

# IMONY : カスタム MPPC を天体観測用高速動画カメラに

山形大学 理学部

中森 健之

nakamori@sci.kj.yamagata-u.ac.jp

2023 年 (令和 5 年) 2 月 3 日

## 1 はじめに

天文観測装置の開発研究なので高エネルギー物理じゃないけど良いんですか、と寄稿依頼を頂いたときは心配になったりしたのですが、「大丈夫だ、問題ない」とのことでしたのでありがたく研究紹介の機会を頂きます。フラグでないことを祈ります。

本記事で紹介する研究は、高エネルギー実験でもおなじみの半導体光センサである Multi Pixel Photon Counter (MPPC)、ときに Silicon Photomultiplier (SiPM) とも呼ばれる素子を、可視光の高速天体測光に応用する開発です。私はもともと可視光の天文学とは接点のない研究キャリアでした。天体ガンマ線の観測研究という文脈から検出器開発を始め、環境ガンマ線計測や核医学に応用したシンチレーション検出器開発を通じて MPPC に関わってきました。そして MPPC を可視光天体の高速観測に応用できそうだと思い至り、分野の境界を超えた研究開発を山形大学の一研究室で細々と始めました。山形と言えば芋煮ですね。われわれはこのシステムを Imager of MPPC-based Optical photon counter from Yamagata (IMONY) と名付けました。

本稿の section 2-4 は過去の解説記事 [1] を再整理しながら加筆修正したもので、以降の section はさらにその後の進捗を加筆した形になります。

## 2 可視高速測光へ

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その電磁放射の主成分を担っており、電波からガンマ線に至るまで非常に広帯域に渡る電磁波を放射します。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ります。また、対象天体の物理状態が変化すると、光度やスペクトルの時間変動として観測されます。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す。時間軸で分解した観測を通じた天体研究は時間領域天文学と呼ばれ、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と言えます。超新星やガンマ線バースト、重力波イベントや高速電波バーストなどの突発天体が観測対象の代表例です。

その中でもわれわれが最初の対象とした現象は、強い磁場を持ち高速で自転する中性子星である、パルサーと呼ばれる天体で発生する巨大電波パルス (Giant radio pulse; GRP) です。GRP は約 3,000 個あるパルサーのうちごく一部で見られる現象で、Crab パルサーはその代表です (e.g., [2])。

Crab パルサーは約 34 ms の周期で繰り返す、パルス状の光度変化が観測されます。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ていると考えられます。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が、パルサーの放射機構への手がかりに繋がります。

Crab パルサーでは、通常のパルスに比べて 100-10,000 倍にもなるような強度で放射が起こる GRP が頻発しています。長年その存在は知られていましたが、生成メカニズムや放射起源は未解決問題です。先に述べたように多波長観測が重要な手がかりになるはずですから、これまでも様々な波長による観測が行われてきました [3]。パルサーや GRP のように時間変動する現象の多波長観測は、共通の時間軸を持つよう同時に観測する必要があり、各波長の時間分解能が同程度であることが望ましいと言えます。すなわち、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ます。

天体可視光の観測に使われる主な検出器は CCD ですが、露光後の電荷転送による読み出し時間が長く、低周波駆動しないと信号雑音比 (S/N 比) が悪くなります。近年は CMOS を採用することで高速化と短時間露光時の

S/N比向上が実現し、比較的安価な製品も普及しておりプロ・アマともに幅広く使われています。これらの撮像素子は読み出し領域を制限することで更に高速化が可能ですが、せいぜいミリ秒程度の露出による連続撮像に留まっていて、GRPの時間分解観測には十分とは言えません。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ため、統計ゆらぎに負けないためには高い感度のセンサが求められます。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、開発に着手しました。

### 3 センサ開発と課題の解決

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す。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であり、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ます。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ます。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時間を区切って計数するなり、粒子計測の手法で処理できます。このような天体電磁波をphoton-countingする手法は特別新しいアイデアではありません。X線やガンマ線観測は言うまでもありませんが、可視光についても古くは光電子増倍管、近年ではsingle-pixel avalanche photodiode (SPAD)や極低温検出器による事例があります。実際にこれらの検出器を用いたCrabパルサーのGRPに付随した有意な可視増光が報告されています[5, 6]。国内ではエネルギー分解もできる可視光用Transition Edge Sensorなども開発されていますが、天体に向けた実用事例はなさそうです。

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様々な課題がありますが、われわれが開発しているIMONYではこれらの問題を克服していることを順に述べます。

#### 3.1 ピクセルサイズと撮像能力

まずMPPCの(素子全体としての)ピクセルサイズはmm程度であり、1つの素子では撮像ができません。数 $\mu\text{m}$ 程度である一般的な撮像素子と比べると100倍以上大きく、光学系が結像するスポットサイズよりはるかに大きいため、このようなMPPCをパルサーのような点光源に向けたとしても、天体からの信号に対して数千から数万倍の夜光を雑音として収集してしまいます。また観測の技術的な問題として、有限の設置精度と

