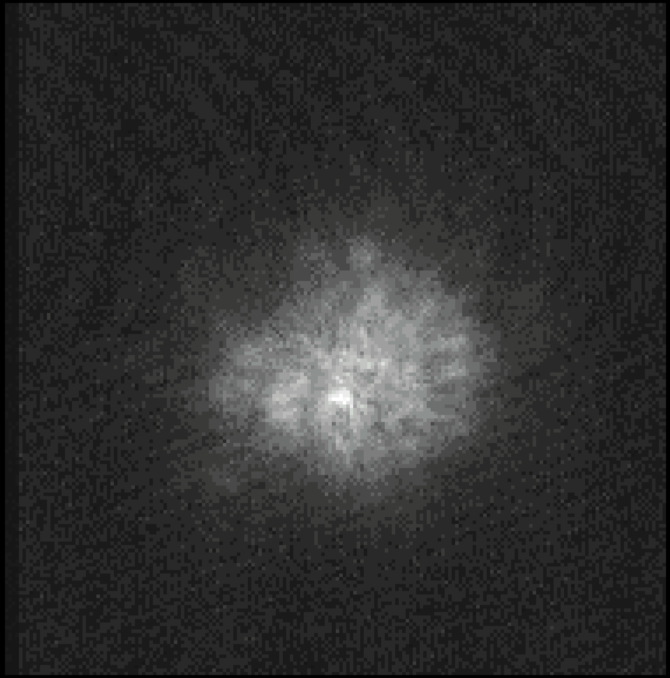
補償光学の開発から見る装置開発の多様性



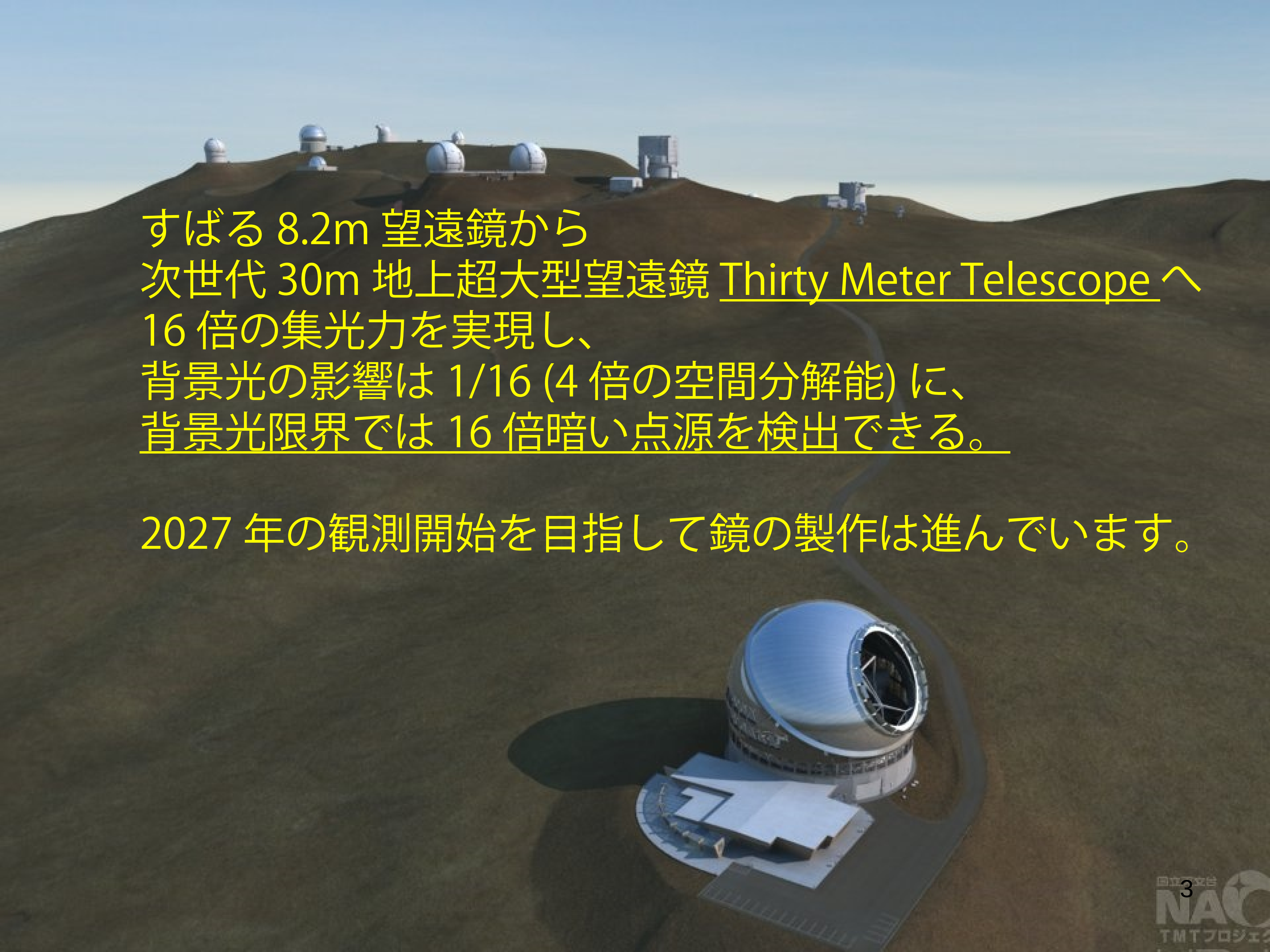
地上からの観測の敵！

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）

2018/07/22
夏の学校@豊橋

レーザーガイド星を用いた補償光学



すばる 8.2m 望遠鏡から
次世代 30m 地上超大型望遠鏡 Thirty Meter Telescope へ
16 倍の集光力を実現し、
背景光の影響は 1/16 (4 倍の空間分解能) に、
背景光限界では 16 倍暗い点源を検出できる。

2027 年の観測開始を目指して鏡の製作は進んでいます。

今日の内容

1. 補償光学の原理と限界
2. 補償光学の新しいモード
   - 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
3. 補償光学の開発から見る装置開発の多様性

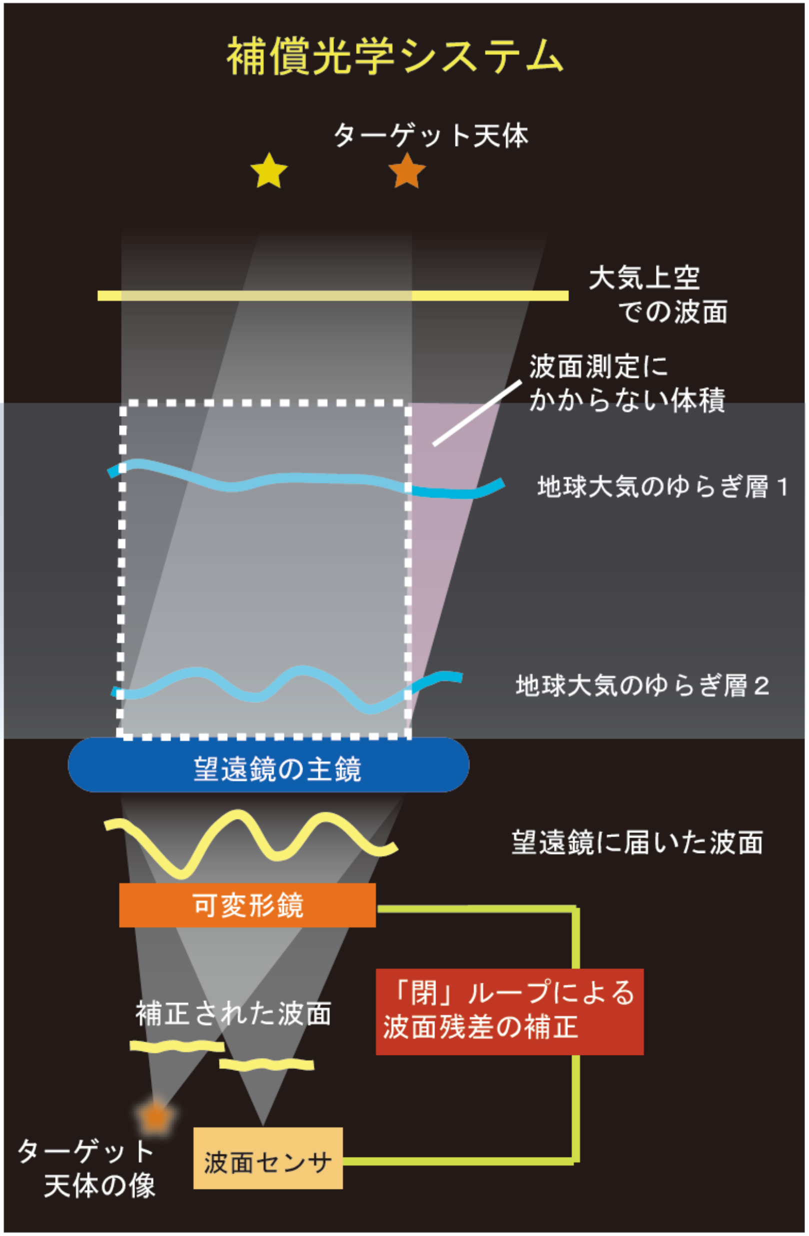
今日の内容

1. 補償光学の原理と限界

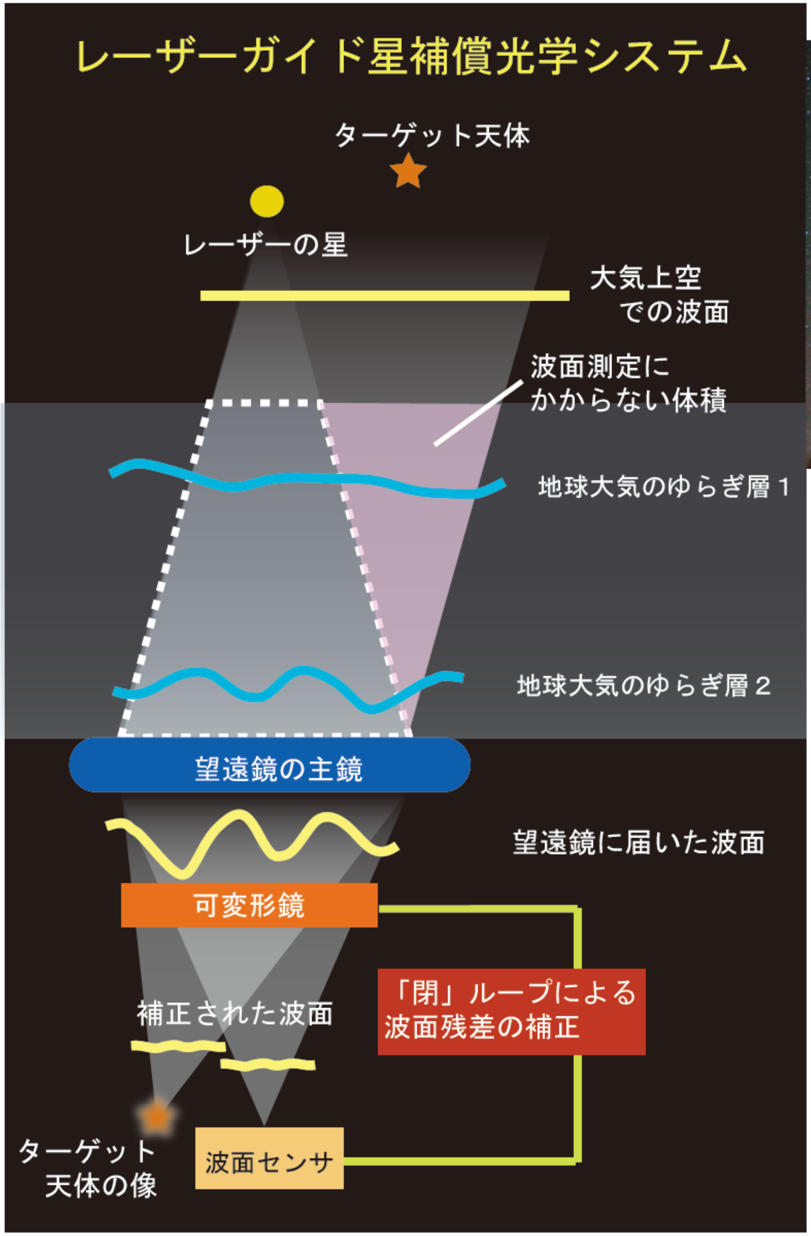
2. 補償光学の新しいモード
   - どういう補償光学の性能がこれから実現するか
   - どういう補償光学であれば実現可能性があるのか

3. 補償光学の開発から見る装置開発の多様性

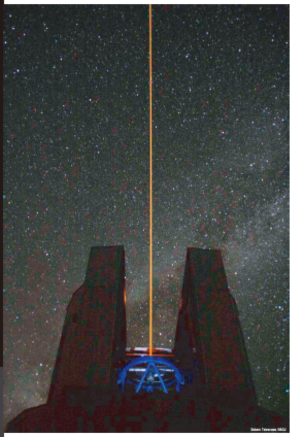
補償光学の原理：概念図



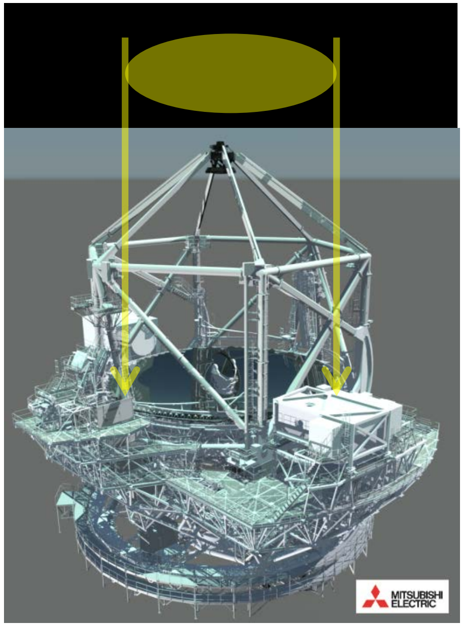
補償光学システム
ターゲット天体
大気上空
での波面
波面測定に
かからない体積
地球大気のゆらぎ層１
地球大気のゆらぎ層２
望遠鏡の主鏡
望遠鏡に届いた波面
可変形鏡
「閉」ループによる
波面残差の補正
補正された波面
ターゲット
天体の像
波面センサ



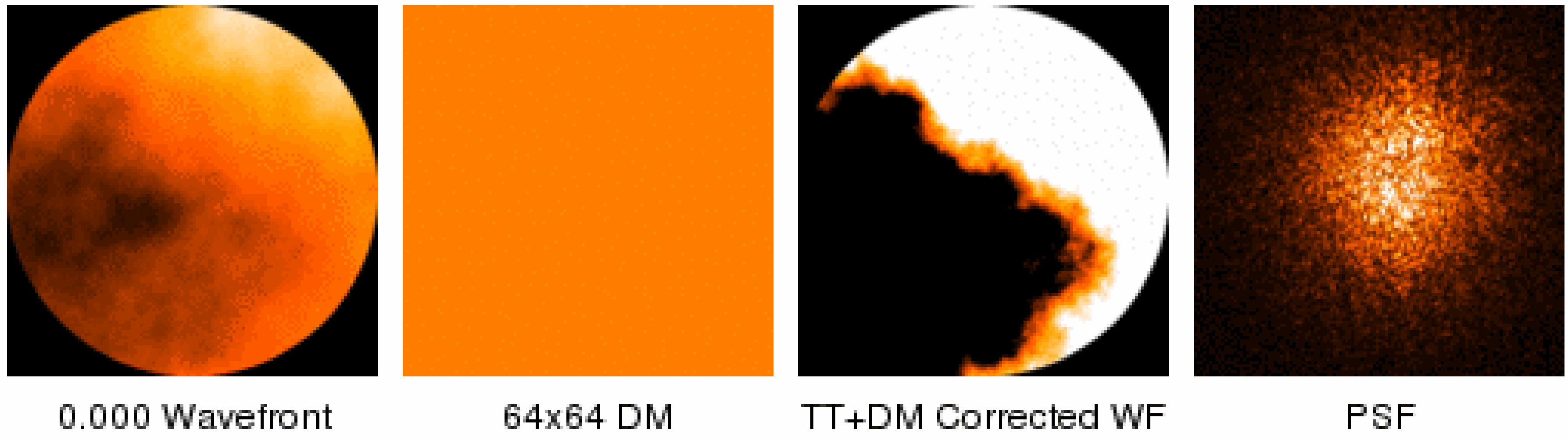
レーザーガイド星補償光学システム
ターゲット天体
レーザーの星
大気上空
での波面
波面測定に
かからない体積
地球大気のゆらぎ層１
地球大気のゆらぎ層２
望遠鏡の主鏡
望遠鏡に届いた波面
可変形鏡
「閉」ループによる
波面残差の補正
補正された波面
ターゲット
天体の像
波面センサ



