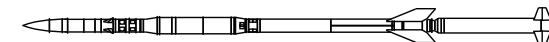
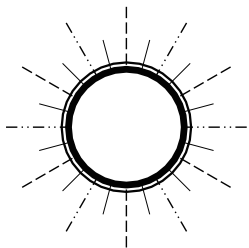




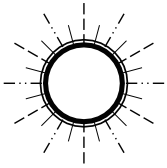
# 日米共同・太陽フレアX線 集光撮像分光観測ロケット実験 FOXSI-4



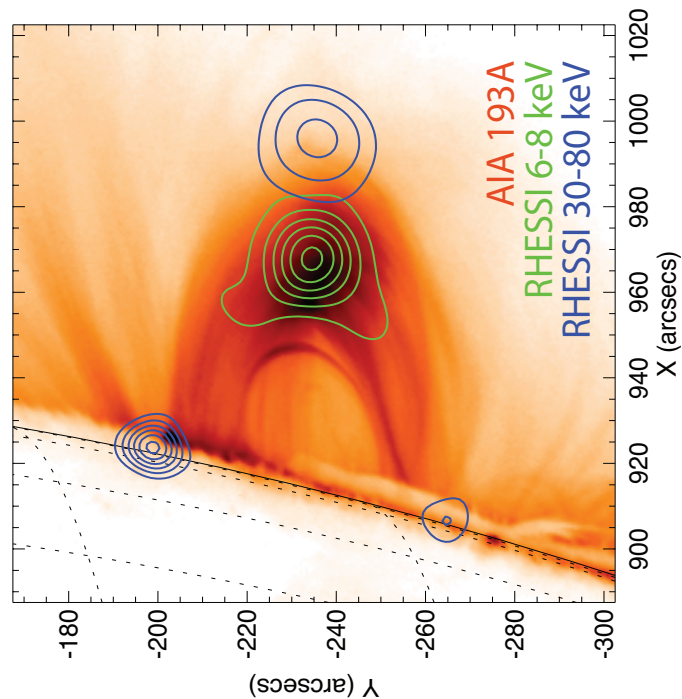
- 成影 典之(国立天文台)、渡辺 伸、坂尾 太郎(宇宙研)、高橋 忠幸、  
長澤 俊作、南 喬博(東大カブリIPMU)、三石 郁之(名大)、  
川手 朋子(核融合研)、石川 真之介(立教大)、  
L. Glesener、A. Pantazides、J. Duncan (University of Minnesota)、  
W. Baumgartner、S. Bongiorno、P. Champey、S. A. Panchapakesan、  
A. Winebarger (NASA/MSFC)、S. Christe、D. Ryan (NASA/GSFC)、  
S. Courtade、S. Krucker、J. C. Buitrago-Casas、J. C. Martinez-Oliveros  
(University of California, Berkeley/SSL)、  
S. Musset (University of Glasgow)、J. Vievering (APL)



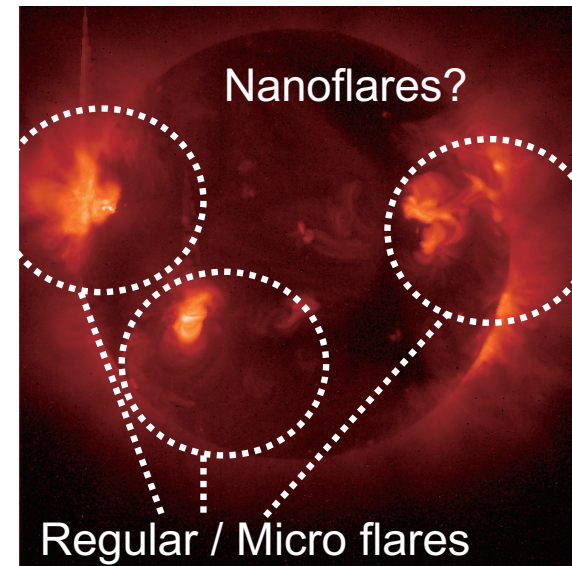
# 観測ロケット実験 FOXSI シリーズの科学目的



- 太陽コロナにおける高エネルギー現象の理解（エネルギー解放、粒子加速、加熱）
- フレアープ上空の粒子加速場所の調査
- ナノフレアの調査とコロナ加熱への寄与の評価



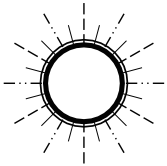
Krucker & Battaglia 2013



- 静穏領域での粒子加速の調査
- 活動領域での高温成分の調査



# Focusing Optics X-ray Solar Imager (FOXSI)



太陽硬X線を**直接集光する**観測実証ロケット実験

- NASA の観測ロケットを使用  
(Low Cost Access to Space の枠組み)
  - 高度100km以上で、5分間強の観測が可能
  - 全長 2m 強の観測装置が搭載可能
  - 1秒角以下の姿勢制御が可能
  - 再利用が可能
- FOXSIは、過去3度飛翔に成功



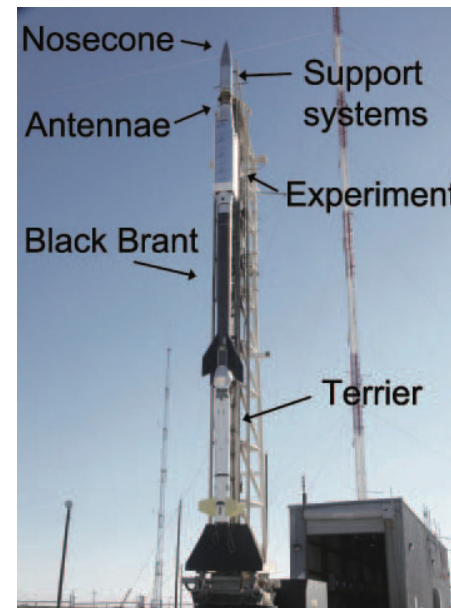
FOXSI-1  
2012年



FOXSI-2  
2014年



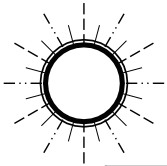
FOXSI-3  
2018年








FOXSI 2nd launch  
White Sands Missile Range  
New Mexico - USA  
Dec 11, 2014



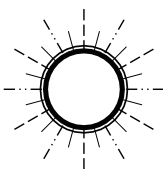
# FOXSI シリーズの発展



|      | FOXSI-1  | FOXSI-2  | FOXSI-3  | FOXSI-4   |
|------|--|--|--|---|
|      |   |  |                                   |            |
| 観測対象 | 静穏領域   | 活動領域<br>静穏領域   | 活動領域<br>静穏領域   | 太陽フレア   |
| 観測波長 |  |  |  |   |
| 望遠鏡  | 7 shells x 7 modules   | 10 shells x 2 modules<br>7 shells x 5 modules                                      | (10 shells + blocker) x 1<br>(7 shells + collimator) x 2<br>10 shells x 3 modules<br>7 shells x 1 modules            | high resolution optics x 5<br>10 shells x 2 modules   |
| 検出器  | Si (7.7 arcsec) x 7<br>[for hard X-rays]   | CdTe (6.7 arcsec) x 2<br>Si (7.7 arcsec) x 5<br>[for hard X-rays]                  | CdTe (6.7 arcsec) x 2<br>Si (7.7 arcsec) x 4<br>[for hard X-rays]<br>+<br>CMOS (1.1 arcsec) x 1<br>[for soft X-rays] | CdTe (6.7 arcsec) x 5<br>[for hard X-rays]<br>+<br>CMOS (1.1 arcsec) x 2<br>[for soft X-rays] |



