

使用 GEO600 搜尋與 SGR1935+2154 相關的銀河系快速電波暴同時發生的重力波

快速電波暴 (FRB) 是一類高能量無線電訊號，通常持續約千分之一秒。已探測到的數千個 FRB 中的絕大多數都是從銀河系外非常遙遠的地方到達地球的。我們探測到河外快速電波暴的能力與其極大的能量有關：單一快速電波暴在一瞬間就能比太陽亮 10 萬到 10 兆倍！在少數情況下，天空中同一個位置但發生時間不同會出現多於一次的 FRB (中間間隔幾分鐘到幾年的平靜期)，這意味著產生 FRB 的物理過程不會把發源的星體完全摧毀 (儘管釋放了巨大的能量)。

雖然我們不知道 FRB 的確切起源，但我們認為它們來自中子星附近的強烈事件。這些中子星中的一小部分擁有已知的宇宙中最強的磁場——大約是地球磁場的千萬億倍 (10^{15})——因此，它們被方便地稱為「磁星」。磁星中的磁場穿過其內部，穿過其表面並延伸到很遠的地方，形成極低密度的大氣層，即「磁層」——類似於地球或太陽的磁層。磁星是一種物理性質極端的物體，它不僅是快速電波暴的源頭，還承載著其他類型的活動，如X射線爆發 (明亮的X射線閃光) 和自轉突變 (磁星旋轉速度的突然變化)。

2020 年 4 月 28 日，銀河系磁星 SGR 1935+2154 產生了一個 FRB，這為了解 FRB 的性質提供了重要線索，這是次來自我們自己星系的 FRB，也是第一次同時觀測到 FRB 和 X 射線爆發。在不到三年的時間裡，這個特殊源又產生了三次 FRB：2020 年 10 月 8 日、2022 年 10 月 14 日和 2022 年 12 月 1 日。

雖然 FRB 和磁星 X 射線閃耀可能是相關現象，但同一顆磁星可能會產生沒有 X 射線閃耀的 FRB，反之亦然。SGR 1935+2154 確實存在這種情況。一種主流理論認為，X 射線閃耀是由磁星外殼的星震活動所引起的。在足夠強烈的扭曲作用下，星殼會發生破裂，就像地震期間的地殼一樣。磁星外殼破裂時釋放的巨大能量被傳遞到中子星內部及其周圍的磁層。進入磁層的那部分能量最終可能會產生磁星閃耀和/或引發 FRB。其餘能量 (實際上是大部分能量) 撞擊中子星內部，使其以非常特殊的頻率振動，即所謂的準正規振盪模式。

尋找重力波

重力波 (GW) 是時空結構的振動，它可以將能量從其源頭傳送到宇宙的其他地方。地殼斷裂引起的磁星內部振盪是重力波的潛在來源，並且可能與快速電波暴的發射方式有關。由於這些重力波的特性取決於中子星及其磁場的性質，因此基本的研究策略是對它們與磁星閃耀進行幾乎同時的觀測。但這樣長期的搜尋迄今為止未有任何發現。一些新的理論模型確實預測，與探測到的重力波源 (例如雙黑洞合併) 相比，孤立磁星內部振盪在重力波中釋放的能量可能相對較小。因此，目前的重力波探測器的靈敏度不足以測量它們。雖然發現與磁星活動相關的重力波將是非常有意義的，但如果沒有發現，我們也能估計重力波釋放能量的上限，從而限定我們用來理解磁星性質的模型。在本文中，我們報告了在銀河系磁星 SGR 1935+2154 中觀測到的 FRB 與相關的重力波未偵測到的情況。

