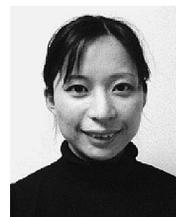


「すざく」で見たTeVガンマ線未同定天体

馬場 彩

〈青山学院大学理工学部物理数理解学科 〒252-5258 相模原市中央区淵野辺5-10-1〉
e-mail: bamba@phys.aoyama.ac.jp



TeVガンマ線未同定天体とは、TeVガンマ線でのみ発見されていた銀河系内にある謎の高エネルギー天体でした。その正体解明は、打ち上げ前には全く予想されていなかった「すざく」の代表的成果の一つに挙げられます。偶然から始まったこの研究は、われわれの銀河系にある超高エネルギー天体の種族に対する概念を大きく変えました。本稿では、この研究の始まりやH.E.S.S.チームとの共同研究の経緯も交えながら、「すざく」が示したTeVガンマ線未同定天体の正体に迫りたいと思います。

1. 始まりは偶然

「すざく」の初期観測天体は、打ち上げ前にチームメンバーたちが何度も検討を重ねて決定されていました。しかし、たいへん残念なことにX線精密分光器XRSが動作せず、「すざく」チームは残された機器で観測すべき天体は何か、急遽考えなければならなくなりました。まだ衛星は初期運用段階でばたばたしているところに「今日はどっちに望遠鏡を向けよう」と考え続ける、本当にどたばたした日々でした。

そのようななか、打ち上げ後2カ月ほど経って初めて、世界中の「すざく」チームメンバーが集まって「今の「すざく」で観測すべき天体」を改めて議論しました。その中で出てきたのが、「TeVガンマ線未同定天体」の追観測です。

2. 謎の天体・TeVガンマ線未同定天体

ここで、TeVガンマ線未同定天体の発見の歴史について少し紹介します。TeVガンマ線とは、一つの光子のエネルギーが1 erg程度という超高エネルギー光子で、X線のざっと10億倍のエネルギー

をもちます。このような光子は宇宙空間でもほとんど存在しておらず、また検出技術も難しいため、2000年代に入るまでは全天でも最も明るい「かに星雲」など、数天体の観測に限られていました。そんな状況を大きく変えたのが、ドイツがナミビアに設置したステレオ観測型TeVガンマ線望遠鏡H.E.S.S.です。H.E.S.S.は一気に上がった感度で、2005年に銀河面の無バイアス探査を行いました¹⁾。TeVガンマ線での無バイアス探査が可能になったことそのものがまずわれわれを驚かせました。さらなる驚きは、この無バイアス探査で検出された10天体のうち何と8天体がTeVガンマ線で初めて見つかった、多波長で対応天体のない「TeVガンマ線未同定天体」だったことです。誰も予想していなかった結果に、みんな非常に驚きました。しかし、TeVガンマ線未同定天体の正体は何なのでしょう。8天体はすべて銀河面に存在し、しかも点源ではなく0.1度程度に広がっているため、われわれの銀河系内に存在する高エネルギー天体であることは間違いのないのですが、それ以上のことはわかりません。また、そもそも本当にほかの波長では「暗い」のかそれとも観測がないだけなのかさえ謎のままです。

3. 「すざく」が見た TeV ガンマ線 未同定天体

2005年と言えば、「すざく」の打ち上げ準備が着々と進んでいるところです。私も「むちゃくちゃ面白そうな天体だ」と思ったのですが、それ以上議論をすることもなく、「すざく」での追観測も思いつかず、そのままになっていました。そこに起きたのが「すざく」の方向転換と突然出てきた TeV ガンマ線未同定天体追観測だったのです。

最初に提案をしたのは当時京大におられた小山勝二教授でした。「最もリスクな観測こそが、最も大きな成果を生む」と主張されたのが、強く記憶に残っています。「すざく」に搭載されている X 線 CCD XIS は「すざく」の低高度軌道のおかげもあり、非常に低くて安定した雑音レベルを誇ります²⁾。また、硬 X 線検出器 HXD は狭視野にすることで雑音レベルを提言し、10 keV 以上で非常に高い感度を達成しています³⁾。つまり、実は「すざく」は、表面輝度が低いと予想される TeV ガンマ線未同定天体の X 線対応天体探しには最適の衛星となっているのです。

