

「遠紅外線與無線電波的相關」之介紹

蔡殷智
國立中央大學天文所研究生

關鍵字 (keyword): 遠紅外線與無線電波的相關 (FIR-RADIO Correlation), 同步輻射 (Synchrotron radiation), 熱塵埃 (Warm dust), 冷塵埃 (Cold dust), 星球產生率 (star formation rate)

一、引言

打從紅外線天文衛星IRAS (Infra-Red Astronomical Satellite) 上天執行任務以來，在星系研究方面，提供了一項令人振奮的結果——「遠紅外線與無線電波的相關」 (FIR-RADIO Correlation) —— (de Jong et al. 1985; Helou et al.1985)，其形貌如圖1 (C. Xu 1990) 所示：所有被觀測的星系緊密地排列在一條窄窄的帶狀區中。

被觀測的星系種類繁多，從正常的旋渦星系 (normal spiral galaxies) 到爆發星系 (starburst galaxies) 都有，正常的旋渦星系亦包含早期型 (early-type，如SO等) 到晚期型 (Late-type Sbc等)；但橢圓星系 (elliptical galaxies) 及擁有活躍星系核 (Active Galactic Nuclei; AGN) 的星系並不包含其中。儘管如此，這麼多種的星系竟可擺在一張圖上的一個帶狀區域，不得不令人驚奇。

筆者在研讀「遠紅外線與無線電波的相關」時，聯想到了赫赫有名的赫羅圖 (H-R diagram)，如圖2所示，在絕對光度—光譜型的圖型上，大部分的恆星集中在所謂的主序帶 (main sequence) 上，稱之為主序星。在恆星演化上，赫羅圖有著不可抹滅的地位，那是否意味著「遠紅外線與無線電波的相關」亦將對星系演化有著劃時代的貢獻呢？ (圖3)

二、「遠紅外線與無線電波的相關」

「遠紅外線與無線電波的相關」，其無線電波的觀測資料來自1.49GHz的地面觀測，而遠紅外線則由IRAS衛星上40-120um的觀測而得。在眾多的研究中，由於取樣與分析的不同，結果有些差異，茲就幾個方面稍做討論。

- 1.斜率問題：如圖1所示，其「相關」(correlation)的斜率為1，而如圖4 (N.A. Devereux, S.A.Eales 1989)，其擬合的結果如圖中實線所示，圖中虛線表斜率為1，很明顯的，實線斜率不為1。
- 2.線性問題：如圖1所示，其「相關」是線性的，而如圖5 (R.Wielebinski et al. 1987)，其擬合的結果為兩段斜線的合成，而圖6 (C.Xu et al. 1993) 則是一個非線性的結果。
- 3.彌散 (dispersion) 問題：由前面數圖可知，星系的觀測數據散落在擬合直線的四周，隨著取樣的不同，彌散的情況亦有差異。

上述三點，在理論模型的解釋中，都有相當的重要性，另外，E.Hummel et al. 1988年的研究顯示，在眾多的觀測區段中—x-光，可見光，近紅外線，遠紅外線，無線電波等一，遠紅外線 (FIR) 與無線電波 (RADIO) 是相關最緊密的一個。

三、「遠紅外線與無線電波的相關」的解釋

甲、質量效應 (richness)

關於「遠紅外線與無線電波的相關」，可有一個淺易的解釋：星系的質量愈大，其發出的光愈多，故FIR光度愈大者其RADIO光度亦大。果真如此的話，不免令人有些失望。由於可見光之藍色光光度 (blue luminosity) 與星系質量相關，藉著可見光之藍色光光度的除去，可以去掉質量的影響，如圖7所示， $RADIO/F_B$.VS. FIR/F_B ，其中 F_B 為在4400 Å° (藍光) 的光通量，去掉質量的RADIO與FIR仍有很好的相關性 (C.XU,1990)，由此可說明「遠紅外線與無線電波的相關」不僅僅是「較大的星系有較大的光度」而已。在C. Xu et al. 1993的研究中，利用星系質量與H-Band光度間的關係，較精確地除去星系質量，得出圖8。比較圖6與圖8可知，扣除質量效應後，相關性由 $r=0.96$ 降至0.87，彌散度由 $\sigma=0.011$ 增到0.036，由此可知質量效應是「遠紅外線與無線電波的相關」的一個因素，但是根本上造成「遠紅外線與無線電波的相關」有更基本的機制，它是源自星系本身更具本質的東西。

乙、「遠紅外線與無線電波的相關」現行的理論解釋

解釋「遠紅外線與無線電波的相關」，通常從兩個方面來看：

在無線電波方面，1.49 GHz的無線電波，通常是由10 GeV左右，宇宙線中的高速電子，在幾個微高斯 (micro Gauss) 的星系磁場中，藉由同步輻射而產生的，在遠紅外線方面，則由於星際間的塵埃 (dust)，吸收來自電離氫區(H II 區)的紫外光 (UV) 和星際間的星光，再輻射所產生的。