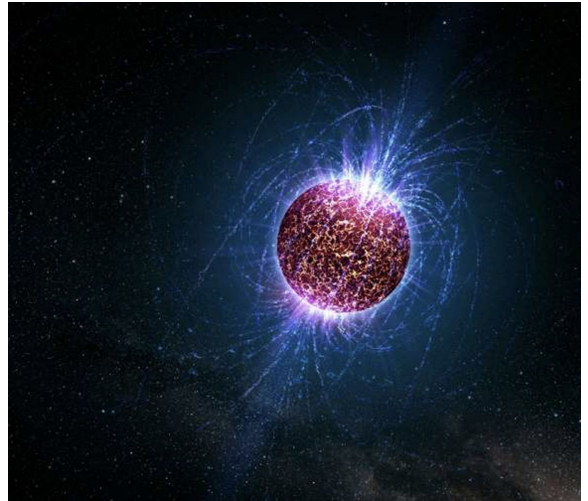


圖 1: 藝術家對磁星的印象圖，磁星可能是快速電波爆發的來源。來源：NASA。

了解更多：

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



已出版文獻的圖

欲了解這些圖表的更多資訊以及它們是如何製作的，請閱讀免費提供的預印本。

重力波源距離越遠，應變越小。即使是巨大的能量，例如強大的天體物理源所釋放的能量，也只會在地上產生微小的應變——小到必須使用極其複雜的探測器。我們使用雷射探測重力波，這些雷射監測 LIGO、Virgo 和 KAGRA 天文台以及 GEO600 天文台的懸掛鏡的運動。擁有多個重力波探測器同時進行觀測對於消除假重力波訊號具有很大的優勢。如果實際的重力波經過一個探測器，預計在地球周圍分佈的不同探測器上會在略微不同的時間留下類似的印記。

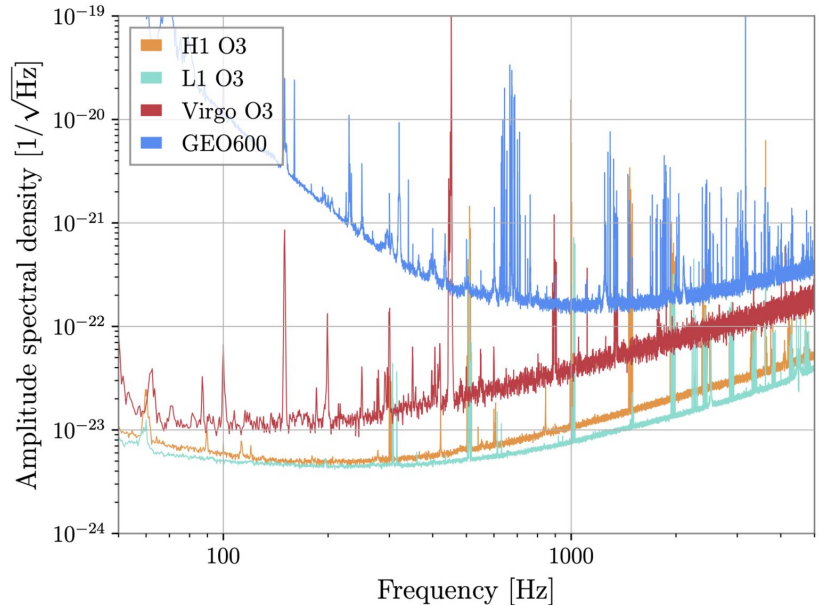


圖 2: LIGO (橘色、青色) 和 Virgo (紅色) 與 GEO600 (藍色) 的靈敏度曲線相比，作為重力波頻率的函數。曲線越低，偵測器在該頻率的靈敏度越高。

當快速電波暴發生在已知磁星中時，我們會在重力波資料中搜尋當時觀測到的電磁訊號的潛在重力波對應物。銀河系磁星 SGR 1935+2154 產生的 FRB 發生在 LIGO 和 Virgo 天文台離線的時候。幸運的是，GEO600 雖然不如 LIGO 和 Virgo 敏感，但在 SGR 1935+2154 的四次 FRB 中，對其中三次的爆發收集了有用的重力波資料。

這種單一探測器的設置帶來了一些挑戰。如前所述，區分真實訊號和雜訊變得更加複雜。其次，由於無法整合多個重力波天文台的數據，因此更難以聚焦在這 FRB 所來自的特定天區。第三，GEO600 的靈敏度低於 LIGO 和 Virgo 探測器，這可能導致低於約 1 kHz 頻率範圍內的重力波無法偵測到。幸運的是，理論模型預測磁星內部快速振盪產生的任何重力波都可能處於高頻率 (1-3 kHz)，而 GEO600 在此頻率範圍具有本身最佳的靈敏度。

與雙黑洞合併的情況不同，我們不知道預期的重力波訊號的確切形式。因此，我們採用通用的「波形」來表示我們對它們可能會是什麼樣子的最佳猜測。我們保持我們的搜尋“最低限度建模”，這意味著即使該訊號與理論波形不完全匹配，它們也會留出一些空間來檢測訊號。我們使用了兩個不同的軟體分析套件，一個用於分析少於一秒的短重力波訊號，另一個用於分析持續時間為一到十秒的長訊號，並在 SGR 1935+2154 的 FRB 和相關的 X 射線事件期間搜尋重力波訊號。

