

搜尋與O3重力波事件相關的伽馬射線天文瞬變事件

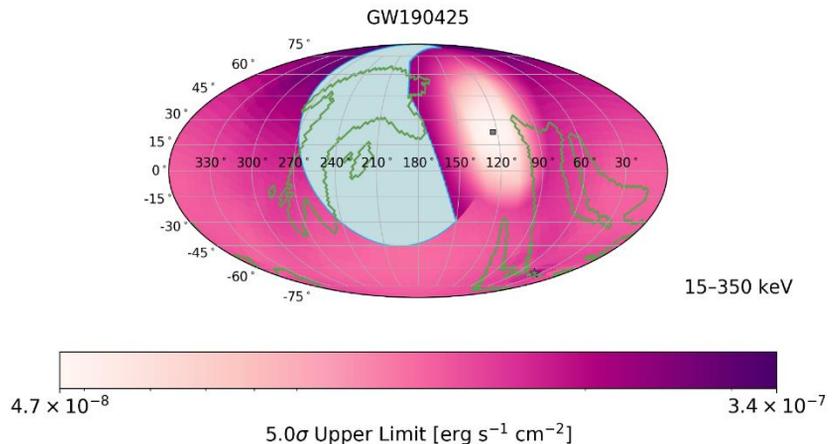
LIGO 和 Virgo 探測器迄今為止捕獲的重力波事件都是「雙星合併事件」，也稱為「合併事件」。偵測到的每一個重力波訊號都是關於兩個巨大星體（黑洞或中子星）的短編故事，它們在相互盤旋中快速地彼此靠近，直到它們最終合而為一。當物體最終在強大的重力波作用下落到一起時，大量的能量以重力波的形式釋放出來，這就是為什麼我們的重力波探測器能夠探測到這些合併事件，即使它們發生在數十億光年之外。

LIGO/Virgo/KAGRA (LVK) 團隊的科學家和許多其他天文學家和天文物理學家都渴望了解我們所發現的任何重力波事件有沒有可能被其他望遠鏡或儀器偵測到。這項「多信使天文學」工作涉及許多不同團體的觀測，並在 2017 年取得了巨大成功：我們在相對較近的星系（距離 1.3 億光年！）探測到兩顆中子星合併，事件名為 GW170817。除了其獨特的重力波訊號之外，GW170817 還在大約 2 秒後產生了伽馬射線（光最高能量的形式），它隨後還發出，從 X 射線到無線電，遍布了整個電磁頻譜其他類型的光。這是迄今為止唯一一次明確的多信使重力波事件，而我們也從那次事件中學到了很多新東西。雖然如此，但從 2019 年 4 月到 2020 年 3 月的 LIGO-Virgo O3 觀測行動中偵測到的重力波事件數量約為 LIGO 和 Virgo 早期運行總和的 8 倍，這些重力波事件為科學家提供了更多機會作多信使天文學研究。

最近，天文學家團隊與 LVK 科學家合作，利用美國太空總署兩個太空望遠鏡的數據，有系統地搜尋可能與 LIGO-Virgo O3 中找到的重力波事件相關的伽馬射線訊號。這兩個太空望遠鏡分別是費米 (Fermi) 和雨燕 (Swift)，都是環繞地球運行的太空望遠鏡，可以偵測到來自深空的高能量光（伽馬射線和 X 射線，以稱為光子的「粒子」形式到達）而不被地球大氣層所吸收。這兩項任務都配備了連續監測大片天空的偵測儀器：費米上的伽馬射線爆發監視器 (GBM) 和雨燕上的爆發警報望遠鏡 (BAT)。它們主要的科學目的為檢測和報告伽馬射線暴 (GRB)。此前，LVK 科學家曾仔細檢查 O3 與更早期的觀測行動期間發生的伽馬暴爆發前後有沒有值得注意的重力波訊號（請參閱「尋找 O3b 中伽馬射線爆發產生的靜態重力波」）。而新的分析是對伽馬射線訊號作全面檢查，以免訊號因太弱或不明確被遺漏。這些訊號被稱為「伽馬射線瞬變」，儘管它們可能包括伽馬射線和 X 射線能量範圍內的光子。

