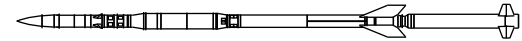
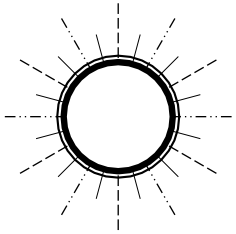




# 日米共同・太陽フレアX線 集光撮像分光観測ロケット実験 FOXSI-4

2024年春打ち上げ予定

JAXA 宇宙科学研究所 2020年度小規模計画に採択



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)

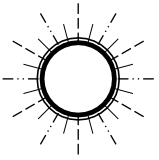
三石 郁之, 瀧川 歩, 作田 皓基, 安福 千貴 (名古屋大学)

川手 朋子 (核融合科学研究所), 石川 真之介 (立教大学)

Lindsay Glesener (University of Minnesota)

FOXSI-4 チーム

# 科学目的



## 新しい観測技術の実証

【1】 世界初となる太陽フレアのX線集光撮像分光観測を成功させる。

## 新しい科学成果の創出

【2-1】 観測から、太陽フレア領域全体の温度構造を精確に評価する。

【2-2】 観測から、太陽フレア領域全体にわたって加速された電子（非熱的成分）を探索する。

【2-3】 観測から、太陽フレアで解放されたエネルギーや加速された電子の伝搬を追跡する。

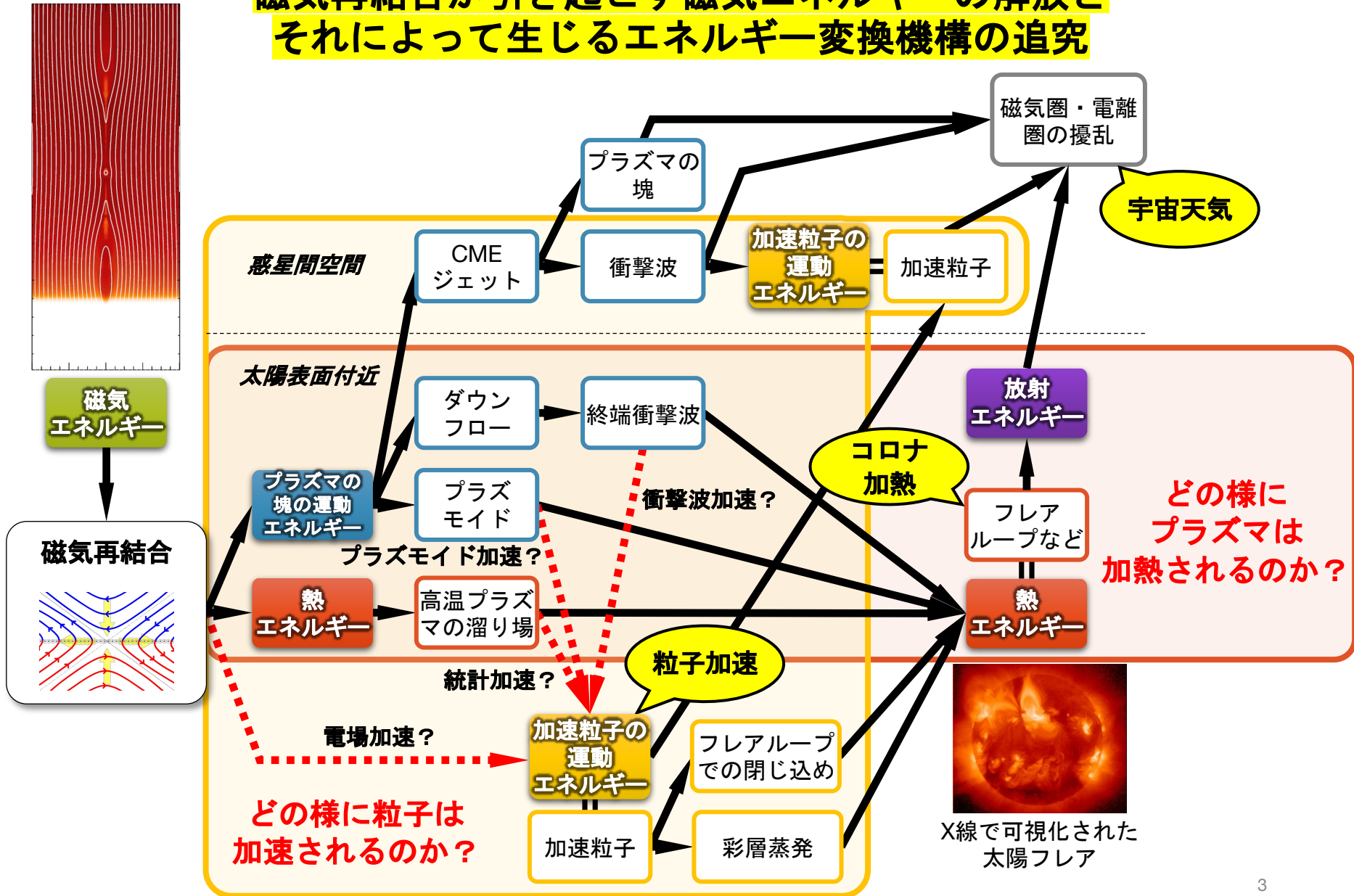
【2-4】 観測と数値計算の両輪で、太陽フレアにおけるエネルギー解放・変換過程を精査する。

## 新しい研究手法の普及

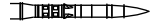
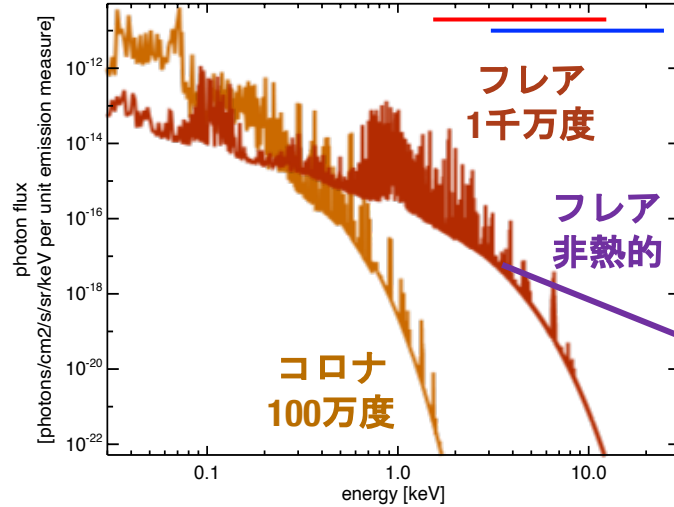
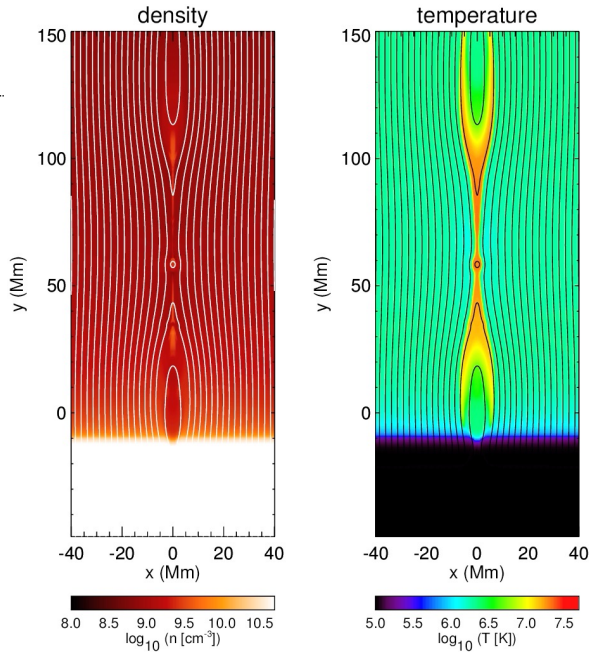
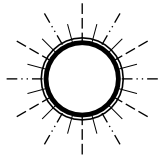
【3】 取得した観測データや解析用ソフトを公開し、この新しい観測手法を普及させる。

# FOXSI-4 の科学意義

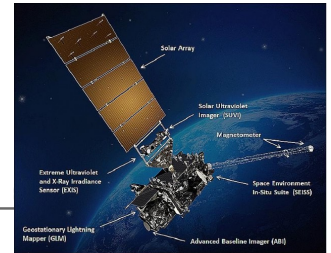
磁気再結合が引き起こす磁気エネルギーの解放と  
それによって生じるエネルギー変換機構の追究



