

引力波的预言、探测和发现

朱宗宏¹ 王运永^{1,2,†}

(1 北京师范大学天文系 北京 100875)

(2 中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

2016-04-21 收到

† email: wangyunyong@bnu.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20160504

The prediction, detection and discovery of gravitational wave

ZHU Zong-Hong¹ WANG Yun-Yong^{1,2,†}

(1 Department of Astronomy, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

(2 Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

摘要 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。文中讨论了引力波的预言和特性, 给出了引力波探测的主要方法, 详细分析了激光干涉仪引力波探测器的的工作原理和基本结构, 介绍了引力波事例GW150914的主要参数和探测、数据处理。

关键词 引力波, 激光, 干涉仪, 预言, 探测

Abstract Gravitational wave is an important prediction of Einstein's general relativity, The detection of gravitational wave is one of the greatest frontier area of physics. The gravitational wave astronomy based on the gravitational wave detection is a new area of science. It is a big development and complimentary of traditional electromagnetic radiation Astronomy. The prediction, properties and detection of gravitational wave have been discussed, the working principle and basic construction of laser interferometer gravitational wave detector were analyzed. The main parameters of the gravitational wave event GW150914, its detection and the method of data analysis have also been introduced.

Keywords gravitational wave, laser, interferometer, prediction, detection

1 引言

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, 以引力波探测为基础的引力波天文学是一门正在崛起的新兴交叉科学, 是继以电磁辐射为探测手段的传统天文学之后, 人类观测宇宙的一个新窗口, 对研究宇宙的起源和进化, 拓展天文学的研究领域都有极其重要的意义。引力波

的发现是一个划时代的科学成就, 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。

2 引力波的预言和主要特性

2.1 引力波的预言

1916年, 爱因斯坦发表了广义相对论, 建立

了引力场方程，开辟了近代物理研究的新纪元。在爱因斯坦引力场方程

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu} (\mu, \nu = 1, 2, 3, 4)$$

中， $R_{\mu\nu}$ 是里奇张量， $g_{\mu\nu}$ 是时空度规张量， $T_{\mu\nu}$ 是物质的能量—动量张量，它描写引力场源的能量和质量分布。

将广义相对论引力场方程与牛顿方程类比，可以得出引力势与度规的对应，从而得到广义相对论的三个重要预言：引力红移，光线在引力场中弯曲和水星近日点的进动。将广义相对论引力场与麦克斯韦电磁场类比导出对引力波的预言。

引力波所满足的方程可以从爱因斯坦引力场方程推导出来。在弱场近似(即忽略二阶以上的小量)情况下，背景度规为平直的闵可夫斯基度规，时空度规张量 $g_{\mu\nu}$ 可写成闵可夫斯基度规 $\eta_{\mu\nu}$ 加上一个小的微扰项 $h_{\mu\nu}$ 的形式，即

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}.$$

将它代入引力场方程且在真空情况下，此方程就变为

$$\left(\nabla^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2}\right) h_{\mu\nu} = 0,$$

这就是大家熟悉的真空方程，该方程最简单的解就是平面波。利用横向无迹规范(TT规范)提取波函数的有物理效应而且与坐标系无关的分量，可以得出方程的解：

$$h_{\mu\nu}^{\text{TT}} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & h_+ & h_\times & 0 \\ 0 & h_\times & -h_+ & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} e^{-i\omega(t-z/c)},$$

这是个横向传播的空间分量，它携带能量，也代表了时空的内禀自由度。

2.2 引力波的产生

引力场的扰动在时空中传播出去，就像水池中水的扰动向外传播的波纹一样，这种弯曲时空中的涟漪就是引力波。引力波理论认为，当物质运动或物质体系的质量分布发生变化时，就会发出引力辐射。从数学上来讲，我们可以把任何物质或物质系统的质量分布以质量多极矩的形式表

示出来，引力波是由于质量多极矩随时间变化时辐射的。物质的质量单极矩是它的质量，根据能量守恒律，它是一个常数，不随时间变化，因此不会有单极矩引力辐射产生。质量偶极矩的时间微分是源的动量，根据动量守恒定律，它也是不随时间变化的，当然也不会有引力偶极辐射。因此第一阶引力辐射是由源的质量四极矩随时间的变化引起的。如果在天体内部存在着质量流，我们同样可以写出它的质量流多极矩。根据对称性，质量流单极矩本身不存在。质量流偶极矩的时间微分是源的角动量，根据角动量守恒定律，质量流偶极辐射是不存在的。因此，引力波是源的质量流四极矩随时间的变化所产生的。

2.3 引力波的特性

由波动方程的解我们可以知道引力波具有如下特性：

(1)引力辐射的一阶项是质量四极矩随时间变化时产生的。

(2)引力波是横向无迹的，它有两个极化方向 h_+ 和 h_\times ，探测器得到的信号是两种极化信号的线性组合，组合系数取决于波源的方位。这种极化模式揭示了引力波与电磁波的区别：引力波两个模式的相位差是 45° 而电磁波两个模式的相位差为 90° 。

(3)引力波以光速进行传播。

(4)引力波强度非常弱，引力波的强度用无量纲振幅 $h(t)$ 表示， $h(t)$ 的物理意义是引力波引起的时空畸变与平直时空度规之比。 h 又称为应变，应变的定义可用图1来说明。

