

激光干涉引力波探测器 ——人类的宇宙助听器

冯 衍[†]

(中国科学院上海光学精密机械研究所 上海 201800)

2016-04-12收到

[†] email: feng@siom.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20160503

Laser interferometer gravitational-wave detectors ——hearing aids for human on deep universe

FENG Yan[†]

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences,
Shanghai 201800, China)

摘 要 爱因斯坦预言引力波 100 周年之际, 人类首次直接探测到引力波信号。文章简单介绍了这次的主角——高新激光干涉引力波天文台(advanced LIGO)的光学与激光部分技术。激光干涉引力波探测器, 本质上是一个迈克尔孙干涉仪。原初的迈克尔孙干涉仪也曾在否定以太理论、促使相对论创立的过程中起关键作用。而基于爱因斯坦受激发射理论发展起来的激光技术也在引力波探测中立下汗马功劳。出于协同测量与定位以及扩展引力波探测频段等方面的考虑, 除 LIGO 之外, 还有多个地面和空间激光干涉引力波探测器在建或在研。可以预计, 当前只是引力波探测技术与引力波天文学发展的开端。

关键词 激光干涉引力波探测器, 引力波, 迈克尔孙干涉仪, 激光器, 爱因斯坦

Abstract Gravitational wave was detected for the first time 100 years after Einstein's prediction. Here we briefly describe the advanced laser interferometer gravitational-wave observatory (advanced LIGO), with which the discovery was made. The emphasis is put on the optical and laser technology of the detector. Laser interferometer gravitational-wave detectors are fundamentally Michelson interferometers. The original Michelson interferometer helped disproving the existence of "luminiferous aether", which led to the development of the theory of relativity. And laser technology, for which Einstein established the foundations with the theory of stimulated emission, has played crucial role in detecting gravitational waves. Besides LIGO, there are other ground or space based laser interferometer gravitational-wave detectors, which are in the process of building and designing. All those detectors will make joint observation and locate the sources of the waves, and extend the detectable spectrum of gravitational waves. It is believed that this detection is the beginning of a new era of the gravitational wave detection technology and gravitational wave astronomy.

Keywords laser interferometer gravitational-wave detectors, gravitational wave, Michelson interferometer, laser, Einstein

1 引言

2016年2月11日，LIGO科学合作机构(LIGO Scientific Collaboration)宣布^[1]，在爱因斯坦预言引力波整100周年之后，首次直接探测到引力波^[2]。具体时间为2015年9月14日，LIGO在美国路易斯安那州和华盛顿州的两个探测器，探测到据信13亿年前两个分别为29和36倍太阳质量的黑洞合并的事件(GW150914)。在合并过程的最后不到一秒时间内，约三倍太阳的质量转化为引力波发射出来。但是，到达13亿光年之外的地球时，其产生的峰值应变仅为 10^{-21} ，这相当于地球与太阳间的距离发生一个氢原子大小的改变。这么微弱的变化，被精密的大型激光干涉仪探测到，技术进步在科学研究中的重要作用显露无遗。

除了进一步验证爱因斯坦的广义相对论的正确性，更为重要的，这次的发现开启了引力波天文学的新时代。在这之前，人类观测宇宙的手段均依赖于电磁波，引力波探测是我们获得的一种新能力。在宣布这个新发现时，LIGO的发言人说：我们将不仅能“看”宇宙，而且能“听”宇宙^[1]。考虑到引力波的频段与声波有所重叠，这样的说法非常生动，甚至贴切。这次

“听”到的引力波，频率在0.2 s内从35 Hz上升至250 Hz，像13亿光年外一只大鹏的啁啾。而激光干涉引力波探测器就像巨大的助听器，帮助地球上的人类倾听宇宙深处，翘曲时空中发生的剧烈事件。

