

仪器与测量

地基激光干涉引力波探测器的升级与改造*

黄小曼¹⁾²⁾ 刘见³⁾ 郭超凡⁴⁾ 马怡秋⁵⁾ 马宇波⁶⁾ 王浩宇⁷⁾ 王梦瑶^{1)†}
吴斌⁸⁾ 杨圣⁹⁾ 尤志强⁹⁾ 张帆¹⁾ 张腾¹⁰⁾ 肇宇航¹¹⁾ 朱兴江^{2)‡}

1) (北京师范大学物理与天文学院, 北京 100875)

2) (北京师范大学文理学院, 珠海 519087)

3) (西澳大利亚大学物理系, 珀斯 WA 6009, 澳大利亚)

4) (马斯特里赫特大学科学与工程学院, 马斯特里赫特 6229 GT, 荷兰)

5) (华中科技大学物理学院, 武汉 430074)

6) (山西大同大学物理与电子科学学院, 大同 037009)

7) (东京科学大学理学院, 东京 152-8551, 日本)

8) (雪城大学物理系, 锡拉丘兹 13210, 美国)

9) (河南省科学院引力波天文研究所, 郑州 450046)

10) (伯明翰大学物理天文系, 伯明翰 B15 2TT, 英国)

11) (巴黎西岱大学, 天体粒子与宇宙学研究所, 巴黎 75013, 法国)

(2025 年 6 月 29 日收到; 2025 年 8 月 11 日收到修改稿)

地基激光干涉引力波探测器不仅首次发现引力波、开创了一个观测天文学的全新分支——引力波天文学, 同时也是物理学相关领域前沿科学与先进技术成功典范. 为了实现引力波探测的目标, 使引力波成为一个常态化的天文观测手段, 全球主要地基引力波探测器经历了持续数十年的技术升级与改造. 本文重点介绍 LIGO, Virgo 和 KAGRA 等探测器的升级历程, 详细分析关键技术改进, 包括激光功率增强、悬挂与隔振系统优化以及量子噪声抑制等方面的进展. 这些技术进步显著提升了探测器在 10 至几千赫兹的灵敏度, 从而成功探测到数以百计的致密天体并合引力波信号. 展望未来, 第三代地基引力波探测器的建设将大幅度拓展引力波的探测能力, 为物理学和天文学研究开辟新的视野.

关键词: 引力波, 激光干涉仪, 地基引力波探测, 天体物理

PACS: 04.30.-w, 04.80.Nn

DOI: 10.7498/aps.74.20250852

CSTR: 32037.14.aps.74.20250852

1 引言

爱因斯坦的广义相对论预言了引力波的存在^[1]. 目前可探测的引力波是由大质量物体的加速运动产生的, 例如双黑洞或双中子星并合. 基于天体引

力辐射的引力波天文学, 可获取电磁观测难以提供的信息, 为研究致密天体的内部结构与宇宙演化机制提供了全新视角. 因此, 引力波的探测不仅可以验证爱因斯坦的广义相对论, 也可以作为一种新的观测手段, 与电磁波进行联合观测. 根据引力波的波源特性和辐射频率, 不同探测方式适用于不

* 国家重点研发计划 (批准号: 2024YFC2208000, 2023YFC2205800, 2023YFC2206704) 和中央高校基本科研业务费专项资金资助的课题.

† 通信作者. E-mail: mengyao.wang@bnu.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: zhuxj@bnu.edu.cn

同频段的引力波信号. 例如, 地基引力波探测器的探测频段通常为 $1\text{--}10^4\text{ Hz}$, 脉冲星计时阵则适用于 $10^{-9}\text{--}10^{-6}\text{ Hz}$ 频段的引力波探测; 宇宙微波背景辐射的 B 模偏振则聚焦低于 10^{-12} Hz 的频段; 而空间引力波探测器如 LISA^[2] 及我国的“天琴”^[3]、“太极”项目^[4] 则聚焦于 $10^{-4}\text{--}1\text{ Hz}$ 的低频段, 通常采用三艘航天器组成等边三角形编队, 通过监测彼此之间的相对距离变化进行干涉测量. 尽管空间干涉仪具有独特的低频优势, 但因其工程实现难度大, 目前仍处于规划和实验验证阶段. 相较而言, 地基激光干涉引力波探测器技术成熟、灵敏度高且具备实时观测能力, 在引力波探测中发挥了关键引领性作用.

引力波信号非常微弱且探测器存在许多噪声, 导致探测引力波十分困难. 引力波探测的研究工作从 20 世纪便开始了, 20 世纪 60 年代美国物理学家韦伯建成了世界上第一个引力波探测器——共振棒^[5], 从此人类对引力波的认识从理论迈向了实验阶段. 共振棒的原理是: 当引力波的频率接近共振棒的固有频率时, 会引起共振棒的振动. 然而, 由于共振棒的共振频率是固定的, 且其灵敏的带宽相对较窄, 因此共振棒始终未能探测到可验证的引力波. 虽然韦伯曾宣称探测到引力波, 但后续多个研究小组使用类似共振棒进行的长期观测均未能重复这一结果. 尽管如此, 共振棒的试验为引力波探测的发展奠定了基础. 目前, 地基引力波探测的主要技术是采用激光干涉^[6], 激光干涉引力波探测器最初在 1963 年由两位苏联科学家提出, 后来美国麻省理工学院的雷纳·韦斯教授对这个想法进行了深入的研究和设计. 1972 年 10 月 4 日, 世界上首个引力波探测器小型样机建成, 之后, 20 世纪 80 年代许多十米量级臂长的原型机相继建成并投入使用, 为之后的公里级臂长的激光干涉引力波探测器的建设积累了经验^[7]. 20 世纪 90 年代, 几台公里级激光干涉引力波探测器陆续开始建造, 并在 21 世纪初陆续建成. 当前, 全球已有多个公里级引力波探测器. 其中, 由美国主导的 LIGO (laser interferometric gravitational-wave observatory)^[8] 主要有两个臂长为 4 km 的观测台, 分别位于美国路易斯安那州的利文斯顿和华盛顿州的汉福德; 除此之外还有位于意大利比萨市附近臂长为 3 km 的 Virgo^[9]; 及位于日本神冈, 臂长为 3 km 的 KAGRA^[10]. 初代激光干涉引力波探测器

建成后, 在这个基础上, 仪器进行了几次重要的升级与改造, 灵敏度以及探测能力都得到了显著的提升. 2015 年, LIGO 首次探测到双黑洞并合事件 GW150914, 标志着人类首次直接观测到引力波. 该发现是引力波研究中的里程碑式突破, 极大地推动了地基干涉仪的升级改造与全球引力波探测网络的发展. 2017 年, 雷纳·韦斯、巴里·巴里什和基普·索恩三位科学家因对引力波发现做出的突出贡献被授予诺贝尔物理学奖.

本文将阐述激光干涉引力波探测器的发展历程和未来趋势, 包括介绍激光干涉引力波探测器的探测原理、探测器在运行过程中的各种噪声源, 详细分析激光干涉引力波探测器历次的升级改造, 展望和探讨未来探测器的设计与升级. 第 2 节将探讨激光干涉引力波探测器的技术基础, 包括其工作原理、结构设计以及主要噪声源和抑制技术. 第 3 节到第 5 节分别介绍各个地基引力波探测器的升级过程, 第 6 节分析比较三大地基引力波探测器的技术差异及运行表现, 第 7 节展望了下一代探测器的规划与发展. 最后, 本文总结了各个阶段的技术演化, 并展望未来的引力波探测技术发展方向.

2 激光干涉引力波探测器的技术基础

2.1 工作原理

激光干涉引力波探测器是一台特殊的迈克尔逊干涉仪, 简化结构示意图如图 1 所示. 入射激光通过分束镜后会被分为两束相互垂直的光束, 这两束光随后沿着垂直的两条臂进行传播. 每条臂上都配置了由输入测试质量和末端测试质量组成的法布里-珀罗腔, 用于多次反射光束以增加有效光程, 提高探测灵敏度. 当没有引力波信号时, 两束光被末端测试质量镜反射后返回分束镜时干涉相消, 输出端口没有信号输出. 当引力波到来时, 会引起两条臂之间的相对长度变化, 从而改变两束光的相位差, 干涉不再完全相消, 使得光电探测器有信号输出, 这表明探测到了引力波^[11].

为提升系统性能, 干涉仪引入了功率循环镜和信号循环镜. 其中, 功率循环镜位于激光注入端, 用于回收从干涉仪反射回来的光, 提高腔内有效光功率; 而信号循环镜则位于输出端口, 有助于调节引力波信号的频率响应, 增强特定频段灵敏度^[12].

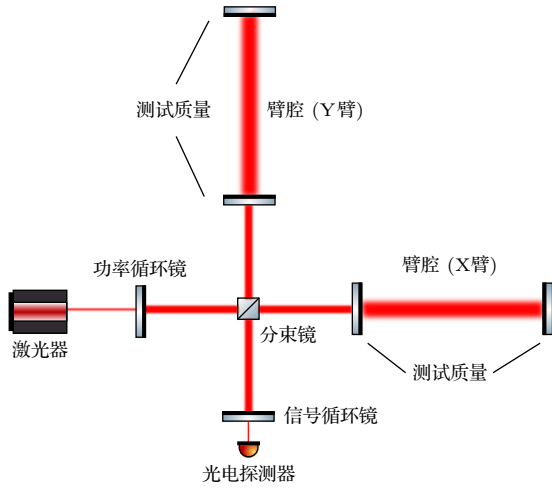


图1 激光干涉引力波探测器简化结构图

Fig. 1. Simplified schematic diagram of a laser interferometric gravitational wave detector.

2.2 噪声源及其抑制技术

地基激光干涉引力波探测器主要有几种基本噪声^[11], 包括量子噪声、地表震动噪声、引力梯度噪声、热噪声及残余气体噪声等, 具体噪声类型以及对探测器灵敏度的影响如图2所示. 此外, 探测器运行的过程中还存在着一些技术噪声, 例如控制系统等引起的噪声. 由于技术噪声通常可以被压制到基本噪声以下, 本文不作详细讨论. 本小节将对各类基本噪声进行详细的分析, 并讨论如何降低这些噪声的影响.

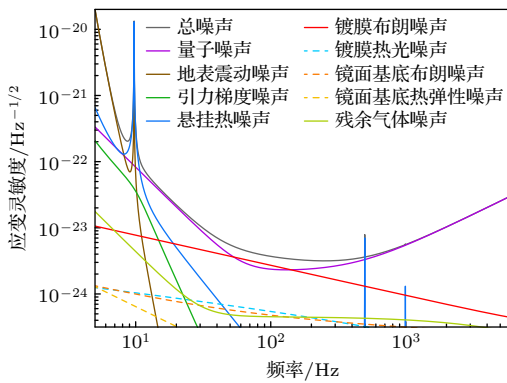


图2 Advanced LIGO 噪声灵敏度曲线由引力波探测器噪声计算器 Gwinc 给出 (<https://git.ligo.org/gwinc/pygwinc>)

Fig. 2. Advanced LIGO noise budget, given by gravitational wave interferometer noise calculator Gwinc (<https://git.ligo.org/gwinc/pygwinc>).

1) 引力梯度噪声: 由波在地表传播时引起的局部引力场扰动引起, 这些扰动作用于探测器的测试质量上, 形成噪声^[13], 主要影响探测器 30 Hz

以下的低频段^[14]. 引力梯度噪声的主要来源是环境地震场和大气中的密度波动^[15], 在 Advanced LIGO 和 Advanced Virgo 探测器中, 其主要来源是地震瑞利波. 随着探测器的升级, 量子噪声和热噪声显著降低, 使得引力梯度噪声的影响逐渐显现. 多种方案可以用来减少引力梯度噪声, 例如将探测器建在质量密度波动较小的区域, 如波动较小的地下^[15], 或在探测器附近部署地震仪监测地表运动, 并计算其对引力梯度噪声的贡献, 从而在引力波探测数据中扣除该噪声^[16].

2) 地表震动噪声: 主要由地表的自然运动以及人类活动引起, 主要影响探测器 0.1—10 Hz 范围内的灵敏度. 这些运动及活动会导致探测器测试质量的位移, 从而改变两束激光光束的路径长度, 改变干涉图样. 由于引力波信号本身十分微弱, 其引起的测试质量位移仅约为 $10^{-19} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ 量级, 而地表运动振幅可达 $10^{-6} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$, 因此地表震动对引力波探测有显著的影响. 为抑制地表震动噪声, 可通过主动和被动隔振系统将光学元件与地表震动有效隔离^[17]. 被动隔振系统通过将探测器的光学元件悬挂以抑制共振频率以上的振动, 而主动隔振系统利用传感器检测地表震动噪声, 并通过反馈控制系统驱动执行器施加与振动相反的力, 以抵消振动.

3) 量子噪声: 量子辐射压噪声和散粒噪声总和, 是探测器的限制噪声. 在量子力学中, 真空存在量子场波动, 这种波动称为“量子真空涨落”. 激光干涉引力波探测器中的量子噪声主要来源于从暗端口进入的真空光场的量子涨落, 这些量子涨落与干涉仪内部光场发生相互作用后返回到暗端口, 并在光电探测器上生成噪声信号^[18]. 量子真空涨落可以分解为正交的振幅涨落和相位涨落, 其中由振幅涨落引起的量子辐射压噪声主要在探测器的低频区域占主导, 而由相位涨落引起的散粒噪声主要在探测器的高频区域占主导^[19]. 具体而言, 散粒噪声来源于光子在两臂中传播时间差的量子波动; 量子辐射压噪声则源于光子在镜子表面被反射时将其带有的动量传递给测试质量, 而光子数量的统计涨落使得这种动量传递本身也具有统计噪声, 使得对镜子造成的辐射压力也有统计涨落, 形成量子辐射压噪声. 引力波信号与光功率成正比, 而散粒噪声仅与光功率的平方根成正比, 因此提高激光功率可以降低散粒噪声. 然而, 较高的激光功率会增

加量子辐射压噪声, 因此对光功率的提高有所限制^[20]. 散粒噪声和量子辐射压噪声之间存在权衡关系, 它们的共同贡献构成了探测器的量子噪声. 标准量子极限对应于两种噪声对系统总噪声贡献相等时的最优平衡点, 代表了探测器可获得的最小量子噪声水平^[21]. 为降低量子噪声, 压缩真空态光场成了抑制量子真空噪声的重要手段, 尤其是为了同时抑制散粒噪声和在低频抑制量子辐射压噪声, 需要采用频率依赖的压缩真空态光场, 具体的抑制原理及方法将在后文阐述.

