

観測ロケット実験 FOXSI-4



成影典之（国立天文台）



NASA や **JAXA** がかわる **日米共同** の **観測ロケット実験**
国立天文台 が日本の代表機関 **2024年春** の実施

太陽フレア からの **X線光子1個1個** を **最新技術** **CMOS検出器**
を用いて **世界で初めて** 観測する **宇宙ミッション** **System on module**
金属3Dプリンター など

科学成果は **Nature・Science** も狙える!! **大学院生も参加** できる!!!

自分で作り上げたものが宇宙に行って戻ってくる

ロケットの打ち上げ **ラスカ** にも立ち会え **国際的な仲間** もできる

SPRING-8 や **マーシャル宇宙飛行センター** など世界第一級設備も使用

企業とも一緒に — 去年のツアーから2名の学生さんが進学・参加



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



2024年春の打ち上げ！！

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秒間に250枚の撮影

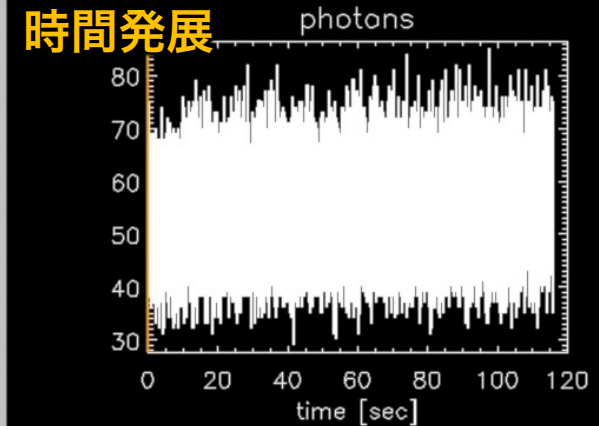
FOXSI-3 phoenix data QL

integrated image : 0.00000 photons

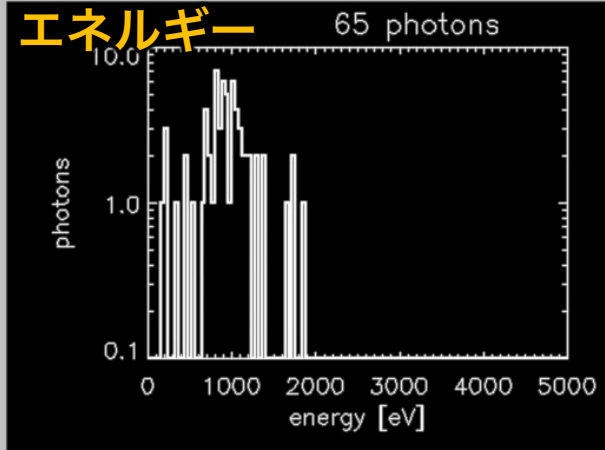


画像 (点描画法の要領で)

時間発展



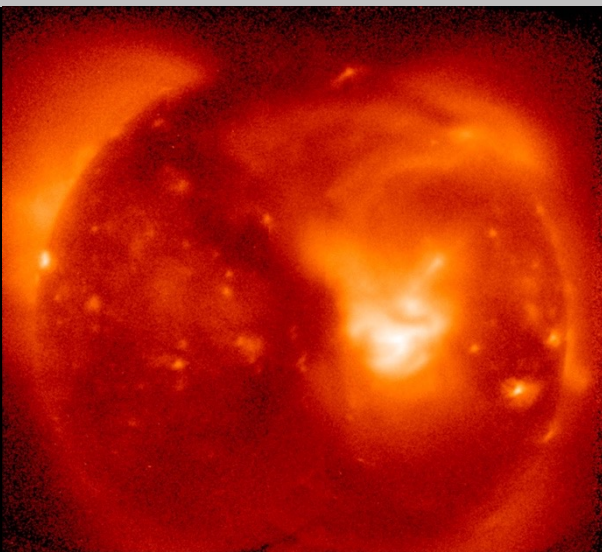
エネルギー



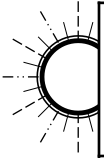
E min [eV] : 0 , E max [eV] : 5000

error oplot view movie scan stop close integ

約6分間の
飛行中に
観測した
約1千万個の
X線光子で
描いた太陽



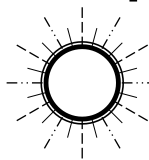
太陽X線観測の種類（画像が取得できる観測）



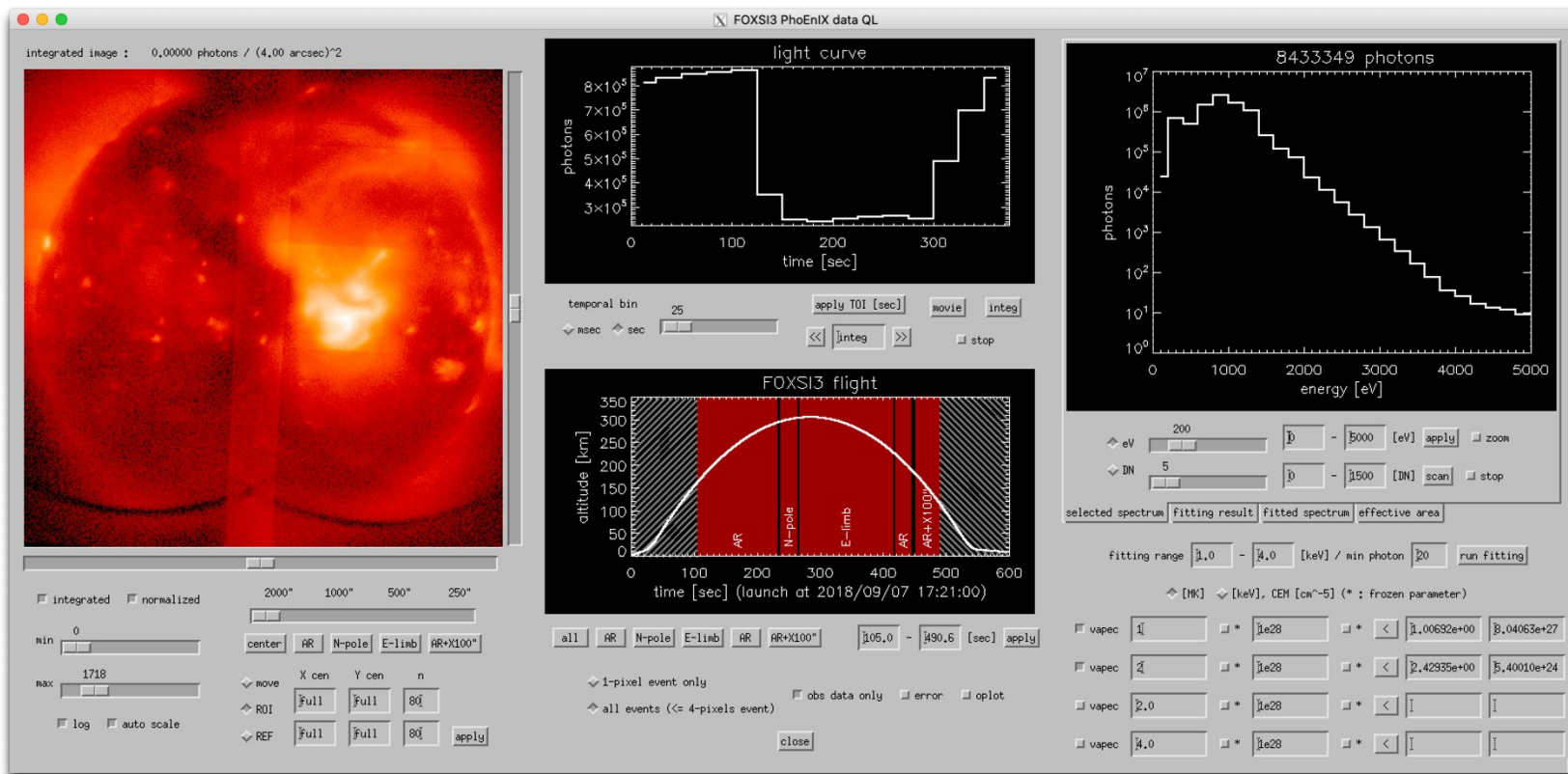
	ダイナミックレンジ	空間分解能	時間分解能	エネルギー分解能	観測データ
【硬X線帯域】 すだれコリメーター	×	△	○	○	エネルギー毎の画像(RHESSI)
【軟X線帯域】 X線ミラーとCCDカメラ	○	○	○	×	 広帯域フィルターでの撮像 (「ようこう」軟X線望遠鏡)
狙うべき観測	○	○	○	○	

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!!

高エネルギーX線の分布

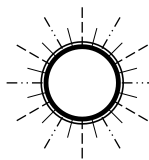


FOXSI-3のデータをお見せします。





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



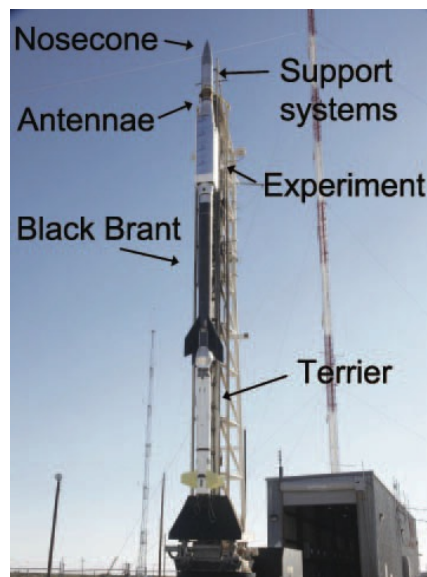
FOXSI-1
2012年



FOXSI-2
2014年

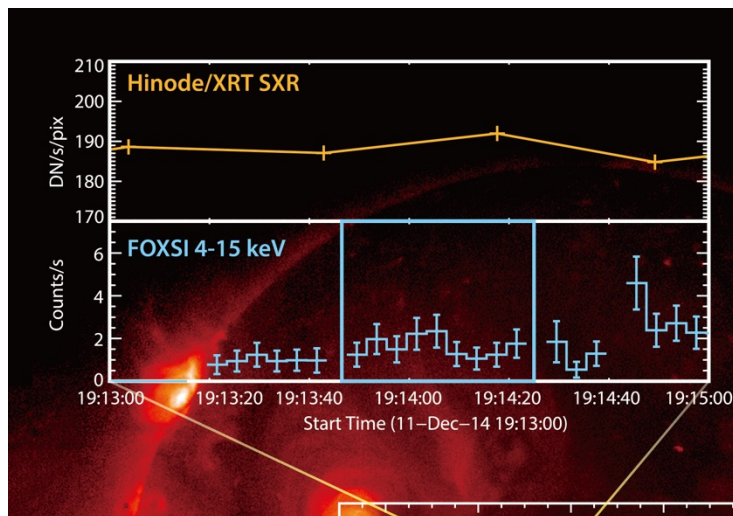
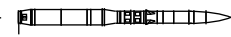
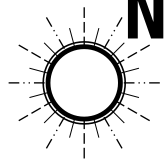


