

# 第三代激光干涉仪引力波探测器

王运永

(中国科学院高能物理研究所 100049, 北京师范大学天文系 100875)

引力波是爱因斯坦在广义相对论的重要预言，引力波探测是当代物理学最重要的前沿领域之一。以引力波探测为基础的引力波天文学是一门新兴的交叉科学，是对传统电磁辐射天文学的巨大拓展与补充。引力波的发现是一项划时代的科学成就，它标志着困扰科学家百年来的物理学难题得以破解，引力波天文学完成了从寻找引力波到研究天文学的历史性转折。

引力波探测走过了一段艰难而曲折的过程。早在 1916 年，爱因斯坦就根据弱场近似，预言了引力波的存在。但是，为什么半个多世纪之后引力波才开始探测而且又过了 50 来年才发现？主要有理论和实验两个方面的困难。在理论方面，第一，引力波的理论最初是同坐标选择有关的，以致无法弄清引力波到底是引力场的固有性质，还是某种虚假的坐标效应。第二，引力波是否从发射源带走能量，也是个十分模糊的问题，这使得引力波探测缺乏理论根据。在实验方面，引力波强度非常弱，在地面 4km 长的距离引力波引起的长度变化仅为  $10^{-19}\text{m}$  数量级，对这样微小长度的测量当时还不知所措。即使有些想法，对探测器的结构、噪声及克服方法也知之甚少，引力波探测缺乏实验手段。到了 20 世纪 50 年代，同坐标选择无关的引力辐射理论才完成，求出了爱因斯坦真空方程严格的波动解。20 世纪 60 年代，物理学家通过研究零曲面上的初值问题，严格证明了引力辐射带有能量，测试质量在引力波作用下会发生运动。至此，经过 50 多年的精心研究，理论上的两大难题相继攻克，引力波探测有了可靠的理论基础。与此同时，经过多年的潜心研究，韦伯的共振棒探测器方安日趋成熟。引力波探测被提到日程上来。

1962 年，美国物理学家韦伯领导的研究小组在马里兰大学建成了世界上第一个引力波探测器—共振棒，迈出了引力波探测的第一步，并在世界各地迅速发展起来。在经过进一步改进之后，新共振棒在 1968 年开始运转，1968 年得到第一个所谓的引力波信号，随后 81 天内又陆续得到 17 个“事例”并被判断为引力波信号。1969 年 6 月，在美国辛辛那提举行的相对论学术会议上，韦伯等人宣布成功地探测到引力波，轰动了整个物理界。遗憾的是经过详细分析，证明这些都是虚假信号，并非引力波事例。后来，尽管采取了很多措施对共振棒进行了升级改造，终因探测频率窄，灵敏度不够高而没有取得突破，到了 21 世纪初，世界上的共振棒引力波探测器就陆续关闭了。

激光干涉仪引力波探测器的出现开辟了引力波探测的新时代。它的探测灵敏度高，探测频带宽，升级潜力大，给引力波探测带来新的希望，并直接导致引力波的发现。

## 1. 第一代激光干涉仪引力波探测器

第三代激光干涉仪引力波探测器是在第一代和第二代干涉仪的基础上升级改造而成的，它们的工作原理是一样的基本结构大致相同。在讨论第三代干涉仪之前，我们首先对第一代和第二代干涉仪进行概括的介绍，以便加深理解。

### 1.1 激光干涉仪引力波探测器的兴起

用干涉仪探测引力波的想法是 1963 年由苏联科学家哥森史特因 (M.Gertsenshtein) 和普斯托瓦伊特 (V.Pustovoit) 首先提出来的，并在俄文杂志上公开发表。很多年之后，美国麻省理工学院教授韦

斯(R. Weiss)也独立地想到了这个主意。1971年到1972年韦斯对激光干涉仪进行了广泛深入的研究并进行了初步设计,考虑了几乎所有的关键部件,这是他第一次对激光干涉仪引力波探测器进行严格的技术检验。他还研究了主要的噪声来源,并全面论述了控制这些噪声的方法。韦斯的论文作为麻省理工学院(MIT)的年度研究进展报告公开发表,标志着激光干涉仪引力波探测器设计原型的诞生。与此同时,福沃特等人从美国航空航天局(NASA)申请到一笔经费,开始建造第一个小型样机。1972年10月4日,样机建成并开动起来。虽然臂长只有2米,探测质量只有几磅,但在激光干涉仪引力波探测器的研发历史上却迈出了重要一步。1976年,德里弗(R. Drever)等人在格拉斯哥建造了另一台小型激光干涉仪,第一次引进了法布里-珀罗腔。使激光干涉仪引力波探测器有了质的飞跃。美国加州理工学院(CIT)教授索恩(K. Thorne)对激光干涉仪的理论问题进行了深入研究,估算了各种可能的引力波源所辐射的引力波的强度,并于1975年在意大利西西里小镇埃利斯(Erice)举行的“国际广义相对论与引力波”研讨会上做了报告,引起广泛的关注。对激光干涉仪引力波探测器在全世界的发展起了巨大的推动作用。随后,他在加州理工学院组织了一支队伍,专门从事引力波探测的研究。他把才华横溢的德里弗招于门下,大大加快了激光干涉仪的研发速度。到了20世纪80年代,若干小型样机陆续建成并用它们做了大量的探测器基础研究,取得了宝贵的经验。特别值得提出的是,在20世纪80年代初,在美国国家基金委和加州理工学院的支持下,德里弗开始在加州理工学院校园内建造一个臂长40米、功能完备的激光干涉仪。该设备在20世纪80年代建成并投入运转,灵敏度为 $h \sim 10^{-15}$ 。20世纪90年代初进行了全面升级,灵敏度达到 $10^{-18}$ 。经过长期的持续不断的创新与技术改造,这台干涉仪渐趋完美。虽然它尺寸不够长,难以算得上真正意义上的引力波探测器,但却是第一台真正意义上的激光干涉仪,是一个真正意义上的激光干涉仪实验室。激光干涉仪的很多新思想在这里诞生,很多新技术、新设备

在这里制造、检验,然后推广到全世界。

## 1.2 LIGO 的建造

1975年6月,美国麻省理工学院教授韦斯和加州理工学院索恩教授经过彻夜长谈,决定两校进行联合,共同进行激光干涉仪引力波探测器的研发,并把这个引力波探测器的名称定为LIGO(Laser Interferometer Gravitational Observatory)。在前期研究的基础上,1986年沃格特(R. Vogt)(前加州理工学院教务长)和韦斯组织两校精英,花了六个多月的时间写了一份报告,向国家科学基金委申请建造两台臂长为4km的激光干涉仪引力波探测器。美国国家科学基金委对此大型项目非常重视,组织了多个专门委员会进行了长达3年的论证。1989年这一提案获得了国家科学基金委员会的支持,资金开始大量流入,工程设计和部件的预制研究迅速开展起来。1994年位于华盛顿州汉福德和路易斯安娜州利文斯通的两台臂长4km的LIGO正式开工建设,2002年建成并开始运转。