この提案には多くのメンバーが賛同し、さっそく観測の検討が始まりました。最初に観測することになったのは、第一期 H.E.S.S. 銀河面探査で発見された未同定天体 8 天体のうち、TeV ガンマ線で最もフラックスが大きかった HESS J1616-508 と HESS J1804-216 に絞られ、天体の位置と近辺のバックグラウンド領域それぞれ 40 ks の観測が行われました。この 40 ks という観測時間は、天体が地球に隠れてしまう時間なども含めると約 1 日を費やす大がかりな観測を示し、バックグラウンド観測も合わせると数日の時間をこのリスクな観測にかけることになります。実は当時すでに H.E.S.S. チームはヨーロッパの X 線天文衛星 XMM-Newton を用いた TeV ガンマ線未同定天体の X 線追観測を始めていました。しかし、観測時間はたったの 20 ks ほどしかなく、XMM-New-

ton 搭載 X 線撮像分光器 EPIC の高い雑音レベルも相まって、あまり深い観測ができていなかったのです。

HESS J1804-216 の中心には、やや暗い X 線点源がありましたが、対応する天体なのかは謎のまま。またフラックスも TeV ガンマ線の 2% 程度しかありません。また、HESS J1804-216 同程度に拡がった X 線放射は見つかりませんでした⁴⁾。最も明るい TeV ガンマ線未同定天体 HESS J1616-508 については、「すざく」の深い観測をもってしても、何も対応天体らしきものがなかったのです⁵⁾。こちらも TeV ガンマ線のフラックスに対して、X 線のフラックスは 2% 以下という厳しい上限値がつけました。つまり、「すざく」は TeV ガンマ線未同定天体が本当に X 線で「暗い」、暗黒加速器 (dark accelerator) であることを初めてはっきりさせました。誰も観測したことのない領域を深く観測するというリスクをとったことで、「すざく」チームは大きな成果を得たのです。これらの結果については、天文月報でも「すざく」初期成果として報告させていただいています^{6),7)}ので、ぜひそちらもご覧ください。

4. ドイツ H.E.S.S. チームとの交流

TeV ガンマ線未同定天体に関する「すざく」初期成果が出た後、われわれはさらに系統的に研究を進めるため、ドイツ・ハイデルベルグにある H.E.S.S. チームの本拠地、マックスプランク研究所を訪問することになりました。もともと H.E.S.S. チームと日本の X 線グループは、宇宙研高橋研究室を中心とした高エネルギー天体研究で共同研究を行っていたのですが、これを拡大した形になります。昔の資料を見ると、馬場が最初に H.E.S.S. チームを訪問したのは、2007 年の春でした。ちょうど最初の TeV ガンマ線未同定天体の「すざく」追観測論文が出る直前です。次に観測すべき TeV ガンマ線未同定天体はどれか、未同定天体以外にも「すざく」の性能を活かした観測



図1 H.E.S.S.望遠鏡プロトタイプ鏡を用いた「すざく」-H.E.S.S.コラボレーションチームメンバーの記念撮影。右から森(宮崎大), 中村(JAXA), 内山(静岡大), 筆者, 小山(京大/阪大), Stefan Wagner(LSW), 寺田(埼玉大)。

ができる天体はないのか、何度も議論を行いました。また、H.E.S.S.チームにも「すざく」をはじめとするX線天文衛星データの解析をやってみようという人が多く、衛星をいわずX線データ解析を教えに通ったりもしました。これがH.E.S.S.チームの信頼を勝ち取る手掛かりになったのか、それまでは門外不出であった出版前のデータについて画像を見せてもらったり、追観測可能性などについて議論できるようになっていきました。共同研究は「すざく」10周年を迎えた現在も続いており、直近の観測提案でもTeVガンマ線未同定天体2天体を提案、両方最も高いpriorityで受理されています。また、2008年9月にはハイデルベルグでTeVガンマ線とX線で見た高エネルギー宇宙の研究会も開いています。この時はH.E.S.S.の他波長観測責任者のStefan Wagner(図1の背の高い男性)の奥様がconference lunchを手作りしてくださるなど、非常に歓

