

GW231123: 聆听宇宙深处的极端黑洞并合

康亚城^{1,2} 邵立晶^{2,3}

(1. 北京大学物理学院天文学系 100871; 2. 北京大学科维理天文与天体物理研究所 100871;
3. 中国科学院国家天文台 100101)

爱因斯坦早在1916年就从广义相对论出发预言了引力波的存在,但由于引力波与物质的相互作用极其微弱,从宇宙深处传播至地球的信号振幅通常非常小,难以被我们直接探测。唯有依赖极为精密的测量技术,人们才有可能捕捉到这种细微的时空“涟漪”。经过半个多世纪的发展,激光干涉测量技术不断取得进步,使科学家们能够探测到约十亿分之一纳米的微小尺度变化^[1],将引力波这一理论层面的预言转化为可被直接验证的实验。值得瞩目的是,2015年9月14日,人类首次直接探测到来自双黑洞并合的引力波信号GW150914,标志着引力波天文学时代的正式开启^[1]。这一里程碑式的发现使得莱纳·魏斯(Rainer Weiss)、巴里·巴里什(Barry C. Barish)和基普·索恩(Kip S. Thorne)分享了2017年度诺贝尔物理学奖,以表彰他们在美国激光干涉引力波天文台(Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory, LIGO)的设计、建设以及引力波探测方面所作出的贡献^[2]。

自首次探测到引力波信号以来,由美国的LIGO、欧洲的处女座干涉仪(Virgo)以及日本的神冈引力波探测器(Kamioka Gravitational wave detector, KAGRA)组成的引力波探测网络(通常称为LVK合作组)已记录到数百个致密天体并合事件^[2]。这些事件大多源自双黑洞系统的并合,其成员黑洞质量通常处于几倍至数十倍太阳质量的范围内(见图1)。随着探测器灵敏度的不断提升,人们观测到的黑洞质量范围也逐渐扩大。在刚刚结束的LVK合作组第四次观测运行期间,位于美国的两个LIGO探测器(LIGO Hanford与LIGO Livingston)同时

记录到了一个极为特殊的引力波信号——GW231123,也是本文讨论的主角。

通过对LIGO此次探测到的仅持续0.1秒的引力波信号进行数据分析,科学家们证实GW231123事件是从遥远宇宙传播至地球的双黑洞并合信号,发生在大约72亿光年之外——意味着我们在地球上接收到这个信号时,这场剧烈的并合已经在数十亿年前就完成了^[3]。不过,与以往探测到的双黑洞并合事件群体不同的是,参与GW231123并合的两个黑洞质量分别约为137倍和103倍太阳质量,并合后形成的黑洞残骸质量更是达到了惊人的约225倍太阳质量,比此前由GW190521事件所保持的纪录(黑洞残骸质量约为140倍太阳质量^[4])高出一半以上,成为迄今通过引力波观测到的质量最大的双黑洞并合事件(见图1)。不仅如此,科学家们还发

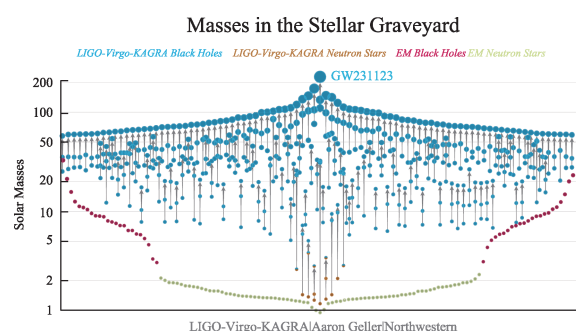


图1 LVK合作组截至2024年1月已探测到的致密双星系统的质量分布示意^[2]。其中,通过引力波探测发现的黑洞和中子星以蓝色和橙色圆点标示,而通过电磁观测识别的黑洞和中子星则以红色和黄色圆点标示。可以看到,GW231123事件对应的双黑洞系统落在分布的最“极端”位置,是目前引力波观测到的质量最大的双黑洞并合事件(图片来源:LVK合作组/亚伦·盖勒(Aaron Geller)/西北大学(Northwestern))

现, GW231123 的两个成员黑洞都转得很快, 几乎逼近广义相对论所预言的转动极限。其中, 主黑洞(双黑洞中质量较大的黑洞)的自转速度接近理论上限的 90%; 次黑洞(双黑洞中质量较小的黑洞)的自转速度也接近上限的 80%^[3]。如此巨大的质量, 加上如此惊人的高速旋转, 使得 GW231123 成为目前引力波天文学中最极端的双黑洞并合事件之一。

