

64. 超小型衛星による X 線観測を用いた新手法で実現する低エネルギー銀河宇宙線の測定と起源解明

近畿大学理工学部理学科物理学コース 講師

信川 久実子

概要

天の川銀河を飛び交う高エネルギー粒子(宇宙線)の起源解明は、その発見以来 100 年にわたる重要課題である。宇宙線は低エネルギーほど数が多いにも関わらず、 10^8 eV 以下の低エネルギー宇宙線の情報はほとんどなかった。そのため従来は低エネルギー側の量は仮定して加速理論が構築され、超新星残骸が主要な加速源であることが常識になっていた。我々は、「低エネルギー宇宙線が星間物質に衝突して放射される、中性の鉄原子からの $K\alpha$ 線 (以下、中性鉄 $K\alpha$ 線) の測定」という新手法を構築した。低エネルギー宇宙線は遠くへ拡散できないので、加速源の近くに多く存在する。我々は中性鉄 $K\alpha$ 線の測定により、超新星残骸以外の加速源が存在する傍証を得た。そこで天の川銀河で真に支配的な加速源を解明するため、独自の観測装置を超小型衛星に搭載し、銀河全体で中性鉄 $K\alpha$ 線のサーベイ観測を行うことを着想した。本助成で、中性鉄 $K\alpha$ 線専用の観測装置を開発する。

背景および目的

宇宙から地球に飛来する高エネルギー粒子(宇宙線)の起源解明は、宇宙物理学の重要課題である。宇宙線はべき型のエネルギー分布を持つため、低エネルギーほど数が多いが、 10^8 eV 以下の低エネルギー宇宙線の観測的情報はこれまでほとんどなかった。そのため従来は低エネルギー側の量を仮定し加速理論を構築してきた。その結果「天の川銀河の宇宙線はすべて超新星残骸 (=星の寿命が尽きる際の大爆発のあとに残る天体) で加速されている」というのが定説になっている。

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によって放射される、中性の鉄原子の $K\alpha$ 線 (以下、中性鉄 $K\alpha$ 線) の測定」という新たな観測手法を構築し、低エネルギー宇宙線研究の開拓といえる成果を得た。この手法により、超新星残骸における 10^6 – 10^8 eV の宇宙線のエネルギー密度が 10 – 100 eV/cc であることを明らかにし、たしかに低いエネルギーから加速されている証拠を突き止めた (Nobukawa et al. 2018)。

低エネルギー宇宙線は宇宙空間に存在する磁場に巻きついて遠くまで伝播できないので、加速源の近傍に多く存在する。すなわち中性鉄 $K\alpha$ 線の分布を測定すれば、宇宙線の加速源が浮かび上がるはずである。我々は、中性鉄 $K\alpha$ 線の分布を世界最高の精度で測定した (図 1)。その結果、超新星残骸が存在しないところ (領域 1 と 2) で、低エネルギー宇宙線起源の可能性が高い中性鉄 $K\alpha$ 線の超過を検出した。 (Nobukawa et al. 2015, Yamauchi, Nobukawa et al. 2016)。これは超新星残骸以外での宇宙線加速を示唆し、定説を覆す結果である。問題は、中性鉄 $K\alpha$ 線の測定が天の川銀河のごく一部に限られ、銀河で真に支配的な加速源は分からないことである。これまで我々は、中性鉄 $K\alpha$ 線 (エネルギー $E = 6.4$ keV, 1 keV = 1.6×10^{-16} J) のエネルギー帯域で世界一の性能を持つ、X 線天文衛星「すざく」のデータを用いてきた。しかし 2015 年に「すざく」の運用が終了して以降、それに匹敵する性能を持つ衛星はない。また現在の X 線観測は、高空間分解能・高精度分光力を持った装置による、視野の狭い (約 0.1 deg^2) ポイント観測が主流で、空間的に広がった放射を狙うサーベイ観測は手薄である。大型衛星は共同利用天文台の役割もあるため、サーベイ観測に必要な時間が専有できないという側面もある。

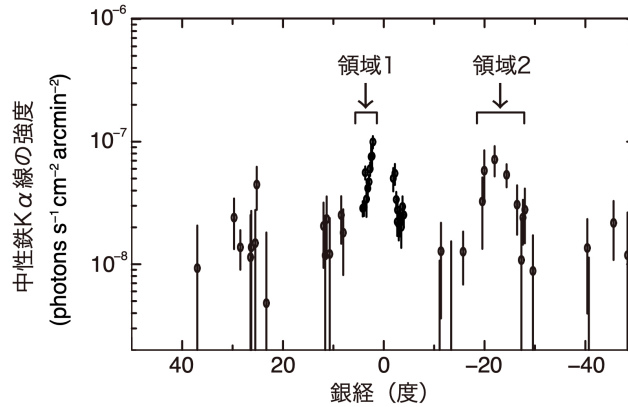


図 1. 申請者が「すざく」で得た天の川銀河面の中性鉄 K α 線の分布.

