恒星级黑洞的搜寻与研究进展

王松^{1*}, 刘继峰^{1,2,3*}, 张昊彤¹, 陆由俊^{1,2}, 白仲瑞¹, 袁海龙¹, 白宇¹, 王逸伦^{1,2}

1. 中国科学院国家天文台光学天文重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049;

3. 武汉大学-国家天文台联合天文中心, 武汉 430072

* 联系人, E-mail: songw@bao.ac.cn; jfliu@bao.ac.cn

2020-11-28 收稿, 2020-12-10 修回, 2020-12-14 接受, 2020-12-15 网络版发表

国家自然科学基金(11988101, 11933004, 11973054, 11873066)、国家重点研发计划(2019YFA0405504)、中国科学院天文大科学研究中心LA-MOST重大成果培育项目和中国科学院青年创新促进会(2019057, 2020060)资助

摘要 迄今为止, 银河系内发现的约20颗恒星级黑洞都是通过黑洞吸积伴星物质所发出的X射线来识别. 若黑洞的X射线辐射低于望远镜探测极限, 人们仍可以通过监测伴星的视向运动来发现黑洞. 我们利用LAMOST望远镜对银河系的一颗B型恒星进行速度测量, 发现它在围绕一颗不可见天体——大质量恒星级黑洞做周期性运动. 这是国际上利用视向速度监测发现黑洞的一次成功实践. 尽管引力波探测实验已经发现相似质量的恒星级黑洞, 但在富金属环境中形成如此大质量的黑洞对目前的恒星演化理论形成了巨大的挑战. 本文介绍了恒星级黑洞的几种探测方法, 并对近些年国内外搜寻黑洞所做的努力进行了回顾, 最后对未来利用视向速度监测方法和天体测量方法寻找黑洞进行了展望.

关键词 恒星级黑洞, LAMOST, 视向速度监测, 引力波

黑洞是宇宙中最致密的天体. 按照质量, 黑洞可以大体分为三类: 超大质量黑洞(10万倍太阳质量以上)、中等质量黑洞(100倍~10万倍太阳质量)、恒星级黑洞(100倍太阳质量以下). 黑洞在宇宙中广泛存在, 几乎每个星系中心都存在一个超大质量黑洞. 理论预计, 在银河系中至少存在上亿颗恒星级黑洞^[1,2].

过去数十年来, 黑洞的研究取得了长足的进展, 并且在近些年, 重大成果不断涌现. 从2015年起, 美国激光干涉引力波天文台(Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory, LIGO)及欧洲处女座干涉仪(Virgo interferometer, Virgo)的引力波探测实验已经发现了数十起黑洞并合事件^[3,4]. 2019年, 事件视界望远镜(Event Horizon Telescope, EHT)国际合作项目通过对M87中心区域的观测, 得到了人类首张黑洞照片^[5]. 2017和2020年的诺贝尔物理学奖都与黑洞理论及探测

密切相关. 黑洞研究已经成为现代天体物理研究最活跃的领域之一.

恒星级黑洞是恒星演化的产物. 一般认为, 小于8倍太阳质量的恒星死亡会形成白矮星, 8~25倍太阳质量的恒星死亡会形成中子星, 而25倍太阳质量以上的恒星死亡可以最终塌缩成黑洞. 对这些致密天体的研究可以加深人们对致密星物理、恒星(双星)形成与演化和高能辐射过程的理解, 对认识和发展极端物理条件(超高密、超高温、强磁场、强引力)下的物理规律有着重要意义.

尽管黑洞的研究已经取得了巨大进展, 但仍有一些关键性的基本问题尚未得到解答, 比较有代表性的是小质量黑洞的缺失问题. 在现有超新星爆炸理论模型下, 给定银河系恒星的初始质量函数, 人们预测黑洞的质量连续分布于约2~3倍太阳质量到约20倍太阳质

引用格式: 王松, 刘继峰, 张昊彤, 等. 恒星级黑洞的搜寻与研究进展. 科学通报, 2021, 66: 1307–1314

Wang S, Liu J F, Zhang H T, et al. Search and research advances on stellar-mass black holes (in Chinese). Chin Sci Bull, 2021, 66: 1307–1314, doi: 10.1360/TB-2020-1530

