

大质量双黑洞并合及其探测*

胡一鸣^{1,2}, 吴庆文³, 雷卫华³, 王炎³, 汪洋¹, 艾艳丽⁴, 申荣锋¹,
邹远川³, 刘尚飞¹, 林伟鹏¹, 范霄³, 冯文凡³, 王海天⁵, 梅健伟^{1,2}

1. 中山大学物理与天文学院, 广东 珠海 519082
2. “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
3. 华中科技大学物理学院, 湖北 武汉 430074
4. 深圳技术大学工程物理学院, 广东 深圳 518118
5. 紫金山天文台, 江苏 南京 210033

摘要: 观测表明在正常星系和活动星系核中一般存在一个百万到数十亿太阳质量的超大质量黑洞和大量的恒星级质量黑洞。同时, 中等质量黑洞存在的证据也初露端倪。在宇宙形成后的几亿年内, 观测发现一些超大质量黑洞就达到了百亿个太阳质量, 这些超大质量黑洞的形成和增长过程仍然是一个谜。在星系形成的等级结构模型中, 小星系通过不断的并合形成越来越大的星系, 其星系中心的黑洞也经历着并合和吸积过程, 逐渐形成今天观测到的不同红移处的超大质量黑洞。本文主要对黑洞基本特征、当前主要观测结果、中等质量黑洞候选体、种子黑洞以及超大质量黑洞与星系关系等做一个简单的综述, 并对天琴对宇宙中大质量双黑洞的探测能力进行评估。对于这些大质量双黑洞引力波的分析, 将可以有效帮助我们认识宇宙中大质量黑洞的特性以及超大质量黑洞的形成和演化历史。

关键词: 星系; 超大质量黑洞; 双黑洞; 引力波

中图分类号: P145.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2021) 01-0020-11

The merger of binary massive black holes and the detection capability with TianQin

HU Yiming^{1,2}, WU Qingwen³, LEI Weihua³, WANG Yan³, WANG Yang¹, AI Yanli⁴,
SHEN Rongfeng¹, ZOU Yuanchuan³, LIU Shangfei¹, LIN Weipeng¹, FAN Xiao³,
FENG Wenfan³, WANG Haitian⁵, MEI Jianwei^{1,2}

1. School of Physics and Astronomy, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China
2. 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
3. School of Physics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China
4. School of Engineering Physics, Shenzhen Technology University, Shenzhen 518118, China
5. Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Science, Nanjing 210033, China

Abstract: Observations have shown that at the center of most galaxy there is a supermassive black hole

* 收稿日期: 2020-11-11 录用日期: 2021-01-06 网络首发日期: 2021-01-18
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 (U1931203, 11703098)
作者简介: 胡一鸣 (1989年生), 男; 研究方向: 引力波天文学; E-mail: huyiming@mail.sysu.edu.cn
通信作者: 吴庆文 (1978年生), 男; 研究方向: 天体物理; E-mail: qwwu@hust.edu.cn

of millions to billions solar masses, together with a large amount of stellar mass black holes. At the same time, evidence of the existence of intermediate-mass black holes is also emerging. Within hundreds of millions of years after the formation of the universe, some supermassive black holes reached tens of billions of solar masses. The formation and growth of these supermassive black holes is still a mystery. In the hierarchical structure model of galaxy formation, small galaxies are constantly merging to form larger and larger galaxies, and the black holes at the center of galaxies also undergo a process of merger and accretion, gradually forming supermassive black holes at different redshifts. This article summarizes the basic characteristics of black holes, current observation results, intermediate-mass black hole candidates, seed black holes, and the relationship between supermassive black holes and galaxies. The detection capability with the TianQin observatory is also evaluated. The analysis of the gravitational waves of these massive black hole binaries will greatly help us to understand the characteristics of massive black holes in the universe and the history of formation and evolution of supermassive black holes.

Key words: galaxy; supermassive black holes; double black holes; gravitational wave

1 引言

1915年爱因斯坦提出了广义相对论, 1916年史瓦西在引力场球对称假设下, 得到了第一个广义相对论的精确解, 该解中存在一个奇点, 奇点外还存在一个视界, 一切物质只要落入这一区域, 它就会消失的无影无踪, 就像一个无底洞, 即所谓的“黑洞”。对于史瓦西黑洞 (Schwarzschild black hole) 而言, 视界半径大小 $R_s = 2R_g$ ($R_g = GM_{\text{BH}}/c^2$ 是引力半径, G 为万有引力常数, c 为光速, M_{BH} 为黑洞质量)。对于旋转黑洞而言, 有两个重要特征半径: 1) 黑洞视界 $R_H = (1 + (1 - a_*^2)^{1/2})R_g$, 其中 $a_* = cJ/GM_{\text{BH}}$ 为无量纲角动量; 2) 最内稳定圆轨道 R_{ms} [1], 对于无穷远下落的粒子, 以抛物线轨道靠近黑洞, 当进入最内稳定圆轨道时, 粒子将落入黑洞。这个最内稳定圆轨道大小依赖于黑洞自旋, 对于不旋转的史瓦西黑洞来说 $R_{\text{ms}} = 6R_g$, 对于极端旋转 ($a_* = 1$) 的科尔黑洞 (Kerr black hole) $R_{\text{ms}} = 1R_g$ (顺行轨道) 或 $9R_g$ (逆行轨道), 这一性质及相关的观测现象可以用来限定黑洞自旋参数。黑洞本身并不发光, 如果周围有物质被俘获, 会形成吸积盘, 吸积物质的引力能转变为热能并辐射出去。根据吸积率不同, 主要有三种主要吸积模式: ① 扁盘 (Slim Disk), 主要适用于吸积率超过或远超过爱丁顿吸积率情况; ② 标准吸积盘 (Standard Shakura-Sunyaev Disk Mdoel, 简称 SSD 盘), 主要适用于吸积率小于爱丁顿吸积率时; ③ 低辐射效率吸积流 (Radiatively Inefficient Accretion Flow), 主要存在于低吸积率黑洞系统 (如径移主导吸积流 Advection-Dom-

inated Accretion Flow, 简称 ADAF) [2]。

2016年 LIGO(Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory, 激光干涉引力波观测台) 团队宣布探测到恒星级双黑洞并合过程产生的引力波, 这不仅打开了一扇探索宇宙新窗口, 也开辟了黑洞天体物理研究的新阵地 [3]。通过多波段电磁辐射和引力波观测, 目前发现宇宙中主要存在两类黑洞。第一类是恒星级质量的小黑洞, 主要包括黑洞 X 射线双星和 LIGO 发现的引力波黑洞, 其中黑洞双星目前已经发现数十颗候选体, 其质量一般在 $5 \sim 15 M_{\odot}$ 左右 [4], LIGO 发现很多几十个太阳质量的黑洞 [3, 5]。另外一类是存在于星系中心的超大质量黑洞, 黑洞质量在 $10^6 \sim 10^{10} M_{\odot}$ 。对于 $10^2 \sim 10^6 M_{\odot}$ 的中等质量黑洞, 在一些近邻矮星系中心以及其他部分超亮 X 射线源中也有了一些初步存在的证据, 但争议非常大, 还需要深入研究。

