

# 穿越銀河的閃電訊號——探索快速電波爆

煙火之所以美麗，是因為它遙遠且稍縱即逝，你唯一能做的，只有欣賞，以及回味。而宇宙也有屬於它自己的煙火，同樣遙遠，同樣稍縱即逝，就是快速電波爆 (Fast Radio Burst, 簡稱 FRB)，雖然我們無法以肉眼觀察他，但他所蘊含的能量與訊息，卻足以讓我們大致了解屬於自己宇宙的故事。

文／黃于綸

快速電波爆FRB 181112從遙遠的母星系出發，穿越宇宙並抵達地球的路徑。影像來源：M. Kornmesser, ESO

## 什麼是FRB？

Fast Radio Burst中文直接翻譯是快速電波爆，是在2007年才被觀測到的天文現象，它在宇宙深處引爆時擁有極高的能量 ( $L = 10^{38} \sim 10^{42} \text{erg}\cdot\text{s}^{-1}$ )，卻只有接近一毫秒的觀測時間。最有趣的是，由於近年才被澳洲的帕克斯電波望遠鏡 (Parkes Radio telescope)，如圖1，觀測到第一筆訊號，然而我們卻能在尚不完全知道其生成機制的情況下，利用它來觀測宇宙奧秘。就像逢年過節時看到的煙火一樣，不知道是誰、在哪、為什麼放，但仍能在遠處欣賞美麗的景色。

而FRB中，有些是會重複觀測到的重複源 (repeater)，就是同個源發出不只一次訊號，有些則是非重複源 (non-repeater)。當然，由於天文

學家不確定每個爆發源的週期，因此可能有些非重複源其實是因為周期太長，或是爆發時沒有被觀測到，而被誤判成非重複源。

目前FRB的起源與機制眾說紛紜，尚未有定論。科學家提出了多種模型來解釋FRB的來源，其中較主流的兩種理論分別是激變雙星模型 (Cataclysmic Binary Model) 與磁星模型 (Magnetar Model)。

其中激變雙星模型認為FRB可能來自劇烈的雙星合併事件，像是超大質量黑洞與中子星合併，或是由兩顆中子星合併。當兩個高質量星體合併時 (如黑洞與中子星的系統)，由於黑洞的引力太過強大，導致中子星因為潮汐力被撕裂，並在黑洞周圍形成吸積盤，而多餘的物質會被往外噴發，形成類似物質雲的結構。當吸積盤的物質被吸到黑洞裡

