

# Solar-C ミッション科学 — 尖鋭化と多様な実現性の検討 —

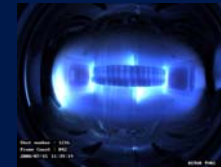
渡邊鉄哉<sup>1)</sup>、一本潔<sup>2)</sup>、草野完也<sup>3)</sup>、末松芳法<sup>1)</sup>、清水敏文<sup>4)</sup>、  
原 弘久<sup>1)</sup>、吉原圭介<sup>4)</sup>、坂尾太郎<sup>4)</sup>、鹿野良平<sup>1)</sup>、関井 隆<sup>1)</sup>、  
勝川行雄<sup>1)</sup>、久保雅仁<sup>1)</sup>、石川遼子<sup>1)</sup>、  
他 Solar-C WG

1)国立天文台、2)京都大学、3)名古屋大学、4) JAXA

# Solar-Cの科学的広がり

## 天文学

恒星大気、フレア、活動天体  
宇宙・天体磁場



Solar-C

## 地球・惑星環境と社会

惑星間空間擾乱、  
フレア予測と宇宙天気  
太陽周期活動の影響

## プラズマ物理学

磁気リコネクション機構  
MHD乱流、衝撃波粒子加速

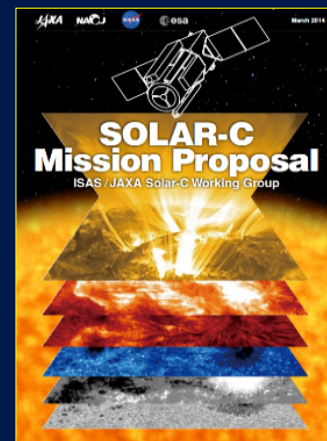
# Solar-Cのミッション提案 2015 Feb.

## 科学目的:

太陽表面から太陽コロナおよび惑星間空間に繋がるプラズマダイナミクスをひとつのシステムとして理解するとともに、宇宙に普遍的に現れる磁気プラズマの素課程を解明する

## 3つの課題:

- I. 彩層・コロナ・太陽風の形成機構の解明
- II. 太陽面爆発現象の発現機構の究明と発生予測のための知見獲得
- III. 太陽放射スペクトルの変動機構の解明



# Solar-Cのミッション提案 2015 Feb.

## 先進的な3つの観測装置

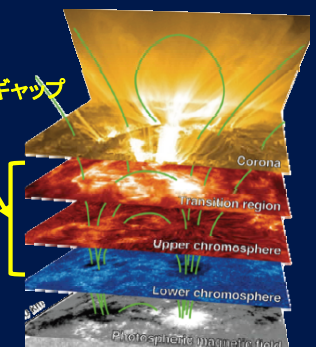
紫外線分光望遠鏡 (EUVST)  
+ IM (Irradiance Monitor)

「ひので」  
物理計測のギャップ

可視光望遠鏡 (SUVIT)

SUVIT  
焦点面装置群

高解像度コロナ撮像装置 (HCI)

