

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：34504

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25870181

研究課題名(和文) CMOSイメージセンサーで切り開くX線撮像分光の新たな地平

研究課題名(英文) Exploring the new frontier of X-ray imaging spectroscopy employing CMOS image sensor

研究代表者

平賀 純子 (HIRAGA, JUNKO)

関西学院大学・理工学部・准教授

研究者番号：00446527

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：X線CCDは高い空間分解能とエネルギー分解能を併せ持つ検出器としてX線天文分野において標準的な焦点面検出器として活躍している。しかし、時間分解能が数秒と極めて低いため、天体のミリ秒程度の変動や、明るい天体を苦手としていた。そこで、CCDの持つ高い能力を維持しながら、時間分解能を格段に向上させるべく、CMOSイメージセンサに注目した。近年開発が進んだ可視光用の低ノイズCMOSイメージセンサを用いて、X線に対する光子計測方式での検出、撮像能力、分光能力の世界初の機能検証を実施し、今後の開発への礎を築くこととする。

研究成果の概要(英文)：we used an Andor-Zyla CMOS camera. A size of the detector is 16.4x14.0 mm², the number of pixel is 2540x2140 and each pixel size is 6.5x6.5 μm square. For X-ray detector, we examined three points, a noise level, splitting of single events and a performance of spectra. We irradiated X-ray as Fe for 50 s in room temperature (~25degrees). First, the noise level (RMS) is very low ~3e-. Second, we checked the expansion of charge for one photon event. In single events, the charges are diffused to immediate pixels. From our measurement, we analyzed that the charges diffused ~0.75 pixel (~5 μm) and knew many charges ran out to other pixels. Third, to we obtained the spectra, we analyzed each single X-ray photon event. We could create spectra of manganese fluorescence lines and their energy resolution is ~290 eV in FWHM.

研究分野：X線天文学、X線撮像分光器開発

キーワード：X線 撮像分光器 CMOSイメージセンサ

1. 研究開始当初の背景

(1) 偏光 X 線が鍵を握る中性子星の磁場構造の解明

中性子星は宇宙で最も高密度な物質であり、強い磁場(>10¹³G)を持つ。超高温、低密度という極限状態の物質(クォークグルーオンプラズマ)の研究は、加速器実験により進みつつある。一方の極限、超高密度、低温(フェルミエネルギーに比べて低温)状態における物質の研究には、まさにその状態が実現している中性子星の観測が必須となる。その詳細な磁場構造については未だ謎のままで、磁場構造を直接観測するためには偏光検出が非常に有用であるが、X 線での偏光ベクトルの撮像は未だ実現していない。X 線パルサーにおける偏光パルスの検出が実現できれば、中性子星の磁場構造の詳細、QED 効果による真空編曲の検証が実現でき、中性子星の内部構造の解明に大きな進展をもたらす。

(2) X 線 CCD から可視 CMOS イメージセンサへ

私はこれまで、X 線天文衛星の観測データを用いた超新星残骸の観測的研究、並びに、X 線天文衛星の開発、次世代 X 線 CCD の基礎開発を行って来た。X 線 CCD は X 線の撮像と分光を同時に実現できる検出器として X 線天文分野において標準的な焦点面検出器として活躍している。X 線光子 1 個が CCD に入射した場合、CCD 内部で数千個もの電子(電荷雲)を生成する。生成された一次電荷雲は、空乏層中をドリフトし、各電極に集められて信号として検出される時には有限の広がりを持つ。入射 X 線が偏光していた場合、一次電子は偏光方向に飛び出しやすいため、電荷雲は偏光方向に延びると考えられる。つまり、電荷雲の異方性を検出できれば、CCD は X 線偏光検出器として活用できる。Tsunemi et al. 1992 により、縦の 2 画素に股がる X 線イベントと、横の 2 画素に股がる X 線イベントの割合から CCD の偏光検出能力が始めて示された。また、私は、画素よりも十分小さいコリメータを用いて、無偏光ではあるものの電荷雲の形状を世界で始めて実測し(Hiraga et al. 1998)、CCD による X 線偏光検出機能の確立に向けた基礎研究のステップを踏んでいる。

しかしながら、総合的に優れた検出器である CCD には、問題が 2 点あった。一つは時間分解能がないこと。標準的には一フレームを読み出すのに 4 秒かかるため、数十ミリ秒で脈動する X 線パルスの時間変動を追尾することは全く出来なかった。また、読み出しに時間がかかるという事は、中性子星など高輝度の X 線の場合、パイルアップしてしまい観測出来なかった。二つ目は、画素サイズが小さく出来ない。画素サイズを小さくすることは、有限の広がりをもつ電荷雲を検出する画素が増え、サンプリングが増えるので、偏光情報を検出しやすくなるが、画素が小さくなると、電荷がうまく収集できない技術的困難

