

尋找在O3b 裡由伽瑪射線暴所產生的微弱重力波

迄今為止，LIGO 和 Virgo 探測器已經觀測到許多重力波訊號。（有關最新的重力波事件目錄，[請參考此處](#)。）然而，重力波越微弱，識別起來就越困難。這些較暗的重力波訊號將成為未來新科學發現的關鍵。尋找微弱重力波的其中一種方法是使用來自電磁波頻譜的信息來提示我們可能隱藏在數據中的黯淡重力波。**伽瑪射線暴 (Gamma-ray burst; GRB)** 是其中一種能產生重力波並釋放出可被觀測電磁波訊號的星體。

伽瑪射線暴

伽瑪射線暴是巨大的爆炸，它可以在幾秒鐘內釋放出與我們的太陽在其 100 億年的生命週期中在整個電磁波譜中發射的能量一樣多的**伽瑪射線**能量。這意味著伽瑪射線望遠鏡可以探測到位於數十億光年之外的它們，根據統計，平均每天可以看到大約一個伽瑪射線暴。當伽瑪射線天文學家偵測到伽瑪射線暴，他們會發布每個伽瑪射線暴在天空中的位置和發生的時間。利用這些資訊，重力波科學家能集中精力，尋找相關的重力波訊號。

大約三分之一的伽瑪射線暴持續時間不到幾秒鐘（短伽瑪射線暴）。這些伽瑪射線暴可以由兩顆中子星碰撞引起，例如 **GW170817/GRB 170817A**，或者是由於一顆中子星在落入**黑洞**時被撕裂。這些災難性事件是兩個星體逐漸向內螺旋運動的高潮，這一過程會發出具有我們可以預測的重力波的形狀，稱為**啁啾(Chirp)**。因此，我們編寫了專門用來檢查這些來自短伽瑪射線暴事件的重力波啁啾的軟體程式。

其餘三分之二的伽瑪射線暴持續幾秒到幾分鐘。這些長伽瑪射線暴是由大質量恆星在死亡時所產生的激烈爆炸而產生的，恆星的核心在自身重力作用下內爆形成**黑洞**，在此過程中釋放出大量能量。這些事件會產生波形難以預測的重力波爆發。儘管我們不知道它們的波形究竟是什麼樣子，我們已經編寫了軟體程式來尋找這種爆發。因為我們不對信號形狀做任何假設，所以我們可以使用這種突發分析從長伽瑪射線暴和短伽瑪射線暴中尋找重力波訊號。

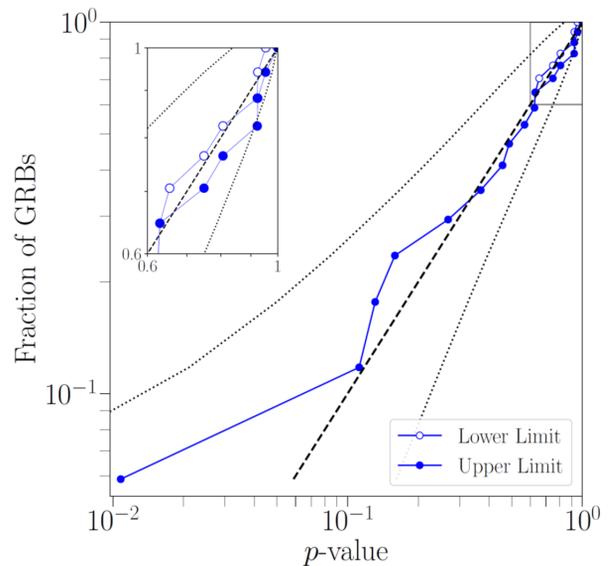


圖1：啁啾分析所檢查的17個短伽瑪射線暴中最佳候選者的p值（藍點），排列從最小到最大。較小的p值代表候選者有異於背景雜訊，因此可能是真實的重力波訊號。然而，如果所有候選者都是由隨機雜訊引起，我們預期某些候選者因隨機關係具有較小的p值。在這種情況下，我們期望它們大致位於圖中的黑色虛線上，只有10%的可能性落在黑色點線範圍之外。由於藍點都在這些虛線內，我們可以推論，我們獲得的p值可以用隨機機會解釋。

我們發現了什麼？

2019年11月1日至2020年3月27日期間，雨燕(Swift)和費米(Fermi)伽瑪射線衛星共觀測到 108 個伽瑪射線暴。其中 86 個發生在我們的重力波天文台在正常運作並獲取適合分析的科學數據時，當中 17 個是短伽瑪射線暴。不幸的是，我們的兩種分析方法都沒有發現任何與我們所針對的伽瑪射線暴相關的重力波。由於大多數伽瑪射線暴發生在很遙遠的地方，天文學家對這結果並不感到意外。