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、そして正しく結像していることを確認するためには撮像能力が求められます。

そこでわれわれは浜松ホトニクス社と相談し、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アレイとして動作する素子を製作してもらいました(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 $\times$ 4画素しかない試作品ですが、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りました。非常に(非常識に?)小面積ですが、単光子を検出できる高感度撮像素子です。画素サイズはまだ一般的なカメラより桁で大きいですが、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す。足し上げる画素数が少ないほうが、ピクセルごとの計数ゆらぎによる不定性を足し上げずにすみ、むしろ都合が良いとも言えます。MPPCのカスタマイズにより、ピクセルサイズの問題が解決しました。

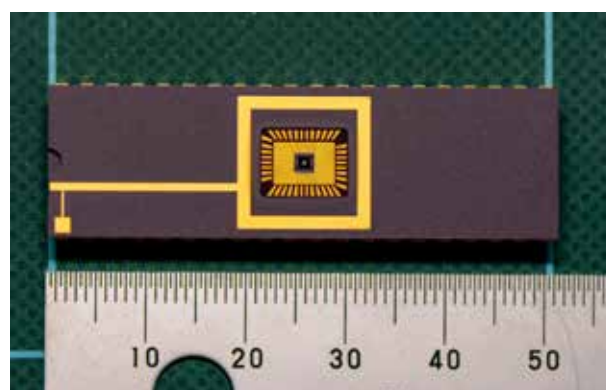


図1: カスタムMPPC [7]。

#### 3.2 アフターパルス

MPPCの一般的な性質としてアフターパルス(AP)、ダークカウント(DC)そしてオプティカルクロストーク(OCT)という3種類の偽信号が知られています。これらが混入すると検出光子の数を超過して見積もってしまい、天体測光の不定性に直結するので問題となります。

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、格子欠陥等により存在する中間準位に寄り道した電子が、遅れて放電することで起こります。図2に光子検出時の出力波形を示します。高帯域のトランスインピーダンスアンプとオシロスコープを通して取得したもので、数ns幅の速い成分とテールを引く遅い成分が見えています。前者は、ピクセルあたり $\sim 0.5$  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

クエンチング抵抗と読み出し回路が作る時定数のテールと解釈しています。MPPCと同様に、光子の非検出時の回路雑音に対して優れたS/N比を持つことがわかります。また図2の負極性で示した波形はAPが発生した一例で、80 ns 付近のパルスがAPです。この時間帯は、先に発生したガイガー放電からまだ完全に復帰していないため、出力波高が低くなります。このような出力信号は、図3に示すように電荷積分するとAPによる余剰な電荷が混入してしましますが、カスタム MPPC はピクセルごとから1光子相当の信号しか得られないことが分かっているため、電荷量を測定する必要はありません。適切にしきい値を設定したコンパレータで信号弁別することにより、APを排除した上で光子到来時刻をナノ秒の精度で、カスタム MPPC のピクセルごとに取り出すことができます。これでAPの課題が解消しました。また、一光電子のパルスが十分に高いため、外気温によるゲインの変動の影響が受けにくいとも言えます。われわれのシステムは今のところ温度制御をしていません。

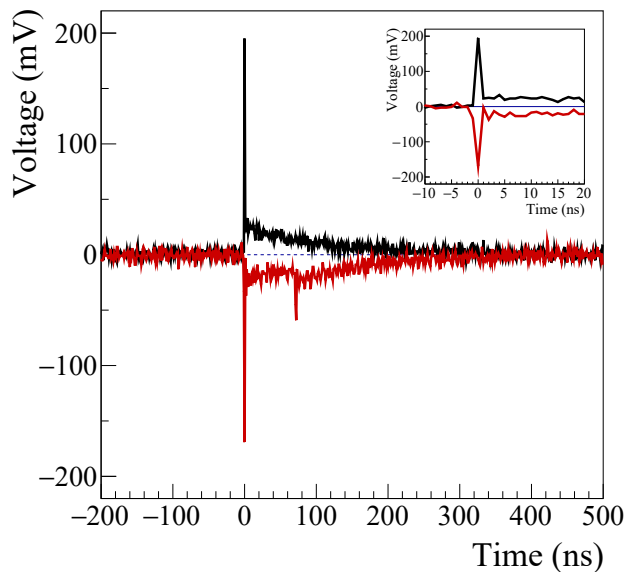


図 2: カスタム MPPC の出力波形 [7]。負極性に反転表示させたものは、アフターパルスを伴った例。

### 3.3 ダークカウント

2つ目の偽信号 DC は、熱電子がバンドギャップを超えてしまってガイガー放電を起こすパルス出力であり、原理的に光子検出時と同じ出力になるため排除することが難しい雑音です。そのため DC レートを別途見積もっておき、観測データから差引くという操作を行います。DC レートが低いほど測光の統計的不定性が抑えられますが、典型的に常温では  $10^5$  counts/s/mm<sup>2</sup> 程度の頻度で発生するため、低温駆動しなければ天体の信号検

