

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 30 年 6 月 28 日現在

機関番号：24402

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2014～2017

課題番号：26707011

研究課題名(和文) 銀河系内-系外宇宙線のエネルギー境界の確定と宇宙線起源論

研究課題名(英文) Exploring transition of cosmic rays of galactic-extragalactic origins with the NICHE experiment

研究代表者

常定 芳基 (TSUNESADA, YOSHIKI)

大阪市立大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：50401526

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,800,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙線の起源が銀河系内であるか銀河系外であるか、そのエネルギー境界はどこかという問題を解決するために、エネルギー10の16乗から18乗の宇宙線のエネルギースペクトルと原子核組成を測定するための「空気チェレンコフ光」検出器を開発し、米国ユタ州の「テレスコープアレイ実験サイト」に設置した。200MHzの高速波形収集装置を用いた検出器を無線ネットワークで接続し、完全自動制御され無人で観測可能なシステムを構築した。メーカーに依頼したエレクトロニクスの開発遅れのために研究の進展には約1年の遅れが生じたが、検出器と観測システムはきわめて安定して稼働しており、現在観測データ解析の解析が進められている。

研究成果の概要(英文)：Fifteen air Cherenkov detectors have been developed and deployed at the observation site of the Telescope Array Experiment in Utah, USA. This project aims at measuring the energy spectrum and nuclear composition of cosmic rays with energies above 10 eV, to determine the transition energy of cosmic rays of Galactic and extra-galactic origins. A 200MHz FADC is used for the Cherenkov detectors to record waveforms of Cherenkov pulses associated with air showers produced by cosmic rays in the atmosphere. A fully-automated observation system has been installed that enables autonomous data acquisition in every dark (moon-less) nights. Due to a delay of electronics development by a vendor, the start of stable run was also delayed about 1 year. Nevertheless the observation system is remarkably stable, cosmic ray events are recorded in every 7 seconds in dark (moon-less) nights, and data analysis is ongoing.

研究分野：宇宙線物理学

キーワード：宇宙線 原子核組成

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 宇宙線は宇宙を飛び交う高エネルギーの陽子や原子核であるが、発見から100年を経た今でもその起源には謎が多い。原子核というミクロな粒子が1Jを超えるようなマクロなエネルギーを持つという観測事実は、この宇宙において激烈な天体現象、粒子加速現象が起こっているという証拠であり、その起源を解明することは現代宇宙物理学の重要なテーマである。宇宙線の起源解明に本質的に重要な観測量が、宇宙線の化学組成(原子核存在比)である。地球上で観測される宇宙線の組成は、宇宙線の起源天体における化学組成を必ず反映しているはずだからである。

(2) 銀河系内の宇宙線の起源として最も有力と考えられているのが超新星残骸である。超新星残骸は大質量星がその寿命を終えて大爆発を起こした残骸であるが、その衝撃波の存在下での「ショック粒子加速」が宇宙線を生み出すメカニズムとして効率的に働くことが理論的に示されている。また粒子加速においては電荷の大きい、つまり重い原子核の方が加速されやすいから、宇宙線の化学組成では、エネルギーが上がるほど重い原子核成分が卓越すると考えられている。そしてこれまでの $10^{15}\text{eV}$ までの観測データはこれを支持している。また銀河系内の超新星残骸における粒子加速では、磁場の強さ、加速天体の大きさ、および加速が可能な爆発からの時間的制限から、到達可能な宇宙線の最高のエネルギーは $10^{15-17}\text{eV}$ と考えられているが、実際にその上限がどこにあるのかは、理論的にも実験的にも確定していない。

(3) いっぽう銀河系外に目を向けると、中心に大質量ブラックホールをともなう活動銀河核 (AGN) など活発な天体が多くあり、そこではさらに高いエネルギーへの粒子加速が起こるであろうことが指摘されている。これまでに観測されている宇宙線には $10^{20}\text{eV}$ を超えるものもあるが、銀河系内にはそのような高いエネルギーにまで宇宙線を加速できる天体も物理メカニズムも知られていないため、一般には $10^{18}\text{eV}$ 以上の宇宙線の起源は銀河系外であろうと考えられている。そしてその場合は、観測される宇宙線には陽子など軽い成分が多いはずだという予測がなされてきた。銀河系外宇宙線が重い原子核として生成されても、長い距離を伝播する間に宇宙背景放射や赤外線放射との相互作用によって光破砕反応が起こり、元の原子核のままでは地球に到達できないからである。これまでの $10^{18}\text{eV}$ 付近の宇宙線観測では陽子が多いことが示されており、このシナリオはある程度正しいと考えられている。

