

銀河系内の中性炭素原子

岡 朋 治

〈東京大学大学院理学系研究科 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1〉

e-mail: tomo@phys.s.u-tokyo.ac.jp

星の母胎である星間分子雲は、宇宙における物質進化過程の重要な要素であるにもかかわらず、その形成過程についてわれわれの知識は非常に限られている。それは、形成初期にある星間分子雲の観測的研究が乏しかったことによるところが大きい。形成初期の星間分子雲では、気相中の炭素が一酸化炭素に完全には固定されておらず、中性の炭素原子が多く存在することが期待される。われわれは、中性炭素原子の放つサブミリ波禁制線による銀河系の広域観測を行う目的で、小型で可搬型のサブミリ波望遠鏡を開発した。南米チリの高地における観測により、銀河系内の中性炭素原子の大局的分布が初めて明らかになった。それは、銀河系渦状腕との遭遇により星間ガスが原子から分子への相変化を起こしていること、つまり渦状腕上で分子雲が形成されている事実を直接示すものであった。

1. アンデス山中にて

2003年9月、われわれは南米チリのアンデス山中にいた。標高 4,800 m、国立天文台の設置した ASTE^{*1}の実験室コンテナの中で、筆者は大学院生 H 君と PC のモニターにかじりついている。午前 2 時。外は零下 15°C、快晴。コンテナごと飛ばされそうな強風の中で、もう一人の大学院生 K 君が作業中だ。おかしい。日本を出たときには、もう一人いたはずだった。そうだ、新人の N 君はこちらへ来るなり体調を崩し、ここ数日下界で寝込んでいるのだった。ここでは 4 名いれば大体において 1 名は体調を崩している。温暖湿潤な環境に生まれ育ったハボネス（日本人）は、この苛酷な環境に耐えられないのだ。連絡用トランシーバからコンテナ外にいる K 君の悲痛な声が響く。またトラブルだ。今度は何だ？ そもそも今は何

の作業中だった？ 酸欠と睡眠不足のため頭が回らない。われわれは一体ここで何をしている？

2. 動機の整理

われわれがこの高地にいる目的は一つ、銀河系内にある中性炭素原子の大局的な分布を調べることだった。これまで、星間ガスから星形成に至る過程に関する観測的研究は、星の母胎である星間分子雲に対する分子回転スペクトル線観測を主要な手段として進められてきた。最も代表的な星間分子雲のトレーサは、一酸化炭素のミリ波回転スペクトル線 ($J=1-0$; 115 GHz; 以降 CO 輝線) である。1970 年、初めて星間空間において CO 輝線が検出されて以来¹⁾、ミリ波領域の天文学は長足の進歩を遂げ、太陽系近傍から高赤方偏移の遠方銀河に渉るさまざまな天体を対象に活発な研究が展開されてきた。その中で、誕生する星の質量や

*1 アタカマサブミリ波望遠鏡実験 (Atacama Submillimeter Telescope Experiment): チリ北部のアタカマ砂漠 (標高 4,800 m) に 2002 年 3 月に設置された、南半球では初めての大口径サブミリ波望遠鏡。国立天文台、日本の大学連合、チリ大学の共同プロジェクトとして運用されている。

形態は、母体となる星間分子雲の物理的性質に深く関連していることが指摘されてきた。

星間分子雲の性質は、それ自身の形成過程に深く依存する。分子雲形成の理解は、星形成のストーリーを完結させるために星間物理学に求められている重要な課題となっている。この問題についてわれわれは、炭素の存在形態に着目して研究を進めていた。希薄な星間ガスが星間分子雲へと進化する過程で、星間ガス中の炭素の主要な存在形態は、炭素イオン (C^+) \rightarrow 中性炭素原子 (C) \rightarrow 一酸化炭素 (CO) と変化する²⁾。そこでわれわれのグループでは、富士山頂に我が国初のサブミリ波望遠鏡³⁾ (口径 1.2 m) を建設し、中性炭素原子の放つサブミリ波禁制スペクトル線 (492 GHz, 809 GHz) の広域観測を行ってきた。望遠鏡は 1998 年冬季から 2005 年夏に閉鎖されるまで^{*2}、主に太陽系近傍の分子雲の観測を進め、かつてない規模で中性炭素原子の分布を描き出すことに成功した。その結果を一酸化炭素分子の分布と比較することにより、実際に分子雲が形成されつつある領域をとらえることに成功している⁴⁾⁹⁾。

