

平成 30 年 6 月 26 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03647

研究課題名(和文) 太陽コロナ観測用・光子計測型・撮像分光X線望遠鏡に向けた光子計測システムの開発

研究課題名(英文) Development of photon-counting system for imaging-spectroscopic observation of solar corona in soft X-rays

研究代表者

成影 典之(Narukage, Noriyuki)

国立天文台・SOLAR-C準備室・助教

研究者番号：50435806

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,390,000円

研究成果の概要(和文)：本研究を通し、太陽コロナからの軟X線を2次元撮像分光観測するための光子計測システムを完成させた。このシステムは、X線光子計測能力を有する高速駆動可能な「裏面照射型CMOS検出器」と、この検出器を高速駆動し大量のデータを保存することが可能な「高速データ収集ボード」から構成されている。

このシステムは、2018年8月下旬に打ち上げ予定の米国NASAの観測ロケット実験FOXSI-3に搭載し、世界初となる太陽軟X線の2次元集光撮像分光観測を実施する。

研究成果の概要(英文)：We have successfully developed X-ray photon-counting system (camera) for the imaging-spectroscopic observation of the solar corona in soft X-rays. This system consists of back-illuminated CMOS sensor and high-speed data acquisition board. The back-illuminated CMOS sensor has a capability for the X-ray photon counting with high speed rate.

Our developed X-ray photon-counting system is mounted on the FOXSI-3 sounding rocket (US NASA sounding rocket) that is planned to be launched in the end of August 2018, for the first focusing imaging-spectroscopic observation of the solar corona in soft X-rays.

研究分野：太陽物理学

キーワード：光子計測 X線 太陽物理学 裏面照射型CMOS検出器 高速撮像 高速データ収集 FOXSI-3ロケット実験 PhoENiX小型衛星計画

1. 研究開始当初の背景

太陽コロナは磁場に蓄積されたエネルギーが解放される場所で、特に活動領域では、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いた静穏領域や極域でも、小さな爆発が頻繁に起きていることが「ひので」衛星のX線望遠鏡によって分かってきた。そして、これらの爆発が、コロナ加熱源の有力な候補の一つと考えられている。この様に太陽コロナの様子が詳細に観測出来るようになったのは、「ひので」のX線望遠鏡が、「高い空間分解能」、「高い時間分解能」、そして「コロナの温度範囲(100万~1,000万度以上)をカバーする幅広いエネルギー感度」を持っているからである。しかし、このX線望遠鏡が測定しているものは、露光中に望遠鏡内に入ってくる数十~数千個のX線光子のエネルギーの総量であり、太陽のX線エネルギースペクトルを積分した量である。そして、そのデータから得られるのは、実際には多様な温度のプラズマが存在するコロナの平均温度である(Narukage et al., 2011 & 2013)。

このような既存のX線望遠鏡の能力の限界を克服するため、我々が次世代のX線望遠鏡として計画しているのは、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「光子計測型・軟X線望遠鏡(軟X線2次元撮像分光望遠鏡)」である。この望遠鏡が実現すれば、下記のように太陽コロナにおける未解決の科学課題の解明に大きく役立つ。

◆ **コロナ加熱**： エネルギー分解したX線のデータ(6.5keV近傍に1,000万度以上で生成する輝線がある)から太陽定常コロナ中(100~200万度)の高温プラズマ(1,000万度以上)を検出し、コロナのエネルギー解放と加熱のメカニズムに迫ることが可能となる。高温プラズマの密度は定常コロナに比べて小さいと予測されており、平均温度しか得られない既存のX線望遠鏡では、これまでのところ定常コロナ中の高温プラズマ成分は検出できていない。高温プラズマの存在が確認できれば、小規模な爆発(ナノフレア)がコロナ加熱の源であると結論付けることができ、その空間分布、時間発展、エネルギースペクトルから、加熱のメカニズムについても迫ることが可能となる。

◆ **粒子加速**： フレア時の非熱的スペクトルの空間分布・時間発展から、粒子加速の理解に迫ることが可能となる。研究代表者の成影は、電波干渉計のデータを用い、磁気リコネクションのX-point近傍で電子加速が起きている事を世界で初めて発見したが(Narukage et al., 2014)、電波干渉計のデータは像合成が必要で空間分解能とダイナミックレンジ(コントラスト)が悪く、電子加速の詳細な空間分布を追い込むことが出来ない。これに対し、X線は鏡を用いて結像

