

GWTC-4.0: LIGO-VIRGO-KAGRA 第四次观测运行第一阶段 引力波暂现源星表更新

2025年8月，[LIGO-Virgo-KAGRA](#) (LVK) 国际合作组发布了从2023年5月至2024年1月运行的第四次观测第一阶段 (O4a) 的[干涉应变](#)数据。在此数据中，我们发现了128例源于[黑洞](#)以及[中子星](#)并合的新增确信[引力波](#) (GW) 信号。与应变数据一同发布的还有第四版的引力波暂现源星表 (GWTC-4.0)，其中收录了候选信号列表以及其性质的测量结果。同时，我们也正在发表一系列与该星表配套的论文。这些文章已作为专题期刊投稿至《天体物理学快报》。本文概述了其中前三篇重点关注于 GWTC-4.0 星表的制作及其结果的论文。

导读

在导读论文“GWTC-4.0: 引力波暂现源星表4.0版本导读”中概述了该专题期刊，涵盖了其他论文的详细内容，以及帮助读者理解本领域命名规范的重要信息。

引力波事件名称是什么?

我们利用[协调世界时](#) (UTC) 记录的引力波探测日期和时间来命名事件。在该星表中，被命名为 GW230518_125908 的首例引力波事件 (按时间顺序) 在 UTC 时间 2023年5月18日12:59:08被探测到。我们为所有候选信号都会添加前缀 (这与以往命名方式略有不同，因为目前的星表中也包含了我们认为可能是由地面效应引起的信号，但同时也提供了我们认为这些可能不是真正引力波信号的附加数据)。

累积的星表

引力波暂现源星表是累积的——换句话说，GWTC-4.0星表中不仅包含 O4a 中的新观测结果，还涵盖以往的所有星表。为了说明这一点，我们在图 1中展示了所有观测运行的时间轴 (彩色条) 以及各星表的数据范围。读者将注意到，我们的星表遵循 GWTC-[主版本号 \(major\)](#) .[次版本号 \(minor\)](#) 的命名规则。其中，当数据覆盖范围增加时，星表的主版本号增加；当描述信号的方法或者数据变化时 (例如[GWTC-2.1](#)中对数据的重新分析)，则次版本号增加。过去，当次版本号为0时，我们通常会省略它 (例如[GWTC-3](#))。然而，我们发现这种做法可能会引起一些混淆——例如，GWTC-2 指的是 GWTC-2.0 还是 GWTC-2.1? 因此，在提及特定星表时，我们将始终包含次版本号。但当仅涉及数据覆盖范围时，我们仍省略次版本号 (如图1所示)。

从图 1可以看出，O4a 运行期间两台LIGO探测器均处于工作状态：所有候选信号及其测量仅依赖这两台探测器的数据。KAGRA 在观测运行初期短暂采集了数据，但灵敏度有限，不足以对星表结果做出贡献。

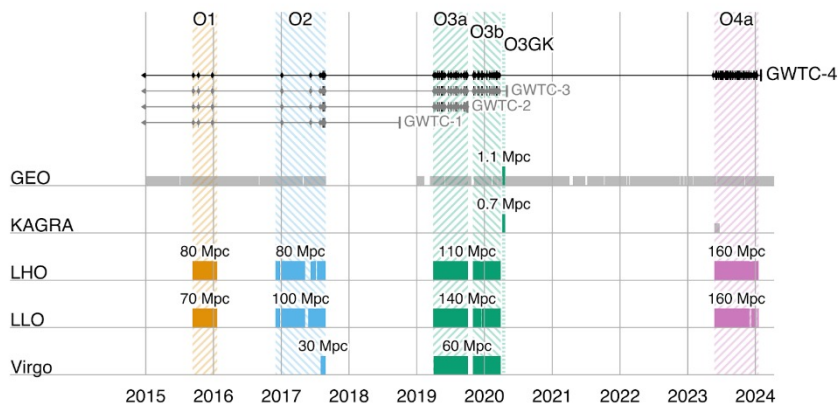


图 1: 该时间轴展示了 [GEO](#), [KAGRA](#), [LIGO-Hanford](#) (LHO), [LIGO-Livingston](#) (LLO) 和 [Virgo](#) 引力波观测天文台的数据采集时间段。彩色方块上的数字表示探测器能够探测到的标准双中子星并合事件的大致距离，反映了探测器的灵敏度。我们在顶部标记了事件被加入到 GWTC 的时间，并且用横条标记了每个版本星表的数据覆盖范围。

