

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 24 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K13801

研究課題名(和文)大面積の半導体光検出器アレイの製造費用を半額にする非球面レンズアレイの開発

研究課題名(英文) Developing an aspherical lens array system to halve the production cost of large-area silicon photomultiplier arrays

研究代表者

奥村 暁 (Okumura, Akira)

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・助教

研究者番号：90645011

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では紫外透過ガラスを使ったレンズアレイを製作することで、多画素のアレイ型半導体光検出器の実効的な光検出効率を改善することを目指した。市販のアレイ型検出器は隣接する画素間に不感領域があるため、入射光子の約15%は損失する。レンズアレイを前面に取り付けることで不感領域に落ちる光を有感領域に導光し、半導体光検出器を使った地上ガンマ線望遠鏡のガンマ線検出能力を高めたり、光検出器の製造費用を低減することができる。我々はレンズアレイを試作し実際に光検出器に取り付けて性能評価を行った。0～70度の入射角度で相対的に10～20%の光検出効率の向上を確認した。

研究成果の概要(英文)：We have developed a UV-transparent lens array system to improve the effective photodetection efficiency of multi-pixel silicon photomultiplier (SiPM) arrays. Array type SiPMs currently available in the market have dead area between adjacent pixels, resulting in about 15% photon loss. Putting a lens array on the SiPM surface can guide photons from the dead area to the sensitive area, enabling us to improve the gamma-ray detection efficiency of ground-based gamma-ray telescopes or to reduce the production cost of photodetectors. Our prototype lens array showed improvement of photodetection efficiency by 10 to 20% in the angle-of-incidence range of 0 to 70 degrees.

研究分野：宇宙線物理学

キーワード：ガンマ線 宇宙線 半導体光検出器 SiPM チェレンコフ望遠鏡アレイ CTA

1. 研究開始当初の背景

数十 GeV 以上のエネルギーを持つ高エネルギー宇宙線やガンマ線は、宇宙空間から地球大気に入射すると空気シャワーと呼ばれる大量の二次粒子生成を引き起こす。この空気シャワー中には多数の荷電粒子が大気中の光速よりも速く運動しているため、大気チェレンコフ光と呼ばれる光が空気シャワーとともに地上へ到達する。しかしこの光は夜空の明るさに比べて微弱であるため、高エネルギーガンマ線を限られた主鏡面積の望遠鏡で観測するためには、できる限り光を高効率で検出し、夜光と区別する能力を高めなくてはならない。

2020 年代に完成の見込まれる次世代の地上ガンマ線望遠鏡計画、チェレンコフ望遠鏡アレイ (Cherenkov Telescope Array、CTA、下図参照) では、一部の望遠鏡の光検出器として半導体光検出器を採用する予定である。数千から 1 万画素の半導体光検出器を焦点面カメラの敷き詰めるためには、多画素でタイル状のアレイ型検出器を使用する必要がある。しかしこのような光検出器は隣接する画素間に不感領域が存在するため、入射光量の約 15% を損失するという問題がある。この検出光量を増やすことはガンマ線検出感度に影響するため、現実的に可能な手法で半導体光検出器の不感領域を取り除く工夫が求められる。

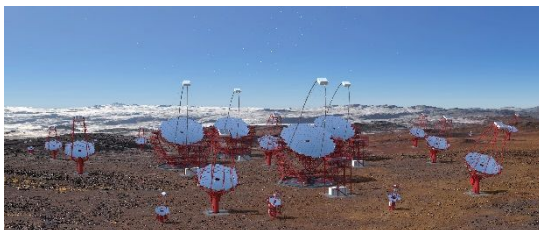


図 1 . チェレンコフ望遠鏡アレイの完成想像図 (画像提供: Gabriel Pérez Diaz, IAC)

2. 研究の目的

本研究では紫外線透過型のガラスを用いてレンズアレイを製作し、レンズアレイによって入射光を有感領域に集めることで、実効的な光検出効率を高める手法を検討する。また試作したレンズアレイを実際に性能測定し、光検出効率がどれだけ向上するかをシミュレーションと比較する。

