

尋找O3a中伽瑪射線暴所產生的隱藏重力波

伽瑪射線暴 (Gamma-ray burst; GRB) 是來自深空極亮的高能量伽瑪射線閃光，每天大約可以觀測到一次。伽瑪射線束被射入狹窄的錐形噴射流中，造成異常明亮的閃光，因此即使從數十億光年的距離外，我們也能夠看到它們。

至少有兩種不同的機制可以產生GRB。“持續時間長”的GRB (長暴) 較為普遍 (約佔所有GRB的70%)，並與超新星爆炸有關，這種關聯支持爆發是由於巨大垂死恆星的坍塌而產生的。以這種方式產生的GRB可以持續幾秒鐘到幾分鐘。

“持續時間短”的GRB (短暴) 只維持最短幾毫秒到最長幾秒鐘之間。我們認為大部分 (如果不是全部) 短暴是由成對的中子星互相碰撞，或者是由於黑洞在吞噬過程中將中子星撕裂而造成的。無論是哪一種GRB機制，短暴都能猛烈加速大量物質從而發出重力波。例如GW170817重力波事件的發現就正伴隨著來自附近星系的短暴。

重力波天文學家通過兩台伽瑪射線太空望遠鏡Fermi和Neil Gehrels Swift Observatory來監測GRB。當檢測到新的GRB時，我們可以以LIGO和Virgo的重力波數據檢查有沒有來自同一方向和同一時間的重力波源。通過這種方法，我們可以更有有效的偵測信號較弱的重力波源。

我們如何獲得重力波

我們使用兩種不同的技術來尋找這些信號。在第一種技術中，我們不在乎重力波波形，而是純粹找尋同時出現在LIGO和Virgo數據中的信號。這意味著這方法可以找到由中子星碰撞或坍塌恆星所產生的重力波。我們將其稱為“通用”搜索方法，只要重力波天文台在收集數據時有GRB發生，我們便會使用它來搜索信號。第二種技術僅尋找具有特定波形的信號，即“啞啞”(chirp)。當成對的緻密星包括成對的中子星或黑洞與中子星對彼此圍繞旋轉並最終碰撞時，就會產生這種信號。因此，當我們認為GRB可能是短暴時，才會使用這種“模型化”搜索。我們以4秒為界線決定是否使用此方法，為求儘可能分析所有與短暴有關的重力波數據。

我們的重力波搜索結果

在2019年4月至9月之間，LIGO和Virgo進行了一段時間的數據採集，稱為O3a。在這段時間內，我們總共對105個GRB進行了通用方法，對32個短暴進行了模型化方法。我們沒有找到任何與這些GRB相關的重力波信號 (參見圖1和圖2)。雖然結果不理想，但其實是可預期的。首先，由於GRB伽瑪射線錐的角度狹窄，因此很大一部分GRB的噴射流沒有正對地球而沒有被觀測到。其次，大多數GRB都發生在很遠的地方，在重力波天文台的敏感距離之外。

