0254-6124/2023/43(4)-0589-11　*Chin. J. Space Sci.*　空间科学学报

编者按　习近平总书记强调，“浩瀚的空天还有许多未知的奥秘有待探索，必须推动空间科学、空间技术、空间应用全面发展”。党的二十大报告明确“加快建设航天强国”，到2035年中国将“实现高水平科技自立自强，进入创新型国家前列”。为此，由中国科学院牵头，集中国空间天文、日球层物理、月球与行星科学、空间地球科学、微重力物理与空间生命科学领域的相关优势力量，围绕极端宇宙、时空涟漪、日地全景、宜居行星、太空格物等科学主题，开展了10个学科专业的发展战略研究。为让各界了解相关学科发展战略研究的成果，积极参与思考学科发展前沿和提出具有重大科学意义的空间科学任务，《空间科学学报》联合中国科学院国家空间科学中心论证中心，策划了《至2035年空间科学学科发展战略研究》专题，本期推出专题第3篇——吴岳良等：空间引力波探测综述与拟解决的科学问题。

WU Yuliang, HU Wenrui, WANG Jianyu, CHANG Jin, CAI Ronggen, ZHANG Yonghe, LUO Ziren, LU Youjun, ZHOU Yufeng, GUO Zongkuan. Review and Scientific Objectives of Spaceborne Gravitational Wave Detection Missions (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2023, **43**(4): 589−599. DOI:10.11728/cjss2023.04.yg08

空间引力波探测综述与拟解决的科学问题*

吴岳良[1,2,3,7]　胡文瑞[4]　王建宇[5,3]
常　进[6]　蔡荣根[7]　张永合[8]　罗子人[4,3]
陆由俊[6]　周宇峰[7,3]　郭宗宽[7,3]

1(中国科学院大学 引力波宇宙太极实验室　北京　100190)
2(中国科学院大学 国际理论物理中心 (亚太地区)　北京　100190)
3(国科大杭州高等研究院 浙江省引力波精密测量重点实验室　杭州　310024)
4(中国科学院力学研究所　北京　100190)
5(中国科学院上海技术物理研究所　上海　200083)
6(中国科学院国家天文台　北京　100101)
7(中国科学院理论物理研究所　北京　100190)
8(中国科学院微小卫星创新研究院　上海　201204)

摘　要　空间引力波探测将为人类探索宇宙打开中低频段（0.1 mHz～1 Hz）引力波观测的新窗口，这个频段的引力波事件被认为具有更重要的天文学、宇宙学以及物理学意义。其典型的波源包括超大和中等质量黑洞双星的并合、极端和中等质量比黑洞双星的绕转、银河系内数以百万计的致密双星系统以及随机引力波背景等，为研究宇宙起源与演化、黑洞形成与结构、引力和时空本质、暗能量和暗物质属性等提供了全新的方法和手段。21世纪以来，欧美联合的LISA计划成功发射了技术验证卫星LISA探路者，目前LISA计划已进入工程实施阶段，中国太极计划和天琴计划也相继发射了技术实验卫星太极一号和天琴一号，标志着空间引力波探测进入了全新的

* 国家重点研发计划项目（2020YFC2201501），国家自然科学基金项目（12147103，11821505）和中国科学院空间科学战略性先导科技专项项目（XDB23030100）共同资助

2023-06-12收到原稿，2023-07-31收到修定稿

Email：ylwu@ucas.ac.cn

©The Author(s) 2023. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

发展阶段。本文主要概述近年来国内外发展态势，详细凝炼空间引力波探测与研究的科学目标和未来发展的重点领域，系统优化引力波天文学、引力波物理学以及引力波宇宙学等相关学科布局，重点阐述推进空间引力波探测与研究的重要意义和发展战略。

关键词 空间引力波探测和研究，发展动态，战略规划

中图分类号 P352

Review and Scientific Objectives of Spaceborne Gravitational Wave Detection Missions

WU Yuliang[1,2,3,7] HU Wenrui[4] WANG Jianyu[5,3] CHANG Jin[6]
CAI Ronggen[7] ZHANG Yonghe[8] LUO Ziren[4,3]
LU Youjun[6] ZHOU Yufeng[7,3] GUO Zongkuan[7,3]

1(*Taiji Laboratory for Gravitational Wave Universe*, *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049)

2(*International Center for Theoretical Physics Asia-Pacific*, *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049)

3(*Zhejiang Key Laboratory for Gravitational Wave Precise Measurement*, *Hangzhou Institute for Advanced Study*, *University of Chinese Academy of Sciences*, *Hangzhou* 310024)

4(*Institute of Mechanics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100190)

5(*Shanghai Institute of Technical Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Shanghai* 200083)

6(*National Astronomical Observatories*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100101)

7(*Institute of Theoretical Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100190)

8(*Innovation Academy for Microsatellites of Chinese Academy of Sciences*, *Shanghai* 201204)

Abstract Spaceborne gravitational wave detection will open a new window for us to observe our universe by gravitational wave messenger in low frequency band (0.1 mHz to 1 Hz). It was believed the gravitational wave events in such frequencies have more significances in astronomy, cosmology and fundamental physics. The typical Sources include massive (intermediate) black hole mergers, extreme (intermediate) mass ration inspirals, galactic binaries and stochastic gravitational wave background. Those gravitational wave provide unique methods to study the origin and evolution of the universe, the formation and structure of the black hole, the nature of gravity and spacetime, dark matter, dark energy, *etc.* In recent years, the ESA-NASA joint mission LISA project had successfully launched its technology demonstration mission the LISA pathfinder and LISA had already enter phase B stage. The Chinese spaceborne gravitational wave missions such as Taiji and Tianqin also launched their technology verification satellites Taiji-1 and Tianqin-1. In this paper, we briefly introduce the recent domestic and international development trends on spaceborne gravitational wave detections, and refine in detail the scientific goals and key research fields in future development for the spaceborne gravitational wave detection and investigation. It is optimized systematically the gravitational wave astronomy and gravitational wave physics as well as gravitational wave cosmology and other relevant disciplinary layout. It is emphasized the importance and development strategy for promoting the spaceborne gravitational wave detection and research.

