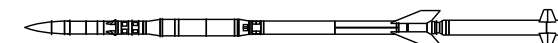
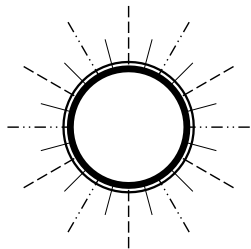




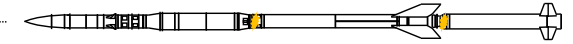
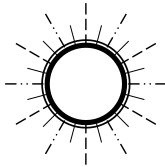
日米共同・太陽フレアX線 集光撮像分光観測ロケット実験 FOXSI-4



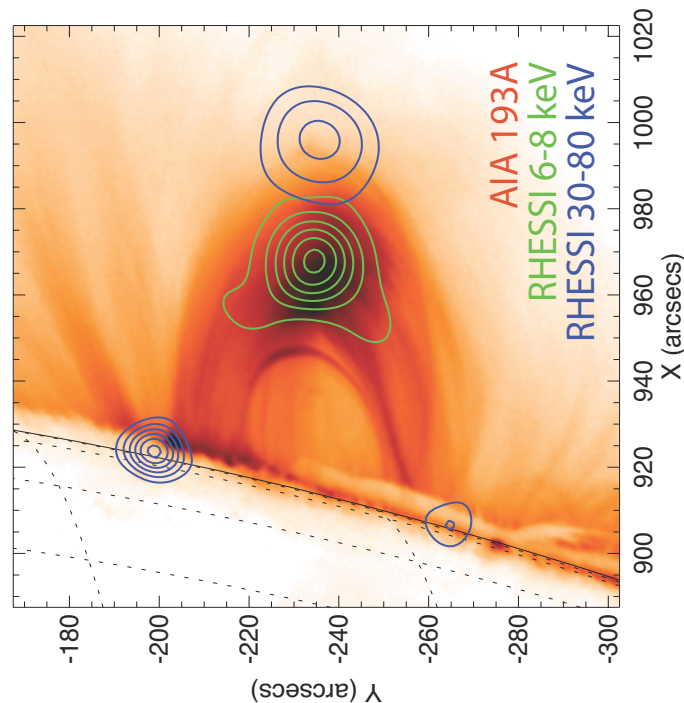
成影 典之 (国立天文台), 渡辺 伸, 坂尾 太郎 (宇宙航空研究開発機構),
高橋 忠幸, 長澤 俊作, 南 喬博 (東京大学 カブリIPMU),
三石 郁之 (名古屋大学), 川手 朋子 (核融合科学研究所), 石川 真之介 (立教大学),
Lindsay Glesener, A. Pantazides, J. Duncan (University of Minnesota),
W. Baumgartner, S. Bongiorno, P. Champey, S. A. Panchapakesan,
A. Winebarger (NASA/MSFC), S. Christe, D. Ryan (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)



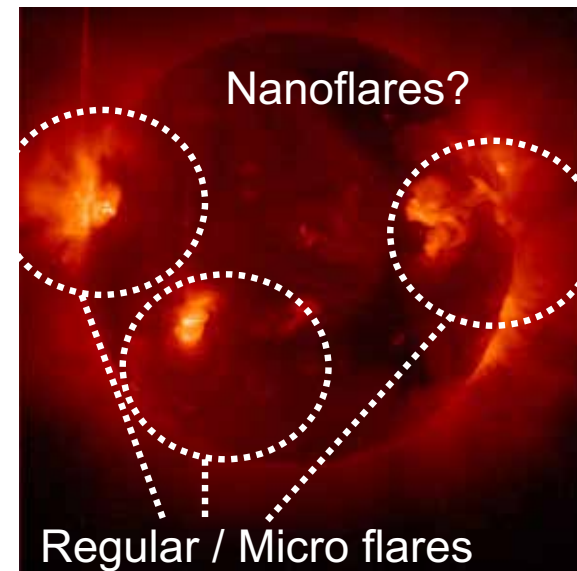
観測ロケット実験 FOXSI シリーズの科学目的



- 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

Significance of solar corona study

[Plasma physics]

Natural laboratory of plasma

- Magnetic reconnection
- Particle acceleration

[Unique observation target]

The closest star

- Solar phenomenon can be observed with wide field of view and with spatial and temporal resolutions

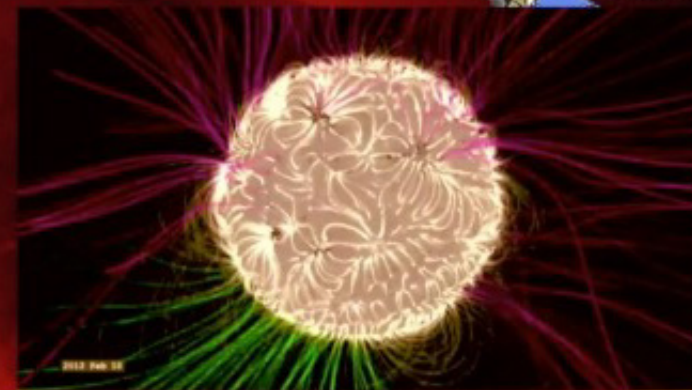
[Impacts on Earth and social environments]

The mother of the Earth

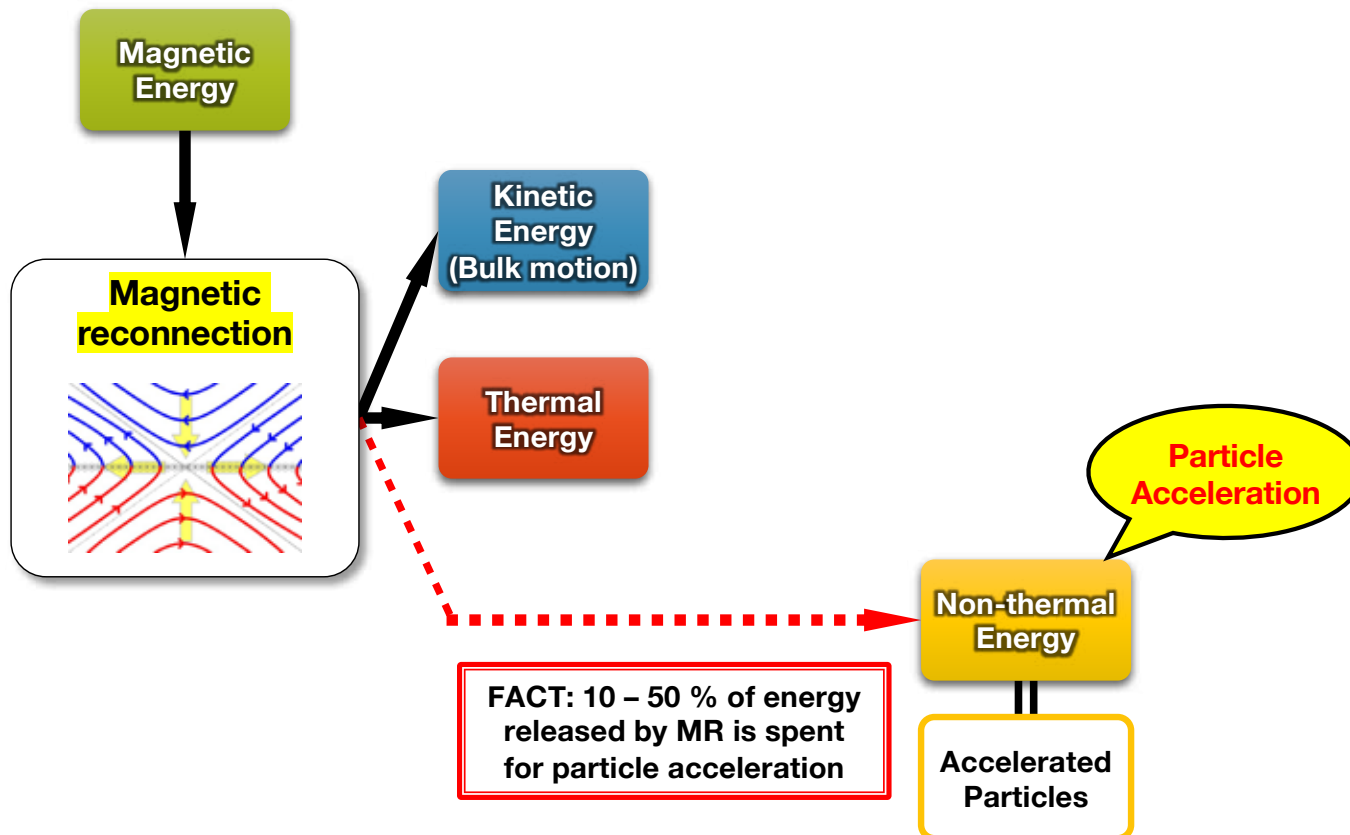
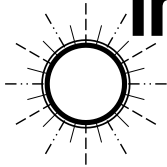
- Evolution of life (cosmic rays)
- Space weather

