

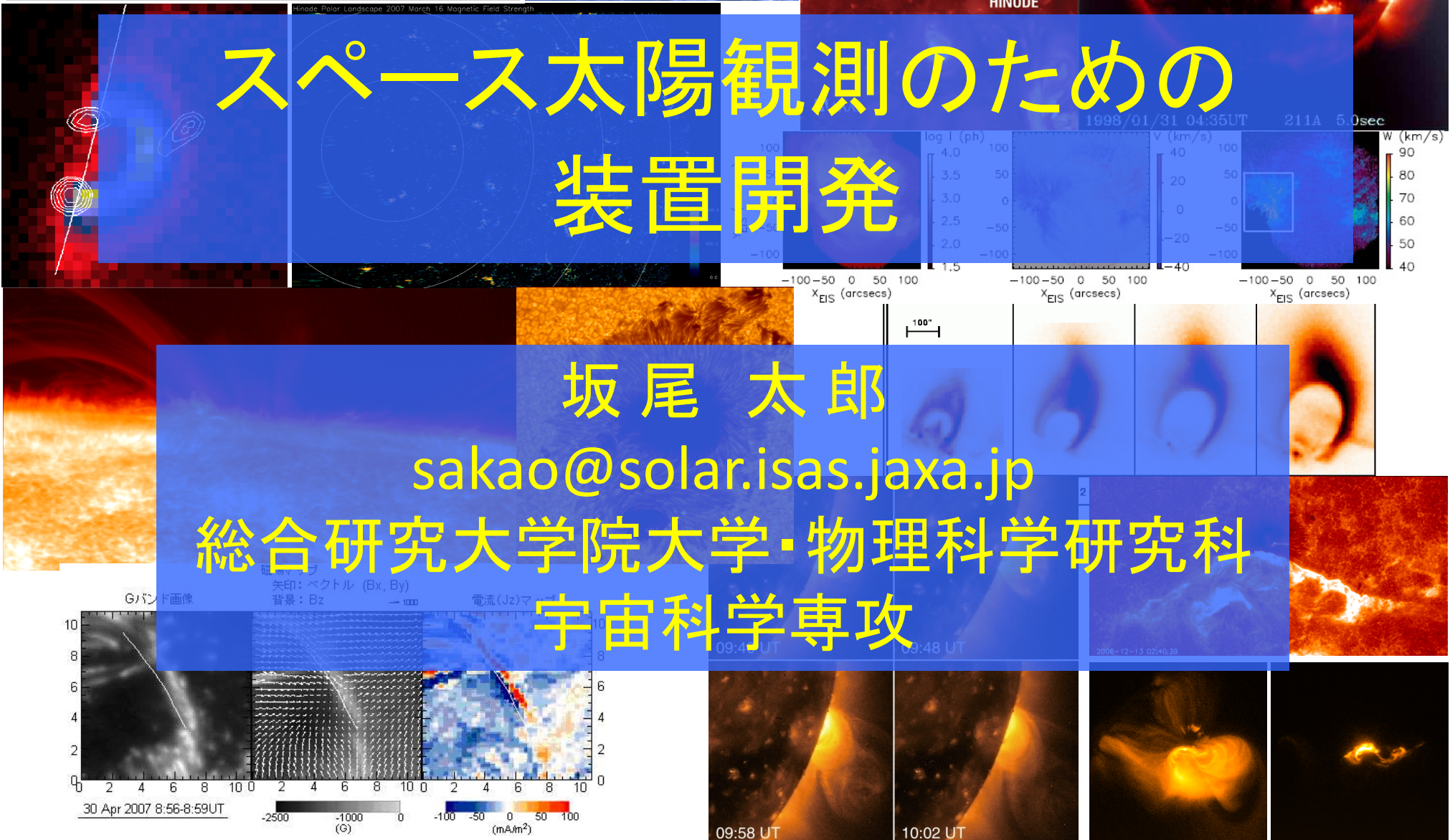
スペース太陽観測のための 装置開発

坂尾 太郎

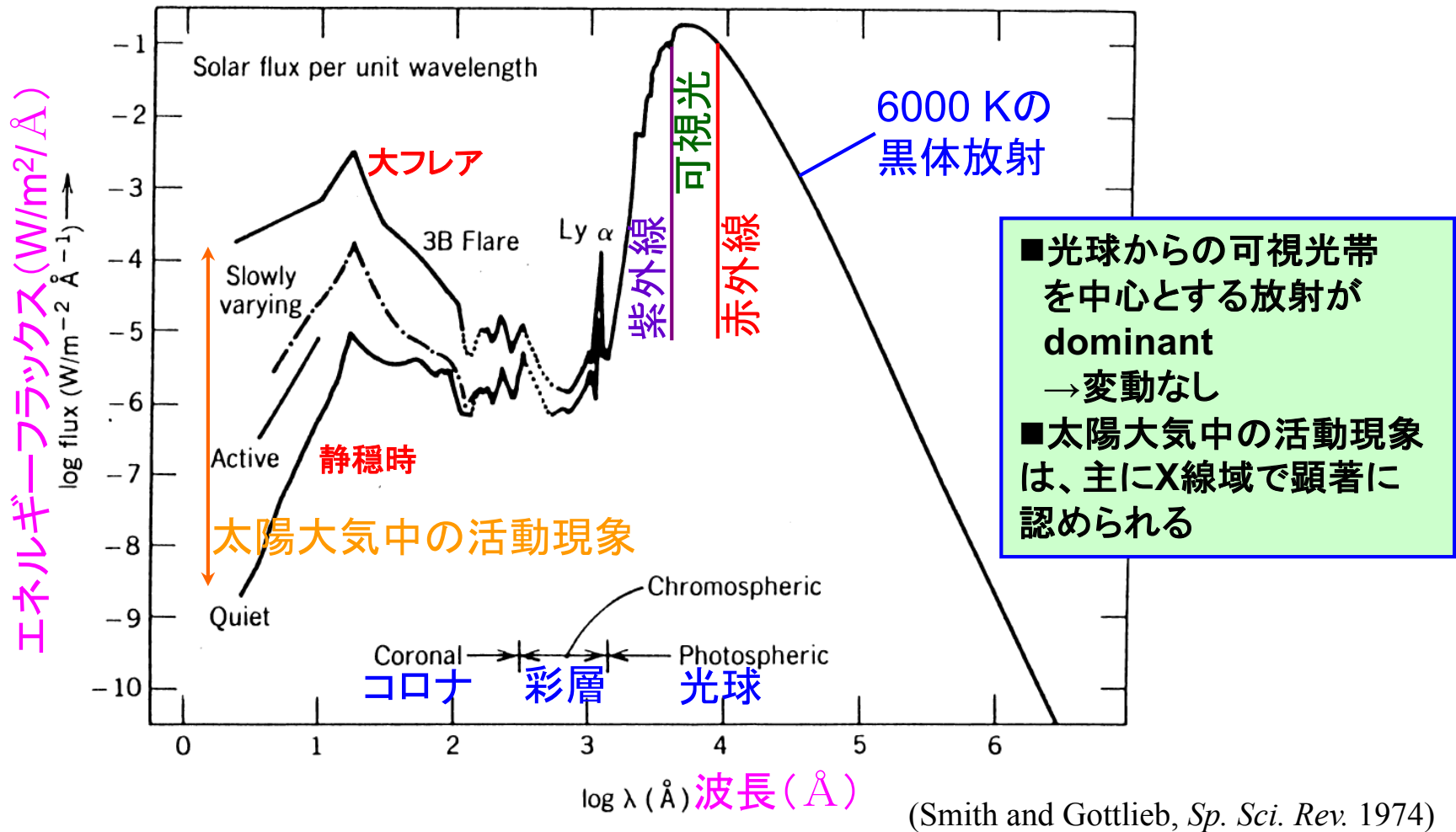
sakao@solar.isas.jaxa.jp

総合研究大学院大学・物理科学研究科

宇宙科学専攻



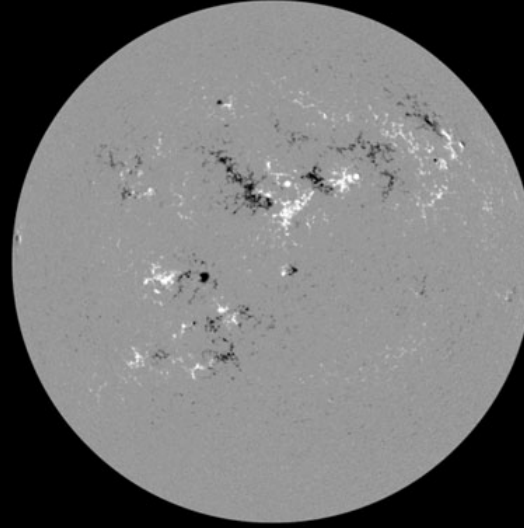
太陽からの電磁波放射



Photosphere/VL

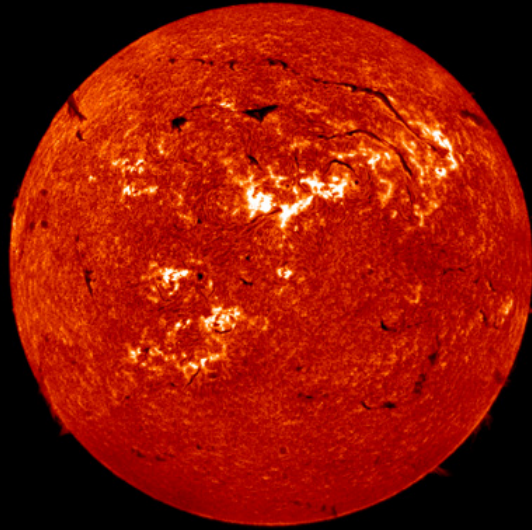


Photosphere/Mag. distribution

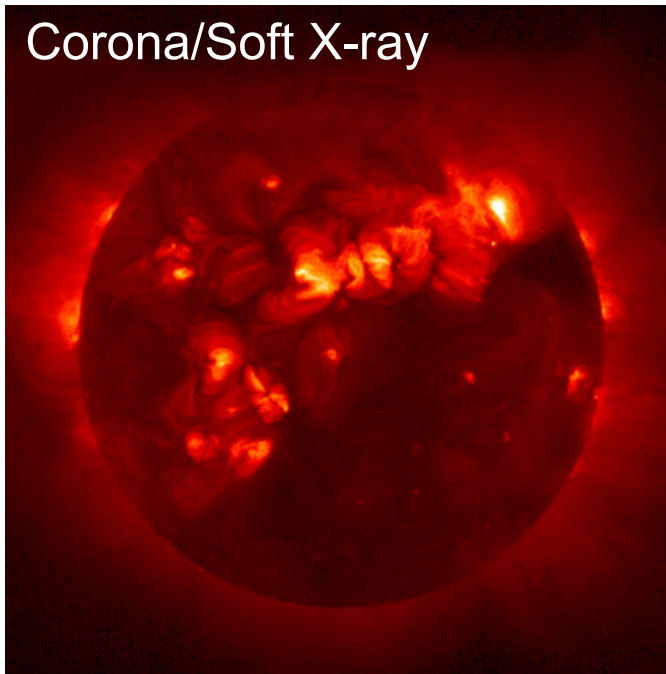


The Sun at various atmospheric layers

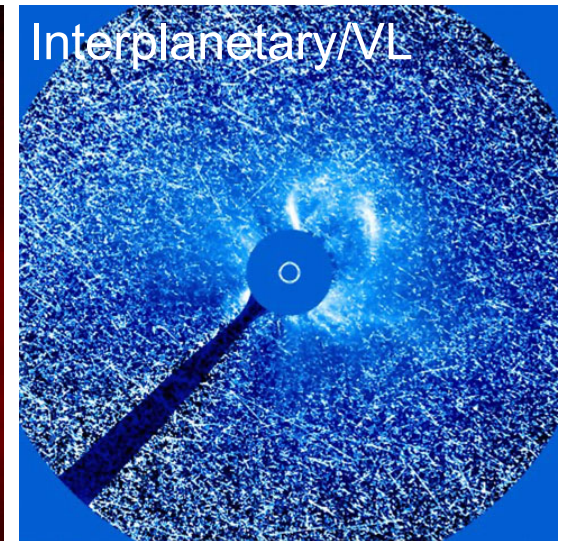
Chromosphere/H α



Corona/Soft X-ray

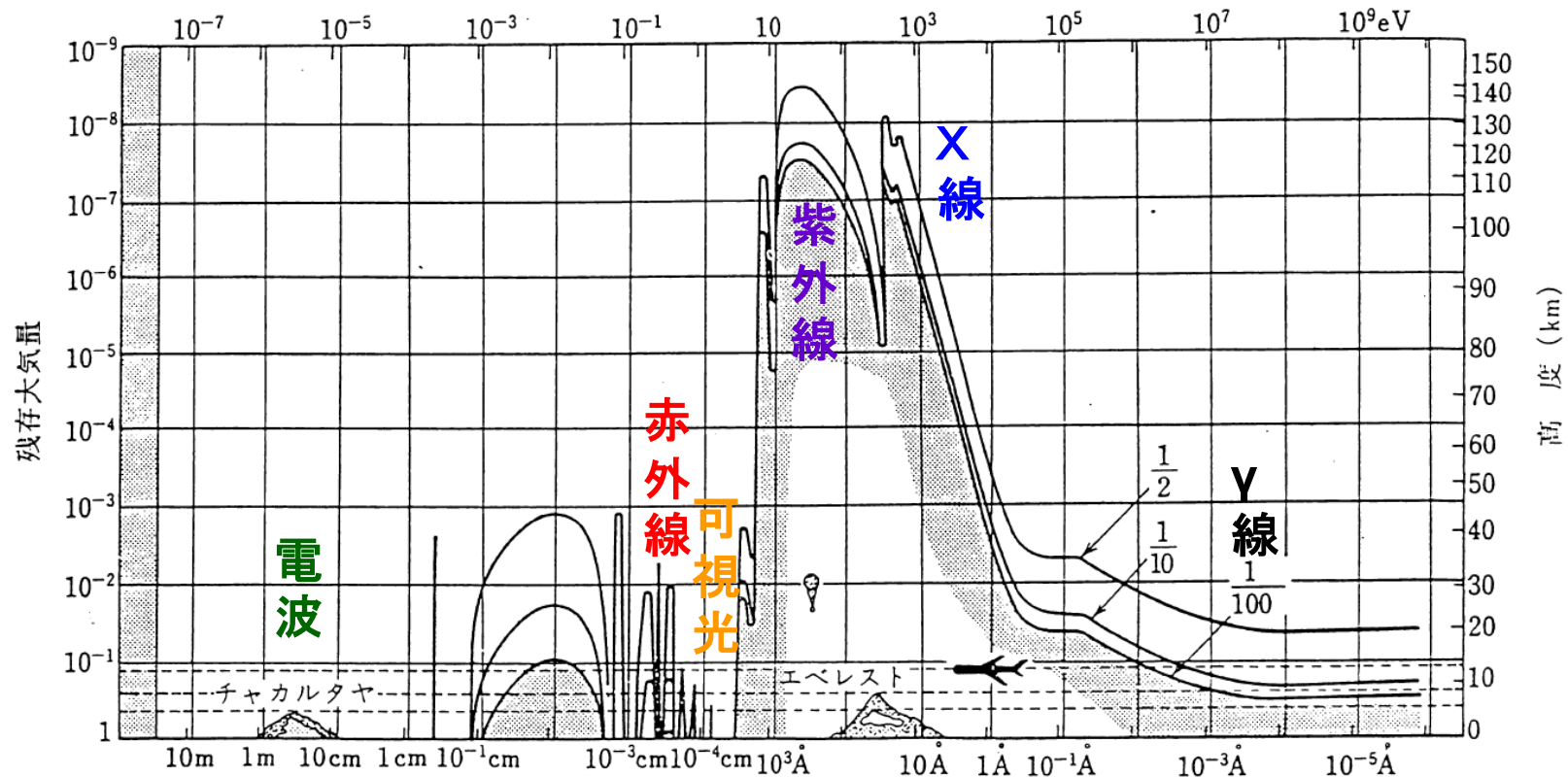


Interplanetary/VL



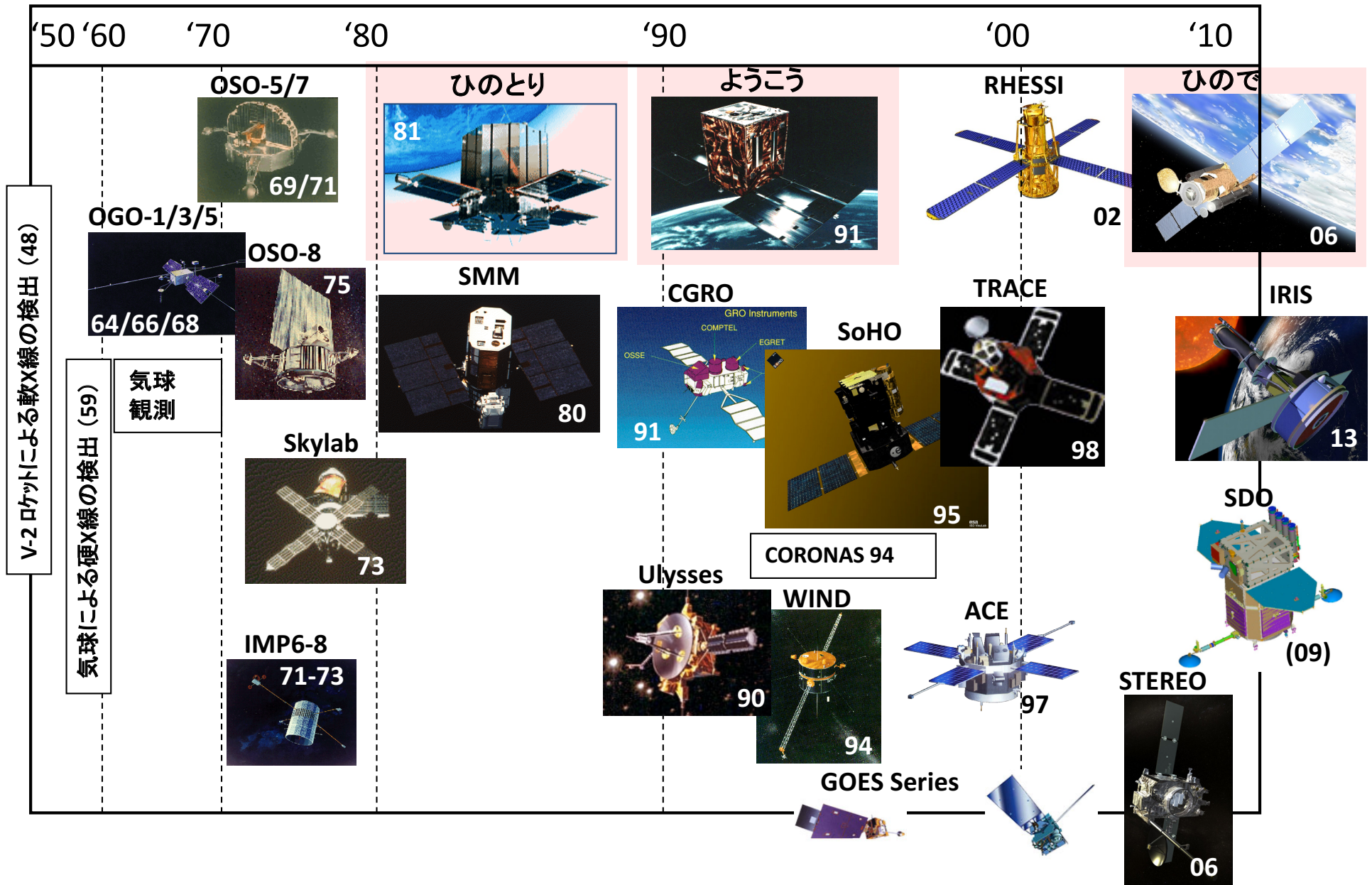
(http://trace.lmsal.com/POD/NAS2002_otherimages.htmlより)

地球大気による電磁波の吸収

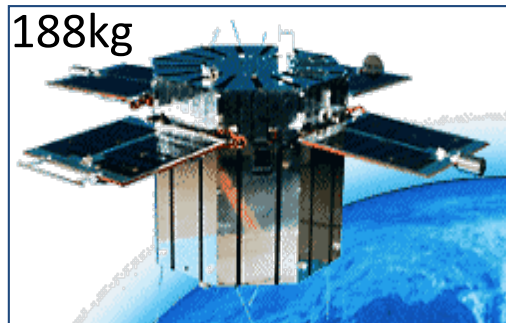


(小田稔「宇宙線」)

宇宙からの太陽観測



日本の宇宙太陽物理学



ひのとり/ASTRO-A (1981-1982)

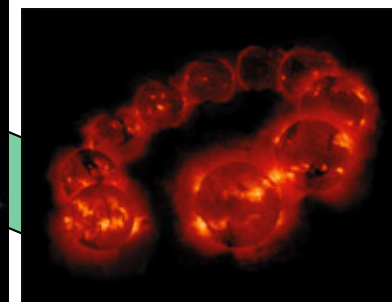
太陽フレアのX線・ γ 線観測

ようこう/SOLAR-A (1991-2001)

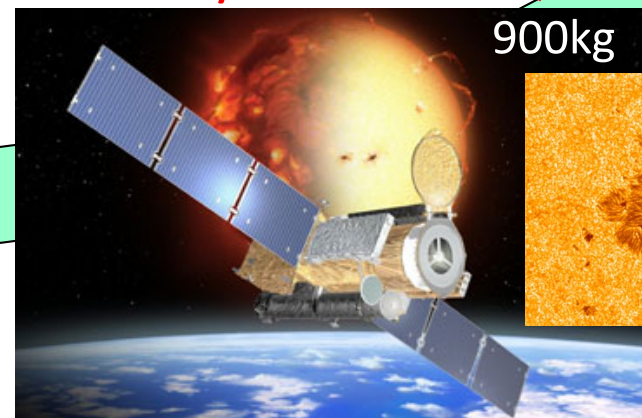


