

次期太陽観測衛星計画 SOLAR-C

原 弘久

国立天文台・ひので科学プロジェクト・准教授

SOLAR-C準備室

総合研究大学院大学・天文科学専攻・准教授

東京大学大学院理学系研究科天文学専攻兼任教員

2013年8月9日

太陽研究最前線体験ツアー2013

講義内容

準備中・進行中の飛行体による観測計画

- 次期太陽観測衛星計画SOLAR-C
- CLASP観測ロケット実験計画
- 国立天文台太陽研究グループの紹介

飛翔体を使った太陽観測

- 飛翔体

- 飛行機、気球、観測ロケット、人工衛星(惑星間飛翔含む)

- 飛翔体を使う必要性

- 地球電離層による電波の反射・吸収を避けるとき
- 雲による遮蔽を避けるとき

極端紫外線・X線で観測を実施する理由

- 地球大気による吸収を避けるとき

解像度を上げたいとき

- 地球大気の動きによる像劣化を避けるとき

- ・ 地上ベストサイトで一年に限られた日数は好条件
- ・ 狭い視野範囲では補償光学で改善されつつある

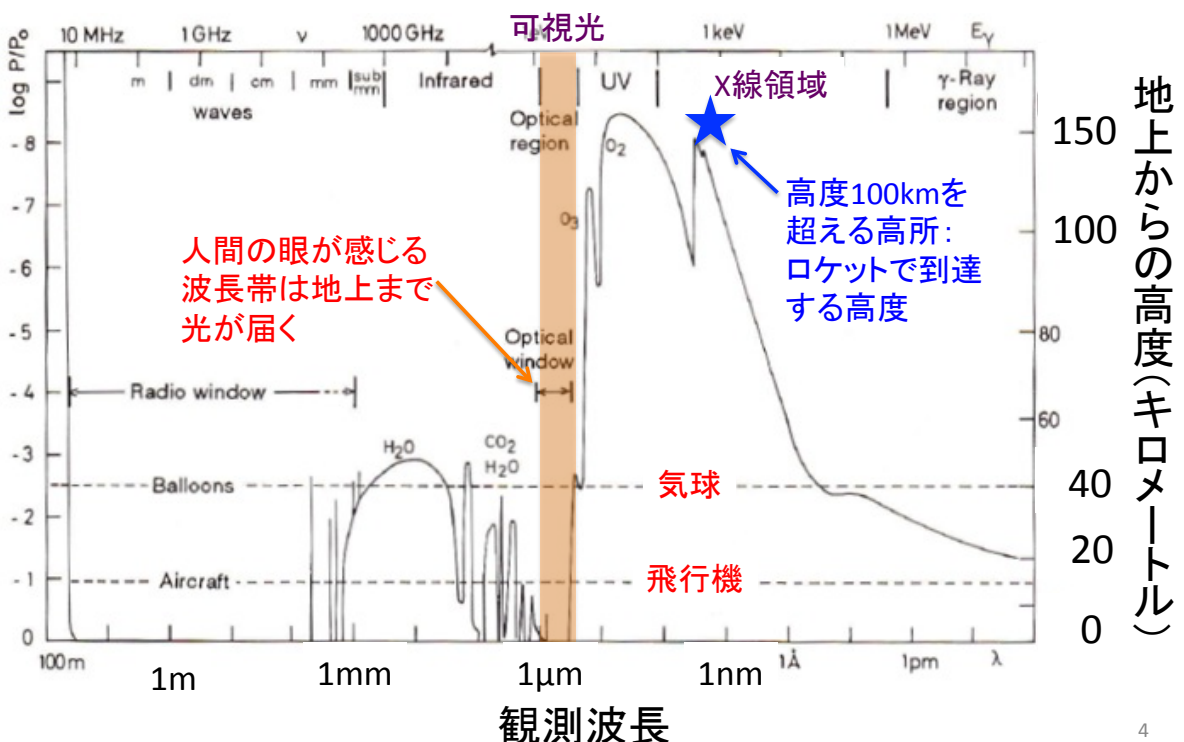
- 地球方向以外からの観測を望むとき(地球を離脱)

- 日食を長時間追うとき(超音速機による観測)

- 夜の無い観測を望むとき(衛星以外では南極で)

X線で観測するにはどこに行けばよい？

宇宙からの届く光の強度が半減する高度を線で表示



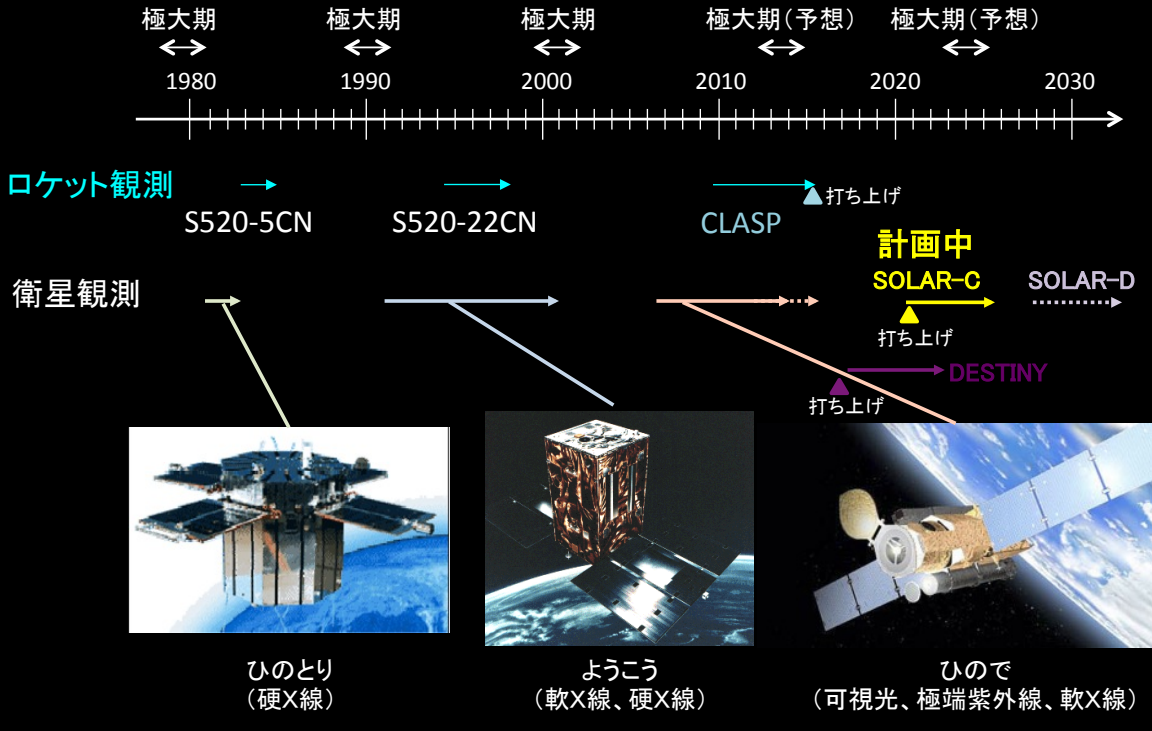
次期太陽観測衛星計画 SOLAR-C

飛翔体観測：今後20年の方向

- 2つの方向性を検討してきた
- 高解像度分光・偏光分光観測による太陽面磁気活動現象の解明へ
 - 大型望遠鏡群を搭載したスペース太陽天文台
 - SOLAR-Cの目指すサイエンス
- 内部流速場・対流構造と磁気構造の観測から太陽ダイナモ機構の理解へ
 - 黄道面離脱軌道から極領域を含む新たな視点
 - SOLAR-Dの目指すサイエンス

