

令和 6 年 6 月 15 日現在

機関番号：12601

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(B)）

研究期間：2019～2023

課題番号：19KK0074

研究課題名（和文）拡張テレスコープアレイ実験による極高エネルギー宇宙線起源の探索

研究課題名（英文）Search for Ultra-High Energy Cosmic Ray origin using the extended Telescope Array experiment

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） 14,100,000円

研究成果の概要（和文）：テレスコープアレイ実験の拡張地上検出器による安定運用を実現した。コロナ禍で初期調整や保守のための渡航が叶わず時間を要したが、ユタ大学との作業分担とオンライン議論によって達成した。拡張部分によるエネルギースペクトル導出も成功し、先行研究と矛盾のないスペクトルを測定した。オリジナルのテレスコープアレイ実験の運用も継続し、2021年5月には史上二番目に高いエネルギーを持つ宇宙線の観測に成功した。「アマテラス粒子」と名付けたこの事象は世界中のメディアで話題となり、宇宙線研究への注目を集めた。宇宙磁場を考慮した到来方向解析も進め、爆発的星生成銀河関連への影響やアマテラス粒子起源の解釈に適用した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙から10ジュールにも相当するエネルギーを持つ超高エネルギー宇宙線が到来していることは現代物理学の最大の謎のひとつである。本研究を通してテレスコープアレイ実験が2021年に観測した、史上2番目にエネルギーの高い宇宙線（通称アマテラス）の報告は、日本のみならず世界で高い関心を集めた。観測能力を向上した拡張テレスコープアレイの安定運用が本研究によって成功したことで、アマテラスのような驚くべき自然現象を今後発見し、物理学の基本問題の解明に挑み社会の期待に応えることができる。

研究成果の概要（英文）：Stable operation of the extended surface detectors of the Telescope Array experiment was achieved. Although the initial adjustments and maintenance were delayed due to travel restrictions during the COVID-19 pandemic, this was accomplished through the task sharing with the University of Utah and online discussions. The energy spectrum derived from the extended part was successfully measured, showing consistency with previous research. The original Telescope Array experiment continued to operate, and in May 2021, it successfully observed the second-highest energy cosmic ray in history. This event, named the "Amaterasu Particle," garnered attention from media worldwide and brought significant attention to cosmic ray research. Analysis of arrival directions, considering the cosmic magnetic field, also progressed and was applied to understand the impact on correlations with starburst galaxies and the interpretation of the origin of the Amaterasu Particle.

研究分野：宇宙線物理学

キーワード：宇宙線 アマテラス粒子 粒子加速 銀河系外天体 空気シャワー実験

1. 研究開始当初の背景

宇宙で最も高いエネルギーを持つ粒子「最高エネルギー宇宙線」の観測は、日米を中心として米国ユタ州で展開するテレスコープアレイ(TA)実験と、欧米を中心にアルゼンチンで展開するオージェ実験が世界をリードしている。2000年代に観測を開始したこれらの実験は、前世代の実験の課題であった 10^{20}eV における到来頻度の急激な減少「カットオフ」の存在を実証した。テレスコープアレイは最高エネルギー宇宙線が特定の方向から集中する「ホットスポット」の存在を示し、オージェ実験も統計的優位度は低いもののウォームスポットと呼ばれる集中を報告していた。さらに、オージェ実験の解析では宇宙線の到来方向が近傍の爆発的星生成銀河の分布と相関していることを示しており、最高エネルギー宇宙線の起源解明をめぐる新たな展開が始まっていた。テレスコープアレイ実験はホットスポットを統計的に有意に実証するために、観測面積を4倍にするTA×4実験を提案し、2.5倍の拡張を実現する「拡張TA実験」の建設が始まっていた。

2. 研究の目的

観測面積を拡大した拡張TA実験を安定的に運用し、蓄積された観測データから最高エネルギー宇宙線の起源の解明を目指す。

3. 研究の方法

拡張TA実験は、米国ユタ州でおよそ1000台の地上検出器(SD)と3箇所に設置された大気蛍光望遠鏡(FD)を用いて最高エネルギー宇宙線の観測を行う。SDは原則自動的に観測が可能だが、過酷な砂漠の中で多くの検出器を利用するため、定常的なメンテナンスが必要である。FDは月のない晴天時に研究者による観測が必要なため、交代で米国に滞在する必要がある。研究期間中にリモート観測システムの整備を進め、現地とリモートによる観測体制を確立する。

