

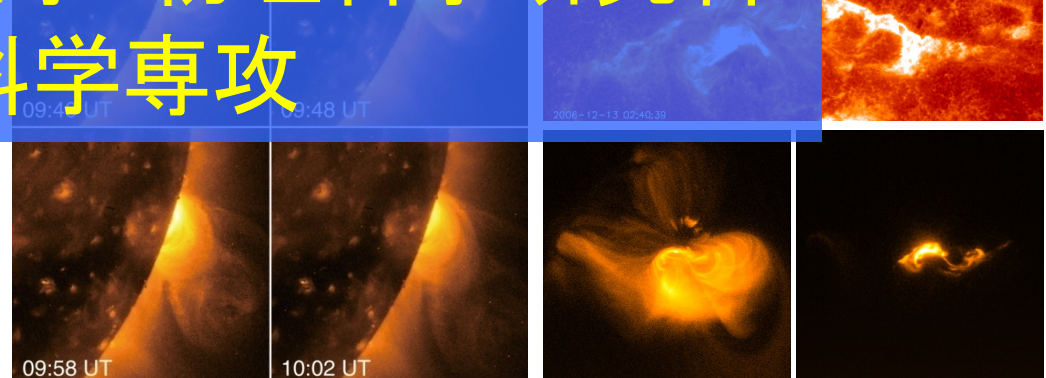
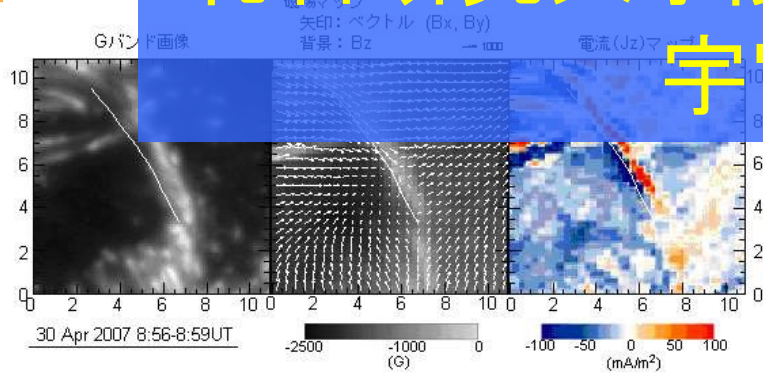
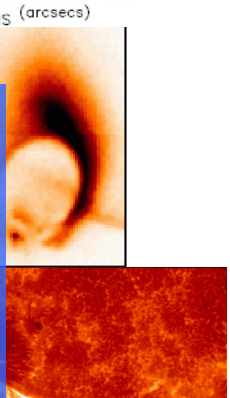
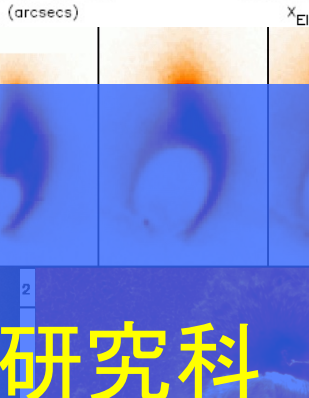
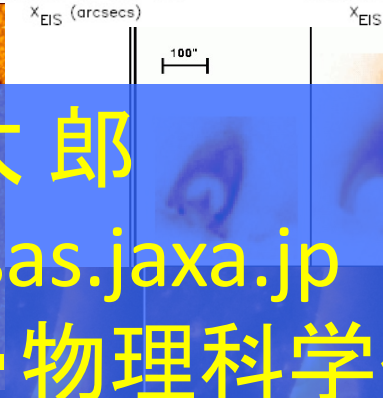
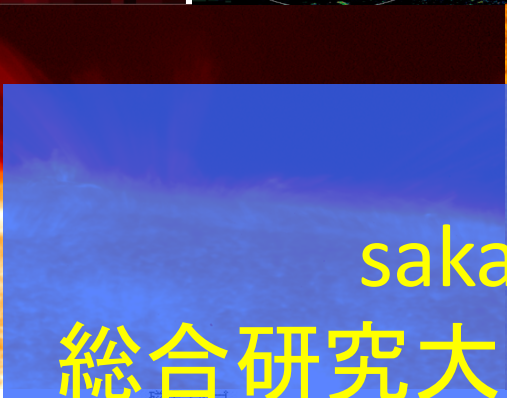
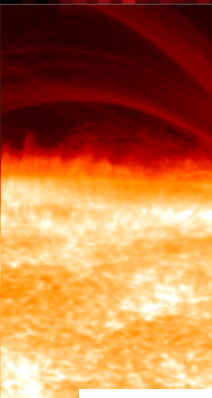
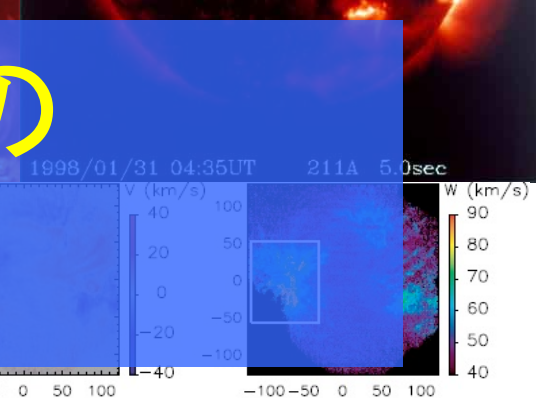
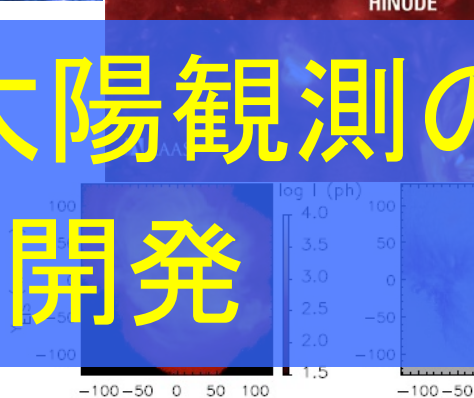
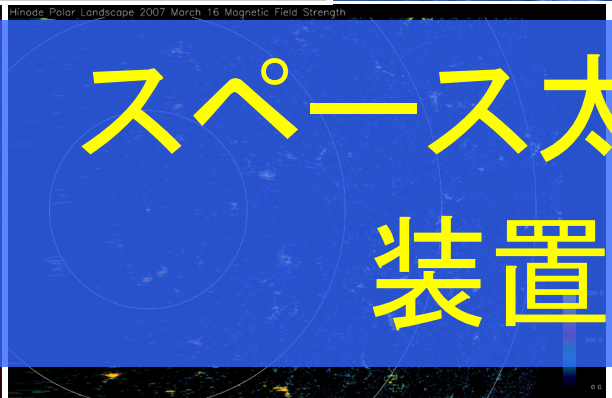
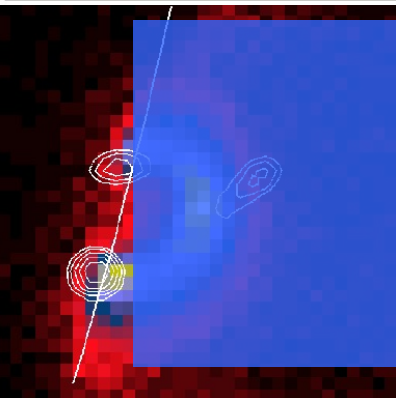
スペース太陽観測の 装置開発

