

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010 ～ 2012

課題番号：22340046

研究課題名（和文）

暗黒加速器のX線観測による宇宙線加速の解明

研究課題名（英文）

Research on particle acceleration by X-ray observations of dark accelerators

研究代表者

松本 浩典 (MATSUMOTO HIRONORI)

名古屋大学・現象解析研究センター・准教授

研究者番号：90311365

研究成果の概要（和文）：天の川銀河面には、TeV ガンマ線で明るく輝きながらも正体不明の天体が多数存在する。ガンマ線は高エネルギー粒子の存在を直接に示すので、「暗黒加速器」と呼ばれる。本研究では、暗黒加速器のX線による系統的観測を行った。その結果、暗黒加速器の一部に、非常に暗いX線対応天体を発見した。X線の暗さは高エネルギー電子がほとんど存在しないことを示すので、ガンマ線の起源は高エネルギー陽子である可能性が高い。つまり、宇宙線の故郷である可能性が高まった。また、Anomalous X-ray Pulsarを生み出した超新星残骸や、異様にコンパクトで明るいパルサー風星雲との関連が示唆されるものを発見した。

研究成果の概要（英文）：There are many TeV gamma-ray objects whose origins are not clarified along the Galactic plane. They are called “dark particle accelerators”, since the gamma-rays are direct evidence of the existence of high-energy particles. We have conducted systematic X-ray studies of the dark particle accelerators. We found dim X-ray counterparts to some of the dark particle accelerators. The dimness of the counterparts tells us that there are few high-energy electrons. Therefore the origin of the gamma-rays is probably high-energy protons, and the dark particle accelerators would be a birth place of the cosmic rays. Some of the dark particle accelerators are suggested to physically related to a special class of supernovae that produce anomalous X-ray pulsars or to an anomalously X-ray bright but very compact pulsar wind nebula.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	6,200,000	1,860,000	8,060,000
2011年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
2012年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
総計	13,600,000	4,080,000	17,680,000

研究分野：宇宙物理学

科研費の分科・細目：天文学

キーワード：X線天文学、ガンマ線天文学、宇宙線

## 1. 研究開始当初の背景

近年、TeV ガンマ線での天の川銀河面サーベイ観測が行われ、百を超える数の超高エネルギー天体が発見された。驚くことに、このうちの30%が、他波長に明確な対応天体の知られていない天体、つまり未同定天体であっ

た。一体どんな天体が、どのようなプロセスで超高エネルギー現象を起こしているのか、全く手がかりのないままであった。

## 2. 研究の目的

超高エネルギーガンマ線の放射は、その場

に高エネルギー粒子が存在することの証明である。従ってこれら TeV ガンマ線未同定天体は、「暗黒加速器」の名前で呼ばれ出した。

ガンマ線の起源には二説考えられる。一つは高エネルギー陽子説、もう一つは高エネルギー電子説である。高エネルギー陽子説の場合、天体で加速された陽子が、周囲の星間物質中の陽子と相互作用して $\pi^0$  粒子を生成し、これが崩壊することによってガンマ線が放出される。高エネルギー電子説の場合、天体で加速された電子が、周囲の低エネルギー光子(宇宙背景放射など)をコンプトン散乱でたたき上げて、ガンマ線を放出する。

宇宙を飛び交う高エネルギー粒子である宇宙線の発見以来約 100 年が経過するが、主成分である陽子の加速源は、謎に包まれていた。もし暗黒加速器のガンマ線の起源が高エネルギー陽子だとしたら、それは宇宙線の起源の一つを明らかにしたことになる。従って、暗黒加速器の正体を明らかにし、宇宙線加速との関連を解明することが重要な課題であると認識されるようになった。

