

天文研究中的大數據與快速電波爆發

胡欽評¹

¹ 國立彰化師範大學

E-Mail: cphu0821@gm.ncue.edu.tw

一、前言

隨著電腦硬體的進步，人類累積的資料量以驚人的速度成長。大數據（或巨量資料）是近年來頻繁被提及的名詞，即使仍未被嚴謹地定義，卻在各領域內佔有舉足輕重的地位。然而，也有部份學者認為「大數據」只不過是一個譁眾取寵的用語。的確，在該詞彙問世之前，許多研究已經依賴龐大的數據。而且資料的累積與分析技術的進步，需要時間慢慢發酵。千里之行，始於足下。在大數據分析背後，堅實的統計學基礎依然不可或缺。

天文學是一門古老的科學，同時也是人類知識的最前沿。早在 16 世紀，好幾代天文學家們的觀測，累積了大量行星運動的數據。克卜勒在沒有電腦的幫助下，便能從這些資料中歸納出行星運動定律。現在即使有了先進的電腦技術，但在沒有適當背景知識的情況下，要從相同的資料中洞察科學結論仍然非常具有挑戰性。由這個故事我們知道，天文學家們自古以來便是時常與大量資料打交道的一群人。同時，天文學家們也善於利用最新科技。例如，電荷耦合元件 (CCD) 於 1970 年代誕生 [1]。而 1975 年起 [2]，全球各大天文台便開始逐步採用 CCD，比數位相機普及還早了 20 年以上。因此，天文用的 CCD 發展出一套特殊的運作機制和檔案格式。

二、天文領域的大數據與資料共享

由於天文觀測的資料很早就開始數位化，天文觀測的數位資料已經累積了相當長的一段時間。以筆者熟悉的高能天文觀測為例，因為 X 射線和伽馬射線望遠鏡需要置於大氣層之外，早期只有少數國家具備儀器開發的能力。為了使經費的效益達到最大化，每一筆觀測資料都會在網路上公開，這已成為該領域的共識與慣例。研究者在獲得觀測資料後，最多僅能保留一年的獨家使用權（某些望遠鏡可能僅半年或更短），隨後這些資料就會向全世界公開，供任何人下載研究。從 1990 年代至 2022 年，美國航空與太空總署 (NASA) 的高能

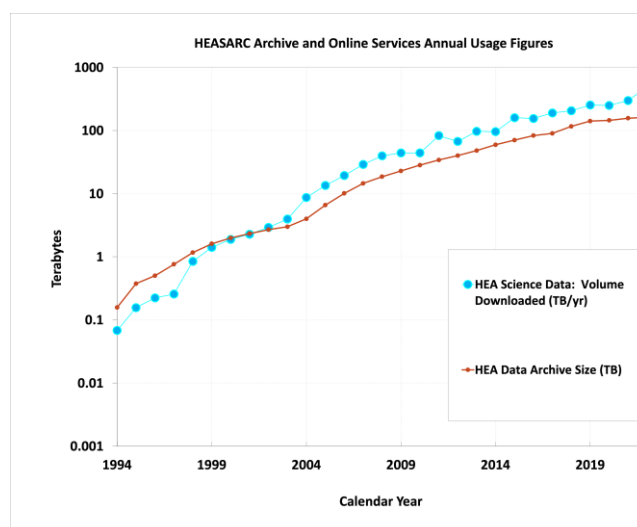


圖 1. HEASARC 的數據量隨時間的累積，以及每年下載量隨時間的成長。圖片來源：HEASARC Usage Statistics

天文物理學數據中心 (HEASARC) 已累積了 160 TB 的資料 (圖 1) [3]。要知道來自天體的 X 射線光子比日本製造的壓縮機還稀少，能累積這如此多的資料絕非易事。

