

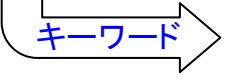
「ひので」の成果と将来展望
はじめに
－ 将来展望の検討にあたって －

原 弘久

国立天文台・SOLAR-C準備室

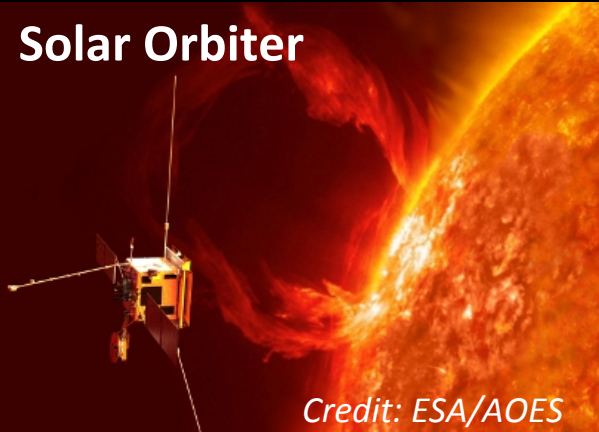
シンポジウム「スペース太陽物理学の将来展望」
2014年10月20～21日@ISAS

2020年代のスペース太陽観測

- 最近の太陽観測の大きな進展はスペース観測から得られている
 - 地上観測が可能な可視光観測においても、「ひので」で大きな進展： 高解像・磁場観測
- 国内スペース計画：
 - 観測ロケット → (たんせい)
 - ひのとり → ようこう → ひので (→ SOLAR-C)
- IRISの後、Solar Probe+、Solar Orbiterと続く
 - 提案を目指すSOLAR-Cはその先の2020年代

Coordinated Observations

Solar Orbiter



Credit: ESA/AOES

Solar Probe Plus

A NASA Mission to Touch the Sun

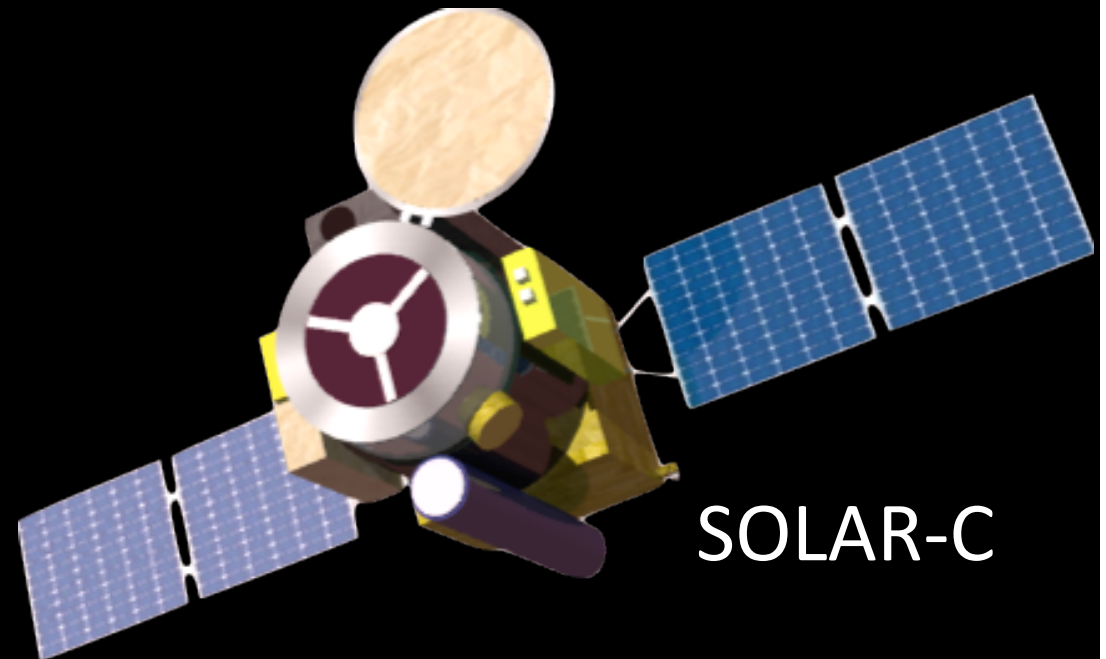
Credit: NASA/JHU APL



(Daniel K. Inouye Solar Telescope)
DKIST



Solar Dynamic Observatory
or a mission of full-disk observations



SOLAR-C

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
- 多彩な表面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

今後20年で取り組む課題

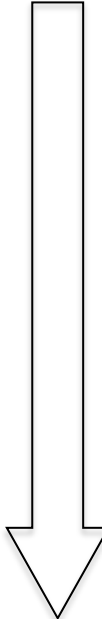
- 2つの方向性を SOLAR-C WG で検討（検討初期）
- 高解像度分光・偏光分光観測による太陽面磁気活動現象の解明
 - 太陽面に自発的に形成される微小スケール磁気構造とそれが引き起こすダイナミクスが対象
 - SOLAR-C の目指すサイエンス
- 内部流速場・対流構造と磁気構造の観測から太陽ダイナモ機構の理解へ
 - 黄道面離脱軌道から極領域を含む新たな視点
 - SOLAR-D の目指すサイエンス
- それぞれのケースの検討をWGの中間報告書としてまとめた(2011年春)。ともに 中型衛星規模 を想定。

SOLAR-C

- 現状の計画案はこの後に説明
- 戦略的中型衛星として2015年2月頃JAXAへ提案
 - 2014年12月下旬に戦略型中型衛星の提案機会(AO)がJAXAよりアナウンス予定(確定情報)
 - 国内他分野との競争に勝って初めて採択への道が拓ける
 - 日本一国では実現不能
 - 欧州・米国との国際協力で実現を目指す
 - 海外でも提案が同時に通る必要性
- 提案採択へのキーワード:
 - 解くべきサイエンス課題の明確さ
 - 課題解決へのアプローチの妥当性
 - 計画の確実さ

本シンポジウムの獲得目標

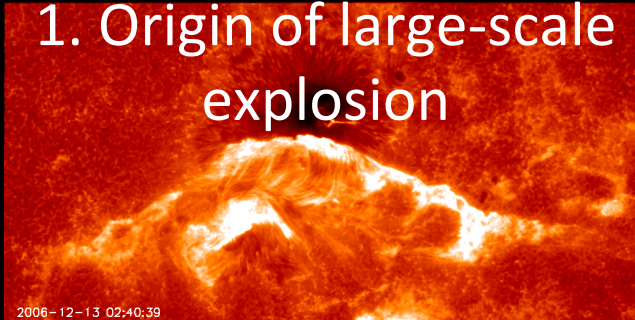
- コミュニティとして計画を推進する意識の共有
- コミュニティによるSC提案書科学内容の吟味
 - 科学課題・解決手法は適切に設定されているか？

- 
- 実施時に課題設定が解決済みになることはないか？
 - 設定された課題の優先度は適切か？
 - 課題解決のための物理量は何か・必要な精度は？
 - 提案される観測装置の波長選択・スペックは適切か？
 - スペース観測の必要性はあるのか？
 - 提案までに既存データで確認すべきことは何か？
- など

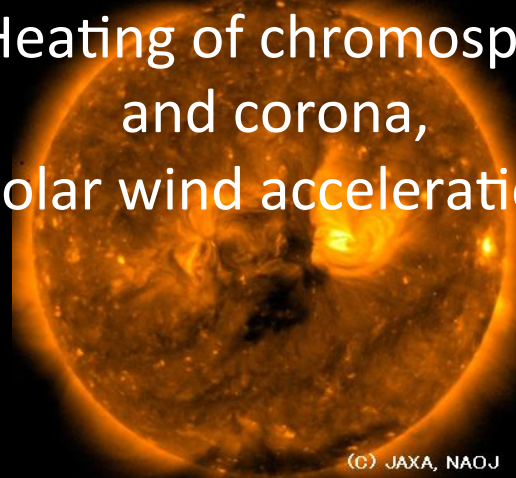
ミッション提案書・要求書への議論の反映

Basic Problems in Helio-Physics

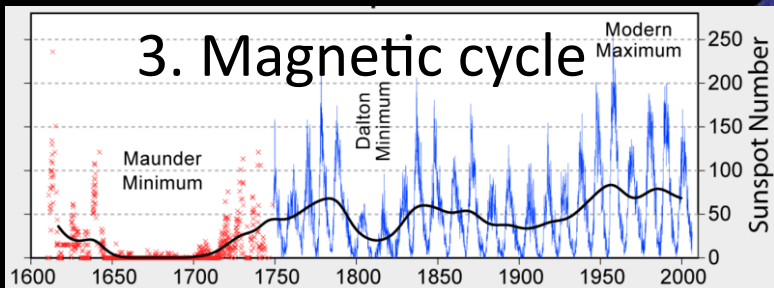
1. Origin of large-scale
explosion



2. Heating of chromosphere
and corona,
Solar wind acceleration



3. Magnetic cycle



SOLAR-C



Planned satellite
Solar observatory
prepared by JAXA
SOLAR-C W.G.

First determines 3D magnetic structures
from unprecedented observations for
elucidating basic problems in Helio-Phys.

Keywords:

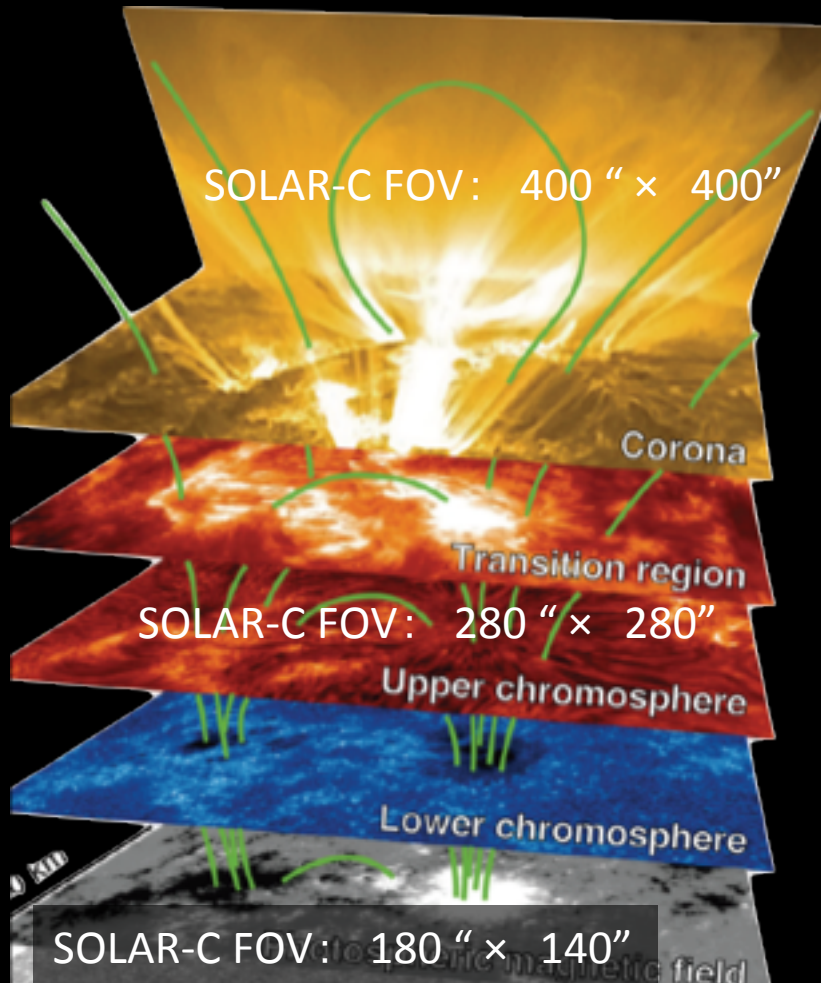
- Chromospheric B measurements
- $0.1'' - 0.3''$ spatial resolution ($0.1'' = 70$ km)
- ~ 1 s high-cadence observations
- high resolution spectroscopy

Science Objectives

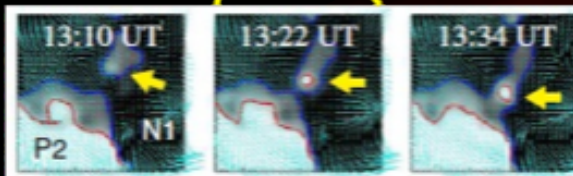
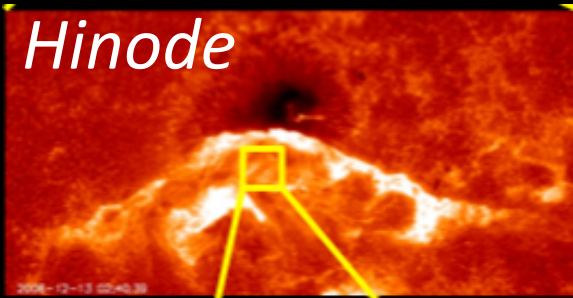
Observations of All from photosphere to corona seamlessly as a system

SOLAR-C will determine

- Physical origin of explosions that drive short-time geo-space variability (space weather)
- Mechanisms responsible for
 - heating and dynamics of chromosphere & corona
 - acceleration of solar wind
- Fine-scale magnetism and associated solar spectral irradiance (space climate)
- Fundamental physical processes
 - Magnetic reconnection, MHD waves, shocks, etc.