390kg

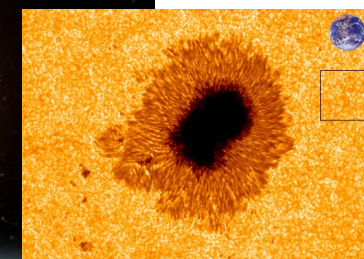
硬X線フレアと軟X線コロナ



ひので/SOLAR-B (2006-)



光球面磁場と軟X線・EUVコロナ



次期太陽観測衛星
計画
(SOLAR-Cなど)

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

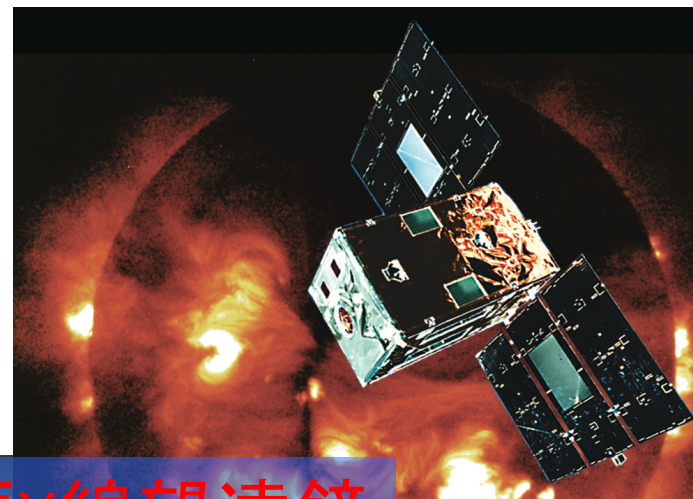
現役で観測中

- **CLASPロケット実験**[NASA観測ロケット](2015打上げ成功)
- **SOLAR-C衛星計画/イプシロン衛星計画**(2020年代半ば)
 - 大型光学望遠鏡(ひのでのヘリテージ)
 - 可動機構、他

現在進行中!

CLASP2
SUNRISE etc.
FOXSI-3 etc.

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

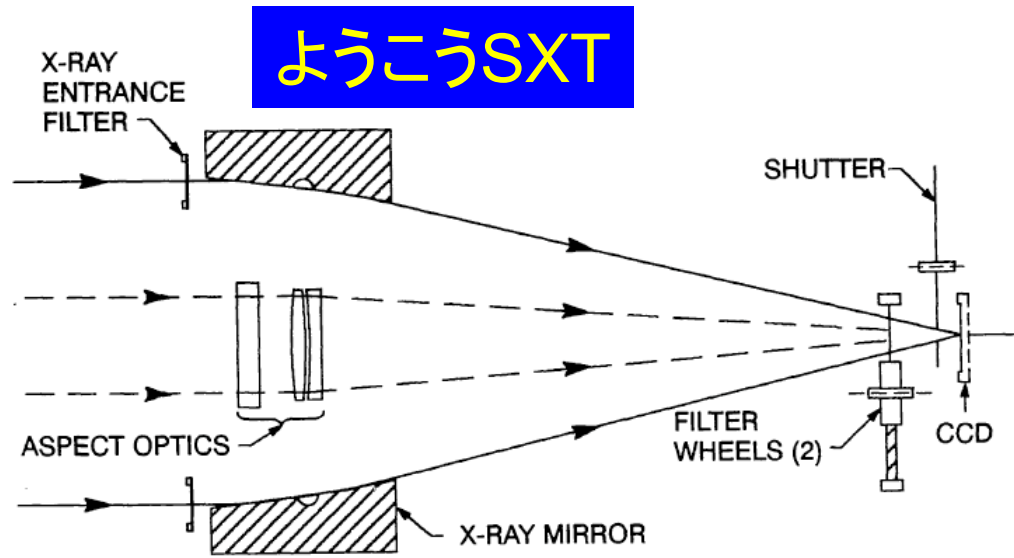


Fig. 1a. Schematic illustration of the optical concept and key elements of the SXT.

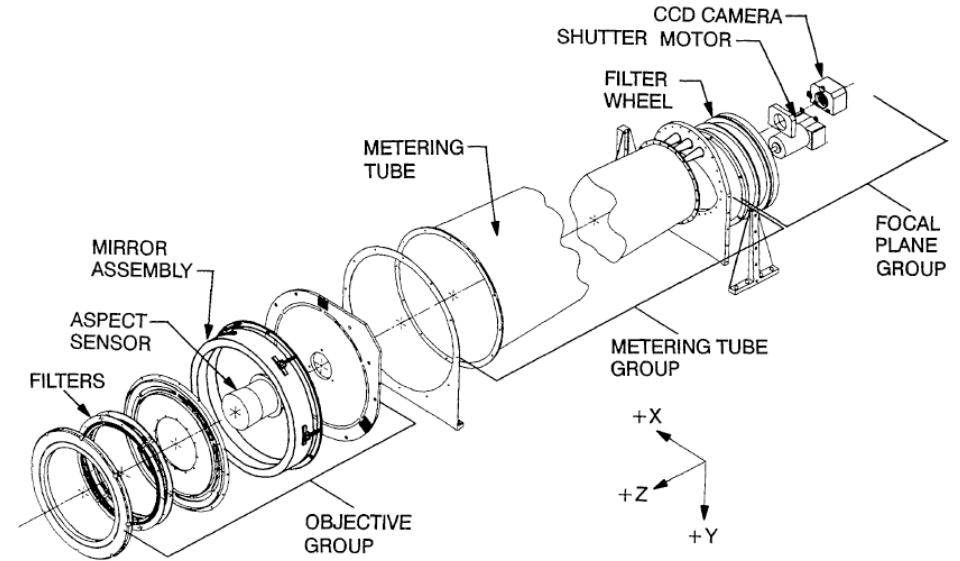
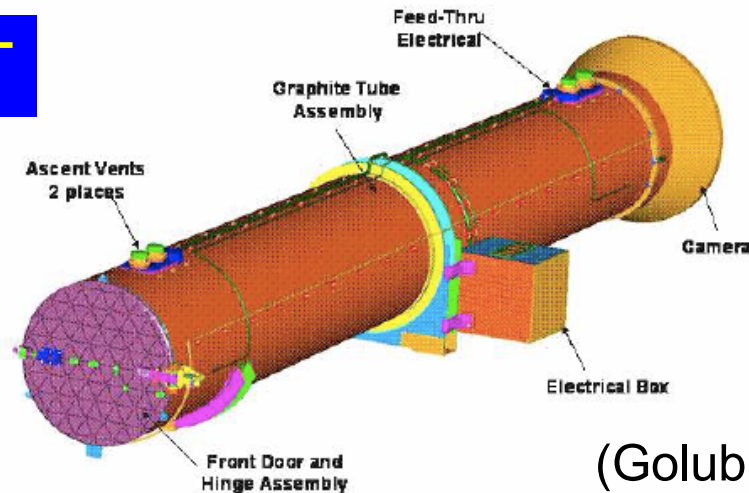


Fig. 1b. Exploded diagram of the SXT. Sub-assemblies mentioned in the text are identified.

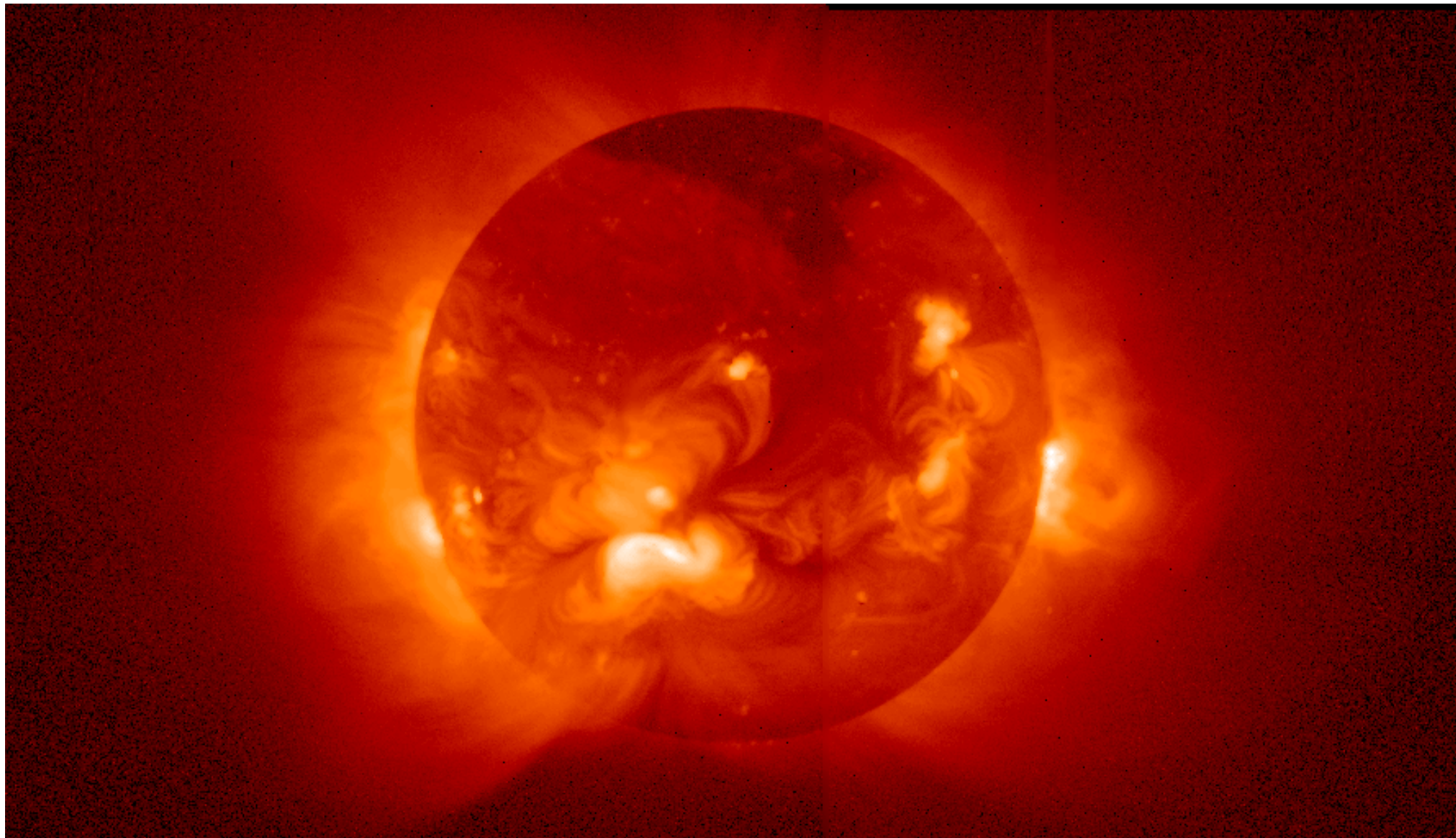
(Tsuneta et al. 1991)

ひのでXRT



(Golub et al. 2007)