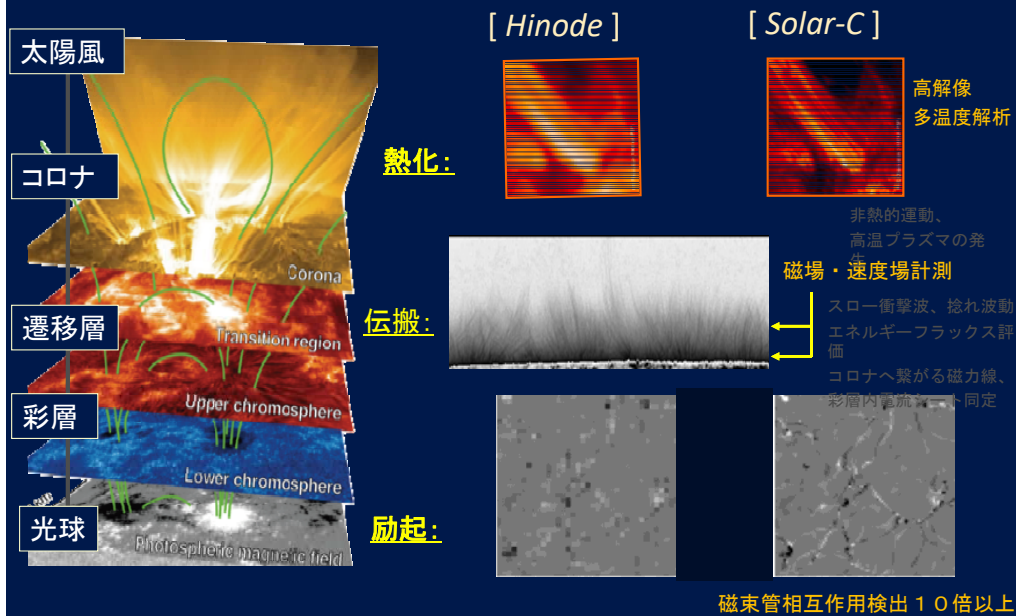


## 「ひので」からのジャンプ

- (1) 空間分解能の向上 約10倍 (コロナ観測)、3倍 (光球彩層観測)
- (2) 偏光分光能力の大幅強化 → 彩層磁場計測
- (3) 高感度(高スループット) → 時間分解能と精度の向上 約10倍
- (4) 観測波長の拡張による太陽大気的全階層アクセス

# 彩層I・コロナ・太陽風の形成機構の研究

例：スピキュールの形成機構とコロナへのエネルギー・質量供給



磁束管相互作用検出 1.0倍以上

評価委 **WGレベルで再検討**

☆サイエンスの先鋭化  
☆国際協力の実現性

**2016**  
**WG継続申請→承認**

## Solar-Cのサイエンス先鋭化へのアプローチ

- 超高解像度の地上観測との協調
  - SUVITは口径を縮小し 広視野、長時間安定観測 の利点を強化
- 科学的重要度のトレードオフにより観測波長の厳選
  - SUVITの紫外線撮像分光装置 (UBIS; 220-350nm) を削除
  - 太陽放射モニター装置 (200-20000nm) を削減 (オプション化)
  - HCIオプション化の可能性を検討 (EUVSTに撮像系を内蔵、等)
- EUVST の機能縮小の可能性検討 (分解能 & 波長)
- 他衛星 (小型ミッション等) で部分的実現可能性の検討
- NGSPM-SOT (JAXA+NASA+ESA) による科学課題の精査
  - (2016年7月~2017年7月 [1年間])

## Solar-C の科学課題 (2015提案)

I. 彩層・コロナ・太陽風の形成機構の解明		
I-1	スピキュールの起源	足下磁場構造、衝撃波、捻れ
I-2	ナノフレア仮説の検証	微小増光、非熱的運動
I-3	波動加熱説の検証	波動モード、エネルギー束、熱化過程
I-4	太陽風加速機構の解明	3D磁場構造、コロナ中 Alfvén 波
I-5	プロミネンスの形成機構	磁場構造、質量循環
II. 太陽面爆発現象の発現機構の究明と発生予測のための知見獲得		
II-1	エネルギー蓄積機構	光球彩層磁場
II-2	トリガー機構	浮上磁場、彩層微小磁気リコネクション
II-3	爆発メカニズム	大規模ダイナミクス、電流系
II-4	高速リコネクション	電流シート、プラズモイド、衝撃波
III. 太陽放射スペクトルの変動機構の解明		
III-1	UV 放射機構	微細UV 放射源の磁場構造
III-2	TSS/SSI モニター	TSI/SSI

## Solar-C の科学課題・先鋭化(2016)

I. 彩層・コロナ・太陽風の形成機構の解明		
I-1	スピキュールの起源	足下磁場構造、衝撃波、捻れ
I-2	ナニオン反説の検証 <i>設定課題の再直し</i>	微小増光、非熱的運動
I-3	波動加熱説の検証 <i>波動モード、エネルギー束、熱化過程</i>	波動モード、エネルギー束、熱化過程
I-4	太陽風加速機構の解明	3D磁場構造、コロナ中 Alfvén 波
I-5	プロミネンスの形成機構	磁場構造、質量循環
II. 太陽面爆発現象の発現機構の究明と発生予測のための知見獲得		
II-1	エネルギー蓄積機構	光球彩層磁場
II-2	トリガー機構 <i>広視野化により補足率向上</i>	浮上磁場、彩層微小磁気リコネクション
II-3	爆発メカニズム	大規模ダイナミクス、電流系
II-4	高速リコネクション	電流シート、プラズモイド、衝撃波
III. 太陽放射スペクトルの変動機構の解明		
III-1	UV 放射機構 <i>主課題としなさい(オプション)</i>	微細放射線の磁場構造
III-2	TSS/SSI モニター	TSI/SSI

