

超小型衛星を用いた太陽フレアX線 集光撮像分光観測のコンセプト

成影 典之（国立天文台）

三石 郁之（名古屋大学）、渡辺 伸、坂尾 太郎
（宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所）、
高橋 忠幸（東京大学 カブリIPMU）

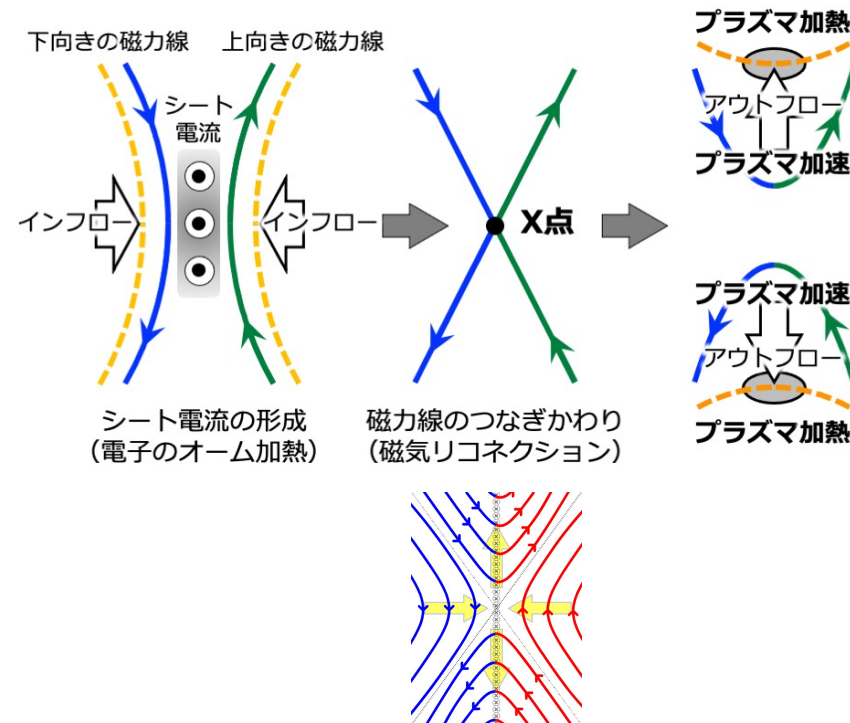
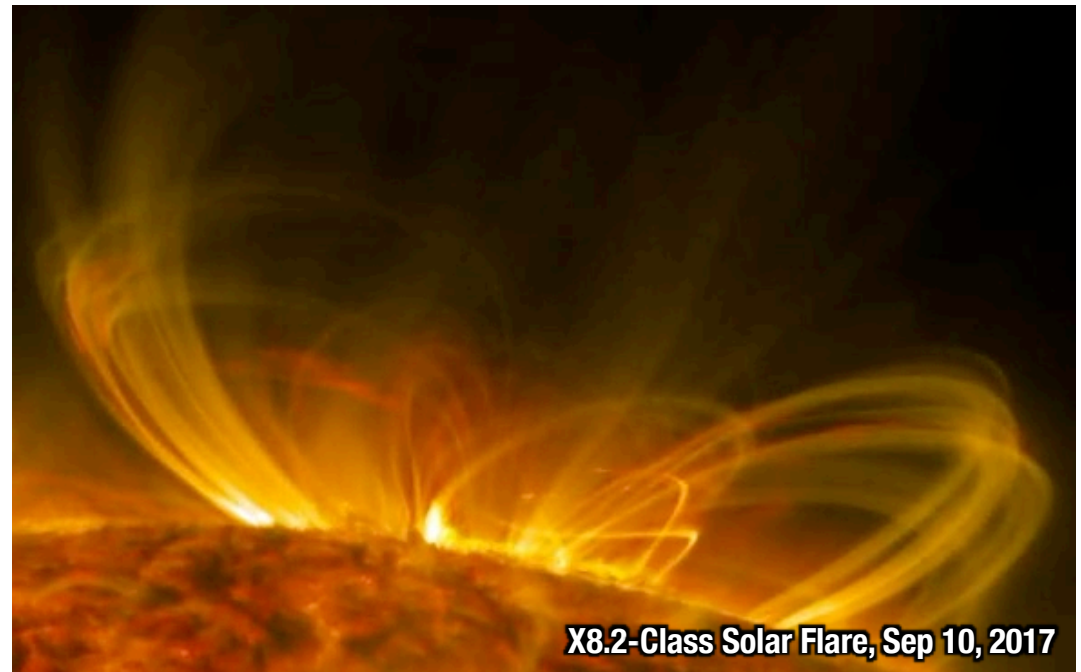
計画の概要



- 太陽系最大の爆発現象である「太陽フレア」が引き起こす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を目的とする。
- そこで太陽フレアが生み出す高エネルギープラズマの詳細観測を行うために、定常的なX線集光撮像分光観測を実施する。これは、空間・時間・エネルギー分解能をすべて備えた定常的な太陽X線観測で、実現すれば世界初となる。
- X線の強度は太陽活動の指標となっており、太陽X線の定常的なモニターは宇宙天気（太陽フレアによる地球周辺環境への影響）の観点でも極めて重要である。

太陽フレアとは

- 太陽フレアは、太陽における爆発現象であり、その規模は太陽系最大である。
- フレアが発生すると、コロナ中のプラズマ（通常は100万度）は数千万度までに加熱され、粒子の加速（10 keV – 1 MeVの電子や10 MeV – 1 GeVの陽子の生成）も生じる。加えて、プラズマ噴出や衝撃波が発生し、時にそれらは地球に接近し磁気嵐を起こす。
- フレアの発生機構については、太陽大気中に蓄えられた磁気エネルギーが、磁気再結合によって爆発的に解放、熱エネルギーや運動エネルギーに変換されることで生じると考えられている。



