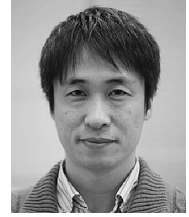


「すざく」で見た宇宙線加速源

内山 泰伸

〈立教大学理学部物理学科 〒171-8501 東京都豊島区西池袋3-34-1〉
e-mail: y.uchiyama@rikkyo.ac.jp



日本のX線天文衛星「すざく」は、広いエネルギー範囲での優れたX線スペクトル測定能力に特色があり、硬X線領域では打ち上げ当時に世界最高の感度を有していた。そのため「すざく」は宇宙線を加速している天体において、非熱的X線放射を捕らえることに適している。本稿では「すざく」による超新星残骸とガンマ線連星の観測結果を紹介し、宇宙における高エネルギー粒子加速の機構について議論する。

1. 宇宙の天然加速器

いわゆる天文学は太陽系外そして銀河系外の宇宙からやってくる光（電磁波）を観測することによって宇宙の様子を明らかにする学問と言える。そして宇宙の彼方から地球に来る「メッセンジャー」は実は光だけでなく、ニュートリノ、重力波、そして宇宙線（本稿では高エネルギーの荷電粒子を指す）も重要なメッセンジャーであり、これらの観測を組み合わせたマルチメッセンジャー天文学の発展が期待されている。

宇宙線観測の歴史は古く、1912年のV. Hessによる気球実験が宇宙線の発見と位置づけられている。宇宙線の平均エネルギーは10ギガ^{*1}電子ボルト程度であり、これは百兆度の温度に相当する。しかしエネルギー分布は熱的なマクスウェル分布ではなく、べき関数分布に従って途方もなく高いエネルギーまで伸びていて、もはや温度が定義できない。人工の加速器ではLHC（大型ハドロン衝突型加速器）で7テラ電子ボルト（TeV）まで陽子を加速できるのが最高であるのに対し、宇宙線は最大で100エクサ電子ボルトにも達して

いる。星間空間において宇宙線のエネルギー密度は恒星の光のエネルギー密度に匹敵しており、銀河宇宙線（銀河系を満ちる宇宙線）は銀河の重要な構成要素となっている。

光、ニュートリノ、重力波といったメッセンジャーが宇宙空間を直進できるのに対し、宇宙線は荷電粒子であるために宇宙空間の磁場によって軌跡が複雑に曲げられ、地球で観測された宇宙線からその源をたどることができない。宇宙線の起源はいまだに解明されておらず、宇宙物理学における重要問題になっている。宇宙のさまざまな天体から、宇宙線が放つ光、非熱的放射を観測することで地球に降り注ぐ宇宙線の起源を探る研究が進められている。特に電磁放射の効率の良い宇宙線電子については観測が大きく進展している。

宇宙線からの非熱的放射は、宇宙線のエネルギー分布がべき関数型であることを反映して、電波からガンマ線に至る非常に広範なエネルギー範囲に現れる。X線領域では、テラ電子ボルト以上のエネルギーをもつ宇宙線電子からのシンクロトロンX線放射の観測が、宇宙線の加速を理解するうえで重要な役割を果たしてきている。本稿では

^{*1} ギガ (G) は 10^9 、テラ (T) は 10^{12} 、ペタ (P) は 10^{15} 、エクサ (E) は 10^{18} を表す。

「すざく」衛星による非熱的X線放射の観測によって解明が進んだ宇宙線の加速現象について、超新星残骸とガンマ線連星に焦点をあてて紹介する。これらの天体では、宇宙線電子の加速が理論的限界に迫る高い効率^{*2}を達成している点が共通している。

2. 超新星残骸

銀河宇宙線の起源として最も有力視されているのが、超新星残骸である。超新星残骸の衝撃波において、宇宙線がフェルミ加速（衝撃波統計加速）¹⁾によって加速され、銀河宇宙線の供給源となっていると考えられている。超新星残骸に限らず、衝撃波におけるフェルミ加速は、宇宙における粒子加速機構の中でも特に重要な位置を占めている。

