

中国空间引力波探测“太极计划”及“太极1号”在轨测试

罗子人^{1,2,3,4}, 张敏^{2,3,4}, 靳刚^{1,2,3,4}, 吴岳良^{2,3,4,5}, 胡文瑞^{1,2}

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院大学引力波宇宙太极实验室, 北京 100049; 3. 中国科学院大学杭州高等研究院基础物理与数学科学学院, 杭州 310024; 4. 国际理论物理中心-亚太地区, 北京 100190; 5. 中国科学院理论物理研究所, 北京 100190)

摘要: 我国空间引力波探测“太极计划”将打开中低频段(0.1 mHz~1 Hz)的引力波观测窗口, 为人类研究宇宙起源与演化、黑洞起源与演化、引力本质、暗能量和暗物质等提供全新的方法和手段。由于空间引力波探测涉及一系列关键技术, 太极计划提出了“单星”“双星”和“三星”3步走的发展路线图。目前“单星”计划——“太极1号”发射成功, 并圆满完成了第一阶段的在轨测试。本文将简要介绍空间引力波探测的科学价值、国内外背景和关键技术分解, 重点对太极计划及其3步走发展规划进行分析, 并提出后续工作的一些设想和发展建议。

关键词: 空间引力波探测; 太极计划; 星间激光干涉测距系统; 无拖曳控制系统; 引力波天文学

中图分类号: P142.8+4; V556.7; V448.2; P15; O412.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-7777(2020)01-0003-08

DOI:10.15982/j.issn.2095-7777.2020.20191230001

引用格式: 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.

Reference format: LUO Z R, ZHANG M, JIN G, 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.

引言

获得空间引力波存在的直接证据不仅可对爱因斯坦广义相对论进行更精确的检验, 也将开辟引力波物理学和引力波天文学的新领域, 对物理学和天文学的未来发展有着非常重大的意义。利用引力波来探测天体物理过程是继电磁辐射和粒子辐射之后的一种新途径, 引力波携带了引力相互作用的基本自由度, 研究引力波物理可为揭示宇宙演化过程的新奥秘、基础物理学新规律和相对论天体物理动力学提供新的方法和手段^[1-2]。宇宙中的引力波来自宇宙天体的能量(含质量)变化, 不同频率的引力波对应于不同的天体物理过程。空间引力波天线可探测中、低频段引力波, 将是物理学和天文学前沿课题, 其研究工作的顺利开展, 将会为未来在基础科学领域取得突破奠定坚实基础。

1 空间引力波探测的重要意义

1.1 引力波及其研究价值

引力波是爱因斯坦广义相对论一个非常重要的预言, 是物质和能量剧烈运动和变化产生的一种物质

波。在广义相对论中, 引力波是时空曲率的一种波动, 它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, 在真空和弱场近似下以光速向外传播。

引力波提供了不同于电磁波的探索宇宙的新手段。在标准宇宙学模型中, 有电磁相互作用的普通物质在宇宙成分中只占不到5%, 超过95%的宇宙成分由暗能量和暗物质组成, 它们无法直接通过电磁波进行探测, 但却都参与引力相互作用, 对暗能量性质和暗物质属性的研究可以帮助我们认识引力的本质, 了解早期宇宙的演化。同时, 引力波探测和研究有助于揭开暗能量和暗物质之谜, 探索未知的新物理, 为我们呈现一幅完整的宇宙图景。

理解引力的本质和探索引力子是基础物理重要的一个方向。自然界有4种基本作用力, 除引力外的其他3种作用力(电磁力、强力和弱力)在量子场论的框架下得到了统一的描述。包括广义相对论在内的粒子物理标准模型有62种基本粒子, 除引力子外其他61种基本粒子均已被找到。引力波探测和研究将为揭示引力本质和探索统一场论提供一个不可替代的途径。

收稿日期: 2019-12-30 修回日期: 2020-01-18

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项“空间引力波探测背景型号研究”(XDA15020700); 中国科学院战略性先导科技专项“多波段引力波宇宙研究”(XDB23030000)

1.2 空间引力波探测的必要性

2015年地面引力波天文台LIGO首次直接探测到引力波事件^[3]，3位激光干涉引力波天文台(Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory, LIGO)主要科学家也因此获得了2017年诺贝尔物理学奖。但是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，波源主要包括几十至几百太阳质量的黑洞并合和双中子星并合等；且因波源特征质量小，引力波强度弱，它仅可探测红移 $z \approx 1$ 的范围^[4]。