除了刷新观测记录, GW231123 事件更引人关注的一点在于, 成员黑洞的质量落在了所谓的“黑洞质量间隙”内或其附近(以下简称为质量间隙), 也就是大约 60 到 130 倍太阳质量的范围内(见图 2)。这一结果让科学家颇感意外, 因为按照传统的恒星演化理论, 这一质量区间的黑洞应当是非常“罕见”甚至是“禁止”存在的。这主要是因为恒星核心内部的温度和密度会高到足以让高能光子转化为正负电子对, 导致支撑恒星的压强突然减弱, 恒星在自身引力的作用下发生坍缩, 并进一步引发失控的热核反应, 最终产生一场剧烈的超新星大爆炸, 将整个恒星完全摧毁, 不会留下任何黑洞残骸^[5]。即使内部释放的能量不足以把恒星完全摧毁, 它也仍可能会经历一次次剧烈的质量抛射, 产生“脉动”现象, 最终同样会阻碍大质量黑洞的形成^[6]。LVK 合作组此前探测到的绝大多数黑洞并合事件中, 其黑洞成员质量均低于质量间隙。然而, GW231123 事件却对这一理论预言提出了挑战: 其质量较小的次黑洞有约 83% 的概率位于质量间隙内, 而质量较大

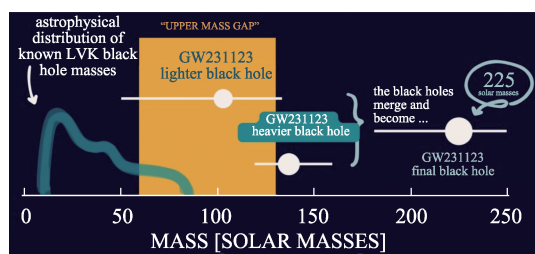


图2 GW231123 事件的黑洞质量特征示意图。左侧分布曲线展示了 LVK 合作组探测到的黑洞质量分布, 大多数黑洞质量低于质量间隙(图中黄色区域)。而 GW231123 事件中的次黑洞很可能位于这一质量间隙内; 质量更大的主黑洞也接近或超过质量间隙的上限(图片来源: 西蒙娜·米勒/加州理工学院(Simona J. Miller/Caltech))

的主黑洞也有约 26% 的概率落于其中^[3]。这表明传统的恒星演化理论或许难以将它们解释为由恒星直接坍缩所形成的产物。因此, GW231123 中的黑洞很可能并非通过普通的恒星坍缩过程直接形成, 而是经历了更为复杂的演化历程。

鉴于 GW231123 事件表现出多方面的反常特征, 全球多个研究团队围绕其起源提出了多种解释模型。第一种较为自然的解释被叫作“等级式并合”起源。正如《老子》所书, “合抱之木, 生于毫末; 九层之台, 起于累土”。在等级式并合这一情景中, GW231123 的两个成员黑洞并非恒星坍缩直接形成的第一代黑洞, 而是由多个较小质量的黑洞经过多次并合、一代代增长而来的产物(见图 3)。例如, 在致密的球状星团, 或活动星系核周围的吸积盘等特殊环境中, 黑洞之间可能经历多次并合, 从而形成 GW231123 中较为特殊的成员黑洞^[8]。在这一过程中, 黑洞并合后的残骸能够继承并积累旋转能量, 最终形成快速自转的大质量黑洞。相比之下, 单个

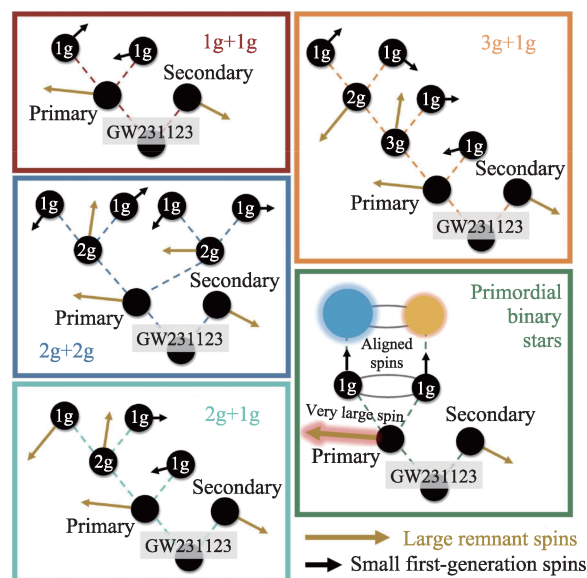


图3 GW231123 事件值得讨论的几种形成渠道示意图。

“1g”“2g”“3g”分别表示第一、第二和第三代黑洞。图中主要展示了主黑洞可能经历的等级式并合历史。黑色箭头表示较慢的自转及其方向, 棕色箭头表示自转较快的情况。右下角的小图进一步展示了: 如果第一代双黑洞的自转方向大致对齐, 它们并合后有可能产生一个自转非常快第二代黑洞(图片源自文献[7])

