

文章编号: 1005-5630(2014)05-0461-04

## 引力波及引力波的探测

张齐元<sup>1</sup>, 韩 森<sup>2</sup>

(1. 苏州慧利仪器有限责任公司, 江苏 苏州 215123;

2. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

**摘要:** 引力波也叫引力辐射, 是爱因斯坦广义相对论中的一项重要预言, 是基础物理和天文学中一个重要的内容。人类为探索引力波付出了几十年的努力, 从早期的棒状探测器到后来的激光干涉引力波探测器, 各国学术机构和科学家们不断采用最先进的技术寻找引力波源, 探测器的探测范围和灵敏度也不断提高。在探测引力波的过程中, 形成了一门引力波天文学的新兴学科, 使人们逐渐了解宇宙的奥秘, 寻找宇宙中天体的运行规律, 而引力波也成为了当今科学界学术重点和热门课题。

**关键词:** 引力波; 广义相对论; 引力波天文学

**中图分类号:** P 1-093 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1005-5630.2014.05.018

## Gravitational wave and the detection of gravitational wave

ZHANG Qiyuan<sup>1</sup>, HAN Sen<sup>2</sup>

(1. Suzhou H&L instruments Co., Ltd., Suzhou 215123, China;

2. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** Gravitational wave is called gravitational radiation, predicted by Einstein to exist on the basis of general relativity, is an important content of basic physics and astronomy. Human has made hard effort over the past few decades to explore the gravitational wave. From the bar detector in the early to the laser interferometer gravitational observatory, academic institutions and the scientists from the different countries adopt the most advance technology to find sources of gravitational wave constantly. The detection range and the sensitivity of the detector are increasing continuously. A new subject of gravitational astronomy has come into being in the process of detection. People can know the mysteries of the universe gradually, to fund the operation laws of the cosmos. The gravitational wave has become the emphases of scientific and academic and hot topic at present.

**Key words:** gravitational wave; general relativity; gravitational astronomy

## 引 言

爱因斯坦于1916年提出了广义相对论, 这是继牛顿的万有引力学说之后物理学上最伟大的成就之

收稿日期: 2014-08-15

作者简介: 张齐元(1987-), 男, 硕士研究生, 主要从事光学设计方面的研究。E-mail: zhangqy@hl-instruments.com

通讯作者: 韩 森(1961-), 男, 教授, 主要从事光学干涉测量方面的研究。E-mail: senhanemail@126.com

一。爱因斯坦和其他物理学家根据广义相对论先后提出了 4 个预言,即光线在引力场中的偏折,光谱线在引力场中的红移,引力波存在和黑洞存在<sup>[1]</sup>。前两个预言很快就被证实,广义相对论经受住了很多实验检验,其中比较著名的是水星近日点,太阳引起的星光偏折,引力红移。而作为广义相对论中最重要预言的引力波,由于其十分微弱,所以很难被探测到,一直以来都是物理学和天文学重点研究的对象。引力波存在的间接证据是脉冲双星 PSR1913+16<sup>[2]</sup>,其发现者普林斯顿大学物理学家拉塞尔·赫尔斯和约瑟夫·泰勒也于 1993 年获得诺贝尔奖。最令人兴奋的是,美国科学家于 2014 年 3 月 17 号宣布首次直接探测到宇宙大爆炸的原始引力波,原始引力波能够证实宇宙膨胀论,帮助人们了解宇宙诞生的历程,是物理学上的重大突破。但随后也有相关的小组质疑这一成果的正确性,有分析说原始引力波引起的偏振信号仅仅是银河系中尘埃导致的,因此原始引力波还需要科学家进一步仔细分析检验。引力波的探测是当前物理学重要的前沿领域之一,引力波天文学正是以引力波探测为基础的新兴学科。由于引力辐射所具有的独特物理特性,使得天文学家可以更广泛、更全面地探索宇宙的奥秘。通过引力波的探测可以搜寻未知的天体和物质,它能提供电磁辐射等传统的天文观测方式所不能够获取的信息。这是人类观测宇宙的一个新窗口,扩展了天文学研究的视野和领域。

