

# テレスコープアレイ実験史上最大のエネルギーをもつ宇宙線を検出

## <ポイント>

- ◇ 2021年5月27日、アメリカ ユタ州における国際共同宇宙線観測実験「テレスコープアレイ実験」によって極めて高いエネルギー（244 エクサ電子ボルト）の宇宙線を検出。
- ◇ 2008年から現在までの15年以上にわたるテレスコープアレイ実験史上最大のエネルギー。
- ◇ 到来方向には発生源候補となる天体は存在せず、未知の天体現象や暗黒物質（ダークマター）の崩壊といった標準理論を超えた新物理起源の可能性も。

## <概要>

宇宙から降り注いでいる高エネルギーの粒子（宇宙線）の中には、非常に高いエネルギーの宇宙線がごく稀に存在しており、宇宙におけるもっとも激烈な物理現象と関連していると考えられています。宇宙線は荷電粒子であるため宇宙磁場で曲げられますが、非常に高いエネルギーの宇宙線は磁場で曲げられにくく、到来方向が発生源を指し示す「次世代天文学」となることが期待されています。

大阪公立大学大学院 理学研究科および南部陽一郎物理学研究所の藤井 俊博准教授（2022年3月まで京都大学白眉センターおよび大学院理学研究科に所属）、常定 芳基教授、東京大学 宇宙線研究所の荻尾 彰一教授、塔 隆志准教授、佐川 宏行シニアフェロー、理化学研究所 開拓研究本部の樋口 諒基礎科学特別研究員、木戸 英治研究員、長瀧 重博主任研究員（数理創造プログラム 副プログラムディレクター）、大阪電気通信大学 工学部の多米田 裕一郎准教授、信州大学 工学部および航空宇宙システム研究拠点の富田 孝幸助教、神奈川大学 工学部の池田 大輔特別助教、有働 慈治准教授らの国際共同研究グループは、アメリカユタ州で稼働中の**最高エネルギー宇宙線観測実験「テレスコープアレイ実験」にて、2021年5月27日に極めて高いエネルギー（ $2.44 \times 10^{20}$  の 20 乗電子ボルト = 244 エクサ電子ボルト）をもった宇宙線の検出に成功**しました（図1）。

テレスコープアレイ実験は2008年から現在までの15年以上にわたり、最高エネルギー宇宙線の定常観測を続けています。今回検出された宇宙線は、テレスコープアレイ実験の観測の中でもっともエネルギーが高く、1991年に検出された「オーマイゴッド粒子」※1と呼ばれる宇宙線に匹敵するエネルギーをもちます。さらに、この宇宙線が到来した方向には候補となる有力な天体が見つからず、未知の天体現象や標準理論を超えた新物理起源の可能性も示唆されます。

本研究成果は、国際学術誌「Science」に2023年11月24日にオンライン掲載されました。

この極めて高いエネルギーの宇宙線を初めて見つけたとき、かつてないエネルギーの値が表示されていたため、何かの間違いだらうと思いました。その後、到来方向に候補天体が見つけれず残念に思うと同時に、ではこの宇宙線はどこから来たのか、という新しい謎が見つかったワクワク感を覚えています。今後は、稼働中のテレスコープアレイ実験拡張計画や、次世代実験によって極高エネルギー宇宙線の発生源を明らかにしたいと考えています。



