

# 激光干涉仪引力波探测器的噪声和灵敏度

王运永<sup>1,2</sup> 朱宗宏<sup>2</sup>

(1. 中国科学院高能物理研究所 100049; 2. 北京师范大学引力波与宇宙学实验室 100875)

引力波是爱因斯坦“广义相对论”的重要预言,引力波探测是当代物理学重要的前沿领域之一。引力波的发现开辟了引力波天文学研究的新纪元。早在1916年,爱因斯坦就根据弱场近似,预言了引力波的存在。但是直到今天引力波才被发现,前仆后继,科学家为之奋斗达百年之久。关键的困难就是引力波强度太弱,引力波探测器的灵敏度太低,引力波信号完全湮没在噪声本底之中。在引力波天文学研究蓬勃发展的今天,降低噪声、提高灵敏度仍是激光干涉仪引力波探测器发展的关键课题。

## 1. 激光干涉仪引力波探测器

引力波探测是非常困难的,一般说来微弱的引力波信号淹没在很强的探测器的噪声本底中,需要降低噪声,达到足够大的信号噪声比才能将它抽取出来。在引力波探测历史上曾经两次宣布找到了引力波,对世界的轰动不亚于今日。第一次是1969年6月,美国物理学家、马里兰大学教授J·韦伯宣布他领导的研究团队利用共振棒探测器成功地探测到引力波,后来证明是噪声。第二次是2014年3月17日,哈佛-史密松天体物理中心的科学家宣布利用BEP2探测器在宇宙微波背景中发现了原初引力波产生的B模偏振形态,但在后来的分析验证中,由于无法排除星际尘埃产生的“噪声本底”而不能定论。这些事件表明,分析噪声来源,压低噪声水平是引力波探测中的核心问题。

激光干涉仪引力波探测器的出现给引力波探

测带来巨大希望,由于探测频带宽,灵敏度高,很快在世界各地迅速发展起来,成为引力波探测的主流设备,在近半个世纪的漫长岁月里,经过几代人的艰苦努力,噪声水平逐步压低,灵敏度逐步提高。导致了引力波的发现。为了表彰在激光干涉仪引力波探测器的发明、发展、建造和提高过程中所做的突出贡献,2018年诺贝尔物理学奖授予了美国物理学家R.韦思、K.索恩和B.巴里什教授。

激光干涉仪引力波探测器灵敏度的提高也不是一蹴而就的。从臂长只有10来米,灵敏度只有 $10^{-17}$ 的原型机到灵敏度为 $10^{-22}$ 、臂长数km的第一代激光干涉仪再到正在运行的灵敏度为 $10^{-23}$ 的第二代激光干涉仪,无不渗透着几代科学家与噪声奋斗的心血和汗水。当前,第三代激光干涉仪引力波探测器的预制研究已在世界各地开展起来,灵敏度直指 $10^{-24}$ ,目标是建设真正意义上的引力波天文台。这是一个非常艰难的任务,充满了挑战和机遇。最大的困难仍然是降低噪声。

为了更好地理解噪声在激光干涉仪引力波探测器中的危害。深入研究噪声来源,探讨压低噪声的途径,有必要对激光干涉仪引力波探测器做一个概括的介绍。

## 2. 激光干涉仪引力波探测器中的主要噪声源

激光干涉仪引力波探测器中的噪声源主要有如下几个方面。

## 2.1 地面震动噪声

地面震动噪声是激光干涉仪主要的噪声源之一,它是由于自然现象和人类活动引起的,如火山和地质活动、弱地震和远程地震、月球潮汐、海浪、大风引起的房屋及树木的晃动对地基的影响、大雨及冰雹等自然现象引起的地面震动以及交通运输、工农业生产、矿山开采、森林砍伐、建筑工地等人类活动引起的地面震动。在频率低于1 Hz时,自然界的扰动占主导地位,在1 Hz之上人类活动起主要作用。0.01 Hz到1 Hz的微地面震动主要是大风暴雨及海洋活动引起的,甚低频( $10^{-5}$  Hz数量级)的地面震动来自月球的潮汐效应。

