

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：TALE ハイブリッド実験による 10^{17} 乗 eV 領域宇宙線の研究
 英文：Study of very high energy cosmic rays around 10^{17} eV
 with the TALE hybrid experiment

研究代表者 (東京大学・宇宙線研究所) 荻尾彰一
 参加研究者 (東京大学・宇宙線研究所) 竹田成宏、藤田慧太郎、大島仁
 (東京大学・大学院理学系研究科) 小山千里
 (大阪公立大学・大学院理学研究科) 常定芳基、藤井俊博、古前孝朗、
 敷田淳、遠藤康平
 (大阪電気通信大学・工学部) 多米田裕一郎
 (信州大学・大学院総合理工学研究科) 富田孝幸

研究成果概要

10^{18} eV 以下の超高エネルギー宇宙線の精密観測から銀河系内起源宇宙線・銀河系外起源宇宙線の源・伝播機構の統一的解釈を目指す TALE Low energy Extension (TALE) 実験は 2018 年 11 月から定常ハイブリッド観測を続けている。ハイブリッド観測のエネルギーしきい値を knee 領域まで下げる TALE infill 地表検出器 (SD) アレイが追加され、2023 年 10 月に稼働開始した。これによって knee 領域から 10^{18} eV までをカバーする世界初、世界で唯一のハイブリッド (SD アレイ+大気蛍光望遠鏡 (FD)) 検出器が完成し、安定運用によるデータ蓄積とデータ解析を継続している。

2025 年度の成果は以下のとおりである。

(1) 安定運用・観測継続

日本からのリモート監視とユタ大学の現地雇用職員による現地作業を連携させて観測装置の保守を行い、定常観測を継続した。

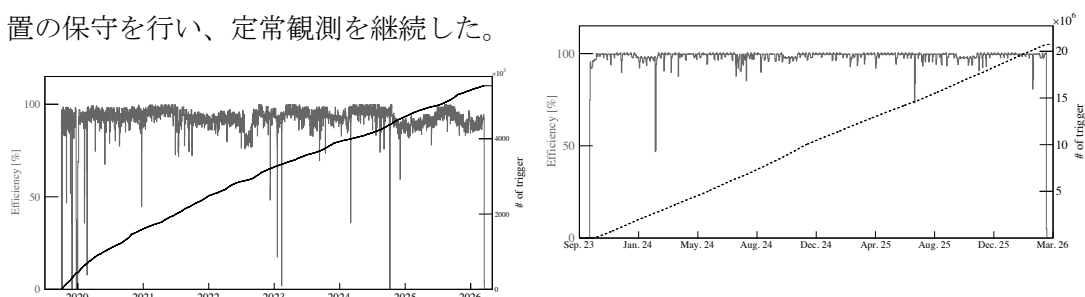


図 1：(左) TALE SD アレイの稼働状況。これまでに取得されたデータ数は 2025 年度末で 3×10^6 に達している。(右) TALE-infill SD アレイの稼働状況。これまでに取得されたデータ数は 2025 年度末で 2×10^7 を超えており、TALE SD のおよそ 10 倍に達している (観測期間は TALE が 6.4 年、TALE-infill が 2.5 年)。

(2) データ解析

TALE 実験 SD+FD ハイブリッドによる $10^{16.5}$ から $10^{18.5}$ eV までのエネルギースペクトル、平均 Xmax、Xmax 分布幅、4 成分 (H, He, N, Fe) 原子核組成比の測定結果を学術論文として公表した [1]。

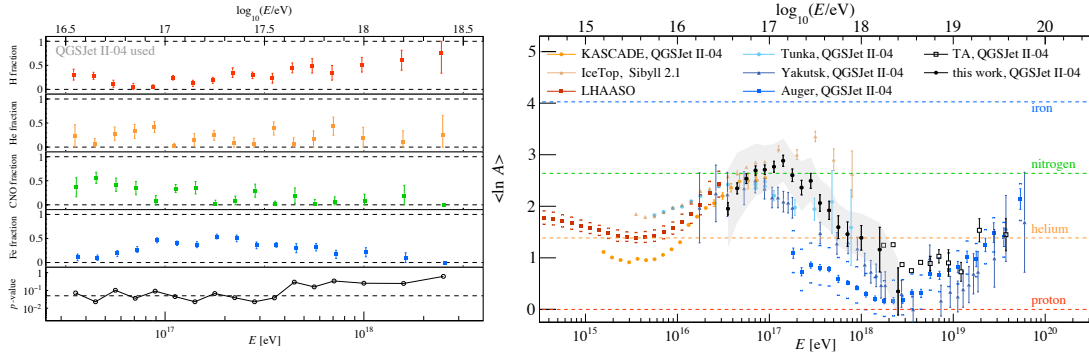


図 2 : (左) 観測された平均 Xmax と Xmax 分布幅を最もよく再現する 4 成分 (H, He, N, Fe) 原子核組成比。(右) エネルギーに対する対数質量数の平均値。黒丸は本研究による結果を示し、系統不確かさは網掛けの帯で示されている。比較のため、KASCADE、IceTop、LHAASO、Tunka、Yakutsk、Auger、および 8.5 年分の TA BRM/LR ハイブリッドの結果も示されている。各測定で用いられた相互作用モデルは、図中の実験名の横に示されている。LHAASO のデータについては、相互作用モデルへの依存性を含め、系統不確かさが図中で角括弧内に表示されている [1]。

およそ 10^{17} eV まで、組成は軽い原子核から重い原子核へと徐々に変化し、鉄が支配的となり、およそ 50% に達していることは、**knee** が銀河系内起源陽子の加速限界に対応し、重い原子核は電荷スケールでより高いエネルギーでそれぞれの限界に達し、**2nd knee** 付近で鉄で終わるという解釈と一致している。このエネルギーを超えると、組成は再び陽子優勢へと移行し、銀河系外成分からの著しい寄与が始まっていることを示している。この組成の変化は、スペクトルの傾きの変化が実験的に観測されるエネルギー付近である約 $10^{17.1}$ eV における **elongation rate** の折れ曲がりとなっている。

本研究課題に関連する最近の研究発表

- [1] R. U. Abbasi, et al., “Cosmic Ray Mass Composition Measurement in the energy range from $10^{16.5}$ eV to $10^{18.5}$ eV observed with the TALE hybrid detector”, Phys. Rev. D 113, 062003
- [2] 古前老朗, “TA 実験 448 : TALE SD アレイによるエネルギースペクトル解析 6”, 日本物理学会 2026 年春季大会, Oral, online, 23, March 2026
- [3] I. Komae, “Measurement of the energy spectrum of cosmic rays with 4 years of data recorded by the TALE-SD array”, PoS(ICRC2025)305
- [4] H. Oshima, et al., “Measurement of the cosmic-ray energy spectrum with the TALE detector in hybrid mode”, PoS(ICRC2025)350