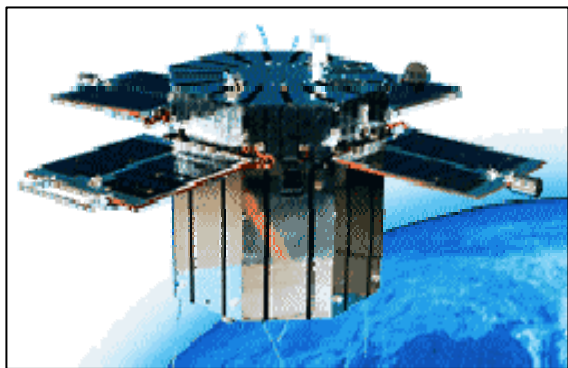


太陽観測衛星 SOLAR-C
太陽が、今「ひので」で面白い

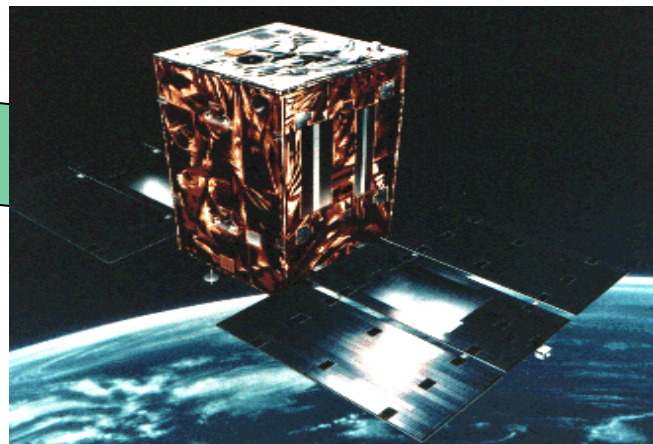
JAXA宇宙科学研究本部
SOLAR-C WG主査 常田佐久

スペースからの太陽観測は日本が主導



ひのとり(1981-1982)

ようこう (1991- 2001)



ひので (2006-)



SOLAR-C
2010年代半ば

2案平行検討

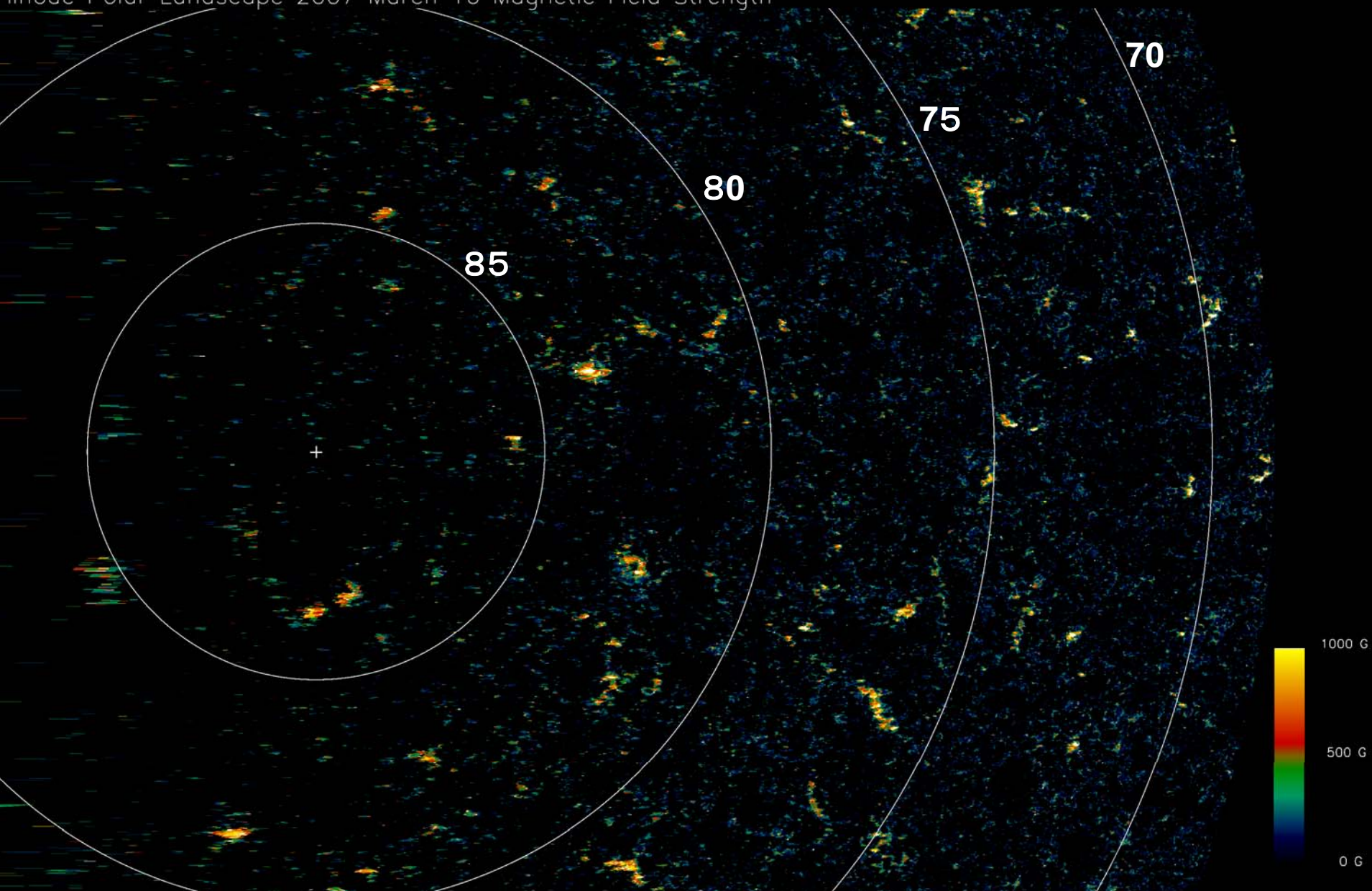
- A案:未踏の**太陽極域探査**
 - 黄道面(目標60度)を離れ未踏の太陽極域の太陽内部診断と太陽ダイナモ機構の解明
- B案:高分解能観測の追及:**撮像から分光へ・可視光から紫外線へ。**
 - ひので望遠鏡の分光能力の大幅向上による彩層を中心とした光球—コロナシステムの観測と彩層コロナ加熱機構の解明
- 2014年度〔2015年2月〕打上げを要求
- いずれもH-IIAによる打ち上げ。

A案:未踏の太陽極域探査

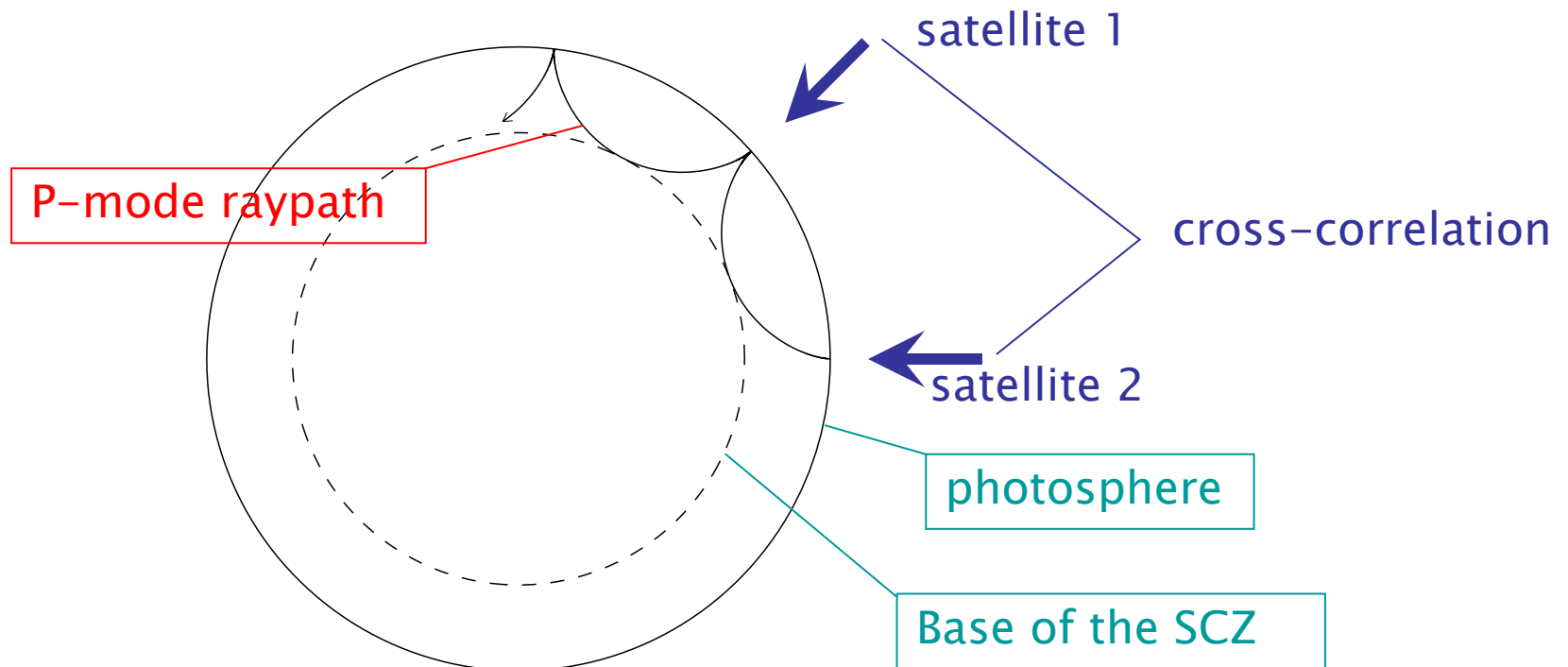
- 未踏の太陽極域の探査を総合的に実施する。
 - 日震学の手法による、太陽極内部の音速・自転角速度・流れ場(子午面還流)・光球下磁力管の観測を行う。
 - 磁場計測の手法による、太陽極域の磁場・速度場の観測を行う。
 - オプション:NASA衛星と共同で局所的日震学の手法による、対流層深部・Tachocline・放射層の探査を行う。
- これらの観測により、太陽の内部構造・ダイナモ機構・高速太陽風の起源の解明を行う。
- 極域の黄道面から離れた位置からの極域観測は、これまで一度も実施されていない。
- 背景
 - 極域ミッションは、NASA、ESAにおいても検討されてきた。
 - 「ひので」の極域観測結果により、極域への関心が一挙に高まっている。