地面震动噪声通过多种途径传递到干涉仪的测试质量,其中测试质量所处地面的水平方向运动会直接导致测试质量的纵向运动。地球表面在其他自由度上的运动也会耦合到测试质量。典型的地面震动幅度为 $x = \alpha/f^2$ ,其中 $f$ 是地面振动频率, $\alpha$ 是常数, $x$ 一般为 $10^{-8} \sim 10^{-6}$  m数量级,与具体的地域有关。可以看出,地面震动噪声对激光干涉仪引力波探测器灵敏度的影响在低频部分(几十赫兹以下)最严重,而这个频带的地面震动是普通隔震系统最难处理的。一般说来,地面运动幅度为 $10^{-6}$  m数量级,我们期望探测到的引力波的幅度为 $10^{-19}$  m量级,因此要求地面噪声的衰减系数要好于 $10^{-13}$ 。

减小地面震动噪声对测试质量干扰的基本方法是不让测试质量系统直接固定在有噪声的地面上,而是通过一个地面震动过滤器把两者隔离。这个过滤器就是我们所说的地面震动衰减系统。

常用的地面震动隔离系统主要有被动隔震和主动隔震系统两大类。被动隔震系统是一种简单的无源机械过滤器,它是各种复杂的机械过滤器的基础。在早期建造的激光干涉仪引力波探测器如LIGO, GEO600和TAMA300,都采用了级联被动机械过滤器技术。基本方法是在地面上用橡胶板、很重的有弹性的不锈钢板和弹簧交替地堆放在一起,搭建成一个多层的堆积平台,在平台之上放置一个悬挂系统,把镜子悬挂起来。多层的堆积平台和悬挂系统在地面和镜子之间起隔震作用。

主动隔震系统有较强的隔震能力,VIRGO及第二代激光干涉仪引力波探测器大都采用这种隔震方式。实用的主动隔震系统至少包括三个基本部分:倒摆、顶台和镜子悬挂系统。

## 2.2 热噪声

根据涨落-耗散理论,任何一个受损耗影响的机械系统都会受到位置涨落的影响。激光干涉仪引力波探测器中的镜子(即测试质量)及其悬挂系统就是这样的一种机械系统。镜子的位置必然受这种涨落影响。这种涨落就是所说的热噪声。热噪声的根源是分子的无规则运动,激光干涉仪引力波探测器中的热噪声主要有如下三种类型。

### A. 单摆热噪声

在激光干涉仪引力波探测器中,干涉仪的测试质量(即镜子)悬挂于稀薄的空气之中。它所处的周围环境相当于一个具有热量的大容器。测试质量系统通过耗散机制与其进行能量交换。交换来的能量作为一种涨落力注入到测试质量系统中,使其悬挂丝和测试质量体(即镜子)发生热运动,导致位置涨落,形成热噪声。干涉仪中用细丝悬挂起来的镜子整体上可以看成是一个单摆。单摆是一个典型的具有损耗的谐振子,单摆热噪声是一种阻尼谐振子的热噪声,它完全可以用阻尼谐振子的热噪声分析方法进行分析。激光干涉仪引力波探测器中的单摆热噪声是比较大的。因此测试质量系统(即镜子)必须置于真空室内,真空室的真空度要好于 $10^{-9}$ 托。

### B. 悬挂丝的热噪声——“琴弦模式”

如上所述,激光干涉仪引力波探测器中的镜子和其悬挂丝构成一个单摆,作为一个整体,它具有单摆热噪声。与此同时,镜子和悬挂丝自身都可以看成连续机械系统,本身都具有有限的刚度,因此它们都具有弹性内部模式。热噪声源于机械系统的内摩擦。由内摩擦引起的热噪声通常分为悬挂丝热噪声(琴弦模式)和镜面本身热噪声(鼓面模式),前者通过悬丝的涨落直接引起测试质量位置的涨落,而镜子本身的热噪声是镜子内部及其涂层中所有涨落和耗过程的叠加。

