

---

## 7. 引力波探测前景展望

引力波的发现完成了从寻找引力波到研究天文学这一历史性转折，开辟了引力波天文学研究的新纪元。激光干涉仪引力波探测器的灵敏度高，探测频带宽，成为引力波探测的主流设备，直接导致引力波的发现。经过几十年来年的精心研究和不断升级改进，激光干涉仪引力波探测器的性能有了长足的进步，灵敏度提高了5个数量级，展现了巨大的发展潜力。

引力波探测器的发展前景主要有两个方面：1) 提高探测器灵敏度，2) 探测频率向低频方向扩展。

当前以欧洲的爱因斯坦望远镜ET和美国的宇宙探索者号为代表的第三代激光干涉仪引力波探测器的预制研究已在全世界蓬勃展开，灵敏度直指  $10^{-24}$ ，目标是建成引力波天文台，开展常态的引力波天文学研究。

## 7.1 探测器灵敏度提高的重要性

灵敏度提高一个数量级, 探测空间扩大到1000倍, 假设波源的分布是均匀的, 意味着千年一遇的稀有事例每年可以发现一个, 提高激光干涉仪灵敏度是引力波探测的重要发展的方向, 前景十分广阔

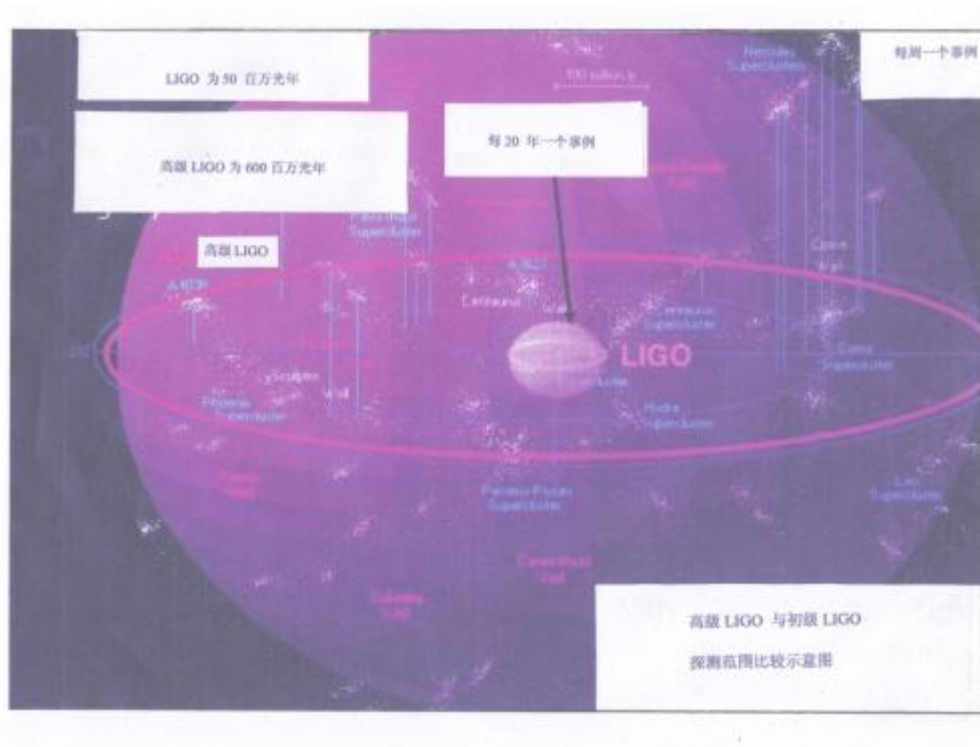


图7.1 灵敏度与事例率之间的关系

---

## 7.2 第一代激光干涉仪引力波探测器的灵敏度

在激光干涉仪引力波探测器的发展过程中，人们一般把本世纪初建成的LIGO, VIRGO, GEO600, TAMA300等称为初级（Initial）探测器，连同其后小步升级改造而成的增强LIGO（Enhanced LIGO）和 " VIRGO+ 又统称为第一代激光干涉仪引力波探测器。

A. 应变灵敏度 $10^{-22}$ ，频带宽度为50 - 20K Hz

B. 基本设计目标：

- \*找到双星系统的引力波信号, 即使不能说“一定能”但可以说“好像能”
- \*给出引力波天文学研究领域一些重要物理参数的上限
- \*灵敏度达到设计值, 检验激光干涉仪来探测的发展潜力

## C灵敏度曲线

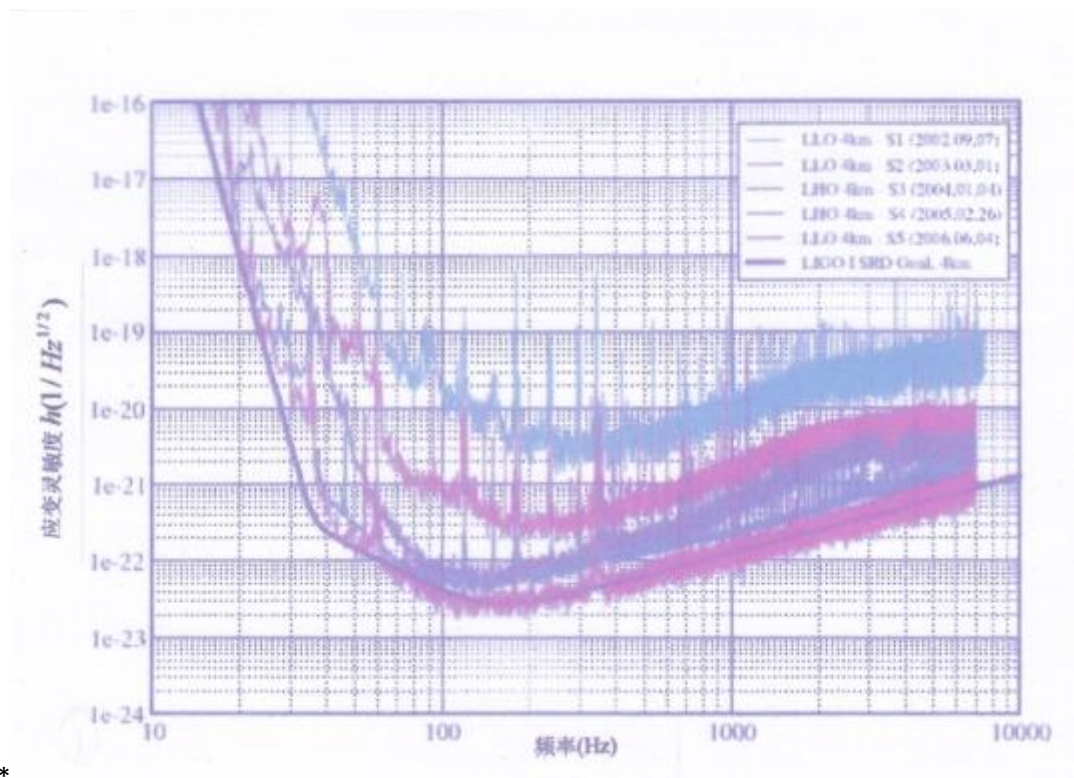


图7.2初级LIGO的灵敏度曲线

初级LIGO从1994年开始建造,2002年中建成。从2002年8月—2007年10月,经过5年多的统调(也叫调优)灵敏度才达到设计指标应变灵敏度 $10^{-22}$ ,频带宽度为50 - 20K Hz (复杂,困难)

## 7.3 第二代激光干涉仪引力波探测器的灵敏度（设计值）

世界上已经建成正在调试和运转的第二代激光干涉仪引力波探测器有高级LIGO, 高级Virgo, GEO-HF 和KAGRA ,除KAGRA外它们是在初级探测器的架构内经过升级改造而成的。

