

令和 6 年 5 月 15 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19H00678

研究課題名（和文）アンデス高地の新しい宇宙線観測装置によるPeV粒子加速天体の探索

研究課題名（英文）Search for cosmic PeV particle accelerators using a new cosmic-ray observatory in Andes highland

研究代表者

さこ 隆志（Sako, Takashi）

東京大学・宇宙線研究所・准教授

研究者番号：90324368

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 34,800,000円

研究成果の概要（和文）：南米ボリビアの標高4740mの高地に新しい宇宙線空気シャワー観測装置ALPAQUITAを設置し、地上検出器による宇宙線観測を開始した。装置は安定して稼働しており、シミュレーション計算で期待される角度分解能が得られている。また、月による宇宙線遮蔽現象も確認した。超新星残骸RXJ1713.7-3946に対するガンマ線探索を行い、200TeV領域で最高レベルの上限値を得た。ガンマ線検出感度を高める地下ミュオン粒子検出器(MD)の設計を完了し、次期予算による建設開始を待っている。ALPAQUITAと1台のMDによる期待性能を導出し、1年の観測で複数の天体から有意な検出ができることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

南半球で初めてとなる高地での本格的宇宙線空気シャワーアレイを設置し、期待通りの性能で運用を開始した。設計が完了した地下ミュオン粒子検出器を建設することで銀河系中心方向のsub-PeVガンマ線放射天体の分布、特性を世界で初めて明らかにできる。これは、宇宙物理学100年以上の課題である、銀河系宇宙線起源の解明につながる成果となる。

研究成果の概要（英文）：A new cosmic-ray air shower array, ALPAQUITA, is installed in the Bolivian Andes at the altitude of 4,740m. The array operation started smoothly and we obtained an expected angular resolution. Occultation of the cosmic-ray flux by the moon, so-called "moon's shadow" is also observed. We searched for a gamma-ray emission from a supernova remnant RX J1713.7-3946 and obtained its flux upper limits. At around 200TeV, the upper limit is comparable to the one by the most sensitive previous work.

The design of the underground muon detector to improve the sensitivity to gamma-rays is fixed and waiting a construction. Once constructed, ALPAQUITA + 1MD will have a 1-year sensitivity to detect some gamma-ray sources known in the TeV range.

研究分野：宇宙線物理学

キーワード：宇宙線 最高エネルギーガンマ線 空気シャワーアレイ実験 天の川銀河

1. 研究開始当初の背景

「目的」で述べる宇宙ガンマ線の観測は 10TeV 近くまでは解像型大気蛍光望遠鏡 (IACT) によって高精度の観測が実現し、多数の天体からの放射が報告されている。しかし、到来頻度の低い sub-PeV のガンマ線を有意に検出するには IACT とは異なる大面積・広視野を持ちながら長い観測時間を確保できる技術が必要である。日中共同の Tibet AS γ 実験は、伝統的な空気シャワー観測装置に地下ミュオン粒子検出器を設置することでこの要求を達成した。

Tibet 実験グループは、本研究を開始した 2019 年にかに星雲からの sub-PeV ガンマ線の確実な検出を世界で初めて報告した。それに続き、米国・メキシコなどが進める HAWC 実験グループも空気シャワー実験を用いたかに星雲からの sub-PeV 近いガンマ線の検出を方向した。Tibet 実験グループはさらに 2021 年に、個別の天体には付随しない、「拡散」ガンマ線の検出に成功し、天の川銀河の中に PeV の宇宙線が閉じ込められていることを初めて実証した。これらの成功をもとに、中国ではさらに巨大な LHAASO 実験が立ち上がり、3 実験によって次々と sub-PeV ガンマ線天体の検出が報告されている。

3 実験の成功によって sub-PeV 観測技術は確立され、起源天体に関する議論が大きく進んでいる。一方、当初の目的である PeV 宇宙線を説明するには天体数、個々の最大加速エネルギーが少ないことがわかってきた。3 実験は全て北半球で観測を行っており、南半球から見える天体からのガンマ線を観測することはできない。南半球からは天の川銀河の中心を観測することが可能で、また、その近くには IACT によって多数の高エネルギーガンマ線天体があることが知られている。北半球で確立した技術をいち早く南半球で実現し、銀河系全体の sub-PeV ガンマ線像を構築する必要がある。