悬挂丝的诸多内部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。这种类型的热噪声模式显示出丝振动模式的谐波性,因此,悬挂丝的这种热噪声模式通常称为琴弦模式。第一琴弦正态模式的频率通常为百赫兹量级。因此有些琴弦正态模式位于引力波探测频带内,对探测灵敏度产生很大的影响。必须引起高度关注。

### C. 镜体的热噪声——“鼓面模式”

镜子本身作为一个连续机械系统,亦可以看成是由无穷多个谐振子构成,它们对应于系统的无穷多个正态模式。每个模式都有自己的共振频率、有效质量和阻尼时间。这使得该连续机械系统具有很多内在的机械共振模式。这些模式能够被热激发而使镜子的表面发生位置涨落,形成热噪声。在分析镜子本身的热噪声时,我们感兴趣的参量是对着高斯型激光束的镜子表面位置的涨落。这种由热噪声导致的镜子表面位置的涨落模式通常被称为热噪声的“鼓面模式”。鼓面模式热噪声的共振频率一般比较高,在激光干涉仪引力波探测器覆盖的探测频带内的热噪声是这些共振模式的尾部效应,它对干涉仪的灵敏度也会产生很大的影响。

镜子基底材料的结构损失在镜子热噪声中起着重要的作用。为了降低基质热噪声,需要选择机械损耗尽可能低的光学材料做镜子的基底材料,最常用的镜子材料为熔硅,它具有非常低的机械损耗,非常小的光学吸收,出色的均匀性及非常小的双折射。

为了得到需要的反射率,镜子表面需要用特殊的材料进行涂镀。沉积在镜子基质表面的涂层是用低折射率材料和高折射率材料交替涂镀15~40层而成。涂层总厚度为几微米。需要指出的是,在重达几十公斤的镜子中,机械损耗的主要贡献来自在镜子表面沉积的这几微米厚的涂层。镜子涂层的热噪声严重地影响干涉仪的灵敏度,寻找机械损耗低的涂层材料,研究现有涂层材料的机械损耗根源仍是当前令人感兴趣的课题。

压低热噪声最有效的方法是将镜子置于低温环境中,KAGRA就是一台低温激光干涉仪引力波探测器,其热噪声得到有效的控制。为了得到很好的散热效果并减少激光束的衍射损失,镜子尺寸要足够大,寻找散热系数好的材料来做镜子的衬垫、涂层和悬挂丝也是当前重要的研究课题。

## 2.3 光量子噪声

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。在激光干涉仪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。光量子噪声通常表现为两种形式:霰弹噪声和辐射压力噪声。霰弹噪声是光探测器中的强度量子噪声,它在高频区域占主导地位,辐射压力噪声是从测试质量反射的光子的动量转移产生的,它在低频区域占主导地位。

### 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

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

其中 $L$ 是干涉仪的臂长, $c$ 是光速, $\lambda$ 是激光的波长, $P_{in}$ 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:

$$h_{rp}(f) = \frac{2}{L} X(f) = \frac{1}{mLf^2} \sqrt{\frac{\hbar P_m}{2\pi^3 c \lambda}}$$

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  $\sqrt{P_m}$  成正比,它不再是白噪声,而是与频率的平方  $f^2$  成反比。这表明,辐射压力噪声在低频区域显得更为重要。光量子噪声在低于 20 Hz 的区域变得很大就是由这个效应引起的。增加镜子的质量可以降低测试质量对力的机械易感性从而减小辐射压力效应对测试质量运动的影响。在实际应用中,初级激光干涉仪引力波探测器测试质量为 10 kg,为了减小辐射压力噪声的影响,高级探测器的测试质量为 40 kg,而筹备中的第三代探测器 ET 的测试质量已增加到 200 kg。

