

重力波探測器LIGO-Virgo-KAGRA 第四次聯合觀測期前八個月的 長時重力波瞬變事件全天域搜尋

Traditional Chinese translation by Jheng-Min Chen. Proofread by Kuo-Chuan Pan. (from the English original at <https://ligo.org/science-summaries/O4aBurstLong/>)

目前為止所有 LIGO–Virgo–KAGRA 聯合探測到的重力波訊號皆來自緻密雙星合併事件，也就是一對中子星或黑洞經歷漫長宇宙之舞後的合併。愛因斯坦廣義相對論的一大成功在於，它能精確預測由這樣劇烈的天體事件所發出的重力波訊號。然而，幾乎可以確定的是宇宙中存在著還沒被探測到、也還沒被完全了解的重力波來源。其中最受關注的，會發出「爆發訊號」就是那些在事前無法得知波形的瞬變重力波訊號。

本篇文章呈現了LVK在最近一次聯合觀測期（O4a，2023年5月至2024年1月）中對這類訊號的搜尋。具體來說要尋找的是持續約 1 至 1000 秒的長時間瞬變訊號。雖然我們還沒辦法確定這些訊號的具體來源，但理論預測它們可能來自非球對稱形變的新生中子星、不穩定圍繞著黑洞的吸積盤、軌道離心率（如：非圓形軌道）的中子星或黑洞雙星系統。

值得注意的是，這類的爆發訊號或許可以讓我們深入了解像 GW170817 這樣的中子星合併事件之後，其殘骸最終會形成超大質量的中子星還是黑洞。

了解更多資訊：

歡迎前往
我們的網
站：
www.ligo.org
www.virgo-gw.eu
gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/



圖一：藝術家描繪的超大質量中子星。其形成於中子星合併之後。這類特殊天體可能會產生長時間的重力波爆發訊號。來源：ESO / L. Calçada / M. Kornmesser

此次搜尋使用了兩個獨立的演算法，分析了約 120 天的數據，這段期間內 LIGO Livingston 與 LIGO Hanford 兩座探測器均收集了具科學品質的數據，對辨識天文物理訊號至關重要，因為真正的訊號應同時出現在兩座探測器中，而雜訊則可能只出現在其中一座。其中一個搜尋演算法 coherent WaveBurst (cWB) 經過升級後，其對此特定訊號的靈敏度比之前（O3 聯合觀測期的搜尋）更高。

這次搜尋的改進包括使用 XGBoost —— 一種以機器學習為基礎的梯度提升決策樹演算法，是負責區分訊號與雜訊的分類器，從而增強整體搜尋的靈敏度。

這是機器學習首次被應用於LVK搜尋中。另一個演算法PySTAMPAS則首次執行了全天域的搜尋。

在排除已知的黑洞合併訊號後，本次的搜尋結果並未發現新的天文物理事件，其中cWB與PySTAMPAS最顯著的兩個觸發事件誤報率分別為每8個月一次與每6個月一次，都與背景雜訊的預期一致。

儘管這次未有新發現，但還是可以從結果中提出具有天文物理意義的結論。透過特定類型事件的模擬訊號，我們可以量化每次搜尋的靈敏度，並推估這些事件在宇宙中可能出現的機率。

事實上，未探測到任何事件表示這些長時重力波爆發訊號可能比「上限」更稀有或更微弱。圖二顯示了本次搜尋的重力波振幅上限（黑色標記），並與前期（O3）搜尋的最佳限制（灰色標記）相比。對於多數訊號類型而言，本次的上限比O3嚴格了約1.2至2倍，歸功於探測器靈敏度的提升與搜尋演算法的進步。