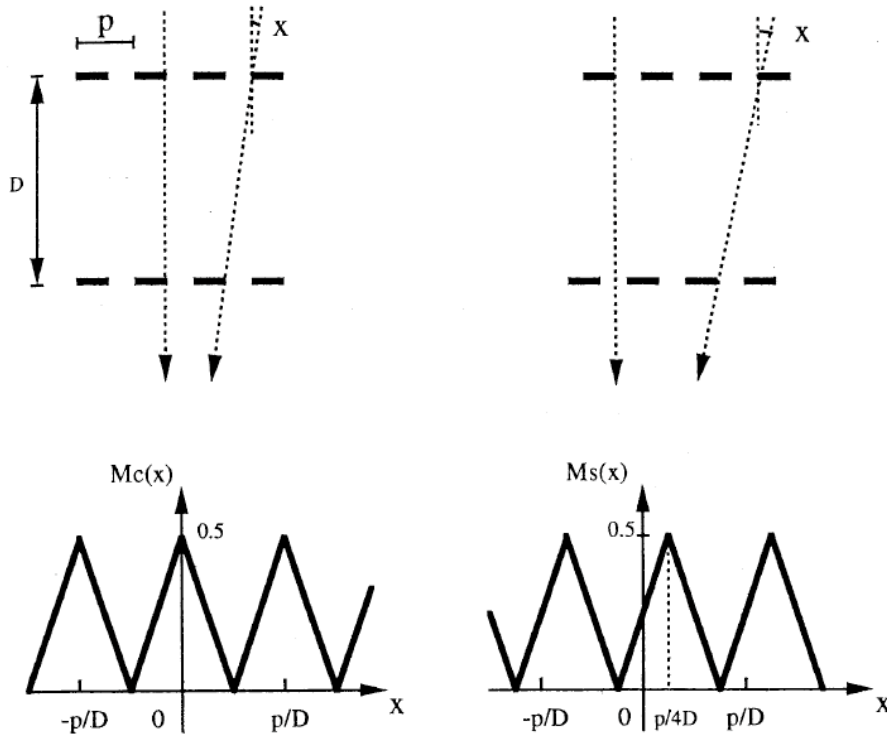
斜入射光学系



Front Door and
Hinge Assembly

(Golub et al. 2007)

すだれコリメータの原理：1次元

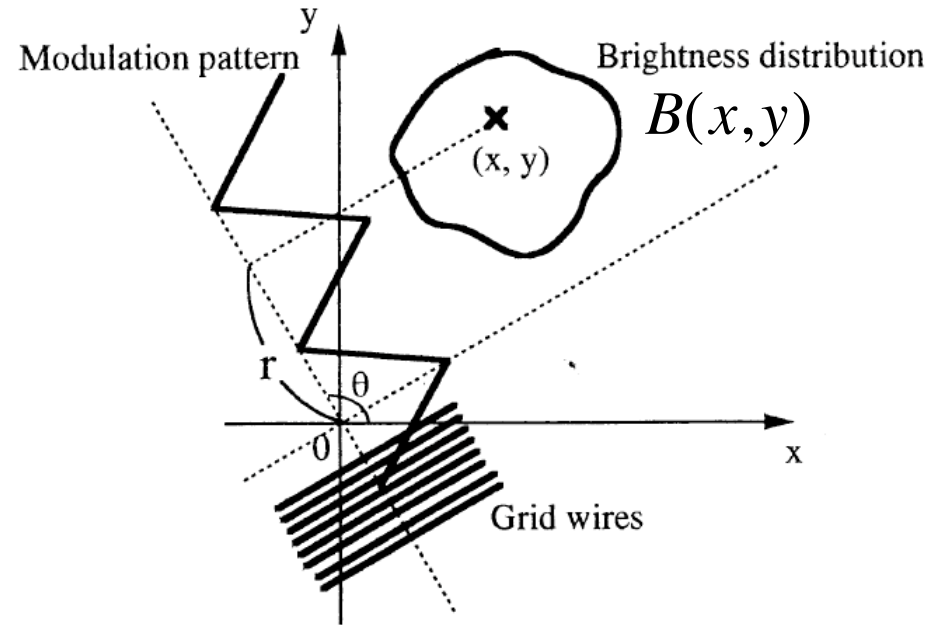


(a) cosine grids

(b) sine grids

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

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

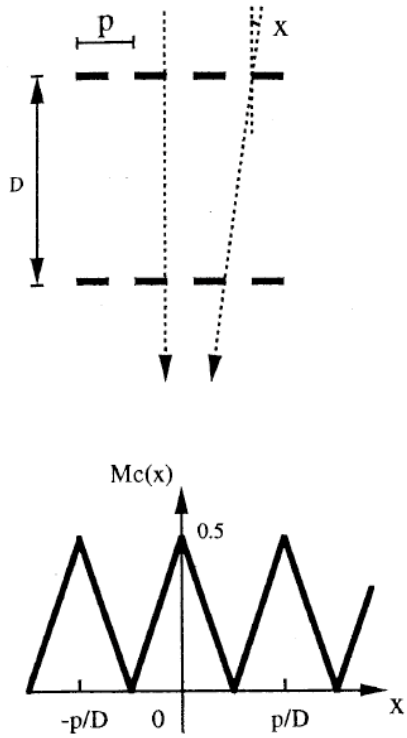


$$b_C(k, \theta) = A \int B(x, y) M_C(kr) dx dy$$

$b_C(k, \theta)$: 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

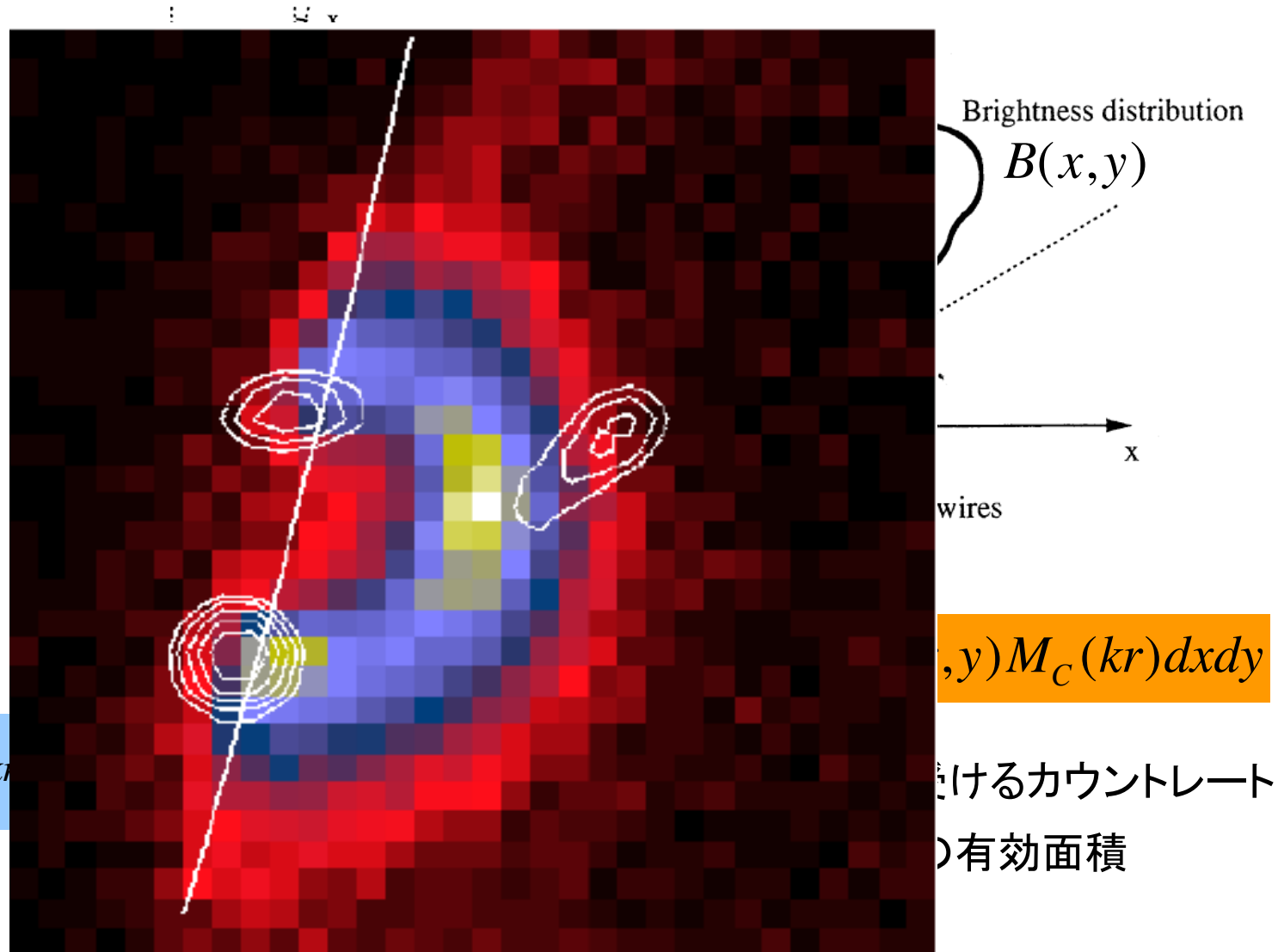
すだれコリメータの原理：1次元



(a) cosine grids

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

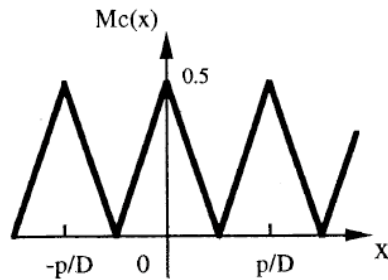
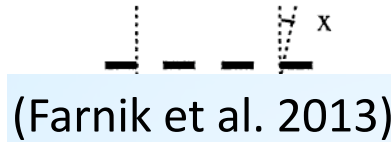
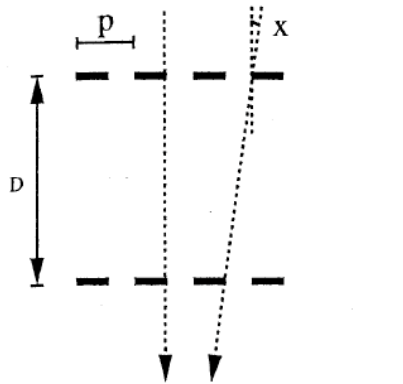
$$M_S(kr) = M_C\left(kr - \frac{\pi}{2}\right)$$



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

検出されるカウントレート
の有効面積

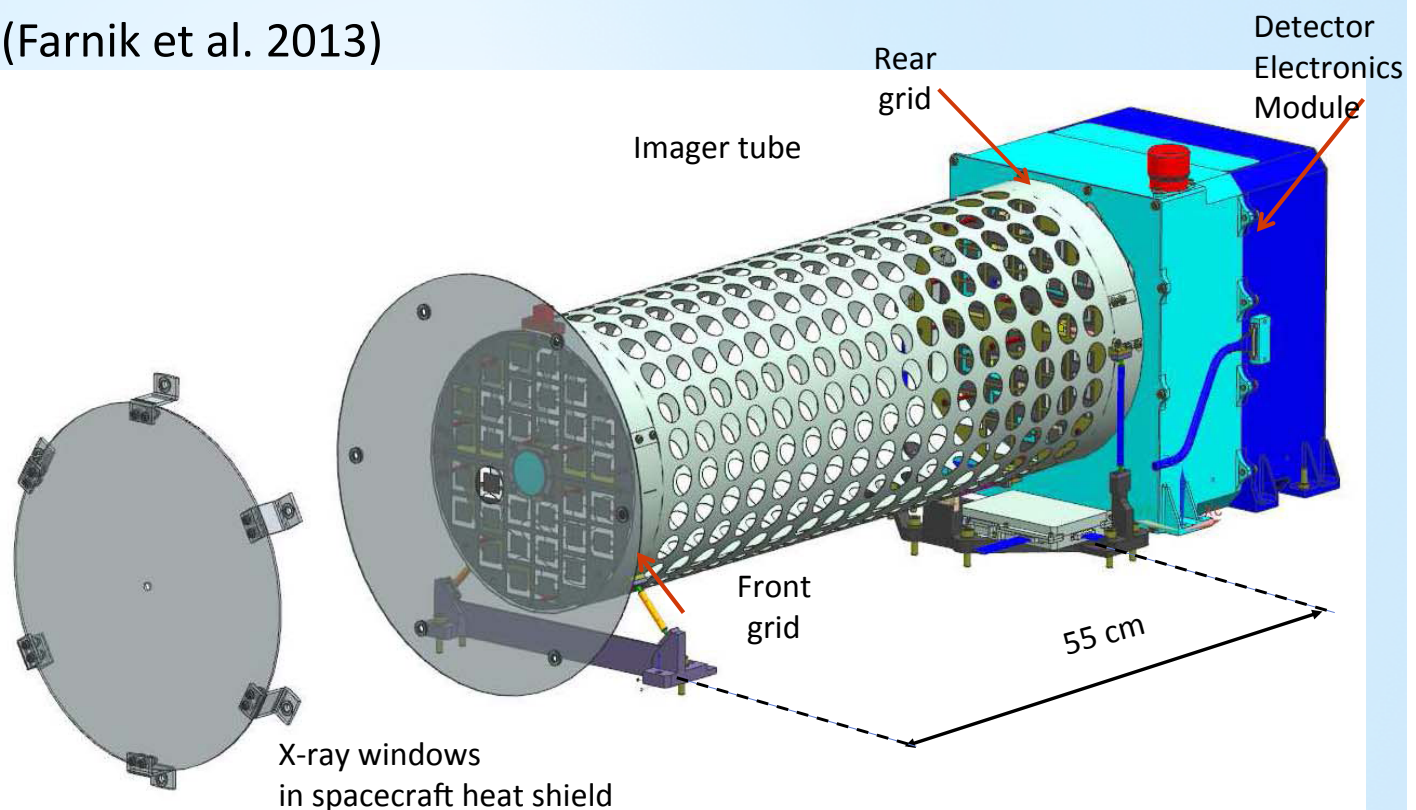
すだれコリメータの原理：1次元



(a) cosine grids

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

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



Solar Orbiter (2018年打上予定) 搭載
STIX硬X線望遠鏡

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ロケット実験**[NASA観測ロケット](2015打上げ成功)
- **SOLAR-C衛星計画/イプシロン衛星計画**(2020年代半ば)
 - 大型光学望遠鏡(ひのでのヘリテージ)
 - 可動機構、他

現在進行中!

CLASP2
SUNRISE etc.
FOXSI-3 etc.

XDT (XUV Doppler Telescope) 反射率レスポンス

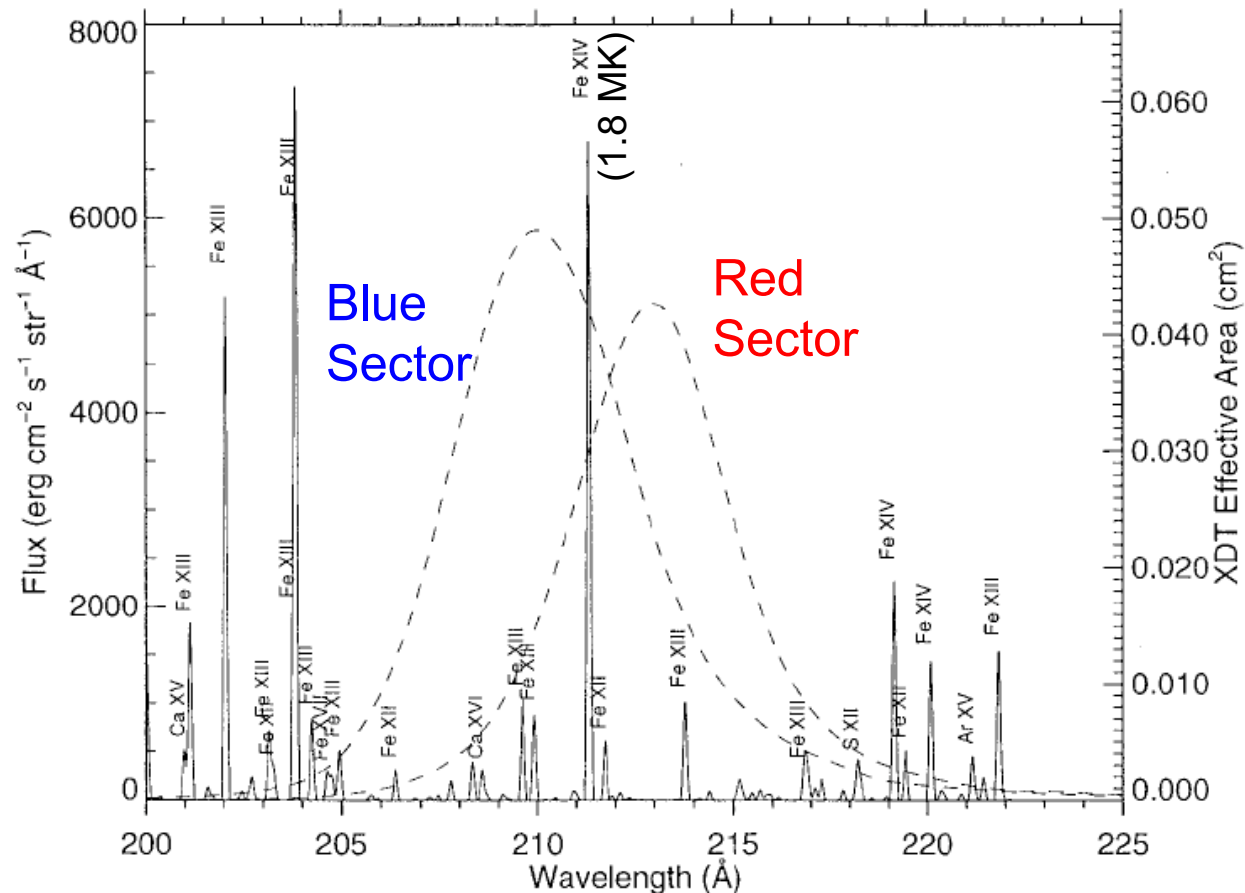
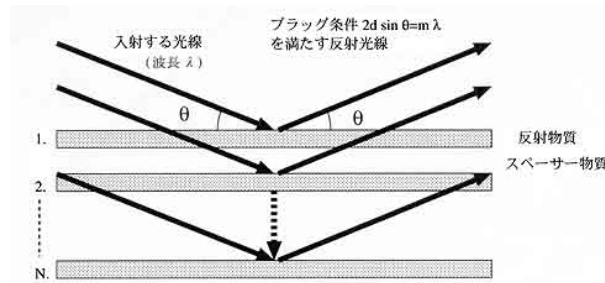


