

令和 5 年 5 月 31 日現在

機関番号：13901
 研究種目：基盤研究(B) (一般)
 研究期間：2018～2020
 課題番号：18H01252
 研究課題名(和文) 星形成フィラメントのダイナミクスを探る日印気球実験による遠赤外[CII]広域観測

 研究課題名(英文) [CII] line mapping of Galactic star-forming filaments with a far-infrared balloon-borne telescope

 研究代表者
 金田 英宏 (Kaneda, Hidehiro)

 名古屋大学・理学研究科・教授

 研究者番号：30301724
 交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,100,000円

研究成果の概要(和文)：2018年10月および2019年4月にインド・ハンデラバードのTIFR気球放球基地にて気球フライトに成功し、[CII]シングルピクセル分光器によって本研究のターゲットである代表的な大質量星形成領域の[CII]マッピング観測データを取得した。また、[CII]アレイ分光器の開発を進めて、TIFR気球望遠鏡との機械・電気インターフェースの調整を行い、搭載可能な状態に整えた。また、観測データ解析ツールと実験室データ解析ソフトを作成した。なお、新型コロナウイルス感染症による渡航・輸出規制による影響のため、新アレイ分光器をインドへ輸送することができず、研究期間内に新装置による観測は実施できなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大質量星形成とフィラメント状分子雲の関係を理解するために、星形成を直接的にトレースする一階電離炭素が出す[CII]遠赤外線スペクトル線を使った気球観測を実施し、[CII]マッピングデータの取得に成功した。また、気球観測用の新しい[CII]観測装置の開発を進めた。本研究は、インドのタタ基礎科学研究所の赤外線天文グループとの共同作業で進めており、現地での観測準備作業や、オンラインでの開発進捗確認会などを通して、科学者・技術者・学生間での学術・文化交流が進んだ。なお、コロナ禍のため、新しい装置を用いた観測は行えなかったが、2022年度後半に観測再開に向けた準備を現地で進めた。

研究成果の概要(英文)：We have successfully conducted far-infrared balloon observations at TIFR Balloon Facility in Hyderabad, India in October 2018 and April 2019, using our [CII] single-pixel Fabry-Perot spectrometer mounted on the TIFR balloon telescope, and obtained wide-area far-infrared [CII] mapping data of massive star-forming regions (e.g., RCW36, W3, NGC6334). In parallel, we have developed a new [CII] array Fabry-Perot spectrometer and adjusted its mechanical and electrical interfaces to be mounted on the TIFE balloon telescope through discussions with corresponding engineers and scientists in India. We have also created observational data analysis tools and laboratory data analysis programs, using the Python code. Because of the stringent export and travel regulations due to COVID19, unfortunately, we had not been able to ship the new [CII] spectrometer to India and thus could not conduct balloon observations using the new instrument.

研究分野：宇宙赤外線天文学

キーワード：遠赤外線分光 [CII]輝線 気球観測 星形成フィラメント 日印共同

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

Herschel 衛星による遠赤外線ダスト観測を通して、星形成が進行する分子雲は多数のフィラメント構造から構成されることが明らかになった。しかし、このフィラメント状分子雲の空間構造やダイナミクスと星形成の関係は十分に理解されていない。その関係を深く探るには、星形成を直接的にトレースする一階電離炭素が出す[CII]遠赤外線スペクトル線(波長 158 μm)を使ったサーベイ観測が有効である。しかし、地球大気は遠赤外線を通さないため、飛翔体を使った大気圏外からの観測が必須である。

我々はインドのタタ基礎科学研究所(TIFR)の赤外線天文グループと長年にわたる共同研究の実績がある。そこで彼らが所有する気球望遠鏡に我々の観測装置を搭載することで、インドで[CII]気球観測を実施する。我々が開発を進めている遠赤外線[CII]アレイ分光器を TIFR 気球望遠鏡に搭載する。

