

第四章 討論

在三個熱分子雲核的普查中,我們觀測到許多大部分是由有機分子所發出的譜線。總計在 Orion KL、Sgr B2(N)與 W51 e1/e2 中可辨識的分子譜線分別為 413、302 及 262 條,無法確認譜線分別為 143、84 和 71 條。

4-1 常見分子之譜線特性

以下針對普查資料中常見的分子譜線作分析比較：

1. 二氧化硫(SO₂)：

在本次普查中,SO₂是強度最強的譜線之一,其中有些譜線 T_R^* 強度可大於 3 K。該分子之平均 LSR 速度約在 7.37 km s⁻¹ (Orion KL)、61.71 km s⁻¹ (Sgr B2(N))及 57.32 km s⁻¹ (W51 e1/e2); 譜線半高全寬(FWHM)平均約為 11.36 km s⁻¹ (Orion KL)、15.38 km s⁻¹ (Sgr B2(N))及 13.57 km s⁻¹ (W51 e1/e2)。此分子其前人觀測到的柱密度(column density),在 Orion KL 為 5.0×10^{16} cm⁻² (Sutton et al. 1985),在 Sgr B2(N)為 7.9×10^{17} cm⁻² (Nummelin et al. 2000)。其譜線最明顯的特徵就是波形不對稱的,而且其半高全寬在所有頻帶中與其他分子比較顯得寬了許多,可能是因為該分子之分佈範圍廣,且受衝激波所激發之故,所以速度場也較為混亂。

2. 一氧化硫(SO)：

雖在普查的頻率範圍中該分子譜線出現次數不多,但訊號都非常強烈,甚至頻率為 215200 MHz 的 SO 譜線,其 T_R^* 達到 17.3 K 左右。SO 分子之平均 LSR 速度約在 8.52 km s⁻¹ (Orion KL)、66.70 km s⁻¹ (Sgr B2(N))及 56.45 km s⁻¹ (W51 e1/e2); 其譜線半高全寬平均約為 16.27 km s⁻¹ (Orion KL)、16.00 km s⁻¹ (Sgr B2(N))及 6.32 km s⁻¹ (W51 e1/e2)。這分子的柱密度,分別在 Orion KL

為 $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ (Blake et al. 1986), 在 Sgr B2(N) 為 $3.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ (Nummelin et al. 2000)。值得注意的是該分子在 Orion KL 與 Sgr B2(N) 比 SO_2 速度分佈更大, 但在 W51 e1/e2 反而變窄了許多。SO 同樣大多是因衝激波化學(shock chemistry)所產生的。在 W51 e1/e2, 可能大部分的 SO 已形成為 SO_2 , 故 SO 化學豐度降低。

3. 甲酸甲酯(HCOOCH_3):

因為分子中的甲基產生內部扭力旋轉, 導致在轉動躍遷態出現兩種基態形式, 其中一種接近剛體轉動模式, 標記為 A 型; 另一種含有扭曲型態記為 E 型。一般來說, 同一組躍遷($J \rightarrow J-1$)的 A 和 E 型之躍遷頻率近似, 是以通常在光譜中成對出現且強度約略相等, 是一種容易判定的譜線。這個含有八個原子之大分子其觀測到的柱密度, 在 Orion KL 為 $3.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ (Sutton et al. 1985), 在 Sgr B2(N) 為 $5.6 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ (Nummelin et al. 2000), 顯示其在分子雲核中存在相當多。甲酸甲酯的平均 LSR 速度約在 7.75 km s^{-1} (Orion KL)、 63.59 km s^{-1} (Sgr B2(N)) 及 56.38 km s^{-1} (W51 e1/e2); 其譜線半高全寬平均約為 2.21 km s^{-1} (Orion KL)、 5.95 km s^{-1} (Sgr B2(N)) 與 5.12 km s^{-1} (W51 e1/e2)。

4. 二甲基醚(CH_3OCH_3):