## 1.3 国际大型激光干涉仪引力波探测器网

在LIGO建造的同时,一些大型激光干涉仪引力波探测器在世界各地开始筹建,掀起了引力波探测的新高潮,到了21世纪初,几个大型激光干涉仪引力波探测器相继建成并投入运转,它们是位于美国路易斯安那州利弗斯通(Livingston)臂长为4km的LIGO(llo),位于美国华盛顿州汉佛(Hanford)臂长为4km的LIGO(lho),位于意大利比萨附近,由意大利和法国联合建造的臂长为3km的VIRGO,位于德国汉诺威(Hannover)由英国和德国联合建造的臂长为600m的GEO600,位于日本东京国家天文台臂长为300m的TAMA300在澳大利亚,科学家们建造了一个臂长80m的小型干涉仪,用来进行探测器的基础研究,这些大型设备的建成并投入运转,形成了一个引力波探测网,标志着激光干涉仪作为一种新的引力波探测器,正式登上历史舞台,引力波探测进入了一个蓬勃发展的新时代。为了与后来升级改进后的干涉仪相区别,人们通常称其为“初级探测器(Initial detector),习惯上又叫做第一代激光干涉仪引力波探测器,灵敏度为 $10^{-22}$ 。图1给出了LIGO的瞰视图。



图 1(a) LIGO[lho]



图 1(b) LIGO[llo]

#### 1.4 激光干涉仪引力波探测器的工作原理

用干涉仪进行科学探测的基本原理是比较光在其相互垂直的两臂中度越时所用的时间。当引力波在垂直于干涉仪所在的平面入射时，由于特殊的偏振特性，它会以四极矩的形式使空间畸变，也就是说，会以引力波的频率，在一个方向上把空间拉伸，同时在与之垂直的方向上把空间压缩。反之亦然。比较光在相互垂直的两臂中度越时所用的时间的变化，就能探测引力波产生的效应，从而知道引力波是否存在。

激光干涉仪引力波探测器的工作原理如图 2 所示。

原则上讲，激光干涉仪引力波探测器是一台“变异”的迈克尔逊干涉仪，其相互垂直的两臂各有一个法布里-珀罗腔，并带有清模器、光循环镜和其他功能部件。为简单起见，暂不考虑法布里-珀罗腔、清模器、光循环镜及其他部件的作用，激光干涉仪引力波探测器就可以简化成一台单次往返的迈克尔逊干涉仪。从激光器发出的一束单色的、频率稳定的激光，在分光镜上被分为强度相等的两束，一束经分光镜反

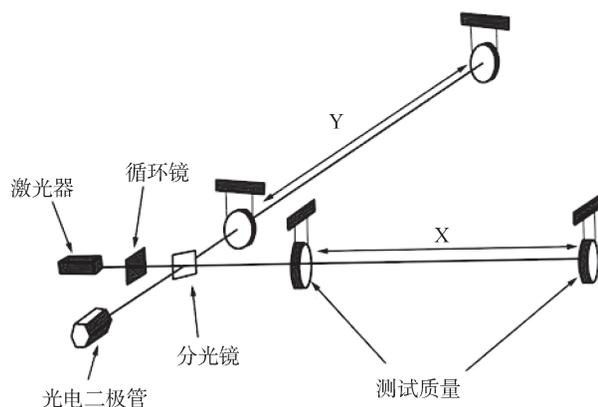


图 2 激光干涉仪引力波探测器工作原理简图

射进入干涉仪的一臂（称为 Y 臂），另一束透过分光镜进入与其垂直的另一臂（称为 X 臂），在经历了几乎相同的度越时间之后，两束光返回，在分光镜上重新相遇，发生干涉。精心调节干涉仪的臂长使两束光完全相干相减，没有光线进入光探测器，激光干涉仪引力波探测器的输出信号为零。这是探测器的初始工作状态。当引力波到来时，由于它独特的极化性质，干涉仪两个臂的长度做相反的变化，即一臂伸长时另一臂相应缩短，从而使两束相干光有了新的光程差，破坏了相干减弱的初始条件，有一定数量的光线进入光探测器，使它有信号输出，该信号的大小正比于引力波的无量纲振幅，探测到这个信号即表明已探测到引力波。

#### 1.5 第一代激光干涉仪引力波探测器的基本结构

激光干涉仪引力波探测器是由光学部分、机械部分和电子学部分组成。因篇幅所限下面只讨论光学部分。激光干涉仪引力波探测器光学部分的主体结构如图 3 所示，它包括激光器、清模器、法布里-珀罗腔、光循环镜等。此外，还有辅助光学系统与器件如：调制解调器、光隔离器、波片、光信号引出系统、光探测器等。下面只就主体光学部分进行分析。

##### A. 激光器

激光器是激光干涉仪引力波探测器的光源，用于引力波探测的干涉仪对光源主要有如下五个方面的特殊要求。

##### (1) 高输出功率和好的功率稳定性

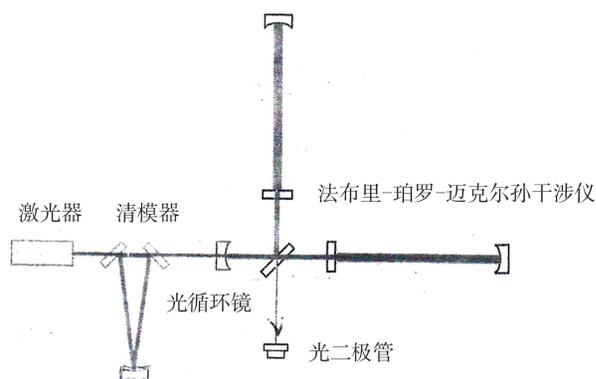


图3 激光干涉仪引力波探测器的主体光学部分示意图

激光干涉仪引力波探测器的灵敏度与激光功率成正比，一般要求激光器的输出功率为几十瓦到几百瓦。输出功率不但要大，还要有好的稳定性；因为输出光束强度的涨落会影响暗纹工作点锁定位置的剩余涨落，从而影响干涉仪的灵敏度，一般说来，输出功率的稳定性  $\frac{\Delta P}{P}$  要达到  $10^{-8} \sim 10^{-9}$  数量级。

#### (2) 单一的振动频率和很高的频率稳定性

为使激光干涉仪引力波探测器能够稳定地锁定在需要的工作点上，要求激光器输出的光束具有单一的振动频率。激光频率涨落引起的噪声是影响干涉仪灵敏度最严重的噪声之一。必须尽量减小。对于激光干涉仪引力波探测器来说，频率稳定性也要达到  $10^{-8} \sim 10^{-9}$  数量级。

#### (3) 输出光束光斑的横截面是纯净的 TEM00 模式

激光束光斑的横向模式是指在垂直于光轴的横截面上电磁场的分布模式，又称为 TEM 模式。用两个整数  $m$  和  $n$  表征为 TEM $mn$ ， $m$  是水平扫描光线时的极小值， $n$  是垂直扫描光线时的极小值。激光束中常见的高阶模式是由偏离光轴的光波形成的。对干涉仪的稳定性和灵敏度都有很大影响，必须予以清除，使输出光束光斑的横截面是纯净的 TEM00 模式，即厄米-高斯模式。

#### (4) 线性极化

光波是横波，其电场分量及磁场分量（在这里我们只讨论电场分量部分）的振动方向是与光的传播方向垂直的。如果电场分量的振动方向相对于光的传播方向是不对称的，则称为偏振，偏振又称极化。如果一束光的电场分量始终在一个平面内振动，则称之为

平面偏振光，平面偏振光电矢量振动的投影是一条直线，因此平面偏振光又称线偏振光，也称这种光的极化为线性极化。为满足激光干涉仪引力波探测器的统调稳定运行的需要，保证干涉仪有较高的灵敏度，要求激光器输出的光束是线性极化的。

