

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25247020

研究課題名(和文) 遠赤外[CII]輝線の高解像度広域マッピングによる大質量星形成環境の理解

研究課題名(英文) Large-scale mapping of massive star-forming regions in the far-infrared [CII] emission

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) 31,400,000円

研究成果の概要(和文)：大質量星の形成メカニズムを理解することを目的に、暖かいガスの冷却スペクトル線で最も重要な1階電離炭素が出す遠赤外線[CII]輝線に着目し、高解像度・広域の良質な[CII]画像データの取得を目指した。まず、既存[CII]分光器の改修を行い、冷却性能や光学性能の向上させた。分光器をインドへ輸送して、タタ基礎科学研究所ハイデラバード気球基地にて、気球望遠鏡観測を実施した。その結果、2017年11月と2018年3月に観測が成功し、大質量星形成領域9天体の科学データを取得した。平行して、5×5アレイ検出器と高波長分解能ファブリー・ペロー分光器の開発を進め、気球用の新型観測装置として組み上げた。

研究成果の概要(英文)：In order to understand the formation mechanism of massive stars, we aim to obtain far-infrared wide-area mapping data of massive star-forming regions in the [CII] emission, which is the strongest cooling line of gas in photo-dissociation regions. We first refurbished the existing [CII] spectrometer to improve the cooling and optical performance. We also developed the ground support equipment to test the spectrometer. Then we shipped the instrument to India and performed balloon-borne observations at Hyderabad Balloon Facility of the Tata Institute of Fundamental Research (TIFR). As a result, we have successfully carried out balloon observations twice (Nov 2017 and Mar 2018), and obtained the [CII] mapping data of 9 massive star-forming regions. In parallel to the observations, we have also developed a new far-infrared Ge:Ga BIB array detector of a 5 x 5 pixel format and a high-resolution Fabry-Perot spectrometer to integrate them to a new instrument for balloon observations.

研究分野：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

1. 研究開始当初の背景

大質量星の形成メカニズムには、いかに短時間で星を成長させるかという問題があった。この問題解決のために、Herschel 宇宙赤外線望遠鏡や、「なんてん 2」電波望遠鏡により、フィラメント構造や分子雲衝突というジオメトリ情報が大質量形成を理解するのに重要であると提案されはじめていた。しかし、Herschel 望遠鏡の遠赤外線観測では、奥行き情報を得ることができない、一方、「なんてん 2」電波望遠鏡の CO 分子ガス観測では、輻射場の情報を得ることが難しく、大質量星形成に係る情報をそろえることが困難であった。

2. 研究の目的

我々は、フィラメント状分子雲、あるいは分子雲衝突を、トレースするために、暖かいガスの冷却スペクトル線でも最も重要な 1 階電離炭素が出す [CII]158 μm 輝線と芳香族炭化水素の巨大分子 PAH が出す 7 μm フィーチャーに着目した。特に、PAH データの良質な画像は、「あかり」衛星で取得していたので、PAH データに匹敵する [CII] の高解像度、広域の良質な画像データの取得を目指した。

そのために、二つの方法で研究を進めた。(1) まず、インド気球望遠鏡で過去に使用した [CII] 観測装置 (従来 [CII] 装置) を整備・調整し、大質量星形成領域の観測を再開して、大質量星形成にあらたなデータから知見を得る。(2) より高感度で高解像度、広域の画像の取得ができる新型観測装置の開発を行い、新しい質の観測データを取得して、大質量星形成に迫る。この新型観測装置には、新しく開発された 5×5 アレイ型半導体検出器と、より高波長分解能のファブリー・ペロー分光器を搭載することで、本目的の観測の実現を目指した。

3. 研究の方法

(1) 2009 年に使用した従来 [CII] 装置の整備・調整を行った。従来 [CII] 装置に搭載されていた Fabry-Perot 分光器の波長分解能は、経年劣化で悪化していたので、実験室据置の遠赤外線フーリエ分光器を用いて、Fabry-Perot 分光器の再調整を行い、最良の光学性能が出るように改善した。また、クライオスタットの真空冷却性能の悪化があったので、新しいクライオスタットに、観測装置の中身を移動させた。そして、地上試験装置は、入手不可能の古いコンピュータでしか動作させることができないものであったため、新しい地上試験装置の開発を行い、観測装置の試験を行った。