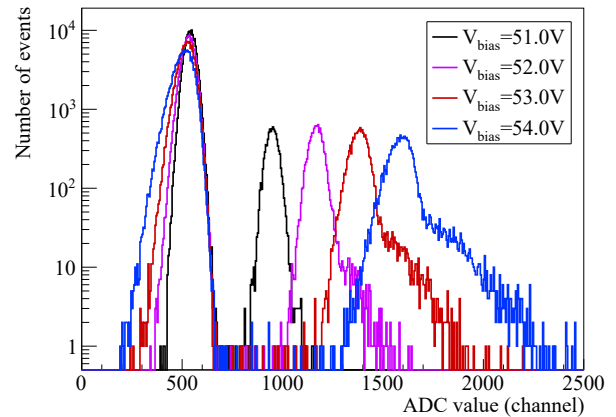


図 3: カスタム MPPC のとあるピクセルから出力される電荷のスペクトル [7]。バイアス電圧を上げるほどゲインが上がって右に移動し、AP 発生確率も上がるため右に伸びるテールがだんだん目立つように推移する。

出の大きな妨げとなりえます。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 レートが減少します (単位面積当たりでは変わりません)。図4に、カスタム MPPC のチャンネルごとに測定したダークカウントレート (いわゆる 0.5 p.e. 相当のしきい値でのレート) の温度依存性を示します。この素子では 25°C でチャンネルあたり 2–300 counts/s, 0°C で 1–20 counts/s でした。後述する実際の観測時の夜光によるバックグラウンドがチャンネルあたり 2 counts/s 程度であるため、とくに冬期の観測中の外気による自然冷却状態では、DC は主たる雑音源となりません。したがって DC レートが高すぎて天体が検出できないという問題は、カスタマイズによって解消しました。

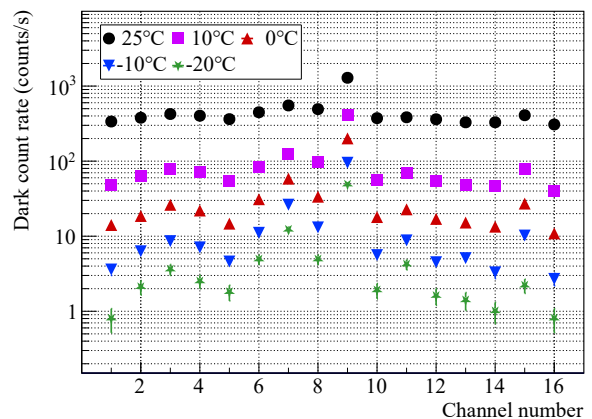


図 4: 16 画素カスタム MPPC のダークカウントレートの温度依存性 [7]。この個体はチャンネル 9 だけダークカウントレートが特異的に高い個性があった。

### 3.4 オプティカルクロストーク

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赤外線等の光子が、周囲のセルに到達して検出してしまふ OCT が3つ目の偽信号でした。DC と同様原理的に排除することは難しいですが、カスタム MPPC はセルごとに信号を読み出しているため、予め発生確率を測定することができます。システムを搭載する光学系にも依りますが、星の像は複数のセルに跨ります。たとえば隣接するセルがほぼ同時にパルス信号を出力していたことが観測データから分かったとき、真に外来光子が同時に検出されたのか、あるいは片方は OCT に由来するものなのか、を確率をもとに判別することで測光精度が向上します。

そこで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る、という手法で OCT 確率を見積もる実験を行いました。図5 (左) にデータ例を示します。基準とするチャンネル (図では Channel 1) のダークカウントによるパルスでトリガをかけ、Domino Ring Sampler 4 チップを搭載した VME モジュールで他のチャンネルの波形も同時に記録しました。ここでは 20 ns 以内のパルスを OCT とみなすこととしました。トリガをかけた信号が別チャンネルからの OCT ではないイベントを選び出すため、自身より先行するパルスがあるイベントはカットします。残ったデータの中から OCT が発生したイベント数を数え、確率を求めました。なおダークカウントレートの十分に低いため、タイムウィンドウ内でダークカウントがそれぞれのチャンネルで偶発的に発生する事象は無視しました。図5 (右) がその結果のマトリックスです。隣接セルほど発生確率が高く、最大で3%程度であること<sup>1</sup>、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りました。OCT を直接測定できる、というのは少し面白いところかなとやっけておりました。測光によりフラックスの相対変化を評価するならば OCT の影響は相殺されますし、フラックスの絶対値を求めるには、OCT 確率の測定結果を加味すれば真の計数を推定することができます。以上から OCT 問題は完全に解消できないが、対処が可能であることが分かりました。

