

暗い可視光天体の高速測光システムの開発



中森 健之
Nakamori Takeshi

半導体センサ Multi Pixel Photon Counter (MPPC), あるいは一般に Silicon Photomultiplier (SiPM) と呼ばれる光センサは、シンチレータの読出し素子として様々な分野で利用されている。シンチレーション検出器として粒子計測を行う素粒子・原子核・宇宙実験のみならず、陽電子断層撮像に代表されるような核医学診断装置としても利用されているため、ご存知の読者も多いことだろう。本稿は MPPC を天体可視光の高速測光に応用した事例^{1,2)}を紹介する。

1 可視高速測光の必要性

高エネルギー天体と総称される天体種族群は、主に相対論的な荷電粒子が電磁放射の主成分を担っており、電波から γ 線に至るまで非常に広帯域にわたる電磁波が観測される。放射の素過程を追求し天体現象を明らかにするためには、様々な波長による観測データを集積した多波長スペクトルが強力な手段になる。また物理状態が変動する天体は、光度やスペクトルの時間変化として観測される。変動のタイムスケールは、天体（あるいは放射領域）の大きさや、変動の原因となる物理現象により様々である。時間軸を切り口とした天体研究は時間領域天文学と呼ばれ、超新星やガンマ線バースト、重力波イベントに代表される突発天体を中心に、近年の観測技術の発展により世界的に活発化している研究分野である。

その中でも筆者らが最初の研究対象とした現象は、強い磁場を持ち高速回転する中性子星・かにパルサーで頻発する巨大電波パルス (Giant radio pulse; GRP) である。かにパルサーからは約 34 ms の周期で繰り返す、パルス状の光度変化が観測される。この周期はパルサー本体の自転周期に対応しており、回転位相の関数としての光度変化は、磁気圏内にある放射領域の 3 次元的構造を反映したものである。そのため、自転周期よりも十分に短い時間分解能で光度変化を測定することにより、パルサーの放射機構への手がかりが得られる。かにパルサーでは、通常のパルスに比べて 100~1000 倍にもなるような強度で放射が起こる GRP と呼ばれる現象が頻発している。長年その存在は知られていたが、その起源は未解決問題であり、様々な波長による観測が行われている。

時間変動天体の多波長観測は、共通の時間軸を持つよう同時に観測する必要があるが、各波長の時間分解能が同程度であることが望ましい。GRP の放射機構の手がかりを得るためには、GRP が発生しているその瞬間に限った多波長データが必要であり、ミリ秒未満の時間分解能が求められる。

天体可視光の観測に使われる主な検出器は Charge Coupled Device (CCD) であるが、露光後のバケツリレー式電荷転送による読出し時間が長く、低温駆動しないと信号雑音比 (S/N 比) が悪い。近年は Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS)

を採用することで高速化と S/N 比の向上が実現し、実用化している。これらの撮像素子は読出し領域を制限することで更に高速化が可能だが、ミリ秒程度の露出による連続撮像に留まっている³⁾。またデバイスやシステムの時間分解能を追求すると、短時間の露出（フレーム）あたりに入射する光量が下がる。そのためセンサには高い感度が求められる。

MPPC はこれら要件である高速応答性と高感度を併せ持つため、天体可視光の高速測光に利用できるポテンシャルがあると考え、開発に着手した。

2 カスタム MPPC の開発

MPPC はセルと呼ばれる有感部が2次元に多数並んだ構造である。個々のセルはガイガーモードで動作するアバランシェフォトダイオード（APD）で、高い内部増幅能により単光子を容易に検出することができる。光子入射に対する応答もサブナノ秒で十分に速いことが知られている。光子として天体可視光を検出すれば、パルスごとに到来時刻を付与するなり計数するなり、粒子計測の手法で処理できる。天体電磁波を光子として検出する手法は特別新しいアイデアではない。X線やγ線観測は言うまでもないが、可視光についても光電子増倍管だけでなく、半導体^{4,5)}や極低温検出器⁶⁾による事例もある。その一方で国内での実用事例はなさそうである。