坂尾 太郎

sakao@solar.isas.jaxa.jp

総合研究大学院大学・物理科学研究科

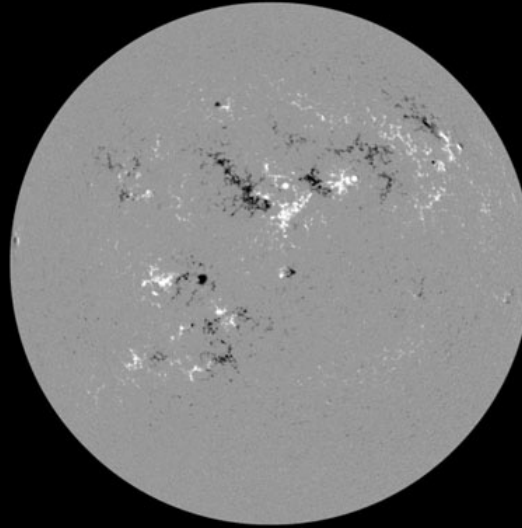
宇宙科学専攻



Photosphere/VL

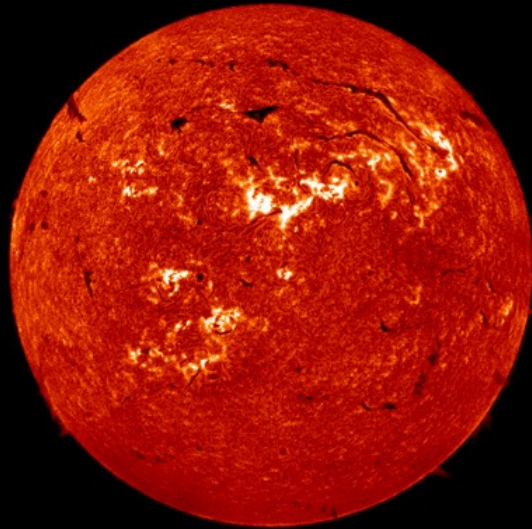


Photosphere/Mag. distribution

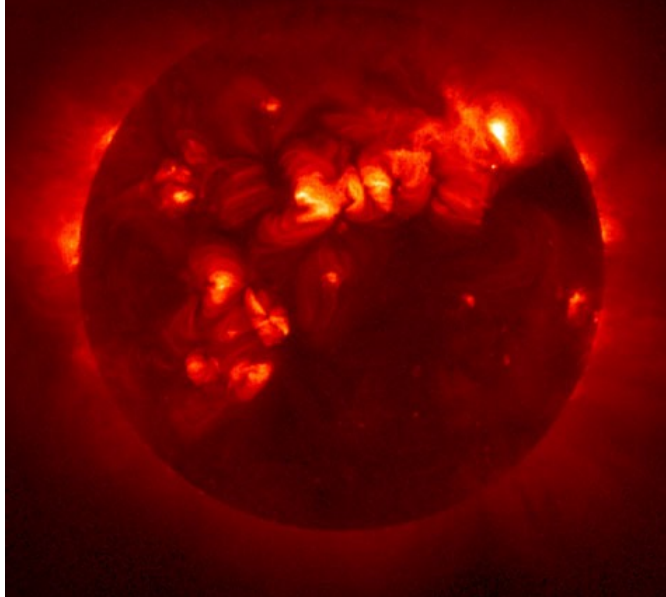


The Sun at various atmospheric layers

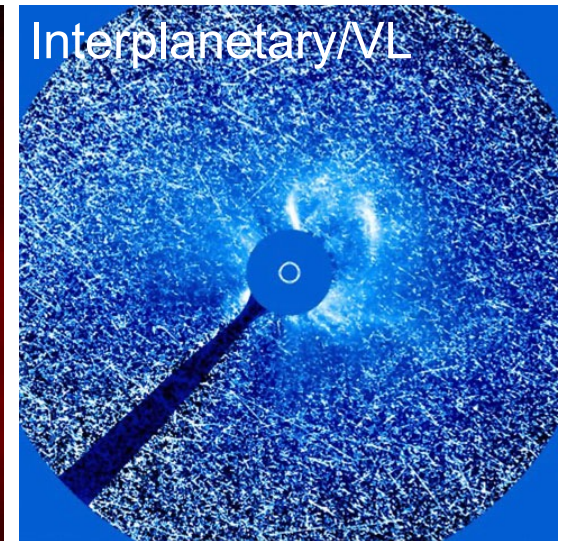
Chromosphere/H α



Corona/Soft X-ray

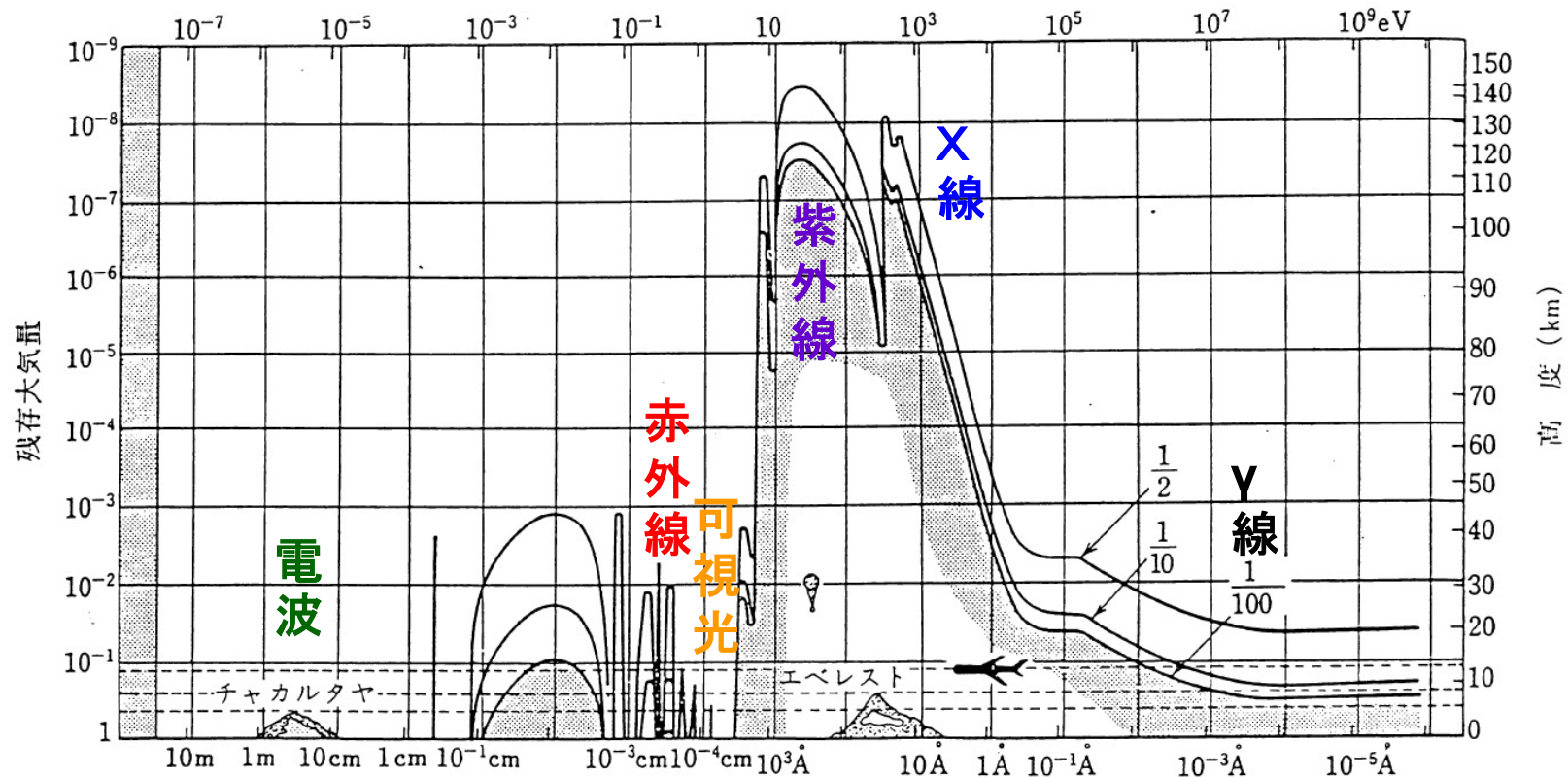


Interplanetary/VL



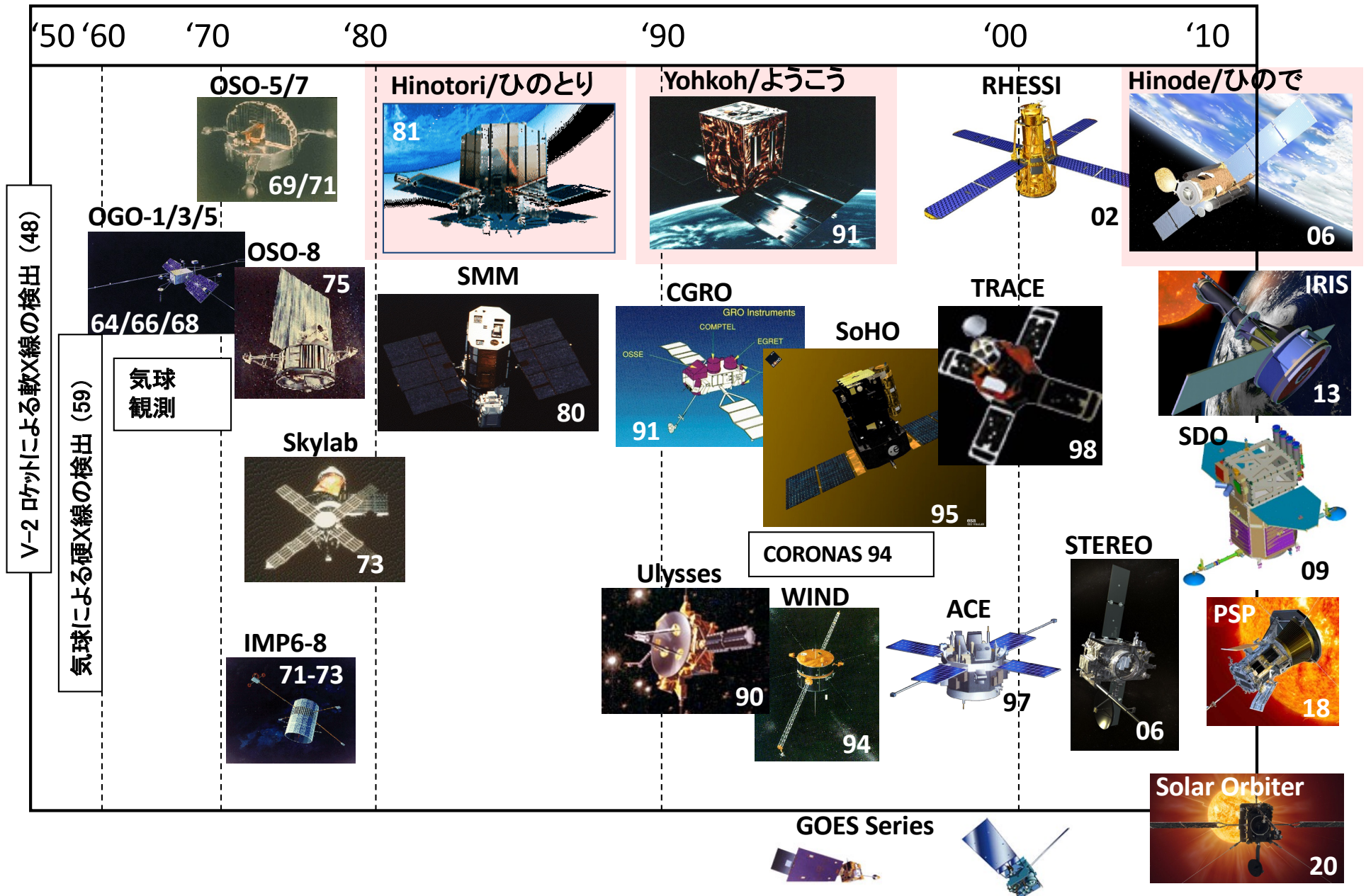
(http://trace.lmsal.com/POD/NAS2002_otherimages.htmlより)

地球大気による電磁波の吸収

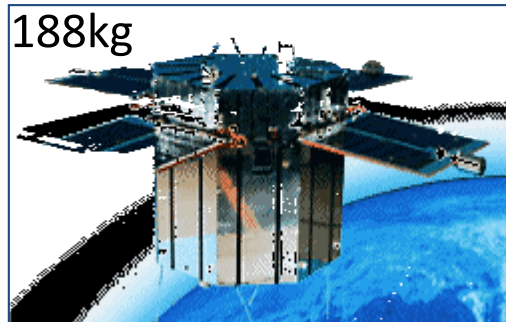


(小田稔「宇宙線」)

宇宙からの太陽観測



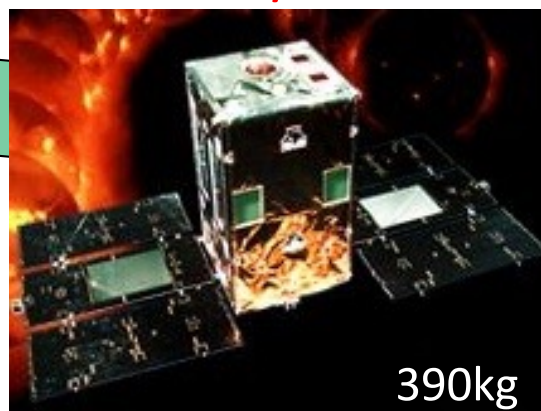
日本のスペース太陽物理学



ひのとり/ASTRO-A (1981-1982)

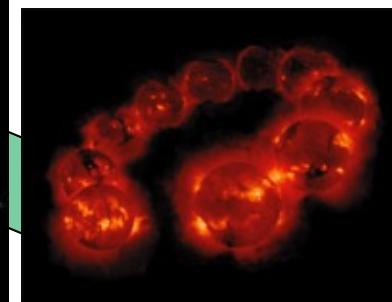
太陽フレアのX線・ γ 線観測

ようこう/SOLAR-A (1991-2001)



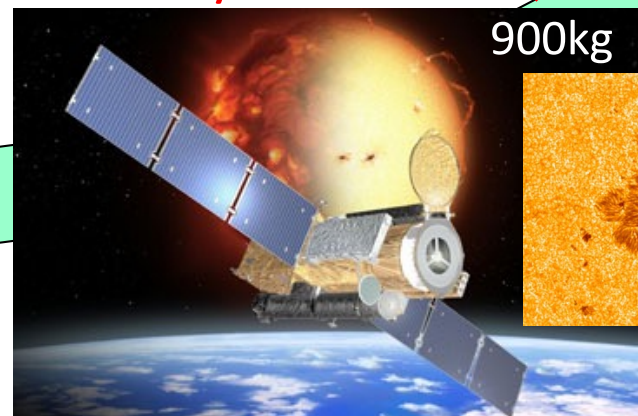
390kg

硬X線フレアと軟X線コロナ



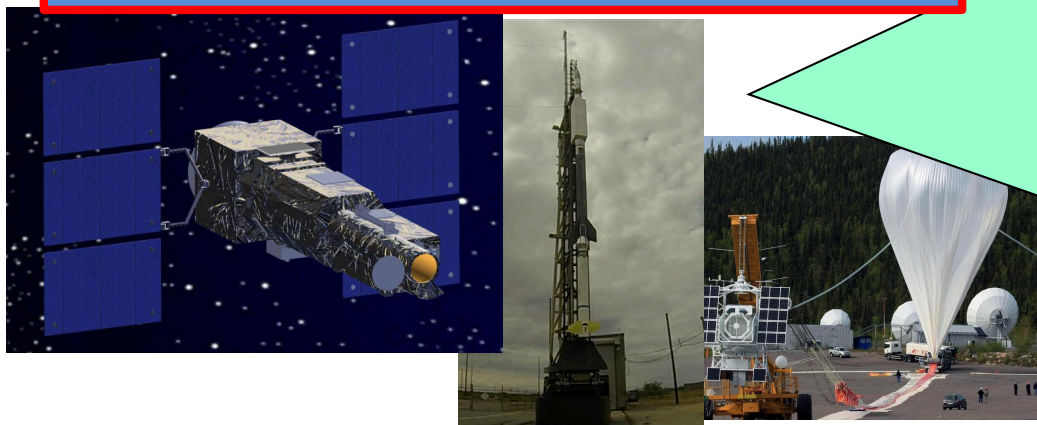
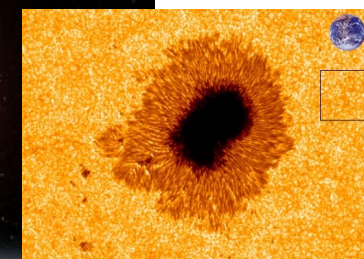
飛翔体による
将来太陽観測

ひので/SOLAR-B (2006-)



900kg

光球面磁場と軟X線・EUVコロナ



日本のスペース太陽グループの装置開発

- **ひのとり衛星** (1981-82); ~190kg
 - X線望遠鏡(すだれコリメータ)、X線精密分光計、X線スペクトル計

- **ようこう衛星** (1991-2001); ~390kg
 - 軟X線望遠鏡のCCDデータ処理部
 - 硬X線望遠鏡

- **XUVドップラー望遠鏡** [ISAS観測ロケット] (1998)
 - 直入射多層膜ミラー
 - 裏面照射型CCDカメラ
 - 可動副鏡機構と制御用センサ

- **太陽フレア硬X線スペクトル計** [ISAS気球実験] (2002)
 - CdTeスペクトル計

これまでの開発



- **ひので衛星** (2006-); ~900kg
 - 可視光磁場望遠鏡の望遠鏡部・光学設計
 - X線望遠鏡のCCDカメラ
 - コンタミネーションコントロール

現役で観測中

- **CLASPシリーズ** [NASA観測ロケット] (CLASP 2015, CLASP2 2019, CLASP2.1 2021)
 - 望遠鏡部、光学素子、偏光変調装置(可動機構)

- **FOXSIシリーズ** [NASA観測ロケット] (FOXSI-3 2018, FOXSI-4 2024 打上げ予定)
 - 軟X線CMOS検出器 (、硬X線ミラー、硬X線検出器)

- **SUNRISE-3** [ドイツ等国際気球実験] (2022飛翔予定)
 - 近赤外線偏光分光装置

現在進行中!!

- **イプシロン衛星計画** (2020年代中頃~)

- 公募型小型4号機 SOLAR-C_EUVST ... 衛星開発検討、超高精度太陽姿勢計、可動機構
- 将来衛星計画 (PhoENiX) ... 精密X線ミラー、軟X線CMOS検出器 → X線光子計測

日本のスペース太陽グループの装置開発

- **ひのとり衛星** (1981-82); ~190kg
 - X線望遠鏡(すだれコリメータ)、X線精密分光計、X線スペクトル計

- **ようこう衛星** (1991-2001); ~390kg
 - 軟X線望遠鏡のCCDデータ処理部
 - 硬X線望遠鏡

- **XUVドップラー望遠鏡** [ISAS観測ロケット] (1998)
 - 直入射多層膜ミラー
 - 裏面照射型CCDカメラ
 - 可動副鏡機構と制御用センサ

- **太陽フレア硬X線スペクトル計** [ISAS気球実験] (2002)
 - CdTeスペクトル計

- **ひので衛星** (2006-); ~900kg
 - 可視光磁場望遠鏡の望遠鏡部・光学設計
 - X線望遠鏡のCCDカメラ
 - コンタミネーションコントロール

- **CLASPシリーズ** [NASA観測ロケット] (CLASP 2015, CLASP2 2019, CLASP2.1 2021)
 - 望遠鏡部、光学素子、偏光変調装置(可動機構)
- **FOXSIシリーズ** [NASA観測ロケット] (FOXSI-3 2018, FOXSI-4 2024 打上げ予定)
 - 軟X線CMOS検出器 (、硬X線ミラー、硬X線検出器)

- **SUNRISE-3** [ドイツ等国際気球実験] (2022飛翔予定)
 - 近赤外線偏光分光装置

- **イプシロン衛星計画** (2020年代中頃~)

- 公募型小型4号機 SOLAR-C_EUVST ... 衛星開発検討、超高精度太陽姿勢計、可動機構
- 将来衛星計画 (PhoENiX) ... 精密X線ミラー、軟X線CMOS検出器 → X線光子計測

これまでの開発



現役で観測中

現在進行中!!

日本のスペース太陽グループの装置開発

- **ひのとり衛星** (1981-82); ~190kg
 - X線望遠鏡(すだれコリメータ)、X線精密分光計、X線スペクトル計

- **ようこう衛星** (1991-2001): ~390kg

- 車
- 砲

- **XUVI**

- 砲
- 砲
- 砲

- **太陽**

- 砲

- **ひの**

- 砲
- X
- 砲

- **CLAS**

- 砲

- **FOX**

- 車

- **SUN**

- 砲

- **イプ**

- 砲
- 砲



これまでの開発

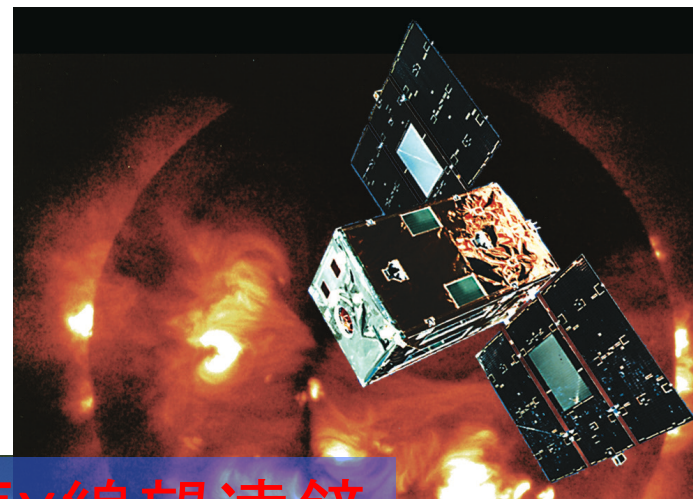


で観測中

進行中!!

動機構

ようこう衛星搭載の X線望遠鏡



軟X線望遠鏡



硬X線望遠鏡



斜入射光学系

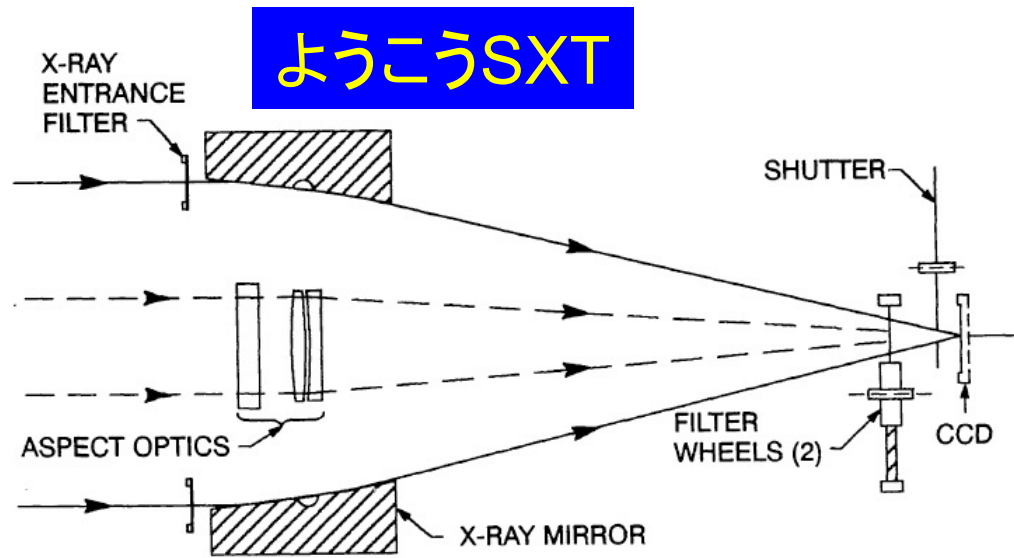


Fig. 1a. Schematic illustration of the optical concept and key elements of the SXT.

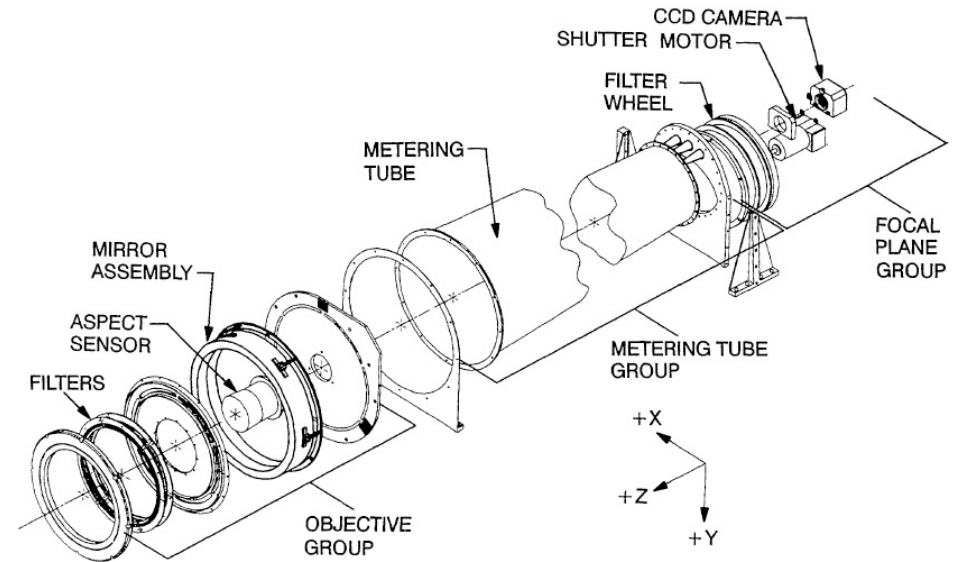
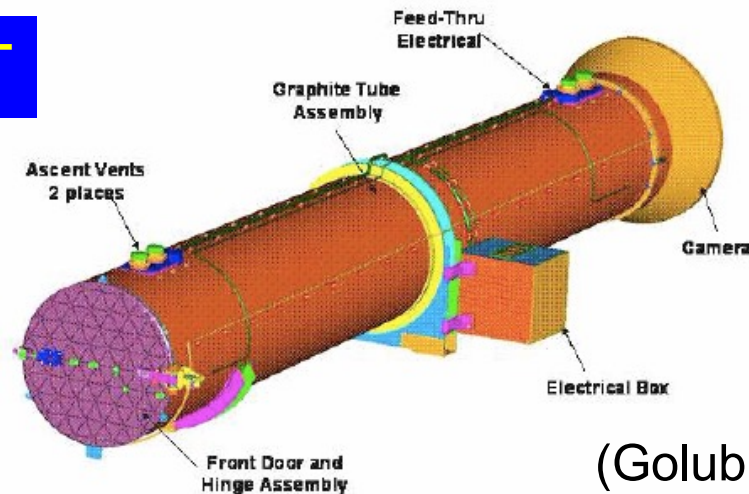


Fig. 1b. Exploded diagram of the SXT. Sub-assemblies mentioned in the text are identified.