二甲基醚分子, 一如甲酸甲酯, 也是以多基態形式存在, 這是由於其分子內同時擁有兩個甲基導致四種分別為 AA、EE、AE、EA 共存的基態。而同一組躍遷($J \rightarrow J-1$)的四種基態之躍遷頻率很接近, 在光譜圖中顯示出類似三尖叉子的波形(一般來說 AE 與 EA 之頻率常近似相等), 是一種容易辨認的譜線。該分子之平均 LSR 速度約在 7.84 km s^{-1} (Orion KL)、 62.53 km s^{-1} (Sgr B2(N)) 及 56.71 km s^{-1} (W51 e1/e2); 其譜線半高全寬平均約為 3.57 km s^{-1} (Orion KL)、 6.40 km s^{-1} (Sgr B2(N)) 及 5.22 km s^{-1} (W51 e1/e2)。此分子的柱

密度，分別在 Orion KL 為 $3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ (Sutton et al. 1985)，在 Sgr B2(N) 為 $7.9 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ (Nummelin et al. 2000)。

5. 丙氰($\text{C}_2\text{H}_5\text{CN}$):

這類分子譜線在普查中是常出現的躍遷譜線，其平均 LSR 速度約在 4.72 km s^{-1} (Orion KL)、 63.61 km s^{-1} (Sgr B2(N)) 及 56.97 km s^{-1} (W51 e1/e2)；其譜線半高全寬平均約為 4.84 km s^{-1} (Orion KL)、 6.67 km s^{-1} (Sgr B2(N)) 及 5.81 km s^{-1} (W51 e1/e2)。在普查鑑定經驗中，丙氰譜線在同一頻帶中會出現多次，最主要是該分子躍遷能階多，數量也很多，所以躍遷頻率相近的譜線往往會成群出現。其柱密度分別為 $2.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ (Orion KL ; Sutton et al. 1985) 及 $1.6 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ (Sgr B2(N); Nummelin et al. 2000)。在 Orion KL 的光譜裡，其譜線輪廓比其他一般分子來得寬，顯示分子在雲核中分佈廣，反映出不同區域之速度差異。

6. 丙烯氰($\text{C}_2\text{H}_3\text{CN}$):

這類分子的平均 LSR 速度約在 5.03 km s^{-1} (Orion KL)、 63.30 km s^{-1} (Sgr B2(N)) 及 56.41 km s^{-1} (W51 e1/e2)；其譜線半高全寬平均約為 4.16 km s^{-1} (Orion KL)、 5.48 km s^{-1} (Sgr B2(N)) 和 5.19 km s^{-1} (W51 e1/e2)。分子之柱密度分別為 $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ (Orion KL ; Sutton et al. 1985) 及 $5.1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ (Sgr B2(N); Nummelin et al. 2000)。該分子與丙氰波形相似，且其 LSR 速度與丙氰接近，這可能說明兩者之空間分佈相似。

7. 乙醇($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$):

該分子在普查出現次數頗多，但一般 T_R^* 強度比上述各類分子之譜線較弱。大概約在 100 至 300 mK 當中。其平均 LSR 速度約在 7.45 km s^{-1} (Orion KL)、 63.49 km s^{-1} (Sgr B2(N)) 及 56.16 km s^{-1} (W51 e1/e2)；譜線半高全寬平

均約為 2.21 km s^{-1} (Orion KL)、 4.70 km s^{-1} (Sgr B2(N))及 3.89 km s^{-1} (W51 e1/e2)。乙醇分子之柱密度分別為 $9.2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ (Orion KL)及 $1.8 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ (Sgr B2(N) ; Turner 1991)。

4-2 分子譜線之鑑定

在鑑定譜線的過程中，產生不少問題與心得，就個別項目逐一討論：

(一) 譜線在三個目標源在光譜圖中所表現的輪廓樣貌各有不同。大致上來說，同一分子所產生的譜線，以 Orion KL 的最強最尖銳，在鑑定過程當中通常是用 Orion KL 之對應靜止頻率與資料庫先行核對，並作為重要參考標準。另外兩個目標源以 Sgr B2(N)所呈現的譜線最寬，譜線混雜之情況也最嚴重。其容許合理的 LSR 速度範圍因此也最大，在判斷上產生不少難處。而 W51 e1/e2 的譜線雖不像 Sgr B2(N)那麼寬，但是普遍來說譜線的強度都比前兩者來得弱。微弱的譜線落在“譜線森林”中，不易辨認。

