

天聞

中華民國 112年 冬季號



中研院天文所季報
ASIAA Quarterly Press
<http://www.asiaa.sinica.edu.tw>

進擊的 BURSTT

位於中研院環變中心富貴角研究站的BURSTT支站。

©曾耀寰/中研院天文所

快速電波爆天文學研究的新紀元

作者 吳曉晗 | 加拿大理論天文物理研究所博士後研究員

2007年，一些觀測脈衝星的天文學家發現了一個奇怪的信號。不同於銀河系內的脈衝星，這個一閃而過的信號極其明亮，而從接收到的電磁波性質來判斷，這個信號似乎來自於遙遠的銀河系外。此後的10年間，人們又陸陸續續的發現了30個類似的信號，並給了這類信號一個名字：快速電波爆。

快速電波爆這個名字已詮釋了它們的屬性：「快速」意味著信號一閃而過，持續往往不到千分之一秒；「電波」代表它們被觀測到的電磁波段，而且這個頻率的範圍和手機信號有很大重疊；「爆」表示有很大能量在極短時間內輸出，能

在千分之一秒輻射出概等於太陽在一個月裡輻射出的能量。到目前為止，人們已經發現了上千起快速電波爆，但依舊不知道它們的起源為何。目前提出的50多種快速電波爆起源的理論中，包括磁星、黑洞合併，甚至外星人等等，每一種都無法解釋所有的觀測現象。而無法確定快速電波爆起源的其中一個原因，是因為絕大部分快速電波爆，我們都不知道它們來自哪兒。

前面說到2007年第一個發現的快速電波爆來自銀河系之外，這個推斷源於電波的色散效應。類似於可見光經過三稜鏡時會被色散成彩虹，電波經過宇宙中高溫的電

離氣體時也會被「色散」，導致高頻率的電磁波比低頻率的要早一些抵達地球。天文學家便根據這個時間差來測量電波穿過了多少電離氣體。因為宇宙中到處充滿了高溫的電離氣體，我們便可以估算快速電波爆起源的地點距離我們有多遠。我們發現，迄今為止發現的上千個快速電波爆中除了一個來自銀河系內，其它都源於千萬光年甚至數十億光年外。所以要想知道快速電波爆如何起源，就必須能夠定位它的宿主星系。

