
2.引力波的探测与发现

引力波发现经历了艰难而曲折的过程

2.1 轰动世界的假引力波事例

引力波探测的先驱是美国马里兰大学教授J·韦伯，1962年他的研究团队建成了世界上第一台共振棒引力波探测器开启了引力波探测的新纪元并于1969年6月，在辛辛那提相对论学术会议，宣布利用共振棒探测器发现引力波，轰动了全世界。

短短几年，就有10多台共振棒引力波探测器在世界各地相继建成，并开始运转。引力波探测成为当时物理学界的热门课题。各种研讨会、讲习班、学术报告在世界各地此起彼伏。各大实验室、大学都投入了大量的人力、物力从事这项研究，掀起了引力波探测的热潮

热潮也波及中国，中国科学院高能物理研究所和中山大学先后加入这个行列，开展了室温共振棒引力波探测器的研制。

2.1.1 共振棒引力波探测器简介

1962年, J·韦伯教授领导的研究小组在美国马里兰大学建成了世界上第一个引力波探测器——共振棒, 开启了引力波探测的新时代.

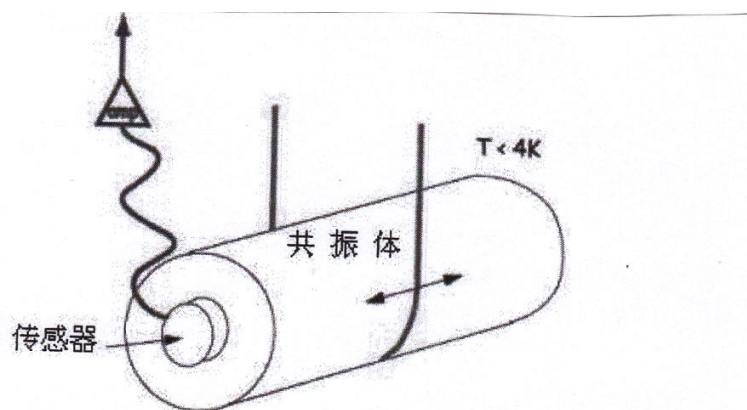


图2.1共振棒引力波探测器原理

共振棒引力波探测器的主体部分是一根很重金属棒, 通过在中央位置的质心悬挂起来. 可以自由地纵向振动. 当引力波在垂直于棒体的方向撞击时, 由于引力波的一个极化方向与棒的纵向轴基本平行, 在引力波的作用下, 金属棒会产生相应的机械振动. 当引力波的频率与棒的固有频率相等时, 棒会产生共振, 振幅达到最大值. 棒的一个端面上装有传感器, 将机械振动变成电信号, 经过放大、滤波和成形之后被记录下来.

具体结构比较复杂

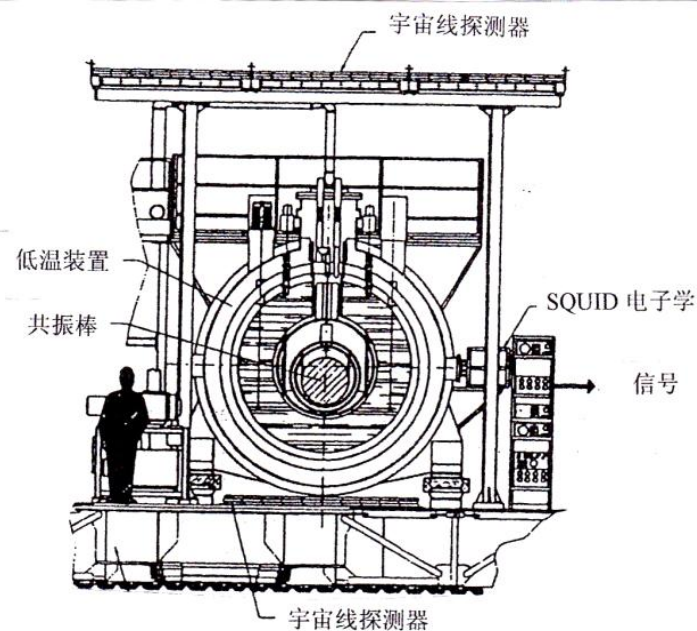


图2.2共振棒引力波探测器NAUTILUS的结构

为了降低热噪声金属棒要在**低温环境**下工作. 为了减少地球表面震动产生的噪声, 整个探测器要置于**防震平台**之上, 并采用特殊的悬挂方法. 金属棒的另一个端面上装有刻度系统, 它可以注入标准信号, 对棒的输出信号幅度进行定标. **宇宙线监测器**——宇宙线广延大气簇射中的高能粒子, 沉积能量, 局部发热, 振动. 环境监测系统——地震, 冰雹, 大风暴雨, 电磁场等

2.1.2 实验结果

改进后的共振棒共两台，分别安置在马里兰大学和芝加哥附近的阿贡国家实验室，两地相隔700多英里。

1968年中开始运转，1968年12月发现第一个信号，随后81天内找到17个“事例”