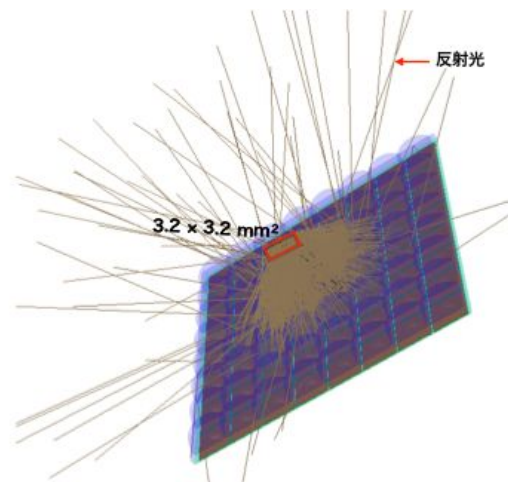
これにより、シリコン半導体光検出器アレイの大幅な面積化を従来手法の半分の費用で実現する。シリコン樹脂の射出成形 (モールドイング) 技術を用いて光検出器上にレンズアレイを成形し、検出器に入射する光子を小さい面積に集光させる。この結果、光検出に必要なシリコン半導体の面積が従来の半分で済むようになるため、大幅な費用低減が可能になる。この手法を地上ガンマ線望遠鏡 Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画で使

用する望遠鏡のうち約 90 台の焦点面カメラで採用することで、10 億円以上を節約できる。同一予算内でより多数の望遠鏡を配置することが可能になるため、ガンマ線検出感度の向上が期待される。

3. 研究の方法

研究代表者が過去に提案したレンズアレイ設計の手法をもとに、光線追跡シミュレーションソフトウェアを用いてレンズアレイの設計を行った。使用する半導体光検出器は有効面積が各画素あたり $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ であり、また隣接画素間の不感領域が 0.2 mm の幅を持つ。そのため、 $3.2 \text{ mm} \times 3.2 \text{ mm}$ の大きさの凸平レンズをタイル状に敷き詰めることで、各画素の有感領域に光を集める手法を採用した。

紫外透過ガラスには UVC-200B という、 300 nm まで紫外線透過率の良い硝材を使用した。この硝材はこれまで成型レンズとしての使用実績がなく、また紫外線透過率や屈折率の詳細な測定も存在しなかったため、本研究ではまず透過率と屈折率の測定をサンプル品に対して行い、この測定結果に基づいて光学シミュレーションとレンズ設計を行っ



た。

図 2. 光線追跡シミュレーションによるレンズアレイで入射光線を集光する様子。

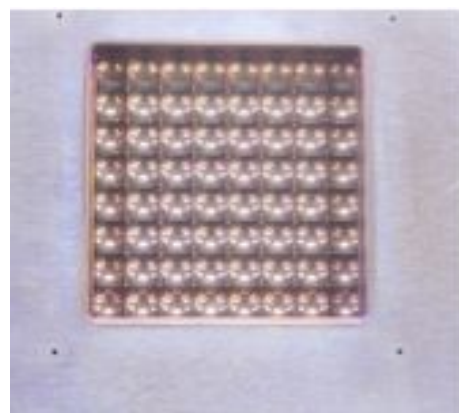


図3 . 試作レンズアレイ用の金型の写真

またレンズアレイの製作が UVC-200B では初めてだったため、別用途で使用された既存の金型を用いて成型加工工程に問題がないかを事前に調査し、亀裂や表面の荒れが発生しないことを確認してから、図3に示すように、本研究で設計したレンズアレイ用の金型を作成した。

図4に示すように、3 mm × 3 mm の画素が 8 × 8 で並んだ半導体光検出器（左）に、試作したレンズアレイを取り付けた（右）。このレンズアレイ取り付けの有無でそれぞれ光検出効率の測定を行い、相対的な比較をすることで、レンズアレイによる集光能力の改善を定量的に得た。