### 3. 研究の方法

暗黒加速器の正体を暴くには、まず対応天体を見つける必要がある。高エネルギー現象が起こっている天体では、ほとんどの場合、X線も放出される。暗黒加速器は銀河面にあるので星間吸収が強く、エネルギー $E < 2\text{keV}$ のX線では銀河面を見通すことは出来ない。暗黒加速器にX線対応天体が知られていないのは、 $E > 2\text{keV}$ の高エネルギーX線で深い観測を行ってこなかったからなのかもしれない。従って、高エネルギーX線による高感度観測が重要であろう。そこで我々は、日本のX線天文衛星すざくで、暗黒加速器の系統的な高エネルギーX線観測を実行することにした。すざく衛星は、バックグラウンドが低く、高エネルギーX線に対する感度が高いからである。

高エネルギー粒子の識別にもX線は有効である。もし暗黒加速器のガンマ線が電子起源なら、この電子は星間磁場と相互作用して、シンクロトロンX線放射を出すはずである。この場合、ガンマ線とX線の強度比は、低エネルギー光子と星間磁場のエネルギー密度比と等しくなる。低エネルギー光子として宇宙背景放射、星間磁場として数マイクロガウスを仮定すると、ガンマ線とX線の強度比はほぼ1となる。粒子加速が起こっているような天体では、磁場強度はもっと強いと考えられるので、X線光度の方がガンマ線光度より大きくなるだろう。暗黒加速器のX線対応天体を見つけ、ガンマ線強度との比較をすれば、このようにして粒子識別をすることが出来る。もしX線光度が小さければ、それはガンマ線の陽子起源を示唆し、宇宙線起源の一つ

を発見したことになるだろう。

### 4. 研究成果

我々はまず、TeV ガンマ線で最も明るい暗黒加速器である、HESSJ1614-518 に着目した(図 1)。この天体は、ガンマ線強度分布が二つ目玉構造になっている。ガンマ線の明るい方のピーク部分のX線観測が松本により実行されており、X線対応天体が発見されていた。X線対応天体がこれだけなら、ガンマ線とX線の強度比は $F_\gamma / F_x \sim 34$ となり、ガンマ線の陽子起源を示唆している。しかしX線対応天体は、この一つしか存在しないのであろうか?そこで我々は、すざく衛星を使って、ガンマ線第二ピーク、ピーク間の谷間部分のX線観測を行い、HESSJ1614-518のX線での全貌を明らかにした。

その結果、第二ピークの位置にはX線対応天体は存在しないことが明らかになり、ガンマ線とX線の強度比が $\sim 34$ に確定した。この大きな比は、ガンマ線の陽子起源を強く示唆している。また、ガンマ線ピークの谷間に、X線天体を発見した。この領域は、角度分解能に優れたXMM-Newton衛星によってX線で観測されていたので、そのデータを解析したところ、光子指数 $\Gamma \sim 5$ の非熱的なX線スペクトルを持つ点源であることが明らかになった。このように大きな光子指数を持つ天体は少なく、ほとんど唯一の候補は Anomalous X-ray Pulsar (AXP) と言われるものである。通常のパルサーは $10^{12}$ ガウス程度の磁場の中性子星だが、AXPは $10^{15}$ ガウスもの磁場を持つ中性子星、すなわちマグネターであると考えられている。どういった超新星爆発がAXPを生み出すのか、まだよくわかっていない。しかし我々の発見により、暗黒加速器との関連が示唆された。つまり、暗黒加速器は、AXPを生み出すような特殊な超新星のなれの果てなのかもしれない。誕生以降数万年以上を経過したため、電子は放射によりエネルギーを失い、そのためX線では輝かない。一方、