### A. 设计指标

灵敏度：  $10^{-23}$  （初级  $10^{-22}$ ）

探测频带： 10-20KHz （初级50-20KHz）

### B. 灵敏度曲线

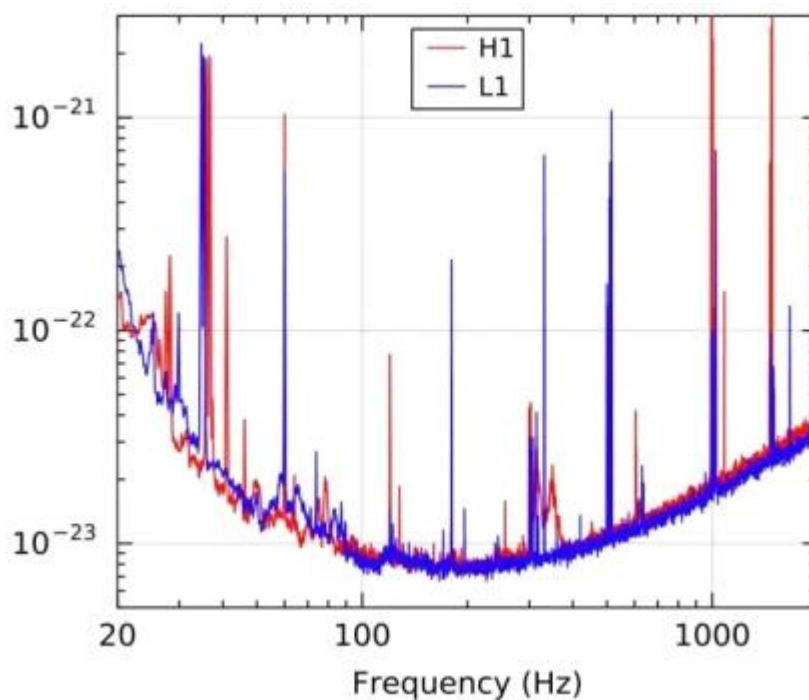


图7.3高级LIGO预期的灵敏度曲线

---

## C. 升级的主要措施

- (1) 大功率激光器：200W （初级17W）
- (2) 大尺寸和大质量镜子：34cm, 40Kg（初级25cm, 11Kg）
- (3) 熔硅悬挂丝（初级：不锈钢丝）
- (4) 主动隔震系统 （初级：被动隔震）
- (5) 信号循环系统

信号循环是第二代激光干涉仪引力波探测器在结构上与第一代的最大区别，下面我们对它进行详细讨论

---

## a). 信号循环技术的基本思想

加入信号循环系统是第二代激光干涉仪引力波探测器在结构上与第一代的最大区别，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。而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。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。

信号循环镜和干涉仪等效镜共同组成一个复合共振腔，复合共振腔的本征频率和品质因数由信号循环镜的位置和反射系数控制，微调信号循环镜的位置使复合腔内光场共振，从而使信号得到共振增强。

## b. 信号循环的光学结构示意图

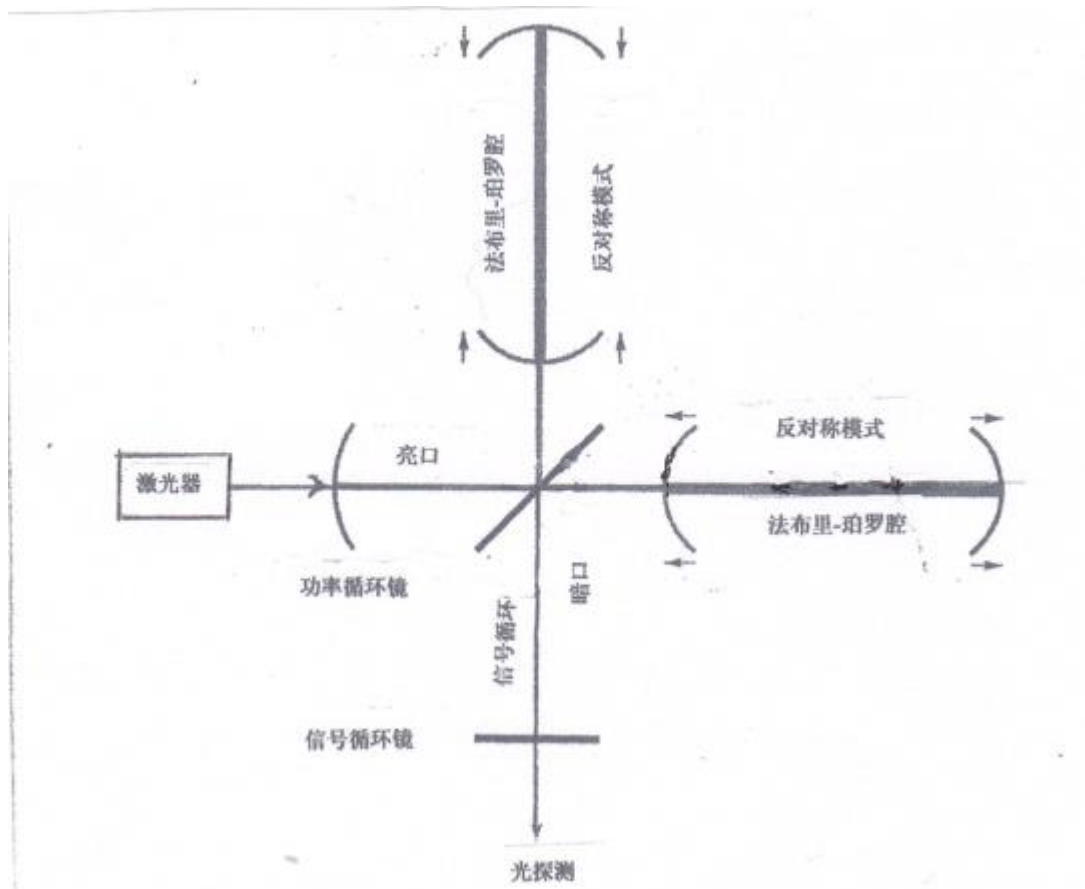


图 7.4 信号循环示意图



---

## C 谐振工作状态

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. 使其共振。**因此我们可以把干涉仪的频带调成窄带,使它在较窄的特殊频带内具有较高的灵敏度,也可以调成宽频带,这种状态下的信号循环腔称为谐振腔(tuned cavity)

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 ”, 优化性能。

---

#### d. 失谐工作状态

我们可以调节信号循环镜的微观位置，改变信号循环腔的固有频率，使载频光在腔内稍微偏离共振状态。即处于失谐工作状态。这种状态下的信号循环腔称为失谐腔(detuned cavity)

失谐状态的信号循环腔还能够产生”光学 - 机械共振”效应，这种共振典型地位于低频区域，光学 - 机械共振会使干涉仪的灵敏度增加而且通过这种共振所引起的振幅涨落和相位涨落之间的关联会使干涉仪的灵敏度在一定频率区间内突破标准量子极限 SQL.

### e. 信号循环干涉仪的灵敏度曲线

加入信号循环系统后，我们可以选择适当的激光功率  $I_0$  使信号循环激光干涉仪的灵敏度在一定频带内突破标准量子极限

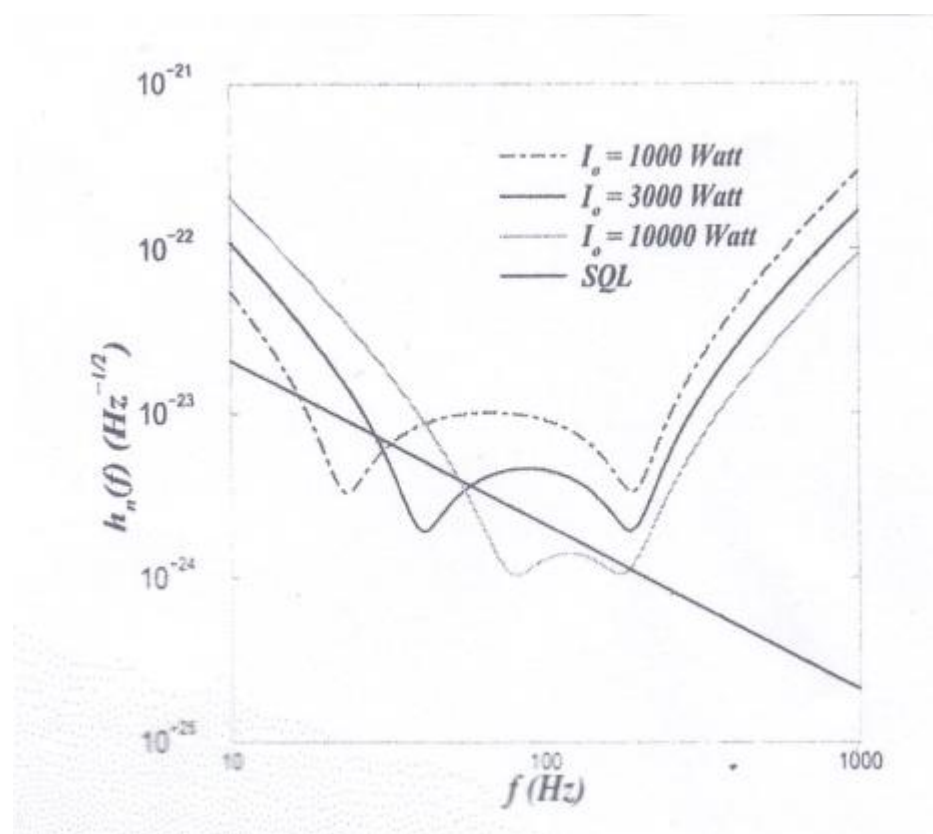


图7.5a 高级LIGO参数下信号循环干涉仪的灵敏度曲线

---

不同的 $I_0$ 值表示不同的激光功率, 在对各曲线进行计算时, 信号循环镜的反射系数及信号循环腔的失谐度是固定的。斜实线是标准量子极限曲线。有两个明显的低谷, 它们的位置由光学-机械体系耦合的共振频率决定, 当 $I_0$ 增加时, 耦合的机械共振频率(左面的低谷)从零值向右移动, 耦合的光学共振频率(右面的低谷)变化不大. 基本上还是位于极限的激光功率 $I_0$ 情况下的纯光学共振频率附近