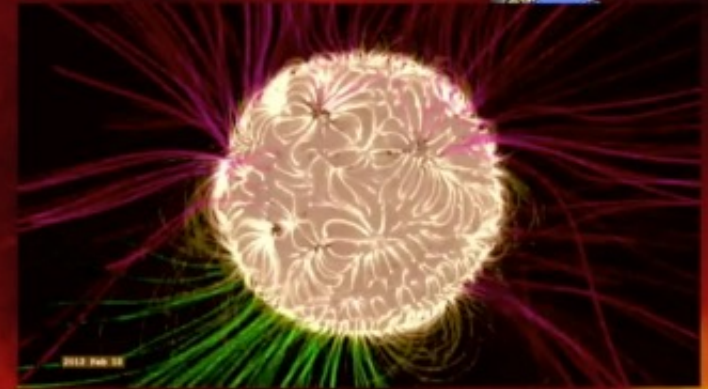
太陽フレアを研究する意義



宇宙プラズマ物理学

天然のプラズマ実験室

- 磁気再結合（エネルギーの解放）
- プラズマ加熱・粒子加速（エネルギーの変換）



観測対象としてのユニークさ

地球に最も近い恒星

- 現象全体を空間・時間分解して観測できる
唯一の天体爆発現象

地球や社会環境への影響

主星としての太陽

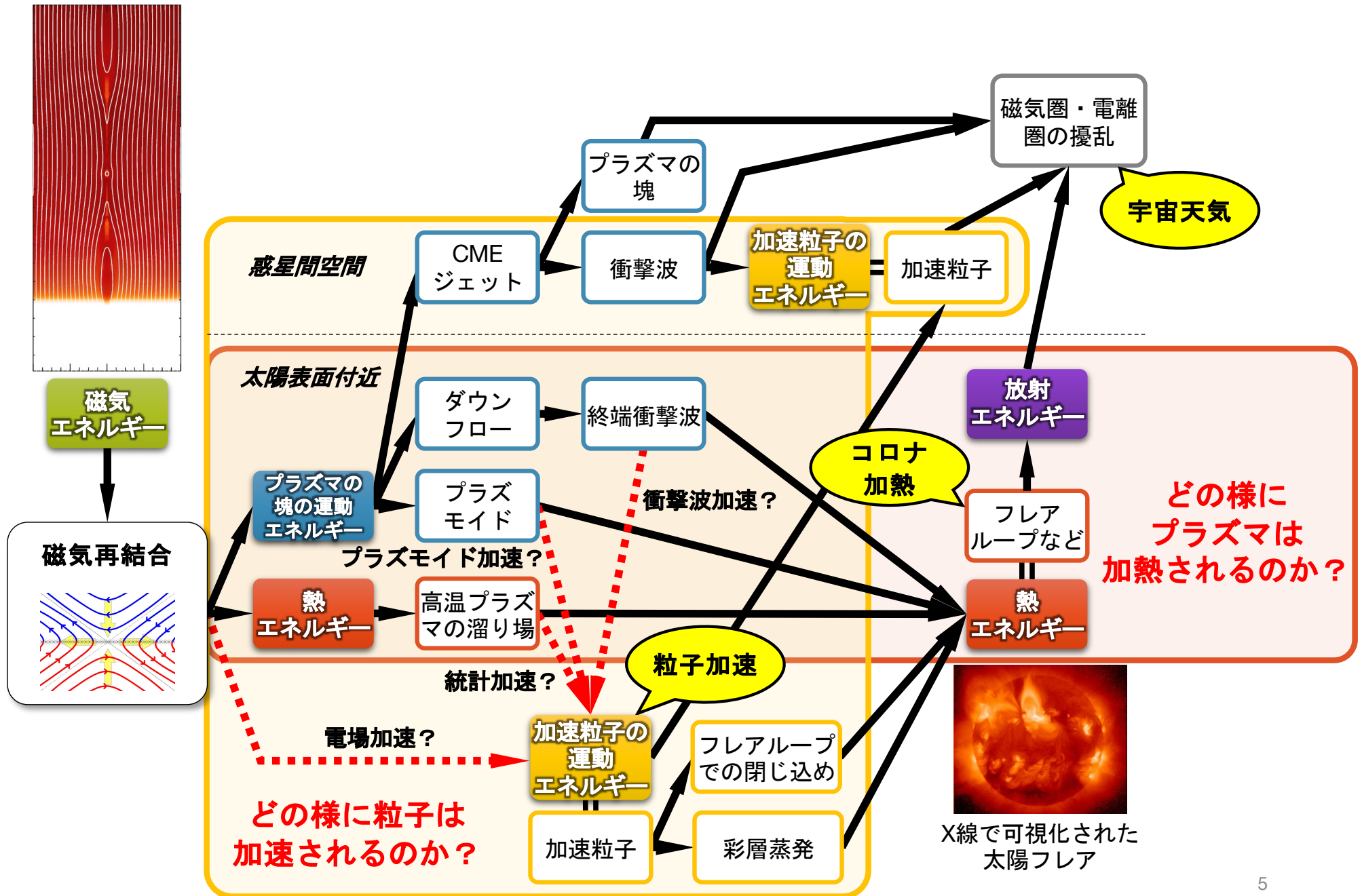
- 通信障害など（短期的影響・宇宙天気）
- 気候への影響（中長期的影響）
- 生命の進化（宇宙線）

