

野辺山 45m 電波望遠鏡を用いた銀河系外縁部における分子雲サーベイ

松尾 光洋 (鹿児島大学大学院 理工学研究科)

Abstract

我々は野辺山 45m 電波望遠鏡およびマルチビーム受信機 BEARS を用いて $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ 輝線のサーベイを行い、その観測から銀河系外縁部における分子雲のリストを作成して CO-to- H_2 変換係数 (X_{CO}) を求めた。銀河系における X_{CO} についての研究は数多くされており、銀河系半径が大きくなるにつれて大きくなるという研究 (Arimoto et al. 1996) があるが銀河系半径 $R=11\text{kpc}$ 程度までしか X_{CO} は求められておらず、 $R=11\text{kpc}$ 以遠でも動径変化が見られるのかは明らかではない。そこで我々は銀経 l が $212^\circ 5$ から $214^\circ 0$ 、銀緯 b が $-0^\circ 25$ から $0^\circ 25$ の範囲を野辺山 45m 電波望遠鏡およびマルチビーム受信機 BEARS を用いて $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ 輝線の OTF 観測を行った。これにより得られた 3次元マップから CLUMPFIND (Williams et al. 1994) を使用して分子雲のリストを作成し、それぞれの分子雲のサイズや線幅などを求めた。その結果、銀河定数 (R_0, Θ_0) = (8.0kpc, 217km/s) として運動学的距離を求めると $R = 8 - 15\text{kpc}$ に存在する分子雲を検出できた。また Solomon et al. (1987) よりサイズが小さい分子雲のサイズ線幅関係を得ることができた。求めたサイズと線幅からピリアル質量を計算し、それと分子雲の積分強度を用いて X_{CO} を決定した。その結果、 X_{CO} は Arimoto et al. (1996) の結果と連続的に銀河系半径とともに大きくなる傾向があることがわかった。

1 Introduction

分子雲とはガスが主として分子の状態にある星間雲のことで一般に 10K 程度と温度が低い。そのため可視光や赤外線などの電磁波では放射されず、分子の回転遷移により放射されるミリ波やサブミリ波の電磁波が放射される。また分子雲の主成分が水素分子であるにも関わらず温度が低いため水素分子は放射しない。したがって観測できる分子から水素分子を見積もる必要がある。 $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ の観測される強度から水素分子の柱密度に変換する係数を CO-to- H_2 変換係数と言い、 X_{CO} と書く。それを式で書くと

$$X_{\text{CO}} = \frac{N(\text{H}_2)}{I(\text{CO})} [\text{cm}^{-2}(\text{Kkm/s})^{-1}] \quad (1)$$

である。Arimoto, Sofue & Tsujimoto (1996) によると太陽近傍での X_{CO} の値は $(2.8 \pm 1.6) \times 10^{20} [\text{cm}^{-2}(\text{Kkm/s})^{-1}]$ である。 X_{CO} については銀河系内で定数であるという結果 (e.g., Heyer et al. 2009; Magdis et al. 2011) や金属量に依存するという結果 (e.g., Wilson 1995; Arimoto et al. 1996; Israel 1997; Leroy et al. 2011; Genzel et al. 2012; Schrubba 2012)、さらに銀河系内でも銀河系中心から

の距離に依存するという結果 (Arimoto et al. 1996) がある。Arimoto, Sofue & Tsujimoto (1996) によると銀河系中心からの距離が増加するとともに X_{CO} も増加している傾向が見られるが、銀河系中心からの距離 $R=11\text{kpc}$ 程度までしか求められておらず、それ以遠はどうなるのか明らかではない。

2 Observations

我々は野辺山 45m 電波望遠鏡を用いて 2007 年 1 月に銀河系外縁部方向の $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ (115GHz) を OTF (On The Fly) 観測した。受信機はマルチビーム受信機 BEARS (the 25-BEam Array Receiver System) を使い、分光計は AC (32MHz) を使用した。空間分解能は $15''$ 、速度分解能は 0.16km/s である。観測領域は銀経が $212^\circ 5$ から $214^\circ 0$ 、銀緯が $\pm 0^\circ 25$ の範囲である。図 1 は観測の結果得られた積分強度図である。グリッドサイズは $15''$ であり、感度は $0.7\text{K}(\text{km/s})^{-1}$ となっている。