## 4 IMONY 味見編：山形での観測実験

カスタム MPPC は、MPPC の課題を克服できそうなことがわかりました。高速天体測光の原理実証を行うために、図6 に示すようなありあわせの NIM と VME モ

<sup>1</sup>このチャンネルはダークカウントレートが特異的に高かったセルであり、放電が起きやすい傾向があると言えるでしょう。

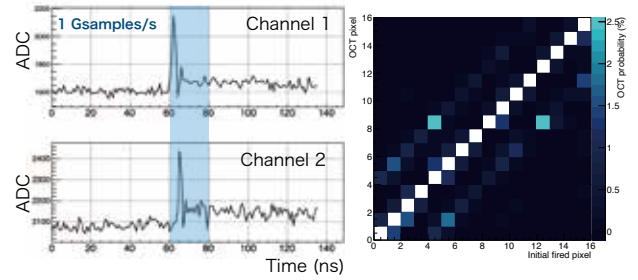


図5: OCT とみなした波形の組の例 (左) と全チャンネル同士の OCT 発生確率 (右) [8]。Channel 1 が放電してから 20 ns 以内に Channel 2 で放電が観測されている。配置上隣接したピクセル間で OCT 確率の高い傾向がある、この個体はチャンネル9だけダークカウントレートが特異的に高い個性があり、OCT 確率も高い。

ジュールでデータ収集系を構築し、試作 IMONY システムとしました。芋煮の調理でいうとこれから味見をして調整していくという段階です。

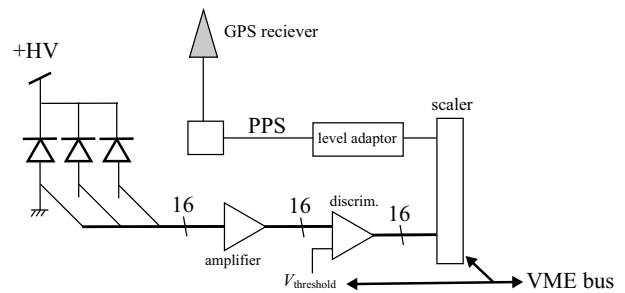


図6: 試作 IMONY システムの DAQ 構成 [7]。

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 VME のディスクリミネータに入れ、光子検出のタイミングパルスを作ります。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  $\mu$ s ごとの計数をチャンネルごとに記録します。このスケーラは内部に FIFO をもつため、バスからの読み出しを待たずに次の計測を始められます<sup>2</sup>。すなわち、デッドタイムなく 100  $\mu$ s 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」が出来上がりました。また、Global Navigation Satellite System (GNSS) の受信機から毎正秒<sup>3</sup>に出力される Pulse Per Second (PPS) 信号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ました。光子が到来した絶対時刻は、パルサー観測において異なる装置、例えば電波望遠鏡の観測データと照合するために取得する必要があります。

<sup>2</sup>とは言い FIFO があふれない速さで読み出す必要はあり、時間ビンの 100  $\mu$ s は VME バスが律速していました。

<sup>3</sup>Coordinated Universal Time で秒未満の端数がないタイミン

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の望遠鏡に設置し、Crab パルサーの観測を行いました。図7にその様子を示します。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になります。



図 7: やまがた天文台の望遠鏡に取り付けた試作システム。治具の中で自動ステージによって 2 軸にセンサが動く。

カスタム MPPC は点源の観測ができる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です。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を繰り返し、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ました。例えば 1 秒露出で  $15 \times 15$  視野を撮影すれば、合計 5 分程度の時間はかかりますが、1.8 分角の視野が撮像できます。この望遠鏡ではピント合わせは手動ノブを回して調整する必要があり、雪国・真冬・屋外での実験のため苦労話も多々あるのですがここでは割愛し、結果を紹介します。

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 周期の自転に対応した回転位相を付与し、「折りたたんで積算した」光度曲線を図 8 に示します。従来からよく知られた大小ふた山のパルス波形が得られ、パルス成分のカウントレートは  $100 \pm 30$  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りました。また位相が 0 (あるいは 1) とは、Crab パルサーをモニタリングしている Jodrell Bank 天文台の電波望遠鏡によって決められた電波パルスが到来するタイミングです。可視光のパルスピークは位相 0 よりわずかに先行する、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ます。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ました。アマチュア望遠鏡で観測できたことから、一般向け天文雑誌でも取り上げてもらいました [4]。

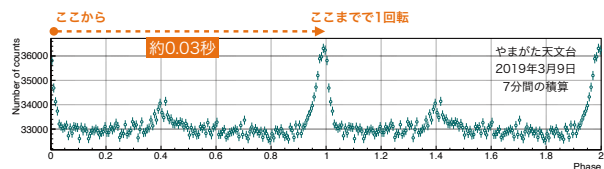


図 8: 35 cm 望遠鏡で取得した Crab パルサーの光度曲線 [4]。

## 5 かなた望遠鏡での観測実験

### 5.1 IMONY 一杯目と読み出し回路の小型化

冒頭に掲げた GRP の観測を推進するにあたり、アマチュア用望遠鏡ではやはり集光力が足りないこと、望遠鏡本体の駆動の安定性や調整精度が不十分であることから、より大型の望遠鏡に搭載する必要があります。ありがたいことに、広島大学・東広島天文台の「かなた」望遠鏡に協力して頂くことができました。