富士山頂サブミリ波望遠鏡は近傍分子雲の広域観測を目的としたため、銀河系全体を対象とする研究には適さない。銀河系スケールでの中性炭素原子の分布、つまり星間分子雲の形成過程と銀河系構造の関連を調べるには、もっと小口径のサブミリ波望遠鏡が必要だった。小型であれば車で運ぶことができ、富士山頂よりも良い条件の場所で観測ができるだろう。サブミリ波は地球大気中の水蒸気によって強く吸収されるため、観測を行うにはできるだけ乾燥した高地が望ましい。つまりそれが、日本から遠く離れたこの不毛の地にわれわれが滞在している最大の理由だった。

3. 可搬型 18 cm サブミリ波望遠鏡

可搬型 18 cm サブミリ波望遠鏡 (図 1) は、中性炭素原子の 492 GHz スペクトル線 ($^3P_1\text{-}^3P_0$; 以降 [CI] 輝線) による銀河系全体の広域サーベイ観測を目的として開発された¹⁰⁾。主鏡の口径は名前のとおり 18 cm。副鏡による遮蔽をなくして損失を最小限に抑えるために、オフセット・パラボロイド光学系を採用している。角分解能は観測周波数 492 GHz において 13.6 分角。これはハーバード・スミソニアン天体物理センターのグループによる CO 輝線サーベイ¹¹⁾の分解能 8 分角を意識している。受信機には、小型軽量で省電力型の冷凍機を採用した 500 GHz 帯超伝導 SIS 受信機を新たに開発した。また銀河系回転 (~ 200 km/s) でドップラー偏移したすべての速度成分を一度にカバーすることが可能な、広帯域の音響光学型分光計が搭載されている。加えて On-the-fly マッピング観測法に対応可能な高速積分器、広帯域にわたって平坦な周波数特性を有する中間周波増幅系など、主要コンポーネントはすべて筆者と大学院生たちによる自作モノであり、それぞれに開発者の名前が付けられている。望遠鏡システムの制御には汎用の Windows PC を使用し、GP-IB インターフェースを介して行っている。なお、制御ソフトウェアはすべて Visual C++ で記述されている。

この望遠鏡の特長は何と言っても、可搬型で世界中のあらゆる優良観測サイトに持ち込むことができるところにある。総重量は制御系も含めて約 200 kg。ギリギリ可搬型だ。運搬には健康な男子が 4 名いれば十分だ。ただし、足腰に不安を抱えている者は戦力にならない。高地への順応性も重要だ。酸欠と闘いながらの重労働を強いられるのだから。つまりサブミリ波天文学は、頭脳ではな

*2 富士山頂サブミリ波望遠鏡は、東京大学大学院理学系研究科物理学専攻・ビッグバン宇宙研究センターのプロジェクトとして 7 年間にわたって運用されてきたが、電力の供給を受けていた気象庁東京管区気象台富士山測候所の冬季無人化に伴い、平成 17 年夏をもって閉鎖された。

