

2016年6月11日

## 二元黑洞合并引力波的观测

B. P. Abbott 等人 (LIGO 科学合作组织和 Virgo 合作组织 (2016 年 1 月 21 日收到; 2016 年 2 月 11 日发表))

2015 年 9 月 14 日 09:50:45

UTC, 激光干涉仪引力观测站的两个探测器同时观测到瞬态引力波信号。该信号在 35 至 250 Hz 的频率范围内向上扫, 重力波应变峰值为  $1.0 \times 10^{-21}$ 。它与广义相对论预测的一对黑洞的吸气和合并以及由此产生的单个黑洞的衰荡波相匹配。用匹配的滤波器信噪比 24 观察到信号, 估计每 203000 年报警率小于 1 个事件, 相当于显著性大于 5.1。源位于  $410 \times 160 - 180$  Mpc 的光度距离处, 对应红移  $z = 0.09 \pm 0.0$ 。在源坐标系中, 初始黑洞质量为  $36 \times 5 - 4$  M 和  $29 \times 4 - 4$  M, 最终黑洞质量为  $62 \times 4 - 4$  M, 其中  $3.0 \times 0.5 - 0.5$  M  $c^2$  以引力波辐射。所有的不确定性都定义了 90% 的可信区间。这些观测结果证明了双星质量黑洞系统的存在。这是首次直接探测到引力波, 也是首次观测到二元黑洞合并。内政部: 10.1103/PhysRevLett.116.061102

决赛后的一年

根据广义相对论方程, 阿尔伯特·爱因斯坦预测了引力波的存在。他发现线性化弱场方程具有波动解, 即以光速传播的空间应变横波, 由源的质量四极矩的时间变化产生 [1, 2]。爱因斯坦明白引力波振幅会非常小; 此外, 在 1957 年教堂山会议之前, 关于引力波的物理性存在重大争论 [3]。同样在 1916 年, 史瓦西发表了  $thf$   $ield$  方程的解 [4], 后来被理解为描述了 1963 年的  $kik$   $h$   $l$  [5, 6] d

黑洞 [5, 6], 1963 年 Kerr 将解推广到旋转黑洞 [7]。从 20 世纪 70 年代开始, 理论工作导致了对黑洞准范模的理解 [8-10], 在 20 世纪 90 年代, 高阶  $pos$   $New$   $ton$  计算 [11] 先于对相对论两体动力学的广泛分析研究 [12, 13]。这些进展, 再加上过去十年数值相对论的突破 [14-16], 使我们能够对二元黑洞合并进行建模, 并对其引力波形进行准确预测。虽然现在已经通过电磁观测确定了许多黑洞候选者 [17-19], 但以前没有观测到黑洞合并。\* 本文末尾给出了完整的作者名单。  $bl$   $h$   $d$   $bh$   $Ahl$   $Sdh$

但这项工作必须归功于  $hbli$   $h$   $di$   $l'i$   $ljl$   $ii$ 

0031-9007 = 16 = 116 (6) = 06110  
2 (16) 0

Hulse 和 Taylor [20] 以及 Taylor 和 Weisberg [21] 的后续观测证明了引力波的存在。这一发现以及新兴的天体物理学理解 [2] 使人们认识到, 直接观测引力波的振幅和相位将有助于研究其他相对论系统, 并为广义相对论提供有力的证据, 特别是在动态强场机制下。探测引力波的实验始于 20 世纪 60 年代的韦伯和他的共振质量探测器 [22-24]  $biilkfi$

随后是国际低温雷诺探测器网络 [24]。干涉探测器是在 20 世纪 60 年代初 [25] 和 70 年代 [26] 对此类探测器的噪声和性能进行研究 [2] 以及改进它们的进一步概念 [28] 时提出的, 并提出了具有显著提高灵敏度潜力的长基线宽带激光干涉仪的建议 [29-32]。到 21 世纪初, 完成了一系列初步探测, 包括日本的 TAMA 300、德国的 GEO

6、美国的激光干涉仪引力观测站 (LIGO) 和意大利的处女座。从 2002 年到 2011 年, 这些探测器的组合进行了联合观测, 在全球网络演变的同时设定了引力波源的上限。2015 年, 高级 LIGO 成为第一个开始观测的更敏感的高级探测器网络 [33-36]。在 Einstein

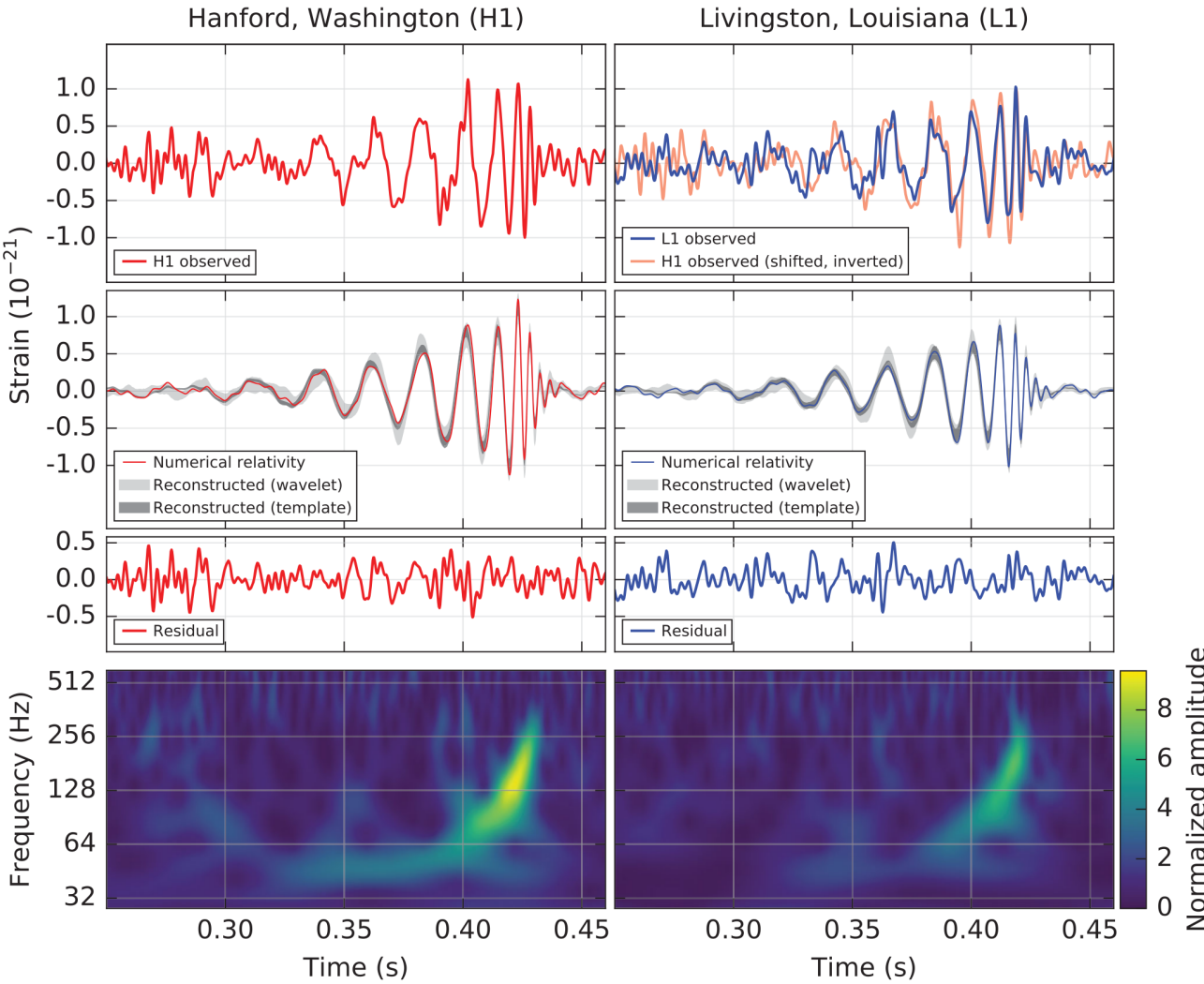
Schwarzschild 的基本预测一个世纪后, 我们报告了第一个直接探测到的引力波和第一个直接观测到的二元黑洞系统合并形成一个单一的黑洞。二元黑洞系统合并形成单个黑洞。我们的观察为美国物理学会发布的 02-1 提供了独特的访问途径

强场、高速区时空的性质，证实了广义相对论对高扰动黑洞  $t h n o n l i n e a r$  动力学的预测。

二、观测

2015年9月14日09:50:45  
UTC，华盛顿州 L I G Hanford 和洛杉矶 L i v i n g s t o n 天文台探测到

图 1 所示的重合信号 GW150914。通过低延迟搜索引力波瞬变 [ 4 1 ] 进行了  $i n i d e t e c t i o n$ ，并在三分钟的数据采集 [ 4 3 ] 中进行了报告。使用共对二元波形的相对论模型的分段滤波器分析 [ 4 4 ] 从每个探测器中恢复了 GW150914 作为这里报告的观测中最重要的事件。发生在 10 毫秒内



传播时间，事件的组合信噪比（SNR）为24[45]。第十八代LIGO

当时只有LIGO探测器在观测oGW150914。处女座探测器正在升级，GEO

600虽然不够灵敏，无法探测到这一事件，但正在运行，但未处于观测模式。由于只有两个探测器，主要由相对到达时间确定的源位置被定位到大约600度2的区域（90%可信区域）[39，46]。GW150914的基本特征表明它是

这是由两个黑洞的合并引起的，即它们的轨道吸气和合并，以及随后的最终black hole环化。在0.2秒内，信号的频率和幅度在大约8个周期内从35增加到150 Hz，幅度达到最大值。对这一演化最合理的解释是，由于引力波发射，两个轨道质量 $m_1$ 和 $m_2$ 被激发。在较低

的频率下，这种演化的特征是啁啾质量[11]  $\delta m m_2 \approx 3 = 5 c^3 \quad 5 - 3 = 5$

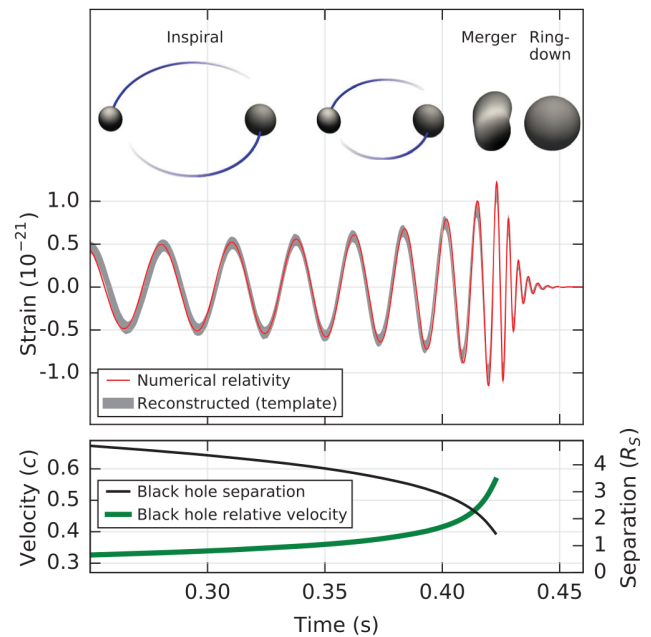
$$\mathcal{M} = \frac{(m_1 m_2)^{3/5}}{(m_1 + m_2)^{1/5}} = \frac{c^3}{G} \left[ \frac{5}{96} \pi^{-8/3} f^{-11/3} \dot{f} \right]^{3/5},$$