さて、MPPC はそのまま観測に用いて天体の光度を測定するには以下に挙げるような課題がある。

課題① 非撮像・大きなピクセルサイズ

課題② 偽信号の発生

②-1 アフターパルス（AP）

②-2 ダークカウント（DC）

②-3 オプティカルクロストーク（OCT）

本研究で開発したセンサによる観測システムでは、これらの問題を克服していることを順に述べる。

まず MPPC の（全体としての）ピクセルサイズは mm 程度であり、単独では撮像ができず、数 μm 程度である一般的な撮像素子と比べると 100 倍以上大きい。このような MPPC をかにパルサーに向けたとしても、天体フラックスの数万倍の夜光を雑音として収集してしまう。また観測の技術的な問題として、有限の設置精度と有限の追尾精度を持つ望遠鏡に搭載した際に、センサ上に結像させるためには、

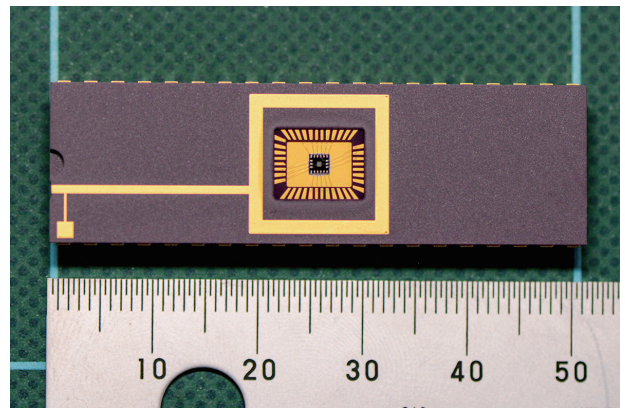


図1 カスタム MPPC 試作品の写真¹⁾

撮像能力が不可欠である。

筆者らは MPPC のセルを独立に読み出すようカスタマイズして、ガイガー APD アレイ、あるいは“マルチアノード” MPPC として動作する素子を製作した（以下、カスタム MPPC と呼ぶ）。図1に示すように dual-in-line にパッケージされた $100\ \mu\text{m}$ 角のセルによる 4×4 画素しかない試作品だが、この構造により入射位置の分解能が得られ、イメージングセンサとして動作できるようになった。非常に小面積であるが、単光子を検出できる高感度撮像素子である。画素サイズはまだ一般的なカメラより桁で大きい、点光源のスポットサイズと同程度であるため、どのみち測光のために加算される程度の面積である。これによって課題①が解消した。

課題②は、MPPC の一般的な性質として知られる3種類の偽信号であり、測光の不定性に直結する。1つ目の AP は、ガイガー放電したセルから遅れて発生するパルスであり、光子数を過剰に見積もる可能性がある。

図2に光子検出時の出力波形を示す。GHz 以上の帯域を持つアンプとオシロスコープを通して取得したものである。数 ns 幅の速い成分とテールを引く遅い成分がある。前者の短いパルス幅は、ピクセルあたり $\sim 0.5\ \text{pF}$ という小さな検出器容量が寄与する高速パルス、後者はクエンチング抵抗が作る時定数のテールと解釈できる。MPPC と同様、光子の非検出時のノイズレベルに対して優れた S/N 比を持つ。コンパレータで信号弁別することにより、光子到来時刻をナノ秒の精度で取り出すことができる。また図2の負極性波形に示すように、AP はガイガー放電の増幅率が復帰する前に発生するため波高が低