本文中的大质量黑洞主要是相对于恒星级黑洞而言, 包括中等质量黑洞和超大质量黑洞, 主要指那些很难通过恒星过程形成的、质量范围在 $10^3 \sim 10^{10} M_{\odot}$ 的黑洞。

1.1 超大质量黑洞

类星体是 20 世纪 60 年代天文学领域四大发现之一。类星体在很小的体积内产生巨大的能量 (可达 10^{47} erg/s) [6], 这远超过星系中恒星辐射的总和, 人们逐渐认识到只有黑洞这样极端引力环境才能以较高的效率把吞噬物质的引力能转变为辐射或动能, 才可以解释类星体这种极端天文现象。随着全波段观测天文学的发展, 人们逐渐发现大部分星系都存在活动现象, 只是活动性强弱不同, 大约有 1% 的星系活动性较强, 我们称之为活动星

系。目前认为大部分星系中心都存在 $10^6 \sim 10^{10} M_{\odot}$ 的超大质量黑洞^[7]。

星系中心超大质量黑洞质量测量方法主要分为直接和间接两类, 直接方法包括测量黑洞视界大小、黑洞周围恒星或气体动力学, 间接方法通过与黑洞质量有关的一些观测量以及理论模型获取 (如黑洞吸积盘谱拟合等)。在黑洞直接测量中, 第一个比较可靠的测量应该是我们银河系中心黑洞, 其距离地球约 8.3 kpc, 地面望远镜即可以分辨部分星系中心的恒星, 并测量它们的运动轨迹。对银河系中心数十颗恒星位置进行连续近 20 年的跟踪观测, 发现这些恒星都绕着某个共同的‘点’绕转, 且速度远大于星系中其他恒星, 根据恒星质量和运动轨迹, 可以得到中心天体的质量约为 430 万倍太阳质量。在中心极小的体积内 (有一颗 S2 的恒星近心点距中心只有 120 AU, 其中 AU 为太阳到地球之间平均距离), 有如此巨大的质量, 除了黑洞目前还没有其他更令人信服的解释^[8]。人们一直渴望获得更直接的黑洞证据, 对于一些活动性比较弱的超大质量黑洞来说, 其吸积盘是光学薄的径移主导吸积流 (ADAF), 其辐射主要在亚毫米波段。文献 [9] 计算了超大质量黑洞周围等离子体的辐射后发现, 在毫米波段或亚毫米波段利用甚长基线干涉测量方法, 基本可以分辨出部分近邻星系中心超大质量黑洞视界尺度 (特别是银河系中心黑洞)^[10]。随着诸多毫米波望远镜的建成, 一个虚拟的接近地球直径大小的望远镜逐步形成, 其分辨率达到了 20 微角秒, 该分辨率几乎接近了银河系中心超大质量黑洞的视界尺度 (约为 10 个微角秒), 因此人们把这一望远镜阵列称为“视界望远镜” (Event Horizon Telescope)^[11]。除了银河系中心黑洞, M87 星系中心的超大质量黑洞质量比银河系中心黑洞质量大了近 1500 倍, 但距离远了近 2000 倍, 因此该黑洞在天空平面投影大小与银河系中心黑洞的投影大小相似。2019 年 4 月 10 日, 视界望远镜合作组公布了人类首张黑洞照片, 这次公布的对象为 M87 星系中心黑洞, 此次公布的黑洞照片除了直接帮助我们确认了黑洞的存在, 亮环特征与理论预言几乎完全一致, 因此也再一次证实了爱因斯坦的广义相对论的正确性。通过黑洞亮环大小测量得到 M87 星系中心黑洞质量为 $(6.5 \pm 0.7) \times 10^9 M_{\odot}$, 这与通过恒星速度弥散测得的黑洞质量非常吻合^[12-13]。

对于稍远的星系来说, 目前还无法直接分辨

出中心气体的运动, 特别是对于活动星系来说, 由于其辐射非常强, 直接测量中心黑洞附近的气体和恒星动力学变得更加困难。对于活动星系来说, 人们找到了一种“反响映射” (reverberation mapping) 的方法, 活动星系核中发射线主要来自宽线区 (Broad Emission Line Region) 和窄线区 (Narrow Emission Line Region), 是由于黑洞周围不同距离的气体在黑洞吸积盘照射下电离激发形成的。如果黑洞吸积盘辐射光度产生变化, 则在一定时间后, 发射线也会产生光变, 由连续谱和发射线光变的时间延迟就可以计算出发射线气体云到中心黑洞的距离, 由宽线区云的速度弥散则可以知晓其运动速度, 因此可计算出中心黑洞质量^[14-15]。

随着超大质量黑洞质量测量取得重要进展, 人们发现星系核球与中心黑洞之间存在着紧密的关系。文献 [16] 指出, M31 的中心黑洞质量大约是 M32 的 5~10 倍, 而这两者的核球光度之比约为 15, 星系总光度之比为 70。如果通过星系的质光比将核球光度转换成核球质量, 当时得出的黑洞-核球质量比为 $(< M_{\text{BH}} / M_{\text{bulge}} > = 0.0022^{+0.0017}_{-0.0009})$ 。文献 [17] 的工作采用 32 个星系样本对这一关系进行了检测, 进一步确认了黑洞质量与核球光度之间的线性相关性。真正推动星系与中心黑洞快速发展的是 $M_{\text{BH}} - \sigma$ 关系的发现^[18-19]。黑洞质量与星系核球之间的关系是理解星系演化和黑洞增长的重要途径, 还需要更加深入的研究。 $M_{\text{BH}} - \sigma$ 关系告诉我们星系中心黑洞与星系应该是共同演化的, 或许是共同增长、相互影响的, 但该过程还没有被很好的理解。