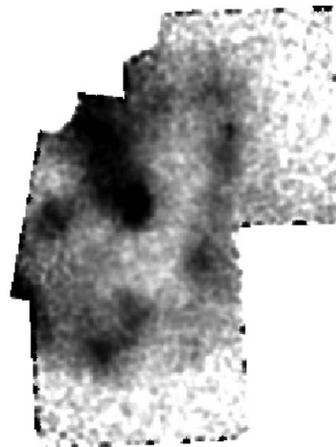


図2 HESS J1731-347の「すざく」2-8 keVマップ¹³⁾. 中心コンパクト星の周りにシェル状の構造が見える。

迎していただきました。図1は、この研究会中に撮った、H.E.S.S.望遠鏡のプロトタイプ鏡に映った研究会参加者たちです。

5. 「すざく」が示したTeVガンマ線未同定天体の正体

ここで宇宙物理の話に戻しましょう。そもそもなぜTeVガンマ線未同定天体はこれほど注目されたのでしょうか。

TeVガンマ線はあまりにエネルギーが高いため、熱的過程では生成されず、必ずTeV程度にまで加速された粒子がその天体に存在することになります。粒子が電子だった場合、宇宙背景放射などの光子を逆コンプトン散乱で叩き上げる「逆コンプトン放射」でTeVガンマ線を作ることができます。ところが、このような電子は星間磁場とも相互作用し、シンクロトロン放射も出てくるはずですが、TeV程度のエネルギーをもった電子が星間磁場中で放射するシンクロトロン光の帯域はX線帯域になるため、TeVガンマ線未同定天体の放射起源が加速された電子だった場合、これらはX線帯域でも明るいはずですが、代表的な例は、かに星雲のようなパルサー星雲で加速された電子で、電波からX線帯域までのシンクロトロン放射とTeVガンマ線帯域の逆コンプトン放射両方が観測されています⁸⁾。一方、加速陽子が分子雲などのターゲットにぶつかるシャワー反応と呼ばれる複雑な原子核反応を起こし、そのうちの一つのパイ0中間子が崩壊することで、GeV帯域からTeV帯域のガンマ線光子を作り出します。したがって、ガンマ線の観測だけでは、放射起源が陽子なのか電子なのか知ることができません。陽子はX線帯域には明るい放射を出さないため、「TeVガンマ線で明るく、X線で暗い」天体があれば、宇宙線の90%を占める加速陽子の起源に迫ることができるというわけです。

「すざく」がせっせとTeVガンマ線未同定天体の追観測をしている間にも、H.E.S.S.はさらに多くの未同定天体を発見し続けました⁹⁾。ほかのTeVガンマ線望遠鏡MAGICやVERITASなどの活躍もあり、現在では既知の天体も含め全天で

161天体がTeVガンマ線源としてカタログ化されています¹⁰⁾。うちTeVガンマ線帯域で初めて見つかった天体は約半数、今も全く対応天体がわからない天体は約30天体。怪しいものも含めると、まだまだ正体のわからない天体が主体であることがわかります。

さて、「すざく」は現在までにTeVガンマ線未同定天体の約半数を追観測しました。まずは種族が判明したものから順に見ていきましょう。

超新星残骸

TeVガンマ線未同定天体が発見されたとき、多くの人が予想した対応天体は超新星残骸でした。超新星残骸の衝撃波では粒子が効率良く加速され、宇宙線の起源になっていると考えられています。これまでに若い超新星残骸からはシンクロトロンX線¹¹⁾やTeVガンマ線¹²⁾が発見され、粒子加速の観測的証拠が見つかってきています。もしTeVガンマ線で明るくシンクロトロン超新星残骸が見つければ、初めて超新星残骸が宇宙線加速源であるとはっきりわかるわけです。

