

文章编号: 1000-8349(2005)03-0195-10

# 引力波和引力波望远镜的发展

程景全<sup>1,2</sup>, 杨德华<sup>2</sup>

(1. 美国国立射电天文台, 图桑 AZ85721; 2. 中国科学院 国家天文台 / 南京天文光学技术研究所, 南京 210042)

**摘要:** 简要回顾了广义相对论中相关的引力波理论, 讨论了对引力波进行探测的重要意义和几种可能的途径; 系统介绍了近 50 年来国际上对引力波进行探测的主要活动, 以及当前几个具有代表性的引力波望远镜工程的进展。

**关键词:** 天体物理学; 引力波; 综述; 引力波望远镜

**中图分类号:** P142.8<sup>+</sup>4; P111.4 **文献标识码:** A

## 1 引力波理论概述

重力波 (gravitational wave) 又称引力波, 是爱因斯坦在广义相对论中首先提出的。在爱因斯坦眼中, 广阔无垠的宇宙中的时间和空间就如同一幅幅平整的布匹一样, 但当它们存在一定的高度集中的质量或者高度集中的能量时, 这些质量或能量就会使其附近的时间和空间发生卷曲。时间和空间场的卷曲就会产生引力。卷曲非常小时, 会产生如同太阳系各星球之间由于万有引力而存在的运动现象, 这种运动现象可以用经典力学来解释; 卷曲很强时, 将呈现出一种非常强的非线性形式。这时空间的进一步卷曲可以由空间的自身卷曲产生, 而不需要任何附加的质量或者能量存在。黑洞就是这种非线性形式的重要表现之一。从时间和空间场角度来看, 黑洞所在的地方是时间和空间场中的一个奇点 (singularity)。由质量引起的空间和时间的曲率变化一般十分微小, 不易被探测到。但是在特殊情况下, 当一个场的曲率迅速变化时, 也就是说, 引起时间和空间卷曲的集中的质量或者能量的位置不断发生变化时, 这种时空卷曲现象就会以光速迅速向四周扩展, 与池塘中水波的传播方式十分类似。这种波动即为引力波<sup>[1~3]</sup>。

在自然界中, 电磁波是人们熟悉的一种波动形式。可以说, 电磁波由电荷的加速运动产生。类似地, 引力波则由质量的加速运动产生。和电磁波一样, 引力波同样以光速在空间传播。电磁波的性质决定于粒子电荷的大小和运动加速度。电磁波有各种不同的时间频率, 因此存在各种不同的表现形式; 引力波的性质也是与产生它的质量大小和运动加速度相关。引力波同样存在各种不同的时间频率。在描述电磁波传播时, 可以用一些相应的粒子, 比如光子

收稿日期: 2004-09-14; 修回日期: 2005-04-14

的运动来代替电磁波(光波)的传播;在描述引力波时,也可以用类似的引力所对应的量子力学上的粒子、引力子(graviton)来描述其传播。不过,这种用粒子来描述引力波的理论并没有得到广泛认同,其中一个重要问题是这种粒子在真空中究竟有没有能量或者质量。在电磁波中,电磁波由于它的交变电场振动方向的不同而存在不同的极化方向;引力波也存在不同的极化方向。用比较形象的术语来说,平坦的时间和空间场是一个各向同性的坐标系,这个坐标系可以用一个完全对称的圆球面来表示。在受到引力波影响的情况下,空间和时间场就不再是完全对称的,这时的场在某一个方向上会不断地产生压缩和扩张,而在与其垂直的方向上则会不断地产生扩张和压缩。时间和空间场的形状如同一个形状不断变化的球体,从一个椭球,返回到完全对称的球体,再变成长轴在其垂直方向上的另一个椭球,如此不断地向外空间传播。一般来讲,引力波前进的方向和空间时间场的变形方向也正好互相垂直。目前的认识认为,引力波和电磁波类似,也存在两个极化方向上的波动。其中一个它是使空间产生的压缩和扩张方向和坐标轴方向相平行的波动。如果在空间坐标系中,引力波在  $Z$  轴上传播,那么这时空间的压缩和扩张的方向是和  $X$ 、 $Y$  轴方向相同,记为引力波的十字形分量  $h_+(t)$ ;而另一个极化分量所产生的扩张和压缩则和  $X$ 、 $Y$  坐标轴方向成  $45^\circ$  角,记为引力波的交叉形分量  $h_\times(t)$ 。任何引力波都是这两个分量的代数和,即  $h(t) = F_+ h_+(t) + F_\times h_\times(t)$  [1], 式中的两个系数决定于引力波的传播方向和坐标系的夹角。不过,引力波真正的传播波形至今仍然没有完全确定,人们对引力波的很多现象仍然在探讨研究之中。