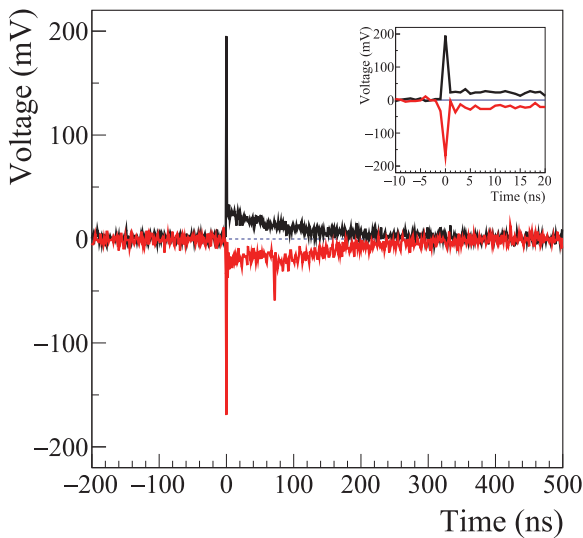


図2 単光子検出時の出力波形（正極性で表示）と、アフターパルスが付随したときの波形例（負極性で表示）¹⁾

く、^{しきい}閾値を適切に設定することで排除できる。これでMPPCの短所②-1が解消した。

2つ目の偽信号DCは、熱電子に起因するパルス出力であり、原理的に排除することが難しい雑音である。DCレートが低いほど測光の統計的不定性が抑えられるが、典型的に常温では 10^5 counts/s/mm²程度の頻度で発生する。そのため、MPPCでは低温駆動しなければ天体の信号検出の大きな妨げとなりうる。カスタムMPPCでは複数セルの出力を加算することなく個別に読み出すため、MPPCと比較するとチャンネルあたりの面積に比例してDCレートが減少する。この素子では25℃で2~300 counts/s/channel、0℃で1~20 counts/s/channelであった¹⁾。後述する観測セットアップでの夜光バックグラウンドが2 kcounts/s/channel程度であるため、冬期の観測中の外気温程度でDCは主たる雑音源とならない。課題②-2がカスタマイズによって解消している。

セルがガイガー放電した際の電子なだれに付随して発生する光子が、周囲のセルに到達して検出してしまうOCTがMPPCの短所②-3であった。DCと同様原理的に排除することは難しいが、セルごとに信号を読み出しているため、あらかじめ発生確率を測定することが可能である。各セルの出力波形を取得する測定系を構築し、先行するDCパルスに追従して発生する別のセルのパルスを探した。図3にデータ例を示す。ここでは20 ns以内のパルスを

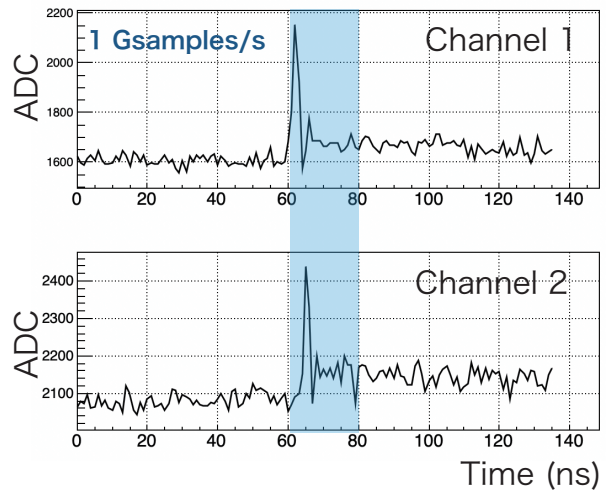


図3 オプティカルクロストーク発生時の波形データ例

先行するChannel 1のパルスに追従してChannel 2でパルスが発生している

OCTと見なした。なおダークカウントレートが低いため、偶発事象は無視できる。その結果、隣接セルほど発生確率が高く、最大で3%程度であることが分かった。また隣接していなければ発生率は0.1%以下であることも分かった。天体測光の相対値を評価する際は相殺されるが、絶対値を求める際にはOCT確率の測定結果を加味して真の計数を推定すれば良い。以上から課題②-3は解消できないが、対策が可能であることが分かった。

