

## 「高銀緯天体 MBM53, 54, 55 の分子雲と原子雲」

服部 桃 (名古屋大学大学院 理学研究科)

### Abstract

高銀緯分子雲 (High Latitude Clouds: 以下 HLCs) は典型的に銀緯  $b > 20$  度に位置する天体である。現在までに Magnani et al. (1985) をはじめとする様々な研究が行われてきた。MBM53, 54, 55 領域の分子雲は、Magnani et al. (1985) により発見されており、「なんてん」望遠鏡による観測でその全体像が明らかにされている (Yamamoto et al. 2003)。しかし、「なんてん」の観測はビームサイズ 2.6 分角に対し 4 分角グリッドであったため、アンダーサンプリングであったこと、比較に用いた水素原子データの分解能が 35 分角であったことなど、現在改善可能な点が多い。そこで、Kaji 修士論文 (2013) では、新しくフルサンプリングの機能を得た NANTEN2 のデータと、GALFA-HI survey ((Peek et al. 2011)) の 4 分角のデータ、更に IRAS100 $\mu\text{m}$  のデータを用いて分子雲、原子ガスとダストについて、空間分布と存在量の比較を行っている。この研究結果から、原子ガスに付随するダストからの放射強度と、分子ガスに付随するダストからの放射強度の違いが、ダスト温度の違いで説明できることを示し、CO と  $H_I$  の観測量からダストの物理量 (100 $\mu\text{m}$  の放射強度) を表すことができるとわかった。

### 1 Introduction

宇宙の起源を明らかにすることは、人類にとって最も重要な課題の 1 つである。我々はすでに、この宇宙が約 137 億年前にビッグバンを経て誕生したことを知っている。これまで、COBE や WMAP などの天文衛星により、宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic Microwave Background: CMB) の観測が行われてきた。CMB には、宇宙が誕生してから 38 万年後に放たれた光の名残であり、わずかな密度ゆらぎ (ムラ) が記録されている。この密度ゆらぎは、ビッグバン以前の宇宙の急速膨張 “インフレーション” によって仕込まれたとされるモデル (インフレーション理論) がたてられ検出が想定されているが、前述の天文衛星は、広視野・低感度であったために、このモデルを完全に検証するには至らなかった。

そこで 2009 年、ESA は新たな CMB 観測衛星 “Planck” を打ち上げた。この衛星は、COBE や WMAP よりも遥かに高角度分解能・高感度で CMB を詳細に明らかにすることができる。特に先の観測で示唆された CMB の偏向度合いを観測することで、インフレーションの証拠をつかむことが期待されている。今年の 3 月、ようやくこれらの観測データが一般に公開された。公開された全天データを見ると、

ほぼ一様等方であるはずの CMB とは異なり、主に銀河面付近で非常に強い放射が見える。これは、宇宙の晴れ上がり時の放射として見えている CMB 放射 (約 137 億光年先) と、我々の間にある前景成分である。具体的には、我々の銀河に含まれるダストや分子・原子ガスからの放射である。強度としてはもちろんのこと、偏光への寄与に関しても、これらの影響を差し引かなければ CMB は検出できない。中でも、分子ガス (以後、分子雲) からの放射は、最も前景放射に占める割合が大きい。これら分子雲は一酸化炭素 (CO) からの輝線放射 (ミリ波・サブミリ波) で観測されるが、銀河面 (低銀緯) のごく限られた領域しか観測されておらず、未だに全天スケールでの分布は明らかになっていない。そのため、銀河面から離れた領域 (高銀緯) の分子雲分布についての情報はほとんどなく、高銀緯も含めた分子雲の全天観測が急務となっている。

我々 NANTEN チームでは、現在、NASCO (NANTEN Super CO survey as legacy) 計画というプロジェクトを推進している。これは、南米チリ共和国に設置された電波望遠鏡 “NANTEN2” を駆使して、未だ存在しない全天の CO マップを作成するというプロジェクトである。すでに計画はスタートしており、昨