観測されたデータを継続して解析する。特に、新たに拡張したSDとFDについては、これまでの解析手法を踏襲しつつ、装置の較正を確立してこれまでの装置による解析結果と合わせた解析を可能にする。

新旧装置のデータを利用して以下の解析を実現する。

- (1) SD検出器とFD検出器の安定運用を実現し、拡張部分のみでのエネルギースペクトルを導出する
- (2) 最新の観測データを利用したホットスポット等の宇宙線到来方向の集中を探索する
- (3) 宇宙磁場の影響を考慮した宇宙線起源の解析方法を確立する
- (4) TA SDを利用した宇宙ニュートリノ事象の探索

4. 研究成果

(1) 安定した観測の実現とSD検出器によるエネルギースペクトルの測定

- ① コロナ禍により日本人の現地渡航が困難になったが、日本からのSDリモートモニタ体制を強化し、現地雇用技術職員とのやりとりによる保守体制を確立した。故障SD回線を日本で検査・修理する体制も確立した。FDは日本担当分の完全リモート化に成功し、米国担当分の現地シフトメンバーと情報交換しながらの観測を確立した。
- ② 拡張SD検出器の初期調整を完了し、エネルギースペクトルを導出した(図1)。これまでの観測で明らかになっていた最高エネルギーでのカットオフを確認し、装置が安定して稼働していることを確認した。
- ③ TA SD検出器の解析を行い、TA観測史上最高(宇宙線観測史上二番目)エネルギーをもつ事象を発見しサイエンス誌で発表した。本事象は「アマテラス粒子」と命名され世界中のメディアでも取り上げられ大きな話題になった(図2)。