Figure 3. Distribution of emission lines around the target line of Fe XIV 211.3 Å. Intensity of each line has been calculated using a differential emission measure profile of an active region reported in Brosius *et al.* (1996). Response profiles of the blue and red bands of the XDT, in units of effective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

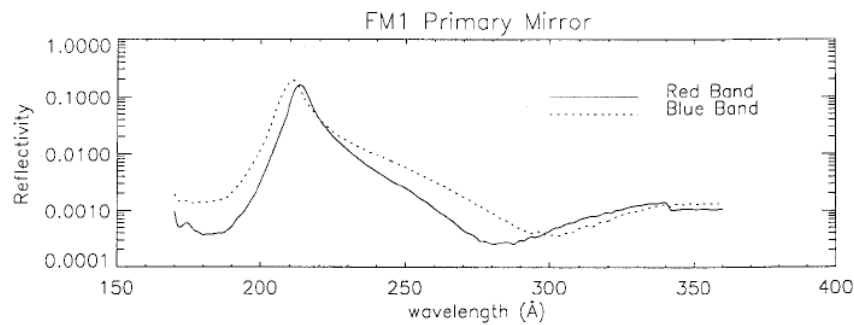
(Sakao et al. 1999)

直入射光学系

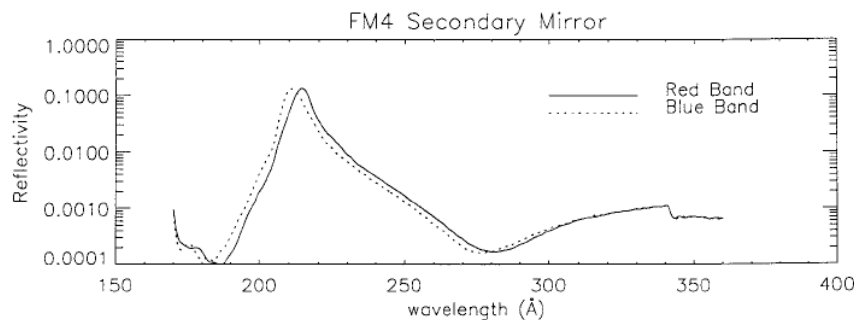


- Cassegrain光学系 (副鏡 = 凸面)
 - SOHO/EIT、TRACE、XDT、...
- 鏡面の多層膜コーティングにより特定の波長を選択的に反射
- 複数波長取得のため、セクターコーティング + 選択シャッター

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



主鏡



副鏡

MoSi/Si (Γ=0.2) 多層膜ミラーの反射率

XUV Doppler Telescope (XDT)

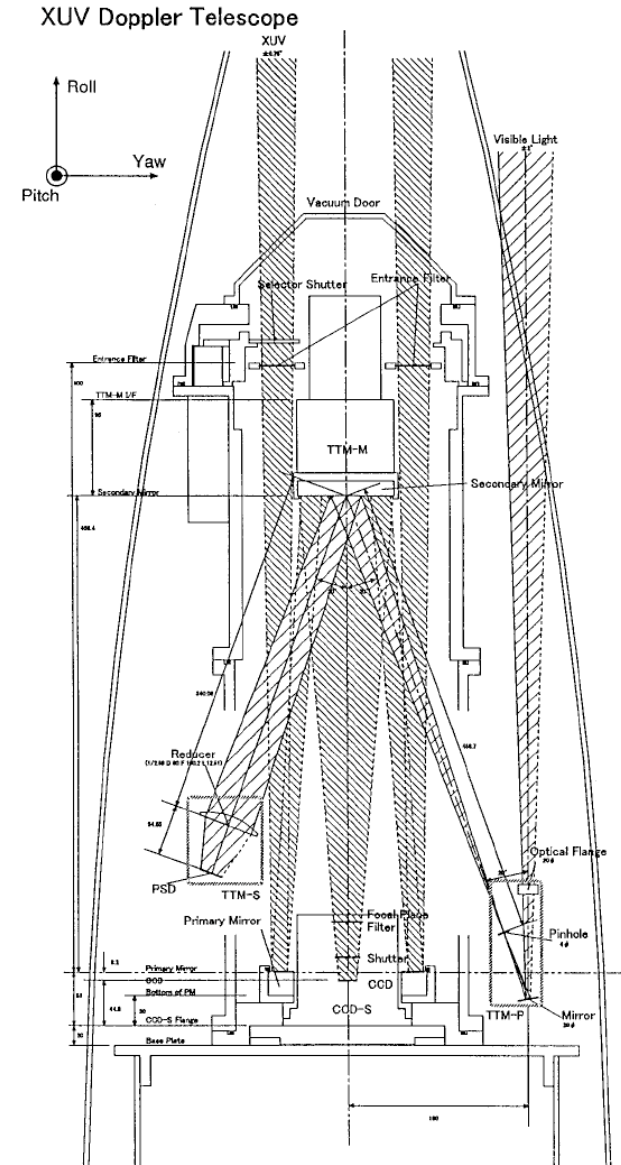
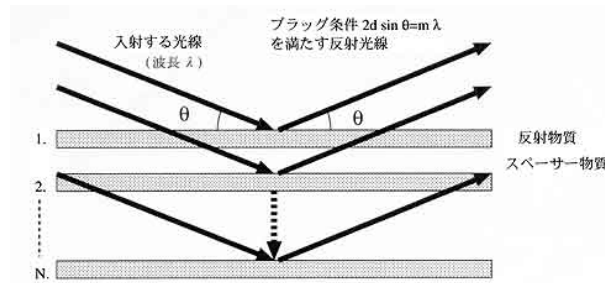


Figure 4. A side view of the XDT mounted inside the nose fairing of the S520 rocket. The path of the incident XUV light is shown in dense hatches while the visible light path for the tip-tilt mirror system is shown in sparse ones. Pitch, yaw, and roll axes of the rocket are also shown in the figure.

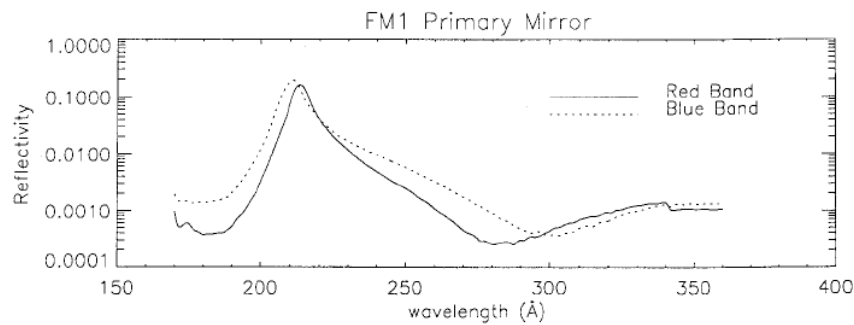
(Sakao et al. 1999)

直入射光学系

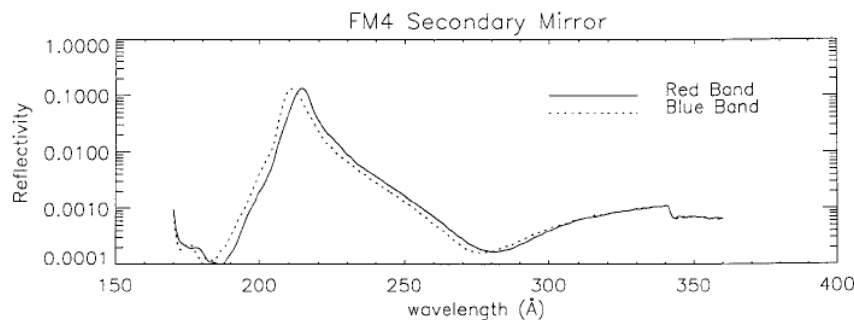


- Cassegrain光学系 (副鏡 = 凸面)
 - SOHO/EIT、TRACE、XDT、...
- 鏡面の多層膜コーティングにより特定の波長を選択的に反射
- 複数波長取得のため、セクターコーティング + 選択シャッター

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



主鏡



副鏡

MoSi/Si (Γ=0.2) 多層膜ミラーの反射率

XUV Doppler Telescope (XDT)

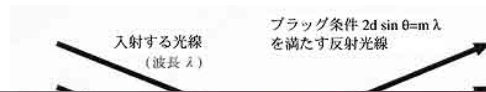


Figure 4. A side view of the XDT mounted inside the nose fairing of the S520 rocket. The path of the incident XUV light is shown in dense hatches while the visible light path for the tip-tilt mirror system is shown in sparse ones. Pitch, yaw, and roll axes of the rocket are also shown in the figure.

(Sakao et al. 1999)

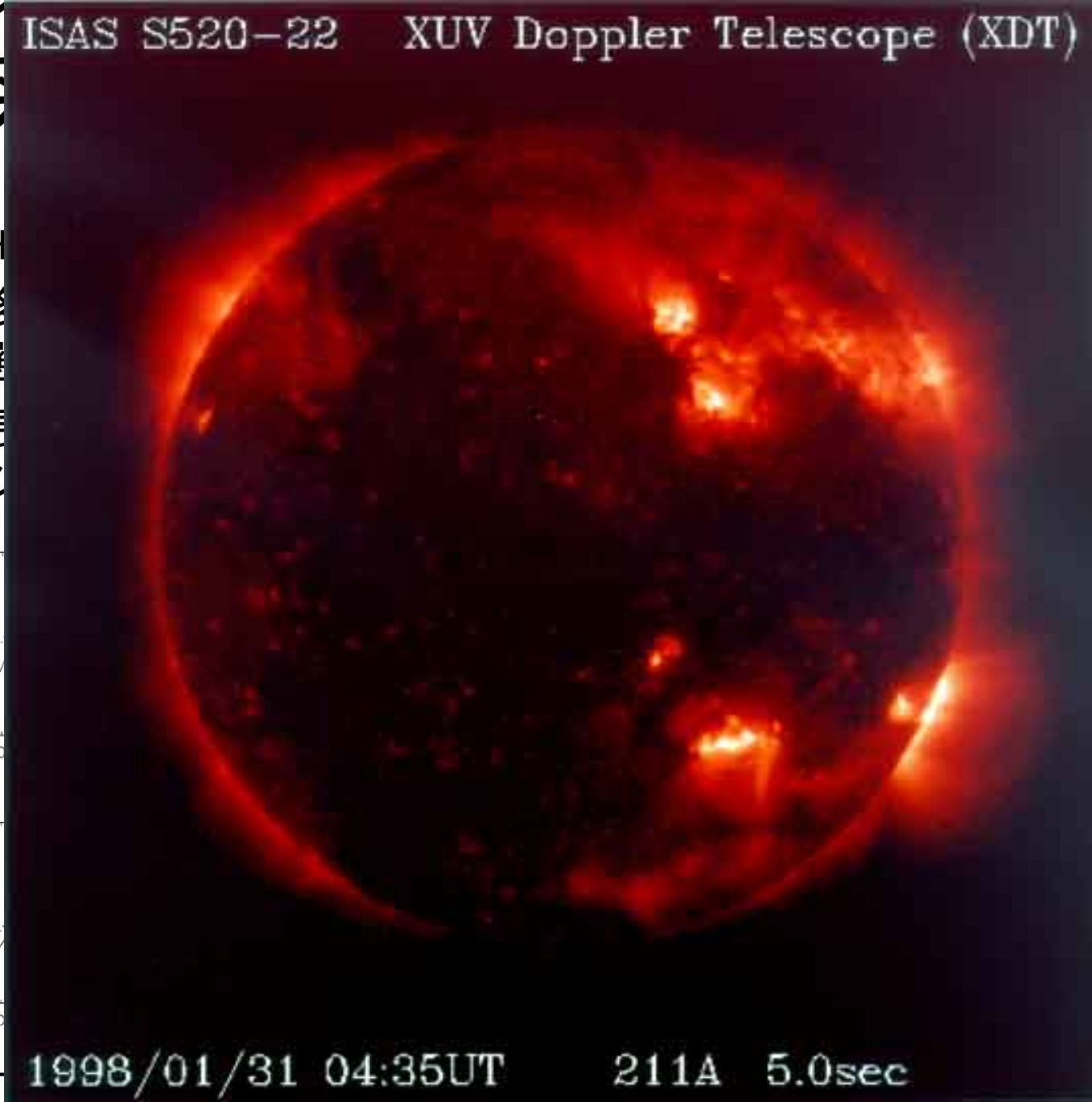
直入射 光学系

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

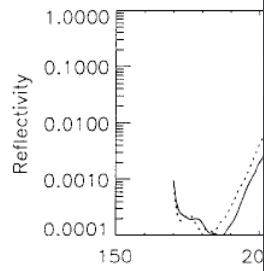
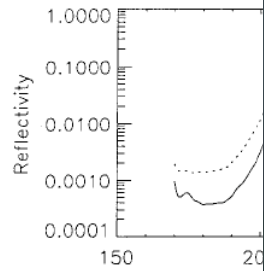


XUV Doppler Telescope (XDT)

ISAS S520-22 XUV Doppler Telescope (XDT)



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



MoSi/Si (Γ)

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

これまでの開発



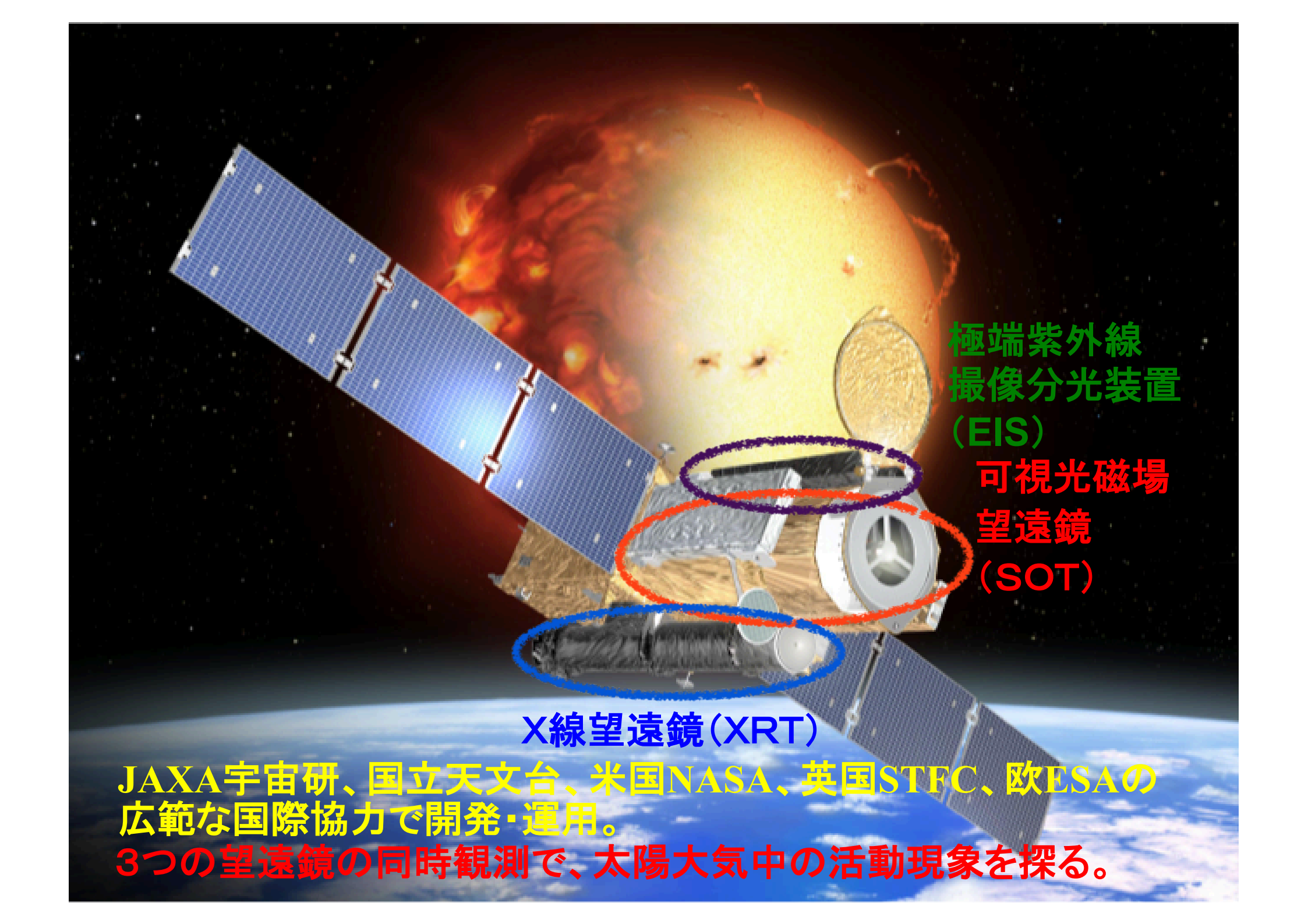
- **ひので衛星**(2006-); ~900kg
 - 可視光磁場望遠鏡の望遠鏡部・光学設計
 - X線望遠鏡のCCDカメラ
 - コンタミネーションコントロール

現役で観測中

- **CLASPロケット実験**[NASA観測ロケット](2015打上げ成功)
- **SOLAR-C衛星計画/イプシロン衛星計画**(2020年代半ば)
 - 大型光学望遠鏡(ひのでのヘリテージ)
 - 可動機構、他

現在進行中!

