

# Solar-C時代の地上太陽 観測

2010年1月20日 Solar-C 国内会議

末松 芳法

# 大口径、分解能の必要性

彩層研究の重要性(「ひので」以降ますます)

彩層のない恒星はない

さまざまな磁気プラズマ現象

プラズマ $\beta \sim 1$ 前後の境界層、磁気波動のモード変換

加熱

磁気浮上現象

コロナ、プロミネンスへの質量供給(太陽風、宇宙天気)

コロナ磁場( $\beta < 1$ )の境界条件: コロナ磁気エネルギー変化の正確な見積りへ

光球

強磁場構造: 黒点の理解

微小磁気構造の形成

乱流磁場

表面ダイナモ

対流構造

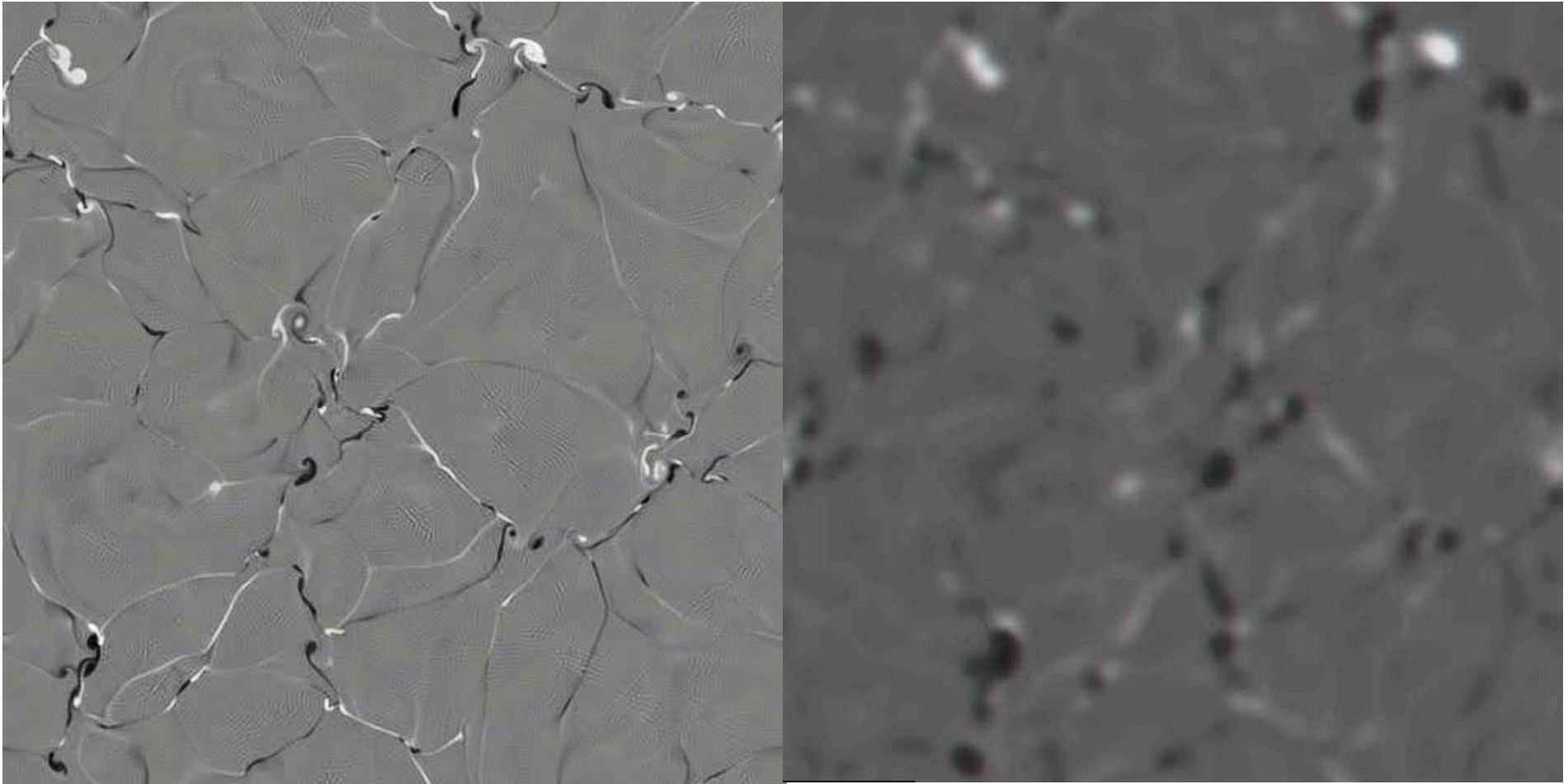
...

2006-11-22T05:57:31.405Z



ひので可視光望遠鏡Ca II H彩層

# 磁場構造の分解



Small-scale dynamo. Mixed polarity fields are “generated” in intergranular lanes. A movie showing the evolution of these fields (<http://flash.uchicago.edu/~mhd>) demonstrates how field lines get twisted and tangled by vortex motions. This important detail (left) is lost when the resolution is reduced to what can currently be achieved with the best high resolution telescopes and adaptive optics (courtesy of F. Cattaneo ).

# 地上vs.宇宙

## 地上に不利な点

- ・大気の影響

像劣化（部分的に補正可能なのはこの部分のみ）

シンチレーション（明るさの短時間変動）

波長透過率

透明度の変化

波長分散（波長による大気屈折率の影響）

## 地上に有利な点

- ・観測手法の自由度、最新技術の導入

- ・観測装置の物理サイズの自由度

- ・データ取得レート、データ発生量

# 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



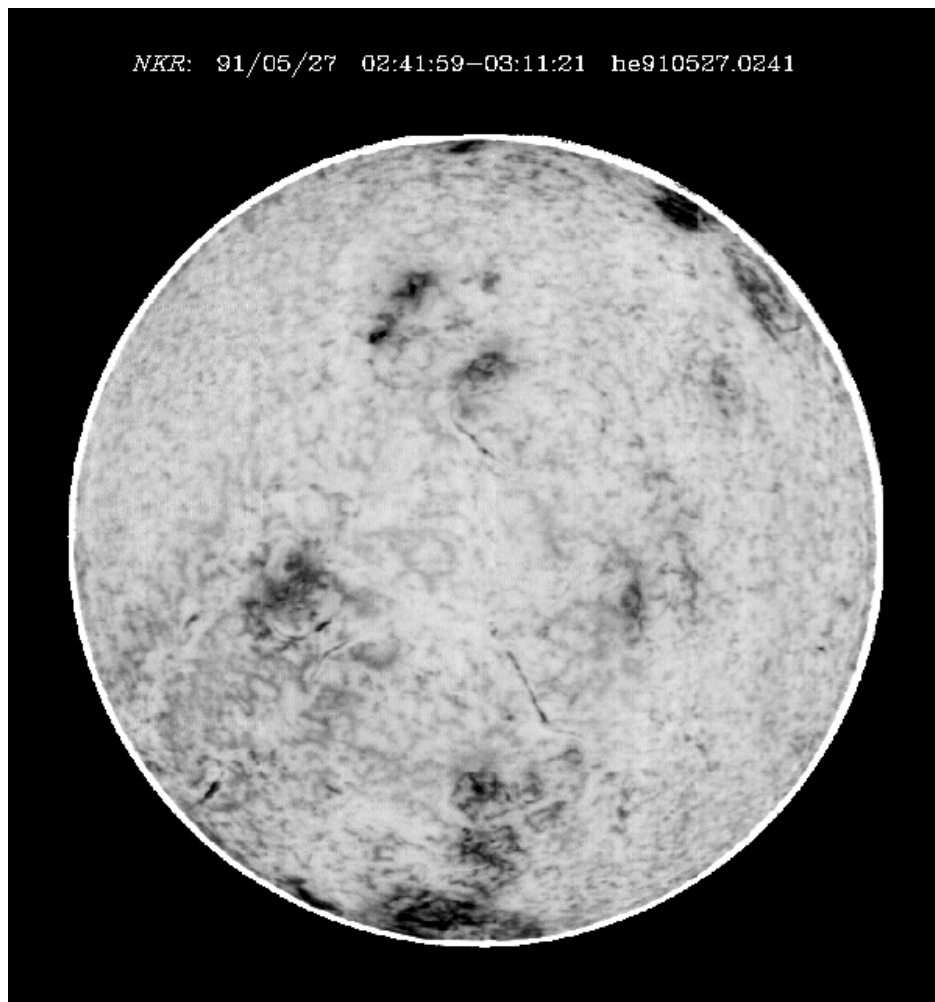
太陽と云えども **光子が不足！**



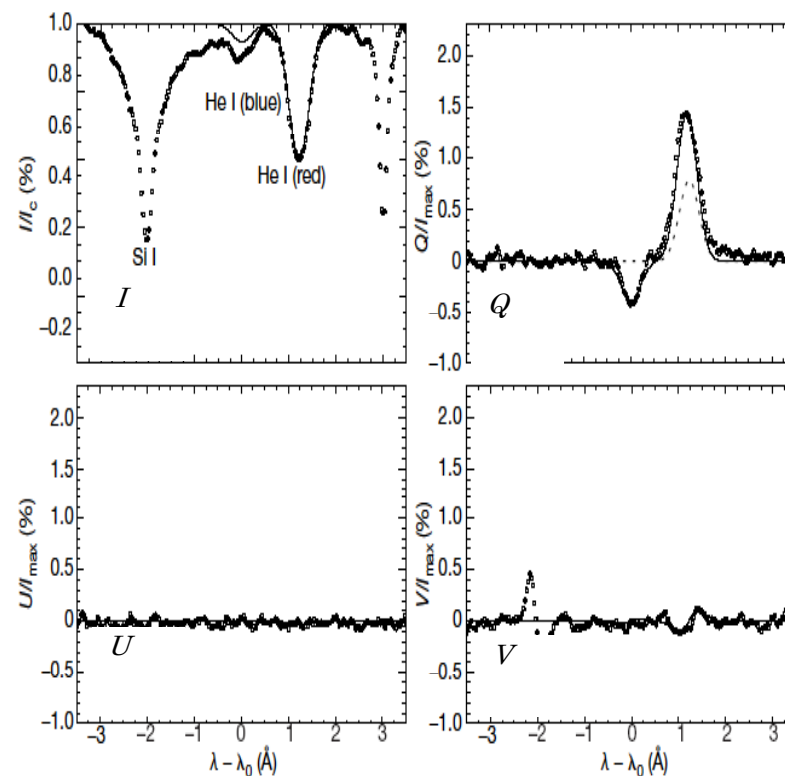
- ・大口径(分解能、photon)
- ・磁場観測に有利な赤外域(AOが有効)
- ・データの大容量化

→ 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)