了解更多信息:

访问我们的网站: www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

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



在这篇导读论文中，我们首次对各个探测器的演变过程进行了详细的描述。通过将这些信息汇总在同一篇文章中，我们希望能够更好地促进研究观测结果的天文团体与构建探测器的设备团体之间的交流与联系。

窥探深空

我们通过模拟引力波信号并判断其能否被探测到，再结合探测器的[占空比](#)信息，可以估算出探测器在时空中可观测到的四维体积（我们称之为“超体积”，因为它是三维以上的体积）。在图2中，我们绘制了该超体积的近似值与天体物理起源概率大于50%的信号累计探测数的关系。这显示了每次观测运行中探测到的信号数量，并直观地展示出在O4a期间，观测到的信号数量已增加了一倍以上！图中的带状区域表示不确定性：虽然很多候选事件的天体物理起源概率接近100%，但那些概率为50%的候选事件亦有可能是由[噪声波动](#)引起的假信号。因此，这些带状区域体现了我们对观测事件数量的不确定度。

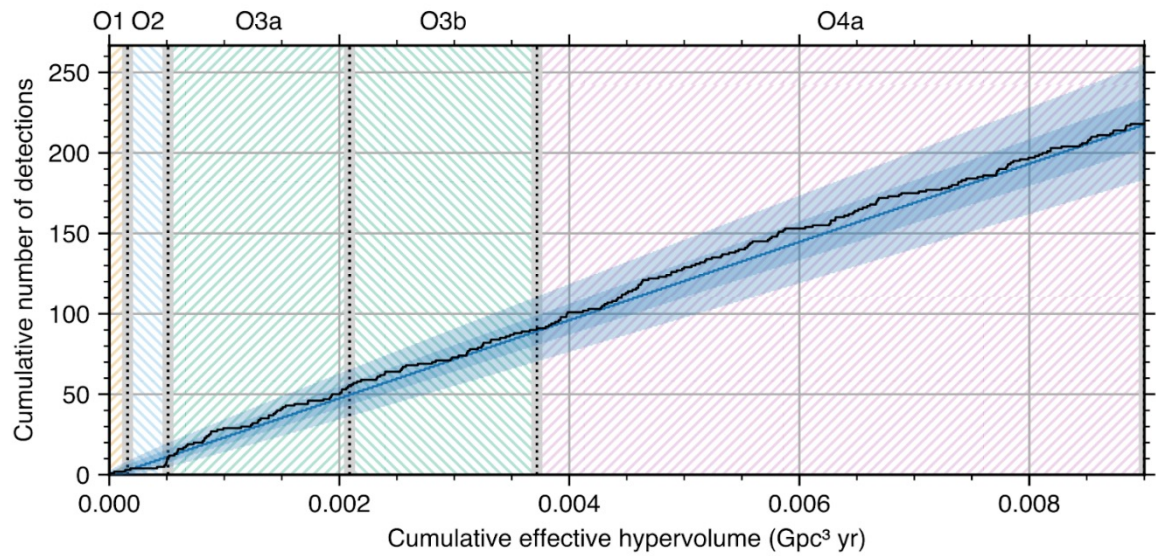


图2：累计探测到事件数量（天体物理起源大于50%的候选事件）与探测器所观测到的时空超体积近似值的关系。

在本文的其余部分，我们将评述观测到的[暂现引力波源](#)，并在最后进行总结。本综述并非旨在取代该领域诸多优秀教科书，而是提供一个在该系列专题期刊中用来描述波源的术语和数学方法的简短介绍。这样可以确保符号使用的一致性，并为对该领域感兴趣的读者提供一个统一的参考点。在附录中我们还介绍了常用缩略语表和术语表，以及数据分析规范的简要讨论。

