搜寻银河系中的恒星级黑洞

顾为民*, 武剑锋*, 王俊峰*

厦门大学物理科学与技术学院天文学系, 厦门 361005

*联系人, 顾为民, E-mail: guwm@xmu.edu.cn; 武剑锋, E-mail: wujianfeng@xmu.edu.cn; 王俊峰, E-mail: jfwang@xmu.edu.cn

收稿日期: 2020-10-10; 接受日期: 2021-01-06; 网络出版日期: 2021-01-27

国家自然科学基金(编号: 11925301, U1938105, U1831205, 12033006)资助项目

摘要 按恒星演化理论预言, 银河系中存在数以亿计的恒星级黑洞. 然而, 目前已证认的黑洞仅有20个左右. 随着天文观测设备的飞跃发展, 搜寻黑洞的新方法也陆续被提出. 我国大型光学望远镜LAMOST(郭守敬望远镜)的海量恒星光谱让我们可以通过光谱分析来搜寻黑洞. 本文回顾了近50年来搜寻恒星级黑洞的历程, 介绍了经典的搜寻方法和目前发展的一些新方法, 侧重介绍了近期基于LAMOST光谱开展的相关工作, 并对未来的搜寻工作给出展望.

关键词 黑洞, 光谱双星, X射线双星, 视差

PACS: 97.60.Lf, 97.80.Fk, 97.80.Jp, 97.10.Vm

1 引言

致密天体是恒星演化的最终产物, 可分为三类, 即白矮星、中子星和黑洞. 恒星的演化历程与其初始质量和金属丰度密切相关. 按照恒星演化理论, 初始质量低于约 $9M_{\odot}$ ($M_{\odot}$ 表示太阳质量)的恒星将演化为白矮星, 高于约 $25M_{\odot}$ 的恒星的演化结局是黑洞(具体情况还与恒星的金属丰度、恒星自转等有关), 而初始质量在这两者之间的恒星将演化为中子星^[1].

通过天文观测寻找和证认恒星级黑洞面临诸多困难. 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. 经典的寻找和证认黑洞的方法依赖X射线观测. 非常明亮的X射线辐射很可能来源于银河系内的天体, 即双星中的中子星吸积或黑洞吸积过程. 因

此, 经典方法中的一个关键问题就是要在X射线双星中区分其致密天体是中子星还是黑洞. 例如, I型X射线暴是中子星系统的特征辐射, 即如果发现某双星系统存在I型X射线暴, 则可以断定该双星中的致密天体是中子星而非黑洞. 相对中子星而言, 黑洞X射线双星则缺少其独特的辐射特征判据. 目前所采用的黑洞证认方法依赖于测定该致密天体的质量. 中子星存在质量上限, 普遍认同 $3M_{\odot}$ 是其比较可靠的上限. 因此, 如果我们能确定某个致密天体的质量大于 $3M_{\odot}$, 即可将其归为动力学证认的黑洞. 首个黑洞X射线双星候选体天鹅座X-1 (Cyg X-1)即是通过此方法被证认^[2,3], 对其质量的限定随着天文观测手段的改进而不断更新^[4,5].

依据恒星质量分布和恒星演化理论, 银河系内存

引用格式: 顾为民, 武剑锋, 王俊峰. 搜寻银河系中的恒星级黑洞. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51: 030014

Gu W M, Wu J F, Wang J F. Searching for stellar-mass black holes in the Milky Way (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2021, 51: 030014, doi: 10.1360/SSPMA-2020-0397

