

# GWTC-3, 引力波探测星表 第3版

## 引言

GWTC-3 (Gravitational-Wave Transient Catalog-3)是由LIGO、Virgo和KAGRA共同发布的第3版引力波暂现源星表。在之前星表的基础上，GWTC-3又新增了从2019年11月到2020年3月的第三次运行后半段（又称O3b）的引力波观测。GWTC-3包括了迄今为止数量最多的引力波观测事件。

那么，截至目前，都有哪些引力波探测星表呢？

- [GWTC-1](#)：包括了第一、二次观测运行（O1和O2）发现的11个事件
- [GWTC-2](#)：在GWTC-1的基础上增加39个事件，总事件数上升至50（来自O1、O2和第三次观测运行前半段O3a）
- [GWTC-2.1](#)：重新分析了O3a数据，发现了8个额外的候选事件。同时，GWTC-2中有3个事件属于真实天体物理信号的概率降低到小于50%，故对它们重分类（详见[“探测引力波”](#)章节）。至此，总事件数为55。
- GWTC-3 (本次发布)：增加了O3b中发现的35个引力波事件，使总事件数升至90（[图3](#)展示了所有事件和其质量分布）。

在O3b时，KAGRA在最后阶段加入了LIGO和Virgo的探测，并在2020年4月与德国的探测器GEO 600一起完成了[为时两周的观测运行](#)，此次观测运行结果将另行报告。

目前，所有的引力波观测都来自于双星并合，这些双星由黑洞或中子星构成，我们称之为**致密天体**，并相信它们是大质量恒星的遗迹。这些事件包括**双黑洞并合**、**双中子星并合**以及**中子星-黑洞并合**。随着探测器变得更加灵敏，探测率也随之增加，自2015年第一次探测后，我们取得了很大的进展。

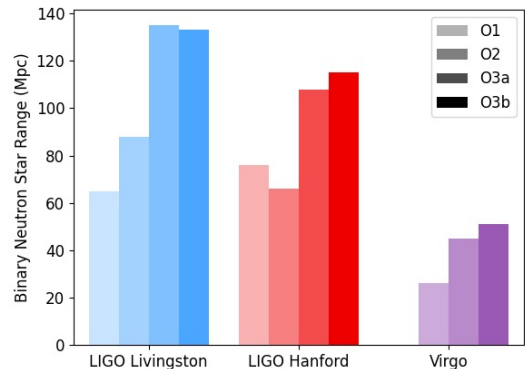
在这篇总结中，你将了解我们怎样收集数据、探测信号、推断并合事件的属性、GWTC-3的亮点以及未来的观测运行计划。

## 引力波探测器

多年来，因为探测器升级、数据质量及分析方法的提高，LIGO和Virgo的灵敏度得到提升。有一些方法能衡量引力波探测器的灵敏度，其一就是估计典型双中子星并合的可探测范围——**范围越大，可探测信号越远，则预期会有更多的探测事件**。由于2019年10月历时一个月的停机，第三次观测运行（O3）被分为两部分（O3a和O3b），此次停机完成了很多设备升级及修复，包括[清理LIGO Livingston的镜子、更换LIGO Hanford的真空设备、以及增大Virgo的激光器功率](#)。此次升级，再加上观测运行期间的维护，使得探测器保持或提高了它们的灵敏度。从[图1](#)看到，对于每个探测器，双中子星探测范围的中位数都有所变化。从O3a到O3b，Virgo和LIGO Hanford双中子星探测范围中位数分别上升了13.3%和6.5%，LIGO Livingston（我们最灵敏的探测器）基本保持不变，灵敏度稍有1.5%的下降。

引力波探测器的原始数据来自于干涉仪输出中随时间变化的激光光强。这样的原始数据经[校准](#)后得到对应的引力波应变振幅。校准需要仔细操作，我们用激光精确地推动镜子来测量干涉仪的输出怎样变化。最初的校准是几乎实时的。如果有需要，后面会进行再次校准及扣除长期噪声，以产生最好的应变数据，即本篇分析中所用到的数据。