希薄なプラズマ中の衝撃波においては、粒子間のクーロン衝突ではなくプラズマ中の波動粒子相互作用により散逸が行われ、エネルギー分布がマクスウェル分布から逸脱して、べき関数型の非熱的粒子が生成される。フェルミ加速では、宇宙線は乱流磁場によって散乱されることで、衝撃波面を横切って何度も衝撃波上流と下流を往復する。その結果、非熱エネルギーを得て、エネルギー分布はべき関数型になる。フェルミ加速の理論は一定の成功を収めているが、その基礎的なところで未解明の部分が大きく、発展途上の理論である。超新星残骸は、宇宙線加速の様子を最も詳細に観測できる天体として、フェルミ加速理論の試金石としての役割も担う。

近年の撮像型大気チェレンコフ望遠鏡による観測によって、TeVガンマ線が検出された天体数は飛躍的に増えた。それらの天体ではTeV以上のエネルギーに宇宙線が加速されていることになる。ナミビアに設置されている撮像型大気チェレンコフ望遠鏡H.E.S.S.による銀河面サーベイの結

果²⁾から、銀河系におけるTeVガンマ線源は主にパルサー星雲と超新星残骸であることが明らかになっている。そのうち最もTeVガンマ線強度が高いのは「かに」星雲であり、それに迫るTeVガンマ線強度をもつ二つの超新星残骸RX J1713.7-3946とRX J0852.0-4622 (Vela Jr.)は、超新星残骸の衝撃波における宇宙線加速を研究するうえで注目されている。特に問題となっているのは、ガンマ線の放射機構である。この二つの超新星残骸では10-100 TeVのエネルギーをもつ宇宙線電子による強いシンクロトロンX線放射が検出されている^{3), 4)}。その高エネルギー電子が宇宙マイクロ波背景放射などの光子をガンマ線に叩き上げる逆コンプトン散乱のメカニズムか、あるいは宇宙線陽子が星間ガス中の原子核と衝突して生成される中性パイ中間子の崩壊によるガンマ線が考えられるが、どちらが主要放射機構かははっきりしていない。フェルミ衛星によって測定されたGeVガンマ線スペクトル^{5), 6)}が硬かった（より高エネルギーの光子が良い大きなエネルギー量を担う）ため、逆コンプトン散乱モデルが優勢という見方がある一方、電波望遠鏡「なんてん」によって観測された分子雲⁷⁾との相関から、パイ中間子崩壊ガンマ線であるとする考え方もある。シンクロトロンX線とガンマ線の詳細な比較がガンマ線の起源を確定するうえで有効な手段となる。

図1に超新星残骸Vela Jr.の「すざく」衛星XIS検出器によるマッピング観測で得られたシンクロトロンX線の画像を示す。比較のためH.E.S.S.によるTeVガンマ線観測の結果をX線画像に等高線で重ねている。Vela Jr.は視直径が約2度とXISの視野に比べてとても大きいため、合計41ポイントを費やして全体をマッピングしてある。ROSAT衛星による軟X線観測（1.5 keV以下）によって、すでにVela Jr.の全体がカバーさ

^{*2} ここでは粒子のエネルギーを倍にするために必要な加速時間が短いことをもって加速効率が高いとしている。

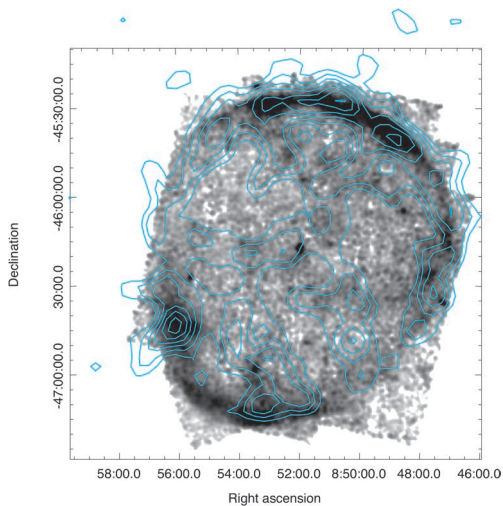


図1 すざく衛星XISによるRX J0852.0-4622 (Vela Jr.)のX線マッピングの結果. エネルギー帯域は2-5.6 keV. 等高線はH.E.S.S.によるTeVガンマ線の結果⁸⁾である.