# FOXSI-1 によりもたらされたもの 硬X線集光撮像分光観測の実現

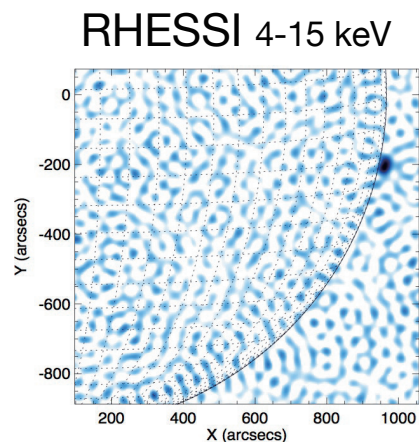
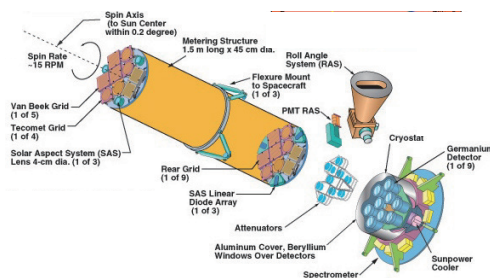
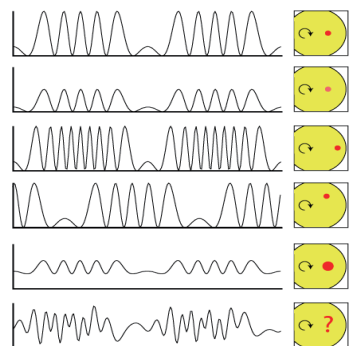
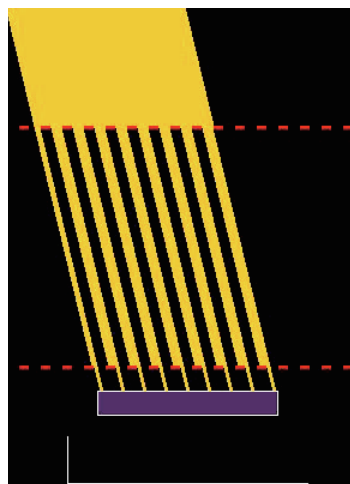


既存の観測装置 (RHESSI など)

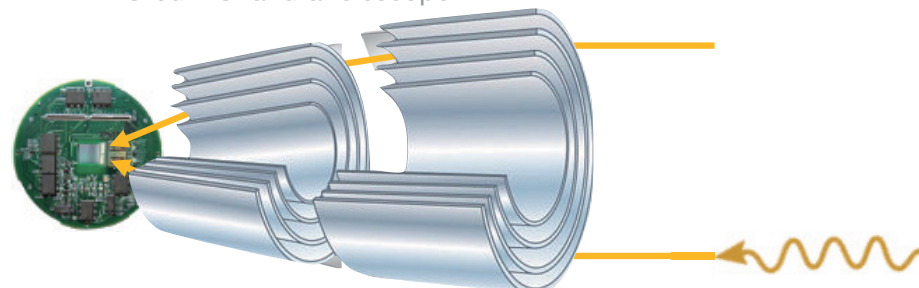
すだれコリメータ + 検出器

新しい観測装置 (FOXSI)