更高红移、更大特征质量和尺度的波源，有更深刻的宇宙学和天文学意义。从几千至几百万太阳质量的超大黑洞波源，其探测频段为中低频(0.1 mHz~1 Hz)；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，引力波强度高，因此其探测范围可覆盖几乎全宇宙空间(红移 $z \approx 12$)^[5-6]。探测这个频段的引力波需要摆脱地面噪声和地面实验尺度的限制，在太空实现百万千米级精密激光干涉测量。

引力波跟电磁波一样，是一个宽频的信号。宇宙中存在着大量的引力波源，覆盖了宽阔的频段。不同频段的引力波起源不同，对应的科学目标也不同，将从不同方面促进基础物理研究和引力波天文学、引力波宇宙学的发展和突破。

1.3 空间引力波探测的意义和价值

通过对超大黑洞并合波源的观测，可研究黑洞宿主星系的并合及星系周围暗物质晕的并合，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起源和演化，首次描绘出宇宙大尺度结构形成的全部历史过程。通过对大质量黑洞俘获其他致密天体的引力波源的观测，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、统一场论及宇宙演化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完整分布图景，为研究银河系演化和发展发挥关键作用^[6-7]。正如美国实验委员会(National Research Council, NRC)在2007年的报告中指出：“直接探测到中低频引力波将是诺贝尔奖量级的重大发现”^[8]。

通过开展空间引力波探测，还可全面推动我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各方面技术的成熟。对于全球重力场测绘、建立高精度全球时

空坐标体系、对地观测、大地测量、资源勘探、自主导航，以及促进未来的前沿空间科学实验等都具有重要的意义^[9]。

2 国内外发展态势

国际上，20世纪90年代由欧洲航天局(European Space Agency, ESA)和美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)共同规划的LISA计划^[10]已发展成为较成熟的空间引力波探测计划(NASA于2011年由于经费问题退出LISA计划，并于2017年重新加入LISA计划，期间LISA计划改成eLISA计划，邀请中国引力波探测组加入)。LISA计划的设想最早在1984—1985年由美欧合作提出，于1993年形成了初步的方案设计，并开始开展关键技术研究。此方案又经过多次修改，于1998年确立了500万km臂长的三星编队方案。美国NASA在2011年突然宣布由于经济原因退出LISA计划。ESA不得不独立承担整个LISA任务。考虑到预算问题，ESA对整个任务进行简化，采用了一颗母星加两颗子星的设计，并更名为eLISA，并且臂长由之前的500万km缩短至100万km。

因为LISA计划所需的技术实现难度大，为保证LISA计划能最终成功实现，LISA研究组从1998年开始经过4年的方案及关键技术论证，于2002年通过了技术验证星计划——“LISA探路者号”(Lisa Pathfinder)，利用其对LISA所需的部分技术进行空间验证。最终，“LISA探路者号”卫星于2015年12月成功发射升空，并于2016年3月进入科学工作模式，并持续工作至2017年6月。在2016年6月“LISA探路者号”公布了第一轮科学工作阶段的结果，远超预期。

2017年在中国科学院大学(以下简称中科院)怀柔校区举行的国际空间引力波大会(ISGW2017)上，“LISA探路者号”项目负责人Vitale教授公布了最新结果，“LISA探路者号”检验质量的自由悬浮水平已完全达到甚至超过未来LISA任务的需求。如此优异的结果也将NASA重新吸引回到了LISA计划中。“LISA探路者号”共同项目负责人Danzmann教授在ISGW2017大会上宣布了NASA回归的消息。LISA计划已被ESA确立为旗舰计划(L3计划)，预期在2034年前发射。近期，LISA对外宣布将有可能将其计划提前到2030年左右。

我国科学家从2008年开始探讨中国的空间引力波探测计划，由中科院牵头组织全国优势力量成立空间引力波探测论证组，研讨我国空间引力波探测在未来数十年内的发展路线图，并列入中科院制定的空间2050年规划中。2012年中科院牵头成立了我国空间引

力波探测工作组。基于中科院空间科学预研项目的支持，2012年我国科学家在首次eLISA联盟会议上，提出了中国空间引力波探测计划，并从技术和科学目标考虑，优先选择间距为300万km的正三角形卫星编队（不同于LISA的500万km和eLISA的100万km），以太阳为中心落后（或超前）地球约 20° 进行绕转^[11]。2016年初该计划向外公布为“太极计划”^[12-13]。2014年，我国空间引力波探测工作组的部分成员开始并行探讨基于地心轨道的探测方案，并于2016年命名为“天琴计划”^[12,14]。

