



X射线双星系统的探测

苟利军^{1,2*}, 董燕婷^{1,2}, 王仲翔³, 李向东⁴, 刘继锋^{1,2}, 刘碧芳^{1,2}, 袁峰³, 张澍⁵, 郝淑平⁶, 李立新⁷, 袁业飞⁸, 顾为民⁹

1. 中国科学院国家天文台, 北京 100012;
2. 中国科学院大学天文和空间学院, 北京 100049;
3. 中国科学院上海天文台, 上海 200030;
4. 南京大学天文与空间学院, 南京 210093;
5. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049;
6. 中国科学院紫金山天文台, 南京 210008;
7. 北京大学科维理天文与天体物理研究所, 北京 100871;
8. 中国科学技术大学天文系, 合肥 230026;
9. 厦门大学天文系, 厦门 361005

*联系人, E-mail: lgou@nao.cas.cn

收稿日期: 2017-10-11; 接受日期: 2017-12-26; 网络出版日期: 2018-01-23

国家重点研发计划(编号: 2016YFA040080X)、国家自然科学基金(编号: 1133305)和中国科学院战略性先导科技专项(编号: XDA15052100, XDB23040000)资助项目

摘要 搜寻X射线双星并建立大规模样本是解决众多科学问题(如“银河系中有多少黑洞X射线双星? 黑洞和中子星之间有无质量间隙? 球状星团中有多少黑洞?”等)的基础. 爱因斯坦探针卫星拥有更灵敏的探测能力, 将在运行的几年之中, 预计可以发现一批新的中子星和黑洞X射线双星, 研究其空间和动力学质量分布成为解决上述问题的关键.

关键词 黑洞, 中子星, 双星系统, X射线

PACS: 97.60.Lf, 97.60.Jd, 97.80.Jp, 95.85.Nv

1 引言

X射线双星是能够在X波段产生较强辐射的一类双星系统. X射线是当气体从伴星上被吸积到主星上释放引力能而产生的辐射. 通常这类天体中的主星(吸积星)可以是黑洞, 也可以是中子星, 而

伴星很多情况下是一个正常恒星. 根据正常恒星质量的大小, 将系统分为小质量双星系统(伴星质量小于1个太阳质量)和大质量双星系统^[1].

就黑洞X射线双星系统而言, 第一个黑洞X射线双星(天鹅座X-1)在60年代被发现^[2]. 截至目前, 已经探测到了70多个, 其中确认的有20多个^[3]. 绝

引用格式: 苟利军, 董燕婷, 王仲翔, 等. X射线双星系统的探测. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48: 039509
Gou L J, Dong Y T, Wang Z X, et al. The X-ray binary system in the EP era (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2018, 48: 039509, doi: 10.1360/SSPMA2017-00287

大多数位于银河系之内, 银河系内发现的有59个, 包括18个确认的. 这些位于银河系之内的黑洞X射线双星, 基本上也是处于银盘之中^[4]. 另外, 这些黑洞双星系统大多都是软X射线暂现源(Soft X-ray Transient). 只有少数几个属于持续源(如天鹅座X-1, M33 X-7, LMC X-1, IC10 X-1等)^[5-7]. X暂现源在绝大部分时间里是处于较低光度的宁静态, 时标为几年到几十年. 由于吸积物质在黑洞周围吸积盘的积累和某种不稳定性的作用, 会跃迁至暂现的爆发态. 在爆发之时, 它们的光度会增加3-5个量级以上, 持续时间为几十天到几百天^[3]. 只有在此时, 平常隐身的黑洞才能被快速巡天的望远镜发现. 大部分已知的黑洞双星软X射线暂现源都是在历史上的爆发期由以前的X射线全天监视器设备发现的. 最典型的是Ariel-V卫星发现的软X射线暂现源A0620-00^[8], 在爆发时比全天最亮的X射线源Sco X-1还要亮3倍, 后来的观测研究证明它是包含一个约7倍太阳质量的黑洞的X射线双星^[9].

