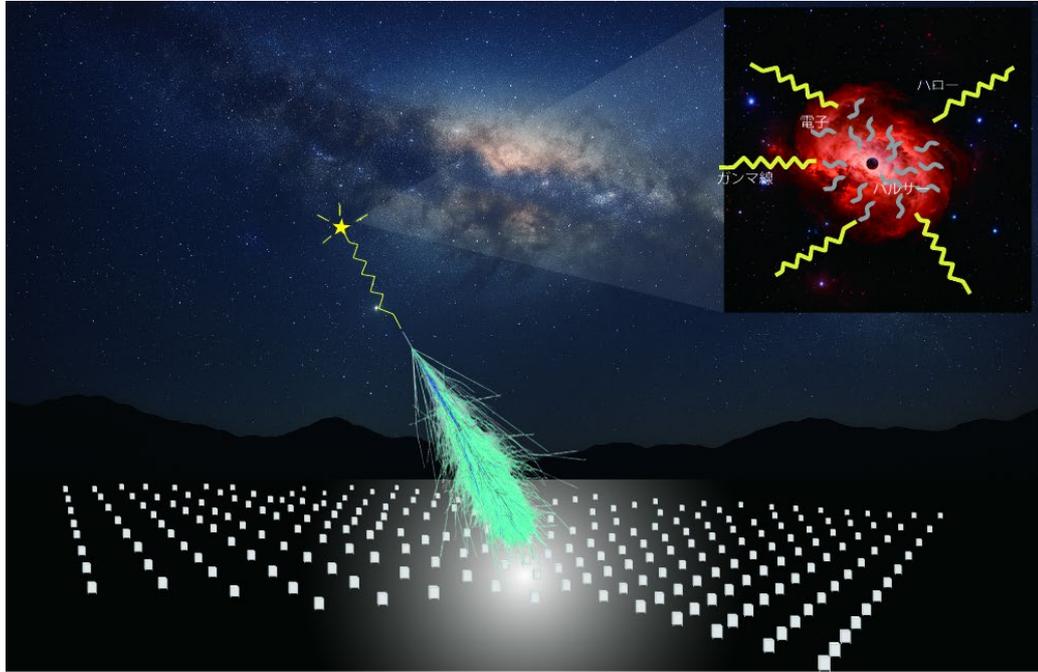


ゲミングパルサーのガンマ線ハローを世界最高エネルギー帯で精密観測！
- ゲミング周辺から 100 兆電子ボルト超の電子の加速限界と拡散の謎に迫る -



1. 発表者：

- 片寄 祐作 (横浜国立大学 大学院工学研究院 教授)
瀧田 正人 (東京大学宇宙線研究所 高エネルギー宇宙線研究部門
名誉教授・シニアフェロー)
川田 和正 (東京大学宇宙線研究所 高エネルギー宇宙線研究部門 准教授)
大西 宗博 (東京大学宇宙線研究所 高エネルギー宇宙線研究部門 助教)
塔 隆志 (東京大学宇宙線研究所 高エネルギー宇宙線研究部門 教授)
塩見 昌司 (日本大学 生産工学部 教養・基礎科学系 教授)
日比野 欣也 (神奈川大学 工学部 応用物理学科 教授)
宗像 一起 (信州大学 理学部 特任教授)
加藤 千尋 (信州大学 理学部 理学科 教授)

2. 発表のポイント：

◆世界最高エネルギー帯でのガンマ線の精密観測

チベット空気シャワー観測装置が、地球から約 800 光年と非常に近くにある天体 ゲミングのガンマ線ハローから 100 兆電子ボルト超のガンマ線の精密測定に成功しました。

◆加速と伝播の同時制約

ゲミングでの電子の加速上限が約 100 兆電子ボルトであることを初めて突き止めました。また、電子の拡散係数のエネルギー依存性の測定から、銀河平均の約 100 分の 1 と小さく電子拡散が強く抑制されることを示し、1 パーセク以下のスケールを持つ乱流特性を初めて明らかにしました。

3. 発表概要：

横浜国立大学・東京大学宇宙線研究所・日本大学・神奈川大学・信州大学などの日中共同研究チームは、チベット AS γ (エイ・エス・ガンマ) 実験(注1)で、パルサー天体ゲミンガの周囲に広がるガンマ線ハローを、100兆電子ボルト(100 TeV) (注2)超という世界最高エネルギー帯で精密に捉えました。