出版文章中的圖表

有關這些圖表及其製作方式，請閱讀免費提供的預印本。



圖一 (出版文章中的圖六): GW190425 (LIGO 和 Virgo 偵測到的雙中子星合併) 的能量通量上限分佈圖。先前尚未報導過該事件的電磁對應物 (與另一雙中子星合併 GW170817 不同)，本次分析中也未發現任何對應物。大橢圓形代表各個方向的完整天空，以度為單位的數字是赤經和赤緯座標。淺藍色區域是 GBM 被地球阻擋 (遮蔽) 和 BAT 視場之外的方向範圍。綠色等值線顯示了可能 (在 90% 信心水平下) 包含重力波訊號的正確位置的天空區域。因此，GBM 和 BAT 的資料能夠限制大部分天空的通量，但僅限於重力波偵測器為此事件識別的部分區域。

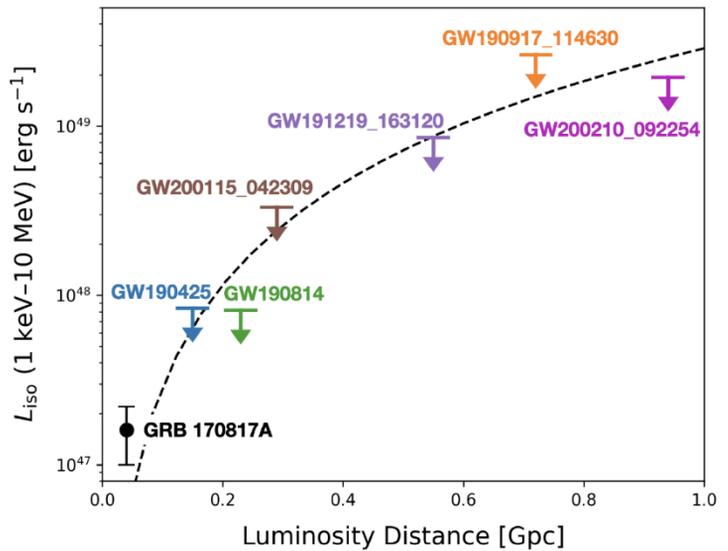
了解更多：

到我們的 www.ligo.org
網站：www.virgo-gw.eu
gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/



此次2分析的重力波候選目標樣本是由 O3 偵測到的 79 個可能事件組成，每一個事件都具有大於 50% 機率源自真實天體（相對於偵測器的雜訊波動）。這些事件的特性已經由 LIGO、Virgo 和 KAGRA 聯合發布在兩個目錄中：「GWTC-2.1：LIGO 和 Virgo 在第三次觀測運行的前半段觀測到的雙星合併延伸目錄」和「GWTC-3：第三個重力波探測目錄」。這分析也包括 6 宗邊緣的候選事件。這些事件中，只有少數涉及被認為是中子星的低質量天體，如果單一或一對中子星在合併之前和合併過程中受到潮汐力的破壞，那麼就有可能發出伽馬射線，如 GW170817 的情況一樣。所有其他事件都很可能是雙黑洞合併，理論天體物理學家認為除非在某些不常見的環境中，它們不太可能產生伽馬射線瞬變。雖然對於不同類型的合併來說，伽馬射線瞬變的具體屬性可能有所不同，但在此分析中，我們統一所有重力波事件的處理方式。

團隊成員分析了 GBM 和 BAT 儀器的可用數據，以搜尋與重力波事件目標樣本相關的瞬變事件。GBM 資料會定期傳輸到地面並存檔。現在已使用兩種比費米預設演算法更靈敏的搜尋方法重新分析所有數據，並對光子能量和可能的伽馬射線瞬變持續時間進行更廣泛的假設，以便識別擴大的觸發因素清單。此外，也對所有 14 個 GBM 閃爍體探測器的數據進行連貫分析，以檢查每個重力波事件時間附近是否有微弱但一致的訊號。