Key words Spaceborne gravitational wave detection and research, Development trend, Strategic planning

0 引言

2016 年 2 月 11 日激光干涉引力波天文台(LIGO)对外宣布其直接观测到引力波信号,开启了引力波天文学、引力波物理学以及量子–宇宙物理研究的新纪元,空间引力波探测和研究涉及的基础科学问题和关键技术攻关不仅成为当今前沿基础研究的突破口,而且成为未来前瞻技术研发的制高点,同时也成为世界科技强国和科技大国优先布局的重点科技领域。2016 年 2 月中国国家领导人对引力波探测和研究做出重要批示。

重要科学意义

引力波是宇宙中普遍存在的一种物质波,不同于电磁波是由带电粒子的加速运动产生,引力波产生于任何物质的运动和能量的改变。引力波可呈现为时空曲率的一种波动,其在行进过程中挤压或者拉伸时空,就像水面泛起的涟漪一般,以光速向外传播。因此,引力波提供了不同于电磁波的一种全新探索宇宙的新窗口,其探测范围可以覆盖几乎整个宇宙空间。引力波探测和研究将可揭开占宇宙组分 95% 以上的暗能量和暗物质的神秘面纱,呈现一幅完整的宇宙图景。量子引力和引力子是完成基础物理完整拼图的最关键环节,引力波探测和研究将为揭示引力本质和时空本质、精确检验爱因斯坦广义相对论和探测超越其理论的新物理、探索统一场论和宇宙起源及相关新现象提供一个不可替代的途径。引力波被称为物理学皇冠上的明珠,是大国间争相竞争的基础科学和尖端技术前沿。

探测的必要性

地面引力波天文台受地面噪声以及干涉仪尺度的限制,探测频段在 10 Hz 以上;且因波源特征质量小,引力波强度弱,可探测的宇宙尺度较有限(红移仅为 $z \approx 1$ 的尺度范围)。空间引力波探测可摆脱地面噪声和地面实验尺度的限制,在太空实现百万公里级精密激光干涉测量,其研究对象可囊括由近到远、由小到大具有更高红移、更大特征质量和尺度的引力波源,可覆盖从几千至几百万太阳质量的超大黑洞波源。空间引力波探测频段为中低频(0.1 mHz～1 Hz),具有极其丰富的波源,包括:大质量黑洞并合、大质量黑洞俘获其他致密天体、双致密天体绕转、早期宇宙相变和宇宙弦等波源都能够产生频率处于中低频段的引力波。中低频波源的特征质量大、引力波强度强,因此其探测范围可覆盖几乎全宇宙空间(红移为 $z \approx 12$ 的尺度范围),具有更丰富和深刻的宇宙学和天文学及其基础物理学意义,对应更重要的科学价值和应用前景。

探测的科学目标与战略意义

通过对超大黑洞并合波源的观测,可研究黑洞宿主星系并合及星系周围暗物质晕并合,届时将首次直接观测到百万太阳质量的超大黑洞,首次揭示超大黑洞的成因与结构及对宇宙演化的作用,首次描绘出宇宙大尺度结构形成的历史过程。通过对大质量黑洞俘获其他致密天体的引力波源观测,将首次提供黑洞附近强引力场的精细结构,为精确检验引力理论和探索统一理论提供理想的天体实验室。通过对早期宇宙相变和宇宙弦等波源的探测,空间引力波探测为研究早期宇宙和暴胀模型、对称破缺和物质起源、宇宙演化等提供无法替代的关键信息。通过对致密双星系统的观测,将首次描绘致密天体在银河系内的分布图景,为研究银河系演化和发展发挥关键作用。正如美国科学研究委员会(NRC)在 2007 年的报告中指出:“直接探测到中低频引力波将会产生一系列诺贝尔奖量级的重大发现”。

通过开展空间引力波探测,还可全面推动中国空间高精度引力参考传感器、星间超高精度激光干涉测量、高精度卫星编队、卫星姿轨控和温控等技术的成熟,带动一系列对国民经济和国家战略需求有重要价值的关键技术的发展;对全球重力场测绘、高精度全球时空坐标体系建立、资源勘探、自主导航及促进未来前沿空间科学实验等都具有重要的战略意义。

通过空间引力波探测必将极大促进物理学、天文学、宇宙学、光学、电子学、精密测量、工程机械、航空航天等诸多学科的研究进步和融合发展。同时还将凝聚一大批国内外专业人才队伍,培养一大批掌握前沿科学和技术的高素质青年研究人才,带动一系列国际学术交流与合作。

1 国际现状与发展态势

截至目前,国际上尚无在轨开展具有科学目标的空间引力波探测的卫星任务。

1.1 LISA 计划

世界上最早提出的空间引力波探测方案是1973 年欧美联合(ESA&NASA)提出的激光干涉空间天线(LISA)计划[1],这也是目前国际上发展最成熟的空间引力波探测方案。 LISA 计划在 20 世纪 90 年代完成了初步的任务设计[2],探测频段为 1 mHz～1 Hz 的引力波信号,主要的探测对象是超大质量黑洞,任务执行时间为 5 年。当时,LISA 计划发射三颗绕日类地轨道(Earth-like orbit)卫星组,形成边长为 5×10^6 km 的等边三角形卫星编队,落后地球大约 18°～20°。LISA 的卫星计划采用无拖曳控制技术,卫星间通过星间激光干涉技术来测量由引力波引起的距离变化。2011 年由于美国航天航空局(NASA)的退出,欧洲航天局(ESA)无法承担 LISA 的全部研制经费,为缩减经费,欧洲航天局(ESA)决定将 LISA 的臂长缩短为 10^6 km。同时 ESA 将 LISA 更名为 eLISA 计划,又名 NGO 计划[3,4]。由于臂长的变化导致 eLISA 探测频段向高频移动,同时探测灵敏度也有所降低。2013 年 11 月 ESA 宣布将空间引力波探测作为其规划和部署的两个重大科学项目之一,列为欧洲第三个重大空间科学卫星项目的候选者[5]。 2015 年 12 月 LISA 计划的技术验证卫星任务 LISA 探路者成功发射,并于 2016 年 1 月底成功抵达日地拉格朗日 L1 点,对 LISA 计划的部分核心关键技术开展了在轨验证,在轨实验取得了超预期的结果[6–10]。受 LISA 探路者在轨实验成功的鼓舞,ESA 于 2017 年宣布将空间引力波探测 LISA 计划正式列为欧洲第三个重大空间科学卫星项目,并将原来 2034 年的发射计划提前到 2030 年 12 月发射[1]。受 2016 年 LIGO 地面实验直接观测到引力波的激励,2017 年在中国科学院大学举办的首届“引力波探测国际会议”上,NASA 科学家宣布将再次加入 LISA 计划,随后 ESA 科学委员会同意接受 NASA 的回归申请,再次合作开展空间引力波探测计划的研究,将 eLISA 重新更名为 LISA 计划,并在星间距离构型上更接近于中国太极计划的任务方案,将臂长调整为 250×10^4 km,可以同时兼顾超大质量黑洞和中等质量黑洞的引力波信号[1]。2022 年 5 月 LISA 计划通过任务方案评审(Mission Formulation Review),评审委员会包括 ESA 和 NASA 的科学和工程专家,标志着 LISA 计划正式进入了工程研制阶段[11]。作为空间引力波探测项目的代表,LISA 计划在任务概念的层面为空间引力波探测学科描绘出了清晰的路径与平台,为国际上其他空间激光干涉引力波探测项目的设计提供了参考,并特别推动了空间引力波探测学科在波源分析、数据处理、相关波源天文学以及相对论理论本身等诸多方面的发展,促进空间引力波探测逐渐形成了一个学科研究领域。