チベット AS γ 実験は、中国チベット自治区の羊八井高原(ヤンパーチン、標高4,300 m)に設置された空気シャワー(注3)観測装置を用い、超高エネルギー宇宙線やガンマ線を観測する国際共同研究プロジェクトです。日本と中国の研究者が1990年から観測を継続しています。2014年には、ガンマ線に由来する空気シャワーを高感度で検出できる装置を追加し、観測能力を大きく向上させました。これにより、世界で初めて天体起源の100 TeVを超えるガンマ線の検出に成功したほか、銀河面に沿ったSub-PeV領域の拡散ガンマ線の世界初の観測、さらに超新星残骸G106.3+2.7からの“ペバトロン”と呼ばれる高エネルギー天体起源と考えられるガンマ線の発見など、多くの重要な成果を挙げています。

観測対象のゲミンガは、地球から約250パーセク(約800光年)の比較的近傍にある古いパルサーで、宇宙線の加速・伝播を同時に探る理想的な実験場です。

今回、エネルギースペクトルが約100 TeV付近で急減(カットオフ)することを確認し、電子の加速限界が約100 TeVにあることを初めて直接示しました。さらに、約16 TeV~250 TeVの広い範囲でハローの広がり測定し、その解析から、ゲミンガ近傍の拡散係数(注4)が銀河平均の約1/10と小さく、粒子の拡散が強く抑制されていることが明らかになりました。加えて、拡散係数のエネルギー依存性がコルモゴロフ型(注5)と呼ばれる電磁流体(MHD)乱流の特徴と一致することを確認し、1パーセク(約3.3光年)以下のスケールをもつ乱流特性を世界で初めて実験的に特定しました。

これらは、パルサー風星雲における宇宙線(電子・陽電子)の加速と広がり方を理解するうえで重要な前進です。最強クラスの加速器として知られる”かに星雲”ではPeV(1000 TeV)級の電子が示唆される一方、ゲミンガでは約100 TeVに上限があることが分かり、天体の年齢や環境により加速能力が大きく異なる可能性が強まりました。また、近傍で拡散が抑えられている事実は、宇宙物理の未解決問題である「陽電子過剰」の理解にも重要な制約を与えます。

本成果はScience Advances 電子版(日本時間3月5日(木)9時00分)に掲載予定です。

今後は、南半球ボリビアで建設中のALPACA観測装置なども活用し、他のパルサー風星雲でも同様の現象が起きているかを調べ、宇宙線の起源解明をさらに進めます。

4. 発表内容：

① 研究の背景

宇宙からは、私たちの目には見えない「宇宙線」と呼ばれる高エネルギーの粒子が、雨のように地球に降り注いでいます。宇宙線の正体は、陽子やヘリウムの原子核、電子といった小さな粒子たちで、そのエネルギーは驚くほど幅広く、 10^9 電子ボルトから 10^{20} 電子ボルトにまでおよびます。これらの宇宙線の一部は、私たちの銀河にある天体で加速されて生まれると考えられており、その中には「ペタ電子ボルト(PeV)」という非常に高いエネルギーに達するものもあります。さらに、それを超えるような超高エネルギーの宇宙線は、銀河の外、つまり宇宙のより遠い場所で生まれていると考えられています。しかし、その正体やどのように作られているのかについては、まだ多くが謎に包まれています。

宇宙線は電気を帯びているため、宇宙空間の磁場によって進む方向を曲げられてしまい、地球に届くまでの間にバラバラに散らばってしまいます。そのため、「どこで生まれたのか」を直接突き止めるのは難しいのです。一方で、加速された宇宙線が電子だった場合、その電子は強い磁場の中で「シンクロトロン放射」を出したり、周囲の光と衝突して「逆コンプトン散乱」(注6)という現象を起こしたりして、X線やガンマ線といった光を生み出します。ガンマ線は宇宙線と違って磁場の影響を受けず、真っすぐ地球に届くため、観測された方向はそのまま放射源の天体の方向を指しています。つまり、ガンマ線を調べることで、宇宙線を生み出した天体やその周囲の環境、そして「宇宙で粒子はどのように加速されるのか」といった謎に迫ることができるのです。