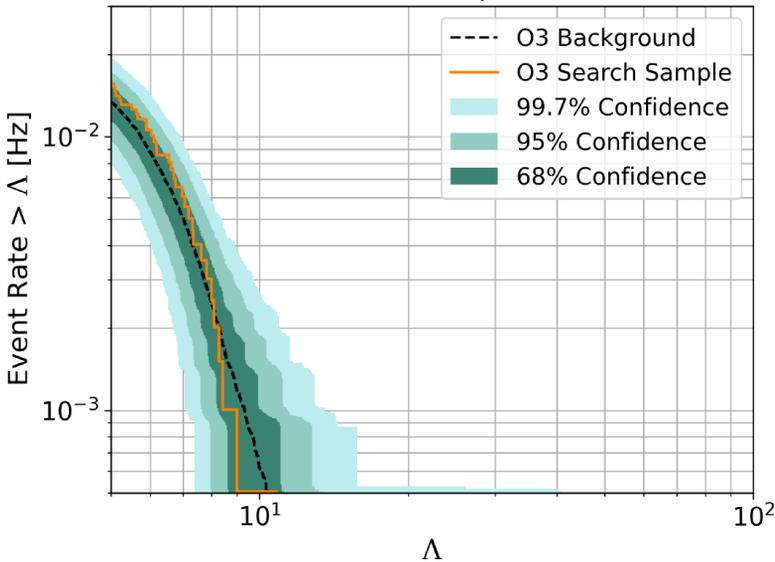
圖二 (出版文章中的圖五): 帶有向下箭頭的短水平線代表六個重力波事件的 X 射線和伽馬射線能量範圍內的光度上限。這六個合併雙星可能有一顆或兩顆中子星，因此特別令人感興趣。垂直軸測量“光度”，即在所有方向發射相同能量的簡化假設下，光源每秒發射的能量。它們都是從 GBM 和 BAT 資料加上已知的距離計算而成，這些距離以千兆秒差距為單位顯示在水平軸上（十億差距約為 32.6 億光年）。虛線是 GBM 靈敏度的近似模型。為了進行比較，2017 年檢測到的伽馬射線爆發以及雙中子星合併 GW170817 顯示為帶有誤差的點。GW170817 距離更近，因此此處顯示的其他 6 個 GW 事件只有在其次光度遠大於 GRB 170817A 的測量值時才能被偵測到。

參考了與雙星合併相關的「短」GRB 的持續時間，分析時間範圍由 0.064 秒到 8 秒。團隊也對 BAT 的數據（測量四個能量範圍內的光子檢測率）進行了分析，以搜索在重力波事件發生時光子檢測率升高的任何時期。

在這些搜尋中沒有發現任何可能與 O3 中的重力波事件有關的伽馬射線瞬變。儘管如此，伽馬射線訊號在這些重力波事件中的缺失也是一個重要科學發現。利用數據，分析團隊計算每個重力波事件的伽馬射線能量通量的上限，也就是說，他們評估了在進行的分析中不作為訊號出現的情況下可能存在多少伽馬射線能量。因為 GBM 和 BAT 都具有與方向相關的靈敏度，所以這些上限也是有方向性的，這取決於事件發生時望遠鏡的方位及其在地球上方的位置，因地球會遮擋（阻擋）撞擊它的伽馬射線。因此，**上限的分佈是根據天空上的位置繪製出來的**。此外，假設重力波事件確實會觸發伽馬射線瞬變，團隊成員透過對重力波事件的機率天空圖進行加權平均來計算邊緣化上限，以獲得能量通量限制的最佳估計。這些上限也可以使用不同的理論模型來解釋，包括產生伽馬射線的雙黑洞合併理論模型，例如透過黑洞的角動量（「自旋」）、系統中的電荷、或微中子與黑洞周圍物質相互作用直接或間接產生高能量光子。

即使是雙中子星合併，偵測到伽馬射線瞬變的機率也可能不高，因為伽馬射線的亮度可能取決於到系統跟我們的距離、中子星的特性及其軌道的方向。在標準伽馬射線暴模型中，已知伽馬射線集中在兩束光束中，其中一束恰好指向地球方向的可能性很小。對於雙黑洞合併來說，伽馬射線是否會產生更是未知數。如果可能產生的話，伽馬射線的亮度是否足以被偵測到。幸運的是，LIGO、Virgo 和 KAGRA 探測器將在未來的觀測中記錄更多的雙星合併，從而提供更多機會來捕獲轉瞬即逝的伽馬射線瞬變，了解這些強大而遙遠的天文物理事件，並測試不同的理論模型。