Polar landscape kG field

Hinode Polar Landscape 2007 March 16 Magnetic Field Strength



NASA・ESAと共同で今後さらなる可能性の追求： 2機の衛星による太陽深部探査 衛星1：SOLAR-C、衛星2：NASA衛星（地上観測）

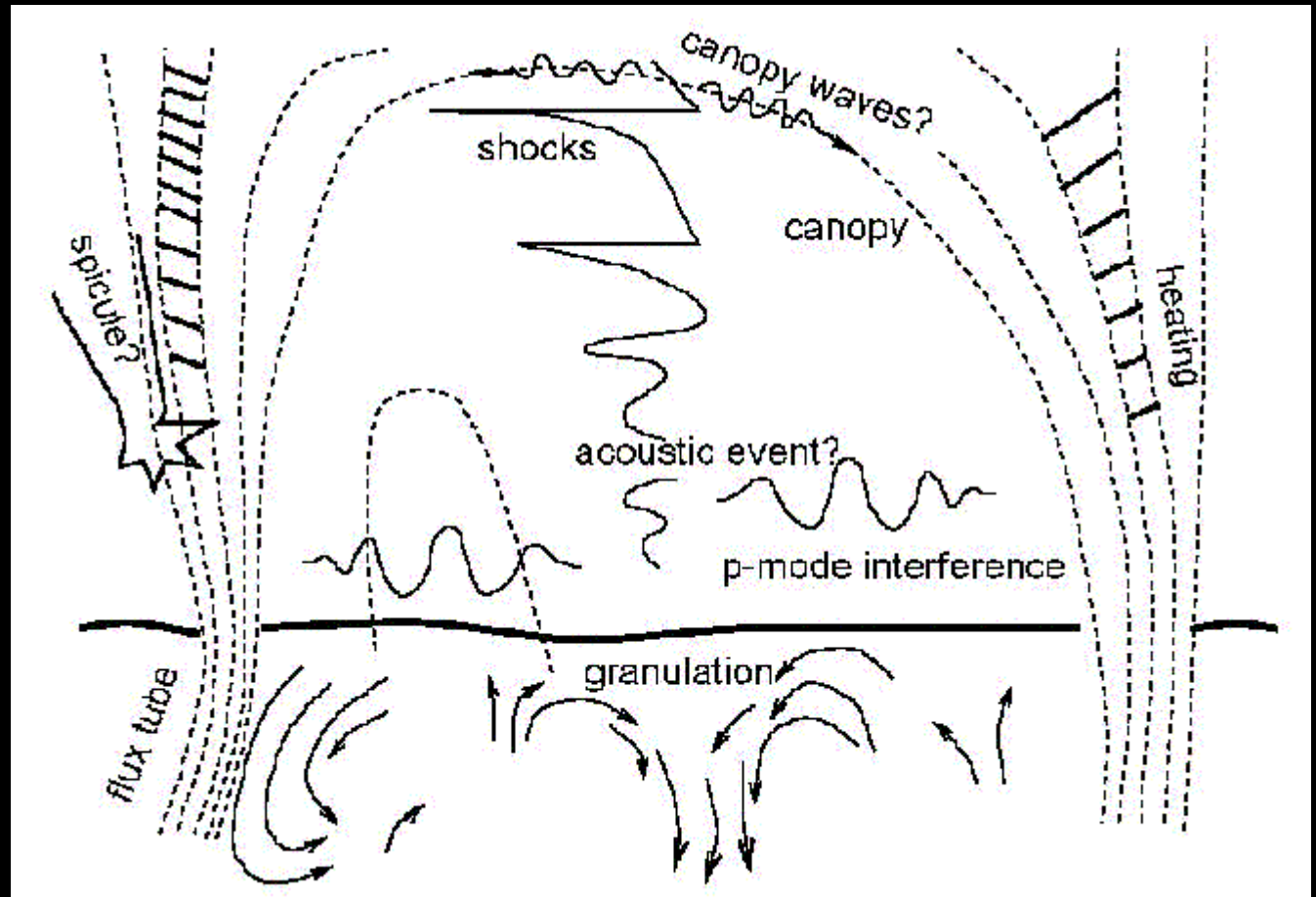


ただし、タコラインの磁束管は10(5)Gあっても見えない可能性が高い。

B案

光球からコロナまで

リコネクション
対流運動
磁気要素
音波
高温コロナ
スピキュール
etc etc....



