

次期地上太陽望遠鏡計画

地上太陽光学観測サブワーキンググループ
末松芳法（国立天文台・ひので）

太陽物理学と恒星物理学の相互交流と将来的展望 2011年12月28日

話の目的

計画の内容はほとんど白紙

2mクラスの太陽望遠鏡持てると良い(願望)

皆さん(特に恒星観測グループ)に支援(特にマンパワー)をお願いしたい。

太陽将来計画WS

2006-2007

太陽将来計画WS開催 → サブワーキンググループ内で詳細検討

- ・スペースからの観測
 - SOLAR-C、D（最もメジャーな計画）
- ・地上光学観測
 - 国立天文台・太陽観測所、京大・飛騨天文台将来計画
- ・電波・高エネルギー
 - ALMA、ロケット実験への参加、SOLAR-C XRT-GI
- ・理論・シミュレーション
 - ダイナモ、フレアトリガー
- ・分野間連携
 - 宇宙天気、磁気圏、他

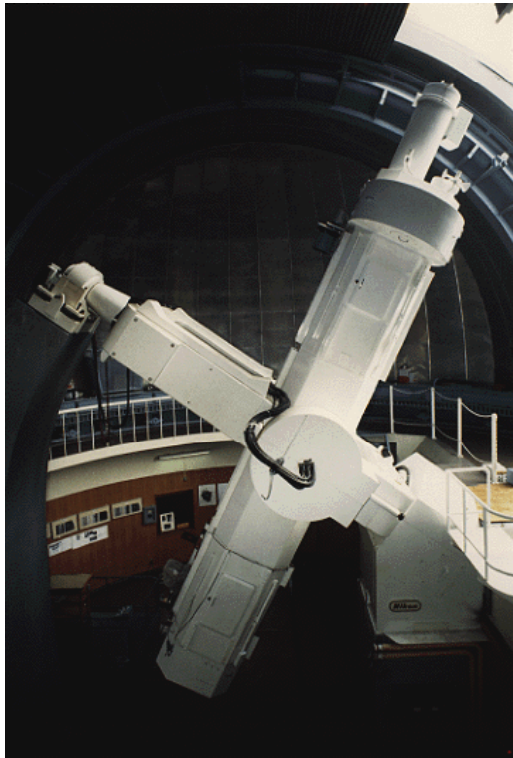
検討報告書の提示： 太陽研究者連絡会WEB内

http://www.kwasan.kyoto-u.ac.jp/renrakukai/PDF/solar_future.pdf

(要内容更新)

現状施設の老朽化、口径不足

アインシュタイン塔望遠鏡(48cm、1930年～1970?)
岡山65cm太陽クーデ・マグネトグラフ(1968年～1995年)
乗鞍コロナグラフ(25cm)・大型分光器(1972年～2009年)
飛騨ドームレス太陽望遠鏡(真空口径60cm、1979年～)



国立天文台・乗鞍25cmコロナグラフ、
付随する大型分光器で複数のコロナ
輝線観測可



京都大学・飛騨ドームレス太陽
望遠鏡。高分解観測への挑戦

地上・宇宙太陽望遠鏡 中大口径予定

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021		
SST Φ1			真空口径1mレンズ、カナリー諸島・ラ・パルマ											
NST Φ1.6			開放口径1.6m軸外し、カリフォルニア・ビッグベア											
GREGO RΦ1.5		?	開放口径1.5m軸対称、カナリー諸島・テネリフェ											
中国 Φ1			真空口径1m軸対称、昆明近郊Fuxian湖											
NLST Φ2												?	開放口径2m軸対称、ヒマラヤ・ハンレ近郊	
ATST Φ4			開放口径4m軸外し、ハワイ・ハレヤカラ											
EST Φ4?			開放口径4m軸対称、カナリー ラ・パルマ										?	
Solar-C Φ1.5?			SOLAR-C搭載、口径1.5mクラス											?

日本近くに望遠鏡できると、中口径ネットワークで1日連続観測

地上大口径へ

磁場(偏光)の観測が重要！

- ★磁気構造の集中化(フィラメント構造) → 高分解能($<0.1''$)
- ★ダイナミックな変化 → (時間分解能 <10 秒、構造/磁気音波速度)
- ★偏光精度 高いS/N
- ★磁場感度のあるスペクトル線 → 高分散



太陽と云えども **光子が不足！**



- ・大口径(分解能、photon)
- ・磁場観測に有利な赤外域(AOが有効)
- ・データの大容量化

→ 地上観測にも利点がある(もちろん宇宙でできればベスト)

地上太陽望遠鏡の進化

進む地上太陽観測

- ・地面より高い位置(~30m)に開口設置
- ・脱“真空”望遠鏡 → 大口径(口径1m以上)化
- ・ドームがあっても風の流れを積極的に利用するオープンコンセプト
- ・太陽用AOの実現 → 多分割化、multi-conjugate(高精度、広視野化)
- ・高速偏光変調、高速読み出しデジタルカメラ → 高精度偏光観測
像改善



Dutch Open Telescope。口径45cmで大きくは無いが、初めて開放型望遠鏡で回折限界を実現できることを示し、地上太陽望遠鏡の大型化への道を開いた。