在校准和扣除噪声之后，需要检验数据质量。对于双星并合信号，在衡量数据质量时，最普遍的问题是脉冲干扰：一种数据中的短时（几秒到几分钟的）噪声跃变。有些脉冲干扰起因是已知的，比如**光的散射**，但有时起源是神秘未知的。脉冲干扰偶尔会与引力波信号重叠，这时候，我们可以在数据中用[消脉冲干扰](#)的方法移除它们，如[图2](#)所示。消脉冲干扰在我们分析第一例双中子星信号[GW170817](#)时起到重要作用，GWTC-3的35个事件中，有7个也需要消脉冲干扰。想要了解更多脉冲干扰的信息，以及想要帮助我们更好地了解它们，请前往社区科学项目：[Gravity Spy](#)。



**图1：**每个探测器在第一次(O1)、第二次(O2)观测运行、第三次运行前半段(O3a)、第三次运行后半段(O3b)的双中子星探测范围中位数。观测范围以**兆秒差距**为单位。版权：LIGO-Virgo-KAGRA Collaborations/Hannah Middleton/OzGrav。

## 探测引力波

在O3a和O3b期间，我们发布了最初引力波候选探测的[公共预警](#)。快速的公共预警使天文学界得以展开多信使信号的搜寻，包括使用（[电磁波](#)）望远镜和[中微子](#)探测器。O3b时，公共预警通常于引力波探测几分钟后发布，而随后对于引力波数据的再分析可能会导致已发布事件的收回或更多事件的发现。得益于整个观测运行期间校准、数据质量、数据分析的提升，GWTC-3所展示的最终分析评估了候选事件是否有意义。O3b共有39例公共预警，其中18例通过了再分析的考验，凭借超过50%概率属于真实信号，被保留在GWTC-3的候选事例中。另外GWTC-3还包括了17个首次发现的事件。

我们寻找引力波候选事件时，采用了两种分析方法：模板搜寻和最小模型搜寻。模板搜寻使用了一系列模拟的双致密星信号（又称模板），与数据进行滤波，挑选出匹配模板形状及演化的部分。最小模型搜寻不去寻找准确的信号，而要求同样的信号出现在多个探测器中。模板方法擅长于找出双星信号（因为我们知道它们应该长什么样），而最小模型方法保证了我们不会由于没有正确模板而错过信号。当评估一个候选事件是否属于真实信号的时候，我们计算随机噪声碰巧看上去像候选事件信号的可能性。通常，不同探测器中信号越一致，我们越相信这是真实的。

在GWTC-3中，我们列出了所有至少50%概率属于真实信号（即非噪声）的候选事件。这样的估算不仅依赖于对探测器噪声的理解，还依赖于引力波信号本应以怎样的频率被我们的探测器观测到，考虑到我们才刚刚开始了解致密星族，这些数字现在仍是不确定的。随着未来更多的观测，我们会了解更多星族信息，我们便可以回来检查目前不确定的候选事件。

此外，GWTC-3还有一张列表，其中包含了那些没有达到50%真实概率阈值的弱信号。和[GWTC-2.1](#)一样，GWTC-3的弱信号列表包括了所有[误报率](#)小于每年两次的候选事件，共1048个，虽然我们预期这些大多数为噪声，但是这张表或许能够帮助天文学家发现潜在的多信使事件。

## 引力波事件命名

引力波事件的名字代表了探测信号时的日期和时间，用[协调世界时 \(UTC\)](#) 表示。先前有几个事例只加入了日期，但随着探测器灵敏度提高，我们可能在一天内探测到不止一例事件，所以，正如我们在GWTC-2和GWTC-2.1中所做的那样，我们把时间加入命名以更好的区分它们。比如，GW200208\_222617 是在2020年2月8日、UTC时间22:26:17被观测到的。

## 引力波源的性质

引力波观测包含了波源双星属性的信息，这些属性可以是内禀的或外在的。内禀属性描述波源本身，比如致密天体的质量、[自旋](#)。外在属性描述了我们从地球如何观测它，包括源所在的天区位置、距地球的距离和两致密天体绕转的轨道平面方向。