# 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!**

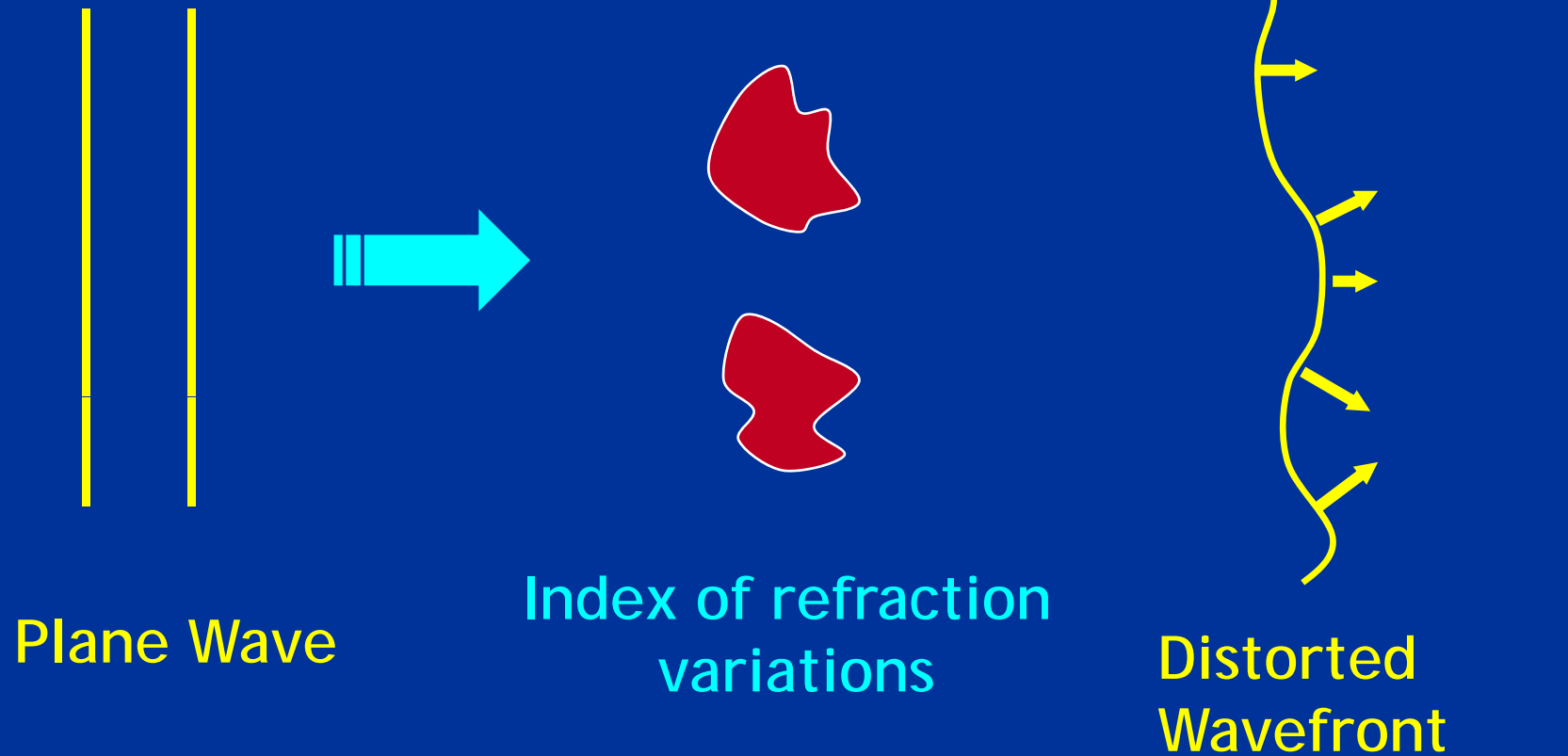
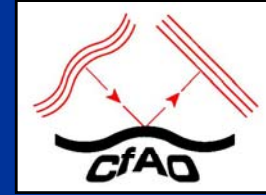
# 地上像補正

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)

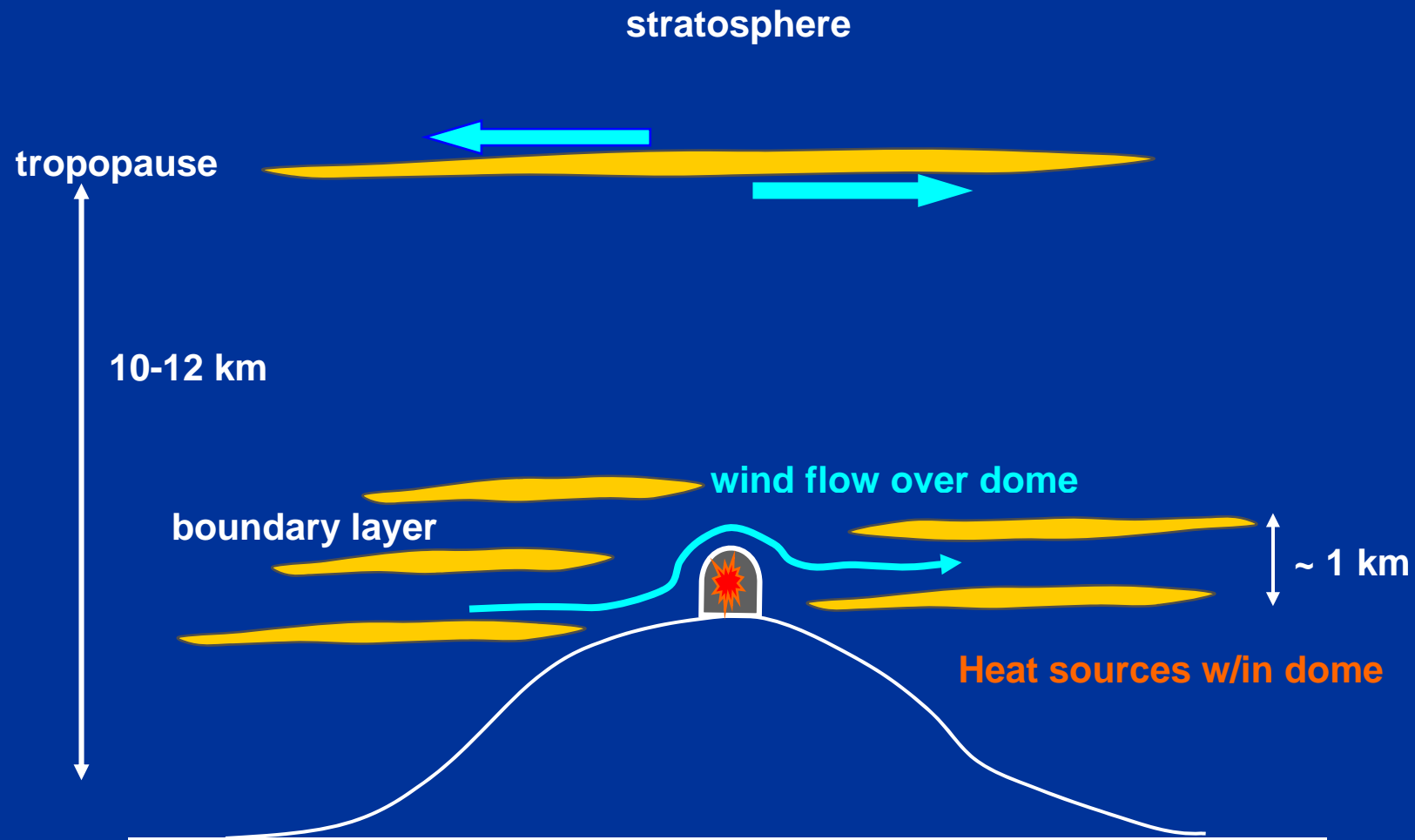
像補正には構造(一般に粒状斑)が見えることが必要  
太陽縁近く、外(プロミネンスなど)の像補正は上手くいかない  
(H $\alpha$ 像での像法性の可能性)  
ここでは宇宙観測が圧倒的に有利(ひのでSOTの観測例)

