

## 天琴计划简介\*

罗俊<sup>1,2</sup>, 艾凌皓<sup>1,2</sup>, 艾艳丽<sup>12</sup>, 安子聪<sup>1,2</sup>, 白伟钢<sup>1,2</sup>, 白彦峥<sup>3</sup>, 包佳慧<sup>18</sup>, 曹斌<sup>1,2</sup>, 常文博<sup>1,2</sup>, 陈琛<sup>2</sup>, 陈厚源<sup>1,2</sup>, 崔凯<sup>6</sup>, 单莹<sup>1,2</sup>, 丁延卫<sup>1,2</sup>, 段会宗<sup>1,2</sup>, 范会敏<sup>1,2</sup>, 范磊<sup>1,2</sup>, 范纹彤<sup>1,2</sup>, 范霄<sup>3</sup>, 冯文凡<sup>3</sup>, 付新菊<sup>7</sup>, 付瑜亮<sup>14</sup>, 高晨光<sup>7</sup>, 郜青<sup>15</sup>, 高添泉<sup>1,2</sup>, 高鑫<sup>1,2</sup>, 高永新<sup>4</sup>, 龚云贵<sup>3</sup>, 谷德峰<sup>1,2</sup>, 辜凌云<sup>1,2</sup>, 郭兴<sup>1,2</sup>, 韩西达<sup>1,2</sup>, 何芸<sup>13</sup>, 胡一鸣<sup>1,2</sup>, 胡越新<sup>4</sup>, 胡展<sup>14</sup>, 黄顺佳<sup>1,2</sup>, 黄祥青<sup>1,2</sup>, 黄潇博<sup>3</sup>, 纪沐婕<sup>1,2</sup>, 蒋贇<sup>1,2</sup>, 焦磊<sup>1,2</sup>, 靳鸿鸣<sup>3</sup>, 康小明<sup>11</sup>, 匡双阳<sup>3</sup>, 雷卫华<sup>3</sup>, 李程远<sup>2</sup>, 李洪银<sup>3</sup>, 李珏<sup>1,2</sup>, 李康康<sup>1,2</sup>, 李萌<sup>1,2</sup>, 李明<sup>1,2</sup>, 黎明<sup>4</sup>, 李涛<sup>1,2</sup>, 李霄栋<sup>2</sup>, 李语强<sup>5</sup>, 李祝<sup>1,2</sup>, 李竹溪<sup>3</sup>, 黎樽彪<sup>1,2</sup>, 练军想<sup>1,2</sup>, 梁正程<sup>1,2</sup>, 林伟<sup>2</sup>, 凌晨<sup>1,2</sup>, 刘辉<sup>6</sup>, 刘佳恒<sup>1,2</sup>, 刘建平<sup>1,2</sup>, 刘力<sup>3</sup>, 刘祺<sup>1,2</sup>, 刘尚飞<sup>2</sup>, 刘胜前<sup>1,2</sup>, 刘帅<sup>1,2</sup>, 刘旭辉<sup>7</sup>, 刘雁冲<sup>3</sup>, 刘源<sup>1,2</sup>, 龙江<sup>3</sup>, 龙军<sup>7</sup>, 陆璐<sup>1,2</sup>, 罗成健<sup>1,2</sup>, 骆颖欣<sup>1,2</sup>, 马波<sup>2</sup>, 梅健伟<sup>1,2</sup>, 孟云鹤<sup>1,2</sup>, 明珉<sup>1,2</sup>, 牛翔<sup>6</sup>, 潘加键<sup>1,2</sup>, 庞爱平<sup>9</sup>, 彭慧生<sup>17</sup>, 屈少波<sup>3</sup>, 区子维<sup>2</sup>, 任亮亮<sup>1,2</sup>, 申荣锋<sup>2</sup>, 沈岩<sup>17</sup>, 石常富<sup>1,2</sup>, 宋佳凝<sup>1,2</sup>, 宋培义<sup>3</sup>, 索晓晨<sup>3</sup>, 谭柏轩<sup>2</sup>, 谭定银<sup>3</sup>, 檀庄斌<sup>17</sup>, 涂良成<sup>1,2</sup>, 王成<sup>1,2</sup>, 王铖锐<sup>3</sup>, 王凤彬<sup>4</sup>, 王海天<sup>16</sup>, 王继河<sup>1,2</sup>, 王凌风<sup>8</sup>, 王尚胜<sup>6</sup>, 王泰卜<sup>6</sup>, 汪旭东<sup>7</sup>, 王炎<sup>3</sup>, 汪洋<sup>2</sup>, 汪一萍<sup>1,2</sup>, 王智钊<sup>1,2</sup>, 魏东东<sup>1,2</sup>, 文明轩<sup>1,2</sup>, 吴庆文<sup>3</sup>, 吴勤勤<sup>11</sup>, 吴书朝<sup>3</sup>, 吴先霖<sup>1,2</sup>, 夏冰<sup>1,2</sup>, 夏旭<sup>14</sup>, 肖青<sup>1,2</sup>, 肖小圆<sup>2</sup>, 谢宁<sup>1,2</sup>, 徐家豪<sup>1,2</sup>, 颜浩<sup>1,2</sup>, 闫勇<sup>1,2</sup>, 杨铖<sup>17</sup>, 杨诚鏊<sup>1,2</sup>, 杨涓<sup>14</sup>, 杨列<sup>1,2</sup>, 杨山清<sup>1,2</sup>, 叶伯兵<sup>1,2</sup>, 叶贤基<sup>1,2</sup>, 叶小容<sup>1,2</sup>, 尹航<sup>3</sup>, 于达仁<sup>6</sup>, 袁慧敏<sup>1,2</sup>, 曾明<sup>6</sup>, 张才士<sup>1,2</sup>, 张德轩<sup>1,2</sup>, 张建东<sup>1,2</sup>, 张静怡<sup>1,2</sup>, 张锦绣<sup>1,2</sup>, 张居正<sup>1,2</sup>, 张开<sup>3</sup>, 张蜡宝<sup>10</sup>, 张立华<sup>4</sup>, 张涛<sup>4</sup>, 张鑫<sup>8</sup>, 张鑫<sup>1,2</sup>, 张雪峰<sup>1,2</sup>, 赵宏超<sup>1,2</sup>, 赵玥<sup>1,2</sup>, 赵泽伟<sup>8</sup>, 周鸿博<sup>9</sup>, 周金灵<sup>1,2</sup>, 周立祥<sup>1,2</sup>, 周泽兵<sup>3</sup>, 朱凡<sup>1,2</sup>, 朱炬波<sup>1,2</sup>, 訾铁光<sup>1,2</sup>, 邹远川<sup>3</sup>

1. “天琴计划”教育部重点实验室, 中山大学天琴中心, 天琴前沿科学中心, 国家航天局引力波研究中心, 广东 珠海 519082
2. 中山大学物理与天文学院, 广东 珠海 519082
3. 华中科技大学物理学院, 湖北 武汉 430074
4. 航天东方红卫星有限公司, 北京 100094
5. 中国科学院云南天文台, 云南 昆明 650011
6. 哈尔滨工业大学能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001
7. 北京控制工程研究所, 北京 100094
8. 东北大学理学院, 辽宁 沈阳 110004
9. 贵州大学电气工程学院, 贵州 贵阳 550025
10. 南京大学电子科学与工程学院, 江苏 南京 210093
11. 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240

\* 收稿日期: 2020-12-23 录用日期: 2020-12-28 网络首发日期: 2021-01-13

基金项目: 广东省基础与应用基础重大项目(2019B030302001)

作者简介: 罗俊(1956年生), 男; 研究方向: 引力实验; E-mail: junluo@mail.sysu.edu.cn

通信作者: 梅健伟(1980年生), 男; 研究方向: 引力及黑洞物理; E-mail: meijw@mail.sysu.edu.cn

12. 深圳技术大学工程物理学院, 广东 深圳 518118
13. 武汉大学电子信息学院, 湖北 武汉 430072
14. 西北工业大学航空航天学院, 陕西 西安 710072
15. 西南大学物理科学与技术学院, 重庆 400715
16. 中国科学院紫金山天文台, 江苏 南京 210023
17. 中山大学航空航天学院, 广东 广州 510006
18. 冲绳科学技术大学院大学, 日本 冲绳 951-8073

**摘要:** 天琴计划预期于 2035 年左右发射并部署边长约 17 万公里的等边三角形卫星星座, 构成一个引力波天文台—天琴。天琴将对  $10^{-4}$ ~1 Hz 频段的引力波进行探测, 为人类描绘一幅更全面的宇宙图景。在本文中, 我们对天琴计划的背景和提出过程、天琴的主要探测对象和主要科学目标、天琴需要攻克的核心关键技术问题、天琴计划技术路线图及进展等进行介绍, 以方便更多人加入这一项富有挑战而又激动人心的工作。