我们通过[参数估计](#)的方法获得双星的属性值，这是一种统计学方法——我们把很多可能的（有着不同的性质的）[引力波波](#)形与观测数据比较，这种比较能告诉我们源的属性值取什么值的时候与数据一致（假设引力波信号是真实的）。在我们的结果中，我们从值的范围中选择了90%的置信区间，这意味着我们对于源的属性值在某范围内有90%的把握。

图4中的等值线表示了[总质量](#)和[质量比](#)这两个属性的90%置信区间。总质量告诉我们双星系统有多重，质量的测量以[太阳质量](#) $M_{\odot}$ 为单位。质量比告诉我们并合的两颗致密天体的质量有多么不对称，接近1的质量比表示两颗致密星近乎等质量。

研究整个引力波源星族的属性有助于我们了解这些系统是如何形成的；我们也可以利用这些观测去验证阿尔伯特·爱因斯坦的理论——广义相对论，甚至去测量宇宙膨胀的速度。

下一节，我们筛选总结出一些O3b中的亮点事件。

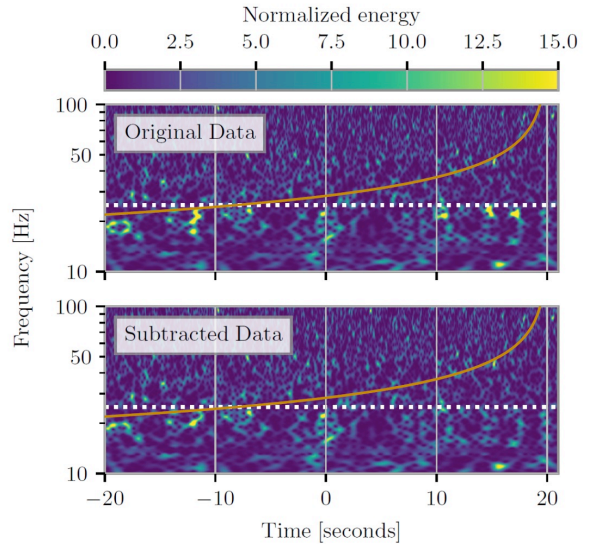


图 2：（源自发表文章图 14）消脉冲干扰实例。图中展示了事件GW200115\_042309的时间-频率数据，颜色表示了每个时间-频率区间的能量。上图展示了未处理的数据，下图展示了噪声消除后的结果。橙色的线是估计信号的轨迹，该轨迹不受消脉冲干扰过程影响。

## GWTC-3的亮点

基于GWTC-3中新列出的35个事件的性质分析，其中32个很可能是双黑洞并合事件，另外3个可能为中子星-黑洞并合事件，我们认为质量小于 $3 M_{\odot}$ 的致密天体可能为中子星候选体，在O3b中，没有发现双中子星候选事件。图5挑选了8个事件，并总结了它们的3个关键参数最可能的取值。

### 中子星-黑洞并合亮点

3个可能为中子星-黑洞并合的事件分别为：

- **GW191219\_163120**是一个质量极其不对称的中子星-黑洞并合事件，黑洞的质量是 $31 M_{\odot}$ ，中子星质量约 $1.2 M_{\odot}$ 。这个中子星是迄今为止观测到最轻的中子星。
- **GW200115\_042309**是一个明显的中子星-黑洞并合事件，并有自己的[报告文章](#)。我们估计黑洞的质量约为 $6 M_{\odot}$ ，中子星的质量约为 $1.4 M_{\odot}$ 。
- **GW200210\_092254**可能是一个中子星-黑洞双星。我们认为其中较重的天体确定为黑洞，因为其质量为 $24 M_{\odot}$ ，但较轻的天体质量约为 $2.8 M_{\odot}$ ，则可能是很重的中子星和或者很轻的黑洞。这个事件与O3a中的[GW190814](#)十分相似。基于我们对中子星的了解，GW200210\_092254的源很有可能是双黑洞，但我们并不确定。