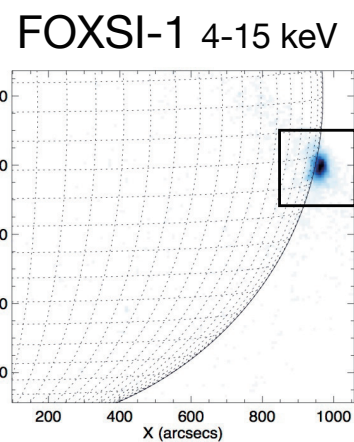
X線斜入射ミラー + 検出器



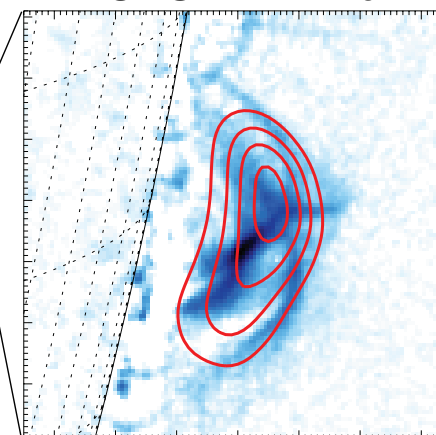
Credit: Chandra telescope



Wolter-I geometry



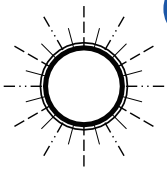
FOXSI-1 4-12 keV



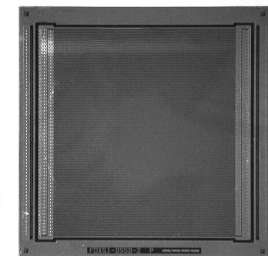
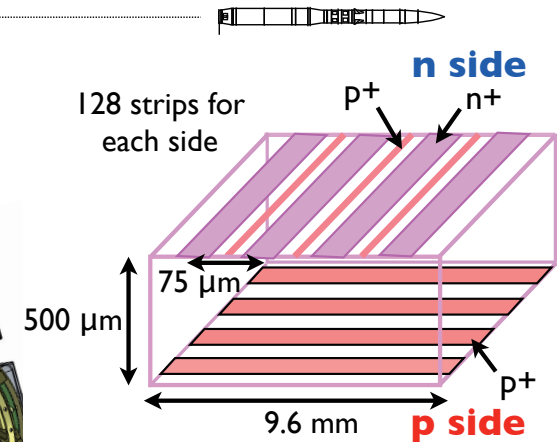
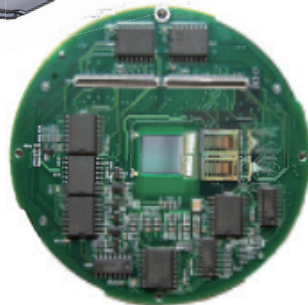
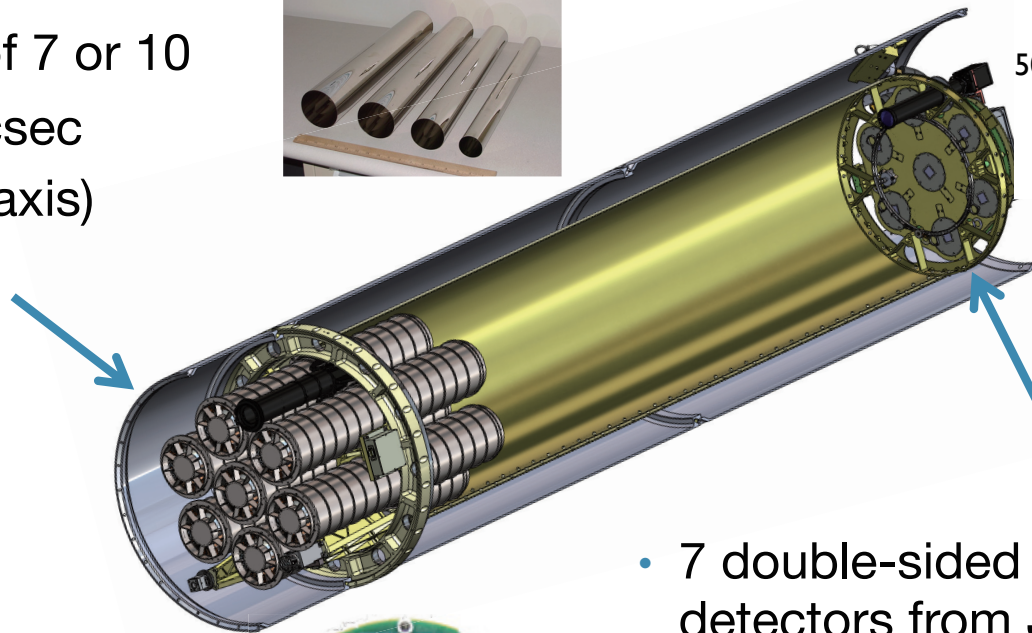
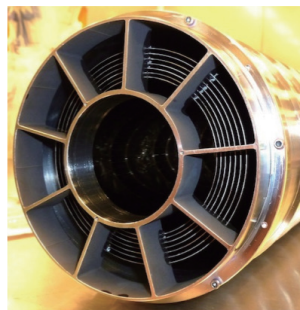


# FOXSI-1, -2 の観測装置

(7つの独立したX線望遠鏡 → FOXSI-3 以降の発展へとつながる)

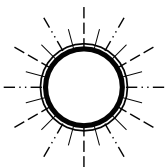


- Replicated Ni optics from NASA/Marshall
- Wolter-I shape
- Nested sets of 7 or 10
- FWHM ~5 arcsec
- HPD 25" (on-axis)

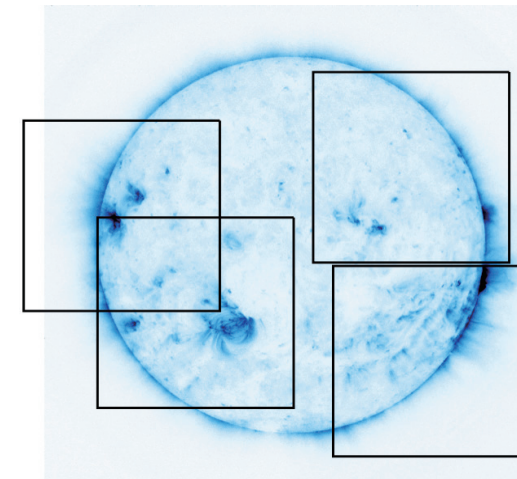
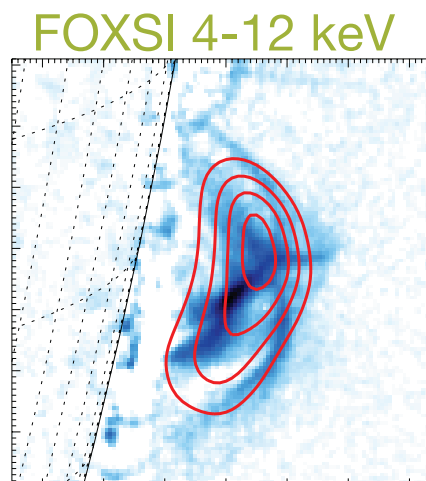
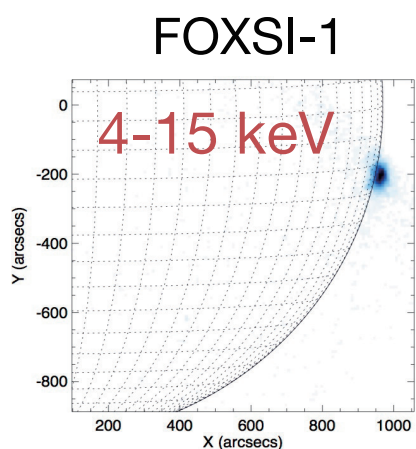
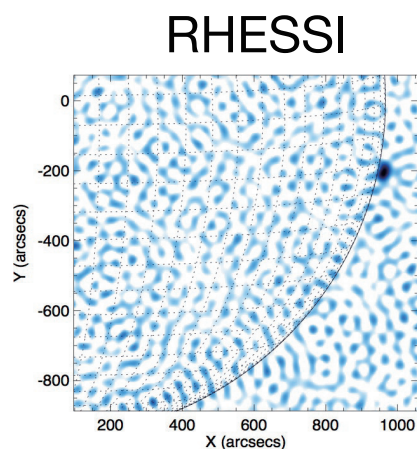
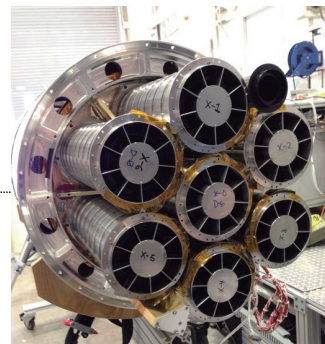


- 7 double-sided Si or CdTe strip detectors from JAXA/ISAS
- 75 (or 60)  $\mu\text{m}$  pitch, 500  $\mu\text{m}$  thick
- Read out by low-power, low-noise ASICs

# FOXSI-1: 2012年11月2日

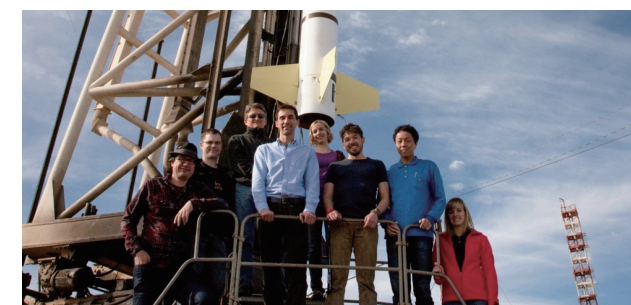
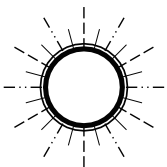


- 1回目のフライト : 6.5 分間の観測
  - 世界初の太陽硬X線 (5 keV 以上) 集光観測に成功。
- 問題点 :
  - ミラー1台が打ち上げ時の振動でズレた
  - サーマルブランケットが光路を塞いだ
  - 迷光によるバックグラウンドの増加