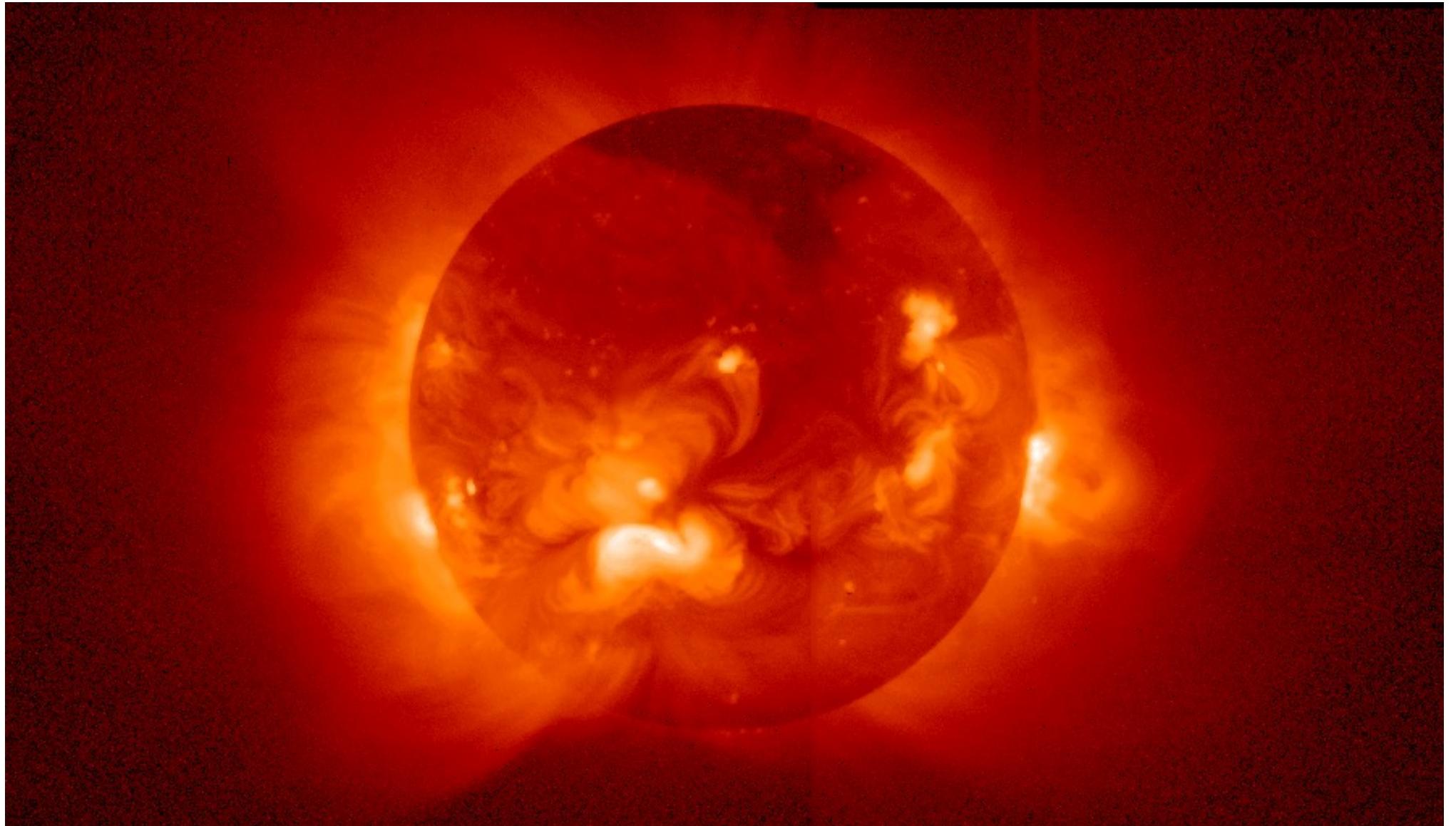
(Tsuneta et al. 1991)

ひのでXRT



(Golub et al. 2007)

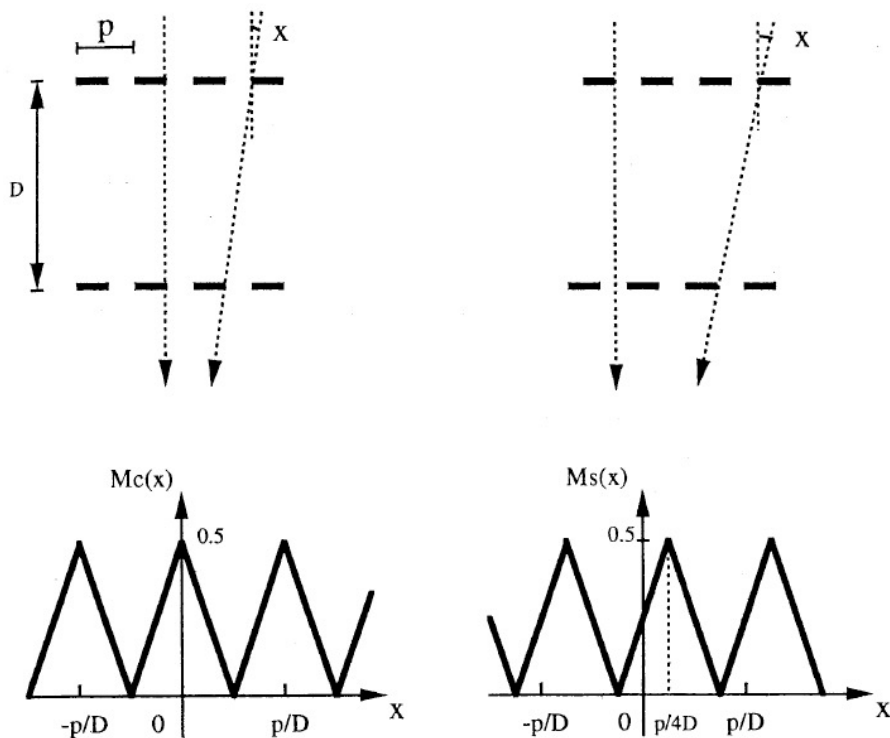
斜入射光学系



Front Door and
Hinge Assembly

(Golub et al. 2007)

すだれコリメータの原理：1次元

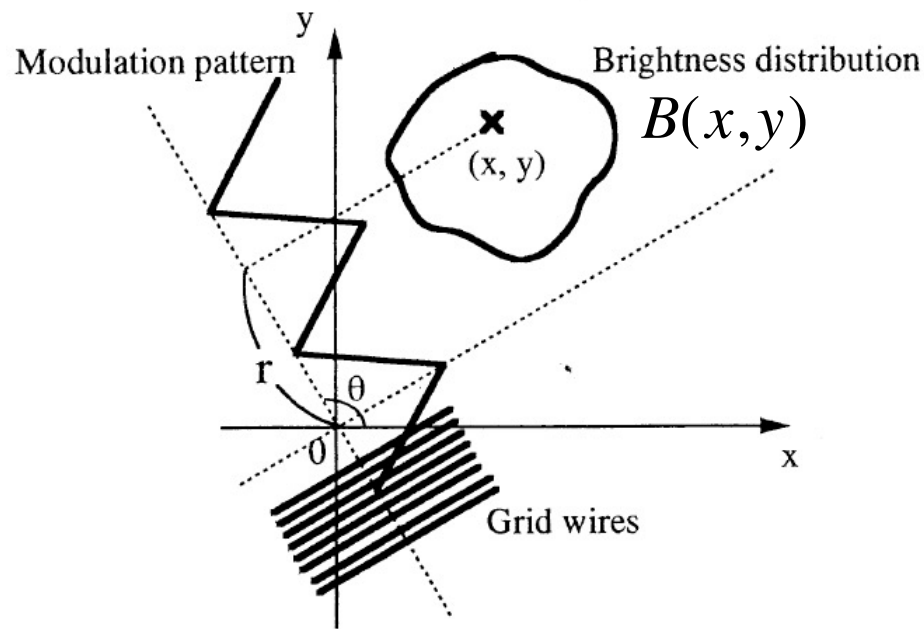


(a) cosine grids

(b) sine grids

$$M_C(kr) = \frac{2}{\pi^2} \left\{ \frac{\pi^2}{8} + \cos(kr) + \frac{1}{9} \cos(3kr) + \frac{1}{25} \cos(5kr) + \dots \right\}$$

$$M_S(kr) = M_C\left(kr - \frac{\pi}{2}\right)$$

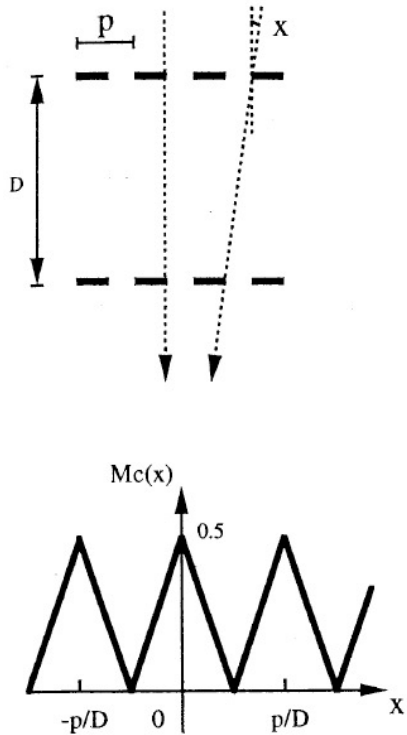


$$b_C(k, \theta) = A \int B(x, y) M_C(kr) dx dy$$

$b_C(k, \theta)$: 検出器の受けるカウントレート

A : すだれコリメータの有効面積

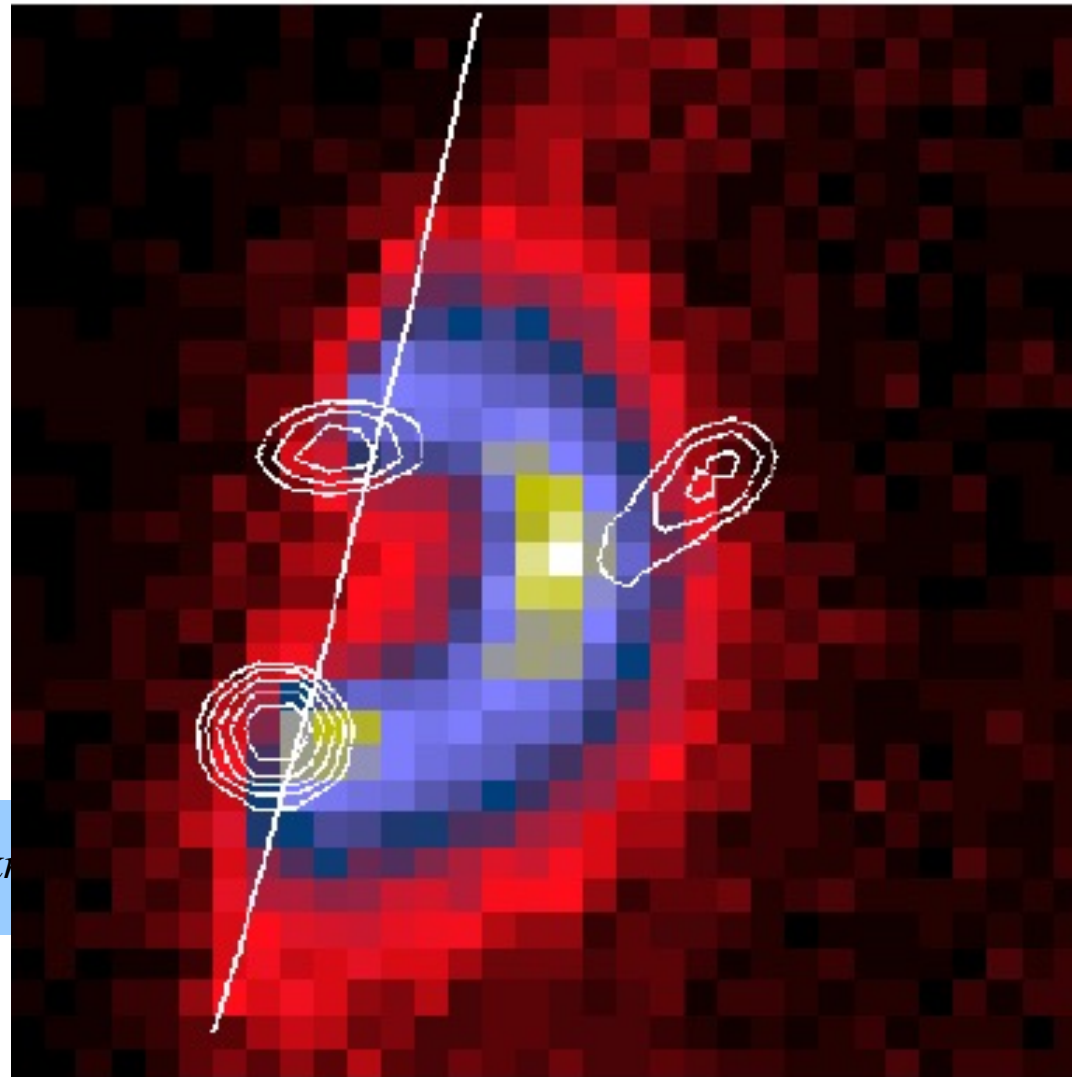
すだれコリメータの原理：1次元



(a) cosine grids

$$M_C(kr) = \frac{2}{\pi^2} \left\{ \frac{\pi^2}{8} + \cos(kr) \right\}$$

$$M_S(kr) = M_C\left(kr - \frac{\pi}{2}\right)$$



Brightness distribution
 $B(x,y)$

wires

$$\int \int B(x,y) M_C(kr) dx dy$$

計測されるカウントレート
の有効面積

日本のスペース太陽グループの装置開発

- **ひのとり衛星** (1981-82); ~190kg
 - X線望遠鏡(すだれコリメータ)、X線精密分光計、X線スペクトル計

- **ようこう衛星** (1991-2001); ~390kg
 - 軟X線望遠鏡のCCDデータ処理部
 - 硬X線望遠鏡

- **XUVドップラー望遠鏡** [ISAS観測ロケット] (1998)
 - 直入射多層膜ミラー
 - 裏面照射型CCDカメラ
 - 可動副鏡機構と制御用センサ

- **太陽フレア硬X線スペクトル計** [ISAS気球実験] (2002)
 - CdTeスペクトル計

- **ひので衛星** (2006-); ~900kg
 - 可視光磁場望遠鏡の望遠鏡部・光学設計
 - X線望遠鏡のCCDカメラ
 - コンタミネーションコントロール

- **CLASPシリーズ** [NASA観測ロケット] (CLASP 2015, CLASP2 2019, CLASP2.1 2021)
 - 望遠鏡部、光学素子、偏光変調装置(可動機構)
- **FOXSIシリーズ** [NASA観測ロケット] (FOXSI-3 2018, FOXSI-4 2024 打上げ予定)
 - 軟X線CMOS検出器 (、硬X線ミラー、硬X線検出器)

- **SUNRISE-3** [ドイツ等国際気球実験] (2022飛翔予定)
 - 近赤外線偏光分光装置

- **イプシロン衛星計画** (2020年代中頃~)

- 公募型小型4号機 SOLAR-C_EUVST ... 衛星開発検討、超高精度太陽姿勢計、可動機構
- 将来衛星計画 (PhoENiX) ... 精密X線ミラー、軟X線CMOS検出器 → X線光子計測

これまでの開発



現役で観測中

現在進行中!!