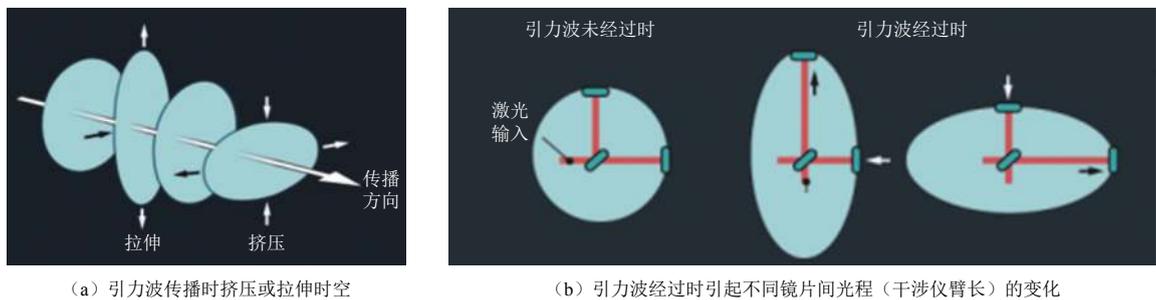
中科院经组织多次研讨，于2016年优先启动了战略性先导科技专项B“多波段引力波探测”项目，经过深入系统论证，明确了“太极计划”“单星、双星、三

星”3步走的发展战略。2018年8月，中科院在空间科学（2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1号”工程任务。2019年8月31日成功发射，通过在轨实验，验证了关键技术路线的可行性，完成了我国空间引力波探测的第一步。

3 空间引力波探测原理与涉及的关键技术

3.1 探测原理简介

引力波经过时会挤压或拉伸附近的时空，从而引起空间中不同位置的点之间的光程变化。空间和地面激光干涉引力波探测器都是基于迈克尔逊干涉测量原理，利用激光干涉仪，精密测量引力波引起的光程变化（图1）^[15]。



(a) 引力波传播时挤压或拉伸时空

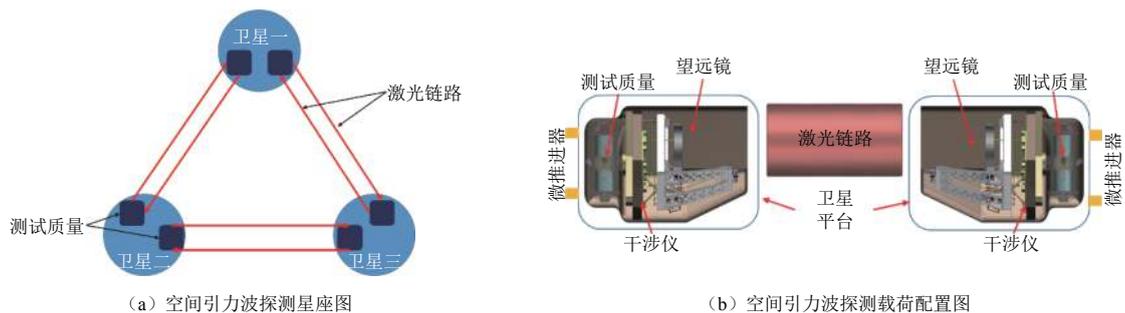
(b) 引力波经过时引起不同镜片间光程（干涉仪臂长）的变化

图1 引力波传播时挤压或拉伸时空和引力波经过时引起不同镜片间光程（干涉仪臂长）的变化

Fig. 1 How the GW stretch and squeeze the space-time, and how optical path length changes when GW passing by

由于科学目标及所需的测量环境不同，空间引力波探测和地面引力波探测的关键技术组成和实现难度也不一样。空间引力波探测器由3颗卫星组成，形成正三角形飞行编队，可在保持轨道稳定的同时较好地响应引力波的振动特性。每颗卫星携带两个测试质量，

代替地面引力波探测器的反射镜。激光在测试质量间传播，建立起两两卫星间的激光干涉链路，如图2（a）所示。引力波经过时，两两测试质量间的光程发生变化，通过激光干涉信号读出^[16]。



(a) 空间引力波探测星座图

(b) 空间引力波探测载荷配置图

图2 空间引力波探测星座图和空间引力波探测载荷配置图

Fig. 2 The satellite constellation and the sketch diagram of payload of space-borne GW detection missions

引力波信号非常微弱，即使两个测试质量相距300万km，引力波引起的光程变化也只在pm量级。因此空间引力波探测要求星间激光干涉测距系统的测量精度达到 $8 \text{ pm/Hz}^{1/2}$ （头发丝直径的千万分之一或氢原