国内の太陽研究者コミュニティで議論の上、国内地上観測の方向性も含めて2011年に3月に上記を決定

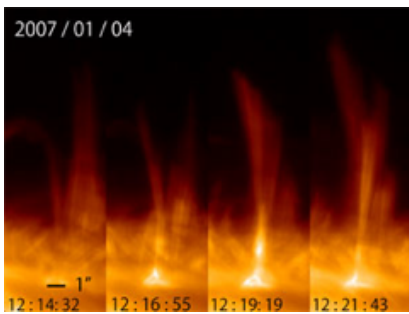
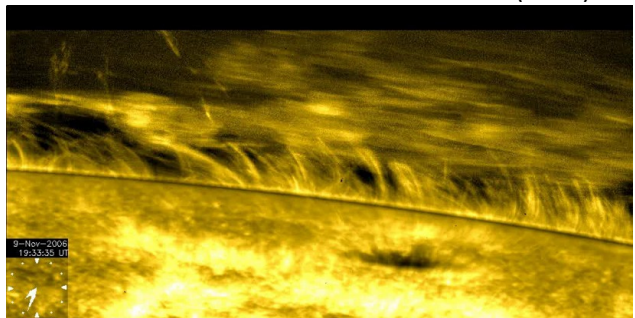
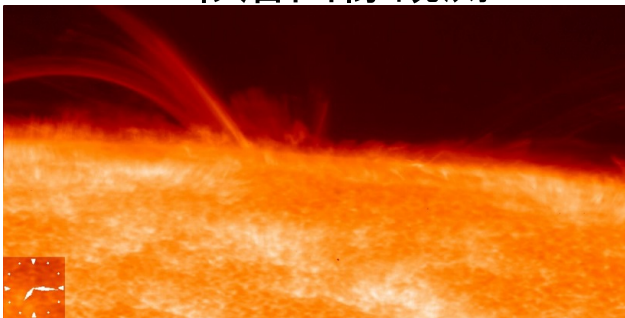
飛翔体による日本の太陽観測



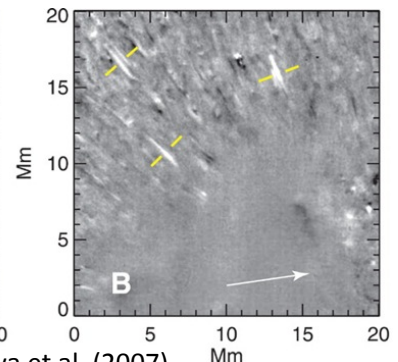
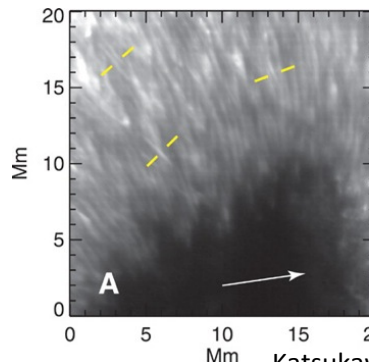
Hinode画像観測からの要請 ⇒ 高速の偏光・分光観測

Hinode彩層画像観測

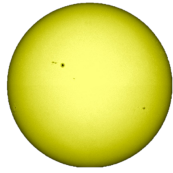
Okamoto et al. (2007)



Shibata et al. (2007)

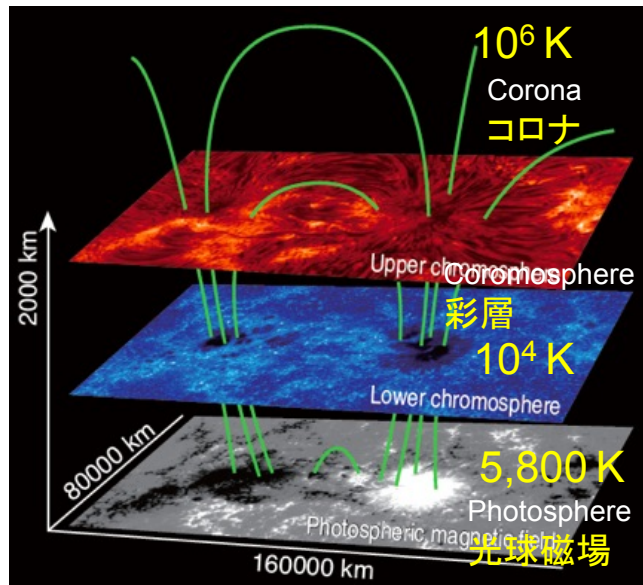


Katsukawa et al. (2007)



太陽の活動現象の現場

- 活動現象には磁場が中心的な役割を果たしている
 - エネルギー源は磁場を通して渡される光球下の対流運動
- 光球からコロナ間の磁気結合
 - 光球からコロナまで数千km
 - 角距離にして5秒角程度
 - この間5,800Kから 10^6 Kに温度上昇
 - 磁場が異なる温度の大気間を通して大気間を接続している
 - 彩層・コロナ・フレアの温度上昇は磁氣的加熱によると考えられている



→ 光球からコロナまでを同時に観測することが活動現象を理解する基本

9

ひので から SOLAR-Cへ 分光能力向上による高解像度観測

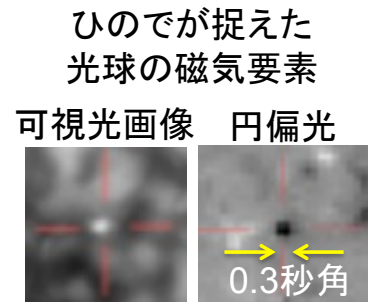
- 画像観測とともに分光・偏光観測へ
 - Hinodeによるスペースからの彩層画像観測から、地上観測ではとらえられなかったダイナミックな現象の発見 → 画像観測では物理量決定が困難
 - 彩層の偏光分光観測による彩層・コロナの理解へ
- 遷移層・コロナの高解像度・高速度観測へ
 - 微細構造存在の観測的証拠が得られてきた
 - 激しい運動が観測される遷移層・コロナ底部を含む上部大気エネルギー解放領域の精査へ