(2) 新型観測装置の開発のために以下の研究を行った。まず新型の遠赤外線検出器、半導体常温ウエハ接合による遠赤外 2 次元ア

レイ検出器の開発を行った。これは、従来の材料に圧力をかけて長波長側 (波長 120 μm 以上) に感度を持たせたものとは異なり、不純物の Ga 濃度を二桁あげることで、不純物バンドを形成し、長波長での感度を実現した検出器である。しかしながら、漏れ電流が増加するので、高純度 Ge を Ge:Ga に「接合」して漏れ電流をブロックした検出器である。我々はこの検出器の開発のために、漏れ電流をブロックするのに適切な高純度 Ge 層の検討と、波長 158 μm の光を検出するのに適切な Ge:Ga 層の Ga 濃度の評価を行った。そして、これらの評価された材料を使って、5×5 のアレイ検出器の製作を行った。

次にアレイ検出器を極低温で読み出すための回路 (図 1, Si ROIC, Wada et al. 2016) を組み込み、検出器と低温回路を制御するための常温回路の開発をおこなった。これらは、プログラマブルな IC (FPGA) を使用することで、アレイ化された 25 素子のオペレーションを容易に可能にしたものである。

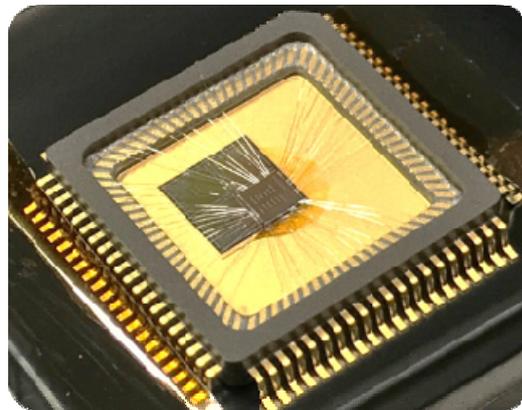


図 1, 極低温検出器を読み出すための回路 (Si ROIC)、25 素子分のオペアンプが搭載されている。

そして、より高感度の観測を実現するために、Fabry-Perot 分光器の高波長分解能化を目指した。従来 [CII] 装置の波長分解能が 2000 弱であったところを、より高い次数の干渉を用いて、より高精度で調整することで、高分解能を実現することを目指した。

新型観測装置の開発は、新規要素 (検出器と分光器) 以外は、ほぼ従来 [CII] 装置のノウハウをもとに開発した。従来 [CII] 装置の再調整時のノウハウを生かし、開発を検出器と分光器に集中させることで、簡略化し実現させた。

4. 研究成果

(1) 従来 [CII] 装置による観測日本で再調整された従来 [CII] 装置をインド



図 2, インド・ハイデラバード気球基地での観測装置の動作試験の様子

のタタ基礎科学研究所に輸送した。輸送後の試験・調整をタタ基礎科学研究所ムンバイキャンパスと打ち上げサイトであるハイデラバード気球基地で行った(2016年9月、11月、図2)。この結果、2017年2月、11月、2018年3月にハイデラバード気球基地から3回のフライトを実施した(図3)。2017年2月のフライトは、上空で観測装置が不具合をおこし正常に動作せず、科学データの取得に失敗した。そこで、2017年7月にハイデラバード気球基地で原因の調査と改修を行った。そして、2017年11月と2018年3月の2回のフライトで、大質量星形成領域を9天体(W3、RCW36、NGC2024、Mon-R2、Carina、NGC6334、NGC6357、W31、RCW106、W40)の観測に成功した。図4に、[CII]輝線マップの例を示す。現在、データ解析をすすめており、科学的目標の大質量星形