が克服できなかった。これらの経験を活かして、私が着想に至ったのが、低ノイズ CMOS イメージセンサの採用である。CMOS イメージセンサは、CMOS という回路構成プロセス用シリコンの一部をフォトダイオードとしてイメージセンサに仕上げた集積回路である。デジタル IC プロセスをそのまま流用するので、大量生産に向いていて安価である。3.3V 単電源駆動が主流で、±10V 程度の電圧をクロッキングする CCD とは消費電力の点で有利である。一画素の中(または数画素に一つ)に、読み出し回路まで半導体プロセスで組み込むため、CCD で必須の電荷転送が不必要になり、読み出し時間は劇的(～10³倍)に速くなる。

2. 研究の目的

中性子星からの偏光 X 線撮像を目指し、CMOS イメージセンサを用いたこれまでに無い新しい X 線検出器の基礎開発を、本研究の目的とする。まず、低ノイズ CMOS イメージセンサを用いた X 線直接検出、並びに X 線撮像分光を実現し、次に偏光検出能力の実証を行う。申請者はこれまで、天体観測を目的とした CCD 検出器による X 線直接撮像分光器の基礎研究や、天体からの X 線観測データを用いた研究に従事してきた。本申請は、これまでの X 線 CCD における経験と実績をフルに生かし、高い計数率に対する困難を解決し、X 線の偏光検出を実現する新しい X 線検出器の実現を目指した CMOS イメージセンサの基礎研究を目的とする。

3. 研究の方法

極低読み出しノイズが実現している、CMOS イメージセンサを用いて、X 線の撮像、分光、高速読み出し能力について、検証実験を行った。採用した CMOS カメラは、可視光用の低ノイズイメージングデバイスとして開発された sCMOS 素子と駆動回路部からなるアンドールテクノロジー社(イギリス)製の Zyla sCMOS camera である。使用した CMOS カメラの諸元を表 1 に示す。

我々は、通常の使用方法とは異なり、X 線光子を直接検出する必要があるため、素子パ

| | |
|----------------|--------------------------|
| Pixel # | 2560*2160 |
| Pixel size | 6.5um*6.5um |
| Imaging area | 16.6*14.0mm ² |
| Device type | Front Illumiated |
| Readout FET | 5T |
| Max frame rate | 30fps |

表 1. CMOS カメラの諸元

パッケージ上の保護ガラスを除去し、カメラレンズマウントのためのインターフェースを取り外し、ICF152 フランジを取り付けインターフェースとした。また、素子上に配置されたマイクロレンズについては、X線直接検出のためには不要であるものの、素子の性能を損なうことなく除去することは、技術的に困難であると判断し、配置されたままになっている。ただし、透過率の高い数 keV 以上の X 線にとっては、無視して良い。

フロントエンドエレクトロニクスで処理されたデジタルデータを、カメラリンクケーブルを介して、データ取得用 PC に搭載した x8PCI フレームグラバボードにより取得した。

実験に使用した X 線源は 2 種類である。一つは、強度約 1M Bq の ^{55}Fe 放射性同位体を用いた密封線源である。低フラックスを実現し、光子計測モードによるスペクトル性能の検証実験に用いた。もう一方は、小型 X 線発生装置(K5039S Keveex)である。これを 50kV, 1mA で駆動し、高フラックス X 線照射による X 線撮像能力と、高い時間分解能を実証する実験に使用した。

4. 研究成果

常温下(～25)で、様々な被写体のフラックスモードにおける透過像(いわゆるレントゲン写真であり、エネルギー分解能を有さない)を撮影し、X線を直接検出でき、ピクセルサイズで決まる位置分解能をもつイメージデバイスとしての性能を確認した。結果を図 1 に示す。

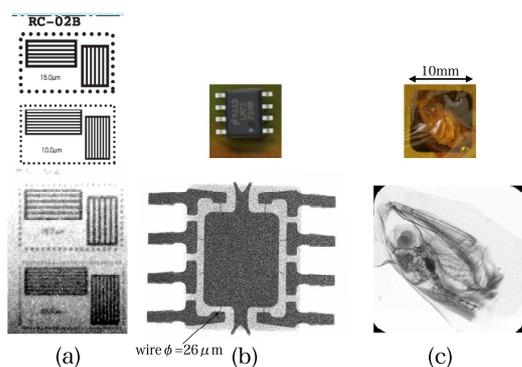


図 1. X 線直接入射の透過像

(a)は JIMA チャート(JIMA RT RC-02B)の設計図と取得画像である。JIMA チャートには、1um 厚のタンゲステンで異なる幅(10um～15um)のスリットが作り込まれている。CMOS カメラによる透過像から、10um 幅スリットが空間

分解できていることがわかる。(b)は IC の撮像結果で、 $\approx 26\mu\text{m}$ のワイヤーを空間分解できていることがわかる。(c)は、煮干し頭部の画像である。眼球、骨の構造が確認できる。可視光用途のため、ピクセルサイズが標準的な X 線 CCD に比べ小さいので、高精細な X 線画像の撮像が容易に実現できることを実証した。

また、照射 X 線フラックスを十分低くした、光子計測モードによるデータ取得にも成功した。露光時間が数秒と短ければ、暗電流の影響をほとんど受けない。密封線源 ^{55}Fe から

