

恒星级双黑洞旋近及其探测*

谭柏轩¹, 区子维¹, 刘帅^{1,2}, 雷卫华³, 胡一鸣^{1,2}

1. “天琴计划”教育部重点实验室, 中山大学天琴中心, 天琴前沿科学中心, 国家航天局引力波研究中心, 广东 珠海 519082
2. 中山大学物理与天文学院, 广东 珠海 519082
3. 华中科技大学物理学院, 湖北 武汉 430074

摘要: 在经历恒星演化后, 大质量恒星最终会形成中子星或黑洞等致密星。此外, 宇宙早期的局部密度涨落也可能形成恒星级原初黑洞。从宇宙诞生至今, 这些恒星级黑洞可以通过不同的机制形成双星, 包括协同演化模型和动力学相互作用模型。在地面引力波探测器实现探测之前, 电磁波观测到的恒星级黑洞质量较小, 即不超过 15 个太阳质量左右。LIGO/Virgo 对 GW150914 等恒星级双黑洞并合产生的引力波信号的探测, 将这一领域引入到相关学者的关注视野中, 由此激发了大量空间引力波探测对恒星级双黑洞旋近等信号的研究。通过当前地面引力波探测结果的统计, 可以预言: 天琴在五年的观测时间内, 可以探测到数起到几十起的恒星级双黑洞旋近事件。由于长时间的积分, 这些空间引力波信号可以精确测量一些参数, 如并合时间精度预期可达约 1 s 水平, 空间定位能力可达约 1 deg² 水平, 等等。因此, 恒星级双黑洞旋近为多波段引力波探测提供了极佳的天文实验室。

关键词: 黑洞; 引力波; 恒星

中图分类号: P14 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2021) 01-0041-12

Stellar-mass binary black holes: Inspirals and their detection

TAM Pakhin¹, OU Ziwei¹, LIU Shuai^{1,2}, LEI Weihua³, HU Yiming^{1,2}

1. MOE Key Laboratory of TianQin Mission, TianQin Research Center for Gravitational Physics, Frontiers Science Center for TianQin, CNSA Research Center for Gravitational Waves, Sun Yat-sen University (Zhuhai Campus), Zhuhai 519082, China
2. School of Physics and Astronomy, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China
3. School of Physics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

Abstract: According to stellar evolution theory, a massive star will eventually become a compact object such as a neutron star or a black hole. On the other hand, local density fluctuations in the early Universe could also form primordial black holes of stellar mass. Since the dawn of the Universe, stellar-mass black holes (SBHs) can come together to form binaries through mechanisms such as coevolution and dynamical processes. Before ground-based gravitational wave (GW) detectors made their first successful detections, the masses of SBHs had been measured by electromagnetic waves only, and never exceeded around 15 solar masses. The LIGO/Virgo detection of GWs from binary SBH mergers has drawn the attention of many scientists, in particular, the GW signals resulting from the inspirals of binary SBHs should be detectable by space-borne GW detectors. Based on the number of GW events detected by ground-

* 收稿日期: 2020-11-14

录用日期: 2020-12-21

网络首发日期: 2021-01-15

基金项目: 广东省基础与应用基础重大项目 (2019B030302001); 国家自然科学基金 (20177100041030015)

作者简介: 谭柏轩 (1981年生), 男; 研究方向: 高能天体物理; E-mail: tanbxuan@sysu.edu.cn

based detectors, it is expected that TianQin will be able to detect a few to dozens of GW events related to inspirals of binary SBHs. Given the long expected duration for each inspiral event, such signals can help measure parameters including the expected merger time (down to ~ 1 second) and the exact location of the SBH (down to 1 square degree). The inspiral through merging of binary SBHs will provide excellent astrophysical probes for multi-frequency GW observations.

Key words: black hole; gravitational wave; star

1 引言

现代天文学在观测和理论上均取得了长足的发展。当前,天文学家对于孤立的恒星到致密星的演化轨迹,在理论和观测上都有比较详细的了解。一般认为,大质量恒星在中心核聚变反应停止后会产生超新星爆发,而核心会在自身引力的作用下塌缩。当核心质量大于 Chandrasekhar 极限(即 1.4 个太阳质量)时,而小于 Oppenheimer 极限(即 2~3 个太阳质量)时,中子简并压抵抗引力,形成中子星。更重的天体将无法抵抗引力的作用,最终塌缩为恒星级黑洞。黑洞作为现今引力波天文学中最重要的天体之一,也越来越为一般人所认识。在致密星的三种类型(即白矮星、中子星及黑洞)当中,黑洞是普遍质量最大的。

与此同时,对于由这些黑洞组成的双星系统的起源和演化还存在许多未完全解决的问题。特别是对于黑洞如何组成密近双星系统,以及它们最终是如何互相融合和并合,仍然有较大的不确定性。由于电磁波观测对大质量(即大于 20 个太阳质量)黑洞数据的缺乏,人们对恒星级双黑洞的形成和演化知之甚少。

两颗大质量双星的共同演化有可能生成恒星级双黑洞,这被称为协同演化。除此之外,致密的球状星团^[1]和星系核星团^[2]也是恒星级双致密星产生的摇篮,这些天体环境中充斥着年老的致密星,它们是如何形成双星、进而如何旋近并最终并合的一系列过程,目前仍有待研究。密近双星的形成率和星团中恒星的密集程度有关,也同恒星的演化、星团的金属丰度等有关。双星在互相绕转时会不断释放出引力波,从而不断损失轨道能量和角动量,导致互转的轨道不断减小(此即为旋近),直到最终并合。当它们距离十分靠近时,又有着质量的交换。这其中涉及到的一些动力学机制仍然需要人们去研究,比如:双星成员中若有超新星爆发,其短时间内损失掉的质量会如何影响双星轨道,爆发后遗留下来的致密星轨

道速度会如何变化,目前主要还是靠数值模拟。

对恒星级双黑洞的研究有着十分重要的意义:

1) 恒星级双黑洞可以帮助验证恒星模型,修正恒星理论,尤其是有关由恒星所产生的各种等离子体的辐射机制、高密度物质下物态方程等方面的理论。伴星的存在使得我们可以获取双星各自的基本参数,这是单星所不具备的条件。2) 了解恒星级双黑洞在不同恒星系统中出现的概率,可以帮助我们预判一些可能伴随的高能辐射事件(如伽马暴、超新星爆发、引力波事件等)在河外星系的出现几率。

2 恒星级双黑洞

2015 年 9 月 LIGO 开始了首次观测运行(O1),9 月 14 日,LIGO 观测到了第一个双黑洞并合事件,命名为 GW150914^[3]。该事件的两个黑洞均为恒星级黑洞,质量分别为 36_{-4}^{+5} 和 29_{-4}^{+4} 个太阳质量,红移为 $z=0.09_{-0.04}^{+0.03}$ ^[4]。在接下来的几个月中,LIGO/Virgo 相继观测到了恒星级双黑洞并合事件 LVT151012, GW151226, GW170104, GW170608, GW170814 和双中子星并合事件 GW170817。到目前为止,LIGO/Virgo 合作组公布了 O1、O2 和 O3a 中的几十例恒星级双黑洞并合事件^[4-5]。

LIGO/Virgo 的探测结果对恒星演化模型提出了挑战。首先,之前对 X 射线双星的观测表明,在这类双星中的黑洞质量均在 10 个太阳质量左右^[4],如何形成像 GW150914(甚至 GW190521)^[3, 6] 这么大质量的恒星级双黑洞?其次,如何产生如此高的黑洞并合率?为此,需要在理论上对恒星级双黑洞的形成途径进行更深入的理解。