FOXSI-3
2018年

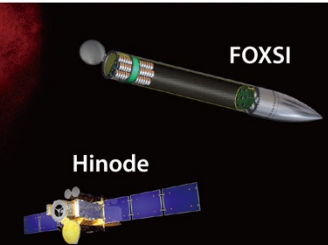
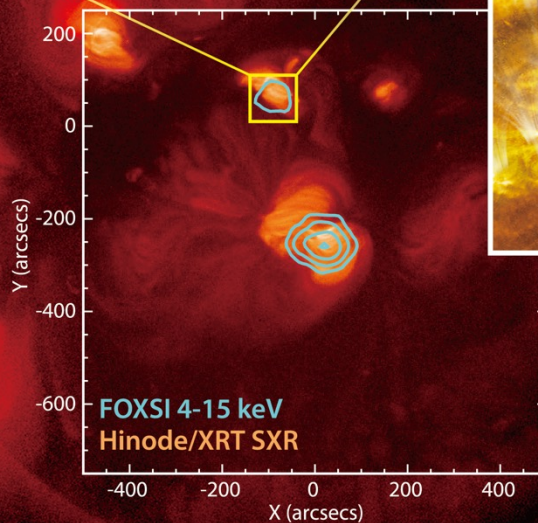
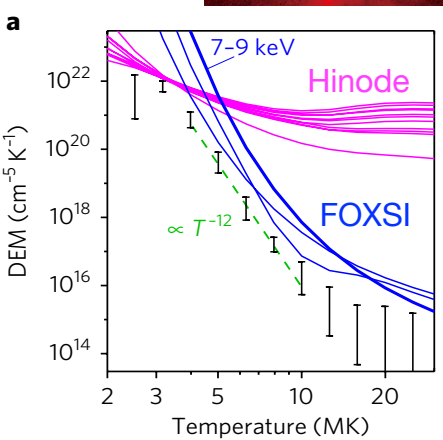




FOXSI-2: 2014年12月11日の成果は Nature Astronomy に掲載 (Ishikawa et al. 2017)

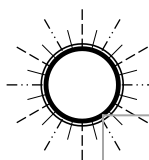






非フレア領域での超高温成分
(1000万度以上) の発見





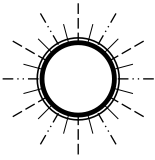
FOXSI シリーズの発展



	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	太陽フレア
観測波長	硬X線 5~30 keV		軟X線 0.5~10 keV	
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-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**

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。

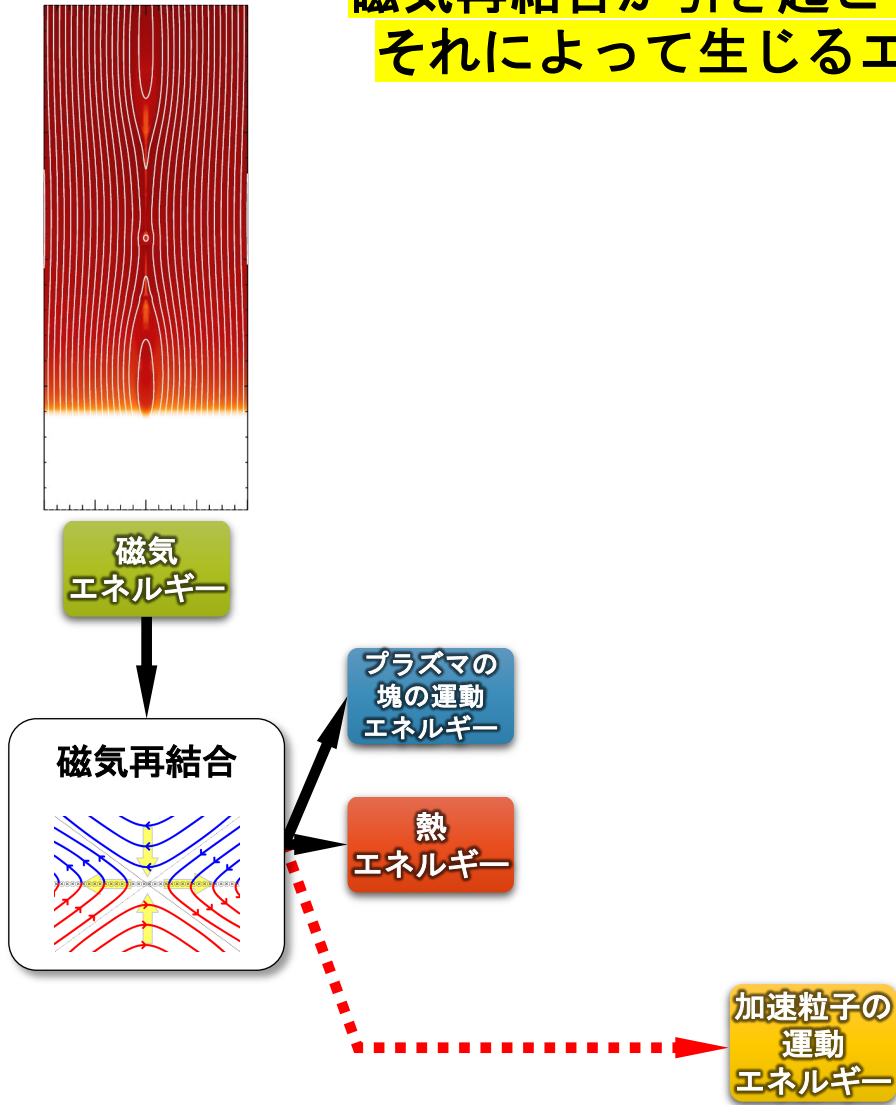
【2-4】 観測と数値計算の両輪で、太陽フレアにおけるエネルギー解放・変換過程を精査する。