2. 研究の目的

本研究では、フィラメント状分子雲の空間構造やダイナミクスと星形成の関係を理解することを目的に、遠赤外線[CII]スペクトルの広域観測データを取得する。我々の[CII]ファブリペロー分光器をインド TIFR が所有する気球望遠鏡に搭載し、[CII]マッピング観測を行う。銀河系内の大質量星形成領域のうち、フィラメント構造が卓越するものを選んで、観測を実施する。Herschel 衛星による遠赤外線ダスト放射や「あかり」衛星による中間赤外線 PAH (多環芳香族炭化水素)放射が示す大質量星形成環境のフィラメント構造との比較を行い、光解離領域が真にフィラメントに付随する証拠と、ガス降着・フィラメント分子雲衝突を示唆する空間・速度構造の有無を探る。

3. 研究の方法

我々の[CII]アレイ分光器をインド TIFR 気球望遠鏡に搭載すべく、まずは分光器側の電気インターフェースおよび機械インターフェースを整備する。具体的には、インド気球望遠鏡側の電気システムと整合させるために、アレイ検出器読み出し回路のデジタルデータ出力部の整備を行う。気球ペイロードのテレメトリフォーマットとの整合とるべく、観測装置の信号の出力レートやデータフォーマットを整える。また、望遠鏡焦点面に分光器をマウントするための光学調整や装置全体の質量管理、電気ケーブルなどの配置設計を実施する。インド側の技術担当者との連絡を取りながら、必要な電子部品や機械部品を揃え、電気・機械インターフェース調整作業を進める。また、既存のアレイ検出器およびファブリペロー分光器をそれぞれ単体で性能評価を進め、必要な光学・電気調整を行う。各コンポーネントを組み上げ、観測装置として整えたのちに、最終的にインドへ機器を輸送する前に、[CII]アレイ分光器全体の性能を評価するために、低温真空試験を行う。

これらの準備作業と並行して、これまでに気球飛翔実績のある従来型[CII]シングルピクセル分光器の実験・観測結果を参考にしながら、データ解析ツールおよび地上データ解析ソフトの作成・整備を進める。また、本研究のターゲットとなる代表的な大質量星形成領域に対して、従来型[CII]分光器による気球観測を進め、新アレイ分光器の観測を立案する際の情報を得る。研究期間中は、各年度ごとに 11 月と 3 月にインド・ハイデラバードの TIFR 気球放球基地に 2-3 週間程度滞在し、従来分光器による[CII]観測を進めながら、新分光器と望遠鏡・気球ペイロードシステムとの噛み合わせ試験を進める。最終年度に新分光器による観測を実施する。

4. 研究成果

2020 年から 2022 年にかけての新型コロナウイルス感染症による渡航・輸出規制による影響のため、新アレイ分光器をインドへ輸送することができず、研究期間内に新装置による観測は実施できなかった。しかし、以下の通り、現地に既存の従来分光器による[CII]観測、新分光器の性能評価・不具合改修、データ解析ツールと実験室データ解析ソフトの作成、インド側の科学者・技術者との綿密な打ち合わせ、などを実施して成果を得た。

(1) 本研究期間中の 2018 年 10 月、2019 年 4 月にインド・ハンデラバードの TIFR 気球放球基地にて気球フライトに成功し、従来分光器によって本研究のターゲットである代表的な大質量星形成領域の[CII]マッピング観測データを取得した。図 1 に得られた結果の一例を示す。この中で、とくに RCW36 に着目して解析を進め、Herschel 衛星の遠赤外線ダスト放射や「あかり」衛星の PAH 放射との比較を行い、フィラメント構造との関連性を議論した。得られた成果を査

読論文で発表した (Suzuki et al. Astronomy & Astrophysics, A30, 2021)。また、インド側の共同研究者によって、W3 領域の解析が進められ、現在、論文投稿準備中である。