### C. 标准量子极限 SQL

通过以上分析我们知道,在激光干涉仪引力波探测器中,有两种与光的量子特性相关的噪声源,它们与输入功率  $P_m$  的关系是相反的。我们可以把这两种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,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:

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

在低频区域,辐射压力噪声占主导地位,在高频区域,霰弹噪声占主导地位,增加输入光束的功率  $P_m$  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。对于任何一个给定的工作频率来说,都存在一个最佳激光功率,选择这个最佳激光功率,霰弹噪声和辐射压力噪声的幅度贡献大小相等。使霰弹噪声和辐射压力噪声的影响得到折中,这时激光干涉仪的位移灵敏度达到一个最佳值。

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

这个最佳值是干涉仪位移灵敏度的一个基本极限,称为标准量子极限,通常以无量纲振幅  $h_{SQL}(f)$  来表示。对常规的激光干涉仪引力波探测器来说,标准量子极限  $h_{SQL}(f)$  是其灵敏度提高的最后障碍。实验表明,对于任何一个可以选用的激光功率,都会有一个霰弹噪声曲线与辐射压力噪声曲线的交汇点,这些交点连接起来形成一条线,它就是激光干涉仪的标准量子极限曲线。图1显示了标准量子极限  $h_{SQL}(f)$  与频率及激光功率的关系。

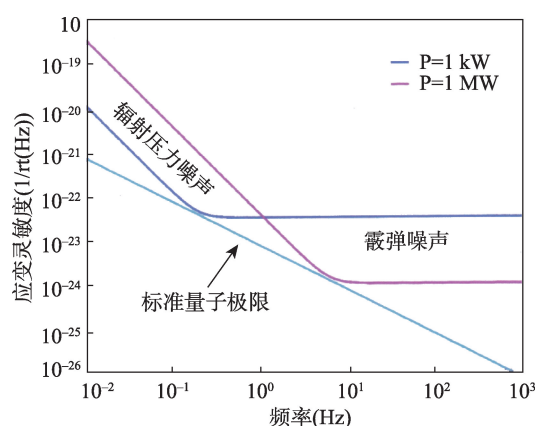


图1 标准量子极限  $h_{SQL}(f)$  曲线示意图

标准量子极限 SQL 的大小与干涉仪的具体参数有关,例如,高级 LIGO 的标准量子极限  $h_{SQL}(f)$  在频率为  $f = \Omega/2\pi = 100\text{Hz}$  时,数量级为  $10^{-24}/\sqrt{Hz}$ 。

### D. 标准量子极限突破

标准量子极限 SQL 最初是作为激光干涉仪引力波探测器灵敏度不可逾越的最后极限提出来的。但是人们很快就意识到,标准量子极限仅仅适用于经典的激光干涉仪。但是有很多新技术,如失谐信号循环技术、压缩态光场注入技术等,都可以用来建造结构更加复杂的干涉仪,俗称非经典干涉仪。其灵敏度可以在一定频带内突破标准量子极限。

## 2.4 引力梯度噪声

从万有引力定律可知,测试质量周围的所有物体都会与该测试质量相互吸引。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)引起的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。引力梯度噪声会使隔震系统“短路”,直接作用在镜子上,它是无法回避的。它是低频段的主要噪声源之一,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。

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,例如把探测器建在地下。在测试质量周围布置一个监测器阵列,对质量密度的涨落进行实时监测并进行修正也是行之有效的。

### 2.5 残余气体噪声

激光干涉仪引力波探测器的真空室和真空管道中会有少量气体残留下来。这些残留气体除了引起单摆热噪声外,它的密度扰动会使折射率发生涨落,这种涨落会对激光束的传播产生影响,形成噪声,称为残余气体噪声。另外,残余气体分子对镜面不同部位的撞击是随机的。撞击产生的压力在镜面上的分布是不均匀的。它会引起镜子晃动,形成噪声。降低残余气体噪声的主要方法是让真空室和真空管道保持尽可能高的真空状态,并减少材料的气体释放。