[As a star]

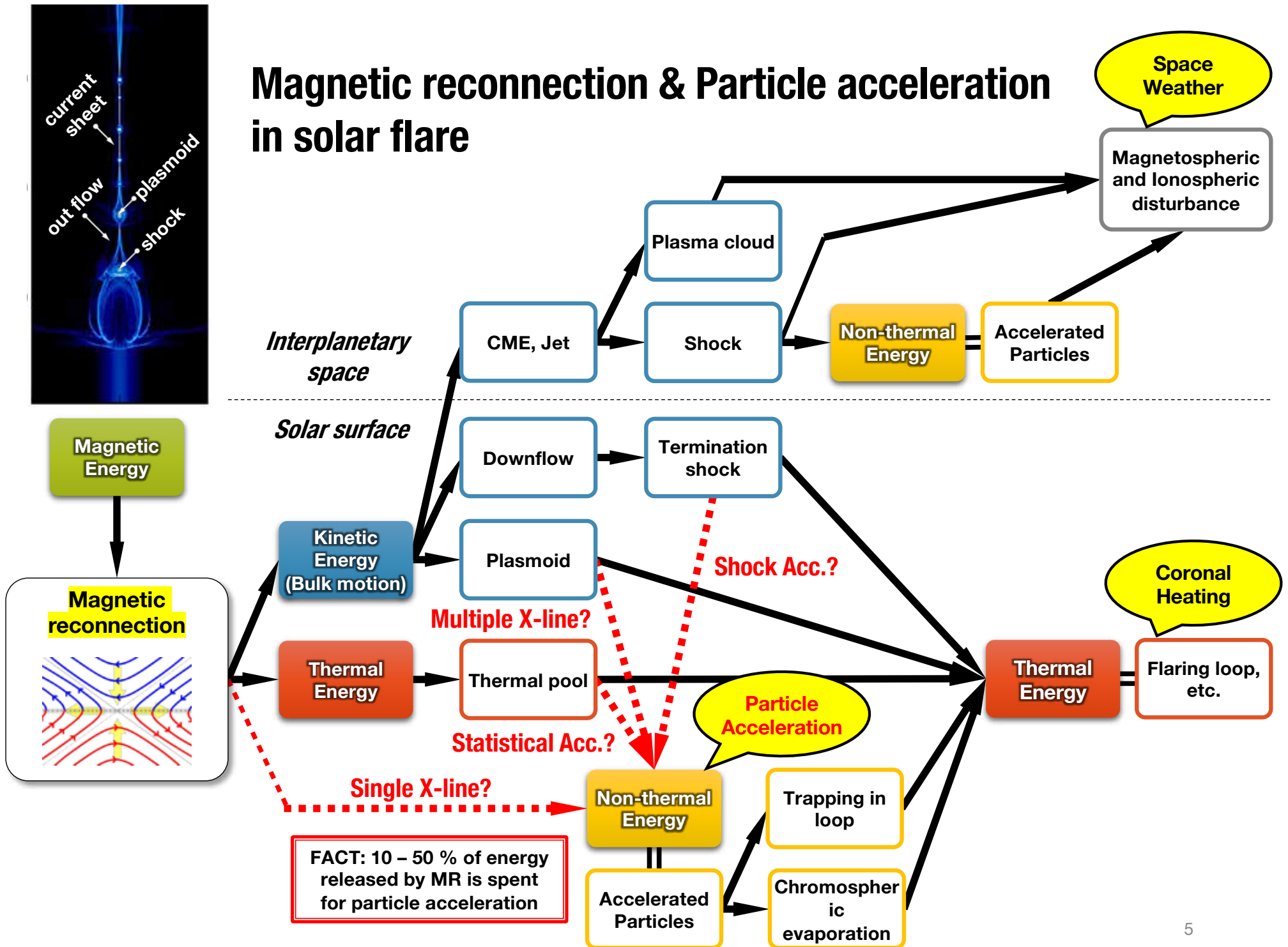
- Reference of other astrophysical objects



Magnetic reconnection & Particle acceleration in solar flare

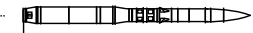
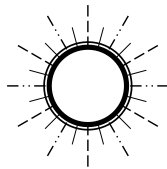


Magnetic reconnection & Particle acceleration in solar flare

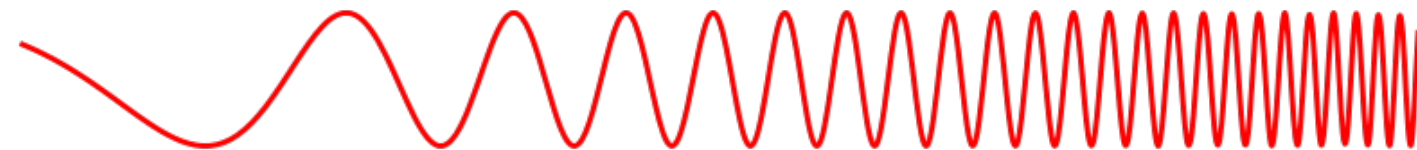




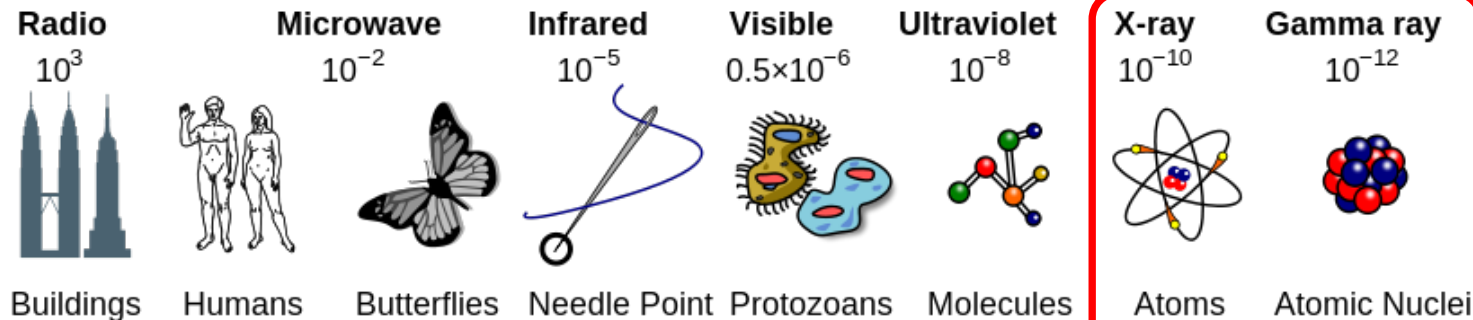
太陽コロナ（フレア）のリモート観測： X線を計測する



Penetrates Earth's Atmosphere?

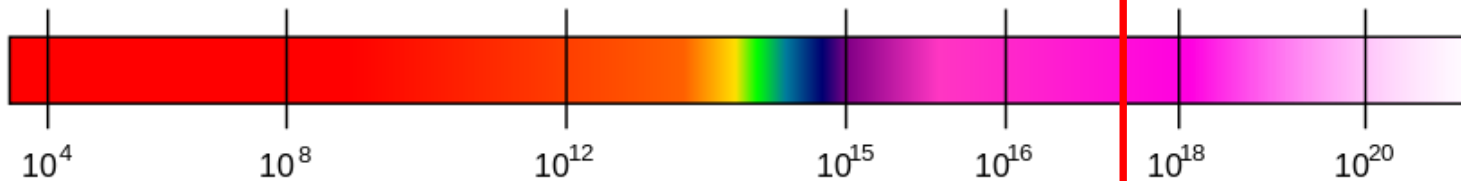


Radiation Type
Wavelength (m)

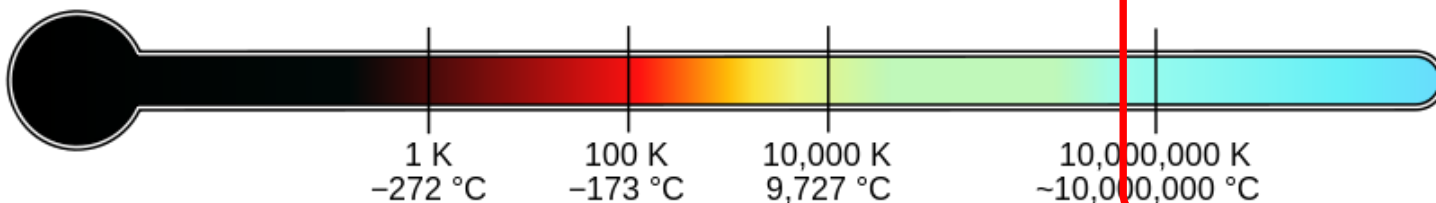


Approximate Scale of Wavelength

Frequency (Hz)