XDT (XUV Doppler Telescope) 反射率レスポンス

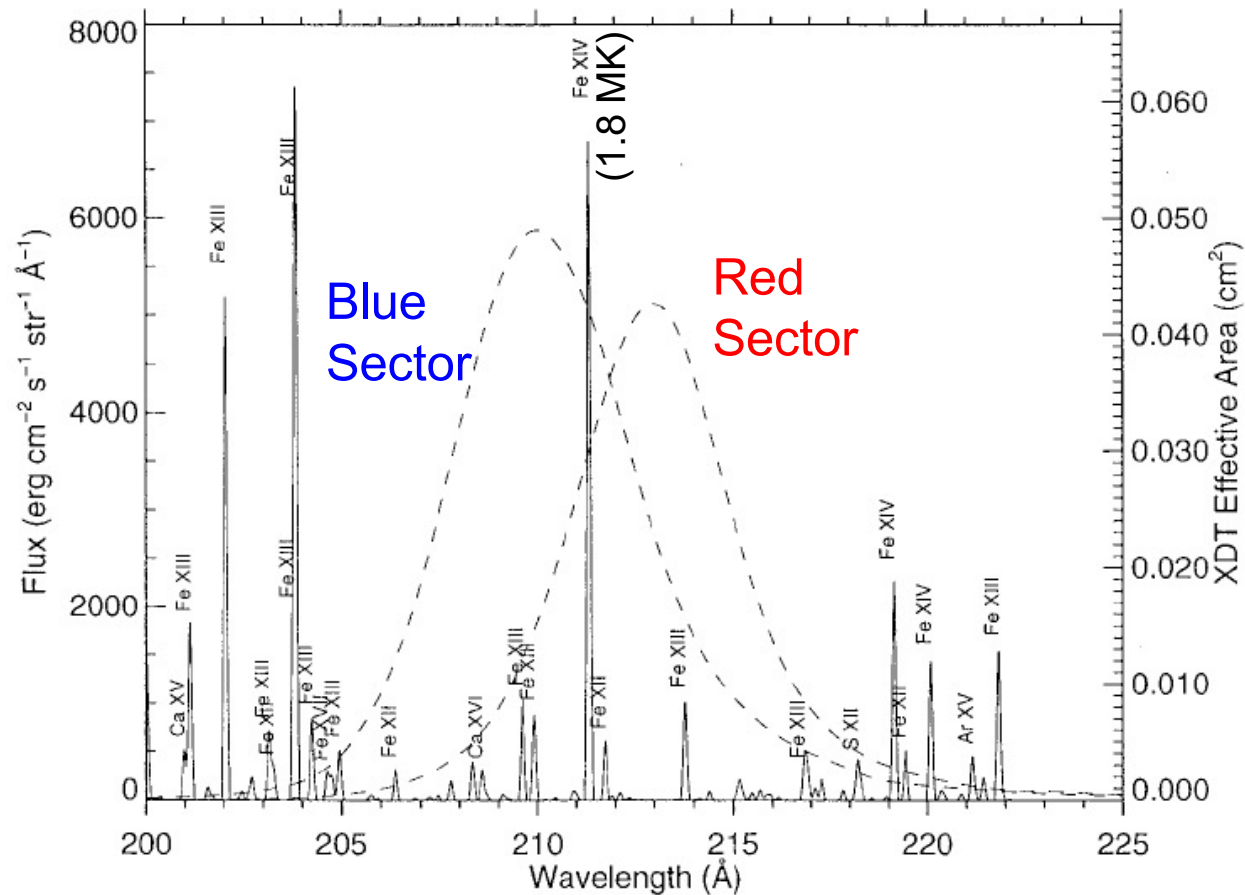
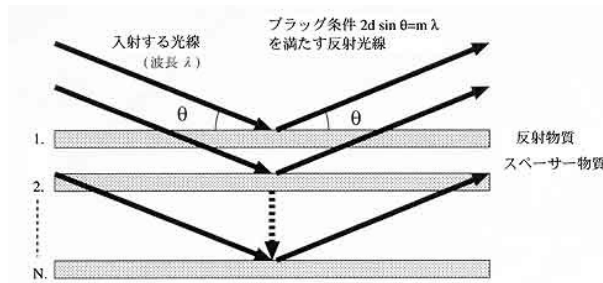


Figure 3. Distribution of emission lines around the target line of Fe XIV 211.3 Å. Intensity of each line has been calculated using a differential emission measure profile of an active region reported in Brosius *et al.* (1996). Response profiles of the blue and red bands of the XDT, in units of effective area, are also shown in dashed lines.

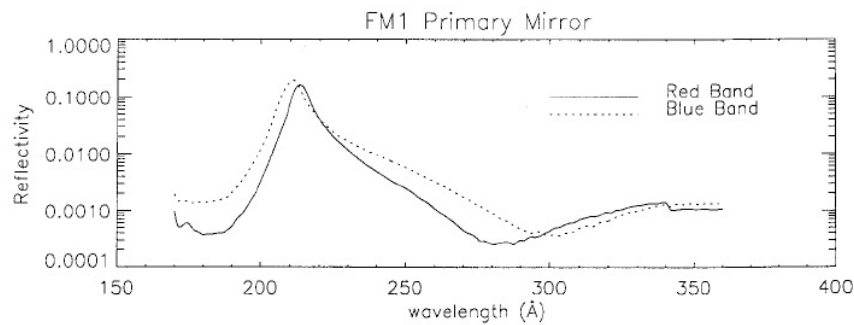
(Sakao *et al.* 1999)

直入射光学系

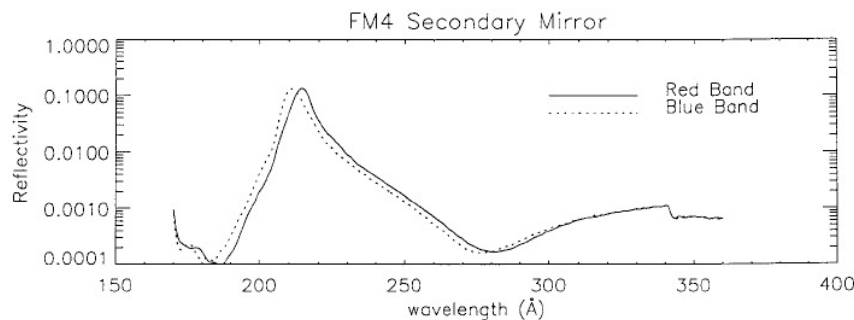


- Cassegrain光学系 (副鏡 = 凸面)
 - SOHO/EIT、TRACE、XDT、...
- 鏡面の多層膜コーティングにより特定の波長を選択的に反射
- 複数波長取得のため、セクターコーティング + 選択シャッター

$$2d \sin \theta = m\lambda$$



主鏡



副鏡

MoSi/Si (Γ=0.2) 多層膜ミラーの反射率

XUV Doppler Telescope (XDT)

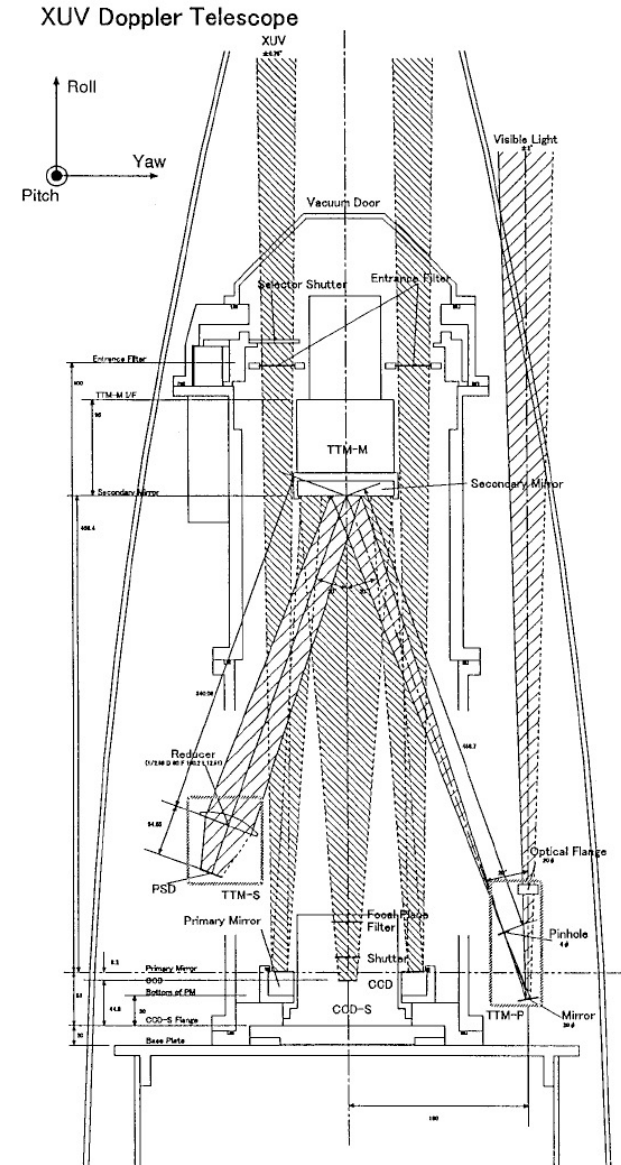
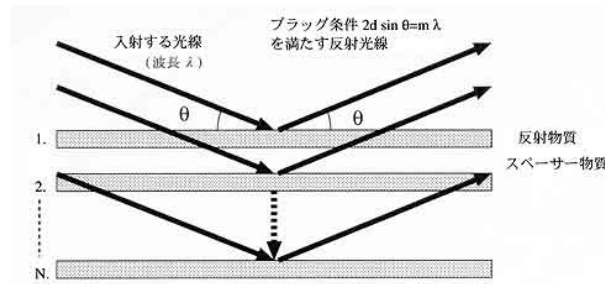


Figure 4. A side view of the XDT mounted inside the nose fairing of the S520 rocket. The path of the incident XUV light is shown in dense hatches while the visible light path for the tip-tilt mirror system is shown in sparse ones. Pitch, yaw, and roll axes of the rocket are also shown in the figure.

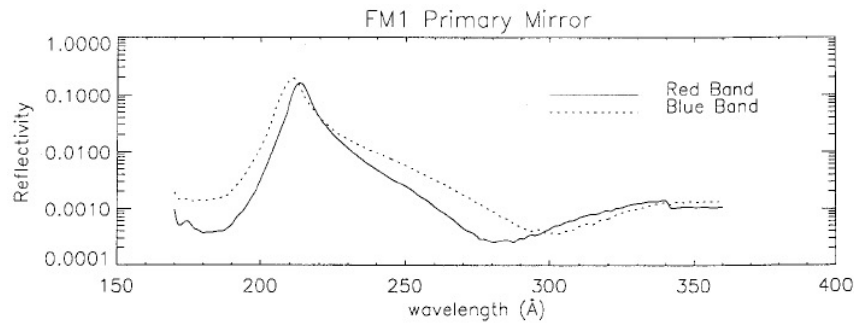
(Sakao et al. 1999)

直入射光学系

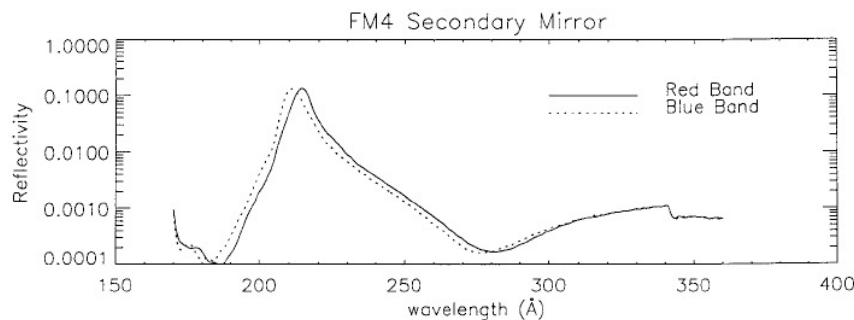


- Cassegrain光学系 (副鏡 = 凸面)
 - SOHO/EIT、TRACE、XDT、...
- 鏡面の多層膜コーティングにより特定の波長を選択的に反射
- 複数波長取得のため、セクターコーティング + 選択シャッター

$$2d \sin \theta = m \lambda$$



主鏡



副鏡

MoSi/Si ($\Gamma=0.2$) 多層膜ミラーの反射率

XUV Doppler Telescope (XDT)

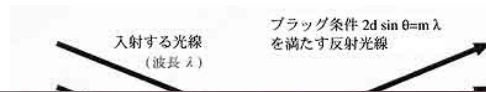


Figure 4. A side view of the XDT mounted inside the nose fairing of the S520 rocket. The path of the incident XUV light is shown in dense hatches while the visible light path for the tip-tilt mirror system is shown in sparse ones. Pitch, yaw, and roll axes of the rocket are also shown in the figure.

(Sakao et al. 1999)

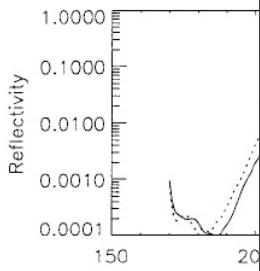
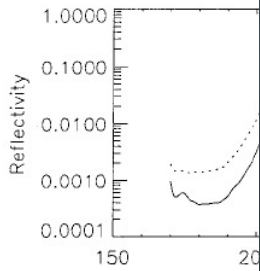
直入射 光学系

- Cassegrain
- SOH
- 鏡面の多
波長を選
- 複数波長
+ 選択シ



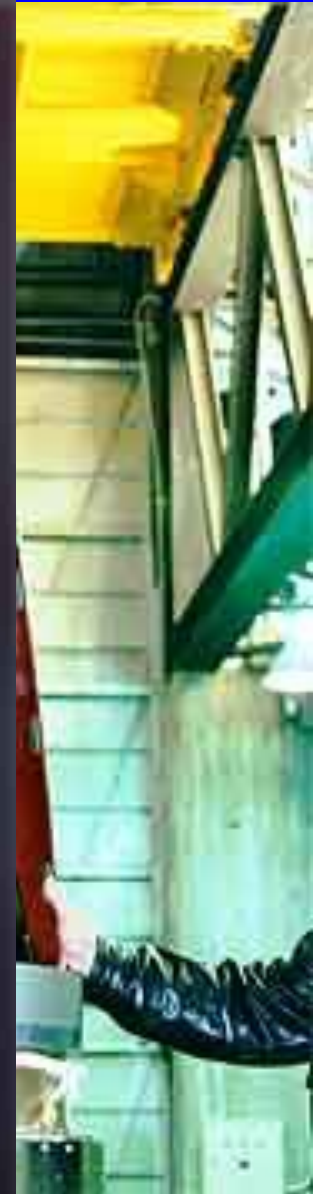
XUV Doppler Telescope (XDT)

ISAS S520-22 XUV Doppler Telescope (XDT)



MoSi/Si (Γ)

1998/01/31 04:35UT 211A 5.0sec



of the S520 rocket. The path of light path for the tip-tilt mirror are also shown in the figure.

999)

日本のスペース太陽グループの装置開発

- **ひのとり衛星** (1981-82); ~190kg
 - X線望遠鏡(すだれコリメータ)、X線精密分光計、X線スペクトル計

- **ようこう衛星** (1991-2001); ~390kg
 - 軟X線望遠鏡のCCDデータ処理部
 - 硬X線望遠鏡

- **XUVドップラー望遠鏡** [ISAS観測ロケット] (1998)
 - 直入射多層膜ミラー
 - 裏面照射型CCDカメラ
 - 可動副鏡機構と制御用センサ

- **太陽フレア硬X線スペクトル計** [ISAS気球実験] (2002)
 - CdTeスペクトル計

- **ひので衛星** (2006-); ~900kg
 - 可視光磁場望遠鏡の望遠鏡部・光学設計
 - X線望遠鏡のCCDカメラ
 - コンタミネーションコントロール

- **CLASPシリーズ** [NASA観測ロケット] (CLASP 2015, CLASP2 2019, CLASP2.1 2021)
 - 望遠鏡部、光学素子、偏光変調装置(可動機構)
- **FOXSIシリーズ** [NASA観測ロケット] (FOXSI-3 2018, FOXSI-4 2024 打上げ予定)
 - 軟X線CMOS検出器 (、硬X線ミラー、硬X線検出器)

- **SUNRISE-3** [ドイツ等国際気球実験] (2022飛翔予定)
 - 近赤外線偏光分光装置

- **イプシロン衛星計画** (2020年代中頃~)

- 公募型小型4号機 SOLAR-C_EUVST ... 衛星開発検討、超高精度太陽姿勢計、可動機構
- 将来衛星計画 (PhoENiX) ... 精密X線ミラー、軟X線CMOS検出器 → X線光子計測

これまでの開発



現役で観測中

現在進行中!!