ゲミンガは、地球からおおよそ250パーセクという比較的近い距離にあるガンマ線天体です。中性子星パルサーから吹き出すプラズマによって形成される「パルサー風星雲」(注7)の一つであり、ここでは電子や陽電子が高エネルギーに加速されています。これらの粒子が周囲の光と衝突して「逆コンプトン散乱」を起こすことで、広がったガンマ線の「ハロー」(注8)が生まれます。ゲミンガは、宇宙線の起源や高エネルギー天体の謎を解き明かすうえで非常に重要な存在です。

近年は、特に次のような問題をめぐって注目を集めています。

- 1) チベット AS γ 実験によるかに星雲の観測から、数百 TeV を超えるガンマ線が生成されていることが明らかになり、その後の LHAASO 実験では PeV 領域までのガンマ線が検出されました。これは、電子が PeV まで加速されていることを示しています。一方、他のパルサー風星雲では同様の高エネルギー電子の証拠は見つかっておらず、かに星雲のような強力な加速器とはかなり違っています。ゲミンガについては、HAWC 実験の観測により数十 TeV 程度までのガンマ線が報告され、さらに H. E. S. S 実験などの観測からもかに星雲のようにエネルギースペクトルが高エネルギーまで伸びていないことが指摘されていましたが、決定的な結論には至っていません。もしガンマ線スペクトルに急激な減少(カットオフ)が確認されれば、それは電子加速の限界を直接示すものとなります。このようなカットオフの検出は、天体における粒子加速機構の解明や天体年齢との関係を理解する上で大きな意義を持ちます。
- 2) 宇宙線は、荷電粒子であり、銀河磁場や天体磁場によって拡散します。つまり、その場所の物理情報を運ぶ担い手であるため、伝播の研究は、宇宙物理の重要なテーマとなっています。拡散の強さは拡散係数で表され、宇宙線がどのように、磁場の乱れによって散乱されながら地球まで届くのかを知る手がかりとなっています。

更に、ゲミンガでの拡散は、陽電子過剰問題とも密接に結びついています。陽電子過剰は PAMELA 実験で見つかった、宇宙物理の未解決問題です。この原因の有力な候補には、暗黒物質の崩壊や対消滅起源説と近傍パルサー電子・陽電子放出説があります。HAWC 実験は、この天体から数10パーセク程度に広がったガンマ線を観測しました。つまり、ゲミンガから陽電子過剰が説明可能なエネルギーを持つ電子・陽電子が作られていることは確かです。また、広がり方は、一般的な銀河空間と比較して、100分の1程度と小さいことを示しました。これは、ゲミンガ近傍で磁場の乱れが強いことを示唆します。もし、この状態が広がっていれば、電子・陽電子は地球まで届きませんが、ある距離から銀河磁場程度の乱流になれば、陽電子過剰を説明できるかもしれません。

② 研究内容

チベット AS γ 実験は、中国チベット自治区の標高4,300 mの高原に多数の粒子検出器を配置し、宇宙空間から降り注ぐ超高エネルギー宇宙線・ガンマ線の観測を1990年から行っ

ています(図1左)。高いエネルギーの宇宙線(またはガンマ線)は、大気上層の原子核などと衝突し多数の粒子を生み、それがさらに衝突を繰り返してシャワー状に粒子が降り注ぐ「空気シャワー」と呼ばれる現象を引き起こします(図2)。この空気シャワー中の粒子を、多数の粒子検出器を碁盤の目状に配置した“チベット空気シャワーアレイ”と呼ばれる装置で観測します。各検出器で計測された粒子密度分布や到着時間分布を用いて、元の宇宙線(またはガンマ線)の持つエネルギーと到来方向を決定することができます。本観測装置の最大の利点は、粒子を直接観測する(光学観測ではない)ため、昼夜・天候を問わず連続して観測できることにあります。しかし、天体からやってくる100 TeVを超えるガンマ線の強度は弱く、一様にやってくる宇宙線雑音の数百分の1以下しかありません。つまり、たとえガンマ線信号があったとしても、その数百倍の雑音に埋もれてしまいます。宇宙線雑音を劇的に減らすために、空気シャワーに含まれるミュオン(注9)の数に着目しました。ガンマ線起源の空気シャワー中のミュオン数は、宇宙線起源のそれと比べて50分の1程度なので、ミュオン数を計測することでガンマ線と雑音である宇宙線を選別することが可能となります。そこで、純度の高いミュオン数を測定するために、空気シャワー中のミュオン以外のほとんどの粒子が遮断される地下2.4 mに水チェレンコフ型ミュオン検出器を新たに建設しました(図1右)。この地下ミュオン検出器は世界最大級の面積3,400 m²を誇り、水深1.5mのプール中に光電子増倍管(注10)を取り付けた構造になっています。これにより、ミュオンが水中で発するチェレンコフ光(注11)を観測し、空気シャワー中のミュオン数を計測します。