然而現今大部分的電波望遠鏡都不具備精確定位快速電波爆的能力，導致我們已經觀測到的上千個快速電波爆當中，



快速電波爆示意圖。©Danielle Futselaar

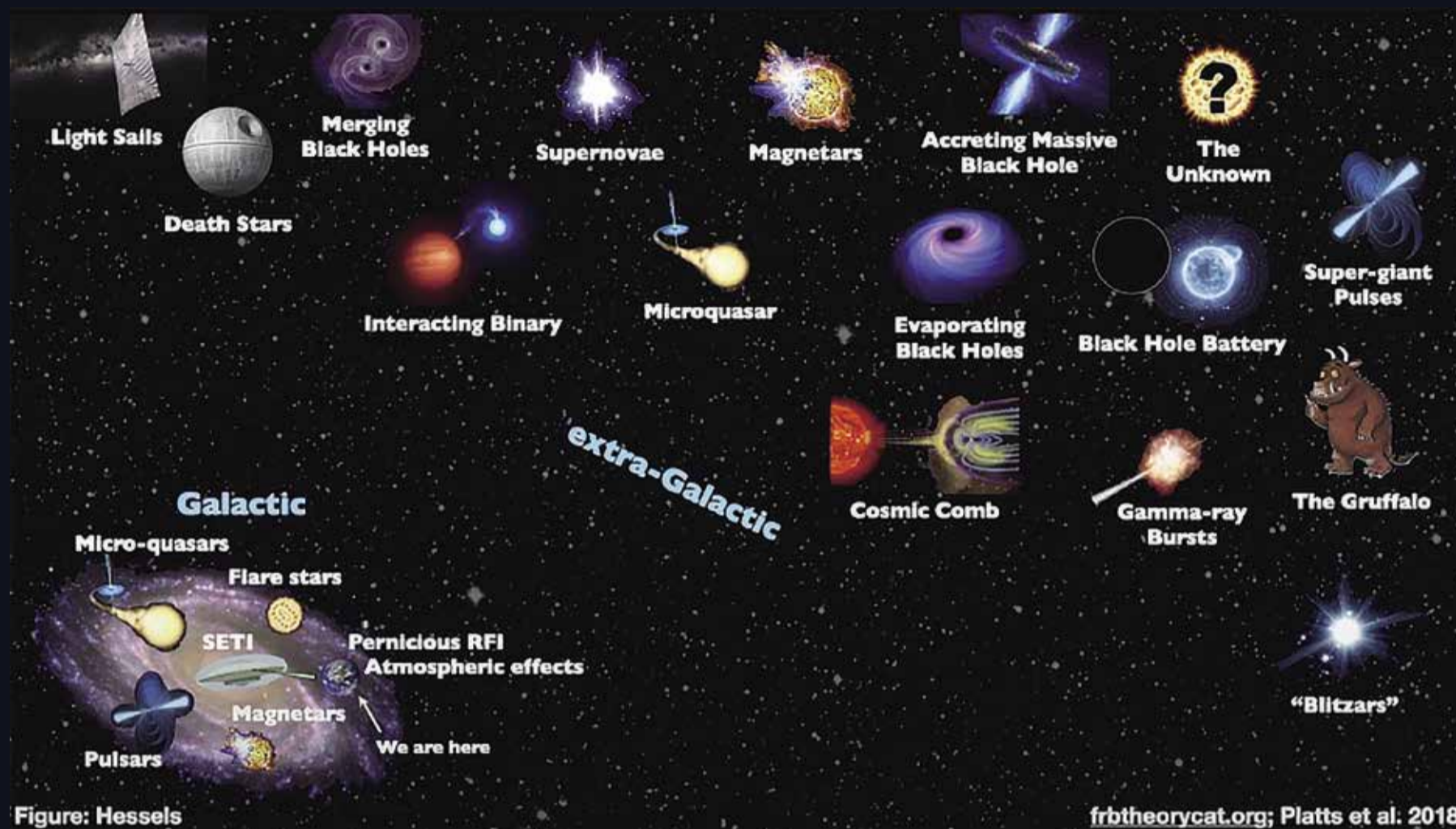


Figure: Hessels

frbtheorycat.org; Platts et al. 2018

快速電波爆的起源模型合集。©Jason Hessels

找到宿主星系的只有幾十個。類似人類雙眼位置不同導致的視網膜上成像差異，使得人眼具有探知景深的能力，定位快速電波爆也需要兩個以上、相隔一定距離的望遠鏡同時觀測，通過電波到達不同望遠鏡的時間差來獲取快速電波爆的位置。然而定位一個千萬光年甚至幾十億光年遠的快速電波爆，需要達到萬分之一度的定位精度，這就需要充當「眼睛」的望遠鏡間距夠大，才能獲得足夠大的時間差。

臺灣宇宙電波廣角監測實驗 (BURSTT) 計畫透過將不同的望遠鏡放置相隔幾十甚至幾千公里來精確定位快速電波爆。BURSTT 將由位於臺灣北部一個擁有 256 個天線的主站以及其它位於臺灣和夏威夷的支站組成，位於臺灣的站點間相距 60 到 270 公里遠，而臺灣和夏威夷則相隔 7800 公里遠。如此長的基線可以實現萬分之一到千萬分之一度的定位精度，屆時將有大量的快速電波爆找到宿主星系，推進快速電波爆的研究。

除了精確定位快速電波爆，BURSTT 的另一個特性是「廣角」，因為它的觀測視野能達到 100 多度。如此大的視野使得 BURSTT 能夠回答關於快速電波爆的另一個重要問題：到底有多少快速電波爆是會重複的。現今已知的快速電波爆當中，有幾十個被發現會重複發生，而剩下的都只接收到一次。然而當今觀測快速電波爆的望遠鏡視野都很有限，很可能某些快速電波爆是重複的，但

當它們的信號第二次到達地球時，望遠鏡朝向另一個方向，我們接收不到這些信號。擁有廣角的觀測視野便能大大改善這個問題，而更了解快速電波爆的重複與不可重複性及起源問題。