1969年6月，美国辛辛那提相对论学术会议，宣布发现引力波

从最初提出探测方案到建成共振棒探测器，韦伯总共花费了10年时间。他的心情是难以平静的。

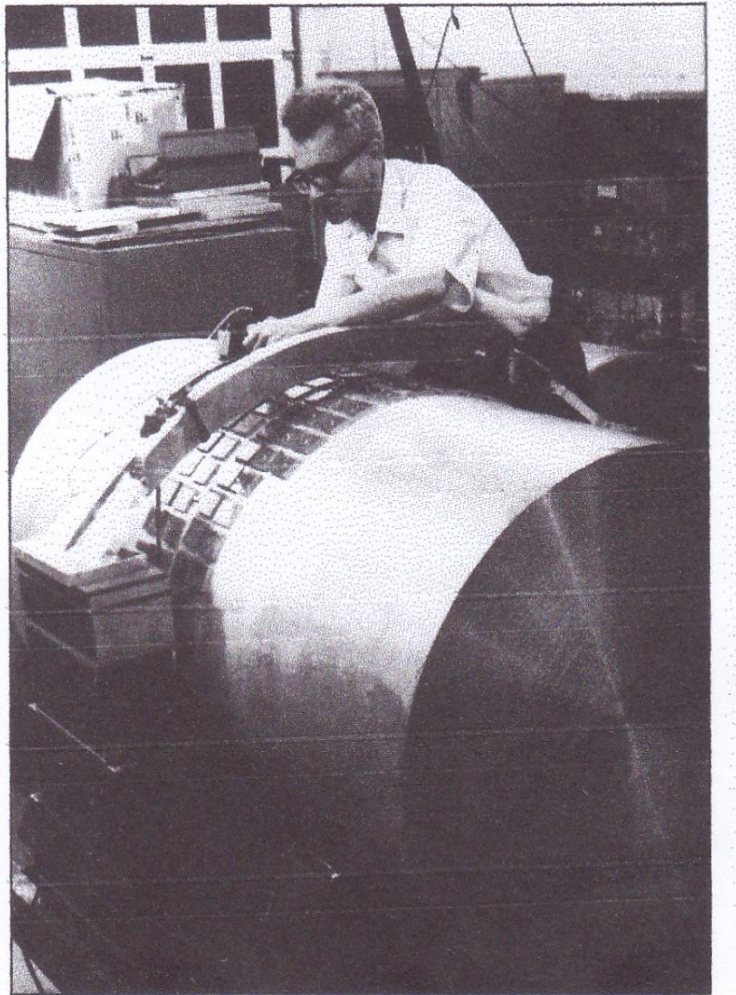


图2. 3著名实验物理学家J. 韦伯

2.1.3 质疑声

结果发表之后，很快就出现了质疑声，首先发难的是理论物理学家

(1). 理论上两大问题

****事例率太高，**

最初韦伯认为该事例来自正在经历引力坍缩而变成新生中子星的星体。从被探测到的引力波能量来看，这些新生中子星到地球的距离应为300光年。

再从J·Weber小组宣称的每天观测到的事例率来看，在地球附近应该有很多这样的中子星。这显然与事实相矛盾，我们的地球附近并没有那么多的中子星。

****信号太强**

后来Weber对波源的位置进行了修正，宣称这些引力波事例是来自银河系的中心，即距地球3万光年之远的地方，那么引力波的能量一定是相当高的。从银河中心辐射出来的引力波一定会带走大量的能量。根据当时共振棒探测器的灵敏度，理论学家计算出每个事件辐射出的引力波能量相当于一个太阳质量。

根据J·Weber所宣布探测到的事例率进行计算，银河系将以巨大的速率丢失质量。这种质量丢失率实在是太快了，它使得100多亿年前诞生的银河系不可能生存到现在。银河系应该在很早很早以前就已经消亡了。

(2) 实验上---不能重复

当时世界上有十多台与韦伯的共振棒相似的探测器在运转，除了韦伯之外没有一个探测器探测到引力波，这是对韦伯来讲是致命的打击。

*争论长达5年之久，彼此的言辞都非常激烈，有一次还差一点动起手来。在1974年特拉维夫第七次国际广义相对论及引力波会议基本上质疑为虚假事例

尽管还有些坚定分子在哪里努力挣扎，但绝大多数人（理论的，实验的）退了出来，引力波探测跌入低谷

*上世纪80到90年代结构更先进，灵敏度更高的低温共振棒引力波探测器陆续建成：

巴吞鲁日的ALLEGRO（快乐的乐章）——2002状况

帕杜瓦的 AURIGA（御夫座），——2005状况

日内瓦的EXPLORER（探险者），——1991状况

弗拉斯卡蒂的NAUTILUS（鹦鹉螺）

珀斯附近的NIOBE（尼俄伯），

经过长期运转，这些探测器没有一台探测到引力波信号。到了本世纪初，风靡引力波界近半个世纪的共振棒探测器正式退出历史舞台

2.2 引力波存在的间接证明

引力波存在的间接实验证据是由美国物理学家泰勒及赫尔斯取得的。1974年，他们利用设在波多黎各的射电天文望远镜，发现了脉冲双星 PSR1913+16。它是由两颗质量大致与太阳质量相当的，相互旋绕的中子星组成。幸运的是其中一颗处在活动期，可以在地球上观测到它发射的射电脉冲。

利用观察到的射电脉冲，可精确地获得两颗星在绕其质心公转时其轨道的长半轴及转动周期。通过连续观测他们发现，其轨道的长半轴逐渐变小，绕质心转动的周期逐渐变短。这种变化可以利用广义相对论，作很好的解释。

根据广义相对论，当两个质量体绕其质心转动时，由于体系的质量四极矩随时间发生变化，会产生引力辐射。辐射出的引力波带走轨道能量。从而使轨道的长半轴变小，公转周期变短。

根据利用射电天文望远镜观测到的轨道参数，可以直接得到该双星系统的动力学特征，而利用这些动力学参数根据广义相对论理论，可以计算出由于引力辐射导致的能量损失，并得到由于能量损失而引起的轨道周期的变化值。

泰勒和赫尔斯对PSR1913+16连续观测达14 年之久，获得的数据与广义相对论的预言符合得很好。这是人类得到的第一个引力波存在的间接证据，是对广义相对论引力理论的一大贡献。泰勒和赫尔斯因此荣获1993年诺贝尔物理学奖。

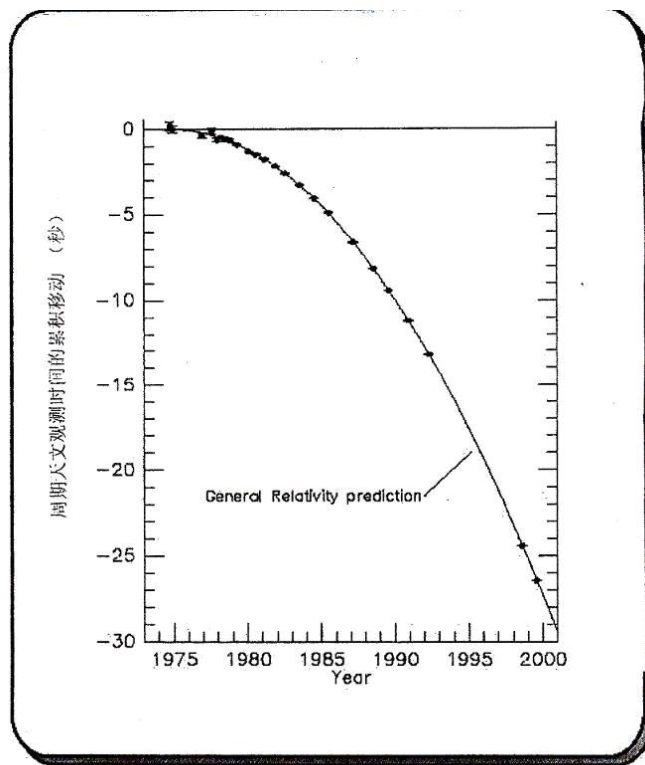


图2.4 PSR1913+16转动周期累积移动观测值与广义相对论
预言值的比较

在图中，纵坐标表示相对的累积周期变化，单位为秒. 取测量开始时周期变化为0秒. 横轴为测量时间，单位为年. 图中圆点表示测量值, 实曲线是根据广义相对论的预言值画出的. 可以看出，测量获得的数据与广义相对论的预言符合得很好.

这是人类得到的第一个引力波存在的间接证据，是对广义相对论引力理论的一大贡献. 泰勒和赫尔斯因此荣获1993年诺贝尔物理学奖. 此后, 对更多中子双星系统的观测和研究，使人们增加了在宇宙中直接探测到引力波的信心.