量之间,并且质量越小,出现的频率越高^[6].在银河系中已观测到约20个恒星级黑洞,并测得了它们的质量^[7].然而,这些黑洞的质量分布与理论上的分布非常不同,表现为缺失低于6倍太阳质量的黑洞^[8].造成小质量恒星级黑洞缺失的原因可能是样本选择效应或超新星爆发能量对恒星初始质量的阶梯状(step-like)依赖性^[6,8],而某些大质量恒星(16.5~25倍太阳质量)通过直接塌缩或超新星爆发失败的方式形成黑洞也可能解释该问题^[9].由于在理论上研究超新星爆发过程还存在诸多不确定因素而很难给出决定性的判据,在银河系中搜寻恒星级黑洞并建立大规模样本,研究其空间和动力学质量分布成为解决上述问题的关键,也是最为可行的技术手段.

然而,由于黑洞存在视界,我们无法直接获取黑洞自身的电磁辐射.在实际的观测中,搜寻和证认恒星级黑洞存在许多困难.长期以来,发现黑洞依赖于其吸积伴星物质所发出的X射线辐射及其爆发特征.从X射线源附近大量的光学对应体中确定其光学伴星,通过后续光谱测定伴星的视向速度变化,同时测光测定双星绕转的轨道倾角,进而测量致密天体的动力学质量,确定它是中子星(小于3倍太阳质量)还是黑洞(大于3倍太阳质量).黑洞要存在显著的X射线辐射,就必须捕获和吸积足够的伴星物质,这只有在密近双星中或部分大质量双星中才有可能.但这两类双星总体数量极少^[10],其中离我们足够近、能够被探测到伴星运动的数量就更少.而且,为了对光学伴星开展有效的光谱和测光观测,需要避免吸积盘的辐射对伴星光谱的污染.这要求黑洞双星X射线爆发结束、系统回到宁静态后,人们才能进行光谱监测.因此,人们通过过去50年的努力,只确定了约20个恒星级黑洞的质量^[7].

引力波也是探测恒星级黑洞的有效方法之一.引力波是广义相对论预言的一种时空涟漪,它是时空本身的一种波动现象.由于引力波保留着波源的原初信息,探测到致密双星并合时所发出的引力波,可以推出并合前双星的质量.2015年9月14日,LIGO发现了第一起双黑洞并合事件(GW150914),由两颗分别为36和29倍太阳质量的黑洞并合为62倍太阳质量的黑洞,其中约3倍太阳质量以引力波的形式释放出去^[11].2017年8月14日,LIGO和Virgo首次联合探测到双黑洞并合所产生的引力波(GW170814)^[12],并于3天后探测到双中子星并合产生的时空涟漪(GW170817)^[13].目前,LIGO和Virgo已经探测到数十起双黑洞并合事件^[3,4].图1给出了目前由引

力波方法和电磁波方法发现的部分黑洞与中子星.

实际上,恒星级黑洞并非都存在于双星或多星系统中,它们中的大部分很可能以孤立的形式存在于宇宙中.微引力透镜是唯一已知的可发现孤立恒星级黑洞的方法.据估计,在银河系核球方向的微引力透镜事件中,大约有1%由孤立恒星级黑洞导致^[14].近些年,利用微引力透镜方法,已经发现了多个孤立黑洞候选体^[15~19],引力源的天体质量也得以精确测量^[20,21].然而,该方法需要对大量恒星长时间监测,探测效率比较低.

我们一直尝试突破传统方法限制,采用多种不同方法来发现更多致密天体,进而测量致密天体的质量,并最终构建致密天体的质量分布.例如,我们曾经尝试使用紫外盈余辐射揭示致密天体吸积盘,结果发现,该类源中恒星活动性造成的污染过于严重,无法有效发现致密天体^[22].视向速度监测方法也可以用来发现黑洞,但是需要新的观测手段来提高效率.从20世纪60年代起,就有天文学家试图利用单缝光谱仪对单线分光双星进行长期监测来发现黑洞,但是效率太低,无法大量发现黑洞.

LAMOST望远镜(即郭守敬望远镜)是我国自主设计建成的光谱巡天望远镜,其独特性在于兼备大口径(有效通光口径:4 m)和大视场(视场角直径:5°).LAMOST的焦面拥有4000根光纤,可以同时观测近4000个天体,具有世界上最高的光谱获取效率.2019年3月,LAMOST公开发布了1125万条光谱,成为全球首个突破千万的光谱巡天项目.这让通过分析致密双星中伴星的光谱(研究其视向速度变化)来搜寻黑洞成为可能.在近期的工作中,我们正是利用LAMOST对同一批3000多个天体进行多达26次的重复观测,成功发现了一颗大质量恒星级黑洞以及数个黑洞候选体^[23].

