

發掘黑洞與中子星的族群性質

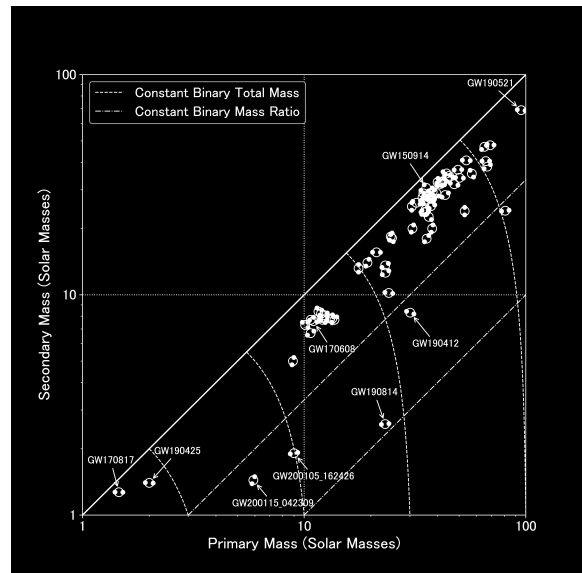
— 於 LIGO 與 Virgo 第三次聯合觀測後

簡介

對於單一緻密雙星合併事件（雙中子星、中子星-黑洞或雙黑洞系統），我們能從重力波訊號推論其波源的性質。然而，若是想一探緻密雙星的形成與演化過程，則必須得有眾多的觀測數據。因此我們專注於量測重力波源的質量與自旋量之分布，以讓我們能更加理解緻密雙星的形成過程。

科學家專注於兩種緻密雙星的形成模型。在「孤立雙星演化」模型中，緻密雙星來自於成對的大質量雙星，分別在恆星演化末期經歷一場爆炸後所殘留的中子星或黑洞。而在「動態互動演化」模型中，於如球狀星團或核星團的密集環境下，中子星與黑洞能透過重力捕捉而形成緻密雙星。兩種模型皆在重力波訊號上留存了其特有的波源性質。其一為緻密天體的質量。現今的重力波偵測器預期能探測到介於 1 – 100 倍太陽質量（以下用 M_{\odot} 表示之）的緻密天體。然而，不同的天體演化過程可能會於此範圍內產生「質量間隙」，即未發現任何中子星或黑洞的質量範圍。譬如先前對於緻密天體的 X 射線與重力波觀測顯示出於 3 – 5 M_{\odot} — 介於最重的中子星與最輕的黑洞之間 — 存在著低質量間隙。此間隙的存在可能與主宰大質量恆星死亡過程的物理機制有關。此外，對於脈動成對不穩定超新星的研究則發現其死亡時會噴發出外層氣體，僅留下低質量黑洞或毫無殘存物，並預測於約 50 – 120 M_{\odot} 之間存在著高質量間隙。透過這些質量間隙的存在與否，我們能夠探究大質量恆星如何終結其一生。

另一個重要的特性為緻密雙星中的伴星其自轉軸與公轉方向的傾角。譬如地球傾斜的自轉軸為我們帶來了節氣。形成自孤立雙星演化的緻密雙星通常有著同方向的自轉軸與公轉軸，但形成動態互動演化的雙星其自轉軸能位於任意方向。此外，重力波源的天體距離也是個關鍵性質，通常藉由哈伯定律以紅移來推斷。因為恆星的組成成分影響其演化成緻密天體的速率，乃至於緻密雙星的合併速率。透過重力波源的紅移分布，我們能得知宇宙不同時期的恆星形成速率與宇宙的組成（組成元素與相對豐度）。因此量測緻密雙星的質量、自旋量與天體距離之分布，與找尋其之間可能的關聯性，是重力波天文學的重點研究項目。



圖一：此次研究選用的緻密雙星系統。橫軸為主質量；縱軸為次質量。標示出名稱的數據點為具有重大意義的事件。虛線與鏈線分別代表相同的總質量與質量比。（來源：LIGO-Virgo-KAGRA Collaboration / IGFAE / Thomas Dent）

研究方法與模型

我們在此次研究中選用了 74 件截至第三次聯合觀測所偵測到的緻密雙星合併事件，其中包含了 70 次雙黑洞、2 次雙中子星，以及 2 次中子星-黑洞合併事件。我們的採用基準為事件的可信度，以避免雜訊偽裝的事件所帶來的影響。為了約束緻密天體的族群性質，我們首先量測各合併事件的性質（質量、自旋量與紅移），並整合這些量測值與其不確定度。我們接著將之與不同的分布模型相擬合，以找出與觀測數據最相符的模型。部分採用的分布模型之參數與天文物理機制有所關聯，例如黑洞的質量下限——此參數能告訴我們低質量間隙是否存在。此外，考量到觀測數據可能有著未預期的特徵，部分模型則使用了較彈性、但不必然與天文物理機制有關的參數。