廣角所帶來的好處，是 BURSTT 將致力於觀測那些離我們比較近、亮度比較高的快速電波爆。這就像是用單眼反光相機拍攝時，會用較小視野的長焦鏡頭，同時配備更長的曝光時間來拍攝那些離我們比較遠、亮度比較低的物體。而用大視野的廣角鏡頭收錄周遭的一切時，如果視野裡有個路燈，就很容易過度曝光，所以不需要很長的快門時間。目前已有的觀測快速電波爆的望遠鏡就類似於前者，而 BURSTT 類似於後者。BURSTT 預計每週可以觀測到數個鄰近的快速電波爆，因為我們已經對鄰近宇宙做過許多的多波段觀測，可以更容易將快速電波爆及其宿主星系的觀測与其它波段的觀測資料聯繫起來，進而對快速電波爆的起源有更深的瞭解。

知道快速電波爆是如何起源的，便可以用來研究其它的天文物理過程。例如前文提到的電波會被高溫的電離氣體色散，可以勾勒快速電波爆傳輸過程中所經過的氣體「地圖」。有了這個地圖，我們可以用來研究星系的形成與演化，甚至可以藉此研究宇宙的膨脹及宇宙學模型。總之，快速電波爆是當今天文學研究的重要前沿，BURSTT 以及其它觀測快速電波爆的計畫將引領天文學研究的新紀元。



距離我們約 1200 萬光年的螺旋星系 M81，在外圍的球狀星團裡曾偵測到一個快速電波爆。© 王為豪 / 中研院天文所



台灣宇宙電波爆廣角監測實驗

——找尋轉瞬即逝的神秘宇宙電波來源——

作者 王士豪

台灣宇宙電波爆廣角監測實驗 (Bustling Universe Radio Survey Telescope in Taiwan, 簡稱 BURSTT) 的首要任務是要探究宇宙中來源未明的快速電波爆 (Fast Radio Burst, 簡稱 FRB, 參見天間季報 2020 年秋季號), 因此在設計上至少要具備兩種能力: 一是能隨時監測廣闊天區並高效地捕捉短暫的脈衝訊號, 才可以快速累積 FRB 的觀測數量, 讓天文學家能分門別類歸納出 FRB 的特性; 二要有足夠的角解析度來精準定向 FRB 訊號來源, 以便和其他波段的望遠鏡作協同觀測, 來研究來源的天體和爆發的機制。

BURSTT 的觀測頻段為 300–800 MHz 的電波, 使用相位天線陣列 (phased antenna array) 的技術來達成廣天區的脈衝監測。相位陣列是由眾多的天線排列組成, 藉由將各個天線接收到的訊號數位化後再合成疊加, 達到有如一面與陣列總面積同等的大型天線的觀測效果。比起單面大天線, 相位陣列有許多優點: 一來天線的擺放固定不需調整, 可省去轉動天線的機械構件和建造成本。二來天線數量可以逐步擴增, 提升靈敏度。三是藉由調整每個天線彼此間的數位訊號延遲時間差 (相位差), 即可讓陣列同時對多個不同方向做觀測——對於給定入射方向的電波, 每個天線因位置不同, 所以接收到訊號的時間彼此會有差異; 只要在數位訊號處理時補償每支天線的接收時間差, 就可以讓所有天線的訊號建設性相加, 使陣列對這個方向特別靈敏。

目前已知的 FRB 僅有上千個且大多來自銀河系外, 為了要定位 FRB 所在的宿主星系, BURSTT 的角解析度至少需達到 1 角秒, 設計上會由一個規模較大的主要天線陣列 (主站), 加上數個與主站相距 100 公里以上的周邊天線陣列 (支站) 組成。臺灣本島大小及與外島的距離恰好符合條件。

那麼天線站要建在哪裡好呢? 站址的首要考量是人為的電波干擾要越低越好。BURSTT 的觀測頻段涵蓋了無線電視與 4G 行動網路使用的頻率, 這些帶來生活便利的電波訊號對電波天文學家來說反倒成為了「光害」。此外許多電子產品、電源或動力設備的內有開關電路, 或是會產生電弧 (如電燈、整流器、馬達等) 的設備, 也會反覆產生脈衝電波干擾觀測。由於台灣地狹人稠, 且通訊基地台的涵蓋率高, 因此理想的觀測地點是偏遠地區的山谷中或是少人居住的離島, 利用地