## 1 引力波是什么

爱因斯坦认为引力是时空曲率所产生的一种现象,质量的存在会使周围的时空产生弯曲,当物质在时空中运动或物质体系的质量发生变化时,周围的时空曲率随之发生改变,时空的波动就会像水面的波纹一样传播,发生引力辐射。如同人们所熟悉的电磁波一样,电荷加速运动会产生电磁辐射,同样质量的加速运动产生引力辐射,引力波被认为与电磁波一样以光速在时空中传播。当引力波经过时,周围的时空被扭曲,物体之间的距离会有节奏地波动,频率与引力波相同。理论上任何大小的质量改变或运动都会引起引力辐射,不过它的能量非常微弱,引力比电磁力几乎要小 39 个数量级,所以现阶段不可能在实验室中产生可以检测到的引力波,最好的办法是观测宇宙中大质量、高速运动的天体的活动。1974 年赫尔斯和泰勒发现了脉冲双星 PSR1913+16,他们根据脉冲双星轨道周期的微小变化,正是由于引力波的辐射使双星逐渐靠近,公转周期减短,很好地符合了爱因斯坦的预言。这是人类首次间接证明了引力波的存在。

## 2 引力波波源

引力波的探测是物理学和天文学一个重要的课题,宇宙中主要存在的引力波的波源主要有以下几种。

### (1) 密近双星的旋绕与结合

双致密天体互绕结合是首选的引力波源,这种双星系统可以是中子星与中子星、黑洞与黑洞或者两种的组合等。双星以较高的频率绕质心旋转,在这一过程中不断向外辐射高频引力波,由于能量的损失,它们之间的距离逐渐减小,旋转周期变短,最后双星结合一体。

### (2) 超新星爆发以及中子星、黑洞的形成

恒星坍缩引起的超新星爆发,超新星质量大且致密,在坍缩过程中,如果星体的内核非对称,那么将会辐射出引力波,坍缩结束后,超新星形成中子星或黑洞<sup>[3]</sup>。超大质量黑洞在不断吞噬周围天体时同样会连续地产生引力波,通过探测这些引力波,可以了解超新星爆发和黑洞形成的机制,以及超大质量黑洞的运行规律。

### (3) 微波背景辐射

宇宙早期爆炸留下了引力波痕迹。目前普遍认为宇宙形成于一次大爆炸,在极短的时间内,发生了剧烈的变化,引发强大的引力波,在漫长的进化过程中,原始的引力波依然广泛分布于宇宙中,美国科学家正是使用射电望远镜,寻找到了隐藏在宇宙背景中的引力波,为宇宙的形成及进化过程找到了强有力的证据<sup>[4-6]</sup>。

### 3 引力波探测

在浩瀚无垠的宇宙中存在大量的引力波源,包括孤立的引力波源以及背景的残余引力波。孤立的引力波源包括中子星、黑洞等,背景的残余引力波主要是由宇宙早期的大爆炸形成,它们的物理运动机制不同,所产生的引力波周期、振幅、波形也不同。国际上根据引力波的测量方式,将引力波的频段分为:高频波段、低频波段、甚低频波段和极低频波段4个频段。探测引力波的方法主要有共振棒和激光干涉,激光干涉又分为空间和地面两种,用于测量不同频率的引力波。

20世纪60年代,美国马里兰大学物理学家约瑟夫·韦伯首次采用铝制棒状探测器,铝棒探测引力波的原料类似于天线接收电磁波,铝棒重1.4 t,长2 m,直径1 m,用细丝悬挂起来,具有很高的品质因子。当有引力波通过时,铝棒与引力波发生谐振,使铝棒产生形变,通过固定在铝棒上的压电传感器感知铝棒的变化。这种方法灵敏度高,但相对于引力波来说还远远不够,轻微的振动都会激发传感器,这些“噪声”极大地影响了引力波的探测。为了排除这些干扰,韦伯使用几个铝质共振棒,重点观测这些铝棒同时出现的信号。1969年韦伯宣布探测到引力波。但经过其他学者的论证,所谓的引力波可能是其他噪声。其后,世界上其他国家通过引入超低温技术,减少噪声,搭建了精度更高的棒状探测器,都未能得到与韦伯同样的结果。虽然实验没有成功,但其测量引力波的原理被广泛认可。

