

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 18 日現在

機関番号：32702

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25610051

研究課題名(和文)大規模宇宙線大気蛍光望遠鏡アレイのための簡易蛍光望遠鏡開発

研究課題名(英文)Development of a simple fluorescence telescope for a large scale telescope array to observe cosmic rays

研究代表者

多米田 裕一郎 (Tameda, Yuichiro)

神奈川大学・工学部・助手

研究者番号：90467019

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、大規模化にともない高コスト化した超高エネルギー宇宙線観測のための、低コスト簡易蛍光望遠鏡の研究開発である。本研究では、シミュレーションにより簡易望遠鏡の検出効率を見積もった。フレネルレンズと光電子増倍管で構成される簡易望遠鏡を製作した。観測対象である宇宙線空気シャワーが発する光と同じ波長域の疑似光源を用いた試験観測を行い、疑似光源の観測に成功した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is research and development of a low cost and simple fluorescence telescope. Costs of ultra-high energy cosmic ray measurement become very high due to large-scale observatory, thus development of a low cost telescope is a matter of great urgency. The detection efficiency of the telescope is estimated by monte-carol simulation. We make the simple telescope which consists of a fresnel lens and a photomultiplier tube. We tested the telescope by observing a pseudo light source of which wavelength range is same as fluorescence light emitted from cosmic ray air showers. We succeeded to observe the light source by the telescope.

研究分野：宇宙線物理学

キーワード：超高エネルギー宇宙線 宇宙線 大気蛍光法

1. 研究開始当初の背景

(1) 超高エネルギー宇宙線観測の現状

宇宙線が発見されて以来 100 年、観測技術の発達に伴い、到来頻度が極めて低い 10 の 18 乗電子ボルトを超えるエネルギーを持つ宇宙線の観測が可能となってきた。現在、超高エネルギー宇宙線の観測を行っている実験は、テレスコープアレイ(TA)実験とピエールオージェ観測所(PAO)がある。TA 実験は、日米主導で北半球である米国ユタ州に設置されている。一方、PAO は、ヨーロッパ主導で南半球のアルゼンチンにて稼働中である。両実験では観測に、地表粒子検出器と蛍光望遠鏡の 2 種類の検出器を用いてハイブリットで観測を行っている。それぞれ、宇宙線により生成された 2 次粒子群である空気シャワーの粒子と、それらが大气中で引き起こす蛍光を検出する。

(2) 超高エネルギー宇宙線実験の成果

TA 実験や PAO 以前では、観測技術が十分でなかったために、AGASA 実験と HiRes 実験とで、宇宙線の到来頻度が異なっており、より高い精度での観測が求められていた。近年、TA 実験と PAO により、より高精度高統計で観測が行われたことにより、到来頻度の違いに関しては解決している。

(3) 新しい課題

超高エネルギー宇宙線は、低エネルギー宇宙線とは異なり、銀河磁場中を直進する性質があり、宇宙線の到来方向から宇宙線の起源の同定が期待されてきた。近年、TA 実験において 10 の 19.75 乗電子ボルト以上の宇宙線の到来方向の解析から、ホットスポットと呼ばれる、到来頻度が高い領域が発見された。この事実は、宇宙線の起源解明にとって非常に重要であるが、TA 実験の統計量では、起源天体の同定には十分ではない。よって、より高統計で観測可能な実験の重要性が高まっている。

(4) 残されている課題

起源天体の同定に有力な結果が得られた一方で、いまだ宇宙線の組成に関しては統一的な見解が得られていない。宇宙線の組成は、起源同定に非常に重要であり、さらなる観測が必要である。

(5) 実験の高統計化への問題点

宇宙線の到来頻度は、10 の 20 乗電子ボルトで、100 平方 km あたりに年間 1 例程度である。このことから、十分な統計を得るためには、非常に大規模な検出面積を持った実験施設が必要となる。TA 実験が 700 平方 km の展開規模で、おおよそ 15 億円のコストが必要であった。統計数は検出面積に比例するので、現在の観測手法ではコストも比例して高額となり、大規模化の大きな障壁となっている。

2. 研究の目的

(1) 低コスト蛍光望遠鏡の開発

超高エネルギー宇宙線の起源解明には、高統計での観測が必要である。高統計を実現するためには、実験の大規模化が不可避であるが、現在の手法では高額なコストがかかるため現実的でない。よって、安価に展開できる検出器の開発が必要である。本研究では、これまでにない低コストで作成可能な蛍光望遠鏡の開発を目的とする。

3. 研究の方法

(1) 蛍光望遠鏡の低コスト化

TA 実験で用いられている従来型の蛍光望遠鏡(図 1)は、口径 3m の球面反射鏡と、焦点位置に置かれた 256 本の光電子増倍管(PMT)で構成される。本望遠鏡の視野は、1 台あたり約 16 度程度で、分解能は 1 度程度である。テレスコープアレイ実験では、本望遠鏡を 3 箇所、12 台ずつ設置されている。



