

令和元年6月13日現在

機関番号：34504

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H03961

研究課題名(和文) 分子雲の進化を解明する30cmサブミリ波望遠鏡による銀河面サーベイ観測

研究課題名(英文) Survey observation of the Milky Way using the 30cm sub-mm telescope to reveal evolution of molecular cloud

研究代表者

瀬田 益道 (SETA, MASUMICHI)

関西学院大学・理工学部・教授

研究者番号：80358994

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：分子雲の形成と進化の解明を目指して、一酸化炭素CO J=4-3 460 GHz, 炭素原子[C I] 492 GHz 並びに 809 GHzの3輝線で銀河面サーベイを行うために、800GHz帯のサイドバンド分離型ミキサーの基礎的開発、及び500GHz帯ミキサーの中間周波数帯域の拡大の開発的な研究を行った。また、近傍銀河及び天の川でのC I及びCO輝線の観測的研究を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

分子雲は天文学における重要な構成単位であるが、その形成と進化の詳細は解明の途上にある。サブミリ波帯での観測が重要である。特に、複数のCO輝線の観測からの強度比から物理状態を解明することや、原子相から分子相への変遷領域をトレースする炭素原子輝線 C Iによる観測が重要である。これらの輝線を同時に観測するための受信機の基礎技術である、800GHz帯のサイドバンド分離型ミキサー、及び中間周波数帯域を拡大する開発を行った。

研究成果の概要(英文)：We developed fundamental devices for sideband separating mixer for 800GHz, and wide IF band 500GHz 2SB mixer so as to reveal evolution of molecular cloud. We observed nearby galaxies and the Milky Way in C I and CO lines.

研究分野：電波天文学

キーワード：サブミリ波受信機

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

星間物質の中で、低温(～10K)で高密度(～ $10^3$ 個/cc)の領域を分子雲と呼ぶ。分子雲は、星と並ぶ銀河の主要な構成要素であり、銀河の進化の理解に重要な天体である。分子雲進化の基本的な過程は描かれている。分子雲は密度が薄く淡いHI雲から形成し、腕領域で分子雲が収縮し星が誕生する。大質量星が出す紫外線は分子雲中に電離領域(HI領域)を形成し、超新星爆発による加熱圧縮等で、分子雲は進化に伴い物理状態が変化する。しかし、腕間での分子雲の形成機構に関しては、腕間で小さな分子雲が集合する説もある。誘発的な大質量星形成の要因も、腕のポテンシャルでの分子雲の加速に加え、分子雲同士の衝突や、HII領域も提唱されている。分子雲の形成と進化の解明には、分子雲の形成の場を見ることが物理状態の変遷を見る観測が重要である。これまで、分子雲の広域観測はCO  $J=1-0$  輝線等のミリ波帯域に限られており、分子雲の分布は描けても質量以外の物理状態(温度や密度)の解明は難しかった。物理状態解明には複数の輝線観測が必要である。特に分子雲の内部まで見通せるサブミリ波帯でのCO輝線観測が必要である。また、分子雲の進化の解明には、分子雲の、原子相から分子相へと相変化する領域を捉えるサブミリ波帯の中性炭素原子[CII]の観測が重要である。ところが、観測地や装置が原因で、サブミリ波の広域観測が可能な望遠鏡は世界的に無い。

### 2. 研究の目的

分子雲の形成と進化の解明を目指して、一酸化炭素CO  $J=4-3$  460 GHz, 炭素原子[CII] 492 GHz & 809 GHz の3輝線で銀河面サーベイを行う観測装置を開発し、銀河面の観測を目指すことを研究の目的とする。観測装置として、銀河面サーベイ用に開発した30cmサブミリ波望遠鏡用の500GHz帯サイドバンド分離型(2SB)受信機の間周波数(IF)帯域の拡大、及び800GHz帯の2SBミキサーを新規に開発する。これらの受信機を30cmサブミリ波望遠鏡に搭載すれば、3輝線同時観測可能なシステムが実現する。

### 3. 研究の方法

本研究は分子雲の形成と進化に迫る研究であり、大きく装置開発と観測から成る。装置開発は、800GHz帯2SB受信ユニット開発、及び既存500GHz受信ユニットのCO  $J=4-3$  と[CII] 492 GHzの同時受信型への拡張である。これらの開発により、[CII]輝線491GHz、809GHz及びCO  $J=4-3$ の3輝線同時に、銀河面サーベイ観測を行うことを目指す。最終的には30cmサブミリ波望遠鏡の、大気透過率の良い南極内陸部での運用へとつなげる。観測データの解析としては、CI/CO比から、分子雲が原子から分子相へと変遷する領域を特定し、その要因を探る。CIやCO輝線の強度比から分子雲の物理状態(温度、密度)を導く。視線速度情報を用い、銀河構造(腕等)と物理状態の変遷の関連を明らかにし、分子雲進化とその要因に迫る。

