

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：13901

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(A））

研究期間：2019～2023

課題番号：18KK0384

研究課題名（和文）暗黒物質と銀河内PeV陽子加速源の発見を目指すガンマ線望遠鏡CTAの高感度化

研究課題名（英文）Improving the gamma-ray detection sensitivity of the Cherenkov Telescope Array to discover dark matter and Galactic PeVatrons

研究代表者

奥村 暁 (Okumura, Akira)

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・講師

研究者番号：90645011

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,000,000円

渡航期間： 5ヶ月

研究成果の概要（和文）：本課題では次世代ガンマ線望遠鏡であるチェレンコフ望遠鏡アレイ（CTA）の装置開発と初期観測の2つの研究を進めた。1つ目はCTA小口径望遠鏡の焦点面カメラの開発であり、ドイツのマックスプランク核物理学研究所を主たる国際共同研究機関として進めた。焦点面カメラに使用する光検出器の開発や光学シミュレーションに基づくカメラ設計を担当し、2025年に予定される望遠鏡1号機に向けたカメラ設計の最終化を行った。2つ目ではスペインのカナリア天体物理研究所（IAC）を主たる国際共同研究機関とし、CTA大口望遠鏡1号機の観測体制の構築と試験観測を進め、複数のガンマ線天体観測の結果を出版した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高エネルギーの荷電粒子である宇宙線を人類の到達できないエネルギー領域まで加速する、銀河系内外の天体とその物理機構は何かという高エネルギー宇宙物理学の問いに答えるため、本研究では次世代ガンマ線望遠鏡であるチェレンコフ望遠鏡アレイ（CTA）の装置開発や初期運用を進めた。CTAの完成は2020年代後半に見込まれるため、現時点で華々しい成果には至っていないが、成果創出のための着実な進展が装置開発と観測体制の構築で得られ、また装置開発では半導体光検出器の高性能化などを進めることができ、産業利用への応用が期待される。

研究成果の概要（英文）：In this research, we focused on two main topics related to the next-generation gamma-ray observatory, the Cherenkov Telescope Array (CTA). The first research topic involved developing the focal-plane camera of CTA Small-Sized Telescopes in collaboration with Max-Planck Institute for Nuclear Physics in Germany. Our primary responsibilities included the development of photodetectors and simulation of the telescope optical system. The telescope and camera designs for their mass production that is planned to be started in 2025 has been finalized. In the second research topic, we initiated the pilot observations using the first Large-Sized Telescope of CTA, in collaboration with Instituto de Astrofísica de Canarias in Spain. We have published several papers based on gamma-ray observations of high-energy objects.

研究分野：宇宙線物理学

キーワード：宇宙線物理学 ガンマ線天文学 チェレンコフ望遠鏡アレイ（CTA） 半導体光検出器

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

銀河系内では $10^{15} \sim 10^{18}$ eV あああ、また銀河系外では 10^{20} eV のエネルギーにまで達する高エネルギーの荷電粒子である宇宙線はどのような天体で加速されているのか（宇宙線の加速起源）、またどのような環境と機構で加速されているのか（宇宙線の加速機構）、これら2つの問いは、高エネルギー宇宙物理学の長年にわたる研究課題である。

宇宙線は星間磁場や銀河間磁場によるローレンツ力でその進行方向を曲げられてしまうため、地球近傍で宇宙線の観測をしても天体の位置情報を得ることができず、宇宙線の加速起源に迫ることは困難である。また、加速天体を発見することができなければ天体種別の決定や加速環境の特定もできないため、宇宙線の加速機構を宇宙線観測そのものから調べることも困難である。

このような荷電粒子の観測における問題を解決するためには、ガンマ線やニュートリノといった電荷を持たない高エネルギーの中性粒子により宇宙を観測する必要がある。高エネルギー天体近傍には高密度の星間物質や強い磁場が存在すると考えられるため、高エネルギー宇宙線がこれら標的に衝突すれば高エネルギーガンマ線や高エネルギーニュートリノを発生させる。