1 黑洞LB-1的发现及讨论

从2016年秋季开始,笔者所在的研究团队利用LAMOST开展双星课题研究,对一个小天区内3000多颗恒星进行了历时两年之久的监测.其中,一颗在反银心方向的B型星(LS V + 22 25)表现出奇特的光谱特征:具有明显周期性运动的恒星吸收线(来自B型星),以及具有小振幅反相位运动的宽H α 发射线(来自某不可见天体).我们随即申请了西班牙10.4 m加纳利大望远镜(Gran Telescopio CANARIAS, GTC)的21次观测和美国10 m凯克望远镜(Keck)的7次高分辨率观测.基于对所有观测数据中恒星吸收谱线的测量,我们发现,该天体(称

图 1 目前由电磁波观测发现的黑洞(紫色)和中子星(黄色)、引力波观测发现的部分黑洞(蓝色)和中子星(橙色). GW190521位于图片中央最上方,是目前引力波探测到的最大质量黑洞,由两颗大质量恒星级黑洞并合而成. 图片版权: LIGO-Virgo/Northwestern U./Frank Elavsky & Aaron Geller(更新于2020年9月2日)

Figure 1 The number and masses of some black holes, detected through electromagnetic observations (purple) and gravitational-wave observations (blue), and neutron stars, detected through electromagnetic observations (yellow) and gravitational waves (orange). GW190521 is highlighted in the middle of the graphic, which is the most massive black hole observed yet in gravitational waves, as the remnant of the merger of two massive stellar-mass black holes. Image credit: LIGO-Virgo/Northwestern U./Frank Elavsky & Aaron Geller (Updated on Sep. 2nd, 2020)

为LB-1)的轨道周期为78.9 d, B型星和H α 发射线的视向速度曲线见图2. 利用B型星和H α 发射线的速度振幅之比(约为8.3), 以及B型星的质量(约为8.2倍太阳质量), 我们最终估算出该双星系统中存在一个质量约为70倍太阳质量的不可见天体. 该天体是迄今为止质量最大的恒星级黑洞.

恒星能演化成多大质量的黑洞, 与恒星的质量、星风属性、金属丰度, 以及超新星爆炸后剩余的质量等参量密切相关. 金属丰度越高, 星风越强, 吹出去的物质越多, 留下的质量就越小, 从而只能形成小质量黑洞. 超新星爆发时抛出的物质越多, 留下的质量就越小. 对于超大质量恒星(约100~260倍太阳质量), 由于在其生命的最后阶段, 星体内部温度和压强极高, 核反应生成的光子会转化为正负电子对, 诱发热核不稳定性的发生, 导致特殊的超新星爆发. 若前身星质量在约100~130倍太阳质量之间, 会产生“脉动对不稳定超新星”(pulsational pair-instability supernovae), 其内核会连续收缩、扩张, 导致一系列重复爆发, 最终剩下一颗35~50倍太阳质量的内核; 若前身星为130~250倍太阳质量, 会产生“对不稳定超新星”(pair-instability super-

novae), 整个恒星都可能爆掉, 什么也不留下^[24,25]. 超新星iPTF14hls与SN2016iet分别可能是两者的具体实例^[26,27]. 恒星演化理论还预言, 超新星可能在一定条件下爆发失败, 直接整体坍缩形成黑洞, 这样形成的黑洞质量可能会偏大. 一些观测已经为这种观点提供了证据, 如Cygnus X-1和N6946-BH1^[28,29].

LB-1的质量如此之大, 对现有的恒星演化和黑洞形成理论提出了挑战. 一般模型认为, 大质量恒星级黑洞主要形成于低金属丰度(低于1/5太阳金属丰度)环境中, LB-1却有一个与太阳金属丰度相近的B型星(基于LB-1中黑洞前身星和B型星是原初双星的推测, 二者应具有相同的金属丰度). 在太阳丰度下, 理论预言所能形成的最大质量黑洞为25倍太阳质量^[30~32]. 因此, LB-1中黑洞的质量已经进入现有恒星演化理论的“禁区”. 这可能意味着有关恒星物理需要进行修改, 或者以前某种形成机制被忽视.

