Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng

News & Focus

科学与工程学的胜利

Lance A. Davis

Senior Advisor, US National Academy of Engineering

2016年2月11日，激光干涉引力波天文台(LIGO)宣布，他们于2015年9月14日观测到十亿年前两个黑洞相互碰撞而产生的引力波。此项发现证实了爱因斯坦广义相对论中的预言，即时空扭曲波动会产生“涟漪”，也就是我们所说的引力波。当然，只有在发生超级能量事件时，比如两个中子星或两个黑洞相互碰撞，所产生的“涟漪”才大到可以被观测到。这次LIGO发现的引力波正是两个黑洞相互碰撞形成的，这同时也成为黑洞确实存在的第一个直接证据。此发现随后被《科学》[†]、《纽约时报》[‡]和《自然》[††]等多家媒体广泛报道。

爱因斯坦的理论发布于1915年，从那以后，引力波及其直接观测就一直是人们关注的话题。1974年，马萨诸塞大学阿默斯特分校的泰勒教授(Joseph Taylor)和他的学生赫尔斯(Russell Hulse)发现了引力波存在的间接证据。他们发现了一个由两颗质量大致与太阳相当的中子星组成的脉冲双星系统，其中一颗中子星是脉冲星。通过计算脉冲星的射电脉冲周期，他们发现这两个星体正在以非常缓慢的速度呈螺旋形环绕相互靠近。这验证了人们所期待的结果：当两个致密星体近距离彼此环绕时，会因辐射引力波造成系统能量减少，从而使轨道半径变短。泰勒和赫尔斯也因此获得了1993年的诺贝尔物理学奖。

但是，科学家们一直难以发现引力波存在的直接证据。不过这并不意外，因为根据理论计算，如果LIGO要探测到引力波，那么引力波振幅的探测精度就要达到10^{-21}。能达到这一测量精度本身就是工程学的一次伟大胜利。

这次LIGO的实验及观测台的构思、设计和推动建设是由加州理工学院的基普·索恩(Kip Thorne)教授和罗纳德·德雷弗(Ronald Drever)教授，以及麻省理工学院的雷纳·韦斯(Rainer Weiss)教授共同完成的。美国国家科学基金会自1972年起开始为项目提供资助，总共花费约11亿美元。两个引力波探测器中的一个位于美国路易斯安那州，另一个位于美国华盛顿州。每个探测器安装有两根臂长为4 km、直径为1.2 m的真空管道，形成激光干涉仪。然后将一束激光用分光镜分成相互垂直的两束，两束激光分别被4 km外的反射镜反射回来并发生干涉，这样的反射可以来回进行多次。在正常情况下，这两束激光的相位应该是完全相同的，因此在出口处的光速探测器检测不到信号；但是如果引力波通过了实验仪器，那么一个方向的空间便会被拉伸，而与之成一定角度的另一个方向的空间则会被压缩，出口处的光速探测器便能检测到信号。在这次观测中，信号的频率在35~250 Hz，而这个过程仅持续了0.25 s。这次实验的难得之处在于为了能检测到如此微弱的引力波的信号，实验仪器必须十分复杂和精密。

LIGO的主要元器件包括隔震系统、真空系统、光学系统、运算系统和数据收集系统等，均在LIGO网站[‡‡]上有简要介绍。

[†] http://science.sciencemag.org/content/351/6274/645

[‡] http://www.nytimes.com/2016/02/12/science/ligo-gravitational-waves-black-holes-einstein.html?emc=edit_th_20160212&nl=todaysheadlines&nlid=35255817

[††] http://www.nature.com/news/gravitational-waves-how-ligo-forged-the-path-to-victory-1.19382?WT.ec_id=NATURE-20160218&spMailingID=50720412&spUserID=MjA1NzU4MzExNwS2&spJobID=862152809&spReportId=ODYyMTUyODA5S0

[‡‡] https://www.ligo.caltech.edu/page/ligo-technology

2095-8099/© 2016 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

英文原文: Engineering 2016, 2(1): 2–3

引用本文: Lance A. Davis. A Triumph of Sciend—and Engineering. *Engineering*, http://dx.doi.org/10.1016/J.ENG.2016.01.001

每一部LIGO实验仪都非常灵敏，可以检测到从几百到几千英里距离外的震动。它们均采用主动系统(类似于消除噪音的耳机)和被动系统来消除噪声。将传感器调到特定的频率用来感应地震活动，感应到的信号被传到一个驱动器上并产生反向运动。镜子被悬挂在隔离驱动器上。被动系统包括一个四级悬臂系统，该系统用直径为0.4 mm的熔融石英光纤悬挂着重达40 kg的镜子(图1)。