星としての太陽

他の天体の指標としての太陽



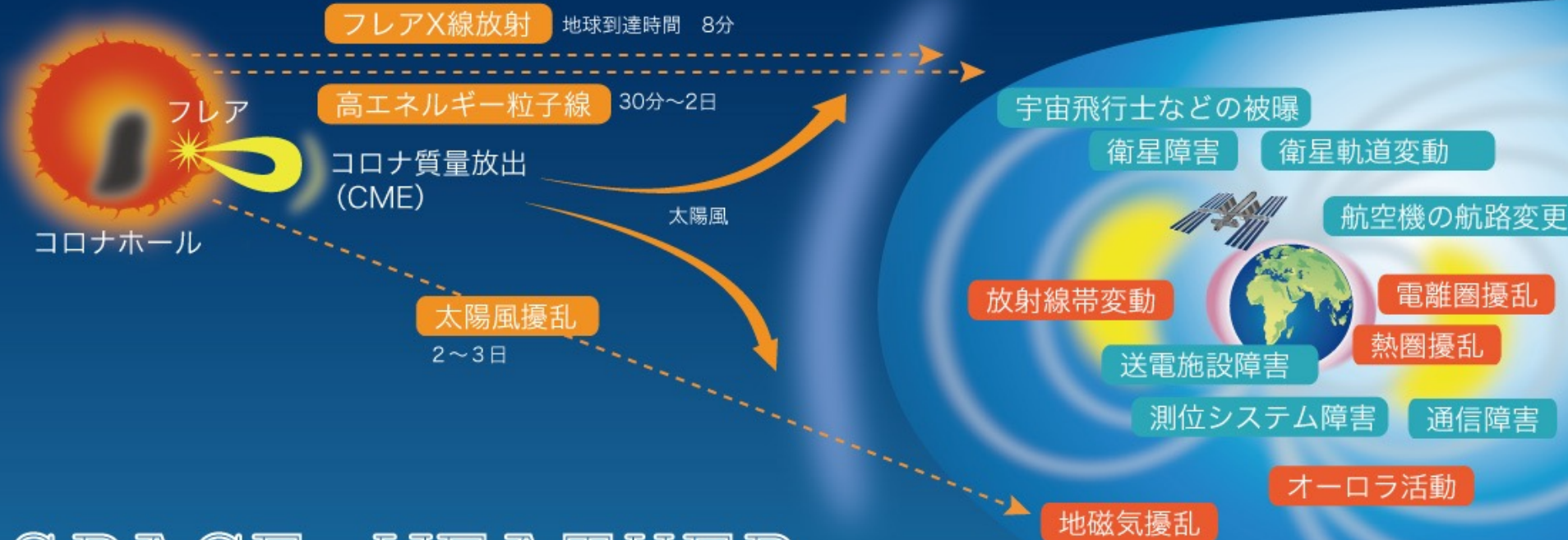
活動する宇宙（宇宙プラズマ物理学）としての太陽フレア



宇宙天気（地球への影響）

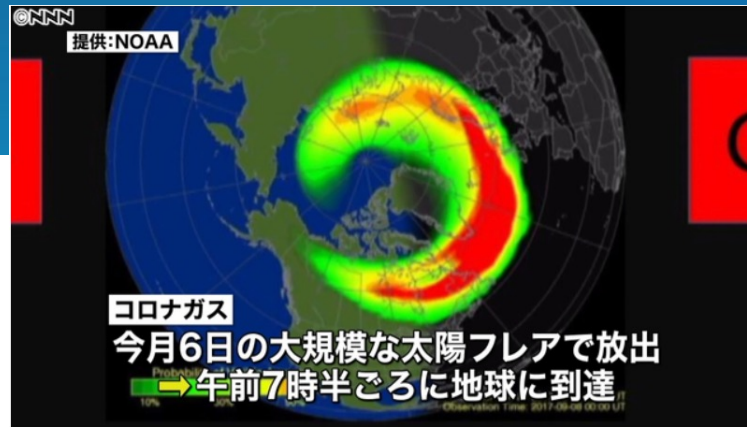
© NICT 情報通信研究機構

©NICT



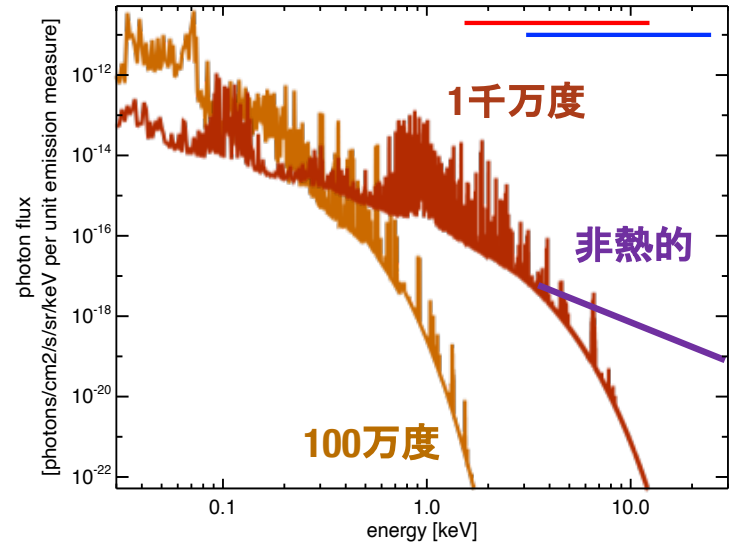
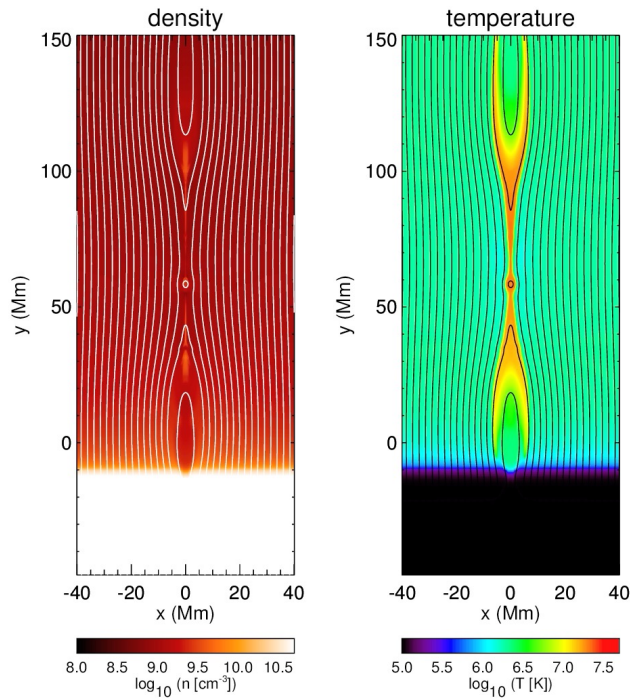
SPACE WEATHER