することが可能で、高いダイナミックレンジを確保できる。軟X線2次元撮像分光望遠鏡が実現すれば、高いダイナミックレンジと3つの分解能(空間・時間・エネルギー分解能)によって、「加速された電子」と「加速に関連するプラズマ現象(衝撃波、プラズモイドなどが想定される候補)」の詳細が捉えられる(図1参照)。これにより、どこで、いつ、どのように電子が加速されているかを定量的に調査することが出来る(図2参照)。また、フレア(磁力線の繋ぎ変わり=磁気リコネクション)によって解放されたエネルギーの何割が加速に費やされているかも調べることができ、粒子加速の理解に大きく役立つ。

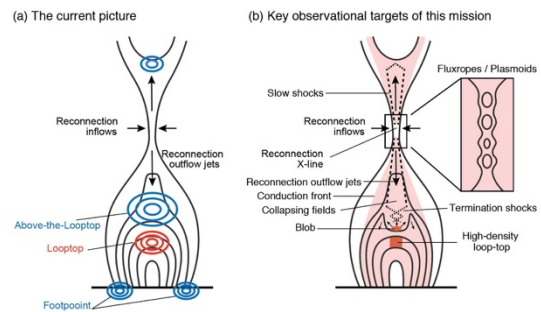


図1. 左図は既存の太陽フレアの観測。観測装置のダイナミックレンジが低く、明るく輝く場所(楕円で示した箇所)しか観測できなかった。本研究で実現を目指す軟X線2次元撮像分光望遠鏡が実現すれば、太陽フレアを引き起こす磁気リコネクション領域全域(右図の薄赤色で示した領域)が観測可能となる。

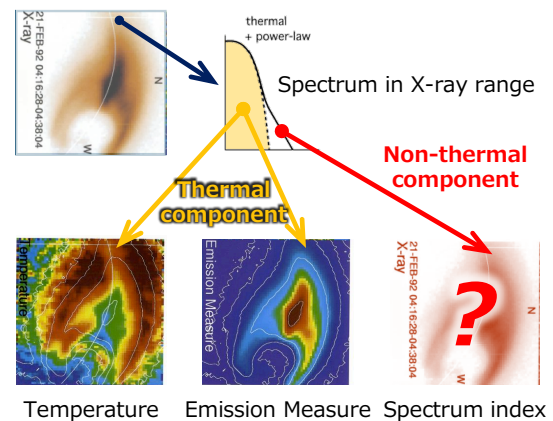


図2. 軟X線2次元撮像分光観測で得られるプラズマ情報。軟X線2次元撮像分光観測により、各場所でのX線エネルギースペクトルが得られる(上段)。このスペクトルを用いれば、熱的成分と非熱的成分の分離ができる。もし非熱的成分が存在していれば、加速された電子が存在していることを意味し、加速電子の情報を得ることが出来る(下段の右図)。熱的成分からは温度・密度の情報が得られ(下段の左と中央の図)、加速に関与している現象(衝撃波やプラズモイドなどが想定される候補)を調べることが出来る。

2. 研究の目的

本研究の目的は、太陽コロナ観測用の軟X線2次元撮像分光望遠鏡の実現に不可欠なキー技術である「軟X線光子計測システム」の開発である。このシステムは、軟X線用の高速度カメラと、カメラから出力されるデータの高速保存エレキから成る。

カメラには、入射したX線光子のエネルギーに比例したシグナル強度を出力するピクセル化されたシリコン検出器を用いる。そして、X線光子1個が検出器1ピクセルに入るよりも速く連続撮像を行うことで、個々のX線光子が持つエネルギーを、空間情報・時間情報とともに取得すること(=2次元撮像分光)ができる。ただし、太陽コロナ中の現象の時間スケールは数十秒~数十分と短いため、現象を十分に時間分解した2次元スペクトルを得るためには、毎秒1,000回程度の連続撮像が必要となる。

このような高速撮像を行うカメラからは、数 Gbps (毎秒数百 MB) という大量のデータが出力される。つまり、高速度カメラを用いた光子計測システムを完成させるには、このデータを保存収集できるエレキシステムも必要である。

そこで本研究では、「軟X線用の高速度カメラ」と「高速データ収集エレキ」から成る「軟X線光子計測システム」の開発を行い、世界初となる太陽コロナの軟X線2次元集光撮像分光観測の実現に向けた準備を行う。

