

从二元黑洞合并中观测引力波

B. P. Abbott等人* (LIGO科学合作和Virgo合作) (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, 激光干涉仪引力波天文台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过, 峰值引力波应变为 1.0×10^{-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的波形相匹配。在匹配的滤波器信噪比为24的情况下观察到信号, 并且估计每203000年的误报率小于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, 对应红移 $z = 0.09 \pm 0.03 - 0.04$ 。在源坐标系中, 初始黑洞质量为 $36 \times 5 - 4 M_{\odot}$ 和 $29 \times 4 - 4 M_{\odot}$, 最终黑洞质量为 $62 \times 4 - 4 M_{\odot}$, 其中 $3.0 \times 0.5 M_{\odot} - 0.5 M_{\odot}$ 在引力波中辐射。所有不确定性都定义了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。

内部: 10.1103/physrevlett.116.061102

一. 引言

1916年, 在广义相对论场方程最终公式化的第二年, 阿尔伯特·爱因斯坦预测了引力波的存在。他发现线性化的弱场方程有波动解: 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在地球上显著的; 此外, 在1957年的教堂山会议之前, 关于引力波的物理实在性一直存在重大争论[3]。

同样在1916年, 史瓦西发表了场方程[4]的解, 后来被理解为描述黑洞[5, 6], 1963年克尔将该解推广到旋转黑洞[7]。从20世纪70年代开始, 理论工作导致了对黑洞准正态模的理解[8-10], 在20世纪90年代, 高阶后牛顿计算[11]先于对相对论两体动力学的广泛分析研究[12, 13]。这些进步, 再加上过去十年中数值相对论的突破[14-16], 使得对二元黑洞合并的建模和对其引力波形的准确预测成为可能。虽然现在已经通过电磁观测确定了许多黑洞伴随物[17-19], 但以前还没有观测到黑洞合并。

* 文章末尾给出了完整的作者名单。

由美国物理学会根据知识共享署名3.0许可条款发布。这项工作的进一步分发必须保持对作者和已发表文章的标题、期刊引用和DOI的归属。

Hulse和Taylor[20]发现的脉冲双星系统PSR

B1913-16以及Taylor和Weisberg[21]随后对其能量损失的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[22], 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新的检验, 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年代韦伯和他的共振质量探测器[23], 随后是国际低温共振探测器网络[24]。干涉探测器最早是在20世纪60年代初[25]和70年代[26]提出的。对这种探测器的噪声和性能的研究[27], 以及改进它们的进一步概念[28], 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, 一组初始探测器已经完成, 包括日本的TAMA

300、德国的GEO

600、美国的激光干涉仪引力波天文台(LIGO)和意大利的Virgo。从2002年到2011年, 这些探测器的组合进行了联合观测, 在演变为全球网络的同时, 为各种引力波源设定了上限。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]。

在爱因斯坦和史瓦西的基本预测一个世纪后, 我们首次直接探测到引力波, 并首次直接观测到二元黑洞系统合并形成一个黑洞。我们的观察为我们提供了独特的途径

强场、高速区时空的性质，证实了广义相对论对高扰动黑洞非线性动力学的预测。

二、观测

2015年9月14日09:50:45
UTC, 华盛顿州LIGO Hanford和洛杉矶Livingston天文台探测到

图1所示的重合信号GW150914。初始检测是通过低延迟搜索一般引力波瞬态[41]进行的，并在数据采集后三分钟内报告[43]。随后，使用对比二元波形的相对论模型的匹配滤波器分析[44]将GW150914恢复为这里报告的观测中每个探测器的最重要事件。发生在10ms站间

传播时间,事件的组合信噪比(SNR)为 $24[45]$ 。

在GW150914发生时,只有LIGO探测器在观测。处女座探测器正在升级,GEO

600虽然对探测这一事件不够敏感,但正在运行,但几乎没有进行观测。只有两个探测器,源位置主要由相对到达时间确定,并定位到大约600度2的区域(90%可信区域) $[39,46]$ 。

GW150914的基本特征表明,它是由两个黑洞的合并产生的,即它们的轨道吸气和合并,以及随后的最终黑洞环化。在0.2秒内,信号的频率和幅度在大约8个周期内从35赫兹增加到150赫兹,幅度达到最大值。对这种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 被吸入。在较低频率下,这种演化的特征是啁啾质量 $[11]$

其中 f 和 \dot{f} 是观测到的频率及其时间导数, G 和 c 是引力常数和光速。根据图1中的数据估计 f 和 \dot{f} ,我们得到一个啁啾质量为 $M \approx 30M_{\odot}$,这意味着探测器框架中的总质量 $M \approx m_1 + m_2$ 为 $70M_{\odot}$ 。这将二元分量的史瓦西半径之和限制为 $2GM/c^2 \approx 210\text{ km}$ 。为了达到75

Hz的异常频率(引力波频率的一半),物体必须非常接近且非常紧凑;以该频率绕轨道运行的牛顿点质量相等,相距仅约350公里。一对中子星虽然紧凑,但没有所需的质量,而啁啾质量降低的黑洞中子星双星的总质量将非常大,因此会以更低的频率合并。这使得黑洞成为唯一已知的足够紧凑的物体,可以在没有接触的情况下达到75赫兹的轨道频率。此外,波形在达到峰值后的衰减与黑洞弛豫到最终静止克尔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。

1.1.1. 探测器

引力波天文学利用多个广泛分离的探测器来区分引力波与当地仪器和环境噪声,提供源天空定位,并测量波极化。每个LIGO站点都运行一个高级LIGO

探测器 $[33]$,一种改进的迈克尔逊干涉仪(见图3),测量重力波应变与其正交臂长度的差异。每个臂由两个镜子组成,作为测试质量块,由 $L_x \approx L_y \approx L/4\text{ km}$ 分开。经过的引力波有效地改变了臂长,使得测量的差异为 $\Delta L \approx \frac{1}{2}(L_x - L_y)h \approx \frac{1}{2}Lh$,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分束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。