2 高新LIGO探测器

LIGO探测器本质上是一个迈克尔孙干涉仪，物理学教科书在讲解光的干涉时都会说起。上世纪六七十年代，就有人提出利用干涉仪探测引力波的想法。经过多年关于这类探测器的噪声和性能的研究，在80年代形成长基线激光干涉仪的具体建议^[3]。LIGO装置在1992年获得美国科学基金会的资助，2000年建设完成。国际上陆续建成的同类装置还有日本的TAMA 300，德国与英国合建的GEO 600，意大利与法国合建的Virgo，这些探测器在2002—2011年间进行了联合观测。虽然没有测量到引力波信号，但是这些观测设定了多种引力波源的上限。这次立功的高新LIGO探测器是改进之后的LIGO探测器，而GW150914是在试运行阶段观测到的。在经过多年的努力之后，这次科学家们的运气可以说是应得的。

利用激光干涉仪测量引力波的基本想法很

简单。引力波带来的时空扭曲，会引起干涉仪两臂相对长度的微小变化。这个微小变化反映在干涉仪中返回分束镜时两个光场的相位差异上，于是产生一个与引力波对应的光学干涉信号。但是引力波带来的时空扭曲非常微小，比如GW150914到达地球时应变仅为 10^{-21} 。LIGO是一个L字形的改良的迈克尔孙干涉仪，其结构如图1所示。两个4 km长的干涉臂互相垂直，GW150914产生的臂长变化只有 10^{-18} m量级。

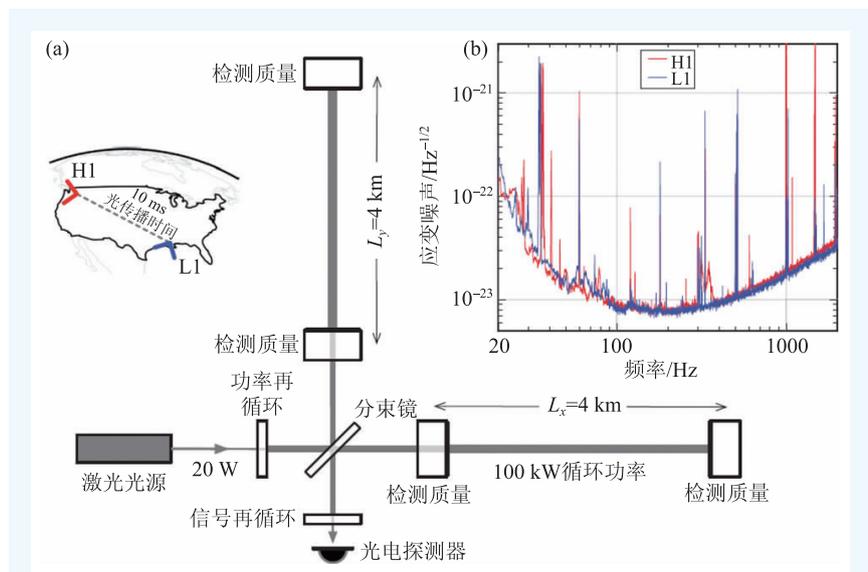


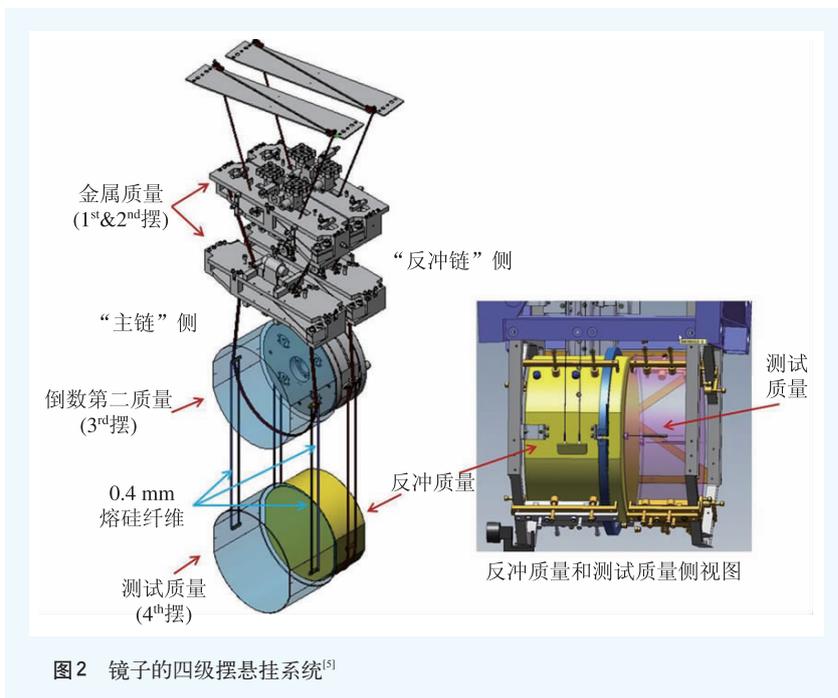
图1 高新LIGO探测器简化示意图^[2]