3. 研究の方法

本研究は、「軟X線用の高速度カメラ」に用いる検出器の選定から始めた。この検出器に求められる性能は、焦点距離2~3mの望遠鏡に対し秒角の空間サンプリングが行なえ、数十秒でスペクトルを作ることができ、太陽軟X線のライン群成分と連続構成成分を分離できることである。つまり、次の6項目が求められる。

- ①ピクセルサイズが $10\mu\text{m}$ 程度であること。
- ②毎秒1,000回程度の連続撮像が行えること。
- ③軟X線に感度があること。
- ④軟X線光子1個が作るシグナルが広範囲のピクセルに広がらないこと(3×3ピクセル以内に収まること)。
- ⑤シグナルが複数ピクセルに広がった場合でも、シグナルの欠損が無いこと。
- ⑥エネルギー分解能が、5 keV 近傍で、数百 eV 以下であること。

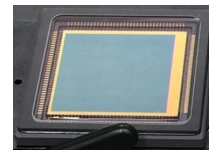
である。項目①、②、③を達成できる検出器として候補となるのが、裏面照射型 CMOS 検出器である。項目③、④、⑤、⑥については、Fe55 線源やシンクロトロン光を用いて評価し、検出器を選定する。

検出器の選定後は、この検出器を高速(毎秒1,000回程度の連続撮像)で駆動できる読み出しエレキを開発しカメラとして仕上げる。また、数 Gbps のデータを高速で保存できる高速データ収集エレキも開発し、軟X線

光子計測システムとして完成させる。なお、これらは太陽X線の観測に必須である衛星や観測ロケットを用いた宇宙からの観測を想定し、真空中で動作可能なものを開発する。

4. 研究成果

検出器の選定に際しては、市販の裏面照射型 CMOS 検出器(可視光用や紫外線用に開発されたもの)を複数種類入手し、Fe55 線源やシンクロトロン光を用いて、X線光子計測能力を評価した。その結果、高速連続撮像が可能で、かつ優れたX線光子計測能力を持つ CMOS 検出器が選定できた(図3参照)。



1 pixel event rate	: 30.0 %
valid split event rate	: 44.5 %
valid event rate	: 74.5 %
FWHM of 1 pixel event	: 168 [eV]
FWHM of valid split event	: 319 [eV]
FWHM of valid event	: 227 [eV]

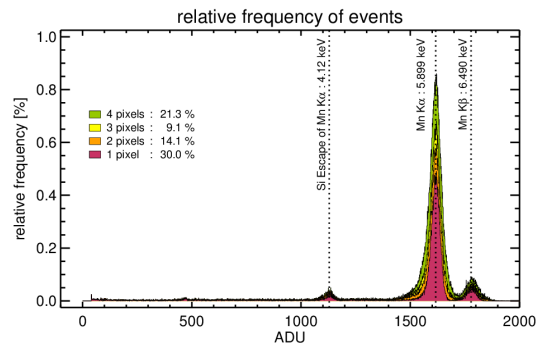


図3. 選定した裏面照射型 CMOS 検出器のX線光子計測能力の評価結果。

(上段) 選定した CMOS 検出器の写真。
(下段) この CMOS 検出器で光子計測を行って取得した Fe55 線源のスペクトル。
なお、光子計測能力の評価結果は、論文として取りまとめ中である(Narukage et al.)。

この CMOS 検出器の性能評価結果が出たのは2016年春であったが、ちょうどこの時期、日米共同で進めていた米国 NASA の観測ロケット実験 FOXS I の3度目の飛翔計画がスタートしつつあった。FOXS I は、7本のX線望遠鏡を持ち、各望遠鏡の焦点面に硬X線検出器を備えた観測装置で、過去に2度の飛翔を行い、大きな科学成果を挙げていた(Ishikawa et al. 2017 など)。FOXS I の3度目の飛翔(FOXS I-3)に向けては、装置の性能向上を目指した改良を施すことになっており、打ち上げは2018年が予定されていた。そこで我々の研究グループは、我々が選定した CMOS 検出器を望遠鏡の1つに搭載

し、世界初となる軟X線の2次元集光撮像分光観測を行うことを提案した。この提案はFOXSI チームに快諾され、FOXSI-3は軟X線から硬X線を観測できる装置となった。我々としては、当初計画よりも数年早くロケット実験を行える機会を得た。