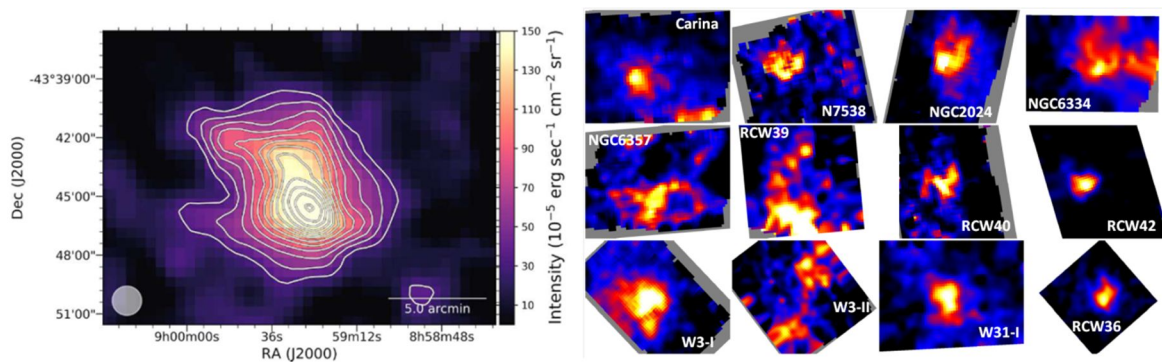


図 1: 本研究期間中に従来分光器によって気球観測を実施して得られた[CII]分布の例。左図は大質量星形成領域 RCW36 (Suzuki et al. 2021)。

(2) 観測装置の遠赤外線アレイ検出器単体の全ピクセルの波長感度特性を測定し、図 2 に示す結果を得た。ピクセルごとの特性のばらつきは非常に小さく、[CII]波長 158 μm において観測に必要な感度を有することを確認した。また、ファブリペロー分光器単体のエタロンの光学調整を実施し、図 3 に示す結果を得た。波長分解能 $R = \lambda/\delta\lambda = 7000$ 程度の値を示すことが確認され、従来分光器 $R = 1800$ に対して、性能が有意に向上することが実証された。また、得られた透過率曲線から、エタロンの反射率・平行度・平面度・吸収率など、ファブリペローのフイネスを決める各要素の物理量を見積もるための分光器の計算機モデルを構築した。

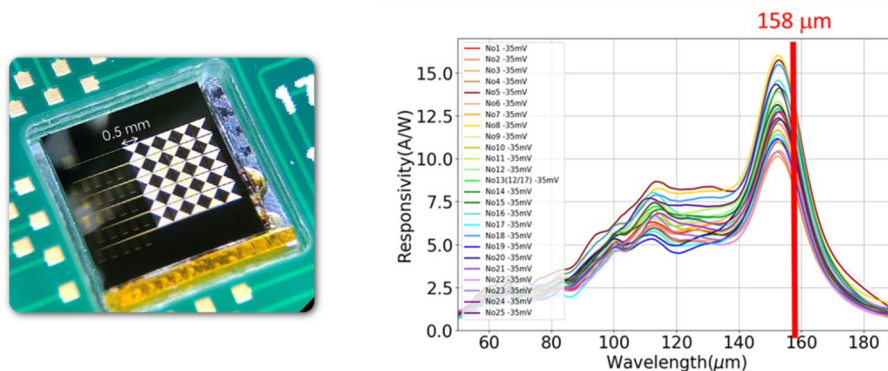


図 2: 観測装置の遠赤外線アレイ検出器と全ピクセルの波長感度特性 (齋藤太志、2019 年度、名古屋大学 修士論文)。

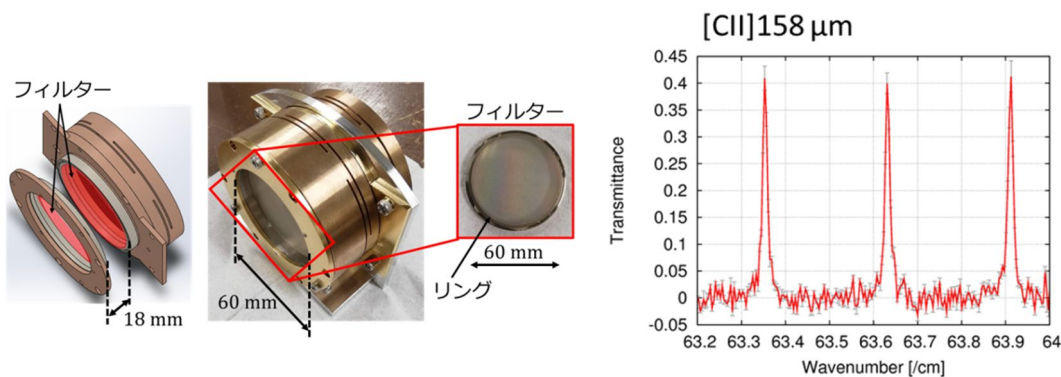


図 3: 観測装置の波長スキャン型ファブリペロー分光器と、波長 158 μm ($= 63 \text{ cm}^{-1}$) 付近の透過率曲線 (金山健也、2020 年度、名古屋大学 修士論文)。