年度までに銀河面と高銀緯領域の一部の CO( $J=1-0$ ) 輝線観測を行った。今年度は、CO( $J=2-1$ ) 輝線の観測を行い、より高励起な分子雲の分布を明らかにしつつある。これら観測と並行して、より短時間で全天の CO データが取得できるように、検出器のマルチビーム化に向けた開発も行っている。このサーベイで得られた CO と、既に取得されている赤外線 (ダストからの熱放射など)、HI ガス (中性水素原子) から放射される 21 cm 線などから得られる空間・強度分布、物理量を比較することで、Planck データの前景成分にもなっている星間物質の詳細な理解を得ることを目的とする。

本研究は、HLCs のうち、MBM 53, 54, 55 について、NASCO で得られた CO データと、IRAS 赤外線天文衛星による 100  $\mu\text{m}$  によるダスト放射、HI ガスのデータを用いてそれぞれを比較し、これらの相関関係を調べたものである。ガス (分子雲+原子ガス) とダストの比は、大局的なスケールでは概ね一定と考えられているが、局所的なスケールでは異なっていると考えられる。従って、これらガス・ダスト比が空間的にどのような分布をしているのか、どの程度の異方性を持つのかは、星間物質の理解を進める上で重要である。今回研究対象に選んだ HLCs は比較的低密度な分子雲で、その銀緯から、太陽系の近く (100 pc 程度以内) に存在すると考えられている。視線方向上で銀河面とは重ならないため、系内の他の天体と重なる可能性が低く、異なる波長間の比較研究が容易な領域である。また、MBM 53, 54, 55 は立体角にして距離が近く、詳細な観測が可能であること、紫外線の放射場が概ね一様であることから、ガスとダストの比較に適しているといえる。

## 2 Observations

使用したデータは、NANTEN2 望遠鏡による CO 回転遷移輝線、アレシボ天文台の 305 m 鏡による HI 21 cm 線、IRAS による赤外線 100  $\mu\text{m}$  の 3 種類である。

CO 輝線は  $^{12}\text{CO}(J=1-0)$  (115GHz) で、南米チリ・アタカマ高地 (標高 4865 m) に設置された口径 4 m のミリ波・サブミリ波望遠鏡 NANTEN2 で取

得された。実効ビーム半値幅 (HPBW) は 2.6 分角であり、太陽系から距離 150 pc における空間分解能は 0.11 pc に相当する。典型的な天頂方向の雑音温度は 115 GHz 帯で 300 K 程度である。なお、NANTEN2 による観測の結果、ノイズレベルは  $\sigma = 1.72 \text{ K km s}^{-1}$  (積分範囲:  $-12 - 2 \text{ km s}^{-1}$ ) となり、 $3\sigma$  以上を CO 輝線の有意な検出とした。

HI ガスは GALFA-HI (Galactic Arecibo L-Band Feed Array HI) survey の HI データを使用している。角度分解能は 4 分角、距離 150 pc では 0.17 pc に相当する。分光計 1  $\text{km s}^{-1}$  あたりのノイズレベルは 60–140 mK 程度となっている。

赤外線 100  $\mu\text{m}$  は、IRAS (Infrared Astronomical Satellite) の 100  $\mu\text{m}$  帯のデータを使用した。角度分解能は 100  $\mu\text{m}$  で 2 分角、距離 150 pc では 0.044–0.087 pc に相当する。

またこれらのデータは、Gaussian 関数をかえけることでスムージングし、分解能をすべて 4 分角に統一した。これは、太陽系からの距離 150 pc で 0.17 pc に相当する。

