

平成25年度共同利用研究・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・准教授・片寄 祐作

参加研究者

横浜国立大学・名誉教授・柴田 楨雄

横浜国立大学・大学院前期博士課程1年・山内紘一

横浜国立大学・大学院前期博士課程1年・荻田竜平

都立産業技術高専・教授・齋藤 敏治

湘南工科大学 杉本 久彦

研究成果概要

[1] **研究内容**：宇宙線加速メカニズムや加速源分布は観測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と考えられる。本研究では、宇宙線エネルギースペクトルに鋭い折れ曲がりが見られる 10^{15} - 10^{16} eV領域(Knee領域)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。

この測定のため、チベット高原に設置されている空気シャワーアレイ (Tibet-III) の中心部にシャワー中心の高エネルギー成分を観測するためのバースト検出器を増設し、高エネルギー2次成分の横広がりの変異を用いた一次宇宙線核種の弁別方法を開発してきた。2009年-2010年度には、16台の空気シャワーコア検出器; YAC (Yangbajing Airshower Core) を1.5m間隔の格子状に配置したYAC-Iアレイ (36m²) とチベット空気シャワーアレイとを連動した観測を実施した。直接観測により一次線組成が知られているエネルギー100 TeV前後の事象が観測対象となり、シミュレーションにより実験結果を最も良く再現する相互作用モデルを特定することができる。2011年度には100TeV以上の陽子・ヘリウムスペクトルの精密観測を目的としてこの装置を100台 (225m²) に拡張した(YAC-II、図1)。宇宙線研究所が中心となって行っているミュー粒子検出器 (MD) が2013年秋に完成し、2014年からAS、MDとYACの連動観測を開始する予定で、2年間の連続観測を行う。最近ATIC、CREAMなど飛翔体による直接観測により、高エネルギー側でヘリウムのスペクトルが陽子に対して有意にハードになるという結果が報告されており、我々の観測からは>100TeV領域でその検証を行う予定である。更に観測エネルギー領域を上げるためYAC検出器を追加すると共にアレイの間隔を3.75mに広げて観測面積を約5000m²に増大させるYAC-III実験を計画している。YAC-IIIはKnee領域で鉄などの重い原子核成分を親とする空気シャワーのコアにも感度を有し、3年間の観測でこの領域の鉄原子核組成を明らかにできる。



図1：Tibet III アレイの中心に設置した YAC-II (100 台のバースト検出器から成る)。

[2]2013年度の成果

① 1996 年から行ったエマルジョンチェンバー、バースト検出器による連動実験

(PhaseI, PhaseII) で得られた陽子、ヘリウムと全粒子スペクトルから宇宙線原子核平均質量数の下限値、上限値を調べた。 10^{15} eV から 10^{16} eV での平均値はカーボン程度であり、エネルギーとともにわずかな増加傾向が見られた (図2、[3]—①)。

② YAC—I 実験からは dead time を除く正味 116 日間の観測データが得られ、データ解析を進めた。観測対象とする一次線のエネルギー領域は 100TeV 前後であり、この領域の化学組成は直接観測により求められている。特に YAC 検出器による検出効率が高い陽子・ヘリウム成分の絶対強度は最近の直接観測データがかなり充実しており、YAC-I による結果の信頼度を検証できる。観測結果を 4 つの相互作用モデル QGSJET1, QGSJET2, SIBYLL,

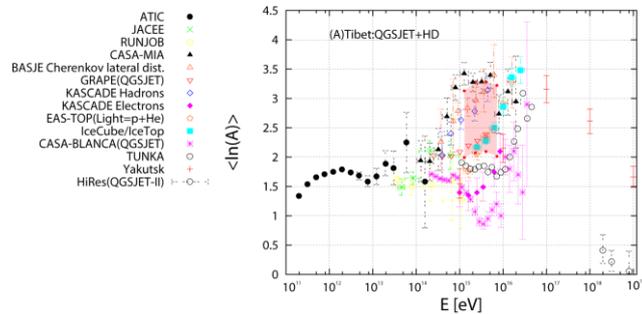


図2: 宇宙線原子核平均質量数 $\ln\langle A \rangle$ のエネルギー依存。 QGSJET と HD 組成モデルでの解析結果である ([3]—①)。

EPOS を用いたシミュレーションに基づいて解析して得られた P+He スペクトルを調べ、各モデルの比較を行った。これらの結果は宇宙線国際会議で報告した ([3]—②③)。

③ 各 YAC-II 検出器のエネルギー較正実験を 2013 年秋に実施し、2014 年からの Tibet-III、MD との連動実験への準備を整えた。同時にモンテカルロシミュレーションから YAC-II 連動実験の性能評価を行った。QGSJET01c と SIBYLL2.1 を使った空気シャワーシミュレーションに加え MD 検出器を含む全ての検出器性能を Geant を用いて詳細に調査した。また粒子弁別手法として ANN とランダムフォレスト法を評価し、最終的にこれらに起因する解析の系統誤差 (仮定する一次宇宙線組成モデル、核相互作用モデル、2つの粒子弁別法) が約 28.9%であることが分かった ([3]—④⑤⑥⑦)。

④ 将来計画である YAC-III 実験のためのデータ収集装置開発を行った。YAC では空気シャワー中心の高密度粒子群を測定するため 1 粒子から 10^6 粒子までの測定が行われる。従って PMT からの信号測定にも測定レンジの広いチャージ積分型 ADC が必要となる。これまでに開発したアナログ ASIC を用いた VME 試作ボードを開発し、性能評価を実施した。

[3] 発表資料

The 33rd International Cosmic Ray Conference (Rio de Janeiro, Brazil.)

- ①) M. Amenomori et al. “Average mass of primary cosmic rays in the knee energy region inferred from Tibet experiment”
- ②) M. Amenomori et al. “Primary proton and helium spectra at energy range from 50 TeV to 10^{15} eV observed with (YAC-I + Tibet-III) hybrid experiment”,
- ③) M. Amenomori et al. “Test of the hadronic interaction model EPOS-LHC and QGSJETII-04 with Tibet EAS core data”
- ④) M. Amenomori et al. “Monte Carlo study to measure heavy-component spectra of the primary cosmic-rays at the knee by a new hybrid experiment (YAC-II+Tibet-III+MD)”
- ⑤) J. S. LIU1 et al. “Study on the primary mass sensitivity of muon multiplicity measured with (YAC-II +Tibet-III + MD) experiment”,
- ⑥) L. M. ZHAI1 et al “A Monte Carlo study to measure heavy-component spectra of the primary cosmic-rays at the knee by a new hybrid experiment (YAC-II+Tibet-III+MD)”
- ⑦) M. Amenomori et al. “Hadronic interaction and EAS muon investigated with the (YAC-II+Tibet-III+MD) hybrid experiment”

最近の発表論文

- ⑧) M. Amenomori et al. “Cosmic-ray energy spectrum around the knee observed with the Tibet air-shower experiment”, *Astrophys, Space Sci, Trans.*, **7**, pp 15-20, (2011)
- ⑨) M. Amenomori et al. “Cosmic-ray energy spectrum around the knee obtained by the Tibet experiment and future prospects”, *Advances in Space Research* **47**, pp 629-639, (2011)