

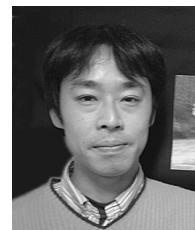
「すざく」で追う謎の天体 “暗黒” 加速器

馬場 彩

〈宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部高エネルギー天文学研究系
高エネルギー天体物理学グループ 〒229-8510 神奈川県相模原市由野台 3-1-1〉
e-mail: bamba@crab.riken.jp



馬場



松本

松本 浩典

〈京大物理学部物理学第二教室 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町〉
e-mail: matumoto@cr.scphys.kyoto-u.ac.jp

「すざく」チーム

TeV ガンマ線帯域でのみ放射が見つかった TeV ガンマ線未同定天体は、“暗黒”加速器などと呼ばれ、その正体や放射機構に注目が集まっている。われわれが2005年7月10日に打ち上げた X 線天文衛星「すざく」は、その安定した低バックグラウンドを活かして TeV ガンマ線未同定天体3天体 (HESS J1804-216, HESS J1614-518, HESS J1616-508) の観測を行い、前二者からは対応 X 線天体を発見、後一者には厳しい上限値をつけた。「すざく」で求められた X 線フラックスと TeV ガンマ線フラックスを比較することで、これら未同定天体が、宇宙物理学 100 年の謎である陽子加速源である可能性が高まった。

1. 宇宙物理学 100 年の謎：宇宙線

宇宙線とは宇宙を飛び交う超高エネルギー粒子で、その最高エネルギーは 10^{20} 電子ボルト（電子ボルト = eV, $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$, 10^{20} eV は約 3.8 カロリー）にもものぼる。また、われわれの銀河系内でのエネルギー密度は 1 cc 当たり約 1 eV であり、宇宙背景放射や星の光、星間磁場のエネルギー密度に匹敵する。つまり、宇宙線は銀河の重要な構成要素なのである。しかし、1912 年に Hess によって発見されて以来¹⁾ 100 年近く経った現在も、「宇宙線はどこで、どのように加速されているのか？」という基本的な問題は「宇宙物理学 100 年の謎」のままである。その主な理由は、宇宙線は荷電粒子なので星間磁場に影響されて直進でき

ないことによる。例えば $1 \text{ TeV} (= 10^{12} \text{ eV})$ 程度の宇宙線の場合、数パーセク (pc; $1 \text{ pc} \sim 3 \text{ 光年}$) しか直進できない。われわれの銀河は半径 8.5 kpc もあるので、たまたま発生源がわれわれのごく近くにある場合を除き、宇宙線はわれわれに届くまでに進行方向が大きく変わる。すなわち、宇宙線の到来方向を調べても、われわれは加速源を突き止められないのだ。

2. “暗黒” 加速器と陽子加速

荷電粒子から放射される光子は空間をまっすぐ進めるため、光子をとらえることでわれわれは加速源を直接見ることができる。高エネルギー電子は、磁場で進行方向が曲げられる際に、光子を放射する。これはシンクロトロン放射と呼ばれ、地

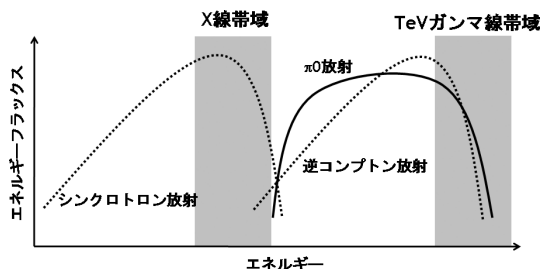


図1 宇宙線からの光子放射の模式スペクトル. 実線・点線はそれぞれ陽子・電子からの放射を指す.

