

# 単光子計数による時間領域可視光天文学の開拓

## Exploring time-domain optical astronomy by the single-photon counting method

(日本天文学会推薦)

代表研究者	山形大学	中森 健之	Yamagata University	Takeshi NAKAMORI
協同研究者	山形大学	大内 優雅	Yamagata University	Yuga OUCHI
	山形大学	荻原 理沙	Yamagata University	Risa OGIHARA
	東京大学	寺沢 敏夫	University of Tokyo	Toshio TERASAWA
	山形大学	柴田 晋平	Yamagata University	Shinpei SHIBATA
	広島大学	秋田谷 洋	Hiroshima University	Hiroshi AKITAYA
	広島大学	川端 弘治	Hiroshima University	Koji S. KAWABATA

We have developed a photo-sensor for an optical photon counting imager for astronomy with high timing resolution. We customize a Multi Pixel Photon Counter as a monolithic Geiger avalanche photodiode array with a pixel size of 100 micro-meter. The prototype model consists of 4x4 pixels sensitive to single optical photons. Excellent timing response is achieved as fast as an order of a nanosecond. We evaluate the basic performance of the sensor and confirm the gain linearity, uniformity, and low dark count rates. We observe the Crab pulsar using this system with a 35-cm telescope and successfully detected periodic pulses with a frequency consistent with that reported by the radio observatory. We also installed our system at the Nasmyth focus of Kanata 1.5-m telescope and observed the Crab pulsar. With a larger collecting area, the Crab pulses are clearly detected in less than 1 second. And finally, in order to make the system more stable and easy to handle, we developed a compact readout system employing a commercial FPGA evaluation board.

### 研究目的

高速回転する中性子星である Crab パルサーは、自転に同期した周期で電波からガンマ線に渡る広帯域の電磁波をパルス状に放出している。カニパルサーでは平均的なパルス強度に対して 10–1000 倍以上にもなる巨大電波パルス (Giant radio pulse; GRP) の存在が知られており、ときにはナノ秒スケールの強度変動が観測されている[1]。GRP は頻繁に繰り返し起こっており、定常的に観測されるメインパルスと同期していることが多い。その起源については未だ結論が得られておらず、多波長同時観測が世界的に活発に行われている。X 線[2]と高エネルギーガンマ線[3,4]では GRP に同期した増光は確認されなかった。可視光では定常パルスピーク前後 1 ミリ秒未満の範囲で 3% 程度の増光が検出されているが[5,6]、電波強度との相関など精査の余地が残されている。最近に

なって X 線の 4% 増光が確認[7]されるに至り、その放射モデルにとどまらず、マグネター天体との関連など議論が活発化している。

GRP のような高エネルギー天体现象の理解には、様々な波長 (や粒子等) で同時に観測することが不可欠である。とくに、高速変動現象が対象となる場合には、各波長の観測で時間分解能が揃った上での同時観測が肝要となる。この点で読み出し速度の遅い CCD や CMOS が使われる可視光観測は、他の波長に対して高速測光能力に劣る。

本研究では、半導体光センサ Multi-Pixel Photon Counter (MPPC) を光学天体観測に改造し、高速測光システムを開発する。MPPC はガイガーモードで動作する有感セルが 2 次元状に配置された構造で、個々のセルが  $10^6$  程度の内部増幅機能を持ち、単光子を検出する高い感度を有する。全セルの信号が合

算されて出力されるため、素子全体で受けた光量が分かるセンサである。MPPC はシンチレータの発光読み出しとして放射線検出器の一部として主に用いられるが、これを可視天体観測に応用する。本来の用途と異なるため、そのままの利用には課題がある。mm サイズの「ピクセル」は大きすぎ、撮像能力を持たない。大きすぎるピクセルサイズは夜光バックグラウンドが大幅に増えてしまい、結局は天体信号に対する感度が低下する。さらには熱雑音レートが高すぎるといった課題があった。

本研究の目的は以下の3つである。(1) 光学天体観測に応用した際の MPPC が有する課題を克服する改造を行い、高速測光センサとして利用できる性能を示すこと。(2) Crab パルサー一定常パルスの観測によってシステムとしての性能を実証する。電波望遠鏡と同時に GRP の観測を行い、日本国内での観測体制を確立するとともに、可視増光を探索すること。(3) 観測システムの安定化と小型化のため、専用のデータ収集回路系を開発すること。

## 研究経過

(1) MPPC の有感セルを独立に読み出すように改造したカスタム MPPC を試作した。Dual-in-line パッケージに 100  $\mu\text{m}$  角のセルが 4x4 に並んで封入されている。単光子に感度を持つ個々のセルが、画素として機能するガイガー・アバランシェフォトダイオードのアレイである。以下、本稿では改造 MPPC と呼ぶ。

