

GW231123: 目前通过引力波探测到的最重双黑洞系统

在协调世界时（UTC）2023年11月23日13时54分30秒，LVK（LIGO-Virgo-KAGRA）引力波观测合作组织探测到了GW231123——一个可能由两个黑洞并合产生的引力波信号。这两个黑洞的总质量是LVK合作组织迄今为止观测到的最大值。这两个黑洞的自旋速度快得难以置信，且各自的质量对当前的恒星演化理论产生挑战。

信号的探测

该引力波由位于美国汉福德和利文斯顿的两个高新LIGO引力波探测器在第四次LVK观测运行的前半段（O4a）观测到。两个天文台之间的相关性对于我们能够确信这次探测至关重要。如图1所示，信号只持续了大约0.1秒，但非常明显，比典型的探测器噪声响亮约20倍。为确认这不是偶然的噪声，我们进行了一系列严格的统计检验。通过产生上千年模拟观测数据的方法，我们得出GW231123事件完全由随机噪声产生的概率小于万年一次！因此我们极其确信该信号并非来自于地球，而是真实探测到的引力波。

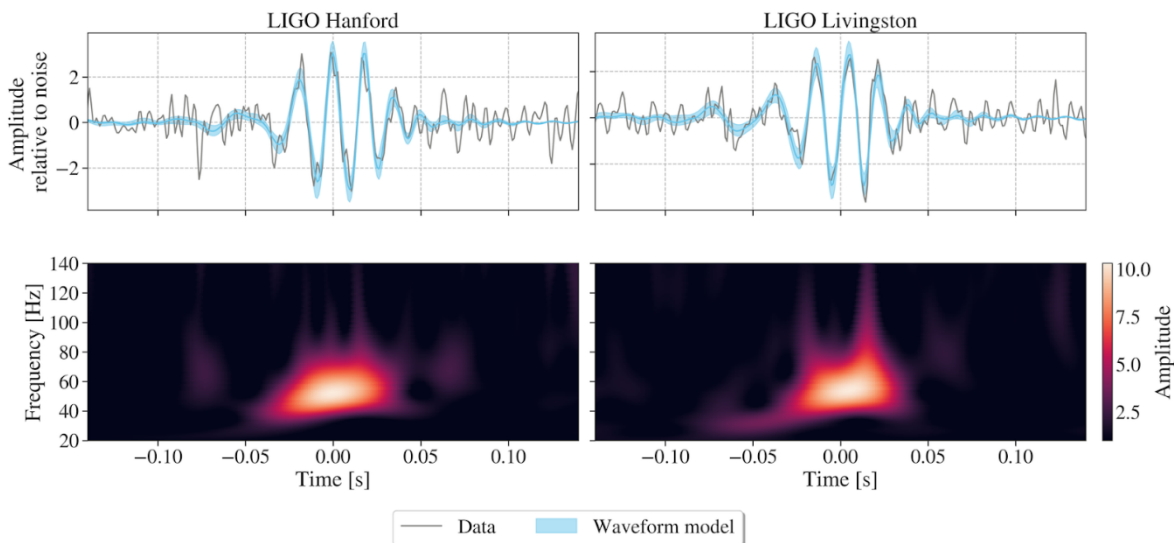


图 1: 图中展示了GW231123事件在LIGO汉福德（左）与利文斯顿（右）探测器中的信号。上半张图中，灰色线代表数据振幅随时间变化，蓝色阴影带表示我们对真实信号的估计。下半张图为频谱图（时间-频率图），显示了信号随时间（横轴）和频率（竖轴）变化的强度。颜色越亮代表信号越强。

信号来源

数据显示该信号来自一个激烈的双黑洞并合。为了进一步了解这些黑洞有多重，以及他们转得有多快，我们采用了基于广义相对论的多个模型来模拟各种黑洞组合所产生的信号。

通过数据与模型的对比，我们估计两个黑洞质量大概分别是137和103倍太阳质量。考虑所有不确定性，它们俩加在一起的总质量大约在190到265倍太阳质量，使其超越GW190521成为目前观测到的最重的双黑洞系统。

