

令和 7 年度 (2025) 共同利用研究・研究成果報告書

研究課題名	和文：ポリビア・チャカルタヤ山宇宙線観測所における高エネルギー宇宙線異方性の研究 英文：Study of high-energy cosmic-ray anisotropy at the Chacaltaya Cosmic Ray Observatory
研究代表者	佐古崇志(長野県工科短期大学校)
参加研究者	埴隆志(東京大学)、川田和正(東京大学)、大西宗博(東京大学)、瀧田正人(東京大学)、宗像一起(信州大学)
研究成果概要	チャカルタヤ山中腹(標高 4,740m)に設置したプラスチックシンチレーション検出器 97 台からなる有効面積およそ 18,000m² の ALPAQUITA 空気シャワーアレイを用いて、TeV 以上のエネルギーにおいて宇宙線のデータを取得している。空気シャワーアレイの超高エネルギー宇宙ガンマ線に対する感度を飛躍的に向上させる目的で、空気シャワーアレイの地下に水チェレンコフ型ミューオン検出器を建設中であり、今年度中の観測開始を目指している。 本研究課題では、電磁流体力学(MHD)シミュレーションにより導出された太陽圏磁場中で宇宙線粒子の軌道計算を行い、その結果を宇宙線観測データに適用することで、太陽圏の外部境界における宇宙線異方性の様相と太陽圏磁場が異方性に与える変調の効果を調べている。先行研究[1]で使われた MHD シミュレーションに基づく太陽圏磁場モデルを Pogoderov 氏から提供していただき、この磁場モデルを使って研究を行っている。この磁場モデルでは、特に太陽圏尾部方向には 10 kAU まで磁場データがあり、現存する太陽圏磁場モデルの中では最も広範囲にわたってデータを再現しているモデルとなっている。 本年度は、ALPAQUITA 空気シャワーアレイのデータを解析し、南半球において宇宙線異方性観測を行った。視野は赤緯-61.5°-8.5°で、南半球中緯度に良い感度を持っている。2023 年 4 月から 2024 年 4 月まで(実稼働時間 291 日)の約 25 億イベントのデータを解析した。詳細な計算機シミュレーションにより、空気シャワーイベントの粒子数Σpと天頂角θの関数として一次宇宙線のエネルギーを推定し、5つのエネルギービン(10, 29, 63, 140, 370 TeV)を設定した。また、天球をピクセル切りする際には HEALPix[2]を採用し、各ピクセルの立体角が等しくなるように解析手法を改良している。 データ解析の結果、大規模な宇宙線強度の超過/欠損領域として知られる Tail-in/Loss-cone 構造を 10TeV 領域で 5 シグマ以上で検出した。また、異方性のエネルギー依存性について、100TeV を超えると位相が反転する様子が確認された。これは過去に他の実験でも見られてきた傾向である[3]。100TeV を超えると 1 次元分布の位相は銀河中心方

向を指すが、2 次元の異方性マップでは銀河中心方向に強度増大は見られない結果となった。

本年度の研究で、ALPAQUITA を用いて初めて南半球中緯度の宇宙線異方性を観測し、南半球の大統計実験で最低エネルギー(10TeV)の異方性観測を達成できた。地下ミュオン観測装置の運用が本格的に始まれば、宇宙線/ガンマ線シャワーの識別が可能となり、異方性へのガンマ線寄与の定量評価が可能となる。また、今後空気シャワーアレイを ALPACA 実験に拡張することで有効面積が約 4 倍になり、統計を大幅に増加させることができる見通しとなっている。

来年度は、北半球のチベット空気シャワーアレイで得られたデータと ALPAQUITA のデータを合わせて解析することで、全天にわたる異方性観測を行う予定である。さらに、先に述べた MHD シミュレーションにより再現した太陽圏磁場中での宇宙線粒子の軌道計算により、Liouville の定理に基づいて地球での宇宙線強度分布を太陽圏外部境界にマッピングする手法を用いて、太陽圏の外部境界における宇宙線異方性の様相と太陽圏磁場が異方性に与える変調の効果を調べる。特に、10TeV 領域での Tail-in/Loss-cone 構造の起源や、太陽圏周辺での 100TeV 以上の宇宙線の流れを明らかにする。また、現在我々が使用している Pogorelov 氏の太陽圏 MHD 磁場モデル以外にも、鷲見[4]や Opher[5]による磁場モデルがある。これらの磁場モデルを用いた場合に太陽圏外部境界での宇宙線異方性がどのようなになるかを導出し、比較を行う。

[1] Zhang et al., ApJ, 889, 97 (2020)

[2] Górski et al., ApJ, 622, 759 (2005)

[3] Amenomori et al., ApJ, 836, 153 (2017)

[4] Washimi et al., ApJL, 846, L9 (2017)

[5] Opher et al., Nat. Astron., 4, 675 (2020)

[本研究課題に関する国内外の口頭発表]

・ Sidereal cosmic-ray anisotropy at TeV energies modeled with data from the Tibet ASgamma experiment, 2025 年 4 月, AIAC 2025, Santiago de Compostela, Spain

・ Sidereal cosmic-ray anisotropy at TeV energies modeled with data from the Tibet ASgamma experiment, 2025 年 7 月, ASTRONUM2025, Madison, Wisconsin, USA

・ ALPACA 実験 56: ALPAQUITA 空気シャワーアレイによる宇宙線異方性の観測, 2025 年 9 月, 日本物理学会, 広島大学

・ ALPACA 実験 62: ALPAQUITA 空気シャワーアレイによる宇宙線異方性の観測, 2026 年 3 月, 日本物理学会, オンライン

整理番号 2025d-F-15