したがって、大きな有効面積と高い角度分解能を有するガンマ線望遠鏡を実現すれば、先頭で述べた宇宙線の加速起源と加速機構を解明できる可能性がある。

実際、現在稼働中の HESS 望遠鏡や MAGIC 望遠鏡などの地上ガンマ線望遠鏡では、超新星残骸や銀河中心などの銀河系内天体からの高エネルギーガンマ線放射を多数発見し、宇宙線加速天体を解き明かしつつある。また Tibet 実験や LHAASO 実験などの地上空気シャワーアレイ実験でも、ガンマ線の全天長時間観測によって多数のガンマ線天体が 10^{15} eV (1 PeV) 帯域で見つかりつつある。

しかし高エネルギー宇宙線のうち特にハドロン成分（陽子や原子核）の加速天体はまだ確定されておらず、数 PeV まで効率良く宇宙線陽子を加速する天体がどこにあるのかは不明なままである。

これを解決するには、広大な有効面積で長時間の観測が可能であり、なおかつ角度分解能に優れたガンマ線望遠鏡が必要である。この目的のために計画されているのが次世代のガンマ線望遠鏡計画であるチェレンコフ望遠鏡アレイ（Cherenkov Telescope Array, CTA）であり、2020年代の観測開始を目指し、望遠鏡光学系と焦点面カメラの要素開発が進められてきた。

2. 研究の目的

本研究では CTA で 高エネルギー帯域（1~300 TeV）の観測を担う小口径望遠鏡の焦点面カメラの装置開発、中間エネルギー帯域（100 GeV~10 TeV）の観測を担う中口径望遠鏡の焦点面カメラの高感度化、また 低エネルギー帯域（20 GeV~1 TeV）の観測を担う大口径望遠鏡の初期観測による科学成果の創出の3つを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では前節で述べたように、3つの研究を進めた。このうち はドイツのマックスプランク核物理学研究所を主たる共同研究相手とした国際共同で行い、研究代表者の奥村が名古屋大学での研究を進めるとともに、相手国へ複数回長期滞在することで共同研究を進めた。

日本側では半導体光検出器の性能評価、光学シミュレーションを用いた焦点面カメラと望遠鏡光学系の性能評価と設計、ソフトウェア開発などを担当した。相手国への滞在中は、カメラモジュールを用いた光検出器の性能評価、試験観測のデータ解析、ソフトウェア開発、カメラ組み上げ試験などを行った。

また同じくマックスプランク核物理学研究所で の中口径望遠鏡の高感度化の検討を進める予定であったが、CTA 全体の計画との整合性を維持するのが困難と判明したため、大口径望遠鏡の光検出器の高感度化に取り組んだ。これは日本国内で行なった。

次に の大口径望遠鏡 1号機を用いた複数天体のガンマ線観測は、スペインのカナリア諸島天体物理学研究所の所有するロケ・デ・ロス・ムチャーチョ天文台へ複数回出張し、観測シフトや現場の環境整備を行なった。

本研究期間中は新型コロナのため当初計画通りに渡航を進めることが困難となり、予定していた 2021~2022 年度の相手国への渡航を断念することとなった。しかしオンライン会議などを用いた共同研究者との密な連携は維持し、観測シフトも現地滞在からリモート観測へ技術的に移行を果たすことに成功し、当初の計画をある程度進めることができた。

4. 研究成果

本節では、3つの研究目的それぞれの研究成果を記述する。

CTA 小口径望遠鏡の焦点面カメラの開発

CTA の小口径望遠鏡の焦点面カメラの開発は、研究代表者の奥村が 2013 年から取り組んできた研究課題である。2015 年の試作 1号機の製作とガンマ線試験観測、2019 年の試作 2号機

の製作とガンマ線試験観測を経て、小口径望遠鏡 70 台の量産前の最終カメラ設計を完成させることが本研究の目的であった。

そこで本研究では研究代表者が名古屋大学で半導体光検出器の性能評価や光学シミュレーションを担当し、国際共同ではカメラ筐体の設計、光検出器の読み出し回路およびトリガー回路の開発、後段エレクトロニクスの開発、カメラ制御・データ収集ソフトウェアの開発を行なった。

