

令和 5 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19H01922

研究課題名(和文) 南天における100TeV宇宙ガンマ線の観測実証研究

研究課題名(英文) Demonstration of 100 TeV gamma-ray observation in the southern hemisphere

研究代表者

川田 和正 (Kawata, Kazumasa)

東京大学・宇宙線研究所・助教

研究者番号：10401291

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、南米ボリビア・チャカルタヤ山中腹(標高4,740m)の実験サイトにプロトタイプ観測装置(ALPAQUITA)を完成させ、その建設の実現性・問題点を検証することである。本研究により、ALPAQUITA実験の水チェレンコフ型ミュオン検出器の設計が完了し設置の準備が整った。また、ALPAQUITA実験のすべてのシンチレーション検出器の設置が完了し2022年9月よりデータ収集を開始した。取得データを解析した結果、約3ヶ月の観測で「月の影(=月による宇宙線の遮蔽現象)」の検出に成功した。これにより、角度分解能は約1度と推定され、当初の期待通りの性能を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙線が発見されて100年以上が経つが、未だその起源についての確定的証拠は得られていない。荷電粒子である宇宙線は宇宙に存在する磁場で方向を曲げられ直接その起源天体を同定できない。一方、加速源で生成された高エネルギー宇宙線は銀河系内の分子雲と衝突して高エネルギーガンマ線を発生させる。磁場による偏向を受けないガンマ線を観測することで、宇宙線の起源を同定し、高エネルギー天体での粒子加速や、宇宙線の地球までの伝搬方法を明らかにすることができる。本研究では、銀河系中心領域を含む南天領域からの100TeV領域ガンマ線を高感度で実現させるためにプロトタイプ検出器を建設し、期待通りの性能を実現させた。

研究成果の概要(英文)：The aim of this project is to complete a prototype experiment (ALPAQUITA) at the site in the middle of Mount Chacaltaya (4,740 m above sea level) in Bolivia, South America, and to verify the feasibility and problems of its construction. In this project, we completed the design study of the underground water-Cherenkov-type muon detector for the ALPAQUITA experiment, and are ready for installation. In addition, we finished to deploy all the scintillation detectors of the ALPAQUITA experiment, and the data acquisition system started in September 2022. As a result, we succeeded in detecting the "Moon's shadow (=cosmic ray shielding phenomenon by the Moon)" using the recorded data for three months with the ALPAQUITA array. From this observation, we demonstrated that the angular resolution is estimated to be about 1 degree, as is expected.

研究分野：宇宙線物理学

キーワード：ガンマ線 宇宙線 ミューオン 空気シャワー

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

陽子を主成分とする高エネルギー放射線が宇宙から絶え間なく降り注いでおり、これを宇宙線と呼ぶ。あるエネルギー以下の宇宙線は理論的に我々の住む銀河系内で生成されていると考えられているが、その生成源は未だ謎である。本研究では、銀河系内の宇宙線を生成しているであろう銀河中心方向にある超巨大ブラックホールからのガンマ線を観測するための装置開発を行う。南米ボリビア・チャカルタヤ山(標高 4740m)に設置される宇宙線観測装置の地下に大型の水槽と光センサーを設置し、宇宙線から二次的に生成されるミュオン粒子を測定する。これにより、天体からの超高エネルギーガンマ線を効率良く観測できることを実証する。

### 2. 研究の目的

南米ボリビアのチャカルタヤ山中腹(標高 4740m)の実験サイトに、空気シャワー観測装置と地下水チェレンコフ型ミュオン検出器を設置し、それらを連動させることで南天領域の超高エネルギーガンマ線を世界に先駆けて観測する。地上で超高エネルギーガンマ線を観測するためには、その 100 倍以上ある宇宙線バックグラウンドが問題となる。ガンマ線起源の空気シャワー中のミュオン数は宇宙線起源のミュオン数と比べると少ないため、ミュオン数を精度良く測定できれば、ガンマ線信号と宇宙線バックグラウンドの識別が可能となる。本研究では、プロトタイプ観測装置を完成させ、その実現性と問題点を検証する。