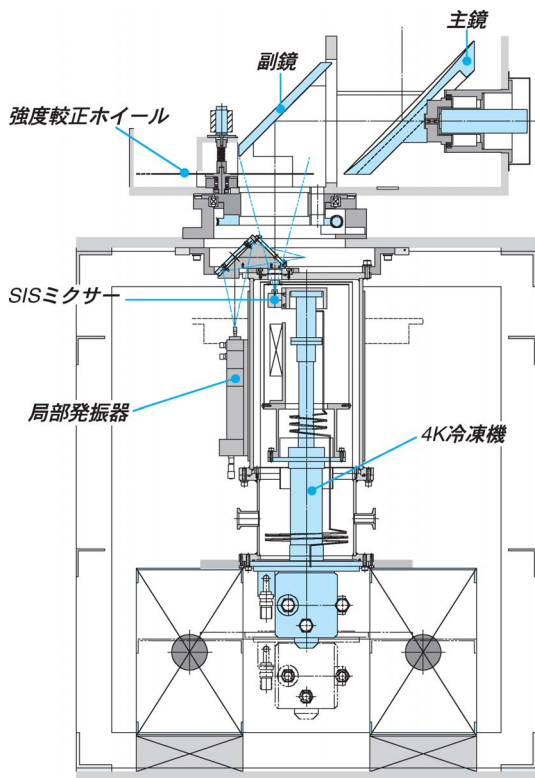


図1 可搬型 18 cm サブミリ波望遠鏡の本体構成。

く体力勝負なのである。

4. 望遠鏡運用の実際

この望遠鏡をこの地に持ち込むのは、実はこれで5度目だった。実験的要素が濃い性格上、また富士山頂サブミリ波望遠鏡の運用と平行している都合上、この望遠鏡は毎回チリへの移設と撤収を繰り返している。チリへの渡航はさまざまな制約に縛られ、それぞれ1カ月程度の期間に限られる。最初の移設実験に筆者は参加していない。残された文献にその記録を求めると、どうやら当地における500 GHzでの大気透過度を測定するにとどまったらしい¹²⁾。筆者がこの望遠鏡を引き継いだのは1999年からだが、受信機を含む信号処理系および制御系を大幅に入れ替えて臨んだ2001年3月の移設実験は、悪天候のためあえなくアウト。その半年後に再挑戦するも、気温が下が

る（観測条件が良くなる）と積分器が狂い始めてアウト。機器の諸問題を解決し、翌2002年9月によりやく中性炭素スペクトル線を初検出。今回よりやく銀河面のサーベイ観測に着手することができたのだった。

各々の移設実験は、まず東大本郷キャンパスでの梱包作業から始まる。望遠鏡システムは合計四つのコンテナに梱包され、航空便でチリへと輸送される。発振器などのデリケートな機器は、手荷物として機内に持ち込むことになるが、当然のことながら毎回検査に引っかかりそのたびに説明しなければならない。チリでは、われわれの滞在する山麓の村サンペドロ・デ・アタカマ（標高2,450 m）のホテル、La Casa de Don Tomasがコンテナを受け取り、敷地内の倉庫に保管しておく。われわれのチリ到着後最初の仕事は、望遠鏡の梱包解きと運搬によるダメージの確認である。道中、相当にヒドイ扱いを受けるらしく、ほとんどのネジは外れてコンテナの底に散乱している。ホテル内にて各々のコンポーネントの動作確認および微調整を行った後、高地の観測サイトへの移設作業に入る。電力は、2002年よりASTEの大型発電機から供給を受けている。それ以前は携帯型発電機を使用していた、それは8時間ごとに給油する必要があり、望遠鏡の運用には非常に厳しいものがあつた。観測サイトで組み立てられた望遠鏡システムは、まずは光学望遠鏡による指向補正（夜のお仕事）、受信機周辺の最適化、中間周波信号系各段のレベル調整、太陽による電波軸の指向補正を経て、すべてが問題なく終了した後実際に実際の観測が開始できる。ここまでの事象はすべて直列接続だ。順調に行って、望遠鏡システム全体の立ち上げに要する期間は10日間といったところか。撤収には運送業者への引き渡しを含めて約3日かかるので、合計約2週間のオーバーヘッド。つまり1カ月間の渡航で、すべてが順調に進んだとしても実質的な観測期間は2週間程度しかない。つまり何か一つでも深刻なトラブルが

発生すれば、その回の移設実験は壊滅的なダメージを被るのである。

5. 銀河面サーベイ観測

このような条件にもかかわらず、2003年9月の移設実験においては（冷却増幅器の故障というトラブルはあったが）奇跡的にほぼすべての立ち上げ作業が順調に進み、2週間の実質観測期間が確保できた。われわれはこの限られた観測期間内で、[CI]輝線による銀河系内域のサーベイ観測を遂行した¹⁰⁾。銀経300°から354°の銀河面を1°間隔で観測し、各々の観測点でrmsノイズレベル