除黑洞双星系统可以存在于银盘上之外, 很多理论工作一直预言黑洞也可以存在于银晕之中的球状星团里, 这一点已经通过最近的观测得到确认. 然而对于星团当中存在黑洞的数目却存在很大争议. 一个典型的球状星团内的大质量恒星在几百万年内就可以演化形成黑洞, 数目有成百上千个. 通过与星团中其他恒星的引力相互作用, 这些黑洞会从星团中被弹射出去. 然而最近的一些研究表明, 至少对中等密度的星团, 部分黑洞仍可能留在星团内, 而且这些黑洞有可能会俘获一颗正常恒星形成小质量X射线双星^[10]. 近年来, Maccarone等人^[11]在球状星团NGC 4472中发现了一颗超亮的X射线源很可能就是一个正在吸积的黑洞. 尽管在几个河外星系中的球状星团中存在黑洞^[12], 但是银河系中的球状星团中是否有黑洞这个问题直到最近才给出了确定的答案. Strader等人^[13]在球状星团M22中发现了两个低质量黑洞X射线双星系统, 同时估计在M22中存在5-100个黑洞双星系统. 这让球状星团中是否有黑洞的问题得到了初步解决. 因为这些黑洞系统也是小质量双星系统, 所以也会和银盘中的小质量黑洞双星系统有着类似的表现^[3].

对于中子星双星系统, X射线的产生机制和黑

洞系统也是类似的, 中子星通过吸积伴星物质释放巨大的X射线能量. 目前已有超过300颗中子星X射线双星被认证发现^[14,15]. 现在每月至少发现一个X射线双星处于爆发活跃状态. 对爆发过程和物理机制的系统研究能够提供及时预警, 使我们能更好地在多波段上观测和研究多类如喷流和吸积盘演化等相关现象过程. Chandra和XMM-Newton的小范围巡天观测表明在银河系分布着大量流量较低(光度小于 10^{34} erg s^{-1})的此类X射线源^[16]. 我们需要拓展对低流量(低吸积)的X射线双星的了解, 从而为研究银河系X射线双星的形成和演化提供完备的样本.

通常的暂现源伴星都是小质量恒星. 对于黑洞而言, 所有的大质量黑洞双星系统均表现为持续源. 对于中子星而言, 尽管多数大质量中子星系统也是持续源, 然而有一类却表现为暂现源, 非常有趣, 这就是伴星为Be星的系统. 这类双星系统的轨道偏心率很大, 所以只有当中子星靠近恒星时才会形成吸积盘, 产生较强的辐射. 远离时就进入宁静态. 根据亮度又可以将此类系统分为两小类, 理论研究表明, 很有可能是与中子星或超新星的爆发渠道有关, 而导致了系统的不同行为. 目前在银河系中已经发现了约50个此类系统.

通常认为前身星的质量在8-20个太阳质量之间时, 恒星核心最终会形成中子星, 如果前身星的质量高于20个太阳质量, 那么中间核心会塌缩形成黑洞. 理论研究表明, 黑洞和中子星的临界质量在3个太阳质量左右. 按照目前的观测, 形成中子星和黑洞的初始恒星质量分布是连续的, 所以可以预计小质量的黑洞应该是非常多的. 然而实际的观测发现, 大多数的黑洞质量集中在7, 8个太阳质量附近, 小质量的黑洞极少. 这就是非常著名的黑洞和中子星质量分布间隙(Mass Gap)问题. 尽管最新的中子星合并引力波观测已经观测到了首例接近于3个太阳质量的天体(还不确定是黑洞还是中子星), 然而从电磁波段而言, 爱因斯坦探针(Einstein Probe, EP)卫星的大视场和高灵敏度将有助于发现更多的X射线双星(黑洞和中子星), 在一定程度上将能够帮助回答黑洞中子星的质量如何分布? 银河系中有多少X射线双星? 它们是如何分布的等众多科学问题.

2 观测特征和理论模型预测

在目前观测到的银河系内的黑洞双星系统中, 绝大多数的黑洞都是位于银盘之中, 具体分布可见图 1.

