

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：Knee 領域一次宇宙線組成の研究	
英文：Study of the composition of cosmic-rays at the Knee	
研究代表者 横浜国立大学 教授・片寄祐作	
参加研究者	
横浜国立大学	
名誉教授・柴田槇雄	
大学院前期博士課程 2 年・野口遊瑚	大学院前期博士課程 2 年・山岸元輝
大学院前期博士課程 1 年・竹山祐希	大学院前期博士課程 1 年・小林証斗
都立産業技術高専 教授・齋藤敏治	
中国科学院高能物理研究所	
教授・黄晶	助理研究員・張穎
中国科学院国家天文台 教授・陳鼎	助理研究員・金洪波
助理研究員・翟留名	

研究成果概要

研究背景と目的： 宇宙線加速メカニズムや加速源分布は原子核組成強度に反映され、これらの精密測定は宇宙線起源の謎を解く鍵の一つと考えられる。本研究では、Knee領域前後の陽子から鉄までの原子核スペクトル変化を明らかにすることを目指している。

組成研究では、飛翔体実験により数百TeVまでの観測結果が得られており、地上実験で得られる高エネルギー領域の観測結果と合わせて銀河内起源宇宙線スペクトルが広範囲なエネルギー領域で明らかにされることが期待されている。 数百TeV以上領域の地上での観測実験では従来、電子ーミュ粒子相関や空気シャワーが最大発達する深さの測定によるものが多く行われてきたが、これまでに報告されている結果は観測手段や解析方法の違いにより互いに大きく異なり一致した結論が得られていない。その一因は海面高度付近で行われた多くの観測実験において、一次エネルギー決定が一次線組成とシミュレーションの相互作用モデルに強く依存することであると考えられる。本研究は高山での空気シャワー中心部の精密測定が一次線組成と相互作用モデルに強く依存しないで一次線核種を弁別可能であることを用いた方法によりKnee領域宇宙線の化学組成を調べる。

研究方法： 本研究では、大規模空気シャワー観測装置（Tibet-III）、シャワーコア検出器（YAC）、大面積ミュ粒子検出器（MD）を連動させた測定実験を行う。シャワーコア粒子に対する測定エネルギー閾値を下げ、高い統計精度で空気シャワー中心の構造を測定することによって、PeV領域の鉄成分に対しても感度を有するようになる。更に大面積ミュ粒子検出器を用いてより一次粒子弁別精度を向上させる。これにより、①数10TeV領域からの陽子スペクトルの精密観測を行う。 ②直接観測実験との比較からシミュレーションにおける相互作用モデルを検証し、③Knee領域の鉄グループのスペクトルの精密測定を行う。

これまでに、チベット高原に設置されているTibet-III観測装置の中心部にコア検出器（YAC：Yangbajing Air shower Core array）を設置して 10^{15} eV前後の宇宙

線化学組成の継続測定を実施している。100 TeV前後の観測のため、16台のYACを1.5m間隔の格子状に配置したアレイYAC-I (36m²) とTibet-IIIアレイとを連動した観測を実施した。更に、100TeV以上の陽子・ヘリウムスペクトル強度の精密観測を目的としてこの装置を124台(約500m²)に拡張したYAC-II アレイを建設した。また、Tibet-IIIアレイの地下にミュオン粒子検出器 (MD) が設置され、Tibet-III、MDとYAC-IIの連動実験を現在まで継続している。

2024年度までの成果

- ・ YAC-IとTibet-IIIアレイ連動実験により観測される陽子とヘリウムを合わせた軽い宇宙線原子核についての検出性能とYAC-II、Tibet-III, MDによる連動実験の性能評価の結果は、2015年度までに査読論文等(2報)で報告した。またYAC-IIによる観測データの解析結果を宇宙線国際会議等で報告した (4件)。
- ・ MDで測定される空気シャワー中のミュオン粒子数を用いることで、数十TeVから数百TeVのエネルギー領域における陽子成分を選別することが可能である。モンテカルロシミュレーションにより、Tibet-IIIとMDによる連動観測における陽子スペクトル測定の性能評価を行った。これらの成果は、物理学会および宇宙線国際会議で報告し、査読付き論文としてまとめた[2]。

2025年度の成果

- ・ Tibet-III、YAC-II、MDを使い、ミュオン粒子、電子横広がり調べ、国際会議で発表した[4]。
- ・ Tibet-IIIで測定される空気シャワー中の荷電粒子数と、MDで測定されるミュオン粒子数の分布データを用いて、ベイズ統計に基づく粒子スペクトルのアンフォールディング手法を開発した。本手法により、数百TeVから数PeVに至るエネルギー領域において、陽子から鉄までの一次粒子エネルギーを推定することが可能となった。これらの成果は、国際会議および物理学会で報告し[3]、査読付き論文として取りまとめた。[1]。

発表資料

査読論文

- [1]G Imaizumi et al., "A Simulation Study on the Cosmic-Ray Energy Spectra of Elemental Mass Groups using the Tibet Air-Shower and Muon Detector Arrays through the Bayesian Unfolding Method", PTEP, vol. 2025, Issue 10, 103F02 (2025) DOI: <https://doi.org/10.1093/ptep/ptaf133>
- [2] D Kurashige et al., "Sensitivity of the large muon detector with the Tibet air shower array to measure the primary proton spectrum between 40 and 630 TeV", PTEP, Vol. 2022, Issue 9, (2022), <https://doi.org/10.1093/ptep/ptac119>

国際会議

- [3] G. Imaizumi et al., "MC study of Bayesian unfolding using the Tibet AS gamma experiment", The 39th ICRC(2025) DOI: <https://doi.org/10.22323/1.501.0461>
- [4]J. Huang et al., "Lateral density distributions of muons and electrons in EAS from the Tibet hybrid experiment (Tibet-III + YAC-II + MD)" The 39th ICRC(2025) DOI:<https://doi.org/10.22323/1.501.0291>

配分予算 10万円

研究打ち合わせのための交通費として主に使用した。

整理番号2025d-F-10