0.1 K 以下の高質なスペクトルを取得した。これは空間サンプリングの完全な観測ではないが、特定の天体に偏らない（無バイアスな）掃天観測であり、その結果は銀河系内域の星間ガスの性質を正しく反映したものになることが期待される¹³⁾。

5.1 中性炭素原子の大局的分布

この観測により、銀河系内域（太陽系よりも内側）の中性炭素原子の分布が初めて明らかになった。図2は、[CI]輝線の銀経-速度図とCO輝線のそれを並べたものである。これらはそれぞれ、中性炭素原子および一酸化炭素分子の、銀河系内域における分布・運動を表している。一見して、銀河系内域の中性炭素原子の大局的な分布・運動は一酸化炭素分子のそれに酷似しており、銀河系回転に沿う運動をしていることがわかる。またサーベイ領域に含まれる三つの銀河系の渦状腕のうち、ともに Scutum-Crux 腕と Norma 腕に付随する成分が特に顕著である。

5.2 物理・化学状態

[CI]輝線を放射するガス成分は、どのような物理・化学状態を有しているのだろうか。これを調べるためにわれわれは、分子雲の大局的速度勾配(LVG)モデル^{14), 15)}に基づいた励起状態の解析を行った。モデルパラメーターは、密度、温度、炭素原子(C)および一酸化炭素分子(CO)の存在量の四つであり、一方で観測量は二つのスペクトル線強度である。したがってここでは、密度と温度にCO輝線の観測結果から評価された代表的な値^{11), 16)}を採用し、各々の観測データ点における2本のスペクトル線強度から、一酸化炭素分子の単位速度幅あたりの柱密度(N_{CO}/dV)および炭素原子/一酸化炭素分子(C/CO)の存在量比を推定した(図3)。その結果、ほとんどのデータ点はCO柱密度が比較的低く、C/CO存在比が2から10と高い領域に集中することがわかった。巨大分子雲で見られるC/CO存在比は一般に0.1前後かそれ以下であることを考えると、この結果は非常に印象的である。つまり、銀河系内域の中性炭素