#### (5) 内在噪声低

激光干涉仪引力波探测器的灵敏度主要是由其噪声水平决定的。激光源作为干涉仪的前端部件，本身的内在噪声必须远远小于干涉仪的总体噪声水平，以确保干涉仪有期望的探测灵敏度。

#### B. 清模器

激光干涉仪引力波探测器要求激光束的横向剖面具有纯净的 TEM00 模式，即应该是基模厄米-高斯模式。因为高阶模式与干涉仪的不对称性相耦合，会使输出信号的对比度变差，而且高阶模式会使法布里-珀罗腔镜子表面光强分布改变，产生附加的热噪声。高阶模式的振幅是不稳定的，它会使镜子不同部位受到的辐射压力发生变化，产生附加的辐射压力噪声，严重时会使镜子抖动引起干涉仪锁定状态的不稳定。激光束中残余的高阶模式需要通过清模器予以清除。清模器的主体部分是一个具有较高透射率的行波谐振腔，常采用由三面光学镜子组成的锐三角形结构，其优点是清模效果好，光束抖动噪声小，能选择偏振形式，具有高的频率稳定性，没有光从清模器返回激光器。合理设计三面镜子的反射和透射系数并适当调节锐角上的镜子，使载频激光和两个旁频都能共振通过而且使 TEM00 模式在腔内共振加强，高阶模式不能共振从而被清除。

#### C. 功率循环腔

为了提高灵敏度，在激光干涉仪引力波探测器中要尽可能地使用高激光功率，除了设计大功率激光器外，使用功率循环技术可以有效地做到这一点。其基本的想法是把从干涉仪亮条纹口射出来的光重新收集起来，再注入干涉仪中，进行循环利用。因为激光干涉仪引力波探测器的工作点选择在暗纹条件，干涉仪内的光损耗很小，几乎所有的入射光功率都会经亮条纹口射出，这是极大的浪费。在激光器和分光镜之间放上一面镜子，将出射光反射回干涉仪，实现光的循环利用。这面镜子称为功率循环镜，功率循环镜的置

入等于在干涉仪上又组成了一个法布里 - 珀罗腔。腔的一个镜子是功率循环镜，另一面镜子是把整个干涉仪等效成的一个复合镜。我们称这个法布里 - 珀罗腔为“功率循环腔”，功率循环镜把漏出的光与从激光器来的新鲜光混合，调整功率循环腔的位置，使光在腔内共振加强，干涉仪内的有效功率将大大增加。设循环腔内的功率增益为  $G$ ，不考虑循环镜的功率损耗时我们有：

$$G = \left( \frac{\sqrt{1 - \gamma_{PR}}}{1 - \sqrt{\gamma_{PR}\gamma_{com}}} \right)^2$$

式中： $\gamma_{com}$  当复合镜的反射系数，它反映了干涉仪内部的综合状态，其大小主要取决于干涉仪内部的功率损耗， $\gamma_{PR}$  为功率循环镜的反射系数。当  $\gamma_{PR} = \gamma_{com}$  时  $G$  达到最大值。

#### D. 法布里 - 珀罗腔

在迈克尔逊干涉仪中，引力波引起的相位变化与臂长成正比，臂长越大，相位变化越大。这种正比关系直到臂长增大到引力波波长的四分之一时都成立，当光在臂中往返一次的时间等于引力波的半个周期时有最佳探测效果。例如，对于频率为 100Hz 的引力波来说，为了获得最佳探测效果，干涉仪的臂长应为 750 km，在地球上建造这么大尺度的干涉仪是不可能的。能否把迈克尔逊干涉仪的臂折叠起来，而折叠后的长度又适中，使我们有可能在地球上建造它，维修它，而又有非常好的探测效果？这种技术是有的，那就是在臂上使用法布里 - 珀罗腔。法布里 - 珀罗腔由前后两面镜子组成，入射的激光束在腔内来回反射，微调镜子的位置使光发生共振加强，并对引力波信号进行多次取样。法布里 - 珀罗腔光的输入 / 输出关系如图 4 所示。

图中  $L$  为腔的长度， $a_0$  表示入射光的电场振幅， $a_1$  为透过输入镜进入腔内的光的电场振幅， $a_1'$  是腔内从输入镜自由传播到终端镜后的电场振幅， $a_2$  是腔

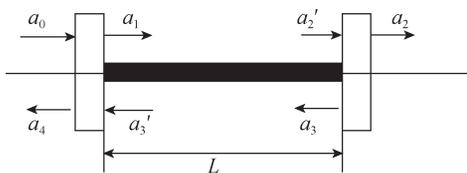


图 4 法布里 - 珀罗腔光的输入 / 输出关系

内光场透过终端镜出射的光的电场振幅， $a_3$  是  $a_1'$  经终端镜反射后的电场振幅， $a_3'$  是反向自由传播后输入镜的光的电场振幅， $a_4$  是腔内的光透过输入镜射出腔外的光的电场振幅。设输入镜的反射和透射系数分别为  $r_1$  和  $t_1$ ，终端镜的反射和透射系数分别为  $r_2$  和  $t_2$ ，我们可以得到如下关系式：

$$a_1 = it_1 a_0 + r_1 a_3'; \quad a_1' = e^{-ikL} a_1; \quad a_2 = it_2 a_1';$$

$$a_3 = r_2 a_1'; \quad a_3' = e^{-ikL} a_3; \quad a_4 = r_1 a_0 + it_1 a_3'$$

由上面的方程组可以得到法布里 - 珀罗腔的振幅

反射系数  $r$  和振幅透射系数  $t$ ：

$$r_c = \frac{r_1 - r_2(t_1^2 + r_1^2)e^{-2ikL}}{1 - r_1 r_2 e^{-2ikL}}$$

$$t_c = \frac{-t_1 t_2 e^{-ikL}}{1 - r_1 r_2 e^{-2ikL}}$$

除了上述主要光学系统之外，还有光预输入系统、法拉第光隔离器频、率调制器、光信号引出系统、光信号转换和探测系统波片等，由于篇幅所限在此不一列举。

## 1.6 第一代激光干涉仪引力波探测器的灵敏度

经过长时间的精心调整，第一代激光干涉仪引力波探测器的灵敏度逐步提高，最终达到设计指标  $10^{-22}$ ，灵敏度曲线如图 5 所示。

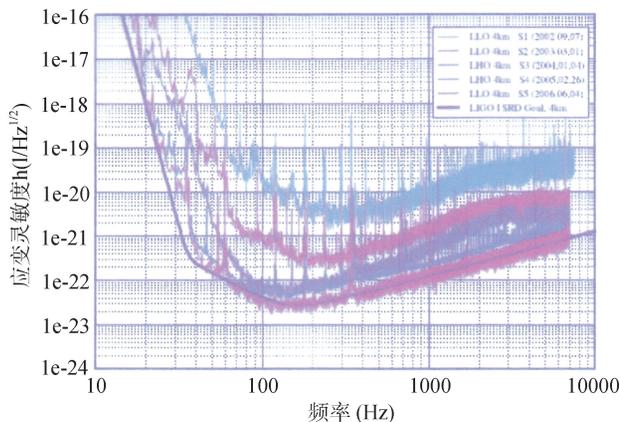


图 5 LIGO 的灵敏度曲线

## 2. 第二代激光干涉仪引力波探测器

第一代激光干涉仪引力波探测器完成之后，世界

各大实验室都在采用新材料和新技术，对它们进行升级和改进，以便降低噪声，提高灵敏度，扩展探测频带的宽度。这就是目前正在运转中的第二代激光干涉仪引力波探测器，高级 LIGO，高级 VIRGO，GEO-HF 和 KAGRA，它们是在第一代干涉仪的基础建设构架内完成的。相对于第一代的“初级 (Initial) 探测器”它们又被称为“高级 (Advanced) 探测器”，应变灵敏度比第一代探测器提高一个数量级，达到  $10^{-23}$ 。利用第二代激光干涉仪，人类实现了探测到引力波的梦想，开辟了引力波天文学研究的新纪元，与初级探测器相比，高级探测器主要进行了如下的重大改进。