## 3 Results

まず、 $^{12}\text{CO}$ 、HI、100  $\mu\text{m}$  の空間分布を比較すると、フィラメントにそって概ね相関があることがわかった。つまり、それぞれがトレースする、分子雲、中性水素原子ガス、ダスト分布に良い相関があると考えられる。次に、星間中性水素の柱密度を求め、それらをプロットして相関を見た。導出方法は、以下のとおりである。

星間中性水素の柱密度は、中性水素原子ガスの柱密度  $N(\text{HI})$  を HI 21 cm 線の積分強度  $W_{\text{HI}}$  から、 $\text{H}_2$  ガスの柱密度  $N(\text{H}_2)$  を  $^{12}\text{CO}$  輝線の積分強度  $W_{\text{CO}}$  から求め、全星間中性水素柱密度  $N_{\text{H}}$  を求めた。

$$N(\text{HI}) = 1.82 \times 10^{18} \times W_{\text{HI}} \text{ (cm}^{-2}\text{)} \quad (1)$$

$$N(\text{H}_2) = 1 \times 10^{20} \times W_{\text{CO}} \text{ (cm}^{-2}\text{)} \quad (2)$$

$$N_{\text{H}} = N(\text{HI}) + 2N(\text{H}_2) \text{ (cm}^{-2}\text{)} \quad (3)$$

このようにして求めた  $N_{\text{H}}$  とダスト放射を比較すると、図 1 のようになった。黒枠は NANTEN2 で観測した領域、カラーが  $N_{\text{H}}$ 、コントラストは 100  $\mu\text{m}$  の強度

である。 $N_{\text{H}}$  が高い所で  $100\mu\text{m}$  の放射が強くなっていることがわかる。

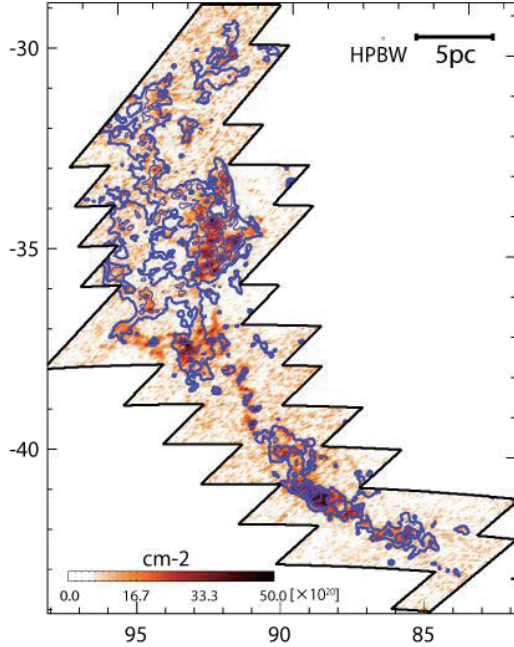


図 1: ダスト放射と  $N_{\text{H}}$  の比較。 $N_{\text{H}}$  のイメージに、 $100\mu\text{m}$  ののをコントアで記載。

また、 $100\mu\text{m}$  の強度  $I_{100\mu\text{m}}$  と中性水素の柱密度  $N_{\text{H}}$  を、データ点ごとに対応させて比較したところ、 $N_{\text{H}}$  の値によって傾向が違うことがわかった。具体的には、 $N_{\text{H}}$  が大きいほど  $I_{100\mu\text{m}}/N_{\text{H}}$  が小さくなる。そこで、 $^{12}\text{CO}$  から求めた柱密度  $N(\text{H}_2)$  と HI から求めた柱密度の比  $r$  を

$$r = \frac{2N(\text{H}_2)}{\text{HI}} \quad (4)$$

と定義し、 $r$  の小さい領域 (原子ガスが支配的) と大きい領域 (分子ガスが支配的) を選んで再度プロットしたところ、図 2 のようになった。青と赤の傾きの比を求めたところ、青 (原子ガスが支配的) : 赤 (分子ガスが支配的) = 7 : 1 となった。グラフの傾きの解釈は、次の式から考えることができる。

$$\frac{I_{100\mu\text{m}}}{N_{\text{H}}} = \alpha B_{\nu}(T) \alpha = \pi a^2 Q_{100\mu\text{m}} \frac{m_{\text{H}}}{100m_{\text{dust}}} \quad (5)$$

