, c 和 G 分别表示光速和万有引力常数。 $r = r_s$ 的奇异性表明该二维曲面对外界观测者的特殊性, 是坐标奇点, 并非空间本身的奇异性所致。实际上 $r = r_s$ 面是把空间分为两个区域的界面, 曲面内部的光不能射出此界面。因此该曲面称为事件视界(event horizon), 简称视界。对 Schwarzschild 黑洞, 视界就是 Schwarzschild 半径 r_s 。同时, r_s 还对应于无穷远点的无限红移面($dt \rightarrow \infty$, 而固有时 $d\tau \rightarrow 0$) 和静界(在该曲面上一切物质粒子均不能保持静止)。对于 Kerr 解, 视界(外、内)和静界(外、内)是不重合的。外视界与外静界之间的区域称为能层。在该区域中, 粒子总能量有可能为负, 使得有可能通过 Penrose 过程从旋转黑洞中提取能量。

与此相反, 无论哪种黑洞, $r = 0$ 处的奇异性不能通过任何坐标变换而消除, 因此 $r = 0$ 是时空的本性奇点。“时空的奇异性”通常采用所谓“测地不完备性”定义^[10]。在奇点处, 时空本身都没有意义了, 因此所有建立在时空概念基础上的物理定律全部失效。Penrose 和 Hawking 先后证明了几个定理, 指出在广义相对论的框架内, 只要存在所谓“捕获面”(trapped surface, 即某类二维类空闭曲面 T , 从它上面任一点向内、向外发出两列光波, 下一时刻的波前的面积比 T 的面积还要小), 奇点就是不可避免的了。而“捕获面”是普遍存在的。这就是所谓“奇异性定理”^[11—13]。这个定理表明广义相对论是不完备的物理学理论。人们猜想未来的量子引力理论可能会消除奇点, 而这样的理论目前尚未建立。

1.1.4 面积定理和黑洞热力学

Hawking 证明: 在任何相互作用中, 一个黑洞的面积永不减少, 两个黑洞合并后, 总面积等于两个黑洞面积之和, 这就是“面积定理”^[14]。由此定理与热力学第二定律的相似性, 可引进黑洞熵的概念。对于 Schwarzschild 黑洞, 有 $S = \frac{1}{4} \frac{kc^3}{G\hbar} A$, 即熵正比于黑洞面积 A (k 和 \hbar 分别表示玻尔兹曼常数和普朗克常数), 而黑洞的温度则反比于黑洞的质量: $T = \frac{\hbar}{8\pi kM} \approx 10^{-7} \left(\frac{M_{\odot}}{M} \right) \text{K}$ 。Bekenstein^[15] 引入广义熵 $S' = S + \frac{1}{4} \frac{kc^3}{G\hbar} A$ 后 (其中 S 为黑洞外物质的熵, $kc^3 A/4G\hbar$ 为黑洞的熵, S' 为总熵), 得到了广义热力学第二定律, 即对于任何过程, 总熵 S' 永不减少 ($dS' \geq 0$)。

1.1.5 Hawking 蒸发和黑洞量子力学

在讨论黑洞热力学时存在一个困难: 在经典广义相对论框架内, 一个包括黑洞在内的系统没有平衡态, 黑洞会不断吸收辐射而永远达不到平衡。Hawking 发现, 在考虑量子效应后, 黑洞会辐射严格的黑体谱, 因而使黑洞缓慢蒸发^[16,17]。详细计算表明, 这种量子效应引起的辐射黑体温度正好与黑洞热力学的要求相吻合。这种“蒸发”违反面积定律, 却保证了广义热力学第二定律。黑洞蒸发可理解为在黑洞附近强引力场中产生的虚粒子对, 其中一个负能粒子落入黑洞, 等效于从黑洞中提取出能量。

黑洞蒸发的时标 $t \propto M^3/\hbar$, 即 $t \approx 10^{10} \left(\frac{M}{10^{15} \text{g}} \right)^3 \text{yr}$ 。因而如果在宇宙早期曾形成各种初始质量的原初黑洞, 只有对 $M \approx 10^{15} \text{g}$ 的黑洞 (其蒸发时标正好是宇宙年龄), 此效应才是显著的。更小的黑洞早已蒸发完, 而更大的黑洞蒸发效应尚不明显, 故没有显著的观测效应。

1.2 天体物理学中的黑洞

原则上, 任意尺度的黑洞都可以存在, 只要能把一定质量的物质限制在特定的尺度内 (对于 Schwarzschild 黑洞, 为 Schwarzschild 半径决定的球体内)。然而, 在天体物理学领域, 能够形成且可能有观测效应的黑洞只有几类 (按质量大小排列): 星系级黑洞、星团级黑洞、恒星级黑洞和微黑洞。

1.2.1 星系级黑洞

星系级黑洞的思想最早来源于对类星体 (QSO) 能源的解释^[18-21]。下落物质被巨大黑洞吸积时, 重力势能转化为辐射能, 因而产生超强的辐射光度。理论给出这些巨大黑洞质量为 $10^6-10^{10} M_{\odot}$ 。既然在红移 $z \geq 2$ 处类星体或更广义的活动星系核 (AGN) 是普遍存在的, 人们自然想到, 作为“冷却”了的 AGN 的正常星系中心也可能存在着巨大黑洞。因为黑洞本身不发光, 只能通过黑洞对周围天体的引力作用来揣测它的存在。人们正在试图用恒星或气体环绕星系中心的动力学过程来推断中心黑洞的可能性^[22]。在第 2 节中我们将详细介绍这个领域的进展。

1.2.2 星团级黑洞

星团级黑洞是指存在于球状星团中心的黑洞。这一思想最初是为了解释球状星团中的 X 射线源的辐射机制而提出的^[23,24]。根据理论, 这种大黑洞的质量为 $10^3 M_{\odot}$ 的量级。后来, 这些 X 射线源可用中子星表面吸积的热核不稳定性模型给出合理的解释^[25,26], 因而黑洞模型受到冷落。1994 年, 哈勃空间望远镜 (HST) 对最致密球状星团之一的 M15 的观测^[27] 支持关于黑洞的预言^[28], 使得黑洞模型得以复活, 但所观测的表面光度分布仍可以用其它平行的模型解释^[29]。最近, 对 M15 中核区附近的两颗脉冲星 (PSR J2129+1210A 和 PSR J2129+1209D) 的精确运动学研究^[30] 和光谱的速度弥散轮廓的测量^[31] 基本上排除了中心黑洞的可能性。目前看来, 在球状星团中心存在大黑洞 ($M \approx 10^3 M_{\odot}$) 的可能性不大。

