

GWTC-2: 引力波探测的拓展目录

我们提供了LIGO和Virgo自2015年的首次探测到O3a（第三次观测的前半段）的引力波探测的更新目录。O3a运行于2019年4月1日至10月1日，在GWTC-1列出的11个已确认事件的基础上新增了39个引力波事件，即GWTC-2中事件总数达到了50个。O3a的发现涵盖了广泛的天体物理参数，这些参数分别与双黑洞并合(BBH)，双中子星并合(BNS)以及中子星黑洞并合(NSBH)事件的理论值一致。

值得注意的是，在O3a中，探测到的可靠的引力波事件是前两个探测时期(O1和O2)的事件总和的三倍以上。而且在整个O3a探测期间，Virgo探测站与两个LIGO探测站一同运行，在97%的探测时间里至少有一个探测站在观测，在82%的时间里至少有二个探测器在观测。在O3a中有一些特别有趣的引力波事件：有史以来第二例观测到的双中子星并合，第一批质量绝对不相等的双黑洞并合以及总质量约为150倍太阳质量的超重双黑洞并合的引力波事件。在这篇摘要中我们简述了LIGO和Virgo探测能力的提升，以及这些观测事件对天体物理领域的意义。

引力波的探测

O3a的39个发现是LIGO和Virgo探测站升级、数据质量提高以及多种引力波搜索的结果。探测仪器在减少噪声和提高灵敏度方面的最新改进包括激光器的功率增大，对反射镜的改进以及对散射光的更好控制。这些变化提升了三个探测站在频率和距离上的探测范围，从而拓展了我们对宇宙视野。如图1所示，在可探测到的典型的中子星并合范围中，其中位值(median)从O2到O3a增加了约63%。

发现引力波源的另一个至关重要的步骤是完善来自探测器的原始数据。此数据调节过程(data conditioning process)涉及校准数据，减少噪声(noise)和消除脉冲干扰(glitch)。

首先，我们将来自每个检测器的原始光功率变化几乎实时地校准为无量纲应变(strain)，以进行初始检测。稍后，我们将重新校准数据以减少系统误差，并消除噪声以进一步扩大检测引力波源的范围，从而揭示数据中的微弱信号。

在分析引力波数据时，我们遇到的最常见的数据质量问题是脉冲干扰。脉冲干扰是短时噪声瞬变，其中一些瞬变能确定干扰源，例如机械照相机快门或从激光束中散射出来的光。但是，有些脉冲干扰的起源更加神秘，例如称为短脉冲的宽带短时故障(blip)。我们在LIGO和Virgo数据中识别和分类故障的一种方法是在数千名科学家的帮助下通过Gravity Spy平台进行识别分类（请参阅如何使用Gravity Spy来帮助我们识别干扰脉冲）。在确定数据中的明显的干扰脉冲后，我们将该数据从引力波候选中删除，如图2所示。在O3a中观察到的39个事件中，有八个事件受益于把去除脉冲干扰作为参数估计之前的预处理步骤。

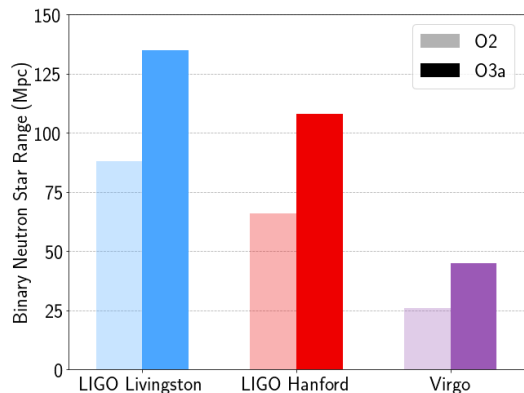


图1: 在O2观测期间，每一个观测站可观测到的双中子星并合的范围中位值和O3a的对比。

注意：1兆帕秒差距 (Mpc) 约326万光年。

(版权: LIGO-Virgo Collaboration / Eve Chase / Caitlin Rose / Northwestern / University of Wisconsin-Milwaukee.)