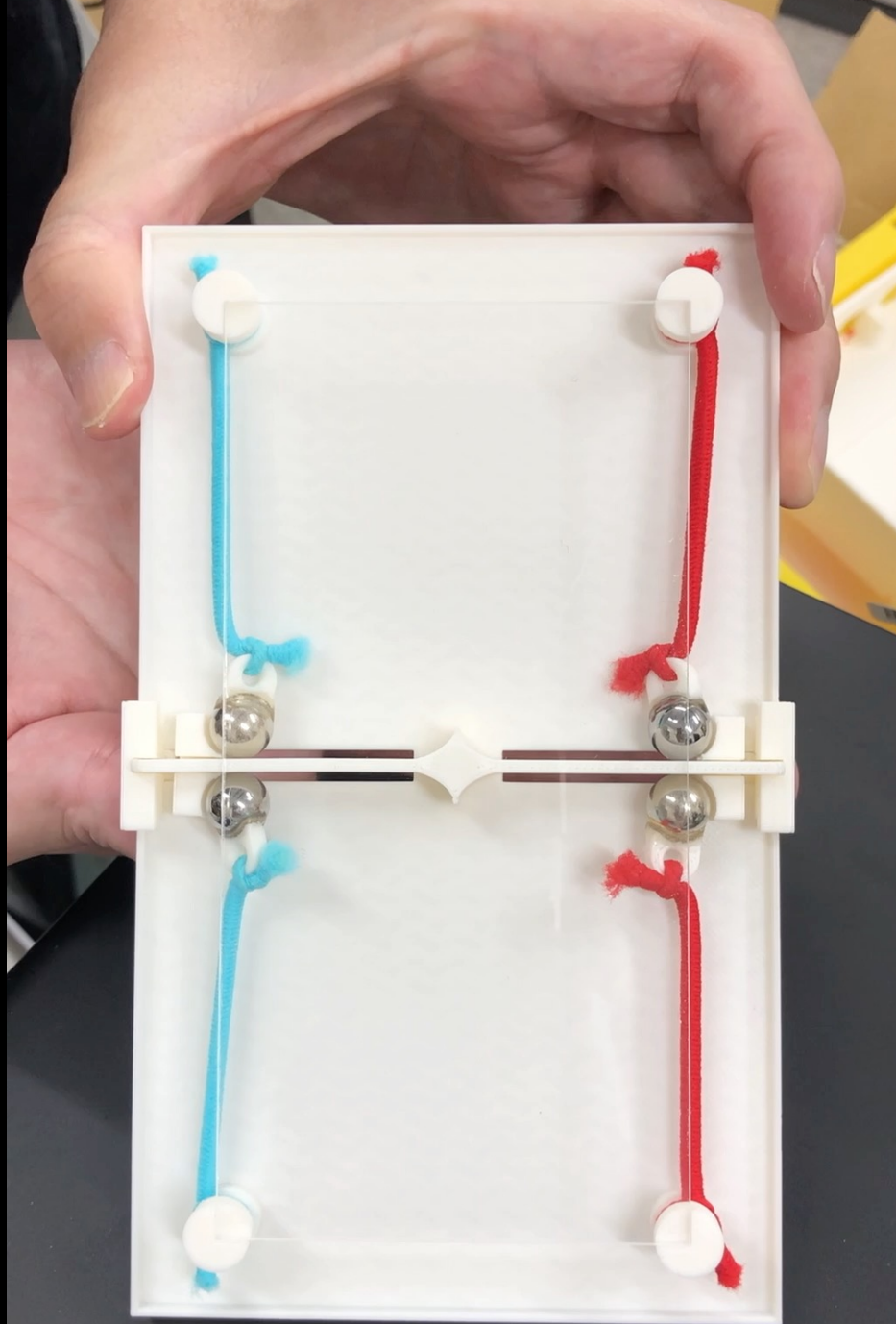
新しい研究手法の普及

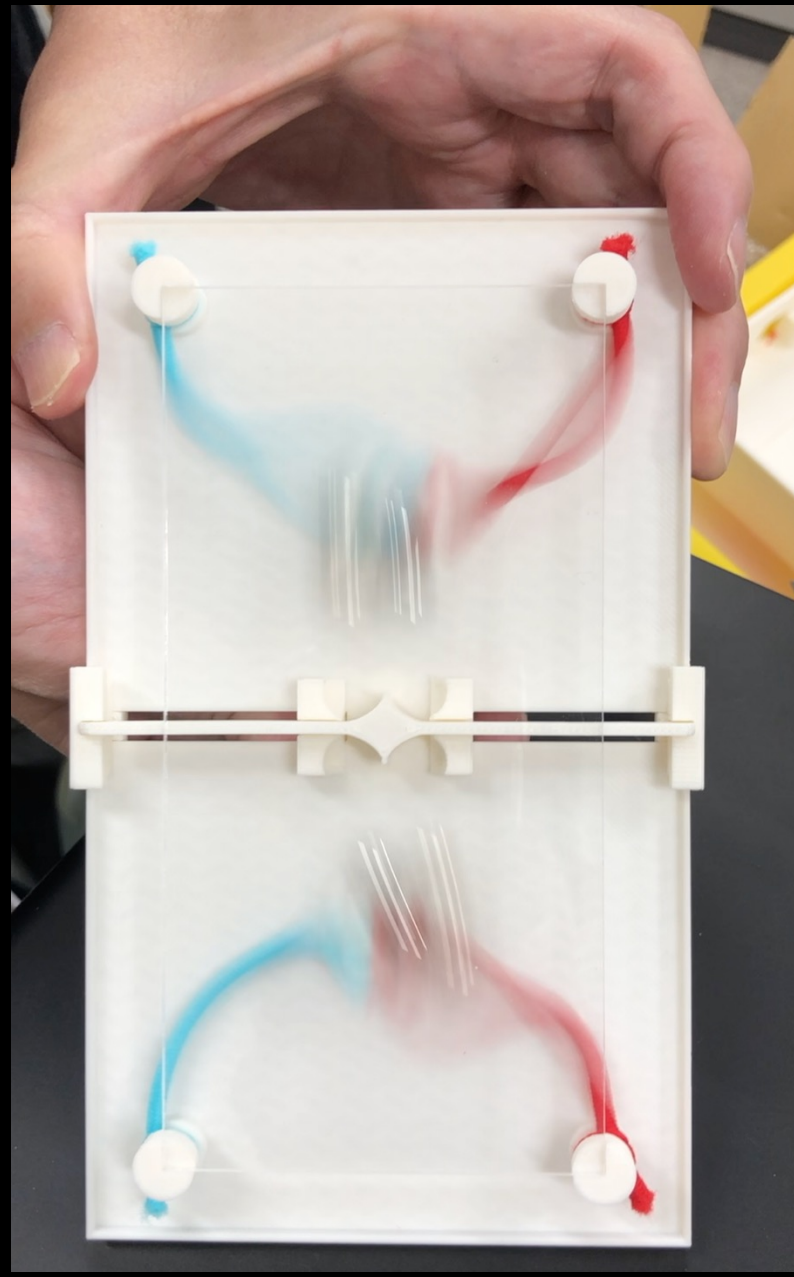
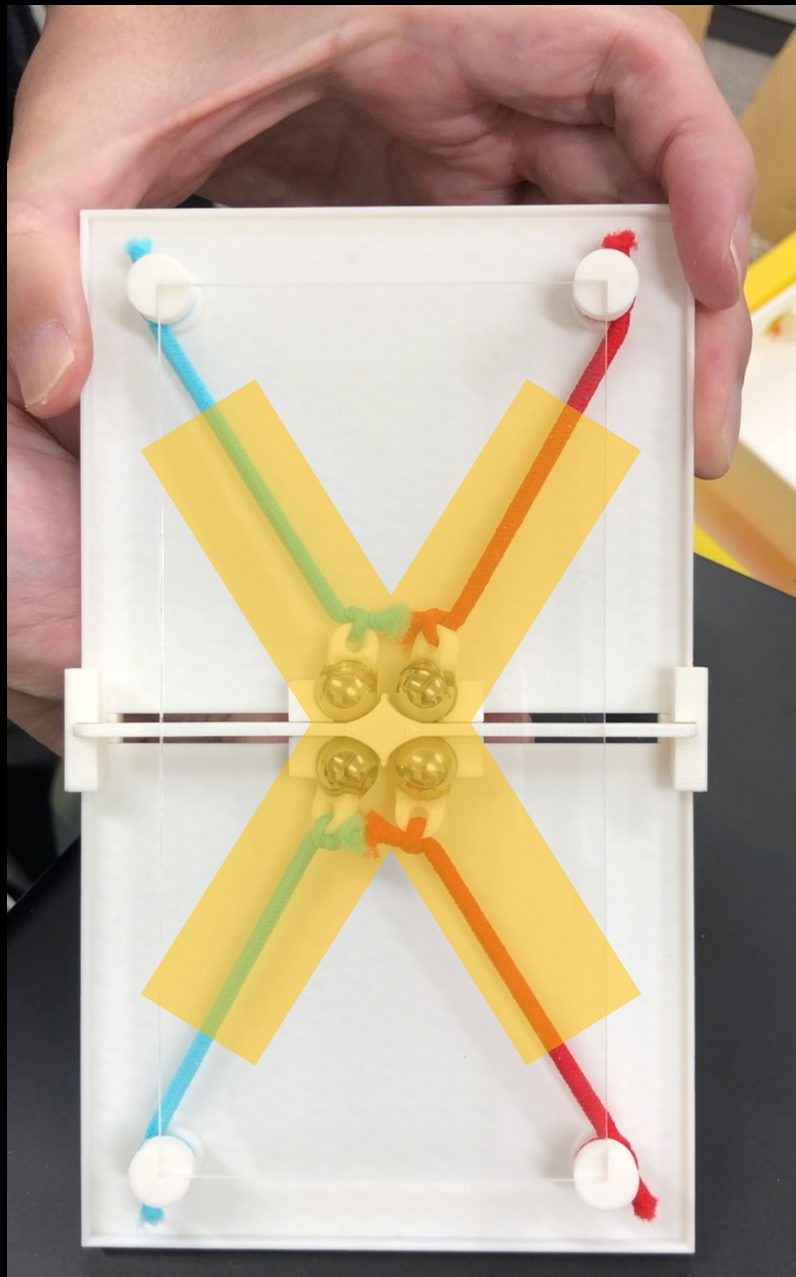
【3】 取得した観測データや解析用ソフトを公開し、この新しい観測手法を普及させる。