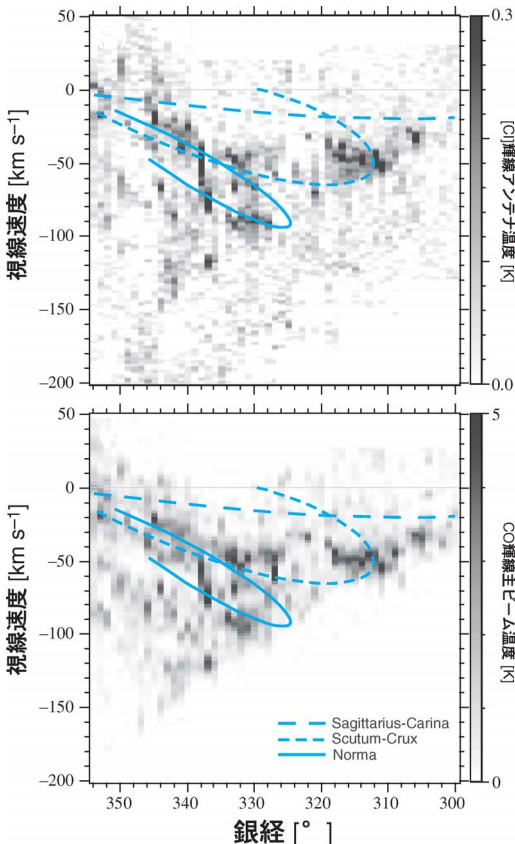


図2 [CI] 492 GHz 輝線（上）と、CO 115 GHz 輝線の銀経-速度図（下）。

CO輝線のデータは、ハーバード・スミソニアン天体物理センターのグループによる。青い線は三つの銀河系渦状腕の軌跡を表す。

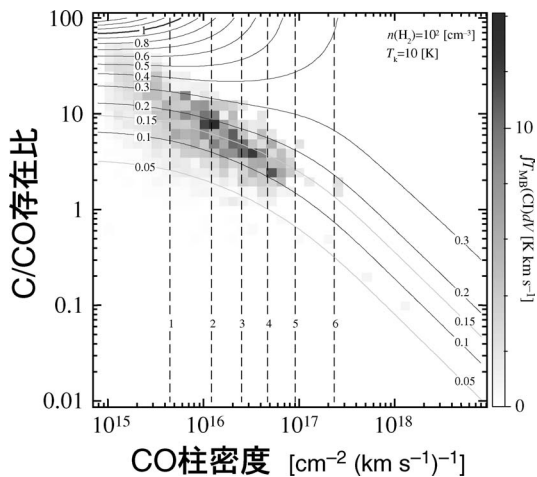


図3 LVG モデルに基づいて計算されたスペクトル線強度および強度比。水素分子密度 100 個/cc, ガス温度 10 K を仮定している。グレースケールは [CI] 輝線強度で重みかけたデータ点の密度分布を表す。

原子スペクトル線放射は、巨大分子雲よりもはるかに希薄な、いわゆる“translucent cloud”という範疇に分類されるべき性質をもった分子雲が支配的であることがわかったのである。

5.3 銀河半径分布

銀河系の回転曲線を仮定すれば、スペクトル線放射強度の銀河半径分布を導出することができる。解析方法の詳細は他の文献 17 に譲るが、ここでは Russeil による回転曲線¹⁸⁾を採用し、[CI] および CO 輝線放射強度の銀河半径分布を導出した。両スペクトル線ともに銀河系中心から 4-6 kpc の間に広い分布ピークを示し、放射強度比はその分布ピーク両側で低くなる傾向が見られる。この結果に先の励起計算を適用すると、C/CO 存在比が銀河半径に対して単調に増加していく傾向が見いだされた。これは言い換えれば、銀河系内域の中性ガスは銀河中心に近いほど分子の形態をとる割合が高いことを示している。

5.4 渦状腕との関係

[CI] 輝線の銀経-速度図は、CO 輝線のそれに非常に酷似していた。しかしながら、それらの比

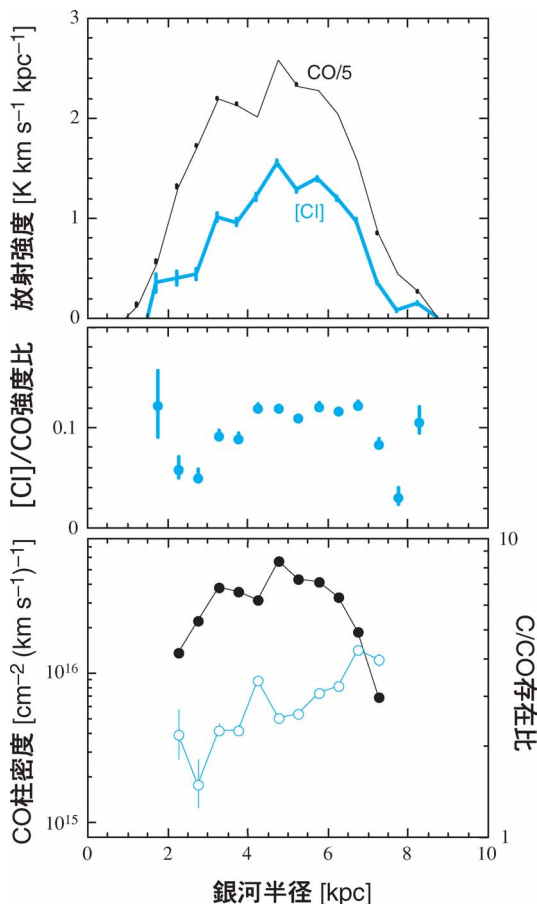


図4 炭素原子および一酸化炭素分子スペクトル線強度の銀河半径分布 (上) とその比 (中), LVG 解析によって求められた CO 柱密度 (黒丸) および C/CO 存在比 (白抜き青丸) の銀河半径分布 (下)。