2.1 恒星级黑洞的形成过程

在引力波实现探测之前,黑洞的质量主要通过 X 射线双星观测而得到,而当时已知恒星级黑洞的质量均小于 20 个太阳质量,且大部分集中于 5~10 个太阳质量,这也与一般的恒星演化模型一致^[7-8]。GW150914 等双黑洞并合事件的引力波探测表明,恒星级双黑洞的总质量比之前理论预言

的要更大, 而质量越大意味着能探测到引力波事件的时间更早, 因此计划中的空间引力波探测器(如天琴)可以在地面探测之前一段时间对旋近信号进行探测^[3, 5]。由此, 恒星级双黑洞也就正式进入了空间引力波天线的可测量范围。

对于恒星而言, 由于金属(天文学中, “金属”指除了氢、氦以外的所有元素)的存在, 会增大恒星中光子与物质作用的散射截面, 增强辐射场到物质的动量转移, 进而导致强的星风过程, 使最终残余的核心质量偏小。LIGO/Virgo 观测到的恒星级双黑洞相对偏重的这一事实, 表明如果这些双星由恒星演化而来, 那么其对应的金属丰度相对较低, Belczynski 等认为如 GW150914 一般的双黑洞, 其前身星的金属丰度约为太阳值的 5%, 而太阳的金属丰度为 $Z_{\odot} = 0.02$ ^[9-11]。

需要注意的是, 当恒星质量过大时, 会经历所谓对不稳定超新星爆发, 恒星演化晚期极高的温度导致部分光子直接形成正负电子对, 从而极快地带走光压, 并触发剧烈的爆发, 最终不会剩下残余致密天体。

这一效应导致恒星演化无法产生约 $20 M_{\odot} \leq M_{\text{PBH}} \leq 100 M_{\odot}$ 的恒星级黑洞^[12-13]。虽然高出该质量范围的恒星同样会经历对不稳定超新星过程, 但由于自身引力太强, 无法完全瓦解。有趣的是, 引力波事件 GW190521 正是由两颗质量约 60~90 太阳质量的黑洞并合时产生的^[6], 对这一物理图像带来了极大的挑战, 也揭示了一个事实, 即现有较大质量对恒星级黑洞形成的理解存在很大的不足。

2.2 恒星级双黑洞的形成过程

恒星级双黑洞的引力波时标 t_{coal} 表示为:

$$t_{\text{coal}} = \frac{5c^5}{256G^3} g(e)(1-e^2)^{7/2} \frac{a^4}{\eta M_{\text{BBH}}^3}, \quad (1)$$

其中 e 是偏心率, $g(0) = 1$, a 为半长轴, M_{BBH} 是双黑洞总质量, 而 $\eta = \mu/M_{\text{BBH}}$ 是对称质量比。可以看出, 引力波时标对双星间距的依赖性极强。要使得双星在 Hubble 时标内并合, 必须存在其它机制使双星足够靠近。因此, 我们根据不同的双黑洞形成机制对其并合进行探讨。恒星级双黑洞的形成, 主要有三种可能性: 协同演化模型、动力学相互作用、原初黑洞模型。

2.2.1 协同演化模型 对于双星的共同演化, 有几种不同的可能性, 而双星间距是一个重要影响因素。如果间距较大, 即所谓远距双星 (Wide Bi-

naries), 两颗星几乎单独演化而互不受彼此影响, 这一情形又称孤立双星演化^[14]。

而对于密近双星系统 (Close Binaries), 大质量恒星晚期膨胀, 将通过洛希瓣溢出来进行物质交换, 其演化过程与单星会很不一样, 零龄主序的质量不再是决定恒星演化的唯一参数^[15]。考虑低金属丰度、恒星密度较低、气体较丰富(如星系的盘中)环境中, 大质量密近双星经过物质交换, 形成两颗 Wolf-Rayet 星。演化中, 它们可能经过公共包层 (Common Envelope) 阶段, 使得双星轨道急剧收缩。因此在它们塌缩成黑洞之后, 轨道间距可能较小, 从而快速进入引力波辐射阶段并最终并合^[16]。

其次, 也有人提出基于贫金属环境中形成的第一代恒星 (星族 III) 双星的途径, 也称化学均匀演化。第一代恒星质量很大, 但质量的上限十分不确定, 可能低于 $100 M_{\odot}$, 也可能高达 $1000 M_{\odot}$, 这类双恒星可自然产生较大质量的双黑洞^[17]。两颗低金属丰度的大质量恒星开始演化时相距就已较近, 并通过潮汐作用互动^[18]。潮汐锁定使得恒星内部的元素均匀混合, 从而避免了恒星演化晚期的膨胀过程, 也就避免了公共包层阶段和对应的质量损失过程^[19]。通过这种双星演化形成的恒星级双致密星系统, 双星轨道会在公共包层阶段圆化, 从而具有较低的轨道偏率。

黑洞或中子星之类的恒星级致密天体源于大质量的 O/B 型星, 观测发现, 大部分 (>70%) 此类天体都存在于密近双星系统中^[20]。而由于双星系统中的星风效应、公共包层演化阶段和 natal kick 效应, 都会极大地影响恒星的演化, 使得双星演化过程和单星演化过程产生巨大的差异^[21]。

在 2010 年之前, 研究的重点是高金属丰度的恒星演化, 因此当时认为 LIGO 等地面引力波天线看到的最多的引力波事件是双中子星并合^[22]。然而, 即使在 LIGO/Virgo 探测到引力波信号之前, 就有相关研究指出, 低金属丰度环境下, 可以产生质量较大的双黑洞系统, 甚至认为 LIGO/Virgo 的探测事件主要由双黑洞主导^[23-24]。LIGO/Virgo 对恒星级双致密星的探测刺激了对其前身星演化的研究。

目前, 理论预言中来自双星演化产生的并合率 ($10 \sim 300 \text{ Gpc}^{-3} \cdot \text{yr}^{-1}$) 与探测得到的事件率 (LIGO/Virgo 计算的 90% 置信区间 $12 \sim 213 \text{ Gpc}^{-3} \cdot \text{yr}^{-1}$), 吻合度已较高^[12, 25]。

双星共同演化存在一些机制, 可能会阻止双

黑洞的形成。比如, 双星系统中, 首先有一颗恒星通过超新星爆发形成黑洞, 这个过程可能会通过超新星爆发的不对称性, 引入较大的 natal kick, 有可能打破双星间的引力束缚。较强的 natal kick 甚至会将黑洞踢出星团的引力势, 所以也可能会影响动力学相互作用的双黑洞形成机制。即使双星可以在第一个黑洞形成时存活, 第二颗恒星末期会膨胀, 经历所谓公共包层阶段, 将包裹业已形成的黑洞, 并在第二颗黑洞产生之前通过摩擦与恒星核区并合。目前对于双黑洞并合信号的探测, 一定程度上排除了这些阻碍双黑洞形成、演化的机制的普遍存在性。另一方面, 现有的测量表明, GW170104 中黑洞的自旋与轨道角动量有非零夹角, 倾向于认为这一双黑洞系统并非来自双星协同演化。

双星系统中的物质吸积, 或者密近双星系统里的潮汐加速, 都能形成较高自转的恒星。快转恒星核心区域物质和外部氢包层会发生物质交换, 转动引起的不稳定性让这种混合更为有效, 恒星演化将进入化学均匀, 变得更亮更蓝。相对于无自转的恒星, 该演化途径将产生更多的氦元素。对于密近双星系统, 如果经历这种化学物质混合达到化学均匀, 恒星将在它的洛希瓣内塌缩, 避免了大量物质损失, 从而能形成质量较大 (典型质量约 50~110 M_{\odot}) 的恒星级双黑洞^[26]。这种机制形成的双黑洞系统, 具有比较接近的黑洞质量, 相同的自转方向。通常需要 (40~110) 亿年时间才并合, 因此这种并合预期在较低红移处发生。根据典型的参数估计, 并合率约为 $20 \text{ Gpc}^{-3} \cdot \text{yr}^{-1}$ 。