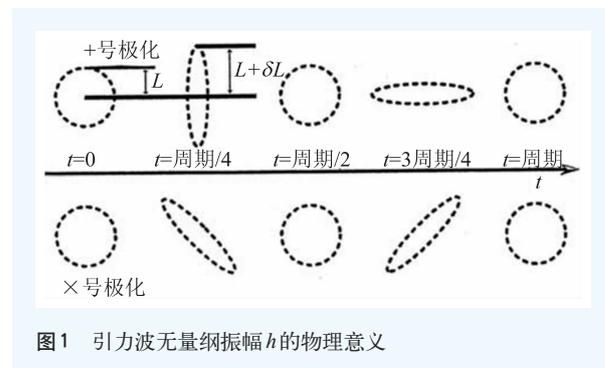


图1 引力波无量纲振幅 h 的物理意义

下面让我们以 h_+ 极化为例加以说明。设在无引力波存在时，在空间划定有一个圆(虚线)，它位于空间中 xy 平面，半径为 L ，该圆表示无引力波存在的空间状态。当引力波沿着垂直于圆的平面(即 z 轴)穿过时，该圆会因时空弯曲发生畸变，根据引力波的特性，圆内的空间将随引力波的频率在一个方向上被拉伸(或压缩)；相应地，在与其垂直的方向上被压缩(或拉伸)，变成一个椭圆。其长半轴为 $L+\delta L$ ，短半轴为 $L-\delta L$ 。当引力波通过 $1/2$ 周期时恢复到圆，而在 $3/4$ 周期时又变成椭圆，不过方向转了 90° 。当引力波走过一个周期时，该空间重新恢复到圆。引力波的强度以此圆畸变的尺度来表示：

$$h_+(t) = \delta L/L .$$

对于叉号偏振 h_\times 同样可以用图 1 来说明，只不过两个偏振引起的空间拉伸或压缩方向成 45° 角。

根据理论计算，在天体物理中有可能出现的引力波的无量纲振幅 h 为 10^{-22} 量级或更小。在臂长为 4 km 的激光干涉仪引力波探测器(如 LIGO)中，由它引起的两个测试质量之间距离的变化仅为 10^{-19} m 量级。

3 引力波探测

早在 1916 年，爱因斯坦就根据弱场近似，预言了引力波的存在。为什么半个多世纪之后引力波的探测才提到日程上来？原因来自理论上的两大困难。首先，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。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的严格的波动解。20 世纪 60 年代，物理学家通过研究零面上的初值问题，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，两大难题相继攻克，引力波探测有了可靠的理论基础。引力波的探测被

提到日程上来。

3.1 共振棒引力波探测器

1962 年，美国物理学家 J·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^[1-3]，标志着人类对引力波的探测正式开始。共振棒引力波探测器的工作原理相当简单：其主体部分是一根又大又重的金属棒，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到来时，会使棒所在的空间伸长或缩短，由于引力波的极化方向与棒的纵向轴基本平行，金属棒会随着引力波的频率伸长缩短地振动起来。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，该信号经过放大、滤波和成形之后被记录下来。滤波器的作用是只让具有共振频率的信号通过。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，对共振棒的输出信号幅度进行定标。

继 J·韦伯开创性的工作之后，共振棒引力波探测器在世界各地迅速发展起来，1969 年 6 月，在美国辛辛那提举行的相对论学术会议上，J·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，终因灵敏度不够高而没有取得突破。从 20 世纪 80 年代起，世界上的共振棒引力波探测器就陆续关闭了，到了本世纪初，几台最精密的共振棒，如位于美国路易斯安那州巴吞鲁日的 ALLEGRO(快乐的乐章)，位于意大利帕杜瓦附近的 AURIGA(御夫座)，位于瑞士日内瓦的 EXPLORER(探险者)，位于意大利弗拉斯卡蒂的 NAUTILUS(鹦鹉螺)和位于澳大利亚珀斯附近的 NIOBE(尼俄伯)也都停止

运转，共振棒引力波探测器彻底退出历史舞台，引力波探测陷入低谷。

除了灵敏度低以外，共振棒引力波探测器还有一个根本的缺点，那就是探测频带太窄，只有几赫兹。当时世界上几乎所有共振棒的共振频率都选择在 1000 Hz 附近，引力波事例本来就很少，探测窗口又局限在 100 加减几赫兹之内，大大降低了探测到引力波的几率。J·韦伯的实验虽然没有成功，但他仍不失为一代物理学大师，作为引力波探测领域第一个“吃螃蟹”的人，J·韦伯教授始终得到人们的尊敬。

3.2 引力波存在的间接证据^[4-6]

引力波存在的间接实验证据是由美国物理学家泰勒(Taylor)和赫尔斯(Hulse)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、相互绕转的中子星组成。其中一颗已经没有电磁辐射，而另一颗还处在活动期，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能量使系统的总能量减小。从而使轨道的长半轴变小，公转周期变短。泰勒和赫尔斯对 PSR1913+16 连续观测达 14 年之久(图 2)。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。在图 2 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。