領域 1 と 2 で低エネルギー宇宙線起源の可能性が高い中性鉄 K α 線の超過を発見した. しかし銀河全体では、未観測の領域が多い.

そこで我々は、中性鉄 K α 線サーベイ専用の観測装置を自分で製作し、天の川銀河全面を網羅的に観測して低エネルギー宇宙線の銀河面分布を世界で初めて測定しようと着想した。素早い実現と専有観測のため、研究室レベルで開発すべく、超小型衛星での実現を考えた。そこで問題になるのは、観測装置の省エネ・省スペース化である。本研究グループが独自に開発してきた SOI-CMOS イメージセンサ「SOIPIX (ソイピックス)」は、他のイメージセンサと違い、(1) 中性鉄 K α 線帯域で高い分光力 (読み出しノイズ 10 e⁻)、(2) 高い X 線感度 (空乏層厚 100 μ m)、(3) 高い時間分解能 (10 μ sec) を、世界で唯一、冷却装置を必要とすることなくすべて実現する。すなわち SOIPIX が我々の構想を実現可能にする。本助成で SOIPIX を用いた中性鉄 K α 線サーベイ専用の観測装置の開発を行い、超小型衛星による低エネルギー宇宙線の分布測定と宇宙線の起源解明を目指す。

成果

中性鉄 K α 線サーベイ用の超小型衛星の構想は次の通りである。サイズは 3U (100×100×300 mm³) で、観測装置とバス機器 (電源系・通信系・姿勢制御系) で構成する。観測装置は、コリメータ、SOIPIX を搭載する基板、および素子の制御基板で構成する。バス機器は外注するため開発要素はない。本助成で観測装置を設計し、試作品を製作した。

まずコリメータの開発に取り組んだ。SOIPIX はピクセル検出器なので、コリメータと SOIPIX の組み合わせによって、コリメータの間隙を X 線が通過した角度を分析でき、空間分解が可能となる。観測に必要な性能を満たすようコリメータを設計したのち、物質中における粒子の飛跡をシミュレーションするソフトウェアキット「Geant4」を用いて SOIPIX が捉える像をシミュレートした。その結果、必要な空間分解能が得られることを確認した。次に SOIPIX を搭載する基板の試作品を製作した。SOIPIX を 2 素子搭載した回路基板を設計・製作した (図 2; 中央の 2 つの長方形の素子が SOIPIX)。SOIPIX は CPU 組み込み FPGA「Zynq」を用いて制御する。「Zynq」を搭載した制御基板についても試作品の設計・製作を行った (図 3)。