半導体光検出器の性能評価では、これまでに考慮されていなかった光検出器外の媒質（本研究の場合はカメラ入射窓）による光学的クロストークの増加、半導体表面の保護層による干渉効果とその光検出効率の入射角度依存性への強い影響を発見した。また月光下でのガンマ線観測を可能にしガンマ線天体の観測可能時間を倍増させるため、半導体光検出器の出力特性が大光量下でどのように変化するかを定量評価などを行なった。これら成果は複数の国内学会や国際会議の場で発表済みであり未査読ではあるが国際会議プロシーディングスとしても発表した。投稿論文も現在執筆中である。

光学シミュレーションでは半導体光検出器、カメラ筐体、望遠鏡光学系を組み合わせた性能評価を行い、カメラ筐体の大きさが望遠鏡性能に与える影響や焦点面での入射角度依存性の評価を行なった。これによりカメラ筐体の外形設計を最終化した。

上記の研究により、2023 年夏にはカメラ設計の最終化を終え、最終試作機の製作を進めた。2024 年現在この作業は継続中であるが、図 1 に示す小口径望遠鏡用の設計完了が本研究の成果である。

2020 年代後半には CTA の本格稼働を予定しており、小口径望遠鏡の銀河系内天体の長時間観測により宇宙線加速天体の発見を目指す。小口径望遠鏡による 300 TeV 超までのガンマ線観測を行いスペクトルの取得ができれば、ガンマ線発生元となる 3 PeV 超の宇宙線陽子の存在を明らかにすることができると期待される。

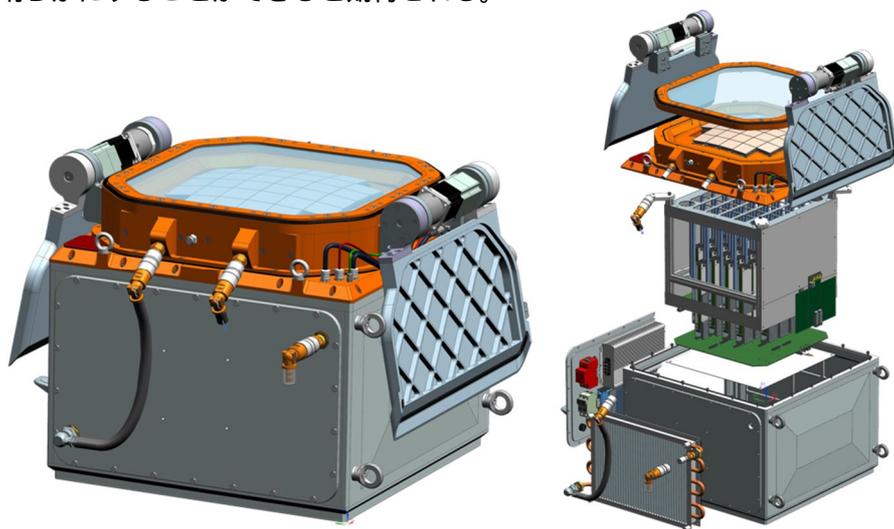


図 1. CTA 小口径望遠鏡の焦点カメラの最終設計（左）と各構成要素の分解図（右）

CTA 中口径・大口径望遠鏡の焦点面カメラの高感度化

CTA の中口径・大口径望遠鏡の焦点面カメラでは約 1800 本の光電子増倍管を使用する。これを将来的に半導体光検出器に置き換えれば、光検出効率の上昇による低エネルギーガンマ線に対する検出感度の向上、高画素化によるガンマ線到来方向決定精度の向上、月光下でのガンマ線観測が可能になることによる超長時間観測の実現の 3 つが見込まれる。

本研究では光電子増倍管の半導体光検出器への置き換えを目指し、これら焦点面カメラで使用する集光器と光電子増倍管を組み合わせた場合の光検出能力の測定、同集光器と半導体光検出器を組み合わせた場合の光検出能力の測定、さらに集光器に後述する多層膜コーティングを施した場合の光検出能力の測定を行なった。

半導体光検出器は光電子増倍管に比べて 600 nm 以上の波長に対しての感度が高いため、300 ~ 500 nm に光量の集中する大気チェレンコフ光を検出する場合、夜空からの長波長光がバックグラウンドとして無視できない。そのため少ない層数で選択的に短波長を集光できる多層膜コーティングを東海光学株式会社と共同で開発し、特許を出願した。