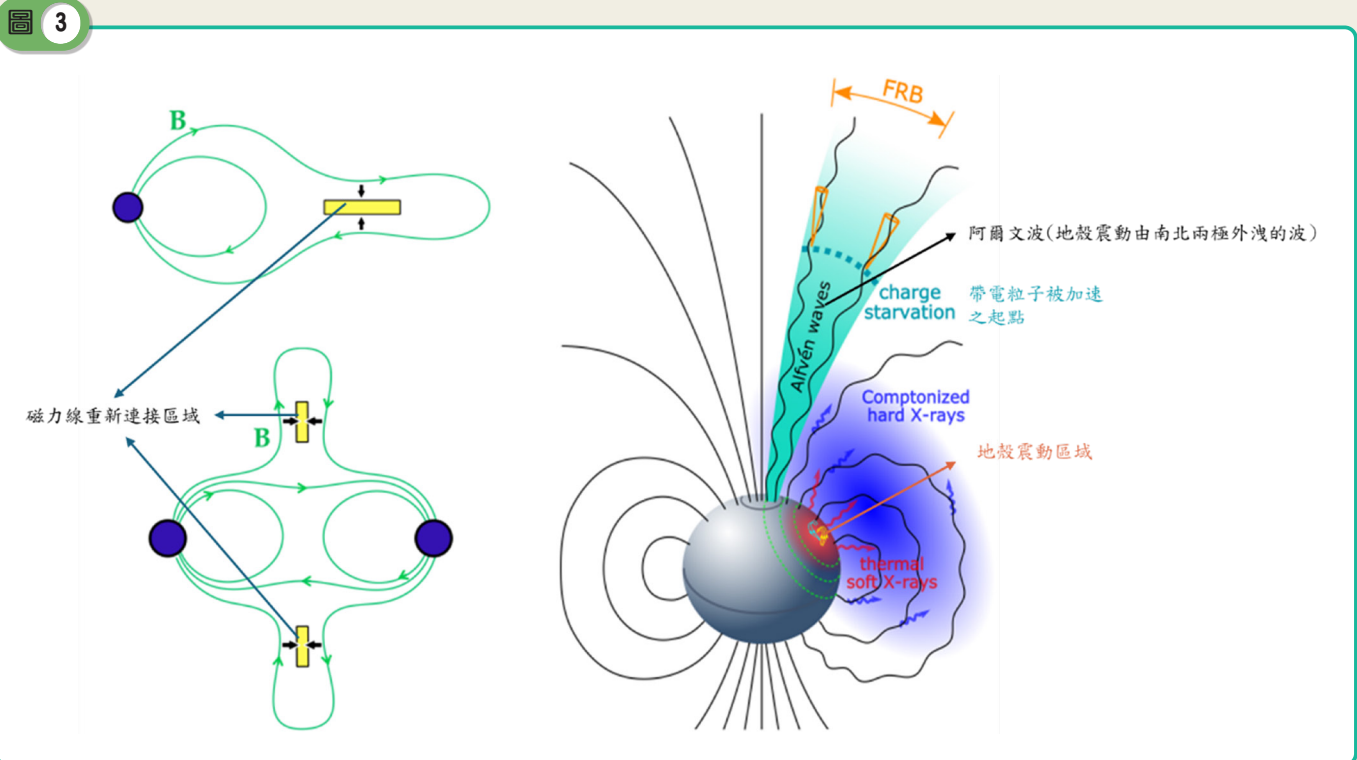
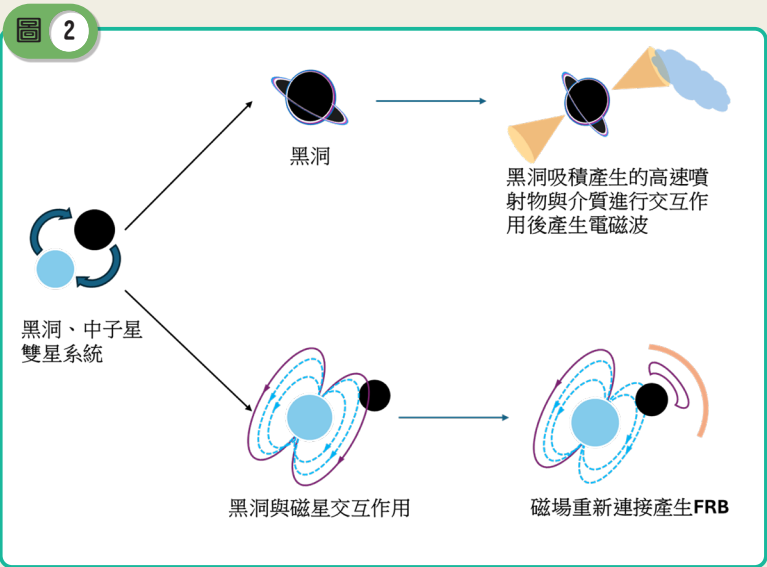
圖 1



第一個發現FRB訊號的澳洲帕克斯電波望遠鏡，口徑為64公尺，觀測範圍為700MHz~4GHz，主要用途為觀測FRB、脈衝星，以及研究宇宙背景輻射。影像來源：David McClenaghan CSIRO