子直径的十分之一）；同时测试质量必须非常稳定，微小的扰动就会淹没引力波信号，因此它的残余扰动加速度噪声要小于 $3 \times 10^{-15} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}/\text{Hz}^{1/2}$ （相当于喜马拉雅山被一个西瓜重量大小的力作用后产生的加速度大

小)。组成激光干涉测距系统和无拖曳控制系统的主要载荷如图2(b)所示。

3.2 空间引力波探测关键技术简介

3颗卫星在发射进入预定轨道后,首先需通过星间自动激光捕获技术,使得3颗卫星获得相互间精确的方位信息;然后通过星间激光跟瞄技术,让3颗卫星通过激光进行相互精确的瞄准,从而建立起稳定的激光干涉链路。由于激光发散角的存在、激光收发望远镜口径有限以及激光器输出功率的限制,在传播300万km后,被航天器接收到的激光光强非常小,必须要通过弱光锁相的技术对信号光进行放大。由于卫星之间存在相对速度,激光传播时会产生多普勒频移,所以空间引力波探测采用差分干涉技术。当引力波经过时,引起的光程变化就会调制在这个差分干涉信号的相位中。这个差分干涉信号会被送至相位计,相位计利用星载超稳时钟生成一个相同频率的信号,对差分干涉信号的相位进行解调,从而获得引力波信息。同时还需建立辅助干涉仪进行百万千米星间测距、通信和对钟等,通过延时数据处理方法来消除激光频率噪声和超稳时钟的噪声。这形成星间激光干涉测距系统^[9]。

如果测试质量暴露在外太空,受到太阳光压、太阳风或者其他宇宙射线的扰动,测试质量就会产生扰动加速度,从而产生位移噪声,很容易把引力波信号淹没掉。因此,我们将测试质量保护在卫星中心,跟卫星没有直接物理接触,使其不受外界干扰力的扰动,测试质量就会处于自由漂移状态,如图2(b)所示。外界扰动就会作用在卫星上,使卫星产生位移扰动,时间一长,卫星跟测试质量就会碰撞到一起,破坏测试质量的自由漂移状态。所以,我们通过位移传感器(电容位移传感或者光传感),时刻读出卫星和测试质量之间的位移变化,反馈给安装在卫星上的微推进器,微推进器产生准确且稳定的推力,将卫星受到的外界扰动力补偿掉,始终保持测试质量和卫星间的位移处于平衡状态。这就是航天器无拖曳控制技术。其中测试质量和位移传感器就组成了惯性传感器(或称为引力参考传感器)^[9]。

3.3 空间引力波探测的科学目标与关键技术分解

空间引力波探测主要有以下4类波源:超大黑洞双星的并合、极端质量比黑洞双星的绕转、银河系内致密双星的绕转以及随机引力波背景。通过观测这些波源,可帮助了解第一代恒星的演化和死亡,宇宙大尺度结构的形成和演化,星系的并合与演化,星系核附近致密天体的密度、分布及其动力学,银河系内致密天体密度、分布及其内部状态等等。为实现上述目

标,需实现如下关键技术:

1) 星间激光干涉测距系统

实现300万km距离上星间测距精度 $8 \text{ pm/Hz}^{1/2}$,包括高稳空间激光光源、高稳空间激光望远镜、高精度激光干涉仪、高精度相位计、空间超稳时钟及其噪声抑制、低噪弱光探测器、激光超前指向机构、呼吸角补偿机构、弱光锁相、激光锁臂、时间延迟干涉、星间激光捕获和跟瞄、星间激光测距和通信、星间对钟等关键部件和技术。

2) 航天器无拖曳控制系统

保证测试质量残余加速度小于 $3 \times 10^{-15} \text{ ms}^{-2}/\text{Hz}^{1/2}$,包括高精度电容传感与静电反馈、高精度电极笼与测试质量加工、测试质量锁紧与释放机构、测试质量电荷管理、惯性传感器真空维持、高灵敏度微推进技术、高可靠性的冷气微推进技术、非正交多自由度航天器无拖曳控制器等关键部件和技术。

3) 超稳超静卫星系统

包括航天器总体方案优化设计耦合仿真及性能评估技术、高精度高稳定度热控技术、超稳结构及质心调整机构、多自由度无拖曳与姿控技术、磁洁净控制技术。

4) 科学目标深化

包括探索中低频段新的引力波源、进一步拓展现有波源的科学意义等技术内容。

5) 数据处理与波形模板库

包括时间延迟干涉等数据预处理技术、匹配滤波等科学数据处理技术、建设高精度波形模板库等技术内容。

6) 空间引力波探测全链路数值仿真

包括卫星编队高精度轨道仿真、空间环境影响建模、引力波探测时空动力学的仿真、星间激光干涉测量数值仿真、航天器无拖曳控制数值仿真、编队控制与无拖曳耦合数值仿真等技术内容。