## Solar-Cのサイエンス先鋭化へのアプローチ

- 超高解像度の地上観測との協調
  - SUVITは口径を縮小し広視野、長時間安定観測の利点を強化
- 科学的重要度のトレードオフにより観測波長の厳選
  - SUVITの紫外線撮像分光装置 (UBIS; 220-350nm) を削除
  - 太陽放射モニター装置 (200-20000nm) を削減 (オプション化)
  - HCIオプション化の可能性を検討 (EUVSTに撮像系を内蔵、等)
- EUVST の機能縮小の可能性検討 (分解能 & 波長)
- 他衛星 (小型ミッション等) で部分的実現可能性の検討
- NGSPM-SOT (JAXA+NASA+ESA) による科学課題の精査
- (2016年7月~2017年7月 [1年間])

## 科学課題の尖鋭化

### NGSPM-SOT

#### Next-Generation Solar Physics Mission - Science Objectives Team

- 世界に一つの観測所: 太陽観測における大型プロジェクトでは、地上・スペースを問わず国際協力が前提
- SOLAR-C:
  - 世界の3宇宙機関(ESA, JAXA, NASA)が参加する予定
  - 計画提案タイミング・貢献 規模等の調整は容易でない
- NGSPM-SOT: SOLAR-C(戦略的中型)と限らず、世界の太陽物理学研究者が2020年代半ばに実施するスペース太陽観測計画の候補を見出す活動
  - JAXA主導の計画を議論
  - 2016年7月より活動を開始
  - 各機関より4名ずつ指名された計12人のSOT委員が1年かけてまとめる
  - 科学課題のリストアップ(世界の研究者よりWhite Paperを募り(実施済み)、提示される案も参考とする)→ミッション候補の推薦

## Charter: Next Generation Solar Physics Mission Science Objectives Team

- Specifically, the SOT will work closely with JAXA, the National Astronomical Observatory of Japan (NAOJ), ESA, and NASA to:
  - **Develop the scientific goals** for NGSP recognizing general limits on resources likely to be available for this activity.
  - Assess how these scientific goals are **aligned with** JAXA, ESA and NASA **agency priorities**.
  - Assess the **required measurements** necessary to meet the science goals.
  - Assess the top-level observational (mission design) strategy for the NGSP mission to accomplish the scientific goals.
  - Identify the **minimum performance for the mission** systems that is necessary and sufficient to justify the international investment into the merged project.
  - Deliver a science report that supports the generation of documents suitable for **input into any future joint Announcement of Opportunity or Call for Missions**. The draft of this report will be delivered to the participating agencies 9 months after the first meeting of the SOT, and the **final report 12 months after the first meeting**.

# NGSPM-SOT membership

## PARTICIPANTS:

- Co-Chairs
  - Masaki **Fujimoto** – ISAS/JAXA
  - Luigi **Colangeli** – ESA
  - Steve **Clarke** – NASA
- NASA appointed Members
  - David McKenzie, NASA, Marshall Space Flight Center
  - Ted Tarbell, Lockheed Martin Solar and Astrophysics Laboratory
  - John Raymond, Smithsonian Astrophysical Observatory
  - Sara Gibson, High-Altitude Observatory
- ESA appointed Members
  - Louis Ramon Bellot Rubio - Instituto de Astrofisica de Andalucia, Spain
  - Mats Carlsson - UiO Institute of Theoretical Astrophysics, Norway
  - Lyndsay Fletcher - University of Glasgow, UK
  - Sami Solanki - Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung, Göttingen