時，由於要保持角動量守恆，黑洞的南北極會噴射出高速粒子流。這些噴流與外圍物質雲進行交互作用時，會形成震波（shock wave），形成FRB。而這機制也被猜測為是FRB非重複源最主流的機制，如圖2。

除了激變雙星模型（cataclysmic binary model）之外，另一個很可能的機制是磁星模型（magnetar model）。在擁有小行星或行星繞行的中子星（磁星）系統中，當行星繞著中子星公轉時，由於中子星的磁場過於強大，會導致中子星的磁場重新連接（magnetic reconnected），就如同圖3左下方部分所示。當磁場重新連接時，原本在外圍的磁力線會被甩飛出去，其中所產生的電磁波，就有可能是FRB。而磁星是磁場強度 $10^{14} \sim 10^{15} \text{G}$ 的中子星，這個模型認為由於磁星表面震動造成裂



隙，震動的能量會從南北兩極外洩，最後產生FRB，如圖3右圖所示；由於磁星的环境足夠極端，因此天文學家猜測磁星模型是目前最有可能產生極端天文現象FRB。

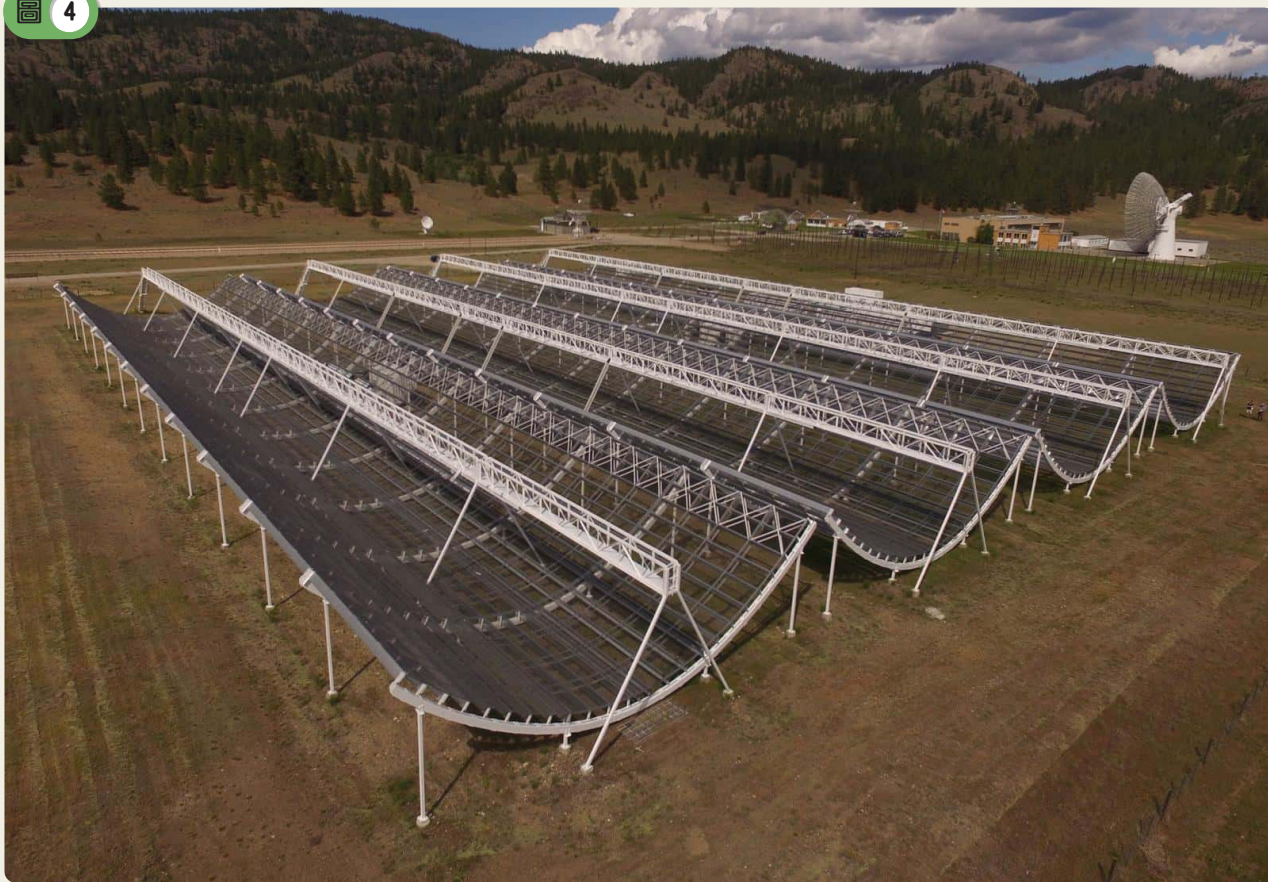
天文學家正在努力的尋找FRB的輻射機制，試著解開它們的身世之謎。以上兩種模型都無法在實際觀測與模型上能夠做到完全整合，主要是因為目前的觀測資料尚未完全。更甚至有科學家大膽猜測，說不定FRB這奇異的天文現象其實是某些高等文明外星人在刻意展現他們的科技以及其所在位置呢！不過，這種猜測目前並沒有實質證據支持，仍屬於科學範疇裡的『天馬行空』假說。若要真正完全搞懂FRB的起源，可能要請未來人搭時光機回來解答了，我們現在能做的就只有利用現有的FRB訊號，透過他們的特性與觀測設備的進步，將宇宙的謎團抽絲剝繭，慢慢拼湊出宇宙的真相。就如同在森林公園散步時，將手機拿出來一棵樹、一株草的上網搜尋，雖然一開始只有零碎