7) 工程目标深化与指标体系地面综合验证

空间引力波探测大体系分析、工程总体方案和实施技术途径确定、工程任务剖面与全指标体系的分解和优化、星际飞行模式下卫星、载荷一体化核心技术的系统级验证和标定检测方法、研制空间力热模拟环境、地面半物理仿真、检测和综合验证系统。

4 太极计划及其3步走发展路线图

4.1 太极计划方案介绍

太极计划由3颗以正三角形编队的卫星组成,卫星采用日心轨道,编队平面与黄道面成 60° 夹角,编队的质心位于地球公转轨道上,落后地球约 20° ,如图3所

示。卫星间的距离（臂长）为300万km。太极计划预计在2030年左右发射，在轨运行5年，对中低频段的引力波进行探测和研究^[13]。

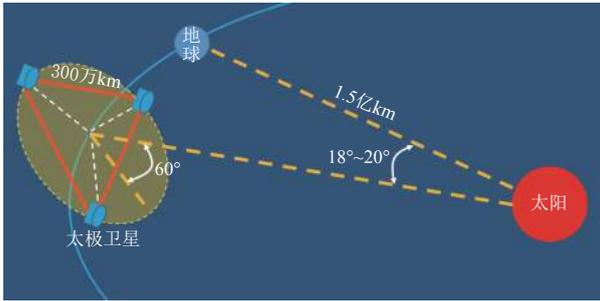


图3 空间引力波探测太极计划三星编队图
Fig. 3 The orbit and constellation of Taiji satellites

4.2 轨道及臂长选择

目前空间激光干涉引力波探测器有两类轨道选择：日心轨道和地心轨道。地心轨道在发射和测控方面相对容易，但受月球引力影响大，卫星编队轨道稳定性较差；同时，卫星会交替进入太阳阴影区和太阳照射区，外热流不稳定，对整星热控提出很大挑战。日心轨道具有长周期稳定性好、卫星编队呼吸角小、太阳指向角稳定及卫星外热流稳定等优势，成为国际上空间引力波探测方案的首选^[17]。

空间激光干涉引力波天线的臂长选择直接决定了

其敏感频段，也就决定了其主要波源类型及波源对应的科学目标。臂长的细小变动，会对特定波源的探测事件率产生显著影响^[6,7]。通过对中低频段的引力波源及其科学意义的深入研究，中国空间引力波探测太极计划在2012年确定了300万km的臂长设计^[11]。而LISA计划在经历了500~100万km的变化后，在2017年最终将臂长设计定为250万km，故其敏感频段和科学目标跟太极大致重合。

4.3 太极计划3步走路线图

太极计划激光干涉测距系统包含测试质量激光干涉仪、百万km星间激光干涉仪、超稳空间激光收发望远镜、激光频率噪声抑制与消除技术、超稳时钟噪声抑制与消除技术、星间激光捕获与跟瞄技术等。无拖曳控制系统由高精度引力参考传感器、高精度微推进器和非正交多自由度无拖曳控制器组成。为保证激光干涉测距系统和无拖曳控制系统实现设计指标，需发展超稳超静卫星平台技术，含高稳定热控技术、超稳卫星结构制造技术、超稳姿态控制技术和磁洁净控制技术。