### 3. 研究の方法

ALPAQUITA 実験は、97 台のシンチレーション検出器から成る空気シャワーアレイと地下水チェレンコフ型ミュオン検出器から構成される。これらを南米ボリビアのチャカルタヤ山中腹(標高 4740m)に設置し、超高エネルギーガンマ線または宇宙線が大気中で作る空気シャワー現象を観測する。空気シャワーは電磁成分(電子・陽電子・ガンマ線)とミュオン成分を含むほぼ光速で地上に降り注ぐ二次粒子群であるが、ガンマ線起源の空気シャワー中に含まれるミュオン数は、宇宙線起源に含まれるミュオン数と比較して極端に少ない。電磁成分は物質(土壌)によって遮断されるためミュオン成分のみを観測することが可能になる。したがって、地下にある粒子検出器を用いてミュオン数をカウントすることで、宇宙線バックグラウンド中に少量しか含まれないガンマ線信号を精度良く選別することが可能になる。これにより、特に超高エネルギー領域(>100TeV)では、宇宙ガンマ線に対する感度が飛躍的に向上することが期待される。本研究では、実験サイトのインフラ設備を整えつつ、ALPAQUITA 実験の検出器を設置、データ収集システムを構築し、超高エネルギー宇宙線およびガンマ線の観測を開始する。さらに、これら観測データを再現する検出器シミュレーションを開発し、空気シャワーの方向とエネルギーを再構成するためのデータ解析プログラムの最適化を行う。

### 4. 研究成果

(1) 観測サイトにて、日本、ボリビアおよびメキシコのスタッフ・学生が連携し、ALPAQUITA 実験を構成するすべてのシンチレーション検出器の設置を完了させた(図 1)。各検出器間のゲイン調整および各検出器間の相対時間計測の較正を行い、2022 年 9 月よりデータ収集を開始させた。水・電気・インターネット・エレクトロニクスハット等のインフラ設備もすべて整っている。



図 1 南米ボリビア・チャカルタヤ山中腹(標高 4740m)で行われている ALPAQUITA 実験の全景写真。白い四角は 97 台のシンチレーション検出器。赤い屋根の建屋にデータ収集システムなどのエレクトロニクスが収められている。

- (2) 取得データを開発した空気シャワー再構成プログラムにより解析したところ、約 3 ヶ月の観測で「月の影(=月による宇宙線の遮蔽現象)」の検出に成功した。これにより角度分解能は約 1 度と推定され、当初の期待通りの性能を実証した。また、空気シャワーアレイを市松模様の 2 つの検出器グループに分けて、それぞれのグループで作った独立の空気シャワーアレイで方向を決定し、それら 2 つのアレイで決定された方向の開き角の分布を調査した。これは Even-Odd 法と呼ばれるが、同方法によっても同様に宇宙線の角度分解能は約 1 度と推定された。これらの成果は日本物理学会および日本天文学会で報告された。