的資訊，但為來可以逐漸將一整座森林的植物樣貌逐漸拼湊出來。因此現階段除了推論FRB的形成機制的理論模型外，累積足夠的觀測數據也很重要，這部分就有賴望遠鏡的觀測了。

## 如何觀測FRB

目前主要觀測FRB的望遠鏡除了前面提到第一個發現FRB的澳洲的帕克斯望遠鏡（Parkes Observatory，簡稱Parkes）外，另外還有加拿大氫強度測繪實驗（Canadian Hydrogen Intensity Mapping Experiment，簡稱CHIME），如圖4、澳洲平方公里陣列望遠鏡（Australian Square Kilometre Array Pathfinder，簡稱ASKAP），以及中國的500公尺口徑球面望遠鏡（Five-hundred-meter Aperture Spherical Telescope，簡稱FAST）。這些望遠鏡與天線陣列具有較大的觀測視窗，因此在單位時間內可以接收到更多微弱又短暫的FRB訊號。

圖 4



此為目前主要研究FRBs的加拿大CHIME陣列電波望遠鏡，觀測波段範圍為400MHz~800MHz，最初設計為觀測、研究宇宙微波背景輻射，由四個長達100公尺的拋物線圓柱體所組成。影像來源：CHIME

## 天空如此之大，要如何知道FRB訊號來自哪裡呢？

在觀測FRB時會遇到許多挑戰。例如，若使用單一望遠鏡（如上述提到的FAST和Parkes），其大口徑設計能夠覆蓋廣闊的天空區域，並接收到不論是強烈、微弱，亦或是多波段的FRB訊號。然而，由於僅依賴單一口徑，它只能粗略推測FRB的來向，類似於知道「臺北101在信義區」，但無法精確定位其具體位置。這種限制使得在FRB上的研究變得困難。

而在觀測的設備方面，以前面提到的CHIME為例，他們將望遠鏡排成陣列，如圖5，在天空中形成類似長方形的觀測視窗。當地球自轉時，視窗觀測到的天窗隨之跟著移動，這樣一天就可以掃視整個天球所收到的訊號，不過由於矩形的寬度不足，因此無法在瞬間觀測到所有的FRB訊號，導致可能因為漏失重複源，而將該源錯判為不重複源。