为实现2030年左右发射太极三星、率先取得空间引力波探测突破的目标，经过多年的积累和酝酿，中国科学院提出了“太极计划”发展3步走发展规划，如图4所示。

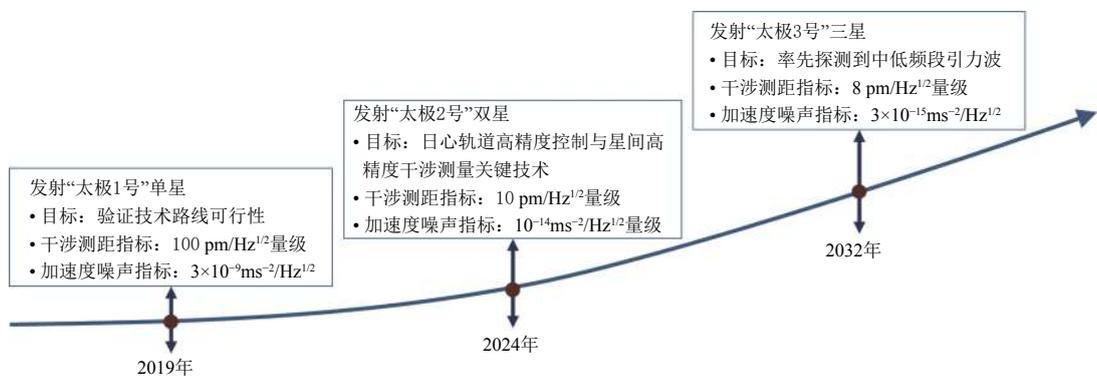


图4 “太极计划”3步走规划内容
Fig. 4 The 3-step strategic planning of Taiji program

第1步，已于2019年8月31日成功发射“太极1号”单星，绕地球轨道，主要验证空间引力波探测技术路线的可行性。干涉测距精度实测值达到百皮米量级，测试质量残余加速度实测值达到 $10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}/\text{Hz}^{1/2}$ 量级。同时对部分关键技术在轨进行测试，含测试质量激光干涉仪、引力参考传感器（加速度计模式）、单自由度航天器无拖曳控制等。

第2步，在2024年前后发射“太极2号”双星绕日运

行，臂长大于50万km，激光干涉测距系统指标达到 $10 \text{ pm}/\text{Hz}^{1/2}$ ，无拖曳控制下测试质量的残余加速度小于 $3 \times 10^{-14} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}/\text{Hz}^{1/2}$ 。并开展引力红移、等效原理等科学实验。在此期间，建设太极关键技术地面实验验证平台，开展全面的关键技术攻关和地面测试，优化工程研制方案设计。更改引力参考传感器设计为惯性传感模式，读出电压噪声降低一倍，在现有结构精密加工和装调基础上，将极大提升惯性传感器性能，将测试

质量残余加速度降至设计指标。并开展50万km星间激光干涉仪、空间激光收发望远镜、激光频率噪声与超稳时钟噪声抑制与消除技术、星间激光捕获与跟瞄技术、高稳定卫星热控技术、超稳卫星结构制造技术、超稳卫星姿态控制技术和磁洁净控制技术等在轨实验。

第3步,在2030年左右发射“太极3号”三星至预定轨道,臂长300万km,率先在空间探测到中低频段引力波信号。激光干涉测距系统验证指标达到 $8 \text{ pm/Hz}^{1/2}$,无拖曳控制后测试质量残余加速度的噪声小于 $3 \times 10^{-15} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}/\text{Hz}^{1/2}$ 。第3步需突破的技术包括非正交多自由度无拖曳控制技术、呼吸角补偿机构、时间延迟干涉等。

4.4 “太极1号”在轨测试进展及后续计划

2019年8月31日我国首颗空间引力波探测技术实验卫星“太极1号”成功发射后,科学团队和工程团队通力合作,通过严格测试实验,“太极1号”的各项功能、性能指标满足研制总要求,成果超出预期,在轨测试取得圆满成功。

“太极1号”是中国科学院空间科学(2期)战略性先导科技专项首发星。“太极1号”完成了我国空间引力波探测所需载荷和卫星主要关键技术的首次在轨验证,包括高稳定激光器、超高精度干涉仪、高灵敏度引力参考传感器、无拖曳控制技术、微牛级微推进技术、超稳超静航天器等。

“太极1号”实现了我国迄今为止最高精度的空间激光干涉测量。完成了射频离子和霍尔双模两种类型电微推技术的全部性能验证,为国际上首次实现。在成功实现加速度模式无拖曳控制实验的同时,进一步完成了位移模式下的航天器在轨无拖曳控制,率先实现了我国两种无拖曳控制技术的突破。部分核心载荷性能实测指标超过设计指标一个量级,达到了我国最高水平。“太极1号”从零到一的突破,验证了我国空间引力波探测“太极计划”技术路线的可行性^[18]。

“太极1号”圆满完成在轨测试,是我国空间引力波探测实验技术验证的重要突破,标志着“太极计划”“3步走”第1步任务目标已成功实现,并转入拓展实验阶段^[19]。

对技术路线可行性验证通过后,将进一步开展地面关键技术攻关,并瞄准太极计划第3步“太极3号”的目标进行展开。但受地面条件如百万千米臂长模拟、地面噪声水平等的限制,无法对所有关键技术进行真实的检验。为此,需通过“太极2号”双星计划对“太极计划”绝大部分关键技术进行高指标的在轨验证,帮助判断地面所做的测试、分析、评估和拓展等实验是否