在数以亿计的恒星级黑洞^[6,7], 而目前通过动力学方法证认的银河系(本文中银河系不包括大小麦哲伦云等近邻的矮星系)内黑洞仅有20个左右^[8-10]. 两者之间存在巨大的数量差异. 图1给出了已探测的银河系中恒星级黑洞的分布情况^[10], 其中圆圈代表已证认的黑洞, 星号代表黑洞候选体(即尚未确认其致密天体质量大于 $3M_{\odot}$). 采用经典方法所证认的黑洞必须满足一系列条件, 例如, 黑洞存在于双星系统中, 伴星是光学/红外可见的, 伴星的物质被黑洞吸积、吸积过程有很强的X射线辐射, 能通过光谱测定伴星的视向速度变化, 能通过测光定出双星绕转的轨道倾角等. 银河系中证认的黑洞X射线双星中仅有一个(天鹅座X-1)是星风吸积模式, 从而显现为X射线持续源, 其光学伴星为O型星, 属于大质量伴星($>1M_{\odot}$); 其余是通过X射线爆发过程所呈现为X射线暂现源而被探测到的, 其伴星多为小质量星($<1M_{\odot}$). 首个被发现的黑洞X射线暂现源是A0620-00^[11]. 暂现源中的黑洞证认必须要等到X射线爆发结束后, 双星系统回归至宁静态, 其光学/红外辐射为伴星所主导, 才能对伴星开展有效的光谱和测光观测. 总体来说, 按经典方法寻找和证认黑洞所需的条件相当苛刻. 图2给出了银河系中已证认的16个黑洞X射线双星的缩略图^[8]. 表1给出了银河系中已证认的20个黑洞X射线双星的名称、轨道周期和黑洞质量^[4,10,12-14].

鉴于X射线双星的爆发现象并不常见, 研究人员相信应该存在更多的处于X射线宁静态的黑洞双星和中子星双星. 国际上也有不同的研究组致力于发现处于X射线宁静态的黑洞双星系统, 比较有代表性的有荷兰空间研究院Jonker博士^[15,16]领导的银河系核球巡天和美国加利福尼亚大学伯克利分校空间科学实验室Tomsick博士^[17]领导的矩尺座旋臂巡天. 银河系核球巡天所针对的是在银河系核球区域较为年老的星族, 主要的目标是发现处于X射线宁静态的小质量X射线双星; 矩尺座旋臂巡天所针对的是位于银河系旋臂区域的年轻大质量恒星, 致力于发现和证认大质量X射线双星. 遗憾的是, 目前两个团队尚未发现新证认的黑洞双星.

恒星级黑洞并非都存在于双星或多星系统中. 对于孤立的黑洞, 微引力透镜被认为是迄今唯一可行的发现方法. 据估计在银河系核球方向上的微引力透镜事件中大约有1%是由孤立恒星级黑洞所产生的^[18]. 微

图1 (网络版彩图)银河系中动力学证认的黑洞(圆圈)和黑洞候选体(星号)的分布. 图片取自参考文献[10]
Figure 1 (Color online) The distribution of dynamically confirmed black holes (circles) and black hole candidates (stars) in the Milky Way. The figure is taken from ref. [10].

图2 (网络版彩图)银河系中16个黑洞双星的缩略图. 太阳至水星的距离(0.4 AU)在上方作为参照. 伴星颜色大致显示其表面温度. 图片取自参考文献[8]
Figure 2 (Color online) Scale drawings of 16 black hole binaries in the Milky Way. The Sun-Mercury distance (0.4 AU) is shown at the top. The color of the companion star roughly indicates its surface temperature. The figure is taken from ref. [8].

引力透镜方法已经发现数个孤立黑洞的候选体, 例如OGLE-1999-BUL-32^[19], MACHO-96-BLG-5, MACHO-98-BLG-6^[20], OGLE3-ULENS-PAR02^[21]等. 对于候选体MACHO-96-BLG-5的深度X射线观测未能探测到其X射线辐射^[22,23], 进一步支持这一透镜天体是孤立的恒星级黑洞. 近年来, 结合光学/红外干涉仪技术(如

表 1 20个已证认的黑洞X射线双星的基本信息. 数据主要取自参考文献[10]. 此外, GRS 1124-684的数据取自参考文献[12,13], MAXI J1820+070的数据取自参考文献[14], Cyg X-1的数据取自参考文献[4]

Table 1 Information of 20 confirmed black hole X-ray binaries. The data are mainly taken from ref. [10]. In addition, the data of GRS 1124-684, MAXI J1820+070, and Cyg X-1 are taken from refs. [12,13], ref. [14], and ref. [4], respectively