除了黑洞质量之外, 角动量或自旋是黑洞另外一个极其重要参数。近年来黑洞自旋的测量有了部分进展, 但测量的源数目依旧有限。对于一些明亮的黑洞天体 (比如类星体和高软态黑洞双星等), 黑洞吸积率较高, 吸积盘为经典的薄盘, 吸积盘中的气体沿着近圆轨道向内运动, 直到最内稳定圆轨道。可以利用最内稳定圆轨道与黑洞自旋有关的特性来限定黑洞自旋参数, 其中最主要的两种方法分别是通过吸积盘上铁发射线轮廓拟合以及吸积盘黑体谱能谱拟合^[20-23]。利用铁线反射谱轮廓来测定黑洞自旋不仅能运用于恒星级黑洞 X 射线双星, 也可以运用于超大质量黑洞的活动星系。该方法不依赖于黑洞质量及距离的测量, 仅依赖于黑洞自旋。到目前为止, 已经有十余个

恒星级黑洞与十余个活动星系中心黑洞利用该方法测定了中心黑洞自旋参数。另外一种办法就是通过拟合黑洞天体中黑体谱成分来限定吸积盘内区温度, 从而确定最内稳定圆轨道的大小。这种方法需要同时确定黑洞质量、距离以及吸积盘的倾角等物理量。由于需要精确确定吸积盘的内区温度, 这种连续谱拟合方法目前主要应用于测定部分恒星级黑洞自旋(黑体辐射主要在可观测的软 X 射线波段)^[24-25]。在 2015 年, LIGO 发现恒星级黑洞合并产生的引力波之后, 在铃宕(ring down)阶段引力波波中也含有双黑洞自旋信息, 但目前探测灵敏度还不足以限定合并前两个黑洞的自旋参量, 但合并后形成的新黑洞自旋还是可以粗略限定的^[26]。未来探测灵敏度提高后, 预期可以更好的限定合并前以及合并后黑洞的自旋。

1.2 中等质量黑洞与种子黑洞

在高红移, 光学和红外望远镜发现了一些类星体中黑洞达到了 $10^9 \sim 10^{10} M_{\odot}$, 比如星系 ULAS J1120+0641 与 SDSS J0100+2802 红移分别为 7.1 和 6.3^[27-30]。如何在宇宙诞生后的几亿年就形成如此巨大的黑洞是目前天文中最重要科学问题之一, 若仅通过吸积过程, 黑洞即使按爱丁顿吸积率吞噬物质增长, 也需要一个初期的种子黑洞, $M(t) = M_0 \exp\left(\frac{1-\eta}{\eta} \frac{t}{t_{\text{Edd}}}\right)$, $t_{\text{Edd}} = 0.45 \text{ Gyr}$ 。对于标准吸积盘 $\eta \sim 0.1$ 来说, 在红移 7 处 $10^9 \sim 10^{10} M_{\odot}$ 超大质量黑洞, 需要种子黑洞至少要达到 $M_0 = 10^2 \sim 10^5 M_{\odot}$ 才可以, 如果考虑到超爱丁顿吸积率时可能的反馈作用, 种子黑洞或许需要更大。目前理论普遍认为, 超大质量黑洞的形成与演化应该是原初种子黑洞(initial black hole seeds)不断地通过合并和气体吸积导致的^[31]。目前主流的种子黑洞主要有两种, 一种是轻种子模型(约 $10^2 M_{\odot}$), 另外一种为重种子模型(约 $10^3 \sim 10^5 M_{\odot}$)。轻种子黑洞可能是第一代恒星的产物, 这些恒星金属丰度极低, 几乎完全由氢和氦组成, 即星族 III 恒星^[32]。这些第一代恒星可能诞生于红移在 20~50 原初密度扰动场的峰值处的质量为 $10^6 \sim 10^7 M_{\odot}$ 的晕中, 其冷却过程主要是氢分子的冷却($T_{\text{vir}} > 10^3 \text{ K}$), 此时氢分子的冷却时标足够短, 晕中心区域的气体足以形成引力自束缚结构, 恒星开始形成。这种恒星的质量比现今恒星要大得多, 典型质量为几百倍太阳质量^[33-34], 这类恒星生命非常短暂, 会在百万年内形成一个黑洞。如果星族 III 恒星的质量超

过 260 倍太阳质量, 它们很可能不经过爆炸而直接因光致解离不稳定性塌缩成 100 倍太阳质量左右的黑洞^[35-36]。目前理论和观测都还不能很好的限定星族 III 恒星的质量, 比如我们不清楚一个晕中是形成一颗还是多颗恒星, 此外星族 III 恒星的质量还依赖于一些外部因素(比如 UV 背景辐射, 宇宙微波背景辐射的温度等)^[37]。一些模拟结果表明, 若在恒星形成过程中考虑更复杂的物理过程, 如湍流^[35], 辐射反馈^[38]等, 星族 III 恒星预期的质量将会更低(10~100 倍太阳质量), 因此形成 260 倍太阳以上的恒星几乎不可能, 因此对于星族 III 恒星而言, 即使直接形成一个黑洞, 上限也大概就在 $100 M_{\odot}$ 左右。当然在宇宙早期稠密的星团中, 这些初始种子黑洞可能在随机行走过程中通过超爱丁顿吸积过程迅速增长, 产生一个 $10^3 \sim 10^4 M_{\odot}$ 的重种子黑洞^[39]。重种子黑洞可能形成于更大的晕中, 通过气体直接塌缩形成^[40-41]。要发生这种过程有一些必要的条件, 比如原始气体不能过度地碎裂成小块的气体团、气体自身的角动量必须足够小。类似于轻种子黑洞模型, 这些早期大质量晕中气体金属丰度几乎为 0 或者极低, 氢分子形成, 从而气体急剧冷却, 导致晕中气体快速塌缩。如果通过合适的角动量转移机制, 这些气体可能会继续塌缩, 其中心氢或氦开始点火, 演化后期可能会塌缩成一个 $10^3 \sim 10^5 M_{\odot}$ 的黑洞。另外一种重种子模型认为种子黑洞可以由星团塌缩直接形成。恒星间动力学过程也有可能形成高红移处种子黑洞。文献[42]提出一种设想, 核球中的星团主要由第二代恒星组成, 他们依然是贫金属的, 金属丰度比太阳低 4~5 个量级, 由于它们的贫金属性, 星风造成的质量损失要比现在的恒星小的多, 这也导致了这些恒星演化末期的残留核心质量更大。在原星系盘中, 不稳定性导致气体向核心掉落, 抑制了气体碎裂成小块, 同时增加了星系中央密度, 恒星的形成随之发生, 一些致密的星团也逐渐形成, 这种星团的典型质量可达 $10^6 M_{\odot}$, 而它们的典型半径只有 1 pc^[43]。星团中的大部分恒星将在约三百万年内核塌缩并失控地相互碰撞, 最终留下约 $10^3 M_{\odot}$ 太阳质量的种子黑洞。