30m 開口 TMT を仮定した補償光学シミュレーション



- 大気揺らぎで生じた光の位相ムラを64x64 素子の可変形鏡で補正することを仮定している。
- アニメーションは補正がない状態からスタート。



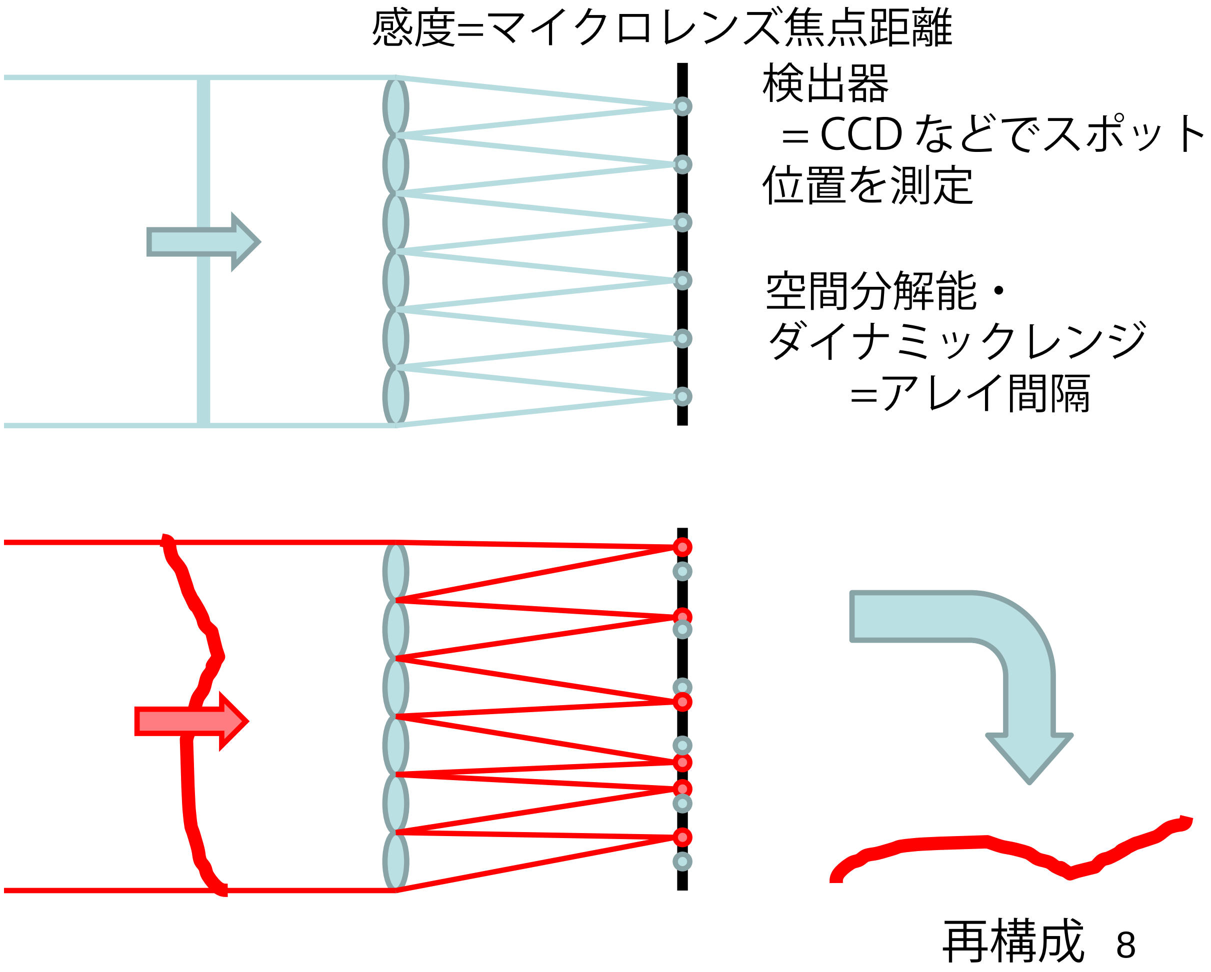
大気揺らぎで生じる光の位相ムラ

補正された星像

位相ムラ＝波面を測る：シャックハルトマン型波面センサーの仕組み

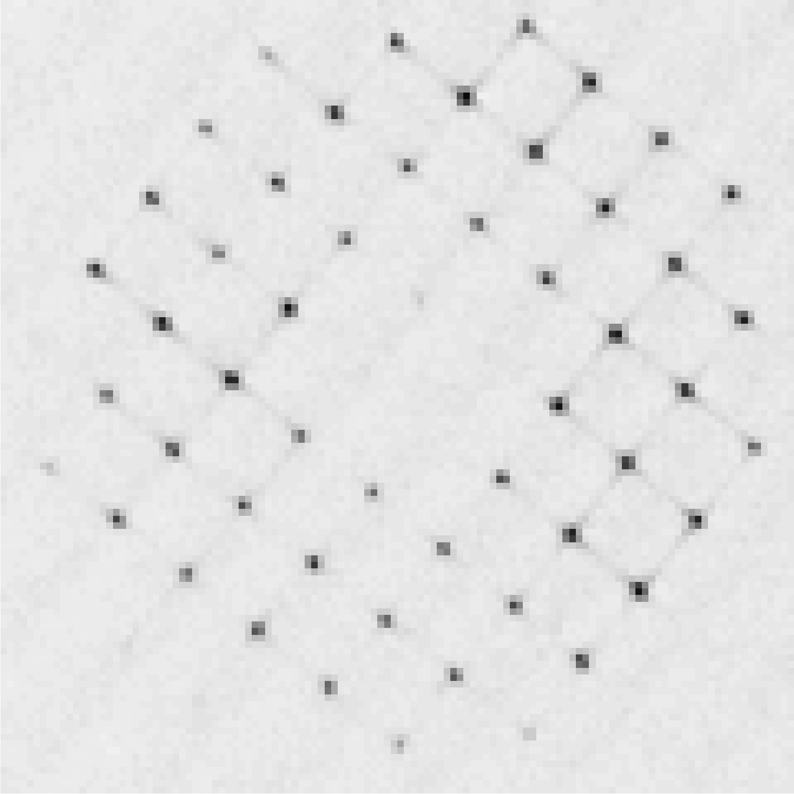
平らな波面が入射したときのスポットの位置を基準位置とする。

歪んだ波面が入射したときの各スポットの基準位置からのずれを測定することで、波面を再構成する。

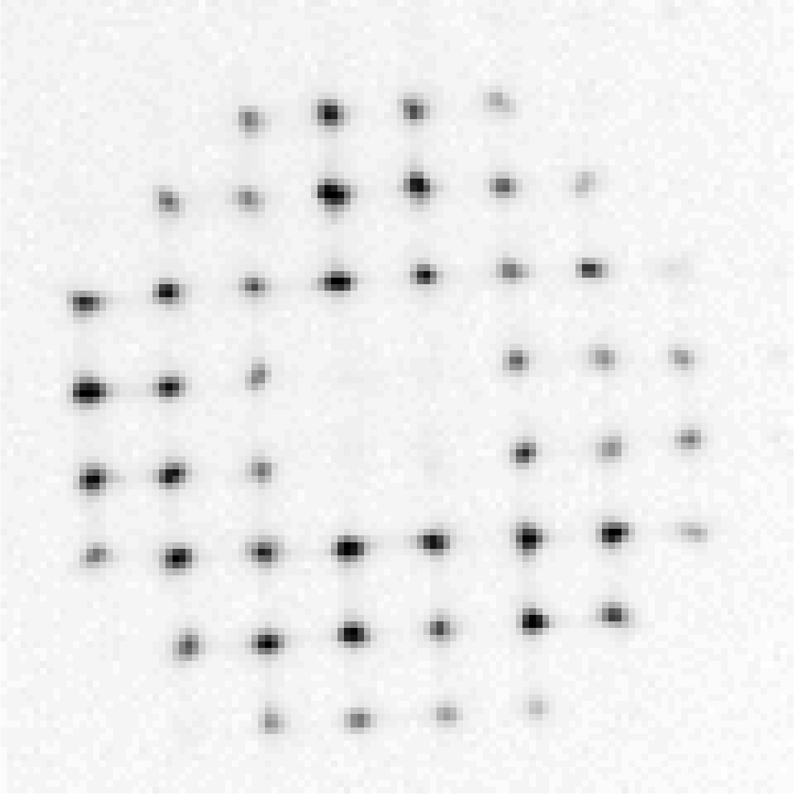


波面センサー：シャックハルトマン型波面センサー：実際の測定例

- 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。
- 300μmピッチ、$f_{\mathrm{eff}} = 8.7\mathrm{mm}$ のマイクロレンズ(左)と $f_{\mathrm{eff}} = 18.8\mathrm{mm}$ のマイクロレンズ(右)を使用した結果を示す。



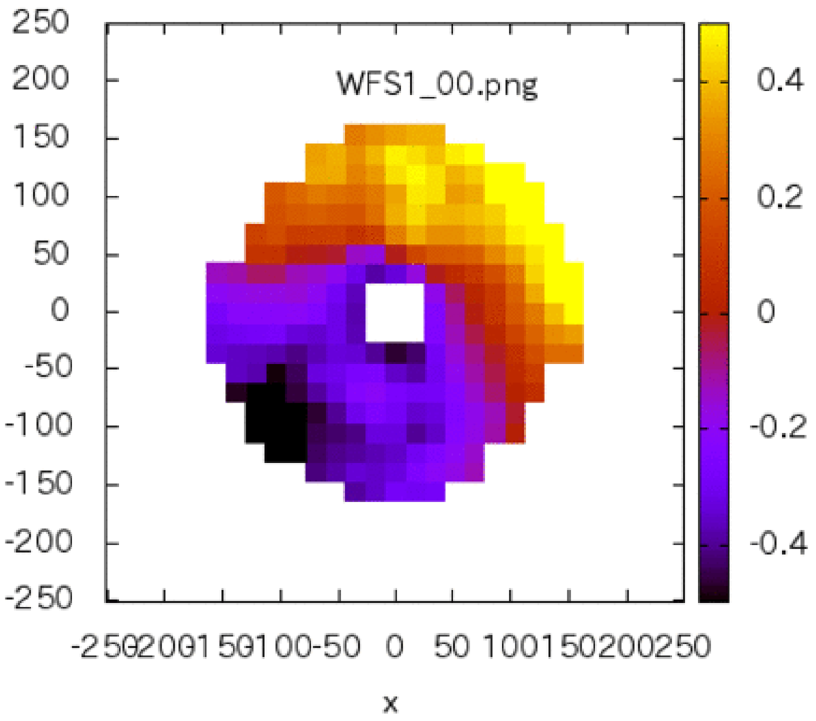
1

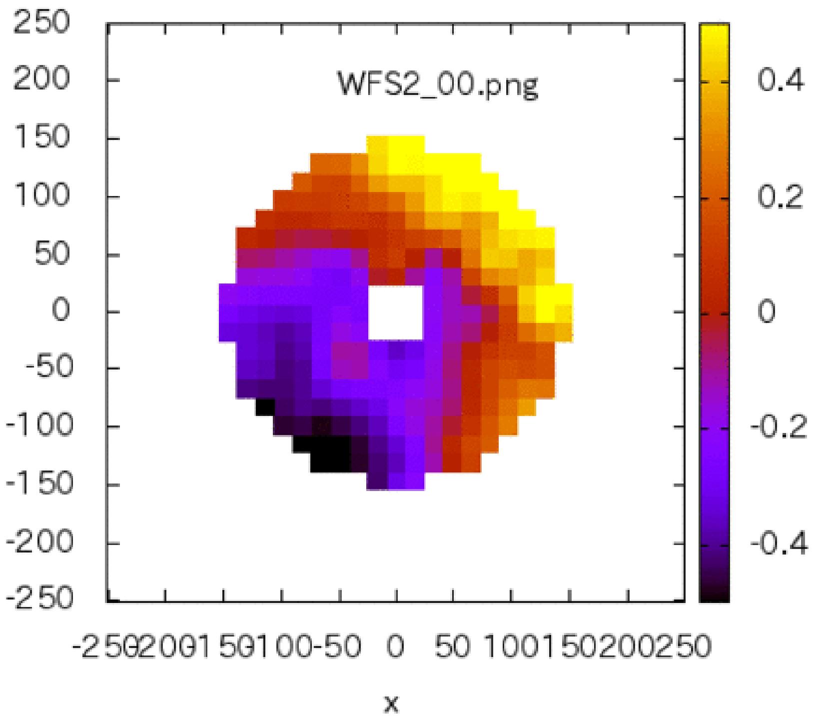


1

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

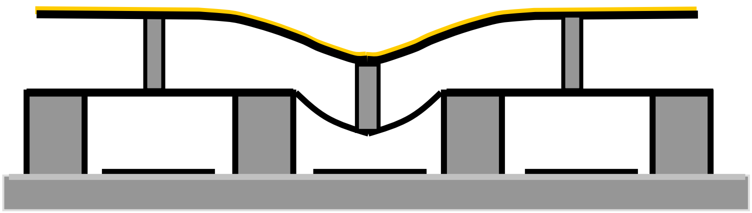
- 東北大学屋上50cm望遠鏡でシリウスを測定した結果。~20frames/sec でデータを取得している。
- 300μmピッチ、$f_{eff} = 8.7\mathrm{mm}$ のマイクロレンズ(左)と $f_{eff} = 18.8\mathrm{mm}$ のマイクロレンズ(右)を使用した結果を示す。



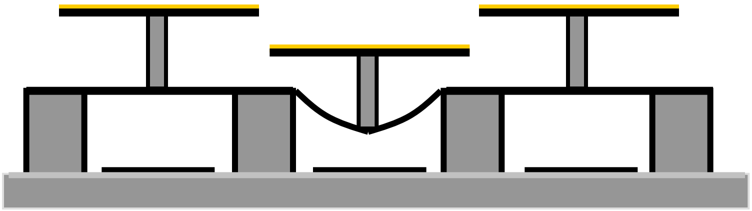


波面を直す可変形鏡：MEMS 技術を用いた多素子可変形鏡

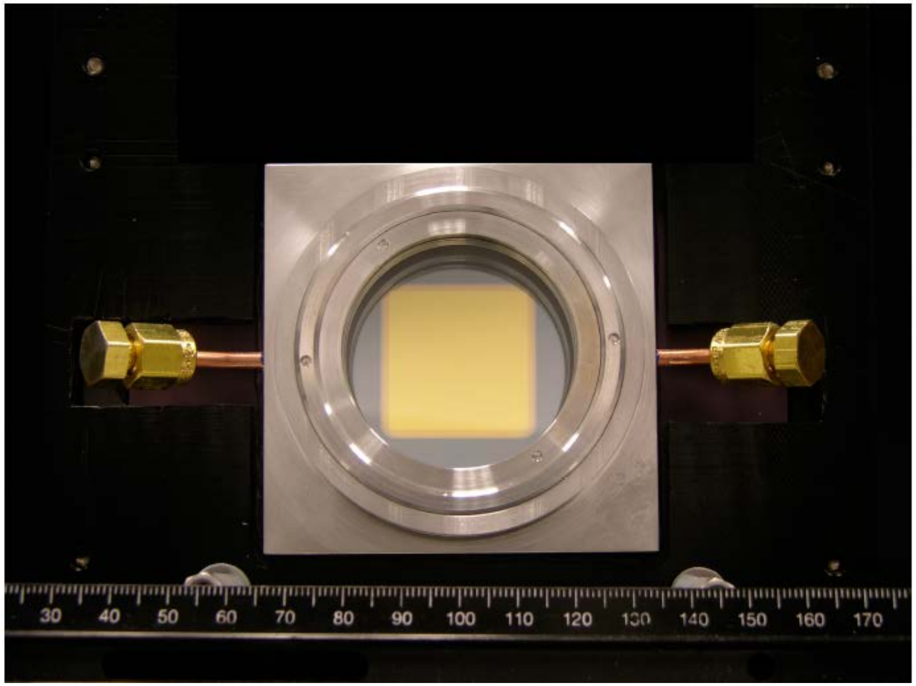
- 多素子のMEMS可変形鏡 については現状では Boston Micromachines の独壇場となっている。素子数の最大は 25mm角 4092 素子、ストローク 3.5μm、ピッチ 400μmである。インプットに対して14nm rms で波面を再現可能。Dead アクチュエータの数を抑える(現状では 1 %程度あり、Wafer の不良の問題)、300V の過電圧による電極接触とアクチュエータ破壊の抑制、駆動回路の小型化が課題となっている。



Continuous mirror
(smooth phase control)



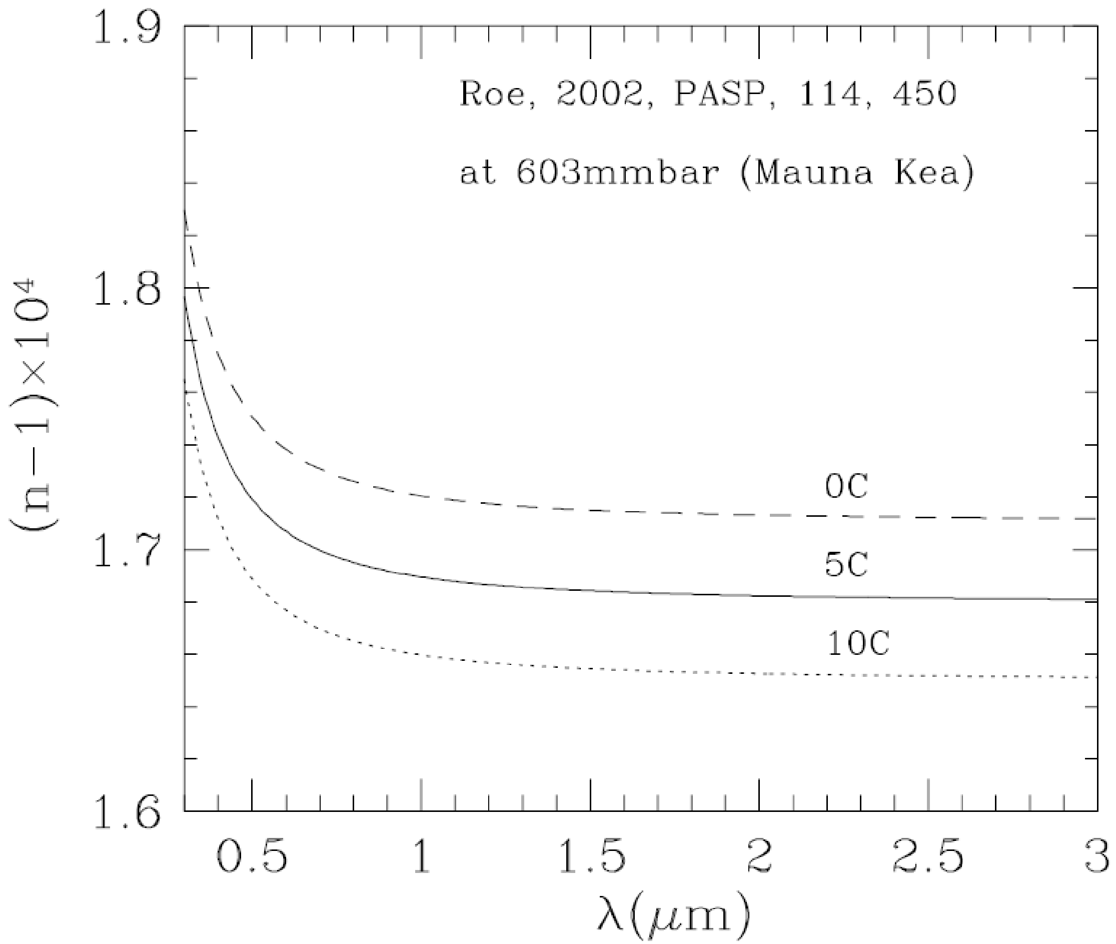
Segmented mirror
(uncoupled control)



Boston Micromachines, AO4ELT2 presen, webpage.