为了获得足够的灵敏度来测量引力波,探测器对基本的迈克尔逊干涉仪进行了几项增强。首先,每个臂都包含一个由两个测试质量镜形成的谐振光学腔,它将引力波对光相位的影响乘以300倍 $[48]$ 。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额外的共振积累 $[49,50]$:分束器上的20W of 激光输入增加到700W入射,进一步增加到每个臂腔中循环的100kW。第三,输出端的部分透射信号回收镜优化了

通过加宽臂腔的带宽来提取引力波信号 [5 1 , 5 2]。

干涉仪用 1 0 6 4

n m波长的 N d : Y A G激光照射, 振幅、频率和光束几何形状稳定 [5 3 , 5 4]。使用零差读数在输出端口提取引力波信号 [5 5]。

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, 从而最大限度地减少光子散粒噪声 (高频的主要噪声) 的影响。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。每个测试质量块都作为四摆系统的最后一级悬挂 [5 6] , 由主动隔震平台支撑 [5 7]。对于频率高于 1 0 H z 的情况, 这些系统共同提供了超过 1 0 个数量级的地震动隔离。通过在测试块中使用低机械损耗材料及其

悬浮液: 试验质量为 4 0 k g 熔融石英基质, 具有低损耗介电光学涂层 [5 8 , 5 9] , 并悬浮有上述阶段的熔融石英纤维 [6 0]。我会的

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振动台上。为了减少瑞利散射引起的光相位波动, 包含臂腔光束的直径为 1 . 2 m 的管中的压力保持在 1 μ P a 以下。

伺服控制用于保持臂腔处于共振状态 [6 1] , 并保持光学元件的正确对齐 [6 2]。通过测量探测器对调制校准激光束的光子压力引起的测试质量运动的响应, 对探测器输出进行校准 [6 3]。校准的幅度不确定度 (1) 小于 1 0 % , 相位不确定度小于 1 0 度, 并在选定频率下用校准激光激励进行连续监测。使用两种替代方法来验证绝对校准, 一种参考主激光器波长, 另一种参考射频振荡器

[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。

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、麦克风、磁力计、无线电接收器、天气传感器、交流电力线监测器和宇宙射线探测器 [6 5]。另有约105个通道记录干涉仪的工作点和控制系统的状态。数据收集与全球定位系统 (GPS) 时间同步, 优于 $10\mu\text{s}$ [6 6]。每个观测站都使用原子钟和辅助GPS接收器验证计时精度。

在其最敏感的频带 $100 - 300\text{Hz}$ 内, 目前的LIGO探测器对应变的敏感度是初始LIGO的3到5倍 [6 7]; 在较低频率下, 改善更大, 在 60Hz 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。对于与GW150914质量相似的二元黑洞, 这里报告的观测结果所测量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

两个探测器在GW150914附近稳定运行了几个小时。所有性能指标, 特别是其平均灵敏度和瞬态噪声行为, 都是整个分析期的典型特征 [6 9 , 7 0]。

对仪器和环境干扰进行了详尽的调查, 没有证据表明GW150914可能是仪器人造物 [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, 任何足以引起观测信号的外部干扰都会被环境传感器阵列清楚地记录下来。没有一个环境传感器记录到像GW150914那样在时间和频率上演变的任何扰动, 在包含GW150914的那一秒内, 所有环境波动都太小, 无法占其应变幅度的6%以上。特别注意寻找可能在两个地点产生几乎同时信号的远程相关干扰。未发现明显干扰。

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。许多具有明显的特征, 在对引力波不敏感的辅助数据通道中可见; 这种仪器瞬态从我们的分析中删除了 [6 9]。数据中残留的任何仪器瞬态都在估计的探测器背景中得到了考虑

如下所述。没有证据表明两个探测器之间存在时间相关性。

V. 搜索

我们分析了2015年9月12日至10月20日两个LIGO探测器之间16天的巧合观测结果。这是2016年1月12日结束的高级LIGO第一个观测期的数据子集。

GW150914被两种不同类型的搜索可靠地检测到。其中一个目标是使用与广义相对论预测的波形进行最佳匹配滤波, 从紧凑物体的闪烁中恢复信号。其他搜索针对的是广泛的通用瞬态信号, 对波形的假设最小。这些研究使用独立的方法, 它们对探测器噪声的反应由不同的、不相关的事件组成。然而, 预计两次搜索都会检测到来自二元黑洞合并的强烈信号。

每次搜索都会确定在两个观测站检测到的候选事件, 这些事件与站点间传播时间一致。事件被分配了一个检测统计值, 该值对它们成为引力波信号的可能性进行排序。候选事件的重要性由搜索背景决定——探测器噪声产生检测统计值等于或高于候选事件的事件的速率。估计这一背景具有挑战性, 原因有两个: 探测器噪声是非平稳和非高斯的, 因此其性质必须通过经验确定; 并且不可能屏蔽探测器免受引力波的影响, 从而直接测量无信号背景。用于估计背景的具体程序在两次搜索中略有不同, 但都使用了时移技术: 一个探测器数据的时间戳被人为地偏移了一个与站点间传播时间相比较大的偏移集, 并根据这个时移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, 这是估计背景的有效方法。在这个过程中, 一个探测器中的引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。这会导致对噪声背景的高估, 从而对候选事件的重要性进行更保守的评估。

非高斯噪声的特征在不同的时频区域之间有所不同。这意味着搜索背景在搜索的信号空间内并不均匀。为了最大限度地提高灵敏度并更好地估计事件的重要性, 搜索根据其时频形态将背景估计和事件候选者分为不同的类别。候选事件的重要性是根据其类别的背景来衡量的。为了解释搜索的原因