$a$  はダスト半径、 $Q_{100\mu\text{m}}$  は  $100\mu\text{m}$  の吸収効率、 $m_{\text{H}}$  は水素原子の質量、 $m_{\text{dust}}$  はダストの平均質量、 $B_{\nu}(T)$  は周波数  $\nu$  に対するプランクの輻射式、 $T$  はダストの温度である。このことから、傾き  $I_{100\mu\text{m}}/N_{\text{H}}$  は温度  $T$  のみの関数といえる。それぞれ原子ガスと分子ガスが支配的な領域の傾きを、 $I_{100\mu\text{m}}/N_{\text{H}}(\text{HI})$ 、 $I_{100\mu\text{m}}/N_{\text{H}}(\text{H}_2)$  とすると、上記の傾きの比 7 : 1 から

$$\begin{aligned} \frac{I_{100\mu\text{m}}}{N_{\text{H}}(\text{HI})} / \frac{I_{100\mu\text{m}}}{N_{\text{H}}(\text{H}_2)} &= \frac{B(T(\text{HI}))}{B(T(\text{H}_2))} \\ &= \frac{\exp\left(\frac{h\nu}{kT(\text{H}_2)}\right)}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT(\text{HI})}\right)} \\ &= 7 \end{aligned} \quad (6)$$

より、 $T(\text{CO})=16$  (K) ならば、 $T(\text{HI})=20$  (K) となる。この値は Reach et al. (1998) の結果と矛盾しないため、よい見積もりと考えることができる。

MBM53, 54, 55, HLCG92-35 の 4 領域に分け、この違いを見たところ、表 1 のようになった。

原子雲が支配的な領域では、概ね 1.4 程度の数値が得られている。分子雲が支配的な領域では、50% 程度のばらつきが見られるが、その原因としては、原子ガスから分子ガスへの進化段階の違いを表していることが考えられる。

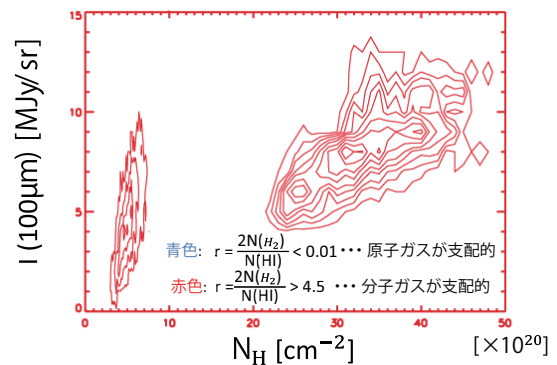


図 2: 原子ガス・分子ガスそれぞれが支配的な領域のダスト放射と  $N_{\text{H}}$  の比較

表 1: 比較結果

	HI dominant	CO dominant	
	$\frac{I_{100\mu m}}{N_H(HI)}$	$\frac{I_{100\mu m}}{N_H(CO)}$	T(HI)
全体	$1.39 \pm 0.03$	$0.20 \pm 0.01$	20 K
MBM53	$1.52 \pm 0.09$	$0.14 \pm 0.05$	22 K
HLCG92-35	$1.41 \pm 0.06$	$0.29 \pm 0.03$	19 K
MBM54	$1.43 \pm 0.09$	$0.20 \pm 0.01$	20 K
MBM55	$0.90 \pm 0.11$	$0.14 \pm 0.01$	20 K