**关键词:** 天琴计划; 空间引力波探测; 引力波

**中图分类号:** O4; P1    **文献标志码:** A    **文章编号:** 0529-6579 (2021) 01-0001-19

## A brief introduction to the TianQin project

LUO Jun<sup>1,2</sup>, AI Linghao<sup>1,2</sup>, AI Yanli<sup>12</sup>, AN Zicong<sup>1,2</sup>, BAI Weigang<sup>1,2</sup>, BAI Yanzheng<sup>3</sup>, BAO Jiahui<sup>18</sup>, CAO Bin<sup>1,2</sup>, CHANG Wenbo<sup>1,2</sup>, CHEN Chen<sup>2</sup>, CHEN Houyuan<sup>1,2</sup>, CUI Kai<sup>6</sup>, DAN Ying<sup>1,2</sup>, DING Yanwei<sup>1,2</sup>, DUAN Huizong<sup>1,2</sup>, FAN Huimin<sup>1,2</sup>, FAN Lei<sup>1,2</sup>, FAN Wentong<sup>1,2</sup>, FAN Xiao<sup>3</sup>, FENG Wenfan<sup>3</sup>, FU Xinju<sup>7</sup>, FU Yuliang<sup>14</sup>, GAO Chenguang<sup>7</sup>, GAO Qing<sup>15</sup>, GAO Tianquan<sup>1,2</sup>, GAO Xin<sup>1,2</sup>, GAO Yongxin<sup>4</sup>, GONG Yungui<sup>3</sup>, GU Defeng<sup>1,2</sup>, GU Lingyun<sup>1,2</sup>, GUO Xing<sup>1,2</sup>, HAN Xida<sup>1,2</sup>, HE Yun<sup>13</sup>, HU Yiming<sup>1,2</sup>, HU Yuexin<sup>4</sup>, HU Zhan<sup>14</sup>, HUANG Shunji<sup>1,2</sup>, HUANG Xiangqing<sup>1,2</sup>, HUANG Xiaobo<sup>3</sup>, JI Mujie<sup>1,2</sup>, JIANG Yun<sup>1,2</sup>, JIAO Lei<sup>1,2</sup>, JIN Hongming<sup>3</sup>, KANG Xiaoming<sup>11</sup>, KUANG Shuangyang<sup>3</sup>, LEI Weihua<sup>3</sup>, LI Chengyuan<sup>2</sup>, LI Hongyin<sup>3</sup>, LI Jue<sup>1,2</sup>, LI Kangkang<sup>1,2</sup>, LI Meng<sup>1,2</sup>, LI Ming<sup>1,2</sup>, LI Ming<sup>4</sup>, LI Tao<sup>1,2</sup>, LI Xiaodong<sup>2</sup>, LI Yuqiang<sup>5</sup>, LI Zhu<sup>1,2</sup>, LI Zhuxi<sup>3</sup>, LI Zunbiao<sup>1,2</sup>, LIAN Junxiang<sup>1,2</sup>, LIANG Zhengcheng<sup>1,2</sup>, LIN Weipeng<sup>2</sup>, LING Chen<sup>1,2</sup>, LIU Hu<sup>6</sup>, LIU Jiaheng<sup>1,2</sup>, LIU Jianping<sup>1,2</sup>, LIU Li<sup>3</sup>, LIU Qi<sup>1,2</sup>, LIU Shangfei<sup>2</sup>, LIU Shengqian<sup>1,2</sup>, LIU Shuai<sup>1,2</sup>, LIU Xuhui<sup>7</sup>, LIU Yanchong<sup>1,2</sup>, LIU Yuan<sup>1,2</sup>, LONG Jiang<sup>3</sup>, LONG Jun<sup>7</sup>, LU Lu<sup>1,2</sup>, LUO Chengjian<sup>1,2</sup>, LUO Yingxin<sup>1,2</sup>, MA Bo<sup>2</sup>, MEI Jianwei<sup>1,2</sup>, MENG Yunhe<sup>1,2</sup>, MING Min<sup>1,2</sup>, NIU Xiang<sup>6</sup>, PAN Jiajian<sup>1,2</sup>, PANG Aiping<sup>9</sup>, PENG Huisheng<sup>17</sup>, QU Shaobo<sup>3</sup>, QU Ziwei<sup>2</sup>, REN Liangliang<sup>1,2</sup>, SHEN Rongfeng<sup>2</sup>, SHEN Yan<sup>17</sup>, SHI Changfu<sup>1,2</sup>, SONG Jianing<sup>1,2</sup>, SONG Peiyi<sup>3</sup>, SUO Xiaochen<sup>3</sup>, TAN Baixuan<sup>2</sup>, TAN Dingyin<sup>3</sup>, TAN Zhuangbin<sup>17</sup>, TU Liangcheng<sup>1,2</sup>, WANG Cheng<sup>1,2</sup>, WANG Chengrui<sup>3</sup>, WANG Fengbin<sup>4</sup>, WANG Haitian<sup>16</sup>, WANG Jihe<sup>1,2</sup>, WANG Lingfeng<sup>8</sup>, WANG Shangsheng<sup>6</sup>, WANG Taibu<sup>6</sup>, WANG Xudong<sup>7</sup>, WANG Yan<sup>3</sup>, WANG Yang<sup>2</sup>, WANG Yiping<sup>1,2</sup>, WANG Zhizhao<sup>1,2</sup>, WEI Dongdong<sup>1,2</sup>, WEN Mingxuan<sup>1,2</sup>, WU Qingwen<sup>3</sup>, WU Qinqin<sup>11</sup>, WU Shuchao<sup>3</sup>, WU Xianlin<sup>1,2</sup>, XIA Bing<sup>1,2</sup>, XIA Xu<sup>14</sup>, XIAO Qing<sup>1,2</sup>, XIAO Xiaoyuan<sup>2</sup>, XIE Ning<sup>1,2</sup>, XU Jiahao<sup>1,2</sup>, YAN Hao<sup>1,2</sup>, YAN Yong<sup>1,2</sup>, YANG Cheng<sup>17</sup>, YANG Chengjun<sup>1,2</sup>, YANG Juan<sup>14</sup>, YANG Lie<sup>1,2</sup>, YANG Shanqing<sup>1,2</sup>, YE Bobing<sup>1,2</sup>, YE Xianji<sup>1,2</sup>, YE Xiaorong<sup>1,2</sup>, YIN Hang<sup>3</sup>, YU Daren<sup>6</sup>, YUAN Huimin<sup>1,2</sup>, ZENG Ming<sup>6</sup>, ZHANG Caishi<sup>1,2</sup>, ZHANG Dexuan<sup>1,2</sup>, ZHANG Jiandong<sup>1,2</sup>, ZHANG Jingyi<sup>1,2</sup>, ZHANG Jinxiu<sup>1,2</sup>, ZHANG Juzheng<sup>1,2</sup>, ZHANG Kai<sup>3</sup>, ZHANG Labao<sup>10</sup>, ZHANG Lihua<sup>4</sup>, ZHANG Tao<sup>4</sup>, ZHANG Xin<sup>8</sup>, ZHANG Xin<sup>1,2</sup>, ZHANG Xuefeng<sup>1,2</sup>, ZHAO Hongchao<sup>1,2</sup>, ZHAO Yue<sup>1,2</sup>, ZHAO Zewei<sup>8</sup>, ZHOU Hongbo<sup>9</sup>, ZHOU Jinling<sup>1,2</sup>, ZHOU Lixiang<sup>1,2</sup>, ZHOU Zebing<sup>3</sup>, ZHU Fan<sup>1,2</sup>, ZHU Jubo<sup>1,2</sup>, ZI Tieguang<sup>1,2</sup>, ZOU Yuanchuan<sup>3</sup>

1. MOE Key Laboratory of TianQin Mission, TianQin Research Center for Gravitational Physics, Frontiers Science Center for TianQin, CNSA Research Center for Gravitational Waves, Sun Yat-sen University (Zhuhai Campus), Zhuhai 519082, China
2. School of Physics and Astronomy, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China
3. School of Physics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China
4. DFH Satellite Co., Ltd., Beijing 100094, China
5. Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011, China
6. School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China
7. Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100094, China
8. Department of Physics, Northeastern University, Shenyang 110004, China
9. The Electrical Engineering College, Guizhou University, Guiyang 550025, China
10. School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China
11. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China
12. School of Engineering Physics, Shenzhen University of Technology, Shenzhen 518118, China
13. Electronic Information School, Wuhan University, Wuhan 430072, China
14. School of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China
15. School of Physical Science and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China
16. Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023, China
17. School of Aeronautics and Astronautics, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China
18. Okinawa Institute of Science and Technology Graduate University, Okinawa 951-8073, Japan

**Abstract:** The TianQin project aims to launch and deploy around 2035 an equilateral triangular constellation with each side measuring 170 000 kilometers, forming a gravitational wave observatory: TianQin. TianQin aims to detect gravitational waves in the frequency range  $10^{-4}$ ~1 Hz and to draw a more comprehensive picture of the universe for mankind. In this article, we introduce the background and the proposing process, the major gravitational wave sources and scientific objectives, the key technology problems to be solved, the technology roadmap, and the current progress of the TianQin project, so as to facilitate more people to join in this challenging and exciting work.

**Key words:** TianQin; space-based gravitational wave detection; gravitational waves

## 1 引言

1915年, 爱因斯坦提出广义相对论, 给出了迄今最优美精确的引力理论。广义相对论提出后不久, 爱因斯坦就从理论上预言了引力波<sup>[1-2]</sup>。但是人们对引力波的认识并非一番风顺, 而是经历了一段曲折的过程, 包括爱因斯坦、爱丁顿等广义相对论的早期权威, 都对引力波的物理真实性表示过怀疑, 人们围绕引力波是否真实存在、引力波是否能够携带和输送能量等问题进行了长时间的争论<sup>[3-4]</sup>。1974年, Hulse-Taylor 脉冲双星被发现, 人们才在观测上找到了引力波存在的间接证据<sup>[5]</sup>, 而引力波的直接探测的实现则等到40多年后的2015年<sup>[6]</sup>。

引力波是引力场的波动, 它在数学上表现为对时空度规的微扰。引力束缚的双星系统是一种典型的引力波源, 它们辐射的引力波强度有一个简单的估算公式:

$$h \sim \frac{r_1 r_2}{a D}, \quad (1)$$

其中  $r_1$  和  $r_2$  是与两个天体质量相同的施瓦西黑洞的半径,  $a$  是两个天体之间的距离,  $D$  是双星系统到观察者的距离。以美国激光干涉引力波天文台 (LIGO) 探测到的第一例引力波事件 GW150914<sup>[6]</sup> 为例, 两个质量分别为36倍和29倍太阳质量的黑洞于大约13亿光年外并合, 所辐射的引力波强度峰值估计为

$$h \sim (36r_s) \times (29r_s) \times (1.3 \times 10^9 \times 365 \times 24 \times 3600 \times 3 \times 10^5 \text{ km})^{-1} \times (65r_s)^{-1} \sim 10^{-21}, \quad (2)$$

其中  $r_s \approx 2.9 \text{ km}$  为一个质量与太阳相等的施瓦西黑洞的半径。公式 (2) 表示来自 GW150914 的引力波仅能够使地球绕太阳公转的轨道发生约一个原子大小的形变! 因此, 引力波的探测异常困难。

美国马里兰大学的约瑟夫-韦伯 (Joseph Weber) 教授是引力波直接探测的先驱, 他从 20 世纪 60 年代开始了最早的引力波探测器——韦伯棒的研制, 并于 60 年代末宣布探测到引力波信号<sup>[7]</sup>。虽然韦伯的实验结果后来受到了广泛质疑, 但他的工作极大促进了世界各国科学家对引力波实验探测的关注。人们从 20 世纪 70 年代到本世纪初建设和运行了多个共振棒探测器<sup>[8]</sup>, 但是由于共振棒探测器探测带宽通常只有几个到几十赫兹, 极大限制了有可能被探测到的引力波源, 各个共振棒探测器经过多年运行之后, 都没能探测到引力波信号<sup>[9-12]</sup>。

利用激光干涉仪探测引力波的方案在 20 世纪 60 年代初期被提出<sup>[13]</sup>。与共振棒探测器相比, 激光干涉仪引力波探测器具有探测频段宽的优点。目前, 世界上已建成的地面激光干涉仪引力波探测器有 LIGO (高新 LIGO)、Virgo (高新 Virgo)、GEO600、TAMA300 和 KAGRA, 这些探测器的激光干涉臂都相互垂直, 其中 TAMA300 已退役, GEO600 更多充当了新技术的试验平台。到目前为止, LIGO 与 Virgo 合作组已经公布了 GWTC-1 和 GWTC-2 两个引力波数据集。GWTC-1 包含了 O1 和 O2 两次运行观测探测到的共 11 个致密双星并合事件<sup>[6, 14-20]</sup>, 其中一个为双中子星并合事件 GW170817, 并随之触发了全面深入的多信使联合观测, 极大地加深了我们对于高密高压物体状态方程、R 过程元素合成等物理现象的理解<sup>[21]</sup>。GWTC-2 包含了从 2019 年 4 月到 9 月的第三次观测运行的前半部分 O3a 中观测到的 39 例误警率低于两年一次的事件<sup>[22]</sup>。其中包含了第二例双中子星并合事件 GW190425<sup>[23]</sup>, 两例质量比较大的事件: GW190412<sup>[24]</sup> 和其中一个致密天体处于低质量间隙中的 GW190814<sup>[25]</sup>, 以及一个天体处于高质量间隙的 GW190521<sup>[26]</sup>, 还有可能为中子星黑洞并合的事件。这些事件为人们研究黑洞和中子星的形成

与演化提供了非常重要的数据, 人们已经利用这些数据开展了一系列的研究。

除了利用大型激光干涉仪, 还可以借助脉冲星来获取引力波的信息。脉冲星测时阵列通过对一系列毫秒脉冲星的高精度时序信号作统计来判断是否存在引力波信号。目前国际上的脉冲星测时阵列主要有三个合作组织: 欧洲的 EPTA<sup>[27]</sup>, 澳大利亚的 PPTA<sup>[28]</sup>, 以及美国的 NANOGrav<sup>[29]</sup>, 他们分别依托欧洲 5 个 100 米级望远镜 (Effelsberg, Jodrell Bank, Nancey, WSRT 和 Sardinia)、澳大利亚的 Parkes 望远镜、北美的 Greenbank 望远镜等国际几个口径最大的望远镜展开工作。这三个合作组织又联合成立了国际脉冲星测时阵列 IPTA<sup>[30]</sup>。最近, NANOGrav 利用积累了 12.5 年的数据进行分析, 发现了随机引力波背景存在的迹象<sup>[31]</sup>, 引发了人们的极大关注。在将来, 平方公里阵 (SKA)<sup>[32]</sup> 和中国的 500 米口径球面射电望远镜 (FAST)<sup>[33]</sup> 都有可能脉冲星测时阵列探测引力波中发挥作用。