10

鍵となるスケールサイズ

- **光球 0.1秒角**

- 短時間の地上の画像観測より
- ひので磁場観測解像度は0.3秒角
(ひので可視光望遠鏡: 50cm開口)



- **彩層 0.2秒角**

この領域の磁場情報が重要

- 安定的なひので画像観測より
- 短時間の地上の画像観測より



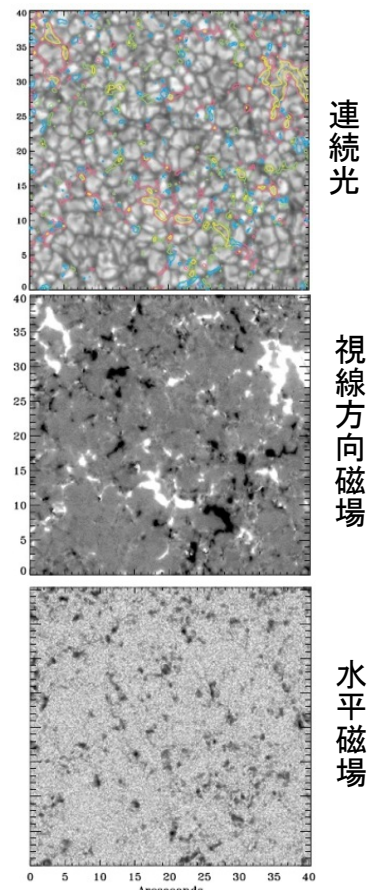
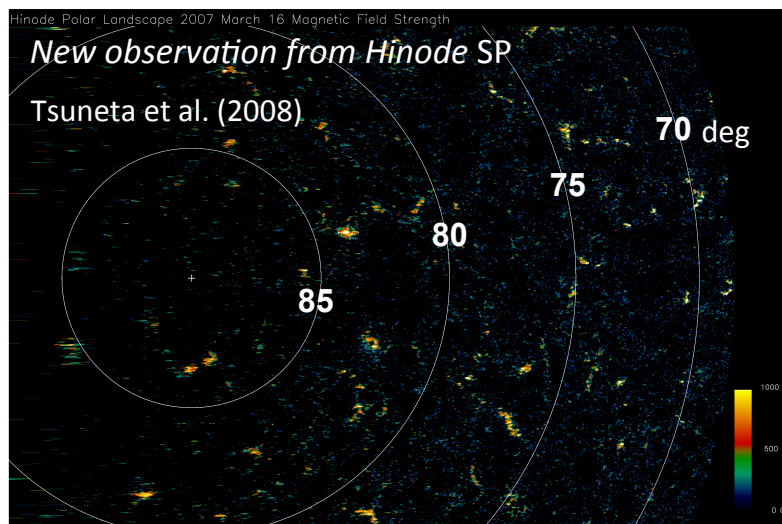
- **コロナ 0.3-0.5秒角**

- ひのでのコロナ分光観測からの推定
- 最近の高解像度ロケット観測から確認

偏光・分光能力による discovery space

- *Hinode*の場合

解像力の高い光球ベクトル磁場の取得により
多くの発見があった

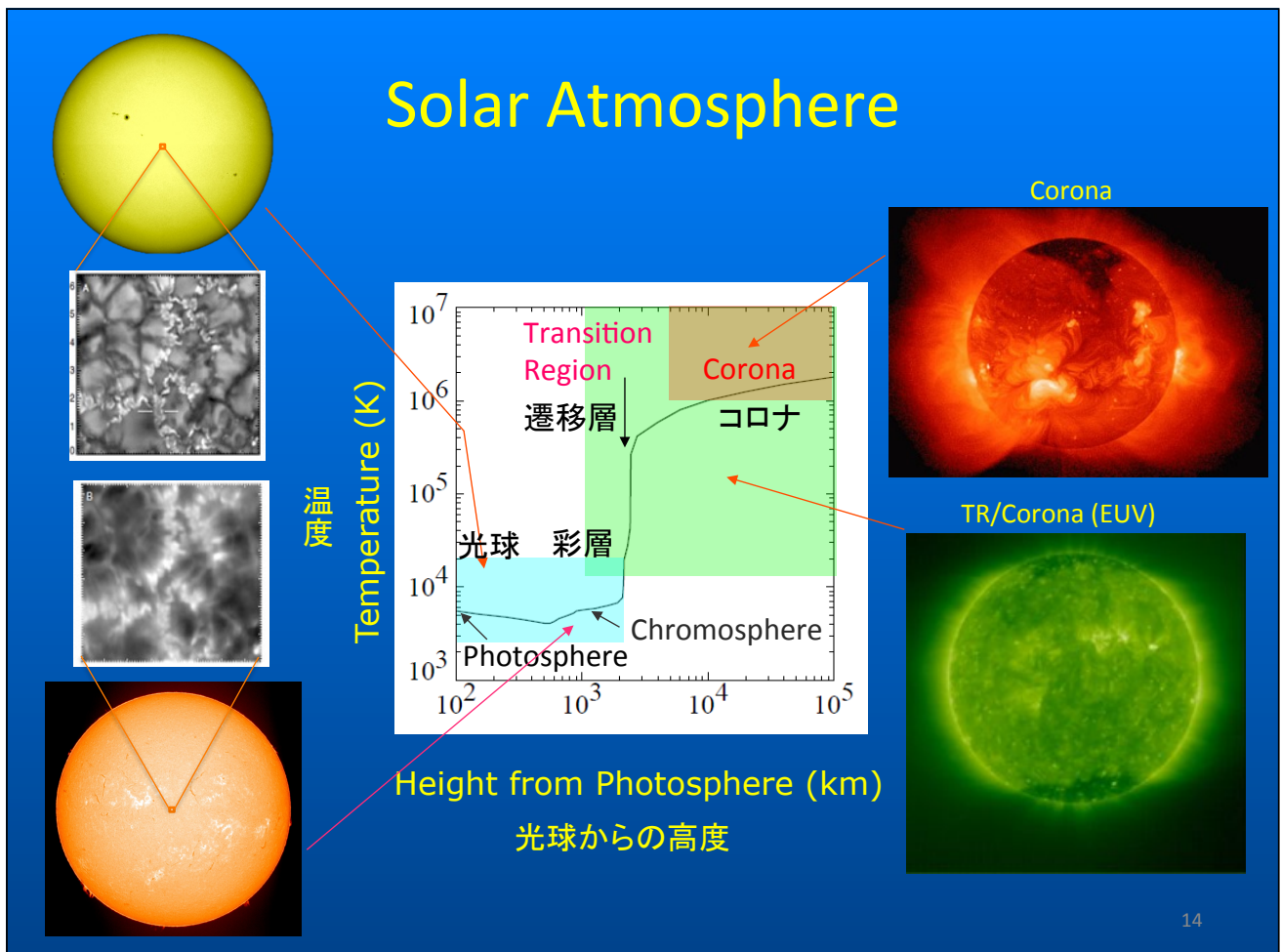


太陽物理：取り組むべき課題

それぞれが古くて、しかし研究の進展により新しい課題へと変貌

- 彩層・コロナはどのように加熱されているか
- さまざまな磁気構造はどのように形成されるか
- 太陽風はどのように加速されているか
- 太陽中の流速場(差動回転・子午面流)・対流構造はどのようにつくられているか
- 太陽磁場はどのように維持されているか
 - 局所的ダイナモ機構(長期的に変動しない磁場成分)
 - 活動周期を生み出す大局的ダイナモ機構
- フレアはどのように発生するのか
- 高エネルギー粒子はどのように加速されているか