它们的爆发频率统计如图 2 所示.

这些暂现源的整体爆发特征可以分为两个阶段: 快速上升和缓慢指数下降. 图 3 总结了其中 3 个源的爆发观测光变曲线.

在双黑洞产生的引力波被直接探测到之前, 根据 X 射线黑洞观测数据以及恒星演化合成理论和金属丰度的研究, 据估计银河系里应该存在着 10^8 – 10^9 个黑洞 [17–19]. 然而在 2015 年 9 月 14 日双黑洞合并所产生的引力波首次被直接探测到后 [20], 截至目前

已经确认了 5 例双黑洞系统, 它们合并前的质量最小只有 $7M_{\odot}$, 然而更多的黑洞质量在 $20M_{\odot}$ 以上. 目前发现的质量最重的黑洞系统, 在合并之前质量分别达到了 $36M_{\odot}$ 和 $29M_{\odot}$, 最后合并成一个 $62M_{\odot}$ 的黑洞 [20], 这些高质量的黑洞完全是在人们的期待之外. 根据这些新的观测结果, Elbert 等人 [21] 对特定质量的星系中黑洞的数目重新进行了估算, 发现对于质量和银河系质量相当的星系, 质量高于 $10M_{\odot}$ 的黑洞数目应该 $>10^8$ 个, 基本和之前的估算数目一致. 尽管黑洞的数目巨多, 但绝大多数为孤立的黑洞; 由于只能吸积密度非常低的星际介质, 辐射极弱, 基本上不能被探测到. 只有处于伴星为正常恒星的双星系统中的黑洞才有可能被探测到. 但从目前观测到小质量黑洞 X 射线双星的数目 (包括候选体总共约