如果存在多个类别,则该重要性会降低一个等于类别数量的试验因子[71]。

A. 通用瞬态搜索

设计用于在没有特定波形模型的情况下运行,该搜索在探测器应变数据的时频表示中识别出重合的过量功率[43, 72],信号频率高达1

kHz,持续时间长达几秒钟。

该搜索使用多探测器最大似然法重建了两个探测器中与共同引力波信号一致的信号波形。根据检测统计量 $\chi^2_{\text{efficiency}}$ efficiency efficiency efficiency efficiency inficiency $2E_c = \delta 1^\circ E_n = E_{c \rightarrow p}$ 对每个符号进行排名,其中 E_c 是通过互相关两个重建波形获得的无量纲相干信号能量, E_n 是从数据中提取重建信号后的无量纲残余噪声能量。因此,统计量 χ^2 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,事件被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学的事件(C1类),频率随时间增加的事件(C3类),以及所有剩余的事件(C2类)。

检测到 $\chi^2_{20.0}$ 时, GW150914 是整个搜索中最强的事件。与它的合并信号特征一致,它出现在具有增加时频演化的事件的搜索类C3中。在相当于67400多年数据的背景下进行测量,包括用于解释搜索类别的试验系数3,其误报率低于22500年中的1。这相当于在分析期间观察到一个或多个与GW150914一样强的噪声事件的概率 $< 2 \times 10^{-6}$, 相当于4.6。图的左侧面板。4显示了C3类的结果和背景。

定义搜索类C3的选择标准通过引入对信号形态的约束来减少背景。为了说明GW150914在具有任意形状的事件背景下的重要性,我们还展示了使用与上述相同的事件集但没有此约束的搜索结果。具体来说,我们只使用两个搜索类:C1类和C2与C3类的并集($C2 \cup C3$)。在这个两类搜索中, GW150914事件在C2 \cup C3类中找到。图4的左侧面板显示了C2 \cup C3类结果和背景。在这一类别的背景下,有四个 $\chi^2_{32.1}$ 的事件, GW150914的虚警率为8400年1次。这相当于 5×10^{-6} 的误报概率,相当于4.4。

为了提高鲁棒性和验证性,我们还使用了其他通用的客户端搜索算法[41]。不同的搜索[73]和参数估计随访[74]检测到GW150914具有一致的显著性和信号参数。

B. 二元合并搜索

该搜索针对的是单个质量为1至9.9 M、总质量小于100 M、无量纲自旋高达0.99的双星系统的引力波发射[44]。为了模拟总质量大于4 M的系统,我们使用了有效的单体形式[75],该形式将后牛顿方法[11, 76]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[77, 78]假设合并物体的自旋与轨道角动量对齐,但结果模板仍然可以在GW150914[44]的参数范围内有效地恢复自旋对齐的系统。大约250000个模板波形用于覆盖该参数空间。

搜索计算每个探测器中每个模板的匹配滤波器信号与噪声 $\delta t \cdot b$,并识别 $\delta t \cdot b$;相对于信号到达时间的最大值[79-81]。对于每个最大值,我们计算一个卡方统计量 $2r$,以测试几个不同频带中的数据是否与匹配模板一致[82]。 $2r$ 接近1的值表明信号与合并一致。如果 $2r$ 大于1,则 $\delta t \cdot b$ 被重新加权为 $\hat{c}^{1/4} = f^{1/2} 1; \delta 2r \cdot b$; $3 = 2g1 = 6$ [83, 84]。最后一步是通过选择出现在15 ms窗口内且来自同一模板的事件对来强制探测器之间的一致性。15 ms的窗口由10 ms的站点间传播时间加上5 ms的弱信号竞争时间的不确定性决定。我们根据两个探测器的 \hat{c} 的正交和 \hat{c} 对重合事件进行排序,为4产生此搜索的背景数据,对一个探测器的信噪比最大值进行时移,并计算一组新的事件。重复该过程107次,产生的噪声背景分析时间相当于608000年。

为了考虑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事件和背景事件分为三个搜索类。图4的右侧面板显示了GW150914搜索类的背景。GW150914的 $\hat{c}^{1/4} 2.3 \cdot 6$ 检测统计值大于任何背景事件,因此只能对其误报率设置上限。在三个搜索类别中,这一界限为23000年一遇。这意味着误报概率 $< 2 \times 10^{-7}$,对应于5.1。

第二个独立的匹配滤波器分析使用不同的方法来估计其事件的显著性[85, 86],也检测到GW150914具有相同的信号参数和一致的显著性。

当一个事件被确定为真实的引力波信号时,如GW150914,用于确定其他事件重要性的背景在没有该事件贡献的情况下被重新估计。这是图4右侧面板中显示为紫色线的背景分布。基于此,第二个最重要的事件的误报率为每2.3年1次,相应的泊松误报概率为0.02。对该事件的波形分析表明,如果它的起源是灾难性的,它也是一个二元黑洞计[44]。

V. 来源讨论

匹配滤波器搜索针对检测信号进行了优化,但它只提供了源参数的近似估计。为了改进它们,我们使用了基于广义相对论的模型[77, 78, 87, 88],其中一些模型包括自旋进动,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[89]。源的初始和最终质量、最终自旋、距离和红移如表1所示。主黑洞的自旋被限制在 < 0.7 (90%可信区间),表明它没有达到最大自旋,而次黑洞的自旋仅受到弱约束。[39]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[92, 93]中二元黑洞合并的数值模拟拟合,我们提供了最终黑洞的质量和自旋、引力波辐射的总能量和峰值引力波光度的估计[39]。估算的生命波辐射总能量为 $3.0 \times 0.5 - 0.5 M c^2$ 。该系统达到峰值引力波光度 $3.6 \times 0.5 - 0.4 \times 10^{56} \text{ erg/s}$,相当于 $200 \times 30 - 20 M c^2 = s$ 。

已经进行了几次分析,以确定GW150914是否与二进制一致

广义相对论中的黑洞系统 [9 4]。第一次一致性检查涉及最终黑洞的质量和自旋。在广义相对论中,黑洞二元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。对于准圆形的吸气,爱因斯坦方程唯一地预测了这些吸气是两个前身黑洞质量和自旋的函数。使用根据数值相对论模拟校准的拟合公式 [9 2],我们验证了从宇宙早期推断出的剩余质量和自旋与从后期独立推断出的残余质量和自旋是一致的,没有证据表明与广义相对论存在分歧。

