

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：34419

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K14491

研究課題名（和文）宇宙X線精密観測による低エネルギー宇宙線の銀河面分布とスペクトルの初測定

研究課題名（英文）Measurement of the distribution along the Galactic plane and spectra of low-energy cosmic rays by precise observations of cosmic X-rays

研究代表者

信川 久実子（Nobukawa, Kumiko）

近畿大学・理工学部・講師

研究者番号：60815687

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：銀河宇宙線の起源は高エネルギー宇宙物理の未解決問題の1つである。これまで、加速前の熱的粒子（keV帯域）と加速後の高エネルギー宇宙線（GeV-TeV帯域）しか観測されておらず、中間段階にある低エネルギー宇宙線（keV-MeV帯域）は観測データが乏しい。我々は「中性鉄からのX線輝線を用いた低エネルギー宇宙線測定」を考案し、それを超新星残骸や銀河系の銀河面の観測により実証した。本研究はこの実績に基づき、X線観測だけでなく、電波観測や理論研究も通じて、銀河系内における低エネルギー宇宙線の分布やスペクトルを調査した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

我々の手法である中性鉄からのX線輝線を用いた低エネルギー宇宙線の探査は、シンプルな物理過程を基にしている。「すざく」衛星は鉄輝線バンドで低バックグラウンドかつ高い検出感度とエネルギー分解能をもち、広がった中性鉄からのX線輝線に対して世界最高レベルの性能を持つ。そのため、この視点に注目した研究は他にない。本手法をさらに発展させるため、本研究では2023年度打ち上げのX線天文衛星「XRISM」の較正を行い、低エネルギー宇宙線研究だけでなく、国内外の「XRISM」観測に対しても重要な貢献を果たした。

研究成果の概要（英文）：The origin of Galactic cosmic rays is one of the unsolved problems in high-energy astrophysics. Until now, only thermal particles (in the keV band) and high-energy cosmic rays (in the GeV-TeV band) have been observed, while the observational data of the low-energy cosmic rays (in the keV-MeV band) have not been scarce. We devised a "low-energy cosmic-ray measurement using X-ray emission lines from neutral iron" and demonstrated it by observing supernova remnants and the Galactic plane of the Milky Way. In this study, we investigated the distribution and spectra of low-energy cosmic rays in the Galaxy not only through X-ray observations but also through radio observations and theoretical studies.

研究分野：X線天文学

キーワード：宇宙線 天の川銀河 超新星残骸 X線天文学

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

我々の住む銀河系内を高速で飛び交う宇宙線の起源は、その発見以来 100 年にわたる重要課題である。宇宙線は最高  $10^{20}$  eV のエネルギーを持ち、べき型のエネルギー分布を持つ。すなわち低エネルギーほど数が多い。これは荷電粒子が徐々に高いエネルギーにまで加速されるためと考えられている。

宇宙線のうち、 $10^8$  eV 以下の低エネルギー宇宙線は、主に電離によってエネルギーを失うため、分子雲の化学進化や星・惑星形成に影響を与えられていると考えられている。しかし、これまで低エネルギー宇宙線の観測的情報はほとんど得られていなかった。というのも、太陽磁気圏のため、低エネルギー宇宙線は太陽系内に侵入できないからである。低エネルギー宇宙線に関する観測的情報は、太陽系を脱出した「ボイジャー」による直接測定 (Cummings et al. 2016) と、 $H3^+$  や  $DCO^+/HCO^+$  などを用いた星間物質の電離率 (e.g. Indriolo et al. 2015) の情報のみである。しかし「ボイジャー」の測定は太陽系のごく近傍に限られる。電離率は、それを求める際に用いる化学モデルに不定性がある上、宇宙線の密度を直接測定するものではない。そのため従来の宇宙線の観測情報は、高エネルギー宇宙線が放射するガンマ線の観測結果に偏っており、低エネルギー宇宙線の量は仮定した上で理論が構築されてきた。

この状況で我々は、「低エネルギー宇宙線と星間物質の衝突で放射される、中性の鉄原子からの  $K\alpha$  線 (以下中性鉄  $K\alpha$  線、 $E=6.4$  keV) の測定」という新たな観測手法を構築した。これは単純な物理過程に基づいており、中性鉄  $K\alpha$  線強度は宇宙線とターゲット物質の密度に比例する。我々は、宇宙線の加速現場として有力な超新星残骸から、低エネルギー宇宙線起源と考えられる中性鉄  $K\alpha$  線の検出に成功した (Nobukawa et al. 2018, 2019)。これにより、超新星残骸における低エネルギー宇宙線のエネルギー密度が  $10\text{--}100$  eV/cc であることを明らかにした。さらに驚くべきことに、近傍に超新星残骸がないところからも、低エネルギー宇宙線起源の可能性が高い中性鉄  $K\alpha$  線が見つかった (Nobukawa et al. 2015)。これは超新星残骸以外の加速源の存在を示唆する。