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

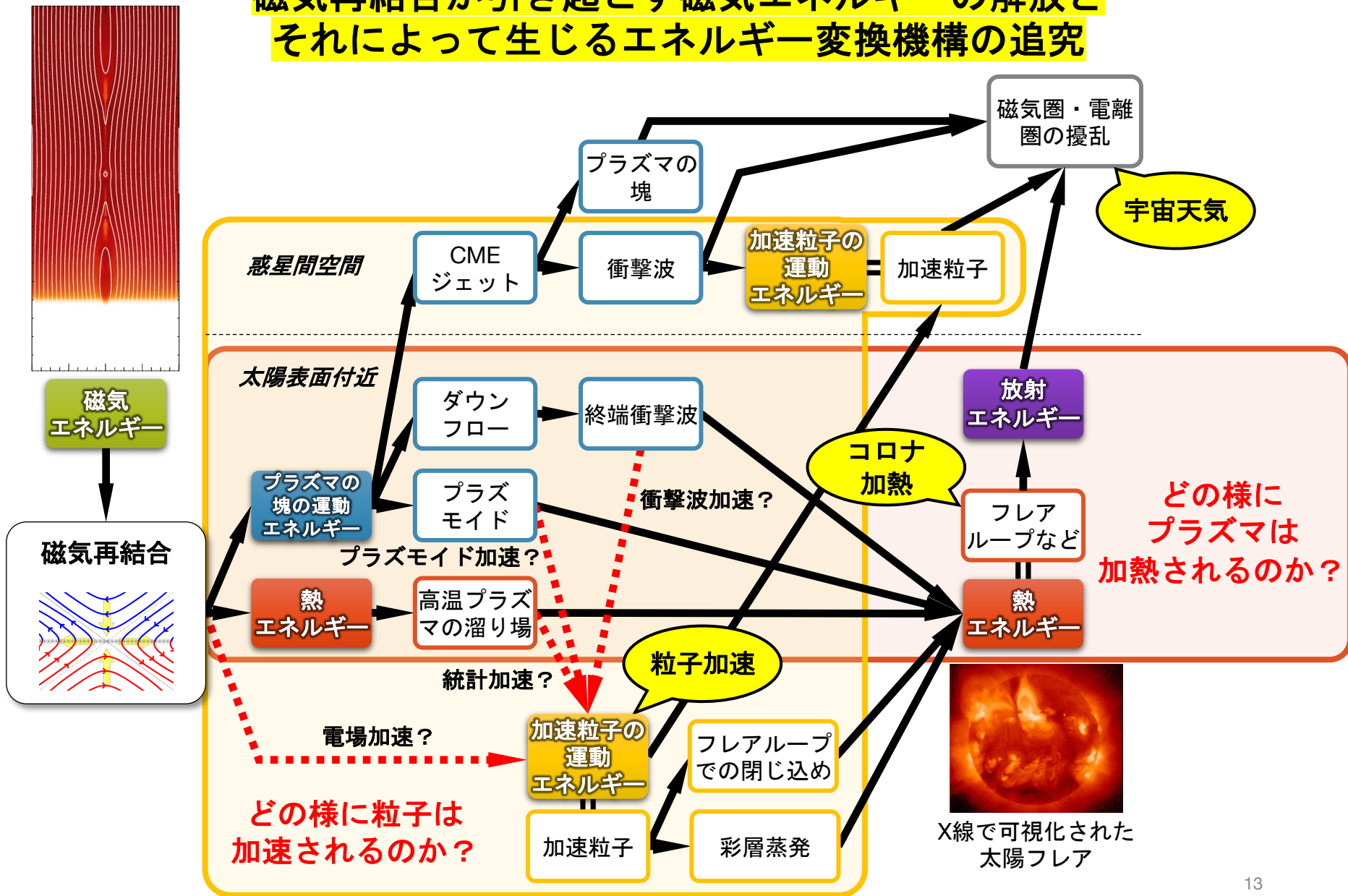




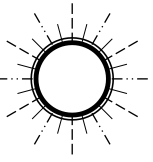


FOXSI-4 の科学意義

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



科学目的を達成するための太陽フレア観測

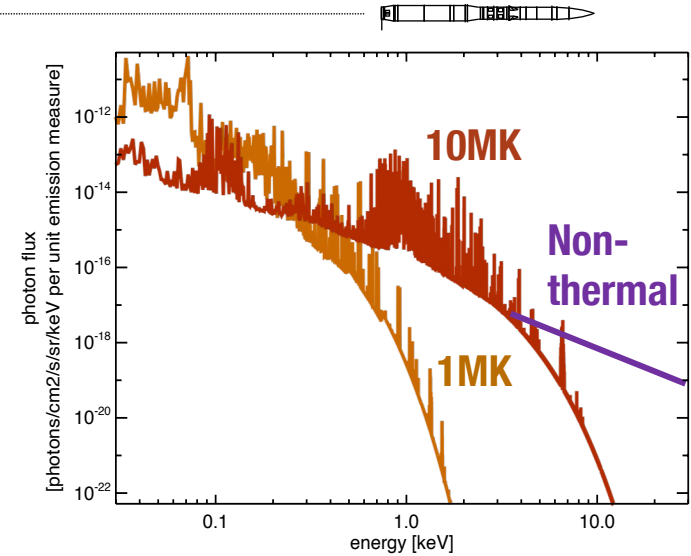


観測に対する要求

- 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

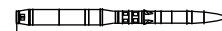
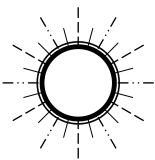
観測方法

- **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!! (世界初)

FOXSI の装置の概要

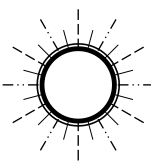


太陽フレアに対するX線集光撮像分光観測

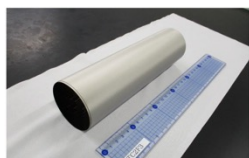
「高精度X線集光ミラー」と「X線用高速カメラ」を組み合わせた望遠鏡で実施する



観測装置のキー技術 (太陽フレア観測に向けた改良)

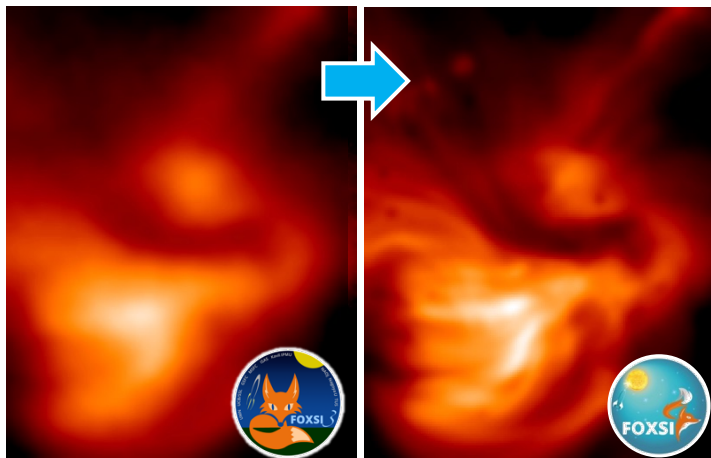
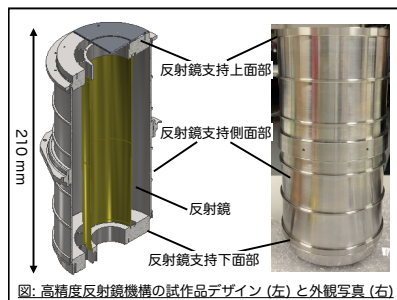
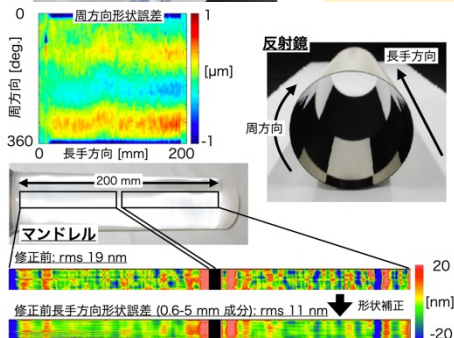


高精度電気铸造X線ミラー



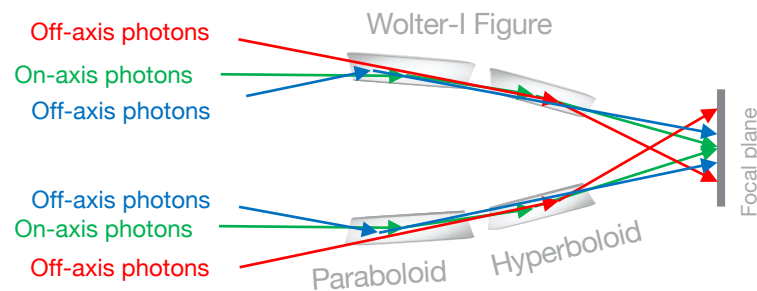
空間分解能の目標 (cf. FOXSI-3)

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



コリメーター

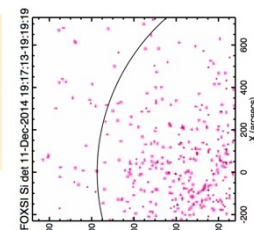
Double reflected photons
Single reflected photons [H]
Single reflected photons [P]



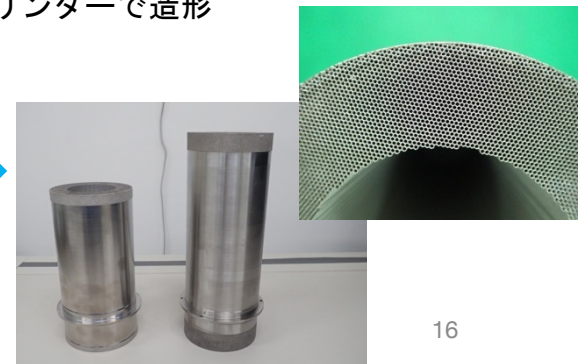
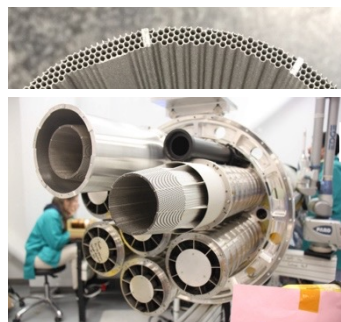
目標 (cf. FOXSI-3)

- アスペクト比 1:270 ($\leftarrow 1:190$)
- 穴の直径 0.7 mm ($\leftarrow 1$ mm)

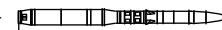
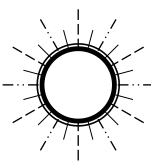
分角レベルの Off-axis photon (迷光) を除去するための高いアスペクト比をもつ多孔構造 → 金属3Dプリンターで造形



Flare here



観測装置のキー技術 (太陽フレア観測に向けた改良)

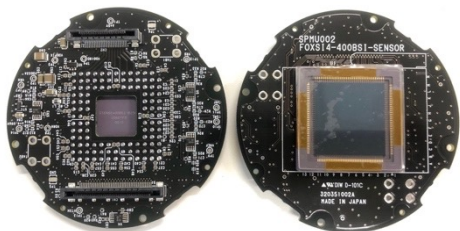


軟X線観測用 CMOSカメラ

硬X線観測用 CdTe カメラ

CMOS カメラ (cf. FOXSI-3)
 25 μm 厚の完全空乏化した感受層 (\leftarrow 4 μm)
 • より高いエネルギーのX線に対する感度向上
 • X線に対する耐性

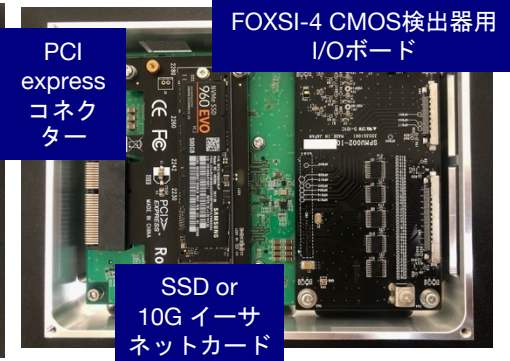
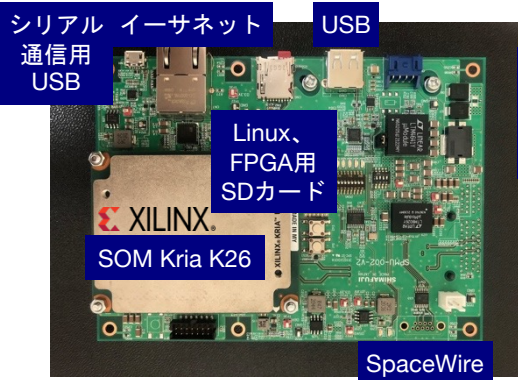
CdTe カメラ (cf. FOXSI-3)
 • 位置決定精度の向上 ($\sim 30 \mu\text{m}$ \leftarrow 60 μm)
 • 検出速度の向上 ($\sim 5 \text{ k events / s / detector}$ \leftarrow 500 events / s / detector)



汎用性に留意し開発中

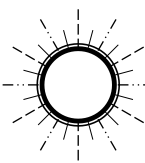
↑ 裏面照射型CMOS検出器 FM品
 ↓ 軟X線カメラ用ボード

↑ FOXSI-4 CdTe DSD FM品
 → 硬X線カメラ用 FPGAカードとハウジング





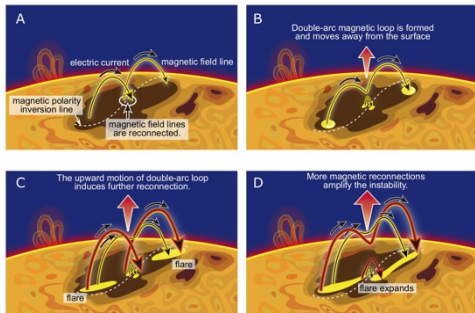
打ち上げオペレーション (ポーカーフラット観測ロケット打ち上げ場)