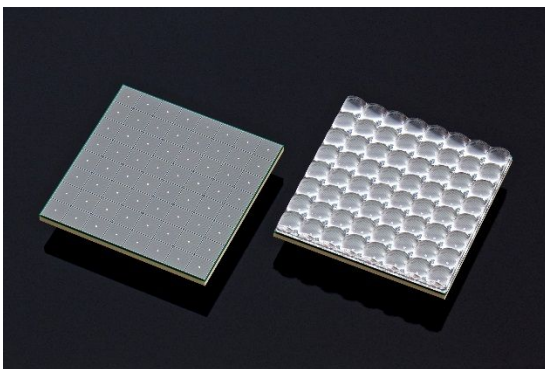


図4 . 64画素のシリコン半導体光検出器（左）と、その上に試作レンズアレイを取り付けた様子（右）

この測定を行うにあたり、LED光源と軸外し放物面鏡を組み合わせた平行光射系と光検出器の性能評価用のステージ系を図5、6に示すように製作した。この測定系には環境安定性を評価するための半導体検出器と性能測定用の半導体光検出器をそれぞれ設置することで、測定中に温度変化や照射光の変動があっても補償できる仕組みとし、図7に示すように、1%程度の安定性と繰り返し精度で光検出効率の測定を可能とした。

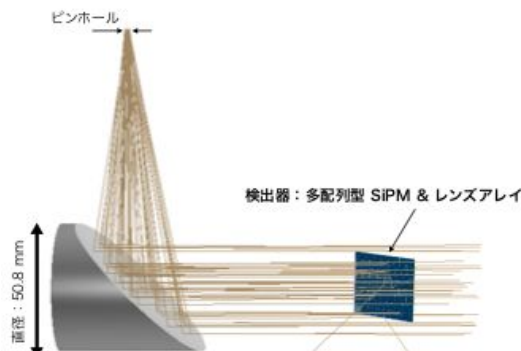


図5 . 光源と軸外し放物面鏡を使って光検出器に平行光を照射する光線追跡シミュレーションの様子。

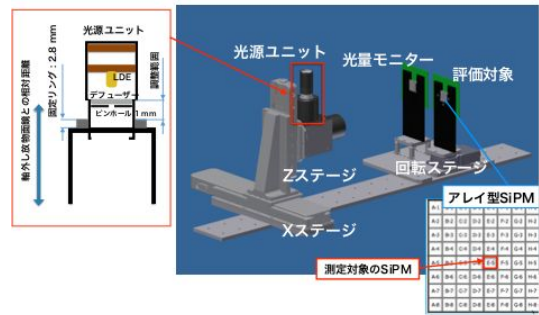


図6 . XZステージと回転ステージを組み合わせた測定系全体。

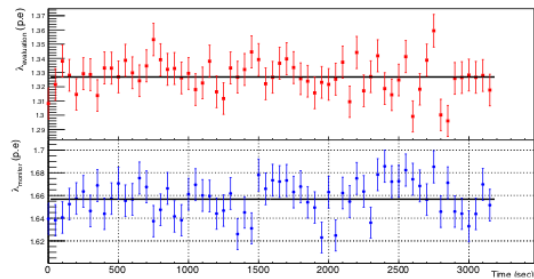


図7 . 安定性評価用の半導体光検出器（上）と、性能評価用の半導体光検出器（下）の検出光量の安定性評価の結果。1%程度の変動で安定していることが分かる。

4 . 研究成果

図7に、レンズアレイの取り付けの有無および平行光の入射角度により、どのように検出光量が変化するかを示す。

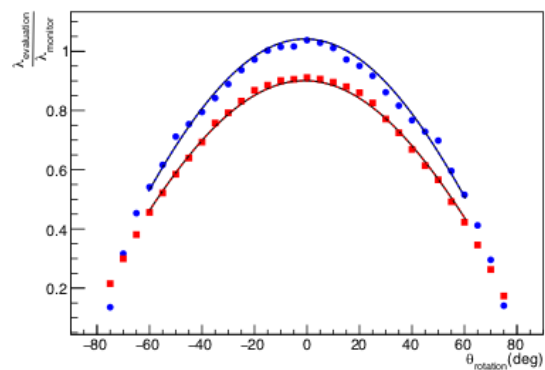


図7 . レンズアレイの取り付けあり（青）の状態と取り付けなし（赤）での検出光量の変化の様子。

また、図7を除算し、レンズアレイを取り付けた場合に光検出効率が相対的にどれだけ向上するかの結果を図8に示す。入射角度に応じて値が10%から20%強まで変化する。これは有感領域部分に光が導かれること、また空気層との境界面との入射角度が、レンズアレイの有無によって変化するためである。

