

■ 研究紹介

天与の加速器からの「アマテラス粒子」の検出

大阪公立大学 大学院理学研究科, 南部陽一郎物理学研究所

藤井 俊博

toshi@omu.ac.jp

2024年(令和6年)1月26日

1 はじめに

「1gで地球破壊」という私自身も驚愕した謳い文句のおかげで、情報解禁日であった2023年11月24日、「アマテラス粒子」という名は研究業界を越えて多くの人々のもとに届いた。M-1グランプリ2023の王者である令和ロマンも、ラジオでアマテラス粒子を取り上げるほどだ。サイエンス誌への論文掲載の反響は非常に大きく、国内外の様々な媒体で取り上げられ、その数は2000件を越えた。そのおかげで今回高エネルギーニュースへの執筆の機会をいただき、とても光栄に感じている。宇宙線について少しでも興味を持っていただけることを願って、宇宙線の魅力について書き記したい。

今回の成果を要約すると、「宇宙から到来した244エクサ電子ボルト¹($= 244 \pm 29$ (stat.) \pm_{76}^{51} (syst.) EeV)の粒子を検出した[1]」、これに尽きる。アマテラス粒子と名付けられたこの粒子は、陽子であるか鉄原子核であるかも明らかになっておらず、発生源を特定したわけでもなく、理論から予測された物理現象が明らかになったわけでもない。ただこのアマテラス粒子は、地球最大の粒子加速器で加速できるエネルギーより約4000万倍も大きい、観測史上2番目のエネルギーをもった粒子なのだ。このような粒子が地球へ到来しているという事実は、宇宙のどこかに100 EeVを超えて宇宙線を加速できる、強大な未知の加速器の存在を示している。長谷川博一氏は、そんな未知の加速器のことを「天与の加速器」と呼んでいる[2]。

244 EeVというエネルギーは、陽子であると仮定して重心系のエネルギー(s)に変換すると、 $\sqrt{s} \sim 700$ TeVに相当する。2040年代後半に向けて検討が進められているFuture Circular Colliderの到達エネルギーが $\sqrt{s} = 100$ TeV[3]なので、地上の加速器でこのエネルギーへ到達するのはまだ先になりそうである。宇宙線観測の最大の魅力としては、加速器が到達できていないエネルギーにおいて新物理を先駆的に探査できることが挙げられる

が、致命的な欠点がある。それは、このエネルギーの宇宙線は到来頻度が極めて低いことであり、北半球で最高感度を誇るテレスコープアレイ実験を15年間稼働し続けてもたった1粒子しか検出できないのである。

本稿では、宇宙線研究の概要と検出装置、起源候補や先行研究を紹介し、テレスコープアレイ実験の概要、アマテラス粒子の検出と考察、そして今後の展望を記述する。今この瞬間も絶えず降り注ぎ、私たちの体を貫通している宇宙線をほんの少しでも身近に感じてもらえれば嬉しい限りである。宇宙線研究の歴史の詳細については宇宙線発見100年記念シンポジウムの特別号[4]、空気シャワー観測については[5, 6]、そして2023年に名古屋大学で開催された宇宙線国際会議での最新成果や今後の展望については[7, 8]をご参照いただきたい。

2 宇宙線研究のはじまり

宇宙線は、宇宙空間に存在している高エネルギーの放射線の総称である。広義にはニュートリノやガンマ線、電子などを含む場合もあるが、ここでは高エネルギーの原子核を指す。高エネルギー状態で電子を剥ぎ取られている荷電粒子となっており、宇宙空間を伝搬するときには宇宙磁場によって曲げられる性質がある。

宇宙線の発見は、1912年にV.F. Hessによる高度5320mまでの気球実験による。高度に比例する放射線量の増加を検出し、宇宙から放射線が飛来していることが明らかになった[9]。7度目の気球実験が着地した1912年8月7日を宇宙線発見の日と定義し、落下地点であるドイツベルリン近郊のバードザーローには記念碑が建てられている(図1)。翌年の1913年には、W. Kolhörsterによる高度9300mまでの気球実験によって、より高精度な放射線量の増加が確認された[10]。どれくらい高いエネルギーの宇宙線が存在するのか、それはどのように生まれ、どうやって地球へたどり着いたのかという問いを解明するために、発見から1世紀以上にわたり宇宙線観測が続けられている。

¹ エクサ電子ボルトは 10^{18} eVであり、EeVと表記する。



図 1: 宇宙線発見 100 年記念シンポジウムにて撮影された V.F. Hess の記念碑、孫の William Breisky (右) と筆者 (左)。

2.1 空気シャワーと地表粒子検出器アレイ

宇宙線は、数 GeV から 100 EeV という 11 桁にもおよぶ広範囲でエネルギーの -3 乗に従うエネルギースペクトルを持っている。エネルギーが 10 倍大きい宇宙線の到来頻度は、約 1000 分の 1 に減少することになる。宇宙線は手のひらほどの広さに 1 秒間に 1 粒子到来しているが、100 EeV の宇宙線は 1 km^2 あたり 300 年にわずか 1 粒子しか到来しない。そのため、より高いエネルギーの宇宙線を多く観測するためには、広大な検出面積と長期間の定常観測が必要である。