SOLAR-Cは、これらの中の多くの問題の解明を目指します



必要とされる観測装置

- 光球・彩層を高解像度観測する光学望遠鏡
 - 高解像度撮像観測 より大口径・より短波長領域へ
 - 高解像度分光観測 口径1.5m程度
 - 高解像度偏光分光観測 (彩層で0.2"解像度, 偏光精度0.01%)
 - 高速二次元同時分光観測 IFU二次元分光装置
- 彩層・遷移層・コロナを高速・高解像分光する撮像分光装置 短時間の微細構造観測のため口径は $>\phi 30\text{cm}$
- コロナで短時間に変化する微細構造をとらえる撮像装置

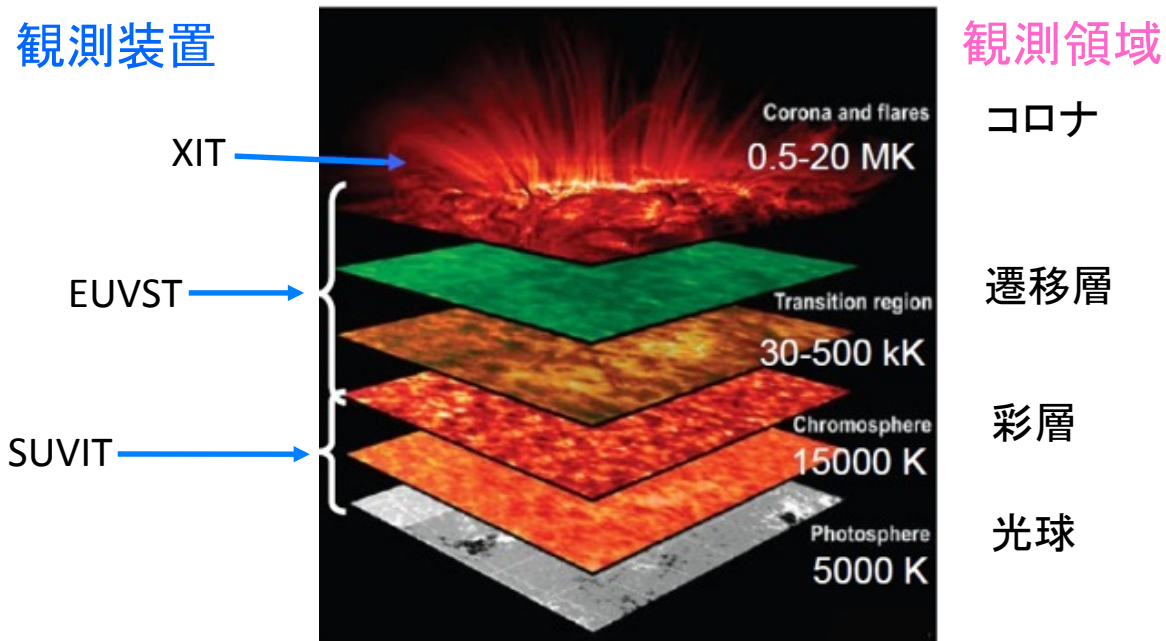
15

望遠鏡設計上の主な観点

- 光学磁場診断望遠鏡 SUVIT
[日米欧で分担製作、望遠鏡は日本]
 - 1.5m ϕ クラスの大型望遠鏡
 - 彩層ラインHe10830観測のために赤外線検出器を持つ
 - 分光器とフィルター光学系を持つ
 - 分光器は面分光(IFU)機能を持つ
- X線撮像分光望遠鏡 XIT [欧米が主力]
 - 超高空間分解能のEUV望遠鏡を搭載する
 - 斜入射ミラーでエネルギー分別photon countingを行う [オプション]
- 紫外線高感度分光望遠鏡 EUVST/LEMUR [欧米]
 - 彩層~遷移層~コロナ~高温プラズマ(フレア)にわたって同時に微細構造の分光観測する

観測領域と観測装置の関係

観測装置



17

SUVIT

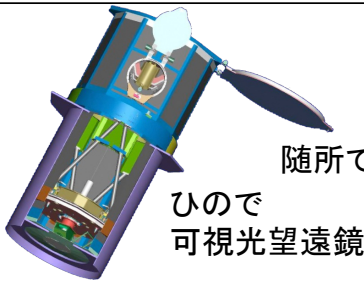
(Solar UV-Visible-IR Telescope)

- 光球・彩層を世界最大口径の宇宙望遠鏡で高解像度観測 (0.1秒角 @可視、0.2秒角 @近赤外)
 - ☆ 口径1.5m、波長域0.28-1.10 μm 、視野180 \times 180秒角
 - ☆ 撮像装置FG、偏光分光装置SP(スリット分光+IFU)
 - ☆ 大気圏外での安定した最高の観測条件で
 - 短波長(UV)領域での高解像度撮像観測(検討中)
 - 光球の約10倍の測光精度での彩層磁場観測
 - 高速の分光観測(温度、密度、速度の測定)
- 上層への磁気エネルギー生成過程・彩層での磁気エネルギー輸送・散逸過程を観測

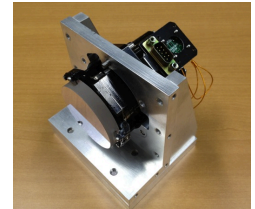
18

SUVIT

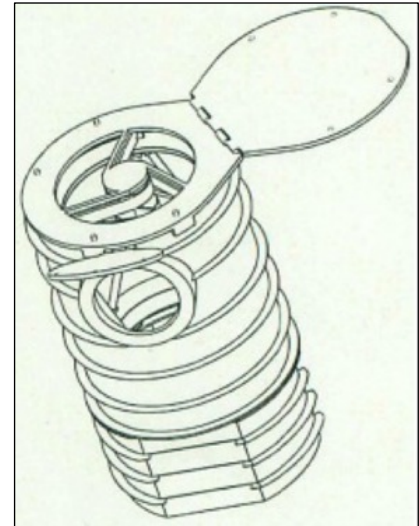
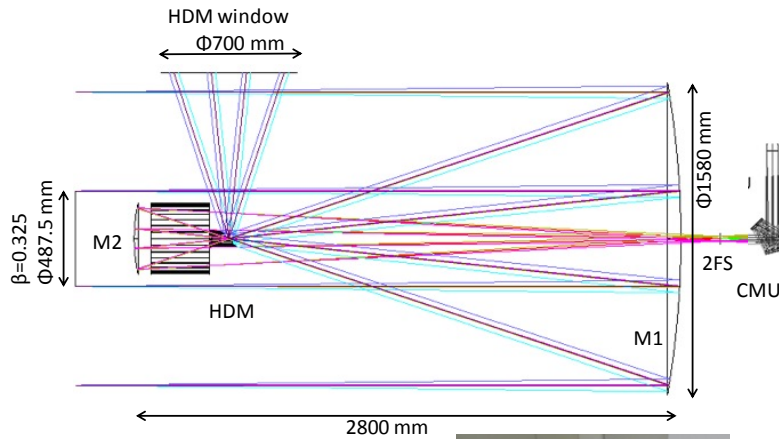
随所で「ひので」のヘリテージが使用予定



