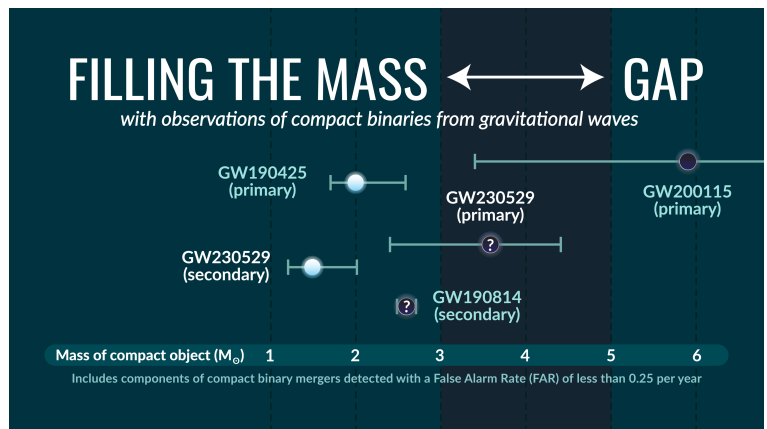


GW230529：中子星與未知緻密天體併合的觀測

在 2015 年首次探測到的**重力波**事件 [GW150914](#) 標志了天文學新紀元的到來。自此之後，有更多不同種類天體所引發的重力波事件被觀測到。所有這些事件都是由中子星或黑洞所組成的**緻密雙星系統併合**事件。我們這次發表的 [GW230529](#) 是在 2023 年 5 月 29 日在 LIGO-Virgo-KAGRA 的第四次聯合觀測的第一部分期間（簡稱 O4a）觀測到的緻密雙星系統併合事件。其中一個天體的性質並不確定，其質量既高於預期的中子星質量上限又低於預期的黑洞質量下限。

我們如何觀測到這次事件？

我們運用**匹配濾波法**分析了所有運作中的探測器的數據。換言之，就是比較探測器的數據與理論預期的訊號並找出最能吻合真實訊號時所產生的數據。並由此估算出訊號強度隨著時間的變化，又稱訊噪比（簡稱 SNR）的時間序列。當一個真實的天文訊號存在於探測器數據中，訊噪比就會相對地高，否則就會相對地低。在過往的實踐中已經證實這種技術能有效地從數據中辨識出微弱的重力波訊號。即使如此，這也並不是絕對可靠的，因為五花八門的雜訊不單能干擾我們測量的數據，甚至能模仿真實的重力波訊號。



圖一：圖中展示數個有星體質量落入 3-5 個太陽質量之間的重力波事件，此區間又稱「低質量間隙」。當中淺藍色的圓圈代表中子星，而黑色的則代表黑洞。黑洞當中有問號標記的代表該天體既有可能是黑洞但亦不排除是中子星。而這次事件 GW230529 的主星正落在此質量間隙中。

（圖片來源：S. Galaudage, Observatoire de la Côte d'Azur.）

我們如何知道 GW230529 是一件真實的天文事件？

過往的觀測主要都是在不同探測器的數據中尋找時間上吻合以及有著相同的雙星系統參數的訊號。經歷了多次的改善及提升後，我們現今已經不再局限於探索在探測器之間相符合的事件了。我們近期採用了嶄新的技術，使致即使只有一台探測器在運作的情況下，我們依然能鑑定天文事件的真實性。正正如此，使得我們這次有幸地捕捉了這次特殊的事件 GW230529，而當時唯一可用的數據來自美國列文斯頓的雷射干涉儀重力波天文台（[LIGO-Livingston](#)）。三個獨立的**搜索算法**都報告了這次事件的發現。雖然這三個算法都是基於匹配濾波法，但它們實現的方式都各有不同，並各自開發了強大的工具區分真實的天文事件和噪聲。此外，由於它們各自的發展都已經成熟，我們更可以有信心地交叉核對它們的結果。