高エネルギーの宇宙線は、大気中の原子核との強い相互作用によってパイオンやケイオンを生成する。中性パイオンが崩壊してできたガンマ線が電子対生成によって電子と陽電子を生成し、それらが制動放射によってガンマ線を生成していくという電磁相互作用を繰り返し、多量の電子や陽電子がねずみ算的に生成される。荷電パイオンの崩壊ではミューオンやニュートリノが生成される。この大量の 2 次粒子群は「空気シャワー」と呼ばれ、1938 年に P. Auger によって 150 m にシャワー状に広がった粒子群がはじめて発見された [11]。そして、B. Rossi が 1930 年に開発した同時計数回路 [12] を利用し、地上に等間隔で設置した粒子検出器によって、広がった空気シャワーを効率よく検出できる「地表粒子検出器アレイ」を使った宇宙線観測が始まった。この時期から、より高いエネルギーの宇宙線の検出を目指して、検出面積を拡張していくようになった。

加速器実験が発展する以前の 1943 年までは、比較的安価な検出器によって多くの科学成果や新粒子の発見が

宇宙線の観測からもたらされた。B. Rossi はこの時代のことを “Age of Innocence of the Physics of Elementary Particles (素粒子物理学の素朴な時代)” と呼んでいる [13]。その後の 1943 年以降の Los Alamos での原子爆弾開発と宇宙線研究の関連について興味がある方は、B. Rossi の自伝や小田稔氏による翻訳書 [14] を読んでいただきたい。

2.2 GZK 限界の予言

1963 年に J. Linsley, B. Rossi らによって米国ニューメキシコに設置したボルケーノランチャアレイで 100 EeV ものエネルギーを持った宇宙線の検出が報告された [15]。ボルケーノランチャアレイは、面積 3.3 m^2 のプラスチックシンチレーター 2 個で 10 cm の厚さの鉛をはさんだ検出器を 19 箇所に設置した地表粒子検出器アレイである。有効検出面積は 8 km^2 と、当時世界最大の宇宙線検出器だった。図 2 は、100 EeV の宇宙線から生成された空気シャワーの検出結果である。

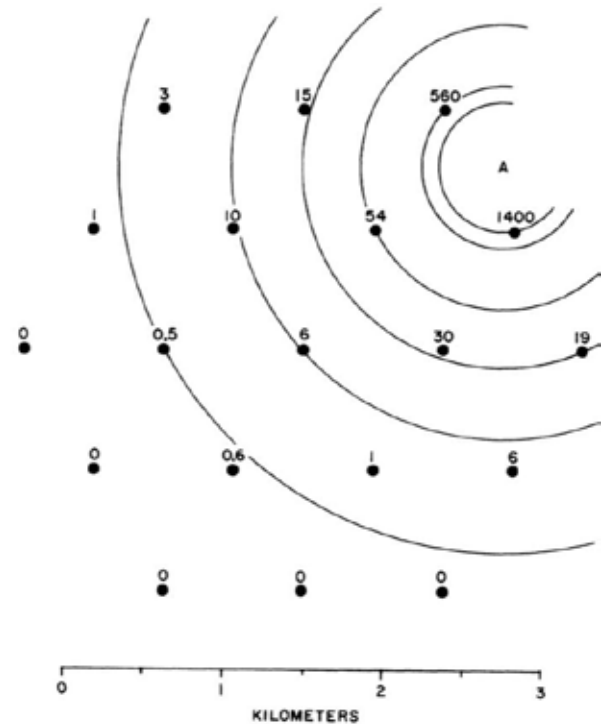
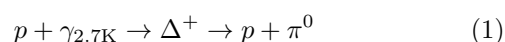


図 2: ボルケーノランチャアレイで検出された 100 EeV の空気シャワー [15]。各検出器の数字は 1 m^2 あたりに検出された粒子数を示す。「A」は、解析によって推定された地表に空気シャワーが到来した場所である。

1965 年には、A.A. Penzias と R.W. Wilson らによってビッグバンからの晴れ上がりの光である 2.7 K の宇宙背景放射の検出が報告された [16]。この発見後すぐ、アメリカでは K. Greisen [17] が、ロシアでは G.T. Zatsepin と V.A. Kuzmin [18] がそれぞれ、60 EeV 以上のエネル

ギーを持った陽子は、宇宙背景放射とデルタ共鳴反応を通じてパイオンを生成し（式 1）エネルギーを大きく失うため、地球に到来する宇宙線のエネルギーには上限が存在すると予言した。