## 2.1 信号循环系统

在第一代激光干涉仪引力波探测器的升级改进中，信号循环是一项十分重要的措施。加入信号循环系统是第二代激光干涉仪引力波探测器结构上的突出特点，该操作是在干涉仪的信号输出口放置一面镜子，称为信号循环镜。信号循环镜将从暗口输出信号反射回干涉仪。这时干涉仪可以等效成一面镜子，它将被信号循环镜反射回来的信号再向输出口方向反射回去。使信号循环起来，信号循环镜和干涉仪等效成的镜子之间形成的共振腔，称为信号循环腔。微调信号循环镜的位置可以将信号循环腔的共振频率调到想要的任意值。因此我们可以把干涉仪的频带调成窄带（这种工作状态称为信号循环状态，此时载频激光频率非常接近腔的共振频率）也可以调成宽带（这种工作状态即所谓的反共振情况下的共振旁频抽取）。这就是说，有了信号循环系统，干涉仪的频率响应就可以根据天体源的特性（主要指它辐射的引力波的频率特性）进行调整，“量身订做”。我们知道，激光干涉仪引力波探测器一般工作在宽频带模式。但是，我们可以把它调成一个“窄频带”探测器，使它在较窄的特殊频带内具有较高的灵敏度。引入信号循环镜可以通过信号循环，增加光在干涉仪臂上法布里-珀罗腔中停留的时间，使信号得到共振增强。

## 2.2 大功率激光器

为了降低霰弹噪声，改善量子噪声对灵敏度的影

响，激光器的功率从初级 LIGO 的 10 W 增大到 200 W，与初级 LIGO 类似，高级 LIGO 也利用环型腔清模器和反射模式匹配望远镜对激光器进行调节。

## 2.3 测试质量的尺寸和重量

为了减小测试质量的热噪声，高级 LIGO 采用大尺寸的镜子（直径 34cm），以加大散热面积，而初级 LIGO 的测试质量直径只有 25cm。与此同时，为了减小光辐射压力噪声，高级 LIGO 的测试质量为 40kg，比初级 LIGO 的 11kg 重得多。

## 2.4 熔硅悬挂丝

为了减小悬挂丝的热噪声（即所谓的琴弦模式），高级 LIGO 用熔硅丝作为悬挂丝，而不像初级 LIGO 那样用不锈钢丝。由于采用这种材料，悬挂丝的热噪声可小于光辐射压力噪声，而且在 10 Hz 频率时，可以减小到与引力梯度噪声相比拟的水平。

## 2.5 隔震系统

高级 LIGO 的地面震动隔离系统虽然是在初级 LIGO 的地基上建立起来的，但却是一套全新的设计。它的测试质量悬挂链含有四级单摆。隔震系统把地面震动的截止频率从初级 LIGO 的 40Hz 降低到 10Hz 左右，对于频率低于 10Hz 的地面运动，它用主动隔震伺服技术来减小。通过这套隔震系统，期望在整个探测频带内，能把地面震动噪声压低到可以忽略不计的程度。

## 2.6 第二代激光干涉仪引力波探测器的灵敏度曲线

第二代激光干涉仪引力波探测器的灵敏度为  $10^{-23}$ ，比第一代干涉仪的灵敏度提高一个数量级。在 LIGO 试运行阶段就发现了引力波事例 GW150914 和 GW151226，实现了全世界科学家几十年的梦想。高级 LIGO 的灵敏度曲线如图 6 所示。

## 3. 第三代激光干涉仪引力波探测器

引力波是爱因斯坦在广义相对论的重要预言，

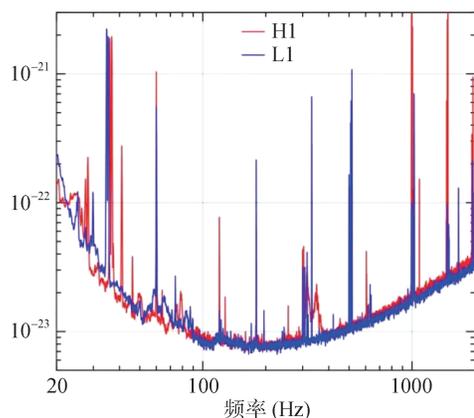


图6 高级 LIGO 的灵敏度曲线

引力波探测是当代物理学最重要的前沿领域之一。引力波的发现使困扰科学家百年来的物理学难题得以破解，引力波天文学完成了从寻找引力波到研究天文学的历史性转折。第二代激光干涉仪引力波探测器在试运行过程中就取得了如此辉煌的成就，显示了优越的性能和广阔的发展前景。坚定了研发第三代激光干涉仪引力波探测器的信心。当前，第三代激光干涉仪引力波探测器的预制研究在世界各地迅速发展起来，各种设计方案也在讨论之中，灵敏度直指  $10^{-24}$ 。目标都是建立真正意义上的引力波天文台，开展天体物理、宇宙学、广义相对论等常态化的引力波天文学研究。

热议中的爱因斯坦引力波望远镜是诸多方案中的先行者，它是欧盟的一个研究计划，目标是建造一台大型激光干涉仪引力波探测器，设计灵敏度比第二代干涉仪又提高一个数量级，达到  $10^{-24}$ ，低端频率从第二代干涉仪的 10Hz 降低到 1Hz，也就是说，它将以极高的灵敏度探测频带从 1Hz 到 10Hz 内所有天体源辐射的引力波，是一台典型的第三代激光干涉仪引力波探测器。造价约 7.9 亿欧元，计划 2025 年建成。

### 3.1 预制研究

第三代激光干涉仪引力波探测器的建造是一件非常困难而艰巨的任务，充满了挑战和机遇。需要全世界科学家通力合作，联合攻关，对关键部件和关键技术进行预制研究。当前正在进行的前期研究主要有以下几个方面。

#### 3.1.1 引力梯度噪声

从牛顿万有引力定律可知，悬挂起来的测试质量周围的物体都会与该测试质量发生引力相互作用。局部质量分布的变化（例如大气密度的变化、人员来往、车辆移动和附近地区的风吹草动等）使测试质量周围的质量密度发生变化，引起局部牛顿引力场的涨落，产生噪声，这种噪声称为引力梯度噪声（有时称为牛顿噪声），引力梯度噪声会使隔震系统“短路”，直接作用在测试质量（即镜子）上，使镜子晃动，是无法回避的。引力梯度噪声是由萨尔松 (P.Saulson) 和斯佩罗 (R.Spero) 首先提出来的，索恩 (K.Thorne) 和贝卡里亚 (M.Beccaria) 对它进行了更深入的研究。引力梯度噪声是低频段的主要噪声源之一，从下面的公式可以看出，引力梯度噪声与频率  $\omega$  的平方成反比。对初级探测器来说（如第一代激光干涉仪），其低频灵敏度很差。牛顿噪声的影响表现不出来，在高级探测器（如第二代干涉仪）中已经引起关注，而第三代激光干涉仪引力波探测器需要极大地提高低频区域的灵敏度，引力梯度噪声成为必须解决的问题。