図 3, 2018年3月の気球望遠鏡打ち上げの様子

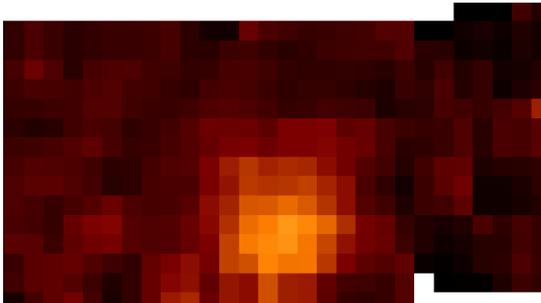


図 4, 2017年11月に取得した大質量星形成領域 W3 の[CII]輝線マップ

成の謎に迫る予定である。

観測をおこなった観測天体選定のための「あかり」等のデータ解析の結果は、科学的成果として出版されている(Hattori et al. 2016)。

(2) 新型観測装置の開発

検出器開発のために、受光層として使う高濃度 Ge:Ga 層とブロック層として使う高濃度 Ge 層の選定のための予備実験を行った(花岡修論、鶴飼修論、Hanaoka et al. 2016)。

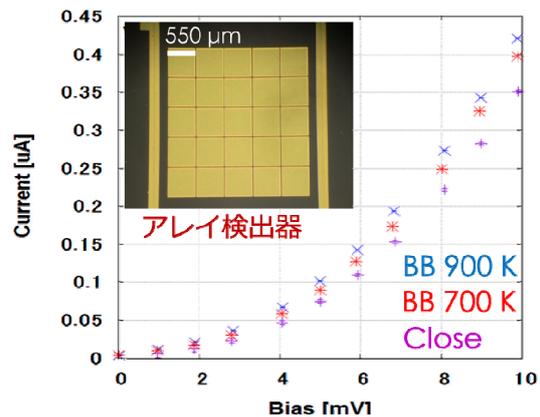


図 5, アレイ検出器の電流-電圧曲線。

(左上) 製作したアレイ検出器の写真

Ge:Ga 層は、濃度を上げすぎると、金属転移してしまうために、半導体として動作するギリギリの濃度を見極める実験を行い、Ge のドーピング量を決めた。ブロック層は、純度を高めすぎると、抵抗が高くなりすぎるために、検出器の一部としての機能しないことがわかった。そのために、適度の不純物を含む Ge を材料として作ったブロック層を使用した。

これらの Ge:Ga 層と Ge 層は、常温ウェハ接合で貼り合わせることで、検出器とし、それらにアレイ構造を持たせることで、アレイ検出器を製作した(図5左上)。そして、この検出器に対して、実験室での動作試験を行った。温度 900 K、700 K の黒体放射と、窓を閉めたときに取得した電圧-電流曲線を、図5に示す。近・中間赤外線を通さない光学フィルターを通して黒体放射を当てており、遠赤外線で感度を持つことを示す。また、その感度は、入射した遠赤外線のエネルギーに対して、 ~ 3 A/W の出力を示し、従来[CII]装置の検出器(0.5 A/W)に比べて、性能が向上していることを確認した(志知修論)。

そして、より高波長分解能の Fabry-Perot 分光器の開発も行った(図6)。従来[CII]装置の Fabry-Perot 分光器よりも高い次数の干渉を使うために 10 mm 程度厚いデザインになっている。この分光器を、フーリエ赤外線分光器内に補助光学系を準備することで、波長分解能を測定した。図7に波長感度特性の結果を示す。波長分解能 6000 以上の性能を実現しており、従来[CII]装置(波長分解能 2000)より高波長分解能、そしてその結果、



図 6, 新しい Fabry-Perot 分光器

高感度を実現することができた (志知修論)。

現在、新しい分光器と検出器を組み込んだ観測装置が組み上がっている。アレイ化、高波長分解能化の結果、観測データ量の増加と観測運用への改造が必要になっている。このため、現在、インド側で気球望遠鏡の電気回路を対応するように改修をすすめており、これが終わり次第、新しい観測装置による観測を実施する予定である。