为获得足够的灵敏度，高新 LIGO 探测器在光学上采取了数个增强措施^[2]。首先，每个干涉臂本身是法布里—珀罗谐振腔。进入干涉臂的激光，不像一般迈克尔孙干涉仪，只走一个来回就回到分束镜与另一臂的光束发生干涉，而是被“保存”在干涉臂中一段时间。激光在法布里—珀罗谐振腔中来回振荡约 300 次才返回分束镜，意味着光场的相位对长度变化的敏感度得到了 300 倍的增强。或者换句话说，干涉仪的有效臂长提高了 300 倍。与此同时，腔中激光功率也因为共振增强作用，提高了 300 倍。其次，干涉仪工作在暗态附近，大部分激光被反射回原激光方向。因此，在激光之后、分束镜之前，放置了一个部分透过的镜子，用以共振增强干涉仪中的激光，增强效果约 35 倍。于是，20 W 的激光输入，在分束镜处增强为约 700 W，在每个臂中增强为 100 kW。另外，在干涉仪的输出端也放置了一个部分透过的镜子，用于增强信号提取和探测器带宽。

所有这些干涉仪技术措施，都是为了使引力波应变产生的光学信号最大化，从而降低光子散粒噪声。光子散粒噪声是由到达光电探头的光量子的统计涨落引起的，它是激光干涉引力波探测器高频端的主要噪声来源，它对信号信噪比的影响与干涉仪中激光功率的平方根成反比。未来数年，高新 LIGO 探测器计划通过增加入射激光功率，把干涉仪中循环的激光功率提高至 750 kW，进一步降低噪声^[4]。

为实现这些增强功能，所有这些耦合的光学腔都需要通过伺服控制系统锁定。干涉臂中的法布里—珀罗腔的腔长起伏稳定到小于 100 fm，而其他的光学腔保持在 1 到 10 pm 以内。同时，每个镜子需要调节并保持与光轴完美重合，偏差在数十个纳弧度以内。

为实现这些增强功能，所有这些耦合的光学腔都需要通过伺服控制系统锁定。干涉臂中的法布里—珀罗腔的腔长起伏稳定到小于 100 fm，而其他的光学腔保持在 1 到 10 pm 以内。同时，每个镜子需要调节并保持与光轴完美重合，偏差在数十个纳弧度以内。



高新 LIGO 探测器能够探测极微弱的引力波应变，必然对环境中的微小振动非常敏感。它本质上是一个巨大的地震仪，可以感应附近路上的车辆，远处海浪拍岸，还可感应地球上几乎所有重要的地震。这些机械振动是低频端的主要噪声来源。为降低震动噪声，每个镜子都被悬挂在一个复杂的四级摆系统上，如图 2 所示；而这个四级摆系统又固定在一个主动震动隔离平台上。以此来滤除大部分机械波，隔离外界的干扰^[5]。

在中间频段，镜子和悬挂装置中分子的布朗运动引起的热噪声是主要噪声源。干涉仪中镜子直径 34 cm，厚 20 cm，重达 40 kg，选择超高纯熔石英材质，以降低热噪声。镜子表面的抛光精度达千分之一激光波长，也就是 1 nm 左右(图 3)。镜子上镀了超低损耗电介质光学膜，300 万个光子打在上面只会吸收一个光子。这些宝石般的镜子通过 0.4 mm 粗的石英光纤被悬挂在上一级单摆上。

