

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月15日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21540251

研究課題名（和文） 太陽コロナ観測用X線フォトン・カウンティング望遠鏡に向けた
CMOSディテクタ開発研究課題名（英文） Development of the CMOS detector for the photon counting type
solar X-ray telescope

研究代表者

成影 典之（NARUKAGE NORIYUKI）

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・宇宙航空プロジェクト研究員

研究者番号：50435806

研究成果の概要（和文）：本研究では、太陽から放射されるX線光子1つ1つのエネルギーを測定する「太陽コロナ観測用X線フォトン・カウンティング望遠鏡」に必要な連続高速撮像可能な検出器の開発を目指している。我々は、民生用のCMOS検出器3種類（2009年度、2010年度、2011年度の開発品）にX線を照射し、能力評価を行った。評価結果によると、3種類の間で飛躍的な性能向上を果たしており、「太陽X線光子計測型望遠鏡」の検出器として使えるCMOS検出器実現に向け今後の発展を期待させる結果を得た。

研究成果の概要（英文）：Our goal is the development of the detector for the photon counting type X-ray solar telescope which requires the performance of the continuous high speed readout. In our experiments, three types of CMOS detectors developed in 2009, 2010 and 2011 were irradiated with the X-rays. The results show that the performance of the CMOS significantly improved among these three detectors, and suggest the realization of the detector for the photon counting type X-ray solar telescope.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
平成21年度	2,800,000	840,000	3,640,000
平成22年度	200,000	60,000	260,000
平成23年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：太陽物理学

1. 研究開始当初の背景

1991年に打ち上げられた「ようこう」衛星、2006年に打ち上げられ現在活躍中である「ひので」衛星と、日本の太陽観測衛星はX線観測用の望遠鏡を搭載し、太陽コロ

ナの観測で世界をリードし続けている。太陽は、赤外線、可視光、紫外線、X線と様々な波長の光を放射しているが、X線は太陽コロナに存在する100万度以上の超高温のプラズマから放射されている。太陽コロナは、

太陽の磁場に蓄積されたエネルギーが解放される場所であり、活動領域と呼ばれる領域では、しばしばフレアと呼ばれる大爆発が起きている。また、これまで活動が穏やかであると思われてきた静穏領域と呼ばれる場所や極域でも、小さな爆発が頻繁に起きており、静穏な領域ではないことが「ひので」衛星のX線望遠鏡によって分かってきた。

このように、ダイナミックな太陽コロナの様子が観測できているのは、両衛星に搭載のX線望遠鏡が、幅広いエネルギー感度を持っているからである。「ひので」衛星のX線望遠鏡の場合、0.05~2 keVのエネルギーに感度があり、温度に換算で100万度~1000万度のプラズマを観測することができる。この温度範囲は、大規模フレアを除く、コロナ現象をすべてカバーしている。さらに、望遠鏡に搭載されている温度感度の異なる2種類以上のフィルタで観測することにより、コロナの温度を測定することもできる。このコロナ温度診断能力により、理論と観測の比較が可能となり、コロナの物理の解明に大いに役立っている。

しかし、現在のX線望遠鏡が観測している量は、露光時間中に望遠鏡内に入ってきた数十~数千個のX線光子のエネルギーのトータル量で、図1の太陽スペクトルを積分した量である。そのため、多様な温度が存在するコロナの状態を調べるには情報不足であった。

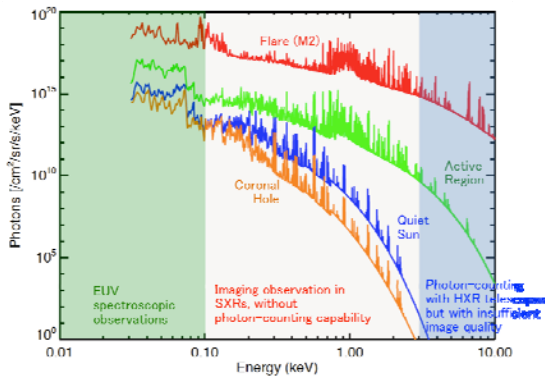


図1 太陽の様々な領域から放出されているX線スペクトル

2. 研究の目的

このような既存の望遠鏡の能力の限界を踏まえ、次世代の望遠鏡として我々が計画しているのは、太陽から放射されるX線光子（光子）1つ1つのエネルギーを測定することで、太陽コロナのプラズマの情報をそのまま取得する（=図1の様なエネルギースペクトルを測定する）「太陽コロナ観測用X線光子・カウンティング望遠鏡」である。これにより、太陽コロナのプラズマの温度を

