

北半球最高感度で極高エネルギー宇宙線の「大角度異方性」を探索 －観測装置の4倍拡張計画によりさらなる高感度測定へ－

概要

宇宙空間に存在する放射線は宇宙線¹⁾と呼ばれ、1秒間に手のひらに約1個という頻度で地上に到来しています。これまでの観測で1年間に500平方kmあたり約1個というとても低い頻度ですが、莫大なエネルギー（10の20乗電子ボルト²⁾）を有する極高エネルギー宇宙線の存在が明らかになりました。このエネルギーは、地上最大の粒子加速器で到達できるエネルギーより7桁も大きく、宇宙のどこかに存在する爆発的なエネルギーを生み出す極限宇宙現象³⁾が発生源と考えられています。本来、宇宙線は電荷を持つために宇宙磁場で曲げられ、発生源についての情報を失い、一様等方に地球へ到来します。しかし、宇宙線はエネルギーが増大するにつれて曲がり角が小さくなり、10の19乗電子ボルト以上では、45度の角度スケールで多く到来する方向と少ない方向（=大角度⁴⁾異方性）が現れると予想されていました。

京都大学白眉センターの藤井俊博特定助教が参加するテレスコープアレイ実験の国際共同研究グループは、アメリカユタ州で稼働中の宇宙線検出器による11年間の定常観測で、北天（北半球）最高感度で極高エネルギー宇宙線の大角度異方性を探索しました。測定データの解析により、 8.8×10 の18乗電子ボルト以上のエネルギーの宇宙線が、赤道座標⁵⁾において赤経131度の方向から3.3%多く到来している結果が得られました。この測定結果は宇宙線の大角度異方性と銀河系外の宇宙線発生源の存在を示唆しますが、まだ統計量が十分ではありません。今後は年間観測事象数を4倍へ増やす拡張計画によって、さらなる高感度で極高エネルギー宇宙線の定常観測を継続していきます。