Rutten, R., ASP-CS, 184, 181, 1999

「ひので」の見た・確認した数々の現象

キーワード: 波、磁気揺動、リコネクション、輻射輸送

遅い太陽風

極のkG磁場

彩層ジェット
彩層リコネクション

スピキュールの
アルベン波

半暗部
彩層ジェット

磁気揺動

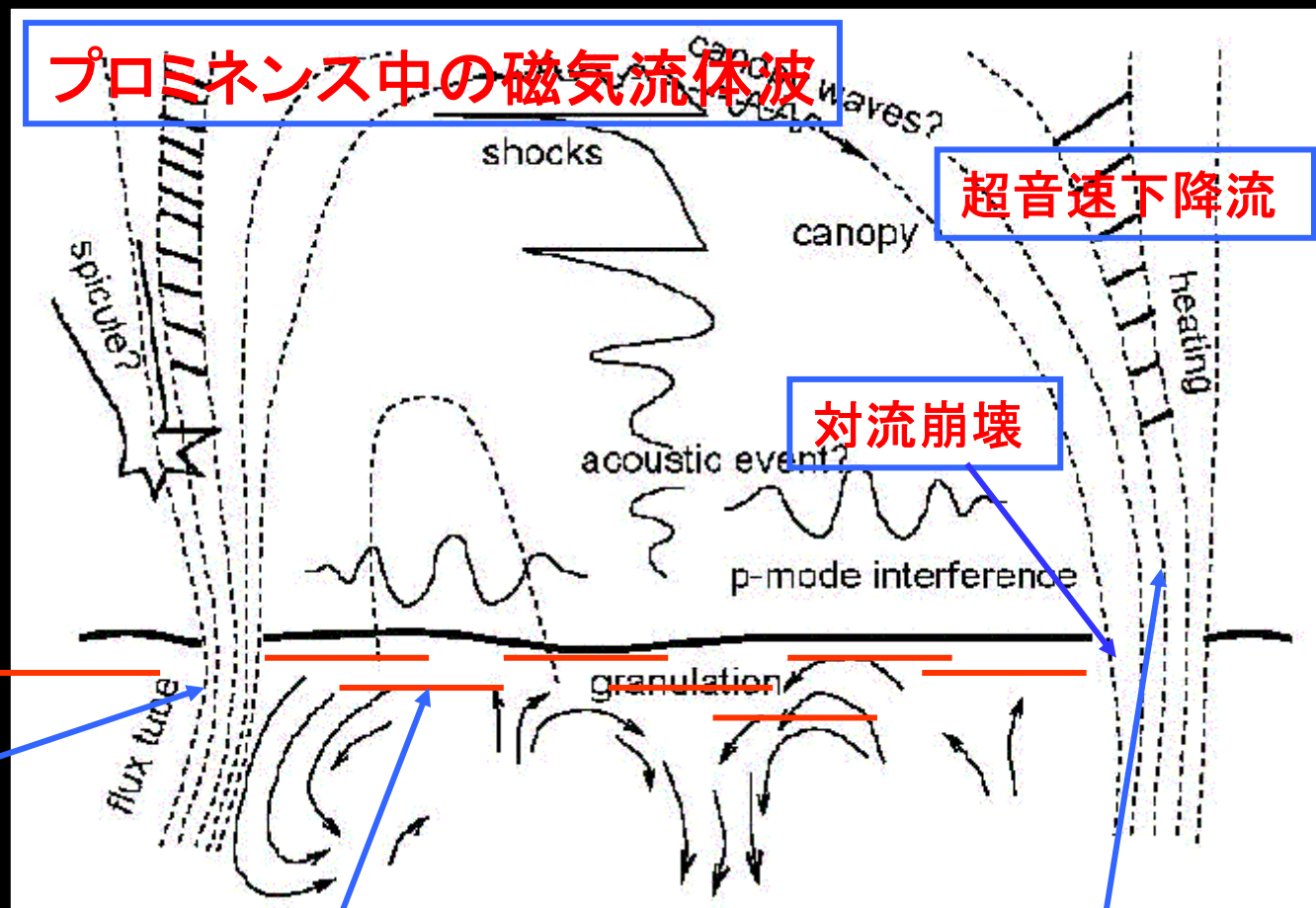
プロミネンス中の磁気流体波

超音速下降流

対流崩壊

ユビキタスな水平磁場

高温プラズマ
の乱流



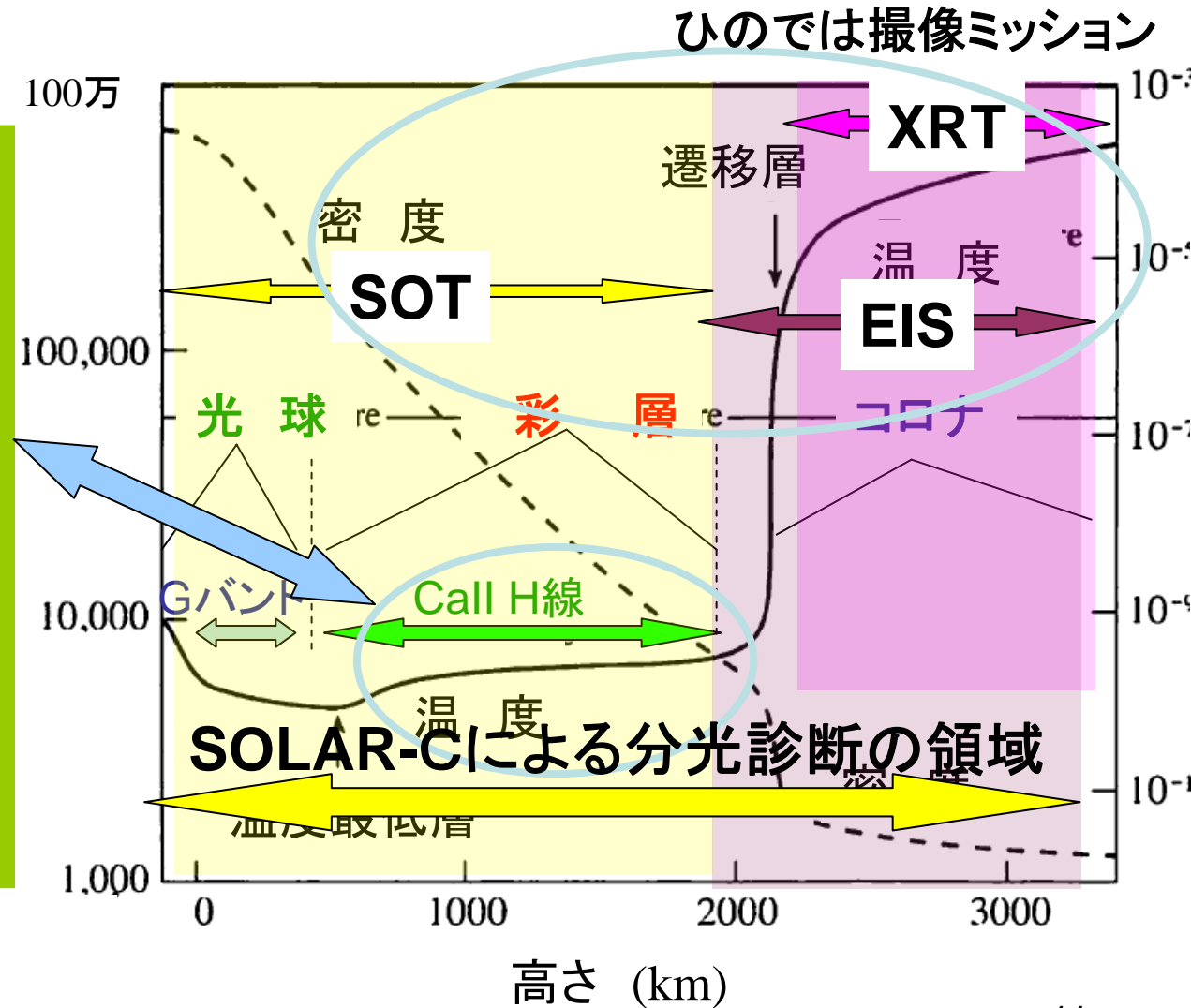
B案：光球下からコロナまでの高分解能観測 撮像から分光へ・可視光から紫外線へ

- 光球下—光球—彩層—遷移層—コロナの極端に温度密度の変化する全領域での高分解能撮像・分光診断を一挙に行い、彩層およびコロナのダイナミクス・加熱・太陽風加速の解明を行う。
 - 可視光・UV望遠鏡(1300-8500 Å) > 50cm回折限界撮像・分光望遠鏡(< 0.1-0.3秒角)
 - 極端紫外線望遠鏡・撮像・分光望遠鏡
 - 超高空間分解能X線望遠鏡
- 観測目的
 - 光球・彩層の偏光磁場観測
 - 彩層・遷移層の動的現象の高い時間分解能を持った分光偏光観測
 - ハンレ効果を利用した光球水平磁場・コロナ・プロミネンス磁場の直接観測
- ミッション概念設計は、今後の「ひので」の解析結果に影響される。
 - 「ひので」による彩層・遷移層(コロナと光球のインターフェース)の驚嘆すべきダイナミックな振舞いが、B案観測への関心を高めている。
- >50cmの回折限界望遠鏡は、当面日本でしか実現できない。

B案: SOLAR-Cによる太陽大気全域 の高分解能・分光診断

大注目領域: 彩層で何が起きているのか?

- ・コロナの10倍の加熱により維持されている
- ・「ひので」による多様な動的現象の発見
- ・コロナ加熱の理解には、コロナ光球のインターフェースである彩層・遷移層の理解が本質であるとの認識が急速に台頭。

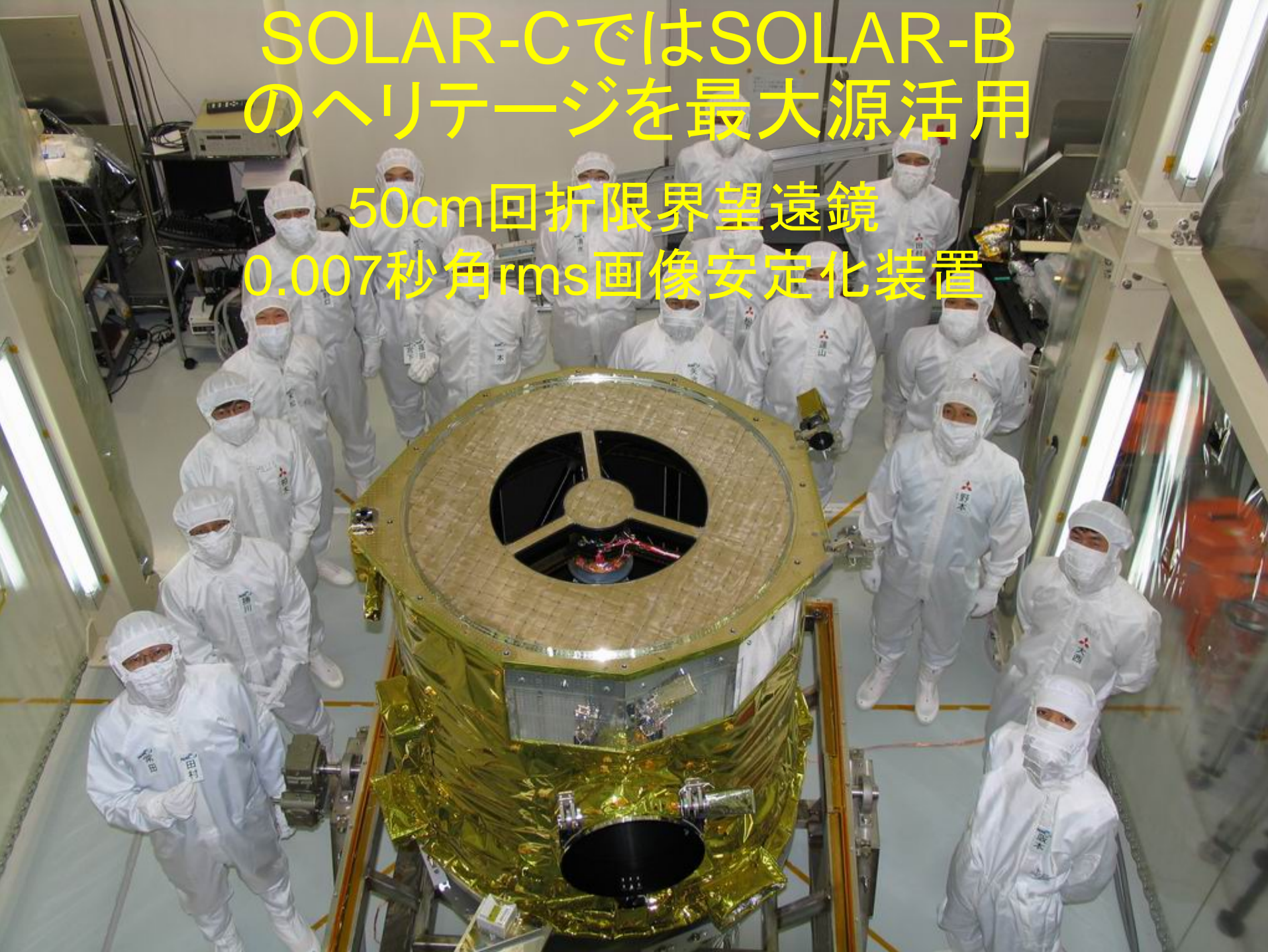


B案課題

- 光球の弱水平磁場の観測
 - 水平磁場による彩層・コロナ加熱の可能性
- コロナ・プロミネンス磁場の直接観測
- 観測波長とカバーする大気
- スペクトログラフの高速化
- ノート
 - 空間分解能を上げるためにUVに行くわけではない。
 - 望遠鏡口径の増大は慎重に。

SOLAR-CではSOLAR-B のヘリテージを最大源活用

50cm回折限界望遠鏡
0.007秒角rms画像安定化装置



光球の弱水平磁場の観測
水平磁場による彩層・コロナ加熱の
可能性

水平磁場の観測のまとめ

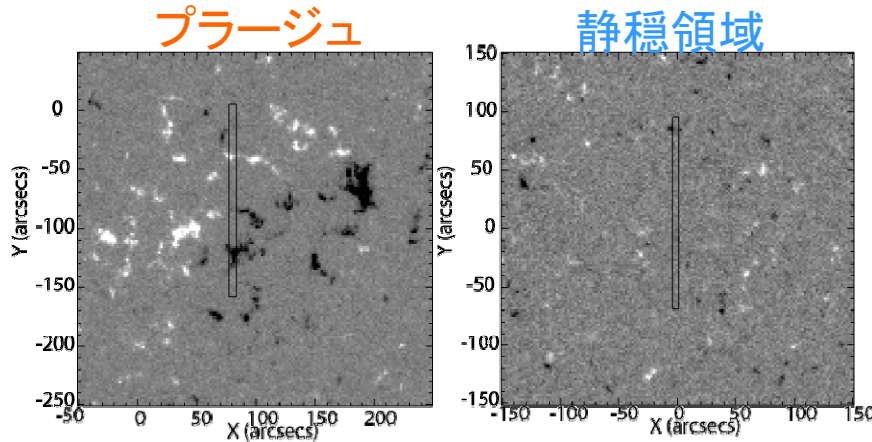
Ishikawa et al. (2008, a,b)

- 活動領域でも非活動領域でも同量の水平磁場が存在することを発見
- 非常に短寿命(1-10分)の現象
- 対流に翻弄されるように出現・消滅
- 水平磁場のエネルギーは対流の運動エネルギーと同等かそれ以下 (磁場強度が400ガウス以下) 黒点は3000ガウス
- 水平磁場の向きはランダム

観測結果との整合性

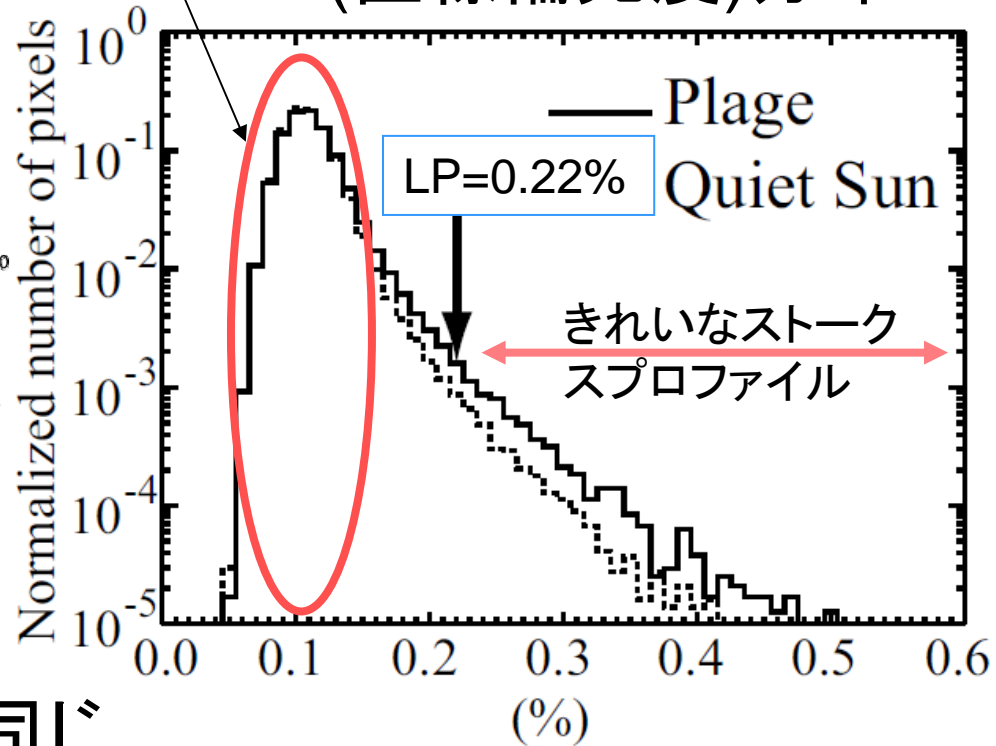
	磁場 ($< 400\text{G}$)	方位角分布に 異方性なし	ほぼ同じ発生 頻度
1. 活動領域 の破片	△	△	×
2. 失敗浮上 磁場	○	×	×
3. 浮上磁場 の崩壊	○	△	△
4. 垂直磁場 から水平磁場	△	○	×
5. ローカルダイナモ	○	○	○

