

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2017～2018

課題番号：17H04838

研究課題名（和文）銀河内PeVatron探査のための地上ガンマ線望遠鏡の開発

研究課題名（英文）Development of Ground-based Gamma-ray Telescopes for Galactic PeVatron Search

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） 19,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では次世代の地上ガンマ線天文台計画であるチェレンコフ望遠鏡アレイ（CTA）に向けて、2つの主要な成果を果たした。まず1つ目は、2048画素のシリコン半導体光検出器を用いたCTA小口径望遠鏡用のチェレンコフカメラ試作機の完成である。このカメラをイタリアにあるCTA試作望遠鏡に搭載し、2019年にファーストライトを果たした。また2つ目の成果は、同様の技術を用いたCTA中口径望遠鏡の試作カメラと試作望遠鏡を用いて、かに星雲からのガンマ線の検出に成功したことである。これら成果により我々のカメラ・望遠鏡デザインの実証につながった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の目的は、銀河宇宙線をベタ電子ボルト（PeV）領域のエネルギーまで加速する銀河内天体、いわゆるPeVatronの発見を目指すガンマ線望遠鏡用の焦点面カメラを、チェレンコフ望遠鏡アレイ（CTA）計画の小口径望遠鏡のために開発することである。本研究では半導体光検出器や読み出し回路を新しく開発し、超高エネルギー宇宙線やガンマ線が大気中で光を発する現象を10億分の1秒毎に撮影する技術を成功させた。また同時に、Schwarzschild-Couder型光学系というこれまで実現したことのない複雑な光学系を持つ望遠鏡を建設し、チェレンコフ望遠鏡としての性能を実証した。

研究成果の概要（英文）：In this research we achieved two main results for the Cherenkov Telescope Array (CTA) project, the next-generation ground-based gamma-ray observatory, to be built in 2020s. The first result is the successful completion of our prototype CTA camera with 2048 silicon photomultiplier camera pixels for the CTA small-sized telescopes. It was installed on a CTA prototype telescope in Italy, and its first light was achieved in 2019. The second result is gamma-ray detection of the Crab Nebula with another CTA prototype camera and telescope for the medium-sized telescopes, that use similar technologies but with a larger mirror diameter. These results are important milestones proving that our camera and telescope designs are viable for CTA.

研究分野：宇宙線物理学

キーワード：銀河宇宙線 超高エネルギーガンマ線 チェレンコフ望遠鏡アレイ 半導体光検出器 ガンマ線天文学

## 1. 研究開始当初の背景

我々の住む天の川銀河（銀河系）には高エネルギーの宇宙線が飛び交っている。このうち主に、その最大エネルギーが  $10^{15}$  eV（電子ボルト）から  $10^{18}$  eV に達する系内成分は、銀河系のどこかで加速され、その加速源となる高エネルギー天体が存在すると考えられている。このような天体は宇宙線陽子の加速エネルギーのカットオフである  $10^{15}$  eV（1 PeV）付近になぞらえ「PeVatron」と呼ばれている。

このような高エネルギーの宇宙線が銀河系のどこでどのように加速されているのかという謎は、高エネルギー宇宙物理学の長年の謎の一つである。しかし荷電粒子である宇宙線陽子は星間磁場で進行方向を曲げられるため、地上から宇宙線陽子を直接観測するだけでは、その加速天体の位置を見つけることはできない。そこで、宇宙線陽子が加速天体周辺の星間物質と衝突した際に生じるガンマ線を観測することで宇宙線加速天体を見つける手法が、ガンマ線観測衛星や地上ガンマ線望遠鏡で用いられてきた。

2020 年代に完成が見込まれるチェレンコフ望遠鏡アレイ（Cherenkov Telescope Array、CTA）は、ガンマ線観測の国際天文台計画である。大中小の 3 つの異なる口径の望遠鏡を 100 台規模で使用することで 20 GeV から 300 TeV までのエネルギー範囲でガンマ線天体の観測を南北半球から行う。このうち直径 4 m の小口径望遠鏡では、特に上述の PeVatron の発見を目指している。超新星残骸や銀河中心を高エネルギー領域で高感度で観測することで  $10^{15}$  eV を超えるエネルギーを持つ宇宙線陽子の加速の証拠の発見が期待されている。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、CTA 計画の小口径望遠鏡を開発し、将来の PeVatron 観測およびその発見に向けた観測装置の準備を整えることである。半導体光検出器を使用した小型の焦点面カメラの開発を軸に据え、光検出器の開発、読み出し回路の開発、カメラ制御ソフトウェアの開発、光学系シミュレーション、カメラ全体の統合試験を行う。カメラ試作機を実験室にて組み立てと試験を行い、これを用いて CTA の試作望遠鏡に搭載し試験観測まで進める。