本来の多温度で求めることも可能になる。光子・カウンティングは、X線天文の分野では普通に行われているが、太陽観測では現象の時間スケールが短い（数~数十秒）ことと、光子の数が圧倒的に多いため困難であった。見積もりでは、1ミリ秒（千分の一秒）の露光時間で連続的に観測するディテクタ（検出器）が作成できれば、この望遠鏡は実現可能になる。しかし、これまでの太陽X線望遠鏡ではCCDがディテクタとして用いられており、CCDでは1ミリ秒の露光時間で連続的に観測するのに必要な高速読み出しは不可能であった。

ところが、近年、ピクセル毎に高速読み出しが可能なCMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) デバイス技術が急速に発展し、我々が要求する1秒間に1000回の高速読み出しも可能になりつつある。そこで、我々は、次期太陽観測衛星「Solar-C」に「X線光子・カウンティング望遠鏡」を搭載することを目標に、ディテクタの検討・開発を行っている（図2）。

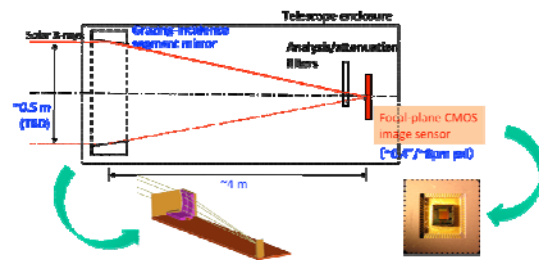


図2 X線光子・カウンティング望遠鏡の構想図

3. 研究の方法

我々は、CMOSデバイスを開発しているメーカーを国内外問わず調査し、英国のe2v社が有力な協力パートナーであると結論付けた。e2v社は宇宙科学観測用検出器の世界トップメーカーであり、「ひので」衛星の観測装置にもe2v社製のCCDが使用されている。そのため、e2v社とは、コミュニケーションの面でも密接な関係を築いており、本社工場にも何度も訪問し、現地施設・品質管理状況も熟知している。

2008年9月には、CMOSデバイスの開発状況についてe2v社と会合を持ち、我々の望遠鏡が要求するスペック（①0.05~10 keVのX線に感度を持ち、②ピクセルサイズは十数ミクロン以下、③200×1000ピクセルの領域をデッドタイムなしで1秒間に1000回露出できるもの、④ノイズが低く、150 eV程度のエネルギー分解能を持つこと。）を提示した。現状、我々

の要求を満たすスペックのデバイスは存在しないが、開発は不可能ではないとの所見ももらった。

CMOS デバイスは民間用にも広く使われており、その技術は日進月歩で進展している。e2v 社では民生用のデモキットシリーズの開発を通して、CMOS デバイスの性能向上を実施している段階である。この性能向上の方向性は、低ノイズ、高速読み出し、X線にも感度を持つ裏面照射型などで、我々が必要としているスペックと同じ方向を向いている。

そこで本研究では、e2v 社のデモキットシリーズに対して読み出しノイズやX線照射などの基本性能評価実験を行い、CMOS デバイスの技術進捗状況を把握することで、「太陽コロナ観測用X線フォトン・カウンティング望遠鏡」実現に向け、今後必要な改善項目の洗い出しを行う。評価結果と改善項目はe2v 社と情報を共有し、共同して我々の必要とするスペックを満たすCMOS デバイスの実現を目指す。

4. 研究成果

本研究では、下記3種類のe2v社のデモキットを入手し、その性能評価実験を行った。

- ① 表面照射型 Jade device (2009 年度に入手)



- ② 裏面照射型 Jade device (2010 年度に入手)



- ③ 裏面照射型 Ruby device (2011 年度に入手)



①は工場の生産ラインをモニタすることを目的に作られたCMOSデバイス最初のデモキット。②は①の検出器を裏面照射型に変更したもので、エレキ部は同じものである。③は低ノイズ化を果たした裏面照射型CMOS。③の表面照射型も存在するが、一般に裏面照射型の方がX線に感度があることと、表面照射型と裏面照射型の違いは①と②で見ているため、評価を省略した。評価は下記の2つを実施した。

(1) 読み出しノイズ評価

この評価は、②と③に対して行った。(何故なら、①と②は同じエレキを使用しており、ノイズ性能は等価だからである。)

評価方法であるが、暗電流は露光時間に比例して大きくなるので、露光時間を変えて暗電流データを取得することで読み出しノイズと暗電流を求めた(図3)。具体的には、各露光時間毎に数千枚のデータを取得し、そのデータの分散を取ると、図4の様に露光時間の1/2乗で変化する成分と一定に(下駄として)存在する成分が検出される。最初の成分が暗電流による分散で、後者が読み出しノイズによる分散である。