綜上所述，探測器的噪聲極不可能產生類似 GW230529 的訊號。這次觀測事件是在實時分析時發現，並且在觀測周期結束時的得到驗證。這次併合事件的**虛警率**是低於每千年一次。這意味著如果數據中並不存在任何緻密雙星併合訊號的情況下，僅由噪聲引致相同的訊號的概率將會低至每千年一次。我們在圖二突顯出這次事件如何從其他候選事件中區別開來。

到訪我們的網站：

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



這次事件為何值得令人關注？

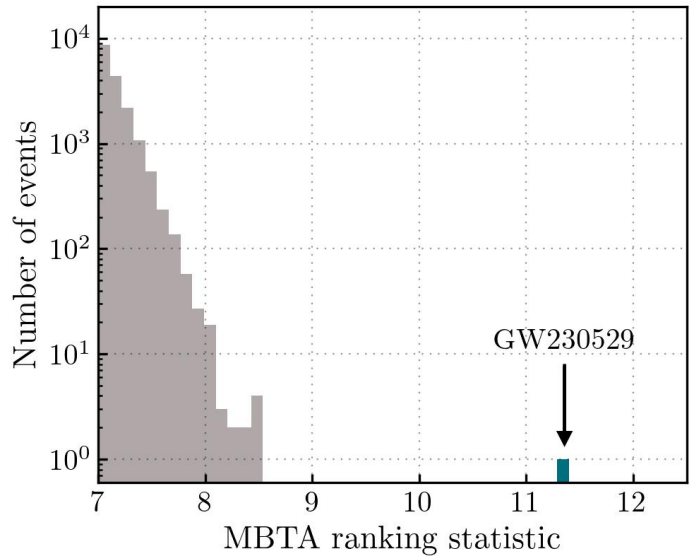
科學家們近年來提出緻密物體的質量分佈中存在一個**低質量間隙**，介於三至五個**太陽質量**（此後將以「 M_{\odot} 」示意）之間，我們預期這個質量間隙中的緻密天體的數目應該相對地較低。但在近年的**電磁波**及重力波的觀測中發現雙星系統中的確有天體存在於這個質量間隙中。例如之前的重力波事件 [GW190814](#) 中較輕的天體所測量到的質量便是有高機率地介乎於 $2.50 M_{\odot}$ 至 $2.67 M_{\odot}$ 之間。這高於當時所知最重的中子星，但又輕於預期的黑洞質量下限。

這次事件中較重的天體質量估計為 $3.6 M_{\odot}$ ，令 [GW230529](#) 成為首個雙星系統中的主星落入質量間隙中，正如**圖三**所示。據我們目前對中子星和黑洞的族群的認知，這次事件中較重的天體有高於 99% 概率符合一個質量少於 $5 M_{\odot}$ 的黑洞。如此同時，根據目前所知的核物理理論及實驗，以及對天體分佈的理解，我們亦估計了較重的天體作為中子星的概率。此概率相對少但並非為零，而且在某些假設下，它甚至高達幾個百分比。因此，我們無法肯定地否定此天體為中子星的可能性。另外，[GW230529](#) 中較輕的天體的質量有高達 90% 概率在 $1.2 M_{\odot}$ 及 $2.0 M_{\odot}$ 之間，幾乎可以肯定是一顆中子星。