結果及未來展望

即使 SGR 1935+2154 是迄今為止距離我們最近的 FRB 來源，我們也沒有偵測到任何與 FRB 相關的重力波。為了確定我們分析的靈敏程度，我們模擬了代表具有合理特性的重力波的人工數據，並注意了這些模擬重力波在我們的搜尋中可探測到的振幅（「響度」）。然後，我們使用這些振幅來確定重力波發射能量的上限：任何訊號的能量都必須低於我們的上限才無法被偵測到。這些限制比 LVK 在 2019 年對 FRB 的分析中設定的改進了達到 4 個數量級。我們也稍微改進了快速電波暴期間重力波釋放的能量與無線電波釋放的能量之比的限制。

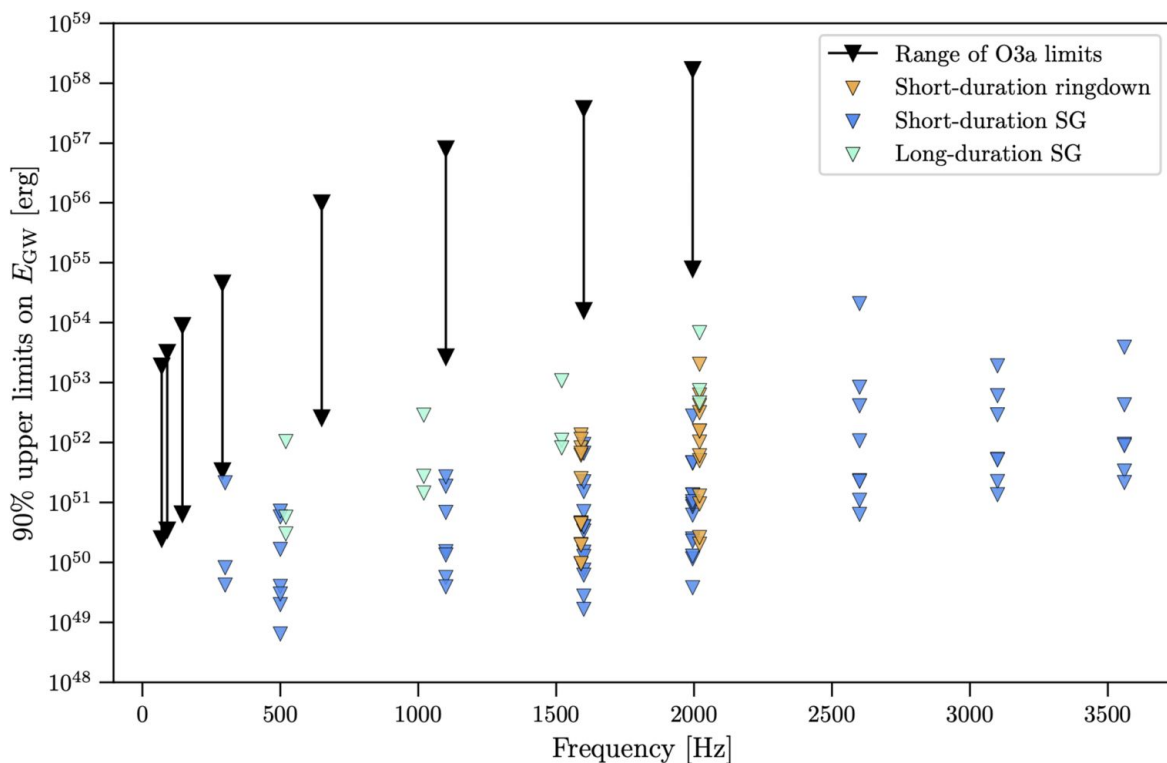


圖 3: 快速電波暴期間釋放的重力波能量的上限。我們將各種頻率和模型的新極限以不同顏色的三角形繪製出來。先前限制的範圍以黑色箭頭表示。我們的新限制明顯更加嚴格。

所有現有的關於伴隨快速電波暴的重力波所釋放能量的預測都低於我們的上限。因此，我們最新的臨界值限定仍然不夠嚴格，無法在預測 FRB 和磁星中重力波之間聯繫的各種理論模型中進行選擇。無論如何，這些上限規範了重力波輻射與快速電波暴聯繫起來的可能方式，從而幫助理論學家尋求改進的快速電波暴模型。

最後，由於 LVK 的重力波探測器將保持觀測模式直到 2025 年中期，如果 SGR 1935+2154 (甚至是另一個銀河系磁星) 再次產生 FRB，我們或許能夠使用更靈敏的探測器搜索同時發生的重力波，這讓我們有另一個機會更好的理解這些極端的天體物理現象。

了解更多：

拜訪我們的網站：

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

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

閱讀完整科學論文的免費預印本，請參考 [此連結](#) 或 arXiv.org。