导数和G和c是光速的引力常数。根据图中的数据估计 $\dot{f}$ 和 $\ddot{f}$ ，我们得到一个啁啾质量为 $M \approx 30 M_\odot$ ，这意味着探测器框架中的总质量 $M \approx m_1 + m_2 \approx 70 M_\odot$ 。这将二元组分的史瓦西半径之和限制为 $2GM = c^2 \approx 10 \text{ km}$ 。为了达到75 Hz的轨道频率（引力波频率的一半），物体必须非常接近和紧凑；以该频率绕轨道运行的牛顿点质量相等，相距仅约350公里。一对单中子星虽然紧凑，但没有所需的质量，而具有推断出的啁啾质量的黑洞中子星双星将具有非常大的总脉泽，因此会以更低的频率合并。这使得黑洞成为唯一已知的能够在不接触的情况下达到75赫兹轨道频率的物体。此外，波形后峰的衰减与black hole弛豫到最终稳态Kerr构型的阻尼振荡是一致的。下面，我们对GW150914进行了广义相对论分析；图2显示了使用所得源参数计算的波形。III、

DETECTORS引力波天文学利用多种宽波段技术

#### 精神与环境

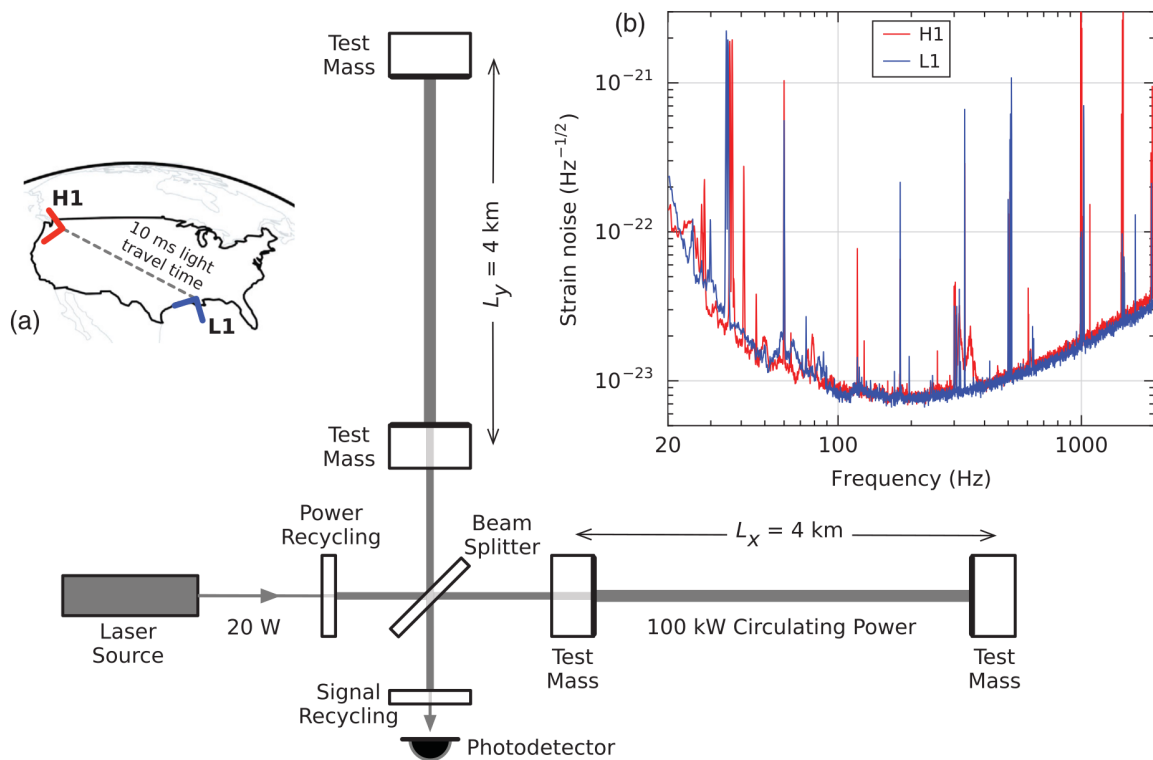
源天空定位和测量波极化LIGO站点每个都运行一个高级LIGO



其正交臂的长度。每个臂由两个镜子组成，作为测试质量，分开 $L_x \approx L_y \approx L/4$

km。经过的引力波有效地改变了臂的长度，使得测量值差为 $\Delta L \approx \frac{1}{2} L \times \frac{1}{2} L \approx \frac{1}{4} h \delta t L$ ，其中h是投影到探测器上的引力波应变振幅。这种差分长度变化改变了返回托贝姆分光器的两个光场之间的相位差，将与引力波应变成比例的光信号传输到输出光电探测器。为了实现足够的灵敏度来测量引力波，探测器包括对基本迈克尔逊干涉仪的几项增强。首先，每只手臂都包含

由其两个测试质量mirror that形成的共振光学腔将引力波对Lip phase的影响乘以300[48]。其次，输入端的部分透射功率回收镜为干涉仪中的激光提供了适当的共振积累[49，50]：入射到分束器上的20瓦激光输入增加到700瓦，在每个臂腔中循环100千瓦。第三，输出端optimi02-3处的部分发射信号回收镜



用振幅、频率和光束几何形状稳定的  $1064\text{ nm}$  波长 Nd:YAG 激光器照射 [53, 54]。使用零差读数在输出端口提取引力波信号 [55]。这些干涉测量技术旨在最大限度地应将应变转换为光信号，从而减轻光子散粒噪声的影响（原理高频噪声）。高应变灵敏度还要求测试块具有低位移噪声，这是通过将其与地震噪声（低频）隔离开来并将其设计为具有低热噪声（中频）来实现的。每个测试质量块都悬挂在四摆系统的最后一级 [56，由主动隔震平台支撑 [57 这些系统共同为  $10\text{ Hz}$  以上的频率提供了超过  $10$  个数量级的地震动隔离。通过在测试质量块中使用低机械损失材料和  $0$

用熔融石英光纤悬挂在上面的平台上 [6] 为了尽量减少额外的噪声源，除激光源外的所有组件都安装在超高真空的隔振平台上，以减少噪声

超高真空中的隔离阶段。为了减少瑞利散射引起的光学相位波动，将包含无腔光束的直径  $1.2\text{ m}$  管中的压力保持在  $1\text{ }\mu\text{ Pa}$  以下。伺服控制用于保持臂腔共振 [61] 并保持光学元件的正确对齐 [62]。探测器输出以  $\text{str}$  为单位进行校准通过测量其对来自调制校准激光器的测试质量运动诱导光子压力的响应 [63]。校准被确定为不确定度（ $1$  振幅小于  $10\%$ ，相位小于  $10^\circ$ ，并用校准激光激励选定的频率持续监测。使用两种替代方法来验证绝对校准，一种参考激光波长，另一种参考射频振荡器  $102 - 4$

[ 6 4 ] . 此外, 通过用校准激光注入模拟波形来测试探测器对重力波的响应。监测环境干扰及其影响

为了监测环境干扰及其对探测器的影响, 每个观测站都配备了一系列传感器: 地震仪、加速计、微型电话、磁力计、无线电接收器、气象传感器、交流电力线监测器和宇宙射线探测器 [ 6 5 ]。另有约105个通道记录干涉测量点和控制系统的状态。D a c o l l e c t i o n 与全球定位系统 ( G P S ) 时间同步, 优于  $10\mu\text{s}$  [ 6 6 ]。每个观测站都用原子钟和辅助 G P S 接收器验证了计时精度。在他们最敏感的频带, 100 - 300 赫兹, 电流

L I G O 探测器对应变的敏感性是初始 L I G O 的 3 到 5 倍 [ 6 7 ] ; 在较低的频率下, 改善更大, 在 60 H z 以下的灵敏度提高了十倍以上。由于探测器对引力波振幅的响应成比例, 在低红移下, 它们敏感的空间体积随着应变灵敏度的立方而增加。对于质量与 GW150914 相似的二元黑洞, 这里报告的观测结果所调查的时空体积比之前的观测结果高出一个数量级 [ 6 8 ]。I V、探测器验证

探测器在 GW150914 周围处于稳态运行状态

特别是它们的平均灵敏度和瞬态噪声行为, 是整个分析期间的典型特征 [ 6 9 , 70 对仪器和环境干扰进行了详尽的调查, 没有证据表明 GW150914 i d b i l i f

表明 GW150914 可能是一个工具性人工智能 [ 6 9 ]。通过测量探测器对特定产生的磁、射频、声和振动激励的响应, 量化了探测器对环境干扰的敏感性。这些测试表明, 任何足以引起观察到的迹象的外部干扰都会被环境传感器阵列清楚地记录下来。与 GW150914 一样, 没有一个环境传感器记录到任何在时间和频率上演变的干扰, 第1秒内包含 GW150914 的所有环境波动都太小, 无法达到其应变幅度的 6 % 以上。特别注意寻找长程相关干扰可能会在两个地点产生几乎同时的信号。没有发现明显的干扰。探测器应变数据表现出由各种仪器机制引起的非高斯噪声瞬态。许多都有明显的特征, 在辅助标签中可见

从我们的分析中删除了对引力波不敏感的数据通道, 如仪器瞬态 [ 6 9 ]。留在数据集中的任何仪器瞬态都在估计的探测器背景中得到了考虑 0

如下所述。没有证据表明仪器瞬变在时间上与 t 检测器相关。

#### V . 搜索

我们对 2015 年 9 月 12 日至 10 月 20 日期间两个 L I G O 探测器之间 16 天的巧合观测结果进行了分析。这是 2016 年 1 月 12 日结束的高级 L I G O 第一次观测任务的数据。GW150914 由两个不同的探测器自信地探测到

搜索类型。一种旨在通过使用由一般相关预测的波形进行最优匹配滤波, 从紧凑对象的合并中恢复信号。另一种搜索目标是广泛的通用瞬态信号, 对波形的假设最小。这些搜索使用独立的方法, 它们的响应检测噪声由不同的、不相关的信号组成。然而, 这两种搜索都预期会检测到来自二元黑洞合并的强信号。每次搜索都会识别出在两个观测站都检测到的候选事件, 这些事件与站点间预测一致