此外，除激光之外所有部件都安装在超高真空中的震动隔离平台上。在干涉臂 1.2 m 粗的管道中，气压保持小于 1 μ pa，以降低空气瑞利散射产生的相位起伏。

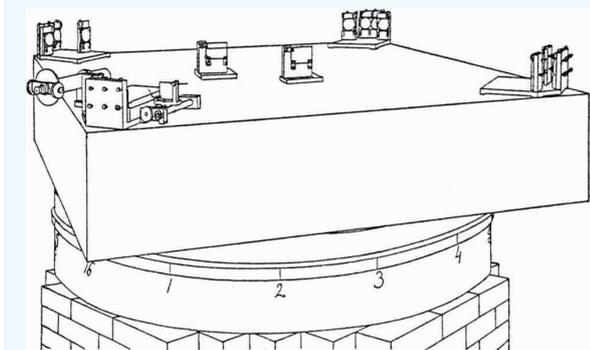
图3 LIGO使用的镜子的照片^[5]

图4 迈克尔孙—莫雷实验中的干涉仪装置(它固定在一块石板上,石板浮动在水银槽上)

所有这些技术措施加在一起,使得高新LIGO探测器可以测量到 10^{-19} m,也即小于万分之一的质子的长度变化。在最灵敏的100—300 Hz频段,应变灵敏度达到前所未有的 $10^{-23}/\sqrt{\text{Hz}}$,使它能够成功测量到GW150914这个双黑洞合并事件。

3 迈克尔孙干涉仪、激光器

马克斯·普朗克引力物理研究所所长布鲁斯·艾伦(Bruce Allen)在评论成功探测引力波这个突破时说^[1]：“爱因斯坦当初认为引力波太过微弱无法探测，并且不相信黑洞的存在。不过，我不认为他会介意自己弄错了。”这个历史过程确实非常有戏剧性。其实，LIGO探测器与爱因斯坦、相对论还有其他有趣的联系。

前面讲到，LIGO探测器本质上是一个迈克尔孙干涉仪。发明这种干涉仪的美国物理学家阿尔伯特·迈克尔孙和爱德华·莫雷在1887年进行了一项实验，试图探测地球相对于“以太”的运动。图4是其干涉仪装置图。19世纪后期，科学家们认为光在“以太”中传播。由于地球以每秒30 km的速度围绕太阳运动，因此在一年当中的大部分时刻，地球应该与“以太”有相对运动。两个垂直方向的光速应该有所不同，在干涉仪上表现为条纹的变化。但是，实验的结果是否定的。这个实验被称为“史上最著名的失败实验”，因为它否定了以太理论，促使爱因斯坦提出光速不变原理——狭义相对论的两个基础公设之一。爱因斯坦后来又在狭义相对论的基础上提出了广义相对论，而广义相对论预言了引力波。因此，这个戏剧的情节链条是这样的：一个原初版的迈克尔孙干涉仪促使了相对论的诞生，相对论预言了引力波，一个改良后的迈克尔孙干涉仪又证实了引力波的存在。爱因斯坦和我们都应当感谢这一种叫“迈克尔孙干涉仪”的测量仪器。

更有意思的是，爱因斯坦除了预言引力波，其实也为探测引力波立下了汗马功劳。

在迈克尔孙—莫雷实验中，首先使用准单色的钠黄光来调节干涉仪至等臂长的位置，然后切换至白光进行测量。因为19世纪没有现代的技术手段，测量是靠人眼观察来进行的。白光产生的彩色干涉条纹相比单色光产生的条纹要容易分辨得多。但是，白光或者钠黄光是无法用在现代的大型引力波探测器上的。一方面，这些光源空间上过于发散，经过这么长干涉臂后只有很小一部分光能反射回来；另一方面，这些光源的相干性太差，对臂长差异忍受度低，而且无法进行共振增强。引力波探测器都采用激光作为光源，因为激光的发散角小，相干性好。而激光技术正是在爱因斯坦的受激发射理论上发明发展起来的。意识到这一点，是不是更加佩服爱因斯坦的伟大了。