文章^[23]发表后, 引起了众多国际团队的高度关注, 掀起了一场激烈的学术辩论. 有研究者认为, 该系统只包含一颗5~20倍太阳质量的普通恒星级黑洞^[33]; 也有研究者认为, LB-1并不包含黑洞, 而是由一颗Be星和

图2 可见B型星(紫色曲线)与不可见主星(黄色曲线)的视向速度曲线和双星轨道拟合. 实心点代表观测数据, 其中蓝色点来自LAMOST, 红色点来自GTC, 绿色点来自Keck. 数据来自参考文献[23]

Figure 2 Folded radial-velocity curves and binary orbital fits of the visible star (purple line) and the dark primary (yellow line). The observed data (filled circles) are from LAMOST (blue), GTC (red) and Keck (green), respectively. Data are from Ref. [23]

一颗氢壳层被剥离的热亚B型矮星组成的较为罕见的双星系统^[34]. 随后, 我们利用西班牙CAHA 3.5 m望远镜的CARMENES高分辨率光谱仪进行了持续3个月的后续监测, 确认该不可见天体的质量是其伴星质量的4~8倍. 如果光学伴星的确是B型星(3~6倍太阳质量), 则主星质量在12~50倍太阳质量范围, 仍然极有可能是银河系内最大质量的恒星级黑洞^[35]. 未来, Gaia积累足够多的数据后, 其天体测量误差能够降低到0.1 mas. 结合视向速度测量和Gaia单次位置测量, 可以同时求解轨道参数和视差. 这将同时给出双星总质量和质量比, 从而最终确定LB-1的物理本质.

值得一提的是, 引力波观测实验已经发现了数十倍乃至上百倍太阳质量的黑洞, 质量远高于先前已知的银河系里的恒星级黑洞. LIGO与Virgo最近探测到一颗142倍太阳质量的中等质量黑洞GW190521, 由两颗分别约85和65倍太阳质量的恒星级黑洞并合而成, 并以引力波的形式释放出8倍太阳质量的能量^[36]. 对于这两个发生并合的大质量恒星级黑洞, 人们推测它们此前都由更小的黑洞并合而成. 类似地, LB-1中的黑洞或许也不是由一颗恒星坍缩形成的, 例如LB-1最初是一个三体系统, 观测到的B型星位于最外轨道, 是质量最小的组成部分, 现在的黑洞由最初内部的双星形成的

双黑洞并合而成. 在公共包层演化阶段, “正常”的恒星级黑洞并合可以生成60倍太阳质量以上的星体, 进而吸积周围的物质形成70倍太阳质量的黑洞. 甚至, LB-1的主星可能仍然包含两个黑洞, 它们彼此绕转形成一个双星, 而观测到的B型星是第三伴星. 这要求单个黑洞质量接近35倍太阳质量, 因此并未对黑洞形成理论构成强烈挑战. 在这种情况下, 该系统为我们研究三星系统中双黑洞的形成提供了一个独一无二的实验室^[23].

2 国内外的恒星级黑洞搜寻

利用视向速度监测的方法, 国内外的研究团组已经发现了数个黑洞及候选体.

厦门大学顾为民、武剑锋、王俊峰及团队成员, 利用LAMOST释放的恒星光谱数据, 对银河系中恒星级黑洞的搜寻与证认开展了一系列工作: (1) 提出了利用LAMOST光谱寻找恒星级黑洞候选体的一种新方法^[37]; (2) 结合LAMOST望远镜的光谱和ASAS-SN望远镜的测光观测来寻找恒星级黑洞候选体^[38]; (3) 估算了利用LAMOST光谱能搜寻到的恒星级黑洞的数目^[39].

Casares等人^[40]通过分析Liverpool望远镜的光谱数据发现, MWC 656的光谱中存在来自Be星星周盘的FeII线和来自伴星周围气体的HeII线, 两者反向运动.

光变周期和视向速度变化周期均约60 d. 研究人员认为, MWC 656是一个由3.8~6.9倍太阳质量的黑洞和Be星组成的双星系统.