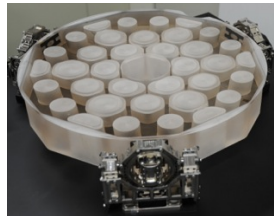
ひので
可視光望遠鏡



「ひので」像安定化鏡



「ひので」排熱鏡



「ひので」有効口径50cm鏡

19

EUVST

(EUV/FUV imaging Spectrometer)

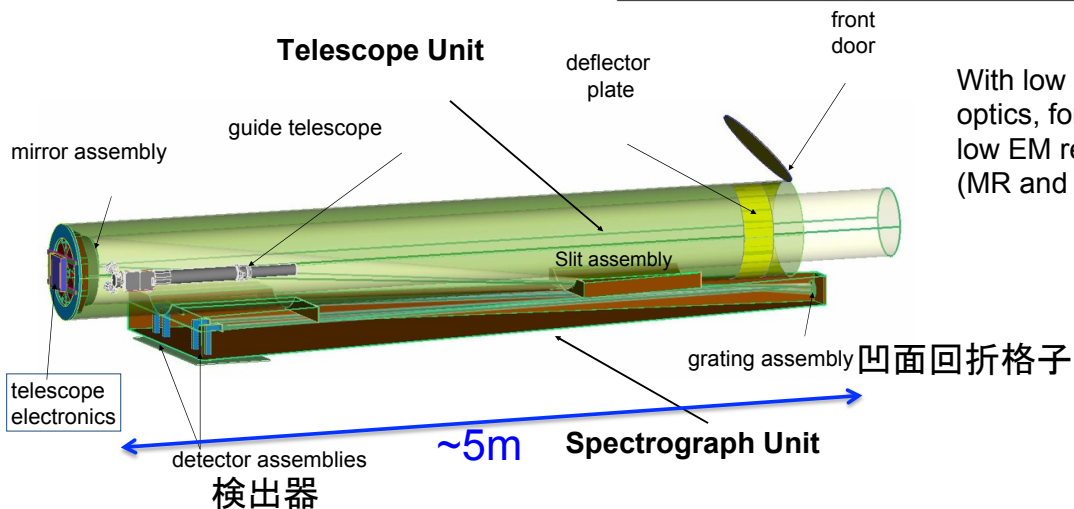
- 彩層—コロナ間の微細構造の同時分光観測
 - ☆ 17-130 nm 波長領域を観測
 - ☆ 0.3秒角の解像度、視野300×300秒角
 - ☆ 高感度分光による $10^4 - 10^7$ K温度域の同時観測
 - ひので衛星の観測から知られるサブ秒角の彩層構造の分光
 - ひので衛星の分光観測より予想されるサブ秒角コロナ構造の分光
- 彩層でのエネルギー散逸、彩層を通過するエネルギー流束の評価、コロナでのエネルギー散逸の直接観測

20

EUVST

- One of key instruments for achieving Solar-C science goals

Field	Required value
Spatial resolution	$\leq 0.28''$
Spectral resolution	$\lambda/\Delta\lambda$ 17 000 to 30 000
Doppler shift accuracy	$\leq 2 \text{ km s}^{-1}$
Doppler width accuracy	$\leq 5 \text{ km s}^{-1}$
Temperature coverage	0.01 to 20 MK
Field-of-view	slit length $280''$
raster coverage	$300''$ (w/o re-pointing)
Exposure times	$\leq 10 \text{ s}$ ($0.28''$ sampling) $\leq 1 \text{ s}$ ($1''$ sampling)
Mirror micro-roughness	about 3 \AA rms or better



With low scattering optics, for exploring low EM regions (MR and CH).

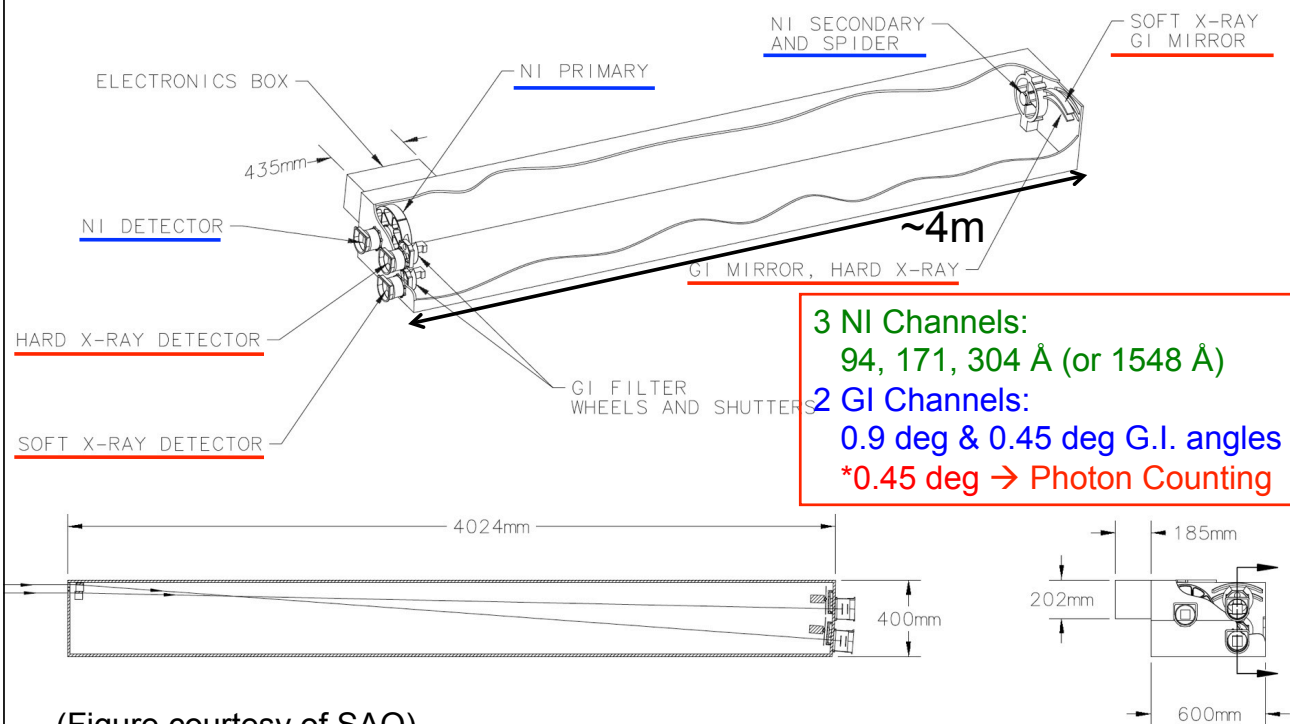
21

XIT(X-ray Imaging Telescope)