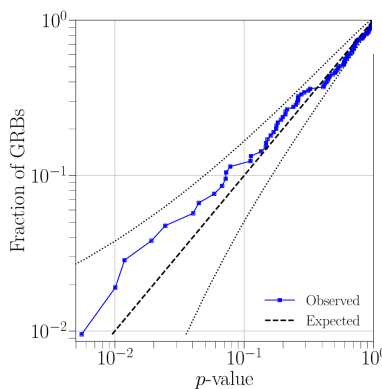


圖2：上圖顯示了與圖1類似的統計結果，不同的是以通用搜索對105個GRB進行分析。

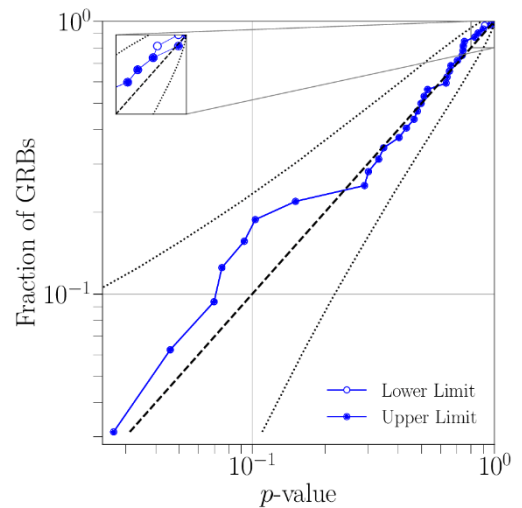


圖1：模型化搜索顯示了每個短暴的最佳候選重力波事件及其強度。我們將其與其他時間的數據進行比較，以估計候選者是雜訊而非信號的可能性 (p值)。在這裡，我們顯示了32個候選 (連接點)，水平軸表示候選p值，垂直軸顯示p值較低的候選分數。虛線顯示了僅從背景雜訊和隨機機會 (並且沒有重力波信號) 中所期望的曲線。候選人的p值越大 (越靠近右側)，則表示它是雜訊而非信號的機會就越大。虛線顯示了我們搜索中預期的雜訊統計。我們看到所有候選者 (由連接點顯示) 都在虛線內，這意味著所有候選者都與預期的背景雜訊一致。



來看我們的網站：
<http://www.ligo.org>
<http://www.virgo-gw.eu>



當我們找不到對應於GRB的重力波信號時，我們向數據添加模擬的重力波信號並查看我們的方法找到了哪些人為信號，來測量重力波天文台對各種類型信號的可檢測距離。通過這個分析，我們可以對每個沒有偵測到重力波的GRB設一個最近距離，也是說如果該GRB產生了某種類型的重力波，則它一定發生在比最近距離更遠的地方。如果實際距離更近，那我們就不應該錯過它。我們為所有的搜索結果都各自計算出此極限距離，我們稱此為“排除距離”，如圖3和4所示。

GRB 190610A的案例

我們對重力波源距離估計還可以在沒有已知距離的情況下對GRB施加約束。對於很大比例的GRB，距離是未知的。其中一個有趣的案例是GRB 190610A，我們的模型化方法告訴我們，如果GRB 190610A是由兩個互相碰撞的中子星所產生的，則最有可能發生在63 Mpc（約2億光年）的距離以外。該GRB的位置非常接近一個距離我們165 Mpc（約6億光年）的星系，因此我們不能從分析中排除中子星對碰撞為該GRB的產生原因（如圖5所示）。

展望未來

儘管在O3a中，我們沒有從任何GRB觀測到重力波信號（如2017年8月我們觀察到GW170817那樣），但探測器改進的計劃和工作都正在一一進行中。隨著重力波天文台變得越來越靈敏，我們將有更大的機會偵測到更多與GRB相關的重力波事件。結合從各個重力波事件和GRB所獲得的信息，我們可以對這些神秘的伽瑪射線暴的機理和性質作出有價值的新見解。

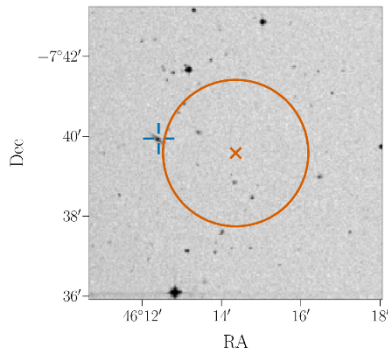


圖5：在該圖中，大圓圈表示GRB190610A位置的可能範圍，該GRB可能在十字星號所示距離我們165 Mpc（約6億光年）的星系中發生。這距離大於我們對此GRB的排除距離，因此我們不能排除中子星對碰撞為該GRB產生機制的可能性。

詞彙表

黑洞：由非常緻密的質量引起的時空區域，在該區域中重力非常強烈，以至於阻止任何物體（包括光）離開。

啁啾 (chirp)：重力波信號或波形的名稱，通常由一對超緻密的物體，例如黑洞或中子星，在合併之前彼此高速圍繞旋轉而產生。在啁啾信號中，頻率和幅度隨時間增加。

巨大恆星的核心坍縮：大質量恆星通過核聚變產生鐵，產生的鐵沉入恆星的中心並形成其核心。一旦足夠重，該鐵核心將在其自身重量和外部壓力作用下坍塌，從而導致整個恆星坍塌。

電磁輻射 (EM)：輻射通常稱為光，但肉眼只能看到光譜的一小部分。以能量分類（從低到高），電磁輻射光的種類包括：無線電、紅外線 (IR)、可見光、紫外線 (UV)、X射線、伽瑪射線。