如果宇宙早期有种子黑洞, 那么当今宇宙中是否还残留一些早期种子黑洞? 探测近邻宇宙中的中等质量黑洞, 建立起观测样本, 分析其质量和自旋分布, 对重构超大质量黑洞的成长路线将

有关键性意义。中等质量黑洞可能存在于较小的矮星系中^[44]、极亮或者超亮 X 射线源^[45]和球状星团^[46]中。最近在矮星系 NGC 4395 中,文献^[47]利用其发射线反映映射方法确定其黑洞质量约为 $10^4 M_{\odot}$,这也是目前测定的最小的星系中心黑洞之一。另外一个比较著名的源是 POX 52,该源也有较强的活动性,通过宽发射线确定的黑洞质量约为 $10^5 M_{\odot}$ ^[48]。此外,X 射线也是探测中等质量黑洞的有效手段^[49]。这些矮星系一般具有明显 X 射线核心,且具有较强的光变,根据光变幅度和黑洞质量关系推断这些黑洞大约为 $10^5 \sim 10^6 M_{\odot}$ 。当然,无论是通过发射线还是通过 X 射线的活动性测得的这些矮星系中的黑洞都具有选择效应,或许还有许多活动性较低或者不活动的中等质量黑洞并没有被观测到。ULX (Ultraluminous X-ray Source, 极亮 X 射线源)或 HLX (Hyper-luminous X-ray Source, 超亮 X 射线源)是一类发现于河外星系非中心位置的 X 射线源,但光度可以达到 10^{39} erg/s 甚至 10^{42} erg/s 以上(即超过或远超过恒星级黑洞的爱丁顿极限),是中等质量黑洞的候选体。特别是极亮 X 射线源 HLX-1,爆发周期大约 400 天,最高光度可以超过 10^{42} erg/s, X 射线能谱中黑体谱限定及吸积盘不稳定性对应的光变周期都表明其中心黑洞质量大约为 $10^4 \sim 10^5 M_{\odot}$,因此该源是中等质量黑洞最好的候选体之一^[45, 50]。

1.3 大质量双黑洞系统

根据冷暗物质宇宙学模型,大质量星系是次级星系多次并合的结果^[51],因此在星系并合的历史长河中应该不可避免的形成双黑洞或多黑洞系统。星系并合后到双黑洞的最终并合大致经历三个阶段。首先是两个星系并合形成新的星系,双黑洞与周围物质和恒星的相互作用,逐渐靠近,此时两个黑洞的距离大概是 kpc 甚至亚 kpc 尺度。然后,两个黑洞依赖动力学摩擦丢失系统角动量,从而使轨道进一步变小达到 pc 尺度。随着双黑洞轨道变小,动力学摩擦作用变得不重要,双黑洞系统可通过抛射恒星进一步缩减轨道。但随着周围恒星被逐渐抛射掉,双黑洞靠近变得越来越困难,这就是所谓的“最终 pc 问题”^[52]。当然这一困难也可以通过双大黑洞与恒星或中心丰富的气体云等三体作用或其他一些特殊机制来解决^[53-54]。事实上,星系并合将形成非球对称的恒星分布,Yu^[55]指出考虑这一因素后,“最终 pc 问题”会被自然解决。最后,随着大质量双黑洞的演化,在

它们的距离接近 0.001 pc 的尺度后,其轨道演化就主要由引力波辐射主导,并快速演化^[56]。虽然理论上预言在许多星系中应该存在双黑洞,但观测上的证据依旧不多。极亮红外星系 NGC 6240 是较早发现的一个著名并合星系,由于星系并合导致恒星形成率非常高,Chandra X 射线卫星就观测到了两个明亮的 X 射线核,其投影距离大概在 700 pc^[57]。高分辨率的哈勃空间望远镜也探测到了一些星系中存在双黑洞的迹象,例如在紫外波段观测中发现 LBQS 0103-2573 可能是一个双活动星系核,并找到了一些两个星系并合导致的潮汐弧等证据,近几年通过双峰窄发射线以及高分辨率光学望远镜也找到了越来越多在 kpc 尺度上双活动星系核存在的证据,如果每一个活动星系核都对应一个超大质量黑洞活动,那么这些证据就表明双黑洞的存在^[58-60]。射电甚长基线干涉阵目前可以达到毫角秒分辨率,该分辨率比 Chandra X 射线波段和 Hubble 望远镜等都高两个量级以上,因此可以分辨诸多近邻星系 pc 到 kpc 尺度^[61-62]。文献^[63-64]发现一些星系中有两个射电核,这些源也是很好的双黑洞候选体。

除了上述高分辨率多波段观测给出的证据外,还有一些其他双黑洞导致的间接效应。首先是通过一些亮源的准周期光变。OJ 287 是最亮的类星体之一,早在 19 世纪 90 年代前就有光学观测,在 100 多年的观测数据中,光学波段存在大约 12 年的准周期性爆发现象。文献^[65]提出其周期性爆发是由于双黑洞导致的,小的次黑洞周期性的穿越主黑洞的吸积盘,产生扰动导致主黑洞活动产生周期性的爆发。根据观测数据,推断双黑洞质量分别为 $1.8 \times 10^{10} M_{\odot}$ 和 $1.5 \times 10^8 M_{\odot}$ 。双黑洞模型预言了多次爆发的起始时间,并得到了观测的支持^[66]。文献^[67]发现类星体 PG 1302-102 光学波段光变中有大约 1900 天的周期,如果这种周期性活动是双黑洞导致,那么两个黑洞的间距只有 0.01 pc。除了连续谱辐射发生周期性光变外,活动星系 NGC 5548 中也观测到了宽发射线轮廓、辐射等周期性变化,该源已经观测了 40 余年,它的光学连续谱和发射线辐射具有大约 14 年的周期性光变。此外,该源宽发射线存在双峰结构,且呈现同样周期的变化,其周期性光变可以利用等质量的双黑洞来解释^[68]。近邻的许多低光度活动星系中均观测到了双峰宽发射线,如果这些双峰发射是两个黑洞携带的双宽线区所致,那么这些

