

令和 6 年 5 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K20929

研究課題名（和文）ナノ秒時間分解能およびサブミリ秒角角度分解能可視光望遠鏡の開発

研究課題名（英文）Development of optical telescopes with nano-second time resolution and sub-miliarcsecond angular resolution

研究代表者

齋藤 隆之（Saito, Takayuki）

東京大学・宇宙線研究所・准教授

研究者番号：60713419

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：CTA大口径望遠鏡をナノ秒分解能可視光望遠鏡および強度干渉計として使用するに、信号読み出しごとに生じる不感時間を減らすことが不可欠で、さらに光センサーを改善する余地もあった。不感時間の問題は、当初予定していた、読み出し回路の修正によって解決するのではなく、アナログ信号を光ファイバーによって外に取り出し、望遠鏡外にデータ収集システムを設置する形で解決した。光センサーの改善には、現行の光電子増倍管をSiPMにアップグレードすることを試みた。そのためには、信号合算回路、波形整形回路、温度補償回路の開発が必要で、3つとも完成した。ただし、それらを統合して実際に望遠鏡に搭載するには至らなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人間の目で宇宙を見上げて、宇宙の一部しか見えない。明るい部分しか見えないし、可視光しか知覚できないし、超高速変動も認識できない。一つ目を解決するのが光学望遠鏡、二つ目を解決するのが他波長望遠鏡、そして三つ目の解決を目指したのが本研究である。本研究をさらに発展させれば、また人類が知らない天体現象が見つかる可能性が大いにあり、人類の持つ宇宙像に修正が加わると期待できる。

研究成果の概要（英文）：In order to use CTA Large Sized Telescope as a nano-second resolution optical telescope and an intensity interferometry device, it was necessary to reduce the dead time which takes at each readout. Also, there was a large room for improvement in the choice of photosensors. For the dead time problem, originally we planned to solve it by a modification of the readout board. However, we solved it differently. The analog output signal was extracted from the telescope and transferred via an optical fiber to the external data acquisition device. As for the improvement of photosensors, we tried to upgrade the current photomultiplier to SiPM. For that, it was necessary to develop a signal summation circuit, a signal shaping circuit, and a temperature compensation circuit. All of the three were successfully developed. However, we could not install them to the telescope.

研究分野：高エネルギー宇宙物理学

キーワード：時間領域天文学 チェレンコフ望遠鏡 強度干渉計

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ナノ秒の時間分解能をもった可視光望遠鏡はこれまで存在しない。そのような望遠鏡が作れば、電波領域で高速電波バーストが発見された様に、可視光領域でも未探索の時間スケールでの変動現象の新発見が期待できる。さらに、その望遠鏡を複数台用いれば、強度干渉計としても使える(参考文献[1])。それにより、通常の可視光望遠鏡よりも圧倒的に高いサブミリ秒角の角度分解能をもった可視光観測システムを構築することができることが知られていた。

ナノ秒分解能可視光望遠鏡を容易に実現する方法として、解像型大気チェレンコフ望遠鏡 (Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope, IACT) を改造することが挙げられる。10 GeV 以上のガンマ線は、大気に突入すると電磁カスケードを起こす。そこから放たれるチェレンコフ光を検出することで、ガンマ線を間接的に観測する装置が、IACT である (下図参照)。その焦点面にあるカメラを改造するだけで、ナノ秒分解能可視光望遠鏡として使うことができる。

2. 研究の目的

CTA 大口径望遠鏡 (CTA Large Sized Telescope, CTA-LST) は次世代ガンマ線天文台 Cherenkov Telescope Array (CTA) のなかで最も口径の大きい IACT である (下図参照)。1 台目がスペインラパルマ島に 2018 年に完成し、残り 3 台もその周りに建設中である。焦点面の光電子増倍管 (photomultiplier, PMT)、アンプ、読み出しボードの帯域などは、3 ns 幅のパルスを取得できるようになっている。ただし、連続的に信号を読み出すことができず、1 マイクロ秒読み出すごとに、30 マイクロ秒の不感時間がある。また、PMT も可視光観測の光センサーとして最良のものとは言えない。これらの問題を解決し、CTA-LST をナノ秒可視光観測や強度干渉計に追加できるようにするのが、本研究の目的である。

3. 研究の方法

CTA-LST の焦点面検出器は、全部で 1855 ピクセルあるが、7 ピクセルごとにモジュール化されている (下図参照)。焦点面の中心のモジュールのみを解像し、ナノ秒可視光観測ができるようにする。具体的には、読み出しボードの FPGA を書き換え、7 ピクセル並行読み出しを 1 ピクセルの直列読み出しに変更する。これにより、不感時間を大幅に軽減できる。さらに、光センサーを、7 つの PMT から 1 つの SiPM に置き換える。SiPM は、現在 CTA-LST で使われている PMT よりも広い波長帯に感度を持ち、さらに量子効率の peak も 1.5 倍ほど高い。可視光観測にはより適している。一方で、有効面積が小さい、出力波形が広い幅をもつ、出力振幅に強い温度依存性がある、などの欠点がある。それを補うため、4 素子信号合算回路、波形整形回路、温度補償回路を開発し、SiPM をこの用途に使えるようにする。