另外, 通过探测宇宙微波背景辐射中光子的 B 模极化也有可能发现原初引力波的踪迹。虽然目前国际上的宇宙微波背景辐射探测实验都还没有观测到原初引力波产生的 B 模式偏振, 但是 BICEP2/Keck Array 的观测数据对张标比给出的非零限制,  $r_{0.05} < 0.07$  (95%)<sup>[34]</sup>, 并不能排除张量模式的存在。我国的阿里原初引力波探测实验希望利用西藏阿里天文台的地域优势、开展北天区 CMB 偏振信号的测量, 与南半球 CMB 实验相结合, 实现全天区原初引力波的地面探测。阿里计划的目标是将目前的原初引力波张标比观测精度提高一个量级<sup>[35]</sup>。

不同的引力波探测手段其敏感频段各不相同, 比如地面探测主要对  $1 \sim 10^4 \text{ Hz}$  频段的引力波敏感, 脉冲星测时阵列的敏感频段在  $10^{-9} \text{ Hz}$  附近, 而 CMB 探测则主要给出在  $10^{-16} \text{ Hz}$  附近频段的引力波信息。不同频段的引力波对应的波源不同, 解决的科学问题也不同, 各种探测手段联合有助于得到关于宇宙的更全面信息。在脉冲星测时阵列和地面探测的敏感频段之间, 尤其在  $10^{-3} \text{ Hz}$  附近, 存在着类型丰富、数量巨大且广泛分布于宇宙空间各个距离上的引力波源, 对这一频段引力波的探测意义尤其重大, 这正是空间引力波探测和天琴计划要突破的方向。

## 2 天琴计划的提出

当激光干涉仪臂长在量级上接近引力波波长时, 激光干涉仪引力波探测器能达到最高的探测灵敏度。目前地基引力波探测器的干涉仪臂长都在公里量级, 下一代地基引力波探测器的干涉仪臂长约为 10 公里, 建造更长臂长的地基引力波探测器将非常困难。此外, 地面震动噪声和地表重力梯度变化会产生极大的低频噪声, 使得地基引力波探测器很难探测 1 Hz 以下的引力波。因此, 在太空中建立臂长为 10 万公里量级的激光干涉仪引力波探测器是探测毫赫兹频段引力波的最可行方案。空间引力波探测就是指在太空中利用卫星编队或星座构建大型激光干涉仪、进行引力波探测的方法。

20 世纪 80 年代, 人们就提出了空间引力波探测的概念方案<sup>[36]</sup>。欧洲空间局 (ESA) 主导的 LISA 项目于 20 世纪 90 年代初被提出, 历经了四星、六星、三星, 以及臂长 500 万公里、100 万公里等多次方案调整<sup>[37-39]</sup>, 目前选定了 250 万公里边长的等边三角形编队方案, 预期部署于地球后方约 5000 万公里的位置, 跟随地球围绕太阳运行, 其探测器平面与探测器到太阳的连线保持  $60^\circ$  夹角, 整个探测器沿着地球绕太阳的公转轨道做车轮运动, 每周年转动一周<sup>[40]</sup>。LISA 的技术验证星 LISA Pathfinder 于 2015 年底成功发射, 获得了超出设计预期的试验结果<sup>[41]</sup>。2017 年 6 月, LISA 被 ESA 选为其“宇宙憧憬 2015-2025” (Cosmic Vision 2015-2025) 计划中的第三次大型任务, 预期于 2034 年发射<sup>[42]</sup>。

日本于 2001 年提出了自己的空间引力波探测任务 DECIGO 的概念方案<sup>[43]</sup>, 主要面向分赫兹频段的引力波探测, 以填补 LISA 与地面引力波探测器 (如 LIGO 等) 之间的空白。完整的 DECIGO 将包含 4 组三星编队, 每个编队包含 3 个臂, 每个干涉臂长 1000 km, 采用直径 1 m 的望远镜。DECIGO 与现有其他空间引力波探测方案的重大区别在于将采用法布里-珀罗谐振腔 (Fabry - Pérot cavity) 模式的激光干涉臂。在 LIGO 探测到引力波后, 人们发现几十倍太阳质量双黑洞的并合几率比原先预想的要大许多, 使得 DECIGO 的技术验证星 Pre-DECIGO 探测到引力波的几率大大增加, 因此, DECIGO 合作组将 Pre-DECIGO 改名为 B-DECIGO, 计划作为一个正式的引力波探测任务<sup>[44-45]</sup>。

我国科学家从 20 世纪 70 年代开始共振棒型引力波探测器的研制, 中山大学负责研制的探测器多项指标达到了当时国际前沿水平<sup>[46]</sup>。华中科技大学于 1983 年开始建设引力实验中心, 于本世纪初布局了空间惯性传感、星间激光干涉测量等空间引力波探测核心技术的研究, 于 2006 年实现了我国空间簧片加速度计的第一次搭载试验。2008 年, 我国科学家召开了第 403 次香山会议, 讨论了空间引力波探测。之后, 龚雪飞等围绕超越 LISA 的 ALIA 方案进行了研究<sup>[47-48]</sup>, 倪维斗于 2009 年提出了 ASTROD-GW 概念方案<sup>[49]</sup>。2013 年, 我国自主研发的静电悬浮加速度计在轨试验成功, 实现了我国在空间惯性传感技术方面的一个重大突破。以此为基础, 天琴计划于 2014 年 3 月 24 日被提出。2015 年 9 月 1 日, 也就是 LIGO 探测到首个引力波事件的前 13 天, 天琴的第一篇概念方案论文被投稿给学术期刊《经典与量子引力》 (Classical and Quantum Gravity), 并于 2016 年初正式发表<sup>[50]</sup>。到 2016 年 2 月 11 日美国 LIGO 合作组宣布探测到引力波之前, 天琴计划已经召开了三次国际研讨会。

天琴计划的目标是实现对  $10^{-4}$ ~1 Hz 频段的引力波的探测。为此, 计划于 2035 年前后在约 10 万公里高的地球轨道上, 部署三颗全同卫星构成一个边长约为 17 万公里的等边三角形星座, 建成一个空间引力波天文台——天琴<sup>[50]</sup>。天琴星座约每 3.6 天绕地球转动一周, 整体每年跟随地球绕太阳运动, 运动过程中卫星轨道平面保持与黄道面接近垂直, 并维持其法向的空间指向近似不变。按照最初设计, 天琴卫星轨道平面的法向被选为指向 RX J0806.3+1527 (以下简称 J0806)。

天琴卫星采用地球高轨显著降低了在卫星部署、测控、通信等方面的一系列困难, 将使天琴在工程上更容易实现; 但是由于距离地球近, 也使天琴面临复杂空间环境的问题。因此, 需要综合权衡科学目标、空间环境、科学载荷等多方面的限制和要求, 对天琴卫星轨道的选取进行优化。通过对星座构型优化<sup>[51]</sup>、轨道面与轨道半径选取<sup>[52]</sup>等问题的分析, 我们发现在天琴预期的轨道高度附近存在诸多可供引力波探测使用的构型稳定的且在“3+3”个月观测期内无月影的轨道<sup>[53]</sup>, 并且地月系主要引力摄动在天琴目标频段 ( $10^{-4}$ ~1 Hz) 内也不会对引力波探测造成干扰<sup>[54]</sup>。

### 3 天琴的主要探测对象和科学目标

天琴的主要波源包括银河系致密双星旋近、恒星级双黑洞旋近、大质量双黑洞并合、极端质量比旋近、以及宇宙早期的相变过程等<sup>[55-62]</sup>。通过对这些波源的探测,天琴有望为研究星系和黑洞的天体物理历史、致密星团和星系核区动力学、引力和黑洞本质、宇宙膨胀、以及与早期宇宙过程相关的基本物理提供关键信息。天琴设计灵敏度曲线与 LISA、B-DECIGO、LIGO A+ 的对比见图 1, 图中也给出了天琴几类主要波源的示例。

洞的天体物理历史、致密星团和星系核区动力学、引力和黑洞本质、宇宙膨胀、以及与早期宇宙过程相关的基本物理提供关键信息。天琴设计灵敏度曲线与 LISA、B-DECIGO、LIGO A+ 的对比见图 1, 图中也给出了天琴几类主要波源的示例。

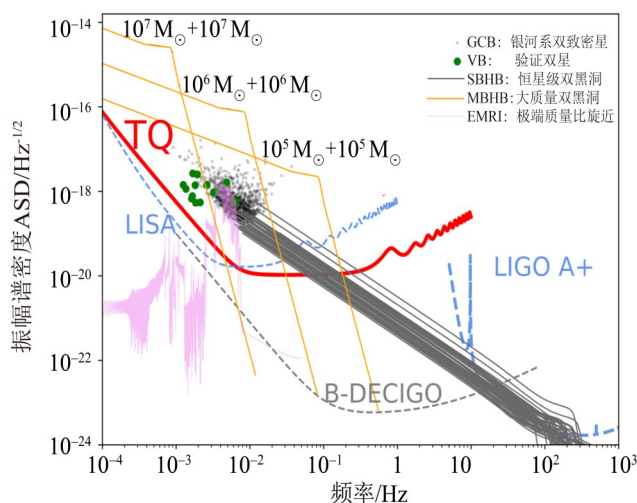


图1 天琴灵敏度曲线与LISA、B-DECIGO、LIGO A+的对比

Fig. 1 Sensitivity curve of TianQin, LISA, B-DECIGO and LIGO A+

#### 3.1 银河系致密双星旋近

银河系致密双星系统预期是天琴能够探测到的数量最多的一类波源<sup>[60, 63]</sup>, 这类源的探测对天体物理和基础物理的研究都有着非常重要的意义。在天体物理方面, 借助引力波预期比电磁观测探测到更多的短周期双致密星<sup>[64]</sup>, 不仅可以对双致密星的形成理论进行精确检验, 还能帮助研究银河系的物质分布和结构<sup>[65-66]</sup>。同时, 这类源产生的引力波也可用于研究基础物理, 例如限制引力波的额外偏振模式<sup>[67-68]</sup>等。

现有的电磁观测已经确认了几十个轨道周期小于几个小时的双白矮星系统<sup>[69]</sup>, 这些双白矮星系统可以成为空间引力波探测器理想的校准源, 因此它们被称为验证双星。我们在参考文献[60]中评估了天琴对银河系双白矮星的探测能力。天琴预期可以探测到约12个验证双星系统。对于目前已知的轨道周期最短的双白矮星系统J0806<sup>[70]</sup>, 天琴预期只需要两天的观测时间就可以信噪比5实现探测。在理想情况下, 天琴对验证双星引力波振幅的测量精度可以达到5%的水平。

基于银河系双白矮星的天文学分布模型, 我们发现天琴运行5年可以探测并分辨大约8700个双白矮星引力波事件, 对于源参数的限制精度的

最可几值为  $\Delta P/P = 3.16 \times 10^{-8}$ ,  $\Delta A/A = 0.10$ ,  $\Delta \cos \iota = 0.05$ ,  $\Delta \Omega_s = 7.94 \text{ deg}^2$ , 其中  $P$  和  $A$  是引力波的周期和振幅,  $\iota$  和  $\Omega$  对应源的倾斜角和空间立体角。在能够探测到的双白矮星系统中, 约38%的系统的空间定位精度将优于  $1 \text{ deg}^2$ 。在低频段, 大量不能被天琴单独识别的源相干叠加会形成前景噪声。