近年來，資料共享的熱潮逐漸席捲天文學界。諸多光學巡天計畫，初始目的是尋找天空中出現的超新星、近地小行星、古柏帶天體等。為了即時捕捉天空中光度變化或是移動的天體，這些計畫需要持續地進行拍攝。這批累積下來的資料對其他科學研究也具有珍貴的意義。然而，因可見光的光子數量眾多，某些觀測站由於資料量過大，可能不會將全部原始資料公開。其中巨量資料的代表之一便是下一代的巡天計畫 Vera C. Rubin Observatory。該天文台預計每晚將產生 20 TB 的觀測資料，十年內將累積高達 60 PB 的原始資料，再加上後續的資料處理，總量可能高達數百 PB [4]。因此，不論是否有分享原始數據，這些天文台都會分享經過整理和處理後，具有科學研究價值的資料，如光變曲線、光譜及位置等。值得注意的是，即使僅是這些處理後的資訊，其資料量仍然相當驚人。例如，Vera C. Rubin Observatory 的目錄資料預計就高達 20 PB。

在資料增長飛快的時代，針對大量資料的分析技巧至關重要。過去，我們透過人力就能達成卓越的科學成果。例如，當發現新的天體時，首要工作就是進行分類。在 20 世紀初，幾位女性天文學家們，例如 Annie Jump Cannon，透過恆星光譜的分類，奠定了人們了解恆星形成與演化的重要基礎 (圖 2)。到了 1970 年代，科學家們意外地偵測到了來自宇宙中的伽瑪射線爆發，開啟了人類用極高能量光子探索宇宙的一扇門。在發現之初，分類仍是最重要的第一步。依照爆發的時間尺度和重複性，伽馬射線爆發可以被分為長於 2 秒的長爆發，短於 2 秒的短爆發，以及能量相對較低且會重複的軟伽馬射線重複爆發等 [5]。不同的觀測特性意味著背後可能有不同的物理機制。透過分類和後續的多波段觀測，人們才得以了解這些事件的成因。在未來，天文學家們需要更多先進的工具來面對快速增長的資料量。



圖 2. Annie Jump Cannon 正仔細檢查照相板上的恆星光譜。他發明的恆星光譜分類法持續延用至今。圖片來源：Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics

三、快速電波爆發：一個快速成長的新領域

在 2000 年後，天文學家們發現了一種與伽馬射線爆發類似，可能同樣具有重大意義的現象，稱為快速電波爆發 (Fast Radio Bursts, FRBs)。FRB 是一種時間尺度極短 (約毫秒等級)，但能量巨大的無線電脈衝訊號。在發現之初的十幾年間，平均每年只能偵測到數個 FRB [6]。這導致一個有趣的情況：在 2018 年以前，解釋 FRB 的理論模型數量比偵測到的 FRB 還多

[7]。即使如此，根據觀測到的特性，FRB 大致可分為重複爆發源 (repeating FRB) 和可能不會重複爆發的 non-repeating FRB [8]。然而，它們背後的成因仍是一大未解之謎。

2018 年後，越來越多無線電天文台投入 FRB 的探測，使得 FRB 偵測到的數量快速地增長。其中 Canadian Hydrogen Intensity Mapping Experiment (CHIME) 是最受矚目的天文台。在 2021 年出版的 CHIME FRB 目錄已偵測到超過 500 個 FRB [9]，這個數量是過去近 20 年偵測到的 10 倍以上 (圖 3)。隨著更多觀測站的投入，可預期將來 FRB 的數量將快速地成長。值得一提的是，台灣在 FRB 相關的研究沒有缺席。由中研院天文所主導的一項台灣宇宙電波爆廣角監測實驗 (Bustling Universe Radio Survey Telescope in Taiwan) 在不久的將來也將投入監測天空中的無線電訊號 [10]。

CHIME 的成就斐然，其中有兩個值得注意的特殊的事件。首先是 FRB180916，它是一個重複爆發源。有趣的是，它的爆發呈現了 16.5 天的週期性 [11]。這個時間尺度的週期性代表它極有可能源自於雙星系統。另一個事件是 FRB 200428，它源自於一個正處於活躍狀態的磁星，SGR 1935+2154。這是人類首次在銀河系內偵測到 FRB，並證實了強大的磁場活動可能是 FRB 的其中一個來源 [12]。而在 FRB 爆發時，Insight-HXMT 也捕捉到了它的 X 射線短爆發，這是人類首次觀測到 FRB 在其他波段的輻射 [13]。