目前高新LIGO探测器上使用的激光器是波

长为 1064 nm 的掺 Nd 固体激光器，它由一个小功率的种子激光器和两个放大模块组成^[6, 7]，如图 5 所示。种子激光采用单块晶体的非平面环形腔设计，非常稳定、小巧、可靠，可输出 2 W 功率的单纵模、单横模激光。在经过由 4 块晶体组成的单程放大器后，功率可提高至 35 W。然后注入锁定一个同样有 4 块晶体的环形腔振荡器，获得 220 W 输出。在这之后，激光系统还要通过两次模式清理，获得完美的高斯基模，稳定功率，锁定至高精度参考腔以稳定波长，然后才被注入至干涉仪。这里采用的固体激光技术是 LIGO 建设阶段最为成熟可靠的技术，未来可以采用光纤激光技术简化激光器系统^[8, 9]。激光系统中的放大器部分可以替换为两级单模 Yb 光纤放大器，其增益介质为细小的单模光纤，光在 10 μm 粗的纤芯中传播。因为单模光纤已经是完美的分布式空间滤波器，所以激光系统也就不再需要后面的模式清理腔了。

4 其他引力波探测器

在 GW150914 事件中，引力波首先到达美国南部路易斯安那州的探测器，6.9 ms 后到达美国西北部华盛顿州的探测器。从这个时间差可以判断引力波源在南天球，但是，再精确的定位就不可能了。LIGO 关注的引力波的波长在 3000 km 量级，波源的定位能力决定于波的衍射，也就是波长除以探测器间距。这是两个相同的 LIGO 探测器建设在美国大陆两端的原因(图 1)。但是这个间距还是远远不够的。当然，两个或多个探

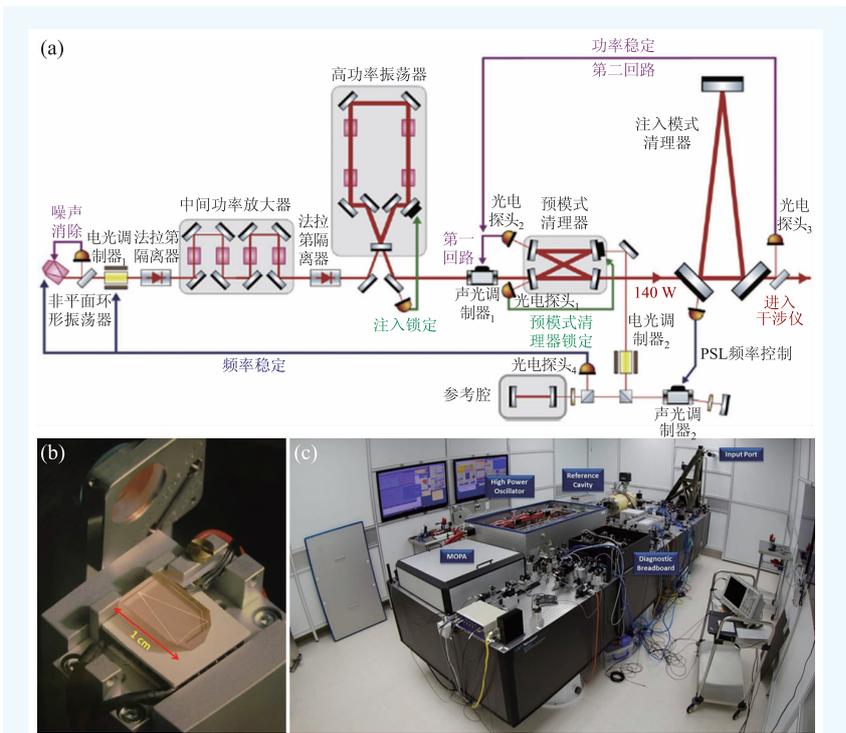


图 5 (a)激光器系统结构示意图^[6]；(b)非平面环形腔种子激光器；(c)LIGO 激光器平台照片^[5]



