

致密天体科学进展

袁海龙 张昊彤

(中国科学院国家天文台光学天文重点实验室 100101)

致密天体,宇宙中一类非常特殊的天体,它们具有极高的物质密度,是恒星演化末期的最终形态,包括以电子简并压力支撑的白矮星、以中子简并压力支撑的中子星、内部状态目前还无法探知的恒星级黑洞,等等。这些致密天体,往往具有极端的密度、温度和压力,这样的物态环境是地球上的实验室难以具备的,但是对于探索和验证物理学中最前沿的一批理论和假说提供了可能,大天区面积多目标光纤光谱天文望远镜(Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope,简称LAMOST,冠名郭守敬望远镜)的光谱巡天在帮助天文学家了解这些极端的物理环境中起到了突破性的作用。在双星系统中,两颗成员星因为万有引力的作用而相互绕转,其轨道周期和振幅与两颗星的质量有密切关联,利用LAMOST巡天探测其中一颗星的运动特征,就能推断其伴星的质量,这就是双星动力学方法的基本原理。将这个方法与LAMOST数据结合,就能发现很多隐藏的致密天体。

1 恒星级黑洞

黑洞具有极强的引力,在其事件视界范围内,就算是以光速运动的光子也无法逃逸出来,因而本身是不可见的,故而称为黑洞。根据黑洞无毛定律,黑洞只有质量、角动量和电荷三个属性,之外的所有物理特征都不存在。不过,天文学家通过对黑洞周围物质的观测,还是能发现黑洞并研究其参数,当然,这是一个极具挑战的任务。

按质量不同,黑洞可以细分为恒星级、中等质量和超大质量黑洞。恒星级黑洞是由大质量恒星死亡后形成的,理论上银河系中有上亿颗这样的

黑洞,但目前只证认了约20颗,它们的质量均小于20倍太阳质量,并且对它们的观测几乎都依赖于黑洞吸积伴星物质发出的X射线。一种猜测认为,大部分的黑洞双星没有物质吸积或者很微弱,处于X射线宁静态,这种类型黑洞双星的发现和认证,只能通过大规模的时域光谱巡天来实现,这在LAMOST引领的千万级光谱巡天时代到来之前是难以想象的。

LAMOST的二期巡天(2017年到2022年)正式增加了时域巡天。实际上,从2016年开始,在国家天文台和云南天文台研究团队的共同提议下,LAMOST已经开展了一个小天区的时域巡天的实验,是国际上首个利用大规模光谱巡天望远镜开展的时域巡天项目。从2016至2019年,该项目监测了一个与Kepler空间望远镜二期巡天—K2项目重叠的小天区(视场中心:赤经 92.98° ,赤纬 23.21°)中的3000多颗恒星,并在一个X射线辐射宁静的双星系统中发现了一颗4~8倍太阳质量的蓝色恒星,它围绕一个“看不见的天体”做周期性运动,轨道周期大约79天,伴星质量函数约1.2倍太阳质量。可以想象,能够让如此大质量蓝色恒星以这么大的速度绕转,意味着存在一个不可见的天体提供了超乎寻常的引力,拖拽着可见蓝色恒星做圆周运动,根据双星动力学原理,估计这个不可见天体的质量为70倍太阳质量(最新结果为20~40倍太阳质量)。考虑到没有普通的天体具有如此大的质量,同时还看不到它发出的光,故而判断这个天体是黑洞(命名为LB-1, J061149+224932,图1)。