访问我们的网站：

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/



更惊人的是，这两个黑洞的自旋速度很可能接近理论上所允许的最大值，使得GW231123不仅是目前通过引力波探测到的**质量最大的黑洞双星系统**，同时也是**自旋最快的黑洞双星系统**。

这次合并产生了一个新的黑洞。这个新黑洞的质量可能在182到251倍太阳质量之间。这个新形成的黑洞是一个罕见的**中等质量黑洞**。它比由恒星坍缩形成的黑洞更重，但又远轻于隐藏在星系中心的超大质量黑洞。本次引力波事件GW231123和过去GW190521的合并遗迹黑洞，都是目前最明确探测到的中等质量黑洞。

这次事件为何如此特别？

现有恒星演化理论认为，质量介于60至130倍太阳质量之间的黑洞应当极为罕见甚至不存在。这一“禁区”被称为**黑洞质量间隙**。这个禁区被认为与特殊的超新星爆发有关——这类爆发要么会将大质量恒星彻底摧毁（**对不稳定性超新星**），要么在恒星坍缩前抛射其大部分物质（**脉动对不稳定性超新星**），从而阻止大质量黑洞的形成。

然而GW231123的发现颠覆了这一预测。并合的两个黑洞中，较轻的黑洞几乎确定位于这个禁区内（概率高达83%），而较重的黑洞也有26%的可能性处于该区间。这表明传统恒星演化理论可能无法完全解释它们的起源。一个令人振奋的可能性是：这两个黑洞（或其中之一）也是形成于过去的黑洞并合。这既能解释其异常的质量与自旋参数，也暗示它们可能诞生于极端致密的天体环境（如**核星团**或**活动星系核**），这类环境中黑洞更易发生碰撞。此外，在这些环境中形成的黑洞双星可能具有**离心率更高的轨道**。然而，为了简化波形的复杂性，我们的模型目前假设黑洞在几乎球形的轨道中向内旋近，随着引力波的辐射，轨道逐渐缩小。如果轨道确实是高度偏心的，特别出现在即将并合的时间点，就可能以我们的模型无法捕捉的方式辐射的引力波波形。对于本次事件GW231123来说，这仍是一个开放的问题，需更完善的波形模型来进一步研究。

其他可能产生类似信号的情形（如**引力透镜效应**、**原初黑洞**、**核心坍缩超新星**、**玻色子星并合**和**宇宙弦**等），在天体物理学上不具有比上述讨论更高的可能性。

黑洞并合的最后瞬间

在LVC合作组织至今已观测近300次黑洞并合事件中，探测器对信号的初始阶段最敏感，也就是当黑洞相互旋近并最终并合的时候。但由于GW231123的总质量较大，使我们能够清晰地观察到并合之后的**铃宕阶段（ringdown）**——由并合而新形成的大黑洞通过引力波辐射能量，像被敲响的钟一样振荡，最终稳定下来。

我们将这一最后阶段的波形与广义相对论对铃宕阶段的预测进行了比对，发现非常吻合。不过，GW231123极端的参数也把我们推向了现有模型的边缘，让我们发现了一些难以解释的小细节，也指导了进一步改进波形模型的方向。

结论

几年前，在我们对**GW190521**的报告里，就说过当时的记录会有一天被打破，而现在的GW231123就做到了。这个奇妙又神秘的事件中的两个黑洞，不仅有可能进入了质量禁区，还达到了自旋速度的边界。这启发我们进一步去探索其他黑洞形成的可能性，而不局限于传统恒星演化理论。这次事件提醒我们，人类才刚刚开始认识这个还充满惊喜的宇宙，而我们也将继续通过引力波聆听宇宙的声音。

简体中文翻译：党伊萱 (Yixuan Dang)

简体中文校对：宋翰林 (Hanlin Song) 赵俊杰 (Junjie Zhao)

原文地址：<https://ligo.org/science-summaries/GW231123/>

发现更多

访问我们的网站：

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/

免费阅读**预印本全文**

此次事件的引力波公开数据 [发布](#)