上でも SPring-8 などの放射光施設で人工的に作られ、医療・化学分析などに利用されている。宇宙線電子程度のエネルギーの場合は、特に keV 帯域の X 線に多くの光子を放射する ($1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV}$)。また、宇宙論などで有名な宇宙背景放射のマイクロ波光子や自身の放射したシンクロトロン光子と衝突して、光子にエネルギーを与えることで (逆コンプトン散乱過程)、TeV 帯域のガンマ線光子も作り出す。一方、高エネルギー陽子は、分子雲などの物質と衝突して複雑な原子核反応を起こす (シャワー反応)。その際、さまざまな粒子が生成されるが、そのうちの一つのパイ 0 中間子 (湯川秀樹博士が、原子核を形成する核力の源として理論的に予測したことで有名) が崩壊することで、GeV 帯域から TeV 帯域のガンマ線光子を作り出す ($1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$)。これらの過程を通じて、宇宙線から放射される光子のエネルギースペクトルを模式的に示したのが図 1 である。図を見てもわかるように、宇宙線加速源は X 線やガンマ線で特に強く輝く。これらの波長での天体観測は、宇宙線加速源の研究に対する強力な武器である。

実際、日本の X 線天文衛星「あすか」は、超新星残骸 SN1006 の北東・南西部からシンクロトロン X 線が発見し²⁾、超新星残骸の衝撃波面が宇宙線電子成分を TeV 領域まで加速している現場であることを世界で初めて明らかにした。現在では

10 天体以上の超新星残骸の衝撃波面からシンクロトロン X 線が発見され、超新星残骸の衝撃波面で電子が加速されていることが広く認知されている。また、筆者らのグループは、空間分解能に優れたアメリカの X 線天文衛星「Chandra」を用いてこの超新星残骸の衝撃波面を詳細に観測した。その結果、「あすか」によって発見されていたシンクロトロン放射が非常に薄いフィラメント状の領域に集中していることを発見した³⁾。これは、衝撃波面で磁場が 10 倍以上増幅されているために、電子の進行方向が強く曲げられてフィラメントの外に抜け出せず、また加速効率が非常に大きくなっていることを示している⁴⁾。詳細は、天文月報 97 巻 12 号 p. 679 の記事を参照されたい。

このように、宇宙線の電子成分については日本のグループが主導的に、加速源から加速効率のようになかなり定量的なことまで解明してきた。しかし、宇宙線電子の存在量は宇宙線陽子の 1% 以下でしかない。肝心の主成分である陽子については、いまだに謎につつまれた状態が続いている。

宇宙線加速源解明の鍵を握る TeV ガンマ線観測において、最近大きな進展があった。これまでの TeV ガンマ線天文学では、歴史が数十年と浅いこともあり、検出天体も数十個にとどまっていた。そのようななか、複数の望遠鏡を同時に用いて一つ一つの TeV 光子の到来方向を決定する「ステレオ観測」の手法が確立されたことで、TeV ガンマ線望遠鏡は大きな発展をみせた。そのなかでもナミビア砂漠にある H.E.S.S. は、TeV ガンマ線帯域では不可能と思われていた銀河面無バイアス探査を成功させ、今までどの波長でも発見されていない天体 (TeV ガンマ線未同定天体) を、何と 10 個以上発見したのである⁵⁾。これらの未同定天体はすべて銀河面に集中し、多くが 0.1 度程度に広がっていることから、われわれの銀河系内の天体であると推測できる。しかし、他波長での対応天体が見当たらないことから、正体は全くの謎であり、“dark particle accelerators (暗黒加速器)”

というSFまがいのニックネームまでつけられ、一躍有名になった。

しかし、彼らは本当に他の波長では「暗黒」なのだろうか？ また、彼らが加速しているのは、電子なのか、それとも陽子なのか。銀河面は広く、星間物質による吸収も大きいので、過去の銀河面探査では、われわれは TeV ガンマ線未同定天体の正体を見過ごしてきただけかもしれない。正体を知るための追観測が必須である。