- 超高空間分解能EUV望遠鏡(直入射型)
 - 0.2-0.3''解像度、94Å, 171Å, 304Å候補波長バンド
 - 2012年に実施されたNASA HiCロケット観測で高解像度観測のデモンストレーションが成功
 - コロナの微細構造・加熱過程を可視化する
- 軟X線撮像型分光望遠鏡(斜入射型:オプション)
 - 撮像モード: 解像度1秒角、視野~13×13分角
 - 分光モード: 解像度2秒角、視野~3×3分角
 - 光検出モードでは、各画素ごとに分光スペクトルが得られる
 - フレアなどの変化の速い対象の研究に対して強力

22

Solar-C X/EUV Telescope

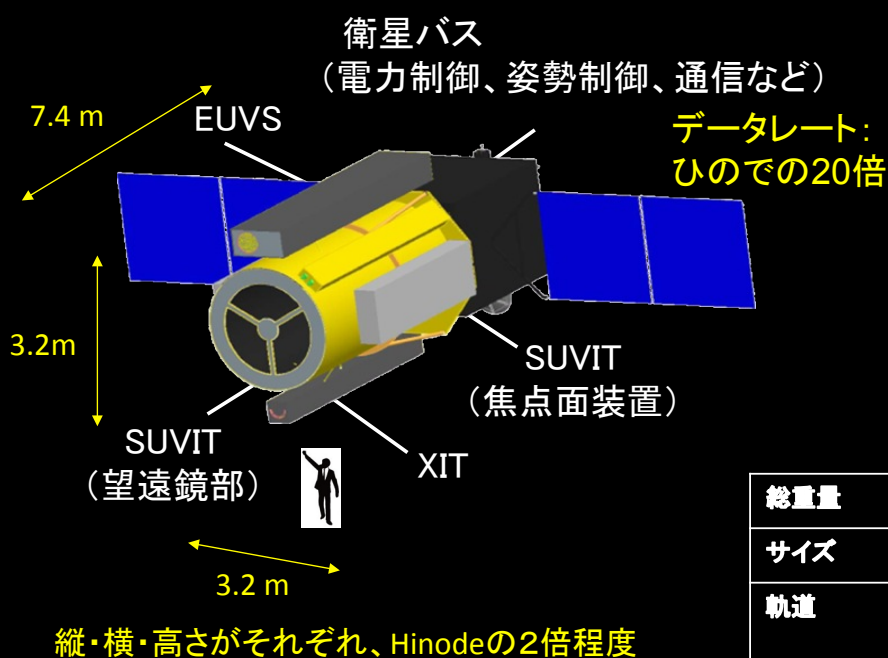


3 NI Channels:
 94, 171, 304 Å (or 1548 Å)
2 GI Channels:
 0.9 deg & 0.45 deg G.I. angles
 *0.45 deg → Photon Counting

(Figure courtesy of SAO)

NORMAL INCIDENCE / GRAZING INCIDENCE HARD AND SOFT X-RAY

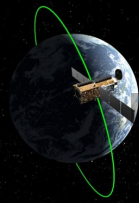
SOLAR-C衛星案



ひので衛星の大きさ

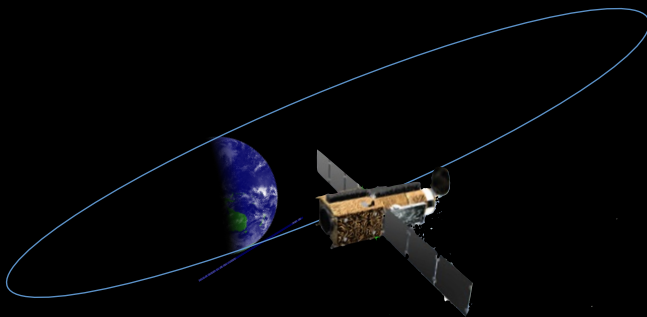
SOLAR-C衛星

総重量	2300kg(燃料除く)
サイズ	3.2mx3.2mx7.4m
軌道	候補:準天頂軌道 (軌道傾斜角28.5°)
ロケット	JAXA H-IIA (202型) ²⁴



SOLAR-C軌道案

- 近地球軌道ではデータ伝送速度の確保不可
- 傾斜角をもった軌道周期24時間の軌道に滞在
 - 伝送速度の確保
 - 少ない日陰期間と日本からの可視時間
 - 準リアルタイム観測運用の可能性が拓かれる
(事前の予定だけですむ他の天文衛星と異なる点)



SOLAR-C衛星の
傾斜角をもった軌道周期24時間の軌道(準天頂軌道)

他衛星・地上観測所との連携

- 地上高分解能観測との連携
 - 全ての機能を衛星に積み込めるわけではない衛星観測で取得できないパラメータを地上望遠鏡の観測で得る。特に高データレート観測はスペース観測は制約され、地上観測が勝る。
 - 太陽圏ネットワーク観測との連携
 - 太陽表面現象に起源をもち、太陽圏へ影響を与える現象の理解を進める。例:フレア/CME, 太陽風
- SOLAR-Cと同時期の国内地上観測はこちらが主体**

国際協力と競争

- 衛星観測はひじょうに高価（なので、それに見合った成果が求められる）
- もともとはロケット、人工衛星自身が高価
- 最近では観測装置が複雑になり、観測装置にかかるコストが衛星自身に相当するようになってきている

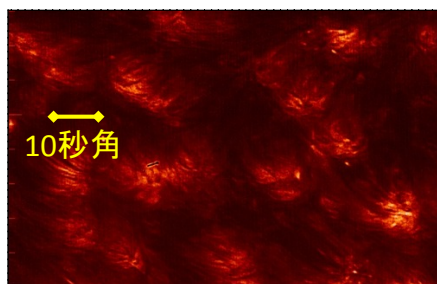
- 国際協力で分担（ようこう、ひので衛星も国際協力で実現）
- 研究に関しては競争（1番目であることが重要）
- SOLAR-CもJAXA, NASA, ESAの国際協力のもと実現しようとしている

