

GWTC-4.0：第四次 LIGO-VIRGO-KAGRA 觀測中首部分數據的重力波源目錄

2025 年 8 月，[LIGO-Virgo-KAGRA](#) (LVK) 團隊發布了 2023 年 5 月至 2024 年 1 月進行的第四次觀測 (O4a) 首部分的干涉應變數據。在這些數據中，我們發現了 128 個新的可信的重力波 (GW) 信號，這些信號源自黑洞間和與中子星的合併。除了應變數據發布外，我們還發布了重力波瞬變目錄 (GWTC-4.0) 的 4.0 版，其中包含候選信號列表及其特性測量。除目錄外，我們也出版了一些相關的論文。這些論文被提交給《天體物理學雜誌快報》作為焦點文章發表。在這裡，我們總結了其中三篇論文，重點討論 GWTC-4.0 本身的生產和結果。

介紹

這篇論文「GWTC-4.0：重力波瞬態事件目錄 4.0 版簡介」概述了包括其他論文的内容以及可以幫助讀者理解有關命名法的重要資訊。

名稱中的内容?

我們使用檢測到重力波的日期和時間，以世界協調時間 (UTC) 為單位來命名它們。在目錄中 (按時間順序排列的) 第一個新事件為 GW230518_125908，表示它於 2023 年 5 月 18 日 12:59:08 UTC 被檢測到。

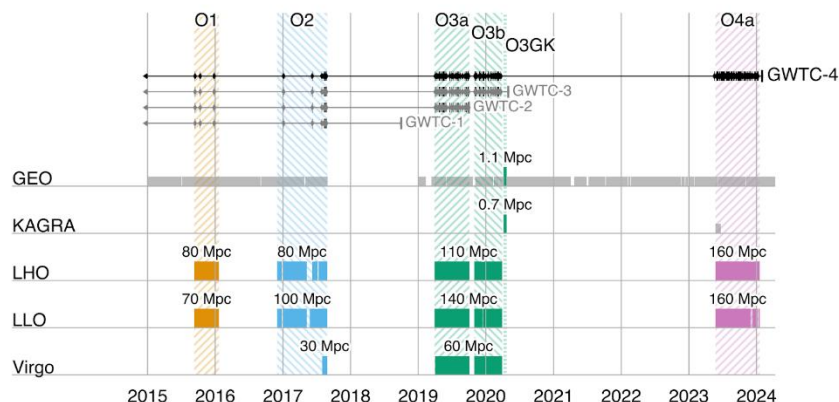


圖 1：觀測運行時間軸，顯示重力波觀測站 GEO、KAGRA、LIGO-Hanford (LHO)、LIGO-Livingston (LLO) 和 Virgo 的數據採集週期。彩色塊上方的數字對應於探測器可以看到標準雙中子星合併的大致距離，以表達儀器的靈敏度。在頂部，我們提供了事件何時添加到 GWTC 的標記，以及垂直刻度以顯示每個目錄中的數據跨度。

此外，我們也將前綴「GW」添加到所有檢測到的候選信號中 (與過去的做法略有不同，當中包括一些很可能由地面活動所引起的候選信號。文章中也提供額外數據表明為什麼我們認為它們不太可能是真正重力波信號)。

累積目錄

GW 瞬變目錄是一份累積目錄—換句話說，GWTC-4.0 不僅包含 O4a 中觀察到的新結果，還包含所有過去目錄的事件。在圖 1 中，我們顯示了所有觀測運行 (彩色帶) 和每個目錄的數據跨度的時間線。你會注意到我們的目錄遵循命名約定 GWTC- $\langle\text{major}\rangle$ - $\langle\text{minor}\rangle$ ，其中主要編號會隨著資料跨度增加；如果描述訊號的方法/資料發生變化 (例如，像 [GWTC-2.1](#) 那樣對資料進行重新分析)，則次要數字會增加。過去，當次要數字是 0，我們通常會省略 (例如 [GWTC-3](#))。然而，我們發現這可能會導致一些混淆—例如，GWTC-2 指的是 GWTC-2.0 還是 GWTC-2.1？因此，我們現在在提及特定目錄時將始終包含次要數字。然而，當僅引用資料跨度時，我們仍然省略了次要數字 (如圖 1 所示)。

