

(譯自Physic Today Oct. 1968)

Pulsars 脈動星

Stephen P. Maiair 著

梵志 譯註

這幾個呈脈動的無線電波源發現以後，我們發覺，愈是深入探究它的特性，則愈難於找出一個完美的理論來解釋它極端規則的脈動週期，及其他種種極不規則的現象。

脈動星的發現，跟天文學其他某些事件一樣，是很偶然的。這使我們想起 Bernard F. Burke 在研究巨蟹星雲時，意外地發現了來自木星的猝發無線電波 (Radio bursts)，以及從事探測高緯度銀河連續體 (Galactic continuum) 的 Arn o, A Penzias R. 和 W. Wilson 却發現了。Cosmic fireball radiation，

發現脈動星後的六個月內，我們對它的性質就知道得相當的清楚了，可是總也找不出圓滿的理論來解釋。這四個已知的脈動星有著極規則的脈動週期，自0.25到1.34 秒不等，但其他的性質就非常不規則：例如不同頻率的強度微變 (Intensity fluctuation) 固然不同，即使是同一個頻率，其脈動波形亦與時俱移，而同一個波源的偏極化，可以是線性的也可以是圓形的。這些物體的估計距離，從30到128秒差不等。而其中至少有一顆星發射可見光，不過此可見光強度變動週期却不同於無線電波的脈動週期。

在康橋，當Anthony Hewish 等人在「閃爍」技術量度天體無線電波源的Angular Structure 時，發現了脈動星。Angular Structure 的量度在天文物理中有著相當的重要性。由角的大小與距離的估計值可以算出實物的大小，這些大小是用來推斷這些無線電波源的年齡，例如強力無線電波銀河。最近有兩種量度角大小的方法頗受重視：長基線的干涉儀 (Long Base line Interferometry) 及無線電波源的Lunar Qccultation。

「掩星 (Occultation) 是個類似「蝕」的現象，例如，木星的衛星時常會進入木星的陰影而看不見，水星與金星常常「凌日」，互相旋繞的雙星，其中一個也常躲到另一個的背後而看不見，一般的星則常被月亮所「蝕」。(利用此特性可計算角大小。)

另一個鮮為人所知的方法可能更適於在相當短的時間內量度許多光源的大小——在無線電波信號中研究由行星際氣體或太陽風導至的閃爍 (Scintillation)。

康橋的Mullard Radio Astronomy Observatory Hewish 等人首先注意到此種閃爍現象，他們認識用此技術求得之數據的潛值，因此他們

更進一步地設計了一種最適於此種工作的無線電波望遠鏡。

這具在Combridge 設計的天線有 470×45 米大小，由銅絲偶極排成，以週率81.5百萬週 (M. Hz) 操作時，它可以再星期測遍 44°N 和 8°S 赤緯 (Declination) 間的「天球」一次。(譯者按：天體座標系計有四種：Horizon, equator, Ecliptic, Galactic system其中Equator system是這樣定的：我們把地球各部分的人極目望去的蒼穹想像成一個「天球」，而日月星辰就好像位於虛無想像的球面上，地極的延長交天球面於南北天極，南北天極連線之垂直平分面交球面於天赤道，過南北天極作之平面與天球面切之線稱 Hour circle，一顆星沿Hour circle至天赤道之角距離稱 Declination。相當於地經度的稱 Right Ascension，其標準點是春分點——每年太陽由南向北穿過天赤道之位置。)

這具望遠鏡在1967年 7月開始啟動，很快地，他們即開始注意到偶發而散見的干涉現象，幾個月後，他們決定跟蹤最強的干涉信號波源，最後發現此干涉來自Vulpecula (狐狸) 星座中的一固定位置，它的信號呈週期性，其脈動間隔約1.3 秒，觀察了幾個月，康橋的天文家們就在Nature 2 月24 日刊物上書面報告他們的發現，此物體定名為 Pulsar I 或 CP1919，表示 Combridge Pulsar at $19^{\text{h}} 19^{\text{m}}$ Right ascension，