27

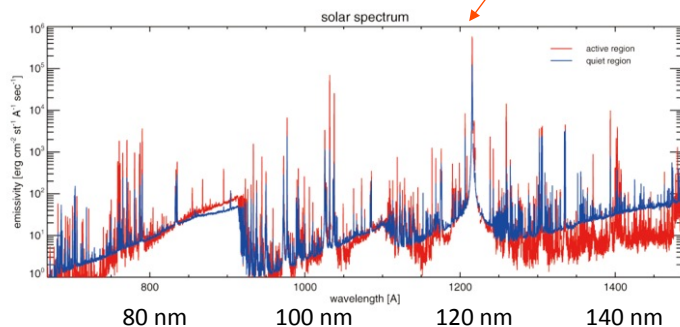
CLASP ロケット実験計画

CLASPロケット実験計画

- **新しい彩層磁場観測**を目指して、**水素Ly α 輝線**の高精度偏光観測ロケット実験
(Chromospheric Lyman-Alpha Spectro-Polarimeter; CLASP)
を、日・米中心に4カ国、10機関の国際協力で推進。
- 米国(NASA)の観測ロケットを使い、観測装置はその構造を含めて日本が製作を担当。



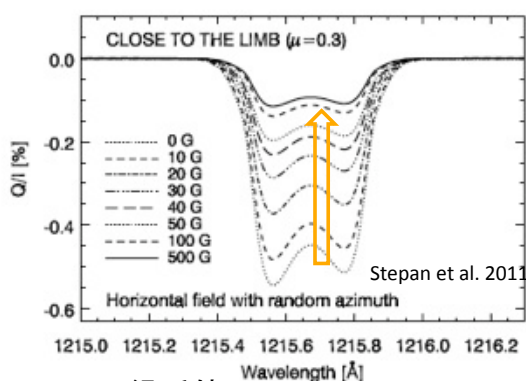
Ly α 線による彩層像



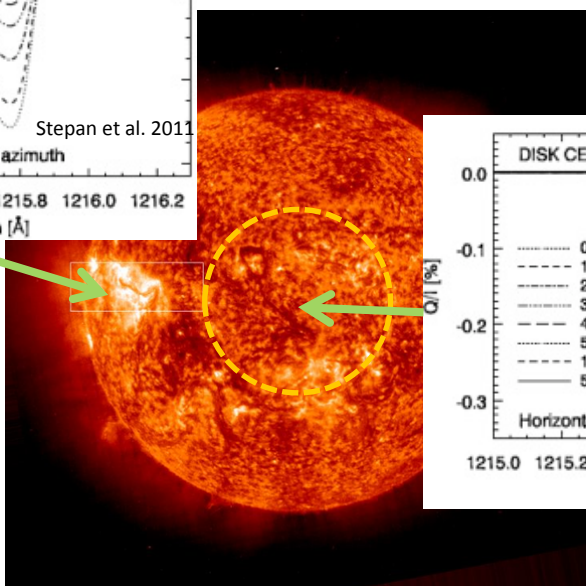
29

彩層磁場とLy α 線直線偏光プロファイル (理論からの予想)

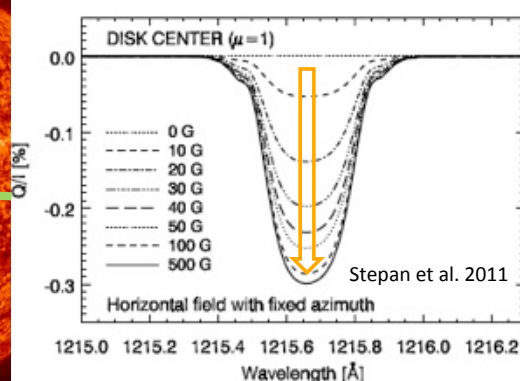
高精度偏光観測で直線偏光成分が検出されれば彩層上部での磁場を直接導出できる



縁近傍
($\mu = \cos\phi = 0.3$)



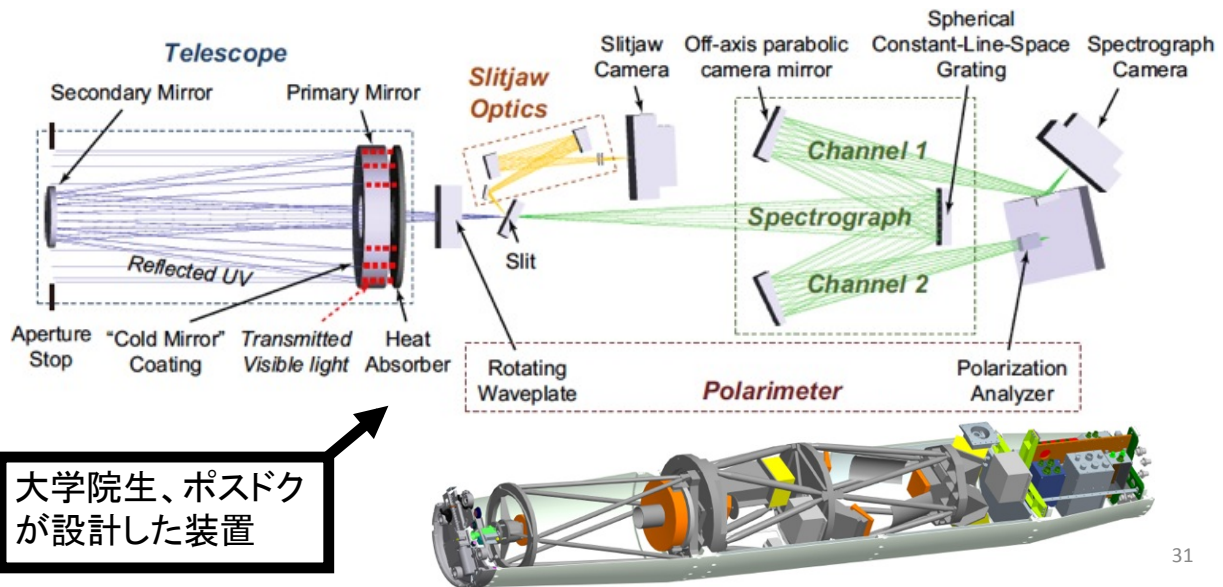
中央付近
($\mu = \cos\phi = 1.0$)



30

CLASPロケット実験計画

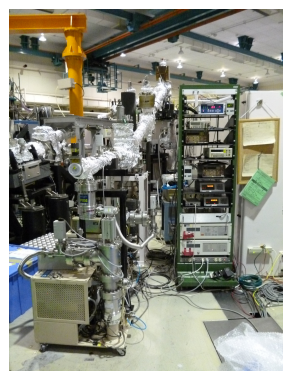
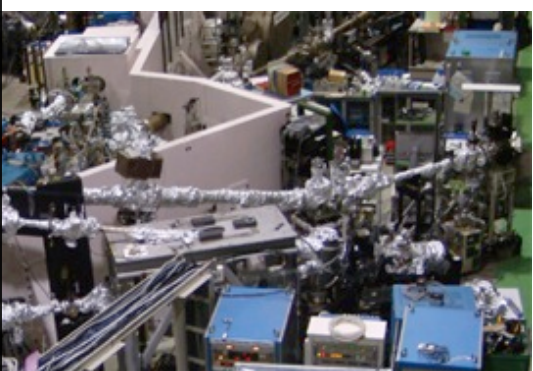
- 2009年より基礎実験・概念設計を進め、2012年5月にNASAへ提案、11月に採択。2015年打ち上げを目標に準備中。
- **ポスドク、大学院生が中心となって**設計や開発が進行
- **打ち上げ前までに大学院に入る人、一緒にやりませんか？**



