

# 世界で最も広大で詳細な天の川銀河の電波地図作り：FUGINプロジェクトの概要



梅本智文

〈国立天文台 野辺山宇宙電波観測所 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: umemoto.tomofumi@nao.ac.jp

天の川銀河における分子ガスから星の形成に至る星間物質の進化のプロセスを明らかにすることは天文学における最大の課題の1つだが、これまでの探査では、天の川銀河全体という大きなスケールから個々の星の誕生に直結する分子雲コアまでの星間物質の構造を同時に捉えることが難しかった。そこで国立天文台をはじめとして多くの大学の研究者にて構成された観測チームは、野辺山45 m電波望遠鏡に搭載された新マルチビーム受信機FORESTを用いて、一酸化炭素分子とその同位体分子輝線で同時に銀河面サーベイを実施した。その結果、130平方度にわたる、世界で最も広大で詳細な天の川の電波地図を作成することに成功した。異なる密度領域を捉える3輝線のデータによって、天の川銀河全体にわたる分子雲の分布から、分子雲における高密度ガスの割合や高密度ガスからの星形成に至るまでを、一挙に見出すことができた。これにより、星間物質の進化を支配している物理過程の解明に迫る。この電波地図は、今後の観測研究の土台となる基礎データとして利用され、このデータからさらに多くの新発見が生み出されると期待される。

## 1. 天の川銀河の探査

夜空の条件のよい場所なら天の川を私たちの目で観察することができる。天の川の正体は太陽のように自ら輝く星の大集団であり、これを「天の川銀河」と呼ぶ。ところで天の川の写真を撮ってみると星があまり無い場所が沢山あることが分かる。これは実は星が無いのではなく、私たちの天の川銀河にあるガスや塵（ちり）によって、その向こう側の星の光が隠されているためである。私たちの天の川銀河は、多くの星だけでなくガスや塵から成り立っている。このように、天の川にあって星が見えなくなっている部分を「暗黒星雲」と呼んでいる。

星の光を隠しているガスは、10 Kと極めて低温のため可視光では見ることはできないが、電波では観測することが可能である。1970年代後半

から盛んになったミリ波の電波天文学によって、宇宙空間はまったくの真空ではなく、主に水素ガスと塵が含まれる巨大な水素分子の雲＝「分子雲」の存在が明らかにされた [1]。それが自己重力で収縮して高密度ガス（分子雲コア）となりやがては星になる星間ガス雲である。私たちの太陽系もこのような分子雲から生まれてきたと考えられている。

遠くの星の光を吸収するガスと塵の雲が手前にあるため、可視光では天の川銀河を見通すことができないが、電波だと天の川銀河全体を見通すことが可能である。ただし、天の川銀河の探査は、大きな望遠鏡にとってはその視野の狭さから、小さな望遠鏡にとっては角分解能の低さから、銀河スケールの大規模な構造から星の誕生に関わる分子雲コアの小規模な構造までを同時に捉えることが難しく、星の材料となる分子ガスの進化の様

子, 特に, どのようにして, またどのようなところで星が誕生するのかを理解する上での難点となっていた。

## 2. これまでの銀河面サーベイ

図1に示すような星間物質の進化や循環を理解するには, どのようにして薄く広がった原子ガスから分子雲が形成され, 次に分子雲内で高密度ガスが, そして高密度ガスから星がどのように形成されるのか, を知る必要がある。このような研究では, 分子雲コア (~0.1 pc) や高密度クランプ (~1 pc) から巨大分子雲 (~50 pc) までのすべてをカバーする高い空間ダイナミックレンジが必要である。さらに, その環境と内部構造を比較して, 分子雲の進化を追跡するために多くの巨大分子雲を観測する必要がある。現在, これらの要件を満たすことができるのは天の川銀河のみである。