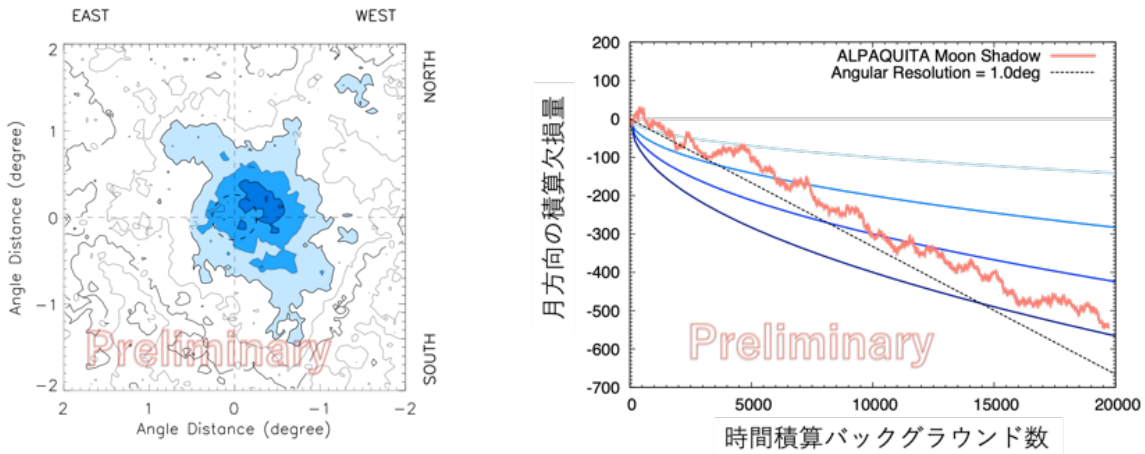


図 2 ALPAQUITA 実験で観測された「月の影」。(左図)月方向を中心とする  $4^\circ \times 4^\circ$  の宇宙線欠損量の有意度マップ。中央の点線の丸が実際の月の大きさ。等高線の一番濃い青の領域は  $4\sigma$  以上を示す。(右図)月方向半径  $1^\circ$  円内の積算宇宙線欠損量の時間変化。横軸は時間積算のバックグラウンド数を示す。点線は角度分解能  $1^\circ$  の時の期待値を示す。