LB-1的发现发表在《自然》杂志^[1],引起了国际天文界的广泛关注,因为当前理论认为在太阳金属丰度下无法形成如此巨大的黑洞,这可能迫使天文

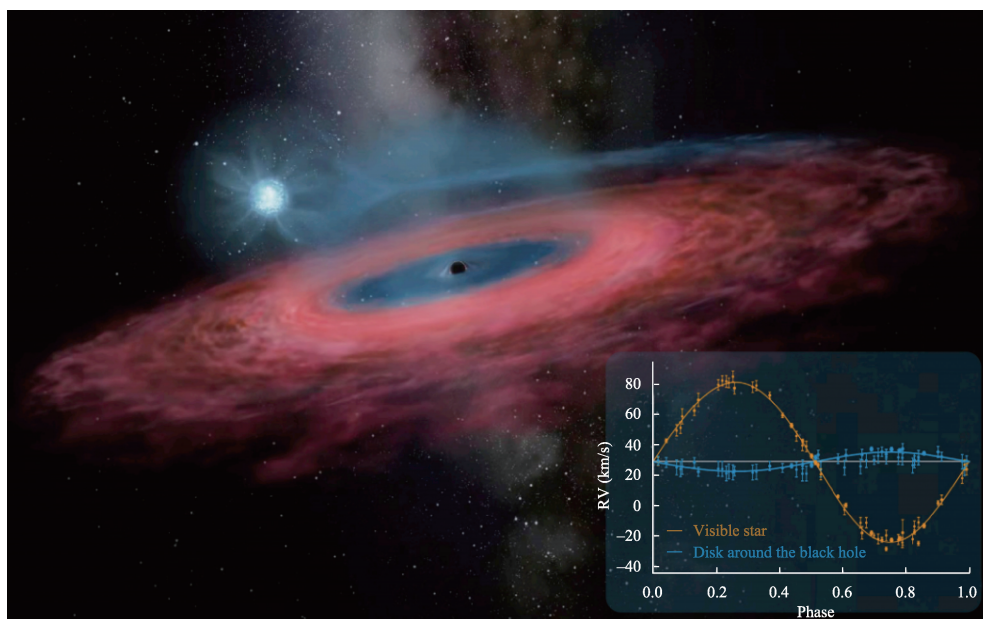


图1 恒星级黑洞 LB-1 的艺术印象图和视向速度曲线 (图片引自 *The Innovation*)

学家改写恒星级黑洞的形成模型。另一方面很多天文学家对这个系统的本质提出了不同的见解。

一种观点认为,这个蓝色的恒星并非常见的蓝色恒星,而是一个被伴星吸积了大部分质量的蓬松的小质量的氦星;如此,拖拽这个小质量的天体就不需要不可见天体具有很大的质量^[2]。另一种观点认为,不可见天体可能是一个高速自转的 Be 星,这类恒星具有类似的星周盘,同时由于高速的自转,其谱线特征难以被发现;那么,就算这个“不可见”天体的质量比较大,也只能算一个普通的非致密恒星,也就不是黑洞^[3]。将来更精确的观测数据和理论模型或许能揭露这个系统的本质。

这一发现引发了国内外黑洞双星的探测和发现的热潮。一些国际大规模巡天项目,例如盖亚 (GAIA),也将恒星级黑洞的搜寻作为其重要的科学目标之一。根据银河系的物理模型开展星族模拟,类似的分离的宁静态的黑洞双星系统还有很多,在 LAMOST 巡天的星等范围内,数量级可能在 100 左右。LAMOST 的光谱巡天在近些年来越来越重视时域巡天,随着时间基线的拉长和数据总量的增长,相信会有越来越多有价值的新发现浮出水面。

2 中子星

中子星,顾名思义,其内部物质密度极大,以至于电子与质子被压缩形成中子,以中子简并压支撑天体的自身引力,不过实际内部结构要更复杂。中子星的质量一般在 1 到 2 倍太阳质量之间,但是半径一般大约为 10 千米,密度高达每立方厘米上亿吨,它们还可能有高速的自转、极高的温度和很强的磁场。作为中大质量恒星演化的最终产物,中子星能为极端情况下的基础物理研究提供实验环境,可以研究相对论引力弯曲和引力波辐射,具有射电信号的毫秒级脉冲星能作为非常稳定的精确计时信号源。目前已知的中子星大部分为具有射电信号的脉冲星,或者具有 X 射线、 γ 射线辐射的中子星。利用双星视向速度解轨方法,有机会从 LAMOST 数据中发现很多不一样的中子星,这些系统没有显著的物质传输,处于 X 射线、 γ 射线和射电宁静状态。

J112306+400736 就是这样的一个例子,它由一个可见的小质量的温度不到 4000K 的晚型恒星和一个不可见的质量大约 1.24 倍太阳质量的中子星组成;晚型恒星以周期 68 分钟和几百千米每秒的速度进行轨道运动,且在伴星的引力作用,发生了显

著的潮汐形变,成为一个水滴状的球体,这一发现被发表在《自然天文》杂志(图2)^[4]。

随后,若干的中子星双星候选体被发现,例如具有早型A型光谱的J061635+231909,中子星伴星大约1.2倍太阳质量^[5];轨道周期2.76天的F型系统J125556+565846,中子星伴星具有1~2倍太阳质量^[6];距离地球100秒差距量级的可能是最近的中子星J152748+353657^[7]和J235456+335625^[8]。不过,这些中子星候选体质量没有确定超过钱德拉塞卡极限,因此不排除是大质量白矮星的可能。