APOGEE是SDSS IV开展的近红外高分辨率光谱巡天项目, 覆盖了银河系约10万颗红巨星. 基于APOGEE视向速度观测和ASAS-SN的光变数据, Thompson等人^[41]发现, 2MASS J05215658+4359220(以下简称J05215658)是一个双星系统, 除了一颗明亮、快速旋转的巨星外, 还有一个巨大的看不见天体. 该系统的轨道周期约为82 d, 偏心率接近于零. 这颗巨星的光度变化周期(自转周期)与轨道周期一致, 表明巨星已被潮汐锁定. 对巨星的质量和半径进行有效限制后, 研究人员估算看不见的天体是3.3倍太阳质量(误差范围为2.6~6.1倍太阳质量). 由于该致密天体质量下限接近于中子星的理论质量上限(约2.5倍太阳质量), 因此它有可能是一个大质量的中子星; 而若认为其质量为3.3倍太阳质量, 它将是目前最小的恒星级黑洞.

最近, Rivinius等人^[42]发现, HR 6819是一个三体系统, 由一颗Be星和一个周期约为40 d的双星系统构成, 而该双星中含有一颗B3亚巨星和一颗质量大于4.2倍太阳质量的黑洞. 该黑洞同样为宁静态黑洞, 是目前发现的离太阳系最近的黑洞. 但同样有作者认为, HR 6819只是一个双星系统, 由一颗转速较快的Be星和一颗转速较慢的B型星组成, 后者氢壳层被剥离, 质量大约为0.5倍太阳质量, 未来将会变成一颗热亚矮星^[43].

这些黑洞与通过X射线发现的恒星级黑洞有何不同呢? LB-1中黑洞与伴星的距离约为1.5倍日地距离, J05215658中黑洞与伴星的距离也大于0.68倍日地距离, 都大于银河系内其他黑洞-恒星组合的双星距离. 这些黑洞都未在X射线观测中被探测到, 其中LB-1的X射线光度上限为 2×10^{31} erg/s^[23], J05215658的X射线光度上限为 7×10^{31} erg/s^[41]. 作为对比, 通过X射线发现的黑洞光度一般大于约 10^{35} erg/s^[44]. 这表明, LB-1类别的黑洞对其伴星的吸积非常弱(吸积物质可能由伴星的星风提供), 其中吸积盘可能在离黑洞较远处截断, 不会延伸到黑洞视界临近的区域, 从而不会产生显著的X射线辐射(类似于银河系中一些处于X射线宁静态的低质量X射线双星)^[45,46].

3 总结与展望

对于X射线辐射宁静的双星系统, 利用常规X射线

方法搜寻黑洞是行不通的. 找到新的方法, 发现数量巨大、没有X射线辐射的黑洞, 成为天文学界近年来研究的热点和难点.

目前通过视向速度监测法所发现的几个黑洞表明, 利用具有大规模巡天优势和极高观测效率的望远镜, 非常有利于通过监测伴星的运动来发现隐藏的黑洞. 目前LAMOST巡天进入第二阶段, 除了正常的低分辨率巡天外, 还包含中分辨率时域巡天(光谱分辨率更高, 视向速度的测量误差更小). 后者包含多个时域观测项目^[47], 其巡天策略计划在同一观测夜对同一天区进行多达8~10次的重复曝光; 对于一些天区, 5年内将有多达50次的累计重复曝光. 预计未来几年, LAMOST在致密天体搜寻领域将发挥重要作用. 同时, 利用LAMOST对大样本恒星重复观测, 不仅可以发现黑洞, 更重要的是选源过程简单, 容易得到样本选择函数, 因此可以得到比较准确的黑洞产生概率. 该方法可以用来验证黑洞产生概率到底是千分之一还是万分之一, 并且检验黑洞概率随天区位置的变化.

