

重力波新來源：中子星黑洞雙星

我們發現了什麼？

2020年1月5號，美國路易斯安那州利文斯頓的雷射干涉重力波天文台(Advanced LIGO)與義大利的處女座干涉儀(Advanced Virgo)觀測到一種與全新的天文系統所吻合的重力波訊號。這些重力波是來自宇宙中最緻密兩種星體的死亡旋入：中子星與黑洞。LIGO與Virgo觀測到中子星與黑洞雙星旋入的最後幾個週期與之後的合併。值得注意的是在偵測到中子星與黑洞合併的訊號十天後，LIGO在美西與美東的兩個偵測器與Virgo皆同時觀測到第二次中子星與黑洞合併的重力波事件。這是人類第一次偵測到來自中子星與黑洞合併的重力波（見圖1）。在這之前只有觀測到雙中子星或是雙黑洞合併的重力波。這兩次新觀測的事件分別取名為GW200105與GW200115。

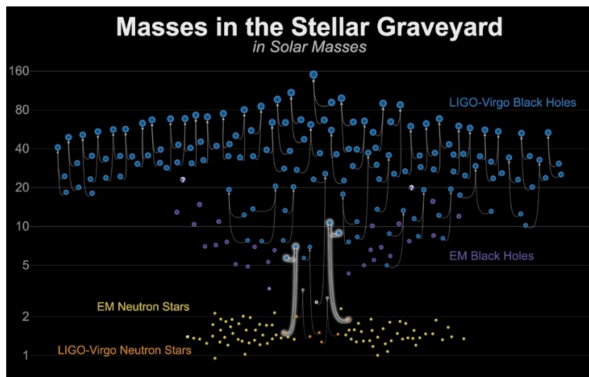


圖 1: 重力波與電磁波觀測所推論的黑洞與中子星質量統計。黃色與紫色的標示為電磁波觀測所測量的中子星與黑洞質量，橘色與藍色的標示則為重力波觀測所測量的中子星與黑洞質量。這次的事件GW200105與GW200115則為白色線條強調的中子星與黑洞合併事件。（圖片引用自: LIGO–Virgo, Frank Elavsky, Aaron Geller, 美國西北大學）

這兩次發現代表著初次偵測到中子與黑洞的雙星系統。過去數十年來，中子星黑洞系統就預測應該存在，但是直到現在才有真實的觀測證據。透過這次觀測，我們目前已經發現所有共三種由中子星與黑洞組成的雙星系統組合。這些由黑洞與中子星所組成的雙

星系統稱為「緻密雙星」。這次的發現與未來更多的觀測將幫助我們了解這些星體如何出生，死亡，與形成時周遭的環境。

偵測重力波訊號

從偵測器數據中搜尋重力波訊號的方法稱作匹配濾波(matched filtering)，透過比較廣義相對論所預測的理論模板與真實包含雜訊的觀測數據。匹配濾波可以從雜亂的數據中找出正確的重力波訊號，就好比我們能夠從音樂片段中聽出每個樂器自己的聲音。我們對GW200115是來自宇宙中天體的訊號有著高度的信心，其來自隨機雜訊的機會小於10萬年一次。GW200105的起源在統計上有著較難的挑戰，但它的訊號也與其他我們所知的雜訊有所不同。我們認為GW200105來自隨機雜訊的機會每2.8年約為一次。理論上中子星與黑洞合併可以產生各種頻譜的電磁波。然而這兩次事件在天空位置的不準確定性約為滿月大小的2,400倍到29,000倍。再加上訊號源也離地球很遠（後面會有更多解釋），這讓尋找電磁波的對應訊號非常困難，因此很可惜我們這次沒有觀測到。未來如果觀測到中子星與黑洞合併的電磁波訊號可以幫助我們了解黑洞的潮汐力如何撕毀中子星以及形成中子星環境的資訊。

訊號特性

重力波數據包含著訊號起源中非常豐富的資訊，譬如黑洞和中子星的質量。產生GW200105的黑洞與中子星分別有著8.9倍與1.9倍的太陽質量。GW200105發生在距今8億年前，比恐龍現身於地球還早上數億年。至於GW200115，我們估算其黑洞與中子星質量分別為5.7倍與1.5倍太陽質量，合併的時間約為十億年前。這些質量範圍的計算可見於圖2。