(二) 一般來說，三個目標源所顯示的光譜面貌，在同一頻帶中會有七分神似；在此有對比及相互參考的條件下，不管強線弱線都比較容易判讀譜線為何種。若光譜圖中僅有單一目標源者(即使僅有 Orion KL 亦同)，在辨認譜線時缺乏相互對照參考，往往不能確認之譜線會因此而較多。

(三) 有些光譜(如中心頻率 208019 MHz 之 Sgr B2(N) ; 圖 3-6)，在譜線中基線似乎呈現如正弦波的低階強度變化，這在譜線鑑定上也產生不少困擾。

(四) 從整體數據注意到，分子內之原子數目在四到五個以下時，預測積分強度 $\text{Log}(I)$ 值，在 -5.5 以上是可觀測到；而原子數目六個以上時，一般需在 $\text{Log}(I) = -4.5$ 以上才有機會觀測得到。這是由於簡單的分子較容易在星際空間形成，造成數量上的優勢所致。同一分子的不同躍遷譜線可能會呈現不同的 LSR 速度，這是由於分子躍遷受到不同激發機制而產生，從而反映出熱分子雲核中不同區域的速度場所致。簡單的分子分佈範圍廣，其速度分佈差異因而較大，所以譜線顯得較寬，並因衝激波激發而呈現不對稱的輪廓，如 SO_2 即是最典型的例子。

(五) 中心頻率為 205559 MHz 的 Sgr B2(N) 光譜圖(圖 3-4)分別顯示出有 CH_3OH 分子所引起的吸收譜線。這是由於該熱分子雲核的外圍包著一層低溫(約在 45 K)之延展雲氣封包；Nummelin et al. (2000) 導出 Sgr B2 外圍雲氣甲醇柱密度約為 $1.0 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ 。Orion KL 和 W51 e1/e2 並未顯示吸收譜線之情形。

(六) 三個熱分子雲核的譜線輪廓與強度之比較：

a. 輪廓比較：分子譜線顯示出 LSR 速度分佈以 Sgr B2(N) 最廣，使得光譜中譜線混雜程度最嚴重；Orion KL 的譜線輪廓最尖銳，顯示 LSR 速度範圍定義最明確，所以是最容易判斷為哪個分子所發出。

b. 強度比較：大致來說，分子所產生之譜線以 Orion KL 最強，W51 e1/e2 最弱，這可能是與分子之柱密度有關。如在電波波束為 30 角秒時，所對應到直徑分別為 0.07 pc(Orion KL)、1.24 pc(Sgr B2(N))及 1.02 pc(W51 e1/e2)。雖然理論上對應範圍愈大，涵蓋之分子數量也愈多，但是波束若大到將熱分子雲核外，分子密度較稀薄之區域也包含在內的話，望遠鏡會將所有接收到的能量通量密度稀釋，造成觀測到的譜線強度減弱。

(七) 分子譜線的 T_R^* 強度與該分子的數量、所處於之激發溫度以及分子本身特性有關。這裡所說的分子特性包含了分子的電偶極矩與分割函數，分割函數是描述分子在特定激發溫度下可容許躍遷程度之多寡。溫度愈高，代表分子不同轉動躍遷之分佈型態愈多，其值會變大。但分子若呈現線性(如 CO、HCN)或是對稱轉子(symmetric top)(如 CH₃CN、CH₃CCH)，則分割函數會變小。

4-3 邊頻帶棄絕

現在討論有關對映邊頻帶棄絕(image sideband rejection)對譜線鑑定過程所造成之干擾。在觀測中望遠鏡可同時接收上邊頻帶(upper sideband)與下邊頻帶(lower sideband)的訊號。所以觀測時，選定使用一組邊頻帶(通常是上邊頻帶)並且捨棄另一對映(image)邊頻帶之訊號，此即為一般所稱之邊頻帶棄絕。一般來說，邊頻帶棄絕都會大於或等於 20 dB。換句話說，從對映邊頻帶來之訊號會衰減一百倍以上。除非是極強的訊號(如譜線強度 ≥ 10 K)，否則從對映邊頻帶進入之訊號，不會滲入目標邊頻帶，從而干擾到譜線認定。因此在大部分情況下，對映邊頻帶之訊號是不會干擾到目標邊頻帶的數據。不過本次研究中，吾人發現到有兩個光譜，邊頻帶棄絕相當低，影響光譜本身之可靠性，討論如下。