尽管引力波和电磁波十分相似,但它们肯定是两种完全不同的波动形式。首先广义相对论描述的引力波所满足的方程是非线性方程,而电磁波所满足的方程是线性方程。非线性方程不存在线性叠加的性质,求解时要困难得多。在很弱的引力波情况下,可以用近似的线性方程来代替这种非线性方程。引力波的能量也要比电磁波的能量微弱得多。据估计,它只有相应的电磁波能量的  $10^{-38}$ 。因此,只有天文量级的质量的加速运动才能够产生可能测量到的引力波。电磁波可以和自然界中的很多物质发生作用,而它们之间除了相干的现象外,一般很少发生相互作用;引力波则不同,它们几乎不和任何其他物质发生作用,可以说,引力波无声无息地通过地球而不为人们所觉察,但是引力波和引力波之间则会发生相互作用。由于电磁波和物质之间存在一定的相互作用,人们可以发展各种望远镜来捕获不同频率的电磁波,将它们在很大空间中的能量集中起来,以利于对一些十分微弱信息的测量(关于不同频率电磁波天文望远镜的原理和设计,请参阅参考文献[4])。然而,由于引力波和物质完全不发生作用,因此人类既不能将微弱的引力波集中起来,也不能直接对引力波进行测量,而只能利用间接方法来探测引力波的存在。

## 2 引力波的存在及其特征振幅

质量的存在会引起空间场的弯曲,所以当光线经过太阳边缘时,太阳可以使光线发生弯曲,这种现象已经得到天文观测的证实。质量的加速运动会产生引力波,但是根据牛顿第三定律,即动量守恒定律,一个质量在一个方向上的加速度必然会伴随着另一个质量在另一个方向上的加速度,而它们的动量,即速度和质量的乘积应该在两个方向上完全相等。从这个意义上讲,这两个质量所产生的引力波也可能会完全抵消。不过如果两个质量的运动并不是在同

一方向上,那么这种相互的抵消就不是完全的,这时就有引力波产生出来。

一种产生引力波的典型运动形式是质量体的旋转运动。这种旋转的质量体可以是一个单一的质量,也可以是一对相关的质量。而引力波的释放与运动着的质量的四极矩 (quadrupole moment) 相关,四极矩愈大,所释放的引力波就愈多。球形的质量的四极矩为零,而任何偏离球形的质量的四极矩均不为零。从这个理论出发,双星系统,特别是在邻近合并时的双星系统,是引力波的一个重要来源。根据研究,中子双星的合并阶段会产生可以探测的较强的引力波。在黑洞附近及其内部,质量的运动应该呈旋涡状,并且运动速度非常高,所以在黑洞将邻近星球吸入过程中,应该有相当的引力波发射出来。另外,超新星爆发、双黑洞合并过程 (blackhole binary coalescence)、宇宙弦 (cosmic strings) 和宇宙畴壁 (domain wall) 等都会产生引力波的扩散,成为可能观测到的引力波源。人们对不同天体发出的不同电磁波 observation 已经积累了十分宝贵的天文学和物理学知识。而对引力波的观测可以很好地帮助天文学家了解这些现象背后所对应的天体运动的过程和机制。可以说,引力波望远镜是人类对宇宙进行观测的最后一只眼睛。此外,由于人们对引力波本身的性质、特点还有很多不同的看法,所以对引力波的观测就有着更加特殊的意义。

Hulse 和 Taylor<sup>[12]</sup>、Taylor 和 Weisberg<sup>[5]</sup> 相继发表了利用脉冲双星的观测来验证引力波存在的文章。他们根据特定的脉冲双星周期随时间的微小变化,指出这种双星运动速度的变化所对应的能量损失正好等于这个系统所释放的引力波的能量。1993 年 Taylor 和 Hulse 因为 1975 年脉冲星的发现和有关引力波能量计算的成就而荣获该年度的诺贝尔奖。从此,天文学家就开始了到达地球的引力波进行观测的努力。

对引力波的观测实际上就是对它的特征振幅值进行估计。所谓引力波特征振幅就是它所对应的时间空间场的相对应变变量。这个应变变量值十分微小。举例来说,一个质量为 500 t 的铁棒飞速旋转产生的引力波所引起的特征振幅值仅仅为  $10^{-40}$ , 这样微小的距离变化是无法测量的。而对于室女座中的一个中子双星在合并时所产生的引力波来说,它在地球上所产生的特征振幅值约为  $10^{-21}$  量级,这个量级用现代测量手段还是有可能测量出来的。据估计,到达地球的引力波的最大特征振幅在  $10^{-20}$  左右,其中黑洞和不对称超新星所发出的引力波具有相对较大的特征振幅,而中子双星所发出的引力波则具有稍小的特征振幅。引力波的特征振幅同时还和引力波源与地球的距离呈反比,对于距离地球小于 1000 Mpc 的引力源,其特征振幅应该在  $10^{-20}$  和  $10^{-22}$  之间。双星型引力波源的引力波频率和它们的旋转周期即它们之间的距离相关。对于距离相距 100 km 的双星,其周期大约在几秒左右,引力波的频率约为 100 Hz; 对于距离更小 (比如 20 km)、周期也更小的双星,其所产生的引力波的频率约为 1000 Hz。

