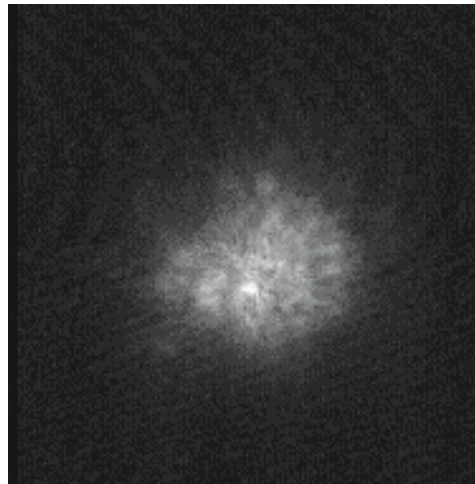




# 補償光学の可能性



補償光学の敵!?

高速カメラ(200fps)で得られた星の像@仙台

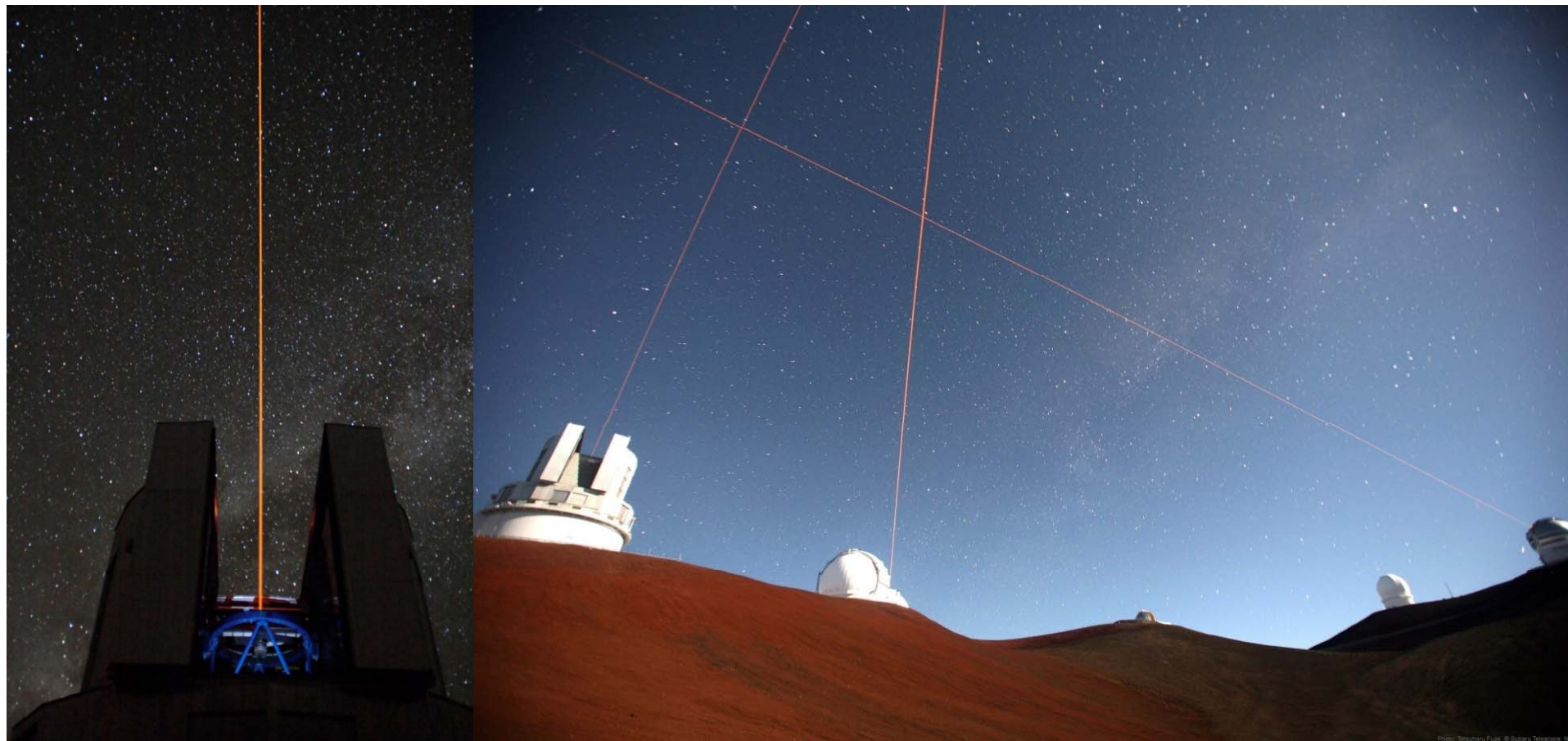
秋山 正幸

(東北大学理学研究科・天文学専攻)

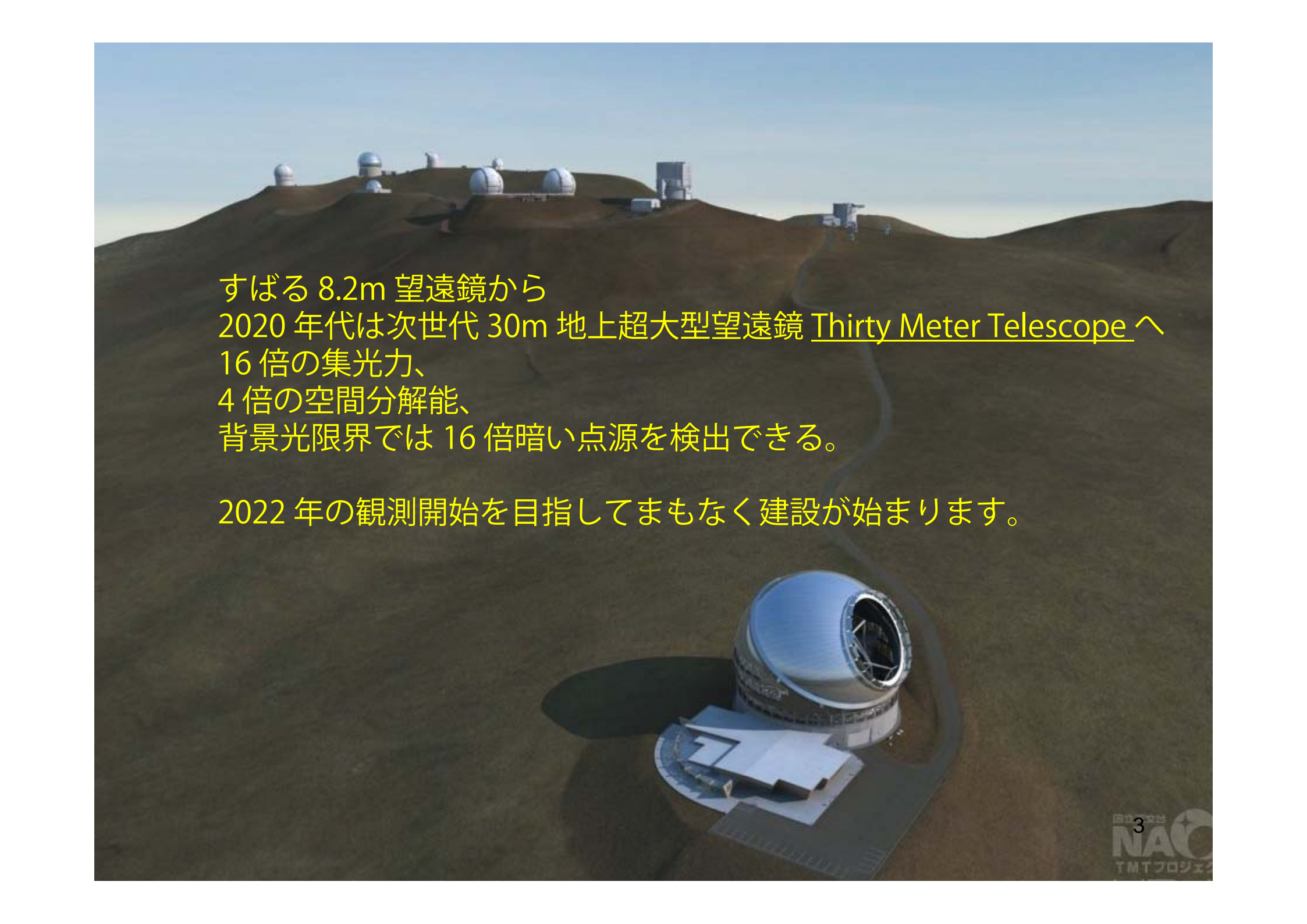
2013/07/30

夏の学校@宮城蔵王

## 天文補償光学の現在: レーザー人工星を用いた観測へ



From Subaru homepage



すばる 8.2m 望遠鏡から  
2020年代は次世代 30m 地上超大型望遠鏡 Thirty Meter Telescope へ  
16 倍の集光力、  
4 倍の空間分解能、  
背景光限界では 16 倍暗い点源を検出できる。

2022 年の観測開始を目指してまもなく建設が始まります。

## 今日の目標

補償光学を用いた観測プロポーザルの提案  
補償光学を用いた観測装置の提案

につなげてもらうための基礎として

- 補償光学の原理と限界とは
- どういう補償光学の性能がこれから実現するか
- どういう補償光学であれば実現可能性があるのか
- どういう点が技術的に限界になっているのか

の話をもとめたいと思います。

1. 補償光学の原理と限界
2. 補償光学の 3+1 種の神器
3. 補償光学の新しいモード
4. 補償光学の可能性

## 補償光学についての3つの誤解？

補償光学を使えばいつでも回折限界の像が得られる。

レーザーガイド星を使えばどの天体でも補償光学で観測できる。

補償光学で観測できる視野は狭い。

## 1. 補償光学の原理と限界

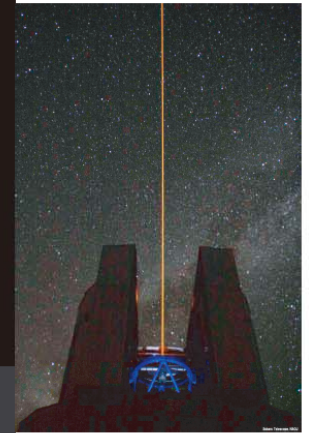
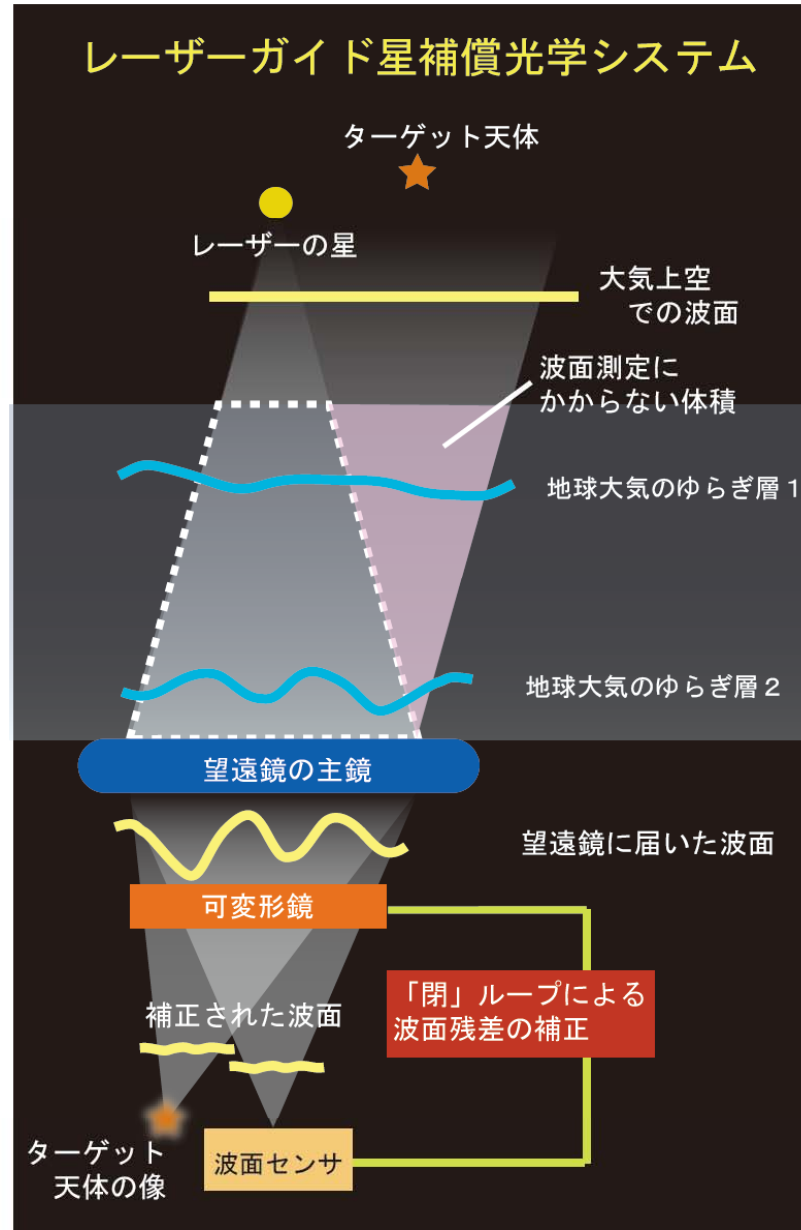
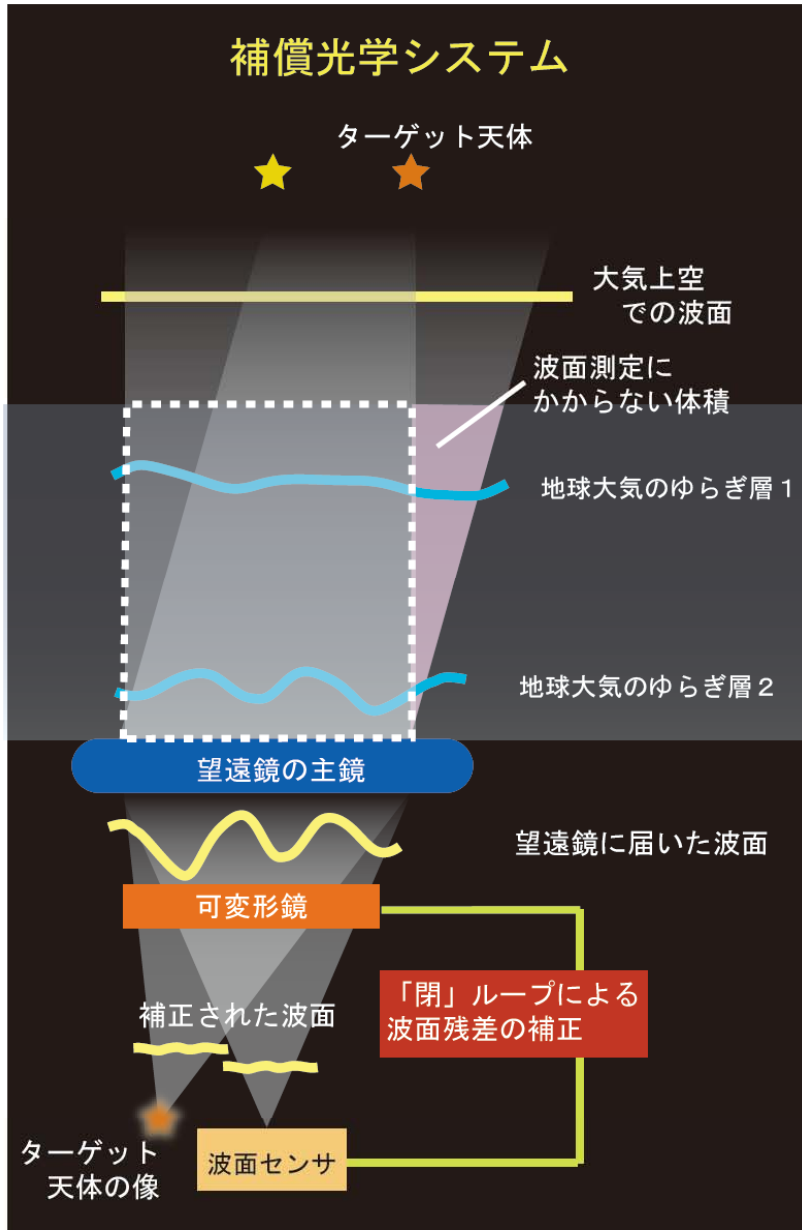
### 1.1 補償光学の原理

### 1.2 大気の性質と光の位相の乱れについて

### 1.3 補償性能の指標

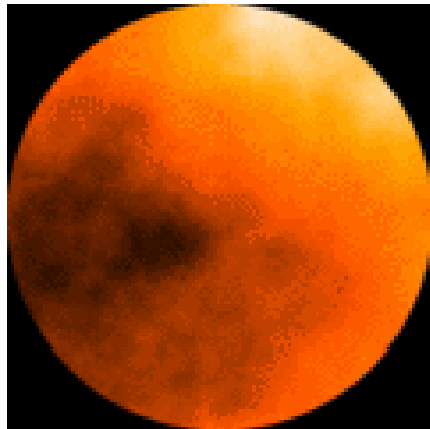
### 1.4 補償性能を決めるいくつかの要因

# 1.1 補償光学の原理：概念図



## 1.1 補償光学の原理：シミュレーション

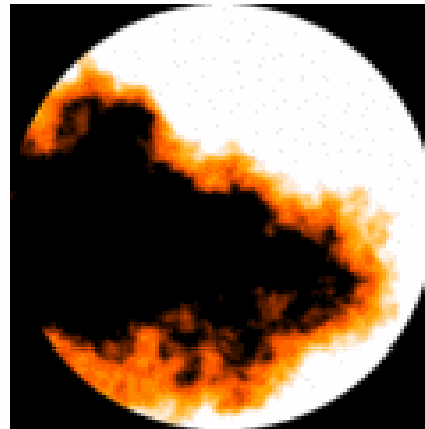
- TMT の補償光学系を想定したシミュレーション計算の一例。



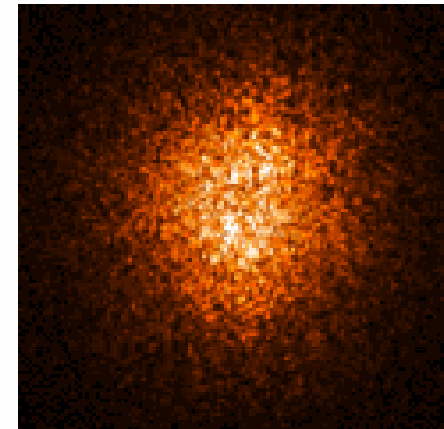
0.004 Wavefront



64x64 DM



TT+DM Corrected WF



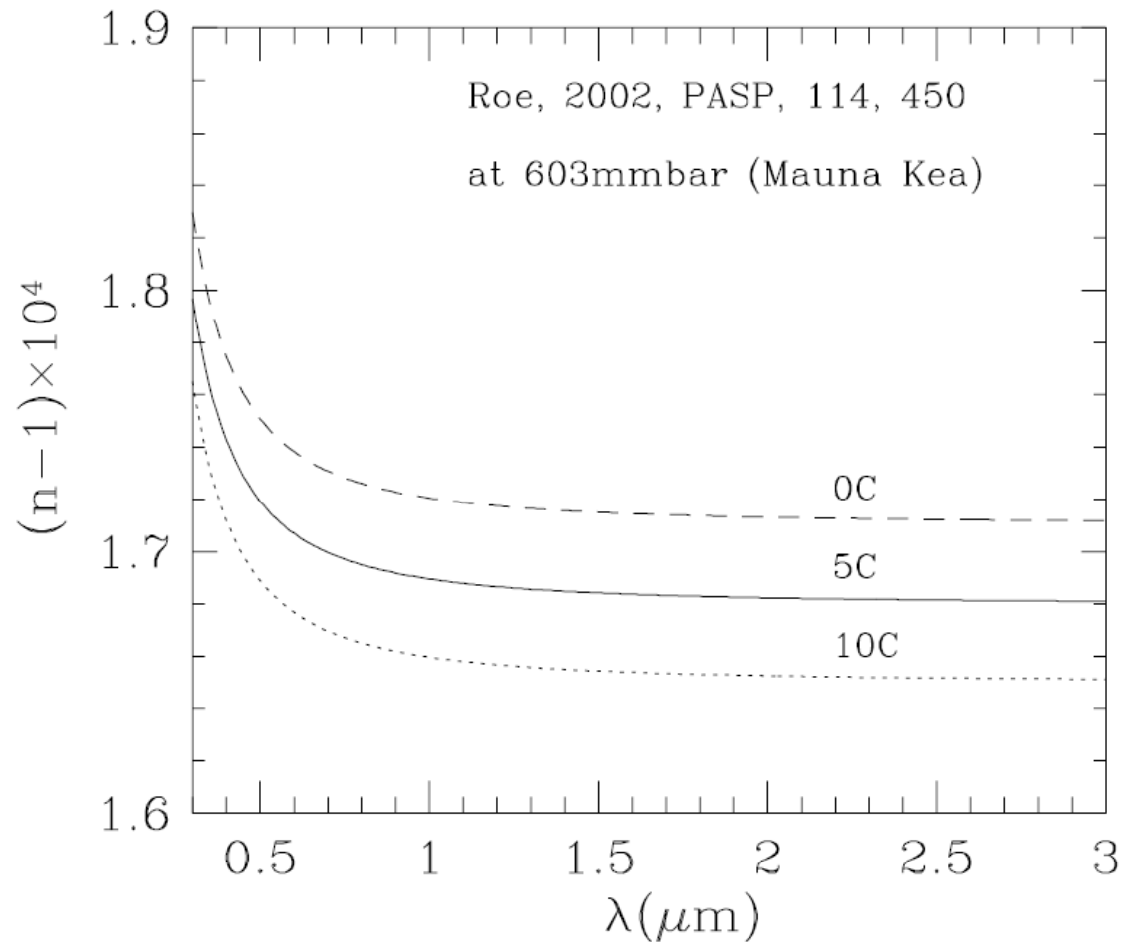
PSF



1. 補償光学の原理と限界
  - 1.1 補償光学の原理
  - 1.2 大気の性質と光の位相の乱れについて
  - 1.3 補償性能の指標
  - 1.4 補償性能を決めるいくつかの要因

## 1.2 大気の性質：大気の屈折率の温度、波長依存性

- 像の乱れの原因は大気中の場所による屈折率の差で生じる位相差である。
- 大気の屈折率は温度や大気圧に依存して決まる。波長にも依存する。
- $0.1 \times 10^{-4}$  の違いは 1km の伝搬で 10mm (観測対象とする波長よりも非常に大きい) の違いに相当する。



## 1.2 大気の性質：大気の屈折率のむら

- 大気中の温度むらによって屈折率むらが生じる。
- 望遠鏡に届く光の場所によって異なる屈折率むらを通るので開口の中で光の位相差が生じる。
- 波長によって届く位相は異なるが、位相差は異なる。
- それは温度による屈折率の違いの波長依存性は小さいから。

波面測定にもちいられるナトリウムレーザーガイド星の波長と観測波長に用いられるKバンドの波長での屈折率 (前のページと同じく  $(n-1) \times 10^{-4}$ )

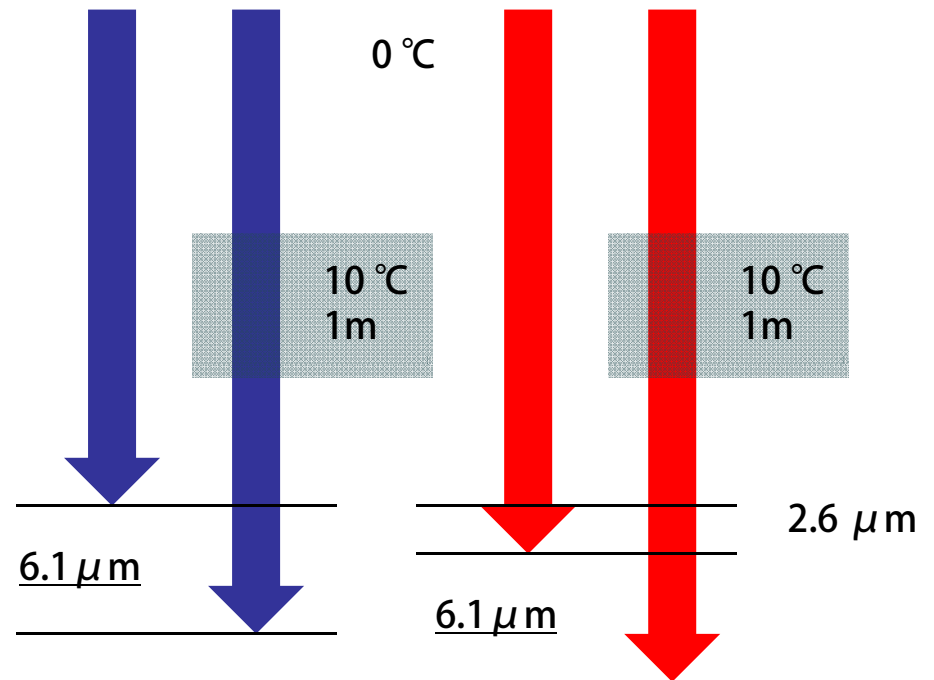
	590nm	2200nm
0°C	1.739	1.713
5°C	1.708	1.682
10°C	1.678	1.652
0-10°C	0.061	0.061

0°C の大気の中を青色の光が 10m 進むとき

10°C の大気を 1m 通る青色の光は  $6.1 \mu\text{m}$  先行する。

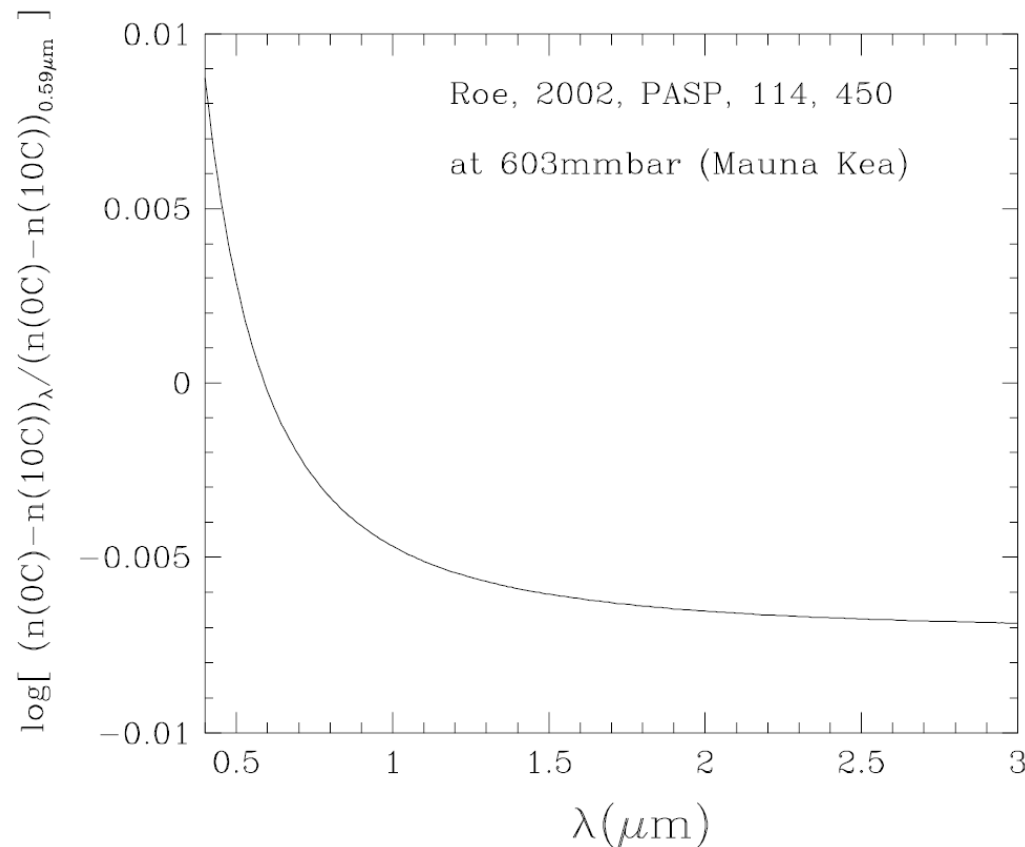
0°C の大気の中を赤色の光は 10m と  $2.6 \mu\text{m}$  進む。