### 2.6 杂散光子噪声

在光的传输过程中,少部分激光光子会被散射离开主光束。当它们随后被反射回来时,会和干涉仪中携带引力波信号的光束耦合。这些散射光携带的是它们散射面上的信息,因此会污染期望中的信号,形成噪声,称为杂散光子噪声。在设计激光干涉仪引力波探测器的真空室和真空管道时,要采取必要的措施,如在适当的部位设置光阑,使该噪声减至最小。

综上所述我们可以看到,激光干涉仪引力波探测器的噪声是由多种因素决定的。它们的大小和

频率特性也互不相同。降低的措施也不同。

## 3. 激光干涉仪引力波探测器的灵敏度

灵敏度是激光干涉仪引力波探测器最重要的参数,由于引力波的强度非常弱,激光干涉仪的噪声水平非常高,其灵敏度的定义和确定都具有鲜明的特色。

### 3.1 灵敏度的定义

为了表示干涉仪对引力波探测的灵敏程度,比较不同干涉仪之间的性能,需要定义一个通用的参数——“灵敏度”。激光干涉仪引力波探测器的灵敏度定义如图2所示。

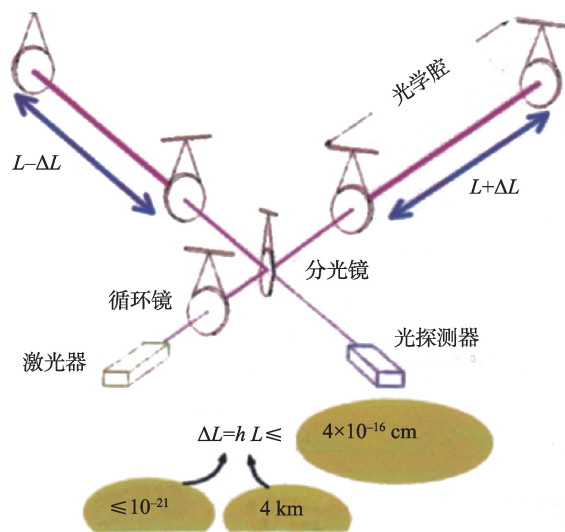


图2 激光干涉仪引力波探测器的灵敏度

设干涉仪的臂长为 $L$ ,当引力波到来时,根据引力波的特性,相互垂直的两臂一个伸长另一个相应地缩短,设臂长的变化量为 $\Delta L$ ,则两臂的长度分别变为 $L+\Delta L, L-\Delta L$ ,干涉仪的应变灵敏度 $h_d$ 定义为:

$$h_d = \Delta L/L$$

### 3.2 干涉仪灵敏度的确定

为了确定激光干涉仪引力波探测器灵敏度的大小,需要用一个标准引力波信号源对其进行刻度。但是,迄今为止,人类还不可能在实验室内建

造这样的信号源。因此,激光干涉仪引力波探测器灵敏度的高低尚不能用引力波信号的幅度来表示。需要用其他方法来确定。我们知道,引力波信号是极其稀有的。迄今为止,除了少数几个真实事例之外,我们在引力波探测器上获得的大量数据基本上都是噪声。这就是说,对一台引力波探测器来说,我们现在可以方便地知道它能探测到的最小噪声水平是多少。探测器自身的灵敏度是由其噪声水平决定的,对于一定幅度的信号来说,信噪比越大,探测到该信号的几率越大,该探测器的灵敏度越高。因此我们现在将激光干涉仪引力波探测器灵敏度的大小定义为:当干涉仪中引力波信号的幅度与其噪声水平相等时,即信噪比等于1时的噪声值。更明确地说,激光干涉仪引力波探测器的灵敏度曲线实际上是它在信噪比等于1时的噪声值曲线。