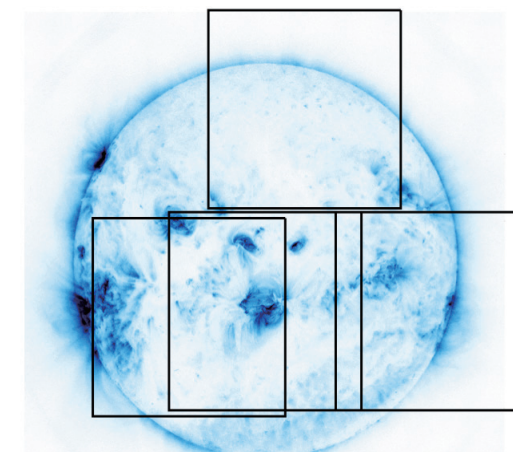
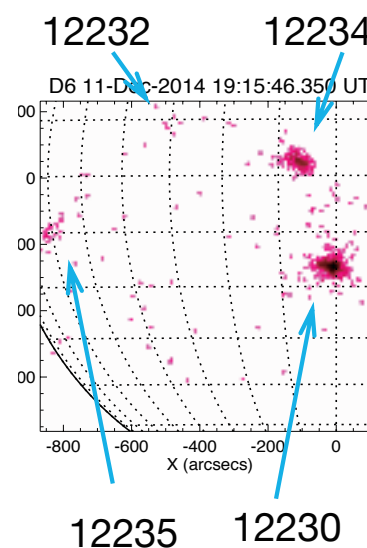
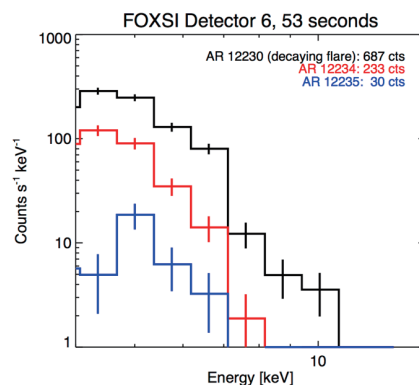
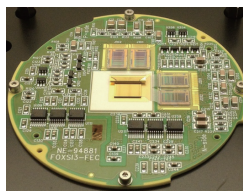
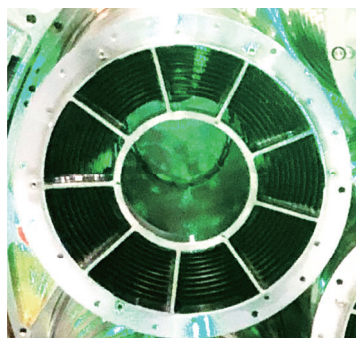


AIA 94A 2012 Nov 2  
Launch 17:55 UTC

# FOXSI-2: 2014年12月11日



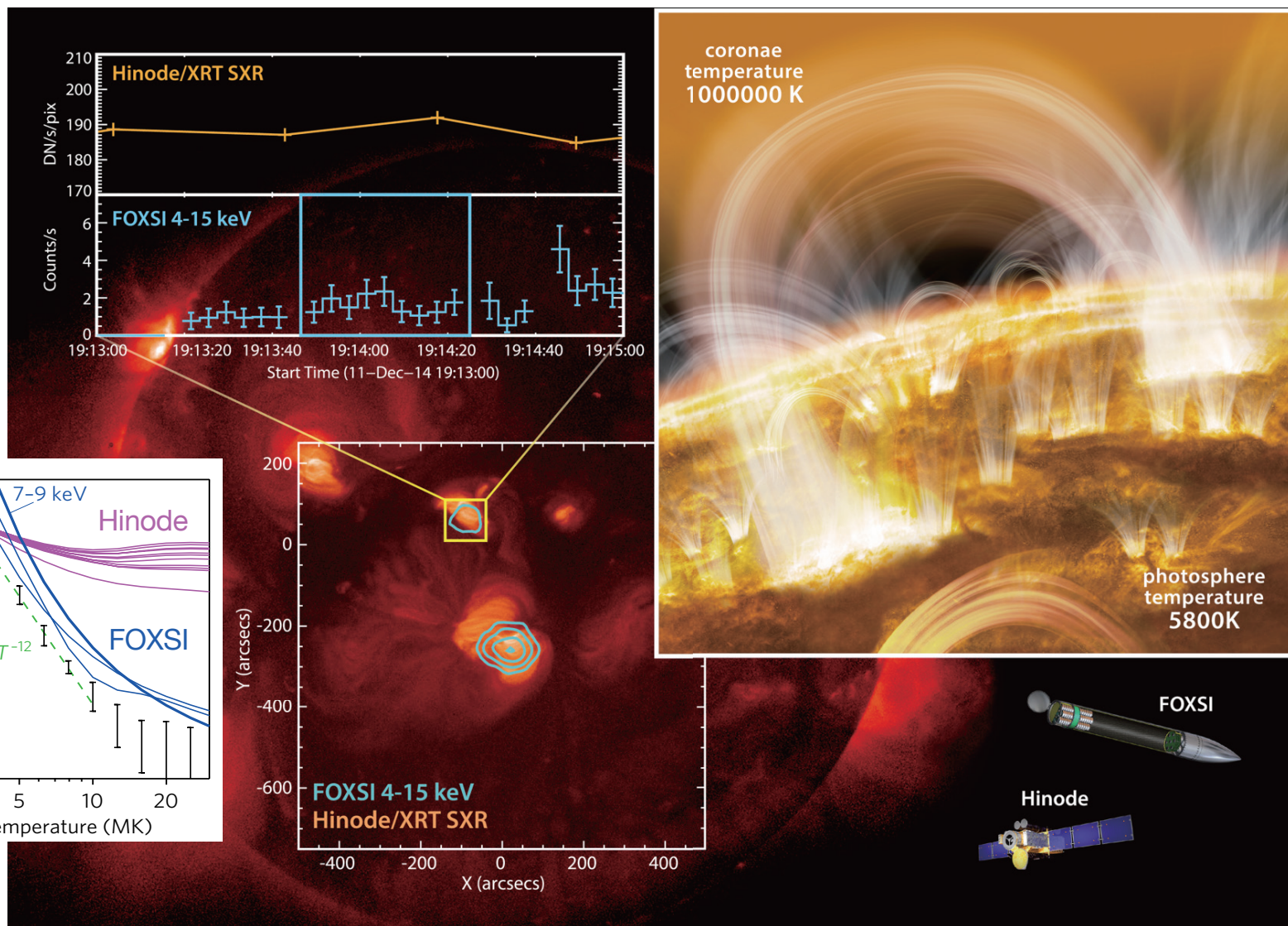
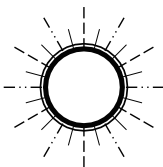
- FOXSI-1からのアップデート:
  - 2つの望遠鏡を10シェルに変更し、感度を向上させた
  - 2つの Si 検出器を CdTe 検出器に置き換え、感度を向上させた
- 2回目のフライト : 6.5 分間の観測
  - 2つのマイクロフレアと、4つの活動領域の硬X線撮像分光観測に成功。
- 問題点 :
  - 迷光によるバックグラウンドの増加