2.2.2 动力学相互作用模型 动力学相互作用模型下, 双黑洞在高恒星密度的环境下独立演化成黑洞, 并最终通过动力学过程形成双星。

动力学相互作用的场所通常认为有两个, 即球状星团和星系核区。在致密星团环境中 (包含球状星团或星系核心的星团), 大质量的恒星会塌缩形成黑洞。这些较重黑洞沉降并聚集到星团中心, 导致极高的黑洞数密度 ($\sim 10^6 \text{ pc}^{-3}$) 和恒星数密度。黑洞和恒星在这里频繁地进行三体散射和交换, 形成恒星级双致密星系统并最终并合^[27-28]。这种恒星级双致密星形成途径主要由动力学所驱动, 对双恒星的演化物理机制并不敏感。在质量较高的球状星团, 会产生更多的黑洞, 将增强通过动力作用形成恒星级双致密星的效率。频繁的多体散射、混沌效应和偶然接近发生的引

力波辐射等效效应, 导致这种“动力学双黑洞”会具有相对较高的轨道椭率^[29]。

整个星系中, 只有约 0.25% 的质量位于球状星团中^[30], 但相比场星, 星团中的动力学环境相当复杂, 恒星密度又极高, 大大提高了双星并合的概率。经过较短时间的演化, 大质量恒星形成黑洞等恒星级致密天体, 并通过动力学摩擦机制, 靠近星团中心, 并可以通过动力学作用, 与别的黑洞形成双星系统, 并且通过双星-单星过程和双星双星过程, 进一步缩减轨道半径, 从而缩短并合时标^[31]。

在球状星团中, 通过动力学相互作用导致的双黑洞并合率远低于 LIGO/Virgo 的观测事件率。特别地, 研究认为小质量的球状星团 ($< 10^5 M_{\odot}$) 对双黑洞并合的事件率贡献可以忽略^[31-32]。不过, 初始质量函数的不确定性会对最终计算得出的事件率有数倍的影响, 并且年轻的小质量星团中双黑洞并合率可能会极高^[33]。可以通过简单的计算估计出球状星团中双黑洞并合的上限: 假设球状星团所有的黑洞都会在一个 Hubble 时标内发生一次并合, 有:

$$R \leq \frac{1}{2} f_{\text{BH}} N_* \frac{n_{\text{GC}}}{t_{\text{Hubble}}} = 38 \text{ Gpc}^{-3} \cdot \text{yr}^{-1}, \quad (2)$$

其中 f_{BH} 是给定初始质量函数 f_{IMF} 下会演化成黑洞的恒星比例, N_* 是球状星团中的初始恒星数目, n_{GC} 是宇宙中的球状星团数密度^[34]。

星系核区的天体数密度极高, 在最接近中心大质量黑洞的附近, 数密度尖峰处的数密度甚至可以达到 $\sim 10^{10} \text{ pc}^{-3}$ ^[35]。由于中心引力势太深, 所以即使是双星-单星的引力弹射过程或超新星爆发产生的 natal kick 都无法将黑洞踢出引力势之外。这种环境下, 恒星级双致密星的形成机制主要是两体弛豫过程^[35]。大质量黑洞的存在可能偶尔会激发 Kozai-Lidov 机制, 产生更紧密的恒星级双黑洞系统。一般估计星系核区的双黑洞并合事件率为 $5 \sim 15 \text{ Gpc}^{-3} \cdot \text{yr}^{-1}$ ^[35-37]。类似以上公式, 可以估计来自星系核区的双黑洞并合率上限为 $30 \text{ Gpc}^{-3} \cdot \text{yr}^{-1}$ 。当然, 模型中还存在一定的不确定性, 如由于质量分层效应, 实际上不断会有新的黑洞从外部补充到星系核区, 因此真实的事件率有可能会超出上述估计的上限^[38-39]。

在星系核区超大质量黑洞邻近环境中, 双星的演化会受到超大质量黑洞的摄动的影响。对于高轨道倾角的双黑洞系统, 在围绕超大质量黑洞

的绕转过程中, Kozai 机制将改变双黑洞的轨道椭圆率和倾角, 使后者进入极高椭圆率的轨道运动。从而在接近近星点时, 双黑洞非常靠近并且产生非常显著的低频引力波辐射 (可被天琴或 LISA 等空间引力波天线探测)。在这样的环境中, 一些双黑洞系统可在短于 Hubble 时间就发生旋近并最终并合^[40]。超大质量黑洞周围的环境为双星的演化和并合提供了极强的“催化作用”。这种机制形成的恒星级双黑洞也会具有相对较高的轨道椭圆率。

除了星团、核区本身的动力学环境以外, 还有一些额外因素会改变双星并合率。如果恒星级双致密星所处的环境中存在大量气体, 如恒星形成区, 那么双星的角动量可以在较短时标内迅速被星周气体迅速带离, 极大的缩短并合时标^[41-42]。再如, 星团中不仅会产生双星系统, 也可能产生恒星级致密三星或四星。

这其中 Kozai-Lidov 机制会大大降低并合时标, 从而提高事件率。不过这一机制下的事件率也仅有约 $6 \text{ Gpc}^{-3} \cdot \text{yr}^{-1}$, 考虑低金属丰度的前身星会进一步提高事件率, 但仍无法解释全部并合事件^[43-45]。此外, 暗物质晕中的第一代恒星产生的大质量恒星级致密天体可能会通过动力学机制产生双星并合。但是理论预言的事件率相对较低^[41, 46]。如果假设足够高比例的暗物质晕由原初黑洞组成, 可以解释观测到的双黑洞并合率, 但这样的假设会和观测结果在其它方面产生冲突^[47]。

当前, 协同演化模型和动力学相互作用模型都可以很好地解释观测到的恒星级致密天体质量分布。要分辨两种形成机制, 主要可以通过事件率和自旋信息实现判别。当前, 动力学机制预言的双黑洞并合事件率通常在 $5 \sim 10 \text{ Gpc}^{-3} \cdot \text{yr}^{-1}$, 明显低于双星演化所预言的双黑洞并合率。另一方面, 两种模型会预言出不同的自旋分布。双星系统经历过公共包层阶段, 因此预期双黑洞的自旋方向一致, 并与轨道角动量一致。在动力学相互作用模型中, 双黑洞处于密集星体环境, 如球状星团、星系核区等区域中, 两个黑洞分别单独形成, 通过动力学相互作用形成双星, 并通过三体相互作用等机制进一步加强引力束缚。这种模型下, 黑洞的自旋方向可以任意, 近乎各项均匀。当前, LIGO/Virgo 可以测量恒星级双致密星并合对应的等效自旋 χ_{eff} , 定义为双星质量加权后自旋在轨道角动量方向的投影:

$$\chi_{\text{eff}} \equiv \frac{M_1 a_1 \cos \Theta_1 + M_2 a_2 \cos \Theta_2}{M_1 + M_2}. \quad (3)$$

协同演化模型预言了较大的 χ_{eff} , 而动力学模型则预言了均匀分布的 χ_{eff} 。在 O1, O2 观测的事件中, 限定了 $|\chi_{\text{eff}}| < 0.35$, 其实与两种主流模型都不完全一致。这一矛盾并非不可调和, 也有不少研究试图解释观测和早期理论预言的不一致, 但均需进一步观测予以检验^[48-51]。