天琴预期还有助于研究双白矮星吸积坍缩而形成的中子星系统<sup>[71]</sup>, 探测源于变形致密星的引力波<sup>[72]</sup>等。

#### 3.2 恒星级双黑洞旋近

恒星级双黑洞旋近是天琴可探测的另一种可能的引力波源。LIGO和Virgo合作组的发现表明, 宇宙中存在大量恒星级双黑洞系统<sup>[20, 22, 73]</sup>, 这些系统的并合将产生频率约为  $10^2 \text{ Hz}$  量级的引力波。然而, 在最终并合前的数年到数月, 这些系统所辐射的引力波处于毫赫兹范围, 正好处于天琴的灵敏频段内, 这使得恒星级双黑洞系统可以成为多波段引力波探测的理想对象。多波段观测不仅能提高源本身的探测和测量, 同时在宇宙学和基础物理方面有着非常重要的应用<sup>[74]</sup>。

恒星级双黑洞的质量分布目前还有很大的不确定性, LIGO和VIRGO合作组在研究该类源问题

时选择了多个不同的质量分布模型<sup>[75]</sup>。空间引力波探测器对恒星级双黑洞旋近信号的探测信噪比一般不高, 而信噪比阈值的选取对探测数有较大影响。我们在文献 [59] 中评估了天琴对恒星级双黑洞旋近的探测能力。就天琴而言, 通过与波形模板库匹配滤波来搜寻该类源的信号所需信噪比阈值大约为 12, 基于该阈值, 天琴运行 5 年大约只能探测到几个恒星级双黑洞信号。考虑到现在距离天琴发射运行还有一段较长的时间, 随着数据处理技术的发展, 所需的探测信噪比阈值预期会降低。如果选择信噪比阈值为 8, 则天琴预期可以探测到几十个恒星级双黑洞旋近事件, 其中对应  $z \approx 0.05$ 、 $M \approx 70 M_{\odot}$  的事件被探测到的几率最大, 在参数估计精度方面, 并合时间、空间定位、啁啾质量和偏心率 (相对) 不确定度的最可几值依次为  $\Delta t_c \sim 0.1 \text{ s}$ ,  $\Delta \Omega_s \sim 0.1 \text{ deg}^2$ ,  $\Delta M/M \sim 10^{-7}$ ,  $\Delta e/e \sim 10^{-4}$ 。对于一个典型的恒星级双黑洞系统, 天琴的空间定位能力足以探测确定其所在的宿主星系, 最乐观情况下甚至能达到  $2 \text{ Mpc}^3$  的水平。

有关天琴在  $0.1 \text{ Hz}$  频段引力波的探测、揭示恒星级双黑洞偏心率分布和形成通道、检验广义相对论等方面的具体作用, 可参考文献 [76-78]。

### 3.3 大质量双黑洞并合

宇宙中各星系中心普遍存在一个大质量黑洞, 黑洞与宿主星系的参数之间存在密切联系<sup>[79-82]</sup>。星系的碰撞有时会伴随大质量双黑洞系统的形成, 并由于引力波辐射而损失能量和角动量, 最终导致并合。大质量双黑洞并合是一类极强的引力波波源, 即使穿越数十亿光年的距离仍然可以保持很高的强度。天琴预期可以探测到多个该类信号<sup>[55-56]</sup>。探测大质量双黑洞并合产生的引力波可以帮助揭示大质量黑洞的起源和形成通道, 为研究高红移下宇宙的膨胀提供新的方法, 并可在强引力场下检验广义相对论及黑洞的性质<sup>[57-58, 83]</sup>。

在宇宙演化过程中, 大质量黑洞的形成过程仍然存在很大不确定性。比如, 人们尚不清楚大质量黑洞是源于大质量星云的直接坍塌 (重种子模型) 还是源于星族 III 恒星的残余 (轻种子模型)<sup>[84]</sup>。因此, 人们提出了不同的大质量黑洞演化模型<sup>[85-87]</sup>。我们在文献 [55] 中通过对五种不同大质量双黑洞天文学模型的分析, 发现不同模型预言的事件率和探测率都有显著差异, 其中最悲观的模型预言天琴平均每年的探测数小于 0.1, 而最乐观的模型预言天琴每年的探测数接近 60, 其

他模型预言每年的探测数在 1~10 的量级。对于红移  $z \sim 2$  的大质量双黑洞并合事件, 天琴有能力在其并合前 24 h 实现探测, 对应信噪比可以达到 23, 空间定位精度可以达到  $100 \text{ deg}^2$  水平, 因此可以为对应的电磁波观测提供预警。

如果天琴能与其他空间探测器 (如 LISA) 同时探测到一个大质量双黑洞并合信号, 则可以显著提高源参数的估计精度, 包括对三维空间定位和并合时间的限制精度都会有量级的提升。利用天琴探测大质量双黑洞并合产生的引力波信号, 还可以用于探索非奇异黑洞<sup>[88]</sup>、或通过测量黑洞自旋来限制类轴场的质谱和数量<sup>[89]</sup>等。

### 3.4 极端质量比旋近

星系中心的大质量黑洞周围几个秒差距范围内往往分布着总质量约  $10^7 \sim 10^8 M_{\odot}$  的核恒星集群<sup>[87, 90]</sup>。致密星体, 如恒星质量的黑洞, 可以通过双体弛豫过程下沉到大质量黑洞的引力势阱中。如果被大质量黑洞的引力场捕获, 这些致密星体可能会通过辐射引力波与大质量黑洞并合。这种恒星质量致密天体被大质量天体俘获并最终并合的过程称为极端质量比旋近, 它所辐射的引力波具有非常鲜明的特点: 恒星质量致密天体可以围绕中心天体运行成千上万个轨道周期, 并且如果中心天体是广义相对论预言的克尔 (Kerr) 黑洞, 引力波辐射会在发生并合时迅速衰减。对极端质量比旋近引力波信号的探测可以帮助精确测量中心天体周围的时空几何、用于检验克尔假设并对广义相对论进行高精度检验<sup>[91]</sup>。

极端质量比旋近系统的探测有两大困难, 一是其形成过程在天文学上还存在着不确定性, 二是其引力波波形非常复杂, 目前还缺乏高效准确的波形计算方法<sup>[92]</sup>。因此, 人们一般选用“拼接” (Kludge) 的方法来获得极端质量比旋近系统的波形<sup>[93]</sup>。我们在文献 [61] 中评估了天琴对极端质量比旋近系统的探测能力。通过考虑不同的天文学模型, 我们发现天琴对该类源的探测事件数从几十到几千不等, 当源质量为  $M \sim 10^6 M_{\odot}$  时探测距离最大, 大约为  $z \sim 2$ 。对于与波形相位密切相关的源参数, 天琴的测量精度可以达到  $10^{-6}$  的量级; 对于其他参数, 例如光度距离和空间定位, 天琴能够提供的限制精度在大多数情况下都要优于  $\Delta D_L/D_L \sim 0.1$ ,  $\Delta \Omega_s \sim 10^{-3} \text{ deg}^2$ , 足以支撑将极端质量比旋近系统作为标准汽笛进行宇宙学相关的研究<sup>[94]</sup>。

天琴对极端质量比旋近信号的探测还可以用来研究玻色星<sup>[95]</sup>、通过探测电磁对应体来揭示极端质量比系统的形成机制<sup>[96]</sup>，以及进一步揭示星系中心大黑洞的动力学<sup>[97]</sup>等。

### 3.5 早期宇宙过程

许多与早期宇宙相关的过程产生的引力波，也有可能被天琴探测到，比如：暴胀过程中重新进入哈勃视界的真空涨落放大、暴胀后的预加热及相关非扰动现象、早期宇宙的一级相变、时空缺陷等<sup>[98]</sup>。这些来自宇宙早期的引力波与许多不能被单独识别的天体物理起源的引力波信号叠加形成随机引力波背景。一些模型预言天琴有可能以高信噪比（ $10^5$ 量级）探测到来自宇宙早期的随机引力波背景<sup>[99]</sup>，这表明天琴有潜力探究未来粒子加速器所能达到的<sup>[100-103]</sup>和达不到的（如大统一理论）能标<sup>[104]</sup>。

作为大统一理论重要观测效应之一，对称性破缺过程中形成的宇宙弦网也会形成随机引力波背景<sup>[105]</sup>，理想情况下，天琴有可能探测到张力系数  $G\mu \geq 0(10^{-6})$  的宇宙缺陷和  $G\mu \geq 0(10^{-17})$  的宇宙弦<sup>[99]</sup>，分别对应对称性破缺能标  $10^{16}$  GeV 和  $10^{10}$  GeV。对这些随机引力波背景的探测，将提供关于宇宙历史的关键信息，也能用于限制描述早期宇宙的基本理论，检验 TeV 能标附近低能有效理论<sup>[106-107]</sup>。

### 3.6 其他重要的科学目标

天琴探测到的引力波信号可以帮助重构宇宙膨胀历史。比如：恒星级双黑洞旋近、极端质量

比旋近以及大质量双黑洞并合可以为不同红移距离上的宇宙学参数测量提供信息；原初引力波的探测则可以提供关于早期宇宙历史有价值的信息<sup>[108-110]</sup>。在理想的情况下，天琴利用大质量黑洞双星并合可以把哈勃常数的测量误差限制到  $10^{-2}$  数量级<sup>[111]</sup>。

利用天琴探测到的引力波信号还可以对广义相对论进行检验。在引力波产生方面，银河系内双致密星可以用于限制额外偏振模式；恒星级双黑洞是理想的多波段观测波源，可以显著提高对一些偏离广义相对论的参数的限制精度<sup>[74, 109]</sup>；大质量双黑洞并合是测量各种后爱因斯坦参数和检验黑洞克尔特性的理想波源；极端质量比旋近系统可以高精度测量大质量黑洞周围的几何特性。在引力波的传播方面，可以利用高红移的引力波信号来约束引力波的色散关系和传播速度。作为定量分析天琴检验广义相对论能力的例子，我们评估了天琴利用大质量双黑洞并合的铃宕信号对黑洞无毛定理的检验的能力<sup>[57]</sup>和限制特定修正引力理论的能力<sup>[58]</sup>。

## 4 天琴关键技术

天琴探测原理示意图见图2。三颗卫星构成一个边长约17万公里的等边三角形星座，每颗卫星内部包含两个方形检验质量，不同卫星上相对的两个检验质量之间以激光进行干涉测量。引力波探测原理和所需的核心技术如下：

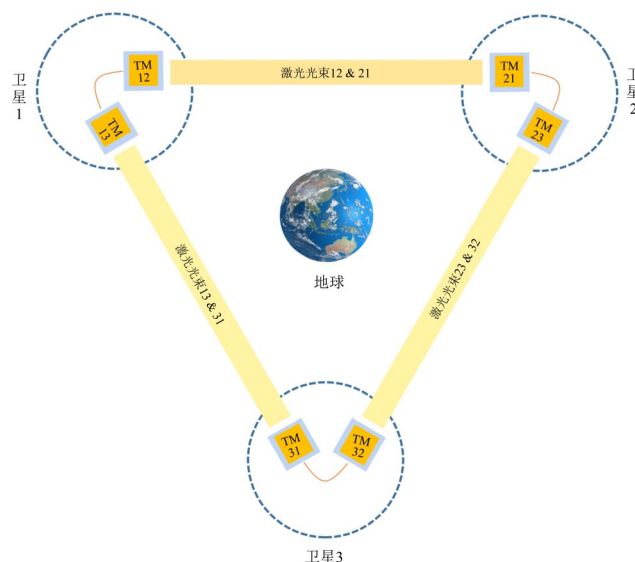


图2 天琴探测原理示意图 (图中TM##代表不同编号的检验质量)

