

GW190521: 迄今測量到最大質量的黑洞碰撞

我們觀察到了什麼？

在2019年5月21日，先進雷射干涉重力波天文台 ([Advanced LIGO](#)) 與先進處女座干涉儀 ([Advanced Virgo](#)) 觀測到一對異乎尋常的黑洞合併所產生的重力波信號。該信號名為 GW190521。比起迄今為止觀察到的任何其他雙黑洞合併系統，GW190521的持續時間都更短，並在更低的頻率處達到峰值。

一般而言，來自雙黑洞合併系統的重力波信號在 Advanced Virgo 和 Advanced LIGO 的靈敏頻帶中持續的時間會與其總質量成反比。而 GW190521 的持續時間僅為約 0.1 秒，比其他重力波信號如 [GW150914](#) (人類史上首個偵測到的重力波信號) 都來得更快更短。同樣，這些重力波在信號達到最強時的頻率高低也與其總質量成反比。此峰值頻率在 GW190521 中僅為約 60 Hz，也是遠低於 GW150914。因此只憑圖 1 也可以輕易看出，LIGO 和 Virgo 攜手發現了一對重量非凡的黑洞。

圖 2 顯示了產生 GW190521 的黑洞之質量估測。這兩個黑洞中較大一個的質量約為太陽的 85 倍 (用符號 M_{\odot} 表示)，而較小的則接近 66 M_{\odot} 。這兩個黑洞都比迄今為止 [Virgo 和 LIGO 所發現的其他黑洞](#) 重得多—即使是那個質量較小的黑洞也已經比許多合併事件中形成的殘留黑洞更重 (請參見圖 3)。

對於 GW190521，合併後殘留的黑洞大約重 142 M_{\odot} ，在 LIGO-Virgo 的發現的黑洞榜單中名列前茅。該殘餘質量比兩個黑洞合併前的總質量小約 8 M_{\odot} ，其質量差轉換為發射重力波的所散失的能量。

為什麼 GW190521 那麼重要？

對於發現產生 GW190521 的龐大黑洞，除了彰顯人類的文明發展的成功，它也挑戰了我們對黑洞形成的理解，同時也是研究重力獨特的實驗室。

製作大黑洞

天文學家會根據黑洞的質量來進行分類，因為在此質譜圖不同端的黑洞其實是以非常不同的方式而形成的。

“超大質量”黑洞位於大多數 (如果不是全部) 大型星系的中心，其質量是太陽的數十萬倍至數十億倍。



Visit our websites:

<http://www.ligo.org>

<http://www.virgo-gw.eu>

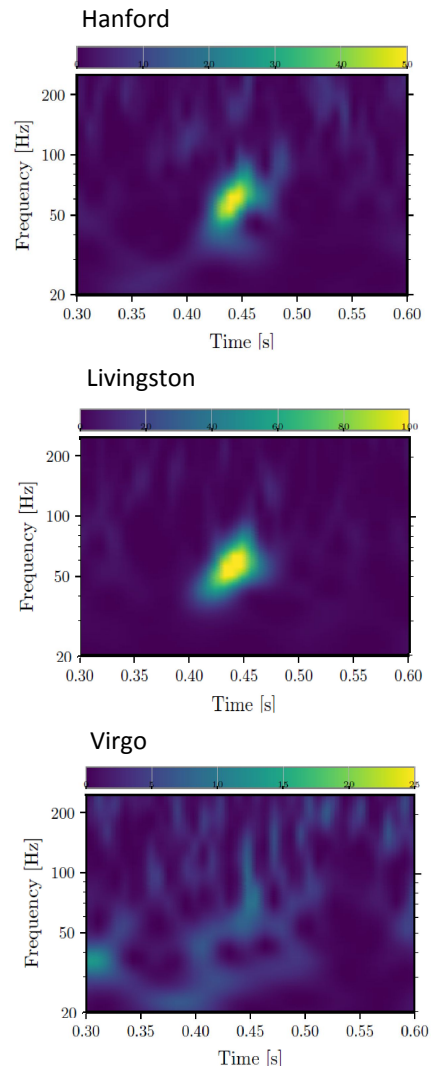


圖 1. LIGO Hanford (上)、LIGO Livingston (中) 和 Virgo (下) 觀察到 GW190521 信號的數據 (以時頻表示)。顯示的時間相對於 UTC 2019 年 5 月 21 日 03:02:29。圖中不同的顏色化表重力波信號的強弱。值得注意的是信號的持續時間非常短，且其峰值頻率約為 60 Hz。(改編自相關論文之圖 1)

我們的銀河系中心，也有一個大黑洞，大約是太陽質量的 400 萬倍。雖然這些怪物黑洞的確切形成方式仍是一個謎，但是我們猜測它們很可能是在宇宙年輕時開始形成，否則黑洞沒法來得及成長到如此的大尺寸。

