

## 奇特的 GW190814: 恆星質量黑洞與一顆神秘緻密星體的合併

西元 2019 年 8 月 14日也是三個重力波偵測器<sup>1</sup> 第一次同時偵測到重力波(GW170814) 的整整兩年後，[雷射干涉重力波天文台\(LIGO\)](#) 與[處女座干涉儀\(Virgo\)](#) 觀測到了另一組可能更令人吊詭的重力波訊號。當時 LIGO–Virgo正在進行第三次的聯合觀測（簡稱O3），所觀測到的重力波是來自於兩顆緻密星體旋入與合併時所產生極度響亮的事件：其中一顆是黑洞，但另一顆則是不明的緻密星體。

GW190814的特別在於它的兩個顯著特徵。其一是較重的那顆緻密星體約為其伴星的九倍重，也是目前觀測到的事件中最不對稱的雙星系統。其二是觀測所推論的質量顯示較輕的那顆緻密星體可能是目前所知最輕的黑洞或是最重的中子星，然而我們無法確定是哪個。這兩個特徵挑戰著我們對緻密星體質量的了解以及如何形成這樣系統的認知。

### 重力波訊號

在搜尋重力波訊號時，目前是使用[匹配濾波 \(Matched Filtering\)](#)的技術，也就是比較觀測的數據與愛因斯坦[廣義相對論](#)所預測的訊號。這樣的分析技術推斷 GW190814的數據是來自於系統雜訊的機率大約只有一萬年才會發生一次。GW190814也是目前所觀測到第三響亮的訊號<sup>2</sup>。這訊號大聲到足以用肉眼在圖1表示頻率與時間的重力波光譜圖中直接看到。

整個 O3聯合觀測中, LIGO–Virgo 合作團隊有即時釋出可能重力波訊號的[公開警示](#)。這些公開警示包含了[訊號類別](#)與一些初步資訊分析。GW190814的警示在觀測後20分鐘內就已經發布並被標記為「質量間隙 (Mass Gap)」，代表說至少其中一顆緻密星體的質量介於三到五倍的太陽質量 ( $M_{\odot}$ )。這個定義是源自於缺乏低於五倍太陽質量的黑洞觀測。這個區塊的黑洞質量分佈也被稱作“低”質量間隙。

進一步的數據分析也可以更精準的測量質量。在觀測事件後約11小時，警示將分類更新為[中子星–黑洞\(NSBH\)](#)，代表說其中一顆緻密星體的質量低於三倍的太陽質量 ( $3M_{\odot}$ )，也是中子星質量上限的粗略估計。訊號來源也追蹤到約為20平方度的一個小天區（見圖2）。透過這些資訊，如同GW170817的情況一樣，[電磁波與微中子](#)的後續觀測也可以陸續進行，然而並沒有偵測到對應的電磁波或微中子訊號。這樣的結果並沒有特別意外，因為 GW190814比 GW170817還來得更遠以及根據觀測的訊號源特性（見下文）這樣的系統並不預期會產生強烈的電磁波。

<sup>1</sup>這三組重力波偵測器其中兩組來自 [雷射干涉重力波天文台](#)（分別在[美國華盛頓州的漢福德](#)和[路易斯安那州的利文斯頓](#)）另一組則來自義大利卡希納的[處女座干涉儀](#)。

<sup>2</sup>僅次於GW170817, 與GW150914。

## 重力波源特性

雙星系統中較重的緻密星體質量約為 $23M_{\odot}$ （見圖3），這與目前LIGO-Virgo所觀測到的黑洞質量分佈是吻合的。較輕的緻密星體質量則分佈約為2.5 到  $3M_{\odot}$ ，這個質量大於目前所知最重的中子星（MSPJ0740+6620），卻也低於普遍電磁波觀測所推論的黑洞質量。較特別的是這個質量與GW170817中兩顆中子星合併後所形成的緻密星體（很可能是黑洞）質量相當。

重力波源的特性可以透過雙星質量的不對稱性來準確的測量。越強的不對稱性，重力波就有更強高次諧波的訊號（好比撥彈吉他的高泛音）。如同在GW190412質量不等黑洞合併的事件，訊號距離與系統的傾角的可以透過高次諧波的資訊來更精準的測量。因此足以判定GW190814的重力波訊號是來自於約八億光年外。

中子星與黑洞這類的緻密星體是預期有自旋的。儘管他們的自旋並不像質量一般可以影響重力波的強弱，也因此非常難測量，重力波探測器偵測到GW190814的訊號卻長達10秒（見圖4）。配合上訊號的強度，我們可以用重力波測量到目前最精準的黑洞自旋：大約是廣義相對論所允許的最大自旋的7%。我們也可以判斷這個系統並沒有在進動。

