

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2015.01.04

空间激光干涉引力波探测与 早期宇宙结构形成

龚雪飞¹, 徐生年¹, 袁业飞², 白 珊³, 边 星^{1,4}, 曹周键^{1,4,5,6},
陈葛锐⁷, 董 鹏^{1,8}, 高天舒⁹, 高 伟^{1,4}, 黄双林⁹, 李玉龙⁹,
刘 影^{4,10}, 罗子人¹¹, 邵明学^{8,12}, 孙宝三^{8,13}, 唐文林^{1,4},
于 品¹⁴, 徐 鹏^{8,15}, 臧云龙^{1,4}, 张海鹏⁹, 刘润球^{1,4,5,6,8}

(1. 中国科学院 数学与系统科学研究院, 北京 100190; 2. 中国科学技术大学 天文学系, 合肥 230026;
3. Theoretisch-Physikalisches Institut, Friedrich-Schiller-Universität Jena, D-07743 Jena, Germany;
4. 中国科学院大学, 北京 100049; 5. 中国科学院 数学与系统科学研究院 计算数学国家重点实验室, 北京
100190; 6. 中国科学院 理论物理研究所 理论物理国家重点实验室, 北京 100190; 7. 北京工业大学 应
用数理学院, 北京 100124; 8. 中国科学院 晨兴数学中心, 北京 100190; 9. 首都师范大学 数学系, 北京
100089; 10. 河南大学 数学系, 开封 475001; 11. 中国科学院 力学研究所, 北京 100190; 12. 河南
理工大学, 焦作 454000; 13. 华中科学技术大学 理学院, 武汉 430074; 14. 清华大学 数学科学中心, 北
京 100083; 15. 中国科学院 理论物理研究所, 北京 100190)

摘要: 空间引力波探测是研究宇宙早期恒星演化和星系形成、黑洞和星系的共同成长等天文学和宇宙学重大问题的一条重要可能途径。经过两期科学院先导科技专项空间科学预研究课题的开展, 通过权衡技术的可行性与科学的前瞻性, 选择以高红移开始的中至大质量双黑洞并合系统、星团等稠密动力学环境中涉及中等质量黑洞的双黑洞引力波波源为主要科学目标, 给出了我国毫米至赫兹频段空间引力波探测任务计划的初步设计。以该任务设计建议为依据, 简要介绍空间引力波探测及其作为一种新的天文观测手段的科学内涵, 以及我国空间引力波探测任务设计的科学目标和探测潜力。

关键词: 引力波; 冷暗物质等级结构形成模型; 中等质量黑洞; 双黑洞并合

中图分类号: P142.8+4 **文献标识码:** A

收稿日期: 2014-08-09; 修回日期: 2014-10-20

资助项目: 中国科学院战略性先导科技专项“空间科学预先研究项目”课题(XDA04070400); 国家自然科学基金(11305255, 11171329); 海洋公益性行业专项(201105032); 科学与工程计算国家重点实验室开放课题; 理论物理国家重点实验室开放课题(Y3KF281CJ1)

通讯作者: 刘润球, lau@amss.ac.cn

1 引言

随着电磁波各波段天文观测手段的不断发展,当今的天文学和宇宙学已经将人类的触角逐渐带向宇宙早期,观测和理论天体物理的研究也达到前所未有的广度和深度。如何理解当今宇宙中丰富结构的来源:第一代恒星的形成与演化、早期星系的形成、星系和黑洞在宇宙学尺度的共同演化历史、暗物质与暗能量的本质及其在宇宙演化中扮演的角色等,成为未来几十年天体物理学和宇宙学发展的主导方向^[1],是国内外众多已在运行和正在发展建造的各类大型地面和空间望远镜(TMT、GMT、JWST、EUCLID、ALMA、SKA、FAST、LSST、21cm天文学天线阵列等)的主要研究目标与科学驱动。

观测发现,正常星系和活动星系中心均含有超大质量黑洞,并且这些星系核球中恒星的速度弥散与星系中心超大质量黑洞的质量存在比较紧密的关联,即 $M - \sigma$ 关系,这是 20 世纪末至 21 世纪初天文观测上最重要的发现之一^[2-4]。 $M - \sigma$ 关系揭示星系和其中心的黑洞具有共同演化的历史。对红移大于 6 处类星体的发现,表明宇宙在只有现在 1/10 年龄处时,其中就已经存在着和当今局域宇宙中最大质量的黑洞质量相当的天体,并且这些活动星系核所处的星系和今天的大质量星系一样成熟^[5-7],这对超大质量黑洞的形成以及宇宙早期的高对比度密度涨落的产生给出了重要的限制,也提供了宇宙再电离发生的证据。同时,多波段特别是高能 X 射线和红外的观测,给出了超大质量黑洞被遮掩阶段的生长过程重要的信息。深入研究超大质量黑洞的形成和演化,是天文观测和理论研究的热点之一。

宇宙微波背景辐射的观测结果显示,宇宙再复合(recombination, $z = 1100 \sim 1200$)后在均匀的背景上存在着 $1/10^5$ 的能量涨落。引力不稳定性导致早期宇宙中这些密度大的地方坍缩聚集,第一代暗物质晕大约在 $z = 20 \sim 30$ 处形成,其中的气体最终经过分子 H_2 的冷却、分裂、结块,从而形成宇宙中的第一代恒星^[8,9]。按照冷暗物质等级成长模型,我们现在的星系结构及星系中心的超大质量黑洞,是由再电离前的这种密度涨落演化而来的:小质量的亚星系结构先形成,之后再不断地通过并合形成越来越大的结构^[10-12]。在这个过程中,星系中心如果存在黑洞,这些黑洞将由暗物质晕和其宿主星系不断经历主并合过程吸积合并,从小到大形成现在观测到的在不同红移处的超大质量黑洞^[11-19]。

种子黑洞的形成和演化具有重要的宇宙学意义。SDSS 观测到红移高于 6 的、由质量约为 $10^9 M_\odot$ 的超大质量黑洞吸积供能的类星体,要求超大质量黑洞的种子必须在宇宙的更早时期形成。另一方面,观测发现,在年老的星系(约 13 Ga)中存在大量的小质量黑洞。如何在一个统一的框架下合理地解释黑洞的宇宙学分布是个问题。根据 SDSS 观测到的最大红移类星体的 Gunn-Peterson 效应,宇宙在 $z = 6 \sim 7$ 时已几乎完全电离;而 WMAP 的结果则表明宇宙在红移 $z = 16$ 左右的时候已经开始被电离。这表明宇宙的再电离历史是非常复杂的,可能经历过多次,甚至是连续的再电离过程。根据现有的类星体光度函数估计,人们发现通常的类星体辐射不足以实现宇宙在红移为 $z = 16$ 或者 $z = 6 \sim 7$ 处发生电离。鉴于此,人们尝试将在红移为 20 左右形成,并迅速演化的零金属丰度的第一代恒星或者质量为 $10^6 M_\odot$ 的小类星体(mini-quasars)作为可能的电离源^[9,11-13,18,19]。

由于没有金属丰度, 并且缺少有效的冷却机制, 因此第一代恒星的质量很大。这些恒星发出的第一束光结束了宇宙的黑暗时代, 同时其中的高能量紫外部分, 也使脆弱的中性 H_2 被电离, 导致宇宙中氢原子的第二次主要相变: 再电离。零金属丰度的第一代恒星, 辐射引起的星风损失可以忽略, 它们死亡的时候丢掉的质量非常少, 数值模拟给出, $100 \sim 260 M_{\odot}$ 的第一代恒星直接经过电子-正电子对不稳定性超新星爆发而消失; 而质量更大的星体则几乎完全坍缩, 形成超过一半原始质量的黑洞^[9], 这是种子黑洞的一个重要可能来源。除此之外, 原初的气体云通过有效的角动量转移直接坍缩可能形成质量大于 $10^4 M_{\odot}$ 的种子黑洞; 星团核坍缩也有可能形成质量为 $10^3 \sim 10^4 M_{\odot}$ 的种子黑洞^[18,19]。

等级模型中这些种子黑洞在宇宙向进一步的不均匀性的演化中成长, 伴随着暗物质晕的并合而吸积并合, 在这个框架下人们可以解释许多观测到的类星体演化的特性。从不同的种子黑洞出发, 几个模型都非常成功地解释了红移 $1 \sim 3$ 区间的超大质量黑洞和类星体的演化^[13-17]。包含黑洞和类星体反馈的星系并合的高分辨率数值模拟也基本验证了超大质量黑洞与类星体共同演化的理论。但技术上对这样高红移处的直接观测目前在光学和射电波段都是做不到的, 发射在望的 Hubble 后继项目 JWST 太空望远镜就是希望能把人类的光学 (红外) 视野拓展到红移约 10 处。

欲从观测上区分各种种子黑洞形成的模型, 一种可能性是观测局域星系晕中由星系低效率的并合过程或者动力学的抛射过程所遗留下来的种子黑洞。它们的数密度和质量密度分布在不同的种子黑洞形成模型中不同。另一种更直接的手段便是探测黑洞并合时所释放的引力波: 在星系成长过程中一直存在着从种子黑洞至大质量黑洞的并合, 因此引力波可以作为一个窗口, 通过观察黑洞的成长过程, 对宇宙黑暗时期结束初期至今结构演化的历史给出重要的信息^[20,21]。

引力波的存在是广义相对论最重要的预言之一。在广义相对论中, 时空几何并不仅仅是物理运动的背景, 它有着自身的动力学内涵, 描述引力源所产生的引力场。在动态的时空动力学演化中, 时空结构的改变会产生相应的几何曲率振荡行为, 这种曲率振荡以波动的形式在时空中传播, 即我们所理解的引力波^[20,22,23]。不同于对相对论其他著名预言的验证, 对引力波的探测不仅仅是对广义相对论正确性的检验, 同时也是对广义相对论的基本物理思想“动力学时空”的直接实验检验。1974 年, Hulse 和 Taylor 发现了脉冲双星 PSR B1913+16, 观测到该双星脉冲周期变短的观测值非常接近于广义相对论预言的引力辐射引起双星轨道变小的理论值, 第一次间接验证了广义相对论对引力波的预言^[24,25], 这个结果于 1993 年获得诺贝尔物理学奖。随着天文观测上更多类似系统, 特别是双脉冲星 PSR J0737-3039 以及致近轨道脉冲双星 PSR J0348+0432 和 PSR J0651+28 的发现和精确测量^[26-28], 进一步提高了对广义相对论引力辐射的检验精度。

除原初引力波外, 宇宙中具有可观测效应的引力波事件更倾向于具有巨大引力辐射功率的天体剧烈运动过程, 遥远天体波源产生引力波的动力学过程极其剧烈, 并释放巨大能量。从这个意义上说引力波探测所瞄准的天体物理过程是宇宙中最“明亮”的天体物理过程, 双黑洞并合时引力辐射的功率甚至超过电磁波段可观测宇宙光度总和的数个量级^[20]。但是, 由

于引力相互作用本身非常微弱,所以引力波经过时所引起的时空几何相对变化量

$$h(t) = \frac{\Delta L}{L} \quad (1)$$

极其微小。以室女星团距离 (15 Mpc) 处的双中子星并合为例,产生的引力波在经过地球时的强度只有 $h \simeq 10^{-21}$ 。探测引力波经过时时空结构产生的微小变化极其困难,对人类精密测量的能力提出了巨大挑战。