図 1: TA 実験で現在稼働中の従来型の蛍光望遠鏡。2 台の望遠鏡が 2 段重ねになっている。

本研究では、蛍光望遠鏡の構成要素を表 1. のように簡易化することによって低コスト化を実現する。

表 1. 望遠鏡の構成要素

	従来型	簡易望遠鏡
集光部	球面鏡 口径 3m	フレネルレンズ 口径 1m
受光部	光電子増倍管 256 本	光電子増倍管 1 本
構造	鉄骨	アルミフレーム

従来型の望遠鏡では、宇宙線の到来方向を得るために、256 本の PMT を使用し、1 度の分解能で、空気シャワーの飛跡を測定する必要があった。本簡易望遠鏡は、1 本しか使用し

ないため、飛跡を測定することは不可能であるが、地表検出器と同時に観測することによって、到来方向の補完が可能である。もしくは、3 箇所以上の望遠鏡で観測した場合には、蛍光の到達時間差を用いて、到来方向を求めることができる。

(2) 観測手法の確立

本望遠鏡は、低コストである一方で、従来型の望遠鏡と比べると集光効率などは悪くなってしまう。加えて、同じ視野あたりを 256 本の PMT で観測していた従来型に比べ、1 本の PMT で観測するため、シグナルに対して夜光によるノイズが大きくなってしまふ。本研究では、簡易蛍光望遠鏡が実際に観測可能かシミュレーションを行い検証する。

4. 研究成果

(1) 簡易蛍光望遠鏡の製作

望遠鏡の設計、製作を行った。実際に製作した望遠鏡を図 2. に示す。本望遠鏡は、アルミフレームでできており、大きさは 1x1x1.5m である。移動や組み立てが容易であり、従来型の望遠鏡と比べると建設コストが非常に少ない。また、望遠鏡の仰角は、稼働式で自由に変更することができる。開口部には、1 平方 m のフレネルレンズが取り付けられている。



図 2：組み立てた蛍光望遠鏡。観測では、周囲を遮光シートで覆う。

フレネルレンズの焦点には、外径 20cm の PMT が取り付けられている(図 3.)。本望遠鏡の視野は約 16 度であり、図 1. に示した従来型の望遠鏡 1 台と同じ視野を確保している。また、PMT に近接して紫外線透過フィルターを設置し、空気シャワーから放射される蛍光のみを透過させる。

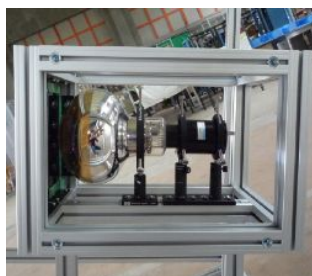


図 3：PMT と紫外線透過フィルター

データ取得、及び PMT の高圧電源装置は、TA 実験の地表検出器で用いられているものを使用する予定であった。しかし、十分なスペアが無いことを考慮して、全て市販品を使用した。本望遠鏡 1 台のコストは約 85 万で、表 2 に内訳を示す。従来型の望遠鏡のコストが、1 台おおよそ 1 千万円程度であることを考慮すると、目的通り大幅な低コスト化が達成されたことがわかる。

表 2. 構成要素と金額

構成要素	金額(千円)
フレネルレンズ	25
フレーム	100
高圧電源	165
データ取得回路	31
PMT	205
紫外線透過フィルター	320
合計	846

ここで、高圧電源とデータ取得回路の金額は、1 チャンネルあたりの金額としてある。

(2) 試験観測

1 本望遠鏡を用いて、試験観測を行った。試験は、2015 年 5 月 17 日から 18 日にかけて、東京大学宇宙線研究所の明野観測所にて行った。試験内容は、空気シャワーから発生される蛍光を想定した疑似光源の観測と夜光の取得である。

2 本試験に使用した疑似光源は、ラジコンヘリコプターに搭載した移動光源である。発光部には、大気蛍光の波長域と同じ LED を用いた。また発光時間は、典型的な宇宙線空気シャワーが観測される時間と同じ 10 マイクロ秒とした。本光源は現在、別課題として研究開発しているものである。2015 年 3 月には、TA 実験サイトにて従来型の望遠鏡で観測し、実証実験を行ってある。本光源を、望遠鏡の視野内で飛行させて、検出できるか試験し、検出に成功した。図 4. は実際に本望遠鏡で取得された波形データである。

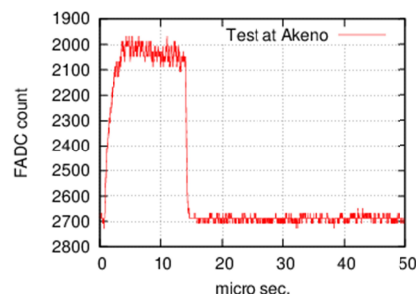


図 4：簡易蛍光望遠鏡の FADC により測定された疑似光源の信号。

宇宙線空気シャワーの発光を疑似的に発生させ、その検出に成功した。本研究課題期間内に実際の宇宙線の観測までは試験することができなかったが、1 年以内に TA 実験サ