宇宙天気擾乱の発生から身近な社会への影響

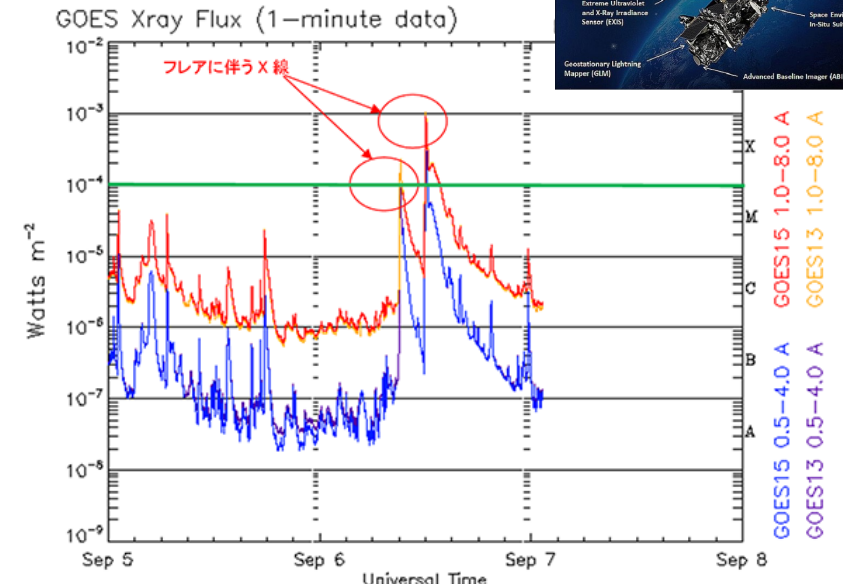
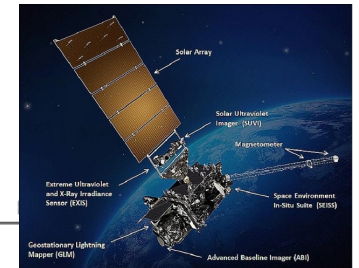


2017年
9月8日の
報道 ©NNN

太陽X線観測の必要性

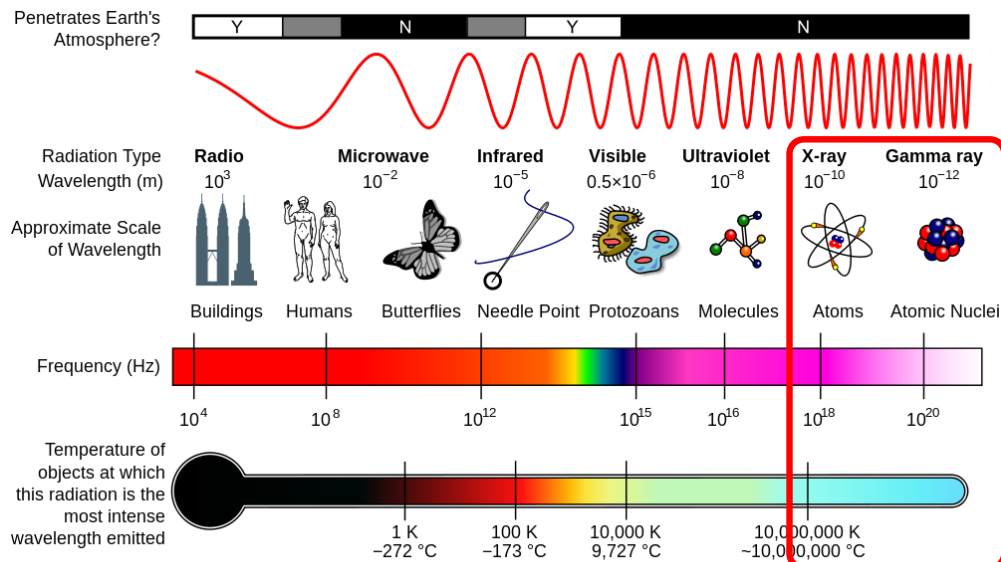


太陽活動の指標 米国気象衛星 GOES の X線強度計

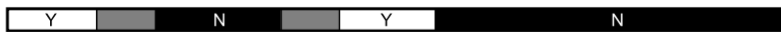


Updated 2017 Sep 7 01:20:12 UTC

NOAA/SWPC Boulder, CO USA



Penetrates Earth's Atmosphere?



Radiation Type	Radio	Microwave	Infrared	Visible	Ultraviolet	X-ray	Gamma ray
Wavelength (m)	10^3	10^{-2}	10^{-5}	0.5×10^{-6}	10^{-8}	10^{-10}	10^{-12}
Approximate Scale of Wavelength	Buildings	Humans	Butterflies	Needle Point	Protozoans	Molecules	Atoms
Frequency (Hz)	10^4	10^8	10^{12}	10^{15}	10^{16}	10^{18}	10^{20}
Temperature of objects at which this radiation is the most intense wavelength emitted		1 K -272 °C	100 K -173 °C	10,000 K 9,727 °C	10,000,000 K -10,000,000 °C		

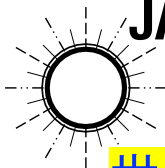
太陽X線観測の種類（画像が取得できる観測）

	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
すだれコリメーター	×	△	○	○	
X線ミラーとCCDカメラ	○	○	○	×	
狙うべき観測	○	○	○	○	定常的な観測は、まだ実現していない

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



世界初の太陽フレアに対するX線集光撮像分光観測 (高いダイナミックレンジと3つの分解能の同時達成)

「高精度X線集光ミラー」と「X線用高速度カメラ」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)

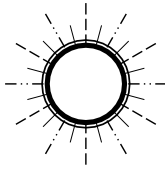


本計画で用いる技術を実証した観測ロケット実験の
webリリースページ

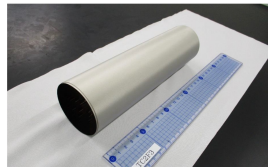
<https://hinode.nao.ac.jp/news/topics/foxsi-3/>

<https://hinode.nao.ac.jp/news/topics/foxsi-3-data-release-jp-20190115/>

観測装置のキー技術 (太陽フレア観測に向けた改良)