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の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。
- 0.1×10^{-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。



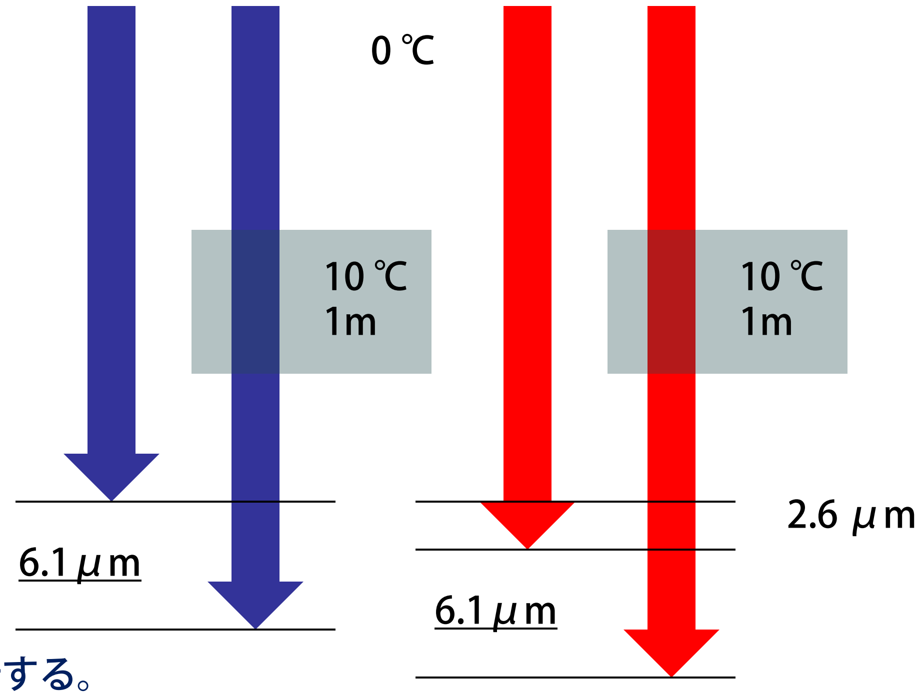
AOinst/refraction_index/refraction_index.pdf

大気の性質：大気の屈折率のむら

- 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、位相差は異ならない。
- 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使われるKバンドの波長での屈折率 (前のページと同じく $(n\text{-}1)\times10^{-4}$)

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



0℃ の大気の中を青色の光が 10m 進むとき

10℃ の大気を 1m 通る青色の光は 6.1μm 先行する。

0℃ の大気の中を赤色の光は 10m と 2.6μm 進む。
10℃ の大気を 1m 通る赤色の光はさらに 6.1μm 先行する。

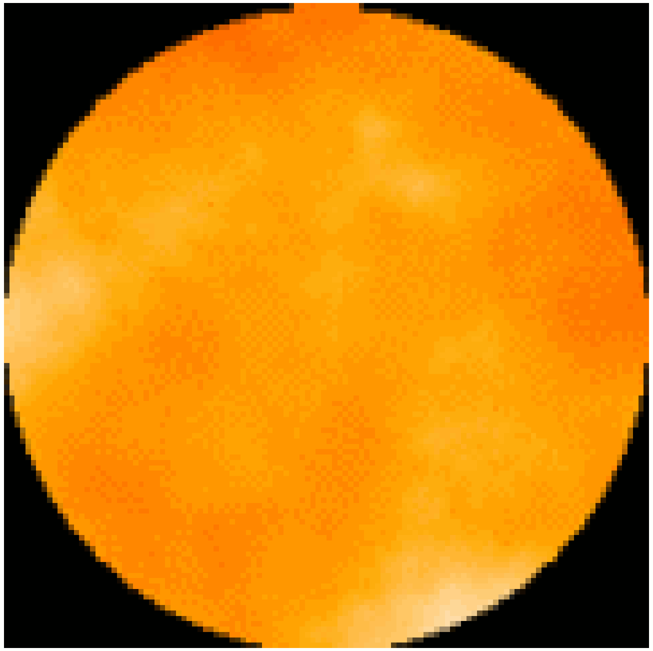
青い波長で位相差を測定し、赤い波長で位相差を補正して観測することが有効になる。

大気の性質：大気の屈折率揺らぎによる位相差の大きさ

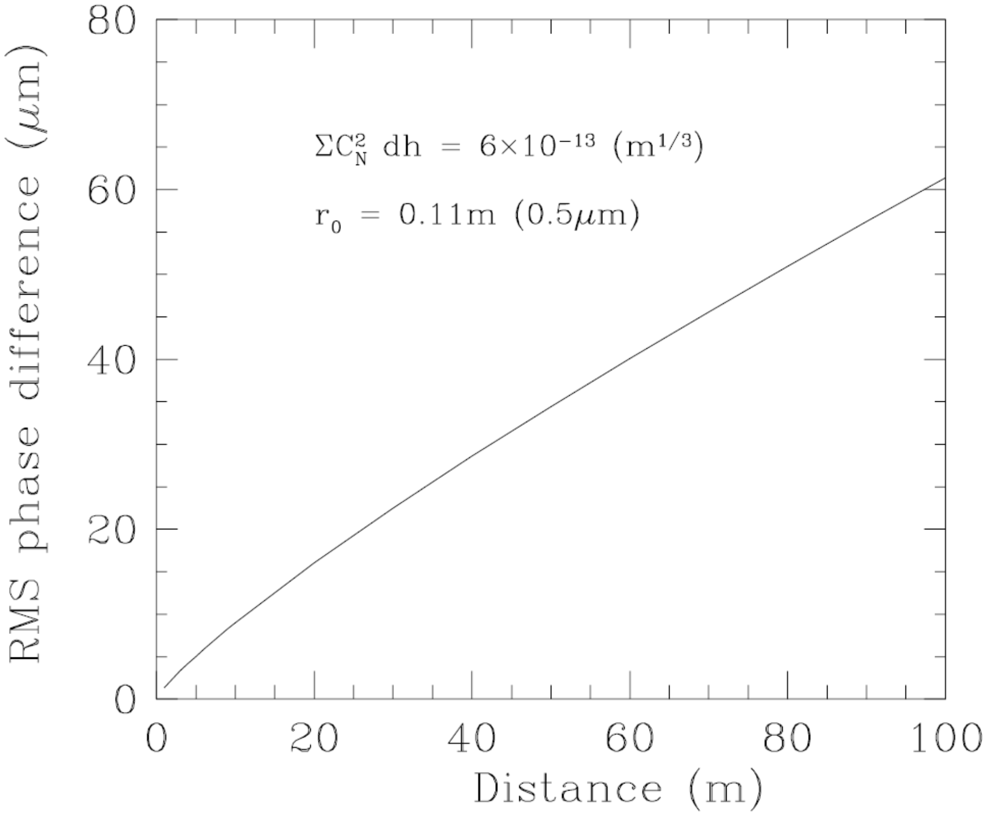
- マウナケアのプロファイルを積分して、構造関数の係数を求める。

$$D_\phi(\xi) =< |\phi(\mathbf{x}) - \phi(\mathbf{x}+\xi)|^2 >= C_n^2\ \xi^{2/3}$$

- 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。



AOinst/SIMAO/4gs_anime.gif



AOinst/refraction_index/phase_delay.pdf

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。

補償光学の点像関数の形を模式的に書くと、

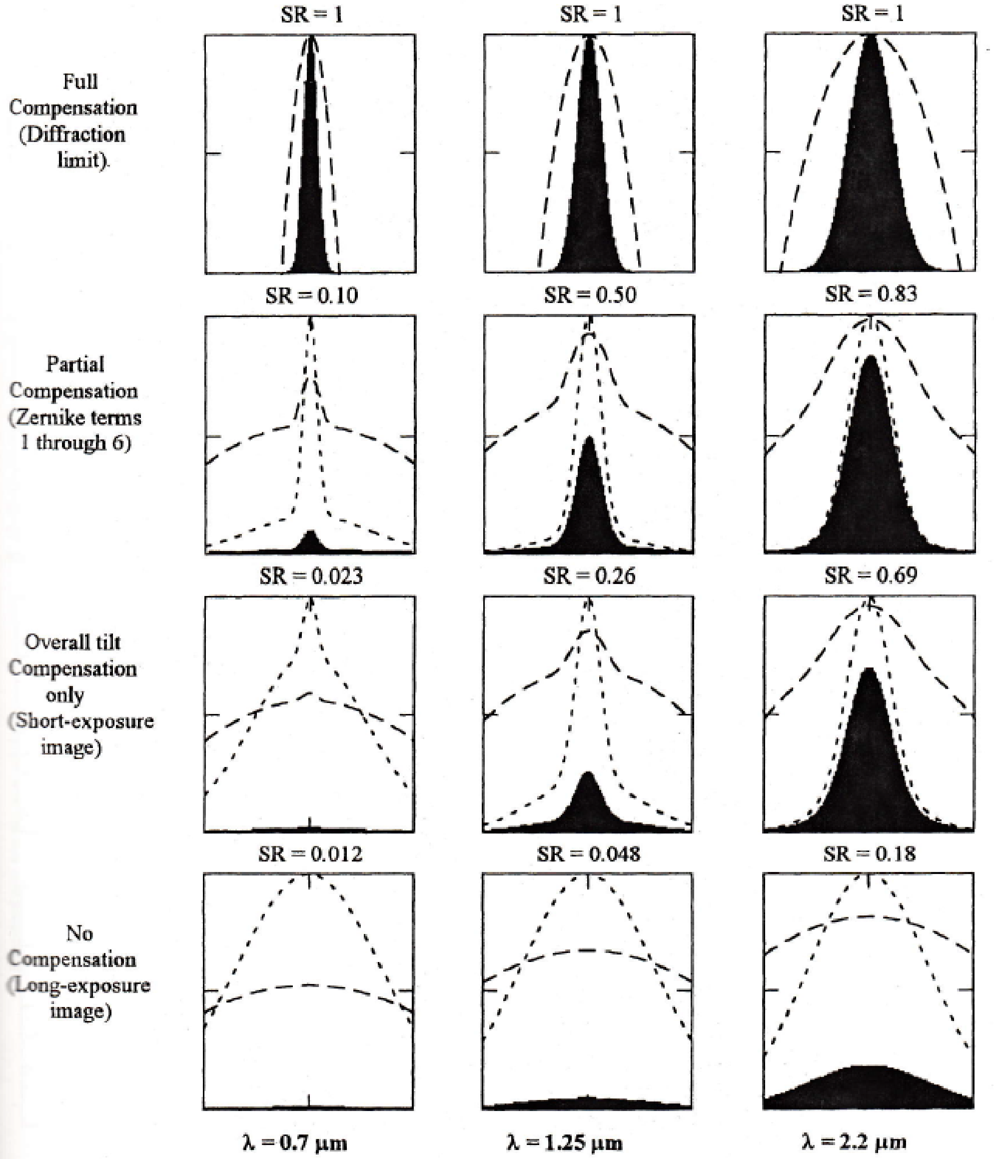


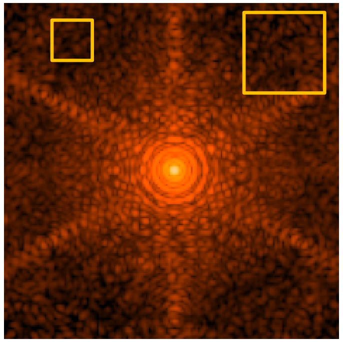
Figure 4.11 Image intensity profiles for various degrees of turbulence compensation, as a function of the observing wavelength. The peak image intensity (Strehl ratio) for each case is shown. The solid figure is the intensity profile with a linear intensity scale. The dotted line shows the shape of this profile, normalized to unity. The dashed curve is the intensity plotted on a logarithmic scale. The horizontal scale is ±0.5 arc seconds. Conditions: aperture = 2.0 m; r_0 = 0.15 m; λ = 0.7, 1.25, and 2.2 μm.

- 補償光学で得られる点像関数の形はだんだんと細くなるのではなく、細いコア(回折限界の幅)とシーイングで決まる成分の比が変わるように変化していく。
- 補償の次数を上げるほど、コアの成分が強くなり、回折限界に近づく。

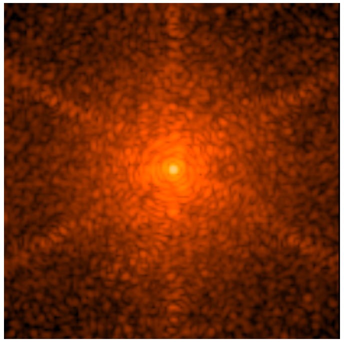
Hardy 1998

補償性能の指標：ストレル比と点像関数

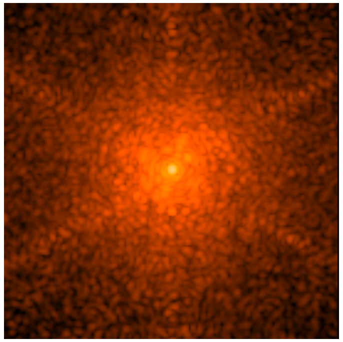
- いろいろなストレル比の点像関数 PSF の例を示す。30m 望遠鏡 K-band での観測を想定したシミュレーションから得られた PSFであり、図の 1 辺は1.0秒角に対応する。明るさは log-scale で表示しているのですそ野が強調されている。
- ストレル比が決まったからと言って PSF が決まるわけではないのでこれらは一例である。
- 補償光学系の PSF は補償が効いているコアとシーイングの影響が残るハローから構成されることが多く、ダブルガウシアンで記述される。
- EE は 0.12"x0.12" に入るエネルギー、EE2 は 0.24"x0.24" に入るエネルギーの %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



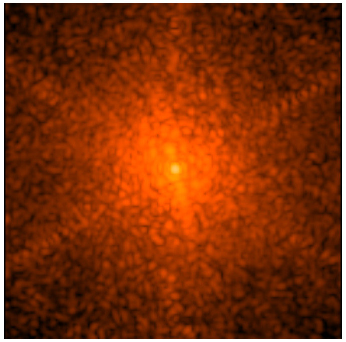
SR=0.89
EE=77
EE2=83



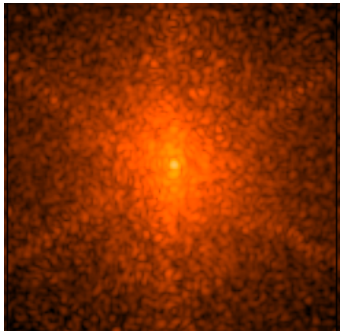
SR=0.74
EE=67
EE2=73



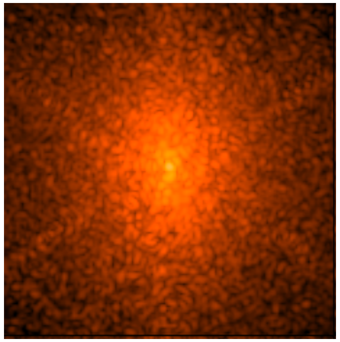
SR=0.64
EE=59
EE2=66



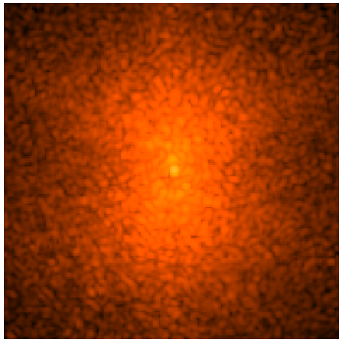
SR=0.53
EE=51
EE2=60



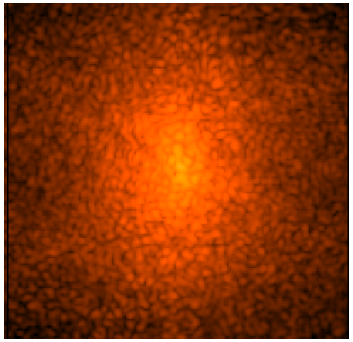
SR=0.41
EE=41
EE2=55



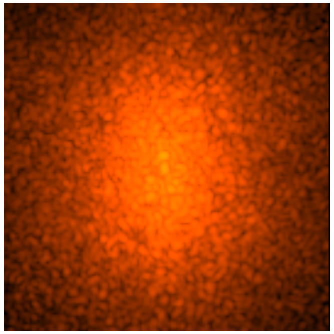
SR=0.27
EE=33
EE2=52



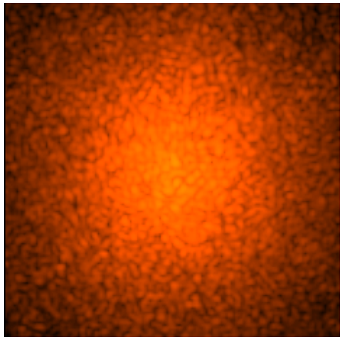
SR=0.20
EE=21
EE2=32



SR=0.10
EE=0.20
EE2=40



SR=0.05
EE=7
EE2=20

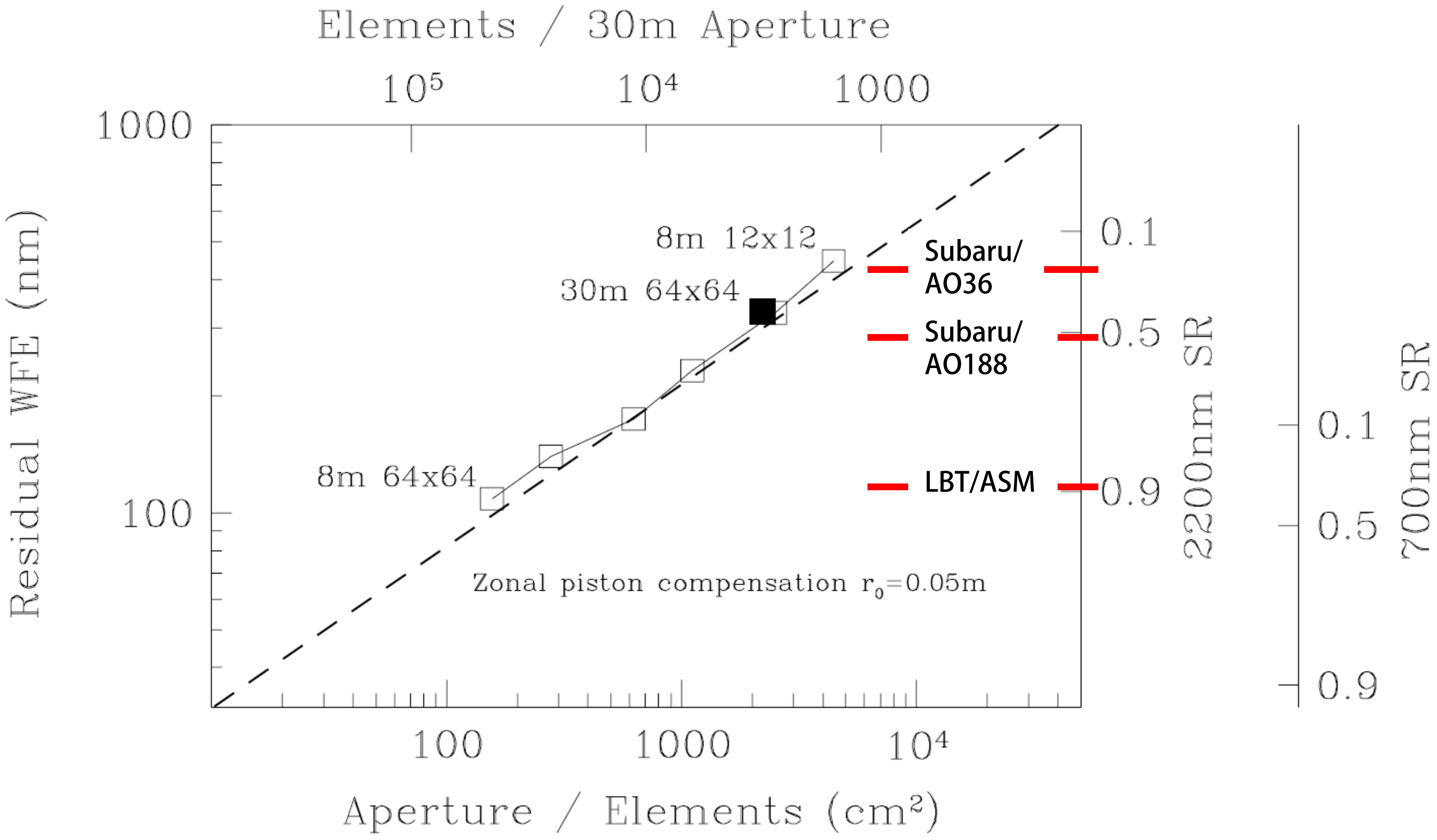


SR=0.02
EE=5
EE2=13

Maos/TMT_MOAO6_psf_images.gif, NFIRAOS1_psf_images.gif

補償性能を決める要因：フィッティング誤差

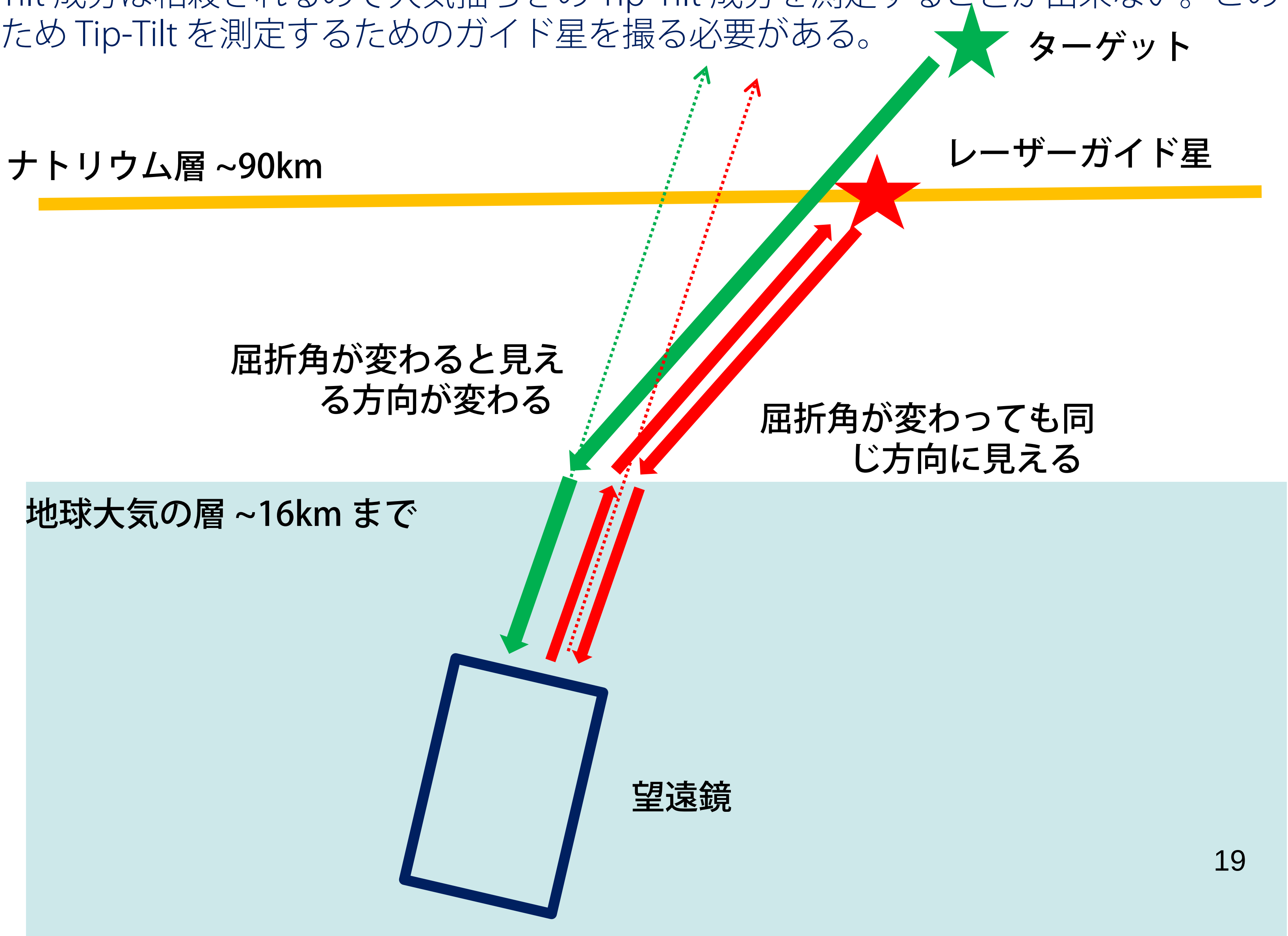
- 補償性能を決める一番大きな要因は補償光学系の素子数(波面センサーの点数や可変形鏡の素子数)である。
- 下の図の破線は理論的に予想される素子数と波面残差の関係を示す。シミュレーションで計算された結果を四角 (白四角 8m、黒四角 30m) で示す。



