

# 引力波探测:引力波天文学的新时代

郭宗宽, 蔡荣根, 张元仲

中国科学院理论物理研究所, 北京 100190

**摘要** 美国 LIGO 于 2016 年 2 月 11 日宣布首次探测到了引力波, 引起全世界范围的广大反响。本文解答从什么是引力波、引力波是如何产生的、人类为什么坚持不懈地探测引力波、如何探测引力波, 介绍国内外引力波探测的现状, 并对引力波探测的未来进行展望。

**关键词** 引力波; 激光干涉引力波探测器; 宇宙学

美国的激光干涉引力波天文台(LIGO)2016年2月11日宣布在位于美国华盛顿州汉福德和路易斯安那州利文斯顿的两个探测器上首次同时探测到了引力波, 这一重大发现发表在《Physical Review Letters》上。该引力波的波源是离地球大约410兆秒差距(约13.4亿光年, 红移0.09)的双黑洞并合事件, 标记为GW150914。两个黑洞的质量分别为36和29个太阳质量, 并合后形成的黑洞有62个太阳质量, 其余3个太阳质量以引力波的形式辐射出来<sup>[1]</sup>。这一重大发现引起了科学家和社会大众的高度关注。本文尝试回答以下几个问题: 什么是引力波? 引力波是如何产生的? 人类为什么坚持不懈地探测引力波? 如何探测引力波? 最后, 介绍国内外引力波探测的现状和前景。



图1 位于美国华盛顿州汉福德(上)和路易斯安那州利文斯顿(下)的两个激光干涉引力波天文台(LIGO)

## 1 什么是引力波?

引力波就是引力扰动在空间的传播。像电磁波一样, 引力波携带能量在空间以真空光速传播。

爱因斯坦1915年提出广义相对论, 认为由于时间和空间中物质的存在, 导致了时间和空间生弯曲, 反过来, 时间和空间弯曲又影响物质的分布。在远离引力波源的近似平坦的区域, 可以在线性近似下求解爱因斯坦引力场方程, 解析地给出扰动的波动解。对于强引力系统, 譬如, 双黑洞并合系统, 由于引力场方程的高度非线性, 只能使用计算机数值计算引力波的波形。

引力波为横波, 有两个独立的极化方向, 也就是说, 传播方向跟极化方向垂直, 两个极化方向的夹角为 $45^\circ$ 。在引力波传播所经过的空间点, 会发生空间拉伸和压缩等物理现象。图2显示了沿 $z$ 轴传播的引力波对 $xy$ 平面上一个圆环形检验质量的影响, 即引力波使得圆环形的检验质量变形为等面积的椭圆形状。测量这两个独立的极化方向为研究者提供了引力波源的方向。

引力波的波形由振幅和频率描述, 对于一个典型的致密双星并合系统, 产生的引力波的振幅大约为 $10^{-21}$ 数量级, 因此, 探测如此弱的信号对人类提出了巨大的挑战。引力波的

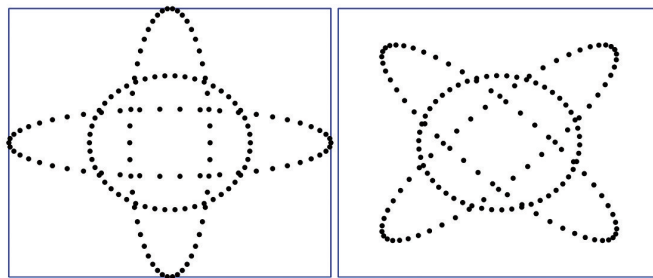


图2 沿 $z$ 轴传播的引力波对 $xy$ 平面上圆环形检验质量的影响

收稿日期: 2015-02-19

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; 蔡荣根(通信作者), 研究员, 研究方向为引力理论与宇宙学, 电子信箱: cairg@itp.ac.cn; 张元仲(通信作者), 研究员, 研究方向为引力理论与宇宙学, 电子信箱: zyz@itp.ac.cn