本研究では、2014年から約2年間に取得したデータを解析しました。地下ミュオン検出器を用いることで、100 TeV以上のエネルギー領域で宇宙線由来の雑音を千分の1以下まで低減し、ゲミングから放射される100 TeV超ガンマ線のスペクトルを高精度に測定しました。解析の結果、スペクトルは約100 TeV付近で急減(カットオフ)することが示されました。これらのガンマ線は、周囲に広がる電子・陽電子が逆コンプトン散乱によって生成したものと考えられ、このことから電子の加速上限が約100 TeVにあることが分かります。さらに、約16 TeV~250 TeVのエネルギー範囲でガンマ線ハローの広がり測定しました(図3)。その結果、ゲミング中心近傍の拡散係数が銀河平均の約100分の1と小さく、粒子の拡散が強く抑制されていることが明らかになりました。加えて、拡散係数のエネルギー依存性がコルモゴロフ型MHD乱流と整合することを確認し、ゲミング周辺における乱流特性を初めて実験的に示しました。

③ 社会的意義・今後の予定

本研究は、ゲミングのパルサー風星雲における電子の加速限界が約100 TeVであることを示しました。若く強力なパルサー風星雲であるかに星雲ではPeV級電子が示唆されており、両天体の物理環境が大きく異なる可能性を裏づけます。本成果は、パルサー風星雲の電子加速機構や天体進化の理解に重要な影響を与えます。

さらに、ゲミング近傍では電子の拡散が強く抑制されていることを明らかにしました。これはHAWC実験の結果と整合し、宇宙線の陽電子過剰問題に対して重要な制約を与えます。加えて、拡散係数のエネルギー依存性が銀河円盤の磁場と同じコルモゴロフ型MHD乱流と一致することを確認しました。この事実は、パルサー風星雲の周辺環境の理解に重要な示唆を与えるものです。

今後は、南半球ボリビアで建設中のALPACAなど、チベットAS γ 実験と類似の観測装置による観測を進めます。新たなエネルギー領域でのデータが蓄積されれば、銀河内のパル

サー風星雲における電子加速の上限や発生原理、伝播の実態がより明確になり、宇宙線起源の解明が大きく前進すると期待されます。

5. 発表雑誌：(*印は Corresponding author / 責任著者)

雑誌名：Science Advances

論文タイトル：Constraining the magnetohydrodynamic turbulence around Geminga
by observing the γ -ray halo beyond 100 TeV

著者：M. Amenomori, M. Anzorena, Y. W. Bao, X. J. Bi*, D. Chen*, T. L. Chen, Y. Chen, Cirennima, S. W. Cui, Danzengluobu, J. H. Fang, K. Fang*, C. F. Feng, Y. L. Feng, Qi Gao, Q. B. Gou, R. Garcia, C. Y. Han, Y. Hayashi, H. H. He, K. Hibino, N. Hotta, Haibing Hu, K. Y. Hu, J. Huang*, G. Imaizumi, H. Y. Jia, K. Kasahara, Y. Katayose*, C. Kato, S. Kato, T. Kawashima, K. Kawata*, M. Kozai, Labaciren, G. M. Le, H. J. Li, Y. H. Lin, L. Y. Liu, M. Y. Liu, H. Lu, Y. Meng, A. Mizuno, K. Munakata, C. C. Ning, M. Nishizawa, M. Ohnishi*, S. Okukawa, X. L. Qian, X. B. Qu, T. Saito, T. Sako, T. K. Sako, Q. Q. Shi, M. Shibata, A. Shiomi*, F. Sugimoto, W. Takano, M. Takita*, Y. H. Tan, S. Torii, H. Tsuchiya, S. Udo, S. Wang, S. F. Wang, Y. P. Wang, Wangdui, Q. Wu, L. Xue, J. Yin, Y. Yokoe, Y. L. Yu, A. F. Yuan, L. M. Zhai, J. L. Zhang, X. Zhang, X. Y. Zhang, Ying Zhang and Y. H. Zou (The Tibet AS γ Collaboration)