1970年,韦伯与加州理工学院的莱纳·魏斯等人意识到激光干涉探测引力波的可能性,激光干涉采用迈克尔逊的干涉形式,引力波会引起两个臂长的变化,导致干涉条纹的变化,通常不同的引力波引起干涉臂长的变化也不同,因此激光干涉仪是最直接的引力波探测。探测引力波所要求的灵敏度要达到 $10^{-21}$ ,而干涉仪的臂长有限,所以在每个干涉臂采用法布里-玻罗干涉腔,增加一块反射镜,使激光在干涉臂中反复循环,增加激光的光程长度。当引力波影响臂长及干涉条纹的变化时,激光在两干涉臂中穿越的时间差发生改变,只要探测到这种变化就可以发现引力波。

20世纪70年代,由于当时的技术所限,无法完成激光干涉探测引力波这样浩大的工程,最初各国只是在实验室内建立了臂长几米至几十米的原型机。20世纪90年代,相关的技术条件成熟,麻省理工学院与加州理工学院在美国国家自然资金资助下,开始建造激光干涉引力波天文台LIGO(laser interferometer gravitational-wave observatory)。资金投入3.65亿美元,于1999年11月分别在路易斯安那的利文斯顿和华盛顿州的汉福德建造了两台,其中利文斯顿天文台(LLO)臂长4 km,汉福德天文台(LHO)臂长2 km。两台引力波探测器彼此相距3 000 km,当它们同时检测到的信号才有可能为引力波。2005年,为进一步提高引力波探测器的灵敏度,激光干涉引力波天文台进行升级改造,激光功率提升至180 W,其探测范围扩大1 000倍,灵敏度提高一个数量级,称为先进激光干涉引力波天文台(Advanced LIGO)。

除美国外,目前还有德国、意大利、日本和印度等几个国家拥有并计划建造激光干涉引力波探测器。GEO600是由德国和英国联合建造,项目开始于1995年,位于德国汉诺威南部的萨尔斯特附近,GEO600的干涉臂长600 m,有效光学臂长1 200 m,可以探测的引力波的频率范围50 Hz~1.5 kHz。Virgo是意大利和法国合作的引力波探测器,于2005年建成,并在2007年5月首次运行。Virgo位于意大利比萨市的郊区,干涉臂长有3 km,每个干涉臂的有效光程可达100 km,为了满足极高的灵敏度要求,意大利和法国的科学家使用了当时很多领域最尖端的技术,比如超高功率稳频激光器,极高反射率反射镜等。目前该项目以每年一千万欧元运行。日本在1995年开始建造TAMA300干涉仪,位于日本国家天文台三鹰校区,其臂长为300 m。2010年6月,日本又开始研制新一代引力波探测器LCGT(large scale cryogenic gravitational wave telescope),2012年1月,LCGT项目更名为KAGRA,位于日本的神冈。为避免地面的噪声,计划建设位于地下的大型干涉仪,臂长3 km,激光功率150 W预计2018年开始运行,预期灵敏度是TAMA300的100倍,可以媲美Advanced LIGO。印度在2012年启动INDIGO项目,计划建造干涉臂长4 km的引力波探测器,预期在频率范围30~800 Hz内的灵敏度为 $10^{-23}/\text{Hz}^{-1/2}$ 。这些引力波探测器全部建成后,可以同时从不同角度对宇宙进行观测,组成引力波探测网络,提高搜索到引力波的概率。