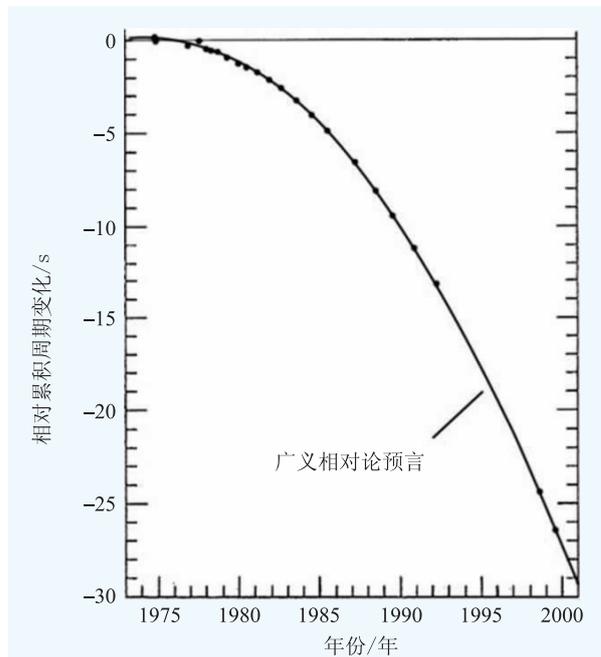


图 2 PSR1913+16 转动周期累积移动观测值与广义相对论预言值的比较^[5]

3.3 激光干涉仪引力波探测器

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。

用干涉仪探测引力波的想法是 1963 年由苏联科学家米哈伊尔·E·哥森史特因等人首先提出来的，美国麻省理工学院教授 R·韦斯^[7, 8]也独立地想到了这个主意，20 世纪 80 年代，若干小型样机陆续建成并用它们做了大量基础研究，取得了宝贵的经验。到了 90 年代初，一些大型激光干涉仪引力波探测器陆续开始建造，世界各地迅速掀起了引力波探测的新高潮。到了本世纪初，几台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文斯顿(Livingston)臂长为 4 km 的 LIGO(llo)(图 3)，位于美国华盛顿州汉福德(Hanford)臂长为 4 km 的 LIGO(lho)^[9, 10]，位于意大利比萨附近，由意大利和法国联合建造的臂长为 3 km 的 VIRGO^[11]，位于德国汉诺威(Hannover)由英国和德国联合建造的臂长为 600 m 的 GEO600^[12]，位于日本东京国

家天文台臂长为 300 m 的 TAMA300^[13]。在澳大利亚,科学家们也建造了一个臂长 80 m 的小型干涉仪,用来进行探测器的基础研究。这些探测装置被称为第一代激光干涉仪引力波探测器,灵敏度为 10^{-22} 量级。紧接着,在原来的基础架构上 LIGO 和 VIRGO 进行了小规模初步升级,变成了 eLIGO (Enhanced LIGO) 和 VIRGO⁺, 灵敏度又有明显的提高。

从样机到初步升级,短短 10 来年内激光干涉仪引力波探测器的灵敏度就提高了 4 个数量级,这在探测器发展史上是极为罕见的,显示了巨大的发展潜力,给引力波探测带来巨大的希望。当前,第二代激光干涉仪引力波探测器的研制已在世界各地蓬勃发展起来,除了美国的高级 LIGO (LLO) 和高级 LIGO (LHO)^[6, 7] 之外,还有英国与德国合建的 GEO600^[10, 11], 法国、意大利合建的高级 VIRGO^[8, 9], 日本的 KAGRA^[12] (臂长 3 km) 以及印度的 INDIGO (臂长 4 km), 灵敏度为 10^{-23} 。

2015 年 9 月 14 日,在高级 LIGO 刚刚建成的试运行阶段就发现了引力波事例 GW150914,取得了划时代的科研成就。人类长达半个世纪之久的引力波探测终于有了结果,它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个历史性的转折。

在引力波发现的巨大鼓舞下,以爱因斯坦望远镜 ET^[13] 为代表的第三代激光干涉仪引力波探测器正在加紧研发,灵敏度又提高一个数量级,直指 10^{-24} 。正如本文作者 2013 年指出的那样^[14]:



图3 LIGO(Llo)鸟瞰^[9]

“在第二代探测器建成并运行 1 到 2 年之内,人类将看到引力波探测的第一道曙光,而以第三代引力波探测器为基础的引力波天文台的建立,必将迎来一门崭新的交叉科学引力波天文学蓬勃发展的新时代”,这个新时代的脚步声越来越近了。

高级激光干涉仪引力波探测器在引力波发现中起了关键作用,可以毫不夸张地说,没有第二代激光干涉仪,就没有今天引力波的发现。当前,激光干涉仪引力波探测器已在世界各地蓬勃发展起来,除了美国、英国、法国、德国、意大利、日本和印度外,爱尔兰、西班牙、波兰、匈牙利、苏格兰、韩国、加拿大、俄罗斯等国家和地区也都投入大量的人力和财力参加到激光干涉仪引力波探测器研制的巨大潮流中^[15],力争在引力波天文学这一新兴的科学领域占有一席之地。