在后牛顿形式中,吸气过程中引力波形的相位可以表示为 $f_1 = 3$ 的幂级数。这种膨胀系数可以在广义相对论中计算出来。因此,我们可以通过允许系数偏离标称值来测试与广义相对论的一致性 [9 5 , 9 6],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质量 $m_g < 1.2 \times 10^{-22} \text{ eV} = c^2$ 的界限。这分别将太阳系和双星脉冲星界 [9 8 , 9 9]提高了几个、几个和几个,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]中得出的模型相关界。总之,这三个检验都与广义相对论在引力强场条件下的预测一致。

GW150914证明了质量大于 $2.5 M_\odot$ 的恒星质量黑洞的存在,并确定了双星黑洞可以在哈勃时间内在自然界中形成并合并。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。恒星演化形成如此巨大的黑洞需要巨大的恒星风,这在金属丰度低于太阳值 $Z = 0.02$ 的恒星环境中是可能的 [1 0 8 1 0 9]。 [1 1 0]中讨论了这一二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恒星质量双星黑洞合并的速率。使用几种不同的潜在二元黑洞质量分布模型,我们在共动框架中获得了 $2 - 400 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$ 的速率估计 [1 1 1 - 1 1 3]。这与 [1 1 4]中回顾的广泛的事件率预测是一致的,只排除了最低的事件率。

较大距离的二元黑洞系统在未解决系统的叠加上产生了引力波的随机背景。这样的预测

背景见 [1 1 5]。如果检测到这种爆发的信号,它将提供有关宇宙历史上这种双星系统演化的信息。

七、展望

有关这些结果和相关数据发布的更多详细信息,请参阅 [1 1 6]。整个第一观测期的分析结果将在未来的出版物中报告。正在努力显著增强全球引力波探测器网络 [1 1 7]。其中包括进一步调试 Advanced LIGO探测器以达到设计灵敏度,这将允许以3倍的信噪比检测GW150914等二进制文件。此外,先进的Virgo、KAGRA和印度可能的第三个LIGO探测器 [1 1 8]将扩展这一网络,并显著改善源的位置重建和参数估计。

八、结论

LIGO探测器观测到了两个恒星质量黑洞合并产生的引力波。检测到的波形与一般相对论对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预测相匹配。这些观测结果证明了双晶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。

致谢

作者衷心感谢美国国家科学基金会 (NSF) 对 LIGO实验室和先进 LIGO实验室的建设和运营的支持,以及英国科学技术设施委员会 (STFC)、马克斯·普朗克学会 (MPS) 和德国下萨克森州对先进 LIGO的建设和 GEO 600探测器的建设和运行的支持。澳大利亚研究委员会为 Advanced LIGO was 提供了额外支持。作者衷心感谢意大利国家原子核研究所 (INFN)、法国国家科学研究中心 (CNRS) 和荷兰科学研究组织支持的物质基础研究基金会,感谢 Virgo 探测器的建造和运行,以及 EGO 财团的创建和支持。作者还衷心感谢这些机构以及印度科学与工业研究委员会、科学和技术部的研究支持

技术,印度,科学与工程研究委员会(SERB),印度,人力资源开发部,印度经济部,经济竞争委员会,理事会经济竞争委员会和教育委员会,巴勒斯省文化大学,波兰国家科学中心,欧洲委员会,皇家学会,苏格兰基金会,苏格兰大学物理联盟,匈牙利科学研究基金会,里昂起源研究所(LIO),韩国国家研究基金会、加拿大工业部和安大略省经济发展部加拿大自然科学与工程研究委员会、加拿大高级研究院、巴西科学技术与创新部、俄罗斯基础研究基金会、Leverhulme信托基金、研究公司、科技部、台湾和Kavli基金会。作者衷心感谢NSF、STFC、MPS、INFN、CNRS和德国下萨克森州对提供计算机资源的支持。本文的文件编号为LIGO-P150914和VIR-0015A-16。

- [1] A. 爱因斯坦. K. 普鲁士. 阿卡德. 维斯. 1, 688 (1916). [2] A. 爱因斯坦. K. 普鲁士. 阿卡德. 维斯. 1, 154 (1918). [3] P. R. Saulson, 雷瑟夫将军. 重力. 43, 3289 (2011). [4] 史瓦西. K. 普鲁士. 阿卡德. 维斯. 1, 189 (1916). [5] D. 芬克尔斯坦, 《物理学》. 第110965号修订本(1958年). [6] M. D. Kruskal, 物理学. 修订版1191743(1960年). [7] R. P. Kerr, 物理. 莱特牧师. 11, 237 (1963). [8] C. V. Vishveshwara, 《自然》(伦敦)227936(1970). [9] W. H. 出版社, 《天体物理学》. J. 170, L105(1971). [10] S. Chandrasekhar and S. L. Detweiler. R. Soc. A 344441(1975). [11] L. Blanchet, T. Damour, B. R. Iyer, C. M. Will 和 A. G. Wiseman, 《物理学》. 莱特牧师. 74, 3515 (1995). [12] L. Blanchet, 《相对论生活评论》, 第17卷, 第2期(2014年). [13] A. Buonanno and T. Damour, 物理学. 修订版 D 59084006(1999). [14] F. Pretorius, 物理学. 莱特牧师. 95, 121101 (2005). [15] M. Campanelli, C. O. Lousto, P. Marronetti 和 Y. Zlochower, 《物理学》. 莱特牧师. 96, 111101 (2006). [16] J. G. Baker, J. Centrella, D. I. Choi, M. Koppitz 和 J. van Meter, 物理. 莱特牧师. 96, 111102 (2006). [17] B. L. Webster and P. Murch, 《自然》(伦敦)235, 37(1972). [18] C. T. Bolton, 《自然》(伦敦)240124(1972). [19] J. Casares and P. G. Jonker, 《空间科学》. 修订版183223(2014). [20] R. A. Hulse and J. H. Taylor, 天体物理学. J. 195, L51(1975).