由于不能完全消除地面振动的噪声,即使采用最先进的隔震措施,其最低的下限频率为 1 Hz,更低频率的引力波 LIGO 等地面引力波干涉仪便无法探测,因此,美国 NASA 和欧洲 ESA 计划联合建设空间激光干涉天线 LISA(laser interferometer space antenna)。LISA 项目主要探测是低频引力波,频率范围为  $10^{-4}$  Hz~1 Hz<sup>[7]</sup>,这个频率范围内可能存在着大量的引力波源。LISA 的结构与 LIGO 类似,计划在太阳轨道上放置 3 个宇航器,排成等腰三角形,彼此相距 500 万 km,在每个三角形的顶点,一对连续的稳定的激光向另外两端发射,这样构成 3 个迈克尔逊干涉仪。其后由于经费问题,NASA 退出 LISA,该项目便由 ESA 独立承担,更名为 eLISA,是 LISA 的简化版,项目由原来的 3 个宇航器精简为一个主宇航器和两个副宇航器。主宇航器与副宇航器之间的距离减少为 100 万 km<sup>[8-9]</sup>,在保持测量精度与 LISA 一致的前提下,仍可以探测到有意义的引力波源。eLISA 不会取代 LIGO 等地基引力波探测器,它们探测引力波的频率不同,扩大了人类探索引力波的范围。

我国目前有多家单位对引力波这一课题进行研究,包括国家天文台、中科院高能物理所等科研院所以及北京师范大学、华中科技大学等高校。北京师范大学天文系宇宙与引力波中心在宇宙加速膨胀、暗能量等方向取得了一些研究成果。2014 年 7 月,中科院高能所的粒子天体物理中心和加拿大的学者合作,根据年初美国科学家发现原始引力波的数据进行分析并发表文章认为,宇宙在大爆炸之前可能不是奇点而是一个压缩的时空,并在暴涨时期之前发生了一次反弹,宇宙的模式可能更像一个弹簧。这为宇宙的起源学说提供了一个新观点,为人类研究宇宙提供了一种新的可能性。

#### 4 探测引力波的意义

引力波的探测是物理学和天文学共同的领域,对引力波的探测可以对广义相对论直接验证,同时也为观测宇宙提供了一个新的途径。由于引力波具有电磁辐射所不具备的特性,因此对于传统的通过电磁辐射观测宇宙的方式是极其重要的补充<sup>[10]</sup>。例如在宇宙暴涨的初期,电磁波无法穿越其中,引力波是人们目前了解宇宙诞生并进化的最好方式。如果引力波最终被证实,这将是物理上又一个里程碑式的事件,对基础物理有着深刻的影响,使人们对时空观重新认识。在天文学上,天文学家可以对黑洞、超新星、中子星等天体进行更深刻,更广泛,更全面的分析,确定很多目前运行机制尚不明确的天体模型,是继传统的电磁辐射观测宇宙之外一个新的窗口。

而对引力波探测的激光干涉探测器工程,同样对世界的科技进步有重要意义。为了满足观测引力波的极端苛刻条件,需要使用目前最尖端的科技和工程技术。例如,为使在两反射镜之间往返的激光能量损失小,反射镜必需具有极高的反射率;为减小噪声的影响,干涉仪必需安置在隔震系统中,仪器运行的环境通常比太空轨道还安静;为减小物体分子运动产生的热噪声,采用流体硅替代钢丝悬挂质量块;为增大仪器灵敏度,采用大功率超稳频激光器等。这些技术对工程领域和科学技术是极大的挑战,对国家工业发展起到促进作用。在学术上,引力波探测也提供了获取诺贝尔奖的潜在机会,可以培养一批优秀的学生和学者,在这个领域出现高水平的物理学家、天文学家和工程技术专家。

#### 5 结束语

引力波是广义相对论中的最重要预言,探测引力波是当前物理界和天文界最前沿的领域之一。自 20 世纪 60 年代以来,引力波的探测已经取得了很大进步,特别是激光干涉的方法使直接探测的引力波成为可能。随着 LIGO 等地基引力波探测器的升级和新一代太空激光干涉引力波探测器项目的实施,未来的探测器以更高的灵敏度搜寻范围更广的引力波源,而这些最先进的科学项目也会推动科技的飞速发展,同时改变人们对基础物理和宇宙的认识。

#### 参考文献:

[1] 李芳昱,张显洪. 引力波与引力波探测[J]. 现代物理知识, 2005, 17(4): 3-6.

[2] 黄玉梅,王运永,汤克云,等. 引力波理论和实验的新进展[J]. 天文学进展, 2007, 25(1): 58-73.