长基线激光干涉技术是当今国内外发展引力波直接探测的主要手段^[29]。自 20 世纪 80 年代起,美国国家自然科学基金、欧洲多国和欧洲航天局 (ESA) 以及日本均投入巨资^[30-39],进行大规模的激光干涉引力波探测实验研究。经过引力波探测器的引力波会引起激光干涉仪臂长的改变,干涉结果相应改变,因此人们可以通过激光干涉仪直接探测引力波。天体来源的引力波按照其质量等特征量的改变具有非常宽广的频段,从小于微赫兹至千赫兹跨越超过 10 个量级。要覆盖这宽广的天体引力波频段,高频 (大于 1 ~ 10 Hz) 波段的探测需要在地面实现 (1 ~ 10) km 量级的激光干涉测量,中低频 (10^{-5} ~ 1 Hz) 波段的探测则需要避开地表振动、重力梯度等噪声以及地面试验尺度的限制,在空间实现精密激光干涉测距^[20,38-40]。

国际上,最早开始发展的空间激光干涉引力波探测项目是 20 世纪 90 年代开始美国航空航天局 (NASA) 和欧洲航天局 (ESA) 合作发展的原 LISA (Laser Interferometer Space Antenna) 项目^[37-39]。这也是 20 余年来国际上发展相对最成熟的空间引力波探测计划,后由于 NASA 的退出和欧洲经费预算的缩减,LISA 发展成为 eLISA (evolved LISA) 项目^[41,42]。2013 年 11 月,欧空局将探索“引力宇宙” (the Gravitational Universe) 作为第三代大型空间任务 (L3 mission) 的主题,eLISA 被建议为探索引力宇宙的空间任务,并给出了 2034 年的发射时间目标。LISA/eLISA 的技术演示项目 LISA-Pathfinder 按目前计划将于 2015 年发射,对 LISA 相关技术进行演示和检验^[43]。

在我国,空间引力波探测已被列入中国科学院制定的空间 2050 年规划中^[44]。2008 年,由中国科学院力学研究所微重力实验室牵头发起,科学院多个研究所及若干院外高校科研单位共同参与,成立了科学院空间引力波探测论证组,开始规划我国空间引力波探测在未来数十年内的发展路线图。经过科学院空间引力波探测论证组的推动与努力,两期科学院先导科技专项空间科学预先研究项目相关课题的研究工作对我国空间激光干涉引力波探测任务已经给出了较明确的概念规划,明确了未来数十年内学科的发展路线图。按照初步规划,计划发射 3 颗卫星,构成臂长在 10^6 km 量级的等边三角形引力波探测星组,用激光干涉的方法对中低频波段 ($< 10^{-3}$ ~ 10 Hz) 的引力波进行直接探测。预研究所建议的我国空间引力波探测任务设计,着眼把黑洞天文学的触角延伸至高红移的早期宇宙 ($z \simeq 10$),并更好地覆盖电磁波观测尚未确认其存在的中等质量黑洞波源。除确认几百至几万太阳质量黑洞的存在并刻画其周围的时空结构、强引力场极端非线性动力学行为、星团星系中心动力学环境外,通过对高红移种子黑洞开始的中等质量黑洞至大质量黑洞的并合波源的探测与分析,将为理解星系结构的形成与演化、黑洞与星系的共同成长演化、主并合引起的大质量黑洞的吸积机制等重要天文问题提供更直接的数据^[45,46]。此外,我国发展空间引力波探测的另一个可行性方案是通过国际合作,以贡献载荷的方式参与欧洲的 eLISA 计划。

本文以科学院战略性先导科技专项空间引力波探测预研究相关课题对我国空间引力波探测任务的规划为基础, 介绍中低频引力波探测的科学内容。我们首先在第 2 章介绍空间引力波探测所涉及的丰富天文学, 然后在第 3 章介绍我国空间引力波探测任务计划的初步规划和其科学目标, 最后给出总结与展望。

2 中低频空间引力波探测的主要波源

经过几十年的发展, 引力波探测的科学内容已经从最初的对相对论的验证逐渐丰富到通过引力波探测来认识天体物理现象, 人们因此提出了引力波天文学的概念, 希望通过技术发展, 能使引力波与电磁波一样, 成为一种天文观察的媒介和手段, 为认识宇宙结构演化、研究相对论天体物理中黑洞和其他致密天体的动力学过程和演化打开一个全新的窗口, 提供一种全新的工具^[20]。

测量频段和目标波源的不同是空间与地面激光干涉引力波探测项目的主要区别, 两者互补才得以实现更加宽广波段的引力波探测与引力波天文学^[20]。空间引力波探测任务工作在天体来源引力波频谱的中低端, 覆盖引力波波源最丰富的频段 ($10^{-5} \sim 10$ Hz)。与地面引力波探测相比, 空间引力波探测任务所面对的波源特征质量和尺度普遍都大很多, 探测器具有更深广的视野。探测器只要在设计灵敏度下正常工作, 便可以保证能探测到双致密星波源, 拥有大量甚至多至发生信号混淆的波源, 主要包括星系并合引起的从中等质量黑洞至大质量黑洞的双黑洞并合系统, 星系 (星团) 中心附近恒星质量黑洞等致密小天体和超大质量 (中等质量) 黑洞形成的超大质量比 (中等质量比) 双黑洞绕转系统, 大量河内河外致密双星系统以及早期宇宙和量子引力来源等^[20,39,41,42,45-48]。

激光干涉引力波探测器的工作原理与数据处理方法, 决定了人们可以通过引力波探测开展天文学观测研究。引力波信号处理不只是信号的检测, 同时也是参数估计问题, 引力波数据处理要在噪声的海洋中寻找信号, 当信号具有精确已知波形的时候, 通过匹配滤波的方法可以确定波源的各种物理参数, 从而使得引力波探测器不仅可以感知引力波的存在, 更能通过引力波携带的信息确定波源的性质。由于引力波的本质是波源剧烈运动所引起的时空几何的改变, 激光干涉引力波探测器对于引力波源具有几乎全天空的响应。入射的引力波的振幅与相位携带着波源的内部动力学信息 (例如黑洞的质量、角动量、轨道偏心率、距双黑洞最后并合的时间等), 中低频的引力波一般是持续时间较长的信号, 引力波探测器对入射引力波的响应在这过程中将被调制, 这可以给出波源的外部信息 (例如在天空中的位置、偏振等)。因此, 引力波探测通过数据处理可以对持续的引力波信号给出波源的诸多物理信息, 其中若干 (例如双星轨道倾角、光度距离等) 是传统电磁波天文学通常较难确定的^[20]。

空间激光干涉引力波探测主要涉及的引力波波源与其研究意义如表 1 所示。

2.1 双致密星系统

迄今, 天文学家通过光学和 X 射线观测, 在银河系内已经确定了几十个周期在 1 h 之内的致密双星系统, 包括一些正在发生质量转移的系统, 这类样本数量还将随着更高精度的观

表 1 空间激光干涉引力波探测的主要波源 ($10^{-5} \sim 10$ Hz)

波源	波源特点及其探测在基础物理和天文学上的意义
致密双星系统 (双白矮星以及双中子星系统)	数以千万计的银河系内双白矮星波源, 甚至构成前景噪声; 保证空间引力波探测器在设计灵敏度下 正常工作可以探测到引力波; 大量波源信号的提取为研究银河系结构、恒星演化以及 超新星爆发机制等问题提供现有电磁波天文学 较难提供的重要数据
大质量双黑洞并合系统	星系的并合导致的中心黑洞的并合过程, 质量范围跨越 从中等质量的种子黑洞到低红移宇宙的超大质量黑洞; 对双黑洞并合的直接观测, 检验最极端强引力场的相对论动力学; 描绘反演星系及其中心黑洞共同成长的历史, 区分种子黑洞的 形成机制及星系并合过程中黑洞的吸积机制, 为理解超大质量 黑洞和星系的成长过程等天文学重大问题提供重要数据
极大质量比双黑洞绕转系统	星系中心致密天体被中心(超)大质量黑洞俘获所形成; 星系中心环境实验室中的天然样本, 为研究星系中心动力学、 超大质量黑洞周围极小区域内时空结构等电磁波 天文学难以解析的重大问题提供了极其宝贵的平台
星团中的中等质量黑洞	星团中心致密小天体与中等质量黑洞形成的绕转系统; 为星团中中等质量黑洞的存在性提供确凿证据; 揭示星团动力学、中等质量黑洞形成机制等
原初背景引力波	BBO、DECIGO 等任务概念的科学目标; 探测宇宙大爆炸后 $10^{-20} \sim 10^{-10}$ s 所产生的引力波
宇宙弦等量子引力来源的瞬时波源	检验标准模型、超弦和其他量子引力理论
未被预见波源	新物理、新天文学

测扩大^[26-28,49]。这其中, 10 多个双星系统已经被确认为毫赫兹频段的引力波波源, 由于人们对这些系统的天体物理参数和位置测量得比较精确, 可以准确预言它们所释放的引力波^[49], 这不但可以保证空间引力波科学内容的实在性(即仪器在设计灵敏度正常工作一段时间一定可以积累探测到引力波), 同时又反过来为人们校准和评价仪器的工作状态提供了标准。

与现有地面引力波项目的一个不同之处是, 空间激光干涉引力波探测任务拥有大量的波源, 甚至会由于波源太多而造成信号的混淆, 构成前景噪声^[50-52]。银河系内、外的双白矮星以及包含中子星等其他致密天体的双致密星系统, 是形成这个问题的主要原因。银河系内在毫赫兹频段释放引力波的双白矮星双星虽然相对于双黑洞系统引力辐射较弱, 但是由于距离较近, 事件率高, 达到千万个的量级。经过人们若干年来对 LISA 和 eLISA 波源的研究和数据处理技术的发展, 可以准确地提取出几千至几万个信号(依赖具体仪器设计和观测时间), 并

且确定这些波源的天体物理参数, 例如质量、光度距离、位置、电磁波观测难以给出的双星轨道倾角等^[53-55]。空间引力波探测所提取出来的海量河内致密双星信号及波源天体物理信息, 将为人们研究银河系的结构、恒星演化以及超新星爆发机制等问题提供现有电磁波天文学较难提供的重要数据。由于观测数据信息量的限制, 剩下更微弱的波源便成为不可分辨的信号, 将集体贡献一种前景噪声, 使得空间引力波项目在毫赫兹附近的噪声水平超过单纯的仪器噪声, 限制仪器实际的灵敏度。当探测器的设计频段和灵敏度提高后, 河外致密双星对背景噪声的贡献也开始显现出来^[45,52]。由于空间引力波探测任务对白矮星的探测是通过长时间(几月至几年)的信号积累实现的, 河内双白矮星系统为主的双致密星所构成的前景噪声, 将随着空间引力波探测器相对于银盘方位的年运动受到调制。因此, 不可分辨河内双白矮星系统所贡献的前景噪声的强度、频谱形状、周年变化可以约束和刻画银河系内致密双星系统的分布、恒星演化历史与形成机制。空间引力波探测所提取出来的海量河内致密双星信号及波源天体物理信息, 将为人们研究银河系的结构、恒星演化以及超新星爆发机制等问题提供现有电磁波天文学较难提供的重要数据。

2.2 星系并合引起的双黑洞并合

这是空间引力波探测任务最重要的一类波源, 具有重要的天体物理与宇宙学意义。这里的大质量黑洞含义比较广, 包括星系成长过程中从小到大、从轻到重的中等质量黑洞、大质量黑洞, 甚至超大质量黑洞^[21,42,45-48]。

