

すばる次世代補償光学

- introduction -



2011/9/8 @ Osaka

Shin Oya (Subaru Telescope)

始めに

- 背景

「すばるの次期赤外線観測装置をどうするか？」

– 暗夜：可視主焦点の撮像(HSC)・分光(PFS)

– 明夜：赤外装置？ + 補償光学(AO: Adaptive Optics)

- 観測所内のワーキンググループで議論

「広視野AOがよかろう」

- すばる広視野AOの検討

– GLAO: Ground Layer AO (早野さん講演)

– MOAO: Multi-Object AO (秋山さん講演)

} この講演
予備知識

ユーザーである皆様からのフィードバック、特にサイエンス

概要

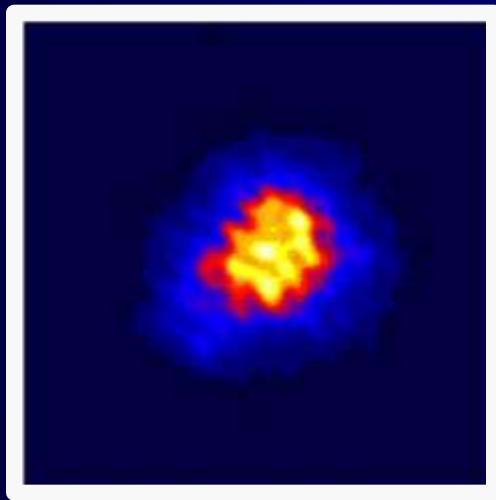
- 補償光学(AO: Adaptive Optics)の基礎
- 次世代AOの種類
 - 各種方式
 - 他望遠鏡のAOの紹介
 - すばるのAOのラインアップ
- すばる広視野AO
 - なぜ広視野?
 - 広視野化に必要なこと / どの方式?
 - すばるであることによる制約 / 星取表

補償光学(AO: adaptive optics)の基礎

なぜAOが必要？

『大気ゆらぎの影響で望遠鏡本来の解像力を発揮できない』

- 8m望遠鏡の回折限界：0.06" @ K-band
- マウナケアの典型的なシーイング：0.5" @ K-band

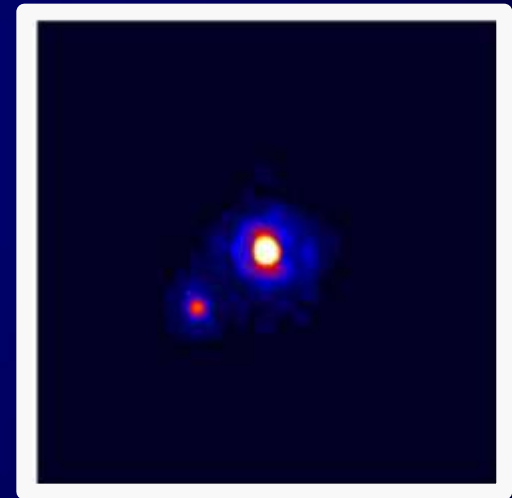


シーイング

AO無し
(FWHM: 0.4")



離角: 0.3"