3 かにパルサーの観測実験

カスタムMPPCは、MPPCの課題を克服できそうなことが分かったため、天体測光の原理実証を行うために以下のようなデータ収集系を構築した。カスタムMPPCから出る16本の信号を、高速アンプで増幅した後にディスクリミネータに入れた。その出力をVMEのスケーラに接続し、内部クロックによる連続トリガによって100 μsごとの計数をチャンネルごとに記録した。このスケーラは内部にバッファを持つため、バスからの読出しを待たずに次の計測を始められる（とは言えバッファがあふれない速さで読み出す必要はあり、時間ビンの100 μsはVMEバスが律速している）。すなわち、デッドタイムなく100 μsごとに各画素の検出光子数を計測し続けられる、「高速動画撮影システム」である。また、

Global Navigation Satellite System (GNSS) の受信機から毎正秒に出力される Pulse Per Second もスケーラにつなぎ、スケーラの内部クロックの校正と絶対時刻の再構成に用いた。

カスタム MPPC は点源の観測に十分な撮像能力があるとは言え、焦点合わせや結像位置調整には不十分なセンサ面積である。そのため、XY ステージを用いてセンサ位置を焦点面内で動かして撮像し、モザイク合成を行うことで実効的に撮像視野を広げる対策を講じた。例えば 1 秒露出で 15×15 視野を撮影すれば 5 分程度の時間はかかるが、1.8 分角の視野が撮像できる。

このようなシステムを、山形大学理学部の屋上にあるやまがた天文台に設置し、かにパルサーの観測を行った。図 4 にその様子を示す。使用した望遠鏡

は口径 35 cm の反射型望遠鏡で、天文研究用途としては小型である。

真冬の屋外での実験のため苦労話も多々あるのだがここでは割愛し、結果を紹介する。7 分間の観測で得られた $100 \mu\text{s}$ ごとの時系列データに対して、約 34 ms 周期の自転位相を付与し、「折りたたんで積算した」光度曲線を図 5 に示す。よく知られた大小ふた山の平均パルス波形が得られた。変動するパルス成分のカウンtrate は $100 \pm 30 \text{ counts/s}$ 程度で、かにパルサーのフラックスから予想されるレートと矛盾しないことも分かった。

また位相が 0 (あるいは 1) となるタイミングは、かにパルサーをモニタリングしているジョドリバンク天文台の電波望遠鏡によって決められた電波パルスの位相である。図 5 のように、位相 0 より可視