等级模型中, 暗物质晕会携带星系不断地并合、增大, 种子黑洞在此过程中伴随着暗物质晕与星系的并合而吸积并合, 最终形成当今宇宙星系中央的超大质量黑洞。在质量相近的大质量暗物质晕携带星系参与的主并合过程中, 更多的气体被带入到暗物质晕中心, 主并合过程带来气体的供给, 给黑洞增长提供吸积物质。吸积过程中气体物质的引力势能通过吸积盘转化为辐射能释放, 作为活动星系核 (AGN) 被我们观测到。理论计算表明, 黑洞的质量增长主要依靠黑洞的吸积。吸积过程中黑洞质量增长的快慢除了由气体的供给外, 还由其本身的特性决定, 主要包括黑洞本身质量大小、黑洞的自转角动量、黑洞自转轴和吸积盘之间的夹角等。同时, 星系中心黑洞的辐射以及外流反过来对星系中心的气体供给以及恒星形成也存在着反馈作用。黑洞的增长和星系的恒星演化、气体消耗过程有着相互制约的关系, 这些制约关系可能正是我们看到的低红移星系与其中心黑洞 $M - \sigma$ 关系的来源。

在星系的主并合过程中, 如果两个星系中心都有大质量黑洞存在, 两个大质量黑洞会因为周围的恒星动力学摩擦很快落到新形成的星系中心, 达到引力相互影响的距离范围, 逐渐形成束缚系统, 束缚双黑洞系统接下来的演化由暗物质晕中的星际环境决定。单独作用在每一个黑洞上的动力学摩擦使得双黑洞的距离不断缩小, 之后依赖于气体是否贫乏, 经过与周围小天体的相互三体作用或通过与气体的摩擦降低势能, 进一步缩减轨道。双黑洞系统通过和周围的恒星相互作用, 把他们的引力能以及角动量转移给周围的恒星时, 周围的恒星获得了较高的能量和角动量, 星系中心区域的恒星会被清空; 在气体贫乏且球对称的星际环境与星系结构中, 双黑洞的并合将难以继续 (此即 Final Parsec 问题)。最新的研究表明, 并合后的星系本身的结构是非球对称的, 其中的恒星轨道为非球轨道。能够进入双黑洞引力区域的恒星足够多, 以致双黑洞能够通过抛射恒星来持续靠近, 双黑洞之间的距离进一步减小; 最

后,双黑洞绕转产生的引力辐射开始起主导作用,带走能量和角动量,使双黑洞发生实质并合。在气体丰富的环境中,双黑洞形成后,周围的气体形成一个双黑洞所共有的吸积盘;双黑洞通过吸积盘吸积物质,转移角动量,从而有效地并合,最终通过引力波辐射而并合为一个黑洞^[13-15,17,56]。这其中涉及到气体吸积、与小恒星的动力学作用、吸积盘性质与吸积效率、最后并合的引力反冲等复杂天体物理因素与过程。空间引力波探测为理解这些因素提供了一条难以取代的途径,通过对星系成长过程中中心双黑洞并合的引力波的探测,不仅能探测到单例黑洞并合过程中极强引力场的动力学行为,以检验广义相对论并测量黑洞的基本参数,还将直接对冷暗物质等级模型、种子黑洞形成机制、主并合引起的黑洞吸积机制等重要问题的相关模型进行检验^[21,57,58]。

空间引力波探测器对低至中等红移、大质量双黑洞并合系统探测到的信噪比,一般说来是很大的;超大质量双黑洞的最后并合阶段所产生的引力波信号,在时域数据中就能显示出来。通过一段观测时间的积累(例如并合前1个月、1年),空间引力波探测器能够较准确地测量大质量黑洞并合系统的天体物理参数,特别是光度距离、轨道平面等电磁波观测较难确定的参数。结合电磁波天文学所擅于测定的红移信息,或依靠对多个波源事件给出的宇宙学参数的自洽性分析,双黑洞并合波源将成为信噪比最大且红移范围最远的标准汽笛(类比于电磁波天文学的标准烛光),为精确确定红移-光度距离关系等宇宙演化信息提供一条能覆盖更高红移范围(红移 $z > 10$)的全新途径^[20,21]。

LISA/eLISA 任务设计可以探测到黑洞成长过程中,质量在 $10^3 \sim 10^6 M_{\odot}$ 范围的双黑洞并合,探测能力优势倾向于重种子模型,通过分析质量、质量比分布,进行贝叶斯后验估计,可以对种子和成长模型给出一定的限制^[21,47,48,57,58]。而对轻种子黑洞高红移并合的直接探测,稍高频段更高灵敏度(例如我国的空间引力波计划设计)具有更大的优势^[45,46,59-61]。我国空间引力波探测的任务设计就是希望通过探测这类波源辐射的引力波,将人类的触角延伸到再电离之前第一代恒星形成后的阶段,对冷暗物质模型下的各种结构形成机制给出一定的区分和限制。

2.3 极大质量比双黑洞绕转

极大质量比双黑洞绕转(Extreme Mass Ratio Inspirals, EMRI) 系统中低频空间引力波计划的另外一类重要波源,是恒星质量黑洞或中子星、白矮星在星系中心(超)大质量黑洞最内稳定圆轨道(Innermost Stable Circular Orbit, ISCO)附近不断绕转的两体绕转系统,质量比为 $1/10^6$ 或更小。EMRI 可以通过星系中心黑洞对小致密天体的动力学俘获形成,也可能通过黑洞周围吸积盘内的大质量恒星的形成和快速演化提供伴星而形成^[62-64]。

虽然事件率高度不确定,如对 eLISA 的事件率估计跨越从每年1个到每年几百个的范围^[62-67],但是像致密双星一样,在空间任务开始收集数据时,EMRI 就一直存在的。需要长时间的观测积累信噪比,而不是通过“捕捉”来实现。

由于 EMRI 所涉及的引力区域接近中心黑洞视界,并且信号积累时间足够长,因此探测 EMRI 系统引力波,为研究反演波源所在的且电磁波很难解析的极小区域内的星系中心环境和动力学演化提供了一种绝佳的方法。引力波数据对 EMRI 动力学的反演,类似于光学上通

过恒星动力学来反演银河系中心的性质, 人们将通过引力波数据获得小致密天体在中心黑洞极强引力场中的运动轨道, 测得中心黑洞的质量、自旋以及更高阶的多级矩信息。与光学大望远镜或长基线干涉方法研究恒星动力学的方法相比, 探测 EMRI 系统的引力波可将探测视野延伸到非局域宇宙 ($z \simeq 0.1 \sim 1$)。

EMRI 系统中, 小的致密天体在超大质量黑洞的 ISCO 附近不断绕转, 由于引力辐射功率较小, 轨道演化非常缓慢, 可以用 Kerr 黑洞测地线的绝热演化来刻画引力辐射导致的轨道演化。虽然一般说来周期平均过的频率演化不显著, 但是由于偏心率的存在和各种进动效应, EMRI 系统辐射的引力波具有丰富的短周期频率变化和结构复杂的相位^[68-72]。EMRI 系统作为引力波源需要 17 个参数来描述, 准确描述其动力学和波形, 对人们理解 Kerr 时空的程度、描述时空及测地线的绝热演化过程、黑洞附近时空的多尺度结构、大参数复杂参数空间的数据处理手段等等都提出了很大的挑战。从 EMRI 的引力波信号中可以精确反演大黑洞的质量、角动量、质量四级矩以及更高阶的多级矩信息^[73-75], 因此还将精确检验黑洞无毛定理^[68,76,77], 并区分其他引力理论。同时, 探测 EMRI 系统的引力波对于质量较小、不活跃星系的中心黑洞 ($10^5 \sim 10^7 M_\odot$) 的确认与测量无疑具有重要意义, 将对质量低端区间星系和中心黑洞质量的联系给出直接观测数据。

2.4 星团中有关中等质量黑洞的波源

对超亮 X 射线源 (Ultraluminous X-ray source, ULX) 和对星团恒星动力学的观测提示, 稠密的星团中很有可能存在着 $10^2 \sim 10^4 M_\odot$ 的中等质量黑洞。

20 世纪 80 年代, Einstein X 射线卫星观测到了 X 波段光度约在 $10^{32} \sim 10^{33}$ J/s 的超亮 X 射线源, 这个光度值介于活动星系核的 X 波段光度 $L_X \simeq 10^{35} \sim 10^{47}$ J/s 和黑洞 X 射线双星的 X 波段光度 $L_X < 10^{31}$ J/s 之间, 引起了人们的注意。20 世纪 90 年代开始, ROAST、Chandra 等 X 射线望远镜的观测结果告诉人们, 这种 X 波段超亮的致密源在我们局域的宇宙中是非常普遍的, 比较著名的有 M82、M15、NGC3628、半人马座 ω 等^[78-81]。ULX 源一般都离星系的光学中心有一定距离, 这说明它们的质量不会太大 (不超过 $10^5 M_\odot$)。在一些 ULX 源的周边观测到被 X 射线点亮的气体环, 这表明至少部分 ULX 源发射的 X 射线并不是高度集中在向着地球观测者的方向上, 如果假设 ULX 释放的能量在各个方向基本均匀, 而且光度不超过爱丁顿, 便可以推出这些 X 射线源的质量在 $10^2 \sim 10^4 M_\odot$ 。若干 ULX 源还显示出强烈的准周期光变。中心存在中等质量黑洞引起的吸积是对 ULX 源的一种可能解释。X 射线的观测发现相当一部分的 ULX 源存在于稠密的年轻星团中。与此同时, 星系动力学的观测表明, 一些球状星团中也应存在这样较大质量的中心天体。

对致密星团的多体数值模拟也指出, 中等质量黑洞可以由星团中心区域恒星质量黑洞的快速碰撞并合, 或恒星的直接失控并合形成的大质量恒星再演化死亡而形成; 在某些模拟中, 当星团中的初始双星数目超过一定比例并且星团的动力学时标满足一定要求时, 人们甚至还看到了多个中等质量黑洞在年轻星团中形成的结果^[82-86]。在包含中等质量黑洞的星团中, 恒星质量的小黑洞、中子星等致密星体, 可以通过两体交换、等级三体作用等动力学过程被中等质量黑洞俘获而形成质量比在几十至上千的双黑洞 (或其一为中子星等致密天体) 绕转系统^[84-89], 被称为中等质量比的绕转系统 (Intermediate Mass Ratio Inspiral, IMRI)。此外,

存在中等质量黑洞的星团在走向星系核中心的过程中,将被潮汐力逐渐撕裂,所剩下的中等质量黑洞将与星系中心的大质量黑洞形成中等质量黑洞—大质量黑洞的 IMRI 系统。

中等质量黑洞吸积的光度相对较弱,引力影响范围也小,在它的引力影响范围内所包含的恒星为数甚少,欲通过恒星动力学的方法观测星团中心恒星的运行轨迹需要极高分辨率的望远镜,并依赖于很多其他因素;目前基于 ULX 观测证据建立在星团中中等质量黑洞比较频繁地俘获吞噬白矮星、主序星等小天体的理论上,在一定条件下释放出很强的 X 波段能量,但对各种观测还存在很多可能的其他解释;晚型星系、矮星系中心的致密星团在哈勃或 XXM-Newton 以及地面上的巡天观测中往往呈现为一个点源,使得分辨中心天体成为难题。但包含中等质量黑洞的双黑洞系统在绕转最后阶段会剧烈地释放引力波,因此引力波天文学在这方面为我们开辟了一条新的途径。

星团恒星质量黑洞与中等质量黑洞的并合系统辐射引力波的特征频率在 $0.01 \sim 1$ Hz 范围内,正是 10^6 km 臂长空间引力波探测的适宜频段。但由于恒星质量黑洞与中等质量黑洞的最后绕转并合系统的信号强度相对于大(中)质量双黑洞并合系统较弱,需要探测器具有较高的精度^[45,46,87-90]。