我們根據伽瑪射線暴發生的時間，使用上述兩種分析方法檢查了局部的重力波數據塊來搜索訊號。對於啣啣分析，數據塊是 6 秒長，而暴發分析使用至少 660 秒長的數據。在這兩種分析，我們首先確定數據中最有可能的重力波候選者，然後與不可能有訊號的數據塊（如沒有觀測到伽瑪射線暴或其他電磁波源）進行比較。這使我們能夠估計所選擇的候選者只是由數據中的正常雜訊波動引起的可能性。我們稱之為 p 值。若 p 值大，候選者有比較大的機會是來自背景雜訊。相反，較小的 p 值表示候選者可能是真實的重力波訊號。不幸的是，我們的伽瑪射線暴分析發現的候選者中沒有一個具有極小的 p 值。換句話說，所有候選者只是隨機雜訊波動，表示我們沒有檢測到新的重力波。

雖然我們沒有發現與伽瑪射線暴相關的重力波，但這反而引出一個有趣的科學問題：伽瑪射線暴需要距離我們多遠，相關的重力波才不會被檢測到（重力波的強度與其源的距離成比例地下降）？這個距離稱為“排除距離”。我們可以人為地將假訊號按照不同距離插入數據中，利用與真實數據相同的分析方法找出可信度高的訊號的極限距離。因為我們的分析方法對不同類型的訊號有著不同的靈敏度，如果我們對不同類型的假訊號採取以上的分析，我們可以估計各種類型的訊號的排除距離。

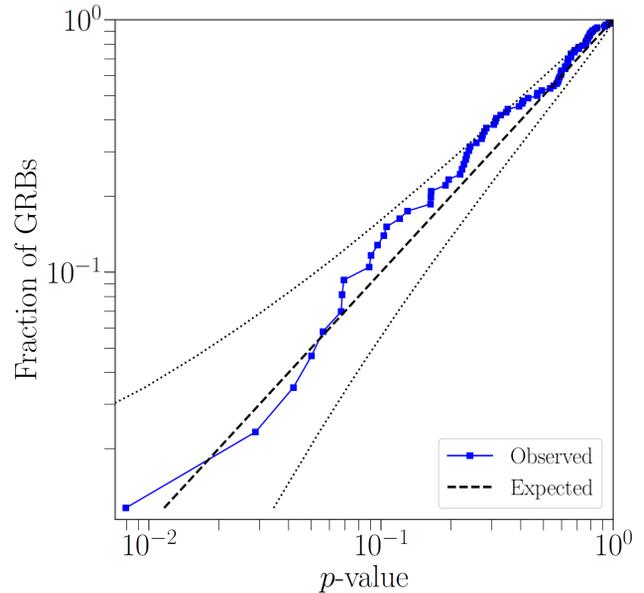


圖 2：暴發分析所檢測的 86 個伽瑪射線暴中最佳候選者的 p 值(藍點)，排列從最小到最大。像圖 1， p 值大致位於圖上的黑色虛線和黑色虛線內，因此我們得出同樣的結論，它們可以通過隨機機會來解釋。

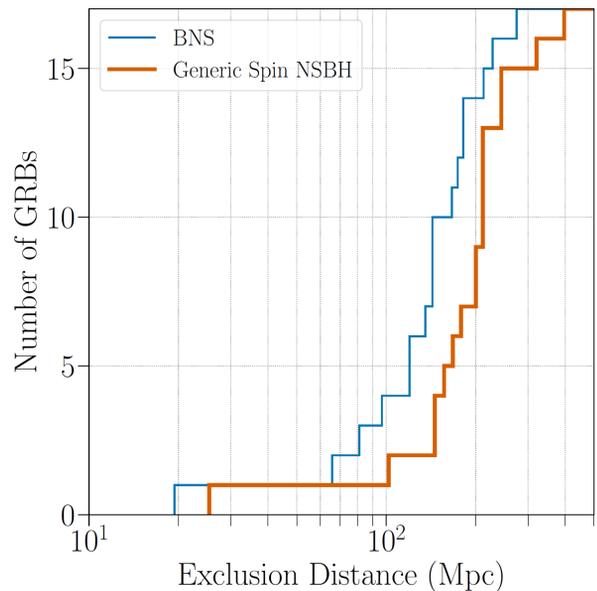


圖 3：啣啣分析方法對兩種不同類型的重力波訊號模型的排除距離。排除距離是對由某類型的天文事件引起的伽瑪射線暴不能被檢測到可能產生的重力波的距離。我們的重力波探測器對不同方向的靈敏度不盡相同，且當不同的伽瑪射線暴發生時，探測器的組合並不一樣，這表示探測器組合對每一個伽瑪射線暴的靈敏度有顯著差異，從而導致一系列排除距離。細藍線表明，對於雙中子星，我們的排除距離範圍約為 20 百萬秒差距(Mpc) 到接近 300 Mpc，中位數為 149 Mpc。中子星-黑洞雙星比雙中子星的質量更大，因此可發出更強的重力波訊號，所以必須距離更遠才能保持不可被檢測(橙色粗線；中位數為 207 Mpc)。

