

# 来自宇宙的微弱声音

## ——2017年度诺贝尔物理学奖成果简析

郭宗宽, 黄庆国

中国科学院理论物理研究所, 北京 100190

**摘要** Rainer Weiss、Barry Clark Barish 和 Kip Stephen Thorne 3位美国科学家分享了2017年度诺贝尔物理学奖,以表彰他们对激光干涉引力波天文台(LIGO)决定性的贡献和观测引力波信号的更大发现,其中Weiss分享了1/2奖金,Barish和Thorne各分享了1/4奖金。本文介绍这3位诺贝尔物理学奖获得者的学术经历,从理论、实验和数据分析方面解读引力波信号被探测到这一重大发现的科学意义。

**关键词** 2017年度诺贝尔物理学奖;引力波;激光干涉引力波天文台;匹配滤波;数值相对论

2017年10月3日,瑞典诺贝尔委员会将2017年度诺贝尔物理学奖授予3位美国物理学家:Rainer Weiss、Barry Clark Barish 和 Kip Stephen Thorne(图1)<sup>[1]</sup>,以表彰他们为LIGO(Laser interferometer gravitational-wave observatory)探测器建设以及引力波探测所作出的贡献。3位获奖者中,Rainer Weiss最早提出了用激光干涉仪探测引力波并作噪声分析,为LIGO探测器建设和观测到引力波信号起到了决定性作用,Barry Clark Barish对建立LIGO作出了关键贡献,而Kip Stephen Thorne的贡献则在于引力波探测和LIGO的理论方面。

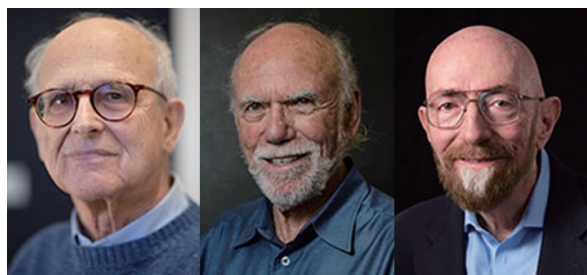


图1 2017年度诺贝尔物理学获奖者(从左至右分别为Rainer Weiss、Barry Clark Barish 和 Kip Stephen Thorne)

### 1 2017年度诺贝尔物理学奖获得者

Rainer Weiss,美国物理学家,1932年9月29日出生于德国柏林,分别于1955年和1962年获得麻省理工学院学士和博士学位。1960—1962年任教于塔夫兹大学,1962—1964年在普林斯顿大学从事博士后研究,1964年加入麻省理工学

院,并于1973—2001年担任麻省理工学院教授,目前为美国麻省理工学院荣誉教授。Weiss一直致力于引力物理和天体物理的研究,曾任宇宙背景探测器(cosmic background explorer, COBE)科学探测团队主席。他发明了引力波探测中的核心技术——激光干涉测量技术,对LIGO的设计、建造和项目立项起到关键作用。

Barry Clark Barish,美国物理学家,1936年1月27日出生于美国内布拉斯加州,1957年获得物理学学士学位,1962年于加州大学伯克利分校获博士学位,1963年加入加州理工学院,成为粒子物理国家实验室一员。此外他还于2005—2013年担任国际线性加速器总体设计的主任。目前任职于美国加州理工学院。1994年Barish成为LIGO合作组的项目负责人,并领导了LIGO项目得到国家自然科学基金资助,1997年成为实验室主任。他还领导了Livingston和Hanford两个引力波天文台的建设,以及建立了LIGO国际科学合作,最终使引力波探测成为可能。

Kip Stephen Thorne,美国物理学家,1940年6月1日出生于美国犹他州,1962年于加州理工学院获学士学位,1965年于普林斯顿大学获博士学位,1967年回到加州理工学院任副教授,1970年晋升为理论物理教授,成为加州理工学院最年轻的教授之一,目前任职于美国加州理工学院。Thorne主要研究相对论性天体物理和引力物理学,是LIGO项目立项的主要领导者之一。他发展了从数据中甄别和发现引力波信号的分析技术,为LIGO得以发现引力波和确定波源的物理特性奠定关键的理论基础。