在寻找引力波时，我们会在两个时间尺度上识别候选的引力波事件。首先，多个搜索管道会立即处理数据，目标是在几分钟内生成**公共探测警报**。随后，我们使用更新后的数据校准，数据质量评估和改进的方法来计算统计学显著性，重新分析引力波数据，以生成此目录中的精选候选事件清单。在确定哪些候选事件时，我们将误报率(false alarm rate)阈值设置为每年两次，这是我们期望此类候选事件由于噪声而偶然发生的比率。在O3a的39个事件中，先前在近实时检测警报中报告了26个事件，而在GWTC-2中首次报告了另外13个事件。

在GWTC-2中，我们为报告的引力波事件引入了修订后的命名惯例。在以前发布的事件（包括最近发生的事件）中仅使用观测日期的原有命名惯例继续存在：GW190412，GW190425，GW190521和GW190814。但是新的GWTC-2事件我们将其检测到的UTC时间添加到了它们的名称中。例如，GW190701_203306（见图2）是在2019年7月1日世界标准时间20:33:06被检测到的。通过这种方式，即使在同一天检测到的两个事件，我们也可以给出唯一的名称，在O3a中这种命名情况出现了三次。

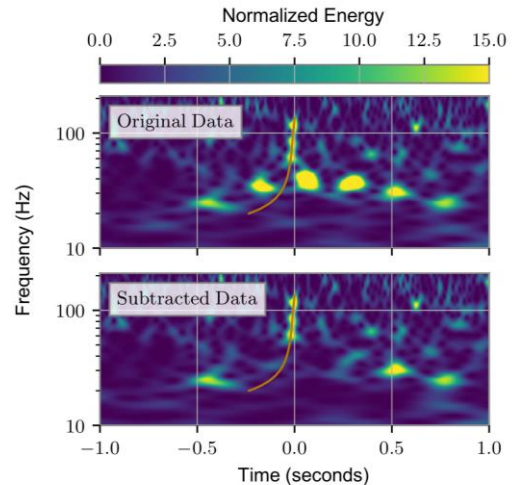


图2：干扰脉冲去除前后事件GW190701_203306的时频数据。在这种情况下，LIGO Livingston检测器中的散射光会以低于40 Hz的频率以过量噪声的形式产生脉冲干扰（改编自该文图5）

天体物理学参数的测量

我们通过称为参数估算的过程来调查每个事件的天体物理性质，该过程量化了每个引力波事件所独有的众多天体物理性质。我们测量**外在参数**，这些参数描述了双星系统(binary system)和我们，即地球的关系，例如地球到引力波源的距离，源在天空中的位置以及从我们的角度看该双星系统的方向。此外，我们测量**固有参数**，这些固有参数指的是诸如双星系统中每个**致密天体**(compact object)的质量和自旋之类的属性。从事件参数中，我们计算出引力**波形**(waveform)，这些波形代表了随时间变化的预期引力波应变。然后，我们将此预测与LIGO和Virgo中测得的数据进行比较，以说明探测器中存在的任何噪声。我们利用这些参数估算的方法计算了参数90%的**可信区间**。该区间代表了与真实数据合理一致值的范围。

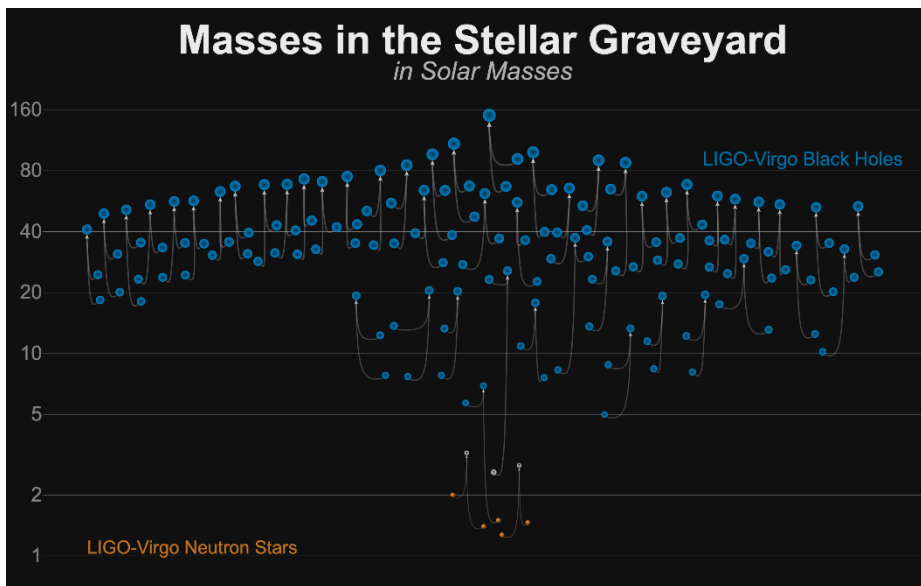


图3：各种致密天体的质量集合。该图显示了黑洞（蓝色），中子星（橙色）和通过引力波检测到的未知致密天体（灰色）。每个双星系统的并合对应于三个对象：两个并合对象和最终的并合残余。（版权：LIGO Virgo Collaboration / Frank Elavsky, Aaron Geller / Northwestern）