10°C の大気を 1m 通る赤色の光はさらに  $6.1 \mu\text{m}$  先行する。



## 1.2 大気の性質：大気の屈折率の温度変化の波長依存性

- 下の図は各波長での屈折率の温度変化を  $0.59 \mu\text{m}$  での屈折率の温度変化で規格化して示す。
- $0.59 \mu\text{m}$  と  $2.0 \mu\text{m}$  での温度変化の違いは 1.6% しかない。
- これにより、青い波長で位相差を測定し、赤い波長で位相差を補正して観測することが有効になる。

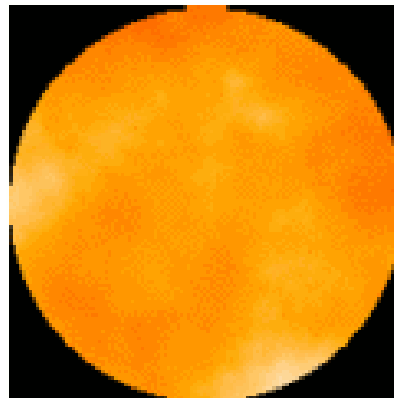


## 1.2 大気の性質：大気の屈折率揺らぎの空間構造

- 大気の温度揺らぎ、屈折率揺らぎはコロモゴルフ乱流に従い、**大きい空間スケールの揺らぎほど大きなパワーを持つ**。長さ  $l$  の構造のパワースペクトルは

$$\Phi(l) \propto (2\pi/l)^{-5/3}$$

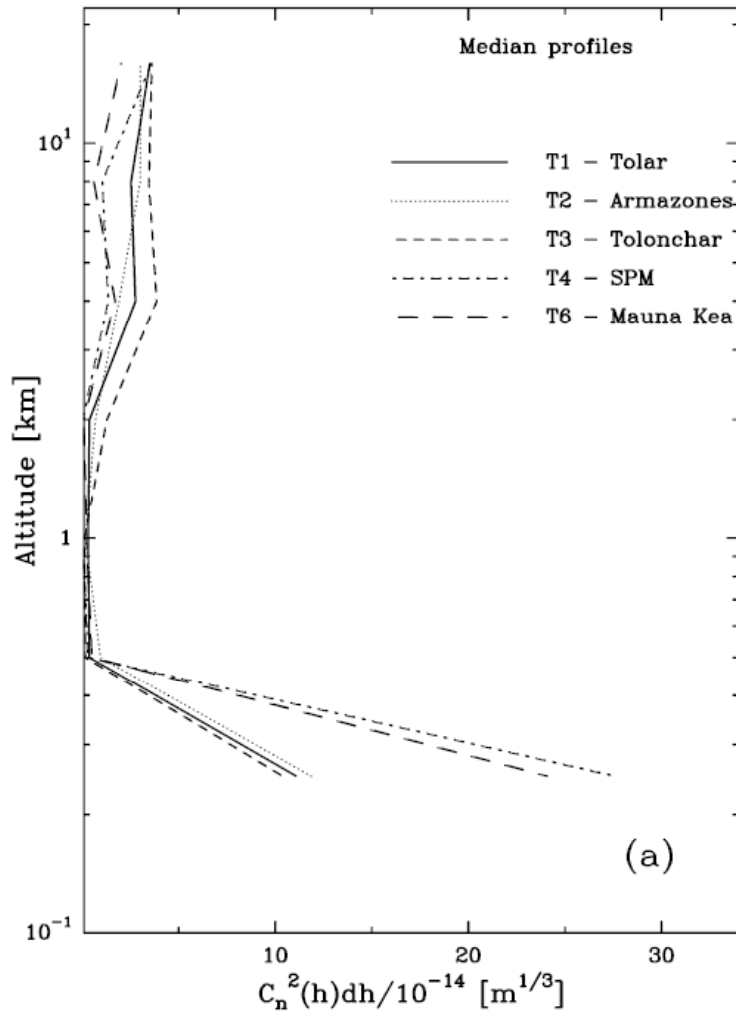
- ただし、大きいスケール (10m order) と小さいスケール (mm order) にそれぞれカットオフがある。
- 構造関数で表すと  $D_\phi(\xi) = \langle |\phi(\mathbf{x}) - \phi(\mathbf{x} + \xi)|^2 \rangle = C_n^2 \xi^{2/3}$
- となる。  $C_n^2$  は大気の屈折率揺らぎの大きさを与える係数。
- 補償性能を制限する要因として補償がずれて起こる効果 (anisoplanatism) が効くので、補償光学系の性能を考える際には構造関数を用いるのが便利である。
- 計算機上で作成した大気揺らぎによる位相差パターンの一例。



AOinst/SIMAO/4gs\_anime.gif

## 1.2 大気の性質：大気の屈折率揺らぎの大きさと高さ分布

- さまざまなサイトで測定された大気の屈折率揺らぎの高さ分布を下の図に示す。ここではでは測定点のビン幅毎に積分した値  $C_n^2 dh$  になっている。高さ方向に足し合わせると高さ方向に積分した値を得ることができる。
- 多くのサイトで地表から500m以下の地表層の成分の大きさが大きいことがわかる。特にマウナケアではこの成分の大きさが大きい。

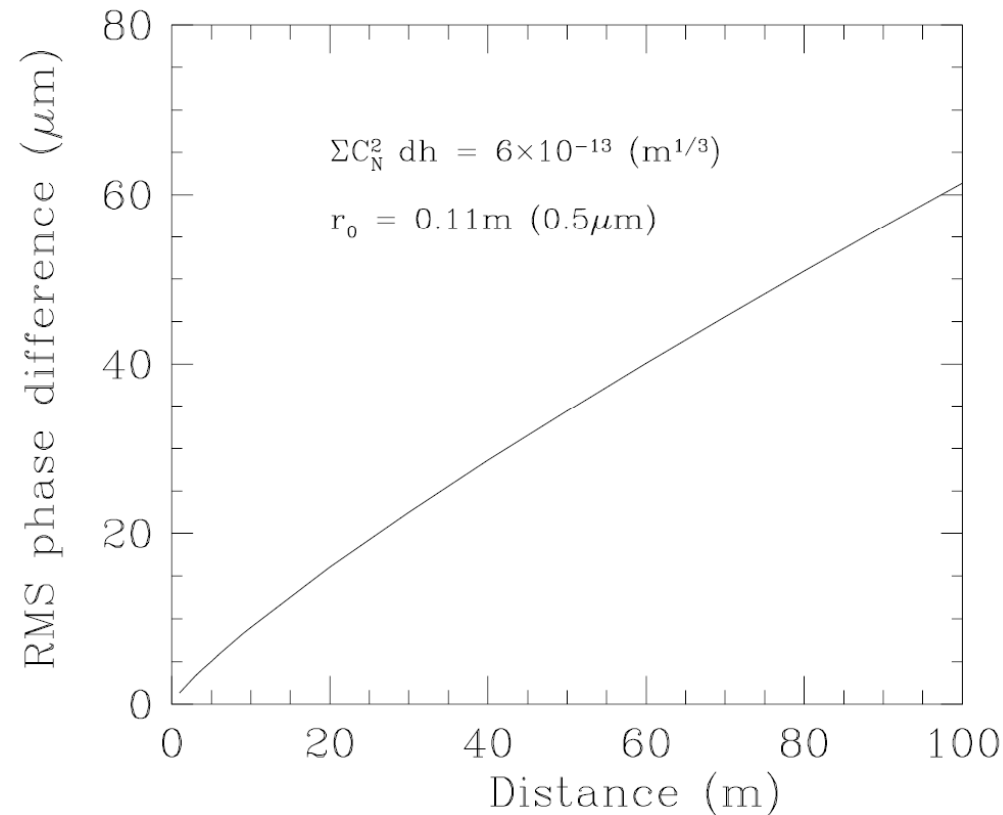


Height (km)	$C_n^2 dh [m^{1/3}]$			
	25%ile	Median	75%ile	Mean
13N Mauna Kea: 121,801 total profiles, 2005 Jun—2008 Feb				
0.0	1.38e-13	2.41e-13	4.29e-13	3.63e-13
0.5	1.22e-20	5.11e-15	4.21e-14	7.71e-14
1.0	1.88e-16	2.46e-15	1.13e-14	4.03e-14
2.0	3.26e-17	8.98e-16	1.18e-14	2.55e-14
4.0	4.81e-15	1.72e-14	4.12e-14	3.48e-14
8.0	4.34e-16	6.21e-15	3.35e-14	3.07e-14
16.0	1.27e-14	2.03e-14	3.48e-14	3.02e-14

Els et al. 2009, PASP, 121, 527

## 1.2 大気の性質：大気の屈折率揺らぎによる位相差の大きさ

- マウナケアのプロファイルを積分して、構造関数の係数を求める。
- RMS位相差を距離の関数として表すと下の図のようになる。距離が離れるほど  $r^{5/3}$  に依存してRMS位相差は大きくなる。この位相差と観測する光の波長の比でどれだけ像が乱れるかが決まる。小さい望遠鏡で長い波長で観測する場合は補償光学系なしでも回折限界を達成することが出来る。つまり、回折限界がシーイングサイズに近い。
- 大口径望遠鏡での補償を考えるほど大きな位相差を補償する必要がある。



1. 補償光学の原理と限界
  - 1.1 補償光学の原理
  - 1.2 大気の性質と光の位相の乱れについて
  - 1.3 補償性能の指標
  - 1.4 補償性能を決めるいくつかの要因



### 1.3 補償性能の指標：波面誤差と構造関数

- どれだけ入ってくる光の波面が乱れているか、どれだけ補償できたかを定量的に評価するパラメータとして、入ってくる光の波面の場所ごとの遅れや進みの二乗平均平方根 (root mean square) をとる。これを波面残差・波面誤差 (Wave Front Error) と呼ぶ。ある点  $\mathbf{x}$  での光の位相を  $\phi(\mathbf{x})$  と表すとき、波面誤差は

$$\sigma^2 = \left\langle \frac{4}{\pi d^2} \iint |\phi(\mathbf{x}) - \phi_0|^2 d\mathbf{x} \right\rangle$$

- と表す。次のスライドで示すようにこの波面誤差はストレル比と対応している。
- 波面誤差は光の位相の構造関数

$$D_\phi(\xi) = \left\langle |\phi(\mathbf{x}) - \phi(\mathbf{x} + \xi)|^2 \right\rangle$$

- で評価することが出来る。
- 光の位相の自己相関関数は

$$R_\phi(\xi) = \left\langle |\phi(\mathbf{x})\phi(\mathbf{x} + \xi)|^2 \right\rangle$$

- であり、構造関数と自己相関関数は

$$\begin{aligned} D_\phi(\xi) &= \left\langle |\phi(\mathbf{x})|^2 \right\rangle + \left\langle |\phi(\mathbf{x} + \xi)|^2 \right\rangle + 2 \left\langle |\phi(\mathbf{x})\phi(\mathbf{x} + \xi)| \right\rangle \\ &= 2R_\phi(0) - 2R_\phi(\xi) \end{aligned}$$

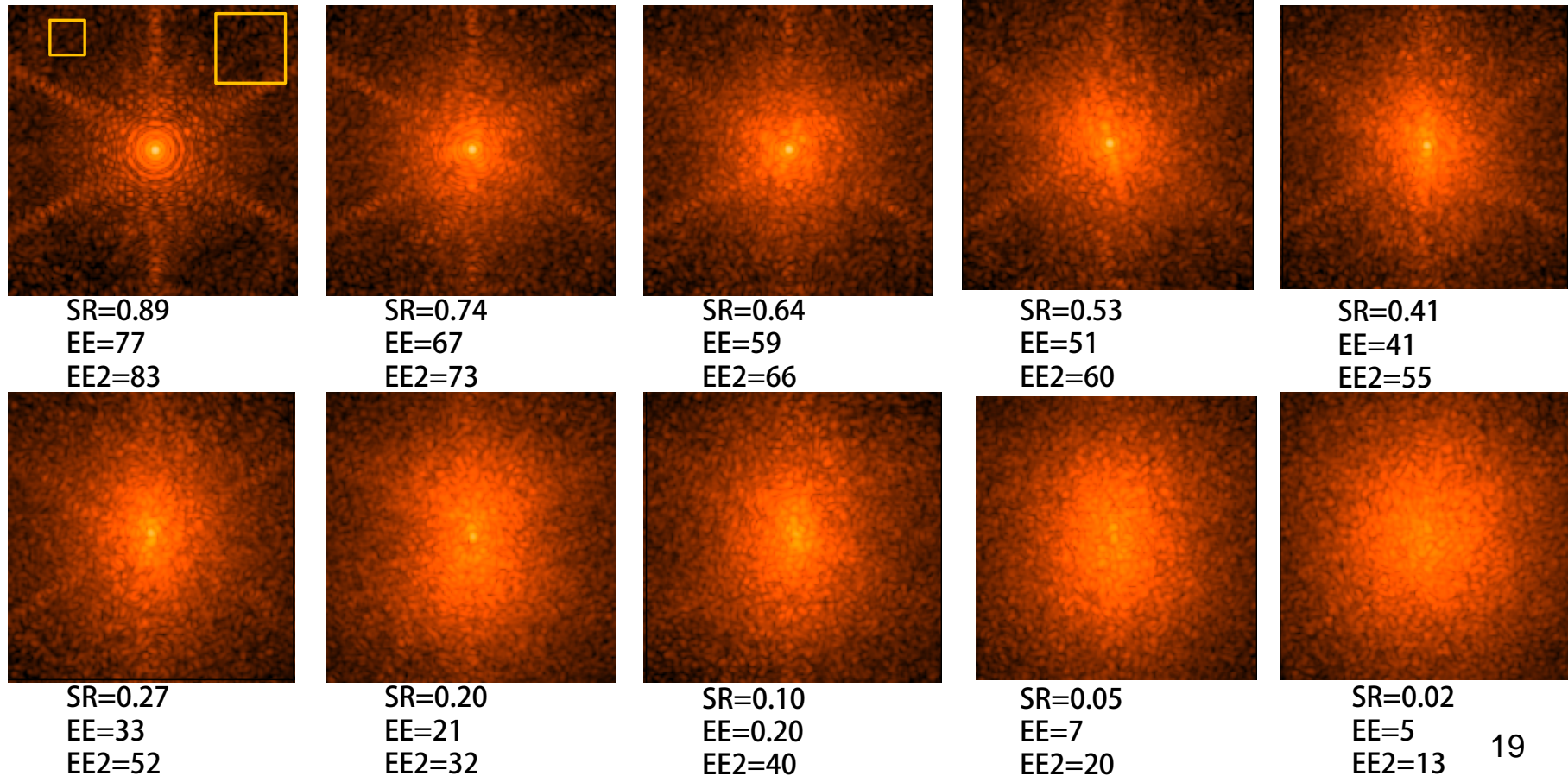
- で対応する。
- 波面誤差は長さで表す場合と用いる光の波長も考慮して位相で表す場合がある。位相で表した場合には波長に依存する。
- やってくる波面の形状および可変形鏡を用いて補償する波面の形状は波長に(ほとんど)依存しないので、長さで表した波面残差は波長によらないとみなせる。

### 1.3 補償性能の指標：波面誤差とストレル比

- 回折限界を達成した場合の PSF のピーク値と実際に観測される PSF のピーク値の比をストレル比と呼ぶ。
- ストレル比は波面誤差が小さい場合には位相で表した波面誤差と  $SR = \exp(-\sigma^2)$  で対応する。
- 同じ波面誤差に対して位相差  $\sigma^2$  は波長に依存する。よって波長  $2.2 \mu\text{m}$  で  $SR=0.9$  の場合でも波長  $0.7 \mu\text{m}$  では  $SR=0.4$  にしかない。
- しかし、観測を立案する場合に波面誤差やストレル比は用いにくい。

### 1.3 補償性能の指標：ストレル比と点像関数

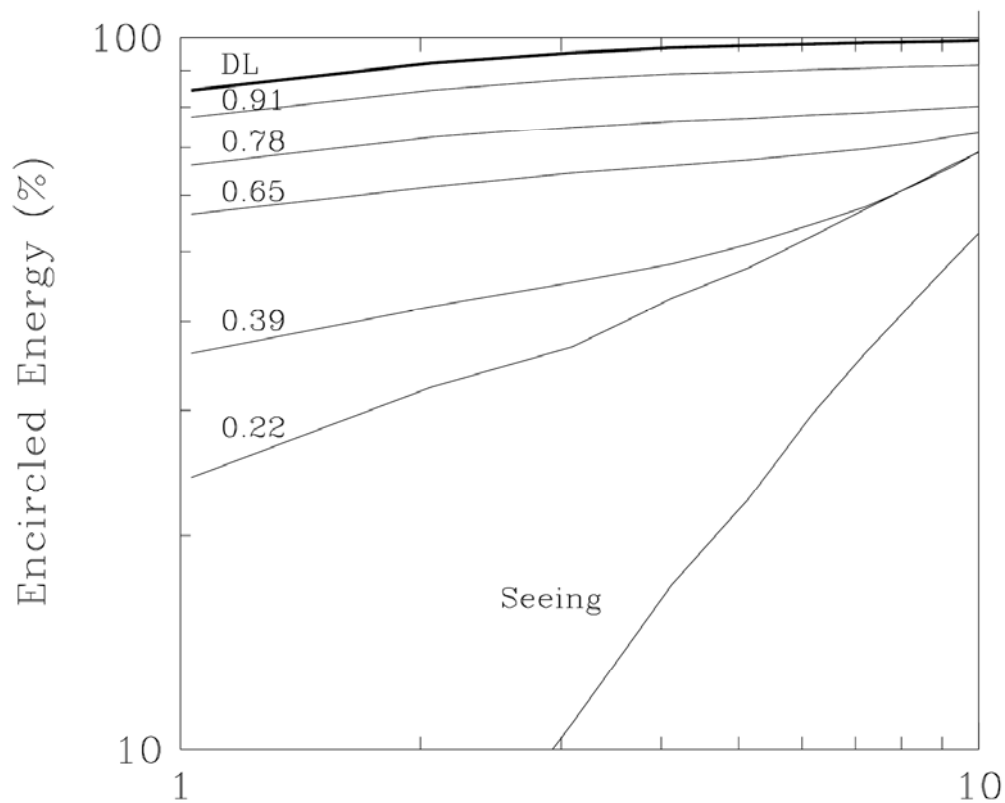
- いろいろなストレル比の点像関数 PSF の例を示す。30m 望遠鏡 K-band での観測を想定したシミュレーションから得られた PSF であり、図の 1 辺は 1.0 秒角に対応する。明るさは log-scale で表示しているのです野が強調されている。
- ストレル比が決まったからと言って PSF が決まるわけではないのでこれらは一例である。
- 補償光学系の PSF は補償が効いているコアとシーイングの影響が残るハローから構成されることが多く、ダブルガウシアンで記述される。
- EE は 0.12"x0.12" に入るエネルギー、EE2 は 0.24"x0.24" に入るエネルギーの % を示す(左上のパネルの四角)。



Maos/TMT\_MOAO6\_psf\_images.gif, NFIRAOS1\_psf\_images.gif

### 1.3 補償性能の指標：エンサークル・エンスクエアエネルギー

- 実際に観測の計画を立てる際にはストレル比では評価をしにくいことが多く、エンサークル・エンスクエアエネルギー(ある決められた開口の中に天体の光のうちどれだけの割合が入っているか)に基づいて評価することが多い。同じストレル比でも PSF の形はいろいろあり得るのでストレル比とエンサークルエネルギーは 1:1 関係ではないが下に一例を示す。
- (前のページのスライドはエンスクエアエネルギー)



数字はストレル比

Aperture Radius ( $1.22\lambda/D$ )

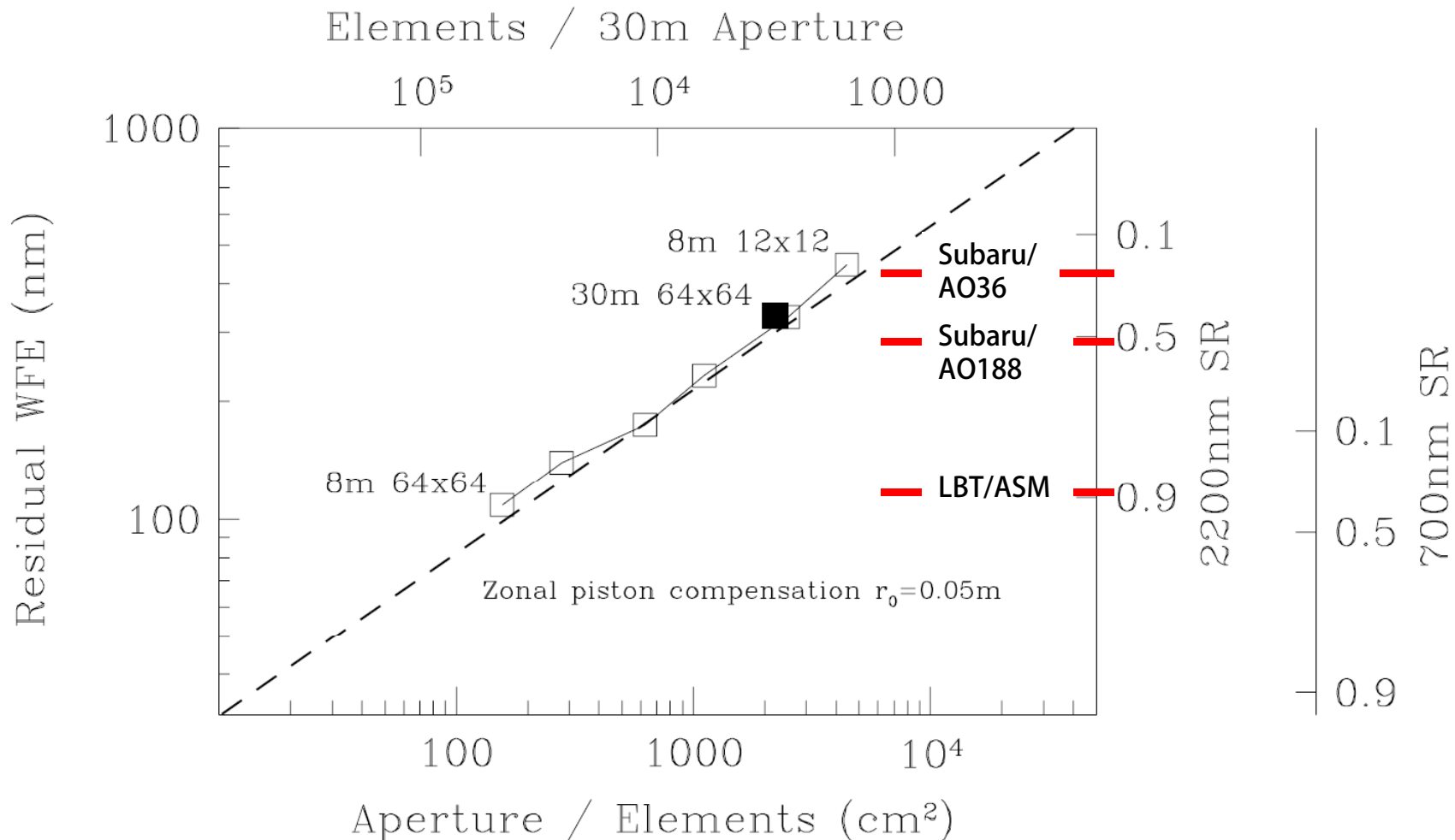
Aoinst/SIMAO/encircle.ps

回折限界で規格化した開口半径  
8m / K-band なら  $r=0.06''$   
30m / K-band なら  $r=0.015''$

1. 補償光学の原理と限界
  - 1.1 補償光学の原理
  - 1.2 大気の性質と光の位相の乱れについて
  - 1.3 補償性能の指標
  - 1.4 補償性能を決めるいくつかの要因

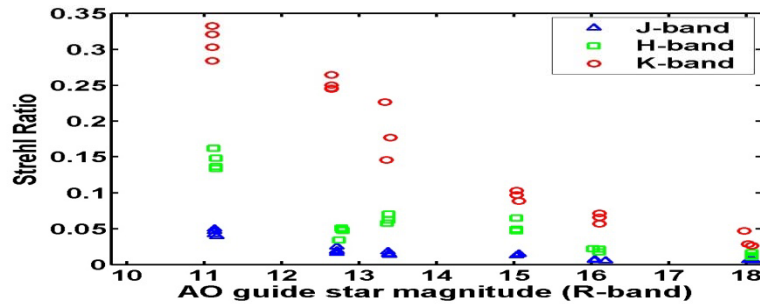
## 1.4 補償性能を決める要因：フィッティング誤差

- 補償性能を決める一番大きな要因は補償光学系の素子数(波面センサーの点数や可変形鏡の素子数)である。
- 下の図の破線は理論的に予想される素子数と波面残差の関係を示す。シミュレーションで計算された結果を四角(白四角 8m、黒四角 30m)で示す。

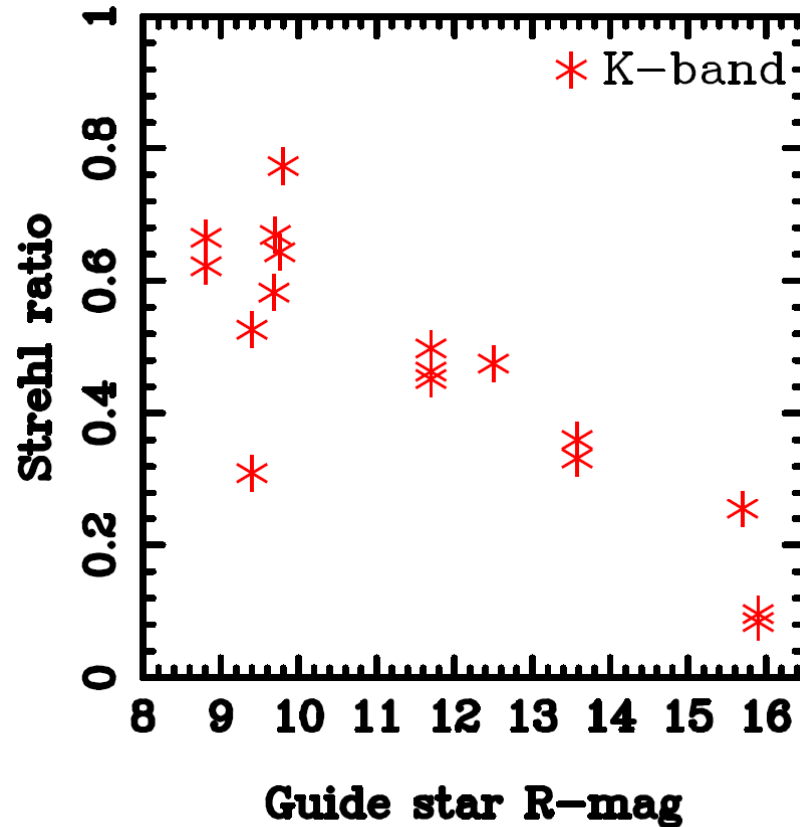


## 1.4 補償性能を決める要因：素子数の増加による性能の向上

- 自然ガイド星を用いた場合の AO の素子数による性能の比較。左側は Subaru/AO36 36 素子、右側は Subaru/AO188 188 素子。明るいガイド星の場合にはフィッティング誤差により素子数が多い方がより高いストレル比が達成されている。すばる望遠鏡の補償光学系ではバイモルフ可変形鏡を用いているので前のページの素子数とは 1 対 1 対応ではない。