合理,提升关键技术的稳定性和可靠性,降低空间引力波探测“太极计划”的技术风险。

“LISA探路者号”作为单星技术验证星,其验证的技术极为有限,不到空间引力波探测关键技术四分之一。“太极2号”双星将覆盖绝大部分(约90%)的关键技术,是真正意义上的关键技术验证卫星。对LISA团队参与“太极2号”计划的合作具有吸引力。通过分析和研究“太极2号”关键技术验证的结果,较全面地掌握空间引力波探测所涉及的关键技术,将为空间引力波探测“太极计划”最终的“太极3号”三星组的成功发射铺平道路。

5 结束语

空间引力波探测涉及基础物理、天文学、宇宙学、光学、精密测量物理、电子工程、航空航天等诸多学科领域。空间引力波探测的开展,必将极大促进相关学科的前沿研究,促进各学科的融合发展。空间引力波探测太极计划将充分发挥中科院长期聚集的多学科人才优势,长期积累的前瞻性高端技术与大科学装置综合平台,以及学科交叉和科教融合特色。空间引力波探测太极计划将吸引全国优势力量,凝聚引力波理论研究和探测实验的科研工作者,致力于开展空间引力波探测的研究工作,并培养一大批基础研究和工程实施的高素质人才。

空间引力波探测涉及一系列前瞻技术。在空间激光干涉仪方面需大功率稳频激光器和激光干涉系统,需采用无拖曳技术控制的超稳超静卫星平台,需测量超低重力水平的高灵敏度引力参考传感器,需控制各种噪声以分辨出引力波引起的微小距离变化,需与实验设备一体化的卫星设计和研制,这些都是急需研究和攻克的空间引力波探测关键技术。我国空间引力波探测研究与国际相比起步晚,目前的技术能力与国际先进水平还有一定的差距,须加快研究步伐,尽快投入必要的人力物力,通过集中优势力量研发以及相应的国际合作来加速缩短与国际先进水平的差距。

空间引力波探测“太极计划”拟在2030年左右发射由位于等边三角形顶端3颗卫星组成的引力波探测星组,用激光干涉方法进行中低频段引力波的直接探测。主要科学目标是探测和发现大质量双黑洞并合和极大质量比天体并合时产生的引力波辐射,以及宇宙中其它各种可能的中低频段的引力波辐射过程。将通过国际合作的途径,使我国空间引力波探测卫星组与国际上另一空间引力波探测卫星组能同时并独立地进行空间引力波探测,以便互相补充和检验测量结果。