まず初めに、以下に述べる一連のセンサ性能評価を行った。単光子検出時に出力されるナノ秒幅のパルス波形を確認し、高速応答性と回路雑音に対する高い S/N 比を有することを Figure 1. に示した。印加電圧に対する内部増幅率を全セルに対して、25°C か

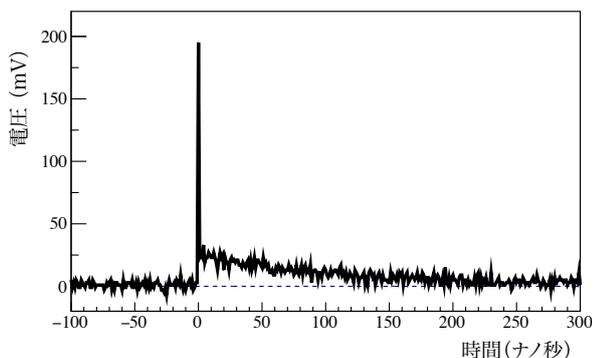


Figure 1. A waveform of the customized MPPC detecting a single photon.

ら-20°Cまでの温度で測定し、線型性を有することを確認した。熱電子によって誘起されるダークカウンターのレートを全セルに対して測定したところ、常温で O(100) Hz であった。従来型 MPPC のダークレートをセル当たりに換算したものと同程度であり、予想通りであった。また夜光雑音に対して十分に低いこともわかり、天体観測においてダークカウントは問題にならないことを示した。MPPC はガイガー放電により検出するため、隣接するセルの放電を誘起してしまうオプティカルクロストークという偽信号が確率的に混入する可能性がある。セルごとに信号を取り出せる改造 MPPC の性質を利用して、クロストーク確率を直接測定することができた。正確な測光と系統誤差の見積りに用いる基礎データが取得できた。

次に素粒子実験用の汎用電子回路モジュールを組み合わせることで、改造 MPPC の光子計数を時系列で記録するシステムを構築した。利用できるモジュールと VME バスの読み出し速度の制限から、0.1 ms ごとの検出光子数をチャンネルごとに記録し続けるシステムとした。Crab パルサーと同程度の 30 Hz で周期的に発光させた LED を照射し、高速フーリエ変換による周期検出と、フォールディング法による周期検出にそれぞれ成功した。また kHz を超える周期でも同様の試験を行い、光源の周期と矛盾しない結果が得られた。以上から、改造 MPPC と読み出しシステムは、光学天体の高速観測に使える性能を持つことが分かった。

(2) 開発したシステムを山形大学天文台にある口径 35 cm の望遠鏡に搭載し、Crab パルサーを 1 分×7 回間観測した。周期解析を行い、Jodrelbank 電波天文台 (イギリス) がモニタリング観測している Crab pulsar の周期と矛盾しない結果が得られた。Figure 2. に示すように、可視の光度変化を表すパルス波形を再構成し、従来から知られていた波形と一致することを確認した。以上と (1) の成果を論文にまとめて投稿し、出版された (誌上発表 1)。

GRP に連動した光度変化を測定するためには、十分な光子統計量が必要となる。小口径望遠鏡では効率が悪いため、さらに大型の望遠鏡に搭載する必要がある。口径 1.5 m を持つ広島大学かなた望遠鏡のナスミス焦点に開発したシステムを設置し、東北大学が運用する飯館電波望遠鏡と Crab パルサーの同時観測を行った。設置に先駆けて、小型自動ステー

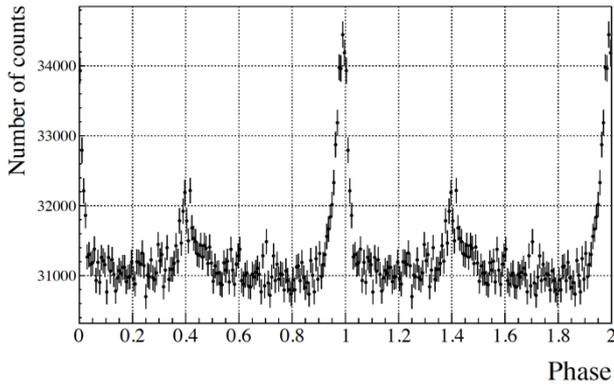


Figure 2. The observed pulse profile of the Crab pulsar. (誌上発表 2)

ジによる焦点合わせ機能を開発実装し、観測の全プロセスをネットワーク経由で遠隔操作できるようソフトウェアを整備開発した。

高い集光力によって、わずか数周期で Crab パルサーの定常パルス信号の検出に成功した。GRP を観測している電波望遠鏡と時刻を精密に合わせる必要があり、GNSS モジュールをデータ処理系に組み込んだ。本実験中に、軽微ではあるが無視できない GNSS の不具合があった。原因の追求と再現実験に時間を費やしたが、信頼できる較正が可能であることまで突き止めた。現在は慎重に可視・電波同時観測データの解析を進めている。

