

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2024.02.02

月基激光干涉仪引力波天文台

牛家树¹, 王运永², 边星³, 韦联福⁴, 霍红庆⁵, 张晓敏⁶

(1. 山西大学 理论物理研究所, 太原 030006; 2. 中国科学院 高能物理研究所, 北京 100049; 3. 中国科学院 力学研究所, 北京 100190; 4. 西南交通大学 信息科学与技术学院 信息量子技术实验室, 成都 610031; 5. 兰州大学 物理科学与技术学院, 兰州 73000; 6. 北京紫微宇通科技有限公司, 北京 100048)

摘要: 引力波是广义相对论的重要预言, 引力波探测是当代物理学最活跃的前沿领域之一。引力波的发现使引力波天文学完成了从寻找引力波到研究引力波这一历史性转折, 开创了引力波天文学蓬勃发展的新时代。以地球为基地的激光干涉仪引力波天文台和空间引力波探测器在世界各地迅速地发展起来。随着探月工程的开展, 以月球为基地的激光干涉仪引力波天文台的建造也越来越引起人们的关注。该文对月基激光干涉仪引力波天文台进行了简介: 首先回顾其历史、陈述其有利条件及探测器基本参数和光学结构, 展望其未来的发展前景。

关键词: 引力波; 引力波探测; 月球基地; 激光干涉仪

中图分类号: P142.8⁺⁴

文献标识码: A

1 引力波和天文学

天文学研究的基础是天体辐射。最基本的天体辐射主要有两大类: 电磁辐射和引力辐射, 分别对应于电磁波天文学和引力波天文学。电磁波天文学指的是传统天文学, 其观测媒介为电磁波 (如射电波、红外线、可见光、紫外线、X射线、 γ 射线等), 探测方法属于“类像”探测, 数据分析手段属于图像分析。早在数千年之前, 我们的祖先就通过电磁辐射研究天象, 创造了丰富、灿烂的古代天文学。300 多年来, 天文学家在世界各地和地球近邻轨道上建立了数以百计的天文台, 通过各种类型的望远镜对天体进行观测, 在天文学的研究方面取得了辉煌的成就。这为人类描绘了一幅宇宙中天体分布的太空图。引力波的发现开辟了引力波天文学研究的新纪元, 为人类打开了研究宇宙的新窗口。

1.1 引力波与引力波天文学

引力波天文学的观测媒介是引力辐射。引力辐射与电磁辐射具有不同的特性, 它的波

收稿日期: 2023-09-28; 修回日期: 2023-12-26

资助项目: 国家自然科学基金 (12005124)

通讯作者: 牛家树, jsniu@sxu.edu.cn

长可以与引力波天体源的尺度相比拟,既不能用眼睛看,也不能用来照相或在电子屏上显示。它的探测方法属于“类声”探测。数据处理和研究手段与声波探测一样,采用波形分析法。“声”和“像”是宇宙实体的两个表象,它们都携带着天体的详细信息,隐含着宇宙的秘密。与电磁波天文学相比,引力波天文学才刚刚起步。“引力波太空图”还是一片空白,还有待我们去探索去研究。引力波天文学这门新兴的交叉科学,将以全新的探测理念和分析方法获取其他天文观测不可能得到的信息。借此探寻未知的天体,研究天体的结构和演化,揭示宇宙的奥秘,它将对传统的电磁波天文学的巨大拓展和补充。

1.2 引力波的频率范围与探测方法

引力波的发现使引力波天文学出现了蓬勃发展的新局面。引力波的频段非常宽,范围为 $10^{-16} \sim 10^4$ Hz (如图 1 所示),使用一种探测器和探测方法进行全频段测量是不可能的。因此,适用于不同探测频率,并具有不同结构、不同探测原理的引力波探测装置(如激光干涉仪引力波探测器、脉冲星计时阵列、微波背景 B 模偏振探测器等)相继发展了起来。现阶段,空间引力波探测器也在筹划和建造之中。世界各地迅速掀起了引力波天文学研究的热潮。

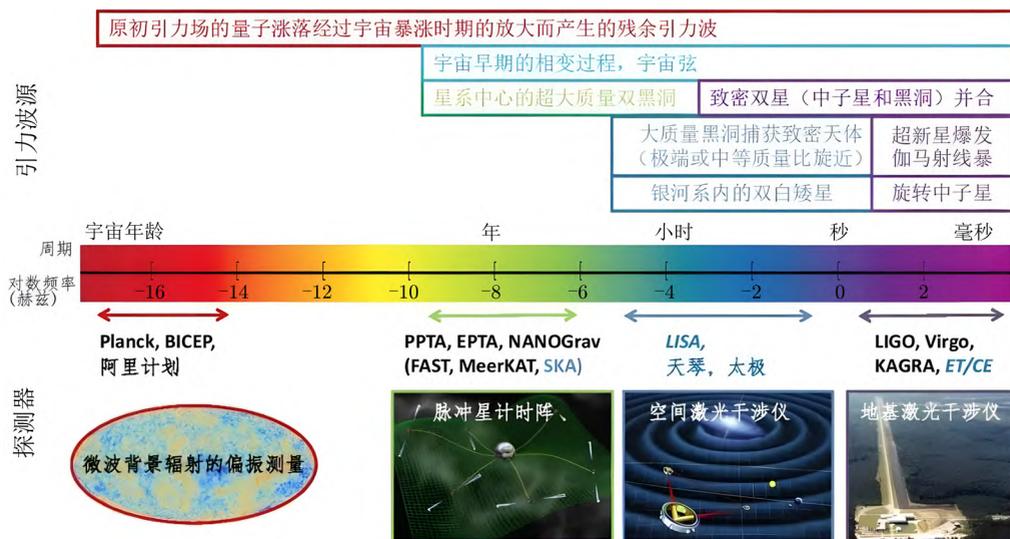


图 1 引力波频率分布及相应的探测方法^[1]

随着探月工程的深入开展,以月球为基地的激光干涉仪引力波探测也引起科学界的高度关注,成为引力波天文学研究的新领域。

1.2.1 频率范围为 $10^{-16} \sim 10^{-12}$ Hz 的超低频引力波探测

频率在 $10^{-16} \sim 10^{-12}$ Hz 的超低频引力波探测,目前通用的方法是寻找宇宙微波背景辐射中的 B 模式偏振形态。

(1) 基本原理

微波背景辐射是一种弥漫在整个宇宙空间中的极微弱的电磁辐射,它是宇宙大爆炸时

留下的痕迹。理论学家认为, 我们的宇宙是由 137 亿年前的一个温度极高、密度极大的奇点突然发生爆炸产生的, 而大爆炸的一刹那就是时间和空间的开端。为使“热大爆炸宇宙模型”更加完善, 美国麻省理工学院的 Guth 等人^[2]在 1981 年提出了“暴涨理论”。该理论认为, 在宇宙大爆炸开始 10^{-35} s 后, 宇宙发生了一次速度无法想象的急剧膨胀过程, 即所谓“暴涨”。在这个过程中, 宇宙在不到 1 s 的时间内体积膨胀了 10^{78} 倍以上。暴涨过程中产生的原初引力波, 由于其物理特性将时空在一个方向压缩的同时在与之垂直的另一方向上拉伸, 使时空产生了畸变。大爆炸产生的“古老”的光经过由引力波畸变的时空时, 便会产生出一种独特的偏振模式, 称为 B 模式偏振, 其是原初引力波留下的独特印记。即 B 模式偏振在宇宙微波背景辐射的偏振观测中展现出涡旋的特征。正是由于 B 模式偏振只能来自于张量扰动, 而电磁场不可能产生这样的扰动; 因此, 如果探测到这种独特印记, 无疑证明原初引力波的存在。

(2) 实验装置 BICEP

通过微波背景辐射中的 B 模式偏振探测引力波的典型实验项目有 BICEP^[3-5] 和中国的阿里计划^[6]。BICEP (Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization) 是“宇宙泛星系偏振背景成像”的英文缩写, 它由建在南极冰盖上的一台射电天文望远镜 (见图 2) 具体实施。科学家用它对天空进行扫描, 观测宇宙微波背景辐射, 并寻找原初引力波在宇宙微波背景辐射中留下的独特印记——宇宙微波背景辐射中的 B 模式偏振。BICEP 实验始于 2005 年, 现在已发展到第三代 (BICEP3^[5]), 该实验还在进行中。