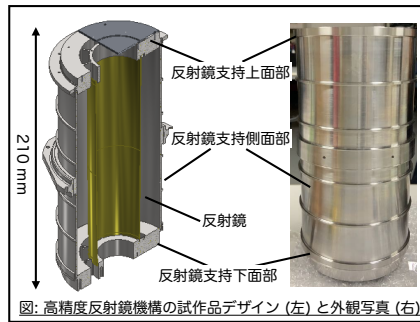
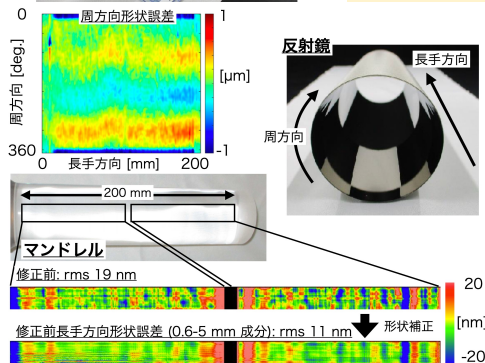


高精度電気鋳造X線ミラー



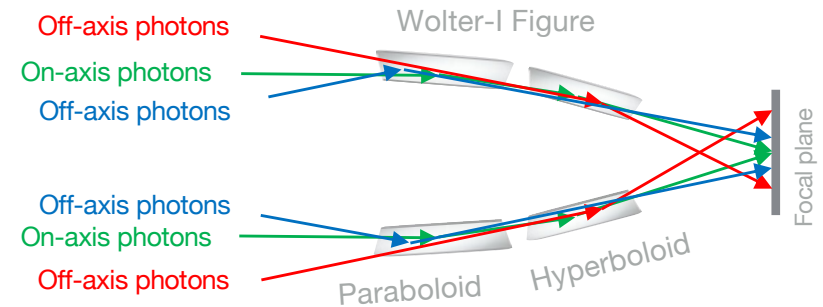
空間分解能の目標 (cf. FOXSI-3)

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



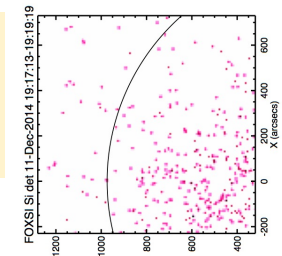
コリメーター

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

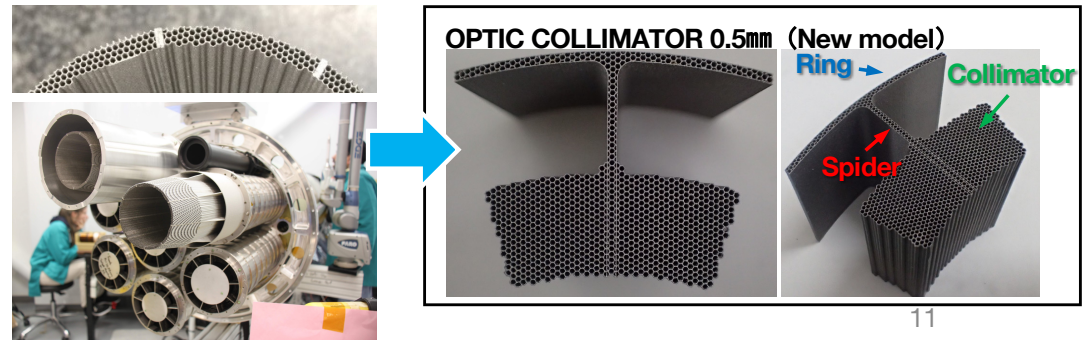
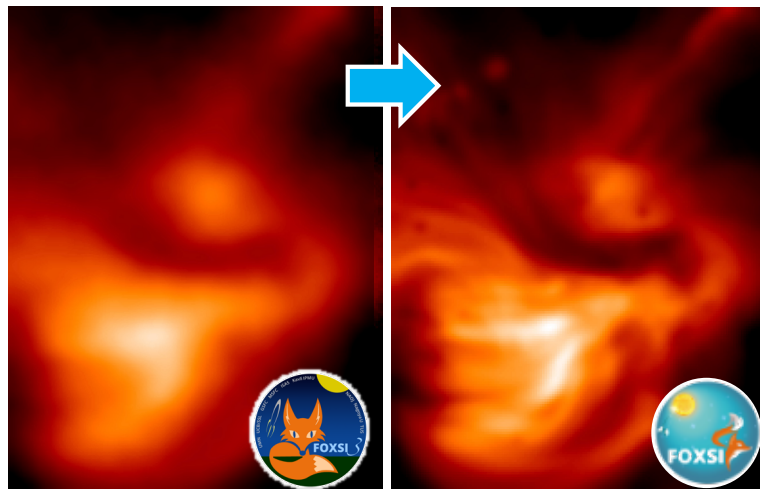


目標 (cf. FOXSI-3)

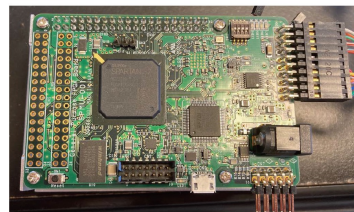
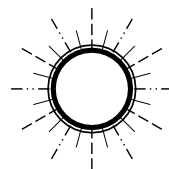
- アスペクト比 1:270 ($\leftarrow 1:190$)
- 穴の直径 0.5 mm ($\leftarrow 1$ mm)



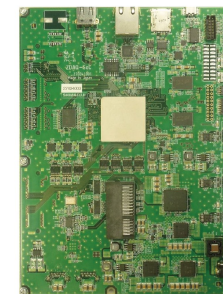
分角レベルの Off-axis photon (迷光) を除去するための高いアスペクト比をもつ多孔構造 → 金属3Dプリンターで造形



観測装置のキー技術 (太陽フレア観測に向けた改良)



SPMU-001 : ラズベリーパイコンピュータの基板サイズの中に、FPGA, メモリ、多信号I/Oの他、SpaceWireやEthernetなどの高速通信I/Fを実装。FOXSI-4では、CdTe DSDの制御、データ収集に使用。また、SpaceWire I/F, Routerとしても使用。