中性鉄  $K\alpha$  線放射は淡く広がっているため、その検出には低バックグラウンドで高感度な検出器が必要である。また、銀河系内の背景 X 線放射に含まれる高階電離鉄  $K\alpha$  線 ( $E=6.7$  keV) と区別するため、高い分光力も必要である。上記の成果は、これらの性能を全て兼備する日本の X 線天文衛星「すざく」を用いて得られたものである。「すざく」衛星は 2015 年に運用を終えたが、現在でも、世界で最も中性鉄  $K\alpha$  線の探査に適した衛星である。

### 2. 研究の目的

本研究は、銀河宇宙線の起源解明を目指し、中性鉄  $K\alpha$  線を用いた低エネルギー宇宙線の探査を主軸に、電波観測や理論研究も用いて低エネルギー宇宙線の研究を推進する。

### 3. 研究の方法

中性鉄  $K\alpha$  線の探査に最も適した「すざく」衛星を用いて、銀河系内の超新星残骸において系統的に中性鉄  $K\alpha$  線を探査する。

低エネルギー宇宙線は電離を通して分子雲の化学進化や星・惑星形成に影響を与えられているが、低エネルギー宇宙線の分子雲中での伝播の過程がわかっていないため、分子雲に与える影響も未知のままである。観測的に低エネルギー宇宙線の分子雲中での伝播の様子を明らかにするため、まず理論的な検討を行う。

中性鉄  $K\alpha$  線を用いた低エネルギー宇宙線の研究をさらに進めるため、2023 年度打ち上げの「XRISM」衛星に搭載する検出器の較正を行う。

### 4. 研究成果

系統探査の手始めに、中年齢、分子雲と相互作用、ガンマ線放射という 3 つの条件の揃った超新星残骸である W51C の調査を行なった。W51C は、星形成領域である分子雲 W51B と相互作用する超新星残骸で、周囲に複数の HII 領域 (内部で星形成が行われている) が存在している。また銀河系の中で最も明るいガンマ線天体の 1 つでもある。DCO<sup>+</sup>/HCO<sup>+</sup> の観測により、銀河系の典型的な値より 2 桁高い電離率が測定されている。我々は「すざく」衛星のデータを解析し、低エネルギー宇宙線が星間物質中の中性鉄原子を電離することで放射されたと考えられる中性鉄輝線を  $2.0\sigma$  の有意度で検出した。結果を査読付き論文として出版した (Shimaguchi, KN et al. 2022)。

次に、銀河系中心の西側の領域に存在する超新星残骸で、低エネルギー宇宙線起源の中性鉄輝線の系統的な調査を行った。そのうち G346.6-0.2 と G304.6+0.1 から、低エネルギー宇宙線起源の可能性が高い中性鉄輝線を約  $3\sigma$  の有意度で検出した (Morikawa et al. in preparation)。

また、電波天文学の専門家との共同研究で、この 2 天体に付随する分子雲を初めて特定した (Sano, KN et al. 2021, Morikawa et al. in preparation)。この結果に基づき、2 天体での低エネルギー宇宙線のエネルギー密度を得た。

もし、同じ超新星残骸で見つかった中性鉄 K 線とガンマ線が、同じ場所で加速された宇宙線に起源を持つなら、2 つの観測の間には相関関係があるはずである。まだサンプル数は限られているものの、W51C を含む、中性鉄 K $\alpha$  線とガンマ線の両方が見つかった超新星残骸で、中性鉄 K 線とガンマ線の光度を比較したところ、両者に相関関係の兆候が見られた (図 1)。

中性鉄 K $\alpha$  線やガンマ線放射に加えて、電離率も宇宙線の情報を与える。これら 3 つの観測に寄与する宇宙線陽子のエネルギーはそれぞれ異なる。理論分野の専門家との共同研究で、3 つの観測を同じ場所で観測すれば、広帯域な宇宙線の情報が得られ、宇宙線の分子雲中での伝播の過程を制限できることを明らかにした (Fujita et al. 2021)。この結果を用いて宇宙線の分子雲中での伝播過程を観測的に明らかにするため、中性鉄 K $\alpha$  線とガンマ線が両方観測されている領域で電離率を測定することを目的として ALMA 望遠鏡の観測提案を行い、W44 の観測が採択された。現在観測データの解析を行なっている。