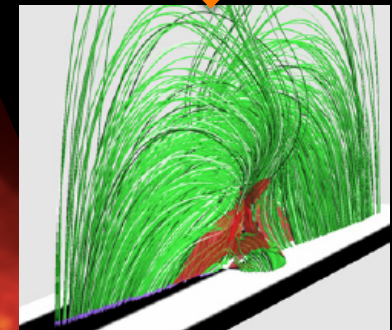
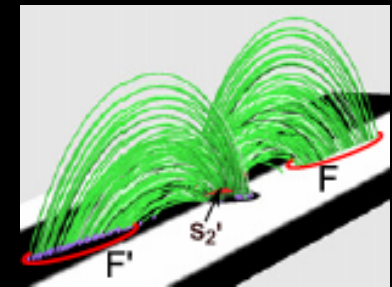


Origin of Explosions & Eruptions: understanding toward Space Weather prediction by magnetic fields measurements in Chromosphere

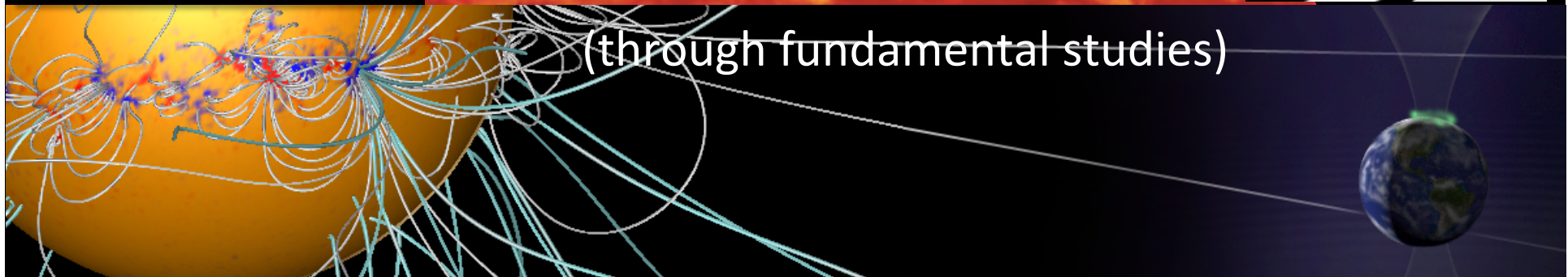


Emergence of a small bipole

- Visualize energy storage in the corona
- Detect a chromospheric structure responsible for triggering eruptions
- Construct a model for space weather prediction



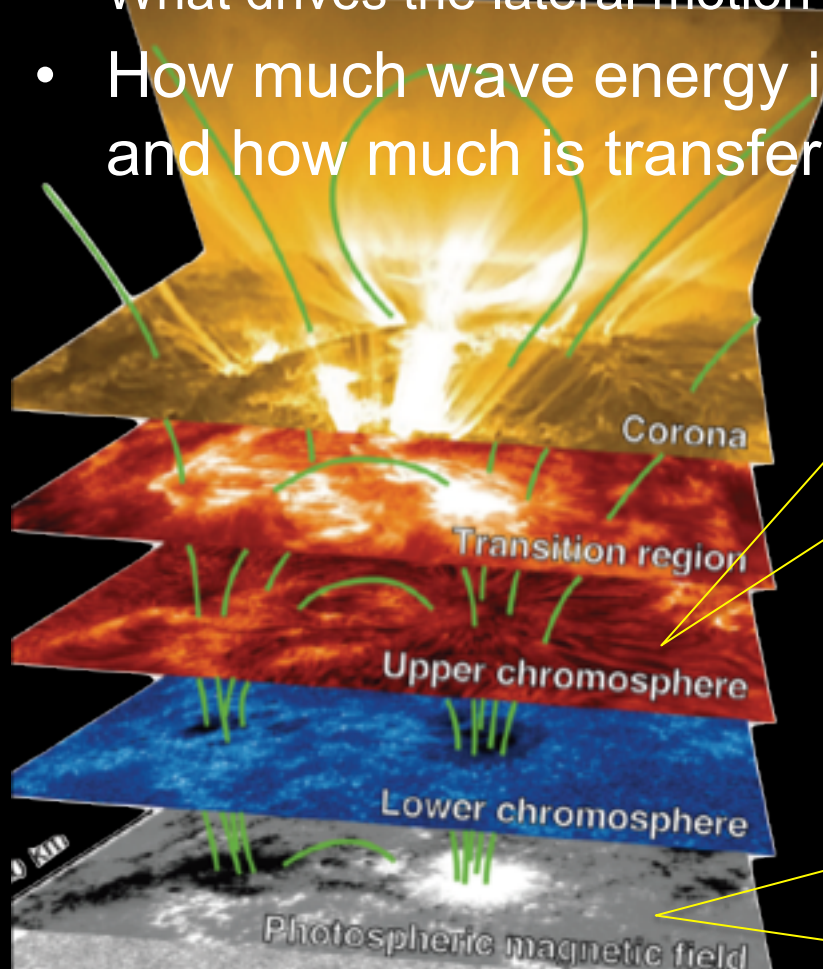
(through fundamental studies)



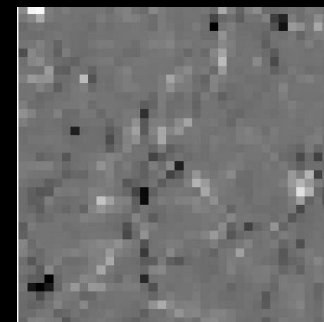
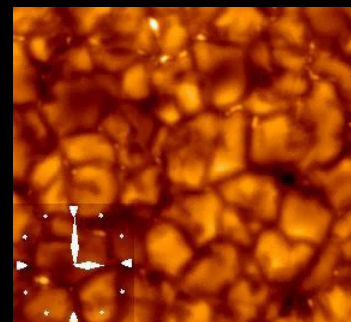
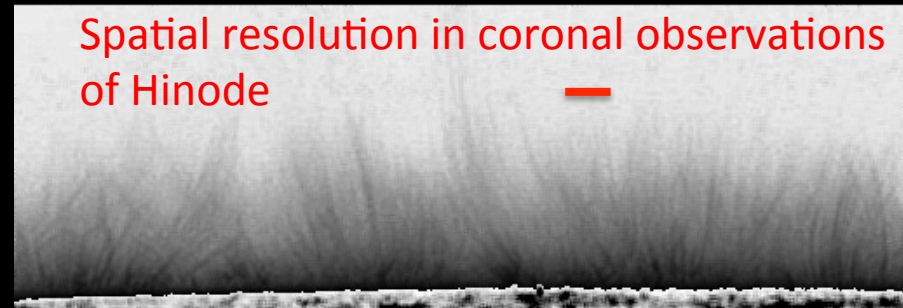
Causal linkage in Solar Atmosphere

Observations of All from photosphere to corona seamlessly

- Relationship between thermal and magnetic structures?
- What drives the lateral motion in the chromosphere? (Alfvén wave)
- How much wave energy is dissipated in the chromosphere and how much is transferred to the corona?



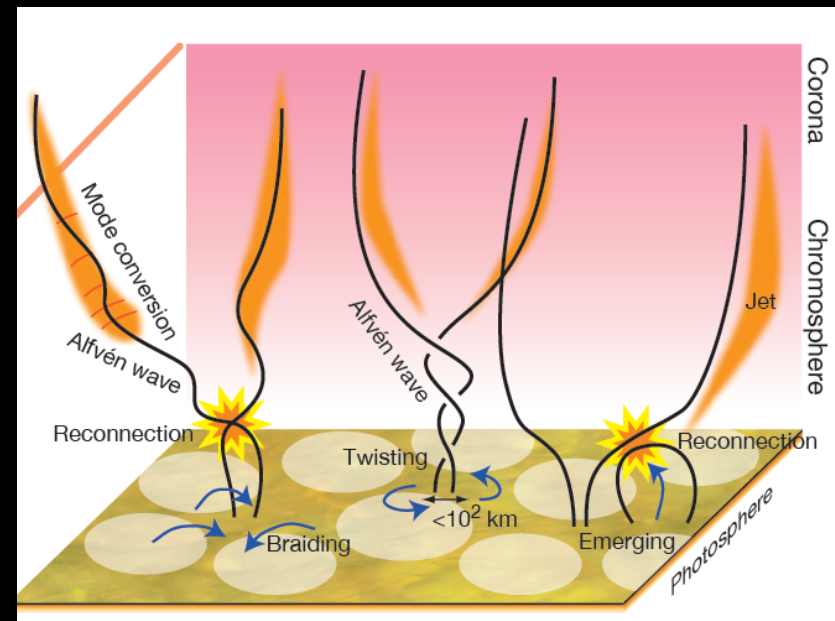
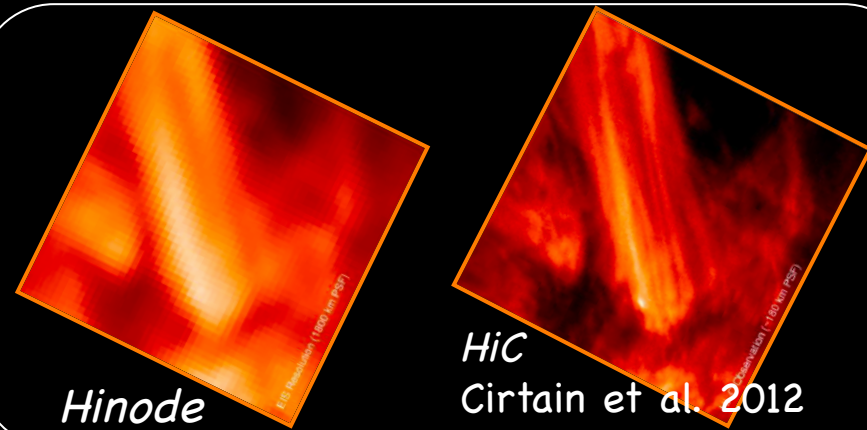
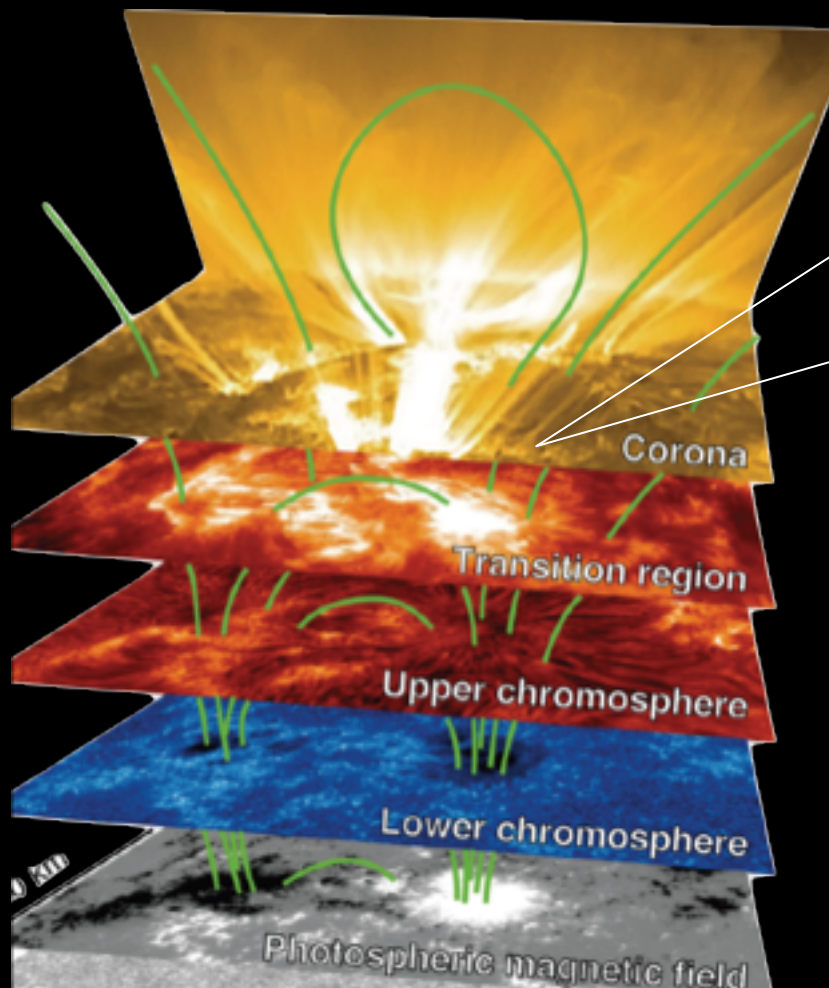
Spatial resolution in coronal observations of Hinode



Causal linkage in Solar Atmosphere

Observations of All from photosphere to corona seamlessly

Can nanoflare hypothesis be quantified?



kG Flux Tube (FT) & Magneto-convection

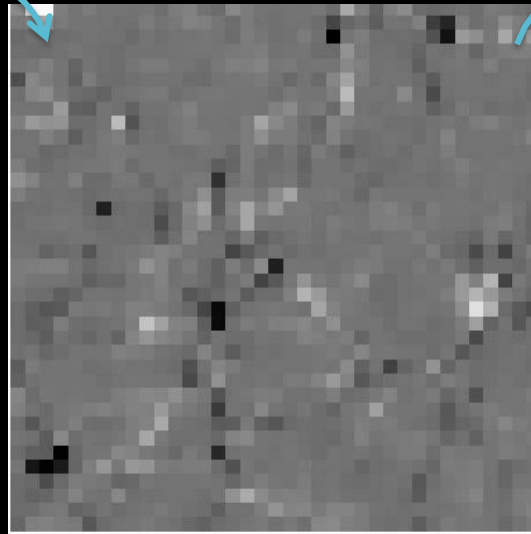
~ photon mean free path length of photosphere

1" resolution (Ground)



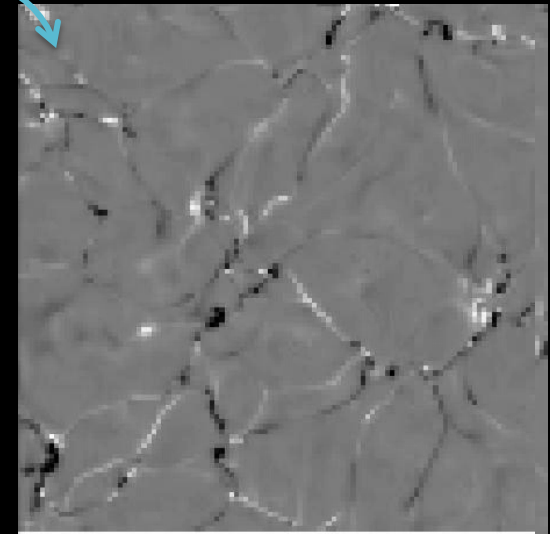
- Existence of FT predicted from polarimetric obs.