敏锐的引力波研究人员可能注意到引力波事件GW200105\_162426的缺失，这一事件与GW200115\_042309曾一起报告在[之前的发表文章](#)中。同时考虑到O3b的所有事件后，我们发现GW200105\_162426是真实天体物理信号的概率为36%，低于50%的界限，不能包括在星表中。更多信息详见下方[GW200105\\_162426](#)的词条。尽管没有通过GWTC-3的阈值，这个事件依然独立于背景噪声，我们仍明确地认为它很有趣！如果GW200105\_162426是真实的，则它的源包含了一个 $9 M_{\odot}$ 的黑洞和一个 $1.9 M_{\odot}$ 的中子星。

### 双黑洞并合亮点

我们精选了一些双黑洞并合事件：

- **GW200220\_061928**可能是O3b中总质量最大的双黑洞并合事件（但小于O3a的[GW190521](#)）。两颗黑洞的总质量为 $148 M_{\odot}$ （分别为 $87 M_{\odot}$ 和 $61 M_{\odot}$ ）。并合后的黑洞质量 $141 M_{\odot}$ ，超过了 $100 M_{\odot}$ 的阈值，被分类为[中等质量黑洞](#)。
- **GW191204\_171526**是一个有效旋近自旋为正的双黑洞并合。有效旋近自旋是从引力波信号中方便测量的参数，一个正值暗示了至少有一个黑洞在自转，并且整体自旋方向与轨道绕转方向相同。自旋信息是研究双星形成机制的关键线索。观测到的第一个正的有效旋近自旋的系统是[GW151226](#)。对于GW191204\_171526，其并合前双黑洞质量分别为 $12 M_{\odot}$ 和 $8 M_{\odot}$ ，并合后黑洞质量为 $19 M_{\odot}$ 。
- **GW191129\_134029**是O3b中拥有最低总质量的双黑洞系统。并合前总质量为 $17.5 M_{\odot}$ （分别为 $10.7 M_{\odot}$ 和 $6.7 M_{\odot}$ ），并合后黑洞质量为 $16.8 M_{\odot}$ 。
- **GW191109\_010717**是负有效旋近自旋显著的双黑洞系统，这意味着双黑洞整体自旋方向与轨道角动量方向相反（意思是两个致密天体的旋转与它们的轨道绕转方向相反）。自旋为负的概率为90%，我们的观测中，负有效旋近自旋比正有效旋近自旋更罕见。GW191109\_010717还拥有较重质量的源，两黑洞分别为 $65 M_{\odot}$ 和 $47 M_{\odot}$ ，并合后黑洞质量为 $107 M_{\odot}$ 。因此事件源的质量与GW200220\_061928相近，在图中，我们换用另一大几率（85%）负有效旋近自旋事件GW200225\_060421来突出亮点。

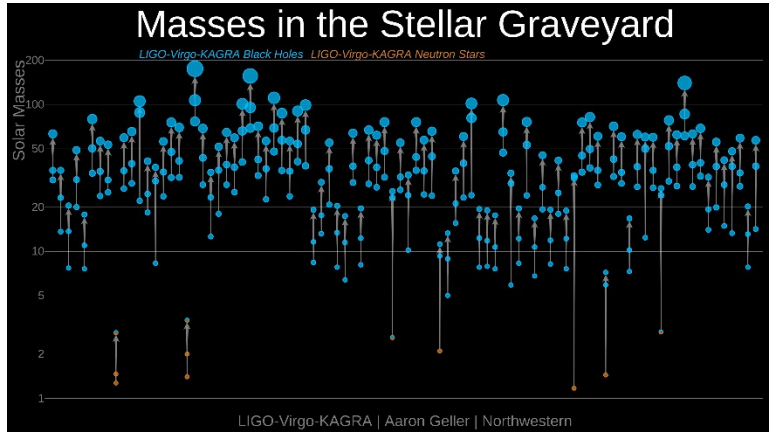


图3：致密天体质量。每个圆圈代表不同的致密天体，纵坐标以太阳质量的倍数表征了质量大小。蓝色圆圈表示黑洞，橙色圆圈表示中子星，一半蓝一半橙的混合圆圈表示分类仍不确定的致密天体。每个并合事件涉及到3个天体：两个并合前天体和一个并合后天体，箭头指示了正在并合的天体和它们的并和产物。版权：LIGO Virgo Collaboration/Frank Elavsky, Aaron Geller/Northwestern。

