

## 大怪獸的交響詩篇： 於 LIGO 與 Virgo 第三次觀測數據中找尋中等質量黑洞

中等質量黑洞 (intermediate-mass black hole, IMBH) 是天文學家多年來找尋的天體之一。在先前 2015 至 2017 年，LIGO 與 Virgo 於第一次及第二次聯合觀測中並未發現任何與之相關的訊號。直至第三次聯合觀測 (O3)，才於前半期的數據中首次偵測到源自雙黑洞合併而生的中等質量黑洞 — 發佈於 2020 年的 GW190521 事件。為了找尋更多此類訊號源與中等質量黑洞，我們詳盡地分析第三次觀測數據。於此次研究中，我們重新偵測到了 GW190521 事件，且有著更高的顯著性。雖然亦發現其他可能的候選者，但其訊號皆不顯著。然而，此次研究讓我們更加了解中等質量黑洞雙星 (IMBH binaries) 的合併率。

### 中等質量黑洞：恆星質量黑洞與超大質量黑洞之間的神秘橋樑

在我們的宇宙中，黑洞可依其質量分為三種類別：恆星質量黑洞 (stellar-mass black hole)、超大質量黑洞 (supermassive black hole)、與中等質量黑洞。恆星質量黑洞誕生於大於 20 倍太陽質量的恆星死亡前的爆炸與重力坍縮，也是其中最輕的類別：其質量小於 100 倍太陽質量。迄今，LIGO-Virgo 重力波天文台已偵測到約五十件源自緻密雙星合併的重力波訊號，並收編於 GWTC-1 與 GWTC-2 重力波源目錄中。

另一方面，超大質量黑洞的質量則大於  $10^5$  個太陽。階式合併模型 (hierarchical merger scenario) 認為此類黑洞為多個大質量黑洞與中等質量黑洞數次合併的產物：於密集的環境中，緻密雙星合併所生成的黑洞可能與其他黑洞碰撞，並合併成更重的下一代。隨著黑洞間的合併持續地發生，最終將形成超大質量黑洞。藉由電磁波段的觀測，我們現在知道多數星系的中心區域皆存在著超大質量黑洞。雖然現今關於超大質量黑洞間的合併過程僅有片段的電磁波觀測證據，且其重力波訊號不在 LIGO-Virgo 天文台的可見波段內，下一世代的重力波偵測器 — 雷射干涉儀太空天

線 (LISA) — 將能夠偵測到源自遠方的超大質量黑洞間的合併訊號！

中等質量黑洞，正如其名所示，是質量介於恆星質量黑洞與超大質量黑洞之間的類別，其範圍為 100 至  $10^5$  倍太陽質量。部分理論模型認為此類黑洞為低金屬豐度的第一代星族 III 巨大恆星重力坍縮後的產物；其他模型則建議其形成於恆星密集的星團內部，經由恆星間的階式合併而誕生。然而，中等質量黑洞的存在仍缺乏直接觀測證據。經由 X 射線波段發現的 HLX-1 是現今最有可能的候選者，其質量推估介於 3,000 至 300,000 倍太陽質量。而透過 LIGO-Virgo 天文台，我們能直接觀測到中等質量黑洞參與其中的緻密雙星合併事件，不管其為雙星之一或合併後產物。

### 為何找尋中等質量黑洞如此重要？

由中等質量黑洞組成的雙星系統是測試廣義相對論的絕佳實驗室。部分此類雙星有著極高的質量比，而其輻射出的重力波除了基波外，通常還伴隨著稱為「高階模態」的高階諧波，如同樂器發出的泛音。LIGO-Virgo 近期偵測到的 GW190412