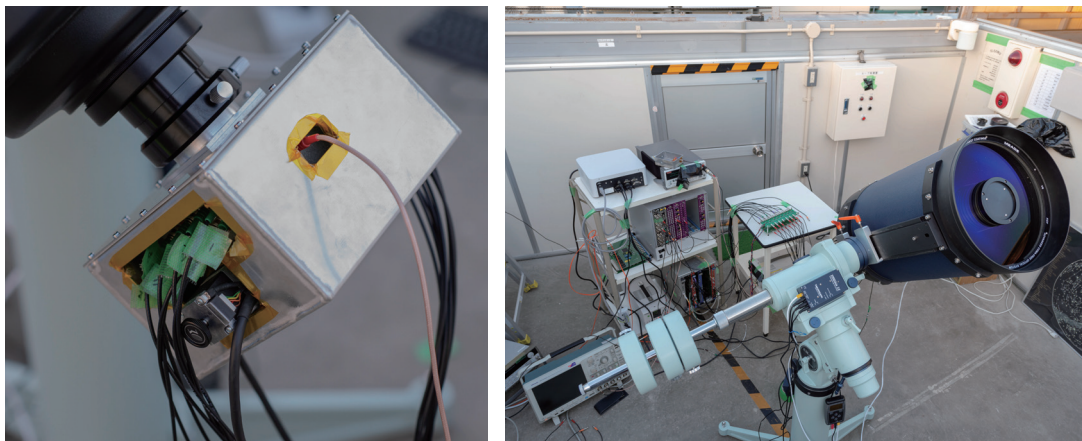


図 4 左: 望遠鏡の接眼部に取り付けたカスタム MPPC とステージ¹⁾。冷却機構はなく外気温で動作する。右: 実験セットアップの全景

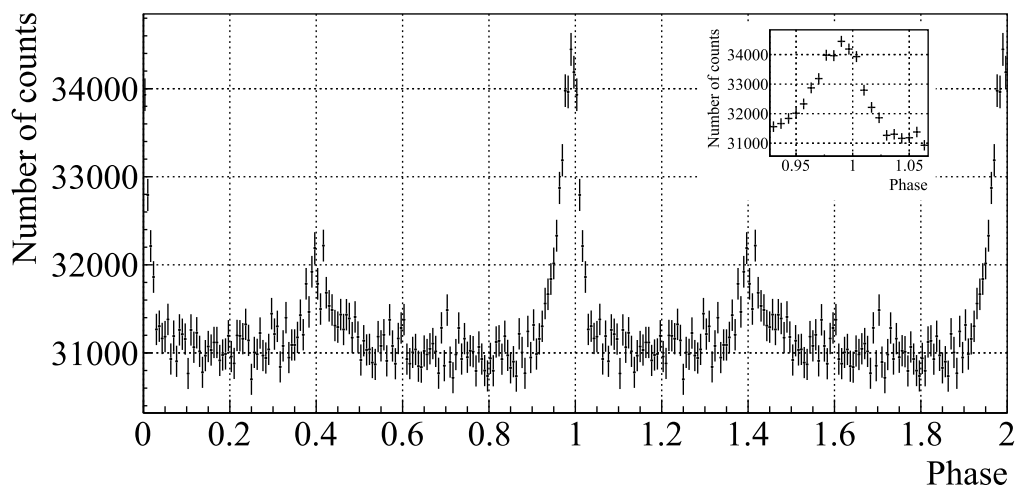


図 5 カスタム MPPC と 35 cm 望遠鏡で測定した、かにパルサーの光度曲線¹⁾ と位相 1 付近の拡大図

光のパルスピークがわずかに先行する，という点も再現できており，絶対時刻の再構成も問題なく達成できたことを示している。以上から，カスタム MPPC のパルサー観測に必要な高速測光の原理実証に成功した。

4 まとめと今後

本研究では，MPPC をセルごとに読み出すカスタマイズにより MPPC の課題を克服し，かにパルサーの観測によって天体可視光の高速測光・動画取得が可能であることを示した。小型望遠鏡では集光力が低いため，口径 1.5 m の広島大学・東広島天文台かなた望遠鏡にシステムを設置し，電波望遠鏡と連携した GRP の科学観測を既に始めている。

並行して主に 2 つの改良開発を進めている。1 つ目は，読出し回路が制限している $100 \mu\text{s}$ という時間分解能の向上である。GRP の観測研究のためには 1 桁以上の改善が求められる。これはイーサネットデータ転送する FPGA によるデータ収集系を開発することで実現する。GNSS 受信機が供給する 10 MHz のシステムクロックに合わせ，検出光子にタイムスタンプを付与するシステムの実証実験を進

めている。もう 1 点はセンサの大型化である。合焦や結像位置調整の効率化だけでなく，大気のゆらぎや望遠鏡の追尾による星像位置のずれに対する安定性の向上が期待でき，結果として長時間の観測による測光の精度が向上するからである。センサの大型化はチャンネル数の増大が避けられないため，回路系の高集積化が求められる。前述の FPGA によるデータ収集系はこの点でも役立つだろう。

改良して安定したシステムができあがれば，フットワークの軽い高速測光システムという新しいツールが確立する。まだ十分に開拓されていない高速時間領域で，新たな発見に出会えることを目指したい。

参考文献

- 1) T. Nakamori, *et al.*, *PASJ*, **73**, 66 (2021)
- 2) T. Nakamori, *et al.*, *Proc. of SPIE*, 11454, 1145418 (2020)
- 3) S. Sako, *et al.*, *Proc. of SPIE*, 10702, 107020J (2018)
- 4) C. Straubmeier, *et al.*, *Exp. Astron.*, **11**, 157 (2001)
- 5) L. Zampieri, *et al.*, *Proc. of SPIE*, **9504**, 95040C (2015)
- 6) B. A. Mazin, *et al.*, *PASP*, **125**, 1348 (2013)

(山形大学理学部)