源名称	周期 (h)	黑洞质量 ($M_{\odot}$)
GRO J0422+32	5.09	2–15
3A 0620-003	7.75	6.6 (+0.3/–0.3)
GRS 1009-45	6.84	≥ 4.4
XTE J1118+480	4.08	6.9–8.2
GRS 1124-684	10.38	11 (+2.1/–1.4)
GS 1354-64	61.07	$\geq 7.6(+0.7/-0.7)$
Swift J1357.2-0933	2.8	> 8.3
4U 1543-475	26.79	8.4–10.4
XTE J1550-564	37.01	7.81–15.6
XTE J1650-500	7.69	≤ 7.3
GRO J1655-40	62.92	6.0 (+0.4/–0.4)
1H J1659-487	42.14	> 6
H 1705-250	12.51	4.9–7.9
SAX J1819.3-2525	67.62	6.4 (+0.6/–0.6)
MAXI J1820+070	16.57	8.48 (+0.79/–0.72)
XTE J1859+226	6.58	> 5.42
GRS 1915+105	812	12 (+2/–2)
4U 1956+350/Cyg X-1	134.40	14.8 (+1.0/–1.0)
GS 2000+251	8.26	5.5–8.8
GS 2023+338	155.31	9.0 (+0.2/–0.6)

VLTI+GRAVITY)以及空间望远镜所产生的视差效应, 微引力透镜天体的质量首次被精确测定^[24]. 这一方法同样能够精确测量微引力透镜所发现的恒星级黑洞候选体的质量, 并最终证认其物理本质.

如果能通过其他观测方式找到更多的恒星级黑洞系统和 neutron 星系统, 对于研究恒星的形成和演化、恒星级黑洞的质量分布, 对比黑洞系统与 neutron 星系统在电磁辐射方面的差异, 甚至探索黑洞系统的电磁辐射特征及其视界面存在的观测证据等课题具有深远的意义. LAMOST望远镜(郭守敬望远镜)对银河系恒星的巡天计划所积累的丰富光谱信息, 让我们有机会可以从致密天体伴星的光谱出发, 来寻找更多含有黑洞或 neutron 星的双星系统, 从而进一步探索其物理机制.

通过伴星光谱来搜寻黑洞的方案是, 基于十余次甚至几十次重复观测伴星的光谱, 依据恒星光谱的多普勒移动测定其视向速度值. 通过拟合视向速度变化曲线得到伴星的视向速度变化振幅和双星的轨道周期, 再结合伴星光谱所提供的有效温度、金属丰度、表面重力等参数可以得到伴星的质量、半径等基本参数, 从而可以对双星中那颗光学不可见天体的质量给出较好的限定. 如果该天体质量大于 $3M_{\odot}$, 则有可能是个黑洞. 对于伴星的重复观测次数不多的双星系统, 有可能通过测光观测得到的光变曲线所反映的轨道周期, 来辅助拟合视向速度变化曲线. 对于仅有数次重复观测的伴星, 也可以通过观测得到的视向速度变化的最大值作为振幅下限来进行估算.

2 LAMOST望远镜及LB-1的发现

LAMOST望远镜是我国自主设计建成的光谱巡天望远镜, 其特点是兼备了大口径(4 m)和大视场(20平方度), 4000根光纤可以同时观测近4000个目标的光谱, 巡天效率非常高. LAMOST自2012年开展银河系的恒星光谱巡天以来^[25], 已积累了千万条恒星光谱, 具有世界上最大的恒星光谱数据库. 这让通过分析双星中致密天体的伴星光谱来搜寻黑洞成为可能.