DOI 番号：10.1126/sciadv.adv8173

URL：<https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.adv8173>

6. 注意事項：

Science Advances 編集部より、日本時間 3 月 5 日 (木) 午前 9 時以前の公表は禁じられています。

7. 問い合わせ先：

<研究内容について>

横浜国立大学 大学院工学研究院

教授 片寄祐作 (かたよせ ゆうさく)

Tel: 045-339-4321

E-mail: katayose-yusaku-dv@ynu.ac.jp

東京大学宇宙線研究所 高エネルギー宇宙線研究部門

名誉教授・シニアフェロー 瀧田正人(たきた まさと)

Tel: 080-4860-7998

E-mail: takita@icrr.u-tokyo.ac.jp

日本大学 生産工学部

教授 塩見昌司 (しおみ あつし)

Tel: 047-474-2845

E-mail: shiomi.atsushi@nihon-u.ac.jp

神奈川大学 工学部応用物理学科
教授 日比野 欣也 (ひびの きんや)
Tel: 045-481-5661
E-mail: hibino@n.kanagawa-u.ac.jp

信州大学 理学部
教授 加藤千尋 (かとう ちひろ)
Tel: 0263-37-2514
E-mail: ckato@shinshu-u.ac.jp

<プレスリリースについて>
横浜国立大学 総務企画部 リレーション推進課
Tel: 045-339-3027
E-mail: press@ynu.ac.jp

東京大学宇宙線研究所 広報室
Tel: 04-7136-3102
E-mail: icrr-pr@icrr.u-tokyo.ac.jp

日本大学 生産工学部庶務課
Tel: 047-474-2201
E-mail: cit.shomu@nihon-u.ac.jp

神奈川大学 企画政策部広報課
Tel: 045-481-5661
E-mail: kohou-info@kanagawa-u.ac.jp

信州大学 総務部総務課広報室
Tel: 0263-37-3056
E-mail: shinhp@shinshu-u.ac.jp

8. 用語解説：

(注1) チベット AS γ 実験グループ：Tibet AS γ 実験に参加している共同研究者グループ。次の28の研究機関に所属している研究者からなる。弘前大学理工学部、東京大学宇宙線研究所、南京大学、中国科学院高能物理研究所、中国科学院国家天文台、西藏大学、河北師範大学、之江実験室、山東大学、信州大学理学部、神奈川大学工学部、宇都宮大学、中国科学院大学、西南交通大学、芝浦工業大学、横浜国立大学工学研究院、ソルボンヌ大学、情報・システム研究機構、中国気象局、福建船政交通職業学院、国立情報学研究所、山東管理学院、中国石油大学、東京都立産業技術高等専門学校、日本大学生産工学部、長野県工科短期大学校、早稲田大学理工学術院、日本原子力研究開発機構

(注2) 電子ボルト(eV)：エネルギーの単位。1電子ボルトは1個の電子が1ボルトの電位差で加速されるときエネルギー。電磁波のエネルギーでは、可視光～数eV、X線～keV、ガンマ線～100keV以上におおよそ対応する。TeV(テラ電子ボルト)は 10^{12} eV、PeV(ペタ電子ボルト)は 10^{15} eV。

(注3) 空気シャワー：高いエネルギーの宇宙線(またはガンマ線)が大気上層の窒素原子核などと衝突し多数の粒子を生み、それらがさらに衝突を繰り返してシャワー状に粒子が降り注ぐ現象。

(注4) 拡散係数：粒子がどれだけ速く拡散するかを示す尺度で、単位は cm^2/s 、つまり、「1秒間にどのくらい広がるか」を示す。小さいほど粒子はなかなか出て行けず、源の近くにとどまり、大きい時は、粒子は早く遠くへ広がる。拡散係数を測定することは「宇宙線が宇宙空間をどうやって伝わってきたか」を定量的に表しており、宇宙空間の磁場や乱流の物理的性質を知ることができる。