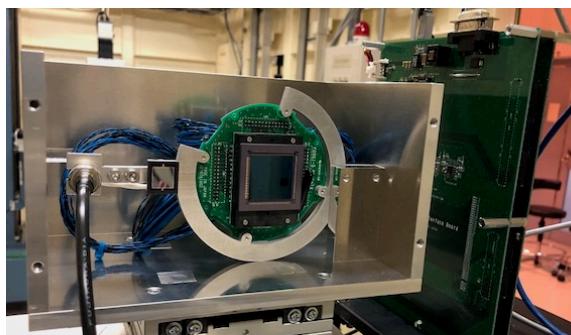


ZDAQ : FOXSI-3のCMOSの読み出し用に開発したSoC(Zynq)搭載I/O基板。~A5サイズ。FOXSI-4のCMOS検出器の制御、データ収集用として、小型化、機能強化(IO高速化)、機械的補強(ロケット振動対策)を施したものを製作中。

軟X線観測用 CMOSカメラ

CMOS カメラ (cf. FOXSI-3)

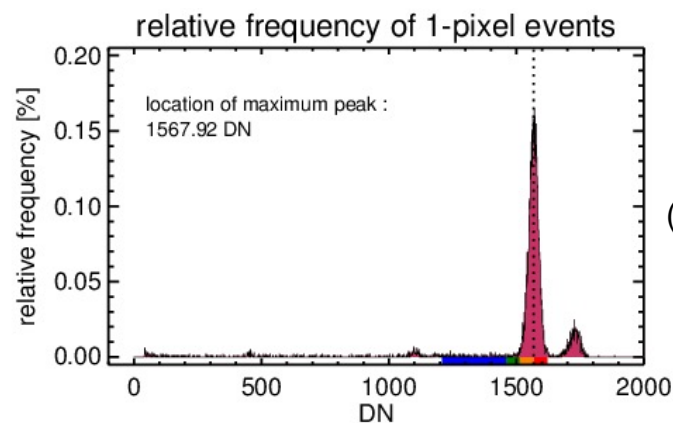
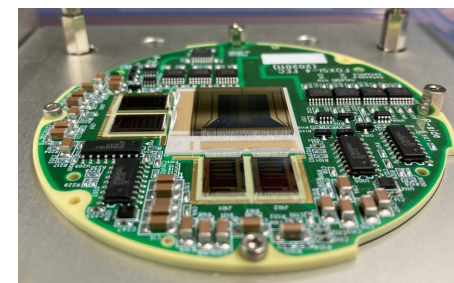
- 25 um厚の完全空乏化した感受層 (← 4 um)
- より高いエネルギーのX線に対する感度向上
- X線に対する耐性



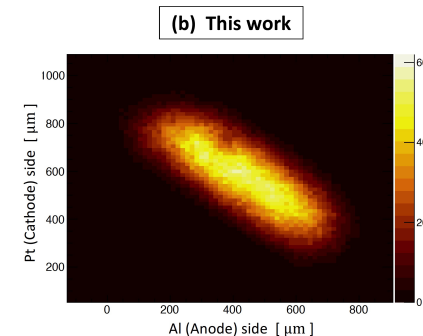
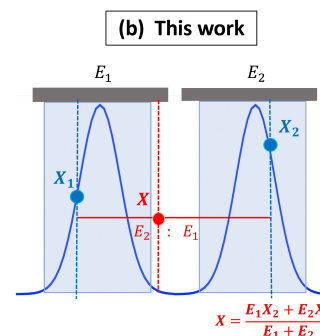
硬X線観測用 CdTe カメラ

CdTe カメラ (cf. FOXSI-3)

- 位置決定精度の向上 (~30 um ← 60 um)
- 検出速度の向上 (~5 k events / s / detector ← 500 events / s / detector)

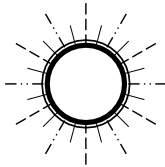


Photon counting capability of CMOS (with ⁵⁵Fe source)



Sub-strip resolution (Furukawa et al., 2020)

観測ロケット実験の限界

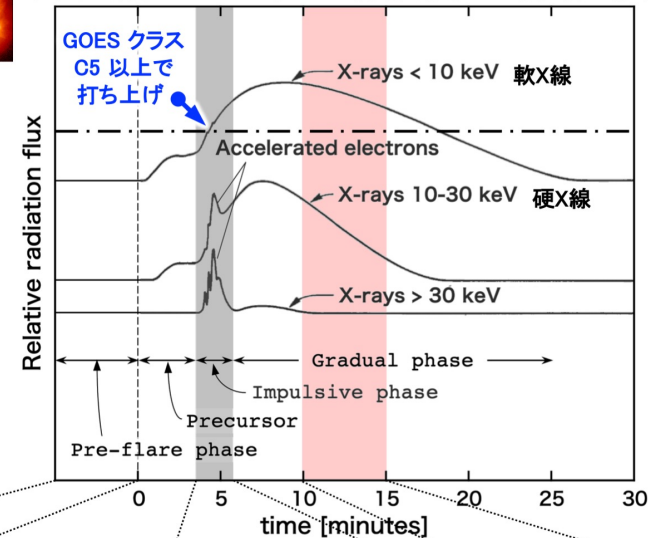


- **観測時間**は、弾道飛行中の**5分程度**に限られるため、太陽フレアの検出後の打ち上げとなる。
- そのため、**最もエネルギーの解放が激しいフレア初期の観測が行えない**。
- また、観測できるフレアは**1つのみ**。
- **フレア観測の技術は成熟してきており、タイムリーに、世界に先駆けて、衛星を用いた定常的な太陽観測を実現したい。**