地上像補正

一様とみなせる大気透過波面の大きさ: Fried parameter、
 $r_0 \sim \lambda^{6/5}$

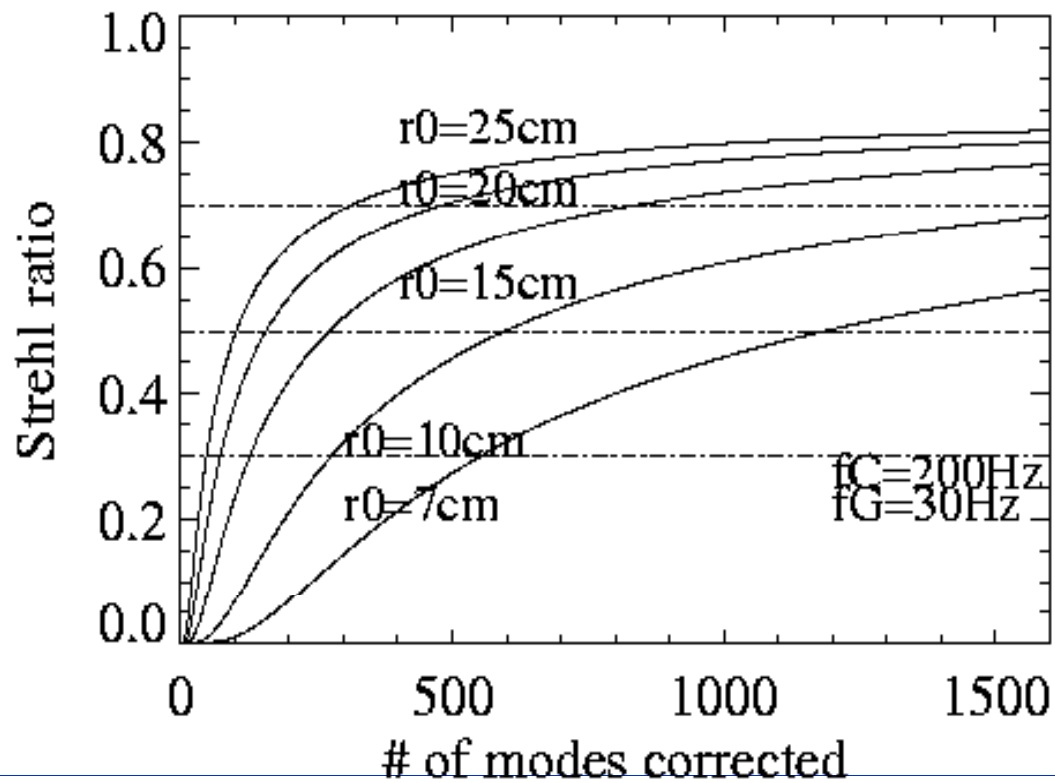
波長が長いほど有利 → 地上大口径では赤外観測が主となる
(大フォーマット赤外ディテクターの発展)

像補正には構造(一般に粒状斑)が見えることが必要
太陽縁近く、外(プロミネンスなど)の像補正は上手くいかない
(H α 像での像法性の可能性)
ここでは宇宙観測が圧倒的に有利(ひのでSOTの観測例)

Adaptive Optics for the ATST

Visible (500nm)

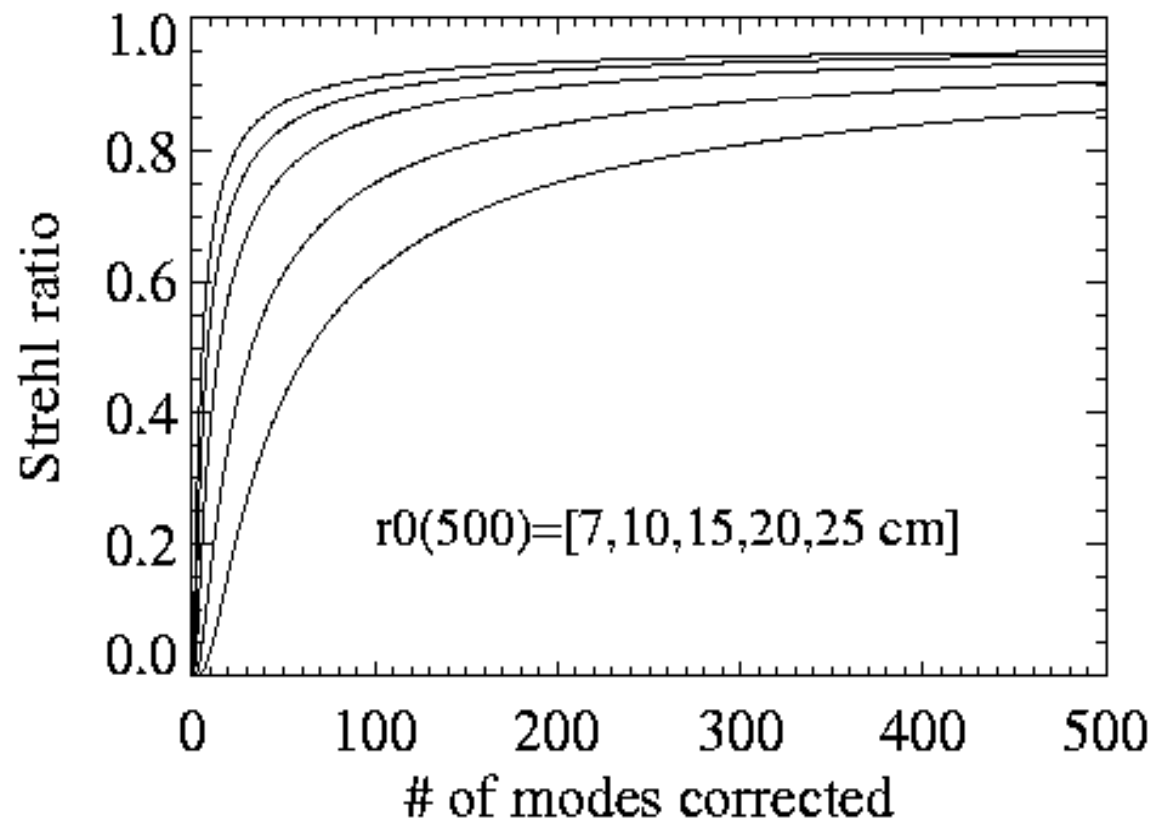
High Strehl Requirement leads to large number of DoFs