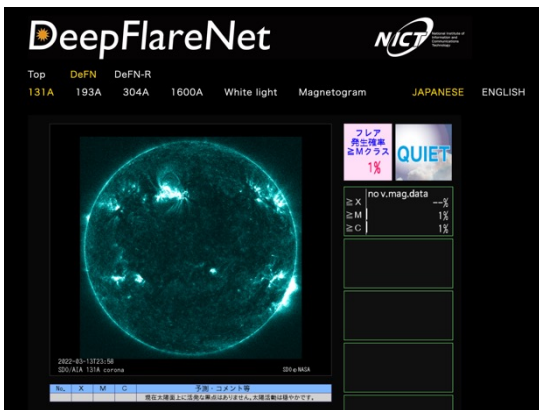
2024年春

Prediction of solar flares

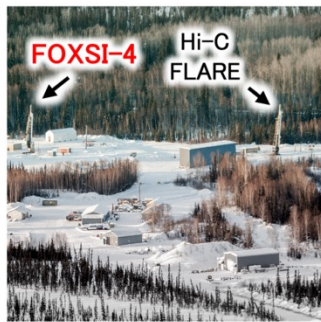
Kusano+ 2020



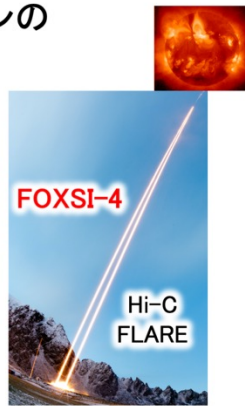
Nishizuka+



(a) フレアキャンペーンの打ち上げイメージ

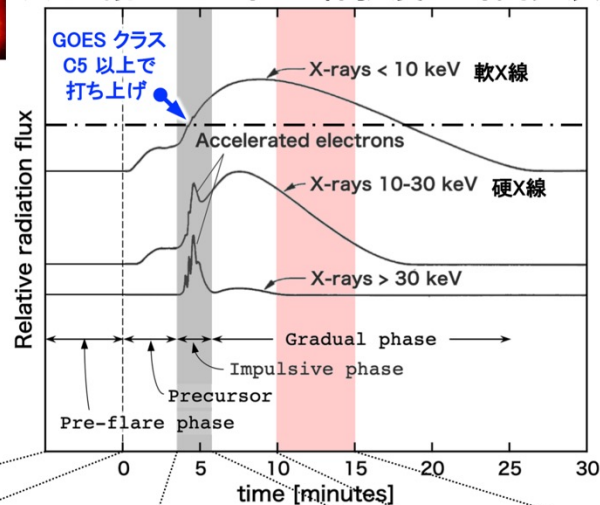


打ち上げ可能状態で待機



フレア検出後直ちに打ち上げ

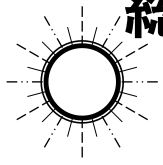
(b) 太陽フレア時のX線強度の時間発展



(c) 打ち上げの手順

Phase	Pre-flare phase (Active region)	Precursor	Impulsive phase	Gradual phase
	1. 打ち上げ可能状態で待機 2. 太陽フレアの発生状況をリアルタイムでモニター		3. フレア検出 4. 打ち上げ	観測高度への飛翔 5. フレア観測
太陽フレアの模式図				

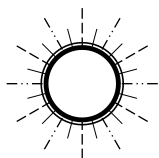
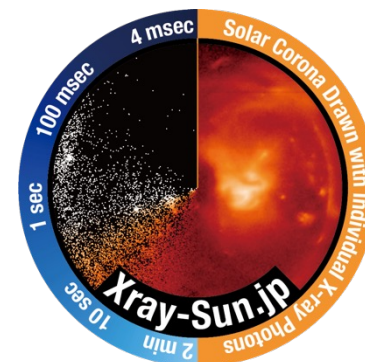
大学院生も参加 総研大、東京大学、カブリIPMU、名古屋大学



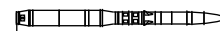
SPring-8 での検出器の評価実験



太陽X線グループ



<https://xray-sun.jp/>



【自然科学研究機構・国立天文台】



成影 典之 (Noriyuki Narukage)

国立天文台 太陽観測科学プロジェクト
助教

[データベース型研究者総覧 research map へのリンク](#)

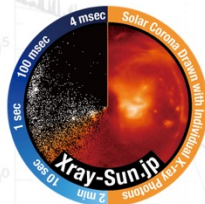


佐藤 慶暉 (Yoshiaki Sato)

総合研究大学院大学 物理科学研究科 天文科学専攻
5年一貫制1年

[データベース型研究者総覧 research map へのリンク](#)

【宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所】



坂尾 太郎 (Taro Sakao)

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 太陽系科学研究系
准教授

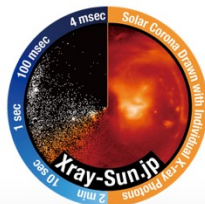
[データベース型研究者総覧 research map へのリンク](#)



清水 里香 (Riko Shimizu)

総合研究大学院大学 物理科学研究科 宇宙科学専攻
5年一貫制1年

[データベース型研究者総覧 research map へのリンク](#)



加島 颯太 (Sota Kashima)

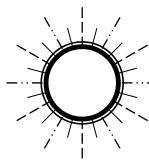
関西学院大学大学院 理工学研究科 物理学専攻 JAXA連携大学院生
修士1年



大学院生の2022年度前期のスケジュール

	月			火			水			木			金			凡例
	佐藤	清水	加島	佐藤	清水	加島	佐藤	清水	加島	佐藤	清水	加島	佐藤	清水	加島	
7:00																
7:15																
7:30																TA
7:45																
8:00																授業
8:15																
8:30																MTGなどwith成影さん他
8:45																
9:00																個別研究打ち合わせ
9:15																
9:30																ひのでグループ輪講
9:45																
10:00																追加(佐藤)
10:15																SXTセミナー
10:30																授業
10:45																新着論文紹介
11:00																
11:15																
11:30																
11:45																
12:00																いっきに朝から夕方まで
12:15																感謝です(佐藤)
12:30																
12:45																
13:00																
13:15																
13:30																
13:45																
14:00																
14:15																
14:30																
14:45																
15:00																
15:15																
15:30																
15:45																
16:00																
16:15																
16:30																
16:45																
17:00																
17:15																
17:30																
17:45																
18:00																
18:15																
18:30																
18:45																
19:00																

研究テーマ

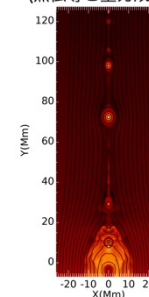


- 佐藤
 - 装置開発：コリメータ
 - データ解析：FOXSI-3観測データのアライメント、DEM解析、FOXSI-3の観測データ解析
 - 数値計算：MHD+テスト粒子計算

- 清水
 - 装置開発：CMOS検出器、カメラ
 - 機械学習：CMOS検出器の評価
 - データ解析：FOXSI-3の観測データ解析

- 加島
 - 装置開発：pixelated-attenuator (NASA開発)
 - データ解析：FOXSI-3の観測データ解析

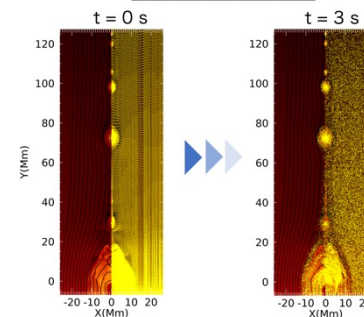
MHDシミュレーション
(熱伝導と重力成層を考慮)



・ドリフト運動
 E : 電場
 B : 磁場

・初期条件
 n : 密度
 T : 温度

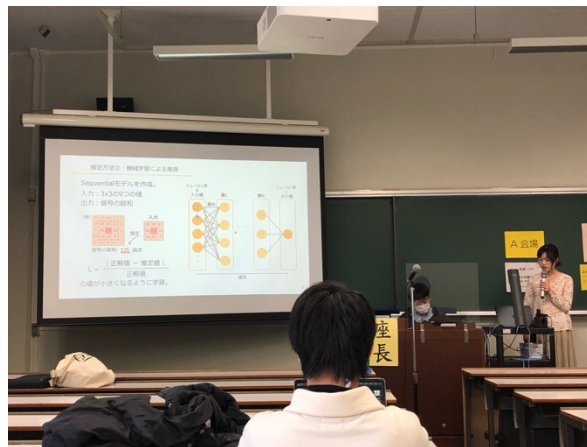
GCAテスト粒子計算



観測機器 (X線・γ線)

2023年3月16日 (木) 午前 (10:00-12:10) [A会場]

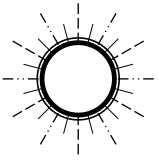
- 10:00 V332a 日米共同・太陽フレアX線集光撮像分光観測ロケット実験FOXSI-4に搭載するプレ・コリメータの開発
佐藤慶暉 (総合研究大学院大学)
- 10:12 V333a 日米共同・太陽フレアX線集光撮像分光観測ロケット実験 FOXSI-4 搭載電铸 X 線望遠鏡の開発の現状と光線追跡シミュレーションによる性能評価
作田皓基 (名古屋大学)
- 10:24 V334a 日米共同・太陽フレアX線集光撮像分光観測ロケット実験 FOXSI-4 搭載電铸 X 線望遠鏡の性能評価 (1)
藤井隆登 (名古屋大学)
- 10:36 V335a 日米共同・太陽フレア X 線集光撮像分光観測ロケット実験 FOXSI-4 搭載電铸 X 線望遠鏡の性能評価 (2)
安福千貴 (名古屋大学)
- 10:48 V336a 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 に用いる CMOS イメージセンサの X 線光子計測能力評価 その2
清水里香 (総合研究大学院大学)
- 11:00 V337a 太陽観測ロケット実験FOXSI-4に向けたワイドギャップCdTeストリップ検出器の開発と性能評価III
長澤俊作 (東京大学 Kavli IPMU)
- 11:12 V338a *PhoENiX*衛星計画に向けた高精度Wolterミラーの開発研究
加島颯太 (宇宙航空研究開発機構/関西学院大学)