# NGSPM-SOT membership

## PARTICIPANTS:

- JAXA / National Astronomical Observatory of Japan (NAOJ) appointed Members
  - Kiyoshi Ichimoto, Kyoto University/NAOJ
  - Kanya Kusano, Nagoya University
  - Toshifumi Shimuzu, ISAS/JAXA
  - Hirohisa Hara, NAOJ
- National Astronomical Observatory of Japan (NAOJ) Observer
  - Tetsuya Watanabe, Solar-C WG Chair, Hinode Science Center, Prof., Solar & Plasma Astrophysics
- NASA OIIR (Office of International and Interagency Relations)
  - Jacob Parsley, International Program Specialist

## NGSPM-SOT: chronicle

- Kick-off Meeting: 13-July-2016
  - Activity announced in the SolarNews 2016.8.15 issue.  
[http://solarnews.nso.edu/2016/20160815.html#section\\_shimizu](http://solarnews.nso.edu/2016/20160815.html#section_shimizu)
- 1<sup>st</sup> F2F meeting: 9-September-2016
  - 10 attendees among 12
  - Discussed how to proceed our tasks and define action items
  - The white paper call via Solar News and any other routes  
[http://spd.aas.org/SolarNews/2016/20161001.html#section\\_mckenzie](http://spd.aas.org/SolarNews/2016/20161001.html#section_mckenzie)
    - **Revision of (Solar-C) scientific objectives list**
    - **Request the community to submit “white papers”**
      - Scientific objectives
      - observations/observable
      - why must be done from space, why should 2025?
      - mission concept, mission class (e.g., **Strategic M-class, Epsilon, NASA MidEX, SMEX**)
      - Deadline: 15-November-2016

## NGSPM-SOT: Activity

- 太陽研連・将来計画シンポ: 3~4-October-2016
  - Comments and draft priority added to the science objectives list
  - **Epsilon mission concepts**
    - ε-launch: A-SOT, EUVST, XR-PC, CLASP3 (全国際協力)
  - **Small Missions**: CLASP-2, SUNRISE-3, FOXSI-2 (全国際協力)
- 2<sup>nd</sup> F2F meeting: 11-December-2016
  - 11 attendees among 12
    - First cut **summary/analysis of “white papers”**
      - 34 submissions
      - coronal heating > magnetic geometry, topology, magnetic reconnection > heating process in flares > magnetic energy build up
    - **Updates of scientific objectives list**
      - science background + tasks key\_observations < input from white papers
      - prioritization < criteria to prioritize
    - Proceed to the 2<sup>nd</sup> phase activity: **mission implementation**
- Draft report: April-2017 ⇒ Final report: July-2017

# Solar-C の科学課題 (2016 尖鋭化)

設定課題の見直し；微細構造と大規模構造のつながりを強化

## I. 彩層・コロナ・太陽風の形成機構の解明

	Sub objectives	Tasks>key observations	Instruments
I-1	彩層微細ダイナミック構造とコロナへの影響	足下磁場構造 波動伝播 コロナの反応 上昇流の起源	SUVIT/DKIST/EST SUVIT/DKIST/EST/SUNRISE-3 EUVST/HCI EUVST/HCI
I-2	ナノフレア仮説の検証	微小増光 高温間歇過程、 コロナ微細構造の時間変化 光球磁場とナノフレアの因果律	HCI EUVST HCI SUVIT+HCI/DKIST+(EUV)
I-3	波動加熱説の検証	光球~コロナ微細構造の時間変化 彩層~コロナの不連続構造 TR・コロナの反応 コロナ大規模の波動伝播	DKIST/SUVIT SUVIT+EUVST/DKIST+(EUV) EUVST+HCI SUVIT+EUVST+HCI
I-4	彩層・TR・コロナ加熱における浮上磁場の役割	小規模浮上磁場構造と上層との相互作用 磁束量とヘリシティ 上層大気へのエネルギー流速	DKIST/SUVIT SUVIT/ASOT EUVST+HCI
I-5	太陽風生成機構の解明	3D磁場構造 高速風源の密度構造 風速の動径構造 Alvén波伝播のエネルギー流速 激空間空間風源の特定 コロナ基底部の温度と擾乱の非等方性	SUVIT/DKIST/EST/SOLO/GBO EUVST+HC/SOLO EUVST EUVST+HCI EUVST SOLO/EUVST
I-6	プロミネンスの形成機構	磁場構造 質量循環 中性線近傍の磁場変化 プロミネンス周辺の磁場構造	SUVIT/ASOT/GBO SUVIT+HCI+EUVST SUVIT/ASOT DKIST