### 3 引力波望远镜

#### 3.1 谐振式引力波望远镜

引力波的探测是从上世纪 60 年代开始的,当时美国马里兰大学的 Joseph Weber 利用在空间悬挂着的巨大实心铝圆柱及一系列压电晶体传感器,来测量引力波影响下所产生的应变情况。这些铝圆柱具有很高的品质因子 (品质因子在动态系统中等于阻尼系数的倒数,其数值高表示系统在振动中的能量损失很小),其自振频率在 1 kHz 以上。这就是最早的引力波望远

镜。由于这种望远镜是利用质量在引力波影响下产生谐振的原理建造的，所以又称为谐振式的引力波望远镜。

这种望远镜的主要问题是它受到很多非引力波的影响，包括地震波动 (seismic wave) 的干扰、声音引起的空气振动、温度和湿度变化引起的振动，以及空气中分子的布朗运动引起的振动等。为了排除这些干扰，Weber 在两个相距 1000 km 的地方分别设置了两个同样的铝圆柱。引力波激发铝圆柱的振动，Weber 用一个类似地震记录仪的仪器来同时记录铝圆柱的响应。只有当两个铝圆柱同时有响应时，才能记录下它们相应的响应值，这样就排除了许多其他因素影响。该仪器的灵敏度号称达到  $10^{-18}$  左右。次年，Weber 利用这些数据发表了第一篇关于引力波观测的论文，引起了很大轰动。但是后来发现，他所记录的响应量级远远超过了实际的引力波所应该产生的响应。由于多种因素影响，Weber 的仪器所记录的噪声远远大于引力波所引起的响应值。

此后，意大利、澳大利亚和美国学者也建造了类似的更为精确的铝圆柱探测器。新的引力波望远镜引进了更为复杂的地震波动隔离措施，同时为了排除声音和温度引起的振动，有的还采用了低温和真空措施以减少其他噪声的影响。其中最有名的是，意大利罗马附近的一个重达 2300 kg、温度为 0.1 K 的圆柱式引力波探测器。然而，所有这些仪器仍然有太大的误差，很少能够得到令人信服的数据。不过尽管如此，一些十分灵敏和精确的谐振式引力波望远镜仍然是下面所要介绍的激光干涉式引力波望远镜的一个重要辅助验证手段。

### 3.2 激光干涉式引力波望远镜

#### 3.2.1 基本原理

根据前面的讨论，当引力波经过某一个空间时，空间场将按照引力波的频率发生周期性变形，从而导致该空间中的两个相隔一定距离的自由质量之间的距离发生变化。当然这种变化十分微小。如果在垂直于引力波传播方向的一个平面上的两个互相垂直方向上分别有两组质量块，那么当引力波传播时，在某一时刻其中一组质量块之间的距离会增大，同时另一组质量块之间的距离会缩小。随后前一组质量块之间的距离会缩小，而后一组质量块之间的距离会增大，如此循环反复。但是当引力波的传播方向与这两组质量块共面时，并且和一组质量块的方向相同时，那么在该方向上的质量块之间的距离就不会变化，而在与其垂直方向上的质量块之间的距离会发生交替变化。如果引力波的方向介于这两个方向之间，那么距离变化的情况也是在这两者之间。激光干涉式引力波望远镜工作的基本原理就是基于这种十分微小的距离变化之上。

激光干涉式引力波望远镜又称为激光干涉仪引力波探测器 (Laser interferometer gravitational wave detector)，这是一种基于法布里-布里 (Fabry-Perot) 干涉仪原理来测量空间相互垂直方向上的两组质量块之间的微小距离变化量的仪器 (见图 1)。其基本结构呈 L 形，包括有两个互相垂直、长度基本相等 ( $L_1 \approx L_2 = L$ ) 的干涉长臂，这两个长臂的两端分别有两个相当于自由质量块的反射镜面。反射镜面用柔性的、稳定的石英丝带悬吊在空中，这种悬挂的摆式结构具有很低的摆动周期，频率约为 1 Hz 左右。如果引力波的频率大于这个频率，镜面就会自由地在水平方向运动。当具有适当的极化方向的引力波从垂直于仪器平面方向经过仪器时，就会使镜面即质量块来回前后运动，这样，两臂的长度将产生变化，其中一个的距离将会增加，另一个的距离则会缩短，从而产生长度差  $\Delta L = L_1 - L_2$ 。这个相对的长度变化就等

