

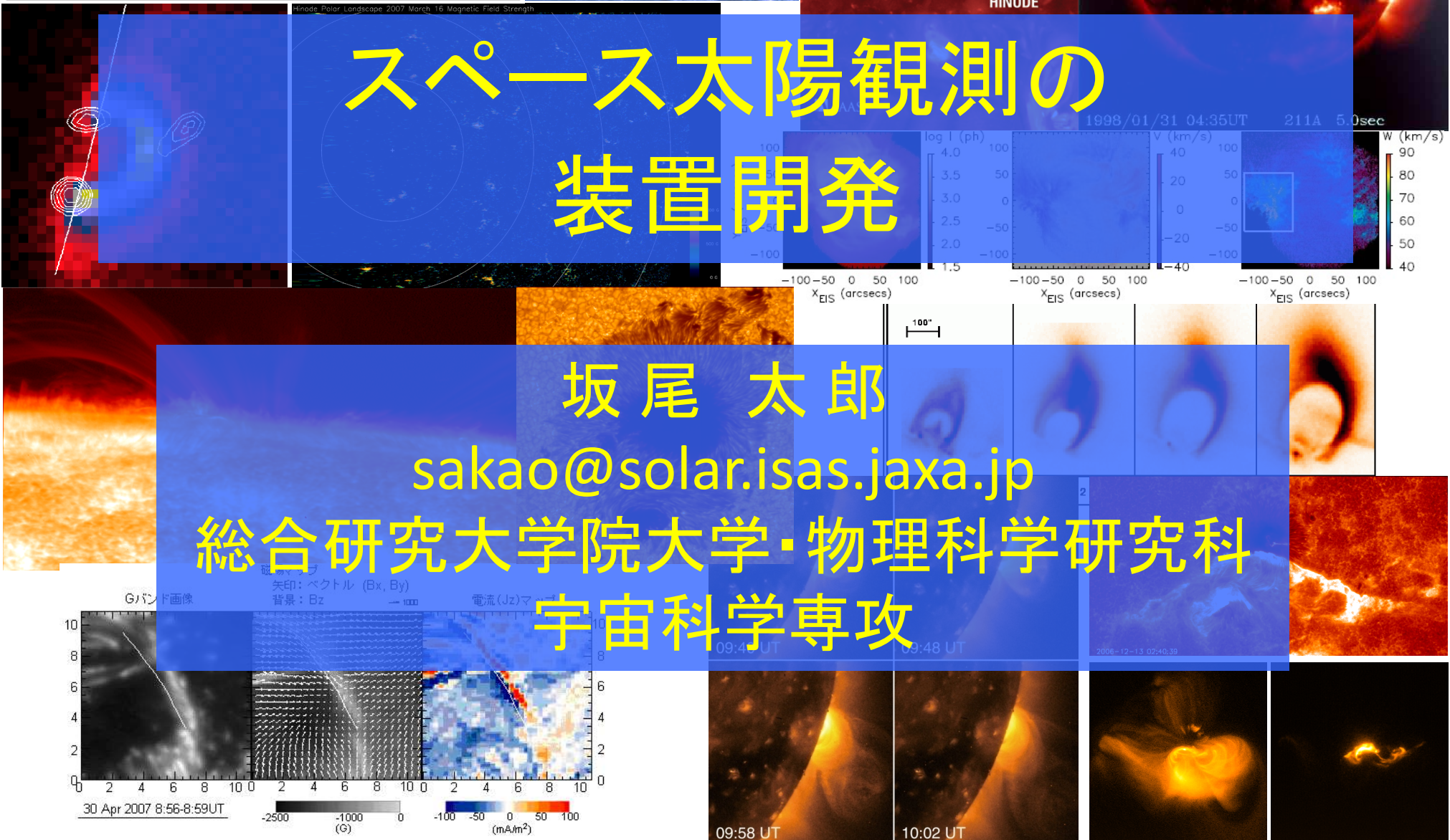
# スペース太陽観測の 装置開発

坂尾 太郎

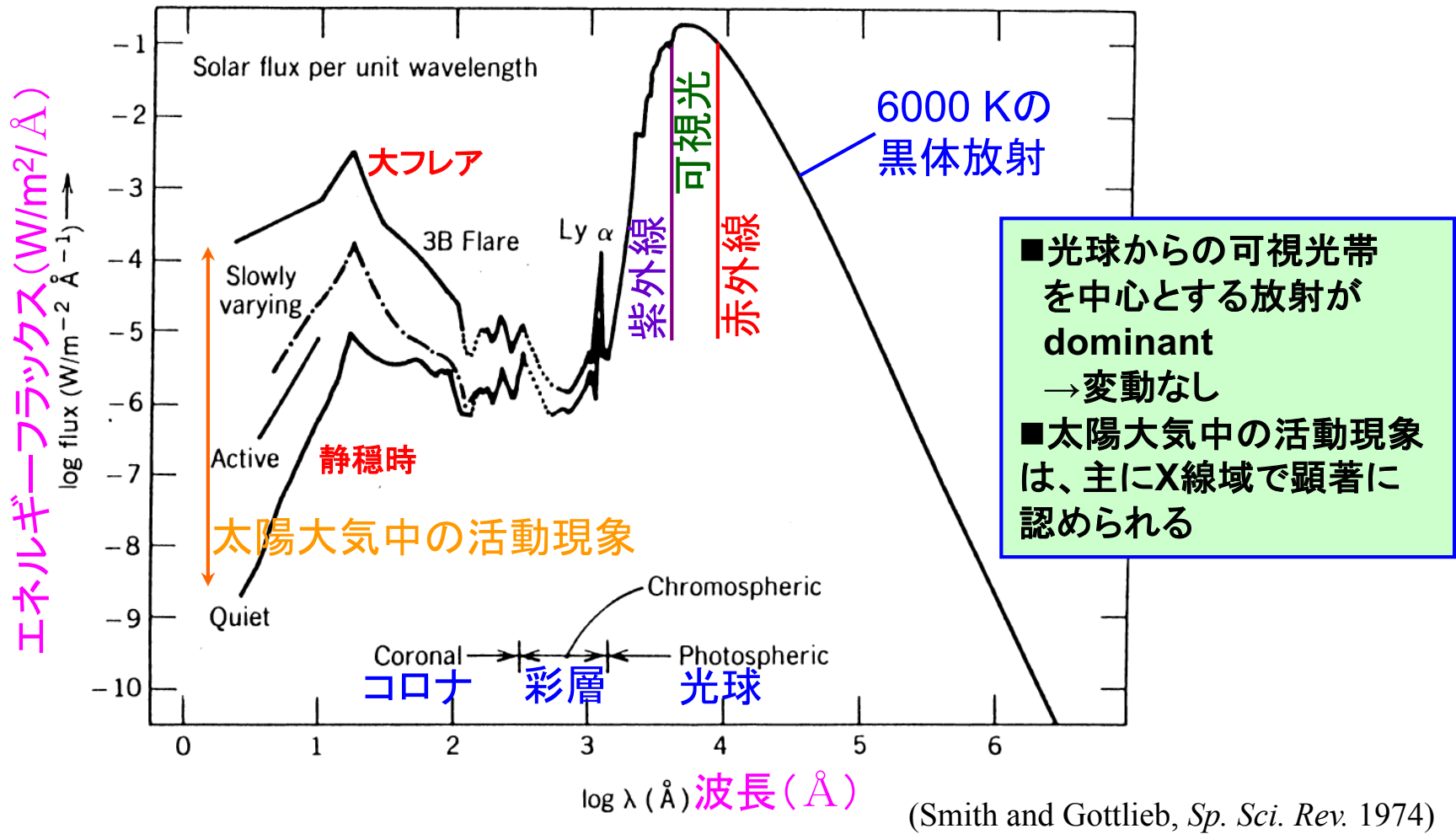
sakao@solar.isas.jaxa.jp

総合研究大学院大学・物理科学研究科

宇宙科学専攻



# 太陽からの電磁波放射

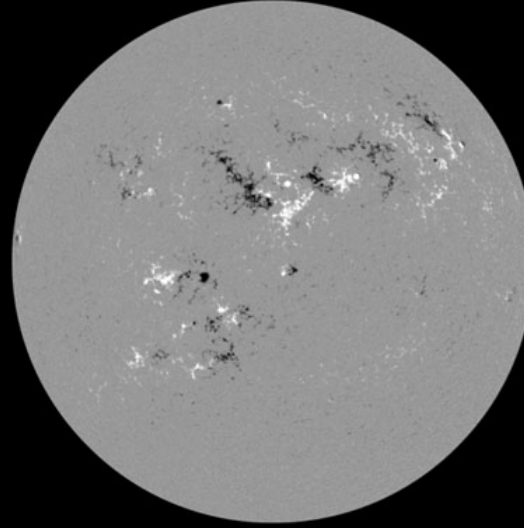




Photosphere/VL

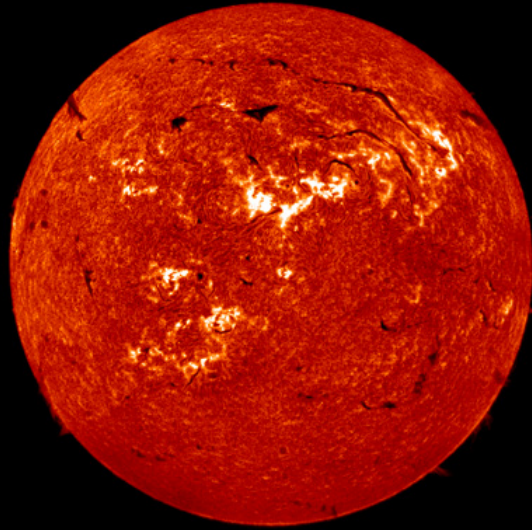


Photosphere/Mag. distribution

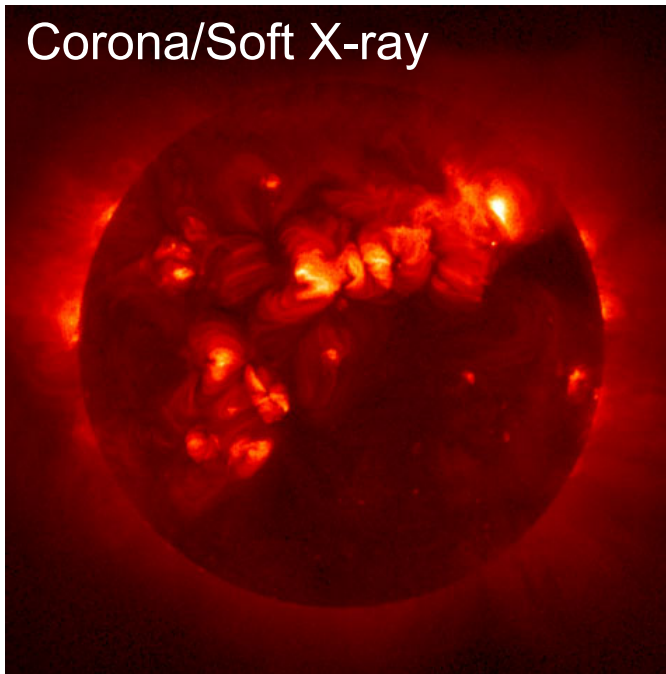


The Sun at various atmospheric layers

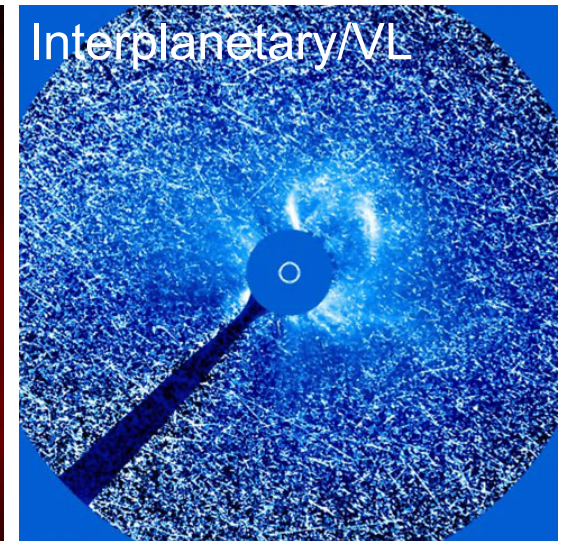
Chromosphere/H $\alpha$



Corona/Soft X-ray

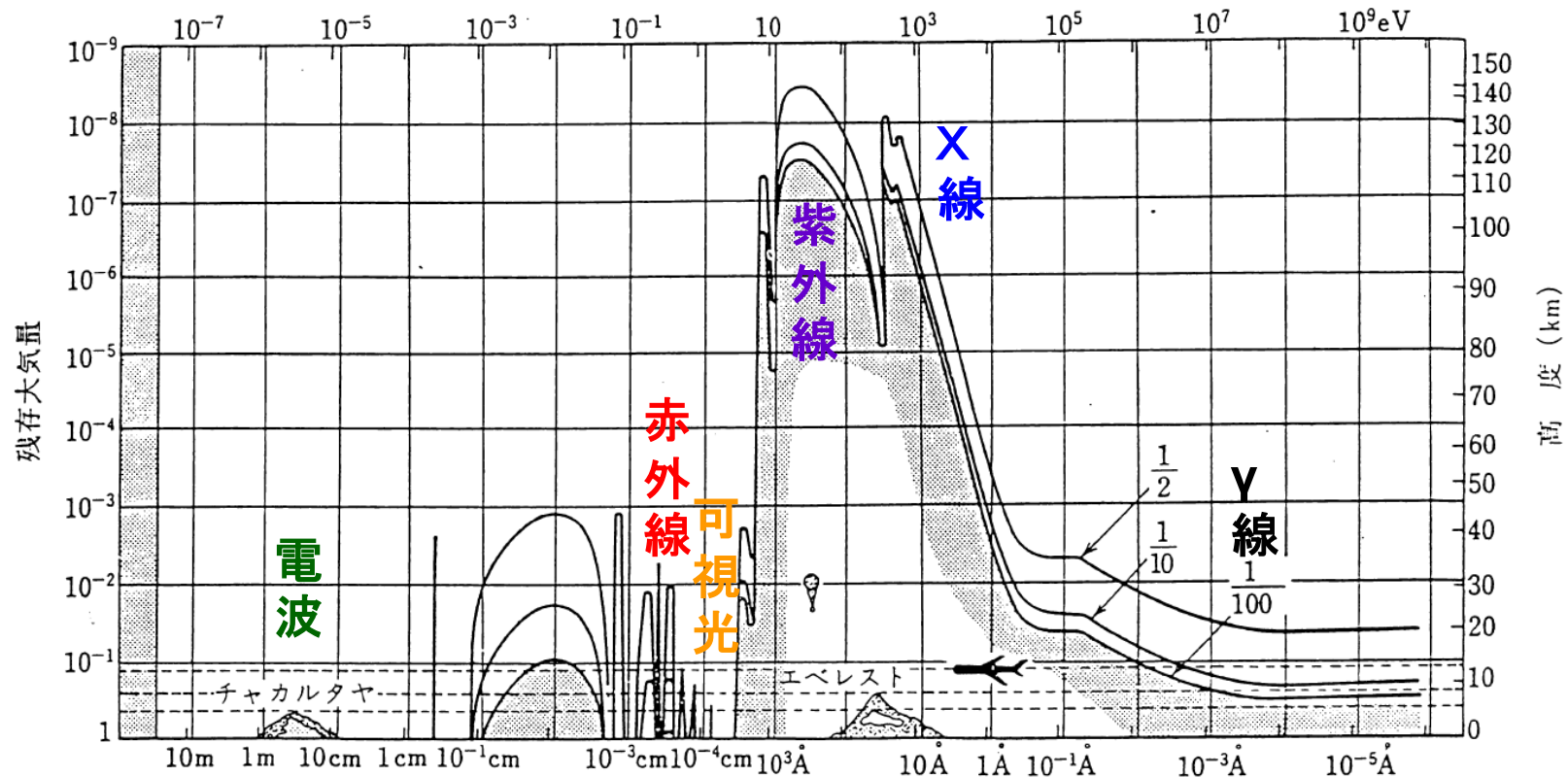


Interplanetary/VL



([http://trace.lmsal.com/POD/NAS2002\\_otherimages.html](http://trace.lmsal.com/POD/NAS2002_otherimages.html)より)

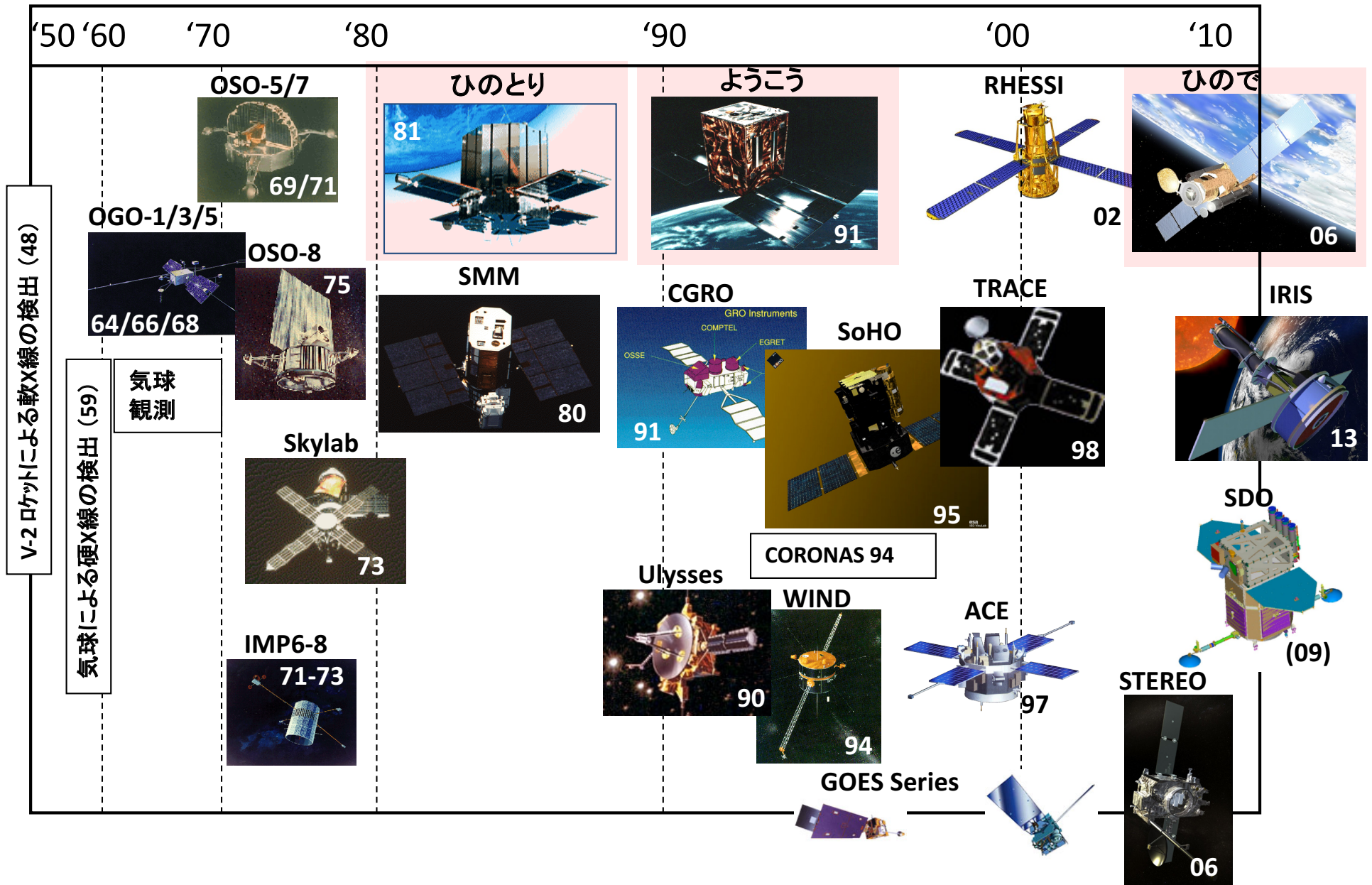
# 地球大気による電磁波の吸収



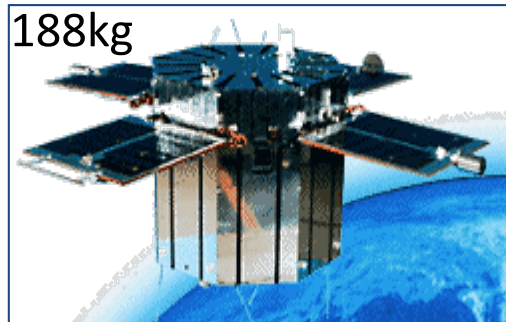
(小田稔「宇宙線」)