这篇导读文章为整个专题期刊奠定了基础。虽然其本身不包含实质性的科学结果，但是其目的是避免各篇论文之间的重复内容，确保论文之间的一致性，并为该领域提供清晰的定义。

方法

方法论文“GWTC-4.0：识别与描述引力波暂现源的方法”详细介绍了制作 GWTC-4.0 所使用的方法。首先，我们从开发用于黑洞以及中子星并合的理论[波形](#)模型着手，然后讨论用于生成候选事件列表的[搜寻流水线](#)。每例候选事件会经过数据质量检查以及候选事件筛选，然后进行[参数估计](#)以了解引力波源性质及波形一致性测试，以验证基本假设。

提高分析水平：迄今最复杂的分析

自第三次观测（O3）结束及GWTC-3.0发布以来，我们投入了大量的精力以进一步提升分析方法。我们引入了能够更好描述波源物理特性且计算更快的新波形模型。在 GWTC-4.0 中，我们不仅使用了最新的波形，还对许多事件采用四种不同的波形进行分析：是 GWTC-3.0 使用波形数量的两倍，使我们能够更好地考虑模型中的不准确性。

我们还调整了搜索算法，引入了新方法以提升探测效率。这些改进增加了构建星表的复杂性，因此我们持续开发新技术来尽可能自动化分析，从而能够处理更多数据，并确保我们的结果易于重复验证。

历史回顾

在方法论文中，你可能会惊讶地发现我们对早至第一次观测运行所使用算法的历史描述。这是源于星表的累积性质：如果旧数据没有使用新方法重新分析，那么在使用这些旧事件的结果时，理解产生这些结果的方法就显得尤为重要（这些方法可能与目前处理新数据时的方法大不相同）。因此，在这篇方法论文中，我们既提供了方法上的历史回顾，也描述了目前的最新改进。

总而言之，这篇方法论文概述了我们的工作流程，展示了我们如何利用在线/离线分析、初步研究和严格筛选以确保最终结果既严谨又达到最高标准。

结果

更多信号，更多类型

我们发现了 128 例新候选事件，其天体物理起源概率都超过了 50%。这使 GWTC-4.0 中的候选事件总数达到 218 例，星表的规模翻了一倍！在本星表中，我们详细分析了其中 86 例新信号。如此多例新的引力波探测结果得益于探测器本身灵敏度的提高以及我们用于从噪声中提取信号的分析技术的发展。

有如此多的新观测结果令人振奋，因为这一新集合既包含了非常容易探测到的双黑洞并合事件（大多数情况），同时也有与我们之前观测到的任何事件都不同的含黑洞与中子星的系统。

从在线到离线（再回到在线）

在 O4 期间，我们（尽可能快地）发布了可能的候选事件的在线公开预警。这使其他天文学家能够进行后续观测，以搜寻这些候选事件可能产生的光学信号。在 O4a 期间，共有 1697 条预警被发布，其中 82 条被认为极有可能是天体物理起源，且不存在任何数据质量问题。如前所述，该星表中包含 128 例高度可能的候选事件：这些是通过所谓的“离线”分析获得的，使用了改进后的搜寻方法。然而，在这 128 例候选事件中，只有 8 例未能通过在线搜寻发现！这表明在线搜寻能够很好地找到大多数候选事件，为天文学家提供了高度准确的信息进行研究。

研究焦点

星表中的两例事件似乎是由黑洞与中子星并合产生的。这类信号非常有趣，因为与很少或没有“真正”物质的双黑洞并合相比，中子星中物质的存在有可能在信号中被测出来。对于这两例事件对应的信号，我们尚未检测到这些物质效应，但随着类似信号数量的增加，我们最终能够测量到这种效应的可能性也将提高。

质量效应

我们可以直接从信号中测量双星系统的质量。在图 3 中，我们展示了双星最可能的质量：这表明，尽管我们没有发现任何新的双中子星系统（图的左下角区域），但我们确实发现了非常有趣的可能的中子星-黑洞系统，以及总质量超过 150 倍太阳质量的新事件！