藤井 俊博准教授

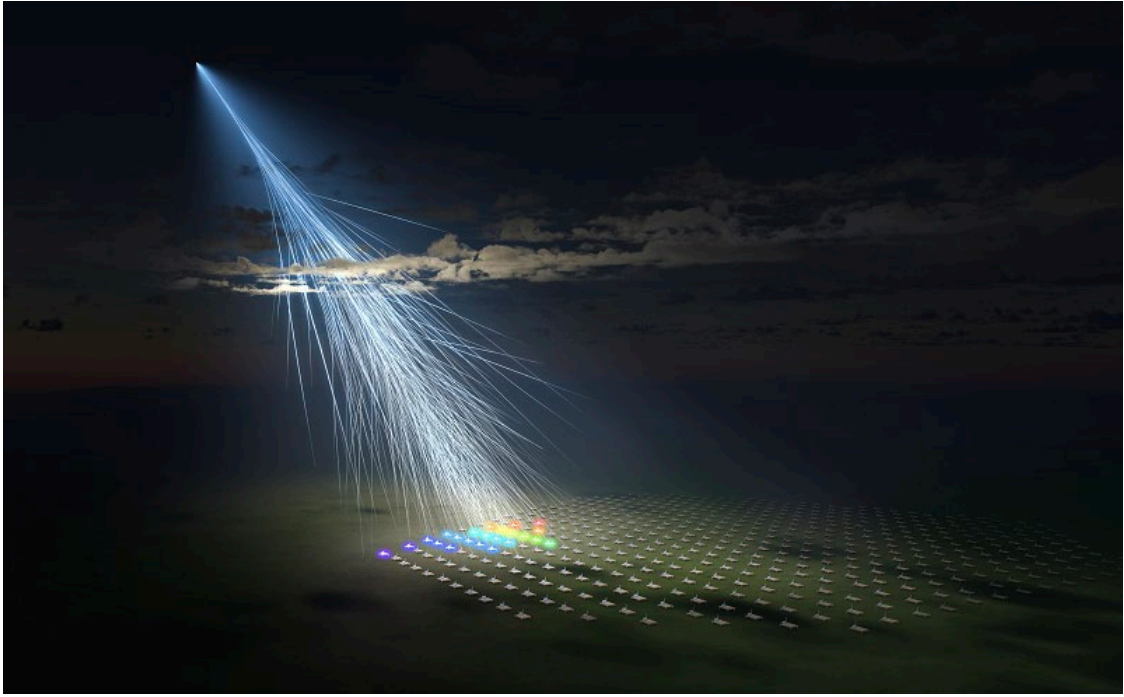


図1：2021年5月27日に望遠鏡アレイ実験で検出された極めて高いエネルギーの宇宙線を地表粒子検出器の信号情報から描画したイメージ図  
(画像提供: 大阪公立大学/京都大学 L-INSIGHT/Ryuunosuke Takeshige)

### <研究の背景>

宇宙空間には高エネルギーの放射線が存在し、地球に絶えず降り注いでいます。この放射線は「宇宙線」と呼ばれ、1912年の発見から1世紀以上にわたって研究が進められています。これまでの観測で、 $10^8$ 乗電子ボルト (=100メガ電子ボルト) から  $10^{20}$ 乗電子ボルト (=100エクサ電子ボルト) を超えるエネルギーの宇宙線が地球で検出されています。この100エクサ電子ボルトというエネルギーは、地上最大の粒子加速器での到達エネルギーよりも7桁以上大きく、宇宙最大のエネルギーを持つ粒子です。この微視的な粒子でありながら巨視的なエネルギーをもつ宇宙線の発生源は、宇宙最大の爆発現象であるガンマ線バーストや、活動銀河核中心の超巨大ブラックホール、もしくはそこから吹き出すジェット、宇宙最強の磁場を持つ強磁場中性子星といった宇宙における激烈な極限物理現象を起源に持つと予想されていますが、これまでの研究では明らかになっていません。(図2)。

非常に高いエネルギーの宇宙線は、地球大気に突入して相互作用を起こすと100億粒子にもおよぶ多量の二次粒子を生成し、直径約10キロメートルの範囲に広がる粒子群となって地表に到来します。この二次粒子群は「空気シャワー」と呼ばれ、地表に数キロ間



図2：極高エネルギー宇宙線による次世代天文学の概念図。極高エネルギー宇宙線は宇宙磁場内をほぼ直進するため、その到来方向が起源方向を指し示すと期待されている。背景には宇宙線起源の候補天体である活動銀河核や強磁場中性子星を表している (画像提供：大阪公立大学/京都大学/Ryuunosuke Takeshige)



図3：アメリカ ユタに設置されている望遠鏡アレイ実験の地表粒子検出器 (画像提供：大阪公立大学)

隔で並べた複数台の地表粒子検出器によりほぼ同時に検出されます。そして、複数台で検出された信号の大きさとマイクロ秒程度の時間差を利用し、到来した宇宙線の到来方向とエネルギーを推定します。

テレスコープアレイ実験は、アメリカ ユタ州の砂漠地帯に面積 3 平方メートルの地表粒子検出器を 1.2 キロメートル間隔で 507 台設置し、700 平方キロメートル範囲に到来する最高エネルギー宇宙線の定常観測を 2008 年から続けています (図 3)。