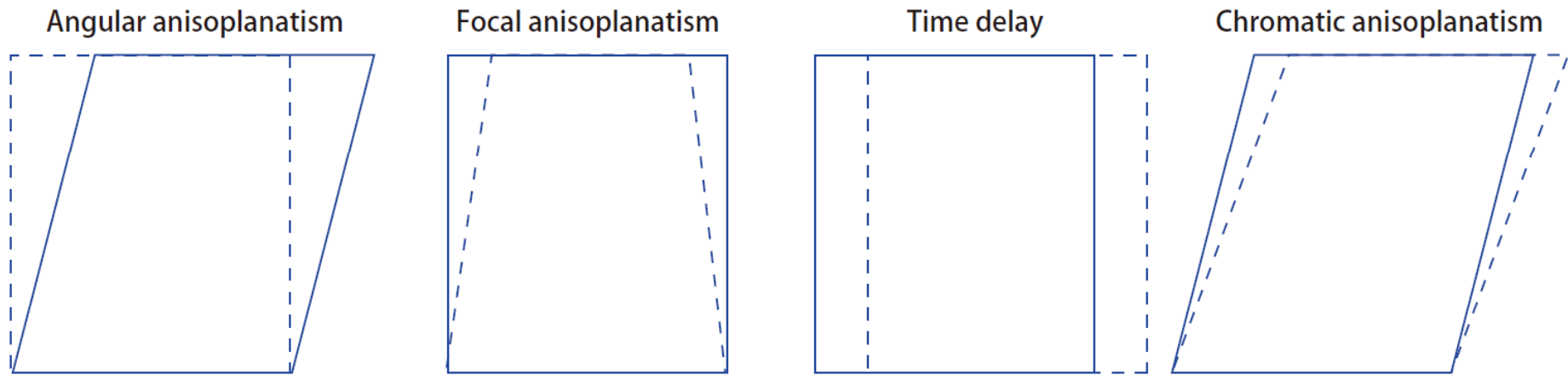


Oya et al. 2004, SPIE, 5490, 409



Minowa et al. 2010, SPIE, 7736, 77363N

## 1.4 補償性能を決める要因：anisoplanatismと波面誤差



ガイド星の方向とターゲットの方向が異なることによる。

ガイド星の高さが有限である、変動することによる。

ガイド星の測定とターゲットへの補正で時間差があることによる。

大気差によりガイド星光路とターゲットの光路が異なることによる。

AO/anisoplanatisms.pdf

- 光の波面を測定する方向を破線で、ターゲットの光の波面が通る方向を実線でしめす。この2個がいろいろな要因でずれることによって補償性能が制限される。
- これらの効果は大気の構造関数と波面誤差の式をそれぞれの場合に当てはめて変形することで評価出来る。

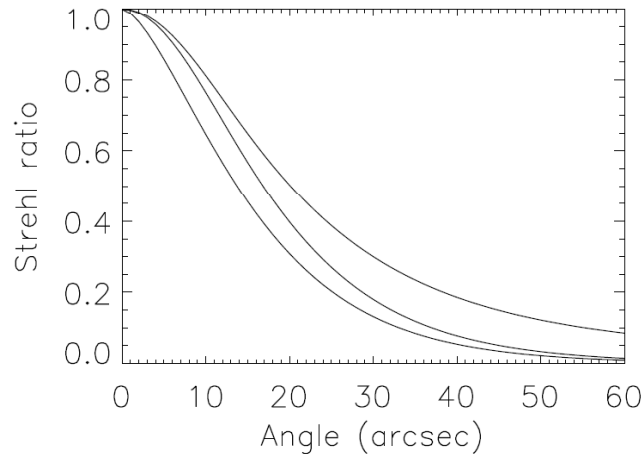
$$D_{\phi}(\xi) = \langle |\phi(\mathbf{x}) - \phi(\mathbf{x} + \xi)|^2 \rangle$$

$$\sigma^2 = \langle \frac{4}{\pi d^2} \int \int |\phi(\mathbf{x}) - \phi_0|^2 d\mathbf{x} \rangle$$



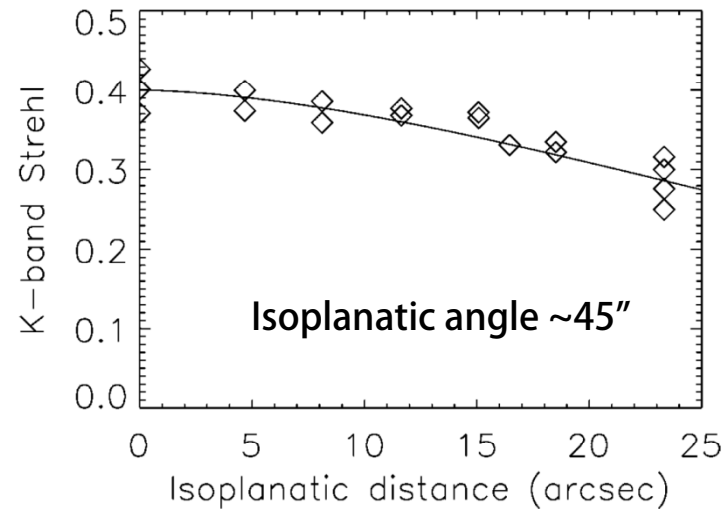
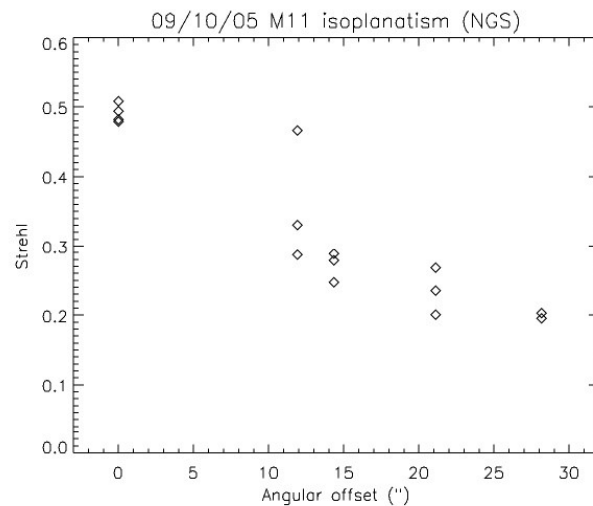
## 1.4 補償性能を決める要因：Angular anisoplanatism

- ガイド星の方向とターゲットの方向が異なることによる anisoplanatism。
- 解析的な計算結果を上図に示す。
- Keck AO (左：自然ガイド星、右：レーザーガイド星) の場合を下図に示す。



ガイド星から離れるにしたがってどれだけストレル比が小さくなるかを計算した結果。上から LGS で Tip-Tilt の項を除いたもの、LGS で Tip-Tilt の項を除いたものに NGS Tip-Tilt error を合わせたもの、NGS の場合。LGS の場合、NGS に比べると落ち方が緩やかである。

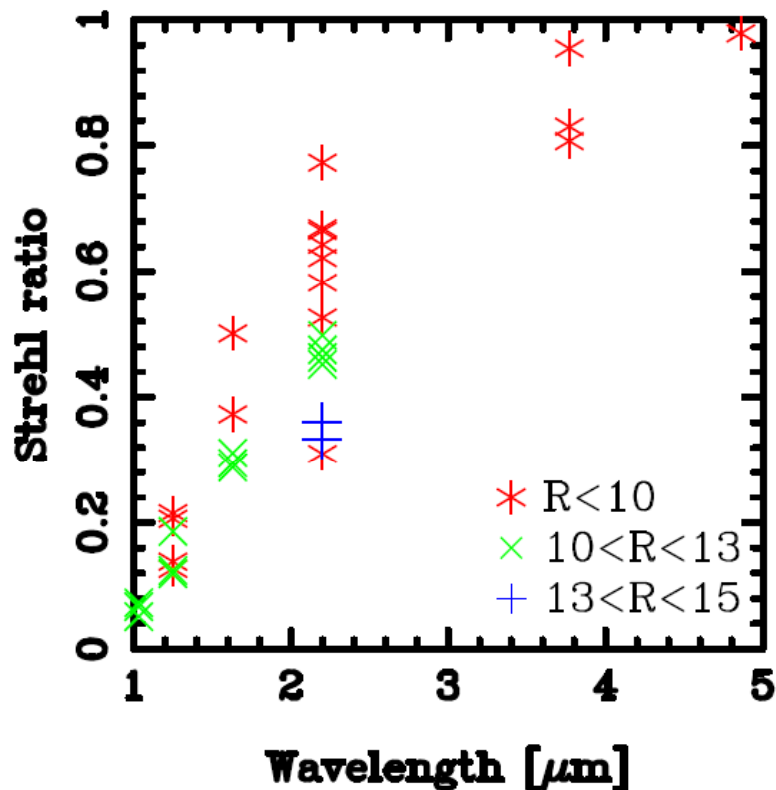
Van Dam et al. 2006, SPIE



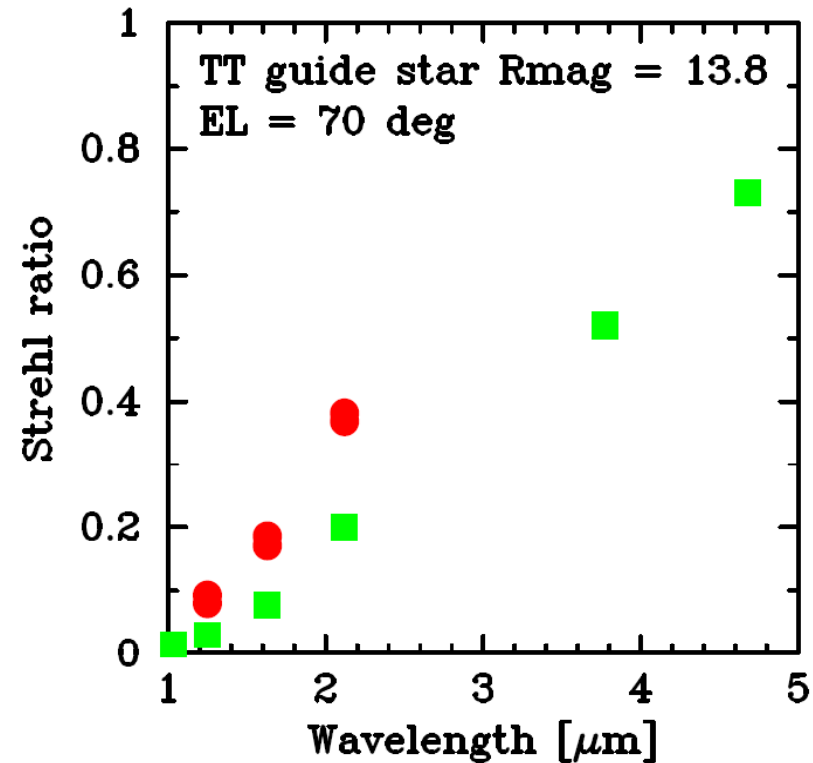
Van Dam et al. 2006, PASP, 118, 310

## 1.4 補償性能を決める要因：Focal anisoplanatism

- すばる望遠鏡 AO188 で自然ガイド星を用いた場合とレーザーガイド星を用いた場合のストレル比の比較。
- レーザーガイド星を用いた場合はコーン効果 (Focal Anisoplanatism) によってストレル比は下がる。



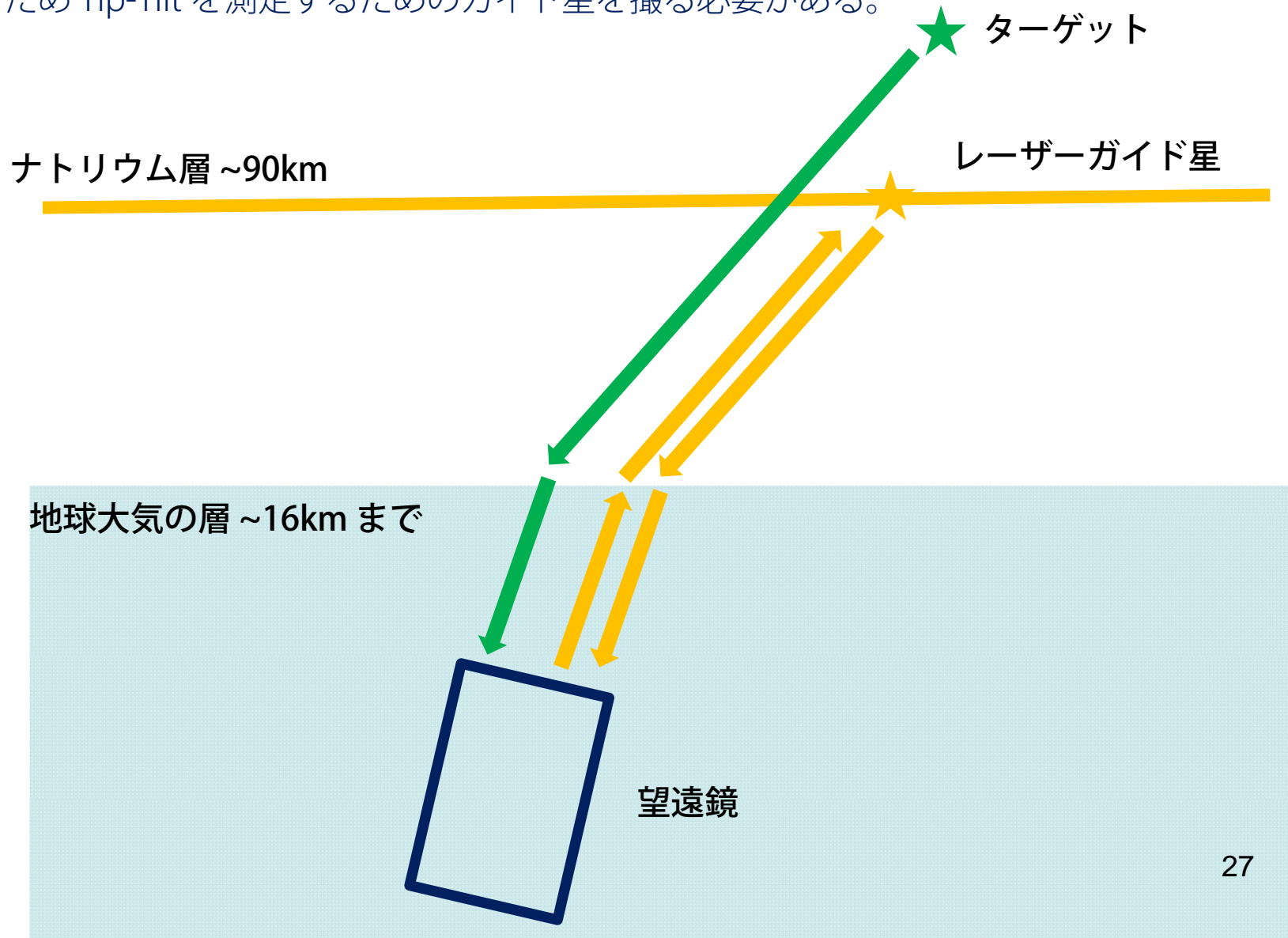
Minowa et al. 2010, SPIE, 7736, 77363N



Minowa et al. 2012, SPIE, 8447, 84471F

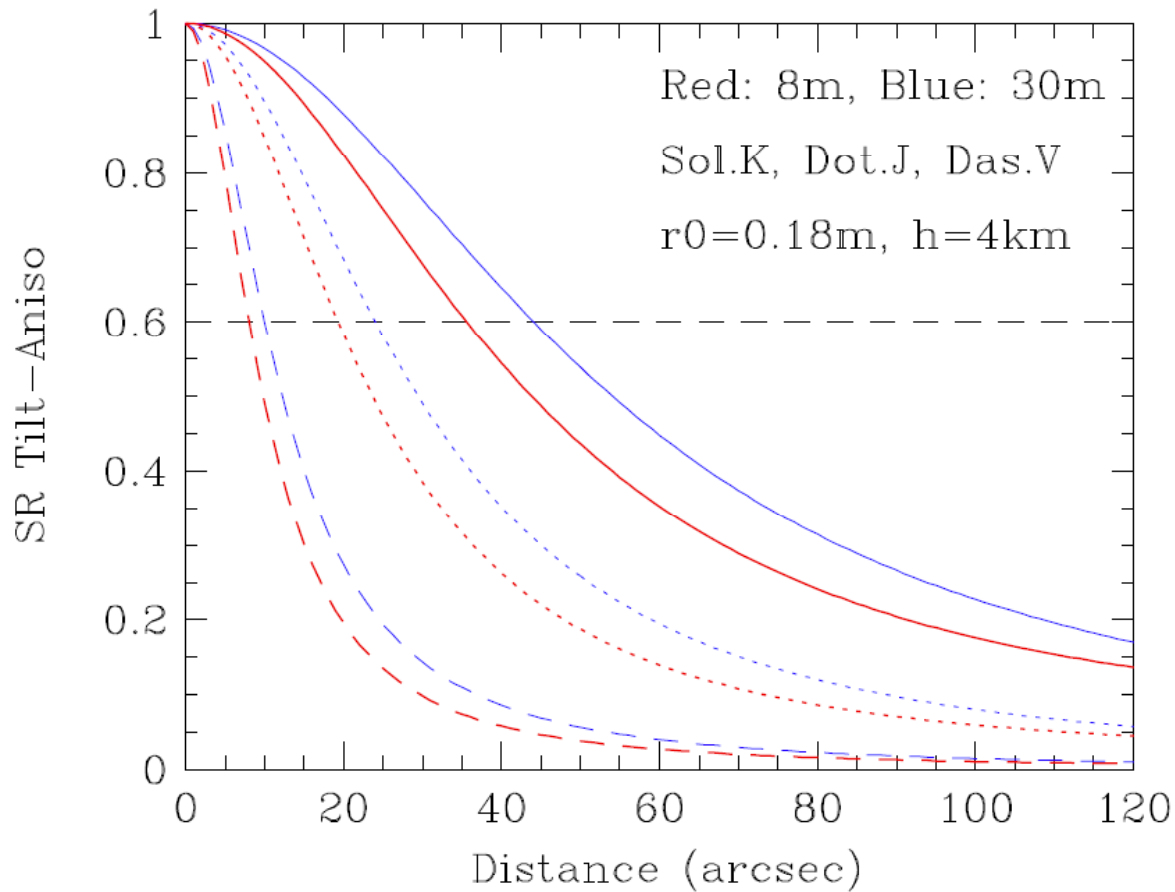
## 1.4 補償性能を決める要因：レーザーガイド星と Tip-Tilt ガイド星

- レーザーガイド星の場合には光源を打ち上げる光路があって大気揺らぎで生じる Tip-Tilt 成分は相殺されるので大気揺らぎの Tip-Tilt 成分を測定することが出来ない。このため Tip-Tilt を測定するためのガイド星を撮る必要がある。



## 1.4 補償性能を決める要因： Tip-Tilt ガイド星でカバーできる領域：Tilt-anisoplanatism

下の図はTTガイド星からの距離によって生じるSRの減少ファクターを解析的に求めたもの(望遠鏡の振動などは含まない)。J-Kの波長域でSRの減少をそこそこに抑える(SR~0.6)時、一つのTTガイド星でカバーできる視野はそこから半径30"程度の領域となる。



# 1.4 補償性能を決める要因：レーザーガイド補償光学とスカイカバレッジ 1

1 個の TT-guide 星がカバーするエリアは最大でも  $R=60''$  程度。すると星の数密度として 1000 stars/sq.deg 程度必要。下の図にある銀極領域での星カウントから考えると、少なくとも  $V=24\text{mag}$ ,  $J\text{vega}=21\text{mag}$ ,  $K\text{vega}=20\text{mag}$  程度に到達する必要がある。それぞれの明るさでの星のカウントレートは先ほどの露出時間の制限30msから考えると、

RAB=24mag : 10.1 photons/30ms/8.2m/3000A

IAB=24mag : 7.7 photons/30ms/8.2m/3000A

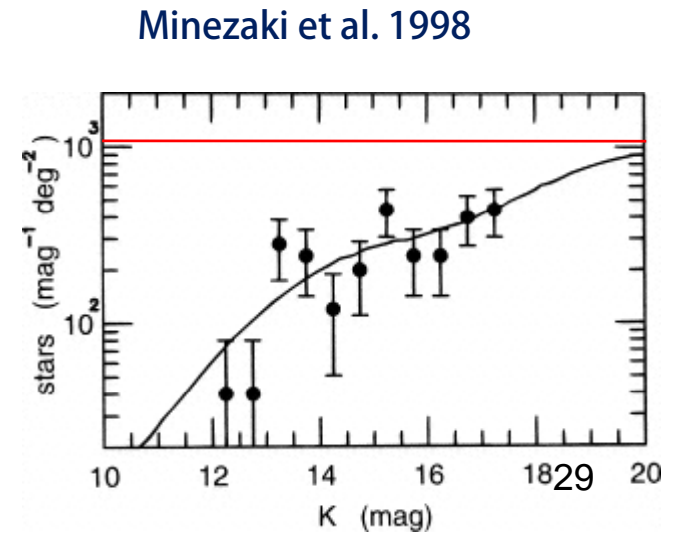
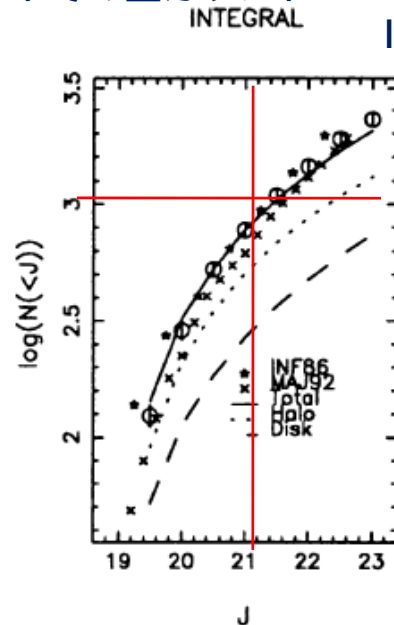
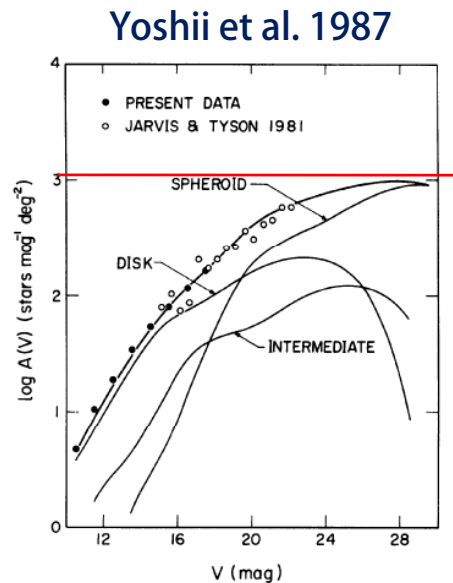
JAB=22.4mag ( $J\text{vega}=21.4\text{mag}$ ) : 23.8 photons/30ms/8.2m/3000A

HAB=22.2mag( $H\text{vega}=20.7\text{mag}$ ) : 21.4 photons/30ms/8.2m/3000A

KAB=22mag ( $K\text{vega}=20\text{mag}$ ) : 18.7 photons/30ms/8.2m/3000A

(現状で用いられる最も暗いガイド星: RAB=18mag : 28 photons/ms/8.2m/1000A)

## Galactic pole 領域でのいくつかのバンドでの星カウント



## 1.4 補償性能を決める要因：レーザーガイド補償光学とスカイカバレッジ 2

- 暗い星を TT ガイド星として用いる場合にはバックグラウンドノイズが効いてくる。CFHT webpage から取ってきた 1) Mauna Kea でのバックグラウンドの明るさ(Vega等級)、2) 0.5"x0.5"での明るさ、3) 0.2"x0.2"での明るさ、4) 0.1"x0.1"での明るさ、4) 予想されるバックグラウンド光子数、5) 前のスライドでスカイカバレッジを確保するために要求されるガイド星の光子数、6) ガイド星の光子数とバックグラウンドの光子数のポアソンノイズの比を表に示す。
- 可視光では 0.5"x0.5" の領域と比較、赤外では補償された星像を見る On-instrument WFS を仮定して 0.2"x0.2" or 0.1"x0.1" の領域と比較しておく。上の段は 8m 望遠鏡、下の段は 30m 望遠鏡。

		1.0"x1.0"	0.5"x0.5"	0.2"x0.2"	0.1"x0.1"	bg/30ms	GS/30ms	GS/sqrt(bg)
8m 鏡 30ms	R-band	20.3	21.8	23.8	25.3	76	10.1	1.15
	I-band	19.2	20.7	22.7	24.2	161	7.7	0.61
	J-band	14.8	16.3	18.3	19.8	1037	23.8	0.74
	H-band	13.4	14.9	16.9	18.4	2825	21.4	0.40
	K-band	12.6	14.1	16.1	17.6	1078	18.7	0.57
		1.0"x1.0"	0.5"x0.5"	0.2"x0.2"	0.1"x0.1"	bg/100ms	GS/100ms	GS/sqrt(bg)
30m 鏡 100ms	R-band	20.3	21.8	23.8	25.3	3403	449	7.7
	I-band	19.2	20.7	22.7	24.2	7166	343	4.1
	J-band	14.8	16.3	18.3	19.8	11629	1060	9.8
	H-band	13.4	14.9	16.9	18.4	31666	956	5.4
	K-band	12.6	14.1	16.1	17.6	48117	836	3.8

