

銀河系外縁部における CO-to-H₂ 変換係数の算出

松尾 光洋、中西 裕之、田中 亜矢子、他観測チーム
鹿児島大学 理工学研究科 物理・宇宙専攻

Abstract

我々は野辺山 45m 電波望遠鏡を用いた ¹²CO(*J*=1-0) 観測データと ASTE10m 電波望遠鏡を用いた ¹²CO(*J*=3-2) の観測データを使って、CO-to-H₂ 変換係数 (X_{CO}) を求めた。

これまで X_{CO} は銀河系中心距離 11kpc より内側で銀河系半径とともに大きくなる傾向が見られるが (Arimoto et al. 1996)、銀河系中心距離 11kpc 以遠でも同様の傾向が見られるかは明らかでない。

そこで我々は銀河系外縁部の分子雲について複数の方法で X_{CO} を調べ比較した。

1つ目の方法は銀河系外縁部 (*l, b*) = (213°, 0°) 方向の分子雲について ¹²CO(*J*=1-0) および ¹²CO(*J*=3-2) 輝線の解析を行い、分子線解析用のコード RADEX (van der Tak F. F. S. et al. 2007) を用いて水素分子の体積密度、運動温度を決定して、Bonnor-Ebert 球モデル (Bonnor 1956, Ebert 1955) でフィットすることにより求めた。2つ目の方法として IDL の clumpfind (Williams et al. 1993) を使ってサイズや線幅を求めてピリアル質量を計算し、 X_{CO} を求めた。これらにより銀河系外縁部における X_{CO} の値とその動径変化を調べることができた。

1 導入

まずはじめに CO-to-H₂ 変換係数 (X_{CO}) について紹介する。

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

X_{CO} とは式 (1) のように、水素分子の柱密度を ¹²CO(*J*=1-0) の強度で割ったものである。

分子雲では温度が低く、H₂ は電磁波を放射しないので、CO の強度から水素の密度を求められる X_{CO} はとても重要である。

Arimoto et al. 1996 によると、太陽近傍では $X_{CO} = (2.8 \pm 1.6) \times 10^{20}[\text{cm}^{-2}(\text{Kkm/s})^{-1}]$ であり、銀河系中心からの距離が大きくなると X_{CO} も大きくなっている (Figure 1)。

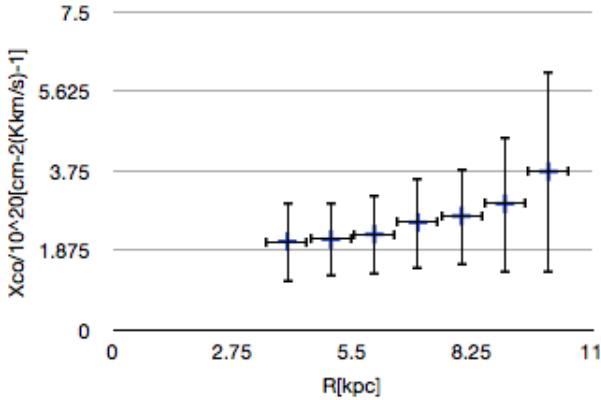


Figure 1: 銀河系中心からの距離に対する X_{CO} (Arimoto et al. 1996)。縦軸は X_{CO} を 10^{20} で割ったもの。

2 データ紹介

2.1 野辺山 45m 電波望遠鏡での観測

2007年1月に ¹²CO(*J*=1-0)(115GHz) を *l* = 212.5–214°, *b* = –0.25 – 0.25° の領域について On The Fly (OTF) 観測した。受信機は BEARS を使い、分光器は AC(32MHz) を使用した。空間分解能は 15″ で、速度分解能は 0.16km/s である。また速度幅は –20 – 120km/s である。Figure 2 はこの観測によって得られたデータから作成された ¹²CO(*J*=1-0) のマップである。

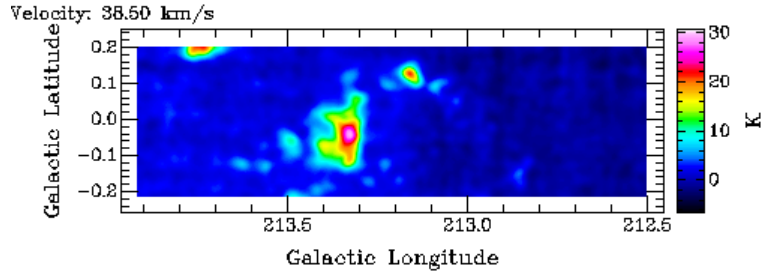


Figure 2: 観測データから作成されたチャンネルマップの一部

2.2 ASTE での観測

2010年9月に ¹²CO(*J*=3-2)(345GHz)、¹³CO(*J*=3-2)(330GHz) を ASTE で観測した。2.1 節での観測結果からピックアップした 6 つの分子雲の中心 1 点を ¹²CO(*J*=3-2) で観測し、そのうち 3 つを同じく中心 1 点を ¹³CO(*J*=3-2) で観測した。受信機は CATS345 を使い、分光器は MAC を使用した。空間分解能は 22″ で、速度分解能は 0.11km/s である。

そしてデータ解析結果を Table 1 に示す。

Table 1: データ解析結果。左から cloud 名、銀経、銀緯、視線速度、それぞれの輝線強度を表記している。強度に \leq が付いているものは受かっておらず rms の値である。

No.	<i>l</i> [°]	<i>b</i> [°]	<i>V_r</i> [km/s]	¹² CO(<i>J</i> =1-0)	¹² CO(<i>J</i> =3-2)	¹³ CO(<i>J</i> =3-2)
				[Kkm/s]	[Kkm/s]	[Kkm/s]
1	213.516	0.192	10	13.0273	0.664	≤0.00585
2	213.787	0.017	25	15.4055	≤0.0129	-
3	213.733	-0.146	51	16.3474	0.643	≤0.0125
4	213.570	-0.154	10	21.6488	0.492	≤0.00466
5	213.429	0.154	9	9.0680	0.429	-
6	213.883	0.017	11	11.9578	≤0.0128	-

3 X_{CO} を求める方法

3.1 方法 1

観測で得た ¹²CO(*J*=3-2)/¹²CO(*J*=1-0) の強度比を用いて RADEX (van der Tak F. F. S. et al. 2007) を利用することに

よりそれぞれの分子雲中心の水素分子体積密度 $n(\text{H}_2)$ と運動温度 T_k の関係を求めることが出来る。例として cloud1 の場合を Figure 3 に示す。

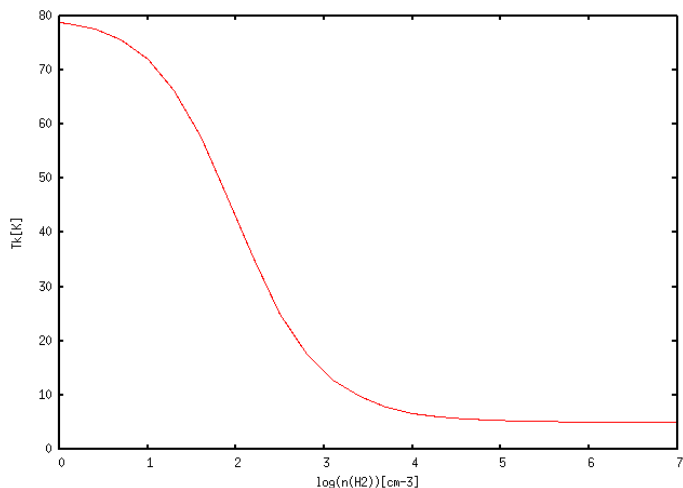


Figure 3: cloud1 中心の $n(\text{H}_2)$ と T_k の関係。cloud1 中心の状態がこの線上のどこかにあるということ。

次に分子雲中心の $n(\text{H}_2)$ と T_k 、分子雲の半径を与えると描ける Bonnor-Ebert 球モデル (Bonnor 1956, Ebert 1955) を先ほど求めたパラメータを使って描く。このモデル作成は kandori et al. 2005 を参考にした。そしてそのモデルと観測データを上手く合わせることによって X_{CO} を求めることが出来る。例として cloud1 の場合を Figure 4 に示す。

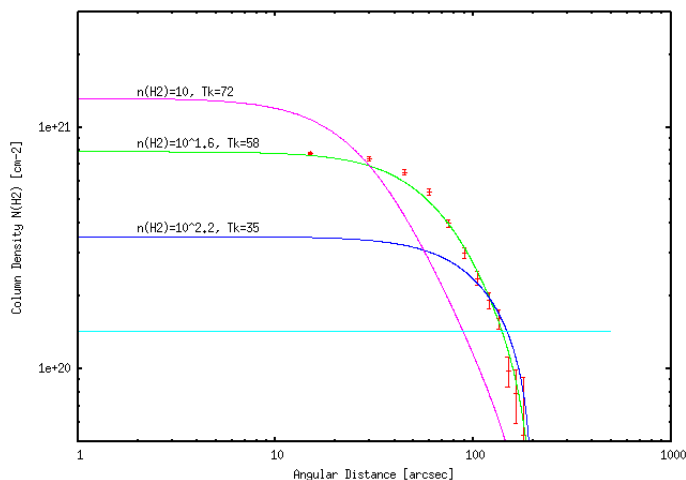


Figure 4: cloud1 の観測結果とモデルを合わせた図。横軸は分子雲の半径で、縦軸は水素分子の柱密度。エラーバー付きの赤プロットが観測から得た $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ の強度に X_{CO} を掛けたもの。緑、青、桃色線が Bonnor-Ebert 球モデル。水色の直線はノイズの 3 倍となる線。この時は緑線のモデルがよく合っている。

3.2 方法 2

IDL (Interactive Data Language: データ分析用のプログラミング言語) の clumpfind (Williams et al. 1993) を使って Figure 2 に存在する分子雲の線幅やサイズを調べ、ピリアル質量を求めることで X_{CO} を得ることが出来る。ピリアル質量を求める際には Solomon et al. 1987 を参考にした。

4 結果

方法 1 と 2 で得られた結果と Arimoto et al. 1996 をまとめてプロットしたのが Figure 5 である。方法 2 で得られた結果は Arimoto et al. 1996 で見られるような銀河中心からの距離の増加に対して X_{CO} も増加する傾向が見られる。しかし、方法 1 で得られた結果は Arimoto et al. 1996 の結果より低い値となっており、Table 2 で示すように方法 1 と方法 2 の結果を比較しても大きな違いが見られるため原因を究明することが現在の問題である。

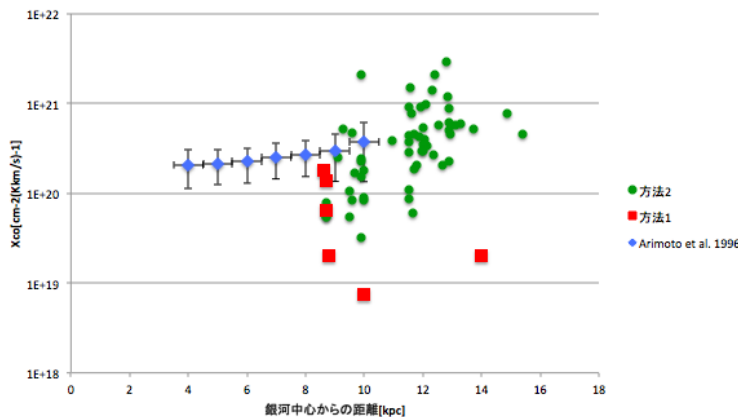


Figure 5: 方法 1 と 2 で得られた結果と Arimoto et al. 1996

Table 2: 方法 1 と方法 2 の結果を比較

name	R [kpc]	方法 1 の X_{CO} [cm ⁻² Kkm/s]	方法 2 の X_{CO} [cm ⁻² Kkm/s]
cloud1	8.7	1.4×10^{20}	7.9×10^{19}
cloud2	10	7.5×10^{18}	2.6×10^{21}
cloud3	14	2.0×10^{19}	5.2×10^{20}
cloud4	8.7	6.5×10^{19}	5.4×10^{19}
cloud5	8.6	1.8×10^{20}	1.0×10^{20}
cloud6	8.8	2.0×10^{19}	1.0×10^{20}

References

- Arimoto, N., Sofue, Y., & Tsujimoto, T. 1996, PASJ, 48, 275
 Bonnor, W. B. 1956, MNRAS, 116, 351
 Ebert, R. 1955, ZA, 37, 217
 Kandori, R., Nakajima, Y., Tamura, M., et al. 2005, AJ, 130, 2166
 Solomon, P. M., Rivolo, A. R., Barrett, J., & Yahil, A. 1987, ApJ, 319, 730
 van der Tak, F. F. S., Black, J. H., Schöier, F. L., Jansen, D.J., & van Dishoeck, E. F. 2007, A&A, 468, 627
 Williams, J. P., de Geus, E. J., & Blitz, L. 1994, ApJ, 428, 693