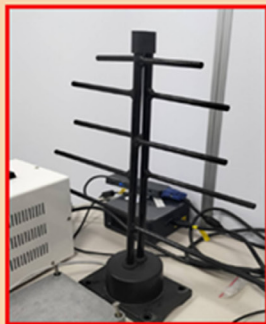
相較之下，干涉陣列望遠鏡（如ASKAP、

CHIME和甚大無線電望遠鏡陣列VLA）則可透過干涉測量技術，在觀測當下即時組合各天線數據，從而精確定位FRB來源，就像直接提供「臺北101的門牌號碼」一樣。目前，干涉陣列技術也是FRB定位最精確的方法之一。

這時你可能會想，為什麼不直接建造一個既能覆蓋大面積天空、又能精確定位訊號來源的陣列望遠鏡呢？這樣不僅能接收到更多FRB訊號，還能提升定位的準確度。

沒錯！這正是中央研究院目前正在推動的Bustling Universe Radio Survey Telescope in Taiwan (BURSTT) 計畫。簡單來說，BURSTT的目標是在臺灣建設屬於我們自己的FRB陣列望遠鏡，透過擴大天空覆蓋範圍（天區覆蓋差異請見圖5），同時結合輔助天線陣列來提升定位能力，期望能超越現有的CHIME陣列。不僅能大規模接收FRB訊號，將不論是新的、舊的、強的、弱的FRB訊號盡可能收集起來，並且能達到更高的定位精度，在FRB研究領域中扮演「最強的外野手」，確保不漏接任何來自宇宙的神秘訊號，將訊號誤判的可能性降低。

圖 5

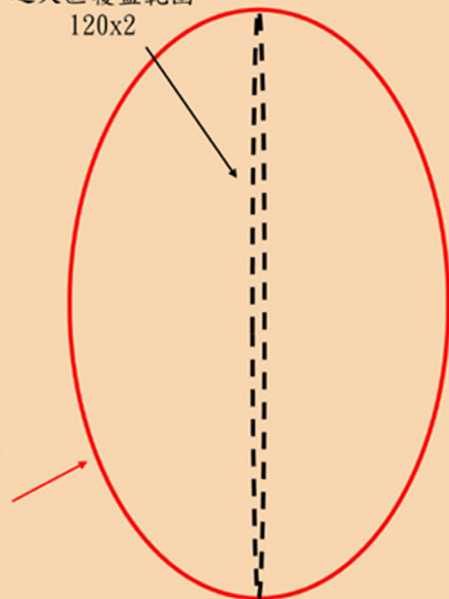


中研院使用之天線  
天線增益:6dBi  
偵測波段:400-800MHz



CHIME使用之天線  
天線增益:2-10dBi  
偵測波段:400-800MHz

CHIME使用天線之天區覆蓋範圍 120x2  
天區覆蓋範圍示意圖



中研院使用天線之天區覆蓋範圍 120x60

dB：分貝，表示增益的強度（相對於某個基準）  
i：一種理論上的完美天線，能夠均勻向所有方向發射能量

CHIME陣列望遠鏡與中央研究院使用之天線的天區覆蓋示意圖。可以看到CHIME的覆蓋範圍僅僅只有中間虛線的範圍，而目前在主站福山植物園與綠島輔助天線站皆以紅色方框所展示的天線為主。