图 6 欧盟设计计划中的爱因斯坦望远镜^[10]

测器联合进行测量，可以同时有效排除虚假信号的干扰，极大地提高测量的可信度。在高新 LIGO 探测器之后，陆续还会有意大利的高新 Virgo 和日本的 KAGRA 完成。在首次探测到引力波的新闻发布之后，印度政府随即通过了印度的 LIGO 计划。这些激光干涉装置将组成一个大型的引力波探测器网络，联合进行引力波测

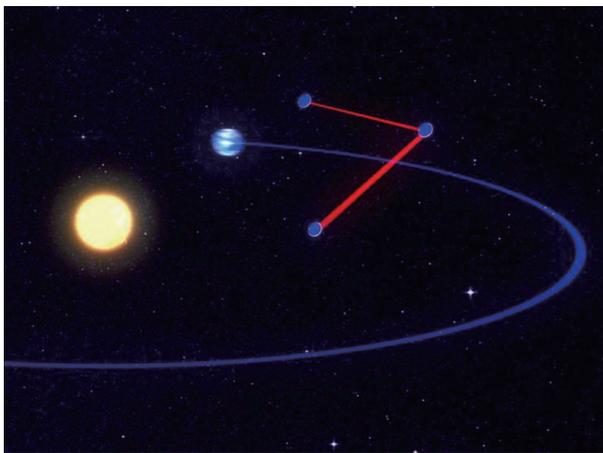


图7 演化的激光干涉空间天线^[11]

量与定位。

另外，测量不同偏振态的引力波也是需要考虑的问题。像 LIGO 这样的 L 字型激光干涉仪，因为方位角的关系，总会有某个线偏振态是无法感应的。在地球表面不同位置，布置不同方向的引力波探测器，可以解决这个问题。

欧盟的科学家还提出了一个所谓第三代地基引力波探测器，名字就叫作“爱因斯坦天文台”（图 6），目前还在设计研究阶段^[10]。这个探测器将像日本的 KAGRA 一样放置在地下，以此来降低引力梯度噪声和震动噪声，提高低频端的灵敏度。所有镜子将被冷却至极低温度，以降低中间频段的热噪声。它由呈等边三角形的三个臂组成，臂长为 10 km，探测目标在比 LIGO 略低的频段。

为测量更低频率的引力波信号，干涉仪的臂长需要进一步增加，科学家们把视线望向了空间。激光干涉空间天线(laser interferometer space antenna, LISA)是欧空局提出的空间引力波探测计划，中间经历了两次修改，目前的设计称为演化激光干涉空间天线(evolved laser Interferometer space antenna, eLISA)(图 7)。eLISA 是由间隔 100 万公里，呈近似等边三角形的 3 个卫星组成的一个巨型的激光干涉仪。由于它百万公里的臂长，没有地面的震动干扰，可探测 0.1 mHz—1 Hz 频段的丰富天体过程的引力波信号^[11]。

我国由于空间技术的发展，对于空间激光干

涉引力波探测表现出强烈的兴趣。目前，有两组科学家提出了“太极”和“天琴”两个空间激光干涉引力波探测计划。其中“太极”计划有两个方案：一是参加欧空局的 eLISA 双边合作计划；二是在 2033 年前后发射中国的引力波探测卫星组，与预计 2035 年发射的 eLISA 互相补充和检验。“天琴”计划则是由中国科学家主导的空间引力波探测计划，与 eLISA 和“太极”类似，只是它采用地球轨道。因此，“天琴”的技术难度略低，不过受地球重力场影响略大^[12]。但是，“天琴”和“太极”计划至今还都没有跨过立项的门槛。

