

引力波的发现是充分应用光机产品的结果

注：本文中部分图片和视频资料来源于美国“激光干涉引力波天文台”（LIGO）官方网站，如有疑问，请登陆 www.ligo.caltech.edu 进行核实和查询。

引力波：

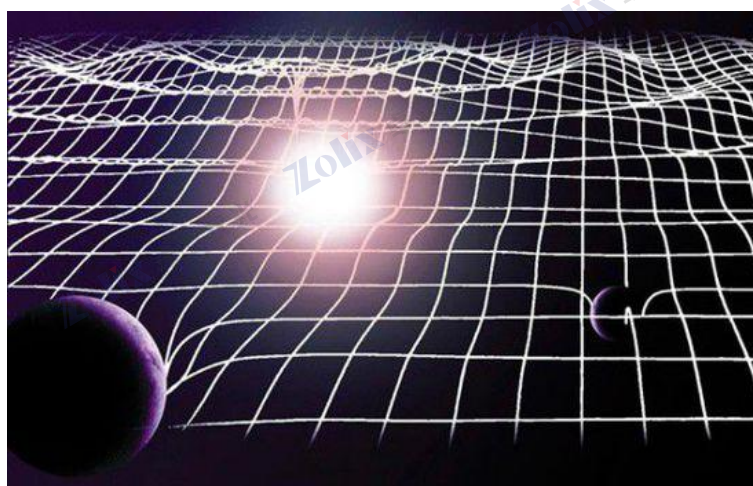
引力波（gravitational waves）也称重力波，引力波是爱因斯坦广义相对论所预言的一种以光速传播的时空波动，是时空曲率的扰动以行进波的形式向外传递的一种方式。如同电荷被加速时会发出电磁辐射，同样有质量的物体被加速时就会发出引力辐射，这是广义相对论的一项重要预言。

引力波与流体力学中的重力波很相似，当液体表面或内部液团由于密度差异离开原来位置，在重力和浮力的综合作用下，液团会处于上下振动以达到平衡的状态，即产生波动。



水波

引力波则是由于空间质量和速度的变化导致空间产生的波动。



引力波形成示意图

引力波的发现：

美国科研人员利用激光干涉引力波天文台(LIGO)于去年9月首次探测到引力波。LIGO在

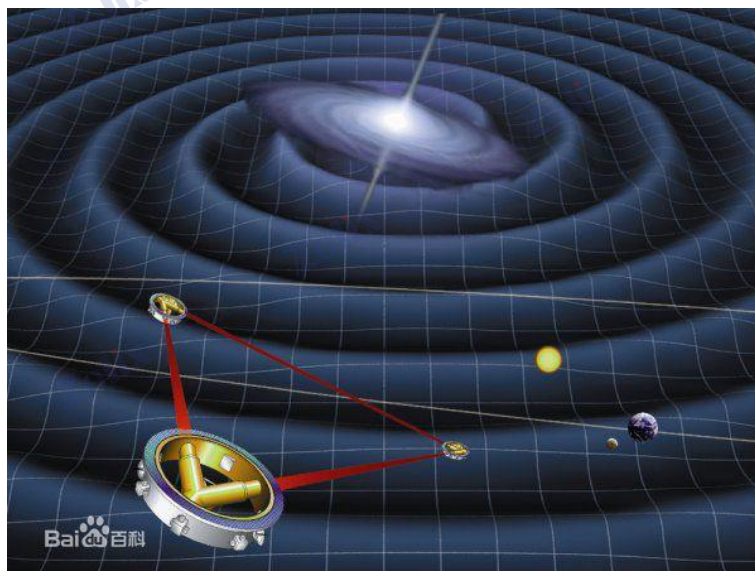
2016年2月11日宣布“探测到引力波的存在”，该引力波是由两个黑洞于约13亿年前碰撞、结合所传送出的扰动，于2015年9月14日抵达地球，被LIGO的精密仪器侦测到。引力波的存在，证实了爱因斯坦100年前所做的预测，爱因斯坦广义相对论实验验证中最后一块缺失的“拼图”被填补了。