図 2 に示すように、集光器表面の鏡面コーティングをこの新規開発のコーティングにしたも

のを製作し、先述の集光能力の比較を行い、新規開発のコーティングで夜空からのバックグラウンド光を低減できる可能性を示した。



図 2. CTA 大口径望遠鏡の焦点カメラで使用する集光器（左）と新規開発した多層膜コーティングを使用した集光器（右）

CTA 大口径望遠鏡 1 号機によるガンマ線天体の観測

2018 年に完成した CTA 大口径望遠鏡 1 号機を用いて複数のガンマ線天体を観測した。最終的には北半球に 4 台、南半球に 4 台の大口径望遠鏡を建設しステレオ観測を行う予定であるが、本研究期間中は完成している 1 号機のみを用いて「かに」星雲などの高エネルギー天体の観測を行なった。

この研究ではスペインのカナリア諸島天体物理学研究所の所有するロケ・デ・ロス・ムチャーチョス天文台へ複数回出張し、望遠鏡のある現地で大口径望遠鏡の観測シフトを行ない、現地での望遠鏡運用を担当した。

現在は望遠鏡 1 台のみのため最終的な性能は出ていないものの、かに星雲の観測による望遠鏡性能の評価や、20 GeV というこれまでの地上ガンマ線望遠鏡では最も低いエネルギー閾値を達成した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計43件（うち査読付論文 22件 / うち国際共著 37件 / うちオープンアクセス 40件）

1. 著者名 MAGIC Collaboration, Abe H., Abe S., Acciari V. A., Agudo I., Aniello T., Ansoldi S., Antonelli L. A., Arbet Engels A., Arcaro C., Artero M., Asano K., et al.	4. 巻 671
2. 論文標題 MAGIC observations provide compelling evidence of hadronic multi-TeV emission from the putative PeVatron SNR G106.3+2.7	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A12 ~ A12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202244931	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 Tagliaferri Gianpiero, Antonelli Angelo, Arnesen Tora, Aschersleben Jann, Attina' Primo, Balbo Matteo, Bang Sunghyun, Barcelo Miquel, Baryshev Andrey, Bellassai Giancarlo, et al.	4. 巻 12182
2. 論文標題 The small-sized telescope of CTA0	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the SPIE	6. 最初と最後の頁 13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2627956	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 Adams Colin B. et al.	4. 巻 8
2. 論文標題 Design and performance of the prototype Schwarzschild-Couder telescope camera	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems	6. 最初と最後の頁 N/A
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/1.JATIS.8.1.014007	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 Adams Colin B. et al.	4. 巻 11820
2. 論文標題 Technical and scientific performance of the prototype Schwarzschild-Couder telescope for CTA	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the SPIE	6. 最初と最後の頁 N/A
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2594580	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 H. Abe et al.	4. 巻 N/A
2. 論文標題 Development of an advanced SiPM camera for the Large Size Telescope of the Cherenkov TelescopeArray Observatory	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 37th International Cosmic Ray Conference	6. 最初と最後の頁 N/A
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. Abe et al.	4. 巻 N/A
2. 論文標題 Status and results of the prototype LST of CTA	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 37th International Cosmic Ray Conference	6. 最初と最後の頁 N/A
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. Abe et al.	4. 巻 N/A
2. 論文標題 First follow-up of transient events with the CTA Large Size Telescope prototype	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 37th International Cosmic Ray Conference	6. 最初と最後の頁 N/A
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 B. Mode et al.	4. 巻 N/A
2. 論文標題 Detection of the Crab Nebula by the prototype Schwarzschild-Couder Telescope	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 37th International Cosmic Ray Conference	6. 最初と最後の頁 N/A
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. Abe et al.	4. 巻 N/A
2. 論文標題 Physics Performance of the Large Size Telescope prototype of the Cherenkov Telescope Array	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 37th International Cosmic Ray Conference	6. 最初と最後の頁 N/A
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 R. Lopez-Coto et al.	4. 巻 N/A
2. 論文標題 Deep-learning-driven event reconstruction applied to simulated data from a single Large-Sized Telescope of CTA	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 37th International Cosmic Ray Conference	6. 最初と最後の頁 N/A
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 R. White et al.	4. 巻 N/A
2. 論文標題 The Small-Sized Telescopes for the Southern Site of the Cherenkov Telescope Array	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 37th International Cosmic Ray Conference	6. 最初と最後の頁 N/A
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. Ohtani et al.	4. 巻 N/A
2. 論文標題 Cross-calibration and combined analysis of the CTA-LST prototype and the MAGIC telescopes	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 37th International Cosmic Ray Conference	6. 最初と最後の頁 N/A
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. Kobayashi et al.	4. 巻 N/A
2. 論文標題 Camera Calibration of the CTA-LST prototype	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 37th International Cosmic Ray Conference	6. 最初と最後の頁 N/A
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 O. Blanch et al.	4. 巻 N/A
2. 論文標題 Commissioning of the camera of the first Large Size Telescope of the Cherenkov Telescope Array	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 37th International Cosmic Ray Conference	6. 最初と最後の頁 N/A
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 D. Ribeiro et al.	4. 巻 N/A
2. 論文標題 Prototype Schwarzschild-Couder Telescope for the Cherenkov Telescope Array: Commissioning the Optical System	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 37th International Cosmic Ray Conference	6. 最初と最後の頁 N/A
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 C. Alispach et al.	4. 巻 N/A
2. 論文標題 Reconstruction of extensive air shower images of the Large Size Telescope prototype of CTA using a novel likelihood technique	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 37th International Cosmic Ray Conference	6. 最初と最後の頁 N/A
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 L. Foffano et al.	4. 巻 N/A
2. 論文標題 Monitoring the pointing of the Large Size Telescope prototype using star reconstruction in the Cherenkov camera	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 37th International Cosmic Ray Conference	6. 最初と最後の頁 N/A
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. Abe et al.	4. 巻 N/A
2. 論文標題 Analysis of the Cherenkov Telescope Array first Large Size Telescope real data using convolutional neural networks	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 37th International Cosmic Ray Conference	6. 最初と最後の頁 N/A
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 A. Okumura	4. 巻 N/A
2. 論文標題 ROBAST 3	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 37th International Cosmic Ray Conference	6. 最初と最後の頁 N/A
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 -