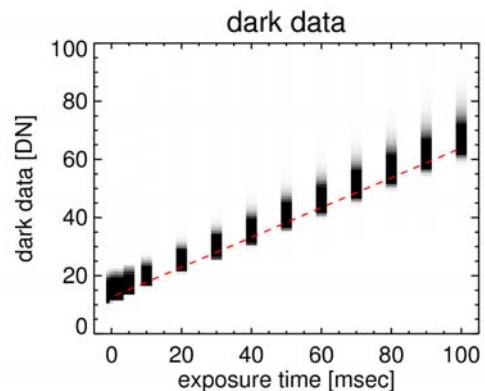


図3. 裏面照射型 Ruby device で露光時間を

変えて取得した暗電流のデータ

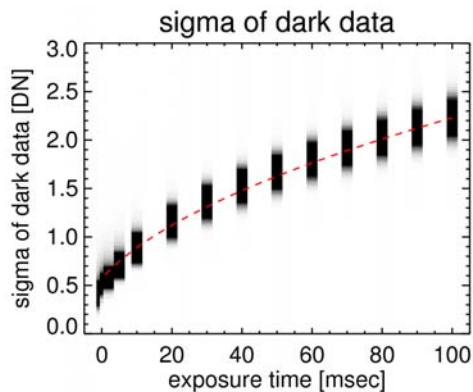


図4. 裏面照射型 Ruby device の暗電流データの分散。

この結果、②のデバイスの読み出しノイズは1露光につき約 18.9 electron であるのに対し、③の低ノイズ化したデバイスでは1露光につき約 4 electron と高い性能を示した。これは、即望遠鏡の検出器としても使えるレベルで、僅か1年の間に飛躍的に進歩した。

(2) X線スペクトル検出能力評価

次に実施したのは Fe55 という鉄の線源から放射される X線をディテクタに照射し、そのスペクトルを再現できるかを評価した。Fe55 線源は、Mn K- α =5.9keV, Mn K- β =6.4keV という2つの輝線を放つので、それらを分解できるかどうかで、検出器のエネルギー分解能力を調べることができる。この評価は①～③全てのデバイスに対して行った。図5～7がその測定結果である。図の線の色の違いは、検出器に入射した1個のX線光子作る電子雲が何ピクセルにまで広がったかを示している。