ところがTeVガンマ線未同定天体の追観測で、宇宙線を加速している新たな超新星残骸と判明したのはたった1天体、HESS J1731-347だけだったのです¹³⁾。図2は「すざく」で観測したH.E.S.S. J1731-347です。超新星残骸の衝撃波にあたる部分からシンクロトロンX線が放射されています。これはこれで貴重な4例目のTeVガンマ線超新星残骸サンプルとなったのですが、大方の研究者の予想は大外れだったことになります。

パルサー星雲

TeVガンマ線未同定天体の位置にX線で暗いながらもパルサーやパルサー星雲が見つかるケースは数多く見られました。特に大きな発見は、XMM-NewtonやChandraの浅い追観測では暗いパルサーとその周りの小さな星雲しか見つからないことが多かった¹⁴⁾のに対し、「すざく」では次々と、表面輝度が非常に小さく大きく広がったパルサー星雲が見つかったのです¹⁵⁾⁻¹⁸⁾。「すざ

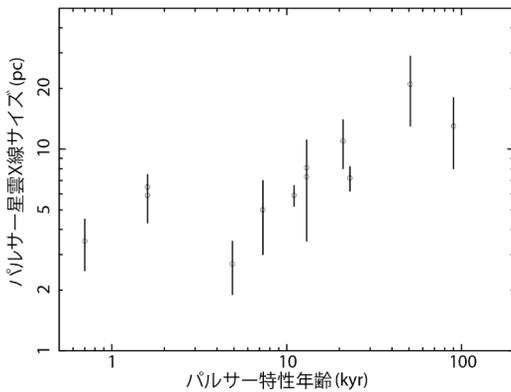


図3 パルサー星雲中のパルサーの特性年齢に対するパルサー星雲のX線での拡がり¹⁷⁾⁻¹⁹⁾。

く」の低バックグラウンドが最高に活かされた成果です。

パルサー星雲が広がっているということは、シンクロtron X線を出す高エネルギー電子が広がって分布していることを示しています。電子の加速はパルサーのごく近傍で起こっていると考えられているため、「すぎく」はパルサー近傍で加速された電子が宇宙空間へ拡散していく様子を捉えたことになります。一方、中心パルサーの回転速度とその減衰から、そのパルサー星雲のおおよその年齢がわかります。これを「特性年齢」と呼びます。図3は、パルサー星雲中のパルサーの特性年齢に対するパルサー星雲のX線での拡がり示しています¹⁷⁾⁻¹⁹⁾。この図から、「すぎく」で捉えられたパルサー星雲中の加速電子は、10万年以上の長い期間にわたって拡散し続けていることが明らかになりました。単純に考えると、加速された電子はシンクロtron X線を出すことでエネルギーを失い、やがてX線を放射できなくなります。そのタイムスケールは、星間空間程度の弱い磁場中でもせいぜい数千年と考えられていて、そのためにX線で見つかるパルサー星雲は小さいと考えられていたのです。「すぎく」の広がったパルサー星雲の発見は従来の説を覆し、加速電子は10万年以上生き残ってパルサー星雲から拡散し

続けていることを表しています。この成果はまた、宇宙線の電子成分の起源の議論にも一石を投じることになりました²⁰⁾。

結局正体不明な天体

TeVガンマ線未同定天体の約半数は超新星残骸やパルサー星雲を中心とした対応天体が他波長で発見されました。しかし残り半分に対しては、そう簡単ではありませんでした。最初のTeVガンマ線未同定天体のように本当にX線で暗かった天体や、何か光っている天体はあるが関係しているかよくわからない、という中途半端な結論に至ったものも数多くあったのです。なかには200 ksという超深観測をしても対応天体が見つからなかった天体もあります²¹⁾。これらの正体は今もってはっきりしていません。