中国科学院国家天文台刘继峰、张昊彤及其团队利用LAMOST对Kepler K2-0天区约3000颗恒星历时两年的观测数据, 发现在LB-1这个双星系统中, 一颗B型星的轨道周期是78.9 d, 视向速度半振幅是52.8 km/s (如图3所示), 因此推断该双星中的不可见天体极有可能是个黑洞. 利用美国Keck望远镜和西班牙GTC望远镜, 研究者发现LB-1的黑洞质量大约是太阳的70倍, 这对经典的恒星演化理论提出了挑战. 该重要成果发表在*Nature*上^[26], 论文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^[27–32]. 对该结果的主要质疑有两处: 即其氢元素的发射线可能并非来自于随光学不可见天体运动的吸积盘, 而是来自于环绕该双星系统的外部气体盘^[27,29]; 光学可见的那颗恒星可能并非B型星, 而是颗外壳层被剥离了的氦星^[30]. 随后, 刘继峰团队^[33]利用西班牙Calar Alto天文台3.5 m望远镜对LB-1进行了红外观测, 通过氢元素的帕邢发射线(双峰轮廓)分析, 确认了观测到的氢发射线来源于光学不可见天体周围的吸积盘. 进一步分析

图 3 (网络版彩图)可见恒星与暗的主星的视向运动. (a) 折叠的视向速度曲线和双星轨道拟合. 实圆圈代表观测数据, 其中蓝色为LAMOST, 红色为GTC, 绿色为Keck; (b) 数据拟合的残差; (c) Keck高分辨率光谱得到的H α 发射线轮廓. 图片取自参考文献[26]

Figure 3 (Color online) Radial motions of the visible star and the dark primary. (a) Folded radial-velocity curves and binary orbital fits. The observed data (filled circles) are from LAMOST (blue), GTC (red) and Keck (green). (b) Residuals for the binary orbital fits. (c) Representative H α emission line profile from one Keck spectrum with high spectral resolution. The figure is taken from ref. [26].

得出该不可见天体的质量是其伴星质量的4–8倍.

目前来看, 对于LB-1的主要争议还是在伴星的属性上. 如果光学伴星的确是B型星($3\text{--}6M_{\odot}$), 则主星质量在 $12\text{--}50M_{\odot}$ 范围, 仍然是个大质量的恒星级黑洞. 而如果光学伴星是个 $1\text{--}2M_{\odot}$ 的外壳层被剥离了的氦星, 主星的质量可能是 $4\text{--}12M_{\odot}$ 范围, 那么有可能是个通常质量的恒星级黑洞, 也可能是颗Be星^[33]. 尽管现阶段还不能对LB-1给出明确结论, 但可以期待在未来1–2年, 利用Gaia卫星的观测数据, 采用天体测量的方法, 能对该天体作出明确的判定.

3 国际上光学波段的黑洞搜寻

国际上一些团队通过分析光学波段的观测数据也已经发现了数个黑洞. Casares等人^[34]利用观测到的来自Be星的星周盘的FeII线和随其伴星运动变化的HeII线, 发现MWC 656是一个由 $3.8\text{--}6.9M_{\odot}$ 的黑洞和Be星组成的双星系统, 双星的轨道周期为60.37 d; Thompson等人^[35]利用SDSS/APOGEE观测数据找到了一个质

量为 $3M_{\odot}$ 左右的黑洞, 其轨道周期约为83 d, 多色光变曲线和视向速度变化曲线如图4所示. 该黑洞的发现可以填补先前在 $2\text{--}5M_{\odot}$ 范围内致密天体的空缺; Rivinius等人^[36]发现HR 6819这个三体系统由一个Be星和一个周期为40.3 d的双星系统构成, 而该双星中含有一个质量大于 $4.2M_{\odot}$ 的黑洞. 此三体系统离太阳系很近, 其中的Be星甚至是肉眼可见的($V = 5.3$ 星等).

以上3个黑洞以及LB-1的搜寻和证认均是从光学波段开展的, 其共同特点是双星的轨道周期相对较长(>40 d). 因此同一观测夜内, 光学伴星的视向速度值不会有显著变化. LAMOST所积累的海量恒星光谱涵盖了轨道周期为0.2 d至数年(甚至更长)的双星系统. 利用LAMOST对同一目标源同一观测夜的多次重复曝光, 以及不同观测夜的重复观测, 在寻找双星中的黑洞候选体方面可发挥重要作用.