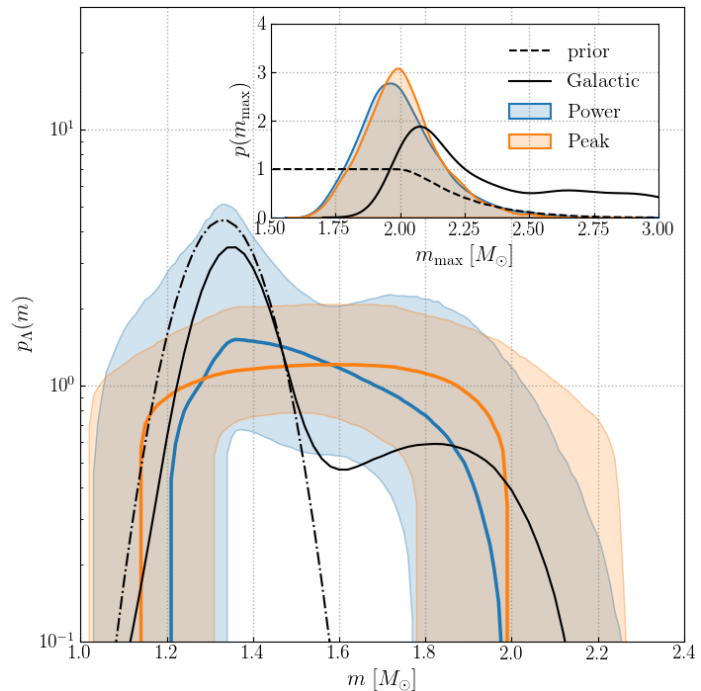
然而，我們所觀測到的重力波事件並不是代表緻密天體族群的公正樣本。因為重力波訊號的強度隨著緻密雙星的質量增加而增強，但隨著距離（或紅移）增加而遞減，所以對於遙遠的緻密雙星，我們僅能觀測到那些大質量的雙星。為了修正此稱為「馬姆奎斯特偏差」的觀測偏差，我們使用隨機的參數值從模型中生成樣本、模擬其重力波訊號，並找出哪個更容易被我們觀測到。

緻密雙星族群數量

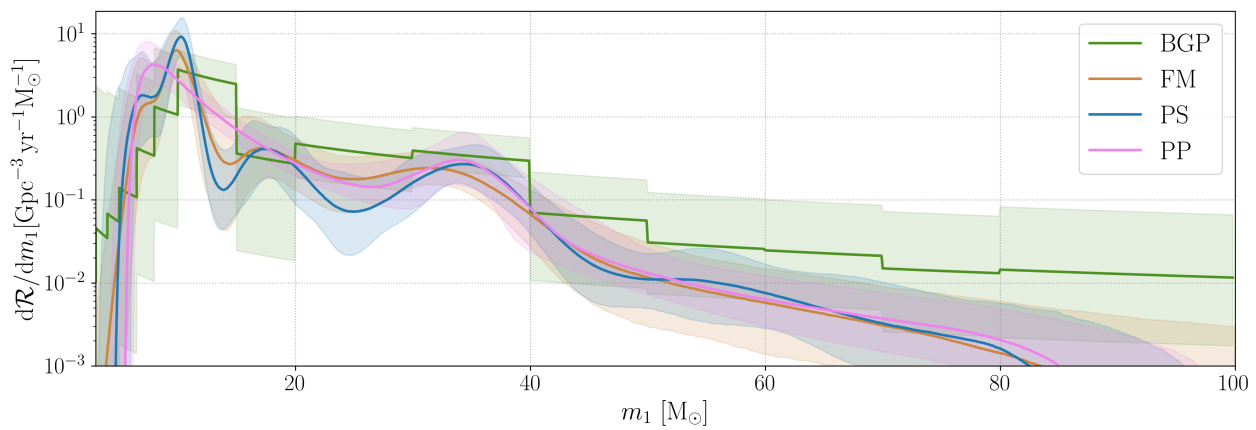
藉由分析所有觀測到的緻密雙星合併事件，我們能估計緻密雙星合併速率約為每年每 10^{27} 立方秒差距 71–2200 次（秒差距為天文常用的距離單位，約為 3.25 光年）。假設中子星與黑洞的質量分界為 $2.5 M_{\odot}$ ，則雙中子星、中子星-黑洞與雙黑洞的合併速率分別約為每年每 10^{27} 立方秒差距 13.0–1900.0、7.4–320.0 及 16.0–130.0 次。雖然我們觀測到較多的雙黑洞合併事件，但實際上它們較不常發生。這是因為緻密雙星的合併速率隨著質量增加而遞減，所以更重的緻密雙星更不容易合併。然而，我們發現合併速率與主質量（緻密雙星中較重天體的質量）的關聯性無法以冪次律分布描述之：合併速率在重於中子星的範圍有所下降，但仍不確定至略輕於黑洞的範圍內是否存有低質量間隙。要更明確地確認這特徵是否存在，我們需要更多的觀測數據。