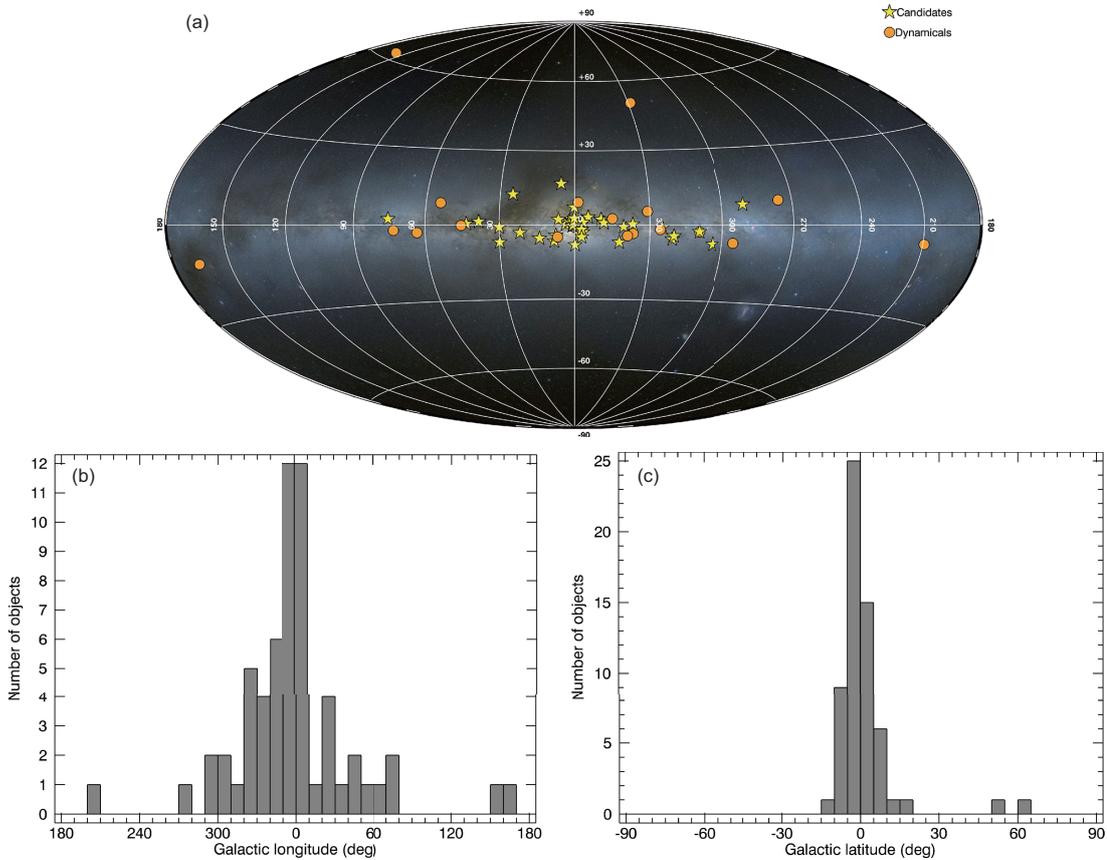


图 1 (网络版彩图)恒星级黑洞双星系统在我们银河系内的空间分布图. (a) 恒星级黑洞双星系统在我们银道坐标系内的空间分布图 [4]; (b) 银经数目分布图; (c) 银纬数目分布图

Figure 1 (Color online) The spatial distribution of BH X-ray binaries within our Milky Way galaxy [4]; (b) number distribution on the galactic longitude scale; (c) number distribution on the galactic latitude.

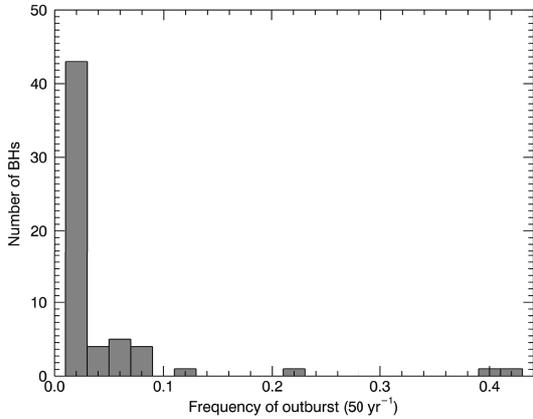


图2 X射线双星系统爆发频率统计图 [4]

Figure 2 Histogram of outburst event rate for the BH X-ray binary systems [4].

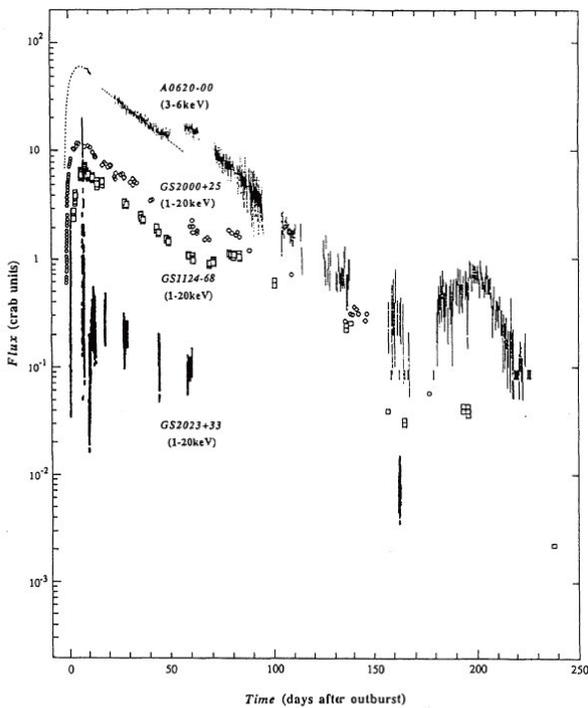


图3 小质量黑洞X射线双星系统(A0620-00, GS1124-68和GS2023+33)爆发时的光变曲线 [8]

Figure 3 Compilation of X-ray light curve for low mass X-ray binary systems: A0620-00, GS1124-68, and GS2023+33 [8].