CLASP2
SUNRISE etc.
FOXSI-3 etc.



極端紫外線
撮像分光装置
(EIS)

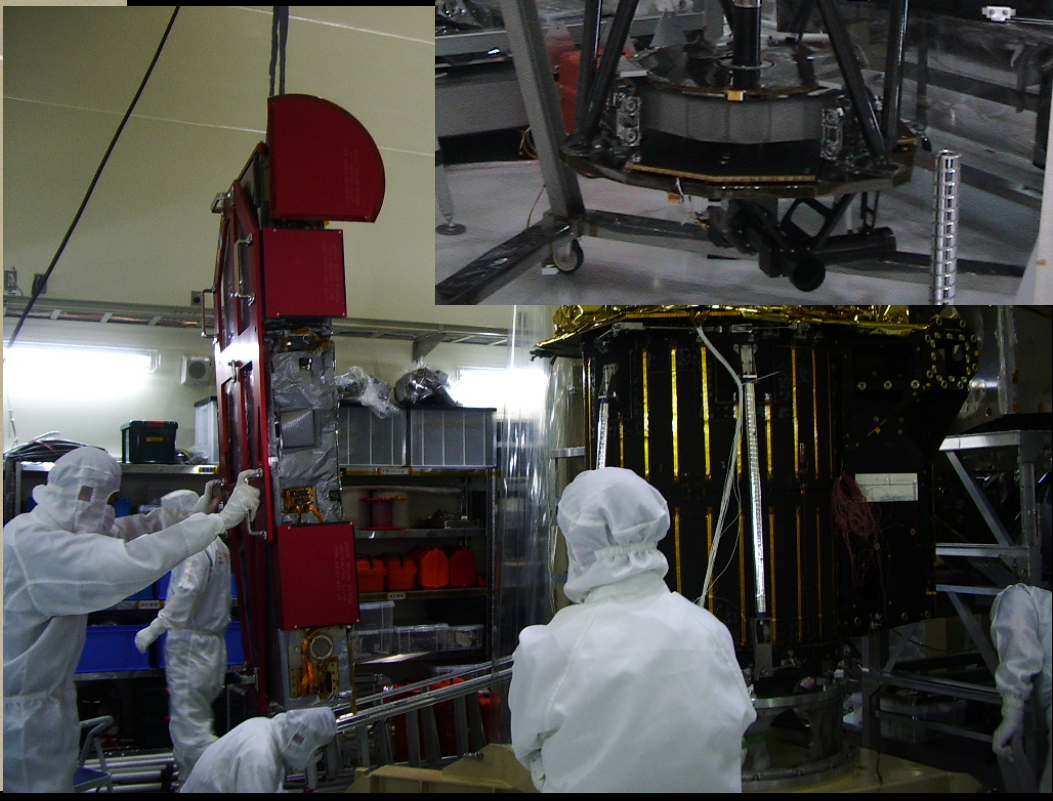
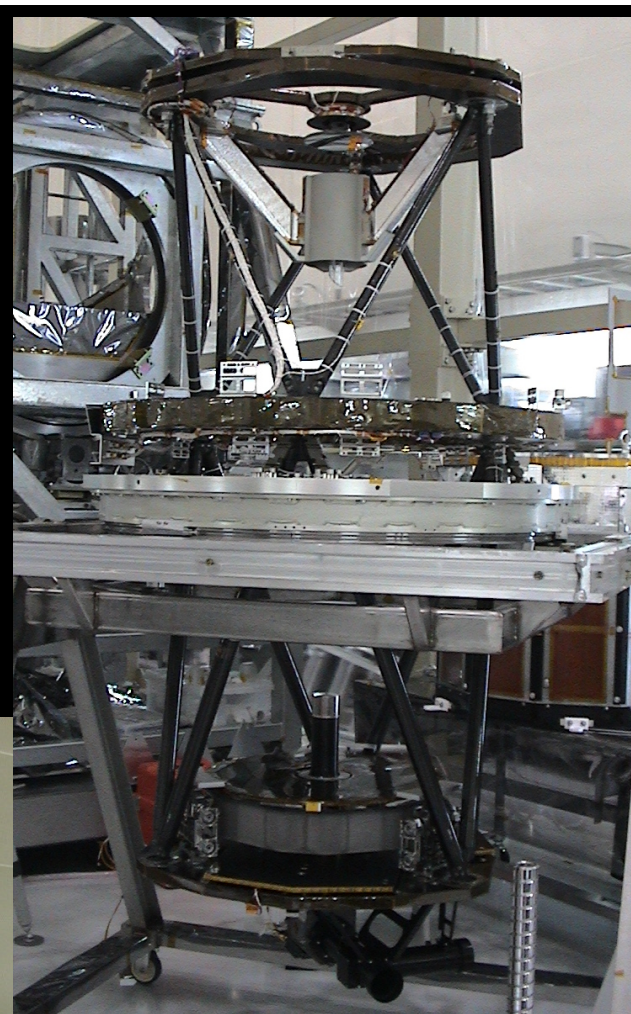
可視光磁場
望遠鏡
(SOT)

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。

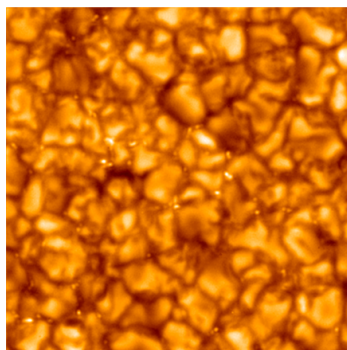
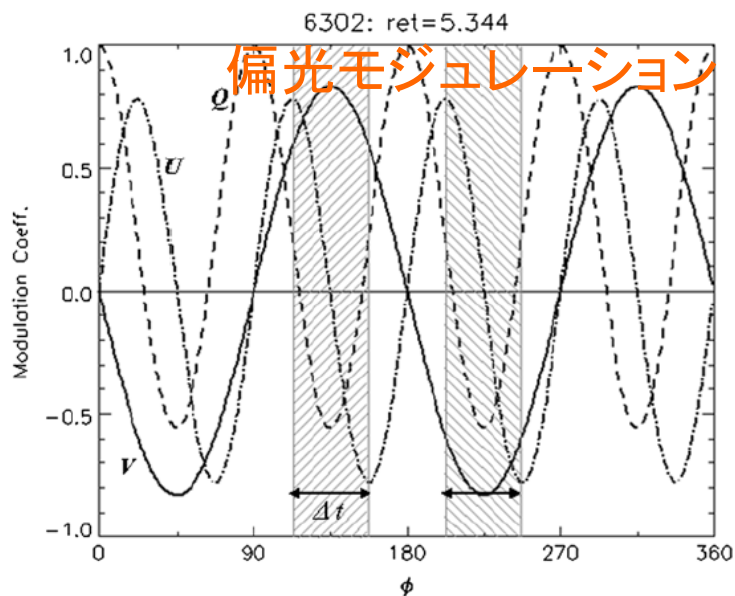
3つの望遠鏡の同時観測で、太陽大気中の活動現象を探る。

可視光磁場望遠鏡 (SOT)

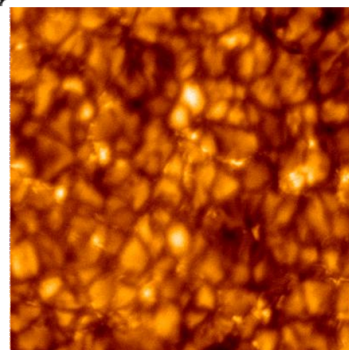


可視光磁場望遠鏡 (SOT)

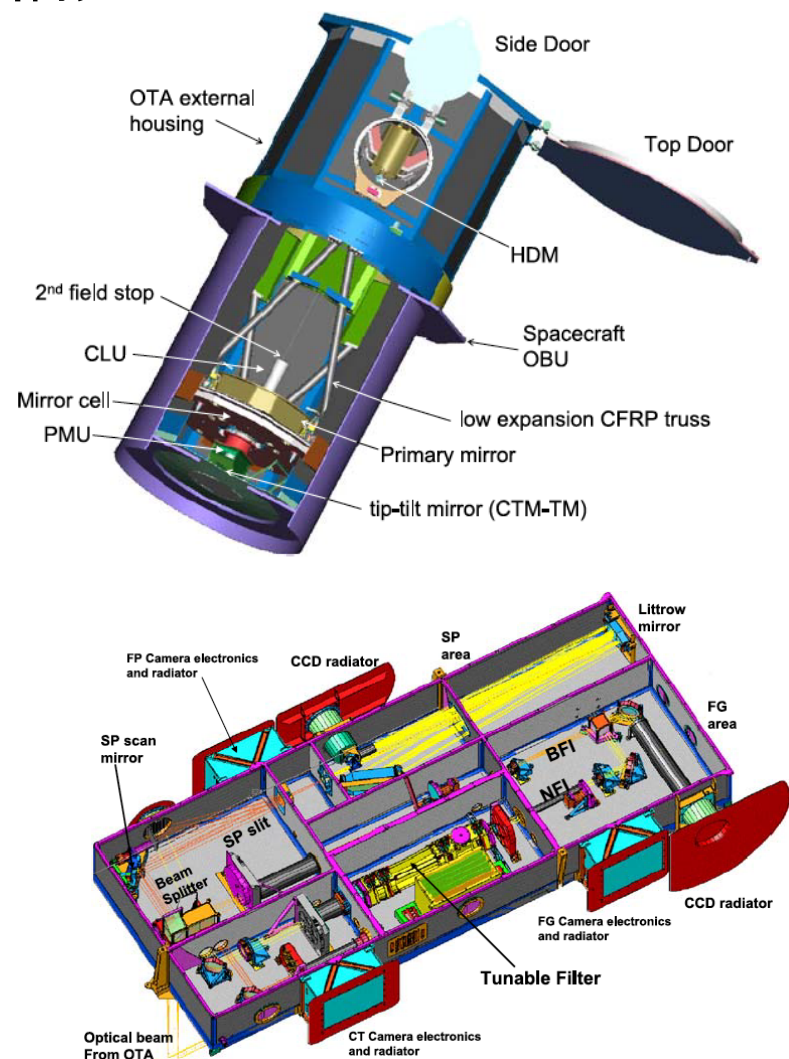
光球からの可視光の直線偏光・円偏光成分の精密計測 (Stokes IQUV)
 → 光球磁場の3次元成分を取得



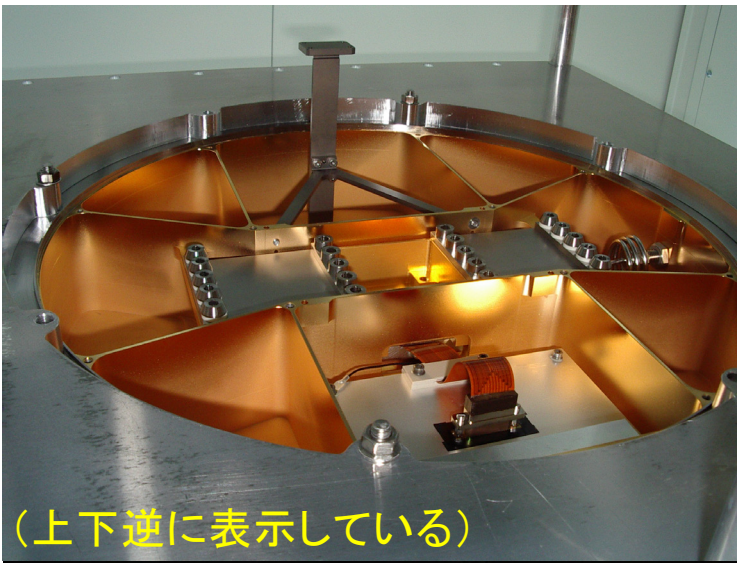
「ひので」



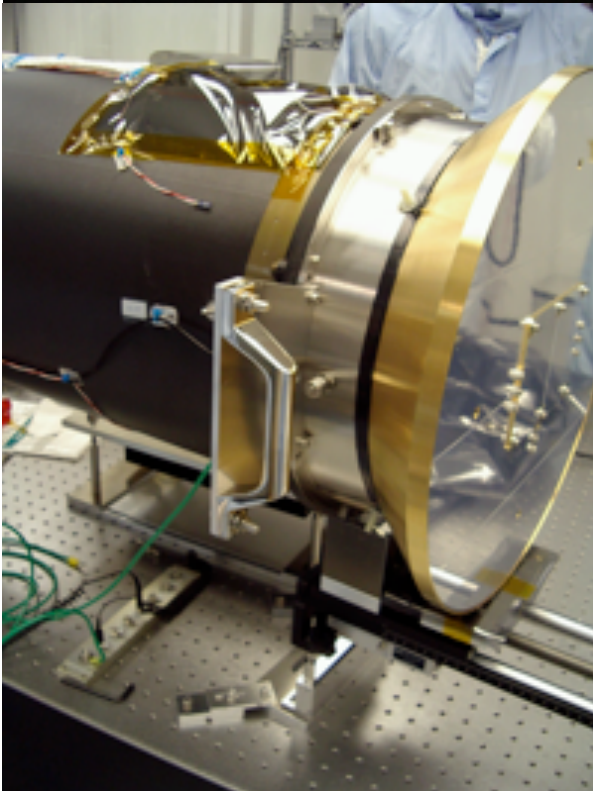
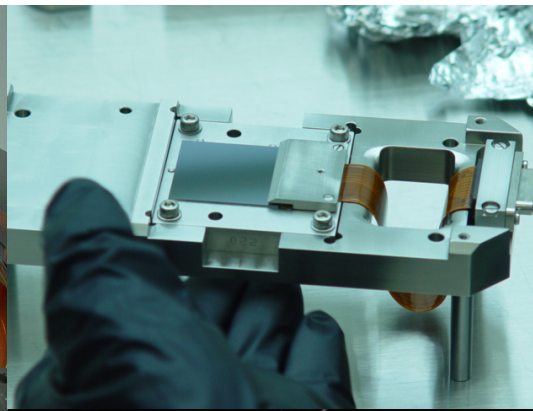
地上望遠鏡による観測例



X線望遠鏡 (XRT)

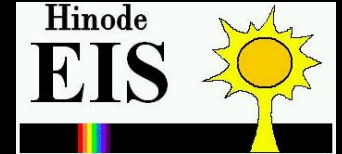


(上下逆に表示している)



EIS

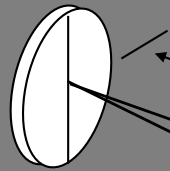
The high-sensitivity solar EUV imaging spectrometer