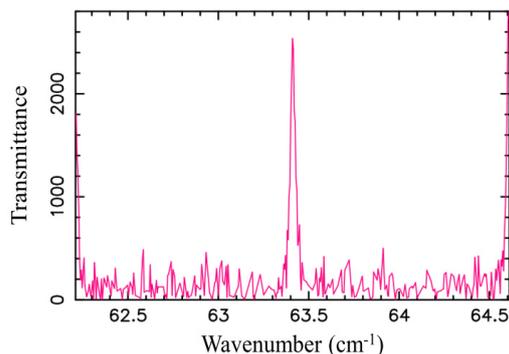


図 7, 新しい Fabry-Perot 分光器の波長感度特性。波長分解能 6000 以上を実現している。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 16 件)

1. Ishihara, D., Kondo, T., Kaneda, H., Suzuki, T., Nakamichi, K., Takaba, S., Kobayashi, H., Masuda, S., Ootsubo, T., Pyo, J., Onaka, T., “A likely detection of a local interplanetary dust cloud passing near the Earth in the AKARI mid-infrared all-sky map”, 2017, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 603, id.A82, 5 pp.

2. Kaneda, H., Kokusho, T., Yamada, R., Ishihara, D., Oyabu, S., Kondo, T., Yamagishi, M., Yasuda, A., Onaka, T., Suzuki, T., “Properties of Dust in Various Environments of Nearby Galaxies”, 2017, *Publications of The Korean Astronomical Society*, vol. 32, issue 1, pp. 135-139

3. Bell, A. C., Onaka, T., Doi, Y., Sakon, I., Usui, F., Sakon, I., Ishihara, D., Kaneda, H., Giard, M., Wu, R., Ohsawa, R., Mori-Ito, T., Hammonds, M., Lee, H.-G., “AKARI and Spinning Dust: Investigating the Nature of Anomalous Microwave Emission via Infrared Surveys”, 2017, *Publications of The Korean Astronomical Society*, vol. 32, issue 1, pp. 97-99

4. Onaka, T., Mori, T. I., Ohsawa, R., Sakon, I., Bell, A. C., Hammonds, M., Shimonishi, T., Ishihara, D., Kaneda, H., Okada, Y., Tanaka, M., “Processing of Interstellar Medium as Divulged by AKARI”, 2017, *Publications of The Korean Astronomical Society*, vol. 32, issue 1, pp. 77-81

5. Ishihara, D., Takeuchi, N., Kondo, T., Kobayashi, H., Kaneda, H., Inutsuka, S., Oyabu, S., Nagayama, T., Fujiwara, H., Onaka, T., “Debris Disks and the Zodiacal Light Explored by the AKARI Mid-Infrared All-Sky Survey”, 2017, *Publications of The Korean Astronomical Society*, vol. 32, issue 1, pp. 67-71

6. Kondo, T., Ishihara, D., Kaneda, H., Oyabu, S., Amatsutsu, T., Nakamichi, K., Sano, H., Ootsubo, T., Onaka, T., “Modeling of the Zodiacal Light for the AKARI Mid-IR All-Sky Diffuse Maps”, 2017, *Publications of The Korean Astronomical Society*, vol. 32, issue 1, pp. 59-61

7. Nakamichi, K., Ishihara, D., Kaneda, H., Oyabu, S., Kondo, T., Amatsutsu, T., Sano, H., Onaka, T., “a Source Extraction Method for the AKARI Mid-IR Faint Source Catalogue”, 2017, *Publications of The Korean Astronomical Society*, vol. 32, issue 1, pp. 29-31

8. Amatsutsu, T., Ishihara, D., Kondo, T., Kaneda, H., Oyabu, S., Yamagishi, M., Nakamichi, K., Sano, H., Onaka, T., “The Current Status of the Akari Mid-Infrared All-Sky Diffuse Maps”, 2017, *Publications of The Korean Astronomical Society*, vol. 32, issue 1, pp. 25-27