此時，曼徹斯特大學及CIT聽到閃爍法可以測角大小，正躍躍欲試，又聽得康橋有此發現，由於他們的儀器足可記錄弱而快速變動的信號，他們立刻轉向CP1919。

同時，在康橋Martin Ryle 用1哩的Interferometer 來決定 CP1919 更精確的位置，再查查Palomar 在這一帶的測量照片，他們發現離新位置 5弧秒的地方有顆暗淡模糊的物體，他們就管它叫「藍星」——雖然它的光現在量起來呈紅色，所以會搞錯是因為Ryle 也發現了一顆更暗更紅而稍遠離無線電波源位置的星，它稱為「紅星」，在康橋，John Pilkington 用閃爍望遠鏡搜索了曾經發生過干涉的50個可能位置，這樣發現了三顆Pulsar CP0834, 0950, 1133，

(按 Pulsar 最新消息：第五顆HP1506在7月中被發現，其週期0.7397秒)。

Ryle宣佈CP1919可能有的 Optical Counterpart後，激勵了許多天文家，從事可見光脈動的探討，他們大都失敗，唯有Roger lynds等人在三月二日得了一點結果，觀察的結果：可見光脈動速率與無線電波的不同。它在 Multi Channel Scaler 的陰極射線管銀幕上呈正弦函數圖形，其週期為CP1919 週期— 1.3 秒的兩倍，其週期既與預期的不同，其形狀亦與預料的大異其趣。3月3日，4日也得了相同的結果，綜合三個晚上的數據，可以在統計的意義上肯定是個正弦波型。

(A)能量與距離

觀察結果：

到目前僅觀察到五個（原文四個）脈動星。康橋測量的極限提示另外新目標的發現可能是：

1. Sky Coverage ——幾乎整個南半球及北半球的大部尚待測查。

2. Frequency response，在閃爍法測量中用的是 0.1秒時間常數，因此，「快Pulsar」，如果存在的話，就會漏掉。

3. Selection for low dispersion：康橋的 81.5MHz接收器有 1MHz 的Bandwidth。脈動的 Arrival time 隨決定於星際散射的頻率變動。因而，如果 Pulsar 很遠，連續的脈動會在有限長的 Bandwidth 內重疊著，而看起來像穩定波源。

| Pulsar | 週 期 (秒) | Spectral index | 距 離 (Parsec) |
|---------|---------------------|----------------|--------------|
| CP 0834 | 1.2737642 ± 3 | -1.2 | 128 |
| CP 0950 | 0.25306516 ± 6 | -1.1 | 30 |
| CP 1133 | 1.18791106 ± 15 | -1.1 | 49 |
| CP 1919 | 1.33730109 ± 1 | -1.5 | 126 |

Spectral index α 的定義如下，

Flux density impulse \propto Frequency α 各別的脈動變化得很快因此 Spectra index 具有平均的性質，在幾分鐘內平均的結果來看 Spectra index 本身也是一個變數。CP1919的 Flux density在高頻率時降得非常快，此種高頻率的 Cut-off在CP0950及1133均未見，（至少到 2300MHz）CP0834資料不全，低頻率的Cut-off則均無。

觀察到的脈動 Arrival time 決定於觀察的頻率，頻率愈低，時間愈長，此現象歸緒於無線電波經過Pulsar與地球間星際介質 Plasma部分引起的Dispersion。

Arrival time 隨頻率的變化如下：

$$\frac{d\nu}{dt} = - \frac{c\nu^3}{\int \nu_p^2 dl} \quad (1)$$

式中 ν_p 是 Plasma 頻率， l 是沿波路徑的距離。

因為 $n_e = 1.24 \times 10^4 \nu_p^2$ (n_e 是電子數目密度) 我們可看出 Arrival time 的變動給了我們一個電子密度沿Pulsar視線積分的量度。