图 2 BICEP 实验^[7]

1.2.2 频率范围为 $10^{-10} \sim 10^{-6}$ Hz 的纳赫兹引力波探测

纳赫兹引力波探测的实验“设备”为脉冲星计时阵列。

(1) 脉冲星计时阵列引力波探测的基本原理

毫秒脉冲星一般是指自转周期为毫秒量级的脉冲星。毫秒脉冲星的脉冲周期短而且非常稳定, 其周期稳定性可以达到 $10^{-18} \sim 10^{-21}$ 。由于这些脉冲周期高度具有可预测性, 因此一系列此类脉冲星构成的阵列可作为标准的计时阵列来探测频率极低的引力波。

当引力波从地球与脉冲星之间通过时,会使地球与脉冲星之间的距离伸长或压缩。这使得脉冲星产生的射电脉冲的传播路径随引力波的频率伸长或缩短,导致我们在地球上接收到射电脉冲信号的到达时间比预计时间早或晚。探测到这种脉冲到达时间的特殊变化模式,就等于探测到引力波。

引力波在单个脉冲星脉冲到达时间中产生的效应非常小,很难与观测过程中噪声的影响区分开。即使我们暂且不考虑噪声,脉冲星计时模型中的各种参数也都是利用大量测得的数据通过优化模型分析拟合得到,具有很大的不确定性及模型相关性。这种误差与引力波产生的效应也非常相似,因此,使用单个脉冲星来探测引力波极其困难,也不合理。基于以上这些困难,利用脉冲星探测引力波时,通常由一组(包括多个)周期稳定的脉冲星构成脉冲星计时阵列来实现。这个计时阵列会同时对很多颗脉冲星进行长期的观测,利用不同脉冲星脉冲到达时间的相关性来压低各类误差的影响,提取引力波产生的信号。这种方法也因此被命名为脉冲星计时阵列引力波探测法(见图3)。现在世界上已有多个脉冲星计时阵列投入运行,并组成国际观测网(IPTA^[9])。

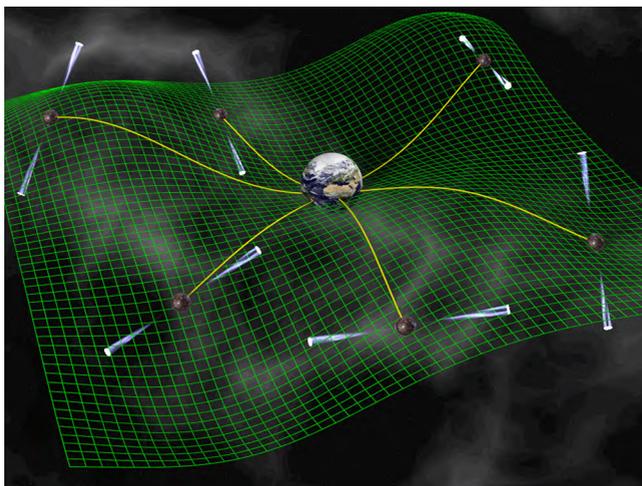


图3 脉冲星计时阵列引力波探测示意图^[8]

脉冲星计时阵列可以看成是一个银河系尺寸的引力波探测器。如果我们想把它与激光干涉仪引力波探测器进行类比,计时阵列中的脉冲星就如同“测试质量”,脉冲星发射的射电脉冲就如同“激光”,脉冲星与地球上观测点的距离就像干涉仪的一个“臂”。

(2) 脉冲星计时阵列

当前世界上正在运行的脉冲星计时阵列主要有以下4个:

- 1) 澳大利亚的PPTA^[10],它建立于2004年,同时对20颗毫秒脉冲星进行监测;
- 2) 欧洲的EPTA^[11],它于2004/2005年投入运行,阵列包括法国、德国、意大利、荷兰、英国等国家的射电天文望远镜,同时对22颗毫秒脉冲星进行监测;
- 3) 北美纳赫兹引力波天文台(NANOGrav^[12]),该项目2007年建成并投入运行,用

Arecibo 和 Green Bank 等射电望远镜对 45 颗毫秒脉冲星进行监测;

4) 中国的 CPTA^[13, 14], 包括“天眼”射电望远镜 (FAST), 同时对 57 颗星进行监测。

1.2.3 频率范围为 $10^{-4} \sim 10^{-1}$ Hz 的低频引力波探测

探测低频引力波, 特别是毫赫兹频段的引力波, 首选的探测设备是空间引力波探测器。理论计算表明, 假设引力波是正弦波, 当干涉仪的臂长等于引力波波长的 $1/4$ 时, 干涉仪的输出信号有最大值。因此, 干涉仪的臂长越长, 对应的引力波最佳探测频率越低。理论上讲, 空间引力波探测器的臂长可以做任意长, 是一种理想的低频引力波探测器。

空间引力波探测器的筹划始于 20 世纪中期, 现在还处于预制研究阶段, 但已经取得相当大的进展。现阶段典型空间引力波探测方案有: 欧洲的 eLISA^[15]、我国的太极计划^[16]和天琴计划^[17]。建立空间引力波探测器的初衷是研究毫赫兹频段的引力波, 对应的干涉仪臂长非常长^①: 其中欧洲的 eLISA, 臂长为 2.5×10^6 km, 探测频段为 $10^{-4} \sim 10^{-1}$ Hz; 中国的太极计划, 臂长为 3×10^6 km, 探测频段为 $10^{-4} \sim 10^{-1}$ Hz。低频引力波携带着极其丰富的物理信息, 能为我们揭露更深层次宇宙及天体结构的奥秘。该波段的探测与研究是引力波天文学重要的组成部分, 是对地基引力波天文台探测能力的有力补充, 是对引力波天文学研究领域的极大拓展。

空间引力波探测器极其庞大而复杂。以太极计划为例, 它由 3 颗卫星组成 1 个等边三角形星座。每个边长为 3×10^6 km, 其质心位于地球绕太阳运行的轨道上, 距地球约 5×10^7 km, 偏离太阳-地球约 20° (如图 4 所示)。

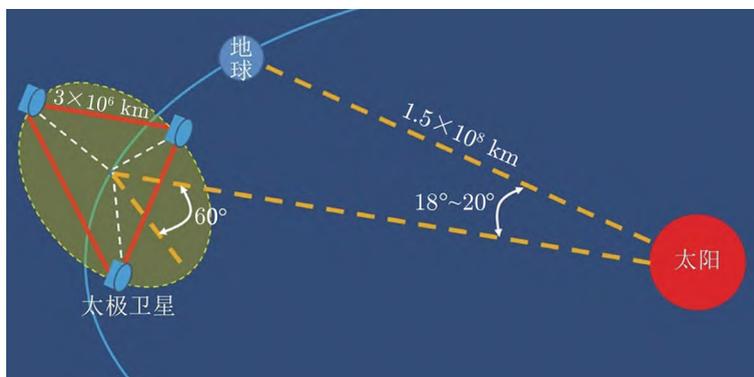


图 4 太极空间引力波探测器示意图^[16]

1.2.4 频率范围为 $3 \sim 2 \times 10^4$ Hz 的引力波探测

频率范围在 $3 \sim 2 \times 10^4$ Hz 波段引力波的最佳探测设备是地球上的激光干涉仪引力波天文台。它是当前引力波探测的主流设备, 在世界各地蓬勃发展^[18], 人类正是通过它直接发现了引力波。地基激光干涉仪引力波天文台的发展经历了长达几十年艰难而曲折的过程。激光干涉仪引力波探测器的出现给引力波探测带来巨大希望。由于灵敏度高、探测频段宽、使

^①以地球为基地的激光干涉仪引力波探测器臂长最多为几十千米, 对应于频率大于几赫兹的引力波。

用寿命长、易于维修和升级改造，其已经成为国际上引力波探测的主流设备，具有广阔的发展前景。当前世界上已有的 5 台大型第二代激光干涉仪引力波探测器已经建成并投入统调和运转（如图 5-9 所示）。其设计灵敏度为 10^{-23} ，探测频段约为 $10 \sim 10^4$ Hz。它们是：