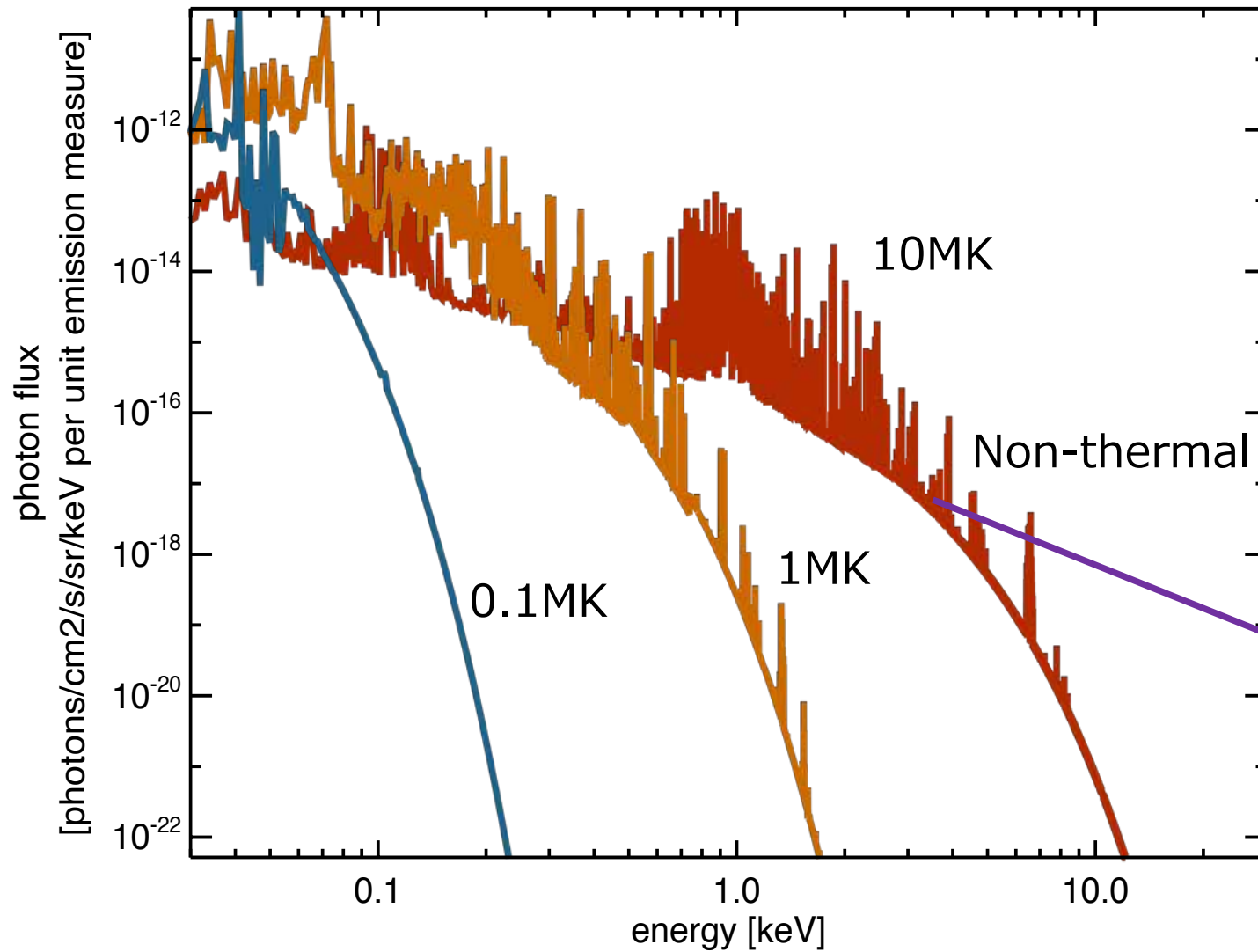
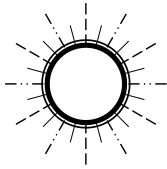


Temperature of objects at which this radiation is the most intense wavelength emitted



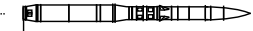
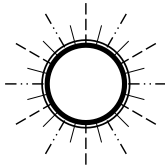


太陽コロナ（フレア）のリモート観測： X線を計測する





理想の太陽コロナ（フレア）観測

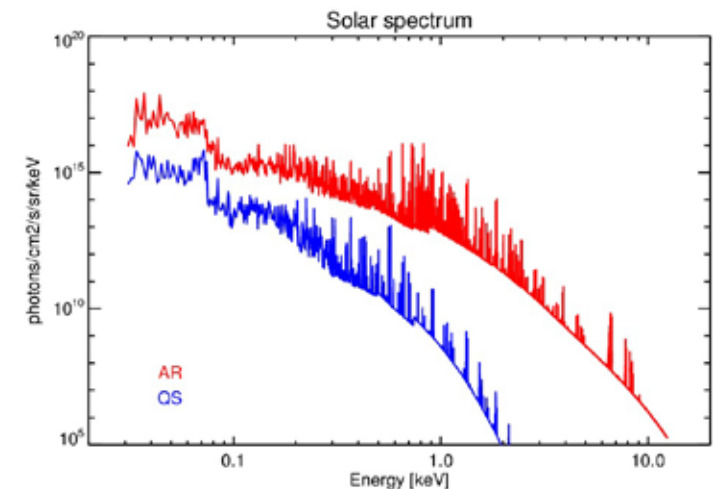


観測に対する要求

- 高温および非熱的プラズマを検出可能なこと
- プラズマの物理量を空間・時間分解して取得できること

観測方法

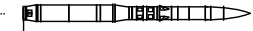
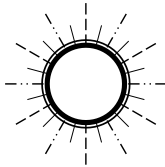
- **X線用ミラーと高速度カメラを用いた光子計測型・集光撮像分光観測**
 - **X線帯域**: 高温および非熱的プラズマに対する高い感度
 - **連続光成分**: 急激な温度変化に対する素早い反応
 - **輝線**: プラズマに対する豊富な情報を含む
 - **ミラーを用いた集光撮像**: 高いダイナミックレンジと空間分解能を確保するため
 - **高速度カメラ**: 時間分解能を確保するため
 - **分光**: 物理量を取得するため



空間・時間・エネルギーの情報を同時に得る!!



Focusing Optics X-ray Solar Imager (FOXSI)



太陽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



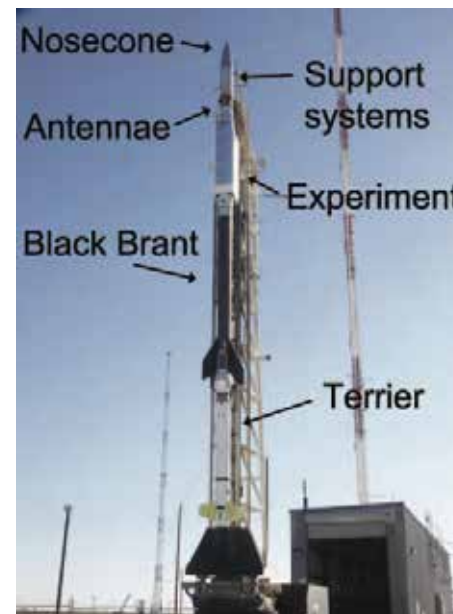
FOXSI-1
2012年



FOXSI-2
2014年



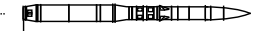
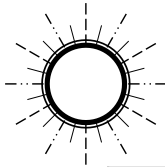
FOXSI-3
2018年







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



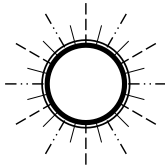
FOXSI シリーズの発展



	FOXSI-1	FOXSI-2	FOXSI-3	FOXSI-4
				
観測対象	静穏領域	活動領域 静穏領域	活動領域 静穏領域	太陽フレア
観測波長	<p>硬X線 5~30 keV</p> <p>軟X線 0.5~10 keV</p>			
望遠鏡	7 shells x 7 modules	10 shells x 2 modules 7 shells x 5 modules	(10 shells + blocker) x 1 (7 shells + collimator) x 2 10 shells x 3 modules 7 shells x 1 modules	high resolution optics x 5 10 shells x 2 modules
検出器	Si (7.7 arcsec) x 7 [for hard X-rays]	CdTe (6.7 arcsec) x 2 Si (7.7 arcsec) x 5 [for hard X-rays]	CdTe (6.7 arcsec) x 2 Si (7.7 arcsec) x 4 [for hard X-rays] + CMOS (1.1 arcsec) x 1 [for soft X-rays]	CdTe (6.7 arcsec) x 5 [for hard X-rays] + CMOS (1.1 arcsec) x 2 [for soft X-rays]