本成果は、2020年7月27日に米国の天文学専門学術誌「Astrophysical Journal Letters」にオンライン掲載されました。

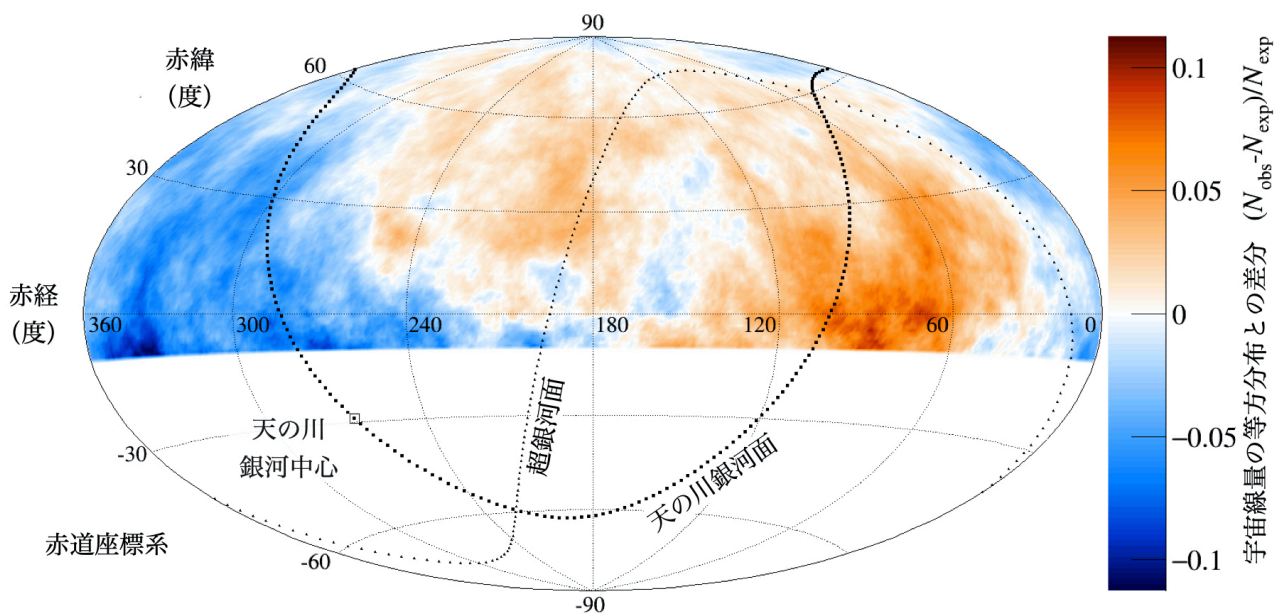


図 本研究で得られた極高エネルギー宇宙線で観る宇宙の姿

1. 背景

人類未踏のエネルギーを持つ極高エネルギー宇宙線の発生源を特定することは、現代宇宙物理学で解明すべき最重要課題のひとつとして挙げられています。極高エネルギー宇宙線の持つエネルギー（10 の 20 乗電子ボルト¹⁾）は、地上最大の粒子加速器での到達エネルギーより 7 桁も大きく、宇宙空間で最大のエネルギーを持つ粒子です。この巨視的なエネルギーを持つ宇宙線の発生源は、ガンマ線バーストや活動銀河核、強磁場星といった極限宇宙現象を起源に持つことが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でした。

宇宙線は荷電粒子であるために宇宙磁場によって曲げられてしまいますが、極高エネルギー領域では宇宙磁場で曲げられにくく、発生源についての情報を含んでいると考えられています（図 1）。宇宙線は、エネルギーが大きくなるにつれて、宇宙磁場による曲がり角は小さくなります。そこで一般的な宇宙磁場の強さを仮定すると、一様等方に地球へ到来していた宇宙線が、10 の 19 乗電子ボルト付近では、45 度という大角度スケールにおいて多く到来する方向と少ない方向（＝大角度異方性）が現れると予測されていました。



図 1 宇宙磁場による宇宙線の曲がり角の影響の概念図。低エネルギー宇宙線は宇宙磁場によって曲げられてしまい発生源についての情報を失うが、極高エネルギー宇宙線は宇宙空間をほぼ直進するためにその到来方向が発生源についての情報を持つことが期待されている。背景にある天体は活動銀河核やスターバースト銀河、強磁場星といった極高エネルギー宇宙線の発生源の候補天体を示している。

(Credit: Ryuunosuke Takeshige and Toshihiro Fujii (Kyoto University))

現在稼働中の極高エネルギー宇宙線観測装置は、北半球と南半球に 1 地点ずつ存在します。北半球では、米国ユタ州にあるテレスコープアレイ実験(http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/ta/ta_public/index.html)により 700 平方 km の範囲に到来する宇宙線を定常観測しています。一方南半球では、アルゼンチンにあるピエールオージェ観測所 (<https://www.auger.org>) により 3000 平方 km の検出面積で同じく観測を行っています。2017

年にピエールオージェ観測所は、 8×10^{18} 乗電子ボルト以上の宇宙線が、赤道座標で赤経 100 度を中心とする方向から 4.7%多く到来し、大角度異方性が現れているとする観測結果を「Science」誌から発表しました [Pierre Auger Collaboration, Science 357, 1266–1270 (2017)]。この観測ではさらに、宇宙線が多く到来する方向は天の川銀河中心から 125 度も離れており、天の川銀河より遠方の銀河系外宇宙に発生源を持つことが示唆されています。しかし、南半球にあるピエールオージェ観測所からは北半球へ対する感度が低く、宇宙線の角度異方性の存在を確認するためには、北半球における測定が必要不可欠でした。

2. 研究手法・成果

極高エネルギー宇宙線は、地球大気との衝突によって約 100 億個という大量の二次粒子を生成し、半径数 km 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現象と呼ばれ、地表に約 1 km 間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の時間差を利用して、極高エネルギー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では、米国ユタ州の砂漠地帯に面積 3 平方 m のプラスチックシンチレーターの地表粒子検出器を 1.2 km 間隔で 507 台設置し、700 平方 km の範囲に到来する極高エネルギー宇宙線の定常観測を 2008 年から継続しています（図 2）。



図 2 米国ユタ州の砂漠地帯に設置されたテレスコープアレイ実験の地表粒子検出器。検出器は 1.2 km 間隔で 507 台設置され、700 平方 km の検出面積を持つ。3 平方 m のプラスチックシンチレーターを通過する宇宙線を検出し、太陽光パネルによる電力供給、長距離無線によるデータ通信によって宇宙線を観測している。

京都大学白眉センターの藤井俊博特定助教が参加するテレスコープアレイ実験の国際共同研究グループは、この 11 年にわたる測定データを解析し、極高エネルギー宇宙線の角度異方性を北天最高感度で探索しました。その結果、先行研究であるピエールオージェ観測所から報告されたエネルギー領域に相当する、 8.8×10^{18} 乗電子ボルト以上の宇宙線が 6,032 事象検出され、赤道座標において赤経 131 ± 33 度の方向から $3.3 \pm 1.9\%$ 多く到来しているという、大角度異方性に関する結果が得られました。この測定結果は、ピエールオージェ