プラージュ領域と静穏領域の 水平磁場を比較する



フォトンノイズが主

LP(直線偏光度)分布



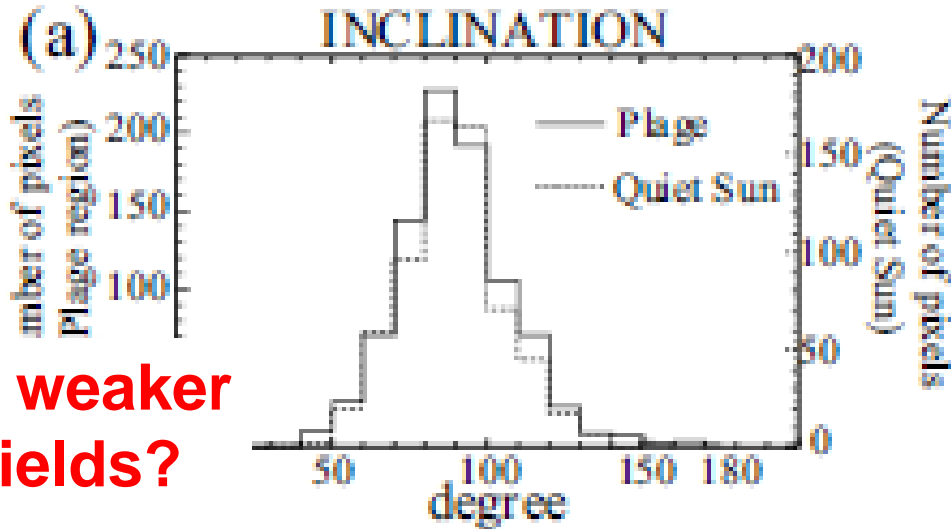
$$LP = \frac{\int \sqrt{Q(\lambda)^2 + U(\lambda)^2} d\lambda}{I_c \int d\lambda} \propto B_t^2$$

Q, U : 直線偏光
(水平磁場を表す偏光線輪郭)

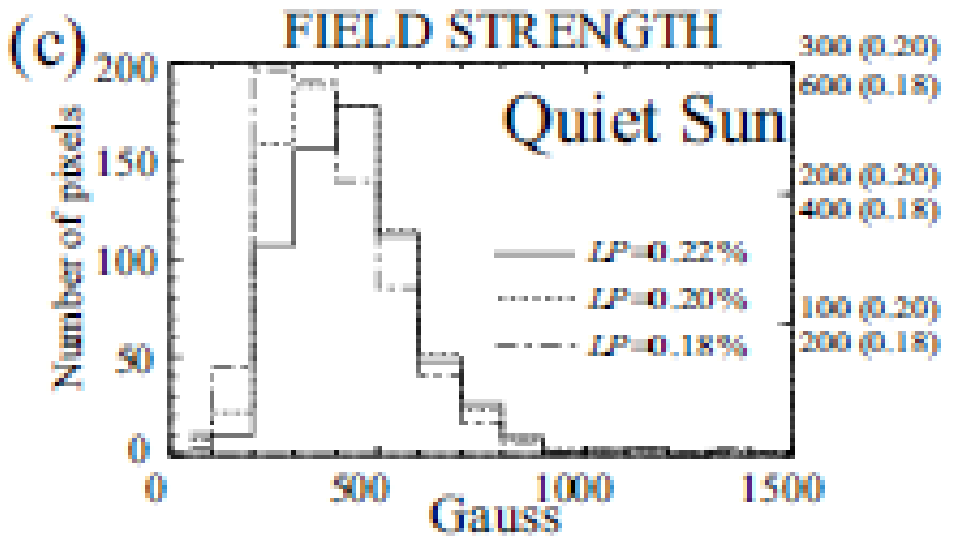
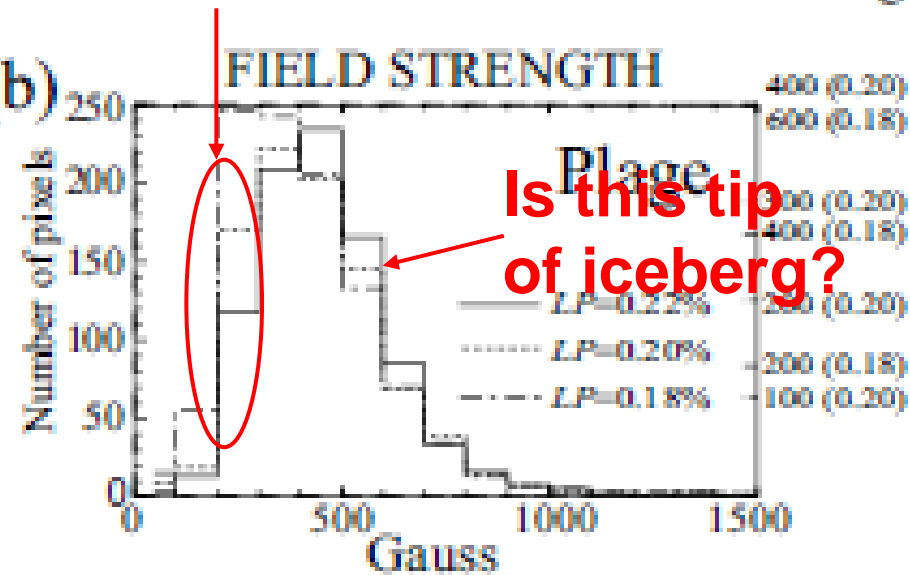
LPの分布がほとんど同じ

→ プラージュ領域でも静穏領域でも両方共通のメカニズムで水平磁場が発生。

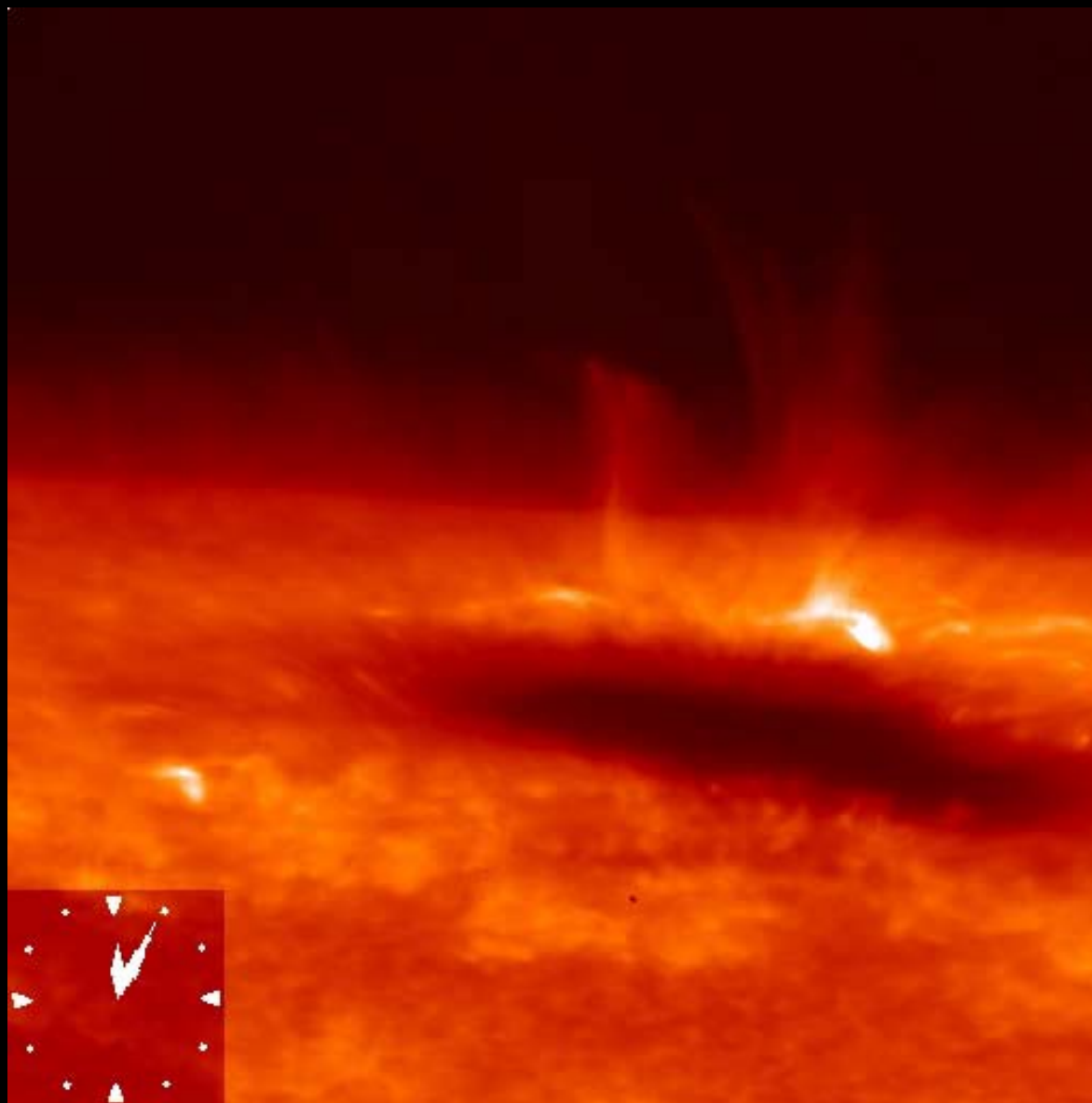
Open question: PDF of HTMF



Do we have weaker Horizontal fields?