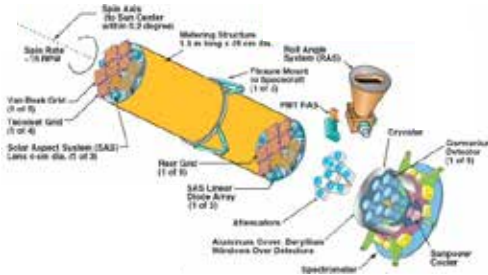
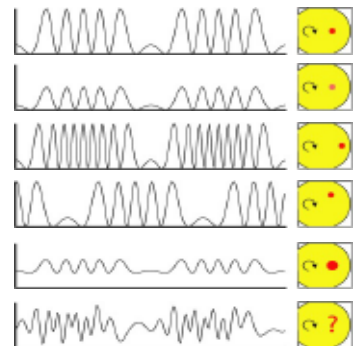
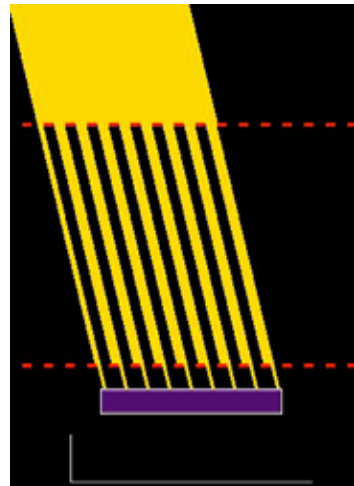
FOXSI-1 によりもたらされたもの 硬X線集光撮像分光観測の実現



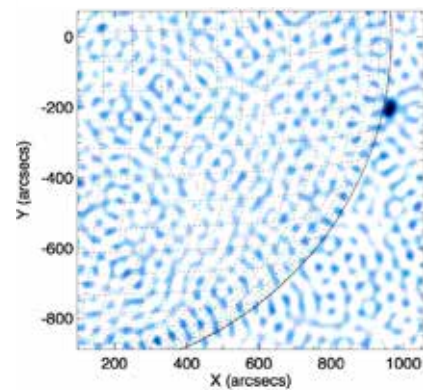
既存の観測装置 (RHESSI など)
すだれコリメータ + 検出器

新しい観測装置 (FOXSI)

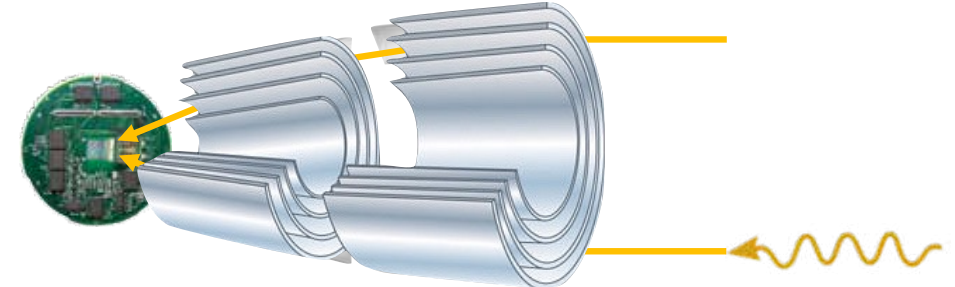
➔ X線斜入射ミラー + 検出器



RHESSI 4-15 keV

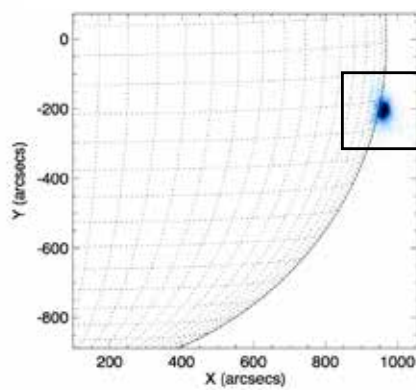


Credit: Chandra telescope

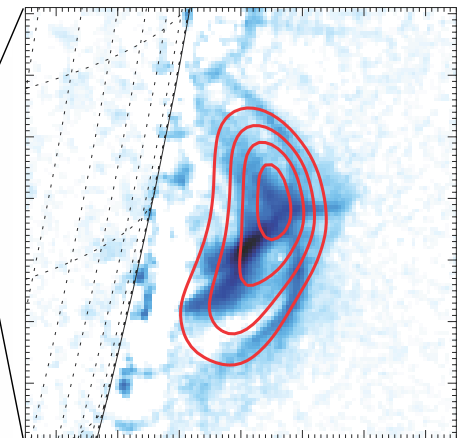


CdTe detector
Furukawa et al. 2019
Wolter-I geometry

FOXSI-1 4-15 keV



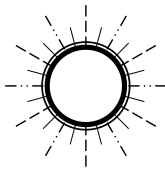
FOXSI-1 4-12 keV



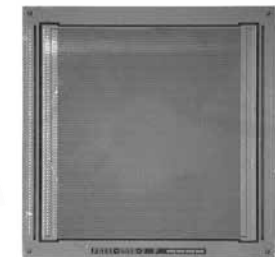
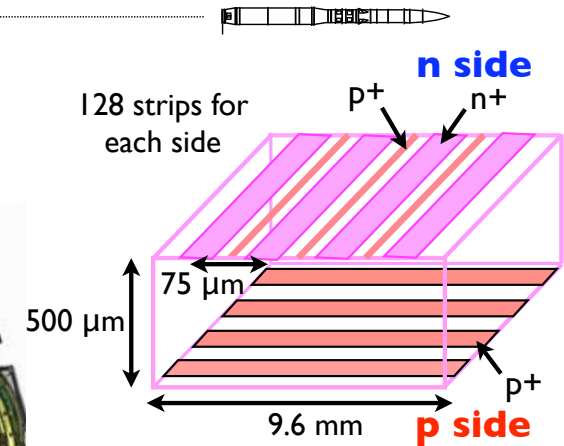
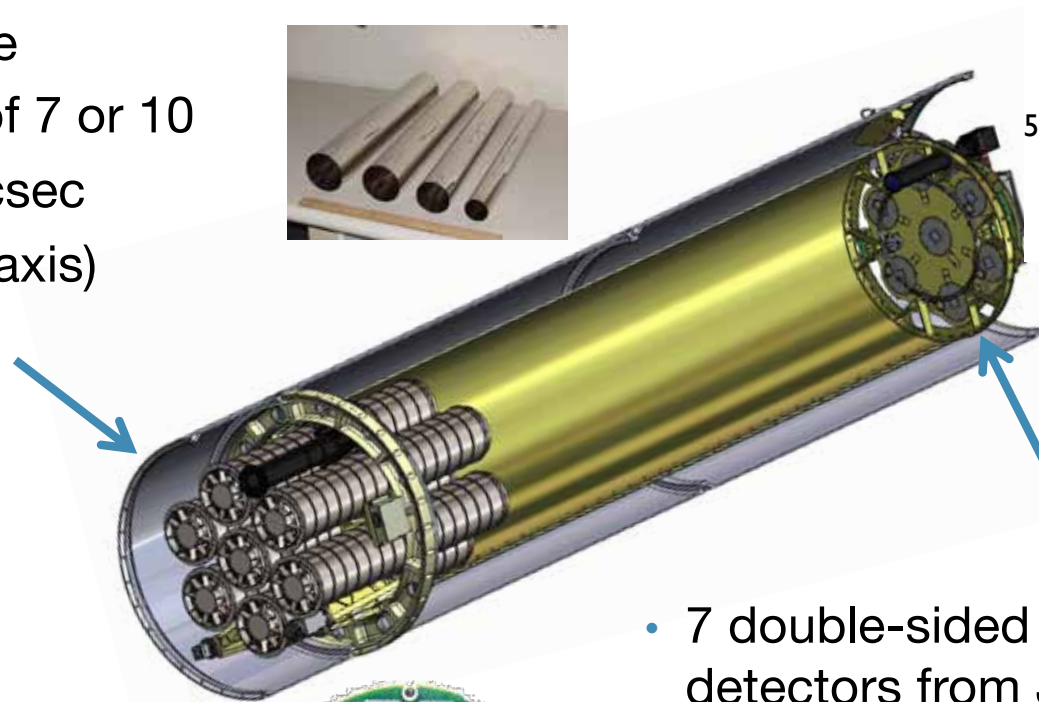


FOXSI-1, -2 の観測装置

(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)

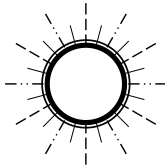


- Replicated Ni optics from NASA/Marshall
- Wolter-I shape
- Nested sets of 7 or 10
- FWHM ~5 arcsec
- HPD 25" (on-axis)