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

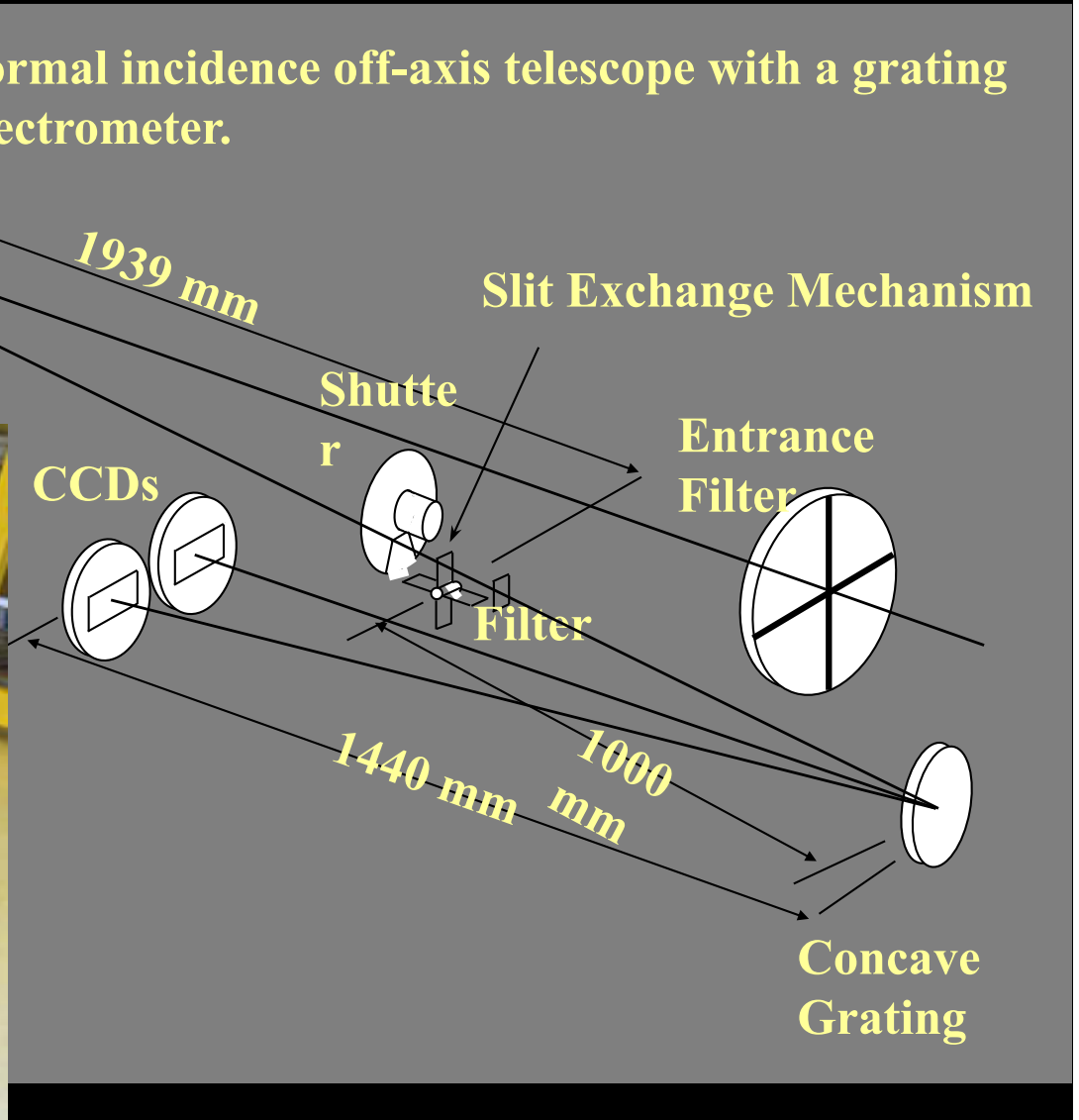
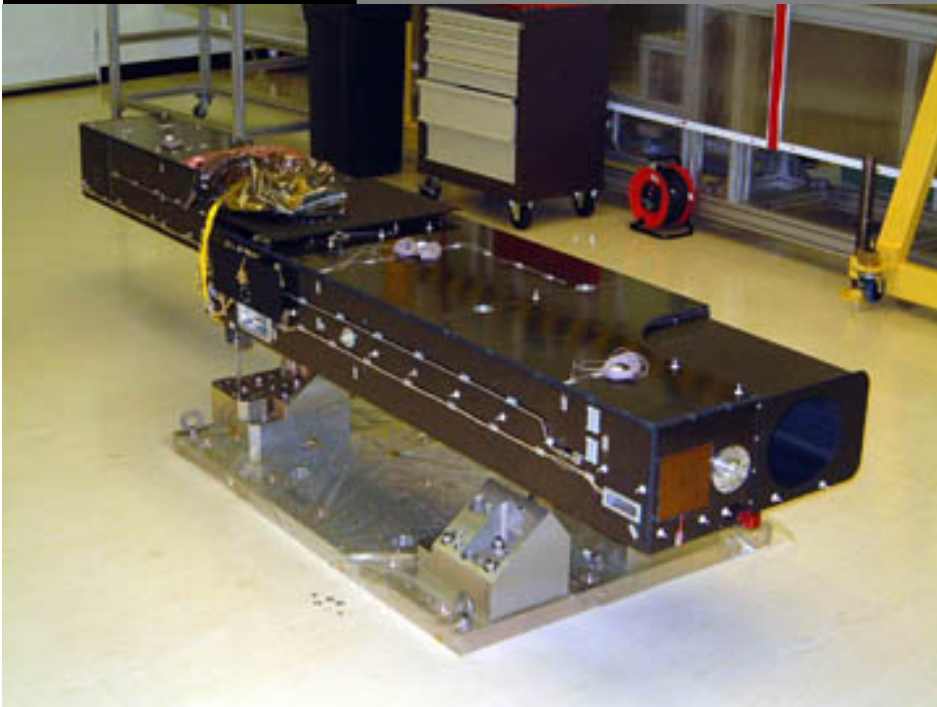
CCDs

Filter

1440 mm

1000 mm

Concave Grating

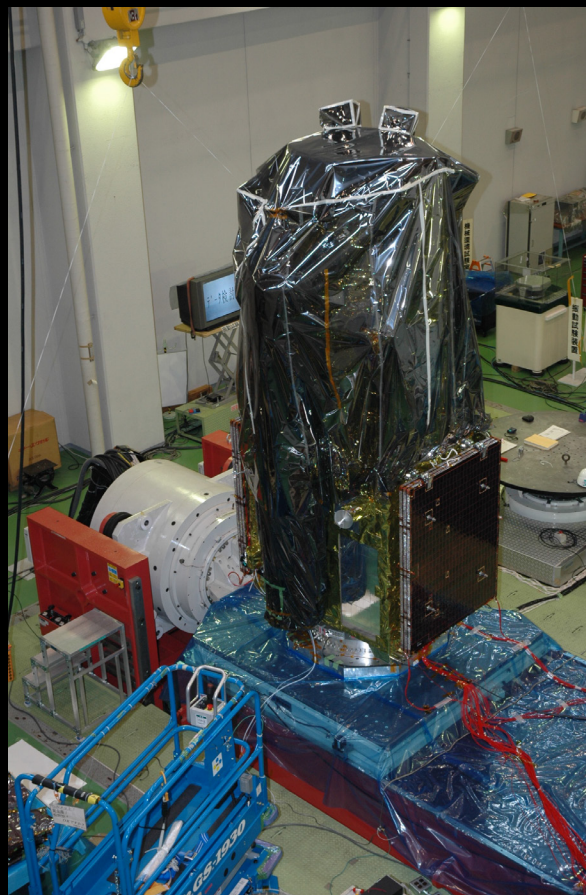


衛星組立作業

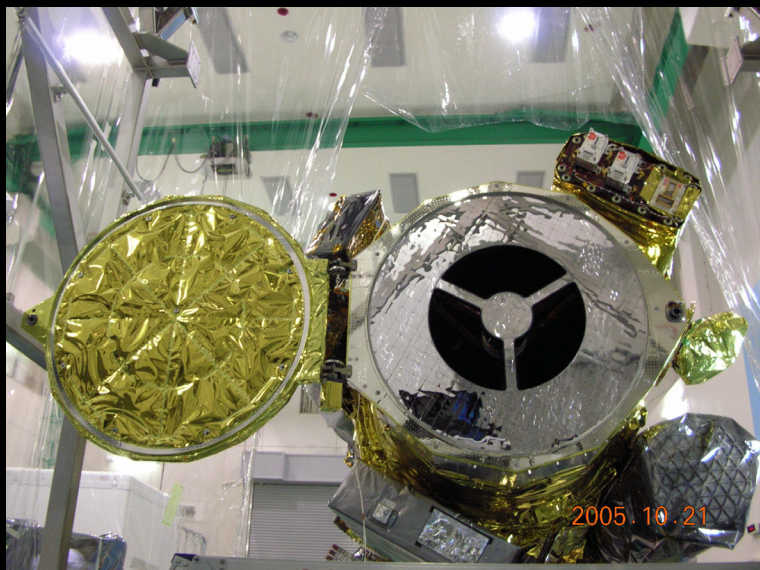
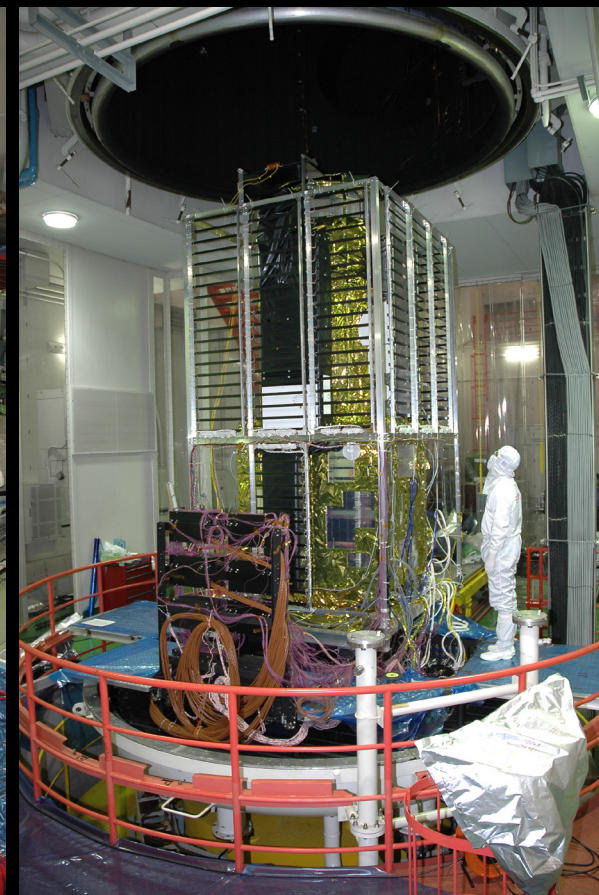


衛星総合試験

機械環境試験
(2005年10月)



熱真空試験
(2006年3月)



2005.10.21

可視光望遠鏡ドア展開試験
(2005年10月)

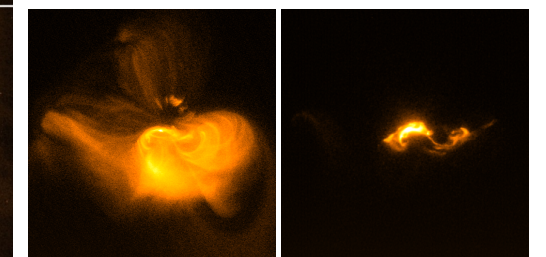
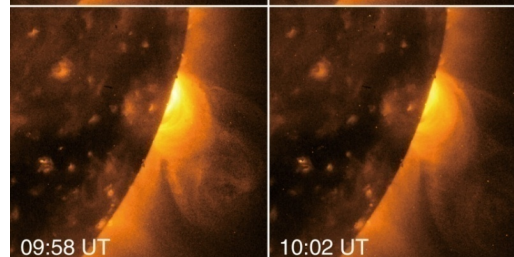
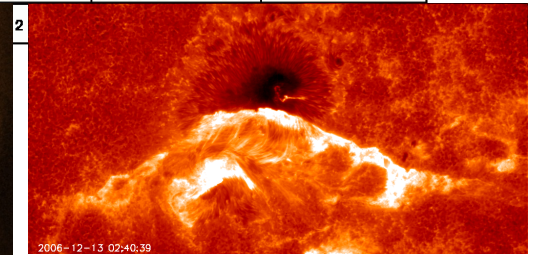
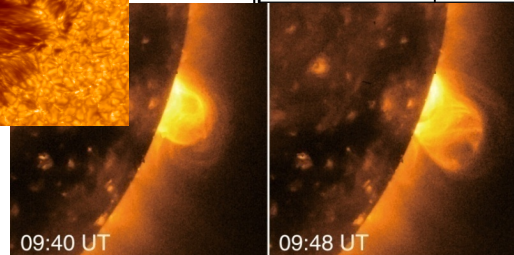
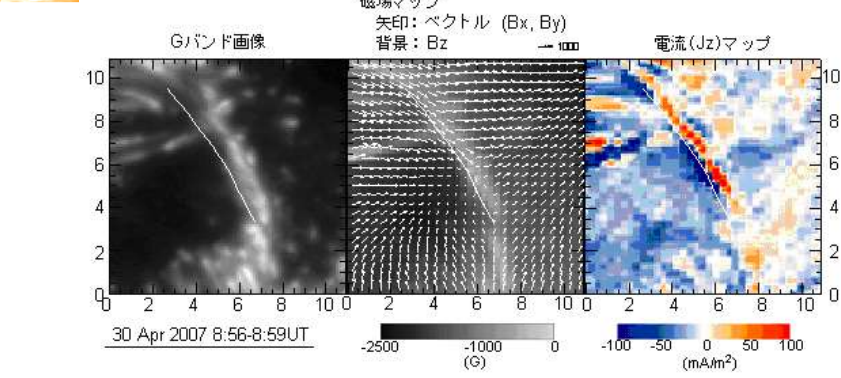
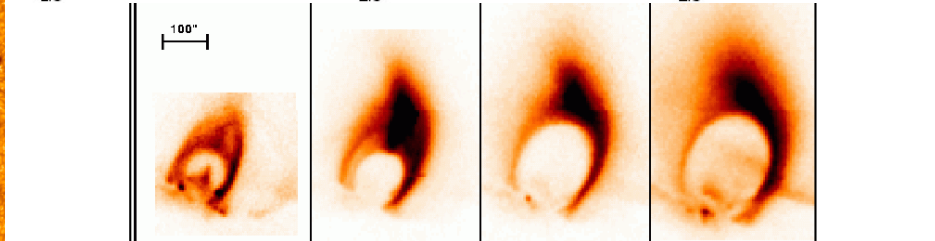
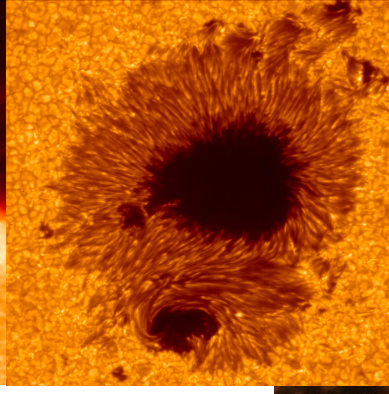
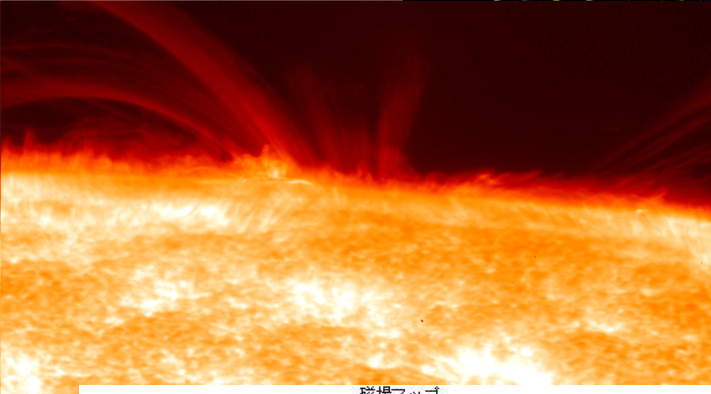
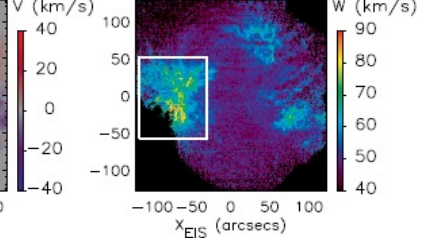
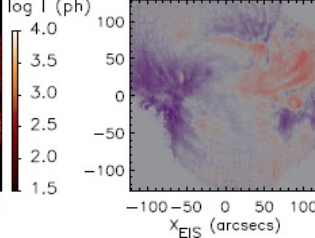
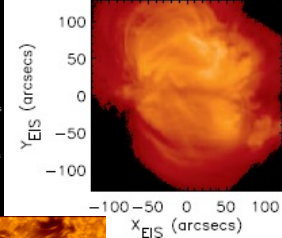
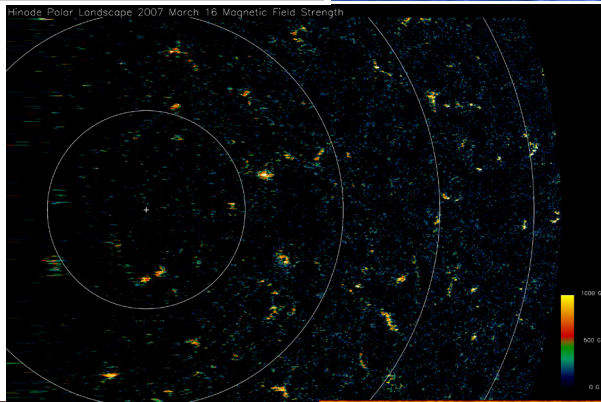
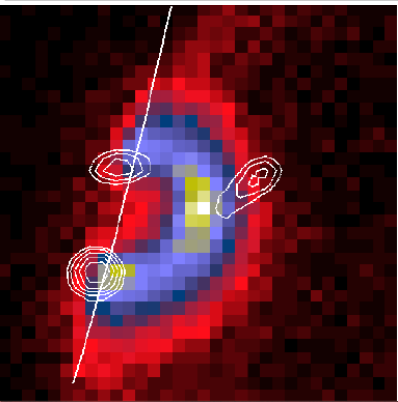
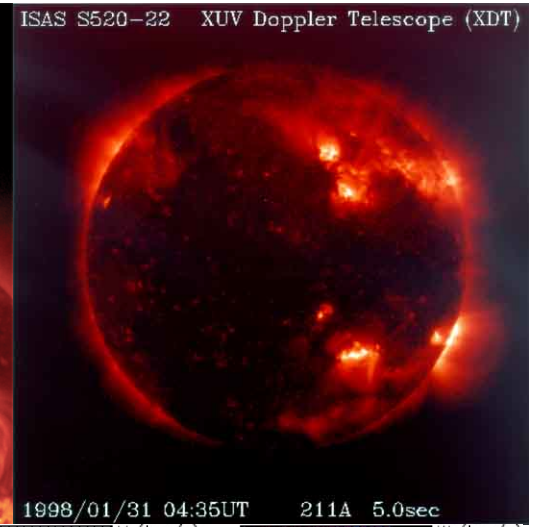
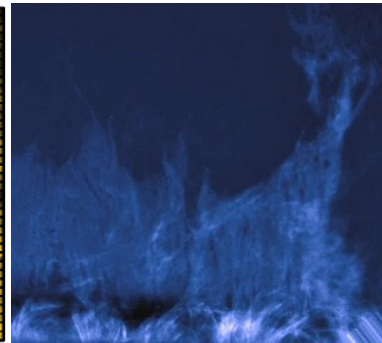
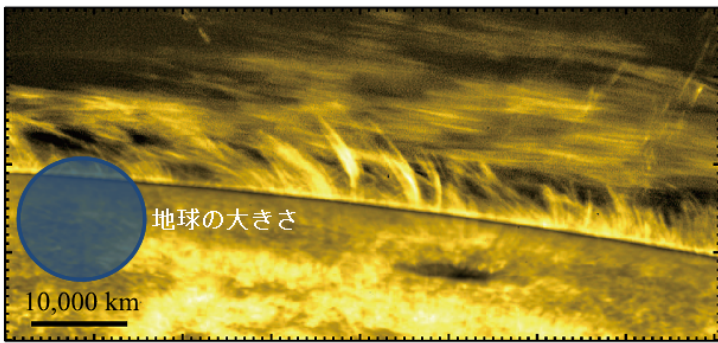