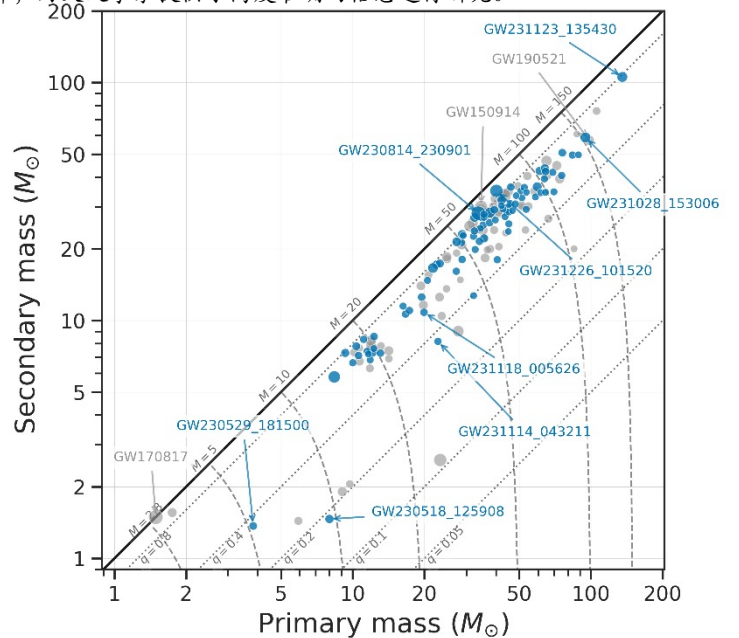


图 3: 质量-质量图显示了在 O4a 中发现的新候选事件（蓝色）以及 O1–O3 的候选事件（灰色）。这些是忽略了不确定度，只报告可能性最大的点估计值。对于每个候选事件，圆形标记的大小与其在探测器网络中的信噪比成正比。点线表示不同的质量比 q （伴星质量除以主星质量），虚线表示不同的总质量。所有质量均以太阳质量为单位。（来源: G. Ashton, 伦敦大学皇家霍洛威学院）

正确的自旋

我们可以测量参与并合的黑洞或中子星自身的两个性质：它们的质量以及是否有**自旋**。如果是这样的，我们可以测量该天体的自旋速度以及自旋轴的相对方向。我们为每例引力波信号计算一个称为“**有效自旋**”的值，它能够对两个组分天体的自旋情况提供有用的概述。一个较大正值的有效自旋意味着其中一个或两个组分天体正在快速自旋且自旋与轨道旋转方向一致；另一方面，一个负的有效自旋数值则表明一个或两个组分天体的自旋与轨道旋转方向相反。