3 白矮星

白矮星,因光度低而被称为矮星,同时其温度较高,视觉上接近白色,故而得名。相对于中子星

或者黑洞,它们的质量和密度要低很多,但是数量众多,是大部分中小质量恒星的最终演化形态。其质量在1倍太阳质量上下,统计分布峰值在0.6倍太阳质量;半径与地球相当,质量越大半径越小。利用大型光谱巡天如SDSS和LAMOST,人们发现了数万光谱认证的白矮星,其光谱特征以氢或者氦的宽吸收线为主导,同时具有较蓝的色指数和显著低于主序带的光度。包含白矮星的双星系统,会呈现多种形态,例如伴星也是白矮星的双致密星,伴星是小质量主序星且有物质传输的激变变星,伴星是巨星的共生星,没有显著的物质传输的白矮主序双星等。研究这类天体,可以完善双星演化过程中的许多物理模型,白矮主序双星和双致密星可能是Ia型超新星和引力波源的前身星,具有重要研究价值。

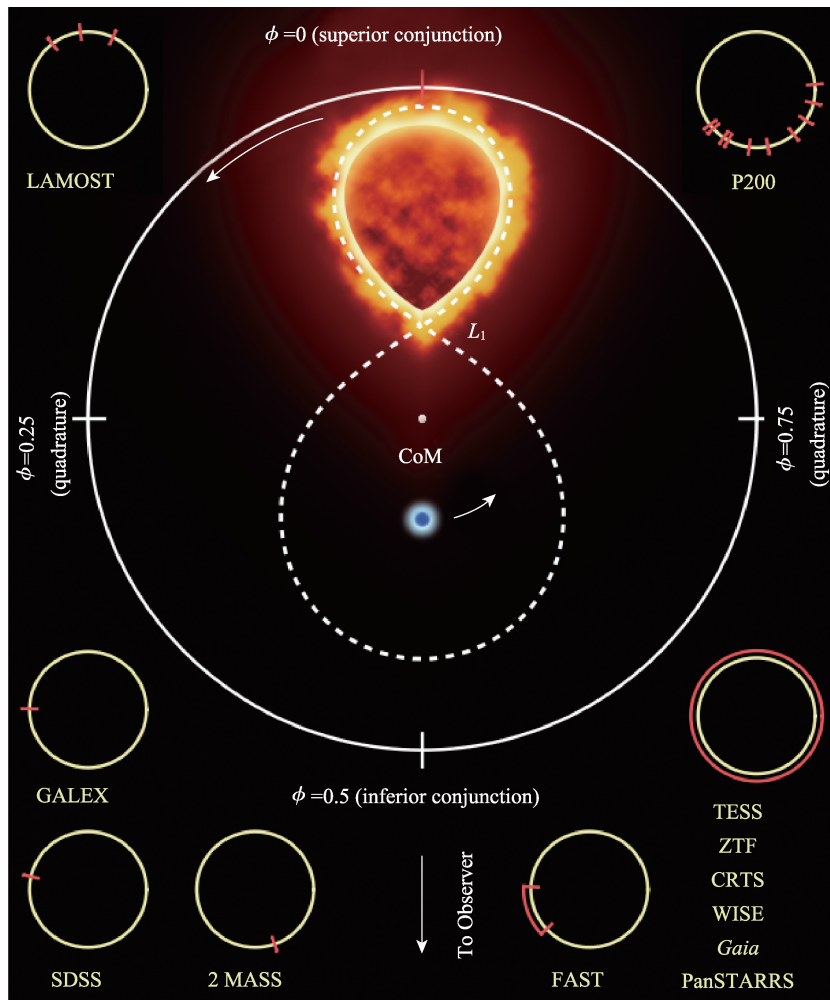


图2 宁静态中子星J112306+400736的观测数据相位(引自 Nature Astronomy^[4])

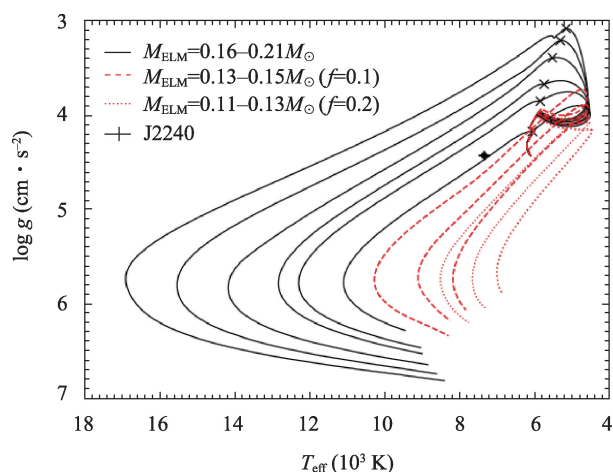


图3 极低质量白矮星的演化轨迹及 J224040-020732 的参数(引自 *The Astronomical Journal* [11])

