



LIGO
Scientific
Collaboration



GWTC-2：重力波源的擴展目錄

我們發表了新的LIGO和Virgo重力波源目錄（GWTC-2或“Gravitational-Wave Transient Catalog 2”），當中使用了從2015年的首次觀測到O3a（第三期觀測的前半期）收集到的所有數據。O3a的實際運行日期為2019年4月1日至10月1日，期間偵測到39個新的重力波源，加上在GWTC-1中列出的11個已確認事件，使GWTC-2中的重力波事件總數達到了50個。在O3a中發現的天體涵蓋了相當廣泛的天文物理性質，它們也分別與雙黑洞（BBH）、雙中子星（BNS）和中子星黑洞（NSBH）合併事件的理論模型非常吻合。

值得注意的是，O3a中偵測到的重力波事件數量比前兩個觀測期（O1和O2）所找到的總和還要高出三倍以上。Virgo探測器更是首次連同另外兩個LIGO探測器全程參與了O3a。在整個O3a觀測行動中，97%的觀測時間有至少一個探測器在運作，而有約82%的時間有至少兩個探測器在運作。此外，一些特別有趣的事件也在O3a被發現，當中包括：史上第二次觀測到與雙中子星合併吻合的重力波事件；第一批具有明顯不同質量對的事件；以及總質量約為太陽質量150倍的重量級雙黑洞。在此摘要中，我們將解構LIGO和Virgo在O3a中被大幅提升的觀測能力，以及這些重力波事件對天體物理學領域的重大意義。

偵測重力波

能夠在O3a發現多達39個重力波事件，這都歸功於LIGO和Virgo天文台的硬體升級、數據質量的提高以及重力波搜索的多樣性。為了減少雜訊和提高靈敏度，我們作出了一系列的改進，包括使用更強的雷射、利用新改良的反射鏡以及對散射光有更好控制。這些升級大幅增加所有三個探測器的頻率和距離偵測範圍，擴展了我們對宇宙的視野。就三個探測器平均而言，典型雙中子星合併事件在O3a中的可觀測距離中位數比O2時的水平擴大了約63%（如圖1所示）。

發現重力波源另一個至關重要的步驟是處理來自探測器的原始數據。數據處理過程涉及校準數據、減去雜訊及消除突發雜音（glitches）。首先，我們幾乎即時將來自每個探測器的原始光功率變化校準成無因次的應變（strain），以進行初始檢測。此後，我們重新校準數據以減少系統誤差並減去雜訊，以進一步增加檢測重力波源的範圍，從而揭示數據中的微弱信號。

在分析重力波數據時，我們最常見遇到的問題是突發雜音。突發雜音是短暫的瞬變雜訊，已知來源的有機械照相機的快門開合或從雷射束中散射出來的光。但是，也有原因不明的突發雜音，例如被稱為短脈衝（blips）的寬帶短時突發雜音。有好幾種方法可以分析LIGO和Virgo數據中的突發雜音，其中一個是在數千名公眾科學家通過Gravity Spy平台的幫助下識別和分類突發雜音（請參閱如何利用Gravity Spy幫助我們識別突發雜音）。在識別到突發雜音後，我們會將其從候選重力波源的數據中減法，就如圖2所示。我們在O3a中觀察到的39個事件中就有8個得益於突發雜音消滅處理，這也是在參數估計分析之前重要的處理步驟。

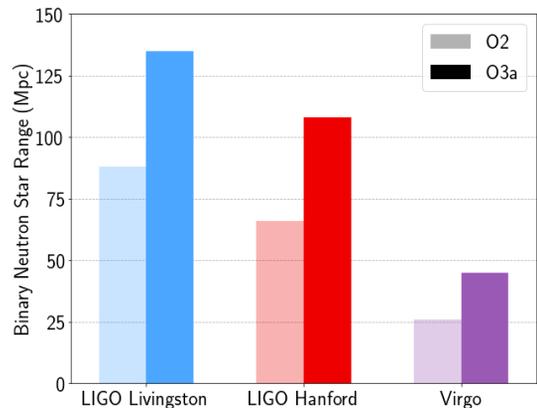


圖1：在第二個觀測期（O2）與第三期的前半期（O3a）相比，每個探測器的能偵測到的中子雙星中位數範圍。注：1兆帕（Mpc）約為326萬光年。（圖片來源：LIGO Virgo Collaboration / Eve Chase / Caitlin Rose / Northwestern / University of Wisconsin-Milwaukee）。

在尋找重力波時，識別候選者的時段主要有兩個。第一個是經過多個搜索管道實時處理數據，目的是可以在幾分鐘內向大眾發佈“[公共檢測警報](#)”。其後，我們會使用更新的數據校正、數據質量評估和更細緻的統計方法來重新分析重力波數據，最後精選出出現在此目錄的候選重力波源。在最後確定哪些候選事件可以留下時，我們設置其誤報率（事件由於雜訊而偶然發生的比率）必須低於每年兩次。在O3a中的39個事件中，26個事件稍前已出現在接近實時的檢測報告中，而其餘13個事件則是首次報告在GWTC-2。