4 利用LAMOST释放数据开展的相关工作

厦门大学天文学系顾为民、武剑锋、王俊峰及团

图 4 (网络版彩图)多色光变曲线(a)和视向速度变化曲线(b). 图片取自参考文献[35]

Figure 4 (Color online) Multicolor light curves (a) and radial velocity curve (b). The figure is taken from ref. [35].

队成员与国家天文台同行专家合作, 从2018年3月开始利用LAMOST释放的恒星光谱数据, 结合ASAS-SN, Catalina, ZTF的测光观测, 以及Gaia卫星的距离信息, 在搜寻银河系中的恒星级黑洞课题开展了系列研究工作, 其中已发表的代表性成果简介如下.

第一项工作提出了利用LAMOST光谱寻找恒星级黑洞候选体的一种新方法^[37]. 该工作基于LAMOST DR6的恒星光谱数据得到了7个含有晚型巨星的双星样本, 其视向速度变化量大于80 km/s (如图5所示). 依靠LAMOST光谱提供的恒星有效温度、表面重力、金属丰度以及Gaia提供的恒星视差, 可以估算巨星的质量和半径, 从而可以限制双星中光学不可见星体的质量. 该工作显示样本中的源均是潜在的黑洞候选体, 值得开展后续光谱观测来进行动力学证认. 该新方法特别适用于寻找那些轨道周期未知的双星中的黑洞候选体.

第二项工作结合了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]. 其中ASAS-SN的周期性光变曲线(例如椭圆调制的光变曲线)可能揭示轨道周期(如图6所示). 样本包含了9个双星系统, 其中每个系统都包含了一个视向速度差大于70 km/s的晚型巨星, 并且从光变曲线获得了这9个源的周期. 这9个源都具有较长轨道周期(测光周期

图 5 (网络版彩图)观测(蓝圆圈)与理论(直线)的对比. 7个含有晚型巨星的双星, 且巨星视向速度变化大于80 km/s. 图片取自参考文献[37]

Figure 5 (Color online) Comparison of the observations (blue circles) with the theoretical results (lines). Seven binaries contain a late-type giant companion with radial velocity variation larger than 80 km/s. The figure is taken from ref. [37].

图 6 (网络版彩图)解析(直线)与观测(符号)的对比. 通过LAMOST光谱与ASAS-SN测光筛选的9个双星系统, 观测数据与理论线的对比显示测光周期与轨道周期是相符的. 图片取自参考文献[38]

Figure 6 (Color online) Comparison between analyses (lines) and observations (symbols). Nine binaries are selected from the LAMOST spectra and the ASAS-SN light curves. It is shown that the analytic orbital periods well agree with the observational periods of light curves. The figure is taken from ref. [38].

大于5 d), 并且利用周期估算了光学不可见伴星的质量. 由于从仅有的数次观测得到的最大视向速度差可能只是真实速度变化振幅的下限, 因此伴星的真实质量可能会显著高于目前的估算值. 该工作指出结合LAMOST的视向速度和ASAS-SN的测光周期来限定伴星质量可能是一种有效方法.

上述两项工作共得到了11个值得后续观测的黑洞候选体, 其赤经赤纬、轨道周期、视向速度变化的最大值、重复观测次数、相应参考文献请参见表2. 需要指出的是, 这11个源是基于仅有数次重复观测的初步筛选结果, 能否被证认为黑洞甚至是致密天体尚有很大的不确定性.

这两项工作的共同点是针对伴星是晚型巨星的双星系统. 而伴星是O型或B型这样的早型星, 也可能成为黑洞伴星, 例如前面提到的天鹅座X-1和LB-1. 只是O型或B型的恒星数量偏少, 且通过谱线测定其视向速度值难度更大. 另一方面, 对于F, G, K型的主序恒星, 采用LAMOST光谱来测定其视向速度值及其他物理参数具有优势, 它们可能与黑洞组成短轨道周期(小于1 d)的双星系统. 目前从X射线双星中证认的多数恒星级黑洞的光学伴星是小质量的, 即质量小于1个太阳质量. 对于搜寻此类系统, 同一观测夜多次重复曝光的光谱可以发挥重要作用. 目前, 我们正专注于利用O, B, F, G, K型的主序恒星光谱搜寻黑洞候选体. 现阶段已找到了一些短轨道周期的致密天体候选体, 其中多数可能是白矮星.