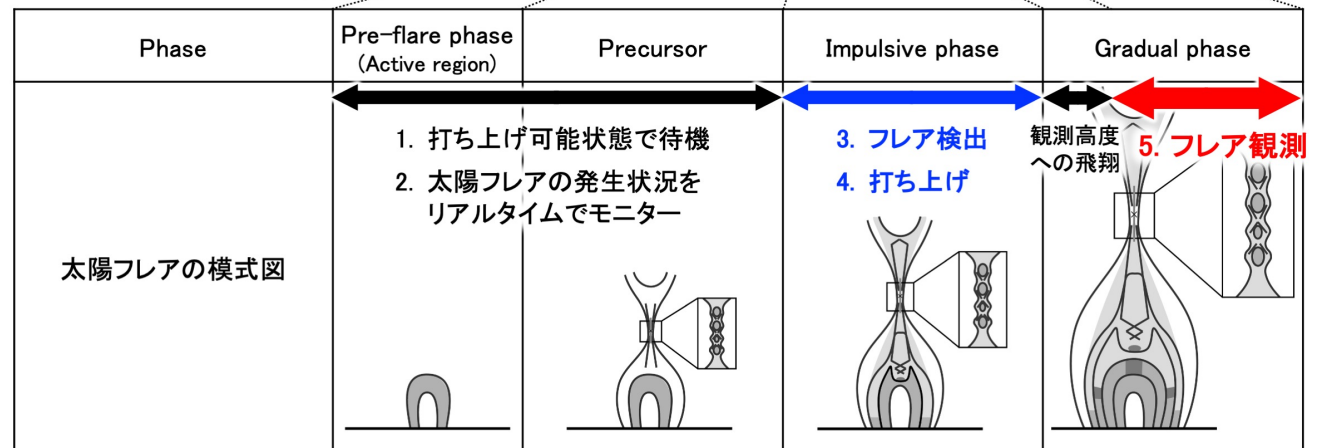
(a) フレアキャンペーンの打ち上げイメージ



(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

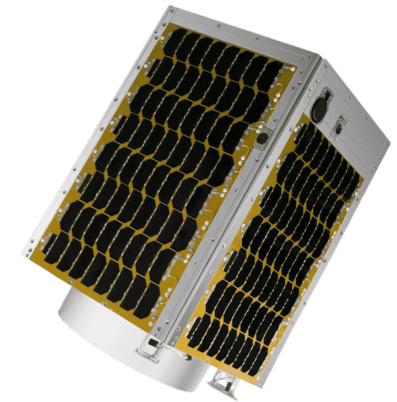
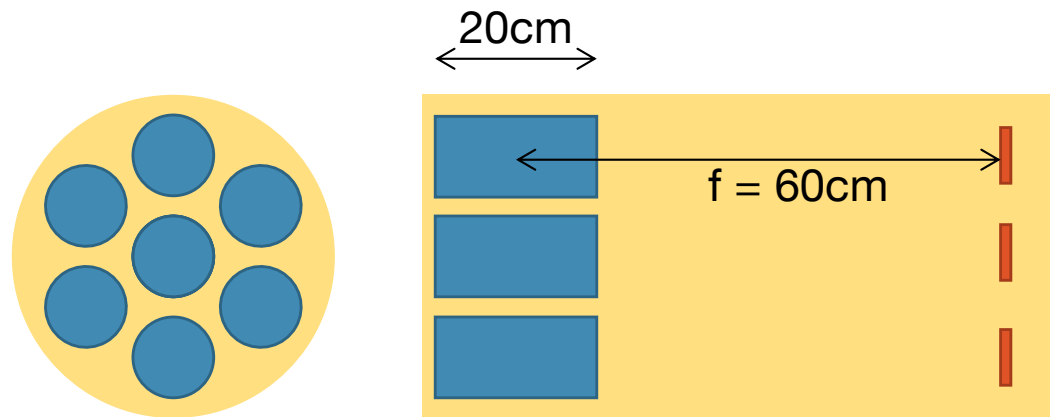


衛星のコンセプト 数十kg級の衛星の場合

※ フルサイズ (JAXA 公募型小型クラス) の衛星は「PhoENiX」として検討中

- ・ 制約 : $\Phi 40\text{cm}$ 、 $L=80\text{cm}$ 程度のミッション部スペース

口径10cm 以下のX線望遠鏡7本の構成
観測ロケット実験 FOXSI の小型版



キヤノン電子の
超小型衛星CE-SAT-I
をベースに検討

Wolter I 型の電気鋳造ミラー

観測ロケット実験 FOXSI-4 用に開発中。
このミラーの小型化で対応可能。
有効面積を稼ぐために、ネスト化 (多重化) や多層膜コーティングを施す。

裏面照射型CMOS検出器 CdTe検出器

観測ロケット実験FOXSI-3で開発済み。
太陽フレアを観測するFOXSI-4用に改良中。

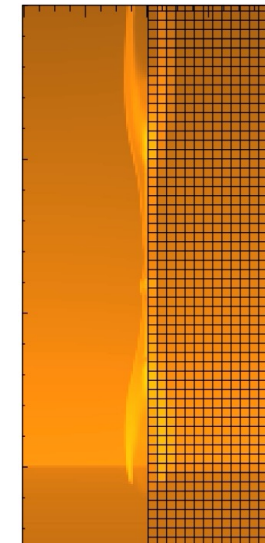
観測装置のスペック

数十kg級の衛星の場合

	軟X線観測用	硬X線観測用
焦点距離	60 cm	
ミラーの空間分解能（目標）	4 秒角以下 FWHM (10 秒角以下 HPD)	
検出器	裏面照射型CMOS検出器 (メインの検出器として4台)	CdTe検出器 (3台)
ピクセルサイズ	11 um	30 um (位置決定精度)
プレートスケール @ f = 60 cm	3.8 秒角 (cf. ようこう衛星が 2.455秒角)	10 秒角 (位置決定精度)

【特徴】

- 世界初となる定常的な太陽X線集光撮像分光観測の実現。
- 軟X線装置の空間分解能は、太陽コロナ研究で大きな成果を出した「ようこう」衛星より若干悪い程度。
- 一方で、高いダイナミックレンジを確保した上で、位置・時間・エネルギーといった3つの情報が同時取得できる。



衛星（バス）に対する要求 数十kg級の衛星の場合

- サイズ・重量：500mm×500mm×850mm 程度・85kg程度（バス65kg程度、観測装置20kg程度）
- 姿勢制御系、通信系等への要求：
 - 絶対指向精度：10分角以下（太陽面（直径30分角）の2/3が視野に入ること）
 - 指向安定性：1分角以下/10秒
 - 指向決定精度：4秒角以下（望遠鏡の空間サンプリング以下）
- 通信系：Xバンド（最低Sバンド）
- 投入したい軌道