两个观测站的观测结果与站间预测时间一致。事件被分配了一个检测统计数据, 对它们成为引力信号的可能性进行排名。候选事件的重要性由搜索背景决定——检测器不产生检测统计值等于高于候选事件的事件的速率。由于两个原因, 估计这种 b a g r o u n d 具有挑战性: 检测器噪声是非平稳的和非高斯的, 因此其性质由经验确定; 并且不可能将探测器从引力波中转移到直接测量无信号背景。用于估计背景的具体程序对于研究略有不同, 但两者都使用了时移技术: 一个探测器数据的 t i s t a m p s 被人为地偏移了与站点间传播时间相比较大的偏移量, 并且基于时间偏移的数据集产生了一组新的事件。对于探测器之间不相关的仪器噪声, 这是一种有效的背景估计方法。在这个过程中, 一个探测器中的重力波信号可能与另一个探测器的时移噪声瞬变相吻合, 从而有助于背景估计。这导致噪声背景估计过高, 因此对候选事件的重要性进行了更保守的评估。非高斯噪声的特征在不同的时频区域之间有所不同。这意味着标志空间内的海岸背景并不均匀

被搜查。为了最大限度地提高灵敏度并提供事件重要性的估计值, 搜索将背景估计值及其事件候选者根据其时频形态分为不同的类别。候选事件的重要性是根据其类别的背景来衡量的。为了解释搜索 02 - 5

如果存在多个类别，则这种重要性会降低一个等于类别数量的三因子 [ 71 ]。

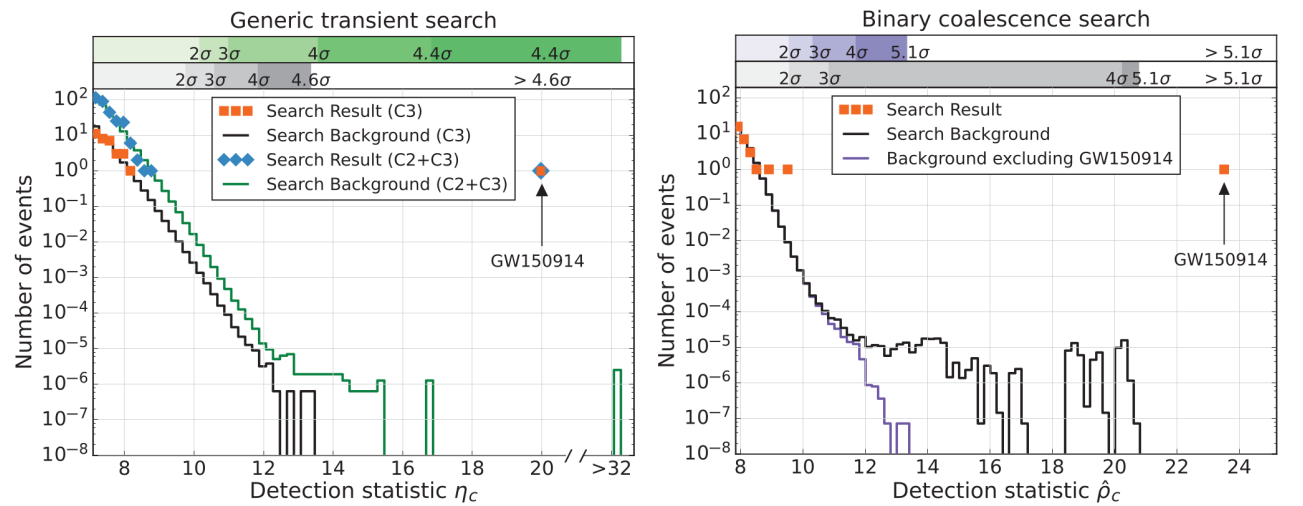
A . 通用瞬态搜索

设计用于在没有特定波形模式的情况下运行，该搜索在信号频率高达 1 k H z 和持续时间长达几秒钟的情况下，在探测器应变 d a 的时频表示中识别出重合的过量功率 [ 43 , 72 ]。搜索重建信号波形一致

g 使用多探测器最大似然法在两个探测器中都有一个共同的引力波信号。E a c e v e n t 根据检测统计量 c % e f f i c i e n c y e f f i c i e n c y a f f i c i e n c y e f f i c i e n c y i n f i c i e n c y 2 E c = δ 1 " E n = E c p p 进行排名，其中 E c 是通过互相关两个重建波形获得的相干信号能量，E n 是从数据中减去重建信号后的剩余噪声能量。因此，统计量 c 量化了事件的信噪比和两个探测器之间数据的一致性。根据它们的时频形态，偶数被分为三个互斥的搜索类 a 分为三个互斥的搜索类，如 [ 41 ] 所述：具有已知噪声瞬变群体的时频形态的事件（C 1 类），甚至具有随时间增加的频率的事件（C 3 类），以及持续事件（C 2 类）。

检测到 c % 20 . 0 时，GW150914 是整个搜索中的最强事件。与它的合并信号特征一致，它出现在具有增加时频演化的 e v e 的搜索类 C 3 中。测量的背景相当于 6 7 4 0 0 多年的数据，包括用于解释海洋等级的试验系数 3，其误报率低于 2 2 5 0 0 年中的 1。这对应于在分析时间内观测到一个或多个与 GW150914 一样强的噪声事件的概率 < 2 × 1 0 − 6，相当于 4 . 6 。左侧面板图。4 显示了 C 3 类的结果和背景。定义搜索类的选择标准

通过在信号形态上引入约束来减少背景。为了说明 GW150914 在具有仲裁的事件背景下的重要性，我们还展示了使用上述事件集但具有此约束的搜索结果。具体来说，我们只使用两个搜索类——C 1 类和 C 2 与 C 3 类的并集（C 2 c 在这两个类搜索中，GW150914 事件被发现为 C 2 C 3 类。图 4 的左侧面板显示了 C 2 C 4 类的结果和背景。在这个类的背景中，有四个事件的 c % 32 . 1，GW150914 的误报率为 8 4 0 0 年内的 1。T 对应于 5 × 1 的误报概率，相当于 4 . 4 。





为了鲁棒性和验证性，我们还使用了其他通用瞬态搜索算法 [ 4 1 ]。不同的搜索 [ 7 3 ] 和参数估计随访 [ 7 4 ] 检测到 GW 1 5 0 9 1 具有一致的显著性和信号参数。

## B . 二元聚结研究

该搜索针对的是单个质量为 1 至 9 9 M<sub>☉</sub>、总质量小于 1 0 0 M<sub>☉</sub>、无量纲自旋高达  $t_{0.99}$  [ 4 4 ] 的双星系统的引力波发射。为了模拟总质量大于  $t_{ha} 4 M_{☉}$  的系统，我们使用了有效的单体形式 [ 7 5 ]，该形式将后牛顿方法 [ 1 1, 7 6 ] 的结果与黑洞微扰理论和数值相对论的结果相结合。波形模型 [ 7 7, 7 8 ] 假设合并物体的自旋与轨道角动量对齐，但模板的结果仍然可以有效地恢复参数区域 GW 1 5 0 9 1 4 [ 4 4 ] 中自旋错位的系统。大约有 2 5 0 0 0 0 个模板 *w a v f o r m s* 用于覆盖这个参数空间。搜索计算每个检测器中每个模板的匹配滤波器信噪比  $\rho_{t,p}$ ，并识别

每个检测器中每个模板的比率  $\rho_{t,p}$ ，以及  $\rho_{t,p}$ ；相对于符号到达时间的最大值 [ 7 9 - 8 1 ]。对于每个最大值，我们计算一个卡方统计  $\chi^2_r$ ，以测试几个不同频带中的数据是否与匹配的模板一致 [ 8 2 ]。 $\chi^2_r$  接近 1 的值表明信号与合并一致。如果  $\chi^2_r$  大于 1，则  $\rho$  被重新加权为  $\hat{\rho} = \rho / \chi^2_r$ 。 $f_{instep}$  通过选择出现在 1 5 m s 窗口内且来自同一模板的事件对来强制检测器之间的一致性。1 5 m s 的窗口由 1 0 m s 的站点间传播时间加上 5 m s 的弱信号不确定性竞争时间决定。我们根据两个探测器的  $\rho$  的正交和  $\rho_c$  对重合事件进行排序 [ 4 5 ] 为了产生本次搜索的背景数据，对一个探测器的  $S/N_{max}$  值进行时移，并计算一组新的入射事件。重复此过程计算重合事件。重复该过程约 1 0 7 次，产生的噪声背景分析时间相当于 6 0 8

0 0 0 年。为了解释搜索背景噪声在目标信号空间中的变化，根据模板长度将候选和背景事件分为三个搜索类

图 4 的右侧面板显示了 GW 1 5 0 9 1 4 搜索类的背景。GW 1 5 0 9 1 4 的  $\hat{\rho}_c / 2.3 \cdot 6$  的检测统计值大于任何背景值，因此只能对其 *f a l s a l a r m* 率设置上限。在三个搜索类别中，这个界限是  $1.2 \times 10^3$  万年。这转化为误报概率  $< 2 \times 10^{-7}$ ，对应于  $5.1 \sigma$ 。第二个独立的匹配滤波器分析使用不同的方法来估计结果的显著性 [ 8 5, 8 6 ]，也检测到 GW 1 5 0 9 1 4 具有相同的信号参数和一致的显著性

信号参数和一致显著性。 0

表 I . GW 1 5 0 9 1 4 的源参数。我们用 9 0 % 可信区间重新表示中值，其中包括统计误差和不同波形模型平均结果的系统误差。弥撒在 *s o u f r a m e* 中进行；转换为探测器帧乘以  $(1 \div [ 9 0 ])$ 。源红移假设标准宇宙学 [ 9 1 ]

Primary black hole mass	$36^{+5}_{-4} M_{\odot}$
Secondary black hole mass	$29^{+4}_{-4} M_{\odot}$
Final black hole mass	$62^{+4}_{-4} M_{\odot}$
Final black hole spin	$0.67^{+0.05}_{-0.07}$
Luminosity distance	$410^{+160}_{-180} \text{ Mpc}$
Source redshift $z$	$0.09^{+0.03}_{-0.04}$

引力波信号，如 GW 1 5 0 9 1 4，用于确定其他事件重要性的 *b a g r o u n d*，在没有该事件贡献的情况下重新估计。背景分布如图 4 右侧面板中的紫色线所示。在此基础上，第二次重大事件的误报率为每 2 . 3 年 1 次，相应的泊松误报概率为 0。对这一事件的波形分析表明，如果起源于灾难物理，它也是一个二元黑 *h m e r g e r* [ 4 4 ]。V I、来源讨论