学会等ではすでに報告していますが、試作 IMONY システムを 1.5 m の口径を持つ「かなた」望遠鏡のナスミス焦点に設置して、首尾よく Crab パルサーの検出に成功しました (IMONY 一杯目)。山形の 20 倍近い集光面積のおかげで、1 秒もかからないうちに Crab パルサーの周期信号が有意に検出できました。東北大学飯館電波望遠鏡との同時観測も実現し、GRP 研究のための科学観測データを蓄積しました。今後さらに統計量を貯めていく必要があります。

それと同時に、早急に改良すべき点が 2 つ持ち上がりました。1 つ目は信号処理系の集積化です。試作 IMONY システムを輸送する際、VME のクレートや NIM ビン、それらを現場で格納する棚やデスクトップ PC まで送ることになり、ダンボール 10 箱を超える大荷物となってしまうました。また設置や撤収時には重量物を高所作業で持ち運ぶ必要があり、安全性の観点からも小型化が望まれました。

そこでわれわれは、専用の読み出し基板を制作し、デジタル処理に FPGA を採用することにしました。Open-It のプロジェクトとして採用していただいたおかげで強力なサポートを得ることができ、専用のフロントエンド基板を設計・制作することができました。信号フローの後段に配置する FPGA ボードはイチから設計する余力がなかったため、市販の Artix-7 搭載ボードで間に合わせました。図 9 にその写真を示します。FPGA のコーディングでも Open-It の多大なサポートを頂きました。

フロントエンド基板ではセンサの各チャンネルから出たアナログ信号がアンプとコンパレータにつながっています。同基板上の DAC を FPGA から SPI で制御し、しきい値を設定します。バイアス電圧の生成もボード上で行

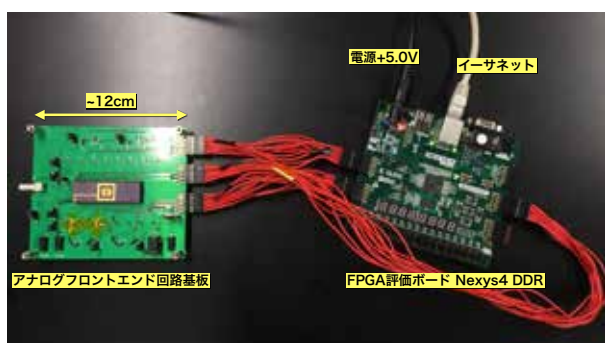


図 9: 開発したフロントエンドボードと FPGA 評価ボード [9]。カスタム MPPC がフロントエンド基板に装着されている。

い、これも FPGA から制御します。写真には写っていませんが、FPGA ボードには GNSS 受信機が接続されており、10 MHz のクロックを受け取ってシステム全体のクロックとしています。また PPS だけでなく測位や時刻情報 (NMEA) も取得します。FPGA の中では、PPS の受信数を数えながら、PPS を受信するたびにリセットするカウンタを 10 MHz クロックと同期して回します。フロントエンドボードからカスタム MPPC の光子検出に対応したタイミング信号が送られてくると、その時のカウンタ値から到来時刻を再構成できます。FPGA は SiTCP を介してイーサネット経由で制御とデータ転送を行います。この開発によって、10 箱だった荷物が 3 箱にまで減量できました。そして、試作システムの時間分解能を律速していた VME バスを撤廃したため、100  $\mu$ s ごとの光子数積算データではなく、光子ごとに 100 ns (10 MHz クロックに対応) の分解能でタイムスタンプを付与できるようになりました<sup>4</sup>。GRP の観測研究の観点でも、精度良く増光のタイミングを検出するために 1 桁程度の分解能向上が求められていたため、科学的な要求仕様もこれで達成できました。

## 5.2 IMONY 二杯目：動作実証

開発した新基板システムを治具に格納し、再びかなた望遠鏡に搭載しました。焦点面の光軸上に設置したときの写真を図 10 に示します。水平に出てくる光軸上にセンサを配置します。

センサが (非常識に) 小さいことはかなた望遠鏡に搭載したときも同じであり、ここでも自動ステージによるモザイク撮像でフォーカス合わせと天体の導入を行います。光軸方向 (=ピント合わせ) の調整は、望遠鏡の副

<sup>4</sup>使用した市販ボードには 100BASE-T のイーサネット I/F しか実装されていないため、SiTCP の性能を活かしきれていない。光子入射レートが 150 MHz/16 ch より高くなると読み出し切れなくなるが、かなた望遠鏡での Crab パルサー観測ではレートが  $O(10 \text{ kHz}/16 \text{ ch})$  であり全く問題にならない。