# 宇宙からの太陽観測

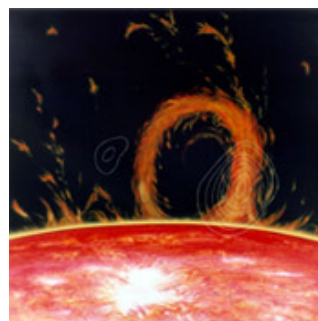


# 日本の宇宙太陽物理学



ひのとり/ASTRO-A (1981-1982)

太陽フレアのX線・ $\gamma$ 線観測

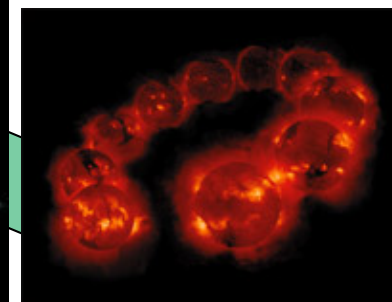


ようこう/SOLAR-A (1991-2001)

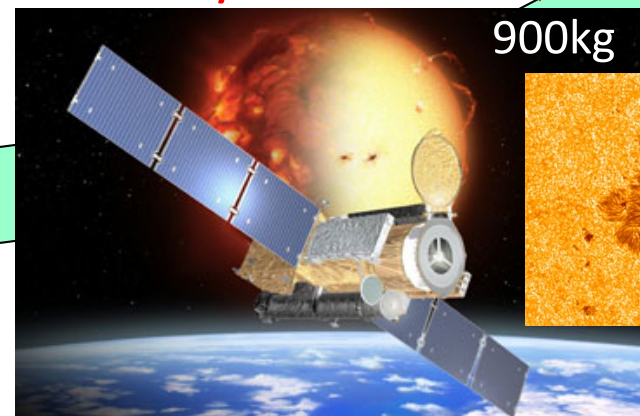


390kg

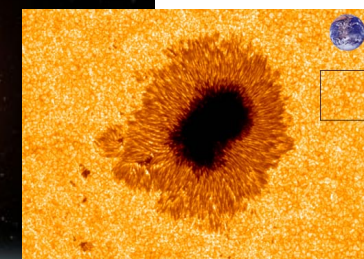
硬X線フレアと軟X線コロナ



ひので/SOLAR-B (2006-)



光球面磁場と軟X線・EUVコロナ



飛翔体による  
太陽観測将来計画



# 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)
- **イプシロン衛星計画**(2020年代半ば)
  - SOLAR-C\_EUVST計画、PhoENiX計画
  - 可動機構などの基礎開発

現在進行中!

CLASP2  
SUNRISE etc.  
FOXSI-3 etc.

# 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

- **よう**

- 車

- 石

- **XUV**

- 口

- 鼻

- 舌

- **太陽**

- 0

- **ひの**

- 口

- X

- E

- **CLAS**

- **イプ**

- S

- P



の開発



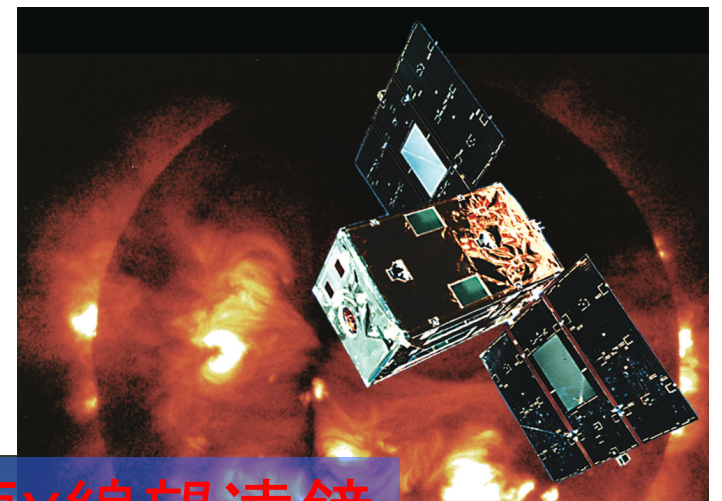
観測中

進行中!

etc.  
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

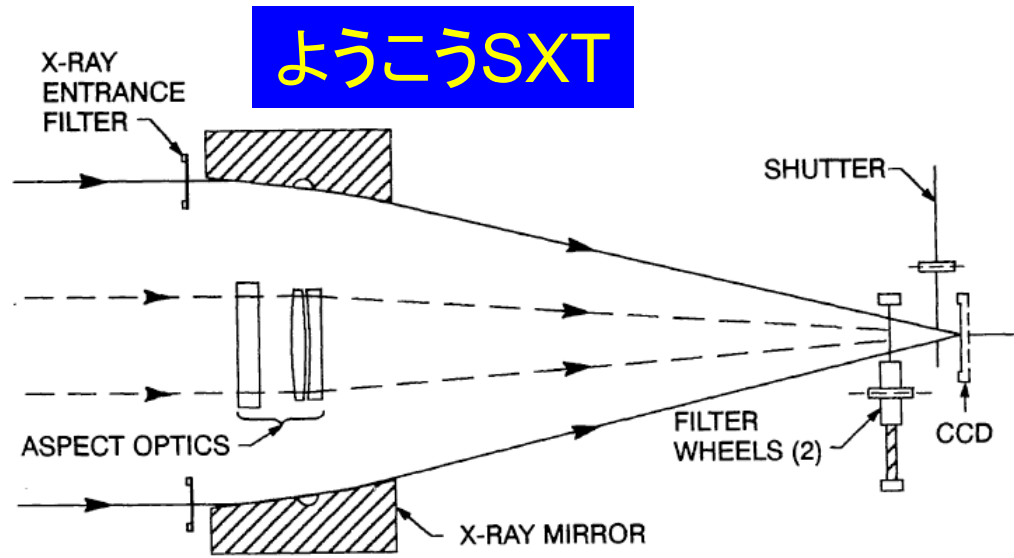


Fig. 1a. Schematic illustration of the optical concept and key elements of the SXT.

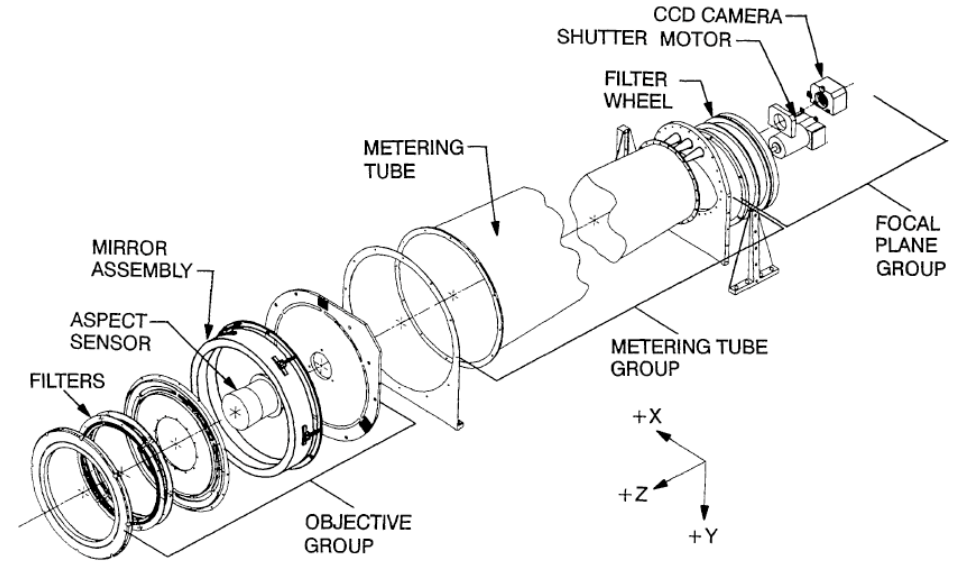
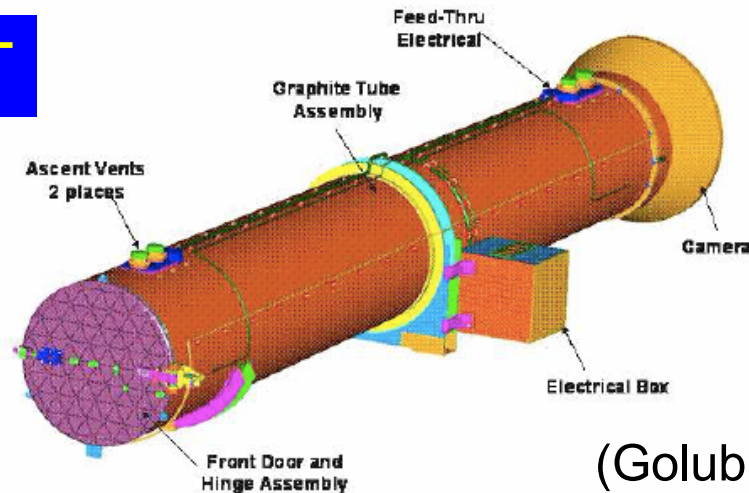


Fig. 1b. Exploded diagram of the SXT. Sub-assemblies mentioned in the text are identified.

(Tsuneta et al. 1991)

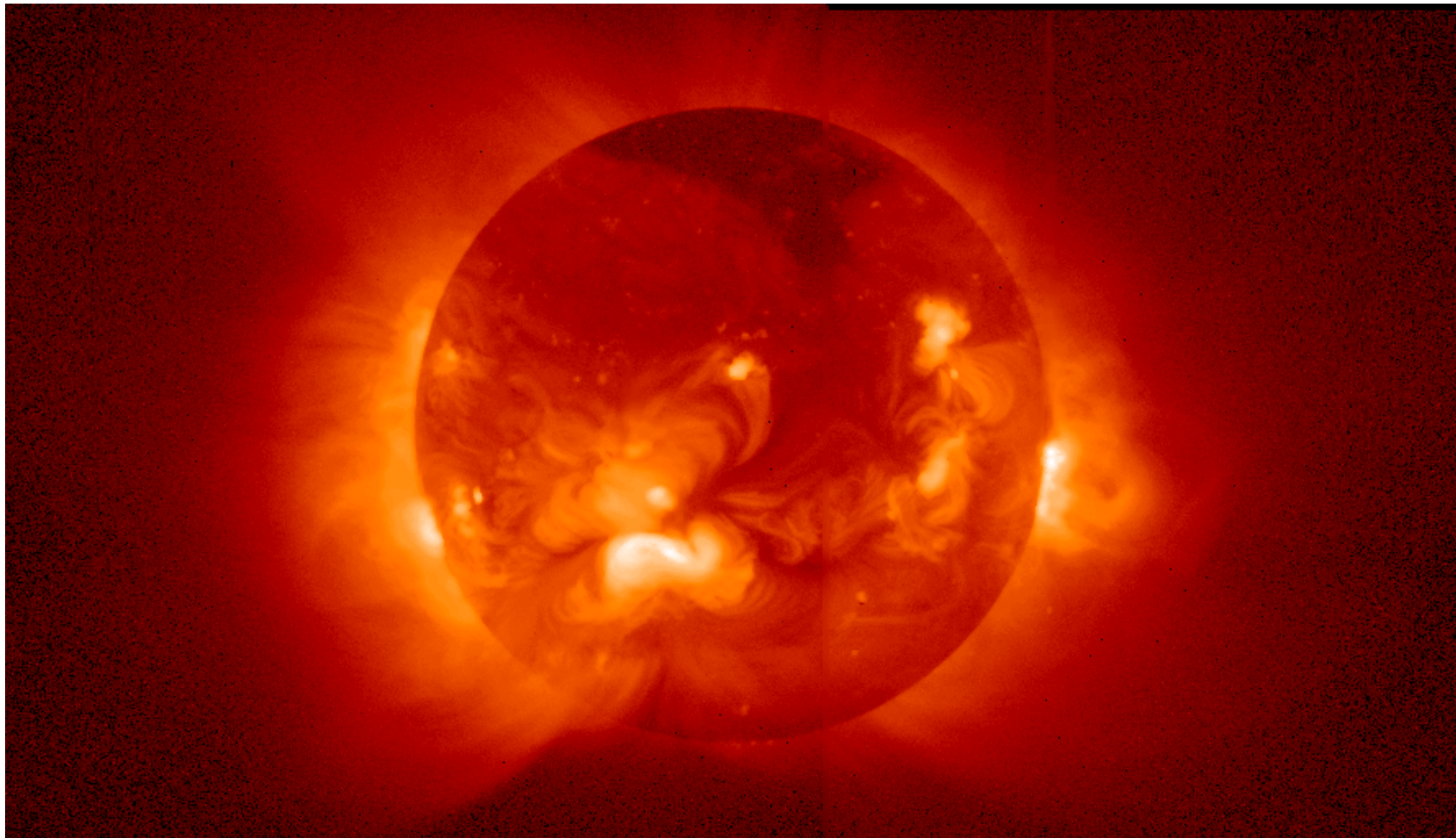
## ひのでXRT



(Golub et al. 2007)



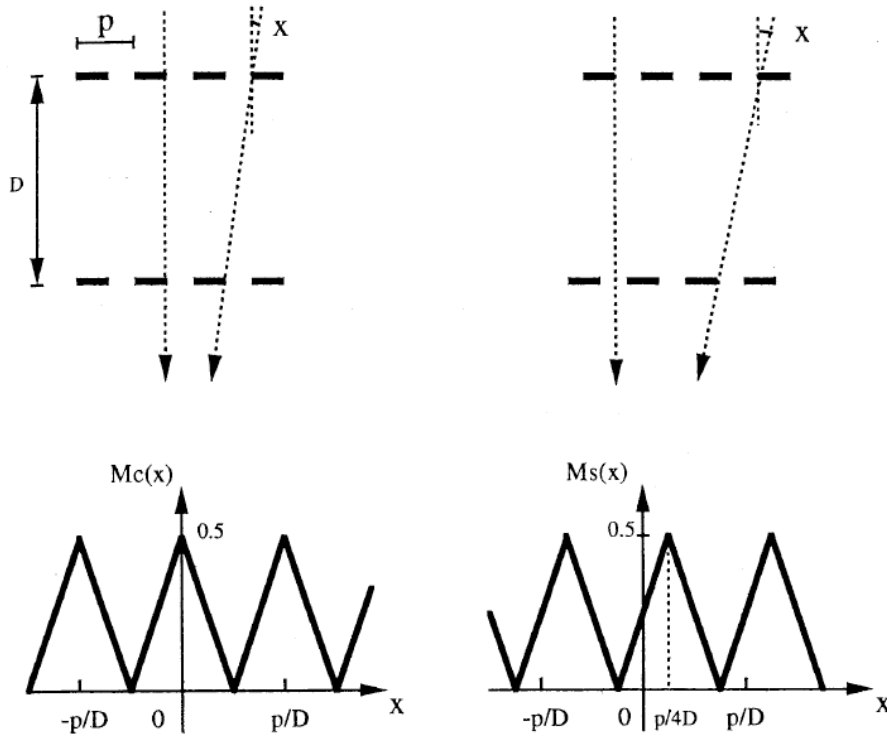
# 斜入射光学系



Front Door and  
Hinge Assembly

(Golub et al. 2007)