收稿日期:2017-11-01;修回日期:2017-11-14

基金项目:国家自然科学基金重大项目(11690021)

作者简介:郭宗宽,研究员,研究方向为引力理论与宇宙学,电子信箱: guozk@itp.ac.cn;黄庆国(共同第一作者),研究员,研究方向为引力理论与宇宙学,电子信箱: huangqg@itp.ac.cn

引用格式:郭宗宽,黄庆国.来自宇宙的微弱声音——2017年度诺贝尔物理学奖成果简析[J].科技导报,2017,35(23):12-15;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2017.23.001

## 2 引力波

引力波是时空曲率像波一样以光速在时空中传播。1916年爱因斯坦基于他所提出的广义相对论预言引力波的存在<sup>[2]</sup>。宇宙中一类典型的引力波波源是两个相互环绕的致密天体。天体的质量越大,它们的间距越小,那么引力越强。同样地,越致密的两个天体相互环绕对方的时候越可以以更短的距离靠近对方,从而产生更强的引力波。

1974年,美国科学家 Hulse 和 Taylor 用引力波导致能量损耗的机理来解释所发现脉冲双星的轨道在不断减小,间接观测到了引力波,因此获得了1993年度诺贝尔物理学奖。自爱因斯坦提出引力波后,历经百年的不懈努力,LIGO 终于于2015年9月14日首次探测到距离地球约13亿光年的2个质量分别约为36和29倍太阳质量黑洞并合产生的引力波,并且引力波携带走约3倍太阳质量的能量<sup>[3]</sup>。这是人类首次证实存在恒星级双黑洞系统,也是人类首次直接探测到引力波。随后 LIGO 又探测到另外两次黑洞并合产生引力波事件<sup>[4-5]</sup>。特别是,2017年8月17日,LIGO 和位于欧洲的 Virgo 联合观测到两个中子星并合产生的引力波事件,这是人类第5次直接探测到引力波,这一事件同时被很多其他天文观测测量到并合产生的光学对应体<sup>[6]</sup>。

## 3 用激光干涉仪探测微弱的引力波信号

激光干涉引力波天文台(LIGO)项目在20世纪80年代由麻省理工学院和加州理工学院共同提出,得到美国国家科学基金会(NSF)的资金支持,开展 LIGO 的可行性研究。1994年,LIGO 获得 NSF 的3.95亿美元的长期资助,开始天文台建设,先后在华盛顿的汉福德(Hanford)和路易斯安那的利文斯顿(Livingston)建造3台臂长千米级别的干涉仪(即第一代陆基激光干涉引力波探测器)。到2002年,LIGO 开始进行引力波的搜索。随着激光探测技术的不断发展,2014年 LIGO 开始全面升级,升级后的激光干涉引力波天文台被命名为 Advanced LIGO(即第二代陆基激光干涉引力波探测器)。

2016年2月11日,美国国家科学基金会和欧洲引力天文台正式宣布,升级后的激光干涉引力波天文台于2015年9月14日第一次直接观测到了引力波(该事件被命名为 GW150914),验证了广义相对论在100年前引力波的预言<sup>[3]</sup>。Advanced LIGO 由2个相距3000 km的独立激光干涉仪组成,一个位于汉福德(臂长4 km),另一个位于利文斯顿(臂长4 km)。2016年2月17日,LIGO-India 项目得到批准,该项目计划将汉福德的臂长2 km的探测器搬到印度,在印度建立一个新的引力波探测器,有助于准确定位引力波波源的方向<sup>[7-8]</sup>。

用激光干涉仪探测引力波的原理非常简单,每个干涉仪由L型的2个臂组成,当引力波经过时,2个臂长差随时间发生细微变化,该细微变化反映在激光干涉条纹上。如图2所示,分光镜(beam splitter)将入射光分成互相垂直的两束,分别沿干涉仪的2个臂传播,被臂端的反射镜反射后,再回到分