0.3" resolution (Hinode)



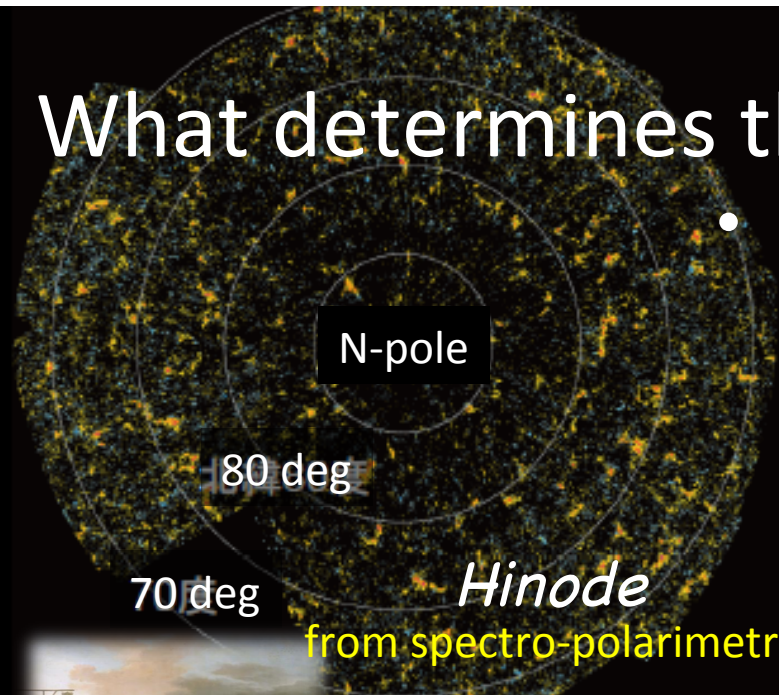
- Existence of FT Proven
- Motion of FT tracked
- **80% FT not resolved**

0.1" resolution (SOLAR-C)

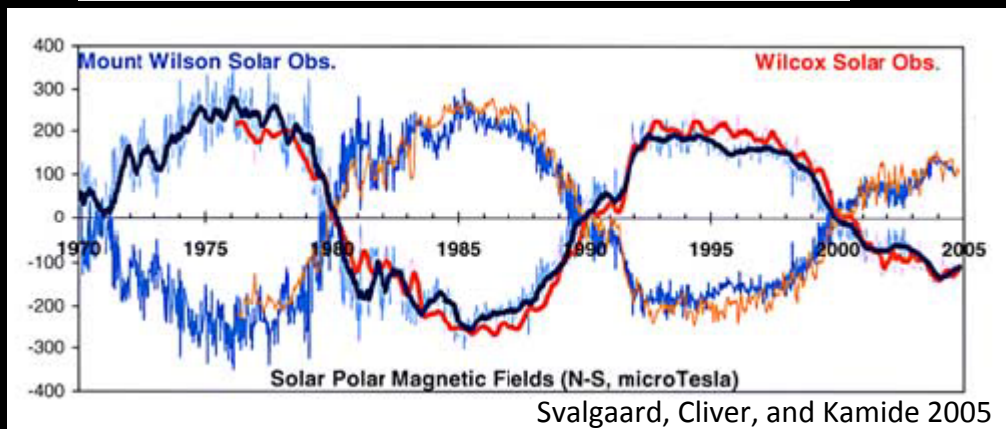
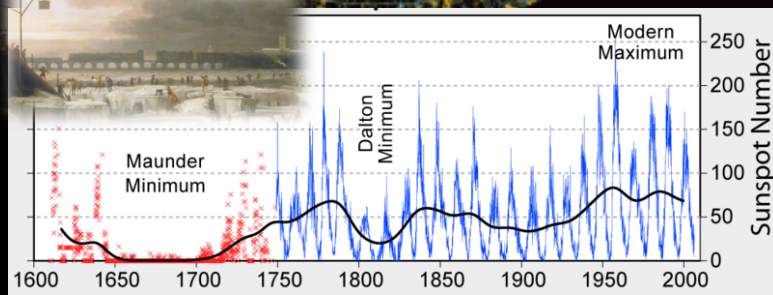


- **kG FT mostly resolved**
- Huge increase in encounter of opposite polarities
- small-scale vortex motions

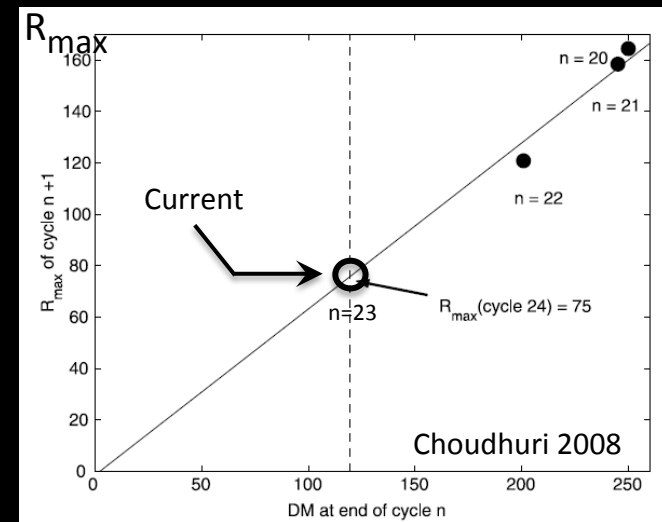
What determines the polar magnetic fields?



- Polar magnetic fields
 - A good indicator to predict solar activity of the next activity cycle
 - SOLAR-C high-res. magnetograms from polarimeter
 - to understand the mag. flux budget
 - to monitor the details near the poles in a low activity phase.



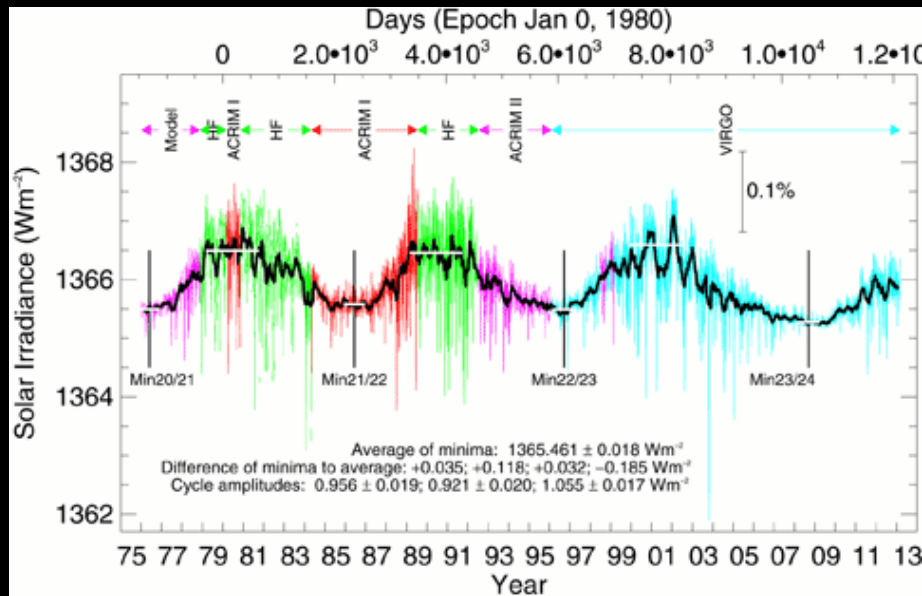
Max. sunspot number of cycle N+1



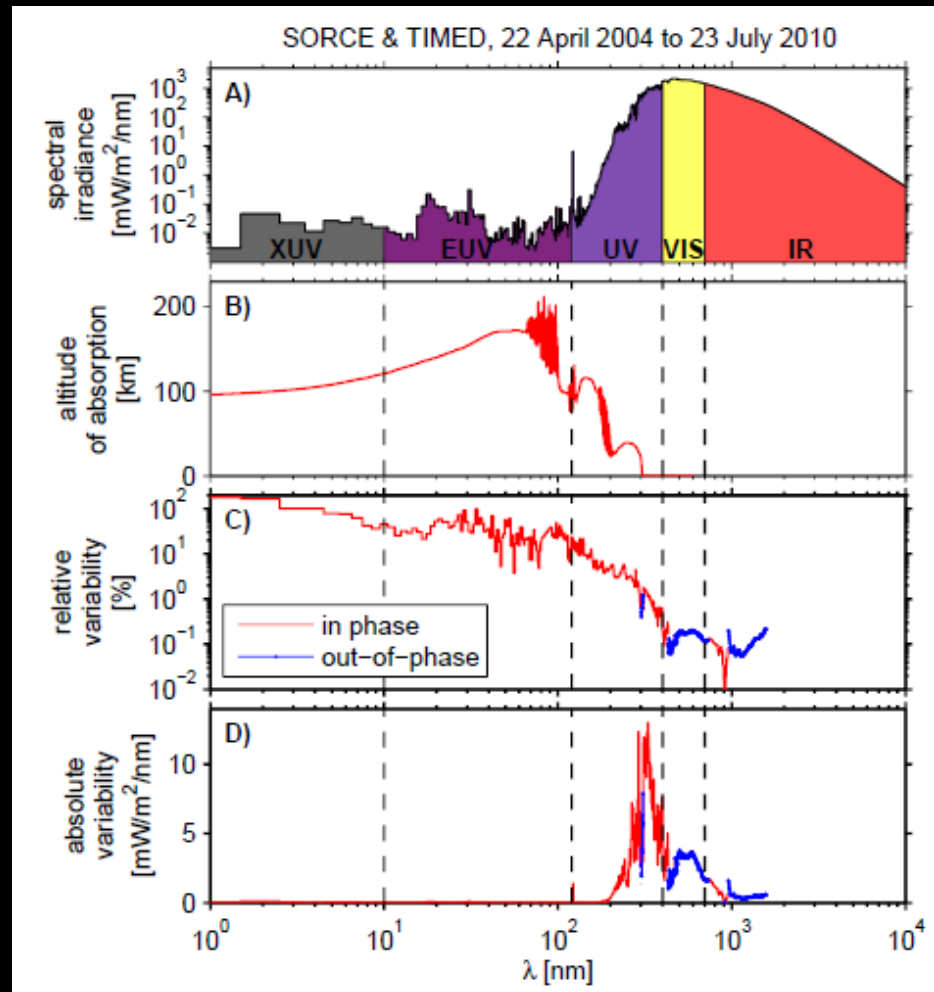
Dipole moment from polar fields at solar min. N

Linkage between Sun and Earth in SSI from UV-band observations

Modeling spectral irradiance from small-scale magnetic structures



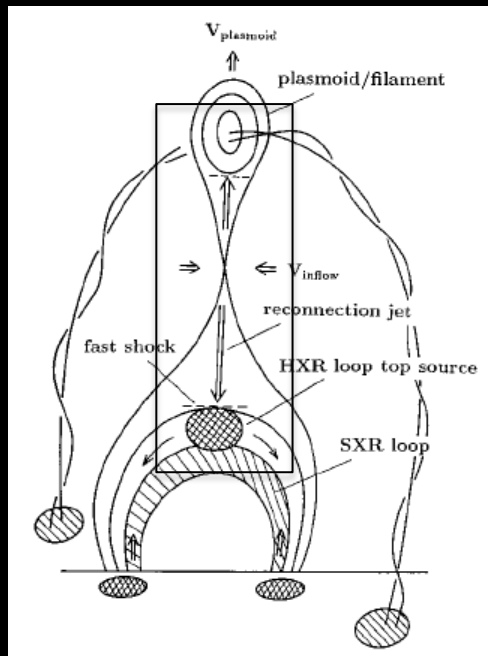
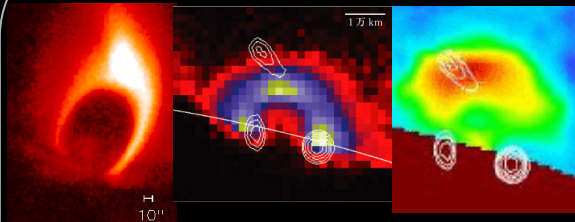
- What contributes to UV variability in Solar Spectral Irradiance that may affect the Earth's climate?
- Can we model the solar spectral irradiance in Maunder minimum?



Magnetic Reconnection

Study of a Fundamental Physical Process

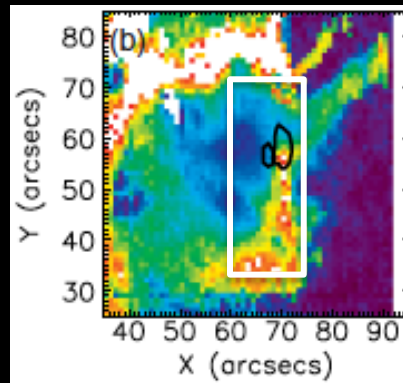
Yohkoh



Shibata et al. (1995)

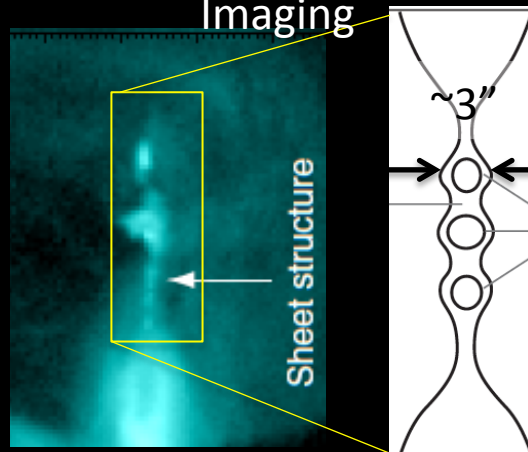
Hinode & SDO

Spectroscopy



Hara et al. (2011)