9. Hanaoka, M., Kaneda, H., Oyabu, S., Hattori, Y., Tanaka, K., Ukai, S., Shichi, K.,

Wada, T., Suzuki, T., Watanabe, K., Nagase, K., Baba, S., Kochi, C., “Evaluation of Far-Infrared Bib-Type GE Detectors Fabricated with the Surface-Activated Wafer Bonding Technology”, 2017, Publications of The Korean Astronomical Society, vol. 32, issue 1, pp. 351-353

10. Hattori, Y., Kaneda, H., Ishihara, D., Fukui, Y., Torii, K., Hanaoka, M., Kokusho, T., Kondo, A., Shichi, K., Ukai, S., Yamagishi, M., Yamaguchi, Y., “Mid- and far-infrared properties of Spitzer Galactic bubbles revealed by the AKARI all-sky surveys”, 2016, Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 68, Issue 3, id.37 41 pp.

11. Kondo, T., Ishihara, D., Kaneda, H., Nakamichi, K., Takaba, S., Kobayashi, H., Ootsubo, T., Pyo, J., Onaka, T., “Modeling of the Zodiacal Emission for the AKARI/IRC Mid-infrared All-sky Diffuse Maps”, 2016, The Astronomical Journal, Volume 151, Issue 3, article id. 71, 11 pp.

12. Hanaoka, M., Kaneda, H., Oyabu, S., Yamagishi, M., Hattori, Y., Ukai, S., Shichi, K., Wada, T., Suzuki, T., Watanabe, K., Nagase, K., Baba, S., Kochi, C., "Development of Blocked-Impurity-Band-Type Ge Detectors Fabricated with the Surface-Activated Wafer Bonding Method for Far-Infrared Astronomy", 2016, Journal of Low Temperature Physics, 184, 225

13. Wada, T., Arai, Y., Baba, S., Hanaoka, M., Hattori, Y., Ikeda, H., Kaneda, H., Kochi, C., Miyachi, A., Nagase, K., Nakaya, H., Ohno, M., Oyabu, S., Suzuki, T., Ukai, S., Watanabe, K., Yamamoto, K., "Development for Germanium Blocked Impurity Band Far-Infrared Image Sensors with Fully-Depleted Silicon-On-Insulator CMOS Readout Integrated Circuit", 2016, Journal of Low Temperature Physics, 184, 217

14. Kaneda, H., Ishihara, D., Kobata, K., Kondo, T., Oyabu, S., Yamada, R., Yamagishi, M., Onaka, T., Suzuki, T., “AKARI observations of interstellar dust grains in our Galaxy and nearby galaxies”, 2014, Planetary and Space Science, Volume 100, p. 6-11.

15. Onaka, T., Mori, T. I., Sakon, I., Ohsawa, R., Kaneda, H., Okada, Y., Tanaka, M., “Search for the Infrared Emission Features from Deuterated Interstellar Polycyclic Aromatic Hydrocarbons”, 2014, The Astrophysical Journal, Volume 780, Issue 2, article id. 114, 9 pp.

16. Kaneda, H., Nakagawa, T., Ghosh, S. K., Ojha, D. K., Ishihara, D., Kondo, T., Ninan, J. P., Tanabe, M., Fukui, Y., Hattori, Y., Onaka, T., Torii, K., Yamagishi, M., “Large-scale mapping of the massive star-forming region RCW38 in the [CII] and PAH emission”, 2013, Astronomy & Astrophysics, Volume 556, id.A92, 9 pp.

[学会発表] (計 9 件)

1. Hanaoka, M., Baba, S., Hattori, Y., Kaneda, H., Kochi, C., Nagase, K., Oyabu, S., Suzuki, T., Ukai, S., Ukai, S., Wada, T., Watanabe, K., “Development of Blocked-Impurity-Band-type Ge detectors fabricated with the surface-activated wafer bonding method for far-infrared astronomy”, Low Temperature Detectors, Grenoble, France, 2015 年 7 月