在較仔細的討論上，無線電波的產生機制主要有二：高速電子在磁場中產生的同步輻射和帶電粒子間的自由-自由躍遷輻射，後者因帶電粒子是由熱電離產生，通常稱為熱無線電輻射 (thermal radio)，相對地，前者則稱為非熱無線電輻射 (Nonthermal radio)。在C. Xu et al. 1993的論文中，無線電輻射功率為： $P_{\text{radio}} = P_{\text{nth}} + P_{\text{th}}$ ， P_{radio} 表無線電功率(Radio power)， P_{nth} 表非熱無線電功率(nonthermal power)， P_{th} 表熱無線電功率(thermal power)因 P_{th} 甚小於 P_{nth} ， $P_{\text{radio}} \approx P_{\text{nth}} = A \cdot v_{\text{SN}} B^{\xi/2}$ 其中A為常數，B為磁場， ξ 為與同步輻射相關的參數， $\xi = 0.2$ 到 0.3 ， v_{SN} 為超新星產生率。

另外，產生遠紅外線的塵埃可細分為兩類：暖塵埃 (Warm dust, 30-40K) 及冷塵埃 (Cold dust, 15-25K)。熱塵埃一般相信是由電離氫區 (H II region) 所加熱的，而冷塵埃的加熱機制則不很清楚。而電離氫區是包圍在新生大質量 ($M \geq 5M_{\odot}$) 星的被電離氫雲，一般相信這些星在一千萬年後會成為超新星，所以我們可以把遠紅外線的光度寫成： $L_{\text{FIR}} = A' \cdot v_{\text{SN}} + X$ ， A' 為一常數，X則代表一未知的變數，因為對冷塵埃的加熱不甚清楚的緣故。

於是，由以上的討論可知， $P_{\text{radio}} \sim v_{\text{SN}} B^{\xi/2}$ 而 $L_{\text{FIR}} \sim A' \cdot v_{\text{SN}} + X$ ，若 $B^{\xi/2}$ 與X變化不大，則 P_{radio} 與 L_{FIR} 呈線性關係，若X與 $B^{\xi/2}$ 有相當的變化則造成非線性與彌散。

如前所述，質量應該扣除，為了 P_{radio}/M 的導出，Xu.C引入了能量均分 (equipartition) 的假設（即宇宙線能量與磁場能量相當），再加上一些變數的代換並假設冷塵埃是由星際輻射場 (Interstellar Radiation Field) 加熱，則得出 $L_{\text{FIR}}/M = f_0 (0.73S + 0.27)$ ； $P_{1.49\text{GHz}}/M = P_0 S^{1.04}$ ， P_0 ， f_0 為常數，S是唯一變數。根據其結果 L_{FIR}/M 與 $P_{1.49\text{GHz}}/M$ 的相關是非線性的。

四、討論：

1.能量均分：假如無線電波真的是由高速電子的同步輻射來負責的話，有一個頗重要的

的問題，因為電子的密度與星系磁場的強度無法直接量得，理論上我們假設宇宙線能量與磁場能量相當，實驗上本銀河系太陽附近似乎如此，藉著實驗上的孤證與理論上的完美，於是可從同步輻射的觀測上得知星系磁場的強度，從而做許多計算。故能量均分是一個未經確實證實的假設，也是這方面研究的一項罩門，不過近來的一些研究似乎顯示此假設的正確性 (volk et al. 1989, E. Hummel 1986)

2. richness：如三的甲部分所說，質量雖不是主因，卻有一定的影響，X. Chi和A.W. Wolfendale對「遠紅外線與無線電波的相關」有一有趣的解釋：高速的電子會逃脫其母星系，如圖9所示。由於質量大的星系會有較大束縛力，C. Xu以為這個結果用來解釋質量對「遠紅外線與無線電波的相關」的部分影響是蠻不錯的。

3. 在現行理論下，我們可以給「遠紅外線與無線電波的相關」的解釋

一張簡圖，如圖10：另外，在引言中，筆者曾提到「遠紅外線與無線電波的相關」能給我們什麼樣的想法呢？由於無線電波正比於超新星產生率 v_{SN} ，而 v_{SN} 又正比於星球產生率 v_{SF} (star formation rate)，而遠紅外線亦正比於 v_{SF} ，那麼，「遠紅外線與無線電波的相關」給我們的大概就是星系星球產生的效率吧，或叫它活躍度，如圖3。