そこで我々は、本研究のゴールを「FOXSI-3に搭載する軟X線光子計測システムの開発」とし、システムの開発を行った。2016～2017年度には、選定したCMOS検出器を駆動させ、かつCMOS検出器から出てくる約1Gbpsのデータを保存収集できるエレキシステムを、System-on-Chip集積回路を用いて開発した(図4参照; Ishikawa et al. 印刷中)。この開発では、様々な研究分野で活用できる汎用性を持たせるため、国立天文台、JAXA、大阪大学、沖縄科学技術大学院大学、東京大学、名古屋大学に所属する様々な分野の研究者らと協議し、仕様を策定した。



図4. 開発した System-on-Chip 集積回路を搭載した高速データ収集ボード。本ボードには、多様な I/F が搭載されており、汎用性が確保されている。

また我々は、FOXSIの望遠鏡の性能向上に関わる開発も行った。FOXSIの望遠鏡には、光軸から18分角以上傾いた場所からの光が迷光として混入し、測定精度を劣化させるという欠点があった。そこで、この迷光を除去するために、18分角以内の光だけが通過することができるプレ・コリメーターを開発した。このコリメーターは、アスペクト比(穴径:長さ) = 1:190を持つ直径1mmの筒をハニカム状に並べたものである。この様な高いアスペクト比の穴を持つ構造を機械加工で製作することは困難であるため、最新の金属3Dプリンター技術を用いて開発した(図5)。

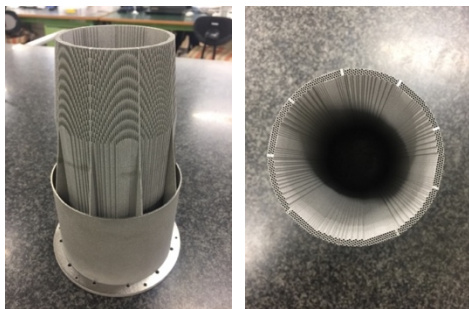


図5. 金属3Dプリンターで製作したプレ・コリメーター。望遠鏡に取り付けるためのインターフェース部分も同時に造形した。左の写真は側面から、右の写真は上(X線の入射方向)から撮影したもの。材質は64チタン。

これらの開発により、FOXSI-3で実現する世界初となる軟X線の2次元集光撮像分光観測の準備は整った(図6)。FOXSI-3の打ち上げは、2018年8月21日の予定である。

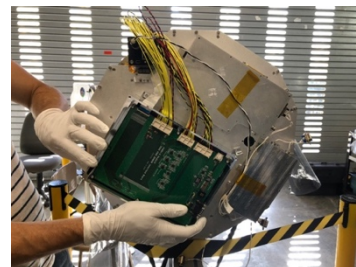
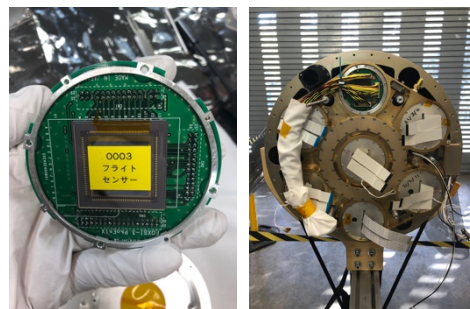


図6. 仮組を行っているFOXSI-3の観測装置(2018年5月撮影)。

(1 段目) FOXSI-3の観測装置の全景。右側に望遠鏡の鏡が設置されており、左側に検出器が設置されている。

(2 段目) 望遠鏡の鏡側からの写真。7本の鏡が設置されているが、12時の方向の鏡が軟X線用光子計測システム用の鏡で、図5のプレ・コリメーターが取り付けられている。

(3 段目) フライト用の CMOS 検出器(左の写真)と、この検出器をFOXSIの焦点面に組込んだ様子(右の写真的12時の方向)。

(4 段目) CMOS 検出器用のカメラボックス。図4の高速データ収集ボードと、CMOS検出器とのインターフェースボードが組込んである。

一方、本研究によって太陽軟X線の光子計測という新しい観測技術が確立したことを受け、この技術を活用した衛星計画の立案も行った。2018年1月、JAXA 宇宙科学研究所の公募型小型計画の公募に対し、「磁気リコネクションに伴う粒子加速の理解」を科学目的とする衛星計画 Physics of Energetic and Non-thermal Plasmas in the X-region (PhoENiX) のミッションコンセプト提案書を提出した。この計画には、粒子加速研究に関連する4分野（太陽物理学、地球・惑星磁気圏プラズマ、高エネルギー宇宙物理学、実験室プラズマの各分野）の科学者ら総勢60名（内、海外研究者5名）が参加している。