天の川銀河の薄い円盤部の中央面を「銀河面」と呼ぶ。近年, これまでいくつかのグループによってサブミリ波連続波による銀河面のサーベイ観測がなされている。例えばATLASGAL [2], BGPS [3], SCUBA-2 [4] サーベイなどがある。また, 中間赤外や遠赤外で, 例えばSpitzerによるGLIMPSとMIPSGAL [5, 6], HerschelによるHi-GAL [7], そしてAKARI [8]といった高角分解能の銀河面

サーベイが行われている。これらのサーベイは星形成の場の同定に大いに役立っており, これらのサーベイによってフィラメントや大質量星や星のクラスター形成の場である高密度クランプといった分子雲の詳細な構造が明らかにされてきた。

これに対して分子スペクトル線観測によって得られる視線速度を含む3次元データは, 分子雲の力学的状態や分子雲の相互作用を明らかにする上で重要な鍵となる。また, 分子雲の視線速度から導き出される運動学的距離の測定は, 分子雲の物理的パラメーターを導き出すために不可欠である。さらに, 分子雲の距離を知ることにより, 分子雲の特性と銀河の大規模な構造, 例えば渦状腕などとの関係を調べることができる。

中性の星間物質の主体をなす水素分子 ( $H_2$ ) は電気双極子モーメントを持たないため, それ自身電波を放射しない。このため主に水素分子で構成される分子雲の観測には一酸化炭素分子の電波輝線を検出するのが一般的である。

これまでいくつか一酸化炭素分子CO輝線による銀河面サーベイが行われているが, 小口径望遠鏡による銀河面サーベイ [9-11] は非常に広大な領域ではあるものの角分解能がとても貧弱 (3-9分角) であった。より高い角分解能 (35-46秒角) での広域の銀河面サーベイはあるものの, 一酸化炭素同位体分子 $^{13}CO$ の1輝線だけの観測であったり (FCRAO 14 m 鏡のGRS [12]), 南天の観測 (Mopra 22 m 鏡のThrUMMS [13]) であった。最近, 高励起のCO  $J=3-2$ 輝線でJCMT 15 m 鏡による高い角分解能 (17秒角) の銀河面サーベイ (COHRS [14], CHIMPS [15]) がなされたが, 銀緯の範囲は $\pm 0.5$ 度と狭く, 2 kpcより近い分子雲の広がりを十分にカバーできていなかった。

そこで, サブミリ波連続波や赤外線観測に匹敵し, 分子スペクトル線による広域かつ高空間分解能の銀河面サーベイが必要とされる。

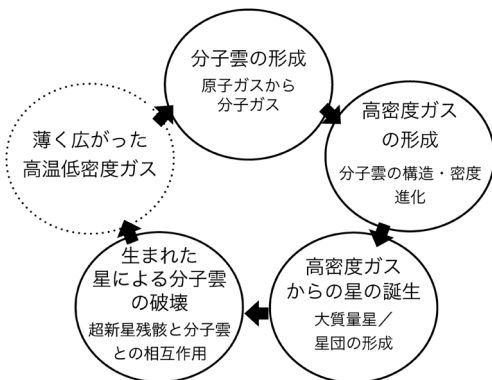


図1 星間物質の進化と循環。

### 3. 野辺山45 m鏡によるCO輝線観測

天の川銀河全体にわたって広がりその大部分を占める低温（ $\sim 10$  K）の分子ガスを検出するには、一酸化炭素分子の基底回転遷移 $J=1-0$ 輝線を用いるのが適当である。天の川銀河の低温の分子ガスの質量をよくトレースできる。また、高励起のCO輝線と比較することで、ガスの温度や密度といった物理状態を正確に求めることができる。

これまでの電波観測では、基本的には受信機は1ビーム（1素子）のため、電波写真を得るためには順番に空間の1点1点を観測するしななく、膨大な時間がかかっていた。そこで野辺山宇宙電波観測所では、大阪府立大学との協力で新たにマルチビーム受信機FOREST (FOur-beam Receiver System on the 45-m Telescope)を開発した [16] (図2)。FOREST受信機は4ビーム（空間の4点を同時に観測）で両偏波、両サイドバンドで $4 \times 2 \times 2 = 16$ サブバンドの高感度受信機で、しかも受信帯域が広く、通常の一酸化炭素分子 $^{12}\text{CO } J=1-0$ 輝線だけでなくその同位体分子 ( $^{13}\text{CO}$ ,  $\text{C}^{18}\text{O}$ ) のスペクトル線も同時に観測することが可能である。