低エネルギー宇宙線は宇宙線加速と星・惑星形成の両方の観点で重要だが、両分野の研究者が同じ研究会に集う機会はない。今後の観測技術や理論の発展を見据えて、関係する研究者の情報交換を行おうと、2021 年 3 月 24-25 日に「低エネルギー宇宙線 Workshop 2021」を開催した。ワークショップは、H $_3^+$  の観測によって低エネルギー宇宙線を研究されてきた岡武史シカゴ大学名誉教授や、国内で低エネルギー宇宙線に関連する観測・理論研究を行なっている研究者 10 名による招待講演、および参加者を交えた議論で構成された。コロナ禍のため、完全オンラインでの開催だったが、20 以上の機関から 50 名以上の研究者が参加し、活発な議論が行われた。

2023 年 9 月に打ち上げた「XRISM」衛星搭載 CCD 検出器 Xtend は、広い視野と大きな有効面積を持ち、低エネルギー宇宙線起源の淡く広がった中性鉄輝線の観測に最適である。Xtend の性能を最大化するため、地上試験データを用いて新しい較正手法を確立し、成果を査読付き論文として出版した (Aoki et al. 2023)。

「XRISM」衛星の初期観測フェーズでは、宇宙線が豊富と考えられる銀河系中心で、本研究のテーマに基づいた観測を実施予定である。「XRISM」衛星や、2030 年代打ち上げ予定の欧州の衛星「Athena」は、「すざく」衛星より 1 桁高い分光力による高い輝線検出感度を持つため、低エネルギー宇宙線測定が飛躍的に進展する。「すざく」衛星を用いた本研究は、将来の観測研究に対して戦略的指針を与えるものとなるだろう。

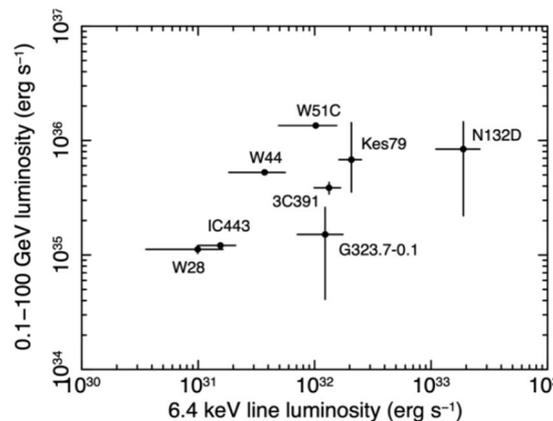


図 1 超新星残骸における中性鉄 K $\alpha$  線とガンマ線の光度の比較

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計18件（うち査読付論文 17件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Kumiko K. Nobukawa	4. 巻 MULTIF2023
2. 論文標題 Suzaku Observations of Fe K-shell Lines in the Supernova Remnant W51C and Hard X-ray Sources in the Proximity	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Proceedings of Multifrequency Behaviour of High Energy Cosmic Sources XIV	6. 最初と最後の頁 45
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Shimaguchi Aika, Nobukawa Kumiko K, Yamauchi Shigeo, Nobukawa Masayoshi, Fujita Yutaka	4. 巻 74
2. 論文標題 Suzaku observations of Fe K-shell lines in the supernova remnant W51C and hard X-ray sources in the proximity	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 656 ~ 663
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/pasj/psac026	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Mori Koji, Kumiko K. Nobukawa et al.	4. 巻 12181
2. 論文標題 Xtend, the soft x-ray imaging telescope for the x-ray imaging and spectroscopy mission (XRISM)	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the SPIE	6. 最初と最後の頁 121811T
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/12.2626894	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Mori Koji, Kumiko K. Nobukawa et al.	4. 巻 12181
2. 論文標題 A broadband x-ray imaging spectroscopy in the 2030s: the FORCE mission	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the SPIE	6. 最初と最後の頁 1218122
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/12.2628772	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Aoki Yuma, Kumiko K. Nobukawa et al.	4. 巻 420
2. 論文標題 Simulation Study of Pulse Height Difference Between Pixel Patterns of X-ray CCDs Onboard the XRISM Satellite	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of science	6. 最初と最後の頁 36
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.420.0036	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Fujita Yutaka, Bamba Aya, Nobukawa Kumiko K., Matsumoto Hironori	4. 巻 912
2. 論文標題 X-Ray Emission from the PeVatron-candidate Supernova Remnant G106.3+2.7	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 133 ~ 133
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abf14a	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 Kumiko K. Nobukawa	4. 巻 528
2. 論文標題 Measurement of Low-energy Cosmic Rays	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 New Horizons in Galactic Center Astronomy and Beyond. ASP Conference Series	6. 最初と最後の頁 415 ~ 1422
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 Sano H., Suzuki H., Nobukawa K. K., Filipovi? M. D., Fukui Y., Moriya T. J.	4. 巻 923
2. 論文標題 Discovery of a Wind-blown Bubble Associated with the Supernova Remnant G346.6-0.2: A Hint for the Origin of Recombining Plasma	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 15 ~ 15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac1c02	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 Uchida Hiroyuki, Tanaka Takaaki, Kumiko K. Nobukawa et al.	4. 巻 978
2. 論文標題 Optical blocking performance of CCDs developed for the X-ray Astronomy Satellite XRISM	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 164374 ~ 164374
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2020.164374	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 Kanemaru Yoshiaki, Sato Jin, Kumiko K. Nobukawa et al.	4. 巻 984
2. 論文標題 Experimental studies on the charge transfer inefficiency of CCD developed for the soft X-ray imaging telescope Xtend aboard the XRISM satellite	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 164646 ~ 164646
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2020.164646	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 Yoneyama Tomokage, Noda Hirofumi, Kumiko K. Nobukawa et al.	4. 巻 985
2. 論文標題 Screening and selection of XRISM/Xtend flight model CCD	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 164676 ~ 164676
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2020.164676	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 Fujita Yutaka, Nobukawa Kumiko K., Sano Hidetoshi	4. 巻 908
2. 論文標題 Intrusion of MeV?TeV Cosmic Rays into Molecular Clouds Studied by Ionization, the Neutral Iron Line, and Gamma Rays	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 136 ~ 136
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abce62	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 -