## 3. 研究の方法

これまで 2012 年頃から研究代表者は、CTA の小口径望遠鏡のカメラ試作機の開発を行ってきた。試作 1 号機は光検出器にマルチアノード型光電子増倍管を用いたものであり、2015 年にパリ天文台に設置された CTA の試作望遠鏡に搭載してファーストライトを迎えた。

本研究ではこの試作機の改良型である、半導体光検出器と新型の読み出し回路を用いた、試作 2 号機の焦点面カメラを開発・製作・試験・観測を行った。研究代表者の率いる名古屋大学のグループでは、半導体光検出器の開発、読み出し回路の開発、カメラ制御ソフトウェアの開発、望遠鏡の光学系シミュレーションなどを担当した。2016 年度からカメラの要素部品の設計・製作を開始し、2017~2018 年度にドイツのマックスプランク核物理学研究所において統合試験を海外共同研究者とともに行った。

2019 年にイタリアに設置されている CTA 小口径望遠鏡の試作機の焦点面にカメラ試作機を搭載し、ガンマ線および宇宙線陽子の試験観測を行った。

## 4. 研究成果

図 1 に、本研究で開発した焦点面カメラの試作機を示す。このカメラは 2048 の読み出し画素を正方形の半導体光検出器で構成している。1 つの読み出し画素がおよそ 6 mm の正方形であり、これを 64 画素ずつにまとめ、タイル状に球面焦点面に配置している。

これら 64 ずつの読み出し画素を、半導体光検出器の背後に設置した 32 台のカメラモジュールに接続している。1 つのカメラモジュールは 64 画素用の波形記録回路とトリガー回路を有し、本研究ではこの回路の開発や、カメラ制御ソフトウェアの構築なども行った。

この焦点面カメラの製作と統合試験を 2016~2018 年度に進め、研究期間延長した 2019 年度の初頭に、図 2 に示す CTA 小口径望遠鏡の試作機に搭載し、ガンマ線および宇宙線陽子の試験観測を行った。これら高エネルギー粒子は地球大気に衝突した際、電磁カスケードやハドロンカスケードを起こし空気シャワーを生成する。このシャワー中の荷電粒子が大気チェレン



図 1：本研究で製作した CTA 小口径望遠鏡のカメラ試作 2 号機の写真。正方形に並んでいる部分が半導体光検出器で、一つずつの正方形が 64 読み出し画素に対応している。カメラ全体は、一辺がおよそ 45 cm の立方体に近い形状であり、2048 画素を持つチェレンコフ望遠鏡用のカメラとしては小型に収まっている。光検出器の背後には、同じく本研究で製作した読み出し回路が収まっているが、写真には写っていない。（写真提供：Christian Föhr、マックスプランク核物理学研究所）



図 2：図 1 の焦点面カメラを搭載し試験観測を行った、CTA 小口径望遠鏡の試作機。イタリアのシチリア島に設置されている中心に見えるのが非球面分割鏡で構成される光学系主鏡（直径 4 m）、右上の黒い部分は、非球面の副鏡（直径 2 m）を保持する構造である。焦点面カメラはこの写真には写っていないが、主鏡と副鏡の間に設置された。

