



LIGO  
Scientific  
Collaboration



## 对双黑洞并合的引力波的观测

发表于一百年前的广义相对论被物理学家马克斯·波恩誉为“人类认知自然的最伟大业绩”。我们在此报告爱因斯坦理论预言的两个重要科学突破：首次直接探测到引力波和首次观测到双黑洞碰撞与并合。

这个被我们命名为GW150914的激变事件，发生于距离地球10亿光年之外的一个遥远星系中。它于2015年9月14日被激光干涉仪引力波天文台（以下简称LIGO）的两个很可能是人类有史以来制造的最灵敏的科学仪器的探测器观测到。LIGO估算出这个双黑洞并合最后时刻所辐射的引力波的峰值功率比整个可观测宇宙的光度（单位时间释放的电磁波能量）还高10倍以上。这个重大的发现意味着令人振奋的天文学新时代的到来，人类开启了一扇观测宇宙的全新窗口——引力波天文学。

### 背景简介

引力波是时空的“涟漪”，由宇宙中例如致密星体碰撞并合这样剧烈变化的物理过程产生。爱因斯坦于1916年预言了它的存在。他证明做加速运动的大质量天体可以剧烈地撼动时空，并且空间扭曲的波动将从波源辐射出去。这些以光速传播的涟漪携带了天体源激烈动荡的信息以及关于引力本质的线索。在过去的几十年中，天文学家通过观测银河系中密近双星，已经间接地证明了引力波的存在。双星轨道由于引力辐射带走能量而收缩；观测结果完全符合爱因斯坦的理论预言。但是科学家们一直在热切地期望就和这次重大突破一样在地球上对引力波的直接探测的机会，因为这为我们提供了更极端的条件来更严格地验证广义相对论，同时开启一条探索宇宙的全新途径。

在爱因斯坦预言引力波的同一年，物理学家卡尔·史瓦西证明爱因斯坦的广义相对论允许黑洞的存在。它是一个奇异的天体，非常致密，以至于光都难以逃脱它的引力束缚。虽然就字面意义来看我们不能直接“看到”黑洞产生的光，天文学家通过研究黑洞候选体对它周围的物质产生的效应已经收集了大量间接证据。例如，我们认为宇宙中绝大多数星系（包括银河系）的中心都有一个超大质量（数百万乃至数十亿倍于太阳的质量）黑洞。同时还有非常多低质量（从几个到几十个太阳质量）的黑洞候选体；它们被认为是恒星剧烈爆炸——核塌缩超新星——的遗留物。

在黑洞的间接观测研究取得进展的同时，对这些奇异天体的理论理解也在不断加深。例如，过去的十年里，对双黑洞并合前的最后时刻的轨道演化的电脑模拟有了十分显著的进步。这些计算机模型帮我们依据广义相对论精确地计算出引力波波，告诉我们引力波的特征模式在两个黑洞彼此靠近并最终并合为一个更大的黑洞过程中是如何演化的。因此双黑洞并合的直接观测为验证爱因斯坦的理论提供了一个最好的宇宙实验平台。

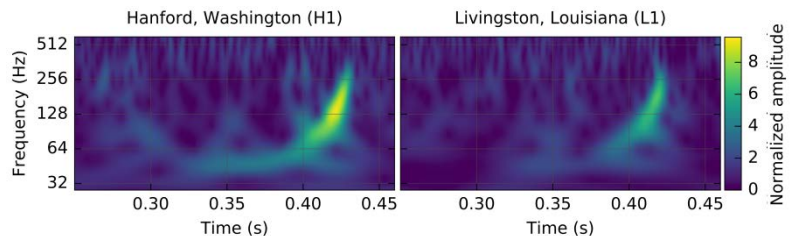


图1 - (取自论文图1) LIGO汉福德 (H1, 左) 和利文斯顿 (L1, 右) 探测器所观测到的GW150914引力波事件。该图展示了在两个LIGO探测器中观测到的由该事件产生的引力波“应变”（见下文）如何随时间（秒）和频率（赫兹）变化。两个图均显示了GW150914的频率在0.2秒内从35赫兹迅速增加到150赫兹。GW150914先到达L1，随后到达H1，前后相差千分之七秒，该时间差与光或者引力波在两个探测器之间传播的时间一致。