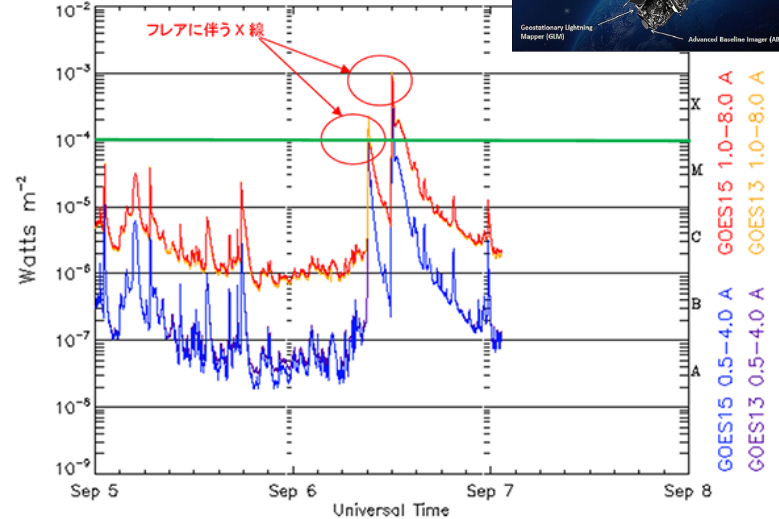
# 太陽X線観測の必要性



## 太陽活動の指標 米国気象衛星 GOES の X線強度計

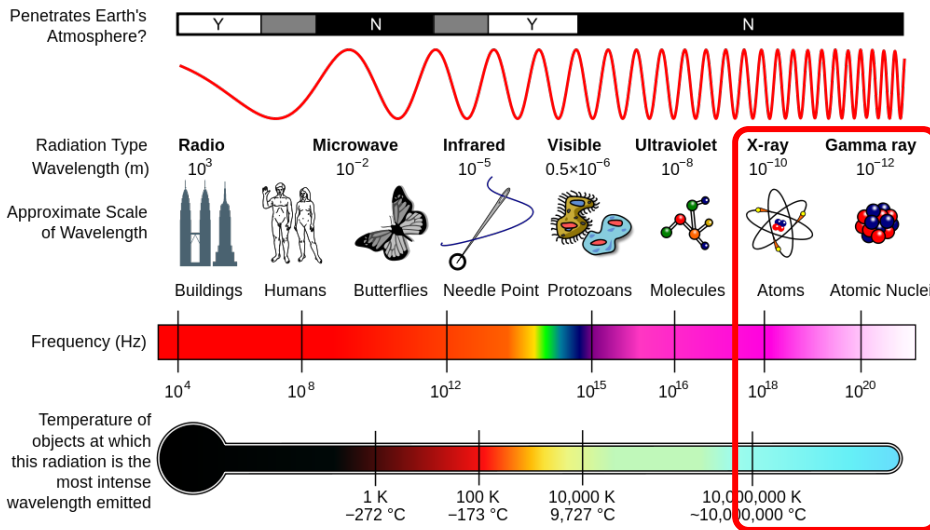


GOES Xray Flux (1-minute data)

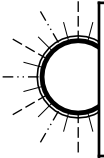


Updated 2017 Sep 7 01:20:12 UTC

NOAA/SWPC Boulder, CO USA



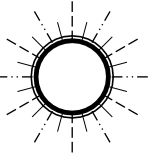
# 太陽X線観測の種類（画像が取得できる観測）



	ダイナミックレンジ	空間分解能	時間分解能	エネルギー分解能	観測データ
<b>【硬X線帯域】</b> すだれコリメーター	×	△	○	○	エネルギー毎の画像(RHESSI) 
<b>【軟X線帯域】</b> X線ミラーとCCDカメラ	○	○	○	×	 広帯域フィルターでの撮像 (「ようこう」軟X線望遠鏡)
狙うべき観測	○	○	○	○	 

ダイナミックレンジを確保した上で、  
空間・時間・エネルギーの情報を同時に得る!!

# 科学目的を達成するための太陽フレア観測

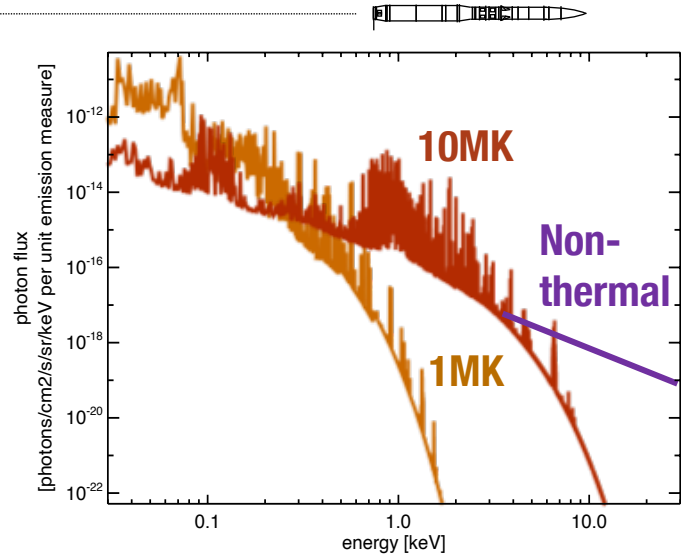


## 観測に対する要求

- 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

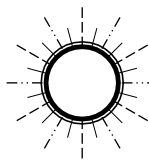
- **X線用ミラーと高速度カメラを用いた光子計測型・集光撮像分光観測**
  - **X線帯域**: 高温および非熱的プラズマを観測するため
    - 連続光成分: 急激な温度変化に対する素早い反応
    - 輝線: プラズマに対する豊富な情報を含む
  - **ミラーを用いた集光撮像**: 高いダイナミックレンジと空間分解能を確保するため
  - **高速度カメラ**: 時間分解能を確保するため
  - **分光 (エネルギー分解)**: 物理量を取得するため



ダイナミックレンジを確保した上で、  
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



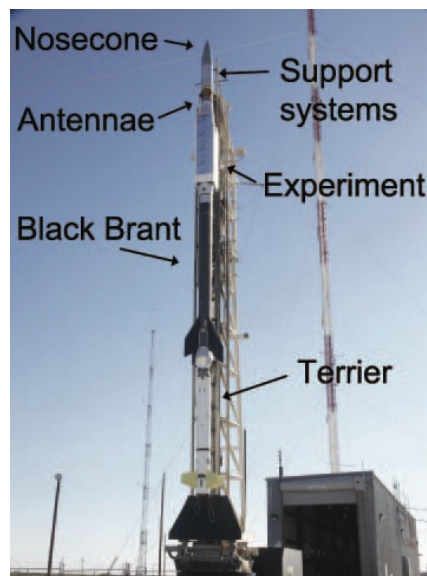
FOXSI-1  
2012年



FOXSI-2  
2014年



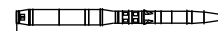
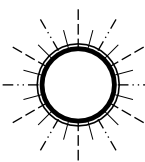
FOXSI-3  
2018年



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

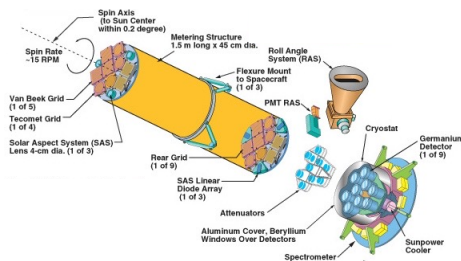
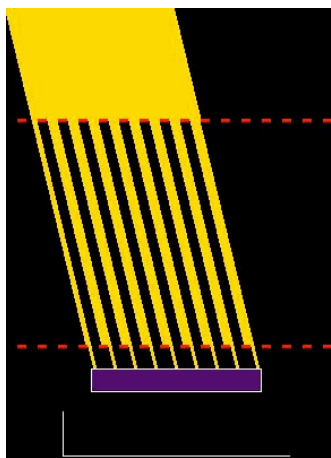