這個結果同時也暗示一部份年輕脈衝星的巨大無線脈衝訊號 (Giant Radio Pulses, GRPs) 可能也是 FRB 的來源。筆者所屬的 NICER 太空望遠鏡團隊便曾於 2017 至 2019 年間，利用 NICER 與地面的無線電天文台聯合監測由蟹狀星雲脈衝星所發出，相當大量的 X 射線光子 (總數約為 10^9 個)。經過分析後，我們確認了在發生 GRP 時，脈衝星的 X 射線輻射有增強的現象 (圖 4) [14]。

2022 年時，SGR 1935+2154 再度爆發。本團隊利用更密集的觀測與更大量的資料，進一步追蹤磁星自轉週期的細微變化。我們發現 FRB 發生前兩個小時，X 射線先劇烈地增強。然而，在更早之前，磁星的自轉週期便已產生了劇烈的變化，這個現象稱為 glitch。目前對

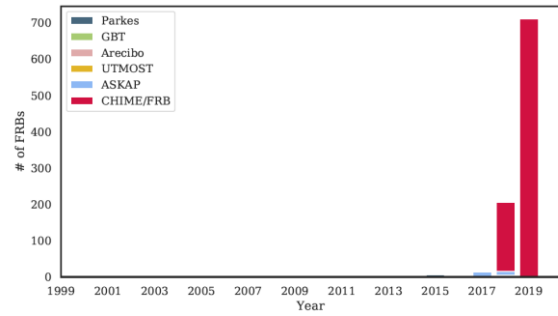


圖 3. CHIME 加入 FRB 的搜尋計畫之後，偵測到的 FRB 數量呈現驚人的成長。圖表來源：CHIME/FRB Collaboration.

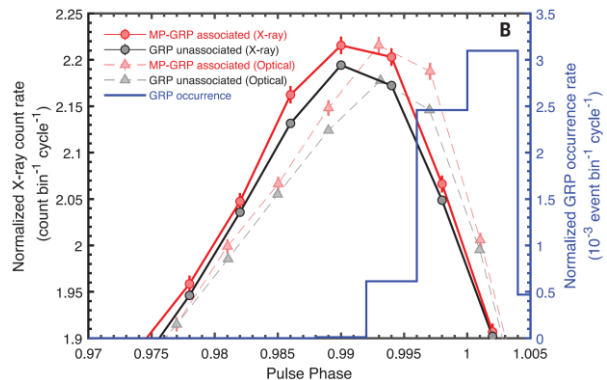


圖 4. 蟹狀星雲脈衝星在發出 GRP 時的 X 射線 (紅色實線) 比沒有發出 GRP 時的 X 射線 (灰色實線) 還亮。這是在可見光波段 (虛線) 後，首次在更高能量的波段看到亮度增強的現象 [14]。

glitch 的解釋是中子星內部快速旋轉的超流體與其他部份結合時，帶動星體的自轉加速 [15]。而磁場可能因此受到扭曲，釋放出大量的能量。這是人類首次找到 FRB、X 射線活動，以及磁星內部變化的連結（該論文正在審核中）。

除了特定事件外，FRB 仍有一大哉問：所謂「不會重複爆發」的 FRB，是否將來有機會重複爆發，只是由於我們的巡天時間太短，尚未捕捉到其第二次的爆發？如果這兩種 FRB 在本質上存在差異，那麼在其他層面上，它們很可能會呈現不同的特性。得益於機器學習技術的持續發展，天文學家可以利用先進的資料分群演算法來探索這一課題。清大與中興的 FRB 研究團隊便運用此一技術，識別出可能潛在的 repeating FRB 候選者（圖 5）[16]。這些 FRB 將是後續追蹤觀測的重點對象。

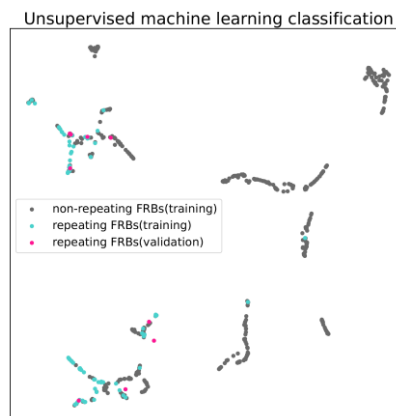


圖 5. 利用非監督式學習，天文學家嘗試找出潛在的 repeating FRBs [16].