この相互作用を起こす平均的な距離は、約 1.5 億光年である。この距離は宇宙全体の大きさから比べると非常に短く、60 EeV 以上の宇宙線は地球近傍の発生源からしか到来しないことになる。結果として、エネルギースペクトルの 60 EeV 以上にカットオフ構造を持つことが予想される。もし宇宙線が鉄原子核である場合でも、宇宙背景放射との光核反応によってエネルギーを失うため、ほぼ同等のエネルギーに上限があることも言及されている。この地球に到来する宇宙線のエネルギーの上限値に関する予言は、提案者の 3 名の頭文字をとって「GZK 限界」と名付けられた。

GZK 限界のような、天与の加速器からの粒子が宇宙最古の光と衝突し、物理相互作用を起こすという極限的宇宙物理の共創は、当時の研究者にとって興味をそそる研究対象だっただろうと想像している。

3 宇宙線の起源候補

これまでの観測で、数 GeV から 100 EeV という広範囲にわたるエネルギースペクトルには細部構造を持つことが明らかになっている。約 3 PeV のところでべき乗的に折れ曲がり構造があり、銀河系内で加速される宇宙線の最大エネルギーではないかと考えられている。どのエネルギー領域を「極高エネルギー宇宙線」と呼ぶかについては諸説あるが、ここでは 10 EeV 以上をそう呼ぶことにする。

極高エネルギー宇宙線は、天の川銀河の典型的な磁場強度 (μG) における陽子のジャイロ半径が銀河よりも大きくなるため、銀河系外に起源をもつことが予想されている。その起源候補として、大きくわけて以下のふたつのシナリオが検討されている。まずひとつめは、宇宙における激しい天体現象によって粒子が加速されるボトムアップシナリオである [19]。その候補としては、宇宙最大の爆発現象であるガンマ線バースト、中心に大質量ブラックホールとジェットを持つ活動銀河核、爆発的な星形成を起こしているスターバースト銀河、宇宙最強の磁場を持つ中性子星が挙げられる。ふたつめは、標準理論を超えた新物理から生成されるトップダウンシナリオである [20]。暗黒物質や未知の素粒子からの崩壊や、初期宇宙の痕跡となる位相欠陥、磁気モノポール、宇宙ひも、といった起源候補が考えられている。どちらのシナリオが正しいかについて決着はついておらず、極高エネ

ルギー宇宙線の起源の解明は宇宙物理学における大きな謎のひとつとなっている。

宇宙線は荷電粒子であるため、宇宙にあまねく存在する磁場によって曲げられる。だが、極高エネルギー宇宙線は宇宙空間をほぼ直進し、到来方向が発生源を指し示す天文学的なアプローチが実現できるため、次世代を担う新たなメッセンジャーとなることが期待されている（図 3）。



図 3: 新たなメッセンジャーとして期待されている極高エネルギー宇宙線を使った次世代天文学の概念図（画像提供：大阪公立大学/京都大学/武重隆之介）。

3.1 オーマイゴッド粒子

これまでの観測史上最大のエネルギーをもつ宇宙線は、1991 年 10 月 15 日にフライズアイ（蠅の目）実験で検出された、 $320^{+35}_{-40} (\text{stat.}) \pm 85 (\text{syst.}) \text{ EeV}$ の宇宙線である [21]。フライズアイ実験は、空気シャワーが大気を通る際に発する微弱な蛍光発光を検出する大気蛍光望遠鏡を、その名の通り蠅の目のように 2π の立体角を視野に持つように配置している（図 4）。そして地球大気を「全吸収型カロリメータ」として活用し、地球大気に入射した宇宙線のエネルギーを推定する。この 320 EeV というエネルギーは、式 1 の GZK 限界で予言される 60 EeV を大幅に超えるエネルギーであったために、「オーマイゴッド（驚くべき）粒子」と名付けられた。GZK 限界のためにこのようなエネルギーの宇宙線は検出できないと考えられていた当時、オーマイゴッド粒子の検出はその名の通り宇宙線業界を震撼させる驚きをあたえただろう。

また、日本の山梨県明野村で実施された有効検出面積 100 km^2 もつ地表粒子検出器アレイを用いた Akeno Giant Air Shower Array (AGASA) 実験で、GZK 限界を超えて伸びるエネルギースペクトルが報告された [22]。一方で、フライズアイ実験の拡張計画によって GZK 限界と一致する結果が報告された [23]。そして、GZK 限