2. Wada, T., Arai, Y., Baba, S., Hanaoka, M., Hattori, Y., Ikeda, H., Kaneda, H., Kochi, C., Nagase, K., Nakaya, H., Ohno, M., Oyabu, S., Suzuki, T., Ukai, S., Watanabe, K., Yamamoto, K., “Development for Germanium Blocked Impurity Band Far-Infrared Image Sensors with Fully-Depleted Silicon-On-Insulator CMOS Readout Integrated Circuit”, Low Temperature Detectors, Grenoble, France, 2015 年 7 月

3. Kaneda, H., Kokusho, T., Yamada, R., Ishihara, D., Oyabu, S., Kondo, T., Yamagishi, M., Yasuda, A., Onaka, T., Suzuki, T., “Properties of Dust in Various Environments of Nearby Galaxies”, THE UNIVERSE IN THE LIGHT OF AKARI and Synergy with future Large Space Telescopes, Oxford, UK, 2014 年 7 月

4. Ishihara, D., Takeuchi, N., Kondo, T., Kobayashi, H., Kaneda, H., Inutsuka, S., Oyabu, S., Nagayama, T., Fujiwara, H., Onaka, T., “Debris Disks and the Zodiacal Light Explored by the AKARI Mid-Infrared All-Sky Survey”, THE UNIVERSE IN THE LIGHT OF AKARI and Synergy with future Large Space Telescopes, Oxford, UK, 2014 年 7 月

5. Hattori, Y., Kaneda, H., Ishihara, D., Yamagishi, M, Kondo, T., & Sano, H. ”AKARI observations of massive star-forming regions indicative of largescale cloud-cloud collisions”, THE UNIVERSE IN THE LIGHT OF AKARI and Synergy with future Large Space Telescopes, Oxford, UK, 2014 年 7 月

6. Kondo, T., Ishihara, T., Kaneda, H., Oyabu, S., Amatsutsu, T., Nakamichi, K., Sano, H., Ootsubo, T., & Onaka, T., "Modeling of the zodiacal light for the AKARI mid-IR all-sky diffuse maps", THE UNIVERSE IN THE LIGHT OF AKARI and Synergy with future Large Space Telescopes, Oxford, UK, 2014 年 7 月

7. Amatsutsu, T., Ishihara, D., Kondo, T., Kaneda, H., Oyabu, S., Yamagishi, M., Nakamichi, K., Sano, H., & Onaka, T., "The current status of the AKARI mid-infrared all-sky diffuse maps", THE UNIVERSE IN THE LIGHT OF AKARI and Synergy with future Large Space Telescopes, Oxford, UK, 2014 年 7 月

8. Nakamichi, K., Ishihara, D., Kaneda, H., Oyabu, S., Kondo, T., Amatsutsu, T., Sano, H., & Onaka, T., "A new source confirmation method for the AKARI mid-IR faint source catalogue", THE UNIVERSE IN THE LIGHT OF AKARI and Synergy with future Large Space Telescopes, Oxford, UK, 2014 年 7 月

9. Hanaoka, M., Kaneda, H., Oyabu, S., Hattori, Y., Tanaka, K., Wada, T., Suzuki, T., Watanabe, K., Nagase, K., Baba, S., & Kochi, C. "Evaluation of far-infrared BIB-type Ge detectors fabricated with the surface-activated wafer bonding technology", THE UNIVERSE IN THE LIGHT OF AKARI and Synergy with future Large Space Telescopes, Oxford, UK, 2014 年 7 月

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等
特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

金田 英宏 (KANEDA, Hidehiro)
名古屋大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：30301724

(2) 研究分担者

大藪 進喜 (OYABU, Shinki)
名古屋大学・教養教育院・講師
研究者番号：10396806

(3) 連携研究者

尾中 敬 (ONAKA, Takashi)
東京大学・大学院理学系研究科・教授
研究者番号：30143358

和田 武彦 (WADA, Takehiko)
独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙
科学研究所・助教
研究者番号：50312202

石原 大助 (ISHIHARA, Daisuke)
名古屋大学・大学院理学研究科・特任講師
研究者番号：30507835

鈴木 仁研 (SUZUKI, Toyoaki)
名古屋大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号：30534599

(4) 研究協力者

なし