

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

大藪進喜(徳島大学教養教育院), 金田英宏(名古屋大学大学院理学研究科), 鈴木仁研, 和田武彦(宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所), 下村太誉, 小田切萌絵(名古屋大学大学院理学研究科), D. K. Ojha, S. L. A. Costa, S. Ghosh, P. R. Sandimani(タタ基礎科学研究所)

Study of massive star-forming regions with Japan-India collaborative balloon experiment of large-scale mapping in the far-infrared [CII] emission line

Shinki Oyabu (Institute of Liberal Arts and Sciences, Tokushima University), Hidehiro Kaneda (Graduate School of Science, Nagoya University), Toyoaki Suzuki, Takehiko Wada (Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency), Takayoshi Shimomura, Moe Otagiri (Graduate School of Science, Nagoya University), D. K. Ojha, S. L. A. Costa, S. Ghosh, P. R. Sandimani (Tata Institute of Fundamental Research)

概要

未解決な問題である大質量星の形成メカニズムに対して、銀河系の大質量星形成領域における遠赤外線[CII]輝線(波長 158 μm)の広域マッピング観測によって明らかにする。そのため、我々は高空間分解能・高波長分解能を有する赤外線分光観測装置を開発した。この観測装置とインド・タタ基礎科学研究所が所有する口径 1m 気球望遠鏡と組み合わせて、2022 年 11 月の初観測を目指している。

1. 科学背景と目的

大質量星の形成メカニズムは、未解明な部分が多い。特に、小中質量星形成で考えられている中心星への質量降着メカニズムでは大質量星成長の時間が足りないという問題がある。近年の赤外線や電波による銀河系の星形成領域の観測により、星形成の母体となる塵・分子雲の構造が普遍的にフィラメント状になっていること (Andre et al. 2010)、分子雲同士の衝突によるガス圧縮による高効率の質量降着の様子 (Fukui et al. 2016)が明らかになってきた。これらの結果から、大質量星の成長の理解において、ガスの力学的構造・作用が

本質的に重要であることが示唆されている。そのため、大質量星の母体雲や周囲の雲に形成される温かいガス領域(光解離領域)から放射される最も明るい一階電離炭素輝線([CII]輝線、波長 158 μm)を観測する。[CII]輝線観測によって、大質量星に付随するガスの空間分布と運動の情報を得ることで、大質量星形成の本質部分に観測的に直接迫ることが本研究の目的である。これまでに[CII]輝線による星形成領域の観測は人工衛星、飛行機望遠鏡で行われてきたが、広域に及ぶ大質量星形成領域の全体を高解像度かつ高波長分解能で観測した例は皆無である。

2. これまでの観測

我々は、20年にわたってインド・タタ基礎科学研究所と共同気球実験を行ってきた。日本側は単素子の遠赤外線検出器と波長分解能1,800の[CII]輝線用分光器を投入した赤外線分光観測装置（従来の観測装置）を担当し、インド側は口径1m気球望遠鏡を含むペイロードを担当した。それらを組み合わせて、タタ基礎科学研究所のハイデラバード気球基地から気球を打ち上げてきた。2009年以降、しばらく日印共同気球実験を中断した。これは、Herschel宇宙望遠鏡やSOFIA飛行機望遠鏡による観測が開始したため、気球実験の意義が薄れると判断したためである。しかし、限られた衛星寿命や飛行機望遠鏡の運用コストの制限で、[CII]輝線の広域マッピング観測がほとんど進まなかった。こうした状況を受け、2013年から大質量星形成メカニズムの解明に向けた新しい赤外線分光装置を開発し、それを気球望遠鏡に搭載して[CII]輝線観測を行う計画をインド側と合意して進めてきた。また、観測経験の蓄積のため、2017年から従来の観測装置を用いた観測も並行して進めている（図1）。

2017-2018年に4回の気球フライトに連続して成功しており、12の大質量星形成領域(Carina、N7538、NGC2024、NGC6334、NCG6357、RCW36、RCW38、RCW39、RCW40、RCW42、W3、W31)の観測に成功した。図2に結果の一例を示す(Suzuki et al. 2021)。RCW36はフィラメント状分子雲にある大質量星形成領域であり、分子雲同士の衝突による大質量星の形成が示唆されている。[CII]輝線観測の結果、[CII]輝線放射の空間分布がフィラメント構造の垂直方向に広がっていることが分かった。こうした領域におけるガス雲は、大質量星による光解離で支配されていることが明らかになった。他の観測データについても、科学的成果を挙げるべく、日印でデータ解析を行っている。

3. 本提案の計画

従来の観測装置を用いた観測では、分子雲のフィラメント構造を議論するほどの空間分解能がなく、分子雲衝突を議論するほど波長分解能がない。従って、本研究の目的である大質量星形成を解明することができない。そこで、我々は5×5素子の遠赤外線アレイ検出器（図3）と、波長分解能を1,800から10,000に上げたファブリ・ペロー分光器（図4）を投入した新しい赤外線分光観測装置を開発した。