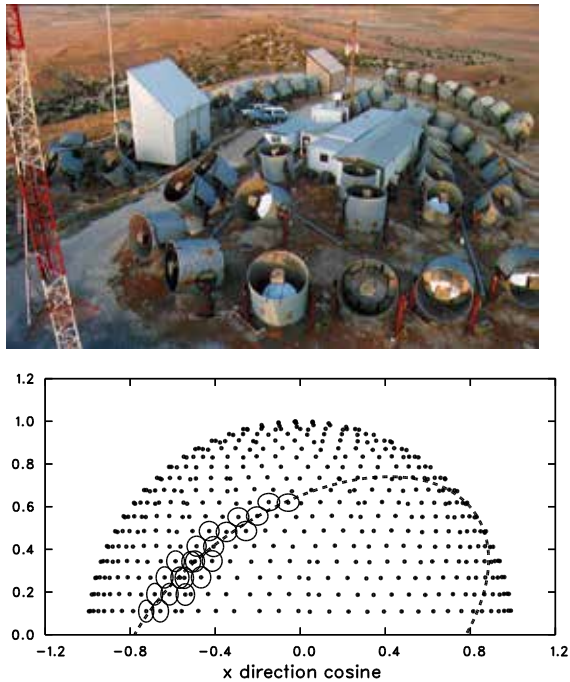


図 4: フライズアイ実験の大気蛍光望遠鏡の写真と、観測史上最大のエネルギーである 320 EeV をもったオーマイゴッド粒子の観測結果 [21]。各点は光電子増倍管の方向であり、信号を検出したものに丸を示す。点線は宇宙線の到来方向と検出器が成す面を表している。X 軸は方位角の余弦、Y 軸は天頂角の余弦を示している。

界の有無と宇宙線の起源を明らかにするため、地表粒子検出器アレイと大気蛍光望遠鏡という 2 種類の検出手法で空気シャワーをハイブリッド観測するテレスコープアレイ実験がはじまった。

4 テレスコープアレイ実験

テレスコープアレイ実験は日本、米国、韓国、台湾、ロシア、ベルギー、チェコ、スロベニア、ポーランドの 9 カ国、約 150 名の共同研究者からなる国際共同実験である。アメリカユタ州の砂漠地帯に地表粒子検出器アレイと大気蛍光望遠鏡を設置し、宇宙線をそれらの検出器で定常観測している。各地表粒子検出器は、面積 3m^2 、厚さ 1.2cm の 2 層のプラスチックシンチレーターであり、それらが 1.2km 間隔で 507 台設置されている。50 MHz の信号波形収集回路、無線 LAN 通信によるデータ送受信機能、GPS アンテナによる時刻同期機能を持ち、ソーラーパネルとバッテリーによって広大な砂漠地帯でも自律稼働している。地表粒子検出器アレイの有効検出面積は 700km^2 であり、ほぼびわ湖の面積に相当する (図 5)。図 6 にあるように、地表粒子検出器は研究者および学生らによる手作りであり、ヘリコプターを使って

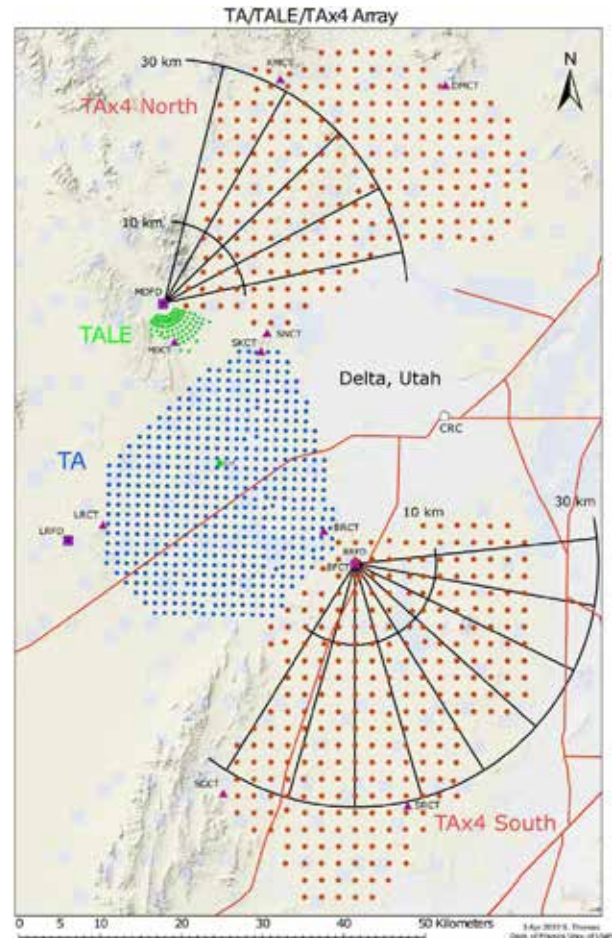


図 5: テレスコープアレイ実験の配置図。現状のテレスコープアレイ実験に加えて、有効検出面積を 4 倍へ拡張する TA×4 実験の配置図も示している [25]。

設置する。

地表粒子検出器アレイの上空に視野を持つように設置された合計 38 台の大気蛍光望遠鏡によって、晴天夜には空気シャワーからの大気蛍光を撮像している。2008 年から現在までの 15 年以上にわたり、極高エネルギー宇宙線の定常観測を実施している。これまでの観測で得られたエネルギースペクトルは、GZK 限界と一致するカットオフ構造が確認されている [24]。さらに、有効検出面積を現在の 4 倍へ拡張する TA×4 実験によって極高エネルギー宇宙線の感度向上を目指している [25]。TA×4 実験は最終目標の約半分の面積に 257 台の地表粒子検出器の設置が完了し、データ収集および解析を実施している [26]。