第三项工作估算了利用LAMOST光谱能搜寻到的恒星级黑洞的数目^[39]. 该工作模拟了银河系黑洞双星的星族, 并通过星族合成模型和双星的轨道参数分布来确定其光学可见度. 综合考虑了黑洞双星的可探测性与LAMOST的探测灵敏度, 预测通过低分辨率、非时域巡天可以找到400个左右的黑洞双星候选体,

而通过正在进行的LAMOST中分辨率、时域巡天可以找到约50–350个黑洞双星候选体(如图7所示). 大多数候选体都是短周期(0.2–2 d)、伴星为M, K, G或F型的恒星, 其中~47%的候选体的质量函数(致密天体的质量下限)超过 $3M_{\odot}$. 因此, 通过探索LAMOST数据, 可以扩大动力学证认的黑洞双星样本, 从而增进对黑洞

图 7 (网络版彩图)利用LAMOST光谱能探测到的恒星级黑洞数量随距离的变化关系, 上图对应低分辨率光谱, 下图对应中分辨率光谱. 图片取自参考文献[39]

Figure 7 (Color online) Number of detectable stellar-mass black hole candidates by the LAMOST as a function of distance. The upper (lower) panel corresponds to the low-resolution (medium-resolution) spectra. The figure is taken from ref. [39].

表 2 文献[37,38]中给出的11个值得后续观测的含有晚型巨星的双星系统

Table 2 The 11 binaries containing late-type giant stars from refs. [37,38], which are worthy of follow-up observations

赤经 (°)	赤纬 (°)	轨道周期 (d)	ΔV_R (km/s)	N_{obs} (次)	参考文献
0.839201575	38.51855052	11.8608	93.5 ± 5.6	3	[37,38]
3.887105349	38.68886824	27.5509	83.7 ± 6.2	4	[37,38]
58.561194	45.43539	—	81.9 ± 9.0	3	[37]
74.05325351	54.00589535	5.2085	127.2 ± 7.8	6	[37,38]
82.31076394	42.09587217	9.6409	70.5 ± 6.7	4	[38]
93.81977494	22.11031808	15.5915	78.1 ± 5.6	2	[38]
102.0930387	21.82487008	7.1848	78.1 ± 6.6	2	[38]
106.45855	13.606334	—	87.5 ± 5.3	3	[37]
111.3363737	28.06745981	28.0117	85.1 ± 7.6	6	[37,38]
169.1246518	55.72840217	46.8920	97.8 ± 5.8	3	[37,38]
325.3386324	28.4225968	17.4856	73.2 ± 5.2	2	[38]

的质量分布问题和恒星演化模型的理解. 该工作为同行学者展示了利用LAMOST数据发掘黑洞候选体的前景, 并与Gaia巡天做了策略和效率上的对比, 分析了LAMOST的优势和不足.

5 总结与展望

可以预见在未来几年, 国际上关于搜寻银河系中的恒星级黑洞的竞争将进入白热化. 除了在前面提到的通过X射线爆发的经典方法和通过X射线源与光学观测交叉寻找X射线宁静态黑洞双星的方法外, 在此课题上具备竞争力的有如下一些观测手段和相应方法.

首先是LAMOST的中分辨率恒星光谱巡天. 从2018年10月LAMOST开始了为期5年的中分辨率巡天^[40], 目前已完成了2年并全部释放了数据. 相比之前的低分辨率巡天, 中分辨率巡天在此领域的优势有: 分辨率显著提高, 从光谱得到的视向速度值误差小; 其时域观测计划在同一观测夜对同一目标源有多达8次的重复曝光, 不同观测夜对同一目标源有多达60次的累计重复曝光; 数据释放速度快, 每观测3个月后释放一批数据, 包括单次曝光的光谱数据. 不足之处则是, 巡

天的深度降低, 只到15星等.