LIGO真空系统是世界上第二大真空系统。它不仅可以防止由太阳光照射引起的镜子变形和气流对光束产生的影响，还可防止光束受到尘埃影响。经过40天的抽气，真空系统的压强达到10^{-12}标准大气压。

LIGO的光学系统由激光器、面镜和光电探测器组成。激光器是一个四级系统，第一级由激光二极管发出功率为4 W、波长为808 nm的激光。在第二级中，激光束进入到一个非平面环形振荡器中，激发出2 W、1064 nm的钕离子激光。在第三级，通过放大器，激光从2 W放大到35 W。在最后一级中，光束被大功率振荡器放大到200 W (1064 nm)并射入到干涉仪中。镜子由非常纯净的熔融石英制作而成，其理论尺寸和实际尺寸之间的误差精确到原子。这种精确十分重要，因为每一束光都要在镜子里来回反射，经过1600 km后重新会合。

LIGO系统的运行由电脑控制，电脑每天产生数太(TB)字节的信息，这些信息都要被储存在电脑里。加利福尼亚理工学院的存档已经有4.5拍字节(PB)的信息，并且每年的信息都会增加0.8 PB。为了分析2015年秋季LIGO的观测数据，还需要使用非常强大的计算机系统，其计算能力相当于现代的一台四核笔记本电脑运行1000年。

在爱因斯坦最初作预言的时代，科学家还没有办法对引力波进行直接测量。50多年后，随着光学、传感器、驱动器等技术水平的提升，索恩(Thorne)等预测了检测引力波的存在是可能的，而真正实现这个愿望是在工程科技水平又发展了50年后。因此，此次发现得益于历史上很多科学技术的重大突破，几乎贯通了整个材料、机械、激光、光学和计算机等重大技术的发展历程，包括

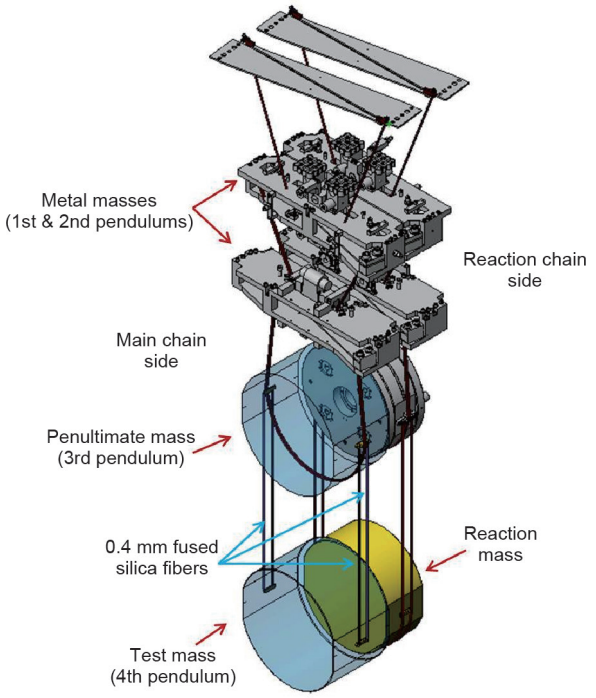

图1. 设备解剖图。（由加利福尼亚理工学院、麻省理工学院和激光干涉引力波天文台实验室提供。）

关键性技术突破，如激光的发明、固态激光材料的演化、集成电路的发明、难以置信的电脑芯片晶体管密度和数据存储密度的剧增以及更快速、更便宜的电脑的出现等。如果没有这些重大突破，测量仪器既不能被制造得如此精密，人类也承担不起建造的高昂费用。这其中的细节远不是一篇短文可以叙述的。举这些例子是为了让人们更深刻地意识到科学和工程技术进步的重要性，其重要性本身是不言而喻的。

本次专刊回顾了中国工程院、美国工程院和英国皇家工程院三方于2015年9月在北京联合主办的第二届全球重大挑战峰会的成果。2007年由美国国家工程院委员会宣布的人类面临的“14项重大挑战”中的一项是“制造设计用于重大科学发现的工具”。建造哈勃太空望远镜是一个较早的典型例子，还有火星探测器“漫步者”的发明，而LIGO引力波探测仪正是人类迎战挑战的最新的成功范例。