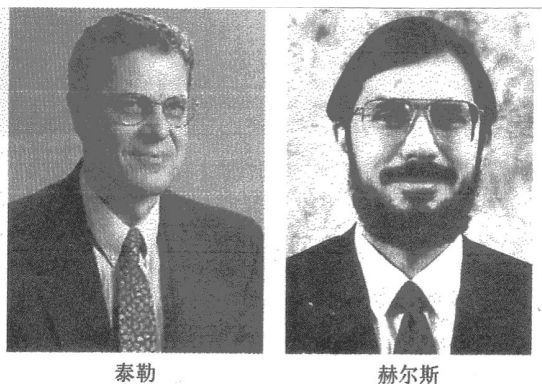


图2. 5泰勒和赫尔斯

2.3. B模偏振-被否定的发现

2014年3月哈佛大学-史密松天体物理中心的翰·科瓦克博士向世界宣布他和他的研究团队利用设在南极的BICEP2实验设备,发现了宇宙大爆炸后产生的原初引力波存在的证据. **引起了物理学界广泛关注**

2.3.1 宇宙微波背景辐射和B模偏振形态

****宇宙微波背景辐射**

微波背景辐射是一种弥漫在整个宇宙空间中的极微弱的电磁波,它是宇宙大爆炸时留下的痕迹,

宇宙大爆炸理论是由比利时牧师兼物理学家乔治·勒梅特(Georges Lematre)1932首次提出来的。

该学说认为宇宙是由一个致密炽热的奇点于138亿年前的一次大爆炸形成的,大爆炸的一刹那就是时间和空间的开端.

在早期的宇宙是不透明的。在恒星和行星尚未形成之前，它由充满着致密的、高温的、以电子、质子、重子和光子交互作用的等离子体所组成。宇宙处于晦暗的迷雾状态。

大爆炸发生后约38万年时，由于膨胀使宇宙的温度降到约3000度 C ，”迷雾”中的电子与质子结合成为中性的氢原子，电子和光子脱离耦合，宇宙逐渐明朗起来。大爆炸形成的这种“最古老的光（电磁波）”得以在宇宙中自由传播。宇宙膨胀时会将光的波长拉长，经过漫长的岁月这些古老的光的波长已经被拉长到数毫米，即已到在微波范围，，成为均匀散布在宇宙空间中的微弱电磁波，好像是宇宙的光子背景。被称为”宇宙微波背景辐射”。

宇宙微波背景辐射在1964年被美国科学家们发现

**暴涨

为使“大爆炸宇宙模型”更加完善，美国麻省理工学院的阿兰·古斯(Alan Guth) 等人在1981年提出

“暴涨理论. 认为，在宇宙大爆炸 10^{-35} 秒后，发生了一次速度无法想象的急剧膨胀过程，即所谓“暴涨过程”。在这个过程中，宇宙在不到1秒的时间内体积膨胀了 10^{78} 倍以上.

** B模式偏振

宇宙大爆炸 10^{-35} 秒后发生的暴涨过程中产生的原初引力波，按照自己的物理特性将时空在一个方向压缩同时在与之垂直的另一方向拉伸，使时空畸变。大爆炸产生的”热辐射”是一种电磁辐射，是光的一种形式，具有光的一切属性，包括偏振(极化)。当它经过被引力波畸变的时空时，原初引力波产生的效应叠加在这种古老的光上，在宇宙电磁辐射中产生一种独特的偏振模式 称为**B模式偏振**。

这种模式在”宇宙微波背景辐射”光的偏振方向中代表一个扭曲或卷曲的格局，特点是形成旋涡。因为静磁场 **B** 是有涡旋的。这个 模式很像是磁场，所以叫做 **B 模式**。

原初引力波创造的**B模偏振**被暴涨放大之后可以达到足以被探测的水平。

2.3.2 BICEP2实验

BICEP2是 “宇宙泛星系偏振背景成像” 的英文缩写，它是建在南极冰盖上的一台射电天文望远镜，科学家用它对天空进行扫描，探测“宇宙微波背景辐射”。寻找原初引力波在宇宙微波背景辐射中留下的独特“印记——宇宙微波背景辐射中的B模偏振形态。

BICEP2之所以放在南极是因为宇宙微波背景辐射的波段极易被水蒸气所吸收，而南极气候干燥，大气稀薄，是最佳探测地点，另外南极洲几乎无人居住，来自广播、电视、雷达及其他电子设备的噪声干扰相对较小。对实验有利。

BICEP2探测器在宇宙微波背景辐射中发现的这种B模偏振形态，是原初引力波留下的独特印记B模式是一个张量扰动，电磁场的自由度不够用，不可能产生这样的扰动，所以说，探测到这种独特印记，无疑证明了原初引力波的存在。

2.3.3 实验结果

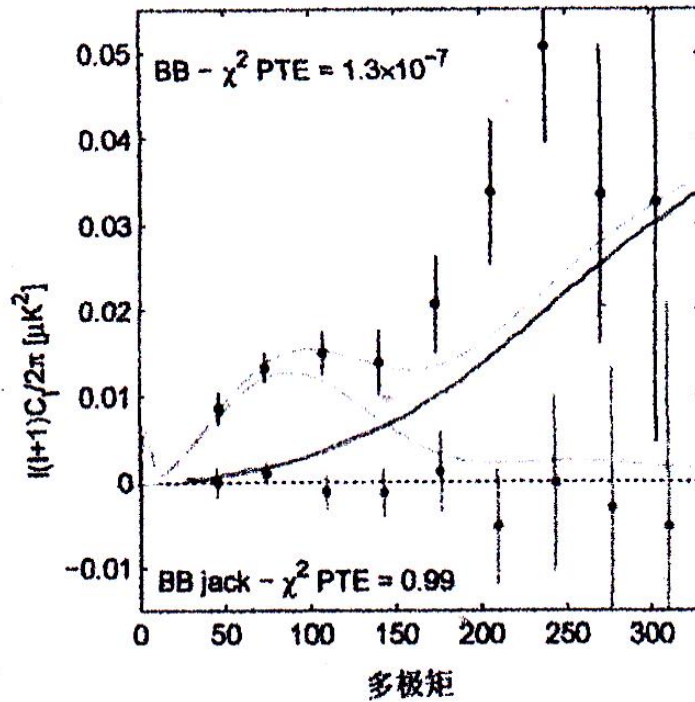


图2.6 BICEP2测得的功率谱

曲线中的点是功率的实验值，实线是引力透镜效应的期待值。引力透镜效应可以使一部分E-模偏振转变为B-模偏振，这些引力透镜导致的B-模偏振是本实验重要的本底之一，为了确定实验中测得的B-模偏振是由原初引力波导致的，需要将实验值与引力透镜效应的期待值进行比较。