5 结束语与展望

爱因斯坦当年认为，自己预言的引力波太过微弱而无法探测，这是基于当时技术条件合乎情理的判断。技术的发展需要时间，而这 100 年技术的发展已经远超当年最聪明之人的想象了。爱因斯坦提出了受激发射理论，但是他也无法预测基于此理论发明、发展的激光技术会如此重要，在科研、国防、工业、医疗、互联网等社会生活的方方面面得到广泛应用，也不会想到，基于自己理论发明的激光技术会在探测基于自己理论预言的引力波中发挥关键作用。

基础科学和技术的发展有各自内在的逻辑，但更重要的它们确实互相促进。首次探测到引力波可以说主要是一项技术的突破，从此人类有了“倾听”宇宙的能力。已有的、在建的、未来的地面、地下、空间激光干涉引力波探测器组成庞大的“助听器网络”，使得人类能够分辨宇宙深处波澜壮阔的乐章。探测到 GW150914 引力波信号，只是一个新时代的开端。可以预见，随着激光干涉引力波探测器灵敏度的进一步提高，引力波天文学将极大地提升人类对宇宙的了解，并有可能带来系列基础科学新发现。

更为有趣的，有人把首次探测到引力波与 1887 年赫兹成功探测到电磁波联系起来。引力和

电磁力都是长程力，可以远距离传播和探测。当年，赫兹在论文的结尾写道，“我不认为我发现的无线电磁波会有任何实际用途”。但是，我们都已经了解，现代生活已经离不开电磁波了。爱因斯坦当年也不可能认为引力波会有实际用途。引力波将首先被应用到天文和宇宙学的研究上，它有没有可能像电磁波一样应用于通信，应用于星系尺度的长距离联络？虽然目前看起来匪夷所思，只可能存在于科幻小说中，但技术的发展常给人惊喜，谁知道未来会怎样呢。

参考文献

- [1] Gravitational Waves Detected 100 Years After Einstein's Prediction. at <<https://www.ligo.caltech.edu/news/ligo20160211>>
- [2] Abbott B P *et al.* Phys. Rev. Lett., 2016, 116:061102
- [3] Drever R W P, Raab F J, Thorne K S *et al.* Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory (LIGO) Technical Report. (1989). at <<https://dcc.ligo.org/LIGO-M890001/public/main>>
- [4] The LIGO Scientific Collaboration & The Virgo Collaboration. GW150914: The Advanced LIGO Detectors in the Era of First Discoveries. (2016). at <<http://arxiv.org/abs/1602.03838>>
- [5] LIGO. at <<https://www.ligo.caltech.edu/>>
- [6] Aasi J *et al.* Class. Quantum Gravity, 2015, 32:074001
- [7] Winkelmann L *et al.* Appl. Phys. B, 2011, 102:529
- [8] Theeg T, Sayinc H, Neumann J *et al.* IEEE Photonics Technol. Lett., 2012, 24:1864
- [9] Zhang L, Cui S, Liu C *et al.* Opt. Express, 2013, 21:5456
- [10] Einstein Telescope. at <<http://www.et-gw.eu/>>
- [11] eLISA Gravitational Wave Observatory. at <<https://www.elisascience.org/>>
- [12] Luo J *et al.* Class. Quantum Gravity, 2016, 33:035010

实验室低温制冷系统



超低振动

4K-1100K

显微应用

光谱学应用

纳米应用低温探针台

超低振动 (3-5nm)

5K样品台温度



Advanced Research Systems

+1 610 967 2120

www.arscryo.com

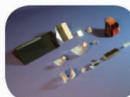
ars@arscryo.com

标准光学元件库存---供您随时选用

总量多达10万片，
超过700个品种规格的透镜，
棱镜，反射镜，窗口，
滤光片等常用光学器件；
涵盖紫外，可见，
近红外，
红外等光学应用领域。



光学透镜



光学棱镜



可见光学元件



红外元件



颜色滤光片



窄带干涉滤光片



北京欧普特科技有限公司
Beijing Golden Way Scientific Co.,Ltd

地址：北京市朝阳区酒仙桥东路1号M7栋5层东段
电话：010-88096218/88096099 传真：010-88096216
邮箱：optics@goldway.com.cn