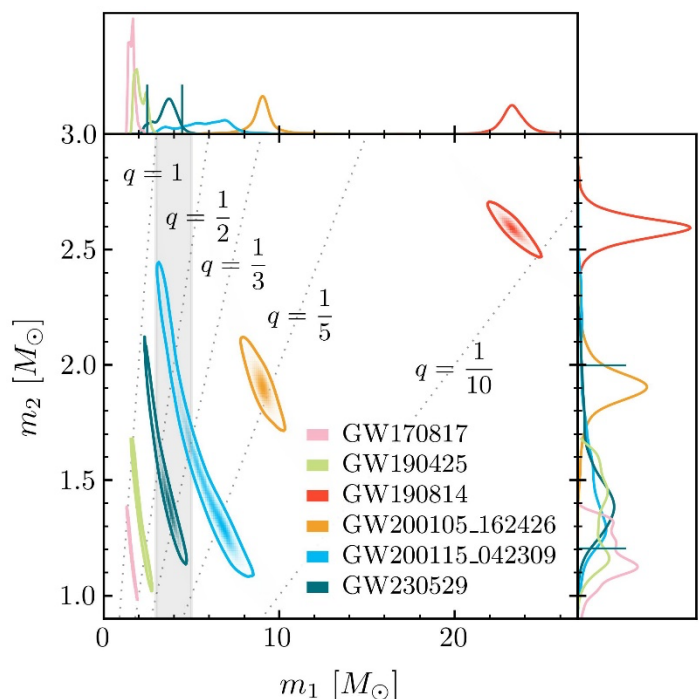
圖三：不同雙星系統中主星及次星的質量的概率分佈。概率分佈函數峰值的所在之處就是最高概率的質量。位於圖上方的是主星 (m_1) 的質量概率分佈函數，而右方的則是次星 (m_2) 的質量概率分佈函數。圖中的破折線代表有著相等質量比 ($q = m_2 / m_1 = 1$) 的雙星系統。兩次的雙中子星併合事件分別為粉紅色的 [GW170817](#) 和淺綠色的 [GW190425](#)。而橙色和藍色分別代表過往觀測到兩次的中子星-黑洞系統 [GW200105_162426](#) 和 [GW200125_042309](#)。紅色的 [GW190814](#) 當中的次星可能是中子星或者黑洞。質量介於 $3 M_{\odot}$ 至 $5 M_{\odot}$ 的區間以灰色表示。我們可見藍綠色的 [GW230529](#) 正正落在早前的兩個雙中子星系統及中子星-黑洞系統之間，並且其主星落入了低質量間隙中。

圖表取自於出版物

更多關於圖表的資訊以及如何重製它們可以閱讀網上的免費[預印本](#)。



圖二： *O4a* 的首兩星期在 LIGO-Livingston 中探測到的候選事件的等級統計量的概率分佈，由一個稱作「MBTA」的搜索算法所算出來。橫軸表示等級統計量的數值，一方面對觸發搜索算法的事件作評級，亦同時具有能分辨出噪聲的不同測試在內。此等級統計量是根據訊號的訊噪比推算出來，其數值越高代表訊號本身的强度高並且有較高機會來源於天文事件。圖中灰色部分是不能被辨認為有真實天文來源的事件。而藍色的長條則表示這次事件 [GW230529](#)。如圖所示，[GW230529](#) 的等級統計量遠高其他候選事件，當中最高的只達到 8.5，只有 [GW230529](#) 能高至 11.4。