野辺山45 m望遠鏡に搭載された新マルチビーム受信機によって初めて、HerschelやSpitzerな

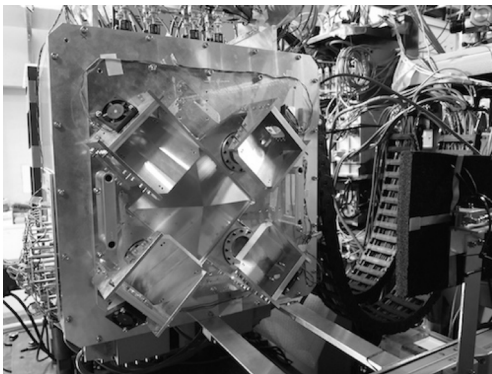


図2 新マルチビーム受信機FOREST.

どの赤外線イメージやJCMTのCO  $J=3-2$ 輝線と比較しうる角分解能で、天の川銀河の大規模なマッピング観測が短い時間で実現できるようになったのである。それが、野辺山45 m電波望遠鏡を用いた高角分解能でCO  $J=1-0$ の3輝線同時の銀河面サーベイ「FUGIN」である。

### 4. FUGINプロジェクト

#### 4.1 FUGINプロジェクトとは

FUGIN (FOREST unbiased Galactic plane imaging survey with the Nobeyama 45-m telescope) プロジェクトは、従来の10倍もの観測効率を持つ新たに搭載されたFOREST受信機を使い、45 m電波望遠鏡の視力を生かして、銀河面を異なる密度領域をトレースする $^{12}\text{CO}$ ,  $^{13}\text{CO}$ ,  $\text{C}^{18}\text{O}$ の $J=1-0$ 輝線で「同時」に、On-The-Fly (OTF) 法によるバイアスが無いサーベイ観測を行うことで、大規模かつ最も詳細な天の川の電波地図を作るプロジェクトである [17]。これは世界で最も角分解能が高い、初のCO  $J=1-0$ の3輝線同時の銀河面サーベイであり、天の川銀河の構造から星形成のスケールに至るまで一挙に捉えることが可能となる。

このプロジェクトは、2014年から3年間、次世代の研究の土台となるデータを後世に残そうという野辺山宇宙電波観測所レガシープロジェクトの1つとして採択された。

一般に分子輝線によってトレースできるガスの密度（臨界密度）が異なる。 $^{12}\text{CO } J=1-0$ 輝線は、水素分子密度が $\sim 10^2$ 個 $\text{cm}^{-3}$ の分子雲のエンベロップなどの薄く広がった領域を含む分子ガスをトレースするが、 $^{13}\text{CO}$ および $\text{C}^{18}\text{O } J=1-0$ 輝線は、水素分子密度が $\sim 10^3$ から $\sim 10^4$ 個 $\text{cm}^{-3}$ のより高密度で光学的に薄い分子ガスをトレースする。この3つのCO分子輝線を同時に観測することで、広いダイナミックレンジでガス密度を捉えることが可能となり、観測した分子ガスの分布や運動の様子だけでなく、温度や密度といった性

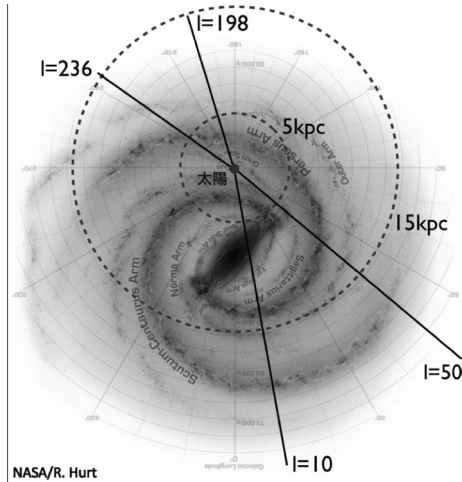


図3 観測計画領域. 15 kpcの大円は本研究によって1 pcクランプが分解できる距離.