除了视向速度监测法, 天体测量方法在黑洞探测上也可以发挥独特的能力. 黑洞会吸引着伴星绕双星质心转动, 因而不但会产生视向速度周期性变化, 其在天球上的位置也会发生周期性变化. 当然, 这个变化非常微小, 一般观测很难区分. 空间望远镜Gaia的发射, 提供给我们前所未有的机遇, 利用数十亿计恒星的超高位置精度测量, 可以结合视向速度曲线和伴星在天球上的位置变化来重构伴星在三维空间里的运动. 例如, 对于一个处于4 kpc处的近圆轨道黑洞伴星, 如果其相对双星质心距离为1.5倍天文单位, 那么其运动引起的位置变化呈现为叠加在自行和周年视运动上的一个大小为0.4毫角秒的近圆轨道运动, 而Gaia最好的位置测量精度可以达到20微角秒. 因此, 对一些距离我们较近且黑洞质量大于可见伴星的双星, Gaia可以探测到伴星除自行和视差外致密天体吸引造成的位置变化. 结合Gaia高精度天测数据和视向速度曲线, 可以有效构建伴星三维轨道运动, 估计黑洞质量. 我们预计, 这种方法产出的致密天体双星属性与传统方法的结果有很大不同, 例如轨道周期较长等.

未来, 通过将视向速度监测和天测数据结合, 天文学家有望发现一批X射线宁静的黑洞. 通过刻画黑洞群像, 构建具有统计显著性的黑洞质量分布, 进而解答黑洞研究的一系列基本问题.

参考文献

- 1 Brown G E, Bethe H A. A scenario for a large number of low-mass black holes in the Galaxy. *Astrophys J*, 1994, 423: 659–664
- 2 Timmes F X, Woosley S E, Weaver T A. The neutron star and black hole initial mass function. *Astrophys J*, 1996, 457: 834–843
- 3 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. GWTC-1: A gravitational-wave transient catalog of compact 4 binary mergers observed by LIGO and Virgo during the first and second observing runs. *PhRvX*, 2019, 9: 031040
- 4 Abbott R, Abbott T D, Abraham S, et al. GWTC-2: Compact binary coalescences observed by LIGO and Virgo during the first half of the third observing run. 2020, arXiv: [2010.14527](https://arxiv.org/abs/2010.14527)
- 5 Akiyama K, Alberdi A, Alef W, et al. First M87 Event Horizon Telescope results. I. The shadow of the supermassive black hole. *Astrophys J*, 2019, 875: L1
- 6 Fryer C L, Kalogera V. Theoretical black hole mass distributions. *Astrophys J*, 2001, 554: 548–560
- 7 Remillard R A, McClintock J E. X-ray properties of black-hole binaries. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2006, 44: 49–92
- 8 Farr W M, Sravan N, Cantrell A, et al. The mass distribution of stellar-mass black holes. *Astrophys J*, 2011, 741: 103
- 9 Kochanek C S. Failed supernovae explain the compact remnant mass function. *Astrophys J*, 2014, 785: 28
- 10 Fabbiano G. Populations of X-ray sources in Galaxies. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2006, 44: 323–366
- 11 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. GW150914: First results from the search for binary black hole coalescence with Advanced LIGO. *PhRvD*, 2016, 93: 122003
- 12 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. GW170814: A three-detector observation of gravitational waves from a binary black hole coalescence. *PhRvL*, 2017, 119: 141101
- 13 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. GW170817: Observation of gravitational waves from a binary neutron star inspiral. *PhRvL*, 2017, 119: 161101
- 14 Gould A. Measuring the remnant mass function of the Galactic bulge. *Astrophys J*, 2000, 535: 928–931
- 15 Mao S, Smith M C, Wozniak P, et al. Optical gravitational lensing experiment OGLE-1999-BUL-32: The longest ever microlensing event-evidence for a stellar mass black hole? *Mon Not R Astron Soc*, 2002, 329: 349–354
- 16 Bennett D P, Becker A C, Quinn J L, et al. Gravitational microlensing events due to stellar-mass black holes. *Astrophys J*, 2002, 579: 639–659
- 17 Wyrzykowski L, Kostrzewa-Rutkowska Z, Skowron J, et al. Black hole, neutron star and white dwarf candidates from microlensing with OGLE-III. *Mon Not R Astron Soc*, 2016, 458: 3012–3026
- 18 Maeda Y, Kubota A, Kobayashi Y, et al. A search for X-rays from the long-duration microlensing event MACHO-96-BLG-5. *Astrophys J*, 2005, 631: L65–L68
- 19 Nucita A A, De Paolis F, Ingrosso G, et al. An XMM-Newton search for X-ray emission from the microlensing event MACHO-96-BLG-5. *Astrophys J*, 2006, 651: 1092–1097
- 20 Dong S, Mérand A, Delpiancke-Ströbele F, et al. First resolution of microlensed images. *Astrophys J*, 2019, 871: 70
- 21 Zang W, Dong S, Gould A, et al. Spitzer + VLT-GRAVITY measure the lens mass of a nearby microlensing event. *Astrophys J*, 2020, 897: 180
- 22 Bai Y, Liu J F, Wicker J, et al. The UV emission of stars in the LAMOST survey. I. Catalogs. *Astrophys J Suppl Ser*, 2018, 235: 16
- 23 Liu J, Zhang H, Howard A W, et al. A wide star–black-hole binary system from radial-velocity measurements. *Nature*, 2019, 575: 618–621
- 24 Heger A, Woosley S E. The nucleosynthetic signature of population III. *Astrophys J*, 2002, 567: 532–543
- 25 Woosley S E. Pulsational pair-instability supernovae. *Astrophys J*, 2017, 836: 244
- 26 Arcavi I, Howell D A, Kasen D, et al. Energetic eruptions leading to a peculiar hydrogen-rich explosion of a massive star. *Nature*, 2017, 551: 210–213
- 27 Gomez S, Berger E, Nicholl M, et al. SN 2016iet: The pulsational or pair instability explosion of a low-metallicity massive CO core embedded in a dense hydrogen-poor circumstellar medium. *Astrophys J*, 2019, 881: 87
- 28 Batta A, Ramirez-Ruiz E, Fryer C. The formation of rapidly rotating black holes in high-mass X-ray binaries. *Astrophys J*, 2017, 846: L15
- 29 Adams S M, Kochanek C S, Gerke J R, et al. The search for failed supernovae with the Large Binocular Telescope: Confirmation of a disappearing star. *Mon Not R Astron Soc*, 2017, 468: 4968–4981
- 30 Belczynski K, Bulik T, Fryer C L, et al. On the maximum mass of stellar black holes. *Astrophys J*, 2010, 714: 1217–1226
- 31 Heger A, Fryer C L, Woosley S E, et al. How massive single stars end their life. *Astrophys J*, 2003, 591: 288–300
- 32 Spera M, Mapelli M, Bressan A. The mass spectrum of compact remnants from the PARSEC stellar evolution tracks. *Mon Not R Astron Soc*, 2015, 451: 4086–4103
- 33 El-Badry K, Quataert E. Not so fast: LB-1 is unlikely to contain a 70 $M_{\odot}$ black hole. *Mon Not R Astron Soc*, 2020, 493: 22–27