2.2.3 原初黑洞模型 除了双星演化和动力学相互作用, 还有第三种机制可以解释 LIGO/Virgo 观测到的双黑洞并合, 那就是原初黑洞模型: 两个原初黑洞分别独立产生, 并形成双星系统。

原初黑洞可以由宇宙早期的许多不同机制产生, 如早期宇宙相变、拓扑缺陷 (宇宙弦等)、凝结分裂、泡成核、暴胀中小尺度大幅度的密度涨落等^[52-53]。

典型的原初黑洞形成过程图景中, 暴胀结束, 宇宙进入辐射主导期时, 局部密度涨落重新回到视界范围, 其巨大的密度梯度触发了引力塌缩, 甚至连早期宇宙的辐射压都无法抵抗, 最终产生了与当时视界范围内质量相当量级的原初黑洞。

在星系晕中, 可能存在两个原初黑洞通过散射、引力波辐射损失能量而束缚形成双黑洞系统, 并在哈勃时间内通过引力波辐射而并合^[54]。因此, 有研究提出可以用原初黑洞来解释 LIGO/Virgo 观测到的双黑洞并合事件^[55]。要区分一个或某些引力波事件是否来自原初黑洞还是上面其它途径, 是非常具有挑战性的。但一些特征或许会对鉴别有帮助: 比如原初双黑洞并合源的分布更接近小尺度的暗物质晕, 不大会出现在明亮星系中; 再如, 原初双黑洞并合也不大可能伴随电磁或中微子对应体。

不考虑黑洞蒸发效应的话, 今天能看到的原初黑洞的质量范围覆盖了 $10^{-18} \sim 10^6 M_{\odot}$ 。这其中, $10^{-18} \sim 10^6 M_{\odot}$ 的原初黑洞通过微引力透镜效应, 已经获得了很强的限制 (如 MACHO 和 EROS 合作组)^[56-57]; 另一方面, $10^{-18} \sim 10^6 M_{\odot}$ 的原初黑洞可以通过微波背景辐射的各向异性及超暗矮星系的观测得到很强的限制^[58-60]。因此, 目前的天文学观测中, 对 $20 M_{\odot} \leq M_{\text{PBH}} \leq 100 M_{\odot}$ 的原初黑洞 (M_{PBH} 为原初黑洞质量) 限制最弱, 通过 Eridanus II 和 Segue I 两个星团给出的限制只能在 0.2 的量级^[61-62], 而这个质量段恰恰位于人们感兴趣的大质量恒星级黑洞对应的质量范围中。

自暗物质的引力效应被观测到以来, 其物理本质至今仍然无法被实验确认^[63]。可以用来解释暗物质的理论有多, 这其中就包括了黑洞^[9], 原初黑洞的质量范围很广, 更有利于它们成为暗物质的候选者。通过对恒星级双黑洞的探测, 可以对原初黑洞占暗物质的比例 $f_{\text{PBH}} = \Omega_{\text{PBH}}/\Omega_{\text{DM}}$ 作出限制。

在原初黑洞双星充分维里化的假设下, 可以通过现有 LIGO/Virgo 的引力波观测数据, 得到 $f_{\text{PBH}} = 1$ 的限制。近年来, 更细致的研究考虑了更为复杂的物理条件, 可以得到更强的限制, 当然, 如原初黑洞质量函数等信息目前尚未确定, 所以相关的限制依旧存在一定的不确定性^[64-65]。在 $10^{-2} \sim 10^5 M_{\odot}$ 范围内对原初黑洞比例 f_{PBH} 的观测限制如图 1 所示^[3]。其中包括微引力透镜项目 EROS+MACHO, 矮星系 Eridanus II 的星团, 吸积 - 射电, 吸积 - X 射线, CMB - 普朗克卫星, CMB - FIRAS。

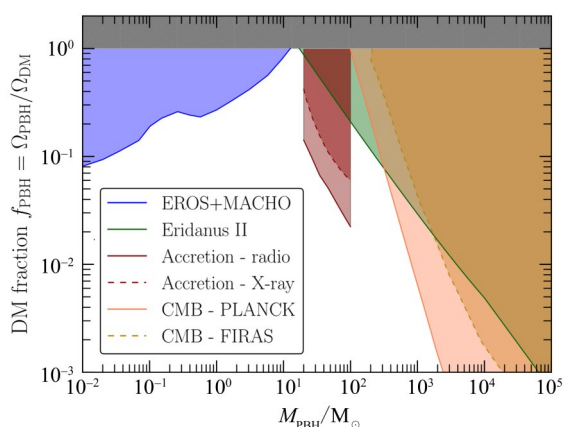


图 1 在 $10^{-2} \sim 10^5 M_{\odot}$ 范围内对原初黑洞 f_{PBH} 的观测限制^[3]

Fig. 1 Observational constraint of primordial black hole fraction on the range of $10^{-2} \sim 10^5 M_{\odot}$ ^[3]

此外, 也可以通过引力波探测对原初黑洞和恒星起源黑洞进行区别。例如, 如果观测到 $1 M_{\odot}$ 以下的黑洞, 则将很有可能来自原初黑洞。另一方面, 极高红移 $z > 40$ 的引力波事件探测也意味着对标准 Λ CDM 宇宙的违背, 也将会是原初黑洞存在的证据。

2.3 鉴别不同的双黑洞形成途径

究竟恒星级双致密星主要来源于哪一种形成途径? LIGO 和 Virgo 等地面探测器的探测结果并不能很好地区分, 因为很多双星演化历史信息在进入并合过程之前已被“抹平”。比如, 引力波辐射的圆化效应使得进入 LIGO 探测阶段的双黑洞轨道

椭圆率非常低等等, 这些对研究恒星级双致密星的形成环境和演化途径造成了极大的阻碍。

而双黑洞系统的旋近信号, 可在并合之前数月或数年就被空间引力波天线探测到。GW150914 在双黑洞并合发生 5 年之前的旋近引力波频率约为 0.016 Hz ^[66], 正好落在空间引力波天线如天琴和 LISA 的敏感频段^[67]。通过空间引力波观测, 有可能解决恒星级双致密星的起源问题。比如, 自旋-轨道耦合引起的进动效应在旋近晚期比较显著而可能被空间引力波天线探测到。空间引力波天线有足够时间获取关于轨道偏心率的信息, 从而为鉴别恒星级双致密星是起源于双星演化还是致密星团的动力学作用或其它途径提供依据^[68]。特别是, 对于银河系内的恒星级双致密星系统, 空间引力波探测能给出非常高精度的定位, 为进一步确定其起源带来决定性的信息。比如, 如果发现引力波源就在球状星团位置, 那至少这一事件极有可能起源于星团中动力学相互作用机制。

总而言之, LIGO 和 Virgo 发现的多例双黑洞并合事件带来了恒星级双黑洞是怎么形成的和高并合率两大问题, 极需要通过未来的空间引力波天线对旋近阶段产生的低频引力波进行分析, 以帮助回答这些问题。

3 恒星级双黑洞与多信使多波段天文学

包含中子星、白矮星的恒星级双致密星在并合时即能产生引力波, 也能产生电磁波, 可以同时成为引力波和电磁波观测手段的探测对象, 可为多信使天文学的发展注入巨大的动力。

