

X線観測を用いた新手法による低エネルギー宇宙線の探査と起源の解明

Search for low-energy cosmic rays and their origin by a new method using X-ray observations

(個人推薦)

代表研究者 近畿大学 信川久実子 Kindai University Kumiko NOBUKAWA

Cosmic rays (CRs) are a major component of the Galaxy and thought to be accelerated in supernova remnants. Since low-energy ($< 10^8$ eV) CRs lose their energy via ionization, they are believed to have a strong influence on the chemical abundance in molecular clouds and on star and planet formation. However, the information on the low-energy CRs has been very limited. We have demonstrated a new method of measuring low-energy CRs using the following physical processes: low-energy CRs ionize molecular clouds and create the neutral Fe K α line at 6.4 keV. In this study, we systematically searched supernova remnants for the particle-induced neutral Fe K α line, and the number of samples in which neutral Fe K α line was found continues to increase. Next step is comparison with other wave lengths. Since the energies of CRs that mainly contribute to the ionization rate, neutral Fe K α line, and gamma-ray emission are different, the measurement of the three observables provides the information of broad CR spectra. However, the number of samples where the three observables are observed are limited. We began measuring the ionization rate at supernova remnants where both the neutral Fe K α line and gamma-rays were detected.

研究目的

我々の住む銀河系内を高速で飛び交う高エネルギー粒子(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。

銀河系内を高速で飛び交う宇宙線のうち、 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、H 3^+ やDCO $^+$ /HCO $^+$ などを用いた星間物質の電離率(e.g. Indriolo

et al. 2015)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 α 線(以下中性鉄K α 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 α 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 α 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、現在も本研究に最も適した衛星である。

本研究では、「すざく」衛星の膨大なアーカイブデータを用いて、低エネルギー宇宙線の系統探索と起源解明を目指す。

研究経過

超新星残骸の観測

本研究以前に、10 天体ほどの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 $K\alpha$ 線が見つまっている (Sato et al. 2014, 2016, Saji et al. 2018, Bamba et al. 2018, Nobukawa et al. 2018, 2020)。その多くは、中年齢かつ分子雲と相互作用している超新星残骸で、ガンマ線放射が見つまっている。これは以下のような「標準的」な加速理論で説明できる (図 1)。すなわち、超新星残骸の衝撃波で宇宙線が加速されると、低エネルギー宇宙線は衝撃波に閉じ込められている一方、高エネルギー宇宙線は衝撃波から逃げ出し、周りに存在している分子雲などのターゲット物質と衝突することでガンマ線を放射する。やがて時間の経過とともに衝撃波が膨張し、周囲の分子雲にぶつかると、低エネルギー宇宙線は衝撃波と接する分子雲の中に侵入し始める。このとき中性鉄 $K\alpha$ 線が放射される。この標準的な加速理論は、W28、W44、IC443 といった超新星残骸で、中性鉄 $K\alpha$ 線の強度とガンマ線のスペクトルを矛盾なく説明することができた (Makino et al. 2018, Nobukawa et al. 2019)。我々は系統探索の手始めに、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

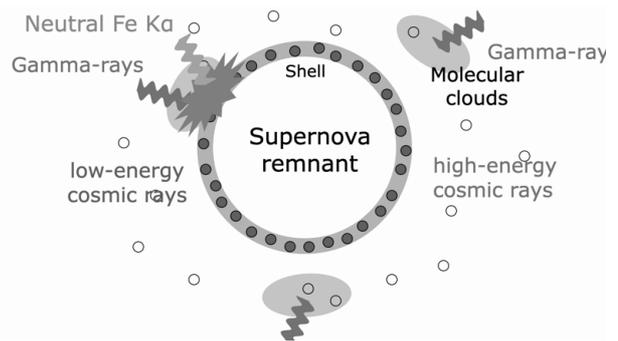


Figure 1. Schematic figure of cosmic rays accelerated at a shock of a supernova remnant and molecular clouds. High-energy cosmic rays escape from the shock and interact with the molecular clouds to emit gamma-rays whereas low-energy cosmic rays are confined in the shock and emit neutral Fe $K\alpha$ when the shock interacts with the molecular clouds.