功率谱在多极矩较高时呈现与引力透镜效应的期待值相一致的情况，但是,当多极矩较低时,测量得到的信号噪声比很大,BB功率超过引力透镜效应期待值,

统计显著性变为 5.2σ ，实验上公认，显著性超过 5.0σ

就不是本底涨落，是个真实的峰。测量结果出错的概率不到百万分之一

2.3.4 尘埃效应

宇宙中的尘埃也会引起B模偏振类似的效应必须在数据中予以扣除。

结果发表之后，有人提出质疑，认为他们在进行误差分析时对尘埃效应的处理引用的数据太陈旧，需要等其他实验组发表了新数据后重新计算。这种说法是无可厚非的。确实,在进行了大量分析之后,特别是与其他探测方法得到的新结果进行比较之后发现,**BICEP2**的结果可能是由尘埃效应引起的,宇宙随机背景中有没有**B**-模偏振形态还不能由该实验确定。

2.4 引力波的发现

美国当地时间2016年2月11日上午10点30分（北京时间2016年2月11日23点30分），美国国家科学基金委员会（NSF召集来自加州理工学院、麻省理工学院以及LIGO科学合作组织的科学家代表在华盛顿国家新闻中心向世界宣布：加州理工学院、麻省理工学院和LIGO科学合作组SLC的科学家利用设在华盛顿州汉福德的高级激光干涉仪引力波探测器（Advanced LIGO）H1和位于路易斯安娜州利文斯顿的相同的实验设备L1发现了引力波存在的直接证据。困扰科学家100年来的物理学难题得到破解。这是一项划时代科学成就，具有极其深远的意义。

2.4.1 第一个事例GW150914

第一个引力波事例是在美国当地时间2015年9月14日点50分

45秒探测到的，他们把这个引力波事例命名为GW150914.

纪念这个人类科学史上这个极不寻常的日子。



图2.7 发布会现场

两段小插曲——秋分事件和大狗事件

第一个事例发现之前，LIGO曾经发现过两个“事例”，引起了很大的轰动。

第一次发生在2007年9月23日，被称为“秋分事件”（当日是秋分），第二次发生在2010年9月16日，后来被称为“大狗事件”（在大狗星座附近）。

这两个“事例”都是用“盲注测试程序”人为注入的模拟引力波信号，目的是检查干涉仪的运行参数，控制数据质量，并测试应用分析软件的性能。看看研究人员在毫不知情的情况下能否成功地找到这个信号。

该工作严格保密，只有盲注委员会（LIGO的一个保密机构）的极少数几个人知道。秋分事件持续了一年多，直到研究人员完成所有的数据分析工作和研究任务后，LIGO-VIRGO盲注委员会才开信封宣布有无盲注。

A主要参数

*双黑洞旋绕并合初始黑洞的质量分别 $36^{+5}_{-4} M_{\odot}$ 和 $29^{+5}_{-4} M_{\odot}$,

*最后形成的黑洞质量为 $62^{+4}_{-4} M_{\odot}$ 有 $E = 3.0^{+0.5}_{-0.5} M_{\odot} c^2$ 的能量
在合并过程中以引力波的形式辐射出去

*引力波频率范围为35赫兹到250赫兹

*波源的亮度距离为 $410^{+160}_{-180} Mpc$ (13亿光年)

*L1和H1时间差 $6.9^{+0.5}_{-0.4}$ 毫秒, 光速, 引力波从南天来

*峰值应变幅度为 1.0×10^{-21}

*信号噪声比 $SNR = 24$

*统计显著性 5.1σ

B引力波信号及探测器的本底波形

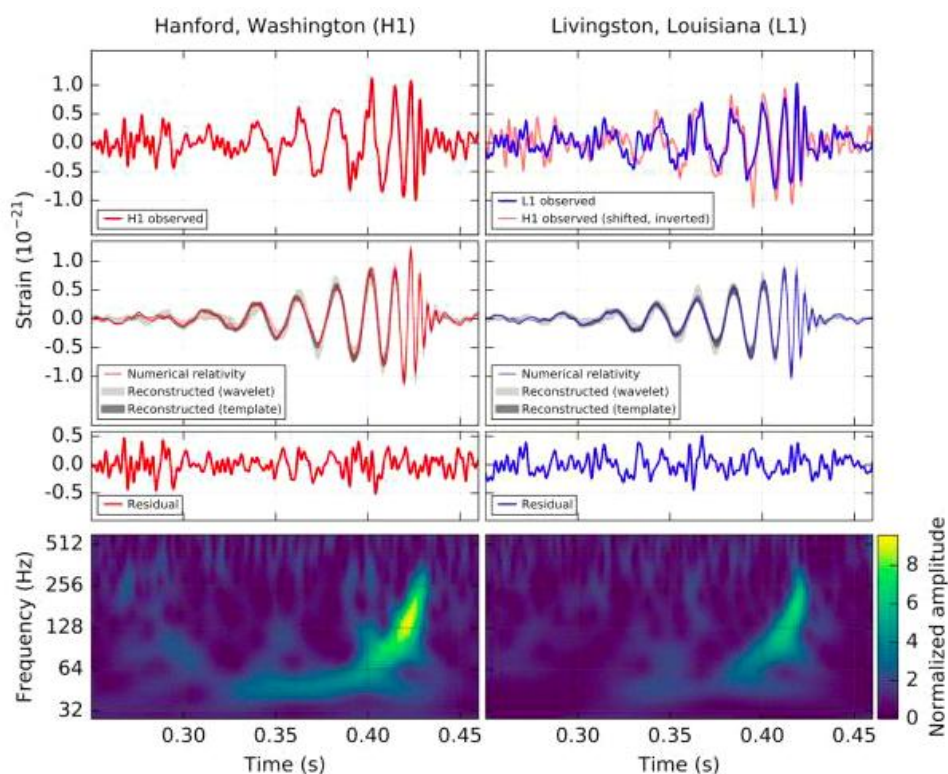


图2.8 Advanced LIGO H1和L1探测到的引力波信号波形。

左列各图是位于汉福德的高级激光干涉仪H1的探测结果（红色），右列各图是位于利文斯顿的高级激光干涉仪L1的探测结果（兰色），为了便于观看，所有时间序列数据都用一个带宽为35到350赫兹的带通过滤器进行了过滤

C. 信号预警与分析

*最初是用低延迟搜寻软件系统发现的，这个低延迟软件系统适用于寻找通用的引力波瞬变事件. 并不对某类引力波特别青睐.

*当该系统察觉到有能量超过阈值的大信号出现时，会发出警示，提醒我们有异常事件发生. 事实的确如此, 在数据获取过程中，当激光干涉仪引力波探测器GW150914有响应3分钟时它给出了警示.