Fig. 2 Schematic diagram of TianQin detection principle

(1) 应答式星间激光干涉测量技术。引力波会导致空间两点之间的光程发生变化,这个变化可以利用激光外差干涉技术对卫星之间的光程进行精确测量来获得。这个过程中,三颗卫星中任选一颗为主卫星,其余两颗为从卫星。由于卫星间的距离达到17万公里,从主卫星发出的激光在传播到从卫星时功率将衰减9个量级以上,此时需要利用光学锁相技术将从卫星上的本地激光锁定到所接收的主卫星激光相位上,然后再将相位锁定后的从卫星激光发射回主卫星,与主卫星上的本地激光进行干涉测量,才能保证激光干涉测量精度满足引力波探测的需求。这项技术称为“应答式星间激光干涉测量”。

(2) 空间惯性基准技术。为了精确测量引力波引起的光程变化,星间激光干涉测量以卫星内完全悬浮起来的检验质量为端点。理想情况下,检验质量只在引力场的作用下作理想的惯性运动(测地线运动),因此能够真实的反映引力场的变化(其中包含了引力波信息)。但是空间环境会对卫星的运动造成各种干扰,使得卫星的运动偏离理想的惯性运动,因此需要实时精确测量检验质量与卫星平台之间的距离变化,通过无拖曳控制技术控制微牛顿级推进器抵消作用在卫星平台上的干扰力,使得卫星平台一直跟随检验质量运动,从而将卫星对检验质量的干扰降至最低,使检验质量的运动尽可能接近理想的惯性运动状态。这项技术包括惯性传感、微牛顿推进、无拖曳控制三个方面,合称“空间惯性基准技术”。

应答式星间激光干涉测量技术可以形象地看作引力波探测的尺子,而近似作理想惯性运动的检验质量就是引力波探测的探头。天琴对这两项核心技术都提出了极高的要求(在0.1 mHz~1 Hz频段范围内,检验质量沿星间连线方向的残余加速度噪声要求低至 $1\text{fm/s}^2/\text{Hz}^{1/2}$ 的水平,而检验质量间位移测量的噪声水平要求低至 $1\text{pm}/\text{Hz}^{1/2}$ 的水平)。为了使这些技术指标得以实现,需要以超静超稳卫星平台及大尺度高精度卫星星座技术进行配合,这不仅对平台本身提出了极高的要求,也对三颗卫星构成的大尺度星座提出了高精度要求。

#### 4.1 应答式星间激光干涉测量技术

激光相位是引力波测量信号的直接载体。空间引力波探测利用激光干涉测量技术,精确测量激光在检验质量之间来回传播的相位变化,以获得光程变化的信息。星间激光干涉测量技术的水

平以位移测量噪声来衡量,天琴要求探测频段内的位移测量噪声不大于 $1\text{pm}/\text{Hz}^{1/2}$ 。

用于空间引力波探测的应答式激光干涉仪包含星载稳频激光系统、超稳光学平台系统、星间光束指向测控系统、弱光锁相系统、检验质量光学读取系统以及(用于实现时间延迟干涉的)星间通信与时钟同步系统。星间激光干涉测量主要噪声来源包含激光频率变化耦合不等臂长干涉测量引起的相位噪声、弱光探测的散粒噪声、激光光束指向偏差与波前畸变<sup>[112]</sup>耦合噪声、望远镜结构形变引入的光程噪声、温度变化引起的光学平台光程噪声、弱光锁相控制回路的残余噪声、相位测量本底噪声等。其中,前两项噪声和激光传播距离直接相关,是星间激光干涉测量的主要噪声来源。

为了满足天琴的需求,星间激光干涉测量各分系统需满足如下量级要求(各项谱指标均为测量频段内的数值):

(1) 星载连续激光器及稳频控制,激光功率5 W,要求激光频率噪声低于 $10^{-5}\text{Hz}/\text{Hz}^{1/2}$ ;由于利用现有最好的PDH稳频方案预期只能将激光频率噪声压低到(1~10)  $\text{Hz}/\text{Hz}^{1/2}$ 量级,因此还需要使用时间延迟干涉技术进一步将激光频率噪声等效消减到 $10^{-5}\text{Hz}/\text{Hz}^{1/2}$ 水平,才能避免激光干涉不等臂长所引入的相位测量误差;

(2) 超稳光学平台,光程稳定度小于 $1\text{pm}/\text{Hz}^{1/2}$ ;

(3) 星载望远镜,要求具备非常高的结构稳定性、小于1/30波长的波前畸变以及小于0.1 nW的后向杂散光;

(4) 高精度相位计,要求测量噪声水平小于 $10^{-6}\text{rad}/\text{Hz}^{1/2}$ ;

(5) 高精度弱光锁相控制,要求对功率小于1 nW的弱光的锁相精度达到 $10^{-6}\text{rad}/\text{Hz}^{1/2}$ ;

(6) 超稳时钟,要求频率稳定度(秒稳)优于 $10^{-13}$ ;

(7) 星间激光光束指向测控,要求星间光束指向偏差和抖动达到 $(10^{-9}\sim 10^{-8})\text{rad}/\text{Hz}^{1/2}$ ;

(8) 检验质量光学读取,要求平动位移测量精度优于 $0.5\text{pm}/\text{Hz}^{1/2}$ ,转动位移测量精度优于 $0.5\text{nrad}/\text{Hz}^{1/2}$ 。

星间激光干涉测量系统的研究还包括系统测试、评估、验证和工程化。需要研发激光干涉测量地面演示系统,研究系统中的耦合效应、噪声

来源以及数据的后处理,同时开展激光干涉测量系统的飞行验证。星间激光干涉测量系统的工程化涉及到各单元部件的研制、真空维持、环境温控、以及光学系统粘结装配工艺、星载封装等工程技术。这些工程化技术与系统设计和相关关键技术都密不可分,要求科学研究和工程实施紧密结合。

我们于2002年开始星间激光干涉测量技术的研究,于2011年研制了一个臂长10 m的激光干涉仪演示系统<sup>[113]</sup>,又于2015年研制和测试了应答式星间激光干涉测量原理样机<sup>[114-115]</sup>,同时也在星间光束捕获、数字相位计的采样抖动噪声抑制等方面取得了初步成果<sup>[116-117]</sup>。

#### 4.2 空间惯性基准技术

以检验质量为惯性参考物体(作理想惯性运动的物体)建立惯性基准,为星间激光干涉提供测量端点和基准点,是获取时空曲率变化和引力波信息的前提。惯性基准的优劣以检验质量的残余加速度来衡量,天琴要求探测频段内检验质量在敏感轴方向(星间连线方向)上的残余加速度噪声不超过 $1 \text{ fm/s}^2/\text{Hz}^{1/2}$ ,为了达到这一目标,检验质量与卫星在敏感轴方向上的相对位移变化要求控制到 $1 \text{ nm/Hz}^{1/2}$ 量级,姿态变化要求控制到 $1 \times 10^{-7} \text{ rad/Hz}^{1/2}$ 量级。空间环境中,光照、粒子、空间磁场<sup>[118]</sup>等都可能对卫星的运动造成干扰,需要加以抵消。直接作用在检验质量上的环境噪声决定了惯性传感器的实际噪声水平,也需要实时抑制;这些环境噪声包括电场、磁场、温度场等,其中与电磁场有关扰动主要包括宇宙磁场影响、卫星本体磁场影响、静电效应、洛伦兹效应等,与温度有关扰动主要包括辐射计效应、辐射压和出气效应。

空间惯性基准技术包括惯性传感、微牛顿级推进、无拖曳控制三个方面。

惯性传感的任务是检测出检验质量与卫星平台间的相对位置变化,涉及的关键技术包括:

(1) 电容传感,要求检验质量与卫星之间的相对位移测量分辨率达到 $1 \text{ nm/Hz}^{1/2}$ 量级,需要折中考虑位移传感分辨率与反作用静电力扰动之间的平衡问题;

(2) 检验质量电荷管理,要求检验质量电荷控制在 $10^{-13} \text{ C}$ 量级;

(3) 温度控制,要求惯性传感器温度变化控制到 $10^{-4} \text{ K}$ 量级,检验质量温度变化控制到 $10^{-6} \text{ K}$

量级;

(4) 锁紧释放,检验质量与电容极板存在4~5 mm的间距,要求在发射期间锁紧检验质量,入轨正常后释放检验质量;

(5) 轴间耦合,每颗卫星上有两个检验质量,每个检验质量只在敏感轴方向上维持惯性运动,在非敏感轴方向上仍有较大控制力,因此需要对敏感轴和非敏感轴之间的耦合进行抑制。

我们于2000年开始空间惯性传感器的研制,所研制的惯性传感器已经完成了多种条件下的飞行试验<sup>[119]</sup>,目前正在通过多种途径进一步提高测量灵敏度和性能<sup>[120-121]</sup>。

微牛顿级推力器作为无拖曳控制的执行机构,用于实时抵消各种非保守力对卫星平台的干扰,需要具有推力宽可调(宽)、低噪声(稳)、高精度(准)、快响应(快)、长寿命(久)等技术特点,这传统航天任务对推力器的高性能的要求差异很大,且指标之间互相制约,实现难度大,成为空间引力波探测的瓶颈技术之一。为了实现任务要求,需要提升推力的可调可控性,基于推力精密反馈控制,保证全任务周期的推力需求。基于这一思想,国内不少单位已经进行了大量的工作。北京工程控制研究所开展了冷气推力器研究,并在“天琴一号”上实现在轨验证。其基于大挠度弹性、流体边界滑移等理论实现了压电比例阀、压电驱动组件等关键技术,为推进系统微流量高精度控制技术提供了基础<sup>[122]</sup>。哈尔滨工业大学开展了会切霍尔推进的研究,采用微波实现了低流量下的稳定放电,引入额外的调控参数,提升了电推力器的可调可控性<sup>[123]</sup>,并基于推力器开展了仿真运算,实现了基于闭环控制降低推力噪声的目标<sup>[124]</sup>。华中科技大学基于MEMS微纳加工技术对场发射电推进开展了研究,探究了针尖型胶体推力器的稳定条件、失效机理等关键问题,提出了阵列化控制组合实现宽范围、高精度推力的方案<sup>[125]</sup>。

天琴卫星的无拖曳控制与检验质量非无拖曳自由度控制、姿态控制紧密相关,一般都在同一个控制器框架联合设计,以保证各个自由度之间的耦合得到约束,并在同一个控制计算机上实施以保证各环路信号延时的一致<sup>[126-127]</sup>。在科学模式下有十多个主要自由度需要控制,每个自由度控制算法的设计需基于各个自由度的环境扰动、耦合扰动、噪声计算对环路传函的需求,可使用 $H_\infty$

环路成型<sup>[128]</sup>或者基于频域法的“状态估计+反馈”算法对控制器进行具体设计。无拖曳控制研究还需要考虑从发射到科学模式下每个状态的模式定义与控制器设计、检验质量释放流程与释放捕获算法、科学模式参数实时辨识与故障诊断等。

### 4.3 卫星平台及星座技术

用于空间引力波探测的卫星平台需要具备超静超稳的特性,一方面控制检验质量受到的外界扰动水平,体现卫星的超静特性;另一方面保证激光干涉测量和惯性传感器的超高精度,体现卫星的超稳特性。天琴卫星平台涉及的关键技术包括:

(1) 高精度无拖曳控制技术,以保证高精度惯性基准技术目标的实现;

(2) 高精度星间指向控制技术,以保证3个卫星的激光干涉臂相互对准精度达到10 nrad的要求;

(3) 超稳定材料与结构技术,以保证对检验质量、星间光程的影响均在可接受的范围内;

(4) 超稳定温度控制技术,使载荷核心区域的温度稳定水平达到 $\mu\text{K}/\text{Hz}^{1/2}$ 量级;