# Solar-C の科学課題 (2016 尖鋭化)

広視野化により補足率向上

## II. 太陽面爆発現象の発現機構の究明と発生予測のための知見獲得

	Sub objectives	Tasks>key observations	Instruments
II-1	エネルギー蓄積機構	光球~コロナの電流分布 暗条磁場構造発展	SUVIT/ASOT SUVIT/ASOT
II-2	トリガー機構	微細磁場構造の運動と周辺磁場との相互作用	SUVIT/ASOT
II-3	爆発メカニズム	コロナ/電流構造の変化によるMHD不安定モード	SUVIT+EUVST+HCI ASOT+(corona)/DKIST+(corona)
II-4	高速磁気リコネクション	彩層磁場不連続(電流)面 磁気再結合率と誘導場  電流の成長過程 温度・密度不連続面と衝撃波・プラズマ加熱	SUVIT/DKIST SUVIT+EUVST+HCI ASOT+(corona)/DKIST+(corona) EUVST+HCI EUVST+HCI
II-5	(δ型)黒点の生成機構		SUVIT/ASOT?
II-6	粒子加速とフレアエネルギー輸送	電子・イオン分布の時間変化、高速電子飛行 追跡、フレア粒子の大気衝突	HXR/FOXSI?

# Solar-C の科学課題 (2016 尖鋭化)

主課題としない (オプション)

## III. 太陽放射スペクトルの変動機構の解明

	Sub objectives	Tasks > key observations	Instruments
III-1	対流層プラズマ流の構造	子午面環流 差動回転 対流	HMI
III-2	大規模磁束一位置特定と追跡	音波異常 コロナ近傍磁束管内の流れ 極磁場 大規模単極磁場構造	HMI HMI/L5-LAH SUVIT+EFI HMI
III-3	ダイナモ機構における乱流の定量化	α効果・ヘリシティ 表面近傍のダイナモ	HMI/GBO
III-4	太陽放射量変化の機構	UV放射量  TSI/SSIモデル生成 太陽型星として低活動度	Hinode/NFI+SP (High-res UV imager) TSI+SSI/HMI photometer
III-5	太陽内部構造の探求	Gモード検出、励起・伝播機構	

## 次期太陽観測フラッグシップ ミッション実現のための 要素技術の開発・装置検討

小型ミッション・システム検討も開始

P-082 SOLAR-C搭載光学望遠鏡(SUVIT)用の  
コーティング宇宙環境耐性試験  
P-083 高精度偏光計測を可能とする宇宙用広帯域波長板の開発  
P-084 次期太陽観測衛星SOLAR-C搭載光学望遠鏡(SUVIT)の  
検討進捗  
P-085 超高精度太陽センサ「UFSS」の研究開発状況0

### 1m光学望遠鏡の熱構造解析

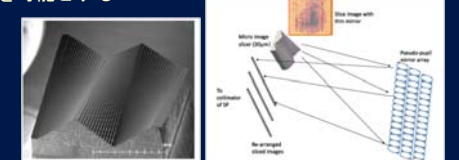
太陽光排熱方式の技術的成立性を検討



ビートパイプ方式から、ひのでOTAの放射のみの排熱方式で成立するか検討中 (ISAS戦略的開発経費)

### イメージスライサー

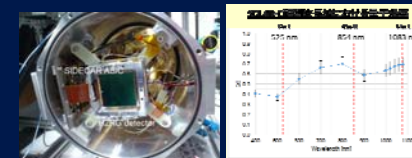
ダイナミックに変動する彩層の高速2次元偏光分光を可能とする



スライサー鏡と露鏡が完成し、フィールドレンズ、全体のユニット化構造を検討中 (ISAS戦略的開発経費、SOLAR-C準備室運営経費)

### 高速赤外カメラ

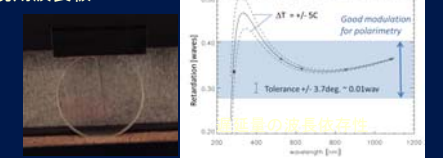
高精度偏光分光を実現する大フォーマット検出器



- 1.7μmカットオフHgCdTe素子(H2RG)
- SOLAR-Cの可視(>500nm)から近赤外(<1.6μm)で高感度
- 高速読み出し(32fps) (科研費若手(A))