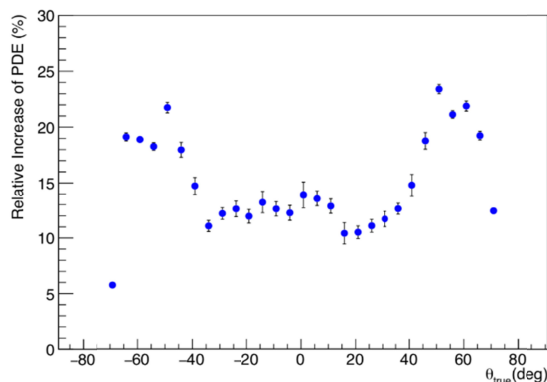


図8．レンズアレイを取り付けた場合に、検出される光量がどれだけ増加するかを入射角度ごとに相対的に表示したものの。

この結果から、当初シミュレーションで期待されていた光検出効率の向上を達成し、またそのようなレンズアレイが実際に製作可能であることが示された。

一方で、本研究と並行して進めていた研究の結果から、このような屈折率の1より大きい硝材を検出器に取り付けた場合にオプティカルクロストーク発生率が增大するという問題が明らかになった。そのため、本研究課題終了後も、このレンズアレイによって改善する部分と悪化する部分をきちんと比較し、ガンマ線望遠鏡の用途として耐えるかを検証する必要がある。

本研究では紫外投下型のガラスを使ったレンズアレイを作製した。しかし大量生産時に実際に多数の光検出器にレンズアレイを工学グリースなどで接着することは現実的ではなく、将来的にはシリコン樹脂などで直接レンズアレイを光検出器表面に形成する手法が考えられる。本研究では予算の都合上ガラスによる試作のみであったが、将来的には樹脂レンズの直接形成を検討したい。

本研究は修士課程大学院生の研究テーマとしても実施し、レンズ設計、試作、測定系の開発、およびレンズアレイの性能評価までを修士論文として出版した。また、国内学会で関連する複数の報告を行い、現在投稿論文の執筆中である。

さらに将来的には、本研究で得られたレンズ形成技術を宇宙物理学分野や素粒子物理学分野での光検出技術への応用も展開したい。

本課題で検証した測定系の安定性や検出効率の測定手法は、チェレンコフ望遠鏡アレイのほかの較正手法や開発項目にも適用可能であり、現在他の科研費研究課題に応用して

いる。また光線追跡シミュレーションや半導体光検出器のシミュレーションにも本研究課題の成果を使用し、半導体光検出器の内部構造でどのように光の伝播が発生するかなどの調査を進めている。

5．主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 9 件)

1. 奥村 暁ほか「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」日本物理学会 第73回年次大会(2018)
2. 中村裕樹ほか「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」日本物理学会 第73回年次大会(2018)
3. 奥村 暁 ほか「Schwarzschild-Couder 光学系を用いたCTA小・中口径望遠鏡の開発」日本天文学会 2017年秋季年会(2017)
4. 中村裕樹ほか「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」日本物理学会 2017年秋季大会(2017)
5. 田島宏康ほか「次世代ガンマ線望遠鏡CTA用SiPMの最適化」日本物理学会 2017年秋季大会(2017)
6. 朝野彰ほか「CTA 計画用SiPMの光検出効率向上に向けたレンズアレイの開発」日本物理学会 第72回年次大会(2017)
7. 中村裕樹ほか「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」日本物理学会 第72回年次大会(2017)
8. 奥村 暁ほか「CTA 報告 110: 焦点面光検出器の光検出効率改善に向けた集光装置の開発」日本物理学会

2016 年秋季年会 (2016)

9. 奥村 暁 ほか 「CTA 報告 113: Schwarzschild-Couder 光学系を用いた小・中口径望遠鏡の開発」日本物理学会 2016 年秋季年会 (2016)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

- a. <http://www.cta-observatory.jp>
- b. <https://www.cta-observatory.org>
- c. <http://robast.github.io>

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

()