(5) 卫星质量特性及自引力的精确控制技术,使自引力引入的差分加速度小于 $1\text{ nm}/\text{s}^2$ 。

空间引力波探测给卫星平台带来了前所未有的技术挑战,尚无满足要求的超静超稳平台,需要进一步开展技术攻关。

超稳定温度控制是天琴卫星面临的一个重要问题。天琴卫星轨道的 $\beta$ 角(太阳光与轨道面夹角)变化幅度大,导致一个测量阶段内太阳辐射外热流变化幅度可达40%,此外天琴卫星还受到地球/月球红外辐射及阳光反照的影响,外热流变化及其噪声环境相比LISA更加复杂<sup>[129-130]</sup>。天琴卫星超稳定温度控制需解决以下问题:

(1) 天琴卫星轨道外热流环境,需要揭示随 $\beta$ 角变化的太阳外热流以及地球/月球红外辐射及阳光反照的变化,揭示外热流变化在空间引力波测量频段的噪声;

(2) 大幅度变化外热流及其低频噪声的控制,需要对大幅度变化的时域温度对热平衡的影响进行储存与控制,对外热流低频噪声进行抑制,为天琴卫星提供良好的外部时域和频域热环境;

(3) 超低频段超低噪声温度测量,通过对电源噪声、传感器噪声、放大器低频 $1/f$ 噪声、模数转换噪声等的抑制,在天琴探测频段内使温度测量噪声水平达到 $1\mu\text{K}/\text{Hz}^{1/2}$ 量级;

(4) 超高精度温度控制,对控制对象进行全面的热特性分析,并针对模型特性进行控制结构和控制算法的设计,包括热特性参数分析、参数时变自适应和鲁棒性设计、新型控制算法设计;

(5) 整星热设计与热试验,包括高精度的温度仿真、被动+主动的热设计、柔性支撑隔离热变形及过定位,以及地面高精度验证等。

天琴三星轨道高度约为10万公里,星间距离约为17万公里,且天琴卫星仅装有微牛顿级推力器。这些特点,使得天琴所涉及的星座动力学与控制问题有别于现在已经广泛研究的近地轨道近距离编队和星座系统,其对超远距离构形发散机理、机动能力受限下的高精度姿轨控制、超多自由度协调控制等方面提出了前所未有的挑战。天琴星座动力学与控制需解决以下问题:

(1) 超远距离星座高稳定构形设计,包括超远距离星座构形发散机理建模和分析、建立可用于高稳定构形设计与控制的星座相对运动模型等;

(2) 超远距离星座高稳定构形的长期保持,需进行高稳定星座构形鲁棒优化设计和入轨偏差下的高稳定构形重优化设计;

(3) 天琴卫星高精度入轨,包括基于微推力器的高精度入轨轨道规划与控制、对科学探测任务影响最小的轨道保持控制策略与方法、非科学模式下星座姿轨参考轨迹规划与控制方法等;

(4) 多星协调控制,包括多星多自由度耦合动力学建模与分析、多星多自由度协调控制策略与控制方法等。我们已经基于自适应小波神经网络的状态估计器完成空间引力波探测对无拖曳系统的干扰量估计<sup>[131]</sup>,通过建立质量块与卫星本体相对运动模型,对质量块最优释放时天琴卫星的轨道位置进行了研究<sup>[132]</sup>。

天琴卫星在发射入轨和科学运行等阶段都对卫星的测定轨有较高的任务需求。卫星轨道的跟踪测量和确定精度受到测控距离、测量系统误差、星座尺度、轨道控制以及测站跟踪几何等因素的影响。天琴采用地球高轨道卫星,可利用的跟踪测量手段非常丰富,比如多跟踪测量手段融合精密轨道确定<sup>[133]</sup>、微小摄动力<sup>[134]</sup>、无拖曳控制力和机动力建模补偿<sup>[135]</sup>、测量系统误差的建模与校准<sup>[136]</sup>以及星间测量信息约束下的多星联合定轨等。初步估计天琴多源融合定轨位置精度优于5 m,定轨速度精度优于 $2\text{ mm}/\text{s}$ 。

激光测距可以为天琴卫星提供高精度的测距

信息。中山大学已经在珠海校区建成了天琴计划激光测距台站,并已经实现了对月球上全部五个激光测距反射器的测距。要使月球/高轨卫星激光测距技术走向成熟,还需开展以下工作:

(1) 月球激光测距试验及回波分析,分析各个角反射器有效回波强度差异和影响回波强度差异的因素;

(2) 月球激光测距数据处理方法,主要涉及信号匹配、信号提取和测距精度分析;

(3) 月球激光测距噪声分析与抑制;

(4) 基于自适应光学的月球激光测距等。

#### 4.4 数值仿真与数据处理技术

数值仿真技术在空间任务方案设计、系统指标确定、关键技术验证等方面发挥着重要的作用,天琴计划中有许多核心关键技术难以在地面进行全面试验验证,也需要借助高置信度的数值仿真验证来作支撑。天琴数值仿真需要解决的问题包括:

(1) 任务全链路仿真,预期包含引力波源、探测系统、地面处理系统和地面评估系统等;

(2) 任务全流程仿真,预期包含每颗卫星从发射一直到退役的整个过程;

(3) 多场耦合仿真,用于动态考核探测系统关键技术指标的满足情况。

引力波数据处理是从探测数据中提取信号、获得科学信息的关键一步。对于确定波形的信号,原则上可以采用先匹配滤波信号探测、后贝叶斯推断参数估计的方案进行处理。天琴数据处理需要解决的问题主要有:

(1) 多个信号混叠的“大杂烩问题”(The Enchilada Problem), LIGO 等地面探测所面临的引力波信号具有偶发性,而像天琴这样的空间探测所面临的大部分引力波信号是长期存在的,因此所得的数据也是大量引力波信号混叠的结果,这对数据处理技术提出了新的挑战;

(2) 数据中断问题,天琴基本方案采用“三个月工作、三个月保护”循环进行的探测模式,因此每三个月的数据之间会有三个月的数据中断,此外,探测系统的临时故障或异常也可能造成数据中断;数据中断会降低数据质量,影响数据处理结果;一般认为,如果数据中断总时长确定,持续的数据中断对后续处理的影响远小于多次、不连续的数据中断;可以采用数据增强方法减少数据中断对数据处理方法带来的影响;

(3) 模板数过高问题,天琴敏感的引力波信号通常持续时间较长,而且部分波源(如极端质量比旋近)的信号波形复杂、参数维度高,若采用匹配滤波方法,对应的计算量将远超现有计算能力的极限,必须依赖创新的方法对相关信号进行探测。

## 5 天琴计划技术路线图及现有进展

我国现有的技术水平离空间引力波探测实际需求还有明显差距,在部分核心技术指标上还有量级的差距。为此天琴计划提出了“0123”技术路线图,主要包括:

第“0”步:开展月球激光测距实验,包括研制新一代激光测距角反射器、新建和升级激光测距台站,获得对天琴卫星的高精度测距能力,为天琴卫星的高精度测定轨提供技术支撑。

第“1”步:发射高精度空间惯性基准技术试验卫星,对高精度惯性传感、微牛级推力器、高精度无拖曳控制等核心技术进行在轨验证,对天琴卫星轨道所在的空间环境参数进行高精度测量。

第“2”步:发射星间激光干涉测量技术试验双星,对星间激光干涉测量技术进行在轨验证。

第“3”步:发射天琴三星构成星座,建成空间引力波探测天文台(天琴),长期进行引力波的空间探测。

目前第“0”步和第“1”步均已有重大项目开展,并在月球激光测距技术和空间惯性基准技术两方面取得了重大突破。

20世纪60年代末70年代初,美国和苏联在月面上布置了5个激光测距角反射器,人类进行了近半个世纪的月球激光测距实验。但遗憾的是,我国的月球激光测距工作一直没能获得突破。2016年,中山大学在国家航天局和国家自然科学基金委的支持下,联合华中科技大学、中科院云南天文台开展“月球中继星激光测距”项目。通过该项目,中科院云南天文台于2018年1月22日成功进行了国内首次月球激光测距实验<sup>[137]</sup>,中山大学和华中科技大学联合研制了国际上首个17 cm口径的大孔径中空激光测距角反射器<sup>[138-139]</sup>,于2018年5月21日搭载嫦娥四号中继卫星“鹊桥”进入距离地球40多万公里的实验轨道,中山大学于2019年初建成天琴计划激光测距台站,在国内首次对月球上全部五个反射器进行了测距实验,测距精度进入厘米量级<sup>[140]</sup>。

在国家航天局、广东省政府的支持下, 中山大学联合华中科技大学、航天东方红卫星有限公司研制的天琴一号试验卫星于 2019 年 12 月 20 日在太原卫星发射中心成功发射, 圆满完成六个月的试验任务, 至今仍在轨运行。天琴一号任务预定的六项关键技术在轨试验结果均优于任务验收指标, 其中高精度惯性传感技术在轨测试结果比国内原有水平提高两个数量级以上, 高稳定性卫星平台技术在轨测试结果比国内原有水平提高三个数量级以上, 无拖曳控制技术指标和星载激光干涉仪指标为国内当前最高水平。有关天琴一号试

验卫星的第一轮实验结果可参考文献 [141]。

为了配合天琴计划的推进, 在教育部和珠海市政府的支持下, 天琴计划载荷研究基地建设顺利推进, 目前天琴中心大楼已经建成并投入使用, 天琴超静山洞实验室隧道已经于 2020 年 6 月 5 日实现了全线贯通。国际合作方面, 天琴计划自 2014 年提出以来便立足“以我为主”开展国际合作, 目前已经召开 6 届天琴国际研讨会, 一次“天琴计划与国际合作”香山科学会议, 并于 2018 年 12 月 18 日在第 5 次天琴国际研讨会上正式成立了天琴合作组及其国际咨询委员会。

### 参考文献:

- [1] EINSTEIN A. Approximative integration of the field equations of gravitation [C]// Berlin: Math Phys, 1916: 688-696.
- [2] EINSTEIN A. Uber gravitation swellen [C]// Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften, 1918: 154-167.
- [3] KENNEFICK D. Traveling at the speed of thought: Einstein and the quest for gravitational waves [M]. Princeton University Press, 2016.
- [4] CHEN C M, NESTER J M, NI W T. A brief history of gravitational wave research [J]. Chinese Journal of Physics, 2016, 55(1): 142-169.
- [5] WEISBERG J M, NICE D J, TAYLOR A J H. Timing measurements of the relativistic binary pulsar PSR B1913+16 [J]. The Astrophysical Journal, 2010, 722(2): 1030.
- [6] LIGO Scientific Collaboration, Virgo Collaboration. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger [J]. Physical Review Letters, 2016, 116(6): 061102.
- [7] WEBER J. Evidence for discovery of gravitational radiation [J]. Physical Review Letters, 1969, 22(24): 1320-1324.
- [8] AUFMUTH P, DANZMANN K. Gravitational wave detectors [J]. New Journal of Physics, 2005, 7(1): 202.
- [9] ASTONE P, BONIFAZI P, COSMELLI C, et al. Methods and results of the IGEC search for burst gravitational waves in the years 1997 - 2000 [J]. Physical Review D, 2003, 68(2): 022001.
- [10] IGEC-2 Collaboration. Results of the IGEC-2 search for gravitational wave bursts during 2005 [J]. Physical Review D, 2007, 76(10): 102001.
- [11] ACERNESE F, ALSHOURBAGY M, AMICO P, et al. First joint gravitational wave search by the auriga-explorer-nautilus-Virgo collaboration [J]. Classical and Quantum Gravity, 2008, 25(20): 205007.
- [12] ASTONE P, BALLANTINI R, BABUSCI D, et al. Explorer and nautilus gravitational wave detectors: a status report [J]. Classical and Quantum Gravity, 2008, 25(11): 114048.
- [13] GERSTENSHTEIN M E, PUSTOVOIT V I. On the detection of low frequency gravitational waves [J]. Journal of Experimental and Theoretical Physics, 1963, 16(2): 433-435.
- [14] ABBOTT B P, et al (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration). GW151226: observation of gravitational waves from a 22-solar-mass binary black hole coalescence [J]. Physical Review Letters, 2016, 116(24): 241103.
- [15] ABBOTT B P, et al (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration). Binary black hole mergers in the first advanced LIGO observing run [J]. Physical Review X, 2016, 6(4): 041015.
- [16] ABBOTT B P, et al (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration). GW170104: observation of a 50-solar-mass binary black hole coalescence at redshift 0.2 [J]. Physical Review Letters, 2017, 118(22): 221101.