透彻研究信号循环的动力学问题要用量子力学分析方法和线性量子测量系统方面的知识, 方程解起来很复杂, 篇幅较长. 因时间关系不在这里详述

## \*\*丰硕的物理成果

高级LIGO共运行3次，取得了丰硕的成果，北京时间2021年11月8日，引力波观测合作组织发布了最新一期引力波事件目录，总共包含了90次，较2020年10月发布的目录又新增了35次。

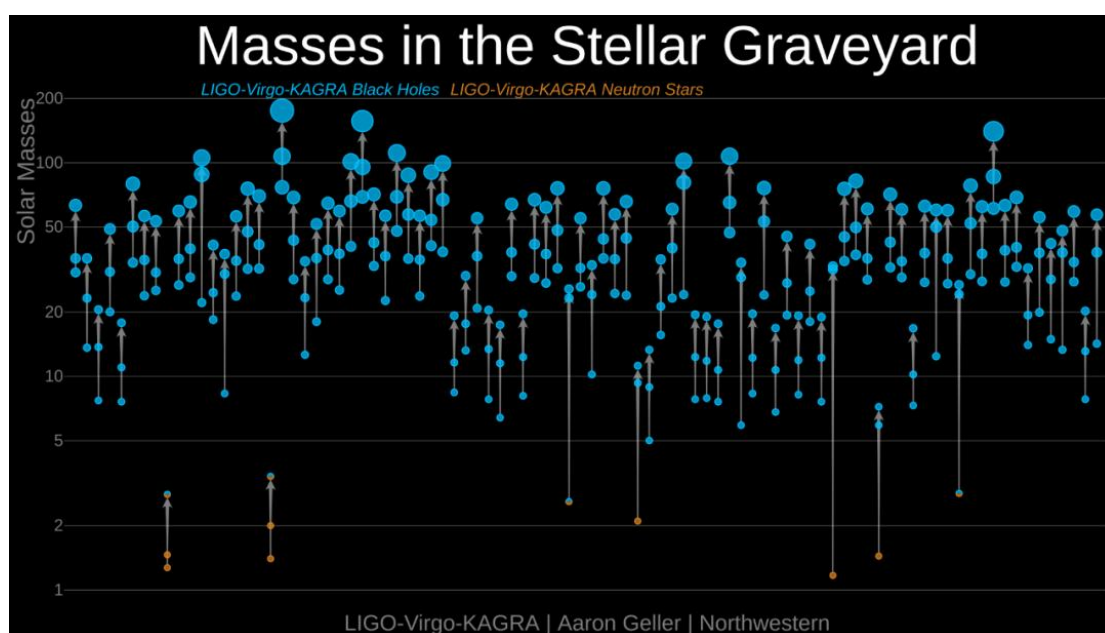


图7. 5b 已探测到的部分引力波事例的质量分布

现在正进行大修改造和调试，预计2022年6月开始第四轮取数，性能会有很大提高。我们期待看到更多惊人的成果。

---

## 7.4 第三代激光干涉仪引力波探测器的筹建

引力波这种全新探测手段的出现，是天文学发展史上的又一场革命，由于引力辐射独特的物理机制和特性，它将为人们提供其他观测方法不可能获取的天文信息，丰富并加深人们对宇宙的认识。建造第三代激光干涉仪引力波探测器的目标是建成正式引力波天文台，开展常态化的引力波天文学研究。这是全世界引力波天文学家共同的梦想。

第三代激光干涉仪引力波探测器，已在世界各地迅速发展起来，正在热烈论议中的欧洲的爱因斯坦望远镜和美国的“宇宙探索者号 Cosmic Explorer”就是诸多方案中的佼佼者，下面我们以爱因斯坦望远镜为例对它的技术特点进行讨论

## **\*\*宇宙探索者号和爱因斯坦望远镜示意图**



图7.6a 讨论中的美国第三代激光干涉仪引力波探测器“宇宙探索者”，臂长40公里

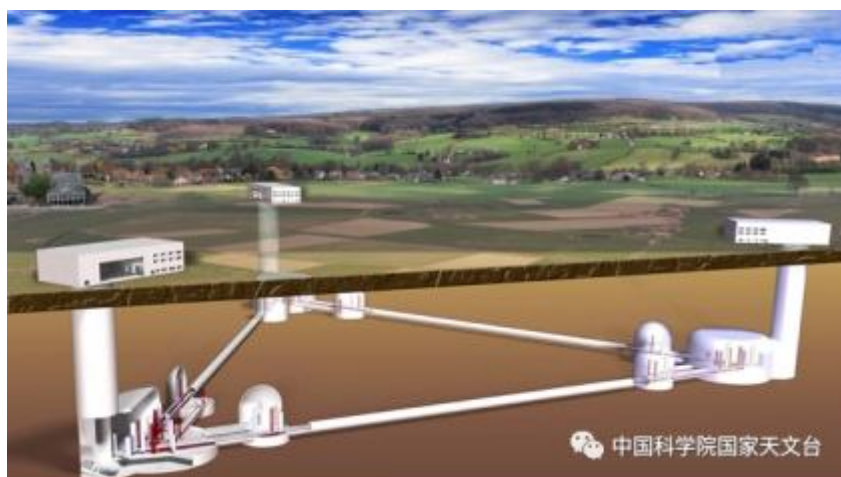


图 7.6b 筹划中的欧洲第三代激光干涉仪引力波探测器“爱因斯坦望远镜”，臂长10公里

### 7.4.1 爱因斯坦望远镜的基本光学结构

爱因斯坦引力波望远镜是一个在双臂有**法布里-珀罗腔**、**功率循环**、**信号循环**而且在输出口带有**频变压缩光场**输入的激光干涉仪它的基本光学结构如下

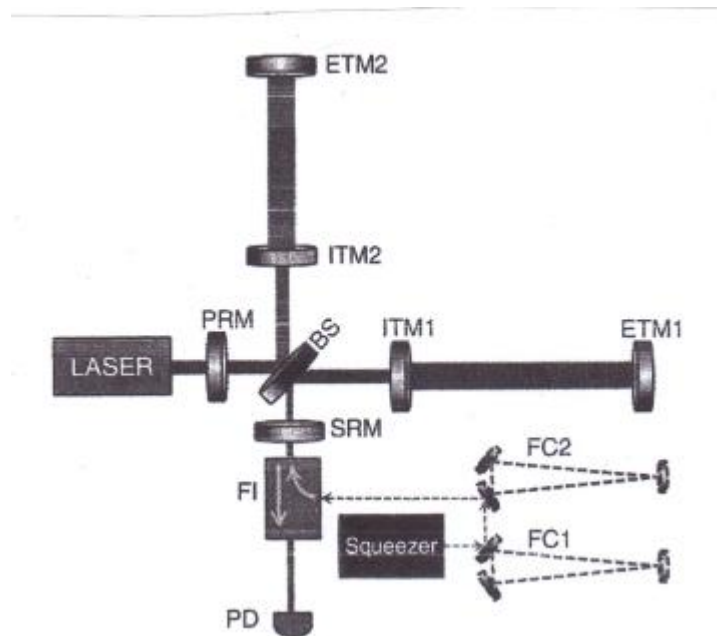


图7.7 爱因斯坦引力波望远镜的基本光学结构

注入压缩态光场，突破标准量子极限是第三代激光干涉仪引力波探测器最大的特点



---

## 7.4.2 爱因斯坦引力波望远镜的结构特点

\*\*设计应变灵敏度  $10^{-24}$

\*\* 探测频带宽度 1Hz-20KHz

\*\* 臂长 10 Km

### A. 地下干涉仪

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，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， $\omega$  是震动谱的角频率， $W(\omega)$  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，

---

**\*\*引力梯度噪声与频率  $\omega$  的平方成反比，引力梯度噪声是低频段的主要噪声源之一，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。**

$\beta(\omega)$  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，干涉仪要建在地下，而且由于安静的地下环境，地面噪声的压低有效地提高探测器的灵敏度并有助于把探测频率移向低频端移动