- (3) 感染症蔓延のため現地への渡航ができない状況が長く続いたが、ボリビアのホスト機関であるサン・アンドレス大学のメンバーと隔週でオンライン会議を行い、ミュオン観測装置の地下水槽の設計を継続的に行なってきた。いくつかのデザインを元に構造計算を行い、鉄筋コンクリート製の水槽の基本設計を完成させた。また、現地の地質調査も行われ地下に設計された地下水槽の建設が可能であることも確認された。
- (4) 水チェレンコフ検出器として使用される地下水槽に封入される水を供給するための水源を確保するために、サイト周辺の地下水の状況を調査した。地中の電気伝導度の調査により実験サイト直下の地下約 50m 地点に地下水があることが判明し、井戸の掘削の準備が整っている。予備の水源として、サイトから数 100m 離れた小さな湖の近くでも調査を行い地下水の含有が確認された。
- (5) プロトタイプである ALPAQUITA 実験およびその拡張実験である 401 台のシンチレーション検出器と 3600 平米の大面积ミュオンから構成される ALPACA 実験のモンテカルロ (MC) シミュレーションを開発し、データ解析の最適化や、予想感度を算出し達成可能なサイエンスの考察を行った。ALPAQUITA 実験においては、1 年間の観測で南天の明るいガンマ線天体 RX J0852.0-4622 (Vela Junior), Vela X, HESS J1702-420A 等の未同定ガンマ線天体の検出が期待される。また、フルスケールの ALPACA 実験では、30 個以上のガンマ線天体、H. E. S. S. 実験が過去に検出した銀河系中心領域の Diffuse 成分や銀河面からの拡散ガンマ線の観測も十分な感度で観測が可能である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 16件 / うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 Okukawa S., Kawata K. et al.	4. 巻 55
2. 論文標題 Hadronic interaction model dependence in cosmic Gamma-ray flux estimation using an extensive air shower array with a muon detector	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Experimental Astronomy	6. 最初と最後の頁 325 ~ 342
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10686-022-09883-4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 de la Fuente Eduardo, Toledano-Juarez Ivan, Kawata Kazumasa, Trinidad Miguel A, Tafoya Daniel, Sano Hidetoshi, Tokuda Kazuki, Nishimura Atsushi, Onishi Toshikazu, Sako Takashi, Hona Binita, Ohnishi Munehiro, Takita Masato	4. 巻 -
2. 論文標題 Detection of a new molecular cloud in the LHAASO J2108+5157 region supporting a hadronic PeVatron scenario	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psad018	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kurashige D, Hotta N, Katayose Y, Kawata K, Ohnishi M, Saito T, Sako T K, Shibata M, Takita M	4. 巻 2022
2. 論文標題 Sensitivity of the large muon detector with the Tibet air-shower array to measure the primary proton spectrum between 40 and 630 TeV	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 093F01
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptac119	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 T. Sako, K. Kawata et al. (ALPACA Collaboration)	4. 巻 ICRC2021
2. 論文標題 Current status of ALPACA for exploring sub-PeV gamma-ray sky in Bolivia	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of 37th International Cosmic Ray Conference (PoS)	6. 最初と最後の頁 733
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Y. Yokoe, K. Kawata et al. (ALPACA Collaboration)	4. 巻 ICRC2021
2. 論文標題 Half ALPACA and its sensitivity to sub-PeV gamma rays from the Galactic Center	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of 37th International Cosmic Ray Conference (PoS)	6. 最初と最後の頁 899
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 S. Kato, K. Kawata et al. (ALPACA Collaboration)	4. 巻 ICRC2021
2. 論文標題 A simulation study on the performance of the ALPAQUITA experiment	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of 37th International Cosmic Ray Conference (PoS)	6. 最初と最後の頁 737
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Kato S., K. Kawata et al. (ALPACA Collaboration)	4. 巻 52
2. 論文標題 Detectability of southern gamma-ray sources beyond 100 TeV with ALPAQUITA, the prototype experiment of ALPACA	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Experimental Astronomy	6. 最初と最後の頁 85 ~ 107
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10686-021-09796-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Calle C., Kawata K. (ALPACA Collaboration)	4. 巻 1468
2. 論文標題 A new high energy gamma-ray observatory in the southern hemisphere: The ALPACA experiment	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012091 ~ 012091
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1468/1/012091	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 M. Amenomori, K. Kawata, K. Munakata, M. Ohnishi, T. K. Sako, M. Takita, et al. (The Tibet ASgamma Collaboration)	4. 巻 123
2. 論文標題 First Detection of Photons with Energy beyond 100TeV from an Astrophysical Source	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 51101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.123.051101	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 C. Calle, K. Kawata, K. Munakata, M. Ohnishi, T. K. Sako, M. Takita, et al. (The ALPACA Collaboration)	4. 巻 ICRC2019
2. 論文標題 Expected Performance of the Prototype Experiment for the ALPACA Experiment	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	6. 最初と最後の頁 711
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.358.0711	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 C. Calle, K. Kawata, K. Munakata, M. Ohnishi, T. K. Sako, M. Takita, et al. (The ALPACA Collaboration)	4. 巻 ICRC2019
2. 論文標題 ALPACA air shower array to explore 100TeV gamma-ray sky in Bolivia	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	6. 最初と最後の頁 779
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.358.0779	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計45件 (うち招待講演 7件 / うち国際学会 16件)

1. 発表者名 川田和正, 他 (ALPACA Collaboration)
2. 発表標題 ALPACA実験30: ALPAQUITA実験の現状とデータ解析
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kazumasa Kawata
2. 発表標題 Galactic sub-PeV Diffuse Gamma Rays Observed by the Tibet Air Shower Array
3. 学会等名 COSPAR2022 (Athene, Greece) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazumasa Kawata
2. 発表標題 Diffuse Gamma Rays and PeV Cosmic Rays with the Tibet ASg Experiment
3. 学会等名 TMEX2023 (Quy Nhon, Vietnam) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Sako, K. Kawata et al. (ALPACA Collaboration)
2. 発表標題 ALPACA experiment: A new air shower array to explore the sub-PeV gamma-ray sky in the southern hemisphere
3. 学会等名 ICHEP2022 (Bologna, Italy) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Okukawa, K. Kawata et al. (ALPACA Collaboration)
2. 発表標題 Hadronic Interaction Model Dependence in Cosmic Gamma-ray Flux Estimation Using Ground-based Air Shower Array with Underground Water Cherenkov muon detector array
3. 学会等名 21st International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazumasa Kawata et al. (ALPACA Collaboration)
2. 発表標題 First observational results of the ALPAQUITA air shower array in Bolivia
3. 学会等名 38th International Cosmic Ray Conference (ICRC2023) (Nagoya, Japan) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 M. Anzorena , K. Kawata et al. (ALPACA Collaboration)
2. 発表標題 New Front end and trigger electronics for the ALPACA experiment
3. 学会等名 38th International Cosmic Ray Conference (ICRC2023) (Nagoya, Japan) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Sako, K. Kawata et al. (ALPACA Collaboration)
2. 発表標題 Mega ALPACA to explore multi-PeV gamma-ray sky in the southern hemisphere
3. 学会等名 38th International Cosmic Ray Conference (ICRC2023) (Nagoya, Japan) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Yokoe, K. Kawata et al. (ALPACA Collaboration)
2. 発表標題 Performance studies of the ALPACA experiment
3. 学会等名 38th International Cosmic Ray Conference (ICRC2023) (Nagoya, Japan) (国際学会)
4. 発表年 2023年