59颗)推测,其总数目很可能约为1500 [4].因此很可能至今只观测到了黑洞双星中的5%,而绝大部分处于宁静(沉寂)状态.另外,对于球状星团中的黑洞,Sippel和Hurley [22]发现,在整个星团演化到120亿年

时,星团核心区域依旧会有约16个黑洞系统;到约200亿年时,依旧有10个黑洞,其中有5个以双星的形式存在,并且推断这个系统.这些模拟结果确认Strader等人 [13]的观测结果.根据Strader等人的观测结果推断球状星团M22中包含5-100个黑洞双星系统,而银河系约有150个球状星团,所以在银河系中约有750-15000个黑洞双星系统存在于球状星团当中.

而对于双星系统中的中子星,也都是通过它们的爆发或闪耀现象而被发现认证的 [23,24].

所以不管致密天体是处于银晕中还是处于银盘中,一旦发生重复性暂现爆发,则有可能被在轨运行的大视场监测设备(如EP)捕捉到.在探测到之后,通常几分钟之内,望远镜就会将源的信息(坐标、流量等)发送到伽玛暴坐标网络(Gamma-Ray Burst Coordinates Network, GCN;最初仅是为伽玛暴观测设立,现在广泛应用于暂现源的信息发布),订阅用户就会瞬时收到相关信息,从而开始计划可能的观测.在整个暂现源的爆发期间,致密星周围的吸积盘通常是被X射线辐射主导,所以通常会使用X射线或伽马射线望远镜进行观测.伴星通常会主导光学或红外辐射.在爆发源系统恢复宁静之后,就可以利用光学或红外望远镜对伴星的运动进行追踪观测,从而得到伴星的运行周期、视向速度等.利用质量函数,就可以很快得到中心致密天体的质量下限,如果大于3个太阳质量,那么至少就可以作为黑洞候选体.通过进一步拟合复杂的光变曲线和视向速度曲线,推断出此系统中每个天体的质量.

3 EP探测前景及预期成果

我们可以对爱因斯坦探针卫星对这类沉寂黑洞的暂现爆发的探测率做个估算.假设小质量黑洞X射线双星的平均爆发频率为10年一次,同时假设银河系内有1000个小质量黑洞X射线双星(Corral-Santana等人 [4]估算结果的保守值),那么EP每年可以观测到40个小质量黑洞X射线双星.即使保守估计,假设平均每50年爆发一次. EP每年也能在银河系内观测到8颗小质量黑洞X射线双星(MAXI在运行的6年内发现了6个新的黑洞X射线双星候

选体). 已探测到的黑洞双星的银河吸收柱密度为 10^{21} cm^{-2} 量级, 在0.5–4 keV能段对X射线的吸收为百分之几十, 不会造成严重的影响, 可以被EP卫星探测到.

截至目前, 各个以前或正在运行的卫星发现的黑洞双星系统数目列举如图4所示.

近些年的卫星在探测黑洞双星的数目上都差不多保持在一个恒定的数目上, 都在6个左右. 很大程度上取决于黑洞双星的爆发频率. 对于EP而言, 它的探测灵敏度要比之前的任何一个巡天望远镜的灵敏度都要高, 比MAXI要高出至少一个量级 [25]. 所以可以预见, EP至少也会发现同样数目的新黑洞双星系统. 对于中子星双星系统, 处于宁静态中子星X射线双星会产生爆发, 至今已有超过300颗X射线中子星双星被认证发现. 现今每月至少发现有一个X射线双星处于爆发活跃状态. 爱

因斯坦探针卫星将能够监测这些爆发, 并由此发现新的中子星双星系统.

4 结论

可以预期, 爱因斯坦探针卫星将发现一批新的X射线双星系统. 这将能够帮助回答“银河系中有多少黑洞X射线双星? 它们是如何分布的?”等问题. 这些问题的回答对黑洞形成机制、前身星的质量分布和公共包层演化、黑洞的形成过程是至关重要的. 现有的观测结果与理论预期还存在相当大的分歧. 例如, 大质量恒星演化理论预言黑洞的质量连续分布于约3–20 太阳质量之间, 且质量越小出现的频率越高 [26]. 但目前没有发现低于约5个太阳质量的黑洞 [27,28] (对于低于4.3太阳质量的黑洞是否存在还有待确认). 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, 以后引力波的大规模直接探测或许也会对这个问题的提供额外的帮助.