3. 「すざく」による暗黒加速器観測

TeV ガンマ線未同定天体の正体をつかむのに最も適しているのが、X線観測である。X線は宇宙線電子からの放射が比較的強い帯域であり、図1のように電子と陽子からの放射を区別できるからだ。TeV ガンマ線放射に対してX線が十分暗ければそれは宇宙線電子成分が存在しないことを示し、間接的に陽子加速の証拠になる。X線観測で「見えない」ことによって、われわれは間接的に宇宙線陽子成分を「見る」ことになるのだ。また、2 keV 以上の硬 X 線は特に透過力が高く、銀河面のような星間吸収の大きい領域の観測には非常に強い。

おりしもわれわれは、10年以上待ち望んだ日本の5番目のX線天文衛星「すざく」を2005年7月10日に打ち上げた⁶⁾。「すざく」では現在0.2–12 keVを受け持つ高感度X線CCD (XIS)⁷⁾と、10–600 keVを受け持つ硬X線検出器 (HXD)^{8), 9)}が順調に稼働している。どちらの検出器も、それぞれの帯域では世界最高のバックグラウンドレベルの良さ・安定性を誇っている。「すざく」の特長の一つは、これら2種類の帯域の違う高感度検出器を組み合わせることで、0.2–600 keVという広帯域で世界最高レベルの安定した低バックグラウンド・高感度の観測ができることである。残念ながら空間分解能はChandra衛星や欧州のXMM-Newton衛星と比較するとやや劣る。しかし、対象天体が広がっていれば問題にならない。した

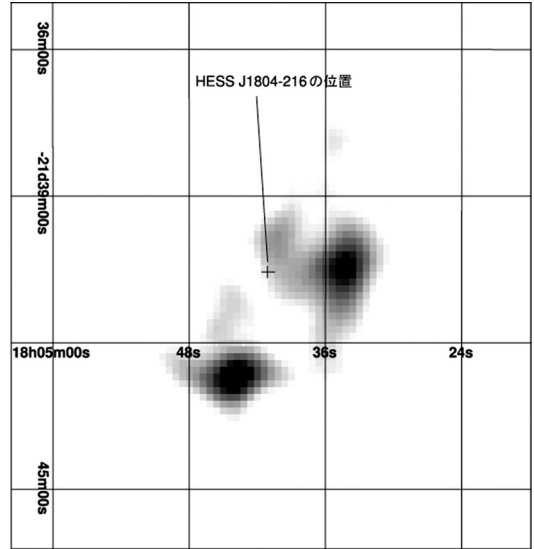


図2 「すざく」XISによる HESS J1804-216 の 2–7 keV イメージ。+は HESS 天体の中心位置を示す。

がって、すざくは「広がった、表面輝度の低い天体」の観測で特に威力を発揮する。そのほかにも、XISの低エネルギー側でのエネルギーレスポンスの良さ、HXDの高時間分解能、全天モニター機能など、「すざく」ならではの特長も多い。

TeV ガンマ線未同定天体のいくつかは今まで対応天体が発見されていない。TeV 帯域では広がっていることから、X線帯域でも暗くて広がっていると予想される。このような天体の観測に、「すざく」は最適である。そこで筆者らは、「すざく」を用いて複数の TeV ガンマ線未同定天体を観測した。本稿では、HESS J1804-216, HESS J1614-518, および HESS J1616-508 の3天体について紹介する。

図2は、「すざく」で観測した TeV ガンマ線未同定天体の一つ、HESS J1804-216 の、XISによる硬X線 (2–7 keV) イメージである¹⁰⁾。複数の天体がかかっているのがわかる。天体の位置は TeV ガンマ線未同定天体の位置と一致しており、未発見であった対応天体である可能性が高い。放射の