質譜的另一端是“[恆星質量](#)”黑洞，它被認為是由[超新星爆炸](#)期間大質量恆星的核心坍塌形成的。恆星質量黑洞的質量範圍由幾倍到幾十倍的太陽質量。這些黑洞也主要構成了 Virgo 及 LIGO 迄今所觀察到的雙黑洞合併系統。

在恆星質量和超大質量黑洞之間的是“[中質量](#)”黑洞的神秘領域，其質量範圍是太陽的 100 到 100,000 倍。雖然已經有不少論理預言它們的存在，但迄今尚無確切的偵測結果。儘管如此，隨著望遠鏡和重力波探測器觀測能力的逐步提高，天文學家對搜尋中質量黑洞的熱情從沒間斷。

根據我們對大質量恆星內部運作以及黑洞形成的理解，一般認為質量為太陽質量 65 到 120 倍之間的黑洞是不可能由坍縮恆星形成。然而，產生 GW190521 那個較大黑洞（“主”黑洞）的質量正好位於上述範圍，故不會是因恆星坍縮而產生。另外，那合併後所殘留的黑洞也擁有非常大的質量，可以被列為中質量黑洞。這些都是研究中質量黑洞的大突破。

LIGO-Virgo 對 GW190521 的觀察說明，要么恆星坍縮可以形成更大質量的黑洞，要么這些巨大黑洞是通過其他方式而形成——可能由兩個或以上的小黑洞合併而成，這也暗示了通過更多的合併會產生更巨大黑洞的可能性。這種多重合併的演化過程必須在有足夠多黑洞的密集環境中才有可能發生。天文學家提出了密集的[星團](#)或[活躍星系核](#)的吸積盤作為這種特殊環境的可能例子。

GW190521 的觀測結果也表明，部分中質量黑洞可能是由兩個或多個恆星質量黑洞合併而成。而同樣的方式也可以形成超級質量黑洞。

驗證我們對重力的理解

愛因斯坦的廣義相對論對重力作出了非常好的描述。利用廣義相對論，物理學家早已預測黑洞合併時會產生強烈的重力波信號。反過來，這些預測將用於幫助分析 Virgo 及 LIGO 的數據。另一方面，重力波信號的觀測數據可用於檢驗該理論本身所做的預測，並尋找任何與現行重力理論所存在的偏差。這些偏差將可能成為發展[廣義相對論替代理論](#)的重要基石。

將重力波用作物理實驗室並不是什麼新鮮事：以前 LIGO-Virgo 的黑洞合併觀測已經廣泛用於檢驗我們對[廣義相對論的理解](#)。那麼，GW190521 對我們理解重力有什麼與眾不同的魅力？

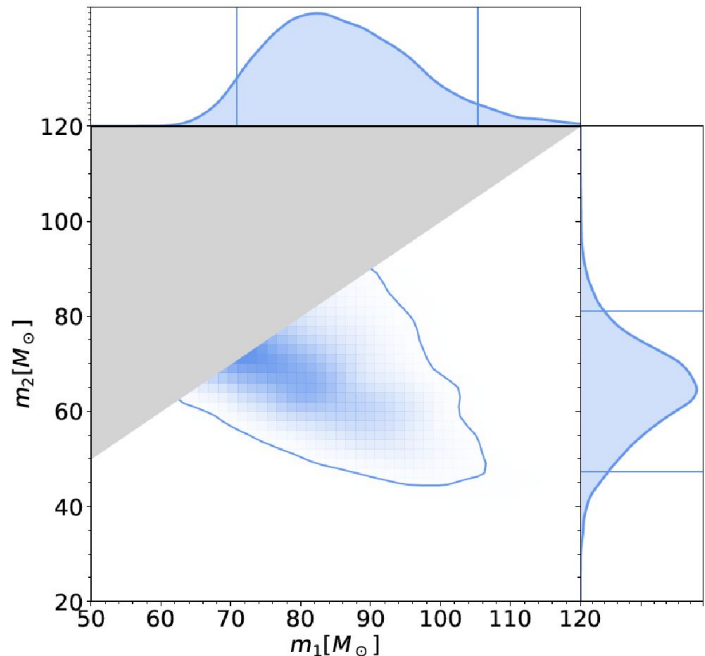


圖 2. 產生重力波信號 GW190521 的雙黑洞合併系統之質量測量（以概率分佈表示）。根據 LIGO-Virgo 分析，該黑洞系統的真實質量有 90% 的概率位於中間圖中的藍色實心輪廓內（這顯示了兩個質量的聯合概率）。圖的頂部和右側的鐘形曲線顯示了各個黑洞的質量測量值，而實心垂直線和水平線代表了 90% 的概率範圍。中間圖中的灰色區域歸因於 LIGO-Virgo 的約定，以確保“主”質量 m_1 始終等於或大於“次”質量 m_2 。