# すだれコリメータの原理：1次元

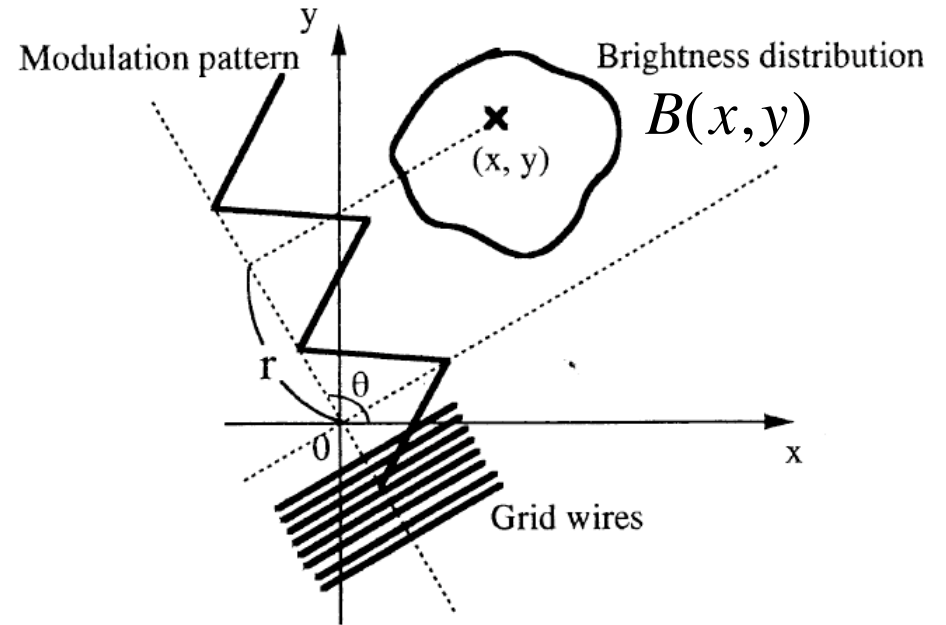


(a) cosine grids

(b) sine grids

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

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



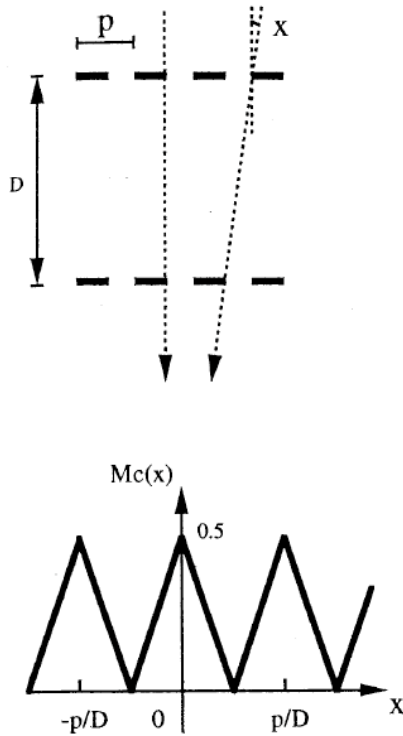
$$b_C(k, \theta) = A \int B(x, y) M_C(kr) dx dy$$

$b_C(k, \theta)$ : 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



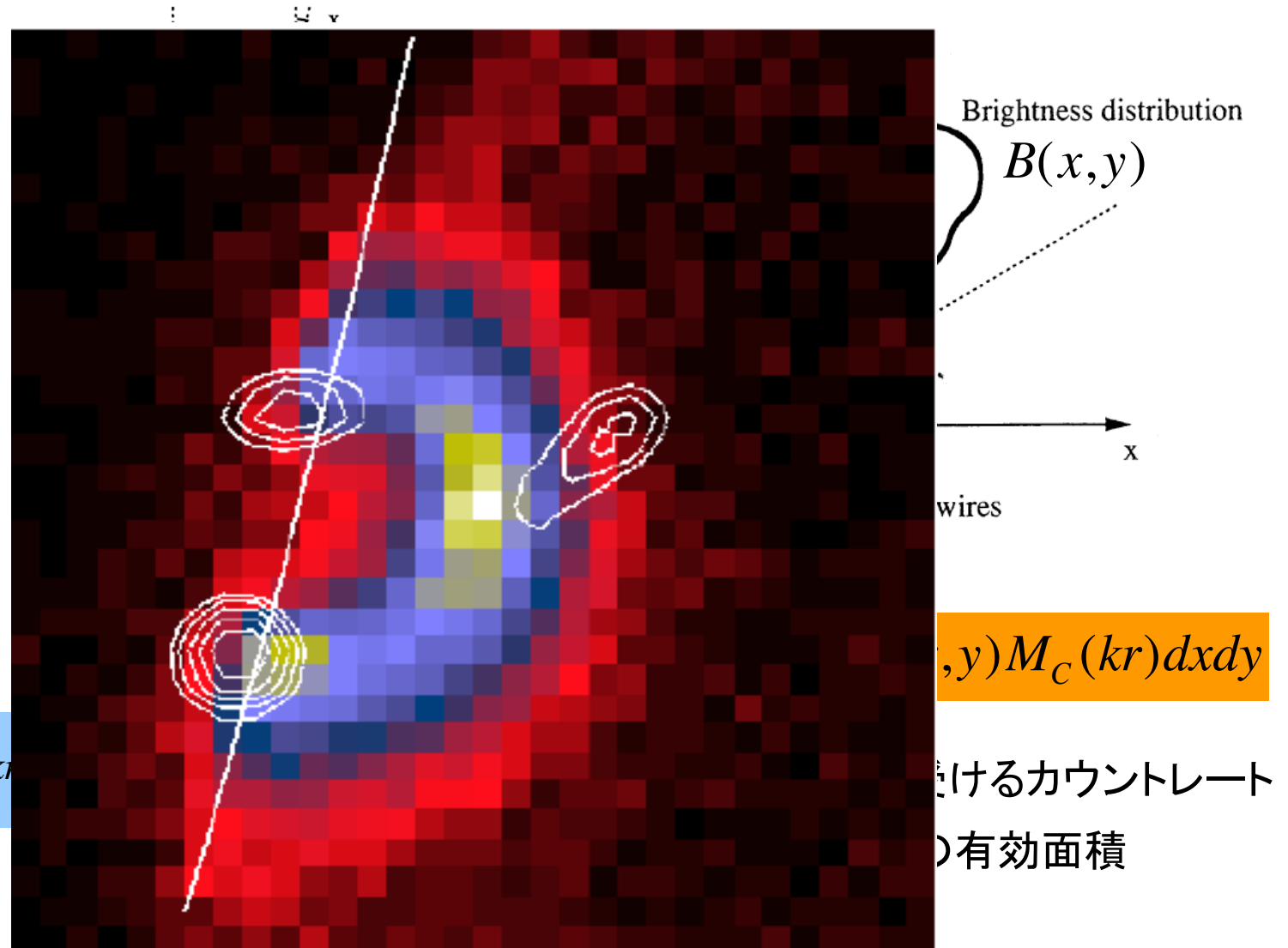
# すだれコリメータの原理：1次元



(a) cosine grids

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

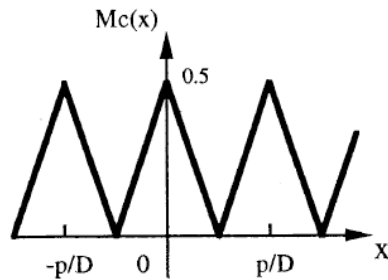
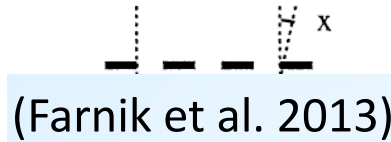
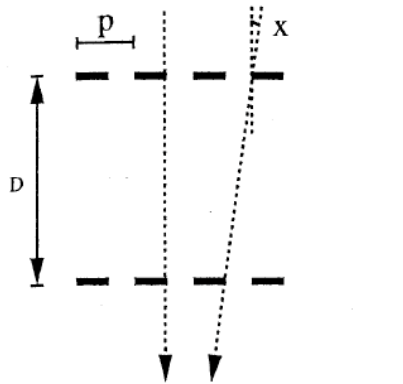
$$M_S(kr) = M_C\left(kr - \frac{\pi}{2}\right)$$



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

送けるカウントレート  
の有効面積

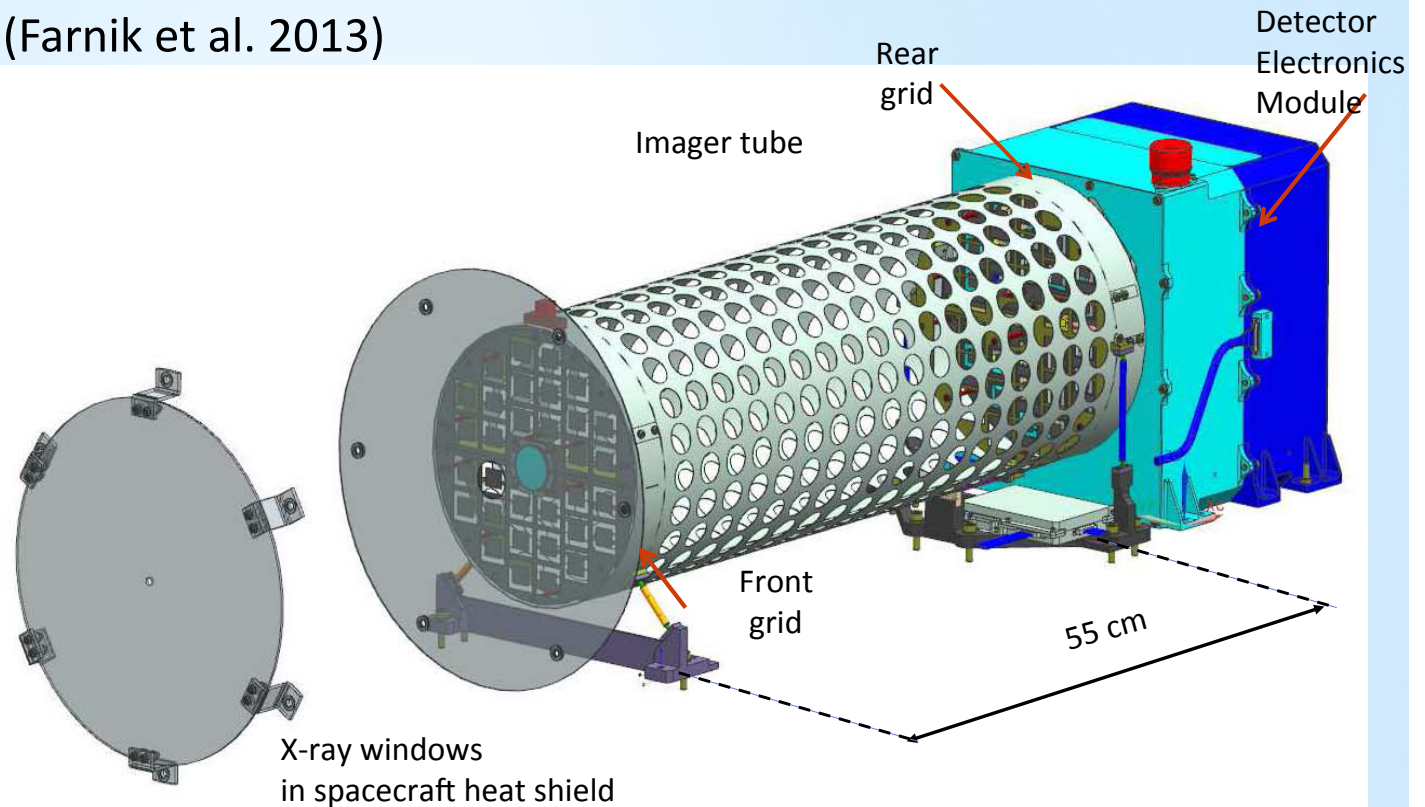
# すだれコリメータの原理：1次元



(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)
- **イプシロン衛星計画**(2020年代半ば)
  - SOLAR-C\_EUVST計画、PhoENiX計画
  - 可動機構などの基礎開発

現在進行中!

CLASP2  
SUNRISE etc.  
FOXSI-3 etc.

# XDT (XUV Doppler Telescope) 反射率レスポンス

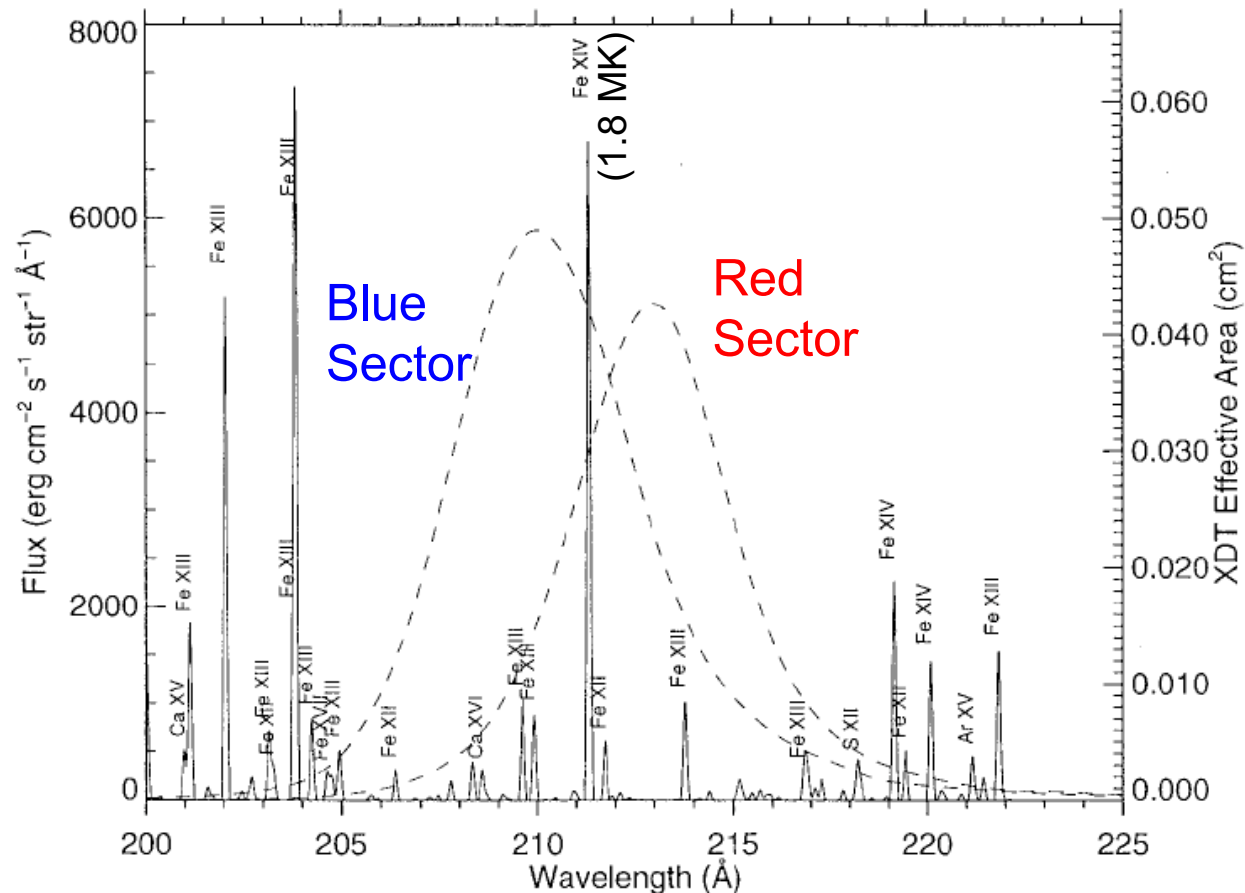
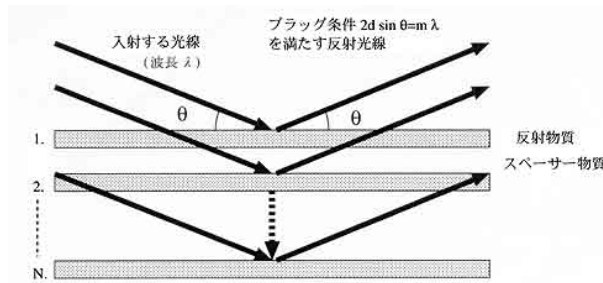


Figure 3. Distribution of emission lines around the target line of Fe XIV 211.3 Å. Intensity of each line has been calculated using a differential emission measure profile of an active region reported in Brosius *et al.* (1996). Response profiles of the blue and red bands of the XDT, in units of effective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

(Sakao *et al.* 1999)

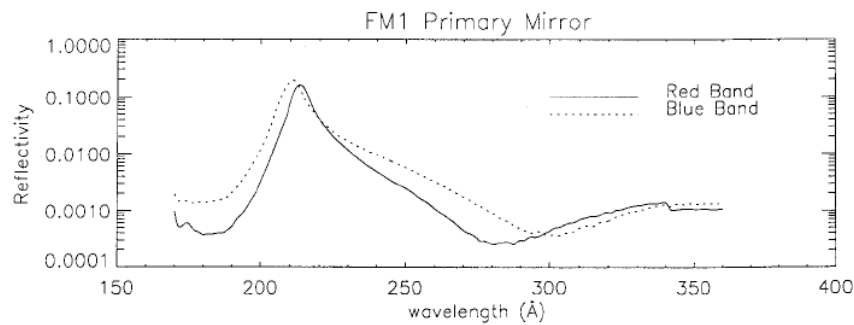


# 直入射光学系

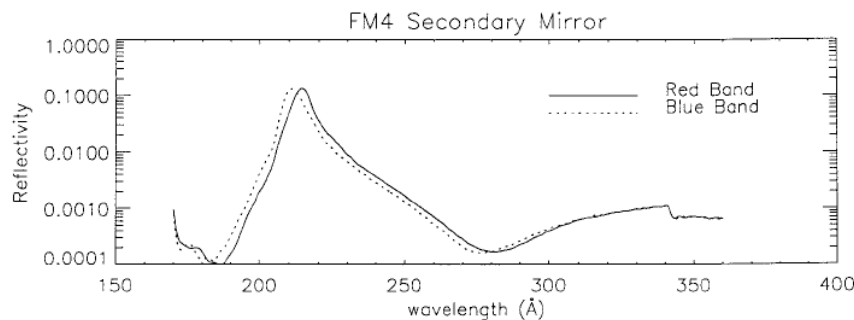


- Cassegrain光学系 (副鏡 = 凸面)
  - SOHO/EIT、TRACE、XDT、...
- 鏡面の多層膜コーティングにより特定の波長を選択的に反射
- 複数波長取得のため、セクターコーティング + 選択シャッター

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



主鏡



副鏡

MoSi/Si (Γ=0.2) 多層膜ミラーの反射率

# XUV Doppler Telescope (XDT)

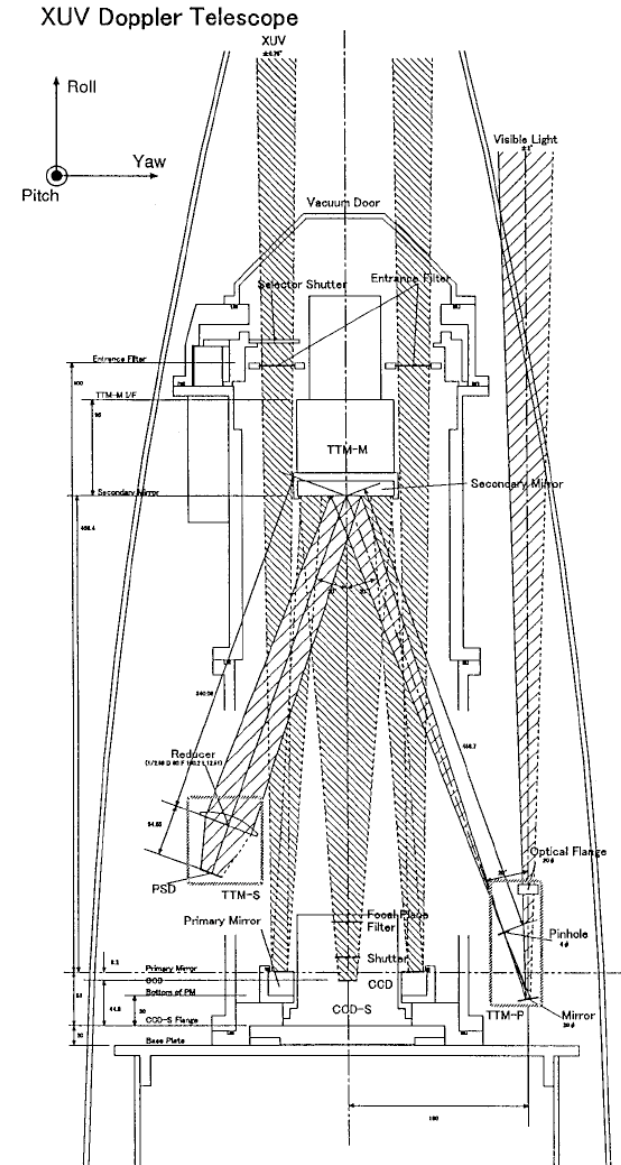
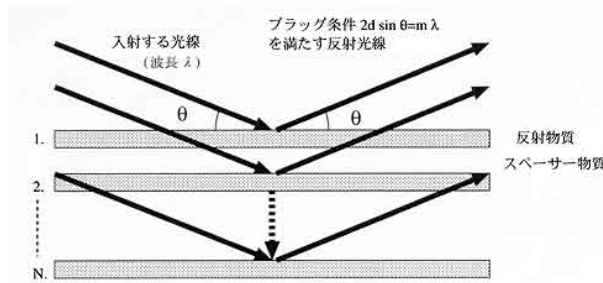


Figure 4. A side view of the XDT mounted inside the nose fairing of the S520 rocket. The path of the incident XUV light is shown in dense hatches while the visible light path for the tip-tilt mirror system is shown in sparse ones. Pitch, yaw, and roll axes of the rocket are also shown in the figure.