# *Atmospheric perturbations cause distorted wavefronts*

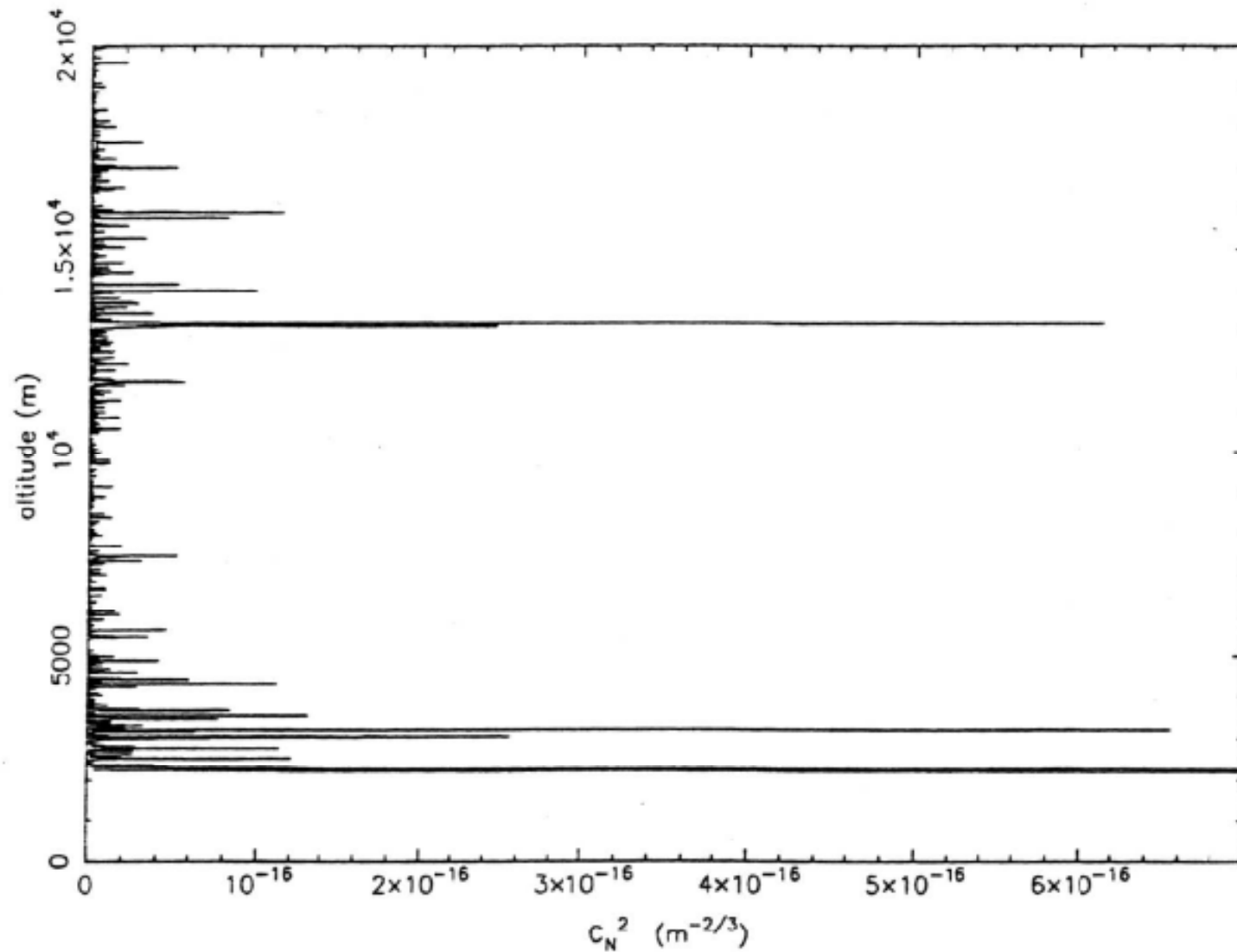




# Turbulence arises in many places



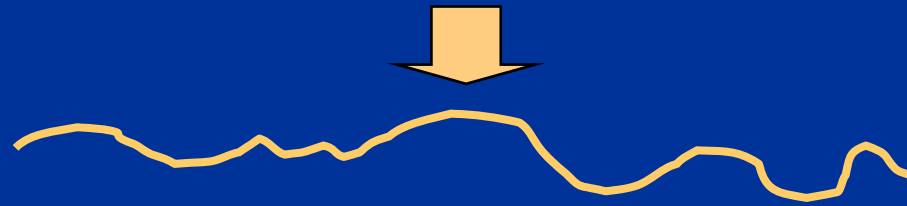
# Atmospheric turbulence is layered



# Characterize turbulence strength by quantity $r_0$



Wavefront  
of light



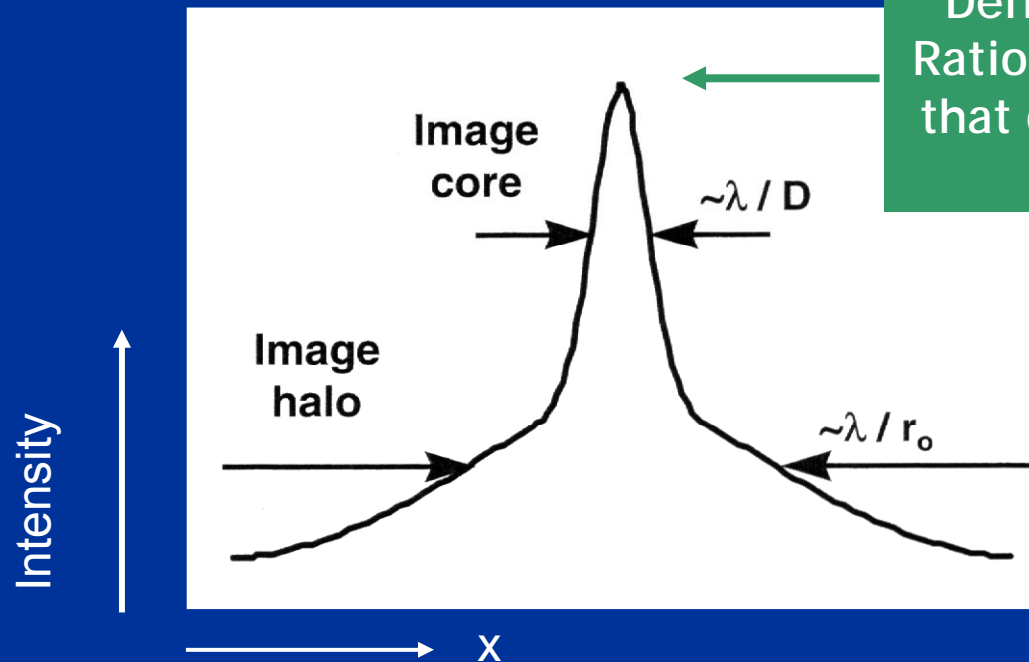
$\longleftrightarrow r_0$  "Fried's parameter"



Primary mirror of telescope

- "Coherence Length"  $r_0$  : distance over which optical phase distortion has mean square value of  $1 \text{ rad}^2$  ( $r_0 \sim 15 - 30 \text{ cm}$  at good observing sites)
- Easy to remember:  $r_0 = 10 \text{ cm} \Leftrightarrow \text{FWHM} = 1 \text{ arc sec}$  at  $\lambda = 0.5 \mu\text{m}$

# AO produces point spread functions with a “core” and “halo”



Definition of “Strehl”:  
Ratio of peak intensity to that of “perfect” optical system

- When AO system performs well, more energy in core
- When AO system is stressed (poor seeing), halo contains larger fraction of energy (diameter  $\sim r_0$ )
- Ratio between core and halo varies during night and in particular during the day

# Expression for isoplanatic angle $\theta_0$



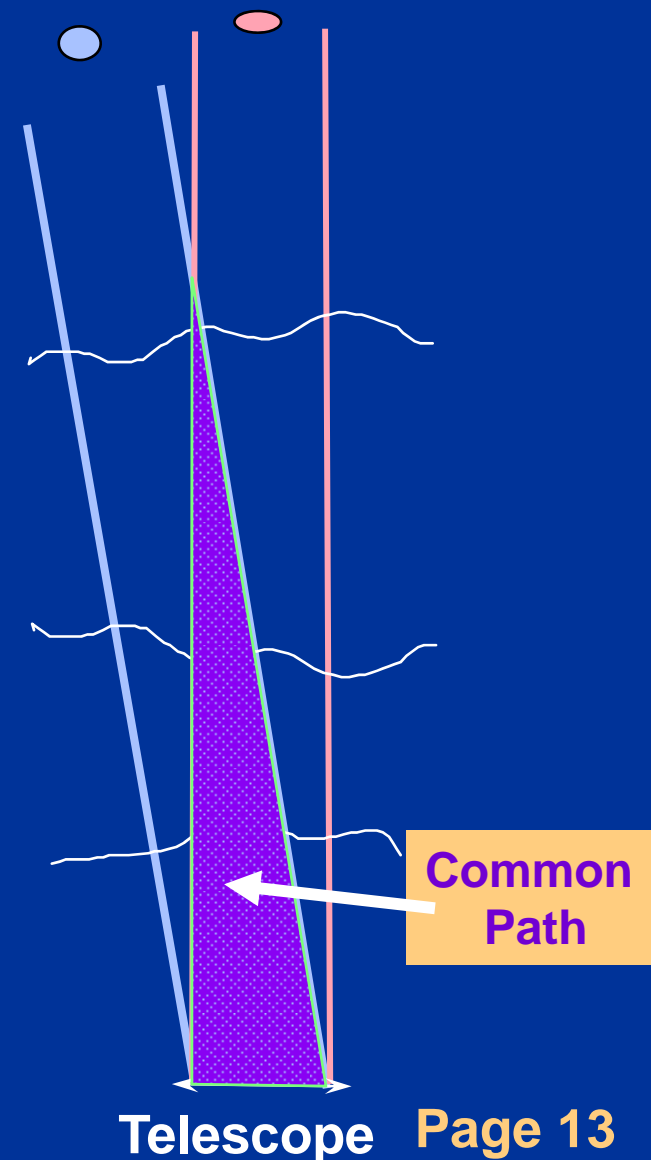
- Strehl = 0.38 at  $\theta = \theta_0$

$\theta_0$  is isoplanatic angle

$$\theta_0 = \left[ 2.914 k^2 (\sec \zeta)^{8/3} \int_0^{\infty} dz C_N^2(z) z^{5/3} \right]^{-3/5}$$

$\theta_0$  is weighted by high-altitude turbulence ( $z^{5/3}$ )

- If turbulence is only at low altitude, overlap is very high.
- If there is strong turbulence at high altitude, not much is in common path



## Isoplanatic angle, continued



- Isoplanatic angle  $\theta_0$  is weighted by  $z^{5/3} C_N^2(z)$
- Simpler way to remember  $\theta_0$

$$\theta_0 = 0.314 \cos \zeta \left( \frac{r_0}{\bar{h}} \right) \quad \text{where } \bar{h} \equiv \left( \frac{\int dz z^{5/3} C_N^2(z)}{\int dz C_N^2(z)} \right)^{3/5}$$

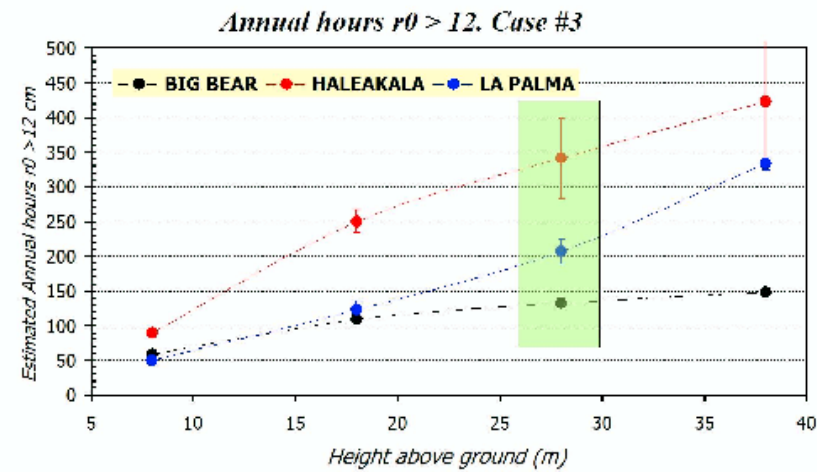
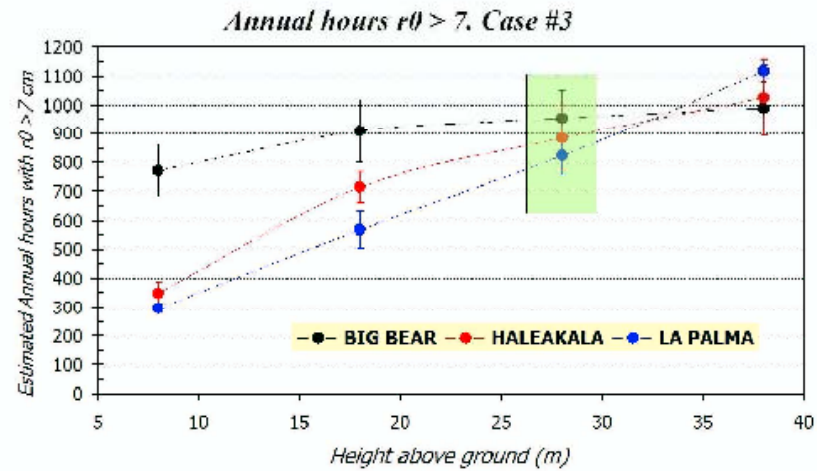
Hardy § 3.7.2