3.3.1 激光干涉仪引力波探测器的工作原理

原则上讲,激光干涉仪引力波探测器是一台“变异”的迈克尔孙干涉仪,其相互垂直的两臂各有一个法布里—珀罗腔,并带有光循环镜和其他功能部件。如果不考虑法布里—珀罗腔、循环镜及其他部件的作用,只把它们等效成是单个镜子,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孙干涉仪(图4),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,一束经分光镜反射进入干涉仪的一臂(比如称为 Y 臂),另一束透过分光镜进入与其垂直的另一臂(比如称为 X 臂),在经历了相同的度越时间之后,两束光返回,在分光镜

上重新相遇并在那里产生干涉。精心调节干涉仪的臂长使两束光完全相干相减,则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,会使干涉仪的一臂伸长而另一臂相应缩短,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 h ，探测到这个信号即表明已探测到引力波。

3.3.2 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等组成。光学部分的主体结构如图5所示，它包括激光器、清模器、臂上法布里—珀罗腔、光循环镜以及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)。

激光干涉仪引力波探测器对激光器要求非常高：为了降低散弹噪声，提高灵敏度，需要有很高的激光功率，而且要有非常高的功率稳定性和频率稳定性；清模器的作用是清除输入激光束中残留的高阶模式；法布里—珀罗腔的作用很重要，因为干涉仪的灵敏度与臂长成正比，而建造几十公里臂长的干涉仪是很不现实的，使用法布里—珀罗腔让激光束在腔内共振相当于把臂折叠起来。激光干涉仪工作在暗纹状态，绝大部分光从亮纹口射出，利用功率循环技术可以把从干涉仪亮纹口射出的光反射回来循环利用，以便提高干涉仪内的激光功率。

3.3.3 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 ΔL ，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 $h_d = \Delta L / L$ 。为了探测到引力波，干涉仪的灵敏度必须大于被探测的引力波的强度。

3.4 BICEP2与B-模偏振形态

北京时间2014年3月18日凌晨，哈佛大学史密松天体物理中心的约翰·科瓦克博士向世界宣布，他和他的研究组利用设在南极的BICEP2实验设备，发现了宇宙大爆炸后产生的原始引力波存在的证据，在科学界掀起了轩然大波^[16]。

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个射电天文望远镜，科学家用它对天空进行扫描，探测“宇

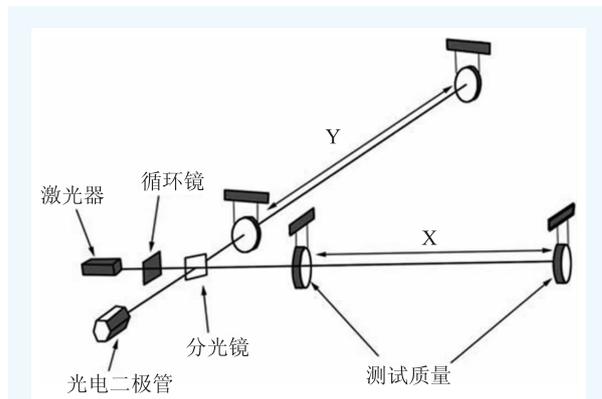


图4 激光干涉仪引力波探测器工作原理

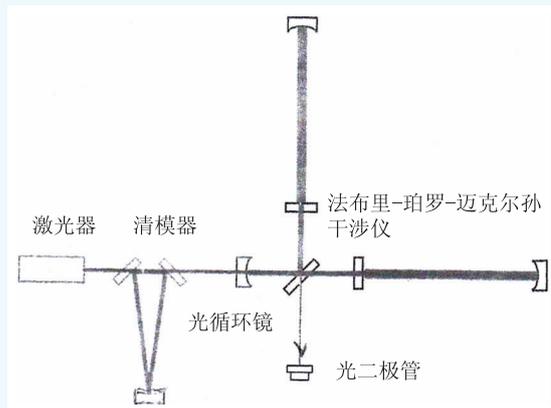


图5 激光干涉仪光学部分主体结构示意图

宙微波背景辐射”。“宇宙微波背景辐射”是一种弥漫整个宇宙的极微弱的电磁辐射信号，是宇宙在大爆炸之后38万年时留下的痕迹，1964年被美国科学家发现，从而获得了诺贝尔物理学奖。与传统的微波背景辐射探测器不同，BICEP2主要测量的不是温度场的信息，而是引力波导致的独特效应——宇宙微波背景辐射中的B模偏振形态。

宇宙大爆炸后不到 10^{-34} s 发生的暴涨过程中产生的引力波，按照自己的偏振特性将时空在一个方向压缩的同时在另一方向拉伸，宇宙微波背景辐射是光的一种形式，具有偏振特性。当它经过被引力波畸变的时空时，原始引力波产生的效应叠加在宇宙微波背景上，在宇宙微波背景辐射中产生一种独特的偏振模式称为B模式偏振，其特点是形成旋涡。原始引力波创造的B模偏振被暴涨放大之后可以达到被探测的水平。BICEP2探测器力图探测的微波背景辐射中的B模偏振形

态,无疑是原始引力波留下的独特印记,是原始引力波存在的有力证据。它不但证明了宇宙大爆炸和暴涨理论的正确性,而且对研究宇宙起源具有十分重要的意义。遗憾的是这又是一场虚惊,BICEP2的结果是由尘埃效应引起的,宇宙随机背景中并没有发现B模偏振形态。