質なども一挙に調査することができる.

観測計画領域は図3に示すように、銀経10度から50度、銀緯-1度から1度の天の川銀河の内縁部を含む第一象限の80平方度と、これと比較するために銀経198度から236度、銀緯銀緯-1度から1度の外縁部の第三象限の76平方度、合計156平方度の広大な領域である. 我々の観測領域にはペルセウス座腕、いて座腕、たて座-ケンタウルス座腕、じょうぎ座腕、外縁部腕といった渦状腕や、天の川銀河中心部の棒状構造領域、3キロパーセク分子ガスリングが含まれる.

このプロジェクトは国立天文台をはじめ、筑波大学、名古屋大学、大阪府立大学、上越教育大学、明星大学、鹿児島大学など15の大学や研究機関の総勢50名以上の研究者との協力によって進められている. また、JCMTによる銀河面サーベイチームと強力な関係を結んでいる.

#### 4.2 プロジェクトの目的

FUGINプロジェクトの主な目的は、天の川銀河内の星間ガスの進化過程の解明である. FUGINでは、原子ガスから分子ガスへ至る分子雲形成、分子雲からの高密度ガスの形成や構造進化、高密度ガスからの(大質量)星形成、星形成

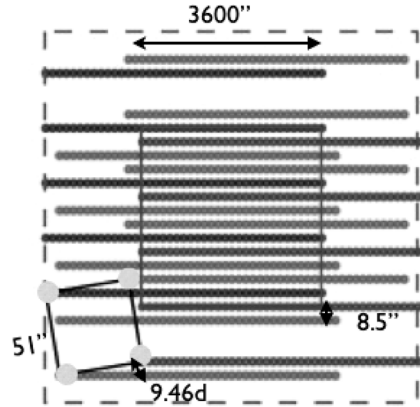


図4 FOREST受信機でのスキャン方法.

領域と星間ガスの相互作用、など科学研究テーマを設定して研究を進める(図1参照). また、渦巻腕/腕間および棒状構造といった天の川銀河の基幹構造と、分子雲の進化過程や物理的特性との関係を明らかにしたい. これにより、巨大分子雲のスケールから分子雲クランプ/コアのスケールまでの星間物質の進化を支配している物理過程に迫る.

#### 4.3 観測手法

観測は、望遠鏡を駆動しながら連続的にデータを取得し効率よく観測できるOTFマッピングモード[18]で行った. マップ全体は、1度角×1度角のサブ領域ごとのモザイク観測で構成される. OTFマッピング中はアンテナは毎秒100秒角の一定速度で連続的に掃き、分光計から0.04秒間隔でダンプされたデータは、スキャン方向に沿った4秒角の間隔に対応する. FOREST受信機をスキャン方向に対して9.46度の角度で回転させてスキャンすることで、スキャンとは垂直方向に8.5秒角間隔で1度角×1度角の領域をカバーできる(図4). スキャン効果によるノイズを低減させるために、第一象限では1度角×1度角のマップごとに、銀河面に平行(Xスキャン)だけでなく垂直(Yスキャン)のスキャンも(一部)行った.