(一)、中心頻率 217917 MHz 之光譜：

在進行譜線判定時，發現中心頻率 217917 MHz 光譜中之強線訊號在資料庫都無法找到可合理對應之頻率與預測強度值，但在檢驗是否為對映邊頻帶之譜線時，結果幾乎完全吻合。所以吾人推斷，此對映邊頻帶之棄絕(rejection)未達 20 dB，故嘗試驗證實際採用之棄絕。出現在目標邊頻帶中之對映邊頻譜線之實際頻率計算方式如下：

$$v_0 = v_c - v_{\text{off}} - (1.5 \text{ GHz} \times 2)$$

v_0 是對映譜線實際之頻率； v_c 是目標邊頻中心頻率； v_{off} 為目標邊頻中譜線所在位置與中心頻率之差值；1.5 GHz 為中間頻率(intermediate frequency)。

圖 4-1 中靠右邊($v_{\text{off}} = 227.23 \text{ MHz}$)有條強線，若該線來自對映邊頻，計算出原來之頻率是 214690.11 MHz。考慮其譜線強度(line intensity)及譜線輪廓，我們發現此線實來自頻率 214689.38 MHz 之 SO_2 躍遷。另外圖中左側有條譜線其橫軸讀值為 -204.42 MHz，算得譜線原來之頻率為 214121.76 MHz，查到對應之分子應為 $\text{C}_2\text{H}_5\text{CN}$ ，譜線頻率為 214119.21 MHz。檢視其他頻帶，發現此 $\text{C}_2\text{H}_5\text{CN}$ 譜線正巧同時涵蓋在中心頻率為 215262 MHz 的光譜中。因此我們可將在 215262 MHz 光譜中之 $\text{C}_2\text{H}_5\text{CN}$ 線實際強度與 217917 MHz 光譜中之強度來做比較，以作為日後參考。表 4-1 為中心頻率 217917 MHz 之邊頻帶棄絕與對應到在中心頻率 215262 MHz 之四條 $\text{C}_2\text{H}_5\text{CN}$ 分子譜線實際強度。

表 4-1. 217917 MHz 光譜之邊頻帶棄絕衰減估計

$\text{C}_2\text{H}_5\text{CN}$ 譜線頻率 (MHz)	對映邊頻帶強度 ^a T_R^* (mK)	實際強度 ^b T_R^* (mK)	對映邊頻帶強度 / 實際強度
215109.05	790	1030	0.767
215119.21	880	1080	0.815
215126.71	540	750	0.720
215173.24	340	450	0.756