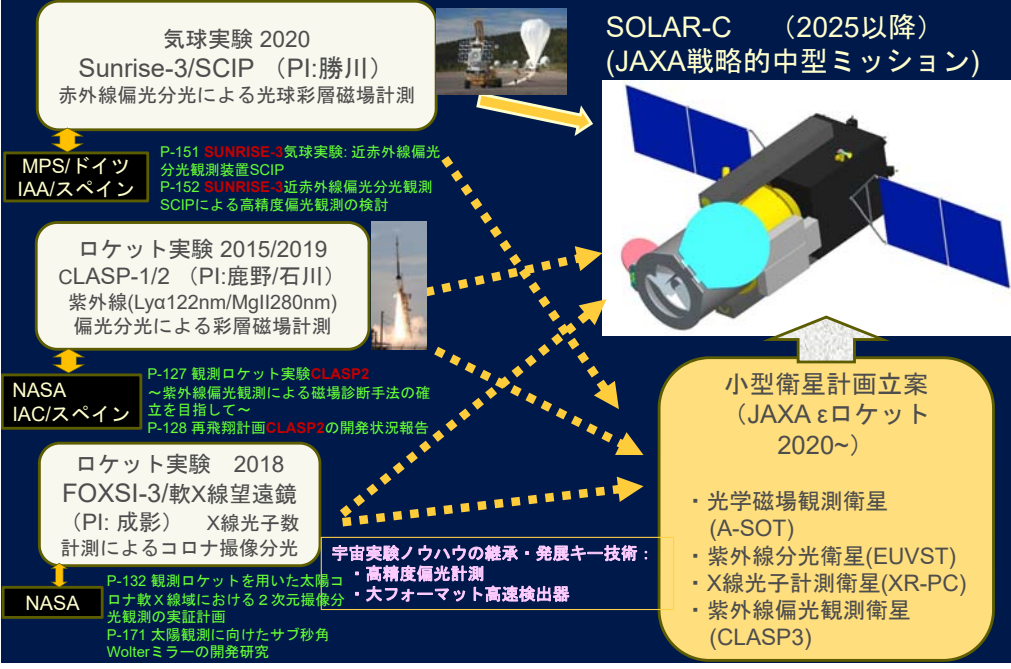
### 偏光変調器用波長板

500-1100nmで高効率偏光変調を可能とする宇宙環境用波長板



水晶とサファイアの組み合わせで口径30mm、70mmの波長板を試作、期待された遅延特性確認 (SOLAR-C準備室開発経費)

# 次期太陽観測フラッグシップミッション実現のための戦略 ～あらゆる飛翔機会の活用～

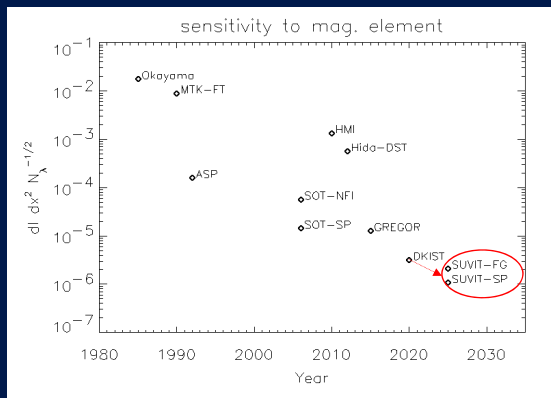


# Solar-C WG

- ☆ Solar-C Mission → **サイエンスの尖鋭化**
    - **Cost reduction with Focused science**
    - **Synergy with other missions/facilities (DKIST, SOLO etc...)**
  - ☆ International Collaboration Scheme  
more feasible/affordable  
NASA: Setup of STDT (→JSSDT)  
ESA: Seek for MoOs → **NGSPM-SOT**
  - ☆ Multifarious Launch Opportunities  
システム・キー技術検討  
preliminary flight experiments (balloons & rockets)
- ⇒ 戦略的中型: 再提案 [2018] ⇒ 新Mission(s): 提案