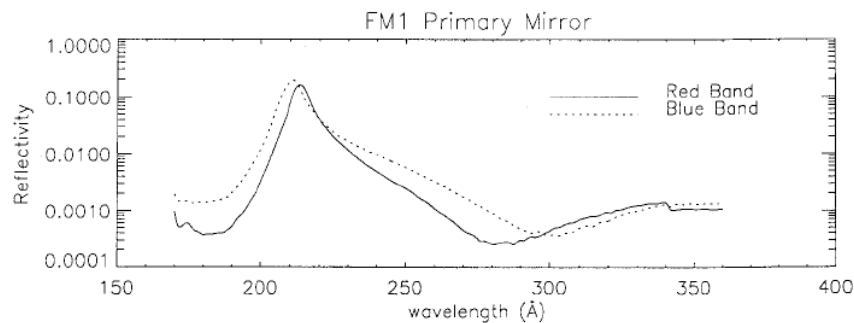
(Sakao et al. 1999)

# 直入射光学系

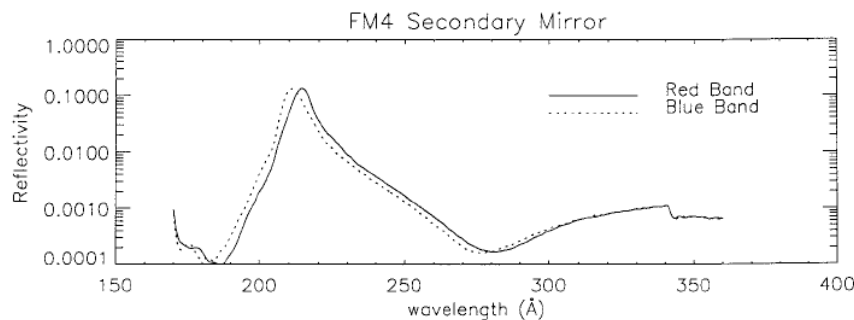


- Cassegrain光学系 (副鏡 = 凸面)
  - SOHO/EIT、TRACE、XDT、...
- 鏡面の多層膜コーティングにより特定の波長を選択的に反射
- 複数波長取得のため、セクターコーティング + 選択シャッター

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



主鏡



副鏡

MoSi/Si ( $\Gamma=0.2$ ) 多層膜ミラーの反射率

## XUV Doppler Telescope (XDT)



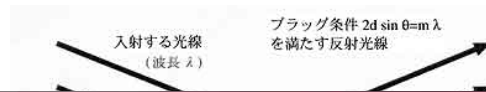
Figure 4. A side view of the XDT mounted inside the nose fairing of the S520 rocket. The path of the incident XUV light is shown in dense hatches while the visible light path for the tip-tilt mirror system is shown in sparse ones. Pitch, yaw, and roll axes of the rocket are also shown in the figure.

(Sakao et al. 1999)



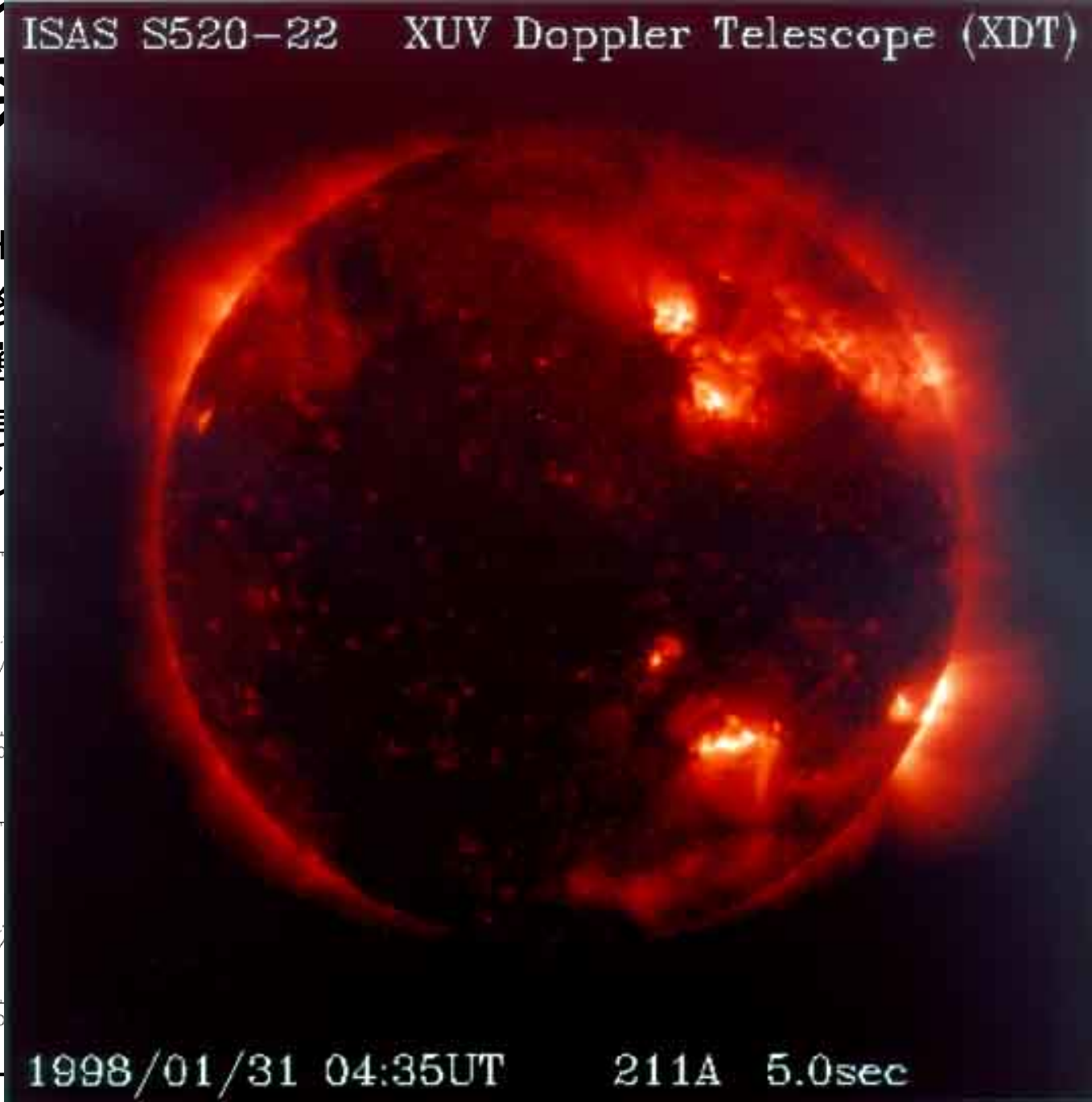
# 直入射 光学系

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

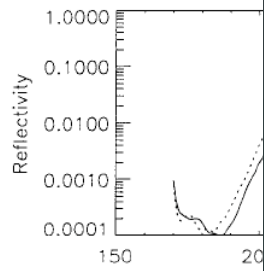
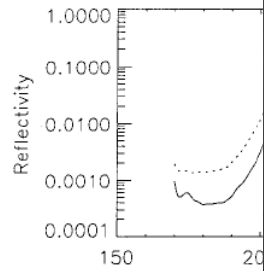


## XUV Doppler Telescope (XDT)

ISAS S520-22 XUV Doppler Telescope (XDT)



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



MoSi/Si (Γ)

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

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)
- **イプシロン衛星計画**(2020年代半ば)
  - SOLAR-C\_EUVST計画、PhoENiX計画
  - 可動機構などの基礎開発

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)

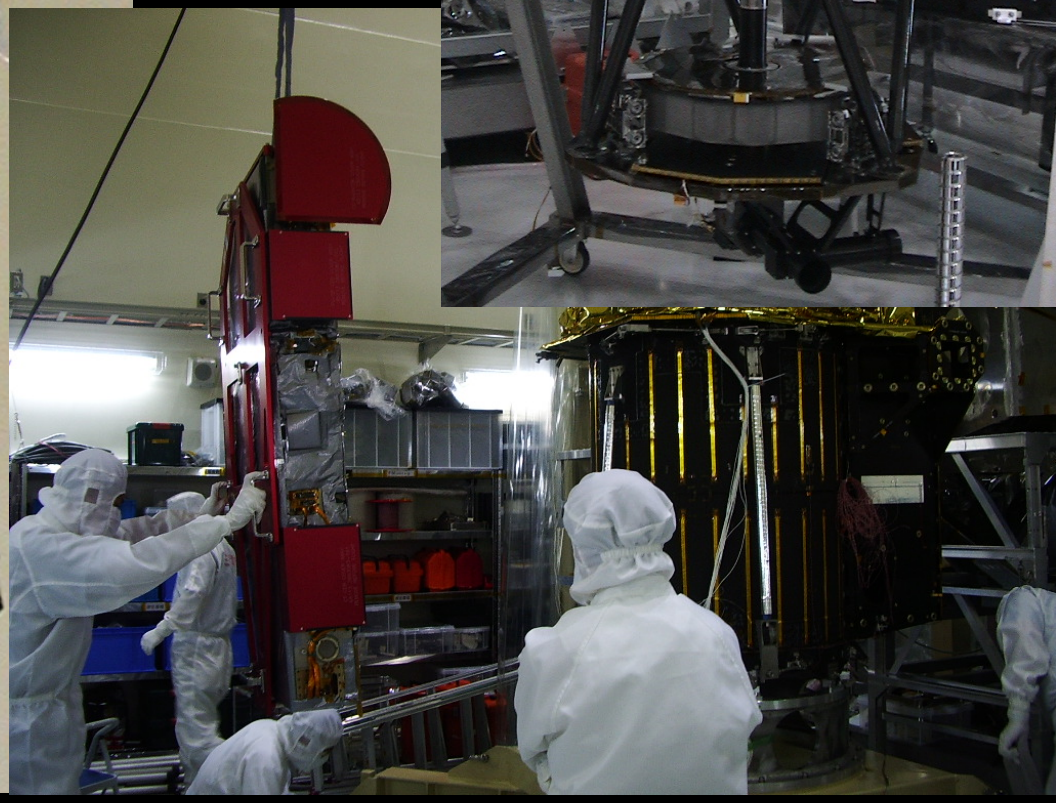
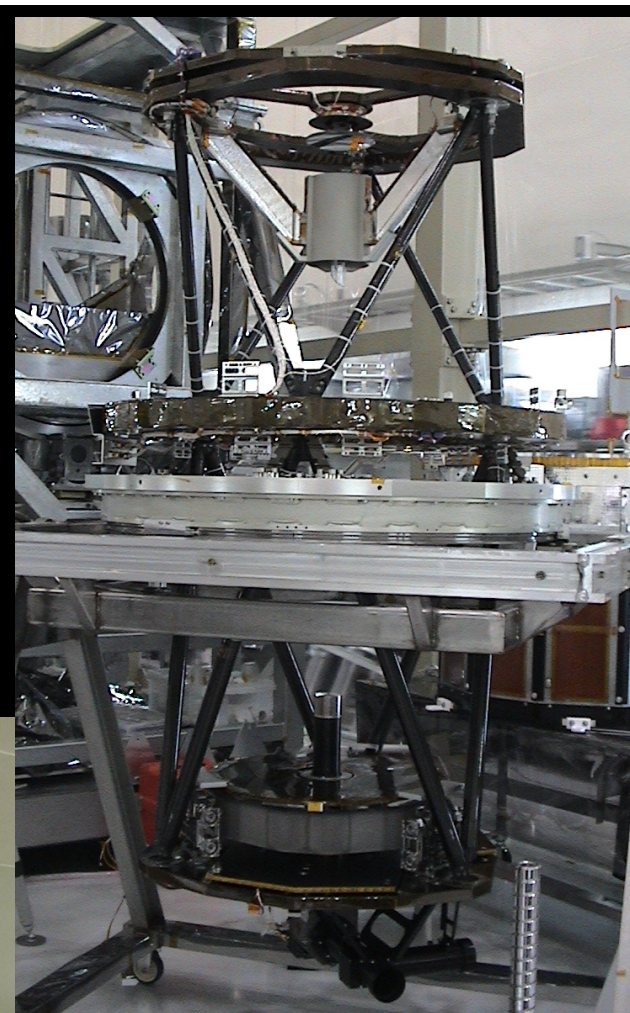
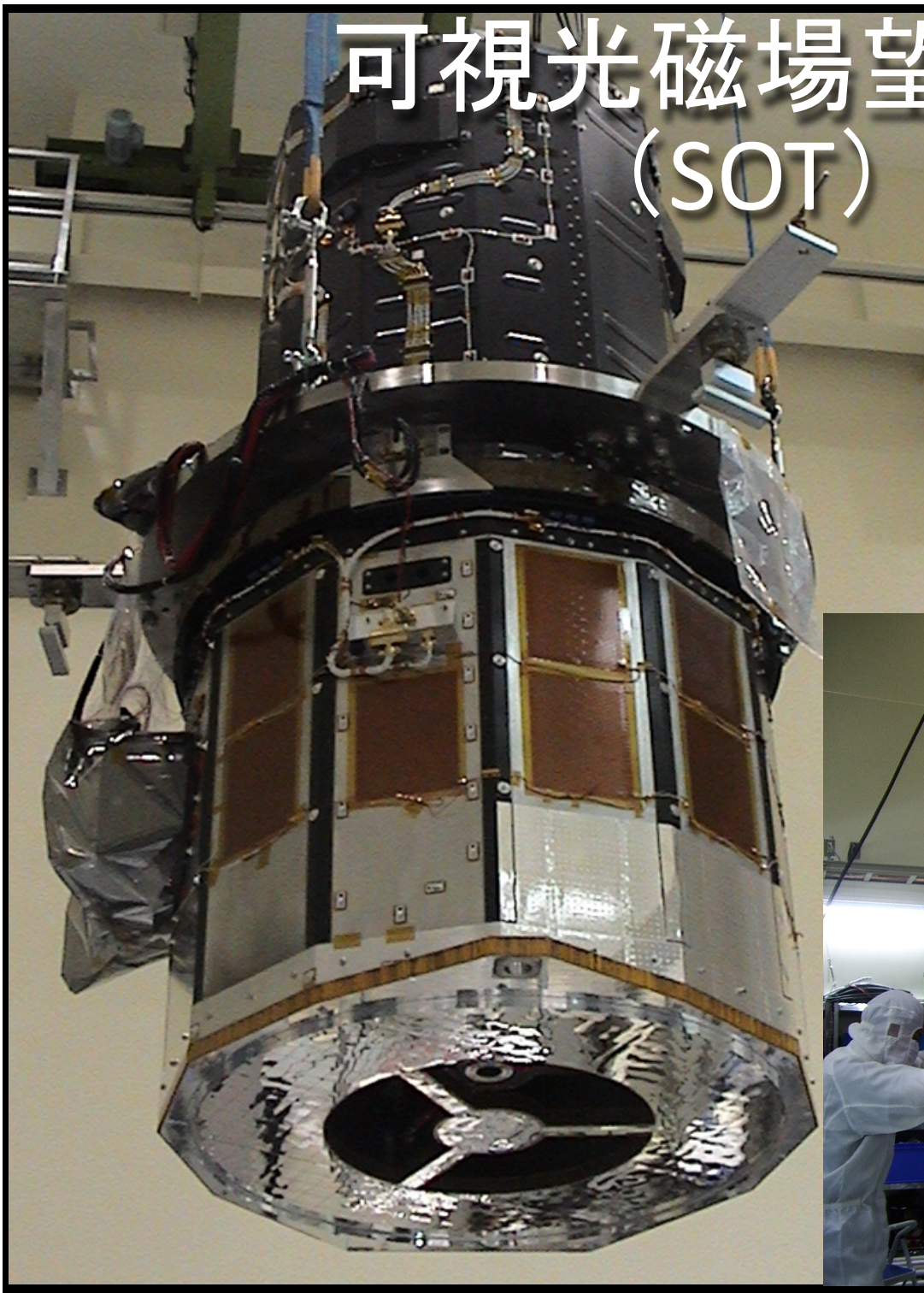
X線望遠鏡(XRT)