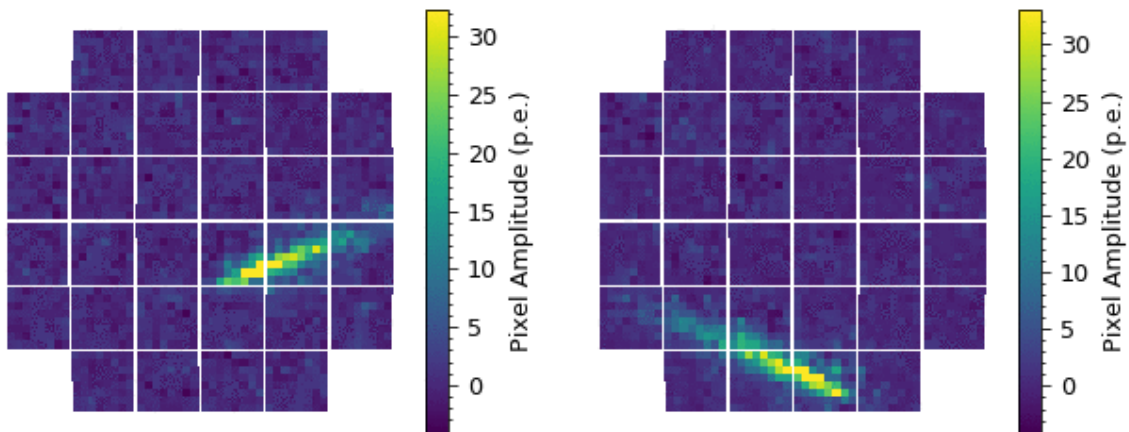


図 3：本研究の試験観測で撮影された宇宙線陽子の作り出す大気チェレンコフ光の撮像例。実際には、10 億分の 1 秒（1 ナノ秒）毎のコマで動画として撮影されている。32 ある正方形が、図 1 の半導体光検出器のタイルに対応している。

コフ光を発生するため、本研究のカメラでこれを撮影することで、入射粒子の性質を調べることができる。

図 3 に、本研究で実際に観測された大気チェレンコフ光の撮像例を示す。宇宙線陽子の発生方向を向いた細長い像を撮影することに成功した。このような画像を 10 億分の 1 秒（1 ナノ秒）ごとに撮影することが、本研究で開発している波形記録回路で可能となっている。



図 4 : CTA 中口径望遠鏡の試作機。図 2 の望遠鏡と同様、非球面の主鏡と副鏡が使用されているが、こちらのほうが主鏡直径が 10 m と大きい。

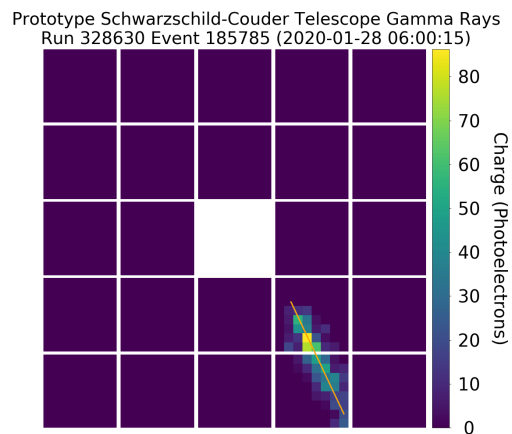
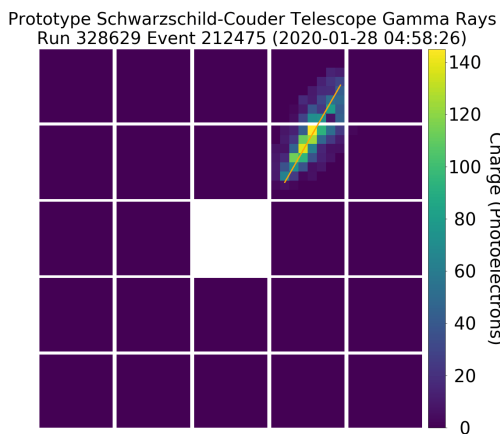