(注5) コルモゴロフ型乱流：流体力学における乱流の統計的構造を記述する最も基本的な理論モデルのひとつ。コルモゴロフ型であれば、拡散係数はエネルギーの3分の1乗に比例する性質を持つ。粒子の散乱(拡散)の強さとエネルギー依存性を決める鍵である。例えば、銀河磁場の乱流スペクトルがコルモゴロフ型かどうかは、宇宙線の拡散理論や星間プラズマ物理で中心的なテーマとなっている。

(注6) 逆コンプトン散乱：高エネルギー電子が周囲の光にエネルギーを与え、より高エネルギーの光(ガンマ線など)に変える現象。

(注7) パルサー風星雲：超新星爆発の後に残された中性子星がパルサーとして活動を続けると、そのエネルギー源となる星雲は「パルサー風星雲」と呼ばれる。ここからは「パルサー風」と呼ばれるプラズマ流が吹き出しており、それが超新星残骸として放出された物質と衝突して衝撃波を形成する。その衝撃波で加速された高エネルギー電子・陽電子が、シンクロトロン放射や逆コンプトン散乱を通じて電波・X線・ガンマ線を放ち、パルサー風星雲として観測される。

(注8) ガンマ線ハロー：天体を取り囲むハロー状にガンマ線が広がった領域。

(注9) ミューオン：電子と同じ負電荷を持つ素粒子。質量は電子の約200倍重く、物質を貫通する能力が高い。

(注10) 光電子増倍管：超高感度の光センサー。光電効果を利用して微弱な光を電子に変換し、増幅させ電気信号に変換する。光子1個から検出可能。

(注11) チェレンコフ光：電荷をもった粒子の速度が(水や空気)の媒質中の光速を超えると放射される青白い光のこと。

9. 添付資料：



図 1 チベット高原・標高 4300 m に設置されている空気シャワー観測装置(左)とその地下に設置されている注水前の水チェレンコフ型ミュオン検出器(右)。

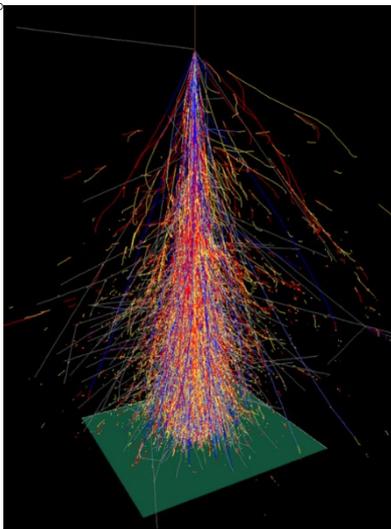


図 2 宇宙線が大気中でつくる空気シャワー。

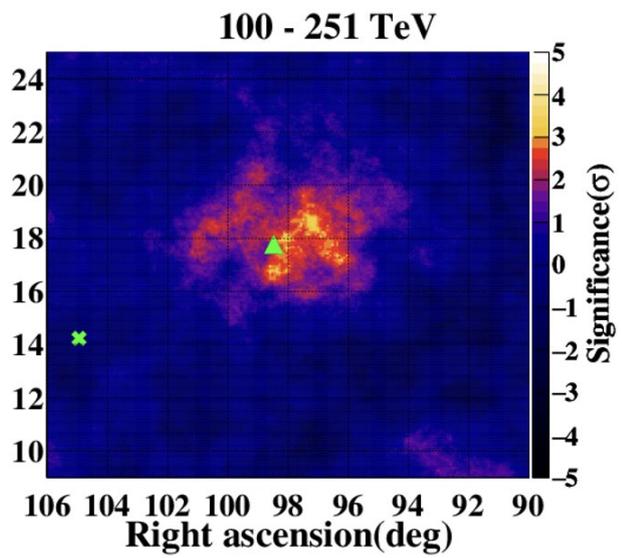


図 3 ゲミンガ周辺の 100 TeV 以上のガンマ線イメージ。緑の三角形がゲミンガパルサー、緑の×印がパルサー-PSR B0656+14 の位置。