1.2.3 恒星级黑洞

恒星级黑洞是指根据恒星演化理论预言的质量超过中子星质量上限的致密天体, 而探测这种黑洞最好的系统应是双星系统。最早的恒星级黑洞的候选者是 Cyg X-1 (见文献 [32,33] 和其中的引文), 其中的 X 射线源是这个大质量 X 射线双星 HMXB (high mass X-ray binary) 中的致密天体。对于这样的 HMXB 系统, 光学子星的质量很大, 由光学子星测出的质量函数较小, 因而利用黑洞的质量判据就有着很大的不确定性。于是人们希望在伴星质量小的 X 射线双星系统中 (质量函数较大) 搜寻黑洞。近来发现, 软 X 暂现源 SXT (soft X-ray transient) 是搜寻黑洞理想的系统。在 SXT 中, 现已发现至少 6 个质量函数大于 $3M_{\odot}$ 的“黑洞双星” (BHB)。我们将在第 3 节较详细地综述这个领域的进展。

1.2.4 微黑洞

微黑洞是指 Hawking 预言的 $M \approx 10^{15} \text{g}$ 的正在显著蒸发的原初黑洞 [16,17]。理论预言, 这些微黑洞显著蒸发会辐射大量的 γ 射线和 X 射线 [34]。但探测到的 γ 射线背景辐射并不提供微黑洞存在的任何正面论据, 只给出一个数密度上限 [35]。微黑洞蒸发到最后阶段会发生爆炸, 但在目前设备条件下, 鉴别探测到的 γ 射线是否来自原初黑洞爆炸的可能性很小。目前对微黑洞的搜寻尚没有肯定的结论。

2 星系级黑洞的搜寻和证认

2.1 活动星系核 (AGN) 中的黑洞

说 AGN 中存在黑洞是出于解释其巨大能源的需要, 因为看来只有黑洞模型才能对众多杂乱无章的观测资料给出简明而统一的解释。人们已发现了众多的 AGN, 因而从某种意义上说, AGN 中巨型黑洞候选者就有成千上万。但由于它们距我们十分遥远, 在它们之中直接证认出黑洞 (同时测定其质量和尺度) 是非常困难的, 它们可能将在很长时间内只是黑洞候选者。不过, 关于这些巨型黑洞存在的间接证据还是多而有力的, 主要包括 [36]:

- (1) 各种独立的方法估计出的 AGN 中心质量都在 $10^6 - 10^{10} M_{\odot}$ 左右;
- (2) 由 AGN 光变时间 Δt 估算其尺度 $D \leq c\Delta t$, 发现其发光区域的尺度非常小, 有的甚至已接近其质量所对应的 Schwarzschild 半径。结合第一点, 这给出了巨型黑洞存在的较强判据。不过, 当考虑相对论效应时, 尺度会有所增大;
- (3) AGN 的巨大能源不可能来自热核反应, 而目前所知的更有效的质能转换机制只有致密天体的吸积过程中引力能的释放或者正反物质的直接湮灭。在 AGN 的情况下, 因 e^{\pm} 湮灭只能产生 0.511MeV 的湮灭线, 而 AGN 的辐射几乎是全波段的, 后一种可能被直接否定。致密天体的吸积成为维持 AGN 能源的唯一可能。而在星系尺度上, 致密天体只有黑洞一种可能。这是巨型黑洞存在的又一证据或推论;
- (4) AGN 中普遍存在准直性极强的射电喷流, 且空间取向可在 10^7 年以上的时间内保持不变。这个特殊的方向可自然解释为转动黑洞的轴向; 而接近光速的喷流表明星系核中心极深势阱的存在, 也间接显示中心存在巨大质量;
- (5) 理论稳定性分析给出, 星系中心集中的巨大质量即使开始时是分立的恒星、中子星或小黑洞, 最终都将演化为巨大黑洞;
- (6) 最近, 在 AGN 中发现了不直接但非常有力的巨型黑洞存在证据 [37,38]: 在 Seyfert 1

星系 MCG-6-30-15 中发现 6.4keV 的 $K\alpha$ 宽铁线显示高达 $0.3c$ 的多普勒运动, 由吸积盘模型估计得出吸积盘距中心为 Schwarzschild 半径的 6 倍。虽然用其它方法也可能解释此现象, 但显得有些牵强。这一发现可以说是星系级黑洞存在的最强证据 (参见表 2)。

可见, 虽然目前很难找到 AGN 中巨型黑洞的“直接证据”, 但 AGN 中巨型黑洞的普遍存在应是毋庸置疑的。这也提示人们: 是否在邻近的正常星系中心也能找到巨型黑洞呢?

2.2 正常星系中心的黑洞: 判据和搜寻证认步骤

通常黑洞判据可归结为两个: 一是“大质量”, 二是“小尺度”。对星系级黑洞, 视界的大小约为 $r_s = 2GM/c^2 \approx 10^{-5}(M/10^8 M_\odot)\text{pc}$ 。如果探测到某个暗天体的质量, 并且测得该质量所对应的 Schwarzschild 半径附近物质的运动学行为与黑洞理论相吻合, 我们就能较有把握地说发现了黑洞。AGN 中的“大质量”结论来源于解释巨大光度的要求, 而“小尺度”结论则来源于光变时间短的事实 (最近也测到盘的多普勒运动, 见 2.1 节中 (6))。二者都非直接观测证据。对于邻近星系, 人们则可以用高分辨率观测恒星或气体的动力学行为来直接推断, 因此可能找到黑洞存在的直接证据。

遗憾的是这个目的也很难达到。万有引力的存在使我们比较容易测定天体的质量, 但目前的观测设备尚不能分辨足够小的尺度。例如, 对于距我们很近的强黑洞候选者仙女座大星云 M31 ($M \approx 3 \times 10^7 M_\odot$), r_s 所对应的分辨角只有 $3 \times 10^{-6}''$, 而哈勃空间望远镜 (HST) 的角分辨率只有 $0.1''$, 射电波段通过综合孔径技术和甚长基线干涉仪可大大提高角分辨率, 但也只能达到 $10^{-4}''$ 的量级。从某种意义上讲, 巨型黑洞的搜寻和证认就好象是在探索物质结构, 即不断地向更小尺度靠拢。于是 Kormendy 和 Richstone 在他们的著名综述中采用了“向内趋近” (inward bound) 一词 [22]。