引用格式: 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; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.03.002

频率依赖于双星并合系统的质量和轨道半径,随着并合过程的演化,其频率也随着时间变化。

## 2 引力波的产生

正如加速的带电粒子产生电磁波,加速的质量则会产生引力波。但是与电磁波的偶极产生机制不同,引力波是四极辐射,也就是物质分布的能动张量的四极矩随时间变化产生引力波。

引力波的源大致可以分为4类:1) 短时存在并已经知悉的源,如致密双星的并合系统(图3),包括中子星-中子星,中子星-黑洞,黑洞-黑洞;2) 短时存在但未知悉的源,如非对称的超新星爆发;3) 长时存在并知悉的源,如非对称的自旋中子星;4) 长时存在并产生随机引力波的源,如宇宙早期暴涨时时空的量子涨落产生原初引力波。

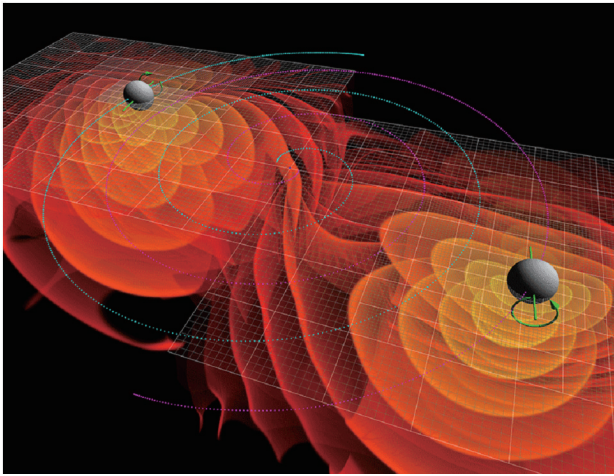


图3 致密双星的并合事件,黑洞周围的彩色轮廓代表数值模拟的引力波振幅

最有希望被激光干涉实验探测到的源是第1类。根据脉冲双星统计可以粗略估算并合事件发生的概率,在1个典型的星系中,每1万年发生一次中子星-中子星并合事件,每30万年发生一次中子星-黑洞并合事件,每250万年发生一次黑洞-黑洞并合事件。因此,地面探测器必须能记录至少包含千万个星系的空间体积内的并合事件,这相当于大约几百兆秒差距的体积半径。

## 3 为什么探测引力波?

1915年爱因斯坦提出了广义相对论,第2年就预言了引力波的存在。尽管泰勒(J. Taylor)和赫尔斯(R. Hulse)发现的双星系统PSR1913+16的轨道周期变化可以由引力辐射给出很好的解释,但这只是引力波存在的间接证据,而他们获得1993年的诺贝尔物理学奖的理由并不是直接证明了引力波的存在<sup>[2]</sup>。经过了整整一个世纪之后,美国科学家宣布他们直接探测到了引力波。引力波的存在验证了广义相对论的预言,将会促进引力量子化的研究。几百年来天文学的发

现主要靠电磁波的测量,即从射电波段到伽马射线等观测手段来认识宇宙。引力波的发现会开启探索宇宙的新窗口,引领人类进入引力波天文学的新时代。

致密双星并合系统的质量可以由波形的形状来确定,从而确定到该系统的光度距离。像Ia型超新星一样,遥远的引力波源也可以作为标准烛光,用来测量宇宙的膨胀历史。随着引力波探测精度的提高,可以用以验证广义相对论,了解黑洞的并合过程,理解中子星的物态方程,研究宇宙的物质分布和大尺度结构的形成过程等。

## 4 如何探测引力波?

当引力波经过时,在引力波传播方向的垂直平面内的时空会引起伸缩变形,从而引起自由检验粒子之间距离的伸缩,激光干涉引力波探测实验的探测原理就是通过激光干来探测臂长距离的变化。