- [17] ABBOTT B P, ABBOTT R, ABBOTT T D, et al (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration). GW170608: Observation of a 19 solar-mass binary black hole coalescence [J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2017, 851(2): L35.
- [18] ABBOTT B P, et al (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration). GW170814: a three-detector observation of gravitational waves from a binary black hole coalescence [J]. *Physical Review Letters*, 2017, 119(14): 141101.
- [19] ABBOTT B P, et al. Multi-messenger observations of a binary neutron star merger [J]. *Astrophys J*, 2017, 848(2): L12.
- [20] ABBOTT B P, et al (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration). GWTC-1: a gravitational-wave transient catalog of compact binary mergers observed by LIGO and Virgo during the first and second observing runs [J]. *Physical Review X*, 2019, 9(3): 031040.
- [21] DROUT M R, PIRO A L, SHAPPEE B J, et al. Light curves of the neutron star merger GW170817/SSS17a: Implications for r-process nucleosynthesis [J]. *Science*, 2017, 358(6370): 1570–1574.
- [22] ABBOTT R, et al (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration). 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>.
- [23] ABBOTT B P, ABBOTT R, ABBOTT T D, et al (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration). GW190425: Observation of a compact binary coalescence with total mass  $\sim 3.4 M_{\odot}$  [J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2020, 892(1): L3.
- [24] ABBOTT R, ABBOTT T D, ABRAHAM S, et al (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration). GW190412: Observation of a binary-black-hole coalescence with asymmetric masses [EB/OL]. <https://arxiv.org/abs/2004.08342>.
- [25] ABBOTT R, ADHIKARI R X, ANANYEVA S, et al (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration). GW190814: gravitational waves from the coalescence of a 23 solar mass black hole with a 2.6 solar mass compact object [J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2020, 896(2): L44.
- [26] ABBOTT R, ABBOTT T D, ABRAHAM S, et al (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration). GW190521: A binary black hole merger with a total mass of  $150 M_{\odot}$  [J]. *Physical Review Letters*, 2020, 125(10): 101102.
- [27] DESVIGNES G, CABALLERO R N, LENTATI L, et al. High-precision timing of 42 millisecond pulsars with the European Pulsar Timing Array [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2016, 458(3): 3341–3380.
- [28] MANCHESTER R N, HOBBS G, BAILES M, et al. The parkes pulsar timing array project [M]. *Publications of the Astronomical Society of Australia*, 2013, 30:17.
- [29] ARZOUMANIAN Z, BRAZIER A, BURKE-SPOLAOR S, et al. The NANOGrav 11-year data set: high-precision timing of 45 millisecond pulsars [J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2018, 235(2): 37.
- [30] VERBIEST J P W, LENTATI L, HOBBS G, et al. The international pulsar timing array: first data release [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2016, 458(2): 1267–1288.
- [31] ARZOUMANIAN Z, BAKER P T, BLUMER H, et al (The NANOGrav Collaboration). The NANOGrav 12.5-year data set: search for an isotropic stochastic gravitational-wave background [EB/OL]. <https://arxiv.org/abs/2009.04496>.
- [32] LAZIO T J W. The square kilometre array pulsar timing array [J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2013, 30(22): 224011.
- [33] HOBBS G, DAI S, MANCHESTER R N, et al. The role of FAST in pulsar timing arrays [EB/OL]. <https://arxiv.org/abs/1407.0435>.
- [34] ADE P A R, AHMED Z, AIKIN R W, et al (Keck Array and BICEP2 Collaborations). Constraints on primordial gravitational waves using planck, WMAP, and new BICEP2/Keck observations through the 2015 season [J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121(22): 221301.
- [35] LI H, LI S Y, LIU Y, et al. Probing primordial gravitational waves: ali CMB polarization telescope [J]. *National Science Review*, 2019, 6(1): 145–154.

- [36] FALLER J E, BENDER P L, HALL J L, et al. An antenna for laser gravitational-wave observations in space [J]. *Advances in Space Research*, 1989, 9 (9) : 107-111.
- [37] DANZMANN K, LISA Study Team. LISA: laser interferometer space antenna for gravitational wave measurements [J]. *Classical and Quantum Gravity*, 1996, 13 (11A): A247.
- [38] DANZMANN K for LISA Study Team. LISA—an ESA cornerstone mission for a gravitational wave observatory [J]. *Classical and Quantum Gravity*, 1997, 14(6) : 1399.
- [39] ESA-L. The 3 gravitational wave mission final report [R]. Gravitational Observatory Advisory Team, 2016.
- [40] AMARO-SEOANE P, AUDLEY H, BABAK S, et al (LISA Collaboration). Laser interferometer space antenna [EB/OL]. <https://arxiv.org/abs/1702.00786>.
- [41] ARMANO M, AUDLEY H, BAIRD J, et al. Beyond the required LISA free-fall performance: new LISA pathfinder results down to 20  $\mu\text{Hz}$  [J]. *Physical Review Letters*, 2018, 120(6): 061101.
- [42] The European Space Agency. Gravitational wave mission selected, planet-hunting mission moves forward [EB/OL]. [https://www.esa.int/Science\\_Exploration/Space\\_Science/Gravitational\\_wave\\_mission\\_selected\\_planet-hunting\\_mission\\_moves\\_forward](https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Gravitational_wave_mission_selected_planet-hunting_mission_moves_forward).
- [43] SATO S, KAWAMURA S, ANDO M, et al. The status of DECIGO [C]// *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2017, 840(1): 012010.
- [44] ISOYAMA S, NAKANO H, NAKAMURA T. Multi-band gravitational-wave astronomy: observing binary inspirals with a decihertz detector, B-DECIGO [J]. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2018(7): 073E01.
- [45] KAWAMURA S, ANDO M, SETO N, et al. Current status of space gravitational wave antenna DECIGO and B-DECIGO [EB/OL]. <https://arxiv.org/abs/2006.13545>.
- [46] 樊军辉, 谢献春, 王洪光. 广东天文八十年 [M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2012.
- FAN J H, XIE X C, WANG H G. Eighty years of astronomy in guangdong [M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2012.
- [47] GONG X, XU S, BAI S, et al. A scientific case study of an advanced LISA mission [J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2011, 28(9): 094012.
- [48] GONG X, LAU Y K, XU S, et al. Descope of the ALIA mission [C]// *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2015, 610(1): 012011.
- [49] NI W T. ASTROD-GW: Overview and progress [J]. *International Journal of Modern Physics D*, 2013, 22 (1): 1341004.
- [50] 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.
- [51] YE B, ZHANG X, ZHOU M, et al. Optimizing orbits for TianQin [J]. *Int J Mod Phys D*, 2019, 28: 1950121.
- [52] TAN Z, YE B, ZHANG X. Impact of orbital orientations and radii on TianQin constellation stability [J]. *Int J Mod Phys D*, 2020, 29: 2050056.
- [53] YE B, ZHANG X, DING Y, et al. Eclipse avoidance in TianQin orbit selection [J]. 2020, submitted.
- [54] ZHANG X, LUO C, JIAO L, et al. Effect of Earth-Moon's gravity on TianQin's range acceleration noise [J]. 2020, submitted.
- [55] 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.
- [56] 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(12): 123002.
- [57] 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.
- [58] BAO J H, SHI C F, WANG H T, et al. Constraining modified gravity with ringdown signals: An explicit example [J]. *Physical Review D*, 2019, 100 (8) : 084024.
- [59] LIU S, HU Y M, ZHANG J D, et al. Science with the TianQin observatory: Preliminary results on stellar-mass binary black holes [J]. *Physical Review D*, 2020, 101(10): 103027.
- [60] 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.
- [61] FAN H M, HU Y M, BARAUSSE E, et al. Science with the TianQin observatory: Preliminary result on extreme-mass-ratio inspirals [J]. *Physical Review D*, 2020, 102(6): 063016.
- [62] 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.
- [63] NELEMANS G. Galactic binaries with eLISA [C]// *ASP Conference Series*, 2013, 467:27–36.
- [64] REBASSA-MANSERGAS A, TOONEN S, KOROL V, et al. Where are the double-degenerate progenitors of Type Ia supernovae?[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2019, 482(3): 3656–3668.
- [65] ADAMS M R, CORNISH N J, LITTENBERG T B. Astrophysical model selection in gravitational wave astronomy[J]. *Physical Review D*, 2012, 86(12): 124032.
- [66] KOROL V, ROSSI E M, BARAUSSE E. A multimessenger study of the Milky Way’s stellar disc and bulge with LISA, Gaia, and LSST [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2019, 483(4): 5518–5533.
- [67] LITTENBERG T B, YUNES N. Binary white dwarfs as laboratories for extreme gravity with LISA [J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2019, 36(9): 095017.
- [68] PHILIPPOZ L, JETZER P. Detecting additional polarization modes with LISA [C]//*Journal of Physics: Conference Series*, 2017, 840: 012057.
- [69] KUPFER T, KOROL V, SHAH S, et al. LISA verification binaries with updated distances from Gaia Data Release 2 [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2018, 480(1): 302–309.
- [70] STROHMAYER T E. Precision X-ray timing of RX J0806. 3+ 1527 with chandra; Evidence for gravitational radiation from an ultracompact binary [J]. *The Astrophysical Journal*, 2005, 627(2): 920.
- [71] WANG B, LIU D. The formation of neutron star systems through accretion-induced collapse in white-dwarf binaries [EB/OL]. <https://arxiv.org/abs/2005.01880>.
- [72] RODRIGUEZ J F, RUEDA J A, RUFFINI R, et al. Chirping compact stars: gravitational radiation and detection degeneracy with binary systems. A conceptual pathfinder for space-based gravitational-wave observatories [EB/OL]. <https://arxiv.org/abs/1907.10532>.
- [73] 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>.
- [74] SESANA A. Prospects for multiband gravitational-wave astronomy after GW150914 [J]. *Physical Review Letters*, 2016, 116(23): 231102.
- [75] ABBOTT B P, ABBOTT R, ABBOTT T D, et al (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration). Binary black hole population properties inferred from the first and second observing runs of advanced LIGO and advanced Virgo [J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2019, 882(2): L24.
- [76] CHEN X, AMARO-SEOANE P. Revealing the formation of stellar-mass black hole binaries: The Need for Deci-Hertz gravitational-wave observatories [J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2017, 842(1): L2.
- [77] SAMSING J, D’ORAZIO D J, KREMER K, et al. Single-single gravitational-wave captures in globular clusters: Eccentric deci-Hertz sources observable by DECIGO and Tian-Qin [J]. *Physical Review D*, 2020, 101(12): 123010.
- [78] RANDALL L, XIANYU Z Z. Eccentricity without measuring eccentricity: discriminating among stellar mass black hole binary formation channels [EB/OL]. <https://arxiv.org/abs/1907.02283>.
- [79] LYNDEN-BELL D, REES M J. On quasars, dust and the galactic centre [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1971, 152(4): 461–475.
- [80] SOLTAN A. Masses of quasars [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1982, 200(1): 115–122.
- [81] KORMENDY J, RICHSTONE D. Inward bound—the search for supermassive black holes in galactic nuclei [J]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 1995, 33(1): 581–624.
- [82] GÜLTEKIN K, RICHSTONE D O, GEBHARDT K, et al. The  $M-\sigma$  and  $ML$  relations in galactic bulges, and determinations of their intrinsic scatter [J]. *The Astro-*