れていたが、「すざく」衛星による2 keV以上の観測によってシンクロトロンX線を選択的に観測することに成功し、その詳細な空間分布が明らかになった. RX J1713.7-3946についても「すざく」によってシンクロトロンX線の全体像^{9), 10)}が捕らえられている.

図2に示すのは、「すざく」によって得られたこれらの超新星残骸のX線エネルギースペクトルである. XIS 検出器と硬X線検出器 (HXD) によって、シンクロトロンX線スペクトルを今までになく広いエネルギー帯域で測定することができている⁹⁾. その結果、スペクトルが単純なべき関数型ではなく、カットオフをもつことが明らかになった. フェルミ加速理論を超新星残骸に適用した結果として予想されていたことであるが、それが観測的に実証されたのである. 測定されたカットオフ・エネルギーから、加速効率が理論的な限界に達していることが示唆されている¹¹⁾. 図2に示したのは超新星残骸全体で積分したスペクトルである. 一方、現在進められている研究では、超新星残骸を細かく区分けして測定したX線スペク

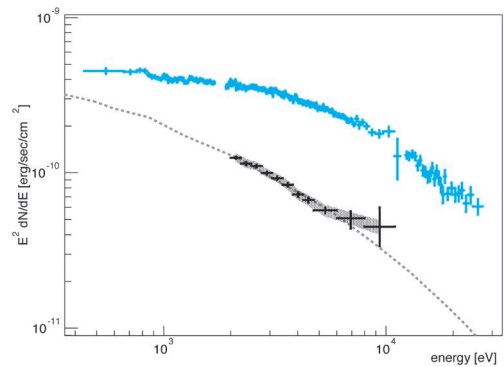


図2 すざく衛星XIS, HXDによって測定されたRX J1713.7-3946 (上)とVela Jr. (下)のX線スペクトル. 点線はシンクロトロン放射モデル.

トルを、区画ごとにTeVガンマ線のスペクトルと比較し、ガンマ線の放射メカニズムを決定することを目指している.

若い超新星残骸ではシンクロトロンX線が普遍的に観測されている. X線帯域では熱制動放射との区別が必ずしもできないが、カシオペア座Aやティコの超新星残骸では「すざく」HXDによる硬X線観測により10 keV以上に伸びるべき関数型スペクトルが確認され、硬X線ではシンクロトロン放射が卓越していることがわかる. チャンドラ衛星によるシンクロトロンX線の観測からは、磁場増幅などのフェルミ加速理論の詳細な検証もされている^{11), 12)}. この二つの超新星残骸ではフェルミ衛星の結果からガンマ線放射の主成分がパイ中間子崩壊ガンマ線であると考えられ、銀河宇宙線がまさに加速されている現場を捉えていると言える.

3. ガンマ線連星

連星軌道に応じて変動するGeV-TeVガンマ線を放射し、大質量星とコンパクト星(ブラックホールあるいは中性子星)の連星系を「ガンマ線連星」と呼ぶ. 現在、六つの連星系がこの新しい天体カテゴリーに分類されている. 銀河宇宙線の直接的な起源ではないものの、相対論的アウトフ