畳み込み関数としてベッセル×ガウス関数を使



用して、第一象限ではデータを空間方向に8.5秒角間隔、速度方向に $0.65 \text{ km s}^{-1}$ でグリッドし(第三象限ではそれぞれ15秒角と $0.65 \text{ km s}^{-1}$ )、最終的に3次元のFITS(天文分野で使われる代表的なファイル形式)データを作成した。FITSデータの速度範囲は、第1象限で $-50\text{--}200 \text{ km s}^{-1}$ 、第3象限で $-50\text{--}150 \text{ km s}^{-1}$ であり、これらの領域の分子ガス速度範囲を十分カバーできている。

#### 4.4 サーベいの最終状況

2014年の3月から2017年3月まで1100時間にもわたって観測を実施した。観測できた領域は、最終的には、第一象限の銀経10度-50度、銀緯-1度から1度の80平方度、第三象限の銀経198度-236度、銀緯-1度から1度の50平方度の、観測計画領域の約83%にあたる130平方度の範囲である。

最終的に作成したマップの有効角分解能は約20秒角、分子輝線の速度分解能は $1.3 \text{ km s}^{-1}$ であり、角分解能について従来の天の川銀河の観測と比較すると、Herschelの $250 \mu\text{m}$ や $350 \mu\text{m}$ とほぼ同じ角分解能を達成した。検出感度は主ビーム温度で、 $^{13}\text{CO}$ 、 $\text{C}^{18}\text{O}$ で平均 $0.7 \text{ K}$ 、 $^{12}\text{CO}$ で平均 $1.5$

$\text{K}$ となった。表1に観測諸元をまとめる。

## 5. 科学的成果

FUGINでは、銀河面を合計130平方度(満月520個分)にわたって、3輝線( $^{12}\text{CO}$ 、 $^{13}\text{CO}$ 、 $\text{C}^{18}\text{O}$ )でマッピング観測が行われ、野辺山45 m鏡の高い角度分解能と観測領域の広さの2点において、他に例を見ない優れたデータが得られている。

図5に示すように、これまでの銀河面サーベイでは知られていなかった、広範囲にわたる分子雲の極めて詳細な構造を鮮明に描き出すことに成功した。まさしく高分解能観測のおかげである。例えば、これまで認識されていなかったひも状のフィラメント構造が多数存在することが分かってきた。これらの構造は、分子雲がどのようにして収縮していくのかといった星の誕生への鍵が隠されている可能性がある。

このデータを使って様々な科学的成果が生まれている。2020年3月現在までに、FUGINプロジェクトによる論文が出版、受理、投稿中も含めて17編に登る。本稿ではすべての成果を紹介することは難しいため、その内いくつか最近のFUGINによる科学的成果について紹介したい。「高密度ガスの割合」と「分子雲衝突による大質量星形成」については、本号の別稿にて詳しく解説されるため、概要のみ述べるに留める。

### 5.1 分子雲形成

天の川銀河の中心部では水素分子( $\text{H}_2$ )ガスの方が、外縁部では中性水素原子( $\text{HI}$ )ガスの方が豊富である[19]。全ガス量( $\text{HI}$ と $\text{H}_2$ )に対する

表1 観測諸元.

|                          |  |
|--------------------------|--|
| 分子輝線                     | $^{12}\text{CO}$ , $^{13}\text{CO}$ , $\text{C}^{18}\text{O}$ $J=1-0$                                |
| ビームサイズ                   | 14 ( $^{12}\text{CO}$ ), 15 ( $^{13}\text{CO}$ , $\text{C}^{18}\text{O}$ ) 秒角                        |
| 有効角分解能                   | 20 ( $^{12}\text{CO}$ ), 21 ( $^{13}\text{CO}$ , $\text{C}^{18}\text{O}$ ) 秒角                        |
| 有効速度分解能                  | $1.3 \text{ km s}^{-1}$  |
| 検出感度 ( $T_{\text{MB}}$ ) | $1.5 \text{ K}$ ( $^{12}\text{CO}$ ), $0.7 \text{ K}$ ( $^{13}\text{CO}$ , $\text{C}^{18}\text{O}$ ) |
| 銀経                       | 10度-50度, 198度-236度   |
| 銀緯                       | -1度-1度   |
| サーベイ領域                   | 80平方度, 50平方度   |