形和距離來屏蔽和降低干擾。但是設站還得考量到便利性如交通、電力、網路等基礎設施, 以便建造、維護、開發測試階段的系統調整。

因此我們在臺灣本島和外島各地進行一系列的實地探勘並量測當地電波背景雜訊後, 選定主站設在被原始山林環繞的宜蘭福山植物園, 支站則選在南投鹿谷的台大實驗林、還有富貴角及綠島的中研院研究站內。我們另外也正在評估籌畫距離更遠的東沙島, 以及國外如夏威夷、泰國、日本和印度等地建站。

目前 BURSTT 主站已安裝了 64 支天線, 南投和富貴角的支站則各有 16 支在進行觀測。台灣的氣候日照強、高溫多雨、不時還有颱風, 所以這些戶外設備在設計上必須要抗紫外線、抗強風、防水、散熱; 在海邊還需要抗鹽蝕、山上則要防止可能有猴子、山豬等野生動物來干擾。另外電子設備還需要能屏蔽電波干擾——不讓觀測系統本身產生的雜訊干擾觀測, 也不讓外界的電波干擾從天線以外的地方被接收。這些性能目前正在各站進行長時間的測試和評估。

BURSTT 的另一個挑戰是即時運算處理大量的資料——一個有 256 支天線的主要陣列資料流量約每秒 100 GB。這些要靠資料擷取系統中的高效能運算設備, 其工作包括將電波訊號數位化、轉換成頻譜、調整相位差並將訊號合成、然後再自動判別是否有疑似 FRB 的脈衝訊號在其中。因為儲存空間有限, 只有當訊號符合某些觸發條件時, 系統才會將資料儲存到硬碟裡 (類似道路上的測速照相, 車輛超速才會拍照)。主站被觸發後立刻會傳送通知給支站們作同步觀測並儲存資料。另外要如何將主站和支站的時間同步達到 1 奈秒以內的精準度來進行特長基線干涉 (VLBI), 也是現階段開發的重點之一。

目前 BURSTT 正在追蹤觀測天空中明亮的電波源, 如太陽、脈衝星、電波星系等, 逐步驗證系統的性能, 同時也在調整演算法來降低雜訊干擾以提高靈敏度。BURSTT 計畫的主站 (256 支天線) 和支站們 (64 支天線) 將在明年落成, 預計每天約能偵測到 1 個 FRB 事件。期待穩定的事件累積, 能解答快速電波爆之謎。

目前正在建造和測試中的 BURSTT 天線站：位於宜蘭福山植物園的主站（上圖）、及分別位於台灣北端的中研院環變中心富貴角研究站（中圖）和南投台大實驗林（下圖）的支站。
圖中黑色的是接收天線、旁邊的盒子內有放大器和濾波器，連接到附近的資料擷取系統。© 曾耀寰，王士豪 / 中研院天文所





本所於 2023 年 11 月 6-10 日舉辦脈衝星閃爍儀會議 (1 ~ 4)，並邀請今年邵逸夫天文學獎得主 Duncan Lorimer 教授於 11 月 8 日晚間給科普演講，Lorimer 教授還當場在季報上親筆簽名 (5 ~ 8)。© 中研院天文所

1	2	3	4
5	6	7	
8			

天間季報編輯群感謝各位閱讀本期內容。本季報由中央研究院天文所發行，旨在報導本所相關研究成果、天文動態及發表於國際的天文新知等，提供中學以上師生及一般民眾作為天文教學參考資源。歡迎各界來信提供您的迴響、讀後心得、天文問題或是建議指教。來信請寄至：「臺北市羅斯福路四段 1 號 中央研究院 / 臺灣大學天文數學館 11 樓 中央研究院天文所天間季報編輯小組收」。歡迎各級學校師生提供天文相關活動訊息，有機會在天間季報上刊登喔！

發行人 | 彭威禮 執行主編 | 周美吟 美術編輯 | 王韻青、楊翔伊 執行編輯 | 曾耀寰、劉君帆

發行單位 | 中央研究院天文及天文物理研究所 天間季報版權所有 | 中研院天文所 ISSN | 2311-7281 GPN | 2009905151

地址 | 中央研究院 / 臺灣大學天文數學館 11 樓 (臺北市羅斯福路四段 1 號) 電話 | (02) 2366-5415 電子信箱 | epo@asiaa.sinica.edu.tw