如图4所示,引力波通过探测器的前半个周期,一个臂被拉长,另一个成直角的臂缩短,在后半个周期刚好相反。由于引力波有两个独立的极化方向,从而可以确定引力波源的方向。只有两个不同地点的探测器同时探测到同一引力波信号,才可以确定引力波源距探测器的距离。另外,引力波源的质量由引力波的波形确定。

由于天文事件产生的引力波非常弱,探测引力波非常困难。典型的致密双星并合系统产生的引力波振幅为 $10^{-21}$ ,对于一个臂长4 km的探测器,通过的引力波引起的臂长变化为 $10^{-18}$  m。若让激光在臂内往返100次,就可以增加光路的有效长度100倍,大大提高了探测器的灵敏度。地面激光干涉探测实验的敏感频段大约从几十到几百赫兹,而空间激光干涉探测器可以探测毫赫兹的低频引力波。在引力波探测实验的数据分析中,采用了“匹配滤波”技术提高信噪比,就是预先数值模拟出引力波源产生的波形,把预言的波形作为模板进行数据分析<sup>[3]</sup>。“匹配滤波”技术可以在既定硬件灵敏度的基础上提高引力波探测能力约100倍,付出的代价是大大增加了数值分析的参数空间。

除了激光干涉探测实验外,可以利用脉冲星计时阵列来探测纳赫兹的低频引力波。毫秒脉冲星能给出非常稳定的

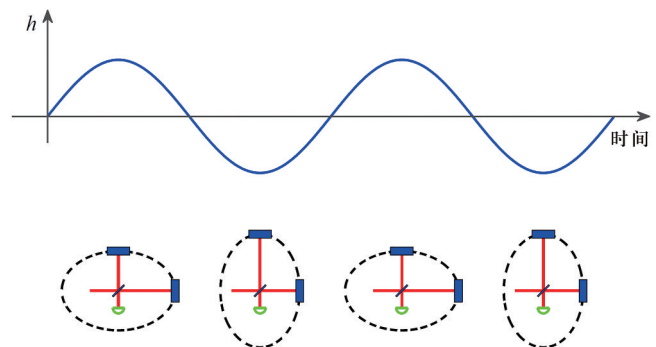


图4 引力波对迈克尔逊激光干涉仪中检验质量的效应

精确的周期信号,通过的引力波能改变脉冲星与地球间的距离,从而改变了接收到的脉冲星信号,达到测量引力波的目的(图5)<sup>[4]</sup>。

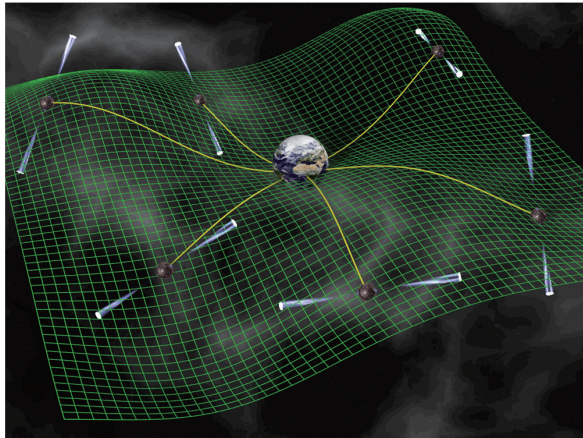


图5 引力波对脉冲星计时阵列的效应

对于宇宙早期暴涨过程中产生的原初引力波,由于宇宙的红移,很难直接探测到。幸运的是,原初引力波能引起宇宙微波背景辐射(CMB)的B模极化,因此,可以通过探测CMB的B模极化来探测原初引力波。

## 5 国外引力波探测现状

目前引力波探测器主要基于迈克尔逊激光干涉仪,分为地面探测实验和空间探测实验。第1代地面激光干涉引力波探测实验包括:日本的TAMA项目<sup>[5]</sup>(臂长300 m),英德合作的GEO项目<sup>[6]</sup>(臂长600 m),意大利的Virgo项目<sup>[7]</sup>(臂长3