激光干涉引力波天文台（LIGO）

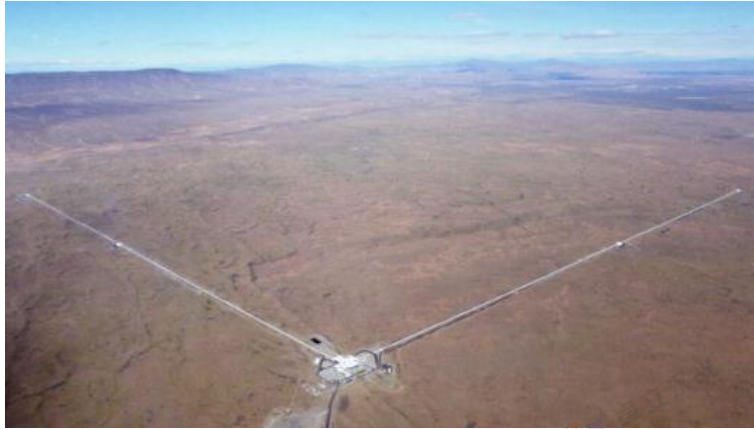
引力波的探测：

引力波是横波，在远源处为平面波；有两个独立的偏振态；携带能量等。引力波携带能量，应可被探测到，但引力波的强度很弱，而且，物质对引力波的吸收效率极低，直接探测引力波极为困难。我们在地球上可观测到的最强引力波来自很远且古老的事件，在这事件中大量的能量发生剧烈移动（例子包括两颗中子星的对撞，或两个极重的黑洞对撞）。这样的波动会造成地球上各处相对距离的变动，但这些变动的数量级应该非常非常小，以LIGO引力波侦测器的双臂而言，这样的变化小于一颗质子直径的千分之一，即 10^{-19} 米左右。



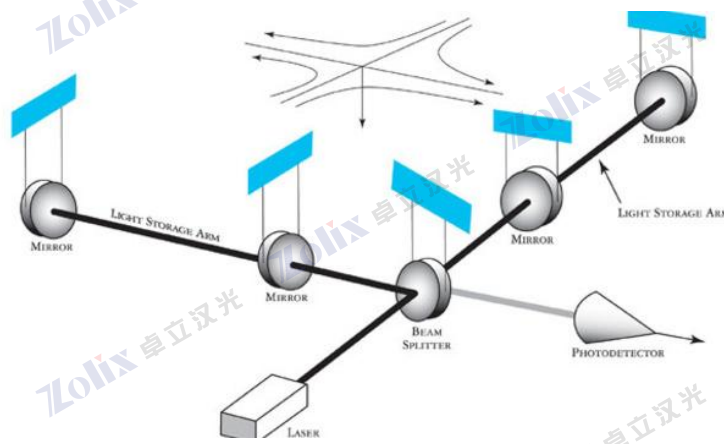
引力波探测示意图

1991年，麻省理工学院与加州理工学院在美国国家科学基金会（NSF）的资助下，开始联合建设“激光干涉引力波天文台”（LIGO）。



LIGO 航拍图

LIGO 的主要部分是两个互相垂直的干涉臂，臂长均为 4000 米。在两臂交会处，从激光光源发出的光束被一分为二，分别进入互相垂直并保持超真空状态的两空心圆柱体内，然后被终端的镜面反射回原出发点，并在那里发生干涉。若有引力波通过，便会引起时空变形，一臂的长度会略为变长而另一臂的长度则略为缩短，这样就会造成光程差发生变化，因此激光干涉条纹就会发生相应的变化。其原理图如下所示：