对星团中有关中等质量黑洞波源的引力波的探测,将明确星团中中等质量黑洞的存在并刻画其周围的时空结构与动力学环境;这为人们理解星团动力学、验证相关模拟结果,提供一条无法取代的途径^[89]。通过对星团中中等质量黑洞—小黑洞系统的多样本、大范围观测,将给出或约束这些中等质量黑洞的形成机制、星团初始质量函数、动力学演化历史等重要天体物理问题。从相对论引力理论的意义上看,小黑洞—中等质量黑洞 IMRI 系统相比于其它波源对于理解极强引力场下的动力学行为是不能代替的。相对于质量相当的双黑洞系统,IMRI 在极强引力场阶段的演化变慢,所度过的周期数大大增加,使得强引力场的效应有足够长时间的累积,自旋与自旋、自旋与轨道之间的耦合与进动等效应也会明显很多;对比于 EMRI 系统,IMRI 系统里小黑洞的自旋在动力学中的作用不能忽略。但这些动力学特点也直接导致在波形的计算上,IMRI 绕转系统难以用后牛顿或微扰近似足够精确地描述,这也对数值相对论的发展提出了挑战^[89,91-98]。

2.5 早期宇宙来源的随机背景引力波

由于引力相互作用极其微弱,引力波在传播过程中几乎不受阻挡,暴涨阶段产生的引力波穿透宇宙演化的过程,成为残留背景引力波,携带着宇宙最早期的信息,为人们了解、研究宇宙起源、诞生提供了最早期的线索。空间引力波探测频段对应于宇宙大爆炸诞生后约 $10^{-20} \sim 10^{-10}$ s 所产生的引力辐射。

关于残余引力波来源,目前理论上有很多模型,包括大爆炸—暴涨的过程、一阶相变、超弦理论所预言的额外维动力学、宇宙弦网、某些暴涨模型下的量子真空涨落放大等^[20,99]。这些模型有的是标准暴涨模型的预言,有的来源于其他理论,每种模型也有各自所预言的谱形状和强度。在空间直接探测宇宙起源的背景引力波,对探测精度要求较高。美国提出的 BBO (Big Bang Observer)^[100,101] 计划以及日本的 DECIGO (Deci-Hertz Gravitational wave Observatory)^[102-104] 就是将原初引力波(残留引力波)作为最主要科学目标的空间引力波探

测计划。但由于技术指标要求太高, 目前看来在空间实现这样的精度还需要长久的努力。而比较有望较早实现的 LISA (eLISA) 以及我国的任务设计, 虽然在其灵敏度内直接探测到残留背景引力波的可能性不大, 但还是可以对背景引力波在探测频段的强度以及对应的一些理论模型参数给出有意义的限制。

2.6 宇宙弦等瞬时甚至难以模型化的引力波信号

还有一类瞬时引力波信号, 它们的持续时间较短, 甚至波形难以预测。这些信号可能来源于天体间的近距离俘获掠过、宇宙弦的断裂等量子引力过程以及尚未预见的天体物理过程(例如一些伽玛暴的伴随过程)。对这类波源的探测, 也是引力波探测的重要目标, 可能展现给人们一些尚未认识到的物理与天体物理过程。

3 我国空间引力波探测任务概念预研究

3.1 我国空间引力波探测预研究所建议的任务设计

空间引力波探测已被列入中国科学院制定的空间 2050 年规划中^[44]。经过中国科学院空间引力波探测论证组的推动与努力, 两期中国科学院空间科学战略性先导专项空间科学预先研究项目课题的工作, 对我国空间激光干涉引力波探测任务已给出较明确的独立任务概念规划^[46]。

预研究对我国空间引力波探测任务的初步设计沿用空间激光干涉引力波探测最自然的三角形形结构, 卫星阵列由 3 颗在地球绕日轨道上运动的卫星组成, 应用差分激光干涉技术, 测量相邻航天器内做测地运行的自由悬浮检验质量之间的实时距离变化来测量通过卫星之间的引力波^[45,46]。

空间激光干涉引力波探测的关键设计指标与技术包括: 轨道臂长设计(决定探测频段和精度需求), 激光干涉部分的空间长时间(数年寿命)稳定工作的激光、望远镜、高精度激光测距系统等, 以及保证卫星跟随做测地运动检验质量的无拖曳航天与微推进技术^[39,40,46]。

在我们的早期工作中, 为填补当时 LISA 的探测频段与地面探测频段的间隙, 预研项目在 2009 年最初给出的任务设计是将原 LISA 的臂长缩短一个量级至 5×10^5 km, 从而实现探测频段一个量级的提升; 同时较大幅度地增大激光功率与望远镜口径, 提高加速计的指标要求, 相对于 LISA 欲求将最佳灵敏度提高一至两个量级^[45]。这个想法与若干年前 Peter Bender 曾提出的 ALIA (Advanced LISA) 任务不约而同^[60,61]。该任务设计由于其适宜的臂长和高要求的灵敏度设计, 对 0.01 Hz 附近频段的引力波波源, 特别是从星系形成演化早期第一代恒星形成的种子黑洞, 具有极高的探测能力, 理论上几乎可以覆盖到 $z = 20$ 处第一代恒星死亡形成的 $100 M_{\odot}$ 以上的中等质量黑洞并合^[46]波源。但由于这个设计在技术上的要求非常高, 特别是 0.1 pm 量级的激光测距水平^[45], 即使是对于空间引力波探测开展最早的欧洲, 在不考虑预算的情况下于合理的期限内 (20 ~ 30 a) 也是极难实现的。这样远大的目标与技术挑战, 在中短期内对于推动我国空间引力波探测科学与相关技术的发展反而会成为一种阻力, 不太利于学科扎实稳步地成长。

经过对技术可行性与科学需求的权衡,在原有主要科学目标的指导下,考虑国际上空间引力波探测(主要是 LISA/eLISA) 近几年的发展情况,以及我国在空间激光、精密测量、相关航天技术方面的基础与发展进度,在保证任务具有重大科学意义的前提下,我们尝试放宽技术指标要求,在合理的范围内寻求并分析技术上可行的任务设计,考虑若干中短期可能实现的任务设计指标,具体技术要求与噪声分配如表 2 所示。

表 2 我国空间引力波探测任务设计所建议的臂长与灵敏度选择

臂长 /km	激光功率 /W	望远镜口径 /m	测距精度 /pm · Hz ^{-1/2}	加速度噪声 /m · s ⁻² · Hz ^{-1/2}
5 × 10 ⁵ (ALIA)	30	1.0	0.07	3 × 10 ⁻¹⁶ (> 1 mHz)
1 × 10 ⁶ (一百万千米臂长选择)	2	0.5 ~ 0.75	1 ~ 2	3 × 10 ⁻¹⁵ (> 0.2 mHz)
3 × 10 ⁶ (三百万千米臂长选择)	2	0.45 ~ 0.6	5 ~ 10	3 × 10 ⁻¹⁵ (> 0.1 mHz)
5 × 10 ⁶ (LISA)	2	0.4	18	3 × 10 ⁻¹⁵ (> 0.1 mHz)
1 × 10 ⁶ (eLISA)	2	0.2	11	3 × 10 ⁻¹⁵ (> 0.1 mHz)

调整后的任务选择对位置噪声预算放宽了大约 2 个数量级,这使得任务设计对镜面参数和激光功率参数的要求都降低了很多,达到接近原 LISA 要求的水平。

如图 1 所示,预研究所给出的任务设计相对于 LISA 的主要区别是臂长缩短、灵敏频段稍向右移以及 0.01 ~ 1 Hz 频段灵敏度的提高;而相对于作为 LISA 简化设计的 eLISA,由于测距精度要求的提高和载荷设计的对称性(出于任务成本考虑,eLISA 只保留了 LISA 设计的两条臂,3 颗卫星有主次之分^[41]),在相似频段的灵敏度具有显著优势。图中,除仪器噪声之外,我们还考虑了河内、河外白矮星背景的可能水平,其中蓝色的实线主要是银河系内白矮星的贡献,来源于 Hils 和 Bender 给出的估算结果^[51];而蓝色的长虚线和短虚线分别对应 Farmer 和 Phinney 对河外致密双星集体水平的上限和下限的估算结果^[52]。基于现有的致密双星演化和数密度模型,河外致密双星带来的混淆噪声水平,对于预研究目前优化给出的任务设计影响不大。

目前看来,3 × 10⁶ km 臂长、位置噪声预算水平在 5 ~ 10 pm 的设计,是预研究所建议采用的灵敏度设计。在这样的设计下,我国空间引力波探测任务有望在未来二三十年内得以实现。在技术发展受限的情况下,我们可以将位置噪声放宽到 10 pm 的水平,任务还仍然具有对中等质量黑洞波源较好的探测能力。接下来我们将主要针对 3 × 10⁶ km 臂长设计讨论科学目标。

3.2 我国空间引力波探测任务建议的科学目标

预研任务设计在科学目标上,除了和 LISA/eLISA 重叠波段的波源,如超大质量黑洞的并合、极大质量比绕转系统和河内白矮星绕转等外,对于涉及中等质量黑洞并合过程的波源,特别是总质量在几百至几万太阳质量的双黑洞绕转并合系统,有更高的探测能力。

平均探测范围(视野)是评价引力波探测任务设计对引力波波源探测能力的一个重要指标,其定义为引力波探测器经过对天空中的方向、引力波极化等影响具体响应的因素进行平均后,对于给定的一类波源、给定的信噪比阈值(探测置信度)所能观测到的最远信号的距

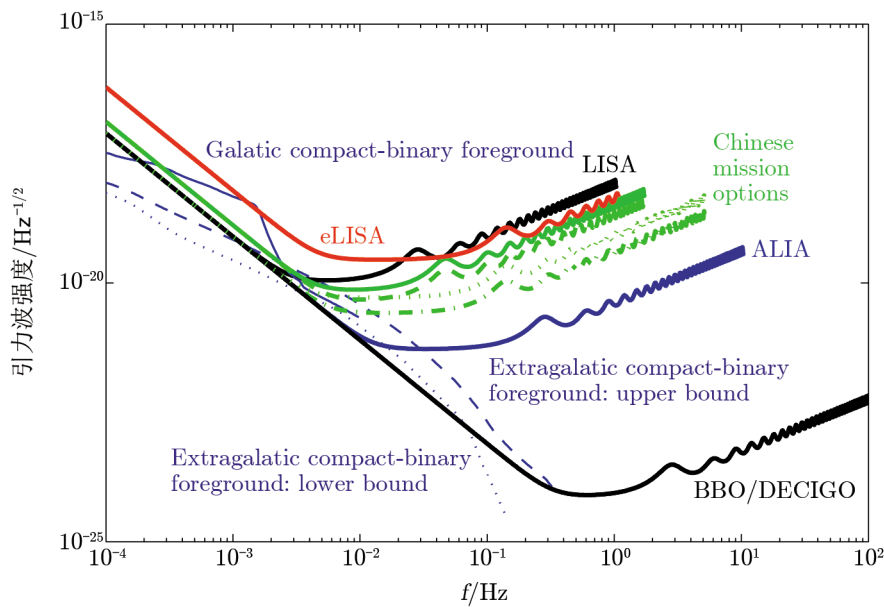


图 1 我国空间引力波探测任务预研究所建议的灵敏度设计及河内、河外双星带来的混淆背景噪声^[51, 52]

