

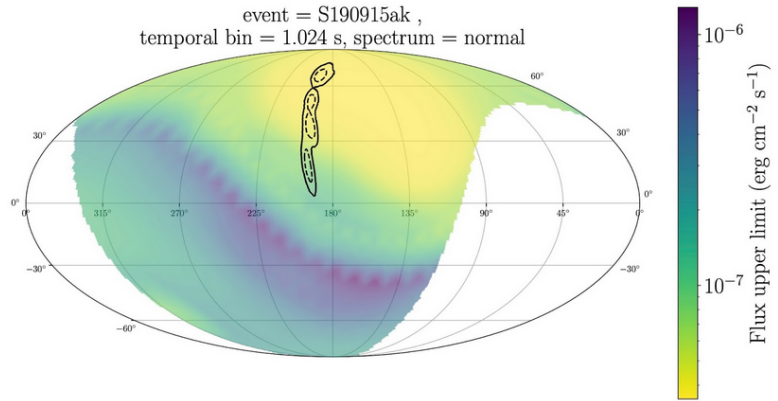
## 利用SWIFT-BAT 的GUANO尋找重力波候選者的伽馬射線對應天體

### 研究背景

[GW170817](#)事件的發現證明了**聯合觀測中子星**合併所發射的**重力波**和**電磁波**的深遠科學意義。這項發現凝聚了LIGO(雷射干涉重力波天文台)-Virgo(室女座干涉儀)-KAGRA(神岡重力波探測器)合作團隊和天文學界的大量協調努力。涉及中子星組成的雙星合併，例如雙中子星合併或中子星黑洞合併，預計會產生可探測的電磁波輻射，並具有各種相關的電磁波**對應天體**。最亮的電磁波成分是由相對論性噴流產生的-噴流物質垂直於雙星軌道平面發射，並且被加速到接近光速。相對論性噴流首先以**(伽馬射線暴)**的形式釋放能量，然後在減速進入星際介質時的餘輝階段放射出不同的波長的輻射。合併物的對應天體的持續時間很短，這給它們的探測帶來了巨大挑戰，需要立即動員天文學界進行後續的觀測。

### 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](#)。



圖一：重力波觸發時 Swift-BAT可獲得的天空地圖範例。地圖的顏色表示與單一重力波事件相對應的每個天空位置的通量上限。黃色區域大致對應於 BAT 儀器最敏感的部分，提供最佳的通量限制。黑色輪廓線內的區域表示天空中發生重力波事件機率最高的區域。白色區域代表被地球遮蔽的天空區域。

### 尼爾·格雷爾斯雨燕天文台(SWIFT)

在探測和識別合併緻密星的電磁波對應天體方面，尼爾·格雷爾斯·雨燕天文台(Swift)發揮著重要作用。借助三種承載儀器：爆發警望遠鏡(BAT)、X射線望遠鏡(XRT)和紫外線/光學望遠鏡(UVOT)，Swift的設計針對自主探測和追蹤伽馬射線暴。BAT對伽馬射線暴初始階段產生的伽馬射線輻射敏感，而XRT和UVOT負責探測餘輝的輻射。除了能夠探測到與合併事件相關的伽馬射線暴的輻射之外，Swift-BAT的儀器還具有能精確確定天空中輻射源位置的獨特能力。這些天體位置會被迅速傳達給天文團體，使得地面和太空望遠鏡能夠開始後續觀測，以充分表徵瞬變星體在多波段的行為。

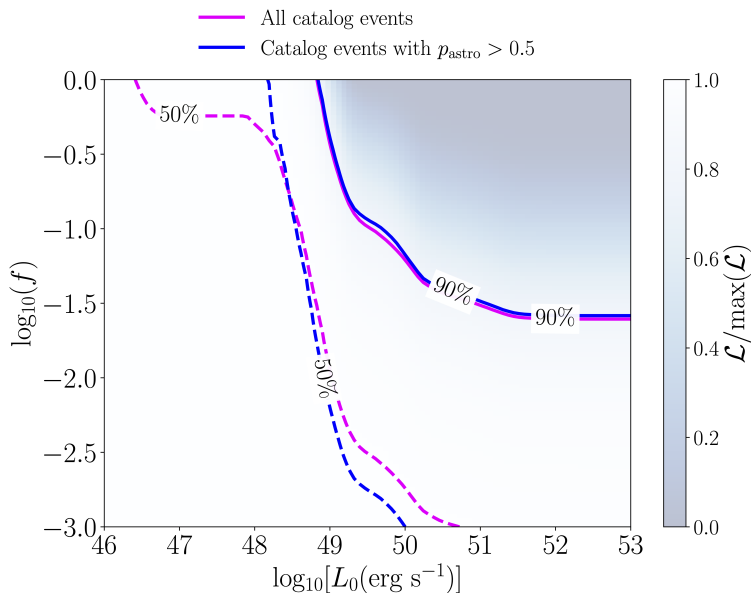
由於雙星合併的對應天體預期發出的電磁輻射一般比較微弱，這促使天文學家需要進行靈敏的目標搜索，以復原這些微弱的目標。顧名思義，我們需要一個伽馬射線暴的天體目標，以及有關其在空間和時間中的位置資訊。術語“次臨界值”指出，透過更深入的統計分析，我們能夠找到名義上低於承載Swift-BAT的偵測門檻的輻射源。另一個關鍵點是Swift承載儲存大量數據產品的能力非常有限。因此，及時請求向地面傳輸資料進行針對性的分析至關重要。該任務已透過建構GUANO(新機遇的伽馬射線緊急檔案庫)管道成功實現，該管道自主接收來自天文物理感興趣的事件(例如伽馬射線暴、快速電波爆、高能**微中子**以及包括重力波)的觸發警報，並立即要求向地面傳輸相關資料。

