



ICECUBE
NEUTRINO OBSERVATORY

重力波與高能微中子之深度多信使聯合搜尋

背景

在地球上，我們透過偵測來自宇宙中各種天體現象（例如恆星碰撞、恆星爆炸、星系核心噴流等）的訊號來探究宇宙的奧秘。這些訊號也就是所謂的「信使」，主要分成三大類：電磁波、重力波與粒子。人類已建造出極為靈敏的儀器，能偵測從宇宙遙遠深處到達地球的信使。

在過去十年，重力波以及來自天體的高能微中子皆已被獨立偵測到，並與電磁波進行聯合觀測。數十年前還被認為幾乎不可能達成的前瞻願景，如今已成為科研機構的旗艦任務。現在，我們稱這個願景為「多信使天文學」。

多信使天文學在過去十年間快速發展得極為快速。截至目前，我們已偵測到超過兩百起重力波事件，其中包括雙黑洞合併、雙中子星合併，以及中子星 - 黑洞合併。同時，微中子偵測器也積累了前所未有的大量資料。其中，對合併中的雙中子星系統所進行的突破性多信使觀測確立了重力波的來源與跨越整個電磁波譜（自伽瑪射線至無線電波）的輻射之間的關聯。然而，在多信使天文學裡，理論上應該會存在的高能微中子卻仍未被偵測到。另一方面，來自同一天體的微中子與重力波訊號，可能隨時抵達地球。若能達成聯合偵測，將大幅增進我們對宇宙與及天文物理過程的理解。

IceCube 偵測器

位於南極地底下數公里處的 IceCube 高能微中子偵測器，利用一立方公里的純淨冰層作為探測介質。IceCube 部署了 5160 個先進光學模組，用以偵測微中子在冰中產生的光訊號。其運作正常率超過 99%，可觀測來自全天空的微中子事件。

IceCube 已觀測到多種類型的微中子來源，包括瀰散背景（可能含未解析的點源）、類星體 TXS 0506+056、活躍星系 NGC 1068、以及來自銀河系的訊號。

（圖片來源：IceCube / NSF）



多信使搜尋

包含重力波的多信使搜尋首次興起於二十多年前，並引領了近年來一些最重要的天文發現。既然天體可能同時發射多種信使，將不同儀器的資料整合並一起分析則是再自然不過。若能在重疊的天空區域與時間窗口中觀察到來自同一來源的訊號，那即是非常重要的科學發現，而這正是多信使搜尋技術的核心理念。重力波攜帶著天體來源的「指紋」，例如合併天體的質量與自旋；而微中子則提供互補資訊，其訊號為真的可能性能由其在偵測器中沉積的能量來推斷。然而，多數偵測到的微中子事件皆是來自地球大氣的背景訊號，而非來自於天體。同樣地，在重力波資料中，除了訊號明顯的事件外，還有大量較弱的次臨界候選訊號存在，其因強度不足而尚無法宣稱為正式事件。我們利用 LIGO、Virgo 與 IceCube 三個觀測站的資料，進行了多信使候選事件的回溯分析。本研究中，我們將所有重力波候選事件納入分析。其中亦包含次臨界事件，因為可能存在對應的微中子事件將提高這些次臨界訊號的可靠性至候選事件的偵測門檻。



LLAMA 數據分析軟體套件

這項搜尋任務是透過多功能的 LLAMA (Low-Latency Algorithm for Multimessenger Astrophysics; 多信使天文物理低延遲演算法) 系統進行。LLAMA 由哥倫比亞大學的研究團隊開發，是首個重力波即時數據分析管線軟體。目前的軟體套件匯聚了自 2006 年起持續投入、具高效率且具領導性的研究成果，其最初目標為搜尋同時產生重力波與高能微中子的天體。LLAMA 採用最先進的貝氏統計 (Bayesian statistics) 框架，能在等價的基礎上評估來自所有信使的觀測數據。LLAMA 建立了一個單一的「虛擬探測器」，將重力波、微中子與電磁波的觀測進行最佳化整合。它能評估不同信使是否確實源自同一個天文物理波源，而非僅是隨機的巧合。LLAMA 既能像本研究一樣處理檔案數據 (archival data)，也能以即時 (real-time) 模式運作，在偵測到聯合候選信號後，立即提醒天文學家將望遠鏡對準該方向進行觀測。

結果與展望

涉及高能微中子與重力波的宇宙事件若能被發現並以多信使方式觀測，將有助於我們理解這些天體的動力學、高能微中子與宇宙線的起源，以及重力波來源所產生的高能輻射。這些成果也能提升電磁波後繼觀測的效率。本研究中，透過分析 LIGO、Virgo 與可能同時出現的 IceCube 候選事件，資料量相比過往大幅增加，使我們能進行更深入、全面的搜尋。

LLAMA (Low-Latency Algorithm for Multimessenger Astrophysics) 的資料分析使用模型導向的最佳化統計方法，並應用於所有 LIGO - Virgo - KAGRA 第三期觀測的正式與次臨界重力波事件，以及對應時間上重疊的 IceCube 微中子事件。我們在重力波事件時間的前後 1000 秒內搜尋可能的微中子事件。儘管並未在個別事件中發現顯著的微中子訊號，但聯合天空分佈圖顯示，多信使搜尋能有效指引電磁波望遠鏡的觀測策略。

雖然目前尚未偵測到相關的訊號，本研究仍對涉及重力波與微中子的宇宙多信使來源族群提供了關鍵限制。特別是在極高能與各向同性輻射的情境中，這些更嚴謹的上限有助於釐清能夠發射高能微中子的重