エ観測所が報告した大角度異方性と一致する結果となっています。また、宇宙線が多く到来する方向は天の川銀河中心から離れた方向に位置し、ピエールオージェ観測所での報告と同様に、宇宙線の発生源が銀河系外に存在することを示唆する結果となっています。

興味深いことに、望遠鏡アレイ実験とピエールオージェ観測所の両方で観測可能な宇宙の方向⁶⁾からの宇宙線は大角度異方性を示す一方、望遠鏡アレイ実験でのみ観測できる方向からの宇宙線は、ピエールオージェ観測所による先行研究とは異なる宇宙線量の増加成分が見えつつあります（図3右上図）。この結果は、宇宙磁場の構造やもっとも近い宇宙線の発生源が関連している可能性が考えられ、より高統計での精密測定が必要になります。

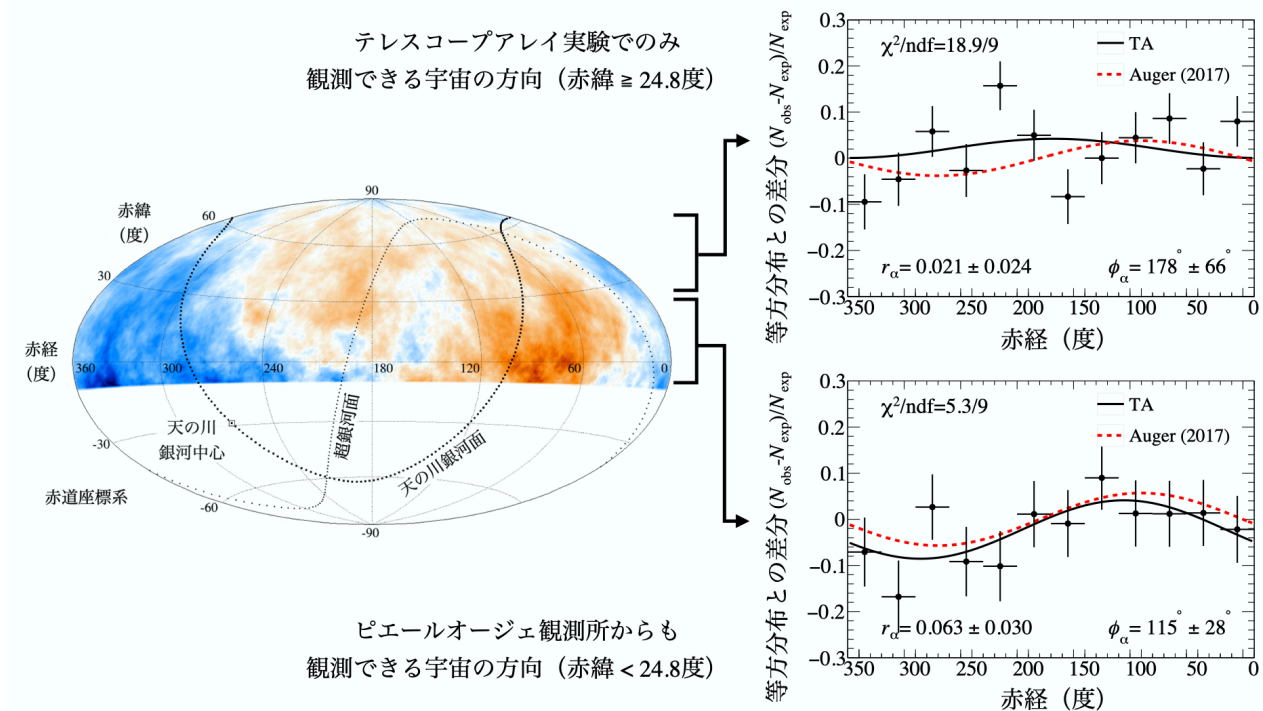


図3 望遠鏡アレイ実験で観測された 8.8×10^{18} 乗電子ボルト以上の極高エネルギー宇宙線の大角度異方性の測定結果。左図は宇宙線量の等方分布との差分を赤道座標で示している。右側の図は、望遠鏡アレイ実験でのみ観測できる宇宙の方向（右上図）、ピエールオージェ観測所からも観測できる宇宙の方向（右下図）から到来した宇宙線量を赤経方向に射影した図となっている。黒点は望遠鏡アレイ実験（TA）の測定結果および黒曲線はそのフィット結果を示し、赤点線は先行研究であるピエールオージェ観測所から報告された大角度異方性の結果を表す。