请访问我们的网站

<http://www.ligo.org/>



#GravitationalWaves

#BinaryBlackHole

#EinsteinWasRight

## LIGO探测器

LIGO是世界上最大的引力波天文台，同时也是世界上最精密的物理实验之一。它由两个相距几千公里的大型激光干涉仪组成，分别位于美国路易斯安那州的利文斯顿和华盛顿州的汉福德。它利用光和空间本身的物理性质来探测引力波，这是早在二十世纪六七十年代就提出的概念。几台第一代干涉仪在二十一世纪初建造完成，包括日本的TAMA300，德国的GEO600，美国的LIGO和意大利的Virgo。这些探测器在2002年至2011年期间共同进行观测，但并未探测到引力波。在经历重大改造升级之后，两个升级版的LIGO探测器的灵敏度大幅提高，并作为升级探测器网络中的先行者进行观测。

LIGO干涉仪由两条分别长达四公里并且互相垂直的干涉臂构成。沿着每条臂传播的激光束在末端反光镜（悬挂的测试质量）处被反射。当引力波经过时，时空的伸缩导致一条臂长变长的同时另一条臂长变短。当两条臂的长度变得不同时，激光束在两臂传播时间不再相同，也就是说两束激光束的相位不再同步，于是所谓的干涉条纹产生了。这也就是我们称之为干涉仪的原因。两条臂的长度差异与经过的引力波强度（被称为引力波“应变”）成正比，但是其数值之小令人咋舌。一个典型的引力波应变大约在质子直径的万分之一！而具有极高灵敏度的LIGO干涉仪能够测量出如此微小的变化。

图2展示了一个高新LIGO探测器的简化版示意图。

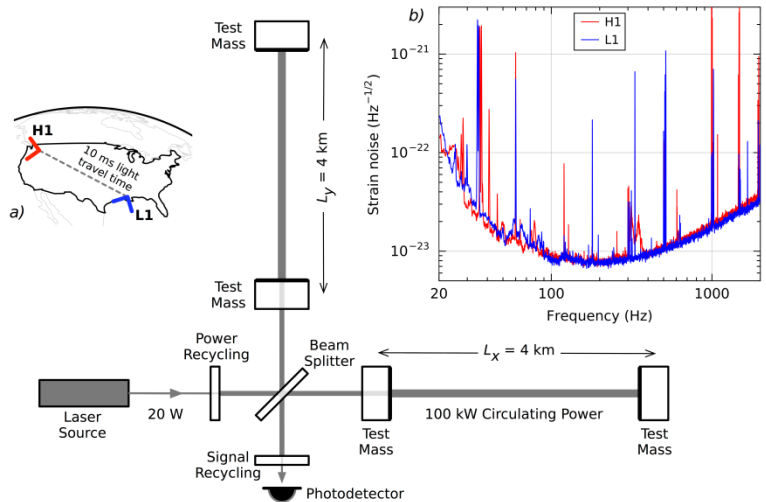


图2：高新LIGO探测器简化示意图（未按比例显示），对基本设计的主要改进包括：一个光学谐振腔，使激光在单臂中来回反射多次，以加强引力波在激光相位上产生的影响；一个功率循环镜，将干涉仪中的激光功率大幅提高；一个信号循环镜，进一步优化从光电探测器中提取的信号。这些改进使得激光功率在光学谐振腔中增强了5000倍，并且延长了信号在干涉仪中循环的时间。图(a)显示了两个LIGO探测器的地理位置和方位，以及光在它们之间传播所需的时间。图(b)展示了在GW150914事件前后两个探测器中仪器噪声与频率的关系。仪器噪声越低，探测器对引力波的灵敏度越高。图中的尖峰表示该窄带频率处有很强的仪器噪声。

想要成功探测诸如GW150914的引力波事件，不仅需要LIGO探测器具有惊人的探测灵敏度，还需要将真正来自于引力波源的信号与仪器噪声分离：例如由环境因素或者仪器本身导致的微扰，都会混淆视听甚至淹没我们所要寻找的信号。这也是为什么要有两个高新LIGO探测器的主要原因。它们帮助我们区分引力波和仪器环境噪声，只有真正的引力波信号会出现在两个探测器。当然考虑到光（或引力波）在两个探测器之间传播的时间，前后出现会相隔几个毫秒。