- 34 Shenar T, Bodensteiner J, Abdul-Masih M, et al. The “hidden” companion in LB-1 unveiled by spectral disentangling. *Astron Astrophys*, 2020, 639: L6
- 35 Liu J, Zheng Z, Soria R, et al. Phase-dependent study of near-infrared disk emission lines in LB-1. *Astrophys J*, 2020, 900: 42
- 36 Abbott R, Abbott T D, Abraham S, et al. GW190521: A binary black hole merger with a total mass of $150 M_{\odot}$. *PhRvL*, 2020, 125: 101102
- 37 Gu W M, Mu H J, Fu J B, et al. A method to search for black hole candidates with giant companions by LAMOST. *Astrophys J*, 2019, 872: L20
- 38 Zheng L L, Gu W M, Yi T, et al. Searching for black hole candidates by LAMOST and ASAS-SN. *Astron J*, 2019, 158: 179
- 39 Yi T, Sun M, Gu W M. Mining for candidates of Galactic stellar-mass black hole binaries with LAMOST. *Astrophys J*, 2019, 886: 97
- 40 Casares J, Negueruela I, Ribó M, et al. A Be-type star with a black-hole companion. *Nature*, 2014, 505: 378–381
- 41 Thompson T A, Kochanek C S, Stanek K Z, et al. A noninteracting low-mass black hole–giant star binary system. *Science*, 2019, 366: 637–640
- 42 Rivinius T, Baade D, Hadrava P, et al. A naked-eye triple system with a nonaccreting black hole in the inner binary. *Astron Astrophys*, 2020, 637: L3
- 43 El-Badry K, Quataert E. A stripped-companion origin for Be stars: Clues from the putative black holes HR 6819 and LB-1. 2020, arXiv: 2006.11974
- 44 Dunn R J H, Fender R P, Körding E G, et al. A global spectral study of black hole X-ray binaries. *Mon Not R Astron Soc*, 2010, 403: 61–82
- 45 Casares J, Charles P A, Naylor T, et al. Optical studies of V404 Cyg, the X-ray transient GS 2023 + 338-III. The secondary star and accretion disc. *Mon Not R Astron Soc*, 1993, 265: 834–852
- 46 McClintock J E, Narayan R, Garcia M R, et al. Multiwavelength spectrum of the black hole XTE J1118+480 in quiescence. *Astrophys J*, 2003, 593: 435–451
- 47 Liu C, Fu J, Shi J, et al. LAMOST Medium-Resolution Spectroscopic Survey (LAMOST-MRS): Scientific goals and survey plan. 2020, arXiv: 2005.07210