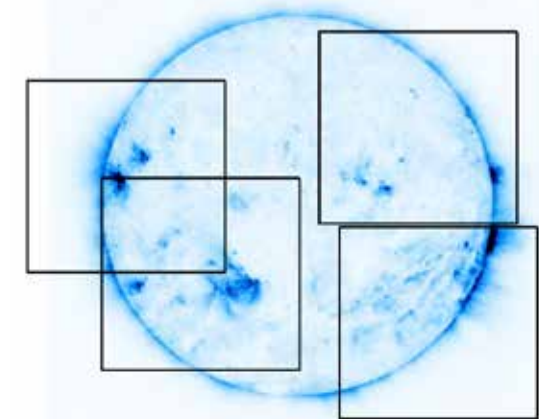
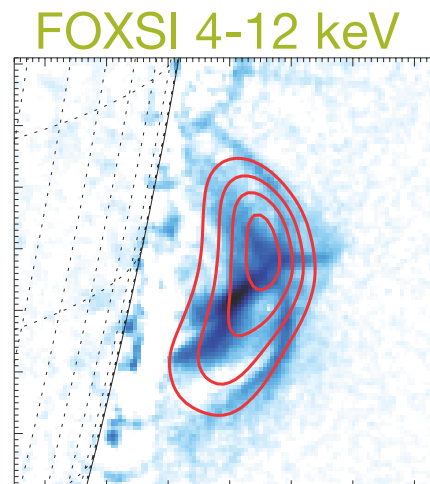
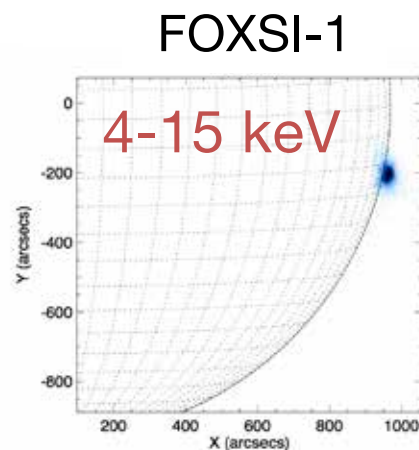
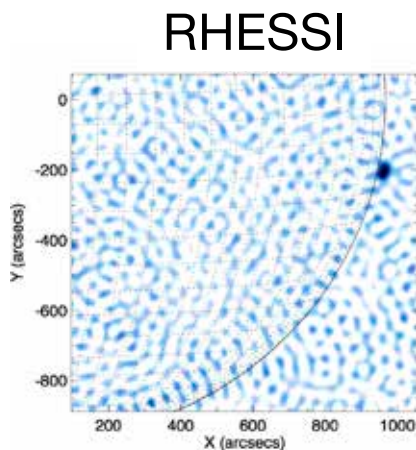
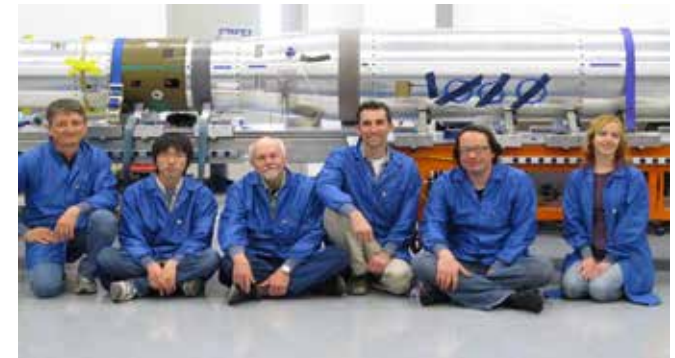
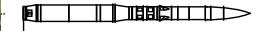


- 7 double-sided Si or CdTe strip detectors from JAXA/ISAS
- 75 (or 60) μm pitch, 500 μm thick
- Read out by low-power, low-noise ASICs

FOXSI-1: 2012年11月2日

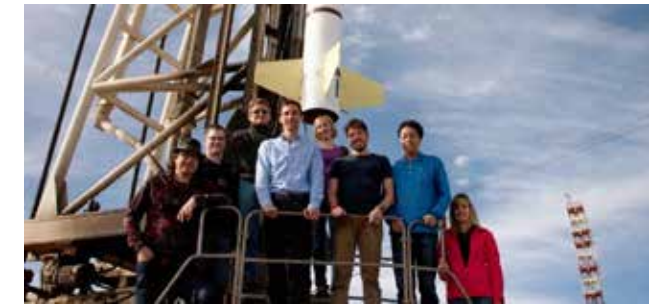
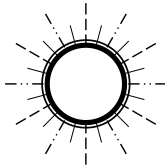


- 1回目のフライト : 6.5 分間の観測
 - 世界初の太陽硬 X 線 (5 keV 以上) 集光観測に成功。
- 問題点 :
 - ミラー 1 台が打ち上げ時の振動でズレた
 - サーマルブランケットが光路を塞いだ
 - 迷光によるバックグラウンドの増加

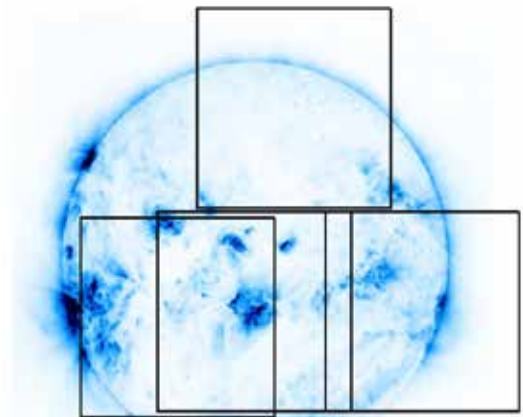
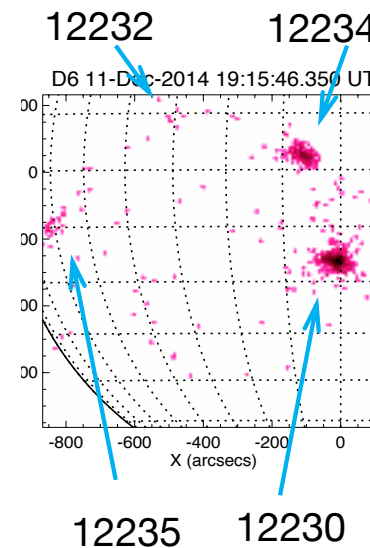
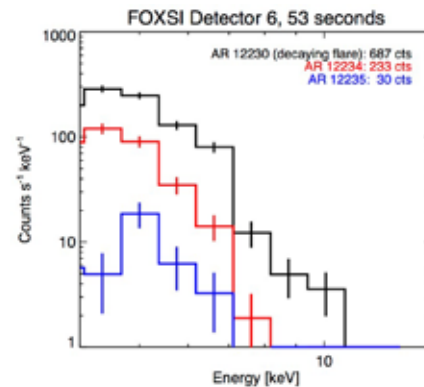