光镜,进入光电探测器(photodetector)。当干涉仪两臂相等时,输出是相消干涉;当干涉仪的2个臂长差随引力波的周期和强度变化时,激光束的位相也将受到相应调制。

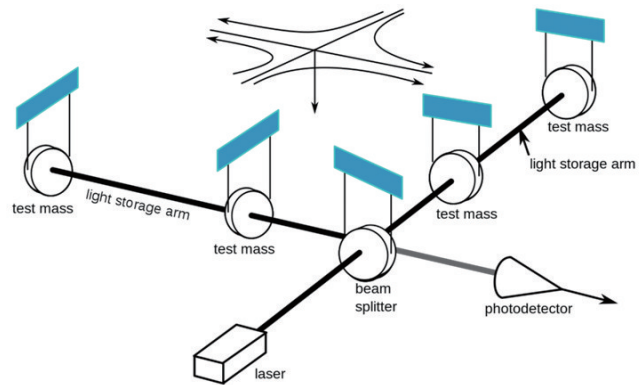


图2 激光干涉引力波探测器示意

但由于引力波信号非常微弱,实际的引力波探测要求复杂和精密的光学技术,因此经历了百余年科学技术的发展,才得以直接探测到。例如,升级后的 LIGO 观测到的 GW150914 引力波事件,应变(strain)大小为  $10^{-21}$ ,对于臂长为4 km的干涉仪,引起的臂长差为  $10^{-18}$  m,相当于原子核直径的万分之一。Advanced LIGO 采用了 FP(fry-perot)腔技术,干涉仪的每个臂用 FP 腔代替,光束在腔内被折叠了很多个来回,相当于增加了臂长,实现相位差的积累,从而增加引力波信号的探测灵敏度。另外,采用了相位锁定探测技术,去除激光强度波动噪声。引力波的可探测灵敏度与激光的功率成正比,但功率的增加又引起光学元件热形变、热透镜效应、模式畸变等不稳定性,特别是辐射压力噪声。

目前对干涉仪的噪声主要来自地面振动噪声、热噪声和量子噪声。前两者来自背景干扰,可以采用有效办法避免和补偿;而量子噪声是由量子涨落带来的不确定性。当干涉仪两臂相等时,输出相消干涉。但量子效应实际的光场并不为0,而是存在一个微小的量子涨落。当引力波经过时,这个微小的涨落会干扰引力波信号的探测。在高频段主要来自光场的相位涨落(称为散粒噪声),在低频段主要来自光场的振幅涨落在镜子上的随机辐射压力(辐射压力噪声)。由于未来引力波干涉仪的噪声将完全由量子噪声主导,因此超越标准量子极限是提高未来所有陆基引力波探测器灵敏度的最重要的问题。研究表明光压缩态技术,可数量级地提高干涉仪的可探测灵敏度。

## 4 从噪音中提取微弱的引力波信号

引力波数据分析是从观测数据中寻找引力波信号。引力波探测器测到的应变强度为  $10^{-19}$ (图3是在汉福德和利文斯顿上观测到的包含 GW150914 引力波信号的数据片段),而在探测器可观测频率范围内典型的双黑洞并合产生的引力

波信号为  $10^{-21}$ , 也就是说, 在时域上噪音完全淹没了信号。基于仪器噪音的统计性质和数值相对论的理论建模, 通过匹配滤波技术可以把埋在噪声下的引力波信号挖出来。匹配滤波方法首先搜集一段时域数据, 然后通过傅里叶变换将信号转换到频域, 在频域数据中找寻引力波信号。可以说, 人类首次引力波探测 GW150914 是实验技术进步和理论研究突破结合的产物<sup>[9]</sup>。