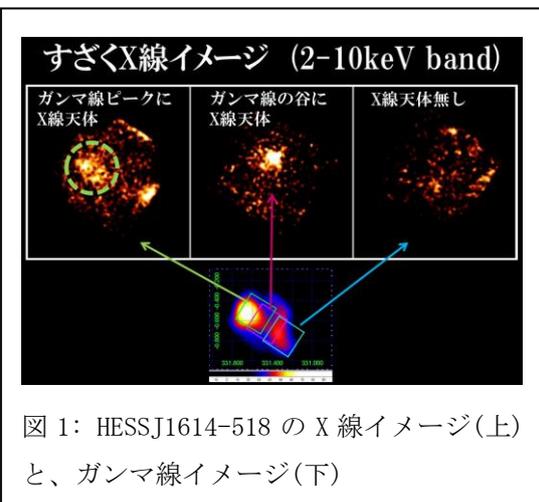


図 1: HESSJ1614-518 の X 線イメージ(上)と、ガンマ線イメージ(下)

陽子はいまだにエネルギーを保ち続け、したがってガンマ線のみで輝いていると考えることが出来る。

次に我々は、最も空間的に大きく広がった暗黒加速器である HESSJ1646-458 に着目した。ガンマ線放射の広がりには約 2 度にも達し、その中には super cluster Westerlund I や、GeV ガンマ線パルサー PSRJ1648-4611 が存在する。我々はすざく衛星を用いて、PSRJ1648-4611 の X 線観測を行った。

その結果、PSRJ1648-4611 を取り囲むように広がった X 線放射を発見した(図 2)。X 線スペクトルが、光子指数  $\Gamma=2$  の非熱的放射で表されることから、これは PSRJ1648-4611 のパルサー風星雲と考えることが出来る。このパルサー風星雲の X 線光度は  $7 \times 10^{32}$  erg/s と測定された。PSRJ1648-4611 のスピンドウン光度から想定される X 線光度は  $10^{31}$  erg/s 程度なので、2 桁近く明るいことになる。また、その直径は  $\sim 3$  pc であるが、PSRJ1648-4611 のスピンドウン光度から予想される直径よりも一桁も小さい。つまり、PSRJ1648-4611 には、異様に X 線光度が明るく、しかしコンパクトなパルサー風星雲が付随していることになる。

パルサー風星雲の広がりには 3 分角程度であり、一方 HESSJ1646-458 の広がりには 2 度もあるので、ガンマ線の全てがパルサー風星雲とは考えにくい。しかし、このパルサー風星雲の X 線光度は、電子の加速効率が非常に高いことを物語っているので、ガンマ線の一部に寄与していることは間違いないであろう。

すざく衛星、Chandra 衛星、XMM-Newton 衛星で X 線観測がされていながら、まだ成果が公表されておらず、データがアーカイブで公開されている暗黒加速器が 8 天体ある。我々はこの 8 天体全ての X 線データの解析を行っ

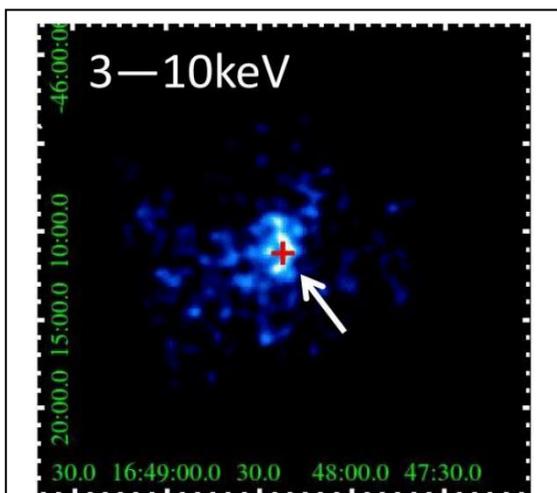


図 2:すざく衛星による GeV パルサー PSRJ1648-4611 領域の X 線イメージ。PSRJ1648-4611 は、赤い+の位置。

た。その結果、HESSJ1614-518、HESSJ1646-458 とは異なり、明らかにガンマ線との関連を示すような X 線対応天体は発見されなかった。ここまでの研究で、暗黒加速器は「AXP を生み出すような超新星残骸」「異様に明るいコンパクトなパルサー風星雲」である可能性を指摘したが、この解析により、そのようなものだけではないことがわかった。つまり、暗黒加速器の正体は統一的なものではなく、色々なものがある、ということである。