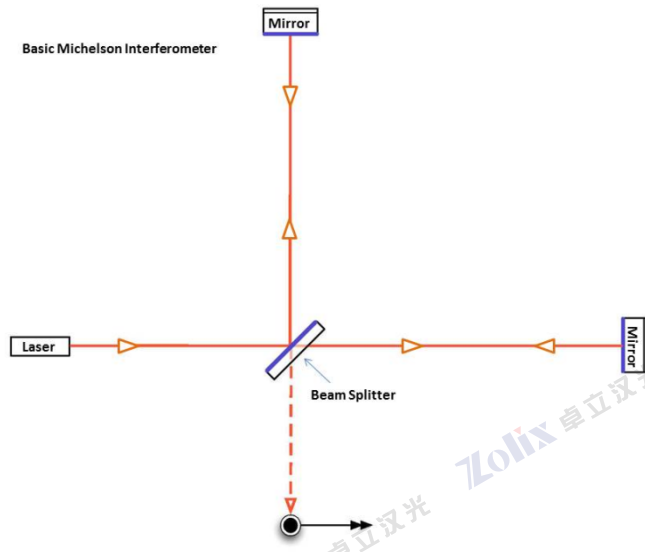


引力波探测光路图



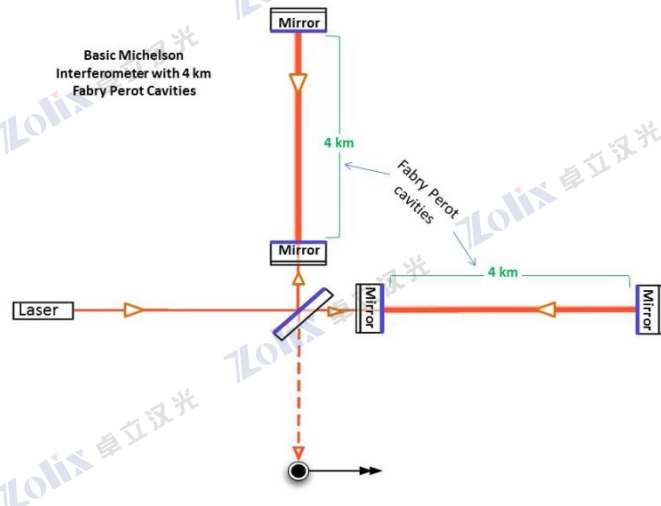
引力波探测原理视频（英文原版）

事实上，LIGO 的引力波探测装置是采用迈克尔逊干涉仪的原理制成。



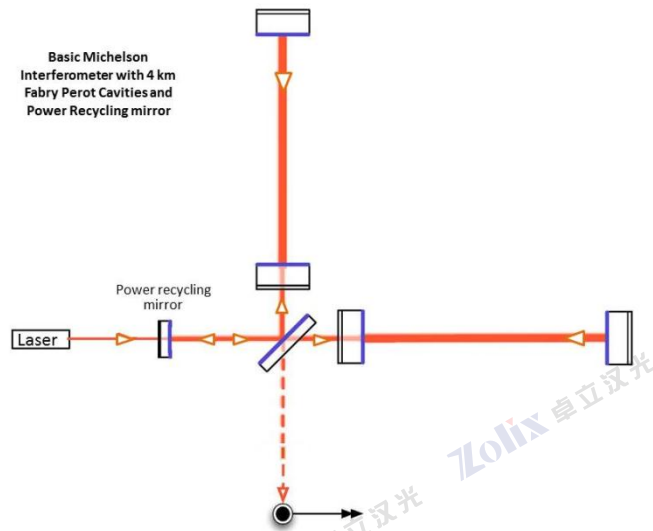
迈克尔逊干涉仪原理图

为了探测超级轻微的扰动，迈克尔逊干涉仪的双臂越长越好，LIGO 的双臂最终被设计为 4 千米长。事实上，4 千米长的光程还不够，所以 LIGO 在双臂上又增加了法布里-珀罗干涉腔，获得了等效于 1120 千米长的光程。



在迈克尔逊干涉仪基础上，4 千米长的双臂中增加法-珀干涉腔的光路图。

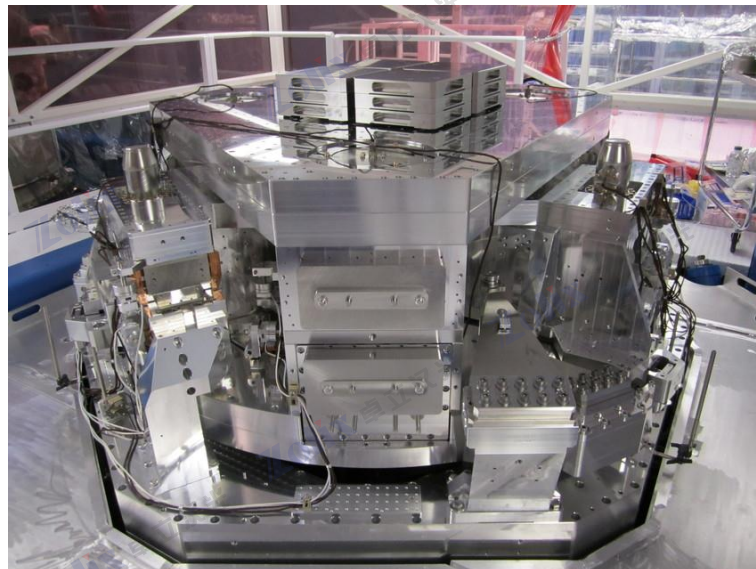
此外，还有一个问题，虽然等效光程达到 1120 千米，若想直接探测到引力波，激光器的功率理论上需要达到 75 万瓦 (750 kW)，为了解决此问题，LIGO 在激光器和分束器之间增加了一个“功率再循环镜片”(“Power recycling mirrors”), 成功地将激光器功率降低了 3750 倍，所以实际上，LIGO 的激光器输出功率仅为 200W。