离^[20]。这是衡量任务设计面对科学目标的探测能力的一个客观的硬性指标, 不依赖于波源的发生率等天体物理模型与假设。

如前所述, 涉及中等质量黑洞的绕转并合波源, 首先是冷暗物质等级模型下高红移开始的中等质量黑洞至大质量黑洞成长过程中的双黑洞并合系统, 这类波源从相对论动力学上来看, 越在高红移处其双黑洞的质量越接近, 一般来说质量比不会太大(近等质量至一比几十的质量比); 另一方面是星团中动力学形成的中等质量黑洞与其他致密天体组成的系统, 这类系统是中等质量比一般在 1:10~1:1000 的 IMRI 双黑洞绕转系统: 恒星质量黑洞—中等质量黑洞绕转系统、中等质量黑洞—大质量黑洞绕转并合系统。我国空间引力波初步任务设计选择这两类不同质量比范围波源的探测视野, 如图 2 所示。图中两种情况分别针对的是质量比为 1:4 的双中等质量黑洞并合系统, 和质量大约为 $10 M_{\odot}$ 的小黑洞与星团中心质量在 $100 \sim 10000 M_{\odot}$ 之间的中等质量黑洞的并合情形, 相同设计的两条线对应双星混淆前景噪声的上下限。在近等质量双黑洞的情形下, 在红移 20 处所画出的水平线是我们假设在此红移之上存在天体来源波源的可能性极小而对探测器视野做出的限制, 即我们假设在红移 20 以前没有种子黑洞的并合发生。

从图 2 可以看出, 即使是最保守的任务设计 (3×10^6 km 臂长, $8 \text{ pm} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 测距精度要求), 对 IMRI 系统的探测范围较之 LISA 也有多于 2 倍(按光度距离衡量)的提高, 对应的探测率则有一个量级的增加, 而这种优势相对于 eLISA 则更加明显。任务设计对高红移处 ($z > 10$) 的轻种子黑洞并合事件的探测能力, 我们将通过对星系黑洞并合历史的蒙特卡罗模拟来考察。

在引力波探测中, 信噪比决定了探测的置信度和对波源物理参数估计的误差水平。采用

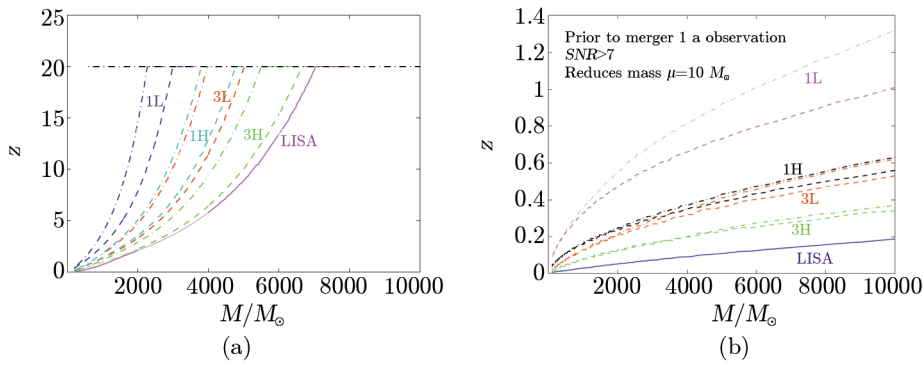


图 2 我国空间引力波探测任务预研究所建议的灵敏度设计在不同致密双星混淆噪声水平下对中等质量黑洞相关的双黑洞绕转并合系统的平均探测范围

(a) 双中等质量黑洞并合系统 (质量比为 1:4); (b) 小黑洞-中等质量黑洞并合系统 (折合质量为 $10 M_{\odot}$)。

3×10^6 km 臂长, 即使在将任务测距精度放宽到 $5 \sim 10$ pm 的水平后, 任务对中等质量双黑洞目标波源的捕捉能力 (视野) 较之 LISA 等仍具有显著的提高。这个提高不仅是探测视野, 任务对可探测到的波源也具有更好的信噪比和置信度水平, 这在保证参数估计的准确度方面是非常重要的。图 3 是 3×10^6 km 臂长设计对恒星质量黑洞 - 中等质量黑洞的 IMRI 并合波源的信噪比等高线图, 其中我们假设了折合质量仍然为 $10 M_{\odot}$ 。图 4、图 5 是 3×10^6 km 臂长设计对双中等质量黑洞并合系统的信噪比等高线图, 分别考察质量比和红移对信噪比分布的影响。这里的信噪比均指对波源位置、双星轨道倾角、极化平均过后的信噪比, 我们假设了对目标波源有 1 年连续的观测时间, 这在空间引力波探测概念研究中是一个保守的假设。

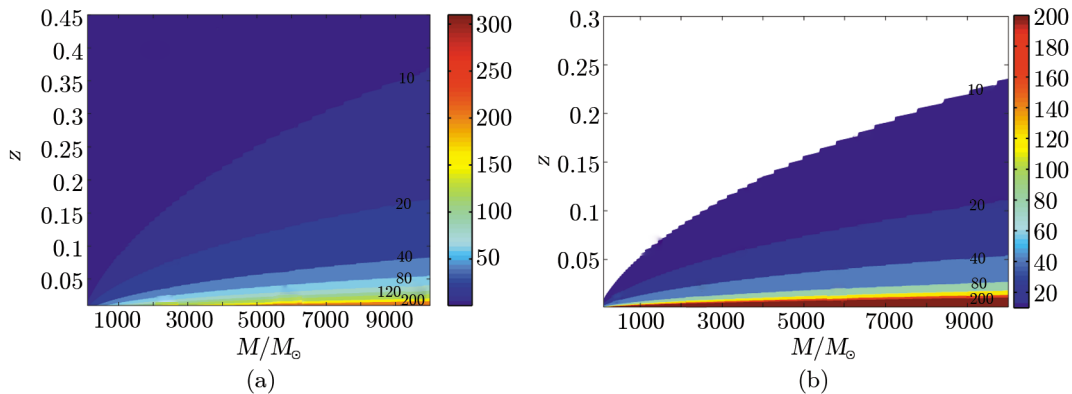


图 3 3×10^6 km 臂长的两种灵敏度设计对小黑洞-中等质量黑洞绕转并合系统 (折合质量为 $10 M_{\odot}$) 的单个迈克尔逊通道探测信噪比等高线图 (并合前 1 年的观测时间)

(a) $5 \text{ pm} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$; (b) $8 \text{ pm} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 。双星背景噪声采用上限和下限估计的折中水平。

3.3 基于冷暗物质模型的黑洞宇宙学成长并合模拟与探测率估计

在冷暗物质宇宙学模型暗物质晕等级成长的框架下, 通过蒙特卡罗模拟实现暗物质晕的

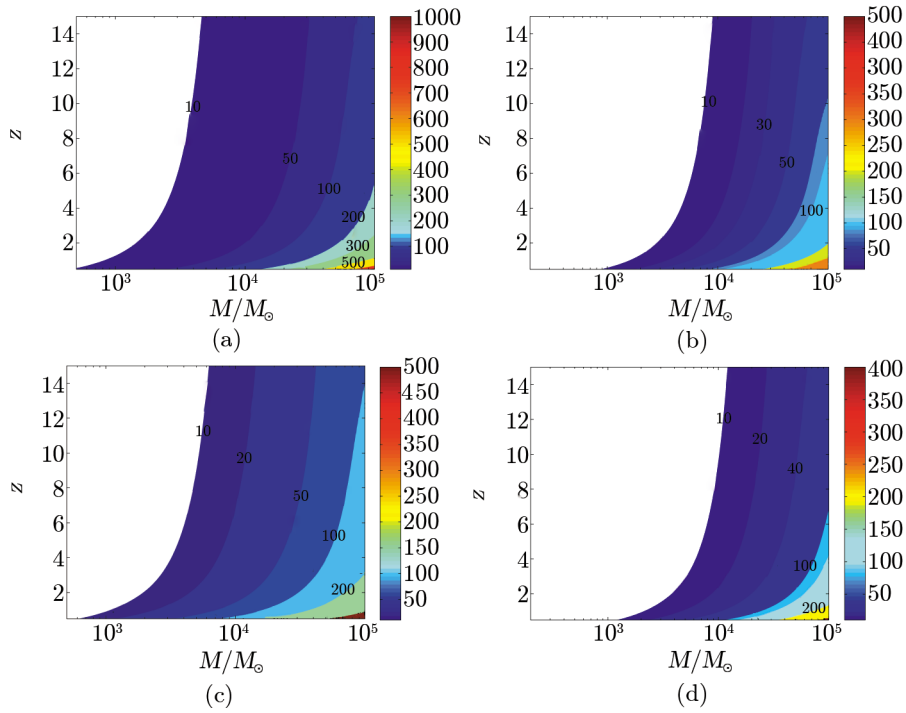


图 4 3×10^6 km 臂长的两种灵敏度设计对双中等质量黑洞绕转并合系统 (质量比分别为 1:1 与 1:10 两种情形下) 的单个迈克尔逊通道探测信噪比等高线图 (并合前 1 年的观测时间)

(a) $5 \text{ pm} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$, 质量比为 1:1; (b) $5 \text{ pm} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$, 质量比为 1:10; (c) $8 \text{ pm} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$, 质量比为 1:1; (d) $8 \text{ pm} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$, 质量比为 1:10。双星背景噪声采用上限和下限估计的折中水平。

并合历史, 再在星系并合的半解析动力学模型下追溯种子黑洞及后继黑洞随暗物质晕 (星系) 并合成长的历史, 是研究黑洞并合事件各种分布特征, 以及黑洞质量和自旋随并合吸积过程演化的主要方法^[13,14,17]。

对黑洞并合历史的模拟, 首先需要生成暗物质晕的并合历史, 这需要采纳现有宇宙学观测给出的各种宇宙学参数 (包括 $z = 0$ 处的哈勃常数、物质与暗能量比例、重子物质比例、原初涨落功率谱指数、原初涨落幅度), 通过蒙特卡罗模拟实现描述暗物质晕并合历史的 EPS 公式 (扩展的 Press-Schechter 公式) 来实现^[10-13]。在每一次的蒙特卡罗实现中, 令红移 $z = 0$ 处的暗物质晕, 在给定的步长下, 随红移增加分裂演化, 其每一步分裂的概率由 EPS 公式决定 (对于给定红移给定质量的暗物质晕, EPS 公式给出其在下一更大红移处的质量分布概率), 即逆向追溯暗物质晕并合的历史。选择步长以保证每步演化都最多分裂出两个暗物质晕。通过一次这样的蒙特卡罗模拟, 一个红移 $z = 0$ 处的暗物质晕就能生成一棵暗物质晕的并合树 (merger tree), 进一步再利用局域宇宙中暗物质晕质量的分布, 赋予源于不同质量暗物质晕的树以权重。

并合树是针对暗物质晕的并合历史生成, 在实现暗物质晕的并合树之后, 就需要在树的顶层 (最高红移处) 以一定的小概率加入种子黑洞, 然后通过星系并合的半解析动力学来追

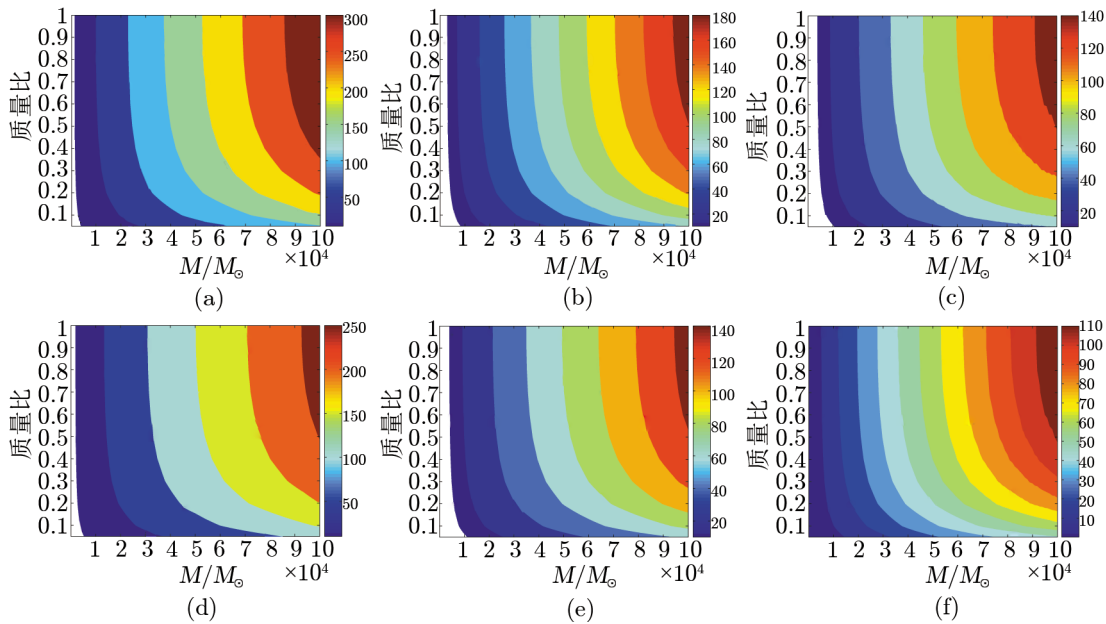


图 5 3×10^6 km 臂长的两种灵敏度设计对双中等质量黑洞绕转并合系统, 在不同红移处的单个迈克尔逊通道探测信噪比等高线图 (并合前 1 年的观测时间)