于引力波特征振幅的大小, 即  $h(t) = \Delta L/L$ 。

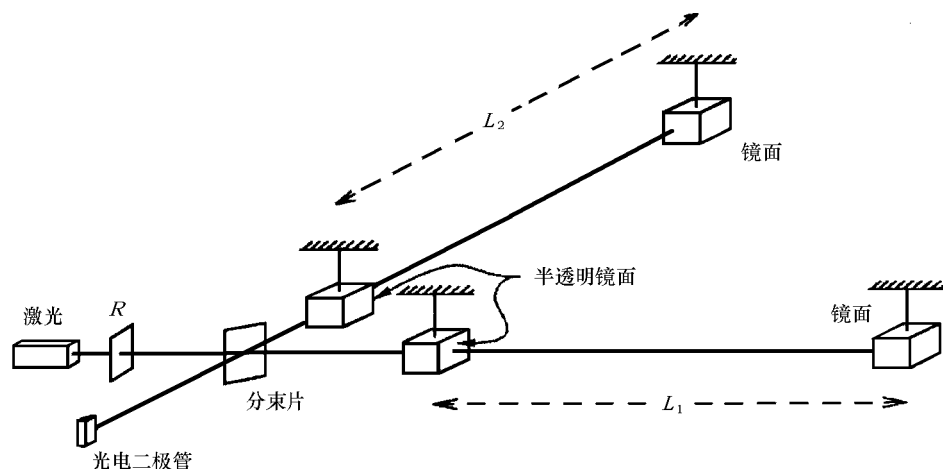


图 1 激光干涉仪式引力波望远镜<sup>[1]</sup>

激光干涉仪式引力波望远镜就是利用激光干涉原理, 通过测量干涉仪两臂长度的微小变化来探测引力波大小的。由于激光光程的变化, 在接收器上会有光强的明暗变化。为了提高仪器的灵敏度, 可以在靠近分光片的位置上各加一个半透明的镜面, 使得光线在两个镜面之间来回反射, 相当于法布里-布里干涉仪的结构, 这样, 总的光程差将增大数倍, 光程差为  $m\Delta L$ 。所以干涉仪上的实际相位差  $\Delta\phi = m\Delta L/\lambda = mhL/\lambda$ , 该相位差可以用光电探测器来检测。如果排除所有可能排除的测量误差, 利用光电方法进行检测所获得的精度的最低极限, 决定于光电接收器所接收的光子随机变量所寄生的随机误差。寄生误差值  $\Delta\phi = 1/\sqrt{N}$ , 式中  $N$  是在引力波一个周期之内进入接收器内的光子总数。所以这样一个理想化的仪器所能够探测到的引力波特征振幅的最小值  $h_{\min} \approx \lambda/(mL\sqrt{N})$ 。举例来说, 如果每个臂长  $L = 4 \text{ km}$ , 光线来回传播的次数  $m = 400$ , 引力波的频率是  $100 \text{ Hz}$ 。当干涉仪中的镜面反射率很高, 在整个激光传播过程中只有 1% 的光子被散射或吸收, 同时在图 1 中  $R$  处是一个高反射率的镜面, 这样进入干涉仪内的光子数大概是激光功率的 100 倍。对  $60 \text{ W}$  功率的激光, 在  $10 \text{ ms}$  积分时间内进入接收器的光子数  $N \approx 2 \times 10^{20}$ , 则  $h_{\min} \approx 0.5 \mu\text{m}/(400 \times 4 \text{ km} \times \sqrt{2 \times 10^{20}}) \approx 10^{-23}$ 。从这个公式可以看出, 光程长, 可能探测到的引力波的特征振幅就低。不过总的光程也不能太长, 太长的光程会影响仪器对较高频率的引力波的探测。另外, 通过增强激光的能量也可以减少光强检测的误差。

### 3.2.2 基本结构

与谐振式引力波望远镜相似, 激光干涉仪式引力波望远镜的主要噪声来源也有地震波干扰、悬挂的质量的热噪声影响, 以及激光光束所受到的气体分子对它的相位影响, 所以仪器中各个主要部件都需要进行非常严格的振动控制, 尤其是作为自由质量块的反射镜面。同时还需要控制镜面所在地的温度和空气中气体分子的影响, 要抽掉光路中所有气体。当然, 有些噪声仍然很难去掉。为了正确识别引力波信号的正确性, 必须在相距很远的地方建造两个同样的仪器, 只有当两个仪器同时得到相同信息时, 所测量的引力波特征振幅才比较可信。而为了