## 2. 補償光学の 3+1 種の神器

### 2.1 波面センサー

シャックハルトマン型波面センサーを例に

### 2.2 可変形鏡

多素子可変形鏡に重点を置いて

### 2.3 レーザー光源

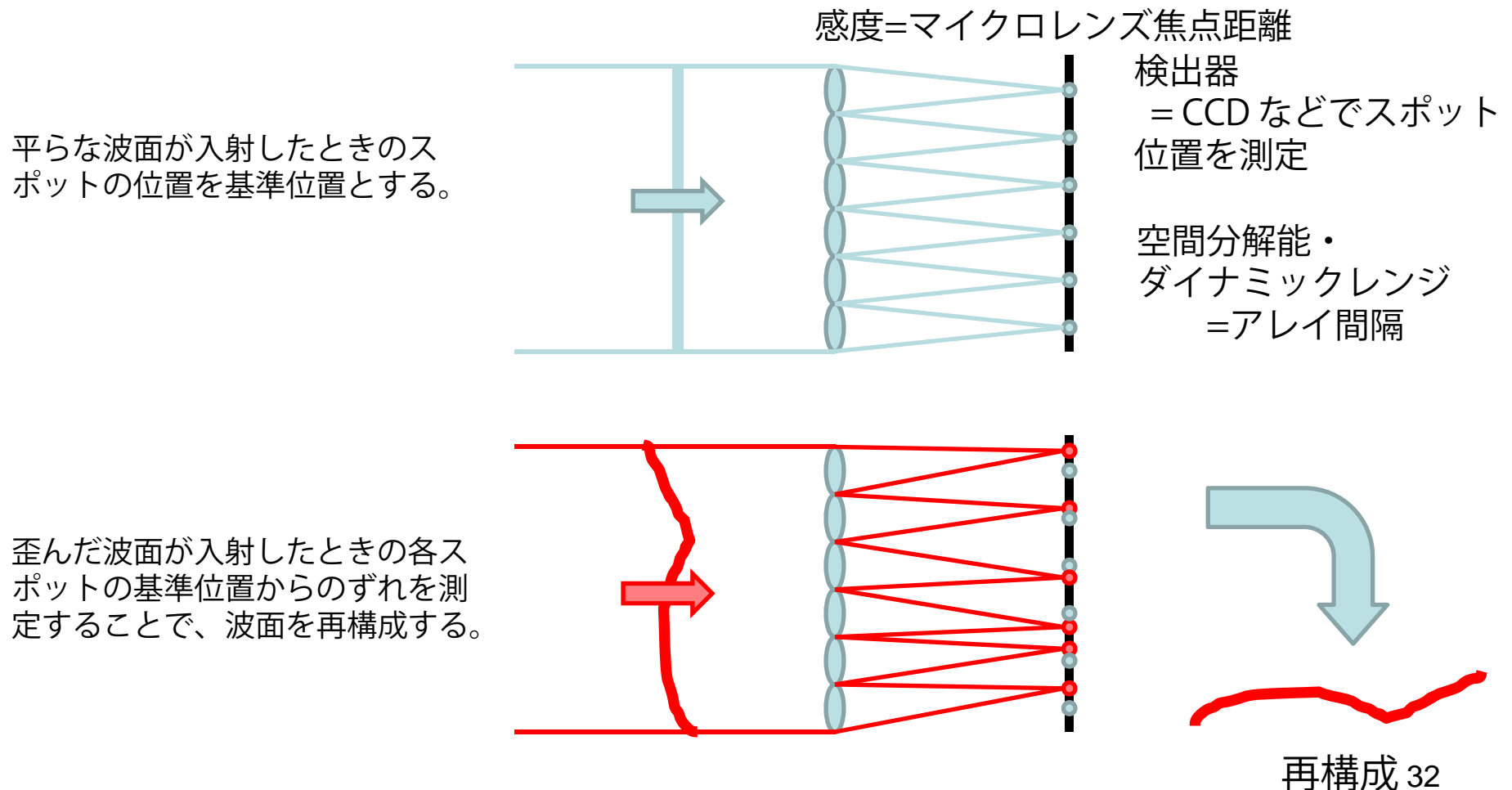
簡単に

### 2.4 リアルタイム計算機

簡単に

## 2.1 波面センサー：シャックハルトマン型波面センサーの仕組み

マイクロレンズアレイで瞳を分割して結像し、それぞれのマイクロレンズの場所での局所的な光の波面の傾きを測定し、その情報をもとに全体の波面を「再構成」する。再構成する部分が逆問題となる。大気の揺らぎで生じる光の波面の形状は「連続」とであると仮定する。不連続があってもシャックハルトマン型波面センサーでは測定することはできない。

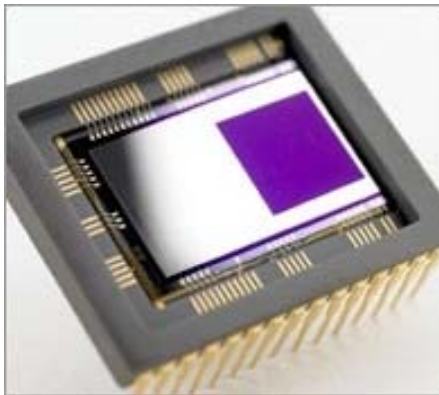




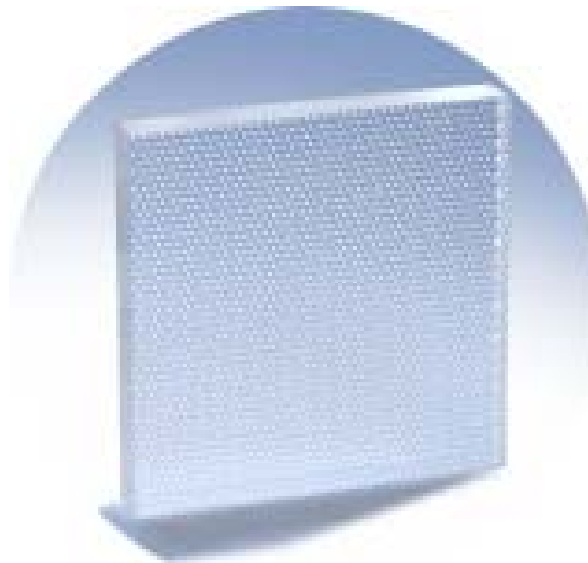
## 2.1 波面センサー：シャックハルトマン波面センサーの実際のパーツ

- CCD (CMOS) 検出器とマイクロレンズアレイを組み合わせ構成される。
- CCD 検出器としては高速の読み出しに伴う読み出しノイズが問題になるので電子増倍型CCD (EM-CCD) がもちいられる。
- 高速の読み出しを可能にする CMOS 検出器も用いられるが、読み出しノイズが CCD に比較すると大きい。

EM-CCD検出器

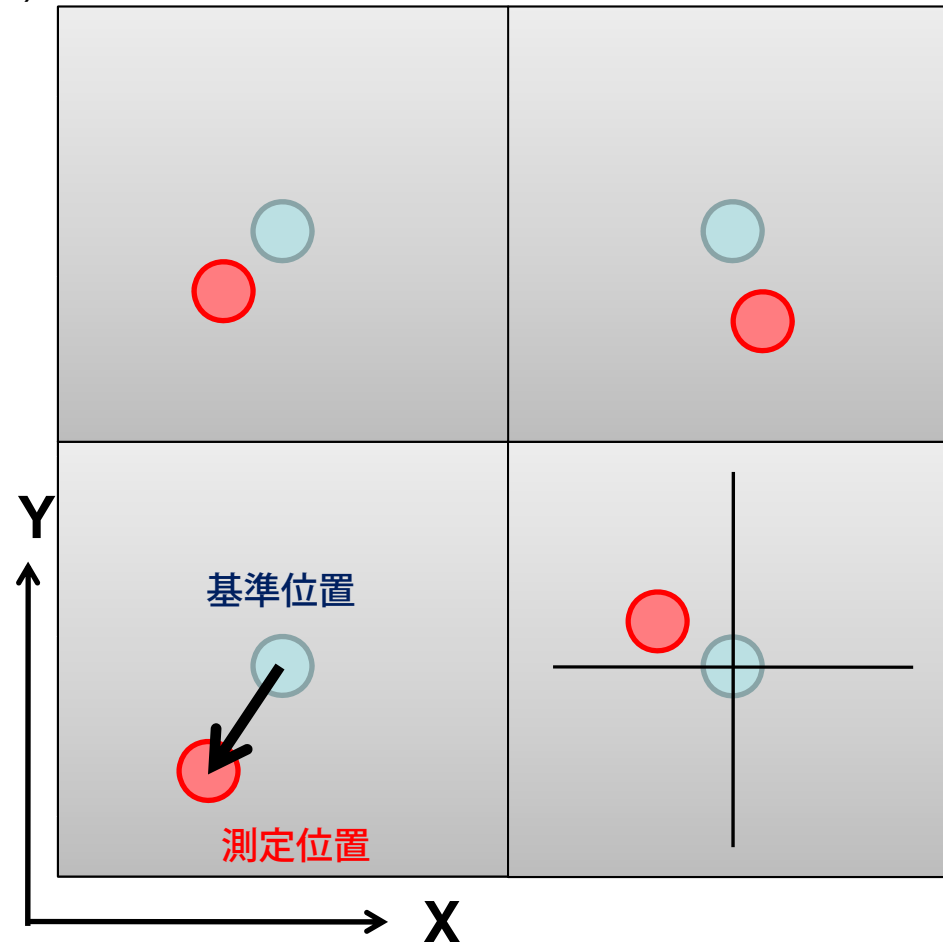


マイクロレンズアレイ



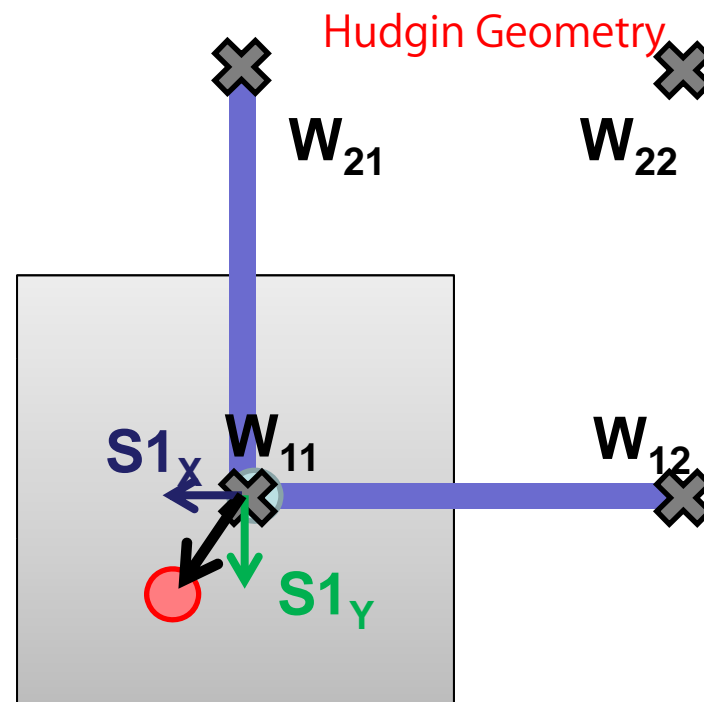
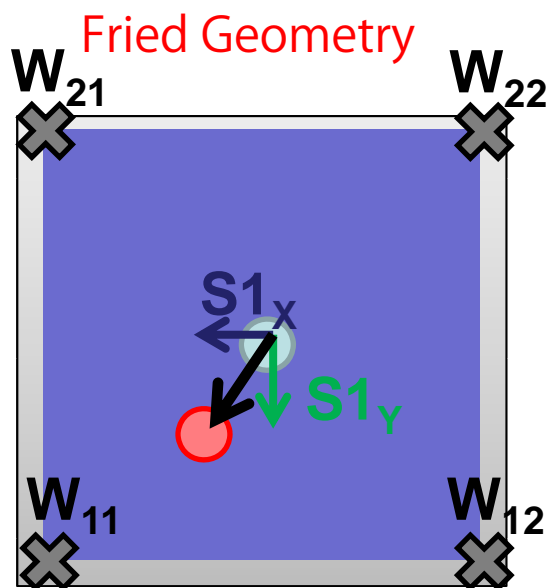
## 2.1 波面センサー：シャックハルトマン型波面センサーの測定値

それぞれの正方形の領域が個別のマイクロレンズに相当する。マイクロレンズ1個に対し1個の像が結像される。入射する光の波面が平らな場合には青丸の基準位置に像が結像される。各マイクロレンズの位置での光の波面の傾きに依じてスポットの位置は赤に示すような測定位置に移動する。基準位置からどれだけ移動したかが傾きの方向と大きさを与える。実際にはマイクロレンズアレイに対して検出器4素子だけ割り当てて(右下のように)相対的な明るさの比でずれ量を測定することもある(Quad Cell)。



## 2.1 波面センサー：シャックハルトマン型波面センサーでの波面再構成

マイクロレンズアレイ"1"に対する重心ずれの測定値 ( $S1_x, S1_y$ )と再構成する波面の点(バツ印で示す)に対して Fried Geometry と Hudgin Geometry の2種類の配置が用いられる。それぞれの点での波面の位相を  $w_{11}, w_{12}, w_{21}, w_{22}$  と表す。測定値と波面の位相の関係はそれぞれ下の式のように表わされる。Cはずれ量を位相のずれ量に直す係数でマイクロレンズの焦点距離で決まる。可変形鏡の制御には  $w_{11}, w_{12}, w_{21}, w_{22}$  を用いる。シャックハルトマン型の波面センサーの場合にはある領域の中の  $x, y$  方向の波面の傾きを測定しているのので Fried Geometry が対応関係が良い。Hudgin Geometry のように  $x, y$  で異なる場所の傾きを測定しているわけではない。ただし、Fried Geometry では後述するワッフルモードが測定できない問題がある。



$$S1_x = C \times 1/2 \times (W_{12} - W_{11} + W_{22} - W_{21})$$

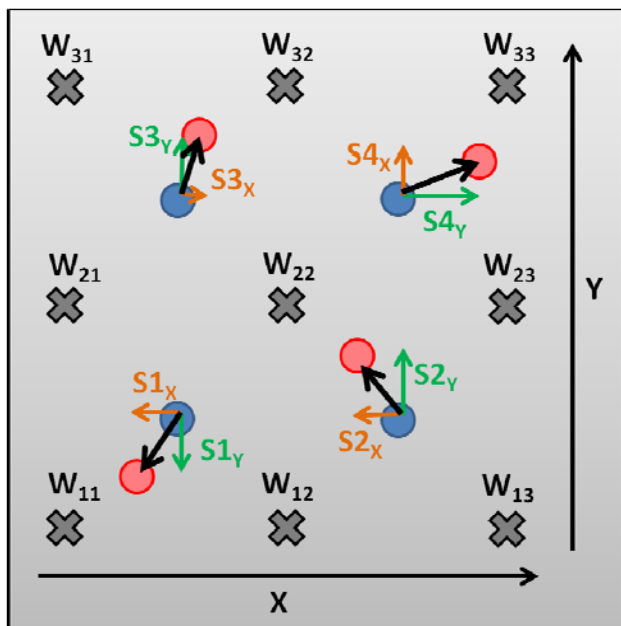
$$S1_y = C \times 1/2 \times (W_{21} - W_{11} + W_{22} - W_{12})$$

$$S1_x = C \times 1/2 \times (W_{12} - W_{11})$$

$$S1_y = C \times 1/2 \times (W_{21} - W_{11})$$

## 2.1 波面センサー：シャックハルトマン型波面センサーでの波面再構成

波面の位相点を3×3に拡張する。係数を1として、解くべき行列は



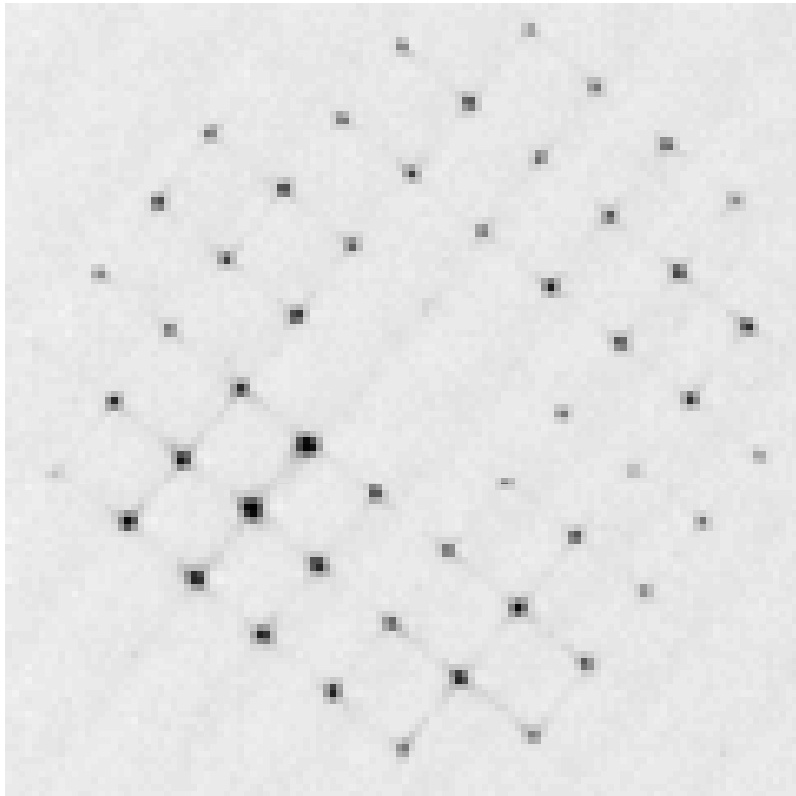
$$\begin{bmatrix} S1_x \\ S1_y \\ S2_x \\ S2_y \\ S3_x \\ S3_y \\ S4_x \\ S4_y \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_{11} \\ W_{12} \\ W_{13} \\ W_{21} \\ W_{22} \\ W_{23} \\ W_{31} \\ W_{32} \\ W_{33} \end{bmatrix}$$

素子数を増やすと測定の数 ( $2n^2$ ) が未知数の数 ( $(n+1)^2$ ) を上回り過決定になる。  
 次世代望遠鏡で 60x60 素子の場合、7200 測定から 3721 の位置での波面を推定することになる。  
 最小二乗解で求めることが出来る。(Fried 1977, JOSA, 67, 370)

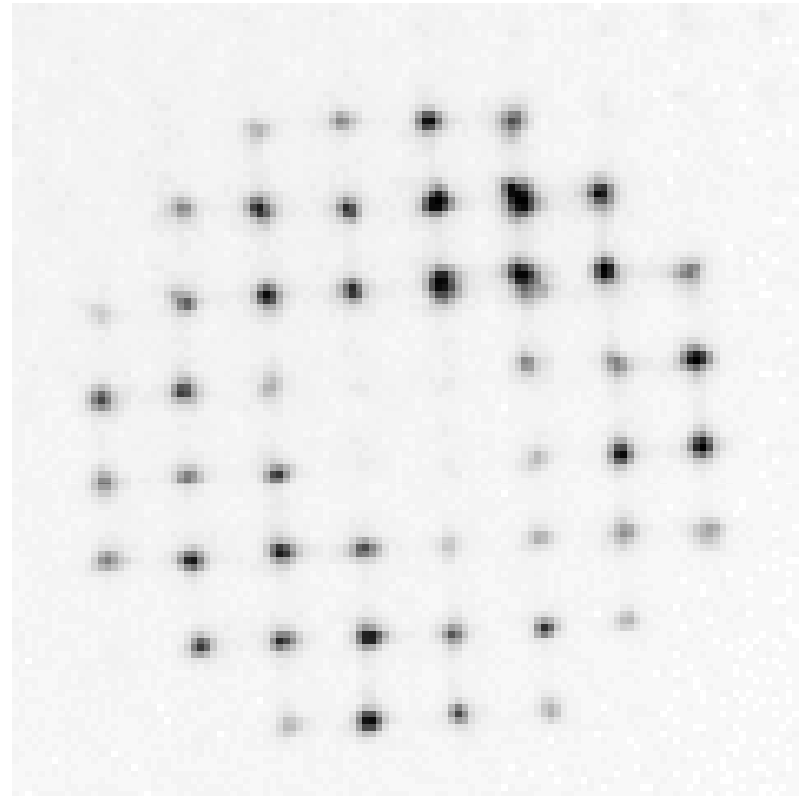
$$\mathbf{s} = \mathbf{A} \mathbf{w} \quad \longrightarrow \quad \mathbf{w} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{s}$$

## 2.1 波面センサー：シャックハルトマン型波面センサー：実際の測定例

- 東北大学屋上50cm望遠鏡でシリウスを測定した結果。~20frames/sec でデータを取得している。
- 300 $\mu$ mピッチ、 $f_{\text{eff}} = 8.7\text{mm}$  のマイクロレンズ(左)と  $f_{\text{eff}} = 18.8\text{mm}$  のマイクロレンズ(右)を使用した結果を示す。



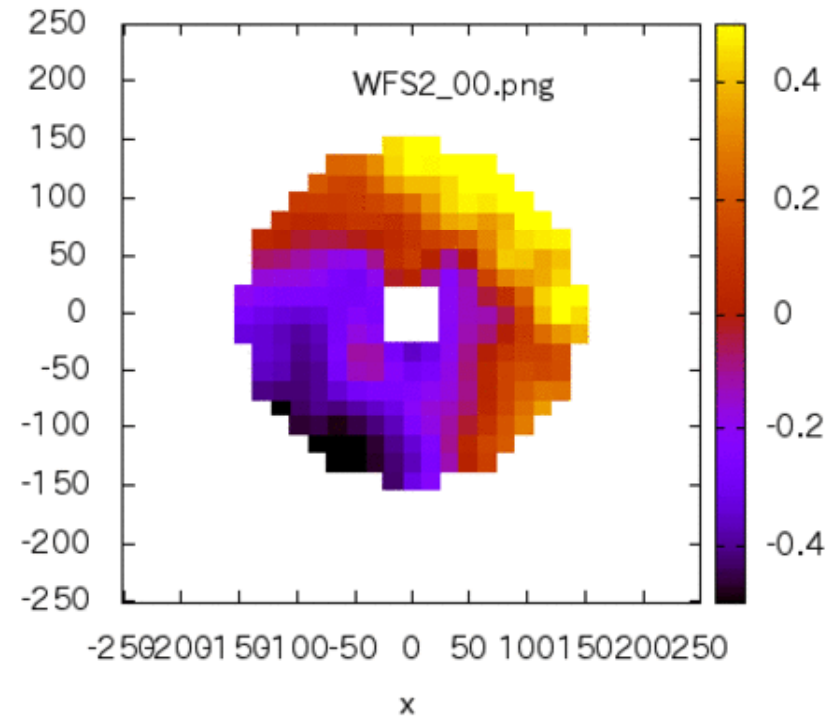
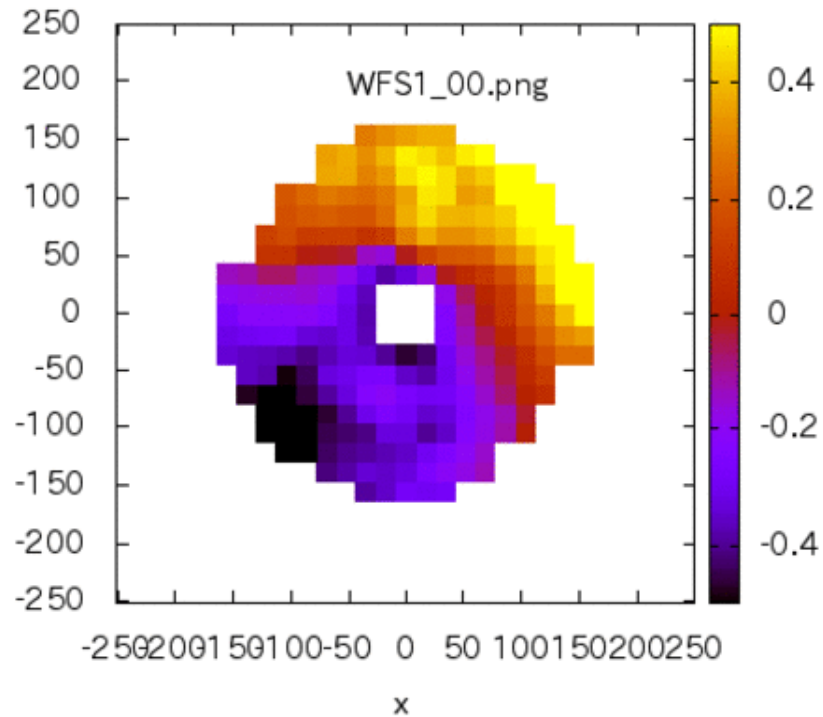
3



3

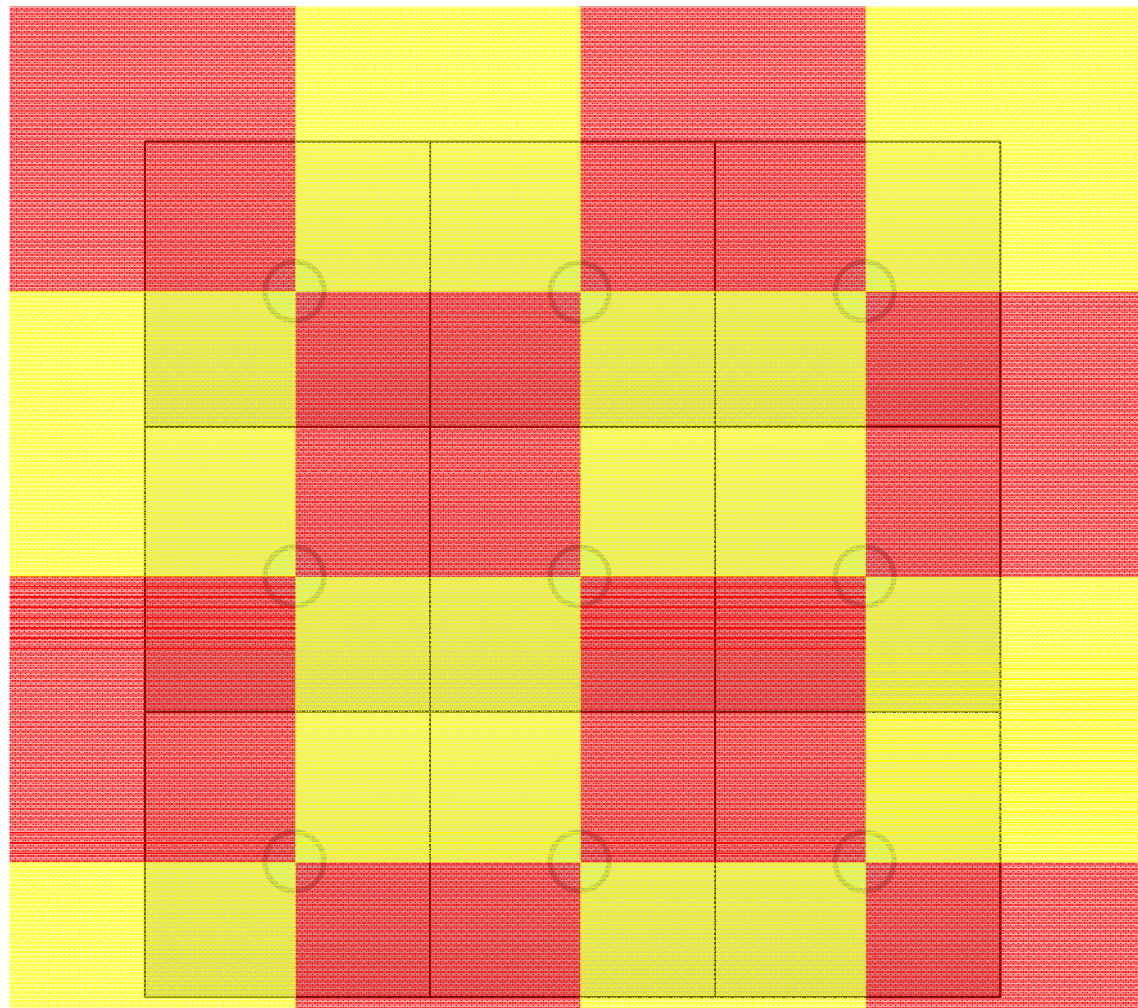
## 2.1 波面センサー：シャックハルトマン型波面センサー：実際の波面

- 東北大学屋上50cm望遠鏡でシリウスを測定した結果。~20frames/sec でデータを取得している。
- 300 $\mu\text{m}$ ピッチ、 $f_{\text{eff}} = 8.7\text{mm}$  のマイクロレンズ(左)と  $f_{\text{eff}} = 18.8\text{mm}$  のマイクロレンズ(右)を使用した結果を示す。



## シャックハルトマン型波面センサーで測定できないモード

測定されないモードが存在する。シャックハルトマン型センサーでは波面のピストンモードを測定することは出来ないが、補償光学系においてはピストンモードを補正する必要はないので無視できる。Fried Geometry を採用した場合には下の図のワッフルモード（チェッカーフラッグモード）：赤で高く黄色で低いような形状、も測定されない。