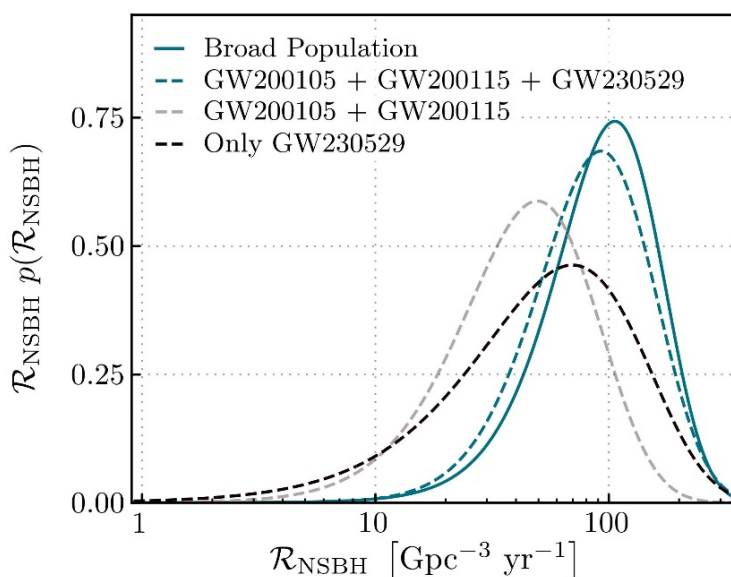


從此事件中我們能得知甚麼？

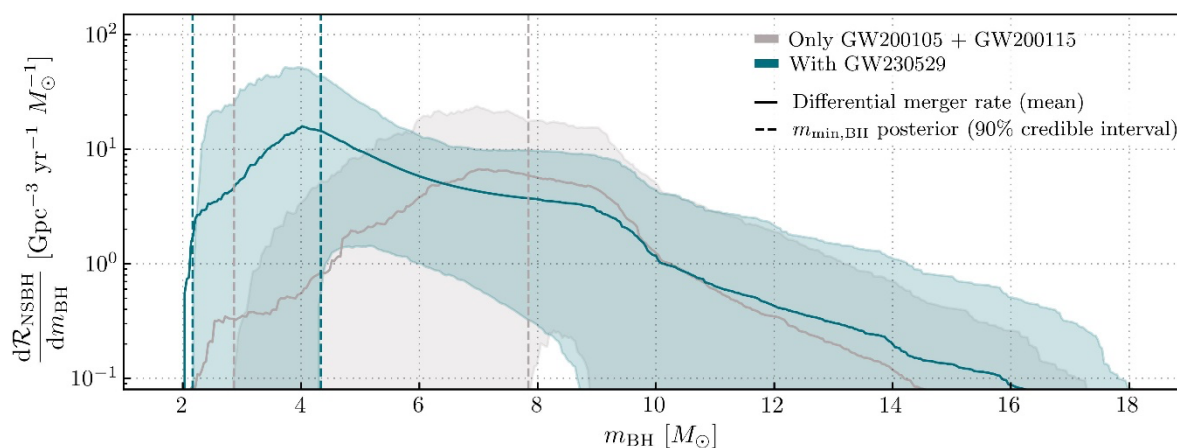
中子星和黑洞的併合（英文簡稱為 NSBH）從來都是罕見的事件，因此每次額外的觀測都是極為寶貴的機會來研究它們的併合率以及它們族群的特徵，這也是重力波天文學的目標之一。當中包括推斷出它們質量分佈的形狀，中子星和黑洞之最小及最大質量，以及不同質量的旋轉緻密天體的數目。單從 GW230529 所計算出來的同類事件併合率，在一個 3.5×10^{28} 立方光年的空間內，大概為每年 39 次。當過往在第三次聯合觀測中的[中子星—黑洞併合候選事件](#)也包括在內時，分析得出併合率大概為每年 61 次在 3.5×10^{28} 立方光年的空間內。如果更進一步地包括一些不太確的候選事件時，所算出的併合率約每年 95 次，在 3.5×10^{28} 立方光年的空間內。我們在這次分析中發現近似 GW230529 的雙星系統，它們的併合率與過去從第三次聯合觀測中所計算出的併合率相近，而當時的事件中較重的天體都無可置疑地肯定是黑洞。這更加確立 GW230529 中較重的天體也是黑洞的假設。圖四所示的便是中子星和黑洞的併合率的概率分佈。

由於這次事件 GW230529 的主星很有可能落入低質量間隙中，它將提供重要的資訊來改善目前的**族群模型**。我們研究了這次 GW230529 的觀測對三個不同的族群模型的影響。首兩個族群模型包含所有緻密物體雙星系統（雙中子星、雙黑洞及中子星—黑洞），而最後一個只考量中子星—黑洞系統的族群。對於首兩個族群模型，包括 GW230529 在內時並不太影響它們的結果，這意味著 GW230529 並不會太偏離這類族群。反而它對第三個族群有著顯著的改變，如圖五所示。當中可以看到低質量的黑洞數目將會上升並同一時間將黑洞的質量下限推至更低。先前的分析推斷出來的黑洞質量下限為 $6.04 M_{\odot}$ ；但當分析中包括 GW230529 時，我們發現這質量下限下降至 $3.36 M_{\odot}$ 。