确定引力波的正确来源,则需要至少有 3 个这样的仪器来共同进行观察。

在激光干涉仪式引力波望远镜中,反射镜面的振动隔离系统最为关键<sup>[10]</sup>。这种振动隔离结构通常包括振动吸收垫、振动隔离框架和双钟摆。振动吸收垫的主要原理和常用的光学平台防振垫的原理基本相同,它是一个具有阻尼的弹簧质量系统,其主要目的是隔离通过地面传递的所有高于一定频率的振动。防振垫(stack)通常有 3 个,它们稳定地支撑着悬挂有反射镜面的双钟摆的支架。防振垫内的主要部件是一个或几个质量块和具有阻尼作用的硅橡胶材料。根据振动传递理论,为了实现较好的振动隔离,防振垫中的硅橡胶材料应该有比较小的弹性系数。一般的硅橡胶材料阻尼较小,这时可以在硅橡胶成形之前加上一些合成碳的粉末来提高它的阻尼系数。如果加入总重量 6% 的碳粉,它的阻尼系数可以从 0.05 提高到 0.08。单独的防振垫系统是一个质量和单一的弹簧和阻尼系统(见图 2),其振动传递的传递函数  $T = (As + B)/(Cs^2 + As + B)$ , 式中  $s$  为复变量,  $A = 1/K$ ,  $B = 1/c$ ,  $C = M/(cK)$ ,  $M$  是质量,  $K$  是弹性系数,  $c$  是阻尼系数。这种减振结构的振动衰减在谐振频率以上和频率的倒数成正比。由于在整个支撑结构中(见图 3),仍然存在与之串联的弹簧结构(见图 2),所以综合结构的振动隔离会更好,这时其传递函数  $T = (As + B)/(Ds^3 + Es^2 + As + B)$ , 式中  $D = M/(KK_d)$ ,  $E = M(K + K_d)/(cKK_d)$ ,  $K_d$  是与之串联的弹簧的弹性系数。这样的振动衰减在谐振频率以上就和频率平方的倒数成正比,振动隔离的效果将大为改善。为了适应高真空度的要求,防振垫常常用金属波纹筒密封起来,这种波纹筒具有很大的扭转强度,可以传递在这个方向上的振动,所以在防振垫的上部还要有一个可以扭转的结构,以避免振动传递。

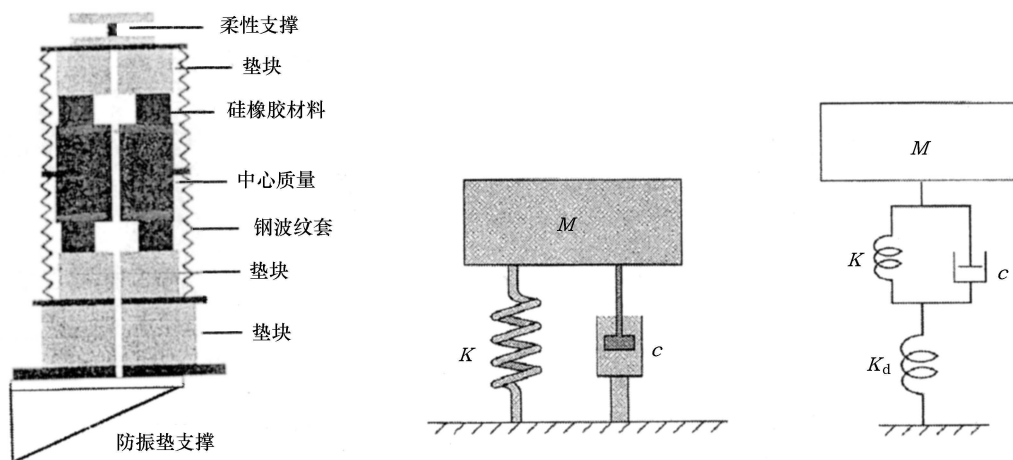


图 2 防振垫的基本结构、系统原理及整个支撑系统原理图<sup>[10]</sup>

为了获得系统中串联的弹簧结构,一些引力波望远镜的镜面支撑系统还引进了悬臂梁式的弹簧结构。在真空室中金属外室壁上连接有 3 个防振垫, 3 个防振垫的上部连接着一个稳定环,从环的 3 个点上再伸出 3 个类似钓鱼杆一样的悬臂梁式的弹簧结构系统,并用 3 根金属丝来支撑悬挂有双钟摆结构的质量平台。悬臂梁式的弹簧结构的弯曲振型频率  $f = (1/2\pi)\sqrt{Eah^3/(4Ml^3)}$ , 式中  $E$  为弹性模量,  $a$  为梁的宽度,  $h$  为梁的高度,  $M$  为悬挂的质量,  $l$  为梁的长度。这里频率的选择原则是,在仪器所需要的工作频率上使地震波动的影响