4.1 アマテラス粒子の検出

現地時間 2021 年 5 月 27 日、テレスコープアレイ実験の観測史上もっとも高いエネルギーをもつ宇宙線が検出された [1]。図 7 には地表粒子検出器アレイの配置図と、各地表粒子検出器で検出された信号波形を示している。



図 6: テレスコープアレイ実験の地表粒子検出器アレイの建設および設置の様子 (画像提供: Telescope Array Collaboration/ICRR PR Office)。

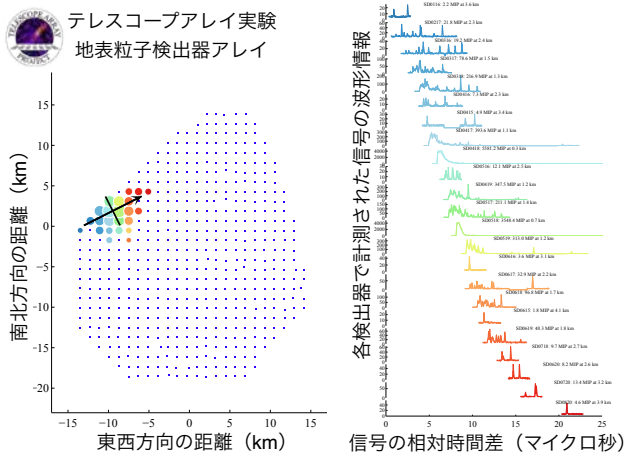


図 7: テレスコープアレイ実験の 15 年間の観測期間でもっとも高いエネルギーをもつ宇宙線、アマテラス粒子の信号波形 [1]。

23 台もの地表粒子検出器が、マイクロ秒の時間差の中において時間的・空間的に連続した信号を検出した。

以下に、アマテラス粒子のエネルギーの推定手法について説明する。まず、検出器ごとに得られた信号の時間差から空気シャワーの到来方向を算出する。到来方向の情報をもとに、各検出器で得られた信号の大きさを、空気シャワーの中心軸と検出器の最短（垂直）距離の関数で表示する。次に、これまでの研究で得られた粒子数密度分布関数でフィットし、エネルギーの指標となる空気シャワーからの距離 800 m での粒子数密度 (S_{800}) を算出する。最後に、シミュレーションを使って得られた粒子数密度と天頂角の関数としてエネルギーを算出するルックアップテーブルを用いて、到来した宇宙線のエネルギーを計算する。アマテラス粒子では天頂角は 38.6 度、 S_{800} は 530 粒子/ m^2 であり、エネルギーは 309 EeV と推定された。

地表粒子検出器アレイで検出される信号は、ハドロン



図 8: アマテラス粒子の検出データをもとに作成した想像図。地表粒子検出器アレイの実際の配置も考慮されており、少しずれた検出器の位置も反映されている。「映える」イラストになっており、筆者のお気に入りである (画像提供: 大阪公立大学/京都大学 L-INSIGHT/武重隆之介)。

相互作用モデルによって大きく依存するミューオン数の影響を強く受けてしまう。また、100 EeV は加速器未到達のエネルギーであるために、ハドロン相互作用モデルの理解が十分に進んでいないことが予想される。一方で、地球大気を全吸収型カロリメータとして使用している大気蛍光望遠鏡は、エネルギー決定において電磁相互作用で生成される電子や陽電子からの大気蛍光を主に検出しているため、ハドロン相互作用モデルへの依存性は比較的小さい。そのため、テレスコープアレイ実験では地表粒子検出器アレイと大気蛍光望遠鏡で同時に検出された宇宙線を選び、2つの検出器で独立に推測されたエネルギーの比をあらかじめ計算している [24]。この結果得られた 1.27 という 2つの検出器のエネルギー比を適用することで、最終的に 244 EeV というエネルギーを算出した。

アマテラス粒子の命名については、先述のオーマイゴッド粒子や、2013 年ノーベル物理学賞受賞の研究対象となったヒッグス粒子がゴッド粒子と呼ばれていることから、何か神話にまつわる名前をつけたいと考えていた。その中で第一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、今後の拡張計画 (TA×4 実験) で同程度かそれ以上のエネルギーをもつ宇宙線のさらなる検出が期待されること、そして宇宙線起源の解明へ向けた道しるべとなることを願い命名した。図 8 は、図 7 の検出信号をもとに作成した想像図である。