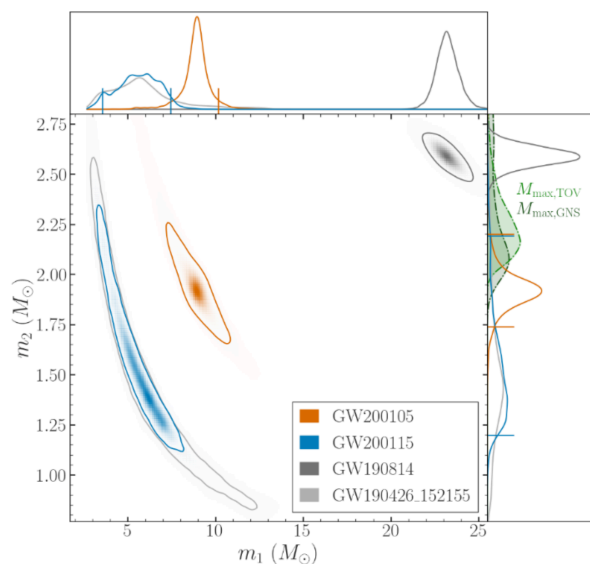


圖 2: 我們對於GW200105與GW200115事件之質量組成的了解。橫軸表示雙星系統中較重的那顆星體（黑洞）之質量；縱軸則表示較輕星體（中子星）之質量。著色的區域則表示與觀測數據吻合的質量組合。橘色為第一次的事件，藍色則是第二次事件。顏色越深表示與數據越吻合，也就是有較高的機率是這樣的質量組合。圖片上方的分格表示黑洞質量的分佈，譬如說藍色的曲線代表在GW200115中，黑洞質量約為3.5倍到7.5倍太陽質量之間。右側的分格則表示中子星質量的分佈，譬如橘色的曲線代表在GW200105中，中子星的質量分佈約為1.75倍到2.2倍太陽質量之間。綠色的色塊代表我們目前所知可能的中子星質量上限，也代表這次觀測的質量小到足以是中子星。圖中也顯示兩次過去所觀測到事件：GW190814是一顆約為23倍太陽質量的黑洞與2.5倍太陽質量黑洞（目前已知最輕的黑洞）的合併。GW190426_152155，可能是一個中子星與黑洞合併的訊號但是訊號弱到不足以確定其來源。

我們發現GW200105中黑洞的自旋約在0與30%的最大旋轉速度之間，而GW200115則為0與85%最大旋轉速度之間。目前我們儀器的靈敏度沒有辦法提供足夠的資訊來推論中子星的自旋（見圖3）。

為什麼我們認為我們觀測到了中子星與黑洞合併呢？為了產生觀測到的重力波訊號，星體必須比一般星球還要來的緻密，不然的話在合併之前就應該被引力所撕裂。較重的星體在這兩個雙星系統中質量分別為8.9倍與5.7倍太陽質量，這樣重而小的星體僅可能是黑洞。較輕的星體質量則為1.9倍與1.5倍太陽質量，比目前所知的黑洞質量都還來的輕。這些質量與目前在銀河系所觀測到或是透過重力波（譬如GW170817）所觀測到的中子星質量吻合。黑洞質量的範圍也符合恆星形成與演化的模型預測。

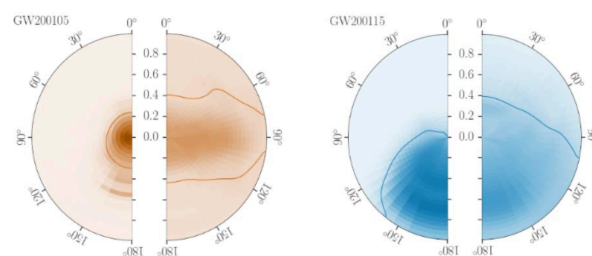


圖 3: GW200105與GW200115中黑洞（左圖）與中子星（右圖）自旋強度與方向的推測圖。極座標圖中的半徑代表自旋的強度，範圍含括0（沒有自旋）到1（黑洞最大旋轉速度）。自旋方向則為極座標圖中的角度，包含0度（自轉方向與公轉方向相同）到180度（自轉方向與公轉方向相反）。顏色深度代表較可能的自旋強度與方向。最左側的半球在球心有最深的顏色代表GW200105的黑洞自旋應該很小。右邊數來第二個半球，在下方有較深的顏色代表GW200115的黑洞較可能有與公轉方向相反的自旋。