大质量恒星在演化过程中会通过抛射包层物质等方式损失大量的旋转能量。因此,由恒星直接坍缩形成的黑洞通常自转较慢,难以解释 GW231123 成员黑洞所表现出的高速自转特征。此外, GW231123 成员黑洞的自转方向与它们二者互相绕转的方向之间存在着一定的夹角^[3]。这种“不对齐”的情况很容易在随机的动力学相互作用中产生,也为等级式并合起源理论提供了进一步的证据。

然而,“逐级并合”也并非 GW231123 事件最理想的解释。这是因为,在多次并合的过程中,新黑洞的旋转主要来自并合前两个黑洞相互绕转时携带的轨道角动量,而不是它们各自的自转能量。从几何上看,这个轨道角动量大致沿着两者绕转的“轨道轴”方向,而各黑洞自身的自转方向往往是随机分布的,未必与之对齐。因此,并合后的黑洞自转通常不会达到极端值,而是多集中在理论上限的 70% 左右。相比之下, GW231123 成员黑洞的自转速度均接近甚至超过理论上限的 80%。在等级式并合情景下,成员黑洞要获得如此高的自转速度,通常需要较为苛刻的质量或自转组合条件^[3,7]。于是,另一种可能的解释是,黑洞通过不断“吃掉”周围的物质来慢慢变大^[9]。在该图像中, GW231123 的两个成员黑洞并非通过多次并合一步步变大,而是在长期吸积周围气体的过程中逐渐增长质量和加快自转。例如,在活动星系核周围的吸积盘中,如果两个黑洞经历了持续且方向稳定的气体吸积,它们的自转就会被不断“加速”,甚至能接近理论极限,从而自然地解释 GW231123 的成员黑洞同时具有大质量和高自转的观测特点。最新研究还指出, GW231123 成员黑洞的自转方向彼此之间可能较为对齐^[10]。这种“自转彼此对齐、但整体倾斜”的结构,可以很自然地由方向相对稳定的气体吸积过程产生,为吸积驱动的形成图景提供了重要线索。

当然,也有研究团队抱着“行到水穷处,坐看云起时”的从容态度,通过修正传统单星坍缩模型,或考虑特定的初始物理条件,来尝试解释 GW231123 事件的起源。近期有研究指出,如果引入恒星坍缩

前的初始强磁场、高速自转,并调控核反应速率等物理效应,黑洞质量间隙的边界会发生移动,从而允许较大质量的恒星直接发生核心坍缩,产生类似 GW231123 事件中的成员黑洞^[11]。数值模拟进一步表明,一个初始约为 250 倍太阳质量、金属含量较低的氦核恒星,在坍缩过程中,自转和磁场的共同作用不可忽略。坍缩时,盘风和喷流可以带走部分物质,从而调节整个过程,并最终留下一个质量较大、自转也较快的黑洞。在某些情形下,如果磁场强度合适,大部分恒星物质都可能被黑洞吸积,使其自转速度被“加速”到接近理论极限,从而为 GW231123 中两个黑洞所表现出的极高速自转提供了一种自然的解释。

理论天体物理学家常常是脑洞大开、灵活多变的。除了以上介绍的几类演化路径,还有团队提出了其他物理模型来解释此次异常极端的 GW231123 事件。例如,考虑一种被称为“化学均匀演化”的过程。在这一图像中, GW231123 的两个成员黑洞被认为起源于一对极大质量恒星所组成的紧密双星系统。它们处在金属元素含量较低的环境中,且两颗恒星的自转足够快、轨道足够近,导致恒星内部的物质得到充分“搅拌”,始终保持着相对均匀的化学组成,避免了传统单颗恒星演化模型中所预期的显著膨胀过程。这样一来,这对大质量双星系统可以坍缩形成两个快速旋转的大质量黑洞,从而构成与 GW231123 观测性质相符的双黑洞系统,并发生随后的并合^[7,12]。此外,有研究者觉得天体物理演化模型太受束缚——正如欧阳修的《画眉鸟》中所述,“始知锁向金笼听,不及林间自在啼”——他们尝试另辟蹊径,从原初黑洞模型的角度进行解释。原初黑洞被认为是在宇宙早期的密度涨落中直接形成的,其形成过程不依赖于恒星演化。因此,它们的质量范围理论上可以覆盖非常广的范围。如果宇宙中确实存在相当数量的原初黑洞,它们之间的并合或许也能产生类似 GW231123 事件的引力波信号^[13]。尽管这一解释目前还存在较大的不确定性,但结合未来更多的宇宙学观测,或许能够对原初黑