# FOXSI-1: 2012年11月2日 により 太陽硬X線集光撮像分光観測が実現 (世界初)

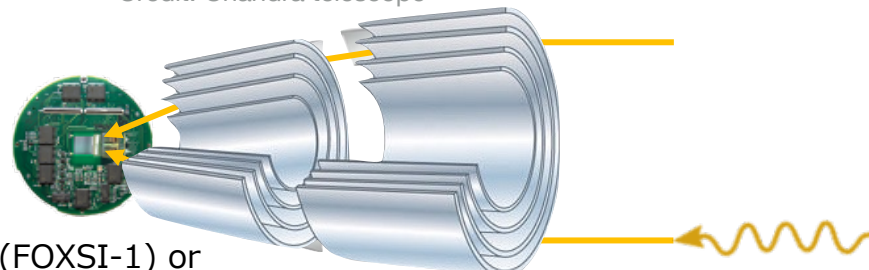


既存の観測装置 (RHESSI など)  
すだれコリメータ + 検出器

新しい観測装置 (FOXSI)  
X線斜入射ミラー + 検出器

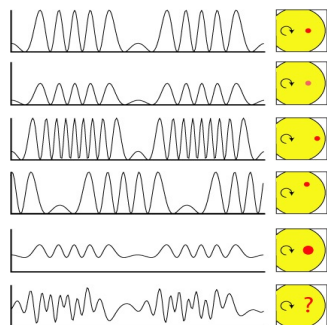


Credit: Chandra telescope

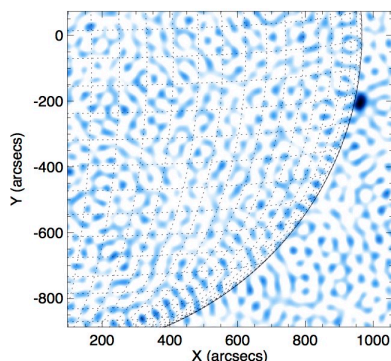


Si (FOXSI-1) or  
CdTe (FOXSI-2 以降)  
detector

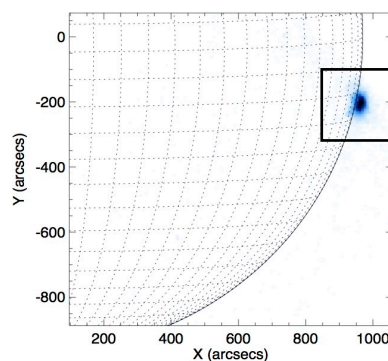
Wolter-I geometry



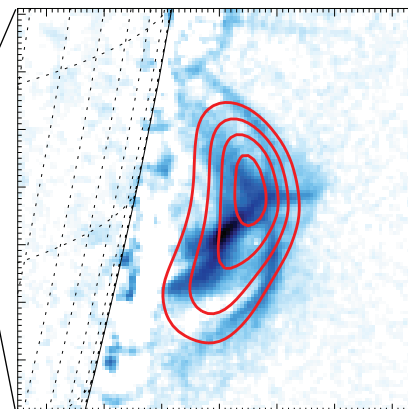
RHESSI 4-15 keV



FOXSI-1 4-15 keV



FOXSI-1 4-12 keV

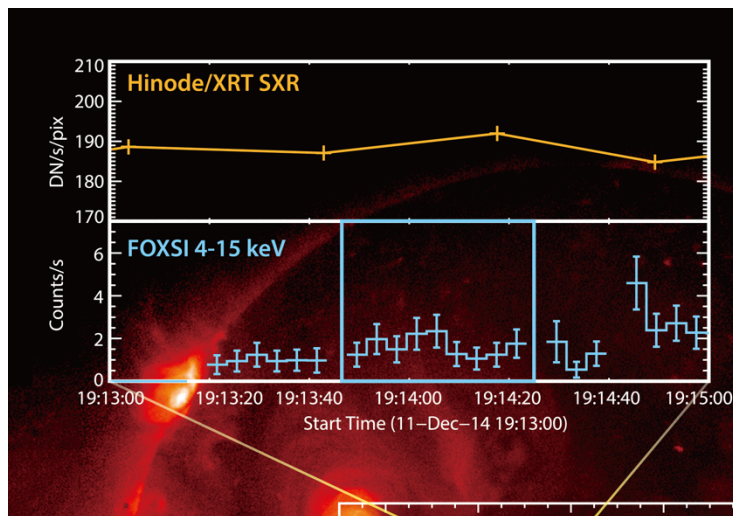
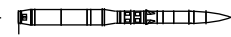
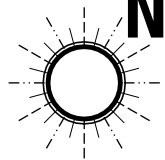


ダイナミックレンジの確保に成功！！

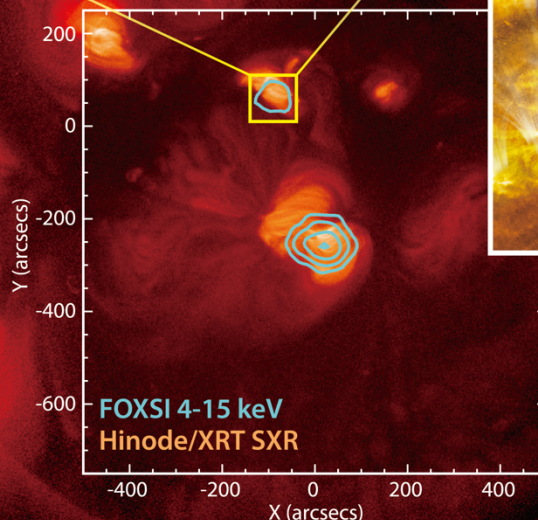
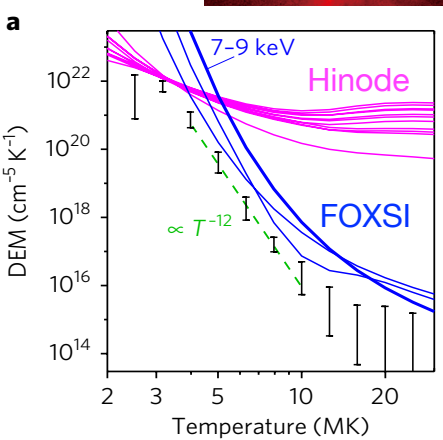




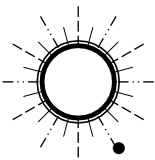
# FOXSI-2: 2014年12月11日の成果は Nature Astronomy に掲載 (Ishikawa et al. 2017)



非フレア領域での超高温成分  
(1000万度以上) の発見



# FOXSI-3: 2018年9月7日

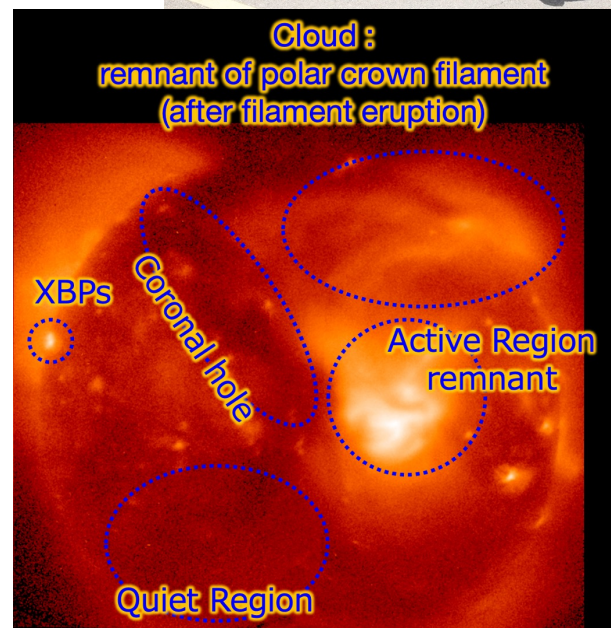


## FOXSI-2 からのアップデート:

- 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
- 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

## 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。

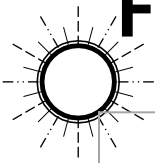






- 問題点 : 装置の問題点はなし
  - ただし、太陽活動が低く、硬X線のデータを十分に取得することができなかった。



# 親プロジェクトに参加する意義と価値 [2.4]

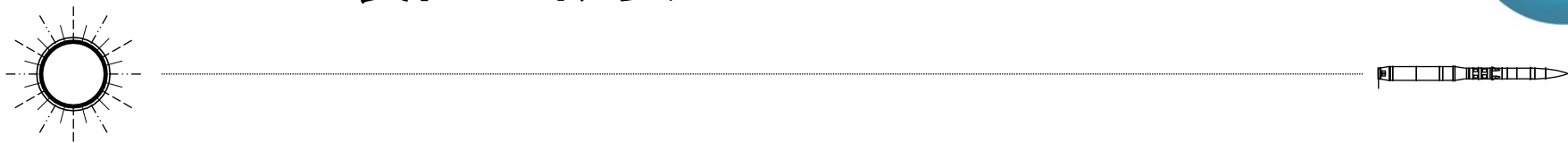
## FOXSI シリーズの発展



	FOXSI-1 (2012)	FOXSI-2 (2014)	FOXSI-3 (2018)	FOXSI-4 (2024)																				
																								
観測対象	静穏領域	活動領域 静穏領域	活動領域 静穏領域	<b>太陽フレア</b>																				
観測波長	硬X線 5~30 keV		軟X線 0.5~10 keV																					
望遠鏡	<p>Glesener, Lindsay 19-HFORT19-0016</p> <p><b>OVERALL GRADE (mark panel overall score with "X")</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Excellent</th> <th>E/V G</th> <th>Very Good</th> <th>VG/ G</th> <th>Good</th> <th>G/F</th> <th>Fair</th> <th>F/P</th> <th>Poor</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>'X': Overall grade.</td> <td>X</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>				Excellent	E/V G	Very Good	VG/ G	Good	G/F	Fair	F/P	Poor	'X': Overall grade.	X									<p><b>high resolution optics x5</b> 10 shells x 2 modules</p>
	Excellent	E/V G	Very Good	VG/ G	Good	G/F	Fair	F/P	Poor															
'X': Overall grade.	X																							
検出器				<p>CdTe (6.7 arcsec) x 5 [for hard X-rays] + CMOS (1.1 arcsec) x 2 [for soft X-rays]</p>																				

FOXSI-4 計画は、2020年7月、**最高評価（Excellent の評価）**で NASA に採択  
2021年9月、**JAXA 宇宙科学研究所 2020年度小規模計画**に採択