- (1) 美国路易斯安那州利弗斯通 (Livingston) 臂长为 4 km 的高级 LIGO（见图 5）；



图 5 美国利弗斯通的高级 LIGO^[19]

- (2) 美国华盛顿州汉佛德 (Hanford) 臂长为 4 km 的高级 LIGO（见图 6）；



图 6 美国汉弗德的高级 LIGO^[20]

- (3) 意大利比萨附近，由意大利和法国联合建造的臂长为 3 km 的高级 VIRGO（见图 7）；

- (4) 德国汉诺威由英国和德国联合建造的臂长为 600 m 的 GEO-600（见图 8）；

- (5) 日本神冈臂长为 3 km 的 KAGRA（见图 9）。

此外，位于印度的美国和印度合建的臂长 4 km 的 LIGO-India，正在建造之中。

1.3 丰硕的研究成果

高级 LIGO 和高级 VIRGO 在统调阶段共进行三次运行，共探测到 90 多个引力波事例。其中包括几十例双黑洞并合，两例双中子星并合，两例中子星-黑洞并合，两例疑似中子星-黑洞并合，取得了丰硕的成果（见图 10）。在经历了长达 3 年的调试和改进之后，它们于 2023 年 5 月开始第四轮运行，我们期待看到更多令人兴奋的新发现。



图 7 意大利比萨附近的高级 VIRGO^[21]



图 8 德国汉诺威的 GEO-600^[22]



图 9 日本神冈的 KAGRA^[23]

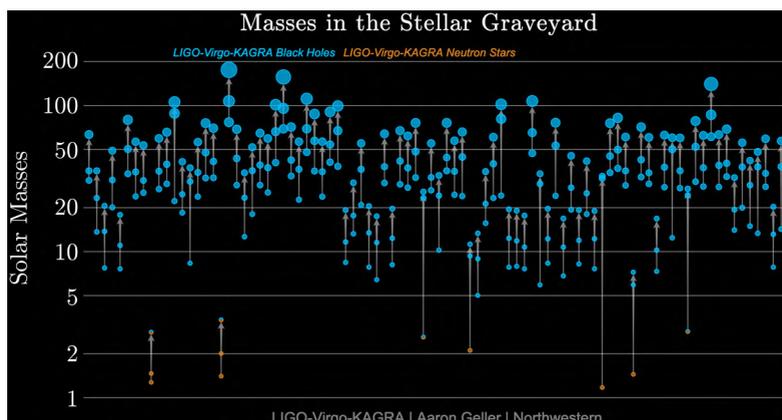


图 10 已发现引力波事例的质量分布^[24]

1.4 第三代激光干涉仪引力波探测器

在第二代激光干涉仪引力波探测器蓬勃发展、方兴未艾之际，以欧洲爱因斯坦望远镜 (Einstein Telescope, ET)^[25] 和美国宇宙探索者 (Cosmic Explorer, CE)^[26] 为代表的第三代激光干涉仪引力波天文台筹划也在紧锣密鼓地进行中。其设计灵敏度直指 10^{-24} ，探测频段为 $1 \sim 10^4$ Hz，目标是建立真正的引力波天文台，开展常态化的引力波天文学研究（如图 11 和 12 所示）。对于下一代激光干涉仪引力波探测器而言，提高灵敏度（特别是低频灵敏度）是其主要发展方向。

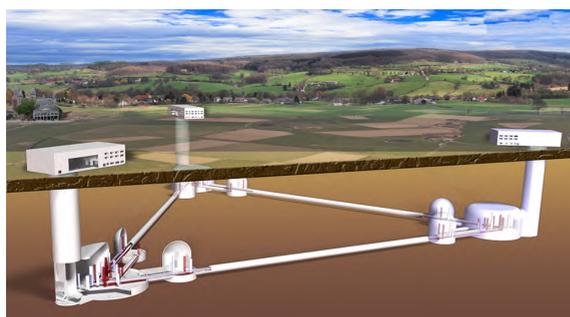


图 11 欧洲第三代引力波探测器“爱因斯坦望远镜”概念图（臂长 10 km）^[27]

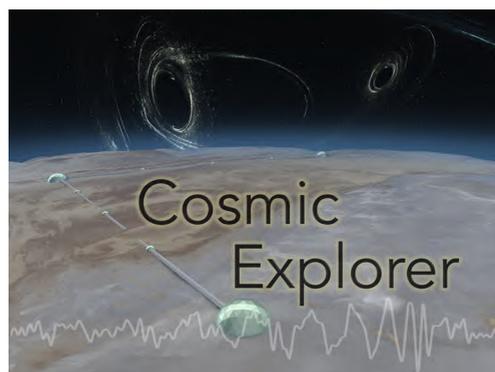


图 12 美国第三代激光干涉仪引力波探测器“宇宙探索者”号概念图（臂长 40 km）^[28]

2 以月球为基地的激光干涉仪引力波天文台

随着探月工程的深入发展, 在月球上建造激光干涉仪引力波天文台的设想引起了人们的强烈关注。许多国家已提出在月球上建立长基线引力波干涉仪的方案, 该提议有助于进行引力波探测^[29, 30], 并逐渐发展成引力波天文学研究中新的领域。

2.1 月基激光干涉仪引力波天文台的重要性

理论研究表明, 引力波的频段非常宽, 每个频段都对应极其丰富的物理内容。对不同频段的引力波, 探测方法也不尽相同。如图 1 所示, 以地球为基地的第三代激光干涉仪 ET 和 CE 可以将探测频率的低频端延伸到 3 Hz 附近, 而空间引力波探测器太极和 eLISA 的探测频段为 10^{-3} Hz 量级。在两者之间, 特别是频率 0.1 ~ 10 Hz 范围内的区域, 对于地基引力波探测器则频率太低, 而对于空间探测器则频率太高。随着上述两种探测方案在此频段内灵敏度的下降, 对于一些发生在此频段内的重要天体物理过程的探测出现了“盲区”。而以月球为基地的引力波天文台正好可以消除这段“盲区”, 弥补现有探测体系的不足。

在 0.1 ~ 10 Hz 的引力波频段, 人们已观测到各类丰富且重要的天体物理现象^[31]。更值得关注的是, 对于某些天体物理过程, 0.1 ~ 10 Hz 是其唯一的观测窗口, 主要体现为 3 类。

(1) 中等质量黑洞相关的并合过程。

在天文学研究中, 黑洞一般按照其质量分为: 超大质量黑洞 ($10^5 M_{\odot} \sim 10^{10} M_{\odot}$)、中等质量黑洞 ($100 M_{\odot} \sim 10^5 M_{\odot}$) 和恒星质量黑洞 ($1 M_{\odot} \sim 100 M_{\odot}$)。人类现在已经确认发现了一定数量的超大质量黑洞 (一般位于星系中心) 和恒星质量黑洞。然而, 作为联系超大质量黑洞和恒星质量黑洞的桥梁及关系着宇宙中黑洞形成和演化等重要问题的关键——中等质量黑洞, 却一直没有被确认大量存在 (虽然有一些疑似个例)。自从引力波被发现以来, 基于 LIGO 等地基引力波天文台, 天文学家发现了大量来自于恒星质量双黑洞的并合事件 (如图 10 所示)。由于黑洞并合时释放的引力波频率反比于双黑洞体系的总质量, 为了通过引力波发现来自于中等质量黑洞相关的并合事件, 引力波的探测就须覆盖 0.1 ~ 10 Hz 频段。

(2) 双白矮星系统的并合过程。

Ia 型超新星作为标准烛光, 是证明现阶段宇宙处于加速膨胀状态的最直接证据, 对宇宙学的发展意义重大。虽然现阶段天文学界在“Ia 型超新星前身星应该是双星系统”这一点上达成了共识, 但其双星系统的具体构成到现在还是一个谜。根据双星演化理论, Ia 型超新星前身星真正的核心问题集中于到底是单简并星还是双简并星^[32]。无论是哪种情况, 其系统中双星的并合过程会伴随着 Ia 型超新星的爆发过程。在此过程中, 不仅会有各种波段剧烈的电磁辐射、中微子释放, 而且会有 $10^{-4} \sim 10$ Hz 频段内的引力波被释放出来^[33]。对此频段内的引力波进行探测, 就可以揭露 Ia 型超新星前身星的神秘面纱, 对恒星物理和宇宙学意义重大。