针对中子星双星系统而言, 对这些持续源中的大质量中子星X射线双星的监测, 可以获得这些X射线脉冲星的光度和自旋演化, 从小小时到天以上时标上的长期演化, 获得轨道周期等长期时变信息. 这些信息可以用来研究中子星磁层和吸积盘的相互作用以及磁中子星的辐射机制. 对持续的小质量中子星X射线双星的监测将有助于对致密天体吸积过程和能谱演化的研究, 因为这类中子星系统由于具有非常小的磁场, 具有非常类似于黑洞双星的能谱和时变特征, 如能谱跃迁和快速X射线光变现象. 因此, 对这些天体的多波段监测将为研究从强引力场效应如最内稳定轨道的探测到致密天体吸积过程提供宝贵的数据.

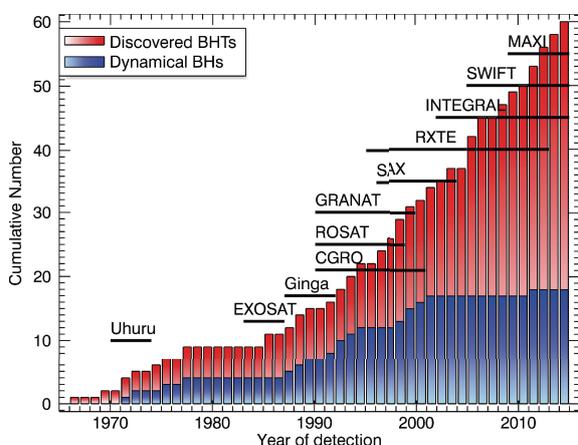


图4 (网络版彩图)发现(红)和确认(蓝)的黑洞系统数目随时间演化的累积直方图 [4]

Figure 4 (Color online) Cumulative histogram of discovered (red) and dynamically confirmed (blue) BHTs as a function of time [4].

参考文献

- 1 Seward F D, Charles Philip A. Exploring the X-ray Universe. Cambridge: Cambridge University Press, 2010
- 2 Bowyer S, Byram E T, Chubb T A, et al. Cosmic X-ray sources. *Science*, 1965, 147: 394–398
- 3 Remillard R A, McClintock J E. X-ray properties of Black-Hole binaries. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2006, 44: 49–92
- 4 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