從圖 1 中，您還將看到兩個 LIGO 探測器在 O4a 期間處於線上狀態：所有候選信號和測量都是僅根據這兩個探測器的數據而進行的。KAGRA 確實在運行開始時曾短暫獲取了數據，但當時的靈敏度不足以對目前的目錄結果做出貢獻。

瞭解詳情:

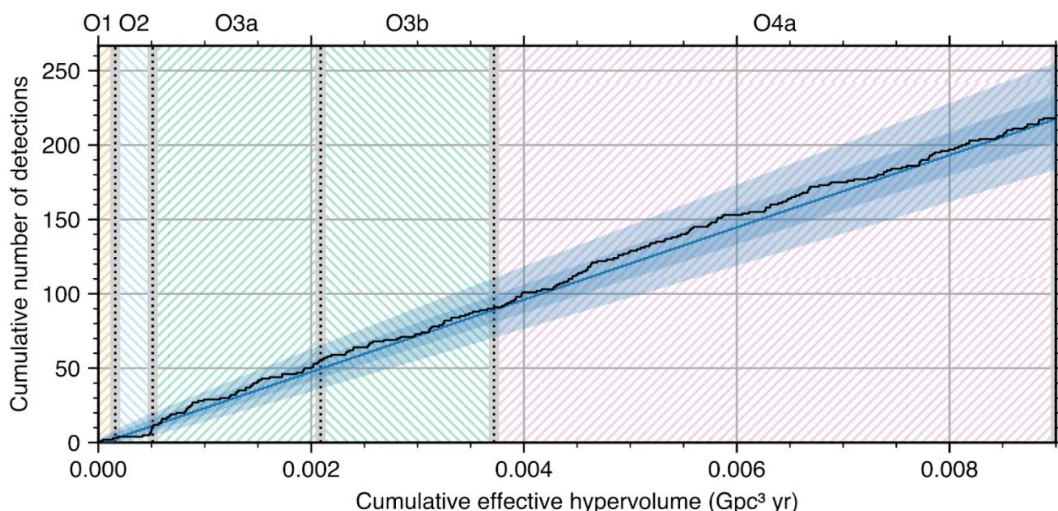
訪問我們的網站：
www.ligo.org
www.virgo-gw.eu
gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/



在介紹論文中，我們首次詳細描述了各個探測器的演變。通過將這些信息搜集在一處，我們希望將天文學界與建造探測器的儀器團隊更好的聯繫起來。

窺視黑暗

我們可以通過模擬信號並查看它們是否被偵測，然後將這些信息與探測器[佔空比](#)的詳細信息相結合，找出探測器在時間和空間上觀察到的 4 維體積（我們稱之為「超體積」，因為它是三個維度以上的體積）。在圖 2 中，我們根據天體物理起源概率大於 50% 的信號數量跟已觀測的超體積作比對，顯示了在每次觀測運行中檢測到的信號數量。在 O4a 中，我們觀測到的信號數量增加了一倍多！圖中的陰影代表不確定性：當許多候選事件的天體物理起源概率非常接近 100% 時，那些概率僅約為 50% 的事件很可能僅源於虛假的雜訊波動。因此，這些陰影反映了我們對觀察到的事件數量的不確定程度。