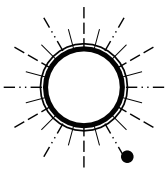
AIA 94A 2014 Dec 11  
Launch 19:11 UTC



# FOXSI-2 の成果は Nature Astronomy に掲載 (Ishikawa et al. 2017)



# FOXSI-3: 2018年9月7日

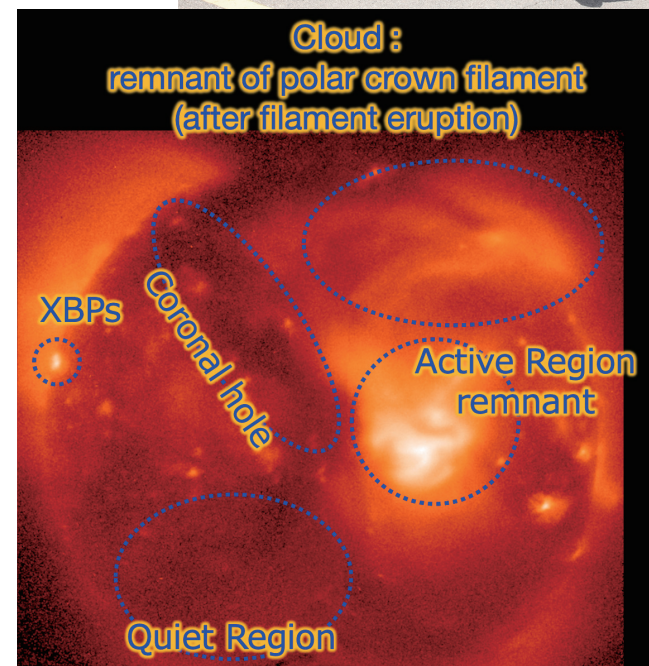


## FOXSI-2 からのアップデート:

- 望遠鏡にコリメーターまたはブロッカーを設置し、迷光を除去した
- CMOS 検出器を搭載し、軟X線の集光撮像分光観測を実施した

## 3回目のフライト：約6分間の観測

- 活動領域、X線輝点、静穏領域、極域フィラメント、コロナホールなどを含む、太陽全面の軟X線撮像分光観測（世界初）に成功。

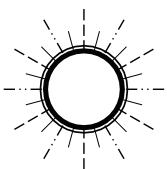


## 問題点：装置の問題点はなし

- ただし、太陽活動が低く、硬X線のデータを十分に取得することができなかった。

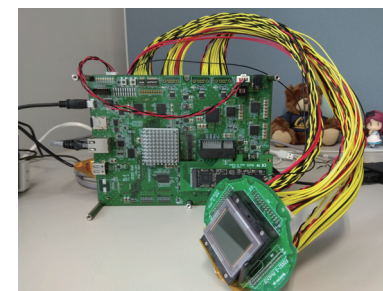
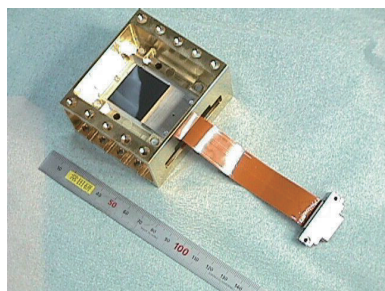