图2(b)展示的是LIGO探测器仪器噪声与频率的关系。我们可以看到噪声在几百赫兹左右达到最低，但在低频和高频区域急剧升高，并且在一些比如由于悬挂反光镜（测试质量）的纤维震动所导致的仪器噪声对应的频率处，显示出一系列窄带尖峰。

为了实现高新LIGO探测器灵敏度的大幅提升，第一代LIGO设计进行了全面地升级：

- 大幅提高激光功率，以减少高频噪声
- 重新设计谐振腔以更好地配合激光的空间分布
- 使用更大更重的石英玻璃作为测试质量，以减少反光镜的随机运动
- 用石英玻璃纤维悬挂测试质量，以减少热噪声
- 用一个四级摆来悬挂测试质量，以更好地隔离地震干扰
- 使用主动“测量一抵消”策略来减少地面运动的影响

了解更多支持高新LIGO的尖端技术：  
<http://tinyurl.com/ALIGO-upgrades-pdf>

利用两个或多个探测器组成的网络，通过分析引力波到达各个探测器的时间差异，我们可以利用“三角视差法”推断引力波源的方位。网络中有越多的探测器，引力波源的位置便能更好地确定。2016年，意大利的高新Virgo探测器会加入全球探测器网络，并且更多其他高新干涉仪也将在不久的将来陆续加入。

详情参见 <http://www.ligo.org/science/Publication-ObservingScenario/index.php>.

## LIGO的观测结果和科学意义

在2015年9月14日格林尼治标准时间9点50分45秒，LIGO 位于美国利文斯顿与汉福德的两台探测器同时观测到了GW150914信号。这个信号首先由低延时的搜索方法识别出来。为了快速分析探测器数据，这种搜索方法并不需要精确地模拟引力波波形，它通过寻找可能为引力波的某些特征迹象来搜索引力波。这些快速的搜索在信号到达探测器后不到三分钟就将它作为引力波的候选事件汇报出来。LIGO干涉仪获得应变数据后，会和一个理论计算得出的海量波形库进行对比，这个数据处理的过程是为了找到和数据最匹配的波形，也就是通常所说的匹配滤波法。

图3展示了详尽分析后的关键结论，所有证据都指向两个黑洞并合导致了GW150914。图片中部，我们重建了在汉福德探测器看到的引力波应变模式。需要注意的是，这个重建的特征模式（灰色）和通过广义相对论理论预测的双黑洞并合的最佳匹配波形（红色）惊人地吻合。

图片上方的漫画代表了双黑洞并合的三个阶段，首先是旋进阶段，两个黑洞因引力波的能量损失逐渐靠近对方；接下来是并合阶段；最后是铃宕阶段，为新形成的黑洞在达到最终稳定状态前短暂的震荡阶段。

将探测器的数据与理论预计相比较可以首先用来检验广义相对论的理论是否可以准确地描述这个事件。回答是肯定的：我们的观测结果强有力地显示广义相对论完美地通过了这次检验。

我们还可以使用获得的数据详细地估计一系列包括并合前的双黑洞质量，并合产生的黑洞质量，并合事件发生的距离在内的GW150914的具体物理特性。

我们的结果显示，GW150914是一个36倍太阳质量的黑洞和一个29倍太阳质量黑洞并合事件，在并合后产生了一个62倍太阳质量的黑洞。除此以外，我们可以推断出这个最终产生的黑洞正在旋转，这种带自转的黑洞是在1963年首先由数学家罗伊·克尔（Roy Kerr）通过理论计算提出的，也就是所谓的克尔黑洞。最后，我们知道GW150914发生于距离我们十几亿光年以外。也就是说LIGO 探测器真实地探测到了很久很久以前，一个很远很远的星系发生的一件惊天动地的大事！

如果我们将并合前的两个黑洞和最终的产生的黑洞相比较，可以注意到这次并合将大约3倍太阳质量（大约六百万亿亿千克）转换成了引力波能量，其中大部分能量在不到一秒的时间里被释放出去。我们来做个简单的比较：太阳这样一个巨大的能量源，每秒钟也不过是将自身质量的十万亿亿分之二（~四十亿千克）转换成电磁辐射，这么一比GW150914的能量真是大得不可思议。而事实上，GW150914放出的峰值功率要比可观测宇宙中所有星系的光度总和的十倍还要多。

