

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2023

課題番号：19K03884

研究課題名(和文) 空気シャワーモデル直接比較のための多チャンネル粒子弁別測定システムの開発

研究課題名(英文) Development of a multi-channel particle discrimination measurement system for direct comparison of air shower models

研究代表者

野中 敏幸 (Nonaka, Toshiyuki)

東京大学・宇宙線研究所・助教

研究者番号：30506754

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：将来の大気蛍光望遠鏡と連動した、“陽子”-“大気”衝突を選択的に選んだ空気シャワーモデルの検証が必要である。本研究では、複数のセグメントで構成した鉛サンドイッチ型検出器(鉛-検出器)と、コンクリート遮蔽の下に備えられた検出器(コンクリート-検出器)の両方を用い、2次シャワー粒子の弁別測定を行う。そのための実際に屋外で測定する検出器の設置と、データ取得システムの開発をおこなった。渡航困難な時期、現地での作業が困難な時期があり、安定稼働するシステムの設置と、得られたデータの空気シャワーモデルとの予備的な比較を行うことはできなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

将来の大気蛍光望遠鏡と連動した、“陽子”-“大気”衝突を選択的に選んだ空気シャワーモデルの検証が必要である。本研究では、複数のセグメントで構成した鉛サンドイッチ型検出器(鉛-検出器)と、コンクリート遮蔽の下に備えられた検出器(コンクリート-検出器)の両方を用い、2次シャワー粒子の弁別測定を行う。そのための実際に屋外で測定する検出器の設置と、データ取得システムの開発をおこなった。また、そのための検出器の制作、インフラの存在しない場所での観測拠点の設営、市街地までのデータ転送の方法など将来必要になる知見を得た。

研究成果の概要(英文)：An air shower model with selective selection of ‘proton’-‘atmospher’ collisions needs to be validated in conjunction with future atmospheric fluorescence telescopes. In this study, both a multi-segment lead sandwich detector (lead-detector) and a detector under concrete shielding (concrete-detector) are used to measure the discrimination of secondary shower particles. The actual outdoor detectors were installed and a data acquisition system was developed for this purpose. Due to periods of travel difficulties and difficulties in working in the field, it was not possible to set up a stable operating system and make preliminary comparisons of the obtained data with the air shower model.

研究分野：宇宙線物理学

キーワード：宇宙線物理学 超高エネルギー宇宙線

1. 研究開始当初の背景

超高エネルギー宇宙線の原子核組成の推定は、事象毎に大気蛍光望遠鏡で撮像された空気シャワーの最大発達深さ (X_{max}) の分布を、空気シャワーシミュレーションで仮定した組成で予測される分布と比較することで行われてきた。シミュレーションによる予測は空気シャワーモデル毎の不確実性が非常に大きく、このため最大発達深さの測定では、モデルの不確実性によって実験データの化学組成についての解釈が大きく異なっている。また一次宇宙線にどの原子核を仮定したとしても、観測されるミュオンの量が空気シャワーモデルの予測より有意に多い事 (ミュオン粒子数異常) が判っており空気シャワーモデルの精度向上が望まれている。[2, 3]。

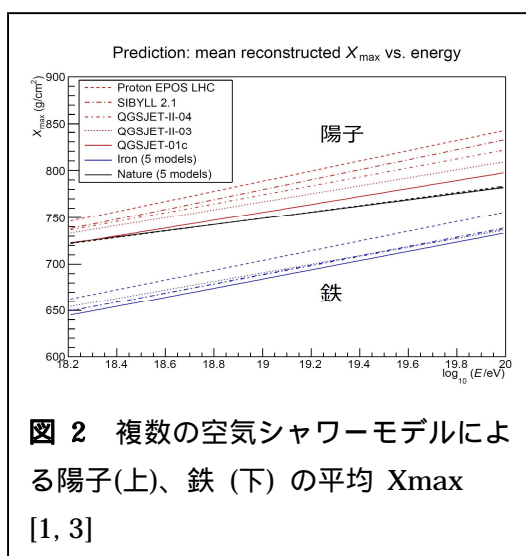


図 2 複数の空気シャワーモデルによる陽子(上)、鉄 (下) の平均 X_{max} [1, 3]

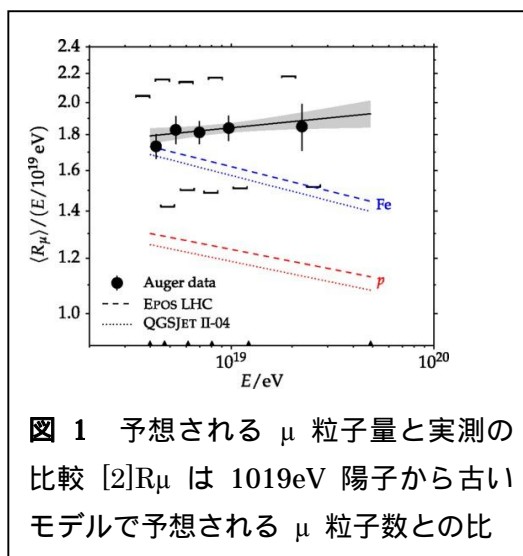


図 1 予想される μ 粒子量と実測の比較 [2] R_{μ} は $10^{19}eV$ 陽子から古いモデルで予想される μ 粒子数との比

この状況に対して、加速器実験からのアプローチとして、LHCf 実験 [4] では、空気シャワー発達に大きく寄与する超前方中性粒子の測定を LHC 加速器の 13TeV 陽子衝突を用いて行い、 $\sim 10^{17}eV$ の宇宙線反応におけるハドロン相互作用モデルの検証を行っている。