## 檢視哈伯與愛因斯坦

GW190814是研究科學的一個絕佳重力波事件。由於GW190814比GW190412有著更顯著的不對稱性，我們有更強烈的證據來證實訊號中的高次諧波與高次多極的重力波輻射。這也美妙的驗證了廣義相對論的預測。

我們也用GW190814做了許多其他廣義相對論的測試並發現重力波訊號用兩顆黑洞來描述是最好的。值得注意的是，目前沒有其他證據顯示較輕的星體是黑洞之外的任何可能，包含中子星或其他更奇特的星體。

透過GW190814，我們也可以建立一個新的方式來運用重力波測量描述宇宙膨脹速率的哈伯常數( $H_0$ )。在沒有電磁波與微中子的對應觀測下，GW190814是目前最準確測量天空位置的重力波源。原則上來說要測量哈伯常數( $H_0$ )，我們還需要知道訊號所在星系的紅位移。在沒有對應觀測來確認所在星系的情況下，我們可以考慮所有GW190814所在的可能星系來當作GW190814的宿主星系。結合重力波的測量與這些所有可能星系的紅位移，並加權考量各個星系是宿主星系的機率就可以用來測量哈伯常數。在這樣的計算之下，我們所估算的哈伯常數比之前所有透過重力波但沒有對應觀測所計算的哈伯常數都還來的準確。透過這樣的計算我們估算出哈伯常數約為每秒每百萬秒差距75公里比過去沒有對應觀測的所有重力波來源都還來的精準。

## 較輕的緻密星體是中子星還是黑洞？

較輕的那顆緻密星體如果不是一顆異常重的中子星就是一個特別輕的黑洞。在包含中子星的雙星系統中，伴星的重力會對中子星產生潮汐的作用，就如同月亮重力對地球海洋造成的潮汐現象。通常上我們藉由檢視重力波訊號中有無潮汐力的痕跡來判斷系統有無中子星，但在重又不對稱的

GW190814中，**潮汐力的痕跡**非常微弱以及難以偵測。因此潮汐的測量並沒有辦法分別 GW190814 是來自於一顆黑洞與一顆中子星的合併，或是兩顆黑洞的合併。

另一方面來說，中子星物質的理論模型以及電磁波天文學所觀測的中子星質量分佈都可以讓我們來估計中子星的質量上限。這些預測暗示這顆較輕的緻密星體對中子星來說或許太重了，而更可能是一顆黑洞。雖然如此目前我們還無法完全否定 GW190814包含一顆極端重的中子星，如果是那樣的話我們將大幅改寫我們對中子星質量上限的估算。

### 起源的故事: 如何形成這樣的系統？

因為輕的那顆緻密星體質量介於多數中子星與黑洞之間，且質量是伴星的九分之一，GW190814與過去LIGO–Virgo所觀測到的合併事件完全不同（見圖5），也與模擬宇宙中雙星合併的系統分佈不相似。我們預期這樣的系統發生的頻率會比一般雙黑洞合併或雙中子星合併的機率要來的低很多。因此要解釋這類系統的起源充滿了非常多的挑戰。

比較 GW190814的特性、推論的合併率與恆星演化理論模型的預測，我們發現年輕與密集的**星團**或**活躍星系核**周圍的星盤要比**球狀星團**更有機會形成 GW190814。這次的事件也不太可能是來自孤立雙星系統的演化。然而較輕的星體卻有可能是來自於過去合併事件的產物，也就是第二世代的合併殘骸。這樣的殘骸在密集星球的環境（譬如球狀星團）再捕捉一顆黑洞伴星就足以解釋 GW190814的起源。但這樣的機制應該不是這類系統形成的主要機制。