## 超高解像度地上観測との協調

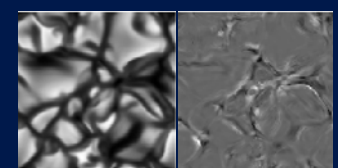
微小磁束(エネルギー要素)の検出限界  
 $\propto$  偏光精度  $\times$  空間分解能<sup>2</sup>



DKIST (Daniel K. Inouye Solar Telescope)

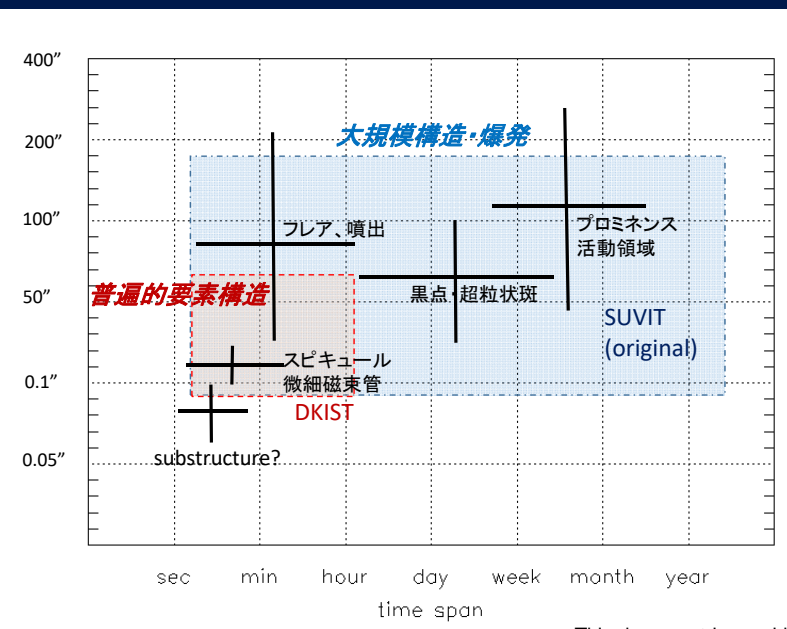


- 口径4m ハワイに建設中
- 運用開始 2020年頃
- 超高解像度撮像 (0.06" @1μm)

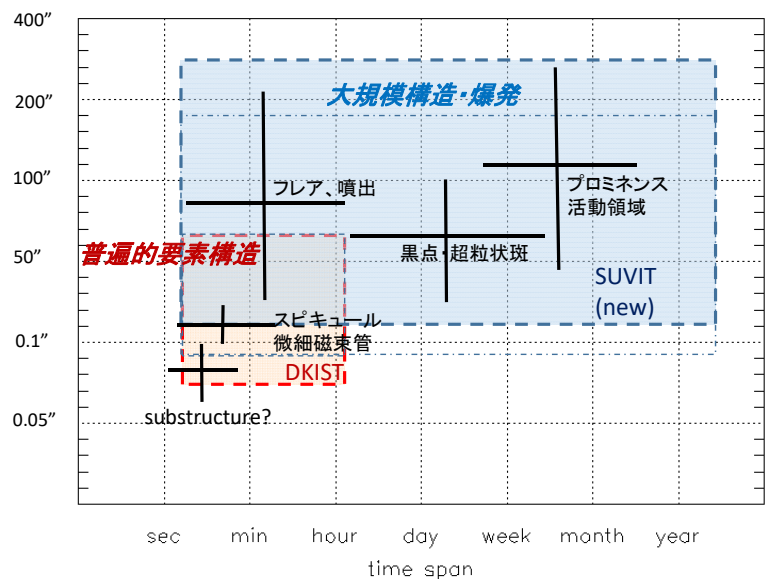


超高解像度でみる光球磁気要素 (数値シミュレーション)