現在、宇宙線観測実験では、更新された空気シャワーモデルによる粒子数の予想と、実際の空気シャワー観測との詳細な比較を準備する段階となっている。

2. 研究の目的

研究背景で述べた様に、宇宙線実験において、宇宙線源までの距離分布、加速物理の平均描象を描き出す為には、空気シャワーモデルが予測する、地表での粒子数や最大発達深さがモデル間で収束し、宇宙線の化学組成の分布が精度よく求まる必要がある。また、[2] で発見されたミュオン数の過剰についても原因の解明へ向けた手がかりを増やす必要がある。

宇宙線の地表観測では入射粒子の核種の同定は困難であるため、大気の深い位置で発達した事象を用い、陽子による事象を選択する必要がある。これらの事から、将来の TALE 大気蛍光望遠鏡と連動した、LHC 実験に対応する エネルギーでの “陽子” - “大気” 衝突を選択的に選んだ大規模検証測定を可能にするための手法の一式を確立する事が必ず必要になると考えた。

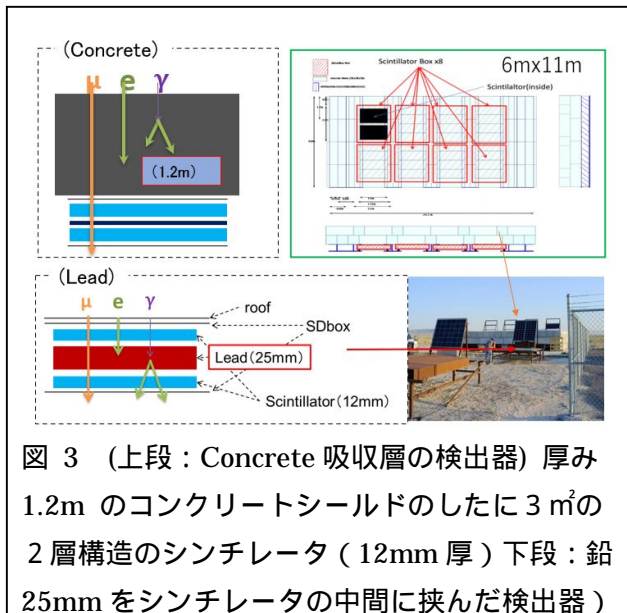
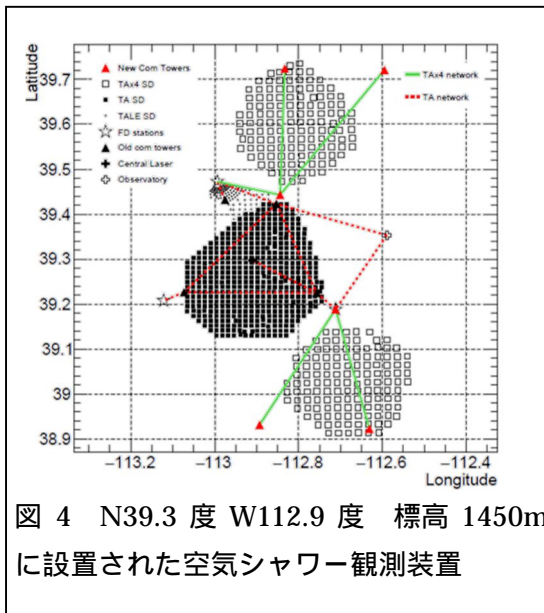
本研究では、複数のセグメントから構成される鉛サンドイッチ型検出器 (“鉛-検出器”) と、コンクリート遮蔽の下に備えられた検出器 (“コンクリート-検出器”) の両方 [5] を用い、2次シャワー粒子の弁別測定を行うためのデータ取得システムの構築、得られたデータの空気シャワーモデルとの比較をおこなう事を目的としている。複数の検出器を一つの自立した多チャンネル検出器としてまとめ、波形収集を TA アレイとは独立に行うことで、空気シャワーアレイ本体に負荷をかけない粒子弁別可能な検出器として成立させ、超高エネルギー宇宙線によるシャワーモデル計算を加速器実験と同じエネルギーで直接的に検証する事を可能にする。

3. 研究の方法

コンクリートブロック (120cm) の遮蔽を用い、TA 地表検出器モジュール 8 基 (24m²)、および鉛 (25mm) サンドイッチ型シンチレータ検出器モジュール 12 基 (9m²) を用いる。信号記録用の FADC 回路を經由し、隣接するシングルボードコンピューター (SBC) からデータ読み出しを行えるように変更する。TA 実験との同時観測については、Auger 実験との先行研究で研究代表者が開発済みである TA 空気シャワーアレイで捉えた空気シャワー事象