図1 2017年の打上の風景。(上)打ち上げ当日の気球望遠鏡・ゴンドラの前での集合写真。この中で日本人は5名、その他はすべてインドの打上関係者。(下)夜間打上の様子。

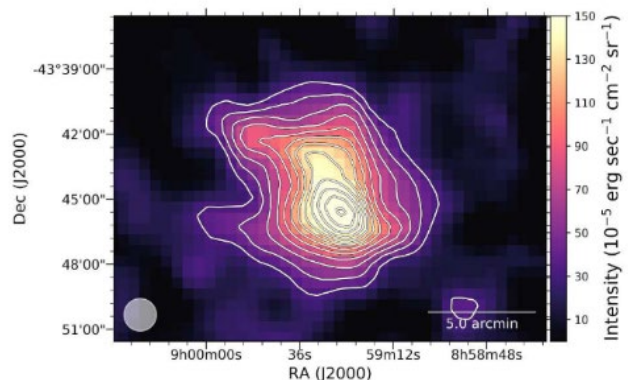


図2 RCW36の[CII]輝線マップ(Suzuki et al. 2021)

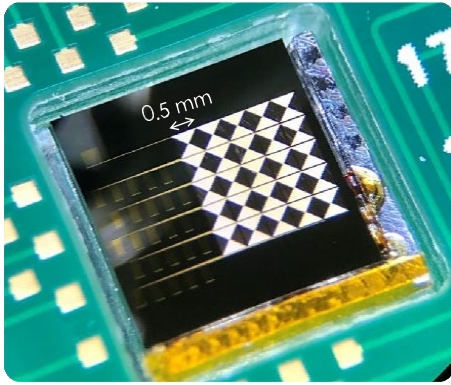


図 3 5×5 ピクセルの遠赤外線アレイ検出器

従来の観測装置に投入されていた遠赤外線検出器は、素子に高い圧力をかけて波長 $158 \mu\text{m}$ に光感度を有していた。それゆえ、頑丈で大きな加圧機構が必要になり、単素子に留まっていた。口径 1 m で波長 $158 \mu\text{m}$ における回折限界の 40 秒角に対して、単素子の検出器は 90 秒角直径であったため、空間分解能は検出器で制限されていた。近年の検出器開発の進歩により、素子に加圧することなく高い光感度を有することが可能になり、コンパクトな遠赤外線アレイ検出器の開発に成功した。5×5 アレイフォーマットにより、回折限界の 40 秒角を十分サンプリングできるため、 90 秒角から 40 秒角へ大幅な空間分解能の向上が実現できる。これによって、Herschel で同定されたフィラメント構造を観測することができる。

ファブリ・ペロー分光器においては、従来型（波長分解能 $1,800$ ）と比べて高い波長分解能を達成するために、2枚のエタロンフィルターの間隔を広げることに加え、エタロンフィルターの面積を大きくする必要がある。しかし、後者はエタロンフィルター面の形状精度を悪化させ、波長分解能の低下を招く恐れがある。そこで、エタロンフィルターを筐体に貼る専用の治具を開発し、面形状精度の要求を満たすことができた。その結果、従来型と比べて高波長分解能なファブリ・ペローの開発に成功した。これにより、[CII]輝線を放射しているガス雲の視線速度を測定することができる。

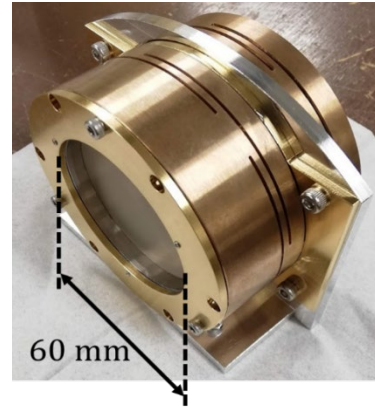


図 4 高波長分解能なファブリ・ペロー分光器

波長分解能 $10,000$ における視線速度の決定精度は、 10 km/s である。これは電波で観測される衝突分子雲同士の典型的な速度差 ($\sim 15 \text{ km/s}$, Fukui et al. 2016) と同程度である。従って、大質量星形成がガス雲同士の衝突によるものなのか否かを議論することができる。こうしたアレイ検出器とファブリ・ペロー分光器の実現によって、高空間解像度・高波長分解能で大質量星形成領域の全域を観測できることが本研究の特色である。

若手の人材育成として、大学院生がこうした技術開発を主体的に進めてきた。検出器の開発では、検出器に用いる半導体の物性評価、検出器の設計や性能評価を行ってきた（鵜飼 2016, 齋藤 2019, 藤原 2019）。その結果、[CII]輝線の検出限界要求を満たす高い感度を確認するとともに、素子毎の感度ばらつきも比較的小さいことが明らかになった（図 5）。また、ファブリ・ペロー分光器の開発では、高波長分解能化に向けた設計、製作および評価を行った（志知 2018, 前田 2019, 金山 2020）。