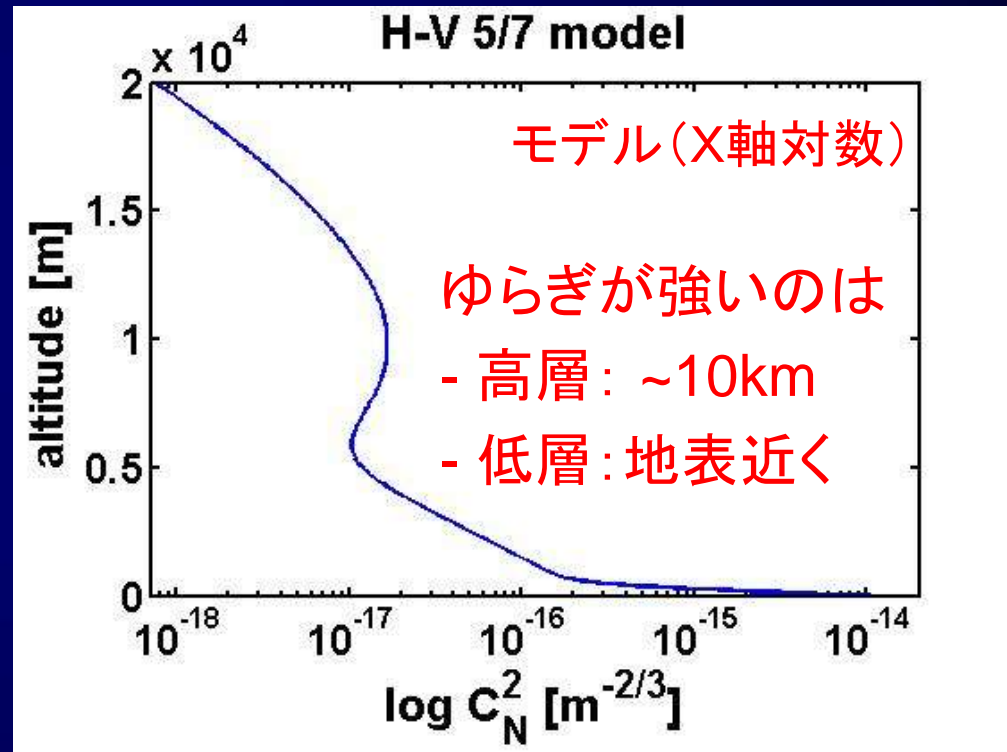
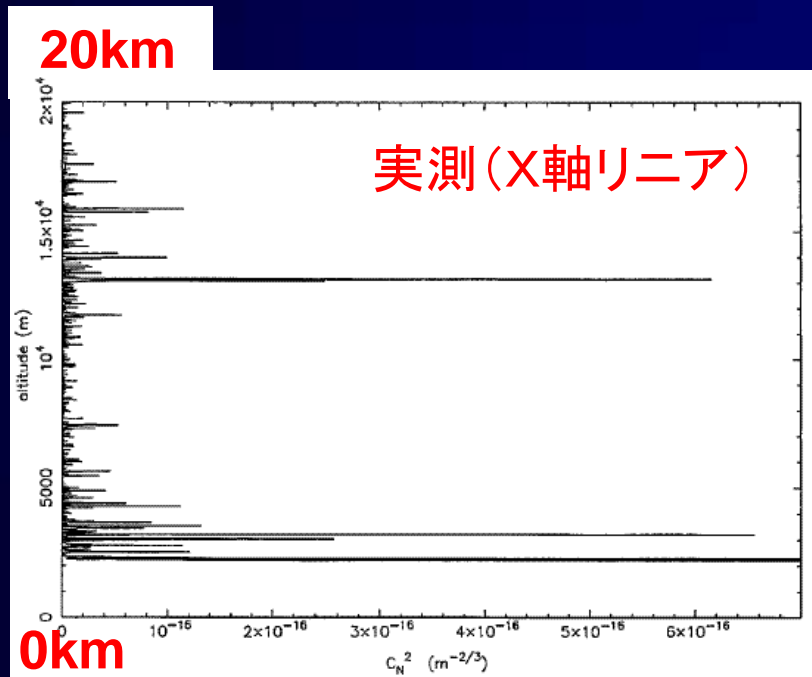


回折限界の分解能

AO有り
(FWHM: 0.07")

大気ゆらぎの層状構造

- 厚さ: $< \sim 100\text{m}$
- 高度分布 (X軸: ゆらぎ強度、Y軸: 高度)