1.2 后 LISA(LISA Follow-on)计划

在 LISA 计划的带动下,国际上出现了一批类 LISA 的空间引力波探测方案,最具代表性的计划有先进激光干涉天线(ALIA)计划[12,13]、宇宙大爆炸天文台(BBO)计划[14–17] 以及 1/10 赫兹干涉仪引力波天文台(DECIGO)计划[18–21]。其中 ALIA 计划于 2004 年由美国科学家提出,采用 LISA 相同的技术路线,同样采用日心类地轨道,由三颗卫星组成正三角形卫星编队,星间距为 5×10^5 km,运用星间激光干涉测量技术和无拖曳控制技术,开展引力波探测。ALIA 计划由于臂长相对较短,因此探测频段为 0.01～1 Hz,主要探测目标为中质量黑洞以及种子黑洞如何并合形成大质量黑洞的成长历史[12,13]。ALIA 计划的提出是作为 LISA 计划的后续,因为 LISA 计划最初的目标集中在超大质量黑洞,因此 ALIA 计划主要瞄准中等质量黑洞。同时作为一个后 LISA 的计划,ALIA 计划在星间激光干涉测量技术的指标相对于 LISA 计划需要提高两个半量级,这对当前的技术能力来说难以实现,因此 ALIA 计划暂时只停留在方案层面,还没有具体的研制和发射计划[12,13]。BBO 计划也于 2004 年由美国科学家提出,其技术路线、卫星轨道、关键技术也与 LISA 计划类似。BBO 计划包含 4 个卫星编队共 12 颗卫星,每个卫星编队由三颗呈正三角形分布的卫星组成。BBO 计划采用的星间距为 5×10^4 km。因为臂长短,BBO 计划的敏感探测频段为 0.1～10 Hz,主要探测目标为宇宙大爆炸遗留下来的随机引力波背景[14,17]。通过研究发现,在 0.1～10 Hz 频段,基于天体源的引力波信号较少,因此是最合适观测宇宙随机引力波背景的窗口。但是要观测宇宙大爆炸的引力波遗迹,对技术指标要求极高,需要在目前 LISA 计划的技术指标基础上再提升 6 个量级,因此 BBO 计划也被称为

下一代的空间引力波探测计划[15]。 DECIGO 计划由日本科学家于 2001 年提出, 采用的是与 LISA 计划不同的技术路线。DECIGO 计划打算将地面引力波天文台的探测技术直接搬到太空中应用。DECIGO 计划同样需要发射三颗卫星, 也是日心类地轨道, 呈正三角形编队。但是星间距只有 1000 km。DECIGO 计划的主要科学目标与 BBO 计划一致, 瞄准宇宙大爆炸的引力波遗迹[18]。虽然 DECIGO 计划的臂长比 BBO 计划要短, 但是由于采用了谐振腔干涉仪技术, 等效臂长与 BBO 计划相当, 因此其敏感频段也是 0.1 Hz 至 10 Hz。并且 DECIGO 计划的灵敏度与 BBO 计划相当, 技术挑战极大[19,20]。因此在 DECIGO 计划之前, 日本科学家安排了一个科学和技术验证卫星计划, 称为 B-DECIGO 计划[22,23], 由三颗卫星组成, 地心轨道, 臂长为 100 km, 灵敏度与 LISA 计划相当, 发射窗口也定为 2030 年。 B-DECIGO 计划已正式启动, 其技术探路者卫星计划在 2024 年发射。

1.3 地心轨道的空间引力波探测计划

无论是 LISA 计划, 还是 ALIA, DECIGO 和 BBO 计划, 均为日心轨道方案。NASA 曾在 2011 年组织过一个全面的空间引力波探测的方案论证, 面向全球征集 LISA 计划的对比方案。在 2012 年形成了详细的论证报告[24], 对各类方案进行了全面的论证, 包含若干地心轨道的空间引力波探测方案, 如 GEOGRAWI 计划[25], GADFLI 计划[26], OMEGA 计划[27,28] 和 LAGRANGE 计划[29] 等。臂长从 7×10^4～1×10^6 km 均有讨论。这个报告也为后续的空间引力波探测计划提供了全面的参考。国外空间引力波探测计划如图 1 所示。

地心轨道的优势是便于卫星测控以及数据传输; 同时, 卫星入轨时间短, 可以较快地开展科学探测。但地心轨道受月球引力影响大, 导致卫星编队轨道稳定性较差; 同时, 采用地心轨道, 卫星会交替进入太阳阴影区和太阳照射区, 因此卫星外热流不稳定, 对整星热控提出了很大的挑战[24]。目前国际上还没有正式启动的地心方案。

2 中国研究现状与发展态势

中国目前也尚未开展具有科学目标的在轨空间引力波探测的卫星任务。

2.1 ASTROD 计划

中国最早提出的空间引力波探测计划是基于光学探测的相对论的天体动力学空间检验(ASTROD)计划。ASTROD 计划是由倪维斗教授于 1994 年在台湾新竹清华大学提出, 并不断迭代[30–37]。2010 年, 倪维斗教授在中国科学院南京紫金山天文台任职期间, 拟定了优化的 ASTROD-GW 计划[38–40]。这个优化后的计划, 可以对频段 50 μHz～5 mHz 的低频引力波信号进行很好的探测。ASTROD-GW 计划由三颗卫星组成, 三颗卫星分别位于日地拉格朗日点 L3, L4, L5 点, 臂长为 2.6×10^8 km。除低频引力波信号外, ASTROD-GW 计划的科学目标还包括相对论时空基本定律的检验、太阳系天体参数(太阳系引力分布)的精密测量。 ASTROD-GW 计划也是定位为后 LISA 计划, 第一代空间引力波探测计划的成功, 将同样推动 ASTROD-GW 计划关键技术的成熟。并且 ASTROD-GW 计划在时间延迟干涉技术[41–43] 以及无拖曳控制方法[44,45] 的研究方面, 为世界空间引力波探测领域做出了非常大的贡献。