SOLAR-B/「ひので」の打ち上げ

JAXA内之浦宇宙空間観測所より
M-V-7ロケットにて

日本時間 2006年9月23日 6:36am





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

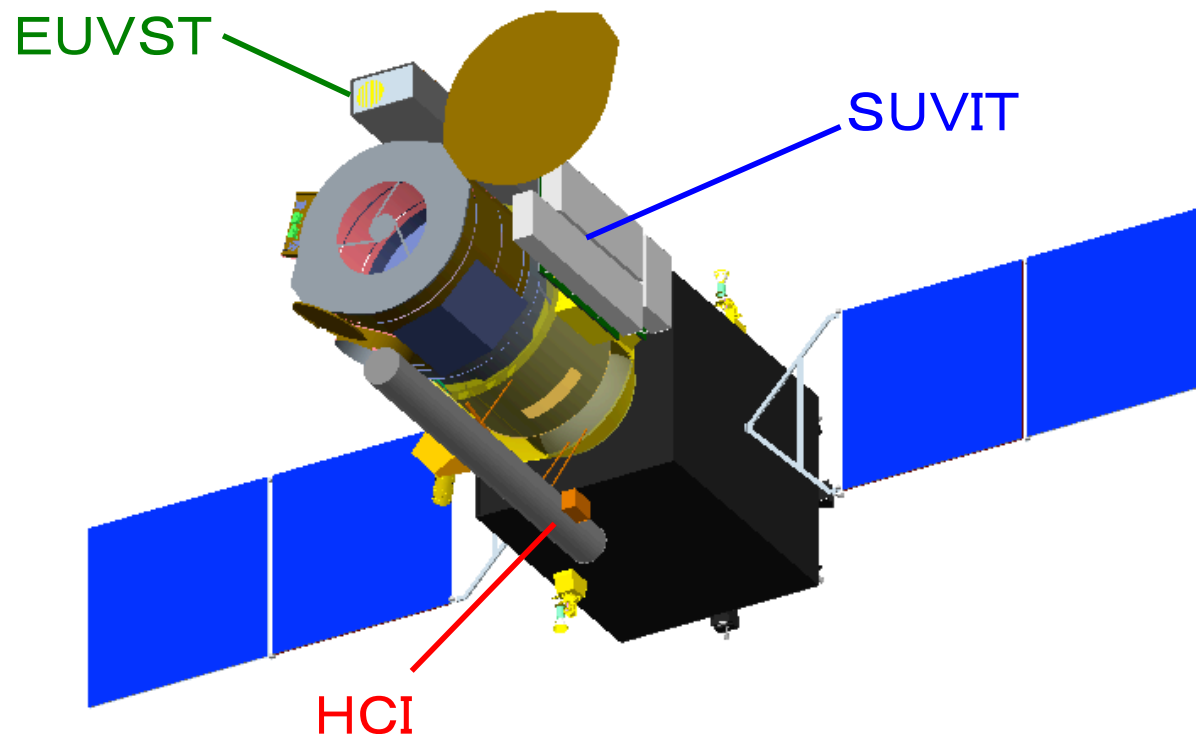
- **CLASPロケット実験**[NASA観測ロケット](2015打上げ成功)
- **SOLAR-C衛星計画/イプシロン衛星計画**(2020年代半ば)
 - 大型光学望遠鏡(ひのでのヘリテージ)
 - 可動機構、他

現在進行中!

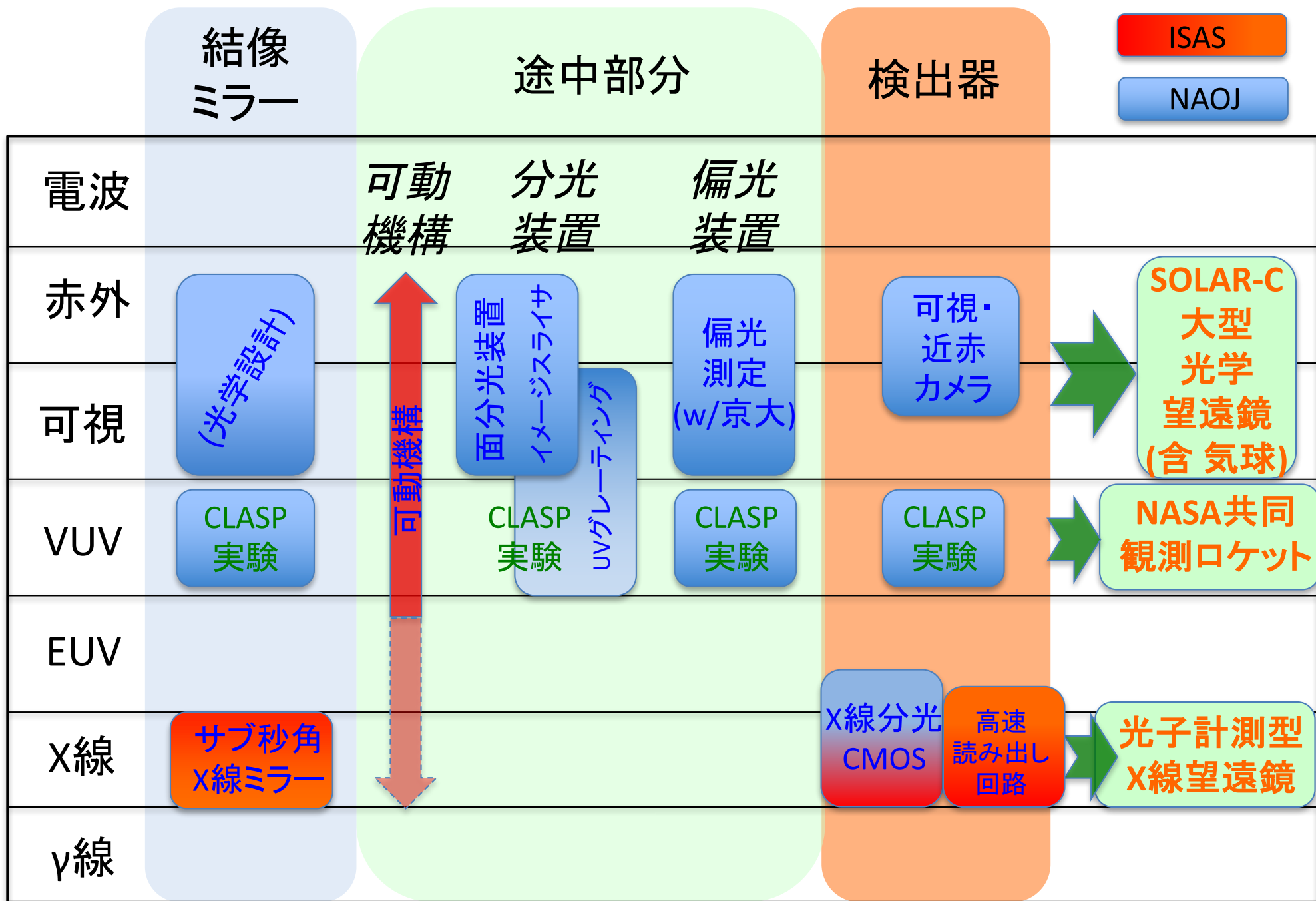
CLASP2
SUNRISE etc.
FOXSI-3 etc.

Solar-C衛星計画

- 「ひので」に続く4機目の日本の太陽観測衛星。2020年代中頃の打上げ。
- 3台の望遠鏡による観測：
 - SUVIT – 光学磁場診断望遠鏡...大型(口径1mクラス)光学望遠鏡
 - EUVST – 紫外線高感度分光望遠鏡
 - HCI – 高角分解能EUV撮像望遠鏡
- 太陽大気を抜けなく分光(+偏光)観測
- 磁力線の構造を特定し、太陽大気の加熱とダイナミックな現象のメカニズムを探る
- NASA・ESAとの国際協力を想定
- ミッションの尖鋭化を策定中



スペース太陽観測機器の開発分布(現在進行分)



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

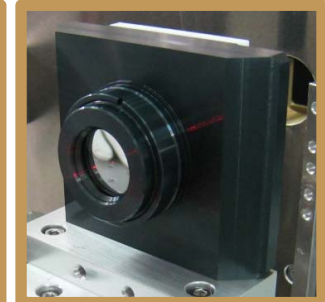
Primary



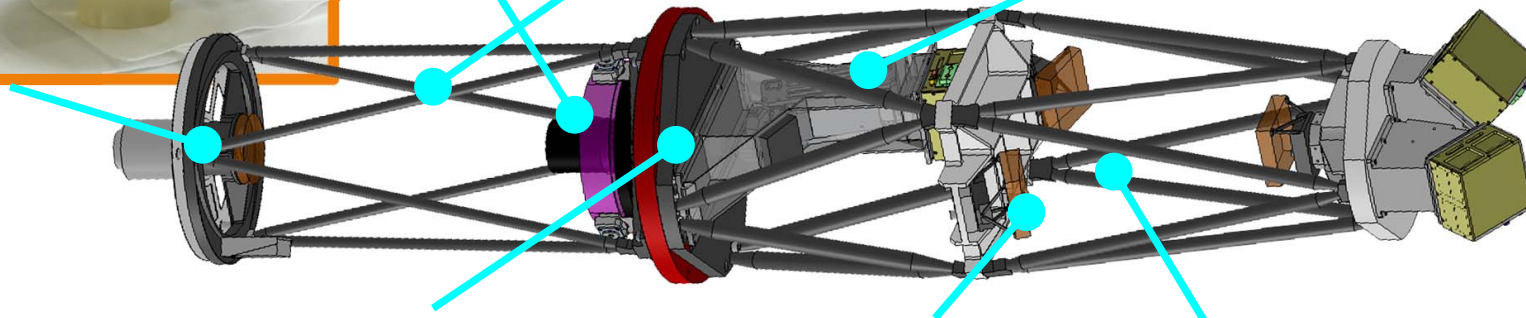
Telescope Structure



Slitjaw optics: mirror unit & filter unit



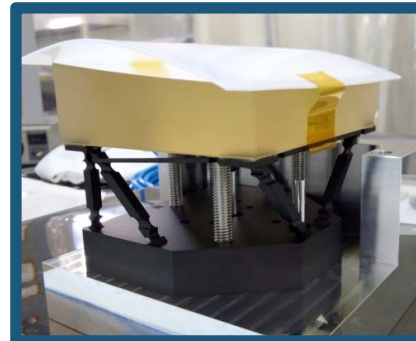
Secondary



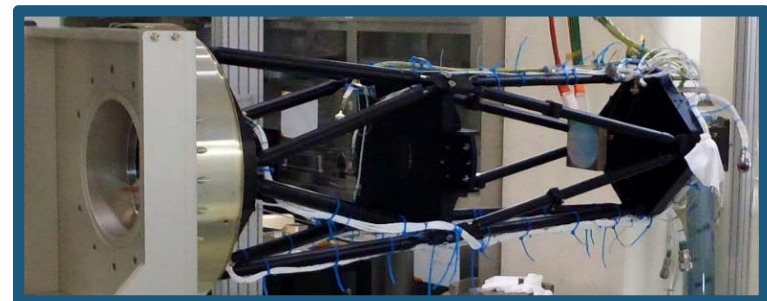
HWP motor (PMU) & driver



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

Primary

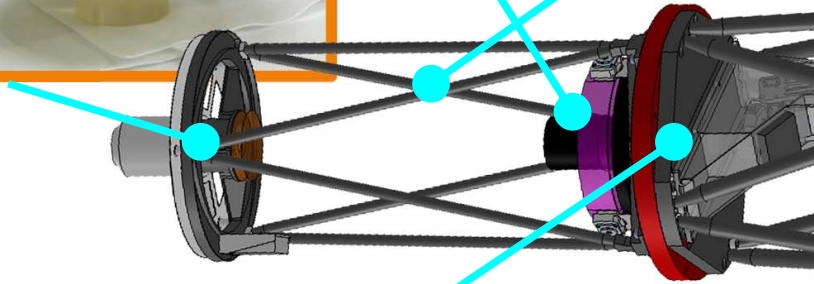


Secondary



偏光分光
CLASP 口径

Telescope Structure



HWP motor (PMU) & driver



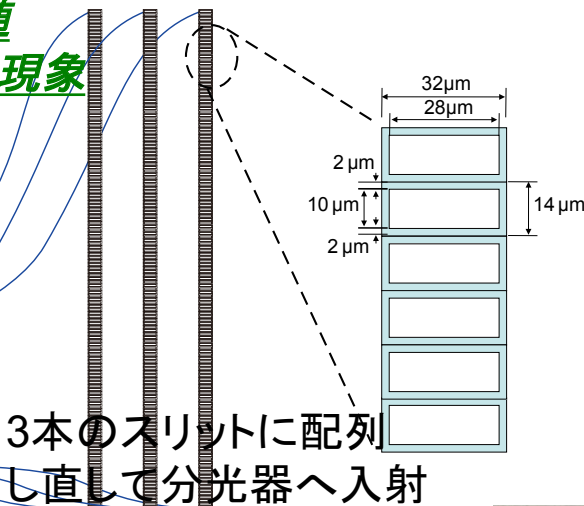
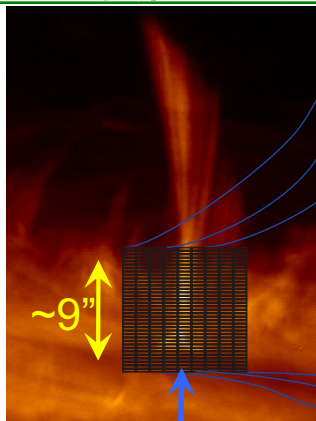
Off-axis Camera