極端紫外線
撮像分光装置
(EIS)

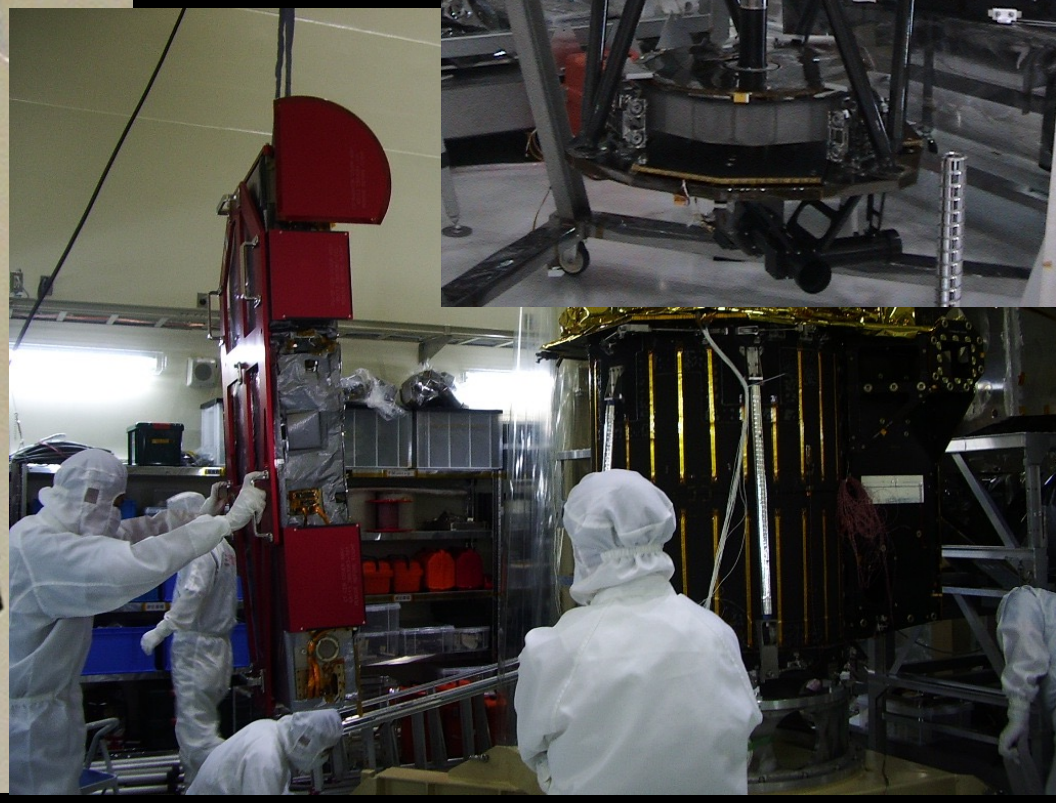
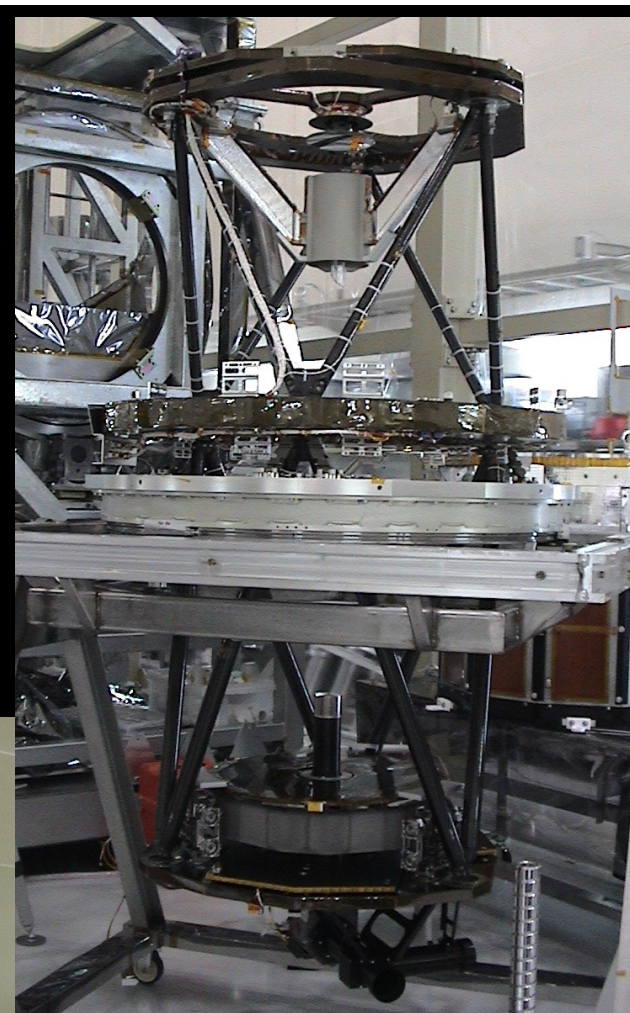
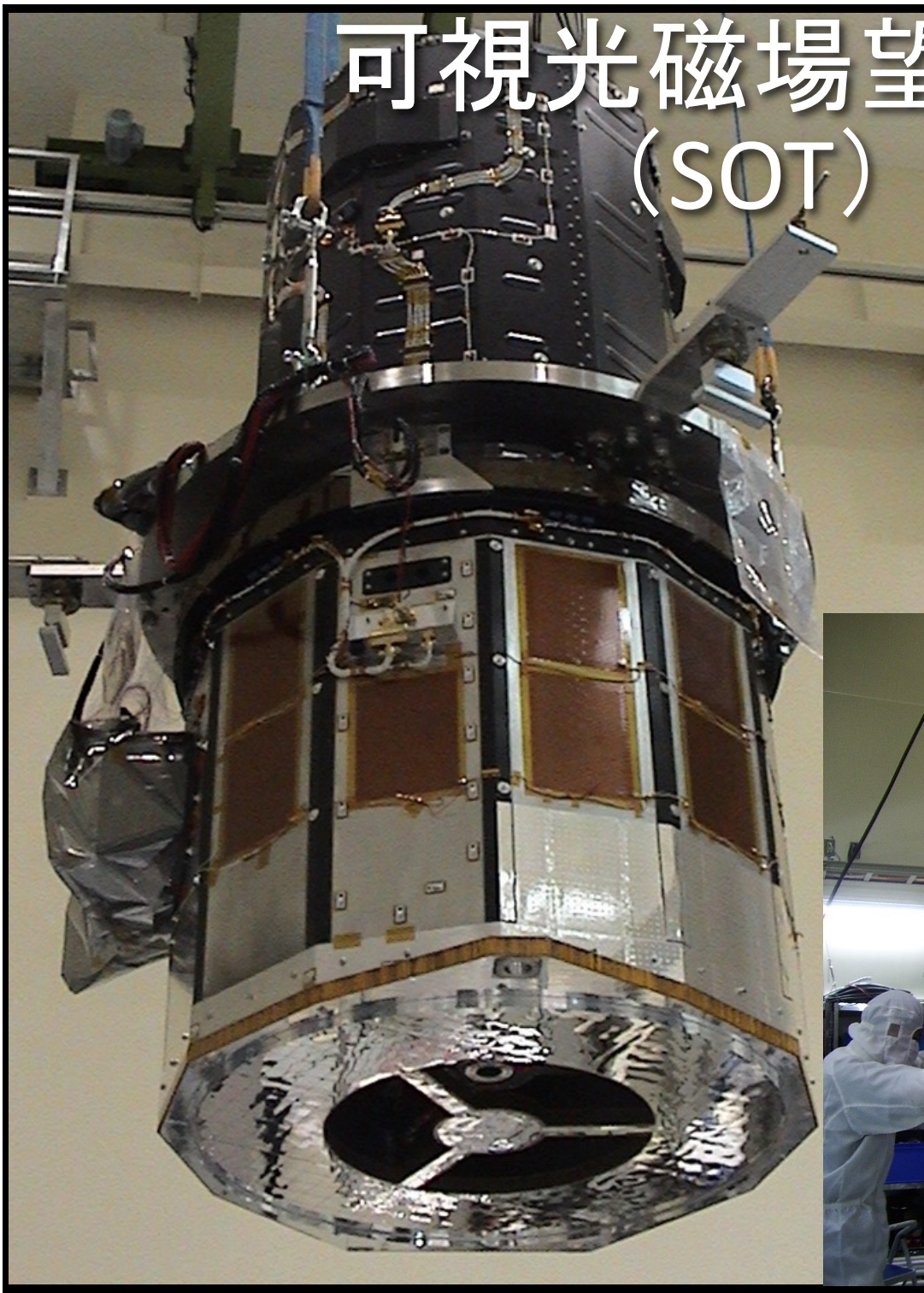
可視光磁場
望遠鏡
(SOT)

X線望遠鏡(XRT)

JAXA宇宙研、国立天文台、米国NASA、英国STFC、欧ESAの
広範な国際協力で開発・運用。

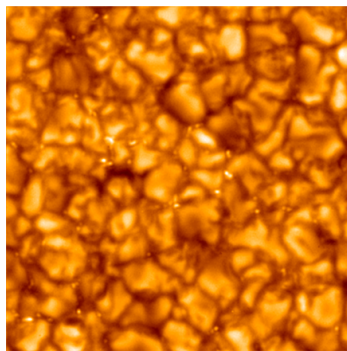
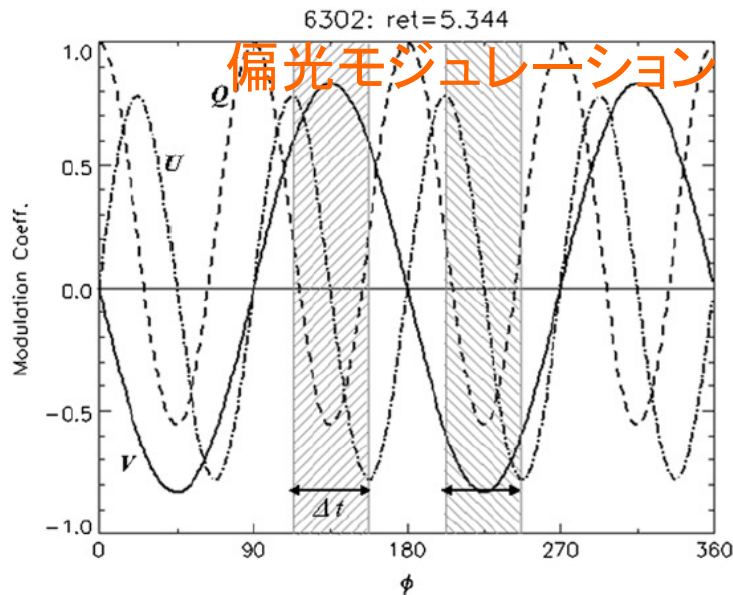
3つの望遠鏡の同時観測で、太陽大気中の活動現象を探る。

可視光磁場望遠鏡 (SOT)

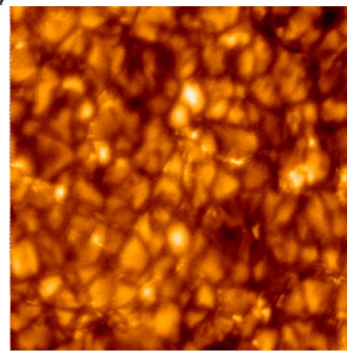


可視光磁場望遠鏡 (SOT)

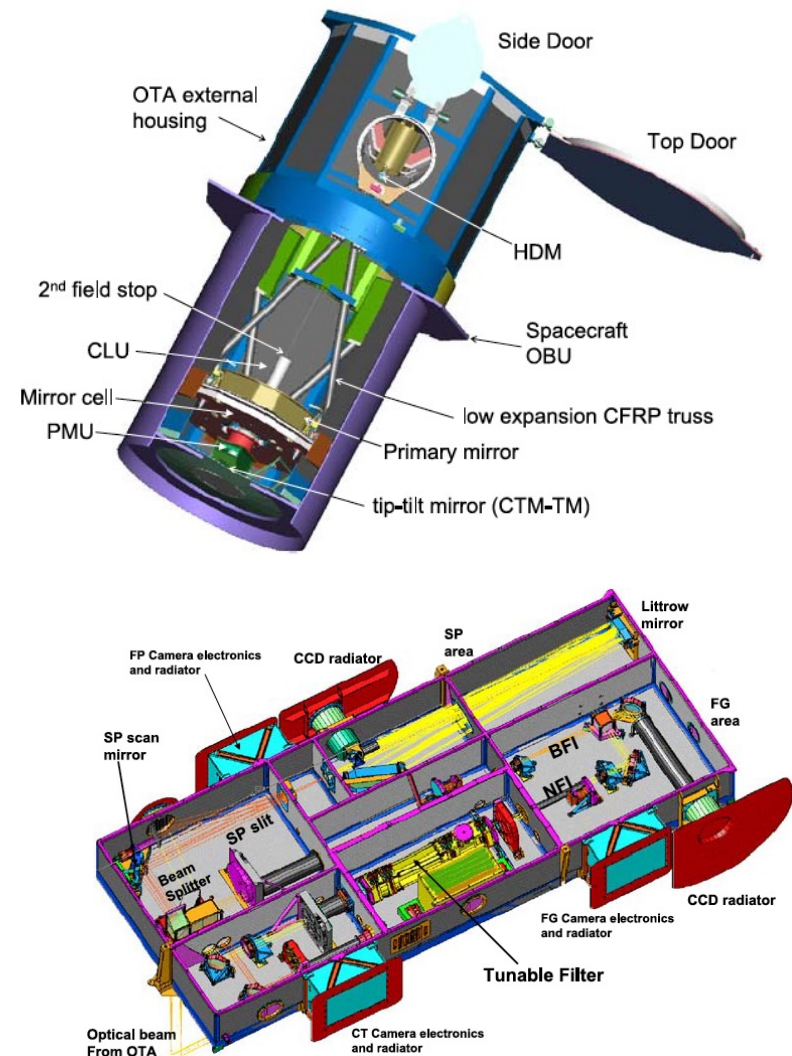
光球からの可視光の直線偏光・円偏光成分の精密計測 (Stokes IQUV)
 → 光球磁場の3次元成分を取得



「ひので」



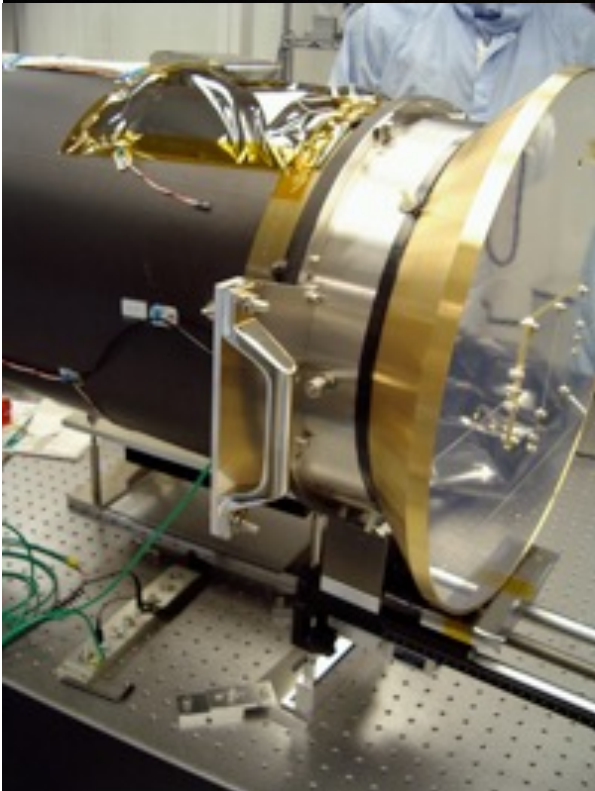
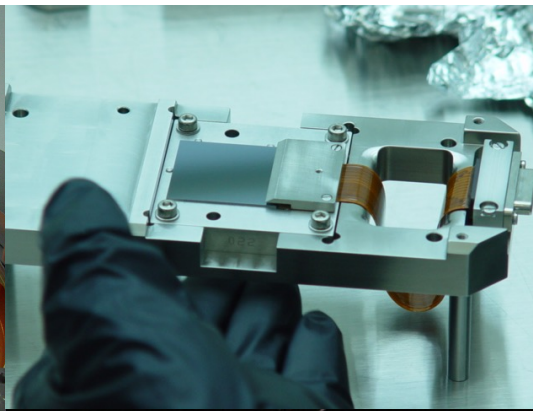
地上望遠鏡による観測例



X線望遠鏡 (XRT)

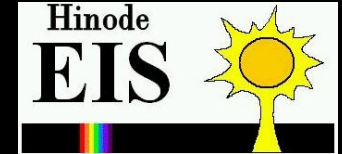


(焦点面CCDカメラ内部)



EIS

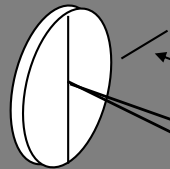
The high-sensitivity solar EUV imaging spectrometer



Product: EUV spectra to determine velocity fields and other plasma parameters in the corona and transition region.

Primary Mirror

Normal incidence off-axis telescope with a grating spectrometer.