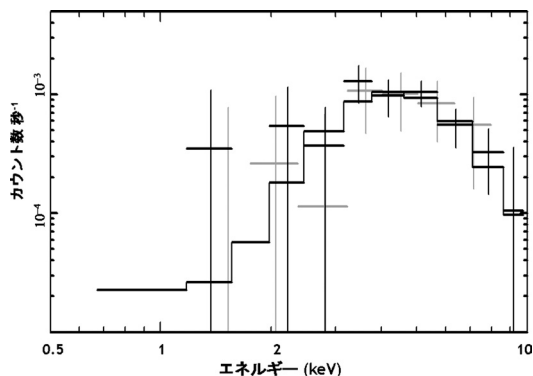


図3 「すざく」XISによる HESS J1804-216 領域の天体のスペクトル例。黒とグレーはXISの2種類のCCDのデータである。

サイズは、TeVガンマ線よりX線のほうが小さい。図3は、同じくXISで得られた対応天体のスペクトルである。スペクトルは10 keVまで伸びており、加速粒子からの非熱的放射を示唆するべき型をしている。この事実も、このX線天体が宇宙線加速源であることの傍証である。また、低エネルギー側、2 keV以下のX線は、ほとんど検出されていないこともわかる。これは、天体とわれわれの間にある星間物質が非常に多く、その影響を受けやすい軟X線がほとんど吸収されてしまったことを示している。「すざく」は、その高感度性を活かして、星間物質に深く埋もれた暗いTeVガンマ線未同定天体HESS J1804-216の正体を探し当てたのである。

図4は同じく「すざく」XISによる、HESS J1614-518の硬X線イメージである。やはりX線で初めて発見された天体が写っている。そして、X線の形状はTeVガンマ線の形状と似ており、TeVガンマ線に比べて広がっていないHESS J1804-216の場合と対象的である。一言で「TeV未同定天体」といっても、実はさまざまな種類があることを、「すざく」は突き止めた。

一方、筆者らが観測したもう一つのTeVガンマ線未同定天体、HESS J1616-508は、もっと謎に満ちた結果をもたらした。図5は「すざく」XIS

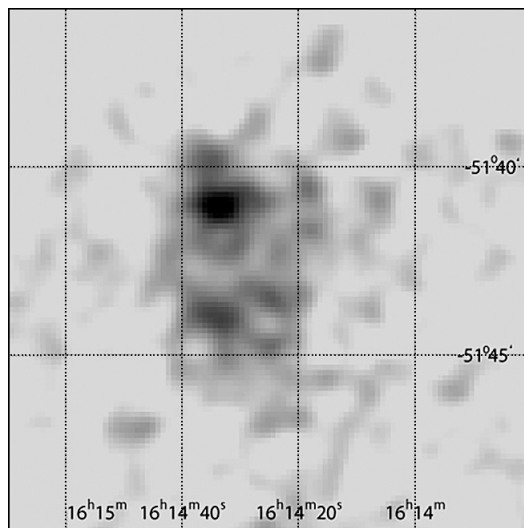


図4 「すざく」XISによる HESS J1614-518 の3-10 keV イメージ。

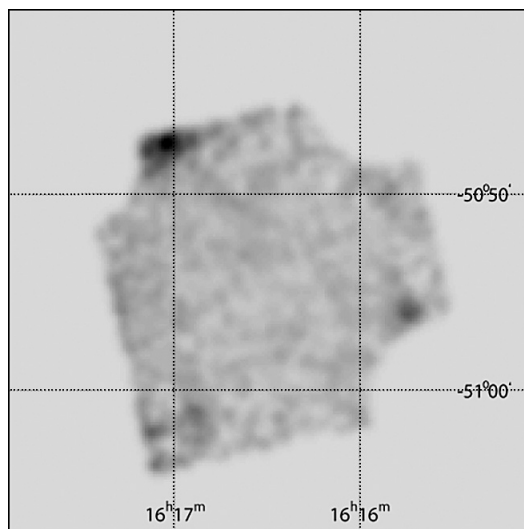


図5 「すざく」XISによる HESS J1616-508 領域の3-12 keV イメージ。

による、HESS J1616-508 領域の硬X線イメージである。HESS天体の位置には何も有意な放射が見られない。「すざく」をもってしても、筆者らは対応天体を見つけれなかったのである¹¹⁾。X線帯域でのエネルギーフラックスは、TeV帯域のフラックスのたった2%以下しかないことが明らか

表1 TeVガンマ線で検出されたさまざまな天体のX線・TeVガンマ線フラックス^{10), 11)}.