JB/T 8226. \* 都是“光学零件镀膜”相关标准,内容有一定的相关性,却被分散在多个标准中,检索和应用都不方便,建议进行修订时将它们归为一个系列标准,减少标准号的分布。

(3)标准引用统一。光学薄膜环境适应性方面,可引用的标准包括 GB/T 2423. \*、GB/T 12085. \*、GB/T 26331—2010。由于 GB/T 2423. \* 被光学薄膜行业引用较早(从 1988 年开始),目前人们还是习惯引用该标准,但与之相比,GB/T 12085. \* 以及其后的标准更适合光学薄膜,并与国际通用方法一致。为了行业中标准引用的统一,建议 GB/T 2423. \* 逐渐淡出光学薄膜行业。

(4)为复杂标准提供必要的说明文件。面形偏差标准 GB/T 2831—2009 和表面疵病标准 GB/T 1185—2006 的实施一直都不顺畅,这与标准的内容相对复杂、人们对其理解不深入有一定关系。对于内容复杂的标准,建议以后在发布标准的同时,提供配套的技术辅助文件来说明标准的内容,增强人们对标准的理解。同时,国家应鼓励专家学者发表标准方面的论文和著作,这有利于标准的顺利实施和推广普及。

(5)根据行业需求,发布新标准。通过表 4 可以看到,现有光学薄膜产品应用类标准仅涉及显微镜、光谱仪、生化分析仪及电影放映机等方面。随着光学薄膜技术的发展,其应用领域在不断扩展,如手机的显示触摸屏、3D 立体影像、天文观测等方面都有光学薄膜的身影。因此,在光学薄膜应用领域,应随着产品的逐渐发展成熟而酌情颁布新的标准。

#### 4 结 论

随着光学薄膜技术水平的提升,行业上对标准化的要求也不断提高。为了使光学薄膜行业相关人士了解本行业的标准状况,本文针对光学薄膜技术相关的 5 个领域,论述了相应标准的发展概况,并结合现状对光学薄膜技术标准的发展提出了几点建议。相信我国光学薄膜技术标准会越来越完善,我国的标准水平也会不断踏上新的台阶。

#### 参考文献:

[1] 叶 帆,顾 兵,黄晓琴. 薄膜材料折射率色散的进展与展望[J]. 光学仪器,2010,32(4):90-94.

[2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 20000. 1—2002 标准化工作指南(第 1 部分):标准化和相关活动的通用词汇[S]. 北京:中国标准出版社,2002.

[3] 莫 洁. 我国标准化工作建设现状分析及对策研究[J]. 生产力研究,2012(7):166-169.

[4] 果宝智. 光学表面光洁度评述[J]. 激光与红外,1991,21(4):29-34.

[5] 刘庆明,盛益鹏. GB/T 1185《光学零件表面疵病》与俄、美相关标准对比分析[J]. 国防技术基础,2007(8)6-10,18.

=====

(上接第 464 页)

[3] 王运永,朱宗宏,R. 迪萨沃. 引力波天文学[J]. 现代物理知识,2013,25(4):25-34.

[4] 赵 文. 宇宙中暗能量、残余引力波和微波背景辐射极化的一些研究[D]. 合肥:中国科技大学,2006.

[5] 刘雪敏. 测量引力波的新方法光孤子存储环—共振棒引力波[D]. 武汉:华中科技大学,2004.

[6] 程景全,杨德华. 引力波和引力波望远镜的发展[J]. 天文学进展,2005,23(3):195-204.

[7] 罗子人,白 珊,边 星,等. 空间激光干涉引力波探测[J]. 力学进展,2013,43(4):415-447.

[8] 赵艳彬,王孝东,孙克新. LISA 引力波探测器与关键技术分析[C]//中国宇航学会深空探测技术专业委员会第七届学术年会论文集,2010.

[9] LISA. Laser interferometer space antenna: A corners tone mission for the of gravitational waves[R]. European Space Agency System and Technology Study Report,2000.

[10] 王运永,朱兴江,刘 见,等. 激光干涉仪引力波探测器[J]. 天文学进展,2014,32(3):1-35.