为了更好地理解激光干涉仪引力波探测器的灵敏度曲线,我们首先要了解几个基本概念,它们不但用来描述探测器的灵敏度,而且在分析探测器性能、处理噪声和引力波信号的过程中也是经常用到的。

#### A. 谱密度和功率谱密度

在频率域内,我们可以写出一个探测器系统所探测到的能量随频率变化的函数,称之为能量频率谱,又称能谱。在频带宽度为1Hz的单位频带中所含有的能量称为能量频率谱密度,简称谱密度,以符号 $D(\omega)$ 来表示

单位时间内的能量谱密度称为功率谱密度 $S(\omega)$ 。

$$S(\omega) = D(\omega)/T, \quad (T \text{ 是探测时间间隔})$$

现在我们来讨论激光干涉仪引力波探测器的灵敏度和噪声水平表示法。我们知道,探测器中的噪声信息是时间的随机函数,也就是说,噪声信号何时出现,以多大幅度出现都是随机的。在无限大的时间间隔内(从 $-\infty$ 到 $+\infty$ ),噪声幅度的平均值是零。因此用幅度平均值表示噪声水平是不可取的。对于噪声这一类的随机函数,其大小要用功率谱密度来表示。功率谱密度有时简称为功率谱。时间函数 $S(t)$ 的功率谱定义为其自相关函数的傅里叶变换:

$$P_s(f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} S(t)S(\tau)e^{-i2\pi f t} d\tau$$

我们在讨论功率谱 $P_s(f)$ 时,通常只用正频率而不用负频率。故我们定义:

$$S^2(f) \equiv \begin{cases} 2P_s(f) & f \geq 0 \\ 0 & f < 0 \end{cases}$$

$S^2(f)$ 称为单边功率谱。若表征噪声函数 $S(t)$ 的物理量是电压 $V(t)$ ,那么功率谱 $S^2(f)$ 的单位就是 $V^2(f)/\text{Hz}$ 。在讨论像噪声这样的随机时间序列时,通过带宽为 $\Delta f$ 的过滤器的功率表示为: $V^2(f)/\text{Hz} \cdot \Delta f$ 。这就是说,当把相邻各噪声合并在一起时,用的是功率(即幅度的平方)相加,而不是幅度相加。

在实际中,我们经常用从功率谱导出的一个物理量“幅度谱密度” $S(f)$ 。它定义为功率谱的平方根:

$$S(f) \equiv \sqrt{S^2(f)}$$

如果功率谱的单位为 $V^2/\text{Hz}$ ,则幅度谱密度的单位为 $V/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

功率谱密度和幅度谱密度是描述同一个噪声水平的两个物理量,当用频谱分析仪进行频谱测量时,用功率谱的单位比较方便。当用示波器或电表进行测量时,用幅度谱密度的单位比较方便。符号 $1/\sqrt{\text{Hz}}$ 没有什么物理意义,它的作用只是时刻提醒我们,即使使用幅度谱密度这一概念,也要牢记:在以时间函数表示的噪声中,对各个独立频带的噪声值求和时,不是幅度的线性相加,而是幅度平方的线性相加。

引力波的强度通常以无量纲振幅 $h$ 表示,因此,在表示激光干涉仪引力波探测的灵敏度时,无量纲振幅 $h$ 的单位为“ $1/\sqrt{\text{Hz}}$ ”。

### 3.3 激光干涉仪引力波探测器的灵敏度曲线

第一代激光干涉仪LIGO的灵敏度曲线如图3所示,它形象地说明了随着噪声水平的降低,灵敏度逐渐提高的过程。



## 4. 结束语

引力波是爱因斯坦“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，引力波的发现标志着引力波天文学完成了从引力波寻找到天文学研究这一历史性转折。第三代激