天体名	X線フラックス*1	TeVガンマ線フラックス*2	フラックス比 (TeV/X)
かに星雲	2.1×10^4	56	2.7×10^{-3}
SN1006	19	<2.6	<0.1
RX J1713-3946	540	35	0.06
HESS J1804-216	0.43	10	23
HESS J1614-518	0.53	18	34
HESS J1616-508	<0.31	17	>55

*1: 2-10 keV のフラックス (10^{-12} ergs s^{-1} cm^{-2}).

*2: 1-10 TeV のフラックス (10^{-12} ergs s^{-1} cm^{-2}).

になった。

表1は、TeVガンマ線望遠鏡で観測されたさまざまな天体のX線とTeVガンマ線のフラックス比をまとめたものである。「すざく」で観測したTeV未同定天体たちは、既知の天体に比べ、群を抜いて高いTeVガンマ線/X線フラックス比を見せている。「すざく」は新しい種族の天体を確立したということがわかる。中でもHESS J1616-508は、TeVガンマ線に対してX線が最も暗い世界最高記録を樹立した。これは、HESS J1616-508は、本当に他の波長では暗い「暗黒加速器」である可能性を示している。

4. 電子加速源？ 陽子加速源？

TeVガンマ線未同定天体の放射機構に、われわれの「すざく」で迫ってみよう。ここでもう一度、図1に沿って宇宙線からの光子放射を考える。まず、天体からの放射がすべて加速電子起源であったと仮定しよう。電子からのシンクロトロン硬X線の強度は、加速された電子の個数と、磁場強度の2乗に比例する。一方、逆コンプトン散乱によるTeVガンマ線は、加速電子の個数だけに比例する。したがって、X線とTeVガンマ線のフラックス比は、磁場強度だけに依存する。磁場が強ければ強いほど、TeVガンマ線に対してX線も強くなり、弱ければ弱いほどX線も弱い。図6は、

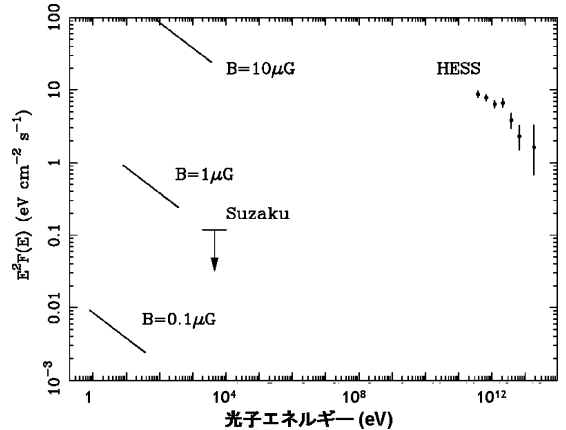


図6 HESS J1616-508の広帯域スペクトル。

HESS J1616-508の広帯域スペクトルである。われわれが「すざく」でつけたTeVガンマ線の2%という非常に低い上限値により、もしこれらの放射が電子起源なら、HESS J1616-508周辺の磁場は1マイクロガウス以下でなければならないことがわかった。しかし、われわれの銀河の星間磁場は平均1マイクロガウス程度で、加速源の周りでそれより弱くなることは考えにくく、最初の「TeVガンマ線放射は加速電子起源である」という仮定に矛盾が生じる。一方、TeVガンマ線が加速陽子起源の放射であると仮定すると、X線帯域で天体が暗くても自然である。つまり、HESS J1616-508からのTeVガンマ線は、加速電子が発したのではなく、加速陽子が放射していると考えるのが自然である。結論づけるにはさらなる検証が必要であるが、もし本当ならば、「すざく」は宇宙物理学100年の謎に初めて肉薄したことになる。