Adaptive Optics for the ATST

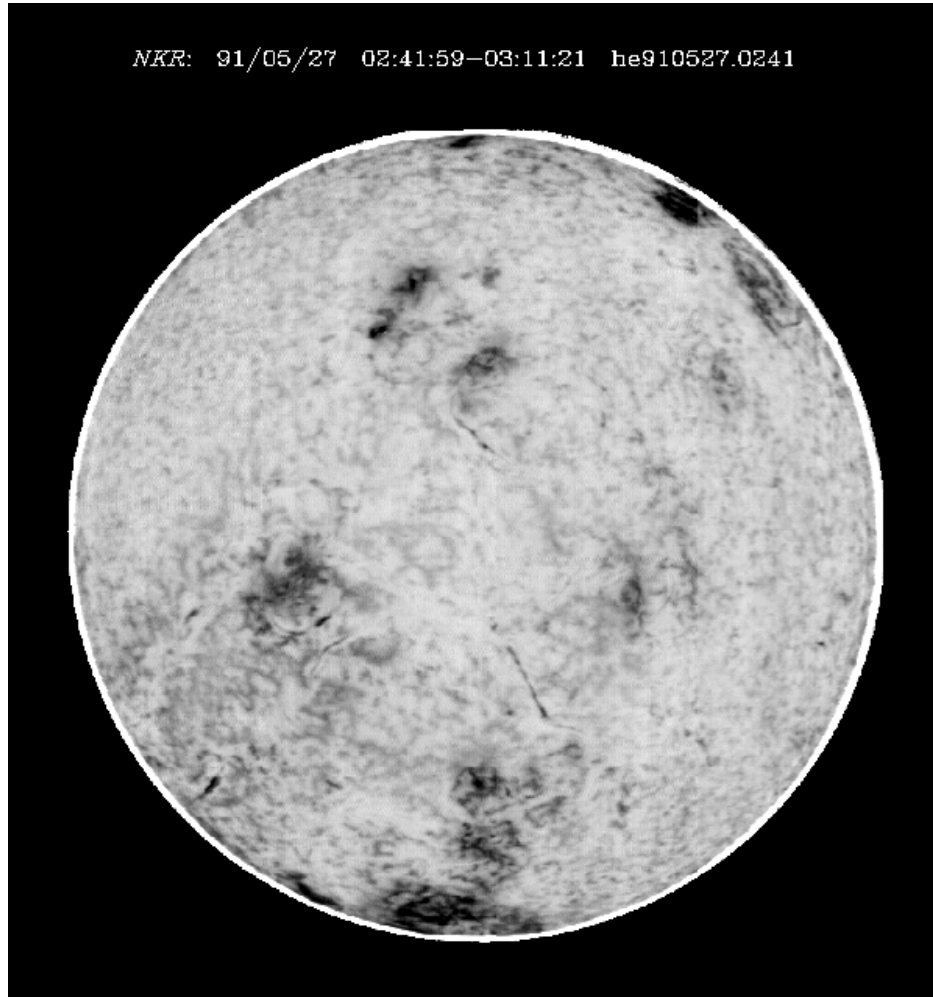
NIR (1.6 μ)

High Strehls are fairly easy to achieve!

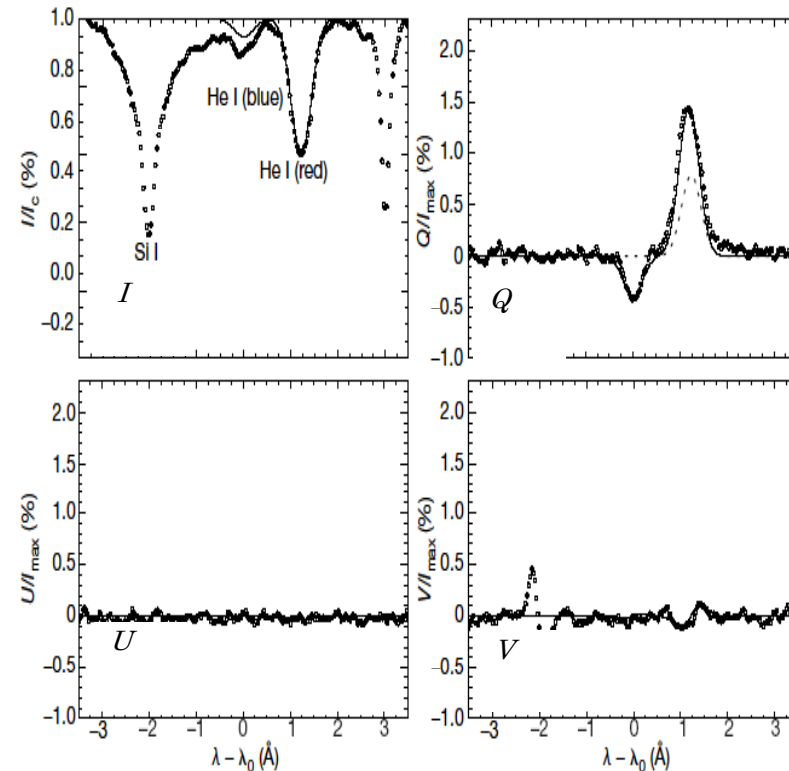


赤外の有用なスペクトル線：

磁場観測は赤外が有利



コロナの活動現象を反映するHe I 10830線観測(太陽全面、乗鞍コロナ観測所)