AIA 94A 2012 Nov 2
Launch 17:55 UTC

FOXSI-2: 2014年12月11日



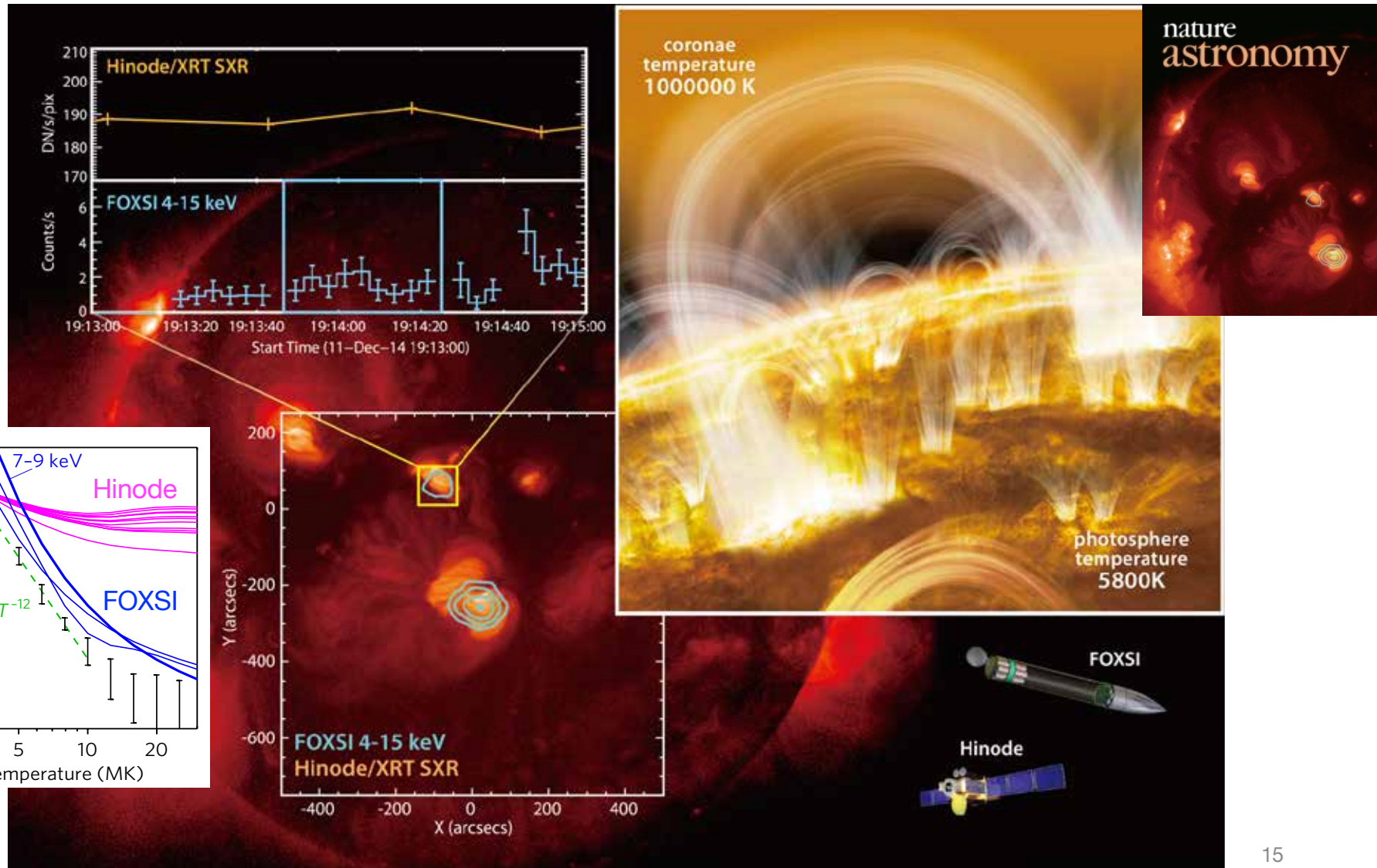
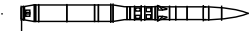
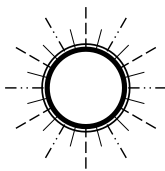
- FOXSI-1からのアップデート:
 - 2つの望遠鏡を10シェルに変更し、感度を向上させた
 - 2つの Si 検出器を CdTe 検出器に置き換え、感度を向上させた
- 2回目のフライト: 6.5 分間の観測
 - 2つのマイクロフレアと、4つの活動領域の硬X線撮像分光観測に成功。
- 問題点:
 - 迷光によるバックグラウンドの増加



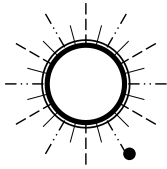
AIA 94A 2014 Dec 11
Launch 19:11 UTC



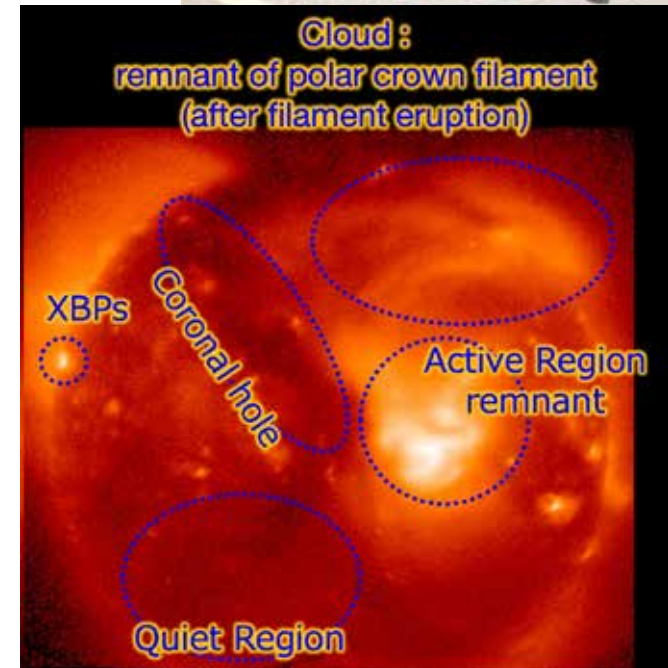
FOXSI-2 の成果は Nature Astronomy に掲載 (Ishikawa et al. 2017)



FOXSI-3: 2018年9月7日



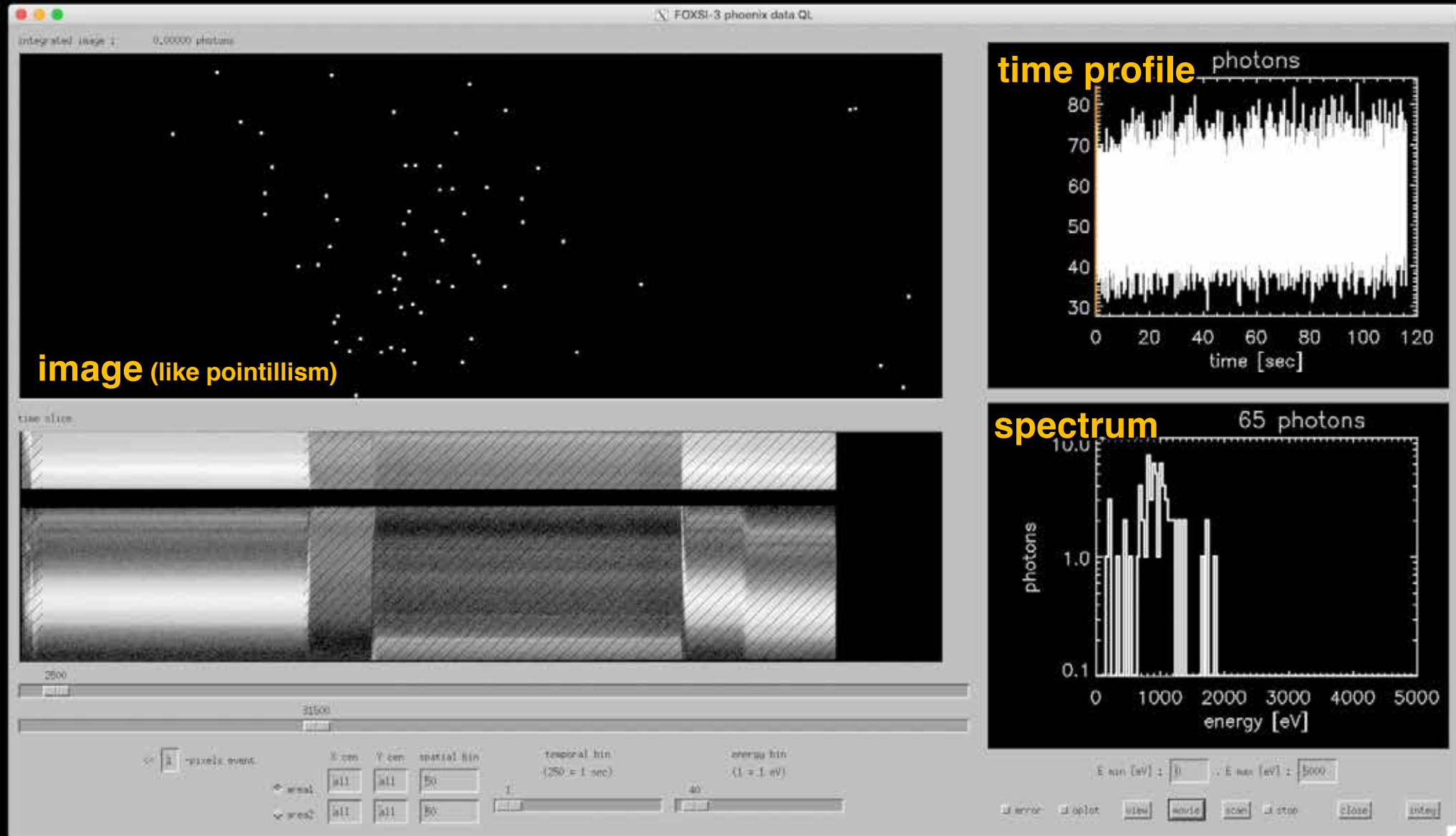
- FOXSI-2 からのアップデート:
 - 望遠鏡にコリメーターまたはブロッカーを設置し、迷光を除去した
 - CMOS 検出器を搭載し、軟X線の集光撮像分光観測を実施した
- 3回目のフライト：約6分間の観測
 - 活動領域、X線輝点、静穏領域、極域フィラメント、コロナホールなどを含む、太陽全面の軟X線撮像分光観測（世界初）に成功。