## *r<sub>0</sub> - Related Parameters*

Quantity	Scaling	Name	Value (at 0.5 μm)	Value (at 2.2 μm)
$r_0$	$\lambda^{6/5}$	Fried parameter (coherence diameter)	20 cm	120 cm
$\tau_0 \sim \frac{r_0}{v}$	$\lambda^{6/5}$	coherence time	20 ms	120 ms
$\theta_0 \sim \frac{r_0}{h}$	$\lambda^{6/5}$	isoplanatic angle	4"	24"
$\theta_{\text{fwhm}} \sim \frac{\lambda}{r_0}$	$\lambda^{-1/5}$	image diameter	0.50"	0.38"
$N_{\text{act}} \sim \frac{D^2}{r_0^2}$	$\lambda^{12/5}$	no. of actuators, D=4m	400	12
$S \sim \frac{r_0^2}{D^2}$	$\lambda^{-12/5}$	uncorrected Strehl ratio	$2.5 \times 10^{-3}$	0.08



oice

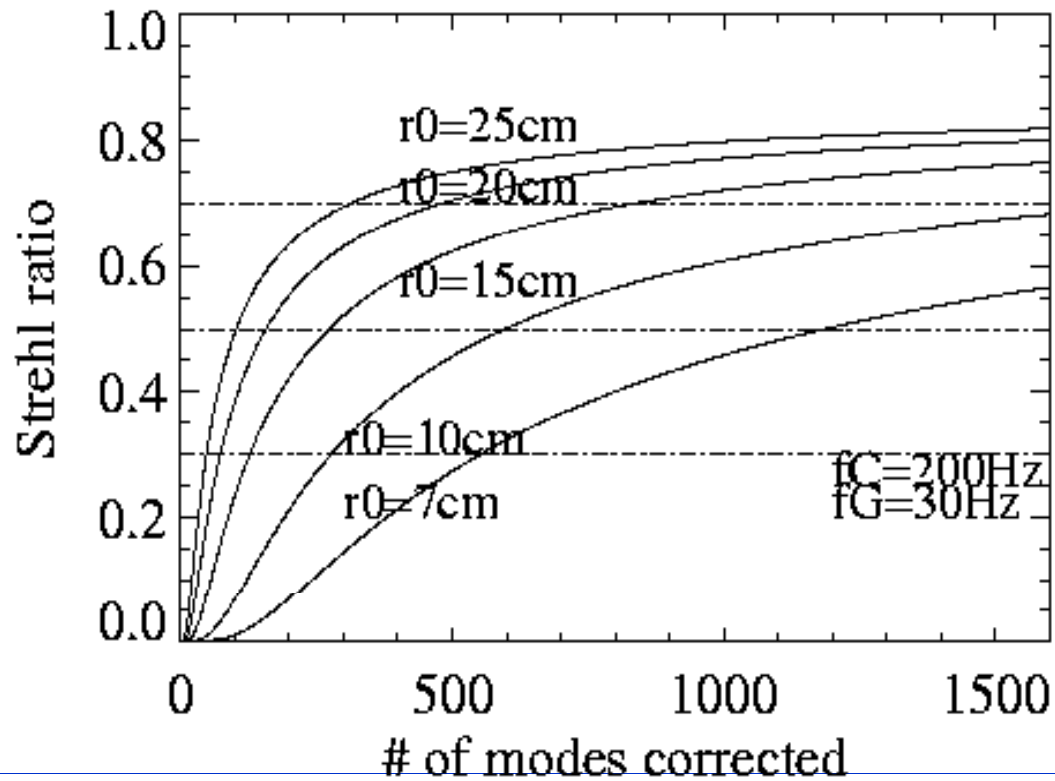




# Adaptive Optics for the ATST

Visible (500nm)

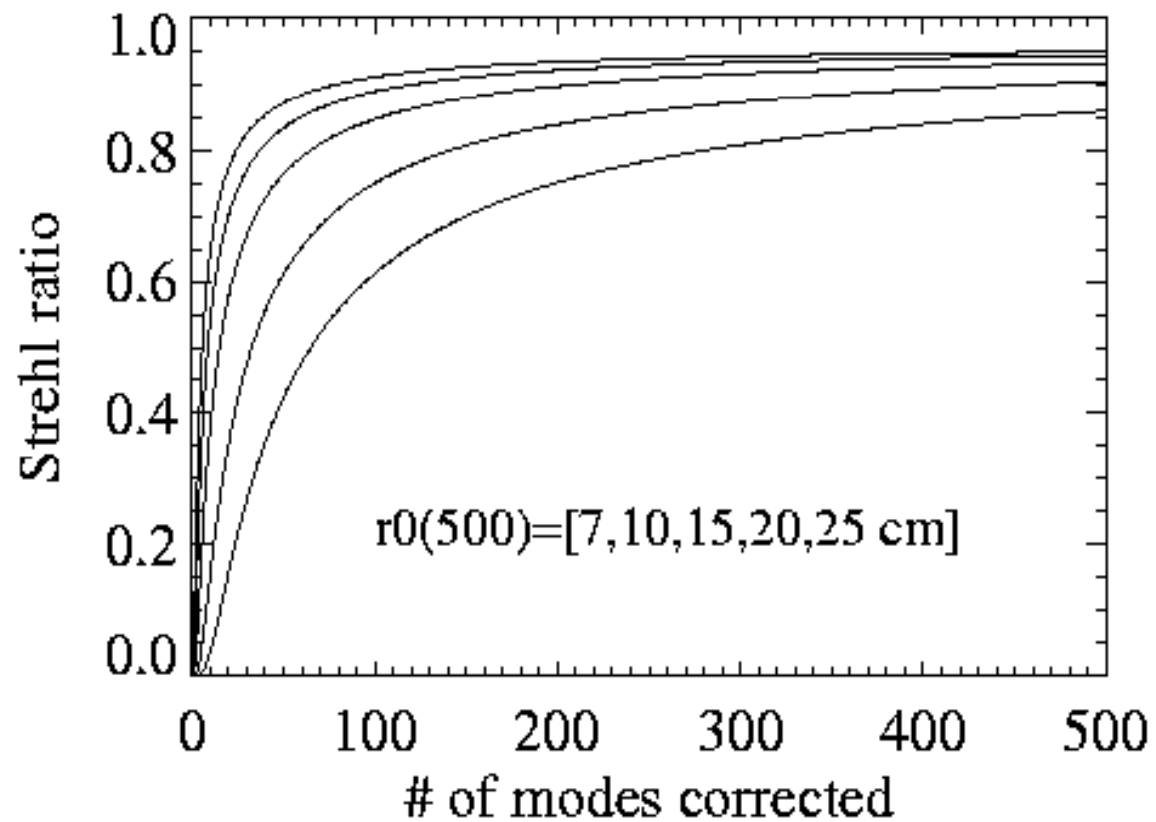
High Strehl Requirement leads to large number of DoFs



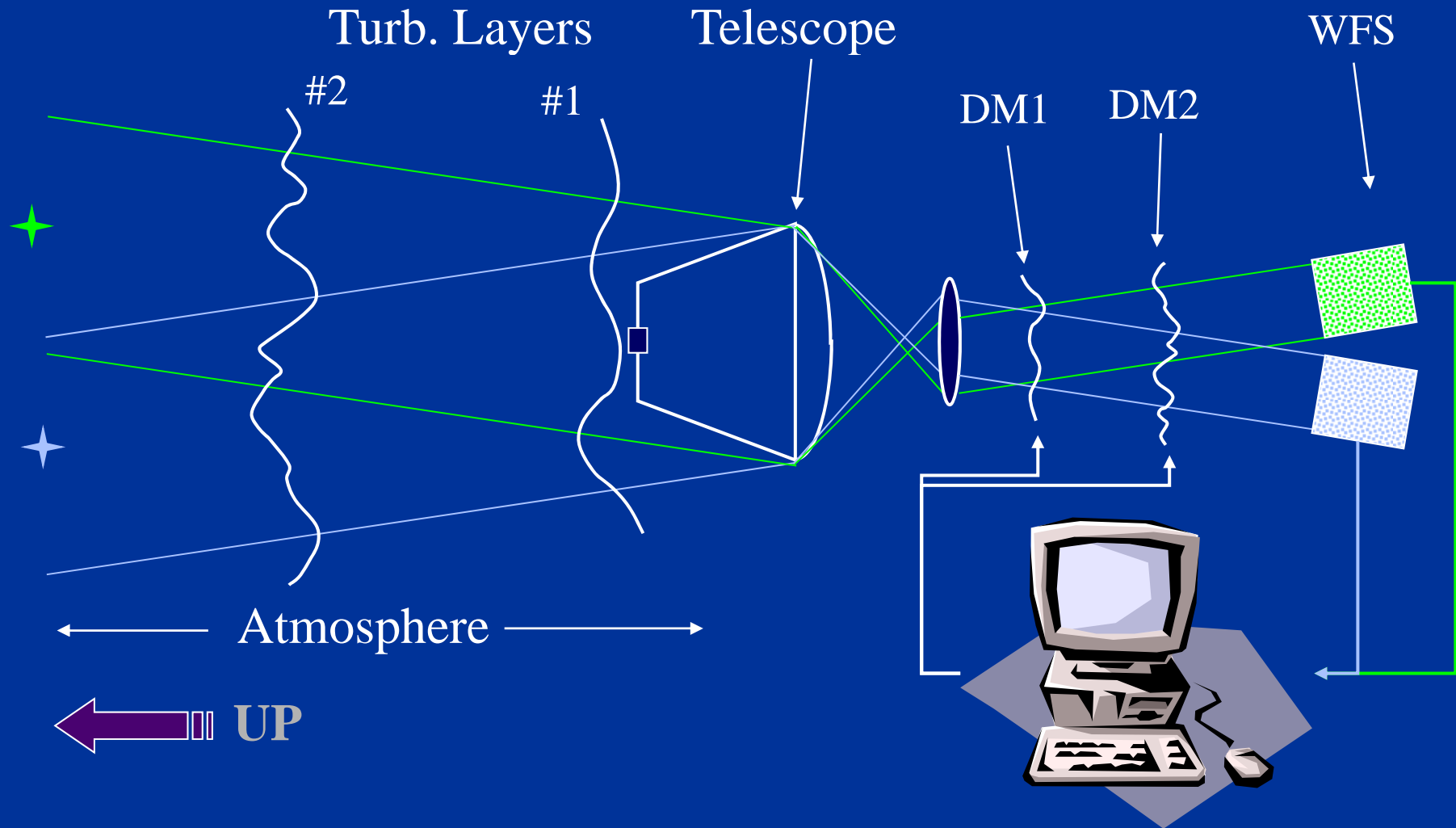
# Adaptive Optics for the ATST

NIR (1.6  $\mu$ )

High Strehls are fairly easy to achieve!