Normal Template



圖三 (出版文章中的圖二): 這種類型的資料圖旨在檢查一組事件是否都與假設一致, 或者某些子集是否明顯異常。在這裡, 為每個重力波事件計算了一個「lambda」(Λ) 值, 該值衡量該事件具有真實伽馬射線瞬變的可能性, 而不僅僅是伽馬射線儀器資料中的雜訊波動 (較大的 Λ 值意味著較高的真實機率)。由於訊號和隨機雜訊的統計變化, 預計會有較大範圍的 Λ 值。該 79 個重力波事件的 Λ 值已根據大小排序, 並以累積方式從右到左繪製為橘色階梯線 (因為垂直刻度是對數的, 所以隨著向上, 垂直步長看起來越來越小, 但所有步長實際上在速率單位上都是相等的)。顯著性檢定是將觀察到的分佈與假設沒有任何重力波事件具有伽馬射線瞬變對應物的情況進行比較。後者在圖中是標記為「O3 背景」的虛線, 並且以綠色條帶顯示了從隨機波動中可能的變化範圍。因為橘色階梯並沒有偏離該圖中的虛線太遠, 即使在最大的 Λ 值下, 我們也可以得出結論, 事件樣本與背景一致。也就是說, 這裡沒有令人信服的證據表明任何重力波事件有伽馬射線瞬變對應體。

了解更多：

我們的網站：

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

閱讀完整科學文章的免費預印本：

<https://dcc.ligo.org/P2100436/public> 或 [on arXiv.org](https://arxiv.org)。

GBM 官方網站：

<https://fermi.gsfc.nasa.gov/>

BAT 官方網站：

https://www.nasa.gov/mission_pages/swift/main

詞彙表

光子：攜帶一定能量的光粒子。20 世紀 00 年代初期, 人們逐漸認識到, 以前被認為是一種波動現象的光, 在某些方面可以像粒子一樣發揮作用。這是導致量子力學發展的關鍵證據。所有光都由光子組成, 光子的能量決定了它如何與物質相互作用。

伽馬射線：每個光子具有大量能量的光。儘管名稱中有「射線」一詞, 但伽馬射線的行為通常就像單一粒子一樣。通常, 能量為 100 keV (千電子伏特) 或更高的光子被視為伽馬射線光子, 儘管這不是一個嚴格的定義。伽馬射線可以在核反應或特別是高能粒子的碰撞或放射性衰變中產生。

X 射線：每個光子具有大量能量的光, 但不如伽馬射線那麼多。能量在約 100 eV (電子伏特) 和 100 keV 之間的光子通常被認為是 X 射線光子, 儘管「硬」(高能量) X 射線和伽馬射線之間存在無縫過渡。X 射線可以在高能粒子的碰撞中產生, 也可以透過原子中電子「激發」(暫時升高的能量) 態的衰變產生。

伽馬射線暴：是一種天文現象, 其中一個遙遠的天體突然發出非常強大的伽馬射線和 X 射線閃光, 通常隨後發射較低能量的光 (紫外線、可見光、紅外線和無線電波)。因為大多數伽馬暴發生在數十億光年之外, 地球附近的探測器只能捕獲少量能量, 以此反推它們釋放的能量一定是非常巨大的。大多數伽馬暴被認為是由比太陽質量大得多的恆星塌縮或雙星系統中的中子星合併產生的。

能量通量：單位時間內到達單位面積探測器的能量量度。例如, 能量通量的單位可以是爾格每平方公分每秒。在瞬態天文物理事件 (例如短伽馬射線暴) 中, 能量通量可能只存在幾分之一秒。

微中子：在一些放射性衰變過程和高能粒子反應中產生的基本粒子。微中子的一個獨特特性是它們通常可以穿過其他物質, 而與其他物質相互作用的機會很小, 因此它們有時被稱為「幽靈粒子」。太陽、超新星以及雙星合併中可能會產生大量微中子。

閃爍體探測器：一種粒子探測器, 當高能粒子進入並停止或散射時會產生閃光。光被收集, 透過光電倍增管等光學感測器轉換為電訊號, 並進行測量以確定沉積在偵測器中的能量。

連貫分析：一種同時分析多個探測器記錄的數據的方法, 要求它們全部與單一物理訊號一致。這種方法比簡單地將探測器的輸出加在一起要有效得多, 特別是當不同探測器中的訊號模式取決於某些因素 (例如天空中的位置) 時。

邊緣化：統計學中使用的一種計算方法, 透過對影響某個或多個其他量的不確定值進行平均來關注感興趣的量。平均通常使用似然或機率加權來完成, 以便邊緣化值代表最佳估計值。