# FOXSI-3によりもたらされたもの 軟X線集光撮像分光観測の実現



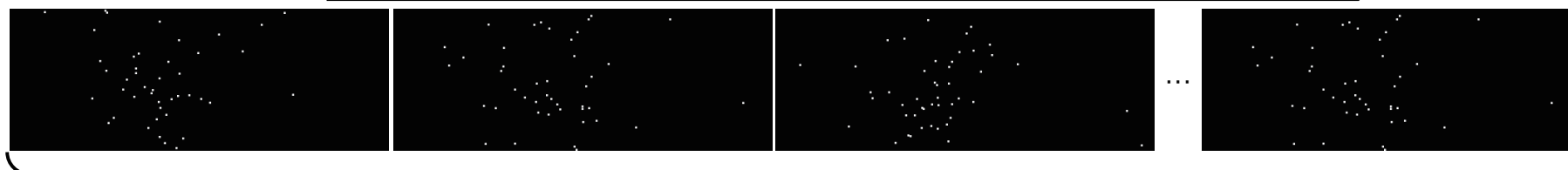
既存の観測装置（ようこう、ひので）  
X線斜入射ミラー + CCD

新しい観測装置（FOXSI-3）  
X線斜入射ミラー + CMOS

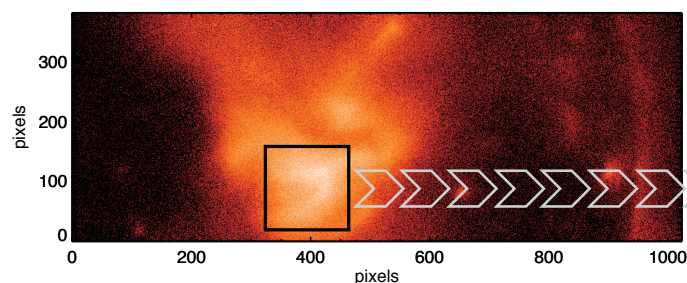


(a) 取得したデータ

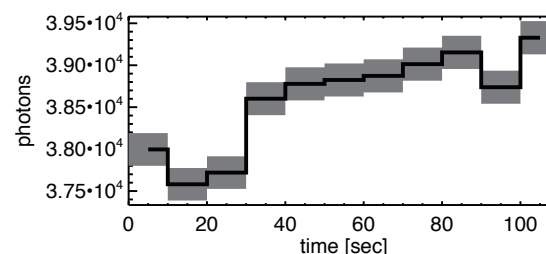
時間の流れ（1秒間に250枚の高速連続撮像）



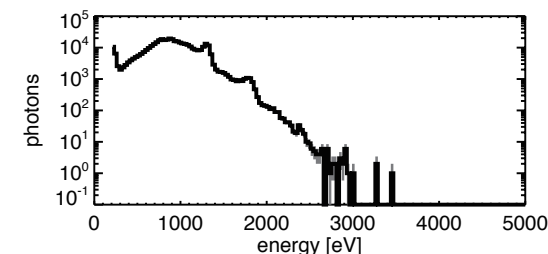
(b) X線光子を集めて作った太陽の画像



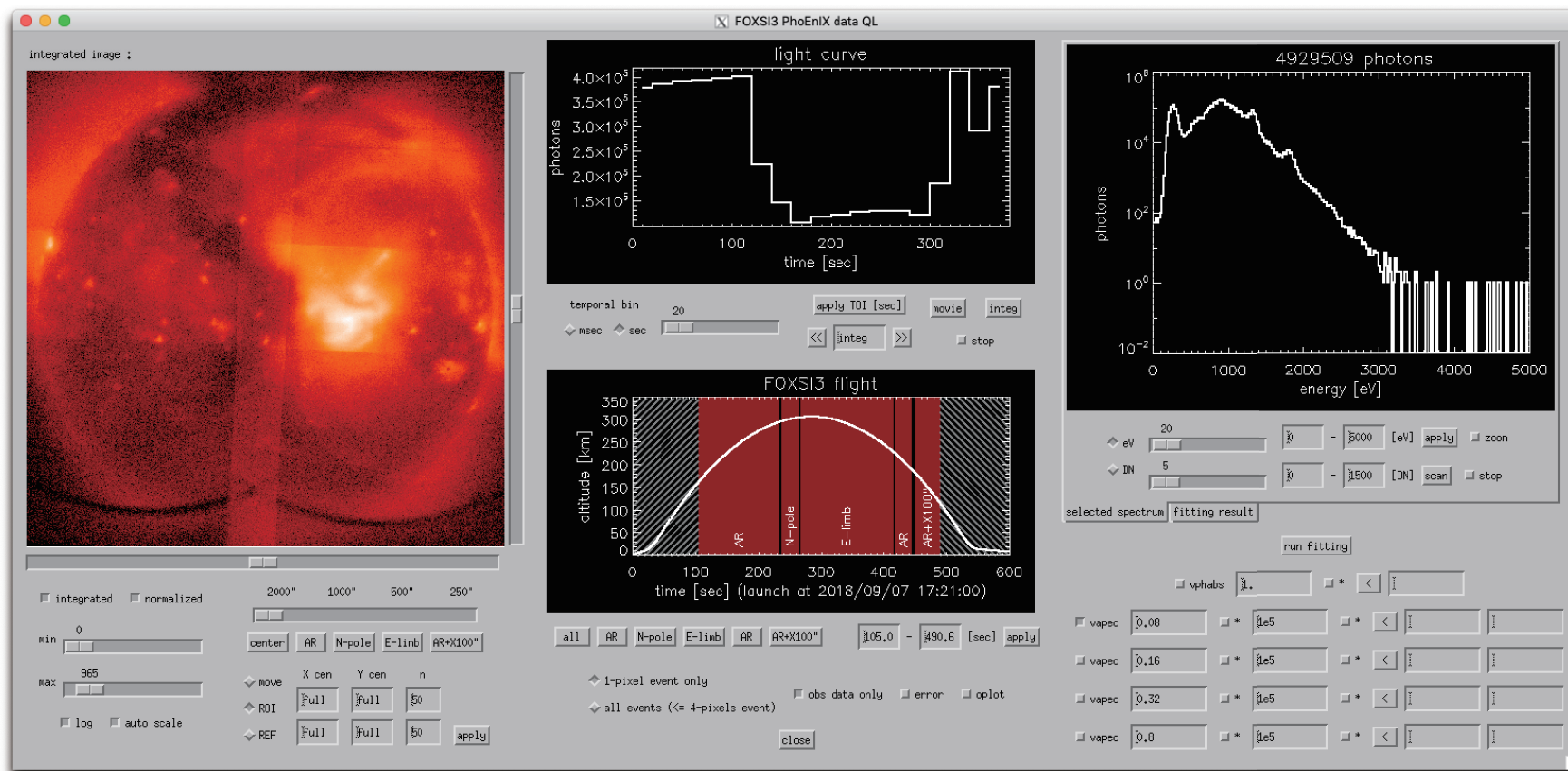
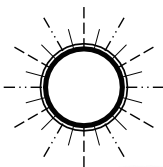
(c) 活動領域のX線光子数の時間変化



(d) 活動領域のX線スペクトル



# FOXSI-3 によりもたらされたもの 高エネルギープラズマに対する豊富な情報を持つ 軟X線スペクトル



## FOXSI-3 のデータ解析用 GUI ツール

1. 解析したい領域・時間・エネルギー帯域の選択
2. 空間・時間・エネルギー binning の調整
3. スペクトルフィッティング (XSPEC を使用) が GUI で視覚的に行える。



# FOXSI-4: 2024年春 いよいよ太陽フレア観測に挑む!!

<https://rscience.gsfc.nasa.gov/keydocs/SolarFlareCampaign.pdf>

Glesener, Lindsay 19-HFORT19-0016

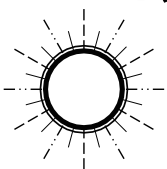
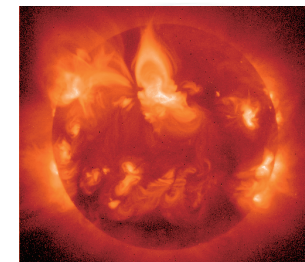
## OVERALL GRADE (mark panel overall score with "X")

|                           | Excellent | E/V<br>G | Very<br>Good | VG/<br>G | Good | G/F | Fair | F/P | Poor |
|---------------------------|-----------|----------|--------------|----------|------|-----|------|-----|------|
| 'X':<br>Overall<br>grade. | X         |          |              |          |      |     |      |     |      |



|          | July, 2020                          | 2021                    | 2022                  | 2023                  | 2024     |
|----------|-------------------------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|----------|
| Schedule | Proposal was<br>accepted by<br>NASA | Design &<br>Development | Fabrication &<br>Test | Integration &<br>Test | Launch!! |

# 観測ロケット実験 FOXSI-4 の科学目的



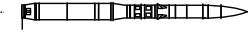
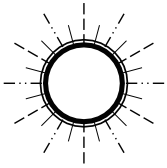
観測ロケットを用いた**世界初の太陽フレア観測キャンペーン**

- Science objectives:
  1. Determine how much particle acceleration occurs in the gradual phase of a flare
  2. Produce images and spectra of flare footpoints from thermal to non-thermal energies
  3. Determine where non-thermal sources and heated plasma are located in a given coronal configuration
  4. Measure the spatial distribution of superhot sources in a flare
  5. Identify locations of energetic electrons in an erupting CME