1. 発表者名 T. Kawashima, K. Kawata et al. (ALPACA Collaboration)
2. 発表標題 Extending the dynamic range of the 2-diameter-inch PMT for the ALPACA experiment
3. 学会等名 38th International Cosmic Ray Conference (ICRC2023) (Nagoya, Japan) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大西宗博, 川田和正, 他 (ALPACA Collaboration)
2. 発表標題 ALPACA実験3: ALPAQUITA建設報告2022
3. 学会等名 日本天文学会2023年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川田和正
2. 発表標題 sub-PeVガンマ線の観測によるPeV宇宙線起源“PeVatron”の探査
3. 学会等名 SNR Workshop 2022 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Kawata et al.
2. 発表標題 Observation of Ultra-High-Energy Diffuse Gamma Rays from the Galactic Plane with the Tibet Air Shower Array
3. 学会等名 37th International Cosmic Ray Conference (ICRC2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川田和正
2. 発表標題 ALPACA実験と将来計画
3. 学会等名 第五回 空気シャワー観測による宇宙線の起源探索勉強会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川田和正
2. 発表標題 sub-PeVガンマ線観測の現状とペバトロン
3. 学会等名 高エネルギー宇宙物理学研究会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazumasa Kawata
2. 発表標題 100 TeV Gamma-Ray Observation with Extensive Air Shower Array
3. 学会等名 YITP workshop 2020（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川田和正
2. 発表標題 南天100TeVガンマ線観測(ALPACA)の将来計画
3. 学会等名 第四回 空気シャワー観測による宇宙線の起源探索勉強会 2021年3月26日（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazumasa Kawata
2. 発表標題 Highlights from the Tibet Air Shower Experiment
3. 学会等名 36th International Cosmic Ray Conference (ICRC2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazumasa Kawata
2. 発表標題 100 TeV Gamma-Ray Observation of the Crab Nebula with the Tibet Air Shower Array
3. 学会等名 36th International Cosmic Ray Conference (ICRC2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sei Kato (The ALPACA Collaboration)
2. 発表標題 A new high energy gamma-ray observatory in the southern hemisphere : The ALPACA experiment
3. 学会等名 16th Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takashi Sako (The ALPACA Collaboration)
2. 発表標題 ALPACA: A new air shower array experiment to explore 100TeV gamma-ray sky in Bolivia
3. 学会等名 TeV Particle Astrophysics 2019 (TeVPA2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

ALPACA実験  
[https://www.alpaca-experiment.org/index\\_ja.html](https://www.alpaca-experiment.org/index_ja.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
研究協力者	瀧田 正人  (Takita Masato)		
研究協力者	大西 宗博  (Ohnishi Munehiro)		
研究協力者	佐古 崇志  (Sako Takashi)		
研究協力者	加藤 勢  (Kato Sei)		

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			
ボリビア	Universidad Mayor de San Andres			
メキシコ	Universidad de Guadalajara			