减少到最小。同时在设计中还要注意材料的表面最大应力，不要使材料发生任何塑性变形。悬臂梁一般使用高强度的钢材，其阻尼系数非常小。除了这一级的悬臂梁支撑，有的设备在双钟摆支撑中也还采用了悬臂梁支撑结构。

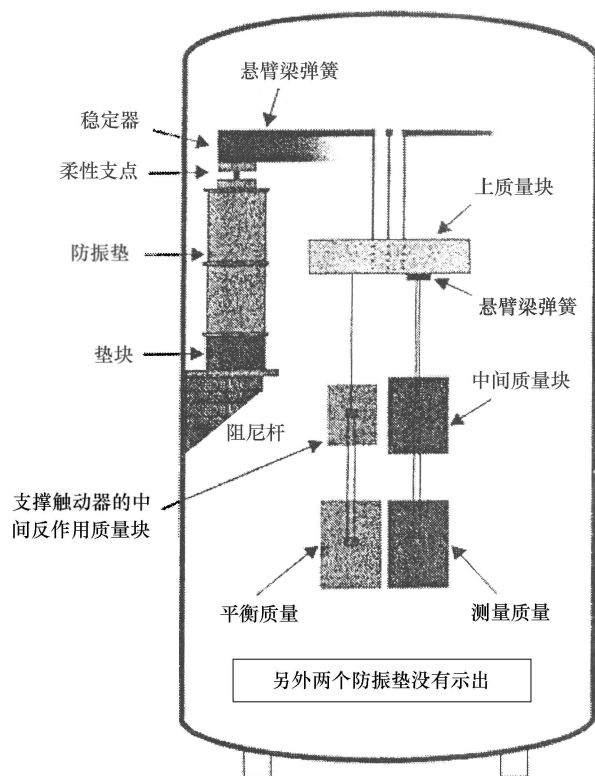


图3 GEO600 (德国-英国引力波望远镜) 实验质量的振动隔离装置<sup>[10]</sup>

双钟摆结构是对地震波动的又一层隔离。从质量平台通过钢丝悬挂着一个中间质量块，在中间质量块的下面再悬挂着关键的实验质量，这就是仪器中的反射镜。为了消除热噪声影响，特别是热噪声引起的损耗，实验质量一般用熔融硅材料，同时悬挂的丝带也往往采用硅纤维。更精确的仪器还使用蓝宝石 (sapphire) 材料，因为它具有非常高的品质因子。在决定这一级材料时，材料的损耗因子 (品质因子的倒数) 是很值得考虑的因素。一个摆系统的损耗因子  $\phi_{\text{pend}}(\omega)$  和材料的损耗因子  $\phi_{\text{mat}}(\omega)$  直接相关，有公式  $\phi_{\text{pend}}(\omega) = \phi_{\text{mat}}(\omega) \cdot 4\sqrt{TEI}/(Mgl)$ ，式中  $T$  为悬挂纤维的张力， $E$  为弹性模量， $I$  为纤维的惯矩， $M$  为摆的质量， $l$  为摆的长度。硅材料的损耗因子为  $10^{-6}$ ，蓝宝石材料的损耗因子约为  $10^{-8}$ 。为了实现对实验质量的反馈控制，在双钟摆结构一侧还要悬挂一个相应的装有感应线圈的中间反作用质量块 (intermediate reaction mass)，以及和实验质量相平行的反作用质量块 (reaction mass) (见图3)。由于整个系统，特别是实验质量块有很高的品质因子，所以地震波动有可能在某些频率上会引起仪器的谐振。为此，还要对整个装置的其他部分进行反馈控制，以消除这些振动的影响。同时当干涉仪的条纹锁定以后，要采用零点补偿方法精确地获得引力波的特征振幅值。

一般来讲,在仪器设计中,应该使实验质量块的谐振频率尽可能高,以减少热噪声影响。热噪声位移的均方根值与温度  $T$ 、谐振频率  $\omega_0$  及该频率相应的模态质量  $m_{\text{eq}}$  相关,有位移公式  $\sqrt{\langle z^2 \rangle} = \sqrt{k_B T / (m_{\text{eq}} \omega_0^2)}$ , 其中  $K_B$  为玻耳兹曼常数。模态质量与在该频率振动时的弹性体体积  $V$  内的应力  $\sigma$  和应变  $\varepsilon$  相关,有式  $\int_V \sigma \cdot \varepsilon dV = m_{\text{eq}} \omega_0^2 z^2 / 2$ , 此位移值经过钟摆悬挂机构的抑制还将进一步降低。在仪器中整个激光通过的地方要保持超高的真空度,防止因为空气分子的作用在光子通过时产生不必要的相位差。整个反射镜面要防止任何灰尘的影响,达到最高的清洁系统标准,以减少光的散射;反射镜面要有很高的反射率。另外,在控制中要避免任何力的交叉影响(crosstalk),激光本身也要有稳频装置,同时激光光束所产生的辐射光压的变化也会对镜面的位置产生影响。