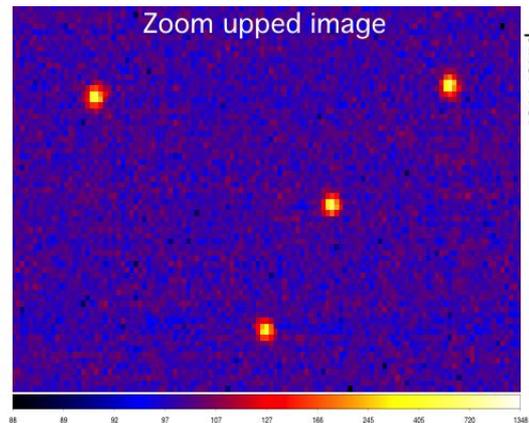


図 2. 光子計測モードにより取得した Mn-Ka., Kb の 1 フレーム分の画像(一部拡大)。

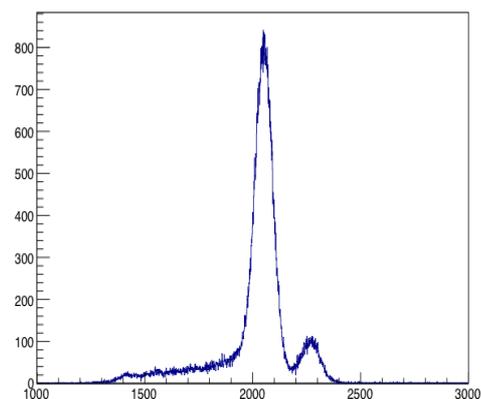


図 3. 光子計測モードにより取得した Mn-Ka., Kb のスペクトル。

の 5.9keV X 線(Mn-K)のスペクトル結果を図 2、図 3 に示す。

フラックスを十分落としているため、1 フレームの画像はほとんどがバックグラウンドレベルである。X 線のあたっていない画素の信号から算出されるノイズレベルは、電子数換算で約 3 e⁻と非常に低いことが分った。一光子から生成された電荷が一画素には収まらず、3x3 あるいは 5x5 画素に渡って広がっていることが分り、複数画素に股がった信号を

足し合わせて入射 X 線のエネルギーを計算して得られたスペクトルは半値幅で 291eV であった。信号電荷が予想以上に広がっていることが課題であるが、スペクトル形状は低エネルギー側へのテールもなく、常温、高計数率で K と K (6.0keV) を明確に分離できるだけの性能を示せたことは意義深い。これらの結果については、2013 年 1 1 月 “The 12th Symposium on X-ray Imaging Optics”、および、2014 年 1 月、“宇宙科学シンポジウム”にてポスター発表を行った。

CCD に比べ格段に高い時間分解能を有する CMOS カメラの有効性を検証するため、RI 線源ではなく、実験室における大強度の X 線発生装置 (KEVEX 社製 X 線発生装置) を最大強度 (50kV, 1mA) で 10cm 離れたカメラに照射し、カメラ直前に配置した被写体について、フラックスモードで X 線の画像のみを取得する実験を実施した。特に、高い時間分解能の実証するため、ランダムに運動する被写体の高速 X 線撮影を実施した。被写体としては、ダンゴムシを選んだ。結果、常温動作で、1msec の時間分解能での X 線動画撮影に成功し、X 線帯域における高い時間分解能をデモンストレーションした。これらの結果を論文にまとめた。現在、NIM(Nuclear Instruments and Method)への投稿準備中である。

これらの結果により、既開発品である、CMOS イメージセンサが、典型的な X 線 CCD 素子より 4 倍程度高い位置分解能、 10^3 倍高い時間分解能、同程度に迫るエネルギー分解能をもつことを実証した。また、X 線の撮像分光器として整備するにあたっての課題が明らかになった。

エネルギー分解能を向上させるために、読み出しノイズ以外のノイズ成分を突き止める必要があること。

光子計測モードにおいて、X 線イベントにシングルピクセルイベントの比率が非常に小さく、5x5 ピクセル以上に広がったイベントが多く、空乏層内の電場が弱いと推定されること。これは、デジタル 3.3V 電源で素子を駆動している事実と整合性のある推測ではある。

現状では、空乏厚が数ミクロンと非常に薄く、X 線の検出効率が低すぎるため、実用には堪えられない。現在の性能を維持したまま、シリコンの有感層をある程度厚くする技術的な開発が必要である。

<引用文献>

Tsunemi et al., Nucl. Instrum. and Meth., A 321 (1992) 629
Hiraga J. Ph.D thesis Osaka University (2002)

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)

[学会発表](計 2 件)
平賀 他,”CMOS イメージセンサを用いた X 線の直接検出” 第 14 回宇宙科学シンポジウム, 2014 年 1 月, JAXA 宇宙科学研究所, 神奈川県

J.Hiraga, Sasano et al. “X-ray detection with newly developed CMOS camera” The 12th Symposium on X-ray Imaging Optics, 2013 年 11 月 18-20 日, 大阪大学中之島キャンパス, 大阪府

[その他]
ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

平賀 純子 (HIRAGA JUNKO)

関西学院大学 理工学部 准教授

研究者番号: 00446527

(2)研究分担者

()

研究者番号:

(3)連携研究者

()

研究者番号: