

平成 30 年 6 月 24 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2013～2017

課題番号：25707017

研究課題名(和文) 大気チェレンコフ光の収集効率改善による次世代ガンマ線望遠鏡CTAの高感度化

研究課題名(英文) Improving the sensitivity of the next-generation gamma-ray observatory CTA with higher collection efficiency of atmospheric Cherenkov photons

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) 17,300,000円

研究成果の概要(和文)：チェレンコフ望遠鏡アレイ(Cherenkov Telescope Array, CTA)計画の大口径望遠鏡で使用するための集光装置の試作機を開発した。焦点面カメラの各画素に取り付ける光検出器で大気チェレンコフ光の集光能力を最大限に高め、検出ガンマ線のエネルギー閾値を下げるため、92～99%という高反射率の反射フィルムを開発し、集光装置の内壁をこれで製作した。試作機の相対的な陽極感度(大雑把に集光効率とみなせる)は重要な入射角度に対して95～105%に達することがわかった。

研究成果の概要(英文)：We have developed a prototype hexagonal light concentrator for the Large-Sized Telescopes of the Cherenkov Telescope Array. To maximize the photodetection efficiency of the focal-plane camera pixels for atmospheric Cherenkov photons and to lower the energy threshold, a specular film with a very high reflectance of 92-99% has been developed to cover the inner surfaces of the light concentrators. The prototype has a relative anode sensitivity (which can be roughly regarded as collection efficiency) of about 95 to 105% at the most important angles of incidence.

研究分野：宇宙線物理学

キーワード：ガンマ線 宇宙線 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。

地上ガンマ線望遠鏡では従来、ウィンストンコーン (Winston cone) と呼ばれる集光装置を焦点面光検出器に取り付け大気チェレンコフ光の集光能力を高めてきた。蜂の巣状に敷き詰めた円柱状の光電子増倍管に効率よく光を導くため、テーパ状になった六角形の筒の内部を鏡面仕上げにすることで、光電子増倍管の存在しない場所に入射した光を検出できるようにするものである。また同時に、望遠鏡の主鏡以外の方向から入射した光は大気チェレンコフ光ではないため、特定の角度以上で入射した光は跳ね返すという役割を併せ持っている。

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) では、これまでの望遠鏡で達成している 50 GeV (ギガ電子ボルト) 程度のエネルギーを 20 GeV まで下げることを目指している。これはガンマ線バーストのような低エネルギーガンマ線の放射の卓越した突発天体の検出や、遠方の活動銀河核などからのガンマ線活動を高い光子統計で観測するのに必要な要請である。そのため、主鏡の反射率や光電子増倍管の光検出効率を高めるだけでなく、光電子増倍管に取り付ける集光装置の高性能化も必要であった。

2. 研究の目的

本研究では従来の Winston cone の製作技法を再検討することで、これまでの地上ガンマ線観測で使われてきた集光装置の集光能力を、相対的に 10%~20% 上回るものの製作を目指した。また本研究で集光装置を量産することで、CTA 計画の大口径望遠鏡初号機で使用する焦点面カメラに、約 2000 個の集光装置を提供することを目指した。

3. 研究の方法

前述の研究目的を達成するため、新たな製作技法として以下の項目を提案し実施した。

- a. これまで Winston (1970) の製作手法を踏襲して作られてきた集光装置の形状を見直し、研究代表者が

Okumura (2012) で考案した Bézier 曲線を使った形状を用いることで、集光能力の入射角度依存性をより性能の高いものにした。

- b. ガラスやプラスチックの表面にアルミ蒸着して作られてきたものを、超高反射率の反射フィルムで置き換えることによって、集光装置表面での反射ロスを低下させた。
- c. 光電子増倍管の光検出効率を光電子増倍管の光入射角度や位置の関数として実測することにより、その結果を集光装置の形状設計のシミュレーションに組み込んだ。
- d. 研究代表者の作成した光線追跡シミュレーションプログラム (Okumura et al. 2016) を使い、集光装置形状や光電子増倍管の特性を組み込んだ光線追跡シミュレーションを行うこと、また試作機を 3D プリンタで複数作成することで、金型製作にかかる初期投資を最低限に抑えつつ性能改善を複数回試み、また実測とシミュレーションの差異の理解に務めるようにした。

4. 研究成果

本研究の主たる最終成果は Okumura et al. (2017) に投稿論文としてまとめ出版した。また途中段階での成果は、複数の国際会議や国内学会、関連論文として発表している。

本研究では前節の 4 つの目的を全て達成し、従来のプラスチック表面にアルミ蒸着を施した集光装置に比べ、相対的に 10% 程度高い集光能力を得られることを示した。この過程で超高反射率の反射フィルムの製作に成功し、300~800 nm の波長範囲および 20~70 度の入射度で 90~100% (測定誤差含む) の反射率を達成した。このような反射材は世界で初めてである。また集光装置の性能測定を光線追跡シミュレーションと比較し、5~10% の精度で実測値を再現できることも分かった。

一方、反射フィルムをプラスチック製の集光装置に貼り付けるという手法は量産時の手作業が膨大となり、また作業員や作業時期により性能差が大きくなりやすいということも分かった。そのため、CTA の大口径望遠鏡には、プラスチックにアルミ蒸着をする従来手法に、本研究で確立した前節 a., c., d. を取り入れることで最終設計とした。

大口径望遠鏡に加え、CTA の小口径望遠鏡および中口径望遠鏡でも同様の開発手法がシミュレーションが採用された。

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 5 件)

1. Akira Okumura, Dang Viet Tan, Sakiya Ono, Syunya Tanaka, ほか 7 名 "Prototyping hexagonal light concentrators using high-reflectance specular films for the Large-Sized Telescopes of the Cherenkov Telescope Array" *JINST* **12** P12008 (2017) 査読あり
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/12/P12008>
2. Akira Okumura, Koji Noda, and Cameron Rulten, "ROBAST: Development of a ROOT-based ray-tracing library for cosmic-ray telescopes and its applications in the Cherenkov Telescope Array" *Astroparticle Physics* **76**, 38–47 (2016) 査読あり
<http://dx.doi.org/10.1016/j.astropartphys.2015.12.003>
3. Akira Okumura, Sakiya Ono, Syunya Tanaka, Masaaki Hayashida, Hideaki Katagiri, and Tatsuo Yoshida, "Prototyping of Hexagonal Light Concentrators for the Large-Sized Telescopes of the Cherenkov Telescope Array" in *Proceedings of the 34th International Cosmic Ray Conference* (2015)
<https://arxiv.org/abs/1508.07776>
査読なし
4. Akira Okumura, Koji Noda, and Cameron Rulten, "ROBAST: Development of a Non-Sequential Ray-Tracing Simulation Library and its Applications in the Cherenkov Telescope Array" in *Proceedings of the 34th International Cosmic Ray Conference* (2015)
<https://arxiv.org/abs/1508.07803>
査読なし
5. Acharya, B.S., A. Okumura (629 番目) ほか 974 名 "Introducing the CTA Concept" *Astroparticle Physics* **43**, 3–18 (2013) 査読あり
<https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2013.01.007>

〔学会発表〕(計 10 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. 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)
3. 小野祥弥ほか「CTA 報告 100: CTA 大口径望遠鏡初号機用ライトガイドの量産及び性能評価」日本物理学会 2015 年秋季大会 (2015)
4. 小野祥弥ほか「CTA 報告 92: CTA 大口径望遠鏡初号機用ライトガイドの開発」日本物理学会 第 70 回年次大会 (2015)
5. A. Okumura et al. "Prototyping of Hexagonal Light Concentrators for the Large-Sized Telescopes of the Cherenkov Telescope Array" The 34th International Cosmic Ray Conference (2015)
6. A. Okumura et al. "ROBAST: Development of a Non-sequential Ray-tracing Simulation Library and its Applications in the Cherenkov Telescope Array" The 34th International Cosmic Ray Conference (2015)
7. 田中駿也ほか「CTA 報告 71: CTA 大口径望遠鏡用ライトガイドの試作機性能評価及び形状最適化に向けた研究」日本物理学会 第 69 回年次大会 (2014)
8. 田中駿也ほか「CTA 報告 62: CTA 大口径望遠鏡用ライトガイドの試作機性能評価及び大量生産に向けた開発」日本物理学会 2013 年秋

季大会 (2013)

9. M. Teshima et al. "Cherenkov Telescope Array Large Size Telescope Optics" The 33rd International Cosmic Ray Conference (2013)

10. G. Ambrosi et al. "The Cherenkov Telescope Array Large Size Telescope" The 33rd International Cosmic Ray Conference (2013)

(3) 連携研究者 ()

研究者番号 :

(4) 研究協力者 ()

〔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 :