(a) $5 \text{ pm} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$, $z = 2$; (b) $5 \text{ pm} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$, $z = 6$; (c) $5 \text{ pm} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$, $z = 10$; (d) $8 \text{ pm} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$, $z = 2$; (e) $8 \text{ pm} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$, $z = 6$; (f) $8 \text{ pm} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$, $z = 10$ 。双星背景噪声采用上限和下限估计的折中水平。

踪黑洞的并合及吸积演化历史。由于能坍缩成黑洞的大质量恒星, 或能形成气体直接坍缩的事件, 均出现在小概率高涨落的暗物质晕中, 种子黑洞的出现也是小概率事件。如前所述, 种子黑洞模型是一个非常争议的问题, 由于在重种子模型下, 无论是 LISA 还是预研究所考虑的任务设计都可以探测到种子黑洞直接开始的并合, 所以在我国空间引力波探测任务的预研究中, 只侧重考虑轻种子模型, 在红移 $z = 20$ 处质量涨落大于 3.5σ 的暗物质晕中放置第一代恒星死亡形成的质量为 $150 M_{\odot}$ 的种子黑洞。

并合树给出了暗物质晕 (星系) 并合历史, 星系的并合携带其中的黑洞, 在融合后的暗晕与星系中形成“双黄蛋”的双黑洞结构, 接下来要描述两个黑洞各自如何吸积增长质量、如何走近、能否并合以及相应时标等, 需要假设一些吸积模型和半解析的动力学。

暗物质晕并合的流体力学模拟指出, 并合星系的相当一部分气体掉入并合后系统的中心区域, 这些气体会引起中心黑洞的吸积。在每次主并合 (质量比大于一定阈值, 比如 0.1 或 0.3) 中, 质量较大的黑洞会以一定的吸积率 (我们假设为爱丁顿吸积率) 吸积一定质量的气体, 吸积气体的总质量通常设定以满足对低红移星系观测到的 $M - \sigma$ 关系。动力学摩擦使质量较小的暗物质晕和其中的黑洞掉向质量较大的暗物质晕的中心, 所经历的动力学摩擦时间依赖于暗物质晕的具体轨道和星系环境。当两个黑洞的轨道所包围的星体质量与它俩自身的质量相同时, 双黑洞束缚系统开始形成, 束缚双黑洞系统接下来的演化由暗物质晕中的星际环境决定, 单独作用在每一个黑洞上的动力学摩擦使得双黑洞的距离不断缩小, 以致结合比

较紧密的硬双黑洞系统形成。此后动力学摩擦的效率大大降低, 在气体贫乏的星系中, 之后的双黑洞演化主要靠和小星体的三体作用, 通过俘获并以更高速率喷射穿入轨道的星体, 降低双黑洞系统的势能。在这种通过硬双黑洞与小天体的三体作用而缩减轨道的过程中, 小星体不断被向外抛出, 使星系中心形成了一个低密度的核, 从而逐渐降低了三体作用的效率; 这个核不断向外膨胀, 双黑洞的距离很快缩入这个低密度核中, 在气体贫乏的星际环境中, 之后双黑洞的距离演化变得非常缓慢。如果双黑洞的距离能继续减小到引力辐射开始起主导作用, 双黑洞便开始比较显著地释放引力波而促使它们之间距离的进一步缩减。这样的机制决定了一个非常长的并合时间。但是在高红移气体丰富的暗物质晕中, 中心黑洞的轨道演化会由气体引起的摩擦耗散机制主导, 在数值模拟中气体引起的轨道耗散会使双黑洞的距离很快缩小到秒差距甚至更小; 在这种情况下可以认为有吸积盘包围的硬双黑洞系统瞬时并合。如果双黑洞在并合之前便经历了下一次带黑洞的暗物质晕并合, 上面描述的动力学过程会被黑洞的三体作用扰乱。一般说来质量最小的黑洞被踢出, 使剩下的双黑洞在束缚变紧的同时产生反冲, 当然出现这种情况的概率很可能比较小。

双黑洞在最后并合成一个黑洞时, 由于引力波释放的不对称性会引起黑洞质心的反冲, 反冲速度由数值相对论模拟双黑洞并合反冲速度的经验公式给出, 其大小敏感依赖于双黑洞并合前的质量比与自旋矢量, 在某些极端位形下 (如等质量双黑洞、两个高自旋黑洞反向躺在轨道面中), 这个反冲速度可以达到几千 km/s, 这样的反冲甚至能把并合后的黑洞踢出逃逸速度约 2000 km/s 的大质量椭圆星系。这也是数值相对论从 2006 年突破双黑洞并合计算稳定性以来, 所得到的具有重要天体物理意义的结果之一。如果实际碰撞中的反冲速度真的能达到这样大, 那么对并合的探测率就会显著降低, 宇宙中将充斥一些流浪的黑洞。幸运的是, 由于存在气体盘有效吸积、小夹角初始黑洞的自旋 - 轨道自旋的近动效应等机制, 人们认为极大引力反冲速度不是一个普遍的现象。在我们的模拟中认为黑洞并合时其自旋方向与轨道角动量方向的夹角不超过 20° , 引力反冲速度因此不会过大。

将这些半解析的动力学, 加在蒙特卡罗模拟实现的暗物质晕并合树上, 就可以实现从种子黑洞开始, 至当今宇宙中超大质量黑洞的黑洞宇宙学的成长历史。在这个过程中, 种子黑洞跟随暗物质晕 (星系) 的并合, 不断吸积、并合, 最终演化成当今宇宙中的超大质量黑洞。

在我国空间引力波探测任务的预研究工作中, 我们根据已有的黑洞吸积理论, 在模拟中考虑直接吸积^[105]和随机吸积^[106-109]两种黑洞吸积模型, 研究了自旋对黑洞质量演化以及双黑洞并合率的影响。直接吸积模型下的模拟结果理论值与观测相比偏离相对较大; 虽然随机吸积模型下的结果能与观测值符合得较好, 但还是有一定的偏离。由此我们的模拟工作在直接吸积模型的基础上, 还考虑了 MHD 磁流体数值模拟结果对吸积盘的影响^[110-111], 并把数值模拟得出的结果应用到黑洞吸积过程, 模拟了星系中心大质量黑洞的演化过程, 其结果比单独采用直接吸积模型以及随机吸积模型都要好, 与观测的光度函数符合很好^[112-114]。

图 6 给出了 MHD 模型下模拟得到的光度函数 (蓝色圈) 和观测上得到光度函数 (黑色三角) 的比较结果, 从中可以看出在红移 $z = 0 \sim 2$ 区间内, 它们都能符合得很好。在直接吸积和随机吸积两种吸积模型中, 黑洞的质量增长率有明显的区别。直接吸积模型因为黑洞整体自旋大, 导致辐射转移率高, 使得黑洞质量增长效率较低, 光度函数的高光度段明显偏低,

而低光度段却偏高；随机吸积盘模型因为吸积过程能够使黑洞自旋保持在一个较低的值，辐射转移系数较小，黑洞质量增长较快，通过对吸积率做一定的限制，与光度函数的符合程度比直接吸积模型好很多。黑洞增长率的不同，会导致不同质量区间双黑洞并合率随红移的分布有比较大的差别。图 7 给出了不同吸积模型下在红移 $z = 0$ 处原则上可观测的黑洞并合数随红移的分布，红色三角点和蓝色圆点分别代表直接吸积和随机吸积模型下的结果。这个图所显示的并合率，与观测手段、观测仪器灵敏度无关，是高红移各处当地宇宙的并合率转换到红移 $z = 0$ 处的并合率。从图中可以看出，总的并合率两者基本上一致，但随机吸积模型下有更多的大质量双黑洞并合发生在更高的红移处，而直接吸积模型下大质量双黑洞并合的事件主要发生在低红移处。

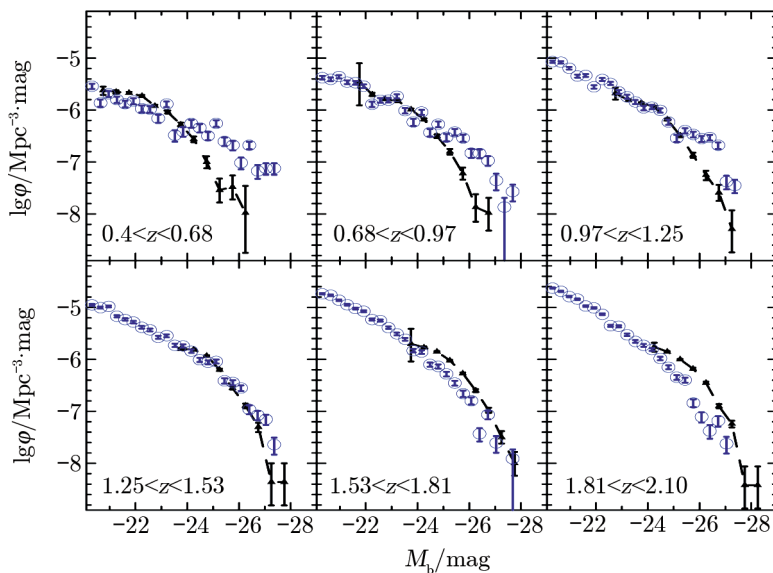


图 6 蒙特卡洛模拟所给出的类星体光度函数与实际观测数据的符合程度

在这个基础上，结合仪器参数设计，考虑引力波探测器对不同红移处、不同质量、不同质量比双黑洞并合的响应，计算每例双黑洞并合在一定观测时间内（我们假设双黑洞并合前，红移 $z = 0$ 处的观察者具有 1 年的观测时间）的信噪比，设定信噪比阈值（我们设定这个阈值为单个迈克尔逊干涉仪的信噪比，等于 7），就可以得到任务设计的探测事件率。对于预研究所建议的我国空间引力波探测任务设计，在所实现的吸积与并合动力学模型下的探测事件率随红移在不同总质量区间的分布如图 8 所示。可以看到，即使是在轻种子的模型下，任务设计也已将触角伸向了高红移处并合与吸积历史较简单的早期黑洞，将对高红移的星系成长和宇宙结构演化给出重要的观测数据。