4) 热噪声: 由探测器内部的布朗运动引起, 根据产生的部位和成因, 通常可分为悬挂热噪声、镀膜布朗噪声、镀膜热光噪声、镜面基底布朗噪声和镜面基底热弹性噪声. 所有类型的热噪声都可以使用低温技术来降低. 但目前使用的熔融石英的基底材料在低温下热导率较低, 限制了其在低温下的散热能力. 因此, 在 KAGRA 探测器以及未来某些第三代探测器中, 测试质量会采用在低温条件下性能较优异的硅或者蓝宝石材料. 这两种材料在低温下具有较高的热导率, 例如在 20 K 的低温下, 蓝宝石的热导率约为 $1000 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ^[10], 硅的热导率约为 $2000 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; 而在室温下, 熔融石英的热导率仅为 $1.38 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$. 这两种材料的机械损耗随温度降低而减少; 同时, 硅在 124 K 温度下的热膨胀系数为零, 这意味着热弹性噪声可被完全消除^[22]. 下面具体介绍几种主要的热噪声.

a) 悬挂热噪声: 在此前讨论地表震动噪声时提到, 为隔绝地表震动, 通常会将测试质量悬挂起来. 然而, 悬挂系统的材料内部会因为微观过程 (例如原子和分子的热运动) 产生损耗^[23]. 根据涨落-耗散原理, 悬挂系统的能量耗散不可避免地引入与频率相关的热位移噪声^[24], 这种噪声即悬挂热噪声. 针对悬挂热噪声, 通常可以通过选用低损耗的材料, 以及优化悬丝的几何结构和连接方式来提高悬挂系统的品质因子, 从而有效降低噪声^[25].

b) 镀膜布朗噪声: 主要影响的探测频段在 40—150 Hz 之间. 该噪声源自测试质量镀膜层内部分子和原子的布朗运动. 为了提高镜面的反射率并延长光在法布里珀罗腔中的储存时间, 测试质量镜通常会使用多层镀膜, 通过使用不同材料交替镀膜, 形成高低折射率材料交错的薄膜层, 从而实现所需的反射系数和透射系数^[26]. 然而, 由于测试质量采用这种多层镀膜结构, 这些镀膜层之间以及镀

膜层与基材之间的布朗运动会引起薄膜层厚度的涨落, 进而使得镜子表面发生微小位移涨落, 导致光学相位波动. 此外, 多层镀膜还会将各层的机械振动叠加, 放大噪声^[27]. 为抑制镀膜布朗噪声, 可采用优化多层镀膜结构以及选择低损耗的镀膜材料, 也可以通过改进制造工艺来降低噪声, 例如利用单晶多层镜面技术, 即通过直接键合技术将单晶材料引入高反射率镜面, 实验结果表明这种反射镜不仅具有高反射率, 还显著降低了机械阻尼, 从而能有效降低镀膜布朗噪声^[28]. 此外, 针对此类镀膜热噪声 (包括将介绍的镀膜热光噪声) 以及后文所述基底热噪声都可以通过增加入射激光光斑直径来降低. 当入射激光光斑直径增大时, 每单位面积上的能量密度减少, 从而降低了局部热累积, 减小由局部热膨胀和热应力变化引起的噪声.

c) 镀膜热光噪声: 由光学元件镀膜材料的温度波动引起, 由于光弹性效应 (即材料在受到热应力时, 其光学性质发生变化的现象), 这些温度波动会导致热膨胀和材料折射率的改变, 引起光程差的涨落, 从而对引力波探测造成影响. 为了有效降低镀膜热光噪声, 并同时保持高反射率, 可以采取优化高、低折射率层的数量和厚度的策略^[29].

d) 镜面基底布朗噪声: 与镀膜布朗噪声类似, 都是由材料内部分子的热振动引起的, 但它们发生的位置不同, 基底布朗噪声主要源于镜面基底部分的涨落^[27]. 基底布朗噪声的幅度与基底材料的弹性和内部损耗特性相关. 优化基底材料的选择和结构设计, 降低内部弹性损耗可以有效地抑制这种噪声.

e) 镜面基底热弹性噪声: 热弹性噪声通常由材料固有的统计温度波动引起^[30]. 对于基底而言, 热弹性效应会引发机械应力和形变, 产生噪声并对引力波探测造成影响. 为缓解这个问题, 可以选择热膨胀系数与镀膜材料相匹配的材料来降低热弹性损耗. 例如可以选用硅作为测试质量材料, 因为硅在低温下具有非常低的热膨胀系数. 这意味着在温度波动下, 其体积变化较小, 这种低热膨胀特性可以直接减少因热膨胀不匹配引起的热弹性噪声.

5) 残余气体噪声: 由在探测器内部真空腔中的残余气体分子引起. 这些残余气体分子的密度扰动会导致局部折射率发生变化, 折射率的变化会导致光程差的波动. 此外, 这些残余气体分子不断地进行热运动, 与探测器内的光学元件发生碰撞, 从而

导致元件表面的机械振动, 形成噪声. 为了抑制这种噪声, 需要维持腔内的高真空度, 可通过选择合适的镜面材料和优化真空系统设计来实现^[31]. 以 LIGO 为例, 其干涉臂管道中的残余气体压力被控制在约 10^{-9} Torr (即 1.33×10^{-7} Pa) 以内^[32].

本节介绍了激光干涉引力波探测器中常见的基本噪声. 为进一步提升探测器的性能, 抑制各类噪声成为探测器升级与改造的关键目标. LIGO 作为目前灵敏度最高的引力波探测器, 经过一次大型的设备升级和多次不断的技术升级和改进, 其灵敏度得到了显著提升. 下节将详细介绍 LIGO 在技术演进过程中的关键升级与改造.

3 LIGO

激光干涉引力波探测器的技术研究始于 20 世纪 70 年代, 而初代探测器的建设则在 20 世纪末启动. 初代探测器包括美国的 LIGO^[33]、欧洲的 Virgo^[34]、德国与英国合作的 GEO600^[35], 以及日本的 TAMA300^[36]. 在此基础上升级产生了第二代引力波探测器, 包括在初代 LIGO 基础上升级的 Advanced LIGO^[32]、欧洲的 Advanced Virgo^[37], 以及日本的 KAGRA^[38]. 其中, LIGO 技术相对领先, 并且在灵敏度上达到了全球最高水平. 本节将介绍 LIGO 在其发展过程中经历的升级与改造. 图 3 展示了 LIGO 位于汉福德和利文斯顿的两台探测器的鸟瞰图. 两探测器间的直线距离为 3002 km.

3.1 初代 LIGO

LIGO 是美国建造的激光干涉引力波天文台, 初代 LIGO 由两个位于华盛顿州汉福德的臂长为 4 km 和 2 km 的干涉仪以及一个位于路易斯安那州利文斯顿的臂长为 4 km 的干涉仪构成. 其始建于 1994 年, 历时五年完成并在 2000 年 12 月开始

首次调试^[40].

初代 LIGO 于 2002 年开始正式运行, 其运行过程分为多个科学阶段, 从 S1 到 S6.

在 S1 至 S6 阶段, LIGO 通过一系列技术改进逐步提升了探测灵敏度, 从 S1 时期约 $3 \times 10^{-21}/\sqrt{\text{Hz}}$ 提升至 S6 时期约 $3.5 \times 10^{-23}/\sqrt{\text{Hz}}$, 在 100 Hz 频率附近实现了近两个数量级的灵敏度提升. S1 阶段自 2002 年 8 月 23 日开始, 此次运行中探测器的噪声水平远高于预期. 在高频范围 (>150 Hz), 散粒噪声对探测器的影响较大, 主要由于探测器使用的激光功率较低; 此外, 在低频范围 (<50 Hz) 由于准直系统中的波前传感系统部分部件不工作导致了准直漂移, 即激光束与干涉仪镜面之间的准直发生了漂移^[40,41], 从而影响了探测器的稳定性和灵敏度. 因此在 S2—S5 的升级期间, 通过将模拟控制器更换为数字控制器、增加独立直流偏置电源和优化滤波器, 显著提升了准直精度和系统稳定性^[42]; 此外, 通过改进悬挂系统及提高激光功率等措施, 持续提升了灵敏度, 为 Advanced LIGO 的设计奠定了基础.

S6 阶段 (2009—2010 年) 作为 initial LIGO 的最后一个运行阶段, 也被叫作 Enhanced LIGO, 标志着系统向 Advanced LIGO 过渡的开始. 在这阶段, 初代 LIGO 升级力度显著增强, 为第二代探测器 Advanced LIGO 的建设提供了重要的实验验证, 下面介绍初代 LIGO 在 S6 阶段引入的新技术以及其对灵敏度提升的作用^[43].

1) 激光系统: 激光系统中安装了新的主环形振荡器和功率放大系统, 初始输入激光系统从 10 W 升级到了 35 W, 显著提高了探测器在高频 (>150 Hz) 的灵敏度, 并为 Advanced LIGO 激光系统的几个关键组件提供了重要的原型设计. 此外, 系统还安装了改进的二氧化碳激光热补偿系统^[44], 用于

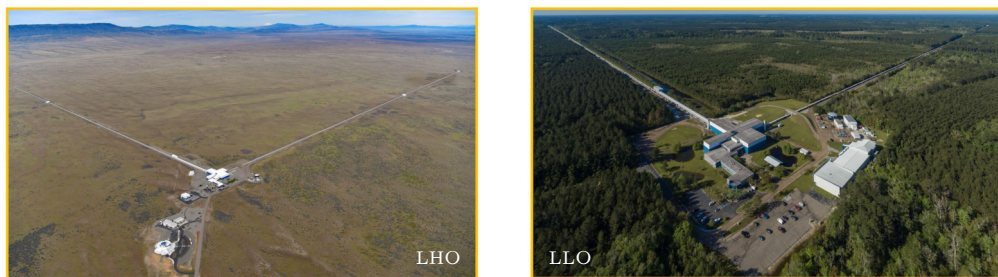


图 3 LIGO 鸟瞰图^[39]. LHO 和 LLO 分别为 LIGO 位于汉福德和利文斯顿处的探测器

Fig. 3. Aerial view of LIGO^[39]. LHO and LLO are the LIGO detectors located at Hanford and Livingston, respectively.

抵消由于吸收主激光束能量而引起的热透镜效应. 图 4 为 LIGO 激光系统的环形振荡器, 它是激光系统的起点.

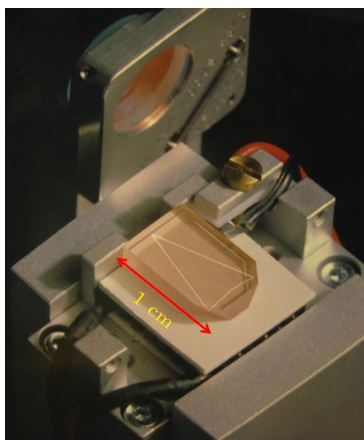


图 4 LIGO 激光系统中的环形振荡器^[39]

Fig. 4. The ring oscillator in the LIGO laser system^[39].

2) 读出系统: 采用了一种新的读出方式, 即利用一种称为直流读出的特殊同相读出方案来取代最初的外差读出方案^[45]. 在传统的干涉仪设置中, 干涉仪通常被调节到“暗条纹”状态, 即在没有引力波信号通过时, 几乎没有光到达光电探测器. 而直流读出方案会将干涉仪的初始状态调置到偏离“暗条纹”的状态, 即在没有引力波信号时, 也会有部分光到达光电探测器. 这种状态下, 探测器可以实现对引力波的线性响应. 因此, 当引力波信号到来时, 其引起的相位变化会叠加在原有的光上, 使得光强发生变化, 从而产生一个可以直接测量的信号, 省去了读取信号时的射频调制和解调的步骤^[46]. 此外, 新的读出系统还安装了输出清模器, 用于滤除输出光的高阶横向模式.

3) 悬挂与隔振系统: 在 2009 年末 S6b 运行期间, 利文斯顿探测器遇到了较为严重的瞬态地表震动噪声. 研究人员发现: 功率循环腔及由分束器与输入测试质量组成的短迈克尔逊干涉仪的长度控制系统同时出现干扰, 这些干扰与超过 70% 的引力波数据中观测到的异常有关, 并发现是较高的地表震动噪声使得功率循环腔严重不稳定, 导致循环功率显著下降^[43]. 为解决这个问题, 研究团队对位于利文斯顿的探测器的液压驱动系统的地震前馈控制进行了改进, 利用地震仪网络 and 一组滤波器实施了前馈控制技术, 使用了位于迈克尔逊干涉仪顶点即分束器位置以及干涉仪臂末端的地震仪信号,

成功抑制了低频地表震动对仪器的影响^[47]. 图 5 为 LIGO 部分输入光学元件的悬挂系统.

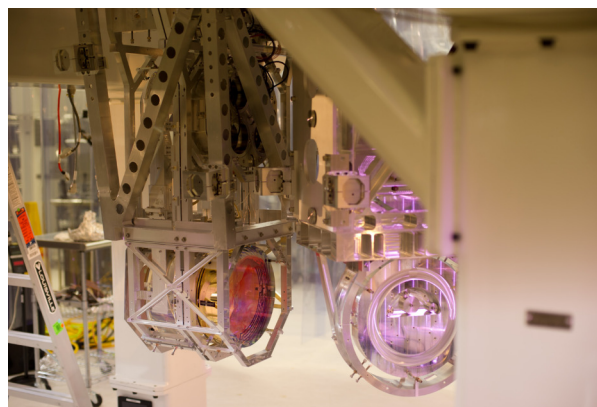


图 5 LIGO 部分输入光学组件的悬挂系统^[39]

Fig. 5. The suspension system of some input optical components of LIGO^[39].

4) 磁性材料引起的巴克豪森效应的缓解措施: 在科学运行阶段, 地表震动不仅会影响 40 Hz 以下的频段, 还会通过探测器内部的非线性过程或系统内部的耦合效应产生地震上转换效应, 影响更高 (40—200 Hz) 的频段, 这种噪声被称为地震上转换噪声. 研究发现, 造成这种地震上转换噪声的来源是巴克豪森效应^[48], 即当外加磁场变化时, 铁磁材料中磁畴的突然重新排列产生的磁场波动. 这种波动通过驱动系统传递到引力波探测器的测试质量上, 转换为高频噪声. 研究进一步发现这种噪声的潜在来源位于测试质量驱动器的附近或内部. 其中一个重要因素是由于冷加工过程使得磁驱动器内部的 303 级不锈钢紧固件具有铁磁性. 为了解决这一问题, 在 Advanced LIGO 探测器中选择了磁性较低的 316 级不锈钢来替代 303 级不锈钢, 从而减小因磁场变化引起的巴克豪森噪声对探测器的影响.