1939 mm

Slit Exchange Mechanism

Shutter

Entrance Filter

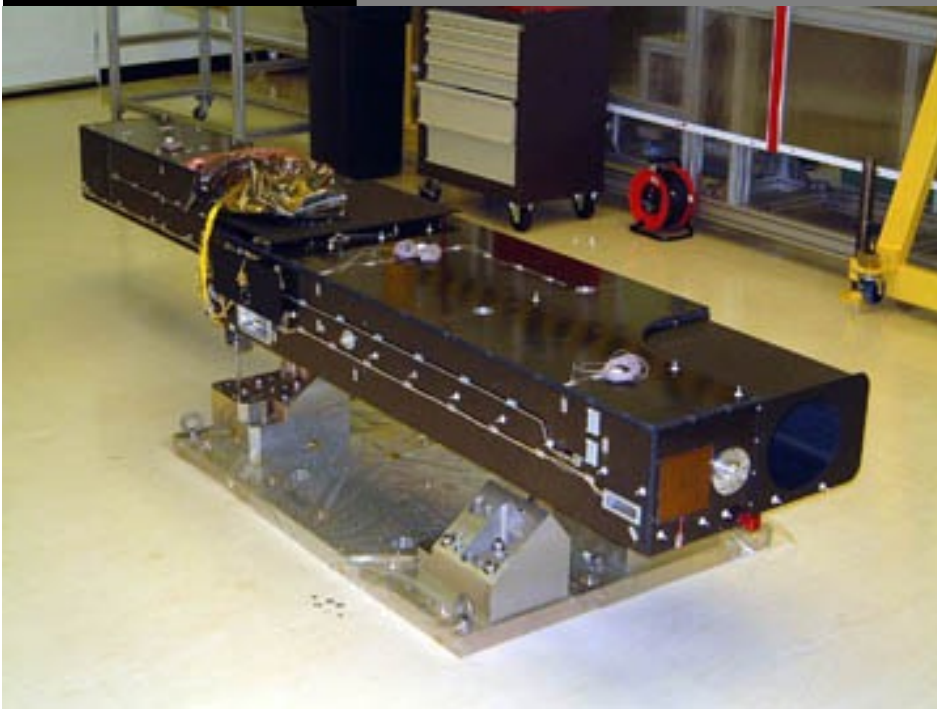
CCDs

Filter

1440 mm

1000 mm

Concave Grating

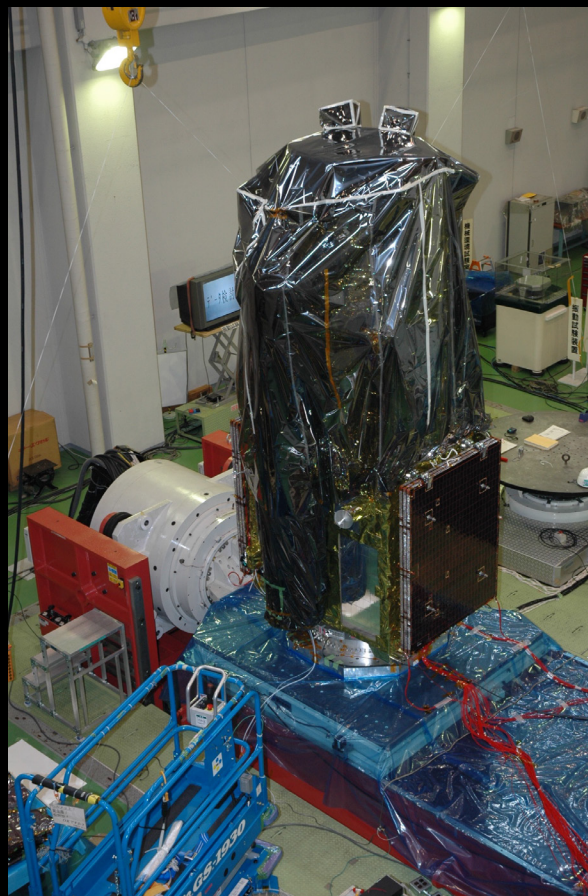


衛星組立作業

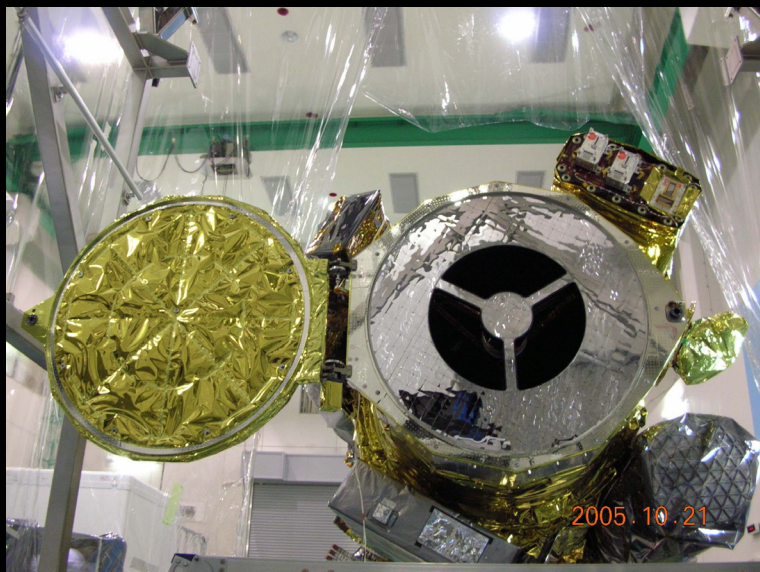
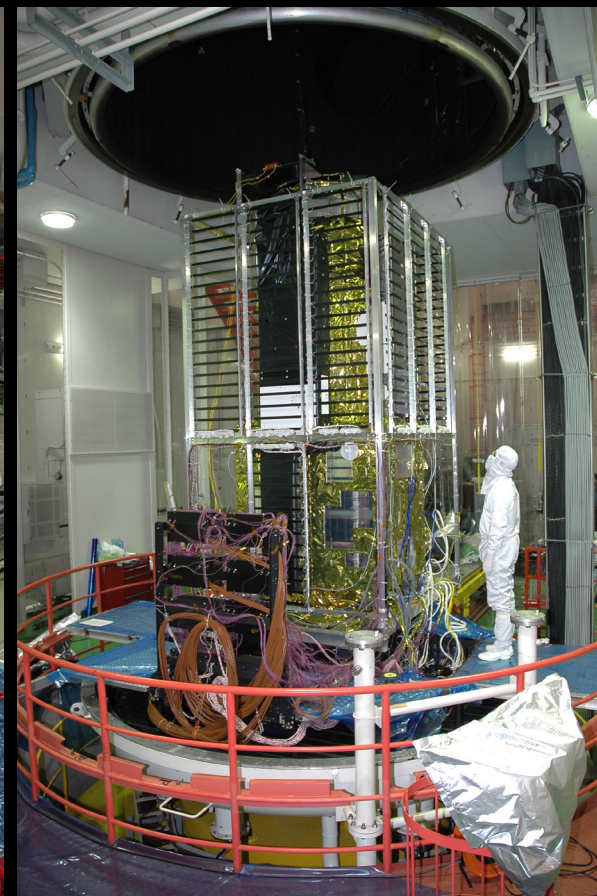


衛星総合試験

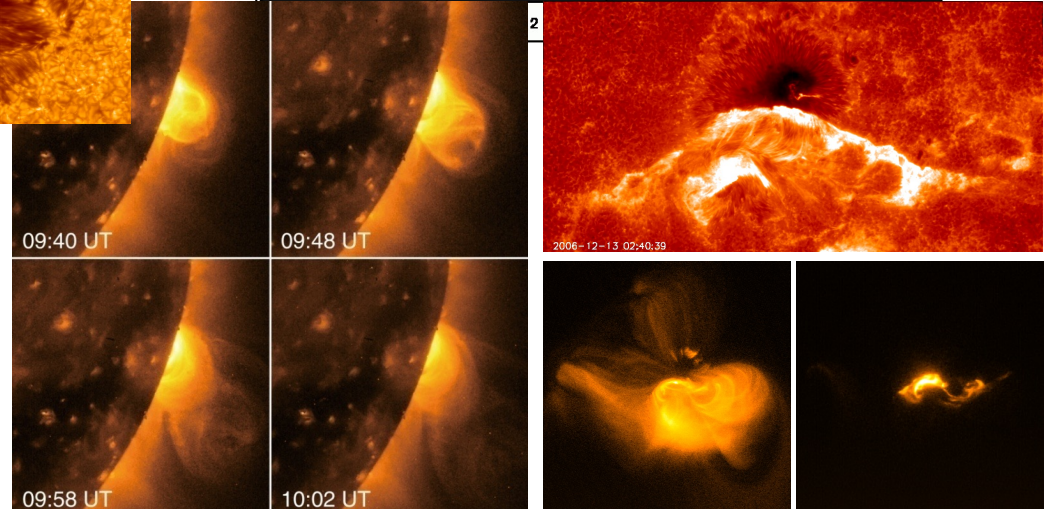
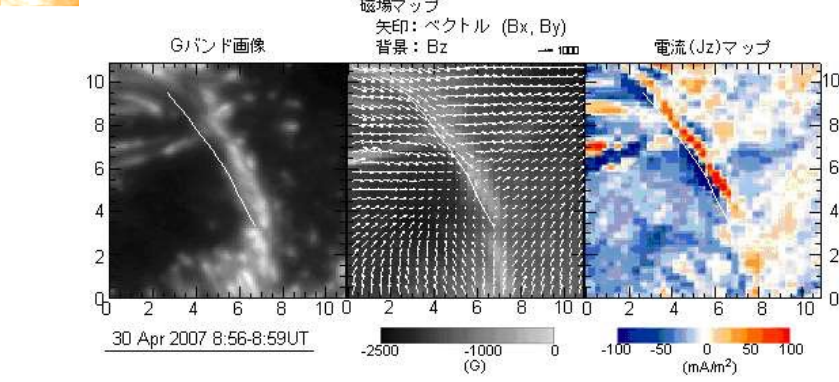
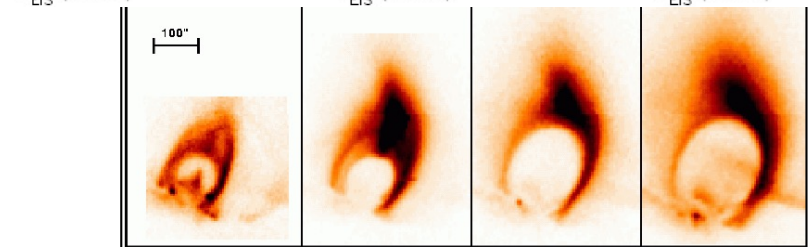
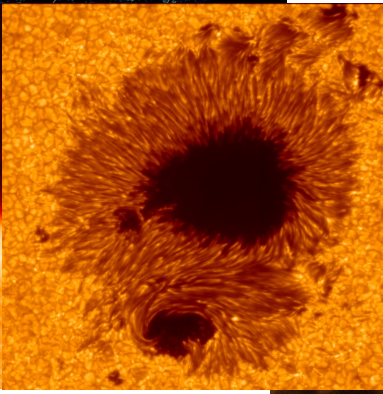
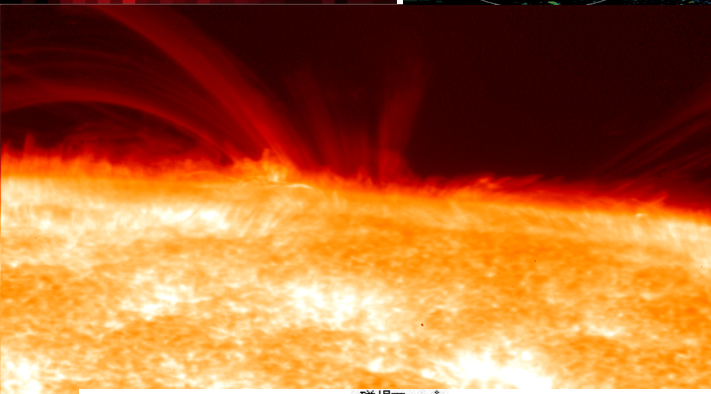
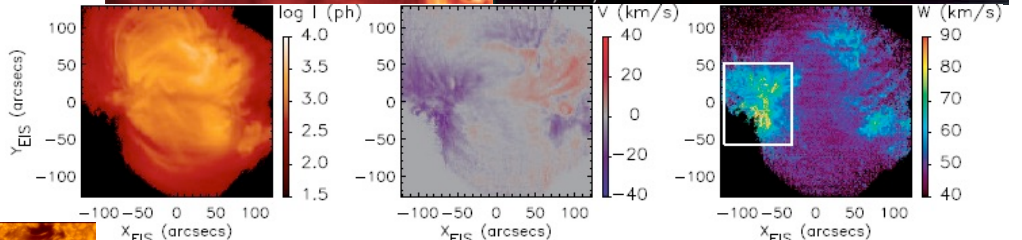
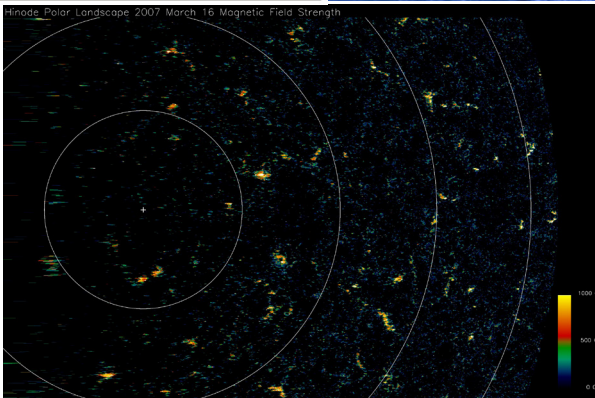
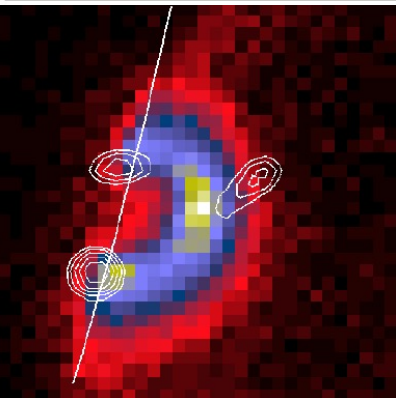
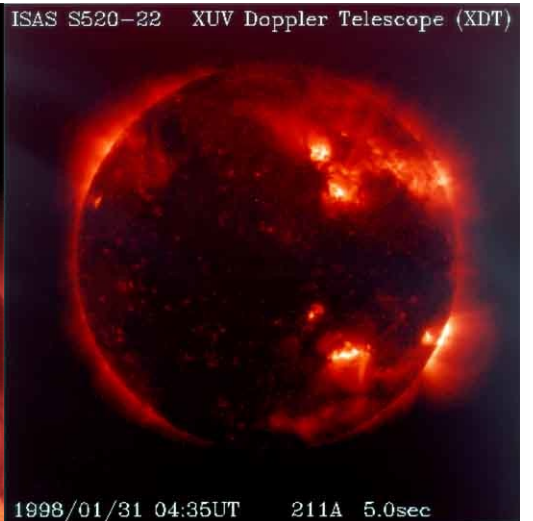
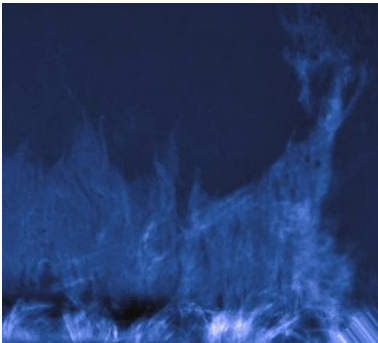
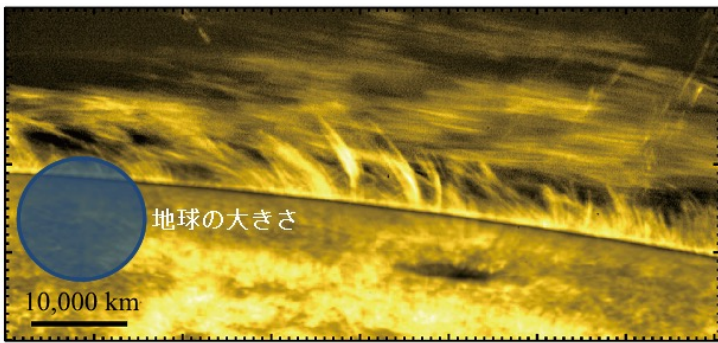
機械環境試験
(2005年10月)



熱真空試験
(2006年3月)



可視光望遠鏡ドア展開試験
(2005年10月)



日本のスペース太陽グループの装置開発

- **ひのと**り衛星 (1981-82); ~190kg
 - X線望遠鏡(すだれコリメータ)、X線精密分光計、X線スペクトル計

- **ようこう**衛星 (1991-2001); ~390kg
 - 軟X線望遠鏡のCCDデータ処理部
 - 硬X線望遠鏡

- **XUVドップラー望遠鏡** [ISAS観測ロケット] (1998)
 - 直入射多層膜ミラー
 - 裏面照射型CCDカメラ
 - 可動副鏡機構と制御用センサ

- **太陽フレア硬X線スペクトル計** [ISAS気球実験] (2002)
 - CdTeスペクトル計

これまでの開発



- **ひので**衛星 (2006-); ~900kg
 - 可視光磁場望遠鏡の望遠鏡部・光学設計
 - X線望遠鏡のCCDカメラ
 - コンタミネーションコントロール

現役で観測中

- **CLASPシリーズ** [NASA観測ロケット] (CLASP 2015, CLASP2 2019, CLASP2.1 2021)
 - 望遠鏡部、光学素子、偏光変調装置(可動機構)

- **FOXSIシリーズ** [NASA観測ロケット] (FOXSI-3 2018, FOXSI-4 2024 打上げ予定)
 - 軟X線CMOS検出器 (、硬X線ミラー、硬X線検出器)

- **SUNRISE-3** [ドイツ等国際気球実験] (2022飛翔予定)
 - 近赤外線偏光分光装置

現在進行中!!