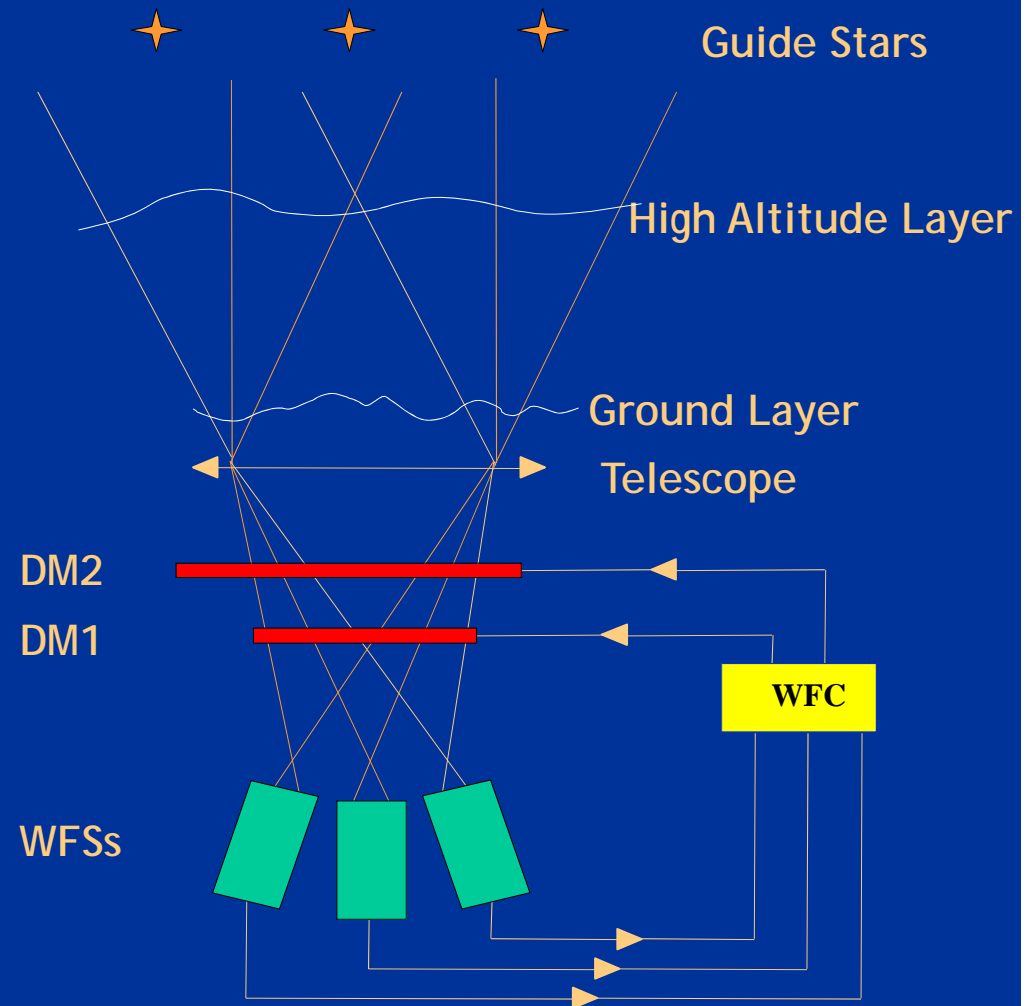
# The multi-conjugate AO concept

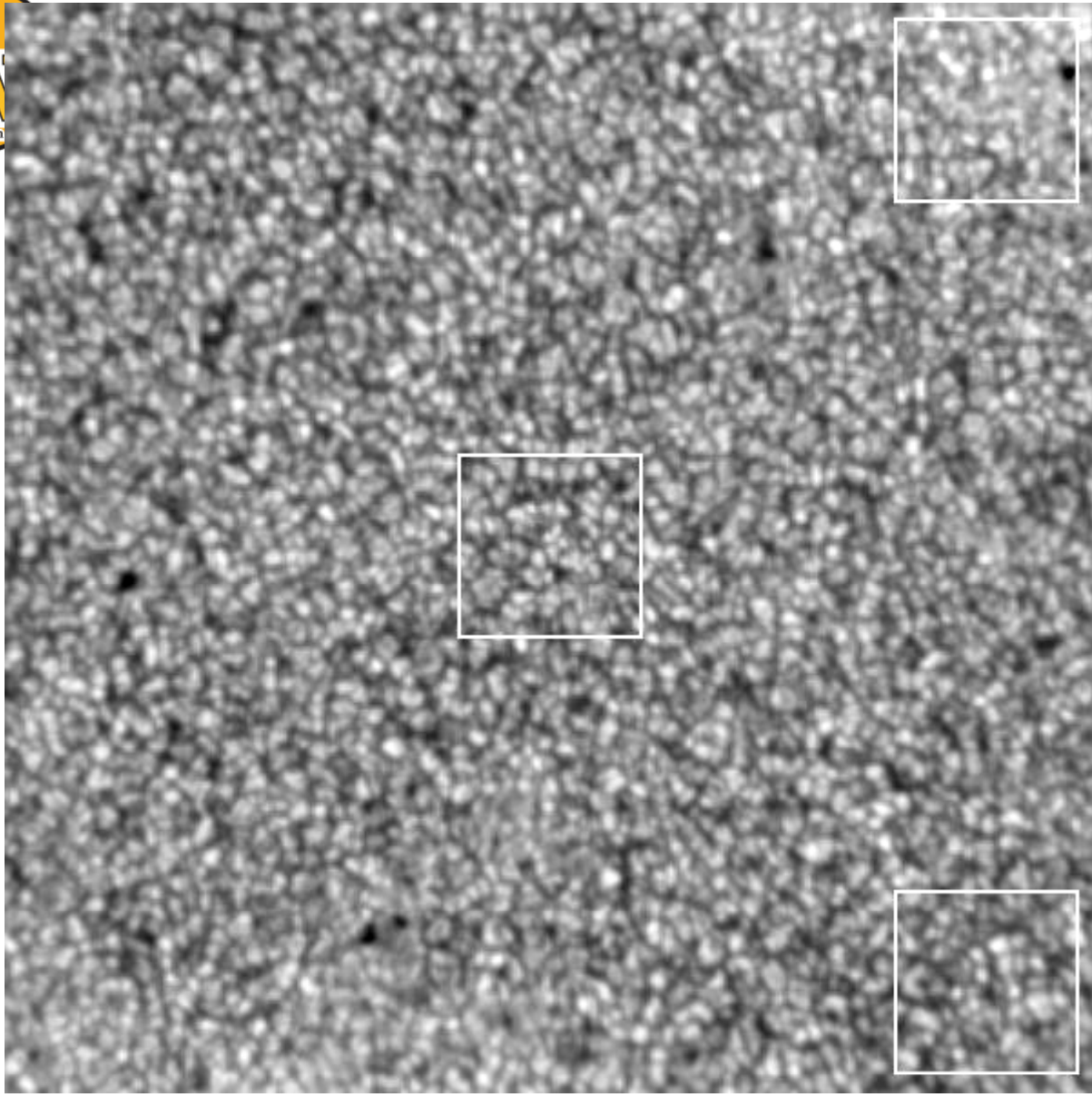


Credit: Rigaut, MCAO for Dummies

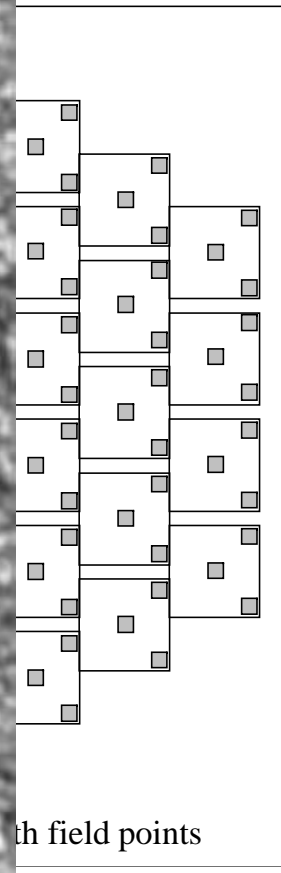
## *“Star Oriented” MCAO*

- Each WFS looks at one star
- Global Reconstruction
- $n$  GS,  $n$  WFS,  $m$  DMs
- 1 Real Time Controller
- The correction applied at each DM is computed using all the input data.





atic alignment



th field points

**Similar to MCAO WFS approach and implementation!!**

# 大気波長分散

Reardon(2006)

波長400nmと850nmでの波長分散の大きさ (arcsec)、LaPalma

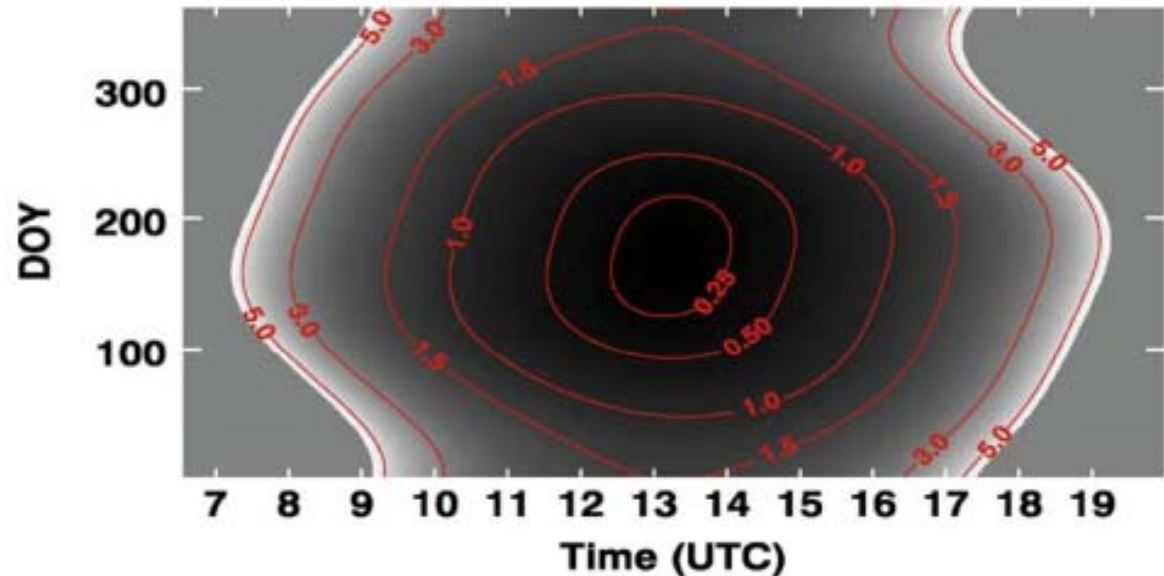


Figure A.1. Magnitude of the atmospheric dispersion, in arcseconds, at La Palma for the Sun between wavelengths of 400 and 850 nm. For each day of the year, shown on the vertical axis, the dispersion is shown for all times when the true elevation of the Sun is greater than  $10^\circ$ .