(1)式僅在 $\nu \gg \nu_p$ 時成立， $\frac{d\nu}{dt}$ 可量度，Pulsar

距離的估計決定於地球與Pulsar之間 n_e 平均值之估計，星際空間可分成中性氫氣其 $n_e \cdot 10^{-3} \text{ cm}^{-3}$ 及游離氫氣 $n_e \approx 0.1 \text{ cm}^{-3}$ 。觀察由 Galactic disk產生之熱無線電波輻射，也顯示 n_e 平均值 $\approx 0.1 \text{ cm}^{-3}$ ，不過，很明顯地， n_e 必定隨位置作大幅度的變動。上表列的距離即為 $n_e = 0.1$ 時算得的。

CP1919在81.5MHz時平均功率是 $10^{-26} \text{ watt/m}^2 \text{ Hz}$ ，但某些個別的脈動可以超過10倍，以上的估計是假定輻射是等向性的。脈動間的週期極端固定，一年之內不會變動 10^6 分之幾以上，或每次脈動不會變動 10^{13} 分之一以上。

(B) 脈動振幅變化，

對在不同頻率時振幅的變化探究的結果相當有趣，複雜，且稍稍有點矛盾。

a. Manchester 觀察：CP0950振幅變動有兩種，其中一種與頻率有極密切的關係，另一種則不，接連幾個脈動間振幅的變動則與頻率無關。因此，如果在151MHz，有一脈動其振幅比前一個強，在408 MHz及922MHz時亦一樣，但是一個兩分鐘脈動列的平均功率，其變化就與頻率大有關係了，例如在151MHz附近，頻率只要差個 2~3MHz，其變化就失以千里了。在其他的 Pulsar 情況亦同，變化的time-scale也與頻率大有關係。

b. Arecibo observation。Frank-Drake 等人發現 CP1919 脈動—脈動間的變化決定於頻率，此波源裡 3 MHz 頻率變化就足以改變接連脈動振幅比的關係，不過有一點，Arecibo的觀察頻率大都比Manchester對CP0959所用的為低，其他觀得CP1919的變化與 Manchester 的結果都很相似。

無線電波脈動會以其基本頻率的一半表現任何週期性嗎？G. Grueff 發現 408MHz 時CP1133脈動的振幅以脈動週期兩倍的週期變動著。妙的是，康橋與曼徹斯特對CP1133的觀察却無此現象，

同時其他三個Pulsar亦無此效應。

(C) 脈動之形狀與偏振

即使是同一 Pulsar，同一觀察頻率，脈動結構仍有很大的變化，無而，多次觀察的平均值顯示每個Pulsar有個與頻率無關的典型“Envelope”。三個一秒級的脈動星（CP0834, 1133, 1919）有著雙脈衝結構，而0.25秒的CP0950呈單脈衝。而CP0950脈衝的前緣的確比後緣昇得慢，這表示CP0950也是雙峯的，不過較弱較不明顯而已，四個Pulsar的Envelope寬度都是50msec，雖然有時個別的脈動只有它的1/10。Rickett等發現在主脈衝前大約100msec有個Interpulse，在408MHz Interpulse的能量為主脈動的1.8%。

Lyne發現四個Pulsar的輻射均是偏振的(Polarized)，100%的線偏振。對不同的脈動分量，電向量有著不同的位置角。Arecibo的觀察顯示430MHz時四個Pulsar均呈橢圓偏振，有時線偏，有時圓偏。CP0950的Interpulse在408MHz時85~100%線偏振。

即使在個別的脈動內，其結構也會發生變動：Arecibo的努力顯示Sub-pulse結構極不定，此fine structure顯示有許多「短命」的輻射區存在著，其幅度不超過50Km。Drake的另一種解釋：此fine structure乃是由於物質在離Pulsar 10^3 公里處以 10^4 Km/Sec的速度橫過視線所引起的閃爍。