(3) 核坍缩超新星的爆发过程。

核坍缩超新星模型一般用来解释 II 型超新星的爆发过程。大质量恒星演化后期, 质量

超过 $8M_{\odot}$, 则可能直接在引力作用下坍缩成黑洞或中子星, 同时进行大量物质抛射和能量释放, 并且会在不同波段释放强烈的电磁信号。在爆发的同时, 也会因为物质(中微子主导)的非球对称抛射, 产生 $0.1 \sim 10 \text{ Hz}$ 的低频引力波信号^[34]。对这种引力波的探测, 可以使我们进一步还原 II 型超新星的内部结构和爆发细节。

对于后两种天体物理过程, 由于其剧烈的能量释放, 将会成为集合多波段电磁波、引力波、中微子等多信使进行天文学研究的极佳场景。

除了这些以 $0.1 \sim 10 \text{ Hz}$ 频段为唯一引力波观测窗口的天体物理过程之外, 对 $0.1 \sim 10 \text{ Hz}$ 频段的引力波进行探测具有以下意义: 1) 对恒星级双黑洞体系在旋进阶段的观测, 可以提供并合前的早期预警, 进而可以有效破除双黑洞系统的各类参数之间的简并; 2) 对黑洞+中子星、中子星+中子星系统进行旋进阶段的观测, 能够提供并合前的早期预警, 进而对此类并合事件进行有充分准备的多信使观测; 3) 在随机背景引力波的探测方面, 将与地面和空间干涉仪完整呈现 $10^{-4} \sim 10^4 \text{ Hz}$ 频段随机背景引力波谱, 对研究早期宇宙意义重大; 4) 可以利用大样本的引力波源进行宇宙学研究。

综上所述, 这个频段是最有可能与电磁波观测相互结合, 并成为大样本多信使天文学观测的窗口!

2.2 月基激光干涉仪引力波天文台的兴起

美国航空航天局(NASA)的探月工程在阿波罗计划之后进入了阿尔忒弥斯(Artemis)时代, 目标也是在月球上建立长期有人居住的月球科研站。作为该计划的组成部分, 美国科学家 Jani 和 Loeb^[35] 提出建立以月球为基地的激光干涉仪引力波天文台的方案。意大利科学家 Harms 等人^[36] 也有类似的月基引力波探测建议, 并于 2021 年 10 月在意大利佛罗伦萨召开了第一次月球引力波探测的国际会议。

2021 年 3 月, 中俄宣布合作建设“国际月球科研站”计划, 并签署了合建“国际月球科研站”的谅解备忘录。打算在月球上合作建造永久性住所, 开展月球自身的探索和利用、月基观测基础实验和技术验证活动, 该计划正在有序地推进。

我国负责探月工程的科学家, 如欧阳自远院士、于登云院士、吴伟仁院士, 指出: 我国也要建立月球科研站, 建设有人驻留的月球基地, 开发利用月球的资源、能源和利用它的特殊环境开展空间科学基础研究。公开的信息显示, 我国计划于 2030 年实现载人登月。同时, 中国国家航天局也正积极倡议建设国际月球科研站, 推动更大范围、更宽领域和更深层次的国际合作。

作为月球科研站的重要组成部分, 建造以月球为基地的引力波天文台也引起中国科学界的强烈关注。以北京理工大学张晓敏教授为首的中国科学家, 于 2021—2023 年组织召开了一系列月基激光干涉仪引力波探测的研讨会, 对相关方案进行了深入的探讨。

2.3 在月球上建造激光干涉仪引力波天文台的有利条件

在月球上建造激光干涉仪引力波天文台具有如下诸多有利条件。

(1) 使用寿命长

引力波天文学是一个新兴的科学领域, 是需要世代科学家为其奉献的伟大事业, 而不仅

仅是一个短期的物理实验。传统天文学的发展已有几百年之久, 世界上知名的天文台也有上百座。作为传统的电磁波天文学的巨大拓展和补充, 引力波天文台也必将沿着类似的历史轨迹发展下去。

以 eLISA 为代表的空间引力波探测器设计寿命只有几年。几年之后, 来自太阳系物体的引力摄动将扰乱它的几何构型, 难以承担引力波天文台长期运转的科学重任。以月球和地球为基地的激光干涉仪使用寿命为几十年, 而且可以不断地采用新材料、新部件、新技术进行改进, 升级换代, 更适合长期稳定运转。

(2) 便于调整和维修

激光干涉仪引力波探测器是一个大型科学装置, 结构复杂、部件多。干涉仪建成之后要进行长期的统调, 以便优化参数、提高性能。

在运行过程中难免会出现故障或损伤, 部件也会逐渐老化, 导致设备性能变差甚至不能正常工作, 需要不断检修, 更换损坏及变质的部件。例如哈勃空间望远镜于 1990 年 4 月 24 日发射升空, 在运行期间也先后进行了五次维修^①。哈勃空间望远镜距地面 569 km, 宇航员尚可乘航天飞机前往, 而对于距地球几千万千米以上的空间探测器, 则不可能做到。但在月球上这种任务可以由驻站宇航员来完成。

(3) 不需要复杂昂贵的真空系统

在地球上建立的所有激光干涉仪引力波探测器都必须有复杂的真空系统, 其真空系统由真空管道和真空室两大部分组成。光束在真空管道中穿行, 所有的测试质量、光学镜、隔震系统都置于真空室中(如图 13 所示)。激光干涉仪引力波探测器对真空度的要求很高, 即真空度要好于 10^{-7} Pa。在这种真空度下, 激光束的相位噪声与激光干涉仪引力波探测器的热噪声、地面振动噪声及霰弹噪声的总和有相同的数量级。在这样大的体积内达到并维持如此高的真空度, 需要庞大而复杂的真空抽取、测量和维持系统。该系统主要包括: 抽真空用的机械泵、涡轮分子泵、离子泵和低温泵, 高真空度测量和检修仪, 高密封真空阀门等。

真空系统是激光干涉仪引力波探测器建造过程中造价最高的部分。以 LIGO 为例, 真空系统的造价几乎占整体造价的 1/3。这还不包括系统建成之后长期维持高真空所需的运行费用。并且干涉仪基线越长, 真空系统所占的预算比例就越高。

月球表面的真空度在太阳升起时约为 10^{-8} Pa, 太阳落山之后降到约 10^{-10} Pa^[37], 这完全可以满足干涉仪对真空度的需求(10^{-7} Pa^[38])。因此, 不需要另建真空系统。这不但节省了庞大的建造经费和运行费用, 还节省了日常维护所需的人力、物力。

(4) 真空材料的气体自然释放

为了达到并保持所需要的真空度, 在地面上建造干涉仪时必须把真空材料吸附的气体进行预释放, 使释放率达到所需要的标准。真空管道的不锈钢壁是主要的气体释放源, 所以在建造激光干涉仪时通常需要用不太贵的隔热材料把管道包起来, 然后在管壁上通大电流, 使管壁的温度达到 140°C , 并需要将此温度维持 30 d 左右。经过这样的烘烤, 水分子的释

^①它们分别是: 1993 年 12 月科研人员乘奋进号宇宙飞船对它进行第一次维修; 1997 年 2 月乘坐发现号宇宙飞船对它进行第二次维修; 1999 年 12 月乘坐发现号宇宙飞船对它进行第三次维修; 2002 年 2 月乘坐哥伦比亚号宇宙飞船对它进行第四次维修; 2009 年 5 月乘阿特兰蒂斯号宇宙飞船对它进行第五次, 也是最后一次维修。

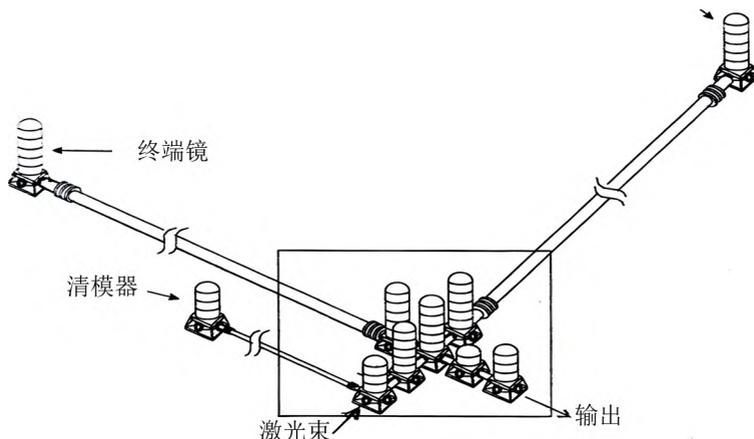


图 13 激光干涉仪引力波探测器 Virgo 的真空室和真空管道^[39]