源中双黑洞的距离大致在亚 pc 尺度^[69-70]。除了双峰宽发射线外, 在观测中也发现了诸多双峰窄发射线源, 这些源也被认为可能是双黑洞候选体^[71-72]。文献 [73] 发现 Mrk 231 的光学紫外波段能谱比较平, 这与正常吸积盘黑体辐射不符, 但该特征与双黑洞形成的共转盘模型较为吻合, 并基于该模型计算了双黑洞的质量和距离。在一些射电源中, 射电喷流呈现特殊的 S 型或 X 型, 这种奇特的形状可能是由于双黑洞轨道的进动导致的^[74]。超大质量双黑洞系统也有可能产生潮汐瓦解事件, 即有恒星在靠近其中一个黑洞时被瓦解, 第二个大质量黑洞将会影响吸积流, 从而暂时中断发生潮汐瓦解事件黑洞的吸积过程, 其光变曲线将具有独特的间隙性“谷”的特征^[75]。因此, 潮汐瓦解事件也是探测超大质量双黑洞的有效方法之一。通过潮汐瓦解事件有望发现亚 pc 尺度的致密超大质量双黑洞系统, 它们将会通过引力波辐射而最终并合。应该指出, 上述每一种证据均还存在较多争议。

2 天琴对大质量双黑洞的探测能力评估

千禧模拟 (Millennium simulation)^[76] 是一个被广泛接受和认可的 N 体数值模拟, 通过模拟宇宙演化过程中的暗物质的演化进而得到宇宙结构的演化。宇宙学演化由千禧模拟得到, 星系的形成和演化可以由半解析模型决定。GABE (Galaxy Assembly with Binary Evolution)^[77] 是一套较完善的半解析模型, 它考虑了一套严格而又重要的星系物理机制。GABE 考虑了两种大质量黑洞的种子模型 (L-seed 和 H-seed), 但没有考虑星系并合与它们中心黑洞并合的时间延迟。实际上, 当星系并合之后, 它们的中心黑洞需要慢慢演化, 不断损失掉几乎所有的轨道角动量之后才会并合。

除了千禧模拟, EPS (Extended Press-Schechter model) 模型也可以用以描述暗物质晕的演化, 结合半解析模型去考虑星系形成和演化。EPS 是一种解析的方法, 它的优势在于质量分辨率高, 计算速度快。LISA (Laser Interferometer Space Antenna, 空间激光干涉仪) 相关分析中用到过这一方法^[78-81], 这里就不详细展开。其中, 考虑了星系并合与黑洞并合之间的时间延迟的重种子模型命名为 Q3_d, 没有考虑此时间延迟的轻、重种子模型分别命名为 pop III、Q3_nod。

千禧模拟中的红移上限为 12, 而在 EPS 模型中, 这一上限可以更大。而且, EPS 模型中大质量黑洞并合路径更加易于理解, 它们的质量随着宇宙的演化而不断增加。此外, EPS 中的三个模型也有明显的区别, pop III 模型中预言的并合率最高的位置位于红移 5~10, 且质量位于低质量端; Q3_d 模型中预言的并合率最高的位置位于红移 $z < 10$ 处; Q3_nod 预言的并合率贡献分布则较为均匀。

根据文献 [82] 的研究, 引力波信号的信噪比 ρ 可以由下面的式子来计算

$$\rho \equiv (hh)^{1/2}, \quad (1)$$

其中内积 $(h_1|h_2)$:

$$(h_1|h_2) \equiv 2 \int_{f_{\text{low}}}^{f_{\text{max}}} df \frac{\bar{h}_1^*(f)\bar{h}_2(f) + \bar{h}_2^*(f)\bar{h}_1(f)}{S_n(f)}. \quad (2)$$

根据后牛顿近似分析, 可以得到双黑洞绕转某个时刻的频率:

$$f_{\text{low}} = (256/5)^{3/8} \frac{1}{\pi} \mathcal{M}_z^{-5/8} (t_c - t)^{-3/8}. \quad (3)$$

然后通过 (3) 可以得到内积定义 (2) 中的积分下限 f_{low} , 对于其积分上限, 可以采用 $f_{\text{max}} = \infty$, 而 $S_n(f)$ 来自于探测器的灵敏度曲线。对于多个探测器对同一个引力波信号的总信噪比等于它们各自信噪比的平方和开根号。

当计算天琴大质量双黑洞事件探测率时, 我们考虑了天琴间歇性工作的情形, 即“工作三个月+休息三个月”的模式, 具体如下:

$$\rho^2 = 4 \sum_i \int_{f_{\text{lo}}^i}^{f_{\text{hi}}^i} df \frac{h(f)h^*(f)}{S_n(f)}. \quad (4)$$

并合的时间是在 $t_c \in U[0, 5]$ 年的范围内随机取值, 并且总是可以假设天琴在运行 5 年的前三个月里是工作的, 结合方程 (3) 就可以确定对应波形的任意频段 $f_{\text{lo}}^i - f_{\text{hi}}^i$ 内天琴的工作状态。

当引力波信号的信噪比大于某个临界值 (一般为 8) 时, 认为它是可以被探测到的。对于上文提到的各个模型, 根据模型本身的数据各随机生产了 200 组天琴运行 5 年时间内所发生的并合事例。对于每一组数据, 都包含了并合时源的质量、红移等信息, 而并合时刻都是在均匀分布的五年时间内随机取值的。然后分别计算每组数据得到的天琴对大质量双黑洞的探测率, 最后 200 组结果相加取平均。由于并合信号主要贡献在最后的并合阶段, 或者说最后并合的一个星期以内, 所以不需要考虑在天琴关机之后才并合的事例。此外, 本工作还参考文献 [83] 中计算探测率的方

法计算了各模型的探测率, 结果与这里采用的方法相一致。

表 1 由 5 个模型给出了大质量双黑洞事件率及探测率, 分别考虑了天琴构型 I 和构型 I + II 的情况, 而且考虑了天琴实际的工作周期, 并计算了各模型探测率在事件率中的占比情况。表 1 中, 第一列为五个模型的事件率, 第二列为构型 I 的探测率, 第三列是构型 I + II 的探测率。其中构型 I 是指一组天琴卫星 (三颗卫星组成等边三角形), 在这种构型下, 天琴每工作三个月则需要中断三

个月。构型 II 设计的工作周期则刚好弥补构型 I 的间歇期, 因此构型 I + II 指的是两组天琴卫星。通过对比不难发现, 构型 I + II 相对于构型 I 在探测率上约有两倍的提升, 而且对于重种子模型, 构型 I + II 几乎可以观测到全宇宙各处的大质量双黑洞事件。此外, 不同模型计算结果的区别在量级上可以达到约 3 量级的差别, 这是由于千禧模拟的质量分辨率不足以及我们对星系和中心黑洞的演化认识上的不足共同导致的结果。

表 1 五个模型的大质量双黑洞事件率及探测率

Table 1 Event rate and detection rate of massive double black holes of five models