1. 著者名 R. Zanin et al.	4. 巻 N/A
2. 論文標題 CTA - the World's largest ground-based gamma-ray observatory	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 37th International Cosmic Ray Conference	6. 最初と最後の頁 N/A
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 Colin B. Adams et al.	4. 巻 N/A
2. 論文標題 Design and performance of the prototype Schwarzschild-Couder telescope camera	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 37th International Cosmic Ray Conference	6. 最初と最後の頁 N/A
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 Colin B. Adams et al.	4. 巻 N/A
2. 論文標題 Technical and scientific performance of the prototype Schwarzschild-Couder telescope for CTA	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 37th International Cosmic Ray Conference	6. 最初と最後の頁 N/A
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 Adams C.B et al.	4. 巻 128
2. 論文標題 Detection of the Crab Nebula with the 9.7m prototype Schwarzschild-Couder telescope	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 102562 ~ 102562
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.astropartphys.2021.102562	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 Acharyya A et al.	4. 巻 2021
2. 論文標題 Sensitivity of the Cherenkov Telescope Array to a dark matter signal from the Galactic centre	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 057 ~ 057
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2021/01/057	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 Adams C. et al.	4. 巻 982
2. 論文標題 Status of the development of NUV SiPMs for INFN optical modules for the SCT medium sized telescope proposed for the CTA observatory	5. 発行年 2020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 164486 ~ 164486
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2020.164486	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 M. Gaug, S. Fegan, A. M. W. Mitchell, M. C. Maccarone, T. Mineo, and A. Okumura	4. 巻 243
2. 論文標題 Using Muon Rings for the Calibration of the Cherenkov Telescope Array: A Systematic Review of the Method and Its Potential Accuracy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4365/ab2123	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 Yuki Nakamura, Akira Okumura, Hiroyasu Tajima, Nobuhito Yamane, and Anatolii Zenin	4. 巻 27
2. 論文標題 Characterization of SiPM Optical Crosstalk and Its Dependence on the Protection-Window Thickness	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 11003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JSPSC.27.011003	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 -

1. 著者名 Akira Okumura, Akira Asano, Kazuhiro Furuta, Naoya Hidaka, Yuki Nakamura, Hiroyasu Tajima, and Anatolii Zenin	4. 巻 27
2. 論文標題 Development of a UV-Transparent Lens Array for Enlarging the Effective Area of Multichannel SiPMs	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 11009
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JSPSC.27.011009	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 -