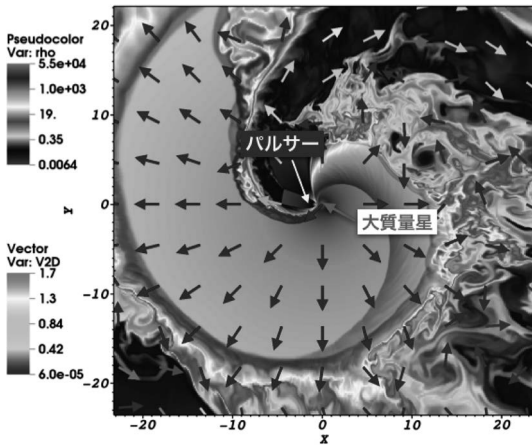


図3 パルサー風と大質量星の星風が衝突する連星系の電磁流体シミュレーション (M. Barkov氏提供)。

ローにおける宇宙線加速を理解するうえで注目される天体である。以下で述べるように、ガンマ線連星では他の宇宙線加速天体と比較して、非常に効率の良い、すなわち加速時間の短い粒子加速が見られる。これほどの加速効率は、パルサー星雲である「かに」星雲にも見られる。「かに」星雲では磁気リコネクションによる宇宙線加速が有力視され、ガンマ線連星でも同様の加速機構が働いている可能性がある。

3.1 PSR B1259-63

六つのガンマ線連星のうち、コンパクト星がはっきりしているのは、PSR B1259-63の連星系だけである。これは電波パルサー PSR B1259-63とBe星との軌道周期3.4年の連星であり、銀河系で変動するTeVガンマ線が発見された最初の例¹³⁾であった。ガンマ線は超高エネルギー電子が大質量星の放つ光を叩き上げた逆コンプトン散乱だと考えられている。図3にパルサーからの相対論的アウトフロー（パルサー風）と大質量星からの星風の相互作用についての数値シミュレーションの結果を示す。組成、流速、磁化パラメータといったパルサー風の基本的なことがよくわかっていないが、加速された宇宙線電子による

シンクロトロン放射と逆コンプトン散乱を観測し、理論やシミュレーションと比較することによって、粒子加速の機構とともに、パルサー風の基本性質にも迫ることができる。

2007年の近星点通過時に「すぎく」とH.E.S.S.望遠鏡による同時観測キャンペーンが実施された。X線放射をシンクロトロン放射と解釈すると、X線強度とガンマ線強度の比から放射源の磁場は1ガウス程度と推定された。また、「すぎく」による観測¹⁴⁾により、星周円盤通過時にX線スペクトルが低エネルギー側で「硬く」なる現象が発見された。これをシンクロトロンX線スペクトルに現れたパルサー風の流速ローレンツ因子を反映した構造だとすると、流速ローレンツ因子は 4×10^5 と推定できる。TeVガンマ線の観測は電子（あるいは陽電子）が10 TeV以上に加速されていることを示す。磁場の大きさから、そのような高エネルギー電子は100秒程度でシンクロトロン放射によってエネルギーを失ってしまうため、100秒以内に電子を10 TeVまで加速する必要がある。フェルミ加速理論から非相対論的な衝撃波ではそのような加速は無理なので、パルサー風内で粒子加速が行われている必要があることがわかる。

3.2 LS 5039

ガンマ線連星LS 5039は、O型星とコンパクト天体（ブラックホールか中性子星かはわかっていない）の連星系であり、電波干渉計観測からは相対論的アウトフローが確認されている。これはマイクロクエーサージェットであるか、あるいはパルサー風だと考えられている。「すぎく」によって連星周期3.9日間の1.5倍の長期間を連続してカバーするX線観測が行われた¹⁵⁾。図4に軌道位相の関数として示したX線とガンマ線の時間変化を示す。過去のX線衛星での観測との比較からは、長期にわたって周期変動の様子が変わっていないことがわかった¹⁸⁾。このことはX線やガンマ線がマイクロクエーサージェットからの放射では