## 2. 研究の目的

エネルギー $10^{15}\text{eV}$ までと、 $10^{18}\text{eV}$ 以上の宇宙線の化学組成については研究が進んでお

り、低-高エネルギー側では組成がはっきり異なることがわかっている。しかし、宇宙線の化学組成の劇的な変化が起こっているはずの中間エネルギー領域では、信頼できる観測データはほとんど存在しない。本研究の目的は、この宇宙物理学的にきわめて重要でありながら「はざま」となっていた $10^{15-18}\text{eV}$ の領域における宇宙線を観測し、エネルギースペクトルを決定するとともに、化学組成とその変化を精密に測定することである。低エネルギー側で銀河系内宇宙線であれば重い原子核が多く、高エネルギー側で銀河系外起源であれば陽子が主成分のはずであるから、この領域で観測を行えばエネルギーとともに急激な重成分の減少と軽成分の増加が見られるはずで、その遷移がどのエネルギーで起こっているかを確定させることができる。

## 3. 研究の方法

(1) 宇宙線が大気中で空気シャワーを発生した際に放射される「空気チェレンコフ光」を捕らえることで実現する。空気シャワーを起こした宇宙線の元の原子核が何であったかを決定するためには、シャワー発達の初期の段階(大気の上層部)を観測することが重要である。本研究では、光電子増倍管(超高感度光センサ)を夜空に向け、空気シャワーの発達の初期段階から最大発達を含む範囲の「履歴」をチェレンコフ光測定によって決定し、宇宙線原子核の質量数判別を行う。

(2) 本研究の特徴は、この観測手法を $10^{18}\text{eV}$ 以上の超高エネルギー宇宙線研究において既に成果を出しつつある望遠鏡アレイ実験 (Telescope Array, TA, 米国ユタ州) に持ち込むことにある。チェレンコフ光検出器はTA実験のサイト内に15台を設置する。本実験単独で宇宙線のエネルギースペクトルや化学組成を測定できるのみならず、TAの大気蛍光望遠鏡(FD)や地表検出器(SD)との同時観測も行えるようにする。これによって、 $10^{15-20}\text{eV}$ という広いエネルギー範囲で、相互比較ができる状況において異なる手法で宇宙線観測を行うことが可能になり、信頼度の高いデータを提供することができる。

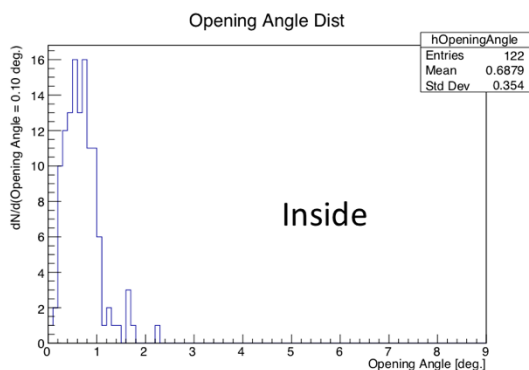
## 4. 研究成果

(1) 時間幅約100ns(ナノ秒)のチェレンコフ光を検出するため、200MHzの高速FADCを用いたエレクトロニクスによる検出器を開発した。エレクトロニクス開発はある企業に依頼したが、その企業によるテスト不足のために仕様を満たさない箇所があることが明らかになり、観測の開始には1年の遅れが生じてしまった。検出器の外箱はユタ大学との共同開発で、耐水性・耐候性に優れ、無人・無線での操作が可能なものを製作した。