在GWTC-2中，我們也為重力波事件引入了新的命名規則。舊的命名規則僅使用發現日期作為事件名稱，例子包括最近發生的事件：GW190412、GW190425、GW190521和GW190814。但新的規則也會將UTC時間一併加入到它們的名稱中，例如GW190701_203306（見圖2）是在2019年7月1日世界標準時間20:33:06被發現到的。通過這種方式，即使在同一天發現到的兩個重力波事件，我們也可以給予它們不同的名稱，而這些情況已經在O3a中發生了三次。

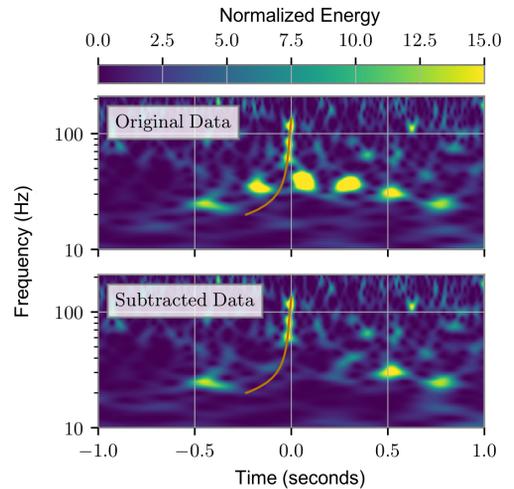


圖2：GW190701_203306時頻數據毛刺消滅前後的對比。LIGO Livingston 檢測器中的散射光會以低於40Hz的頻率以過量雜訊的形式產生毛刺。（改編自[此文圖5](#)）

測量天文物理參數

我們通過稱為參數估算的方法來調查每個重力波事件，該過程可以獨立揭示該事件被量化的天文物理性質。我們會測量“外在參數”，這些參數描述了該雙星系統與地球的關係，例如系統跟我們的距離、系統在天空中的位置以及從觀察者角度中該雙星的方位。此外，我們也會測量“內在參數”，這些內在參數指的是在該雙星系統中每個**緻密星**諸如質量和自旋之類的屬性。從事件的參數，我們計算出重力波波形來重組隨時間變化的**重力波波形**。然後，我們將預測結果人工加入模擬的探測器雜訊，再與LIGO和Virgo的數據進行比較。通過這些參數估算技術，我們可以計算參數的90%[可信區間](#)，該區間代表了與真實數據可符合的參數範圍。

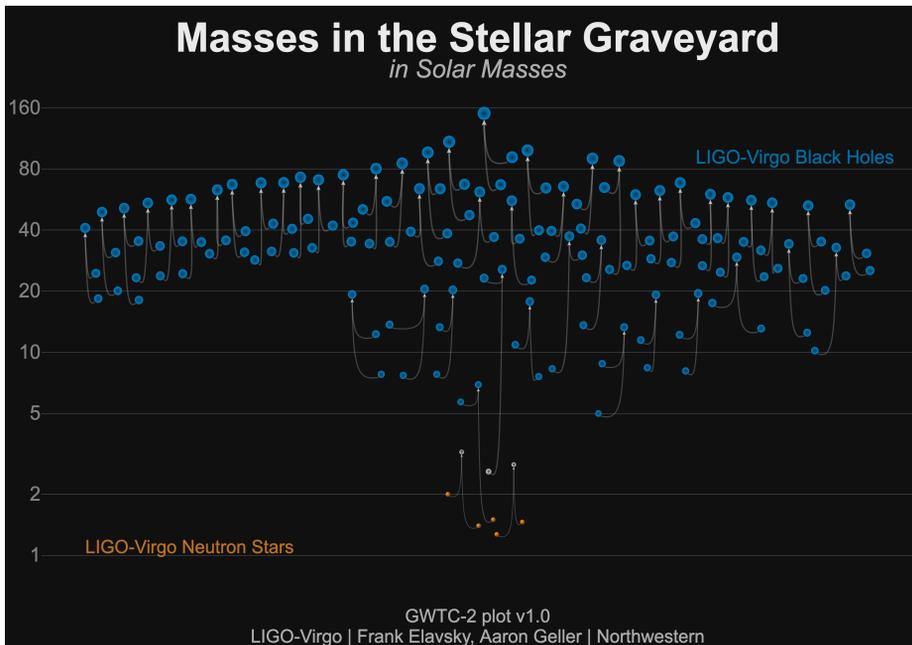


圖3：該圖顯示了黑洞（藍色）、中子星（橙色）和通過重力波偵測到身份未明的緻密星（灰色）。每個合併事件皆對應於三個緻密星：兩個合併對象和合併後所殘留的天體。（圖片來源：LIGO Virgo Collaboration / Frank Elavsky, Aaron Geller / Northwestern）。