波長400nmと850nmがスリット幅内(0.11arcsec)に留まっている時間(分)、スリットは最初鉛直方向、LaPalma

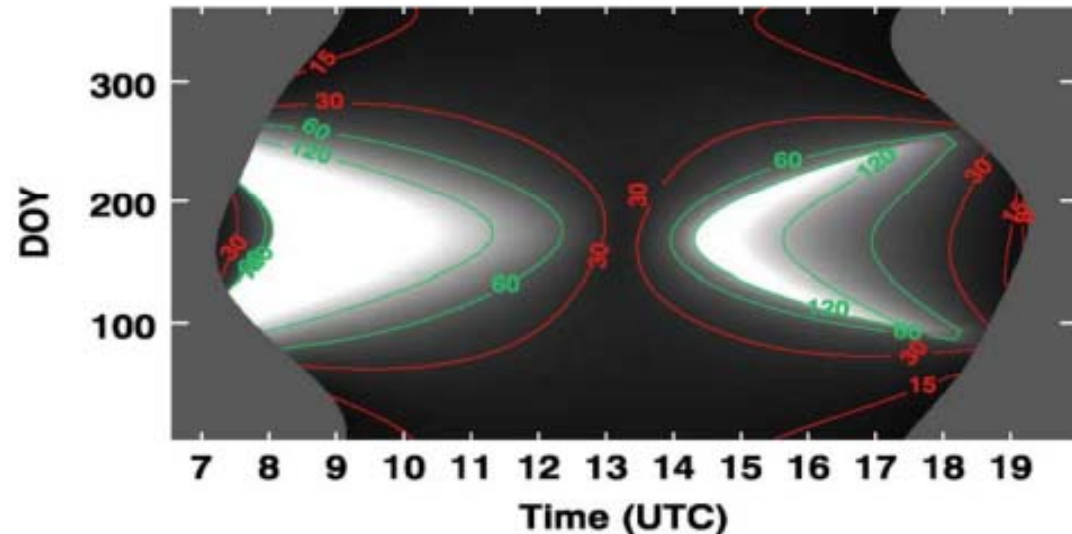


Figure A.3. The duration in minutes for which spectra obtained at two different wavelengths will remain aligned within one slit width. The slit is initially oriented perpendicular to the horizon but the image is rotated during the scan to maintain a constant orientation with respect to the celestial coordinates. The figure is calculated for observations obtained at La Palma at 400 and 850 nm and with a slit width of  $0.11''$ , a width typical of present observations (see e.g., ?).



# 地上太陽望遠鏡

## 進む地上太陽観測

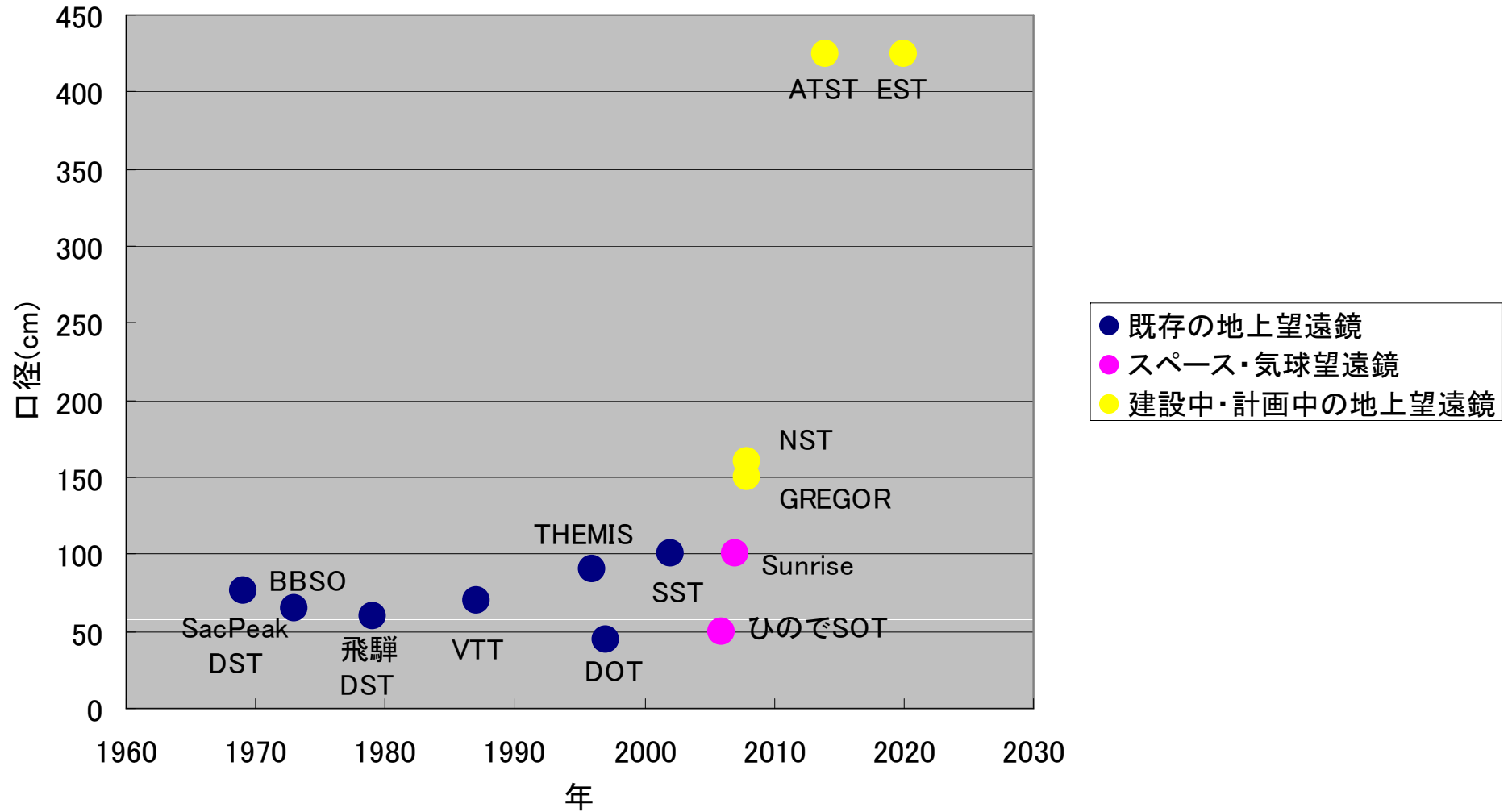
- ・脱“真空”望遠鏡 → 大口径(口径1m以上)化
- ・太陽用AOの実現 → 多分割化、multi-conjugate(高精度、広視野化)
- ・高速偏光変調、高速読み出しデジタルカメラ → 高精度偏光観測  
像改善



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。

# 太陽望遠鏡：口径の拡大

太陽光学望遠鏡の口径の拡大





# 地上太陽観測国際情勢

**SST**(口径1m真空、スウェーデン、カナリー諸島ラ・パルマ)  
運用中

**NST**(口径1.6m軸外しグレゴリアン、米国、ビッグベア-天文台、\$5M)  
2009年2-4月ファーストライト、スペックル観測でデータ出始めている  
2010年2月76素子AO設置予定

**GREGOR**(口径1.5m軸対称グレゴリアン、ドイツ、カナリー諸島テネリフェ)  
Solarlight用1m軽量主鏡で試験中、2010年ファーストライト？  
Multiconjugate-AOの試験進んでいる

**ATST**(口径4m軸外しグレゴリアン、米国、ハワイ・ハレヤカラ)  
予算化(\$300M)、2009年12月4日Enclosure&M1ブランクAoO、2010年より  
建設予定、2017年ファーストライト

**EST**(4m?、ヨーロッパ連合、カナリー諸島ラ・パルマ)  
ATSTに対抗・協調、とにかく低予算で(\$100-150M)、光学設計最終段階へ

中国(口径1m真空、Fuxian湖) 2010年開所予定、SST(口径1m)の地上版を  
Huairouに。口径5m幅0.5mのリング状望遠鏡、口径3-5m望遠鏡(具体的な案  
はないが、今後10年計画として国際協力を呼び掛け)

**NLST**(インド口径2m、標高4500mハンレ付近)、ドイツが支援(GREGOR)、設計  
中、予算規模\$25M、2013年ファーストライト希望(ATSTまで世界一！)

**COSMO**(口径1.5m屈折コロナグラフ、米国HAO)計画中 (日本の参加期待?)

# 地上太陽観測国際情勢

---

EST(ヨーロッパ、口径4m) :

デザインフェーズ。ATSTよりかなり安く。詳細設計(2010-2013)、建設予定(2014-2019)。焦点面装置は標準的: Broad-Band、Narrow-Band、Grating Spectrograph、2次元分光のtradeoff中。LESTが挫折した経緯があるが、今回大丈夫か？