## 磁場観測がカバーする空間・時間スケール



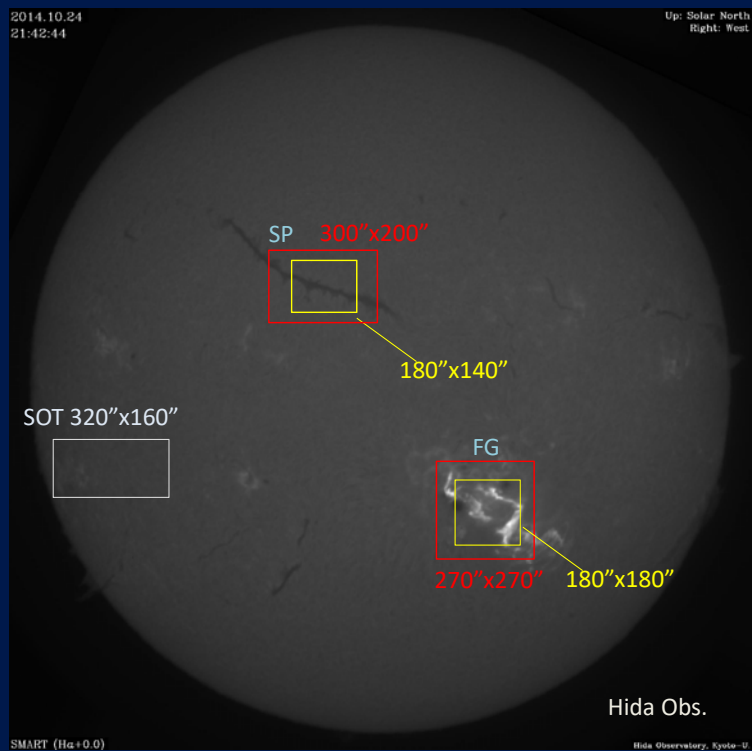
# 磁場観測がカバーする空間・時間スケール



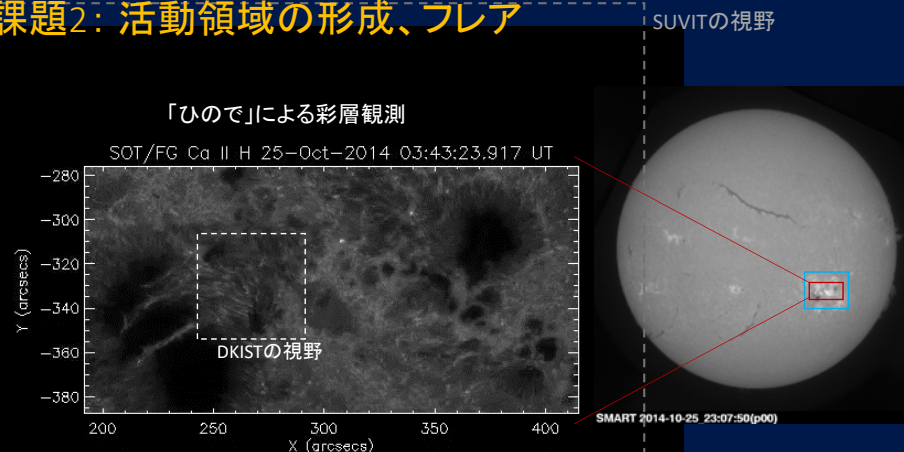
# SUVITの基本性能

	2015 提案	検討中
口径	1.4m	1m <sup>*</sup> )
観測波長	220~1100nm	380~1100nm
空間分解能		
光球磁場	0.09"	0.13"
彩層磁場	0.14"	0.22"
光球彩層撮像	0.07"	0.1"
視野		
撮像装置	180"x180"	270"x270"
分光装置	180"x140"	300"x200"
積分時間		
光球磁場 ( $1 \times 10^{-3}$ )	1sec	1sec
彩層磁場 ( $3 \times 10^{-4}$ )	10sec	10sec

口径1m: 光球の磁気要素(~100km)を解像し、0.3"の彩層磁場(10Gauss)を10秒の積算で検出できる集光力



## 課題2: 活動領域の形成、フレア



## Solar-Cの彩層物理診断・・・ 2次元から3次元へ・・・

- ・磁気中性線に横たわるダークフィラメントのベクトル磁場を計測
- ・微小彩層ジェット(<0.2")がコロナに供給する波動エネルギー、質量フラックスを計測
- ・光球( $\beta > 1$ )からコロナ( $\beta \leq 1$ )への磁力線(電流)のつながりを同定
- ・フレアに至るエネルギー蓄積、不安定化開始条件の理解
- ・光球から彩層に浮上する磁束を3次元的に捉え電流シートの形成過程を理解