この様に、本研究で開発した技術を契機とし、より大きな研究計画が立ち上がったことは、本研究の大きな成果である。

<引用文献>

- ① Narukage, N.; Sakao, T.; Kano, R.; Hara, H.; Shimojo, M.; Bando, T.; Urayama, F.; Deluca, E.; Golub, L.; Weber, M.; Grigis, P.; Cirtain, J.; Tsuneta, S, “Coronal-Temperature-Diagnostic Capability of the Hinode/ X-Ray Telescope Based on Self-Consistent Calibration”, *Solar Physics*, 2011, Volume 269, Issue 1, pp. 169-236
- ② Narukage, N.; Sakao, T.; Kano, R.; Shimojo, M.; Winebarger, A.; Weber, M.; Reeves, K. K., “Coronal-Temperature-Diagnostic Capability of the Hinode/X-Ray Telescope Based on Self-consistent Calibration. II. Calibration with On-Orbit Data”, *Solar Physics*, 2014, Volume 289, Issue 3, pp. 1029-1042
- ③ Narukage, N.; Shimojo, M.; Sakao, T., “Evidence of Electron Acceleration around the Reconnection X-point in a Solar Flare”, *The Astrophysical Journal*, 2014, Volume 787, Issue 2, article id. 125, 8 pp.
- ④ Ishikawa Shin-nosuke, Glesener Lindsay, Krucker Sam, Christe Steven, Buitrago-Casas Juan Camilo, Narukage Noriyuki, Vievering Juliana, “Detection of nanoflare-heated plasma in the solar corona by the FOXSI-2 sounding rocket”, *Nature Astronomy*, Vol. 1, 2017, 771-774, DOI: 10.1038/s41550-017-0269-z
- ⑤ Ishikawa, Shin-nosuke; Takahashi, Tadayuki; Watanabe, Shin; Narukage, Noriyuki; Miyazaki, Satoshi; Orita, Tadashi; Takeda, Shin'ichiro; Nomahi, Masaharu; Fujishiro, Iwao; Hodoshima, Fumio, “High-speed X-ray imaging spectroscopy system with Zynq SoC for solar observations”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 印刷中

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計2件)

- ① Ishikawa, Shin-nosuke; Takahashi, Tadayuki; Watanabe, Shin; Narukage, Noriyuki; Miyazaki, Satoshi; Orita, Tadashi; Takeda, Shin'ichiro; Nomahi, Masaharu; Fujishiro, Iwao; Hodoshima, Fumio, “High-speed X-ray imaging spectroscopy system with Zynq SoC for solar observations”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 印刷中
- ② Ishikawa Shin-nosuke, Glesener Lindsay, Krucker Sam, Christe Steven, Buitrago-Casas Juan Camilo, Narukage Noriyuki, Vievering Juliana, “Detection of nanoflare-heated plasma in the solar corona by the FOXSI-2 sounding rocket”, *Nature Astronomy*, Vol. 1, 2017, 771-774, DOI: 10.1038/s41550-017-0269-z

[学会発表] (計19件)

- ① 成影典之, PhoENiX ワーキンググループメンバー, 「磁気リコネクションとそれに伴う粒子加速過程を明らかにする衛星ミッション Physics Of Energetic and Non-thermal plasma In X-region (PHOENIX) の紹介」, 日本物理学会 第73回年次大会 (2018年), 2018年
- ② 成影典之, 石川真之介, 坂尾太郎, ほか FOXSI チーム, PhoENiX WG, 「太陽軟 X線の光子計測型・2次元撮像分光観測計画の進捗報告」, 日本天文学会 2018年春季年会, 2018年
- ③ 成影典之, 「PhoENiX 計画」, 第17回高宇連研究会「ひとみ衛星の成果と将来への展望」, 2018年
- ④ 成影典之, PhoENiX チーム, FOXSI チーム, 「太陽 X線撮像分光観測プロジェクト: 磁気リコネクションに伴う粒子加速の理解を目指して (衛星計画 PhoENiX とロケット実験 FOXSI-3)」, 太陽研連シンポジウム「太陽研究の将来展望」, 2018年
- ⑤ 成影典之, PhoENiX メンバー, 「磁気リコネクションとそれに伴う粒子加速過程を明らかにする衛星ミッション」, 第18回宇宙科学シンポジウム, 2018年
- ⑥ 石川真之介, 高橋忠幸, 渡辺伸, 古川健人, 萩野浩一, 武田伸一郎, 成影典之, 川手朋子, ほか FOXSI-3 チーム, 「太陽 X線観測ロケット実験 FOXSI-3 の準備状況」, 日本天文学会 2017年秋季年会, 2017年
- ⑦ 成影典之, ほか PHOENIX チーム, 「磁気