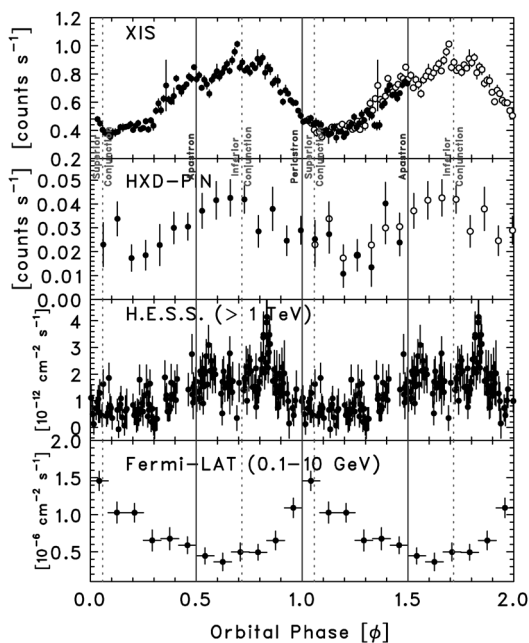


図4 「すざく」XIS, HXDによるガンマ線連星LS5039の光度曲線。軌道位相は $\phi=0$ が近星点で $\phi=0.5$ が遠星点である。H.E.S.S.望遠鏡¹⁶⁾とフェルミ衛星LAT¹⁷⁾によって得られた光度曲線も示す。

なく、図3のようなパルサー風からの放射であることを示唆する。X線から軟ガンマ線をシンクロトロン放射だとし、TeVガンマ線を同じ電子による逆コンプトン散乱だと考えると、数ガウスの磁場中で、1秒程度で10 TeVまで電子を加速していることになる。ジャイロ周期程度の時間で粒子加速が行われており、極めて効率の良い加速機構が必要になる。

PSR B1259-63, LS 5039いずれの場合も非常に速い電子加速が見られ、その点でもパルサー星雲との対応があり興味深い。磁気リコネクションによる超高エネルギー宇宙線の加速の可能性があり、今後新しい研究領域に発展していくと予感できる。

謝辞

本稿では「すざく」による宇宙線加速天体の観

測結果についてレビューしたが、ここで取り上げられたのは一部の結果であることをご承知いただきたい。本稿では一部の図の作成に福山太郎氏にご協力いただいた。

参考文献

- 1) Blandford R. D., Ostriker J. P., 1978, ApJ 221, L29
- 2) Aharonian F., et al. (H.E.S.S. Collaboration), 2006, ApJ 636, 777
- 3) Koyama K., et al., 1997, PASJ 49, L7
- 4) Slane P., et al., 2001, ApJ 548, 814
- 5) Abdo A. A., et al. (Fermi-LAT Collaboration), 2011, ApJ 734, 28
- 6) Tanaka T., et al., 2011, ApJ 740, L51
- 7) Fukui Y., et al., 2003, PASJ 55, L61
- 8) Aharonian F., et al. (H.E.S.S. Collaboration), 2007, ApJ 661, 236
- 9) Tanaka T., et al., 2008, ApJ 685, 988
- 10) Sano H., et al., 2015, ApJ 799, 175
- 11) Uchiyama Y., et al., 2007, Nature 449, 576
- 12) Bamba A., et al., 2005, ApJ 621, 793
- 13) Aharonian F., et al. (H.E.S.S. Collaboration), 2005, A&A 442, 1
- 14) Uchiyama Y., et al., 2009, ApJ 698, 911
- 15) Takahashi T., et al., 2009, ApJ 697, 592
- 16) Aharonian F., et al. (H.E.S.S. Collaboration), 2005, Science 309, 746
- 17) Abdo A. A., et al. (Fermi-LAT Collaboration), 2009, ApJ 706, L56
- 18) Kishishita T., et al., 2009, ApJ 697, L1

Cosmic-ray Accelerators as Seen by Suzaku

Yasunobu UCHIYAMA

Department of Physics, Rikkyo University, 3-34-1 Nishi-Ikebukuro, Toshima-ku, Tokyo 171-8501, Japan

Abstract: The Suzaku X-ray satellite covers a wide energy range, realizing low background measurement in the energy band of 1–60 keV. Suzaku allows study of nonthermal emission from cosmic-ray accelerators and provides information on how cosmic rays can be accelerated. Here we review results obtained with Suzaku for supernova remnants and gamma-ray binaries and discuss their implications to particle acceleration processes.