## \*\* KAGRA地面与地下震动噪声的比较

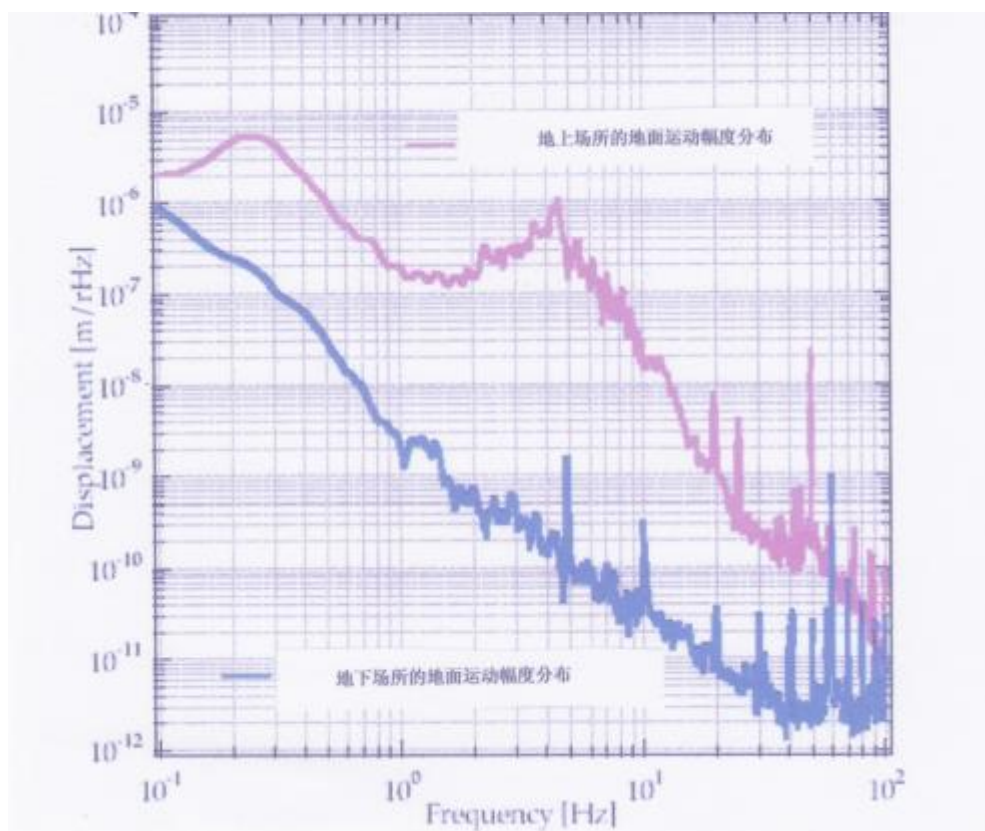


图 7.8 KAGRA 地面与地下震动噪声的比较

由于 KAGRA 建在地下，大大减小了牛顿梯度噪声，地面震动噪声也可以减小到原来的 1/100 左右，地面噪声的压低有效地提高了探测器的灵敏度并把探测频率向低频端推进。

---

## B. 新型涂层镜体材和悬挂丝材料研究

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，这种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过程的叠加。

(一) 研发新涂层材料：为了获得需要的反射和折射系数，镜子表面要用不同材料均匀涂镀数十层，涂镀总厚度几十微米，这薄薄的涂层产生的热量比整个巨大的镜子还多。研究新型涂层材料是新型干涉仪最迫切的两大任务之一

---

## (二)对悬挂丝材料的要求:

- 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。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。

---

### (三) 对镜体材料的要求

镜体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，在激光照射下，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。

因此要求镜体材料有非常好的热传导性，看好蓝宝石材料

---

## C. 低温干涉仪

除了选择合适的材料和形状以减少耗散外,根据等分布理论,系统的温度直接正比于储存在悬丝系统每个自由度中的能量,降低温度能够降低涨落幅度,降低温度还有助于压低耗散机制,减小镜体热噪声. 镜子表面由于热噪声导致的位置涨落就可以写为 :

$$x_{\text{th}}^2(\omega) = \frac{4k_B T}{\omega^2} \frac{1 - \sigma^2}{\sqrt{\pi} E_0 w} \phi(\omega)$$

其中  $E_0$  是镜子的杨氏模量,  $w$  是激光束截面半径,  $\sigma$  是泊松比.  $\phi(\omega)$  耗损角,  $T$  是镜子的温度。让测试质量（即镜子）工作在低温环境中,做成低温干涉仪可以降低热噪声

## \*\* KAGRA测试质量在室温和低温条件下热噪声应变幅度的比较

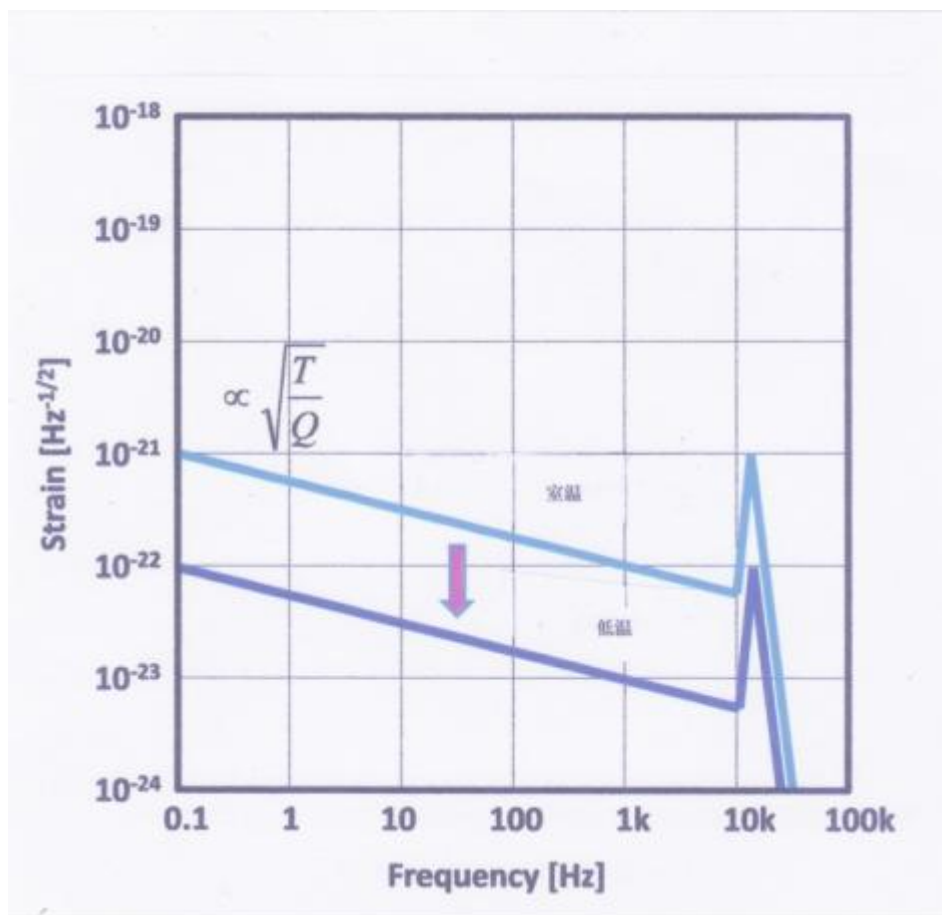


图 7.9 KAGRA 的测试质量在室温和低温条件下的热噪声



---

## D. 压缩态光场注入

光量子噪声是限制第三代激光干涉仪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灵敏度的标准量子极限为  $10^{-24}$ ，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，突破标准量子极限的成为第三代激光干涉仪的灵敏度能否达到设计值的关键。压缩态光场的注入是当前可以采取的主要手段

---

## E. 复式激光干涉仪

在1Hz到10kHz这样宽的频率范围内建造一台单独的干涉仪使其达到非常高的灵敏度，如 $10^{-24}$ ，是相当困难的。也是不聪明的。例如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）的辐射压力噪声升高，灵敏度变差。

聪明的设计是将一台宽频带干涉仪拆分为两台频带较窄的干涉仪，一台主要工作在高频段，另一台主要工作在低频段。分别采用不同的技术措施使得高频和低频部分都能得到较高的灵敏度，这种结构称为复试干涉仪

---

爱因斯坦引力波望远镜就是要设计成一台复式干涉仪，具体做法是在每个三角形的V形顶点建造一对干涉仪，两台干涉仪的臂共用一条隧道，而激光器、清模器、功率循环镜等其他部件共用一个实验大厅，降低造价。其中一台干涉仪称为ET-HF，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，引入光场压缩技术减小光量子噪声。