をとると実に興味深い結果が得られた。ここで再び銀河回転曲線を仮定して、[CI]/CO 輝線強度比が 0.3 を超えるデータ点の銀河系内での位置をそれぞれ決定し、その分布を見てみる。その際、同一視線方向に解は二つ存在するので、その双方を表示したものが図 5 である。興味深いことに、「遠い」側の解の分布は、Scutum-Crux 腕と Norma 腕の内側に沿って分布するように見える。これは銀河回転に対して渦状腕の上流側に相当し、HII 領域および分子雲で定義される渦状腕とのずれの量は数百 pc 程度である。一般に、重力ポテンシ

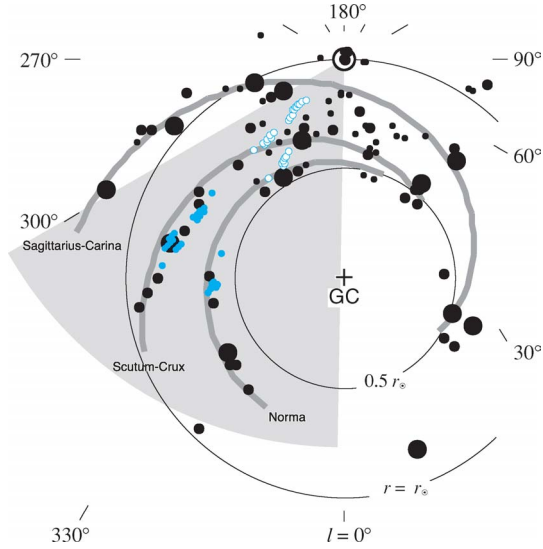


図5 [CI]/CO 輝線強度比が0.3を超えるデータ点の銀河系内での位置分布。青丸は「遠い」側の解、白抜き青丸は「近い」側の解を表す。黒丸はHII領域、太実線は渦状腕の軌跡。

ルの極小点付近に形成される渦状腕をガスが通過する際、主に原子相であった拡散ガス雲が集結し、星間分子雲という形態に数百万年の時間をかけて進化すると考えられている。上記の結果は、その渦状腕通過に伴う原子→分子相変化の過程、つまり渦状腕上での星間分子雲形成の過程を、初めて観測によってとらえたものと考えられる。

5.5 予想外の結果

銀河面サーベイの開始前、われわれはいくつかの代表的な天体でテスト観測を行っていた。そのうちのひとつM17において、図6に示す特異なスペクトルを得た¹⁹⁾。この方向の炭素原子スペクトルには、巨大分子雲に典型的な成分に加え、速度幅40 km/s程度の「裾」が存在する。富士山頂サブミリ波望遠鏡で追観測を行った結果、この高速度成分は空間的に広がった強度の微弱な成分であることがわかった²⁰⁾。「なんてん」望遠鏡の観測結果によると、このM17分子雲は直径約200パーセクのスーパーシェル構造の端に位置することが

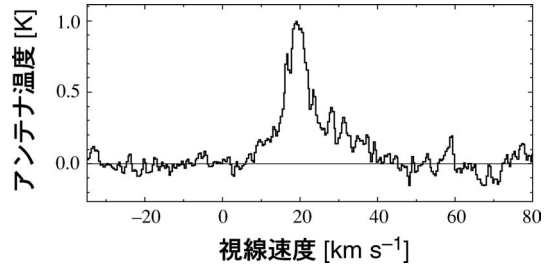


図6 M17方向の炭素原子サブミリ波スペクトル。速度幅40 km/s程度の超高速成分が見えている。

わかっている²¹⁾。このことから、ここで検出された炭素原子の高速度成分は、過去の複数の超新星爆発によってスーパーシェル形成とともに掃き集められた拡散ガスと考えられ、この後新しい分子雲を形成する「種」を見ているものと考えられる。