光干涉仪引力波探测器是引力波天文台的核心设备，当前，世界各大引力波实验室正在投入大量的人力物力对它进行前期研究，灵敏度直指  $10^{-24}$ ，这是一个非常艰巨的任务，充满了挑战和机遇。分析主要的噪声来源，研究降低不同噪声的方法和技术是首先需要面对的难题。

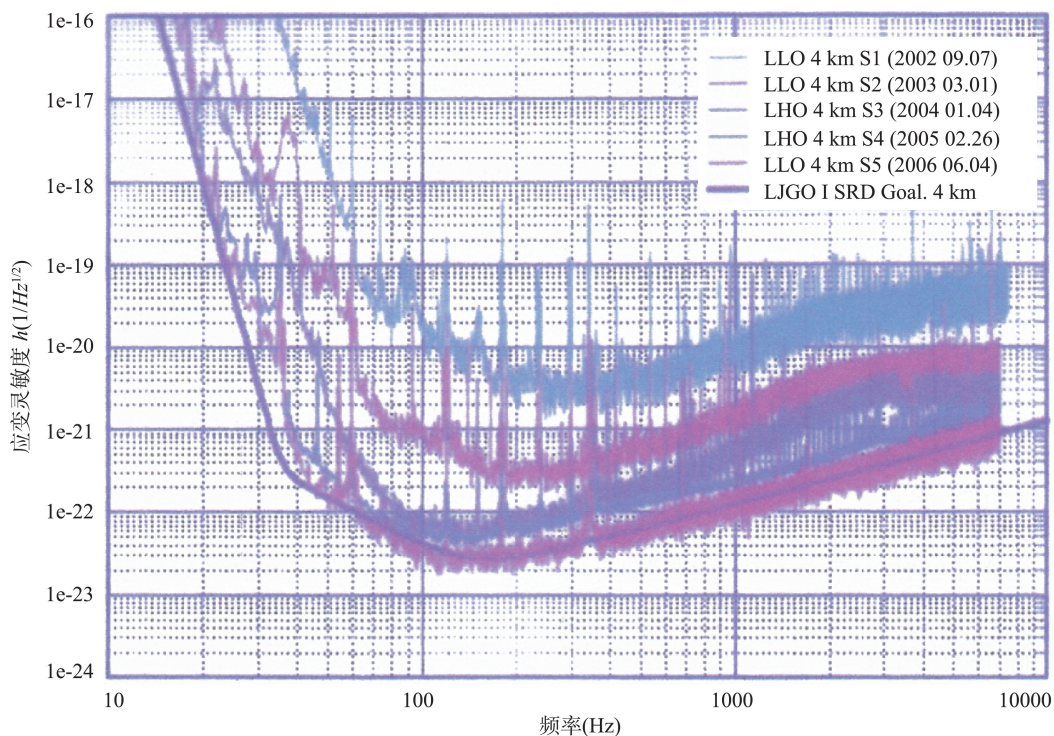


图3 第一代激光干涉仪引力波探测器LIGO的灵敏度曲线



### 科苑快讯

#### 精确治疗眼疾的螺旋形微小机器人

尽管一想到一大群微型机器人钻进眼球里就会让人心生不安，科学家相信微型可控运载工具可能是眼药未来的发展方向。现在，研究人员开发出一种微小的螺旋，可以用于成千上万的靶向药物输送。

目前青光眼或糖尿病黄斑水肿的治疗是通过直接注射或滴眼液来给药。这些方法有效却不精确，往往用药物覆盖整个眼睛。

所以，科学家利用纳米级3D打印技术制造出螺

旋形机器人，它小到可以通过被称为玻璃体的占据眼球大部分的致密果冻状物质。研究人员还给它加了光滑涂层和磁性材料，所以就能够利用磁场推动机器人进入眼球。

(高凌云编译自2018年11月7日 [www.sciencemag.org](http://www.sciencemag.org))