ダークフィラメントのHe I 10830Å ラインの偏光。散乱+磁場のハンレ効果による偏光が確認できる。(J. Trujillo Bueno et al. 2002, NATURE, 415, 24)

彩層上部(コロナ底部)の磁場ベクトル！

有用な光球・彩層スペクトル線(赤外)

波長(nm)	元素	χ (eV)	log(gf)	g_eff	remarks
676.78	Ni I	1.83	-1.89	1.5	
705	TiO				continuum
709.04	Fe I	4.23	-1.21	0	
722.45	Fe II	3.89	-3.39	0	
1006.319	FeH			0	umbra
1006.27	FeH			1	umbra
1062.76	Si I	5.86	-0.29	1.75	
1083	He I			1.44	chromosphere
1089.63	Fe I	3.07	-2.85	1.5	
1142.23	Fe I	2.2	-2.89	1.98	
1221.33	Fe I	4.64	-1.93	2.5	
1281.8	H I(P β)			1	chromosphere
1558.83	Fe I	6.37	0.25	1.5	
1564.85	Fe I	5.43	-0.67	3	
1630	cont.				opacity min
2208.367	Na I			1.3	no pai-comp
2227.358	Ti I			2.5	umbra
2324	CO				
4051.2	H I				chromosphere
4665	CO				
10879	He I				chromorphshre
11065	OH				chromosphere oscillation
11306	H I				chromosphere

宇宙観測時代： 宇宙観測と地上観測の共存

宇宙	地上
短波長域の観測 リム近く、リム外の観測	AOが働かない
安定(長時間)な広視野、回折限界分解能観測	AO+後処理(スペックルなど)、狭い視野(~1分角)、短時間(~1時間)、長波長域で高分解能観測 宇宙観測を超える分解能達成
安定したPSFによる広視野高精度偏光観測 測光観測	赤外域での狭視野高精度偏光観測 大気変動により絶対測光できない
データ発生量に制限	高時間分解能 多波長同時観測
観測波長、手法固定	観測手法の自由度大、新規性 教育的 多目的利用
	宇宙観測装置・手法へのpathfinder

地上は実験的、宇宙観測で確定

自前の中口径太陽望遠鏡でサイエンス広がる： 日本の独自性検討

偏光精度、広い視野、長期間連続観測（高分解能は他の大口径、スペースで）

サイエンス：

- ・活動領域の磁氣的進化
- ・フレア、フィラメント噴出などの発生機構と、宇宙天気予報への寄与
- ・太陽磁気構造の（活動領域の）周期活動
- ・スペクトル線の周期活動変動（太陽輝度変化の要因）
- ・恒星の周期活動とダイナモ機構の解明
- ・光球、彩層のダイナミクス
- ・他の地上、スペース観測との連携、相補的観測によるサイエンス
- ・などなど

地上のメリット

- ・長期にわたる均質データ蓄積
- ・大量データ取得による磁場解析高精度化

データ処理

- ・光球から彩層にかけて3次元ベクトル磁場、大気モデル、3次元速度場導出
- ・得られたベクトル磁場から、コロナ磁場のNLFF導出

地上の利点： 恒星（ダイナモ、フレア）観測も

星としての太陽研究に貢献

恒星の変動周期や磁場強度などの物理量は、太陽ひとつに比べ、幅広く、普遍的なダイナモ機構のヒントを与えてくれる。しかしながら、精度良い活動周期や、磁場強度とその変動周期の決定に必要な観測的データは不足している。なかでも、磁場強度の長期的な変動観測はまだあまり行われておらず、ダイナモを理解する上で有用な項目であると考えられる。

- ・恒星の常時・長期観測が必要。
 - ・今のところ共同利用観測が主。
 - ・口径2m以上の望遠鏡による常時観測
- 偏光磁場
Ca II
He I 10830(コロナ活動情報)

仕様検討

	次期太陽大口径望遠鏡	ATST (口径4m、米国)
サイエンスからの要求	高空間分解能 高精度偏光診断 恒星偏光観測	高空間分解能 偏光診断 赤外コロナ観測
主な特徴	昼夜両用偏光観測	大口径コロナグラフ (主鏡のクリーン度維持が鍵)。夜の観測は重視しない方針。
口径	~ 2 m	4 m
観測波長	0.3~25μm	0.3~25 μ m
空間分解能	0.05'' (撮像) ~0.2'' (偏光)	0.03''@500nm
視野	~3分角	3分角 (5分角目標)
偏光測光精度	~10⁻⁵	<10 ⁻⁴ 軸外シグレゴリアンによる人為偏光の較正が鍵
備考	寿命： 30年以上 (恒星の周期活動)	寿命： 30-40年想定 建設予定地： ハレヤカラ (標高3000m)、2010年建設開始予定、2015年ファーストライト予定

なぜ口径2mクラス？

- 低予算で出来るだけ大口徑(わずかでも世界一にできればなおベスト)

 - 実績(口径1.8mカセグレイン望遠鏡のみ ~2億円?)

- AOの現実的能力

- 焦点面装置の光学系(口径に伴い大型化)

- 運用・維持のし易さ

 - ...