### 了解更多：

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



任何有針對性的次臨界值分析的相關影響是，即使外部觸發因素不足以而被導致歸類為偵測發現，更敏感的離線搜尋也有可能提升其重要性。透過這種方法，這類分析有可能找到外部觸發和Swift-BAT 探測到的伽馬射線訊號之間同時發生的巧合，否則這些巧合將會遺失。此原理已廣泛且有系統的應用於GUANO在第三次LVK(LIGO-Virgo-KAGRA) 觀測運行中能夠接收到的所有重力波觸發訊號，總計約1500個警報。本文所進行分析的最終目標是尋找Swift-BAT儀器中任何可能偵測到的輻射與重力波事件在空間和時間上相互重疊。需要這樣的重疊以確保重力波和伽馬射線訊號都在天空中的同一位置發生，並且要求其時間延遲符合我們的理論預期。



圖二：此圖顯示了使用第三次LVK運行期間收集的Swift-BAT通量上限對雙黑洞(BBH)合併所產生假定的電磁波(EM)發射性質的限制。 $f$ 和 $L_0$ 參數描述了電磁波放射模型，且線以上的區域被排除於分析之外。這邊 $f$ 指得是發生電磁波放射的機率，而 $L_0$ 是這種放射的典型光度。藍線表示如果我們只考慮該重力波事件具有高機率為天體物理所造成而排除的區域，而粉紅線則是相較於考慮在LVK第三次運行(O3)中所收集所有BBH事件的分析。

Swift-BAT數據的次臨界值分析是使用NITRATES進行的，這是一種新穎的框架，與傳統的BAT成像技術相比，它已被證明具有更高的靈敏度。即使微弱的伽馬射線訊號出現在BAT儀器的編碼視野之外，NITRATES也能恢復這些訊號。由於BAT響應和光子入射方向之間的複雜關聯，運行NITRATES分析在計算上具有挑戰性。單一觸發事件的端對端NITRATES運算需要最多500個核心小時(如果標準筆記型電腦只有8個核心，則需要近3天的不間斷計算)。由於GUANO目前平均每天接受20個觸發事件，因此使用高效能叢集電腦至關重要。

## 成果

為了能夠在背景雜訊中偵測到弱訊號，盡可能地描繪雜訊特性至關重要。任何能夠模仿天文物理事件的偽造訊號都必須被辨識並排除。

不幸的是，此次搜尋並未發現所分析的重力波候選事件與Swift-BAT收集的訊號之間有顯著的關聯。這並不奇怪，因為用NITRATES分析的絕大多數重力波事件都是雙黑洞(BBH)合併。事實上，根據最先進的理論模型，只有在特殊情況下，雙黑洞合併事件才會有相關的電磁波輻射。作為本分析的一部分，只有少數被追蹤的重力波事件由至少一個中子星組成，但它們相對於天文物理事件起源的機率不到50%。

自然而然的問題是：一旦我們無法獲得探測到的重力波和伽馬射線訊號之間的存在任何可能的關聯，我們該怎麼辦？在沒有發現的情況下，通常的做法是定義出任何可能的伽馬射線訊號強度的限制。由於伽馬射線探測到的機率隨著其強度的增加而增加，因此未成功探測就意味著其亮度有上限。由於我們充分了解Swift-BAT的靈敏度，根據假定的伽馬射線訊號在天空中的位置，我們可以推估伽馬射線通量上限的天空分佈圖，如圖一所示。這圖告訴我們，在重力波觸發前後20秒的時間範圍內，如果發現任何伽馬射線瞬變星體，其相關的通量一定低於天圖上報出的值。我們還注意到，BAT儀器無法為地球後方的天區提供任何通量約束。