- [21] J. H. Taylor 和 J. M. Weisberg, 天体物理学. J. 253908(1982). [22] W. Press 和 K. Thorne, Annu. 阿斯特伦牧师. 天体物理学10335(1972). [23] J. Weber, 《物理学》. 第117306号修订本(1960年). [24] P. Astone 等人, 《物理学》. 修订版 D 82022003(2010). [25] M. E. Gertsenshtein 和 V. I. Pustovoit, Sov. 物理. 第433页(1962年). [26] G. E. Moss, L. R. Miller 和 R. L. Forward, 《掌声》. 选择. 10, 2495 (1971). [27] R. Weiss, 电磁耦合宽带重力静止天线, 电子研究实验室季度报告, 麻省理工学院第105号报告, 1972年, <https://dcc.ligo.org/LIGO-P720002/public/>. [28] R. W. P. Drever, 《引力辐射》, N. Deruelle 和 T. Piran 编辑(北荷兰, 阿姆斯特丹, 1983年), 第321页. [29] R. W. P. Drever, F. J. Raab, K. S. Thorne, R. Vogt 和 R. Weiss, 激光干涉引力波观测(LIGO)技术报告, 1989年, <https://dcc.ligo.org/LIGO-M890001/public/>. [30] A. 阿布拉莫维奇等人, 《科学》256325(1992). [31] A. Brillet, A. Giazotto 等人, 处女座项目技术报告编号VIR-0517A-15, 1989年, <https://tds.ego-gw.it/ql/?c=11247>. [32] J. Hough 等人, 关于德国-英国联合干涉引力波探测器的建议, MPQ技术报告147, 编号GWD/137/JH(89), 1989年, <http://eprints.gla.ac.uk/114852>. [33] J. Aasi 等人, 经典量子引力320074001(2015). [34] F. Acernese 等人, 经典量子引力320024001(2015). [35] C. Affeldt 等人, 经典量子引力31224002(2014). [36] 麻生太郎、道村、草谷、安藤忠雄、宫川、关口、立井和山本, 物理. 修订版 D 88043007(2013). [37] 所示波形为SXS:BBH:0305, 可在以下时间下载<http://www.blackholes.org/波形>. [38] A. H. Mroué 等人, 《物理学》. 莱特牧师. 111, 241104(2013). [39] B. Abbott 等人, arXiv:1602.03840. [40] N. J. Cornish 和 T. B. Littenberg, 经典量子引力32135012(2015). [41] B. Abbott 等人, arXiv:1602.03843. [42] S. Chatterji, L. Blackburn, G. Martin 和 E. Katsavounidis, 经典量子引力21, S1809(2004). [43] S. Klimenko 等人, 《物理学》. 修订版 D 93042004(2016). [44] B. Abbott 等人, arXiv:1602.03839. [45] S. A. Usman 等人, arXiv:1508.03357. [46] B. Abbott et al., <https://dcc.ligo.org/LIGO-P1500227/public/>. [47] B. Abbott 等人, arXiv:1602.03838. [48] R. W. P. Drever, 《引力波的探测》, D. G. Blair 主编(剑桥大学出版社, 英国剑桥, 1991年). [49] R. W. P. Drever 等人, 《量子光学、实验引力与测量理论》, P. Meystrand M. O. Scully 主编, NATO ASI, Ser. B, 第94卷(Plenum出版社, 纽约, 1983年), 第503-514页。

[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. Strain, P. G. Nelson, J. M. Chen, R. Schilling, A. Rüdiger, W. Winkler 和 K. Danzmann, 物理学。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, 014502 (2016)。[55] T. T. Fricke 等人, 经典量子引力 29065005 (2012)。[56] S. M. Aston 等人, 经典量子引力 29235004 (2012)。[57] F. Matichard 等人, 经典量子引力 32185003 (2015)。[58] G. M. Harry 等人, 《经典量子引力》24405 (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 31245010 (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, 《引力波: 第八届 Edoardo Amaldi 会议论文集》, Amaldi, 纽约, 2009年; 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. Heefner, S. Márka, Z. Márko, 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 32115012 (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 32245005 (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, E. Xhakaj, F. Salemi, M. Drago, G. Vedovato 和 S. Klimenko, Phys. 修订版 D 93022002 (2016)。[75] A. Buonanno 和 T. Damour, 物理学。修订版 D 620064015 (2000)。[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。修订版 D 89061502 (2014)。[78] M. Pürrer, 经典量子引力 31195010 (2014)。[79] B. 艾伦, W. G. 安德森, P. R. 布雷迪, D. A. 布朗和 J. D. E. Creighton, 物理。修订版 D 85122006 (2012)。[80] B. S. Sathyapra