太陽望遠鏡は熱処理の容易なグレゴリー

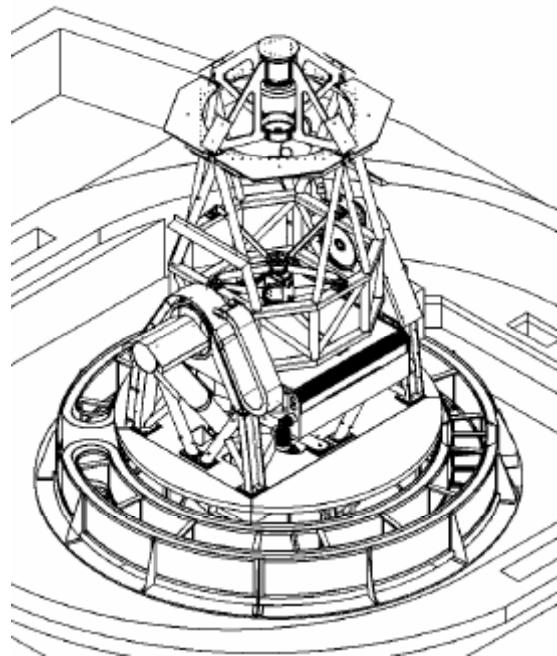
屋外開放型

偏光観測を重視すると、軸対称光学系；

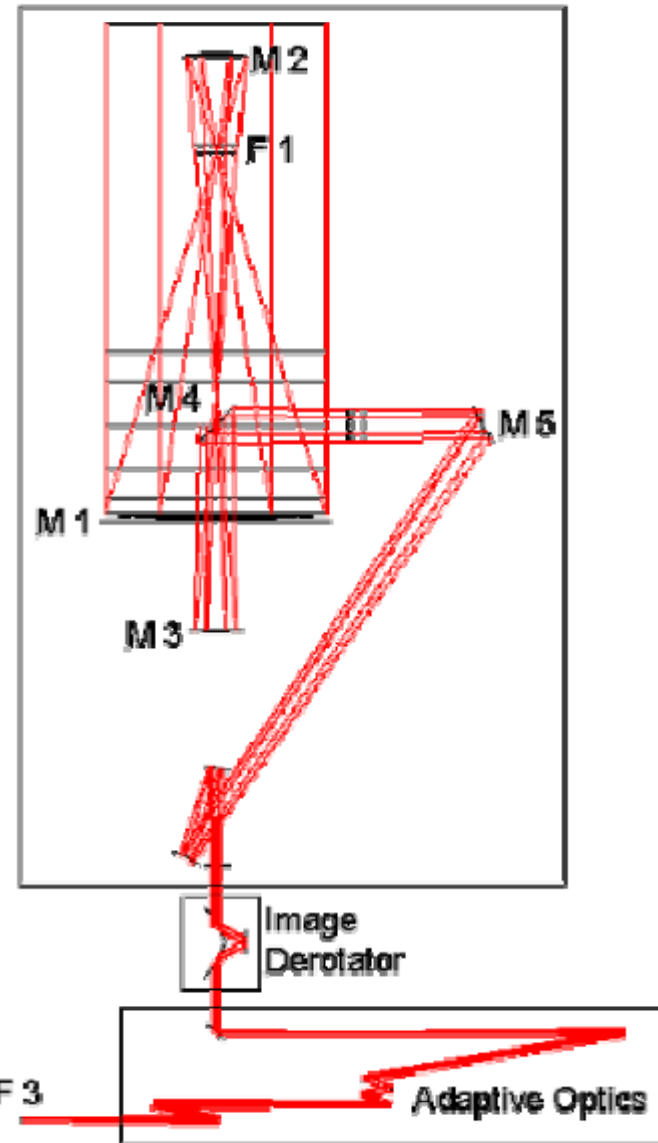
GREGORにちかいもの

像質、AO重視なら、軸外し

NST、ATSTにちかいもの



GREGOR光学系



サイト候補(未調査)

日本の適地？

晴天率、過去のシーイング調査 → 浜名湖

既にインフラがある → 岡山天体物理観測所

アジア適所(海外協力、リモート観測)

中国・Fuxian湖 (昆明郊外、標高1750m、中国太陽観測の拠点)

晴天率、シーイング良好

太陽口径1m真空望遠鏡他建設



インド・ハンレ近郊湖(標高4500m)

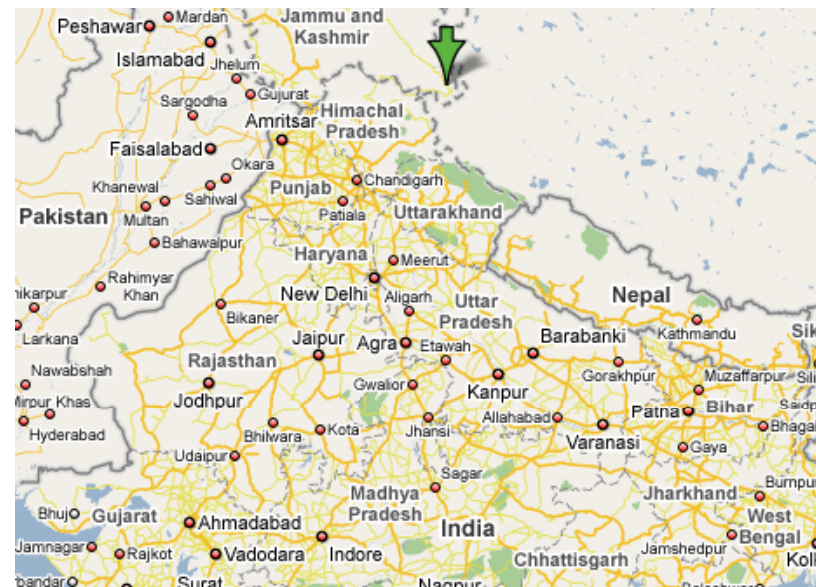
シーイング調査中(インド)

インド2m太陽望遠鏡の候補地

台湾

合歡山(標高~3000m)