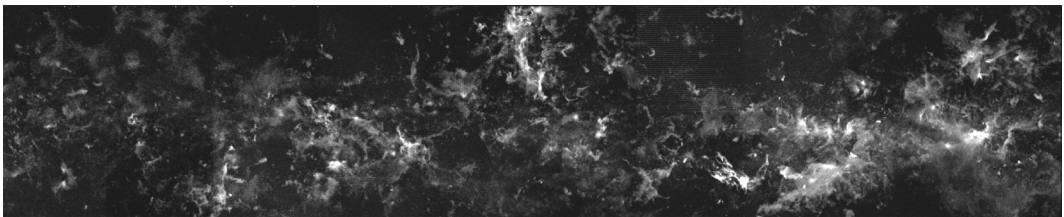


図5 天の川銀河内縁部の銀経12度から22度、銀緯-1度から1度の範囲の $^{13}\text{CO}$ 電波強度図。

$\text{H}_2$  ガス量の比  $f_{\text{mol}}$  は、ガス密度、紫外線強度、および金属量によって決まると考えられている [20]. このモデルは天の川銀河におけるキロパーセク・スケールでの  $f_{\text{mol}}$  をうまく説明できるが、すべて球状の雲で中心に分子ガスが集中するという単純なモデルを仮定している.

そこで FUGIN の  $^{12}\text{CO}$  データと同じ領域の Very Large Array (VLA) Galactic plane survey (VGPS) の HI データについて、Dendrogram アルゴリズム [21] を用いて 7883 の HI 雲を同定したところ、HI 雲内に含まれる  $\text{H}_2$  ガスは、全ガス量にほぼ比例することが明らかになった. これはこれまでのモデルでは説明できず、大部分の雲は、お菓子の「チョコチップスコーン」のように、HI 雲内に分子雲が散らばった構造をしていると考えられる [22].

## 5.2 天の川銀河の構造と分子雲の分布

渦状腕といった天の川銀河の基幹構造と分子雲の分布や物理量との関係を調べることは、巨大分子雲への分子ガス構造の進化過程や分子雲内で起こる大規模な星形成の発生メカニズムを明らかにする上で重要な鍵となるが、FUGIN のデータを用いることで天の川銀河内の様々な分子雲の分布を詳細に調査することが可能となる.

そこで第一象限 80 平方度の FUGIN  $^{12}\text{CO}$  データに対して、Dendrogram を用いた分子ガス構造同定を実施したところ、約 26000 個の分子ガス構造 (分子雲候補) を同定した. そのうち  $10^3$  太陽質量以上の分子雲について調査したところ、 $10^5$  太陽質量以上の分子雲は概ね腕状に分布しており、いて座、たて座、じょうぎ座腕が確認できた. 一方腕間領域には、 $10^4$  太陽質量以上の分子雲は (一部の例外を除き) ほとんど存在しないことが分かった. また、腕間領域には  $10^3$  太陽質量の分子雲も少ないことも分かった. これは腕間領域では、コンパクトな分子雲か広がった分子ガスが主流である可能性を示唆している (Saito, H. et al. 論文準備中).

## 5.3 高密度ガスの割合

分子雲の全質量のごく一部しか星を形成しないという星形成効率の低さは、星間物質の循環および星形成を理解するための基本的かつ重要な研究課題である. そこで、分子雲の大部分を占める低密度ガスと星の誕生の場である高密度ガスの量を同時に測定できる FUGIN の膨大なデータを解析したところ、低密度ガスに対して高密度ガスは、質量にしてわずか 3% しか存在しないことが明らかになった. このことは、低密度ガスからはわずかしき高密度ガスが作られず、その結果星形成効率が低くなっていることを意味する [23, 24].

## 5.4 分子雲衝突による大質量星形成

近年の天の川銀河および大マゼラン銀河に対する分子雲の観測から、2つの分子雲の衝突が大質量星形成に重要な役割を果たしていることが明らかになってきた. FUGIN データを用いることで、多くの衝突分子雲の詳細研究が可能となる. そこでいくつかの巨大分子雲に対し、分子雲衝突の痕跡を探す解析を実施したところ、我々は 8 つの大質量星形成領域において、分子雲衝突の有力な証拠を検出した [25]. さらに、大質量星形成をまだ起こしていない分子雲衝突候補も発見した. FUGIN のバイアスの無いサーベイの賜物である.