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⁺/HCO⁺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。「すざく」を用いた我々の解析の結果、超新星残骸全体から 2σ の有意度で中性鉄 $K\alpha$ 線が検出された。中性鉄 $K\alpha$ 線は、他の天体からの強い X 線が分子雲に照射されることでも生成されうるが、観測された中性鉄 $K\alpha$ 線の強度を説明できるほど明るい X 線放射天体は周囲に存在しない。つまり、中性鉄 $K\alpha$ 線の起源として最も可能性が高いのは低エネルギー宇宙線である。

W51C の解析では serendipitous な発見もあった。W51C 近傍の HII 領域 G49.0-0.3 から高階電離鉄 $K\alpha$ 線を 3.4σ の有意度で初めて検出した。すなわち HII 領域に高温プラズマが存在することを示している。実際、この HII 領域の X 線スペクトルを解析すると、温度が 3.0 ± 0.9 keV (およそ 3000 万度) で、元素組成比が太陽の 0.5 ± 0.2 倍であることがわかった。HII 領域 G49.0-0.3 は、領域の中にある大質量星 (O 型星) の星風によって生成されたプラズマが存在していることが明らかになった (Shimaguchi et al. in press.)。

さらに調査を拡大するため、これまで中性鉄 $K\alpha$ 線の探査が手薄だった銀河中心の西側に注目し、ここに位置する銀河面上の 8 つの超新星残骸を系統的に解析した。8 天体のうち、4 つは分子雲と相互作用しており、5 つはガンマ線を放射している。解析の結果、2 天体 (G304.6+0.1、G346.6-0.2) からおよそ 3σ の有意度で中性鉄 $K\alpha$ 線を検出した。このうち

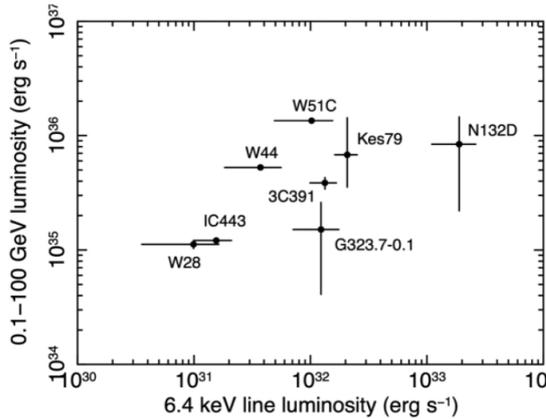


Figure 2. Comparison between the neutral Fe K α line luminosity and 0.1–100 GeV gamma-ray luminosity (Shimadzu et al. in press.).

G346.6–0.2 は、相互作用している分子雲が詳細に調べられており (Sano et al. 2021)、中性鉄輝線の分布は分子雲と部分的に一致していた。この天体においても、W51C と同様、観測された中性鉄 K α 線の強度を説明できるほど明るい X 線放射天体は周囲になく、中性鉄 K α 線の起源として最も有力なのは低エネルギー宇宙線である。

もし、同じ超新星残骸で見つかった中性鉄 K α 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ば、2 つの観測の間には相関関係があるはずである。またサンプル数は限られているものの、中性鉄 K α 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 α 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る (図 2)。今後の系統調査でさらにサンプルを増やし、さまざまな年齢の超新星残骸や、ガンマ線は観測されているが有意な中性鉄 K α 線は見つからなかった天体も含め、2 つの観測の関係性から、超新星残骸における宇宙線の加速過程を解き明かしたい。

電離率との関連

宇宙線のプローブである電離率、中性鉄 K α 線、ガンマ線は、寄与する宇宙線のエネルギーが異なり、それぞれ、 $E \sim 10^4$ eV (Padovani et al. 2009)、 $E \sim 10^6$ eV (Tatischeff et al. 2012)、そして $E \geq 10^9$ eV の陽子が主に寄与する。つまりこれら 3 つの観測を組み合わせることで、宇宙線の広帯域なエネルギーにおける情報を得ることができる。例えば、高い電離率、中性鉄 K α 線、ガンマ線が同じ分子雲から検出され

ば、低エネルギーから高エネルギーに至る宇宙線がたしかに加速されているという確固たる証拠となる。また、分子雲中における 3 つの観測量の分布の違いを用いると、宇宙線が分子雲中を侵入していく様子をエネルギーごとに明らかにすることができる (Fujita et al. 2021)。

しかし、これまで超新星残骸近傍における電離率の測定例は非常に少なく、IC443 (Indriolo et al. 2010)、W51C (Ceccarelli et al. 2011)、W28 (Vaupre et al. 2014) の 3 例しかない。いずれの天体も、銀河系の典型的な値より 1–2 桁高い電離率が測定されている。さらに、これらの天体からは低エネルギー宇宙線起源と考えられる中性鉄 K α 線が検出されている。我々は、中性鉄 K α 線とガンマ線が両方検出されている超新星残骸で電離率を調査するため、2021 年に ALMA 電波望遠鏡による DCO⁺/HCO⁺ の観測提案を行い、採択された。観測は 2022 年春に行われた。今後は中性鉄 K α 線だけでなく、電離率測定も用いて、低エネルギー宇宙線研究を進めていきたい。