- **イプシロン衛星計画** (2020年代中頃~)

- 公募型小型4号機 SOLAR-C_EUVST ... 衛星開発検討、超高精度太陽姿勢計、可動機構
- 将来衛星計画 (PhoENiX) ... 精密X線ミラー、軟X線CMOS検出器 → X線光子計測

直近/現在進行中の装置開発

偏光分光測定により彩層のVUV磁場信号検出を行う
CLASP ロケット実験

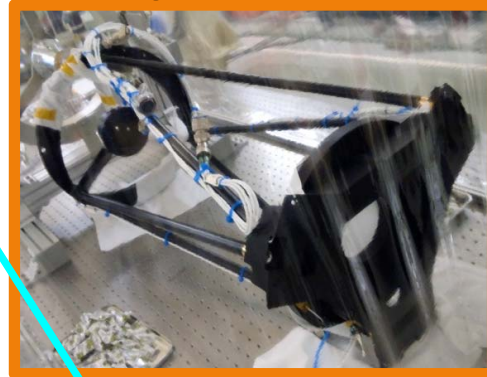
Primary



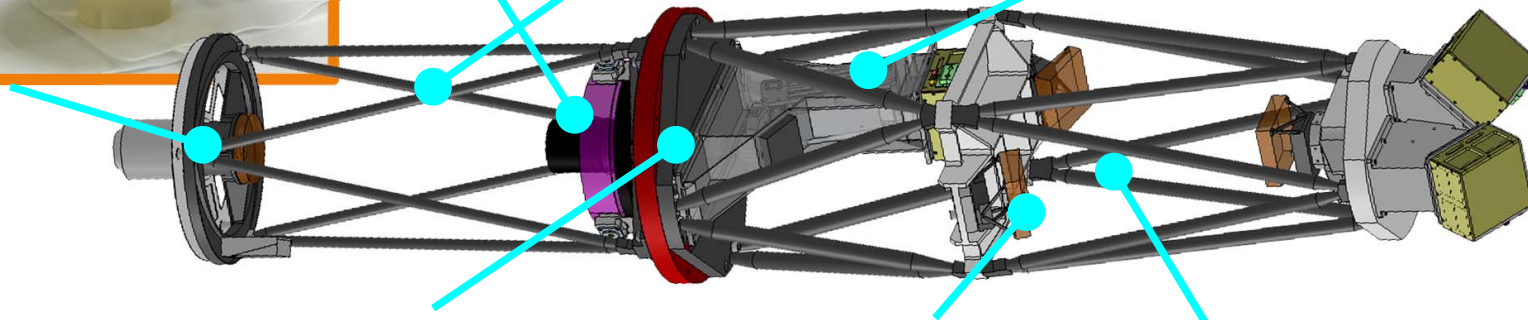
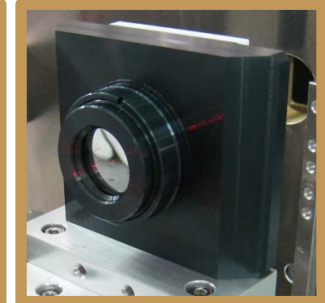
Secondary



Telescope Structure



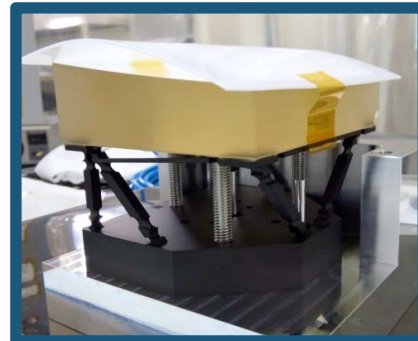
Slitjaw optics: mirror unit & filter unit



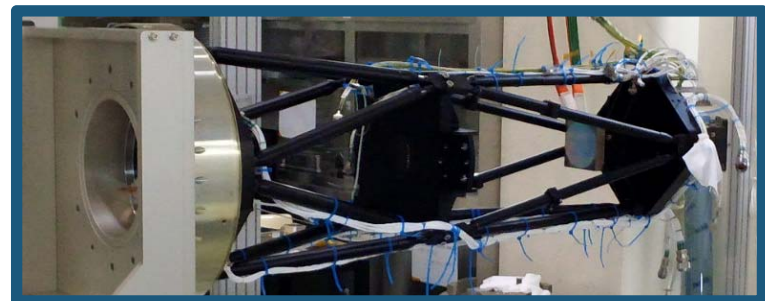
HWP motor (PMU) & driver



Off-axis Camera mirror



Spectro-Polarimeter Structure



(鹿野さんのCOSPAR2014講演スライドより)

直近/現在

偏光分光
CLASP 口

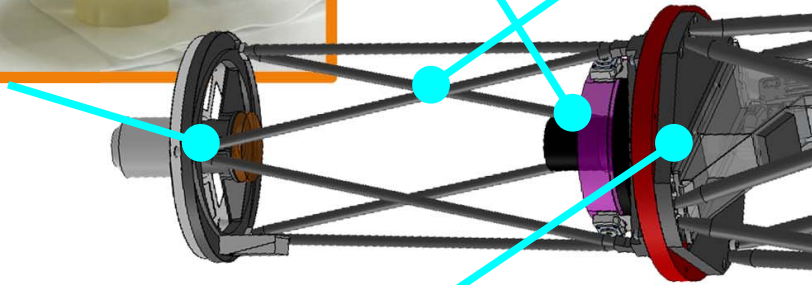
Primary



Telescope Structure



Secondary



HWP motor (PMU) & driver

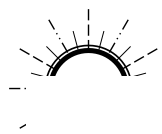


Off-axis Camera



FOXSI-3 軟X線装置

太陽コロナの軟X線光子計測・撮像観測



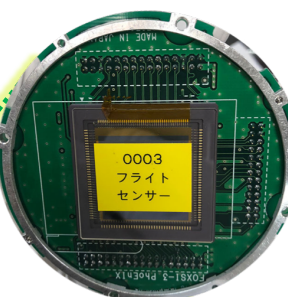
プレ・コリメーター

X線用ミラー

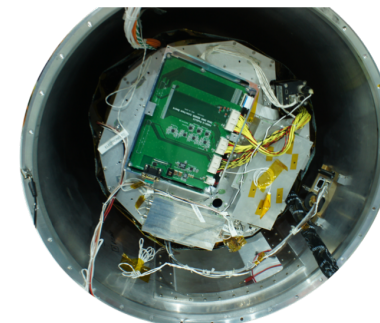
プレ・フィルター

400 x 1k pixels の領域を
250 FPS で高速連続撮像可能。

CMOS センサー



カメラボックス



FOXSI-3 の観測装置

CMOSセンサーからの大量のデータ
~ 160MB / sec を処理し保存する。





置

太陽コロナの軟X線光子計測・撮像観測

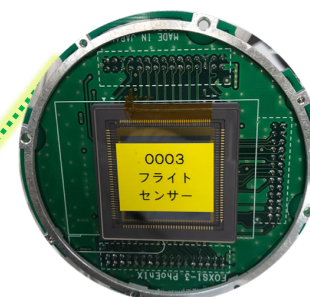


X線用ミラー

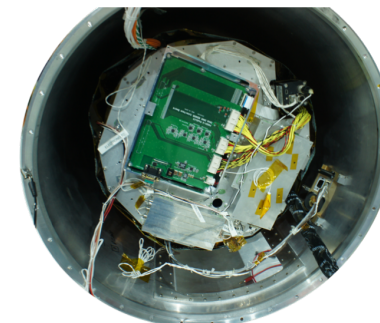


400 x 1k pixels の領域を
250 FPS で高速連続撮像可能。

CMOS センサー



カメラボックス



XSI-3 の観測装置

CMOSセンサーからの大量のデータ
~ 160MB / sec を処理し保存する。



大気球太陽観測実験 SUNRISE-3

- 口径1m (ひのでの2倍) の光学太陽望遠鏡
- スウェーデン・キルナからカナダまで大西洋上空の高度約35kmを1週間飛翔
 - 紫外線域 (波長 200 – 400 nm) の観測
 - シーイングの無い高精度偏光観測
- 2009年と2013年に2度観測を実施
- 2022年に3度目の飛翔予定 (SUNRISE-3)
 - 近赤外線偏光分光装置**SCIP** (スキップ)を日本主導で開発



Boothia Peninsula, June 17, 2013
Somerset Island, June 14, 2009

SUNRISE Flight

Kiruna, June 12, 2013
Kiruna, June 8, 2009

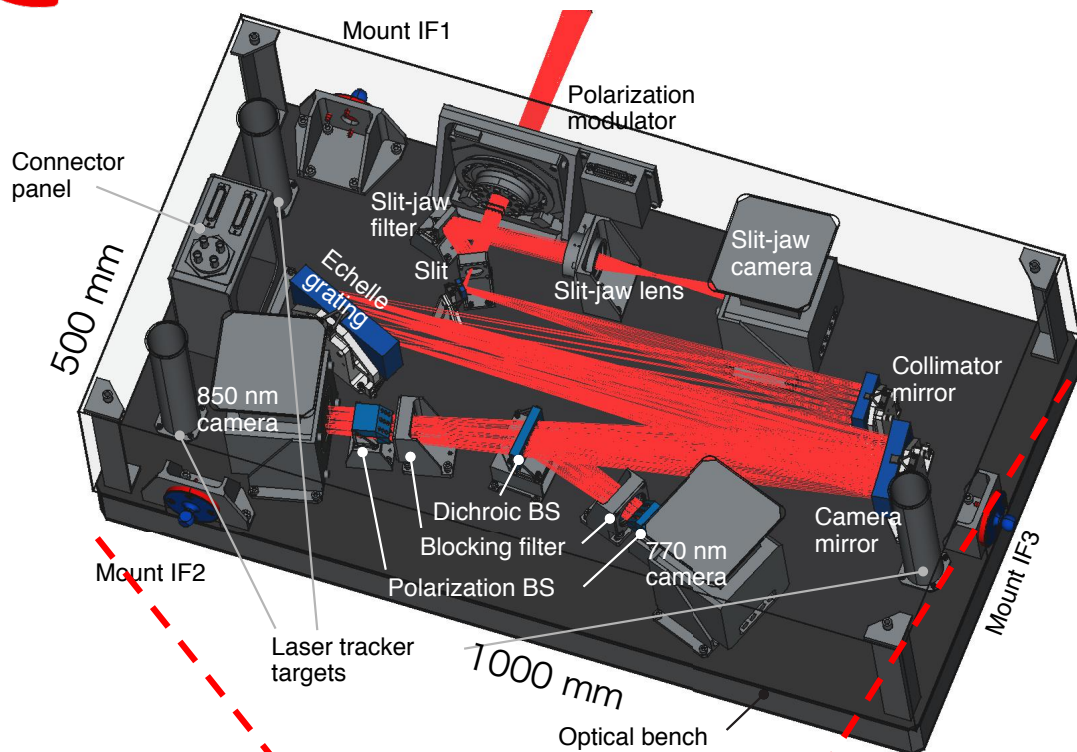


光球・彩層の高解像度・高精度偏光分光データを
手にする絶好のチャンス



SCIP (スキップ)

Sunrise Chromospheric Infrared spectroPolarimeter



● 高空間・時間分解能

- 「ひので」と同じ解像度: 0.2秒角
- 0.2秒角を音波が通過する時間: 15秒

● 高精度偏光観測

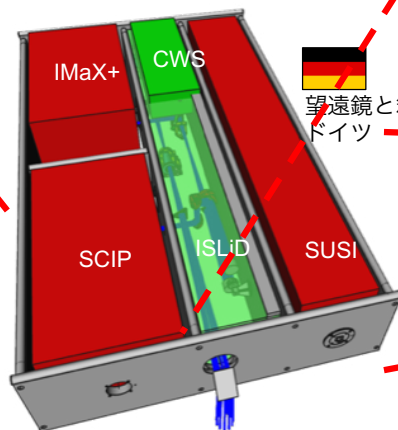
- Ca II 線で ~5 G の磁場を測定: 0.03%(1 σ) の偏光度測定

Science instruments

- SUSI = SUNRISE UV Spectropolarimeter and Imager $\lambda = 300 - 408$ nm
- SCIP = SUNRISE Chromospheric Infrared Spectro-Polarimeter $\lambda = 770$ nm, 850 nm
- IMaX+ = upgraded Imaging Magnetograph eXperiment $\lambda = 517, 525$ nm

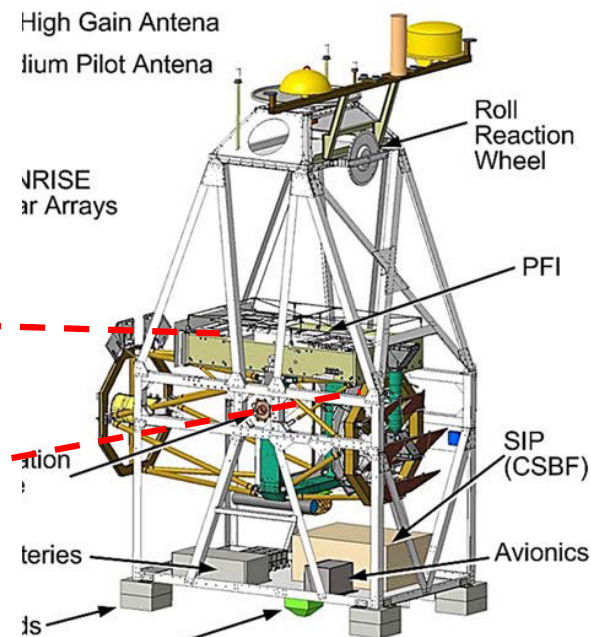
Service Units

- ISLiD = Image Stabilization and Light Distribution system
- CWS = Correlation tracker and Wavefront Sensor



焦点面装置箱

望遠鏡と箱はドイツ



SUNRISE ギンドラ (米担当)