双致密星旋近产生的引力波的探测率同双星的质量、距离、引力波频率以及探测器的灵敏度有关。在双致密星即将互相并合之前的几个轨道周期中, 潮汐效应会变得非常显著, 双中子星系统释放出的引力波震动频率将达到 500 Hz 以上。并合之后, 中子星遗迹的震动频率达到 1 kHz 以上, 并且可能会坍塌成黑洞。相较于双黑洞并合释放出的引力波, 详细探测双中子星释放出的引力波需要灵敏度更高的探测器。双中子星并合后, 产生的残骸可能会在高频产生震荡信号, 目前的探测器在高频灵敏度有限, 无法通过引力波深入研究双中子星并合后的物理过程, 而探测器灵敏度在 $10^{-24}/\sqrt{\text{Hz}}$ 可以在 $2 \sim 4 \text{ kHz}$ 范围内探测到 100 Mpc 外的这类过程^[69]。

2017年8月17日, LIGO/Virgo探测到了首个双中子星系统并合时产生的引力波^[70], 这是人类历史上第一次同时探测到引力波及其电磁波对应体, 为天文学观测方法带来了一次重大革新。引力波和电磁信号联合探测可以对中子星状态方程进行限制, 例如: 通过测量潮汐形变参数^[70]或TOV质量^[71]等参数来限制中子星物态、质量等(受限于信噪比, LIGO/VIRGO的探测并未对此给出很强的限定); GW170817伴随着千新星事件, 未来更灵敏的引力波、电磁波和粒子联合探测将对宇宙重元素生成的相关核物理带来重大启示; 通过更多的观测, 也将帮助人们了解双中子星并合产生相对论性喷流的物理机制。

LIGO/Virgo探测到了比预期更高的双黑洞并合事件率和更高的恒星级黑洞质量, 这有利未来空间引力波天线在双黑洞旋近阶段探测到它辐射的引力波, 有助多波段引力波天文学的实现。图2给出不同引力波探测仪器对已知引力波事件的特征强度^[72]。由此看出空间引力波探测器对高频信号更为灵敏。

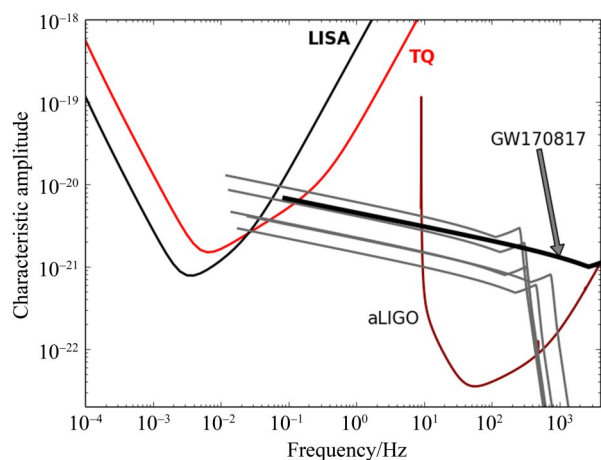


图2 多波段引力波天文学概念示意图 (黑色曲线为LISA灵敏度曲线, 红线为天琴曲线, 棕线为aLIGO设计曲线。灰色线为O1、O2探测到的双黑洞并合事件; 黑色粗线为双中子星并合事件GW170817, 所有事件均从并合前10年开始画^[72])

Fig. 2 Characteristic amplitude of the detected GW signals (Ten years before merger, binary black hole systems lie in the TianQin band. After that, the systems would evolve and eventually merge in the sensitive band of ground-based detectors^[72])

通过对相同源的观测, 可以用来交叉检查和校准地面和空间两种不同的探测器(尤其对于空间探测器特别有价值)。此外, 通过在不同的频段

上观测, 可以对恒星级双黑洞的不同演化阶段进行观测。双黑洞系统演化的每个阶段都承载着不同方面的物理信息, 需要将这些信息组合在一起, 才能掌握整个双黑洞系统的各个不同天体物理参数(包括质量、质量比、自旋和偏心率), 在这意义上, 空间和地面探测提供的信息正好互补^[73]。比如, 自旋-轨道耦合引起的进动效应在旋近晚期比较显著而可能被空间引力波天线探测到。同时, 空间引力波天线有足够时间来获取关于轨道偏心率的信息, 从而为鉴别恒星级双致密星是起源于双星演化还是致密星团的动力学作用提供依据^[74]。

在恒星级双黑洞并合前几个月观测到将具有特别重要的意义, 即可以为将要发生的并合发出预警。空间引力波探测可以精确估计穿越地面探测频段的双黑洞的一些关键参数, 包括并合时间以及源的空间方位。尽管双黑洞并合预期不会产生很强的电磁辐射, 但人们也提出了几种可能的产生电磁辐射的方案, 国际天文界正保持开放的态度并对恒星级双黑洞并合进行多波段电磁波观测。如果能够提前知道双黑洞并合的时间和空间方位, 就可以提早安排其它望远镜进行联合观测, 重要的是还可以在并合的同时进行深度搜索, 在双黑洞并合动态时间尺度上深入测量源的各种参数。

4 天琴对恒星级双黑洞的探测能力

天琴(TQ)预期能够探测到恒星级双黑洞^[75]。如图3所示, 当信噪比阈值为8时, 天琴预计能探测到大约几个恒星级双黑洞, 在多个探测器联合探测的情况下, 比如天琴双星座(TQ I + II)、天琴联合LISA(TQ+LISA)和天琴双星座联合LISA(TQ I + II +LISA), 探测数能够得到明显提升, 其中提升最大的联合探测模式是TQ I + II + LISA, 预期最多能够探测到100多个恒星级双黑洞; 当信噪比阈值提升为12时, 虽然探测数会有所减小, 但是TQ I + II +LISA依然预期最多探测到几十个恒星级双黑洞。对于并合时间为5~10年的恒星级双黑洞, 天琴单星座和多探测器联合的探测数会有所减小, 但是依然和总探测数处于一个量级。

天琴对于探测到的恒星级双黑洞的参数预期能够做出精度相当高的估计^[75]。选取在天琴观测下信噪比大于8的恒星级双黑洞为估计参数源, 如图4所示, 天琴对并合时间和空间方位的精度预期