各高度の層のゆらぎは独立で、形状一定のままその高度の風速で観測している星からの光ビームを横切るとみなせる。

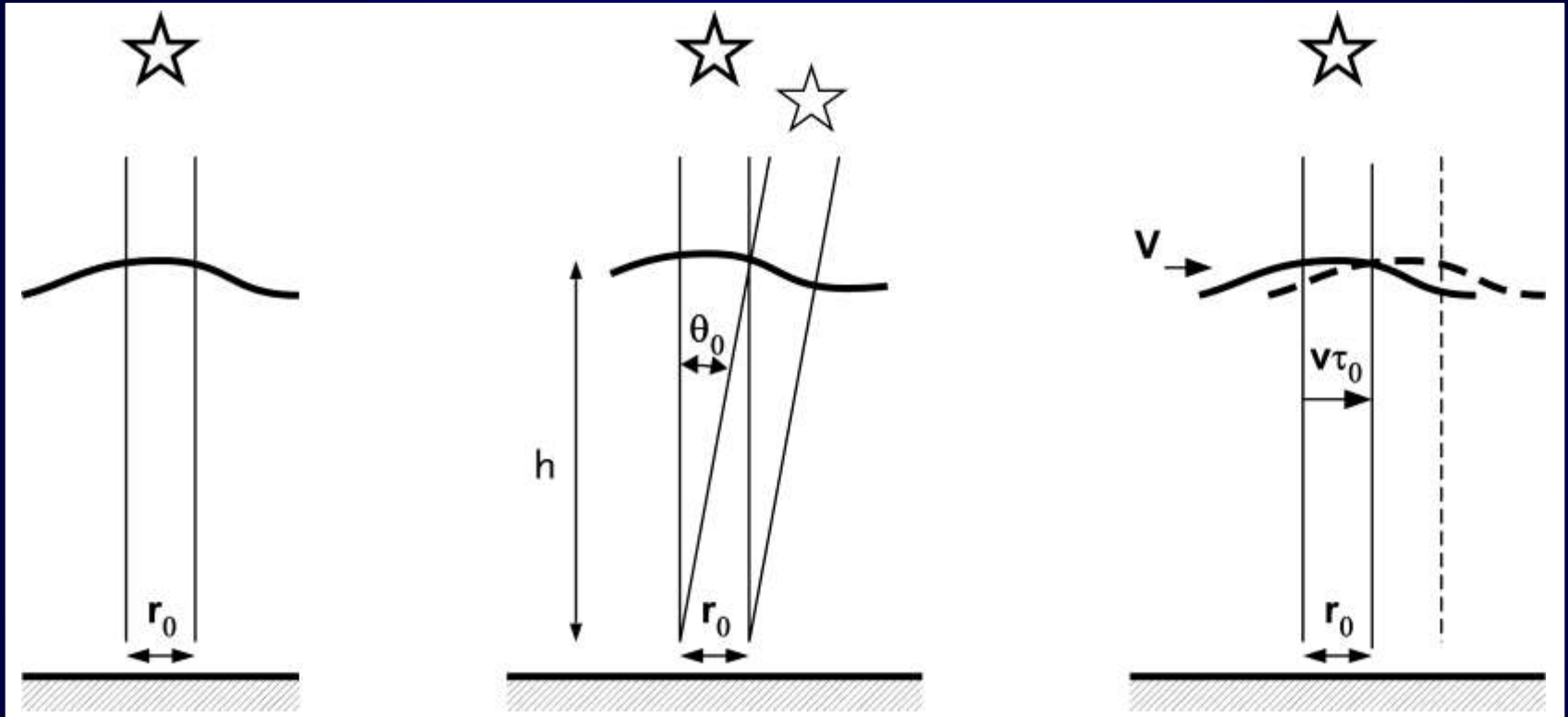
AOシミュレーションでは7層程度の位相スクリーンを用いる

大気ゆらぎのパラメータ

• Fried's parameter

• isoplanatic angle

• coherent time



角分解能相当の開口直径

$$r_0 \propto \lambda^{1.2}$$

単一ゆらぎ層(高度H)なら

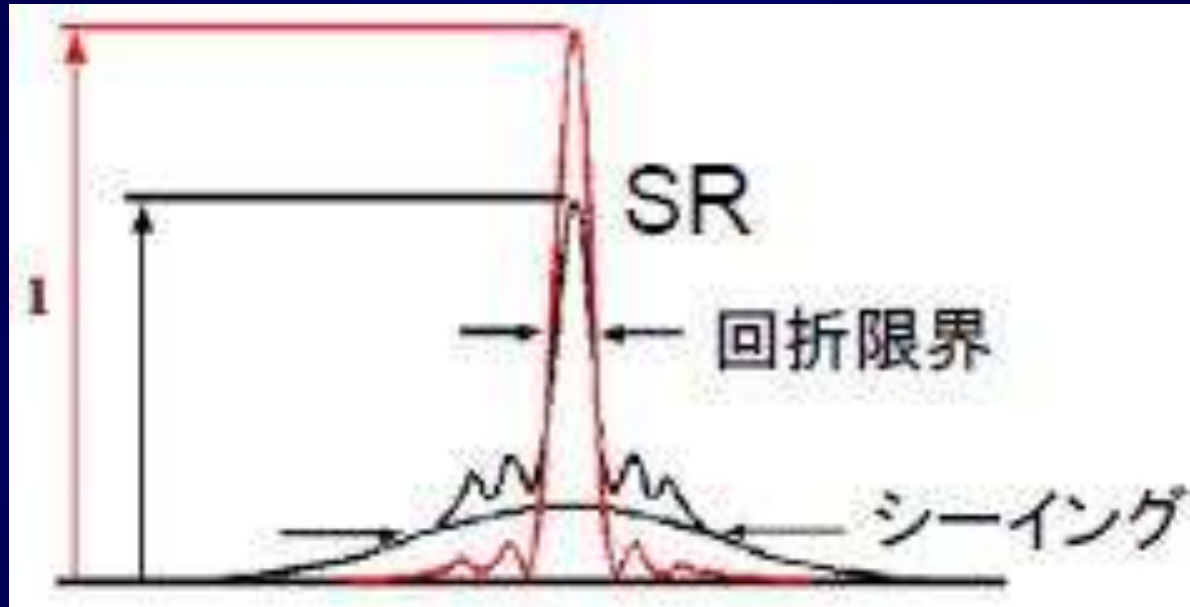
$$\theta_0 \sim r_0 / H \propto \lambda^{1.2}$$