*用匹配过滤器对该事例进行了详细分析, 复原了这个事例

2.4.2 第四个引力波事例GW170814

2017年9月27日，美国LIGO和欧洲VIRGO两个引力波项目组在意大利都灵召开新闻发布会宣布：

2017年8月14日，从位于三个不同地点、相距遥远的引力波探测器，即位于美国路易斯安娜州利弗斯通（Livingston）和华盛顿州汉佛德（Hanford）的两台激光干涉仪引力波天文台（LIGO）和位于意大利比萨附近的激光干涉仪引力波探测器VIRGO，几乎同时探测到一个新的引力波事例，这是人类发现的第四个引力波事例。随后该事例被命名为GW170814。

引力波探测史上一个标志性事例

A. 主要参数

*双黑洞并合, 两个黑洞的质量为 $31M_{\odot}$ 和 $25M_{\odot}$

*合并后生成的黑洞质量 $53M_{\odot}$, 约 $3M_{\odot}$ 转变成引力波

*波源距地球: 约18亿光年

*信号噪声比约 14

*频率 50Hz到350Hz

B信号波形

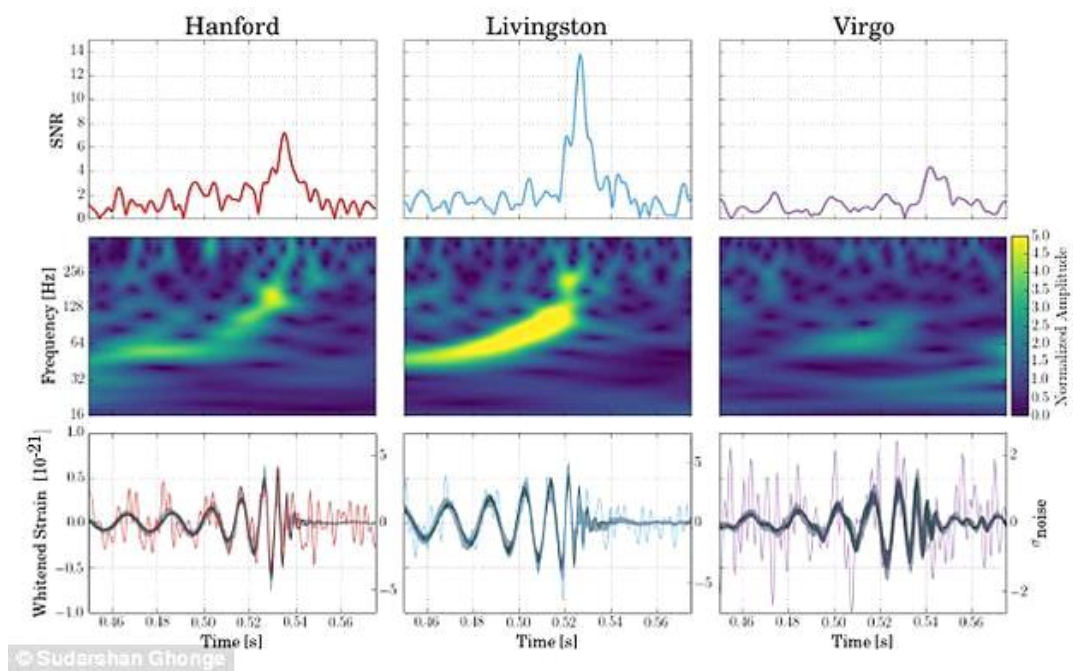


图2.11第四个2事例信号波形

第一排，三个探测器中的信号噪声比

第二排，频率特性

第三排，信号波形

C发现第四个事例的重要意义

第四个引力波事件的发现具有十分特殊的意义，因为它是被**两个不同的实验组**，在相距遥远的**不同地点**，利用结构**相互有差异**的探测器**LIGO**和**VIRGO** 同时探测到的

引力波探测史上一个重要的里程碑

****符合测量提高结果的可信度**

前三个事例是都由LIGO自己发现的，虽然两台LIGO分别位于美国西北部的华盛顿州和东南部的路易斯安娜州，两地相距3000 千米，由同一个噪声源 产生同一个虚假信号的几率极小；**但毕竟是由同一个实验组的两台结构相同的探测器发现的，**难免引起某些人对事例真实性的怀疑。GW170814 **被两个不同的实验组，在美洲和欧洲相距遥远的不同地点，利用结构相互有差异的探测器LIGO和VIRGO 同时探测到的事实**彻底打消了这些人对引力波事例真假的猜疑。

****提高波源的定位精度**

有史以来人类第一次同时使用三台探测器联手发现的，第三个探测器的加入大大提高了引力波源在太空中的定位精度。

利用单个探测器很难辨认引力波是从太空中哪个地方来的，因为在以探测器为圆心，以探测到的引力波源到探测器的距离为半径，我们可以在太空中划定一个球，由于测量精度是有限的，存在测量误差，我们在太空中划定的是一个壳很薄的空心球。

引力波源可以位于球壳上任何地方

利用设在不同地域的两个探测器进行量，例如， LIGO
(llo) 和LIGO(lho) 同时进行测量，由于两个探测器的输出信息是同一个事件产生的，是相互关联的，我们可以很好地测量出两个探测器输出信息之间的时间差，而两个探测器之间的距离是已知的.利用两地的距离和时间差我们在空中划出的不是一个球壳而是一个带状圆环

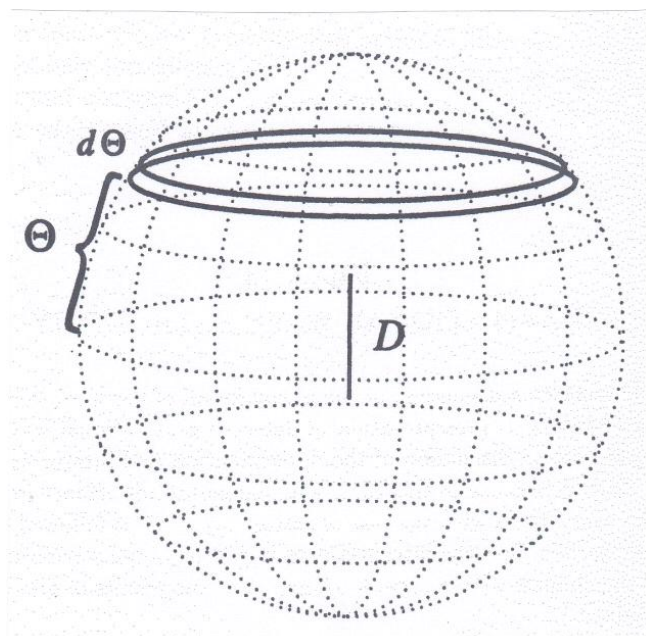


图2.10两个探测器画出的定位环

引力波源可能位于圆环上任何一点

利用三个探测器进行符合测量时我们能够得到两个独立的时间差，利用距离及两个独立的时间差可以在太空中划定两个带状环，这两个带状环的交叉在太空中形成两个有一定厚度的“补丁”，引力波信号可能是从这两个“补丁”中的任何一个内发出的。