観測方法: **X線集光撮像分光観測 (FOXSI-3 のアップデート)**

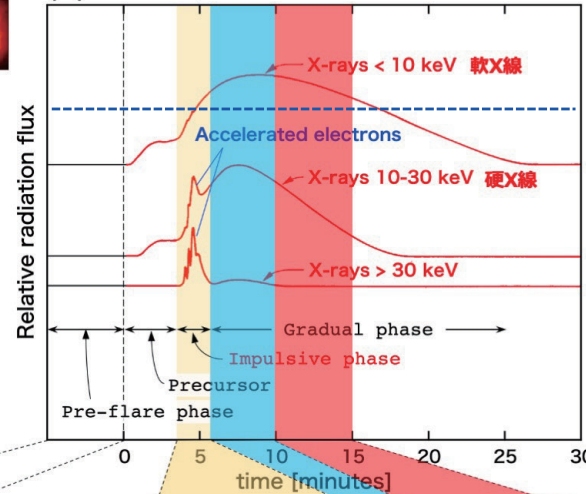
# FOXSI-4 で実施するフレアキャンペーン



(a) フレアキャンペーンの打ち上げイメージ



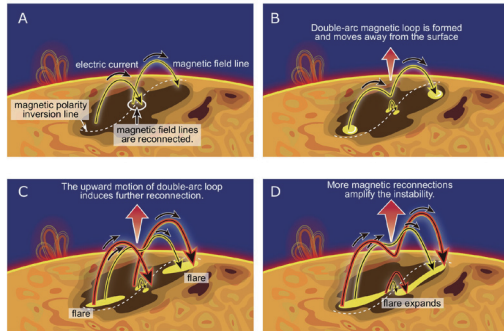
(b) Time profile of a solar flare



> GOES C5-class

太陽のX線強度をリアルタイムでモニター（GOES衛星を使用予定）、事前のフレア規模予測も参考にし、X線強度が閾値を超えた時点で打ち上げを行う。

## Prediction of solar flares



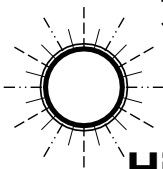
Kusano+ 2020

(c)

| Phase                              |             | Pre-flare phase (Active region) | Precursor                                     | Impulsive phase  | Gradual phase               |
|------------------------------------|-------------|---------------------------------|---|--|-----------------------------|
|                                    |             | 太陽フレアのリアルタイムモニター + 打ち上げ待機       |   | フレア検出 + 打ち上げ   | 観測高度への飛翔 + フレア観測            |
|                                    |             |                                 |   |  |                             |
| Time                               |             | $t < 0$ sec                     | $0 < t < 200$ sec                             | $200 \text{ sec} < t < 300$ sec                                      | $t > 300$ sec               |
| Energy release region              | density     | -                               | $\sim 10^8 \text{ cm}^{-3}$                   |  | $\sim 10^8 \text{ cm}^{-3}$ |
|                                    | temperature | -                               | 2 MK $\rightarrow$ 10 MK                      |  | 10 MK                       |
| Flaring loop or active region loop | density     | $\sim 10^9 \text{ cm}^{-3}$     | $\sim 10^9 \text{ cm}^{-3}$                   | $\sim 10^9 \text{ cm}^{-3} \rightarrow \sim 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ |                             |
|                                    | temperature | $\sim 3 - 5$ MK                 | $\sim 3 - 5$ MK $\rightarrow \sim 10 - 20$ MK |  | $\sim 10$ MK                |

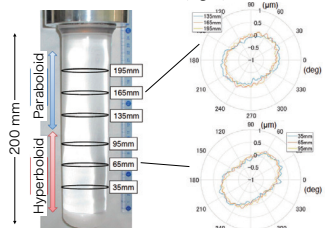


# FOXSI-4 によりもたらされるの 新機軸の太陽フレア高エネルギープラズマ観測



## High-precision electroformed X-ray mirror

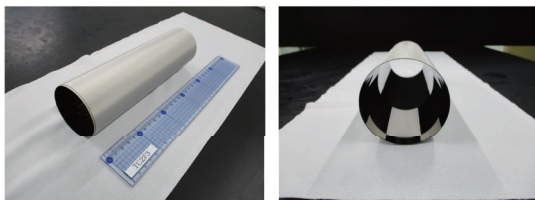
Wolter type I mandrel (left) and circumferential errors (right)



Goal (cf. FOXSI-3)

- **<10" HPD** (← 30" HPD)
- **<4" FWHM** (← 5" FWHM)

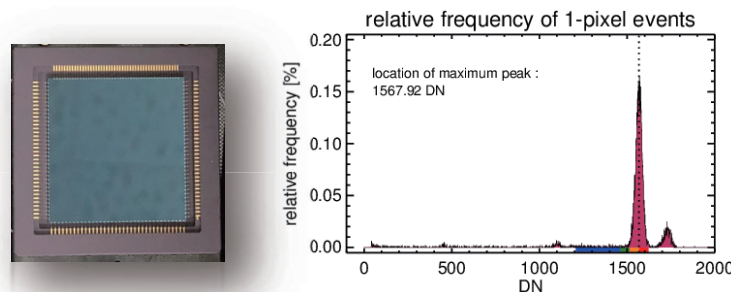
GO3-4  
独自の次世代高性能  
多重薄板型電鍍X線  
望遠鏡の開発  
瀧川 歩  
(名古屋大学)



## Updated CMOS (for soft X-rays) & CdTe (for hard X-rays) detectors

CMOS detector (cf. FOXSI-3)

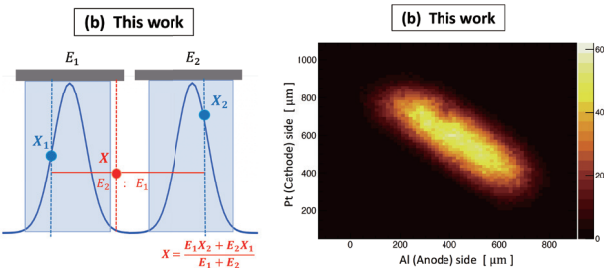
- **25 um depletion layer thickness** (← 4 um) for
- Higher sensitivity to high-energy X-rays
- Higher robustness against X-rays



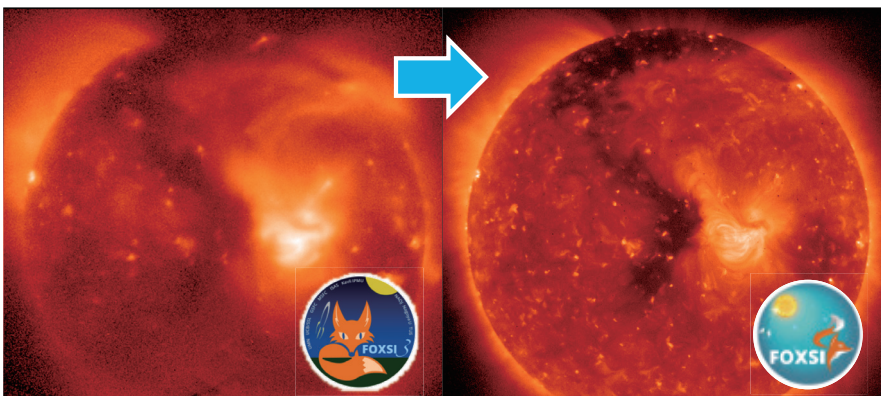
CMOS の  
光子計測能力  
(<sup>55</sup>Fe線源)

CdTe detector (cf. FOXSI-3)

- Position resolution ( ~30 μm ← 60 μm )
- High Count Rate (~5 k events / s / detector  
← 500 events / s / detector )