### 4. 研究成果

サブミリ波帯の分光観測は、周波数が高くそのままでは分光観測できないため、観測信号に、隣接した周波数のローカル信号を混ぜ、低い中間周波数(IF)信号周波数に変換するヘテロダイン受信で行う。周波数変換を担う素子(ミキサー)のIF信号出力は、基本的な動作状態では、観測信号の周波数帯域に不要な周波数帯域の信号も重ねて受信(DSB受信)してしまう。DSB受信では、観測したい信号に加えて、不要な信号が重なることになり、強度較正誤差の要因となる。特にサブミリ波の観測では、大気の変動が激しいために誤差が大きくなる。本研究で観測する[CII] ( $^3P_2-^3P_1$ ) 809GHz輝線は、[CII]492GHzとの強度比を求めるため、高い強度較正精度が必要であるために、観測信号のみの取り出す2SB受信機(SSB受信)の開発を行った。

2SB受信機におけるSSB受信は、観測信号を、入力ハイブリッドで等分し、片方の信号に90度の位相差を設け、DSB方式のミキサーで周波数変換を行った後、IFハイブリッドで再び90度の位相をつけて結合させることで実現できる。世界的には、800GHz帯のミキサーは、国立天文台で開発したALMAバンド10ミキサーが世界で一番良好な雑音性能を有している。しかし、ALMAで規定されているSSB方式での雑音抑制が難しいため、現状ではDSB方式である。本研究では、まず、入力ハイブリッドの機能実証から研究を開始した。ハイブリッドは、導波管部品である。2経路の導波管をブリッジ構造と呼ばれる導波管通路で接続し、通路の長さや幅を調整することで、信号の強度の分割や位相差を制御できる。導波管シュミレーターHFSSを用いて、導波管の設計を行った。損失の低減には、導波管長を短くすることが基本である。しかし、ミキサーを取り付ける構造上の要求や、信号の等分割、90度の位相差の創出するためには、導波管長の低減には限界が生じる。また、800GHz帯における広い周波数範囲で、所望の特性を得られるようにするには、ブリッジの数や幅の調整が必要である。膨大なパラメータ空間の中から各々の特性に敏感に反応するパラメータを抽出するのに成功した。例えば、観測帯域はブリッジの数で増大する。次に設計した導波管ハイブリッドを実際に製作した。材料として、熱伝導性を考慮して銅を用いた。ハイブリッドでの損失の要因は金属面でのオーミック損失に起因する。金は比較的損失が小さいが、高価であるため、銅の表面のみにメッキで金薄膜を形成す

る方式を採用した。導波管のサイズは、数 10 ミクロンの構造を、数ミクロンの精度で加工する必要がある。検討の結果金属部に刃物で加工する方式が一番有望であるとの結論に至った。しかし、実際の加工では、工程が複雑であり、想定以上の時間を要した。仕上げ具合を顕微鏡で確認して、所定の形状で削れていることを確認した。製作したハイブリッドは、ベクトルネットワークアナライザを用いて評価試験を実施した。被試験物であるハイブリッドにサブミリ波の信号を入力し、その応答を強度及び入力信号に対する位相差の情報を測定した。強度測定においては、設計に従う、強度の二等分は確認できたが、位相差測定に関しては、想定外ノイズが混入してしまった。原因を追求したところ、測定装置にケーブル系に位相差の誤差を生じる要因があったことが判明した。500 GHz 帯では実績がある装置を用いて、機器の固定等には注意を払っていたが、より波長の短い 800GHz 帯では、ケーブルの僅かな変化も位相測定に影響を及ぼしていることを突き止めた。研究期間内には改修した装置を用いての性能確認には至らなかったが、今後本研究を基に改良を続ける。また、将来のより高い周波数への研究展開を狙い、1THz を超えるミキサー素子の作成も検討をした。Nb に代わる素子の材料選定や成膜方法を工夫することで、1THz を超える動作が見込める素子の製作の目処を立てた。IF 帯域の拡大に関しては、アンプを 2-20GHz 帯の広い帯域に拡大し、従来の 4-8GHz と比べても性能に遜色が無いことを示した。CO と CI の同時観測には IF 帯域 16GHz が必要であり、その実現性は実験によりイメージバンド抑圧性能や雑音温度で示したが、従来のミキサーの設計 IF 周波数帯域を超えているため性能の劣化があり、実用的な受信機に仕上げるには、ミキサーの改良も必要なことが判明した。