図 5 : CTA 中口径望遠鏡試作機と試作焦点面カメラで撮像した、かに星雲からのガンマ線による大気チェレンコフ光の例。

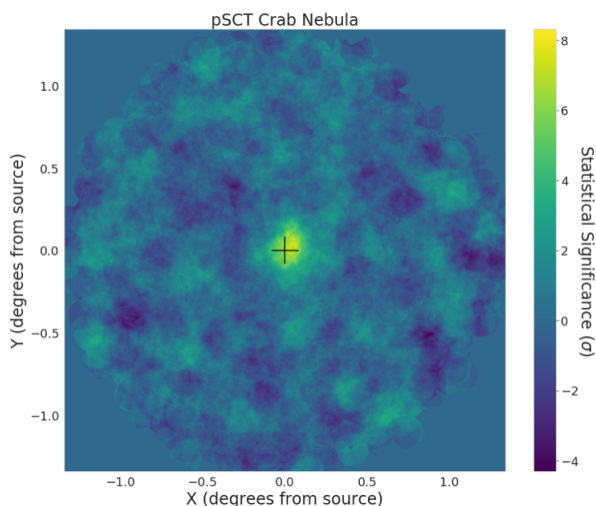


図 6 : CTA 中口径望遠鏡試作機で観測した、かに星雲方向のガンマ線有意度の分布図。図中心がかに星雲の方向を示す。

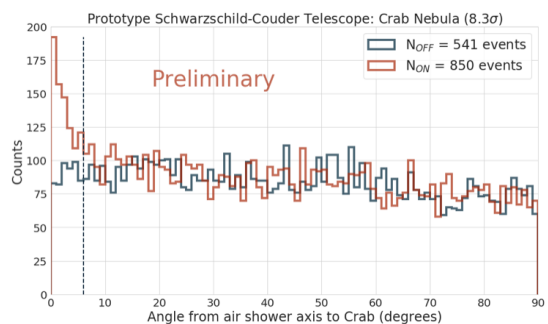


図 7 : CTA 中口径望遠鏡試作機で観測した、かに星雲方向とガンマ線到来方向の角度のずれの分布図。赤線がかに星雲観測時のもの、黒線がバックグラウンド領域観測時のもの。

これらの成果に加えて、本研究で用いる技術とほぼ同様の手法を採用した CTA 中口径望遠鏡の試作機による「かに」星雲からのガンマ線の検出にも成功した。図 4 にこの望遠鏡の写真

を示す。

図 5 にあるように、この望遠鏡でも超高エネルギーガンマ線や宇宙線が生じる大気チェレンコフ光の撮像に成功した。この望遠鏡は直径が 10 m と大きく、4 m の小口径望遠鏡だけでなく、非球面の Schwarzschild-Couder 型光学系と半導体光検出器の焦点面カメラという設計思想と新たな技術的挑戦を、より大きな望遠鏡で実証することができたと言える。

図 6~7 は、かに星雲方向からの超高エネルギーガンマ線が、バックグラウンドとなる宇宙線陽子や宇宙線電子に対して超過していることを示す。今回の試験観測では焦点面カメラの視野が狭くまた観測時間も短かったものの、 $8.3\sigma$ の統計的有意度で、かに星雲からの超高エネルギーガンマ線を検出することに成功した。

本研究では上記のように、CTA 小口径望遠鏡および中口径望遠鏡の試作機を完成させ、実際の大気チェレンコフ光の観測や、かに星雲からの超高エネルギーガンマ線の検出に成功した。これら半導体技術や独自の読み出し回路技術、また複雑な非球面の Schwarzschild-Couder 光学系の実証など、今後のガンマ線・宇宙線観測、天文学、素粒子実験などへの発展が見込める成果を得ることができた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 9件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Albert A., Funk S., Katagiri H., Kawashima T., Murphy M., Okumura A., Quagliani R., Sapozhnikov L., Shigenaka A., Tajima H., Tibaldo L., Vandenbroucke J., Varner G., Wu T.	4. 巻 92
2. 論文標題 TARGET-5: A new multi-channel digitizer with triggering capabilities for gamma-ray atmospheric Cherenkov telescopes	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 49 ~ 61
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.astropartphys.2017.05.003	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 Okumura A., Dang T.V., Ono S., Tanaka S., Hayashida M., Hinton J., Katagiri H., Noda K., Teshima M., Yamamoto T., Yoshida T.	4. 巻 12
2. 論文標題 Prototyping hexagonal light concentrators using high-reflectance specular films for the large-sized telescopes of the Cherenkov Telescope Array	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 P12008 ~ P12008
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-0221/12/12/P12008	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 Asano A., Berge D., Bonanno G., Bryan M., Gebhardt B., Grillo A., Hidaka N., Kachru P., Lapington J., Leach S., Nakamura Y., Okumura A., Romeo G., Ross D., Stephan M., Tajima H., Timpanaro M.C., White R., Yamane N., Zink A.	4. 巻 912
2. 論文標題 Evaluation of silicon photomultipliers for dual-mirror Small-Sized Telescopes of Cherenkov Telescope Array	5. 発行年 2018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 177 ~ 181
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2017.11.017	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 Zorn J. et al.	4. 巻 904
2. 論文標題 Characterisation and testing of CHEC-M?A camera prototype for the small-sized telescopes of the Cherenkov telescope array	5. 発行年 2018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 44 ~ 63
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2018.06.078	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 Leach S.A., Lapington J.S., Ross D., Thornhill J., Duffy C., Funk S., Zink A., Jankowsky D., White R., Zorn J., Tibaldo L., Varner G., Okumura A., Tajima H., Watson J.	4. 巻 N/A
2. 論文標題 Front-end electronics of the Compact High Energy Camera	5. 発行年 2019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 N/A
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2018.12.061	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 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) doi.org/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 et al.	4. 巻 -
2. 論文標題 Characterization and assembly of near-ultraviolet SiPMs for the Schwarzschild-Couder medium-size telescope proposed for the CTA Observatory	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 -	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) doi.org/10.1117/12.2530617	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 Leach S.A., Lapington J.S., Ross D., Thornhill J., Duffy C., Funk S., Zink A., Jankowsky D., White R., Zorn J., Tibaldo L., Varner G., Okumura A., Tajima H., Watson J.	4. 巻 952
2. 論文標題 Front-end electronics of the Compact High Energy Camera	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 161746 ~ 161746
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi.org/10.1016/j.nima.2018.12.061	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 Nakamura Yuki、Okumura Akira、Tajima Hiroyasu、Yamane Nobuhito、Zenin Anatolii	4. 巻 -
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 -	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) doi.org/10.7566/jpscp.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 該当する