匹配的过滤器搜索是优化的，但它只提供近似值

源参数。为了改进它们，我们使用基于一般性的模型 [ 7 7, 7 8, 8 7, 8 8 ]，其中一些包括自旋进动，并对每个模型进行相干贝叶斯分析，以得出源参数的后验分布 [ 8 9 ]。表 I 显示了源的初始和最终质量最终自旋、距离和红移。主黑洞的自旋被限制在  $< 0.7$  ( 9 0 % 可信区间 )，表明它是最大自旋的，而次黑洞的自旋则受到限制。[ 3 9 ] 中详细讨论了这些源参数。参数不确定性包括不同波形模型平均结果的统计误差和系统误差。使用 [ 9 2, 9 3 ] 中二元黑洞合并的数值模拟拟合，我们提供了最终黑洞的 *m a n d* 自旋、总能量 *r a d i a* 的估计值

引力波和峰值引力光度 [ 3 9 ]。估计的总能量辐射引力波为  $3.0 \times 0.5 - 0.5 M_{☉} c^2$ 。该系统达到  $3.6 \times 0.5 - 0.4 \times 10^5 6$  的峰值引力波光度，相当于  $200 \times 30 - 20 M_{☉} c^2 = s$ 。已经进行了几次分析，以确定 GW 1 5 0 9 1 4 是否与 *b i n* 一致

广义相对论中的黑洞系统 [ 9 4 ]。首次一致性检验涉及  
 黑洞的质量和自旋。在广义相对论中，布拉乔尔双星合  
 并的最终产物是克尔黑洞，它完全由其质量和自旋来描述  
 。对于准圆形的黑洞，爱因斯坦方程唯一地预测了它们是  
 两个黑洞的质量和自旋的函数。使用校准到数值相对论模  
 拟的拟合公式 [ 9 2 ]，我们验证了从合并早期推断出的  
 $remnanmass$  和自旋与独立于最后阶段推断出的  
 $remnanmass$  and  
 $spin$  是一致的，没有证据表明与广义相对论不一致。  
 在后牛顿形式主义中

吸气过程中的重力波形可以表示为  $f_1 = 3$  的幂级数。这  
 个膨胀系数可以用广义相对论来计算。因此，我们可以通  
 过允许系数偏离标称值来测试广义相对论 [ 9 5 , 9 6 ]  
 的一致性，并查看得到的波形是否与数据一致。在第二次  
 检查 [ 9 4 ] 中，我们对这些偏差施加了约束，没有发现  
 违反广义相对论的证据。最后，假设引力波的色散关系经  
 过修改 [ 9 7 ]，我们的观测约束了

引力波 [ 9 7 ]，我们的观测将引力子的康普顿波长限制  
 为  $\lambda_g > 1.0 \times 10^{13} \text{ km}$ ，这可以解释为引力子  $m_{asmg} < 1.2 \times 10^{-22} \text{ eV} = c^2$  的束缚。这分别将太阳  
 系和双星脉冲星界 [ 9 8 , 9 9 ] 提高了几千倍，但并没  
 有改善从星系团动力学 [ 1 0 0 ] 和弱透镜观测 [ 1 0 1  
 ] 中得出的依赖于模式的界。总之，这三个测试都与广义  
 相对论在引力强场区的预测一致。GW 1 5 0 9 1 4 证明  
 了质量大于  $2.5 M_\odot$  的恒星脉泽黑洞的存在，并建立了  
 恒星脉泽的理论基础

双星黑洞可以在自然界中形成，并在哈勃时间内合并。据  
 预测，二元黑洞既可以在孤立的二元星系 [ 1 0 2 - 1 0  
 4 ] 中形成，也可以在稠密的环境中通过动力学相互作用  
 [ 1 0 5 - 1 0 7 ] 形成。恒星演化形成如此大质量的黑  
 洞需要弱的大质量恒星风，这在金属丰度低于太阳值  $Z = 2$   
 的恒星环境中是可能的 [ 1 0 8 1 0 9 ]。 [ 1 1 0  
 ] 中讨论了二元黑洞发现的进一步天体物理学意义。这些  
 观测结果限制了局部宇宙中星状双星黑洞合并的速率。使  
 用几种不同的潜在二元黑 h o 模型

在质量分布中，我们得到的速率估计范围为  $2 - 4 \times 10^{-3}$   
 $\text{Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$ ，在共动框架中 [ 1 1 1 - 1 1 3 ]。这与 [ 1  
 1 4 ] 中广泛的事件率预测一致，仅排除了最低的事件率  
 。较大距离的二元黑洞系统通过未解析系统的叠加产生了  
 引力波的随机背景。对此的预测

背景见 [ 1 1 5 ]。如果探测到来自次级粒子群的信号，  
 它将提供有关宇宙历史上此类二元系统演化的信息。

## 七、OUTLOOK

有关这些结果和相关数据的更多详细信息，请参阅 [ 1 1  
 6 ]。第一个观测期的分析结果将在未来的出版物中报告  
 。目前正在努力显著增强全球引力波探测器网络 [ 1 1  
 ，其中包括进一步调试高级 L I G O 探测器以达到设计灵敏  
 度，这将使 GW 1 5 0 9 1 4 等双星的探测信噪比提高 3  
 倍。此外，印度可能的第三个 L I G O 探测器 A d v a n  
 c e d  
 V i r g o、K A G R A [ 1 1 8 ] 将扩展该网络，并显  
 著改善源的位置重建和参数估计。

GO探测器已经观察到

来自两个恒星质量黑洞的合并。T 检测到的波形与一对黑  
 洞的吸气和合并以及由此产生的单个黑洞的衰荡的发生率  
 预测相匹配。这些观测结果证明了双星质量黑洞系统的存  
 在。这是第一次直接探测引力波，也是第一次观测到双星  
 黑洞合并。致谢

美国国家科学院

L I G O 实验室和高级 L I G O 实验室的建设和运营，以  
 及英国科学技术设施委员会 ( S T F C )、马克斯·普朗  
 克学会 ( M P S ) 和德国 S t o f  
 N i e d e r s a c h s e n，以支持高级 L I G O 的建  
 设和 G E O  
 6 0 0 探测器的建设和运行。澳大利亚研究委员会为 A d  
 v a n c e d  
 L I G 提供了额外的支持。T a u t h o r s 非常了解意  
 大利国家核物理研究所 ( I N F N )、法国国家科学研究  
 中心 ( C N R S ) 和荷兰科学研究组织物质供应基础研究  
 基金会关于 V i r g o 探测器的建造和运行，以创建和支  
 持 E G O 联盟。T a u t h o r s 还衷心感谢这些机构以  
 及印度科学工业研究委员会科学部 a 0 2 - 8 的研究支持





[50] R. 席林 (未发表)。[51] B. J. Meers, 《物理学》。修订版 D 382317 (1988年)。[52] 水野, K. A. 斯特林, P. G. Nelson, J. M. Chen, Rüdiger, W. Winkler 和 K. Danzmann Phys. Lett. A 175273 (1993年)。[53] P. Kwee 等人, 选择。快速 2010617 (2012)。[54] C. L. Mueller 等人, 《科学评论》。Instrum. 87, 01450 (2016)。[55] T. T. Fricke 等人, 经典量子引力 2906500 (2012)。[56] S. M. Aston 等人, 经典量子引力 2923500 (2012)。[57] F. Matichard 等人, 经典量子引力 3218500 (2015)。[58] G. M. Harry 等人, 《经典量子引力》24, 40 (2007)。[59] M. Granata 等人, 《物理学》。修订版 D 93012007 (2016)。[60] A. V. Cumming 等人, 经典量子引力 29035003 (2012)。[61] A. Staley 等人, 经典量子引力 3124501 (2014)。[62] L. Barsotti, M. Evans 和 P. Fritschel, 《经典量子引力》27084026 (2010)。[63] B. Abbott 等人, arXiv:1602.03845。[64] E. Goetz 等人, 载于《引力波: 第八届 Edoardo Amaldi 会议论文集》, Amaldi, New York 2009; E. Goetz 和 R. L. Savage Jr., 《经典量子引力》27084024 (2010)。[65] A. 埃夫勒, R. M. S. 斯科菲尔德, V. V. 弗罗洛夫, G. 冈萨雷斯, K. Kawabe, J. R. 史密斯, J. 伯奇和 R. 麦卡锡, 《经典量子引力》320035017 (2015)。[66] I. Bartos, R. Bork, M. Factourovich, J. Heifner, S. Márk Z. Márka, Z. Raics, P. Schwinberg 和 D. Sigg, 《经典量子引力》27084025 (2010)。[67] J. Aasi 等人, 经典量子引力 3211501 (2015)。[68] J. Aasi 等人, 《物理学》。修订版 D 87022002 (2013)。[69] B. Abbott 等人, arXiv:1602.03844。[70] L. Nuttall 等人, 经典量子引力 3224500 (2015)。[71] L. 莱昂斯, 安。《法律总汇》第 2887 页 (2008年)。[72] S. Klimenko, I. Yakushin, A. Mercer 和 G. Mitselmakher 经典量子引力 25114029 (2008)。[73] R. Lynch, S. Vitale, R. Essick, E. Katsavounidis 和 F. Robinet, arXiv:1511.05955。[74] J. Kanner, T. B. Littenberg, N. Cornish, M. Millhouse, X. Hajaj, F. Salemi, M. Drago, G. Vedovato 和 S. Klimenko, 《物理学》。修订版 D 93022002 (2016)。[75] A. Buonanno 和 T. Damour, 物理学。第 D 版, 第 62 卷, 第 06401 页 (2000年)。[76] L. Blanchet, T. Damour, G. Esposito Farèse 和 B. R. Iyer, 《物理学》。莱特牧师。 93, 091101 (2004)。[77] A. 塔拉基涅塔尔, 物理学。修订版 D 8906150 (2014)。[78] M. Pürrer, 经典量子引力 3119501 (2014)。[79] B. 艾伦, W. G. 安德森, P. R. 布雷迪, D. A. 布朗, and J. D. E. Creighton, 物理学。修订版 D 85122006 (2012)。[80] B. S. Sathyaprakash 和 S. V. Dhurandhar, 《物理学》。修订版 D 44, 3819 (1991)。06