彩層の予想外の活動性

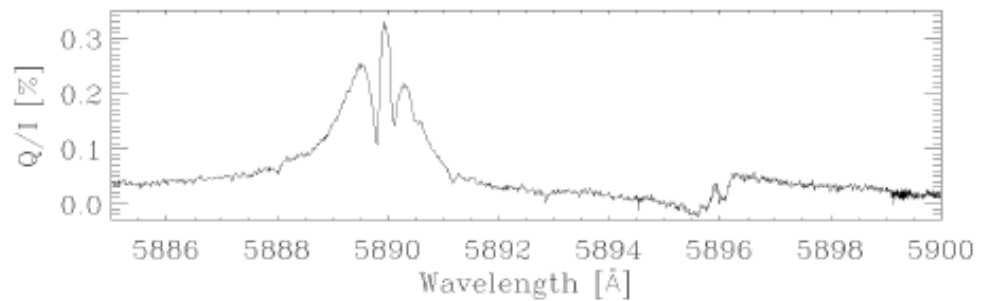
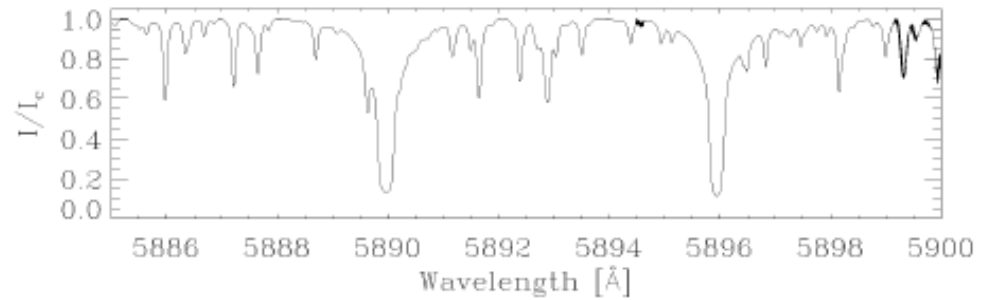
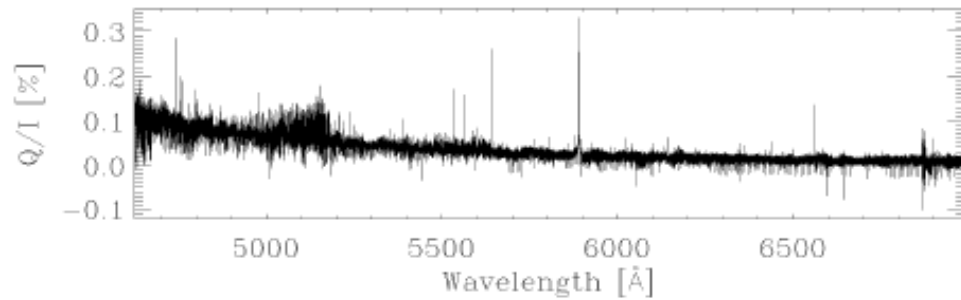
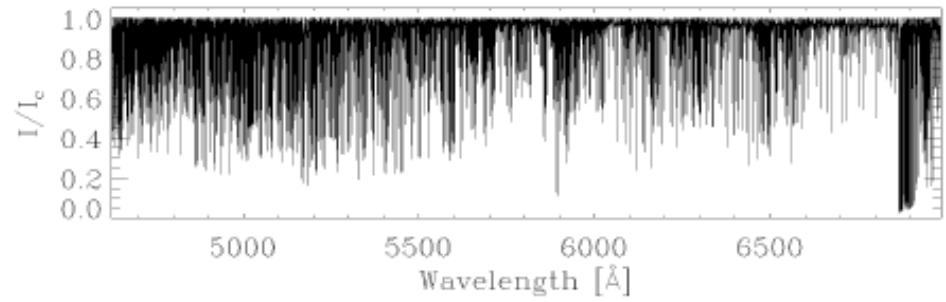


Energy flux of horizontal magnetic fields = chromospheric input

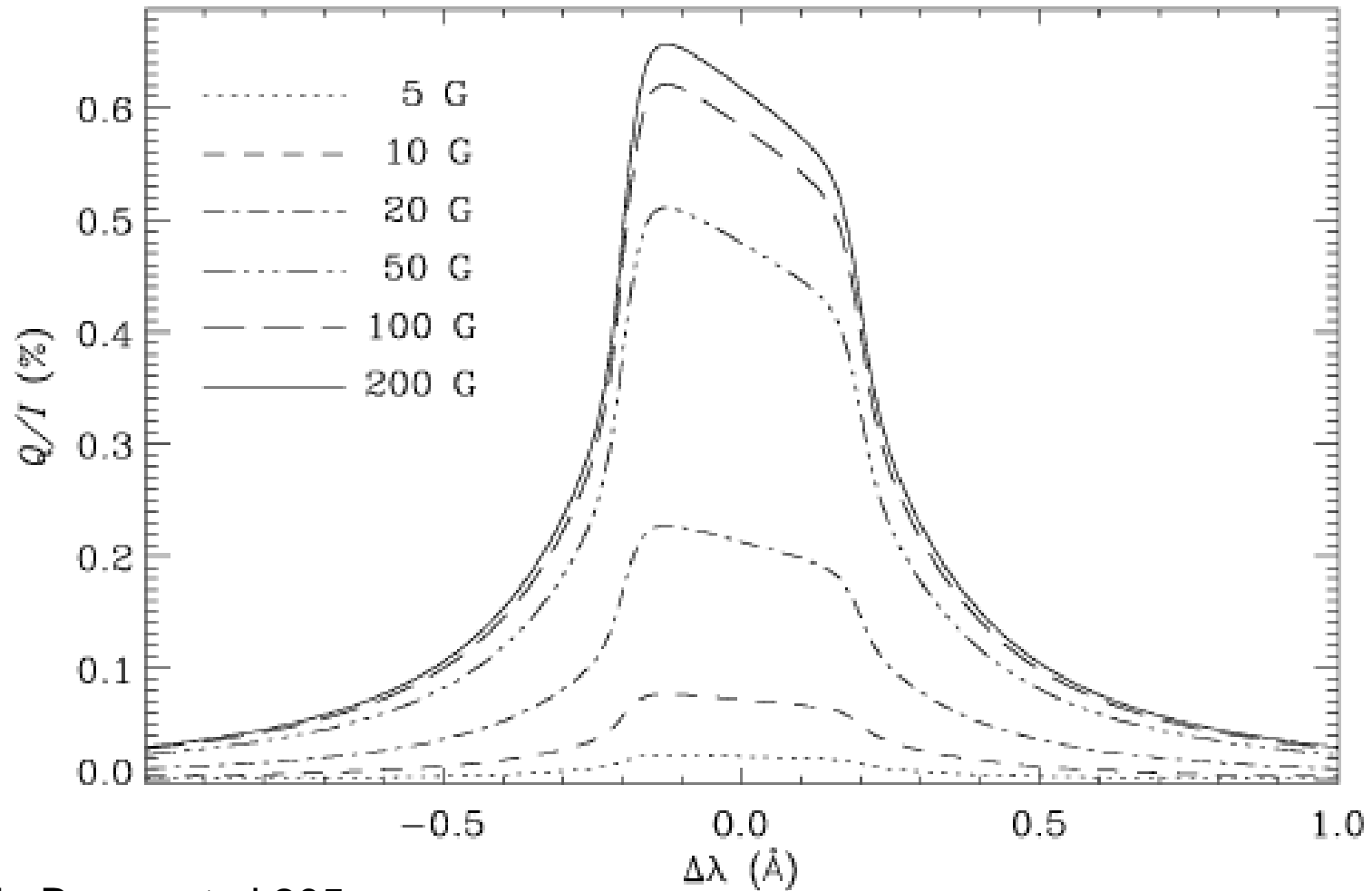
Parameter	Quiet Sun	Active region
Transition layer pressure (dyn cm^{-2})	7×10^{-2}	2
Coronal temperature (K , at $r \approx 1.1R_{\odot}$)	1.1 to 1.6×10^6	2.5×10^6
Coronal energy loss ($\text{erg cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$)		
Conduction flux F_c	2×10^5	10^5 to 10^7
Radiative flux F_r	10^5	10^5 to 5×10^6
Solar wind flux F_w	$\leq 5 \times 10^4$	(< 10^5)
Total corona loss $F_c + F_r + F_w$	3×10^5	10^7
Chromospheric radiative loss ($\text{erg cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$)		
Low chromosphere	2×10^6	$\geq 10^7$
Middle chromosphere	2×10^6	10^7
Upper chromosphere	3×10^5	2×10^6
Total chromospheric loss	4×10^6	2×10^7
Pointing flux of transient horizontal fields ($\text{erg cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$)	Quiet Sun $\sim 3 \times 10^6$	Plage region $\sim 6 \times 10^6$

コロナ・プロミネンス磁場 の直接観測

Second
Solar spectrum
(Observational)
(Stenflo & Keller 1996)



Lyman alpha Q/I due to Hanle effect (theoretical)



ハンレ効果を用いた 光球・コロナ・プロミネンス磁場の観測

- 散乱による直線偏光の生成 (Hanle効果)
 - ミリガウスから数100Gまで感度
 - リムだけでなく太陽中心も (水平磁場)
 - Mixed polarity regionでも信号が消えない
 - ドップラ幅が広くても良い。
- 光球だけでなく、UV での観測により、彩層・コロナ・プロミネンス磁場の直接観測が可能になる？
 - Permitted UV and EUV lines between 1600 \AA and 3000 \AA : Mg ii k-line at 2795 \AA or hydrogen Ly α line at 1216 \AA