引力梯度噪声使测试质量产生的运动幅度的方均根值为

$$x(\omega) = \frac{4\pi G \rho}{\omega^2} \beta(\omega) W(\omega),$$

在这里  $\rho(\omega)$  是测试质量附近局部的质量密度， $G$  是引力常数， $W(\omega)$  是在三个方向上平均得到的方均根位移， $\beta(\omega)$  是一个无量纲的减弱传递函数，它表示测试质量与地面之间的距离对引力梯度噪声的影响。当测试质量与地面之间距离的绝对值增大时，引力梯度噪声的影响会减小，因此  $\beta(\omega)$  又被称为减弱因子。 $\omega$  是探测频率。

为了降低引力梯度噪声的影响，干涉仪要建在远离局部质量密度涨落大的区域，最好是把探测器建在地下，做成地下干涉仪。由于安静的地下环境，风、雨、散射光的影响及温度的涨落也被压低了。

#### 3.1.2 热噪声

激光干涉仪引力波探测器中的热噪声是由光学部件中的布朗运动或干涉仪所在环境中温度场的涨落引起的，热噪声通常分为悬挂丝热噪声和镜体热噪声，前者通过悬丝的涨落直接引起测试质量位置的涨落，

而镜体热噪声是镜体内部及其涂层中所有涨落和耗损过程的叠加。这种热噪声导致的镜子表面位置的涨落，激发法布里-珀罗腔的参量不稳定性。此外，在激光照射下，测试质量（即镜子）表面的镀膜层都会吸收光子能量而变热。激光从测试质量的中心穿过时，中心部位会吸收激光功率并转化为热量由中心向周围传递，使测试质量内部形成一个不均匀的温度场。测试质量的不同部位将会因热膨胀而有不同程度的变形。这一变形会直接改变测试质量的透射率，改变透射光的光程差，使透射光波形失真。同时，由于测试质量的表面变形，将改变测试质量的曲率半径，而测试质量的曲率半径是光学谐振腔的重要参数。它的变化将直接导致光学谐振腔的构型发生变化，破坏腔的稳定性，必须认真对待。精心选择传热性能好的材料做镜子也是降低热噪声的好办法。有些实验室正在对硅和蓝宝石进行研究。为了降低热噪声，让测试质量（即镜子）工作在低温环境中，做成低温干涉仪是一种非常好的方案。低温干涉仪是第三代激光干涉仪引力波探测器预制研究过程中一个重要的课题。

### 3.1.3 悬挂丝材料研究

悬挂丝的诸多正态模式能够被热激发而使丝产生近似于正弦序列的琴弦运动模式。在正弦形状的琴弦运动模式下，悬挂丝的位置会产生波动，使测试质量的质心位置出现涨落，形成噪声，称为琴弦噪声。为了压低这种热噪声，必须选择或研发好的材料做悬挂丝，它要满足以下几个条件：a) 低的热胀系数以减小热-弹性噪声。b) 低的机械-耗散角以减少布朗噪声。c) 好的断裂强度以便安全地挂起测试质量。此外，选用的悬挂丝材料在工作温度下必须有非常好的热传导性，因为光学腔内激光功率很高，有大量的热能储存在测试质量体内，必须很快抽取出来。当前正在研发的悬挂丝材料有硅丝、蓝宝石丝等。

### 3.1.4 大功率激光器

为了降低霰弹噪声，第三代激光干涉仪引力波探测器要采用 500 瓦的强功率激光器，这比第二代激光干涉仪引力波探测器所用的 200 瓦激光器要高得多。研制这样的高精度大功率激光器是一项困难而艰巨的任务。

### 3.1.5 复式激光干涉仪

第三代激光干涉仪引力波探测器预计工作在 1Hz 到 10kHz。在这样宽的频率范围内，建造一台单独的干涉仪使其达到  $10^{-24}$  这样高的灵敏度是相当困难的。也是不聪明的。因为虽然使用大功率激光器可以压低高频部分（如 100Hz 以上的区域）的霰弹噪声，使灵敏度提高，但它同时又在频率低的部分（如 10Hz 到 100Hz 的区域）增加有害的辐射压力噪声，使灵敏度变差。同时，在强激光功率照射下，镜子的衬垫和涂层会发热，产生强烈的热噪声。因此，在同一地点建造一对干涉仪，两台干涉仪的臂共用一条隧道，激光器、清模器、功率循环镜等其他部件共用实验大厅以降低造价。两台干涉仪中的一台干涉仪是高频干涉仪，它在高频区域有很高的灵敏度而不考虑低频部分，工作在室温，测试质量用熔硅材料，使用高功率激光器压低霰弹噪声，激光波长  $\lambda=1064\text{ nm}$ ，引入压缩光场技术减小光子噪声。另一台干涉仪称为低频干涉仪，它致力于低频区域的探测，使用适中的激光器功率以减小辐射压力噪声，激光波长  $\lambda=1555\text{ nm}$ ，测试质量用硅材料，使用高水平的隔震系统以降低地面震动噪声，这种噪声在低频部分是非常大的。把测试质量和悬挂系统放在 10K 的低温环境中以减小热噪声，这个干涉仪的灵敏度在低频部分得到很大的改善，虽然它是以牺牲高频部分的性能为代价的。这两台具有不同探测频率的干涉仪联合起来使用，形成一台复式干涉仪。它在频率较高的区域和频率较低的区域都有很高的灵敏度。

### 3.1.6 参量不稳定性

第三代激光干涉仪引力波探测器中需要解决的一个重要问题是参量不稳定性。参量不稳定性是共振腔的光学模式与腔镜材质的声学模式之间的耦合所产生的联合共振引起的。我们知道，激光干涉仪引力波探测器升级改造的重要措施之一是使用大功率激光器以降低霰弹噪声。但是，使用大功率激光器也会带来负作用。理论分析表明，当法布里-珀罗腔内激光功率过高时，光辐射压力会在腔内驱动一个光-声散射过程，即三模参量不稳过程。当基模和高阶模式频率之差与镜子本身固有的机械震动模式频率相等，且高阶

光学模式的横向剖面与声模式的剖面在空间上大幅度重叠时,这种光-声模式相互作用就被放大了。它使镜子的振动幅度剧烈地按指数规律增大并使光的高阶模式的强度增强,这种现象被称为光声参量放大,它导致的不稳定性称为三模不稳定性,一旦此现象发生,轻则会使灵敏度降低,重则使干涉仪失锁,不能正常工作。大大降低设备的有效运行时间。在第一代激光干涉仪探测到引力波探测器使用的激光功率仅为 10W 量级,参量不稳定性问题并未显现出来。第二代激光干涉引力波探测器如高级 LIGO 和高级 VIRGO 拟使用的功率均为 200W,法布里-珀罗腔内激光功率可达 800 kW,参量不稳定性问题需要加以考虑,第三代激光干涉引力波探测器灵敏度直指  $10^{-24}$ ,计划使用的激光功率均高达 500W 以上,参量不稳定性是必须解决的问题,它的研究与控制已成为新一代激光干涉引力波探测器预制研究的重要课题之一。