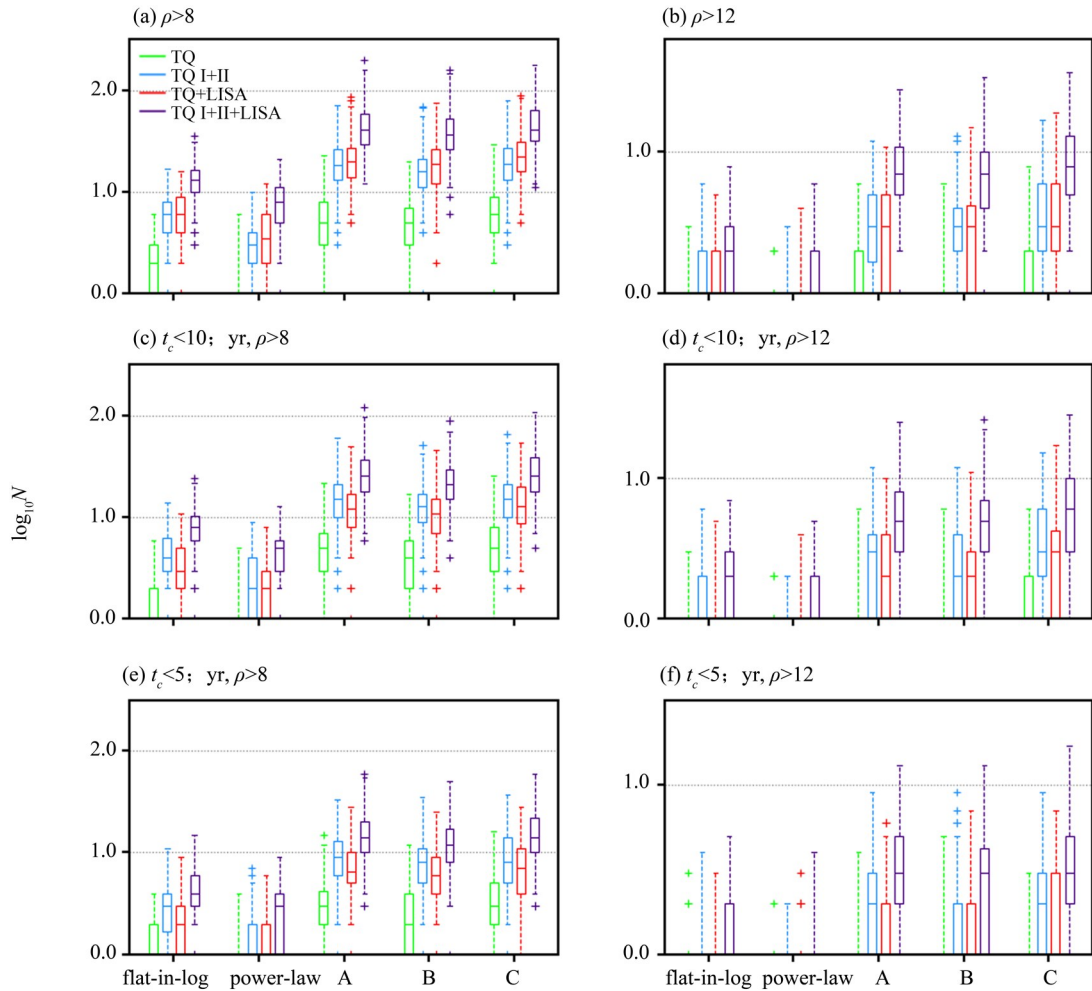


图3 不同恒星级双黑洞质量分布模型 (flat-in-log、power-law、A、B和C) 下, 天琴对恒星级双黑洞的探测数 (绿色、蓝色、红色和紫色的箱线图分别代表TQ、TQ I+II、TQ+LISA和TQ I+II+LISA的观测模式^[75])

Fig. 3 The box plots for detection number, under different mass distribution models

(Green, blue, red and purple represent detector cases of TQ, TQ I+II, TQ+LISA, and TQ I+II+LISA^[75])

能够分别定到大约 1 s 和 1 deg^2 , 因此预期能够为地面引力波探测和可能的电磁波观测提供预警。天琴对于光度距离的相对误差的估计预计大约为 20%, 再根据空间方位的精度可以计算出三维体积误差大约为 50 Mpc^3 。由于星系的平均数密度大约为 0.01 Mpc^{-3} , 因此天琴能够确定引力波事件所处的宿主星系。天琴对轨道离心率能做出相当精确的估计, 比如当基准频率为 0.01 Hz , 初始离心率为 0.01 时, 相对误差大约为 0.01% , 因此天琴预期具有根据测得的轨道离心率区分恒星级双黑洞形成机制的潜力。此外, 天琴对啁啾质量和对称质量比能够做出精确估计, 相对精度分别为 10^{-7} 和 10^{-3} 。在 TQ I+II、TQ+LISA 和 TQ I+II+LISA 各自观测下对信噪比大于 8 的恒星级双黑洞参数估计精度的结果与 TQ 的结果相近。

以上结果表明, 天琴在预期探测到恒星级双

黑洞的情况下, 能够为地面引力波探测和可能的电磁波观测提供预警, 并且能够根据测量的恒星级双黑洞的参数做出区分其形成机制等方面的科学研究。

5 总结

恒星级双致密星的研究是引力波天文时代的重要研究对象, 它们一方面是重要的引力波源, 另一方面在光学、高能等波段也有可能被观测, 两者对确定双星系统成员的基本特征都至关重要。目前对于这类双致密星系统的形成与演化依然主要存在于理论上和数值模拟上, 在观测方面仍然十分缺乏。即使理论分析中, 也对恒星晚期将产生的剧烈反应, 如超新星爆发, 会对双星系统带来怎样的变数依然有着很大的疑问。对于银河系外的双致密星系统而言, 由于其距离较远, 其引

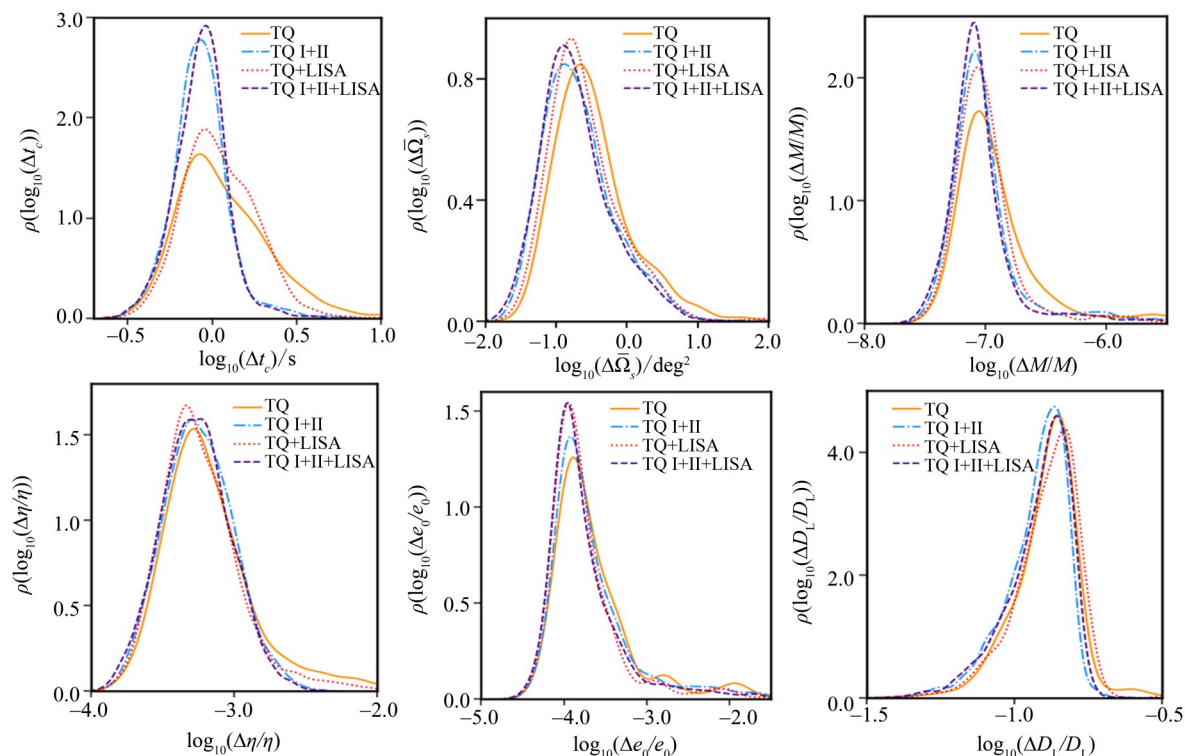


图4 参数估计精度分布图

(橙色、蓝色、红色和紫色曲线分别代表TQ、TQ I + II、TQ+LISA、TQ I + II+LISA观测模式^[75])

Fig. 4 Estimation precision distribution of different parameters

(Red solid, blue dashed line, green dash-dotted line, and orange dotted line represent TianQin, TianQin twin constellations, TianQin+LISA, and TianQin twin constellations+LISA, respectively^[75])