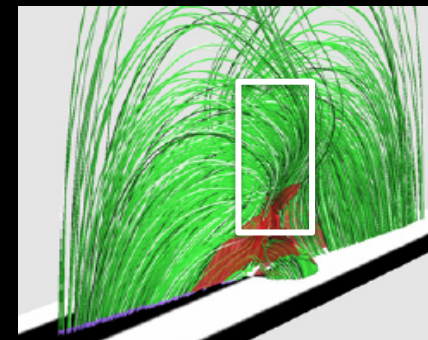
Imaging



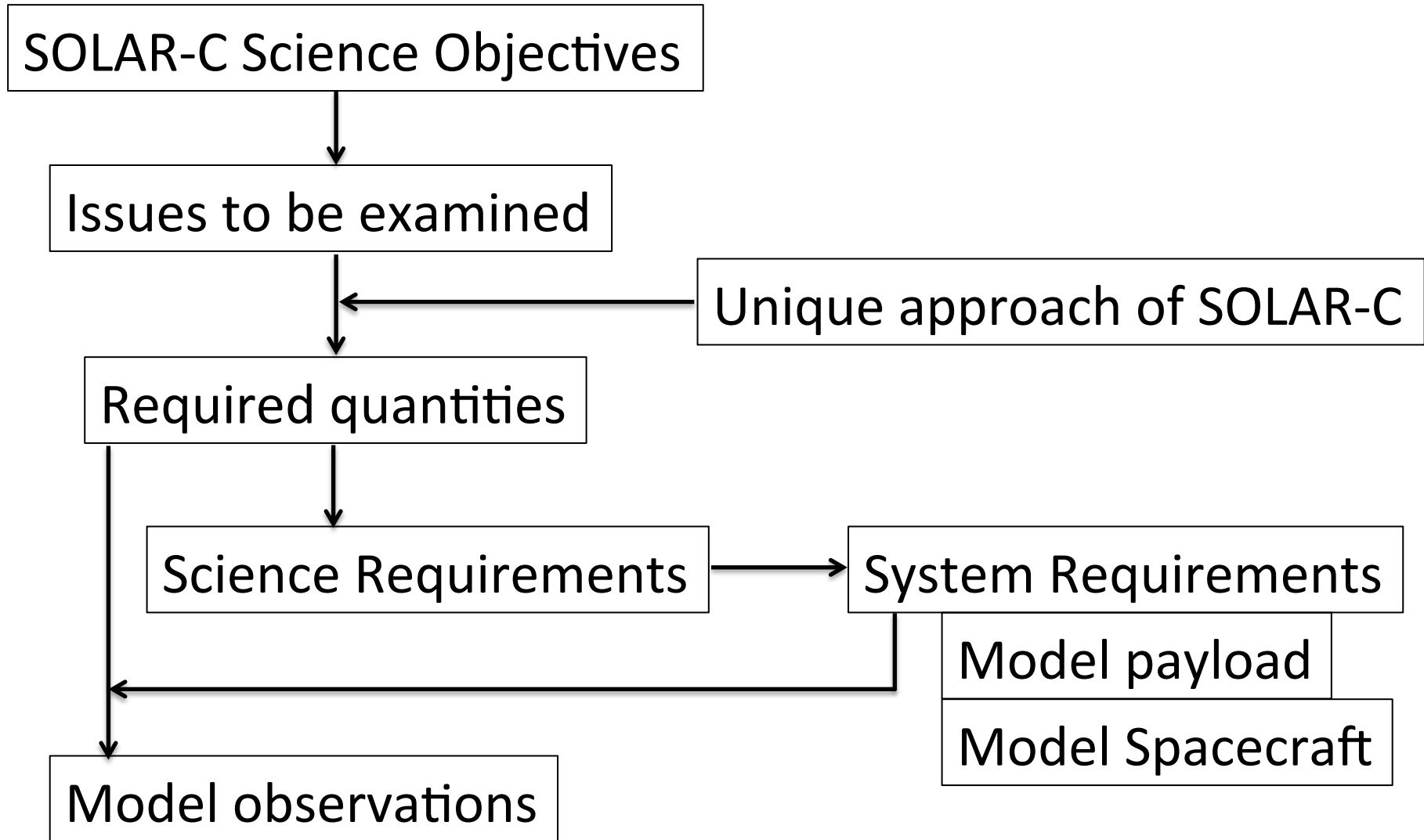
Takasao et al. (2012)

SOLAR-C

- ◆ High-resolution ($0.3''$) imaging & spectroscopy in chromosphere-corona
- ◆ Higher sensitivity ($> \times 10$) than *Hinode* in spectroscopy
- ◆ Growth of sheet structure by high-cadence ($> \times 5$) obs.
- ◆ MHD shock structure for heating outflows



From Objectives to Observations



Unique approach of SOLAR-C

SOLAR-C observes the solar atmosphere

[= photosphere – corona]

- by both imaging and spectroscopy
- High spatial resolution: 0.1'' – 0.3''
- High cadence: ~1 sec sampling
- Seamless coverage in spectroscopy without significant temperature gap from photosphere to corona
- Wide-field high-precision spectro-polarimetry in photosphere and chromosphere

Table 3.1 SOLAR-C 科学課題 I における具体的な課題設定

課題 I : 宇宙天気に影響を及ぼす太陽面爆発現象の発現機構の究明		
課題名	課題内容	具体的な達成課題
I-1	フレアや CME 領域の磁気エネルギー蓄積過程を測定すること。	光球磁場と彩層磁場からコロナに到達する電流構造を測定。
I-2	フレアや CME を引き起こすトリガー構造を特定すること。	周囲の磁場と相互作用する彩層微小磁気構造を観測。
I-3	系全体を不安定化して噴出を引き起こす条件を理解すること。	噴出前のコロナのトポロジーと電流系のダイナミックな変化を観測。
I-4	上記の 3 つの課題を理解し、測定データからフレアや CME の確率的予測を通して宇宙天気予報に寄与すること。 (I-1,-2,-3 の課題達成が前提)	上記 3 つの課題を達成し、測定データに基づいた爆発の確率的予測モデルを計算機上で実現。

Table 3.2 SOLAR-C 科学課題 II における具体的な課題設定

課題 II: 彩層・コロナの加熱機構と太陽風の形成機構の究明		
課題名	課題内容	具体的な達成課題
II-1	スピキュール*の形成機構を究明 (いわゆる彩層スピキュールのほか、ひので衛星で発見されたコロナ下部の高速運動成分も調査対象) *彩層の構成要素であるジェット状の構造	II-1-1: スピキュール足下での磁気トポロジーとダイナミックスを観測。
		II-1-2: スピキュール構造に沿ってスローモード MHD 波・torsional Alfvén wave の伝播を観測。
		II-1-3: スピキュールに関与する加熱過程を同定。衝撃波もしくは磁気リコネクションが有力候補とされている。
II-2	ナノフレア+仮説を定量化 +最大級フレアのエネルギー (10^{32} erg) のナノレベル (10^{23} erg) のエネルギーを解放する小爆発現象	II-2-1: 光球上の対流起源でコロナに生成される微小電流シート構造を観測。
		II-2-2: コロナ中のサブ秒角の構造とその時間発展を観測。
		II-2-3: 短時間で加熱に対して 10^6 – 10^7 K 範囲の広温度域に現れるプラズマの量 (DEM; differential emission measure) を測定。
II-3	コロナで観測される非熱的運動の起源を同定	サブ秒角のコロナ構造の運動を観測。

Table 3.2 SOLAR-C 科学課題 II における具体的な課題設定

課題 II: 彩層・コロナの加熱機構と太陽風の形成機構の究明		
課題名	課題内容	具体的な達成課題
II-3	コロナで観測される非熱的運動の起源を同定	サブ秒角のコロナ構造の運動を観測。
II-4	太陽風発生源の磁気構造・運動を究明	II-4-1: 太陽風の発生領域であるコロナホール内の磁気構造を決定。
		II-4-2: 高速太陽風の発生源を同定(plume/inter-plume/jet)
		II-4-3: 高速風の加速を担うとされる Alfvén 進行波の存在をコロナ中で確認し、そのエネルギーフラックスを評価。
		II-4-4: 太陽風発生源の元素存在比を測定。

Table 3.3 SOLAR-C 科学課題 III における具体的な課題設定

課題 III: 宇宙気候に寄与する太陽周期活動および放射スペクトルの変動機構の解明		
課題名	課題内容	具体的な達成課題
III-1	次期活動周期の活動度を予測する指標として知られる極領域磁場の形成過程を理解すること。	微細構造を識別できる光球磁場観測から、光球面に対して水平方向・垂直方向の磁場の輸送過程を観測。
III-2	宇宙気候を決定するパラメータとなる太陽スペクトル放射モデル作成のため、11年周期内の変動幅の大きい UV 領域において、放射量を微細磁気構造との対応で調査すること。	地球の上層大気に影響を及ぼす 200–300 nm の波長域を含む紫外線-近赤外線域($0.2\mu\text{m} < \lambda < 1.1\mu\text{m}$)で、磁気大気構造からの放射量を測定。

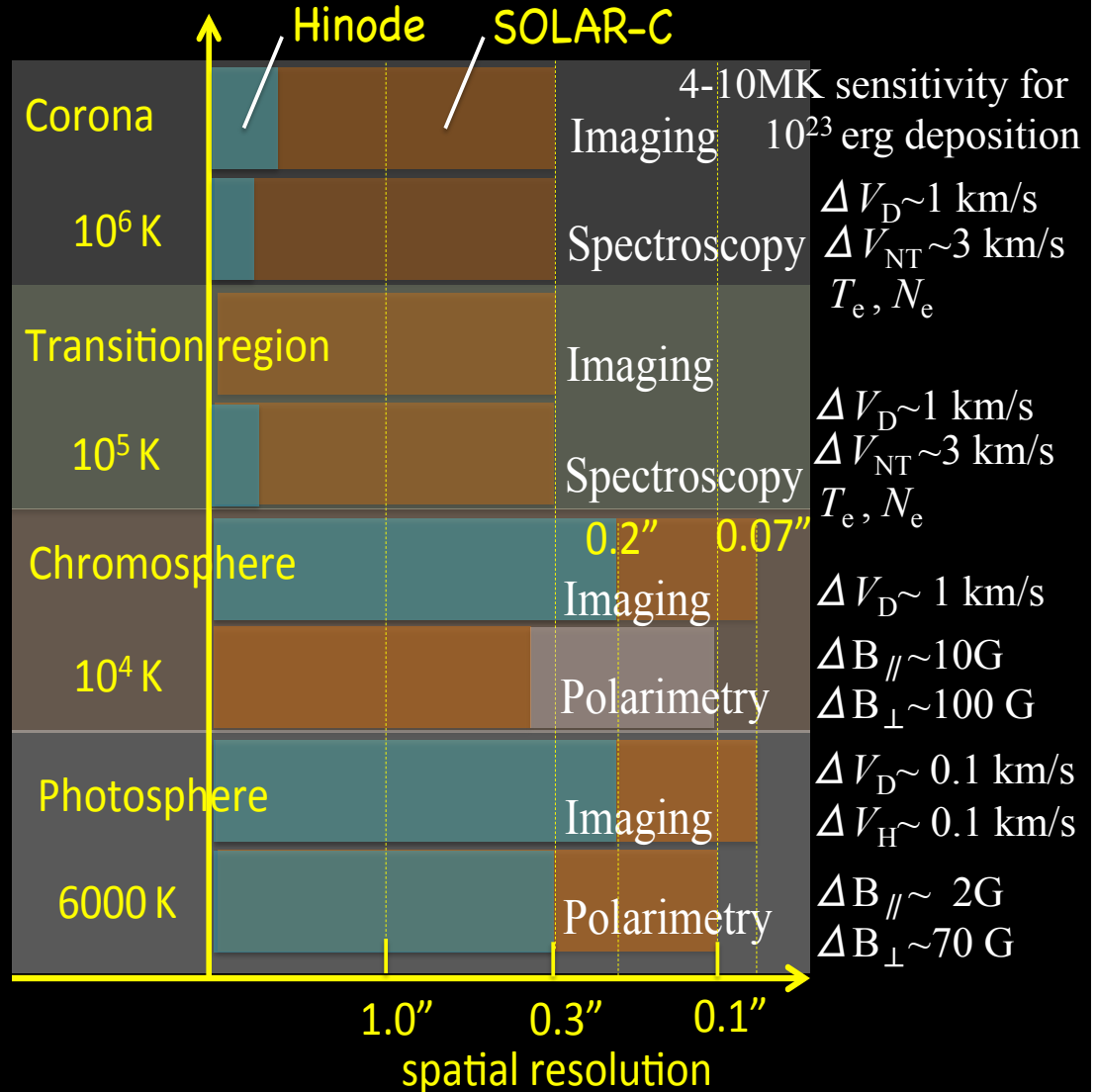
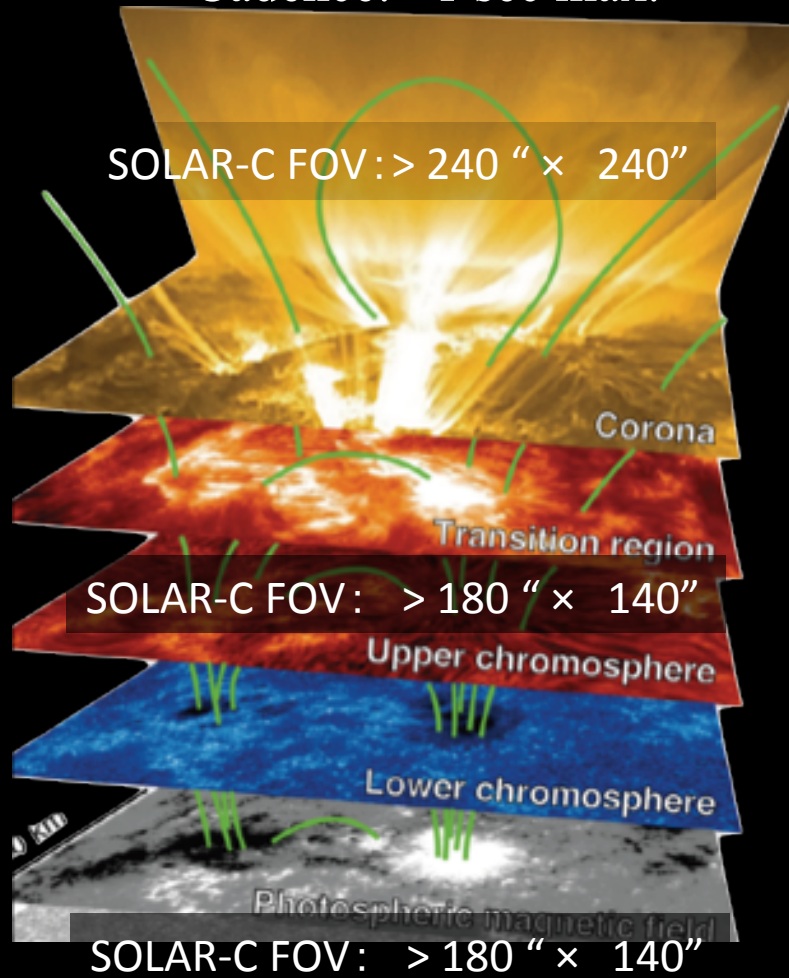
Table 3.4 SOLAR-C 科学課題 IV における具体的な課題設定

課題 IV: 高速磁気リコネクション発生領域での構造形成過程の究明		
課題名	課題内容	具体的な達成課題
IV-1	部分電離状態にある彩層における磁気リコネクション領域の磁気構造を解明。	IV-1-1: 彩層中の電流シート構造を磁場観測から捉えること。
		IV-1-2: 彩層中の電流シート内におけるプラズモイドの成長過程を観測。
IV-2	コロナにおける磁気リコネクション領域の磁気構造を解明。	IV-2-1: コロナ中の電流シート構造を磁場観測から捉えること・
		IV-2-2: コロナ中の電流シート内におけるプラズモイドの成長過程を観測。
		IV-2-3: コロナ中の電流シート構造近傍の衝撃波構造の存在について診断。

SOLAR-C Requirements

All atmospheric layers are observed simultaneously.