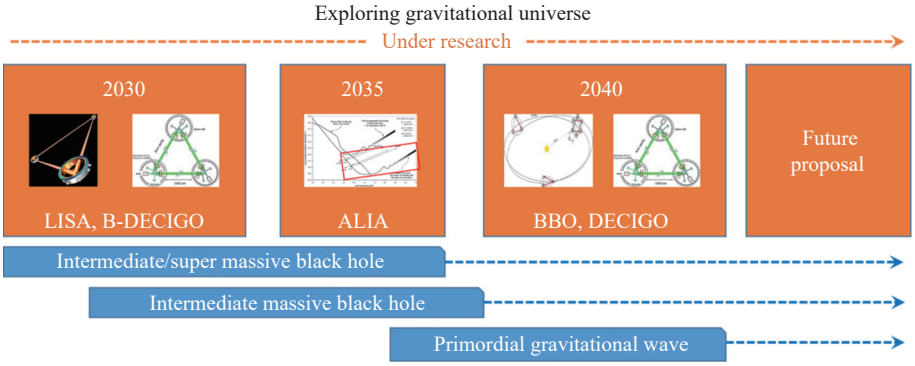


图 1 国外空间引力波探测计划

Fig. 1 Foreign space-borne gravitational wave detection program

2.2 太极计划与天琴计划

中国科学家于 2008 年开始探讨能与 LISA 计划同期发射的中国空间引力波探测计划，并由胡文瑞院士发起、中国科学院牵头，组织全国高校和工业部门的优势力量成立空间引力波探测论证组，研讨中国空间引力波探测在未来数十年内的发展路线图，并被列入中国科学院制定的空间 2050 年规划中[46]。基于中国科学院空间科学预研项目的支持，论证组开展了中国空间引力波探测的方案设计[47]，并对星间激光干涉仪、激光器、望远镜、无拖曳控制、惯性传感器、微推进系统和超稳超静卫星平台等关键技术进行了原理实验验证[48]。

中国科学院于 2012 年牵头成立了中国空间引力波探测工作组，由吴岳良院士和胡文瑞院士分别任正副组长。同年，吴岳良院士在 eLISA 首届联盟大会上，提出了中国的空间引力波探测计划[49]，并从技术和科学目标考虑，优先选择间距为 3×10^6 km 的正三角形卫星编队（不同于 LISA 最初的 5×10^6 km 和 eLISA 的 10^6 km），其可以同时兼顾超大质量黑洞和中等质量黑洞的引力波信号。中国科学家于 2012 年提出的方案，采用日心类地轨道，以太阳为中心落后（或超前）地球约 20°进行绕转[50]，如图 2 所示。此计划于 2016 年对外宣布为太极计划[51]，并持续开展了更为详细具体的科学目标和任务方案论证[52–62]。

2014 年中国空间引力波探测工作组的部分成员，由中山大学和华中科技大学牵头，开始并行探讨基于地心轨道的方案。在华中科技大学前期技术积累的基础上，经过国内外专家多方讨论，于 2015 年明确了关于地心轨道空间引力波探测的初步概念。2016 年此地心轨道空间引力波探测方案对外宣布为天琴计划[51]。天琴计划经过长期任务方案论证和科学目标研究[63–73]，确定以地球为中心，在高度约 10^5 km 的轨道上部署 3 颗航天器，构成等边三角形的卫星编队，星间距约为 1.7×10^5 km。

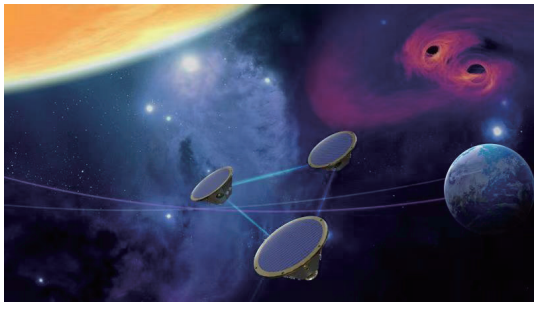


图 2 太极计划三星编队概念

Fig. 2 The conceptual diagram of Taiji mission's satellite constellation

太极团队创新地提出利用空间引力波天线联合编队开展引力波探测的想法，可大大提高对波源参数的估计精度[74,75]。在此基础上，太极和天琴科学团队利用太极-LISA[76–90]、天琴-LISA[91] 和太极–天琴-LISA[92–94] 编队探测的方法，进一步深化了空间引力波探测的任务设计，扩展了空间引力波探测的科学目标。

2.3 研究力量、机构及实验室

中国空间引力波探测团队主要由太极计划科学联盟、天琴计划团队和 ASTROD 研究团队组成，包含了中国科学院、高校和工业部门等 40 多家研究所、大学和企业，以及相关的全国重点实验室、中国科学院重点实验室、教育部重点实验室和地方省级重点实验室等 20 多家重点实验室，直接参与的科学、技术和工程人员已超过 1000 人。

2.4 相关卫星任务

为落实国家领导人关于加强中国引力波探测和研究的重要批示精神，中国科学院与国家相关部委组织多次研讨，超前谋划。中国科学院于 2016 年优先启动了战略性先导科技专项 B——多波段引力波探测。国防科技工业局于 2016 年启动了天琴一号卫星工程任务[95]。2018 年 8 月中国科学院在空间科学（二期）战略性先导科技专项中，优先安排实施微重力技术实验卫星太极一号工程任务[96,97]。太极一号作为太极计划的技术实验卫星率先于 2019 年 8 月成功发射，接着天琴一号作为其技术实验卫星于 2019 年 12 月发射成功。两组技术实验卫星均对激光干涉仪、无拖曳控制、惯性传感器、微推系统和超稳超静卫星平台技术开展了在轨验证，迅速缩小了与国外的差距[69,98]。

3 探测与研究涉及的前沿科学问题

鉴于空间引力波探测其覆盖的引力波信号波源类型更加丰富，覆盖的宇宙范围更深更广，因此相对于地面引力波天线而言，对应着更加丰富的物理学、天文学和宇宙学等基础科学方面的深刻意义。空间引力波探测卫星任务的发射，不仅将会像哈勃望远镜

和詹姆斯韦伯望远镜那样, 彻底改变人类对宇宙的认知, 甚至将作为一种新的信使完全改变探测宇宙的方式, 并将取得一系列诺贝尔奖级别的原创科学成果。

3.1 天文学

超大质量黑洞起源及其与宿主星系的协同演化。尽管恒星级黑洞的产生和形成较为清楚, 但对超大质量黑洞的起源和形成无论对天文学家还是物理学家却一直是个谜团, 通常认为其主要通过吸积成长, 尤其是并合在其成长过程中可能扮演了重要角色。星系因受吸积过程的反馈与黑洞协同演化和成长。但中等质量黑洞是否存在、超大质量黑洞是否由种子黑洞形成而来、其成长过程如何、何种机制决定了其与星系的协同演化等仍是未解之谜。中等/超大质量黑洞的起源、演化、分布及其与星系的协同演化一直是天文学领域的重大科学问题。