夜間2m望遠鏡とは別の山



望遠鏡大型化共通の技術課題

観測装置の大型化

フィルター装置： 開口20cmを越すファブリ・ペロ・エタロンの開発

面分光装置： どれが良い？

- ・Multi Slit
- ・イメージスライサー(短冊像をスリットに配列)
- ・MLA-Fiber Bundle-Multi Slit (大bundleの開発)
- ・TUNIS (Double Pass Spectro Imaging)

Speckle Reconstruction (露出10msec以下で100枚以上)

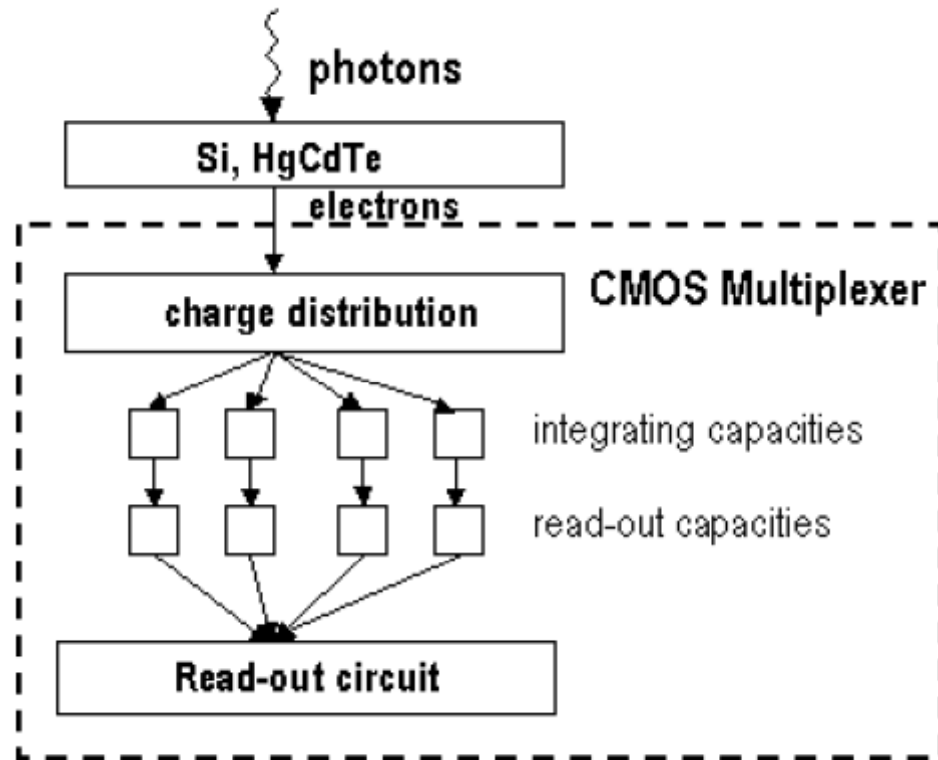
大フォーマット(4k×4k)高速読み出しCMOSセンサーの開発

現在： 2560x2160 front side, 110fps, 3e- read noise

大容量データハンドリングシステムの開発

ATSTでも新たな技術開発の十分な予算がない！

Charge Caching CMOS detector for Polarimetry (C3PO, Keller 2002)



Schematic layout of a single pixel of a new CMOS hybrid array detector that is capable of measuring all four Stokes parameters. It has a 100% geometric fill factor and very high quantum efficiency.

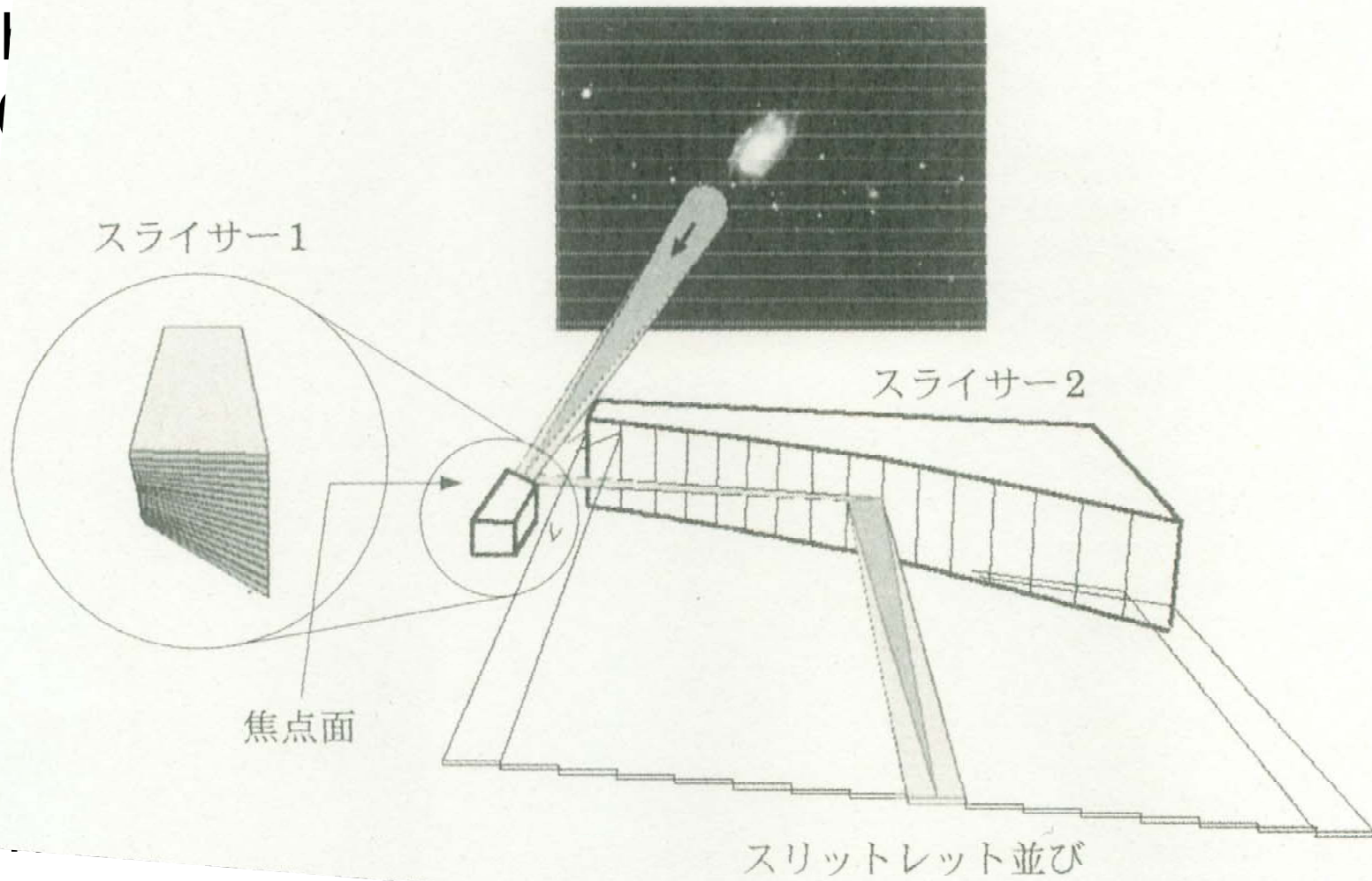
The photosensitive layer can be chosen to cover either the 300 to 1100-nm or the 1000 to 5000-nm wavelength ranges.