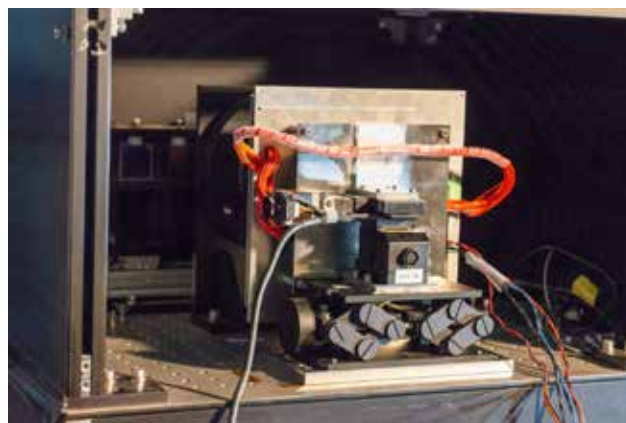


図 10: かなた望遠鏡の焦点に設置 (途中) の IMONY の背面写真。X ステージと Z ステージによって、焦点面内でセンサを移動させることができ、モザイク撮像を行う。

鏡を移動させる機能があるため、IMONY システムは 2 軸の自動ステージに載せています。

望遠鏡はドーム建屋内に設置されていますが観測中は外気にさらされます。観測中のセンサ付近の温度は数秒感に渡って 5–10  $^{\circ}$ C で安定しており、温度によるゲインの大きな変化、あるいはコンパレータによるパルス検出効率の変化はなかったと言えるでしょう。図 11 に約 3 時間に渡って Crab パルサーの連続観測した畳み込み波形を示します。システムが安定して長時間動作することが実証でき、専用基板と FPGA の採用によるシステムの小型化が実現しました。手軽に持って行って設置するだけ、という手軽さは様々な場面で役立つと期待しています。繰り返し Crab パルサーばかりを観測しているという印象を持たれるかもしれませんが、パルサーは「精密な時計」であり、適度な明るさかつ高い時間分解能と絶対時刻精度が実証できる便利な光源だからです。

さて、一杯目の実験で直面したもう 1 つの課題がまだ解決していません。それはやはり、センサの面積が小さすぎることです。

## 5.3 IMONY 三杯目：大面積化

望遠鏡が大型になると焦点距離が長くなり、焦点面で結像する点光源像が大きくなります。かなた望遠鏡は焦点距離が 18.3 m で、 $\sim 400 \mu\text{m}$  角のカスタム MPPC の視野は約 8 秒角になり、点像がギリギリ収まる大きさでした。センサ素子の中央に結像し続けられれば良いのですが、星像は大気によってゆらぐ上に、望遠鏡の追尾精度が有限であるため、徐々に結像位置がずれていきます。センサの視野外に取りこぼす光子の量が時間変化するこ

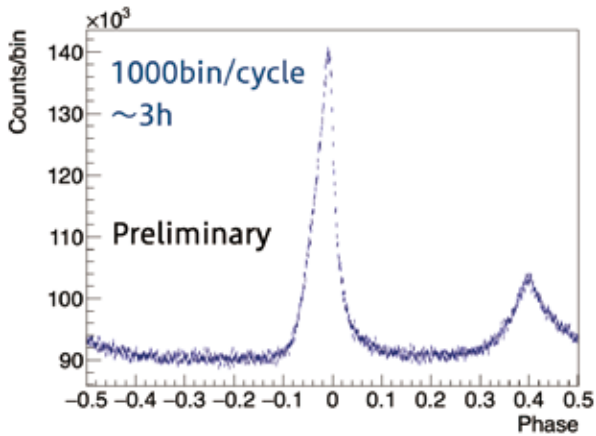


図 11: かなた望遠鏡に搭載した IMONY で得られた Crab パルサーの光度曲線。

とを意味しており、測光の精度にやはり悪影響を与えます。そこでわれわれは、 $8 \times 8$  画素に拡張したカスタム MPPC を製作すると同時に、複数のピクセルサイズの素子を用意しました。これらを使えば視野を約 4 倍から 16 倍に拡張することができ、最適なピクセルサイズを実際の観測による比較検討によって選定する計画です。

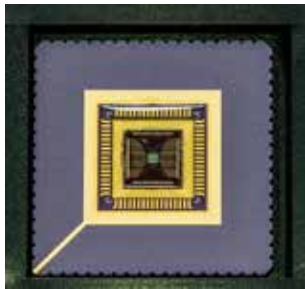


図 12:  $8 \times 8$  画素センサ。68 ピン LCC と互換のパッケージにシリコン樹脂で封入されている。

図 12 に素子の写真を示します。この新しい大(?)面積センサ素子で観測するためには、4 倍に増えたチャンネル数を処理する回路系が必要になります。回路部品不足の世の流れがあり、そして開発のマンパワーもないため、既存の  $4 \times 4$  画素の信号処理系を 4 系統並べることに対応する方針にしました。