BICEP2的实验没有得到正确的结果,但它的研究方向是正确的,它所探测的波段是很多人感兴趣而且正在进行探测的波段之一。设备在升级改造提高性能之后,希望能取得重要成果,因此我们在这里进行扼要的介绍。

4 引力波发现

在经过半个世纪的艰苦探索之后,引力波探测终成正果。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和位于路易斯安那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。美国科学家将该波事例命名为GW150914,以纪念这个人类科学史上极不寻常的日子^[15]。

4.1 主要参数

该信号的频率范围为35 Hz到250 Hz,峰值应变幅度为 1.0×10^{-21} ,该事例与广义相对论预言的两个相互旋绕的黑洞在旋近、合并及最后生成新的单个黑洞衰荡时引发的引力波波形相匹配。深入分析后得知,波源的亮度距离为 410^{+160}_{-180} Mpc(pc为秒差距,是天文学中的长度单位,另一个长度单位是光年,即光在真空中传播一年走过的长度,有的报道中说这个波源的距离为13亿光年,相应的红移 $z=0.09^{+0.03}_{-0.04}$),波源中初始黑洞的质量分别为 $36^{+5}_{-4} M_{\odot}$ 和 $29^{+5}_{-4} M_{\odot}$, M_{\odot} 是太阳质量,最后形成的科尔黑洞的质量为 $62^{+4}_{-4} M_{\odot}$,这表明有 $E=3.0^{+0.5}_{-0.5} M_{\odot} c^2$ 的能量在合并过程中以引力

波的形式辐射出去。用匹配过滤器观测到这个事例,组合信号噪声比 $SNR=24$,误报率小于每20300年1次,相应于显著性 5.1σ 。该信号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对GW150914有响应3分钟时它给出了警示。

随后,用匹配过滤器对该

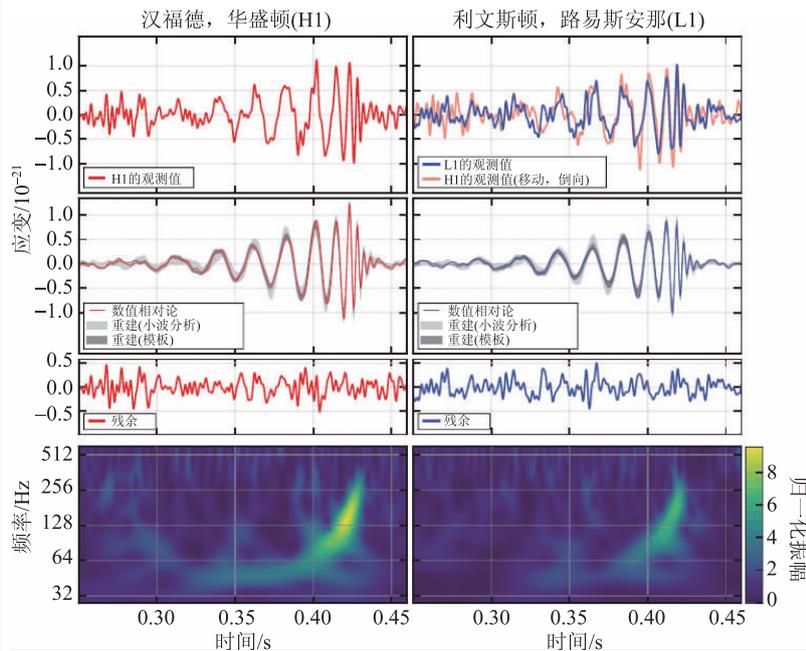


图6 Advanced LIGO H1和L1探测到的引力波信号波形^[15]

事例进行了详细分析,复原了这个事例,这个匹配过滤器是专门为研究致密双星引力波波形而设计的。GW150914 在两个场地间的传播时间在 10 ms 以内。由于 Virgo 还没有完成升级改造, GEO 虽然正在运转但未处于观测模式,所以都没有探测到这个事例,仅利用 H1 和 L1 两个探测器的时间差,可以把该波源的位置确定在一个面积为 600 deg^2 区域内。在位于汉福德的高级激光干涉仪引力波 H1 和位于利文斯顿的探测器 L1 上探测到的引力波信号及探测器的本底波形如图 6 所示。

图 6 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(蓝色),为了便于观看,所有时间序列数据都用一个带宽为 35—350 Hz 的带通滤波器进行了过滤,以便压低探测器最灵敏的频带外的大涨落,同时也使用了频带拟制过滤器,以便移走很强的仪器谱线。第一排左图为 H1 的应变曲线,第一排右图为 L1 的应变曲线, GW150914 首先到达 L1,并在 $6.9_{-0.4}^{+0.5}$ ms 后到达 H1,这个时间差与两个探测器之间的距离相符,并表明引力波是从南部天区传来的。