模型	事件率/年	构型 I		构型 I + II	
		探测率/年	探测占比/%	探测率/年	探测占比/%
L-seed	2.57	0.08	3.1	0.162	6.3
H-seed	2.57	1.055	41.1	1.642	63.9
Pop III	174.70	10.58	6.1	22.60	12.9
Q3_d	8.18	4.42	54.0	8.06	98.5
Q3_nod	122.44	58.96	48.2	118.12	96.5

天文学上, 引力波源的参数至关重要, 研究引力波探测器探测到的信号对于源参数的估计能力的方法主要有: 费歇尔矩阵和贝叶斯分析。我们选取了比较常用、快速, 同时也是一种高信噪比下近似的方法: 费歇尔矩阵法^[82]。在另外一个相关的工作中, 采用了 3 PN 的波形并且考虑无进动的自旋以及一阶离心率的影响, 对单个天琴迈克尔逊引力波探测器进行了一系列的参数估计分析^[84]。关于参数估计能力, 我们考虑了两种情况。首先是高红移的双黑洞, 它们还是种子黑洞, 处于宇宙早期, 然后分析天琴对于此类源的参数估计能力 (主要是对质量以及光度距离的估计能力), 结果表明天琴将有助于区分种子模型。另一种情况是位于红移 ~ 2 处并合率较高的啁啾质量主要集中在 $10^3 \sim 10^7 M_{\odot}$ 的源, 这类源事件率占比较高, 我们计算并分析了天琴对这种源在并合前约 24 h 之前的引力波信号参数估计能力, 结果表明天琴和地面电磁波段进行多信使联合观测前景较好。

3 结 语

过去 20 年, 星系中心超大质量黑洞质量测量、中心黑洞与星系关系等相关研究取得了突破性进展。这些发现也提出了系列新的问题, 规划中的

系列望远镜为下一个 10 年甚至 20 年与黑洞相关的研究提供了更大的机遇。特别值得一提的是, 结合大黑洞引力波分析, 将进一步帮助我们理解黑洞和星系演化的关键信息, 比如:

1) 红移 $z > 6$ 的早期宇宙中超大质量黑洞是如何形成的? 为什么可以增长的这么快?

2) 宇宙中不同红移处超大黑洞质量分布与自旋分布? 其分布如何反映黑洞演化历史? 高红移星系中星系、近邻伪核球星系中核球与超大质量黑洞质量关系是否符合其他星系中发现的关系?

3) 星系并合历史如何? 星系并合如何导致了黑洞的并合? 双黑洞是通过什么样的机制逐渐靠近并最终并合的?

4) 黑洞吸积和喷流等活动是否以及如何影响黑洞的增长甚至星系和宇宙大尺度结构?

5) 宇宙早期是否存在种子黑洞? 近邻宇宙中是否存在中等质量黑洞? 若有这些中等质量黑洞, 是否是早期宇宙种子黑洞遗留到今天的?

6) 我们的宇宙如何演化? 通过空间引力波探测计划将会给宇宙学参数限定带来哪些新的突破^[85]?

7) 利用双大黑洞引力波可以对理解黑洞无毛定理带来哪些新限定?

本文对大质量双黑洞的物理性质做了一个简

短的回顾, 并结合天琴计划讨论了未来的空间引力波探测对于大质量双黑洞相关的基础物理问题、以及引力波天体物理问题等带来的启迪。随着下一代 30~40 m 级地基光学望远镜、LSST 巡天望远镜 (Large Synoptic Survey Telescope, 大口径全天巡视望远镜)、JWST (James Webb Space Telescope, 韦布空间望远镜) 等空间光学望远镜、超

高灵敏度的 X 射线望远镜和平方公里射电望远镜, 特别是天琴、LISA 等空间引力波望远镜的投入运行, 将可能直接探测到宇宙早期种子黑洞的电磁信号与引力波信号, 这些设备将为理解宇宙中黑洞的分布、黑洞的形成和演化、黑洞与星系关系、宇宙学和黑洞物理等提供强大支撑^[86]。

参考文献:

- [1] BARDEEN J M, PRESS W H, TEUKOLSKY S A. Rotating black holes: locally nonrotating frames, energy extraction, and scalar synchrotron radiation [J]. *The Astrophysical Journal*, 1972, 178: 347-370.
- [2] YUAN F, NARAYAN R. Hot accretion flows around black holes [J]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 2014, 52: 529-588.
- [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 (6) : 061102.
- [4] ZHANG S N. Black hole binaries and microquasars [J]. *Frontiers of Physics*, 2013, 8: 630-660.
- [5] ABBOTT R, ABBOTT T D, ABRAHAM S, et al. Population properties of compact objects from the second LIGO -Virgo gravitational-wave transient catalog [EB/OL]. <https://arxiv.org/abs/2010.14533>.
- [6] NETZER H. Bolometric correction factors for active galactic nuclei [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2019, 488(4): 5185-5191.
- [7] KORMENDY J, HO L C. Coevolution (or not) of supermassive black holes and host galaxies [J]. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2013, 51: 511-653.
- [8] GENZEL R, EISENHAUER F, GILLESSEN S. The galactic center massive black hole and nuclear star cluster [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2010, 82: 3121-3195.
- [9] FALCKE H, MELIA F, AGOL E. Viewing the shadow of the black hole at the galactic center [J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2000, 528: L13-L16.
- [10] YUAN Y F, CAO X, HUANG L, et al. Images of the radiatively inefficient accretion flow surrounding a Kerr black hole: application in Sgr A [J]. *The Astrophysical Journal*, 2009, 699: 722-731.
- [11] AKIYAMA K, ALBERDI A, ALEF W, et al (The Event Horizon Telescope Collaboration). First M87 event horizon telescope results. II. array and instrumentation [J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2019, 875(1): L2.
- [12] AKIYAMA K, ALBERDI A, ALEF W, et al. The event horizon telescope collaboration. first m87 event horizon telescope results. I. the shadow of the supermassive black hole [J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2019, 875(1): L1.
- [13] GHEZ A M, KLEIN B L, MORRIS M, et al. High proper-motion stars in the vicinity of sagittarius A*: evidence for a supermassive black hole at the center of our galaxy [J]. *The Astrophysical Journal*, 1998, 509(2) : 678-686.
- [14] PETERSON B M. Reverberation mapping of active galactic nuclei [J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 1993, 105: 247.
- [15] BENTZ M C, KATZ S. The AGN black hole mass database [J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2015, 127: 67.
- [16] DRESSLER A, RICHSTONE D O. Stellar Dynamics in the nuclei of M31 and M32: evidence for massive black holes [J]. *The Astrophysical Journal*, 1988, 324: 701.
- [17] MAGORRIAN J, TREMAINE S, RICHSTONE D, et al. The demography of massive dark objects in galaxy centers [J]. *The Astronomical Journal*, 1998, 115: 2285-2305.
- [18] GEBHARDT K, BENDER R, BOWER G, et al. A relationship between nuclear black hole mass and galaxy velocity dispersion [J]. *The Astrophysical Journal*, 2000, 539: L13-L16.
- [19] FERRARESE L, MERRITT D. A fundamental relation between supermassive black holes and their host galaxies [J]. *The Astrophysical Journal*, 2000, 539: L9-L12.
- [20] FABIAN A C, VAUGHAN S, NANDRA K, et al. A long hard look at MCG-6-30-15 with XMM-Newton [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2002, 335: L1-L5.