6. 望遠鏡のアップグレード

以上紹介したように、数々の厳しい制約の下で運用されているにもかかわらず、可搬型18 cmサブミリ波望遠鏡のデータからは重要な科学的成果が次々と出てきている。とは言うものの、もっと安全に能率良く観測が進められないものだろうか。現在われわれは、この望遠鏡を一定期間据え置いて遠隔操作で運用すべく改修を施している。具体的には、指向精度の悪かった仰角制御モータの交換、主要機器の計算機制御およびモニターの整備、そして制御系のVMEバス計算機への移行である。さらに、窒素イオンの1.46 THzスペクトル線の観測を目的とした、テラヘルツ帯受信機も制作中である。お金があればレドームも欲しいし、欲を言えばキリがない。あと足りないモノは……、そう、労働力である。

謝辞

可搬型18 cmサブミリ波望遠鏡は、東京大学大学院理学系研究科物理学専攻・山本研究室において開発され、チリ大学天文学科L. Bronfmanのグループとの共同プロジェクトとして運用されてい

ます。国立天文台 ASTE チームの方々には、電力の供給をはじめさまざまな有形無形の支援をいただきました。ここに改めて感謝の意を表します。Thomas Dame 氏（ハーバード・スミソニアン天体物理センター）には CO サーベイのデータを提供していただきました。この場を借りてお礼申し上げます。最後に、この辛いプロジェクトに参加し、数々の重要な貢献をしてくれた大学院生（卒業生）の方々、池田正史、亀谷和久、岩田充弘、松尾公大、林田将明、永井 誠、久保井信行、田中邦彦の各氏に心から感謝の意を表します。本日に有り難うございました。

参考文献

- 1) Wilson R. W., Jefferts, K. B., Penzias, A. A., 1970, ApJ 161, L43
- 2) Suzuki H., et al., 1992, ApJ 392, 551
- 3) Sekimoto Y., et al., 2000, Rev. Sci. Instr., 71, 2895
- 4) Maezawa H., et al., 1999, ApJ 524, L129
- 5) Ikeda M., et al., 1999, ApJ 527, L59
- 6) Oka T., et al., 2001, ApJ 558, 176
- 7) Ikeda M., et al., 2002, ApJS 139, 467
- 8) Kamegai K., et al., 2003, ApJ 589, 378
- 9) Oka T., et al., 2004, ApJ 602, 803
- 10) Oka T., et al., 2005, ApJ 623, 889
- 11) Dame T. M., et al., 1987, ApJ 322, 706
- 12) Hirota T., et al., 1998, PASJ 50, 155
- 13) Liszt H., 1993, ApJ 411, 720
- 14) Scoville N. Z., Solomon, P. M., 1974, ApJ 187, L67
- 15) Goldreich P., Kwan, J., 1974, ApJ 189, 441
- 16) Scoville N. Z., et al., 1987, ApJS 63, 821

- 17) Burton W. B., Gordon, M. A., 1978, A&A 63, 7
- 18) Russeil D., 2003, A&A 397, 133
- 19) 岡 朋治, 2003, 日本天文学会春季年会, Q26a
- 20) 永井 誠, 2005, 日本天文学会秋季年会, Q01a
- 21) Moriguchi Y., et al., 2002, The Proceedings of the IAU 8th Asian-Pacific Regional Meeting, II, 173

Atomic Carbon in the Galaxy
Tomoharu OKA

Research Center for the Early Universe and Department of Physics, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan

Abstract: To investigate formation processes of molecular clouds, it is crucial to know the large-scale spatial distribution and kinematics of molecular cloud forming regions in the Galaxy. Here we present a coarsely sampled longitude-velocity map of the southern Galaxy in the 492 GHz fine-structure transition of neutral atomic carbon taken with the Portable 18 cm Submillimeter-wave Telescope (POST18). The map clearly delineates concentrations of gas with high C/CO ratio in the “upper stream” rms of the Galactic rotation. These could be gas condensations just accumulated in the potential well of spiral arms, and be in the early stages of molecular cloud formation.