为了进行直观比较,在把 H1 数据移动了时间差 $6.9_{-0.4}^{+0.5}$ ms 后也画在 L1 的应变曲线上。图 6 第二排表示在 35—350 Hz 频带内每个探测器上的应变曲线。实线是一个双星旋绕系统的数值相对论波形,这个系统具有的参数与从 GW150914 复原的参数一致。深灰色曲线是用双黑洞模板波形模拟了测得的信号重建的,浅灰色曲线没有使用天体物理模型,而是像正弦高斯小波的线性组合那样计算应变信号重建的。这些重建的应变曲线有 94% 是重叠的。第三排是从过滤后的探测器输出的时间序列波形减去过滤后的数值相对论波形后残存的波形。第四排表示的是应变数据的时间—频率曲线,给出信号频率随时间增加的情形(图 6 来源于 LIGO)。

4.2 双黑洞旋绕系统的确立

根据 GW150914 的性质可以说明它是由双黑

洞坍缩产生的,即相互旋绕的双黑洞在轨道旋近、合并最后形成单个黑洞衰荡时产生的。实验表明,在 0.2 s 内信号经历 8 次循环,频率从 35 Hz 增加到 150 Hz,幅度也增加到最大值。这种演变看起来最有道理的解释是,两个质量体 m_1 和 m_2 在做轨道旋绕时发射引力波造成的。在频率较低时,这种演变以所谓“鸟鸣”质量 \bar{M} 来表征:

$$\bar{M} = \frac{(m_1 m_2)^{3/5}}{(m_1 + m_2)^{1/5}} = \frac{c^3}{G} \left[\frac{5}{96} \pi^{-8/3} f^{-11/3} \dot{f} \right]^{3/5},$$

公式中 f 和 \dot{f} 是观测到的频率及其对时间的导数, G 是万有引力常数, c 是光速。从图 6 中的数据我们可以估算 f 和 \dot{f} 的值,从而得到“鸟鸣”质量 $\bar{M} \approx 30 M_\odot$, 这暗示在探测器框架内,双黑洞的质量和 M 为

$$M \approx m_1 + m_2 \geq 70 M_\odot,$$

式中 m_1 和 m_2 分别是双黑洞系统中两个子黑洞的质量。这个数值把双黑洞组份的史瓦西半径的和界定为 $2GM/c^2 \geq 210 \text{ km}$, 为了达到 75 Hz 的轨道频率,两个质量体必须已经靠得很近,而且必须非常致密。两个在这个频率上做轨道运动的相等的牛顿点质量应该分开大约 350 km, 一对致密的中子星没有上面要求的那样大的质量,而具有上面推导出的“鸟鸣”质量数值的中子星—黑洞系统需要有非常大的总质量,而且也由于这个原因,应该在非常低的频率上合并。这样,测得的引力波事例就只剩下双黑洞系统一种可能。它与实验结果相符合: 它们足够致密以达到 75 Hz 的轨道频率而又不相互接触,再者,在达到峰值以后,波形的衰变也与最终形成的稳定的科尔黑洞的阻尼震荡相符合。

4.3 旋近双星系统与引力波发射

LIGO 合作组宣称,他们探测到的引力波是两个相互旋绕的黑洞在旋绕、靠近进而合并成一个新黑洞的过程中发射的。相互旋绕的致密双星是宇宙空间中最丰富的引力波源,这种双星主要包括中子星—中子星,中子星—黑洞,黑洞—黑洞。根据广义相对论计算可知,在两个黑洞相互

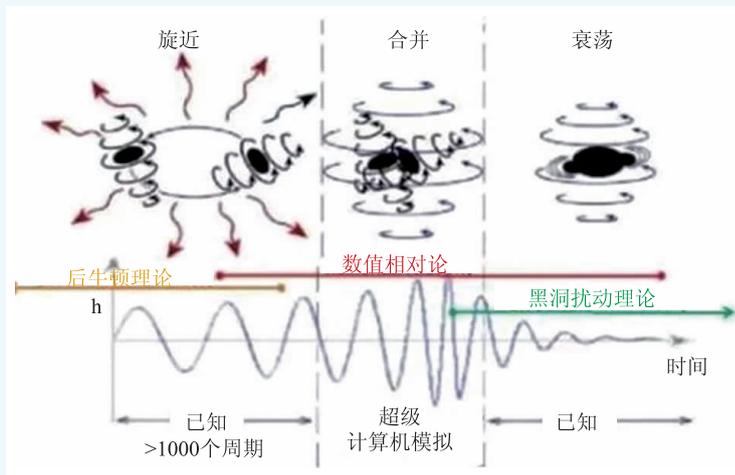


图7 密近双星的旋近、合并和衰荡阶段辐射的引力波波形示意图

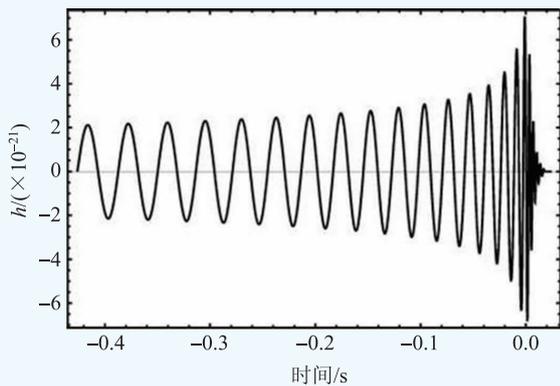


图8 相互旋绕的双黑洞系统发射的引力波信号波形示意图

接近绕转的过程中，系统的质量四极矩会随时间变化，因此会不断向外辐射引力波，而引力波的辐射会把两个黑洞之间的引力势能降低，损失系统的轨道能量，使两黑洞越来越靠近。随着两个黑洞的距离变小，它们之间相互绕转的频率会变得更高，所辐射的引力波的振幅也越来越大，最后两个黑洞相互碰撞进而合并在一起。计算表明，双黑洞系统辐射的引力波的功率是如此之大，以致于一个彼此相距几千米的双星，会在几分钟甚至几秒钟或更短的时间完成上述过程。其物理图像如图7所示。