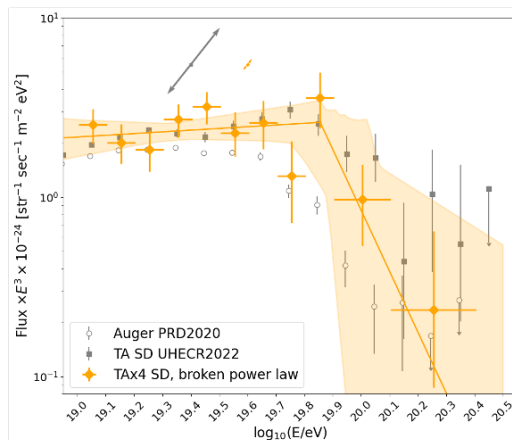


図1: 拡張SD検出器によるエネルギースペクトル(オレンジ点)。過去のTAの結果(黒点)と無矛盾な結果が得られた。

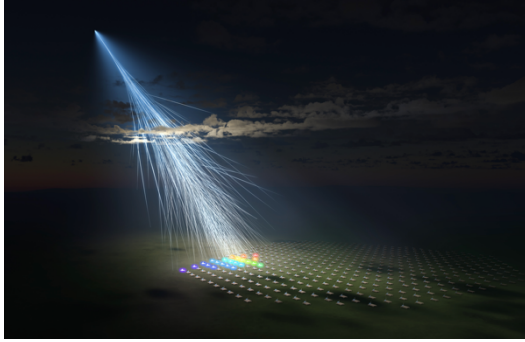


図 2: アマテラス粒子検出の様子を示すイメージ図。米国ユタ州の明け方に地上検出器によって 244EeV の宇宙線が観測された。

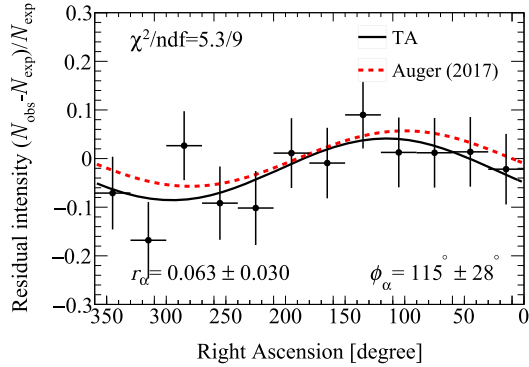


図 3: 双極異方性の解析。TA の結果 (黒点) は Auger のベストフィット (赤点線) と無矛盾だが統計的には有意ではない

(2) 宇宙線到来方向による起源探索

- ① ホットスポット領域の解析を継続し最新のデータでも信号の増加を確認した。一方で、後半のデータでは前半に対して信号の増加率が低い傾向にあり、統計的有意度は増加しなかった。
- ② ホットスポットよりも低いエネルギーの解析によって、ペルセウス座・魚座超銀河団方向の新たな宇宙線事象の増加を発見・報告した。
- ③ オージェ実験が南半球の観測をもとに報告する双極異方性の解析を行った。振幅・位相ともにオージェと矛盾しない結果が得られたが、統計的に有意な振幅は得られなかった (図 3)。

- (3) 銀河磁場による宇宙線の軌道偏向を計算し、仮定した爆発的星生成銀河の分布に応じて観測結果を予想する手法を確立した。オージェデータによる、磁場偏向を考慮しないこれまでの解析では、わずか 10% の宇宙線が仮定天体から到来するとされてきたが、磁場を考慮することで、天体の寄与が大きい可能性があることがわかった (図 4)。

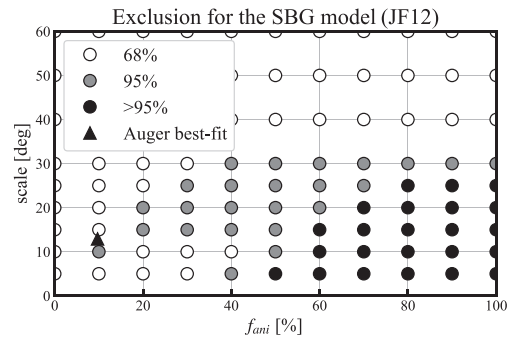


図 4: 銀河磁場の影響を考慮した場合の爆発的星生成銀河の寄与とランダム磁場の効果の制限。

(4) 大天頂角空気シャワーの解析を進めた。

- ① 機械学習を用いた粒子判定方法を確立し、拡散ニュートリノ事象を探索した。ニュートリノ事象は未検出であったため、フラックスの上限を求めた (図 5)。今後の点源探索のために、シミュレーションと解析手法の改善を進めている。
- ② 大天頂角ハドロン宇宙線事象に対するエネルギー決定関数を確立した。既存データによる解析可能事象数の増加を可能にした。