### 我们怎么知道GW150914是黑洞并合？

我们估计的GW150914并合前的两个天体的质量有力地证明了它们都是黑洞。尤其是图3底部，它们之间的距离如此小，而速度又是如此地快。图中的速度以光速为单位，而距离间隔以这一质量的黑洞的特征尺度为单位，也就是所谓的史瓦西半径。

这些图表意味着，两个黑洞在并合前——也就是引力波的频率差不多达到150赫兹时——相距仅仅几百公里。在这么大的质量下靠这么近还能不发生并合的，只有黑洞了。中子星也是一种致密而大质量的天体，LIGO同样在关注着中子星发出的引力波。然而一对中子星的质量相比我们计算的质量还是太轻；由中子星和黑洞组成的双星系统，早在低于150赫兹的频率就发生并合了。所以我们可以确凿无疑地断定，这是一对黑洞并合产生的信号。

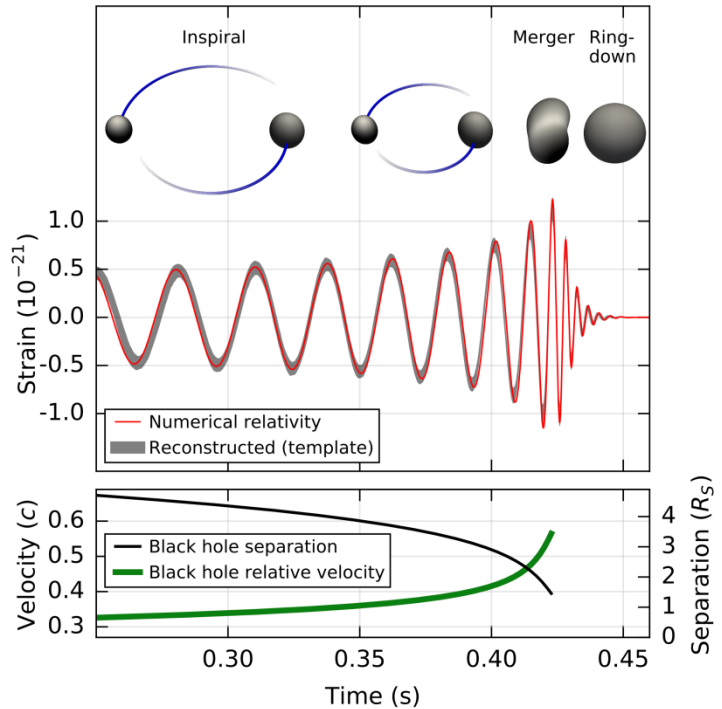


图 3：通过比较由数据重构的引力波应变（以在汉福德的H1探测器所接收的应变为例）和由广义相对论计算得出的在旋进、并合和铃宕三个过程的最佳匹配波形，得出的关于GW150914的一些关键结论。图片下方展示了两个黑洞的间距和相对速度随时间演化的过程。

## 我们是否确信GW150914是一个真实的天文事件？

一个字：是。当然，这个问题事实上非常重要，而LIGO科学合作组织和Virgo组织的很多努力都是为了回答这个问题。为此进行的每一个独立而全面的检查，都给我们宣布GW150914的发现增添一分信心。

首先，如前所述，两个LIGO探测器记录的信号时间差与光穿梭于台址间的时间吻合。另外，如图1所示，来自汉福德与来自利文斯顿的信号有着十分相似的模式。由于两个干涉仪的朝向近乎一致，这一点恰恰符合预期。同时，这个信号非常强，在噪声的背景中“鹤立鸡群”，就好像在一个拥挤的大房间里从嘈杂的背景中辨析出一场对话一样。

对于我们的分析而言，理解背景噪声至关重要。这也意味着我们需要监测台址附近海量的环境信息：地面运动，温度变化，电网波动等等。与此同时，许多数据通道实时监测着干涉仪的状态，比如检查激光束正确地指向镜子正中。如果这众多的监测通道中的任意一个出现异常，采集到的数据就会被舍弃。然而，在经历了详尽的研究和检查后，该事件前后的数据都没有发现质量问题。

不过，又或许GW150914只是由于机缘巧合，凑巧在两个台址都出现了相似特征的噪声扰动？要排除这种可能，我们需要计算这种情况到底得有多么凑巧——发生地越罕见，我们就越相信GW150914是真实引力波事件。