Table 1: Comparison of ZIMPOL II and C³Po concept.

	ZIMPOL II	C ³ Po
Geometric fill factor	<25%	100%
Peak quantum efficiency	<35%	>85%
Wavelength coverage	200 – 1100 nm	200 – 10,000 nm
Full-well depth	250,000	>500,000

Capability of Winlight Optics

TI
20
O
n
r



Slicer Mirrors for UV and Visible Light Observations (Winlight Optics)

Table. 1. Summary of optical performances typically reached with our method. This innovative method provides well known performances since it is based on classical polishing techniques. It is interesting to note that because all slices are produced during the same process all the above performances are homogeneous over all slices.

Surface shape accuracy	$\lambda/100$ rms
Surface roughness	<0.4 nm
Edges quality	from 1 μm to 5 μm
Tilt error of slices	< 15 arcsec PTV

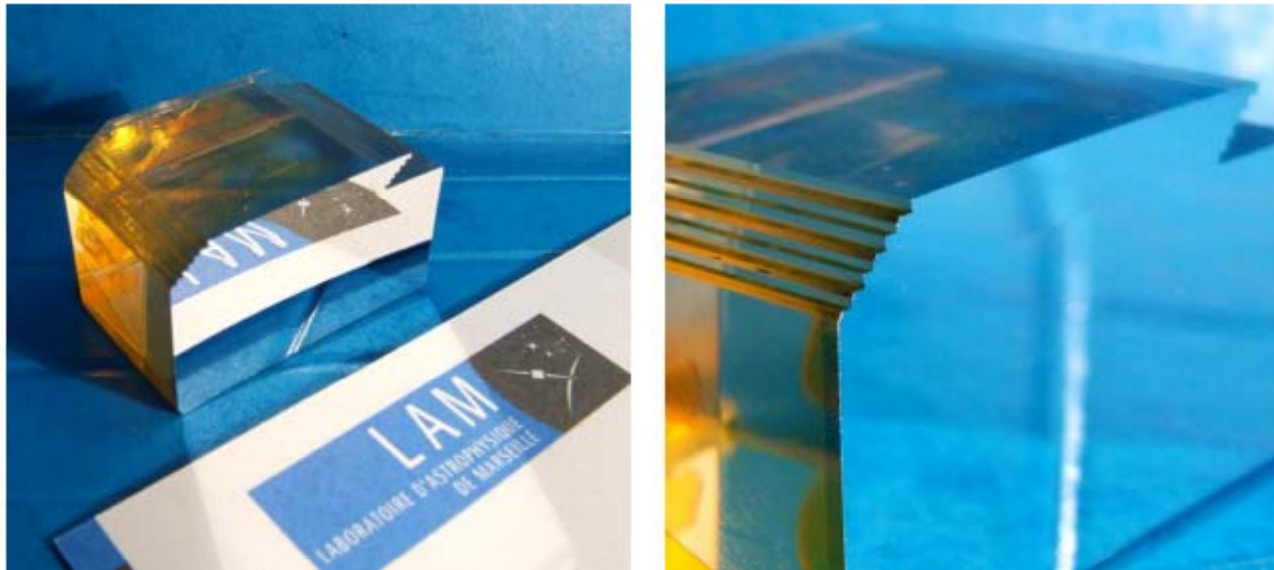


Fig. 3. Slicer mirror demonstrator designed by LAM and manufactured by Winlight Optics. It is composed of 6 slices (0.5x23mm). Note that slices are stacked to show the disposition of slices on the block during polishing.