Summary for “恒星级黑洞的搜寻与研究进展”

Search and research advances on stellar-mass black holes

Song Wang^{1*}, Jifeng Liu^{1,2,3*}, Haotong Zhang¹, Youjun Lu^{1,2}, Zhongrui Bai¹, Hailong Yuan¹, Yu Bai¹ & Yilun Wang^{1,2}¹ Key Laboratory of Optical Astronomy, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;² School of Astronomy and Space Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;³ WHU-NAOC Joint Center for Astronomy, Wuhan 430072, China* Corresponding authors, E-mail: songw@bao.ac.cn; jfliu@bao.ac.cn

All stellar-mass black holes in the Milky Way have hitherto been identified by X-rays emitted from gas that is accreting onto the black hole from a companion star. The masses of the black holes in these ~20 systems are all less than 30 times that of the Sun. Theory predicts, however, that there are hundreds of millions of stellar-mass black holes and X-ray-emitting systems form only a minority of the total population of star-black-hole binaries. When the black hole is not accreting gas, it can be found through radial-velocity measurements of the motion of the companion star. A radial-velocity monitoring campaign using the Large Aperture Multi-Object Spectroscopic Telescope (LAMOST) to discover and study spectroscopic binaries has been running since 2016. Among about 3000 objects, we find that one B-type star, called LB-1, exhibits periodic radial-velocity variation, along with a strong, broad H α emission line that is almost stationary. Combined with the GTC and Keck spectral observations, we find that the motion of the B star and the spectral features require the presence of a dark companion, indicating a massive stellar-mass black hole. We further conducted a high-resolution, phase-resolved spectroscopic study of its Paschen lines, using the Calar Alto 3.5 m telescope. We find that Pa β and Pa γ (after subtraction of the stellar absorption component) are well fitted with a standard double-peaked disk profile, confirming its nature as one stellar-mass black hole. The discovery of LB-1 suggests that future similar campaigns will probe a quiescent black-hole population different from the X-ray-bright one. The gravitational-wave experiments LIGO and Virgo have discovered about 50 gravitational-wave events caused by binary black hole mergers. Although they have detected black holes of similar mass, the formation of such massive ones in a high-metallicity environment would be extremely challenging within current stellar evolution theories. In this article, we introduce several methods for discovering stellar-mass black holes, including X-ray emission (searching for star-black-hole binaries), gravitational wave (searching for binary black holes mergers), micro-lensing (searching for isolated black holes), and radial-velocity monitoring (searching for star-black-hole binaries). We review the research advances on recent discoveries on stellar-mass black holes. Until now, less than five stellar-mass black holes were discovered by radial-velocity monitoring. In addition, since September 2018, LAMOST starts a new 5-year medium-resolution spectroscopic survey. This survey will observe about two million stellar spectra with $R \approx 7500$ and limiting magnitude of around $G=15$ mag. Moreover, it can also provide about 200 thousand stars with averagely 60-epoch observations and limiting magnitude of $G \approx 14$ mag. The radial velocity uncertainty can be less than 1 km/s. The time-domain spectral data can be quite helpful in discovering the X-ray-quiescent black holes. In the other hand, Gaia transit data in the next data release will reach an astrometric error as small as 0.1 milliarcsecond. The full orbit and the parallax of one star-black-hole binary can be solved simultaneously from the combination of radial velocity measurements and Gaia transit data. This will give the total binary mass and the mass ratio, simultaneously. We expect in the future, the combination of radial-velocity monitoring and astrometry can play a key role on this intriguing area.

stellar-mass black hole, LAMOST, radial-velocity monitoring, gravitational wavedoi: [10.1360/TB-2020-1530](https://doi.org/10.1360/TB-2020-1530)