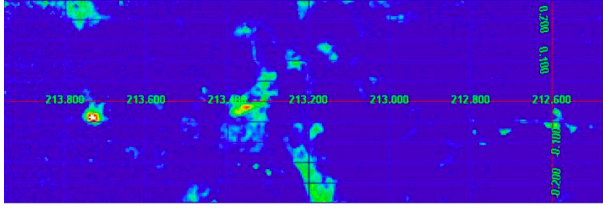


図 1: 我々が観測を行った $(l, b) = (212.5^\circ - 214.0^\circ, \pm 0.25)$ 領域の積分強度図。

3 Methods

前章で紹介した観測データから分子雲のリストを作成するために CLUMPFIND (Williams et al. 1994) を使用し、その結果得られたパラメーターから分子雲それぞれの X_{CO} を求めた。ここでは観測データから X_{CO} を求めるまでの方法を記述する。

本研究では、前章で紹介した観測データから分子雲のリストを作成するために CLUMPFIND を使用した。必要なパラメーターとしては、Lowest contour level と Contour increment の 2 つだけである。Lowest contour level とは分子雲と判断するピークの最低値であり、今回はマップのノイズの 5 倍と設定した。Contour increment とは 2 つの隣り合った分子雲を分けるための高低差であり、この値よりも大きい高低差だと 2 つに分けられる。この値もノイズの 5 倍と設定した。

CLUMPFIND の出力される結果としては x, y, v がピーク値の位置であり、 x, y の値はマップのピクセル値で、 v はチャンネル数である。ここで注意したいのが v は 0 から始まるので 1 から始まるチャンネル数とは一致しない。 T_{peak} はピーク値の輝度温度である。 $FWHM_x, FWHM_y, FWHM_v$ は x, y, v 方向の T_{peak} の半値幅である。 N_{pix} は分子雲と判断したピクセル数の合計であり、 $\text{Sum}(T)$ がその分子雲の輝度温度の合計である。また、 R は銀河中心からの距離だが、位置と視線速度から自分で銀河定数を設定して計算した。そして T_{peak} が大きい順に分子雲のリストが出力される。運動学的距離を求める際に使用した銀河定数は、Arimoto, Sofue & Tsujimoto (1996) で使用していた $R_0 = 8\text{kpc}$ と合わせるために、 $R_0 = 8\text{kpc}, \Theta_0 = 217\text{km/s}$ を使用した (Dehnen

& Binney 1998; Nakanishi & Sofue 2003; Nakanishi & Sofue 2006)。

次に CLUMPFIND で得られたパラメーターから X_{CO} を算出するためにまずビリアル質量を求める。ビリアル質量は Solomon et al. (1987) の式を参考にして計算を行った (式 2)。

$$M_{\text{VT}} = 3f_p \frac{S(\sigma_v)^2}{G} (M_\odot) \quad (2)$$

ここで M_{VT} がビリアル質量であり、 f_p はここでは 2.9 という値を用いる。 S は分子雲のサイズであり、

$$S = D \tan(\sqrt{\sigma_l \sigma_b}) \quad (3)$$

から得られる。 D は太陽から分子雲までの距離、 σ_l, σ_b はそれぞれ銀経、銀緯方向の分子雲の標準偏差である。 σ_v は線幅で、 G は太陽質量を掛けて km/s と pc を単位とした万有引力定数であり、 $G=1/232[(\text{km/s})^2\text{pc}]$ である。したがって、CLUMPFIND の結果からビリアル質量を求めることができる。

最後にビリアル質量を利用し X_{CO} を算出する。そのために次の等式をたてる。

$$\Sigma(X_{\text{CO}} I(\text{CO}) S_{\text{pix}}) m_{\text{H}_2} \frac{100}{71} = M_{\text{VT}} \quad (4)$$

ここで、 S_{pix} は 1pix での面積であり、 m_{H_2} は水素分子 1 個の質量である。最初の合計の項は分子雲にある水素分子の個数を示しており、左辺の $100/71$ は水素が分子雲中に 71% 存在すると考えて全体の質量を考慮した。 X_{CO} と S_{pix} は定数なのでこれを整理すると、

$$X_{\text{CO}} = \frac{M_{\text{VT}}}{\frac{100}{71} \Sigma(I(\text{CO})) S_{\text{pix}} m_{\text{H}_2}} \quad (5)$$