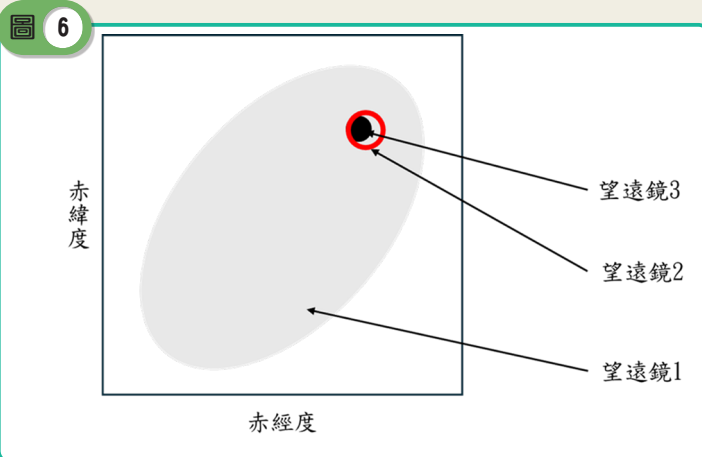
## 關於綠島觀測站

目前BURSTT計畫的FRB主要觀測站位於臺北的福山，除了主站外，後來還逐漸增設其他的輔助天線陣列。輔助天線陣列在研究FRB的工作中是非常重要的環節，如圖6。簡單來說，輔助天線陣列的接收訊號靈敏度會比主要陣列還要低，原因是輔助陣列的設計目的只是為了增加探測的範圍，而非深入探測、分析訊號。換句話說，若連靈敏度較弱的輔助天線都有偵測到FRB的訊號，也可以反過來印證這個訊號的真實性。

而其中一站的輔助天線觀測站就在綠島上的海洋研究站內，如圖7。

綠島海洋研究站的前身為綠島技能訓練所，設立於1992年，目的是訓練當時的累犯好讓他們擁有一項技能。這個訓練所在2002

年已經關閉，並在2007年開始計畫改建為海洋研究站，主要研究黑潮經過的綠島周圍海域時，溫暖海水中所帶來的豐富且多樣的海洋生物。由於綠島地處偏遠，光害極少，具備良好的天文觀測條件，並且來自無線電波的干擾也比較少，因此在2022年開始計畫在研究站內架設了輔助天線陣列，作為BURSTT計畫的一部分。



此圖定位FRB源的示意圖，利用多個望遠鏡來定位FRB來自於星系的準確位置。其中灰色橢圓區域是望遠鏡1的偵測區域；紅色圓圈為望遠鏡2的偵測區域；黑點為望遠鏡3的偵測區域。首先利用望遠鏡1來確定源的相對位置，再利用望遠鏡2與望遠鏡3的偵測區域相疊後精準捕捉源的絕對位置。

圖 7



這是綠島輔助天線站的現場天線照片，白色盒子為天線的配線盒。現場配置為南北向四排，東西向一排，共計16支天線，總數為64支天線，構成干涉陣列。

筆者就讀的臺東大學地理位置正好接近綠島，因此和BURSTT計畫的主要執行機構中央研究院天文及天文物理研究所（ASIAA）合作，我們主要協助天線維護、更換零件、檢修內部線路等工作。雖然這些任務看似繁瑣，但它們對於保持設備正常運作至關重要，確保FRB訊號的觀測能順利進行。

## 說了這麼多，FRB能夠幫助我們解開哪些宇宙奧秘呢？

### FRB的色散測量（DM）

提到快速電波爆（FRB），通常會提到一種測量，稱為色散測量（Dispersion measure，簡稱DM）。當電磁波經過星際介質時，會遇到自由電子，並與自由電子進行交互作用，導致高頻率訊號比低頻率訊號先到達觀測站，如圖8，而延遲的程度取決於星際介質中電子的密度，以及電磁波的頻率，科學家利用這個延遲程度定義出一個值，稱為色散測量值（DM value，或稱為DM值）。DM值可以推測源頭到地球的距離和星際介質的密度，從而了解宇宙物質在空間中的分布，以及其組成。

如果將天文學家比喻成考古學家，上述提到的各種望遠鏡與陣列望遠鏡則如同考古學家手上的槌子與十字鎬，是我們挖掘未知的工具。至於色散測量（DM）就像是放射性碳定年法可以讓考古學家回推化石年齡，DM則可以幫助我們測定宇宙中物質的距離與分佈。而要真正了解宇宙的歷史與結構，就需要全面