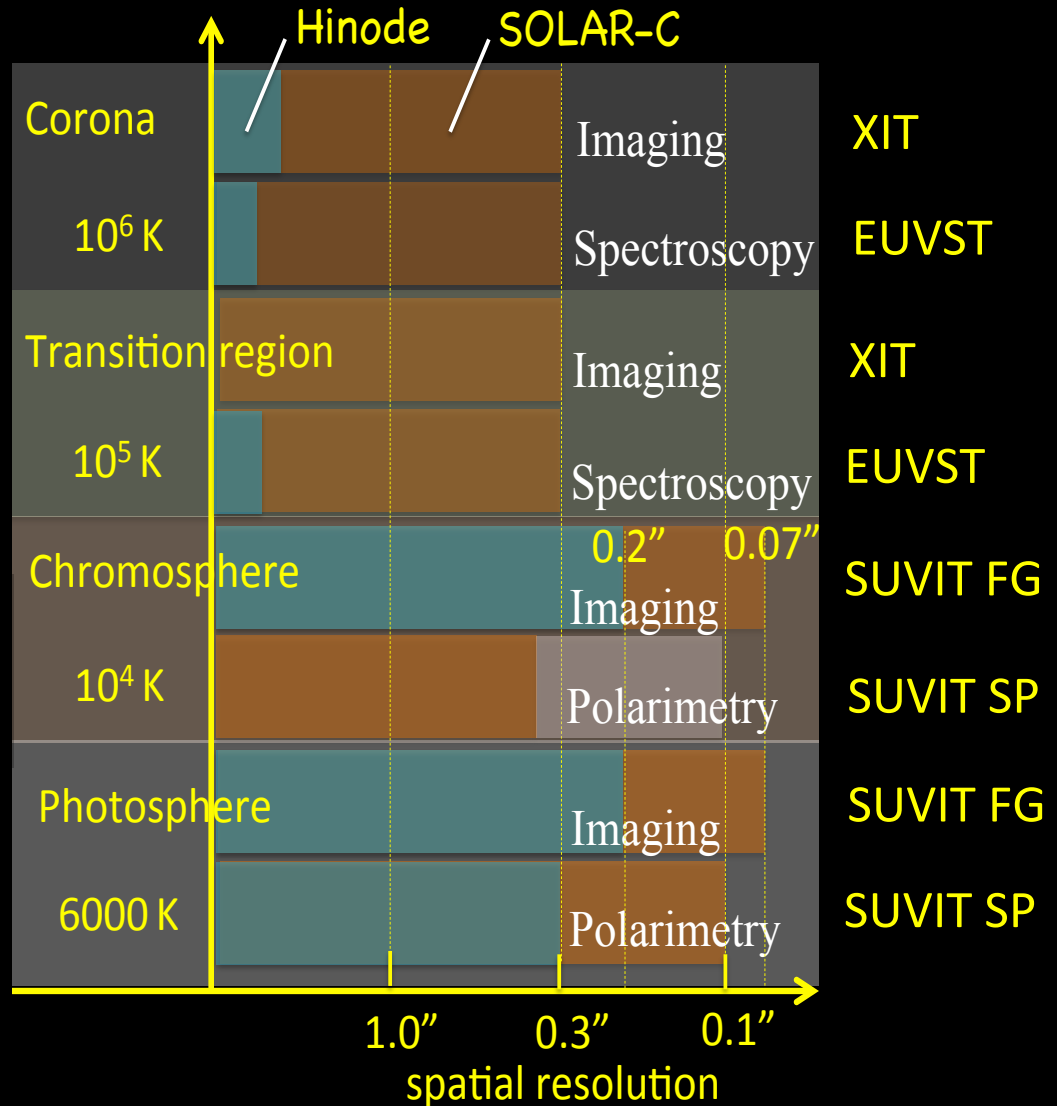
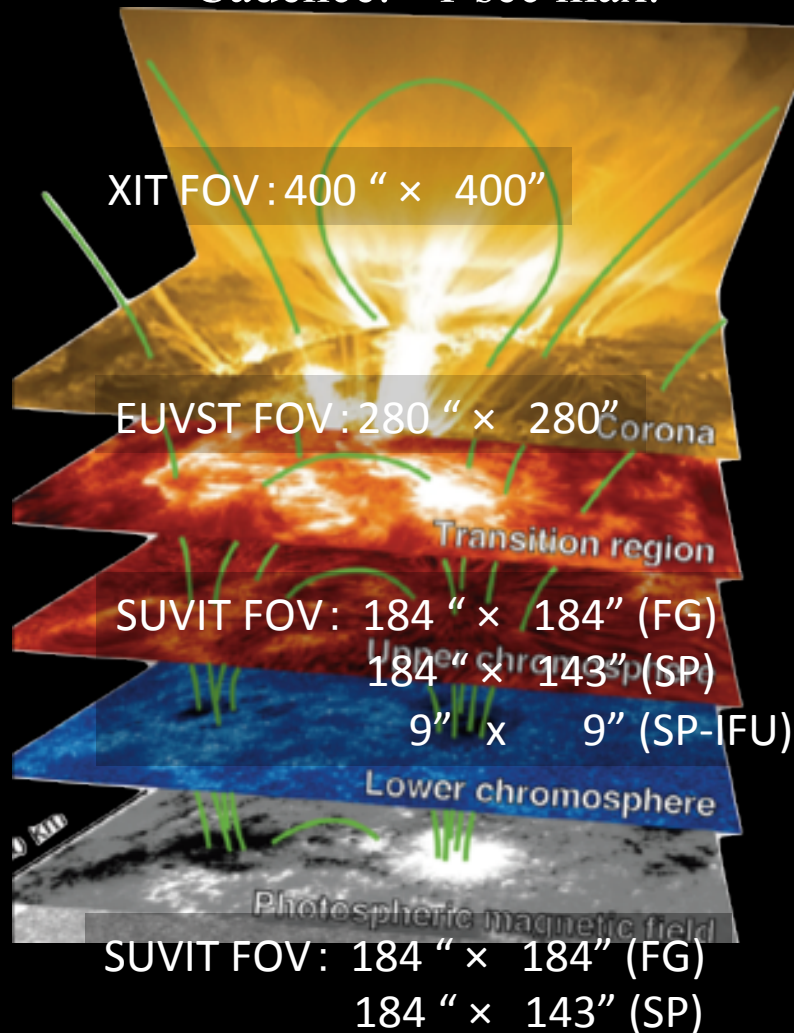
Cadence: ~1 sec max.



SOLAR-C Requirements

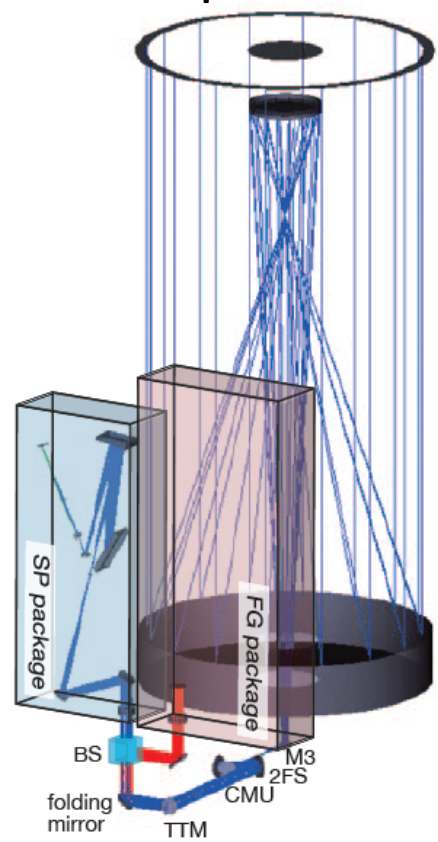
All atmospheric layers are observed simultaneously.

Cadence: ~1 sec max.

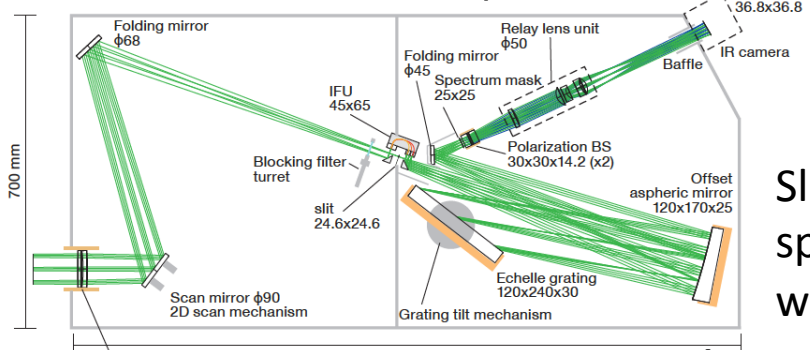
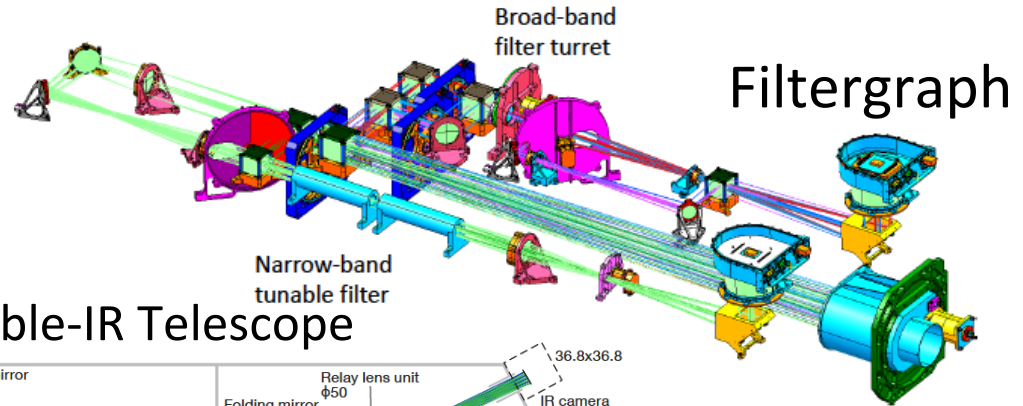