效率可达到 $10^{-17} \text{ Pa} \cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ ，才能够满足维持所需要真空度的要求。

幸运的是，月球表面的温度夜间为 -130°C ，白天为 120°C ^[40]。如果充分利用这种优越条件，在管道组装之前先在月球上放置一段时间，便可使材料做到充分的气体释放，节省大量的人力和经费。

(5) 月球表面振动噪声小

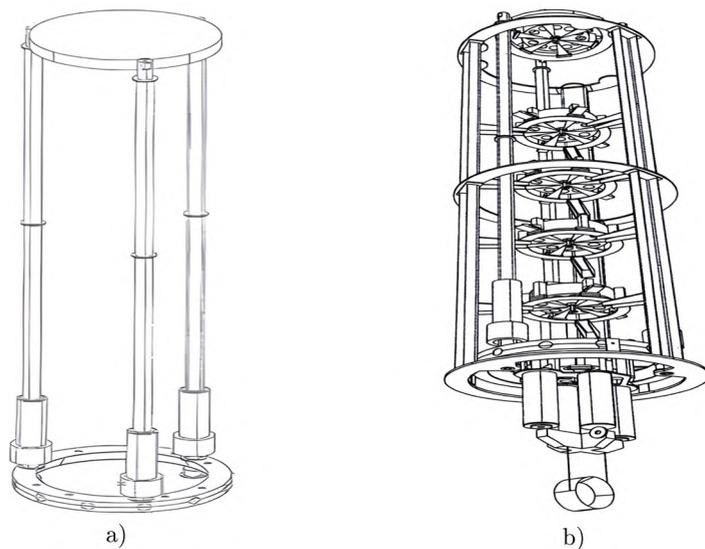
地面振动噪声是地球上建立的激光干涉仪引力波探测器最重要的噪声源之一^[39]。其主要来源有两方面：1) 自然现象，火山和地质活动、弱地震和远程地震、月球潮汐、海浪、大风引起的房屋及树木的晃动对地基的影响、大雨及冰雹等自然现象引起的地面振动；2) 人类活动，交通运输、工农业生产、矿山开采、森林砍伐、建筑工地等活动引起的地面振动。

在地球上，典型的地面振动幅度的量级为 10^{-6} m 。以 LIGO 为例，我们期望探测到的引力波振幅的量级为 10^{-19} m ，这就需要通过非常庞大而复杂的地面振动隔离系统（见图 14）对地面振动噪声进行衰减，衰减系数要好于 10^{13} 。因此，在地球上地面振动噪声是提高低频灵敏度最根本的障碍。即使是新一代干涉仪通过若干雄心勃勃，耗资费力的措施也只能把低频极限降低到 3 Hz 左右^[41]。

反观月球，其表面比地球表面安静得多。在 $0.1 \sim 4 \text{ Hz}$ 的低频区域，月球表面的振动噪声比地球上低 $3 \sim 4$ 个数量级^[42-44]。这种有利条件可以使庞大而复杂的地面振动衰减系统大大简化，降低建造费用。预计可以将最低探测频率降低到 0.1 Hz ，极大地拓展了相关天体物理过程的研究。

(6) 引力梯度噪声小

由牛顿万有引力定律可知，悬挂起来的测试质量周围的物体都会与该测试质量相互吸引。局部质量分布的变化（如大气密度的变化、人员来往、车辆移动和附近地区的风吹草动等）均会引起局部引力场的涨落，产生引力梯度噪声。这种噪声会使隔震系统“短路”，直接作用在镜子上，是无法避免的。研究表明，引力梯度噪声的大小与探测频率的平方成反



注: a) 倒摆; b) 垂直振动衰减及悬挂链。

图 14 Virgo 的地面振动衰减系统 (由倒摆和悬链组成)^[39]

比, 对低频引力波探测的危害极大。为了降低引力梯度噪声的影响, 在地球上最有效的办法是把干涉仪建在几百米深的地下, 这不但带来一系列的技术问题, 而且造价也会急剧增长。月球表面比地球表面安静得多^[40], 上面没人居住, 不存在由于人类的生产生活而产生的质量分布变化; 再者, 月球上没有大气, 也不存在雨雪风暴等气象因素产生的空气密度变化。因此, 月球上引力梯度噪声很小, 没有必要把干涉仪建在地下, 建造费用可以大幅降低。

(7) 占空比高

探测器长期连续而稳定的运转是至关重要的, 因为这样我们才能获取尽可能多的数据, 进行物理研究。地基激光干涉仪引力波探测器的运行状态毫无意外地会受到地震、交通运输、灯光、暴风雨等一些不确定的环境因素的干扰, 破坏它的稳定性, 从而使探测器不能正常工作。每当出现这种情况, 都要花费很多时间重新把它锁定。由于在地球上这种“停工”现象发生得很频繁, 探测器的占空比则较低。月球上几乎没有什么人类活动的干扰, 受地球潮汐的影响也非常轻微。与地震波的频率相比, 月震波的频率要低得多^[44], 基本上不会对相关的引力波探测频段的灵敏度产生影响。因此长期稳定性好, 占空比高。

(8) 极大增强波源的定位能力

与地基引力波天文台配合, 进行联合观测, 可以把引力波波源的空间定位能力提升近 30 倍^[35, 45]。这将为快速的电磁波多波段后随观测提供精准的指向信息, 也将为多信使天文学的开展奠定基础。

3 月基激光干涉仪引力波探测器的基本参数和光学结构

月基激光干涉仪引力波探测器主要由机械部分、电子学部分和光学部分组成，它的基本参数和光学结构如下。

3.1 主要参数

月基激光干涉仪引力波探测器的基本参数及其取值如下：灵敏度， 10^{-24} ；探测频率， $0.1 \sim 10^4$ Hz；臂长，100 km；总体构型，L 形；激光功率，200 W；压缩态光场压缩度，15 dB。

3.2 基本光学结构

月基激光干涉仪引力波探测器的基本光学结构如图 15 所示，主要包括以下系统。

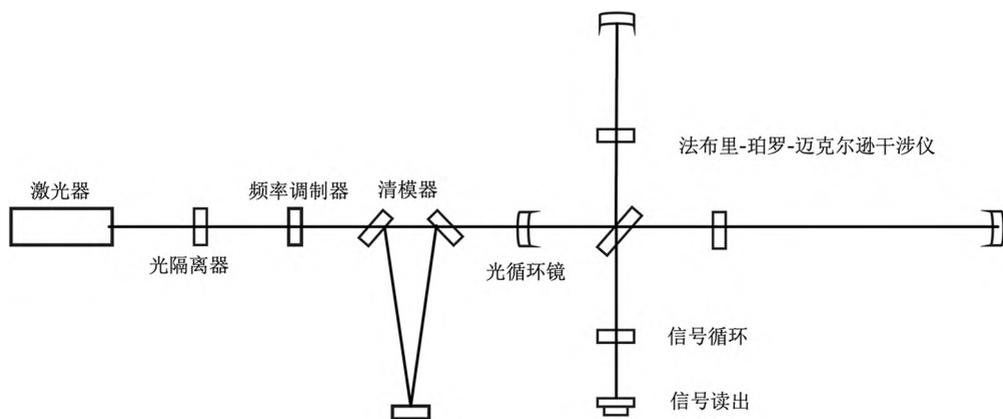


图 15 月基激光干涉仪引力波探测器的基本光学结构^[39]

(1) 激光器

要求有高输出激光功率 (200 W)，好的功率稳定性 ($\frac{\Delta P}{P} < 10^{-9}$)；好的频率稳定性 ($\frac{\Delta \nu}{\nu} < 10^{-12}$)；输出光束的横向模式是纯净的 TEM₀₀ 模式；线性极化；内在噪声低（需要大幅低于干涉仪的总噪声）。