- 5 Orosz J A, McClintock J E, Narayan R, et al. A 15.65-solar-mass black hole in an eclipsing binary in the nearby spiral galaxy M33. *Nature*, 2007, 449: 872–875
- 6 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
- 7 White N E, Nagase F, Parmar A N. *X-ray Binaries*. Lewin W H G, van Paradijs J, van den Heuvel E P J, eds. Cambridge: Cambridge University Press, 1995
- 8 Ebisawa K, Ogawa M, Aoki T, et al. *Publ Astron Soc Japan*, 1994, 46: 375–394
- 9 Cantrell A G, Bailyn C D, Orosz J A, et al. The inclination of the soft X-ray transient A0620-00 and the mass of its black hole. *Astrophys J*, 2010, 710: 1127–1141
- 10 Qin Y, Liang E W, Liang Y F, et al. A comprehensive analysis of fermi gamma-ray burst data. III. Energy-dependent T_{90} Distributions of GBM GRBs and instrumental selection effect on duration classification. *Astrophys J*, 2013, 763: 15
- 11 Maccarone T J, Kundu A, Zepf S E, et al. A black hole in a globular cluster. *Nature*, 2007, 445: 183–185
- 12 Barnard R, Garcia M R, Murray S S. *Chandra* identification of 26 new black hole candidates in the central region of M31. *Astrophys J*, 2013, 770: 148
- 13 Strader J, Chomiuk L, Maccarone T J, et al. Two stellar-mass black holes in the globular cluster M22. *Nature*, 2012, 490: 71–73
- 14 Liu Q Z, van Paradijs J, van den Heuvel E P J. A catalogue of high-mass X-ray binaries. *Astron Astrophys Suppl Ser*, 2000, 147: 25–49
- 15 Liu Q Z, van Paradijs J, van den Heuvel E P J. A catalogue of low-mass X-ray binaries. *Astron Astrophys*, 2001, 368: 1021–1054
- 16 Degenaar N, Wijnands R, Miller J M, et al. The *Swift* X-ray monitoring campaign of the center of the Milky Way. *J High Energy Astrophys*, 2015, 7: 137–147
- 17 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
- 18 Timmes F X, Woosley S E, Weaver T A. The neutron star and black hole initial mass function. *Astrophys J*, 1996, 457: 834
- 19 Meier D L. *Black Hole Astrophysics: The Engine Paradigm*. Heidelberg: Springer, 2012
- 20 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger. *Phys Rev Lett*, 2016, 116: 061102
- 21 Elbert O D, Bullock J S, Kaplinghat M. Counting black holes: The cosmic stellar remnant population and implications for LIGO. *Mon Not R Astron Soc*, 2018, 473: 1186–1194, arXiv: 1703.02551
- 22 Sippel A C, Hurley J R. Multiple stellar-mass black holes in globular clusters: Theoretical confirmation. *Mon Not R Astron Soc-Lett*, 2013, 430: L30–L34
- 23 Yu W, Klein-Wolt M, Fender R, et al. Hard X-ray flares preceding soft X-ray outbursts in aquila X-1: A link between neutron star and black hole state transitions. *Astrophys J*, 2003, 589: L33–L36
- 24 Wang Z, Breton R P, Heinke C O, et al. Multiband studies of the optical periodic modulation in the X-ray binary SAX J1808.4-3658 during its quiescence and 2008 outburst. *Astrophys J*, 2013, 765: 151
- 25 Yuan W M, Zhang C, Chen Y, et al. Einstein Probe: Exploring the ever-changing X-ray Universe (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2018, 48: 039502 [袁为民, 张臣, 陈勇, 等. 爱因斯坦探针: 探索变幻多姿的X射线宇宙. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48: 039502]
- 26 Fryer C L, Kalogera V. Theoretical black hole mass distributions. *Astrophys J*, 2001, 554: 548–560
- 27 Farr W M, Sravan N, Cantrell A, et al. The mass distribution of stellar-mass black holes. *Astrophys J*, 2011, 741: 103
- 28 Özel F, Psaltis D, Narayan R, et al. The black hole mass distribution in the galaxy. *Astrophys J*, 2010, 725: 1918–1927

The X-ray binary system in the EP era

GOU LiJun^{1,2*}, DONG YanTing^{1,2}, WANG ZhongXiang³, LI XiangDong⁴, LIU JiFeng^{1,2},
LIU BiFang^{1,2}, YUAN Feng³, ZHANG Shu⁵, YAN ShuPing⁶, LI LiXin⁷,
YUAN YeFei⁸ & GU WeiMin⁹

¹The National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China;

²College of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China;

⁴School of Astronomy and Space Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

⁵Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

⁶Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

⁷Kavli Institute for Astronomy & Astrophysics, Peking University, Beijing 100871, China;

⁸Department of Astronomy, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

⁹Department of Astronomy, Xiamen University, Xiamen 361005, China

Searching for X-ray binaries and establishing a large sample are the foundation of answering many scientific problems, such as, how many BH X-ray binaries are there within our Milky Way galaxy? Does there exist a real gap between the mass distribution of neutron stars and black holes? Is there any black hole system within globular clusters? The planned mission Einstein Probe (EP) has a much better sensitivity compared to the past missions, so it is expected to discover many new X-ray binary systems over its operating period, which will play a key role in helping solve the problems above then.

black holes, neutron stars, binary stars, X-ray

PACS: 97.60.Lf, 97.60.Jd, 97.80.Jp, 95.85.Nv

doi: [10.1360/SSPMA2017-00287](https://doi.org/10.1360/SSPMA2017-00287)