1.4m diameter telescope

SOLAR-C payload

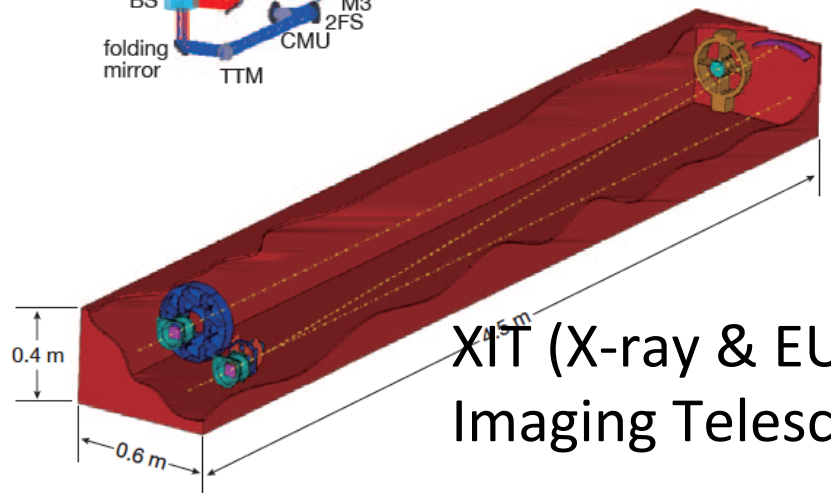


SUVIT Solar UV-Visible-IR Telescope

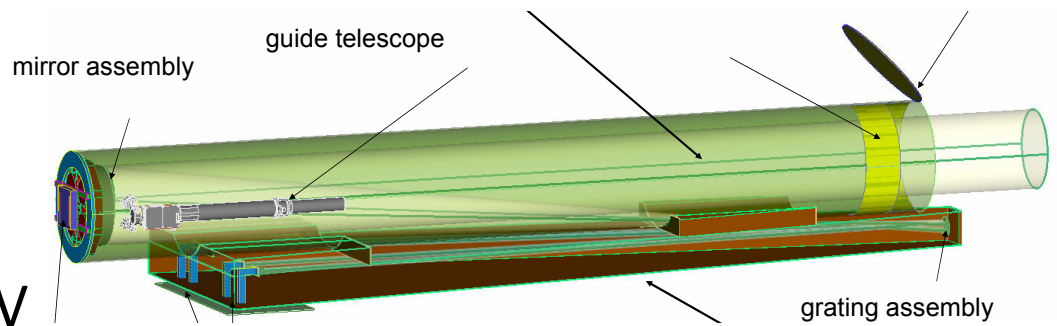


Slit scanning spectro-polarimeter with IFU

Spectro-polarimeter

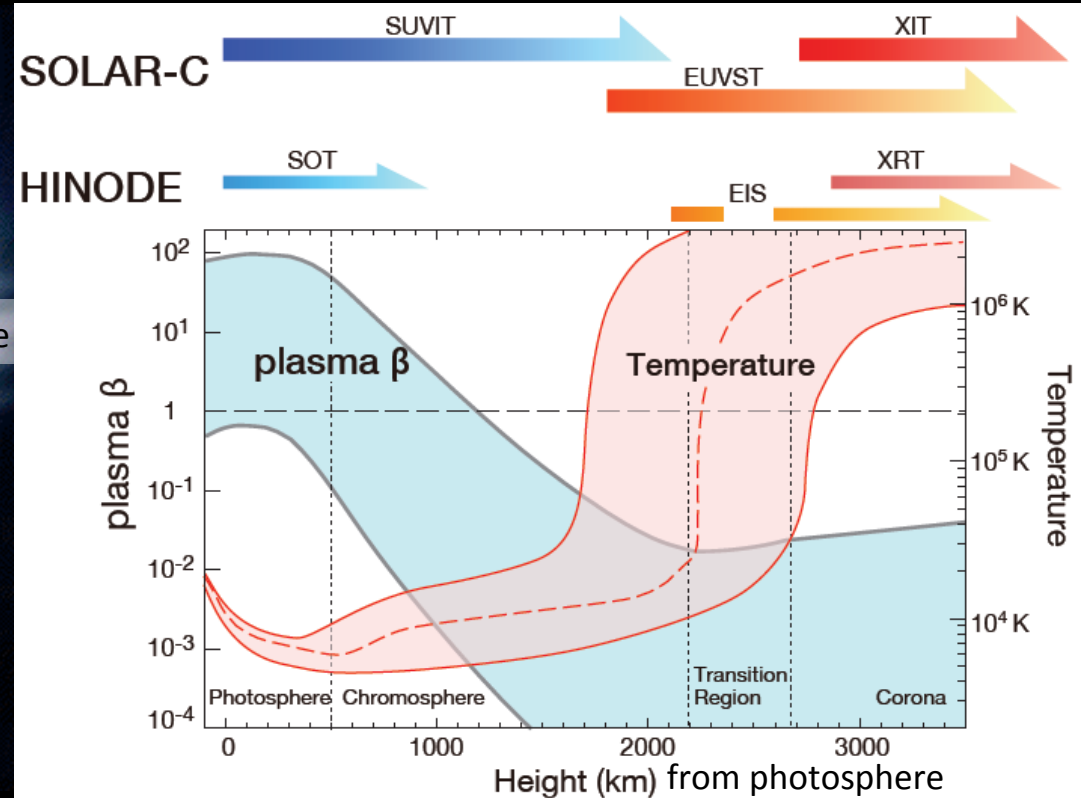
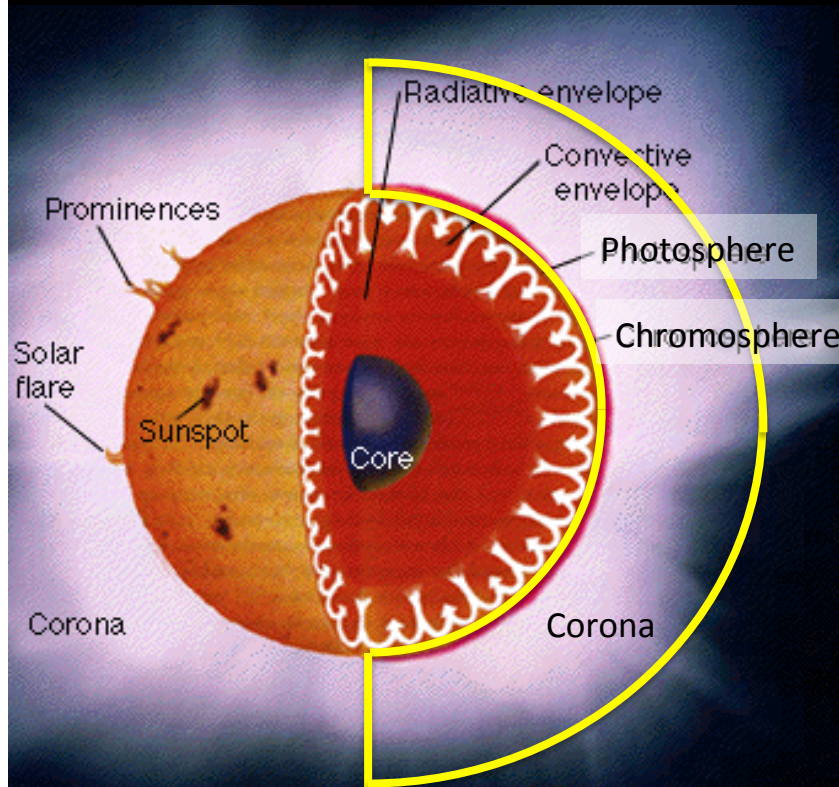


XIT (X-ray & EUV Imaging Telescope)

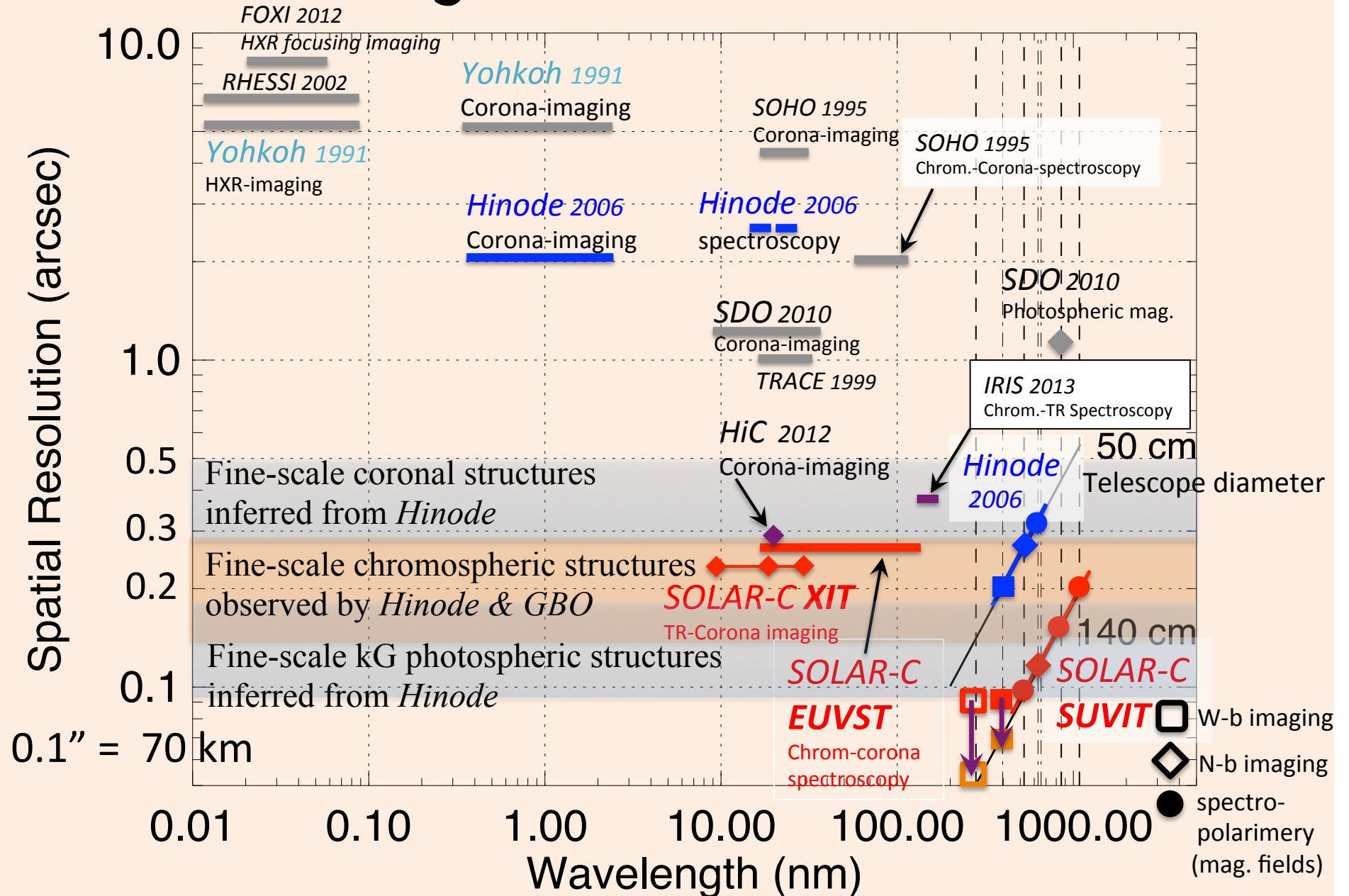


EUVST (EUV Spectrograph)

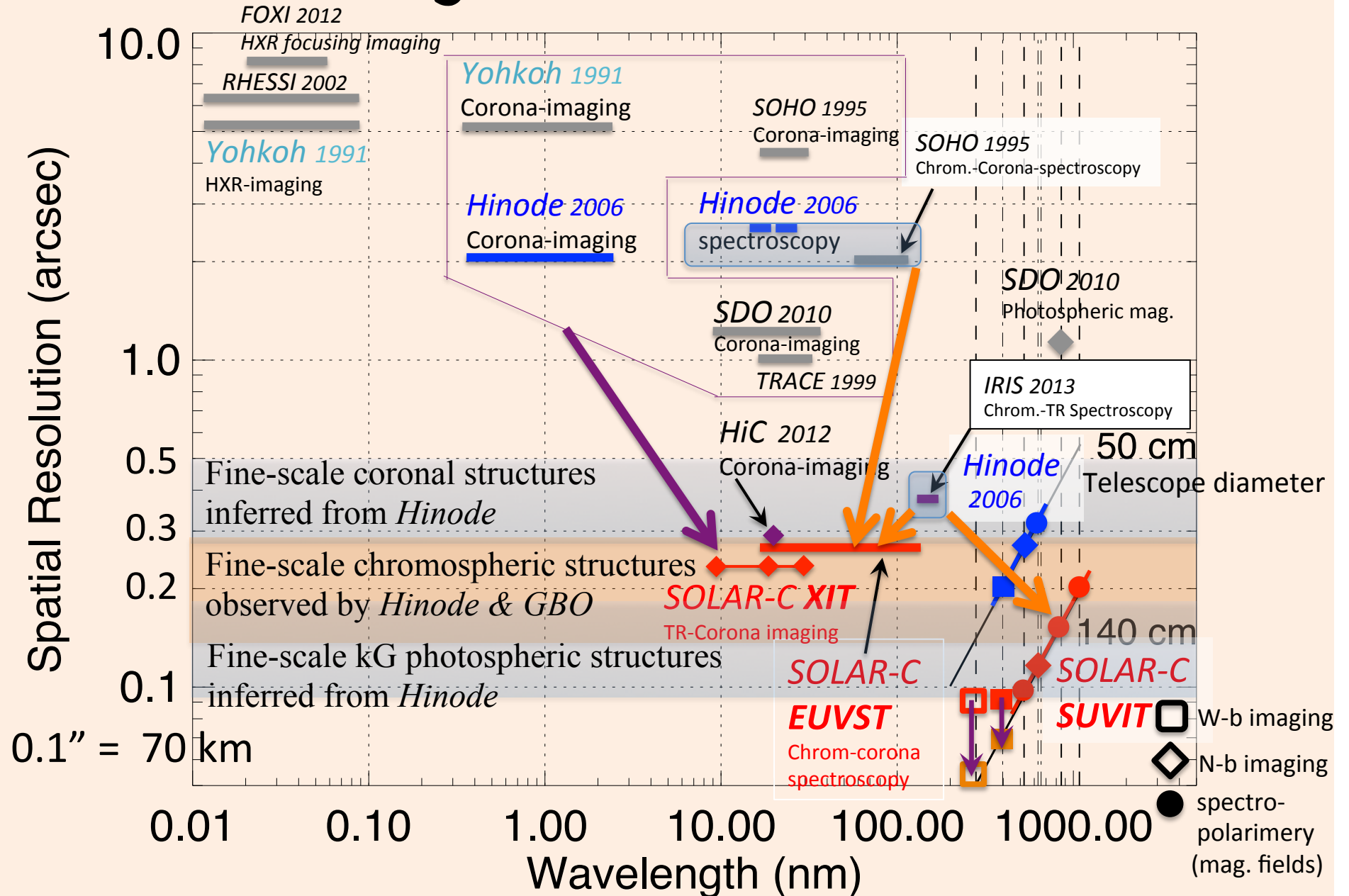
Regions to be observed by SOLAR-C



SOLAR-C High-resolution Observations

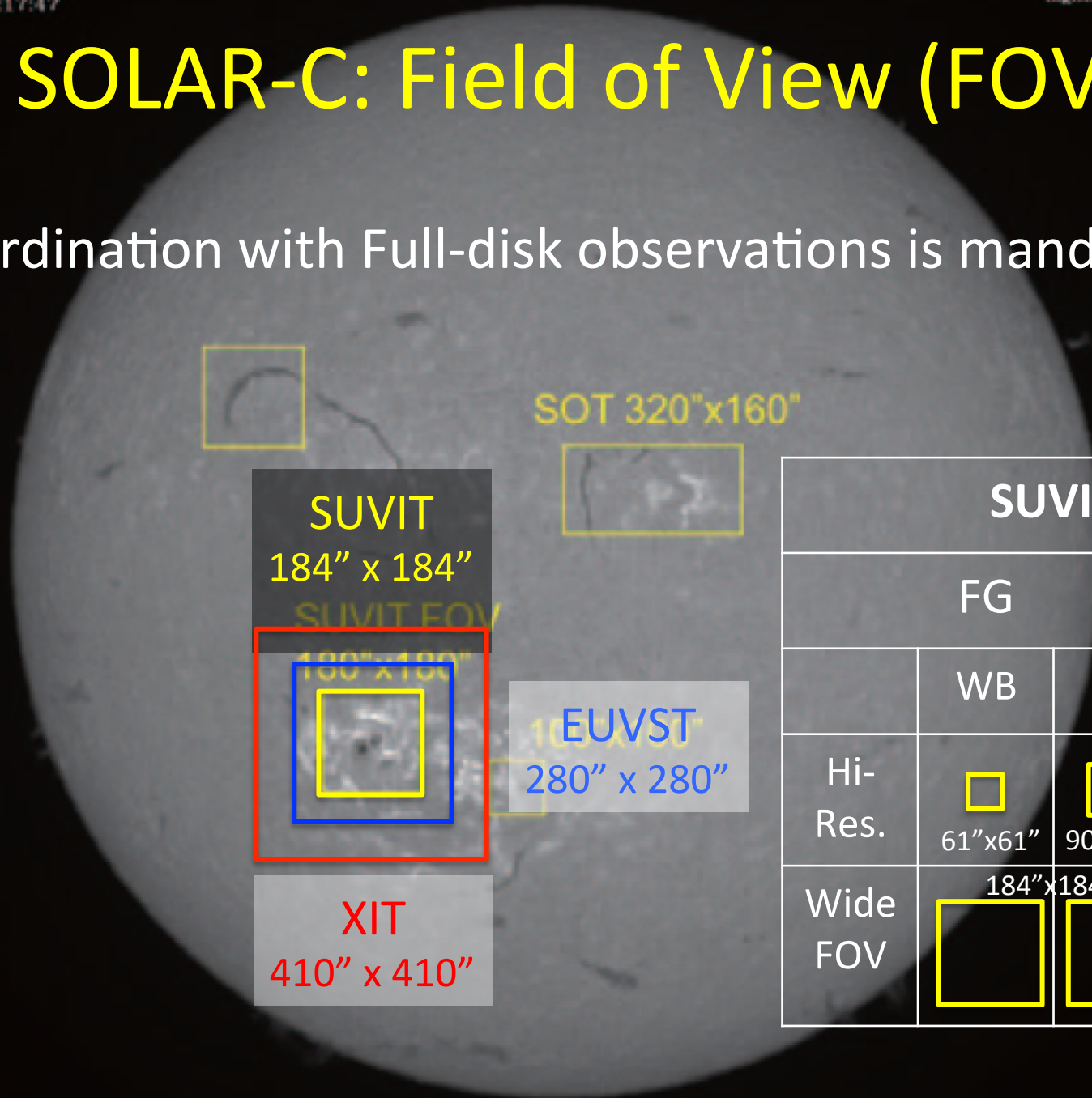




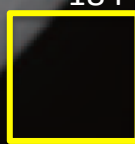


SOLAR-C High-resolution Observations



SOLAR-C: Field of View (FOV)

Coordination with Full-disk observations is mandatory!