5) 光束抖动的控制: 在 S6 阶段前, LIGO 对输出清模器进行了升级. 然而, 该腔体的模式传输对入射光束的角度波动较为敏感, 未准直的光束很容易引起透射光的非线性功率波动^[49]. 在观测运行中, 研究人员观察到低频地表震动噪声和光学平台振动会与输出清模器高频光束抖动相互耦合, 进而在主抖动频率周围产生噪声边带. 这些噪声边带的幅度不稳定, 可能在 LIGO 探测器最敏感的频带内引发瞬态频率噪声. 为缓解这个问题, LIGO 优化了辅助光学元件的悬挂系统, 引导光束进入输出清

模器,从而最大限度地减少光学平台运动对光束运动的耦合.

尽管初代 LIGO 在 2006 年成功地达到了其设计灵敏度——在 200 Hz 频段处应变灵敏度约为 $2 \times 10^{-23}/\sqrt{\text{Hz}}$, 但并未探测到引力波. 主要原因在于其探测带宽不足, 尤其是在低频和高频范围内存在局限. 在低频段, 灵敏度受到地表震动的影响, 悬挂系统和隔振系统的性能不足, 需要在后续的探测器升级中进行改进. 而高频段的灵敏度则受到散粒噪声的限制. 虽然初代 LIGO 未能成功探测到引力波, 但它为后续的激光干涉引力波探测器的升级奠定了坚实的基础, 推动了更高灵敏度探测器的开发.

3.2 Advanced LIGO

初代 LIGO 的 S6 阶段在 2010 年 10 月 20 日结束, 在探测器运行阶段达到了预计的灵敏度目标, 在 200 Hz 频率附近达到了最佳灵敏度, 约为 $10^{-23}/\sqrt{\text{Hz}}$. 随后, 在 2011—2014 年之间, LIGO 进行了全面的设备更新, 保留了位于汉福德和利文斯顿的两台 4 km 的探测器并对其进行升级改造. 2015 年 9 月, 升级后的 Advanced LIGO 开始运行, 并依次进入多个科学运行阶段, 从 O1 阶段持续至今, 目前正处于 O4 阶段. 相较于初代 LIGO, Advanced LIGO 的灵敏度显著提升, 并在 2015 年 9 月 14 日成功地探测到了第一例引力波信号 GW150914^[50].

3.2.1 初代 LIGO 到 Advanced LIGO 的升级

表 1 列出了初代 LIGO 与 Advanced LIGO 的主要参数对比, 从表 1 可以看出, 经过一系列升级, 大部分参数都有了显著提升.

在初代 LIGO 升级到 Advanced LIGO 的过程中, 几个关键的部分进行了升级, 使得 Advanced LIGO 的性能获得了大大的提升.

1) 信号循环腔的加入: 在 Advanced LIGO 的升级过程中, 一个重要的改进是在干涉仪的暗端口加入了信号循环腔. 通过调节信号循环腔的长度, 可以对特定频率的信号进行增强^[12], 同时通过改变信号循环腔的位置可以选择峰值响应频率以及拓宽探测器响应范围.

2) 超稳定高功率激光系统: 在 Advanced LIGO 的升级设计中, 初始激光输出功率计划提升至 180 W, 然而在 O1 阶段, 为确保系统稳定, 实际输入激光功率仅采用了 20 W. 激光功率的提高有助于降低散粒噪声. 然而, 由于干涉仪两个臂之间的不匹配 (如臂长差异或光学元件的损耗不同), 激光噪声无法完全消除并耦合到暗端口^[51], 一般可以通过优化光学设计或是利用对称性以及各种主动和被动的稳定方案来减少激光噪声的耦合. 为进一步增强稳定性, Advanced LIGO 引入了前级稳定激光系统 (pre-stabilized laser, PSL) 系统来稳定输入激光功率、频率、光束指向和光束质量^[52].

3) 光学元件升级: 在光学元件部分, Advanced LIGO 增大了光学元件的尺寸, 并通过改变镜面的曲率半径将入射到测试质量和末端测试质量上的光束半径分别增大到了 5.3 和 6.2 cm. 增大光束半径有效降低了激光能量在镜子上的集中程度, 从而降低测试质量中的温度梯度和相应的热损耗^[53], 抑制镀膜布朗噪声. 同时, 随着测试质量本身质量的增加, 光子对测试质量的辐射压力作用减弱, 进一步降低了量子辐射压噪声.

表 1 初代 LIGO(S1 阶段) 与 Advanced LIGO 的主要参数
Table 1. Key parameters of Initial LIGO (S1 phase) and Advanced LIGO.

参数	Initial LIGO (S1)	Advanced LIGO
臂长/m	3995	3995
臂腔精细度	220	450
激光种类及波长	Nd:YAG, $\lambda = 1064 \text{ nm}$	Nd:YAG, $\lambda = 1064 \text{ nm}$
功率循环腔处的输入功率/W	4.5	125
测试质量所用材料	熔融石英	熔融石英
测试质量尺寸及质量	直径 25 cm, 厚度 10 cm, 质量 10.7 kg	直径 34 cm, 厚度 20 cm, 质量 40 kg
光束半径 ITM/ETM	3.9 cm/4.5 cm	5.3 cm/6.2 cm
输入清模器长度及精细度	24 m, 1350	32.9 m, 500
循环腔长度 PRC/SRC	9 m/-	57.6 m/56.0 m

注: ITM 表示输入测试质量, ETM 表示末端测试质量; PRC 为功率循环腔, SRC 为信号循环腔.

4) 隔振与悬挂系统: 升级后, Advanced LIGO 使用熔融石英悬挂丝代替原有的钢丝来悬挂测试质量. 由于熔融石英悬挂丝的固有损耗约为钢丝的 10^{-4} 倍 [54], 因此可以有效地减少悬挂热噪声. 此外, 使用氢氧化催化黏接的新技术来连接悬挂丝和测试质量, 将连接处的机械损耗降到最低 [53]. 为了有效地减少地表震动这一低频噪声同时避免引入额外的噪声, Advanced LIGO 中采用了四级摆悬挂系统 [55]. 四级悬挂能够减少对沿光轴方向的振动影响, 另外还通过悬臂式叶片弹簧对垂直方向的振动方向进行隔离. 四个悬挂级提供了充分的地震衰减, 在 10 Hz 时衰减系数达到 10^7 . 除了悬挂系统之外, 还利用主动与被动隔振系统进行额外的衰减. 与初代的四级被动隔振系统不同, Advanced LIGO 采用两级主动隔振系统. 该系统使用高灵敏度的地震仪来实时监测地表的震动, 并通过反馈控制有效地进行补偿, 在 1—10 Hz 的频率范围内提供 10^3 — 10^4 的衰减. 最后, Advanced LIGO 采用静电相互作用代替线圈-磁铁驱动对测试质量施加控制力, 磁铁可能与环境磁场耦合引入额外噪声, 而静电相互作用的本质是利用电荷的相互作用, 因此改用静电相互作用可以防止磁场在探测器运行时与环境磁场耦合产生噪声 [56].

初代 LIGO 经过升级后, 灵敏度得到了显著提升, 升级后的灵敏度曲线如图 6 所示. 接下来详细介绍 Advanced LIGO 阶段的运行情况及其进一步的升级过程.

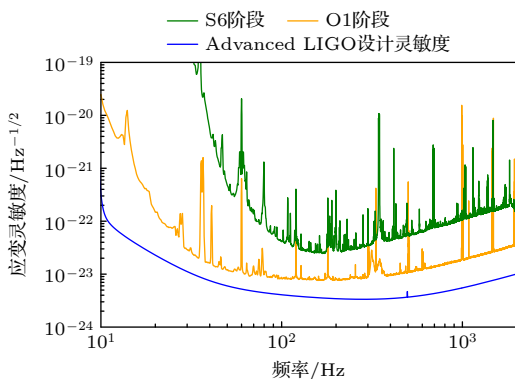


图 6 初代 LIGO 和 Advanced LIGO 应变灵敏度对比. 数据来源: <https://gwosc.org/data/>
Fig. 6. Strain Sensitivity Comparison between Initial LIGO and Advanced LIGO. Data sources: <https://gwosc.org/data/>.

3.2.2 Advanced LIGO 的运行情况及升级

Advanced LIGO 的首次观测运行阶段 O1 从

2015 年 9 月开始, 并持续到 2016 年 1 月. 虽然 Advanced LIGO 在第一次观测运行阶段没有达到预期的灵敏度, 但它在 10 Hz—1 kHz 频段的灵敏度已远超上一代探测器, 在 100 Hz 处, 其应变灵敏度达到 $8 \times 10^{-24} / \sqrt{\text{Hz}}$ [57]. 同时在 2015 年 9 月 14 日, 探测器首次成功地直接探测到了来自双黑洞合并的引力波, 标志着引力波探测新纪元的到来 [50].

在 O1 阶段, 尽管 Advanced LIGO 取得了重要突破, 但仍面临一些技术难题和噪声问题.

1) 探测器参数未完全达标: 臂腔内谐振功率原设计值为 800 kW, 但在 O1 实际运行中仅达到 100 kW, 未达到预期性能. 此外, 信号循环镜的透射率为 36%, 高于设计值 20%. 虽然更高的透射率改善了 60—600 Hz 频率范围内的量子噪声, 但也导致了其他频段灵敏度的降低 [57].

2) 激光功率提升的影响: 首先, 激光功率的提升使得光学元件吸收了更多的激光能量, 产生热透镜效应, 引发光学畸变. 其次, 不均匀的光压分布可能对光学元件施加旋转力矩, 从而影响系统的准直稳定性. 为维持探测器的稳定运行, 通常采用准直传感与控制 (alignment sensing and control) 系统调节干涉仪光学元件的准直状态; 对偏离准直状态的光学元件进行校正并补偿辐射压力对光学元件产生的扭矩 [32]. 最后, 当腔内激光功率过高时, 可能会引发参量不稳定性 [58,59]. 参量不稳定性来自测试质量的机械模式以及高阶光学模式之间的三模相互作用: 主激光模式将部分能量散射成高阶光学模式, 当这个高阶模式与机械模式的频率差等于主模频率时, 它们之间会发生拍频, 导致散射场在干涉仪中循环时, 再次通过辐射压力与主光学模式和机械模式相互作用, 形成反馈循环; 若反馈循环的强度超过系统的阻尼能力, 机械振动和高阶光学模式会指数增长, 导致系统不稳定, 影响引力波探测.

3) 噪声问题: 除了激光功率提升造成的影响之外, O1 阶段还面临几种主要的噪声问题, 包括突发噪声 (glitches)、梳状噪声 (combs)、呼吸噪声 (breathing noise) 和低频噪声 (low-frequency noise). 其中突发噪声是一种短时间、高强度的噪声, 对双黑洞合并和短暂爆发性事件的探测影响较大. 该突发噪声与高通滤波器的阶跃响应一致, 且可能受到环境湿度的影响 [60]; 梳状噪声是一种在特定间隔 (1 Hz) 形成周期性的噪声, 主要对连续引力波以及随机背景的探测造成影响; 呼吸噪声则

表现为 55—90 Hz 范围内的周期性波动, 受周围环境影响; 30 Hz 以下的低频噪声主要表现为两种类型: 散射噪声 (scattering noise) 和短时的“划痕”噪声 (short duration ‘scratchy’ glitches), 主要对双黑洞并合参数估计造成影响^[61]. 此外, 来自射频调制造成的噪声影响了探测器高频段的数据质量.

为了减少噪声、延长探测器工作时长并提升数据质量, Advanced LIGO 在第二次观测运行 O2 前进行了长达十个月的升级、维护和调试. 在此阶段, 研究团队对 Advanced LIGO 探测器的升级包括: 在 O1 结束后, 在利文斯顿处的探测器安装了多项新部件, 包括在末端测试质量的悬挂系统上安装被动调谐质量阻尼器 (passive tuned mass dampers), 以抑制特定频率下的振动; 增加了一组用于稳定激光强度的真空内光电二极管阵列; 在输出端口安装了高量子效率光电二极管, 以更高效地检测光信号; 更换了 Y 臂的输入测试质量, 以优化激光传输的路径. 同时对汉福德处的探测器进行的升级内容包括: 将初始激光输出功率提升至 50 W. 然而, 这一操作并未显著地改善探测器灵敏度, 因此 O2 阶段恢复使用 30 W 的激光功率^[62]. 此外, O2 期间引入了一种基于线性传递函数的噪声减除方法^[63], 其原理是先通过传感器记录仪器噪声 (如光束抖动、校准线以及主电源线噪声), 随后计算该噪声与引力波应变数据之间的传递函数, 从而得到噪声投影分量, 并从原始数据中将其减除, 以消除线性耦合噪声并提高探测器灵敏度. 这一方法使得 O2 阶段 LHO 探测器的 BNS 范围提高了 20%. 这里的 BNS 范围是指双中子星探测范围 (BNS range), 是一种衡量探测器灵敏度的简化方式, 表示标准的 $1.4M_{\odot} + 1.4M_{\odot}$ 双中子星系统以信噪比为 8 被探测到的平均距离, 单位为 pc, $1 \text{ pc} = 3.0857 \times 10^{13} \text{ km}$.

O2 阶段从 2016 年 11 月 30 日开始, 运行至 2017 年 8 月 25 日. 在 O2 阶段的最后 25 天, Virgo 加入了观测网络与 LIGO 共同参与了数据采集. 2017 年 8 月 17 日, 随着 Virgo 加入全球引力波探测网络, 其与 LIGO 共同探测到了 GW170817 事件, 这是首例探测到的双中子星并合事件. 且后续在同一方位发现了全电磁波波段暂现源, 实现了引力波与电磁波的首次联合观测, 标志着多信使引力波天文学的开启^[64]. 在 O2 和 O3 期间, Advanced LIGO 对汉福德和利文斯顿的两个探测器进行了不同配置的运行, 以此来筛选和优化不同噪声源.

由于配置差异, 汉福德探测器存在一种利文斯顿探测器中未观察到的噪声——抖动噪声, 这种噪声与前级稳定激光束的角度和光斑直径的随机变化有关, 使用前文中所说的噪声减除方法进行了抑制, 同时进一步扩大了探测范围.

O3 阶段分为 O3a 和 O3b 两个阶段, O3a 阶段自 2019 年 4 月 1 日开始, 运行至同年 10 月 1 日. 随后对探测器进行了为期一个月的升级. O3b 阶段从升级结束后继续运行, 至 2020 年 3 月 26 日结束.