(2) 法拉第光隔离器

由于光路是可逆的，干涉仪内的激光将沿着其入射干涉仪时的路径返回到激光器，这会使激光器受到严重破坏。法拉第光隔离器是用旋光材料制成的器件，它的功能相当于一个光的单通过滤器。激光器发出的光可以顺利通过，从干涉仪返回的光不能通过，从而对激光器起到保护作用。

(3) 频率调制器

主要用于对激光器发出的激光频率进行电光调制，在主频率两旁各产生一个旁频。通过微调法布里-珀罗腔的长度使主频在腔内共振，这时两个旁频光的幅度相等。当干涉仪的臂长受到干扰而伸长或缩短时，法布里-珀罗腔失谐，主频偏离共振位置，进而造成干涉仪不

能正常工作。这时两个旁频的幅度也发生变化, 它们不再相等。在运行过程中, 我们此时可以利用这个误差信号通过庞德-德里弗-赫尔技术和相应的控制系统自动调节法布里-珀罗腔的长度, 使其恢复谐振状态。

(4) 清模器

激光束横截面上光强的分布可以用厄米-高斯多项式描述。激光干涉仪引力波探测器要求激光束是纯净的基础厄米-高斯模式 (TEM₀₀), 清模器的作用是清除激光束中有害的高阶模式, 只保留有用的基础厄米高斯模式。

(5) 功率循环镜

用于把从干涉仪激光输入口出射的光重新注入干涉仪, 循环利用。

(6) 分光镜

用于将激光束分成强度相等的两束, 一束经反射进入干涉仪的一个臂, 另一束经透射进入与它垂直的另一个臂。

(7) 法布里-珀罗腔

由于引力波引起的激光束相位变化与干涉仪的臂长成正比, 增加干涉仪的臂长可以有效地提高探测器的灵敏度。法布里-珀罗腔由前端镜和终端镜两面镜子组成, 入射光在腔内共振, 多次往返, 对引力波产生的镜子位移反复多次取样。这相当于把超长臂长的干涉仪臂折叠了起来, 便于建造。法布里-珀罗腔的引入使激光干涉仪引力波探测器的探测能力发生了质的飞跃, 在激光干涉仪引力波探测器的发展史上占有重要的地位。

(8) 信号循环镜

它与干涉仪等效镜组成一个法布里-珀罗腔, 可以使得输出信号在腔内共振增强。

(9) 低温干涉仪

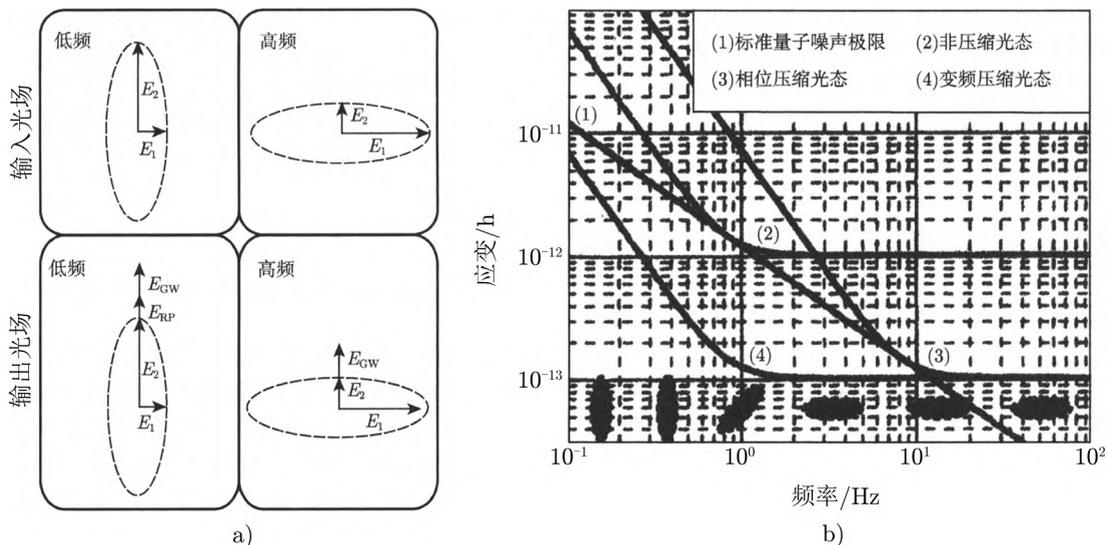
激光干涉仪引力波探测器中的热噪声是由光学部件中的布朗运动或干涉仪所在环境中温度场的涨落引起的。低温激光干涉仪引力波探测器主要指把它的测试质量放在低温环境中, 降低热噪声, 提高灵敏度。低温室用不锈钢做成, 低温室内壁的温度约为 8 K, 低温室内镜体的温度约为 20 K。

(10) 压缩态光场注入系统

对于设计灵敏度为 10^{-24} 的新一代激光干涉仪引力波探测器来说, 标准量子极限是其灵敏度提升的主要障碍。压缩态光场注入是超越标准量子极限的重要手段^[46]。单纯地注入振幅压缩光或者相位压缩光 (如图 16a)), 只能够在低频或者高频端减小干涉仪的量子噪声, 并不能在干涉仪的整个探测频段内减小量子噪声, 使灵敏度突破标准量子极限。而以频变压缩 (或称为频率制约压缩) 的方式改变注入光的压缩角, 便可以做到这一点 (如图 16b))。方法是以探测频率的函数来转动压缩椭圆, 使得在整个探测频段内总能够以最理想的正交量进行压缩, 就可以在探测器的整个探测频段内减小量子噪声, 提高灵敏度。由于压缩角的转动作为频率的函数进行调制, 我们称这种压缩为频变压缩 (有的文献称其为频率制约压缩)。

在图 16b) 中, 曲线 (1) 为标准量子噪声极限, 曲线 (2) 表示没有使用压缩态时常规干

涉仪的量子噪声谱, 曲线 (3) 表示利用纯粹相位压缩时的量子噪声谱, 曲线 (4) 表示利用频变压缩时的情况。图中底部的椭圆表示在探测频段的不同频率注入压缩光的压缩椭圆的最佳取向。



注: a) 变频压缩正交示意图; b) 变频压缩的量子噪声谱。

图 16 压缩态光场注入系统^[39]

除此之外还有隔震系统、控制系统、管道防护、波片和环境监测系统部分。在此不再赘述。

3.3 月球环境下激光干涉仪引力波探测器的噪声问题

频率为 0.1 ~ 10 Hz 频段的引力波包含非常丰富的物理内容和各类重要的天体物理现象, 是在地面与空间引力波探测频段之间观测宇宙的新窗口, 具有非常重要的科学价值。虽然在月球上建造激光干涉仪引力波天文台具有很多有利条件, 但是由于月球探测环境的特殊性, 因此在噪声和误差分析方面其与地基探测相比有很大的不同。

经过几十年的探索与深入研究, 我们对地面上激光干涉仪引力波探测器的噪声来源已经有了比较清楚的认识, 对如何降噪也已采取行之有效的应对方法^[39], 这对于月基干涉仪有很好的借鉴作用。一般而言, 地面上激光干涉仪引力波探测器的噪声来源有: 地面振动噪声, 热噪声, 引力梯度噪声, 光量子噪声和杂散光子噪声等。

(1) 地面震动噪声是激光干涉仪主要的噪声源之一, 其主要来源有自然现象和人类活动两个方面。在地球上, 典型的地面振动幅度的量级为 10^{-6} m。月球表面比地球表面安静, 没有人类活动, 也没有地球上的自然现象。文献资料表明, 在 0.1 ~ 4 Hz 的低频区域, 月球表面的振动噪声比地球上低 3 ~ 4 个数量级^[42-44]。但是作为影响激光干涉仪引力波探测器灵敏度的重要参数, 必须对其频率和振幅的分布进行前期研究和具体测量。