3.4 对星团来源的中等质量黑洞 IMRI 波源的探测

中等质量黑洞如果存在于星系环境稠密的星团中，它将比较频繁地俘获其它天体，恒星质量的小黑洞相对于星团中心的中等质量黑洞的绕转将释放出相当可观的引力波，其并合时

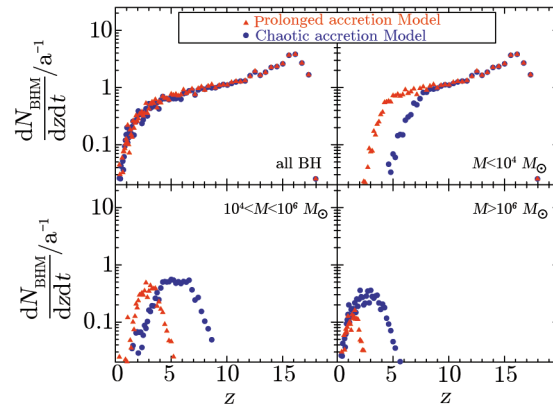


图 7 两种吸积机制下, 红移 $z = 0$ 处所观测到的黑洞并合率在不同质量区间随红移的分布

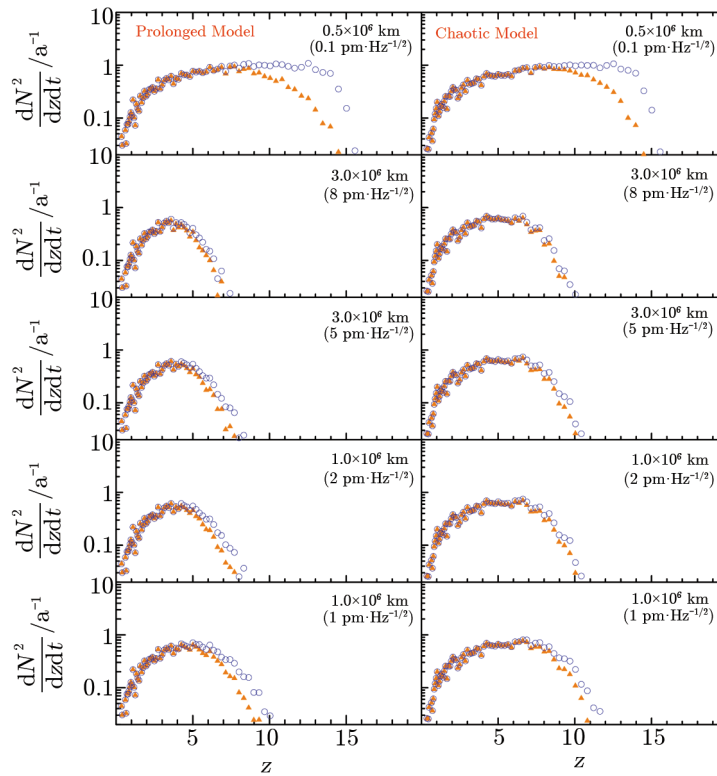


图 8 在所实现的宇宙学与天体物理模型下, 预研究所建议的空间引力波探测任务设计对宇宙学双黑洞并合事件的探测率

的频率在 0.1 ~ 1 Hz 频段, 是我国空间引力波探测任务设计的重要波源。

我们利用前面任务设计所给出的在一定信噪比阈值下对于给定总质量和折合质量的 IMRI 系统的平均可探测范围, 通过对中等质量黑洞的质量和位置分布积分, 得到星团来源恒星质量黑洞—中等质量黑洞并合系统的探测事件率, 其中采用了如下的天体物理假设^[85-87]。

(1) 星团的空间数密度在任务设计观测能力所能涉及的宇宙范围内, 相对于以光度距离计算的体积为常数, 具有局域宇宙的数值, 对于球状星团和年轻星团: $n_{GC} \approx 8 h^3 \cdot \text{Mpc}^{-3}$, $n_{YC} \approx 3 h^3 \cdot \text{Mpc}^{-3}$, 其中 $h = H_0 / (100 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1})$, 我们取 $h = 0.73$ 。我们在事件率估计计算中只考虑了球状星团, 即假设星团总体数密度为 $n_C = 8 h^3 \cdot \text{Mpc}^{-3}$, 这将给出事件率的保守估计。

(2) 小的致密天体被中心中等质量黑洞俘获的概率具有如下的形式:

$$\nu(M, \mu, z) \simeq 10^{-10} \frac{M}{\mu} \text{ a}^{-1} \quad ,$$

即与中心中等质量黑洞的质量成正比, 与系统的折合质量 (小黑洞的质量) 成反比。这个假设来源于对球状星团动力学的分析^[83-86], Pau Amaro-Seoane 等人的最新模拟结果也支持了这样的估计。Pau Amaro-Seoane 等人在 2010 年完成的工作中, 第一次实现了存在中心中等质量黑洞星团动力学的多体数值模拟。他们在恒星演化完全的星团中, 人为地植入一个中心中等质量黑洞, 相应修改中心引力势能与其他星体分布, 研究随后的动力学演化。一个幸运的结果是, 他们在一个实现中, 看到了星团中心质量为 $500 M_{\odot}$ 的黑洞对 1 个质量为 $20 M_{\odot}$ 的恒星级质量黑洞的俘获, 此后经过与其他高偏心率天体的若干强烈相互作用与交换, 形成的 IMRI 系统在 0.1 Ma 内并合, 他们还给出了该系统在进入 LISA 以及我国空间引力波任务设计工作频段时的偏心率^[86]。

在计算探测器的探测事件率时, 对于红移效应不可忽略的波源, 原则上需要对上式进行 $(1+z)$ 的修正, 不过由于碰撞率本身就是个量级估计, 我们考虑的红移范围又不大, 因此事实上这个修正对事件率计算结果的影响可以忽略。

(3) 在存在中等质量黑洞的星团中, 假设中等质量黑洞的质量分布函数为:

$$f(M) = \frac{f_{\text{tot}}}{\ln \frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{min}}}} \frac{1}{M} \quad .$$

M_{min} 和 M_{max} 分别是中心黑洞质量分布范围的下限与上限, 我们分别取它们的质量为 $10^2 M_{\odot}$ 和 $10^4 M_{\odot}$, 在这个范围之外, $f(M) = 0$; f_{tot} 是包含中等质量黑洞的星团占星团总数的比例, 这个量的选取是不确定的, 但它的影响容易估计, 因事件率与之成线性关系, 参考目前对星团中中等质量黑洞的观测和理论估计值, 我们取其为 $f_{\text{tot}} = 0.1$ ^[85,87], 即认为有 10% 的球状星团中存在着质量在 $10^2 \sim 10^4 M_{\odot}$ 之间的中等质量黑洞。

事件率通过对中等质量黑洞的质量和位置分布积分得到。表 3 列出了在不同仪器设计和背景天体混淆噪声假设下的事件率计算结果, 其中我们假定了并合前 1 年的观测时间, IMRI

系统折合质量取为 $10M_{\odot}$, 单个迈克尔逊探测信噪比阈值为 7。对比 LISA 及 eLISA, 预研究所给出的任务设计在探测与确认中等质量黑洞, 研究其环境动力学等方面具有实质性的优势; 而从技术指标要求的角度看, 预研究所建议的任务设计相比 LISA、eLISA 的要求并不十分苛刻, 适宜臂长的选择与技术指标的略微提高, 对中等质量黑洞的探测能力却有着显著提高, 这也是由于我们的任务设计一开始就以中等质量黑洞作为最主要科学目标。这个结果与我们利用前面探测范围的估算结果相一致, 即最大可探测光度距离上超过 2 倍的增长将带来事件率相应立方 (约 10 倍) 的增加。

表 3 我国空间引力波探测任务设计对于星团来源的 IMRI 系统的探测事件率

任务选择	基于并合前 1 年观测的事件率
1×10^6 km 臂长, $1 \sim 2 \text{ pm} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$	100 ~ 1000
3×10^6 km 臂长, $5 \sim 10 \text{ pm} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$	20 ~ 100
LISA (优于 eLISA)	1 ~ 3

4 结束语

空间引力波探测为人类认识理解宇宙早期演化、星系结构形成、超大质量黑洞的成长, 以及其他诸多天体物理学和宇宙学中复杂的物理过程提供了一个新窗口。

空间引力波探测已被列入中国科学院制订的空间科学 50 年规划中, 发展空间引力波探测项目, 对我国相关技术提出了极高的要求。自 2008 年至今, 针对我国空间引力波项目的预研究工作已经开展了 6 年, 在过去的 6 年中, 从最初的 0.1 pm 测距精度任务设计到科学院二期先导专项课题给出的更为切实且有利于我国相关技术扎实发展的任务技术指标规划, 我国空间引力波探测任务的设计方案和科学目标已基本确立, 预研究所给出的任务设计相对于 LISA 的主要区别是臂长缩短、灵敏频段的右移以及 0.01 ~ 1 Hz 频段灵敏度的提高, 而相对于作为 LISA 简化设计的 eLISA, 在相似频段的灵敏度具有显著优势。

以此为出发点, 我们讨论了我国空间引力波探测预研设计所瞄准的科学目标。在科学目标上, 预研任务设计除了和 LISA/eLISA 重叠波段的波源如大质量黑洞的并合、极大质量比绕转系统和河内白矮星绕转等外, 对于涉及中等质量黑洞并合过程的波源——总质量在几百至几万太阳质量的双黑洞绕转并合系统, 有更高的探测能力。

致谢

感谢张双南研究员在科学院空间科学先导科技专项课题“中国空间引力波探测任务概念研究”开展过程中给予我们的诸多宝贵意见与指导。相关课题研究工作的开展受益于胡文瑞院士在推动我国空间引力波探测任务上所做的努力。感谢丘成桐教授、杨乐教授和中国科学院晨兴数学中心长期以来在各方面为我们研究工作所提供的支持和帮助。

参考文献:

- [1] National Research Council. *New Worlds, New Horizons in Astronomy and Astrophysics*. Washington DC: The National Academies Press, 2010
- [2] Ferrarese L, Merritt D. *ApJ*, 2000, 539: L9
- [3] Gebhardt K, et al. *ApJ*, 2000, 539: L13
- [4] Ferrarese L. *ApJ*, 2002, 578(1): 90
- [5] Fan X, et al. *ApJ*, 2000, 122: 2833
- [6] Fan X, et al. *ApJ*. 2000, 121: 54
- [7] Fan X, et al. *ApJ*. 2004, 128: 515
- [8] Madau P, Rees M J. *ApJ*, 2001, 551: L27
- [9] Heger A, Woosley S E. *ApJ*, 2002, 567: 532
- [10] Press W H, Schechter P. *ApJ*, 1974, 187: 425
- [11] Lacey C, Cole S. *MNRAS*, 1993, 262: 627
- [12] Cole S, et al. *MNRAS*, 2000, 319: 168
- [13] Volonteri M, Haardt F, Madau P. *ApJ*, 2003, 582: 559
- [14] Volonteri M, Haardt F, Madau P. *ApJ*, 2003, 593: 661
- [15] Volonteri M, Madau P, Quataert E, et al. *ApJ*, 2005, 620: 69
- [16] Volonteri M, Rees M J. *ApJ*, 2005, 633: 624
- [17] Koushiappas S M, Zentner A R. *ApJ*, 2006, 639: 7
- [18] Koushiappas S M, Bullock J S, Dekel A. *MNRAS*, 2004, 354: 292
- [19] Begelman M C, Volonteri M, Rees M J. *MNRAS*, 2006, 370: 289
- [20] Sathyaprakash B S, Schutz B F. *Living Rev. Relativity*, 2009, 12: 2
- [21] Sesana A, Volonteri M, Haardt F. *MNRAS*, 2007, 377: 1711
- [22] Misner C, Thorne K, Wheeler J, eds. *Gravitation*. San Francisco: W H Freeman and Company. 1973
- [23] Thorne K. in *Three Hundred Years of Gravitation*. Hawking S K, Israel W, eds. Cambridge: Cambridge University Press, 1978
- [24] Weisberg J M, Taylor J H, Fowler L A. *Scientific American*, 1981, 245: 74
- [25] Taylor J H, Weisberg J M. *ApJ*, 1982, 253: 908
- [26] Burgay M, et al. *Nature*, 2003, 426: 531
- [27] Lyne A G, et al. *Science*, 2004, 303: 1153
- [28] Antoniadis J, et al. *Science*, 2013, 340: 6131
- [29] Saulson P R, ed. *Fundamentals of Interferometric Gravitational Wave Detectors*. World Scientific, 1994
- [30] <http://www.ligo.org>, 2014
- [31] <https://www.cascina.virgo.infn.it/>, 2014
- [32] <http://www.geo600.uni-hannover.de/>, 2014
- [33] <http://tamago.mtk.nao.ac.jp/spacetime>, 2014
- [34] <https://advancedligo.mit.edu>, 2014
- [35] <http://www.et-gw.eu/>, 2014
- [36] <http://www.anu.edu.au/Physics/ACIGA/>, 2014
- [37] <http://www.lisa.aei-hannover.de/>, 2014
- [38] Bender P, Brilliet A, Ciufolini I, et al, eds. *LISA pre-phase A report*. Garching: Max-Planck-Institut fuer Quantenoptic, 1998
- [39] *LISA Yellow Book*. ESA/SRE[2011]3, February 2011
- [40] 罗子人, 等. *力学进展*, 2013, 43: 415
- [41] NGO – Revealing a hidden Universe: opening a new chapter of discovery: Assessment Study Report. ESA/SRE(2011)19 December 2011
- [42] NGO White Paper: The Gravitational Universe A science theme addressed by the eLISA mission observing the entire universe, 2013