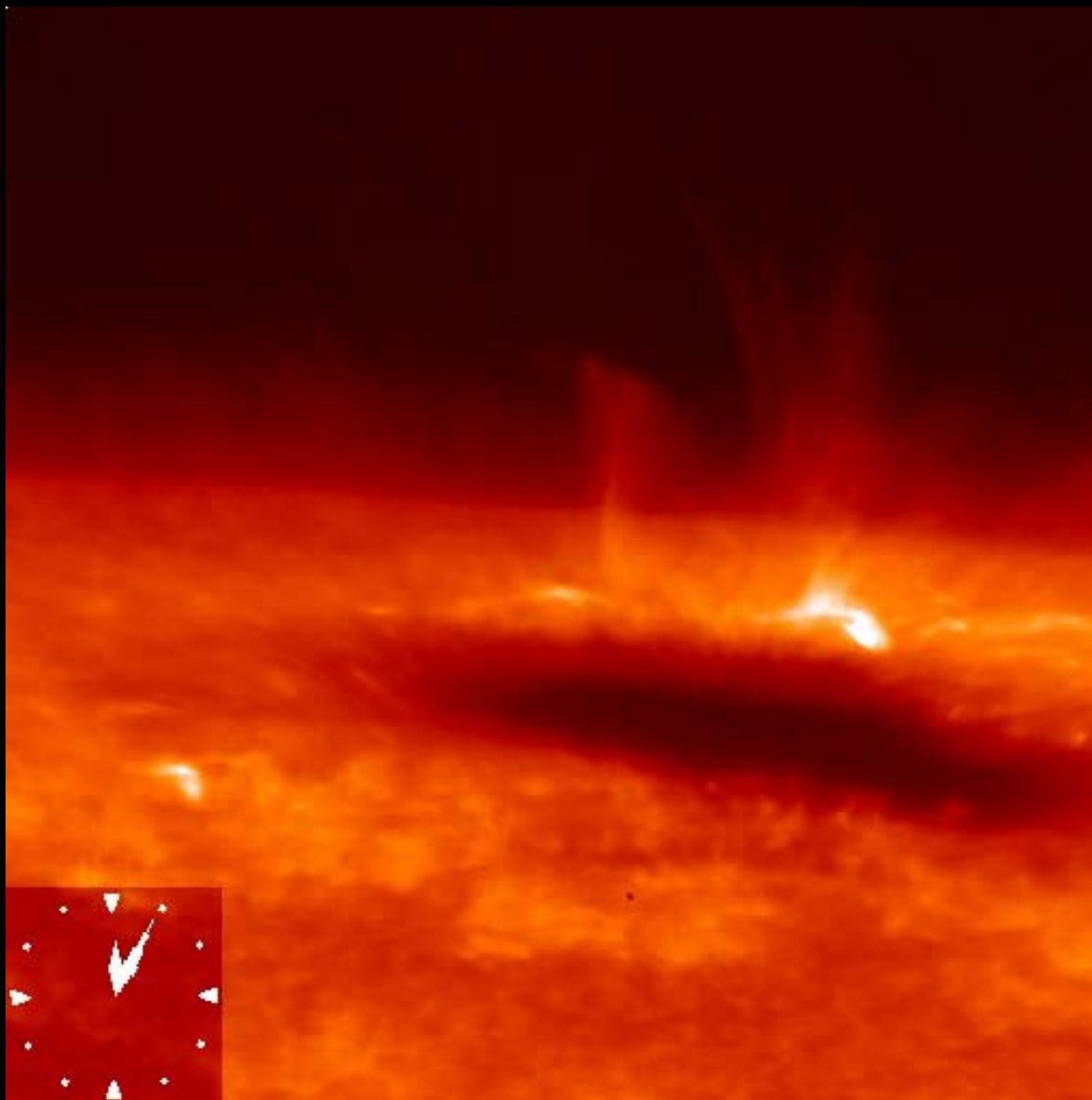
観測波長とカバーする大気

ラインのセレクション (Doschekのインプット)

- OTA:1300 to 8300 Å, Al + MgF₂ (beyond 1300 Å SiC)
- good coverage of the chromosphere and lower transition region
 - Ly-alpha H I temperatures
 - Si II e.g., 1533 Å and C II 1334 Å at around 2×10^4 K in the chromosphere
 - O V (about 2.2×10^5 K) in the lower transition region.
 - C II -1334, 1335; C III – 1909; C IV – 1548, 1550; N III – 1750 multiplet; N IV – 1486; O III – 1666; O IV – 1401 multiplet; Al III – 1854; Si II – 1304, 1256, 1533, 1808; Si III – 1892; Si IV – 1393, 1402; S IV – 1406; flare line – Fe XXI 1354, forbidden lines of Si VIII – 1445; Fe X – 1463; Fe XI – 1467; Fe XII – 1349 plus others.
 - goes slightly lower to about 1200 Å
 - H I (1025, H series plus helium lines); Si III – 1206, 1294 multiplet; N V – 1238, 1242; O V – 1218; S II - 1253, 1259; S III – 1201
- On the disk, the practical temperature coverage does not extend beyond the lower transition region ($< 2 \times 10^5$ K for Al coatings).
- Coronal lines
 - A group of strong lines is found within the EIS wavebands.
 - SUMER observes Si XII and Mg X (SiC coatings).
 - The strong coronal lines fall mostly below the SUMER wavelength range.

スペクトログラフの高速化

彩層の予想外の活動性



ひのでの観測結果から SOLAR-Cへの科学要求

- ダイナミカルな現象が多数発見され、
 - スペクトログラフによる分光診断がますます重要
 - 現象に追従するため10秒程度の早い時間分解能が必要
 - 水平磁場のようにサイズが ~ 1 秒角程度の現象があり、 0.2 秒角の空間分解能の維持が必要
 - 現象の全貌をとらえられる、あるいは現象を高い確率で捕まえられる視野サイズ(TBD秒角)が必要。

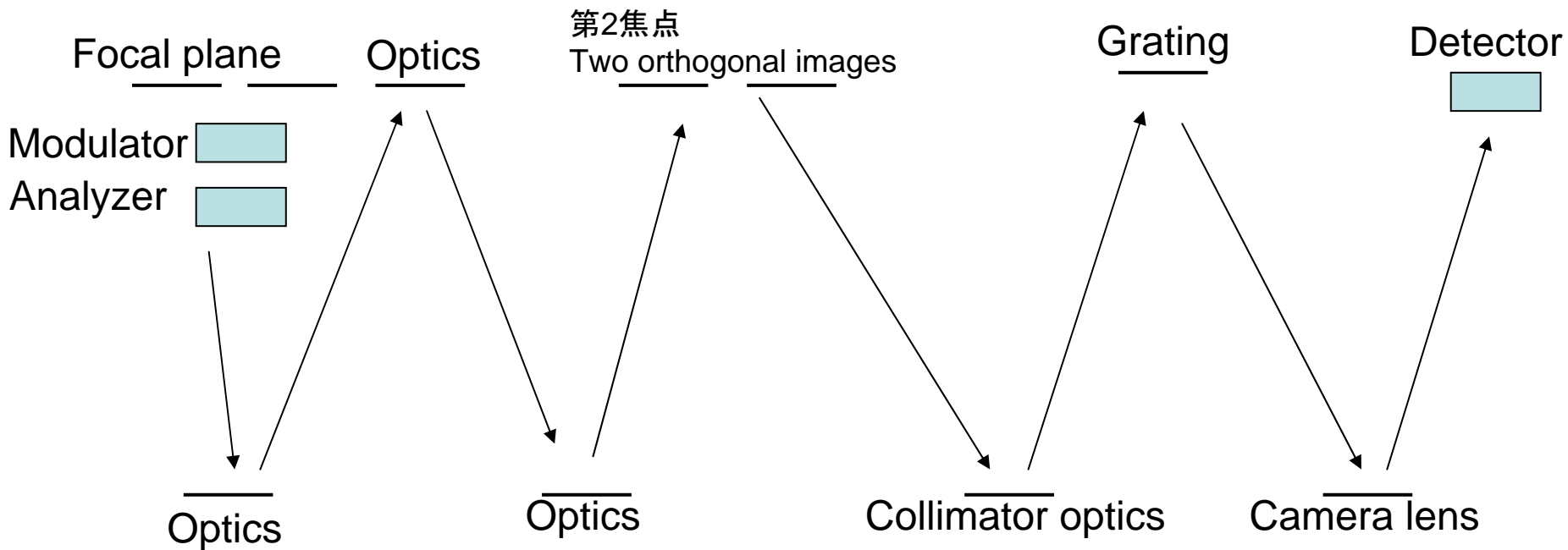
科学要求の装置設計への反映

- 開発要素を最少にするため、OTAの口径・基本設計をできるだけ維持する。
- 従来のスリットスキャンでは要求の実現は不可能。
- これが「撮像から分光へ」のSOLAR-Cミッションステータメント実現の最大の問題の一つ。
- このため、マルチオブジェクトスペクトログラフ化を行う。
- 高速化のため、CCDでなくCMOSを使用する？

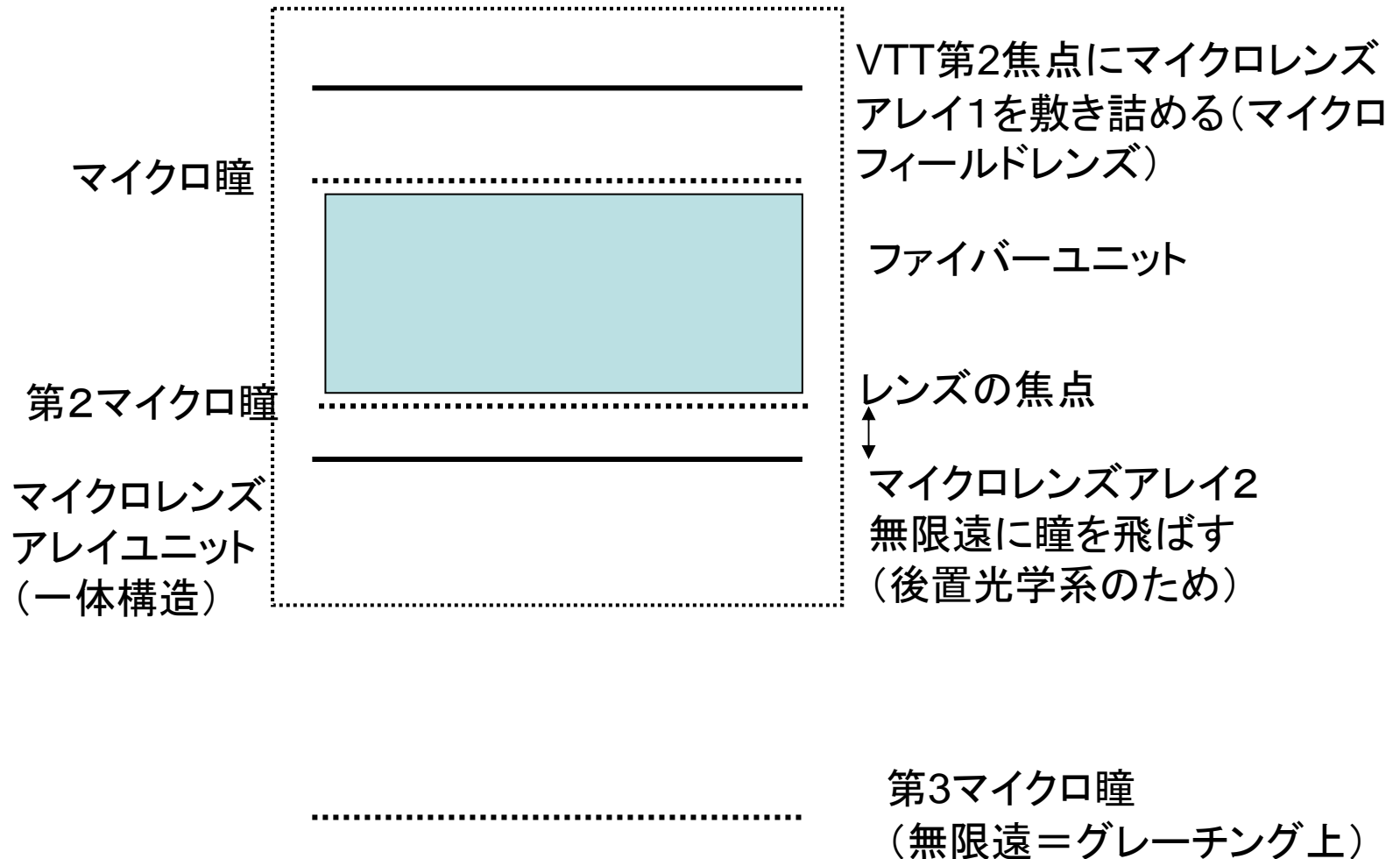
マルチオブジェクトスペクトログラフ

- Night-time astronomyで一般化しつつある
 - 観測対象が離散的でよい（遠方銀河など）、焦点面にファイバーを置いて実現（地上）
 - スペースでは、NASA James-Webb space telescopeでマイクロシャッターアレイを用いた地上から遠隔操作可能な画期的なマルチオブジェクトスペクトログラフを開発中（昨秋のGSFC訪問で視察）。
 - SOLAR-Cへの適用は、観測対象が連続的な太陽では、難しいと思われる。
- Spain IACマルチオブジェクトスペクトログラフをVTT用を開発している