3. 波及効果、今後の予定

今回得られた測定結果は、大角度異方性についての決定的な証拠を示すために必要な統計量はまだ達成できていません。そのため、今後も望遠鏡アレイ実験による宇宙線の定常観測を継続する必要があります。さらには、望遠鏡アレイ実験では、宇宙線の検出可能面積を4倍に増やすための拡張計画（TA×4計画）が進んでいます（図4）。これまでの4倍の年間宇宙線観測事象数によって大角度異方性の高感度測定を実現し、宇宙線の発生源についての理解が進むことが期待されます。



図 4 テレスコープ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（上写真）。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（下写真）。

(Credit: ICRR PR Office, University of Tokyo)

4. 研究プロジェクトについて

●テレスコープアレイ実験 (http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/ta/ta_public/index.html)

●予算の出資者

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

京都大学 次世代研究者育成支援事業「白眉プロジェクト」

●国内関連研究機関

東京大学宇宙線研究所、大阪市立大学、大阪電気通信大学、神奈川大学、高エネルギー加速器研究機構、高知大学、埼玉大学、芝浦工業大学、情報通信研究機構、信州大学、千葉大学、東京工業大学、東京大学国際高等研究所、東京大学地震研究所、東京都市大学、東京理科大学、広島市立大学、山梨大学、理化学研究所、立命館大学、量子科学技術研究開発機構

●海外関連研究機関

ロヨラ大学、ラトガーズ大学、ユタ大学、ロシア科学アカデミー原子核研究所、モスクワ大学、ブリュッセル自由大学、梨花女子大学、漢陽大学、成均館大学、蔚山科学技術大学、チェコ科学アカデミー

<用語解説>

1) **宇宙線**：宇宙空間に存在する放射線。大部分が陽子である。

2) **電子ボルト**：1電子ボルトは、1個の電子が1ボルトの電位差で得ることができるエネルギー。

3) **極限宇宙現象**：宇宙最大の爆発現象であると考えられているガンマ線バースト、大質量ブラックホールを中心に持ちそこからジェットが放出されている活動銀河核、宇宙で最も強い磁場を持つ強磁場星などといった宇宙空間で最もエネルギーの高い物理現象を指す。

4) **大角度**：極高エネルギー宇宙線分野においては、小角度は5度以内、中角度は5度から40度以内、大角度は40度以上の角度スケールを表し、ここでは45度スケールでの宇宙線量の増減について大角度と定義する。

5) **赤道座標**：宇宙で恒星の方向を表すとき使用する赤道を基準にした天球座標系。地理座標系での経度・緯度に対応する赤経・赤緯によってここでは恒星の方向ではなく宇宙線が到来方向を表している。主に赤緯が0度以上の方向は北半球での観測で感度が高く、赤緯が0度以下の方向は南半球から感度が高い。

6) **観測可能な宇宙の方向**：テレスコープアレイ実験は北緯39.3度にあり、天頂から角度で55度以内に到来する宇宙線を検出するため、赤緯-15度から+90度の方向から到来する宇宙線を観測できる。一方、ピエールオージェ観測所は南緯35.2度にあり、天頂からの角度60度以内の宇宙線を検出するため、赤緯-90度から+25度の方向からの宇宙線を観測できる。結果として、赤緯25度以下から到来する宇宙線は両方の実験で観測可能な宇宙の方向となる。

<研究者のコメント>

「宇宙最大のエネルギーの宇宙線はどこで生まれたのか？」この宇宙の謎は、現在の宇宙物理学および素粒子物理学において解明すべき課題のひとつです。宇宙線の発見から 100 年以上が経過し、ようやく天の川銀河よりも遠方に発生源があるということが明らかになってきました。しかし、遠方のどこで生成されたかについてはまだ明らかになっておらず、拡張計画や次世代実験によるさらなる高感度測定によって発生源を突き止めたいと考えています。

<論文タイトルと著者>

タイトル：Search for Large-scale Anisotropy on Arrival Directions of Ultra-high-energy Cosmic Rays Observed with the Telescope Array Experiment (テレスコープアレイ実験で観測された極高エネルギー宇宙線による到来方向の大角度異方性の探索)

著 者：R.U. Abbasi et al. (Telescope Array Collaboration)

掲 載 誌：The Astrophysical Journal Letters, DOI : <https://doi.org/10.3847/2041-8213/aba0bc>
プレプリント (arXiv) <https://arxiv.org/abs/2007.00023>