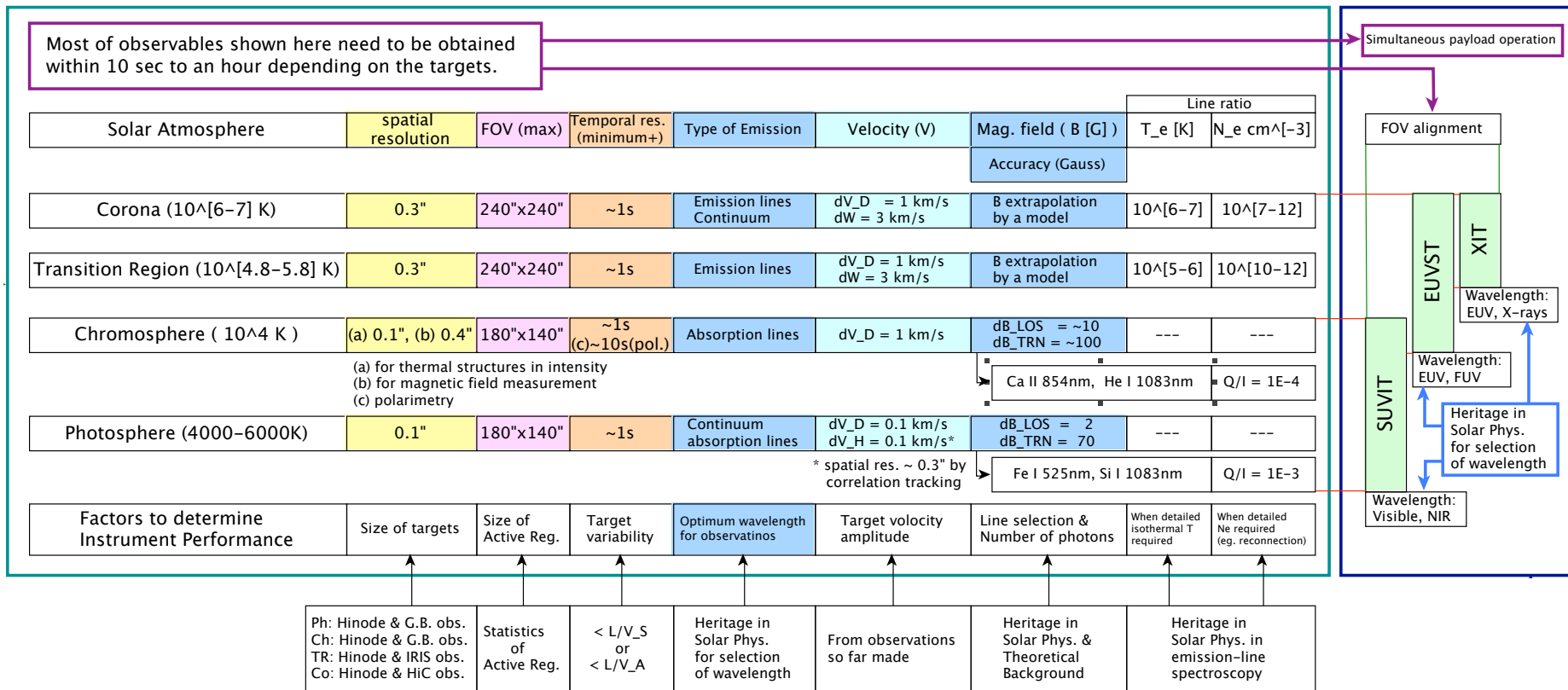


SUVIT			
	FG		SP
	WB	NB	
Hi-Res.	 61"x61"	 90"x90"	
Wide FOV	 184"x184"	 184"x184"	 184"x143"

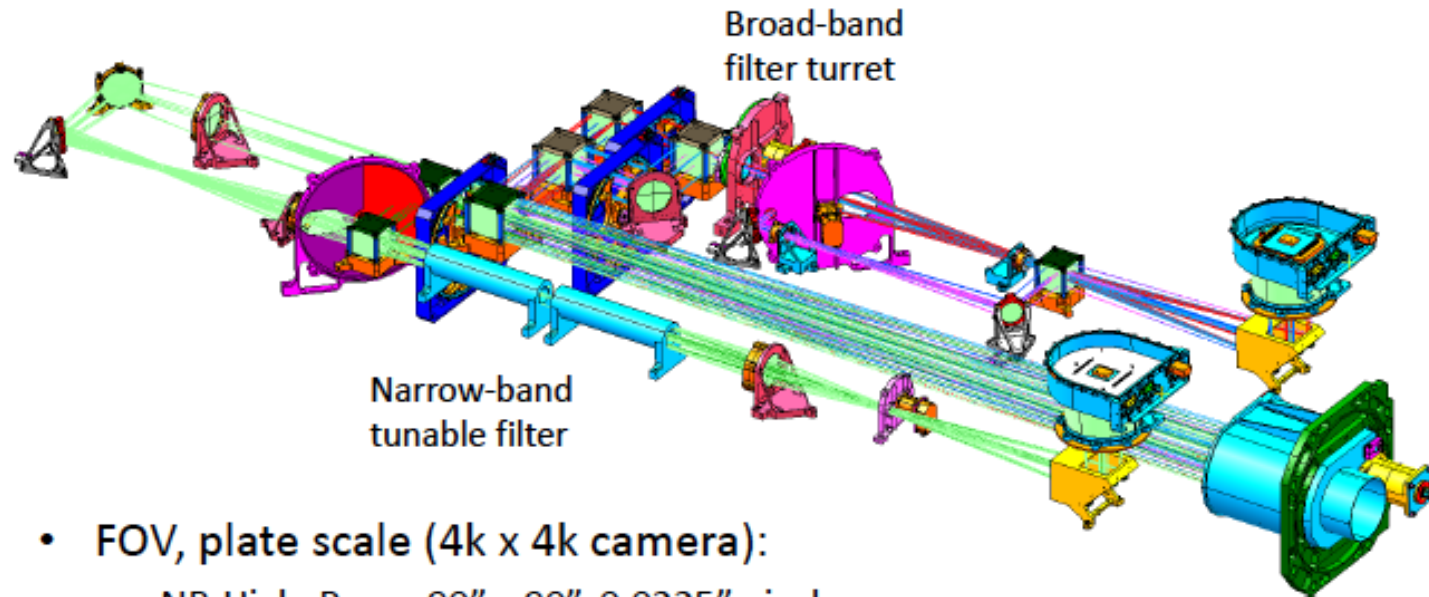
Science Requirements

Mission Requirements for SOLAR-C observations

Atmosphere covered by Proposed payload (System Req.)



SUVIT Filtergraph (FG)



- FOV, plate scale (4k x 4k camera):
 - NB-High Res: 90" x 90", 0.0225" pixels
 - NB-Wide FOV: 180" x 180", 0.045" pixels
 - WB-High Res: 60" x 60", 0.015" pixels
 - WB-Wide FOV: 180" x 180", 0.045" pixels

Wide bands

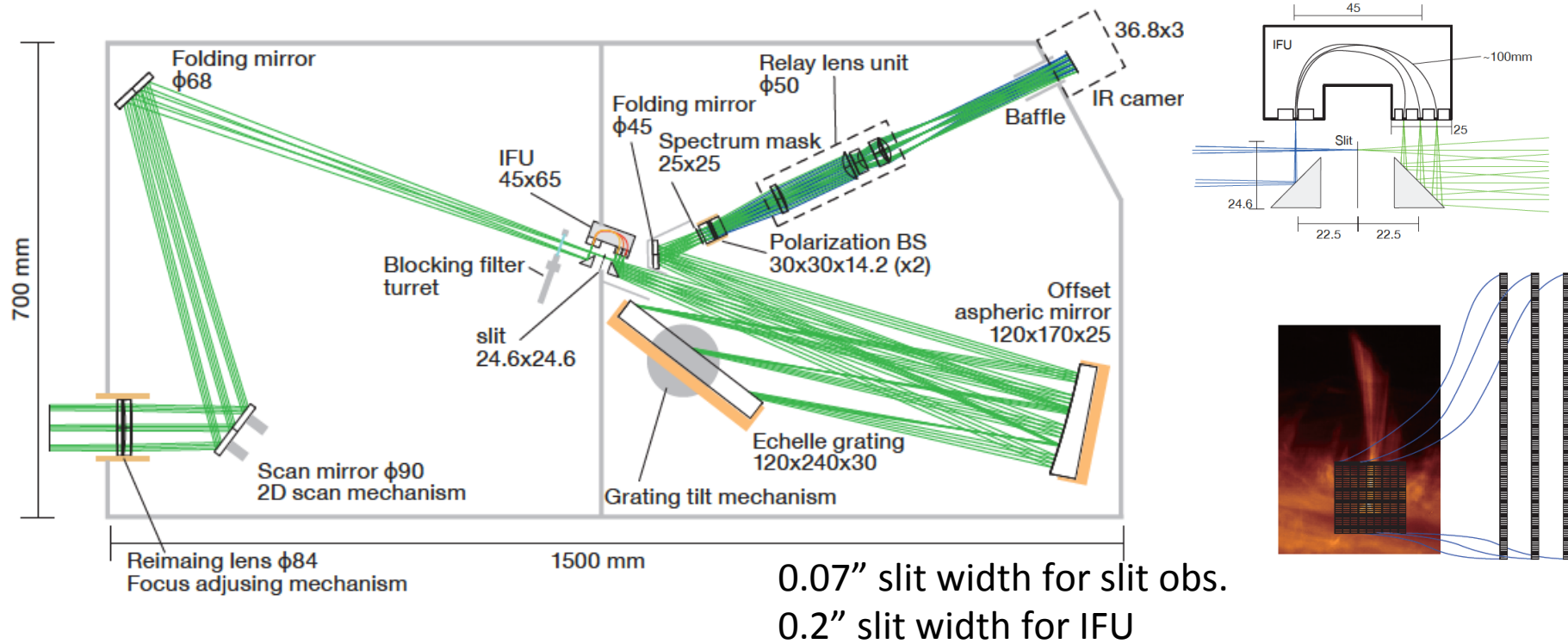
Pass-bands	279 nm	380 nm	393 nm	TBD
Spectrum lines	Mg II k/h	CN band	Ca II K	continuum

Narrow bands with a polarimeter

Pass-bands	517 nm	525 nm	589 nm	656 nm	854 nm
Spectrum lines	Mg I b	Fe I	Na I D	H I α	Ca II

SUVIT Spectro-polarimeter (SP)

to observe photospheric & chromospheric *mag.* fields

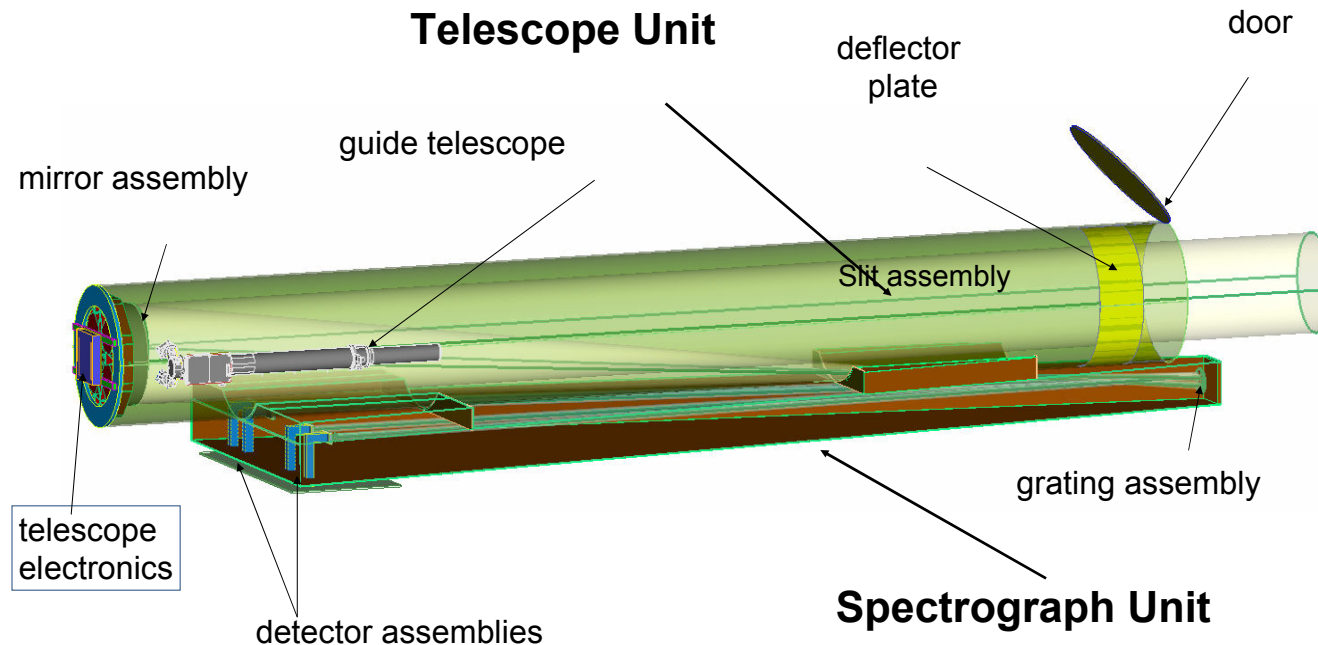


Wavelength bands	1083 nm	854 nm	525 nm
Spectrum lines	He I	Ca II	Fe I
Order	15	19	31
Wavelength sampling	45.2 mÅ	35.6 mÅ	21.9 mÅ