我們可以從沒有被偵測到的短伽瑪射線暴訊號學到甚麼？

短伽瑪射線暴仍然是一類知之甚少的天文事件。例如，它們的亮度似乎變化很大，而我們對最微弱的短伽瑪射線暴的普遍性或它們能變得有多微弱亦缺乏認知。大多數看起來微弱的伽瑪射線暴可能只是距離更遠。通過將這項工作的發現與 LIGO-Virgo 第一次、第二次和第三次早期觀測中的結果相結合，我們可以使用啣嗽分析結果作進一步的研究。

短伽瑪射線暴越微弱，我們的望遠鏡就需要離它越近才能偵測到。距離越近，我們就越有可能檢測到重力波。因此，若本質微弱的短伽瑪射線暴越多，觀測到與伽瑪射線暴相關的重力波信號的頻率就越高。根據我們分析的伽瑪射線暴，並扣除 GW170817，我們沒有發現來自伽瑪射線暴的重力波。由此我們可以估計非常微弱的伽瑪射線暴的比例，從而推算出任何亮度的短伽瑪射線暴在近域宇宙的總比率。我們發現該比率與我們從已發現的重力波事件中推斷出的雙中子星合併比率一致，並預測第四次重力波聯合觀測可能每年會偵測到大約一次重力波暨伽瑪射線暴事件。

正體中文翻譯：江國興

正體中文校稿：李君樂、林峻哲、謝和峯

更多資訊

閱讀完整的科學文章：

<https://dcc.ligo.org/P2100091/public/main>

GWTC-3 公開數據：

<https://www.gw-openscience.org/>

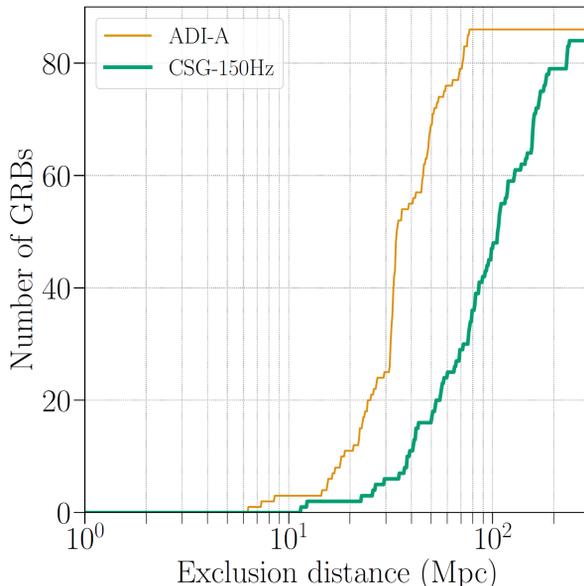


圖 4：暴發分析方法的排除距離。如圖 3 所示，我們展示了兩種不同重力波訊號模型的距離。兩種訊號模型分別為吸積盤不穩定模型 (Accretion Disk Instability, ADI; 細橙色線) 和圓形正弦高斯模型 (Circular Sine-Gaussian, CSG; 粗綠色線)。吸積盤是圍繞黑洞旋轉並最終落入其中的物質盤。如果磁場導致圓盤不均勻或凹凸不平，那麼當圓盤圍繞黑洞旋轉時，就會產生重力波。圓形正弦高斯模型是一個簡單的模型模擬來自坍縮恆星的重力波發射。吸積盤不穩定和圓形正弦高斯模型的排除距離中位數分別為 34 Mpc 和 92 Mpc。

詞彙表

伽瑪射線：波長最短、能量最高的電磁波。

伽瑪射線暴 (GRB)：在宇宙發生的伽瑪射線閃光，可以持續幾分之一秒到幾分鐘。

中子星：恆星死亡後其核心極其緻密的殘餘物，其典型質量為太陽質量的 1 到 2 倍，但直徑僅約 20 公里。

黑洞：重力非常強大的時空區域，任何東西都無法逃脫，甚至光也無法逃脫。

百萬秒差距 (Megaparsec; Mpc)：距離的單位。一百萬秒差距 (1 Mpc) 約為 326 萬光年。

p 值：統計顯著性的量測，可用於評估實驗或觀測結果是否可能由隨機統計機會造成的。

拜訪我們的網站

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

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