AOinst/SIMAO/number_rms.pdf

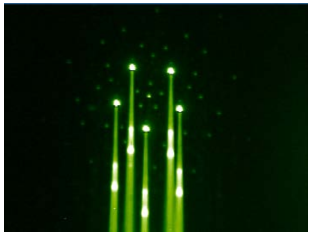
補償性能を決める要因：レーザーガイド星とTip-Tilt ガイド星

– 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。

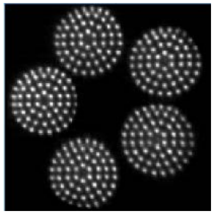


地表層補償光学：MMT

– 可変副鏡、レーリーレーザー、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



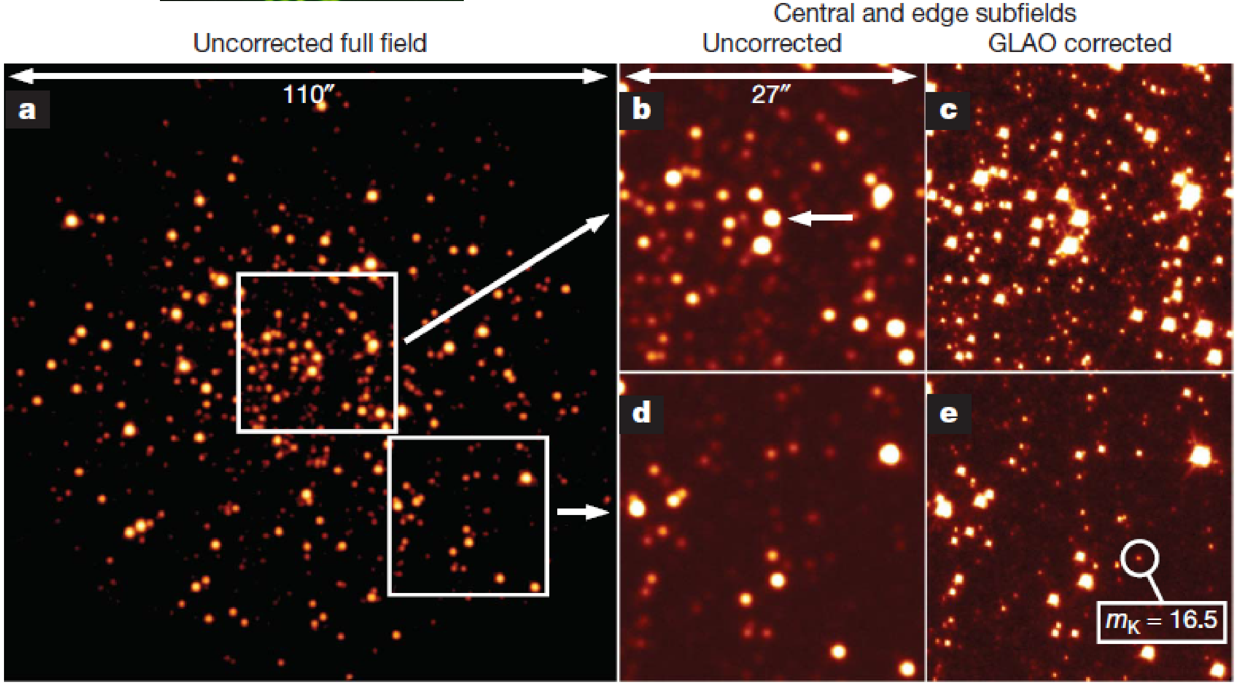
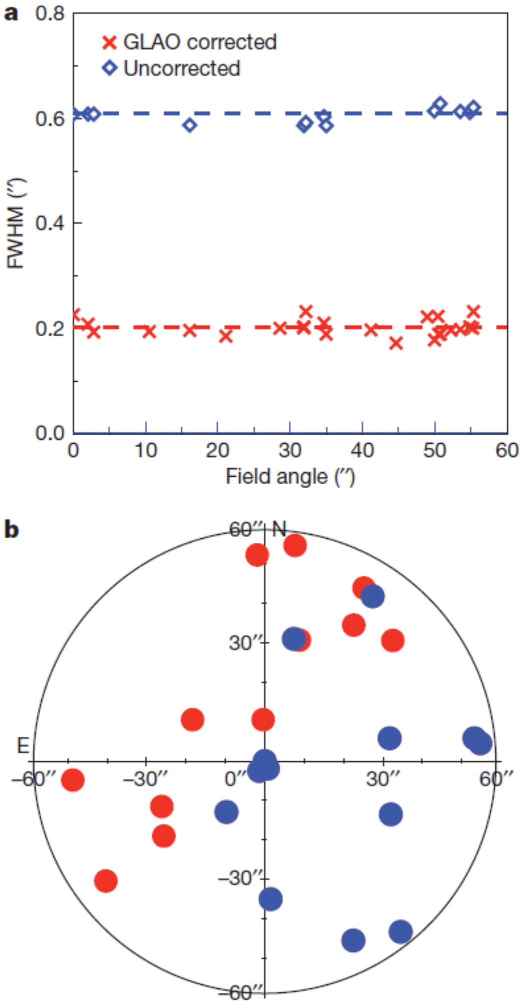


Figure 1 | The core of M3 imaged in the K band in two 60-s exposures in May 2009. a, The full 110′′ field of our infrared camera in the native seeing limit of 0.7″, on a logarithmic intensity scale. **b**, **d**, Two smaller 27′′ regions of the same image, indicated by the boxes in **a**, shown on a 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.

Hart et al. 2010, Nature, 466, 727

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。



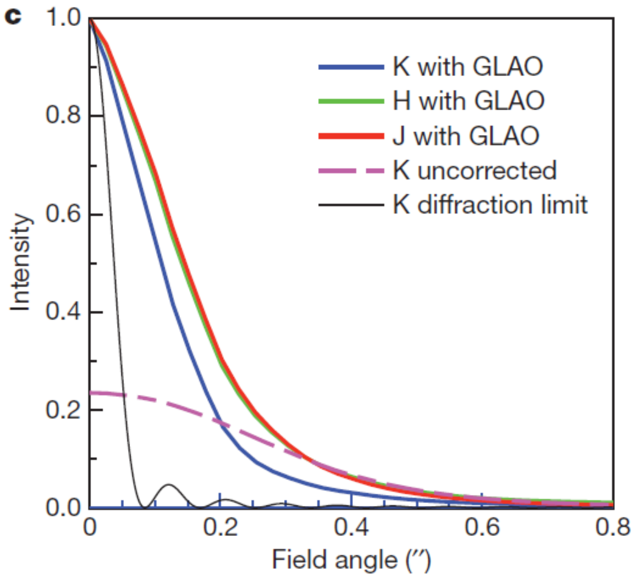
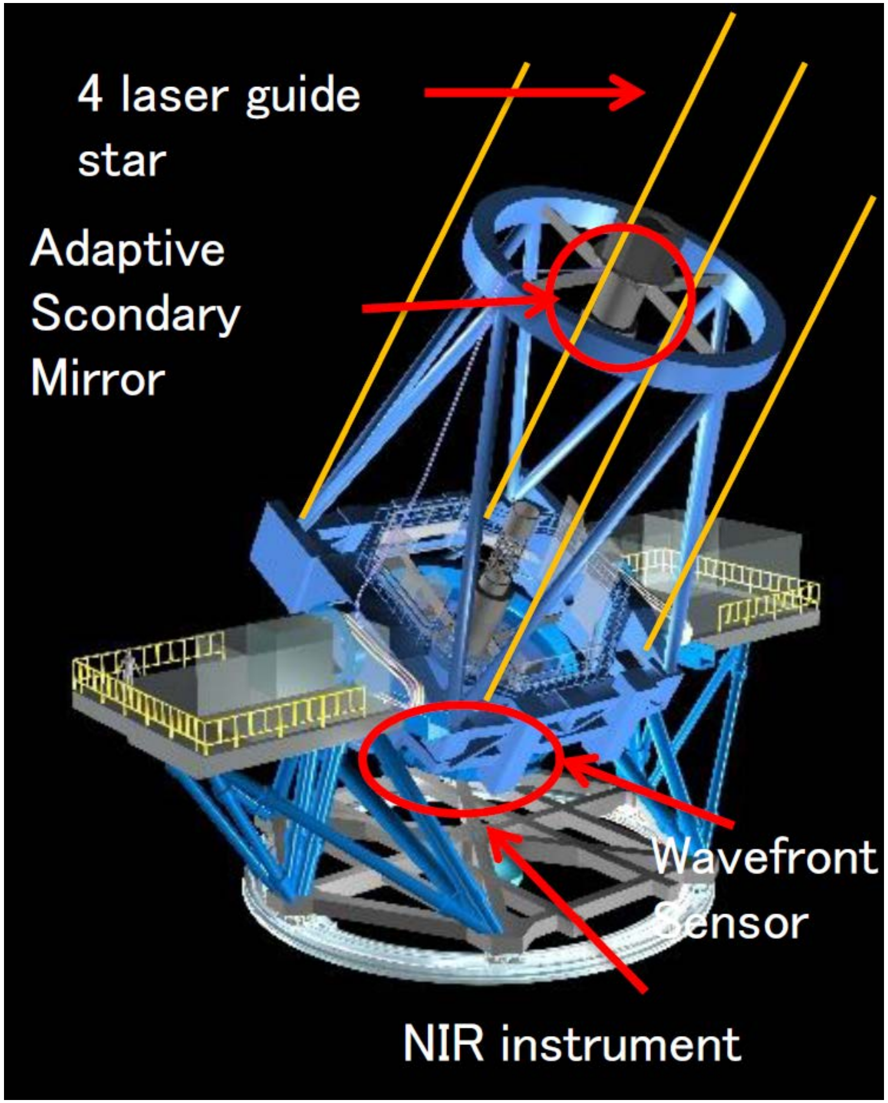


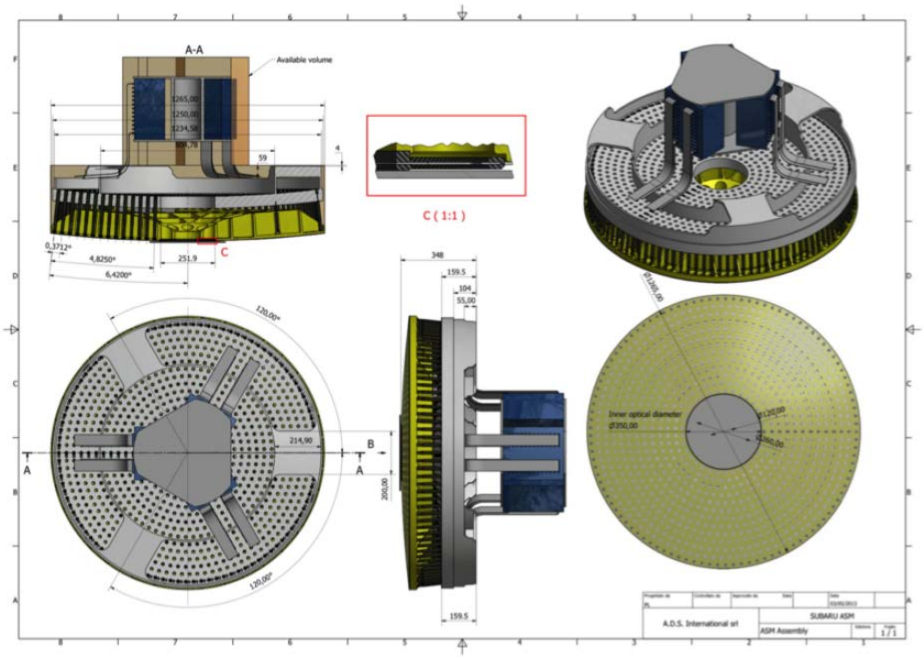
Figure 2 | Comparison of open-loop and closed-loop near-infrared image widths. a, In the K band, the corrected stellar images in M34 show no more significant variation in FWHM versus separation from the tip–tilt star (spectral type A1, $m_K = 10.0$) across the PISCES field than they do in the seeing 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

広視野の地表層補償光学：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。





今日の内容

1. 補償光学の原理と限界

2. 補償光学の新しいモード
   - 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

3. 補償光学の開発から見る装置開発の多様性

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、青は現在制作中、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/SCExAO
VLT/Sphere
Gemini/GPI
Palomer/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