となり、 X_{CO} を求めることができる。これを用いてそれぞれの分子雲について X_{CO} を計算した。

4 Results & Discussion

2 章で紹介した観測データから CLUMPFIND を使用して分子雲のリストを作成した。ここで使用したパラメーターは Lowest contour level = 3.5K、Contour increment = 3.5K であり、これらの値はノイズの 5 倍である。この実行結果からさらに線幅が 0.1km/s

表 1: CLUMPFIND の結果から計算した分子雲のパラメーター。58 天体のうち 5 天体を示す。

N_{cl}	l [°]	b [°]	V_{lsr} [km/s]	σ_l [°]	σ_b [°]	σ_v [km/s]	R [kpc]	D [kpc]	S [pc]	M_{VT} [M_{\odot}]	$\Sigma I(\text{CO})$ [K km/s]
1	213.731	-0.038	44.5	0.056	0.064	3.205	12.684	5.228	5.484	113690.826	24600.39
2	213.185	-0.208	22.5	0.063	0.058	1.889	9.870	2.150	2.266	16321.229	22697.75
3	213.373	-0.017	18.5	0.045	0.040	2.555	9.467	1.701	1.251	16481.719	13498.62
4	213.327	-0.038	37.5	0.060	0.082	1.671	11.671	4.127	5.060	28518.713	20782.27
5	213.181	-0.067	23.5	0.031	0.063	1.96	9.974	2.266	1.745	13531.508	7147.6

に満たないものはノイズだと判断し除外した。その結果 58 天体の分子雲が検出された。

その結果を使用し分子雲のパラメーターを計算した。それを示したのが表 1 である。ここでは検出された 58 天体のうち 5 天体を表示している。 l [°] は銀経、 b [°] は銀緯、 V_{lsr} [km/s] は視線速度を表している。 σ_l [°]、 σ_b [°] はそれぞれ銀経、銀緯方向の標準偏差であり、 σ_v [km/s] は線幅である。 R [kpc] は銀河系中心から分子雲までの運動学的距離であり、また D [kpc] は太陽から分子雲までの運動学的距離である。 S [pc] は式 (3) により求めた分子雲のサイズである。 $M_{VT}[M_{\odot}]$ は式 (2) から求めたビリアル質量である。 $\Sigma I(\text{CO})$ [K km/s] は分子雲全体の積分強度である。

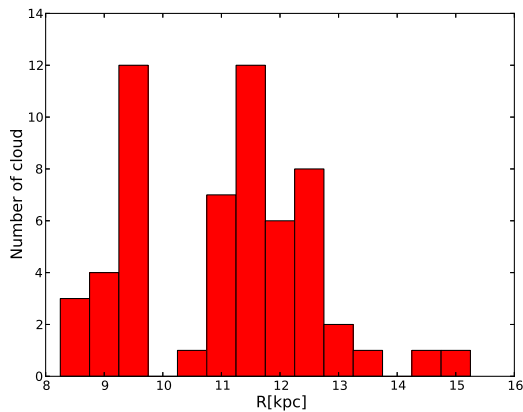


図 2: 銀河系中心からの距離 R に対する分子雲の数。

表 1 で示した R に対して分子雲の数をとったヒストグラムが図 2 である。これを見ると $R=9.5\text{kpc}$,

11.5kpc 辺りに存在する分子雲が多く、 $R=10\text{kpc}$, 14kpc には分子雲がないことがわかる。これは Local arm と Perseus arm に付随する分子雲が多いということである。さらに $R=15\text{kpc}$ 辺りには Outer arm の存在も示唆する。