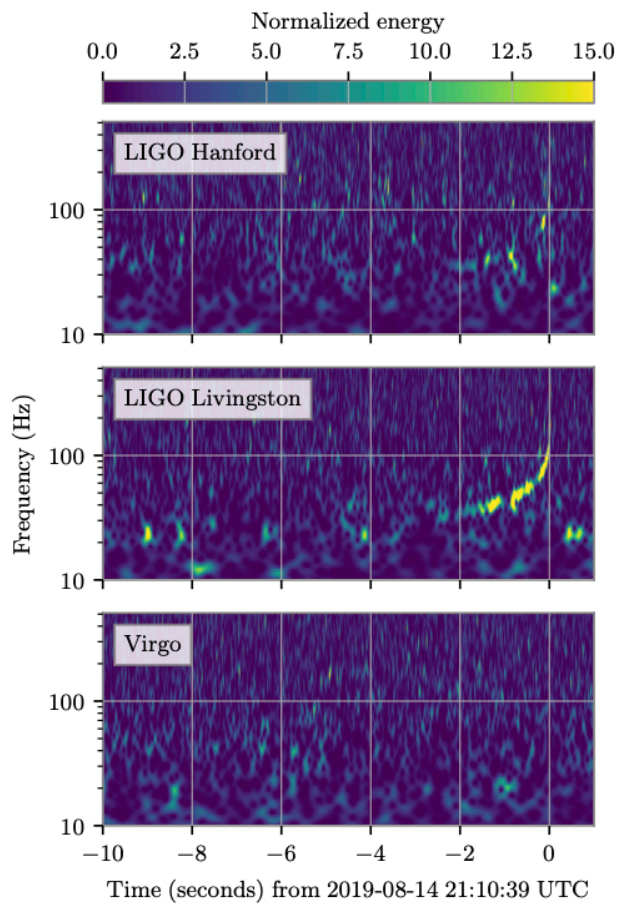
GW190814為我們帶來了許多關於「緻密星體的質量」與「雙星如何導致合併」的迷人的問題。而未來更多的重力波觀測將為了解不對稱雙星合併的分佈帶來一道曙光（或說曙重力波！），而 GW190814只是個開始。

### 詞彙表

- **緻密星體(Compact Object)**: 高密度星體，譬如白矮星，中子星與黑洞，通常來自恆星演化生命週期的終點。
- **黑洞 (Black Hole)**: 一個引力強大的緻密星體，連光都無法掙脫其重力。
- **中子星(Neutron Star)**: 來自於大質量恆星塌縮後的極端緻密星體。
- **$M_{\odot}$** : 太陽質量也是天文學中常用的質量單位，大約等於 $2 \times 10^{30}$ 公斤。
- **質量間隙(Mass-gap)**: 黑洞質量分佈的缺口，來自於緻密星體質量觀測在 $2.5$ 與 $5M_{\odot}$ 的缺口。
- **高次多極 (Higher Harmonics/Multipoles)**: 重力波的輻射可以用「**球諧函數**」來展開。高次多極代表展開後比主要的四極項還要多次的部分。
- **進動 (Precession)**: 根據角動量守恆，當黑洞自轉的方向與公轉的方向不同時，公轉平面會轉向角動量的方向。

- **光年(Light-year):** 距離的單位。定義為光走一秒鐘的距離，大約為 $10^{13}$ 公里。
- **百萬秒差距(Megaparsec):** 距離的單位，大約為3.26百萬光年。
- **紅位移(Redshift):** 因為訊號源與觀測者間的移動所造成（聲波、光、或重力波）的波長增長。根據**宇宙膨脹**，星系將慢慢遠離我們，而所發出的光或其他電磁波輻射會有較長的波長。
- **球狀星團(Globular Cluster):** 星系中包含密集星球的小球團。一個球狀星團可以包含到一百萬顆星星。
- **活躍星系核(Active Galactic Nuclei):** 在某些星系中心所發現非常緻密與明亮的區域，也是宇宙中最強烈與穩定的能量源。

圖



**圖 1.** 用時間與頻率來表現GW190814的數據。數據分別為LIGO 漢福德(上), LIGO 利文斯頓(中), 與 Virgo (下)。時間約從合併事件的十秒前開始顯示。顏色則表現特定時間與頻率下的重力波能量強度。重力波最響亮的“啁啾聲”可以在中圖(LIGO 利文斯頓)裡清楚看見。