伽瑪射線：在電磁頻譜上具有最高能量的電磁輻射。

伽瑪射線暴 (GRB)：極短的高能光子（稱為伽瑪射線）爆發。伽瑪射線爆發 (GRB) 通常持續長達數十秒。

LIGO：LIGO由兩個4公里長的干涉重力波探測器組成，相隔約3000公里（1900英里），分別位於美國洛杉磯的利文斯頓和華盛頓州的漢福德。

光年：距離單位，等於光在一年內傳播的距離。一光年大約等於9.46萬億公里（或大約5.88萬億英里）。

百萬秒差距 (Mpc)：天文距離的單位，約等於326萬光年。

中子星：巨大恆星坍縮後遺留下的緻密。一個典型的中子星的質量是地球質量的一百萬倍，但大小僅約30公里。

p值：給定量度作出統計顯著性的度量。一般而言，p值回答了以下問題：“該結果僅僅是背景雜訊的可能性有多大？”低p值事件很可能是由實際重力波信號所引起的。

超新星：一種在天空中快速出現然後逐漸消失的劇烈爆炸。超新星的亮度可以比其星系更亮。有各種不同的超新星。有些來自大質量恆星的坍塌，另一些可能來自兩個白矮星的碰撞。

Virgo：Virgo是位於意大利比薩附近比薩市的地面雷射干涉儀。

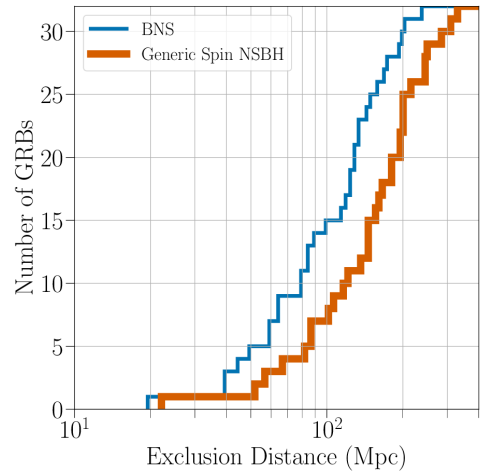


圖3：在此圖中，我們顯示了排除距離（由模型化搜索計算得出的）小於或等於某個值的伽瑪射線爆發數量。排除距離可以告訴我們，在沒有偵測到重力波（假設為特定模型）的情況下，GRB可能的最近距離。我們通過將不同強度的人為重力波信號添加到特定GRB發生時的數據中來計算這些距離。人為信號偵測率不足90%的最接近距離定義為排除距離，假設一種特殊類型的重力波信號，如雙星中子星 (BNS-細線) 或中子星-黑色合併 (NSBH-粗線)。事件必須發生於排除距離之外。距離軸以百萬秒差距 (Mpc) 為單位。

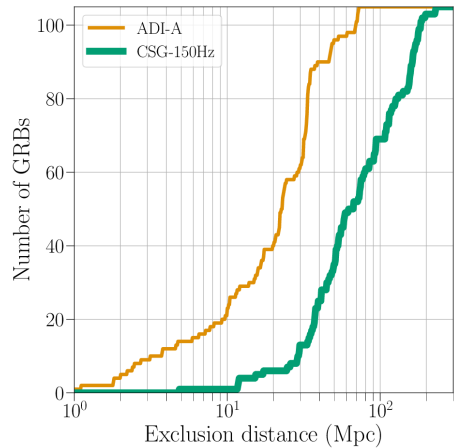


圖4：與圖3相同的繪圖類型，但是是以通用搜索進行分析（不採用啁啾信號）。這次使用的人為重力波信號是基於來自GRB的兩種可能機制。第一個模型是ADI-A，它對來自黑洞周圍大量物質所產生的重力波輻射進行建模。第二個是CSG，代表圓形正弦高斯信號，是重力波波形的簡單近似。距離軸以百萬秒差距 (Mpc) 為單位。

如想知道更多：

來看我們的站：

<http://www.ligo.org>, <http://www.virgo-gw.eu>

在[這](#)上閱讀完整的科學文章(免費預印本)