下面对各个阶段做简要的介绍：

4.3.1 旋绕阶段

在旋绕阶段，由于引力辐射带走能量，密近双星的旋绕轨道逐渐从椭圆变成圆形。其辐射的引力波频率也逐渐进入我们在地球上建立的探测

器的测量范围之内。在此阶段，由于引力辐射不断带走轨道能量，旋绕轨道不断收缩，引力波幅度增大，频率也不断增高。发射的引力波波形具有“鸟鸣”（chirp）信号特征（图8）。这个阶段的物理图像是清楚的，可以根据动力学公式精确地计算出它辐射的引力波的信息。

4.3.2 合并阶段

第二阶段是合并阶段，当双星的旋绕轨道达到最内稳定圆时，两个星体将动态地合并在一起，合并过程的引力辐射是剧烈的、爆发性的。合并阶段的物理机制我们是不知道的，只能根据自己的知识和经验，建立物理模型，利用超级计算机进行模拟计算，估计出该阶段发射的引力波波形。这时的引力波携带大量与星体内部结构和质量有关的信息，为研究此类天体的内部结构和特性参数提供有用的数据。

4.3.3 余波阶段(或称衰荡阶段)

当两个黑洞合并成高速旋转的科尔黑洞时，其发射的引力波具有“余波”特点，幅度逐渐衰减，类似于摇铃后铃声逐渐变小直至消失的情况。它会给出并合体的质量、自旋等信息。

5 引力波天文学

天文学的观测基于天体辐射，由于引力辐射独特的产生机制和性能，引力波天文学具有很多鲜明的特点：

5 引力波天文学

天文学的观测基于天体辐射，由于引力辐射独特的产生机制和性能，引力波天文学具有很多鲜明的特点：

(1)引力波是物质运动或物质体系的质量分布发生变化时产生的，它直接联系着波源整体的宏观运动，而电磁辐射来自天体源分子、原子的激发，因此引力辐射所揭示的信息与电磁辐射观测到的完全不同，它能告诉我们天体源整体结构和宏观运动的状态与规律。

(2)引力波在传播过程中，基本上不被吸收、不被散射、不被屏蔽，它可以将观测领域扩大到被宇宙尘埃弄暗、或被其他物质屏蔽的宇宙区

域,发现新的天体和物质体系,更加明晰地揭示宇宙真面目。引力波能向我们提供天体源深处、高密度部分所发生的物理过程的完整信息,揭示天体的内部构造和内部物质运动状态,而发自天体源深处的电磁辐射全部或部分地丧失了这些信息。

(3)宇宙空间中很多引人注目的天文事件,如超新星爆发、星体碰撞、双星并合、脉冲星转动、黑洞扰动等剧烈的天文过程可能会以引力波形式释放相当强的能流,探测到这些引力波,则可以获取这些剧烈过程的完整的、独特的信息。

(4)理论计算表明,宇宙中普通物质约占4.9%,暗物质约占26.8%,暗能量约占68.3%。这就是说,我们所知的宇宙中所有的质量,包括已知的星体、尘埃、气体等,还不足用来解释星体运动所需质量的1/10。由于引力波与大质量天体密切相关,而且能探测没有电磁辐射的、传统的电磁辐射天文学没法探测的天体及暗物质、黑洞等,引力波天文学的研究将给我们提供破解这一难题的机会。

(5)电磁辐射天文望远镜只能观测天空的一小部分,而且光学望远镜一般都在晴朗的夜间工作。从遥远天体发射的电磁辐射必须穿过大气层才能到达地面,大气层对电磁波的很多波段会产生强烈的吸收,使得大气层对这些波是不透明的。在地面上就接收不到这些波段的天体辐射,因此,电磁辐射天文学只能通过对可见光、射电波和部分波段的红外线等透明的大气窗口进行观察和测量。引力波探测器则不同,它能够对整个天空进行探测。除了在晴朗的夜间工作外,引力辐射探测器在阴雨天气和白天都能正常运转,它甚至能够探测从地球的另一面穿透而来的引力波信号。再者,大气层对任何频率的引力波都是透明的,不需要开设特殊的窗口。它是一种全天候、全方位、宽频带的探测器。

(6)根据宇宙大爆炸理论,引力波是在大爆炸 10^{-43} s与物质分离的,是随机背景引力波的重要组成部分。而在大爆炸后 10^{-34} s发生的暴涨过程中产生的引力波会在宇宙微波背景中产生B模偏振,它