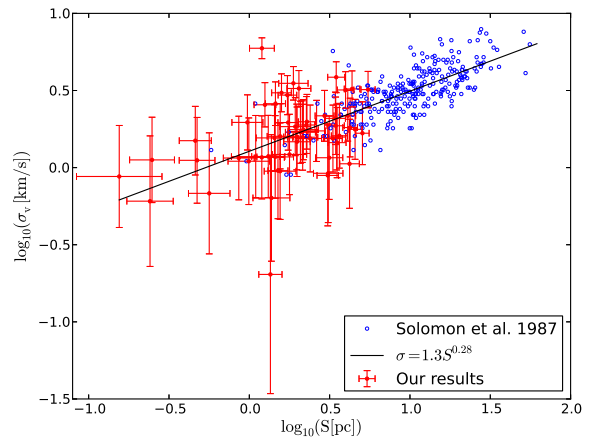


図 3: 我々の結果と Solomon et al. (1987) を合わせたサイズと線幅の関係。直線は我々の結果だけを使って最小二乗法で求めた近似式で $\sigma = 1.3S^{0.28}$ である。

続いて、サイズと線幅の関係を図 3 に示す。誤差棒付きの赤プロットが我々の結果であり表 1 で求めたサイズと線幅を使用している。サイズの誤差は 1 ビーム分で 15 [arcsec] で、線幅の誤差はマップの 1ch の間隔である 1[km/s] である。青丸のプロットは Solomon et al. (1987) の結果である。これらの結果から我々はこれまで得られていなかったサイズが小さい分子雲で

のサイズと線幅の関係が得られた。そして Solomon et al. (1987) に対して我々の結果では勾配が小さいことがわかった。

最後に、今回得た分子雲のパラメーターを使用して 3 章の方法で各分子雲の X_{CO} を求めた。その結果と Arimoto, Sofue & Tsujimoto (1996) で求められている X_{CO} を同時にプロットし、縦軸を対数とした片対数グラフにしたものが図 4 である。赤のプロットが我々の結果であり、1kpc 毎に X_{CO} の平均をとり、分散を縦軸方向の誤差棒で示している。直線はすべてのプロットでの最小二乗近似であり、 $X_{\text{CO}} = 1.0 \times 10^{20+0.05R}$ である。Arimoto, Sofue & Tsujimoto (1996) では 11kpc 程度までしか求められていなかったが、本研究ではそれより遠い 15kpc 程度まで得ることが出来た。Arimoto, Sofue & Tsujimoto (1996) で見えていた銀河系中心からの距離が大きくなると X_{CO} も大きくなる傾向が我々の結果からも見ることができた。

Genzel, R. et al. 2012, ApJ, 746, 69
 Heyer, M., Krawczyk, C., Duval, J., & Jackson, J. M. 2009, ApJ, 699, 1092
 Israel, F. P. 1997, A&A, 328, 471
 Leroy, A. K. et al. 2011, ApJ, 737, 12
 Magdis, G. E. et al. 2011, ApJ, 740, 15
 Nakanishi, H., & Sofue, Y. 2003, PASJ, 55, 191
 Nakanishi, H., & Sofue, Y. 2006, PASJ, 58, 847
 Schruba, A. et al. 2012, ApJ, 143, 138
 Solomon, P. M., Rivolo, A. R., Barrett, J., & Yahil, A. 1987, ApJ, 319, 730
 Williams, J. P., de Geus, E. J., & Blitz, L. 1994, ApJ, 428, 693
 Wilson, C. D. 1995, ApJ, 448, 97

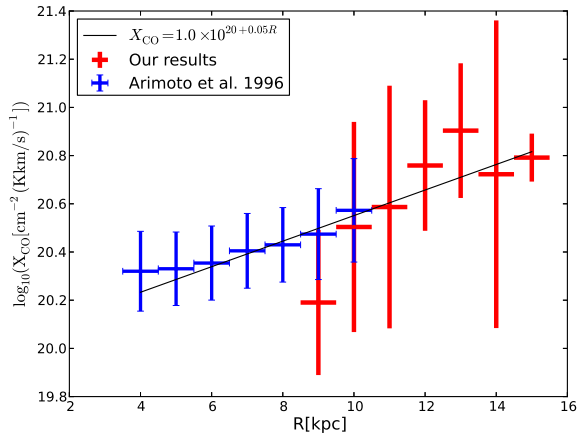


図 4: 我々が算出した X_{CO} の結果と Arimoto, Sofue & Tsujimoto (1996) の結果。直線は両方の結果での最小二乗近似である。

Reference

Arimoto, N., Sofue, Y., & Tsujimoto, T. 1996, PASJ, 48, 275
 Dehnen, W. & Binney, J. 1998, MNRAS, 294, 429