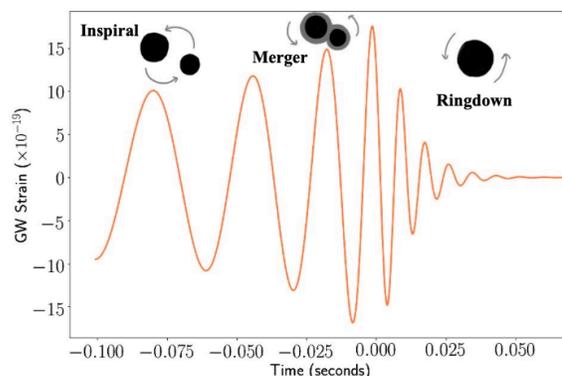
其訊號即**存在著高階模態**，這事件也是科學家首次於雙黑洞交織出的交響詩中，聽到**完全五度**的諧波。觀測此類高質量比的雙黑洞系統能增進我們對黑洞基本性質的了解，譬如**無毛定理**中描述的黑洞質量、角動量與**電荷**。另一方面，這類研究亦能告訴我們巨大恆星的演化過程。然而，由於 LIGO-Virgo 天文台無法偵測到源自超大質量黑洞的重力波，要一窺恆星質量黑洞與超大質量黑洞之間的演化關聯性，我們仍須等待雷射干涉儀太空天線對超大質量黑洞的觀測來完成最後一片拼圖。

## 如何找尋中等質量黑洞雙星系統？

當由中子星或黑洞組成的緻密雙星合併時，其幅射出的重力波將會拉伸或壓縮干涉儀偵測器所在的**時空**，而所造成的形變能藉由雷射干涉儀而被 LIGO 與 Virgo 精確地測量出。然而除了重力波訊號外，偵測器亦會接收到各式各樣的環境與儀器雜訊，其中部分雜訊的強度更勝於重力波訊號。要於這些充斥雜訊的觀測數據中發掘出重力波訊號，科學家採用了特殊搜尋方法，譬如於數據中找尋相似於廣義相對論所預測的重力波訊號的「**匹配濾波**」法 (matched filtering)。另一個無需理論模板的**方法**則是監控雷射光傳輸於偵測器時的能量變化：若其能量增加，而非耗損，則其能量來源可能為重力波。

來自緻密雙星合併的重力波訊號可分為旋入 (inspiral)、合併 (merger) 與衰盪 (ringdown) 三個階段 (見圖一)，其持續時間取決於雙星的性質：越重的雙星，其持續時間越短。要於充斥雜訊的數據中發掘出如此短暫的重力波訊號是極具挑戰性的，此外仍須排除由環境與儀器雜訊所偽裝的假訊號更增加搜尋難度。因此，仔細地調整搜尋方法，使其僅偵測出真實訊號是極其重要的。

此次研究中，我們結合匹配濾波法與另一個無需理論模板的方法，於第三次觀測數據中找尋中等質量黑洞雙星，並發現多個於數個偵測器皆觀測到的潛在候選者。於這些候選者中，我們挑選出殘餘質量高於 100 倍太陽質量，且主質量 (雙黑洞中較重黑洞的質量) 高於 65 倍太陽質量的系統



圖一：雙黑洞系統合併的三個階段與其重力波訊號。橫軸為時間；縱軸為重力波應變 (表示時空形變的無因次量)。

。其中，65 倍太陽質量此條件為能引發**不穩定對超新星爆炸**，而非坍縮成黑洞的質量間隙之下界。此外，我們亦要求挑選出的候選者需有著**低誤報率**，以降低其訊號來自雜訊的**可能性**。

## 我們發現了什麼？

基於上述的挑選準則，我們發現 GW190521 是最有可能的中等質量黑洞候選者。GW190521 事件已發佈於 2020 年 9 月 2 號，且其重力波訊號亦被詳盡地研究過。此事件源自於重達 66 與 85 倍太陽質量的雙黑洞之合併，並形成殘餘質量約為 142 倍太陽質量的黑洞。於此研究中，我們發現 GW190521 的顯著性更高於早先研究的推估值。

此次搜尋採用的方法有著對大質量緻密雙星的高度靈敏度，因而亦適用於找尋大質量雙黑洞系統。於此次研究中，我們亦發現其他收編於 GWTC-2 目錄的大質量雙黑洞。然而，我們並未發現來自未知中等質量黑洞的新訊號。