们的探测能给我们提供宇宙最早状态的信息。

(7)引力波天文学将揭示大量的、不能用我们现有的思维去预测的新类型的天体和新类型的天文现象,提供一幅与电磁辐射天文学完全不同的太空画面,带来对宇宙结构及其进化的全新理解。电磁辐射天文学和引力波天文学同属天文学研究,是一个领域中的两大研究体系,你中有我,我中有你,不可分。电磁辐射天文学的观测手段是电磁辐射,包括射电、红外线、可见光、紫外线、X射线、伽玛射线等,探测方法属于“类像”探测,引力波天文学的观测手段是引力辐射,引力辐射不具有电磁辐射的特性,它的波长可以与天体的尺寸相比拟,既不能用眼睛看,也不能用来照相或在电子屏上显示。引力波的频率范围很广,涵盖整个声音频率,它的探测方法属于“类声”探测。引力波天文学的数据处理和和研究手段和声波探测一样,用的是波形分析法。

“音”和“像”是宇宙表象的两个方面,引力波天文学和电磁辐射天文学分别研究宇宙的这两个方面。有声有色的宇宙才是真实的宇宙和完美的宇宙。因此,引力波天文学和电磁辐射天文学的研究领域和研究内容是统一的、兼容的,新兴的引力波天文学是传统的电磁辐射天文学的巨大拓展和补充。

6 结束语

引力波是爱因斯坦“广义相对论”的重要预言,引力波探测经历了艰难而曲折的过程。激光干涉仪引力波探测器的出现给引力波探测带来巨大的希望并直接导致引力波的发现。当前,激光干涉仪引力波探测器的研发、建造已在世界各地蓬勃发展起来,引力波天文学的研究进入一个崭新的阶段。激光干涉仪引力波探测器的快速发展也引起了中国科学家的强烈关注,2004年就对它进行过研讨并提出了自己的建造方案。北京师范大学、清华大学、中国科学技术大学、中国计量科学研究院与西澳大利亚大学成立了国际合作组,致力于激光干涉仪引力波探测器的新技术、

CIOE | 中国光博会

18th

中国国际光电博览会
CHINA INTERNATIONAL
OPTOELECTRONIC
EXPO

 **精密光学展**
镜头及摄像模组展
PRECISION OPTICS,
LENS & CAMERA MODULE EXPO

2016.9.6-9
深圳会展中心

 CIOE官方应用

 CIOE官方微信

**全球规模领先的
光学大展**

同期展会

 OPTICAL COMMUNICATIONS EXPO
光通信展

 LASERS INFRARED APPLICATIONS EXPO
激光红外展

 LED Technia
技术及应用展

 Smartcity China
中国智慧城市
创新产业大会

同期论坛

 中国国际光电高峰论坛
CHINA INTERNATIONAL
OPTOELECTRONIC CONFERENCE

了解更多展会信息, 请详询:

 **0755-86290901**

 **CIOE@CIOE.CN**

WWW.CIOE.CN

新工艺的研究, 在国内学术刊物上发表了多篇综述性文章^[14, 17, 18], 对引力波天文学和激光干涉仪引力波探测器进行系统介绍。北京师范大学是日本引力波项目 KAGRA 的中方中心合作单位, 多年来注重引力波人才培养, 早在 2009 年, 北京师范大学天文系就在国内首先开设了“引力波天文学导论”课程, 并多次在国内组织引力波国际研讨会和暑期讲习班, 该校毕业生中有 5 人是本次发现引力波文章的作者。我们相信, 伟大的中华民族一定会在引力波天文学这一新兴的科学领域占有一席之地, 以激光干涉仪引力波探测器为基础的引力波天文台也一定会在我国建立起来。

参考文献

- [1] Weber J. Phys. Rev., 1960, 117:306
- [2] Weber J *et al.* Phys. Rev. Lett., 1969, 22:1320
- [3] Weber J *et al.* Phys. Rev. Lett., 1970, 24:276
- [4] Hulse R A, Taylor J H. Astrophysics J., 1974, 191:L59
- [5] Hulse R A, Taylor J H. Astrophysics J., 1975, 195:L51
- [6] Taylor J H *et al.* Nature, 1979, 227:437
- [7] Forward R L. Phys. Rev. D, 1978, 17:379
- [8] Weiss R *et al.* Anenna Quart. Progr. Rep., 1972, 105:54
- [9] Moss G E, Miller L R, Forward R L *et al.* Appl. Opt., 1971, 10:2495
- [10] Drever R W P *et al.* Proceedings of the NATO Advanced Study Institute. Aug. 16, Badwindsheim, Germany
- [11] The VIRGO Collaboration. VIRGO Final Design Report, VIR- TRE 1000-13, 1997
- [12] Danzmann K *et al.* MPQ Report, 1994, 190:9
- [13] Takahashi R *et al.* Phys. Lett. A, 1994, 187:157
- [14] 王运永, 朱宗宏等. 现代物理知识, 2013, 25(4):25
- [15] Abbott B P *et al.* Phys. Rev. Lett., 2016, 116:061102
- [16] BICEP2 Collaboration. BICIP2I: Detection of B-mode Polarization at Degree Angular Scales, arXiv:submit/0934233 [astro-ph.CO]17, Mar. 2014
- [17] 王运永, 朱宗宏等. 天文学进展, 2014, 32(3):348
- [18] 王小鸽, 朱宗宏, 王运永等. 天文学进展, 2016, 34(1):50