### 3.1.7 压缩光场技术

光量子噪声源自光的量子性质。它直接产生于测量和读出过程。在激光干涉引力波探测器探测频带内几乎所有频率上它都会对灵敏度加以限制。光量子噪声是限制第三代激光干涉引力波探测器灵敏度提高的主要障碍,计算表明,在 LIGO 探测器中,由光量子噪声决定的标准量子极限为  $10^{-24}$ ,第一代激光干涉仪的灵敏度为  $10^{-22}$ ,离标准量子极限还远,第二代激光干涉仪的灵敏度为  $10^{-23}$ ,标准量子极限的影响不十分严重,而第三代激光干涉仪的灵敏度的设计值为  $10^{-24}$ ,与标准量子极限相比拟,因此,研究突破标准量子极限的方法成为第三代激光干涉仪的灵敏度能否达到设计值的关键。

#### (1) 标准量子极限

在激光干涉引力波探测器中,量子噪声通常表现为两种形式:霰弹噪声和辐射压力噪声。

##### A. 霰弹噪声

从统计物理可知,激光器发射的光子数目本身是有涨落的。也就是说,在激光束中光子数并非在每个时间点都是相同的。激光束的强度是有起伏的。激光束强度的涨落在干涉仪输出端引起的噪声称之为霰弹噪声,有时也称为散粒噪声。引力波噪声误差  $h$  中的

霰弹噪声的大小可以用谱密度表示:

$$h_{\text{shot}}(f) = \frac{1}{L} \sqrt{\frac{\hbar c \lambda}{2\pi P_{\text{in}}}}$$

其中  $L$  是干涉仪的臂长,  $c$  是光速,  $\lambda$  是激光的波长,  $P_{\text{in}}$  是输入的激光功率。可以看出,增加激光功率能够降低霰弹噪声。

##### B. 辐射压力噪声

光子具有动量,在干涉仪臂中往返运动的光束中的光子,在撞击到几乎自由下垂的镜子(即测试质量)表面之后,会向相反的方向折回,将自己的动量传递给镜子。这种光子动量的转移使镜子受到一种压力,称为光辐射压力。在该力的作用下,镜子会向光子弹回方向的反方向反冲,其平衡位置发生变化。由于光子数目的统计涨落,到达镜子表面的光子数并非在每个时间点都是相等的。也就是说,光辐射压力不是常数,它是有统计涨落的。这种辐射压力的涨落会直接引起测试质量位置的波动,形成噪声。称之为辐射压力噪声。这是光的量子特性产生的另一类噪声,它导致测试质量位置的直接晃动。引力波噪声误差  $h$  中辐射压力噪声的大小也可以用谱密度表示为:

$$h_{\text{rp}}(f) = \frac{2}{L} X(f) = \frac{1}{mL f^2} \sqrt{\frac{\hbar P_{\text{in}}}{2\pi^3 c \lambda}}$$

在这里  $m$  是测试质量的质量,  $L$  是干涉仪臂长,  $f$  是辐射压力噪声的频率,  $c$  是光速,  $\lambda$  是光的波长。可以看出辐射压力噪声的大小与输入功率的平方根  $\sqrt{P_{\text{in}}}$  成正比,它不再是白噪声,而是与频率的平方  $f^2$  成反比。

##### C. 标准量子极限

通过以上分析我们可以把霰弹噪声和辐射压力噪声看成一种噪声的两张面孔。它们都是由光的量子效应引起的,称为光量子噪声,两种噪声与输入功率  $P_{\text{in}}$  的关系是相反的。霰弹噪声随功率  $P_{\text{in}}$  的增大而减少,但是,辐射压力噪声随功率  $P_{\text{in}}$  的增大而增大。在无相互关联(激光功率不是非常大时)的情况下,光量子噪声的大小为两种噪声之和:

$$h_{\text{om}}(f) = \sqrt{h_{\text{shot}}^2(f) + h_{\text{rp}}^2(f)}$$

在低频区域,辐射压力噪声占主导地位,它正比于

$\frac{1}{f^2}$ 。在高频区域，霰弹噪声占主导地位，它是白噪声。增加输入光束的功率  $P_{in}$  可以改善干涉仪在高频区域的灵敏度，但要以增加低频区域的噪声为代价。因为随着干涉仪内激光功率的增加辐射压力噪声也同时增加了。因此，对于任何一个给定的激光功率来说，都存在一个特殊的频率点，在这个点上，霰弹噪声和辐射压力噪声的幅度贡献大小相等。两种噪声的影响得到折中。

$$h_{rp}(f) = h_{shot}(f)$$

这时激光干涉仪的位移灵敏度达到一个最佳值。这个最佳值称为标准量子极限。

### (2) 压缩态光场

采用压缩光场技术，可以在一定条件下突破标准量子极限。

#### A. 真空涨落

光量子噪声产生的根源是真空涨落，量子场论是标准模型的根基。在量子场论中，电磁场的最低能量状态叫“真空态”或称为“零点场”。根据量子力学的测不准原理，没有什么东西的能量是绝对为零的。既然真空是电磁场的一个能量状态（即便是最低能态），它的能量也是不为零的，因而是有涨落的，这种真空涨落是由电磁场的量子特性导致的。电磁场的真空涨落通过干涉仪向外界的开口进入干涉仪内部并与干涉仪内部光场之耦合，产生光量子噪声，对干涉仪的输出信号进行干扰。

#### B. 正交振幅与正交相位涨落

在量子场论中，电磁场是用振幅和相位这两个正交分量来描述的。真空涨落就寓于正交振幅和正交相位的涨落之中。涨落水平能够在这两个正交分量之间对立地进行互易，但两个涨落的乘积受测不准原理的约束，是保持不变的。

正交振幅的涨落导致被光探测器探测到的功率的涨落，等价于输入激光束功率的涨落，这种涨落就是霰弹噪声。正交相位的涨落等价于测试质量位置的涨落，这个效应就是辐射压力噪声。

#### C. 压缩光场

光场的两个正交分量的涨落都是可以压缩的。既然通过输出口进入干涉仪内部的电磁场真空态的两

个正交分量（正交相位和正交振幅）的涨落在满足测不准原理的条件可以相互对立的进行互易，那么为了降低霰弹噪声，我们就可以把正交振幅的涨落进行压缩，得到一个压缩态。这时我们不考虑正交相位涨落的涨大而引起的辐射压力噪声的增大。若把这种以牺牲辐射压力噪声为代价而使霰弹噪声降低的压缩态注入干涉仪的输出口，那么被光探测器探测到的光信号中的霰弹噪声就会被降低，反之亦然。由于在激光干涉仪引力波探测器中，霰弹噪声和辐射压力噪声分别在不同的频率区域占主导地位，我们可以在一个频率区域内（高频区域）使用正交振幅压缩真空而在另一个频率区域内（低频区域）使用正交相位压缩真空。以一定的频率函数适当转动压缩相角就能够使霰弹噪声（在高频区域）和辐射压力噪声（在低频区域）同时减小。这种技术称为变频压缩技术。压缩光场技术可以帮助我们一定条件下突破的标准量子极限。使激光干涉仪引力波探测器的灵敏度得到很大提高。

## 3.2 爱因斯坦望远镜

正在热烈议论中的爱因斯坦引力波望远镜是欧盟的一个研究计划，目标是建造一台大型激光干涉仪引力波探测器，设计灵敏度比第二代干涉仪又提高一个数量级，达到  $10^{-24}$ ，低端频率从第二代干涉仪的 10Hz 降低到 1Hz，也就是说，它将以极高的灵敏度探测频带从 1Hz 到 10kHz 内所有天体源辐射的引力波，是一台典型的第三代激光干涉仪引力波探测器。