在 O3 阶段开始前, 对探测器的升级包括:

1) 激光功率的增加: 为了增加臂腔内激光功率, 分别在激光器的升级、参量不稳定性的抑制以及采用准直传感与控制三个方面做出了改进. 首先是提高激光功率, 升级后汉福德探测器的输入激光是 37 W, 利文斯顿探测器的输入激光是 40 W. 除此之外, O3 两个探测器激光系统中的高功率振荡器被更换为小的单程固态放大器, 该放大器需要的冷却剂更少, 替换后降低了光束角度抖动的幅度. 其次是参量不稳定性的抑制, 前文提到过 Advanced LIGO 因激光功率的提高产生了参量不稳定性, 为了缓解这个问题, 安装了声学模式阻尼器. 阻尼器的安装降低了测试质量的机械模式的品质因子, 并将参量增益降低到低于 1 的水平. 通过安装声学模式阻尼器, 臂腔中的循环功率相较之前增加了 2 倍^[65]. 最后, 研究团队对准直传感与控制系统进行了升级, 包括辐射压补偿、抖动系统的引入以及信号循环腔传感器的优化. 这些改进可以提供更稳定和可重复的光斑定位, 同时提升了信号循环腔的准直精度. 升级后的系统不仅能够适应更高的激光功率, 并且在提高角度控制能力的同时也能有效避免角度控制噪声的引入^[66].

2) 注入压缩光: 在前文关于噪声源及其抑制技术的讨论中提到量子噪声对探测器的灵敏度造成影响, 尤其是在 20 到几千赫兹的频带内. 如图 7 所示, 光的相干态在两个正交方向上的不确定性相等, 且不确定性乘积受到海森伯不确定性原理的限制^[67]. 为了降低量子噪声, 探测器采用了注入压缩真空态光场的策略. 基本原理是用压缩真空态光场代替真空态光场, 从而导致被压缩的真空涨落正交方向的量子噪声成分得以降低, 但是并不会突破量子极限^[68]. 在使用百赫兹附近的频率依赖的压缩真空态光场或调整信号循环镜为失谐时, 量子极限会被突破^[21]. 由于海森伯不等式, 当降低一个方向

的不确定性时, 另一个正交方向的不确定性会相应增加, 从而导致该方向的噪声上升. 2011 年, LIGO 在汉福德处的探测器注入压缩光进行原理验证实验, 以验证该技术降低量子噪声的可行性^[69].

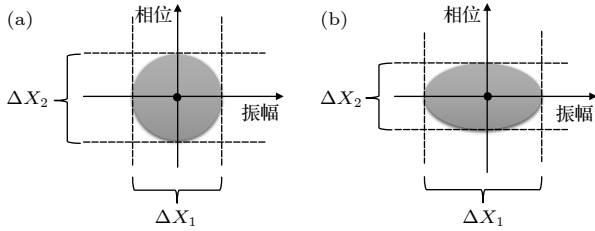


图 7 真空态光场与压缩真空态光场 (a) 真空态光场; (b) 压缩真空态光场. X_1 和 X_2 分别是电磁场的两个正交分量

Fig. 7. Vacuum state and squeezed vacuum state of light: (a) Vacuum; (b) squeezed. X_1 and X_2 are the two orthogonal components of the electromagnetic field, respectively.

3) 主要光学元件的更换: 为了提升探测器性能, 替换了两个探测器末端的测试质量^[70]. 更换后的测试质量镀膜具有更低的散射损耗, 从而提高了功率循环增益. 汉福德探测器处的 X 臂输入测试质量因检测到点状缺陷也被更换^[71]. 此外, 两处探测器的信号循环镜也进行了更换, 原先使用的铝和熔融石英复合信号循环镜由于高机械损耗的复合系统内部模式易引入热噪声. 新的信号循环镜使用单体熔融石英制成, 直径为 150 mm, 更换后有助于降低热噪声. 在提升循环光功率的情况下, 降低了信号循环镜的透射率, 这有助于增加信号循环腔的增益, 进而提升高频段的灵敏度, 扩大双中子星并合的观测范围. 另外, 在悬挂系统上采用了环形反作用质量 (reaction mass) 设计^[72,73]. 与传统的设计不同, 传统系统中测试质量与圆柱形反作用质量之间狭窄的间隙会增强残余气体分子的布朗热噪声. 而环形反作用质量通过改变优化几何结构, 避免了测试质量运动对间隙内残余气体分子的压缩效应, 从而显著降低了由分子多次碰撞引起的布朗噪声.

4) 测试质量放电系统的优化: 在早前的运行阶段, 发现测试质量电荷的累积会与周围的悬挂系统以及控制结构的表面之间形成静电相互作用, 导致机械能量的耗散, 进而降低品质因数并引起热噪声^[74]. 为有效抑制这一噪声, 采取了多种改进措施: 首先, 在探测器末端安装了高灵敏度电场检测计, 实现了局部电场的监测; 其次, 在真空的离子泵和

测试质量之间加装挡板, 有效阻隔溅射带电粒子并减少了电荷累积; 此外, 在汉福德探测器的测试质量上安装了放电系统并成功投入运用^[72].

探测器工作周期受多种因素影响, 包括环境干扰、硬件性能以及调试周期. 经过上述的升级措施, 相较于 O1 阶段, O2 和 O3 阶段探测器稳定性显著提高, 有效工作时长增加约 16%.

在 O3a 和 O3b 阶段之间的升级期间, 升级工作主要聚焦于影响探测范围的噪声耦合问题, 同时减少降低数据质量的光散射问题, 并提高对环境的抗干扰能力, 增加探测器的工作时长. 具体改进措施包括: 首先, 更换了向晶体传输泵浦光源的受损光纤, 使泵浦功率提升至原先的三倍; 其次, 为减少光散射的影响, 利文斯顿探测器在其悬挂平台周围配备了新型的光吸收板^[75], 防止真空外壳反射的散射光与主光束重新耦合. 除此之外, 在汉福德和利文斯顿的探测器均发现限制功率循环增益的主要因素是测试质量镀膜层的点状缺陷. 这种点状缺陷是在探测器光学元件上随机存在的小的高吸收点, 这些小吸收点会引起 nm 级的热弹性效应以及基底透镜效应, 使得探测器功率循环增益降低并间接干扰反馈控制系统^[71]. 因此, 在 O3b 阶段开始前对测试质量进行了全面的检查, 以防止点状缺陷对探测器造成影响.

经过这些升级, 探测器的探测性能大幅提升, 且探测器每月工作运行周期稳定在 70%—80%.

在 O3 阶段运行完成之后, 为进一步提升探测器灵敏度, 对探测器进行了多项升级改造. 此次升级主要包括升级光场压缩技术、替换存在缺陷的光学器件、优化反馈控制环路及在汉福德探测器使用相机伺服系统代替准直抖动系统 (the alignment dither system)^[76], 以避免 O3 阶段中使用的准直抖动系统在 20 Hz 处出现的窄带噪声问题.

该升级阶段的重点在于光场压缩技术的升级. 在 O3 阶段, 使用的光场压缩技术是与频率无关的, 这种设计在降低高频散粒噪声的同时, 不可避免地导致了量子辐射压噪声在低频的增加. 随着激光功率的提升以及高压压缩度的应用, 量子辐射压噪声在低频段逐渐增强, 成为不可忽视的噪声来源之一. 为此, 从 O4 阶段开始引入频率依赖的压缩真空态光场, 通过在每个探测器上增加一个 300 m 长的滤波腔来实现频率相关的压缩. 如图 7 所示, 压缩态可以通过不确定性椭圆进行表征, 其中压缩场和

干涉仪场之间的相对相位决定了椭圆角(或称为压缩角),通过调节压缩角可以调整被压缩的正交分量,从而优化噪声分布,实现对特定频段噪声的有效抑制^[19].在 O4 阶段两处探测器皆使用了约 11—17 dB 的生成压缩光,而 O3 阶段为 7—9 dB.除此之外,两个滤波腔的镜子也被更换以降低压缩光的阈值功率^[76].图 8 展示了光场压缩技术对汉福德处探测器的量子噪声抑制效果,其中绿色曲线对应与频率无关的压缩光注入时的应变灵敏度,与未使用光场压缩技术的黑色曲线相比,在 1 kHz 附近的噪声幅度降低至原来的 1/1.6(降低了约 4.0 dB);而在利文斯顿探测器中,噪声降低至原来的 1/1.9 倍(降低了约 5.8 dB).而在低频处,该技术使两个探测器的有效探测范围较未使用压缩技术时提升了 15%—18%.

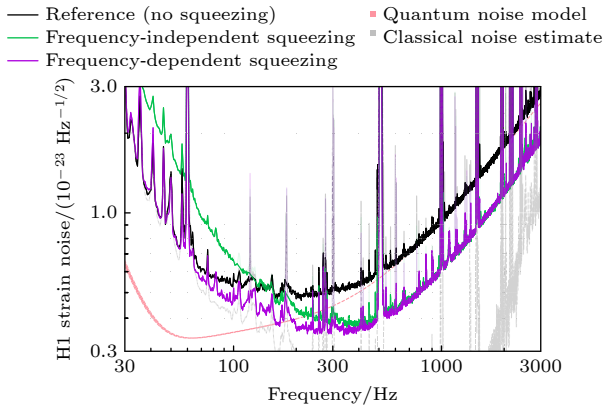


图 8 LIGO Hanford 在 O4 前调试期间的应变灵敏度曲线^[19]
Fig. 8. Strain sensitivity of the LIGO Hanford measured during the pre-O4 commissioning phase^[19].

其次,由于镜面镀膜中存在点状缺陷,这些缺陷会引发控制的不稳定,并引入来自散射光和光束抖动的额外噪声,且会限制探测器在观测运行中的最大激光工作功率^[71,75,77].因此,两处探测器的测试质量均进行了更换.在 O4 阶段开始前更换了汉福德处探测器的 Y 轴输入测试质量以及利文斯顿处两端的末端测试质量,更换后两处探测器的功率循环增益都得到了有效的提高.

探测器的 O4 阶段自 2023 年 5 月 24 日开始, O4a 阶段于 2024 年 1 月 16 日结束,随后 O4b 阶段在 2024 年 4 月 10 日开始运行.经过一系列升级改造,在 O4a 阶段中,探测器的带宽噪声显著降

低.在低频范围,为消除散射光对地表震动的耦合,移除了用于维持真空环境的分隔窗,从而显著改善了应变噪声表现^[78];同时,光吸收板共振的阻尼优化减少了散射光的耦合.然而,在利文斯顿观测站观察到 100 Hz 附近的应变噪声高于汉福德观测站,这可能与利文斯顿探测器处更换的末端测试质量的热噪声较高有关.

在 O4a 阶段结束之后,对两处探测器进行了升级.其中一项主要改进是优化压缩真空态光场的光学系统,使 LIGO 探测器能够突破标准量子极限^[79].

O4 阶段预计运行至 2025 年 11 月,在 O5 阶段开始前计划再次对探测器进行升级.升级过程将分别针对低频范围和高频范围进行改进.在低频范围,升级措施包括将测试质量的重量增至约 100 kg,并改进隔振与悬挂系统以进一步隔离衰减地表震动噪声.在高频范围内,升级计划包括提高激光功率,同时辅以热补偿和参量不稳定性抑制的改进,以及增加压缩光的应用^[80].

在 LIGO 的升级过程中,技术发展借鉴了其他探测器的技术经验.例如, LIGO 早期就与德国和英国合作建造的 GEO600 探测器展开了合作.尽管 GEO600 的臂长较短,灵敏度较低,但它为强信号源提供了额外的置信度,并补充有关引力波的方向和极化信息^[81].此外,由于 GEO600 的臂长较短,其维护和升级更加便捷, LIGO 许多的关键技术都是在 GEO600 探测器上先得到的验证.有关 GEO600 探测器的介绍,详见附录 A.

通过与 GEO600 的合作, LIGO 验证了多项关键技术.当前 LIGO, Virgo 和 KAGRA 三大引力波天文台合作组成国际引力波天文台网络(international gravitational-wave observatory network, IGWN^①),该网络通过协调多探测器联合观测,有助于精确定位引力波源及提供更可靠的数据.接下来介绍 Virgo 探测器的升级过程.

4 Virgo

4.1 初代 Virgo 的升级

Virgo 探测器是由法国和意大利共同建设的引力波探测器,始建于 1997 年,位于意大利比萨市

① <https://igwn.docs.ligo.org/web/website/>

附近, 其干涉臂长度为 3 km. 该探测器于 2003 年正式启用, 经过调试后于 2007 年开始科学观测, 并在同年与 LIGO 探测器签署协议决定共同合作运行和共享数据. Virgo 探测器的整体结构与 LIGO 探测器大致相似, 但也有些许差异. 例如为缓解地表震动, Virgo 的悬挂系统采用了独特的五级超级衰减器 (superattenuator). 在 10 Hz 频率处, 这一系统能将噪声幅度谱密度 (amplitude spectral density) 抑制高达 15 个数量级 [34]. 图 9 为 Virgo 的鸟瞰图.



图 9 Virgo 鸟瞰图 [82]
Fig. 9. Aerial view of Virgo [82].

Virgo 探测器的第一次科学运行 (VSR1) 从 2007 年 5 月 18 日持续至同年 10 月 1 日, 与 LIGO 以及 GEO600 的 S5 阶段的最后几个月同步. 在此期间, Virgo 在高频段的灵敏度已达到与 LIGO 相当的水平; 在低于 40 Hz 的低频范围内, 其灵敏度优于 LIGO; 而在中段部分的灵敏度则略低于 LIGO. 在整个 VSR1 阶段, Virgo 有 84.2% 的时间处于锁定状态, 其中 81% 的时间处于科学运行状态.

在 VSR1 阶段, 低于 1 Hz 频率的测试质量扰动主要来自恶劣天气如强风或海浪活动. 一般来说, 这些影响会降低探测器灵敏度, 但不会导致锁定失效; 当全球范围内发生 6 级以上的地震时, 探测器的锁定状态会失效, 导致悬挂系统受到扰动, 需要数小时才能重新稳定, 这严重影响了探测器的运行效率. 为了提升探测器的稳定性并延长其有效运行时间, 在此阶段对悬挂控制系统进行了多项升级. 首先, 改进了控制系统, 使其在地震发生时能够自动切换至更稳定的控制模式; 其次, 引入了悬挂差分控制 (suspension differential control) 技术, 通过比较和差分处理多个悬挂系统的位置信号, 有效过滤共模干扰 [83], 从而优化整体悬挂性能; 此外,

还采用信号交换技术, 通过在悬挂系统之间交换信号, 补偿各悬挂点的不同振动响应, 从而提升中央区域和端塔的控制能力. 这些升级措施使探测器的抗震能力提高了 2—3 倍, 有效减少了失锁次数, 并提升了探测器的运行稳定性.