致密星体的本质、形成演化及其并合物理。致密天体(恒星级黑洞、中子星和白矮星)的本质、形成演化及其并合物理是上海交通大学与 *Science* 联合发布的 125 个前沿问题中天文部分的第 7, 16 和 21 个问题。LIGO/VIRGO 虽然已探测到约百例双黑洞合并、双中子星、中子星–黑洞并合等事件。然而这些致密双星如何形成演化、其内部结构、基本性质及分布如何, 是否存在夸克星等仍亟待解答。

极端/中等质量比旋进体起源、动力学和性质。超大质量黑洞能俘获其邻域恒星级或中等质量黑洞, 产生极端/中等质量比旋近事件, 但其起源和动力学过程仍是公认的难题。同时, 小天体在超大质量黑洞视界附近绕转多达 10^4～10^6 周期, 其引力波带有视界及周围(暗)物质分布等信息, 可以揭示旋进体的起源和性质, 确定中等质量黑洞的存在, 高精度检验黑洞无毛定理、视界和奇点是否存在及黑洞本质等基本科学问题。

3.2 物理学

引力和时空本质是什么, 是否存在统一场论。爱因斯坦的广义相对论作为引力的经典理论, 对宇观世界的描述取得了极大的成功, 但广义相对论引力理论由弯曲时空动力学来描述, 不可避免地导致时空的奇性。同时, 自然界的时空维数如何确定, 自然界的基本对称性是什么又如何产生和支配基本相互作用的。另外, 由弯曲时空动力学刻画的引力与由物质内禀性质描述的量子力学/量子场论在本质上是无法建立起统一理论, 必然导致超越广义相对论的引力理论和超统一理论, 并需打破爱因斯坦以纯粹的时空观和几何观作为统一场论的出发点, 进而从更基本的原理出发探究自然界的基本组元以及引力本质和时空本质, 解决时空奇性问题, 避免黑洞奇点问题, 确定时空维度问题, 理解对称性起源和破缺问题等。空间引力波探测为实现精确检验引力理论和等效原理, 认知时空和引力本质, 探测统一理论的新物理效应等重大科学目标提供了全新的手段和途径。

对称破缺机制、物质起源及暗物质属性。早期宇宙在暴胀和热大爆炸阶段, 对称性如何破缺, 物质如何形成, 暗物质属性是什么等仍是未解之谜。根据粒子物理理论, 早期宇宙的相变, 如电弱相变、QCD 相变等, 蕴含着统一理论、对称性破缺和物质起源等信息。暗物质的存在预示着一种新的相互作用, 也有可能在宇宙早期由标量场涨落或弱相互作用产生。早期宇宙相变和涨落的随机引力波能谱有助于揭示这一宇宙奥秘。

非微扰强相互作用本质与核子质量起源。根据粒子物理标准模型, 夸克的质量来源于希格斯机制, 但标准模型给出的夸克质量仅仅是核子质量的约 1/60, 绝大部分核子质量来源于强相互作用非微扰性质导致的动力学对称破缺。要理解核子质量的起源, 需揭示强相互作用的色禁闭和手征对称性破缺机制。此问题被 Clay 数学研究所列为 7 个千禧年大奖问题之一。中子星碰撞产生的引力波是当前研究这一体系最佳的空间核物理实验室。

引力场的量子特性和相关量子引力理论。一些物理学家尝试提出对广义相对论几何引力场进行量子化的方案, 但目前仍没有一个完善的有关广义相对论的量子引力理论。自然地导致基于物质内禀性质的引力规范理论作为超越爱因斯坦广义相对论的量子引力理论。然而, 物理学家还没有找到合适的实验方法, 探索引力场的量子特性、检验量子引力理论。为此, 提出有效的实验方法和途径来开展对量子引力理论的探索和检验成为引力波探测实验的前沿研究目标。

3.3 宇宙学

极早期宇宙暴胀产生和预加热机制及宇宙起源和演化。宇宙起源和演化是宇宙学领域的重大前沿科学问题之一。在早期宇宙中存在强非线性扰动过

程,包括暴胀期间粒子的产生、暴胀后的预加热、宇宙弦的振动及畴壁塌缩等,这些过程伴随引力波的产生。这些引力波信号频谱上的观测特征是什么,如何通过这些观测数据揭示早期宇宙物理,引力波探测提供了崭新的手段来理解早期宇宙发生的物理过程。

原初黑洞的形成机制及其观测效应。产生数量可观的原初黑洞并同时满足宇宙微波背景辐射观测的限制,暴胀曲率扰动的功率谱幅度在小尺度上需增强约 7 个量级。如何实现曲率扰动增强,如何确认黑洞是原初黑洞,原初黑洞形成之后其将如何随着宇宙膨胀而演化,空间引力波探测将可对原初双黑洞并合的引力波信号及原初黑洞产生时伴随的诱导引力波进行观测,从而对上述问题做出回答。

引力波探测为理解暗能量本质和宇宙学参数精确测定提供新途径。暗能量本质与精确测量哈勃常数是当前宇宙学领域的重大科学问题。一般认为宇宙加速膨胀是由暗能量引起,破解暗能量本质的关键是精确测量其状态方程。哈勃常数是刻画宇宙当前的膨胀率,但早期宇宙和晚期宇宙的测量结果严重不一致,使宇宙学陷入深刻危机。引力波标准汽笛作为极具潜力的晚期宇宙探针,在解决这些科学问题上将发挥关键作用。

单一引力波信使精确测量哈勃常数。引力波标准汽笛得到的红移取决于系统质量的大小,仍需要找到其寄主星系并借助光学观测来确定红移。而电磁辐射过程容易受环境污染,测量存在不可调和的系统误差。中子星的质量存在上限,对双中子星系统的引力波观测可以打破对光学观测的依赖,实现独立于电磁观测确定哈勃参数的手段,为精密测定宇宙演化参数起到一锤定音的作用。

4 结语

空间引力波探测不仅将打开关键的毫赫兹频段引力波探测窗口,产生一系列诺贝尔奖级别的原创科学成果,还将促进一系列尖端技术成熟,带动一系列对国民经济和国家发展有重要价值的关键技术的发展。推动空间引力波探测取得重大突破,不仅可极大地推进中国空间科学及相关基础科学的跨越发展,还可锻炼和培养一支具有国际竞争力的青年研究队伍。同时,将全面夯实中国空间科学及相关基础科学和前沿交叉科学研究的基础,实现中国空间科学领域在国际上的制高点,并为国家长远发展提供前瞻技术支撑。

致谢 本文得到引力波相关学科方向和领域 10 余位专家学者提出的有益建议和给予的大力支持,包括祝世宁院士、李得天院士、张新民研究员、董晓龙研究员、李华旺研究员、周泽兵教授、朱宗宏教授、耿朝强教授、乔从丰教授、康琦研究员、靳刚研究员。