■ 2: 累積信號探測次數（發現的信號根源於天體物理概率大於 50% 的候選事件）與探測器調查大約的時空超體積相比。

在論文的其餘部分，我們回顧了觀測到的[瞬態重力波源](#)，然後以概要作結。我們強調本介紹文的目的並不是要取代有關領域的教科書，而是要簡要介紹我們在整個「焦點文章」中使用的學術和數學語言。這確保了我們的符號保持一致，並為對該領域感興趣的人提供單一參考點。我們還包括一個常用首字母縮略詞和詞彙表定義的表格作為附錄，以及定義數據分析慣例的簡短討論。

本介紹文為其他「焦點文章」奠定了基礎。雖然它本身不包含實質性的科學結果，但目的是消除其他論文之間的重複，確保它們保持一致，並為該領域提供明確的定義。

方法

在探討研究方法的論文「[GWTC-4.0：識別和表徵重力波瞬變事件的方法](#)」中，我們提供了用於產生 GWTC-4.0 的方法的詳細信息。從開發碰撞黑洞和中子星的理論[波形](#)模型開始，到我們討論產生候選列表的[搜索管道](#)。然後，每個候選事件在進行參數估計之前都要接受數據品質和候選審查，以驗證重力波源和上述理論波形的一致性。

提升水平：迄今為止最複雜的分析

自 O3 結束和 GWTC-3.0 發布以來，我們付出了很多努力來使我們的分析變得更好。我們引入了新的波形模型，在提高計算速度的同時，可以更好地描述重力波源的物理特性。在 GWTC-4.0 中我們不僅引入了最新波形，並且現在使用四種不同的波形來分析許多事件：

使用的數字是 GWTC-3.0 中使用的兩倍，使我們能夠更好地解釋模型中的不準確之處。我們還調整了搜索演算法，引入了新方法來提高檢測效率。其中許多改進增加了構建目錄的複雜性，我們繼續開發創新的新技術，以盡可能多地自動化分析，使我們能夠做更多事情並確保我們的結果易於重現。

歷史視角

在「方法論文」中，你可能會驚訝地發現對第一次觀測運行所使用的演算法的歷史描述。這是由於目錄的累積性質：如果舊資料沒有使用新方法重新分析，那麼在使用這些舊結果時，使用者更須要了解產生結果的方法（可能與在新資料上運行的方法有很大不同）。因此，在我們的方法論文中，我們提供了歷史視角以及對方法論新變化的描述。總之，該方法論文概述了我們使用的工作流程，展示了我們如何利用線上/線下分析、初步研究和仔細審查來確保最終紀錄的事件嚴謹且符合最高標準。

結果

更多信號，更多種類

我們發現了 128 個新候選事件，其源於天體物理概率都大於 50%。這使得 GWTC 內的候選事件總數達到 218，目錄規模翻了一番！我們將對本目錄中的 86 個新信號進行詳細分析。由於探測器本身靈敏度的提高以及我們用來從雜訊中挖掘訊號的分析技術的發展，使得我們得以有如此多的新發現。

有這麼多新的觀測結果是令人興奮的，因為這代表（大部分）探測器已經非常擅長識別常見的雙黑洞合併，也包含黑洞和中子星的合併，一種我們還沒有非常了解的系統。

從線上到線下（然後再來一次）

在 O4 期間，我們製作了（盡可能快的）關於可能候選事件的線上公眾警報。這使得其他天文學家能夠進行後續觀測，以尋找重力波候選事件可能發出的光。O4a 有 1697 個警報，其中 82 個被認為極有可能是天體物理事件。如前所述，該目錄包含 128 個極有可能的重力波候選事件：這些是使用改進的搜索方法的所謂“離線”分析的結果。然而，在這 128 個中，只有 8 個沒有在線立刻被找到！這表明在線搜索在找到大多數候選事件方面做得很好，確保天文學家擁有高度準確的信息。

有趣的系統

其中兩個目錄事件似乎是由黑洞與中子星合併產生的。像這樣的信號非常有趣，因為與黑洞之間的合併相比，黑洞很少或不涉及“真實”物質，而中子星物質的存在可以在信號中測量。對於這兩個信號，雖然我們沒有檢測到任何這些物質帶來的效應，但我們看到的此類信號越多，我們最終就越有可能測量到與物質相關的效應。