我們偵測到的39個重力波事件涵蓋了廣泛的質量範圍，蘊含了大量有關黑洞和中子星形成與演化歷史的信息。雙星合併發生前所產生的重力波信號強弱，主要取決於由該兩個星體個別質量計算而來的特別質量，被稱為“啁啾質量”（[chirp mass](#)）。其他重要的質量參數包括雙星系統的總質量（兩個緻密星的質量總和）和[質量比](#)（最大值為一）。

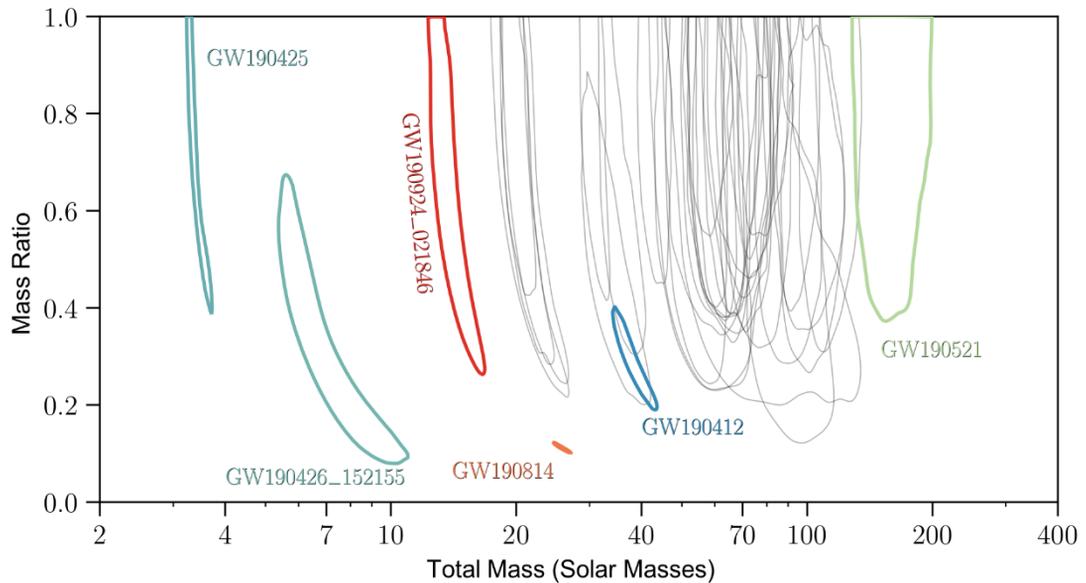


圖4：所有O3a事件的質量比和總質量估算值。等高線表示90%的可信區間。其中六個獨特事件以彩色被特別標示。（改編自此文圖6）

O3A的獨特發現

圖3展示了GWTC-2中重力波事件質量的多樣性，從1.4個太陽質量的中子星到150個太陽質量的黑洞。圖4和圖5突顯了更為特別的八個事件，其中的四個更各自被發表在專業的學術期刊，這八個事件分別為：

- [GW190412](#)：第一個具有不對稱質量的BBH，其重力波數據也顯示出[高次諧波](#)的證據
- [GW190425](#)：繼[GW170817](#)之後的第二次偵測到與BNS一致的重力波事件
- GW190426_152155：與NSBH或BBH一致的低質量事件
- GW190514_065416：所有O3a事件中，有效對齊自旋最小的BBH事件
- GW190517_055101：所有O3a事件中，有效對齊自旋最大的BBH事件
- [GW190521](#)：總質量超過太陽質量150倍的BBH
- [GW190814](#)：具有高度不對稱質量且身份未明的合併事件。雙星的質量分別為23及2.6個太陽質量的緻密星，使後者成為目前發現最輕的黑洞或在緊湊型雙星中觀測到最重的中子星
- GW190924_021846：可能是質量最低的BBH，當中的兩個黑洞都超過3個太陽質量

此外，GWTC-2的發現橫跨2.5至5個太陽質量，此質量範圍被稱為“低質量間隙”。多年來，由於缺乏在這一質量範圍內的觀測資料，天體物理學家一直假定“低質量間隙”的存在。但是我們在O3a中發現了潛在的“質量間隙”天體，例如在GW190814和GW190924_021846中較輕的緻密星。

如圖4所示，GW190521的總質量為O3a中最大，幾乎是GW170729（[GWTC-1](#)中最重的BBH）的兩倍。此外，GW190521合併事件前的其中一個黑洞質量超過90個太陽質量，是迄今為止最重的。另外，O3a也有一些總質量可能超過100個太陽質量的事件，包括GW190519_153544、GW190602_175927和GW190706_222641。