- 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。

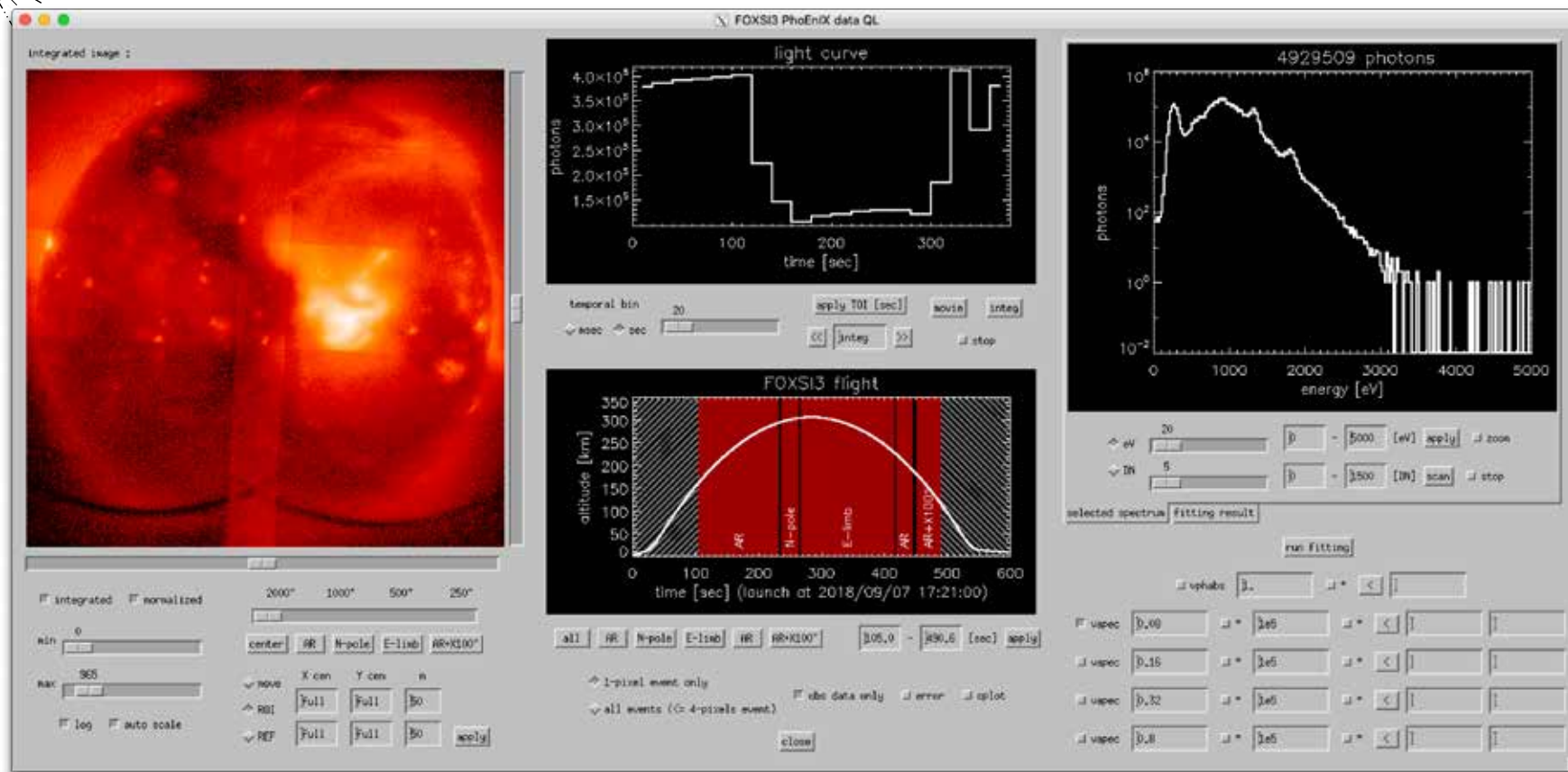
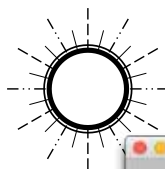
FOXSI-3 Soft X-ray data

250 FPS data (4 ms continuous exposure)



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。

科学データ解析を行いながら、
キャリブレーション中
→ データ解析ワークショップを開催予定



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

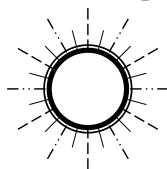
OVERALL GRADE (mark panel overall score with "X")

	Excellent	E/V G	Very Good	VG/ G	Good	G/F	Fair	F/P	Poor
'X': Overall grade.	X								



	July, 2020	2021	2022	2023	2024
Schedule	Proposal was accepted by NASA	Design & Development	Fabrication & Test	Integration & 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

→ **太陽フレア後期における加速・加熱の調査・理解**

• Science objectives:

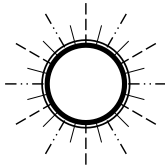
1. Determine **how much particle acceleration** occurs in the gradual phase of a flare
2. Produce images and spectra of flare footpoints **from thermal to non-thermal energies**
3. Determine **where non-thermal sources and heated plasma** are located in a given coronal configuration
4. Measure the spatial 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)



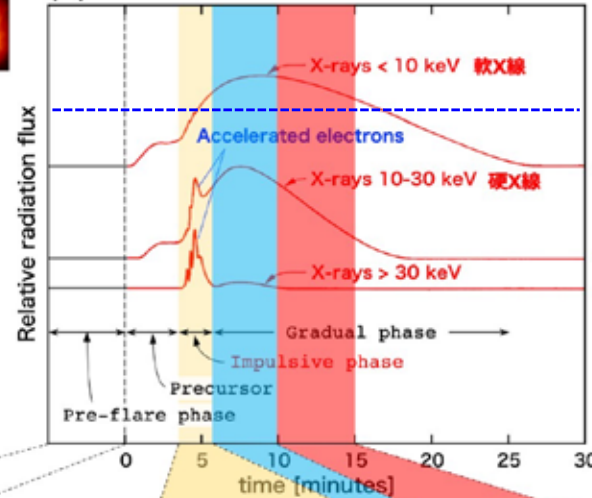
FOXSI-4 で実施するフレアキャンペーン



(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



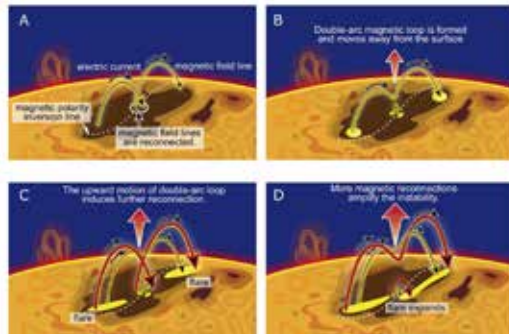
> GOES C5-class

(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	-	$2 \text{ MK} \rightarrow 10 \text{ MK}$	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	$\sim 3 - 5 \text{ MK}$	$\sim 3 - 5 \text{ MK} \rightarrow \sim 10 - 20 \text{ MK}$	$\sim 10 \text{ MK}$

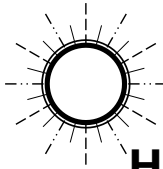
太陽のX線強度をリアルタイムでモニター（GOES衛星を使用予定）、事前のフレア規模予測も参考にし、X線強度が閾値を超えた時点で打ち上げを行う。

Prediction of solar flares

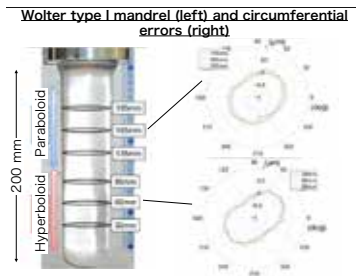


Kusano+ 2020

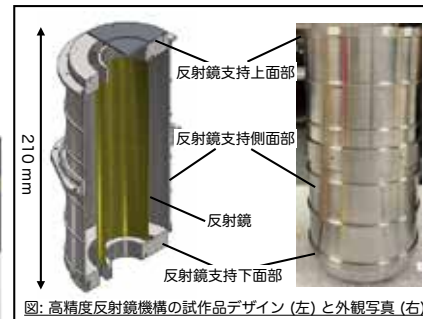
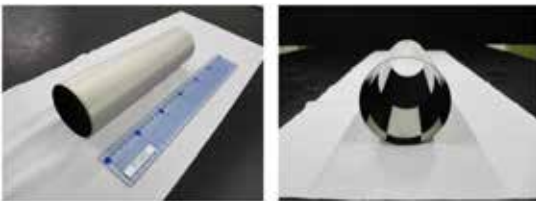
FOXSI-4 によりもたらされるの 新機軸の太陽フレア高エネルギープラズマ観測