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。



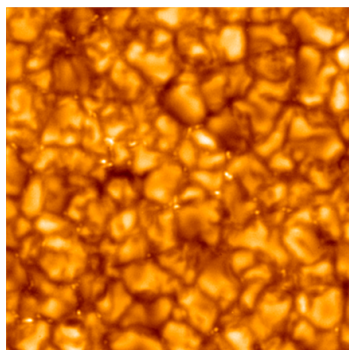
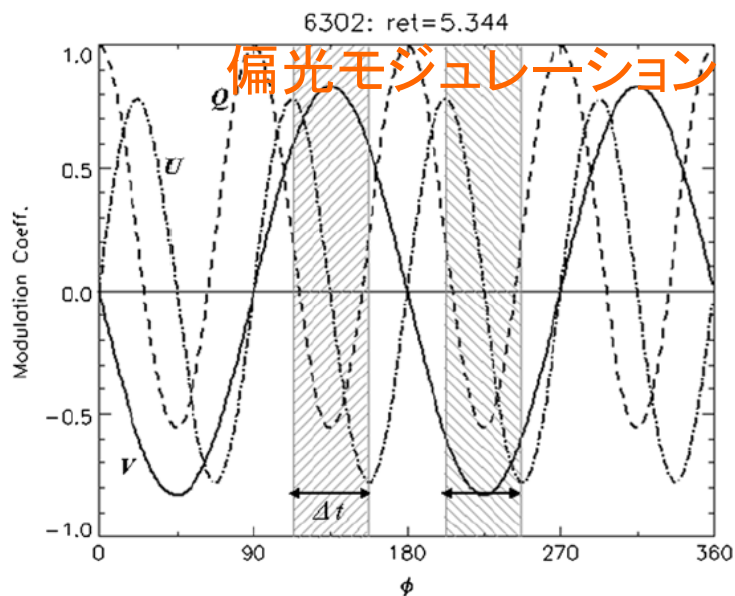
# 可視光磁場望遠鏡 (SOT)



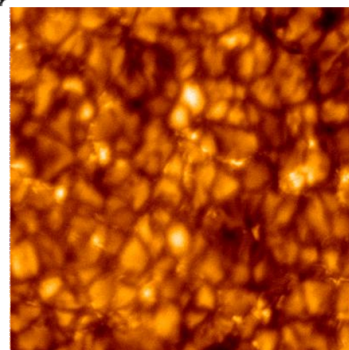


# 可視光磁場望遠鏡 (SOT)

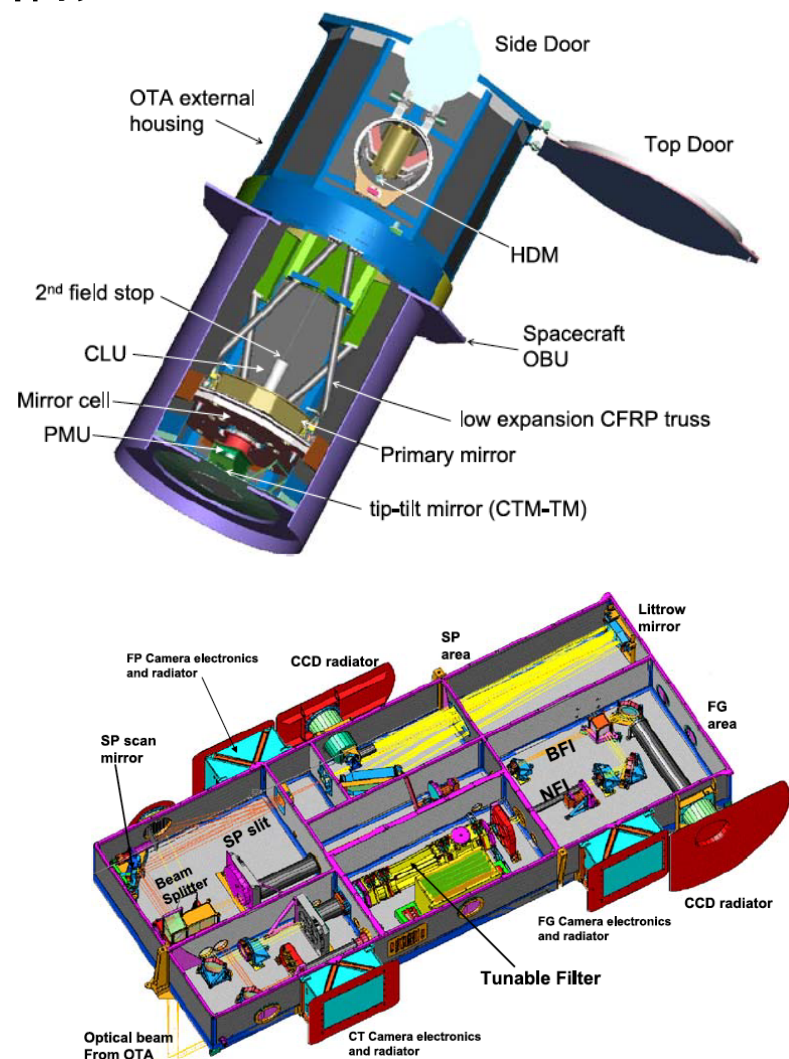
光球からの可視光の直線偏光・円偏光成分の精密計測 (Stokes IQUV)  
 → 光球磁場の3次元成分を取得



「ひので」

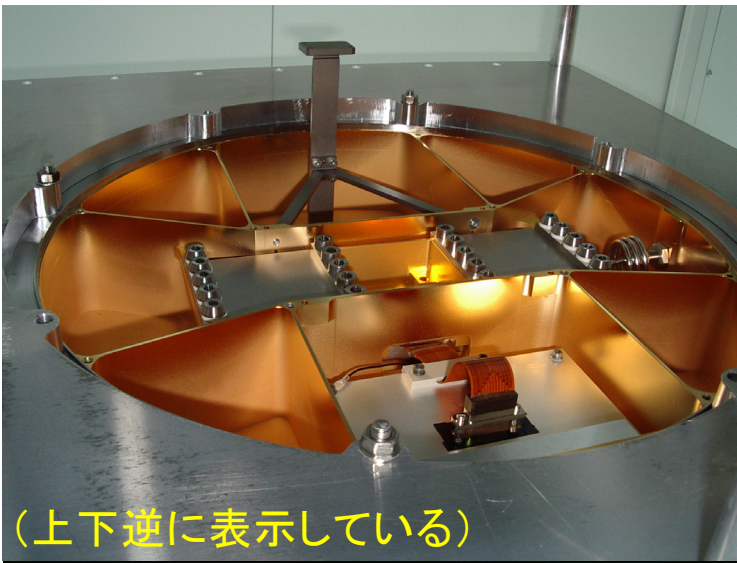


地上望遠鏡による観測例

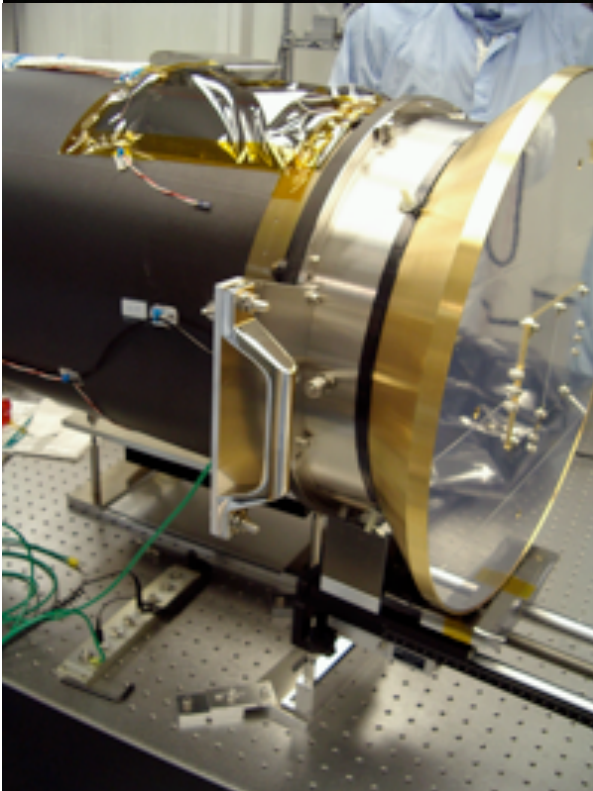
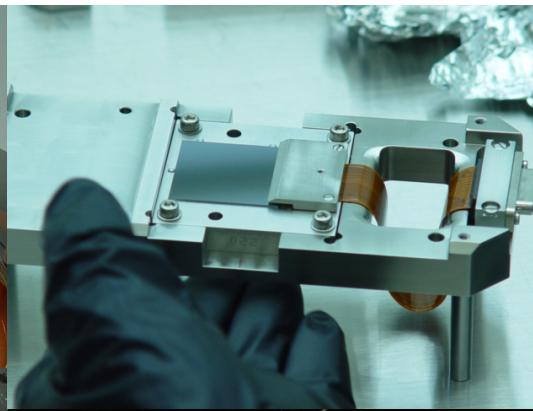




# X線望遠鏡 (XRT)



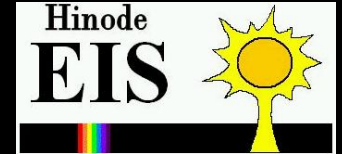
(上下逆に表示している)





# EIS

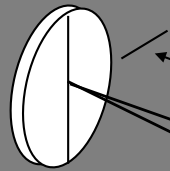
## The high-sensitivity solar EUV imaging spectrometer



**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**

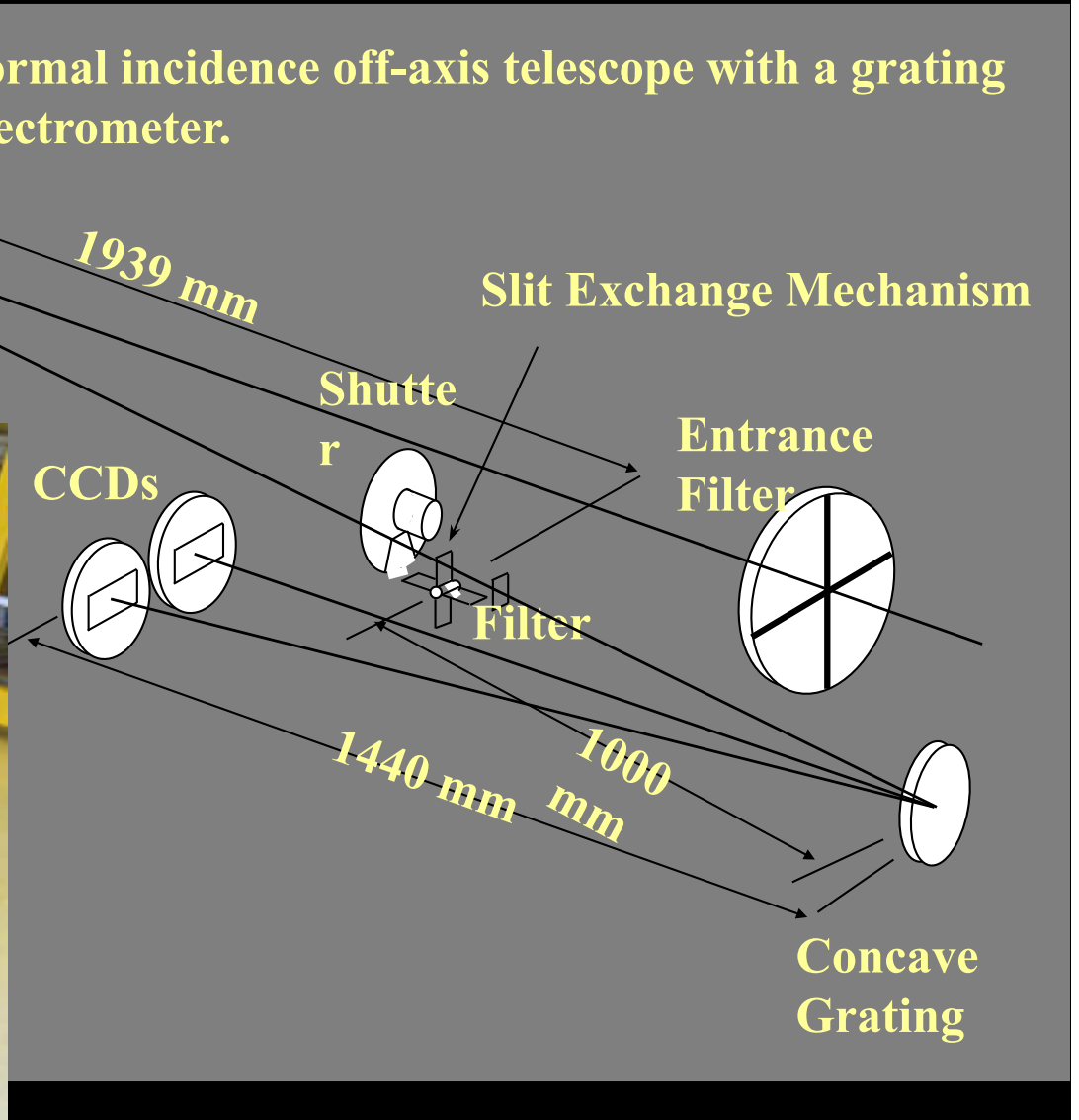
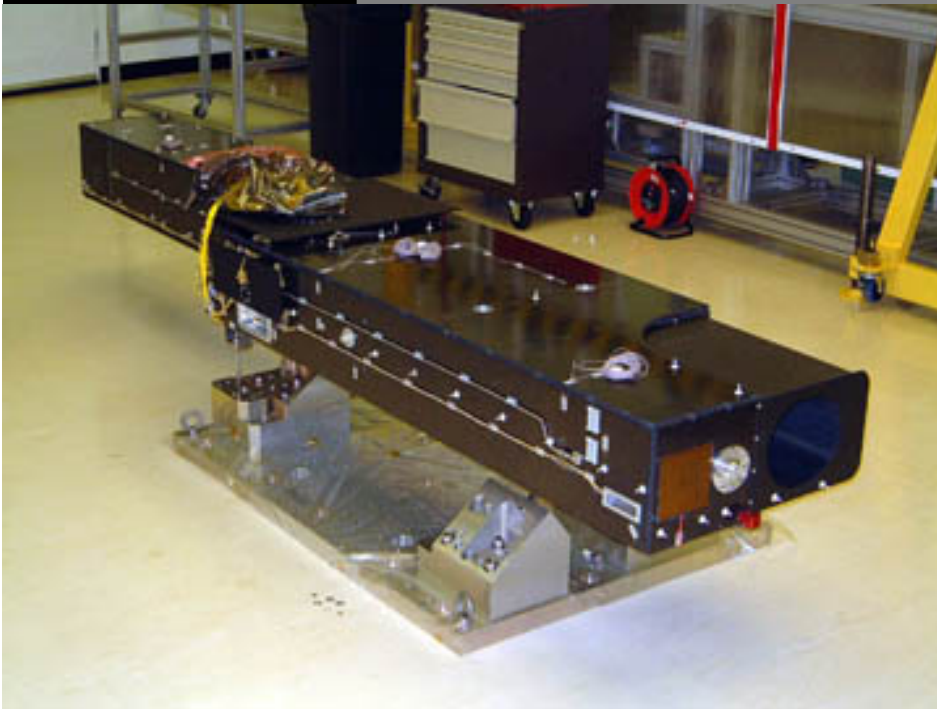
**CCDs**

**Filter**

1440 mm

1000 mm

**Concave Grating**



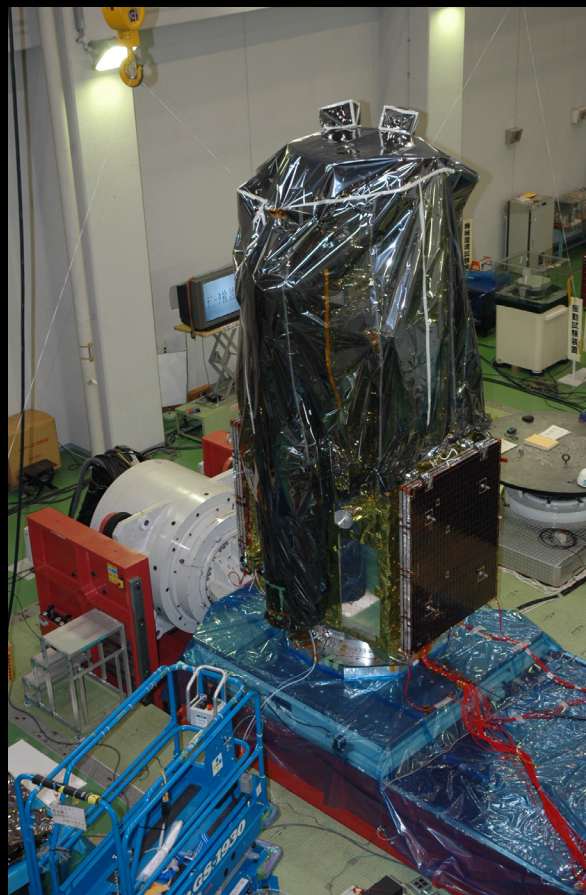


衛星組立作業

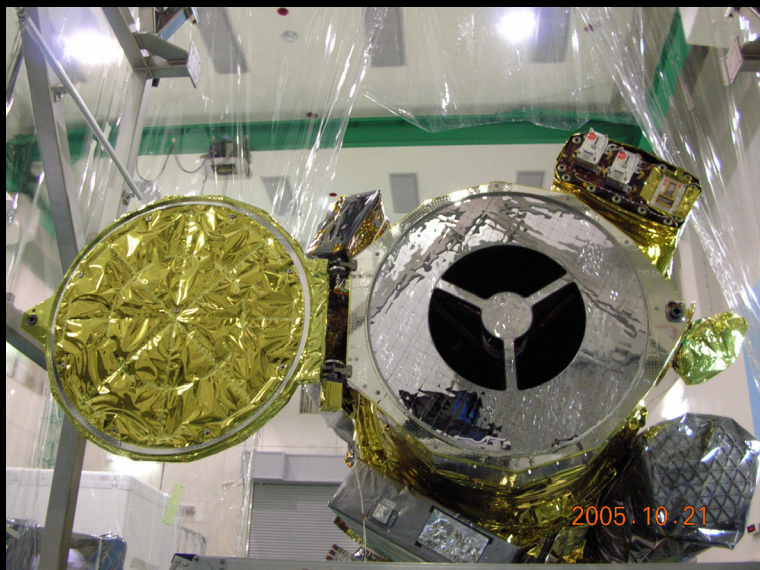
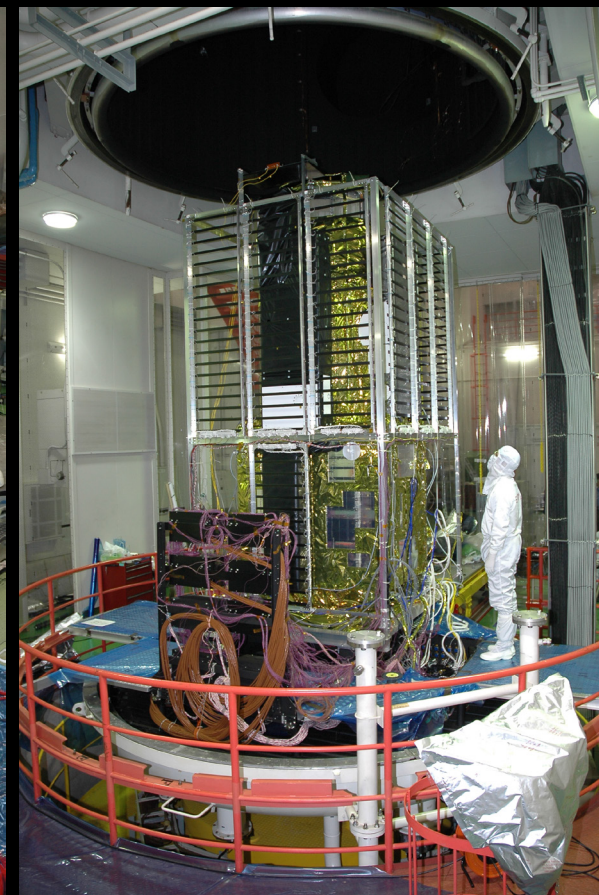