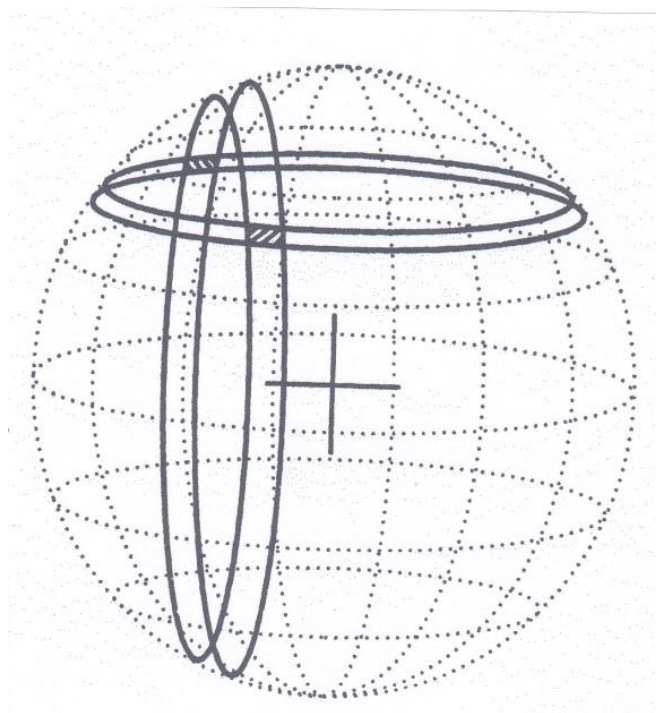


图2.12三个探测器画出的定位补丁

利用第四个探测器的观测将给出第三个时间差，它足以在太空中把引力波源定位在一个“补丁”内，利用更多的探测器联网测量，可以使“补丁”缩得更小，使波源的定位精度得到极大的提高。

世界上需要建立多台引力波探测器

****已经发现的几个引力波源的位置**

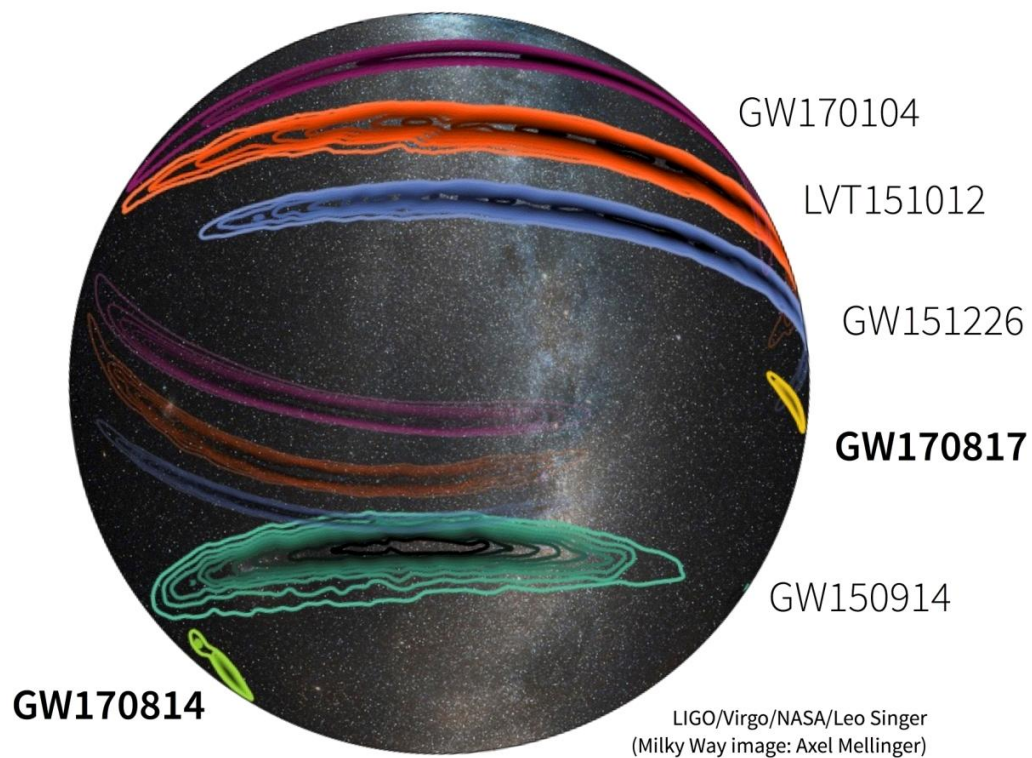


图2.13 测得的6个引力波事例空间定位图

GW170817在黄色补丁之内 GW170814在黄浅绿色补丁之内其他事例都在圆环内定位

2.4.3 第五个引力波事例GW170817

激光干涉引力波天文台LIGO和VIRGO于2017年8月17日美国东部时间8时41分(北京时间20时41分)发现一个引力波事例，命名为GW170817。经分析确定，第五个引力波事例是由相互旋绕的两个中子星并合产生的

A) 极为重要的标志性事例

双中子星并合过程不仅向外辐射出引力波，还会在多个波段发出电磁辐射。这种在发出引力波同时，又被电磁观测手段探测到的天体被称为引力波的电磁对应体。GW 170817 是人类第一次探测到引力波电磁对应体，标志着以多种观测方式为特点的“多信使”天文学时代的到来

B) 引力波之光

仅在LIGO观测到GW170817 引力波信号1.7 秒之后，美国宇航局的费米卫星上搭载的伽马暴监测器以及欧洲航天局INTEGRAL 望远镜上搭载的SPI-ACS 探测器，均探测到一个极弱的短时标伽马暴与该引力波事件相伴，随后，该伽马暴被编号为GRB 170817A。其后几天，光学望远镜还探测到该引力波源发出的X射线以及射电波段的电磁辐射。欧洲南方天文台(ESO)16 日在网站上发布了用望远镜首次探测到引力波对应的光学信号，并公布了捕捉到的“引力波之光”的画面



图2.17 欧洲南方天文台（ESO）的望远镜捕捉到的双子星并合引力波之光

B.主要参数:

- *两个子星的质量估计为 $1.1 M_{\odot}$ 到 $1.6 M_{\odot}$
- *合并后形成一个新的中子星
- *约0.025 倍太阳质量转变成引力波能量
- *波源到地球的距离为1.3 亿 光年,