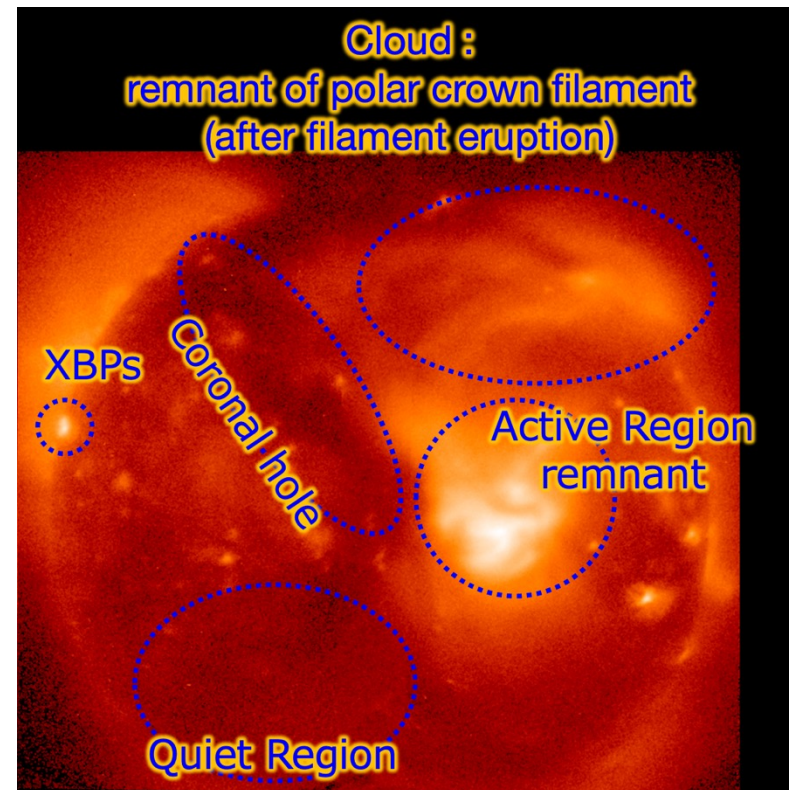
FOXSI全体では、8名の大学院生が参加 先週行ったFOXSIのデータ解析研究会の様子 @ 名古屋大学



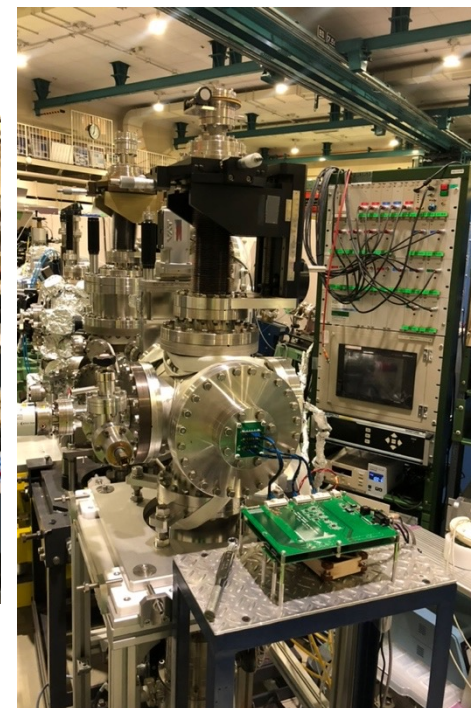
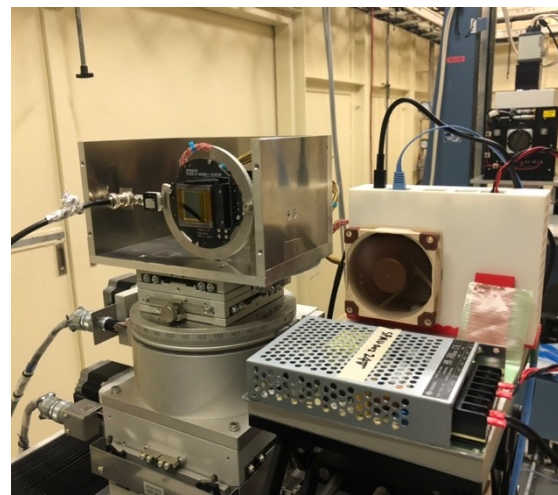
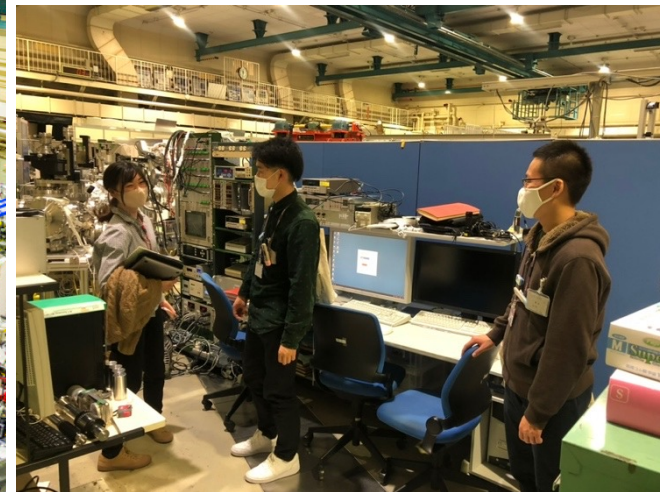
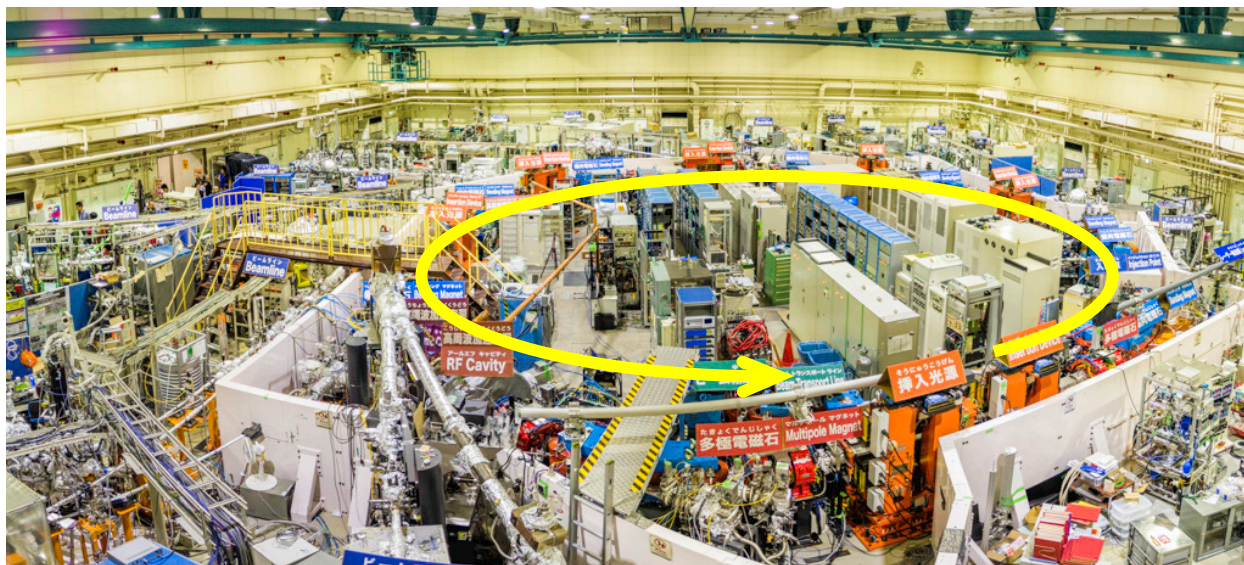
FOXSIのデータ解析テーマ



- 活動領域の時間変化のパワースペクトル
- フィラメント噴出領域
- XBPの時間変化
- 静穏領域の高温成分
- 電離非平衡
- 重元素比（アバンダンス）
- 地球大気とのinteraction