上記は研究開始以降の進展であるが、本研究はこのような進展を見越して世界に先駆けて南半球における sub-PeV ガンマ線天文学の開始を提案したものである。

2. 研究の目的

宇宙からは「宇宙線」と呼ばれる高エネルギーの原子核が飛来している。宇宙線の発見から 100 年以上が経つが、その発生源と発生メカニズムはいまだに宇宙物理学の最大の課題のひとつである。宇宙線は天の川銀河の中では PeV(ペタ電子ボルト、 10^{15} eV)までは加速されていると考えられており、観測的にその起源を解明することが本研究の目的である。

PeV の宇宙線が周囲の星間物質と反応すると、多くの二次粒子を生成するが、最終的に親粒子の 10%程度 (0.1PeV=100TeV, sub-PeV) のエネルギーを持つガンマ線が生成される。ガンマ線は生成場所から宇宙磁場の影響を受けずに直進するため、これらのガンマ線の到来方向を測定することで、PeV 宇宙線の発生源を突き止めることができる。

本研究では、南米ボリビアの高山 (4740m) に建設中の ALPAQUITA 空気シャワー実験に地下ミュオン粒子検出器を設置することで、バックグラウンドとなる大量の宇宙線空気シャワー事象から、稀事象である sub-PeV ガンマ線を選別し、南天における宇宙線の加速天体を探索する。

3. 研究の方法

ALPAQUITA 実験は、150m×150m の範囲に約 50 台のプラスチックシンチレーション検出器を配置し (空気シャワーアレイ)、宇宙線空気シャワーを観測する実験である。本研究では、この地上検出器アレイの地下 2.5m に各 60m² の地下ミュオン粒子検出器を 10 台設置し、ALPAQUITA による sub-PeV ガンマ線観測を実現する。期間前半に地下検出器の設計を完了し、随時設置を進めながら期間後半にガンマ線観測をおこない、ガンマ線で明るい数天体からの sub-PeV ガンマ線の検出を目指す。

研究開始後、「背景」で述べた急速な進展を受け、ALPAQUITA の 4 倍の大きさの ALPACA 実験 (300m×300m に 401 台のシンチレーション検出器を設置) の予算が認められた (代表・瀧田正人)。大型計画で最も効果的な観測ができるよう、ミュオン粒子検出器の設計を改めることになり、本研究では設計と運用のための準備に注力した。一方、地上検出器を 97 台に増強して南半球における初めての本格的な空気シャワー実験を確立した。

コロナ禍で現地への渡航が制限される中、日本・ボリビアの共同研究者に両国の建築技術者を交えたオンライン会議を繰り返すことで、新しいミュオン粒子検出器の設計を確定した。コロナ禍後の 2022 年から現地訪問を再開し、地上検出器の設置、運用開始、メンテナンスを行い、ほぼリアルタイムで転送したデータを日本で解析を進めた。

4. 研究成果

(1) 地下ミュオン粒子検出器の設計確定と運用の準備
 日本研究者、ボリビア研究者、両国の建築技術者を交えたオンライン会議を隔週で継続し、大面積地下ミュオン粒子検出器の設計を確定した(図1)。7.5m×7.5mの小部屋(cell)を16個配置し、合計900m²の有効検出面積をもつ。このような装置をALPACA全体で4基設置する設計とした。まず、先行してALPAQUITA用に1基建設し、早期にsub-PeVガンマ線の観測を実現する。

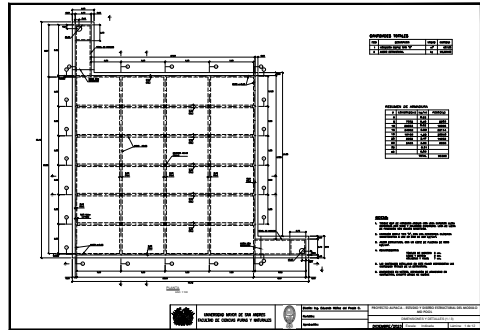


図1 大面積地下ミュオン粒子検出器平面図。

設計に先立ち、現地の地質調査と水源調査も実施し、地質に問題がないことを確認した。一方、当初予定していた井戸の掘削は、水量が安定しない見込みであることから断念した。近隣の街から輸送に加えて、サイトから1.3kmの場所にあるダム水の使用許可をえた。フィルターを通すことで実験に使用可能な水質が得られることを実証した。