[81] B. J. Owen 和 B. S. Sathyaprakash, 《物理学》。版本 D022002 (1999)。[82] B. 艾伦, 物理学。修订版 D 71062001 (2005)。[83] J. Abadie 等人, 《物理学》。第 D 版, 2002 年 8 月 8 日 (2012年)。[84] S. Babak 等人, 《物理学》。修订版 D 87024033 (2013)。[85] K. Cannon 等人, 天体物理学。J. 748136 (2012)。[86] S. Privitera, S. R. P. Mohapatra, P. Ajith, K. Cannon, Fotopoulos, M. A. Frei, C. Hanna, A. J. Weinstein, J. T. Whelan, Phys. D 89, 024003 (2014)。[87] M. 汉南, P. 施密特, A. 波赫, L. 海格尔, S. Husa, Ohme, G. 普拉滕和 M. Pürrer, 《物理学》。莱特牧师。 1151101 (2014)。[88] S. Khan, S. Husa, M. Hannam, F. Ohme, M. Pürrer, Jiménez Forteza 和 A. Bohé, 《物理学》。修订版 D 930440 (2016)。[89] J. 维奇等人, 《物理学》。修订版 D 91042003 (2015)。[90] A. Krolak 和 B. F. Schutz, 《相对论将军》。重力。 19, 1 (1987)。[91] P. A. R. Ade 等人, arXiv:1502.01589。[92] J. Healy, C. O. Lousto 和 Y. Zlochover, 《物理学》。D104004 修订版 (2014年)。[93] S. Husa, S. Khan, M. Hannam, M. Pürrer, F. Ohme, Jiménez Forteza 和 A. Bohé, 《物理学》。修订版 D 930440 (2016)。[94] B. Abbott 等人, arXiv:1602.03841。[95] C. K. Mishra, K. G. Arun, B. R. Iyer 和 B. Sathyaprakash, 《物理学》。修订版 D 82064010 (2010)。[96] 李, W. Del Pozzo, S. Vitale, C. Van Den Broeck, M. 阿加索斯, J. 维奇, K. 格罗弗, T. 塞德里, R. 斯图拉尼, A. 维奇奥, 物理学。Rev. D 85082003 (2012)。[97] C. M. Will, Phys. D 572061 (1998) 修订版。[98] C. Talmadge, J. P. Berthias, R. W. Hellings 和 E. Standish, 《物理学》。莱特牧师。 61, 1159 (1988)。[99] L. S. Finn 和 P. J. Sutton, 《物理学》。修订版 D 650440 (2002)。[100] A. S. Goldhaber 和 M. M. Nieto, 《物理学》。D 9, 1 版 (1974年)。[101] S. Choudhury 和 S. Sen Gupta, 欧洲物理学。J. C 74, 3 (2014)。[102] A. Tutukov 和 L. Yungelson, Nauchnye Informatsii 70 (1973)。[103] V. M. Lipunov, K. A. Postnov 和 M. E. Prokhorov, MNRAS. 288245 (1997)。[104] K. Belczynski, S. Repetto, D. Holz, R. O'Shaughnessy, Bulik, E. Berti, C. Fryer, M. Dominik, arXiv:1510.046 [天体物理学杂志 (待出版)]。[105] S. Sigurdsson 和 L. Hernquist, 《自然》(伦敦) 364, 4 (1993)。[106] S. F. Portegies Zwart 和 S. L. W. McMillan, 《天体物理快报》。528, 117 (2000)。[107] C. L. Rodriguez, M. Morscher, B. Pattabiraman, Chatterjee, C. - J. Haster 和 F. A. Rasio, 《物理学》。修订版 L115051101 (2015)。[108] K. Belczynski, T. Bulik, C. L. Fryer, A. Ruiter, F. Valsecchi, S. Vink 和 J. R. Hurley, 天体物理学。J. 714, 12 (2010)。[109] M. Spera, M. Mapelli 和 A. Bressan, 周一。没有。阿斯特隆。《美国律师会法典》第 451 卷第 4086 页 (2015年)。[110] B. Abbott 等人, 《天体物理学》。J. 818, L22 (2016)。[111] B. Abbott 等人, arXiv:1602.03842.02-10

[112] C. Kim、V. Kalogera和D. R. Lorimer, 天体物理学. J. 584985 (2003). [113] W. M. Farr、J. R. Gair、I. Mandel和C. Cutler, 《物理学》。ReD 91023005 (2015)。[114] J. Abadie等人, 经典量子引力2717300 (2010)。[115] B. Abbott等人, arXiv:1602.03847。

[116] LIGO开放科学中心 (LOSC), <https://lsc.ligo.org/events/GW150914/>。[117] B. P. Abbott等人 (LIGO科学合作Virgo合作), 《相对论生活评论》19, 1 (2011)。[118] B. Iyer等人, LIGO印度技术报告编号LIGM11002962011, [https://dcc.ligo.org/LIGO\\_M11002公共/](https://dcc.ligo.org/LIGO_M11002公共/)主。

B. P. Abbott, 1 R. Abbott, 1 T. D. Abbott, 2 M. R. Abernathy, 1 F. Acernese, 3, 4 K. Ackley, 5 C. Adams, 6 T. Adams, 7 P. Address, R. X. Adhikari, 1 V. B. Adya, 8 C. Affeldt, 8 M. Agathos, 9 K. Agatsuma, 9 N. Aggarwal, 10 O. D. Aguiar, 11 L. Aiello, 12 A. 艾因, 14 P. 阿吉斯, 15 B. 艾伦, 8, 16, 17 A. 阿洛卡, 18, 19 P. A. 阿尔廷, 20 S. B. 安德森, 1 W. G. 安德森, 16 K. Arai, 1 M. A. Arai, M. C. Araya, 1 C. C. Arceneaux, 21 J. S. Areeda, 22 N. Arnaud, 23 K. G. Arun, 24 S. Ascenzi, 25, 13 G. Ashton, 26 M. Ast, 2 S. M. 阿斯顿, 6 P. 阿斯通, 28 P. 奥夫茅斯, 8 C. 奥尔伯特, 8 S. 巴巴克, 29 P. 培根, 30 M. K. M. 巴德, 9 P. T. 贝克, 31 楼. 巴尔达奇尼, 32, 33 G. 巴拉丁, 34 S. W. 鲍默, 35 J. C. 巴拉约加, 1 S. E. 巴克利, 36 B. C. 巴里什, 1 D. 巴克, 37 F. Barone B. 巴尔, 36 L. Barsotti, 10 M. Barsuglia, 30 D. Barta, 38 J. Bartlett, 37 M. A. Barton, 37 I. Bartos, 39 R. Bassiri, 40 A. Basti, 18 J. C. 批次, 37 C. Baune, 8 V. Bavigadda, 34 M. Bazzan, 41, 42 B. Behnke, 29 M. Bejger, 43 C. Belczynski, 44 A. S. Bell, 36 C. J. Bell, 36 B. K. Berger, 1 J. Bergman, 37 G. Bergmann, 8 C. P. L. Berry, 45 D. Bersanetti, 46, 47 A. Bertolini, 9 J. Betzwiese S. Bhagwat, R. Bhandare, I. A. Bilenko, G. Billingsley, J. Birch, I. A. Birney, 3548491650 O. Birnholtz, 8 S. Biscans, 10 A. Bisht, M. Bitossi, 34 C. Biwer, 35 M. A. Bizouard, 23 J. K. Blackburn, 1 C. D. Blair, 51 D. G. Blair, 51 R. M. Blair, 37 S. Bloemen O. 博克, 8 T. P. 博迪亚, 10 M. Boer, 53 G. Bogaert, 53 C. Bogan, 8 A. Bohe, 29 P. Bojtos, 54 C. Bond, 45 F. Bondu, 55 R. Bonnan B. A. 博姆, 9 R. Bork, 1 V. Boschi, 18, 19 S. Bose, 56, 14 Y. Bouffanaïs, 30 A. Bozzi, 34 C. Bradaschia, 19 P. R. Brady, 16 V. B. Braginsky, 49 M. Branchesi, 57, 58 J. E. Brau, 59 T. Briant, 60 A. Brillet, 53 M. Brinkmann, 8 V. Brissou, 23 P. Brockill A. F. Brooks, 1 D. A. Brown, 35 D. D. Brown, 45 N. M. Brown, 10 C. C. Buchanan, 2 A. Buikema, 10 T. Bulik, 44 H. J. Bulten, A. Buonanno, 29, 62 D. Buskulic, 7 C. Buy, 30 R. L. Byer, 40 M. Cabero, 8 L. Cadonati, 63 G. Cagnoli, 64, 65 C. Cahillane, J. Calderón Bustillo, 66, 63 T. Callister, 1 E. Calloni, 67, 4 J. B. Camp, 68 K. C. Cannon, 69 J. Cao, 70 C. Capano, 8 E. Capocasa F. Carbognani, 34 S. Caride, 71 J. Casanueva Diaz, 23 C. Casentini, 25, 13 S. Caudill, 16 M. Cavaglia, 21 F. Cavalier, 23 R. 卡瓦列里, 34 G. 塞拉, 19 C. B. 塞佩达, 1 L. 塞博尼·巴亚尔迪, 57, 58 G. 塞雷塔尼, 18, 19 E. 切萨里尼, 25, 13 R. 查克拉博蒂. 查勒姆松萨克, 1 S. J. Chamberlin, 72 M. Chan, 36 S. Chao, 73 P. Charlton, 74 E. Chassade Mottin, 30 H. Y. Chen, 7 Y. 陈, 76 C. 程, 73 A. Chincarini, 47 A. Chiummo, 34 H. S. Cho, 77 M. Cho, 62 J. H. Chow, 20 N. Christensen, 78 Q. Chu S. 蔡, 60 S. Chung, 51 G. Ciani, 5 F. Clara, 37 J. A. Clark, 63 F. Cleva, 53 E. Coccia, 25, 12, 13 P. - F. Cohadon, 60 A. Colla, 79 C. G. 科莱特, 80 L. Cominsky, 81 M. Constancio Jr., 11 A. Conte, 79, 28 L. Conti, 42 D. Cook, 37 T. R. Corbitt, 2 N. Cornish A. 科西, 71 S. Cortese, 34 C. A. Costa, 11 M. W. Coughlin, 78 S. B. Coughlin; 82 J. P. Coulon, 53 S. T. Countryman, 39 P. 库瓦雷斯, 1 E. E. Cowan, 63 D. M. Coward, 51 M. J. Cowart, 6 D. C. Coyne, 1 R. Coyne 和 71 K. Craig, 36 J. D. E. Creighton T. D. Creighton, 83 J. Cripe, 2 S. G. Crowder, 84 A. M. Cruise, 45 A. Cumming, 36 L. Cunningham, 36 E. Cuoco, 34 T. Dal Canto S. L. Danilishin, 36 S. D'Antonio, 13 K. Danzmann, 17, 8 N. S. Darman, 85 C. F. Da Silva Costa, 5 V. Dattilo, 34 I. Dave, 4 H. P. Daveloza, 83 M. Davies, 23 G. S. Davies, 36 E. J. Daw, 86 R. Day, 34 S. De, 35 D. DeBra, 40 G. Debreczeni, 38 J. Degallaix M. 德劳伦蒂斯, 67, 4 S. Deléglise, 60 W. Del Pozzo, 45 T. Denker, 8, 17 T. Dent, 8 H. Dereli, 53 V. Dergachev, 1 R. T. DeRos R. 德·罗萨, 67, 4 R. 德萨尔沃, 87 S. Dhurandhar, 14 M. C. Díaz, 83 L. Di Fiore, 4 M. Di Giovanni, 79, 28 A. Di Lieto, 18, 19 S. 迪佩斯, 79, 28 I. 迪帕尔玛, 29, 8 A. 迪维吉里奥, 19 G. 多伊西诺斯基, 88 V. 多利克, 65 F. 多诺万, 10 K. L. 杜利, 21 S. 多拉瓦里 R. Douglas, 36 T. P. 唐斯, 16 M. 德拉戈, 8, 89, 90 R. W. P. 德雷弗, 1 J. C. Driggers, 37 Z. 杜, 70 M. 达克罗, 7 S. E. 德怀尔, T. B. 埃多, 86 M. C. 爱德华兹, 78 A. 埃佛尔, 6 H. - B. 埃根斯坦, 8 P. Ehrens, 1 J. Eicholz, 5 S. S. 艾肯伯里, 5 W. 恩格斯, R. C. Essick, 10 T. Etzel, 1 M. Evans, 10 T. M. Evans, 6 R. Everett, 72 M. Factourovich, 39 V. Fafone, 25, 13, 12 H. Fair, 35 S. 费尔赫斯特, 91 X. 范, 70 Q. 方, 51 S. 法里农, 47 B. 法尔, 75 W. M. 法尔, 45 M. 法瓦塔, 88 M. 费斯, 91 H. 费尔曼, 8 M. M. Fejer, 40 D. Feldbaum, 5 I. Ferrante, 18, 19 E. C. Ferreira, 11 F. Ferrini, 34 F. Fidecaro, 18, 119 L. S. Finn, 72 I. Fiori, 34 D. 费奥鲁奇, 30 R. P. 费舍尔, 35 R. Flaminio, 65, 92 M. 弗莱彻, 36 H. 方, 69 J. - D. 福尼尔, 53 S. 佛朗哥, 23 S. Frasca, 79, 2 F. Frascioni, 19 M. Frede, 8 Z. Frei, 54 A. Freise, 45 R. Frey, 59 V. Frey, 23 T. Fricke, 8 P. Fritschel, 10 V. Frolov, 6 P. Fuld M. Fyfe, 6 H. A. G. Gabbard, 21 J. R. Gair, 93 L. Gammaitoni, 32, 33 S. G. Gaonkar, 14 F. Garufi, 67, 4 A. Gatto, 30 G. Gaur, 9 N. Gehrels, 68 G. Gemme, 47 B. Gendre, 53 E. Genin, 34 A. Gennai, 19 J. George, 48 L. Gergely, 96 V. Germain, 7 Abhirup Ghosh 061102-11