5. 正体はいまだ闇の中

「すざく」は、TeVガンマ線では明るく輝くの、X線では非常に暗い天体が存在することをつきとめた。これら「暗黒加速器」は、陽子加速源候補として非常に重要である。しかし、「暗黒加速器」がどんな天体であるのか、という根本的な問

題に答えるには、まだ時間がかかりそうである。その正体として、年老いた超新星残骸¹²⁾、ガンマ線バースト残骸¹³⁾などの多くの候補天体が考えられているが、観測的な決定打はまだ出ていない。正体解明には、X線とTeVガンマ線での観測だけでなく、電波や赤外線、MeVガンマ線などの他波長観測グループ、そして理論グループも含めた宇宙物理全般にわたる連携が必須であろう。

その第一歩として、われわれはH.E.S.S. TeVガンマ線望遠鏡チームと「すざく」チームを組み合わせた多波長観測チームを結成した。すでに本稿で紹介した3天体以外にも「すざく」でTeVガンマ線未同定天体の観測を開始しており、数年以内に系統的探査を完了する予定である。近い将来、われわれは「暗黒加速器」の正体を突き止め、100年の謎を解くことを期待している。

謝 辞

この研究は、昨年打ち上げに成功した「すざく」なしにはなしえなかったものです。「すざく」打ち上げに協力していただいたすべての皆様に、深く感謝いたします。また、打ち上げ前の10年以上にわたる準備期間、打ち上げ後の運用・検出器維持などにあたってのすべての「すざく」チームの方に感謝いたします。また、本研究に多くの助言をいただいたHESS TeVガンマ線望遠鏡チームの方々、小山勝二教授（京都大）、高橋忠幸教授（ISAS/JAXA）、内山泰伸氏（ISAS/JAXA）、山崎了氏（広島大）にも感謝いたします。また、本稿に関して貴重なコメントをいただいた寺田幸功氏（理研）に感謝いたします。

本研究の一部は、馬場 彩が理化学研究所在籍中に行われたものです。

参考文献

- 1) Hess V. F., 1912, Phys. Zeits 13, 1084
- 2) Koyama K., et al., 1995, Nature 378, 255
- 3) Bamba A., et al., 2003, ApJ 589, 827
- 4) Yamazaki R., et al., 2004, A&A 416, 595
- 5) Aharonian F., et al., 2006, ApJ 636, 777
- 6) Mitsuda K., et al., 2007, PASJ 59, S1
- 7) Koyama K., et al., 2007, PASJ 59, S23
- 8) Takahashi T., et al., 2007, PASJ 59, S35
- 9) Kokubun M., et al., 2007, PASJ 59, S53
- 10) Bamba A., et al., 2007, PASJ 59, S209
- 11) Matsumoto H., et al., 2007, PASJ 59, S199
- 12) Yamazaki R., et al., 2006, MNRAS 371, 1975
- 13) Atoyan, et al., 2006, ApJ 642, L153

Exploring “Dark” Particle Accelerators with Suzaku

Aya BAMBA

High Energy Astrophysics, Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, 3-1-1 Yoshinodai, Sagami-hara-shi, Kanagawa 229-8510, Japan

Hironori MATSUMOTO

Department of Astronomy, Kyoto University, Sakyo-ku, Kyoto 606-8502, Japan

Suzaku Team

Abstract: We carried out observations of three “dark” particle accelerators (HESS J1804-216, HESS J1614-518, and HESS J1616-508) with the Suzaku XIS, which has the lowest and most stable background, in order to catch up their nature. The former two have diffuse counterparts, whereas the last one is really dark in the X-ray band. Suzaku reveals us that the dark particle accelerators might be proton accelerators, which has been one of the big mysteries of physics for these 100 years.