的分析這些『宇宙化石』也就是FRB的起源以及機制。透過這些神秘的訊號，科學家或許能解開宇宙演化的關鍵線索。

若想掌握更多FRB的起源與機制，就必須如同考古學者分析化石年代一樣，需要將這若干平方公畝地的化石所生成的年代完全分析完成，接下來的工作就是將已知的拼圖拼上，以及將未知的部分套用理論模型進行擬合推論拼圖中缺失的部分。天文學家推測，如果我們了解了FRB更多的資訊，就可以將FRB做為一個宇宙的探針，解決目前在天文界多個懸而未解的難題。而這些難題中，其中一個就是「重子失蹤問題」。

### FRB與「重子失蹤問題」

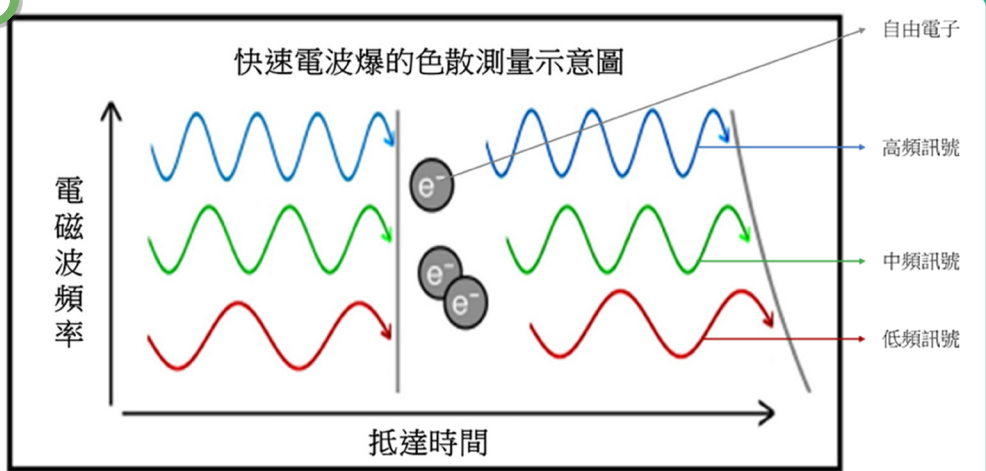
「重子（baryon）」是組成物質的一種粒子分類，由三個夸克組成。舉例來說，如果這顆重子是由一個上夸克與兩個下夸克所組成，則這顆重子是大家所熟悉的中子；若是由兩個上夸克與一個下夸克所組成，則是質子。而重子在宇宙中扮演著重要的角色，因為它們組成了所有你看到的、看不到的天體，例如恆星、行星等等，並且也是星際間塵埃（Intergalactic medium，簡稱IGM）的主要組成物質。

說了這重重子，你可能會問：「重子很重要沒錯，但關FRB什麼事？」

簡單來說，理論上根據宇宙大爆炸的模型推算，宇宙中的重子數量應該比我們實際觀測到的多。這就是在天文物理中著明的重子失蹤問題（missing baryon problem）。而當FRB經過大多數由重子構成的IGM時

圖 8

此圖為色散（Dispersion）示意圖，橫軸為時間，縱軸為頻率。可以看到訊號經過星際介質後與自由電子作用後發生色散的現象，也就是高頻訊號先到達觀測站，低頻訊延遲到達觀測站。（不同頻率的光速傳遞的速度不一樣的現象叫做『色散』）。



會產生色散效應，這就是天文學家所感興趣的。可以利用已知的FRB源來計算、推測在FRB到地球這距離之中的自由電子的數量，進而尋找『消失的重子』。找出重子之後，又可以進一步研究他們的性質，以及為什麼重子會難以觀測到。就好比在你的吸塵器前端加上雷射光，原本看不見的灰塵就也無所遁形。