對這些單一重力波事件的分析提供了另一個關鍵資訊：輻射源的距離。只要知道距離和通量上限，我們就可以直接推測緻密恆星合併產生的電磁輻射的固有亮度。與先前的情況類似，未偵測到的結果使我們得出結論：如果伽馬射線閃是由緻密星體合併產生的，則其亮度不可能超過最大亮度。特別說明一下，我們之所以關注雙黑洞合併類別可能產生的電磁波輻射，是因為在所有收集到的重力波觸發事件中，它們源自於天文物理的機率是最大的。

儘管可能性極小，但有幾種理論模型預測雙黑洞合併事件會在伽馬射線波段產生電磁波輻射。例如，如果雙黑洞合併事件發生在密集的環境中，例如**活躍星系核**的盤面，理論模型就會預測可能出現可以在電磁波段被偵測的瞬變星體。這項工作中，我們考慮了一個對電磁波輻射本質做出最少假設的模型。該模型僅用兩個物理量來表徵電磁發射： $f$  和  $L_0$ ，其中  $f$  是有電磁波輻射的機率， $L_0$  是這種放射的典型光度。透過進行一個模擬，結合我們對 *Swift*-BAT 通量上限、距離以及重力波事件本身的天文物理起源的可能性的所有知識，我們可以推斷出對兩個參數  $f$  和  $L_0$  的限制，如圖二所示。從圖中可以看出，這兩個參數的複合關係導致有兩種可能的情況可以解釋結果。第一種可能性是，大部分雙黑洞合併事件可以產生電磁波輻射，但在這種情況下這類輻射不會太亮。或者，雙黑洞合併事件可能會產生明亮的伽馬射線閃，但這種情況非常罕見( $f$  遠小於 1)。

## 未來展望

這項研究說明，即使沒有任何關聯性的顯著偵測，靈敏的針對性分析也可以為我們對緻密星體合併在電磁波的對應天體其性質的理論預期提供有價值的見解。

本研究中所採用的次臨界值分析管道採用了極為有效率的工作流程。由於擁有多個超級運算設施，它每天能夠接收許多觸發事件。該代碼也公開提供給其他天文學團隊根據需要採用和量身定制。作為正在進行的第四次 LVK 觀測運行的一部分，它目前每天接收數十個重力波觸發事件。如果存在潛在的重力波事件與伽馬射線暴相關聯，*Swift* 會立即與 LVK 進行通信，以評估其關聯的重要性。如果其重要性超過預先設定的門檻，就會發佈公共警報，包括有關重力波的性質、伽馬射線閃和天空中各自位置的基本資訊。這一警報將被天文學界迅速接收，以觸發對該事件的進一步追蹤以檢測整個電磁波頻譜中任何可能的輻射。

*Swift* 的快速轉向和角分等級的精確定位能力使其成為當前時代的多信使瞬變天文物理學領先發現的儀器之一。與本研究中採用的類似新穎的目標搜尋方法將為未來任務採用類似的策略奠定基礎，增強我們追蹤瞬變星體的科學和揭示緻密星體合併本質的能力。

## 了解更多：

拜訪我們的網站：

- [www.ligo.org](http://www.ligo.org)
- [www.virgo-gw.eu](http://www.virgo-gw.eu)
- [gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/](http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/)

閱讀完整科學論文的免費預印本，請參考 <https://dcc.ligo.org/P2300364/public> 或 [on arXiv.org](https://arxiv.org)。

已發表的科學論文請參考 [這裡](#)。

Neil Gehrels *Swift* 天文台網站請參考：  
[https://www.nasa.gov/mission\\_pages/swift/main](https://www.nasa.gov/mission_pages/swift/main)

### 詞彙表

**重力波：**這些時空中的漣漪，是由宇宙中一些最劇烈的過程產生的，例如中子星或黑洞合併。

**電磁波：**可以覆蓋整個光譜的光，包括伽馬射線、X射線、紫外光、紅外光和無線電波。

**中子星：**恆星在其演化末期坍縮的核心，通常質量約為 1.4 個太陽質量，但直徑僅幾公里，因此是一個密度極其緻密的物體！

**對應天體：**電磁波對應天體是指可與重力波事件相關聯的事件。

**伽馬射線暴 (GRB)：**一種天文現象，遙遠的物體突然發射出非常強烈的伽馬射線和 X射線閃光，通常會伴隨較低能量的光（紫外線、可見光、紅外線和無線電波）。大多數伽馬射線暴被認為是於由大質量恆星坍縮或雙星系統裏的中子星合併產生的。

**管道：**作為工作流程的一部分所使用的流程。GUANO 管道涉及自動保護人造衛星數據，並針對有趣的天文物理事件提出即刻報告的回應。

**微中子：**在某些放射性衰變過程和高能粒子反應中產生的基本粒子。微中子的一個獨特性質是它們通常可以正常地穿過其他物質，且與之相互作用的機會很小，因此它們有時被稱為“幽靈粒子”。微中子大量產生自太陽，也來自超新星，也可能產生自雙星合併。

**活躍星系核 (AGN)：**高能量天體源自於星系中超大質量黑洞吸積所提供能量。