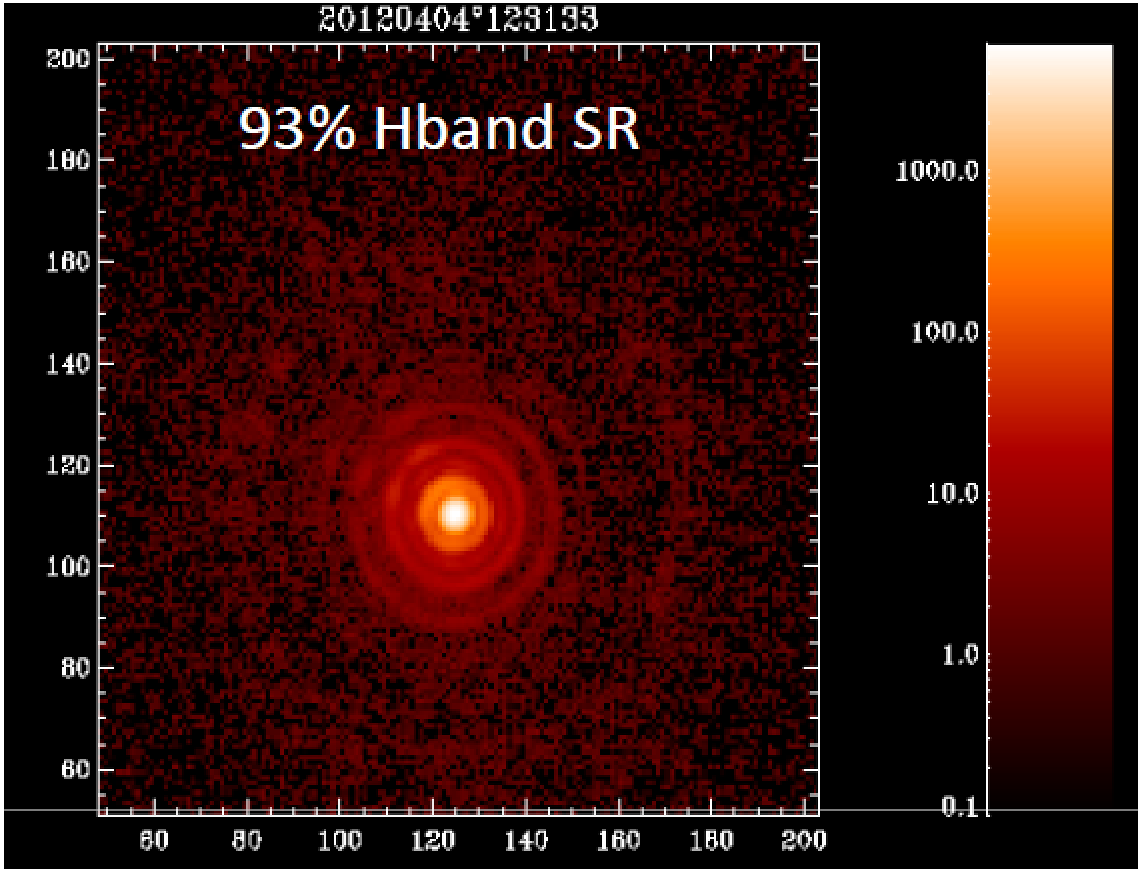
視野・多天体性

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

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.)。



Eposite 2012, Gemini-North AO WS presentation

自然ガイド星 vs. レーザーガイド星　補償光学

- 計算機でシミュレートした TMT 補償光学の補償後の点像関数を示す。

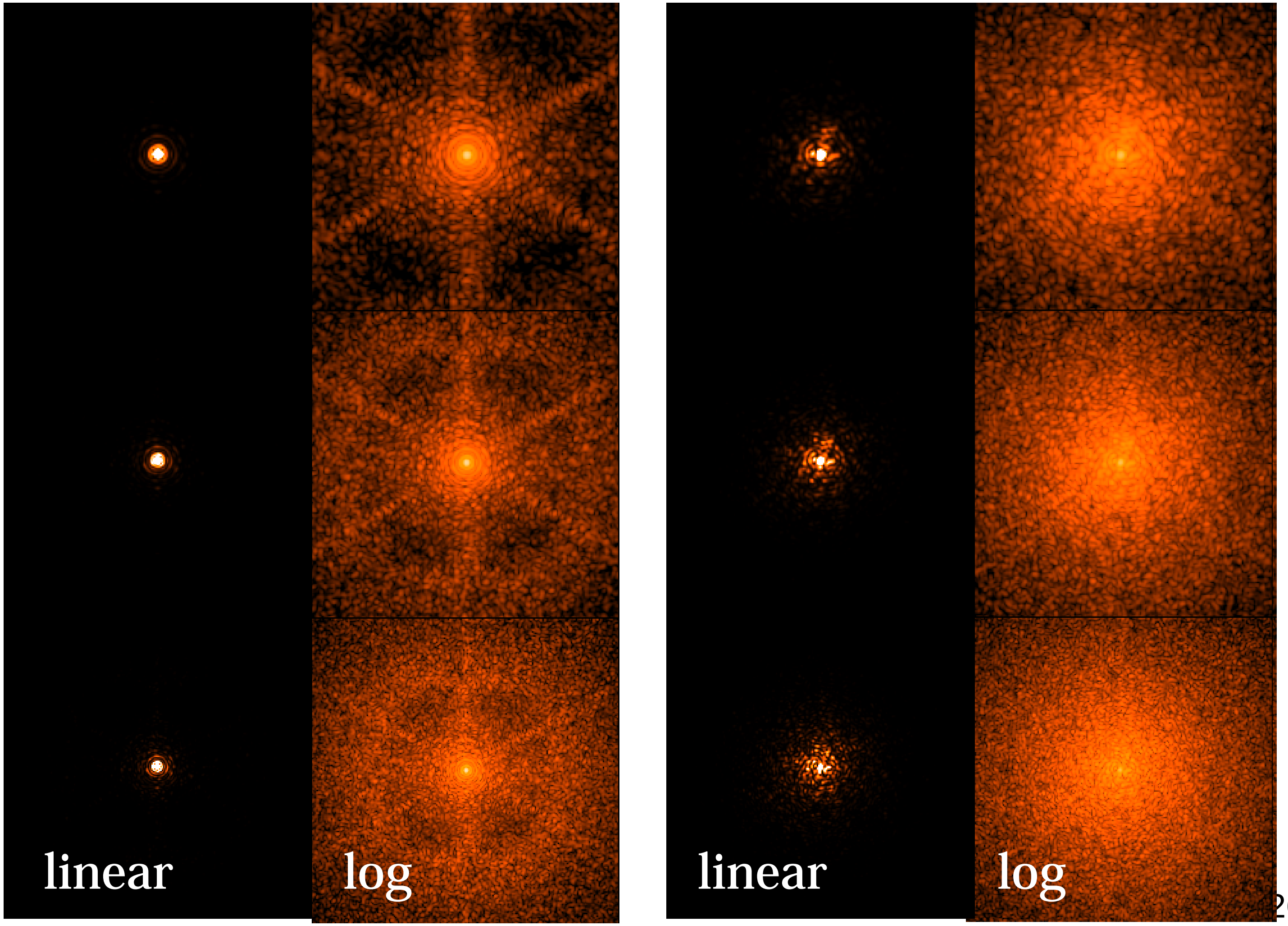
自然ガイド星の場合　　レーザーガイド星の場合

2200nm

1600nm

1200nm

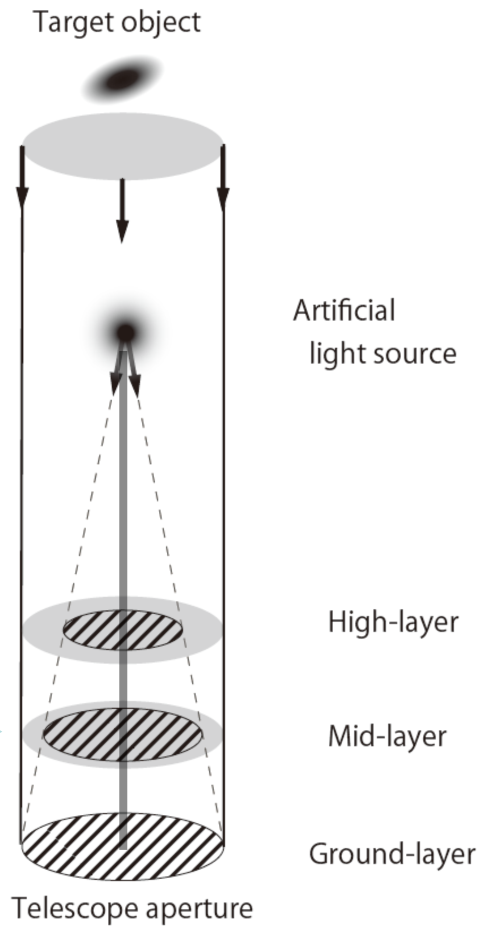
1” x 1”



TMTinst_20120606_akiyama/NFIRAOS1_1LGS_psfimages.gif

なぜレーザーガイド星補償光学システムの性能が悪いのか？

- レーザーガイド星が有限な高さにあることによる円錐効果が問題！



Infinity

90km

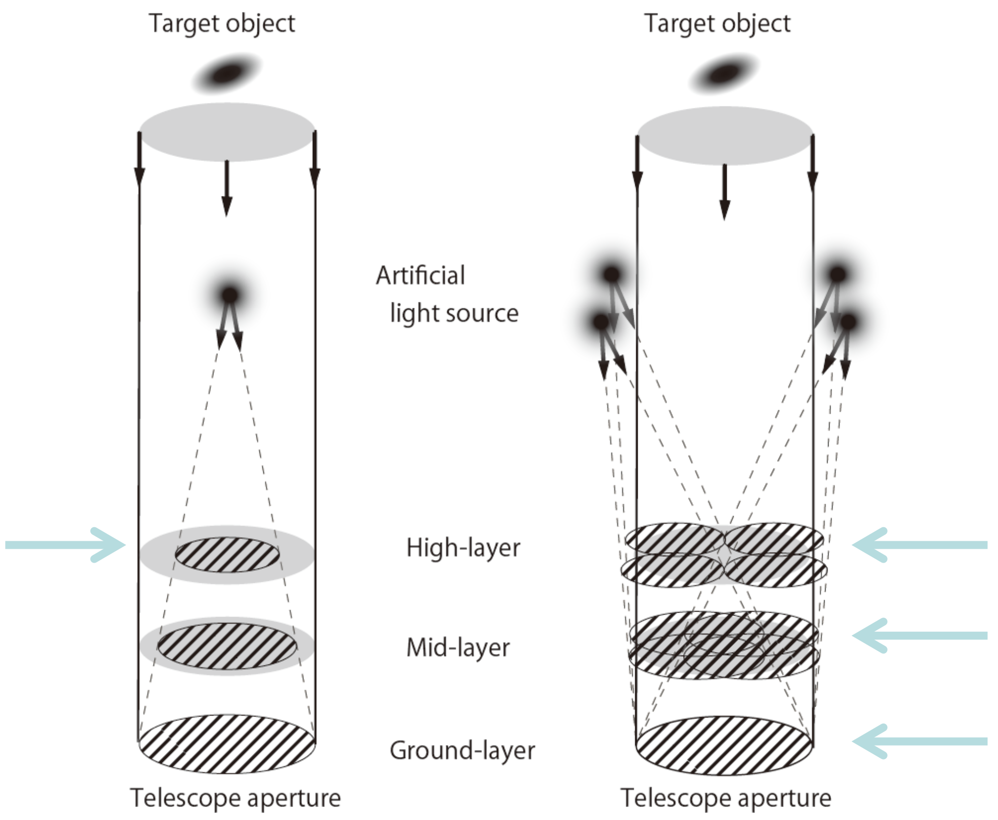
Turbulence layers
up to 15km

Outside areas of the “cone” are not sensed

トモグラフィー補償光学システムで解決する

- 複数のレーザーガイド星を用いることで円錐効果を解決！

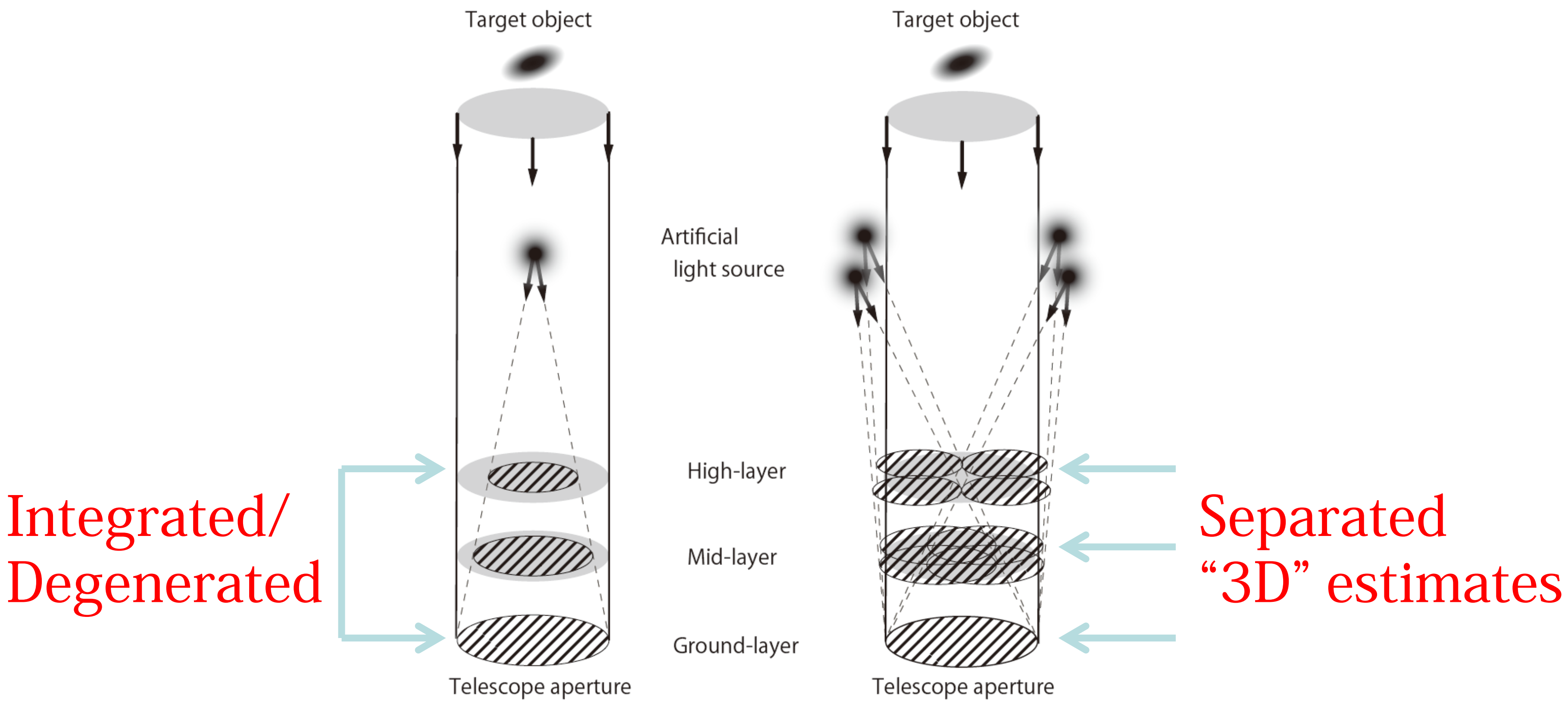
Outside areas of the “cone” are not covered



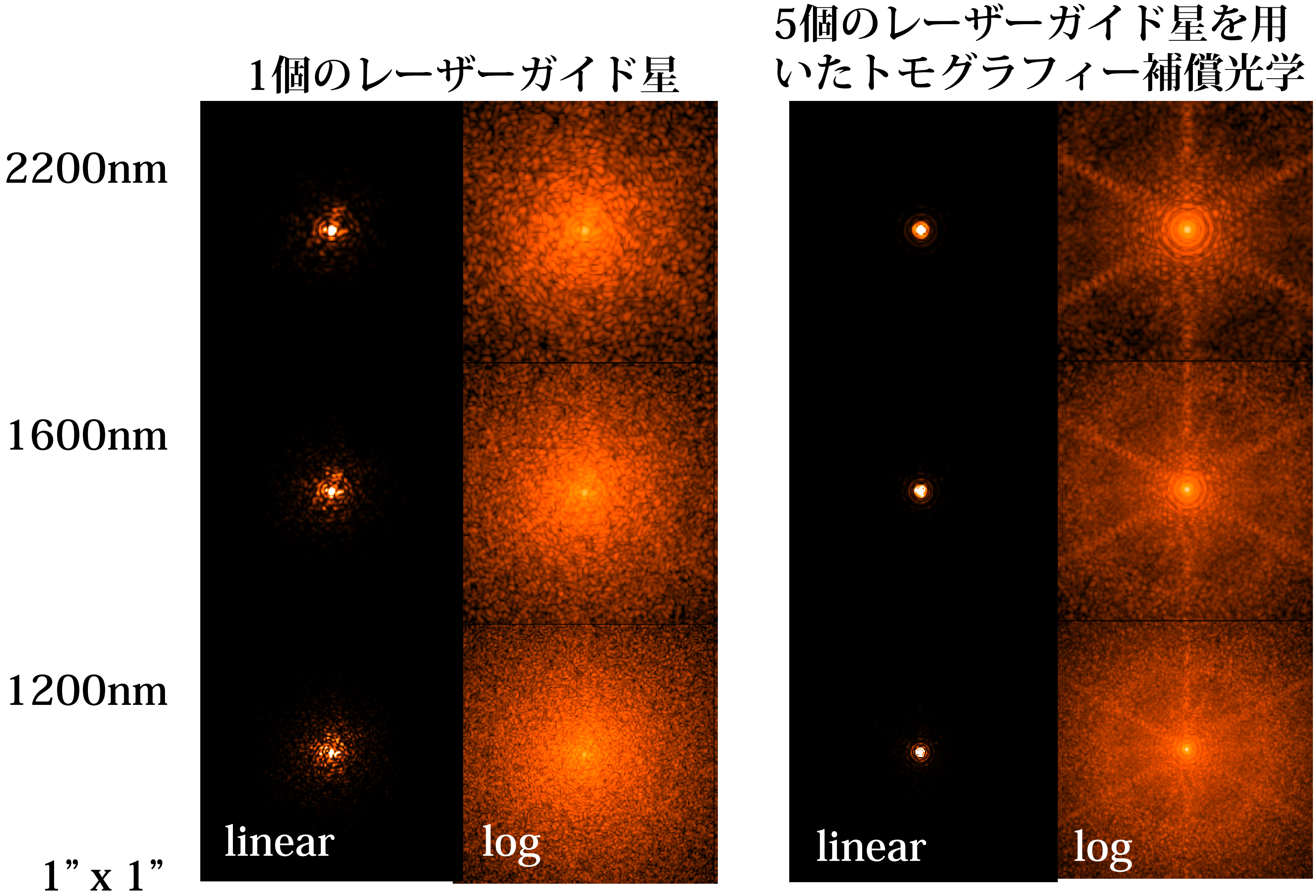
All areas are covered

トモグラフィー補償光学システムで解決する

- さらに、高さ方向に分解した推定を行うことが出来、「面」としての推定から「体積」としての推定へ！

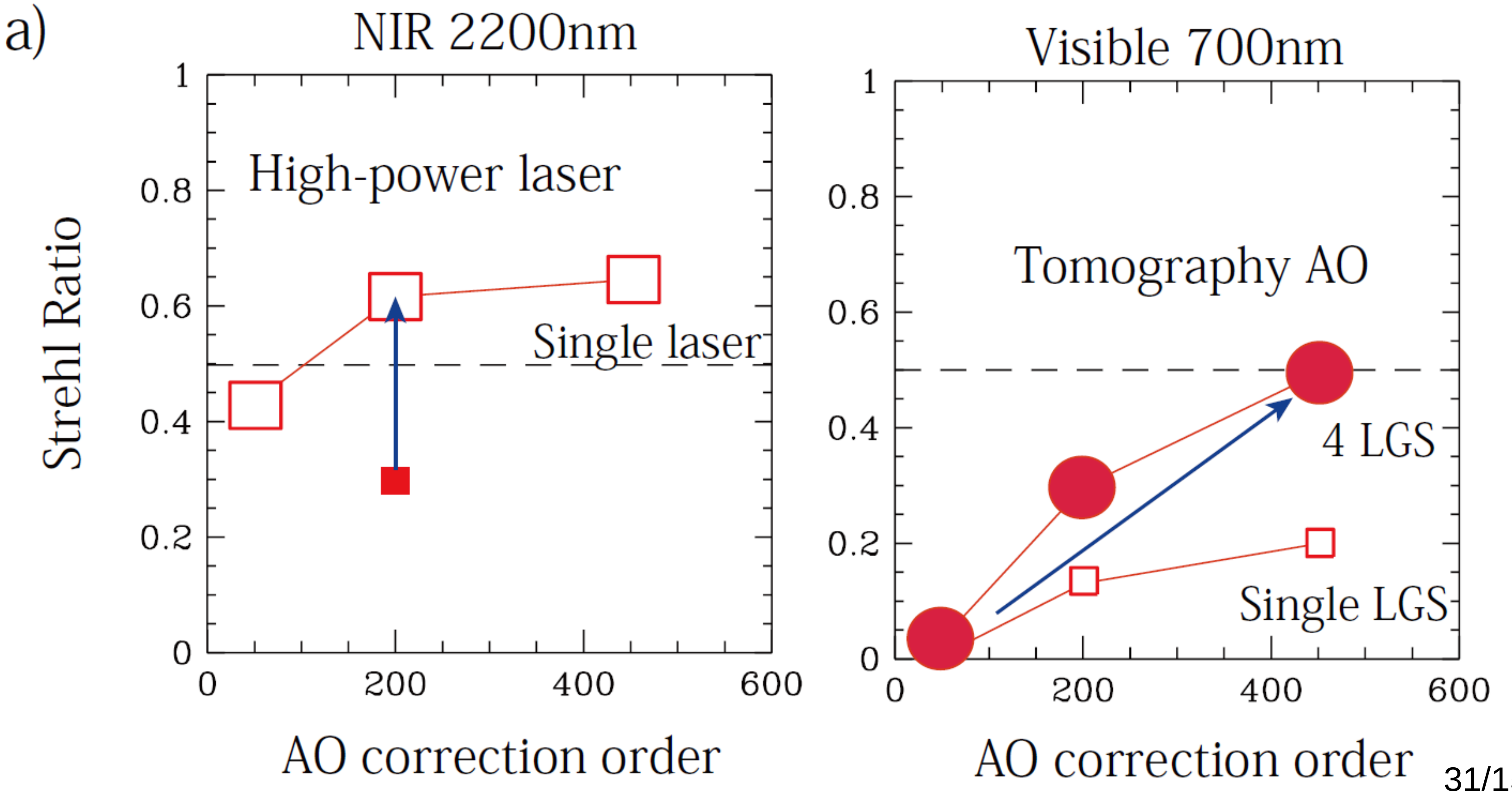


トモグラフィー補償光学での点像関数



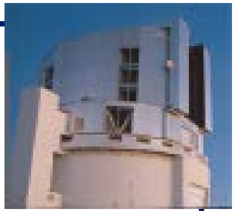
トモグラフィー補償光学で実現する可視光補償光学

- 近赤外線では高輝度レーザーガイド星を実現することで回折限界と言える (SR>0.5) 補償性能を実現することが出来る。
- 可視光ではトモグラフィー補償と多素子化を行わなければ回折限界の補償性能を実現することは出来ない。

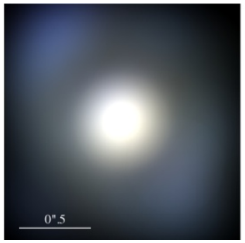


トモグラフィー補償光学で可視光補償光学の実現へ

100億年前の銀河の見え方のシミュレーション

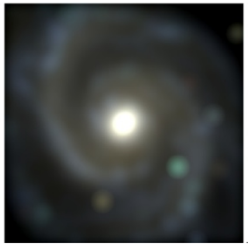


0.6秒角



大気揺らぎの影響を受けたすばる望遠鏡での観測

0.2秒角

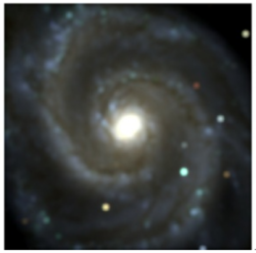


ハッブル宇宙望遠鏡 (赤外線)

<u>現在のレーザー補償光学</u>を用いたすばる望遠鏡での観測

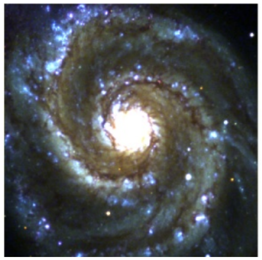
現状の限界

0.06秒角



すばる望遠鏡の赤外線での回折限界

0.02秒角



すばる望遠鏡の可視光での回折限界

可視光でのレーザー補償光学を

<u>トモグラフィー補償光学で実現する</u>

高い空間分解能で見えてくるもの

0.01″ (TMTの1.6umでの回折限界、すばる望遠鏡の0.4umでの回折限界)

@ 1kpc = 10AU = 5x10^-5pc (木星、土星までの距離のスケール)