kash, 《物理学》。修订版 D 60022002 (1999)。[82] B. 艾伦, 物理。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, N. Fotopoulos, M. A. Frei, C. Hanna, A. J. Weinstein 和 J. T. 惠兰, 物理学。D 89, 024003 (2014)。[87] M. 汉南, P. 施密特, A. 波赫, L. 海格尔, S. 胡萨, F. 欧姆, G. 普拉滕和 M. Pürrer, 《物理学》。莱特牧师。 113, 151101 (2014)。[88] S. Khan, S. Husa, M. Hannam, F. Ohme, M. Pürrer, X. Jiménez Forteza 和 A. Bohé, 《物理学》。修订版 D 93044007 (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, 1163 (1987)。[91] P. A. R. Ade 等人, arXiv:1502.01589。[92] J. Healy, C. O. Lousto 和 Y. Zlochower, 《物理学》。修订版 D 90104004 (2014)。[93] S. Husa, S. Khan, M. Hannam, M. Pürrer, F. Ohme, X. Jiménez Forteza 和 A. Bohé, 《物理学》。修订版 D 93044006 (2016)。[94] B. Abbott 等人, arXiv:1602.03841。[95] C. K. Mishra, K. G. Arun, B. R. Iyer 和 B. S. Sathyapraakash, 物理学。修订版 D 82064010 (2010)。[96] 李, 德尔波佐, 维塔莱, 范, 阿加索斯, 维奇, 格罗弗, 西德里, 斯图拉尼和 A. 维琪奥, 物理。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. M. 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 65044022 (2002)。[100] A. S. Goldhaber 和 M. M. Nieto, 《物理学》。第 D 版, 1119 (1974)。[101] S. Choudhury 和 S. SenGupta, 欧洲物理学。J. C 743159 (2014)。[102] A. Tutukov 和 L. Yungels on, Nauchnye Informatsii 27, 70 (1973)。[103] V. M. Lipunov, K. A. Postnov 和 M. E. Prokhorov, 周一。没有。R. Astron. 美国律师会 288245 (1997)。[104] K. Belczynski, S. Repetto, D. Holz, R. O'Shaughnessy, T. Bulik, E. Berti, C. Fryer, M. Dominik, arXiv:1510.04615 [天体物理学杂志 (待出版)]。[105] S. Sigurdsson 和 L. Hernquist, 《自然》(伦敦) 364423 (1993)。[106] S. F. Portegies Zwart 和 S. L. W. McMillan, 天体物理学。J. Lett. 528, 117 (2000)。[107] C. L. Rodriguez, M. Morscher, B. Pattabiraman, S. Chatterjee, C. J. Haster 和 F. A. Rasio, 《物理学》。Rev. Lett. 11505101 (2015)。[108] K. Belczynski, T. Bulik, C. L. Fryer, A. Ruiter, F. Valsecchi, J. S. Vink 和 J. R. Hurley, 天体物理学。J. 714, 1217 (2010)。[109] M. Spera, M. Mapelli 和 A. Bressan, 周一。没有。R. Astron. 《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。

[112] C. Kim, V. Kalogera and D. R. Lorimer, 天体物理学. J. 584985 (2003). [113] W. M. Farr, J. R. Gair, I. Mandel and C. Cutler, 《物理学》. 修订版 D 91023005 (2015). [114] J. Abadie 等人, 经典量子引力 27173001 (2010). [115] B. Abbott 等人, arXiv: 1602.03847.

[116] LIGO 开放科学中心 (LOSC), <https://losc.ligo.org/events/GW150914/>. [117] B. P. Abbott 等人 (LIGO 科学合作和 Virgo 合作), 《相对论生活评论》19, 1 (2016). [118] B. Iyer 等人, LIGO 印度技术报告编号 LIGO-M11002962011, <https://dcc.ligo.org/LIGO-M1100296/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. Addresso, 3 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, 13 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. 阿赖, 1 M. A. 阿赖, 5 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, 27 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. 鲍尔默, 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. 巴伦, 3, 4 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, 19 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. Betzwisser, 6 S. Bhagwat, R. Bhandare, I. A. Bilenko, G. Billingsley, J. Birch, I. A. Birney, 3548491650 O. Birnholtz, 8 S. Biscans, 10 A. Bisht, 8, 17 M. 比托西, 34 C. Biwer, 35 M. A. Bizouard, 23 J. K. Blackburn, 1 C. D. 布莱尔, 51 D. G. 布莱尔, 51 R. M. 布莱尔, 37 S. Bloemen, 52 O. 博克, 8 T. P. 博迪亚, 10 M. Boer, 53 G. Bogaert, 53 C. Bogan, 8 A. Bohe, 29 P. Bojtis, 54 C. Bond, 45 F. Bondu, 55 R. Bonnand, 7 B. A. 博姆, 9 R. Bork, 1 V. Boschi, 18, 19 S. Bose, 56, 14 Y. Bouffanaiss, 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. Brisson, 23 P. Brockill, 16 A. F. 布鲁克斯, 公元一世纪布朗, 公元三十五世纪布朗, 北纬四十五度布朗, 公元十世纪布坎南, 公元二世纪布凯马, 公元十年布利克, 44 H. J. 布尔滕, 61, 9 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, 1 J. 卡尔德隆·布斯蒂洛, 66, 63 T. 卡利斯特, 1 E. 卡洛尼, 67, 4 J. B. Camp, 68 K. C. Cannon, 69 J. Cao, 70 C. 卡帕诺, 8 E. Capocasa, 30 楼. Carbognani, 34 S. Caride, 71 J. Casanueva Diaz, 23 C. Casentini, 25, 13 S. Caudill, 16 M. Cavaglià, 21 F. Cavalier, 23 R. 卡瓦列里, 34 G. Cella, 19 C. B. Cepeda, 1 L. Cerboni Baiardi, 57, 58 G. Cerretani, 18, 19 E. Cesarini, 25, 13 R. Chakraborty, 1 T. 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, 75 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, 51 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, 28 C. G. 科莱特, 80 L. 科明斯基, 81 M. 小康斯坦西奥, 11 A. 孔蒂, 79, 28 L. 孔蒂, 42 D. 库克, 37 T. R. 科比特, 2 N. 康沃尔, 31 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, 16 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 Canton, 8 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, 48 H. P. Daveloza, 83 M. Davier, 23 G. S. Davies, 36 E. J. Daw, 86 R. Day, 34 S. De, 35 D. DeBra, 40 G. Debreczeni, 38 J. Degallaix, 65 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. DeRosa, 6 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. 多伊辛斯基, 88 V. 多利克, 65 F. 多诺万, 10 K. L. 杜利, 21 S. 多拉瓦里, 6, 8 R. 道格拉斯, 36 T. P. 唐斯, 16 M. Drago, 8, 89, 90 R. W. P. 德雷弗, 1 J. C. Driggers, 37 Z. 杜, 70 M. Ducrot, 7 S. E. 德怀尔, 37 T. B. 埃多, 86 M. C. 爱德华兹, 78 A. 埃佛尔, 6 H. B. 埃根施泰因, 8 P. 埃伦斯, 1 J. Eichholz, 5 S. S. Eikenberry, 5 W. 恩格斯, 76 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. 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, 28 F. 弗拉斯科尼, 19 M. 弗雷德, 8 Z. 弗雷, 54 A. 弗雷斯, 45 R. 弗雷, 59 V. 弗雷, 23 T. T. 弗里克, 8 P. 弗里切尔, 10 V. 弗罗洛夫, 6 P. 富尔达, 5 M. Fyffe, 6 H. A. G. Gabbard, 21 J. R. Gair, 93 L. Gammaitoni, 32, 33 S. G. Gammaitoni, 14 F. Garufi, 67, 4 A. Gatto, 30 G. Gaur, 94, 95 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, 15