# FOXSI の装置の概要

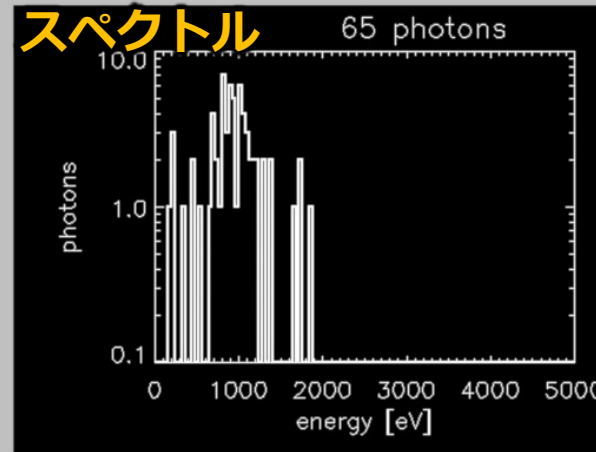
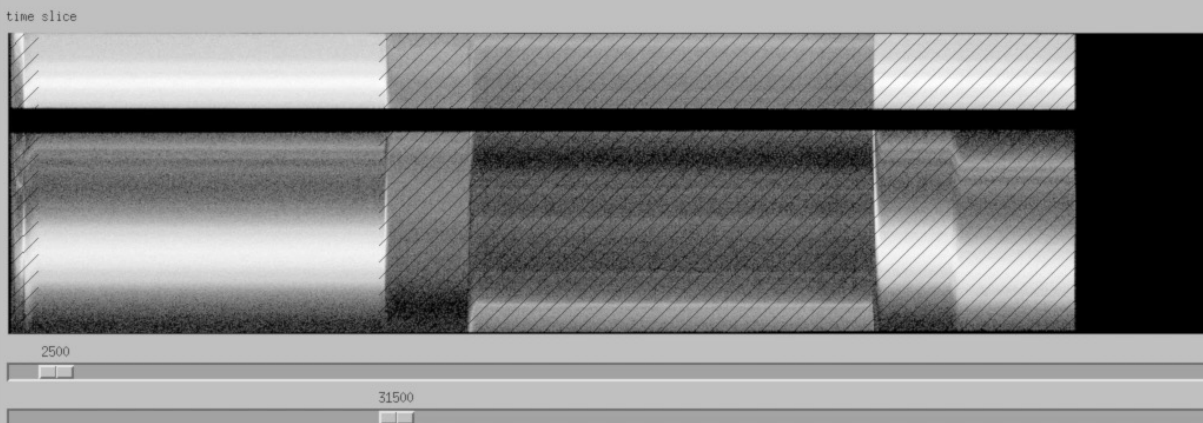
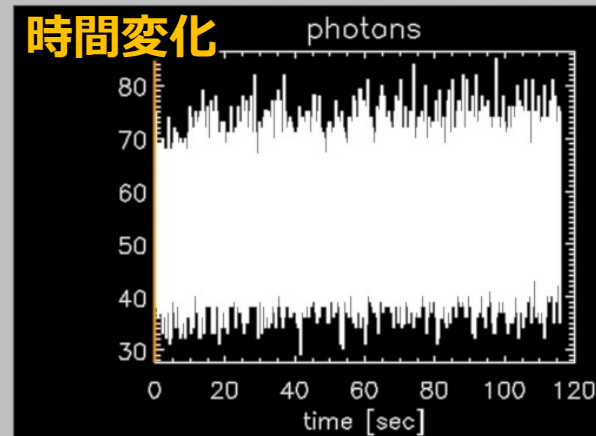
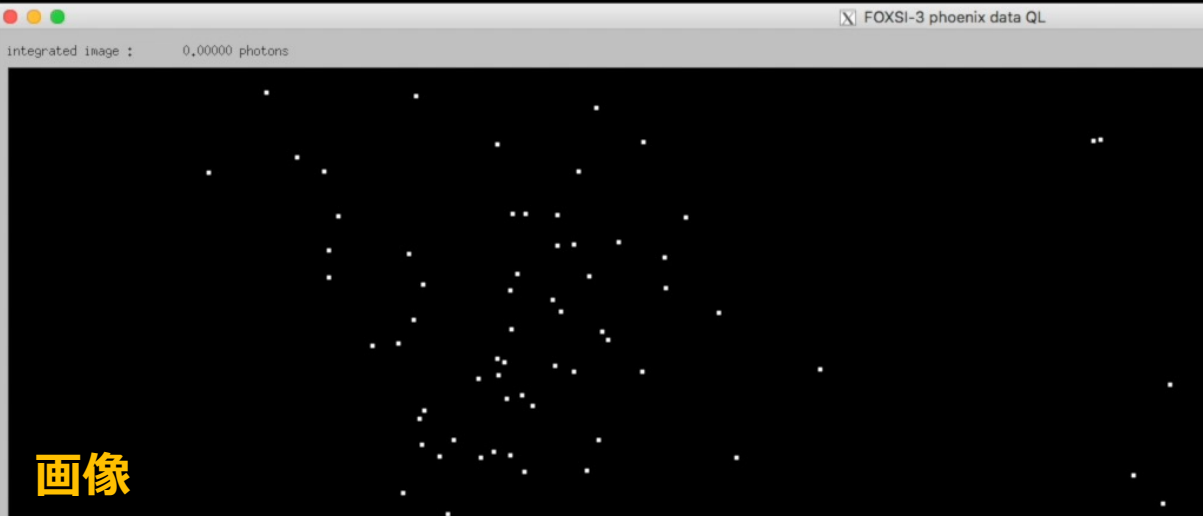


太陽フレアに対するX線集光撮像分光観測  
**「高精度X線集光ミラー」と「X線用高速カメラ」**を組み合わせた望遠鏡で  
 実施する



# FOXSI-3 (2018年打ち上げ) で取得した軟X線データ

## 毎秒 250 枚の高速連続撮像 (4 ミリ秒露光)



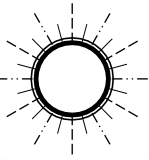
<= 1 -pixels event

	X cen	Y cen	spatial bin	temporal bin (250 = 1 sec)	energy bin (1 = 1 eV)
area1	all	all	50	1	40
area2	all	all	50		

E min [eV] : 0 , E max [eV] : 5000

error oplot view movie scan stop close integ

# FOXSI-4 の装置スペック

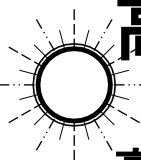


大きな科学目標	本研究の科学目的	調査		装置	
		求める物理量	観測量	デザインパラメータ	要求値
磁気再結合が引き起こす磁気エネルギーの解放とそれによって生じるエネルギー変換機構の追究	Cクラス以上の太陽フレア後期に対する調査			視野	> 360" × 360"
	【1】世界初となる太陽フレアのX線集光撮像分光観測を成功させる。 【2-1】観測から、太陽フレア領域全体の温度構造を精密に評価する。 【2-2】観測から、太陽フレア領域全体にわたって加速された電子(非熱的成分)を探索する。	磁気再結合システムによって生じる構造に対する温度・密度情報の空間分布と時間発展	空間・時間分解した軟X線帯域のX線スペクトル	エネルギー帯	0.5 - 10 keV
				空間分解能	< 3 秒角 FWHM
				時間サンプリング	< 1 秒
				エネルギー分解能	< 0.2 keV FWHM
	【2-3】観測から、太陽フレアで解放されたエネルギーや加速された電子の伝搬を追跡する。 【2-4】観測と数値計算の両輪で、太陽フレアにおけるエネルギー解放・変換過程を精査する。 【3】取得した観測データや解析用ソフトを公開し、この新しい観測手法を普及させる。	加速電子が作る非熱的電子密度フラックスの空間分布と時間発展	空間・時間分解した硬X線帯域のX線スペクトル	ダイナミックレンジ	> 10 <sup>3</sup>
				エネルギー帯	10 - 30 keV
				空間分解能	< 5 秒角 FWHM
時間サンプリング				< 1 秒	
			エネルギー分解能	< 1 keV FWHM	
			ダイナミックレンジ	> 10 <sup>3</sup>	

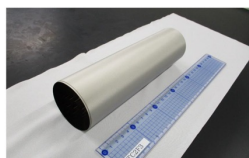
空間分解能  
 時間分解能  
 エネルギー分解能  
 高いダイナミックレンジ  
 を同時に達成する  
 【世界初】の  
 太陽フレアX線観測