洞模型的合理性进行更严格的检验。

诚然,探索 GW231123 事件的起源固然重要,但这一事件的意义和影响远不止于“追根溯源”。事实上,该事件对传统的恒星演化理论提出了新挑战。如前文所述, GW231123 成员黑洞的质量落入所谓的质量间隙区域,这一事实迫使人们重新审视超新星理论:或许实际的质量间隙边界与理论预言之间存在差异;又或许在金属含量极低或某些特殊的环境中,部分恒星能够“逃过”被彻底摧毁的命运。无论如何, GW231123 事件的发现为检验和完善恒星演化模型提供了珍贵的观测约束,也为理解中等乃至更大质量黑洞的形成与演化提供了关键线索。

另一方面,鉴于 GW231123 系统极端的质量、自转特征,其引力波信号也为研究黑洞残骸的“余振”阶段提供了独特机会^[9]。事实上,并合后的残骸黑洞会经历一个被称为“铃宕”的阶段,此时释放的引力波信号可以用一系列特定的振荡模式来描述。在爱因斯坦的广义相对论框架下,这些振荡模式的频率和衰减速度仅由残骸黑洞的质量和自转两个参数决定,不依赖其形成历史,因此常被形象地称为黑洞独特的“指纹”。近期有研究对 GW231123 的铃宕信号展开细致分析,发现该事件中可能存在多个振荡模式叠加的证据^[14]。这种多模结构不仅有助于更精确地测量残骸黑洞的质量与自转,还为检验广义相对论关于黑洞性质的基本预言提供了重要机会^[14]。

更进一步地说, GW231123 事件还为研究极端引力环境中的基础物理问题提供了新的实验平台。例如,在某些包含一种新的超轻粒子的理论中,高速自转的黑洞会通过所谓的“超辐射不稳定性”过程与这些粒子发生相互作用,从而逐渐损失自转能量。因此,一旦观测到具有极高自转的黑洞,人们便可以对这种相互作用施加严格限制,从而排除部分超轻粒子的存在可能。 GW231123 中两个黑洞所表现出的大质量与高自转特征,使其成为检验这一机制的重要观测样本。研究表明,利用该事件的结果,可以对质量在 10^{-14} 到 10^{-12} 电子伏特范围内的超轻玻色子给出新的排除约束^[15],拓展了此前通过电

磁观测或其他引力波事件所得到的约束范围(约 10^{-13} 到 10^{-11} 电子伏特)。可以说,此类工作不仅为暗物质候选粒子提供了新的探索途径,也意味着引力波天文学正逐步成为粒子物理与宇宙学前沿的重要研究手段。

杜甫有云:“挽弓当挽强,用箭当用长”。 GW231123 作为一例同时具有极端质量和自转特征的双黑洞并合事件,为多个研究方向提供了重要契机。无论是推动恒星演化理论的修正,还是利用黑洞铃宕阶段的信号检验广义相对论,亦或是借助高自旋黑洞探索超轻粒子等新物理,围绕这一事件所开展的广泛而深入的研究,正在不断拓展引力波天文学的科学边界。未来,随着地面引力波探测器灵敏度的进一步提升,以及空间引力波探测器的投入运行,人们有望通过更多类似 GW231123 的极端事件,逐步揭示黑洞形成与演化的奥秘,并深入理解极端引力环境下更深层的物理规律。

致谢:感谢国家自然科学基金(12573042)、北京市自然科学基金(1242018)和“马普伙伴合作组”的资助。

注:

1) 这种精度好比在地球到太阳的距离上,仍能捕捉到小于一根头发丝宽度的细微变化。

2) 三位获奖者中,魏斯最早提出利用激光干涉仪探测引力波的方法,并对噪声来源进行了系统分析,因此获得了一半的奖金;巴里什和索恩则共同分享另一半奖金。其中,巴里什在 LIGO 的建设和组织实施中发挥了关键作用,而索恩则在引力波探测及 LIGO 相关理论研究方面作出了原创性重要贡献。

参考文献

- [1] Abbott B., et al. (2016a), GW150914: The Advanced LIGO Detectors in the Era of First Discoveries. *Physical Review Letters* 116 (13): 131103-131103
- [2] Abac A., et al. (2025), GWTC-4.0: Updating the Gravitational-Wave Transient Catalog with Observations from the First Part of the Fourth LIGO-Virgo-KAGRA Observing Run, arXiv: 2508.18082
- [3] Abac A., et al. (2025), GW231123: A Binary Black Hole Merger with Total Mass $190-265 M_{\odot}$. *The Astrophysical Journal Letters*,