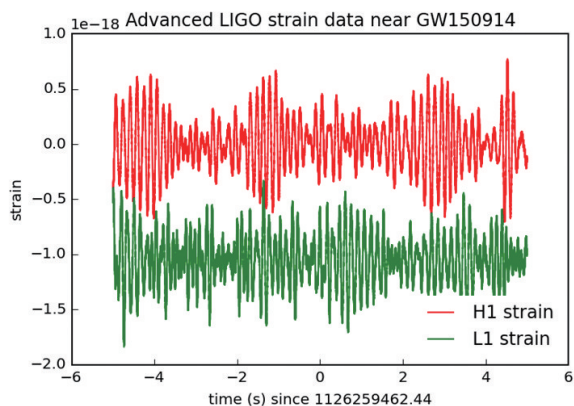


图3 汉福德(H1)和利文斯顿(L1)的观测数据

从各个引力波探测器传送过来的数据, 在进行匹配滤波之前, 首先要对数据进行预处理。除了干涉数据, 同时也记录了全球定位系统(GPS)时间、探测器的状态信息和环境条件, 如, 温度、气压、地震、声响、电场、磁场等, 多达几百个数据通道。预处理主要根据记录的辅助数据标识出由于仪器等原因不可使用的干涉数据, 得到片段的科学数据。匹配滤波就是要从这些科学数据中发现隐藏的引力波信号, 然后根据多个探测仪的结果对引力波的方位进行定位。

快速识别引力波信号具有十分重要的科学意义, 只有快速识别才可以向电磁望远镜发出预警, 及时探测致密双星并合事件产生的电磁信号, 从而对于全面了解引力波源所发生的天体物理过程。因此, 数据分析面临2方面的挑战: 1) 提高发现引力波信号的准确度, 既不能漏掉引力波信号, 也不能把噪声误报为信号。2) 提高发现引力波信号的速度, 必须在双星合并时甚至在双星合并之前给出可靠的引力波信号警示与精确的引力波方位, 从而为同时观测电磁对应体在时间上提供保证。目前有很多不同的实时在线数据处理流水线来处理引力波数据, 如 SPIIR (summed parallel infinite impulse response) 流水线、CWB (coherent wave burst) 流水线、PyCBC 和 GstLAL 流水线。SPIIR 流水线是一种运用无限冲击响应技术的时域引力波搜索方式, CWB 流水线是同时对多个观测站的数据进行小波分析, 然后对得到的小波系数进行聚类来发现引力波信号。

匹配滤波分析依赖于引力波波库。基于数值相对论所建立起来的有效单体数值相对论模型<sup>[10]</sup>在 GW150914 的数据处理中已发挥了巨大的威力。数值相对论就是在计算机上数值求解引力波源对应爱因斯坦方程。在数值相对论发

展的早期, 数值相对论学家在很长时间里被稳定性问题困扰。计算不稳定表现为在计算过程中微小误差迅速指数地增加, 导致程序中非数的发生。直到 2005 年, Pretorius 宣布数值相对论的稳定性问题被成功突破, 并给出双黑洞整个并合过程的数值计算<sup>[11]</sup>。之后, 数值相对论学家们把关注的重心转移到双黑洞波源引力波数值计算的准确性和计算效率问题上。

## 5 中国科学家的相关研究

2009 年 LIGO 科学合作组织 (LSC) 接受清华大学为中国大陆唯一成员。清华大学 LSC 研究团队由清华大学信息技术研究院研究员、LSC 理事会成员曹军威负责, 研究团队还包括清华大学计算机系副教授都志辉和王小鸽等成员。研究团队着重采用先进计算技术提高引力波数据分析的速度和效率, 参与了 LSC 引力波暴和数据分析软件等工作组相关研究。清华大学研究团队主要与麻省理工学院、加州理工学院、西澳大利亚大学、格拉斯哥大学等 LSC 成员合作, 在引力波实时在线数据处理和多信使天文学方面<sup>[12]</sup>开展了算法设计、性能优化与软件开发等方面的工作, 主要研究成果包括: GPU 加速引力波暴数据分析<sup>[13]</sup>、实现低延迟实时致密双星并合信号的搜寻<sup>[14]</sup>、采用机器学习方法加强引力波数据噪声的分析<sup>[15]</sup>等。清华大学研究团队还研究利用虚拟化<sup>[16]</sup>和云计算<sup>[17]</sup>技术构建引力波数据计算基础平台, 开发的软件工具为 LSC 成员广泛使用。

