

双黑洞并合引力波探测评述

范锡龙^{1,2}, 胡一鸣¹, 都志辉³, 王小鸽³, 曹军威¹

¹清华大学信息技术研究院

²湖北第二师范学院

³清华大学计算机系

注: 本文作者均为激光干涉引力波天文台(LIGO)科学合作组织成员, 本文内容来源于 LIGO 科学合作组织针对首次直接探测引力波的解读材料, 得到世界各地 LIGO 科学合作组织多位华人学者的翻译帮助。本文的图摘自首次直接探测引力波的 Physical Review Letters 论文。

一、评述背景

2016年2月11日, 美国国家科学基金和欧洲引力天文台召开对外新闻发布会, 正式宣布有史以来, 科学家第一次直接观测到了来自遥远宇宙的剧变事件所产生的时空涟漪——引力波。**这一探测证实了阿尔伯特·爱因斯坦 1915 年发表的广义相对论的一个重要预言。**

引力波携带了产生它的经历异常激烈天体物理过程的天体源信息, 同时引力波还携带了揭示引力本质的信息, 这些信息是其它类型信号所不能获得的。物理学家们确信他们探测到了来自两个黑洞最后并合瞬间的引力波, 这两个黑洞的并合最终形成了一个更大质量的快速旋转的黑洞, 这一现象长久以来就被理论预言, 然而在此之前从未被观测到。这个被命名为 GW150914 的激变事件, 发生于距离地球 13 亿光年之外的一个遥远星系中。它被激光干涉仪引力波天文台(以下简称 LIGO)的两个探测器观测到。**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。**

这一引力波信号于世界协调时间 2015 年 9 月 14 日 9: 51 (北京时间当天下午 17: 51), 由分别位于美国路易斯安那州列文斯顿(Livingston, Louisiana)和华盛顿州汉福德(Hanford, Washington)的激光干涉引力波天文台(LIGO)的一对探测器同时探测到, 该台由美国国家科学基金资助, 由加州理工学院和麻省理工学院构思、建造并运行。这一发现是由 LIGO 科学合作组织(包含 GEO 合作组织和澳大利亚干涉引力天文协会)以及室女座引力波探测器(Virgo)合作组织共同完成, 数据来自两个 LIGO 探测器。本次发现被物理评论快讯(Physical Review Letters)期刊接受发表。

LIGO 的研究工作由 LIGO 科学合作组织 (LSC) 完成, 这一合作组织包含来自美国和其他 14 个国家的 1000 多名科学家。室女座引力波探测器 (Virgo) 的研究工作由 Virgo 合作组织完成, 这一组织包含 250 多名物理学家和工程师, 分别隶属于 19 个不同的欧洲的实验室。清华大学 LIGO 工作组是中国大陆唯一的 LIGO 科学合作组织成员, 参与了引力波数据分析工作。

二、科普知识

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形, 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。

三、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。它由两个相距三千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。

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。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：1）大幅提高激光功率，以减少高频噪声，2）重新设计循环腔以更好地配合激光的空间分布 3）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 4）用石英玻璃纤维悬挂测试质量，以减少热噪声 5）用一个四级摆来悬挂测试质量，以更好地隔离地震干扰 6）使用主动“测量-抵消”策略来减少地面运动的影响。

四、探测结果

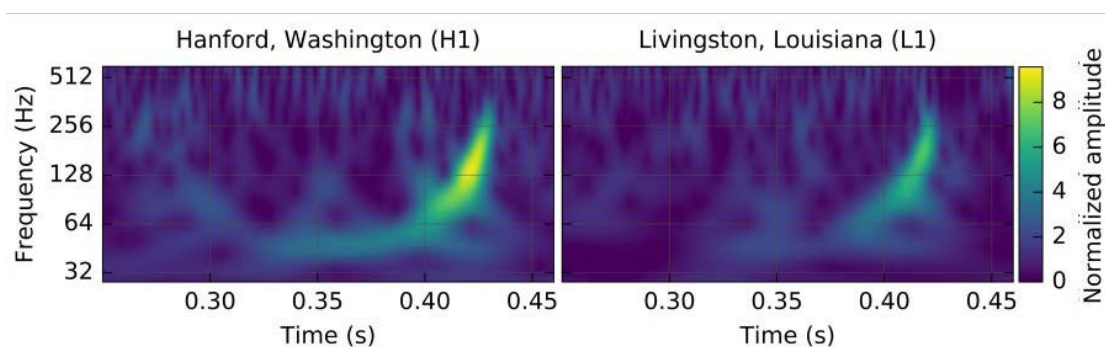


图. LIGO 汉福德(H1, 左)和利文斯顿(L1, 右)探测器所观测到的 GW150914 引力波事件。该图展示了在两个 LIGO 探测器中观测到的由该事件产生的引力波应变如何随时间(秒)和频率(赫兹)变化。两个图均显示了 GW150914 的频率在 0.2 秒内从 35 赫兹迅速增加到 150 赫兹。GW150914 先到达 L1, 随后到达 H1, 前后相差 7 毫秒, 该时间差与光或者引力波在两个探测器之间传播的时间一致。

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。尤其是它们之间的距离如此小, 而速度又是如此地快。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。

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。事实上，对于 GW150914 这样的事件，能够伪装成信号的噪声极其罕见，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 σ 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，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。

五、未来展望

本次 LIGO 探测器数据给出了关于引力波和天体源一些非常精确的细节，是不是完美的直接测定所有相对论预言的细节呢？有两个细节还是没有直接给出测量：极化和速度。没有测到引力波的极化是由于 LIGO 两个探测器的干涉臂几乎平行的方位决定的。未来的探测器加入可以改变这个情况，这不是个难题。确定引力波是不是以光速传播，需要和光速比较，比如探测同时波源发射的光波。LIGO 数据里只包含引力波信息，所以就只能用间接的方法论证这一预言。LSC 的科学家利用了探测到不同频率上引力波传播速度一致这个事实，外加“狭义相对论协变性”这一原理，间接的部分验证了引力波以光速传播。

引力波的波源、波谱类型是多样的。双黑洞系统是双致密天体这类波源中的一种，类似的波源，诸如双中子星、双白矮星也存在。还有别的如大质量恒星塌缩产生的引力波爆、快速旋转的中子星产生的连续引力波、产生于宇宙起源和大量不可分辨引力波天体波源发射的引力波背景。未知天体源产生的引力波更是让人期待。探测引力波的手段也是多种多样的。宇宙微波背景、脉冲星计时阵列，空间引力波探测器和地面引力波探测器可以为我们提供不同波段引力波信息。探测这些源需要的数据处理方法也是不同的。举来自旋转中子星的连续引力波来说，除了对探测器的灵敏度要求更高之外，对我们数据分析的能力也提出极高的要求。