力波和电磁探测概率较低, 因此需要精度和灵敏度十分高的探测器。比起LISA, 天琴在高频(约1 Hz)的相对较高灵敏度可以对未来的双中子星实现更高灵敏度的探测, 同时提供更准确的参数估计结果。

综合而言, 恒星级双黑洞及其前身星的演化、合并, 在电磁观测上具有较大的困难。对应地, 对相应理论研究的开展也带来了挑战。首先, LIGO/Virgo等地面引力波天线对恒星级双黑洞并合事件的探测, 首先将恒星级双黑洞的形成机制这

一研究领域带进了研究者的视野中。而由于以天琴为例的空间引力波探测有望对偏心率、黑洞自旋等物理参数给出较为精确的限制, 将为恒星级致密双星的形成机制这一领域的深入研究带来希望。此外, 通过空间引力波探测和地面引力波探测结合的多波段引力波探测, 以及引力波探测与电磁波段观测相结合的多信使天文学研究, 在对多次引力波事例进行综合分析后, 可以对恒星级双黑洞的族群特性进行研究, 有望更深入地研究其前身星的演化和物理特性。

参考文献:

- [1] KURANOV A G, POSTNOV K A. Neutron stars in globular clusters: Formation and observational manifestations [J]. *Astronomy Letters*, 2006, 32: 393-405.
- [2] PETROVICH C, ANTONINI F. Greatly enhanced merger rates of compact-object binaries in non-spherical nuclear star clusters [J]. *The Astrophysical Journal*, 2017, 846: 146-167.
- [3] ABBOTT B P, ABBOTT R, ABBOTT T D, et al. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger [J]. *Physical Review Letters*, 2016, 116: 061102.
- [4] ABBOTT A, ABBOTT R, ABBOTT T D, et al. GWTC-1: a gravitational-wave transient catalog of compact binary mergers observed by LIGO and Virgo during the first and second observing runs [J]. *Physical Review X*, 2010, 9: 1040-1088.
- [5] ABBOTT A, ABBOTT R, ABBOTT T D, et al. GWTC-

- 2: compact binary coalescences observed by LIGO and Virgo during the first half of the third observing run [EB/OL]. <https://arxiv.org/abs/2010.14537>.
- [6] ABBOTT R, ABBOTT T, ABBOTT S, et al. GW190521: a binary black hole merger with a total mass of $150M_{\odot}$ [J]. *Physical Review Letters*, 2020, 125: 101102.
- [7] FARR W M, SRAVAN N, CANTRELL A, et al. The mass distribution of stellar-mass black holes [J]. *The Astrophysical Journal*, 2011, 741: 103–158.
- [8] COLPI M, SESANA A. Gravitational wave sources in the era of multi-band gravitational wave astronomy [EB/OL]. <https://arxiv.org/abs/1610.05309>.
- [9] BELCZYNSKI K, DOMINIK M, BULIK T, et al. The effect of metallicity on the detection prospects for gravitational waves [J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2010, 15: 138–141.
- [10] SPERA M, MAPELLI M, BRESSAN A. The mass spectrum of compact remnants from the PARSEC stellar evolution tracks [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2015, 451: 4086–4103.
- [11] BELCZYNSKI K, HOLZ D E, BULIK T, et al. The first gravitational-wave source from the isolated evolution of two stars in the 40–100 solar mass range [J]. *Nature*, 2016, 534: 512–515.
- [12] FENG J L. Dark matter candidates from particle physics and methods of detection [J]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 2010, 48: 495–545.
- [13] BELCZYNSKI K, HEGER A, GLADYSZ W, et al. The effect of pair-instability mass loss on black-hole mergers [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2016, 594: 97–106.
- [14] BARACK L, CARDOSO V, NISSANKE S, et al. Black holes, gravitational waves and fundamental physics: a roadmap [J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2019, 36: 3001–3178.
- [15] POSTNOV K A, YUNGELSON L R. The evolution of compact binary star systems [J]. *Living Reviews in Relativity*, 2014, 17: 168.
- [16] BELCZYNSKI K, HOLZ D E, BULIK T, et al. The first gravitational-wave source from the isolated evolution of two stars in the 40–100 solar mass range [J]. *Nature*, 2016, 534: 512–515.
- [17] HARTWIG T, VOLONTERI M, BROMM V, et al. Gravitational waves from the remnants of the first stars [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2016, 460: 74–78.
- [18] KUSHNIR D, ZALDARRIAGA M, KOLLMEIER J A, et al. GW150914: spin-based constraints on the merger time of the progenitor system [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2016, 462: 844–849.
- [19] MARCHANT P, LANGER N, PODSIADLOWSKI P, et al. A new route towards merging massive black holes [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2016, 588: 50–62.
- [20] SANA H, de MINK S E, de KOTER A, et al. Binary interaction dominates the evolution of massive stars [J]. *Science*, 2012, 337: 444–452.
- [21] LANGER N. Presupernova evolution of massive single and binary stars [J]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 2012, 50: 107–164.
- [22] ABADIE J, ABBOTT R, ABERNATHY M, et al. TOPICAL review: Predictions for the rates of compact binary coalescences observable by ground-based gravitational-wave detectors [J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2010, 27: 3001–3020.
- [23] VOSS R, TAURIS T M. Galactic distribution of merging neutron stars and black holes – prospects for short gamma-ray burst progenitors and LIGO/VIRGO [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2003, 342: 1169–1184.
- [24] BELCZYNSKI K, BULIK T, FRYER C L, et al. On the maximum mass of stellar black holes [J]. *The Astrophysical Journal*, 2010, 714: 1217–1226.
- [25] STEVENSON S, VIGNA-GÓMEZ A, MANDEL I, et al. Formation of the first three gravitational-wave observations through isolated binary evolution [J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 14906–14912.
- [26] MANDEL I, de MINK S E. Merging binary black holes formed through chemically homogeneous evolution in short-period stellar binaries [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2016, 458: 2634–2647.
- [27] RODRIGUEZ C L, CHATTERJEE S, RASIO F A. Binary black hole mergers from globular clusters: Masses, merger rates, and the impact of stellar evolution [J]. *Physical Review D*, 2016, 93: 4029–4050.
- [28] MILLER M C, LAUBURG V M. Mergers of stellar-mass black holes in nuclear star clusters [J]. *The Astrophysical Journal*, 2009, 692: 917–923.
- [29] BENACQUISTA M J, DOWNING J M B. Relativistic binaries in globular clusters [J]. *Living Reviews in Relativity*, 2013, 16: 4–91.
- [30] HARRIS W E, HARRIS G L, HUDSON M J. Dark matter halos in galaxies and globular cluster populations. ii. metallicity and morphology [J]. *The Astrophysical Journal*, 2015, 806: 36–49.
- [31] PARK D, KIM C, LEE H M, et al. Black hole binaries dynamically formed in globular clusters [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2017, 469: 4665–4674.
- [32] ASKAR A, SZKUDLAREK M, GONDEK-ROSIŃSKA D, et al. MOCCA-SURVEY Database – I. Coalescing binary black holes originating from globular clusters [J].

- Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2017, 464: 36–40.
- [33] BANERJEE S. Stellar-mass black holes in young massive and open stellar clusters and their role in gravitational-wave generation [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2017, 467: 524–539.
- [34] KROUPA P. On the variation of the initial mass function [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2001, 322: 231–246.
- [35] O’LEARY R M, KOCSIS B, LOEB A. Gravitational waves from scattering of stellar-mass black holes in galactic nuclei [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2009, 395: 2127–2146.
- [36] BELCZYNSKI K, ASKAR A, ARCA-SEDDA M, et al. The origin of the first neutron star – neutron star merger [J]. Astronomy and Astrophysics, 2018, 615: 91–103.
- [37] HOANG B M, NAOZ S, KOCSIS B, et al. Black hole mergers in galactic nuclei induced by the eccentric Kozai-Lidov effect [J]. The Astrophysical Journal, 2018, 856: 140–149.
- [38] GNEDIN O Y, OSTRIKER J P, TREMAINE S. Co-evolution of galactic nuclei and globular cluster systems [J]. The Astrophysical Journal, 2014, 785: 71–85.
- [39] ARCA-SEDDA M, CAPUZZO-DOLCETTA R, ANTONINI F, et al. Henize 2–10: the ongoing formation of a nuclear star cluster around a massive black hole [J]. The Astrophysical Journal, 2015, 806: 220–233.
- [40] ANTONINIAND F, PERETS H B. Secular evolution of compact binaries near massive black holes: gravitational wave sources and other exotica [J]. The Astrophysical Journal, 2012, 757: 27–41.
- [41] BELCZYNSKI K, RYU T, PERNA R, et al. On the likelihood of detecting gravitational waves from population III compact object binaries [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2017, 471: 4702–4721.
- [42] TAGAWA H, UMEMURA M. Merger of multiple accreting black holes concordant with gravitational-wave events [J]. The Astrophysical Journal, 2018, 856: 47–54.
- [43] SILSBEE K, TREMAINE S. Lidov-Kozai cycles with gravitational radiation: merging black holes in isolated triple systems [J]. The Astrophysical Journal, 2017, 836: 39–52.
- [44] ANTONINI F, TOONEN S, HAMERS A S. Binary black hole mergers from field triples: properties, rates, and the impact of stellar evolution [J]. The Astrophysical Journal, 2017, 841: 77–86.
- [45] RODRIGUEZ C L, ANTONINI F. A triple origin for the heavy and low-spin binary black holes detected by LIGO/VIRGO [J]. The Astrophysical Journal, 2018, 863: 7–24.
- [46] FANG X, THOMPSON T A, HIRATA C M. Dynamics of quadruple systems composed of two binaries: stars, white dwarfs, and implications for Ia supernovae [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2018, 476: 4234–4262.
- [47] BRANDT T D. Constraints on MACHO dark matter from compact stellar systems in ultra-faint dwarf galaxies [J]. The Astrophysical Journal Letters, 2016, 824: 31–36.
- [48] ANTONINI F, RODRIGUEZ C L, PETROVICH C, et al. Precessional dynamics of black hole triples: binary mergers with near-zero effective spin [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2018, 480: 58–62.
- [49] BELCZYNSKI K, KLENCKI J, FIELDS C E, et al. The evolutionary roads leading to low effective spins, high black hole masses, and O1/O2 rates of LIGO/Virgo binary black holes [J]. Astronomy and Astrophysics, 2020, 636: 40–144.
- [50] GARCIA-BELLIDO J, CLESSE S, FLEURY P. LIGO Lo (g) normal MACHO: primordial black holes survive SN lensing constraints [EB/OL]. <https://arxiv.org/abs/1712.06574>.
- [51] CLESSE S, GARCÍA-BELLIDO J. Seven hints for primordial black hole dark matter [J]. Physics of the Dark Universe, 2018, 22: 137–146.
- [52] SASAKI M, SUYAMA T, TANAKA T, et al. Primordial black holes—perspectives in gravitational wave astronomy [J]. Classical and Quantum Gravity, 2018, 35: 3001–3087.
- [53] GREEN A M. Primordial black holes: sirens of the early universe [EB/OL]. <https://arxiv.org/abs/1403.1198>.
- [54] BIRD S, CHOLIS I, MUÑOZ J B, et al. Did LIGO detect dark matter [J]. Physical Review Letters, 2016, 116: 1301–1305.
- [55] CARR B, KÜHNEL F, SANDSTAD M. Primordial black holes as dark matter [J]. Physical Review D, 2016, 94: 3504–3535.
- [56] ALCOCK C, ALLSMAN R A, ALVES D R, et al. MACHO Project limits on black hole dark matter in the 1–30 msolar range [J]. The Astrophysical Journal Letters, 2001, 550: 169–172.
- [57] TISSERAND P, Le GUILLOU L, AFONSO C, et al. Limits on the macho content of the galactic halo from the EROS-2 survey of the magellanic clouds [J]. Astronomy and Astrophysics, 2007, 469: 387–404.
- [58] CARR B J. Pregalactic black hole accretion and the thermal history of the universe [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1981, 194: 639–668.

- [59] QUINN D P, WILKINSON M I, IRWIN M J, et al. On the reported death of the MACHO era [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2009, 396: 11–15.
- [60] LI T S, SIMON J D, DRLICA–WAGNER A, et al (Collaboration). DES farthest neighbor: the distant milky way satellite eridanus ii [J]. *The Astrophysical Journal*, 2017, 838: 8–23.
- [61] BRANDT T D. Constraints on MACHO dark matter from compact stellar systems in ultra–faint dwarf galaxies [J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2016, 824: 31–36.
- [62] KOUSHIAPPAS S M, LOEB A. Dynamics of dwarf galaxies disfavor stellar–mass black holes as dark matter [J]. *Physical Review Letters*, 2017, 119: 1102–1106.
- [63] BERTONE G, HOOPER D. History of dark matter [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2018, 90: 45002–45087.
- [64] KAVANAGH B J, GAGGERO D, BERTONE G. Merger rate of a subdominant population of primordial black holes [J]. *Physical Review D*, 2018, 98: 3536–3550.
- [65] ALI–HAIMOUD Y. Correlation function of high–threshold regions and application to the initial small–scale clustering of primordial black holes [J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121: 1304–1308.
- [66] SESANA A. Prospects for multiband gravitational–wave astronomy after GW150914 [J]. *Physical Review Letters*, 2016, 116: 231102.
- [67] LUO J, CHEN L S, DUAN H Z, et al. TianQin: a space–borne gravitational wave detector [J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2016, 33: 5010–5041.
- [68] NISHIZAWA A, BERTI E, KLEIN A, et al. LISA eccentricity measurements as tracers of binary black hole formation [J]. *Physical Review D*, 2016, 94: 4020–4032.
- [69] MARTYNOV D, MIAO H, YANG H, et al. Exploring the sensitivity of gravitational wave detectors to neutron star physics [J]. *Physical Review D*, 2019, 99: 2004–2020.
- [70] ABBOTT B P, ABBOTT R, ABBOTT T D, et al. GW170817: measurements of neutron star radii and equation of state [J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121: 1101–1110.
- [71] MARGALIT B, METZGER B D. The Multi–messenger Matrix: the future of neutron star merger constraints on the nuclear equation of state [J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2019, 880: 15–22.
- [72] HU Y M, MEI J, LUO J. Science prospects for space–borne gravitational–wave missions [J]. *National Science Review*, 2017, 4: 683–684.
- [73] SESANA A. Multi–band gravitational wave astronomy: science with joint space– and ground–based observations of black hole binaries [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, 840: 012018.
- [74] NISHIZAWA A, SESANA A, BERTI E, et al. Constraining stellar binary black hole formation scenarios with eLISA eccentricity measurements [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2017, 465: 4375–4380.
- [75] LIU S, HU Y M, ZHANG J D, et al. Science with the TianQin observatory: Preliminary results on stellar–mass binary black holes [J]. *Physical Review D*, 2020, 101: 3027–3046.

(责任编辑 王海蓉)