其次是LAMOST对4个Kepler卫星K2天区亮于15星等的上万颗恒星的针对性观测. 计划通过2–3年的观测, 对这些恒星有20余个观测夜的重复观测, 从而可以得到恒星的视向速度曲线. 该观测计划由国家天文台刘继峰、张昊彤主导开展. 有望通过这种针对特定区域的普查方式搜寻出多个恒星级黑洞.

再则是Gaia卫星在此领域也具备独特的能力. Gaia卫星具有高精度的角分辨本领, 通过天体测量法可以精确定位十亿颗恒星的位置和运动状态. 预计通过5年以上的观测, Gaia卫星可以应用测定轨道的方式搜寻到一批轨道周期较长(数月甚至数年)的黑洞双星^[41–44].

除了光学波段, 未来的X射线大视场巡天卫星, 例如我国的爱因斯坦探针(EP)和国际的eROSITA, 也很可能从X射线波段发现一批黑洞候选体, 并最终通过对其光学伴星的光谱和测光观测来完成证认.

搜寻银河系中的恒星级黑洞是近年来天文学的热点课题. 随着观测手段的提升, 搜寻黑洞不再局限于传统的依赖X射线爆发的方法. 预计在未来5–10年, 搜寻黑洞的国际竞争将进入白热化阶段, 而我国LAMOST望远镜的性能优势将有望在此领域作出重要贡献.

致谢 感谢张昊彤、王松、伊团、郑铃霖、张志翔对本文提供了很好的意见.

参考文献

- 1 Heger A, Fryer C L, Woosley S E, et al. How massive single stars end their life. *Astrophys J*, 2003, 591: 288–300
- 2 Bolton C T. Identification of Cygnus X-1 with HDE 226868. *Nature*, 1972, 235: 271–273
- 3 Webster B L, Murdin P. Cygnus X-1—A spectroscopic binary with a heavy companion? *Nature*, 1972, 235: 37–38
- 4 Orosz J A, McClintock J E, Aufdenberg J P, et al. The mass of the black hole in Cygnus X-1. *Astrophys J*, 2011, 742: 84
- 5 Miller-Jones J C A, Bahramian A, Orosz J A, et al. Cygnus X-1: Emerging view of a 21-solar mass black hole in the Milky Way. *Science*, 2021, doi: 10.1126/science.abb3363
- 6 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
- 7 Timmes F X, Woosley S E, Weaver T A. The neutron star and black hole initial mass function. *Astrophys J*, 1996, 457: 834–843
- 8 Remillard R A, McClintock J E. X-ray properties of black-hole binaries. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2006, 44: 49–92
- 9 Tetarenko B E, Sivakoff G R, Heinke C O, et al. WATCHDOG: A comprehensive all-sky database of Galactic black hole X-ray binaries. *Astrophys J Suppl Ser*, 2016, 222: 15
- 10 Corral-Santana J M, Casares J, Muñoz-Darias T, et al. BlackCAT: A catalogue of stellar-mass black holes in X-ray transients. *Astron Astrophys*, 2016, 587: A61
- 11 McClintock J E, Remillard R A. The black hole binary A0620-00. *Astrophys J*, 1986, 308: 110–122