星系中心黑洞的搜寻和证认可分三个步骤 [22]: 1. 寻找星系中心存在大质量暗物体 MDO (massive dark object) 的动力学迹象, 这些 MDO 就是巨型黑洞的候选者; 2. 研究 MDO 几倍 Schwarzschild 半径处的物体的运动学行为以证认其是否是黑洞; 3. 发现很多黑洞以后进行统计研究 (如黑洞质量分布函数、形成几率、MDO 质量与母星系质量的关系等)。如前所述, 由于观测能力的局限, 现在寻找 MDO 的工作 (步骤 1) 已有相当大的进展, 但步骤 2、3 则远未开始 (参见表 2 最后一栏)。

2.3 MDO 存在的迹象

最早 MDO 存在的迹象来自对星系的表面光度轮廓 (表面光度随中心距离的变化函数) 的研究 [39,40]。黑洞产生的

很深的引力势阱会使周围恒星成团环绕其旋转, 因此在黑洞附近会形成一个相对于普通星系理论模型而言的较密的密度分布。然而, 不久后发现, 这种性质并不是黑洞特有的, 一些中心显然没有 MDO 的星系也存在类似的分

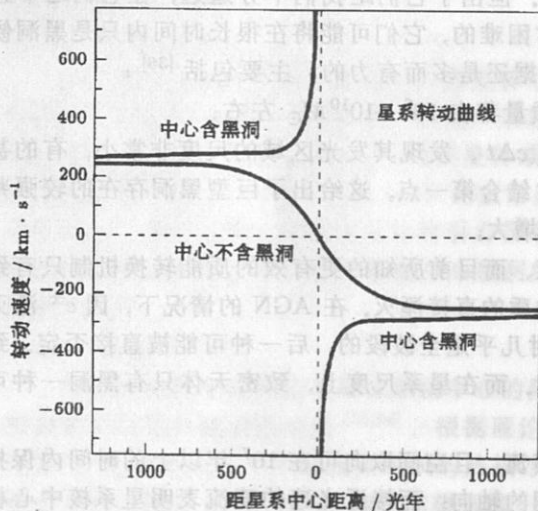


图 1 中心存在黑洞和无黑洞的星系转动曲线示意图 [41]

布曲线, 这使得较密的密度分布不能作为巨型黑洞候选者的有效判据 [22]。

目前确定 MDO 的主要方法是根据星系中心附近恒星或气体的动力学状况来论证大质量的存在。由于气体会受非引力因素的影响, 因此恒星动力学判据更有力一些。

恒星动力学中一个判断 MDO 存在的较可靠判据是考察星系的转动曲线。假设有一半径为 r 的圆形开普勒轨道, 轨道内包围的全部质量可简单表示为 $M(r) = \frac{V^2 r}{G}$, 其中 V 是开普勒速度, G 为万有引力常数。黑洞质量集中于一点, 因此在靠近黑洞的过程中, 转动速度 V 会显著增加, 这与中心不存在黑洞的情形大不相同。两种情形的星系转动曲线示意图见图 1。

实际上问题要复杂得多, 但原理类似。在球坐标下, 在轨道 r 内包围的全部质量更一般的表达式为 [22]:

$$M(r) = \frac{V^2 r}{G} + \frac{\sigma_r^2 r}{G} \left[-\frac{d \ln \rho'}{d \ln r} - \frac{d \ln \sigma_r^2}{d \ln r} - \left(1 - \frac{\sigma_\theta^2}{\sigma_r^2}\right) - \left(1 - \frac{\sigma_\phi^2}{\sigma_r^2}\right) \right] \quad (1)$$

其中 σ_r 、 σ_θ 、 σ_ϕ 分别表示球坐标系中的三个速度分量的弥散, ρ' 是我们所能观测和测量其运动学特征的那部分质量密度 (注意: 不是总质量密度 ρ , 因为对 ρ 有贡献的物质大部分并不发光)。实际观测得到的量都是沿视线方向的投影, 因此还需要用一些细节性的方法由投影量导出 (1) 式中的非投影量 [42,43]。

利用恒星动力学判断 MDO 的另一种方法是考察星系质量光度比 M/L 在靠近星系中心的行为。原理同前, 当中心存在巨大暗天体时, 在靠近中心时 L 会显著降低, 而 M 基本保持不变, 因而 M/L 迅速增加。以太阳值为单位, 对于一个典型恒星系统 (如球状星团), M/L 平均为 3—5, 典型星系距中心几千光年处的值为 5—10。如果在更靠近中心的区域, M/L 值达到数十或数百时, 我们就有较充分的理由说明中心存在 MDO。

作为一个例子, 图 2 给出典型巨型

黑洞候选者 M31 的观测结果 [22,42,43]。 M/L 在靠近中心时显著增大表明 MDO 的存在。转动曲线 (3) 并不象图 1 那样在趋近中心时不断增大, 但速度弥散曲线 (2) 却在靠近中心处显著增大, 从而使利用 (1) 式得出的中心质量不减, 也暗示 MDO 的存在。

研究星系中心附近的气体动力学也是搜寻和证认巨型黑洞的另一个重要途径。尽管气体可能会受到非引力因素的影响, 但气体中谱线的存在使得人们得以考察盘的多普勒运动。用

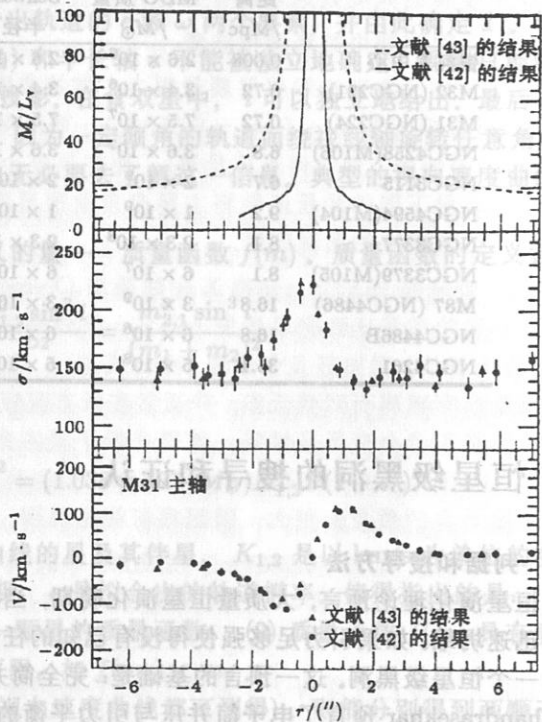


图 2 巨型黑洞候选者 M31 的观测曲线 [22]