# FOXSI-4のキー技術 (太陽フレア観測に向けた改良)

## 高精度電気鋳造X線ミラーとコリメータ

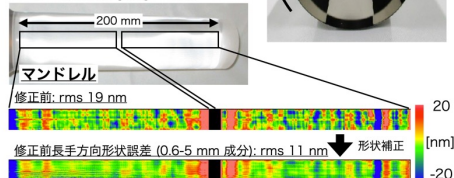
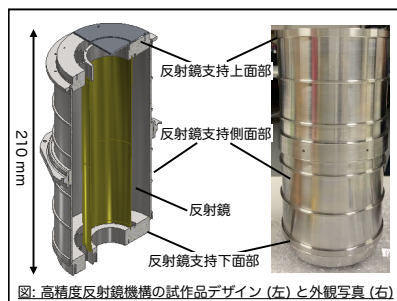
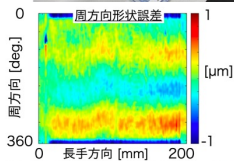


### 高精度電気鋳造X線ミラー (超小型衛星・ロケット実験にもマッチするサイズ)

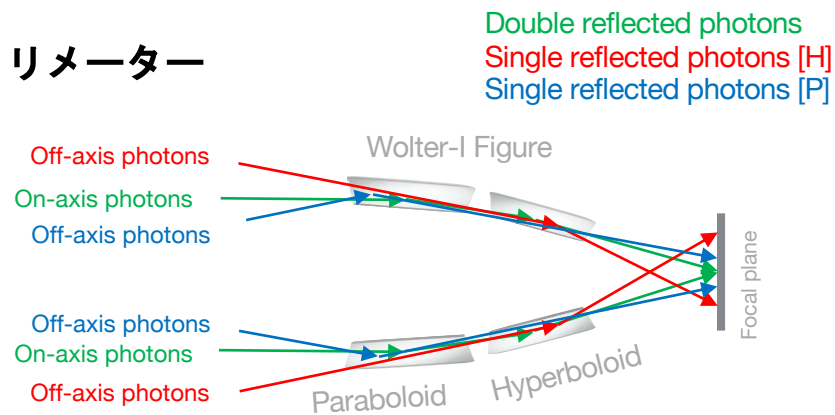


空間分解能の目標 (cf. FOXSI-3)

- <math>< 10''</math> HPD ( $\leftarrow 25''</math> HPD)$
- <math>< 4''</math> FWHM ( $\leftarrow 5''</math> FWHM)$



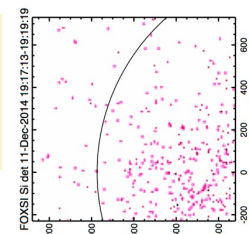
### コリメーター



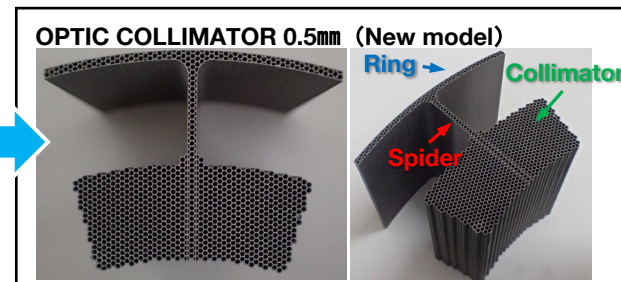
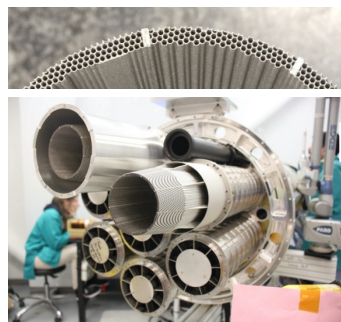
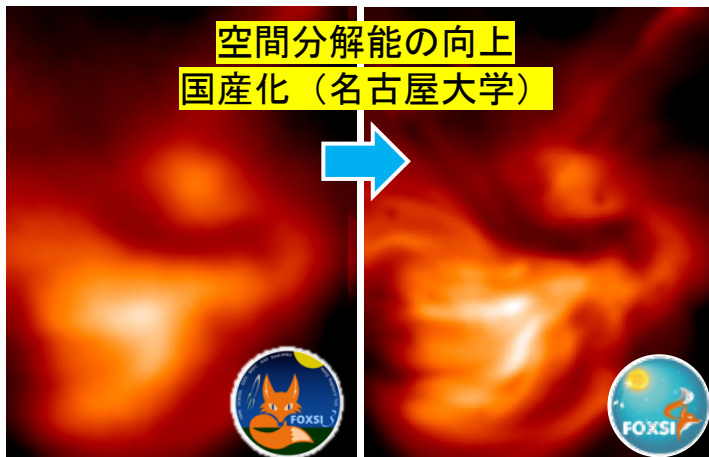
目標 (cf. FOXSI-3)

- アスペクト比 1:270 ( $\leftarrow 1:190$ )
- 穴の直径 0.5 mm ( $\leftarrow 1$  mm)

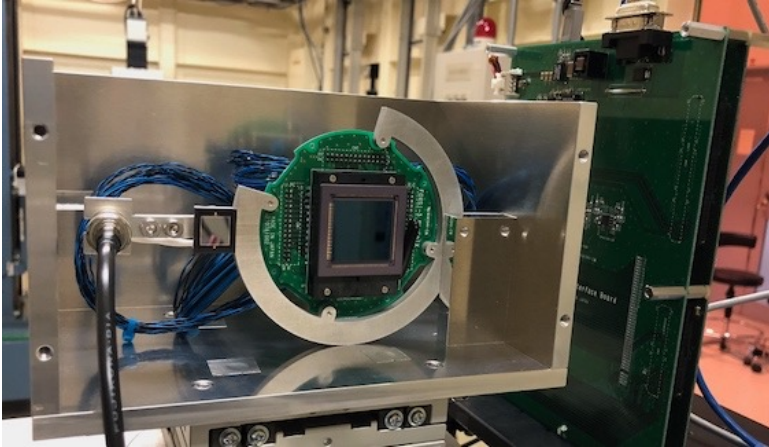
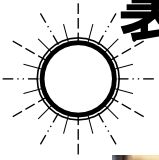
分角レベルの Off-axis photon (迷光) を除去するための高いアスペクト比をもつ多孔構造 → 金属3Dプリンターで造形



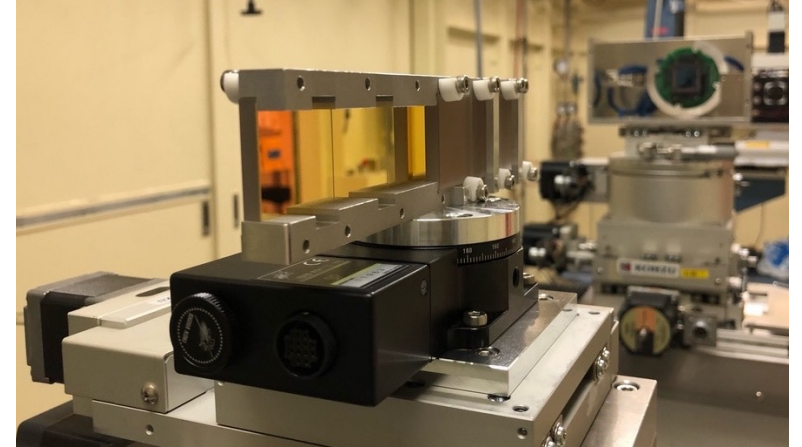
空間分解能の向上  
国産化 (名古屋大学)



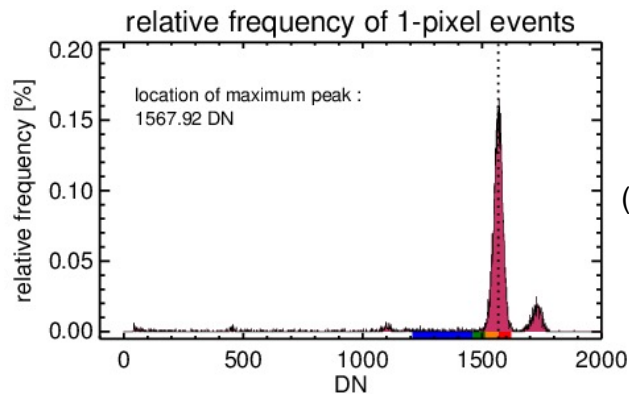
# 軟X線カメラ 裏面照射型CMOS検出器と評価試験



完全空乏化した 25um 厚の感受層を持つ  
裏面照射型検出器



検出器の評価用に開発したミラー（反射）を  
使った減光システム。これにより高次光の影  
響を受けない単色の光での評価が行える。



Photon counting  
capability of  
CMOS  
(with  $^{55}\text{Fe}$  source)