このように X 線対応天体が見つからなかった暗黒加速器が残り、正体は未だ不明である。将来、硬 X 線で更なる高感度観測を行えば、暗い X 線対応天体が見つかり、研究がさらに発展する可能性がある。そこで我々は、硬 X 線検出器システムの開発を行った。プラチナと炭素の多層膜スーパーミラーを用いて、ブラッグ反射の原理を用いて X 線を反射する硬 X 線反射鏡を開発した。シンチレーター検出器と組み合わせ、高輝度放射光 SPring-8 にて X 線反射率測定を行い、 $E=30$ keV の X 線に対して角度分解能で 2.0 分角、有効面積  $170\text{cm}^2$  の値を得た。もしこのシステムを宇宙空間にあげることが出来れば、有効面積はすざく衛星 HXD の 10 倍以上の感度を達成できるだろう。

## 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 36 件)

- ① Sakai, M., Matsumoto, H., Haba, Y., Kanou, Y., Miyamoto, Y., “Discovery of Diffuse Hard X-Ray Emission from the Vicinity of PSR J1648-4611 with Suzaku”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有、掲載決定、2013
- ② Fujinaga, T., Mori, K., Bamba, A., Matsumoto, H. (11 番目) 他 8 名, An X-ray counterpart of HESS J1427-608 discovered with Suzaku”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有、掲載決定、2013
- ③ Beilicke, M., Baring, M. G., Barthelmy, S., Matsumoto, H. (14 番目), 他 17 名, “Design and tests of the hard X-ray polarimeter X-Calibur”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, Volume 692, p. 283-284., 査読有, 2012
- ④ Mori, H., Maeda, Y., Ueda, Y., Dotani, T., Ishida, M., “Suzaku Observations of Unidentified X-Ray Sources toward