現在進行中の装置開発

彩層ダイナミクスをとらえる面分光装置の開発 (NAOJ)

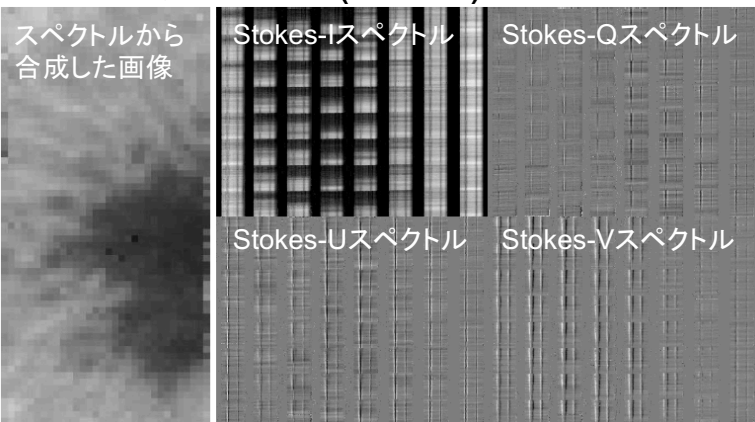
スリット分光では追従
できない彩層ジェット現象



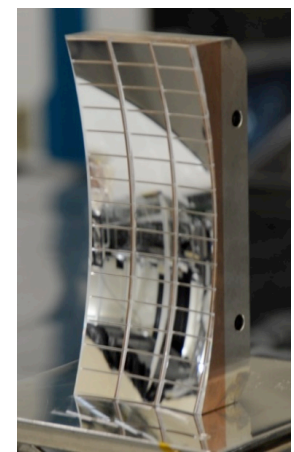
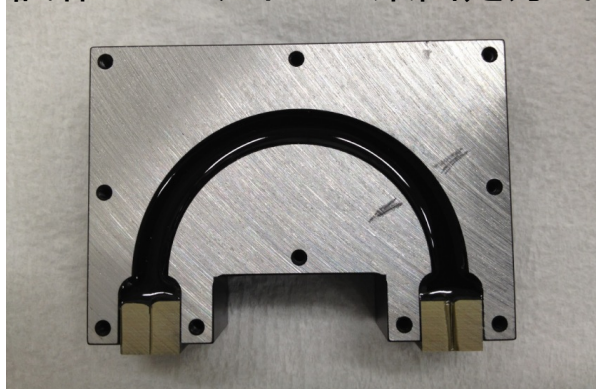
ダイナミックに変動する彩層の偏光分光
情報を高速かつ二次元的に取得したい
→スリット分光に加え、**面分光装置**を
SOLAR-Cに搭載
(c.f., 地上での偏光分光観測で
近年技術革新)

像面にファイバーアレイ
を二次元的に配置

ファイバーアレイを用いた黒点の2次元
面分光観測の例 (H. Lin)

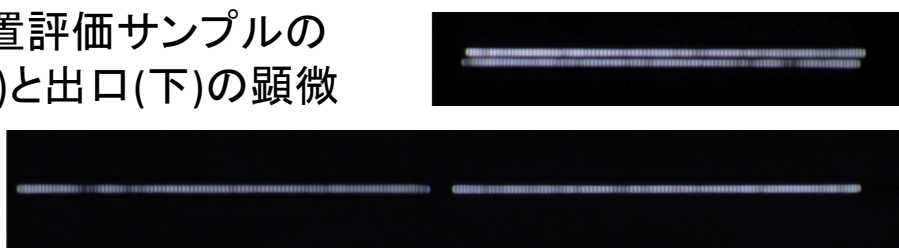


試作したファイバー束固定方式



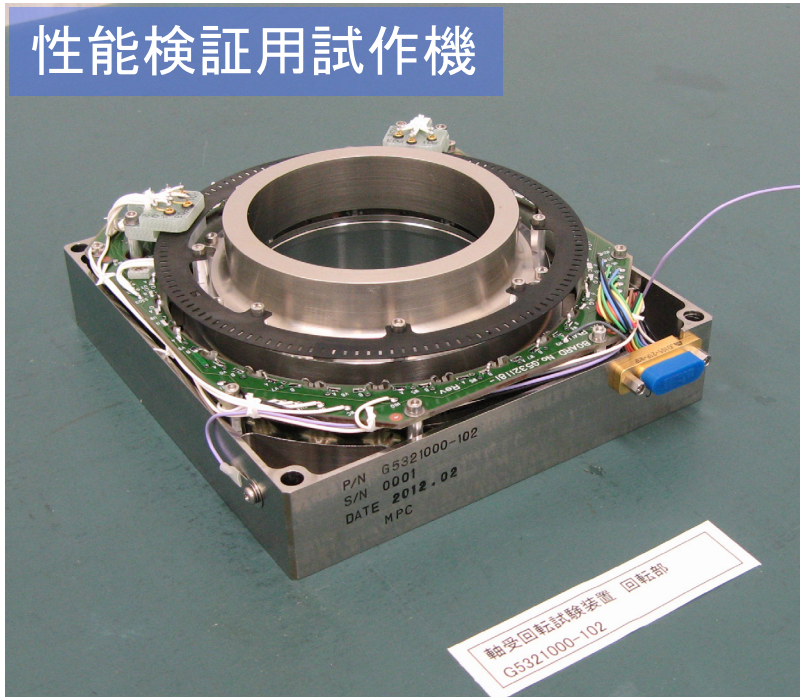
イメージスライサ
望鏡ユニット試作品

面分装置評価サンプルの
入口(上)と出口(下)の顕微
鏡写真



現在進行中の装置開発

性能検証用試作機



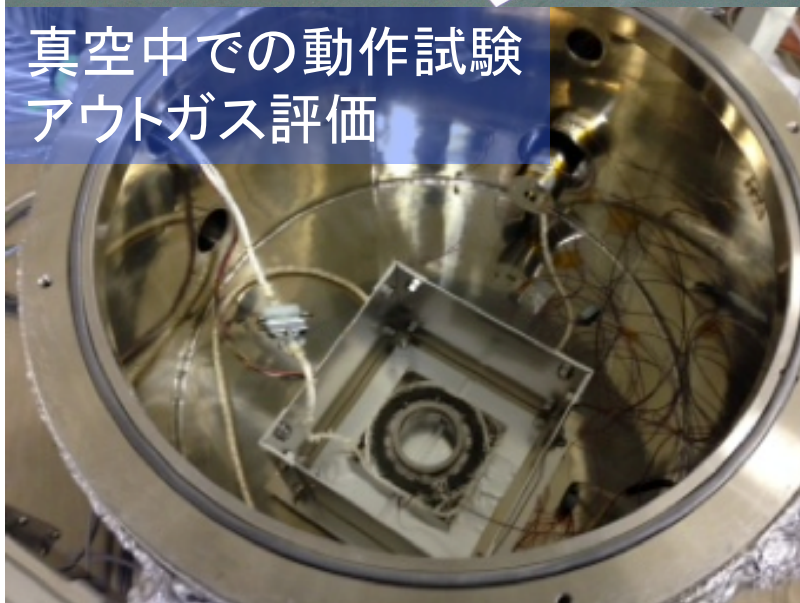
宇宙用高信頼性可動機構の開発 (ISAS)

宇宙空間で1000万回以上、確実に動作する高信頼性回転機構

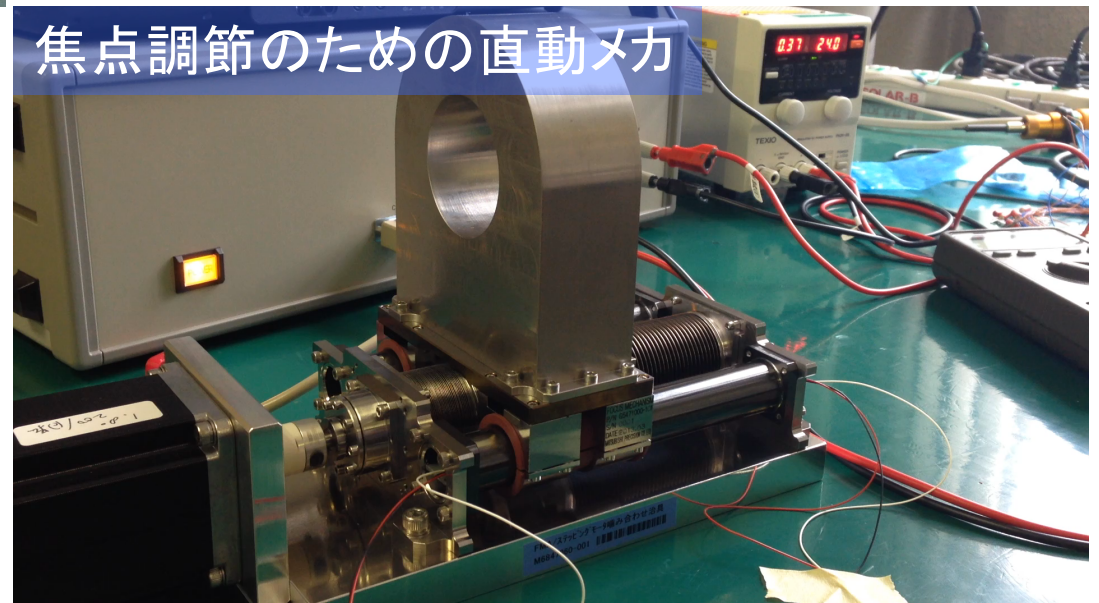
最適な潤滑材の決定
軸受に必要な精度の特定と試験

- 真空中での連続動作検証
- 低アウトガスの確認
- CLASPロケット実験への搭載

真空中での動作試験
アウトガス評価



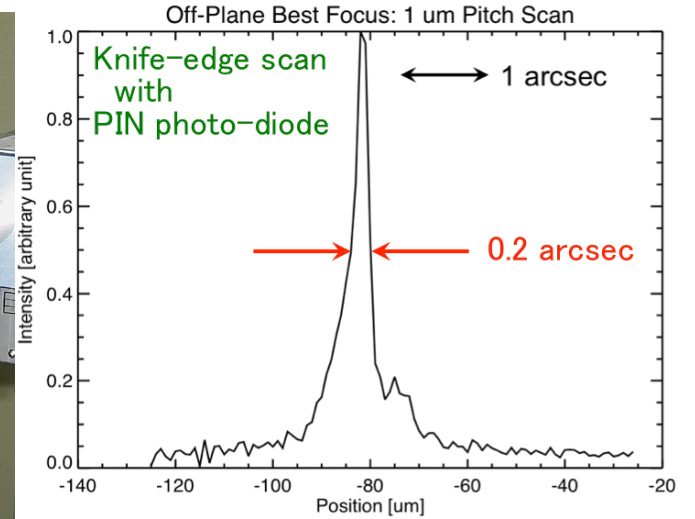
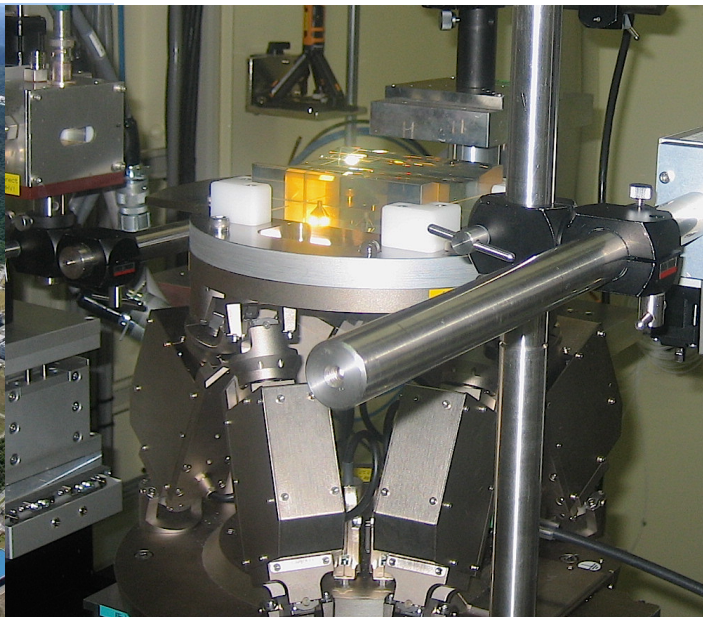
焦点調節のための直動メカ



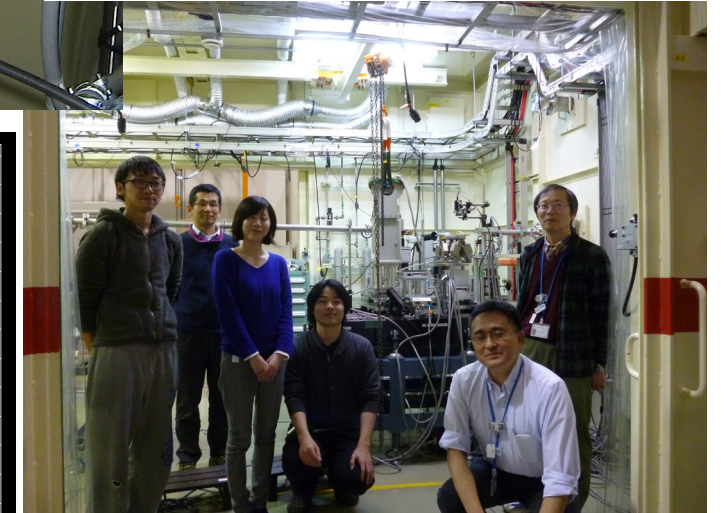
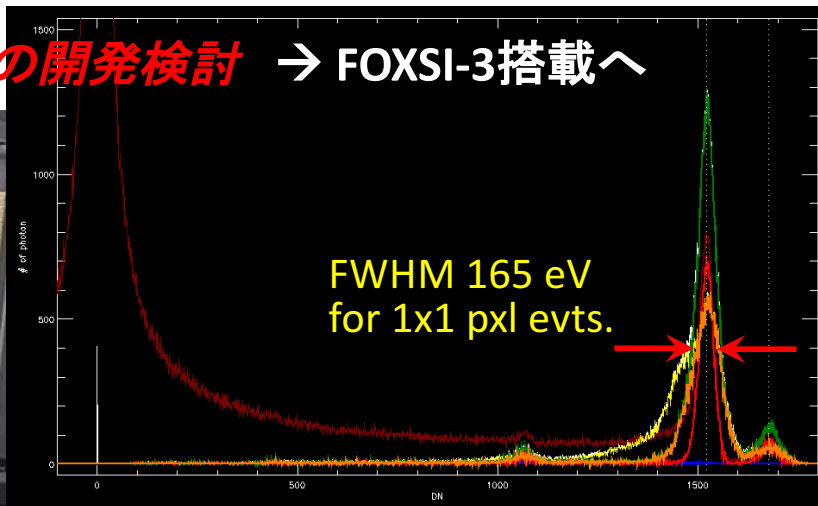
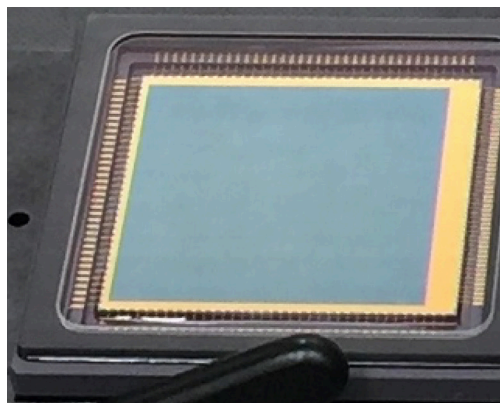
現在進行中の装置開発

光子計測型X線望遠鏡に向けた開発研究 (ISAS・NAOJ)

*S*Pring-8を用いたサブ秒角斜入射X線ミラーの開発 (阪大工学研究科・山内研究室との共同研究)



*X*線分光CMOSセンサの開発検討 → FOXSI-3搭載へ



← X線分光性能の評価

新しい装置を自分で作って
新しい観測をやってみたい人を
歓迎します！