本文撰写还得到了在引力波相关学科方向和领域多位骨干人员的广泛参与和讨论,包括曹周键、何吉波、刘河山、王智、徐鹏、康琦、贺建武、王鹏程、贾建军、蔡志鸣、陈弦、范锡龙、韩文标、胡一鸣、黄永锋、刘富坤、邵立晶、汤勇、王建民、于清娟、禹升华、赵文、缪海兴、马永亮、刘辉、刘京、张鑫、刘玉孝、边立功、周也铃、郭怀珂、张君、黄庆国、皮石、吴普训、赵文、王少江、金洪波、黄达、张云龙、朱兴江。

参考文献

[1] LISA scientific collaboration. LISA L3 mission proposal [EB/OL]. (2017-02-23) https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1702/1702.00786.pdf

[2] LISA scientific collaboration. LISA Pre-Phase A Report [EB/OL]. (1998-07-08) https://lisa.nasa.gov/archive2011/Documentation/ppa2.08.pdf

[3] LISA scientific collaboration. NGO, Revealing a hidden Universe: opening a new chapter of discovery-Assessment Study Report [EB/OL] . (2011-12-09) https://sci.esa.int/documents/34985/36280/1567258287202-NGO_YB.pdf

[4] LISA scientific collaboration. L1 Mission Reformulation, NGO - New Gravitational Wave Observer - Technical programmatic review report [EB/OL] . (2012-02-28) https://sci.esa.int/documents/34985/36280/1567258945033-NGO_technical_and_programmatic_review_report.pdf

[5] CESARSKY C and the Senior Survey Committee. Report of the Senior Survey Committee on the selection of the science themes for the L2 and L3 launch opportunities in the cosmic vision programme [EB/OL] . (2013-10-10) https://sci.esa.int/documents/34375/36249/1567259858030-ESA_Senior_Survey_Committee_report_L2 andL3_themes.pdf

[6] ARMANO M, AUDLEY H, AUGER G, *et al*. Sub-Femto-g free fall for space-based gravitational wave observatories: LISA pathfinder results[J]. *Physical Review Letters*, 2016, **116**(23): 231101

[7] ARMANO M, AUDLEY H, BAIRD J, *et al*. Beyond the required LISA free-fall performance: New LISA pathfinder results down to 20 μHz[J]. *Physical Review Letters*, 2018, **120**(6): 061101

[8] WANNER G. Space-based gravitational wave detection

and how LISA Pathfinder successfully paved the way[J]. *Nature Physics*, 2019, **15**(3): 200-202

[9] ARMANO M, AUDLEY H, BAIRD J, *et al*. LISA pathfinder performance confirmed in an open-loop configuration: Results from the free-fall actuation mode[J]. *Physical Review Letters*, 2019, **123**(11): 111101

[10] ARMANO M, AUDLEY H, BAIRD J, *et al*. Sensor noise in *LISA Pathfinder*: In-flight performance of the optical test mass readout[J]. *Physical Review Letters*, 2021, **126** (13): 131103

[11] ESA. LISA mission moves to final design phase [EB/OL] . (2022-05-04) https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/LISA_mission_moves_to_final_design_phase

[12] BENDER P L. Additional astrophysical objectives for LISA follow-on missions[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2004, **21**(5): S1203-S1208

[13] BENDER P L, BEGELMAN M C, GAIR J R. Possible LISA follow-on mission scientific objectives[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2013, **30**(16): 165017

[14] Phinney S, Bender P, Buchman R, *et al*. The Big Bang Observer: direct detection of gravitational waves from the birth of the Universe to the present[R]. NASA Lewis Research Center: NASA Mission Concept Study, 2004

[15] HARRY G M, FRITSCHEL P, SHADDOCK D A, *et al*. Laser interferometry for the Big Bang Observer[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2006, **23**(15): 4887-4894

[16] CUTLER C, HARMS J. Big Bang Observer and the neutron-star-binary subtraction problem[J]. *Physical Review D*, 2006, **73**(4): 042001

[17] CORBIN V, CORNISH N J. Detecting the cosmic gravitational wave background with the Big Bang Observer[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2006, **23**(7): 2435-2446

[18] SETO N, KAWAMURA S, NAKAMURA T. Possibility of direct measurement of the acceleration of the universe using 0.1 Hz band laser interferometer gravitational wave antenna in space[J]. *Physical Review Letters*, 2001, **87**(22): 221103

[19] KAWAMURA S, NAKAMURA T, ANDO M, *et al*. The Japanese space gravitational wave antenna – DECIGO[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2006, **23**(8): S125-S131

[20] KAWAMURA S, ANDO M, SETO N, *et al*. The Japanese space gravitational wave antenna: DECIGO[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2011, **28**(9): 094011

[21] SATO S, KAWAMURA S, ANDO M, *et al*. The status of DECIGO[J]. *Journal of Physics*: *Conference Series*, 2017, **840**(1): 012010

[22] KAWAMURA S, NAKAMURA T, ANDO M, *et al*. Space gravitational-wave antennas DECIGO and B-DECIGO[J]. *International Journal of Modern Physics D*, 2019, **28**(12): 1845001

[23] KAWAMURA S, ANDO M, SETO N, *et al*. Current status of space gravitational wave antenna DECIGO and B-DECIGO[J]. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2021, **5**: 05A105

[24] NASA. Gravitational-wave mission concept study final report[EB/OL] . (2012-08-09) https://pcos.gsfc.nasa.gov/physpag/GW_Study_Rev3_Aug2012-Final.pdf

[25] TINTO M, DE ARAUJO J C N, AGUIAR O D, *et al*. A geostationary gravitational wave interferometer (GEOGRAWI)[OL]. arXiv preprint arXiv: 1111.2576, 2011

[26] MCWILLIAMS S T. Geostationary antenna for disturbance-free laser interferometry (GADFLI)[OL]. arXiv preprint arXiv: 1111.3708, 2011

[27] HISCOCK B, HELLINGS R W. OMEGA: a space gravitational wave MIDEX mission[J]. *Bulletin of the Astronomical Society*, 1997, **29**(5): 1312

[28] HELLINGS R, LARSON S L, JENSEN S, *et al*. A low-cost, high-performance space gravitational astronomy mission[EB/OL]. (2011-01-20) https://pcos.gsfc.nasa.gov/studies/rfi/GWRFI-0007-Hellings.pdf

[29] CONKLIN J W, BUCHMAN S, AGUERO V, *et al*. LAGRANGE: LAser GRavitational-wave ANtenna at GEo-lunar Lagrange points[OL]. arXiv preprint arXiv: 1111.5264, 2011