## 關於中等質量黑洞雙星的合併率，我們知道了什麼？

要推估給定的時空體積內中等質量黑洞雙星系統的合併率 (稱為合併率密度)，我們得先知道搜尋方法的靈敏度 — 偵測到來自中等質量黑洞雙星

其訊號的可能性。為此，我們於觀測數據中「注入」人工訊號，用以模擬真實情況並推估此次搜尋的靈敏度。借助於**數值相對論**，我們首先透過數值方法求解**愛因斯坦場方程式**，並模擬出中等質量黑洞雙星合併所產生的重力波訊號。於此次研究，我們共模擬了總質量小於 800 倍太陽質量，且質量比介於 0.1 與 1 之間的中等質量黑洞雙星系統。為了探索所有的可能性，我們調整了這些訊號，使其訊號源均勻分佈於全天區與**共動體積**，且有著相異的系統**傾角**。最後再使用相同的搜尋方法去偵測這些被注入的人工訊號。藉由給定的時空體積內找回的人工訊號之數量，我們能推估此次搜尋的靈敏度（見圖二）與合併率密度的上界（見圖三）。

藉由上述的分析，我們發現總質量為 200 倍太陽質量、自旋為 0.8，且有著相同質量的中等質量黑洞雙星系統，每  $10^{27}$  立方秒差距的空間內每年最多會發生 0.06 次合併事件，較之前基於**第一次與第二次觀測的推估值**低上了 3.5 倍。假設**球狀星團**的生命期為一百億年，此合併率密度代表在其一生中僅會發生 0.2 次中等質量黑洞雙星合併事件。而相似於 GW190521 的合併事件，每  $10^{27}$  立方秒差距的空間內每年則會發生 0.08 次。

## 詞彙表

- **黑洞 (Black hole)**：有著連光也無法逃離其重力束縛的大質量、高密度天體。
- **高階模態 (Higher-order modes)**：將重力波以球諧函數展開時，次於主要與四極矩兩項的分量。其中重力波的四極矩項對應於聲波的基波。
- **質量比 (Mass ratio)**：雙星系統中較輕天體與較重天體的質量之比。
- **十億秒差距 (Gigaparsec, Gpc)**：距離單位，約為三百億光年或  $3 \times 10^{22}$  公里。
- **進動雙星 (Precessing binaries)**：組成

天體其自旋未對齊於軌道角動量的雙星系統。有效對齊自旋 (effective aligned spin,  $\chi_{\text{eff}}$ ) 是量測雙星系統合併前，其組成天體自旋狀態的物理量；負值代表其自旋方向相反於軌道角動量之方向。有效進動自旋 (effective precession spin,  $\chi_p$ ) 是另一個由組成天體的自旋決定的物理量，用於量測雙星系統的進動速率；更高的值代表系統有著更快的進動速率。

- **靈敏時空體積 (Sensitive volume-time)**：搜尋方法有足夠靈敏度於偵測重力波源所需的時空體積。
- **太陽質量 (Solar mass)**：質量單位，約為  $1.989 \times 10^{30}$  公斤。
- **上界 (Upper limit)**：物理量基於研究所推估的最大值。