另一台干涉仪称为ET-LF，它致力于低频区域，使用适中的激光器功率以减小辐射压力噪声，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。把测试质量和悬挂系统放在 $10\text{ K}^0$ 的低温环境中以减小热噪声，使用很长的地面震动过滤器悬挂链将灵敏度向1Hz的区域推进。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。图 10.33 给出了复式干涉仪灵敏度与单一干涉仪灵敏度的比较。

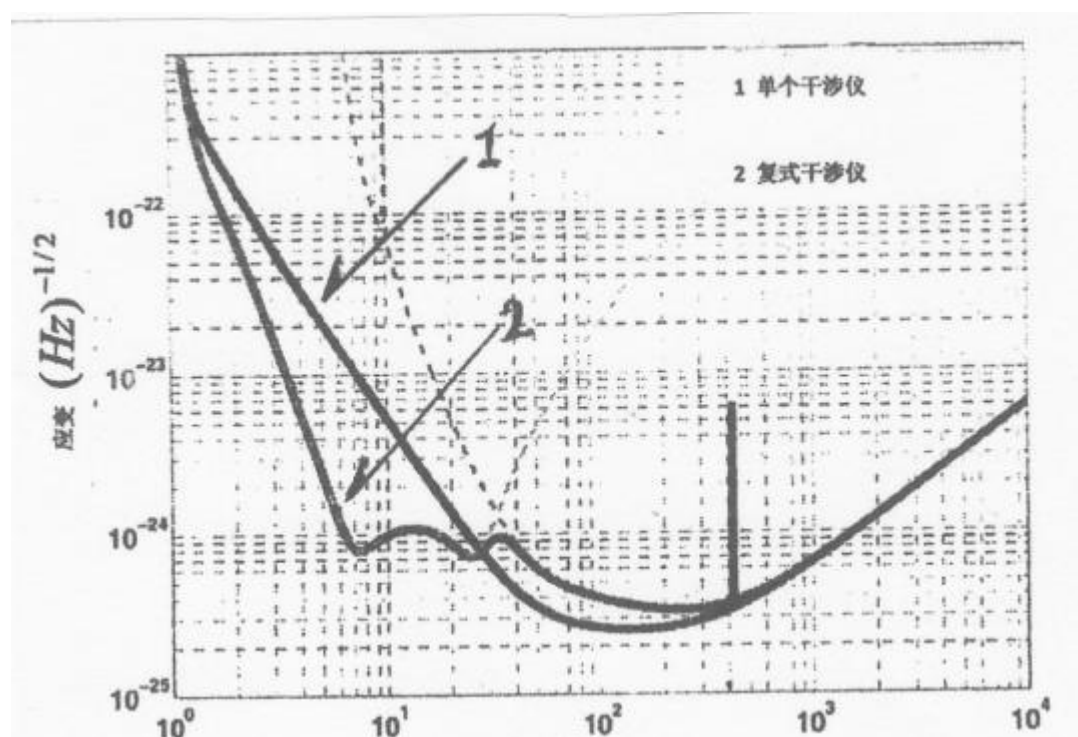


图 7.13 复式干涉仪与单一干涉仪灵敏度的比较[269]

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*

---

## 7.5 空间引力波探测器

空间引力波探测器基本设计思想都是为了降低噪声，增加干涉仪的臂长，提高探测器的位移灵敏度，并将探测频率向低频区域扩展。

我们国家的太极（Taiji）计划，和 eLISA计划是正在筹建中的大型空间激光干涉仪引力波探测器。eLISA 是由LISA演变而来的，LISA计划最初是欧洲和美国的合作项目，设计臂长为500万公里，2011年美国退出后规模缩小，LISA 改名为 eLISA计划，最初臂长定为100万公里，现在改为250万公里。

---

### 7.5.1 空间引力波探测的优点

- 1) 没有地面震动噪声的干扰
- 2) 周围环境的热稳定性好比地面上好
- 3) 工作在高真空环境中, 散射光子噪声和残余气体噪声相对说来比较小
- 4) 没有以地球为基地的引力波探测器所遇到的地域球面效应, 臂可以做得很长. 由于建在太空, 干涉仪的臂长可以做的非常大。臂长特别大的激光干涉仪是探测低频引力波最用力的实验装置之一, 因为如果我们探测的引力波可以近似地看成正弦波, 当激光干涉仪引力波探测器的臂长等于被测引力波波长的 $1/4$ 时该设备具有最佳探测条件, 这个引力波的频率是最佳探测频率。例如, Taiji的臂长为300万公里, 其最佳探测频率为25毫赫兹, eLISA最初设计臂长为100万公里, 其最佳探测频率为75毫赫兹。他们都是很好的低频引力波探测方案。

## 7.5.2 太极空间引力波探测器的基本结构

(1) 太极空间引力波探测计划由三颗卫星组成一个等边三角形星座，每个边的长度为 300 万公里，其质心位于地球绕太阳运行的轨道上，距地球约 5000 万公里，偏离太阳-地球约 20 度角。太极星座在太空中与太阳及地球的相对位置如图 7.14 所示，



图 7.14 太极星座与地球及太阳的相对位置示意图

---

## (2) 太极星座在绕太阳轨道上运行的轨迹

太极星座在轨道上绕太阳飞行的同时，星座内的三颗卫星还绕着它们的质心旋转，运行轨迹如图 7.15 所示

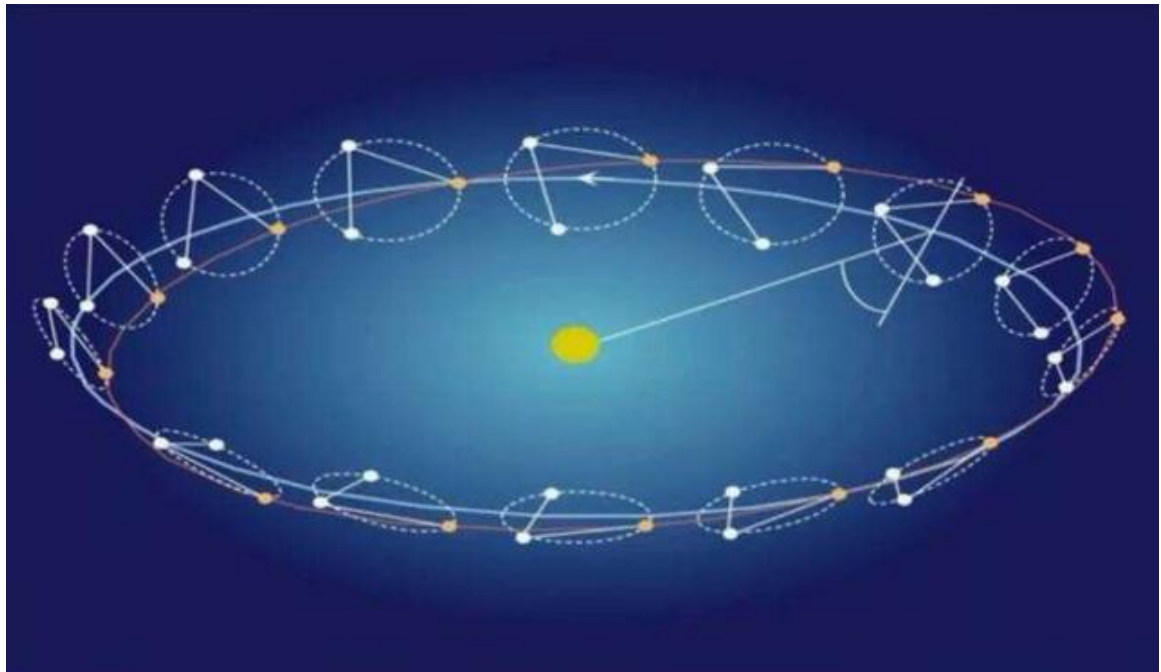


图 7.15 太极星座绕太阳飞行的运行的轨迹



## \*\* 空间引力波探测器的基本结构

当前筹划中的空间激光干涉仪引力波探测器太极计划和 eLISA 有基本上相同的架构：由三个宇宙飞船组成，每个飞船分别位于一个等边三角形的三个顶点。太极的臂长为 300 万公里(eLISA 臂长为 250 万公里)，每个宇宙飞船上装有两个测试质量和两台激光器，两台激光器分别向相邻的宇宙飞船发射激光束。同时每个飞船还接收从临近两个飞船返回的光束(图 7.16)