GWTC-2也記錄了一些有非對稱質量的事件，它們的非對稱性都比GWTC-1中任何事件來得更高，例如GW190412和GW190814，兩者均源於一個黑洞與它較輕伴星的合併。而這些非對稱合併事件所放出的重力波都會有較明顯的高次諧波，如GW190412。這個新目錄還包括了其他一些重力波天文學的獨特成就，包括在O3a中檢測到迄今為止最遙遠的合併事件，以及定位在不到天空總面積1%的9個重力波事件。

自旋可以進一步揭示緊湊型雙星的演化歷史。自旋與緻密星的角動量有密切關係，其尺度可以從非自旋到最大自旋。我們通常以名為“有效對齊自旋(effective aligned spin)”的參數表示事件中的自旋，該參數與合併前兩個緻密星的各自自旋有密切的關係。圖5顯示了每個GWTC-2事件中所測得的“有效對齊自旋”與其啁啾質量。負值的有效對齊自旋表示未對齊自旋，暗示該緊湊型雙星可能在密集的環境中形成，如球狀星團。如圖5所示，GW190517_055101可能具有最大的有效對齊自旋。儘管GW190514_065416可能具有極小的有效對齊自旋，在GWTC-2中沒有找到確定為負值的有效對齊自旋。此外，自旋的測量也可告訴我們該緊湊型雙星是否有旋進；GWTC-2記錄了一些可能有旋進的事件，例如GW190412和GW190521。

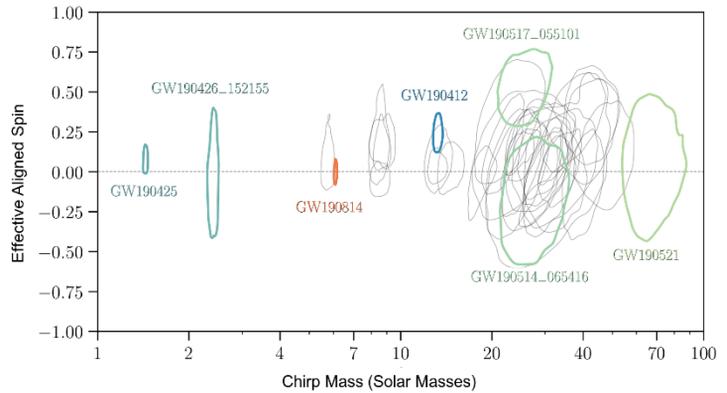


圖5：所有O3a事件的有效對齊自旋和啁啾質量估算值。等高線表示90%的可信區間。(改編自此文圖7)

重力波天文學的光明前途

令人不可置信的是，從2015年9月首次直接觀測到重力波，到偵測重力波變成天文學家日常的現在，中間只花了短短五年時間。現在有了這50個重力波事件的數據，我們可以更好地研究與探索在宇宙中存在的黑洞和中子星（見此摘要）。額外的重力波檢測數據也可以增加我們對廣義相對論的理解（見此摘要）。

在O3進行的前六個月，重力波事件的總數就被增加了39個，這充分顯示了重力波天文學的未來是可被期待的。目前正在對O3的後半期（O3b）進行分析，而這將進一步更新及擴大我們的重力波瞬變目錄。在O3之後，我們的重力波探測器將進行各種硬體上的升級，以進一步增加未來在第四期中可被觀測的天體物理覆蓋範圍。在我們等待儀器升級和新探測器建造的時，學界將繼續利用重力波探索整個宇宙中黑洞和中子星。

詞彙表

啁啾質量：以數學式組合雙星系統中兩個緻密星質量而成的特殊質量。啁啾質量的大小決定了小質量雙星合併時所發出的重力波頻率特性之高低。

緻密星：極緻密的天體，如黑洞、白矮星或中子星。

重力波形：重力波信號隨時間變化的表示。

質量比：較輕的緻密星與較重的質量之比。

中位數：在任一數值分佈中，該值位於分佈的正中間，有一半的數位於其上方和一半位於其下方。

參數估算：以統計方法推斷對應於重力波信號的天文物理性質。

太陽質量：太陽的質量，是天文學常用的質量單位。

應變：探測器臂長會因重力波的時空變形而產生變化，將之除以總臂長為應變。

如想知道更多：

來看我們的網站：

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

在 <https://dcc.ligo.org/P2000061/public> 上閱讀完整的科學文章（免費預印本）

在O3a中發現的39個事件的數據可從GWOSC Web服務器獲取，網址為：

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

GWOSC網站也包含相關的說明文件、代碼範例和教程，以幫助公眾探索這些公開的數據集。



來看我們的網站：

<http://www.ligo.org>

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