除了探测器运行时长和稳定性的提升外, 在 VSR1 阶段, 为了进一步提高探测器灵敏度, 针对不同频段的噪声源采取了不同的优化措施. 在中频范围内, 由压电驱动器引入的噪声被成功隔离并移除; 而在低频段, 探测器主要受到准直系统噪声的影响, 这种噪声来源于激光在镜面上的不均匀分布, 导致角度噪声通过散射光或镜面的不对称性耦合至暗条纹信号中. 为抑制低频范围内的准直系统噪声, 采用了优化纵向控制回路增益以及调整滤波器设计的措施, 使得探测器性能改善 [83].

在 VSR1 结束后, Virgo 探测器对其关键部件进行了升级, 这一过渡阶段被称为 Virgo+, 将为后续 Advanced Virgo 的升级奠定基础. 本次升级的重点是通过增加激光功率来提升散粒噪声占主导的高频段灵敏度. 为此, 安装了一台新的激光放大器, 其输出功率高达 60 W. 然而, 激光功率的提升也引发了热透镜效应. 为抑制该效应, 引入了热补偿系统, 以均衡激光照射镜面导致的温度不均匀性. 此外, 本次升级还安装了一种新型清模器, 采用腔长为 144 m 的短三角形腔结构, 能够有效降低高频激光强度噪声, 同时对光束进行空间滤波. 其他改进措施还包括更换部分老化的组件, 并安装实时光纤链路, 以提升信号传输的速度 [84].

经过升级后, Virgo 在 VSR2 阶段于 2009 年 7 月正式投入运行. 在此期间, 工作周期可超过 90%, 灵敏度已接近预定设计值. 得益于其出色的隔振系统 [85], Virgo 在 75 Hz 以下实现了最佳灵敏度. 由于臂腔的精细度 (finesse) 和臂长的差异, Virgo 探测器更适用于探测由较重双天体并合事件及低频脉冲星产生的引力波.

VSR2 阶段结束后, Virgo 探测器的升级主要集中于悬挂系统. 原有悬挂线采用厚度 2 mm 的 C85 钢丝, 但钢丝悬挂线存在较高的意外接触损耗和结构损耗. 因此在此次升级中, 金属悬挂线被替换为熔融石英悬挂线. 熔融石英在室温下具有更低的损耗和更高的抗拉强度, 使其成为更适合于悬挂系统的材料. 新型熔融石英悬挂线通过整体式结构直接连接至测试质量上, 即通过硅酸盐键合技术将

高纯度熔融石英悬挂线固定在测试质量侧面, 实现与测试质量的无缝衔接, 从而形成一个整体的悬挂系统^[86]. 图 10 所示为 Virgo 采用的熔融石英材料的悬挂丝. 升级后的悬挂系统在 30—40 Hz 频段内显著降低了热噪声, 使探测器的灵敏度提升了两倍. 然而, 在此次升级过程中, 发现探测器 X 臂末端测试质量的曲率半径比 Y 臂末端测试质量的曲率半径短了约 110 m, 使得模式无法完全匹配, 在输出端口产生了额外的散射光.

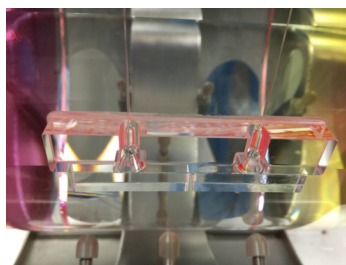


图 10 Virgo 采用的熔融石英材料的镜面悬挂丝^[87]
Fig. 10. Mirror suspension of fused silica fibers^[87].

为了与 LIGO 同步运行, Virgo 探测器于 2010 年 7 月启动了 VSR3 阶段的运行^[34]. 在 VSR3 阶段结束之后, 为进一步提升探测器灵敏度, 首先在真空室内引导和吸收对散射光影响最大的光束, 减少了输出端的散射光噪声; 其次, 针对曲率半径差异导致的模式不匹配问题, 通过加热 X 臂末端测试质量, 使其曲率半径与 Y 臂末端测试质量的曲率半径相匹配. 与此同时, Virgo+ 升级进入最后阶段, 为后续 Advanced Virgo 的安装和调试做好了充分的准备.

4.2 初代 Virgo 到 Advanced Virgo 的升级

为了提高探测器的灵敏度, Advanced Virgo 的升级计划在 2009 年获批, 并最终于 2017 年 7 月 31 日完成全部升级工作. 在这个升级阶段, 首先将测试质量的重量从 20 kg 增加到 42 kg 并增大光斑大小, 以有效降低量子辐射压噪声^[88]. 其次, 为了减少镜面镀膜中的热噪声, 将光束束腰放置在 3 公里法布里-珀罗腔的中心附近, 以放大测试质量上的光斑. 在激光功率方面, 根据探测器灵敏度的需求, 经过计算确定臂腔内输入功率需达到 125 W. 然而考虑到激光输入系统的损耗, 最终将激光功率设计值定为 200 W. 在 Advanced Virgo 运行初期, 采用分阶段提升功率的策略, 先以低功率输入, 初始激光的输入功率为 10 W. 为了适应

光学功率的提升, 对光电调制器和法拉第隔离器进行了升级, 以确保其能承受提高后的功率. 关键光学元件采用熔融石英材料, 因为其具有低吸收性和优异的均匀性. 此外, 采用了先进的抛光技术, 使得镜面中心区域的面形精度达到优于 0.5 nm (RMS) 的水平, 并通过低吸收、低损耗的镀膜将腔体内的热噪声和光损耗水平限制在吸收低于 0.5×10^{-6} 、散射低于 1×10^{-5} 的范围内^[37]. 在 Virgo+ 阶段, 曾尝试将悬挂线从金属钢丝改为熔融石英材质, 以降低悬挂热噪声. 然而, 由于真空污染问题 (现已修复), 使得这些悬挂丝失效. 为了避免延迟 Virgo 参与 O2, 恢复使用了金属钢丝^[62]. 升级完成后, Advanced Virgo 在 O2 运行阶段的最后 25 天 (2017 年 8 月 1 日开始) 和 Advanced LIGO 一起参与联合数据采集.

4.3 Advanced Virgo 的升级

在 O2 阶段之后, Virgo 实施了多项改进措施以进一步提升探测器的灵敏度. 在低频区域, 最重要的升级之一是将 O2 阶段的四根金属悬挂丝的材质替换为熔融石英悬挂丝, 从而将探测频段扩展至 100 Hz 以下. 同时, 对真空系统和清洁程序进行了优化, 以减少灰尘对探测器环境的污染. 此外, 在载荷的主动控制系统中新增了悬挂丝保护装置, 以防止真空操作过程中高速颗粒冲击导致熔融石英悬挂丝失效^[89]. 另一项提升低频灵敏度的升级是引入了悬挂外部注入台, 用于操纵和引导激光进入干涉仪, 从而衰减地表震动对光学元件的影响, 并减少光束抖动噪声. 在高频区域, 探测器更换了更高功率的激光器. 经过多次不同功率的测试, 最终将激光功率设置为 18 W. 然而, 功率循环腔的边缘稳定性问题以及热效应的像差, 导致干涉仪纵向控制稳定性和准直性能下降^[90]. 为此, 采用环形加热器调整末端测试质量的曲率半径, 以补偿热效应对腔体的影响, 从而稳定光学模式.

在 O3 阶段, Virgo 与 LIGO 同步注入了压缩光, 以有效降低散粒噪声. 为了优化压缩性能并减少光学损耗, 干涉仪的输出端口更换了高量子效率的光电二极管, 从而提高了引力波信号的检测能力. 此外, 在光学平台和真空罐内补充安装了光阑和隔膜, 进一步减小了散射光对探测器灵敏度的影响^[72].

在 O3a 和 O3b 两个观测阶段之间的一个月, Advanced Virgo 进行了多项关键配置的调整,

其中最重要的配置变化是将初始激光输出功率从 18 W 增加到 26 W. 此外, 通过优化谐振腔反馈控制系统, 并在输入测试质量上使用加热带减少镜面基底噪声, 显著地提升了低频段内的 BNS 探测范围. 在 O3a 阶段开始前, 干涉仪输出端口安装的高量子效率的光电二极管虽然提升了信号检测能力, 但也引入了额外的低频电子噪声. 在 2020 年 1 月底的维护期间, 通过更换前置放大器, 成功地消除了这部分电子噪声, 使探测器的 BNS 范围提高了 2 Mpc. 与此同时, 压缩光注入的准直系统也得到了进一步优化^[75], 从而提高了压缩光的注入效率和准直精度.

2020 年 3 月 26 日 O3 阶段结束后, Advanced Virgo 进行了全面升级, 升级后的探测器在 O4 阶段被称为 Advanced Virgo+. 这一阶段的升级主要包括增加初始激光输出功率、安装信号循环镜以及实现频率依赖的压缩真空态光场. 首先, 2020 年 7 月安装了信号循环镜, 使得 Advanced Virgo 成为了双循环干涉仪. 探测器的注入系统经过优化, 将初始激光输出功率提升到了 40 W. 同时, 清模器镜子的载荷机械结构也进行了改进, 解决了俯仰角度的控制问题. 为了在整个频带上降低量子噪声, 计划在输出端口注入频率相关的压缩光. 频率依赖的压缩真空态光场的实现依赖于频率无关的压缩光束在失谐的 285 m 长的滤波腔上的反射色散特性. 2021 年 3 月完成了滤波腔的安装工作, 包括用于滤波腔控制和频率无关压缩光注入的五个附加光学平台. 由于信号循环镜的加入, 锁腔策略也进行了调整改进. Advanced Virgo+ 的锁腔策略进行了优化, 使用了辅助激光系统解耦臂长自由度与中心区域自由度^[91], 从而提高锁定的稳定性. 此外, 功率循环腔的锁定稳定性依赖于循环镜的曲率半径. 为此, 2022 年 7 月安装了中部加热曲率半径修正器 (central heating radius of curvature correction, CHRoCC), 用于动态调整镜面的曲率半径. 该装置安装调试完成后, 显著提升了锁定的稳定性^[92].

Advanced Virgo 项目开始时, 若要实现稳定性循环腔的结构, 需要大量基础设施的改造. 为了及时进入 O2 阶段, 探测器维持了边缘稳定腔的设计 (即腔的稳定性参数接近于 1), 与 LIGO 使用的稳定循环腔相比, 其对外部扰动更为敏感, 导致干涉仪的控制难度增加^[93]. 这一问题使得 Advanced Virgo 未能如期进入 O4a 阶段的观测运行. 经过多

次调试和优化, Advanced Virgo 最终于 2024 年 4 月 10 日成功进入了 O4b 阶段的观测运行. 受限于边缘稳定腔的结构, Advanced Virgo 加入后实际运行时初始激光输出功率仅为 17 W, 使得在低频未达到辐射压力噪声的极限, 因此压缩真空态光场技术仅针对高频段的散粒噪声使用.

同时, Advanced Virgo 也在为进入 O5 阶段进行准备, 目标是将干涉仪探测范围提升至 O3 阶段的 3 倍. 为实现这一目标, 升级重点聚焦于引入稳定的功率循环腔和信号循环腔, 并降低限制探测器中频段应变灵敏度的热噪声. 由于稳定腔的引入, 探测器中心区域的布局需要重新规划, 包括增加新的真空罐、设计新的悬挂系统以及将现有系统与新的功率循环腔和信号循环腔进行匹配. 此外, 升级还将优化镀膜材料和工艺以减少热噪声的来源^[94].

5 KAGRA

KAGRA 项目是日本主导的第二代地基引力波探测器, 探测器位于日本神冈天文台的山洞中, 其臂长为 3 km, 呈“L”形. KAGRA 的设计与第二代引力波探测器 Advanced LIGO 以及 Advanced Virgo 类似, 但在技术上有两个独特之处: 首先, KAGRA 位于山洞中, 能够有效地减轻地震震动噪声和引力梯度噪声; 其次, 其测试质量采用 23 kg 的蓝宝石材料, 并设计在低温 (约 20 K) 环境下运行, 以显著降低热噪声. 由于采用低温运行, KAGRA 在 100 Hz 附近的灵敏度显著提升, 其技术特点与第三代引力波探测器概念相近, 因此被称为基于激光干涉测量的第 2.5 代引力波探测器. 本节介绍 KAGRA 探测器的主要技术特点以及升级过程. 图 11 是 KAGRA 在山洞中的示意图.

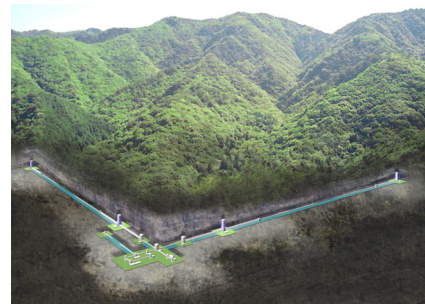


图 11 KAGRA 鸟瞰图^[95]

Fig. 11. Aerial view of KAGRA^[95].

5.1 KAGRA 原型机: TAMA300 与 CLIO

KAGRA 的设计基于日本早期的两个原型机: TAMA300 和 CLIO. 其中 TAMA300 位于东京三鹰, 臂长为 300 m, 1995 年开始建造, 并于 1998 年至 2008 年间运行, 其灵敏度达到了 $5 \times 10^{-21}/\sqrt{\text{Hz}}$. 2002 年, TAMA300 与 LIGO 联合参与了 S2 阶段的观测. 尽管受限于臂长, TAMA300 未能成功探测到引力波, 但其主要作为技术验证平台, 为公里级探测器的开发积累了宝贵经验, 特别是在功率循环腔和地表震动衰减系统方面的技术突破, 为 KAGRA 的设计和建造奠定了重要基础.

CLIO (cryogenic laser interferometer observatory) 于 2002 年建造于日本神户的地下, 其臂长为 100 m, 采用了低温技术, 测试质量使用蓝宝石材料并冷却至 20 K^[38]. 2005—2010 年间, CLIO 主要用于验证 KAGRA 的低温技术, 为后续低温干涉仪的设计和运行提供验证和技术支持.

KAGRA 的前身为 LCGT (large-scale cryogenic gravitational wave telescope) 项目, 该项目于 2010 年 6 月 22 日正式获批, 并于 2012 年 1 月更名为 KAGRA.