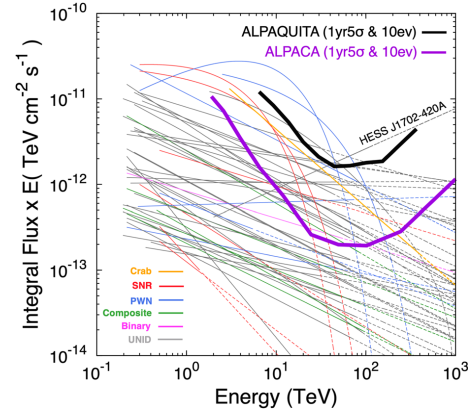


図2 南天既知のTeV天体に対するALPACA+MDの検出感度。

(2) ALPACA 地上検出器と新地下ミュオン粒子検出器によるガンマ線検出感度の見積もり

モンテカルロ計算を利用して、大面積地下ミュオン粒子検出器1基と97台の地上検出器を利用したALPAQUITA実験のガンマ線検出感度を求めた。図2は南半球の既知のTeVガンマ線天体のエネルギースペクトルを、測定範囲は実線で外挿範囲を破線で示す。黒実線で示すALPACA感度で、一年の観測でも複数の天体に対してsub-PeVで有意な検出が可能になることがわかる。同時に、全ALPACAが完成すれば一年で既知天体の半数に対してsub-PeVまでのスペクトルの伸びの有無を判定できることがわかった。



図3 ボリビアに設置された97台のALPACA地上検出器アレイ。

(3) ALPACA 97台地上検出器の設置とデータ解析

① 地上検出器の設置

コロナ禍明けの2022年、2023年にボリビアを訪問し97台の検出器の設置、配線、データ収集機器の設置、立ち上げを行った(写真3)。2022年9月から部分観測を開始したのち、2023年4月と6月には初期不良部品の交換・修理を行った。これにより2023年6月以降安定したデータ収集を継続している。図4に本装置で観測された宇宙線空気シャワー事象の1例を示す。

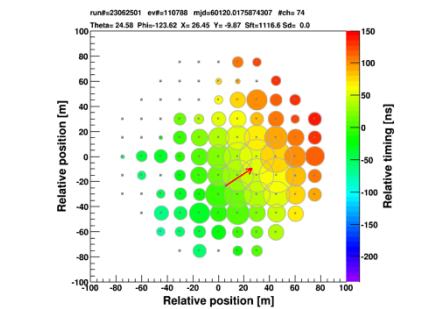


図4 ALPACA 地上検出器アレイで観測された宇宙線空気シャワー事象例

② 地上検出器による角度分解能の検証

空気シャワーアレイの角度分解能を検証するため、97台の検出器を半分ずつにグループ分けしてそれぞれで到来方向を解析するEven-odd法を適用した。得られた到来方向の開き角の分布を図5に示す。中央値が2度であることは、対応するモードエネルギー7TeVにおいて角度分解能が1度であることを示す。図5は観測データとシミュレーションの一致も示しており、装置が期待通りの性能で稼働していることがわかった。

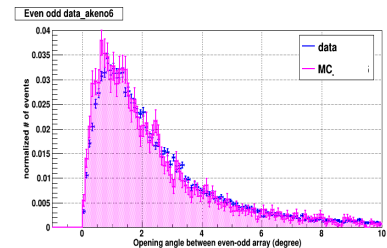


図5 Even-odd法による開き各分布。十字が観測データでマゼンタはシミュレーション結果。

③ 地上検出器による月の影の検証

観測している宇宙線は全方位から等方的に到来するが、月に遮断されるため月の方向に限って到来頻度の減少が期待される。図6に225日間の観測で得られた月を中心とした方向の宇宙線頻度分布を示す。青色で示す頻度減少が月の周りで起きていることがわかる。最大の減少方向、減少の深さと広がり、東西方向の非対称構造は期

待通りの値である。これは、ALPAQUITA 地上検出器とその解析において、指向方向の決定、各シャワーの到来方向決定の精度が予想通りであることを示す。本解析から得られる角度分解能は1度であり、even-odd 解析と同じ結果が得られた。

④ 地上検出器によるガンマ線探索

地下ミュー粒子検出器を設置していない状態での天体からのガンマ線探索を実施した。南半球でよく知られる TeV ガンマ線を放射する超新星残骸 RX J1713.7-3946 について解析を行ったが有意なガンマ線信号は得られなかった。エネルギー別に得られた到来頻度の上限値を図 7 の白抜き三角で示す。白丸と黒四角で示す IACT による先行研究と矛盾しない上限値となった。特に 200TeV 近くではすでに先行研究と同等の上限値を得ており、空気シャワーアレイ実験の威力を証明した。