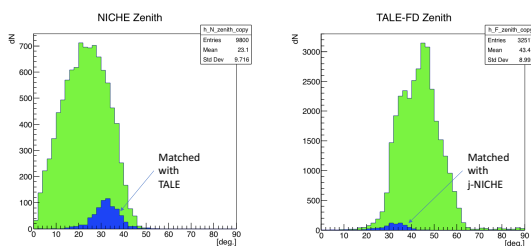
(2) 検出器の試験は日本国内で行った。光戦さである光電子増倍管の特性試験、エレクト

ロニクスの応答試験、検出器の温度特性試験は15台全ての検出器について行い、設計通りの性能を有することを確認した。

(3) 検出器はTAサイトに設置され、無人でのリモート観測が可能なシステムを開発し、現在はきわめて安定稼働しており順調に観測データが蓄積されている。検出器による宇宙線の到来方向決定精度は1°程度である。



(4) 検出器はTAの検出器と連動して稼働しており、同じ宇宙線イベントを独立に観測できている。本実験およびTAで決定された宇宙線の到来方向は5°程度で一致しており、TAの角度決定精度が5°程度(本実験は1°)であることを考慮すれば、同時観測はきわめてうまく機能していると言える。現在は本実験で決定される宇宙線のエネルギーと原子核種推定と、TAでのそれとが一致するかの検証を進めており、これによって本実験のみでのエネルギースペクトルと原子核組成の決定を可能とするべく解析を進めている。



## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

1. Y. Tsunesada, Y. Omura, D. Bergman, J. Krizmanic, “NICHE: Cherenkov Observation at the Telescope Array Site”, JPS Conference Proceedings Vol. 19, 011042 (2018) (査読あり)

[学会発表] (計 8 件)

1. 2018年3月日本物理学会年次大会(東京理科大学) 尾村勇吾、中井慧、常定芳基、BK. Shin、野中敏幸、D. Bergman, J. Krizmanic 「TAサイトにおけるチェレンコフ観測」
2. 2018年3月アメリカ物理学会(コロンバス、オハイオ)、D. Bergman, J. Krizmanic, Y. Tsunesada, Y. Omera, K. Nakai, “The NICHE Experiment”
3. 2017年3月日本物理学会年次大会(大阪大学) 尾村勇吾、常定芳基、BK. Shin、野中敏幸、D. Bergman, J. Krizmanic 「jNICHE-TA サイトにおけるチェレンコフ観測へ向けて」
4. 2017年8月宇宙線国際学会(釜山)、D. Bergman, J. Krizmanic, Y. Tsunesada, Y. Omura, “jNICHE: Prototype detectors of a non-Imaging Cherenkov array at the Telescope Array Site”
5. 2016年10月UHECR2016(京都)、常定芳基、尾村勇吾、D. Bergman, J. Krizmanic, “NICHE: Cherenkov Observation at the Telescope Array Site”
6. 2016年3月アメリカ物理学会(ソルトレイクシティ)、D. Bergman, J. Krizmanic, Y. Tsunesada, Y. Omera, “jNICHE Experiment at the Telescope Array Site”
7. 2015年8月宇宙線国際学会(ハーグ)、D. Bergman, J. Krizmanic, Y. Tsunesada, Y. Omura, “NICHE: A non-Imaging Cherenkov array at the Telescope Array Site”
8. 2015年3月日本物理学会年次大会(早稲田大学) 常定芳基、光家貴斗、野中敏幸、D. Bergman, J. Krizmanic 「TALE 実験連動チェレンコフ光観測」

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

常定 芳基 (TSUNESADA, Yoshiki)  
大阪市立大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：50401526

(2) 研究分担者

( )

研究者番号：

(3) 連携研究者

( )

研究者番号：

(4)研究協力者

尾村 勇吾 (OMURA, Yugo) 大阪市立大学・  
大学院理学研究科・博士前期課程、  
中井 慧 (NAKAI, Kei) 大阪市立大学・大学  
院理学研究科・博士前期課程、  
野中 敏幸 (NONAKA, Toshiyuki) 東京大学・  
宇宙線研究所・助教、研究者番号：30506754

Douglas R. Bergman, 米国ユタ大学・准教授

John Krizmanic, NASA