### <研究の内容>

テレスコープアレイ実験は、2021 年 5 月 27 日のアメリカ ユタ現地時間午前 4 時 35 分 56 秒に、244 エクサ電子ボルト (= $2.44 \times 10^{20}$  乗電子ボルト) という極めて高いエネルギーを持った宇宙線の検出に成功しました (図 4)。1.2 キロメートル以上離れた地表粒子検出器であるにもかかわらず、合計 23 台の検出器がマイクロ秒の時間差を持ってほぼ同時に連続的に信号を検出しています。この結果は、もともとはひとつの極めて高いエネルギーの宇宙線から生成された空気シャワーであることを示しています。それぞれの検出器で検出された信号の大きさおよび時間差から、空気シャワーの到来方向とエネルギーを算出しました。

図 5 は、この極めて高いエネルギーの宇宙線が到来した方向を赤道座標で示しています。興味深いことに、求められた到来方向には有力な候補天体が見あらず、天の川銀河近傍の宇宙大規模構造では局所的空洞 (ローカルボイド) と呼ばれる方向から到来していました。これまでブラックホールの直接撮像で有名なおとめ座銀河団にある楕円銀河 (M87) や、星形成が非常に活発な活動的な銀河 (M82) が、候補天体として考えられていましたが、そのどの方向とも異なる方向であり、テレスコープアレイ実験で報告されたおおぐま座から多くの宇宙線が到来する方向とも異なっています。そのため、未知の天体現象や暗黒物質 (ダークマター) の崩壊といった標準理論を超えた新物理起源の可能性も示唆されます。

2013 年にノーベル物理学賞の対象となったヒッグス粒子は「ゴッド粒子」と呼ばれ、1991 年に検出された 320 エクサ電子ボルトという非常に高いエネルギーの宇宙線は「オーマイゴッド粒子」と呼ばれています。今回の宇宙線は、発見者が日本人だったこと、現地時間の明け方に検出されたこと、今後もさらにこのような極めて高いエネルギーを持った第二、第三の宇宙線の検出が期待されることから本研究チームが「アマテラス (天照) 粒子」と名付けました。

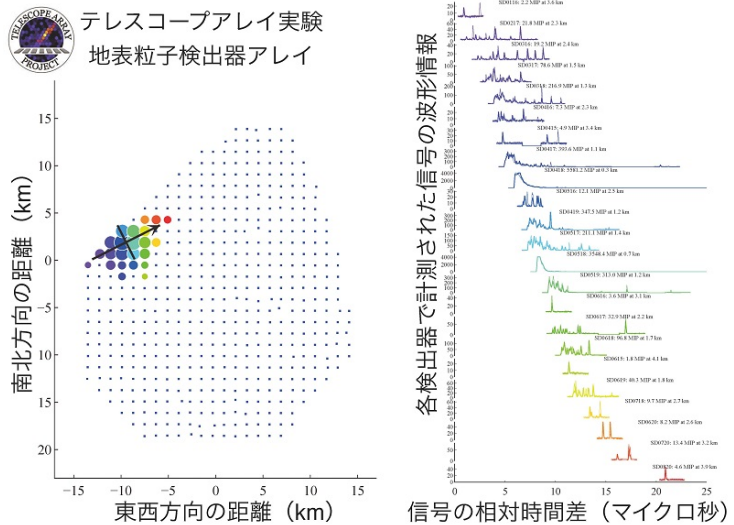


図 4: 2023 年 5 月 27 日にテレスコープアレイ実験で検出された極めて高いエネルギー宇宙線の信号 (画像提供: 大阪公立大学)

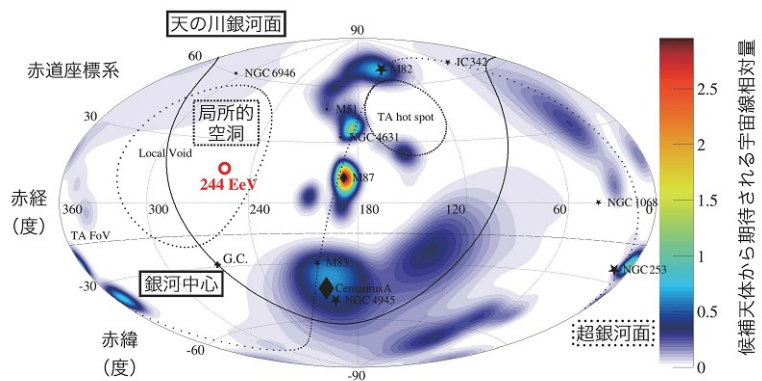


図 5: 244 エクサ電子ボルト (EeV) の極めて高いエネルギーの宇宙線の到来方向 (赤丸, 244 EeV) を赤道座標で表す。候補天体となる活動銀河核 (◆) や星形成が活発な銀河 (★) を示し、銀河磁場を考慮した候補天体から期待される宇宙線量は、近傍天体が集中する超銀河面に沿って到来すると予想されている。244 EeV の宇宙線は候補天体方向とは異なる局所的空洞の方向から到来している (画像提供: 大阪公立大学)