## 5.5 超新星残骸と分子雲の相互作用

大質量星の最期である超新星爆発によって生じる、超新星残骸と分子雲との相互作用は、銀河における物質循環の一翼を担うだけでなく、宇宙線の起源を理解する上でも重要な役割を果たす. 近年、ガンマ線で明るい超新星残骸が、その加速源として注目されている.

そこでガンマ線超新星残骸 Kes 79 について、FUGIN  $^{12}\text{CO}$  データを解析したところ、超新星残骸を取り巻くように分子ガスが分布しており、ガスの膨張運動や高温領域が存在していることを発見した. これより超新星残骸の距離と年齢が決まり、宇宙線陽子の全エネルギーと加速効率を求めることができた [26].

サーベイ領域内にはその他にも、超新星残骸と分子雲が相互作用をしている可能性があるものはいくつか発見しており現在解析を進めている。

## 6. 教育的効果

FUGIN プロジェクトは科学的成果のみならず教育的に果たした面も見逃せない。

2020年3月現在までに、FUGIN プロジェクト並びにFUGIN関連プロジェクトにより、筑波大学、名古屋大学、鹿児島大学から合わせて4編の博士論文が、また筑波大学、東京大学、上越教育大学、名古屋大学、鹿児島大学から合わせて10編の修士論文が出版されている。また、電波天文学の初心者である学生が、FOREST受信機の立ち上げや実際の45 m望遠鏡による観測に参加し、電波天文学の基礎や経験を学ぶよい機会になった。

このようにFUGINプロジェクトは、大学を十分に活性化し、電波天文学の人材育成に貢献できたと言える。

## 7. データ公開

レガシー観測で得られたデータはプロジェクトの終了後1年で公開することが観測所の方針であった。そこで2018年6月にキャリブレーション済みの3次元FITSデータを国立天文台のJVOにて公開した[27]。このデータには、世界の研究潮流にインパクトをもたらす研究を生み出すポテンシャルがあると考えられる。これからの天の川銀河における研究の基礎データとなり、アルマ望遠鏡などでの電波観測だけでなく、赤外線観測などの多波長の観測にも大いに役立つことが期待される。

## 8. 今後に向けて

$^{12}\text{CO}$ データのみならず $^{13}\text{CO}$ や $\text{C}^{18}\text{O}$ についても、Dendrogramを用いて、高密度クランプ/コアの同定を現在進めている。FUGINのような完

全なサンプリングと均一な感度を持つバイアスの無いマッピング調査は、天の川銀河内の空間分布のみならず、分子雲/クランプ/コアの統計的研究を可能とする。近い将来これらのカタログを公開する予定である。

一酸化炭素分子の $J=1-0$ 輝線だけのデータからは、温度、密度、存在量を一意に決めることは難しい。そこで、ほぼ同じ角分解能のJCMT  $J=3-2$ 輝線のデータと比較することで、天の川銀河の広い領域にわたる分子雲/クランプについての温度や密度といった物理量を決定できる。すでに部分的には実施しているが、さらに我々と同じ観測領域に拡大したJCMTサーベイを実施するための研究協力も現在進めている。

一方で、FUGINでは、先にあげたようにいくつかの科学研究テーマを設定して研究を進めているが、研究がかなり進んだテーマと研究が端緒に終わったばかりのテーマがある。今後は、これらのテーマを有機的に強く結びつけることで、天の川銀河における星間物質の進化を支配している物理過程の解明に迫りたい。このためにも、広範なサイエンスの視点を持つ、様々な波長の研究者や理論家にもFUGINに多く参入してもらえたらと思う。