1. 著者名 Acharyya A. et al.	4. 巻 111
2. 論文標題 Monte Carlo studies for the optimisation of the Cherenkov Telescope Array layout	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 35 ~ 53
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.astropartphys.2019.04.001	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 Depaoli D., Lapington J., Leach S., Okumura A., Sofia I., Tajima H.	4. 巻 1060
2. 論文標題 Silicon photomultipliers for the SST camera of the Cherenkov Telescope Array	5. 発行年 2024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 169047 ~ 169047
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2023.169047	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 MAGIC Collaboration, Okumura A. et al.	4. 巻 682
2. 論文標題 Multi-year characterisation of the broad-band emission from the intermittent extreme BL Lac 1ES 2344+514	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A114 ~ A114
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202347845	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 Abe H, Okumura A. et al.	4. 巻 527
2. 論文標題 MAGIC detection of GRB 201216C at $z = 1.1$	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 5856 ~ 5867
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stad2958	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 Abe H., Okumura A. et al.	4. 巻 680
2. 論文標題 Performance of the joint LST-1 and MAGIC observations evaluated with Crab Nebula data	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A66 ~ A66
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202346927	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 Abe K., Okumura A. et al.	4. 巻 679
2. 論文標題 Star tracking for pointing determination of Imaging Atmospheric Cherenkov Telescopes	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A90 ~ A90
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202347128	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 Abe H., Okumura A. et al.	4. 巻 956
2. 論文標題 Observations of the Crab Nebula and Pulsar with the Large-sized Telescope Prototype of the Cherenkov Telescope Array	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 80 ~ 80
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ace89d	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 Acharyya A., Okumura A. et al.	4. 巻 523
2. 論文標題 Sensitivity of the Cherenkov Telescope Array to TeV photon emission from the Large Magellanic Cloud	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 5353 ~ 5387
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stad1576	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 Acero F, Okumura A. et al.	4. 巻 150
2. 論文標題 Sensitivity of the Cherenkov Telescope Array to spectral signatures of hadronic PeVatrons with application to Galactic Supernova Remnants	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 102850 ~ 102850
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.astropartphys.2023.102850	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 Abe H., Okumura A. et al.	4. 巻 266
2. 論文標題 Multimessenger Characterization of Markarian 501 during Historically Low X-Ray and γ -Ray Activity	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Supplement Series	6. 最初と最後の頁 37 ~ 37
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4365/acc181	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 Abe S., Okumura A. et al.	4. 巻 673
2. 論文標題 Multiwavelength study of the galactic PeVatron candidate LHAASO J2108+5157	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A75 ~ A75
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202245086	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 Tajima H., Okumura A., Furuta K.	4. 巻 1049
2. 論文標題 Studies of propagation mechanism of optical crosstalk in silicon photomultipliers	5. 発行年 2023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 168029 ~ 168029
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2023.168029	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 -

1. 著者名 Okumura Akira, Haga Junya, Inoue Chiaki, Nishimoto Keiji, Furuta Kazuhiro, Tajima Hiroyasu	4. 巻 -
2. 論文標題 Development of a blue-mirror multilayer coating on light concentrators for future SiPM cameras	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the 38th International Cosmic Ray Conference	6. 最初と最後の頁 673
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.444.0673	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 -

1. 著者名 Okumura Akira, Wakazono Kawori, Furuta Kazuhiro, Tajima Hiroyasu	4. 巻 -
2. 論文標題 Study on the gain and photon detection efficiency drops of silicon photomultipliers under bright background conditions	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the 38th International Cosmic Ray Conference	6. 最初と最後の頁 674
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.444.0674	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 -