4. 研究成果

(1) 不感時間の問題に関しては、海外の共同研究者とともに当初計画していた方法とは別の方法で解決した。具体的には、読み出しボードの一部からアナログ信号を取り出し、光信号に変換してファイバーに望遠鏡の外に引き出し、別の装置で信号を記録する、というものである。現行の PMT を使って実際に強度干渉計として動作するか試験観測をし、成果も出ている（参考文献 [2]）。

(2) SiPM 4 素子合算回路については、MEG 実験で開発された回路をもとに、図 A のような回路を用いた。4 つの素子に並列バイアス電圧が掛けられるが、高速の信号に対しては 4 つが直列につながることで、静電容量が加算されずに済む。降伏電圧がほぼ等しい 4 つの SiPM を使い、出力信号の電荷分解能を計測したところ、図 B のようになった。4 つの信号がほぼ同じ増幅率をもち、ノイズなども問題ないことが確認された。

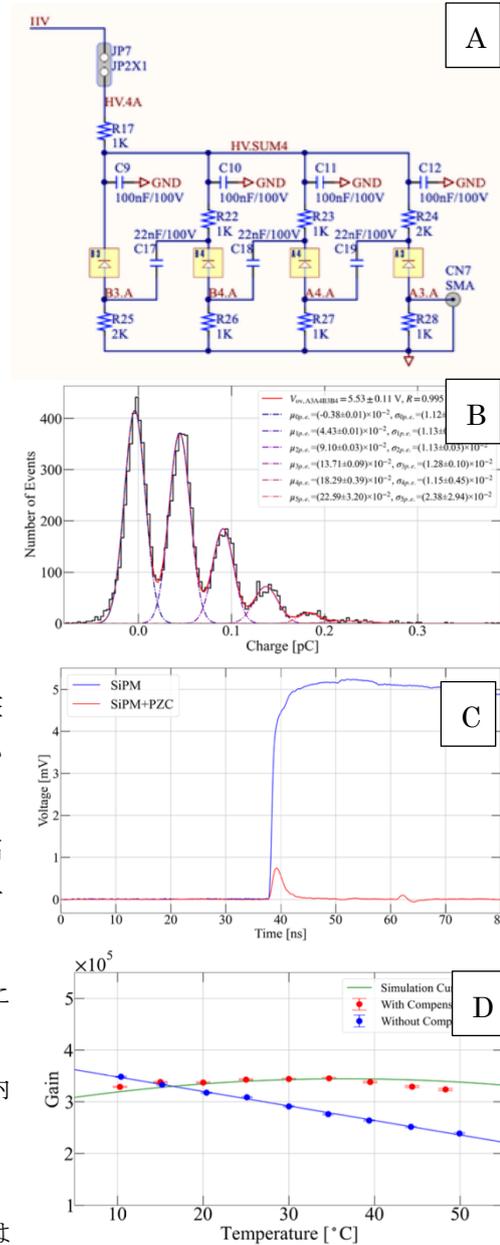
(3) SiPM の波形整形に関しては、Pole-Zero-Canceller 回路を使用した。図 C に示すとおり、300 ナノ秒あったパルス幅を、3 ナノ秒程度に縮めることに成功した。これでナノ秒時間分解能の可視光望遠鏡として使える波形になった。しかし、振幅がかなり減衰することも同時にわかった。アンプの増幅率で調整はできるが、消費電力や発熱量に問題がないかについては今後調査が必要になるかもしれない。

(4) 温度補償回路については、浜松ホトニクス社製の高圧生成集積回路, C14156 を用いた。サーミスターを外付けすることで温度補償回路を実現できるだけでなく、その温度係数も電圧で制御できる。回路を最適化させた結果を図 D に示す。1.0%/°C 程度あった温度依存性を、0.08%/度に低減することに成功した。これで CTA-LST 内のカメラで問題なく使用できる。

CTA-LST が強度干渉計として使えることが示せたのは良かったが、実際に望遠鏡に SiPM を搭載するまでには至らなかった。ただ解決すべき問題はすべて解決できたので、今後 CTA-LST をナノ秒時間分解能可視光望遠鏡としても使えるように、SiPM モジュールを製造していきたい。

【参考文献】

- [1] Matthews N. et al., POS(ICRC2019), 740, 2019
- [2] Cortina J. et al., Proc. SPIE 12183, 11, 2022
- [3] Sawada R., Proc. of TIPP2014, 2015



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 齋藤隆之
2. 発表標題 CTA 報告 210:CTA大口径望遠鏡のためのSiPM モジュールの開発(2)
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 橋山 和明
2. 発表標題 CTA大口径望遠鏡のためのSiPMモジュールの開発
3. 学会等名 日本天文学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 齋藤隆之
2. 発表標題 CTA大口径望遠鏡の高画素化に向けたSiPMモジュールの開発
3. 学会等名 日本天文学会2022年春季大会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 Takayuki Saito
2. 発表標題 SiPM characterisation at University of Tokyo
3. 学会等名 LST Advanced Camera meeting
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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
研究 分担 者	猪目 祐介 (Inome Yusuke) (90869710)	東京大学・宇宙線研究所・技術職員 (12601)	

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
---------	---------