5.2 KAGRA 的发展

KAGRA 的技术特点包括: 首先, 探测器整体位于地下, 其测试质量放置于山洞中, 距山体表面 200 m, 这个选址降低了探测器的地表震动噪声和引力梯度噪声, 地表震动噪声比地表在 1—100 Hz 频段低 2 个数量级, 且山洞中的温湿度波动较低. 其次, KAGRA 使用低温技术, 测试质量的温度维持在约 20 K, 有助于降低探测器的热噪声. 由于采用低温技术, 其测试质量无法使用常温第二代探测器普遍使用的熔融石英, 因为熔融石英的热导率很低, 导致制冷效率低, 并且机械损耗随着温度降低而升高, 会极大地增加热弹性噪声. 低温探测器测试质量的材料目前主要有两种选择, 一是蓝宝石晶体 (约 20 K), 另一种是单晶硅 (约 120 K). KAGRA 使用蓝宝石晶体. 相对于单晶硅, 蓝宝石的最大好处是可以兼容当前探测器普遍使用的 1064 nm 波长的激光. 另外, 蓝宝石在 20 K 低温左右热导率极高, 且热膨胀系数几乎为零. 这意味着蓝宝石可以在很短的时间内达到制冷温度, 并且其本身几乎不会有高功率激光引起的热效应. 然而由于激光入

射到镜面会被吸收导致镜面升温, 热量需通过悬挂测试质量的悬挂丝传导至冷却系统, 但悬挂丝的直径只有约 50 μm , 导热能力有限, 因此注入激光的功率取决于蓝宝石镜面的吸收^[10]. 但蓝宝石属于单轴晶体, 具有双折射特性^[96], 会引入光学损耗并因为其波动会在臂腔反射光中产生额外的相位噪声, 降低探测器的灵敏度^[97].

KAGRA 项目于 2010 年获得审批, 2012 年开始挖掘隧道, 2019 年完成所有设备的安装. 项目分为两个阶段: 第一阶段称为初始阶段 (iKAGRA), 其配置为简单的迈克尔逊干涉仪, 由两个末端测试质量和一个分束器构成; 第二阶段为基线设计阶段 (baseline-design KAGRA, bKAGRA), 其干涉仪的两臂配备了低温法布里-珀罗光学谐振腔, 并增加了功率循环腔和信号循环腔^[10]. 这两个阶段的目标不同, iKAGRA 旨在集成基本子系统并实现探测器的初步运行, 而 bKAGRA 的建设重点在于实现探测器的长时间稳定运行, 以便能够持续地开展引力波信号的探测.

KAGRA 探测器在 2016 年 (iKAGRA 阶段) 使用常温反射镜进行测试, 2018 年 (bKAGRA 阶段-I) 使用低温反射镜进行了进一步测试. 2020 年 4 月, KAGRA 与 GEO600 探测器进行了名为 O3GK 的联合运行. 在这次联合运行中, KAGRA 探测器的 BNS 范围达到了 500 kpc. 2023 年 5 月 24 日, KAGRA 与 LIGO 开始了 O4 阶段的联合探测, 并于 2023 年 6 月 21 日停止观测, 计划升级后重新加入联合观测. 在 O4 阶段, KAGRA 的 BNS 探测范围提升至 1.3 Mpc, 工作周期达到了 80%, 相较于 O3GK 阶段的 53%, 有了显著提高. 这一灵敏度和运行周期的提升, 得益于 O4 前对 KAGRA 的一系列升级^[98].

1) 低温系统: 在先前的测试中, 冷却蓝宝石的测试质量时出现了结霜现象, 导致探测器的精细度下降. 为解决这一问题, 采取了多种措施, 首先, 将可接受的真空泄漏水平从 $10^{-9} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 降低到 $10^{-10} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$; 其次, 在每个低温冷却器中安装质量分析仪用于实时监测 N_2 , O_2 和 H_2O ; 同时建立了多步骤的冷却程序以减少结霜现象; 此外, 为了在紧急情况下将镜子快速加热到室温, 在中间质量处安装了加热器以提升加热速度.

2) 高功率激光源: 在前级稳定激光室安装了一台新型高功率激光器, 最大功率达到 60 W. 通过

这一高功率激光器, 成功实现了输入清模器的锁定, 显著改善了激光强度稳定系统, 最终将相对强度噪声降低到 10^{-8} 的水平, 满足了 O4b 观测阶段的运行要求。

3) 准直传感与控制系统: 在本次升级中, 成功实现了包括波形传感和光束位置控制在内的准直传感与控制系统. 这些改进有效增强了腔内功率及其稳定性, 从而使得探测器能够注入更高功率的激光, 进一步有效降低了散粒噪声。

4) 悬挂与隔振系统: 在 KAGRA 的悬挂与隔振系统中, 针对不同光学元件对灵敏度的影响, 采用了四种不同类型的悬挂结构, 如图 12 所示. 在 O3GK 的观测后, 针对悬挂系统进行了详细的检查和故障排除. 此外, 由于低温下滤波器可能出现温度变化而导致性能不稳定. 因此, 安装了带式加热器并引入了温度控制系统, 从而稳定了几何反向弹簧滤波器的性能。

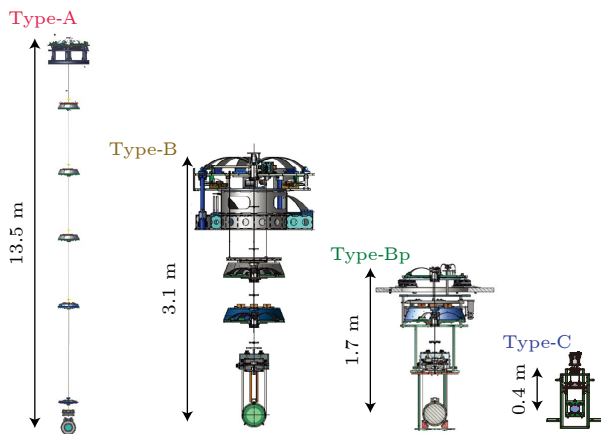


图 12 KAGRA 悬挂系统的示意图 [99]

Fig. 12. Schematic diagram of KAGRA suspension system.

KAGRA 参与了 O4a 的第一个月观测, 并在 O4b 的最后几个月加入. 根据最新的数据, KAGRA 的 BNS 探测范围已提升至 6.7 Mpc^[100]. 未来十年, KAGRA 还将采取一系列升级措施. 在低频范围 (<30 Hz), 将改进主动隔振控制与锁定方案, 减少低频振动引入的控制噪声; 在中频段 (30—300 Hz), 为减少热噪声将采用低损耗的镜面涂层; 而在高频范围 (>300 Hz), 针对主要的量子噪声, 将采取增加激光输出功率以及采用与频率有关的光场压缩技术; 文献 [101] 比较了多种升级方案, 并指出聚焦 200 Hz 以上的高频升级方案提供了技术可行性和科学回报之间的最佳平衡。

虽然 KAGRA 在实际运行中尚未达到设计指标, 但在低温技术以及地下运行方案上的探索, 为后续地基引力波探测器的发展提供了宝贵的经验. 为了进一步理解地基引力波探测器在技术升级中的关键问题与挑战, 下面将对 LIGO, Virgo 和 KAGRA 在技术路线与实际运行表现等方面进行简要对比与总结。

6 地基激光干涉引力波探测器的技术路线比较与经验总结

LIGO, Virgo 与 KAGRA 探测器虽均采用激光干涉原理, 但在具体的技术实现与工程设计上存在些许差异。

三大地基引力波探测器中, LIGO 启动较早, 并最早进入稳定运行阶段. 通过持续提升出射激光功率与稳定性、优化悬挂与隔振系统及控制光学损耗等多个关键环节, LIGO 实现了系统性能的整体优化, 构建了一套完备且成熟的工程系统. 因此, LIGO 在运行中整体灵敏度较高, 基本达到目标灵敏度. Virgo 在整体设计构型上与 LIGO 相似, 但在隔振系统中采用了独特的五级超级衰减器. 因此, 在低频段具有更好的隔振性能. 然而, 在实际运行过程中, 功率循环腔临近不稳定条件的设计、五级悬挂系统控制难度较大以及镜面尺寸及镀膜性能的限制使得 Virgo 整体灵敏度与目标灵敏度仍存在一定差距. KAGRA 是首个建造在地下并使用了低温技术的公里级引力波探测器, 并采用了蓝宝石作为测试质量材料, 使其在理论上能有效降低热噪声和引力梯度噪声. 但在实际运行中, 其灵敏度仍受蓝宝石的双折射效应、低温系统不稳定以及镜面镀膜限制等多方面因素的限制, 尚未达到目标灵敏度. 图 13 为不同观测阶段经过升级与改造后各探测器双中子星探测范围的提升。

综上, 实现高灵敏度的引力波探测需要把握整体系统的协同作用. 在引入新技术时, 可能会产生一些非理想效应或引入额外噪声. 各探测器在设计灵敏度与实际灵敏度之间的差距, 反映出探测器系统复杂度高、调试周期长及不可控因素多等挑战. 未来探测器在设计与后续升级阶段, 应参考三大地基探测器在发展中遇到的技术问题及经验, 注重系统整体的协同优化与长期稳定性, 以达到更优探测灵敏度。

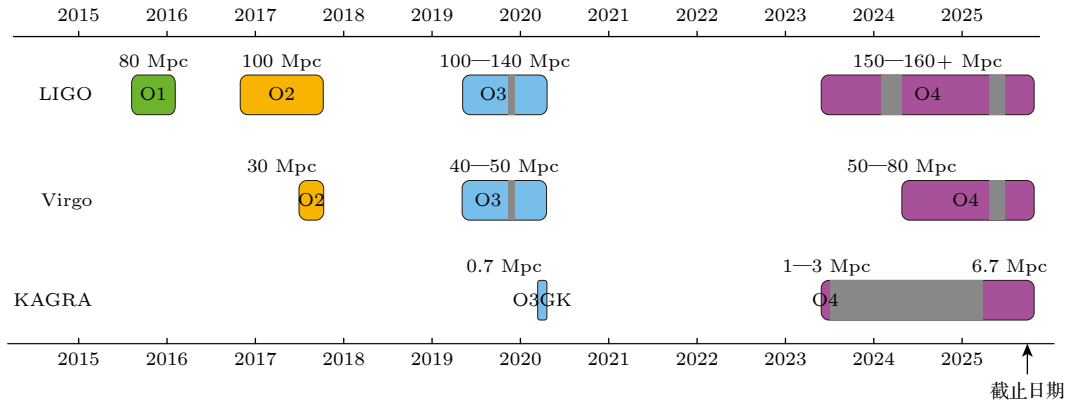


图 13 各观测阶段不同引力波探测器的 BNS 范围

Fig. 13. BNS range of different gravitational wave detectors in various observing runs.

当前, 以 Advanced LIGO, Advanced Virgo 和 KAGRA 为代表的第二代地基引力波探测器已逐步逼近理论灵敏度极限. 受限于现有技术框架下的热噪声和量子噪声, 这些探测器的性能提升空间日趋受限. 为突破这一技术瓶颈, 实现更远距离、更高精度的引力波探测, 全球引力波天文界正积极推进第三代探测器的研发工作. 下一代探测器相较于第二代探测器有显著的不同, 预计探测灵敏度将大幅提升. 下文将重点论述第三代探测器的规划方案及其核心技术突破.

7 下一代探测器未来展望与技术革新

在接下来的几年中, Advanced LIGO 将进行一系列升级, 这一阶段被称为 A+ 和 A#. A+ 和 A# 阶段的主要升级目标是通过压缩光技术降低探测器的量子噪声, 并在一定程度上减少镜面镀膜噪声^[102]. 目前, 第二代探测器将在几年内接近热噪声和量子噪声极限. 为了进一步扩展探测范围, 探测更远距离的引力波事件, 第三代引力波探测器正在筹建中.

7.1 LIGO Voyager

经过两个升级阶段 A+ 和 A# 后, Advanced LIGO 作为第二代地基引力波探测器, 性能将达到极限. 为进一步突破限制, LIGO 团队提出了 Voyager 这一项目. LIGO Voyager 是 Advanced LIGO 向下一代探测器宇宙探索者 (cosmic explorer) 过渡的关键项目, 基于现有 LIGO 基地进行建设. 在保留 Advanced LIGO 基本结构的基础上

进行了多项技术升级, 包括引入低温技术、采用硅制测试质量以及使用波长为 2050 nm 的激光系统, 旨在将探测器的宽带灵敏度进一步提升, 为下一代引力波探测器的核心技术进行验证. LIGO Voyager 整体干涉仪结构与 Advanced LIGO 一致, 但在其基础上做了若干关键升级.

1) 光学元件: 在 Advanced LIGO 中, 存储在臂腔中的光功率受到熔融石英测试质量因热引起的波前畸变的限制, 进而影响了量子噪声的抑制效果. 因此, LIGO Voyager 计划将测试质量的温度降低到 123 K 以降低热噪声. 在低温下, 熔融石英机械损失变高, 因此将改用硅制、重量为 200 kg 的测试质量. 硅材料在 123 K 处热弹性系数为 0, 有助于降低热弹性噪声^[103].

2) 激光器: 由于硅材料在短波长下的光学吸收较为显著, LIGO Voyager 探测器中预计使用波长为 2050 nm、功率为 300—700 W 的激光. 较长波长的激光不仅可以减少测试质量表面的光学吸收, 还能有效降低镜面上的光学散射, 同时支持更高精细度的臂腔设计^[104].

3) 隔振与悬挂系统: 沿用了 Advanced LIGO 的四级悬挂系统, 以实现测试质量的高效隔振与稳定支撑. 在此基础上, 根据升级后更重、运行温度更低的测试质量特性, 对悬挂系统结构进行了相应优化. 悬挂系统的上两级悬挂仍采用常温金属丝进行悬挂, 而下两级悬挂由于测试质量温度的降低以及测试质量变为硅制, 将采用低损耗的硅制悬挂丝, 以降低热噪声并保持稳定性^[105]. 此外, 设计了地震计阵列, 实时监测地表震动并进行实时噪声抑制, 以减少地震引起的牛顿引力噪声对引力波探测

的干扰.

7.2 宇宙探索者 (cosmic explorer, CE)

宇宙探索者是一个位于美国的新型地基激光干涉引力波探测器的提案, 其采用与 Advanced LIGO 相同的双循环法布里-珀罗腔迈克尔逊干涉仪设计, 项目计划建造两个臂长分别为 40 和 20 km 的探测器, 目标灵敏度为在音频频段内实现 $10^{-25}/\sqrt{\text{Hz}}$ [106]. CE 的建造将扩展 Advanced LIGO 的先进技术 [107], 预计在 2035 至 2040 年之间开始运行.

由于地球表面是球状的, 且 CE 的臂长达到 40 km, 干涉仪臂腔中心和末端之间存在约 30 m 的高度差. 为了平坦坡度, 计划将土壤沿臂的长度重新分布, 以弥补高度差. CE 设计的臂腔内循环光功率达到 1.5 MW, 每个臂每次光束往返的损耗控制在 4×10^{-5} [108]. 为缓解由于激光功率提升带来的量子辐射压噪声, CE 阶段计划使用约 320 kg 的熔融石英作为测试质量材料, 并将光场压缩目标提升至 10 dB. 下一代引力波探测器将采用全球协作模式, CE 的技术方案仍可能根据爱因斯坦望远镜 (ET) 项目进展进行相应调整与优化.