そのようななか、いくつかの天体については、X線で明るい超新星残骸のすぐ外からTeVガンマ線が発見されています^{22), 23)}。実はこのTeVガンマ線の位置は、超新星残骸がぶつかっている分子雲と一致していたのです。この現象は、超新星残骸で加速され逃げ出した陽子が分子雲にぶつかり、ガンマ線帯域で放射をしているという描像でうまく説明できます。もしこれが本当なら、われわれは高エネルギー粒子が超新星残骸を飛び出し、宇宙線となる「宇宙線誕生の瞬間」を見たのかもしれない。近年TeVガンマ線よりエネルギーの低いGeVガンマ線帯域でも、Fermi衛星が超新星残骸から逃亡しつつある陽子からの放射を捉えており^{24), 25)}、宇宙線誕生の全貌が明らかになる日も近いと思われます。

6. これからのX線とガンマ線の協力の行方

「すぎく」とH.E.S.S.の共同研究は、多くのすばらしい成果を上げました。日本を中心としたX線コミュニティは今年度に次世代X線天文衛星ASTRO-Hの打ち上げを予定しています²⁶⁾。また、TeVガンマ線帯域でも超大型チェレンコフ望

遠鏡Cherenkov Telescope Array (CTA) が計画されており, 検出天体が一気に10倍に増えると期待されています²⁷⁾. GeVガンマ線望遠鏡Fermiもまだまだ健在²⁸⁾. 「すざく」がつかないでくれたガンマ線天文学とX線天文学の絆を, さらに強固で建設的なものにしていきたいと思えます.

参考文献

- 1) Aharonian F., et al., 2005, Science 5717, 1938
- 2) Koyama K., et al., 2007, PASJ 59, S23
- 3) Takahashi T., et al., 2007, PASJ 59, S35
- 4) Bamba A., et al., 2007, PASJ 59, S209
- 5) Matsumoro H., et al., 2007, PASJ 59, S199
- 6) 馬場彩, 松本浩典, 2007, 天文月報100, 219
- 7) 馬場彩, 2011, 天文月報104, 634
- 8) Weekes T. C., et al., 1989, ApJ 342, 379
- 9) Aharonian F., et al., 2006, ApJ 636, 777
- 10) <http://tevcat.uchicago.edu/>
- 11) Koyama K., et al., 1995, Nature 378, 255
- 12) Aharonian F., et al., 2004, Nature 432, 75
- 13) Bamba A., et al., 2012, ApJ 756, 149
- 14) Kargaltsev O., et al., 2007, ApJ 670, 655
- 15) Uchiyama H., et al., 2009, PASJ 61, S9
- 16) Anada T., et al., 2010, PASJ 62, 179
- 17) Kishishita T., et al., 2012, ApJ 750, 162
- 18) Izawa M., et al., 2015, PASJ 67, 43
- 19) Bamba A., et al., 2010, ApJL 719, 116
- 20) Kawanaka N., et al., 2010, ApJ 710, 958
- 21) Fujinaga T., et al., 2011, PASJ 63, S857
- 22) Bamba A., et al., 2009, ApJ 691, 1854
- 23) Nakamura R., et al., 2014, PASJ 66, 6210
- 24) Abdo A.A., et al., 2010, Science 327, 1103
- 25) Uchiyama Y., et al., 2012, ApJL 749, 35
- 26) 高橋忠幸, 2016, 天文月報109, 1号掲載決定
- 27) 手嶋政廣, 2011, 天文月報104, 333
- 28) 釜江常好, 大杉節, 2010, 天文月報103, 314

TeV Gamma-ray Unidentified Sources Observed with Suzaku

Aya Bamba

*Aoyama Gakuin University, 5-10-1 Fuchinobe,
Chuo-ku, Sagamihara 252-5258, Japan*

Abstract: Thanks to low and stable background of Suzaku, we have caught up a part of the nature of TeV gamma-ray unidentified sources (TeV unIDs). In this paper, we introduce what Suzaku showed us on the nature of TeV unIDs, together with how we proceed the collaboration between Suzaku and H.E.S.S.