参 考 文 献

- [1] SATHYAPRAKASH B S, SCHUTZ B F. Physics, astrophysics and cosmology with gravitational waves[J]. *Living Rev Relativ*, 2009, 12: 2-141.
- [2] CUTLER C, THORNE K S. An overview of gravitational wave sources[C]// Proceedings of the GR16 Conference on General Relativity and Gravitation. Durban, South Africa: the International Society on General Relativity and Gravitation, 2002.
- [3] LIGO and Virgo Scientific Collaboration. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger[J]. *Phys Rev Lett*, 2016, 116: 061102.
- [4] JANI K, SHOEMAKER D, CUTLER C. Detectability of intermediate-mass black holes in multiband gravitational wave astronomy. *Nat Astron*[EB/OL].[2019-12-30]. <https://doi.org/10.1038/s41550-019-0932-7>.
- [5] The eLISA Consortium. The gravitational universe: a white paper on the gravitational waves detection and characterization in space using million kilometers laser interferometry[R]. Paris: ESA, 2013.
- [6] GONG X F, LAU Y K, XU S N, et al. Descope of the ALIA mission[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2015, 610: 12011.
- [7] GONG X F, XU S N, YUAN Y F, et al. Laser interferometric gravitational wave detection in space and structure formation in the early universe[J]. *Chin Astron Astrophys*, 2015, 39: 411-446.
- [8] Committee on NASA's Beyond Einstein Program. NASA's beyond einstein program: an architecture for implementation[M]. Washington DC: Natl Acad. Press, 2007.
- [9] 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, 434: 415-447.
LUO Z R, BAI S, BIAN X, et al. Gravitational wave detection by space laser interferometry[J]. *Advances in Mechanics*, 2013, 434: 415-447.
- [10] LISA Consortium. LISA: laser interferometer space antenna—a proposal in response to the ESA call for L3 mission concepts[EB/OL].[2019-12-30]. https://www.cosmos.esa.int/documents/678316/1700384/LISA_L3_20170120+-+Submitted.pdf/5b036a72-ed33-dbad-871d-f16ed282723d.
- [11] WU Y L. Space gravitational wave detection in China[C]//Presentation on First eLISA Consortium Meeting. APC-Paris, France: [s.n.], 2012.
- [12] CYRANOSKI D. Chinese gravitational-wave hunt hits crunch time[J]. *Nature News*, 2016, 531: 150-151.
- [13] HU W R, WU Y L. The Taiji program in space for gravitational wave physics and the nature of gravity[J]. *Natl Sci Rev*, 2017, 4: 685-686.
- [14] LUO J, CHEN L S, DUAN H Z, et al. TianQin: a space-borne gravitational wave detector[J]. *Class Quantum Gravity*, 2016, 33: 35010.
- [15] SAULSON P R. Fundamentals of interferometric gravitational wave detectors[M]. Singapore: World Science PubCo Inc., 1994.
- [16] ROWAN S, HOUGH J. Gravitational wave detection by interferometry(ground and space)[J]. *Living Rev Relativ*, 2000, 3 (1): 3.
- [17] 胡文瑞. 空间引力波探测方案的探讨[J]. *科技导报*, 2018, 36: 1.
HU W R. Overall discussion on the key problems of a space-borne laser interferometer gravitational wave antenna[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2018, 36: 1.
- [18] 董瑞丰. “太极一号”在轨测试成功我国空间引力波探测迈出第一步[C]//“太极一号”新闻发布会. 北京: 新华社, 2019.
DONG R F. “Taiji-1” on orbit testing successfully completed[C]//“Taiji-1” news conference. Beijing: Xinhua News Agency, 2019.
- [19] 吴月辉. 我国首颗空间引力波探测技术实验卫星“太极一号”圆满完成在轨测试实验[N]人民日报客户端, 2019-12-25.
WU Y H. Chinese First space-borne GW detection technology demonstration satellite “Taiji-1” successfully finish its on orbit experiments[N]. *People's Daily*, 2019-12-25.

作者简介:

罗子人(1980-), 男, 副研究员, 硕士生导师, 主要研究方向: 空间引力波探测、激光精密测量。

E-mail: luoziren@imech.ac.cn

吴岳良(1962-), 男, 中国科学院院士, 研究员, 博士生导师, 空间引力波探测太极计划首席科学家, 主要研究方向: 粒子物理、量子场论和宇宙学。**本文通讯作者。**

通讯地址: 中国科学院理论物理所(100190)

电话: (010)62562587

E-mail: ylwu@ucas.ac.cn, ylwu@itp.ac.cn

Introduction of Chinese Space-Borne Gravitational Wave Detection Program “Taiji” and “Taiji-1” Satellite Mission

LUO Ziren^{1,2,3,4}, ZHANG Min^{2,3,4}, JIN Gang^{1,2,3,4}, WU Yueliang^{2,3,4,5}, HU Wenrui^{1,2}

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China;

2. Gravitational Wave Universe Taiji Laboratory, University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China;

3. School of Fundamental Physics and Mathematical Science, Hangzhou Institute for Advanced Study, UCAS, Hangzhou 310024, China;

4. International Center for Theoretical Physics Asia-Pacific, Beijing 100190, China;

5. Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China)

Abstract: Chinese Space-borne Gravitational Wave Detection Program “Taiji” is to detect the gravitational wave (GW) within the frequency band between 0.1 mHz and 1 Hz. The GW sources in such frequency band offer a brand new approach to study our universe, the super massive black holes, the nature of gravity, the dark matter and the dark energy. The technologies related to Taiji program are so challenging that Taiji have to take three steps, “single satellite”, “double satellites” and “three satellites”, to achieve the final objectives. The “single satellite” mission, called Taiji-1, is now successfully launched, and the first run of on-orbit testing is completed. A brief review of the scientific influences, the recent status and the anatomy of key technologies of the space-borne GW detection missions are given. The mission overview and the 3-step strategic planning of Taiji program are analyzed. The future perspectives and some advices concerned with Taiji program are also discussed.

Keywords: space-borne gravitational wave detection mission; Taiji program; inter-satellite laser ranging interferometer system; drag-free control system; gravitational wave astronomy

Highlights:

- The importance and significance of space-borne GW detection mission are given.
- A comprehensive key technology configuration of space-borne GW detection mission is listed.
- An overall introduction to Taiji program and its 3-step planning are given.
- A brief introduction to the status of Taiji-1 is firstly given.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 朱恬]