- 993, L25
- [4] Abbott R., et al. (2020), GW190521: A Binary Black Hole Merger with a Total Mass of $150 M_{\odot}$, *Physical Review Letters*, 125, 101102
- [5] Farmer R., et al. (2019), Mind the Gap: The Location of the Lower Edge of the Pair-instability Supernova Black Hole Mass Gap, *The Astrophysical Journal*, 887, 53
- [6] Hendriks D., et al. (2023), Pulsational pair-instability supernovae in gravitational-wave and electromagnetic transients, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 526, 4130
- [7] Stegmann J., et al. (2025), Resolving Black Hole Family Issues among the Massive Ancestors of Very High-spin Gravitational-wave Events like GW231123, *The Astrophysical Journal Letters*, 992, L26
- [8] Paiella L., et al. (2025), Assembling GW231123 in Star Clusters through the Combination of Stellar Binary Evolution and Hierarchical Mergers, *The Astrophysical Journal Letters*, 994, L54
- [9] Shi Y., et al. (2024), From Seeds to Supermassive Black Holes: Capture, Growth, Migration, and Pairing in Dense Protobulge Environments, *The Astrophysical Journal Letters*, 969, L31
- [10] Bartos I., & Haiman Z., (2025), Accretion is All You Need: Black Hole Spin Alignment in Merger GW231123 Indicates Accretion Pathway, *The Astrophysical Journal Letters*, 996, L44
- [11] Gottlieb O., et al. (2025), Spinning into the Gap: Direct-horizon Collapse as the Origin of GW231123 from End-to-end General-relativistic Magnetohydrodynamic Simulations, *The Astrophysical Journal Letters*, 993, L54
- [12] Popa S., & de Mink S., (2025), Very Massive, Rapidly Spinning Binary Black Hole Progenitors through Chemically Homogeneous Evolution—The Case of GW231123, *The Astrophysical Journal Letters*, 995, L76
- [13] Yuan C., et al. (2025), GW231123 mass gap event and the primordial black hole scenario, *Physical Review D*, 112, L081306
- [14] Wang H., et al. (2025), Detection of a Higher Harmonic Quasi-normal Mode in the Ringdown Signal of GW231123, *arXiv*: 2509.02047
- [15] Aswathi P., et al. (2025), Ultralight boson constraints from gravitational wave observations of spinning binary black holes, *Physical Review D*, 112, 123048

科苑快讯

星际彗星揭示与太阳系不同的空间环境

一颗来自太阳系外的彗星为天文学家提供了一个罕见的机会,让他们了解外行星系统是如何在与我们宇宙邻居截然不同的条件下形成的。

这个被称为彗星的物体是不到一年前在穿越太阳系时被发现的。尽管科学家们仍然不知道它的确切起源,但密歇根大学(University of Michigan)领导的一项新研究表明,这颗彗星形成于太空中一个极其寒冷的地区。

这项发表在《自然天文学》(*Nature Astronomy*)上的发现,3I/ATLAS 含有异常高水平的富氘水,通常被称为“重水”。水由两个氢原子和一个氧原子组成,化学式为 H_2O 。在正常的水中,氢原子只含有一个质子。但氘是氢的较重版本,包含一个质子和一个中子。

研究人员发现,这颗彗星的水中含有氘的比例惊人地高。重水也可以在地球和太阳系的彗星上发现,但在 3I/ATLAS 上探测到的数量要多得多。

通过将彗星的化学成分与我们太阳系中的物体进行比较,研究人员得出结论,这颗彗星可能是在较冷的环境中形成的,辐射水平较低。

研究人员使用智利的 ALMA (阿塔卡马大型毫米/亚毫米阵列) 提供专业知识,更详细地研究了彗星的化学成分。ALMA 足够灵敏,可以区分普

通水与氘化水,使研究人员能够计算出两种形式之间的比例。科学家表示,这标志着这种类型的分析首次在星际物体上成功进行。

研究人员表示,这项研究表明,未来的星际物体也可以进行化学分析,可能为整个星系的行星系统形成,提供新的见解。迄今为止,天文学家只探测到 3 个已知的星际物体穿过我们的太阳系,其中包括 3I/ATLAS。

随着新天文台开始扫描太空,这样的发现可能会更加普遍。同时,让夜空保持晴朗和黑暗,才能探测到这些微小而微弱的物体。

(高凌云编译自 2026 年 5 月 11 日 SciTechDaily 网站)