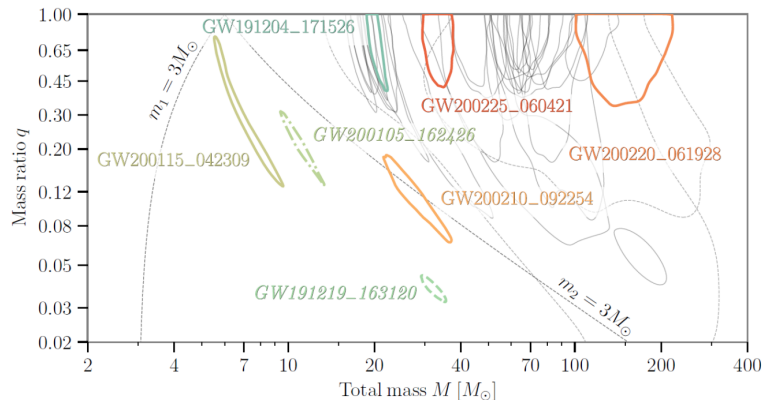


图4：（我们发表文章的图8）所有的O3b事件的总质量(M)和质量比(q)。每个等值线代表了一个不同的事件，等值线内包含了最可能的90%的参数值（90%置信区间）。有几个事件由于有趣的性质用彩色线强调（见本文及我们的文章）。



## 展望未来

LIGO和Virgo合作组揭示了宇宙中有大量的引力波源。目前为止，我们已经观测到90例事件，GWTC-3新增35例，其中包括了最好的中子星-黑洞并合事件。随着我们继续观测更多事件，我们会更加了解产生它们的天体以及它们的族群性质，并用它们继续检验广义相对论。探测更多事件也意味着我们有更大的机会能找到这些族群中的异常成员。

LIGO和Virgo探测器现在处于关机升级中，直到即将到来的第四次观测运行O4（[且前定于2022年开始](#)），届时日本的KAGRA探测器将全程加入O4。在探测网中加入更多探测器有助于提高对源的定位精度。

同时，我们将继续分析数据、学习致密天体的观测，去搜寻尚未发现的连续引力波信号、随机引力波信号和更多的惊喜！

(简体中文翻译：刘畅、邵立晶)

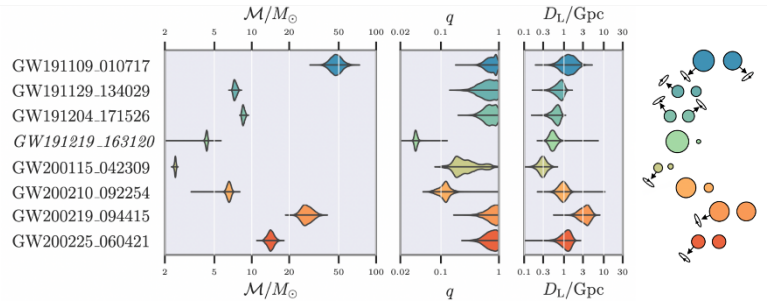


图5：该图展示了GWTC-3里其中8个事件的3个关键参数最可能的取值。三个参数为：双星啁啾质量 $M$ ，质量比 $q$ ，和光度距离 $D_L$ 。每个双星系统在图右侧画出，圆圈的大小代表了质量大小，箭头表示自旋方向（非等比例）。版权：LIGO-Virgo-KAGRA Collaborations/Isobel Romero-Shaw/OzGrav.

## 了解更多

从我们的网站上了解资讯：

<https://www.ligo.org/news.php>

<https://www.virgo-gw.eu/#news>

<https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/>

阅读完整的科学文献：

<https://dcc.ligo.org/LIGO-P2000318/public/main>

GWTC-3数据发布：

<https://www.gw-openscience.org/>

## 访问我们的网站

[www.ligo.org](http://www.ligo.org)

[www.virgo-gw.eu](http://www.virgo-gw.eu)

[gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/](http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/)