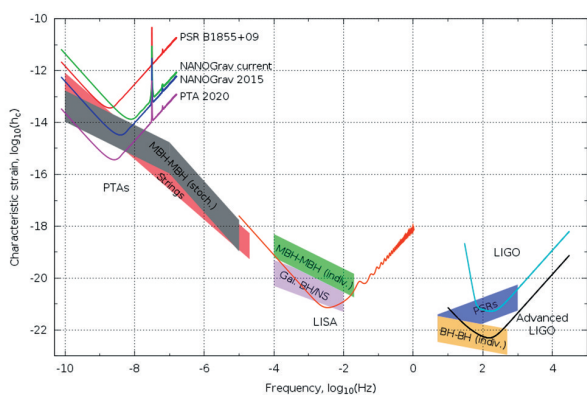


图6 探测器对引力波的限制

## 6 国内“天琴计划”、“阿里计划”、“空间太极计划”相继启动

目前,中国主要有两大空间引力波探测项目,一个是中国科学院的“空间太极计划”,另一个是中山大学的“天琴计划”,这两个项目都处在预研阶段,主要科学目标是观测双黑洞并合和极大质量比天体并合时产生的低频引力波辐射。对于原初引力波的探测,中国科学家提出了“阿里计划”。

km),美国华盛顿州和路易斯安那州的LIGO<sup>[8]</sup>(其中2个臂长4 km,1个臂长2 km)。LIGO探测器的最敏感的频率为150 Hz(图6)。后来,LIGO和Virgo做了升级,提高了探测的灵敏度,更名为高级LIGO(Advanced LIGO)<sup>[9]</sup>和高级Virgo(Advanced Virgo)<sup>[10]</sup>,成为第2代地面激光干涉实验装置;同时,日本也正在建造一个臂长3公里的地下神冈引力波望远镜(KAGRA)<sup>[11]</sup>,该项目以前叫大尺度低温引力波望远镜(LCGT)。印度也正在建造引力波探测器(LIGO-India)。目前,LIGO已经开始设想建造第三代低温引力波探测器,欧洲也计划在地下建造爱因斯坦望远镜,边长为10 km的三角形,采用低温探测器<sup>[12]</sup>。

在地球上很难探测低于1 Hz的引力波,因为在该频段地球的引力成为了噪音源,因此,探测更低频率的引力波需要把激光干涉仪放入太空中。欧洲航天局开始了激光干涉空间天线(LISA)项目,发射3颗卫星,组成一个边长为500万 km的巨大三角形,它们之间以激光束相连,在太空中进行观测(图7)。由于经费问题,推出了一个缩小版的eLISA项目<sup>[13]</sup>。2015年12月3日,LISA探路者卫星发射,以检验eLISA项目涉及的关键技术,eLISA卫星计划2034年发射。日本科学家提出了DECIGO计划,拟开展空间引力波探测。

除了激光干涉探测实验外,脉冲星计时阵列也可以用来探测引力波,尤其是几个纳赫兹的超低频引力波(图6)。目前国际上有3个研究组,澳大利亚的帕克斯脉冲星计时阵列(PPTA)<sup>[14]</sup>,英国、法国、荷兰和意大利合作的欧洲脉冲星计时阵列(EPTA)<sup>[15]</sup>,美国和加拿大合作的北美纳赫兹引力波天文台(NANOGrav)<sup>[16]</sup>。

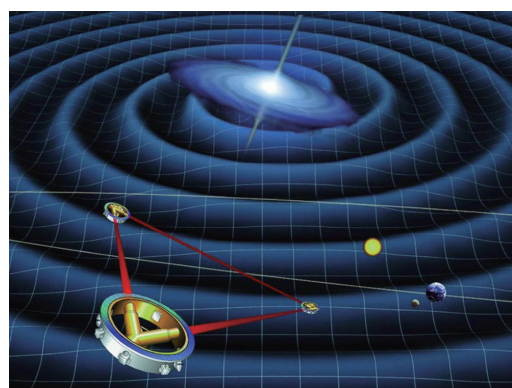


图7 激光干涉空间天线

## 7 展望

引力波的发现是对广义相对论预言的验证,为进一步在宇宙学尺度和强引力场验证广义相对论提供了可能,同时打开了探索宇宙的新窗口。未来的引力波实验将引领人类进入引力波天文学的新时代。有理由相信,这次引力波的探测仅仅是开端,未来人们将探测到大量的不同引力波源产生的引力波。这对理解宇宙的演化,大尺度结构的形成过程,和