# Big Bear NST (New Solar Telescope)



日本の若手の参加、歓迎！



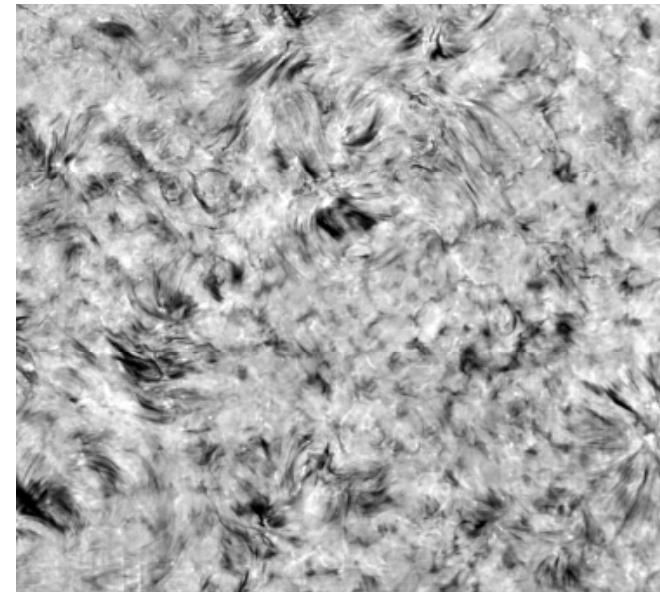
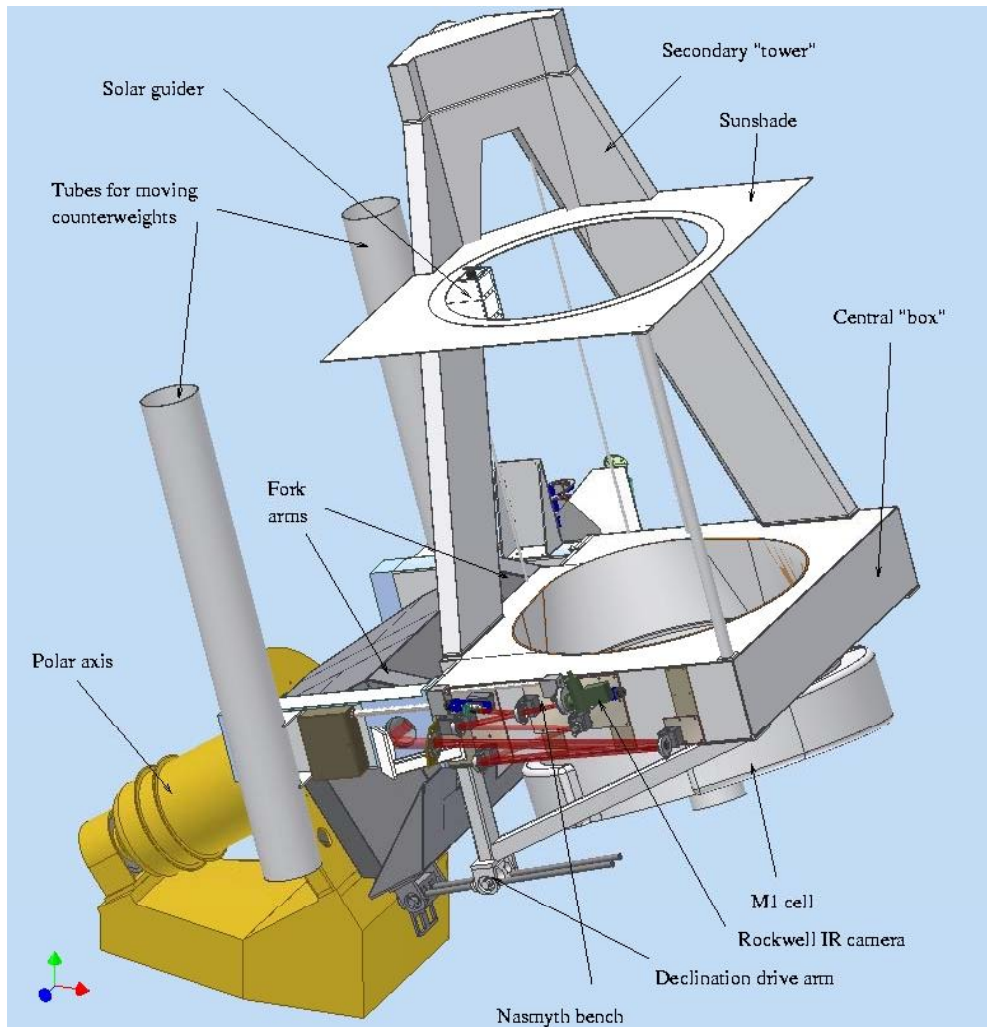
BBSO News

Dec 18, 2009: First NST Flare has been Caught on Camera by John Varsik!

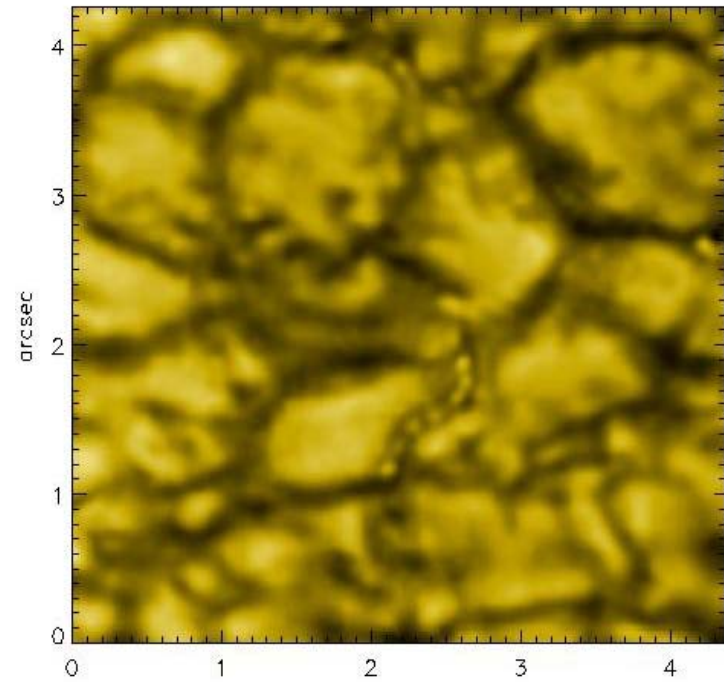
Dec 18, 2009: [AGU Session SH53B](#) on NST First Light and Results

Dec 12, 2009: Ichimoto, K. (Kyoto Univ) and Suematsu, Y. (ISAS) Visiting BBSO

# NST



H $\alpha$ -0.7A



TiO705nm連續光



# NSTの特徴

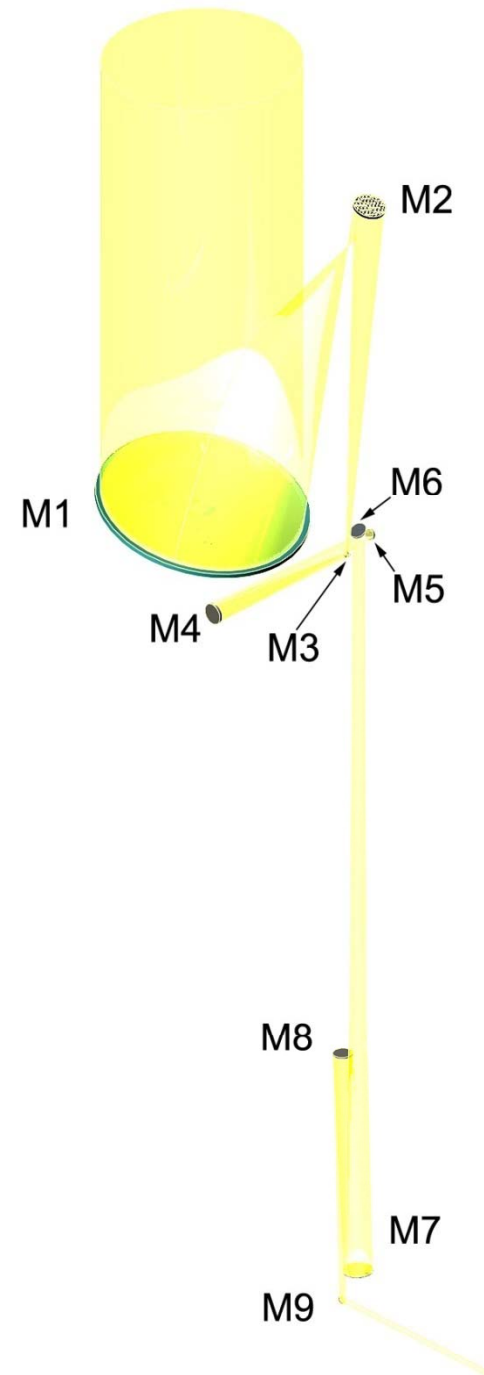
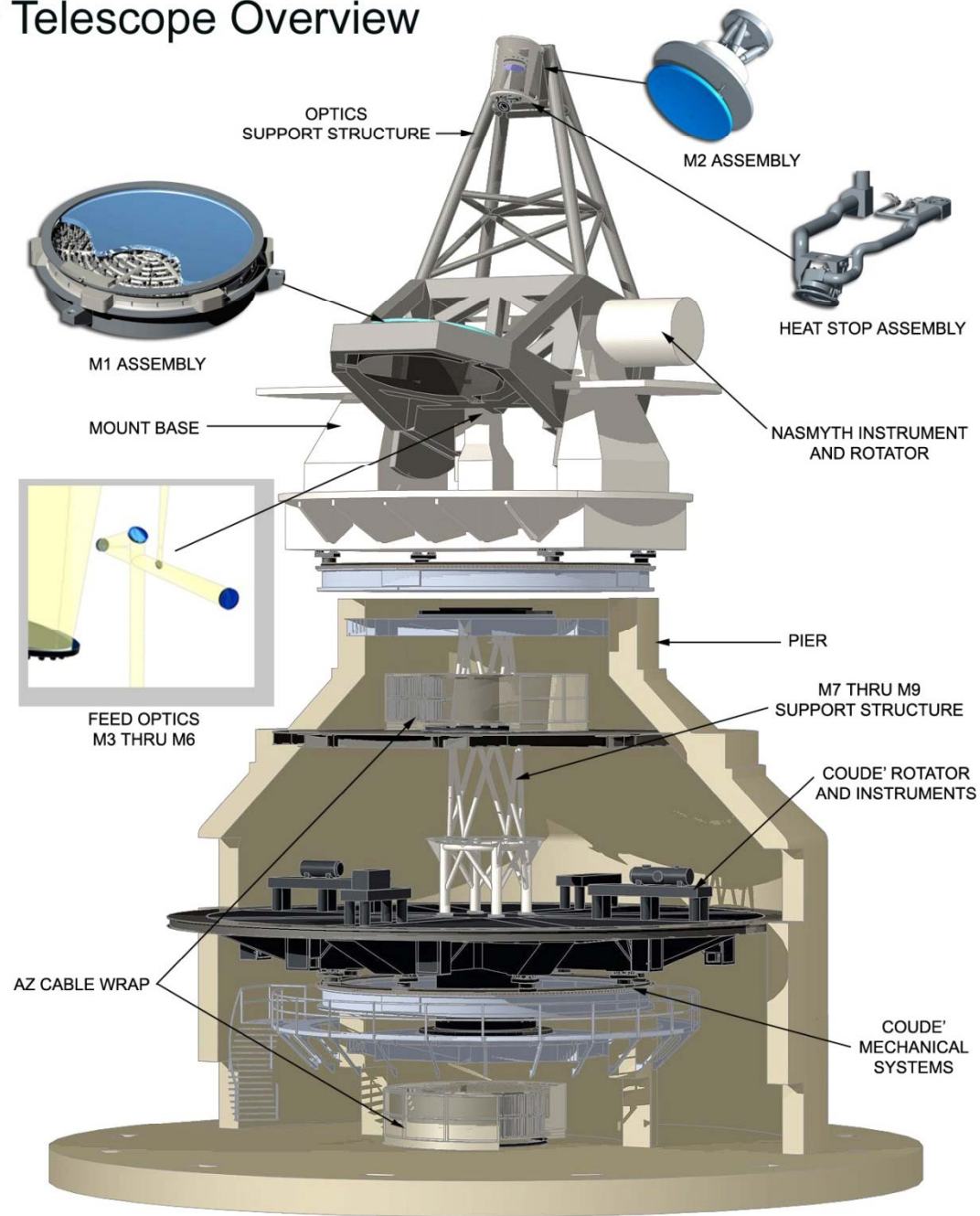
- 1.6 m clear aperture、 $f/2.4$  primary mirror (M1)
    - 83.2m effective focal length ( $f/52$  at Gregorian focus)、 Plate scale 2.48 arcsec/mm
  - Off-axis Gregorian configuration、 Telescope optics (PM, SM) made of Zerodur.
    - Figuring of primary mirror (PM) to 16nm r.m.s.、 10-15Å finishing of PM
  - Secondary figured to 20nm accuracy and has protected silver coating.
  - Open telescope structure with equatorial mount and new, ventilated dome
  - Real-time systems for maintaining telescope alignment
  - Computer controlled pointing and tracking
  - Active optics
  - Adaptive optics
  - Multiple focus locations that serve a variety of focal-plane instrumentation
  - 2 arcmin FOV in Gregory-Coudé focus
  - Wavelength range from 0.39-1.6 $\mu$ m with AO
  - All wavelengths  $> 0.39\mu$ m also at Nasmyth focus with tip/tilt but without AO
  - Diffraction limited resolution of 0.06" at 500nm and 0.2" at 1,565nm (with adaptive optics)
- Temperature monitoring at many points on the telescope