我们的39个事件涵盖广泛的质量范围，这蕴含了宇宙中黑洞和中子星形成和演化历史的大量信息。并合之前产生的引力波信号主要取决于各个分量质量的特殊组合，称为**啁啾质量**(chirp mass)。其他重要的质量参数包括每个双星系统的总质量（致密天体的质量的总和）和质量比（代表较轻的天体与较重的天体的**质量比**(mass ratio)）。

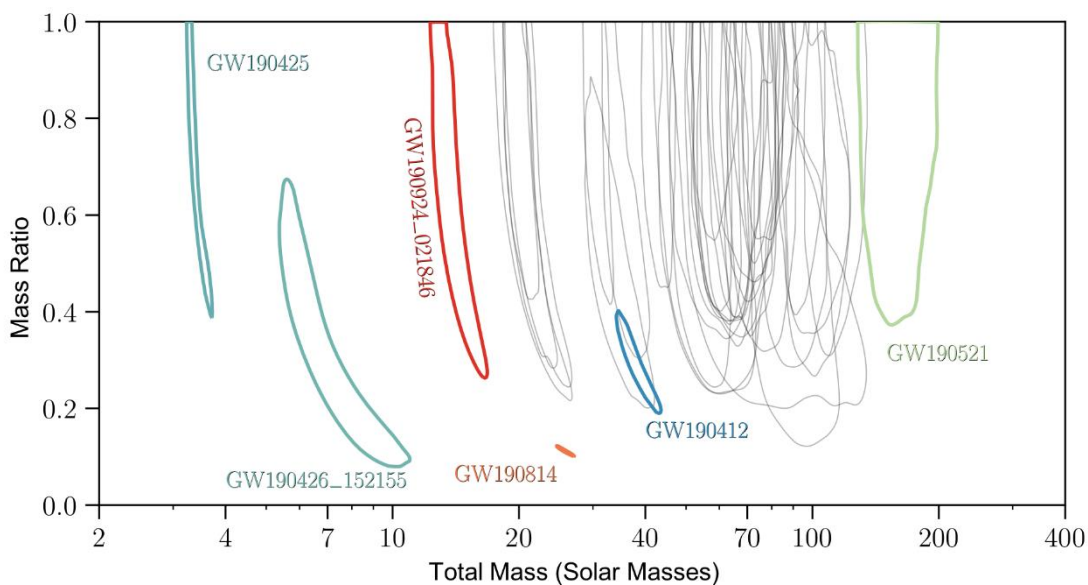


图4：所有O3a事件的质量比和总质量估算值。等高线表示90%的可信区间。突出显示了六个独特事件。（改编自该文的图6）

O3a的独特发现

图3显示了GWTC-2中质量的多样性，范围从1.4倍太阳质量的中子星到大约150倍太阳质量的黑洞。图4和图5突出显示了以下八个引力波事件，其中四个事件在单独的文章中都有描述：

- [GW190412](#): 首个具有绝对不对称成分质量的双黑洞并合，这也显示了引力波**更高次谐波**的证据
- [GW190425](#): 自[GW170817](#)第二个双中子星并合的引力波事件
- [GW190426_152155](#): 引力波源为双黑洞并合或者黑洞中子星并合的低质量的引力波事件
- [GW190514_065416](#): 所有O3a事件中有效对齐自旋最小的双黑洞并合事件
- [GW190517_055101](#): 所有O3a事件中有效对齐自旋最大的双黑洞并合事件
- [GW190521](#): 总质量约为150倍太阳质量的双黑洞并合事件
- [GW190814](#): 具有高度不对称的双星系统，其中对应于一个23倍和一个2.6倍太阳质量的天体，而后者可能是在并合的双星系统中观察到的最轻的黑洞或者最重的中子星
- [GW190924_021846](#): 可能是质量最低的双黑洞并合事件，两个黑洞的质量均超过3倍的太阳质量

除此之外，GWTC-2包括了低质量间隙的事件：2.5到5倍的太阳质量。许多年来，由于该质量范围内的观测不足，天体物理学家假定低质量间隙是存在的。然而O3a发现了潜在的质量间隙的天体，比如在[GW190814](#)和[GW190924_021846](#)中较轻的天体。

如图4所示，[GW190521](#)的对象中包含O3a中的最大质量，几乎是[GWTC-1](#)中最终的双黑洞并合事件[GW170729](#)的两倍。此外，[GW190521](#)最有可能包括迄今为止通过引力波检测到的最重的单个黑洞，其质量超过90倍太阳质量。其他一些事件的总质量可能超过100倍太阳质量，包括[GW190519_153544](#)，[GW190602_175927](#)和[GW190706_222641](#)。