五、參考書目：

Chi.X; Wolferidale A.W., 1990, MNRAS 245 101-107

Devereus N.A; Eales.S.A, 1989, AP.J 340 708-712

Helou.G. et al. , 1985, AP.J 298 L7

Hummel.E. et al. , 1998, A&A 199 91-104

Hummel.E , 1986, A&A 160 L4-L6

de Jong.T. et al. , 1985, A&A 147 L6

Volk.H.J et al. , 1989, A&A 213 L12-L14

Wielebinski.R. et al., 1987, in Star Formation in Galaxies, et. C.J.Londale Persson, S. 583

xu.c ; 1990, AP.J 365 L47

Xu.C et al. , 1993, A&A in press

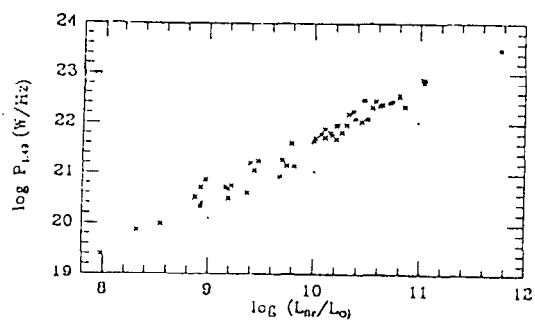


圖1

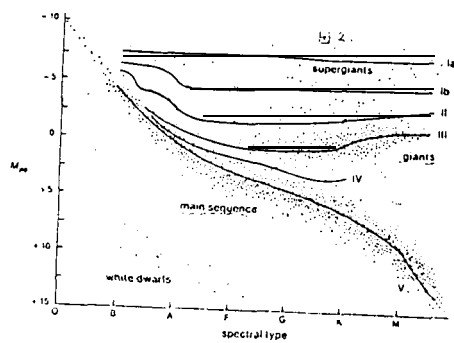


圖2

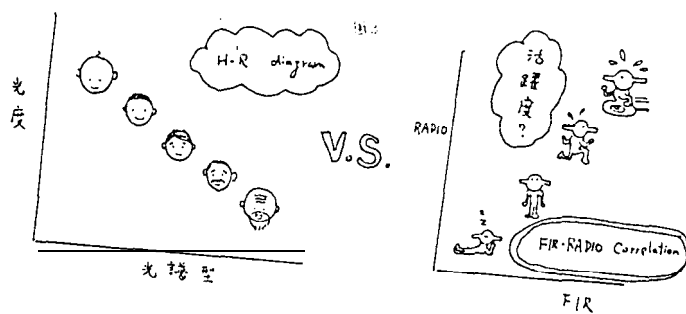


圖3

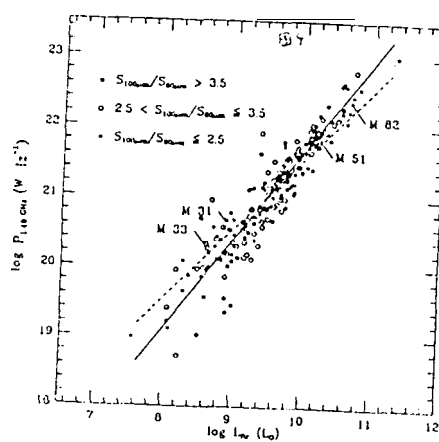


圖4

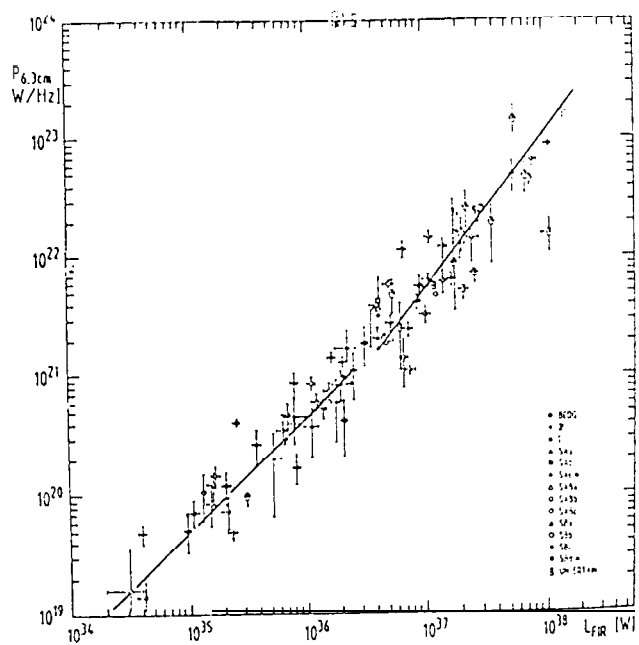


圖5

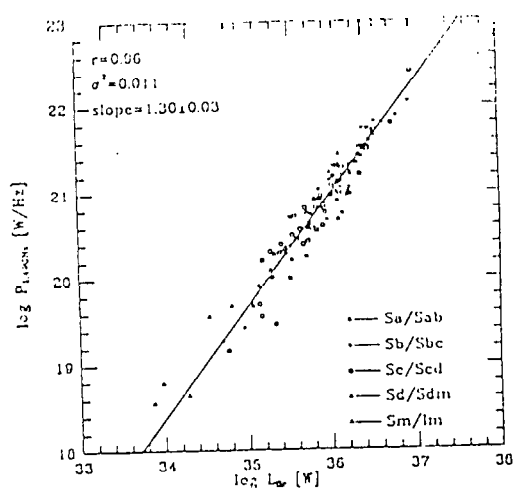


圖6

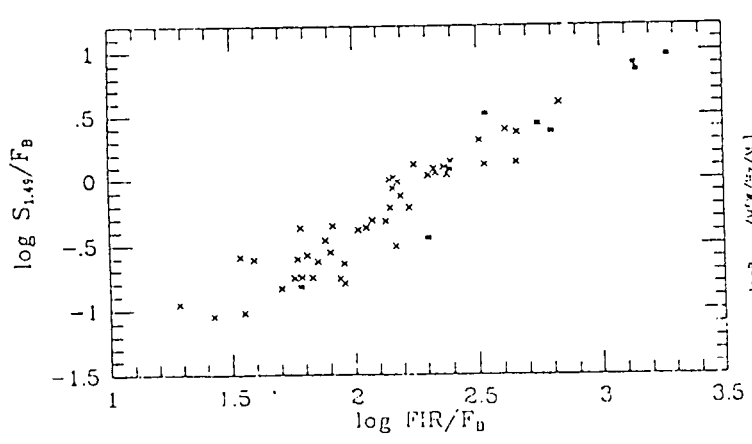


圖7

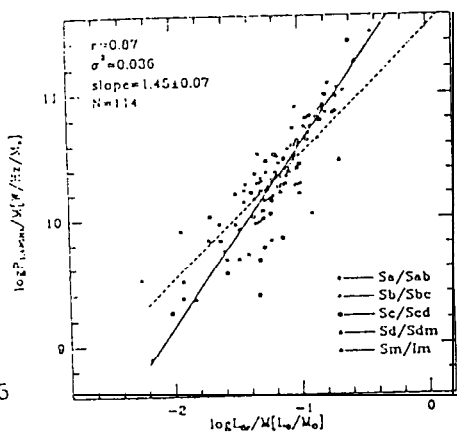


圖8

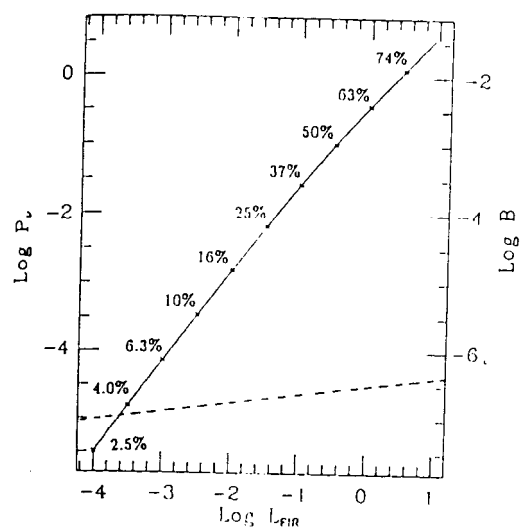


圖9

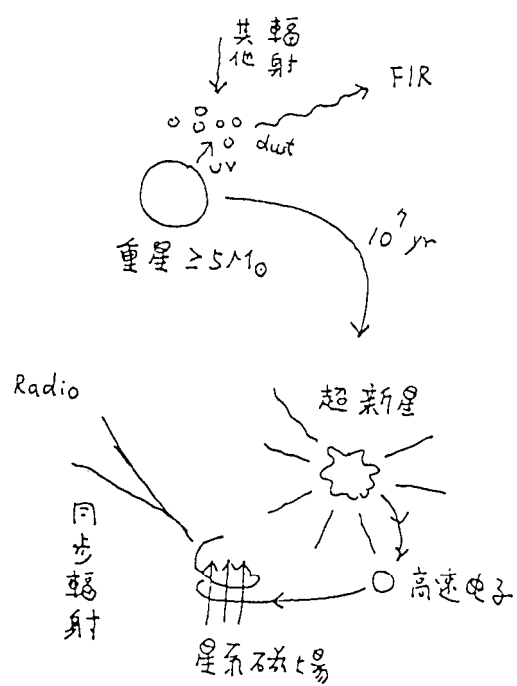


圖10