EUVST

- Optics: single off-axis mirror (30cm ϕ , f=360cm) and a grating
- Telescope length: 430cm

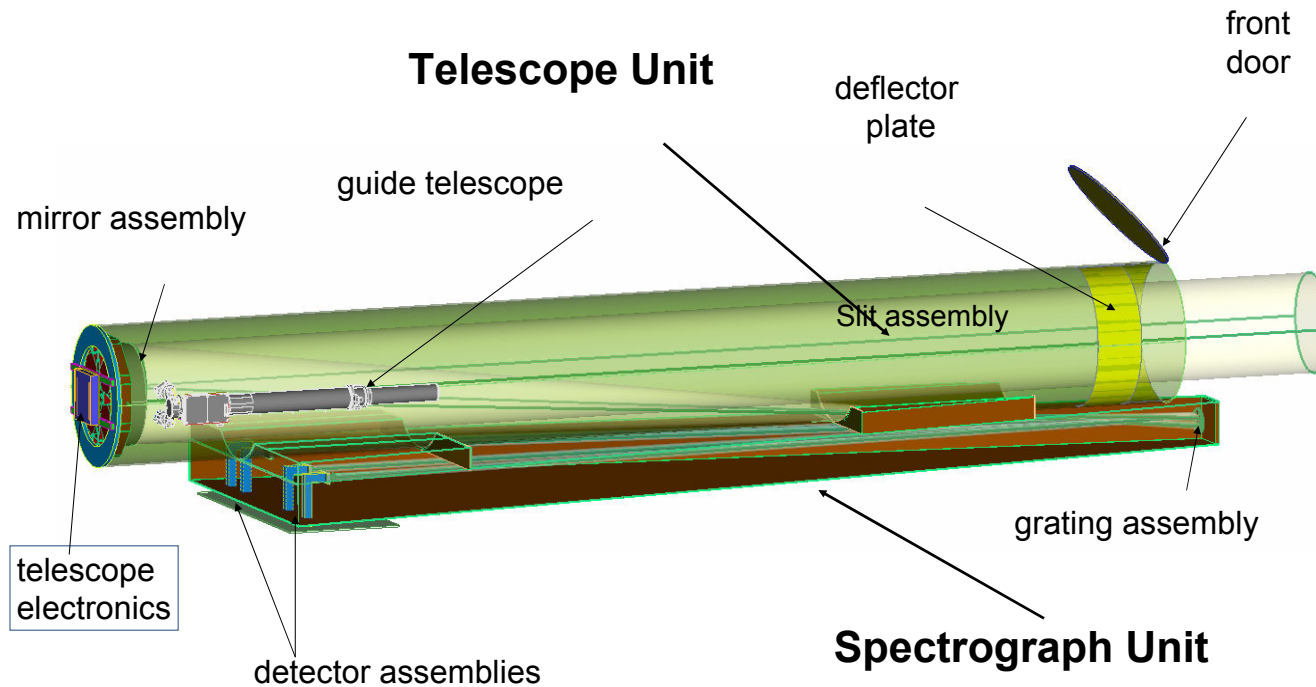
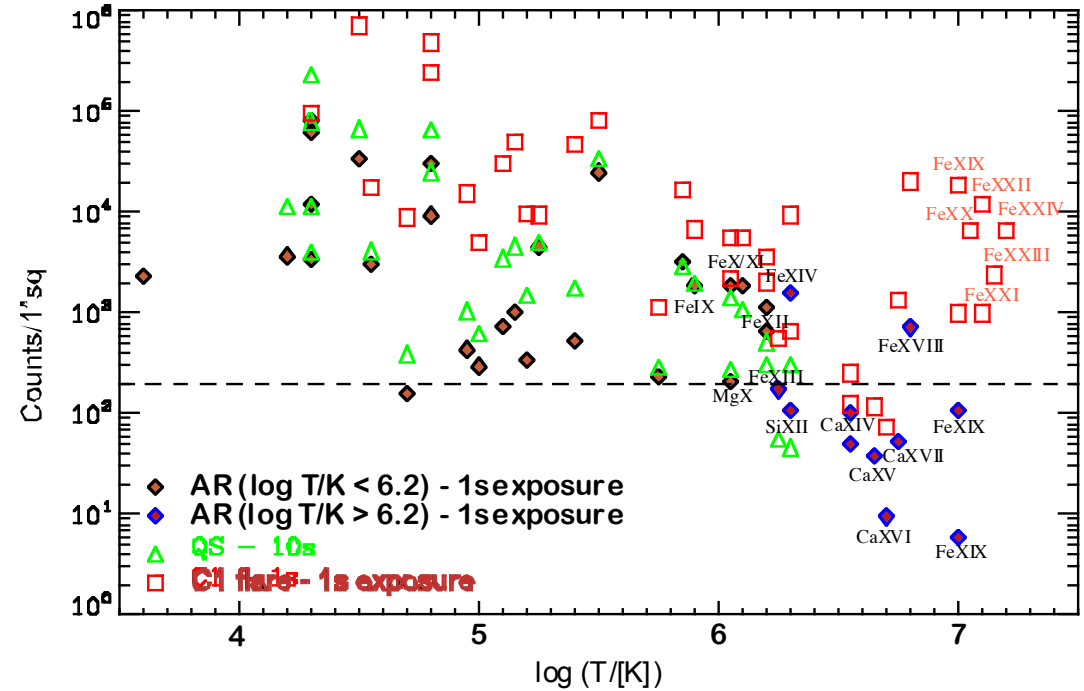
Field	Required value
Spatial resolution	$\leq 0.28''$
Spectral resolution	$\lambda / \Delta\lambda$ 17 000 to 32 000
Doppler shift accuracy	$\leq 2 \text{ km s}^{-1}$
Doppler width accuracy	$\leq 5 \text{ km s}^{-1}$
Temperature coverage	0.01 to 20 MK
Field-of-view	slit length $280''$
raster coverage	$300''$ (w/o re-pointing)
Exposure times	$\leq 10 \text{ s}$ ($0.28''$ sampling) $\leq 1 \text{ s}$ ($1''$ sampling)
Mirror micro-roughness	about 3 Å rms or better



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

EUVST

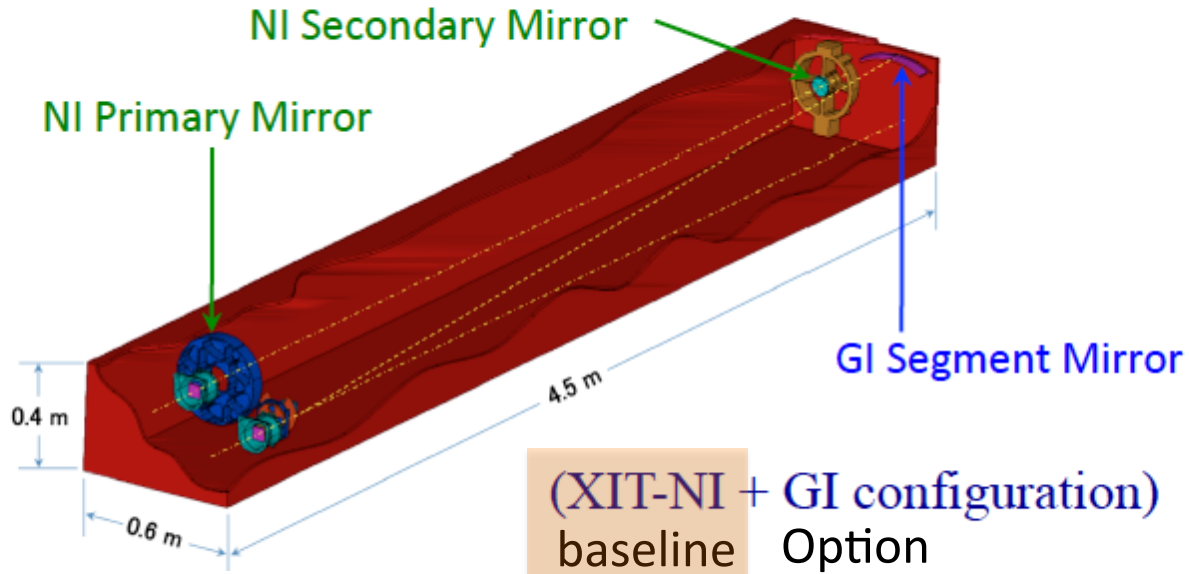
- Optics: single off-axis mirror (30cm ϕ , f=360cm) and a grating
- Telescope length: 430cm



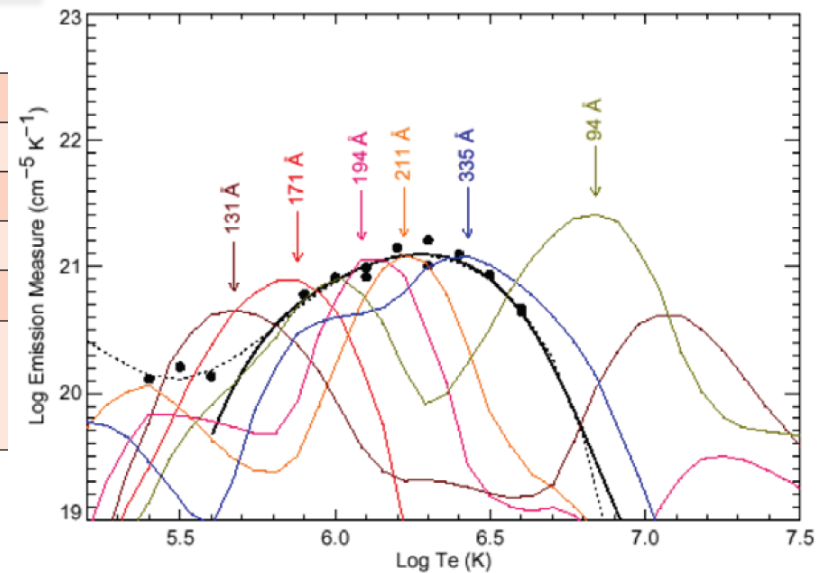
With low scattering optics, for exploring low EM regions (MR and CH).

X/EUV imaging telescope (XIT)

- He II 304
- Fe IX 171
- Fe XVIII 94



	XIT	SDO/AIA
Optics	EUV normal-incidence	EUV normal-incidence
Spatial resolution	0.2"-0.3"	1.2"
Cadence	~<2.0 s (typ. 10 s)	12 s
Field of view	~400" × 400"	full Sun
Temperature coverage	5×10^4 K (He II 304Å) 6.3×10^5 K (Fe IX 171Å) 6.4×10^6 K (Fe XVIII 94Å)	5×10^4 K to 2.0×10^7 K in Table 4.4-3



International Collaboration

A planned case of task share that world-wide solar physicists desire

EUVST (EUV Spectrograph)

ESA & EUVST consortium

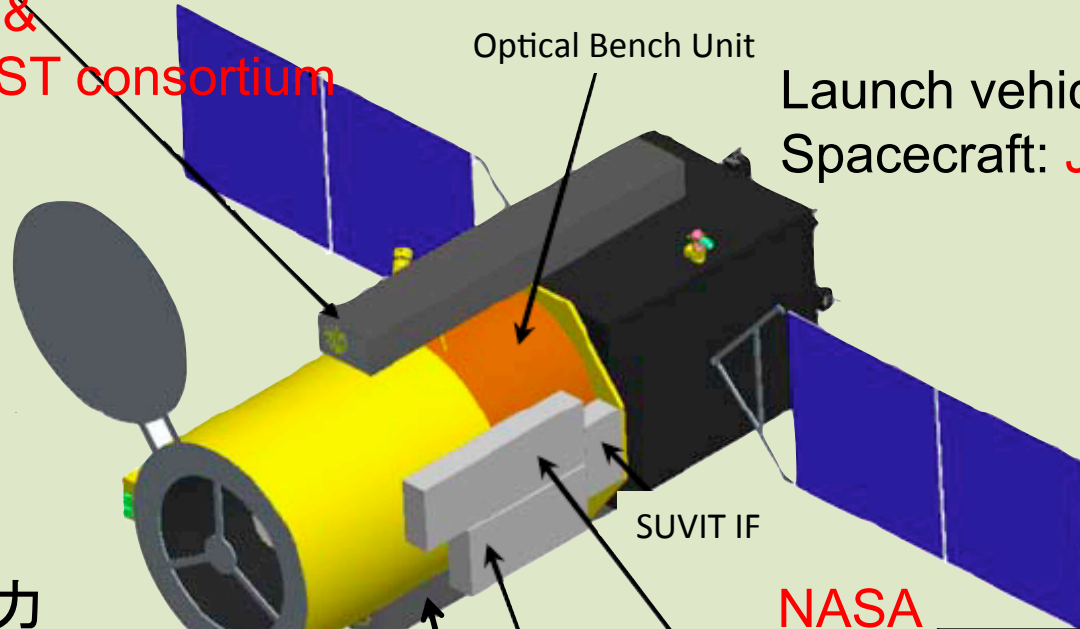
Optical Bench Unit

Launch vehicle: JAXA

Spacecraft: JAXA



Hinode



国際協力
体制の見直しが
進行中

SUVIT TA
JAXA+ α

SUVIT SPP
JAXA+ α

NASA

SUVIT FGP

XIT (X-ray imager)
NASA

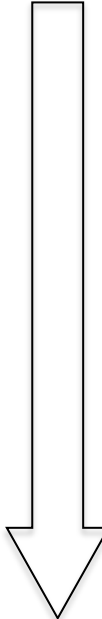
α : European countries

Weight	2300 kg (w/o fuel)
Size	3.7m x 3.2m x 7.1m
Power	5 kW generation @EOL
Data rate and DR volume	Average: 8 Mbps ($\times 20$ of Hinode) DR volume: 100GB
Attitude control	3-axis attitude control
Orbit	a geosynchronous orbit

- Proposed to US Heliophysics Decadal Survey
- EUVST: proposed to ESA Cosmic Vision II

本シンポジウムの獲得目標

- コミュニティとして計画を推進する意識の共有
- コミュニティによるSC提案書科学内容の吟味
 - 科学課題・解決手法は適切に設定されているか？

- 
- 実施時に課題設定が解決済みになることはないか？
 - 設定された課題の優先度は適切か？
 - 課題解決のための物理量は何か・必要な精度は？
 - 提案される観測装置の波長選択・スペックは適切か？
 - スペース観測の必要性はあるのか？
 - 提案までに既存データで確認すべきことは何か？
- など

ミッション提案書・要求書への議論の反映