通常,利用光谱发现的白矮星系统中两个成分光度不相上下,而 LAMOST 的数据可以发现一些被伴星光度掩盖的暗弱的白矮星。基于 LAMOST 的 DR5 数据,研究人员发现了 35 个可能有致密星伴星的候选体,并对其中两个进行了细致的分析。LAMOST 在二期巡天中拍摄了 4 个新的时域天区(天区位置也在 Kepler 空间望远镜二期巡天 K2 天区中),每个天区获得了上百次时域光谱,得到了较为完整的轨道覆盖,国家天文台和厦门大学的两个团队采用不同的方法,合计从中发现了 9 个致密双星系统,其可见恒星是 FGK 型矮星或者亚巨星,伴星可能是致密的白矮星或者小质量中子星^[9,10]。

利用 LAMOST 数据还发现了一些极低质量白矮星(ELM)的前身星系统。不同于普通的白矮星,这些前身星,结束双星质量传输不久,还未进入白矮星冷却序列,壳层仍有氢在燃烧,因而恒星外包层仍然处于蓬松状态,这个阶段的生命周期可能有 10 亿年。它们具有较高的温度,呈现 AFGK 型光谱,半径接近或者略低于主序星,但是质量却非常低,只有 0.1~0.2 倍太阳质量,显著低于寻常的同光谱类型恒星。图 3 显示的 J224040-020732 的演化路径,经过光谱和测光分析,这个前身星的质量大约是 0.1 倍太阳质量,小于现有 ELM 演化理论模型的下限(0.14 倍太阳质量),这是否意味着现有模型需要引入新的机制,还有待将来进一步论证^[11]。

4 致密星光谱巡天发掘前景巨大

相对于非致密的双星系统,包含致密星的双星系统的主要特点是致密星的辐射特征较难被发现,同时很可能两个成员星之间没有显著的物质交换,因而,监控其中可见成员星的视向速度变化是主要的发现手段之一。LAMOST 的大天区光谱巡天,首次将恒星光谱的数量带入了千万级别,具有开创性的意义。不过,相对于银河系千亿级的恒星数量,以及时域光谱研究的需求,可用的数据依然是很小的,更多的致密星还有待发现。获得更多更全面的数据,对于完善恒星形成和演化图谱,开展极端环境下的基础物理、引力波、超新星、高能物理研究,具有巨大的研究前景。

参考文献

- [1] Liu, J., Zhang, H., et al. 2019, A wide star–black–hole binary system from radial–velocity measurements, *Nature*, 576, 618.
- [2] Irrang, A., et al. 2020, A stripped helium star in the potential black hole binary LB–1, *Astronomy & Astrophysics*, 633, L5.
- [3] El–Badry, K., Quataert, E. 2021, A stripped–companion origin for Be stars: clues from the putative black holes HR 6819 and LB–1, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 502, 3436.
- [4] Yi, T., et al. 2022, A dynamically discovered and characterized non–accreting neutron star–M dwarf binary candidate, *Nature Astronomy*, 6, 1203.
- [5] Yuan, H., et al. 2022, Discovery of One Neutron Star Candidate from Radial–velocity Monitoring, *Astrophysical Journal*, 940, 165.
- [6] Mazeh, T., et al. 2022, Probable dormant neutron star in a short–period binary system, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 517, 4005.
- [7] Lin, J. et al. 2023, An X–Ray–dim “Isolated” Neutron Star in a Binary?, *Astrophysical Journal Letters*, 944, L4.
- [8] Zheng, L., et al. 2023, The nearest neutron star candidate in a binary revealed by optical time–domain surveys, *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 66, 129512.
- [9] Li, X., et al. 2022, Binaries with Possible Compact Components Discovered from the LAMOST Time–domain Survey of Four K2 Plates, *Astrophysical Journal*, 938, 78.
- [10] Qi, S., et al. 2023, Searching for Compact Object Candidates from LAMOST Time–domain Survey of Four K2 Plates, *Astronomical Journal*, 165, 187.
- [11] Yuan, H., et al. 2023, ELM of ELM–WD: An Extremely–low–mass Hot Star Discovered in LAMOST Survey, *Astronomical Journal*, 165, 119.