# 衛星総合試験

機械環境試験  
(2005年10月)



熱真空試験  
(2006年3月)



可視光望遠鏡ドア展開試験  
(2005年10月)



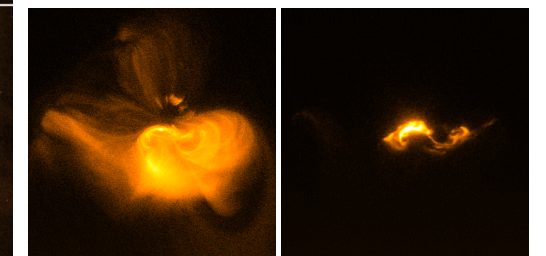
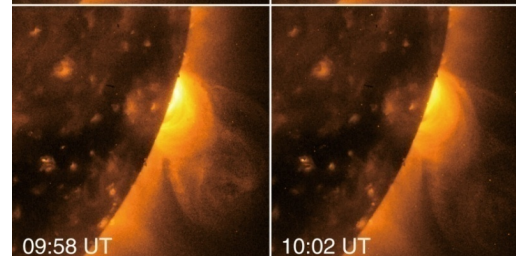
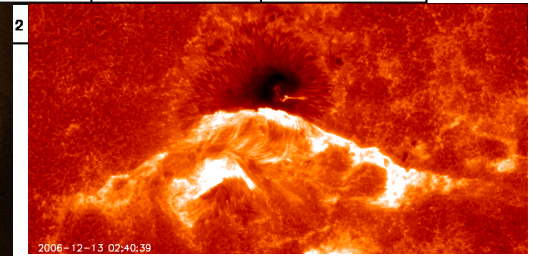
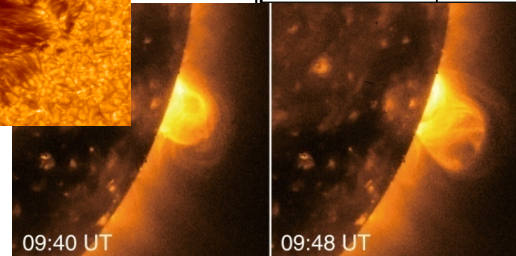
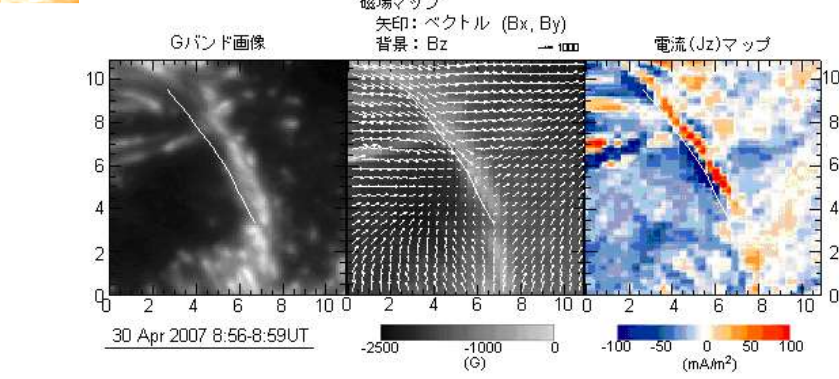
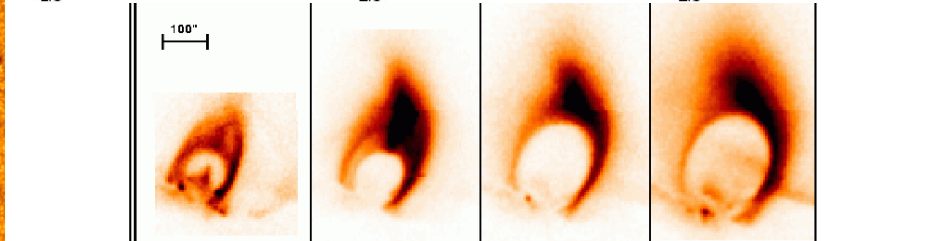
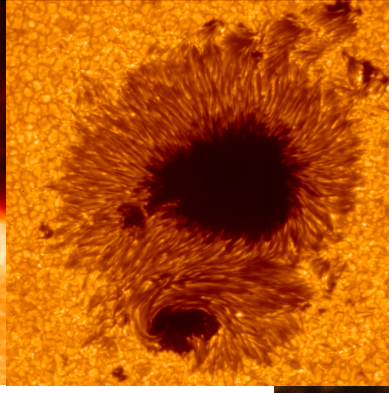
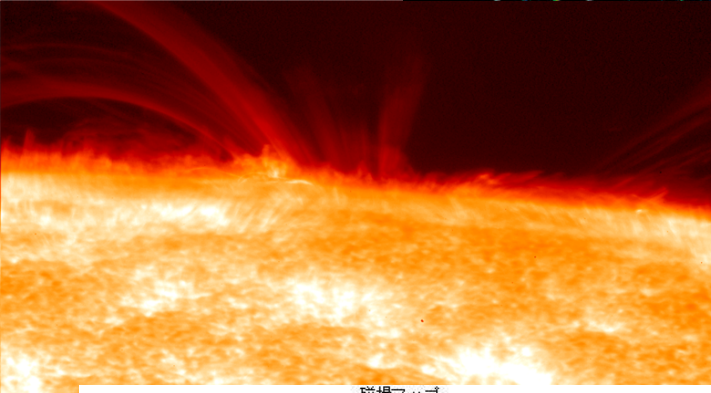
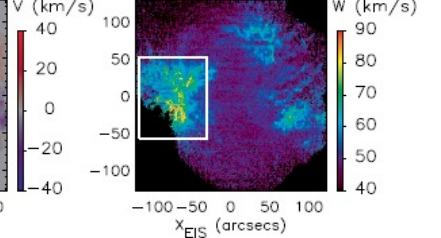
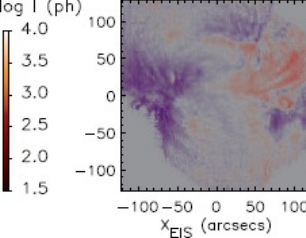
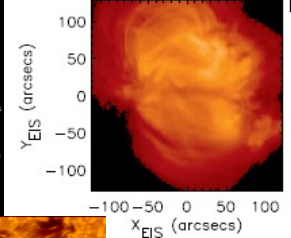
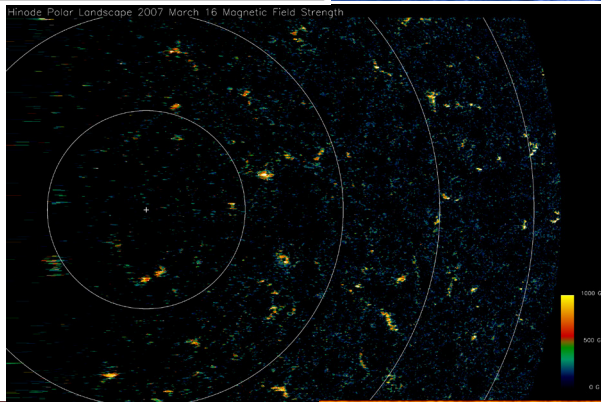
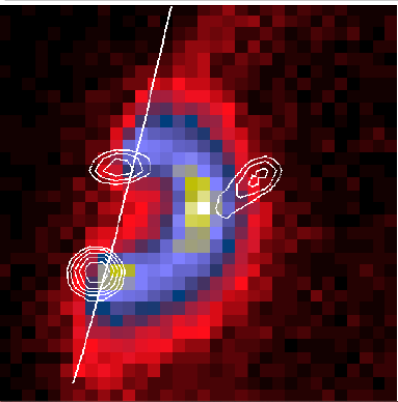
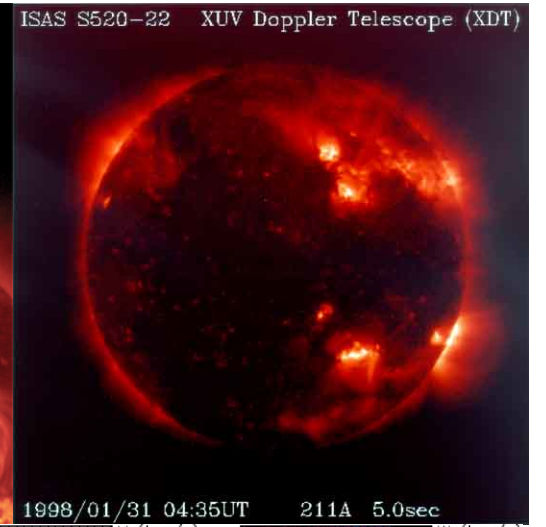
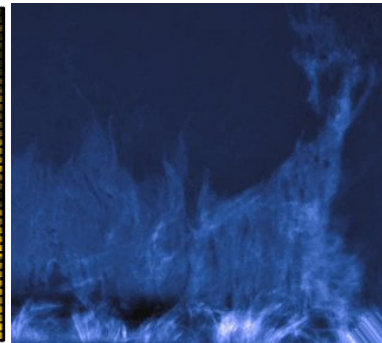
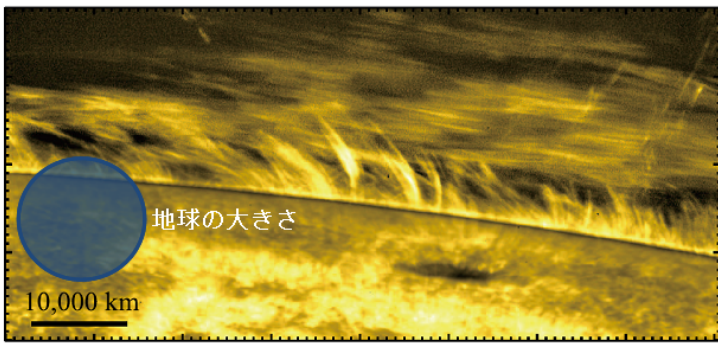
# SOLAR-B/「ひので」の打ち上げ

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

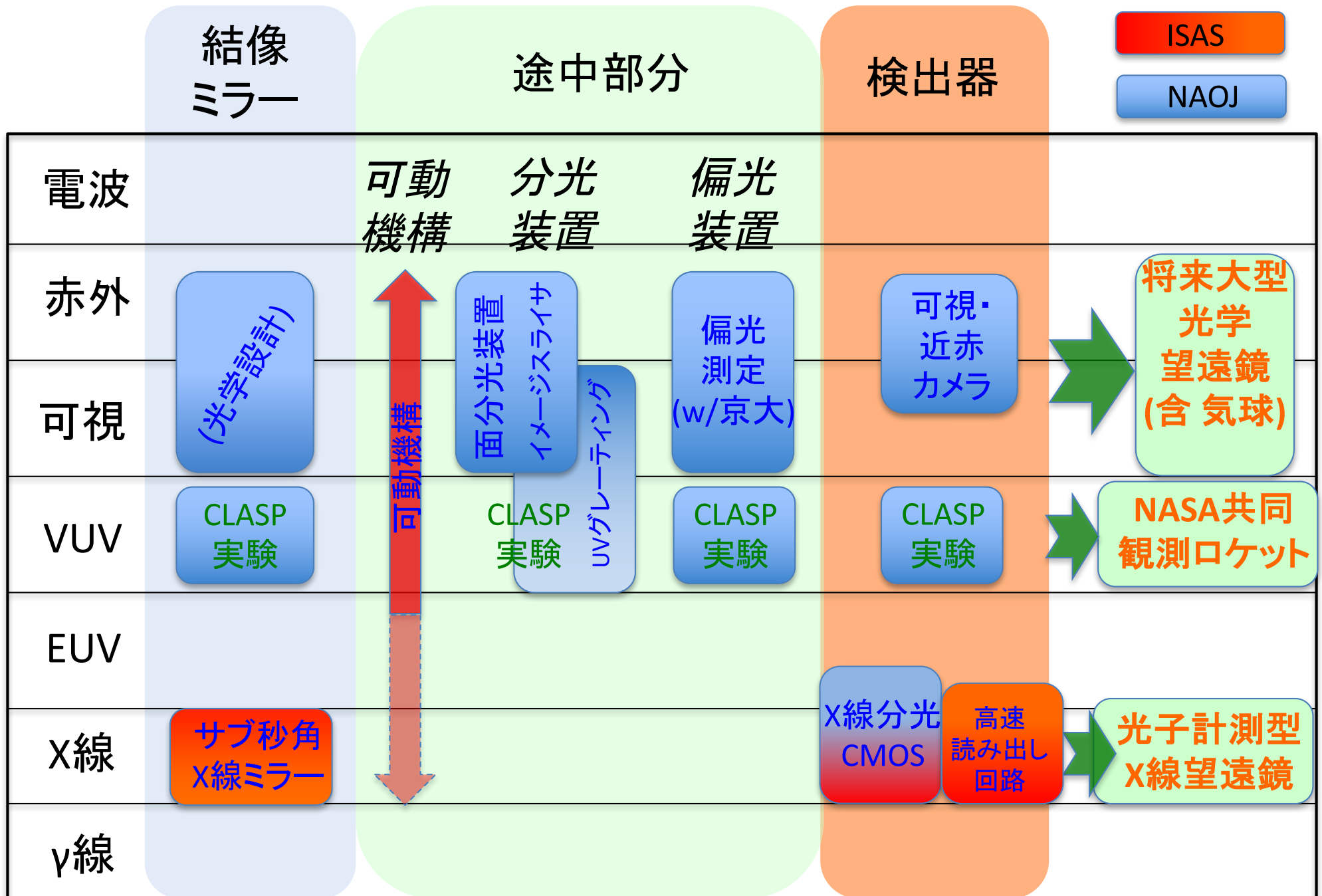
現役で観測中

- **CLASPロケット実験**[NASA観測ロケット](2015打上げ成功)
- **イプシロン衛星計画**(2020年代半ば)
  - SOLAR-C\_EUVST計画、PhoENiX計画
  - 可動機構などの基礎開発

現在進行中!