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, 5E. Goetz, 98 R. Goetz, 5 L. Gondan, 54
G. González, 2 J. M. Gonzalez Castro, 18, 19 A. Gopakumar, 99
N. A. Gordon, 36M. 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, 10C. 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, 57, 58X. 郭, 70 A. 笈多, 14 M. K. 笈多, 95 K. E. 古斯塔, 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, 56E. D. 霍尔, 1 G. 哈蒙德, 36 M. 哈里, 99 M. 汉克, 8 J. 汉克斯, 37 C. 汉纳, 72 M. 汉南, 91
J. 汉森, 6T. 哈德威克, 2 J. 哈姆斯, 57, 58 G. M. 哈里, 101 I. W. 哈里, 29 M. J. 哈特, 36 M. T. 哈特曼, 5
C. - J. 哈斯特, 45 K. 豪吉安, 36 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, 34M. 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, 65S. 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, 51Y. 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. Idrisy, 72
N. Indik, 8 D. R. Ingram, 37 R. Inta, 71 H. N. Ilsa, 36 J. - M. Isac, 60 M. Isi, 1 G. Islas, 22
T. Isogai, 10 B. R. Iyer, 15 K. Izumi, 37M. B. Jacobson, 1 T. Jacqmin, 60 H. Jang, 77
K. Jani, 63 P. Jaranowski, 106 S. Jawahar, 107 F. Jiménez Forteza, 66
W. Johnson, 2N. K. Johnson McDaniel, 15 D. I. Jones, 26 R. Jones, 36 R. J. G. Jonker, 9
L. Ju, 51 K. Haris, 108 C. V. Kalaghatgi, 24, 91V. Kalogera, 82 S. Kandhasamy, 21
G. Kang, 77 J. B. Kanner, 1 S. Karki, 59 M. Kasprzack, 2, 23, 34
E. Katsavounidis, 10W. 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, 35W. 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, 95E. A. Khazanov, 109 N. Kijbunchoo, 37 C. Kim, 77 J. Kim, 110 K. Kim, 111 Nam Gyu
Kim, 77 Namjun Kim, 40 Y. - M. Kim, 110E. 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. Kokeyama, 2S. Koley, 9 V. Kondrashov, 1 A. Kontos, 10 S. Koranda, 16 M. Korobko, 27
W. Z. Korth, 1 I. Kowalska, 44 D. B. Kozak, 1V. Kringel, 8 B. Krishnan, 8 A. Królak, 112113
C. Krueger, 17 G. Kuehn, 8 P. Kumar, 69 R. Kumar, 36 L. Kuo, 73
A. Kutynia, 112P. 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, 79, 28S. 李继, 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, 90J. 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, 116N. 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. Loriette, 117M. 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, 78R. 林奇, 10 Y. Ma, 51 T. MacDonald, 40
B. Machenschalk, 8 M. MacInnis, 10 D. M. Macleod, 2 F. Magaña-Sandoval, 35R. M. Magee, 56
M. Mageswaran, 1 E. Majorana, 28 I. Maksimovic, 117 V. Malvezzi, 25, 13 N. Man, 53
I. Mandel, 45 V. Mandic, 84V. 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, 39A. 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. Marx, 1K. 梅森, 10
A. Masserot, 7 T. J. Massinger, 35 M. Masso Reid, 36 F. Matichard, 10 L. Matone, 39
N. Mavalvala, 10N. 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, 1J. McIver, 1 D. J. McManus, 20 S. T. McWilliams, 105 D. Meacher, 72
G. D. Meadors, 29, 8 J. Meidam, 9 A. Melatos, 85G. 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. 米德尔顿, 45 E. 米哈伊洛夫, 120 L. 米兰, 67, 4J. 米勒, 10
M. 米尔豪斯, 31 Y. 米南科夫, 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, 49G. 米切尔马赫, 5 R. 米特利曼, 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. C. 摩尔, 88 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. Mueller, 5G. Mueller, 5 A. W. Muir, 91 Arunava
Mukherjee, 15 D. Mukherjee, 16 S. Mukherjee, 83 N. Mukund, 14 A. Mulavey, 6J. 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. Necula, 5K. 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, 52, 9A. 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, 100E. 欧尔克, 10 G. H. Ogini, 124 J. Oh, 125 S. H. Oh, 125F. Ohme, 91
M. Oliver, 66 P. Oppermann, 8 Richard J. Oram, 6 B. O'Reilly, 6R. 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. Pankow, 62 C. Pannarale, 91 B. Pant, 48 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. Passaquietti, 18, 19D. 帕苏埃洛, 19 B. Patr icelli, 8, 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. 贝利, 6S. 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, 57, 58V. 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. Post, 8