C,引力波电磁对应体的重要意义

(1) 精确地确定波源的空间位置

同时利用电磁辐射和引力辐射**两种不同的探测原理和方法**探测同一个天体，能更加精确地确定波源的空间位置

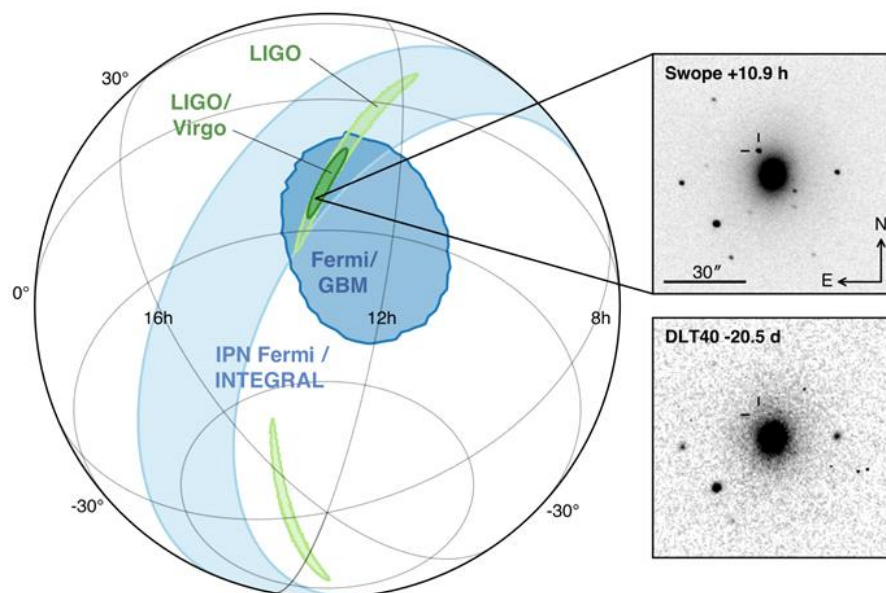


图2.17 GW170817事例中引力波信号、短时标伽马暴和可见光源的位置

浅绿色是两台**LIGO** 的数据，深绿色来自两台**LIGO**和**VIRGO**,浅蓝色来自费米与**INTEGRAL**时间延迟得到的三角定位，深蓝色来自费米的**GMB**.右侧的放大图展示了宿主星系**NGC4993**的位置，右上图是双中子星并合后**10.9**小时的**Swope**光学发现图（有），右下图为双中子星并合**20.5**天前的图片（空）。_

(2)短时标伽马射线暴的来源

伽马射线暴是天空中某一个方向伽马射线辐射突然增亮的现象。根据伽马射线暴时间长于 或短于2秒，可分为长暴与短暴

长伽马射线暴与大质量恒星塌缩形成黑洞的过程相关，短伽马射线暴则源自双中子星并合或中子星与黑洞并合。前者已被大量观测所证实，后者却一直没有找到直接观测证据。**GW 170817**引力波电磁对应体的测量数据中人类第一次看到与引力波伴随的短伽马射线暴,支持了这种看法.

(3)哈勃常数的测量

哈勃常数是衡量宇宙膨胀速度的重要参数,迄今为止,哈勃常数的值都是通过电磁辐射得到的.常用的方法有Ia型超新星测量、重子声波震荡、宇宙微波背景测量等.然而,随着探测精度的提高,不同方法测得的数值的差异越来越明显。例如,通过测量临近Ia型超新星得到数值,明显大于普朗克太空卫星通过宇宙微波背景观测得到的值,使天文学家深受困扰.

引力波及其电磁对应体的发现,将提供测量哈勃常数的独立探测渠道.人们可以把由引力波测得的数据和由电磁波提供的信息联合起来计算哈勃常数.以一种全新的方式和信息校准宇宙膨胀速度.

(4)重金属的产生

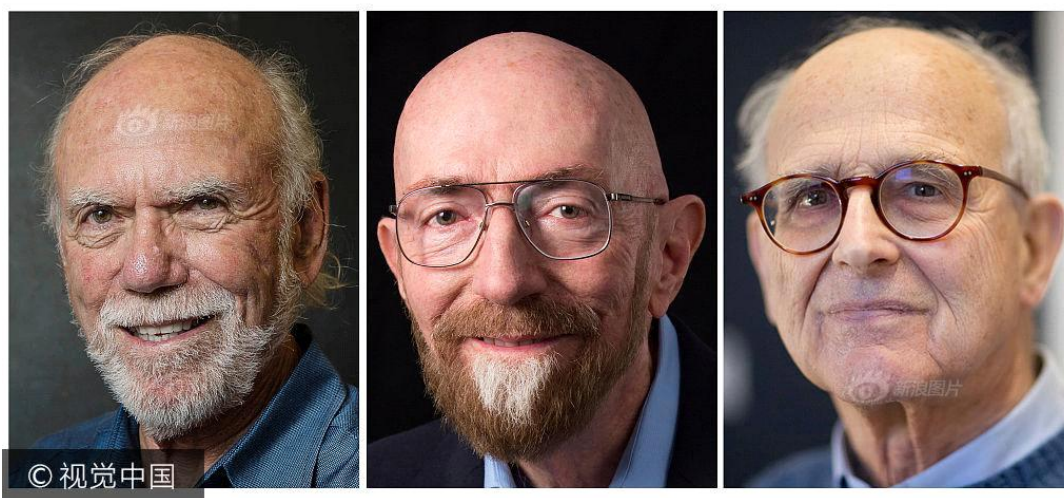
理论认为，宇宙大爆炸产生了一些轻元素如氢、氦、氮、氧等,恒星燃烧又产生了一些较重的元素,但也只是到铁元素为止,

而更重的元素如金银等的来源之一可能是双中子星并合(另一种来源可能是超新星爆发),但是没有实验根据. 通过此次事例中伴随的电磁辐射进行光谱分析，确实看到了重元素发出的光,为以前的理论提供了实验根据.

2.5 荣获2017年诺贝尔物理学奖

2017年10月3日瑞典当地时间上午11点50分，诺贝尔物理学奖评审委员会、瑞典皇家科学院秘书长约兰·汉森宣布，将2017年诺贝尔物理学奖授予3位美国物理学家雷纳·韦斯（Rainer Weiss）、巴里·巴里什（Barry Barish）、基普·索恩（Kip Stephen Thorne），以表彰他们对引力波探测器LIGO的决定性贡献及其对引力波的观测成果。这既是对三位科学家杰出贡献的奖励，也是引力波学术界的巨大荣耀

表彰他们对激光干涉仪引力波探测器的研发和建造所做的突出贡献——没有LIGO, 没有引力波的发现



雷纳·韦斯（Rainer Weiss）

1963年由苏联科学家米哈伊尔·E·哥森史特因和V·I普斯托瓦伊特首先提出来的，文章发表在俄文刊物JETP1962年第16期上，并未引起人们的注意。

美国麻省理工学院教授R·韦斯也独立的想到了这个主意，他与他的学生R·法沃德进行过详细的讨论，虽然没有正式发表文章，但R.法沃德在实验室的正式记录本上做了详细的记录，并画有韦斯方案的草图。1971年到1972年，韦斯对激光干涉仪进行了广泛深入的研究和设计，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。他还研究了干涉仪的噪声问题，指出了迄今为止研究人员仍然为之奋斗着的主要噪声来源，指出并全面论述了控制这些噪声的途径。韦斯全面而透彻的分析作为麻省理工学院（MIT）的一篇季度研究进展报告发表，至今仍被当作一篇里程碑式的论文发挥作用。韦斯出色的工作标志着激光干涉仪引力波探测器设计原型的诞生。