**CLASP2**  
**SUNRISE** etc.  
**FOXSI-3** etc.

# 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

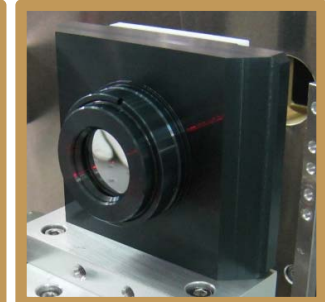
Primary



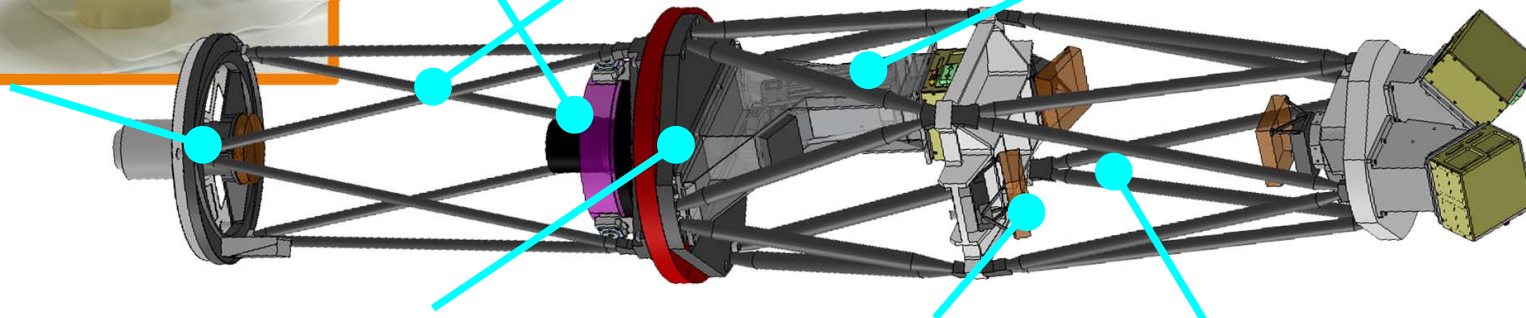
Telescope Structure



Slitjaw optics: mirror unit & filter unit



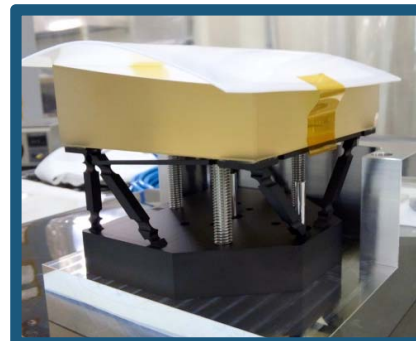
Secondary



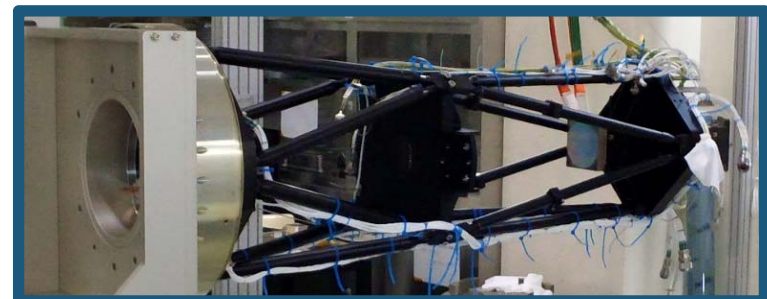
HWP motor (PMU) & driver



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

偏光分光  
CLASP 口径

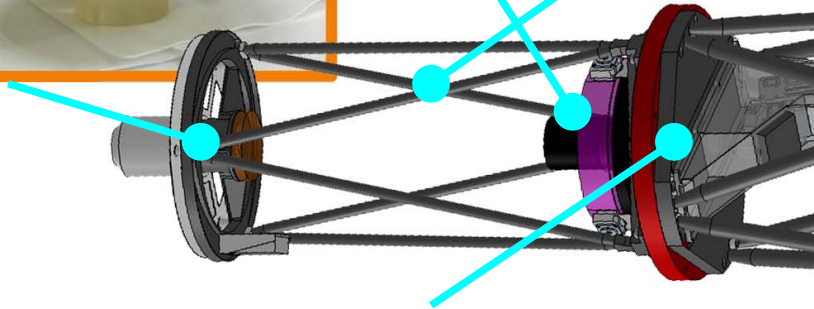
Primary



Telescope Structure



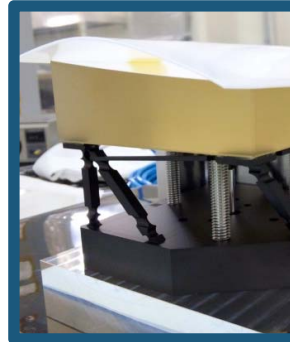
Secondary



HWP motor (PMU) & driver



Off-axis Camera

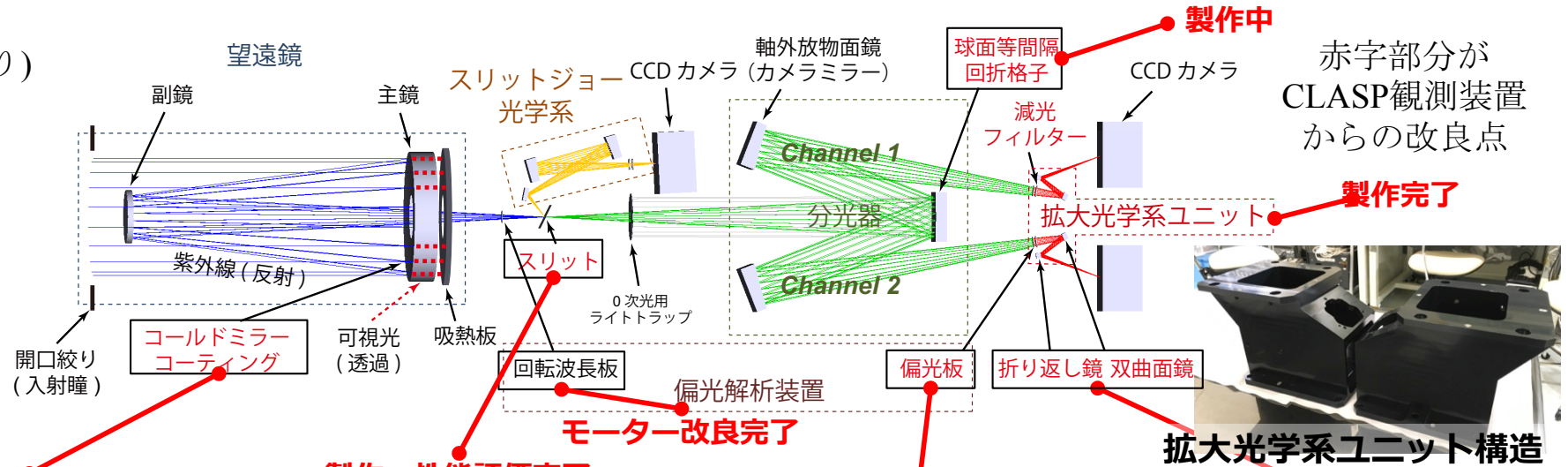




# CLASP2観測装置と開発進捗

(国立天文台・  
勝川さんの  
スライドより)

回折格子 (仏提供) 以外のフライト品、製作完了!

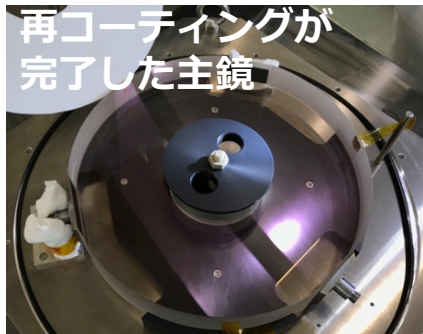


赤字部分が  
CLASP観測装置  
からの改良点

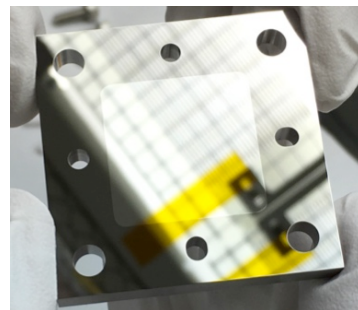
製作完了

拡大光学系ユニット構造

製作・性能評価完了



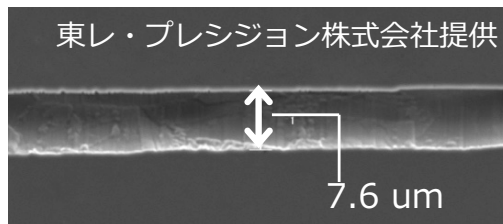
製作・性能評価完了



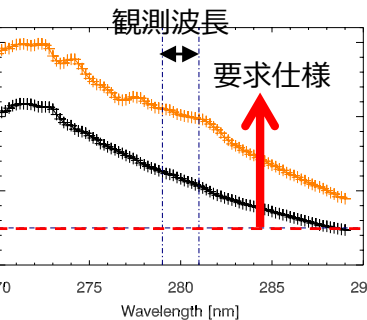
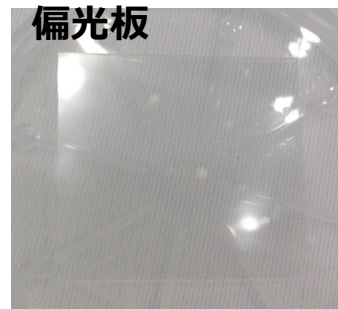
コーティングが完了  
したスリット鏡

スリット部拡大

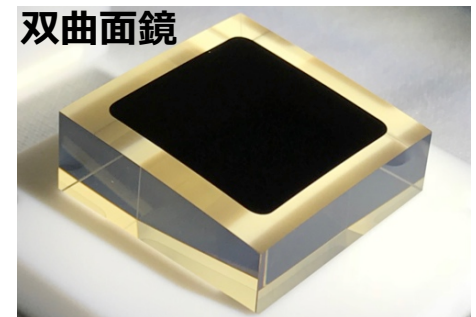
東レ・プレジジョン株式会社提供



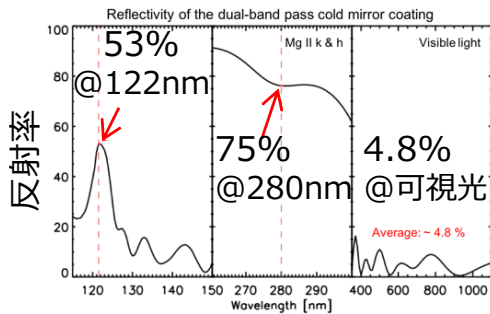
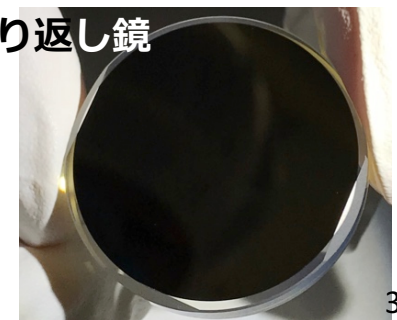
製作・性能評価完了



製作・性能評価完了



折り返し鏡

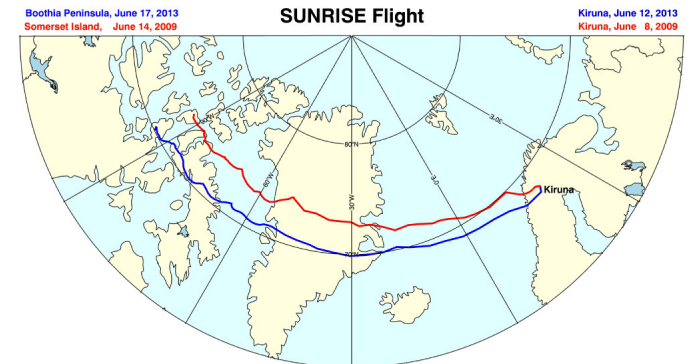






# 大気球太陽観測実験 SUNRISE-3

- 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
- 2021年に3度目の飛翔SUNRISE-3を提案
  - 近赤外線偏光分光装置**SCIP** (スキップ) を日本主導で開発

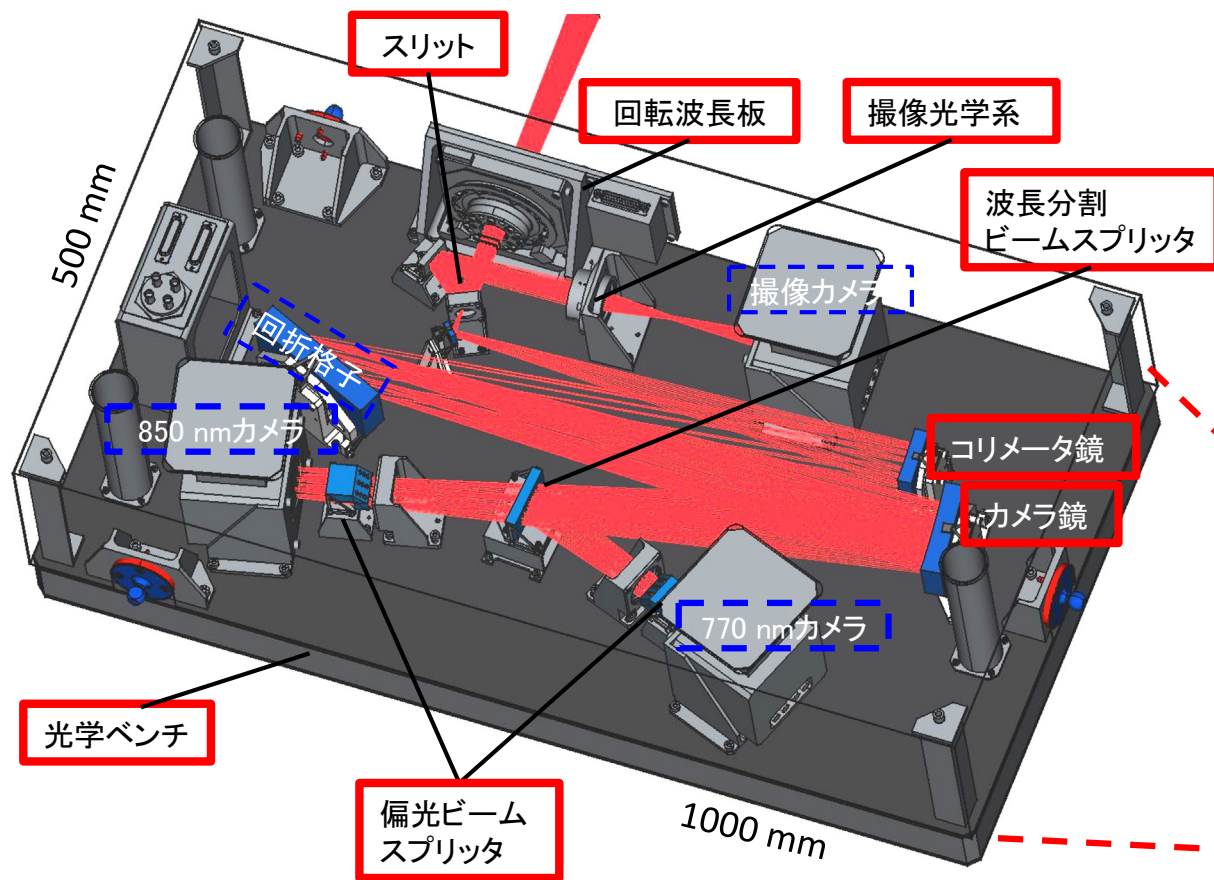


光球・彩層の高解像度・高精度偏光分光データを手にする絶好のチャンス

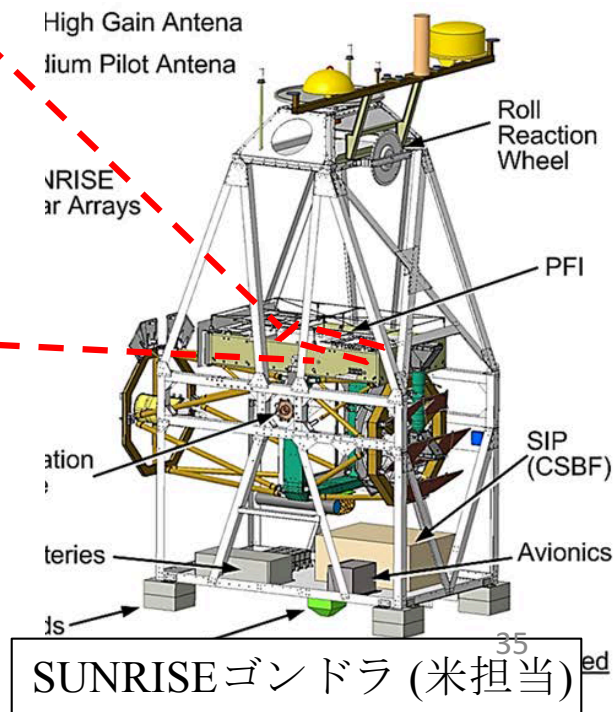


# SCIP (スキップ)

## 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% の偏光度測定



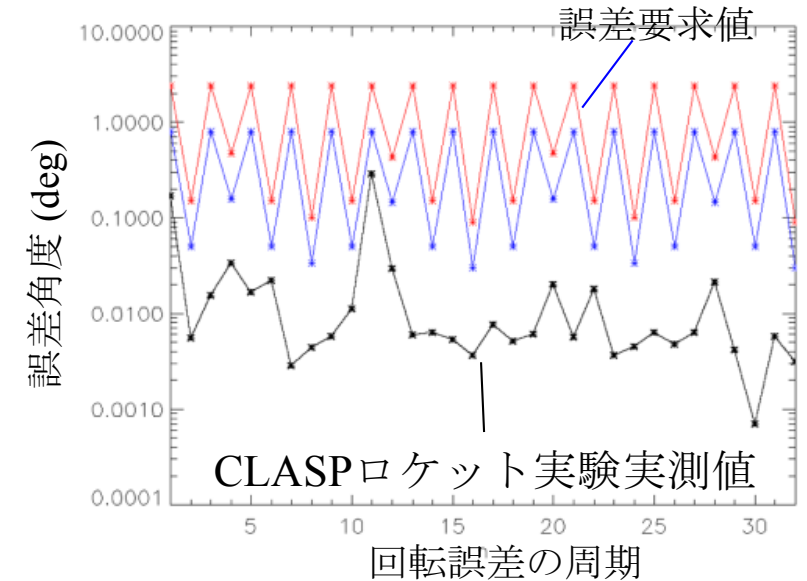
ゼーマン効果に高感度なスペクトル線がある近赤外線2波長帯を同時に偏光分光



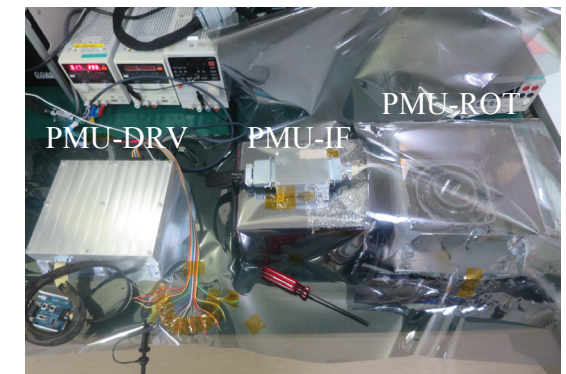
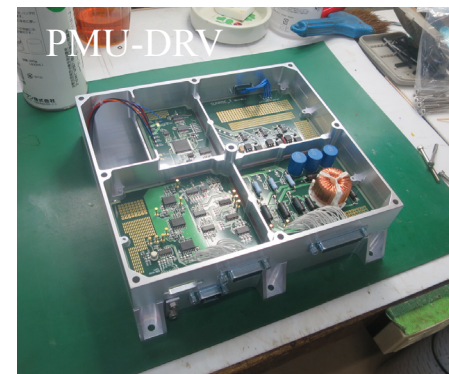
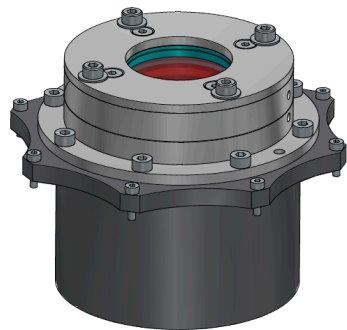
# SCIP: 波長板回転駆動機構 (PMU)

- SOLAR-C戦略経費で開発、CLASPで飛行実証
  - 高速化(CLASP: 4.8秒 → SCIP: 0.5秒)と一様回転が鍵
- SCIP用PMUの開発進行中
  - PMU-IF/DRVエレキ: CLASP設計をもとに新規製作、制御ソフトウェア開発中
  - 波長板ホルダ: 回転一様性のためMoIを調整したホルダを開発