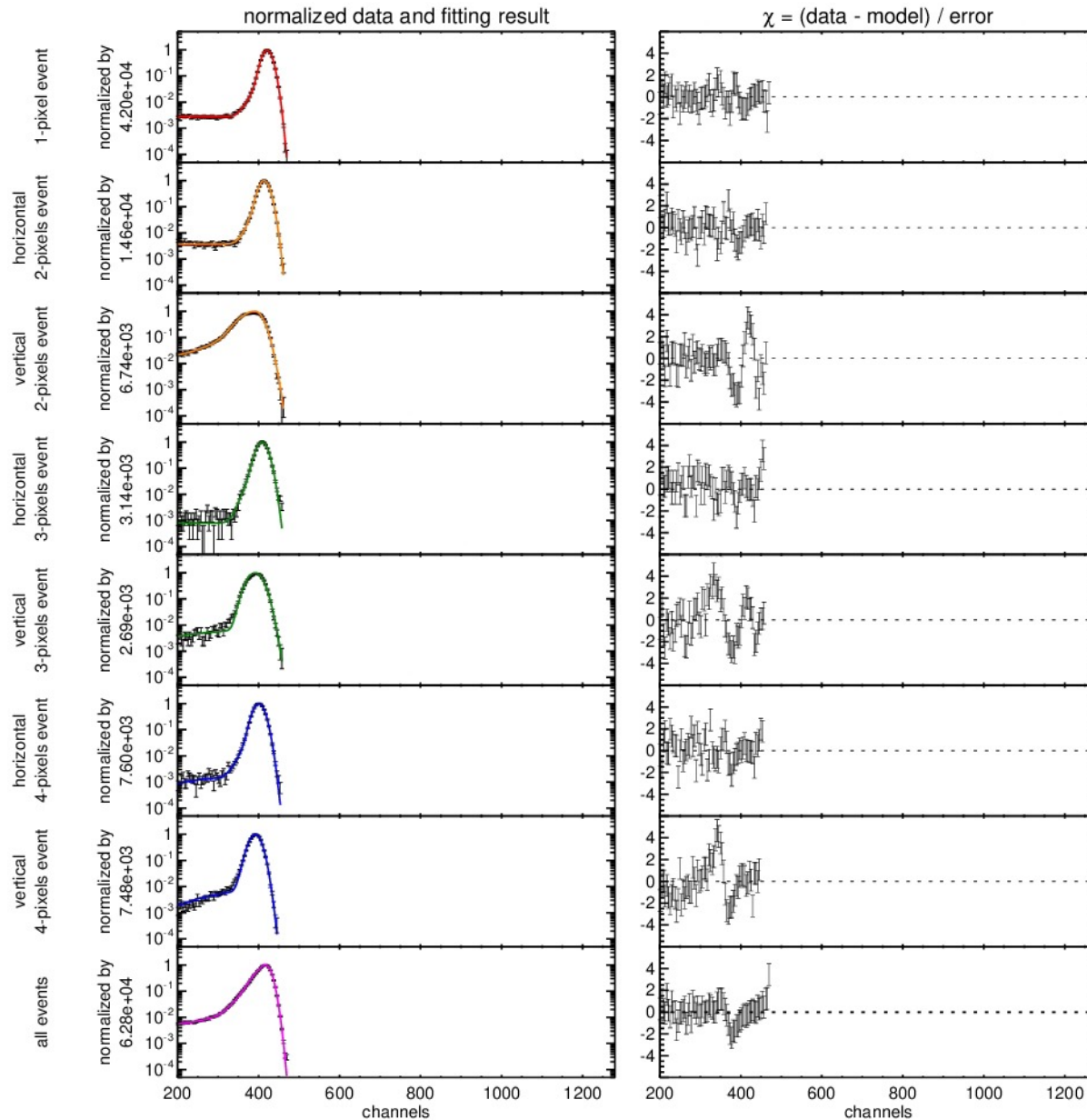
完全空乏化により、FOXSI-3で用いた検出器よりも**シャープなスペクトル**が得られている。また、感受層が厚くなったことにより、**感度の向上**と、**X線によるダメージに対する耐性が向上した**。



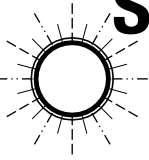
# FOXSI-3で用いたCMOSセンサーの response matrix のモデリング

[modeling step4]

energy = 1568.1 eV



# 軟X線カメラ用ボード (Linux, FPGA込) と SpW Routerボード

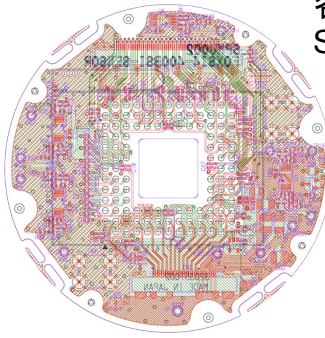


## 軟X線カメラ用ボード (SPMU-002)

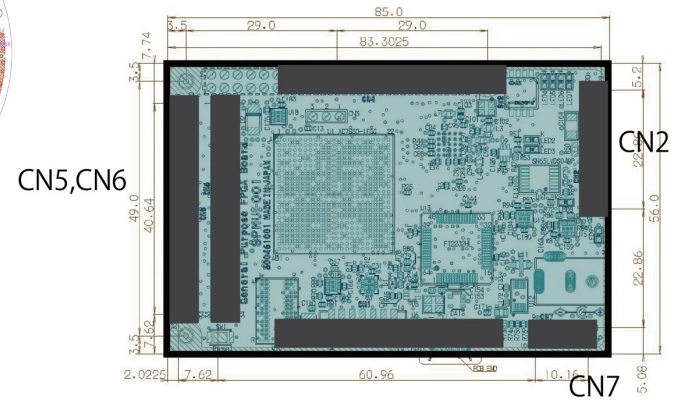
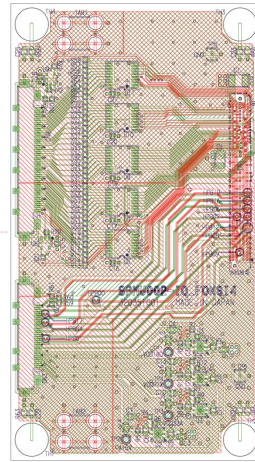
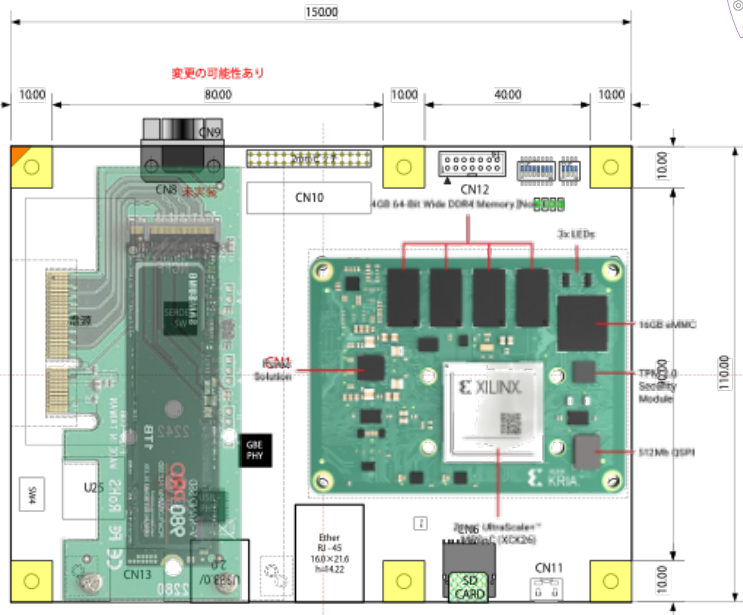
## SpW Routerボード

XILINX SOM (Kria K26) を用いたカメラボード

- SpW
- PCI express
- SSD
- 10 G イーサネット
- USB 3.0/2.0
- イーサネット
- LVDS, LVC MOS



各カメラの入出力 (コマンド、テレメなど) は、SpW 経由で行うが、それをまとめあげるためのボード。

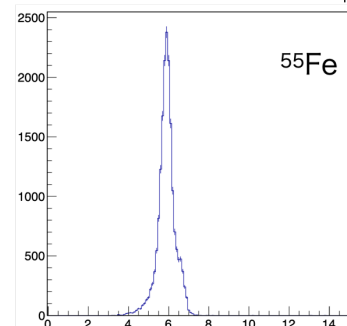
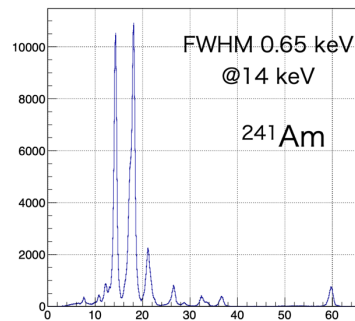
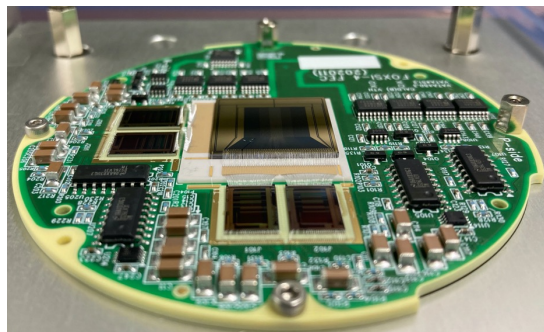