サイエンスの点では観測時間が長時間確保できる太陽同期極軌道が望ましいが、民生品の使用を想定し放射線環境の緩い赤道軌道もありえる。

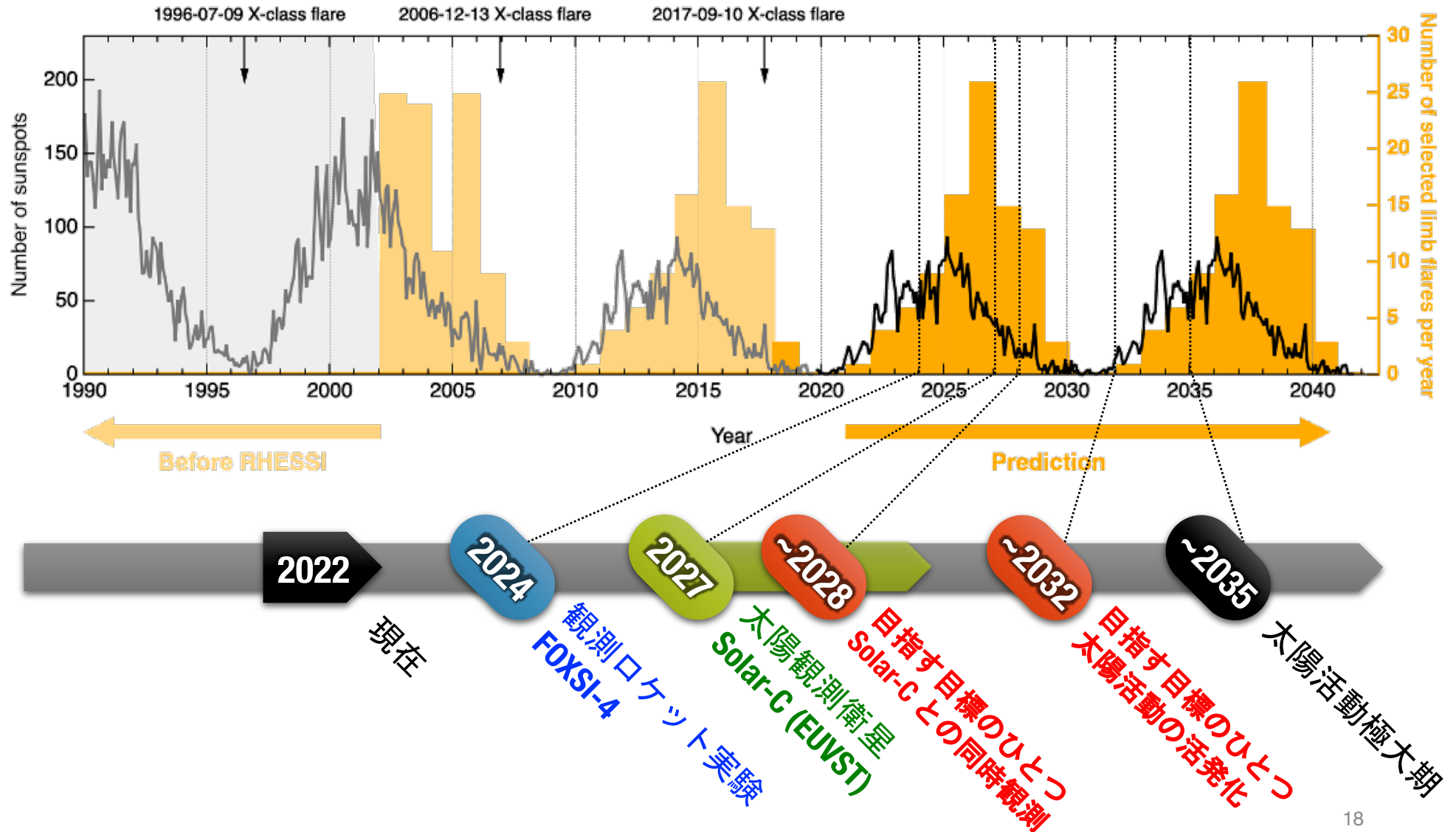
※ より小型の衛星の場合でも（例えば6U）、性能に一部制限は生じるが、同様のコンセプトで規模感・コスト感に見合った観測が実現できると考えている。

超小型衛星を用いた 太陽フレアX線集光撮像分光観測のアピールポイント

- 太陽は地球に最も近い恒星であり、高エネルギープラズマ現象が詳細に観測可能である。
- そのため小型の観測装置でも新規性を打ち出せば一級の科学成果が期待できる。
- 本計画の新規性は世界初の定常的な太陽X線集光撮像分光（高いダイナミックレンジを確保した上で、位置・時間・エネルギーといった3つの情報が同時取得できる）であるが、太陽活動のモニター（宇宙天気）の観点でも新しく、社会的貢献にも寄与できる（cf. GOES衛星はX線の強度のみのモニター）。
- 観測技術の開発は順調に進んでいる（観測ロケット実験で実証）。
 - ミラーは電気鋳造技術で製作するため、一度、母型の開発が完了すれば複製が可能であり低コスト化が見込める。

【超小型衛星への期待】超小型衛星の低コスト化と打ち上げの高頻度化が実現すれば、タイムリーな（世界に先駆けた）観測が実現できる。また太陽活動周期（11年周期）をカバーするための衛星のシリーズ化（定期的な機器の入れ替えとアップデート）の道も拓いてくれる。

スケジュール (案)



計画のサマリ

概要

- 太陽系最大の爆発現象である「太陽フレア」が引き起こす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を目的とする。
- そこで太陽フレアが生み出す高エネルギープラズマの詳細観測を行うために、定常的なX線集光撮像分光観測を実施する。これは、空間・時間・エネルギー分解能をすべて備えた定常的な太陽X線観測で、実現すれば世界初となる。
- X線の強度は太陽活動の指標となっており、太陽X線の定常的なモニターは宇宙天気（太陽フレアによる地球周辺環境への影響）の観点でも極めて重要である。



本ミッションの狙い

- 太陽は地球に最も近い恒星であり、高エネルギープラズマ現象が詳細に観測可能である。
- そのため小型の観測装置でも新規性を打ち出せば一級の科学成果が期待できる。
- 本計画の新規性は世界初の定常的な太陽X線集光撮像分光であるが、太陽活動のモニター（宇宙天気）の観点でも新しく、社会的貢献にも寄与できる。