GWTC-2中存在比GWTC-1中呈现的任何引力波源更高的非对称质量的事件，例如GW190412和GW190814两者均源于黑洞与更轻的天体的并合。如GW190412的探测所示，非对称并合会放大高次谐波的音调。这个更新的目录还包括其他一些引力波天文学的独特成就。O3a包括迄今为止检测到的最遥远的引力波事件，以及定位在不到天空总面积1%的9个事件。

自旋可以进一步揭示双星天体系统的演化历史。自旋与给定对象的角动量有关，可以从非自旋到最大自旋之间变动。我们通常在称为“有效对齐自旋(effective aligned spin)”的参数中测量自旋，该参数与每个致密天体在并合之前自旋的特定组合有关。图5显示了针对每个事件测得的针对啁啾质量的有效对齐旋转。负有效对齐的自旋表示未对齐的自旋，暗示双星系统可能已在密集环境，例如球状星云(globular cluster)中形成。如图5所示，GW190517_055101可能具有最大的有效对齐旋转。尽管GW190514可能具有最小的有效对齐自旋，但在GWTC-2中没有发现显著为负值的有效对齐自旋。另外，自旋可以揭示双星系统是否有进动(precession)。GWTC-2包含可能支持进动的事件，例如GW190412和GW190521。

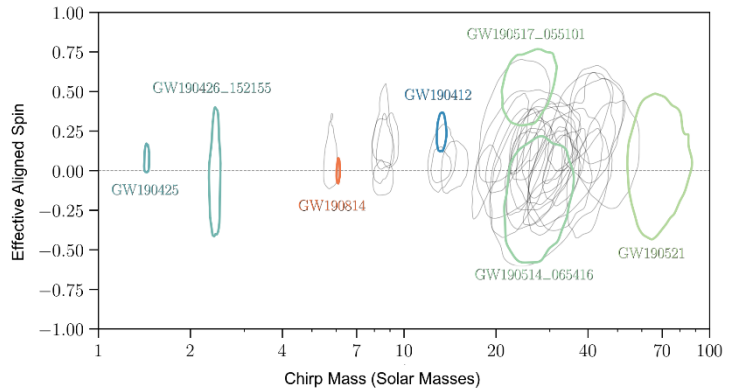


图5: 所有O3a事件的有效对齐的自旋和啁啾质量的估算。等高线表示90%的可信区间。(改编自该文的图7)

引力波天文学的明朗未来

看起来不可思议的是，尽管距2015年9月的第一次探测事件仅过去五年，现今引力波的探测已变得司空见惯。如今在这50次引力波探测的基础上，我们能更好地探索整个宇宙中的黑洞和中子星（请参见本摘要）。更多的引力波探测也增加了我们对广义相对论的理解（请参见本摘要）。

引力波事件仅在O3观测期的前六个月就增加了39个，引力波天文学的未来正越发明朗。目前正在对O3的第二部分(O3b)进行分析，这将进一步扩大我们不断增长的引力波瞬变目录。在O3之后，探测器将进行其他工程改进，以进一步增加第四次观测运行的覆盖范围。在我们等待仪器改进和建造新探测器的过程中，引力波学界将继续探索整个宇宙中黑洞和中子星的性质。

词条

啁啾质量(chirp mass): 双星系统中每个致密天体质量的组合。啁啾质量决定了低质量双星系统的啁啾频率特性的增加。

致密天体(compact object): 诸如黑洞，白矮星或中子星等密度很高的天体物体。

引力波形(waveform): 表示引力波信号随时间的演变。

质量比(mass ratio): 较轻和较重的致密天体的质量比。

中位数(median): 该值正好位于分布的中间，因此其他值的一半位于中位数之上，另一半位于中位数以下。

参数估算(parameter estimation): 用于推断与引力波信号相对应的天体参数的统计技术。

太阳质量(solar mass): 太阳质量是代表天文学质量的常用单位。

应变(strain): 探测器臂长的变化，是由于通过每个探测器的引力波引起的时空变形除以臂的总长而引起的。

了解更多:

访问我们的网站:

<http://www.ligo.org>, <http://www.virgo-gw.eu>

阅读完整文章的免费预印本

<https://dcc.ligo.org/P2000061/public>

在O3a中发现的39个事件的数据可从GWOSC Web服务器的门户网站获取:

<https://www.gw-openscience.org/eventapi/html/GWTC-2/>

GWOSC网站包含有用的背景文档，示例代码和教程，以帮助探索这些公开可用的数据集。



访问我们的网站:

<http://www.ligo.org>

<http://www.virgo-gw.eu>