(2) 激光干涉仪引力波探测器的热噪声是由光学部件中的布朗运动或干涉仪所处环境中

温度场的涨落引起的。用于悬挂测试质量(即镜子)的细丝的热噪声模式称为琴弦模式, 镜子本身热噪声的模式称为鼓面模式。月球表面昼夜温差大, 为了减小热噪声, 法布里-珀罗腔的端镜及其悬挂丝须置于低温环境中。为了进一步降低电子学和光学器件的热噪声, 实验大厅(图 13 方框内部分)须有温度调节设备, 大厅最好置于熔岩管等恒温环境内。

(3) 引力梯度噪声, 局部质量分布的变化引起局部引力场的涨落产生的噪声, 称为引力梯度噪声(有时称为牛顿噪声)。而月球表面并无大规模质量分布变化的环境, 因此, 在月球上引力梯度噪声可以忽略不计。

(4) 光量子噪声源自光的量子性质, 它直接产生于测量和读出过程。在激光干涉仪引力波探测器探测频段内的几乎所有频率上, 它都会对灵敏度加以限制。光量子噪声通常表现为两种形式: 霰弹噪声和辐射压噪声。霰弹噪声是光探测器中的强度量子噪声。从统计物理可知, 激光器发射的光子数本身有涨落, 即在激光束中光子数并非在每个时间点都相同(激光束的强度有起伏)。激光束强度的涨落在干涉仪输出端引起的噪声被称之为霰弹噪声, 有时也称为散粒噪声, 它在高频区域占主导地位。辐射压噪声由测试质量反射光子的动量转移产生。光子具有动量, 在干涉仪臂中往返运动的光束中的光子, 在撞击到几乎自由下垂的镜子(即测试质量)表面之后, 会向相反的方向折回。在此过程中, 光子会将自己的动量传递给镜子。这种动量的转移会使镜子受到一种压力, 称为光辐射压力。在该压力的作用下, 镜子会向光子回弹的反方向反冲, 致使其平衡位置发生变化。由于光子数目的统计涨落, 到达镜子表面的光子数并非在每个时间点都相等。因此, 光辐射压力不是常数, 它也有统计涨落。这种辐射压力的涨落会直接引起测试质量位置的扰动, 形成噪声; 这被称之为辐射压噪声, 它在低频区域占主导地位。月基激光干涉仪引力波探测器工作在 $0.1 \sim 10$ Hz 这个低频区域, 主要是辐射压噪声在起作用, 故而使用中等功率的激光器并使用光场压缩技术可以对它进行有效压低^[39]。

(5) 杂散光子噪声来自少部分在传输过程中被散射离开主光束的激光光子。当它们随后被反射回来时, 会与干涉仪中携带引力波信号的光束相耦合。这些散射光子携带着光路上散射面的信息, 因此会污染真正的引力波信号, 并形成噪声; 这被称之为杂散光子噪声。临近月球表面空间中的月球尘埃(月尘)是产生杂散光子噪声的重要原因。因此, 测量月尘的浓度及颗粒分布、研究可靠的过滤方法是前期研究的重要课题。当然, 在适当部位布设光阑也可以降低该类噪声。

3.4 前期研究

在做具体设计之前, 为了确定探测器的参数和结构, 我们需要做很多前期研究, 主要包括以下几个方面。

(1) 月球上非高斯噪声的主要来源是宇宙射线轰击和太阳耀斑, 需要研究降低这些噪声的方法。如在测试质量所在的真空室加磁屏蔽阻止这些附加的电荷及月壤产生的散射光, 或利用宇宙线甄别器进行排除。

(2) 月球表面的夜间温度为 -130°C , 白天为 120°C , 昼夜温差巨大。这就需要研究在相关设备表面涂装隔热层的材料及方法, 或者使用制冷设备使温度保持稳定, 减轻由于巨大

的昼夜温差产生的热胀冷缩对设备的影响。

(3) 月球表面的曲率很大，球面效应比地球表面严重得多。例如，40 km 的长度可导致 450 m 的高度偏离。需要在月球上选择理想的地形地貌或者研究其他可行的解决方案。

除了以上的不利因素，还有一些太阳辐射、月尘对设备的影响，及数据通讯等方面的困难，都需要在接下来的研究中想办法克服（可参考文献 [47] 中的相关内容）。

4 月基激光干涉仪引力波天文台的选址

月球表面布满了大大小小的撞击坑，而这些撞击坑特有的环形山构造可以在很大程度上抵消，甚至消除月球表面曲率对布置大型激光干涉仪引力波探测器的不利影响。

一般而言，我们可以用两个特征量来描述撞击坑^[48]（如图 17 所示），一个是撞击坑的直径 D ，其定义为通过撞击坑中心点连接坑边缘线段的平均长度（其上限可以达到数百千米）；另一个是撞击坑的深度 d ，其定义为撞击坑最深点和坑边缘的平均高度（一般从几十米到几千米）。

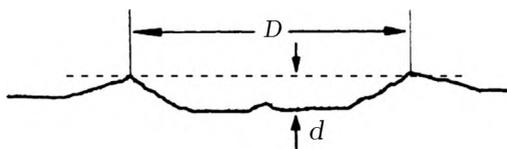


图 17 撞击坑直径 D 及其深度 d 示意图^[48]

对于绝大多数撞击坑而言，其直径越大，深度越深。但是，撞击坑深度与直径之比 (d/D) 一般随着直径的增加而减小^[49, 50]：对于直径 28 ~ 90 km、90 ~ 120 km 和大于 120 km 的撞击坑，其 d/D 平均比值分别为 1/20、1/30 和 1/40。正是由于撞击坑 d/D 的分布特点，如果想要通过将激光干涉仪引力波探测器架设在撞击坑的环形山上，以完全消除月球表面曲率效应，在理论上撞击坑的直径（对应干涉仪的臂长）有一个最大值。通过简单的计算可得，这个完全消除曲率效应的撞击坑最大直径约为 250 km，对应的引力波探测器臂长约为 180 km（L 构型）和 220 km（等边三角形构型），这正好可以满足建设百千米臂长激光干涉仪的需求！

基于现有对月球上大型撞击坑的统计数据^[51]，直径为 200 ~ 250 km 的大型撞击坑数量为 72 个（对应 L 构型的激光干涉仪臂长为 140 ~ 180 km）。如果考虑到每个撞击坑地质构造的不规则性、当地的月震状况以及其区位对于信号传输的影响等因素，真正适合布置大型激光干涉仪引力波探测器的撞击坑数量非常有限。因此，对于月球撞击坑这种能够建立月基激光干涉仪引力波天文台的战略资源，我们建议可以在利用月表观测数据进行先期初筛之后，放置小型的振动测量仪等科学仪器进行下一步的环境监测，为后续引力波天文台的建设打好基础！

5 总结与展望

随着各国探月工程的深入开展, 在月球上建造引力波天文台的设想引起了人们的强烈关注, 逐渐成为引力波天文学研究中新领域。各种各样的建议书也被提出来, 它们基本上可分为两大类: (1) 类似 LIGO 的激光干涉仪方案; (2) 类似韦伯棒 (Weber bar) 的月震仪方案。前者直接测量引力波引起的悬挂检验质量的相对位移, 后者以月球为天线, 测量引力波引起的月球振动 (例如, Harms 等人^[30]提出的 LGWA (Luna Gravitational Waves Antenna) 方案, Jani 和 Loeb^[35]提出的 GLOC (Gravitational-Wave Lunar Observatory for Cosmology) 方案, 北京师范大学张帆等人^[52]提出的“月作弦, 利用月震探测分赫兹引力波”方案等)。这些方案各具特色, 基本上都处于早期讨论阶段。

本文中提出的月基激光干涉仪引力波探测设备具有灵敏度高、发展前途广、使用寿命长、技术先进、便于维护和升级改造等一系列特点, 可以建成真正意义上的引力波天文台进行长期运转。此外, 月球表面还具有大量的、从几米到几百千米的各种尺度的撞击坑、没有大气、没有人类活动、月面振动小等诸多有利条件, 可简化激光干涉仪结构、降低造价、提升性能。同时, 在月球表面我们还可以基于天体物理目标选择干涉仪臂长, 从几千米、几十千米到上百千米量级进行量身定做, 大范围覆盖引力波探测频段, 为引力波天文学的研究开辟新天地。

特别是带有特大臂长 (百千米级) 和高精度法布里-珀罗腔的激光干涉仪引力波天文台的建立, 对于 0.1 ~ 10 Hz 引力波天文学的研究有独特的优势。这个独特的频段不仅是最有可能与电磁波观测相结合, 成为大样本多信使天文观测的窗口, 而且消除了空间干涉仪和地基干涉仪引力波探测器在探测频段上的“盲区”, 使得三者共同建立起 10^{-4} ~ 10^4 Hz 的引力波全频段探测体系。

我们坚信, 随着探月工程的深入开展和探测方案的不断优化和完善, 月基引力波探测必将迎来快速发展的新局面, 月球也将成为人类探测引力波、进行引力波天文学研究的最重要的基地!