如何形成？多常發生？

大家或許會問這些中子星黑洞雙星系統是如何形成的呢？目前有兩種主要的可能。第一種可能是它們來自於原本就是雙星的系統。而這雙星系統在演化後期經歷兩次超新星爆炸一顆變成黑洞，另一個則變成中子星。這樣的劇本稱作「孤立雙星演化」。另一種可能則是中子星與黑洞是分別來自沒有關係的系統經歷過超新星爆炸後才因為重力捕捉而形成中子星黑洞雙星。這樣的劇本稱作「動態互動」，在數量密度較高的恆星環境（譬如球狀星團）較可能發生。要區分這兩種可能，黑洞的自旋方向是一個很好的暗示。在孤立雙星演化模型中，黑洞的自轉方向會傾向同於公轉的方向，也就是說我們預期中子星會繞行於赤道面。而如果是動態互動模型，自旋方向沒有特別的偏好，中子星軌道與黑洞的赤道面可以是任何方向。

GW200105中的黑洞自旋並沒有辦法讓我們分辨它的起源，但是GW200115中，黑洞自轉方向較可能與公轉方向相反。譬如說，中子星是順時針的繞著黑洞，黑洞的旋轉軸則是逆時針旋轉。這暗示說GW200115可能是來自恆星數量密度較高的環境，譬如說球狀星團。

在固定的時間內宇宙中有多少中子星黑洞系統可以合併呢？我們所觀測到的這兩個中子星黑洞系統告訴我們在十億年內每年約有5到15個這樣的事件發生。這樣的發生頻率在孤立雙星演化與年輕星團中的動態互動模型皆可以達到，因此我們不能否定任何一種劇本。

詞彙表

- **旋入 (Inspiral):** 在雙星系統中（譬如中子星黑洞雙星）的公轉運動。當雙星因為放出重力波而流失能量，中子星與黑洞會越轉越快並逐漸靠近最終合併。
- **中子星 (Neutron star):** 大質量恆星演化末期的遺物。當大質量恆星燒盡內部的核反應時，它的生命會形成一場毀滅性的爆炸—超新星，超新星爆炸後通常會遺留一顆中子星。中子星的大質量與高密度使內部原子無法保持類似地球上時的型態。中子星的質量與太陽相當但是大小只有幾十公里。
- **黑洞 (Black hole):** 時空中的一個區域其重力之高使任何事物，包含光，皆無法逃離其重力束縛。黑洞有不同的大小，包含**恆星質量黑洞**：通常來自於恆星坍縮，質量範圍約在數個太陽質量到約65倍太陽質量左右；**中等質量黑洞**：質量約為100倍太陽質量到 10^5 倍太陽質量；以及**超大質量黑洞**：質量從 10^5 倍太陽質量到超過 10^9 倍太陽質量。
- **緻密雙星 (Compact binary):** 包含兩顆緻密恆星殘骸（譬如中子星或黑洞）的雙星，彼此相距非常的近。
- **匹配濾波 (Matched filtering):** 一種用來偵測滿是雜訊數據中訊號的一種技術。透過廣義相對論先計算可能的重力波模板再逐一掃描數據直到有發現類似型態模式的數據。
- **廣義相對論 (General Relativity):** 愛因斯坦在1915年所提出的重力理論。在這個理論中，時間與空間像是可延展的布料被物質與能量所變形，而物體會沿著這被彎曲的時空所運行。

- **球狀星團 (Globular cluster):** 因為重力束縛而聚在一起高數量密度星團。
- **電磁波頻譜 (Electromagnetic spectrum):** 可見光包含紅光到紫光，但是在人眼可見的範圍之外，電磁波連續著。紅光之外還有紅外線，微波與無線電波；紫光之外也有紫外線，X射線與伽瑪射線等。這些電磁波輻射的光譜常常被天文學家拿來研究和了解我們的宇宙。電磁波輻射呈現著電場與磁場的微小擾動，有著頻率或波長（擾動的長度）的不同。
- **光年 (Light year):** 光走一年的距離作為的單位。一光年約為9.46兆公里。
- **太陽質量 M_{\odot} (solar mass):** 太陽質量約為 2×10^{30} 公斤，是天文中常用的質量單位。

更多資訊

拜訪我們的網站:

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



閱讀完整的科學論文預印本。

正體中文翻譯：潘國全

正體中文校稿：江國興、謝和峯