[30] NI W T, SHY J T, TSENG S M, *et al*. Progress in mission concept study and laboratory development for the astrodynamical space test of relativity using optical devices (ASTROD)[C]//Proceedings Volume 3116, Small Spacecraft, Space Environments, and Instrumentation Technologies. San Diego: SPIE, 1997: 105-116

[31] RÜEDIGER A. Detecting gravitational waves with ground and space interferometers - with special attention to the space project ASTROD[J]. *International Journal of Modern Physics D*, 2002, **11**(7): 963-994

[32] NI W T. ASTROD - An overview[J]. *International Journal of Modern Physics D*, 2002, **11**(7): 947-962

[33] NI W T, BAO G, BAO Y, *et al*. ASTROD I, test of relativity, solar-system measurement and G-wave detection [J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2004, **45**: S118-S123

[34] NI W T, SHIOMI S, LIAO A C. ASTROD, ASTROD I and their gravitational-wave sensitivities[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2004, **21**(5): S641-S646

[35] NI W T, BAO Y, DITTUS H, *et al*. ASTROD I: Mission concept and Venus flybys[J]. *Acta Astronautica*, 2006, **59**(8/9/10/11): 598-607

[36] NI W T. ASTROD (astrodynamical space test of relativity using optical devices) and ASTROD I[J]. *Nuclear Physics B – Proceedings Supplements*, 2007, **166**: 153-158

[37] NI W T. ASTROD and ASTROD I - Overview and progress[J]. *International Journal of Modern Physics D*, 2008, **17**(7): 921-940

[38] NI W T. Super-ASTROD: probing primordial gravitational waves and mapping the outer solar system[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2009, **26**(7): 075021

[39] NI W T. ASTROD-GW: Overview and progress[J]. *International Journal of Modern Physics D*, 2013, **22**(1): 1341004

[40] WU A M, NI W T. Deployment and simulation of the AS-

TROD-GW formation[J]. *International Journal of Modern Physics D*, 2013, **22**(1): 1341005

[41] WANG G, NI W T. ASTROD-GW time delay interferometry[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2011, **52**(5): 427-442

[42] WANG G, NI W T. Orbit optimization for ASTROD-GW and its time delay interferometry with two arms using CGC ephemeris[J]. *Chinese Physics B*, 2013, **22**(4): 049501

[43] WANG G, NI W T. Orbit optimization and time delay interferometry for inclined ASTROD-GW formation with half-year precession-period[J]. *Chinese Physics B*, 2015, **24**(5): 059501

[44] SHIOMI S, NI W T. Acceleration disturbances and requirements for ASTROD I[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2006, **23**(13): 4415-4432

[45] BAO G, LIU L, SHAUL D, *et al*. Further computation of the test mass charging and disturbances in ASTROD I[J]. *Nuclear Physics B – Proceedings Supplements*, 2007, **166**: 246-248

[46] Strategic Research Group in the Space Field of Chinese Academy of Sciences. Space Science and Technology in China: A Roadmap to 2050[M]. Beijing: Science Press, 2009 (中国科学院空间领域战略研究组. 中国至2050年空间科技发展路线图[M]. 北京: 科学出版社, 2009)

[47] GONG X F, XU S N, BAI S, *et al*. A scientific case study of an advanced LISA mission[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2011, **28**(9): 094012

[48] LUO Ziren, BAI Shan, BIAN Xing, *et al*. Gravitational wave detection by space laser interferometry[J]. *Advances in Mechanics*, 2013, **43**(4): 415-447 (罗子人, 白姗, 边星, 等. 空间激光干涉引力波探测[J]. 力学进展, 2013, **43**(4): 415-447)

[49] WU Y L. Space Gravitational Wave Detection in China[C]//*Presentation to 1 st eLISA Consortium Meeting*, APC-Paris: ESA, 2012

[50] GONG X F, LAU Y K, XU S N, *et al*. Descope of the ALIA mission[J]. *Journal of Physics:Conference Series*, 2015, **610**(1): 012011

[51] CYRANOSKI D. Chinese gravitational-wave hunt hits crunch time[J]. *Nature*, 2016, **531**(7593): 150-151

[52] HU W R, WU Y L. The Taiji Program in Space for gravitational wave physics and the nature of gravity[J]. *National Science Review*, 2017, **4**(5): 685-686

[53] CAI R G, CAO Z J, GUO Z K, *et al*. The gravitational-wave physics[J]. *National Science Review*, 2017, **4**(5): 687-706

[54] HUANG Shuanglin, GONG Xuefei, XU Peng, *et al*. Gravitational wave detection in space—a new window in astronomy[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2017, **47**(1): 010404 (黄双林, 龚雪飞, 徐鹏, 等. 空间引力波探测——天文学的一个新窗口[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017, **47**(1): 010404)

[55] RUAN W H, GUO Z K, CAI R G, *et al*. Taiji program: Gravitational-wave sources[J]. *International Journal of Modern Physics A*, 2020, **35**(17): 2050075

[56] ZHAO Z W, WANG L F, ZHANG J F, *et al*. Prospects for improving cosmological parameter estimation with gravitational-wave standard sirens from Taiji[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, **65**(16): 1340-1348

[57] LUO Z R, GUO Z K, JIN G, *et al*. A brief analysis to Taiji: Science and technology[J]. *Results in Physics*, 2020, **16**: 102918

[58] LUO Z R, WANG Y, WU Y L, *et al*. The Taiji program: A concise overview[J]. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2021, **2021**(5): 05A108

[59] LUO Ziren, ZHANG Min, JIN Gang, *et al*. Introduction of Chinese space-borne gravitational wave detection program "Taiji" and "Taiji-1" satellite mission[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2020, **7**(1): 3-10 (罗子人, 张敏, 靳刚, 等. 中国空间引力波探测"太极计划"及"太极1号"在轨测试[J]. 深空探测学报, 2020, **7**(1): 3-10)

[60] LUO Z, ZHANG M, WU Y L. Recent status of Taiji program in China[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2022, **42**(4): 536-538

[61] ZHAO M Y, PENG X D, YANG Z, *et al*. Preliminary simulation of intersatellite laser interference link for the Taiji program[J]. *Journal of Astrnomical Telescope Instruments and Systems*, 2022, **8**(3): 038002

[62] LUO Ziren, ZHANG Min, JIN Gang. Overall discussion on the key problems of a space-borne laser interferometer gravitational wave antenna[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, **64**(24): 2468-2474 (罗子人, 张敏, 靳刚. 激光干涉引力波空间阵列核心问题的综合讨论[J]. 科学通报, 2019, **64**(24): 2468-2474)

[63] 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

[64] HU Y M, MEI J W, LUO J. Science prospects for space-borne gravitational-wave missions[J]. *National Science Review*, 2017, **4**(5): 683-684