7.3 爱因斯坦望远镜 (Einstein telescope, ET)

爱因斯坦望远镜是由欧洲引力天文台提议的第三代引力波探测器, 计划覆盖 3 Hz 至数千 Hz 的宽频率范围. 为了有效抑制引力梯度噪声和地表震动噪声, ET 预计建造在地下 200—300 m 深处, 设计臂长为 10 km. 测试质量的工作温度将降低到 10—20 K, 以降低热噪声的影响. 根据当前规划, ET 预计在 2028 年开始建设, 并于 2035 年正式开始观测运行 [109].

不同于其他 L 形探测器, ET 预计将采用等边三角形结构, 从而对引力波的两偏振都具有敏感性. 探测器由三个嵌套探测器构成, 每个探测器内设有两个干涉仪, 分别探测低频和高频部分. 专门用于探测高频 (30 Hz 到几千 Hz) 的探测器在室温下运行, 测试质量采用直径约 60 cm, 质量约为 200 kg 的熔融石英镜. 该部分的臂腔功率预计为 3 MW. 而用于探测低频 (3—30 Hz) 的干涉仪在低温 (10—20 K) 下运行. 此部分测试质量采用硅材料, 镜面直径为 45 cm, 重量为 200 kg. 由于硅在

1064 nm 的激光下不透明, 因此需要将激光波长增加到 1550 nm. 为了降低量子噪声, 预计压缩源处的初始压缩水平为 15 dB, 最终有效压缩水平预计为 10 dB [110]. 图 14 比较了第二代与第三代地基引力波探测器的灵敏度.

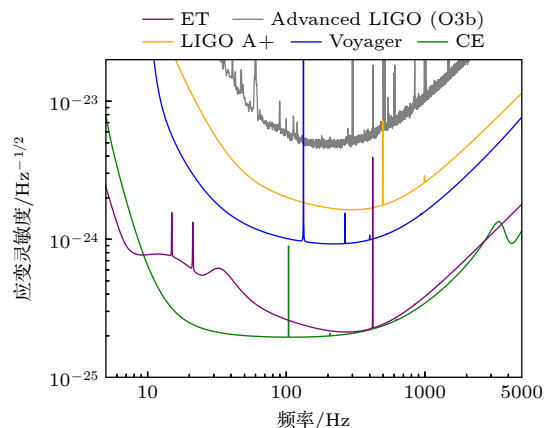


图 14 第二代与第三代引力波探测器应变灵敏度对比. 数据来源: <https://git.ligo.org/gwinc/pygwinc>, <https://www.et-gw.eu/index.php/etsensitivities>

Fig. 14. Comparison of sensitivity curves for second and third generation gravitational wave detectors. Data sources: <https://git.ligo.org/gwinc/pygwinc>, <https://www.et-gw.eu/index.php/etsensitivities>.

8 总结

激光干涉引力波探测器的发展是当代物理学与天文学研究的前沿, 引力波的首次探测不仅验证了爱因斯坦广义相对论的预言, 更开辟了多信使天文学的新时代. 本文系统回顾了全球主要地基激光干涉引力波探测器——LIGO, Virgo 和 KAGRA 的关键技术改进和升级历程, 重点分析了探测器的激光增强、量子噪声抑制、隔振与悬挂系统等核心技术的改进. 通过对比不同阶段探测器的性能参数, 解释了探测器灵敏度提升背后的物理.

从第一代探测器的概念验证到如今 Advanced LIGO, Advanced Virgo 以及 KAGRA 的成功运行, 每一次技术升级都显著提升了探测器的灵敏度、稳定性和探测范围. LIGO 主要通过激光系统的升级、光学系统的优化、升级悬挂与隔振系统与量子噪声的抑制等措施提升了探测灵敏度; Virgo 拥有独特的超级衰减器系统, 在低频段表现出独特的优势; KAGRA 则通过地下选址与低温技术, 为未来探测器提供了新的技术可能. 随着全球引力波探测网络 (international gravitational-wave obser-

vatory network; IGWN) 的持续扩展, 探测器之间的协同观测效率将进一步提高, 实现对引力波源的精确定位。

通过本文分析可以看出, 地基引力波探测器的升级不仅是对单一技术指标的提升, 更是多子系统集成优化的系统工程。探测器在高频段主要受到散粒噪声的限制, 通常可通过提高激光功率以及注入压缩光进行抑制; 而在低频段, 则重点关注抑制地表震动与量子辐射压噪声的影响, 这通常通过优化悬挂与隔振系统和地下选址等方案实现。

展望未来, 第三代探测器的设计将聚焦于系统性的重构。爱因斯坦望远镜的三角形构型将实现对引力波偏振的完整测量; 宇宙探索者 40 km 的臂长设计可显著提升探测器的低频灵敏度; 而低温技术与新型镜面材料则有望显著缓解热噪声。预计下一代探测器将在灵敏度上实现 1—2 个数量级的提升, 并覆盖更广的频段。这些更长的干涉臂、新的探测器构型、低温技术的引进以及更先进的噪声抑制手段将使我们得以探测更遥远、更低频的引力波信号, 推动引力波天文学的蓬勃发展。

感谢于皓存博士和缪海兴教授对本文提出的修改意见。

附录A GEO600

GEO600 探测器的设计基于两个原型机的经验: 格拉斯哥大学的 10 m 干涉仪和位于慕尼黑马克斯-普朗克研究所的 30 m 干涉仪。GEO600 建造始于 1995 年, 由德国和英国合作在德国汉诺威建造。由于场地限制, 该干涉仪的臂长为 600 m。探测器包括光学系统和悬挂系统、真空系统、两个悬挂的三角清模器以及一个由干涉仪臂和功率循环腔组成的法布里-珀罗腔体等关键组件。GEO600 探测器于 2002 年 1 月与 LIGO 同步运行。最初, GEO600 为迈克尔逊干涉仪和功率循环腔体安装了自动准直系统, 该系统提高了探测器的灵敏度^[40]。该探测器包括以下关键组件系统。

1) 真空系统: GEO600 所有光路都处于真空系统中, 采用两根 600 m 长、直径 60 mm 的真空管悬挂在地下沟槽中。为了减少管道的重量和成本, GEO600 采用了一种新型的波纹管道设计, 使得不锈钢真空管壁厚仅有 0.8 mm。管内还装有光吸收板, 防止管壁反射杂散光。真空室的压力维持在 10^{-8} mbar (1 mbar=100 Pa)。

2) 镜面悬挂和隔振系统: GEO600 探测器除了激光系统和光电探测器之外的其他光学元件都被悬挂在真空系统中。GEO600 采用了两种不同的镜面悬挂和隔振系统, 由于

清模器对隔振的要求更低, 因此清模器的隔振系统采用结构更简单、成本更低的悬挂双摆结构。而主干涉仪悬挂系统中的测试质量、分束器、迈克尔逊干涉仪以及其他反射镜对隔振精度有更高的需求, 因此采用更为复杂的三级摆结构。为了进一步降低机械噪声以降低镜面和摆的内部热噪声, GEO600 的最低摆级采用熔融石英材料, 因为熔融石英拥有较高的品质因数 Q , 能量损失较少, 可以有效地降低热噪声。

3) 激光系统: GEO600 采用注入锁定的激光二极管泵浦 Nd:YAG 系统, 主激光器采用非平面环形振荡器, 输出功率为 0.8 W。主激光器产生的激光输出功率为 12 W, 输出的激光被注射到更大的从属激光器。从属激光器由一个四腔镜构成, 使用两根 Nd:YAG 晶体棒作为增益介质。为了确定偏振方向、减少偏振损耗并补偿从激光腔曲面镜引入的像散, 激光腔内加入了两块布儒斯特片。由于采用了模式选择性泵浦方案, GEO600 的激光器发出的光中有超过 95% 处于基模 TEM_{00} 模式。激光进入真空系统后, 会通过两个三角形谐振腔 (清模器) 以去除高阶模态。因为 GEO600 采用双循环干涉仪, 即在传统的迈克尔逊干涉仪上增加了两个反射镜——功率循环腔和信号循环腔, 而初代 LIGO 并没有采用双循环系统, 所以为了配合双循环干涉仪结构, GEO600 采用了两个清模器, 可以最大限度地减少噪声以及防止模式干扰。两个清模器的光路往返长度分别为 8.0 和 8.1 m, 激光束在进入第一个清模器之前, 施加了射频相位调制边带。在清模器和功率循环腔之间安有一个法拉第隔离器以获取功率循环腔的反射光。

4) 干涉仪配置: 主干涉仪的设计为双循环折叠臂迈克尔逊干涉仪, 使得干涉仪臂的长度增加到了 2400 m。由于功率循环腔的存在, GEO600 预计的累积功率可以达到 2000 倍, 在干涉仪内累积约 10 kW 的功率。同时, GEO600 还配备有信号循环腔, 在干涉仪输出端增加一个部分透射的镜子, 将部分探测到的信号光返回干涉仪形成信号循环腔。这样使得特定傅里叶频率信号的光功率会被增强, 这种效应降低了探测器在这些傅里叶频率下等效的散粒噪声。这种情况下, 散粒噪声的曲线会出现一个下沉点, 且下沉点的中心频率可以通过信号循环腔的位置改变, 下沉点的带宽由信号循环腔的反射率改变^[35]。

5) 压缩光的注入: 自 2010 年起, 600 m 长的 GEO600 探测器就开始采用压缩真空态光场技术, 在 700 Hz 及以上频率下实现了更高的灵敏度。

由于以其目前的灵敏度, GEO600 探测器很难探测到引力波信号, 因此, 后期 GEO600 探测器作为观测运行计划外的探测器运行, 重点关注几千赫兹高频窄带的灵敏度。同时 GEO600 探测器将继续进行失谐信号循环和压缩光的调试与研究^[11]。

参考文献

- [1] Einstein A 1915 *Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss. Berlin (Math. Phys.)* **831** 1915
- [2] Danzmann K, Team LISA 1996 *Class. Quantum Grav.* **13** A247
- [3] Luo J, Chen L S, Duan H Z, Gong Y G, Hu S, Ji J, Liu Q, Mei J, Milyukov V, Sazhin M, et al. 2016 *Class. Quantum Grav.* **33** 035010
- [4] Luo Z, Guo Z, Jin G, Wu Y, Hu W 2020 *Results Phys.* **16** 102918
- [5] Weber J 1969 *Phys. Rev. Lett.* **22** 1320
- [6] Whitcomb S E 2008 *Class. Quantum Grav.* **25** 114013
- [7] Chen C M, Nester J M, Ni W T 2017 *Chin. J. Phys.* **55** 142
- [8] Sigg D, for the LIGO Science Collaboration, et al. 2006 *Class. Quantum Grav.* **23** S51
- [9] Acernese F, Amico P, Arnaud N, et al. 2003 *Class. Quantum Grav.* **20** S609
- [10] Somiya K, KAGRA Collaboration, et al. 2012 *Class. Quantum Grav.* **29** 124007
- [11] Saulson P R 1994 *Fundamentals of Interferometric Gravitational Wave Detectors* (Singapore: World Scientific) pp12–14
- [12] Harms J, Chen Y, Chelkowski S, Franzen A, Vahlbruch H, Danzmann K, Schnabel R 2003 *Phys. Rev. D* **68** 042001
- [13] Harms J, Venkateswara K 2016 *Class. Quantum Grav.* **33** 234001
- [14] Trozzo L, Badaracco F 2022 *Galaxies* **10** 20
- [15] Harms J, Slagmolen B J, Adhikari R X, Miller M C, Evans M, Chen Y, Müller H, Ando M 2013 *Phys. Rev. D* **88** 122003
- [16] Driggers J C, Harms J, Adhikari R X 2012 *Phys. Rev. D* **86** 102001
- [17] Creighton J D, Anderson W G 2012 *Gravitational-Wave Physics and Astronomy: An Introduction to Theory, Experiment and Data Analysis* (Berlin: John Wiley & Sons) pp151–153
- [18] M C 1981 *Phys. Rev. D* **23** 1693
- [19] Ganapathy D, Jia W, Nakano M, et al. 2023 *Phys. Rev. X* **13** 041021
- [20] LIGO Scientific Collaboration 2011 *Nat. Phys.* **7** 962
- [21] Yu H, McCuller L, Tse M, Kijbunchoo N, Barsotti L, Mavalvala N 2020 *Nature* **583** 43
- [22] Shapiro B, Adhikari R X, Aguiar O, et al. 2017 *Cryogenics* **81** 83
- [23] Saulson P R 1990 *Phys. Rev. D* **42** 2437
- [24] Hammond G, Cumming A, Hough J, Kumar R, Tokmakov K, Reid S, Rowan S 2012 *Class. Quantum Grav.* **29** 124009
- [25] Cumming A, Bell A, Barsotti L, et al. 2012 *Class. Quantum Grav.* **29** 035003
- [26] Harry G M, Gretarsson A M, Saulson P R, et al. 2002 *Class. Quantum Grav.* **19** 897
- [27] Hong T, Yang H, Gustafson E K, Adhikari R X, Chen Y 2013 *Phys. Rev. D* **87** 082001
- [28] Cole G D, Zhang W, Martin M J, Ye J, Aspelmeyer M 2013 *Nat. Photonics* **7** 644
- [29] Kondratiev N, Gurovsky A, Gorodetsky M 2011 *Phys. Rev. D* **84** 022001
- [30] Zhou R, Molina-Ruiz M, Hellman F 2023 *Class. Quantum Grav.* **40** 144001
- [31] Michael E Z, Stanley E W 1996 *Proceedings of the Seventh Marcel Grossman Meeting on Recent Developments in Theoretical and Experimental General Relativity, Gravitation, and Relativistic Field Theories* (Berlin: Springer-Verlag) p1434
- [32] Aasi J, Abbott B, Abbott R, et al. 2015 *Class. Quantum Grav.* **32** 074001
- [33] Abramovici A, Althouse W E, Drever R W, et al. 1992 *Science* **256** 325
- [34] Accadia T, Acernese F, Antonucci F, et al. 2011 *Class. Quantum Grav.* **28** 114002
- [35] Willke B, Aufmuth P, Aulbert C, et al. 2002 *Class. Quantum Grav.* **19** 1377
- [36] Takahashi R, collaboration T, et al. 2004 *Class. Quantum Grav.* **21** S403
- [37] Acernese F, Agathos M, Agatsuma K, Aisa D, Allemandou N, Allocca A, Amarni J, Astone P, Balestri G, Ballardin G, et al. 2014 *Class. Quantum Grav.* **32** 024001
- [38] KAGRA Collaboration 2019 *Nat. Astron.* **3** 35
- [39] LIGO Scientific Collaboration 2024 <https://www.ligo.caltech.edu>[2025-06-23]
- [40] Abbott B, Abbott R, Adhikari R, et al. 2004 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.* **517** 154
- [41] Adhikari R X, González G, Landry M, O'Reilly B 2003 *Class. Quantum Grav.* **20**
- [42] Abbott B, Abbott R, Adhikari R, et al. 2005 *Phys. Rev. D* **72** 062001
- [43] Aasi J, Abadie J, Abbott B, et al. 2015 *Class. Quantum Grav.* **32** 115012
- [44] Ballmer S, Frolov V, Lawrence R, et al. 2005 *LIGO-Document: LIGO-T050064-00-R*
- [45] Fritschel P, Bork R, González G, Mavalvala N, Ouimette D, Rong H, Sigg D, Zucker M 2001 *Appl. Opt.* **40** 4988
- [46] Fricke T T, Smith-Lefebvre N D, Abbott R, et al. 2012 *Class. Quantum Grav.* **29** 065005
- [47] Driggers J, Frolov V, Atkinson D, Miao H, Landry M, Adhikari R, DeRosa R 2010 *LIGO-Document: LIGO-P1000088*
- [48] Schofield 2010 *LIGO-Document: LIGO-G1000923*
- [49] Smith N D 2012 *Techniques for Improving the Readout Sensitivity of Gravitational Wave Antennae Ph.d. dissertation* (Cambridge: Massachusetts Institute of Technology)
- [50] Abbott B P, Abbott R, Abbott T, et al. 2016 *Phys. Rev. Lett.* **116** 061102
- [51] Somiya K, Chen Y, Kawamura S, Mio N 2006 *Phys. Rev. D* **73** 122005
- [52] Kwee P, Bogan C, Danzmann K, et al. 2012 *Opt. Express* **20** 10617
- [53] P F 2003 *Gravitational-Wave Detection* **4856** 282 (SPIE)
- [54] Gretarsson A M, Harry G M, Penn S D, Saulson P R, Startin W J, Rowan S, Cagnoli G, Hough J 2000 *Phys. Lett. A* **270** 108
- [55] Matichard F, Lantz B, Mittleman R, et al. 2015 *Class. Quantum Grav.* **32** 185003
- [56] De Rosa R, Garufi F, Milano L, Mosca S, Persichetti G 2010 *J. Phys. Conf. Ser.* **228** (IOP Publishing) 012018
- [57] Martynov D V, Hall E, Abbott B, et al. 2016 *Phys. Rev. D* **93** 112004
- [58] Evans M, Gras S, Fritschel P, et al. 2015 *Phys. Rev. Lett.* **114** 161102
- [59] Braginsky V B, Strigin S E, Vyatchanin S P 2002 *Phys. Lett. A* **305** 111
- [60] Abbott B, Abbott R, Abbott T, et al. 2016 *Class. Quantum Grav.* **33** 134001
- [61] Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. 2017 *Phys. Rev. D* **96** 062002