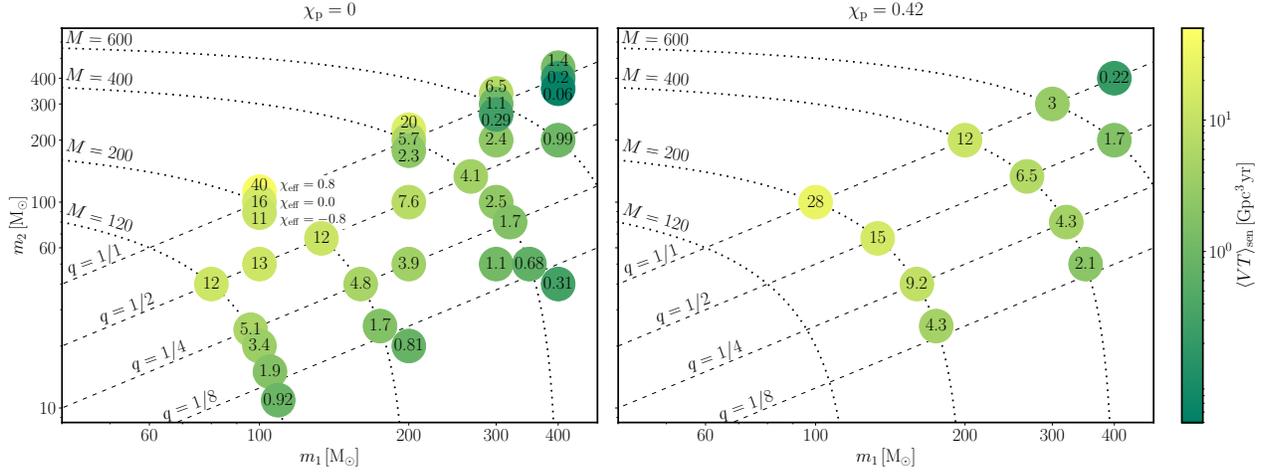
## 延伸閱讀

- 造訪我們的網站：
  - [LIGO](#)
  - [Virgo](#)
  - [KAGRA](#)

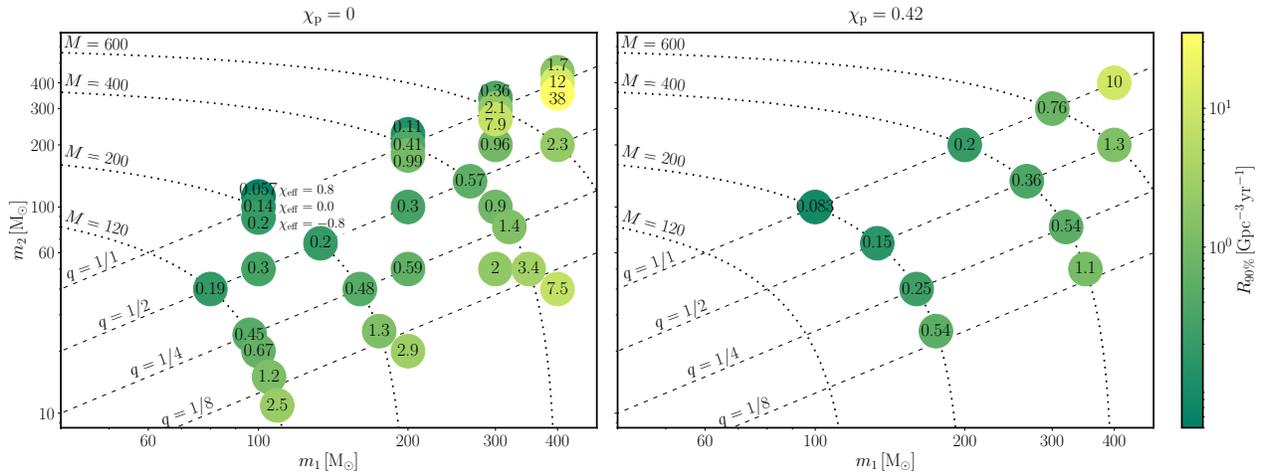


- 完整的科學論文**預印本**。
- 此科學摘要的英文**原文**。

正體中文版翻譯：謝和峯  
正體中文版校稿：潘國全



圖二：非進動雙黑洞（左圖）與進動雙黑洞系統（右圖）的平均靈敏時空體積 ( $\langle VT \rangle_{\text{sen}}$ ，單位為  $10^{27}$  立方秒差距·年)。橫軸為雙星系統中較重天體的質量 ( $m_1$ )；縱軸為較輕天體的質量 ( $m_2$ )；虛線則表示雙星系統的總質量 ( $M$ ) 與質量比 ( $q = m_2/m_1$ )。每個圓圈皆代表不同類型的雙黑洞系統，而圓內的數字為此系統的平均靈敏時空體積。對於非進動雙黑洞系統，於固定質量比的情況，其平均靈敏時空體積隨著總質量增加而減少。而有著非零有效進動自旋 ( $\chi_p$ ) 的進動雙黑洞系統，靈敏時空體積則取決於系統的有效總自旋。(取自科學論文的圖一)



圖三：非進動雙黑洞（左圖）與進動雙黑洞系統（右圖）的合併率密度其 90% 信賴上界 ( $R_{90\%}$ ，單位為每  $10^{27}$  立方秒差距每年)。(取自科學論文的圖二)