(1) M/L ; (2) 速度弥散; (3) 转动曲线

这种方法研究的两个著名源是 M87 和 NGC 4258。值得指出的是, 日美科学家合作利用 VLBI 对 NGC 4258 中的水脉泽源进行了高分辨率观测研究, 探测到在 0.13pc 尺度内存在质量为 $3.6 \times 10^7 M_{\odot}$ 的 MDO [44]。这是目前星系级黑洞搜寻中“直接”探测到的最小尺度。

2.4 现 状

表 2 列出有很强证据的 11 个黑洞候选源 (按距离远近排列)[22,41,45]。其中 8 个源是 1995 年的综述 [22] 中给出的, 按 MDO 恒星动力学证据的强弱顺序排列依次是: M31, NGC3115, M32, NGC4594, 银河系中心, NGC3377 (很弱的证据); 气体动力学判据给出的两个源是 M87 和 NGC4258。近 3 年来探测到的巨型黑洞候选者数目增长较快, 在最新的综述中, 利用恒星动力学和气体动力学方法找到的 MDO 数目已突破 20 个 [46]。主要的结论是: (1) 巨型黑洞候选者普遍存在, 几乎每个大星系中心都有一个; (2) MDO 的质量通常正比于母星系的质量, 说明黑洞 (如果有的话) 的形成与其所在星系的形成过程相关; (3) 所发现 MDO 的质量与 AGN 黑洞模型中所要求的质量相符。

表 2 星系级黑洞候选者 [22,41,45,46]

	距离 /Mpc	MDO 质量 / M_{\odot}	Schwarzschild 半径 r_s /pc	包含 MDO 的最 小半径 r_{\min} /pc	r_{\min}/r_s
银河系中心	0.008	2.6×10^6	2.6×10^{-7}	0.006	2.3×10^4
M32 (NGC221)	0.72	3.4×10^6	3.4×10^{-7}	0.30	8.8×10^5
M31 (NGC224)	0.72	7.5×10^7	7.5×10^{-6}	0.30	4.0×10^4
NGC4258(M106)	6.8	3.6×10^7	3.6×10^{-6}	0.012	3.3×10^3
NGC3115	6.7	2×10^9	2×10^{-4}	1.7	8.5×10^3
NGC4594(M104)	9.2	1×10^9	1×10^{-4}	4.4	4.4×10^4
NGC3377	8.1	2.3×10^8	2.3×10^{-5}	11.4	5.0×10^5
NGC3379(M105)	8.1	6×10^7	6×10^{-6}	3.9	6.5×10^5
M87 (NGC4486)	16.8	3×10^9	3×10^{-4}	3.5	1.2×10^4
NGC4486B	16.8	6×10^8	6×10^{-5}	12.2	2.0×10^5
NGC4261	35.1	5×10^8	5×10^{-5}	16.9	3.4×10^5

3 恒星级黑洞的搜寻和证认

3.1 判据和搜寻方法

恒星演化理论预言, 大质量恒星演化晚期, 当核反应停止, 没有与引力抗衡的力量时, 天体会迅速坍缩。如果引力足够强使得没有已知的任何力量能抵御它的时候, 中心天体会最终坍缩为一个恒星级黑洞。这一预言的基础是: 完全简并费米气体构成的天体存在一个质量上限。在 Chandrasekhar 预言了电子简并压与引力平衡的白矮星质量上限以后 [2], Oppenheimer 和 Volkoff 第一次指出了以简并中子压与引力平衡的中子星也存在质量上限 [47], 后来 Rhoades 和 Ruffini 做了进一步证明和计算, 给出质量上限为 $3.2M_{\odot}$ [48]。

中子星存在质量上限使得判断恒星级黑洞存在的判据由“大质量”、“小尺度”两条几乎减少为只剩前者, 而后者只要求是“致密天体”即可。相对而言, 天体质量更容易测量 (仅是一个动力学问题)。然而, 由于人们对中子星内部, 特别是超过核子密度时的物质状态知之甚少, 致使中子星的质量上限成为一个依赖于模型的量, 而磁场、转动及双星系统中的演化经历等因素也都会不同程度地影响此上限, 因此上限值有较大的浮动范围 [5,49,50]。尽管考虑各

种因素后, 中子星质量上限可能高达 $(5-6)M_{\odot}$ ^[5], 但现有观测所确定的中子星的质量都在 $2M_{\odot}$ 以下。通常 $3M_{\odot}$ 被当作中子星质量上限。最近的物态方程精确的数值解指出, 如认为这些物态方程在不大于核子密度的范围内有效的话, 则将中子星质量上限选作 $2.9M_{\odot}$ 较为可靠^[51]。

探测恒星级黑洞理想的场所是双星系统, 因为其中黑洞候选者的质量 (更多的是质量下限) 可以得到很好的测量。

对一个有心束缚轨道的经典描述需要七个要素, 其中包括两个轨道要素: 半长轴 a 、偏率 e ; 三个方向要素: 轨道倾角 i 、轨道面和天球切面交线的位置角 Ω (longitude of the ascending node)、轨道面内近星点的“黄”经 ω_0 (argument of periastron); 两个时间要素: 经过近星点的绝对时刻 T (time of periastron passage)、轨道周期 P_b 。双星系统中的两个子星围绕共同的质心做共面运动, 且轨道完全相似: 偏率 e 相等, 半长轴与质量成反比, 即 $m_1 a_1 = m_2 a_2$ 。

实际观测中, 常常可以通过双星中的一个 (或两个) 子星中谱线的多普勒频移得到一条 (或两条) 视向速度曲线, 而后由该曲线去反演轨道要素。这种处理已有成熟的方法^[52,53]。首先, 轨道周期 P_b 可以在较长时间观测后通过折叠法较精确地确定, 从而得到很好的视向速度曲线。由视向速度曲线可以直接拟合出轨道的 e 和 ω 两个要素, 并由此确定 T 。轨道倾角 i (定义为轨道平面与天球切平面的夹角) 和半长轴 a 不能被独立地确定, 观测只能给出二者的耦合 $a \sin i$, 即轨道半长轴在视向的投影。在食双星中, i 可以独立地给出。最后一个方向要素轨道面方位角 Ω 一般不能被确定, 因为一定倾角的轨道面绕视线轴旋转任意角度, 不产生任何观测效应的差别, 我们不可能也无必要去了解这一信息。典型的视向速度曲线图可见文献 [74] 中的图 3。