[学会発表] 計16件(うち招待講演 4件/うち国際学会 4件)

1. 発表者名 青木悠馬、伊藤耶馬斗、福田開大、木山穂乃香、信川久実子、信川正順、森浩二、富田洋、中嶋大、野田博文、鈴木寛大、小林翔悟、萩野浩一、内田裕之、米山友景、田中孝明、村上弘志、幸村孝由、鶴剛、松本浩典、小高裕和、山内誠、廿日出勇、山岡和貴、内山秀樹、吉田鉄生、金丸善朗、水野恒史
2. 発表標題 X線天文衛星XRISM搭載X線CCD検出器SXIにおけるフレームデータとノイズ性能の評価
3. 学会等名 日本天文学会 2024年春季年会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Kumiko K. Nobukawa
2. 発表標題 Suzaku Observations of Fe K-shell Lines in the Supernova Remnant W51C and Hard X-ray Sources in the Proximity
3. 学会等名 Multifrequency Behaviour of High Energy Cosmic Sources - XIV (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kumiko K. Nobukawa
2. 発表標題 XRISM observations of the GC
3. 学会等名 Galactic Center Workshop 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 森川朋美、信川久実子、信川正順、山内茂雄、内山秀樹、松本浩典
2. 発表標題 超新星残骸G304.6+0.1とG346.6-0.2からの中性鉄輝線放射の起源
3. 学会等名 日本天文学会 2023年秋季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Aoki Yuma, Kumiko K. Nobukawa et al.
2. 発表標題 Simulation study of pulse height difference between pixel patterns of X-ray CCDs onboard the XRISM satellite
3. 学会等名 10th International Workshop on Semiconductor Pixel Detectors for Particles and Imaging (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 信川久実子、神農夕奈
2. 発表標題 超新星残骸3C396における鉄K輝線の調査
3. 学会等名 日本天文学会2022年秋季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 森川朋美、信川久実子、小沼将天、信川正順、山内茂雄、佐治重孝、松本浩典
2. 発表標題 超新星残骸における低エネルギー宇宙線起源の中性鉄輝線の探査
3. 学会等名 日本天文学会2022年秋季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 青木悠馬、信川久実子、信川正順、金丸善朗、宮崎啓太郎、楠康平、森浩二、富田洋、中嶋大、松本浩典、野田博文、林田清、鶴剛、内田裕之、田中孝明、鈴木寛大、吉田鉄生、米山友景、村上弘志、山内誠、廿日出勇、萩野浩一、幸村孝由、小林翔悟、平賀純子、内山秀樹、山岡和貴、尾崎正伸、堂谷忠靖、常深博、他 XRISM/Xtend チーム
2. 発表標題 X線分光撮像衛星XRISM搭載CCD検出器におけるGoffsetのシミュレーション
3. 学会等名 日本天文学会2022年秋季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 信川久実子、XRISM GCチーム
2. 発表標題 次期X線天文衛星XRISMで探る天の川銀河に広がるX線放射
3. 学会等名 天の川銀河研究会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 信川久実子 他 XRISM/Xtend チーム
2. 発表標題 X線分光撮像衛星(XRISM) 搭載軟X線撮像装置(Xtend) の開発の現状(9)
3. 学会等名 日本天文学会2023年春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 信川久実子
2. 発表標題 低エネルギー宇宙線起源の中性鉄輝線探査と今後の展望
3. 学会等名 SNR Workshop 2022 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 信川久実子
2. 発表標題 中性鉄輝線で探る低エネルギー宇宙線
3. 学会等名 低エネルギー宇宙線ワークショップ (招待講演)
4. 発表年 2021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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------