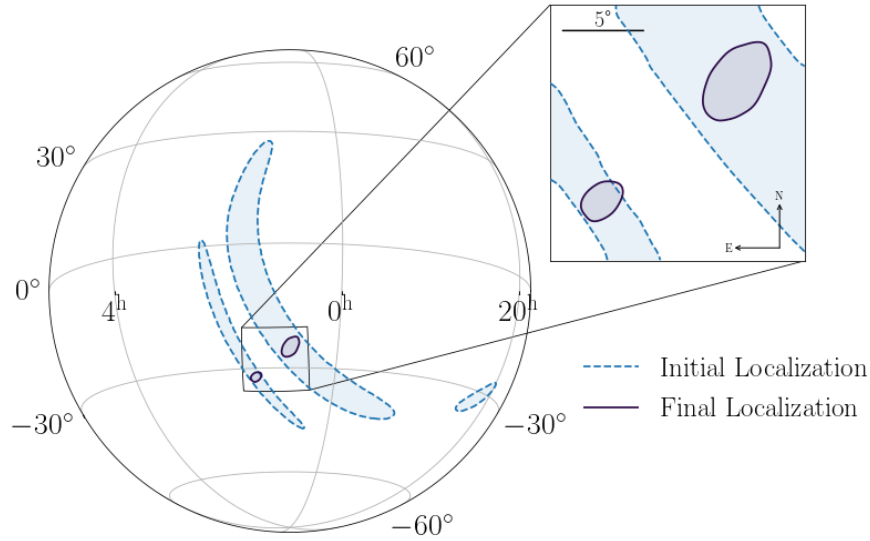


圖 2. GW190814可能來自的天空區域。藍色的區域代表最初線上分析的數據，紫色區域則代表最後所認定的天空位置。

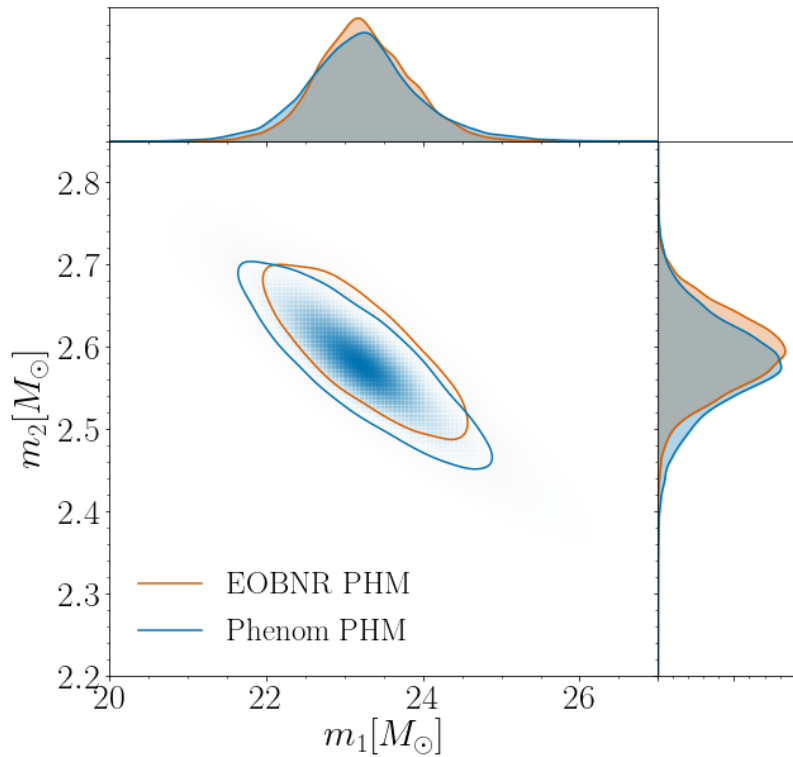


圖 3. GW190814所推論兩顆緻密星體的質量分佈。橫軸代表較重星體的質量，而縱則表示較輕星體的質量（可能是中子星或黑洞）。在深藍色區域的等高線則代表與數據吻合的質量組合。周邊的深色曲線代表單顆質量的機率分佈。兩個顏色則代表兩種不同的廣義相對論預測模型。



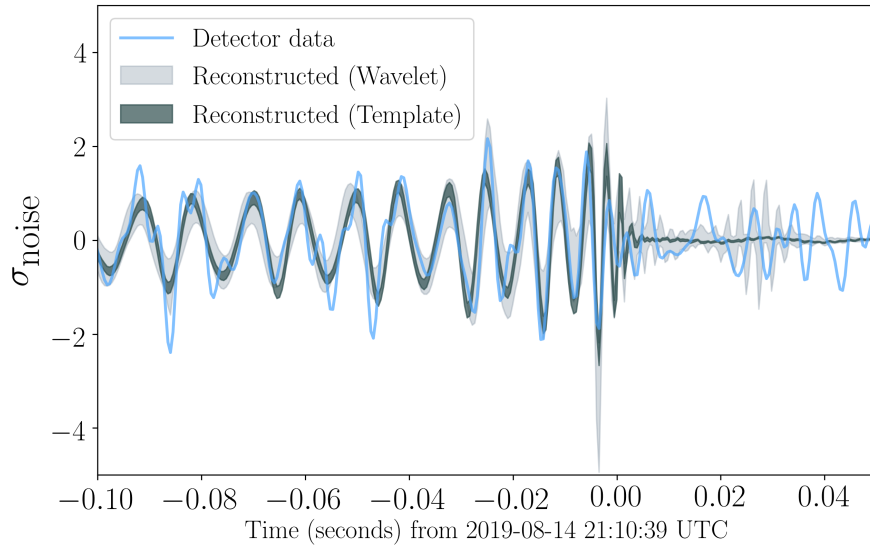


圖 4. 重力波事件發生前後的偵測器真實數據（藍線）與預測的訊號。深灰色的區域代表廣義相對論所預測的訊號模型，而淺灰色的區域則表示用最少重力理論參數所重建的一組訊號。縱軸的數值歸化到雜訊的強度約為一。