[65] HU Yiming, MEI Jianwei, LUO Jun. TianQin project and international collaboration[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, **64**(24): 2475-2483 (胡一鸣, 梅健伟, 罗俊. 天琴计划与国际合作[J]. 科学通报, 2019, **64**(24): 2475-2483)

[66] WANG H T, JIANG Z, SESANA A, *et al*. Science with the TianQin observatory: Preliminary results on massive black hole binaries[J]. *Physical Review D*, 2019, **100**(4): 043003

[67] SHI C F, BAO J H, WANG H T, *et al*. Science with the TianQin observatory: Preliminary results on testing the no-hair theorem with ringdown signals[J]. *Physical Review D*, 2019, **100**(4): 044036

[68] HUANG S J, HU Y M, KOROL V, *et al*. Science with the TianQin Observatory: Preliminary results on Galactic double white dwarf binaries[J]. *Physical Review D*, 2020, **102**(6): 063021

[69] LUO Jun, AI Linghao, AI Yanli, *et al*. A brief introduction to the TianQin project[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2021, **60**(1/2): 1-19 (罗俊, 艾凌皓, 艾艳丽, 等. 天琴计划简介[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2021, **60**(1/2): 1-19)

[70] MILYUKOV V K. TianQin space-based gravitational wave detector: Key technologies and current state of implementation[J]. *Astronomy Reports*, 2020, **64**(12): 1067-1077

[71] MEI J W, BAI Y Z, BAO J H, *et al*. The TianQin project: current progress on science and technology[J]. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2021, **2021**(5): 05A107

[72] ZI T G, ZHANG J D, FAN H M, *et al*. Science with the TianQin Observatory: Preliminary results on testing the no-hair theorem with extreme mass ratio inspirals[J]. *Physical Review D*, 2021, **104**(6): 064008

[73] LIANG Z C, HU Y M, JIANG Y, *et al*. Science with the TianQin Observatory: Preliminary results on stochastic gravitational-wave background[J]. *Physical Review D*, 2022, **105**(2): 022001

[74] WANG G, NI W T, HAN W B, *et al*. Numerical simulation of sky localization for LISA-TAIJI joint observation[J]. *Physical Review D*, 2020, **102**(2): 024089

[75] RUAN W H, LIU C, GUO Z K, *et al*. The LISA-Taiji network[J]. *Nature Astronomy*, 2020, **4**(2): 108-109

[76] OMIYA H, SETO N. Searching for anomalous polarization modes of the stochastic gravitational wave background with LISA and Taiji[J]. *Physical Review D*, 2020, **102**(8): 084053

[77] GONG Y G, LUO J, WANG B. Concepts and status of Chinese space gravitational wave detection projects[J]. *Nature Astronomy*, 2021, **5**(9): 881-889

[78] WANG G, NI W T, HAN W B, *et al*. Alternative LISA-TAIJI networks[J]. *Physical Review D*, 2021, **104**(2): 024012

[79] WANG G, HAN W B. Observing gravitational wave polarizations with the LISA-TAIJI network[J]. *Physical Review D*, 2021, **103**(6): 064021

[80] GUO Z K. Standard siren cosmology with the LISA-Taiji network[J]. *Science China-Physics, Mechanics & Astronomy*, 2022, **65**(1): 210431

[81] CHEN J, YAN C S, LU Y J, *et al*. On detecting stellar binary black holes via the LISA-Taiji network[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2021, **21**(11): 285

[82] KANG Y C, LIU C, SHAO L J. Prospects for detecting exoplanets around double white dwarfs with LISA and Taiji[J]. *The Astronomical Journal*, 2021, **162**(6): 247

[83] RUAN W H, LIU C, GUO Z K, *et al*. The LISA-Taiji network: Precision localization of coalescing massive black hole binaries[J]. *Research*, 2021, **2021**: 6014164

[84] WANG G, HAN W B. Alternative LISA-TAIJI networks: Detectability of the isotropic stochastic gravitational wave background[J]. *Physical Review D*, 2021, **104**(10): 104015

[85] ORLANDO G, PIERONI M, RICCIARDONE A. Measuring parity violation in the Stochastic Gravitational Wave Background with the LISA-Taiji network[J]. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2021, **2021**(3): 069

[86] WANG L F, JIN S J, ZHANG J F, *et al*. Forecast for cosmological parameter estimation with gravitational-wave standard sirens from the LISA-Taiji network[J]. *Science China-Physics, Mechanics & Astronomy*, 2022, **65**(1): 210411

[87] WANG R J, RUAN W H, YANG Q, *et al*. Hubble parameter estimation via dark sirens with the LISA-Taiji network[J]. *National Science Review*, 2022, **9**(2): nwab054

[88] YANG Y C, HAN W B, YUN Q Y, *et al*. Tracing astrophysical black hole seeds and primordial black holes with LISA-Taiji network[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2022, **512**(4): 6217-6224

[89] LIU G C, NG K W. Overlap reduction functions for a polarized stochastic gravitational-wave background in the Einstein Telescope-Cosmic Explorer and the LISA-Taiji networks[J]. *Physical Review D*, 2023, **107**(10): 104040

[90] ZHANG X H, ZHAO S D, MOHANTY S D, *et al*. Resolving Galactic binaries using a network of space-borne gravitational wave detectors[J]. *Physical Review D*, 2022, **106**(10): 102004

[91] ZHANG C, GONG Y G, LIU H, *et al*. Sky localization of space-based gravitational wave detectors[J]. *Physical Review D*, 2021, **103**(10): 103013

[92] SETO N. Gravitational wave background search by correlating multiple triangular detectors in the mHz band[J]. *Physical Review D*, 2020, **102**(12): 123547

[93] HU Q, LI M Z, NIU R, *et al*. Joint observations of space-based gravitational-wave detectors: Source localization and implications for parity-violating gravity[J]. *Physical Review D*, 2021, **103**(6): 064057

[94] SHUMAN K J, CORNISH N J. Massive black hole binaries and where to find them with dual detector networks[J]. *Physical Review D*, 2022, **105**(6): 064055

[95] LUO J, BAI Y Z, CAI L, *et al*. The first round result from the TianQin-1 satellite[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2020, **37**(18): 185013

[96] The Taiji Scientific Collaboration. China's first step towards probing the expanding universe and the nature of gravity using a space borne gravitational wave antenna[J]. *Communications Physics*, 2021, **4**(1): 34

[97] LUO Z R, ZHANG M, WU Y L. Taiji-1 satellite mission[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2020, **40**(5): 691-692

[98] The Taiji Scientific Collaboration. Taiji program in space for gravitational universe with the first run key technologies test in Taiji-1[M]. *International Journal of Modern Physics A*, 2021, **36**(11/12): 2102002