Archisman Ghosh, 15 S. Ghosh, 52, 9 J. A. Giaime, 2, 6 K. D. Giardina, 6 A. Giazotto, 19  
K. Gill, 97 A. Glaefke, 36 J. R. Gleason, 98 R. Goetz, 5 L. Gondan, 54  
G. González, 2 J. M. Gonzalez Castro, 18, 19 A. Gopakumar, 99  
N. A. Gordon, 36 M. L. Gorodetsky, 49 S. E. Gossan, 1 M. Gosselin, 34 R. Gouaty, 7  
C. Graef, 36 P. B. Graff, 62 M. Granata, 65 A. Grant, 36 S. Gras C. 格雷, 37 G. Greco, 57, 58  
A. C. 格林, 45 R. J. S. 格林哈尔, 100 P. Groot, 52 H. Grote, 8 S. Grunewald, 29  
G. M. Guidi, 5 X. 郭, 70 A. 笈多, 14 M. K. 笈多, 95 K. E. 古斯瓦, 1 E. K. 古斯塔夫森, 1 R. 古斯塔夫森, 98  
J. J. 哈克, 22 B. R. 霍尔, 5 E. D. 霍尔, 1 G. 哈蒙德, 36 M. 哈尼, 99 M. 汉克, 8 J. 汉克斯, 37 C. 汉纳, 72 M. 汉南, 91  
J. 汉森, 6 T. 哈德威克, 2 J. Harms, 57, 58 G. M. Harry, 101 I. W. Harry, 29 M. J. Hart, 36  
M. T. Hartman, 5 C. - J. Haster, 45 K. Haughian J. Healy, 102 J. Heefner, 1, a. Heidmann, 60  
M. C. Heintze, 5, 6 G. Heinzl, 8 H. Heitmann, 53 P. 你好, 23 G. Hemming, 3 M. 亨得利, 36  
I. S. Heng, 36 J. Hennig, 36 A. W. Heptonstall, 1 M. Heurs, 8, 17 S. Hild, 36 D. Hoak, 103  
K. A. Hodge, 1 D. Hofman S. E. Hollitt, 104 K. Holt, 6 D. E. Holz, 75 P. Hopkins, 91  
D. J. Hosken, 104 J. Hough, 36 E. A. Houston, 36 E. J. Howell, 51 Y. 胡, 36 S. Huang, 73  
E. A. Huerta, 105, 82 D. Huet, 23 B. Hughey, 97 S. Husa, 66 S. H. Huttner, 36 T. Huynh  
Dinh, 6 A. Idris N. 印第克, 8 D. R. 英格拉姆, 37 R. Inta, 71 H. N. Isa, 36 J. M. Isac, 60 M. Isi, 1  
G. Islas, 22 T. Isogai, 10 B. R. Iyer, 15 K. Izumi, M. B. Jacobson, 1 T. Jacqmin, 60  
H. Jang, 77 K. Jani, 63 P. Jaranowski, 106 S. Jawahar, 107 F. Jiménez Forteza, 66  
W. Johnson N. K. Johnson McDaniel, 15 D. I. Jones, 26 R. Jones, 36 R. J. G. Jonker, 9  
L. Ju, 51 K. Haris, 108 C. V. Kalaghtgi, 24, 91 V. Kalogera, 82 S. Kandhasamy, 21  
G. Kang, 77 J. B. Kanner, 1 S. Karki, 59 M. Kasprzak, 2, 23, 34  
E. Katsavounidis, 10 W. Katzman, 6 S. Kaufer, 17 T. Kaur, 51 K. Kawabe, 37  
F. Kawazoe, 8, 17 F. Kéfélian, 53 M. S. Kehl, 69 D. Keitel, 8, 66 D. B. Kelley W. Kells, 1  
R. Kennedy, 86 D. G. Keppel, 8 J. S. Key, 83 A. Khalaidovski, 8 F. Y. Khalili, 49  
I. Khan, 12 S. Khan, 91 Z. Khan E. A. 卡扎诺夫, 109 N. Kijbunchoo, 37 C. Kim, 77 J. Kim, 110  
K. Kim, 111 Nam Gyu Kim, 77 Namjun Kim, 40 Y. - M. Kim, E. J. King, 104 P. J. King, 37  
D. L. Kinzel, 6 J. S. Kissel, 37 L. Kleyborte, 27 S. Klimenko, 5 S. M. Koehlenbeck, 8  
K. Kokeyam S. Koley, 9 V. Kondrashov, 1 A. Kontos, 10 S. Koranda, 16 M. Korobko, 27  
W. Z. Korth, 1 I. Kowalska, 44 D. B. Kozak, 1 V. Kringel, 8 B. Krishnan, 8  
A. Królak, 112 113 C. Krueger, 17 G. Kuehn, 8 P. Kumar, 69 R. Kumar, 36 L. Kuo, 73  
A. Kutynia P. Kwee, 公元前8年, Lackey, 35 M. Landry, 37 J. Lange, 102 B. Lantz, 40  
P. D. Lasky, 114 A. Lazzarini, 1 C. Lazzaro, 63, 42 P. Leaci, 29, 7 S. 李维, 36  
E. O. Lebigot, 30, 70 C. H. Lee, 110 H. K. Lee, 111 H. M. Lee, 115 K. Lee, 36 A. Lenon, 35  
M. Leonardi, 89, 90 J. 梁, 8 N. Leroy, 23 N. Letendre, 7 Y. Levin, 114 B. M. Levine, 37  
T. G. F. Li, 1 A. Libson, 10 T. B. Littenberg, 116 N. A. 洛克比, 107 J. Logue, 36  
A. L. Lombardi, 103 L. T. London, 91 J. E. Lord, 35 M. Lorenzini, 12, 13  
V. Lorient, 117 M. 洛曼德, 6 G. 洛苏多, 58 J. D. Lough, 8, 17 C. O. Lousto, 102 G. Lovelace, 22  
H. Lück, 17, 8 A. P. Lundgren, 8 J. Luo, 7 R. 林奇, 10 Y. Ma, 51 T. MacDonald, 40  
B. Machenschalk, 8 M. MacInnis, 10 D. M. Macleod, 2  
F. Magaña-Sandoval, 35 R. M. Magee, 56 M. Mageswaran, 1 E. Majorana, 28  
I. Maksimovic, 117 V. Malvezzi, 25, 13 N. Man, 53 I. Mandel, 45 V. Mandic V. 曼加诺, 36  
G. L. 曼塞尔, 20 M. 曼斯克, 16 M. 曼托瓦尼, 34 F. 马尔切索尼, 118, 33 F. 马里恩, 7 S. 马尔卡, 39  
Z. 马尔卡 A. S. Markosyan, 40 E. Maros, 1 F. Martelli, 57, 58 L. Martellini, 53  
I. W. Martin, 36 R. M. Martin, 5 D. V. Martynov, 1 J. N. Mark M. Mason, 10 A. Masserot, 7  
T. J. Massinger, 35 M. Masso Reid, 36 F. Matichard, 10 L. Matone, 39  
N. Mavalvala, 10 N. 马祖姆德, 56 G. 马佐洛, 8 R. 麦卡锡, 37 D. E. 麦克莱兰, 20 S. 麦考密克, 6  
S. C. 麦圭尔, 119 G. 麦金太尔. McIver, 1 D. J. McManus, 20 S. T. McWilliams, 105 D. Meacher, 72  
G. D. Meadors, 29, 8 J. Meidam, 9 A. Melatos, 85 G. 门德尔, 37 D. 门多萨·甘达拉, 8 R. A. 默瑟, 16  
E. Merilh, 37 M. Merzougui, 53 S. Meshkov, 1 C. 信使, 36 C. 梅西克, 72 P. M. 迈耶斯, 84  
F. Mezzani, 28, 79 H. 苗, 45 C. 米歇尔, 65 H. 米德顿, 45 E. 米哈伊洛夫, 120 L. 米兰, J. 米勒, 10 M. 米尔豪斯, 31  
Y. 米嫩科夫, 13 J. 明, 29, 8 S. 米尔舍卡里, 121 C. 米什拉, 15 S. 米特拉, 14 V. P. 米特罗法诺夫, G. 米切尔马赫, 5  
R. 米特曼, 10 A. 莫吉, 19 M. 莫汉, 34 S. R. P. 莫哈帕特拉, 10 M. 蒙塔尼, 57, 58 B. 摩尔, 8 C. J. Moore, 122  
D. Moraru, 37 G. Moreno, 37 S. R. Morriss, 83 K. Mossavi, 8 B. Mours, 7 C. M. Mow  
Lowry, 45 C. L. Muelle G. Mueller, 5 A. W. Muir, 91 Arunava Mukherjee, 15  
D. Mukherjee, 16 S. Mukherjee, 83 N. Mukund, 14 A. Mulavey, 6 J. 蒙克, 104 D. J. Murphy, 39  
P. G. Murray, 36 A. Mytidis, 5 I. Nardecchia, 25, 13 L. Naticchioni, 79, 28  
R. K. Nayak, 123 V. Necul K. Nedkova, 103 G. Nelemans, 52, 9 M. Neri, 46, 47  
A. Neunzert, 98 G. Newton, 36 T. Nguyen, 20 A. B. Nielsen, 8 S. Nissanke, A. Nitz, 8  
F. Nocera, 34 D. Nolting, 6 M. E. N. Normandin, 83 L. K. Nuttall, 35 J. Oberling, 37  
E. Ochsner, 16 J. O'Dell, 10 E. 奥尔克, 10 G. H. Ogini, 124 J. Oh, 125 S. H. Oh, 125 F. Ohme, 91  
M. Oliver, 66 P. Oppermann, 8 Richard J. Oram, 6 B. O'Reill R. O'Shaughnessy, 102  
C. D. Ott, 76 D. J. Ottaway, 104 R. S. Ottens, 5 H. Overmire, 6 B. J. Owen, 71 A. Pai, 108  
S. A. Pai. R. Palamos, 59 O. Palashov, 109 C. Palomba, 28 A. Pal Singh, 27 H. Pan, 73  
Y. Pan, 62 C. Pankow, 82 F. Pannarale, 91 B. Pan F. Paoletti, 34, 19 A. Paoli, 34  
M. A. Papa, 29, 16, 8 H. R. Paris, 40 W. Parker, 6 D. Pascucci, 36 A. Pasqualetti, 34  
R. Passaquieti, 1 D. 帕苏埃洛, 19 B. 帕特里克, 18, 19 Z. 帕特里克, 40 B. L. 皮尔斯通, 36 M. 佩德拉扎, 1  
R. 佩德兰德, 65 L. 佩考斯基, 35 A. 佩尔斯. 宾夕法尼亚大学, 126 A. Perreca, 1 H. P. Pfeiffer, 69, 29  
M. Phelps, 36 O. Piccinni, 79, 28 M. Pichot, 53 M. Pickenpack, 8  
F. Piergiovanni, 5 V. 皮耶罗, 87 G. Pillant, 34 L. Pinard, 65 I. M. Pinto, 87 M. Pitkin, 36  
J. H. Poeld, 8 R. Poggiani, 18, 19 P. Popolizio, 34 A. Pos061102-12