(3) かなた望遠鏡での観測実験で、汎用回路モジュールで構成したデータ収集系がかさばる重量物であり、移植性・可搬性に難があることが明らかとなった。また、センサ信号の増幅回路も環境変化にともなう電源ノイズに対してやや弱いことも分かった。これらの問題を解消するため、センサとアンプ、光子検出を判別するコンパレータが一体化した専用のフロントエンド回路基板を設計制作した。フロントエンド基板には、バイアス電源とコンパレータをそれぞれ駆動する DAC が搭載されており、SPI 通信によって制御する。開発のコストを削減するため、市販の Field Programmable Gate Array (FPGA) 評価ボードを採用し、フロントエンド基板全体への電源供給と、DAC の制御を FPGA から行う構成とした。

コンパレータの出力も FPGA で受け取り、光子検出時刻を測定する機能を実装した。GNSS モジュールから Pulse Per Second 信号と 10 MHz のクロックを FPGA に接続し、コンパレータのパルスを受けたタイミングを 100 ns の精度で記録することができるよ

うになった。データはイーサネットから送信されるため、転送速度で律速することなく、高い時間分解能で全 16 セルの光子検出時刻を測定できるようになった。山形大学 35 cm 望遠鏡に搭載できるよう治具を設計制作したものを Figure 3. に示す。



Figure 3. A photo of the developed camera system with the FPGA evaluation board.

この新しい測定システムに周期的に発光する LED を照射して性能評価を行い、初期システムと同様に周期検出能力を有することが分かった。本システムを搭載して Crab パルサーの試験観測を行う計画であったが実現できなかった。山形大学天文台の観測小屋が積雪により損傷し、機能を喪失する事故が発生したことが理由の 1 つである。また新型コロナウイルス感染拡大の影響により、かなた望遠鏡への出張観測を組むことが困難であったことも理由に挙げられる。

## 考察

カスタム MPPC によって Crab パルサーの定常パルスは光子計数法で問題なく検出することができたため、高速可視観測のセンサとして有望であると言えるだろう。開拓と題した本研究の目的は、ある程度達成できた。可搬性と小型化をさらに追求できれば、小惑星による恒星食などの野外観測への新しい応用が実現する可能性も考えられる。

かなた望遠鏡のような大型望遠鏡の焦点距離ではスポットサイズが大きくなる。観測中の追尾精度や大気の状態によっては結像位置が動いてしまうため、面積の小さな改造 MPPC では点光源の光を安定して受光しにくい。センサの大型化が望まれるが、同時

に読み出しチャンネル数の増加を意味する。より集積度の高い IC の採用や開発が必要となるだろう。性能の向上とシステムの堅牢化が進めば、従来型のセンサでは到達できない時間領域の探索が効率的に実施でき、既知天体现象の理解が深まり、未知の現象の発見につながるだろう。

## 引用文献

- [1] Hankins et al., Nature 422, 141, 2003
- [2] Hitomi Collaboration, PASJ, 70, 15, 2018
- [3] Bilous et al., ApJ, 728, 110, 2011
- [4] Aliu et al., ApJ, 760, 138, 2012
- [5] Shearer et al., Science, 301, 493, 2003
- [6] Strader et al., ApJL, 779, L12, 2013
- [7] Enoto et al., Science, 372, 187, 2021

## 研究の発表

### 口頭発表

1. 「可視光子計数法による Crab パルサーの時間分解観測」、中森健之、高エネルギー突発現象の多波長・多粒子観測と理論、東大宇宙線研、2019 年 11 月
2. 「MPPC を用いた中性子星パルサーの観測システムの開発」、中森健之他、日本物理学会春季年会、オンライン、2020 年 3 月

3. 「光子計数撮像システムと Crab pulsar の観測」、中森健之他、かなた望遠鏡ユーザーズミーティング、オンライン、2020 年 6 月
4. 「MPPC による Crab パルサーの観測とシステムの改良」、中森健之他、日本物理学会秋季大会、オンライン、2020 年 9 月
5. 【招待講演】「Crab pulsar の光学光子計数観測」、中森健之他、光・赤外線天文学大学間連携ワークショップ、オンライン、2020 年 11 月
6. “Development of an optical photon counting imager using Geiger APD array”, T. Nakamori et al., SPIE, X-ray, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy IX, online, 2020 年 12 月
7. 「パルサーの可視観測」、中森健之、中性子星および関連現象、オンライン、2020 年 12 月

### 誌上発表

1. “Development of an optical photon counting imager using Geiger Avalanche Photodiode array”, T. Nakamori, Y. Ouchi, R. Ogihara, T. Terasawa, S. Shibata, PASJ, 73, 66, 2021
2. “Development of an optical photon counting imager using a monolithic Geiger APD array”, T. Nakamori, Y. Ouchi, R. Ogihara, T. Terasawa, S. Shibata, H. Akitaya, K. S. Kawabata, Proc. SPIE 11454, 1145418, 2020