增加了“功率再循环镜片”的光路图

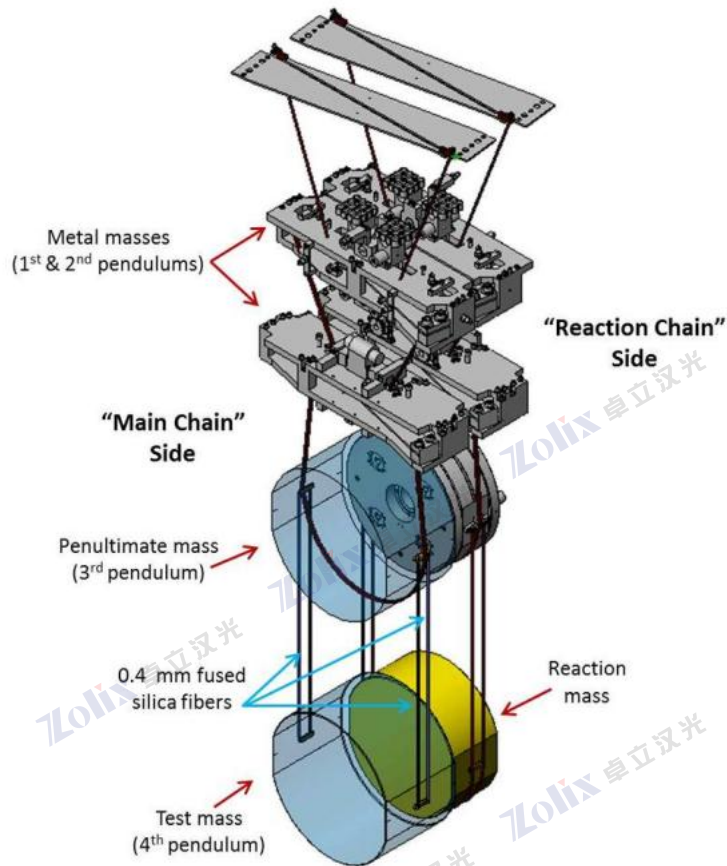
此外，LIGO 要求对扰动极其敏感，以至于几千里内任何稍大的振动，都可能把引力波的信号淹没。所以 LIGO 采用了双重减震系统：“主动”减震系统和“被动”减震系统。

“主动”减震系统是由内部振动隔离（Internal Seismic Isolation，简称 ISI）系统构成，其原理是：探测周围地面所有频率的振动，然后主动产生一个反向振动，将其抵消，保留引力波引起的振动。



LIGO 的“主动”减震系统（ISI 系统）照片

“被动”隔震系统是通过 4 级钟摆机构（LIGO 称其为“quad”）将镜片悬吊起来的复杂系统组成。



LIGO 的“被动”减震系统（quad 机构）示意图

整个 quad 机构分两侧，“主链”侧（“Main Chain” side）面向激光束，“反作用链”侧（“Reaction Chain” side）用于进一步消除外界扰动，保证最终只剩下引力波引起的振动。



Quad 照片（局部）

此外，LIGO 还具有非常强大的真空系统，腔体内的真空度为海平面气压的一万亿分之一。如此高真空，主要两个原因：

1. 消除空气分子传热和流动：镜片可能会受热传递影响而变形。另外，如果腔内空气分子太多，可能会产生气流，光线穿过气流时将发生折射现象，导致光线偏离直线，就像公路上形成的热浪。

2. 消除任何灰尘进入激光腔，造成杂射光的可能。



LIGO 的激光和真空设备区



LIGO 的真空管路

意义：

引力波的重大发现意义重大，从科学意义上看，引力波可以直接与宇宙大爆炸连接。广义相对论中预言的引力波也可以产生于宇宙大爆炸中，这就是说大爆炸之初的引力波在 137 亿年后的今天仍然可以探测到。一旦发现了宇宙大爆炸时期的引力波，就可以揭开宇宙的各种谜团，甚至了解宇宙的开端和运行机制。