- the Galactic Bulge”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, Vol. 64, No. 5, Article No. 112 (1 pp.), 2012
- ⑤ Tsai, An-Li., Matsushita, S., Kong, A. K. H., Matsumoto, H., Kohno, K., “First Detection of a Subkiloparsec Scale Molecular Outflow in the Starburst Galaxy NGC 3628”, The Astrophysical Journal, 査読有, Volume 752, Issue 1, article id. 38, 14 pp. 2012, DOI: 10.1088/0004-637X/752/1/38
- ⑥ Chernyshov, D. Dogiel, V., Nobukawa, M., Tsuru, T. G., Koyama, K., Uchiyama, H., Matsumoto, H., “Spatial and Temporal Variations of the Diffuse Iron 6.4 keV Line in the Galactic Center Region”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, Vol. 64, No. 1, Article No. 14 (8 pages), 2012
- ⑦ Uchiyama, H., Nobukawa, M., Tsuru, T., Koyama, K., Matsumoto, H., “Global Distribution of Fe K $\alpha$  Lines in the Galactic Center Region Observed with the Suzaku Satellite”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, Vol. 63, No. SP3, pp. S903-S911, 2011
- ⑧ Sakai, M., Yajima, Y., Matsumoto, H., “Nature of the Unidentified TeV Source HESS J1614-518, Revealed by Suzaku and XMM-Newton Observations”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, Vol. 63, No. SP3, pp. S879-S887, 2011
- ⑨ Uchiyama, H., Koyama, K., Matsumoto, H., Tibolla, O., Kaufmann, S., Wagner, S., “No X-Ray Excess from the HESS J1741-302 Region, except for a New Intermediate Polar Candidate”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, Vol. 63, No. SP3, pp. S865-S872, 2011
- ⑩ Sano, H., Sato, J., Horachi, H., Matsumoto, H. (16 番目), 他 22 名, “Star-forming Dense Cloud Cores in the TeV Gamma-ray SNR RX J1713.7-3946”, The Astrophysical Journal, 査読有, Volume 724, Issue 1, pp. 59-68, 2010, DOI: 10.1088/0004-637X/724/1/59
- ⑪ Yuasa, T., Nakazawa, K., Makishima, K., Saitou, K., Ishida, M., Ebisawa, K., Mori, H., Yamada, S., “White dwarf masses in intermediate polars observed with the Suzaku satellite”, Astronomy and Astrophysics, 査読有, Volume 520, id. A25, 18 pp., 2010, DOI: 10.1051/0004-6361/201014542
- [学会発表] (計 11 件)
- ① 松本浩典, “ASTRO-H 衛星搭載用 X 線望遠鏡 (HXT, SXT) の開発”, 日本物理学会 第 68 回年次大会, 2013 年 3 月 27 日, 広島大学
- ② 森英之, “「すざく」衛星による新しい銀河団候補 Suzaku J1759-3450 の発見”, 日本天文学会 2013 年春季大会, 2013 年 3 月 20 日, 埼玉大学
- ③ Matsumoto, H., “Production of the Hard X-ray Mirror of the ASTRO-H satellite”, 精密工学会国際シンポジウム “International Symposium on Application of Precision Engineering to Support Next Generation Astronomical Telescopes”, 2013 年 3 月 14 日, 東京工業大学
- ④ 松本浩典, “すざく衛星による Fermi パルサー 0FGL J1648.1-4606 の X 線観測”, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012 年 9 月 14 日, 京都産業大学
- ⑤ 松本浩典, “最も暗い TeV ガンマ線未同定天体 HESS J1741-302 のすざく衛星による X 線観測”, 日本物理学会 第 67 回年次大会, 2012 年 3 月 25 日, 関西学院大学
- ⑥ 松本浩典, “すざく衛星による HESS J1832-084 の X 線観測”, 日本天文学会 2012 年春季大会, 2012 年 3 月 21 日, 龍谷大学
- ⑦ 松本浩典, “ASTRO-H 搭載 硬 X 線望遠鏡 (HXT) の開発の現状 IV”, 日本天文学会 2012 年春季大会, 2012 年 3 月 19 日, 龍谷大学
- ⑧ 森英之, “ASTRO-H 搭載 X 線望遠鏡用ブリコリメータの開発の現状”, 日本天文学会 2012 年春季大会, 2012 年 3 月 19 日, 龍谷大学
- ⑨ Matsumoto, H., “X-ray observation of dark particle accelerators”, KMI Inauguration Conference on “Quest for the Origin of Particles and the Universe” (KMIIN), 2012 年 10 月 24-26 日, 名古屋大学
- ⑩ 松本浩典, “HESS J1616-508 の近傍のパルサー PSR J1617-5055 の X 線観測”, 日本天文学会 2011 年春季大会, 2011 年 3 月 18 日, 筑波大学
- ⑪ Matsumoto, H., “X-ray Emission due to Charge Exchange between Solar Wind and Earth Atmosphere on September 12 2005”, Suzaku 2011 : Exploring the

X-ray Universe: Suzaku and Beyond,  
2011年7月20-22日, SLAC, 米国

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

〔その他〕

○アウトリーチ活動

- ① NHK 大河講座「ひとの大学」2013年3月13日
- ② NHK 大河講座「ひとの大学」2012年3月28日
- ③ 名古屋大学・名古屋市科学館 第19回公開セミナー「天文学の最前線～暗黒宇宙」2010年8月19日

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

松本 浩典 (MATSUMOTO HIRONORI)  
名古屋大学・現象解析研究センター・准教授  
研究者番号: 90311365

### (2) 研究分担者

森 英之 (MORI HIDEYUKI)  
独立行政法人宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所・高エネルギー天文学研究系・招聘研究員  
研究者番号: 20432354

### (3) 連携研究者

鶴 剛 (TSURU TAKESHI)  
京都大学・理学研究科・教授  
研究者番号: 10243007