力波事件所佔的比例。此外，結果顯示，重力波與高能微中子的聯合觀測目前受到微中子探測靈敏度的限制，進一步突顯發展下一代微中子探測器的重要性。

接續的觀測期間，LLAMA 的即時多信使搜尋已持續運作於正式與次臨界事件資料上。這些即時搜尋已展現更高效能，拓展了可探索的緻密天體合併事件範圍，並提高未來獵捕重力波 - 微中子共同源的機率。

源自論文的圖表

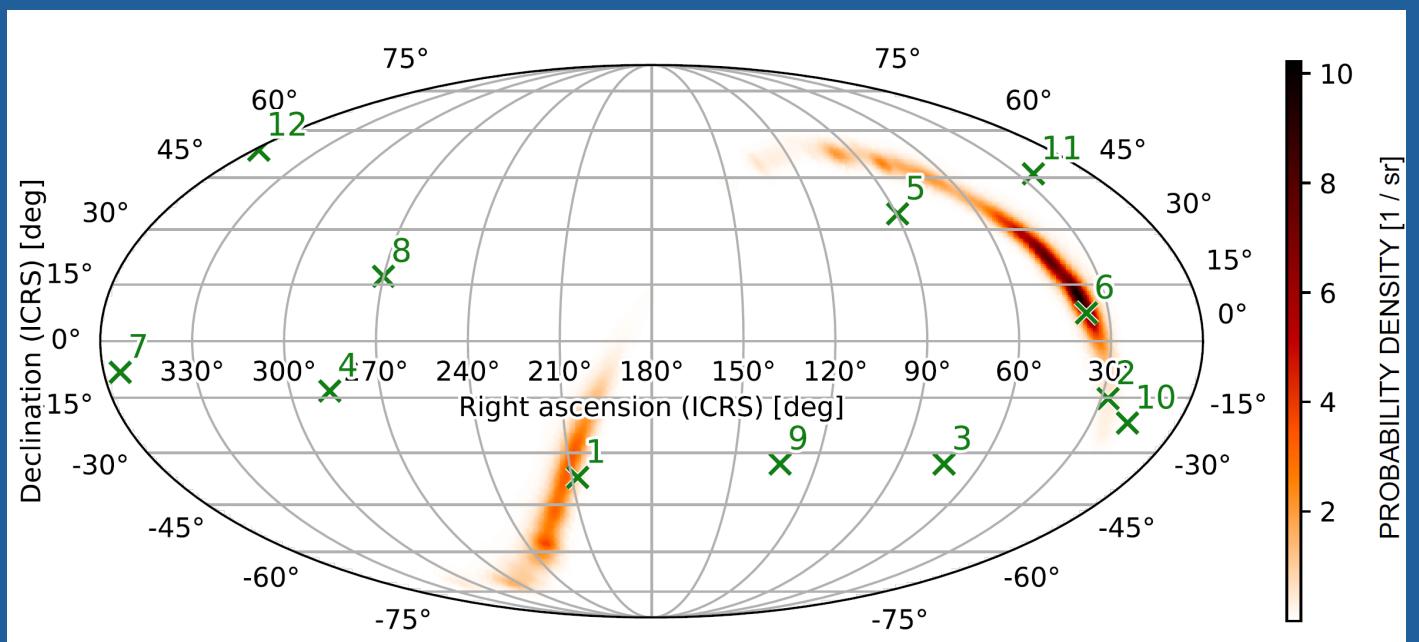


圖 1：聯合星圖顯示與 2020 年 1 月 4 日 UTC 03:08:48 之雙中子星重力波候選事件重合的所有微中子候選訊號。在雙星合併詮釋下的 O3 次臨界值觸發數據中，微中子 6 號（Neutrino#6）為最具顯著性的候選訊號。

目前正在設計中的第三代重力波探測器，旨在將其可達的宇宙觀測體積提升數個數量級。同時，下一代 IceCube 微中子觀測站預計大幅提升儀器體積，並能偵測高達數百 PeV 的微中子 ($1 \text{ PeV} = 10^{15}$ 電子伏特)。隨著這些未來探測器的啟用，我們預期觀測事件的發生率與資料品質將大幅提升，並為透過 LLAMA 進行涵蓋微中子、電磁波與重力波等信使的全面性多信使研究，開啟嶄新的契機。

論文原文:



Arxiv 版本:



相關數據:



深入閱讀

貝氏統計 (Bayesian statistics)：由於目前尚不存在完美的獨立於模型之外的多信使搜尋方式，因此在分析中納入關於假設天文物理波源以及探測器的事前資訊 (prior information)，以辨別觀測到的重合事件之顯著性，是一個必然的選擇。這種使用事前知識 (prior knowledge) 的方法，與另一種也廣泛使用的頻率論 (frequentist) 方法有所不同，後者是透過重複且精心設計的實驗來評估顯著性。

IceCube-Gen2 有什麼新進展？請至 <https://icecube-gen2.wisc.edu/> 了解南極微中子探測的未來，一窺它如何引領並改變多信使天文物理學的新時代。

造訪我們的網站：

- 了解重力波及其偵測：www.ligo.org、www.virgo-gw.eu、gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp
- 了解微中子與 IceCube 微中子觀測站：<https://icecube.wisc.edu/>

翻譯：Albert Kong (NTHU)；校對：Po-Ya Wang (NTHU)