参考文献:

- [1] 中国科学院国家天文台, 国家空间科学中心. 来自茫茫宇宙的一个疑似低频引力波的信号, <https://www.smoc.ac.cn/international/2356.jhtml>, 2023
- [2] Guth A H. Phys Rev D, 1981, 23(2): 347
- [3] Keating B G, Ade P A R, Bock J J, et al. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series: volume 4843 Polarimetry in Astronomy, 2003: 284
- [4] Ogburn I R W, Ade P A R, Aikin R W, et al. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series: volume 7741 Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy V, 2010: 77411G
- [5] Ahmed Z, Amiri M, Benton S J, et al. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series: volume 9153 Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation

- for Astronomy VII, 2014: 91531N
- [6] Li H, Li S Y, Liu Y, et al. *National Science Review*, 2018, 6(1): 145
- [7] Coyle I. The BICEP/Keck CMB Experiments, <http://bicepkeck.org/>, 2024
- [8] Champion D. Pulsar Timing Arrays, <https://www.aei.mpg.de/ptas>, 2024
- [9] Hobbs G, Archibald A, Arzoumanian Z, et al. *Class Quantum Grav*, 2010, 27(8): 4013
- [10] Manchester R. 36th COSPAR Scientific Assembly: volume 36, 2006: 283
- [11] Stappers B W, Kramer M, Lyne A G, et al. *Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics Supplement*, 2006, 6(S2): 298
- [12] Jenet F, Finn L S, Lazio J, et al. <https://arxiv.org/abs/0909.1058>, 2023
- [13] Lee K J. *Astronomical Society of the Pacific Conference Series: volume 502 Frontiers in Radio Astronomy and FAST Early Sciences Symposium 2015*, 2016: 19
- [14] Xu H, Chen S, Guo Y, et al. *Res. A&A*, 2023, 23(7): 5024
- [15] Amaro-Seoane P, Audley H, Babak S, et al. <https://arxiv.org/abs/1702.00786>, 2023
- [16] 罗子人, 张敏, 靳刚, 等. *深空探测学报*, 2020, 7(1): 3
- [17] 罗俊, 艾凌皓, 艾艳丽, 等. *中山大学学报 (自然科学版)*, 2021, 60(1-2): 1
- [18] Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. *Phys Rev X*, 2019, 9(3): 1040
- [19] Caltech/MIT/LIGO Lab. LIGO Livingston Observatory, <https://www.ligo.caltech.edu/>, 2024
- [20] Caltech/MIT/LIGO Lab. LIGO Hanford Observatory, <https://www.ligo.caltech.edu/>, 2024
- [21] Virgo Collaboration. VIRGO Observatory, <https://www.virgo-gw.eu/>, 2024
- [22] Max-Planck-Gesellschaft. GEO600 Gravitational-Wave Detector, <https://www.geo600.org/>, 2024
- [23] National Astronomical Observatory of Japan, Gravitational Wave Project Office. KAGRA Project, <http://gwpo.nao.ac.jp/en/research/kagra.html>, 2024
- [24] LIGO-Virgo-KAGRA/Aaron Geller/Northwestern University. Masses in the Stellar Graveyard, <https://media.ligo.northwestern.edu/gallery/mass-plot>, 2024
- [25] Punturo M, Abernathy M, Acernese F, et al. *Class Quantum Grav*, 2010, 27(19): 4002
- [26] Reitze D, Adhikari R X, Ballmer S, et al. *BAAS*, 2019, 51: 35
- [27] ET Collaboration. Einstein Telescope (ET) Project, <https://www.et-gw.eu>, 2024
- [28] Cosmic Explorer Project. Cosmic Explorer Observatory, <https://cosmicexplorer.org/>, 2023
- [29] Lafave N, Wilson T L. *Lunar and Planetary Science Conference: Lunar and Planetary Science Conference*, 1993: 841
- [30] Harms J, Ambrosino F, Angelini L, et al. *ApJ*, 2021, 910(1): 1
- [31] Arca Sedda M, Berry C P L, Jani K, et al. *Class Quantum Grav*, 2020, 37(21): 5011
- [32] Liu Z W, Röpke F K, Han Z. *Res Astron Astrophys*, 2023, 23(8): 2001
- [33] Falta D, Fisher R, Khanna G. *Phys Rev Lett*, 2011, 106(20): 1103
- [34] Seitzzahl I R, Herzog M, Ruiter A J, et al. *Phys Rev D*, 2015, 92(12): 4013
- [35] Jani K, Loeb A. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2021, (06): 044
- [36] Harms J, Ambrosino F, Angelini L, et al. *ApJ*, 2021, 910(1): 1
- [37] Johnson F S, Carroll J M, Evans D E. *Journal of Vacuum Science Technology*, 1972, 9: 450
- [38] LIGO Scientific Collaboration, Aasi J, Abbott B P, et al. *Class Quantum Grav*, 2015, 32(7): 4001
- [39] 王运永. *引力波探测*. 北京: 科学出版社, 2021: 349
- [40] Williams J P, Paige D A, Greenhagen B T, et al. *Icarus*, 2017, 283: 300
- [41] Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. *Class Quantum Grav*, 2017, 34(4): 4001
- [42] Larose E, Khan A, Nakamura Y, et al. *Geophys Res Lett*, 2005, 32(16): 16201
- [43] Lognonné P, Le Feuvre M, Johnson C L, et al. *J Geophys Res Planets*, 2009, 114(E12): 12003
- [44] Hanada H, Heki K, Araki H, et al. *A Window on the Future of Geodesy*, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005: 163
- [45] Amaro-Seoane P, Bischof L, Carter J J, et al. *Class Quantum Grav*, 2021, 38(12): 5008
- [46] 王运永, 韩森, 钱进, 等. *光学仪器*, 2016, 38(6): 488
- [47] 吴铠岚, 林栩凌, 郑永超, 等. *深空探测学报*, 2023, 10(3): 247

- [48] Sun S, Yue Z, Di K. *Icarus*, 2018, 309: 61
[49] 欧阳自远. 月球科学概论, 北京: 中国宇航出版社, 2005: 61
[50] Pike R J. *Geophys Res Lett*, 1974, 1(7): 291
[51] Head J W, Fassett C I, Kadish S J, et al. *Science*, 2010, 329(5998): 1504
[52] Li J, Liu F, Pan Y, et al. *Science China: Physics, Mechanics, and Astronomy*, 2023, 66(10): 9513

Lunar-based Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory

NIU Jia-shu¹, WANG Yun-yong², BIAN Xing³,
WEI Lian-fu⁴, HUO Hong-qing⁵, ZHANG Xiao-min⁶

(1. *Institute of Theoretical Physics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China*; 2. *Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; 3. *Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*; 4. *Information Quantum Technology Laboratory, School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China*; 5. *School of Physical Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*; 6. *Beijing Azspace Technology Co. Ltd, Beijing 100048, China*)

Abstract: Gravitational wave is an important prediction of general relativity, and the detection of gravitational waves is one of the most active frontiers of contemporary physics. The discovery of gravitational waves has made gravitational wave astronomy complete the historic transition from the search for gravitational waves to astronomical study, and has ushered in a new era of vigorous development of gravitational wave astronomy. Earth-based laser interferometer gravitational-wave observatories and space-based gravitational-wave detectors have been developed rapidly around the world. With the commencement of the Lunar exploration project, the construction of a Lunar-based laser interferometer gravitational wave observatory has attracted more and more attention. In this paper, we give a brief introduction to Lunar-based laser interferometer gravitational wave observatory: review its history, describe its favourable conditions and the basic parameters and optical structure of the detector, and look forward to its future development prospects.

Key words: gravitational waves; gravitational wave detection; Lunar base; laser interferometer