[学会発表] 計18件(うち招待講演 0件/うち国際学会 3件)

1. 発表者名 奥村暁
2. 発表標題 Schwarzschild-Couder 光学系を用いたCTA 小・中口径望遠鏡の開発
3. 学会等名 日本天文学会 2017年秋季年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中村裕樹
2. 発表標題 CTA報告127: ガンマ線望遠鏡CTAにおけるSiPMの多チャンネル同時較正システムの確立と検証
3. 学会等名 日本物理学会 2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 田島宏康
2. 発表標題 次世代ガンマ線望遠鏡CTA用SiPMの最適化
3. 学会等名 日本物理学会 2017年秋季大会
4. 発表年 2017年



1. 発表者名 奥村暁
2. 発表標題 地上ガンマ線望遠鏡 CTA のための高効率な集光装置の試作
3. 学会等名 日本物理学会 第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中村裕樹
2. 発表標題 CTA報告136: ガンマ線望遠鏡CTAにおけるSiPMの多チャンネル同時較正システムの検証
3. 学会等名 日本物理学会 第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐々井義矩
2. 発表標題 CTA報告135: CTA 小口径望遠鏡のトリガー性能の最適化
3. 学会等名 日本物理学会 第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田島宏康
2. 発表標題 次世代ガンマ線望遠鏡CTA用SiPMの低クロストーク化
3. 学会等名 日本物理学会 2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中村裕樹
2. 発表標題 CTA報告144: CTA 小口径望遠鏡用焦点面カメラの統合試験
3. 学会等名 日本物理学会 2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Anatolii Zenin
2. 発表標題 CTA報告145: Feasibility study on a future upgrade of PMT camera pixels with silicon photomultipliers
3. 学会等名 日本物理学会 2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Anatolii Zenin
2. 発表標題 CTA report 152: Comparison of photon detection performance of photomultiplier tube and silicon photomultiplier for Medium Sized Telescopes
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中村裕樹
2. 発表標題 SiPM の隣接画素オプティカルクロストークとその保護層厚依存性
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 奥村暁
2. 発表標題 紫外線透過レンズアレイによる アレイ型シリコン半導体光検出器の検出効率改善
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 奥村暁
2. 発表標題 Development of a UV-transparent Lens Array Enlarging the Effective Area of Multi-channel SiPMs
3. 学会等名 5th International Workshop on New Photon-Detectors (PD18) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中村裕樹
2. 発表標題 Characterization of SiPM Optical Crosstalk and its Resin Thickness Dependence
3. 学会等名 5th International Workshop on New Photon-Detectors (PD18) (国際学会)
4. 発表年 2018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 Anatolii Zenin
2. 発表標題 Evaluation of a multi-channel silicon photomultiplier with a light concentrator for Medium-Sized Telescopes of Cherenkov Telescope Array
3. 学会等名 SiPM workshop (国際学会)
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

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<a href="http://www.cta-observatory.jp/">http://www.cta-observatory.jp/</a> <a href="https://www.cta-observatory.org">https://www.cta-observatory.org</a>
--

## 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
連携研究者	田島 宏康  (Tajima Hiroyasu)  (80222107)	名古屋大学・宇宙地球環境研究所・教授     (13901)	