- [43] <http://sci.esa.int/lisa-pathfinder/>, 2014
- [44] Space Science and Technology in China: A Roadmap to 2050, Beijing: Science Press, 2010
- [45] Gong X, et al. *Class. Quantum Grav.*, 2011, 27: 084010
- [46] 刘润球, 等. 中国科学院空间科学战略性先导科技专项“空间科学预先研究项目”(第二批):“中国空间引力波探测计划任务概念研究”课题研究报告, 2013 年 9 月
- [47] Amaro-Seoane P, et al. eLISA: Astrophysics and cosmology in the millihertz regime. Preprint arXiv:1201.3621v1, 2012
- [48] Amaro-Seoane P, et al. Low-frequency gravitational-wave science with eLISA/NGO. Preprint arXiv:1202.0893v1, 2012
- [49] Marsh T R. *Class. Quantum Grav.*, 2011, 28(9): 094019
- [50] Nelemans G, et al. *A&A*, 2011, 368: 939
- [51] Bender P L, Hils D. *Class. Quantum Grav.*, 1997, 14: 1439
- [52] Farmer A J, Phinney E S. *MNRAS*, 2003, 346: 1197
- [53] Babak S, et al. *Class. Quantum Grav.*, 2010, 27: 084009
- [54] Baker J G, et al. *Bulletin of the American Astronomical Society*, 2010, 42: 574
- [55] Blaut A, Babak S, Kr ó lak A. *Phys. Rev. D*, 2010, 81: 063008
- [56] Berti E, Volonteri M. *ApJ*, 2008, 684: 822
- [57] Alberto Sesana, Jonathan Gair, Emanuele Berti, et al. *Phys. Rev. D*, 2011, 83: 044036
- [58] Jonathan R Gair, et al. *Class. Quantum Grav.*, 2011, 28: 094018
- [59] Bender P L, Begelman M C, Gair J R. Talk presented at the 8th International LISA Symposium. Stanford University: California, 2010
- [60] Bender P L. *Class. Quantum Grav.*, 2004, 21: S1203
- [61] Bender P L, Begelman M C, eds. *Trends in Space Science and Cosmic Vision 2020. (ESA SP-588) Noordwijk: ESA Publications Division, 2005: 33*
- [62] Amaro-Seoane P, et al. *Class. Quantum Grav.*, 2007, 24: 113
- [63] Miller M C, Freitag M, Hamilton D P, et al. *ApJ*, 2005, 631: L117
- [64] Levin Y. *MNRAS*, 2007, 374: 515
- [65] Hopman C. *Class. Quantum Grav.*, 2009, 26: 094028
- [66] Preto M, Amaro-Seoane P. *ApJ*, 2010, 708: L42
- [67] Merritt D, Alexander T, Mikkola S, et al. *Phys. Rev. D*, 2011, 84: 044024
- [68] Ryan F D. *Phys. Rev. D*, 1995, 52: 5707
- [69] Ryan F D. *Phys. Rev. D*, 1997, 56: 1845
- [70] Barack L, Cutler C. *Phys. Rev. D*, 2007, 75: 042003
- [71] Finn L S, Thorne K S. *Phys. Rev. D*, 2000, 6212: 124021
- [72] Drasco S. *Class. Quantum Grav.*, 2006, 23: 769
- [73] Cornish N J. *Class. Quantum Grav.*, 2011, 28: 094016
- [74] Gair J R, Porter E, Babak S, et al. *Class. Quantum Grav.*, 2008, 25: 184030
- [75] Babak S, et al. *Class. Quantum Grav.*, 2010, 27: 084009
- [76] Drasco S, Hughes S A. *Phys. Rev. D*, 2004, 69: 044015
- [77] Barack L, Cutler C. *Phys. Rev. D*, 2007, 75: 042003
- [78] Matsushita S, et al. *ApJ*, 2000, 545: L107
- [79] Van der marel R P. Preprint arXiv:astro-ph/0302101v2, 2003
- [80] Fabbiano G. *Science*, 2005, 307: 533
- [81] Maccarone T J, Kundu A, Zepf S E, et al. *Nature*, 2007, 445: 183
- [82] Portegies Zwart S F, McMillan S L W. *ApJ*, 2002, 576: 899
- [83] Miller M C, Hamilton D P. *MNRAS*, 2002, 330: 232
- [84] Miller M C. *ApJ*, 2002, 581: 438
- [85] Miller M C, Colbert E J M. *Int. J. Mod. Phys. D*, 2004, 13: 1
- [86] Miller M C. *ApJ*, 2005, 618: 426

- [87] Will C M. ApJ, 2004, 611: 1080
- [88] Konstantinidis S, Amaro-Seoane P, Kokkotas K D. Investigating the retention of intermediate-mass black holes in star clusters using N-body simulations Preprint: arXiv:1108.5175, 2011
- [89] Mandel I, Gair J. Class. Quantum Grav., 2009, 26: 094036
- [90] Gair J R, Mandel I, Miller M C, et al. General Relativity and Gravitation, 2011, 43: 485
- [91] Huerta E A, Gair J. Phys. Rev. D, 2011, 84: 064023
- [92] Huerta E A, Gair J, Brown D. Preprint arXiv:1111.3243v2, 2011
- [93] Lousto C O, Zlochower Y. Phys. Rev. D, 2009, 79: 064018
- [94] Gonzalez J A, Sperhake U, Bruggmann B. Phys. Rev. D, 2009, 79: 124006
- [95] Lousto C O, Nakano H, Zlochower Y, et al. Phys. Rev. Lett., 2010, 104: 211101
- [96] Lousto C O, Zlochower Y. Phys. Rev. Lett., 2011, 106: 041101
- [97] Lousto C, Nakano H, Zlochower Y, et al. Phys. Rev. D, 2010, 82: 104057
- [98] Han W, Cao Z. Phys. Rev. D, 2011, 84: 044014
- [99] Binsetruy P, Bohse A, Caprini C, et al. Cosmology Astropart. Phys., 2012 6: 027
- [100] Phinney S, et al, eds. The Big Bang Observer: direct detection of gravitational waves from the birth of the Universe to the present. NASA Mission Concept Study, 2004
- [101] Crowder J, Cornish N. Phys. Rev. D, 2005, 72: 083005
- [102] Seto N, Kawamura S, Nakamura T. Phys. Rev. Lett., 2011, 87: 221103
- [103] Asto S, et al. Jour. of Physics: Conf. Series, 2008, 120: 032004
- [104] Ando M, et al. Class. Quantum Grav., 2011, 27: 084010
- [105] Shakura N I, Sunyaev R A. A&A, 1973, 24: 337
- [106] King A R, et al. MNRAS, 2005, 363: 49
- [107] King A R, Pringle J E. MNRAS, 2006, 373(1): L90
- [108] King A R, Pringle J E, Hofmann J A. MNRAS, 2008, 385(3): 1621
- [109] Lodato G, Pringle J E. MNRAS, 2006 368(3): 1196
- [110] Gammie C F, Shapiro S L, McKinney J C. ApJ, 2004, 602(1): 312
- [111] Shapiro S L. ApJ, 2005, 620(1): 59
- [112] Croom S M, et al. MNRAS, 2004, 349(4): 1397
- [113] Yuan Y F. Astrophysics of Compact Objects. US: AIP, 2011: 369
- [114] 徐生年, 袁业飞. 中国科学: 物理学力学天文学, 2012, 42: 1256
- [115] Ajith P, et al. Phys. Rev. D, 2008, 77: 104017
- [116] Ajith P, et al. Preprint arXiv:0909.2867, 2009

Laser Interferometric Gravitational Wave Detection in Space and Structure Formation in the Early Universe

GONG Xue-fei¹, XU Sheng-nian¹, YUAN Ye-fei², BAI Shan³,
 BIAN Xing^{1,4}, CAO Zhou-jian^{1,4,5,6}, CHEN Ge-rui⁷, DONG Peng^{1,8},
 GAO Tian-shu⁹, GAO Wei^{1,4}, HUANG Shuang-lin⁹, LIU Ying^{4,10},
 LUO Zi-ren¹¹, SHAO Ming-xue^{8,12}, SUN Bao-san^{8,13}, TANG Wen-lin^{1,4},
 Yu Pin¹⁴, XU Peng^{8,15}, ZANG Yun-long^{1,4}, ZHANG Hai-peng⁹, LAU Yun-kau^{1,4,5,6,8}

(1. Academy of Mathematics and Systems Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. University of Science and Technology of China, Department of Astronomy, Hefei 230026,

China; 3. *Theoretisch-Physikalisches Institut, Friedrich-Schiller-Universität Jena, D-07743 Jena, Germany*; 4. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; 5. *State Key Laboratory of Scientific and Engineering Computing, Academy of Mathematics and Systems Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*; 6. *State Key Laboratory of Theoretical Physics, Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*; 7. *Beijing University of Technology, College of Applied Sciences, Beijing 100124, China*; 8. *Morningside Center of Mathematics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*; 9. *Capital Normal University, Beijing 100089, China*; 10. *Henan University, Department of Mathematics, Kaifeng 475001, China*; 11. *Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*; 12. *Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China*; 13. *Huazhong University of Science and Technology, School of Physics, Wuhan 430074, China*; 14. *Tsinghua University, Mathematical Sciences Center, Beijing 100083, China*; 15. *Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

Abstract: In this article, we report on the feasibility study of gravitational wave detection in space commissioned by the Chinese Academy of Sciences. We consider the relative merits between scientific significance and viability in technologies of a few representative mission options. The primary science driver is targeted at the detection of mergers of intermediate to super massive binary black holes in the structure assembly history as well as in dense stellar environments within our local Universe. By striking a balance between science and technological feasibility, a preliminary mission design is put forward for future Chinese gravitational wave detection mission alternative to eLISA. Our study indicates that, with suitable design of baseline parameters of a mission, gravitational wave detection in space holds the promise of being a new observation window to the structure formation stage at early Universe and shed light on certain outstanding issues, among which are the evolution of PopIII stars after the dark age, the co-evolution of galaxies and their central black holes, etc.

Key words: gravitational wave; Λ CDM hierarchical structure formation picture; intermediate mass black hole; binary black hole coalescence