^a：在中心頻率為 217917 MHz 光譜中所顯示的強度。

^b：在中心頻率為 215262 MHz 之比較光譜中的強度，此實為該譜線之真正強度。

將此四條譜線所得到對映邊頻帶強度除以實際強度的比值取平均值後，再化成分貝數值為-1.217 dB(負值代表訊號衰減)。這裡棄絕衰減的轉化公式為：

$$\text{棄絕衰減(dB)} = 10 \times \log(\text{對映邊頻帶強度} / \text{實際強度})$$

這說明了這個 217917 MHz 光譜的邊頻帶棄絕是相當小，對判斷譜線時會產生偌大的干擾。

(二)、中心頻率 212994 MHz 之光譜：

同樣地，我們發現中心頻率 212994 MHz 之光譜(圖 4-2)，也有同樣棄絕不足之情況發生。在這個光譜中之對映邊頻帶訊號回推其真正頻率為 209994±300 MHz 之範圍。不幸的是，我們並無其他頻帶涵蓋同一頻率範圍，故無法直接作比較。我們為了想瞭解原來譜線有多強，以便於計算棄絕之衰減值，所以將已鑑定辨識完成的強線中，挑出一些“標準”譜線來做基準。由於在對映邊頻中以甲酸甲酯(HCOOCH₃)的譜線最多也最強，所以我們選定甲酸甲酯作為量測棄絕程度之依據。先將其他光譜中甲酸甲酯，根據下列兩篩選原則作挑選。第一點是選擇不與鄰近譜線混和的譜線，即使是甲酸甲酯所產生之頻率相同或相近的躍遷也不行。第二點是選擇譜線強度高的(大於 300 mK 以上)，因為不強的譜線易遭到其他鄰近譜線與雜訊的侵入。以上選擇方式僅適用於 Orion KL，另外兩個目標原因譜線較寬，訊號疊合情形嚴重，統計誤差亦較大。表 4-2 列出所選出作為比較用之甲酸甲酯譜線。將表 4-2 中以譜線強度(I)對對映邊頻帶之 T_R^* 取一次線性回歸，得出下列關係式：

$$\text{HCOOCH}_3 : I = (1 \times 10^{-7}) T_R^* + 4 \times 10^{-6}$$

若以 Orion KL 在中心頻率為 212994 MHz 之光譜中(圖 4-2)，最靠右側之 HCOOCH₃ 分子譜線 209853.56 MHz 為例。我們判定此邊頻帶棄絕訊號是

由 HCOOCH_3 209853.56 MHz 躍遷所致。查詢資料庫得其 $\text{Log}(I)$ 值 -3.9833，套用上式推得原來 T_R^* 強度應為 999 mK。表 4-3 顯示 HCOOCH_3 分子之邊頻帶棄絕衰減估計，由五條譜線所得到的比值取平均值後，最後推斷棄絕衰減值只有 1.994 dB(即衰減約 1.6 倍)，遠小於通常之 20 dB(即衰減 100 倍)。

綜合上述對兩個光譜的所作邊頻帶棄絕估計，除了可以讓我們瞭解邊頻帶棄絕有時會因儀器操作上之失誤而小於 20 dB，另外也對判定分子譜線時，推算分子譜線強度以瞭解儀器的偵測極限有所助益，並減少我們誤判譜線的機率。

表 4-2. 選擇甲酸甲酯標準譜線一覽表

HCOOCH ₃ 譜線頻率 (MHz)		Orion KL T _R [*] (mK)	Log(I) ^a (T _{ex} =300 K) ^b
203853.69	E	1050	-3.8644
203864.15	A	1040	-3.8644
205250.76	E	390	-4.7139
205257.10	A	370	-4.7138
206247.83	E	1570	-3.8845
206270.42	A	1660	-3.8844
206619.38	A	1520	-3.8677
206710.76	E	1640	-3.8503
206719.85	A	1500	-3.8502
208729.54	E	360	-4.4982
208776.61	E	810	-4.1682
208804.60	E	720	-4.1680
208886.42	E	600	-4.2547
208905.67	E	790	-4.2546
216830.11	E	1520	-3.7983
216838.85	A	1500	-3.7983

^a : I 為譜線強度。

^b : T_{ex} 是激發溫度。

表 4-3. 212994 MHz 光譜之邊頻帶棄絕衰減估計

HCOOCH ₃ 譜線頻率 (MHz)		對映邊頻帶強度 T _R [*] (mK)	Log(I) (T _{ex} =300 K)	實際強度 ^a T _R [*] (mK)	對映邊頻帶強度 / 實際強度
209853.56	E	670	-3.9833	999	0.671
209870.73	A	1270 ^b	-3.6822	2039	0.623
209873.25	E	810	-3.9832	999	0.810
209918.45	E	1190 ^c	-3.8554	1355	0.509
209932.61	A	2440 ^d	-3.8554	1355	0.546

^a : 採用上述一次回歸關係式所算得結果。

^b : 該訊號是由兩條相近之甲酸甲酯譜線疊加起來，其 I 值應相加再作修正。

^c : 該訊號與另對映邊頻帶訊號 SO₂ 疊合，大約減去 500 mK 才是應有訊號強度。

^d : 該訊號與另對映邊頻帶訊號 SO₂ 疊合，大約減去 1700 mK 才是應有訊號強度。