## 2.1 波面センサー：波面センサーのまとめ

		光学素子	駆動部	検出器	瞳での空間分解能	感度	ダイナミックレンジ	特徴
シャックハルトマン波面センサー	傾き	マイクロレンズアレイ	不要	CCDでスポット位置を検出	レンズアレイのレンズピッチ	レンズアレイの焦点距離	レンズアレイのレンズピッチ	
シア干渉系	傾き	シア光学系	不要	CCDで像の濃淡を測定	検出器のサンプリング = 可変	シアの量と濃淡	シアの量	分割鏡の間のピストン成分の検出が可能である。
ピラミッド型波面センサー	傾き	ピラミッド光学系	ピラミッドを焦点面で駆動	CCDで像の濃淡を測定	検出器のサンプリング = 可変	ピラミッドの振動範囲	ピラミッドの振動範囲	
曲率センサー	曲率	光ファイバーバンドル	焦点位置の移動	APDアレイで明るさの違いを測定	ファイバーアレイのピッチ	前後移動量	前後移動量	バイモルフ可変形鏡との相性が良い。



## 2. 補償光学の 3+1 種の神器

### 2.1 波面センサー

シャックハルトマン型波面センサーを例に

### 2.2 可変形鏡

多素子可変形鏡に重点を置いて

### 2.3 レーザー光源

簡単に

### 2.4 リアルタイム計算機

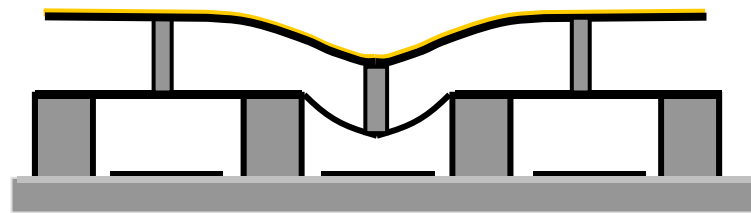
簡単に

## 2.2 可変形鏡：TMT を想定した時に要求される仕様例

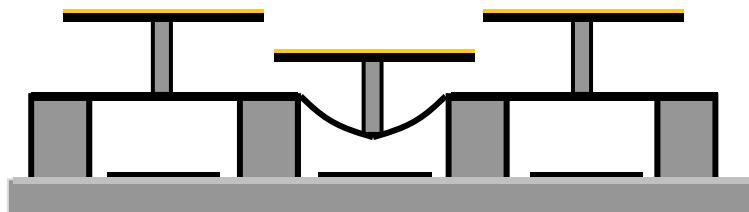
<b>Element count</b>	<b>1024 = 32x32 (goal: 4096 = 64x64)</b>
Pitch	300 ~ 1,000 um
Aperture size	10~ 30mm (goal: 20~ 60mm)
Fill factor	98%
Actuator yield	> 99%
<b>Stroke (overall)</b>	<b>20 um</b>
<b>Stroke (at highest spatial freq.)</b>	<b>4 um</b>
Surface roughness (RMS)	< 20nm (goal: <10nm)
Flatness (controlled; RMS)	< 20 nm
Bandwidth	> 100Hz
First resonance	> 1kHz
Hysteresys	< 0.1%
Reflective surface	Gold (Silver) w/ overcoat
Uniformity of surface reflectivity	±1% RMS
Stability	< 4nm
Repeatability	< 4nm
Resolution	< 4nm
Maximum drive voltage	< 300V
Operating temperature	-5°C ~ +15°C (goal: -30°C ~ +30°C)
Relative Humidity	0 ~ 90 %
Altitude	0 ~ 4500 m

## 2.2 可変形鏡：MEMS 技術を用いた多素子可変形鏡

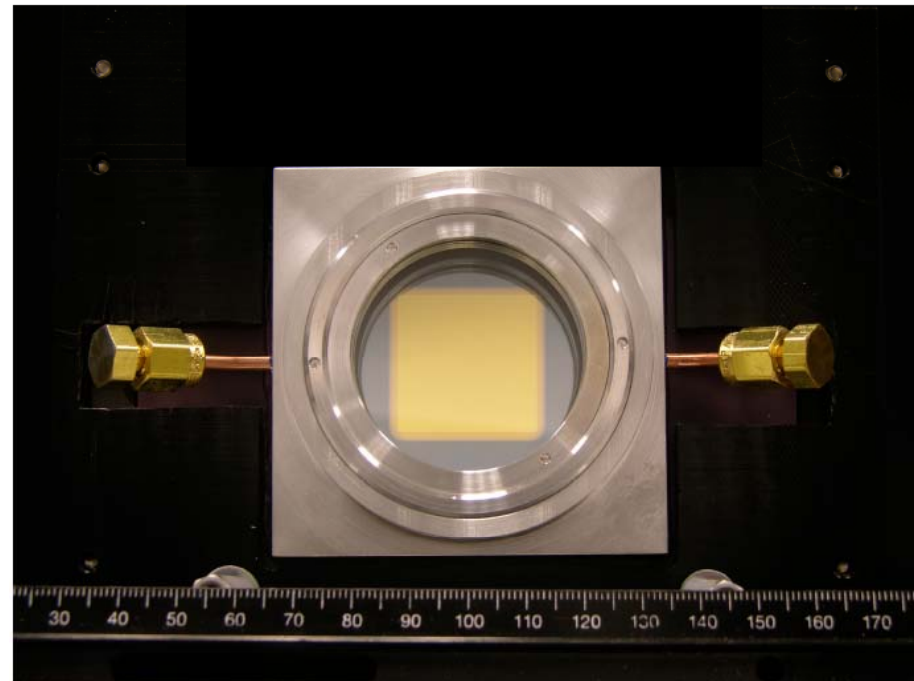
- 多素子のMEMS可変形鏡については現状では Boston Micromachines の独壇場となっている。素子数の最大は 25mm角 4092 素子、ストローク  $3.5\mu\text{m}$ 、ピッチ  $400\mu\text{m}$  である。インプットに対して  $14\text{nm rms}$  で波面を再現可能。Dead アクチュエータの数を抑える(現状では 1%程度あり、Wafer の不良の問題)、300V の過電圧による電極接触とアクチュエータ破壊の抑制、駆動回路の小型化が課題となっている。



Continuous mirror  
(smooth phase control)



Segmented mirror  
(uncoupled control)



Boston Micromachines, AO4ELT2 presen, webpage.

## 2.2 可変形鏡：MEMS 技術を用いた多素子可変形鏡

- MEMS で有望そうなものは他に IRIS-AO (Berkeley) がある。現状では素子数の最大は 163 鏡で 489 素子相当が最大。ストローク 5 $\mu$ m、ピッチ 600 $\mu$ m。ホームページの情報が更新されていない。。

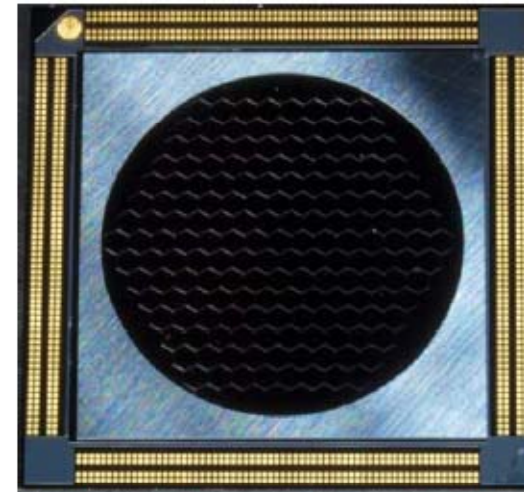
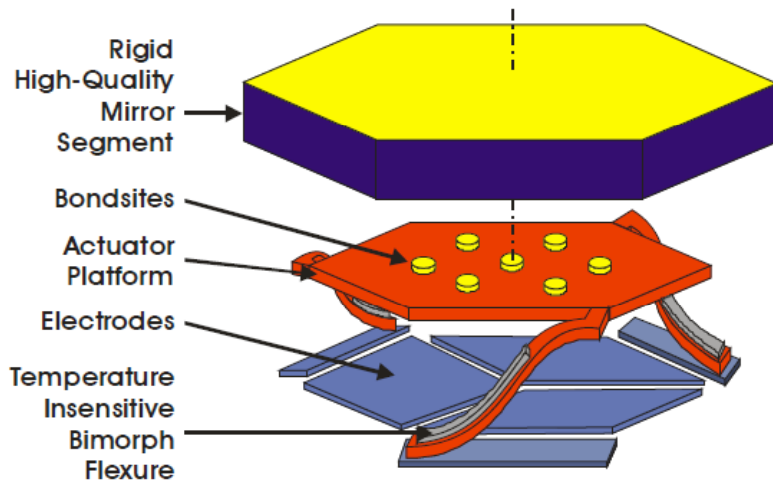


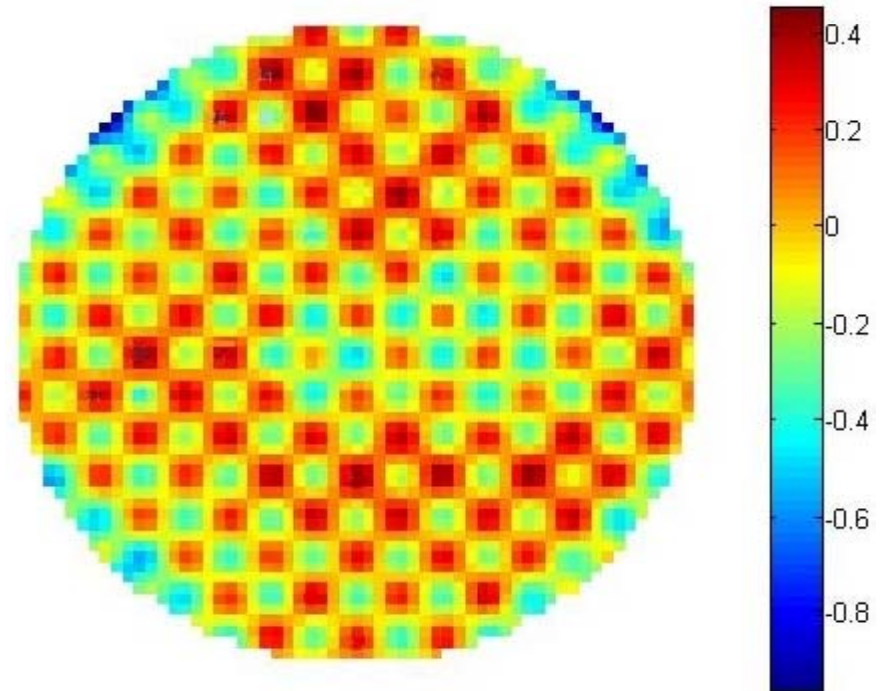
Figure 11. Photograph of a PTT489 deformable-mirror chip prior to optical coating.

Model #	Number of Actuators	Number of Segments	Max Stroke	Max Tilt Angle	Min. Freq. Response	Inscribed Aperture	Availability
PTT111-5	111	37	5 $\mu$ m	$\pm 5$ mrad	2 kHz	3.5 mm	✓
PTT111-8	111	37	8 $\mu$ m	$\pm 8$ mrad	2 kHz	3.5 mm	Q2, 10
PTT489-5	489	163	5 $\mu$ m	$\pm 5$ mrad	2 kHz	7.7 mm	✓*
PTT489-8	489	163	8 $\mu$ m	$\pm 8$ mrad	2 kHz	7.7 mm	Q3, 10*

\* Beta availability

## 2.2 可変形鏡：多素子可変形鏡

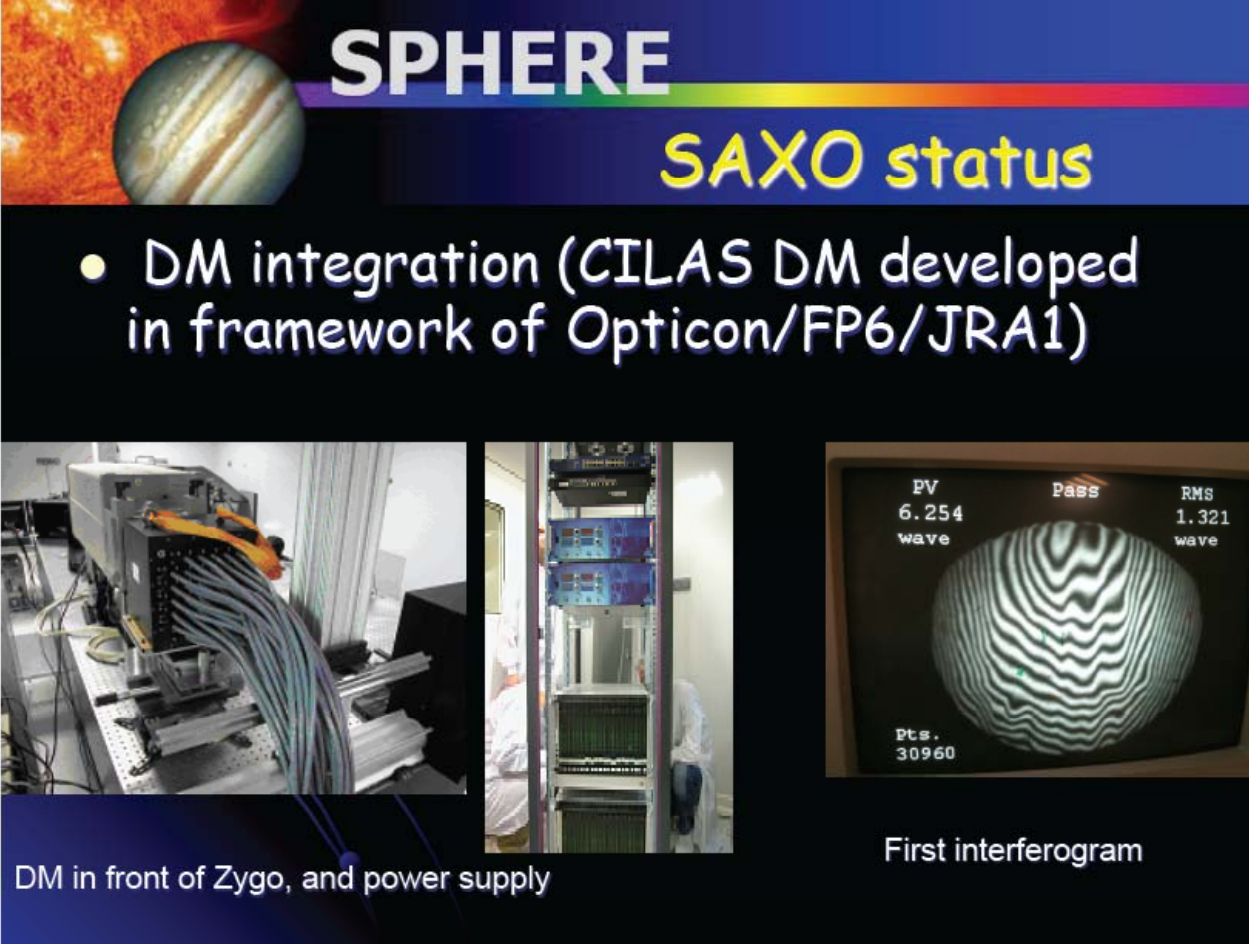
- MEMS ではないが ALPAO の電磁式アクチュエータの可変形鏡も比較的小型、277 素子、1.2mm 間隔。低空間周波数では $\pm 60\mu\text{m}$  ストローク、高空間周波数ではその 1/5 程度、隣どうしでは  $3\mu\text{m}$  ストローク。素子数が増やせるのであればストローク的には良く、ピエゾのものよりも小さい。



ALPAO web page. AO4ELT2 booth

## 2.2 可変形鏡：ピエゾ素子を用いた多素子可変形鏡 1

- ピエゾを用いた場合の多素子可変形鏡として VLT/SPHERE の例。CILAS で製作されている。41x41素子、180mm 直径、5mm ピッチ。隣どおしのストロークは  $>1\mu\text{m}$ 。



The slide features a header with the text "SPHERE" in white and "SAXO status" in yellow on a blue background. Below the header, a bullet point reads: "DM integration (CILAS DM developed in framework of Opticon/FP6/JRA1)". The slide is divided into three main sections: a photograph of the DM in front of a Zygo interferometer with power supply cables, a photograph of the DM in a rack, and a circular interferogram. The interferogram includes the following data: PV 6.254 wave, Pass, RMS 1.321 wave, and Pts. 30960. The text "First interferogram" is centered below the circular image.

SPHERE  
SAXO status

- DM integration (CILAS DM developed in framework of Opticon/FP6/JRA1)

DM in front of Zygo, and power supply

First interferogram

PV	Pass	RMS
6.254		1.321
wave		wave
Pts.		
30960		

## 2.2 可変形鏡： piezo素子を用いた多素子可変形鏡 2

- piezoを用いた場合の現状として Palomer/PALM3000 の例。Xinetics 3388 素子、66x66素子が1.8mmピッチで並ぶ。ケーブルリングが大変なことになっている。隣どうしのストロークは 1.2 $\mu\text{m}$ 。

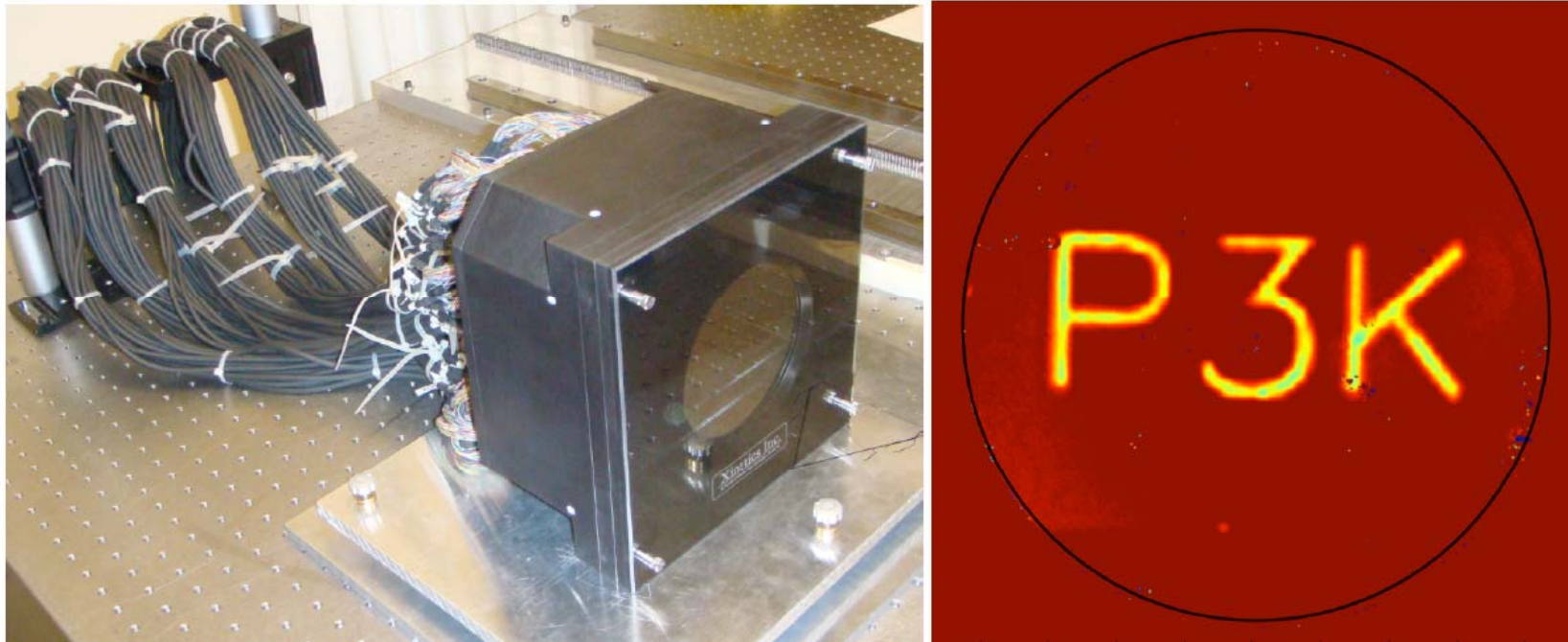


Figure 2. *Left:* The 3388-actuator deformable mirror cabled for optical testing in the laboratory at Xinetics Inc. *Right:* Zygo interferometer surface map of the deformable mirror with actuators spelling “P3K”. The surface actuation is  $\sim 100$  nm.

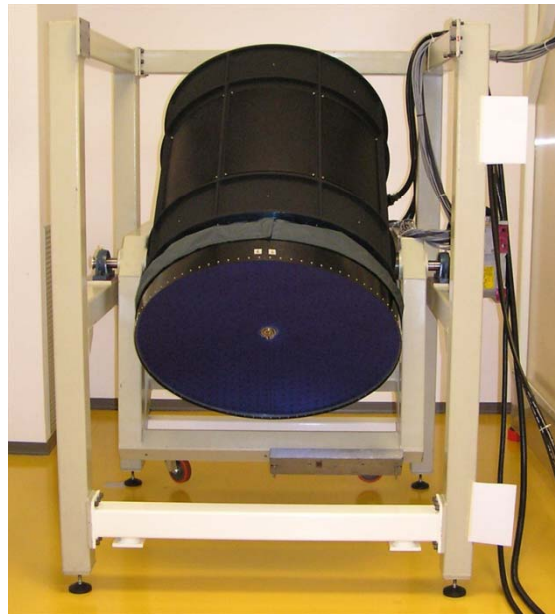
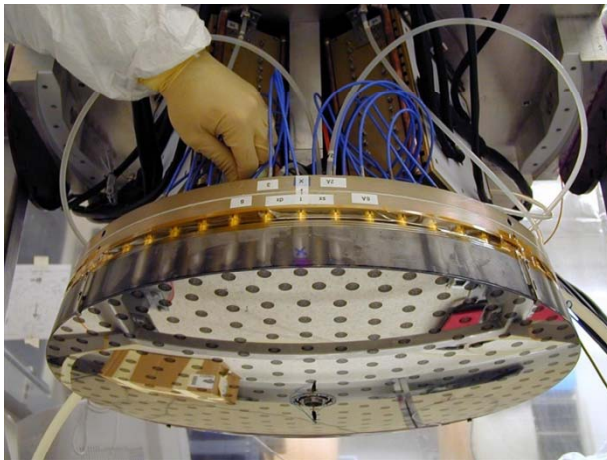
## 2.2 可変形鏡：可変副鏡

- 望遠鏡の副鏡を可変形鏡にすることも行われている。この場合、鏡が大きいので素子数を増やすことが出来る。また副鏡を可変形鏡にすることで補償光学に伴う光学素子を増やす必要がなくなり、装置の透過効率を高くし装置からの背景放射を減らす効果もある。
- ボイスコイルを用いたアクチュエータを使用している。

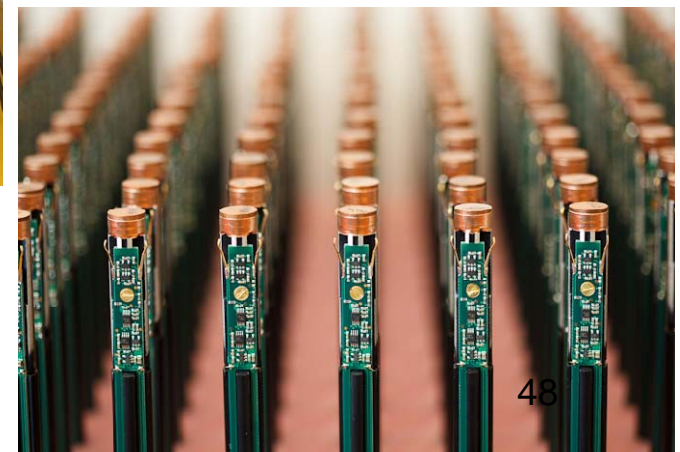
VLT 1170

LBT 672

MMT 336



A.D.S. international homepage  
Gallieni 2013, AO4ELT3 presentation





## 2. 補償光学の 3+1 種の神器

### 2.1 波面センサー

シャックハルトマン型波面センサーを例に

### 2.2 可変形鏡

多素子可変形鏡に重点を置いて

### 2.3 レーザー光源

簡単に

### 2.4 リアルタイム計算機

簡単に

## 2.3 レーザー光源：レーリレーザーとナトリウムレーザー

- レーザーガイド星として用いられる光源には今のところレーリ散乱を利用したレーリレーザーと上空のナトリウム層を励起するナトリウムレーザーがある。
- レーリレーザーはレーリ散乱を利用するため、大気密度によって明るさが決まり、上空に行くほどリターンは暗くなる。実用的には8-12km 上空での散乱を用いる。ガイド星の高さを制御するためにレーザーはパルスで送り、パルスのタイミングに合わせて波面センサーでの測定を行う。
- ナトリウムレーザーでは地球大気中のナトリウム層の高さでガイド星の高さが決まり、およそ90km 上空である。ただし、ナトリウム層の高さ自体には時間変動がある。
  - Subaru LGS 4.0W on-sky 10.5mag (R-band)
  - Gemini-South LGS 50W
- レーリレーザーの方が一般には安価であるが、ガイド星ができる高さが低いので特に大望遠鏡ではコーン効果の影響を受けやすい。地表層補償光学系のように地表層の揺らぎ成分を測定したい場合にはレーリレーザーでも十分である。

## 2.4 リアルタイム計算機：GPU を用いたシステム

TMT の補償光学系を考えた場合、リアルタイムの制御を行う計算機にも高い計算能力が要求される。

64x64 素子の補償光学系を考えた場合、単純には 4096x2 (x, y) の波面センサーの測定ベクトルから 4096 素子の可変形鏡の制御ベクトルを計算する必要がある。

8192x4096 行列と8192ベクトルの掛け算を1秒間に1000回計算する必要があり、計算速度として30Gfpsに対応する。

グラフィックボード GPUを用いた並列計算 GPGPU がリアルタイム計算機に用いられ始めている。性能の数字としては倍精度で 1Tfps が達成されている。今のところデータ転送の速度がボトルネックとなっているが、性能向上が著しい。



	コア数	ベースクロック	メモリ帯域幅
NVIDIA Tesla C2070	448	1.15GHz	144GB/sec
NVIDIA GeForce GTX 690	3072	0.84GHz	288GB/sec
NVIDIA Kepler K20X	2688	0.73GHz	250GB/sec
Intel Xeon Phi 5110P	60	1.10GHz	320GB/sec

表 3: 多コア計算ボード比較

### 3. 補償光学の新しいモード

#### 3.1 補償光学のパラメータスペース

#### 3.2 極限補償光学

#### 3.3 多層共役補償光学

#### 3.4 地表層補償光学

#### 3.5 多天体補償光学

### 3.1 補償光学系パラメータスペース：2 個のパラメータ軸

- 赤は現在稼働中、緑は現在建設中、青は提案中の装置を示す。リストはコンプリートではない。30m 望遠鏡レーザーガイド補償光学では focal anisoplanatism の効果が大きく、現状の SCAO では十分な性能が出ない。LTAO, MCAO が採用される。

#### 高補償性能

多素子数  
多レーザーガイドでの  
低コーン効果  
~ 高ストレル比 (~0.9)

#### 極限補償光学: ExAO

Subaru/SCEAO

VLT/Sphere

Gemini/GPI

Palomar/Palm3000

LBT/ASM

Magellan/MagAO

TMT/PFI SITE

E-ELT/EPICS

レーザートモグラ

フィー補償光学: LTAO

Keck/NGAO

GMT/LTAO

#### 複数層共役補償光学: MCAO

VLT/MAD (eng)