質量效應

我們可以直接從信號中測量雙星的質量。在圖 3 中，我們顯示了雙星成員質量的最可能值：這說明，雖然我們沒有發現任何新的雙中子星（在左下角），但我們確實發現了非常有趣的可能為中子星黑洞合併以及星體融合後總質量大於 150 的新事件！

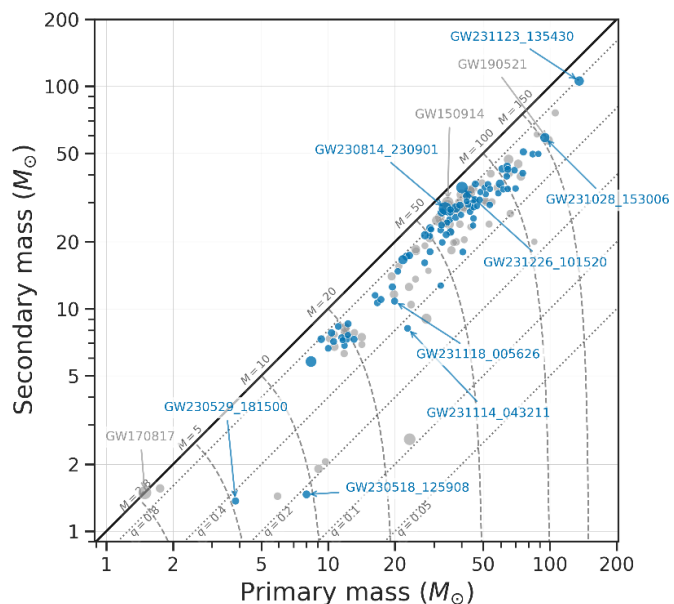


圖 3：質量圖顯示了在 O4a 中發現的新候選事件（藍色）和來自 O1-O3 的候選事件（灰色）。這些是點估計，忽略了巨大的不確定性，只報告最有可能的值。對於每個候選標識，標記的大小與其訊噪比成正比。點虛線表示質量比 q （次要質量除以主要質量），虛線表示總質量的不同值。所有質量均以太陽質量為單位。（圖片來源：G. Ashton，倫敦皇家霍洛威大學。）

正確的旋轉

在合併事件中，我們可以測量當中黑洞或中子星本身的兩個特性：它們的質量和它們是否在**旋轉**。我們可以測量它們各自旋轉的速度以及它們自旋軸的相對方向。我們為每個信號計算一個稱為“**有效自旋**”的值，該值提供了兩個分量自旋的有用概述。大而正的有效自旋意味著一個或兩個合併成員旋轉得很快，並且與它們的軌道旋轉方向相同；另一方面，負有效自旋告訴我們一個或兩個成員的旋轉與軌道旋轉方向相反。