视向速度曲线还给我们一个很有意义的量——质量函数 $f(m)$ 。质量函数的定义式为

$$f(m_{2,1}) = \frac{a_{1,2}^3 \sin^3 i}{P^2} = \frac{m_{2,1}^3 \sin^3 i}{(m_1 + m_2)^2} \quad (2)$$

用观测值表示为

$$f(m_{2,1}) = \frac{K_{1,2}^3 P}{2\pi G} (1 - e^2)^{3/2} = (1.038 \times 10^{-7} M_{\odot}) K_{1,2}^3 P (1 - e^2)^{3/2} \quad (3)$$

其中下标 1, 2 分别代表测得视向速度曲线的星及其伴星, $K_{1,2}$ 是以 km/s 为单位的视向速度的半振幅, P 是以天为单位的轨道周期, e 是拟合出的轨道偏率。值得指出的是: (1) 对一颗星视向速度曲线的研究给出的是另一颗星的质量函数; (2) 质量函数 $f(m)$ 具有质量的质量纲, 某颗星的质量函数是该星的质量下限, 如 $f(m_2) < m_2$ 。

如果系统是双谱双星 (即两颗子星的视向速度曲线都可测得), 则能分别得到两颗子星的质量函数, 从而得到两颗子星质量比 m_2/m_1 。

3.2 大质量 X 射线双星中的黑洞候选者

首先发现的可能存在黑洞的双星系统是大质量 X 射线双星 (HMXB), 即由一个大质量恒星与一个致密天体 (中子星或黑洞) 组成的系统。致密天体从大质量星吸积物质, 并将下落物质的引力势能转化为辐射能。理论指出, 对于中子星或黑洞, 这些辐射能主要是以 X 射线形式发射。很多 HMXB 表现为 X 射线脉冲星, 表明其中的致密天体是中子星, 而有些则无 X 射线脉冲。某些 HMXB 的光学子星光度大, 光谱测量比较容易, 对其进行仔细研究也可以

揭示伴星(致密天体)的性质。如发现其质量可能大于中子星质量上限时,则可能找到了一个黑洞候选者。因此X射线双星是搜寻恒星级黑洞的重要目标。

第一个也是最著名的黑洞候选者 Cyg X-1 就处在一个 HMXB 中。这个强 X 射线源被发现^[54]后不久,它的光学对应体被证认为一颗 9 等的 B 型(后来被确认为 O 型)超巨星^[55],并很快发现它们构成一个轨道周期为 5.6d 的单谱双星系统。如果光学大质量星与同光谱型的单星有相同的性质,根据其光谱型即可推断其质量,并由此和视向速度曲线所提供的信息(详见 3.1 节)一道,可给出作为 X 射线源的致密天体的质量,结果发现 $M > 3M_{\odot}$ ^[56,57],表明它很可能是一个黑洞。以后许多人做了大量的工作,得出该系统的轨道倾角 i 约在 30° 左右,而致密星的质量在 $10M_{\odot}$ 左右。1986 年, Gies 和 Bolton^[58] 对 Cyg X-1 的光谱和视向速度曲线做了全面分析,得出: (1) 质量函数 $f(m) = (0.25 \pm 0.01)M_{\odot}$; (2) 轨道倾角 $i \approx 33^{\circ}$; (3) 光学子星的质量 $M_{\text{opt}} = (33 \pm 9)M_{\odot}$, X 射线致密天体的质量为 $M_x = (16 \pm 5)M_{\odot}$ 。但此结果仍然存在一些不确定性。另一种建立在超巨星演化模型基础上的方法^[59]独立地给出 $M_x \geq 9.5M_{\odot}$ 。近 20 年来, Cyg X-1 一直被当作最强的黑洞候选者。除 Cyg X-1 外,在 HMXB 中发现的黑洞候选者还有处在大麦云中的 LMC X-3 和 LMC X-1(详见表 3)。

3.3 软 X 暂现源中的黑洞候选者

HMXB 中,由于光学伴星质量很大,即使致密天体质量远超过 $3M_{\odot}$,其质量函数也还是非常小(如 Cyg X-1, $f(m) = 0.25M_{\odot}$)。要证明黑洞存在,还需要从观测来反演其它一些信息(如轨道倾角、光学伴星质量等)。而在具有小质量伴星的 X 射线双星(LMXB)中,作为致密天体质量下限的质量函数将主要来自致密星质量的贡献,其本身就有可能大于 $3M_{\odot}$,于是可以得到明快的黑洞证据。

软 X 暂现源(SXT),又称 X 射线新星(X-ray novae),就是这样一种理想的系统,其中的光学子星的质量比致密星质量小得多。这样的系统有时会发生爆发,使 X 射线光度比正常情况(称为低态)增加好几个量级(称为高态)。这种 X 射线爆发过后,经过半年到一年, X 射线流量渐渐减弱而回到低态,并通常在低态沉寂多年直到下次爆发。在低态时, SXT 中致密天体的吸积盘会变得足够暗,使得光学子星的光谱测量成为可能,从而确定致密天体的质量函数。这样的系统有些是包含中子星的,但也有一些质量函数已经大于 $3M_{\odot}$ 的系统,说明致密伴星本身的质量会更大,因而很可能是黑洞。

A0620-00, 又名 V616 Mon, 是 SXT 中的一个典型的黑洞候选者。发现于 1975 年 8 月(当时正处于爆发高态)^[60], 后来发现其光学伴星是一颗 K 型矮星, 轨道周期为 7.8 h, 质量函数为 $f(m) = (3.18 \pm 0.16)M_{\odot}$ ^[61]。以后不同作者的独立研究得出类似的结论。

目前,至少已发现有 7 个这样的 SXT 黑洞候选者(详见表 3)。

3.4 现状

表 3 给出目前恒星级黑洞的强候选者(又称黑洞双星 BHB, black hole binaries)^[32,45,62-64]。10 个 BHB 中,在 HMXB 中的有 3 个,其余 7 个来自 SXT 中,有 6 个(第 4 至第 9)候选者质量函数 $f(m)$ 本身就达到或超过可能的中子星质量上限。