引力波的重大发现是充分应用光机产品的结果：

“激光干涉引力波天文台”（LIGO）在探测和发现引力波的装置中，大量采用光机类产品及其设计原理，比如：

1. 隔振技术：

由于外界的微振动直接影响精密仪器设备（如引力波的探测设备）的测量精度。因此，在光学、电子、精密机械制造、冶金、航天、航空、航海、精密化工和无损

检测等领域以及其他机械行业的精密试验仪器、设备振动隔离的关键装置中，其隔振性能的好坏直接影响试验结果的准确性和可靠性。

近年来，卓立汉光也一直关注并努力改善光学平台的动态力学特性，并致力于光学平台隔振性能的研究。卓立汉光生产、销售的光学平台是通过隔振技术的不断改进完善并经过包括科研单位及各大院校的实验、演示、创新开发出来的高科技产品。



卓立汉光光学平台

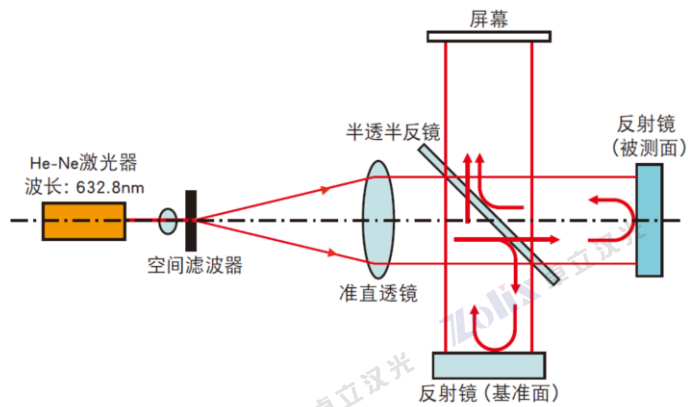
从 2015 年起，卓立汉光生产的光学平台，全面采用整体焊接支架，结构更稳定、隔振效果更好。



2. 迈克尔逊干涉仪实验装置

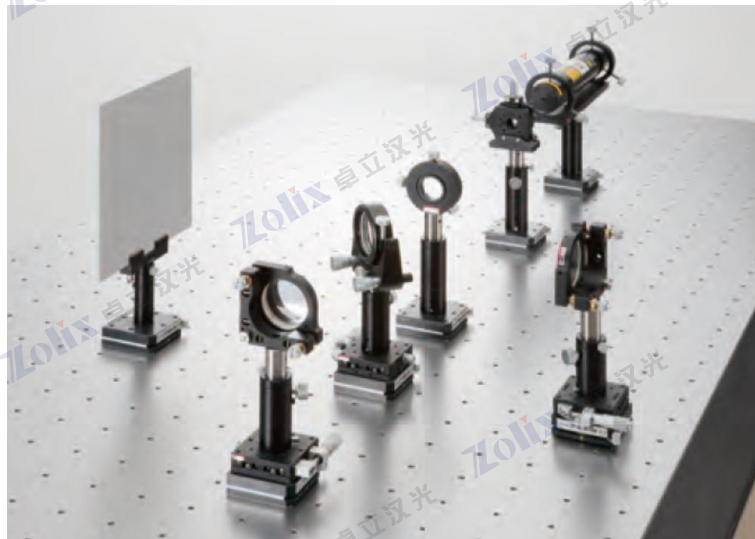
LIGO 探测引力波装置的说明已经提到，该装置的光学原理雏形是基于迈克尔逊干涉仪，卓立汉光可提供迈克尔逊干涉仪实验装置套件，相关产品如下：

原理图：



迈克尔逊干涉仪原理图（光路图）

套件照片：



迈克尔逊干涉仪实验装置照片

实验装置组成：

迈克尔逊干涉仪	组件名称	组件型号	数量
IFS2-MI-25	激光组件	IFC2-L	1
	空间滤波器组件	IFC2-SF	1
	准直镜组件	IFC2-CL	1
	反射镜组件	IFC2-M	2
	半透半反镜组件	IFC2-BS	1
	屏幕组件	IFC2-SC	1

另外，卓立汉光还提供各种精密位移产品、光学调整架、光学元件等产品，为您拓展类似的光学系统或搭建各类光学实验提供丰富的选择。



卓立汉光光学调整架



卓立汉光光学元件



卓立汉光电动位移台



卓立汉光手动位移台

Zolix 卓立汉光 Zolix 卓立汉光
Zolix 卓立汉光 Zolix 卓立汉光
Zolix 卓立汉光 Zolix 卓立汉光