Gemini/Gems

TMT/NFIRAOS

E-ELT/MICADO

#### 多天体補償光学: MOAO

Subaru/RAVEN (eng)

WHT/CANARY (eng)

TMT/IRMOS, TMT-AGE

E-ELT/EAGLE

#### 単層共役補償光学: SCAO

現在の多くのシステム

#### 視野・多天体性

多レーザーガイド星での広視野測定  
~ 広視野 (>10分角)

#### 地表層補償光学: GLAO

VLT/GRAAL, GALACSI

Subaru/Ultimate

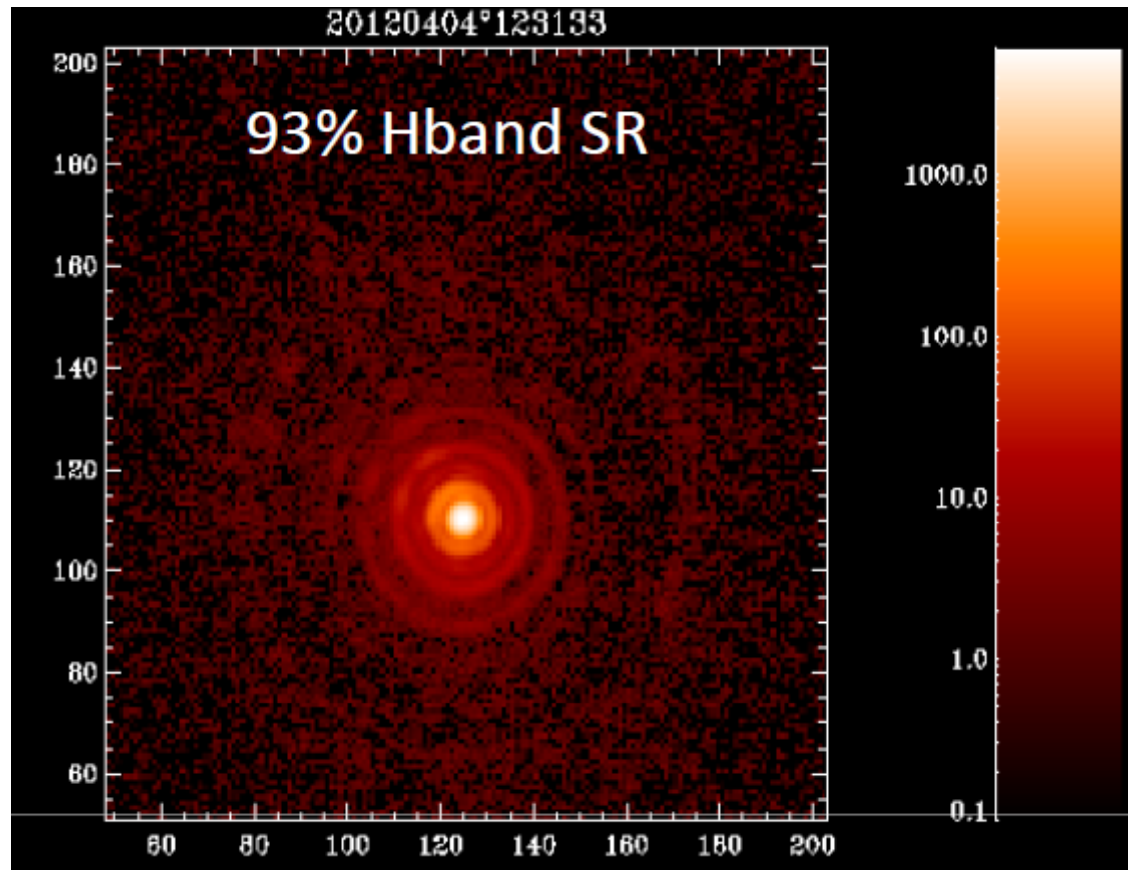
LBT/GLAO

MMT/GLAO 53

- 3. 補償光学の新しいモード
  - 3.1 補償光学のパラメータスペース
  - 3.2 極限補償光学
  - 3.3 多層共役補償光学
  - 3.4 地表層補償光学
  - 3.5 多天体補償光学

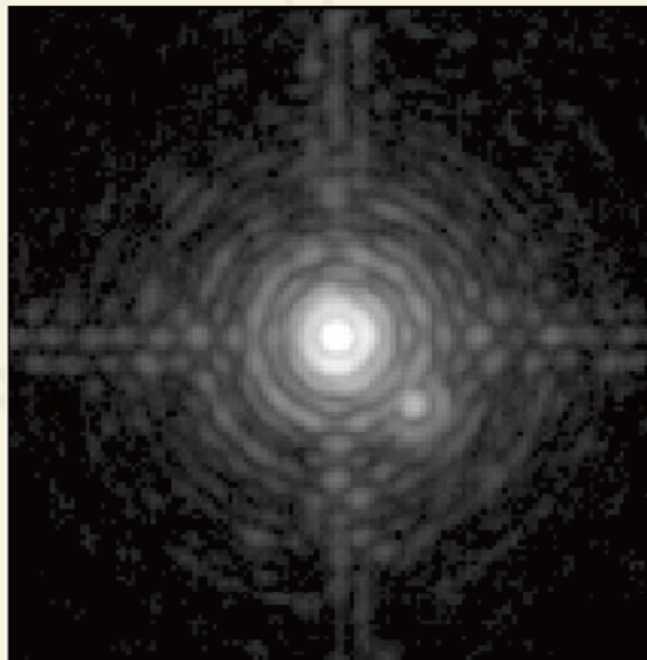
## 3.2 極限補償光学：LBT/FLAO

- LBT 8.3m 望遠鏡の可変副鏡を用いた補償光学系。
- ピラミッド波面センサー。
- 672 素子の可変副鏡(A.D.S.Int.)。

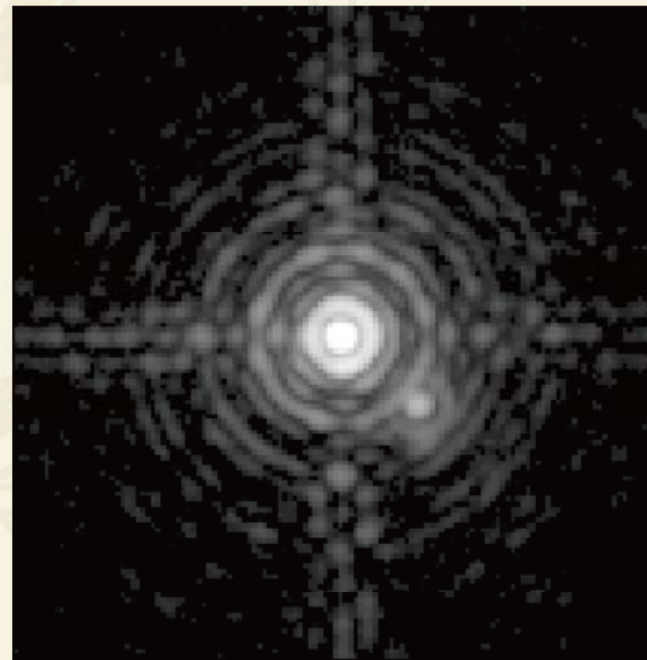


## 3.2 極限補償光学系：Palomar/Palm3000

- Palomar 天文台 5.1m 望遠鏡。
- 64x64, 32x32 素子の Shack-Hartmann 波面センサー。
- 3000 素子のピエゾアクチュエータを用いた可変形鏡 (Xinetics)。
- GPU を用いたリアルタイム計算機。
- ベガの画像



**June 02, 2012**  
64.6% Strehl

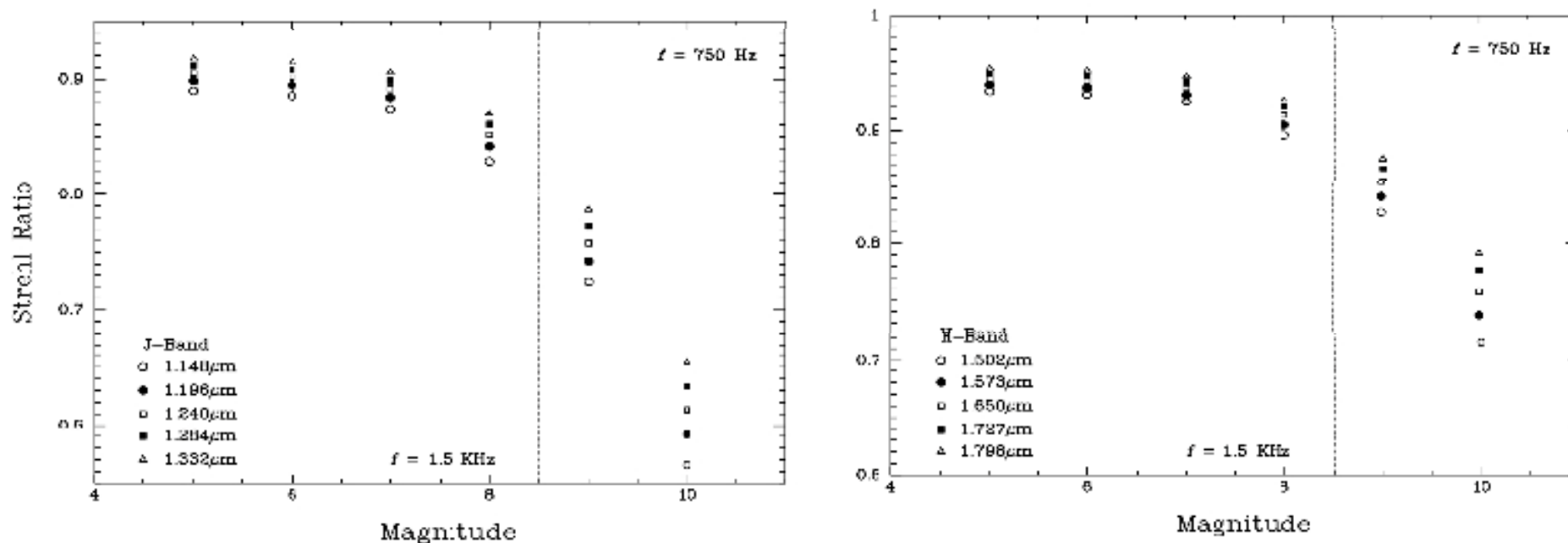


**September 25, 2012**  
84.3% Strehl



## 3.2 極限補償光学：Gemini/GPI

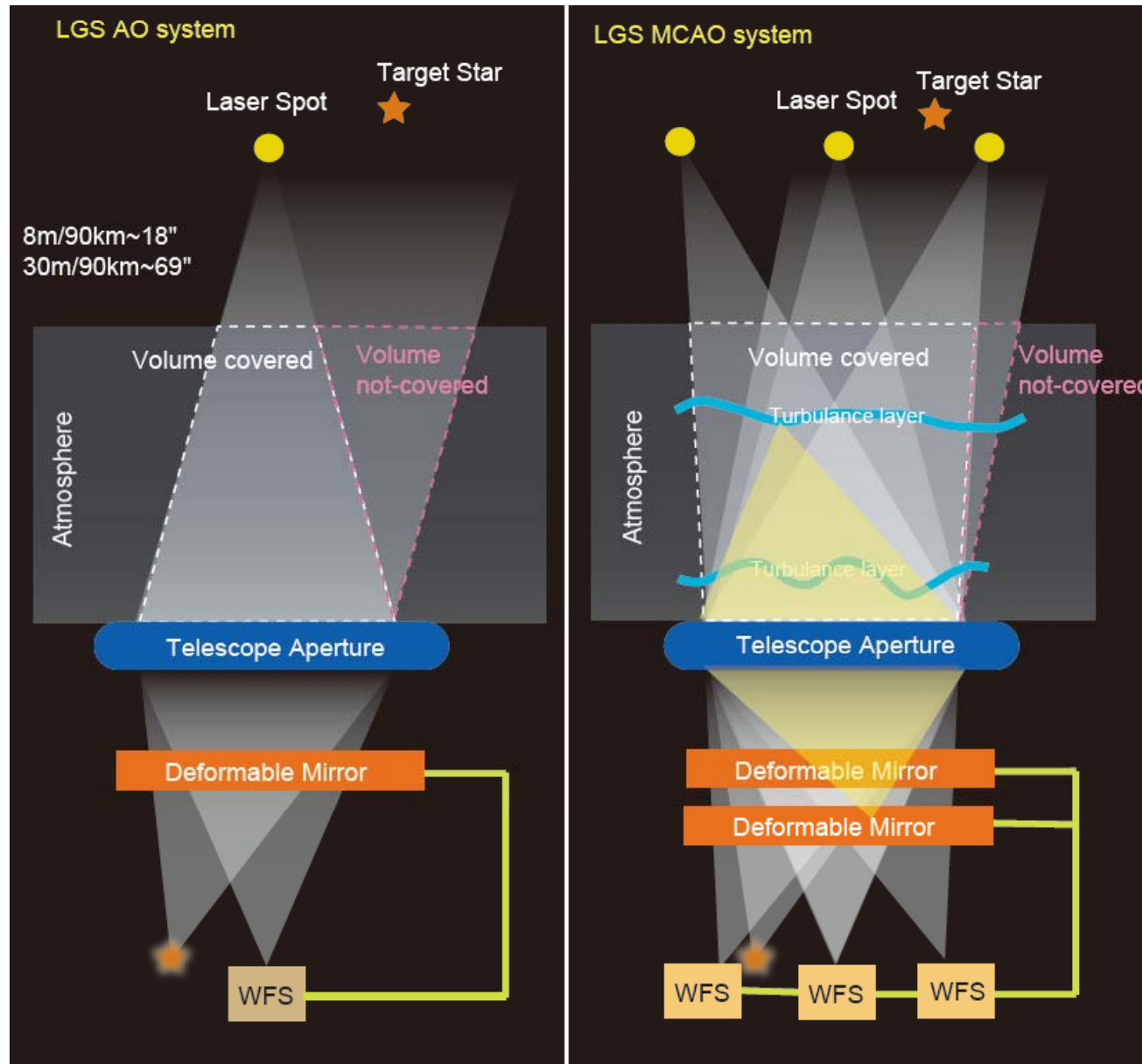
- 自然ガイド星を用いた極限補償光学系。2014A から観測開始予定。
- 4096 素子の MEMS 可変形鏡と 97 素子のピエゾ可変形鏡を用いた “Woofers-Tweeter” 系になっている。
- 下の図は想定されているストレル比をガイド星の等級の関数として示したものの。左側は J-band、右側は H-band。



Gemini homepage

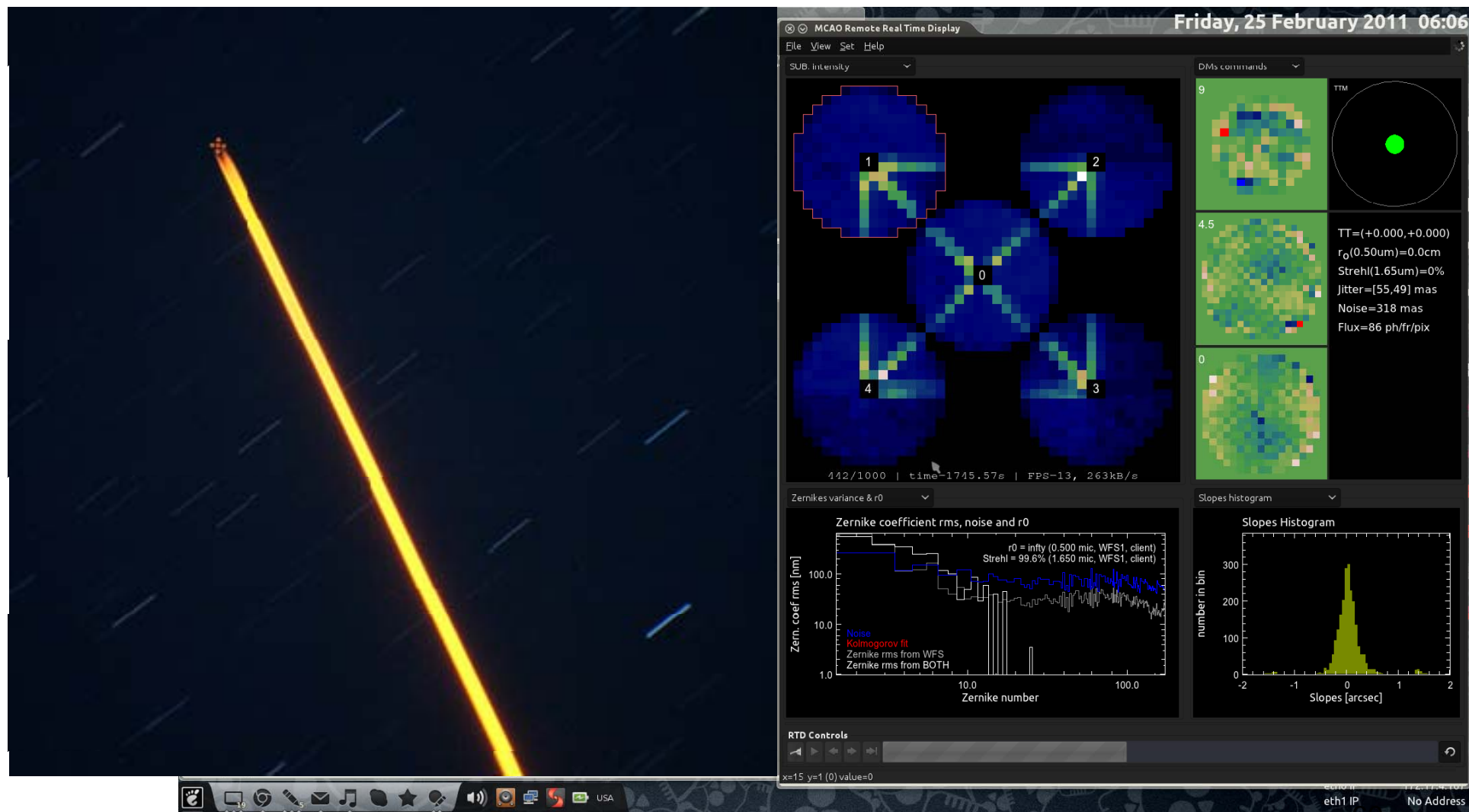
- 3. 補償光学の新しいモード
  - 3.1 補償光学のパラメータスペース
  - 3.2 極限補償光学
  - 3.3 多層共役補償光学**
  - 3.4 地表層補償光学
  - 3.5 多天体補償光学

### 3.3 複数層補償光学系：SCAO との比較



### 3.3 複数層共役補償光学：Gemini / GEMS

- 世界で初めての複数のNa レーザーガイド星の打ち上げ。
- 右の画像は波面センサーによる測定の様子を示す。



From Gemini website

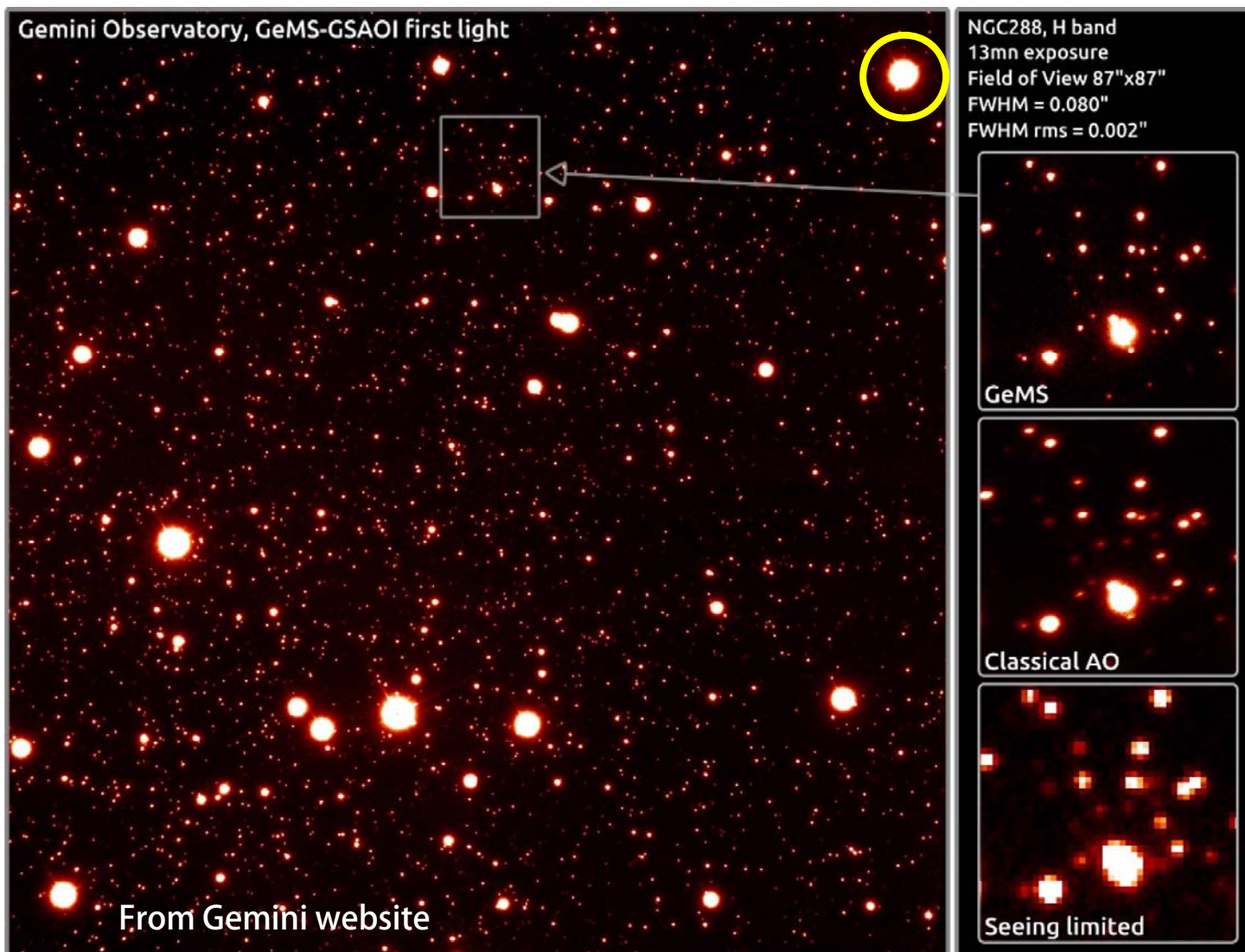
### 3.3 複数層共役補償光学：Gemini / GEMS

- 複数の層 (地上から9km, 4.5km, 0km) に共役の変形鏡を3枚入れて補正を行う。



### 3.3 複数層共役補償光学：Gemini / GEMS

- 広い視野にわたって一様なPSFが得られている。
- Classical AO の場合は黄色の星をガイド星として観測した場合の PSF を示している。この場合にはガイド星のある方向に星像が伸びている。



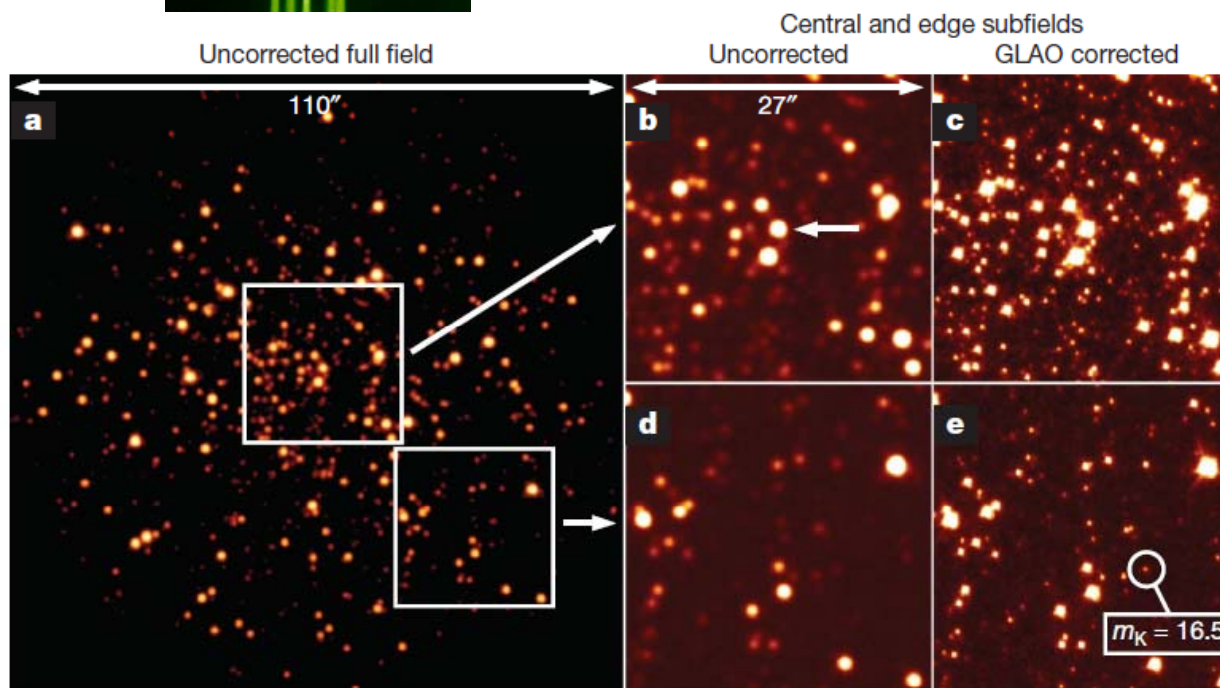
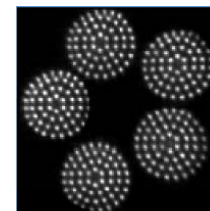
- 3. 補償光学の新しいモード
  - 3.1 補償光学のパラメータスペース
  - 3.2 極限補償光学
  - 3.3 多層共役補償光学
  - 3.4 地表層補償光学
  - 3.5 多天体補償光学

### 3.4 地表層補償光学：MMT

- 可変副鏡、レーリレーザー、シャックハルトマンセンサーを用いた地表層補償光学。



Stalcup 2006, Ph.D Thesis



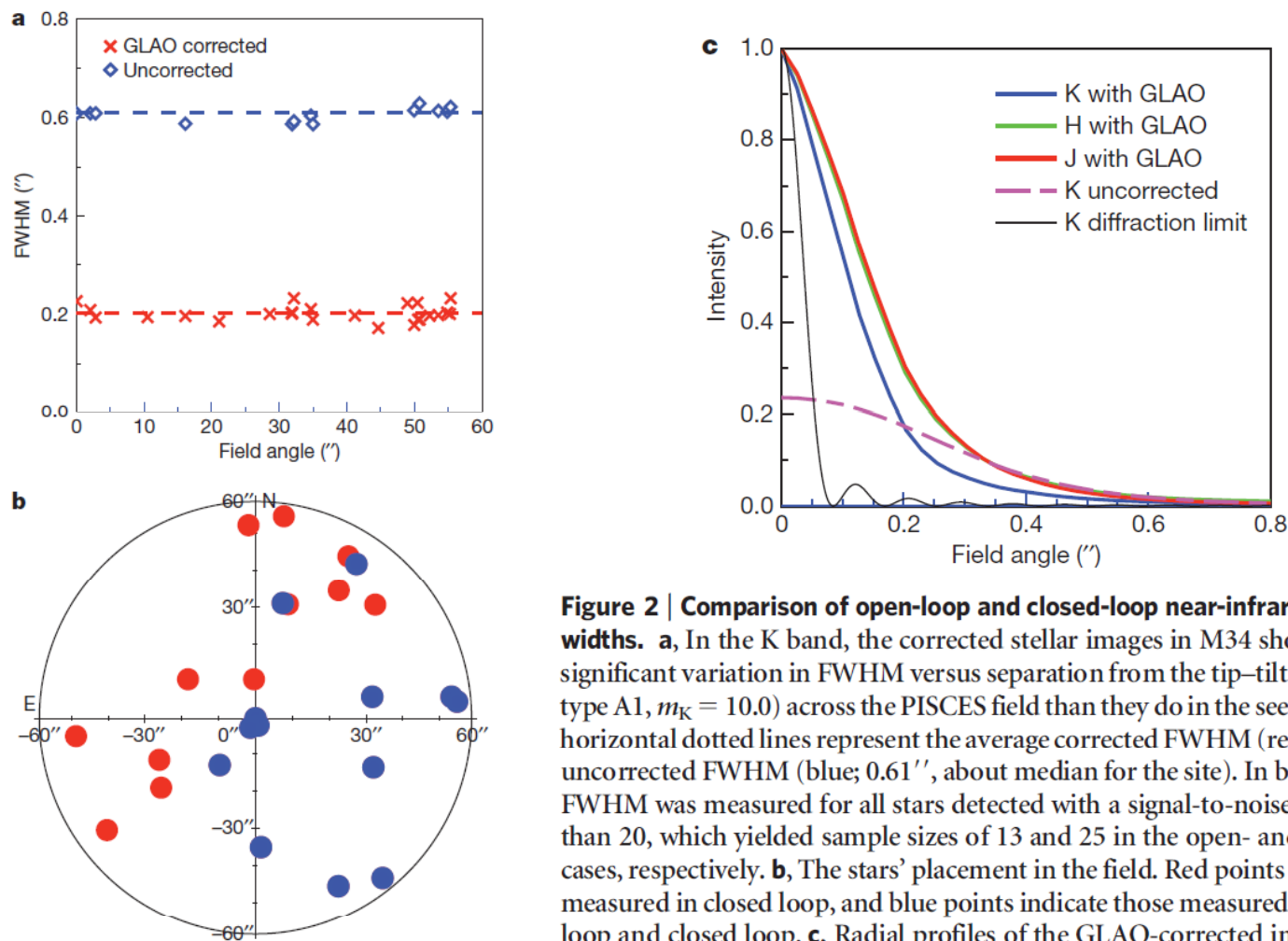
**Figure 1 | The core of M3 imaged in the K band in two 60-s exposures in May 2009.** **a**, The full 110'' field of our infrared camera in the native seeing limit of 0.7'', on a logarithmic intensity scale. **b, d**, Two smaller 27'' regions of the same image, indicated by the boxes in **a**, shown on a truncated linear scale in which bright stars appear saturated but which reaches the noise floor and brings out the faintest observable stars: one (**b**) is centred on the tip-tilt star, indicated by the arrow, and the other (**d**) is positioned to show the edge

of the field. **c, e**, In a second 60-s exposure of the same two regions, taken with GLAO running at 400 Hz, and shown on the same linear scale as **b** and **d**, the stellar image width is reduced to 0.3'' and the PSF morphology is very similar across the whole field of view. For reference, we highlight a star in the corrected image with K-band magnitude  $m_K = 16.5$ , detected at a signal-to-noise ratio of 26. In the uncorrected image, stars must be 2 mag brighter to be seen at the same signal-to-noise ratio.