3.5 辐射判据

动力学判据只是证明致密天体的质量大于中子星质量上限,并没有提供黑洞的特定性质,即反映黑洞视界附近的信息。另外,并非所有的 X 射线双星都能从观测给出质量函数

表 3 恒星级强黑洞候选者 (黑洞双星)^[32,45,62,63,64]

源	类型	轨道周期 /d	致密天体	致密天体	光学伴星
			质量函数 $f(m)/M_{\odot}$	可能质量 / M_{\odot}	
Cyg X-1	HMXB	5.6	0.24 ± 0.01	7-20	O 型超巨星
LMC X-3	HMXB	1.7	0.14	7-14	B 型矮星
LMC X-1	HMXB	4.2	2.3 ± 0.3	4-10	O 型巨星
A0620-00 (V616 Mon)	SXT	0.32	2.91 ± 0.08	4.9-10	K 型矮星
GS1124-683 (XN Mus 1991)	SXT	0.43	3.01 ± 0.15	5.0-7.5	K 型矮星
GS2023+338 (V404 Cyg)	SXT	6.47	6.08 ± 0.06	12.3 ± 0.3	K 型矮星
GS2000+25	SXT	0.34	4.97 ± 0.10	8.5 ± 1.5	K 型矮星
H1705-250 (XN Oph 1977)	SXT	0.70	4.0 ± 0.8	4.9 ± 1.3	K 型星
GRO J1655-40 (XN Sco 1994)	SXT	2.61	3.16 ± 0.15	7.02 ± 0.22	F-G 型矮星
GRO J0422+32 (XN Per 1992)	SXT	0.21	1.21 ± 0.06	3.57 ± 0.34	M 型矮星

$f(m)$ 。有些源可能太远,有些源则可能吸积盘太亮以至于埋没了光学子星的辐射。于是人们进一步试图寻找包含黑洞的 X 射线双星的特有辐射判据。如能找到这种判据,则能发现更多的黑洞候选者,并能自然区分包含黑洞双星和中子星双星 NSB(neutron star binaries)。可惜这样的决定性判据目前尚未找到。

通常人们从由动力学判据发现的黑洞双星 (BHB) 中去归纳 X 射线辐射独特的或是普遍存在的性质,然后以这些性质为判据进一步搜寻更多黑洞候选者 (BHC)。

早在只有 Cyg X-1 一个强黑洞候选者的年代,人们就发现 Cyg X-1 的辐射具有一些独特的特征^[65]: (1) 超软 X 射线谱; (2) 快速 (约 1ms) X 射线时变; (3) 存在两种 X 射线谱态 (软态和硬态) 等。于是人们定义,凡与 Cyg X-1 有相似的辐射性质的源称为“黑洞候选者” (BHC, 注意与强黑洞候选者区分)^[32,66]。然而,一些开始看似独特的性质 (如快速时变等) 后来都在包含中子星的双星系统中找到,因而,这些性质并不具有排他性。这是可以理解的,因为这些辐射都是来自吸积盘的,尽管中心天体不同,但只要盘相似,就会有相似的辐射特征。具有强磁场的 NSBs 与 BHBs 是较容易区分的,有两个特征是强磁场 NSBs 所特有的^[67]: (1) 标志中子星 (NS) 磁层的热韧致辐射 (TB) 谱型和低于 20keV 的截止; (2) 标志 NS 表面辐射的 1—2keV 的单色黑体谱 (SCB) 成分。然而,由于 BHBs 和弱磁场 NSBs 的吸积盘较相似,因此不太容易区分。目前,被当作 BHBs 特性的判据主要有三条^[67]: (1) 没有来自 NS 表面的 SCB 污染的明亮 (约 10^{37} erg/s) 的超软多色黑体谱 (MCB, 来自吸积盘内缘); (2) 有高能截止 (> 100keV) 的明亮 (约 10^{37} erg/s) X 射线幂率谱 (光子谱指数: -1.5 至 -2.0); (3) 一直到 300—500keV 都没有高能截止的陡幂率谱 (SPL) 与明亮 (约 10^{37} erg/s) 的超软 MCB 共存。前两个特点与 BH 没有固体表面相关,而最后一个是由于 BH 的视界所致。具有上述三条特征中至少一条的系统都可当作是强的 BHCs。目前,根据这些判据,已选出 BHCs 约 20 个^[68,67]。

最近,寻找黑洞辐射判据的工作有了很大进展。至少有三个证据不同程度地表明了黑洞视界的存在: (1) 吸积过程引力能会转化为大量热能。黑洞缺乏固体表面,这些巨大的热能会流入视界而消失,而对于中子星,固体表面会被加热并再发射。观测已发现明显的黑洞视界“隐藏”吸积热能的迹象^[69]; (2) 在强黑洞候选者 GRO J1655-40 和 GRS1915+105 中观测到高频准周期振荡 (QPO), 最简单直观的解释是黑洞的自转^[70]; (3) BHBs 和 BHCs 的 X

射线谱通常可归入两类：(i) 软态 (又称高态)：在 2—10keV 有较高的光度，能谱为一个软热成分 ($T \geq 1\text{keV}$) 加一个超过 10keV 的硬幂率成分；(ii) 硬态 (又称低态)：2—50keV 范围内单一的幂率成分。有些源 (如 Cyg X-1) 有时在两个态之间“跃迁”。对于这种“双态”现象，一个最简单直观的解释也是黑洞的自转。最近，张双南等人^[66]指出谱型的差异完全由吸积盘转动方向与黑洞自转方向之间的关系决定：两个软态的视超光速喷流源 GRO J1655-40 和 GRS 1915+105 中的黑洞以接近最大值的速度与吸积盘同向旋转；普通软态源的黑洞无旋转或转速很小；硬态源是黑洞与吸积盘反向旋转所致。根据他们的理论，硬态 X 射线谱中应仍有软热成分，不过已红移至探测能段以外，可以预言，如这些 SXT 能再次爆发，则可以在更软的能段找到热峰。三位作者还指出，Cyg X-1 的“双态跃迁”完全起因于吸积盘的突然反转，这种现象对于 Cyg X-1 这样的星风吸积系统是可能的。

以上表明，人们已经找到了一些黑洞视界的可能证据，而且，X 射线谱的“双态”和高频准周期振荡可能已向我们提示了除质量以外的第二个黑洞参量，即转动的信息。换句话说，人们可能发现了 Kerr 黑洞。