- [21] BRENNEMAN L W, REYNOLDS C S. Constraining black hole spin via X-Ray spectroscopy [J]. *The Astrophysical Journal*, 2006, 652: 1028–1043.
- [22] CACKETT E M, ZOGHBI A, REYNOLDS C, et al. Modelling the broad Fe K α reverberation in the AGN NGC 4151 [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2014, 438: 2980–2994.
- [23] BRENNEMAN L W, REYNOLDS C S, NOWAK M A, et al. The spin of the supermassive black hole in NGC 3783 [J]. *The Astrophysical Journal*, 2011, 736: 103.
- [24] MCCLINTOCK J E, SHAFEE R, NARAYAN R, et al. The spin of the near-extreme Kerr black hole GRS 1915+105 [J]. *The Astrophysical Journal*, 2006, 652: 518–539.
- [25] GOU L, MCCLINTOCK J E, REID M J, et al. The extreme spin of the black hole in Cygnus X-1 [J]. *The Astrophysical Journal*, 2011, 742: 85.
- [26] ABBOTT R, ABBOTT T D, ABRAHAM S, 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/2010.14527>.
- [27] REYNOLDS C S. Observing black holes spin [J]. *Nature Astronomy*, 2019, 3: 41–47.
- [28] FAN X, STRAUSS M A, RICHARDS G T, et al. A survey of $z > 5.7$ quasars in the Sloan Digital Sky Survey. IV. discovery of seven additional quasars [J]. *The Astronomical Journal*, 2006, 131: 1203–1209.
- [29] BOLTON J S, HAEHNELT M G, WARREN S J, et al. How neutral is the intergalactic medium surrounding the redshift $z = 7.085$ quasar ULAS J1120+0641? [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2011, 416: L70–L74.
- [30] WU X B, WANG F, FAN X, et al. An ultraluminous quasar with a twelve-billion-solar-mass black hole at redshift 6.30 [J]. *Nature*, 2015, 518: 512–515.
- [31] VOLONTERI M. The formation and evolution of massive black holes [J]. *Science*, 2012, 337: 544.
- [32] MADAU P, REES M J. Massive black holes as population III remnants [J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2001, 551: L27–L30.
- [33] COUCHMAN H M P, REES M J. Pregalactic evolution in cosmologies with cold dark matter [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1986, 221: 53–62.
- [34] BOND J R. Massive objects and the first stars [M]. *Astrophysics and Space Science Library*, 1984.
- [35] CLARK P C, GLOVER S C O, KLESSEN R S, et al. Gravitational fragmentation in turbulent primordial gas and the initial mass function of population III stars [J]. *The Astrophysical Journal*, 2011, 727: 110.
- [36] HEGER A, WOOSLEY E S. The nucleosynthetic signature of population III [J]. *The Astrophysical Journal*, 2002, 567: 532–543.
- [37] TRENTI M, STIAVELLI M. Formation rates of population III stars and chemical enrichment of halos during the reionization era [J]. *The Astrophysical Journal*, 2009, 694: 879–892.
- [38] STACY A, GREIF T H, BROMM V. The first stars: mass growth under protostellar feedback [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2012, 422: 290–309.
- [39] DEVECCHI B, VOLONTERI M. Formation of the first nuclear clusters and massive black holes at high redshift [J]. *The Astrophysical Journal*, 2009, 694: 302–313.
- [40] HAEHNELT M G, REES M J. The formation of nuclei in newly formed galaxies and the evolution of the quasar population [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1993, 263: 168–178.
- [41] LOEB A, RASIO F A. Collapse of primordial gas clouds and the formation of quasar black holes [J]. *The Astrophysical Journal*, 1994, 432: 52.
- [42] DEVECCHI B, VOLONTERI M. Formation of the first nuclear clusters and massive black holes at high redshift [J]. *The Astrophysical Journal*, 2009, 694: 302–313.
- [43] DEVECCHI B, VOLONTERI M, ROSSI E M, et al. High-redshift formation and evolution of central massive objects – II. The census of BH seeds [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2012, 421: 1465–1475.
- [44] GREENE J E, HOL C. A new sample of low-mass black holes in active galaxies [J]. *The Astrophysical Journal*, 2007, 670: 92–104.
- [45] WU Q, CZERNY B, GRZEDZIELSKI M, et al. The universal "heartbeat" oscillations in black hole systems across the mass-scale [J]. *The Astrophysical Journal*, 2016, 833: 79.
- [46] PERERA B B P, STAPPERS B W, LYNE A G, et al. Evidence for an intermediate-mass black hole in the globular cluster NGC 6624 [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2017, 468: 2114–2127.
- [47] WOO J H, CHO H, GALLO E, et al. A 10,000-solar-mass black hole in the nucleus of a bulgeless dwarf gal-