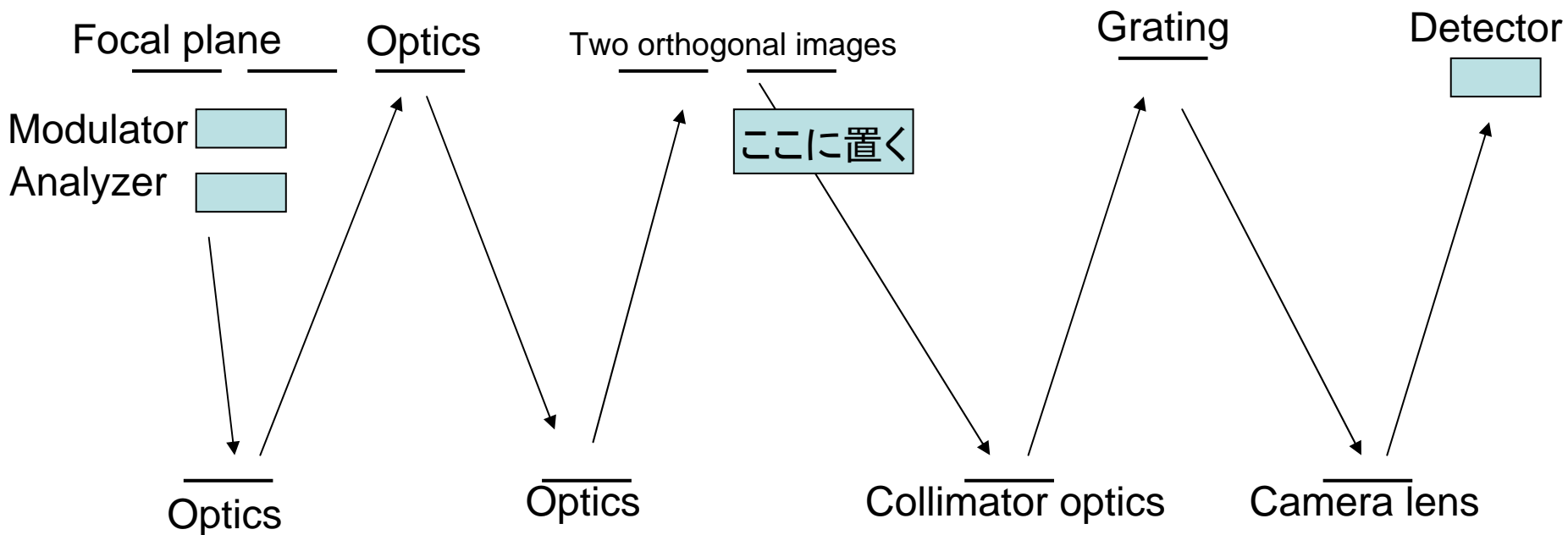
VTTスペクトログラフ



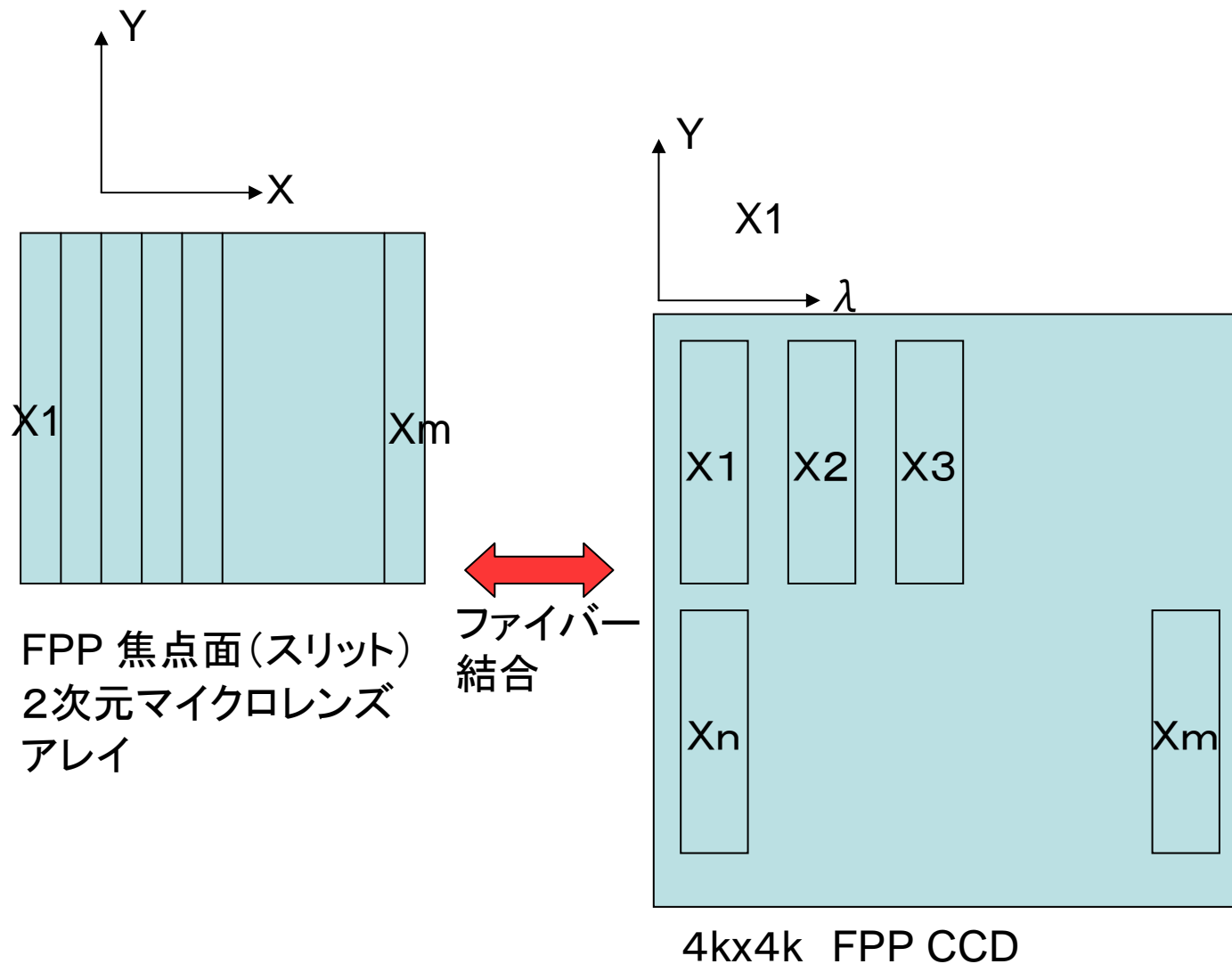
VTTの第2焦点に以下を挿入 (IAC Manolo Colladosの考案)



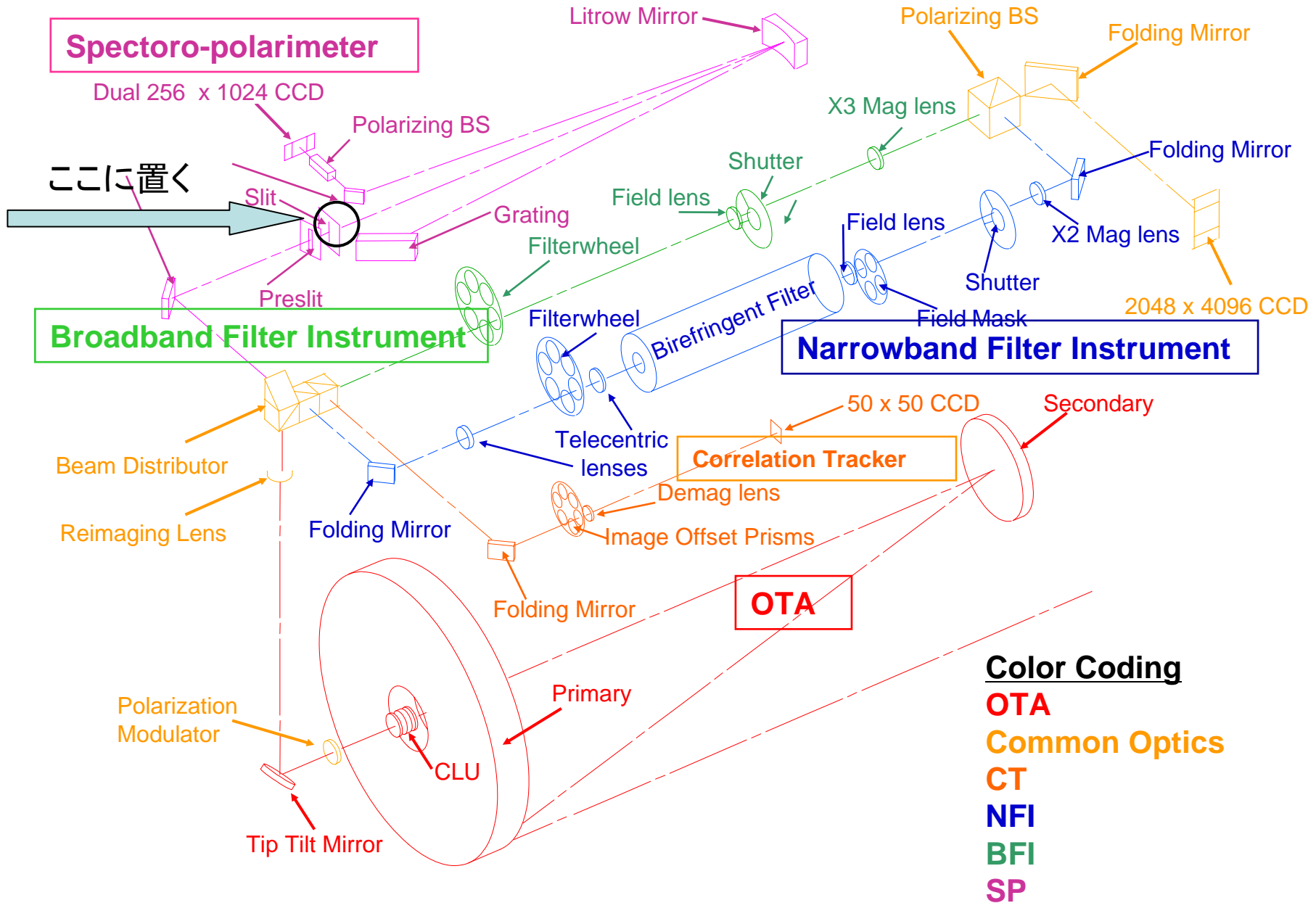
VTTスペクトログラフ (IAC Manolo Colladosの考案)