1. 著者名 Okumura Akira, Ross Duncan, G. Saturni Francesco, Sironi Giorgia, White Richard	4. 巻 -
2. 論文標題 Evaluation of the effective mirror area of CTA Small-Sized Telescopes for camera design and Monte Carlo simulation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the 38th International Cosmic Ray Conference	6. 最初と最後の頁 675
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.444.0675	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23件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Akira Okumura
2. 発表標題 ROBAST 3
3. 学会等名 37th International Cosmic Ray Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田島宏康、奥村暁、古田和浩
2. 発表標題 Detailed Studies of SiPM Delayed Optical Crosstalk
3. 学会等名 KEK Photosensor/Scintillator Workshop
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 奥村暁
2. 発表標題 光線追跡シミュレーションへの多層膜フィルターの導入と SiPM での応用
3. 学会等名 KEK Photosensor/Scintillator Workshop
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 芳賀純也、田島宏康、奥村暁、古田和浩
2. 発表標題 CTA 報告 197: CTA大・中口径望遠鏡のカメラのSiPM化に向けた、集光器を用いた夜光低減手法の検討(2)
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 若園香緒里、田島宏康、奥村暁、古田和浩
2. 発表標題 CTA 報告 198: 月光観測の背景光環境における小口径望遠鏡用SiPMの性能評価
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 奥村暁
2. 発表標題 CTA報告171: 小口径望遠鏡用SiPMの光検出効率の入射角度依存性
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 黒田裕介
2. 発表標題 CTA報告180: 小口径望遠鏡の保護ガラスによるSiPMオプティカルクロストークの実測とシミュレーションによる評価
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 芳賀純也
2. 発表標題 CTA報告181: 大・中口径望遠鏡カメラSiPM化に向けた、集光器への多層膜蒸着による夜光低減の検討a
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田島宏康
2. 発表標題 SiPMのクロストーク特性
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 奥村暁
2. 発表標題 Schwarzschild-Couder型のCTA 小・中口径望遠鏡の開発状況
3. 学会等名 日本天文学会 2020年秋季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 奥村暁
2. 発表標題 CTA報告164:小口径望遠鏡用SiPMの光検出効率の入射角度依存性
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 黒田裕介
2. 発表標題 SiPM光検出効率の入射角度依存性の評価
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田島宏康
2. 発表標題 SiPM保護膜のクロストーク低減への影響
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 バンソンヒョン
2. 発表標題 CTA 報告 217: 最尤法を用いたCTA小口径望遠鏡の角度分解能の向上の検証
3. 学会等名 日本物理学会 第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 河原崎琉
2. 発表標題 CTA 報告 216: 小口径望遠鏡用64チャンネルSiPMの暗電流の安定性試験
3. 学会等名 日本物理学会 第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 奥村暁
2. 発表標題 CTA 報告 215: 小口径望遠鏡の開発状況
3. 学会等名 日本物理学会 第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 溝手雅也
2. 発表標題 CTA 報告 214: CTA大口径望遠鏡のためのSiPMモジュールに装着する集光器の開発
3. 学会等名 日本物理学会 第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 河原崎琉
2. 発表標題 CTA 報告 225: 小口径望遠鏡用 64 チャンネル SiPM の暗電流の安定性試験 (2)
3. 学会等名 日本物理学会 2024春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 奥村暁
2. 発表標題 CTA 小口径望遠鏡の開発状況
3. 学会等名 日本天文学会 2023年秋季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 奥村暁
2. 発表標題 溝手雅也
3. 学会等名 日本天文学会 2023年秋季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Akira Okumura
2. 発表標題 Development of a blue-mirror multilayer coating on light concentrators for future SiPM cameras
3. 学会等名 The 38th International Cosmic Ray Conference (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Akira Okumura
2. 発表標題 Study on the gain and photon detection efficiency drops of silicon photomultipliers under bright background conditions
3. 学会等名 The 38th International Cosmic Ray Conference (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Akira Okumura
2. 発表標題 Evaluation of the effective mirror area of CTA Small-Sized Telescopes for camera design and Monte Carlo simulation
3. 学会等名 The 38th International Cosmic Ray Conference (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 特許権	発明者 奥村暁、西本圭司、 井上知晶	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2021-031974	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

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
ヒントン ジェームス (Hinton James)	マックスプランク核物理学研究所・Non-Thermal Astrophysics Division・Director	

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
	マジン ダニエル (Mazin Daniel)	東京大学・宇宙線研究所・特任教授	

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			
ドイツ	マックスプランク核物理学研究所	マックスプランク物理学研究所	ドイツ電子シンクロトロン	
スペイン	ロケ・デ・ロス・ムチャーチョス天文台			