中子星的質量分布

我們接著估計中子星的質量分布。先前的相關量測使用了位於銀河系內的脈衝星其觀測資料——一類因快速自旋與強磁場而週期性輻射出無線電波或 X 射線的中子星，並發現出其質量分布具有兩個峰值。然而，我們發現藉由重力波觀測到的中子星族群則偏好一個峰值的質量分布，且偏向先前分布中較高質量



圖二：緻密雙星重力波源中的中子星其質量分布。橫軸為中子星的質量；縱軸為觀測到具有特定質量的中子星其機率。藍色與橘色實線為不同模型所推估的質量分布，而同顏色的區域則為其對應的 90% 不確定度區域。黑色鏈線為銀河系內雙中子星系統的質量分佈，而黑色實線為所有在銀河系內發現的中子星族群其質量分布。圖中的小圖為中子星質量上限的機率分布。縱軸代表著中子星質量上限為特定值的相對機率，黑色虛線則是我們採用的先驗分布。（來源：科學論文中的圖七）



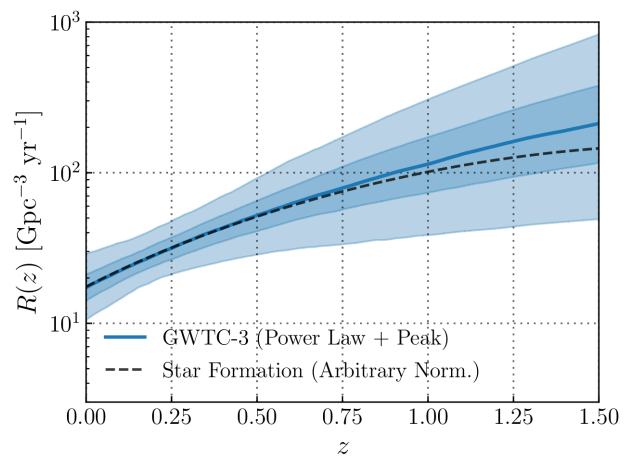
圖三：四種不同模型所推估的主質量分布。除了 PP 模型（粉紅色），其他三個較彈性的模型皆辨識出位於 $10 M_{\odot}$ 與 $35 M_{\odot}$ 的峰值，以及位於 $18 M_{\odot}$ 的潛在峰值。縱軸為具有特定主質量的緻密雙星其合併速率，而不同顏色的區域為各模型推估值的 uncertainty。更高的合併速率則代表其對應的緻密雙星系統更普遍地存在。（來源：科學論文中的圖十一）

的峰值。這表示銀河系外的中子星其族群特性可能不同於銀河系內的脈衝星。而在中子星的質量上限量測上，我們的估計值與先前脈衝星的觀測相吻合，約為 $1.8 - 2.3 M_{\odot}$ 。

黑洞的性質

在黑洞的質量分布上，與我們先前的研究相比，此次的數據偏好黑洞族群中有著更多不對等質量的緻密雙星，以及更高比例的低質量緻密雙星合併事件。而在主質量分布上，除了先前研究所發現位於約 $35 M_{\odot}$ 的峰值，我們此次採用的較彈性的新模型更辨識出兩處新的局部突起，約落於 $10 M_{\odot}$ 與 $18 M_{\odot}$ 。儘管孤立雙星演化模型能解釋 $8 - 10 M_{\odot}$ 的局部突起，我們仍不確定此次新發現的局部突起其形成原因。如同先前章節對於低質量間隙的討論，我們亦無法確認高質量間隙是否存在。在質量分布上，我們並未發現在高於 $50 M_{\odot}$ 的範圍有著成對不穩定超新星模型所預期的急速減少，這意味著部分緻密雙星系統可能不是形成自孤立雙星演化。在動態互動演化模型中，緻密天體藉由階式合併而成長，並能有著位於低質量或高質量間隙範圍內的質量，因而減緩原先預期該急速減少的質量分布。另一種可能性為緻密雙星中的黑洞藉由吸積周遭氣體而成長至高質量間隙範圍內的質量。