由此可見，GW230529 這個雙星系統的形成方式並不明確。由於這雙星系統中的主星質量過於低，根據目前我們對**核塌陷超新星**的認識，此主星並不可能通過此這機制形成。另一較可能的形成機制是超新星後的**回落機制**，意思是超新星後的內核透過吸積附近物質而形成黑洞。近期的電腦模擬結果中亦都顯示這種形成機制是有可能產出質量為 $3 - 6 M_{\odot}$ 的黑洞。此外，一些模擬氦星核塌陷的結果甚至能產出輕如中子星質量上限的黑洞，雖然結果中低於 $5 M_{\odot}$ 的黑洞並不常見。時至今日，核塌陷模型結果中的產物仍然存在有頗大的誤差，以致我們無法精準地判斷出緻密物體質量的上下限。故此，GW230529 將提供十分寶貴的資訊於約束這些林林總總的模型。



圖四：中子星—黑洞系統的併合率密度的概率分佈。橫軸所指的是併合率密度，而概率分佈函數峰值的所在之處便是最高概率的併合率密度。破折線代表的是只涵蓋中子星—黑洞系統的併合率密度，圖例中具體說明包括在內的事件。黑實曲線代表的是「Broad Population」意指包含那些有較低顯著程度的候選事件，如正文所述。由此我們可以見到不同的分佈的峰值都相對接近，而且有一定程度上的相互重疊。值得注意的是，只考慮 GW230529 時的峰值併合率比得上當包括其他事件時所得的峰值。



圖五：以黑洞質量（橫軸）作變量的中子星－黑洞系統的併合率密度函數（縱軸）。兩個不同模型的併合率密度的平均值均以實線代表，而陰影部分表達該模型的不確定性。垂直的破折線之間為推算出來的黑洞質量下限的 90% 可信區間。灰色的模型只包括 GW230529 在外的兩個中子星－黑洞系統；而藍綠色的則包含 GW230529 在內。如圖中所示，當 GW230529 也包括在中子星－黑洞族群內時，低質量部分的分佈明顯地增加，同一時間亦把黑洞質量下限推至更低。

另一可能形成此系統中的主星是通過雙中子星併合而成。如此一來，我們假設次星或許是一個三星或者四星系統中的一員，又或者它是當主星在一個年輕的星團或活躍星系核中演變過程中捕獲所得的。當然我們也不能排除主星有非恆星起源的可能性，如**原初黑洞**。

進一步研究類似 GW230529 的質量間隙系統將使我們能夠進一步完善對黑洞和中子星族群的理解。這將進一步使我們能夠更好地理解它們的形成機制，以及中子星的內部結構。

延伸閱讀

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

[在此](#)閱讀完整的科學文章預印本。

繁體中文翻譯：梁軒瑋

繁體中文校對：黃進鋒

英文原文來自：<https://www.ligo.org/science/Publication-GW230529/>

詞彙表

緻密雙星系統併合 (Compact binary coalescence)：通常簡稱為“CBC”。它是指由兩個黑洞、兩顆中子星、或一個黑洞及一顆中子星所構成的雙星系統相互旋近，並最終併合的一個過程。雙星系統中的較重的天體被稱作主星，而較輕的那個則稱為次星。併合後產生的天體可以是一個中子星或一個黑洞，這取決於初始系統。形成雙星的物體稱為其組件，其中質量較大的定義為主星。

黑洞 (Black hole)：這是一種緻密物體並且其高密度以至連光都無法逃脫。由於光無法從它身上發送至我們，因此在內眼上看來就是一片漆黑的空間。

中子星 (Neutron star)：這是一種主要由中子及少量質子和電子組成的極其緻密的天體，當中的原子結構因不能承受其內部壓力分裂而成。中子星一般在大質量恆星塌陷並經歷了核塌陷超新星後形成。它們理論上的最大質量大約為 $3 M_{\odot}$ 。