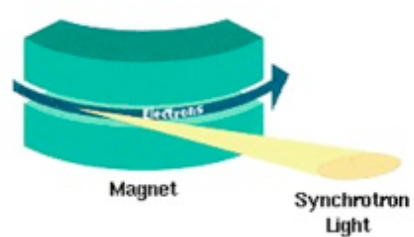
大学院生、ポスドク
が設計した装置

UVSORで開発品の測定を実施

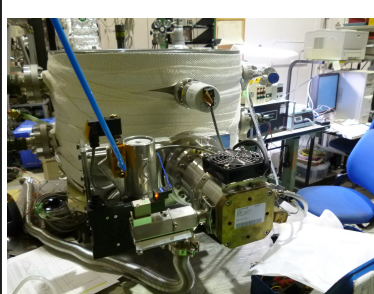
UVSOR: 分子科学研究所シンクロトン放射光施設



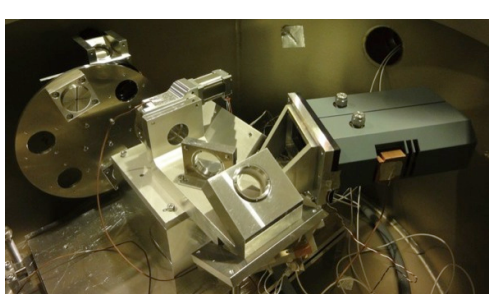
UVSOR BL-7B



円形加速器に高速電子を蓄積。接線方向に連続光が放射。

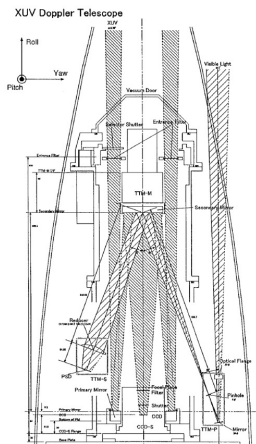


試験用真空槽



1/2波長板と偏光素子の測定

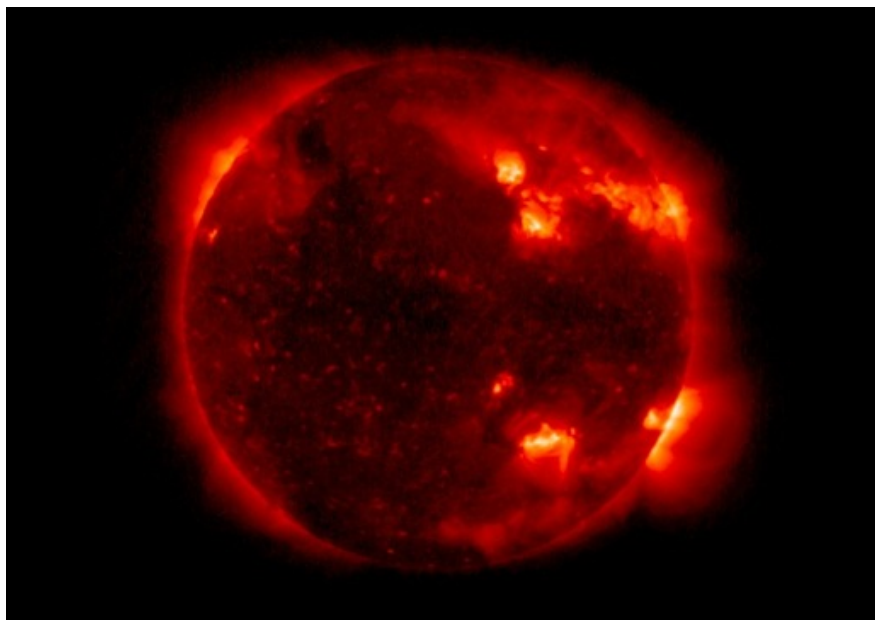
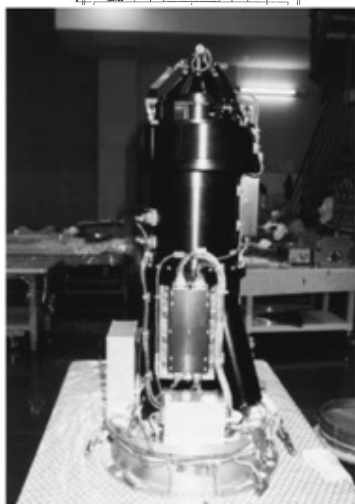
シンクロトン光を使用してCLASP用に開発した光学要素の性能試験を実施



15年前に国内で実施した XDTロケット観測実験

1998年打ち上げ
ISAS S520-22CN rocket

日本で開発した本格的な太陽観測用多層膜望遠鏡



国立天文台の太陽研究スタッフ

- 太陽天体プラズマ研究部 (三鷹)
 - ひので科学プロジェクト
准教授(末松, 関井), 助教(勝川, 久保, 石川R)
研究員(加藤, 西塚, Antolin(9月より), 石川S)
 - SOLAR-C準備室
教授(渡邊), 准教授(原), 助教(鹿野), 研究技師(坂東)
 - 太陽観測所
教授(桜井), 准教授(花岡), 研究員(大辻)
- 電波研究部(野辺山)
 - 野辺山太陽電波観測所
教授(柴崎), 助教(下条:三鷹勤務)

このほかに、毎年数名の著名な外国人客員教授が三鷹に滞在

国立天文台スタッフによる 大学院教育

国立天文台スタッフが関わる大学院教育

- 総合研究大学院大学天文科学専攻
 - 原を除く国立天文台太陽研究スタッフが主指導教員となれる(一人の学生に対し、指導教員は主が1名、副が2名の3名)。
- 東京大学大学院理学系研究科天文学専攻
 - 原は兼任教員。指導教員となれる。

35

おわりに

- 天文学では新たな観測を通して新たな宇宙観が得られてきています。飛翔体を使った観測は観測環境として理想的。
- 私はSOALR-A打ち上げ1年前にその計画の存在を知り、この分野に入ってきました。
- ようこう、ひので衛星の打ち上げが成功し、得られたデータから新たなことをいくつも発見することができました。世界中の研究者と協力し、開発、研究を進めています。
- 現在SOLAR-C計画, CLASP計画の準備中
- みなさんの中から私たちと一緒に新規の太陽観測装置を開発し、研究をしていく方が出てくることを期待しています。

36