全ゆらぎ層で風速Vとすると

$$\tau_0 \sim r_0 / V \propto \lambda^{1.2}$$

$$\text{seeing} \sim \lambda / r_0 \propto \lambda^{-0.2}$$

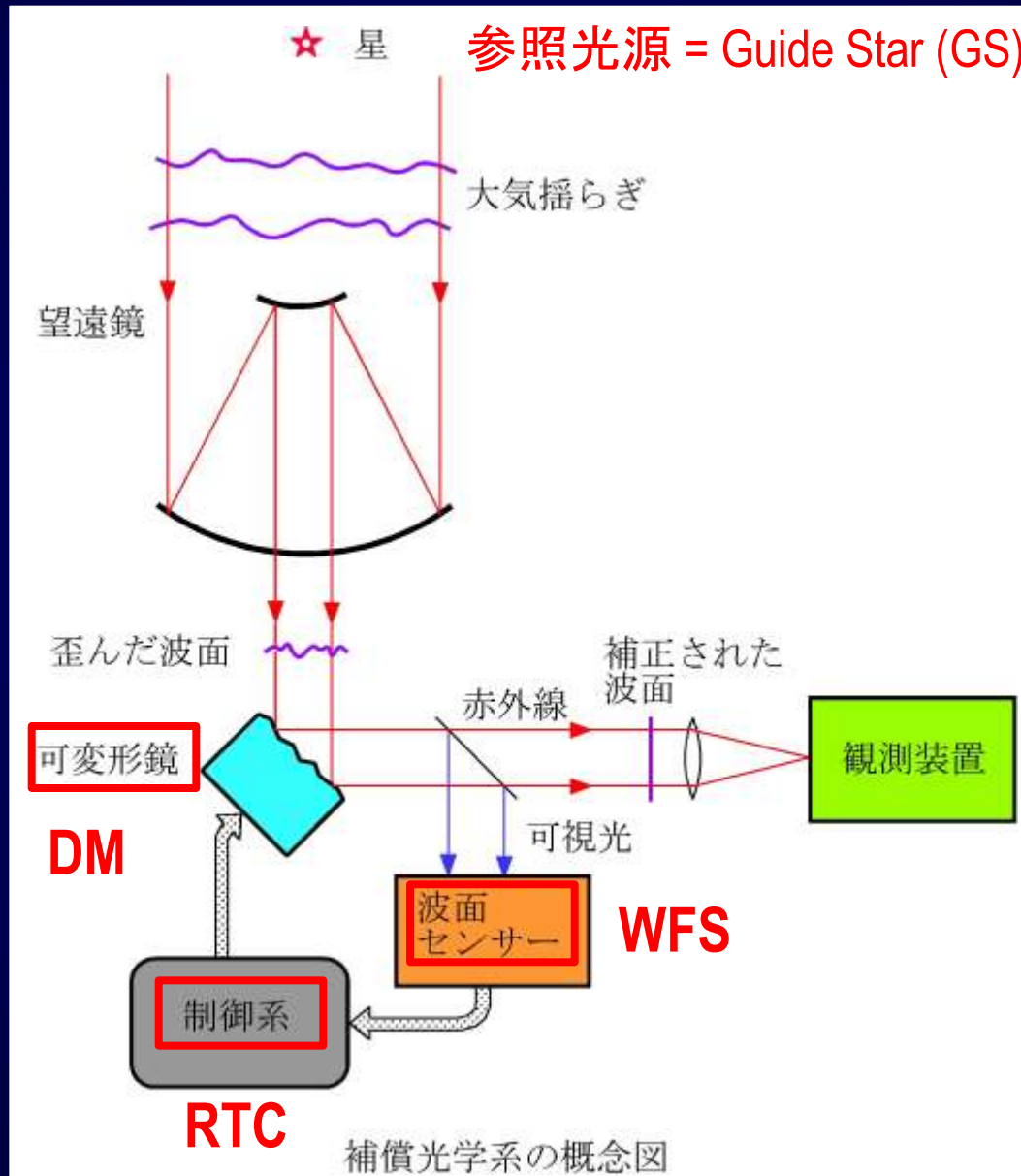
ストレーラ比



$$\begin{aligned} \text{SR} &\sim \exp(-\sigma^2) && \sigma: \text{RMS波面誤差 [rad]} \\ &= \exp[-\{2\pi(\sigma_\lambda/\lambda)\}^2] && \text{波長 } \lambda [\mu\text{m}]; \sigma_\lambda: \text{RMS波面誤差 } [\mu\text{m}] \end{aligned}$$