### 3.4 地表層補償光学：MMT

- 直径 2 分角の視野の中でかなり一様な補正が得られている。

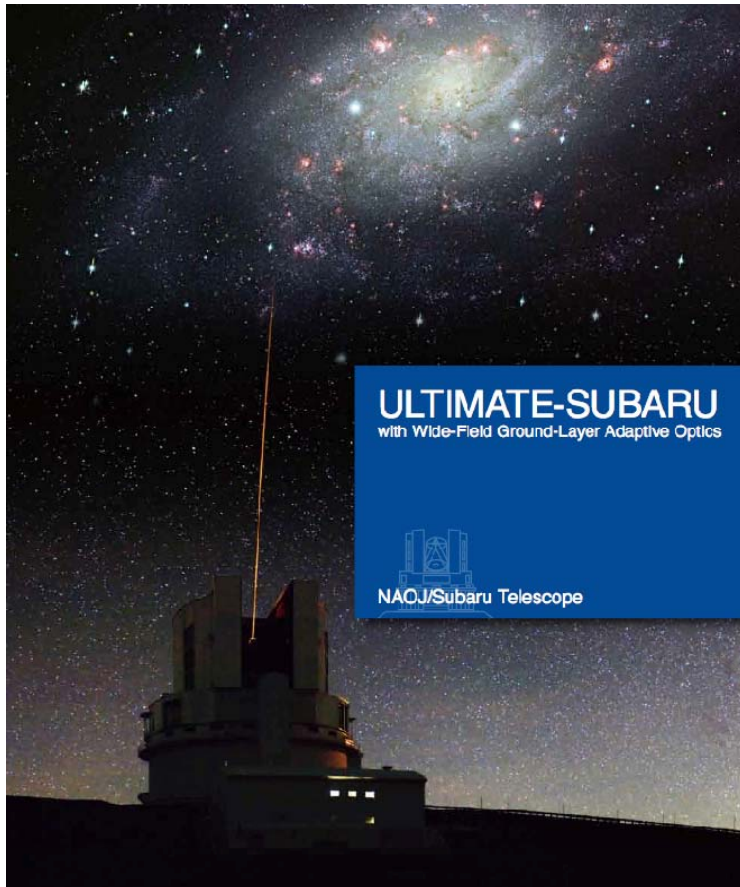


**Figure 2 | Comparison of open-loop and closed-loop near-infrared image widths.** **a**, In the K band, the corrected stellar images in M34 show no more significant variation in FWHM versus separation from the tip-tilt star (spectral type A1,  $m_K = 10.0$ ) across the PISCES field than they do in the seeing limit. The horizontal dotted lines represent the average corrected FWHM (red; 0.22") and uncorrected FWHM (blue; 0.61", about median for the site). In both cases, the FWHM was measured for all stars detected with a signal-to-noise ratio greater than 20, which yielded sample sizes of 13 and 25 in the open- and closed-loop cases, respectively. **b**, The stars' placement in the field. Red points indicate stars measured in closed loop, and blue points indicate those measured in both open loop and closed loop. **c**, Radial profiles of the GLAO-corrected images, normalized to unit peak intensity, in the J, H and K wavebands have FWHMs of 0.29", 0.29" and 0.22", respectively. The remarkable degree of similarity between the J and H profiles is, we believe, attributable to statistical fluctuations in the seeing. Also shown, for comparison, are the seeing-limited K-band image

Hart et al. 2010, Nature, 466, 727

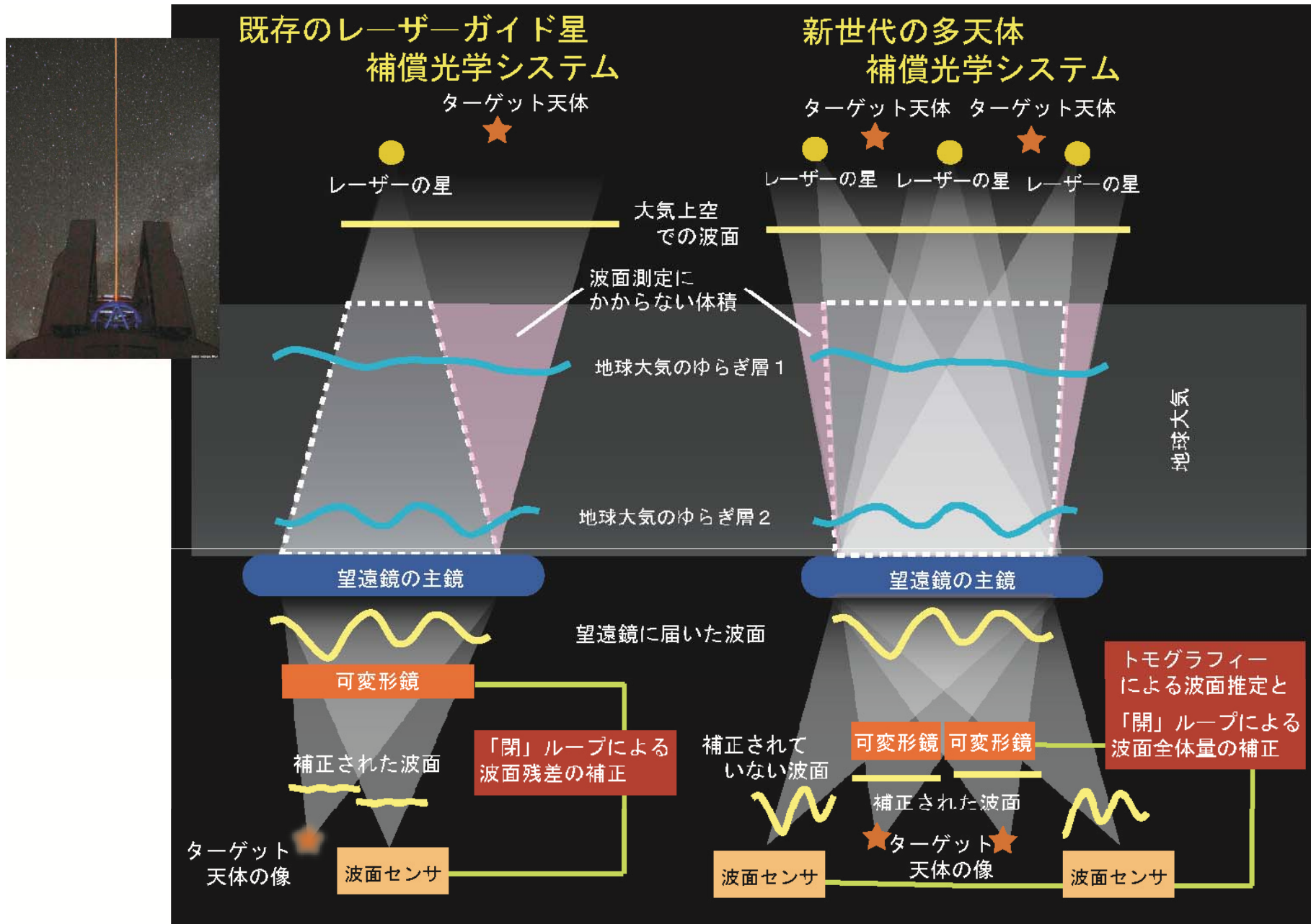
### 3.4 地表層補償光学：Subaru / Ultimate-Subaru

- すばる望遠鏡でも可変副鏡を用いた地表層補償光学系の実現に向けた検討が進んでいる。
- 左は可変副鏡のプレリミナリなモデル。



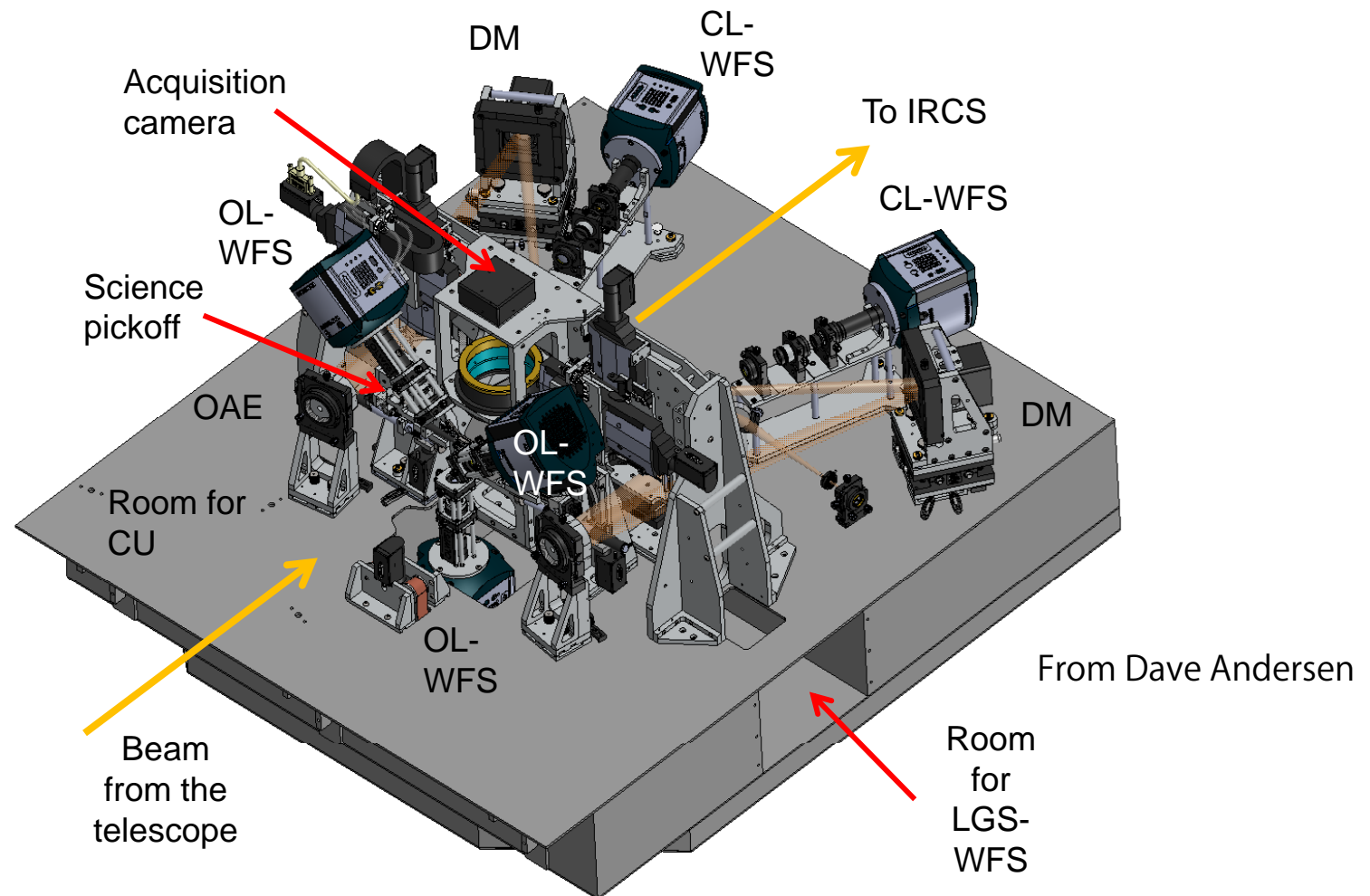
- 3. 補償光学の新しいモード
  - 3.1 補償光学のパラメータスペース
  - 3.2 極限補償光学
  - 3.3 多層共役補償光学
  - 3.4 地表層補償光学
  - 3.5 多天体補償光学

### 3.5 多天体補償光学：SCAO との比較



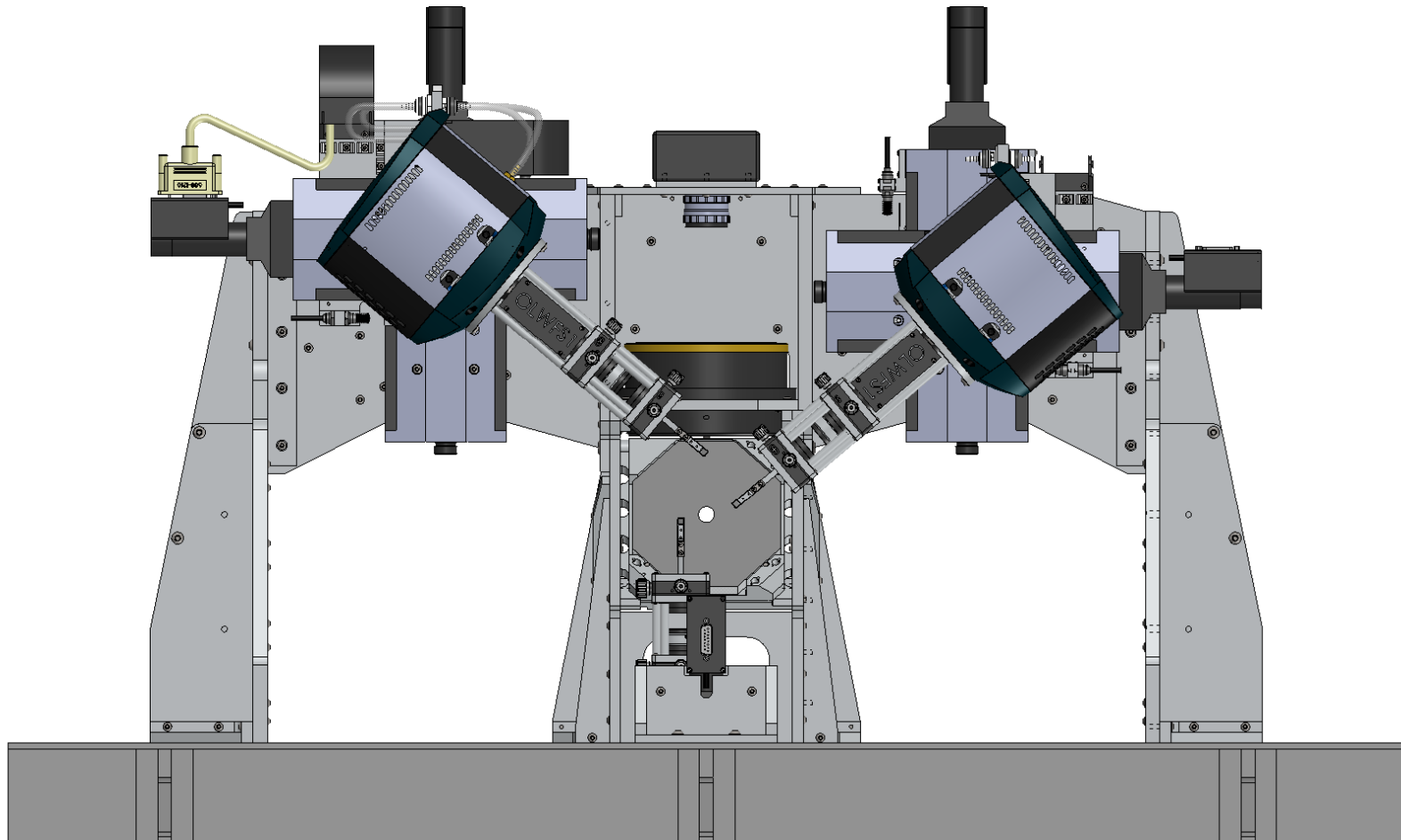
### 3.5 多天体補償光学：Subaru/RAVEN

- 3個の自然ガイド星と1個のレーザーガイド星を測定してトモグラフィック推定を行う。2個の天体を同時にSubaru/IRCSで観測する。
- 基本的には技術試験実証のための持ち込み装置であるが、科学目的の観測も行う。
- 現在ビクトリア大学で組み上げ中で、2014年度にはファーストライトの予定。



### 3.5 多天体補償光学：Subaru/RAVEN

- 3個の自然ガイド星と1個のレーザーガイド星を測定してトモグラフィック推定を行う。2個の天体を同時に観測する。



## 4. 補償光学の可能性

4.1 TMT-AGE: Analyzer for Galaxies in the Early universe

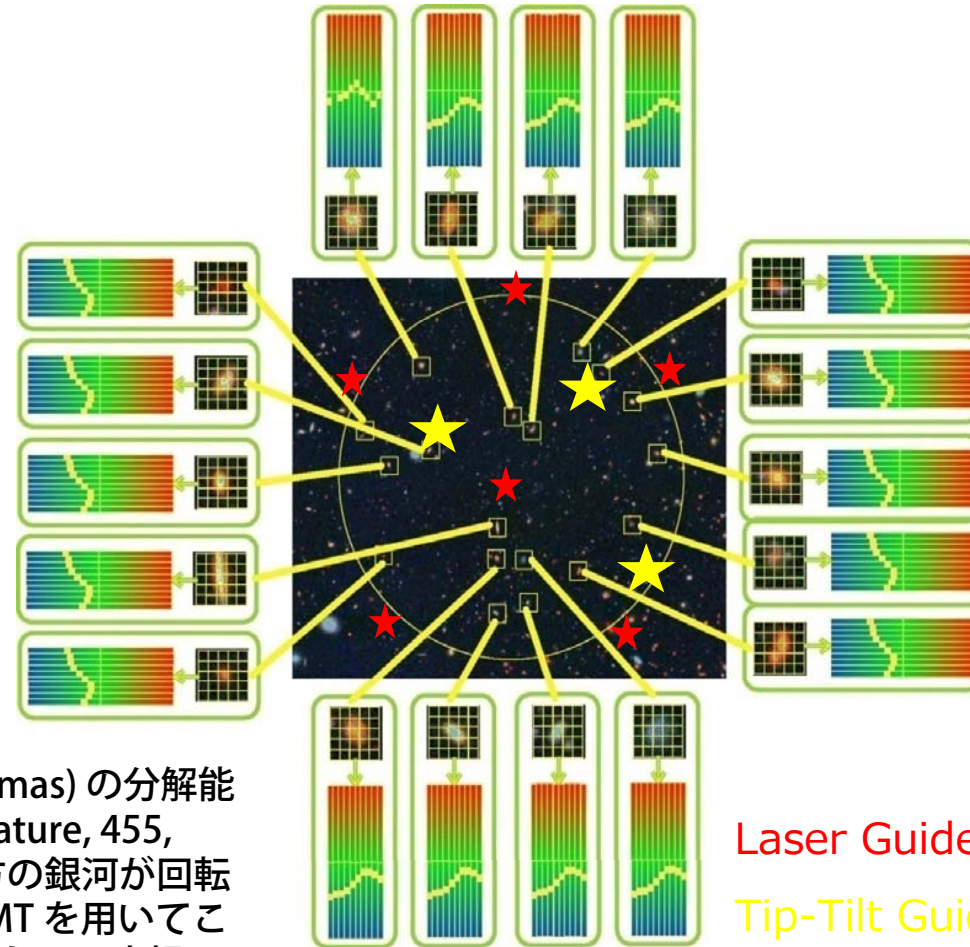
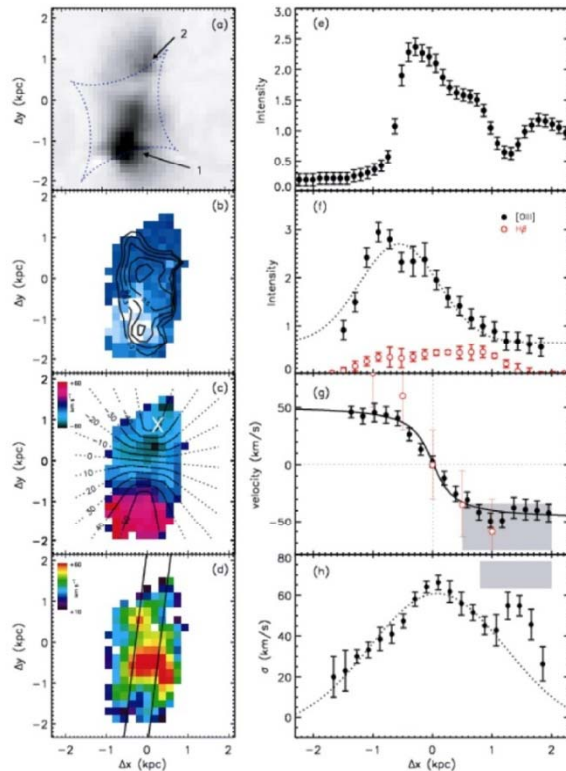
4.2 TMT 30m で可視光補償光学!?