## <期待される効果・今後の展開>

宇宙線の発生源を特定し、次世代天文学を開拓するためにはより多くの最高エネルギー宇宙線を検出する必要があります。望遠鏡アレイ実験では、検出可能範囲を4倍に増やすための拡張実験(TA×4実験)が進んでいます(図6)。これまでの4倍の感度で100エクサ電子ボルト以上の宇宙線を検出することで、最高エネルギー宇宙線の発生源に突き止めることが期待されます。また、最高エネルギー宇宙線が陽子かそれより重い原子核であるかという、粒子種解析を高精度で進めることもできます。粒子種についての情報が得られれば、他の観測結果と組み合わせることで、宇宙に存在する磁場の大きさ・構造という宇宙環境についての新たな知見が得られます。さらには、電波・赤外線・可視光・紫外線・X線・ガンマ線といった多波長観測と、ニュートリノと重力波を加えたマルチメッセンジャー天文学という宇宙観測における総合知によって、宇宙線の発生源・加速機構の理解について大きな変革・転換、そして最高エネルギー宇宙線による次世代天文学の共創を目指します。

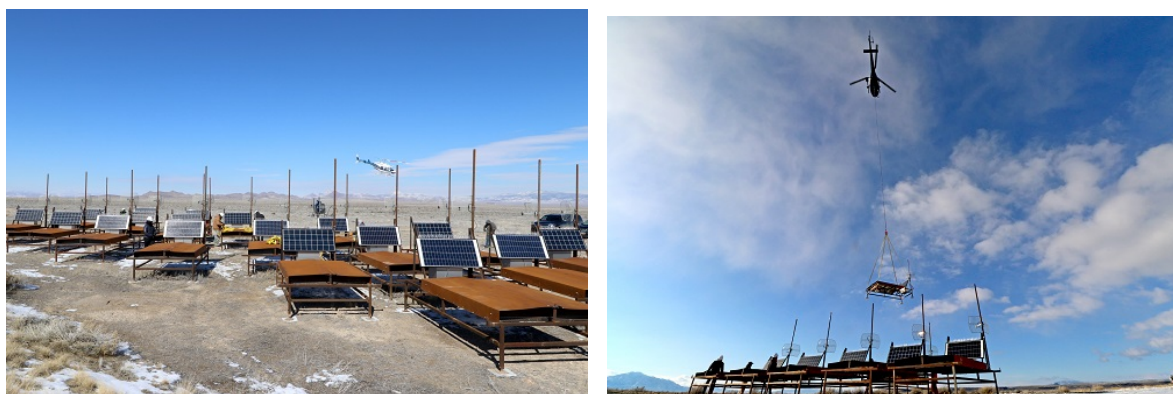


図6：(左) 望遠鏡アレイ実験の拡張計画のために製作し、設置を待つ地表粒子検出器。(右) ヘリコプターによってアメリカユタ州の砂漠地帯へ設置される地表粒子検出器 (画像提供:東京大学宇宙線研究所)

## <資金情報>

文部科学省 科学研究費重点領域研究 431

日本学術振興会 科学研究費助成事業

特別推進研究 JP21000002、同 JP15H05693、基盤研究(S)JP19104006、同 JP15H05741、同 JP19H05607、基盤研究(A) JP18H03705、若手研究(A) JPH26707011、国際共同研究強化(B) JP19KK0074

アメリカ国立科学財団、韓国国立研究財団、ロシア科学アカデミー、Belgian Science Policy IUAP (ULB) 東京大学宇宙線研究所 共同利用研究プロジェクト、RIKEN Pioneering Project: Evolution of Matter in the Universe (r-EMU)

## <用語解説>

※1 オーマイゴッド粒子：1991年10月15日にフライズアイ実験によって観測された320エクサ電子ボルトという極めて高いエネルギーを持つ宇宙線。驚くべきエネルギーを持つことから「オーマイゴッド粒子」と呼ばれている。

## <掲載誌情報>

【発表雑誌】 Science

【論文名】 An extremely energetic cosmic ray observed by a surface detector array

【著者】 Telescope Array Collaboration

【掲載URL】 <https://doi.org/10.1126/science.abo5095>