FPPへの応用:ファイバーによる視野のマッピングを行う



どこに入れるか？



マルチオブジェクトスペクトロ ポーラリメーターの威力は絶大

- 4kx4kCCD2個で、
- 波長方向256点で、画素は16x4096ピクセル=256x256=40秒x40秒角の領域を一挙に同時撮像分光(正方形視野の場合)。
- 視野の形状は、今後の検討により変更可能(ファイバーマッピングの仕方を変えるだけ)。
- SPを文字通りFGのように使える。Deepな撮像も同時にできる。
- さらに広視野はスキャンミラーにより実現。

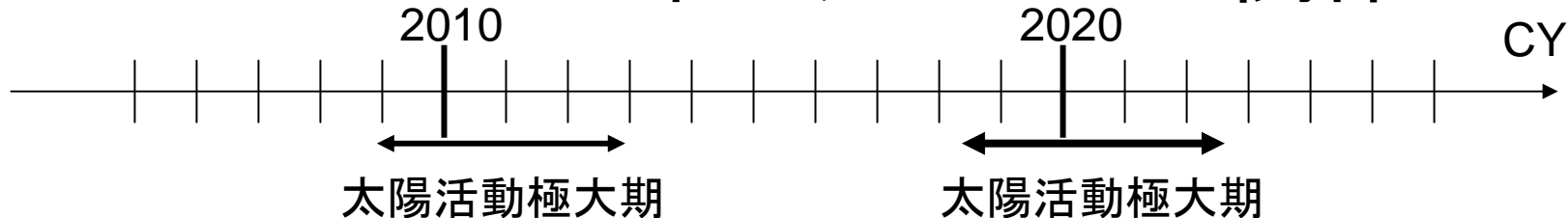
A案・B案決定の方針

- JAXA WGにおいて、2008年中に決定し、2008年度中にミッション提案。
- 決定の指針
 - サイエンスが主要ドライバー
 - 初期フェーズにある「ひので」のデータ解析の深化が方向性を示す。
 - A案については、軌道・衛星バスの実現性検討もキーポイント。
 - NASA・ESA計画との整合性。

C案！

- B案衛星(w/ サイスマロロジー装置)をA案軌道に持っていき、A案、B案のサイエンスの両方を行う。
- ただし、軌道傾斜角を小さくする。
 - SOLAR ORBITERは、35度までいく。

SOLAR-C・他ミッションとの関係



HINODE



SOLAR-C

B案 2015年2月

A案 2015年2月 軌道遷移

ATST (NSF)

2014

SDO (NASA)

2008年12月打上

Solar Orbiter (ESA)

2015年5月上

▲
2018年夏
観測地点到達

▲
2021年夏
軌道傾斜15度

2022-23年
軌道傾斜35度

注1: A案軌道遷移期間は、模式的で正確でない。

注2: NASAのDecadal planについては、NASAが委員会を編成中であり、SOLAR-Cも考慮した、SDO以降の米国の宇宙計画ロードマップが策定される。

注3: ESAのSOLAR ORBITERの0.22AU到達は、2018年夏。

2015年(CY)打上げの必須性

- A案の場合、極磁場の反転(太陽極大期前後)の観測のため、2018年には極に到達している必要がある。
- NASAのSDO衛星(太陽全面視野)との同時観測が必須
 - A案、B案とも太陽全面視野のSDOと相補的ミッション。
- ESA Solar Orbiter衛星との同時観測が必須
 - Aの場合、同時観測のためには、2015年打上げが必要。
 - 0.2AUの近距離でのその場観測、撮像観測
- ひのでの打ち上げが2006年であり、学問分野の継続的発展のためには、10年間隔でミッションが必要。
- NASA,ESAとも同時期に類似のミッションの計画がなく、長期的空白期間を作らない国際的要請。
 - B案の可視光UV高解像度望遠鏡は、日本以外では容易に実現できない。

SOLAR-C開発スケジュール

- 2014年度 打ち上げ〔2015年2月〕
- 2014年度 総合試験
- 2012～13年度 FM製作
- 2010～11年度 PM設計、製作
- 2009年度 JAXAフェーズA
- 2008年度 1案決定の上ミッション提案
- 2007年度 SOLAR-C WG設立

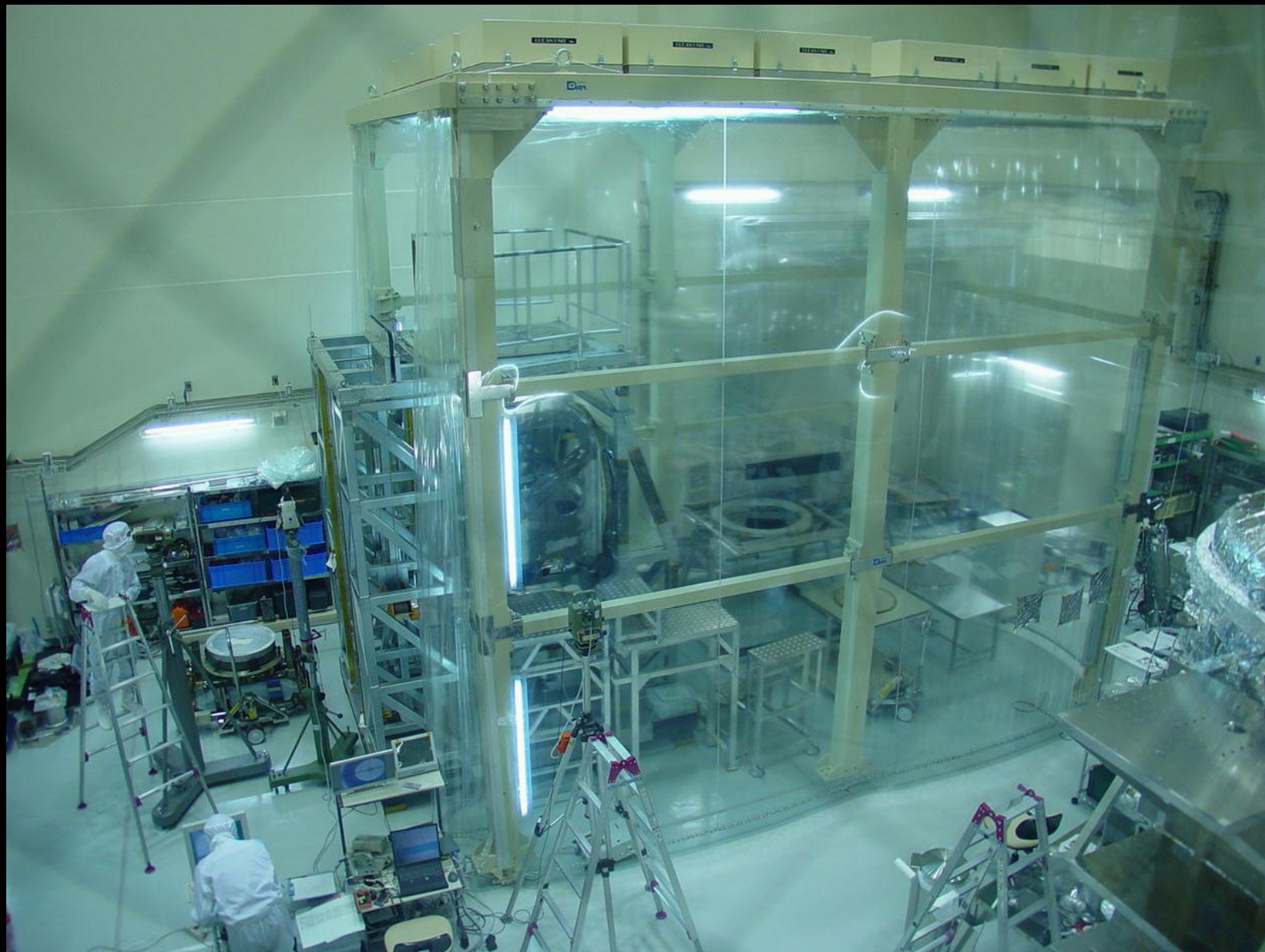
SOLAR-C検討・開発体制

- WG体制
 - JAXA WG主査 常田佐久
 - JAXA WG主査補佐 坂尾太郎、清水敏文、渡邊鉄哉
- 国立天文台SOLAR-C準備室
 - プロジェクト長 原弘久
- 大まかに言って、JAXAは衛星バス、天文台＋大学は、観測装置担当となるが、個々の研究者は相互乗り入れする：天文台もバス開発に協力、ISAS研究者も観測機器開発に深く関与。
- ひのでデータ解析とSOLAR-C検討のバランスのとれた取組。
- 太陽物理分野における大学との連携強化。

「ひので」で獲得した宇宙光学技術

- SOLAR-Bで獲得した先端宇宙光学技術の維持発展は、日本として必須。
 - 口径50cmクラスの回折限界太陽望遠鏡を宇宙に上げられるのは、ほぼ日本のみ。
- SOLAR-B試験設備を国立天文台先端技術センターにてSOLAR-C用に温存
 - 190平米クリーンルーム
 - 各種光学試験装置(含大型フラット)
 - 光学試験可能なスペースチャンバー
 - 太陽・星光導入用ヘリオスタット

国立天文台衛星搭載望遠鏡組み立て試験用クリーンルーム(190平米)



「ひので」可視光望遠鏡の組立・調整作業



SOLAR-Cマイルストーン

- 2007年10月16日
 - NASA本部打合
- 2007年12月5日
 - 国立天文台・臨時企画・財務拡大委員会ヒアリングでのSOLAR-C計画審議
- 2007年12月18日
 - NASA副長官とSOLAR-Cに関する懇談
- 2007年12月27日
 - ISAS宇宙理学委員会(SOLAR-C WG提案)
- 2008年1月30日—2月1日
 - SOLAR-C—ESAソーラーオービターサイエンス連絡会議(マックスプランク太陽圏研究所)
- 2008年夏
 - SOLAR-C検討国際会議(対ESA)
- 2008年秋
 - SOLAR-C検討国際会議(対NASA)

まとめ

- 日本の太陽物理・関連分野の研究者は、一致してSOLAR-C衛星の実現をサポートしている。
- SOLAR-Cへの国際的期待も極めて高く、ミッション実現に向けて、NASA、ESAへの継続的かつ緻密な対応が必要である。
- 国立天文台は、JAXAおよび大学と密接に協力して、SOLAR-C実現の中核機関としての役割を果たす。

関連研究機関

- 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部
 - 自然科学研究機構 国立天文台
 - 東京大学 大学院 理学系研究科
 - 京都大学 理学研究科
 - 名古屋大学 太陽地球環境研究所
 - 情報通信研究機構 電磁波計測研究センター
 - 海洋研究開発機構地球シミュレータセンター
- (順不同)