J. Powell, 36 J. Prasad, 14 V. Predoi, 91 S. S. Premachandra, 114 T. Prestegard, 84  
L. R. Price, 1 M. Prijatelj, 34 M. Principe S. Privitera, 29 R. Prix, 8 G. A. Prodi, 89, 90  
L. Prokhorov, 49 O. Puncken, 8 M. Punturo, 33 P. Puppo, 28 M. Pürner, 29 H. Qi J. 秦, 51  
V. Quetschke, 83 E. A. Quintero, 1 R. Quitzow James, 59 F. J. Raab, 37 D. S. Rabeling, 20  
H. Radkins, 37 P. Raffa S. Raja, 48 M. Rakhmanov, 83 C. R. Ramet, 6 P. Rapagnani, 79, 28  
V. Raymond, 29 M. Razzano, 18, 19 V. Re, 25 J. Read, 22 C. M. Reed, 37 T. Regimbau, 53  
L. Rei, 47 S. Reid, 50 D. H. Reitze, 1.5 H. Rew, 120 S. D. Reyes, 35 F. Ricci, 79, 28  
K. Riles, 9 N. A. Robertson, 1, 36 R. Robie, 36 F. Robinet, 23 A. Rocchi, 13 L. Rolland, 7  
J. G. Rollins, 1 V. J. Roma, 59 J. D. Romano, R. Romano, 3, 4 G. Romanov, 120 J. H. Romie, 6  
D. Rosi ska, 127, 43 S. Rowan, 36 A. Rüdiger, 8 P. Ruggi, 34 K. Ryan, 37 S. Sachdev, 1  
T. Sadecki, 37 L. Sadeghian, 16 L. Salconi, 34 M. Saleem, 108 F. Salemi, 8  
A. Samajdar, 123 L. Sammut, 85, 11 L. M. 桑普森, 82 E. J. 桑切斯, 1 V. 桑德伯格, 37 B. 桑登, 82  
G. H. 桑德斯, 1 J. R. 桑德斯, 98, 35 B. 萨索拉斯, 65 B. S. Sathyaprakash, 91 P. R. Saulson, 35  
O. Sauter, 98 R. L. Savage, 37 A. Sawadsky, 17 P. Schale, 59 R. Schilling, 8, b  
J. Schmid P. 施密特, 1.76 R. 施纳贝尔, 27 R. M. S. 斯科菲尔德, 59 A. 舍恩贝格, 27 E. 施赖伯, 8 D. 舒特, 8, 17  
B. F. 舒茨, 91, 2 J. 斯科特, 36 S. M. 斯科特, 20 D. 塞勒斯, 6 A. S. 森古普塔, 94 D. 森特纳克, 34 V. 塞奎诺, 25, 13  
A. 谢尔盖耶夫, 109 G. 塞尔纳, 22 Y. Setyawati, 52.9 A. Seigny, 37 D. Shaddock, 20 T. Shaffer, 37  
S. Shah, 52.9 M. S. Shahriar, 82 M. Shaltev, 8 Z. Shao, B. Shapiro, 40 P. Shawhan, 62  
A. Sheperd, 16 D. H. 鞋匠, 10 D. 鞋匠, 63 K. Siellez, 53, 63 X. 西门子, 16 D. Sigg A. D. 席尔瓦, 11  
D. 西马科夫, 8 A. 辛格, 1 L. P. 辛格, 68 A. 辛格, 29, 8 R. 辛格, 2 A. 辛格, 12  
A. M. 辛茨, 66 B. J. J. Slagmolen, 20 J. R. Smith, 22 M. R. Smith, 1 N. D. Smith, 1  
R. J. E. Smith, 1 E. J. Son, 125 B. Sorazu, 36 F. Sorrentino T. Souradeep, 14  
A. K. Srivastava, 95 A. Staley, 39 M. Steinke, 8 J. Steinlechner, 36 S. Steinlechner, 36  
D. Steinmeyer, 8, 17 B. C. Stephens, 16 S. P. Stevenson, 45 R. Stone, 83 K. A. Strain, 36  
N. Straniero, 65 G. Stratta, 57, 58 N. A. Strauss, 78 S. Strigin R. Sturani, 121  
A. L. Stuver, 6 T. Z. Summerscales, 128 L. Sun, 85 P. J. Sutton, 91 B. L. Swinkels, 34  
M. J. Szczepa czyk, 9 M. 塔卡, 30 D. Talukder, 59 D. B. Tanner, 5 M. Tápai, 96  
S. P. Tarabrin, 8 A. Taracchini, 29 R. Taylor, 1 T. Theeg, 8 M. P. Thirugnanasambandam, 1  
E. G. Thomas, 45 M. Thomas, 6 P. Thomas, 37 K. A. Thorne, 6 K. S. Thorne, 76  
E. Thrane S. 蒂瓦里, 12 V. Tiwari, 91 K. V. Tokmakov, 107 C. Tomlinson, 86 M. Tonelli, 18, 19  
C. V. Torres, 83 C. L. Torrie, 1 D. Töyrä F. 特拉瓦索, 32, 33 G. Traylor, 6 D. Trifirò, 21  
M. C. Tringali, 89, 90 L. Trozzo, 129, 19 M. Tse, 10 M. Turconi, 53  
D. Tuyenbayev D. 乌戈利尼, 130 C. S. Unnikrishnan, 99 A. L. Urban, 16 S. A. Usman, 35  
H. Vahlbruch, 17 G. Vajente, 1 G. Valdes, 83 M. 瓦利斯内里, 76 N. van Bakel, 9 M. van  
Beuzekom, 9 J. F. J. van den Brand, 61, 9 C. van den Broeck, 9 D. C. Vander  
Hyde, 3 L. 范德沙夫, 9 J. V. van Heijningen, 9 A. A. van Veggel, 36 M. Vardaro, 41, 42  
S. Vass, 1 M. Vasúth, 38 R. Vaulin, 10 A. 维奇奥, 45 G. 韦多瓦托, 42 J. 维奇, 45 P. J. 维奇, 104  
K. 文卡特斯瓦拉, 131 D. Verkindt, 7 F. Vetrano, 57, 58 A. 维切雷, 5 S. 温奇盖拉, 45 D. J. Vine, 50  
J. - Y. Vinet, 53 S. Vitale, 10 T. Vo, 35 H. Vocca, 32, 33 C. Vorvick, 37 D. Voss, 5  
W. D. Vousden S. P. 维亚查宁, 49 A. R. 韦德, 20 L. E. 韦德, 132 M. 韦德, 132 S. J. 沃尔德曼, 10 M. 沃克, 2  
L. 华莱士, 1 S. 沃尔什, 16, 王, 12 H. 王, 45 M. 王, 45 X. 王, 70 Y. 王, 51 H. 沃德, 36 R. L. 沃德, 20 J. 华纳, 37  
M. 瓦斯, 7 B. Weave L. W魏, 53 M. Weinert, 8 A. J. Weinstein, 1 R. Weiss, 10 T. Welborn, 6  
L. Wen, 51 P. Weßels, 8 T. Westphal, 8 K. Wette J. T. Whelan, 102, 8 S. E. Whitcomb, 1  
D. J. White, 86 B. F. Whiting, 5 K. Wiesner, 8 C. Wilkinson, 37 P. A. Willems, 1  
L. William R. D. Williams, 1 A. R. Williamson, 91 J. L. Willis, 133 B. Willke, 17.8  
M. H. Wimmer, 8.17 L. Winkelmann, 8 W. Winkler C. C. Wipf, 1 A. G. Wiseman, 16  
H. Wittel, 8, 17 G. Woan, 36 J. Worden, 37 J. L. Wright, 36 G. Wu, 6 J. Yablon, 82  
I. Yakushi W. Yam, 10 H. Yamamoto, 1 C. C. Yancey, 62 M. J. Yap, 20 H. Yu, 10 M. Yvert, 7  
A. Zadrožny, 112 L. Zandrando, 42 M. Zanolin J. PZendri, 42 M. Zevin, 82 F. Zhang, 10  
L. Zhang, 1 M. Zhang, 120 Y. Zhang, 102 C. 赵, 51 M. Zhou, 82  
Z. Zhou, 82 X. J. Zhu M. E. Zucker, 1.10 S. E. Zuraw, 103 and J. Zweizig 1 (LIGO科学合作和Virgo合作)