### 3.2.1 技术指标

爱因斯坦望远镜是第三代激光干涉仪引力波探测器各种设计方案中比较著名的一个，具有非常先进的技术指标和结构特色。主要表现在以下几个方面：

a. 灵敏度  $10^{-24}$ ； b. 频带 1Hz ~ 10kHz； c. 臂长 10km； d. 激光功率 500W； e. 地下干涉仪； f. 低温干涉仪； g. 复式干涉仪； h. 和压缩光场； i. 三角形结构

### 3.2.2 结构特点

爱因斯坦引力波望远镜的基本结构特点如下：

1) 爱因斯坦引力波望远镜是一台地下干涉仪，建设地下干涉仪的最大造价是挖掘隧道和建设地下大厅。因此爱因斯坦引力波望远镜采用三角形结构，三

台干涉仪只需修建三条隧道，三条隧道组成等边三角形的三条边，每一条隧道内有足够的空间安放多条干涉仪的臂。这样三台干涉仪就可以共用隧道和地下大厅，降低工程造价，优化价格收益比。

2) 爱因斯坦引力波望远镜每台干涉仪的臂长都是 10km。两臂之间的夹角为  $60^\circ$ ，而不是  $90^\circ$ 。中心分别位于一个等边三角形的三个顶点上。当然，两臂间的夹角为  $60^\circ$  的干涉仪与两臂夹角为  $90^\circ$  时相比，灵敏度会有所损失，这是三角形结构的一个缺点，但是，通过三个探测器输出信号的联合使用，可以使灵敏度损失得到一定的补偿，把损失减小到 0 到 60% 之间。爱因斯坦望远镜的总体布局图如图 7 所示。

3) 在图中，位于三个顶点的三台干涉仪分别以蓝

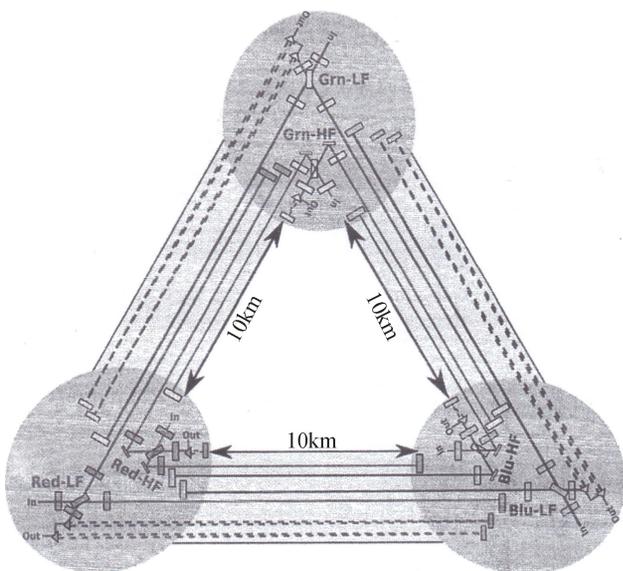


图 7 爱因斯坦望远镜的总体布局图

色、红色和绿色来表示。其中 Blu-LF 为蓝色低频干涉仪，Blu-HF 为蓝色高频干涉仪，Red-LF 为红色低频干涉仪，Red-HF 为红色高频干涉仪，Grn-LF 为绿色低频干涉仪，Grn-HF 为绿色高频干涉仪，In 为激光输入口，Out 为信号输出口。

建于同一个地点的多台干涉仪对在引力波观测中抽取附加的信息是极其有利的。例如，建于同一个地点的两台成  $45^\circ$  角的 L-形干涉仪可以完全解决入射引力波的两个极化振幅。建于同一个地点的三台彼此转动成任意角度的干涉仪之间的有效组合同样可以完整地重建引力波的两个极化。

### 3.2.3 灵敏度曲线

爱因斯坦望远镜的设计灵敏度曲线如图 8 所示。

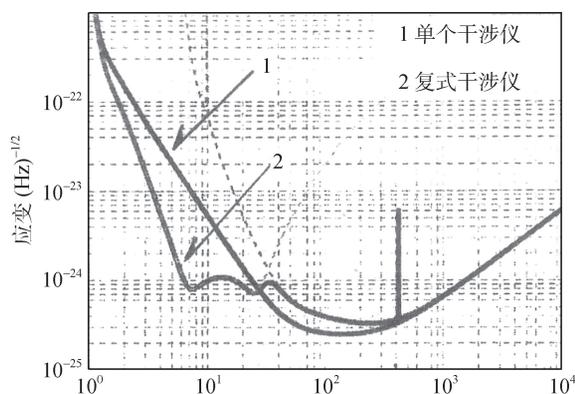


图 8 爱因斯坦望远镜的设计灵敏度曲线

### 3.2.4 第三代激光干涉仪引力波探测器研究的物理问题初探

研发第三代激光干涉仪引力波探测器是 21 世纪第三个十年的任务，以第三代激光干涉仪引力波探测器为基础的引力波天文台的建立将开辟引力波天文学研究的新时代。第三代干涉仪有希望能以信噪比  $SNR=8$  的精度每年探测到几十个双中子星并合事例，实现从寻找到引力波信号到研究和测量引力波天文学各种天体源物理参数的过渡。

第三代干涉仪的关键要素是灵敏度比第二代干涉仪提高一个数量级，在低频区域 (1-10Hz) 甚至更高。这将使它能够以信噪比  $SNR=50$  的精度对很多强信号事例进行测量。在此条件下，有可能对单源系统 (如黑洞和中子星核) 以及具有强引力场的系统进行详细研究。到目前为止，中子星的结构及其磁场所扮演的角色仍是未知数。然而其状态方程的识别标志却寓于中子星系统发射的任何类型的引力波中 (例如，双中子星系统并合时发射的引力波)，这种引力波信息可望包含对中子星状态方程敏感的一些特征。能够把不同类型的状态方程区分开来。根据一定的物理模型，第三代干涉仪可以在 100Mpc 探测距离上以  $\pm 0.5\text{--}1.0\text{km}$  的精度测量质量为  $1.00\text{--}1.35M_\odot$  的双中子星系统中中子星的直径。双中子星并合的结果可能是一个超重的、在相对说来比较长的时间内振荡并发射引力波的残留物体，中子星并合的状态方程影响该震荡的存在和特点，第三代激光干涉仪引力波探测器应该能

够看到这种信号并确定相应的物理机制。此外，观察孤立的中子星发射的引力波中的“尖峰”(glitch)信号和 $r$ 模式不稳定性可以探索中子星动力学。

$\gamma$ 射线暴(GBs)是宇宙中亮度几乎最大的爆炸，通常按照脉冲的持续时间它们又被分为短 $\gamma$ 射线暴( $\Delta t < 2\text{s}$ )和长 $\gamma$ 射线暴( $\Delta t > 2\text{s}$ )。超新星核的坍塌可以被认为是长 $\gamma$ 射线暴的原本，而双中子星并合及中子星-黑洞并合有望是短 $\gamma$ 射线暴的始祖。第一代激光干涉仪引力波探测器尝试过与 $\gamma$ 射线暴探测进行符合测量来寻找引力波，由于探测距离不足以观测用人造卫星探测到的 $\gamma$ 射线暴发生的宇宙学距离，因此未能如愿。第二代激光干涉仪引力波探测器有望观测到短 $\gamma$ 射线暴过程中发射的引力波，虽然探测到的事例率较低(对双中子星-黑洞来说约为每年3例，对双中子星来说为每年0.3例)。第三代激光干涉仪引力波探测器则有希望在远达17Gpc光度距离上(相应的红移约为2)探测双中子星系统，而对于中子星-黑洞系统，探测的光度距离更高(高达红移 $z \approx 2 \sim 5$ )，这与短 $\gamma$ 射线暴期待的发射距离( $z < 1$ )相匹配，而这种短 $\gamma$ 射线暴可望是双中子星系统并合时用电磁法探测到的对应物，其探测到的事例率约为每年100个。