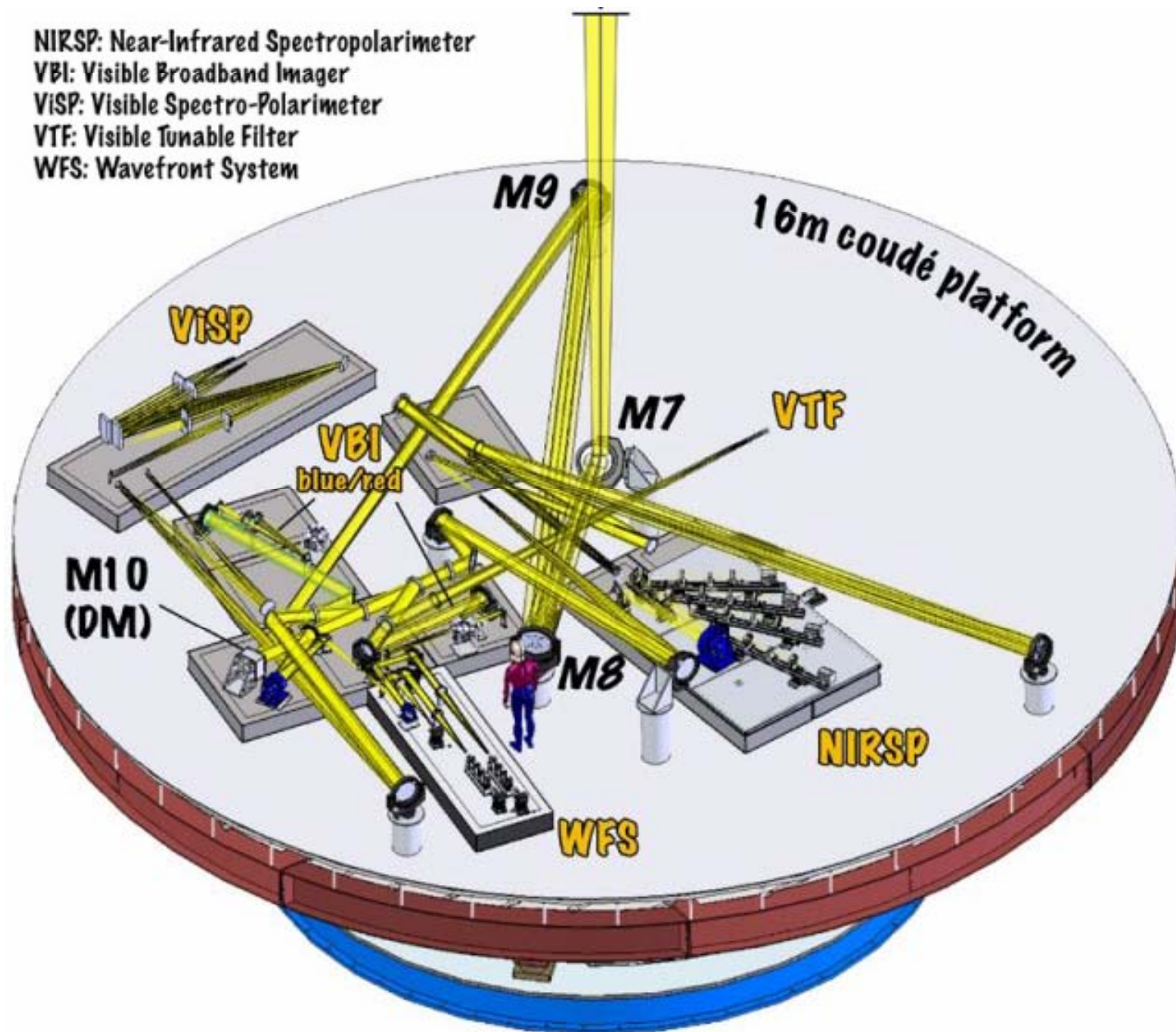
## Telescope Requirements

- **Aperture:** 4 m
- **Resolution:** diffraction limited:
  - within isoplanatic patch (conventional AO)
  - over ~2 arcmin using MCAO (upgrade)
- **Adaptive Optics:** **Strehl ratio: >0.3 , goal of S > 0.6**  
**during good seeing**
- **FOV:** 3 arcmin (goal 5 arcmin)
- **Wavelength Coverage:** 300 nm - 28 micron
- **Polarization Accuracy:**  $10^{-4}$  (low instrumental polarization)
- **Polarization Sensitivity:** limited by photon statistics down to  $10^{-5}$
- **Low Scattered Light:** e.g. sunspots: 1% of surrounding photosphere  
Corona:  $< 10^{-5}$  at  $R= 1.1R_{\odot}$ ;  $\lambda= 1\mu$
- **Coronagraph:** in the NIR and IR
- **Flexibility:** e.g., Combine various post-focus instruments
- **Adaptability:** e.g., try out new ideas, bring your own instrument

# Telescope Overview



NIRSP: Near-Infrared Spectropolarimeter  
VBI: Visible Broadband Imager  
ViSP: Visible Spectro-Polarimeter  
VTF: Visible Tunable Filter  
WFS: Wavefront System





# ATST

ATST(米国、口径4m):

予算は現在手に入る技術で見積もられており、観測仕様を満たすためのあらたな技術開発には不十分。高速読み出し大フォーマット(4kx4k) CMOS、口径20cm超のエタロン、2次元大型ファイバーバンドル、大量データの処理・アーカイブなど、パートナーとの協力を呼び掛ける。また、ESTでも問題は共通なので、両者で協力する体制作りをする。ATSTの運用については衛星搭載の望遠鏡のイメージになりそう。コストが高いため無駄な時間を極力なくし、予定されたプログラムを遂行していく。観測時間をもらって自由に利用することにはならないだろう。

日本の具体的な貢献は表明できていないが、SOCでは、(1)SWGメンバーとしての貢献(現状)、(2)装置開発へのマンパワー提供、(3)大型科研費での装置開発、の順で可能性があることを云うに留める。

# 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)

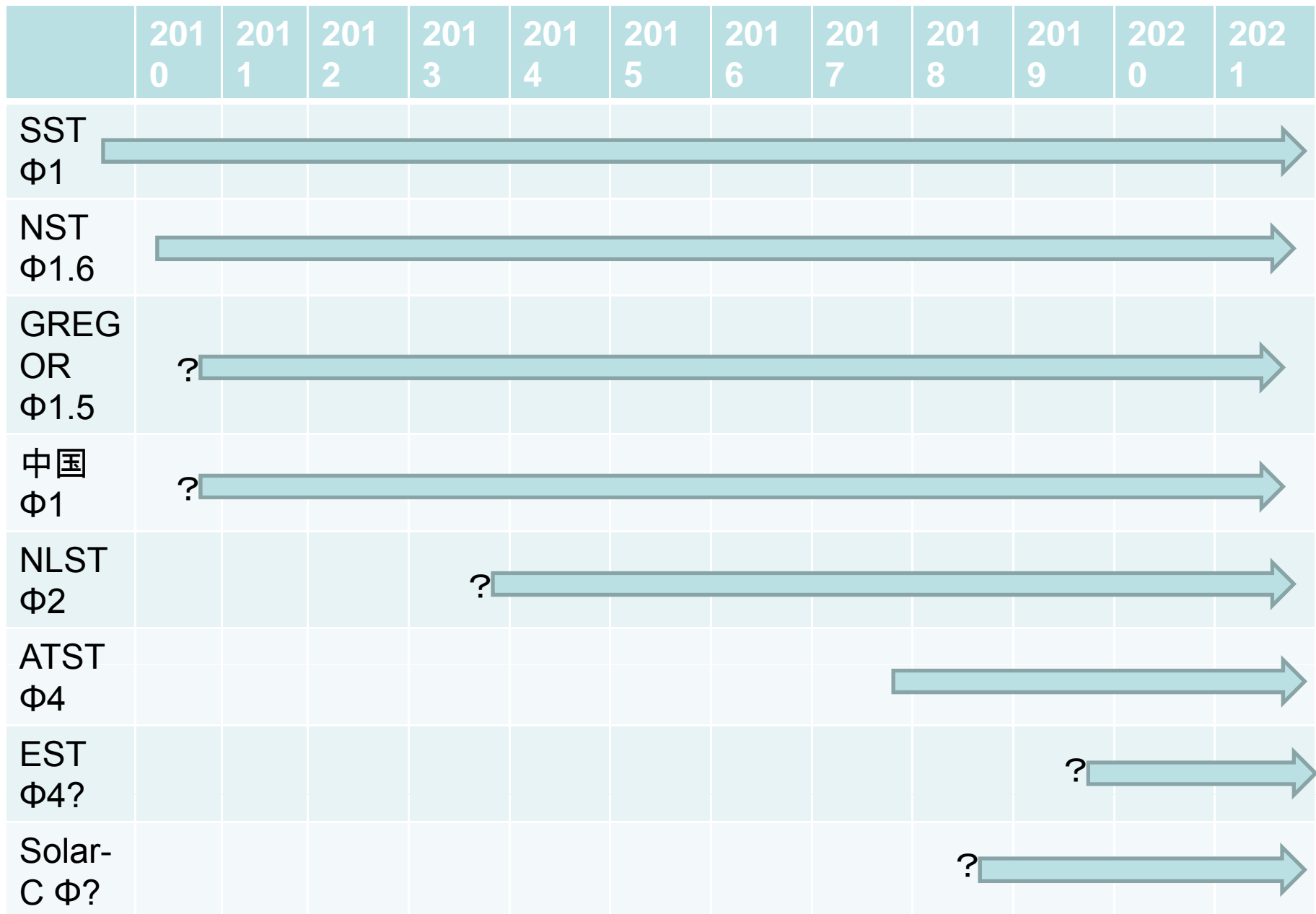
大フォーマット(4k×4k)高速読み出しCMOSセンサーの開発

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！**

# 大口径予定



# 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
	宇宙観測装置・手法へのpathfinder

**地上は実験的、宇宙観測で確定**

# 中口径太陽望遠鏡へ：日本の独自性検討 (一案)

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