## 回顧快速電波爆（FRB）是什麼？

說了這麼多，相信面前的你對於FRB有更多的認識，那麼就讓我們小小回顧一下什麼是快速電波爆（FRB）吧！

FRB擁有極高的能量，但持續時間極短（毫秒級）。目前的觀測顯示，部分FRB會重複爆發，而有些則是單次爆發，其來源仍是天文學研究的重大謎團之一。根據色散測量的值，可以用來推斷這個從爆發源到接收端的這段途中IGM內的電子密度，進而推算出星際介質中，所包含的宇宙中『失蹤重子』組成物質的重要粒子的數量，再進一步研究觀測與理論不相符的重子數量，找出重子失蹤問題中的問題到底在哪裡。

由於FRB在天文學上具有可應用與研究的價值，因此各國的天文界陸續提出了觀測FRB的計畫，逐漸增加陣列望遠鏡的數量，所以在FRB的訊號接收上數量上有著大幅的增加。由原本的每年不到100筆訊號，到目前的每日超過1,000筆的訊號接收，可以知道FRB在天文學的前景與重要性。

## FRB讓我學到了什麼

科學研究的突破往往源於對細節的專注。回顧歷史，牛頓的經典力學理論就源自於對蘋果落地現象的思考。看似微不足道的事情，往往蘊含著改變世界的關鍵。

在研究團隊中，每個人都是不可或缺的一部分，就像機械運轉時的每顆螺絲釘，雖然微小，卻支撐著整個系統的穩定運作。沒有這些基礎，科學突破便無從談起。

過去，我曾想過要從事最酷、最前沿的科學研究，但在綠島電波觀測站與臺灣最頂尖的科學家

的工作經驗讓我深刻體會到：真正的研究並非一蹴可及，而是需要一步一腳印，穩扎穩打地構築基礎。這讓我想起2017年上映的電影『關鍵少數』

（Hidden Figures），該片背景設定於1960年代美國太空競賽期間，NASA為了發射美國第一位進行軌道飛行的太空人約翰·葛倫（John Glenn），借重一群被稱為「人類計算機」（Human Computer）的數學家進行計算。其中，凱瑟琳·強森（Katherine Johnson）、桃樂絲·沃恩（Dorothy Vaughan）和瑪麗·傑克遜（Mary Jackson）三位傑出的非裔女性，在面臨種族與性別歧視的阻礙下，仍以卓越的數學才能突破層層困難，為NASA太空計畫帶來關鍵性貢獻，最終改變歷史。

正如這些科學家們所展現的精神，在科學研究領域中，每一個微小的發現、每一個看似不起眼的步驟，都是邁向重大突破的基石。就像燦爛的煙火，每一顆細小的火花，都是點亮夜空的關鍵。

黃于綸：國立臺東大學 應用科學系 大學部學生

## 參考資料：

- Zhang, B. (2023). The Physics of Fast Radio Bursts. *Reviews of Modern Physics*, 95(3), 035005. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.95.035005>
- Beloborodov, A. M. (2021). Emission of magnetar bursts and precursors of neutron star mergers. *The Astrophysical Journal*, 922(2), 236. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac17e7>
- Bailes, M. (2022). The discovery and scientific potential of fast radio bursts. *Science*, 375(6578), eabj3043. <https://doi.org/10.1126/science.abj3043>
- Clarke, T. A., et al. (2024). Quantifying the coincidence between gravitational waves and fast radio bursts from neutron star – black hole mergers. arXiv:2408.02534. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2408.02534>
- Kumar, P., & Bosnjak, Z. (2020). FRB coherent emission from decay of Alfvén waves. arXiv:2004.00644. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2004.00644>
- Lu, W., Kumar, P., & Zhang, B. (2020). A unified picture of Galactic and cosmological fast radio bursts. arXiv:2005.06736. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2005.06736>