30cm 望遠鏡を南極に運び、銀河面の 3 輝線の同時観測を行う計画の準備を進めた。しかし、内陸部は南極の中でも、到達が困難な場所であり、研究期間内に合致するトラバースに組み込むことはできなかった。しかしながら、欧州及び国立極地研究所との調整は継続しており、今後、完成させた受信機を用いて南極内陸部で実際に 30cm 鏡による観測を行う予定である。サブミリ波での銀河面サーベイに備えた既存望遠鏡を用いた観測では進展があった。本研究では、CI の分布から分子雲の形成過程に迫ることを目指しているが、ALMA を用いて、近傍の銀河において、CO 輝線と CI の分布を探る研究を進めた。また、野辺山 45m 望遠鏡を用いた、高い空間分解能の CO 1-0 輝線のデータ(FUGIN)プロジェクトを用いても研究を進めた。銀河系の内部領域では視線上に多数の分子雲があり、スペクトルは複数のピークを持つ、この複雑なスペクトルから分子雲を抽出する方法を採用し、高い空間分解能を生かして、銀河系の棒状構造等との関係を議論した。超新星残骸 Kes79 においては、CO 輝線の強度比から、超新星残骸と相互作用する分子雲を特定し、従来とは別の分子雲が相互作用していることを明らかにした。分子雲の進化で重要な過程であるホットコアに着目した研究も進めた。ホットコアは、従来は、電波連続波を基に観測が行われていたが、分子雲の観測から輝線強度を基にホットコアを見出す方法を提唱した。銀河面で CI を観測する際に、近傍の広域での CI を知ることは重要であり、空間分解能が大幅に向上した ALMA において、天の川との比較に耐える系外銀河の観測が可能となった。近傍セIFAート型銀河である NGC613 の中心領域を CI 及び CO 等の輝線で観測し、CO に対する CI の輝線強度比が高い領域を見出した。CI は CO とは異なる領域を見ている可能性を示唆している。

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6 件)

1. Miyamoto, Y., Seta, M., Nakai, N., Watanabe, Y., Salak, D., Ishii, S., "ALMA [C I] observations toward the central region of Seyfert galaxy NGC 613", Publications of the Astronomical Society of Japan, 70,3,L1, 2018.

DOI: 10.1093/pasj/psy016

2. Kuriki, M., Sano, H., Kuno, N., Seta, M., et. al., "Discovery of Molecular and Atomic Clouds Associated with the Gamma-Ray Supernova Remnant Kesteven 79", The Astrophysical Journal, 864,161 (10pp), 2018.

DOI: 10.3847/1538-4357/aad7be

3. Umemoto T., Minamidani T., Kuno N., Fujita S., Matsuo M., Nishimura A., Torii K., Tosaki T., Kohno M., Kuriki M., Tsuda Y., Hirota A., Ohashi S., Yamagishi M., Handa T., Nakanishi H., Omodaka T., Koide N., Matsumoto N., Onishi T., Tokuda K., Seta M., Kobayashi Y., Tachihara K., et. al., "FOREST unbiased Galactic plane imaging survey with the Nobeyama 45 m telescope (FUGIN). I. Project overview and initial results", Publications of the Astronomical Society of Japan, 69, 5, 78, 2017.

DOI: 1093/pasj/psx061

4. Miyamoto Y., Nakai N., Seta M., Dragan S., Nagai M., "ALMA multiline observations toward the central region of NGC 613", Publications of the Astronomical Society of Japan, 69, 5, 83, 2017.

〔学会発表〕（計 14 件）

1. 玉川陽大, 瀬田益道, Dragan Salak, 中村美月, 長谷川豊, 小島崇文, 藤井泰範, 小川英夫, 「ALMA Ban10 対応の Sideband Separating(2SB)方式冷却受信機の設計」, 日本天文学会 2018 年春季年会, 千葉大学, 2018 年 3 月.
2. A. Tamagawa, M. Seta, T. Kojima, Y. Hasegawa, H. Ogawa, "Development of a Waveguide Hybrid with Lo coupler for a 800GHz Sideband Separating Receiver", The 19<sup>th</sup> EA Syb-mm wave Receiver technology Workshop, Kwangaku-kaikain, Nishinomiya, Japan, 2018.
3. 宮本祐介, 瀬田益道, 中井直正, 久野成夫, Dragan Salak, 石井峻, 「ALMA による近傍銀河 NGC613 中心領域の[CI]」, 日本天文学会 2018 年春季年会, 千葉大学, 2018 年 3 月
4. 佐藤雄登, 中井直正, 久野成夫, 瀬田益道, 長崎岳人, 関本祐太郎, 「南極望遠鏡用 500GHz 帯 2SB 受信機の間周波数 (IF)帯域の広帯域化」, 日本天文学会 2018 年春季年会, 千葉大学, 2018 年 3 月.
5. 佐藤一樹, 長谷川哲夫, 梅本智文, 南谷哲宏, 鳥居和史, 久野成夫, 半田利弘, 瀬田益道, 坪井昌人, 他, 「NRO 銀河面サーベイプロジェクト (FUGIN): ホットコアの無バイアスサーベイ」, 日本天文学会 2017 年秋季年会, 北海道大学, 2017 年 9 月.

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

出願状況（計 0 件）

取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

<https://sci-tech.ksc.kwansei.ac.jp/~seta/>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：ドラガン サラク

ローマ字氏名：Dragan Salak

所属研究機関名：関西学院大学

部局名：理工学研究科

職名：助教

研究者番号（8 桁）：6073564

研究分担者氏名：酒井 剛

ローマ字氏名：Sakai Takeshi

所属研究機関名：電気通信大学

部局名：大学院情報理工学研究科

職名：准教授

研究者番号（8 桁）：20469604

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：中井 直正

ローマ字氏名：NaKai Naomasa

研究協力者氏名：久野 成夫

ローマ字氏名：Kuno Nario

研究協力者氏名：小嶋 崇文

ローマ字氏名： Kojima Takafumi

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。