原初黑洞 (Primordial black hole)：這是一種理論上在大爆炸之後不久形成的黑洞。目前對它們的質量範圍估計在 $10^{-18} M_{\odot}$ 及 $10^{36} M_{\odot}$ 之間。

LIGO-Virgo-KAGRA：分別位於美國、意大利和日本用於測量重力波的儀器。這些干涉儀的基本結構都是由兩條長達數公里並且互相垂直的臂組成，形成「L」形狀，而每條臂的末端都懸掛反光鏡，用作循環反射雷射光。當重力波穿過地球時，會改變兩臂之間的相對長度，而我們便是運用臂內的雷射光束來測量此變化。我們所收集的重力波數據便是通過長時間地監測著各探測器中這兩臂間的距離。

匹配濾波法 (Matched-filtering)：我們用於分析探測器數據及偵測出緻密雙星併合事件的方法。它涉及比較探測器的數據與理論中預期的重力波訊號並尋找它們之間的相關性，而訊號的波型則取決於雙星系統的特性。當來自真實天文事件的重力波穿過地球時，我們應能找到一個與數據有高吻合度的訊號。

低質量間隙 (Lower mass gap)：一個我們預計沒有或相對少的緻密天體存在的質量範圍。此區間介於 $3 M_{\odot}$ 至 $5 M_{\odot}$ 之間，就是中子星質量上限與黑洞質量下限之間。

太陽質量 (Solar mass, M_{\odot})：太陽的質量，在天文學上用作為質量的單位，大約等於 2×10^{30} 公斤。

光年 (Light year)：一種長度單位。一光年代表光在一年時間內在真空中傳播的距離，大約等於 9.5×10^{12} 公里。

族群模型 (Population model)：一種理論模型用於預測某一類緻密天體的數目，此函數以雙星系統內的參數作為變量。

核塌陷超新星 (Core-collapsed supernova)：在穩定的恆星中，氣體壓力不斷與它自身的重力相對抗。當星體快要殆盡時，它氣壓將會下降而無法再抗衡重力的壓縮，因此引致極其迅速的重力塌陷至其內核，導致有多種可能的結局。這種突然的塌陷在星體內造出極高的壓力使其爆炸形成超新星事件，因而得名——「核塌陷超新星」。其後所剩下的可能是一顆中子星，或當有回落機制發生時便會形成黑洞。如果原來的星體有著非常大的質量時便會直接塌陷成一個黑洞，期間並不會形成超新星。

回落機制 (Fallback)：當核塌陷超新星形成中子星後，附近的物質能「回落」至中子星上。這吸積過程能讓中子星的質量高於其臨界質量，使其形成黑洞。

搜索算法 (Search pipeline)：一套包括多個步驟所組成的計算程序。當中包括對數據進行過濾及篩選從而計算出不同的統計量用以盡量撇除噪聲訊號並估算出候選天文事件的顯著程度。有些搜索算法是實時計算的，有些是線下的，更有些是兩種運作方式都有的。更多關於這方面的資訊能在「IGWN 公開預警的用戶手冊」

(IGWN public alerts user guide) 中找到。

線下搜尋 (Offline search)：在觀測周期結束後進行的數據分析，一般在周期與周期之間的空檔期間進行，這時的探測器都暫停運作並進行更新改進。這些分析能與在觀測周期時進行的實時分析互補，又稱線上搜尋。

虛警率 (False alarm rate)：這是一個用於衡量一件天文事件能被噪聲模仿的概率。計算的方式是依靠模擬大量噪聲的訊號並算出其訊號強度，從而得出一個噪聲訊號發生率的概率分佈並以訊號強度作為變量。換言之，當一件天文事件的虛警率為每天一次，意味著探測器中的噪聲能每天製造類似這類事件的訊號。因此我們無法肯定這類事件的天文真實性。