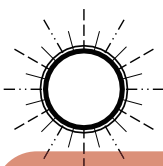
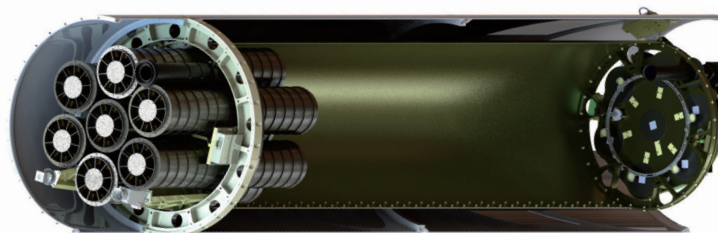


サブストリップ・レベル  
での位置決定精度の達成  
(Furukawa et al., 2020)





# FOXSI-4 の体制



## 軟X線装置

### 国立天文台

成影 典之 (Co-PI)

### ISAS/JAXA

坂尾 太郎

### 核融合科学研究所

川手 朋子

### 立教大学

石川 真之介

軟X線カメラの開発・製作、コリメーターの開発・製作、軟X線装置の機器較正

### 名古屋大学

三石 郁之 (Co-I)

高精度X線ミラー、軟X線用フィルターの製作と較正

## ミネソタ大学

Lindsay Glesener (PI)  
A. Pantazides (PM)  
J. Duncan

全体取りまとめ、硬X線検出器の評価

## カリフォルニア大学 バークレー校

Sasha Courtade (Co-I)  
Sâm Krucker (Co-I)  
Milo Buitrago-Casas  
J. C. Martinez-Oliveros

マネジメント、構造の製作

## NASA マーシャル

W. Baumgartner (Co-I)  
S. Bongiorno (Co-I)  
P. Champey (Co-I)  
S. A. Panchapakesan  
A. Winebarger

X線ミラーの製作と較正

## 硬X線装置

### 東京大学 IPMU

高橋 忠幸 (Co-PI)  
長澤 俊作  
南 喬博

### ISAS/JAXA

渡辺 伸 (Co-I)

硬X線検出器の開発・製作

### NASA ゴダード

Steven Christe (Co-I)  
Daniel Ryan

減光フィルター、アライメント望遠鏡

### APL

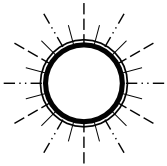
J. Vievering (Co-I)

### University of Glasgow

S. Musset (Co-I)

観測計画

# FOXSI における日本のコントリビューション



- FOXSI シリーズは、1号機 (FOXSI-1) から高橋グループ（当時、宇宙研；現、東大 IPMU）が **fine pitch の硬 X 線焦点面検出器** を投入することで実現した。

【背景】• CdTe や Si を用いた検出器技術をもっていた。

- カリフォルニア大学バークレイ校との良好な関係を構築していた。

- FOXSI-3 からは、成影（国立天文台）らが、**軟 X 線用高速度カメラとコリメーター** を開発し、FOXSI-3の主要アップデートに貢献した。

【背景】• X線測定に使えるCMOSセンサーを世界に先駆けて評価していた。

- X線用高速度CMOSカメラ（エレキ）の開発技術をもっていた。
- 最新の金属3Dプリンター技術に目をつけ、活用することが出来た。
- FOXSI-1, 2 での日米協力の成果があった。

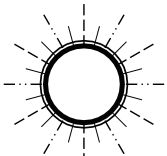
- FOXSI-4 からは、三石（名古屋大学）らが、**X 線用高精度電気鋳造ミラー** を開発し、空間分解能の向上に貢献する。

【背景】• 東京大学工学部との連携により、X線天文用高精度電気鋳造ミラーの基礎開発を開始していた。

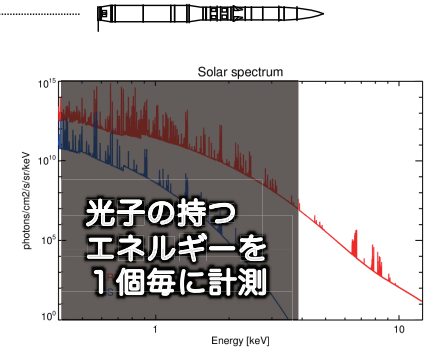
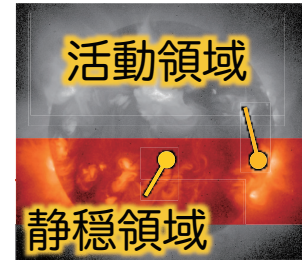
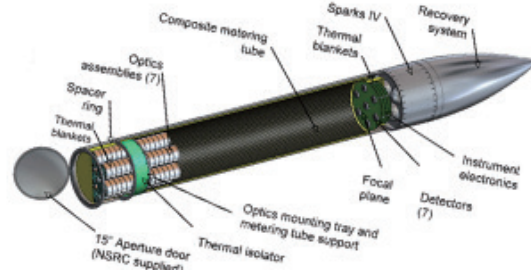
- IXPE の開発で FOXSI のミラーを開発した NASA/MSFC との協力関係を構築していた。



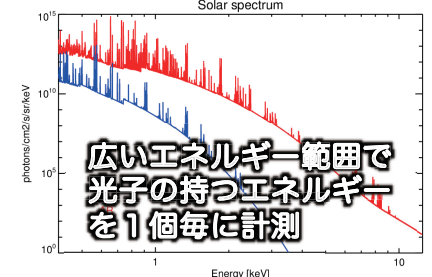
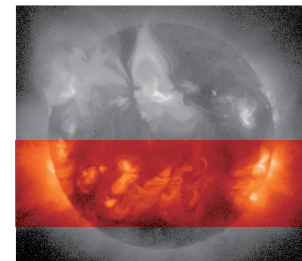
# 観測ロケット実験 FOXSI の先



ロケット実験  
FOXSI-1, 2  
(2012年, 2014年)

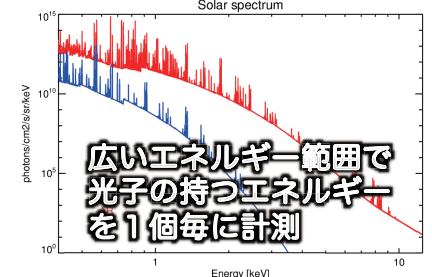
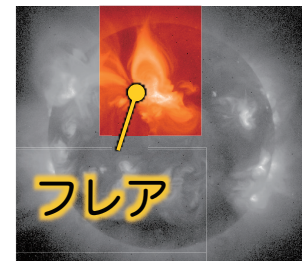
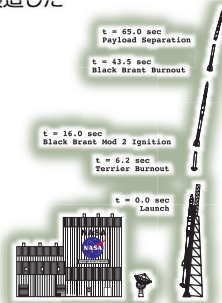


ロケット実験  
FOXSI-3  
(2018年)



ロケット実験  
FOXSI-4  
(2024年春)

世界初の太陽フレア  
X線集光撮像分光観測



「PhoENiX」衛星  
(2030年代はじめ)

軟X線望遠鏡  
硬X線望遠鏡  
軟ガンマ線検出器

GO3-1  
磁気リコネクションに伴う粒子加速の理解を目指す衛星計画  
PHOENIX  
成影 典之 (国立天文台)