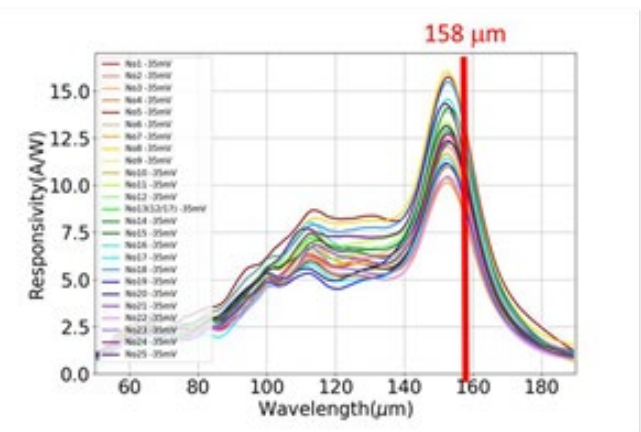


図 5 遠赤外線アレイ検出器の波長感度

その結果、従来型よりも高い波長分解能を確認できた (図 6)。

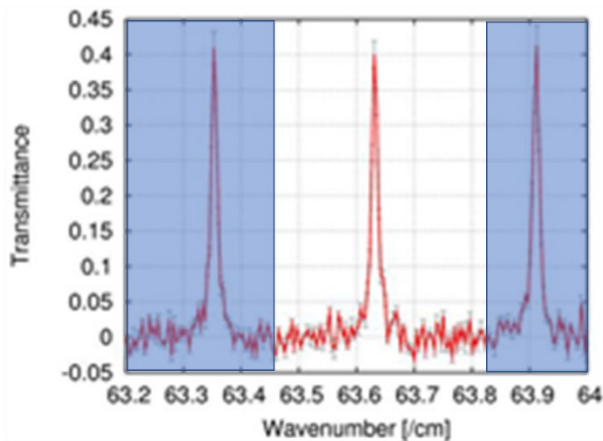


図 6 ファブリ・ペロー分光器の波長 158 μm (=63 cm^{-1}) 付近の透過率。

一方、インド側では、日本の分光器とのインターフェース調整のために、望遠鏡システムの改修を進めている。主要な改修点は三点あり、一点目は分光器と望遠鏡システムとの電気インターフェースである。データ量の増加に伴い高速で通信する必要があるため、分光器と望遠鏡システム間で RS422 プロトコルをもちいて通信を行う。二点目は、望遠鏡システムと地上とのテレメトリーのアップデートである。検出器の素子数の増加に伴うデータ量の増加により、従来システムの 10 kbps から 512 kbps に通信速度を上げる。三点目は、新分光器の視野方向をキャリブレーションする装置の開発である。これまで、観測装置の視野方向のキャリブレーションは、明るい惑星を観測することで行っていた。しかし、惑星の可視性が低い時期が存在するため、このキャリブレーションが観測時期の強い制約になっていた。この問題を解決するため、地上で観測装置の視野方向をキャリブレーションできるシステムを構築する。

以上のように、日印が協力してそれぞれ分光観測装置とペイロードの開発を進めており、2022 年 11 月に新しい赤外線分光観測装置を用いた初観測を目指している。

4. インドとの共同研究の意義

インド・タタ基礎科学研究所はハイデラバードに気球基地を所有しており、気球観測の設備・経験は充実している。また、彼らが所有する口径 1m 望遠鏡は、世界最大級の気球望遠鏡であり、彼らが持つ長年の気球望遠鏡運用の経験は、我々が簡単に習得できるものではない。一方、インド側は遠赤外線観測装置が必要であったが、遠赤外線の観測装置においては検出器から開発する必要があるため、一朝一夕にできるものでない。そこで長年我々が開発してきた遠赤外線検出器を搭載した観測装置を提供する。

加えて、インドからの観測は、赤道付近で気球実験を行うことで、南半球側にある銀河中心付近の多数の大質量星形成領域を観測することができる。このことは大質量星形成の観測的研究を進める上で、大きなメリットである。

さらに、インドでの気球実験では、フライト終了後、陸上で観測装置を回収することができる。陸上での観測装置回収は、すみやかな装置のリカバリーを行うことができる。一方、日本での気球観測は海上回収であることから、海水につかった観測装置の修理の手間を考えると、大きな利点となる。すなわち、素早く次のフライト機会に移行することができ、年に 2 回の観測をコンスタントに実現する。これらのことから、インド・タタ基礎科学研究所との研究交流は、本計画の実現のために必要不可欠である。

参考文献

- Andre, P., et al. 2010, A&A 518, L102.
- Fukui, Y., et al. 2016, ApJ 820, 26.
- Suzuki, T., et al. 2021, A&A 651, 30
- 鶴飼壮太、2016 年度、名大 修士論文
- 志知和幸、2017 年度、名大 修士論文
- 前田浩希、2018 年度、名大 修士論文
- 齋藤太志、2019 年度、名大 修士論文
- 藤原侑、2019 年度、名大 修士論文
- 金山健也、2020 年度、名大 修士論文