要完成这一统计分析，我们使用该数据后一个月内采集到的总时长为16天的稳定、高质量的探测器数据。GW150914的确是两个探测器在这段时间内最强的信号。接下来我们人为地在两个探测器数据间引入一个时间平移，等效于构造出一个时间上长很多的数据，用以搜寻其中不弱于GW150914的巧合性信号。我们只采用大于10毫秒（光在两个探测器间传播所需的时间）的时间平移，这样保证了人造数据中不含任何真实的信号。如此我们可以放心地使用这些数据来分析噪音的统计学波动——回答“伪造出一个像GW150914这样的信号有多难”这样的问题。我们可以归纳得出一个“误警率”，也就是说，统计上，噪音被错误地归类为信号的频率。

图4（由论文中的图4改编而来）展示了我们对探测器数据进行的这类统计分析结果。黑色和紫色的实线代表了不同的噪音背景：基于稍微不同的假设，两条线展示了不同信号强度下模拟成信号的巧合噪音“事件”预期发生的数目。在这幅图中，最关键的信息是GW150914距离黑色和紫色曲线非常远；这意味着能够伪装成信号的噪声极其罕见。事实上，对于GW150914这样的事件，我们估计的误警率低于每20万年一次！这个误警率可以转换成一个sigma值，或者说标准差，用以估计统计分析中一个新发现的显著程度。从图中可以看出，这一搜索可以在5个标准差以上的显著水平确认GW150914是一个真实的信号。

## 结论和展望

第一次直接探测到引力波，以及第一次观测到双黑洞合并是一项非凡的成就。然而，他们不过是天文学激动人心的新篇章的扉页而已。

将来，高新LIGO探测器会进一步改进，而现有的全球探测器网络也将拓展，其中包括高新Virgo，日本的大型低温引力波望远镜（KAGRA），和可能的建于印度的第三个LIGO探测器。这些都有助于我们更好的定位引力波源在天空中的位置和更准确地估计它们的物理学性质。引力波天文学这一新兴领域必将有一个光明的未来！

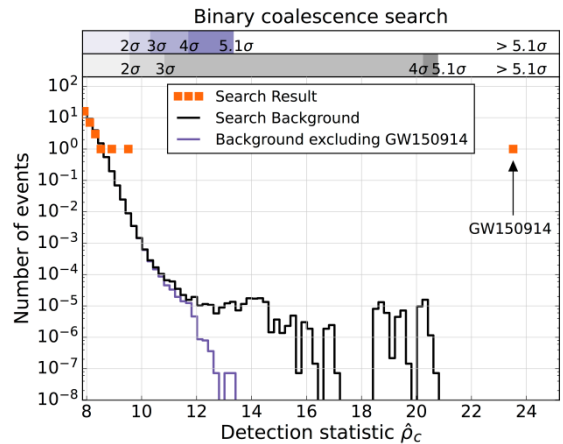


图4（由论文中的图4改编而来）。对双星并合信号的搜索，定量地显示了同噪声起伏产生的背景相比，GW150914是多么地罕见。这一搜索可以断定由噪声伪装成GW150914是极端罕见的——少于每两万年一次——这一数值等同于高于五倍标准差的探测显著性。

## 更多信息

LIGO Scientific Collaboration homepage (includes link to our main publication, published in Physical Review Letters): <http://www.ligo.org>

Advanced Virgo homepage: <http://public.virgo-gw.eu/language/en/>

Some of the companion papers to our main publication:

- Observing gravitational-wave transient GW150914 with minimal assumptions: <https://dcc.ligo.org/P1500229/>
- GW150914: First results from the search for binary black hole coalescence with Advanced LIGO: <https://dcc.ligo.org/P1500269/>
- Astrophysical implications of the binary black hole merger GW150914: <https://dcc.ligo.org/P1500262/>
- Localization and broadband follow-up of the gravitational-wave candidate G184098: <https://dcc.ligo.org/P1500227/>
- GW150914: a black-hole binary coalescence as predicted by general relativity: <https://dcc.ligo.org/P1500213/>
- The rate of binary black hole mergers inferred from Advanced LIGO observations surrounding GW150914: <https://dcc.ligo.org/P1500217/>
- Properties of the binary black hole merger GW150914: <https://dcc.ligo.org/P1500218/>

LIGO Open Science Center (with access to GW150914 data): <https://losc.ligo.org/about/>