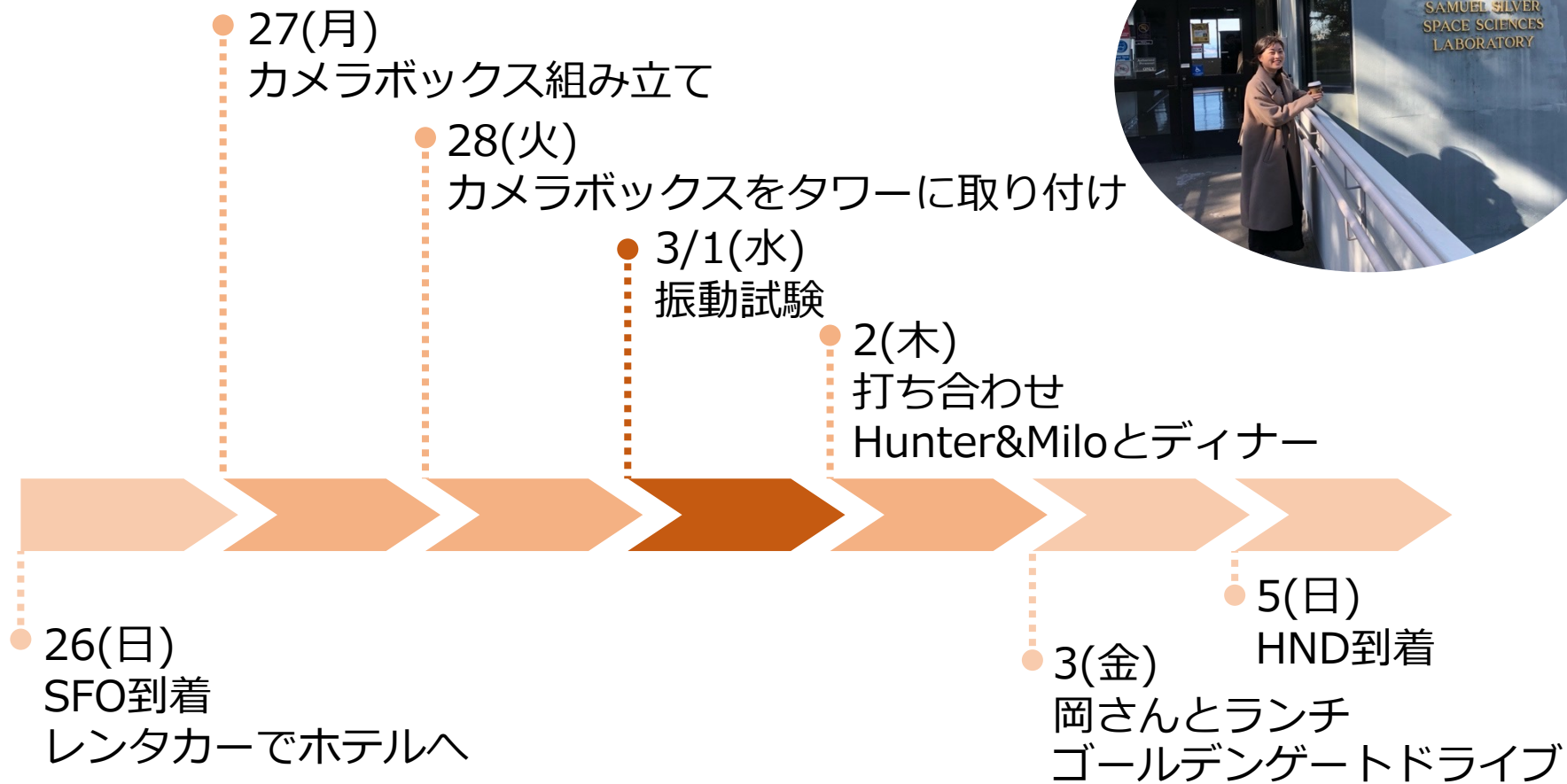
放射光施設での実験：UVSOR, Spring-8



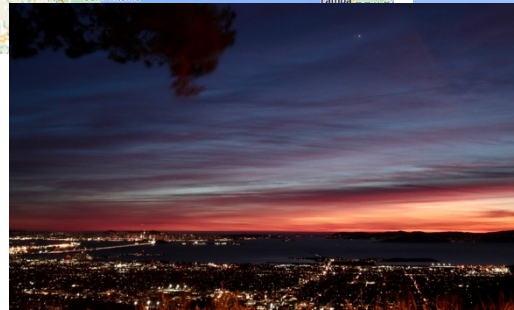
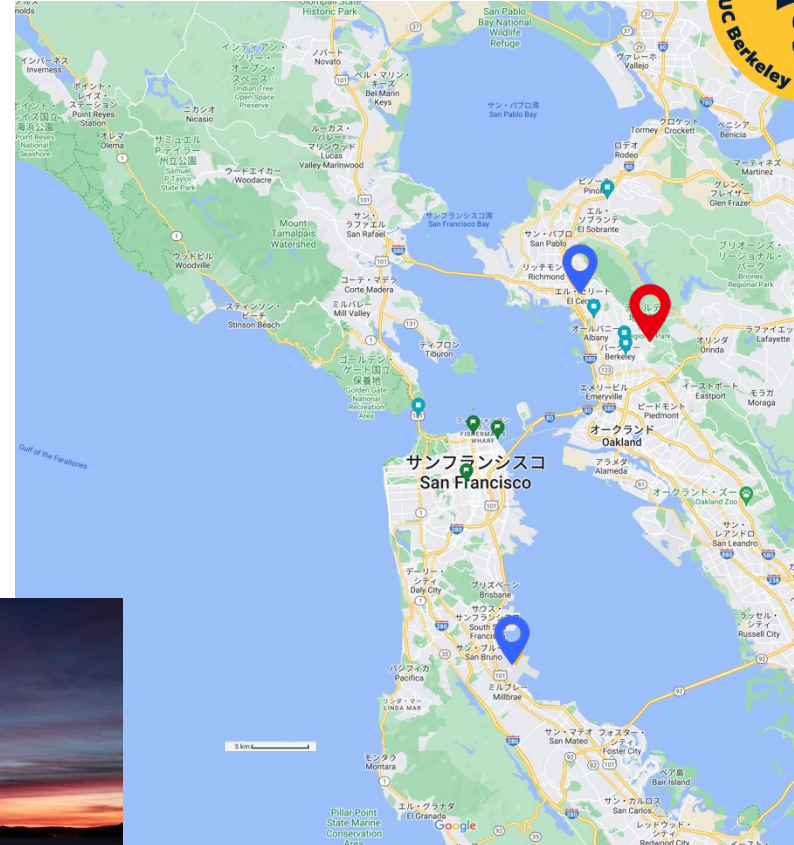
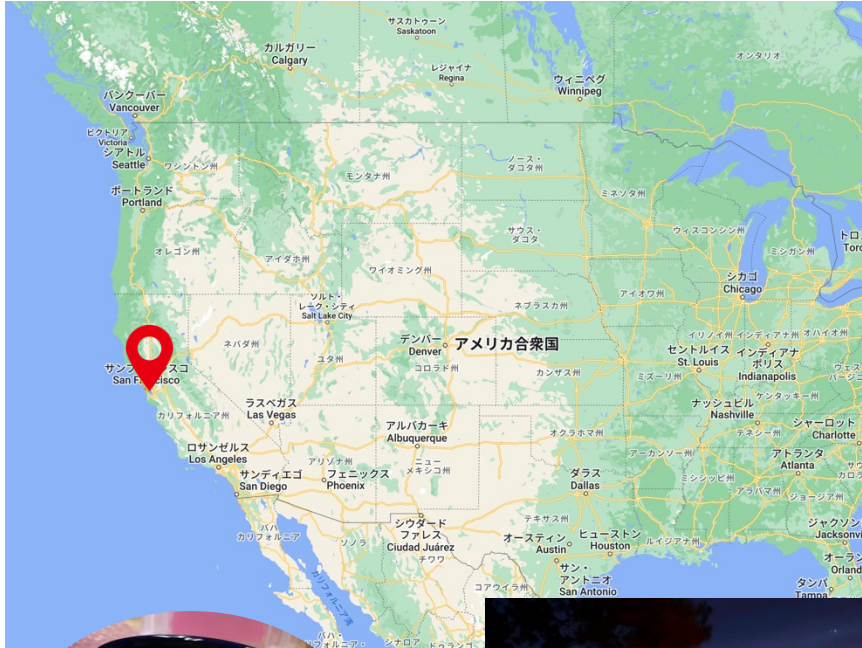
CMOSカメラ振動試験@SSL 2023/02/26-03/05

報告 清水

スケジュール



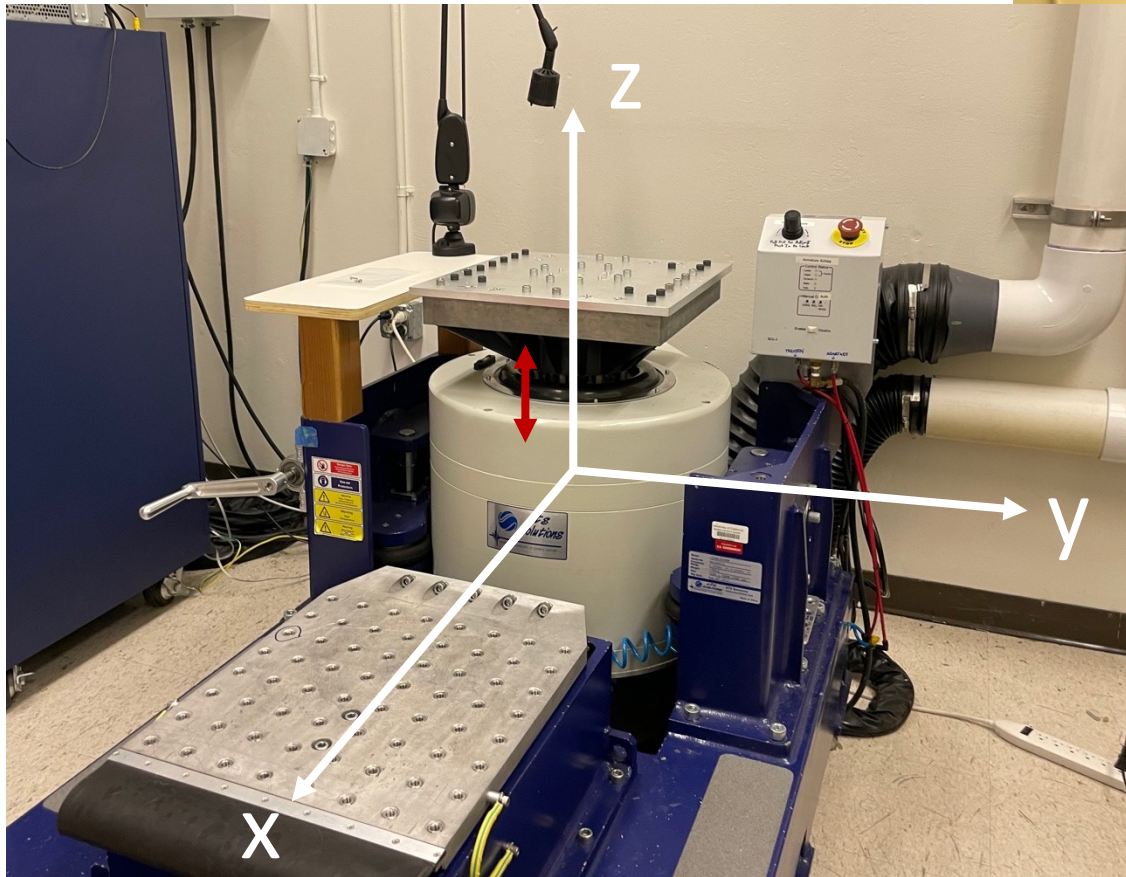
Space Sciences Laboratory – University of California, Berkeley