これまで、銀河における分子ガスの研究と、天の川銀河における高密度ガスからの星形成の研究が別々に行われてきたが、近傍銀河の巨大分子雲が直接撮像できるようになったALMA時代の今、FUGINこそが天の川銀河内での星形成の研究と、銀河での分子ガスの研究を繋げることになるに違いない。

## 参考文献

- [1] Heyer, M., & Dame, T. M., 2015, ARA&A, 53, 583
- [2] Schuller, F., et al., 2009, A&A, 504, 415
- [3] Aguirre, J. E., et al., 2011, ApJS, 192, 4
- [4] Moore, T. J. T., et al., 2015, MNRAS, 453, 4264
- [5] Benjamin, R. A., et al., 2003, PASP, 115, 953
- [6] Carey, S. J., et al., 2009, PASP, 121, 76
- [7] Molinari, S., et al., 2016, A&A, 591, A149

- [8] Doi, Y., et al., 2015, PASJ, 67, 50
- [9] Dame, T. M., et al., 2001, ApJ, 547, 792
- [10] Mizuno, A., & Fukui, Y., 2004, in ASP Conf. Ser. 317, Milky Way Surveys: The Structure and Evolution of Our Galaxy, eds. Clemens, D., Shah, R., & Brainerd, T., (San Francisco, CA: ASP), 59
- [11] Yoda, T., et al., 2010, PASJ, 62, 1277
- [12] Jackson, J. M., et al., 2006, ApJS, 163, 145
- [13] Barnes, P. J., et al., 2015, ApJ, 812, 6
- [14] Dempsey, J. T., et al., 2013, ApJS, 209, 8
- [15] Rigby, A. J., et al., 2016, MNRAS, 456, 2885
- [16] Minamidani, T., et al., 2016, Proc. SPIE, 9914, 99141Z
- [17] Umemoto, T., et al., 2017, PASJ, 69, 78
- [18] Sawada, T., et al., 2008, PASJ, 60, 445
- [19] Nakanishi, H., & Sofue, Y., 2016, PASJ, 68, 5
- [20] Elmegreen, B. G., 1993, ApJ, 411, 170
- [21] Rosolowsky, E. W., et al., 2008, ApJ, 679, 1338
- [22] Nakanishi, H., et al., 2020, PASJ, accepted
- [23] Torii, K., et al., 2019, PASJ, 71, S2
- [24] 藤田真司, 鳥居和史, 2020, 天文月報, 113, 332
- [25] 河野樹人, 藤田真司, 西村淳, 2020, 天文月報, 113, 339
- [26] Kuriki, M., et al., 2018, ApJ, 864, 161
- [27] <http://jvo.nao.ac.jp/portal/nobeyama/fugin.do> (2020.4.20)

## Making the Most Extensive and Detailed Radio Map of the Milky Way: FUGIN Project

Tomofumi UMEMOTO

*National Astronomical Observatory of Japan,  
Nobeyama Radio Observatory, 2-21-1 Osawa,  
Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

Abstract: Understanding the evolutionary process of the interstellar medium from molecular gas to star formation in the Milky Way Galaxy is one of the most crucial issues in astrophysics. However, it was difficult to capture simultaneously both the large-scale structure of the Milky Way Galaxy and the small-scale structure of molecular cloud cores that are related to star formation. A research group including members from NAOJ and many universities has conducted the Galactic plane survey simultaneously with carbon monoxide and its isotope molecules emission lines using a new multi-beam receiver FOREST installed on the Nobeyama 45-m radio telescope. As a result, we successfully created the most extensive and detailed radio maps of the Milky Way Galaxy in the world covering 130 square degrees. From the data of the three emission lines that capture the different density regions, we can find out at once from the distribution of molecular clouds throughout the Milky Way Galaxy to the percentage of dense gas in molecular clouds and star formation from dense gas. We will elucidate the physical processes govern the evolution of interstellar medium. The map will be a fundamental data set for future studies of the Milky Way Galaxy. We expect many discoveries by researchers around the world based on this map.