4 小 结

由前文可见，人类搜寻黑洞这种谜一般的天体已走了很长一段路程，无论在星系尺度还是在恒星尺度都找到了许多黑洞存在的证据。然而，看来还不能说已找到了黑洞。黑洞是黑的，而我们又希望通过探测电磁辐射来搜寻和证认黑洞，这本身就是一个悖论。以上的推理过程是：如果找到一个暗的天体，而它的性质不能用别的替代物作出解释，它就是黑洞。Shipman^[71]在一幅漫画中这样幽默地表述：“它是黑的，它看起来象个洞，因此我们说它是黑洞”。

AGN 中心的黑洞出于解释巨大能源的需要；附近星系中心的 MDO 被认为是黑洞是因为其它可能的情况 (如聚集的恒星、中子星、小黑洞等) 都是不稳定的；X 射线双星中存在“黑洞”是因为中子星存在质量上限，不能想象还有什么别的机制可造就一个非黑洞的 $> 3M_{\odot}$ 的致密天体；上节所引述的三个黑洞视界的观测证据也只是表明用黑洞解释最为简单，但并不能完全排除其它可能性。所有这些推理都依赖于某一个或几个理论，尽管这些理论很可能是正确的。

如前所述，不依赖于理论的黑洞判据包括两方面：“大质量”和“小尺度”。前者已有了很好的观测，而后的测量则比较困难。正如表 2 所示，在星系尺度目前观测到的最小距离仍远大于 Schwarzschild 半径。即使在可预期的将来，探测星系级黑洞 Schwarzschild 半径附近的物质运动学行为也很难实现。在 X 射线双星中，除掩食系统的迅速光变外，还没有对致密天体尺度的非常直接的测量，由 X 射线谱所反演的吸积盘内半径的大小也是依赖于模型的。

一种可能的理想的确认黑洞的系统是由一颗中子星和一颗黑洞组成的脉冲双星系统^[72,73]。这是因为，脉冲星精确的时间测量 (timing) 可给出许多其它天体系统无法提供的信息。虽然上述脉冲星—黑洞系统尚未找到，但理论预测它将会在近期内被发现。一旦发现这种系统，人们不仅可以精确地确定轨道参数及脉冲星、黑洞的质量，而且可以精确验证更强引力场中的引力理论，了解黑洞视界附近的信息和精确研究转动性质。因此对这种系统的搜寻和研究有着深远意义。我们将在本文 (II) 中详细综述脉冲星—黑洞系统的性质及其发现意义^[74]。

致谢 作者感谢 Manchester 教授、卢炬甫教授、李惕碫研究员、吴学兵、朱宗宏、徐仁新博士及洪碧海、刘继峰、郑政、王洪光等同学的有益讨论。

参 考 文 献

- 1 Laplace P S. Le Systeme du Monde, Vol. II, Paris, 1795 (English edition: Flint W. London: The System of the World, 1809)
- 2 Chandrasekhar S. Ap. J., 1931, 74: 81
- 3 Oppenheimer J R, Snyder H. Phys. Rev., 1939, 56: 455
- 4 Wheeler J A. American Scientist, 1968, 56: 1
- 5 Shapiro S L, Teukolsky S A. Black holes, white dwarfs, and neutron stars - The physics of compact objects, New York, Singapore: A Wiley-Interscience Publication, 1983. 335-369, 241-266
- 6 Wald R M. General relativity. Chicago: The University of Chicago Press, 1984
- 7 张镇九. 天文学进展, 1984, 2(4): 341
- 8 王永久, 唐智明. 引力理论和引力效应. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1990. 399-450
- 9 Chandrasekhar S. Rev. Mod. Phys., 1984, 4: 137
- 10 梁灿彬. 天文学进展, 1984, 2(4): 355
- 11 Penrose R. Phys. Rev. Lett., 1965, 14: 57
- 12 Hawking S W. Proc. R. Soc. London, Ser.A, 1967, 300: 187
- 13 Hawking S W, Penrose R. Proc. R. Soc. London, Ser.A, 1970, 314: 529
- 14 Hawking S W, Ellis G F R. The large scale structure of space-time. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1973
- 15 Bekenstein J D. Phys. Rev. D, 1973, 7: 2333
- 16 Hawking S W. Nature, 1974, 248: 30
- 17 Hawking S W. Commun. Math. Phys. 1975, 43: 199
- 18 Salpeter E E. Ap. J. 1964, 140: 796
- 19 Lynden-Bell D. Nature, 1969, 223: 690
- 20 Lynden-Bell D, Rees M J. M.N.R.A.S., 1971, 152: 461
- 21 Rees M J. Annu. Rev. Astron. Astrophys., 1984, 22: 471
- 22 Kormendy J, Richstone D. Annu. Rev. Astron. Astrophys., 1995, 33: 581
- 23 Bahcall J N, Ostriker J P. Nature, 1975, 256: 23
- 24 Silk J, Arons J. Ap. J., 1975, 200: L131
- 25 Clark G W. Ap. J., 1975, 199: L143
- 26 Grindlay J E, Hertz P, Steiner J E et al. Ap. J., 1984, 282, L13
- 27 Yanny B, Guhathakurta P, Bahcall J N et al. A. J., 1994, 107: 1745
- 28 Bahcall J N, Wolf R A. Ap. J., 1976, 209: 214
- 29 Gebhardt K, Fischer P. A. J., 1995, 109: 209
- 30 De Paolis F, Gurzadyan V G, Ingrassio G. Astron. Astrophys., 1996, 315: 396
- 31 Dull J D, Cohn H N, Lugger P M et al. Ap. J., 1997, 481: 267
- 32 Cowley A P. Annu. Rev. Astron. Astrophys., 1992, 30: 287
- 33 Liang E P, Nolan P L. Space Sci. Rev., 1984, 38: 353
- 34 Page D N. Phys. Rev. D, 1976, 13, 198
- 35 Page D N, Hawking S W. Ap. J., 1976, 206, 1
- 36 卢炬甫. 致密天体的吸积和喷流, 见李启斌, 李宗伟, 汲培文编, 90年代天体物理学. 北京: 高等教育出版社, 1996: 793
- 37 Tanaka Y, Nandra K, Fabian A C et al. Nature, 1995, 375: 659
- 38 Nandra K, George I M, Mushotzky R F et al. Ap. J., 1997, 477: 602
- 39 Young P J, Westphal J A, Kristian J et al. Ap. J., 1978, 221: 721
- 40 Lauer T R, Faber S M, Holtzman J A et al. Ap. J., 1991, 369: L41
- 41 Ford B, Tsvetanov Z I. Sky & Telescope, June 1996: 28