1975年决定与K·索恩教正式联手，加州理工学院和麻省理工学院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，韦斯和索恩分别麻省理工学院和加州理工学院开始了LIGO的前期研究和团队建设。筹建两台臂长4Km的激光干涉仪引力波探测器，一台位于华盛顿州的汉福德，另一台位于路易斯安娜州利文斯通。在建造、统调运行中发挥了关键作用。

韦斯教授是位天才的实验物理学家，1932年生于德国，犹太人，1939年举家迁往美国。在实验物理方面有很深的造诣

基普·索恩 (Kip.Thorne)

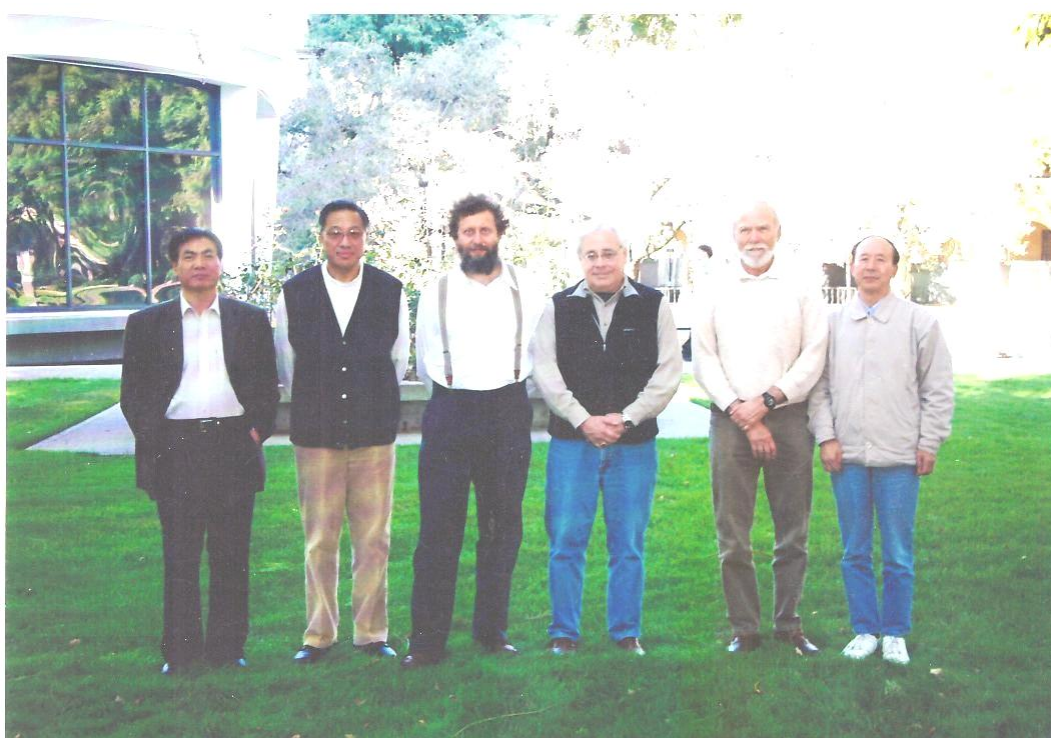
K·索恩教授是美国知名物理学家，一直担任加州理工学院费曼理论物理学教授，在加州理工学院领导着全球顶尖的广义相对论研究中心。他与学生们一起力图把广义相对论与引力波结合在一起，找到一些实验物理学家们能够测量的参数，从而让广义相对论效应比较容易地进行测量。他们的研究奠定了引力波探测的理论基础，并在引力波波形计算以及数据分析的研究的方面进行了开创性工作。这个顶尖研究小组的加入极大地壮大了对引力波研究团队。1975年在意大利西西里召开的引力波探测国际讨论会上，K·索恩对用激光干涉仪探测引力波的理论进行了深入分析，报告了对各种可能的引力波源所辐射的引力波强度的计算结果，引起广泛的关注。K·索恩教授搭建了整个LIGO的理论研究框架，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。

巴里·巴里什（Barry Barish）

B. 巴里什教授是美国著名的高能物理学家，具有惊人的组织才能。早在上世纪70年代，就领导着一个庞大的研究团队在美国斯坦福直线加速器中心的正负电子对撞机PEP上进行实验，上世纪80年代，是美国超级超导对撞机SSC上GEM 实验项目的负责人，这是SSC上仅有的两个实验项目之一，本人作为GEM中国合作组的成员，有幸与巴里什教授共事，研究探测器GEM的具体结构和实验方案，彼此留下深刻的印象。SSC下马后巴里什教授受命于美国能源部，成为LIGO项目的负责人对LIGO的建成做出了关键贡献。

应该说巴里什教授是临危受命，因为对具体方案存在巨大分歧，两派互不相让，LIGO长期处于停顿状态并有中途夭折的危险。巴里什教授以胸襟宽阔著称，是矛盾双方都能接受的不二人选。他以快刀斩乱麻的方式迅速建立起新的LIGO实验室，自己担任主任，让得力助手、干练的加里-桑德斯为副主任，派得力干将马克·库尔斯去LIGO利弗斯通当台长，工作很快走上正规并使两台臂长4公里的激光干涉仪引力波探测器LIGO顺利建成并投入运转。取得了举世瞩目的成果。可以说，没有巴里什教授的努力，就没有今天的LIGO, 也没有今天引力波探测所取得的主要成就。他让LIGO成为了现实。他的获奖是众望所归，理所当然的。

巴里. 巴里什教授对中国人民十分友好，关心中国的引力波研究，中美之间的一个引力波合作备忘录（即MOU）就是由他和中国国家天文台前台长艾国祥院士共同签署的。作者在LIGO工作期间受到巴里什教授的大力帮助和热情关怀，收获颇多。这是在加州理工学院校园内留下的一张珍贵的照片。



雷纳.德雷弗（Ronald Drever）

作为LIGO创始人之一，苏格兰实验物理学家R. 德雷弗（Ronald Drever）教授对激光干涉仪引力波探测器的发展作出了突出的、关键性的贡献。

***1976年在英国格拉斯哥建造了一台小型激光干涉仪**

***第一次引进了法布里 — 珀罗腔**

***第一次引进了功率循环腔**

两项发明使激光干涉仪引力波探测器的性能实现了质的飞跃

***上世纪80年代初, 在美国国家基金委和加州理工学院的支持下, 在加州理工学院校园内建造了一个臂长40米, 功能完备的激光干涉仪.**

***作为 LIGO 初期的三位领导人之一, 为LIGO的设计和建造贡献颇多**

***作为苏格兰人R. 德里弗是位个性极为鲜明的人, 和别人共事非常困难, 这也限制了他的发展前途。**

德里弗学问做的很好, 可以说他对激光干涉仪引力波探测器了如指掌。别人解决不了的疑难问题, 向他请教都能解决, 三年多的共事使我受益颇深。

R. 德里弗的贡献是突出的、关键性的, 他获得诺贝尔也是当之无愧的。但是, 他于2017年3月7日不幸去世, 没有机会获此殊荣。引以为戒,

谢谢大家