(3) 遠赤外線アレイを極低温読み出し回路および常温アナログ・デジタルエレキと組み合わせ、検出器システムとして end-to-end で性能評価を実施したところ、アレイピクセル間の感度のばらつきが非常に大きく、常温エレキ部の可変抵抗の調整範囲内では実効検出器バイアス電圧を揃えることができないことが判明した。この原因は、極低温読み出し回路の dual MOSFET

の電気特性のばらつきであることが分かったため、低温 IC プローバーを用いた極低温読み出し回路の動作を調査した。dual MOSFET の特性のばらつきが小さいものを選別し、ワイヤボンダーを用いて、読み出し回路や半導体 Ge 素子の結線を行った。静電破壊を防ぐための措置を施したうえで、検出器システムを再構築した。基本動作評価を行った結果の一例として、アレイのピクセルごとの波長感度特性を図 4 に示す。気球による大質量星形成領域の[CII]観測（波長 158 μm ）に必要な感度は約 5 A/W と見積もられており、一方、測定された全ての素子で観測要求値よりも有意に高い感度 (> 10 A/W) が得られた。

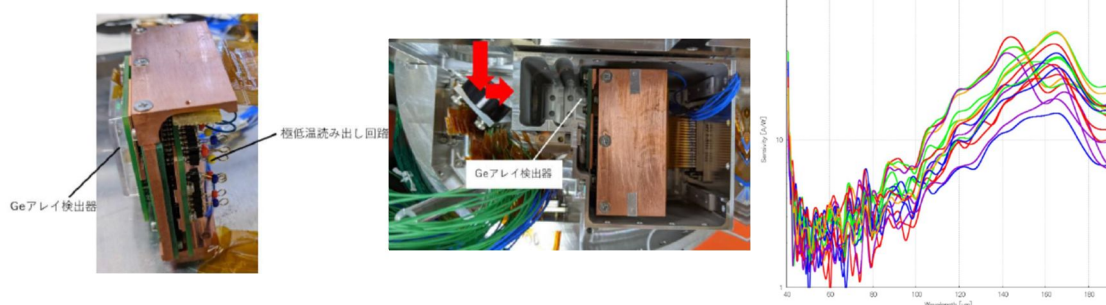


図 4 (左) Ge アレイと極低温読み出し回路を組み合わせた構造、(中央)クライオスタットに配置した検出器ハウジング、(右)測定された波長感度特性、縦軸が光感度 1 - 100 A/W、横軸が波長 40 - 170 μm 、観測対象の[CII]輝線は 158 μm (小田切萌絵、2022 年度、名古屋大学 修士論文)。

(4) 気球データの解析プログラムを、Python コードを用いて新たに構築した。このプログラムを用いて、2017 年～2019 年に取得された[CII]データの再解析を実施した。また、アレイ分光器の実験室データを処理するツール群を整備し、リアルタイムで観測装置の動作を評価するための試験システムを整備を進めた。これらの作業のために、技術支援員をパートタイムで雇った。