黑洞物理,甚至量子引力带来极大的帮助。

### 参考文献 (References)

- [1] Abbott B P, et al. The LIGO Scientific Collaboration, Virgo Collaboration. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger[J]. *Physical Review Letter*, 2016, 116(6). Doi: 10.1103/PhysRevLett.116.016102.
- [2] Hulse R A, Taylor J H. Discovery of a pulsar in a binary system[J]. *Neutron stars, black holes, and binary X-ray sources*, 1975, 48: 433.
- [3] Jaranowski P, Królak A. Gravitational-wave data analysis. Formalism and sample applications: the Gaussian case[J]. *arXiv preprint arXiv:0711.1115*, 2007.
- [4] Sesana A, Vecchio A. Gravitational waves and pulsar timing: stochastic background, individual sources and parameter estimation[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2010, 27(8): 084016.
- [5] Takahashi R, TAMA collaboration. Status of TAMA300[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2004, 21(5): S403.
- [6] Willke B, Aufmuth P, Aulbert C, et al. The GEO 600 gravitational wave detector[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2002, 19(7): 1377.
- [7] Acernese F, Amico P, Al-Shourbagy M, et al. Status of VIRGO[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2005, 22(18): S869.
- [8] Abramovici A, Althouse W E, Drever R W P, et al. LIGO: The laser interferometer gravitational-wave observatory[J]. *Science*, 1992, 256(5055): 325–333.
- [9] Harry G M, LIGO Scientific Collaboration. Advanced LIGO: the next generation of gravitational wave detectors[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2010, 27(8): 084006.
- [10] Accadia T. Plans for the upgrade of the gravitational wave detector virgo: Advanced virgo[C]//Twelfth Marcel Grossmann Meeting on General Relativity. 2012, 1: 1738.
- [11] Kuroda K, LCGT collaboration. Status of LCGT[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2010, 27(8): 084004.
- [12] Punturo M, Abernathy M, Acernese F, et al. The third generation of gravitational wave observatories and their science reach[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2010, 27(8): 084007.
- [13] Amaro-Seoane P, Aoudia S, Babak S, et al. eLISA: Astrophysics and cosmology in the millihertz regime[J]. *arXiv preprint arXiv:1201.3621*, 2012.
- [14] Manchester R N. The Parkes Pulsar Timing Array[J]. *arXiv preprint arXiv:0710.5026*, 2007.
- [15] Janssen G H, Stappers B W, Kramer M, et al. European pulsar timing array[C]//40 Years of Pulsars: Millisecond Pulsars, Magnetars and More. AIP Publishing, 2008, 983(1): 633–635.
- [16] Jenet F, Finn L S, Lazio J, et al. The north american nanohertz observatory for gravitational waves[J]. *arXiv preprint arXiv:0909.1058*, 2009.

## Gravitational wave detections: A new age of gravitational wave astronomy

GUO Zongkuan, CAI Ronggen, ZHANG Yuanzhong

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

**Abstract** On February 11, 2016 the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO) in the United States announced the first direct detection of gravitational waves. This discovery attracted public attention. In this paper, we try to answer the following questions: What are gravitational waves? How are gravitational waves produced? Why and how do scientists detect gravitational waves? Moreover, we introduce the current status and prospects of gravitational wave detections.

**Keywords** gravitational waves; Laser interferometer gravitational-wave detectors; cosmology

(责任编辑 刘志远)