### 3.2.3 重要设备

上世纪 70 年代以后,美国和英国的一些天文学家开始了激光干涉仪引力波望远镜的建设,该工程称为激光干涉仪引力波天文台(Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory, LIGO),于 1991 年获得美国政府的投资,并于 1999 年 11 月建成,耗资 3.65 亿美元。工程在美国圣路易斯安那州和华盛顿州分别建造一个臂长成 L 形、长度为 4 km 的激光干涉仪,两者距离 3000 km,均通过半透明的镜面内部反射使每一个臂长可增加近 50 倍。光路的管道采用不锈钢钢管,钢管直径为 1.2 m,内部真空度为  $10^{-12}$  大气压。

尽管工程的投资非常巨大,但是这个仪器能否在短时期内探测到引力波还是一个问题。为此仪器将于 2005 年进行改造,新的仪器称为先进的引力波天文台(Advanced LIGO)。主要改造工作包括进一步减少地震波噪声、采用高功率的激光器、完全实现闭环控制、采用单晶体的蓝宝石反射镜面。经过这样的努力,整个仪器的灵敏度将提高 15 倍以上。

还有其他一些激光干涉仪引力波望远镜:法国和意大利合作的 VIRGO 望远镜(以法、意两国在天文领域合作的一个团体名字命名),它每个臂长是 3 km,真空管道直径 1.2 m,该项目已于 2003 年竣工<sup>[11]</sup>;德国和英国的 GEO600 望远镜,它每个臂长仅 600 m,采用 60 cm 直径、0.8 mm 的波纹型真空管道,该工程也已于 2001 年竣工<sup>[10]</sup>;日本的 TAMA300 引力波望远镜<sup>[13]</sup>,其臂长 300 m,测量精度为  $8 \times 10^{-19}$  m/Hz<sup>1/2</sup>,同样已于 2001 年竣工。目前,日本正在计划建造一个新的大规模低温引力波望远镜,称为 LCGT(Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope),它将是一个臂长 3 km 的大型仪器<sup>[6]</sup>。此外,澳大利亚也有建造引力波望远镜的计划,称为 AIGO(Australia Interferometer Gravitational Observatory)。

然而,建立在地面上的引力波望远镜不可能完全消除地震波动的影响,同时由于质量之间的距离限制,在引力波探测上有很多的局限性,其测量频率范围一般仅在 10~1000 Hz 之间,这些频率是能量极大但非常短暂的事件所引起的,探测机会很少。为了探测频率更低的引力波,必须使用空间引力波望远镜。空间激光干涉天线 LISA(Laser Interferometer Space Antenna)已在计划中,如图 4、图 5 所示。这是欧洲航天局(ESA)和美国航空航天局(NASA)共同投资的项目,耗资十分巨大。计划中的 LISA 是一个正三角形激光干涉仪,边长为 5000000 km,其反射镜面为悬挂在太空中的一个稳定的质量块,可以在低温下工作,从而有更高的精度,更低的频率范围( $10^{-4}$ ~ $10^{-1}$  Hz)。和地面引力波望远镜不同,LISA 可能探测到来自黑洞并合的引力波形,这一点在相对论理论验证中具有很重要的意义<sup>[9]</sup>。本仪器采用了很多补偿装置来消除光学平台中的振动、温度的差别和其他因素的影响。LISA 计划 2012 年发射升空<sup>[14]</sup>。



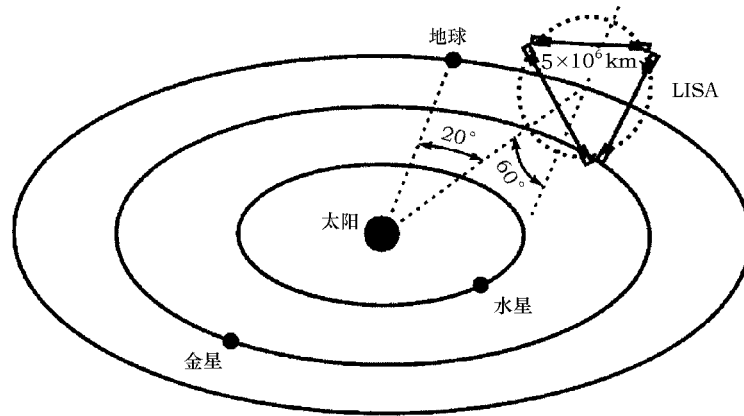


图 4 LISA 的运行轨道 [7]