未來O4數據（預計持續至2025年底）的搜尋將具備更高靈敏度，有望設下更嚴格的限制，並在開創新發現的道路上邁出重要一步。

了解更多資訊：

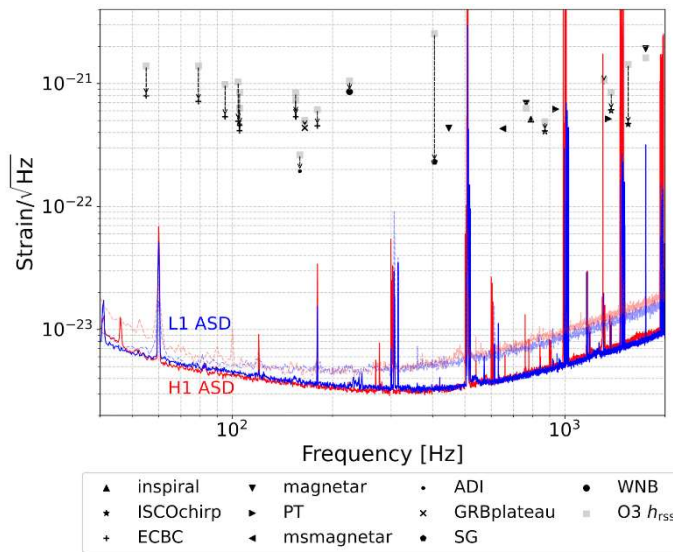
歡迎前往我們的網站：

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/

閱讀完整科學論文的免費預印本，請參考[這裡](#)。



圖二：各種類型的長時爆發訊號振幅上限與 LIGO 探測器靈敏度

（藍色與紅色）之比較。縱軸為振幅（應變），橫軸為頻率。

黑色標記為O4a期間對應不同訊號類型的振幅上限，灰色標記則為O3相對應的結果。大多數上限的數值提升了約1.2至2倍。例如，「magnetar」（磁星，向下箭頭）與「msmagnetar」（毫秒磁星，向左箭頭）分別對應於兩種不同類型的磁星訊號；而「ECBC」（偏心緻密雙星合併，加號）代表具有偏心軌道的雙星系統。其他訊號類型還包括：「inspiral」（雙中子星合併），「ISCOchirp」（旋轉黑洞最內穩定圓軌道），「PT」（中子星的落回吸積），「ADI」（吸積盤不穩定性），「GRBplateau」（新生磁星驅動的伽瑪射線暴持續期），「SG」（正弦-高斯波形），和「WNB」（白雜訊爆發訊號）。

術語表

緻密雙星合併 (Compact binary coalescence)：簡稱CBC，指兩個黑洞、兩個中子星或一個黑洞與一個中子星，旋繞靠近最後合併。過程中隨著雙星越靠近、加速度越大時，產生的重力波的頻率與振幅也會隨之上升。合併後的天體可能是中子星或黑洞，視初始狀態而定。構成雙星的兩個天體分別稱為主星或半星，其中質量較大者為「主星 (primary component)」。

廣義相對論 (General relativity)：由愛因斯坦於1915年提出的重力理論。該理論認為時空如同一塊可扭曲的布，會因物質或能量的存在而彎曲，物體則沿著這個彎曲的時空運動。

爆發訊號搜尋 (Burst search)：在不預設特定波形模型的情況下，於多台重力波探測器中搜尋同時出現的過量能量。

瞬變現象 (Transient)：相對於持續數千年至數十億年的天文事件而言，較短時的天文現象。

觀測期 (Observing run)：重力波探測器實際進行數據收集的觀測期間。

誤報率 (False alarm rate)：用來量化某事件可能是雜訊所造成的機率。計算方式是模擬來自雜訊的事件並觀察其訊號強度，以得出這類事件作為訊號強度函數的期望機率分佈。例如某事件的誤報率為每天1次，就表示我們預期探測器的雜訊大約每天會產生一次類似的事件，我們對該事件的信心就會偏低。

上限 (Upper limit)：在沒有探測訊號時，某數量所能具有的最大值。我們使用95%信念度 (degree-of-belief) 上限，即給定數據，具有95%的機率低於此上限。