## 词条（英语首字母顺序）

**双黑洞 (Binary Black Hole)**：由两个紧密绕转的黑洞组成的系统（见[这里](#)）。

**双中子星 (Binary Neutron Star)**：由两个紧密绕转的中子星组成的系统（见[这里](#)）。

**黑洞 (Black hole)**：一个由极致密质量引起的极其弯曲的时空，在这里引力极强以至于任何物体，包括光线，都无法离开。

**啁啾质量 (Chirp mass)**：双星系统中两个致密天体质量的数学组合。啁啾质量决定了低质量双星系统的啁啾频率增加的特征（见[这里](#)）。

**致密天体 (Compact object)**：诸如黑洞、中子星、[白矮星](#)等密度极高的天体。

**有效旋近自旋 (Effective Inspiral Spin)**：引力波信号中最易测量的承载自旋信息的参数。它描述了双黑洞各自的自旋方向与轨道绕转的方向的一致程度（比如，自旋与轨道是否都是顺时针或逆时针的）。

**误报率 (False Alarm Rate)**：仪器噪声产生如同候选事件信号的频率。误报率越小，候选事件更可能是天体物理的。

**引力波波形 (Gravitational waveform)**：代表了引力波随时间演化的信号。

**GW200105\_162426**：一个[之前报道的](#)中子星-黑洞并合事件。这个事件有36%的概率是真实天体物理信号。有两个原因使得分析这个源很有挑战，一是它只被LIGO Livingston一个探测器探测到，那时，LIGO Hanford没有在收集数据，Virgo在收集数据，但没测到信号。一个事件出现在一个探测器中而没出现在另一个探测器中是有可能的，这取决于仪器的相对灵敏度和波源在天空中的位置（[GW170817](#)就是类似的情况）。但估算只被一个探测器探测到的信号的天体物理意义是很有挑战的。第二个因素是由于观测数据少，目前我们对中子星-黑洞族群了解甚少，这使得将事件可靠地分类为中子星-黑洞并合变得困难。随着今后观测到更多中子星-黑洞并合事件，我们更了解这类双星后，可以回过头来检验如GW200105\_162426这样的候选体。

**光的散射 (Light scattering)**：当激光照向光学部件，一小部分光会被散射（反射角大小随机）。散射光可能被其他表面反射回到探测器激光束中造成散射光脉冲干扰。关于脉冲干扰的更多信息，参见[Gravity Spy](#)。

**太阳质量 $M_{\odot}$  (solar mass)**：太阳的质量（约 $2 \times 10^{30}$ 千克）。太阳质量是天文学常用的代表质量的单位。

**质量比 (Mass Ratio)**：较轻与较重的致密天体质量之比。

**中位数 (Median)**：正好位于分布中间的数值，所以其他值的一半位于中位数之上，另一半位于中位数以下。

**兆秒差距 (Megaparsec)**：距离单位，一个兆秒差距是326万光年。

**中子星 (Neutron star)**：大质量恒星遗迹。当大质量恒星耗尽核燃料后，以灾难性方式死亡——超新星爆发，这促使中子星形成。中子星是极重致密的物体（尽管不如黑洞）以至于原子无法维持我们通常在地球上所见到的结构。它们和太阳一般重，但半径只有10千米左右。

**中子星-黑洞双星 (Neutron Star-Black Hole binary)**：由一个黑洞、一个中子星构成的紧密绕转的系统（见[这里](#)）。

**观测运行 (Observing run)**：引力波探测器收集天体物理观测数据的一段时间。

**参数估计 (Parameter estimation)**：一种统计学方法用以从引力波信号中推断天体物理参数。

**来源于天体物理的概率 (Probability of being astrophysical)**：量化表示信号源于真实引力波事件的概率。这既依赖于信号相对噪声的强弱，还依赖于我们对波源族群的了解。大量双黑洞事件的探测帮助我们理解双黑洞族群，进而帮助我们计算候选事件是真实天体物理的概率。由于我们观测到中子星-黑洞并合事件很少，这类系统的概率很难计算，一旦我们有更多观测并更了解这一族群后，可能需要再回来重新评估现有的估计结果。

**自旋 (Spin)**：黑洞绕质心旋转的速度和方向（即角动量）。

**总质量 (Total Mass)**：双星中两个致密天体的质量和。