



掃視無線電的天空

深度巡天陣列 DSA

無線電天文學（Radio Astronomy）是現代天文物理中的重要分支。這種長波長的電磁波雖然肉眼不可見，卻攜帶著宇宙天體的大量資訊。自1930年代天文學家首度使用無線電探測天空至今，短短不到一個世紀，以無線電望遠鏡取得的科學成果就四度獲得諾貝爾獎的肯定。如今，隨著電子技術的日新月異，天文學家也正不斷將最新的技術應用在無線電望遠鏡的建造上，讓我們能看得更廣、更遠。而由加州理工學院（Caltech）主導的深度巡天陣列（Deep Synoptic Array，簡稱DSA），將是未來幾年天文學家探索快速電波爆（FRB）、脈衝星（Pulsars）與其他天體的利器。

文／林彥興



深度巡天陣列DSA想像圖。圖片來源：DSA。

無線電望遠鏡的工作原理 與深度巡天陣列的技術突破

說到無線電望遠鏡，多數人腦海中浮現的印象可能是在裏無人煙的深山或是荒漠中，一座數十公尺高的巨型盤狀天線，如圖1。這個印象雖然沒錯，世界上確實有很多單一盤面（Single Dish）的無線電望遠鏡，且有相當重要的科學意義，如圖2，但這些單一盤面式的無線電望遠鏡有其先天劣勢。

受限於工程技術，目前世界上最大的無線電望遠鏡直徑約為五百公尺，雖然這聽起來很大，但是考慮到無線電的波長，其能夠提供的角解析度僅有約1角分，也就是六十分之一度左右，與人眼相當，遠遠落

後於光學望遠鏡的水準。這會大大限制無線電望遠鏡的科學潛力。

因此，現代多數的無線電望遠鏡都是採用「干涉儀陣列」（Interferometric Array）的設計，由多個各自獨立的小天線組成。當每個天線同步觀測、儲存原始資料之後，天文學家可以藉由複雜的演算法將所有原始資料整合起來，計算出一張高解析度的影像，就好像讓這些小天線共同組成一個巨大的虛擬望遠鏡一般。大家熟知的SMA、ALMA、VLA等無線電望遠鏡，都是採用這樣的設計。原則上，小天線的數量越多，望遠鏡就越靈敏，代表可以拍到更暗的天體；小天線之間的距離越長，最終計算出來的影像角解析度就越高，代表成像越清晰。

圖 1



500公尺口徑球面無線電望遠鏡（Five-hundred-meter Aperture Spherical Telescope，簡稱FAST），是目前世界最大的單一盤面固定式無線電望遠鏡。影像來源：SCJiang

圖 2



綠堤無線電望遠鏡（Green Bank Telescope，簡稱GBT），是目前世界最大的單一盤面可動式無線電望遠鏡。影像來源：NRAO/AUI/NSF

深度巡天陣列也不例外。這個由加州理工學院領導的計畫，預計會在內華達沙漠中，大小約 20×16 公里的橢圓區域中，部署約1,650個直徑6.15公尺的無線電天線，這個數量比現役的MeerKAT，如圖3、ASKAP等望遠鏡，如圖4，要多了二十倍以上。之所以能夠部署這麼多，很大程度上要歸功於團隊使用了新開發的室溫無線電接收機（receiver），從而確保在性能相似的情況下，大幅降低了接收機的成本。當這些天線共同運作時，深度巡天陣列可以產出角解析度高達三角秒的無線電影像，並能以數百倍於現役無線電望遠鏡的效率迅速巡天。

但干涉儀陣列的設計也不是沒有缺點。當前限制干涉儀陣列發展的重要技術瓶頸之一，其實不在天線的盤面或是接收器本身，而在於干涉儀陣列產生的龐大資料量。以圖4的ASKAP望遠鏡為例，其一年產生的總資料量約在10 PB

(10^{16} Bytes) 的等級，因此光是儲存和傳輸這些資料就是一個很大的技術難題。而對於擁有1,650個天線的深度巡天陣列來說，如果繼續使用傳統方法，那他們將要面對的是每年20 EB $(2 \times 10^{19} \text{ Bytes})$ 等級的資料流。

那麼，這個問題有沒有辦法解決呢？研發深度巡天陣列的團隊認為，解方就是選擇不儲存這些龐大的「原始」資料，而是在觀測時就同步進行資料處理，然後只儲存計算出的影像。

為此他們開發了一套完整的無線電資料處理程式，並使用NVIDIA的GPU機櫃以進行每秒 10^{18} 次運算，以即時產生無線電影像。相較於傳統無線電干涉儀的「先儲存、後計算」，深度巡天陣列這套即時計算影像的做法，讓無線電觀測某些意義上變得與光學觀測更為相似，團隊因此稱這套系統為「無線電相機（Radio Camera）」。而與此同時，這強大的計算能力也會讓深度巡天陣列成為發現快速電波爆的利器。

圖 3



除了內文提到的SMA、ALMA與VLA之外，位於南非的MeerKAT也是當代重要的無線電望遠鏡陣列之一。影像來源：Square Kilometre Array Organisation (SKAO) /South African Radio Astronomy Observatory (SARAO)

圖 4



另外，位於澳洲的ASKAP亦是重要的無線電望遠鏡陣列之一。影像來源：Kim Steele, ICRAR

深度巡天陣列的科學目標 與未來展望

如果一切順利，當深度巡天陣列預計將運作至少五年的時間。其中：

①65%的時間將用於無線電巡天：其範圍將涵蓋深度巡天陣列所處的緯度所能看到的所有天空。這將包含數百萬個星系，上萬個新脈衝星、上千個棕矮星等天體。

②25%的時間將用於脈衝星計時陣列（Pulsar Timing Array）：藉由長期觀測毫秒脈衝星來探測來自宇宙早期或是超大質量黑洞合併產生的低頻「奈赫茲（ 10^{-9} Hz）」重力波。

③10%的時間將用於觀測LIGO等重力波探測器偵測到的雙中子星合併事件：尋找合併時產生噴流所發射的無線電訊號。

根據團隊於2025年底最新演講中提供的資訊，深度巡天陣列目前預計於2026下半年開工建造，並在2027年底至2028年進入試運轉（Commissioning Phase）。無線電天文學的新篇章，也許比你想得更早到來。

延伸閱讀：

1. History of Radio Astronomy: celebrating 90 years of innovation and discovery。
2. 拿下4次諾貝爾物理學獎的無線電天文學。
3. Gregg Hallinan (Caltech) The Deep Synoptic Array: Revolutionizing Access to the Radio Sky。

林彥興：加州大學聖地牙哥分校天文所博士生