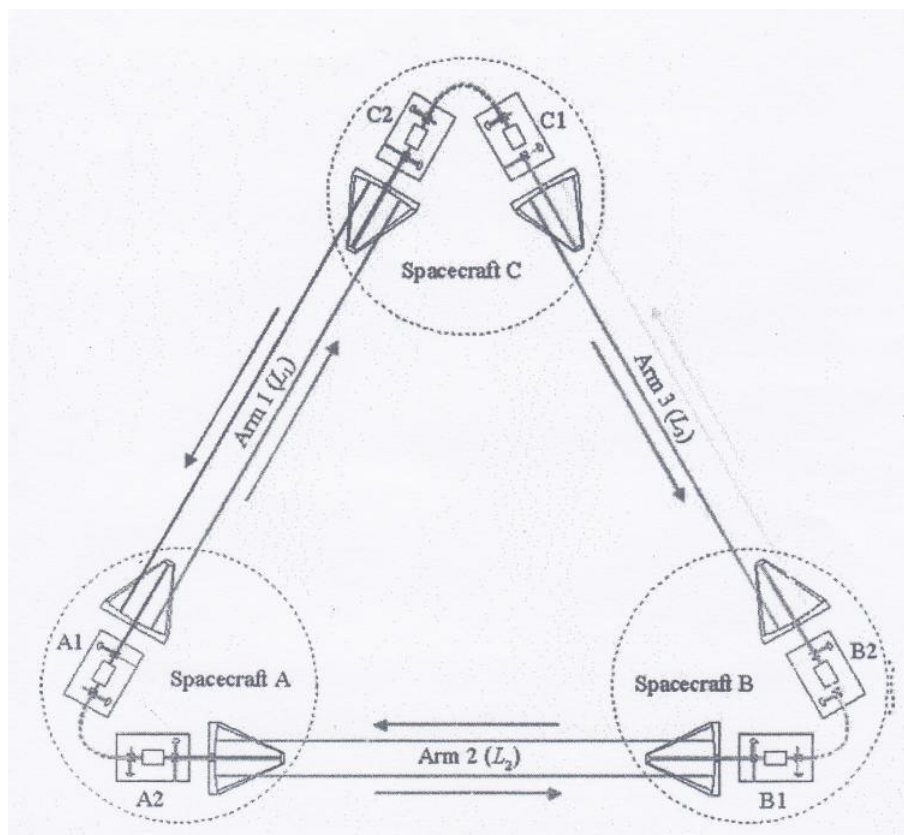


图 7.16 空间干涉仪引力波探测器示意图

---

### 7.5.3 空间引力波探测器的工作原理

我们以 eLISA 为例，简单介绍一下空间激光干涉仪引力波探测器的基本工作原理。在 eLISA 的每个宇宙飞船上都安装了两台  $N_d$ -YAG 激光器，功率为 1 W，通过直径为 30cm 的望远镜把激光束从本部飞船分别向它相邻的两个远方飞船发射，与此同时，本部飞船也接收从相邻飞船而来的激光束。本部飞船上的测试质量与相邻飞船上的测试质量构成干涉仪的一臂。当引力波通过时，会使干涉仪的臂伸长或缩短，在臂中穿行的激光束有了新的光程差即相位差。或通过监测本部飞船上产生的激光束与接收到的从相邻飞船反射而来的激光束之间的相位差，利用干涉仪原理对臂长进行比较和计算，探测到这个相位差就等于探测到引力波。

---

## 7.5.4 空间引力波探测的尖端技术

空间引力波探测器有非常多的优点，为引力波探测开辟了广阔的发展前景。但空间引力波探测要求测量精度高、长期稳定性好、技术复杂，它的研发涉及到诸多学科领域，如物理学、天文学、宇宙学、天体物理、空间科学、光学、电子学、计算技术等，制造、运行和维护都十分困难。它所涉及的尖端技术大部分都处于该领域的前沿，很多都不太成熟，需要花费绝大的人力物力进行研发，主要包括以下几个方面

---

## (1) 弱光锁相技术

由于衍射效应，光束在长距离的传播过程中会扩展开来，从相邻的远方飞船上直接反射回来的原始光束强度很弱，其功率不足以用来进行需要的干涉测量，因此需要采用弱光锁相技术进行处理。弱光锁相技术的其基本思想是：在本部飞船上，利用接受到的从相邻的远方飞船反射回来的原始激光束锁相本部飞船激光器发射的原始光束，本部飞船被锁相过的光束的相位变化与直接从相邻飞船上反射回来的原始光束的相位变化是相同的。利用锁相过的光束和本部飞船上激光器发射的原始光束进行相干处理，可以得到引力波信号。

弱光锁相技术是空间引力波探测最关键的技术之一。

---

## (2) 无拖曳控制技术

### **\*\*空间引力波探测的噪声**

空间引力波探测器的噪声主要包括：光量子噪声、热噪声、激光器的频率噪声、电场磁场的涨落、宇宙线粒子的撞击、太阳光压力、空间残余气体、太阳风等，空间引力波探测器的测试质量放置在宇宙飞船（卫星）内部，它应该处于自由运动的悬浮状态，不受除重力之外的其他外部干扰，运行在几乎纯重力轨道上。虽然宇宙飞船对测试质量有屏蔽作用，**但上述这些干扰噪声会直接作用到宇宙飞船上，引起飞船本身位置的晃动，这种晃动会引起飞船与其内部测试质量之间相对位置的涨落. 宇宙飞船本身与测试质量之间的距离的不稳定性引起的噪声，是太空引力波探测器中最主要的噪声源.**

---

因为以太空为基地的引力波探测器工作在低频区域，很小的噪声源也会产生相对说来比较大的位移噪声。宇宙飞船与测试质量之间的距离必须在频率一直低到  $0.1\text{mHz}$  的情况下，稳定在  $3\text{nm} / \sqrt{\text{Hz}}$  水平。否则牛顿引力梯度噪声及其他与位置有关的噪声将会使测试质量受到扰动。宇宙产生位移噪声和引力梯度噪声。该噪声是空间探测器灵敏度提高的主要障碍，必须用特殊的方法加以限制，这种方法就是无拖曳控制技术

无拖曳技术可以为空间引力波探测提供一个超静、超精、超稳平台，降低外部干扰，提高探测灵敏度。

---

## **\*\*无拖曳控制技术的工作原理**

空间引力波探测是通过飞船编队内部自由悬浮的测试质量之间的激光干涉测量来完成的。宇宙飞船与测试质量之间的距离稳定性是由曳力释放控制系统来维持的，该系统由高精度传感器、微牛推进器和反馈控制系统等部分组成，称为无拖曳控制系统。该系统由传感器、牵引执行部件和反馈控制系统组成，传感器用来测量宇宙飞船相对于测试质量的位移，微型牛顿推冲器用来控制宇宙飞船的位置，使其保持不变。除了空间引力波探测外，无拖曳技术在空间基础科学如等效原理检验、短程线效应和坐标系拖曳效应的测量，高精度卫星重力测量，地球海洋科学，卫星导航定位等方面都有重要应用。

## 无拖曳控制系统的工作原理如下：

置于飞船内且自由释放的测试质量悬浮在飞船内，测试质量被飞船包围但不与飞船直接接触，处于完全的纯引力飞行状态，它可以作为纯引力轨道基准。当飞船受到外界非保守力干扰时，与测试质量的相对位置会发生变化，产生位移。飞船内的高精度传感器会测量到这个位移并将其转变为误差信号，通过控制系统启动微牛推进器，产生推力，这个推力与外界干扰力大小相等，方向相反，对空间环境对飞船的摄动进行补偿。使它恢复到与测试质量原来的相对位置，与测试质量同步运动，这种状态称为无拖曳。如原理如图 8.13 所示

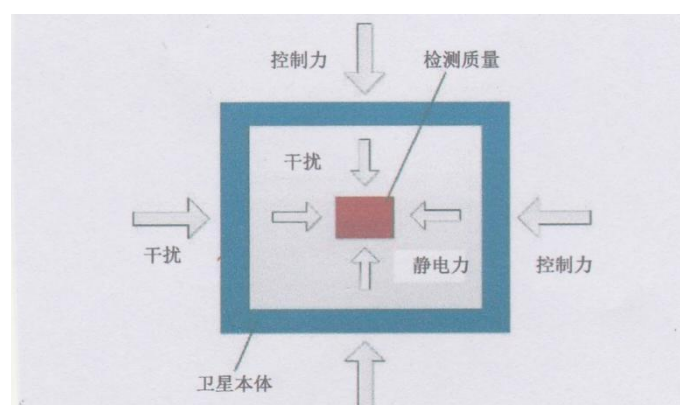


图 7.17 无拖曳控制示意图



---

### (3) 超高灵敏度惯性传感器技术

超高灵敏度惯性传感器用来检测飞船平台与测试质量之间的位置信息，经过处理之后产生微推进器的执行指令，实现无拖曳控制。惯性传感器包括敏感探头、电容位移传感与静电控制、电荷管理、锁定与释放等部分。