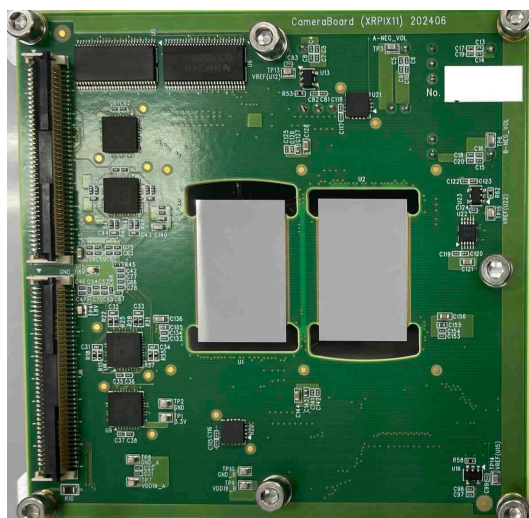


図 2. 中性鉄 $K\alpha$ 線サーベイ用の受光部分の試作品。
中央の 2 つの長方形の素子が SOIPIX

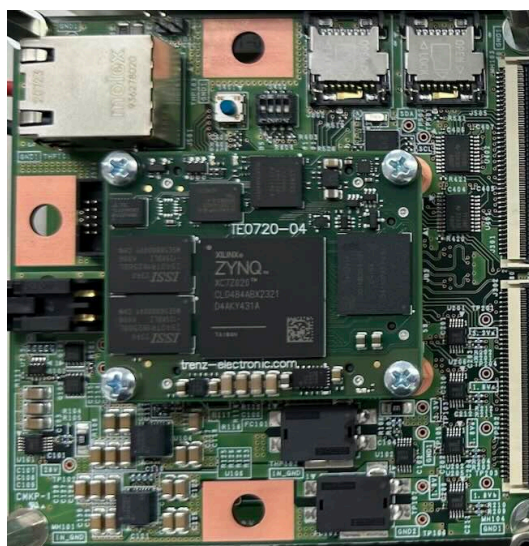


図 3. SOIPIX を駆動・読み出す制御基板の試作品。
CPU 組み込み FPGA「Zynq」を用いて制御する。

「Zynq」は中性鉄 $K\alpha$ 線サーベイ用の超小型衛星において最も発熱量の大きい構成部品である。宇宙空間のような真空環境下における熱の伝わり方は大気下とは全く異なる。すなわち真空環境下では対流が効かず、熱伝導か輻射によってのみ熱が伝わる。「Zynq」搭載の制御基板を含む X 線カメラの熱設計に問題がないかは、高真空環境下で評価しなければいけない。真空試験システムを新たに構築し、試作品を高真空中で動作させる実験を行った。

最後に、宇宙空間における荷電粒子起源の偽信号が観測に影響を与えないかを「Geant4」を用いてシミュレーションを行った。X 線は SOIPIX 上の 1 ピクセルか 2 ピクセルの信号として検出されるが、荷電粒子は長い飛跡を作るため、SOIPIX 上で数ピクセル分の信号として検出される。この違いを利用して荷電粒子を検出・棄却することで、荷電粒子起源の偽信号は宇宙 X 線を観測可能なレベルまで低下させることができるという結果を得た。

今後の展望および課題

本研究助成によって、中性鉄 $K\alpha$ 線サーベイ用の超小型衛星の実現化に向けた端緒を開くことができた。一方で課題も見つかった。現状では「Zynq」の消費電力が大きく、SOIPIX 2 素子分を読み出すだけでも最大 10 W の電力を消費してしまう。読み出しや駆動方法を最適化する等の工夫による電力削減を今後行う。課題解決ののうち実機製作や打ち上げに必要な予算を申請し、「銀河面全体で低エネルギー宇宙線を測定し、宇宙線の起源を解明する」という最終目的の達成を目指す。

(完)

発表論文

- 1) K. K. Nobukawa, A. Takeda, S. Katsuda, T. G. Tsuru, K. Nakazawa, K. Mori, H. Uchida, M. Nobukawa, E. Kurogi, T. Kishimoto, R. Matsui, Y. Aoki, Y. Ito, S. Kuwano, T. Tanaka, M. Uenomachi, M. Matsuda, T. Yamawaki, T. Kohmura, Proc. SPIE 13093, Space Telescopes and Instrumentation 2024: Ultraviolet to Gamma Ray, 130932G (2024)
- 2) T. Kishimoto, K. K. Nobukawa, A. Takeda, T. G. Tsuru, S. Katsuda, K. Nakazawa, K. Mori, M. Nobukawa, H. Uchida, Y. Kawabe, S. Kuwano, E. Kurogi, Y. Ito, Y. Aoki, Proc. SPIE 13093, Space Telescopes and Instrumentation 2024: Ultraviolet to Gamma Ray, 130935J (2024)
- 3) M. Onuma, K. K. Nobukawa, M. Nobukawa, S. Yamauchi, H. Uchiyama Publications of the Astronomical Society of Japan, 76, 1202-1210 (2024)
- 4) T. Morikawa, K. K. Nobukawa, S. Saji, H. Sano, K. Hirano, M. Nobukawa, S. Yamauchi, H. Uchiyama, H. Matsumoto, Publications of the Astronomical Society of Japan, accepted

引用文献

- 1) K. K. Nobukawa, M. Nobukawa, H. Uchiyama, T. G. Tsuru, K. Torii, T. Tanaka, D. O. Chernyshov, Y. Fukui, V. A. Dogiel, K. Koyama, Astrophysical Journal Letters, 807, L10 (2015)
- 2) S. Yamauchi, K. K. Nobukawa, M. Nobukawa, H. Uchiyama, K. Koyama, Publications of the Astronomical Society of Japan, 68, 59 (2016)
- 3) K. K. Nobukawa, M. Nobukawa, K. Koyama, S. Yamauchi, H. Uchiyama, H. Okon, T. Tanaka, H. Uchida, T. G. Tsuru, Astrophysical Journal, 854, 87 (2018)