汎用性にも留意し開発中

国立天文台「すばる」望遠鏡用に開発中のCMOS検出器用カメラボードにも水平展開

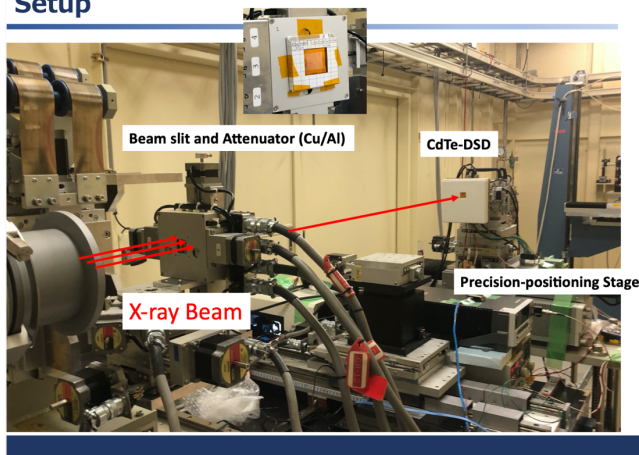
# 硬X線カメラ

## FOXSI-4 CdTe DSD 試作機の製作と評価試験



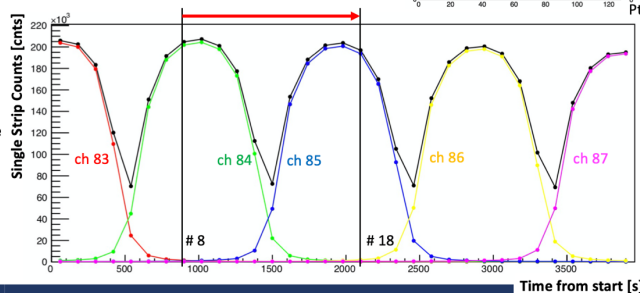
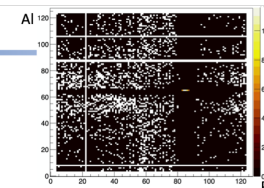
FOXSI-4向けのCdTe半導体両面ストリップ検出器の試作機（2021年10月）の写真と得られたスペクトル。  
（スペクトルは両面とも1stripのイベントのみに適用可能な簡易なエネルギー再構成手法による。）

### Setup



### Pt Side (X-axis) scan

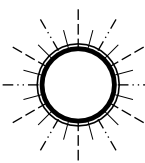
- Ex)
- 80  $\mu\text{m}$  strip pitch (strip 30 $\mu\text{m}$  – gap 50  $\mu\text{m}$ )
  - Energy = 16 keV
  - 4strip/gap, scan per 10  $\mu\text{m}$  = Total 33 point
  - 120 sec integral per 1 point



2021年11月に行ったSPring-8での性能検証試験の様子。上記のFOXSI-4向けのCdTe半導体両面ストリップ検出器の試作機を使用。ペンシルビームで、10  $\mu\text{m}$ ごとのスキャンを複数のエネルギー（7 keV, 16 keV, 25 keV, 35 keV）で実施。位置分解能の性能検証のためのデータ解析を実施中。

→ サブストリップレベル（30 $\mu\text{m}$  = 3 秒角）の位置決定精度を達成できる見込み

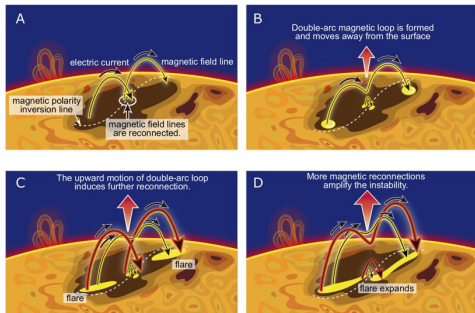
# 打ち上げオペレーション (ポーカーフラット観測ロケット打ち上げ場)