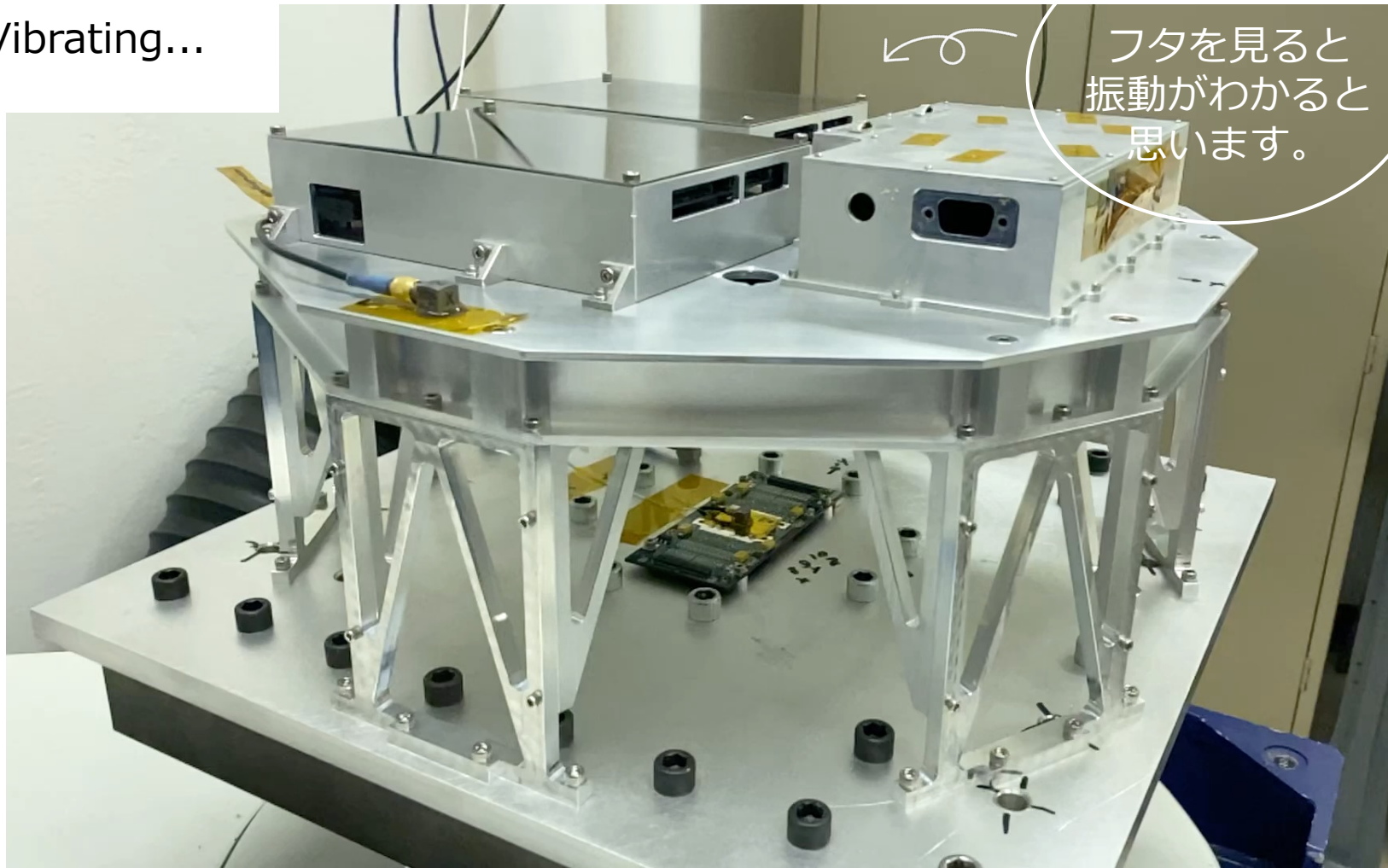
タワーにカメラボックスを取り付けた！
穴位置がちゃんと合っていてほっとしました。



3軸に、順に振動を与えて試験を行う。

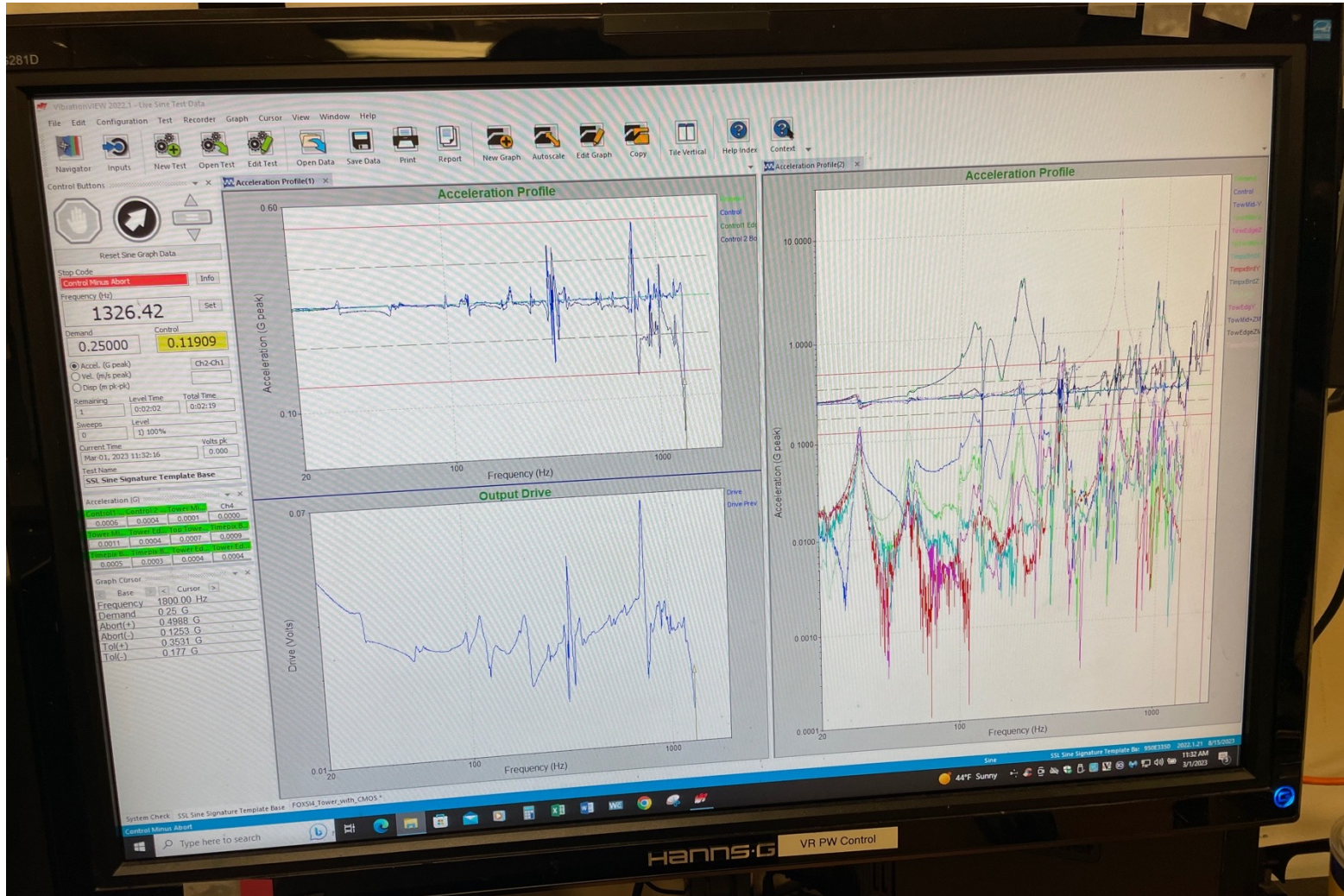


Vibrating...



フタを見ると
振動がわかると
思います。

M1の学生さんの出張報告レポートより



FOXSI hardware

M1の学生さんの出張報告レポートより



かっこいい...♡

支えが今は壊れているらしい(笑)

ご飯など



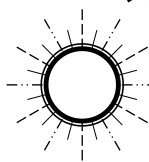
M1の学生さんの出張報告レポートより



楽しかったです♪



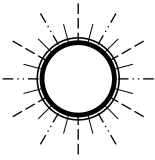
進学したら何ができるか



年度	学年	FOXSI-3	FOXSI-4	FOXSI-5
2022	B3	機器較正など	組立、試験	企画
2023	B4	データ解析		打ち上げ データ解析 (機器較正)
2024	M1		開発 組立 試験	
2025	M2			
2026	D1			
2027	D2		打ち上げ (SOLAR-C, MUSE との同時観測)	
2028	D3	データ解析 (機器較正)		



FOXSI 関連資料



- 太陽X線グループのホームページ
<https://xray-sun.jp/>
https://twitter.com/Xray_Sun_jp
- FOXSI-3 の打ち上げ成功のニュース
<https://hinode.nao.ac.jp/news/topics/foxsi-3/>
- FOXSI-3 のデータ紹介のニュース
<https://hinode.nao.ac.jp/news/topics/foxsi-3-data-release-jp-20190115/>
- 国立天文台ニュース: FOXSI-3 の記事
https://www.nao.ac.jp/contents/naoj-news/data/nao_news_0310.pdf
- X線・EUV結像光学ニュースレター: FOXSI の記事
https://www.xray-euv-optics.group/file/pdf/X-rayNL_54.pdf
- FOXSI-4 のホームページ
<https://phoenix-project.science/foxsi-4>
- 成影のコンタクト先
[noriyuki.narukage \[at\] nao.ac.jp](mailto:noriyuki.narukage@nao.ac.jp) ([at] を @ に変えて下さい)

観測ロケット実験 FOXSI-4



成影典之（国立天文台）



NASA や **JAXA** がかわる **日米共同** の **観測ロケット実験**
国立天文台 が日本の代表機関 **2024年春** の実施

太陽フレア からの **X線光子1個1個** を **最新技術** **CMOS検出器**
を用いて **世界で初めて** 観測する **宇宙ミッション** **System on module**
金属3Dプリンター など

科学成果は **Nature・Science** も狙える!! **大学院生も参加** できる!!!

自分で作り上げたものが宇宙に行って戻ってくる

ロケットの打ち上げ **ラスカ** にも立ち会え **国際的な仲間** もできる

SPRING-8 や **マーシャル宇宙飛行センター** など世界第一級設備も使用

企業とも一緒に — 去年のツアーから2名の学生さんが進学・参加