我們仍然認為緻密雙星中的黑洞有著較小的自旋量，且其自轉軸並不完全同向於公轉軸。實際上，新觀測數據的轉軸傾角之分布比我們預期的更加隨機。我們現在更確信雙黑洞族群能有著負自旋量，亦即自轉軸指向相反於公轉軸的方向。然而，這並不是孤立雙星演化模型所預期的結果，意味著部分雙黑洞族群可能形成自動態互動演化。我們亦發現兩個理論所未預期的關聯性。其一為較輕的雙黑洞有著較小的自旋量，而較重的雙黑洞則有著較大的自旋量。另一為高質量比的雙黑洞有著較大的自旋量，且同向於公轉軸。新發現的關聯性可能是因為選用的事件包含了兩種不同的族群，但我們仍需更深入地研究才能了解其緣由。



圖四：宇宙各時期的合併速率密度其中位數（藍線）。橫軸為紅移；縱軸為合併速率密度。深藍與淺藍區域分別為 50% 與 90% 不確定度區域。黑色虛線則為宇宙各時期的恆星形成速率。（來源：科學論文中的圖十三）

另一個新發現是合併速率隨紅移增加而遞增。從星系的觀測資料，我們知道恆星形成速率隨紅移而改變。這意味著宇宙各時期能演化成緻密天體，最終合併的恆星其數量亦不同。因此我們自然預期合併速率與恆星形成速率應有著相似的分佈。雖然我們先前的分析顯示合併速率並不隨紅移而改變（平緩的分佈），但在此次分析我們認為先前結論不正確的可能性為 99.4%。對合併速率之演化的精確量測最終能讓我們理解宇宙的組成以及氣體塌縮成恆星的物理過程。

總結

我們更完備的新重力波源目錄讓我們能夠更加精確地量測中子星與黑洞的族群性質。我們開始深入研究重力波偵測器所能發現的緻密天體其形成與演化過程。伴隨著未來聯合觀測所帶來的更多觀測資料，我們預期最終將能確認質量間隙是否存在，以及更理解此次發現的新特徵。這將使我們更加地了解恆星如何死亡、緻密天體如何透過重力捕捉而形成雙星系統，以及宇宙的組成等天文現象。

詞彙表

- **黑洞 (Black hole)**：有著連光也無法逃離其重力束縛的天體。
- **中子星 (Neutron star)**：主要由中子所組成的緻密天體，為大質量恆星經歷超新星爆炸後的殘存物。
- **緻密天體 (Compact object)**：擁有極高密度的天體，如白矮星、中子星與黑洞。為恆星演化的終點。
- **自旋 (Spin)**：緻密天體的角動量。來自中子星的自轉或是因黑洞附近的時空扭曲而產生的轉動性質。
- **孤立雙星演化 (Isolated binary evolution)**：雙星系統從形成至分別終結於緻密天體，最終形成緻密雙星其演化過程。
- **動態互動演化 (Dynamical formation)**：於密集環境下，緻密天體透過重力捕捉而形成緻密雙星。
- **低質量間隙 (Lower mass gap)**：缺少質量介於最重的中子星與最輕的黑洞之間的緻密天體之觀測資料，約落於 $3 - 5 M_{\odot}$ 。
- **高質量間隙 (Upper mass gap)**：成對不穩定超新星模型所預測不可能存有黑洞的質量範圍，約落於 $50 - 120 M_{\odot}$ 。
- **紅移 (Redshift)**：一種用來表示宇宙距離的物理量，得之於電磁波的波長因宇宙膨脹而增加的量值。
- **恆星形成速率 (Star formation rate)**：宇宙各時期氣體重力塌縮成恆星的速率。

- **吸積 (Accretion)**：氣體或其他物質掉落入中心天體的物理過程。
- **太陽質量 (Solar mass, M_{\odot})**：天文常用的質量單位，約為 2.0×10^{30} 公斤。

延伸閱讀

- 完整的科學論文：
<https://dcc.ligo.org/LIGO-P2100239/public/main>
- GWTC-3 相關資訊：
<https://www.ligo.org/news.php>
<https://www.virgo-gw.eu/gwtc3>
<https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/>
- GWTC-3 公開數據：
<https://www.gw-openscience.org/>
- 此科學摘要的英文原文：
<https://www.ligo.org/science/Publication-O3bAstroDist/>
- 造訪我們的網站：
[LIGO](#)
[Virgo](#)
[KAGRA](#)



正體中文版翻譯：謝和峯
正體中文版校稿：潘國全、林峻哲、江國興