- [62] Abbott B P, Abbott R, Abbott T, et al. 2019 *Phys. Rev. X* **9** 031040
- [63] Davis D, Massinger T, Lundgren A, Driggers J C, Urban A L, Nuttall L 2019 *Class. Quantum Grav.* **36** 055011
- [64] Abbott B P, Abbott R, Abbott T, et al. 2017 *Phys. Rev. Lett.* **119** 161101
- [65] Biscans S, Gras S, Blair C, Driggers J, Evans M, Fritschel P, Hardwick T, Mansell G 2019 *Phys. Rev. D* **100** 122003
- [66] Mow-Lowry C M, Martynov D 2019 *Class. Quantum Grav.* **36** 245006
- [67] Aasi J, Abadie J, Abbott B, et al. 2013 *Nat. Photonics* **7** 613
- [68] Zhao Y, Aritomi N, Capocasa E, et al. 2020 *Phys. Rev. Lett.* **124** 171101
- [69] Dwyer S E 2013 *Quantum Noise Reduction Using Squeezed States in LIGO Ph.D. Dissertation* (Cambridge: Massachusetts Institute of Technology)
- [70] Billingsley G, Yamamoto H, Zhang L 2017 *ASPE* **66** 78
- [71] Brooks A F, Vajente G, Yamamoto H, et al. 2021 *Appl. Opt.* **60** 4047
- [72] Abbott R, Abbott T, Abraham S, et al. 2021 *Phys. Rev. X* **11** 021053
- [73] Dolesi R, Hueller M, Nicolodi D, et al. 2011 *Phys. Rev. D* **84** 063007
- [74] Mitrofanov V, Prokhorov L, Tokmakov K, Willems P 2004 *Class. Quantum Grav.* **21** S1083
- [75] Abbott R, Abbott T, Acernese F, et al. 2023 *Phys. Rev. X* **13** 041039
- [76] Capote E, Jia W, Aritomi N, et al. 2025 *Phys. Rev. D* **111** 062002
- [77] Buikema A, Cahillane C, Mansell G, et al. 2020 *Phys. Rev. D* **102** 062003
- [78] Soni S, Berger B, Davis D, et al. 2025 *Class. Quantum Grav.* **42** 085016
- [79] Jia W, Xu V, Kuns K, et al. 2024 *Science* **385** 1318
- [80] Collaboration L S 2022 *LIGO-Document: LIGO-T2200287-v2*
- [81] Abbott B, Abbott R, Adhikari R, et al. 2009 *Rep. Prog. Phys.* **72** 076901
- [82] Virgo Collaboration 2024 <https://www.virgo-gw.eu>[2025-06-23]
- [83] Acernese F, Alshourbagy M, Amico P, et al. 2008 *Class. Quantum Grav.* **25** 184001
- [84] Accadia T, Swinkels B, for the VIRGO Collaboration, et al. 2010 *Class. Quantum Grav.* **27** 084002
- [85] Braccini S, Barsotti L, Bradaschia C, et al. 2005 *Astropart. Phys.* **23** 557
- [86] Lorenzini M, on behalf of the Virgo Collaboration, et al. 2010 *Class. Quantum Grav.* **27** 084021
- [87] Bersanetti D, Patricelli B, Piccinni O J, Piergiovanni F, Salemi F, Sequino V 2021 *Universe* **7** 322
- [88] Di Pace S, Collaboration V, et al. 2021 *Phys. Scr.* **96** 124054
- [89] Naticchioni L, Collaboration V, et al. 2018 *J. Phys. Conf. Ser.* **957** (IOP Publishing) 012002
- [90] Rocchi A, Coccia E, Fafone V, Malvezzi V, Minenkov Y, Sperandio L 2012 *J. Phys. Conf. Ser.* **363** (IOP Publishing) 012016
- [91] De Rossi C, Brooks J, Casanueva Diaz J, Chiummo A, Genin E, Gosselin M, Leroy N, Mantovani M, Montanari B, Nocera F, Pillant G 2020 *Galaxies* **8** 87
- [92] Collette C, Boudart V, Cudell J R, et al. 2023 *Yes* (Institute of Physics)
- [93] Garufi F 2024 *Ground-based and Airborne Telescopes X* **13094** 573
- [94] Acernese F, Agathos M, Ain A, et al. 2023 *J. Phys.: Conf. Ser.* **2429** (IOP Publishing) 012040
- [95] KAGRA Collaboration 2024 <https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp>[2025-06-23]
- [96] Wang H, Aso Y, Leonardi M, Eisenmann M, Hirose E, Billingsley G, Kokeyama K, Ushiba T, Tamaki M, Michimura Y 2024 *Phys. Rev. D* **110** 082007
- [97] Michimura Y, Wang H, Salces-Carcoba F, Wipf C, Brooks A, Arai K, Adhikari R X 2024 *Phys. Rev. D* **109** 022009
- [98] Y I, Collaboration K 2024 *38th International Cosmic Ray Conference* Nagoya, Japan, July 26 — August 3, 2023 p1555
- [99] Akiyama Y, Akutsu T, Ando M, et al. 2019 *Class. Quantum Grav.* **36** 095015
- [100] Abac A, Abbott R, Abouelfettouh I, et al. 2024 *arXiv: 2410.16565[astro-ph.HE]*
- [101] Akutsu T, Ando M, Aoumi M, et al. 2025 *arXiv: 2508.03392[astro-ph.HE]*
- [102] Adhikari R X, Arai K, Brooks A, et al. 2020 *Class. Quantum Grav.* **37** 165003
- [103] Adhikari R, Arai K, Brooks A, Salces-Carcoba F, Wipf C 2023 *LIGO-Document: LIGO-G1601461*
- [104] Team L V 2016 *LIGO-Document: LIGO-G1602258-v1*
- [105] Adhikari R X, Brooks A 2024 *LIGO-Document: LIGO-T1400226*
- [106] Hall E D 2022 *Galaxies* **10** 90
- [107] Reitze D, Adhikari R X, Ballmer S, et al. 2019 *arXiv: 1907.04833[astro-ph.IM]*
- [108] Evans M, Adhikari R X, Afle C, et al. 2021 *arXiv: 2109.09882[astro-ph.IM]*
- [109] Branchesi M, Maggiore M, Alonso D, et al. 2023 *JCAP* **2023** 068
- [110] Committee E S 2020 *ET-Document: Design Report Update 2020* Technical Report
- [111] Brown D D, Miao H, Collins C, Mow-Lowry C, Tyr D, Freise A 2017 *Phys. Rev. D* **96** 062003

INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT

Upgrades and improvements of ground-based laser interferometric gravitational wave detectors^{*}

HUANG Xiaoman¹⁾²⁾ LIU Jian³⁾ GUO Yuefan⁴⁾ MA Yiqiu⁵⁾ MA Yubo⁶⁾
 WANG Haoyu⁷⁾ WANG Mengyao^{1)†} WU Bin⁸⁾ YANG Sheng⁹⁾
 YOU Zhiqiang⁹⁾ ZHANG Fan¹⁾ ZHANG Teng¹⁰⁾
 ZHAO Yuhang¹¹⁾ ZHU Xingjiang^{2)‡}

1) (School of Physics and Astronomy, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

2) (Faculty of Arts and Sciences, Beijing Normal University, Zhuhai 519087, China)

3) (Department of Physics, The University of Western Australia, Perth WA 6009, Australia)

4) (Faculty of Science and Engineer, Maastricht University, Maastricht 6229 GT, Netherlands)

5) (School of Physics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

6) (School of Physics and Electronic Science, Shanxi Datong University, Datong 037009, China)

7) (School of Science, Institute of Science Tokyo, Tokyo 152-8551, Japan)

8) (Department of Physics, Syracuse University, Syracuse 13210, USA)

9) (Institute for Gravitational Wave Astronomy, Henan Academy of Sciences, Zhengzhou 450046, China)

10) (School of Physics and Astronomy, University of Birmingham, Birmingham B15 2TT, United Kingdom)

11) (Astroparticle and Cosmology Laboratory, Université Paris Cité, Paris 75013, France)

(Received 29 June 2025; revised manuscript received 11 August 2025)

Abstract

Gravitational wave astronomy has rapidly developed into a powerful means of probing compact objects and understanding the evolution of the Universe. In order to improve sensitivity and expand the detection band, ground-based laser interferometers such as LIGO, Virgo, and KAGRA are constantly upgraded. This review summarizes their systematic development with an emphasis on noise sources and mitigation strategies. After outlining the principle of gravitational wave detection with laser interferometry, we analyze dominant noise sources, including quantum vacuum fluctuations, thermal noise, and seismic disturbances, and introduce techniques such as frequency-dependent squeezed light, advanced seismic isolation, multi-stage suspensions, and cryogenic mirrors. For LIGO, we highlight the transition from the Initial to Advanced configurations, which results in strain sensitivities of the order of $10^{-24}/\sqrt{\text{Hz}}$ and leads directly to the first detection, GW150914, and over one hundred subsequent events during O1 to O4. The unique superattenuator system of Virgo and its recent implementation of squeezed light, as well as the underground design of KAGRA and the use of cryogenic sapphire test masses, represent different approaches to suppressing low-frequency and thermal noise. In addition, we compare the technical routes adopted by different detectors and summarize the lessons learned from their upgrades, thereby providing valuable guidance for designing future detectors. Finally, we present next-generation projects, including LIGO Voyager, the Cosmic Explorer, and the Einstein Telescope, which aim to increase sensitivity by up to orders of magnitude and provide new research opportunities for developing gravitational-wave cosmology and fundamental physics. Overall, the development of detector technologies has been a key driving force for advances in gravitational wave astronomy, and the forthcoming facilities will change our ability to explore the universe.

Keywords: gravitational wave, laser interferometer, ground-based gravitational wave detection, astrophysics

PACS: 04.30.-w, 04.80.Nn

DOI: 10.7498/aps.74.20250852

CSTR: 32037.14.aps.74.20250852

^{*} Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant Nos. 2024YFC2208000, 2023YFC2205800, 2023YFC2206704) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities, China.

[†] Corresponding author. E-mail: mengyao.wang@bnu.edu.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: zhuxj@bnu.edu.cn

地基激光干涉引力波探测器的升级与改造

黄小曼 刘见 郭越凡 马怡秋 马宇波 王浩宇 王梦瑶 吴斌 杨圣 尤志强 张帆 张腾 肇宇航 朱兴江

Upgrades and improvements of ground-based laser interferometric gravitational wave detectors

HUANG Xiaoman LIU Jian GUO Yuefan MA Yiqiu MA Yubo WANG Haoyu WANG Mengyao
WU Bin YANG Sheng YOU Zhiqiang ZHANG Fan ZHANG Teng ZHAO Yuhang ZHU Xingjiang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 200401 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250852

CSTR: 32037.14.aps.74.20250852

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250852>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

地基引力波探测激光干涉仪的真空残余气体噪声分析

Residual gas noises in vacuum of optical interferometer for ground-based gravitational wave detection

物理学报. 2024, 73(5): 050401 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231462>

面向第三代地基引力波探测的激光源需求分析

Laser parameters requirement for third-generation ground-based gravitational wave detection

物理学报. 2022, 71(16): 164203 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220552>

面向地基引力波探测频段的超低噪声激光强度噪声评估系统

Ultra-low-noise laser intensity noise evaluation system in Hz frequency band for ground-based gravitational wave detection

物理学报. 2025, 74(3): 034202 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241319>

面向空间引力波探测的激光强度噪声评估系统

Laser intensity noise evaluation system for space-based gravitational wave detection

物理学报. 2022, 71(20): 209501 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220841>

面向空间引力波探测的程控低噪声高精度电压基准源

Programmable precision voltage reference source for space-based gravitational wave detection

物理学报. 2023, 72(4): 049502 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222119>

面向空间引力波探测的毫赫兹频段低强度噪声单频激光器

Millihertz band low-intensity-noise single-frequency laser for space gravitational wave detection

物理学报. 2023, 72(5): 054205 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222127>