イプシロン衛星計画: SOLAR-C_EUVVST

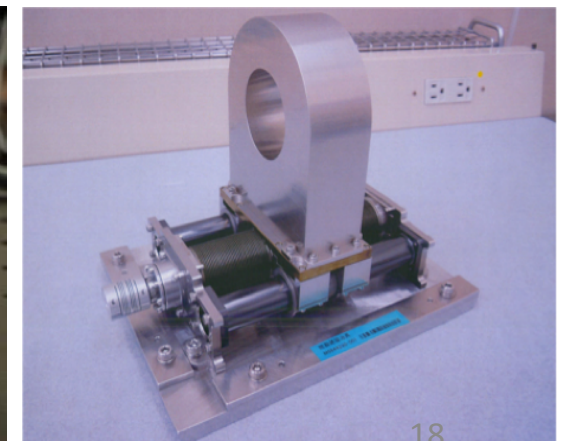
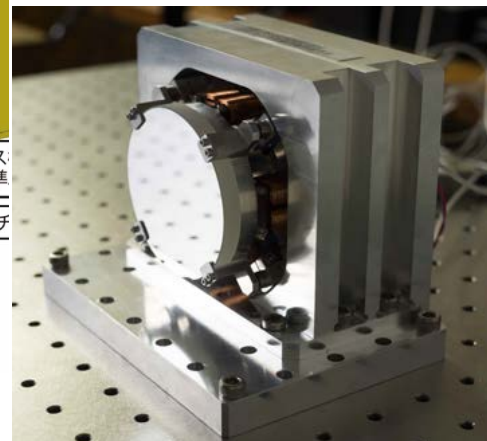
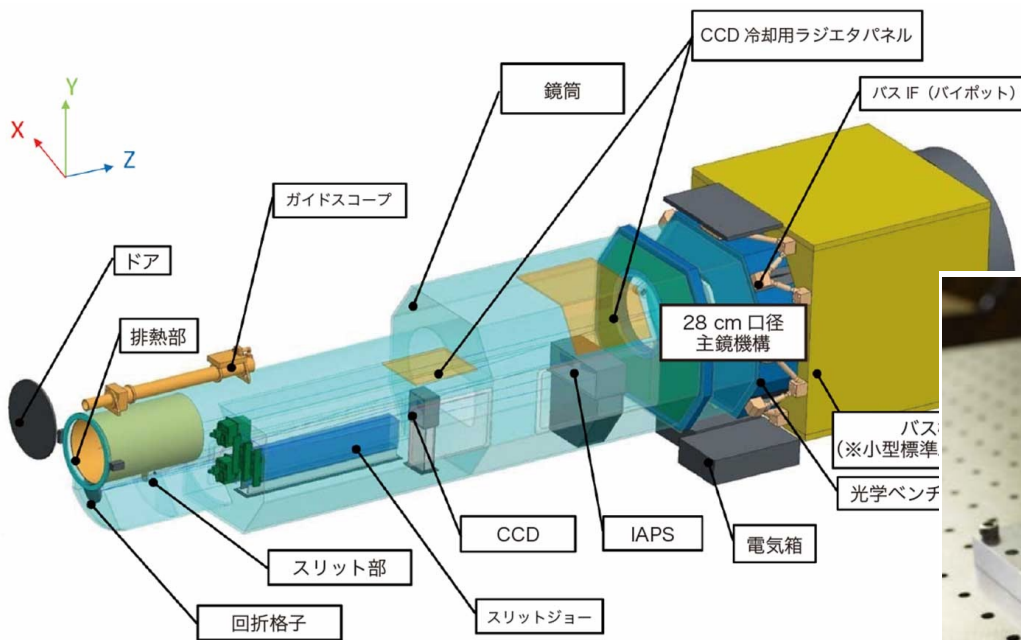
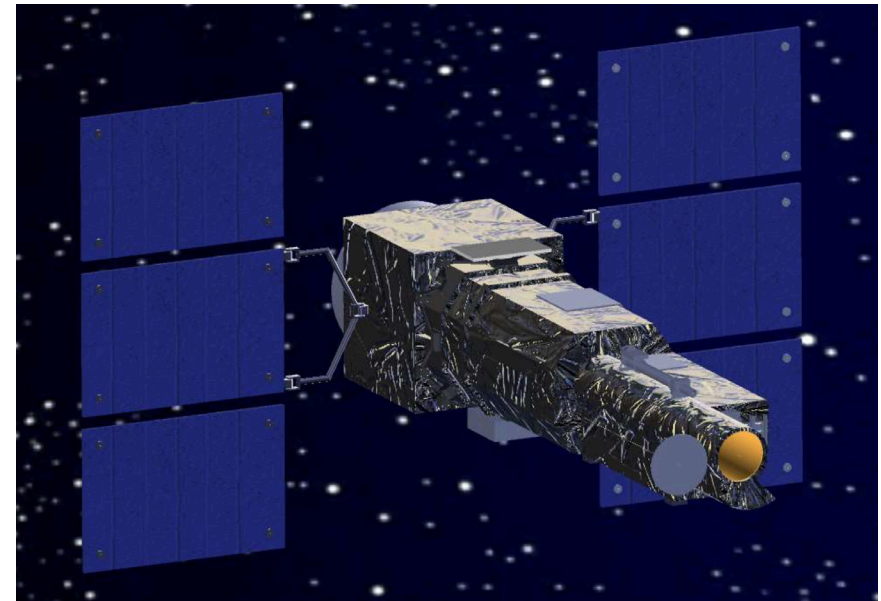
宇宙研の公募型小型計画4号機として2020年代後半の打ち上げ

彩層・コロナのUV-EUV高スループット分光・撮像観測

高スループット: ひのでEISの約10倍

空間分解能: 0.4 秒角

波長範囲: 170 – 1300 Å

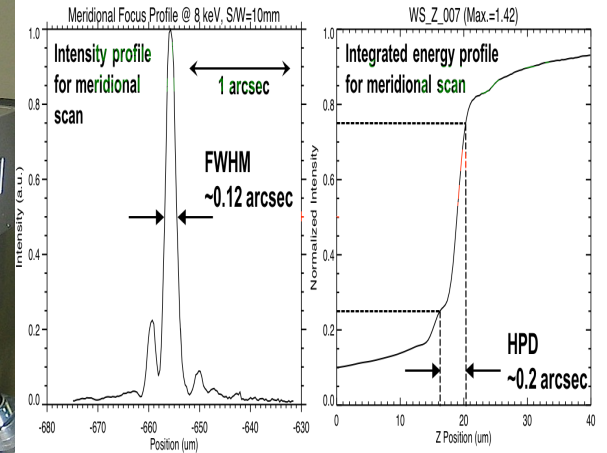
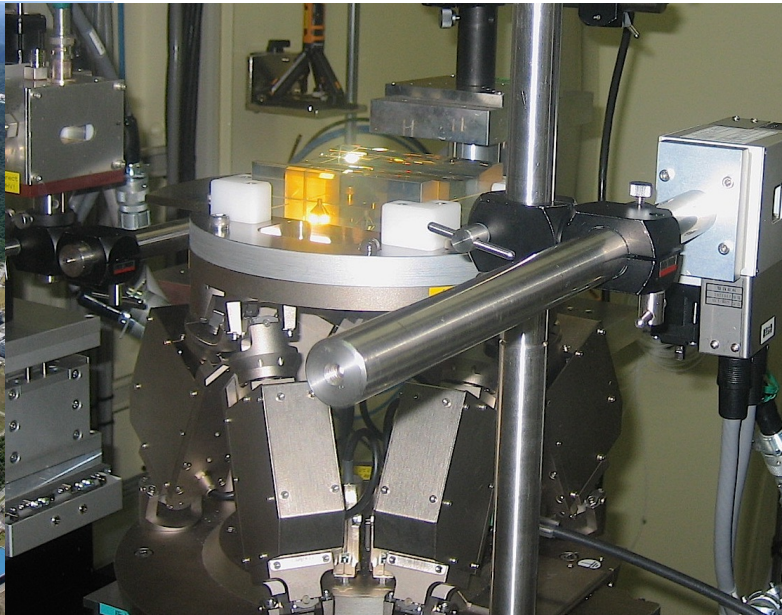
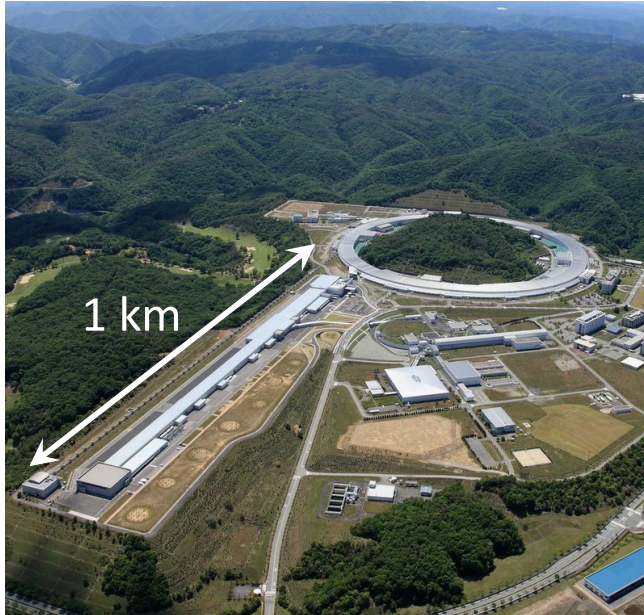


可動機構の要素試作活動

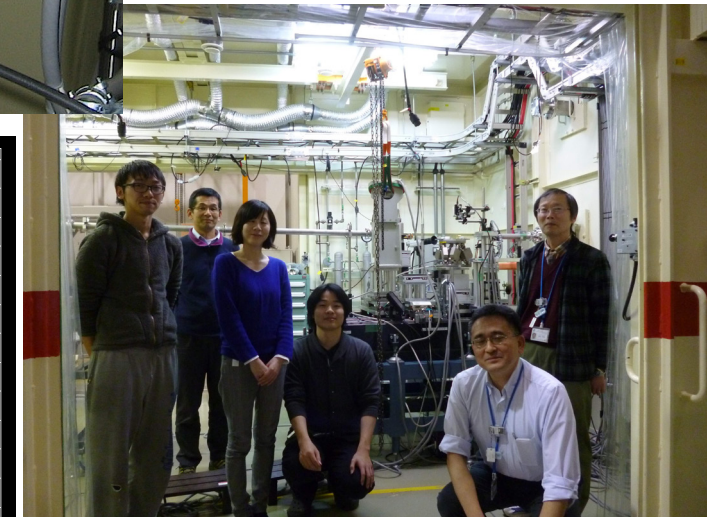
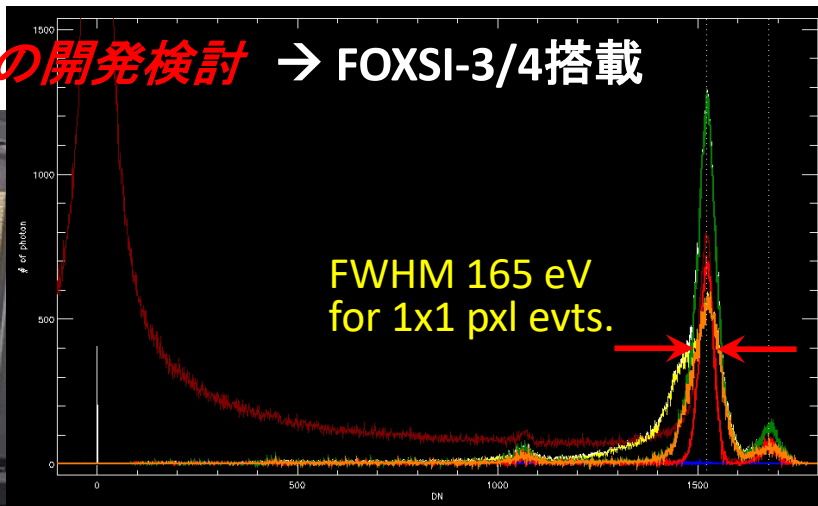
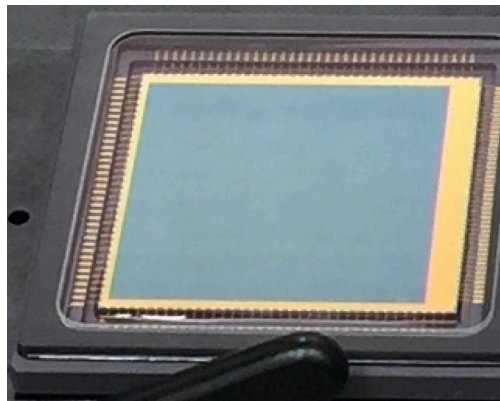
現在進行中の装置開発

光子計測型X線望遠鏡に向けた開発研究 (ISAS・NAOJ)

SPRING-8を用いた高精度斜入射X線ミラーの開発 (大阪大学・名古屋大学との共同研究)



X線分光CMOSセンサの開発検討 → FOXSI-3/4搭載



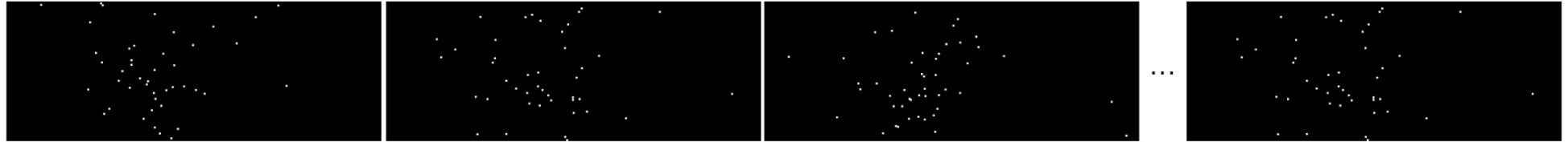
← X線分光性能の評価

現在進行中の装置開発

光子計測型X線望遠鏡に向けた開発研究 (ISAS・NAOJ)

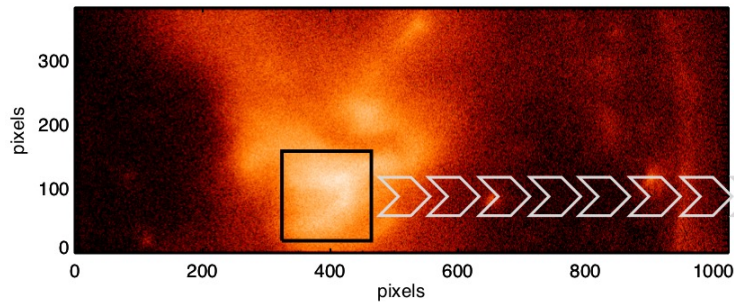
(a) 取得したデータ

時間の流れ (1秒間に250枚の高速連続撮像)

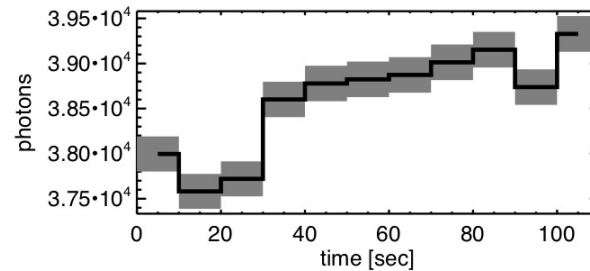


<https://www.nao.ac.jp/news/topics/2019/20190115-solar.html>

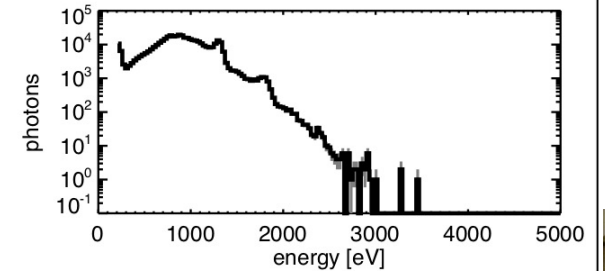
(b) X線光子を集めて作った太陽の画像



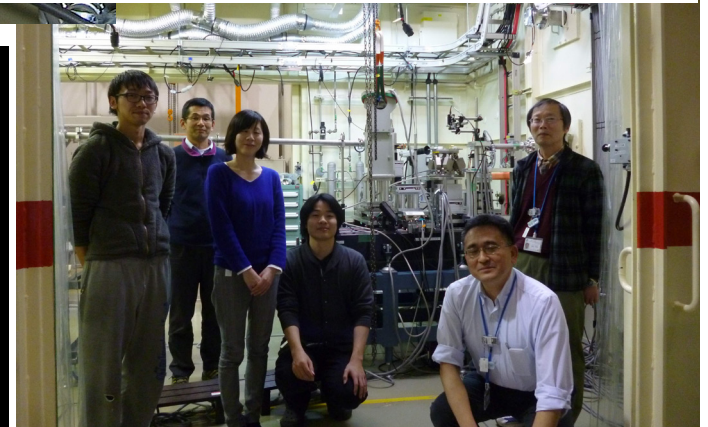
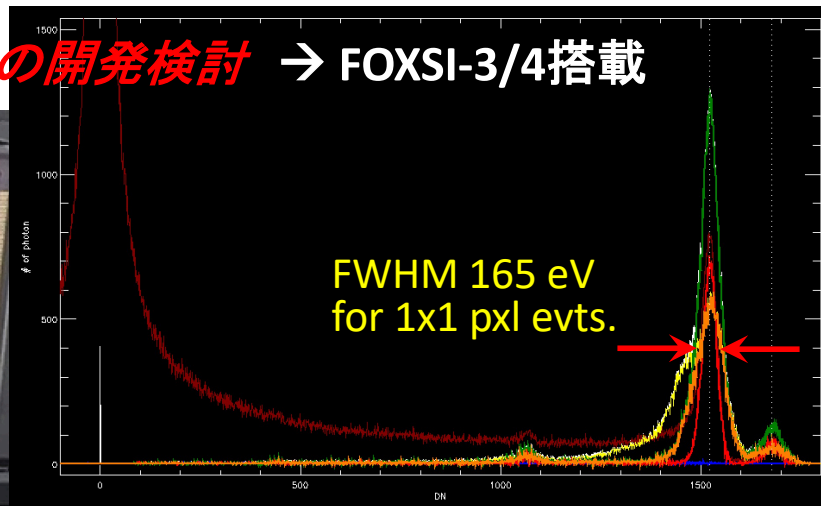
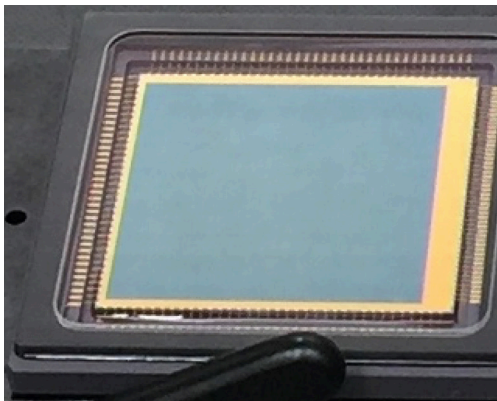
(c) 活動領域のX線光子数の時間変化



(d) 活動領域のX線スペクトル



X線分光CMOSセンサの開発検討 → FOXSI-3/4搭載



← X線分光性能の評価

装置開発に関わって
新しい観測をやってみたい人を
歓迎します！