今後地下ミュー粒子検出器を設置、稼働することで本天体からのガンマ線が検出できると期待できる。

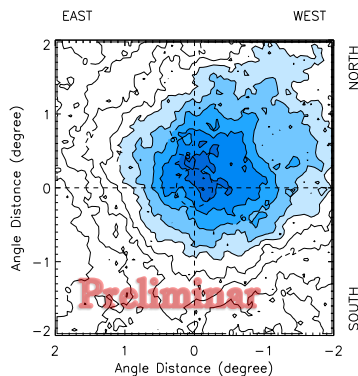


図 6 ALPAQUITA 地上検出器アレイで観測された「月の影」

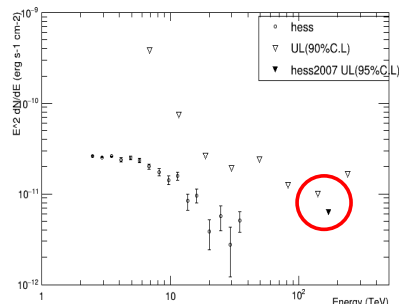


図 7 ALPAQUITA 地上検出器で決定した RX J1713.7-3946 からのガンマ線強度上限値 (白抜き三角)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 7件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 S .Okukawa et al. (ALPACA Collaboration)	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 S. Kato 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 T. Sako on behalf of the 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 Science	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 M. Anzorena et al. (The ALPACA Collaboration)	4. 巻 ICHEP2022
2. 論文標題 ALPACA experiment: A new air shower array to explore the sub-PeV gamma-ray sky in the southern hemisphere	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	6. 最初と最後の頁 91
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 T. Sako for the ALPACA collaboration	4. 巻 ICRC2021
2. 論文標題 Current statu of ALPACA for exploring sub-PeV gamma-ray sky in Bolivia	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	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 Y. Yokoe for the 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 Science	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 S. Kato for the 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 Science	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

〔学会発表〕 計15件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 さこ隆志
2. 発表標題 ALPACA実験4 : ALPAQUITA初期性能と今後の建設計画
3. 学会等名 日本天文学会 2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 川田和正
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
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 加藤勢、他ALPACA Collaboration
2. 発表標題 ALPACA実験20: ALPAQUITA実験の性能評価シミュレーション6
3. 学会等名 日本物理学会 2021年年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takashi Sako for the ALPACA Collaboration
2. 発表標題 ALPACA実験24: 建設状況と2022年の計画
3. 学会等名 日本物理学会 2022年年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川島輝能、他ALPACA Collaboration
2. 発表標題 ALPACA実験27: 光電子増倍管のダイナミックレンジの拡張
3. 学会等名 日本物理学会 2022年年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 さこ隆志
2. 発表標題 ALPACAの現状
3. 学会等名 CRC将来計画タウンミーティング (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Sei Kato for the ALPACA Collaboration
2. 発表標題 VHE gamma-ray astronomy using the prototype array of a new extensive air-shower experiment ALPACA in the southern hemisphere
3. 学会等名 Connecting high-energy astroparticle physics for origins of cosmic rays and future perspectives (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takashi Sako for the 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 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takashi Sako for the ALPACA Collaboration
2. 発表標題 Current status of ALPACA for exploring sub-PeV gamma-ray sky in Bolivia
3. 学会等名 37th ICRC 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Marcos Anzorena for the ALPACA Collaboration
2. 発表標題 The ALPACA experiment: observing sub-PeV γ -rays in the Southern Hemisphere
3. 学会等名 27th European Cosmic Ray Symposium (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takashi Sako
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 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takashi Sako
2. 発表標題 ALPACA air shower array to explore 100TeV gamma-ray sky in Bolivia
3. 学会等名 Internatioanal Cosmic Ray Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takashi Sako
2. 発表標題 Current status of ALPACA for exploring sub-PeV gamma-ray sky in Bolivia
3. 学会等名 Internatioanal Cosmic Ray Conference 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takashi Sako
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 International Conference on High Energy Physics 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takashi Sako
2. 発表標題 ALPACA実験24：建設状況と2022年の計画
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

ALPACA実験 https://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
研究分担者	日比野 欣也 (Hibino Kinya) (80260991)	神奈川大学・工学部・教授 (32702)	

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	サンアンドレス大学			
メキシコ	グアダラハラ大学			