致密双星发射的引力波信号可以看成宇宙学的“标准烛光”，更贴切地说，可以看成是宇宙学的“标准笛声”。频率位于声音频带。事实上，引力波信号的振幅完全由啁啾质量(或称为鸟鸣质量)和光学距离 $D_L$ 决定，根本不需要引入复杂的天体物理模型。因此，通过致密双星并合引力波信号的重建就可以确定这两个参量从而测量出双星系统的光度距离。但是，测量所涉及的是宇宙学距离，引力波信号被红移了( $f(t) \rightarrow f(t)/(1+z)$ )，它会导致错误的质量重建( $M \rightarrow (1+z)M$ )和错误的距离重建( $D \rightarrow (1+z)D$ )。同时探测双中子星并合发射的引力波信号(用第三代干涉仪)和短 $\gamma$ 射线暴闪光信号(用电磁望远镜)使我们能测量源的光度距离和红移这两个参数。如果探测到大约500个这种类型的事例(第三代激光干涉仪引力波探测器取数5年左右)就有可能用很好的精度约束宇宙学模型。

弄明白超新星爆发的物理机制是第三代干涉仪的另一个重大的研究目标。尽管做了一系列的模型尝

试，超新星核坍塌爆炸机制的详情至今仍未搞清。坍塌的超新星核不能用光学望远镜进行研究，因为核周围的星球包层对电磁辐射是不透明的。引力波携带着直接从坍塌着的重星体核而来的信息，它们的观测能够制约林林总总的被建议的震荡-复苏机制。第二代激光干涉仪引力波探测器探测到超新星爆发的可能性很小，因为在它们的探测体积内每个世纪只能期待有几个这样的事例发生，而在第三代干涉仪的观测距离内可望每10年能探测到几个事例，尽管事例数不算多，它仍然能使我们得到超新星机制中非常珍贵的资料。另外，对超新星爆发时的电磁波、引力波和中微子辐射进行符合探测对于研究这种复杂的物理现象将是一个绝妙的多信息架构。

总的说来，第三代激光干涉仪引力波探测器的研究目标可以更具体的归纳为以下几个方面：

#### A. 基本物理问题

1) 第三代激光干涉仪引力波探测器将检验在质量四极矩近似之外引力波产生的方式，利用在红移 $Z=2$ 时从双中子星并合而来的引力波与电磁波的符合测量精确测量引力波的传播速度，检验广义相对论对引力波速度的预言。

2) 检验对天体观测到的质量和其内在质量之间的关系。

$$M_{\text{int}} = M_{\text{obs}} / (1+Z)$$

3) 黑洞的时空是否唯一地由科尔(Kerr)几何给出。

4) 引力坍缩的物理机制。

5) 研究超核密度情况下物质的状态方程。

#### B. 天体物理和多信息天文学

1) 中子星和黑洞的质量函数及它们的红移分布，中子星的最大质量。

2)  $\gamma$ 暴的祖先。

3) 致密双星的形成和演化。

4) 超新星身后的物理机制，不对称性与引力坍缩的关系。

5) 相对不稳定性在年轻的中子星内部是否发生，如果发生的话它们在中子星的演化过程中扮演什么角色。

6) 为什么在低质量X-射线双星中的中子星的旋

转频率是被限制的？

7) 中子星的外壳本质及与中子星内核的相互作用。

8) 在高红移区域引力波源群体。

#### C. 新宇宙学研究

1) 宇宙源的亮度距离。

2) 暗能量的状态方程及与红移的关系。

3) 星系核中黑洞的形成和演化。

4) 宇宙原始的物理条件及其早期历史上发生的相位转移。

## 4. 结束语

引力波是爱因斯坦在广义相对论的重要预言，引力波探测是当代物理学最重要的前沿领域之一。以引力波探测为基础的引力波天文学是一门新兴的交叉科学，由于引力辐射独特的物理机制和特性，使得引力波天文学研究范围更广、更全面。它以全新的手段和理念探寻宇宙中未知的质量体系，提供其他天文观测方法不可能获得的信息，加深人们对宇宙中天体结构

的认识。继以电磁辐射（如可见光、红外线、紫外线、X射线、伽马射线和射电）为探测手段的传统电磁辐射天文学的巨大拓展与补充。

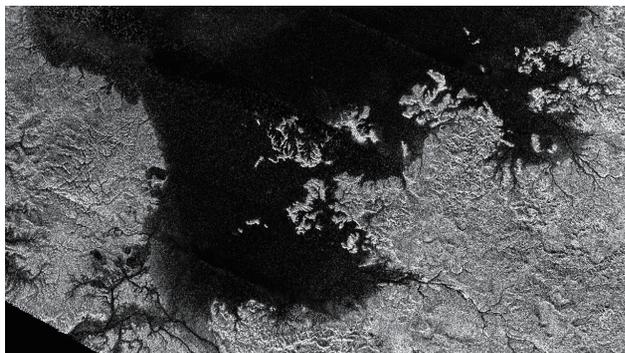
引力波探测经历了艰苦而曲折的过程。激光干涉仪引力波探测器的出现开辟了引力波探测的新时代。它的探测灵敏度高，探测频带宽，升级潜力大，很快就在世界各地蓬勃发展起来，成为引力波探测的主流设备。经过40多年的潜心研究，从小型样机到臂长几千米的第三代、第二代，激光干涉仪引力波探测器的灵敏度提高了5个数量级，达到 $10^{-23}$ ，直接导致引力波的发现，实现了近百年来几代科学家的梦想。引力波的发现使引力波天文学完成了从寻找引力波到研究天文学这一历史性转折，第三代激光干涉仪引力波探测器的研发是引力波天文学发展史上一个新的里程碑，是当前世界各大实验室大力发展的热门课题。它的设计灵敏度为 $10^{-24}$ ，探测频带为1Hz到10KHz。作者坚信，以第三代激光干涉仪引力波探测器为基础的引力波天文台的建立必将迎来引力波天文学蓬勃发展的新时代。



### 科苑快讯

## 土星最大的卫星上发现峡谷中的河湖

最新研究显示，土星最大的卫星泰坦陡峭的峡谷中存在甲烷海洋，支流众多的漫长河网则汇入海洋。通过卡西尼探测器掠过泰坦时收集的雷达数据，天文学家确定谷底大约不到1千米宽、570米深，地形平坦，起伏不超过2.7毫米。由于比地球上的任何地形



都要平坦得多，所以研究者认为峡谷一定充满液体。谷底的水平面与海洋相匹配，说明这里的液体能够流动，研究者在《地球物理研究通讯》（*Geophysical Research Letters*）网络版上做了报告。因为峡谷边缘陡峭、内部宽广，所以海平面一直低得多，直到后来抬升，液体才充满河流侵蚀形成的峡谷。

以前因为峡谷看起来一片昏暗，所以不清楚这里是充满液体，还是因观察角度所致的阴影。这次飞越泰坦过程中收集的雷达数据也显示，河网的众多支流也有液体，虽然还没有确切的证据，但研究者认为这些河流仍然保持活跃，继续侵蚀着泰坦的表面。

（高凌云编译自2016年7月20日 [www.sciencemag.org](http://www.sciencemag.org)）