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, 87 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, 16 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. Rafai, 54 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, 98 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, 83 R. 罗曼诺, 3, 4 G. 罗曼诺夫, 120 J. H. 罗密, 6
D. 罗辛斯卡, 127, 43 S. 罗文, 36 A. 吕迪格, 8 P. 鲁吉, 34 K. 瑞安, 37 S. 萨奇德夫, 1 T. Sadecki, 37
L. Sadeghian, 16 L. Salconi, 34 M. Saleem, 108 F. Salemi, 8 A. Samajdar, 123
L. Sammut, 85 114 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, 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. Schmidt, 8 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, 29 J. 斯科特, 36 S. M. 斯科特, 20
D. 塞勒斯, 6 A. S. 森古普塔, 94 D. 森滕纳克, 34 V. 塞奎诺, 25, 13 A. 谢尔盖夫, 109 G. 塞尔纳, 22 Y. Setyawati, 52, 9
A. Sevigny, 37 D. Shaddock, 20 T. Shaffer, 37 S. Shah, 52.9 M. S. Shahriar, 82 M. Shaltev, 8
Z. Shao, 1 B. 夏皮罗, 40 P. Shawhan, 62 A. Sheperd, 16 D. H. 鞋匠, 10 D. M. 鞋匠, 63 K. Siellez, 53, 63
X. 西门子, 16 D. Sigg, 37 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, 47 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, 49 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, 97 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, 114 S. 蒂瓦里, 12
V. Tiwari, 91 K. V. Tokmakov, 107 C. Tomlinson, 86 M. Tonelli, 18, 19 C. V. Torres, 83
C. I. Torrie, 1 D. Töyrä, 45 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, 83 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, 35, 22 L. van der Schaaf, 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. 韦金特, 7 F. 韦特拉诺, 57, 58
A. 维切雷, 57, 58 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. Voudsen, 45 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, 8, 29 G. 王, 12 H. Wang, 45
M. Wang, 45 X. Wang, 70 Y. Wang, 51 H. Ward, 36 R. L. Ward, 20 J. Warner, 37 M. Was, 7
B. Weaver, 37 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, 8 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. Williams, 5 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, 8 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. Yakushin, 6 W. Yam, 10 H. Yamamoto, 1 C. C. Yancey, 62 M. J. Yap, 20 H. Yu, 10 M. Yvert, 7
A. Zadrožny, 112 L. Zandano, 42 M. Zanelin, 97 J. P. Zendri, 42 M. Zevin, 82 F. Zhang, 10
L. Zhang, 1 M. Zhang, 120 Y. Zhang, 102 C. 赵, 61 M. Zhou, 82
Z. Zhou, 82 X. J. Zhu, 51 M. F. Zucker, 1-10 S. F. Zuerow, 103和J. Zweizig, 1

1 LIGO, 加州理工学院, 加利福尼亚州帕萨迪纳, 邮编91125, 美国2路易斯安那州巴吞鲁日路易斯安那州立大学, 邮编70803, 美国3萨勒诺大学, Fisciano, I-84084萨勒诺, 意大利4 INFN, 那不勒斯科学院, 意大利Monte S. Angelo大学, 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, 邮编32611, 美国6 LIGO利文斯顿天文台, 路易斯安那州利文斯顿, 邮编70754, 美国7萨沃伊-勃朗峰大学, CNRS / IN2P3, F-74941法国安娜西勒维尔8阿尔伯特爱因斯坦研究所, 马克斯·普朗克引力物理研究所, D-30167德国汉诺威9尼切夫, 科技园, 1098 XG荷兰阿姆斯特丹10 LIGO, 麻省理工学院, 剑桥, 马萨诸塞州02139美国

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, 德国 18 比萨大学, 比萨 I-56127, 意大利 19 INFN, 比萨学院, I-56127 比萨, 意大利 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 亨奈数学研究所, 印度钦奈 603103 25 罗马托尔维尔加塔大学, 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 波茨坦戈尔德, 德国 30 APC, 天体物理学和宇宙学, 巴黎狄德罗大学, CNRS / IN2P3, CEA / Irfu, 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 Miklósút 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 Artemis, 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, "Lendület" 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, 法国 56 华盛顿州立大学, 普尔曼, 华盛顿 99164, 美国 57 乌尔比诺研究大学 "Carlo Bo", I-61029 乌尔比诺, 意大利 58 INFN, Sezione di Firenze, I-50019 Sesto Fiorentino, 意大利 佛罗伦萨 59 俄勒冈州尤金大学, 俄勒冈州 97403, 美国 60 卡斯特勒·布鲁塞尔实验室, UPMC-Sorbonne 大学, CNRS, ENS-PSL 研究大学, 法国科尔热, F-75005 巴黎, 法国 61 VU 大学阿姆斯特丹, 1081 HV 荷兰阿姆斯特丹 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, 乔治亚理工学院, 亚特兰大, 乔治亚 30332, UStut Lumière Matière, 里昂大学, Claude Bernard Lyon 1, UMR CNRS 5306, 69622 Villeurbanne, F65 Matériaux Avancés 实验室 (LMA), IN2P3 / CNRS, 里昂大学 西班牙那不勒斯大学 "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

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, 加利福尼亚州罗纳特公园949
28, 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07043, 美国89 特伦托大学, 佛罗里达大学, I-38123 波沃, 特伦托, 意大利90 INFN, 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 日本国家天文台, 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, 甘地纳格尔艾哈迈达巴德古吉拉特邦382424, 印度95 甘地纳格尔巴特等离子体研究所382428, 印度96 塞格德
大学, Dómer
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99 Tat
a 基础研究所, 孟买400005, 印度100 Rutherford 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10
6 比亚尔斯托克大学15-424, 格拉斯哥 G1 1XQ, 英国108 ILSER-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112 NCBJ, 05-400
hwierk-Otwock, 波兰113 IM-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117 ESPCI, CNRS, F-75005 巴黎, 法国11
8 卡梅里诺大学, Fisica 大学, I-62032 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21 哥斯达黎加研究所, 圣保罗州立大学 / 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123 ILSER 加尔各答, 西孟加拉邦莫汉布尔741252, 印度124 惠特曼学院, 345 Boyer Avenue, Walla
Walla, Washington 99362 美国125 韩国大田国家数学科学研究所305-390
126 霍巴特和威廉·史密斯学院, 日内瓦, 纽约14456, 美国127 Janusz Gil 天文学研究所, Zielona
Góra 大学, 65-265 Zielona Góra, 波兰

128安德鲁斯大学，密歇根州贝里恩斯普林斯49104，美国129锡耶纳大学，I-53100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，阿比林79699，美国

a 2012年4月去世。b
2015年5月去世。c
2015年3月去世。