Graham Smith也討論過脈動平均振幅的緩慢變動起源於閃爍的可能性，他指出Pulsar的大小可能約為 10^{-11} 弧度，可以擬Quasar比的大小 (10^{-8} 弧度)。

那麼康橋的測量（用來測量閃爍現象的測量。）可能導至離地球更遠的閃爍的發現。P.A.G Scheuer發現：數據顯示，要用閃爍來解釋脈動平

均振幅的緩慢變動，必須用Two-Screen Model；高頻輻射波的閃爍起於通常的星際介質，低頻的則起於離Pulsar 0.1 Parsec內的物質。

(D) 可見光的觀察。

CP1919的光以兩倍於脈衝週期的週期，呈正、餘弦函數變動的事實是在Kitt peak發現的，此結果是用50吋望遠鏡，未加濾光鏡的IP21 Photo multiplier tube及400 channel R.I.D.L multi scaler累計了8.7小時的結果。

對藍星的觀察顯示：①視星等17.46，色差：

$$\text{藍一視} = 1.41 \quad \text{紫外一藍} = 0.70 \quad (\text{譯者按：} \frac{B_1}{B_2} =$$

$2.512^{m_2 - m_1}$ 式中B：亮度，m：視星等。

由於網膜對光的感受與照像底片對光的感受不同，（肉眼看紅星甚亮，底片則對藍光敏感），以攝星等減去視星等稱藍一視色差，因視星等數字愈大，星愈暗，故知色差（藍一視）值愈大愈近紅色，愈小（甚至可以是負的）愈近於藍色。

②其光譜呈連續紅色，其中單游離的H.K.線被吸收。此觀測與「藍星」是個普通K或G級星，且被星際粒子吸收而呈紅色的假設相符。然而早先Kitt peak的光譜顯示：H.K除線外，還有條強而寬的H β 吸收譜線。（氫Balmer系第二條）。

在最近，Lyne測得的光譜中尚有額外的氫吸收譜線，這些線的寬度約為15Å，這個寬度在把Pulsar解釋成旋轉的白矮星時可能嫌太窄了一點。

（譯者按：星星除了按亮度可分成視星等級外，也可按其光譜分成七大類：O. B. A. F. G. K. M.（哈佛分類法），光譜決定於星球的溫度，低溫時尚有簡單的化合物存在，溫度增加分子減少，而原子呈激發態或游離態。）

| 類 別 | O | B | A | F | G | K | M |
|-----------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
| 溫 度 °K | 50,000 | 20,000 | 10,000 | 7,000 | 6,000 | 4,000 | 3,000 |
| 顏 色 | 藍 白 | 藍 白 | 白 | 淺 黃 | 黃 | 橙 | 紅 |

天文學家為了方便再把每大類分成10小類，如AO, B3, G5.另外W, R, N, S用於不適於以上七大類的星。太陽屬G級星。）

有關理論部分，因至今尚無圓滿定論，從略，它可能是中子星或白矮星的轉動，擺動，然不甚確定，不過有一點是可以確定的：它不是地球外高度智慧生物與聯外界絡的信號，康橋最初曾非正式地稱脈動星為「小綠人」“L.G.M.”。Drake隨即指出，脈動星光譜的形狀並非沒有自然波源的特性，而且它也不適於作有效的通訊，同時，即使「他們」可能有超地球的工程技術，可是能量的輻射實

在太高了！（ 10^{28} erg/pulse）

(E) 應用：

Pulsar可能在天文及物理上有點用途，Drake集團指出：週期的精密量度可能可以測出波源的軌道運動，還有一點，這是Banesh Hoffman建議的，可能有點令人懷疑，這些量度可以作得極精確以作為廣義相對論的實驗證明，Drake等人也建議脈動星可以提供精確的時間服務。Graham

Smith分析過來自CP0950高度偏振振動的Faraday rotation因而發現星際磁場平行視線的分量極小的事實。