　球状星団　M3:10kpc　M4:2kpc

@ 8.5kpc = 85AU = 4x10^-4pc

　現状銀河中心の星で最も小さい軌道は r=0.05″=0.002pc=400AU

　固有運動は 0.02″/yr=160AU/yr

　銀河系中心ブラックホール 3x10^6Ms Rs=0.06AU

　ブラックホールが支配的になる半径 RBH~GM./sigma^2~0.03pc

@ 1Mpc = 0.05pc

　M31@720kpc

　M33

@ 20Mpc = 1pc (銀河の中の星の間隔のスケール)

　NGC1068@14.4Mpc

　M87@18Mpc、ブラックホール質量は 3x10^9Ms RBH~3pc

@ z=0.5 = 0.07kpc (銀河の中の星形成領域のスケール)

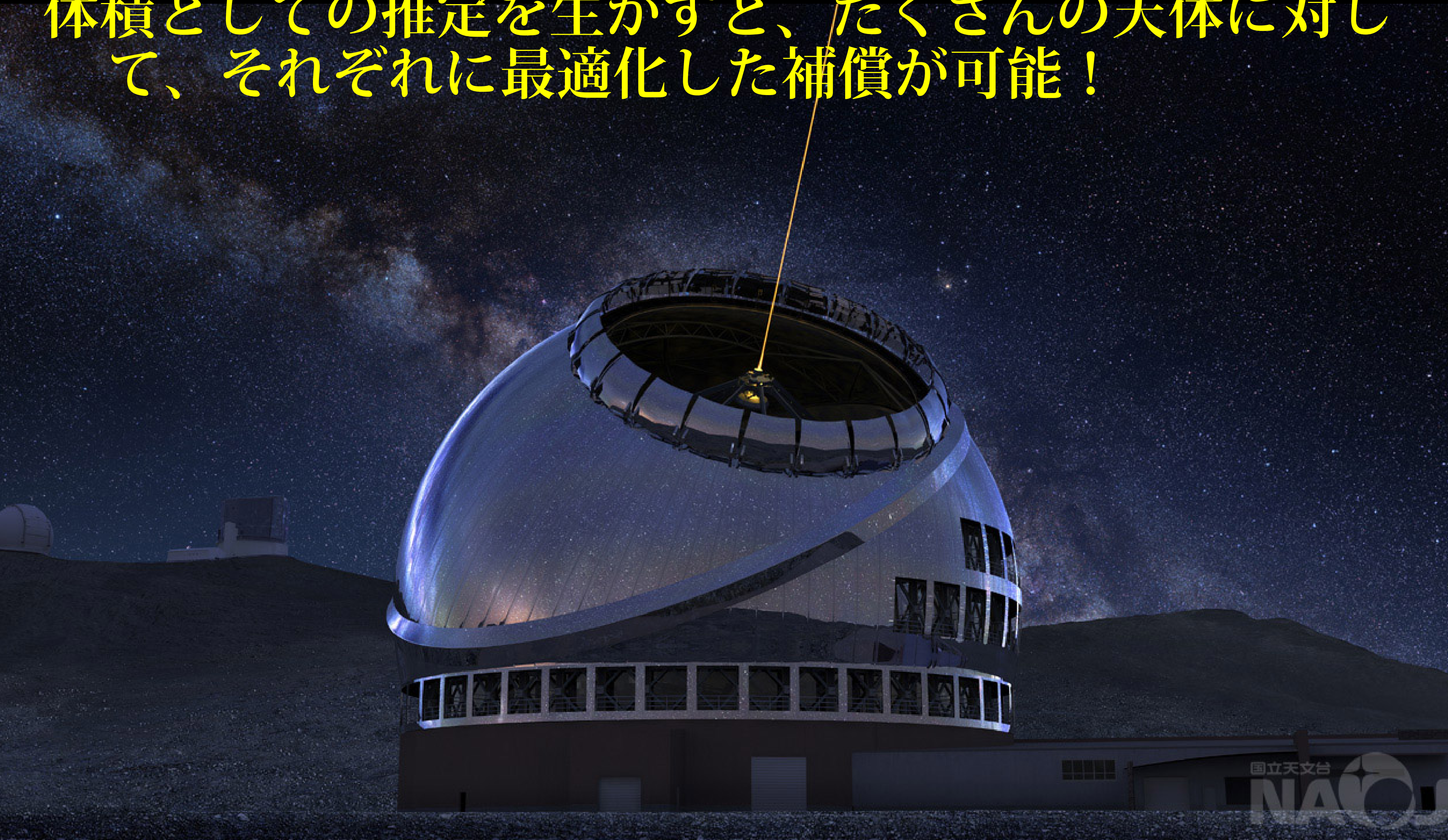
@ z=1.0 = 0.09kpc

@ z=2.5 = 0.09kpc

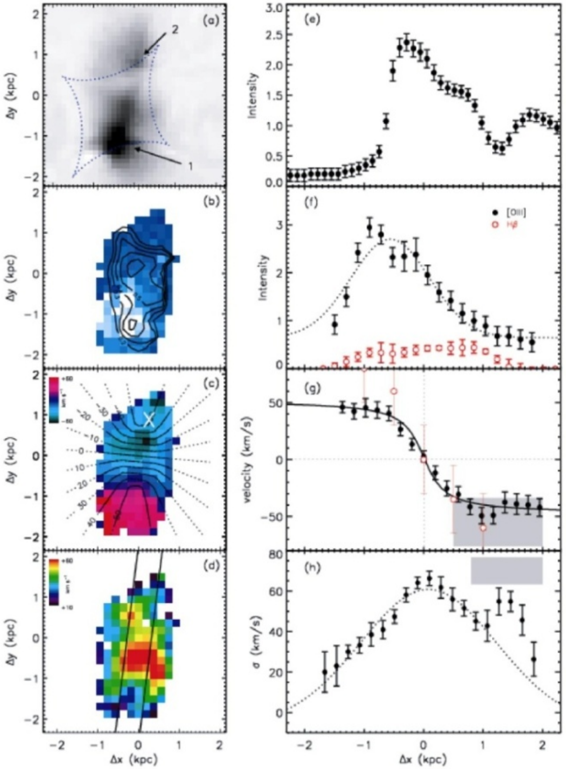
@ z=5.0 = 0.07kpc

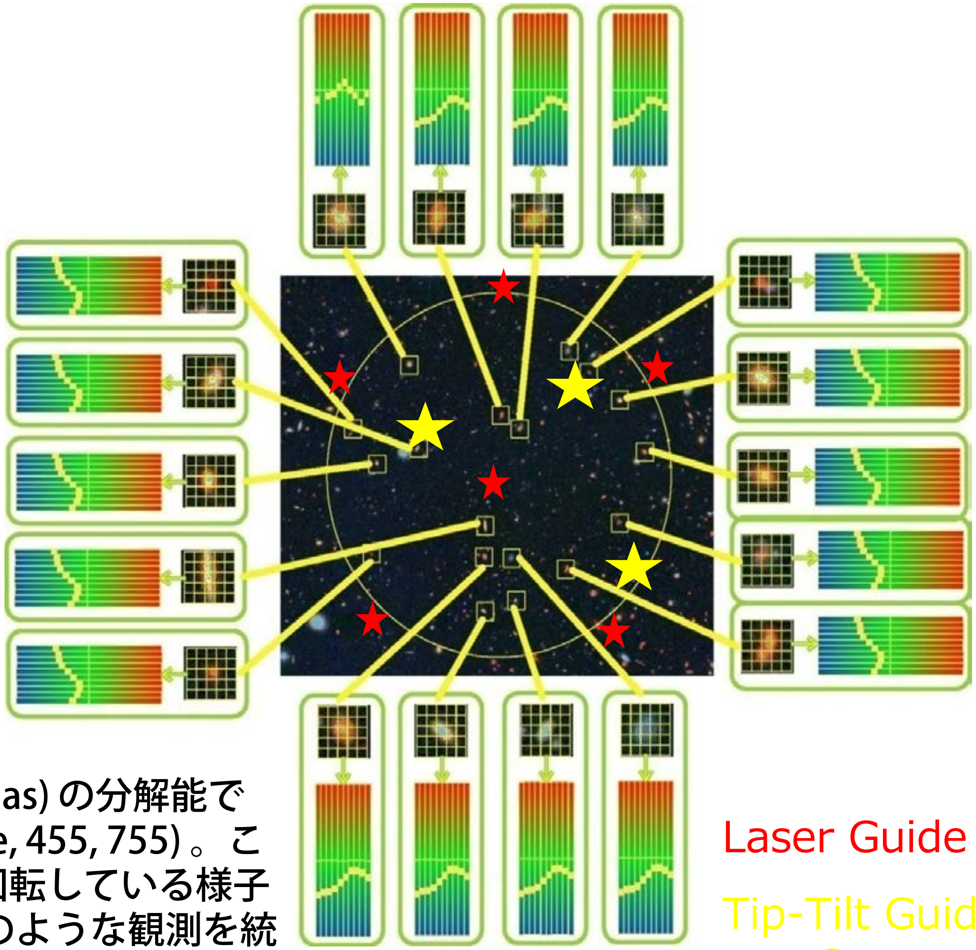
次世代超大型望遠鏡では鏡のサイズが大きくなり円錐効果が効くので、トモグラフィー補償光学が必須。

体積としての推定を生かすと、たくさんの天体に対して、それぞれに最適化した補償が可能！



TMT-AGE：
Analyzer for Galaxies in the Early universe
面分光により明かす銀河の内部構造の進化





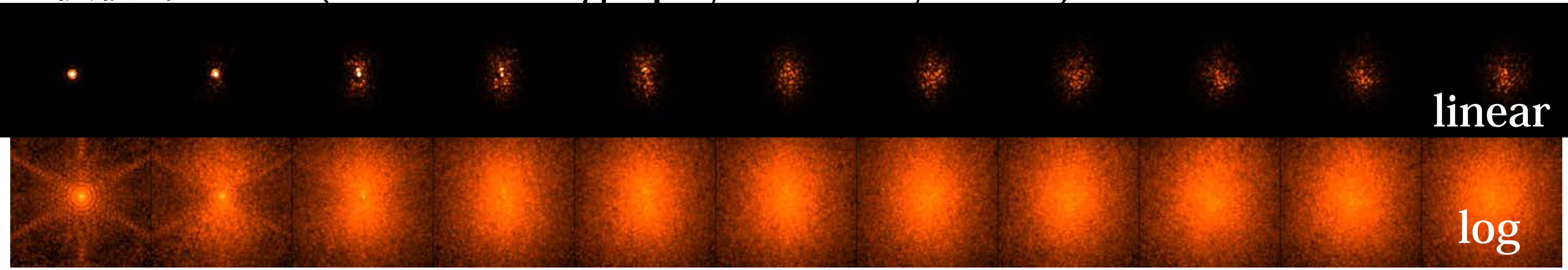
Laser Guide Star

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この視野で良い補償性能を達成する必要がある。

広視野・多天体補償光学をTMTで

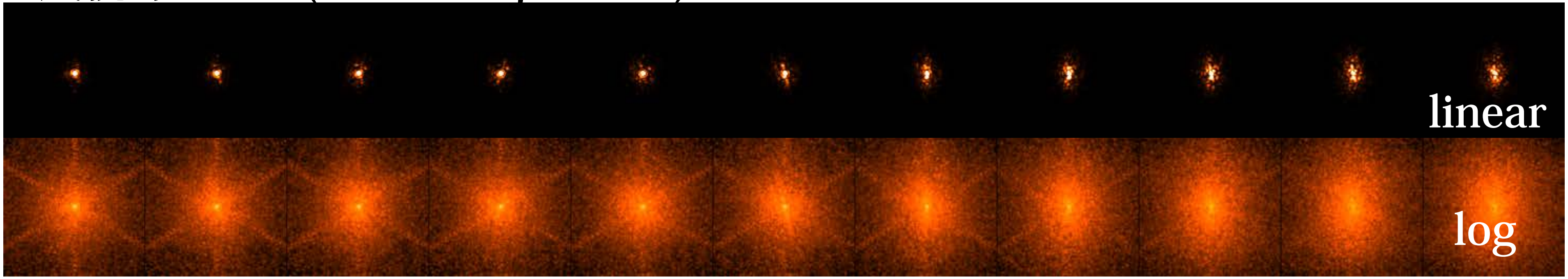
狭視野モード(“Laser Tomography Multi Layer AO”)



0” 60” 120” 180” 240” 300”

- Ensquared Energy within 0.05” ~50% up to 30”

広視野モード(“Multi-Object AO”)



0” 60” 120” 180” 240” 300”

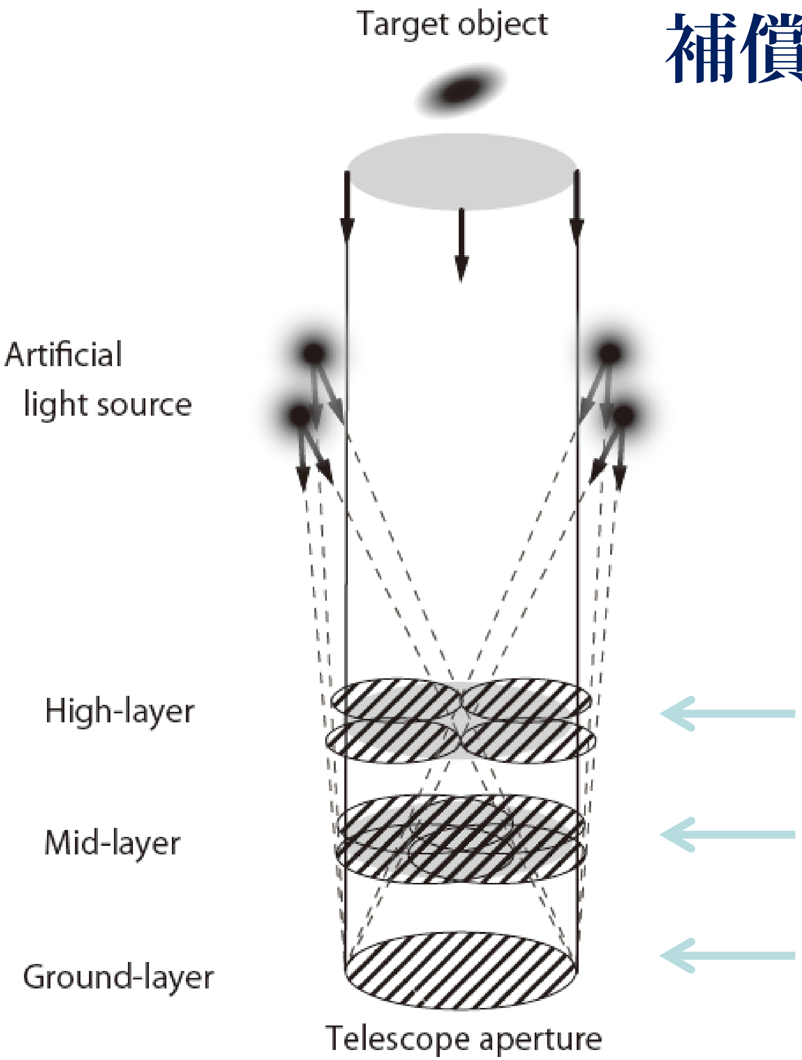
- Ensquared Energy within 0.05” ~50% up to 150” (<u>25 time larger area</u>)

今日の内容

1. 補償光学の原理と限界

2. 補償光学の新しいモード
   - 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

3. 補償光学の開発から見る装置開発の多様性



補償光学の中の「トモグラフィー」の難しさ

- 医療用CTスキャンと違い、測定方向の数や角度の違いが限られる。
- 事前情報を使った推定が重要になる。

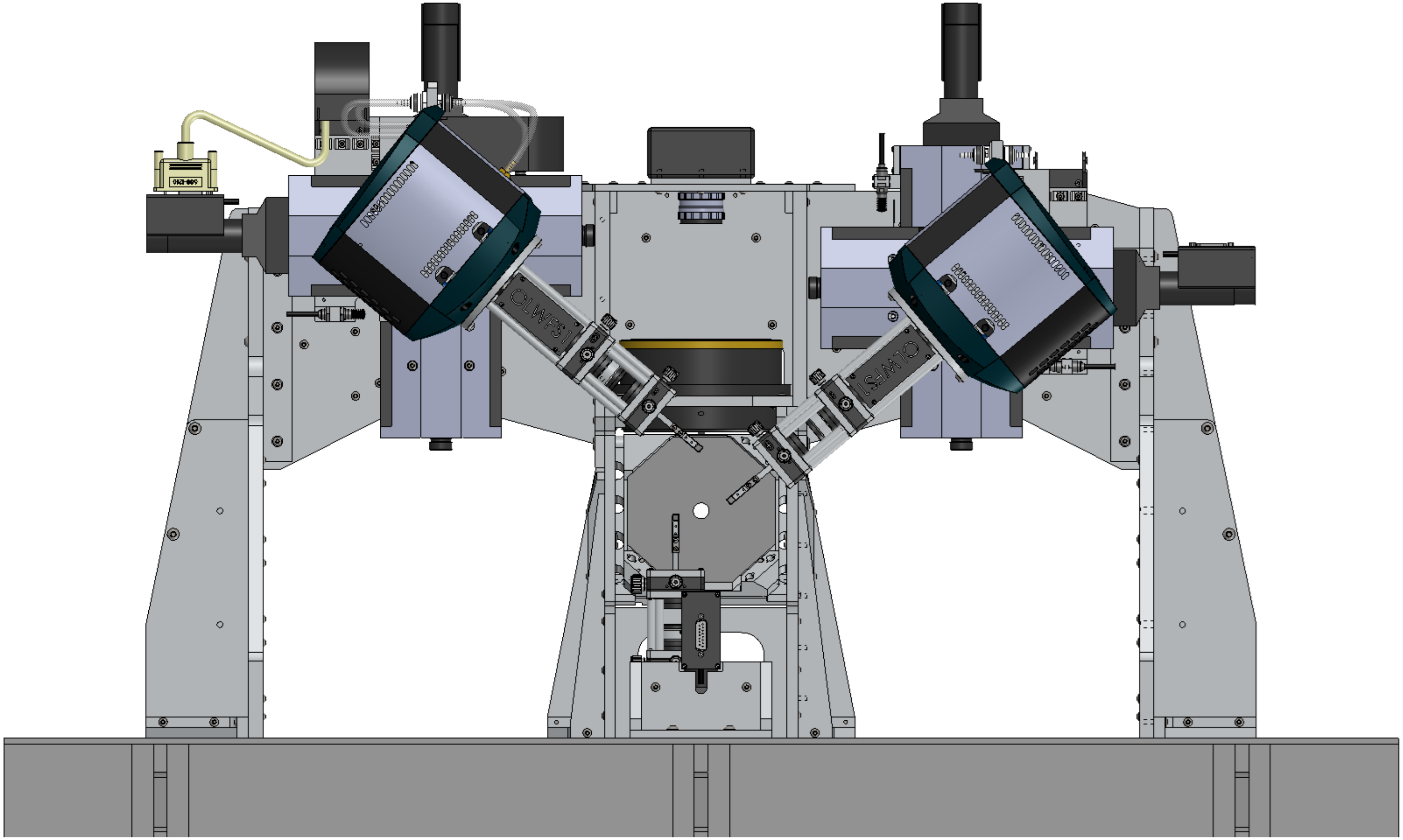
1. Turbulence height profile

Cannot be fully separated with the limited measurements.
Turbulence height profiles are used to set up the turbulence layer altitudes and strength of each layer