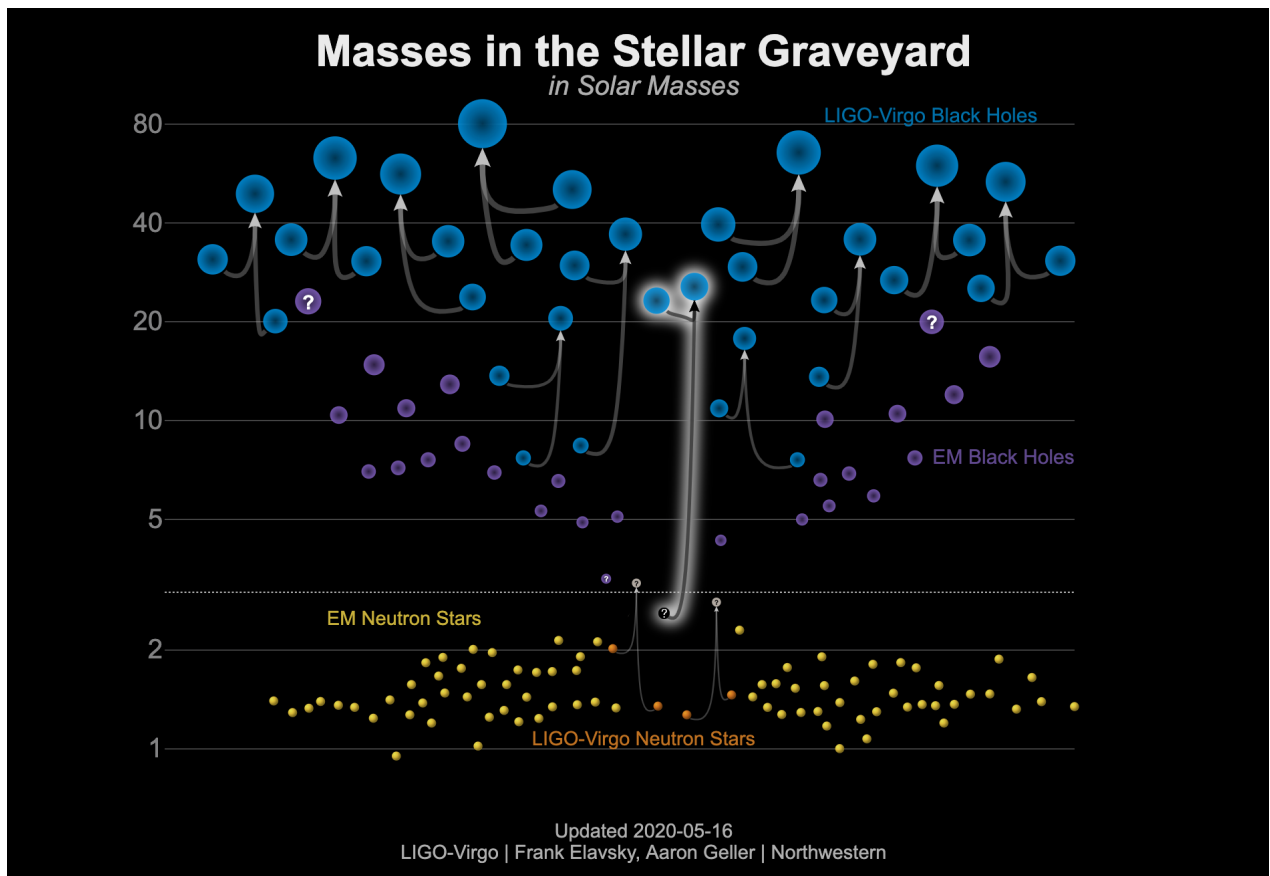


圖 5. 重力波與電磁波觀測所測量之中子星與黑洞質量分佈。黃色與紫色記號分別為電磁波觀測所測量之中子星與黑洞質量，橘色與藍色記號則代表重力波觀測測量之中子星與黑洞質量。圖中間特別標注的事件則是本次的GW190814：由一顆黑洞與一個神秘約 $2.6M_{\odot}$ 的星體合併並形成一個黑洞。