波長板回転一様性の評価



波長板ホルダ



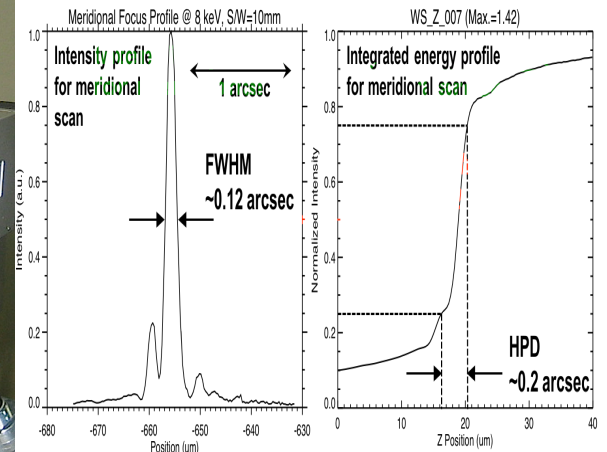
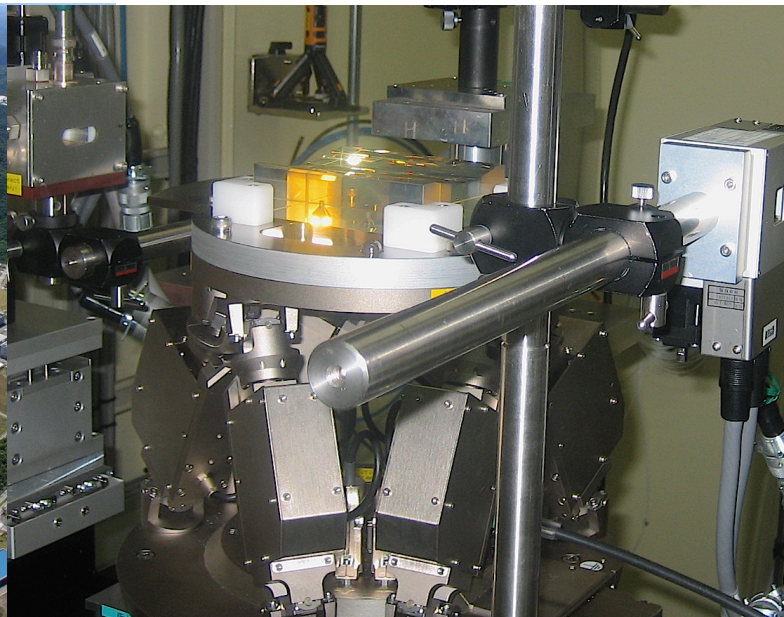
次年度: 回転一様性・擾乱実測、熱真空試験  
ほぼ同じPMUを紫外線偏光分光装置(ドイツ担当)用に開発



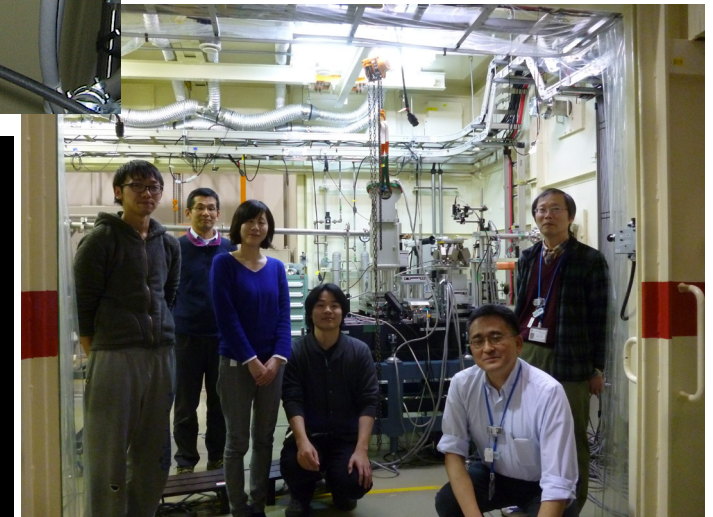
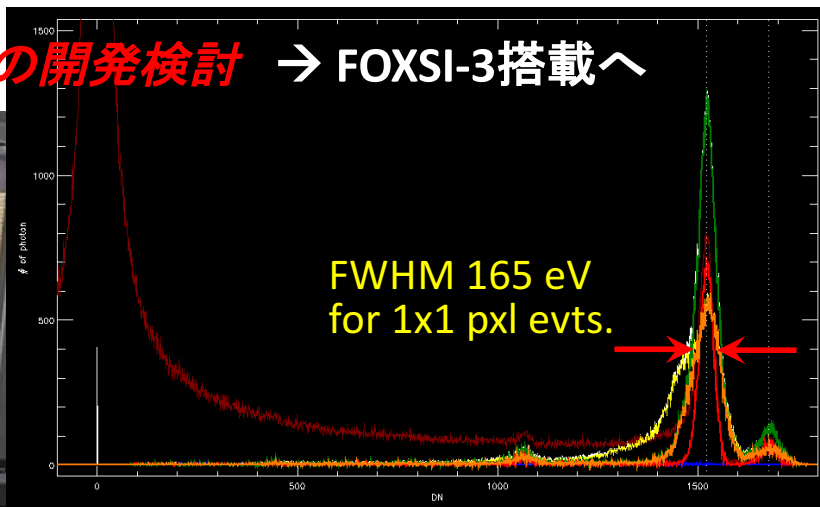
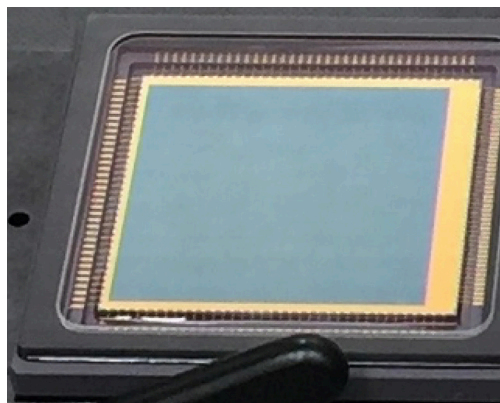
# 現在進行中の装置開発

## 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



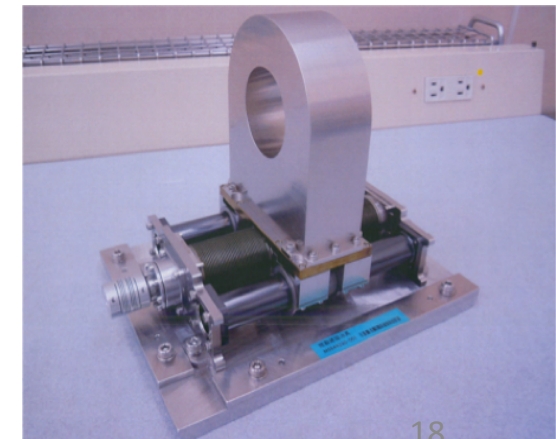
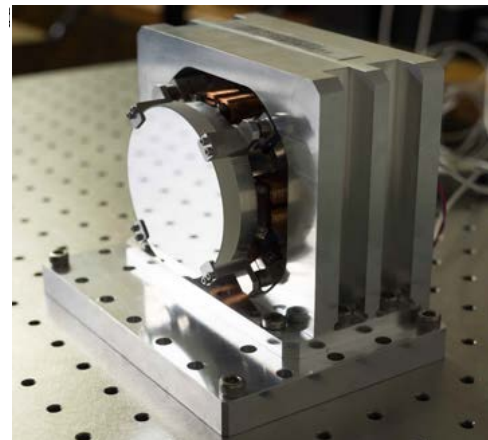
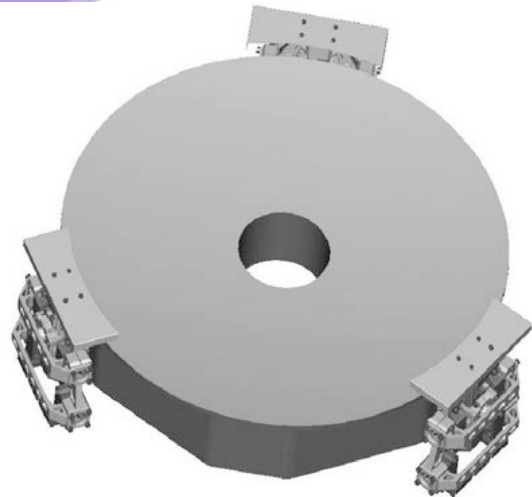
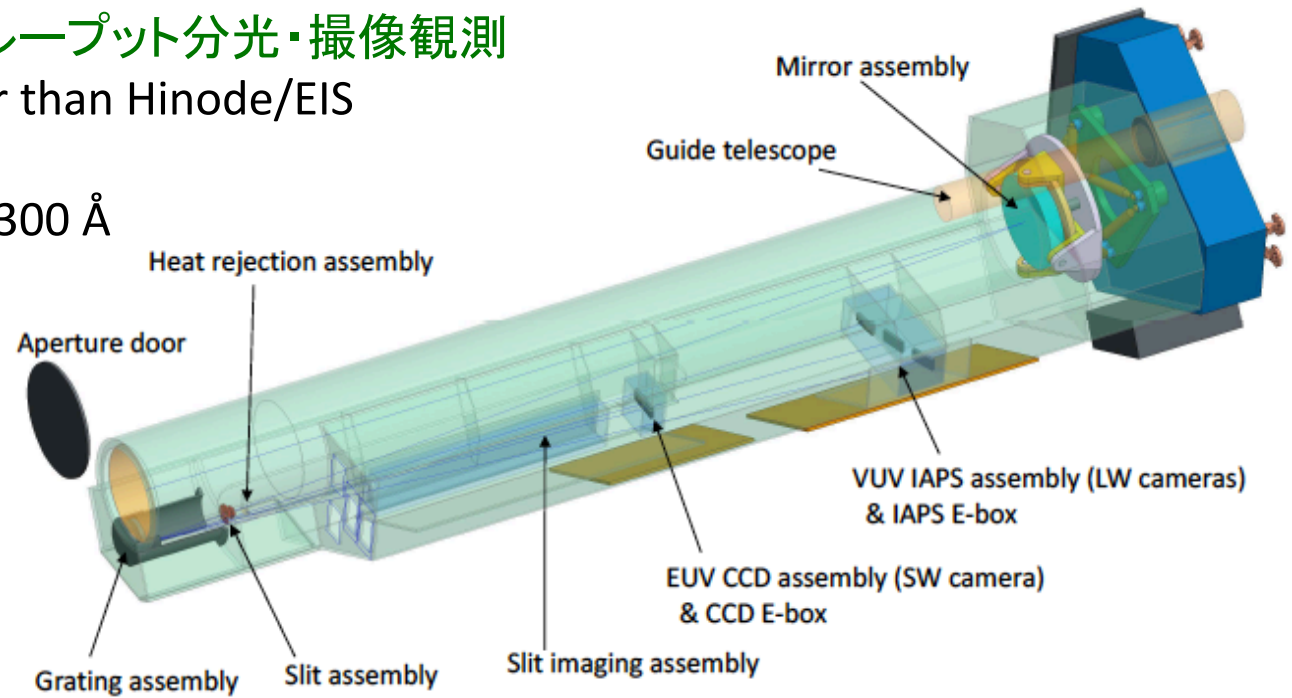
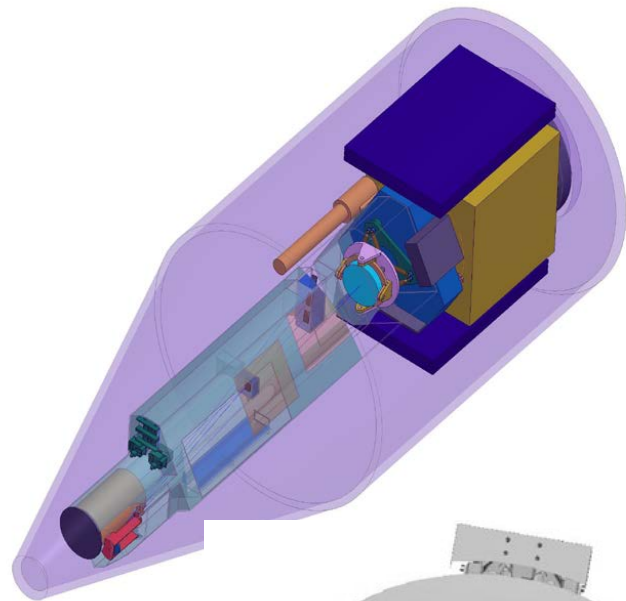
# イプシロン衛星計画: SOLAR-C EUVST

彩層・コロナのUV-EUV高スループット分光・撮像観測

High throughput:  $\sim x10$  larger than Hinode/EIS

Spatial resolution: 0.4 arcsec

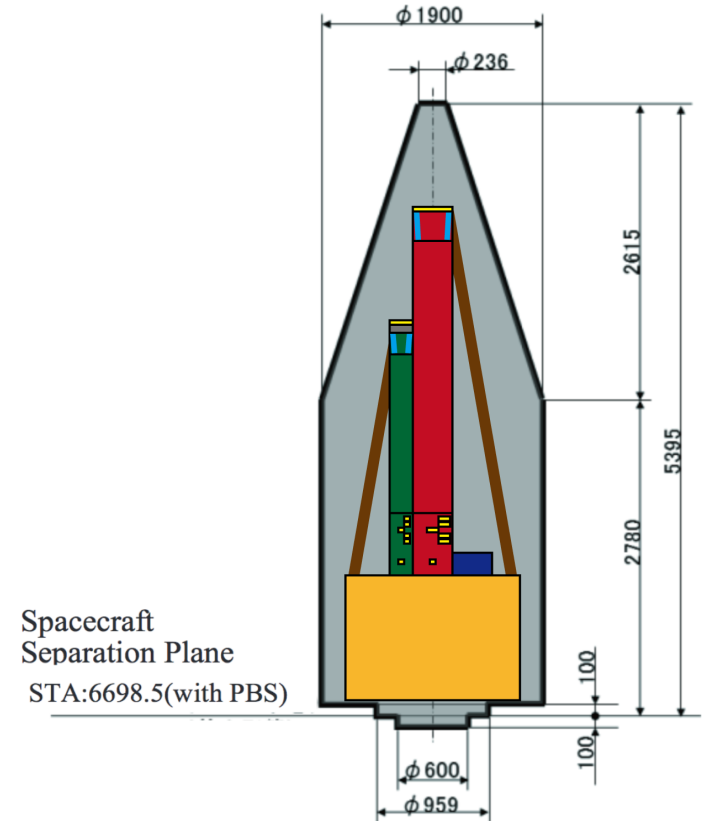
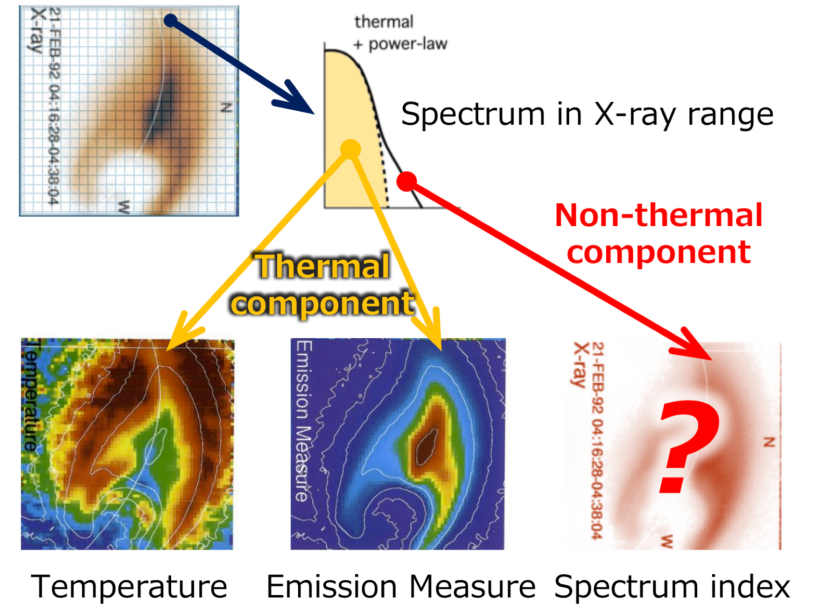
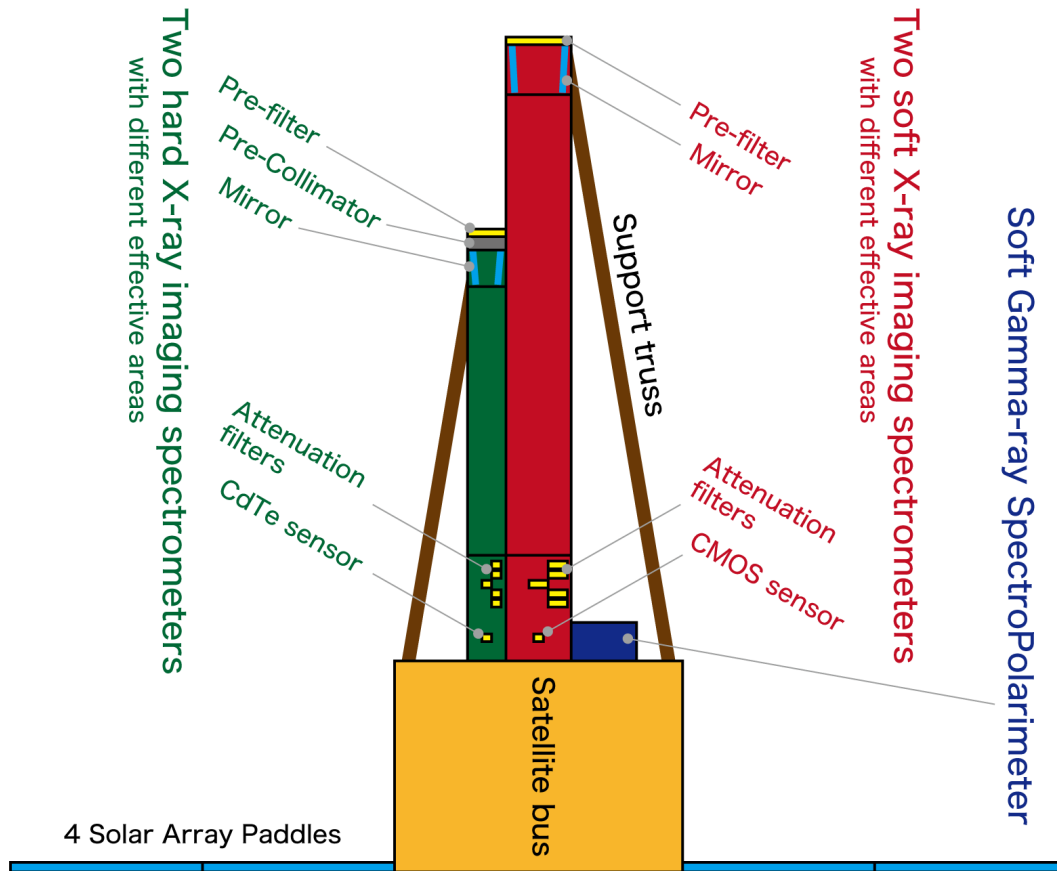
Wavelegth coverage: 170 – 1300 Å



可動主鏡の検討と要素試作

# イプシロン衛星計画: PhoENiX

- ・太陽フレアを対象とした軟X線・硬X線撮像分光観測
- ・宇宙プラズマ中で普遍的に発生する、粒子(電子)加速と磁気リコネクション過程との関連を調べる





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！