---

## (4) 飞船编队构型的建立与状态控制技术

太极空间引力波探测需要3颗卫星通过长基线编队协同飞行来实现。卫星入轨之后卫星编队需要在指定空间内形成一个稳定的等边三角形构型，编队中的每颗卫星通过发射和接收来自其他两颗卫星的激光进行通信和测量。

但是卫星编队在轨道上会受到空间环境中很多摄动力的作用，其转动周期、偏心率、升交点赤径和倾角会不断变化，因此需要通过控制技术确保卫星之间的相对位置维持在特定的空间平面内，使编队构型保持不变。

---

## (5) 超远距激光链路捕获、跟踪和瞄准技术

在建立超远距离卫星间激光链路时，需要考虑超前指向角预报，因为在300万公里的卫星间距离的情况下，激光传输时间需要10秒，因此需要综合考虑当前入射角和预报未来时刻的卫星方位，计算超前指向角。还要综合考虑导航定位误差、轨道预报误差、指向角误差对激光链路对准的影响，在进行链路捕获与保持时还要综合考虑卫星平台姿态控制与激光链路指向控制的耦合。在链路捕获后，要采用合地跟踪卫星姿态，精确控制望远镜精镜筒的指向

---

## (6) 微推进技术

引力波探测需要亚微牛级分辨率推进器来提供极低的干扰环境，需要推进器喷气产生小且精的推力和力矩以抵消外部环境干扰对卫星平台的影响。当前国内外正在大力研发的推进系统主要有微型冷气推进器、离子微推进器、胶体推进器和场发射电推进器几种类型。

**\*\*胶体推进器**是一种新型的微型离子发动机，它由胶体流体驱动，胶体流体通过加压系统经由针头注入，在针尖处施加高电场，使胶体流体形成液滴并从针尖喷出。液滴自发地被高压电离并加速，以在所需范围内产生可变推力。推力的精确变化是通过改变加速电压来实现的。

**\*\*场发射电推进器**是一种以液体为推进剂的场发射离子推进器，通过把由场发射产生的金属正离子加速到很高的速度来产生推力。金属正离子是直接从液体金属中提取的，在高真空条件下利用静电力对其加速。

---

除此之外，还有超高精度卫星入轨定轨技术，皮瓦级弱光探测、相位测量和读出系统，超高精度、超远距空间激光干涉仪，超高精度航天器温度控制技术等。

几乎每一项技术都处在该领域的前沿水平，需要花大力气认真进行研究

---

## 7.5.5 空间引力波探测器物理目标

空间引力波探测为引力波天文学、引力波物理和量子宇宙物理研究提供了重要手段，对认识宇宙起源和时空结构具有革命性的意义。大家最感兴趣的问题**主要有如下几个方面**

- \*\*超大质量和中等质量黑洞的并合
- \*\*极大质量比绕转系统发射的引力波
- \*\*河内白矮星绕转的引力波辐射
- \*\*黑洞的质量、自旋以及分布测量
- \*\*中等质量种子黑洞是如何形成的，暗物质能否形成种子黑洞，种子黑洞是如何成长为大质量黑洞和超大质量黑洞，
- \*\*寻找第一代恒星形成、演化、死亡的遗迹，
- \*\*引力波极化，
- \*\* 强引力场的高度非线性行为
- \*\* 检验相关的量子引力理论，
- \*\* 暗物质和暗能量的性质研究

---

## 7.6 脉冲星定时阵列引力波探测

毫秒脉冲星精确的定时特性可以用来探测频率非常低的引力波（ $10^{-6}$  -  $10^{-10}$  Hz），单个脉冲星的测量不太适宜用做引力波探测，因为引力波产生的效应不能与其他噪声（如脉冲星自身的不规则自旋）区分开来。将分布在世界各地的脉冲星计时观测台联合起来组成脉冲星定时阵列 (PTA) 对多颗毫秒脉冲星进行符合测量，是探测低频引力波的重要途径。

---

### 7.6.1 脉冲星计时阵列引力波探测最新成果

2020 年北美纳赫兹引力波天文台 NANOGrav 宣称利用脉冲星计时阵列 (PTA) 观测到脉冲星到达时间的涨落，这可能是纳赫兹引力波存在的佐证，虽然有待进一步证实，但在引力波界引起了广泛的关注。

NANOGrav 观测 45 颗脉冲星，寻找数千光年距离上引力波产生的空间弯曲效应。当引力波在地球上的观测点与脉冲星之间穿越时，空间的伸长和缩短将使脉冲星发出的射电脉冲到达观测点的时间发生变化。发布的结果是基于 12.5 年数据的分析，得到了年度尺度的涨落，而且所有被观测的脉冲星都显示出这种涨落。因此它排除了脉冲星自身的计时噪声。

NANOGrav 认为，这种引力波可能是双黑洞并合产生的，也不排除其他引力波源，如宇宙弦，宇宙早期的原初黑洞，随机背景引力波等。



---

## 7.6.2 脉冲星定时阵列引力波探测原理

### (1) 脉冲星精确定时

脉冲星是旋转的中子星，本身存在着极强的磁场（约 $10^7$ — $10^{14}$  忒斯拉）。由于极强磁场的存在，中子星发出的电磁辐射被强磁场封闭起来，只能沿着磁轴方向，从互相对着的两个小磁极区发射出来，其他地方辐射是跑不出来的。这两磁极区就是探测中子星的“窗口”，在观测站探测到的电磁脉冲信号周期就是脉冲星的自转周期，该周期很短而且稳定。

中子星的电磁辐射从两个“窗口”出来后，在空中传播，形成两个圆锥形的电磁辐射束。若地球刚好位于这束辐射的方向上，我们就能接收到。由于中子星的自转轴与它的磁轴不重合而是有一定的夹角度，中子星每自转一圈，这束电磁辐射就扫过地球一次，因此我们接收到的是一个有规律的电磁脉冲信号，如果中子星的电磁辐射束不扫过地球，我们就接收不到它的脉冲信号。

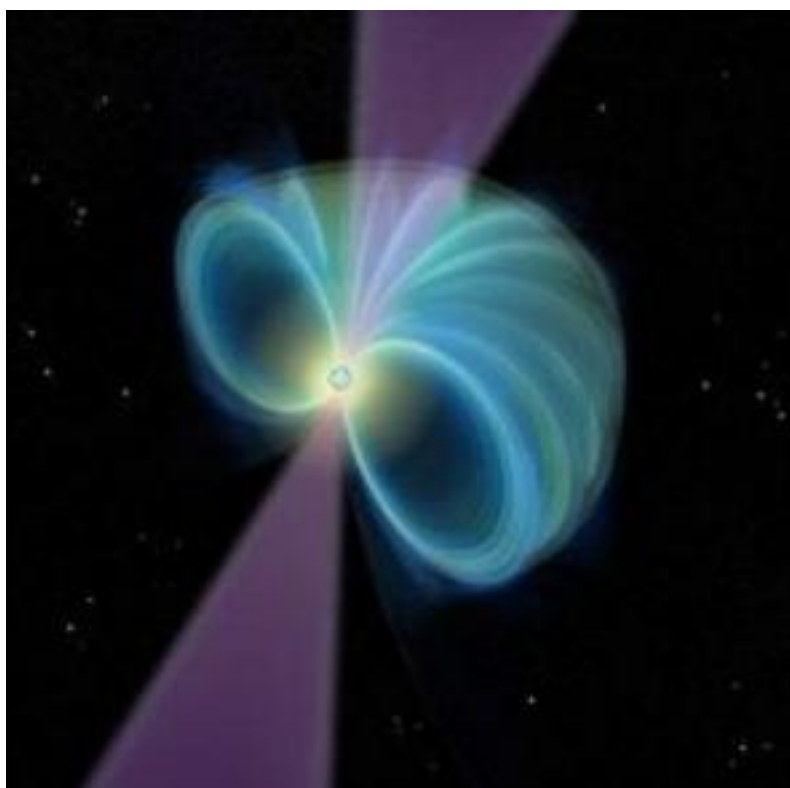


图 7.18 脉冲星的磁场与电磁辐射束示意图

**脉冲星**是 1967 年 10 月剑桥大学卡文迪许实验室的安东尼·休伊什教授的研究生乔丝琳贝尔无意中发现的。**它与类星体、宇宙微波背景辐射、星际有机分子一道，并称为 20 世纪 60 年代天文学“四大发现”**。安东尼·休伊什教授本人也因脉冲星的发现而荣获 1974 年诺贝尔物理学奖。目前发现的脉冲星有 2500 余颗，自转周期从 1.4 毫秒到 8.5 秒，直径大多为 10 千米左右。