考察

2010 年代から活発になってきた電離率の測定と、2013 年に太陽系を脱出した「ボイジャー」の成果によって低エネルギー宇宙線が捉えられ、宇宙線の起源解明の新たな端緒が見えてきた。しかしこれらの観測だけでは、低エネルギー宇宙線の分布や密度を測定することはできず、観測データは非常に不足している。そのため低エネルギー宇宙線に関連する研究は、主に欧米を中心に低エネルギー宇宙線の密度を様々に仮定した上での理論研究が先行してきた (例えば Padovani et al. 2020 とその参考文献)。

中性鉄 K α 線を観測することで低エネルギー宇宙線を測定するという本研究の方法は、アイデア自体は 20 年前から提案されていたが (Tatischeff et al. 1998)、我々が実際に実証したところこそが重要である。すなわち中性鉄 K α 線を用いて、低エネルギー側を含めた宇宙線理論の観測的検証が行えるようになった。

我々が宇宙線起源の中性鉄 K α 線を発見できたのは、「すざく」衛星のおかげである。現状では、欧米の衛星 (「XMM-Newton」、「Chandra」、「NuSTAR」) も存在するが、これらは中性鉄 K α 線のバンドでの高いバックグラウンドや分光力不足のため、有意な検出は難しい。そのため海外で類似の研究はほとん

ど行われていない。

2022年度には日本のX線天文衛星「XRISM」が打ち上げ予定である。「XRISM」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」や、2030年代打ち上げ予定の欧州の衛星「Athena」は、「すざく」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」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。

参考文献

- Bamba et al. 2018, ApJ, 854, 71
Ceccarelli et al. 2011, ApJL, 740, L4
Cummings et al. 2016, ApJ, 831, 18
Fujita et al. 2021, ApJ, 908, 136
Indriolo et al. 2010, ApJ, 724, 1357–1365
Indriolo et al. 2015, ApJ, 800, 40
Makino et al. 2019, PASJ, 71, 78
Nobukawa et al. 2015, ApJL, 807, L10
Nobukawa et al. 2018, ApJ, 854, 87
Nobukawa et al. 2019, PASJ, 71, 115
Padovani et al. 2009, A&A, 501, 619
Padovani et al. 2020, SSRv, 216, 29
Saji et al. 2018, PASJ, 70, 23
Sano et al. 2021, ApJ, 923, 15
Sato et al. 2014, PASJ, 66, 124
Sato et al. 2016, PASJ, 68, S8
Shimaguchi et al. PASJ in press.
Tatischeff et al. 1998, ApJ, 504, 874-888
Tatischeff et al. 2012, A&A, 546, A88
Vaupre et al. 2014, A&A, 568, A50

研究の発表

口頭発表

1. 信川久実子：中性鉄輝線で探る低エネルギー宇宙線、低エネルギー宇宙線ワークショップ、オンライン開催、2021年3月24日-25日(招待講演)
2. 信川久実子：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、SNR workshop 2022、オンライン開催、2022年3月28日-29日(招待講演)

誌上発表

1. K. K. Nobukawa, Low-energy Cosmic Rays in Supernova Remnants Interacting with Molecular Clouds, Proceedings of Multifrequency Behaviour of High Energy Cosmic Sources - XIII. 3-8 June 2019. Palermo, Italy (2020), id.51
2. Y. Fujita, K. K. Nobukawa, H. Sano, Intrusion of Cosmic-Rays into Molecular Clouds Studied by Ionization, the Neutral Iron Line, and Gamma-Rays, *Astrophysical Journal*, 908, 136 (2021)
3. K. K. Nobukawa, Measurement of Low-energy Cosmic Rays, New Horizons in Galactic Center Astronomy and Beyond. ASP Conference Series, Vol. 528, Proceedings of a workshop held 21-24 October 2019 at Keio University, Yokohama, Japan. Edited by Masato Tsuboi and Tomoharu Oka. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific (2021), p.415
4. H. Sano, H. Suzuki, K. K. Nobukawa, M. D. Filipovic, Y. Fukui, T. J. Morita, Discovery of a Wind-blown Bubble Associated with the Supernova Remnant G346.6-0.2: A Hint for the Origin of Recombining Plasma, ApJ, 923, 15 (2021)
5. A. Shimaguchi, K. K. Nobukawa (Corresponding author), S. Yamauchi, M. Nobukawa, Y. Fujita, Suzaku Observations of Fe K-shell Lines in the Supernova Remnant W51C and Hard X-ray Sources in the Proximity, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, in press.