4.2 発生源についての考察

図 9 は、アマテラス粒子が到来した方向を赤道座標で示している。興味深いことにアマテラス粒子が到来した方向は「局所的空洞」と呼ばれる、近傍の宇宙大規

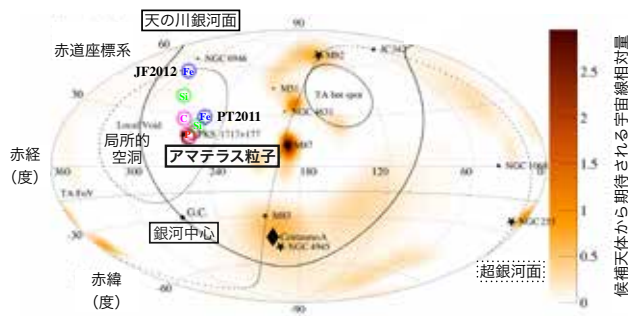


図 9: アマテラス粒子の到来方向。陽子、炭素、ケイ素、鉄原子核を仮定した場合に、天の川銀河系内の磁場でどの方向に曲げられて到来するかを赤道座標で表している。背景のマップは近傍の候補天体が宇宙線源であると仮定し、銀河磁場の乱流成分による偏向を考慮した場合に地球で検出される宇宙線の到来方向分布の予測を示している [1]。

模構造においては天体が少ない方向から到来していたのである。式 1 の GZK 限界を思い出すと、極高エネルギー宇宙線は GZK 限界によって近傍 1.5 億光年しか到来することができない。そのため既知の天体起源である場合、極高エネルギー宇宙線の到来方向は近傍の銀河がたくさん存在する超銀河面にそって分布すると考えられていた。GZK 限界内の近傍で宇宙線を極高エネルギーまで加速できそうな候補天体は、10 天体ほどしか存在していない。アマテラス粒子の到来方向の近くには PKS 1717+177 という活動銀河核があるが、この天体までの距離は GZK 限界の 1.5 億光年よりもはるかに遠い約 20 億光年である。式 1 の相互作用がこのエネルギー領域で破れていない限りは、この天体で加速された 244 EeV の宇宙線は地球に到来できない。GZK 限界によってエネルギーを大きく失うことは、発生源の特定において候補天体が近傍に限られるという大きな利点になっているのだ。

図 9 の背景のマップは、宇宙大規模構造に従って宇宙線の発生源が分布し、アマテラス粒子が考えうるもっとも重い鉄原子核と仮定した場合、天の川銀河の磁場の乱流成分でどれくらい広がって地球に到来するかを示している。すなわち、カタログに載っているすべての天体が 244 EeV のエネルギーの鉄原子核の発生源であるボトムアップシナリオが正しいときに、地球で検出される極高エネルギー宇宙線の到来方向分布を表している。

図 9 には天の川銀河の磁場モデルを考慮すると、真の到来方向からどれくらい曲げられるかについても記載している。陽子の場合ほとんど曲げられないが、鉄原子核の場合天の川銀河面に近いので大きく曲げられてしまう。また、2 種類の磁場モデル (JF2012, PT2011) による結果を示しているが、モデル間での違いが非常に大きいことがうかがえる。JF2012 のモデルと鉄原子核を仮

定すれば、近傍で星形成が活発な花火銀河 (NGC 6946) から到来したと考えられるが、その銀河では宇宙線を 100 EeV 以上に加速できるような兆候は今のところ見られていない。さらにアマテラス粒子は、2014 年に報告されたホットスポットと呼ばれる 57 EeV 以上の宇宙線の過剰の方向 [27] や、1991 年のオーマイゴッド粒子の到来方向とも異なる方向から到来していた。ブラックホールシャドウの直接撮像 [28] で有名になったおとめ座銀河団にある楕円銀河 (M87) と異なる方向であり、現在考えられている有力な候補天体からは到来していないのである。

極高エネルギー宇宙線は宇宙磁場で曲げられにくいとはいえ、光・ニュートリノ・重力波に比べると到着時間が遅れてしまう。天体への距離にもよるが、系外天体である場合は 1 万年から 100 万年ほど遅れてしまう。そのため、過去にあったガンマ線バーストや潮汐破壊といった突発現象で加速され、現在は何も痕跡が残っていないことも十分考えられる。ただその天体現象も天体が少ない局所的空間の方向で起こるのではなく、天体が多く存在する超銀河面にそって起こることが予測される。

アマテラス粒子の発生源の他の候補としては、天体起源ではなく標準理論を超えた新物理、すなわちトップダウンシナリオが考えられる。暗黒物質や未知の素粒子の崩壊や初期宇宙の位相欠陥といった新物理起源であれば、近傍天体との相関はなくても問題はない。もしかすると、光を発しない「なにか」で宇宙線が加速される「暗黒加速器」が起源なのかもしれない。いずれにせよ、1 粒子のみの検出では不十分であり、さらなる極高エネルギー宇宙線の観測および将来計画の実現が必要不可欠である。