2路那斯安那州巴吞鲁日路那斯安那州立大学70803, 3U i i a d i S i F i i 84084 S i i

4 INFN, 那不勒斯科学院, 圣安吉洛山大学综合楼, I - 80126 那不勒斯, 意大利5佛罗里达大学, 佛罗里达州盖恩斯维尔, 32611, 美国6 LIGO利文斯顿天文台,  
路易斯安那州利文斯顿, 70754, 美国7 LAPP实验室, 萨沃伊 - 勃朗峰大学, CNRS / IN2F - 74941 安纳西 - 勒维尔, 法国8 Albert  
Einstein研究所, 马克斯·普朗克引力研究所, d - 30167 汉诺威, 德国9 Nikhef, 科学园, 1098 XG阿姆斯特丹, 荷兰10 LIGO, 马萨诸塞州美国马萨  
诸塞州剑桥理工学院02139 061102-13

11 西班牙国家研究所, 12227-10 São José dos Campos, 圣保罗, 巴西 12 INFN, Gran Sasso 科学研究所, I-67100 L'Aquila, 意大利 13 INFN, Sezione di Roma Tor Vergata, I-00133 Roma, 意大利 14 大学间天文学和天体物理学中心, 浦那 411007, 印度 15 塔塔基础研究所国际理论科学中心, 班加罗尔 560012, 印度 16 威斯康星大学密尔沃基分校, 密尔沃基, 威斯康星州 53201, 美国 17 汉诺威莱布尼兹大学, D-30167 Hannover, 德国 18 比萨大学, I-56127 比萨, 意大利 19 INFN, Sezione di Pisa, I-56127 Pisa, Italy 20 澳大利亚国立大学, 堪培拉, 澳大利亚首都直辖区 0200, 澳大利亚 21 密西西比大学, 密西西比 38677, 美国 22 加利福尼亚州立大学, 富勒顿, 加利福尼亚 92831, 美国 23 LAL, 巴黎南大学, CNRS / IN2P3, 巴黎萨克雷大学, 奥赛, 法国 24 Henna i 数学研究所, 印度钦奈 603103 25 罗马托尔韦加塔大学, I-00133 罗马, 意大利 26 南安普敦大学, 南安普敦 SO17 1BJ, 英国 27 汉堡大学, D-22761 汉堡, 德国 28 INFN, 罗马学院, I-00185 罗马, 意大利 29 阿尔伯特·爱因斯坦研究所, 马克斯·普朗克引力研究所, D-14476 波茨坦戈尔姆, 德国 30 APC, 天体物理学和宇宙学, 巴黎狄德罗大学, CNRS / IN2P3, CEA / Ifrfu, 巴黎天文台, 索邦-巴黎城市大学, f-75205 巴黎 Cedex 13, 法国 31 蒙大拿州立大学, 博兹曼, 蒙大拿州 59717, 美国 32 佩鲁贾大学, I-06123 佩鲁贾, 意大利 33 INFN, 佩鲁贾学院, I-06123 佩鲁贾分校, 意大利 34 欧洲引力观测站 (EGO), I-56021 卡西纳, 比萨, 意大利 35 锡拉丘兹大学, 纽约锡拉丘兹 13244, USA 36 SUPA, 格拉斯哥大学, 格拉斯哥 G12 8QQ, 英国 37 LIGO 汉福德天文台, 里奇兰, 华盛顿 99352, USA 38 Wigner RCP, RMKI, H-1121 布达佩斯, 孔科利 Thege Miklós út 29-33, 匈牙利 39 哥伦比亚大学, 纽约 10027, USA 40 斯坦福大学, 斯坦福大学加利福尼亚州, 邮编 94305, 美国 41 帕多瓦大学, 金融与天文学系, I-35131 帕多瓦, 意大利 42 INFN, 帕多瓦学院, I-35131 Padova, 意大利 43 CAMK PAN, 00-716 华沙, 波兰 44 华沙大学天文台, 00-478 华沙, 波兰 45 伯明翰大学, 伯明翰 B15 2TT, 英国 46 热那亚大学, I-16146 热那亚, 意大利 47 INFN, 热那亚学院, I-16146 Genova, 意大利 48 RRCAT, 印多尔 MP 452013, 印度 49 罗蒙诺索夫莫斯科国立大学物理系, 莫斯科 119991, 俄罗斯 50 SUPA, 西苏格兰大学, 佩斯利 PA1 2BE, 英国 51 西澳大利亚大学, 克劳利, 西澳大利亚 6009, 澳大利亚 52 天体物理系 / IMAP, 奈梅亨拉德布大学, 邮政信箱 9010, 6500 GL 奈梅亨, 荷兰 53 阿尔忒弥斯, 蓝色海岸大学, CNRS, 蓝色海岸天文台, CS 34229, 尼斯 cedex 4, 法国 54 MTA eötvös 大学, "Lendulet" 天体物理学研究小组, 布达佩斯 1117, 匈牙利 55 雷恩物理研究所, CNRS s, Rennes 大学 1, F-35042 Rennes, France 56 华盛顿州立大学, Pullman, Washington 99164, USA 57 瓦尔比诺研究大学 "Carlo Bo", I-61029 瓦尔比诺, 意大利 58 INFN, Sezione di Firenze, I-50019 Sesto Fiorentino, 佛罗伦萨, 意大利 59 俄勒冈大学, Eugene, Oregon 97403, USA 60 Laboratoire Kastler Brossel, UPMC-Sorbonne 大学, CNRS, ENS-PSL 研究大学, Collège de France 75005 Paris, France 61 VU University Amsterdam, 1081 HV Amsterdam 荷兰 62 马里兰大学, 马里兰大学帕克分校, 邮编: 20742, 美国 相对论天体物理学和物理学院中心, 佐治亚亚特兰大理工学院, 邮编: 30332 itut Lumière Matière, 里昂大学, Claude Bernard Lyon 1, UMR CNRS 5306, 69622 Villeurbanne 65 Laboratoire des Matériaux Avancés (LMA), IN2P3 / CNRS, 里昂大学那不勒斯 "费德里科·二世" 意大利那不勒斯蒙特圣安吉洛大学, I-80126 68 美国国家航空航天局 / 戈达德太空飞行中心, 马里兰州绿带, 20771, 美国 061102-14



69加拿大理论天体物理学研究所，多伦多大学，安大略省多伦多M5S  
3H8，加拿大70清华大学，北京100084，中国71德克萨斯理工大学，德克萨斯州卢伯克79409，美国72宾夕法尼亚州立大学，宾夕法尼亚大学公园16802，美国  
73国立清华大学，新竹市，30013台湾，中华民国74查尔斯斯特特大学，新南威尔士州沃加沃加2678，澳大利亚75芝加哥大学，伊利诺伊州芝加哥60637，美国76  
加州理工学院，加利福尼亚州帕萨迪纳91125，美国77韩国科学技术信息研究所，大田305-806，韩国78卡尔顿学院美国明尼苏达州诺思菲尔德55057，79罗马“  
La  
Sapienza”大学，I-00185罗马，意大利80布鲁塞尔大学，布鲁塞尔1050，比利时81索诺马州立大学，加利福尼亚州罗纳德公园94928，美国82伊利诺伊  
州埃文斯顿西北大学60208，美国83德克萨斯州格兰德河流域大学，德克萨斯州布朗斯维尔78520，美国84明尼苏达大学，明尼苏达州明尼阿波利斯55455，美国85  
墨尔本大学，维多利亚州帕克维尔3010，澳大利亚86谢菲尔德大学，谢菲尔德S10  
2TN，英国87桑尼奥大学，意大利贝内文托，I-82100和INFN，那不勒斯学院，I-80100那不勒斯，意大利88蒙特克莱尔州立大学，新泽西州蒙特克莱尔070  
43，美国89特伦托大学，佛罗里达大学，I-38123波沃，特伦托，意大利90INFN，特伦托基础物理与应用研究所，I-38123波沃，意大利91卡迪夫大学，加的  
夫CF24 3AA，英国92国家日本天文台，三鹰大泽2-21-1，东京181-8588，日本93爱丁堡大学数学学院，爱丁堡EH9  
3FD，英国94印度理工学院，甘地纳加尔艾哈迈达巴德古吉拉特邦382424，印度95甘地纳加尔巴特等离子体研究所382428，印度96塞格德大学，Dóme r  
9，塞格德6720，匈牙利97安柏瑞德航空大学，亚利桑那州普雷斯科特86301，美国98密歇根大学，密歇根州安阿伯48109，美国99Tata基础研究所，孟买40  
0005，印度100Rutherford Appleton实验室，HSLC，Chilton，Didcot，Oxon OX11  
0QX，英国101美国大学，华盛顿特区20016，美国102罗切斯特理工学院，纽约州罗切斯特14623，美国103马萨诸塞州阿默斯特市马萨诸塞大学01003，美国  
104阿德莱德大学，南澳大利亚州阿德莱德5005，澳大利亚105西弗吉尼亚州摩根敦市西弗吉尼亚大学26506，美国106比亚尔斯托克大学15-424，格拉斯哥G1  
1XQ，英国108IISER-TVM，CET校区，Trivandrum Kerala  
695016，印度应用物理研究所，下诺夫哥罗德，603950，俄罗斯110釜山国立大学，釜山609-735，韩国111汉阳大学，首尔133-791，韩国112NC  
BJ，05-400  
hwierk-Ottock，波兰113IM-PAN，00-956华沙，波兰114莫纳什大学，维多利亚3800，澳大利亚115首尔国立大学，首尔151-742，韩国  
116阿拉巴马大学亨茨维尔，阿拉巴马州亨茨维尔35899，美国117ESPCI，CNRS，F-75005巴黎，法国118卡梅里诺大学，Fisica大学，I-620  
32卡梅里诺，意大利119南方大学和A&M学院，路易斯安那州巴吞鲁日70813，美国120威廉和玛丽学院，弗吉尼亚州威廉斯堡23187，美国121哥斯达黎加研究所  
，圣保州州立大学/ICTP南美基础研究所圣保罗SP 01140-070，巴西122剑桥大学CB2  
1TN，英国123IISER加尔各答，西孟加拉邦莫汉布尔741252，印度a124惠特曼学院，345 Boyer Avenue，Walla  
Walla，Washington 99362  
USA125国立数学科学研究所，大田305-390，韩国126霍巴特和威廉·史密斯学院，日内瓦，纽约14456，USA127 Janusz  
Gil天文学研究所，Zielona Góra大学，65-265 Zielona G.óra，波兰061102-15

2016年6月11日

P H Y S I C A L R E V I E W T E R

2月12日结束的一周

128安德鲁斯大学，密歇根州贝里恩斯普林斯49104，U129锡耶纳大学，I-5310  
0锡耶纳，意大利130三一大学，德克萨斯州圣安东尼奥78212，美国131华盛顿大学，  
西雅图，华盛顿98195，美国132俄亥俄州甘比尔肯扬学院43022，美国133德克萨  
斯州阿比林基督教大学79699，美国

2012年4月去世。

2015年5月去世