イトでの宇宙線の試験観測を予定している。

(3) 検出効率の見積もり

観測技術及び解析手法の確立のために、シミュレーションを行い、検出効率の見積もりを行った。10の19乗と10の20乗電子ボルトの宇宙線空気シャワーが、簡易望遠鏡からそれぞれ10-18kmまたは16-24kmの距離に発生した場合に得られる信号をシミュレーションで見積もった(図5)。

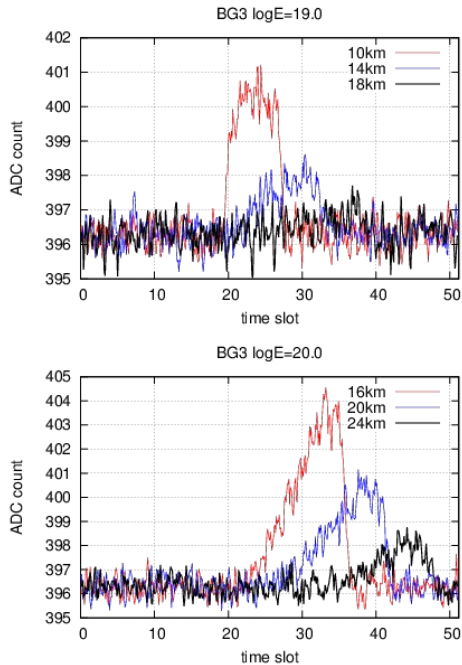


図5：シミュレーションで得た、簡易蛍光望遠鏡による空気シャワーの信号。

図6は、シミュレーションで見積もられたエネルギー毎のシグナル/ノイズ比であり、黒線で引いた4シグマを検出の閾値と仮定した。本シミュレーションの結果、本望遠鏡の検出可能距離は、10の19乗と20乗電子ボルトの宇宙線でそれぞれ、15kmと26km程度であることがわかった。

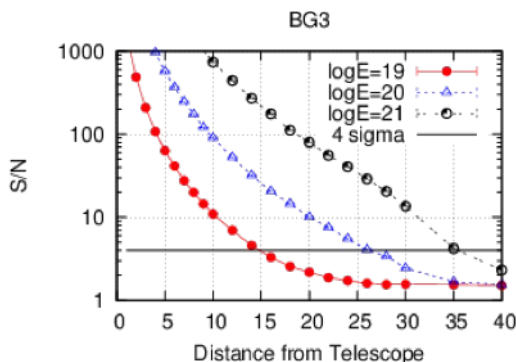


図6：シミュレーションで見積もられた、10の19-21乗電子ボルトの宇宙線の信号のS/N比。

(4) 大規模アレイのコスト見積もり

4-(1)では、望遠鏡の1台あたりのコストを算出した。4-(3)では望遠鏡1台あたりの検出効率を算出した。これらを用いて、現在のTA実験を本望遠鏡に置き換えた時のコストを算出した。TA実験の検出面積は700平方kmである。10の19乗電子ボルトで、検出距離が15kmであるので、簡易望遠鏡をリング状に配置すれば、検出面積は約700平方である。リング上に本望遠鏡を2段重ねで配置すると仮定すると、望遠鏡は46台必要であり、総コストが4000万円程度となる。TA実験の蛍光望遠鏡の総コストがおおよそ5億円であることから、コストを1/10程度に抑えることが可能であることがわかった。

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 0件)

〔学会発表〕(計 4件)

- 1 Y. Tameda, "The current status of the composition measurements of UHECRs with TA", Multi-messenger approaches to Cosmic Rays: Origins and Space Frontiers, 2013年11月27日, パリ(フランス)
- 2 多米田裕一郎, "TA実験226:TAFDで観測されたXmaxによる質量組成解析" 日本物理学会秋季大会. 2013年9月23日 高知大学
- 3 Y. Tameda, "Mass Composition of UHECRs Measured Stereoscopically by the Telescope Array Fluorescence Detectors" 33rd International Cosmic Ray Conference. 2013年7月2-9日, リオデジャネイロ(ブラジル)
- 4 多米田裕一郎, "TA実験251:FD Xmax測定による超高エネルギー宇宙線の質量蘇生解析" 日本物理学会秋季大会. 2014年9月20日 佐賀大学

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.n.kanagawa-u.ac.jp/~tame/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

多米田 裕一郎 (TAMEDA YUICHIRO)
神奈川大学・工学部・助手
研究者番号：90467019

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4)研究協力者

富田 孝幸 (TOMIDA TAKAYUKI)
信州大学・工学部・助教

藤井 俊博 (FUJII TOSHIHIRO)
東京大学・宇宙線研究所・研究員

林 幹樹 (HAYASHI MOTOKI)
信州大学・工学部・修士課程 1 年

山本 昂平 (YAMAMOTO KOHEI)
信州大学・工学部・学士課程 4 年