2. Wind height profile (for predictive estimation)

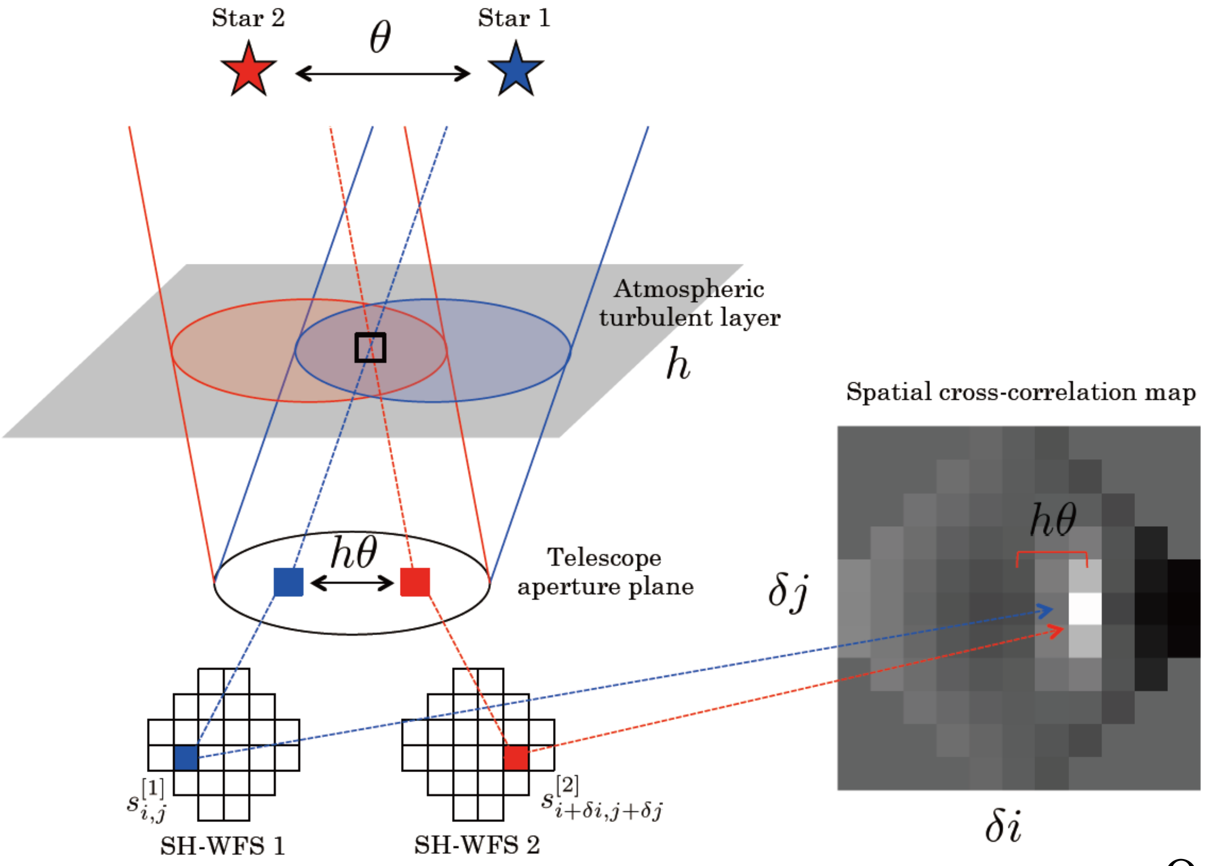
補償光学トモグラフィーの試験：Subaru/RAVEN

- 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ー推定を行う。2個の天体を同時に観測する。



From Colin Bradley

Tomography AO ingredient I : Turbulence height profile

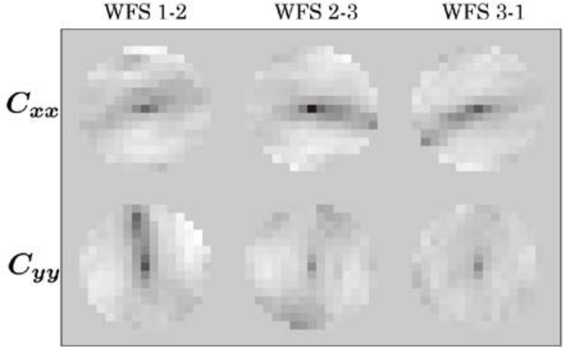


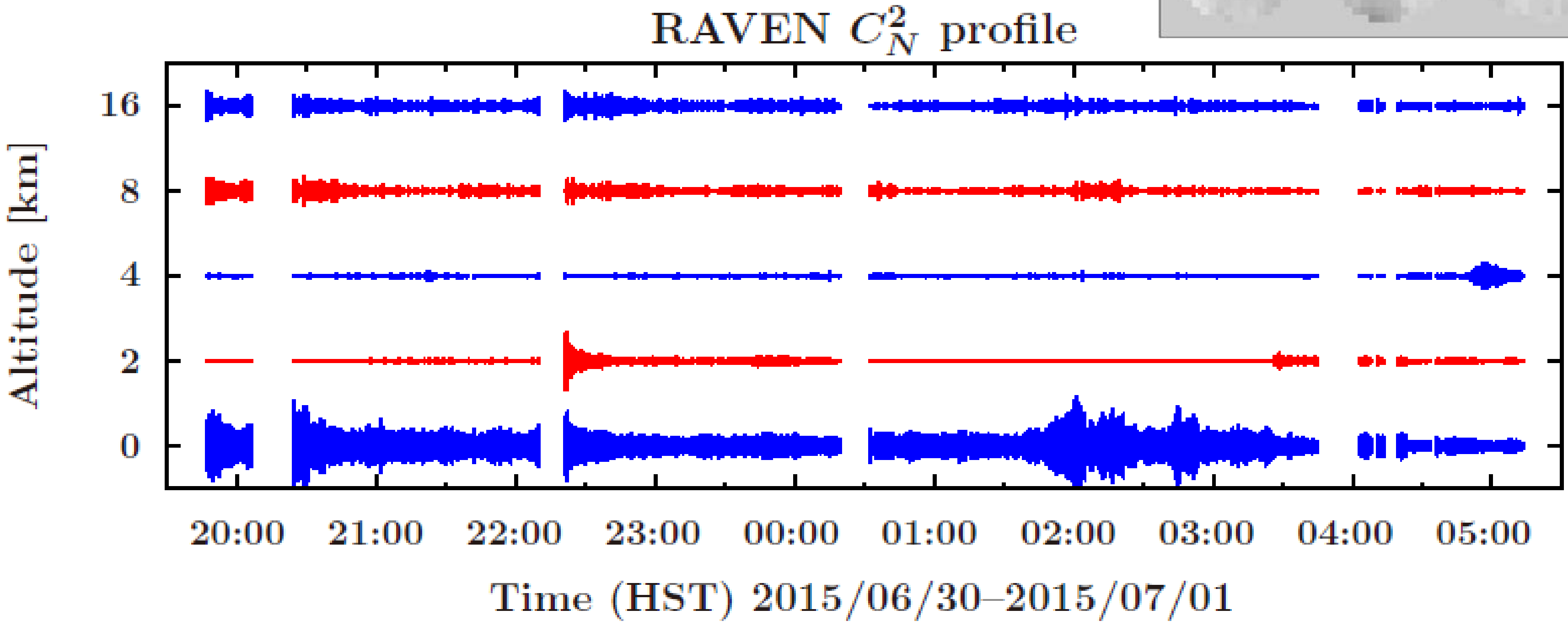
Ono et al. 2016

- Turbulence height profile can be estimated with taking cross-correlation between two WFSs monitoring two different reference stars.

Tomography AO ingredient I : Turbulence height profile

- Real-time turbulence height profiling with cross-correlation of multiple WFSs.

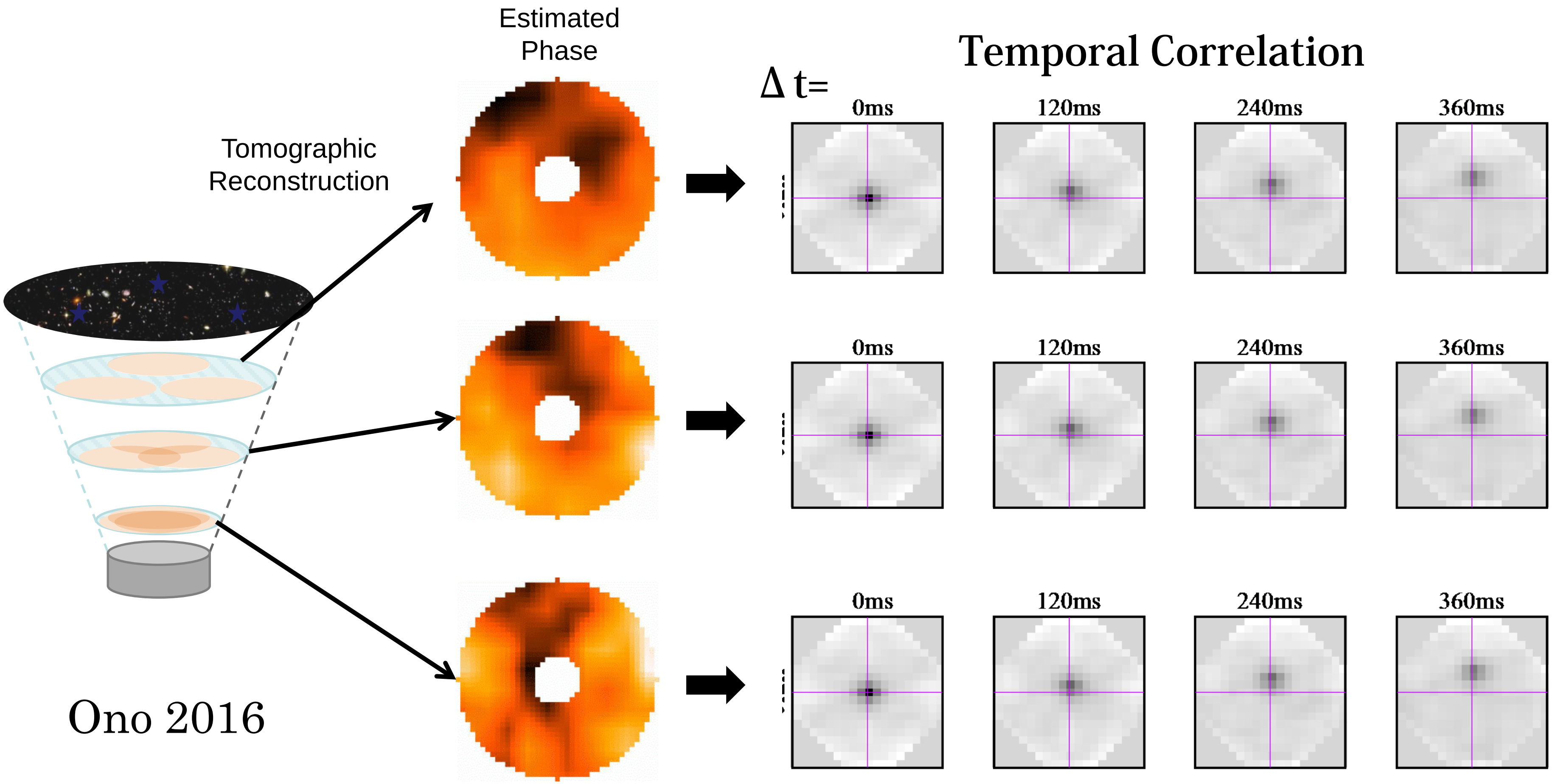




Ono et al. 2016 SPIE

Tomography AO ingredient II : Wind profile

- Wind direction and velocity of each turbulence layer can be estimated with cross-correlation of wavefront sensor data at two different time steps.



Ono 2016

Tomography AO ingredient II : Wind profile

- Result of a real-time wind profiling above Subaru.

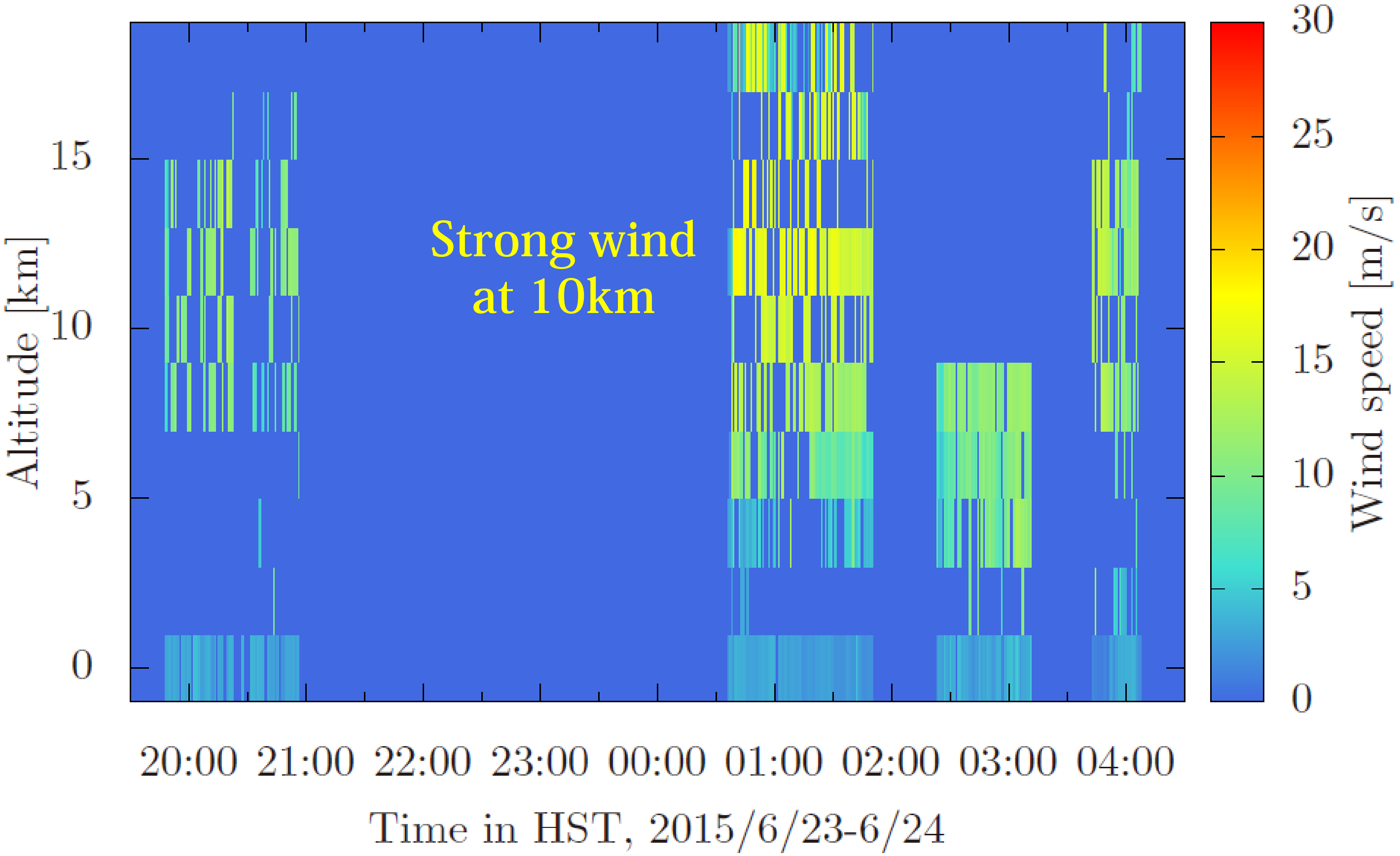
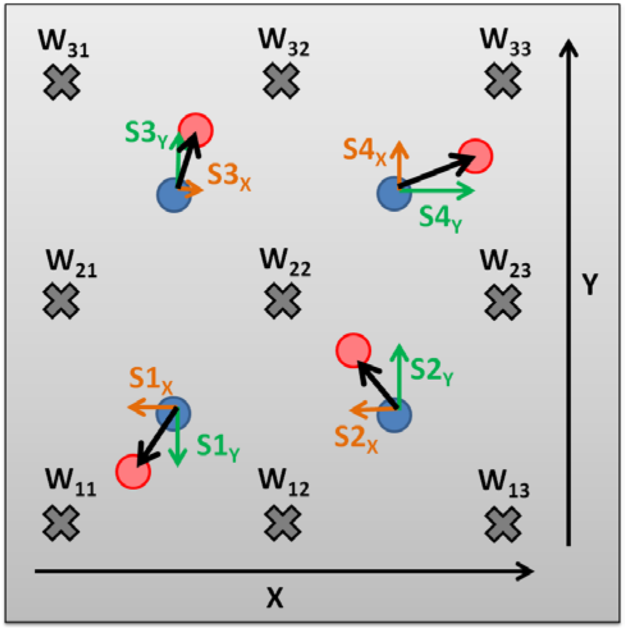


Figure. 6.12: Wind speed profile on June 23–24th, 2015.

Ono 2016

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

$$
\begin{bmatrix} S1_X \\ S1_Y \\ S2_X \\ S2_Y \\ S3_X \\ S3_Y \\ S4_X \\ S4_Y \end{bmatrix}
= 1/2
\begin{bmatrix}
1 & -1 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
-1 & -1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & -1 & 1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
0 & -1 & -1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 1 & -1 & 0 \\
0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 1 & -1 \\
0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 1 & 1
\end{bmatrix}
\begin{bmatrix} W_{11} \\ W_{12} \\ W_{13} \\ W_{21} \\ W_{22} \\ W_{23} \\ W_{31} \\ W_{32} \\ W_{33} \end{bmatrix}
$$

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)

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

グラフィックボードによる並列計算を用いて行列計算を高速に！

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。

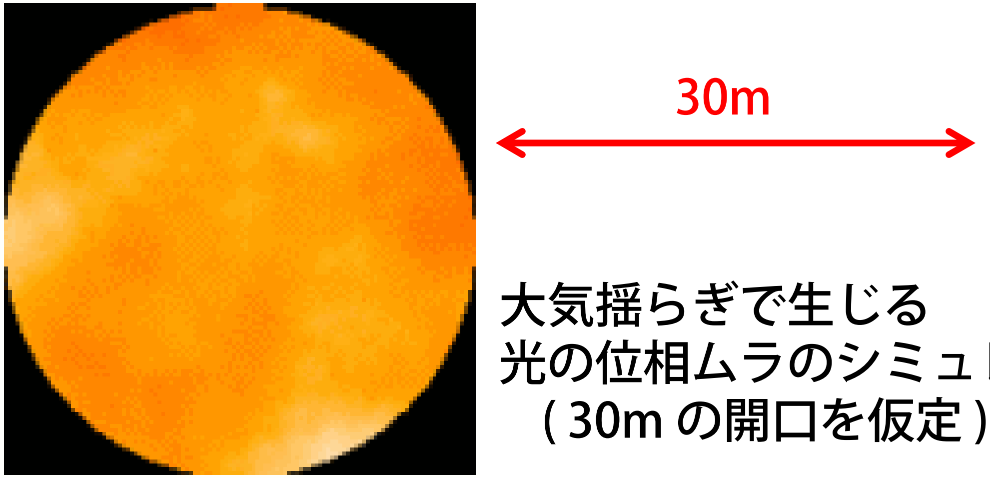
グラフィックボード GPUを用いた並列計算 GPGPU がリアルタイム計算機に用いられ始めている。性能の数字としては倍精度で 1Tfps が達成されている。今のところデータ転送の速度がボトルネックとなっているが、性能向上は著しい。