- 42 Kormendy J. *Ap. J.*, 1988, 325: 128
- 43 Dressler A, Richstone D O. *Ap. J.*, 1988, 324: 701
- 44 Miyoshi M, Moran J, Herrnstein J *et al.* *Nature*, 1995, 373: 127
- 45 Rees M J. In: Wald R ed. *Black holes and relativity*, Proc. Chandrasekhar Memorial Conference, 1996, Chicago: Chicago Univ. Press, 1998: in press
- 46 Ho L C. In: Chakrabarti S K ed. *Observational evidence for black holes in the universe*. Dordrecht: Kluwer, 1998, in press
- 47 Oppenheimer J R, Volkoff G M. *Phys. Rev.*, 1939, 55: 734
- 48 Rhoades C E Jr, Ruffini R. *Phys. Rev. Lett.*, 1974, 32: 324
- 49 Hartle J B. *Phys. Rep.*, 1978, 46: 201
- 50 Baym G, Pethick C. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 1979, 17: 415
- 51 Kalogera V, Baym G. *Ap. J.*, 1996, 470: L61
- 52 南京大学数学天文系天体物理教研室, 天体物理学方法. 上海: 上海科学技术出版社, 1962: 488-496
- 53 佩克尔 J C, 夏茨曼 E. 普通天体物理学. 李珩译. 北京: 科学出版社, 1964: 311-314
- 54 Bowyer S, Byram E T, Chubb T A *et al.* *Science*, 1965, 147: 394
- 55 Wade C M, Hjellming R M. *Nature*, 1972, 235: 271
- 56 Webster B L, Murdin P. *Nature*, 1972, 235: 37
- 57 Bolton C T. *Nature*, 1972, 235: 271
- 58 Gies D R, Bolton C T. *Ap. J.*, 1986, 304: 371
- 59 Paczynski. *Astron. Astrophys.*, 1974, 34: 161
- 60 Elvis M, Page C G, Pounds K A *et al.* *Nature*, 1975, 257: 656
- 61 McClintock J E, Remillard R A. *Ap. J.*, 1986, 308: 110
- 62 Charles P A, Wagner R M. *Sky & Telescope*, May 1996: 38
- 63 Barret D, McClintock J E, Grindlay J. *Ap. J.*, 1996, 473, 963
- 64 Zhang S N, Mirabel I F, Harmon B A *et al.* invited review article for the 4th Compton Symposium, Williamsburg, VA, 1997, in press
- 65 White N E, Marshall F E. *Ap. J.*, 1984, 281: 354
- 66 Zhang S N, Cui W, Chen W. *Ap. J.*, 1997, 482: L155
- 67 Zhang S N. invited review talk at the IAU Colloquium 163 "Accretion Phenomenon and Related Outflows", PASP Conference Series, Queensland, Australia, 1996, in press
- 68 Tanaka Y, Lewin W H G. In: Lewin W H G, van Paradijs J, van den Heuvel E P J. eds. *X-ray Binaries*, Cambridge: Cambridge University Press, 1995: 126
- 69 Narayan R, Garcia M R, McClintock J E. *Ap. J.*, 1997, 478: L79
- 70 Morgan E H, Remillard R A, Greiner J. *Ap. J.*, 1997, 482: 993
- 71 Shipman H L. *Sky & Telescope*, May 1996: 43
- 72 Qiao G J, Han J L, Zhang B *et al.* 北京天文学会第十一届代表大会学术报告文集, 1996, 北京: 北京天文学会, 1996: 29
- 73 Qiao G J, Han J L, Zhang B. In: Cheng K S, Chan K L eds. *Proc. of the 21st Century Chinese Astronomy Conference*, 1996, Hong Kong, Singapore: World Scientific Publishing, 1997: 305
- 74 张冰, 乔国俊, 韩金林. 天文学进展, 1998, 本期: 274

Detection and Confirmation of Black Holes (I): Current Status

Zhang Bing^{1,2} Qiao Guojun^{1,2,3} Han Jinlin⁴

(1. Department of Geophysics, Peking University, Beijing 100871)

(2. CAS-PKU Joint Beijing Astrophysics Center)

(3. LCRHEA, IHEP, CAS, Beijing 100039)

(4. Beijing Astronomical Observatory, CAS, Beijing 100080)

Abstract

1.1 The theory of black holes and their possible appearances are briefly introduced. The principles, methods, as well as the current status of black holes' detecting and confirming both in the galactic centers and in the X-ray binaries are reviewed. On the galactic scale, besides the possible black holes dwelling in the centers of active galactic nuclei (AGNs), at least 11 black hole candidates have been detected in the nearby galactic centers. However, the smallest scale observed is still several orders of magnitude larger than the event horizon of black holes. On the stellar scale, people have detected at least 10 strong black hole candidates in high mass X-ray binaries (HMXBs) and soft X-ray transients (SXTs) using the dynamical criterion, and some more using the radiation criteria. But no conclusive criterion is available so far to distinguish black hole binaries (BHBs) from the neutron star binaries (NSBs). All these indicate that no adequate evidence has been found to confirm the existence of the black holes in nature.

Key words relativistic astrophysics: black hole—galactic center—X-ray binary

经历了“再加速”(recycled)阶段,且平均说来P和L较正常PSR小一量级而... PSR-NS系统的数目会比以上估计值再低一个量级,即 $N_{PSR-NS(ops)} \approx 10^{-2} z_0 N_{PSR(ops)}$. 这个结论在现在看来也是正确的,目前 $N_{PSR(ops)} \approx 750$, $N_{PSR-NS(ops)}$ 则应为几个,而原... (2) 比较已观测到的... 爆发后系统未解体而形成NS-NS系统的几率 $\phi_{\sim} 10^{-2}$,于是对于每一个在双星系统中发现的再加速PSR,应对应于 $10^2/z_0$ 个有再加速... (4) 假设含BH的HMXBs中的黑洞质量约 $10M_{\odot}$,... 黑洞的大质量而不解体,又假设BH-BH系统诞生的可能性较小,于是可得PSR-BH的诞生率也约是 $10^{-1} yr^{-1}$,这个值与PSR-NS系统的诞生率是相当的,但这种PSR-BH系统中