High-precision electroformed X-ray mirror

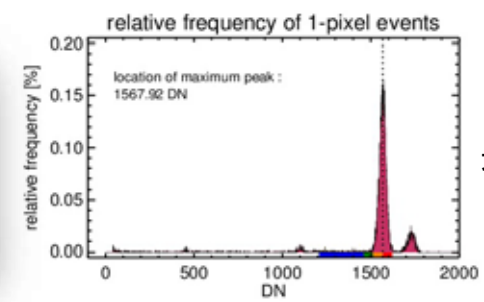
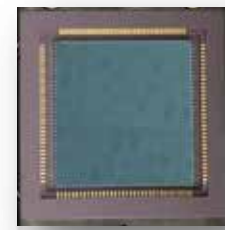


- Goal (cf. FOXSI-3)
- $< 10''$ HPD ($\leftarrow 30''$ HPD)
 - $< 3''$ FWHM ($\leftarrow 5''$ FWHM)



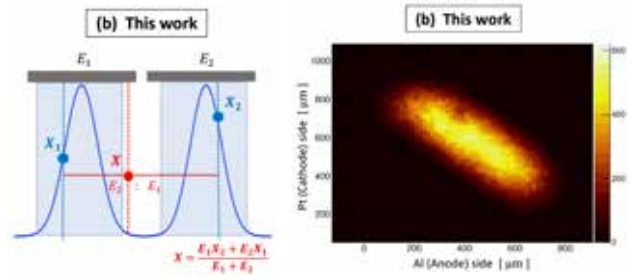
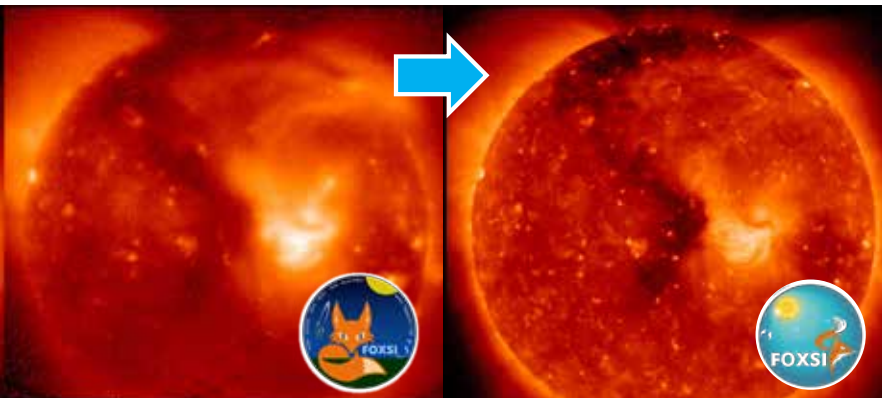
Updated CMOS (for soft X-rays) & CdTe (for hard X-rays) detectors

- CMOS detector (cf. FOXSI-3)
- 25 μm depletion layer thickness ($\leftarrow 4 \mu\text{m}$) for
 - Higher sensitivity to high-energy X-rays
 - Higher robustness against X-rays



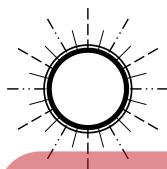
CMOS の
光子計測能力
(^{55}Fe 線源)

- CdTe detector (cf. FOXSI-3)
- Position resolution ($\sim 30 \mu\text{m}$ $\leftarrow 60 \mu\text{m}$)
 - High Count Rate ($\sim 5 \text{ k events / s / detector}$ $\leftarrow 500 \text{ events / s / detector}$)



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)
Säm Krucker (Co-I)
Milo Buitrago-Casas
J. C. Martinez-Oliveros

マネージメント、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

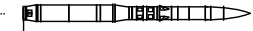
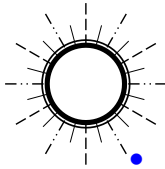
J. Vievering (Co-I)

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。

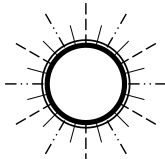
- IXPE の開発で FOXSI のミラーを開発した NASA/MSFC との協力関係を構築していた。

- **今後、科学的貢献を更に加速させていく。**

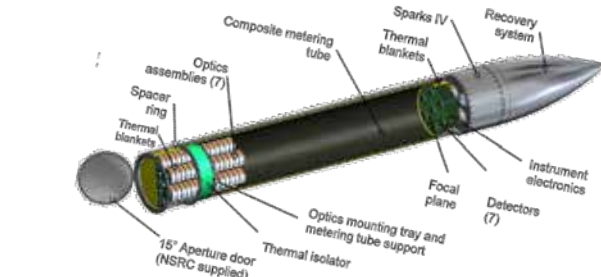
- **FOXSIのデータを用いたデータ解析WSの開催を予定。**



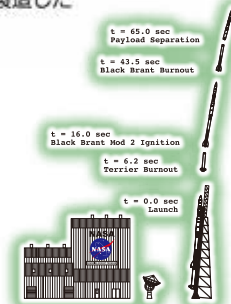
観測ロケット実験 FOXSI の先



ロケット実験
FOXSI-1, 2
(2012年, 2014年)



ロケット実験
FOXSI-3
(2018年)



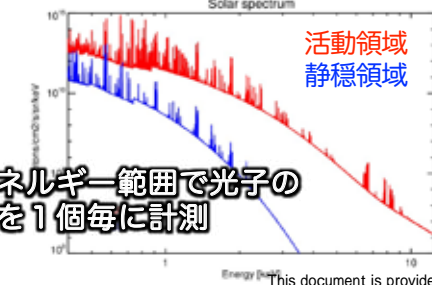
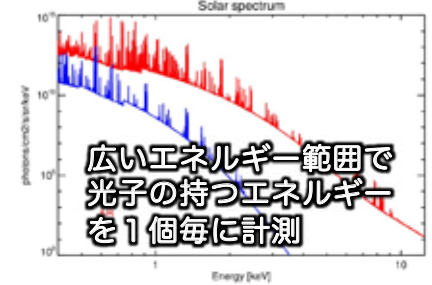
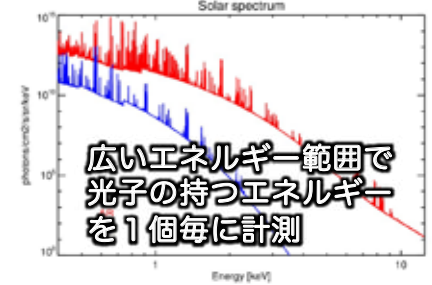
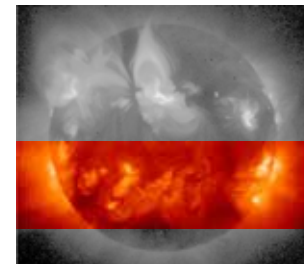
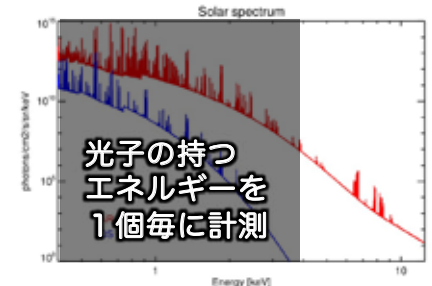
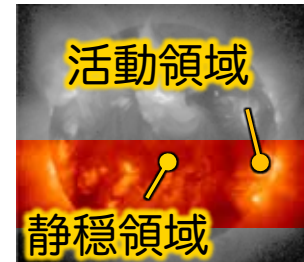
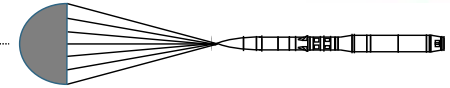
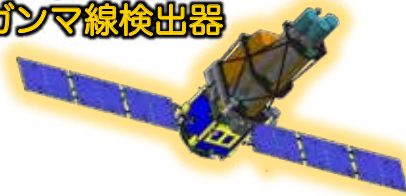
ロケット実験
FOXSI-4
(2024年春)

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





FOXSI-3 flight on 7 September 2018

本研究は、下記のJSPS科研費の助成を受けたものです。

- JP18H03724 (基盤研究(A)、研究代表者：成影典之)
- JP17H04832 (若手研究(A)、研究代表者：石川真之介)
- JP16H02170 (基盤研究(A)、研究代表者：高橋忠幸)
- JP16H03966 (基盤研究(B)、研究代表者：渡辺伸)
- JP15H03647 (基盤研究(B)、研究代表者：成影典之)
- JP24244021 (基盤研究(A)、研究代表者：高橋忠幸)
- JP21540251 (基盤研究(C)、研究代表者：成影典之)
- JP20244017 (基盤研究(A)、研究代表者：高橋忠幸)