## 6 结论

2017 年度诺贝尔物理学奖的获奖工作首次直接观测到了引力波 (GW150914), 验证了广义相对论在 100 年前对引力波的预言, 打开了人类认识宇宙的一扇崭新的窗口, 也拉开了引力波天文学和引力波宇宙学的序幕。

### 参考文献 (References)

- [1] The Nobel Prize in Physics 2017[EB/OL]. [2017-10-20]. [https://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2017/](https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2017/).
- [2] Simon D. Albert Einstein: Akademie-Vorträge: Sitzungsberichte der preußischen akademie der wissenschaften 1914—1932[M]. Weinheim, FRG: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006: 99-108.
- [3] Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger[J]. Physical Review Letters, 2016, 116(6): 061102.
- [4] Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. GW151226: Observation of gravitational waves from a 22-Solar-Mass binary black hole coalescence [J]. Physical Review Letters, 2016, 116(24): 241103.
- [5] Scientific L. GW170104: Observation of a 50-solar-mass binary black hole coalescence at redshift 0.2[J]. Physical Review Letters, 2017, 118(22): 221101.
- [6] Collaboration V, Gbm F, Collaboration I, et al. Multi-messenger observations of a binary neutron star merger[J]. Astrophysical Journal Letters, 2017, 848(L12).

- [7] 郭宗宽, 蔡荣根, 张元仲. 引力波探测: 引力波天文学的新时代[J]. 科技导报, 2016, 34(3): 30-33.
- [8] 傅雪, 刘国卿. 2016年天文学热点回眸[J]. 科技导报, 2017, 35(1): 30-35.
- [9] Cai R G, Cao Z, Guo Z K, et al. The gravitational-wave physics[J]. arXiv, 2017, doi: 10.1093/nsr/nwx029.
- [10] Pan Y, Buonanno A, Taracchini A, et al. Inspiral-merger-ringdown waveforms of spinning, precessing black-hole binaries in the effective-one-body formalism[J]. Physical Review D, 2014, 89(8): 1-37.
- [11] Pretorius F. Evolution of binary black-hole spacetimes[J]. Physical Review Letters, 2005, 95(12): 121101.
- [12] Cao J W, Li J W. Real-time gravitational-wave burst search for multimessenger astronomy[J]. International Journal of Modern Physics D, 2011, 20(10): 2039-2042.
- [13] Lee H M, Bigot E O L, Du Z H, et al. Gravitational wave astrophysics, data analysis and multimessenger astronomy[J]. Science China, 2015, 58(12): 1-21.
- [14] Liu Y, Du Z, Chung S K, et al. GPU-accelerated low-latency real-time searches for gravitational waves from compact binary coalescence [J]. Classical & Quantum Gravity, 2012, 29(23): 235018.
- [15] Biswas R, Blackburn L, Cao J, et al. Application of machine learning algorithms to the study of noise artifacts in gravitational-wave data[J]. Physical Review D, 2013, 88(6): 062003.
- [16] Cao J W, Zhang W, Tan W. Dynamic control of data streaming and processing in a virtualized environment[J]. IEEE Transactions on Automation Science & Engineering, 2012, 9(2): 365-376.
- [17] Zhang F, Cao J W, Li K Q, et al. Multi-objective scheduling of many tasks in cloud platforms[J]. Future Generation Computer Systems, 2014, 37(7): 309-320.

## Faint voices from the universe ——The 2017 Nobel Prize in Physics

GUO Zongkuan, HUANG Qingguo

Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

**Abstract** The Nobel Prize for Physics 2017 was divided, one half awarded to Rainer Weiss, the other half to Barry Clark Barish and Kip Stephen Thorne, for decisive contributions to the LIGO detector and the observation of gravitational waves. In this paper we introduce the academic experiences of these scientists, and interpret the scientific significance of this important discovery from theory, experiment and data analysis.

**Keywords** the Nobel Prize in Physics 2017; gravitational waves; LIGO; matched filtering; numerical relativity

(责任编辑 傅雪)