# TMT-AGE : Analyzer for Galaxies in the Early universe

- 科学目標：  
広視野の多天体補償光学系により
  - 赤方偏移 4 程度までの宇宙にある銀河に対して静止系可視域のスペクトルで内部構造を分解した観測を行い、現在の宇宙に見られる銀河の構造がどのように確立してきたのかを明らかにすること。
  - 赤方偏移 7 程度までの宇宙にある銀河に対して、その静止系紫外線波長域の連続光スペクトルの詳細な観測を行い、銀河の誕生期における激しい星形成の物理を明らかにすること。
  - 赤方偏移 12 程度までの宇宙にある銀河に対して、その静止系紫外線波長域の輝線を検出し、その正体を明らかにすること。



## 4.1 TMT-AGE : 科学目標 面分光により明かす銀河の内部構造の進化



Laser Guide Star

Tip-Tilt Guide Star

• 重力レンズを用いて有効的に 100pc (20-40mas) の分解能で  $z=3$  銀河を観測した例 (Stark et al. 2008 Nature, 455, 755)。この空間分解能を達成することで遠方の銀河が回転している様子が始めて確実に捉えられる。TMT を用いてこのような観測を統計的なサンプルに対して行うには広視野多天体面分光機能が重要になる。

• 中間赤方偏移の銀河の数は多く、このようなターゲットに対してはそこその視野で良い補償性能を達成する必要がある。

# 4.1 TMT-AGE: 広視野 PSF の比較

次世代 30m 地上超大型望遠鏡で予想される初期補償光学系(上)と多天体補償光学系(下)の星像の比較。1辺は 1"x1"

0"

90"

180"

270"

Kバンド

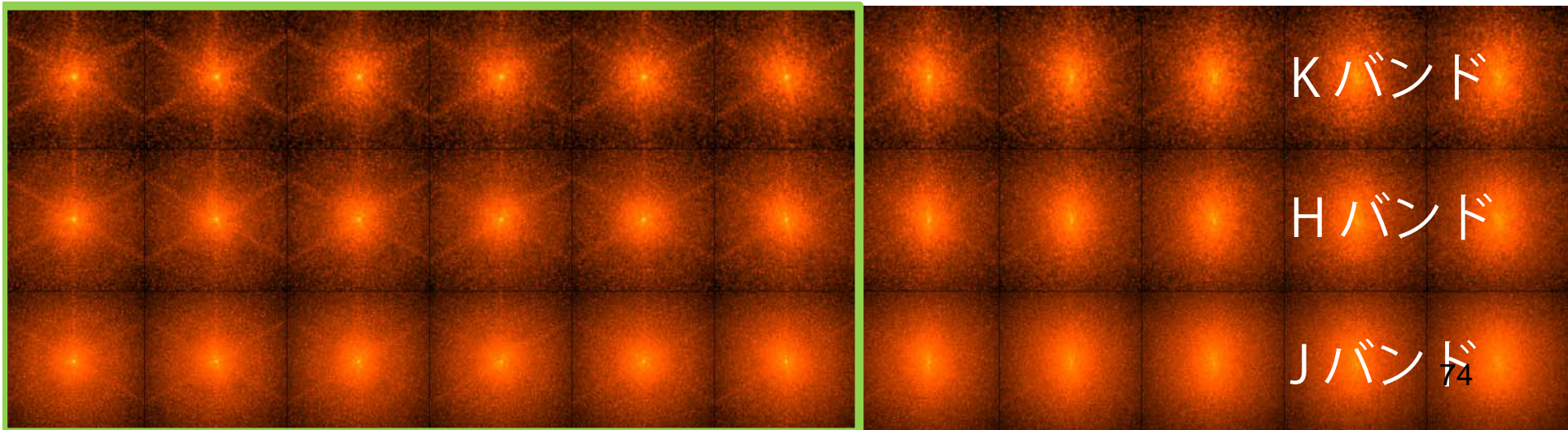
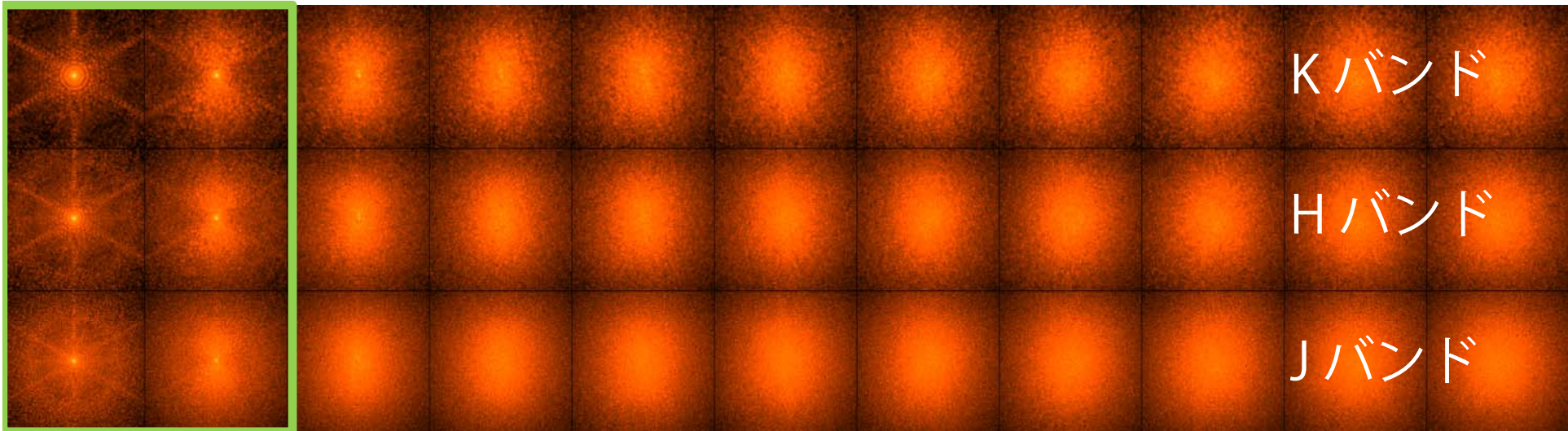
Hバンド

Jバンド

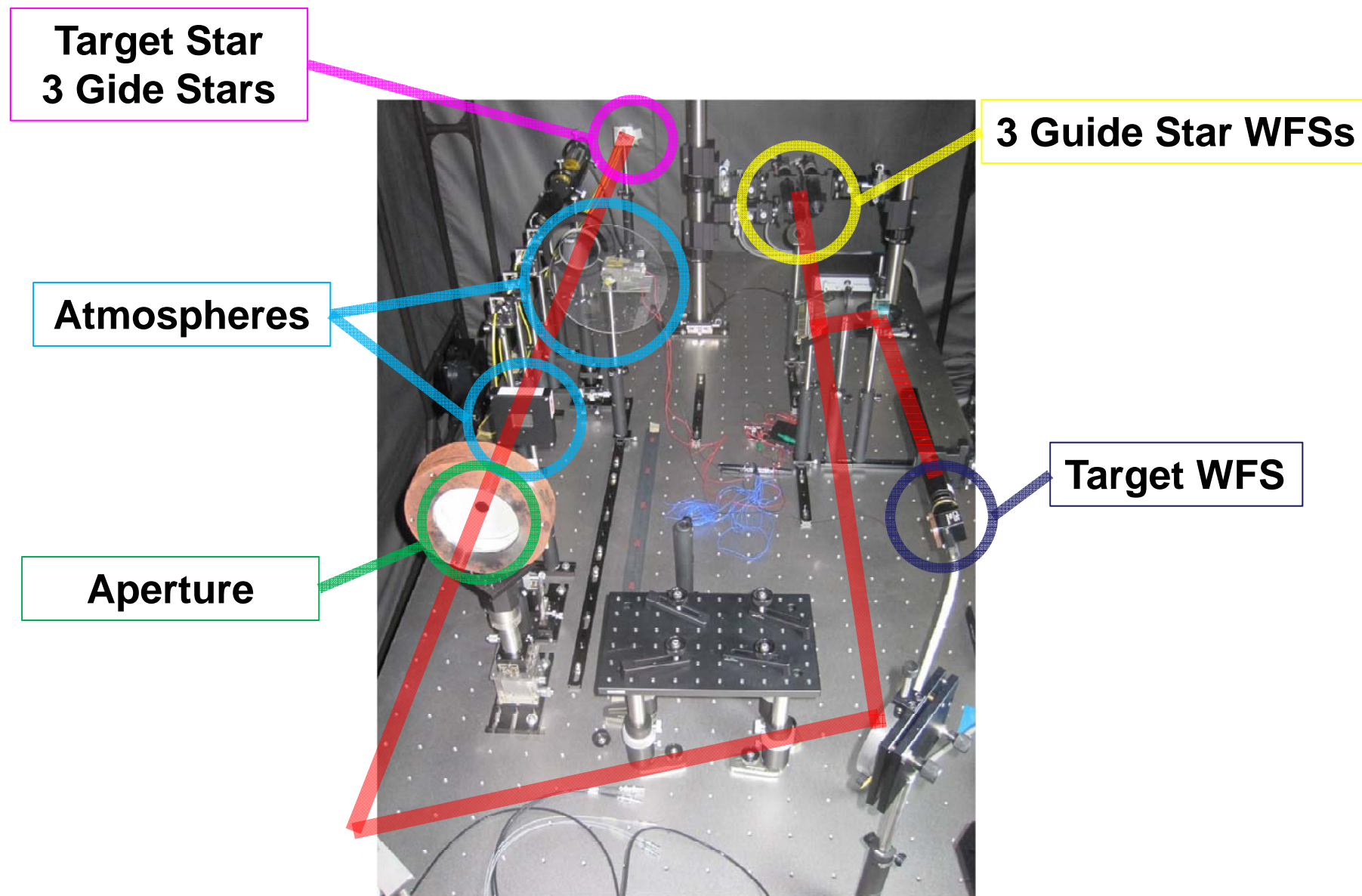
Kバンド

Hバンド

Jバンド



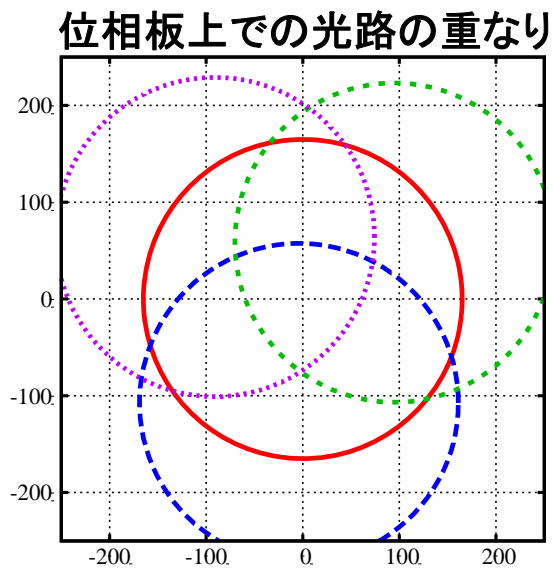
## 4.1 TMT-AGE: 実験室でのトモグラフィー実証実験



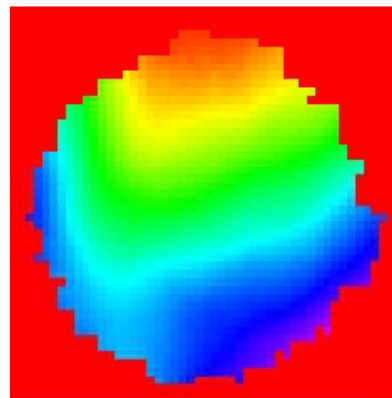
## 4.1 TMT-AGE: 実験室でのトモグラフィー実証実験

### 実験結果 トモグラフィー計算結果 (Single Layerの場合)

位相板と口径との距離が48.3cm

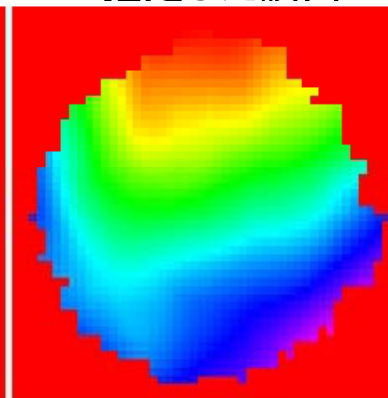


直接測定した波面

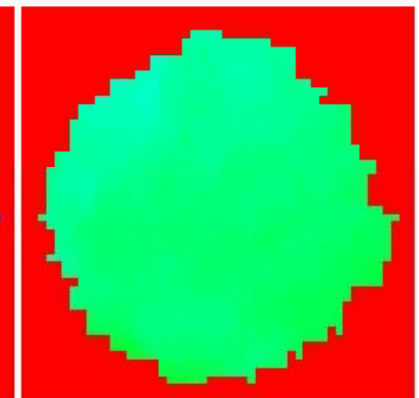


RMS = 310.0nm

トモグラフィーで  
推定した波面



残差波面



RMS = 30.07nm

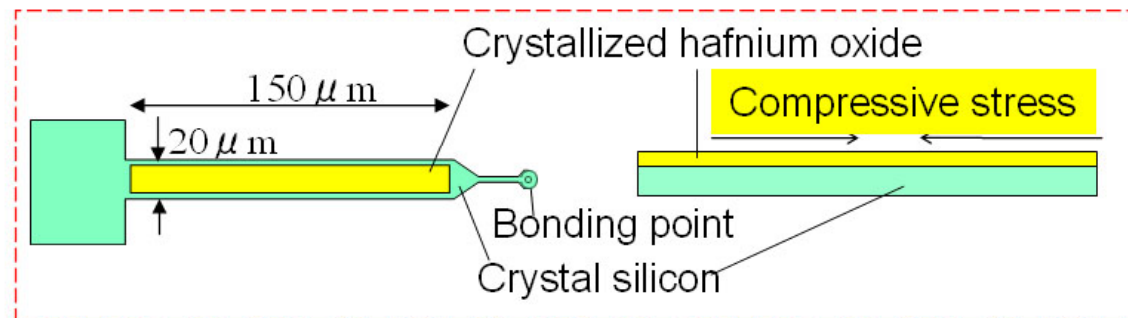
## 4.1 TMT-AGE:

### 小型 大ストローク多素子 MEMS 可変形鏡の開発 : 光 MEMS 羽根研 : 呉 同 (D3)

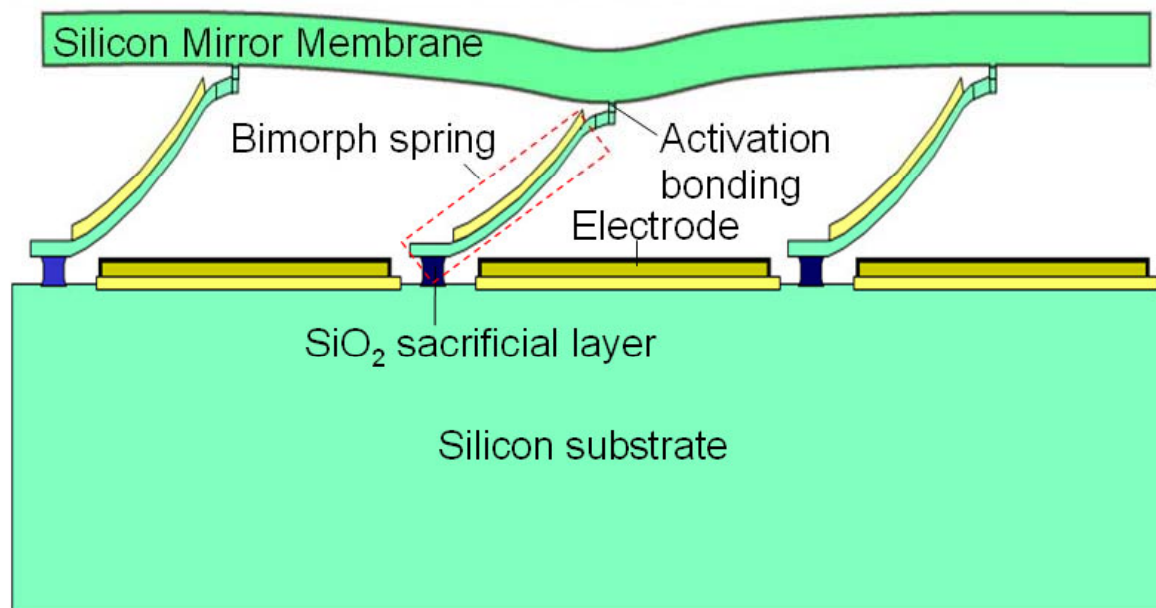
独自の構造、プロセスに基づいた大ストローク MEMS 可変形鏡の開発を進める。

#### Si/HfO<sub>2</sub> Bimorph spring

#### Original Points



1. HfO<sub>2</sub> **crystallization-induced stress** is used to introduce large out-of-plane deflection.
2. Relatively **soft spring** structure (small spring constant) instead of fixed posts is used to increase the stroke.
3. High optical quality mirror surface is guaranteed by the top layer of SOI wafer and the Si-Si **plasma activation bonding**.

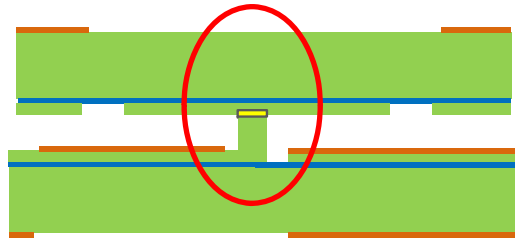


High-stroke MEMS-DM Structure

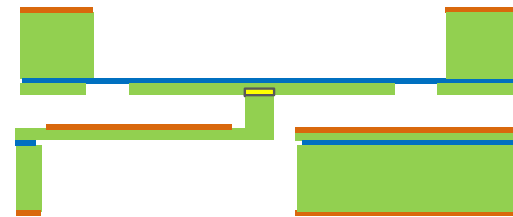
# 4.1 TMT-AGE: MEMS 可変形鏡の製作プロセス

## (c) Bonding and release

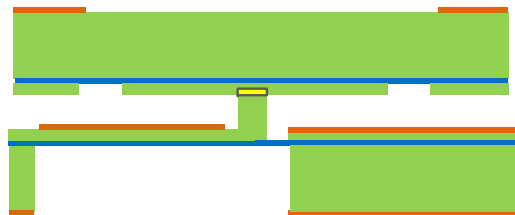
(1) Au-Si eutectic bonding



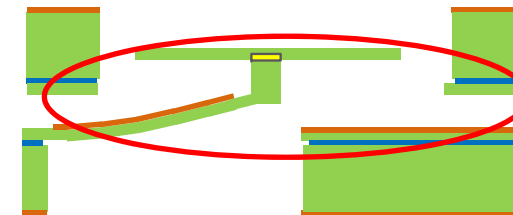
(4) SiO<sub>2</sub> Dry Etching (CHF<sub>3</sub>)



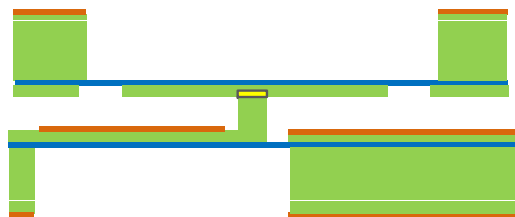
(2) Actuator chip handle layer etching



(5) SiO<sub>2</sub> Dry Etching (CHF<sub>3</sub>)



(3) Mirror chip handle layer etching



## 4.1 TMT-AGE:

### 小型 大ストローク多素子 MEMS 可変形鏡の開発 : 光 MEMS 羽根研 : 呉 同 (D3)

- Au-Si 共晶化接合をプロセスを変えて再度挑戦しアクチュエータチップとミラーチップの接合、ミラーチップのリリースに成功し、可変形鏡としての性能評価を行っている。下の写真は 4x4 素子の試作品の例。実際に駆動した結果を右側に示す。

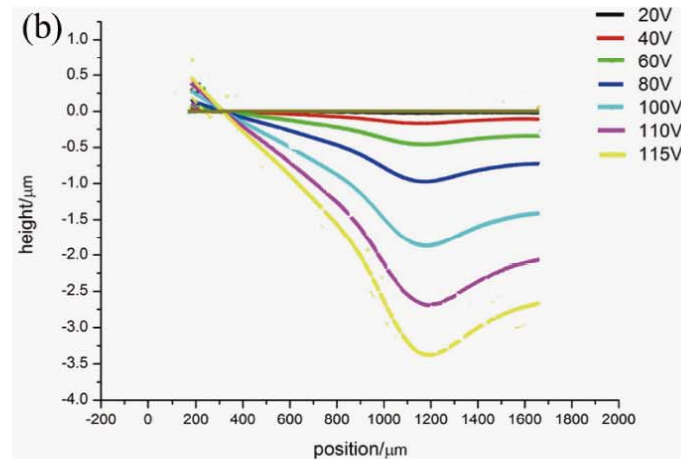
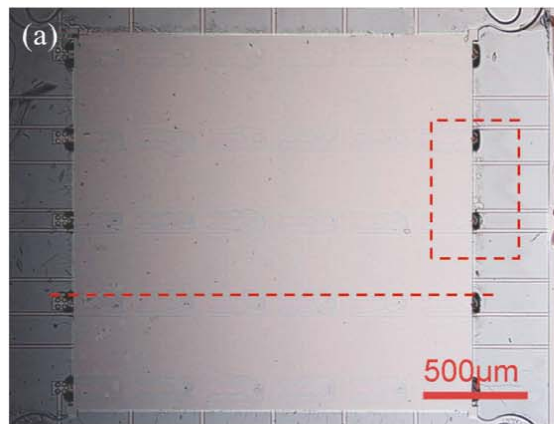
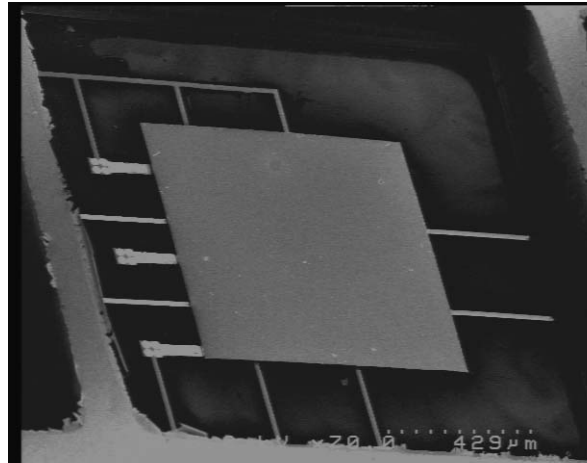


図 6: 左) 4 × 4 素子の MEMS 可変形鏡試作品。右) 電圧をかけた駆動実験の結果。0V からの差分を示す。Wu et al. 2013, Transducers 13 より引用。

## 4. 補償光学の可能性

4.1 TMT-AGE: Analyzer for Galaxies in the Early universe

4.2 TMT 30m で可視光補償光学!?



## 4.2 TMTで可視光補償光学!?: 目指すべき波面誤差

TMTで可視光の補償光学系を実現することが出来れば0.004"の分解能で観測することが出来る。

600nmでストレル比0.6を達成するシステムを考えよう!

$$SR = \exp(-\sigma^2)$$

より位相で表した波面誤差0.71、長さで表した波面誤差67nmを達成する必要があることがわかる。

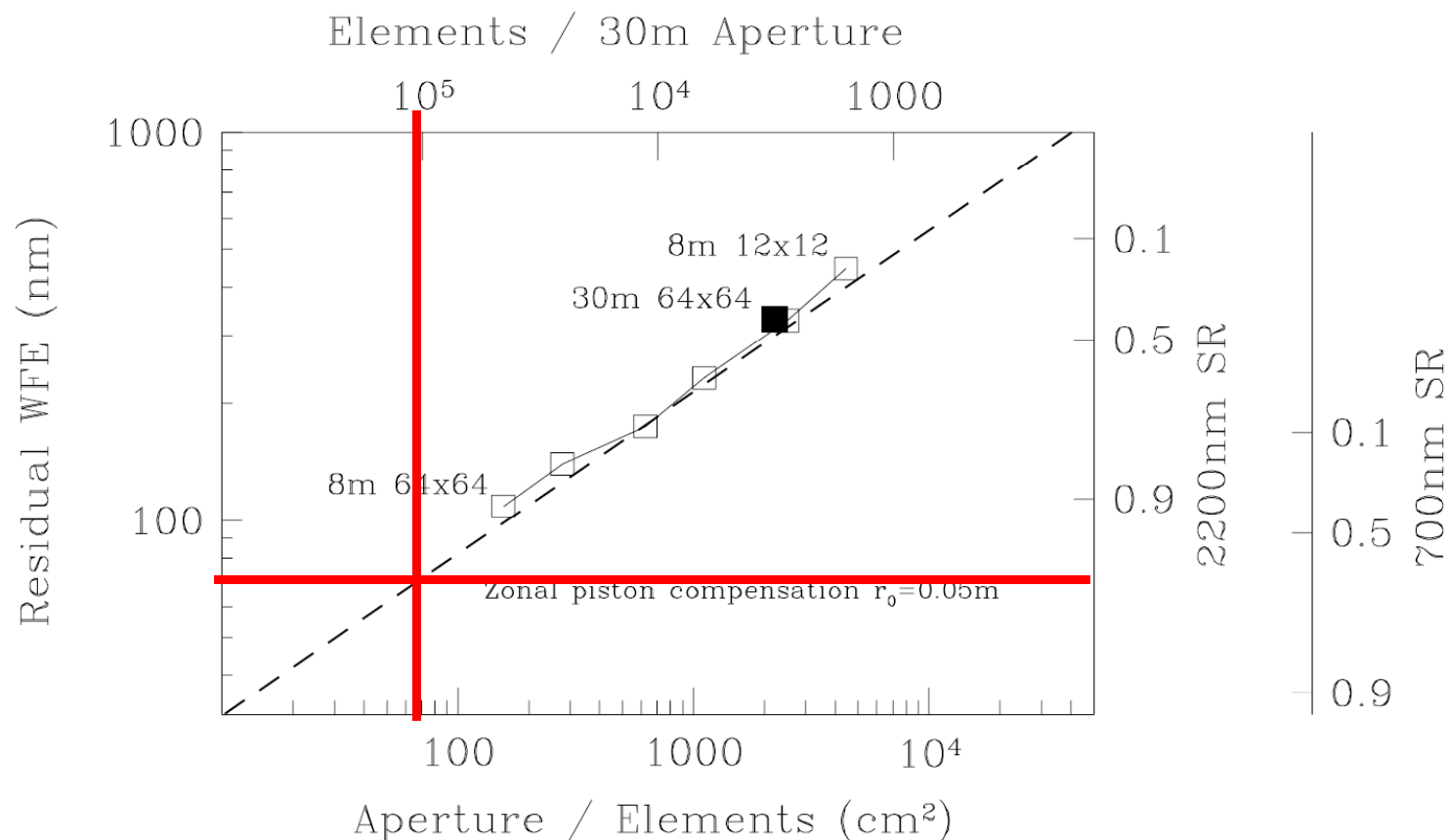
ここでは大まかに

フィッティング誤差と素子数  
時間遅れ  
素子数とレーザーガイド星の明るさ

だけを見てやる。

実際にはレーザーガイド星を用いることによるfocal anisoplanatismの効果も考えないといけない。

## 4.2 TMTで可視光補償光学!?: フィッティング誤差と素子数



波面誤差 67nm を達成するには各素子が  $70cm^2$  をカバーする必要があることがわかる。素子数としては  $10^5$  素子に対応する。

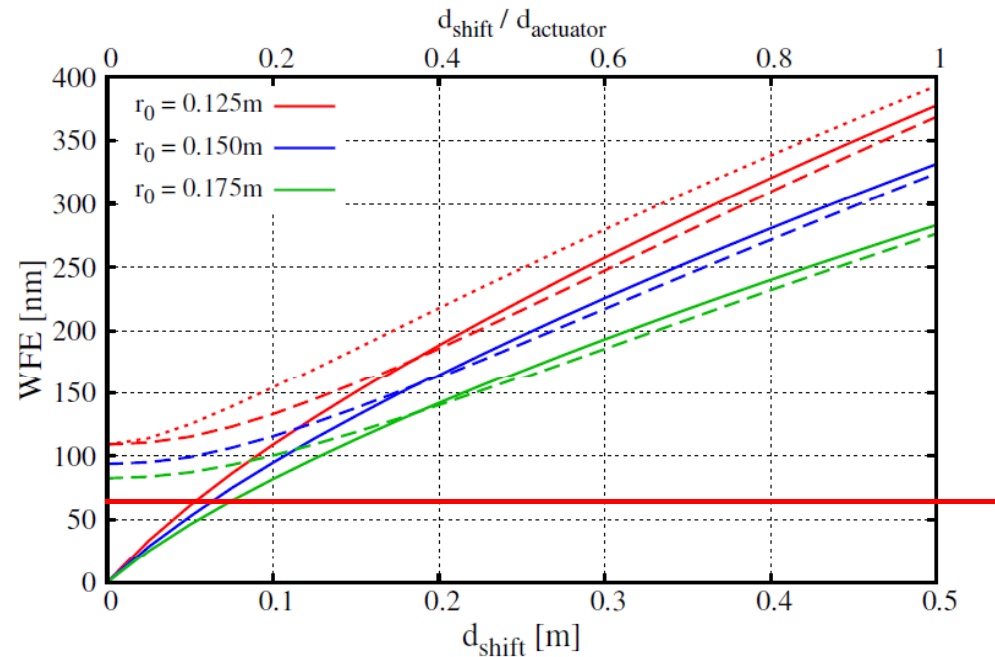
よって波面センサーや可変形鏡は 300x300 素子程度のシステムが必要となる。<sup>82</sup>

## 4.2 TMTで可視光補償光学!?: 時間遅れ

波面揺らぎのパターンは風によって移動する。

パターンが移動することによるずれで生じる波面誤差を下に示す。波面誤差を $67\mu\text{m}$ よりも十分に小さく抑えるにはずれを $0.02\text{m}$ より小さく抑えたい。

マウナケア山の上の典型的な風速として $20\text{m/s}$ と仮定すると $1000\text{Hz}$ での補正が必要であるとわかる。



大野君の計算結果

図 3: シミュレーションで計算した波面がずれ量と生じる WFE。色の違いは  $r_0$  の値の違いである。実線は 2.2 のステップ 4 で計算した WFE、つまり波面がずれることによって生じる WFE である。破線はステップ 5 で計算した WFE、つまりずれた波面を DM で補正したときの WFE である。赤の点線は  $r_0=0.125\text{m}$  の場合に、実線の WFE とこのときのフィッティング誤差の 2 乗和を示している。

## 4.2 TMTで可視光補償光学!?: 素子数とガイド星の明るさ

各素子に入る光子数として 100 個必要であると仮定する。

$100 \times 10^5 \times 1000$  photons/s の明るさが必要である。

このような星の明るさは RAB=8mag !

計算量を考えると、、、

$$10^5 \times 10^5 \times 1000 = 10\text{Tfps}$$

今、8m 望遠鏡の極限補償光学系で可能になっている素子数や計算能力  
のおよそ x10 倍が出来れば実現できるかもしれない。

## まとめ

補償光学を用いた観測プロポーザルの提案  
補償光学を用いた観測装置の提案

にむけて

サイエンス要求に基づいてさまざまなモードから選択する必要性が出ている。

すばる望遠鏡/地表層補償光学系 *Ultimate-Subaru*

30m望遠鏡/多天体補償光学系 *TMT-AGE*

をよろしく。