5 今後の展望

テレスコープアレイ実験の 15 年間の観測で、200 EeV を超える宇宙線はこのアマテラス粒子のたった 1 粒子だった。テレスコープアレイ実験では、現在 TA×4 計画という有効検出面積を 4 倍に広げる計画が進んでいる [25]。TA×4 実験が完成すれば、15 年かかってようやく検出したエネルギーの宇宙線が、約 4 年で検出されることが期待できる。アマテラス粒子を超えるエネルギーをもった宇宙線の検出も十分期待できる。また現在テレスコープアレイ実験では、機械学習を使ってこのアマテラス粒子の粒子種識別の解析を鋭意進めている。到来した宇宙線の粒子種がわかり、発生源を特定できれば、不定性の大きい天の川銀河の磁場の強さや構造を大幅に制限できるだろう。

南半球で稼働中のピエールオージェ観測所との共同研究も重要となる。ピエールオージェ観測所は 3000 km²

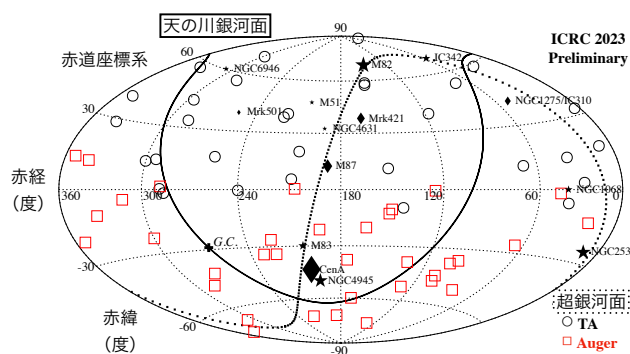


図 10: テレスコープアレイ実験とピエールオージェ観測所によって観測された 100 EeV 以上の宇宙線の到来方向を赤道座標で示す [7]。実線は銀河面、破線は超銀河面を示している。候補天体と考えられている近傍の活動銀河核や星形成が活発な銀河は、菱形や星で表している。この中で最大のエネルギーをもつ宇宙線（アマテラス粒子）は赤経 256 度、赤緯 16 度の方向から到来した。

の有効検出面積を持ち、2004 年から宇宙線の定常観測を続けている。筆者は 2013 年からピエールオージェ観測所にも所属し、両実験をつなぐ架け橋として研究を続けている。図 10 は、テレスコープアレイ実験の 15 年間でピエールオージェ観測所の 17 年間の定常観測で検出された 100 EeV 以上の宇宙線の到来方向を示している [7]。アマテラス粒子の到来方向には 100 EeV 以上の宇宙線の集中は見られず、また超銀河面という近傍の候補天体が多く集まっている方向からも集中は見られない。50 年前の予測では、おとめ座銀河団にある M87 が極高エネルギーまで宇宙線を加速している最有力候補とされていたが、その方向から 100 EeV 以上の宇宙線は確認されておらず、これを“Virgo scandal”と呼ぶ研究者もいる。また、“Muon puzzle”と呼ばれる極高エネルギー宇宙線から生成される空気シャワー中のミュオン数とシミュレーション結果との不一致 [29] など、予想外の研究成果が報告されている。

これらの問題解決へ向けてテレスコープアレイ実験とピエールオージェ観測所は、ライバル関係を越えたワーキンググループを作り、相互理解のためのデータ交換や解析手法についての議論を進めている。到来方向異方性 [30] に加えて、エネルギースペクトル [31]、質量組成 [32]、ハドロン相互作用モデル [29] のグループがあり、お互いの実験結果についての整理・検証が実施されている。また、テレスコープアレイ実験サイトにピエールオージェ観測所の水チェレンコフ検出器を設置し、到来する宇宙線を両実験の地表粒子検出器で捕える試み [33] や、低コスト型の新型大気蛍光望遠鏡を両サイトに設置して宇宙線を検出し、相互比較する実験 [34] が進められている。

さらに、現在稼働中の宇宙線検出器よりも一桁大き

い感度を実現する将来計画へ向けて、テレスコープアレイ実験とピエールオージェ観測所の枠組みを越えて、世界でひとつの極高エネルギー宇宙線国際共同観測実験 (Global Cosmic ray Observatory, GCOS) へ向けた構想を立てはじめている [35]。GCOS では 40,000 km² の有効検出面積を実現し、粒子種識別能力の高精度化によって極高エネルギー宇宙線の起源の解明、次世代天文学の開拓を目指している。起源方向が明らかにできれば、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に、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を組み合わせ、天与の加速器の理解に大きな変革・転換がもたらされるだろう。