- リコネクションとそれに伴う粒子加速過程を明らかにするミッション - Physics Of Energetic and Non-thermal plasma In X region (PHOENIX) - の紹介」, 日本天文学会 2017 年秋季年会, 2017 年
- ⑧ Noriyuki Narukage, “Photon counting type imaging spectrometer for solar soft x-rays”, SPIE Optical Engineering + Applications, 2017 年
- ⑨ Shin-Nosuke Ishikawa, Tadayuki Takahashi, Shin Watanabe, Noriyuki Narukage, Satoshi Miyazaki, Tadashi Orita, Shin’ ichiro, Takeda, Masaharu Nomachi, Shinya Saito, Hiroaki Murakami, Iwao Fujishiro, Fumio Hodoshima, “High-speed X-ray Imaging and Spectroscopy System with Zynq SoC for Solar Observations”, 8th International Conference on New Developments in Photodetection, 2017 年
- ⑩ Noriyuki Narukage, Shin-Nosuke Ishikawa, “Soft X-ray Photon Counting Capability of a Back-Illuminated High-Speed CMOS Sensor”, 8th International Conference on New Developments in Photodetection, 2017 年
- ⑪ Noriyuki Narukage, “X-ray imaging-spectrometers for the next solar satellite mission”, RHESSI 16th Workshop / MinXSS 1st Workshop, 2017 年
- ⑫ 成影典之, 石川真之介, 川手朋子, 坂尾太郎, 「観測ロケットを用いた軟 X 線域における太陽コロナ 2 次元撮像分光観測の実証計画」, 日本天文学会 2017 年春季年会, 2017 年
- ⑬ 成影典之, 石川真之介, 川手朋子, 坂尾太郎, 「観測ロケットを用いた太陽コロナ軟 X 線域における 2 次元撮像分光観測の実証計画 (FOXSI-3)」, 太陽研連シンポジウム「太陽系科学の中での太陽研究の将来展望」, 2017 年
- ⑭ N. Narukage, “Evidence of Electron Acceleration around the Reconnection X-point in a Solar Flare”, IAUS 327: Fine Structure and Dynamics of the Solar Atmosphere, 2016 年
- ⑮ 成影典之, 「光子計測型軟 X 線望遠鏡 FOXSI-3 ロケット実験への参加」, シンポジウム「スペース太陽研究の到達点と将来像」, 2016 年
- ⑯ N. Narukage, “Evidence of Electron Acceleration around the Reconnection X-point in a Solar Flare”, 15th RHESSI Workshop, 2016 年
- ⑰ N. Narukage, “Evidence of Electron Acceleration around the Reconnection X-point in a Solar Flare”, The 2016

Solar Physics Division Standalone Meeting, 2016 年

- ⑱ 成影典之, 「光子計測型 (フォトンカウンティング) 太陽 X 線撮像望遠鏡の概要と開発状況」, 太陽研連シンポジウム「ひので 10 年目の成果と Solar-C を柱とする太陽研究の新展開」, 2016 年

- ⑲ N. Narukage, M. Shimojo, T. Sakao, “Evidence of Electron Acceleration around the Reconnection X-point in a Solar Flare”, Hinode 9 Science Meeting, 2015 年

[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

観測ロケット実験 FOXSI-3 のホームページ:
<http://foxsi.umn.edu/launches/foxsi-3>

小型衛星計画 PhoENiX のホームページ:
<http://www.phoenix-project.science/>

本研究で推進している軟 X 線・光子計測システムの開発について、日経産業新聞で紹介された (平成 29 年 12 月 12 日朝刊)。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

成影 典之 (NARUKAGE, Noriyuki)
国立天文台・SOLAR-C 準備室・助教
研究者番号: 50435806

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

石川 真之介 (ISHIKAWA, Shin-nosuke)
国立研究開発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: 10724685

坂尾 太郎 (SAKAO, Taro)
国立研究開発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

(4) 研究協力者

なし