- 12 Wu J, Orosz J A, McClintock J E, et al. A dynamical study of the black hole X-ray binary Nova Muscae 1991. *Astrophys J*, 2015, 806: 92, arXiv: [1501.00982](#)
- 13 Wu J, Orosz J A, McClintock J E, et al. The mass of the black hole in the X-ray binary Nova Muscae 1991. *Astrophys J*, 2016, 825: 46, arXiv: [1601.00616](#)
- 14 Torres M A P, Casares J, Jiménez-Ibarra F, et al. The binary mass ratio in the black hole transient MAXI J1820+070. *Astrophys J*, 2020, 893: L37
- 15 Jonker P G, Bassa C G, Nelemans G, et al. The galactic bulge survey: Outline and X-ray observations. *Astrophys J Suppl Ser*, 2011, 194: 18
- 16 Jonker P G, Torres M A P, Hynes R I, et al. The galactic bulge survey: Completion of the X-ray survey observations. *Astrophys J Suppl Ser*, 2014, 210: 18
- 17 Fornasini F M, Tomsick J A, Bodaghee A, et al. The norma arm region Chandra survey catalog: X-ray populations in the spiral arms. *Astrophys J*, 2014, 796: 105
- 18 Gould A. Measuring the remnant mass function of the Galactic bulge. *Astrophys J*, 2000, 535: 928–931
- 19 Mao S, Smith M C, Woźniak 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, arXiv: [astro-ph/0108312](#)
- 20 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
- 21 Wyrzykowski Ł, 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
- 22 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
- 23 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
- 24 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
- 25 Zhao G, Zhao Y H, Chu Y Q, et al. LAMOST spectral survey—An overview. *Res Astron Astrophys*, 2012, 7: 723–734
- 26 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
- 27 Abdul-Masih M, Banyard G, Bodensteiner J, et al. On the signature of a 70-solar-mass black hole in LB-1. *Nature*, 2020, 580: E11–E15
- 28 Liu J, Soria R, Zheng Z, et al. Reply to: On the signature of a 70-solar-mass black hole in LB-1. *Nature*, 2020, 580: E16–E17
- 29 El-Badry K, Quataert E. Not so fast: LB-1 is unlikely to contain a $70M_{\odot}$ black hole. *Mon Not R Astron Soc-Lett*, 2020, 493: L22–L27
- 30 Irrgang A, Geier S, Kreuzer S, et al. A stripped helium star in the potential black hole binary LB-1. *Astron Astrophys*, 2020, 633: L5
- 31 Simón-Díaz S, Maíz Apellániz J, Lennon D J, et al. A detailed non-LTE analysis of LB-1: Revised parameters and surface abundances. *Astron Astrophys*, 2020, 634: L7
- 32 Shenar T, Bodensteiner J, Abdul-Masih M, et al. The “hidden” companion in LB-1 unveiled by spectral disentangling. *Astron Astrophys*, 2020, 639: L6
- 33 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
- 34 Casares J, Negueruela I, Ribó M, et al. A Be-type star with a black-hole companion. *Nature*, 2014, 505: 378–381
- 35 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
- 36 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
- 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 Liu C, Fu J, Shi J, et al. LAMOST medium-resolution spectroscopic survey (LAMOST-MRS): Scientific goals and survey plan. arxiv: [2005.07210](#)
- 41 Breivik K, Chatterjee S, Larson S L. Revealing black holes with Gaia. *Astrophys J*, 2017, 850: L13
- 42 Mashian N, Loeb A. Hunting black holes with Gaia. *Mon Not R Astron Soc*, 2017, 470: 2611–2616
- 43 Yalinewich A, Beniamini P, Hotokezaka K, et al. Dark passengers in stellar surveys. *Mon Not R Astron Soc*, 2018, 481: 930–937
- 44 Yamaguchi M S, Kawanaka N, Bulik T, et al. Detecting black hole binaries by Gaia. *Astrophys J*, 2018, 861: 21

Searching for stellar-mass black holes in the Milky Way

GU WeiMin^{*}, WU JianFeng^{*} & WANG JunFeng^{*}

Department of Astronomy, College of Physical Science and Technology, Xiamen University, Xiamen 361005, China

According to the stellar evolution model, 10^8 – 10^9 stellar-mass black holes (sMBHs) may exist in the Milky Way. However, only around 20 sMBHs have been dynamically confirmed. With the tremendous advancements in astronomical telescopes, new methods have been proposed to search for sMBHs. A large number of stellar spectra from the Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope (LAMOST) have enabled us to search for sMBHs through spectral analysis. This article reviews the 50-year history of sMBH search and introduces the classical method and some new methods on this issue. In particular, some recent studies based on LAMOST spectra are presented. Moreover, the prospects of sMBH search are discussed.

black holes, spectroscopic binaries, X-ray binaries, parallaxes

PACS: 97.60.Lf, 97.80.Fk, 97.80.Jp, 97.10.Vm

doi: [10.1360/SSPMA-2020-0397](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0397)