四、結語

在 21 世紀，天文學與資料科學交織發展，在天文學的各領域中取得長足的進展。特別是 FRB 這類短暫而強烈的無線電脈衝訊號仍帶有眾多謎團。隨著觀測工具的投入與數據的累積，再加上先進演算法的應用，科學家們正慢慢地揭開它神秘的面紗。同時，科學家也將嘗試把 FRB 變成一個探索宇宙本質的工具。台灣在此領域也有所貢獻，未來將持續深化研究，進一步解開宇宙之謎。

參考文獻

- [1] W. S. Boyle and G. E. Smith, "Charge coupled semiconductor devices," in *JPL Conference*, 19770010339, 1976.
- [2] B. A. Smith, "Astronomical imaging applications for CCDs," in *JPL Conf. on Charge-Coupled Device Technol. and Appls.*, 19770010339, 1976.
- [3] "HEASARC Usage Statistics," [Online]. Available: https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/heasarc/stats/stats.html#arch_data.
- [4] "Data Management of Vera C. Rubin Observatory," [Online]. Available: <https://www.lsst.org/about/dm>.
- [5] C. Kouveliotou, C. A. Meegan and G. J. Fishman, "Identification of Two Classes of Gamma-Ray Bursts," *Astrophysical Journal Letters*, vol. 413, p. 101, 1993.
- [6] E. Petroff, E. D. Barr, A. Jameson, E. F. Keane, M. Bailes, M. Kramer, V. Morello, D. Tabbara and

- W. van Straten, "FRBCAT: The Fast Radio Burst Catalogue," *Publications of the Astronomical Society of Australia*, vol. 33, p. 45, 2016.
- [7] E. Platts, A. Weltman, A. Walters, S. P. Tendulkar, J. E. B. Gordin and S. Kandhai, "A living theory catalogue for fast radio bursts," *Physics Reports*, vol. 821, p. 1, 2019.
 - [8] L. G. Spitler, P. Scholz, J. W. T. Hessels, S. Bogdanov and A. Brazier, "A repeating fast radio burst," *Nature*, no. 531, p. 202, 2016.
 - [9] CHIME/FRB Collaboration et al., *The Astrophysical Journal Supplement Series*, vol. 257, p. 59, 2021.
 - [10] H.-H. Lin,, K.-Y. Lin, C.-T. Li, Y.-H. Tseng and H. Jiang, "BURSTT: Bustling Universe Radio Survey Telescope in Taiwan," *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, vol. 134, p. 094106, 2022.
 - [11] CHIME/FRB Collaboration, "Periodic activity from a fast radio burst source," *Nature*, vol. 582, p. 351, 2020.
 - [12] CHIME/FRB Collaboration, "A bright millisecond-duration radio burst from a Galactic magnetar," vol. 587, p. 54, 2020.
 - [13] C. K. Li, L. Lin, S. L. Xiong, M. Y. Ge and X. B. Li, "HXMT identification of a non-thermal X-ray burst from SGR J1935+2154 and with FRB 200428," *Nature Astronomy*, vol. 5, p. 378, 2021.
 - [14] T. Enoto, T. Terasawa, S. Kisata, C.-P. Hu, S. Guillot, N. Lewandowska, C. Malacaria, P. S. Ray, W. C. G. Ho and A. K. Harding, "Enhanced x-ray emission coinciding with giant radio pulses from the Crab Pulsar," *Science*, vol. 372, p. 187, 2021.
 - [15] P. W. Anderson and N. Itoh, "Pulsar glitches and restlessness as a hard superfluidity phenomenon," *Nature*, vol. 256, p. 25, 1975.
 - [16] B. H. Chen, T. Hashimoto, T. Goto, S. J. Kim, D. J. D. Santos, A. L. On, T.-Y. Lu and T. Y.-Y. Hsiao, "Uncloaking hidden repeating fast radio bursts with unsupervised machine learning," *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 509, ,p. 1227, 1 2022.