

平成 26 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 大学院前期博士課程 2 年・山内絃一

大学院前期博士課程 1 年・風間光喜

都立産業技術高専 教授・齋藤 敏治

湘南工科大学 杉本 久彦

中国科学院高能物理研究所

教授・黄晶(huang jing) 博士課程 3 年・翟留名(zhai liuming)

博士課程 2 年・刘金胜(liu jinsheng) 助理研究員・张颖(zhang ying)

博士課程 1 年・陈旭(chen xu) 博士課程 2 年 胡孝斌(hu xiaobin)

博士課程 1 年・林钰晖(lin yuhui)

中国科学院国家天文台 教授・陈鼎 (chen ding) 研究員・金洪波(jin hongbo)

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される原子核組成の強度スペクトルに反映され、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、“Knee領域”と呼ばれるエネルギーが 10^{14} eVから 10^{16} eV付近までの陽子から鉄に至る原子核強度とその変化から、銀河系宇宙線を研究している。このため高山において空気シャワーを測定し、更にシャワー中心の高エネルギー粒子密度横広がりから一次核種弁別を行う独自の方法により化学組成を調べる。この方法では、宇宙線間接測定においては系統誤差の主要因となる一次宇宙線組成の仮定による差異と空気シャワー相互作用モデル依存を最小限に押さえた核種弁別が可能である。

これまで我々は中国と共同で標高 4300m に位置するチベットの羊八井高原に設置した空気シャワー観測装置 (Tibet-III)、エマルジョンチェンバーおよびその下に設置したバースト検出器から成る複合システムにより、PeV 領域一次陽子とヘリウムスペクトルを求めた。その結果、これらの軽原子核成分の全粒子に対する割合が 100TeV 以上で徐々に減少することが分かり、Knee 領域では重粒子成分が支配的であることが示唆された。また、全粒子スペクトルの折れ曲がりの鋭さを説明するためには、超新星残骸でのフェルミ加速から予測される各原子核スペクトルの単純な重ね合わせでは説明できず、Knee 付近には特別なスペクトルを有する成分が寄与していると考えることが可能であることも示唆され、新たな観測実験からその正体を明らかにすることを目指している。

このため、空気シャワー中心粒子を測定するための新しいコア検出器 (YAC; Yangbajing Air shower Core) を開発し、モンテカルロ計算からシャワー二次粒子の横広がり分布の差異を用いた核種弁別方法を開発してきた。2009 年-2010 年度には試験観測のため、Tibet-III アレイの中心付近に 16 台の YAC 検出器を 1.5m 間隔の格子状に配置した YAC-I アレイ (36m²) を設置し連動実験を実施した。直接観測により高精度な組成が得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、シミュレーション計算と合わせて相互作用モデルを調べることができる。更に 100TeV 以上の陽子・ヘリウムスペクトル観測を目的として、125 台 (225m²) に拡張した YAC-II アレイ (図 1) を建設し、2014 年から Tibet-III アレイ、ミュオン粒子検出器 (MD) との連続観測を行っている。この観測から陽子とヘリウムスペクトル Knee 形状の精密な結果が明らかになると期待される。

[2]2014年度の成果

(1) YAC-I 検出器による実験については、陽子とヘリウムを合わせた軽い宇宙線原子核の検出感度等をモンテカルロシミュレーションによりを詳しく調べた。3種類の相互作用モデル (SIBYLL2.1、QGSJETII-04、EPOS-LHC) と、宇宙線組成モデルとして“He-rich”、“He-poor”と“Gaisser-fit”モデルの計5つの組み合わせについて検出器有効面積、観測される空気シャワーコア粒子数サイズ差、原子核選別能力等の違いを調べた。その結果、各モデルによる依存は小さく、92%以上の純度でかつ70%以上の検出器効率で陽子+ヘリウムスペクトルを出せることを明らかにした。この結果は査読論文として発表した(3-①)。



図1 Tibet III アレイの中心に設置した YAC-II アレイ (125 台の検出器から成る)。

(2) YAC-II 検出器実験では検出器を増設することによって、エネルギー領域 50TeV から 10000 TeV まで調べることができ、2014 年から現在まで順調に観測を続けている。今年度は、シミュレーション計算から YAC-II、Tibet-III,MD 連動実験の性能評価を行い、期待される陽子、ヘリウムスペクトル精度等を調査した。核相互作用モデルとして QGSJET01c と SIBYLL2.1、宇宙線組成モデルとして“Helium poor”と“Helium rich”の各組合せについて調べた。YAC 検出器応答についても Geant4 コードを使い実際の検出器を再現したモデルを詳細に調べた。また、全宇宙線中からの陽子、ヘリウム選別ため ANN 法とランダムフォレスト (RF) 法の2種類のアルゴリズムを試験した。その結果、解析に起因する系統誤差は約 28.9%以下になることが分かり、どのモデルを用いても観測値から陽子、ヘリウムスペクトルが明らかになることが分かった。これらの結果は査読論文として報告した(3-②)。

(3) 将来、検出器を 400 台まで増設し、鉄などの重い原子核成分の観測を行う YAC-III 実験を計画している。このための新しいデータ収集システム開発を行った。空気シャワー中心の高密度粒子群を測定するため、YAC 検出器 1 台について 1 粒子から 10^6 粒子までの測定が必要となる。従って PMT からの信号測定にもレンジの広いチャージ積分型 ADC が求められる。本年度は、これまでに開発したアナログ ASIC を用いて 4 チャンネルからなる VME 試作ボードを開発し、性能評価を実施した。測定レンジは 1 pC 以下から 1000 pC 以上までであり、YAC 検出器の 2 つの PMT によって 1 粒子から 10^6 粒子まで測定可能であることを実証した。また信号のデジタル化には市販の安価な FPGA を使用した TDC 利用する。この評価試験も現在行っている。これらの結果は日本物理学会で報告した(3-③)

[3] 発表資料

査読論文

① Zhai et al., “Sensitivity of YAC to measure the light-component spectrum of primary cosmic rays at the 'knee' energies”, Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, Volume 42 Number 4

② J. Huang et al., “Performance of the Tibet hybrid experiment (YAC-II + Tibet-III + MD) to measure the energy spectra of the light primary cosmic rays at energies 50–10,000 TeV”, Astroparticle Physics, vol.66 (2015) pp. 18-30

学会発表

③ 山内紘一 他、「空気シャワーコアアレイ (YAC) に宇宙線化学組成測定」, 23pDD-10, 2015 年 3 月 23 日、早稲田大学

整理番号 F23