	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

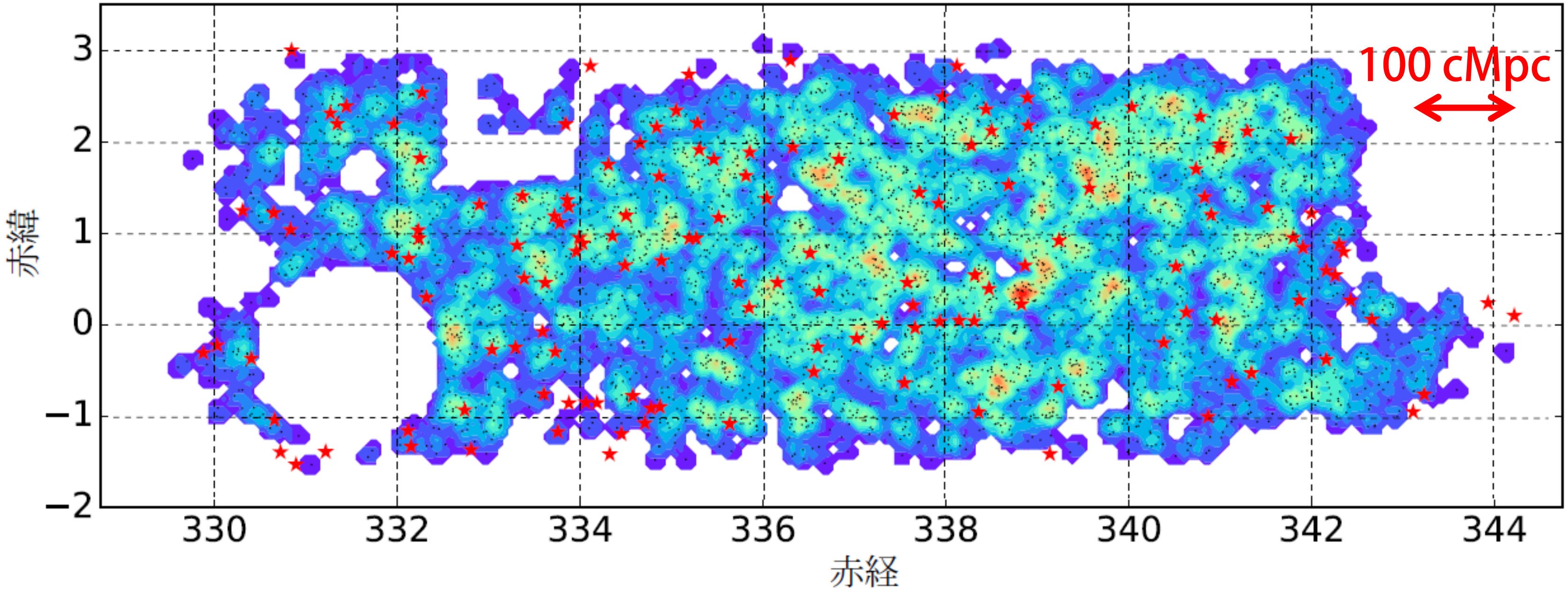
ちょっと情報は古い。。

位相乱れと銀河の大規模構造：共通点



大気揺らぎで生じる
光の位相ムラのシミュレーション
（30m の開口を仮定）

すばる望遠鏡HSCによる探査で得られた赤方偏移4の銀河(とクェーサー)の分布図
(He et al. 2018)



位相乱れと銀河の大規模構造：共通点から相違点へ

- 共通点と相違点

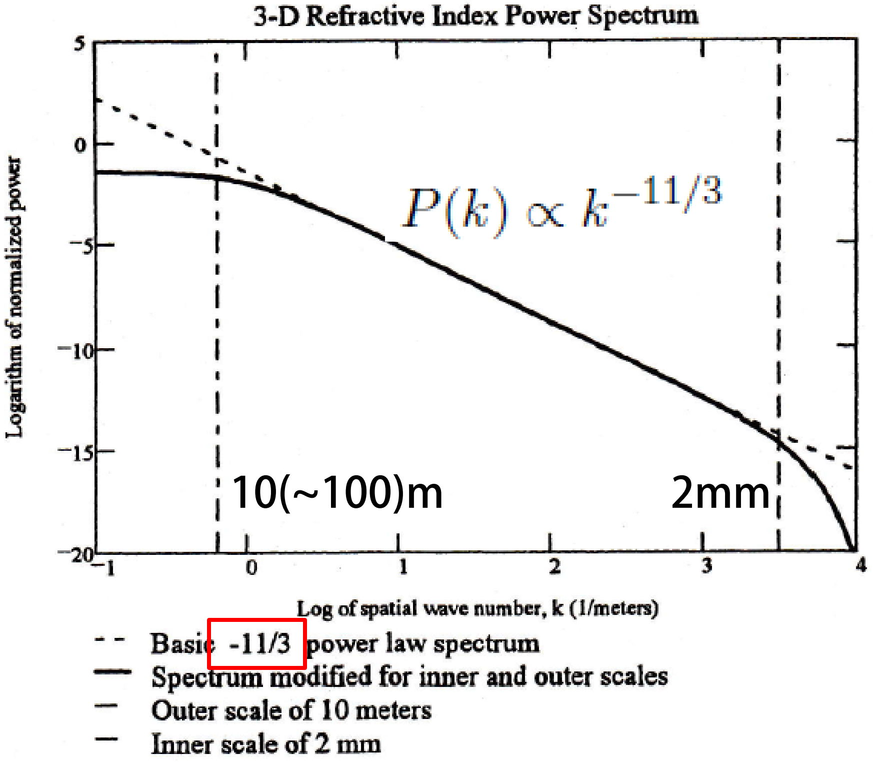
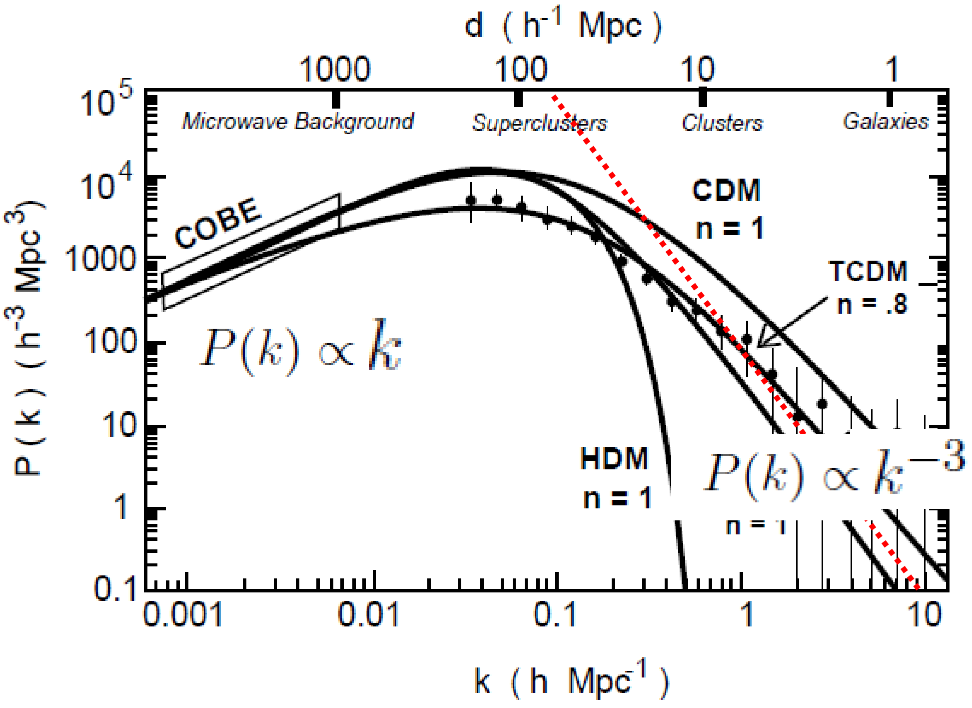


Figure 3.2 Three-dimensional power spectrum of refractive index variations. The vertical dotted lines represent spatial wave numbers ($2\pi/\lambda$) for an outer scale of 10 m and an inner scale of 2 mm. The drop-off above the inner scale is due to dissipation of the turbulent energy. The flattening of the spectrum below the outer scale is necessary to represent a finite energy input.

大気揺らぎのパワースペクトル
Hardy 1998



銀河分布のパワースペクトル
Garcia-Bellido 2005

位相乱れと銀河の大規模構造：共通点から相違点へ

- 共通点と相違点

大気揺らぎの評価：構造関数を用いて行う。異なる方向でどれだけ位相が異なるか(anisolpanatism)を知りたい！

$$D_\phi(\xi) =< |\phi(\mathbf{x}) - \phi(\mathbf{x}+\xi)|^2 >= C_n^2\ \xi^{2/3}$$

銀河分布の評価：相関関数を用いて行う。平均からのずれの相関を知りたい！

$$\rho(\vec{x}) \equiv \bar{\rho}(1 + \delta(\vec{x}))$$

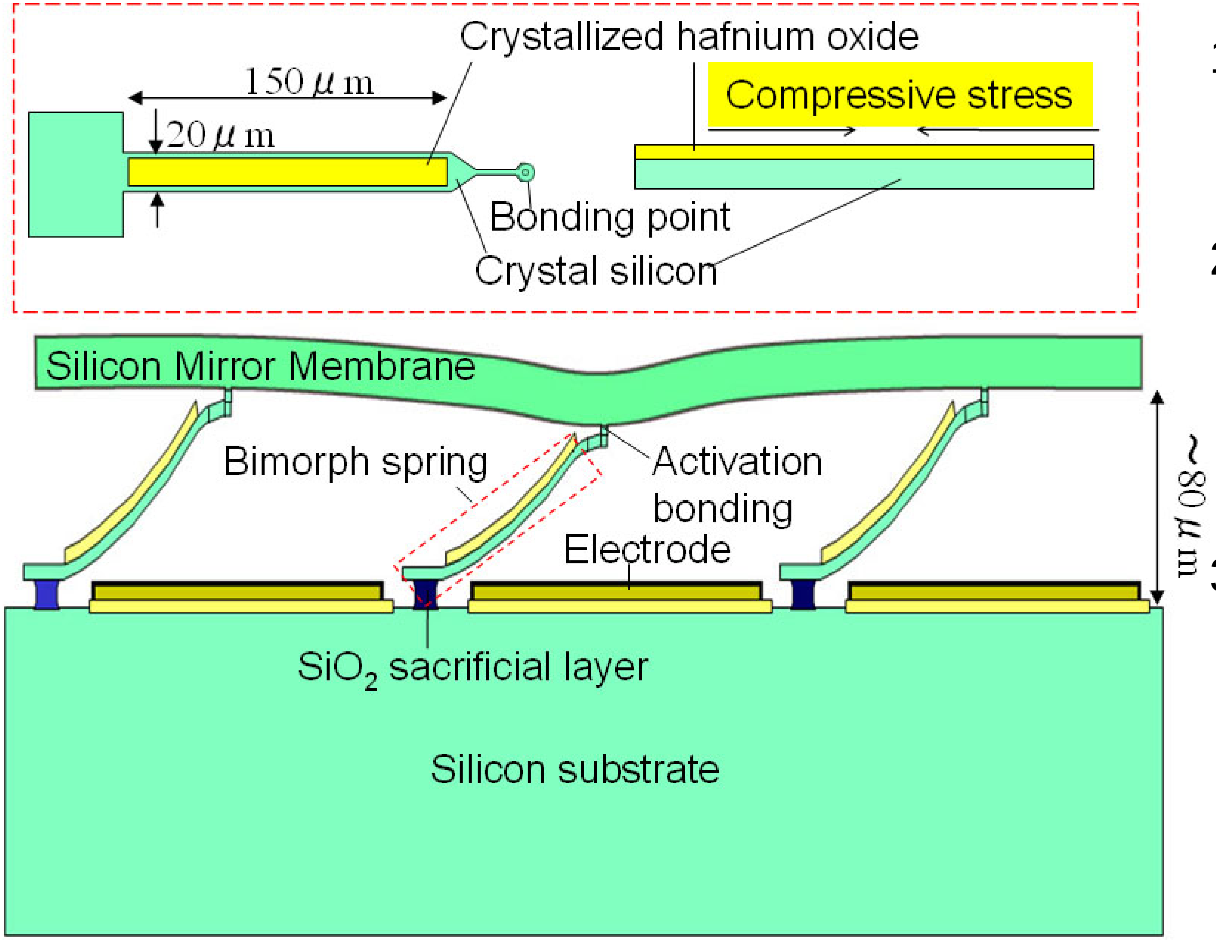
$$\xi(r) \equiv \langle \delta(\vec{x_1}) \cdot \delta(\vec{x_2}) \rangle$$

マイクロマシン技術を用いた可変形鏡の開発

小型 大ストローク多素子 MEMS 可変形鏡の開発：光 MEMS 羽根研

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/HfO2 Bimorph spring



High-stroke MEMS-DM Structure

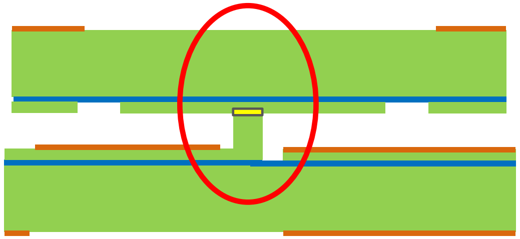
Original Points

1. HfO2 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.

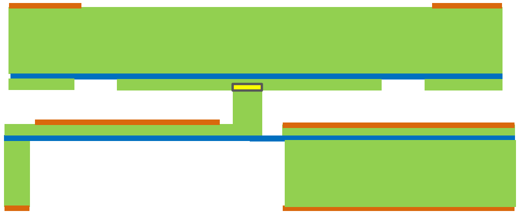
マイクロマシン技術を用いた可変形鏡の開発
MEMS 可変形鏡の製作プロセス

(c) Bonding and release

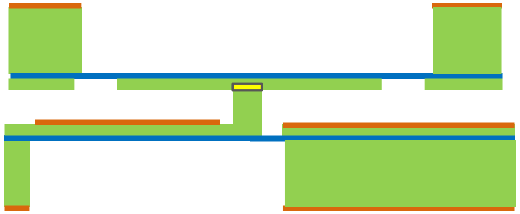
(1) Au-Si eutectic bonding



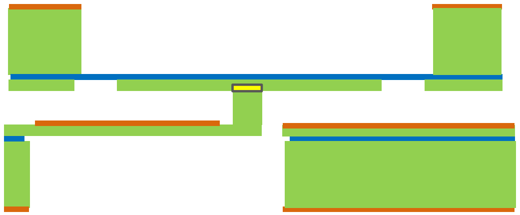
(2) Actuator chip handle layer etching



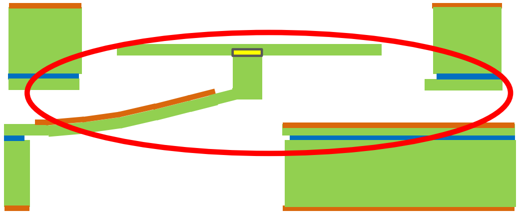
(3) Mirror chip handle layer etching



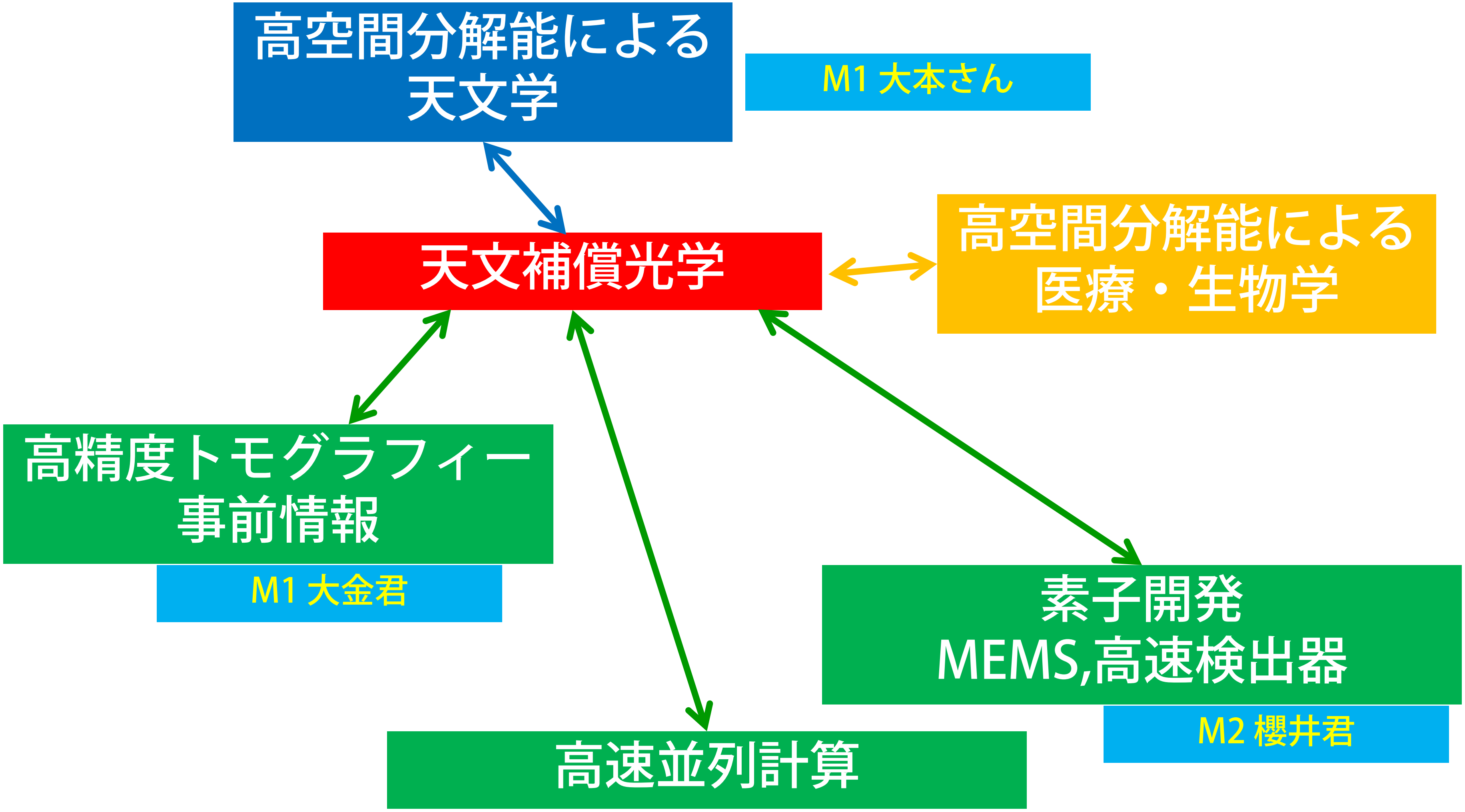
(4)SiO_2 Dry Etching (CHF_3)



(5) SiO_2 Dry Etching (CHF_3)



補償光学の開発現場の多様性



天文学を見直す：宇宙装置開発も一分野

- ネタはごろごろ落ちている。
- プロジェクト大型化の中で研究としての開発は？
- 「餅は餅屋」専門家に任せる？
- 「必要は発明の母」若手の人には専門にとらわれずいろんなことに手を出してもらいたい。
- 天文専攻から工学研究科の光学研究室の立ち上げへなどなど。
- どこに自分の興味を据えますか？

装置開発の現場の議論を続けています。

可視赤外線観測装置技術ワークショップ

これまでワークショップの資料は

http://gopira.jp/siryo.html

から見ることが出来ます。

日本補償光学情報交換会

これまでのワークショップの資料は

https://sites.google.com/site/jpnaobase/meeting

から見ることが出来ます。

開発現場の良い情報のまとめに！

2030年代に向けて
可視赤外線天文学の将来計画の議論
が始まっています。

光学赤外線天文連絡会
20 年後までのスペースミッションを考えるワーキンググループ
２０１８年２月６日

2030 年代の光赤外スペース将来計画に向けた検討報告

光学赤外線天文連絡会(以下、光赤天連)のサブワーキンググループとして、2020 年代後半に予定される 30m 口径地上望遠鏡 TMT の観測開始、2.5m 口径赤外線衛星 SPICA の打ち上げに続く、日本の光学赤外線天文学分野の基幹ミッションをどのように設定し、具体化

将来計画に興味のある若手の方は
光学赤外線天文連絡会の議論にもぜひ参加を！

http://gopira.jp

gopira-adm@gopira.jp

「2030年代の光学赤外線天文学を考える - 2018年秋 -」
9/10-9/12 国立天文台三鷹 にて開催

謝辞

- 紹介した Subaru/RAVEN プロジェクトは Univ. Victoria (Canada), NRC (Canada), Subaru telescope, と東北大学の協力で行われました。

First run in May 2014.

Second run in Aug. 2014.