兩個黑洞的碰撞合併大致可分為三種不同的階段(見圖 4)：首先是“旋入”(inspiral)，即兩個黑洞彼此分離並互相圍繞運行；接下來是“合併”(merger)，兩個黑洞連接在一起。最後是“衰盪”(ringdown)，當殘留的黑洞像敲鐘一樣“振鈴”，然後落入穩定的最終狀態。

如前所述，在 LIGO-Virgo 數據中可以觀察到不同時間長度的黑洞信號，並且根據不同的黑洞質量可以測量到不同的峰值頻率。因此，重力波探測器對不同雙黑洞系統的各個階段會有不同程度的靈敏度，取決於該系統的質量。質量較低的黑洞系統在旋入和合併階段會被觀測得較為清晰。反之，產生 GW190521 的黑洞系統質量非常高，這為我們提供了研究重力波信號後期合併和衰盪階段的極佳機會。

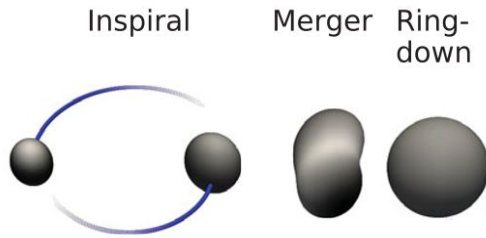


圖 4. 當兩個黑洞碰撞時，系統呈現的三種不同階段

就像到目前為止所觀察到的黑洞信號一樣，廣義相對論也通過了 GW190521 的測試。其中一項測試是將數據分為“旋入和合併”與“衰盪”兩部分作獨立分析，並檢查兩者結果是否相互一致。其他測試包括在重力波信號中尋找被“廣義相對論替代理論”預測存在的額外特徵、測試其他作為重力波信號來源的假設(即非雙黑洞合併系統)。這些測試均無法找出 GW190521 的重力波觀測與根據廣義相對論描述所得出的黑洞信號有任何矛盾之處。

總結

GW190521 是一項前所未有的重力波發現，它突破了我們有關黑洞形成方式的知識範圍，並提供了一種新的方法來研究最極端的引力。它也直接點出宇宙中存在著大量大質量黑洞合併系統的可能性，也許暗示了會有更多的大質量黑洞會在 LIGO (包括 [LIGO India](#))、Virgo 及日本的 [KAGRA](#) 的未來觀測活動中被發現。

對恆星質量黑洞中較大質量的族群進行調查將有助於我們了解產生黑洞的過程及其所處的環境。雖然 GW190521 現為迄今所觀察到最大質量的黑洞合併事件，但相信記錄將在不久的將來被打破。LIGO、Virgo 及 KAGRA 將以更進一步的靈敏度，尤其是在低頻下，繼續在宇宙中尋找重力波，打撈更多更沉重的黑洞。除此之外，還有未來加入黑洞搜索的新探測器包括建設在地球上的愛因斯坦望遠鏡 ([Einstein Telescope](#)) 和宇宙探索者 ([Cosmic Explorer](#))，以及太空中的 [LISA](#)。記錄就是用來打破的！

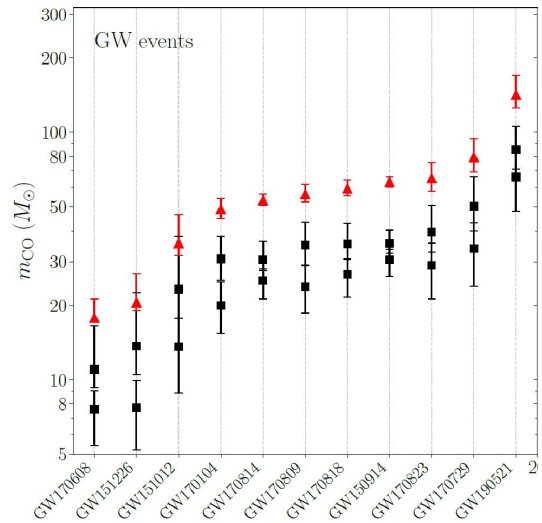


圖 3. 本圖顯示了所有 LIGO 和 Virgo 第一次和第二次觀測中所偵測到的黑洞之質量分佈。合併前的質量顯示為黑色匣子，而合併後所殘留的黑洞質量則顯示為紅色三角形。豎線的長度表示估算質量的不確定性範圍。從本圖可以清楚看到 GW190521 破紀錄的質量。(改編自相關論文之圖 10)

如想知道更多：

來看我們的網站 www.ligo.org, www.virgo-gw.eu

閱讀由 LIGO 和 Virgo 發佈有關發現 GW190521 的新聞稿：

www.ligo.org/detections/GW190521/pr-english.pdf

<http://www.virgo-gw.eu/GW190521>

閱讀描述 GW190521 發現的論文：

<https://dcc.ligo.org/P2000020/public>

閱讀描述 GW190521 所伴隨的物理意義的論文：

<https://dcc.ligo.org/P2000021/public>

GW190521 的重力波數據 [這裡](#)