6 まとめ

テレスコープアレイ実験は有効検出面積 700 km² をもつ北半球最大の極高エネルギー宇宙線観測装置であり、宇宙線の起源解明を目指して 2008 年から観測を続けている。2021 年 5 月 27 日、史上 2 番目のエネルギーをもった 244 ± 29 (stat.) $^{+51}_{-76}$ (syst.) EeV の宇宙線が検出された。1991 年に検出された観測史上最大のエネルギーであるオーマイゴッド粒子とは誤差の範囲内で一致しており、アマテラス粒子と名付けられた。興味深いことに、アマテラス粒子の到来方向は局所的空洞という、近傍の宇宙大規模構造では有力な起源候補天体が少ない方向から到来していた。過去に起きた突発現象か、予想よりも強い磁場か、もしくは新物理起源かなどいくつかの可能性が考えられるが、これまでの研究では明らかになっていない。今後、テレスコープアレイ実験および進行中の TA×4 実験、さらには将来計画によって極高エネルギー宇宙線の検出事象数が増え、天与の加速器の正体に迫ることが期待されている。

謝辞

本稿を執筆する機会を与えていただいた堀井泰之氏および高エネルギーニュース編集委員の皆さまに深くお礼申し上げます。なお本成果はテレスコープアレイ実験に携わった共同研究者全員の研究成果になります。この場をお借りして、共同研究者の方々に深く感謝申し上げます。

本研究は、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) の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Telescope Array Collaboration, *Science* **382**, 903 (2023).
- [2] 長谷川博一, 「宇宙線の謎 – 発生から消滅までの驚異を追う」, ブルーボックス B-397, (1979).
- [3] Future Circular Collider <https://fcc.web.cern.ch>
- [4] **Special issue** : Centenary of cosmic ray discovery, *Astropart. Phys.* **53**, 1 (2014).
- [5] 永野元彦, 「空気シャワー観測による宇宙線研究の歴史」 (2014).
- [6] 棚橋五郎, 「大気の蛍光観測による宇宙線実験の始まり: コーネルと日本での仕事」, 宮古短期大学研究紀要 **8**, 1 (1998).
- [7] T. Fujii, *PoS ICRC2023*, 031 (2023).
- [8] A. Coleman *et al.*, *Astropart. Phys.* **149**, 102819 (2023).
- [9] V.F. Hess, *Phys. Z.* **13**, 1084 (1912).
- [10] W. Kolhörster, *Phys. Z.* **14**, 1153 (1913).
- [11] P. Auger, *Comptes Renduz* **206**, 1721 (1938).
- [12] B. Rossi, *Nature* **125**, 636 (1930).
- [13] B. Rossi, *Moments in the life of a scientist*, Cambridge University Press (1990).
- [14] ブルーノ・ロッシ (著), 小田稔 (翻訳), 「物理学者ブルーノ・ロッシ自伝 – X 線天文学のパイオニア」, 中公新書 (1992).
- [15] J. Linsley, *Phys. Rev. Lett.* **10**, 146 (1963).
- [16] A.A Penzias, R.W. Wilson, *Astrophys. J.* **142** 419 (1965).
- [17] K. Greisen, *Phys. Rev. Lett.* **16**, 748 (1966).
- [18] G.T. Zatsepin, V.A. Kuzmin, *JETP Lett.* **4**, 78 (1966).
- [19] A.M. Hillas, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **22**, 425 (1984).
- [20] P. Bhattacharjee, G. Sigl, *Phys. Rep.* **327**, 109 (2000).
- [21] J.D. Bird *et al.*, *Astrophys. J.* **441** 144 (1995).
- [22] M. Takeda *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **81**, 1163 (1998).
- [23] HiRes Collaboration, *Phys. Rev. Lett.* **100**, 101101 (2008).
- [24] Telescope Array Collaboration, *Astrophys. J. Lett.* **768**, 1 (2013).
- [25] Telescope Array Collaboration, *Nucl. Instr. Meth. A* **1019**, 165726 (2021).
- [26] K. Fujisue *et al.* (Telescope Array Collaboration), *PoS ICRC2023*, 308 (2023).
- [27] Telescope Array Collaboration, *Astrophys. J. Lett.* **790**, 21 (2014).
- [28] Event Horizon Telescope Collaboration, *Astrophys. J. Lett.* **875** 1 (2019).
- [29] J.C. Arteaga Velazquez *et al.*, *PoS ICRC2023*, 466 (2023).
- [30] L. Caccianiga *et al.* (Pierre Auger and Telescope Array Collaboration), *PoS ICRC2023*, 521 (2023).
- [31] Y. Tsunesada *et al.* (Pierre Auger and Telescope Array Collaboration), *PoS ICRC2023*, 406 (2023).
- [32] A. Yushkov *et al.* (Pierre Auger and Telescope Array Collaboration), *PoS ICRC2023*, 249 (2023).
- [33] S. Mayotte *et al.* (Pierre Auger and Telescope Array Collaboration), *PoS ICRC2023*, 368 (2023).
- [34] S. Sakurai *et al.* (FAST Collaboration), *PoS ICRC2023*, 302 (2023).
- [35] 藤井俊博, 「極高エネルギー宇宙線国際共同観測実験による次世代天文学の開拓と極限宇宙物理現象の解明」, 日本学術会議「未来の学術振興構想 (2023 年版)」 (2023).