- physical Journal, 2009, 698(1): 198.
- [83] BERTI E, YAGI K, YUNES N. Extreme gravity tests with gravitational waves from compact binary coalescences: (I) inspiral–merger[J]. *General Relativity and Gravitation*, 2018, 50(4): 46.
- [84] WOODS T E, AGARWAL B, BROMM V, et al. Titans of the early universe: The prato statement on the origin of the first supermassive black holes [EB/OL]. <https://arxiv.org/abs/1810.12310>.
- [85] BARAUSSE E. The evolution of massive black holes and their spins in their galactic hosts[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2012, 423(3): 2533–2557.
- [86] KLEIN A, BARAUSSE E, SESANA A, et al. Science with the space-based interferometer eLISA: Supermassive black hole binaries[J]. *Physical Review D*, 2016, 93(2): 024003.
- [87] JIANG Z, WANG J, GAO L, et al. GABE: galaxy assembly with binary evolution[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2019, 19(10): 151.
- [88] LIU H, ZHANG C, GONG Y G, et al. Exploring non-singular black holes in gravitational perturbations [EB/OL]. <https://arxiv.org/abs/2002.06360>.
- [89] STOTT M J, MARSH D J E. Black hole spin constraints on the mass spectrum and number of axionlike fields[J]. *Physical Review D*, 2018, 98(8): 083006.
- [90] SCHÖDEL R, FELDMEIER A, NEUMAYER N, et al. The nuclear cluster of the Milky Way: our primary testbed for the interaction of a dense star cluster with a massive black hole[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2014, 31(24): 244007.
- [91] BARACK L, CUTLER C. Using LISA extreme-mass-ratio inspiral sources to test off-Kerr deviations in the geometry of massive black holes[J]. *Physical Review D*, 2007, 75(4): 042003.
- [92] de MEENT MVAN. Gravitational self-force on eccentric equatorial orbits around a Kerr black hole [J]. *Physical Review D*, 2016, 94(4): 044034.
- [93] BABAK S, GAIR J, SESANA A, et al. Science with the space-based interferometer LISA. V. Extreme mass-ratio inspirals[J]. *Physical Review D*, 2017, 95(10): 103012.
- [94] TAMANINI N, CAPRINI C, BARAUSSE E, et al. Science with the space-based interferometer eLISA. III: Probing the expansion of the Universe using gravitational wave standard sirens[J]. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2016(4): 002.
- [95] GUO H K, SINHA K, SUN C. Probing boson stars with extreme mass ratio inspirals [J]. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2019(9): 032.
- [96] WANG Y Y, WANG F Y, ZOU Y C, et al. A bright electromagnetic counterpart to extreme mass ratio inspirals[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2019, 886(1): L22.
- [97] HAN W B, ZHONG X Y, CHEN X, et al. Very-Extreme-mass-ratio gravitational wave bursts in the Galaxy and neighbors for space-borne detectors [EB/OL]. <https://arxiv.org/abs/2004.04016>.
- [98] CAPRINI C, FIGUEROA D G. Cosmological backgrounds of gravitational waves[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2018, 35(16): 163001.
- [99] LIANG Z C, et al. In preparation.
- [100] DEV P S B, FERRER F, ZHANG Y, et al. Gravitational waves from first-order phase transition in a simple axion-like particle model[J]. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2019(11): 006.
- [101] BIAN L G, CHENG W, GUO H K, et al. Gravitational waves triggered by BL charged hidden scalar and leptogenesis[EB/OL]. <https://arxiv.org/abs/1907.13589>.
- [102] DI BARI P, MARFATIA D, ZHOU Y L. Gravitational waves from neutrino mass and dark matter genesis [EB/OL]. <https://arxiv.org/abs/2001.07637>.
- [103] BIAN L G, WU Y C, XIE K P. Electroweak phase transition with composite Higgs models: calculability, gravitational waves and collider searches [J]. *Journal of High Energy Physics*, 2019(12): 28.
- [104] HUANG W C, SANNINO F, WANG Z W. Gravitational waves from Pati-Salam dynamics [EB/OL]. <https://arxiv.org/abs/2004.02332>.
- [105] KING S F, PASCOLI S, TURNER J, et al. Gravitational waves and proton decay: complementary windows into GUTs [EB/OL]. <https://arxiv.org/abs/2005.13549>.
- [106] LIN J, GAO Q, GONG Y, et al. Primordial black holes and secondary gravitational waves from k and G inflation [J]. *Physical Review D*, 2020, 101(10):

- 103515.
- [107] DREES M, XU Y. Overshooting, critical higgs inflation and second order gravitational wave signatures [EB/OL]. <https://arxiv.org/abs/1905.13581>.
- [108] DI H R, GONG Y G. Primordial black holes and second order gravitational waves from ultra-slow-roll inflation [J]. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2018(7): 007.
- [109] LU Y Z, GONG Y G, YI Z, et al. Constraints on primordial curvature perturbations from primordial black hole dark matter and secondary gravitational waves [J]. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2019(12): 031.
- [110] LIN J, GAO Q, GONG Y, et al. Primordial black holes and secondary gravitational waves from  $k$  and  $G$  inflation [J]. *Physical Review D*, 2020, 101(10): 103515.
- [111] 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 [J]. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2020(11): 012.
- [112] LINGFENG L U, YING LIU, HUIZONG D, et al. Numerical simulations of the wavefront distortion of inter-spacecraft laser beams caused by solar wind and magnetospheric plasmas [J]. *Plasma Science and Technology*, 2020, 22(11): 115301.
- [113] YE H C, YAN Q Z, LIANG Y R, et al. Intersatellite laser ranging with homodyne optical phase locking for Space Advanced Gravity Measurements mission [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2011, 82(4): 044501.
- [114] LIANG Y R, DUAN H Z, XIAO X L, et al. Note: Inter-satellite laser range-rate measurement by using digital phase locked loop [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2015, 86(1): 016106.
- [115] LUO Y, LI H, YE H C, et al. A self-analyzing double-loop digital controller in laser frequency stabilization for inter-satellite laser ranging [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2015, 86(4): 044501.
- [116] ZHANG J Y, MING M, JIANG Y Z, et al. Inter-satellite laser link acquisition with dual-way scanning for space advanced gravity measurements mission [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(6): 064501.
- [117] LIANG Y R. Note: a new method for directly reducing the sampling jitter noise of the digital phasemeter [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(3): 036106.
- [118] SU W, WANG Y, ZHOU Z B, et al. Analyses of residual accelerations for TianQin based on the global MHD simulation [J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2020, 37(18): 185017.
- [119] BAI Y, LI Z, HU M, et al. Research and development of electrostatic accelerometers for Space Science Missions at HUST [J]. *Sensors*, 2017, 17(9): 1943.
- [120] PEI S X, LIU L, WU S C, et al. Location effect and adjustment scheme of the translation-tilt compensation bench for accelerometer performance investigation [J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2019, 36(23): 235023.
- [121] YANG F, BAI Y, HONG W, et al. Investigation of charge management using UV LED device with a torsion pendulum for TianQin [J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2020, 37(11): 115005.
- [122] 李永, 刘旭辉, 汪旭东. 空间极小推力宽范围可调推进技术研究进展 [J]. *空间控制技术与应用*, 2019, 45(6): 23-38.
- LI Y, LIU X H, WANG X D. Review and prospect on the large-range thrust throttling technology with extremely small thrust [J]. *Aerospace Control and Application*, 2019, 45(6): 23-38.
- [123] 于达仁, 崔凯, 刘辉, 等. 用于引力波探测的微牛级霍尔电推进技术 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2020, 52(6): 171-181.
- YU D R, CUI K, LIU H, et al. Micro-newton hall electric propulsion technology for gravitational wave detection [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2020, 52(6): 171-181.
- [124] CUI K, LIU H, JIANG W J, et al. Effects of cusped field thruster on the performance of drag-free control system [J]. *Acta Astronaut*, 2018(144): 193-200.
- [125] SONG P Y, SUN L M, KUANG S Y, et al. Micro-Newton electrospray thrusters for China's spaceborne gravitational wave detection mission (TianQin) [C]// *IEPC*, 2019(A): 284.

- [126] 胡明, 李洪银, 周泽兵. 无拖曳控制技术及其应用 [J]. 载人航天, 2013, 19(2): 61-69.  
HU M, LI H Y, ZHOU Z B. Drag-free control technology and its applications [J]. Manned Space Flight, 2013, 19(2):61-69.
- [127] 李洪银. 下一代重力卫星新型无拖曳与姿态控制系统研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.  
LI H Y. Research of drag-free and attitude control system for the next generation gravimetric satellite [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.
- [128] LI H, BAI Y, HU M, et al. A novel controller design for the next generation space electrostatic accelerometer based on disturbance observation and rejection [J]. Sensors, 2017, 17(1): 21.
- [129] 郑浩颖. 天琴卫星的空间外热流分析与隔离控制研究[D]. 广州: 中山大学, 2020.  
ZHENG H Y. Study on heat flow analysis and isolation control of TianQin satellite[D]. Guangzhou: Sun Yat-sen University, 2020.
- [130] 王磊. 天琴计划地面模拟设备中的 10mK 级温度测量研究[D]. 广州: 中山大学, 2020.  
WANG L. Study on 10mK temperature measurement in ground simulation equipment of TianQin project [D]. Guangzhou: Sun Yat-sen University, 2020.
- [131] LIAN X B, ZHANG J X, WANG J H, et al. State and disturbance estimation for test masses of drag-free satellites based on self-recurrent wavelet neural network [EB/OL]. Advances in Space Research, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.09.014>.
- [132] LIAN X B, ZHANG J X, YANG J K, et al. The determination for ideal release point of test masses in drag-free satellites for the detection of gravitational waves [EB/OL]. Advances in Space Research, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.09.030>.
- [133] YI B, GU D, CHANG X, et al. Integrating BDS and GPS for precise relative orbit determination of LEO formation flying [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2018, 31(10):2013-2022.
- [134] SHAO K, GU D, JU B, et al. Analysis of Tiangong-2 orbit determination and prediction using onboard dual-frequency GNSS data [J]. GPS Solutions, 2020, 24: 11.
- [135] JU B, GU D, HERRING T A, et al. Precise orbit and baseline determination for maneuvering low earth orbiters [J]. GPS Solutions, 2017, 21(1):53-64.
- [136] GU D, JU B, LIU J, et al. Enhanced GPS-based GRACE baseline determination by using a new strategy for ambiguity resolution and relative phase center variation corrections [J]. Acta Astronautica, 2017, 138(9):176-184.
- [137] 李语强, 伏红林, 李荣旺, 等. 云南天文台月球激光测距研究与实验 [J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0104004.  
LI Y Q, FU H L, LI R W, et al. Research and experiment of lunar laser ranging in Yunnan observatories [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0104004.
- [138] HE Y, LIU Q, DUAN H Z, et al. Manufacture of a hollow corner cube retroreflector for next generation of lunar laser ranging [J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2018, 18(11):136.
- [139] HE Y, LIU Q, HE J J, et al. Development of a 170-mm hollow corner cube retroreflector for the future lunar laser ranging [J]. Chinese Physics B, 2018, 27(10):100701.
- [140] LUO J, et al. In preparation.
- [141] 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.

(责任编辑 王海蓉)