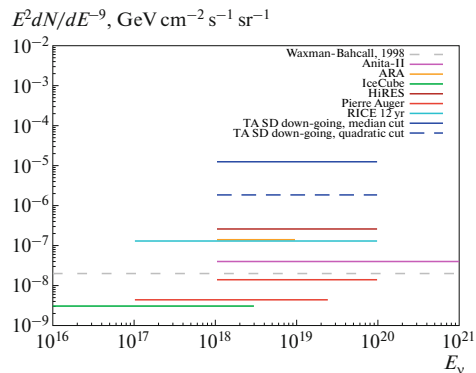


図 5: 拡散ニュートリノに対するフラックス上限値。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計16件（うち査読付論文 13件 / うち国際共著 16件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Albert A. et al.	4. 巻 934
2. 論文標題 Search for Spatial Correlations of Neutrinos with Ultra-high-energy Cosmic Rays	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 164 ~ 164
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac6def	査読の有無 有
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 Kalashev O., Kharuk I., Kuznetsov M., Rubtsov G., Sako T., Tsunesada Y., Zhezher Ya.	4. 巻 17
2. 論文標題 Deep learning method for identifying mass composition of ultra-high-energy cosmic rays	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 P05008 ~ P05008
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-0221/17/05/P05008	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 Abbasi R.U. et al.	4. 巻 105
2. 論文標題 Observation of variations in cosmic ray single count rates during thunderstorms and implications for large-scale electric field changes	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 62002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.105.062002	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 A. Coleman et al.	4. 巻 147
2. 論文標題 Ultra high energy cosmic rays The intersection of the Cosmic and Energy Frontiers	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 102794 ~ 102794
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.astropartphys.2022.102794	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 R.U.Abbasi et al. (Telescope Array Collaboration)	4. 巻 1019
2. 論文標題 Surface detectors of the TAx4 experiment	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 165726 ~ 165726
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2021.165726	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 Ivanov D, Kalashev O E, Kuznetsov M Yu, Rubtsov G I, Sako T, Tsunesada Y, Zhezher Y V	4. 巻 2
2. 論文標題 Using deep learning to enhance event geometry reconstruction for the telescope array surface detector	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Machine Learning: Science and Technology	6. 最初と最後の頁 015006 ~ 015006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/2632-2153/abae74	査読の有無 有
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 E. Kido et al. (Telescope Array Collaboration)	4. 巻 ICRC2021
2. 論文標題 Current status and prospects of surface detector of the TAx4 experiment	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	6. 最初と最後の頁 203
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 H. Jeong et al. (Telescope Array Collaboration)	4. 巻 ICRC2021
2. 論文標題 Reconstruction of Air Shower Events Measured by the Surface Detectors of the TAx4 Experiment	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	6. 最初と最後の頁 331
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. W. Kim et al. (Telescope Array Collaboration)	4. 巻 ICRC2021
2. 論文標題 Analysis of TAx4 hybrid trigger and events	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	6. 最初と最後の頁 332
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 Abbasi R. U. et al. (Telescope Array collaboration)	4. 巻 909
2. 論文標題 The Cosmic-Ray Composition between 2 PeV and 2 EeV Observed with the TALE Detector in Monocular Mode	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 178 ~ 178
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abdd30	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 Ivanov D, Kalashev O E, Kuznetsov M Yu, Rubtsov G I, Sako T, Tsunesada Y, Zhezher Y V	4. 巻 2
2. 論文標題 Using deep learning to enhance event geometry reconstruction for the telescope array surface detector	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Machine Learning: Science and Technology	6. 最初と最後の頁 015006 ~ 015006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/2632-2153/abae74	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 Belz J. W. et al. (Telescope Array collaboration)	4. 巻 125
2. 論文標題 Observations of the Origin of Downward Terrestrial Gamma Ray Flashes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Atmospheres	6. 最初と最後の頁 1-26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2019JD031940	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 Abbasi R. U. et al. (Telescope Array collaboration)	4. 巻 131
2. 論文標題 Search for Ultra-High-Energy Neutrinos with the Telescope Array Surface Detector	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Experimental and Theoretical Physics	6. 最初と最後の頁 255 ~ 264
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1134/S106377612005012X	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 Abbasi R.U. et al. (Telescope Array collaboration)	4. 巻 102
2. 論文標題 Measurement of the proton-air cross section with Telescope Array 's Black Rock Mesa and Long Ridge fluorescence detectors, and surface array in hybrid mode	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 062004-1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.062004	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 Abbasi R. U. et al. (Telescope Array collaboration)	4. 巻 899
2. 論文標題 Evidence for a Supergalactic Structure of Magnetic Deflection Multiplets of Ultra-high-energy Cosmic Rays	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 86 ~ 86
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aba26c	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 Abbasi R. U. et al. (Telescope Array collaboration)	4. 巻 898
2. 論文標題 Search for Large-scale Anisotropy on Arrival Directions of Ultra-high-energy Cosmic Rays Observed with the Telescope Array Experiment	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L28 ~ L28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/aba0bc	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

[学会発表] 計18件(うち招待講演 5件/うち国際学会 14件)