---

## (2) 脉冲星电磁辐射脉冲的主要特征

- (A) 绝大多数脉冲星的电磁辐射频率在射电波段，少数的脉冲星的电磁辐射也可能在可见光、X 射线甚至  $\gamma$  射线波段。
- (B) 脉冲周期短而且非常稳定，例如，第一颗发现的脉冲星 PSR1919+21 的周期为： $T=1.3373011922$  秒，现在对脉冲星的周期测量精度可以达到 10 多位有效数字。
- (C) 毫秒脉冲星发射很窄的电磁脉冲，多数脉冲星的脉冲宽度与周期的比约为  $1/30$ 。这些脉冲具有极高的可预测到达时间，非常适合于作为标准计时器来探测频率极低的引力波
- (D) 脉冲周期总是在非常缓慢地增加，即  $dT/dt > 0$
- (E) 脉冲星的射电辐射能谱  $E$  不是热辐射能谱而是幂律谱，即  $E = E_0 \nu^a$ ， $\nu$  是电磁辐射频率。

---

### (3) 脉冲星计时引力波探测原理

毫秒脉冲星一般是指自转周期为毫秒量级的脉冲星，毫秒脉冲星具有非常稳定的自转周期并发射很窄的电磁脉冲，这些脉冲具有极高的可预测到达时间，非常适合于作为标准定时器来探测频率极低的引力波。

#### **\*\*毫秒脉冲星——宇宙中最精确的时钟**

毫秒脉冲星不仅自转速度快的惊人，而且自转的周期性非常精确，几乎可以说是宇宙中最精确的时钟。脉冲星依靠消耗自转能来弥补辐射出去的能量，由于脉冲星具有巨大的角动量，自转速度变慢的效应又非常小，这就让它们在漫长的时间里能够一直保持近乎不变的自转周期，自转周期精度几乎可以与地球上最精确的原子钟相媲美，自转周期的变化率一般在 $10^{-20}$ 量级。也就是说，即便经过数十亿年，毫秒脉冲星的自转周期也只会延长几个毫秒。由于天文学家们能够精确测定其减速速率，因此他们就可以扣除减速效应的影响并将它们用作精确的计时工具。

---

## **\*\*毫秒脉冲星，一个理想的周期性引力波源**

以目前中子星结构和演变的理论推算，科学家们预言，脉冲星的自转不能超过每秒 **1,500** 转，超过了可能会分裂开来。在达到这种高速自转之前，毫秒脉冲星会辐射出引力波，引力波的辐射造成脉冲星的能量损失，抑制自转速度的提高。因此，高速旋转的毫秒脉冲星有可能是一种理想的周期性引力波波源。

目前被发现的自转周期小于 **20** 毫秒的脉冲星有 **300** 多颗。

---

## **\*\*脉冲星计时引力波探测原理**

当引力波从地球和脉冲星之间通过时，会使地球与脉冲星之间的距离伸长或压缩，这使得脉冲星产生的射电波传播路径的长度随引力波的频率伸长或缩短，**导致我们在地球上接收到脉冲信号的到达时间会比预计的时间早一些或晚一些。探测到这种脉冲到达时间的变化，就等于探测到引力波。**引力波导致的时空变化虽然非常小，由于**毫秒脉冲星具有非常稳定的自转周期并发射很窄的电磁脉冲，这些脉冲具有极高的可预测到达时间，**只要探测器的灵敏度足够高，探测方法合理，数据处理得当，这种由引力波效应导致的脉冲到达时间的变化还是能被探测到的。

---

## （4）脉冲星计时阵列

引力波在单个脉冲星数据中产生的效应非常小，很难与观测过程中噪声的影响区分开。

退一步讲，我们暂且不考虑噪声，脉冲星定时模型中的各种参数都是利用大量测得的数据、通过优化模型、分析拟合得到的，具有很大的不确定性及模型相关性。这种误差与引力波效应也非常类似。因此，使用单个脉冲星来探测引力波是极其困难的，也是不合理的。

利用国际上多个脉冲星计时观测站组成脉冲星计时阵列，对很多颗脉冲星进行联合而长期的测量，是我们的最佳选择，这种方法也因此被命名为脉冲星计时阵列引力波观测法，其示意图如图 7.19 所示。



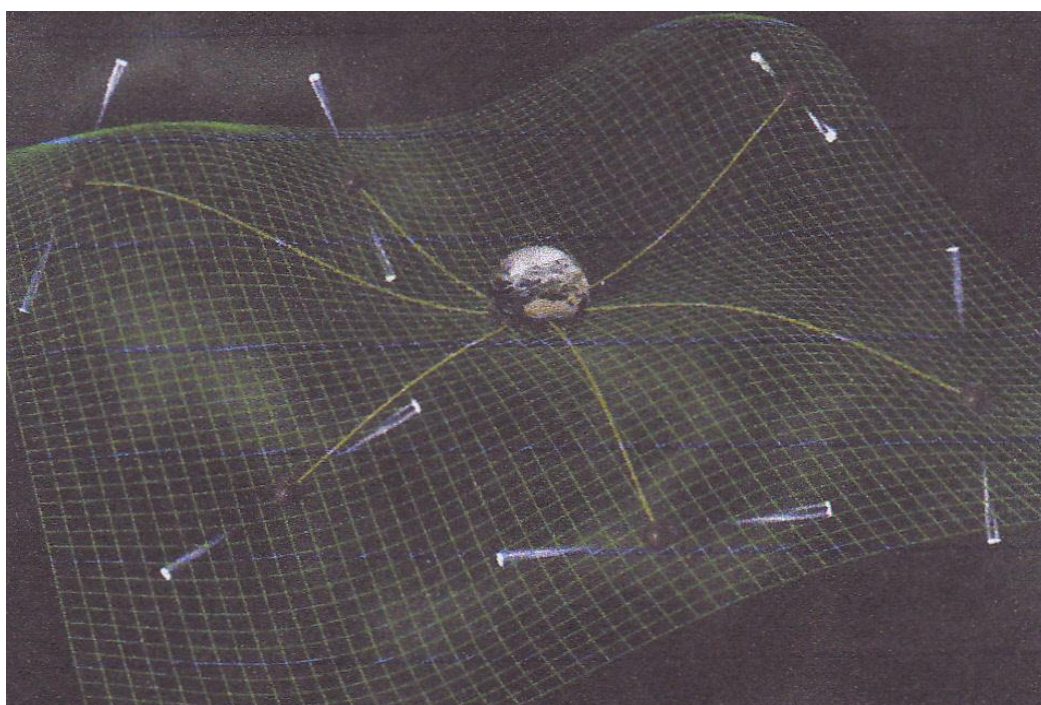


图 7.19 脉冲星计时阵列引力波探测示意图

典型的脉冲星计时阵列观测取样时间间隔为数星期，观测时间连续 10 年以上，脉冲星**计时阵列引力波探测**的频率范围约为  $10^{-9} \text{ Hz}$  **量级**，敏感的引力波波长为**几个光年**，比脉冲星到地球的距离小得多（一般说来，银河系中毫秒脉冲星到地球的距离约为  $Kpc$  即几千光年量级）。这使得数据分析非常复杂，非常困难。



---

脉冲星计时阵列可以看成是一个银河系尺寸的引力波探测器，如果我们想把它与激光干涉仪引力波探测器进行类比的话，**计时阵列中的脉冲星就好比是“测试质量”，脉冲星发射的射电脉冲就好比是“激光”，脉冲星与地球上观测点的距离就类似于干涉仪的一个“臂”。**

---

### 7.6.3 世界上正在运转的脉冲星定时阵列

当前世界上正在运转的脉冲星定时阵列有以下三个

1. 澳大利亚的 PPTA，它建立于 2004 年，对 20 颗毫秒脉冲星进行测量
2. 欧洲的 EPTA，它于 2004/2005 年投入运转，阵列中包括法国、德国、意大利、荷兰、英国的射电天文望远镜，对 22 颗毫秒脉冲星进行测量
3. 北美洲毫微赫兹引力波观测站 NANOGrav，该站 2007 年建成，用 Arecibo 和 Green Bank 望远镜对 45 颗毫秒脉冲星进行观测。

现在这三个脉冲星定时阵列已联合起来，组成了一个国际脉冲星计时阵列 IPTA，开展低频引力波的探测和研究。

---

谢谢大家