4 系統を同時に動作させるために、FPGA の書き換えや測定プログラム群を整備をした上で、本稿の納品直前に、3 度目のかなた望遠鏡での搭載実験を行いました。目下のところ初期解析を進めているところで、解析結果については今後の発表をお待ち頂ければと思います。

## 6 IMONY おかわりへ：今後の展望

多チャンネル化により、あるいは将来さらに大面積化を考えると、信号処理系のさらなる集積化が必要になるでしょう。Open-It で開発されている、MPPC 用に開発されてきた広帯域アナログ ASIC である FGATI チップの採用を検討しています。

FGATI は 16 チャンネルの入力を持ち、slow アンプで増幅されたアナログ出力と、fast アンプとコンパレータの判定を経て LVDS が出るデジタル出力を合わせ持ちます。われわれの用途はデジタル出力だけがあれば十分なのでオーバースペックとも言えますが、ASIC の開発コストを考えると、使わせて頂けるなら大変ありがたいチップです。

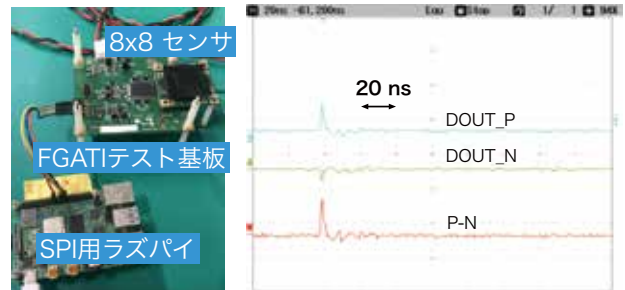


図 13: FGATI テスト基板による読み出し実験セットアップ (左) と、デジタル出力をオシロスコープで観察した波形 (右)。

図 13 に示すように、基礎実験をすでに実施しています。 $8 \times 8$  画素センサを FGATI 評価基板に接続し、ダークカウントによるパルスを検出できるかという観点で評価しました。FGATI 内部のオフセットを適切に設定することによって、デジタル出力のパルスが確認できました。この信号を FPGA で拾うことができれば、現在のフロントエンド基板を大幅に集積することが可能になると考えられます。 $8 \times 8$  画素センサを 1 枚のボードで処理できるようになり、更に小型化ができるかと期待しています。

IMONY は Crab パルサーだけの観測装置ではありません。視野が狭く明るすぎると飽和し、光子のエネルギーも測れませんが、扱いやセットアップの手軽さを生かした活躍の場があるはずで、視野の狭さは位置の分かっている点源ならば問題になりませんし、高速で時間変動する現象が観測対象なので、視野からはみ出すような広がった天体は候補に上がらないでしょう。瞬間的な短時間の現象の観測は、光子数統計との勝負になることが多いでしょうから、エネルギー分解能を有していても光子数を分割することになって活かしきれないこともあ

るでしょう<sup>5</sup>。量産とまで行かずとも、比較的容易に複数台のコピーを作ることができるのではないかと思います。

図 14 に可視天体の時間変動スケールと可視光度のスケッチを示しました。他の波長と比較して可視光は検出器が時間分解能を制限していたり、高速検出器が普及していなかったりしてミリ秒以下がまだまだ未開拓です。ミリ秒程度の継続時間で突発的な電波パルスが到来する高速電波バースト (Fast Radio Burst; FRB) と呼ばれる現象 [11] があり、銀河系外で発生すると考えられています。その中でも反復型 FRB は、パルサーの GRP との時間・強度のスケールに類似性があり、関係性が議論されています<sup>6</sup>。バーストの発生は予言できませんが、反復型 FRB は発生位置は特定されているため、観測戦略次第では IMONY で捉えられる可能性があるかもしれません。

さらに、図 14 の中でも特に、掩蔽 (恒星食) はこれまでの高エネルギー天体研究とは異なる方向性で、IMONY の長所が活かせるのではと検討しています。掩蔽とは太陽系内の小惑星が恒星の前を横切ると、地上では恒星の減光として観測される現象です。恒星食の起こる場所や継続時間から、小惑星の軌道や形状がわかる [12] だけでなく、減光時の光度曲線を精密に測定することで小惑星の大気 [13] やリングの様子 [14] がわかることもあるという、間接的なリモートセンシングです。恒星の位置が Gaia 衛星によって精密に決められ、多数の小惑星の軌道が Vera C. Rubin Observatory/LSST の稼働により精度よく決まると期待されています。両者がそろったとき、恒星食の予報精度が格段に向上し、観測機会の頻度が高くなります。掩蔽が観測できる場所に望遠鏡とともに持っていくことができ、かつ時間分解能に優れる IMONY ならば活躍できるのではないかと期待しています。もしうまく機能すれば、小惑星の精査を通じて太陽系形成史や惑星系形成の研究にもつながるような新しい展開になるかもしれません (芋煮がカレーうどんに発展するかのよう)。