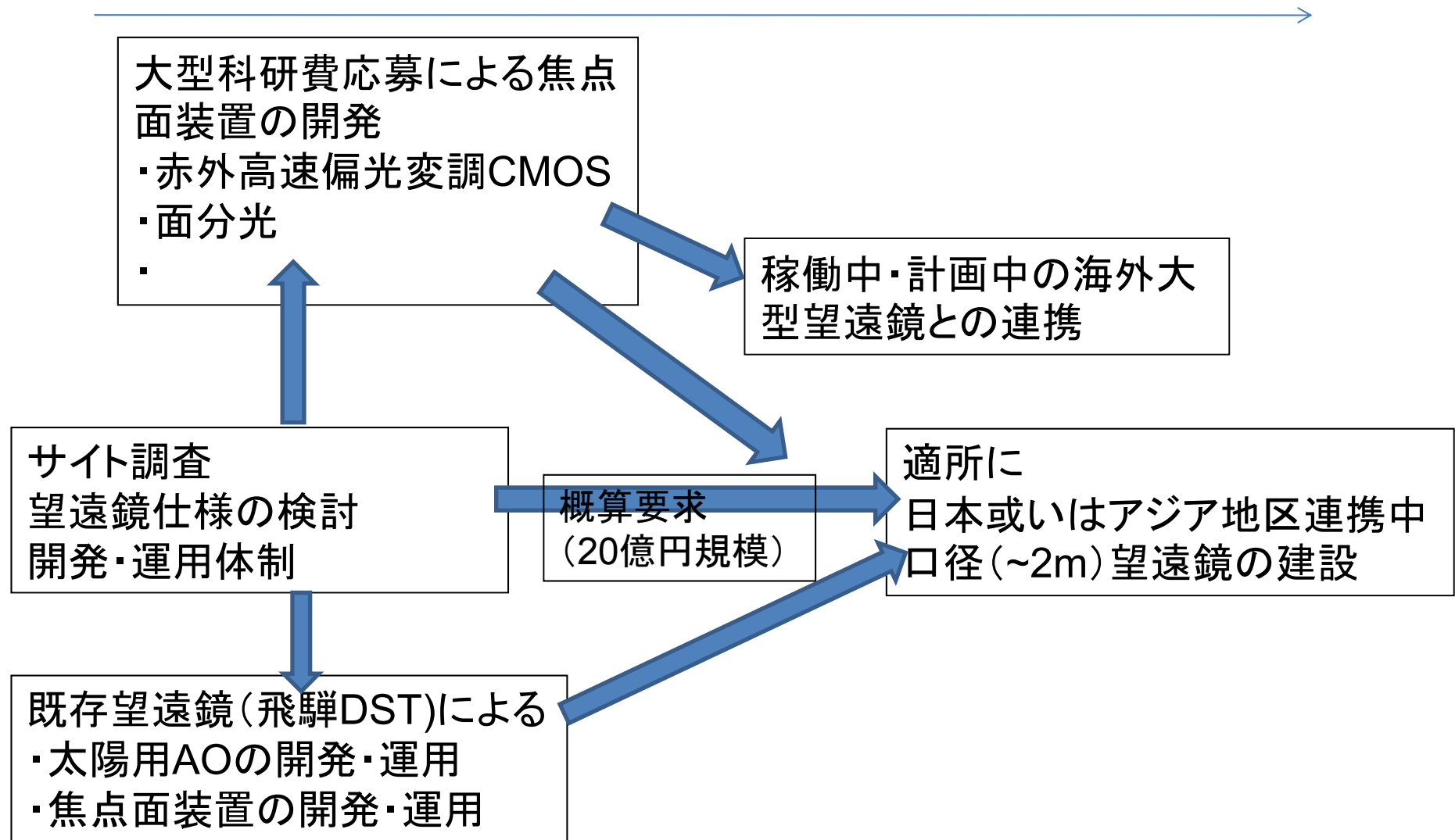
計画の目的まとめ

- ユニークな観測を実現する地上2mクラスの太陽(+恒星)望遠鏡を建設する。
- 太陽磁場とそれに関連する磁気プラズマ現象を、特に短期的予報や長期継続観測に軸足を置いた宇宙天気・宇宙気候サイエンスの立場から解明することを目的
- 広い視野・大型のバックエンド装置・融通の利く望遠鏡時間といった特性により、スペース望遠鏡とも地上大口径装置とも相補的な役割を担う(共同利用)。
- 同時に恒星の活動周期現象を詳細に長期にわたり観測することにより太陽を含む恒星ダイナモ一般の理解を深める研究も視野にいれる。
- 長期かつ太陽全体を広くとらえる観測により、短期的には太陽活動現象の予測、長期的にはダイナモ現象に迫るような成果がもつとも期待される。
- 手近な望遠鏡を持つことは将来へ向けた装置開発(地上・スペースを問わず)の基地ともなる(学生教育も)。

検討推進・(運用)体制

国立天文台・太陽観測所 (ホスト機関)	地上太陽グループ 研究員(名大STE研)	一部SOLAR-Cと併任
京都大学・附属天文台	太陽グループ	
北見工大	AO開発、画像改善グループ	
(恒星観測グループ)	積極的な参加を期待!	

計画の進め方



日本の資産

スペース技術
地上観測資産



ひので可視光望遠鏡の開発

(口径50cm、世界最大の宇宙回折限界太陽望遠鏡！ +高精度偏光観測)



スペース望遠鏡
(SOLAR-C、他)



地上太陽望遠鏡

・太陽用AOの開発 (国立天文台・花岡、北見工大・三浦、京都大学・飛驒)

・ユニークな焦点面観測装置の開発

偏光観測精度の向上(フレア望遠鏡、乗鞍NHK、飛驒)

(擬似)2次元同時分光(乗鞍NOGIS、SPヘリオグラフ、)

2次元同時分光(MLA)

赤外観測(乗鞍、赤外ストークスポーラリメータ)