(5) 2020 年 2 月 (新型コロナ感染症による渡航規制前) および 2022 年 6 月 (渡航規制緩和後) にインド側の共同研究者を名古屋大学に招待して、これまでに得られた観測データの解析状況の確認、解析プログラムや観測装置の開発状況の確認、科学成果の議論、観測計画の立案などを行った。また、インド側の技術者との間でオンラインミーティングを 2-3 ヶ月に一回の頻度で実施して、望遠鏡と観測装置の電気インターフェースおよび機械インターフェースの調整・確認、双方の開発状況の確認などを行った。さらに、国内のチームメンバーの間で、週一回の頻度で進捗確認のオンラインミーティングを実施し、情報共有を図った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hanaoka, M., Kaneda, H., Suzuki, T., Kokusho, T., Oyabu, S., Ishihara, D., Kohno, M., Furuta, T., Tsuchikawa, T., Saito, F.	4. 巻 72
2. 論文標題 A systematic study of Galactic infrared bubbles along the Galactic plane with AKARI and Herschel. II. Spatial distributions of dust components around the bubbles	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 id.5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/pasj/psz123	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Hanaoka, M., Kaneda, H., Suzuki, T., Kokusho, T., Oyabu, S., Ishihara, D., Kohno, M., Furuta, T., Tsuchikawa, T., Saito, F.	4. 巻 71
2. 論文標題 A systematic study of Galactic infrared bubbles along the Galactic plane with AKARI and Herschel	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 id.6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/pasj/psy126	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Suzuki, T., Kaneda, H., Wada, T., Ukai, S., Hanaoka, M., Shichi, K., Maeda, H., Oyabu, S., Watanabe, K.	4. 巻 57
2. 論文標題 Evaluation of the compensation ratio of heavily-Ga doped Ge for far-infrared detectors in astronomy	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 pp.116701
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7567/JJAP.57.116701	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Suzuki T., Oyabu S., Ghosh S. K., Ojha D. K., Kaneda H., Maeda H., Nakagawa T., Ninan J. P., Vig S., Hanaoka M., Saito F., Fujiwara S., Kanayama T.	4. 巻 651
2. 論文標題 [CII] emission properties of the massive star-forming region RCW 36 in a filamentary molecular cloud	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A30 ~ A30
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1051/0004-6361/201935739	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 齋藤太志、鈴木仁研、金田英宏、大藪進喜、藤原侑、金山健也、下村太誉、和田武彦、石丸貴博、長勢晃一
2. 発表標題 気球望遠鏡を用いた 高解像度・高波長分解[CII]マッピング観測のための Blocked-Impurity-Band型遠赤外線アレイ検出器の開発
3. 学会等名 日本天文学会2020年春季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 花岡美咲、金田英宏、鈴木仁研、國生拓摩、大藪進喜、石原大助、河野樹人
2. 発表標題 大質量星形成領域に付随する赤外線バブルの銀河円盤全域における系統的研究
3. 学会等名 日本天文学会2019年春季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大藪進喜、鈴木仁研、金田英宏、金山達也、下村太誉、小田切萌絵、和田武彦、D. Ojha、S. Ghosh
2. 発表標題 大質量星形成領域の気球赤外線観測の現状と将来
3. 学会等名 「(サブ)ミリ波単一鏡の革新で挑む、天文学の未解決問題」研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大藪進喜、金田英宏、鈴木仁研、和田武彦、下村太誉、小田切萌絵、D. K. Ojha、S. L. A. Costa、S. Ghosh、P.R. Sandimani
2. 発表標題 日印共同気球実験による遠赤外[CII] 輝線の広域マッピング観測で迫る大質量星形成の理解
3. 学会等名 JAXA宇宙科学研究所大気球シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大藪進喜, 鈴木仁研, 和田武彦, 金田英宏, 下村太誉, 小田切萌絵, D. K. Ojha, S. L. A. D'Costa, S. Ghosh, P.R. Sandimani
2. 発表標題 大質量星形成領域の遠赤外線 [CII] 輝線広域観測を進める日印共同気球実験
3. 学会等名 日本天文学会2022年春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木仁研, 藤原侑, 齋藤太志, 金田英宏, 石丸貴博, 和田武彦, 大藪進喜
2. 発表標題 接合型 Ge 検出器の平面展開構造による未開拓な赤外線波長帯の高感度化
3. 学会等名 日本天文学会2022年春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金田英宏
2. 発表標題 衛星搭載用の観測装置・技術開発と人材育成
3. 学会等名 シンポジウム「2030年代の天文学と光赤外地上・スペース計画：日本の戦略」（招待講演）
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	大藪 進喜 (Oyabu Shinki) (10396806)	徳島大学・教養教育院・准教授 (16101)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	和田 武彦 (Wada Takehiko) (50312202)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教 (82645)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	鈴木 仁研 (Suzuki Toyoaki) (30534599)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授 (82645)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
インド	Tata Institute of Fundamental Research		