## 7 まとめ

MPPC をセルごとに読み出すことでガイガーモード APD アレイとして動作させる、光子計数型のイメージングセンサを開発してきました。Crab 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、かなた望遠鏡にシステムを設置して電波望遠鏡と連携した GRP の科学観測をすでに始めています。

<sup>5</sup>もちろん活かせるケースも多々あると思います。

<sup>6</sup>銀河系内にあるマグネターと呼ばれる強磁場中性子星から、FRB に類似した電波バーストが検出され、FRB=マグネター説も有力な候補です。

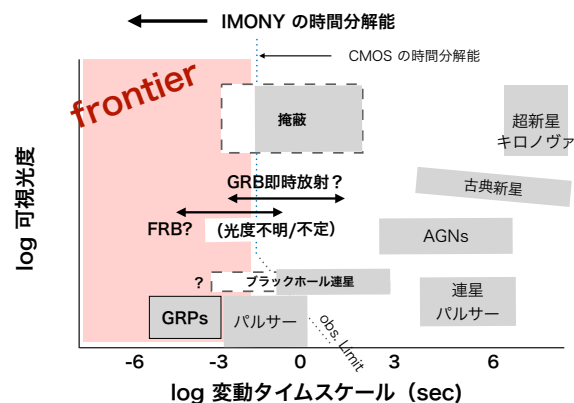


図 14: 可視天体と変動の時間スケール ([10] をもとに加筆)。短い時間スケールがまだまだ未開拓。

センサの大面積化と回路系の小型化の開発を現在も進めており、安定に動作するパッケージを構成して、ネットワークの軽い高速測光システムのネットワーク形成を目指します。まだ十分に開拓されていない可視光の高速時間領域で、IMONY で新たな発見に出会えることを期待しています。

## 8 謝辞

本研究は大変多くの方にお世話になっています。素人を制作していただいた浜松ホトニクス社に感謝いたします。そして歴代の学生さん諸氏 (特に、荻原理沙, 大内優雅, 佐藤凜, 佐藤杏樹, 橋山和明, 佐藤知宙ほか) の力なくてはここまで到達することはできなかったでしょう。素人だった可視観測について多数のアドバイスとサポートを頂きました。広島大学・川端弘治さん、中岡竜也さん、千葉工大・秋田谷洋さん、東京大学・土居守さん、酒向重行さん、国立天文台・山下卓也さん電波望遠鏡との同時観測や電波データ解析をしていただいた東大名誉教授・寺澤敏夫さん、東北大学・三澤浩昭さん、土屋史紀さん、理論家の立場から観測戦略の議論や様々な情報を提供していただいた広島大学・木坂将大さん、山形大学・柴田晋平さん、Open-It を通じて回路系開発に多大なサポートを頂いた KEK・庄子正剛さん、大阪大・上野一樹さん、治具設計でお世話になった Dayphys Tech の武井大さん、アマチュア望遠鏡の選定・設置でお世話になった NPO 法人小さな天文学者の会・有志の皆様にご礼申し上げます。掩蔽については産業医科大・吉田二美さんにご指導頂きました。

本研究は科研費基盤研究 (B) (20H01940), 2019 年度山田科学振興財団研究奨励費, 自然科学研究機構国立天文台研究交流委員会 (NAOJ-RCC-2101-0103) の助成を受けたものです。



最後になりましたが、寄稿のお誘いを頂きました編集委員の中村輝石さんに御礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] 中森健之, *Isotope News*, **780**, 7 (2022)
- [2] J. M. Codes *et al.*, *ApJ*, **612**, 375 (2004)
- [3] T. Enoto *et al.*, *Science*, **301**, 187 (2021)
- [4] 中森健之, 月刊星ナビ, **249**, 56 (2021)
- [5] A. Shearer *et al.*, *Science*, **301**, 493 (2003)
- [6] M. J. Strader *et al.*, *ApJL*, **779**, L12 (2013)
- [7] T. Nakamori *et al.*, *PASJ*, **73**, 66 (2021)
- [8] T. Nakamori *et al.*, *Proc. SPIE*, **11454**, 1145418 (2020)
- [9] 大内優雅, 山形大学理工学研究科修士論文 (2021)
- [10] M. Kasliwal, *CaltechTHESIS*, 6395, (2011)  
doi:10.7907/EA7Q-WX87
- [11] E. Petroff, *et al.*, *Astron. Astrophys. Rev.*, **30**, 2 (2022)
- [12] F. Yoshida *et al.*, *PASJ*, **75**, 153 (2023)
- [13] K. Arimatsu *et al.*, *AJ*, **158**, 236 (2019)
- [14] F. Braga-Ribas, *et al.*, *Nature*, **508**, 72 (2014)