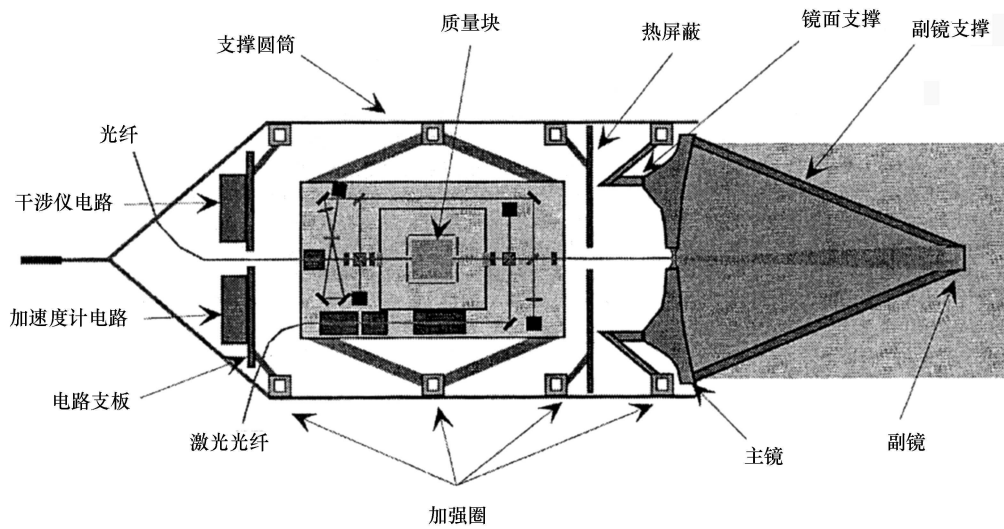


图 5 LISA 光学部套示意图 [7]

### 4 展 望

尽管“单靠望远镜本身不能导致对宇宙的更多了解”<sup>[9]</sup>，然而理论预言和观测检验是相辅相成的，理论完美需经过证实才能最终为人们所接受，反过来也是如此。虽然引力波的探测异常艰难和昂贵，但理论的魅力依然激发各国学者投入巨大的努力，以利用对引力波这个可能是人类观测宇宙的最后一只眼睛，来观察和了解人类生于其中的宇宙的全部图景和奥秘。

**参考文献:**

- [1] Abramovici A, Althouse W E, Drever R W P *et al.* *Science*, 1992, 256: 325
- [2] <http://www.sciencehuman.com/party/essay/essays2004/essays200407q.htm>, 2004
- [3] <http://www.sciencehuman.com/party/essay/essays2004/essays200408r.htm>, 2004
- [4] 程景全. 天文望远镜原理和设计, 北京: 中国科学技术出版社, 2003
- [5] Taylor J H, Weisberg J M. *AJ*, 1989, 345: 434
- [6] <http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/gr/LCGT.pdf>, 2004
- [7] Hughes S A, Marka S, Bender P L *et al.* <http://lanl.arxiv.org/abs/astro-ph/0110349>, 2001
- [8] Maggiore M. Gravitational Wave Experiments and Early Universe Cosmology, Report IFUP-TH20/99, Italy: Universita di Pisa, 1999
- [9] National Research Council, *Astronomy & Astrophysics in the New Millennium*, USA, 2001
- [10] Plissi M V, Strain K A, Torrie C I *et al.* *Rev. Sci. Instrum.*, 1998, 69(8): 3055
- [11] Bernardini A, Majorana E, Puppo P *et al.* *Rev. Sci. Instrum.*, 1999, 70: 3463
- [12] Hulse R A, Taylor J H. *ApJ*, 1975, 195: L51
- [13] <http://tamago.mtk.nao.ac.jp/>, 2005
- [14] <http://sci.esa.int/science-e/www/area/index.cfm?fareaid=27>, 2003

## Progress in Gravitational Wave Detection

CHENG Jing-quan<sup>1,2</sup>, YANG De-hua<sup>2</sup>

(1. National Radio Astronomy Observatory, Tucson AZ 85721, USA; 2. National Astronomical Observatories/Nanjing Institute of Astronomical Optical Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China)

**Abstract:** General theory of Einstein's relativity predicts the existence of gravitational wave when mass is accelerated. However, no material has direct effect when the gravitational wave passes. Therefore, gravitational wave can only be detected indirectly. The effort in gravitational wave detection was started in the 60s of last century by using a huge cylinder of aluminum. This paper introduced all the relevant projects in the gravitational wave detection. These projects include Weber's bar, Laser interferometer Gravitational wave Detector (LGD), Laser Interferometer Gravitational wave Observatory (LIGO), GEO600, VIRGO, TAMA300, Advanced LIGO, Large scale Cryogenic Gravitational wave Telescope (LCGO), and Laser Interferometer Space Antenna (LISA).

**Key words:** astrophysics; gravitational wave; review; gravitational wave telescope