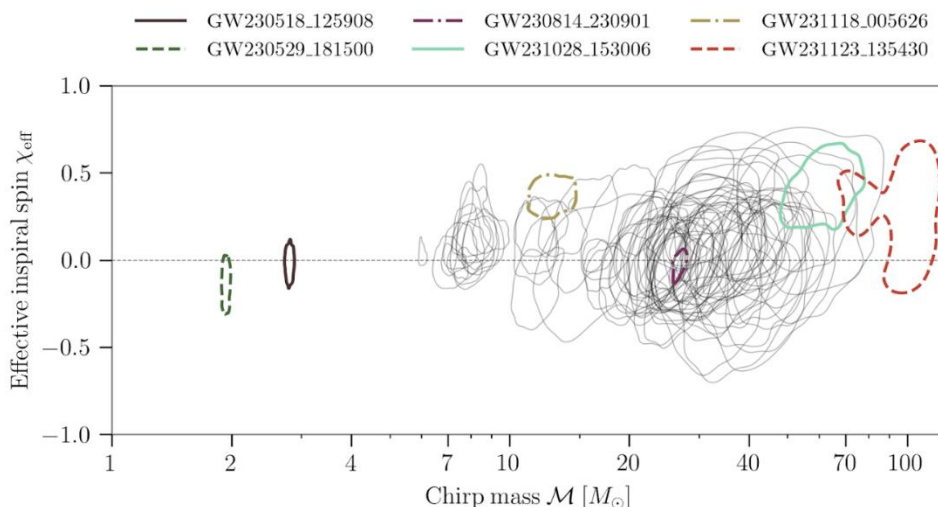


圖 4: GWTC-4.0 中所有新候選事件的**啞啞質量**與有效自旋的圖，其中以顏色突出顯示了一些特別有趣的候選事件。每個等高線都包含該候選參數的 90% **信賴區間**。

GWTC-4.0 使已知重力波信號的數量增加了一倍。這是一項了不起的成就，也證明了探測器的許多改進。這些新信號為我們提供了許多關於黑洞和中子星的新見解，並將在學界內引起極大的興奮，從而開展大量新研究。

瞭解詳情:

訪問我們的網站:

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

閱讀完整科學文章的免費預印本。

- 介紹論文:
[按這](#) 或 [arxiv](#).
- 方法論文:
[按這](#) 或 [arxiv](#).
- 結果論文:
[按這](#) 或 [arxiv](#).

重力波開放科學中心
GWTC-4.0 數據發布在[這](#)。

辭典

黑洞: 一個時空區域，重力強大，以至於它阻止了任何東西，包括光，逃逸。黑洞有不同的尺寸：恆星質量的黑洞起源於恆星坍縮，其質量範圍從幾個太陽質量到大約 65 個太陽質量。中等質量黑洞的質量範圍從大約 100 個太陽質量到 105 個太陽質量不等。最後，超大質量黑洞的範圍從超過 10⁶ 個太陽質量到超過 10⁹ 個太陽質量不等。

啞啞質量: 合併雙星中兩個成員質量的數學組合。啞啞質量決定了由於發射重力波造成的能量損失而導致的導軌道演化。

信賴水準: 預期真實值包含在引用範圍內。

佔空比: 信號或系統處於活動狀態的時段。

效率: 檢測到的模擬信號的比例（假設隨機到達方向和時間）。

重力波: 由宇宙中一些最劇烈的過程（例如合併中子星或黑洞）產生的時空漣漪。

中子星: 一顆大質量恆星的遺物。當恆星耗盡核燃料時，它會以災難性的方式死亡—超新星—這可能會導致形成一顆中子星：一個如此沉重且緻密的物體（儘管不如黑洞），以至於原子無法維持我們在地球上看到的結構。這些恆星的質量與我們的太陽差不多，但半徑約為十公里。

雜訊: 由於各種儀器和環境影響導致的重力波測量信號的波動。重力波探測器的靈敏度受到雜訊的限制。

離線搜尋: 離線分析是對先前觀察期間的資料執行的搜尋，通常是在偵測器不運作的休息期間，以進行維護和升級。它們補充了在觀察期間進行的實時分析（也稱為在線分析）。

參數估計: 用於推斷與重力波信號相對應的天體物理參數的統計技術。

搜尋管線: 計算程序由一系列過程組成，這些過程對數據進行分析、過濾它們，然後計算各種數量，以盡可能拒絕多數的雜訊事件並估計為候選天體物理事件的顯著性。

旋轉: 旋轉黑洞的角動量；黑洞的定義特性之一，還有質量和電荷。

應變: 由於經過的重力波對時空的變形，兩個參考點之間距離的分數變化。即使是最重的重力波到達地球的典型應變也非常小—通常小於 10⁻²¹。

波形: 重力波信號振幅隨時間變化的行為。