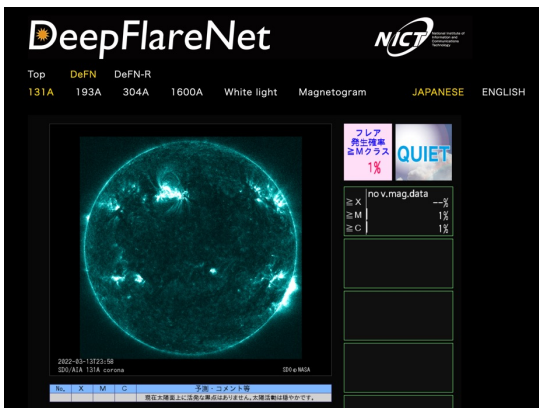
## 2024年春

Prediction of solar flares

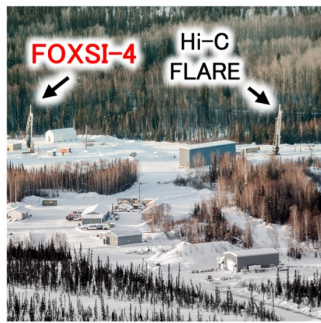
Kusano+ 2020



Nishizuka+



(a) フレアキャンペーンの打ち上げイメージ

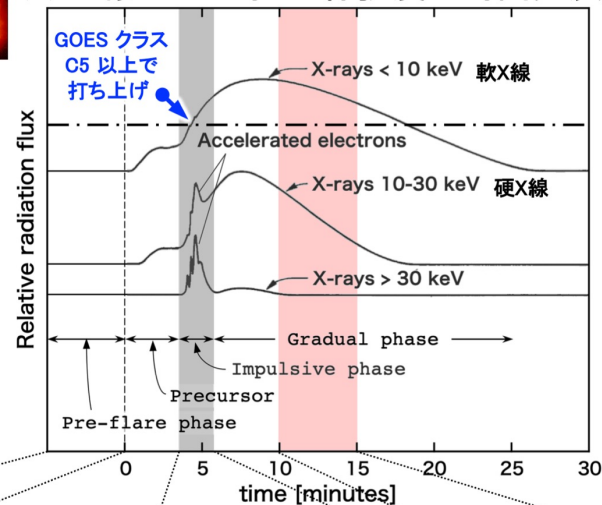


打ち上げ可能状態で待機

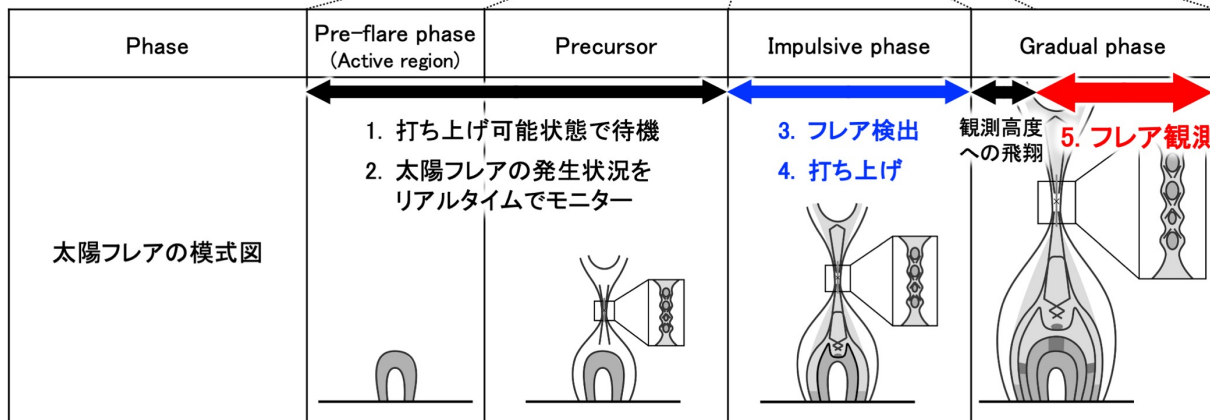


フレア検出後直ちに打ち上げ

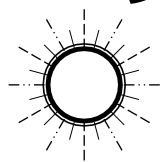
(b) 太陽フレア時のX線強度の時間発展



(c) 打ち上げの手順



# 実施体制



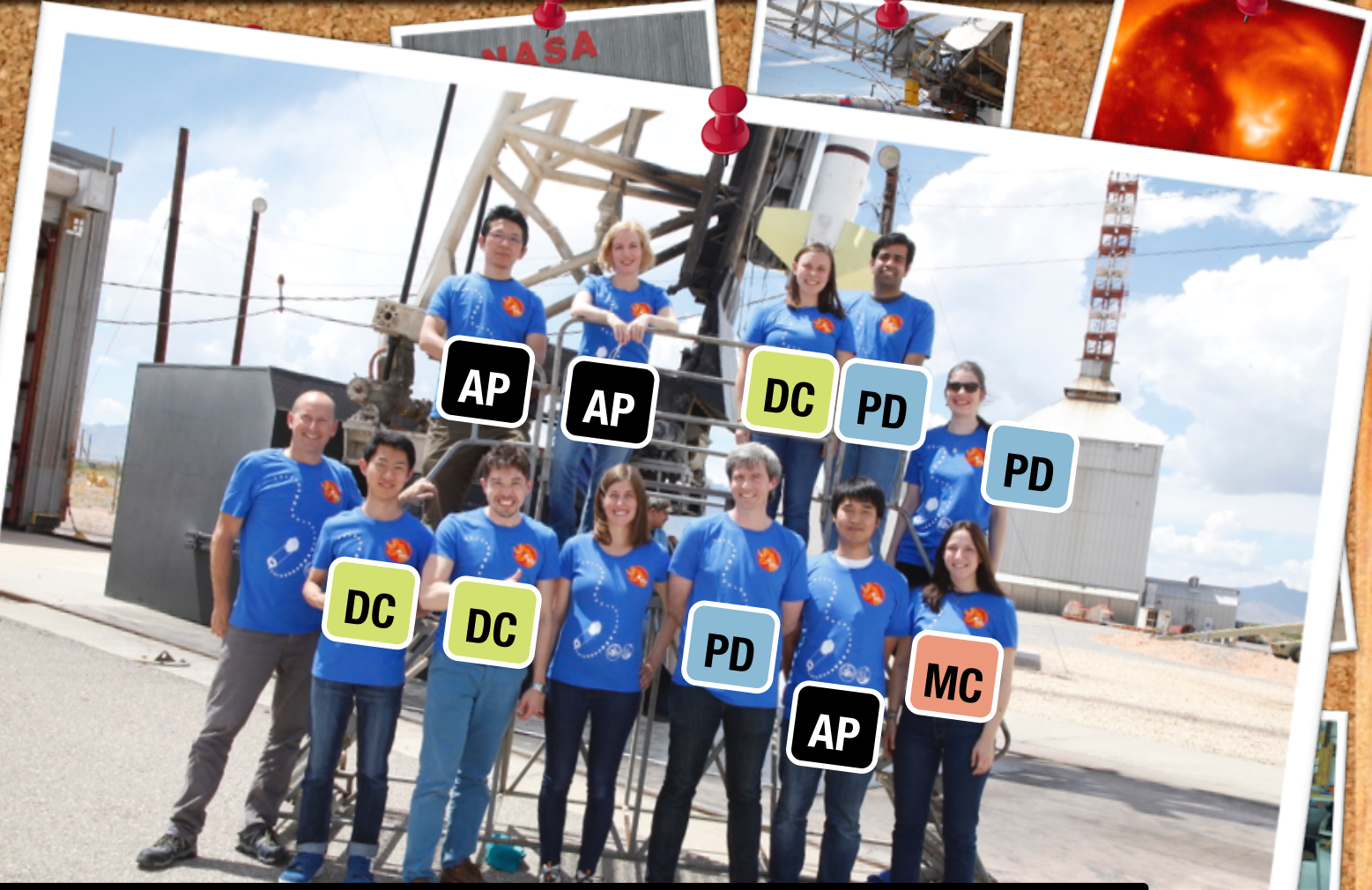
- ☀ 太陽物理学
- ✦ 高エネルギー宇宙物理学
- 👁 地球惑星磁気圏プラズマ物理学



## 数値計算の実施メンバー

- ✦ 高棹 真介 (大阪大学大学院 理学研究科)
- 👁 岡 光夫 (カリフォルニア大学バークレー校)
- ☀ 金子 岳史 (名古屋大学 宇宙地球環境研究所)

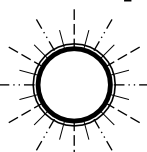
なお、このメンバーが指導する大学院生も本計画に参加しており、将来のスペースミッションを担う若手の育成にも役立っている。



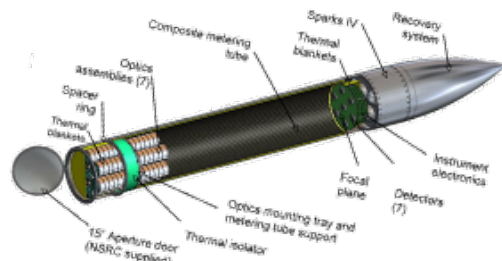
**FOXSI-4**  
**2022年度からは日本の大学院生7名が参加**



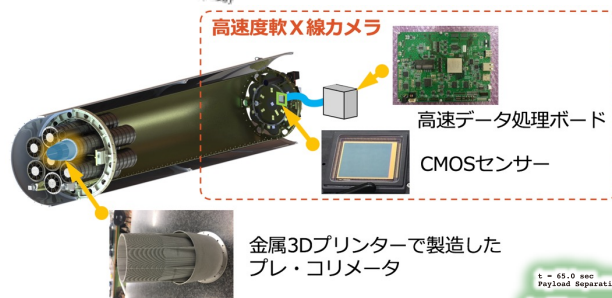
# 観測ロケット実験 FOXSI の先



ロケット実験  
FOXSI-1, 2  
(2012年, 2014年)

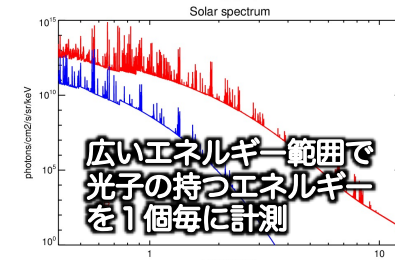
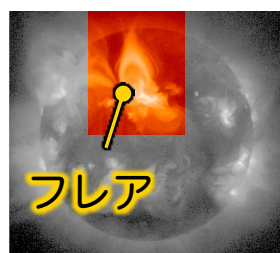
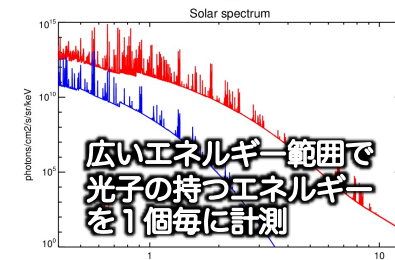
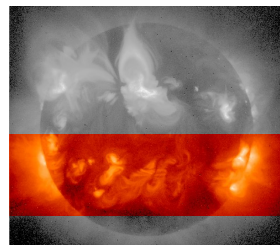
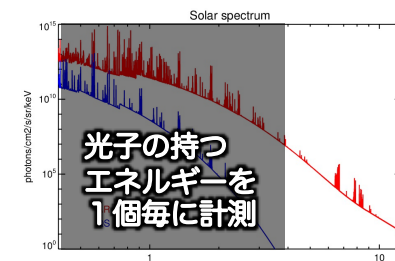
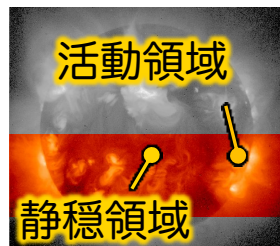
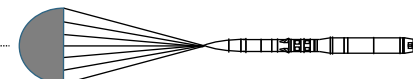
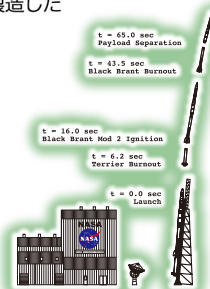


ロケット実験  
FOXSI-3  
(2018年)



ロケット実験  
FOXSI-4  
(2024年春)

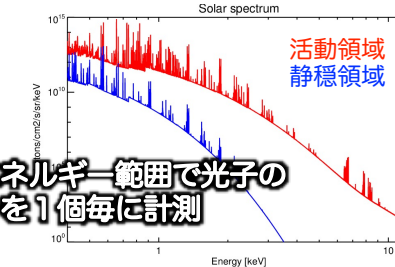
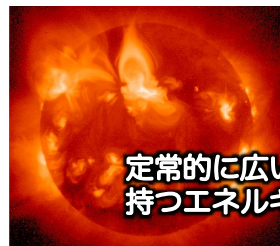
世界初の太陽フレア  
X線集光撮像分光観測



軟X線望遠鏡  
硬X線望遠鏡  
軟ガンマ線検出器



「PhoENiX」衛星  
(2030年代はじめ)





# FOXSI-3 flight on 7 September 2018 (動画) の成功を受けて



## いよいよ太陽フレアを観測するロケット実験 FOXSI-4

集光撮像分光観測

太陽フレア（磁気再結合）におけるエネルギーの解放と変換

- 新しい太陽フレアX線観測の実現と、それを用いたサイエンスのリード
- 既存コミュニティー3分野（太陽物理学、高エネルギー宇宙物理学、地球惑星磁気圏プラズマ物理学）の連携
- データの公開とアーカイブ
- 広く活用できる数値計算モデルの構築
- 様々な小規模実験に活用できる標準ハードウェアの構築
- 人材育成
- 公募型小型計画PhoENiXへの発展

2024年の打ち上げにご期待下さい！！

小規模計画  
ISAS/JAXA

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,  
PI: 成影 (FY2021~2025)

科研費  
KAKENHI

- 基盤研究(A) 新規採択, PI: 成影 (FY2022~2024)
  - 国際共同研究加速基金(国際共同研究強化(B)) 21KK0052, PI: 成影 (FY2021~2024)
  - 基盤研究(A) 21H04486, PI: 渡辺 (FY2021~2024)
- ほか（上記は現在実施中のもののみ記載；採択順）