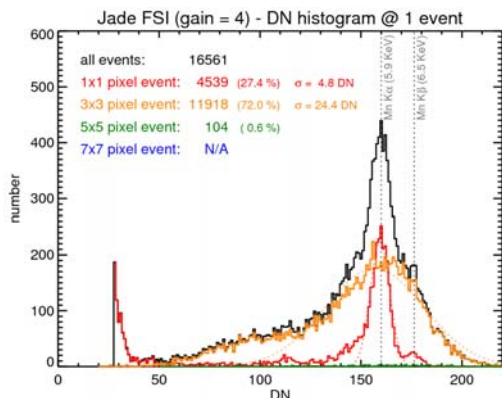


図5. 表面照射型 Jade device で検出した Fe55 線源の X線スペクトル

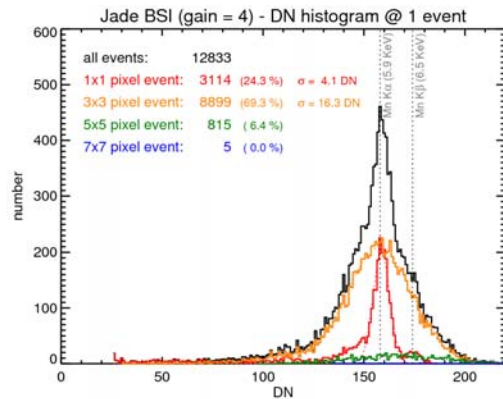


図6. 裏面照射型 Jade device で検出した Fe55 線源の X線スペクトル

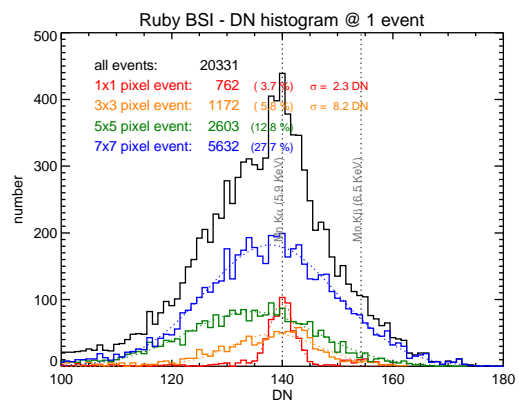


図7. 裏面照射型 Ruby device で検出した Fe55 線源の X線スペクトル

まず、いずれのデバイスの場合も Mn K- α =5.9keV, Mn K- β =6.4keV という2つの輝線を分離することができた(各図の赤線参照)。

次に、図5と図6の違いを見ることで、表面照射型と裏面照射型のデバイスの違いを知ることができる。表面照射型の場合(図5)、オレンジ色の線が低エネルギー側にテールを引いている。これは3×3ピクセルの領域に広がった電子雲を集めても、Mn K- α =5.9keV もしくは Mn K- β =6.4keV の持つエネルギーに戻らず、電荷を失っていることを示唆している。一方、表面照射型の場合(図6)、オレンジの線の幅は、Mn K- α =5.9keV を中心にして左右対称に広がっている。これは、電荷を保存していることを示している。なお幅の広がりを読み出しノイズや暗電流の効果で、ピクセルを積算するほどノイズが大きくなり幅が広がっている。以上のことから、表面照射型は電荷を失うため、検出した信号から正確なX線のエネルギーを見積もることが不可能で、望遠鏡の検出器としては採用不可であることが分かった。

次に、図6と図7の違いを見ることで、低

ノイズ型検出器の持つ高いエネルギー分解能を見ることが出来る。電子雲が1ピクセル以内に収まった場合(赤線)を見てみると、高ノイズ型(Jadeデバイス;図6)の場合の分散は153eV(=4.1DN×5.9keV/158DN)であるのに対し、低ノイズ型(Rubyデバイス;図7)の分散は97eV(=2.3DN×5.91keV/140DN)と小さいことがわかる。しかし、一方で、低ノイズ型(Rubyデバイス;図7)の方が、電子雲が広い範囲に広がっていることがわかる。これは低ノイズ型の方が、検出器のシリコン層が厚く、電子雲が広がりやすいためと推察できる。

望遠鏡に搭載する検出器には、電子雲がなるべく広がらず、電子雲の電荷が保存し、低ノイズであることが重要であるが、上記(1)、(2)の評価から、これら全てを有する検出器はまだ存在していないことが分かった。しかし、②の持つ「電子雲の広がりの抑制」と③の「低ノイズ+高いエネルギー分解能」は、期待を持たせる結果であった。今後、真空対応やX線耐性など、調査すべき課題も残されているが、望遠鏡の検出器としてCMOSデバイスに高い可能性があることが分かったことは意義深い。また、供給メーカーの開発計画と我々の評価結果を合わせて判断すると、「太陽コロナ観測用X線フォトン・カウンティング望遠鏡」に用いる裏面照射型CMOS検出器の実現性は高い。

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)

[雑誌論文] (計1件)

- ① Sakao, Taro; Narukage, Noriyuki; ら
“Photon-counting soft x-ray telescope for the Solar-C mission”
Solar Physics and Space Weather Instrumentation IV. Edited by Fineschi, Silvano; Fennelly, Judy. Proceedings of the SPIE, 査読なし, 8148, 2011年, 81480C-81480C-13,
DOI: 10.1117/12.893276

[学会発表] (計7件)

- ① 坂尾太郎、成影典之ら
「次期太陽観測衛星に向けたX線望遠鏡の検討」
日本天文学会2010年春季年会、2010年3月25日、広島大学
- ② 坂尾太郎、成影典之ら
「SOLAR-C衛星に向けたX線望遠鏡の検討状況」

第11回宇宙科学シンポジウム、2011年1月5日~7日、JAXA宇宙科学研究所・相模原キャンパス

- ③ 坂尾太郎、成影典之ら
「X線撮像望遠鏡のサイエンスと装置概要」ISAS宇宙放射線シンポジウム「太陽研究の新展開とSOLAR-Cへの期待」、2011年1月17日、JAXA宇宙科学研究所・相模原キャンパス
- ④ 成影典之、坂尾太郎
「光子計測型太陽X線望遠鏡に用いるCMOS検出器の開発と評価 - part I」
日本天文学会2011年秋季年会、2011年9月21日、鹿児島大学
- ⑤ 坂尾太郎、成影典之ら
「Solar-C搭載X線望遠鏡の検討状況」
日本天文学会2011年秋季年会、2011年9月20日、鹿児島大学
- ⑥ 成影典之、坂尾太郎
「光子計測型太陽X線望遠鏡に用いるCMOS検出器の開発と評価 - Part II」
日本天文学会2012年春季年会、2012年3月20日、龍谷大学(深草キャンパス)
- ⑦ 坂尾太郎、成影典之ら
「Solar-C搭載X線望遠鏡の検討状況(II)」
日本天文学会2012年春季年会、2012年3月20日、龍谷大学(深草キャンパス)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

<http://hinode.nao.ac.jp/SOLAR-C/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

成影典之 (NARUKAGE NORIYUKI)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・宇宙航空プロジェクト研究員
研究者番号: 50435806

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

坂尾 太郎 (SAKAO TARO)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙
科学研究所・准教授

研究者番号：00225781

下条 圭美 (SHIMOJO MASUMI)

国立天文台・野辺山太陽電波観測所・助教

研究者番号：00332164