## 4 Discussion & Conclusion

以上の結果から、原子ガス・分子ガスに付随するダストからの放射強度間の違いが、ダスト温度の違いとして説明できると解釈する。具体的には、MBM 領域では下記のように定式化できる。

$$I_{100\mu m} = 0.2N_H \text{ (MJy sr}^{-1}\text{)} \text{ (原子雲が支配的な領域)}$$

$$I_{100\mu m} = 1.4N_H \text{ (MJy sr}^{-1}\text{)} \text{ (分子雲が支配的な領域)}$$

しかしながらこれは、MBM 領域だけの解析結果であり、他の領域においてどこまで普遍的なものかは調べる必要がある。HLCs の領域にも、このようにガスからダスト量を見積もるのに適した領域がまだ複数存在する (Musca, HLCG など)。そこで私は現在、Musca 領域についてその比較を始めており、同様の傾向がみえつつある (詳細は “Appendix Musca 領域の解析” を参照)。これらの結果は、MBM の結果での上記の解釈を支持する。今後、より多くの HCLs について同様の解析を行うことで、ガスの状態とダスト温度の密接な関係を明らかにでき、銀河系の星間物質の理解に必ずや貢献できると考えている。

### Appendix Musca 領域の解析

Musca 領域について同様の解析を行った。

図 3 は本文の MBM 領域の比較と同様に、NANTEN2 による 12CO 輝線と IRAS100  $\mu m$  を重ねたものである。カラーが 100  $\mu m$  であり、コントアが 12CO 積分強度となっている。100  $\mu m$  の強い所で 12CO が強くなっていることがわかる。

図 4 は 100  $\mu m$  の強度を縦軸に、12CO より求めた  $N_{H_2}$  を横軸にとったものである。ここでは、HI のデータを用いていないので、プロットは  $N_{H_2}$  の値に

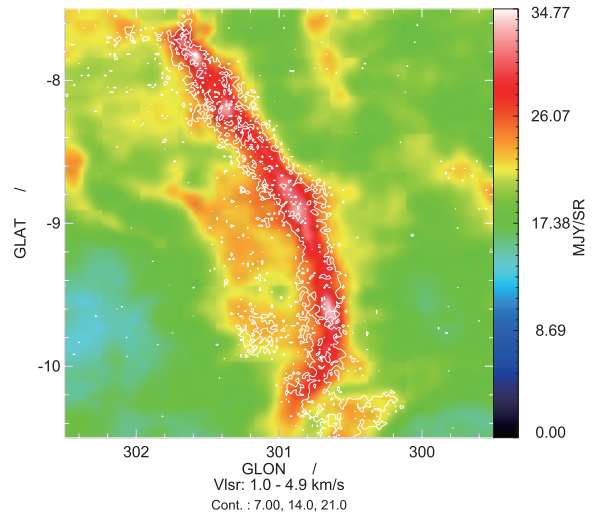


図 3: Musca 領域・ダスト放射と  $N_H$  の比較

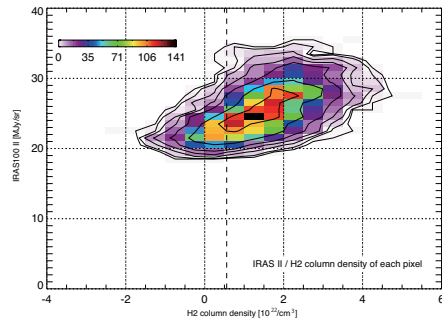


図 4: Musca 領域・ダスト放射と  $N_H$  の比較

よって傾きが変わっていない。今後、このような比較を続けて、ガスとダストの関係を更に深く見ていきたい。

## Reference

- Magnani, L., Blitz, L., & Mundy, L. 1985, *ApJ*, 295, 402
- Peek, J. E. G. et al. 2011, *ApJ*, 194, 20
- Reach, W. T., Wall, W. F., & Odegard, N. 1998, *ApJ*, 507, 507
- Yamamoto, H., Onishi, T., Mizuno, A., & Fukui, Y. 2003, *ApJ*, 592, 217