の情報を受信するトリガー分配器(TD)を用いる。SBC はトリガー分配器 (TD) が分配する TA 実験からの空気シャワートリガーを受け、FADC 回路からの読み出しを開始する。これにより TA 実験と連動して複数モジュールから構成される多チャンネルの信号を収集するようにする。SBC,TD への電力供給と、外部との長距離無線通信のために太陽電池パネルによるデータ収集拠点を設営する。設置後は TA 実験の活動拠点から遠隔操作、装置のコントロールと収集されたデータの定期バックアップを行い観測を継続する。

4. 研究成果



超高エネルギー宇宙線による空気シャワー粒子の弁別観測のために、図 3 に示すような検出器を設計している。シミュレーション計算を用いて、多チャンネル化した TA 地表粒子検出器の設計について以下の知見を得ている。

- 10¹⁹eV の陽子シャワーに対して、上下シンチレータ間に 25mm の鉛を挟んだ 1 セグメントが 0.75 m² のシンチレータによる測定では、1200m 以遠で約 20% の精度で μ 粒子数を評価できる。
- 1.2m のコンクリート下に設置した 3 m² のモジュールにおいては、1400m 以遠では 20% の精度 (粒子数評価を信号波形の立ち上がりで評価した場合) 電荷量で評価した場合には、1200m 以内では 20-30% の精度で μ 粒子数を評価できる事が分かっている。

TA 実験サイト(図 4)中央のレーザー射出装置(CLF)付近に、これまでにコンクリートブロックの遮蔽下に配置された検出器モジュール(2.4 m²) および鉛サンドイッチ型シンチレータ検出器(3 m²) が配置され、部分的に試験的な測定を継続している。図 3

電力、通信手段といった都市基盤の無い場所での 観測拠点の設営、データ取得、データ転送方法について以下のような知見を得た。

観測サイトは平坦な土地であり、民生品の 2 地点間の長距離無線 LAN アンテナを通じて、観測サイトの近くの市街地からネットワークを通すことができる。個別の検出器の消費電力は 5W 程度である。データ収集拠点の電力はおおむね 35W 程度の電力である。これらを安定して賄える太陽電池パネルとバッテリーの組み合わせで運用できる。これらの設置の経験は、今後の大規模な観測の際に有用である。

一方で、COVID-19 の影響もあり、当初計画したような検出面積でのデータ取得システムの設置、長期の安定したデータ取得を完全な形で出来ていない。

そのため、研究目的である、空気シャワー中の粒子種の弁別測定のための、長期間の運用にむけての調査は研究期間内に十分に行うことが出来なかった。しかし、設置済の装置のほとんどは正常に動作している事は確認しており、故障などが無い限り、今後継続して使用する事が可能である。

本研究で確立を試みた、遠隔地での自立した多チャンネルデータ収集システムのパッケージは、COVID-19 の影響とその後の状況によって、想定通り完全に完成したとは言えない。

しかし、将来の TA-TALE 実験場での空気シャワーモデルの検証測定につながる、検出器設計、設置方法について知見を得る事が出来た。大気蛍光観測と連動する TA-TALE, TAX4 実験だけでなく、汎用性があり、検出器とデータ取得システム一式を例えば Auger 実験, LASSO 実験, GRAPES-3 実験 等の地上空気シャワー実験に適応可能である。

- [1] T. Stroman et al, Telescope Array measurement of UHECR composition from stereoscopic fluorescence detection, Proc. 34th ICRC, 361 (2015).
- [2] A. Aab et al., (The Pierre Auger Collaboration), Muons in air showers at the Pierre Auger Observatory: Mean number in highly inclined events, Phys. Rev. D., 91, 032003 (2015).
- [3] R. Takeishi, (phD thesis), Study of muons from ultra-high energy cosmic ray air showers measured with the Telescope Array experiment. University of Tokyo, (2017).
- [4] O. Adriani et al., The LHCf detector at the CERN Large Hadron Collider, Journal of Instrumentation, Vol3, (2008).
- [5] M. Takamura, (Master thesis), Telescope Array 実験における μ 粒子数測定用地表粒子検出器の開発, Tokyo university of Science (2014).
- [6] T. Nonaka et al., Performance and Operational Status of Muon Detectors in the Telescope Array Experiment, PoS(ICRC2015)656 (2015).
- [7] S. Quinn et al., Auger at the Telescope Array: toward a direct cross-calibration of surface- detector stations PoS(ICRC2017)395, (2017)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 野中敏幸
2. 発表標題 空気シャワー実験と連動するμ粒子数測定用検出器とデータ取得システムの開発
3. 学会等名 第75回日本物理学会年次大会
4. 発表年 2019年～2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

第75回日本物理学会年次大会 https://onsite.gakkai-web.net/jps/jps75lec/data/html/programu.html

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	荻尾 彰一 (Ogio Shyouichi) (20242258)	東京大学・宇宙線研究所・教授 (12601)	
研究分担者	さこ 隆志 (Sako Takashi) (90324368)	東京大学・宇宙線研究所・准教授 (12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------