- axy [J]. *Nature Astronomy*, 2019, 3: 755–759.
- [48] BARTH A J, HOL C, RUTLEDGE R E, et al. POX 52: A dwarf seyfert 1 galaxy with an intermediate-mass black hole [J]. *The Astrophysical Journal*, 2004, 607: 90–102.
- [49] KAMIZASA N, TERASHIMA Y, AWAKI H. A new sample of candidate intermediate-mass black holes selected by X-ray variability [J]. *The Astrophysical Journal*, 2012, 751: 39.
- [50] DAVIS S W, NARAYAN R, ZHU Y, et al. The cool accretion disk in ESO 243–49 HLX-1: further evidence of an intermediate-mass black hole [J]. *The Astrophysical Journal*, 2011, 734: 111.
- [51] SPRINGEL V. The cosmological simulation code GADGET-2 [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2005, 364: 1105–1134.
- [52] BEGELMAN M C, BLANDFORD R D, REES M J. Massive black hole binaries in active galactic nuclei [J]. *Nature*, 1980, 287: 307–309.
- [53] GOICOVIC F G, SESANA A, CUADRA J, et al. Infalling clouds on to supermassive black hole binaries – II. Binary evolution and the final parsec problem [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2017, 472: 514–531.
- [54] GUALANDRIS A, READ J I, DEHNEN W, et al. Collisionless losscone refilling: there is no final parsec problem [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2017, 464: 2301–2310.
- [55] YU Q J. Evolution of massive binary black holes [J]. *Monthly Notices of The Royal Astronomical Society*, 2002, 331(4): 935–958.
- [56] TREMMEL M, GOVERNATO F, VOLONTERI M, et al. Dancing to CHANGA: a self-consistent prediction for close SMBH pair formation time-scales following galaxy mergers [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2018, 475: 4967–4977.
- [57] KOMOSSA S, BURWITZ V, HASINGER G, et al. Discovery of a binary active galactic nucleus in the ultraluminous infrared galaxy NGC 6240 using chandra [J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2003, 582: L15–L19.
- [58] WANG J M, CHEN Y M, HU C, et al. Active galactic nuclei with double-peaked narrow lines: are they dual active galactic nuclei? [J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2009, 705: L76–L80.
- [59] HUANG Y, LIU X W, YUAN H B, et al. HST and LAMOST discover a dual active galactic nucleus in J0038+4128 [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2014, 439: 2927–2932.
- [60] LIU X, GUO H, SHEN Y, et al. Hubble space telescope wide field camera 3 identifies an $r_p = 1$ Kpc dual active galactic nucleus in the minor galaxy merger SDSS J0924+0510 at $z = 0.1495$ [J]. *The Astrophysical Journal*, 2018, 862: 29.
- [61] AN T, MOHAN P, FREY S. VLBI studies of DAGN and SMBHB hosting galaxies [J]. *Radio Science*, 2018, 53: 1211–1217.
- [62] YANG X, YANG J, PARAGI Z, et al. NGC 5252: a pair of radio-emitting active galactic nuclei? [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2017, 464: L70–L74.
- [63] RODRIGUEZ C, TAYLOR G B, ZAVALA R T, et al. A compact supermassive binary black hole system [J]. *The Astrophysical Journal*, 2006, 646: 49–60.
- [64] KHARB P, LAL D V, MERRITT D. A candidate sub-parsec binary black hole in the Seyfert galaxy NGC 7674 [J]. *Astronomy Nature*, 2017, 1: 727–733.
- [65] LEHTO H J, VALTONEN M J. OJ 287 outburst structure and a binary black hole model [J]. *The Astrophysical Journal*, 1996, 460: 207.
- [66] DET L, GOPAKUMAR A, VALTONEN M, et al. The unique blazar OJ 287 and its massive binary black hole central engine [J]. *Universe*, 2019, 5: 108.
- [67] GRAHAM M J, DJORGOVSKI S G, STERN D, et al. A possible close supermassive black-hole binary in a quasar with optical periodicity [J]. *Nature*, 2015, 518: 74–76.
- [68] LI Y R, WANG J M, HO L C, et al. Spectroscopic indication of a centi-parsec supermassive black hole binary in the galactic center of NGC 5548 [J]. *The Astrophysical Journal*, 2016, 822: 4.
- [69] TANG S, GRINDLAY J. The quasar SDSS J153636.22+044127.0: a double-peaked emitter in a candidate binary black hole system [J]. *The Astrophysical Journal*, 2009, 704: 1189–1194.
- [70] WANG J M, SONG S Y, LI Y R, et al. Kinematic signatures of reverberation mapping of close binaries of supermassive black holes in active galactic nuclei [J]. *The Astrophysical Journal*, 2018, 862: 171.
- [71] LIU X, GREENE J E, SHEN Y, et al. Discovery of four kpc-scale binary active galactic nuclei [J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2010, 715: L30–L34.
- [72] COMERFORD J M, NEVIN R, STEMMA A, et al. The origin of double-peaked narrow lines in active galactic

- nuclei. IV. association with galaxy mergers [J]. *The Astrophysical Journal*, 2018, 867: 66.
- [73] YAN C S, LU Y, DAI X, et al. A probable milli-parsec supermassive binary black hole in the nearest quasar Mrk 231 [J]. *The Astrophysical Journal*, 2015, 809: 117.
- [74] DENNWT-THORPE J, SCHEUER P A G, LAING R A, et al. Jet reorientation in active galactic nuclei: two winged radio galaxies [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2002, 330: 609–620.
- [75] LIU F K, LI S, CHEN X. Interruption of tidal-disruption flares by supermassive black hole binaries [J], *The Astrophysical Journal Letters*, 2009, 706: L133–L137.
- [76] SPRINGEL V, WHITE S D M, JENKINS A, et al. Simulations of the formation, evolution and clustering of galaxies and quasars [J]. *Nature*, 2005, 435(7042): 629–636.
- [77] KLEIN A, BARAUSSE E, SESANA A, et al. Science with the spacebased interferometer elisa: supermassive black hole binaries [J]. *Physical Review D*, 2016, 93: 024003.
- [78] JIANG Z, WANG J, GAO L, et al. Gabe: galaxy assembly with binary evolution [EB/OL]. <https://arxiv.org/abs/1904.11224>.
- [79] DVORKIN I, BARAUSSE E. The nightmare scenario: measuring the stochastic gravitational wave background from stalling massive black hole binaries with pulsar timing arrays [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2017, 470(4): 4547–4556.
- [80] ANTONINI F, BARAUSSE E, SILK J. The coevolution of nuclear star clusters, massive black holes, and their host galaxies [J]. *The Astrophysical Journal*, 2015, 812(1):72.
- [81] LUO J, CHEN L S, DUAN H Z, et al. TianQin: a space-borne gravitational wave detector [J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2016, 33(3): 035010.
- [82] WANG H T, JIANG Z, SESANA A, et al. Science with TianQin: preliminary results on massive black hole binaries [J]. *Physical Review D*, 2019, 100: 043003.
- [83] SALCIDO J, BOWER R G, THEUNS T, et al. Music from the heavens—gravitational waves from supermassive black hole mergers in the eagle simulations [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2016, 463(1): 870–885.
- [84] FENG W F, WANG H T, HU X C, et al. Preliminary study on parameter estimation accuracy of supermassive black hole binary inspirals for tianqin [J]. *Physical Review D*, 2019, 99:123002.
- [85] WANG L F, ZHAO Z W, ZHANG J F, et al. A preliminary forecast for cosmological parameter estimation with gravitational-wave standard sirens from TianQin [EB/OL]. <https://arxiv.org/abs/1907.01838>.
- [86] SHI C, BAO J, WANG H, et al. Science with TianQin: preliminary results on testing the no-hair theorem with ringdown signals [EB/OL]. <https://arxiv.org/abs/1902.08922>.

(责任编辑 王海蓉)