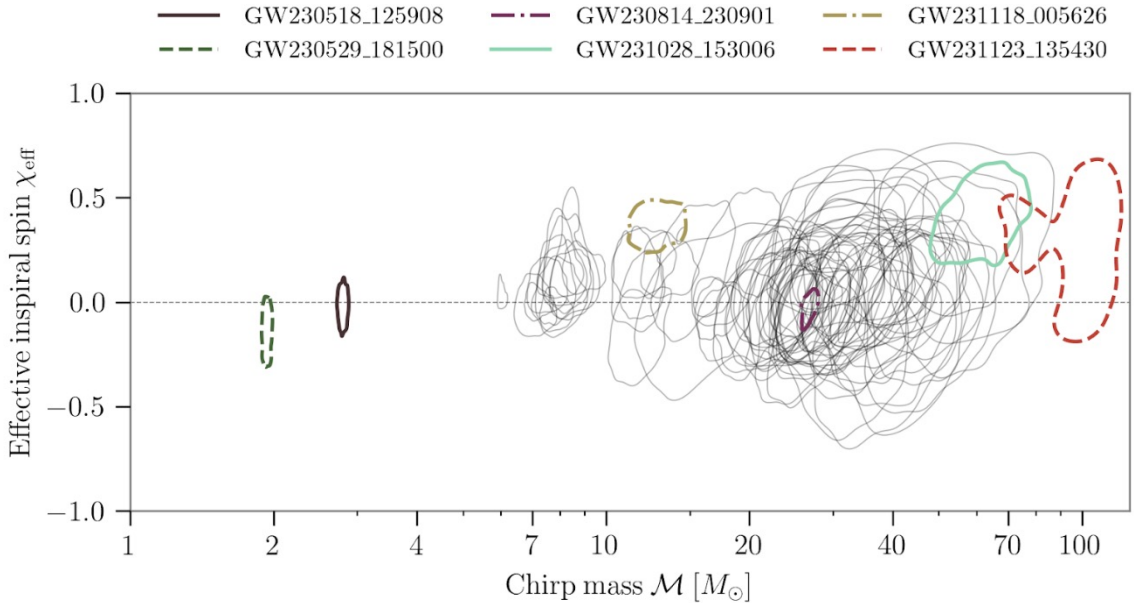


图 4: GWTC-4.0 中所有新候选事件的**啁啾质量**与有效自旋数值的图，其中特别有趣的候选事件以彩色标出。每条包络线表示该候选事件参数的 90% **置信区间**。

GWTC-4.0 星表将已知的引力波信号数量翻了一倍。这是一个了不起的成就，也是对探测器所取得的诸多改进的证明。新发现的信号为我们提供了关于黑洞和中子星的诸多新见解，并将在科研界引发极大关注，推动开展大量新的研究工作。

了解更多信息：

访问我们的网站：

www.ligo.org
www.virgo-gw.eu
gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/

免费获取完整科学论文的预印本

- 导言论文：
点击[这里](#)或访问 [arXiv](#)。
- 方法论文：
点击[这里](#)或访问 [arXiv](#)。
- 结果论文：
点击[这里](#)或访问 [arXiv](#)。

GWTC-4.0 引力波开放科学中心数据发布可[在此](#)获取。

简体中文翻译: 宋翰林, 赵俊杰
简体中文校对: 邵立晶

术语表

黑洞：一个引力极强，任何物质包括光也无法逃脱的时空区域，黑洞的质量大小不一：恒星质量黑洞由恒星坍缩形成，其质量从几倍太阳质量到约 65 倍太阳质量；中等质量黑洞的质量约在 100 到 10⁵ 太阳质量之间；超大质量黑洞的质量则超过数十万至数十亿倍太阳质量。

啁啾质量：双星系统中两个致密天体质量的运算组合。啁啾质量决定了系统由于辐射引力波而产生能量损耗的领头阶轨道演化。

置信水平：所引用区间内包含真实值的概率百分比。

占空比：信号或系统处于运行状态的周期占比。

效率：假设信号到达方向和时间均为随机情况下，可被探测到的模拟信号的比例。该比例可表示为波形类型和强度的函数。

引力波：由宇宙中最剧烈的过程——如中子星或黑洞的并合产生的时空涟漪。

中子星：大质量恒星在耗尽核燃料并经历超新星爆炸后形成的遗迹。中子星的质量较大，且极为致密（尽管不如黑洞致密），以至于原子无法维持我们在地球上熟悉的结构。其质量通常与太阳相当，但半径仅约 10 公里。

噪声：由多种仪器源和环境源引起在探测器中的信号波动。引力波探测器的灵敏度受噪声限制。

离线搜索：离线分析是对以往观测周期的数据进行的引力波信号搜索，通常在探测器因维护或升级而停机期间进行。与在观测期内执行的实时分析（亦称在线分析）相互补充。

参数估计：用于推断与引力波信号对应的天体物理源参数的统计方法。

搜寻流水线：由一系列处理流程组成的计算程序，这些流程用于对数据进行分析、滤波，并计算各种量，以尽可能剔除噪声事件，同时评估候选天体物理事件的显著度。

自旋：旋转黑洞的角动量；与质量和电荷一起描述了黑洞的基本性质。

应变：由于引力波经过时时空的扰动，两参考点之间的距离发生的相对变化。即便是到达地球的最强引力波，其典型应变也非常微小——通常小于 10⁻²¹。

波形：引力波信号幅度随时间变化的函数。