1. 発表者名 Shoichi Ogio
2. 発表標題 Energy spectrum measured by the Telescope Array Surface Detectors
3. 学会等名 UHECR2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Jihyun Kim
2. 発表標題 Updates on the Hotspot and the Perseus-Pisces supercluster Excess Observed by the Telescope Array Experiment
3. 学会等名 UHECR2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Eiji Kido
2. 発表標題 Current status of the TAx4 surface detectors
3. 学会等名 UHECR2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kozo Fujisue
2. 発表標題 TAx4 surface detectors data analysis
3. 学会等名 UHECR2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ryo Higuchi
2. 発表標題 Estimation and reduction of the biases by the galactic magnetic field on the UHECR correlation studies
3. 学会等名 UHECR2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 E. Kido
2. 発表標題 Status of the Telescope Array detectors
3. 学会等名 TIPP2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Nonaka
2. 発表標題 Anisotropy search in the Ultra High Energy Cosmic Ray Spectrum in the Northern Hemisphere using latest data obtained with Telescope Array surface detector
3. 学会等名 ICRC2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 R. Higuchi
2. 発表標題 Effects of Galactic magnetic field on the UHECR anisotropy studies
3. 学会等名 ICRC2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 E. Kido
2. 発表標題 TA and TAx4 experiment summary. Status and results.
3. 学会等名 GCOS workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Fujii
2. 発表標題 Update on the large-scale cosmic-ray anisotropy search at the highest energies by the Telescope Array Experiment
3. 学会等名 ICRC2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takashi Sako
2. 発表標題 Cosmic ray physics - experimental review -
3. 学会等名 Workshop on forward physics and QCD with LHC, EIC and cosmic ray (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yana Zhezher
2. 発表標題 Overview of the Telescope Array experiment
3. 学会等名 Connecting high-energy astroparticle physics for origins of cosmic rays and future perspectives (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ryo Higuchi
2. 発表標題 Effects of Galactic magnetic field on the UHECR anisotropy studies
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 Toshihiro Fujii
2. 発表標題 Overview and Summary: Connecting high-energy astroparticle physics for origins of cosmic rays and future perspectives
3. 学会等名 Connecting high-energy astroparticle physics for origins of cosmic rays and future perspectives (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 さこ隆志
2. 発表標題 テレスコープアレイ実験による超高エネルギー宇宙線原子核組成研究の進展
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木戸英治, 他Telescope Array Collaboration
2. 発表標題 TA実験332: TAx4実験全体報告6
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 申興秀, 他Telescope Array Collaboration
2. 発表標題 TA実験335: ハイブリッドトリガを用いた大気蛍光望遠鏡事象の解析
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yana Zhezher, 他Telescope Array Collaboration
2. 発表標題 TA実験337: Mass composition studies with the Telescope Array Surface Detector
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p> テレスコープアレイ実験 http://www-ta.icrr.u-tokyo.ac.jp/ta_public/index.html テレスコープアレイ実験 http://www-ta.icrr.u-tokyo.ac.jp/ta_public/index.html テレスコープアレイ実験 webページ (日本) http://www-ta.icrr.u-tokyo.ac.jp/ta_public/index.html テレスコープアレイ実験 webページ (ユタ大学) http://www.telescopearray.org テレスコープアレイ実験 webページ (日本) http://www-ta.icrr.u-tokyo.ac.jp/ta_public/index.html テレスコープアレイ実験 webページ (ユタ大学) http://www.telescopearray.org </p>

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	野中 敏幸 (Nonaka Toshiyuki) (30506754)	東京大学・宇宙線研究所・助教 (12601)	

6. 研究組織（つづき）

	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	木戸 英治 (Kido Eiji) (00633778)	国立研究開発法人理化学研究所・開拓研究本部・研究員 (82401)	
研究分担者	藤井 俊博 (Fujii Toshihiro) (50706877)	京都大学・白眉センター・特定助教 (14301)	

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			
米国	ユタ大学	ロヨラ大学	ラトガーズ大学	
韓国	成均館大学	漢陽大学	梨花大学	
ロシア連邦	ロシア科学アカデミー原子核研究所			
ベルギー	ブリュッセル自由大学			
米国	ユタ大学	ロヨラ大学	ラトガーズ大学	
韓国	梨花大学	漢陽大学	成均館大学	
ロシア連邦	ロシア科学アカデミー原子核研究所			
ベルギー	ブリュッセル自由大学			
米国	University of Utah	Loyola University Chicago		
韓国	Hanyang University	Sungkyunkwan University	Yonsei University	他2機関
ロシア連邦	Institute for Nuclear Research	Lomonosov State University		
ベルギー	Universit Libre de Bruxelles			
チェコ	Czech Academy of Sciences			

共同研究相手国	相手方研究機関			
米国	University of Utah	Rutgers University		
韓国	Hanyang University	Sungkyunkwan University	Yonsei University	他2機関
ロシア連邦	Institute for Nuclear Research	Lomonosov State University		
ベルギー	Universite Libre de Bruxelles			
チェコ	Czech Academy of Sciences			