$\sigma^2 = 1$ の時、SR ~ 0.37

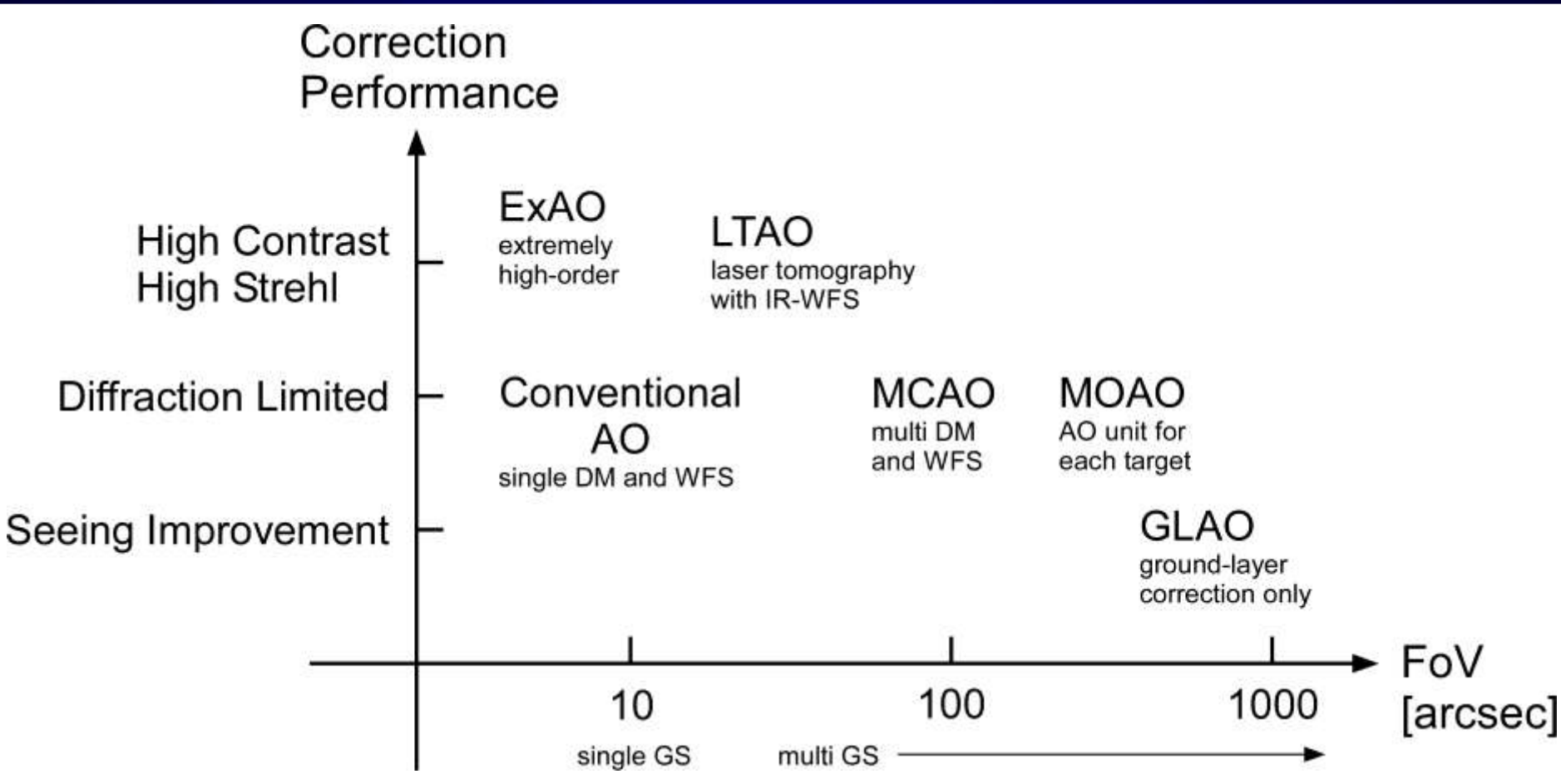
AOの基本構成



次世代のAO

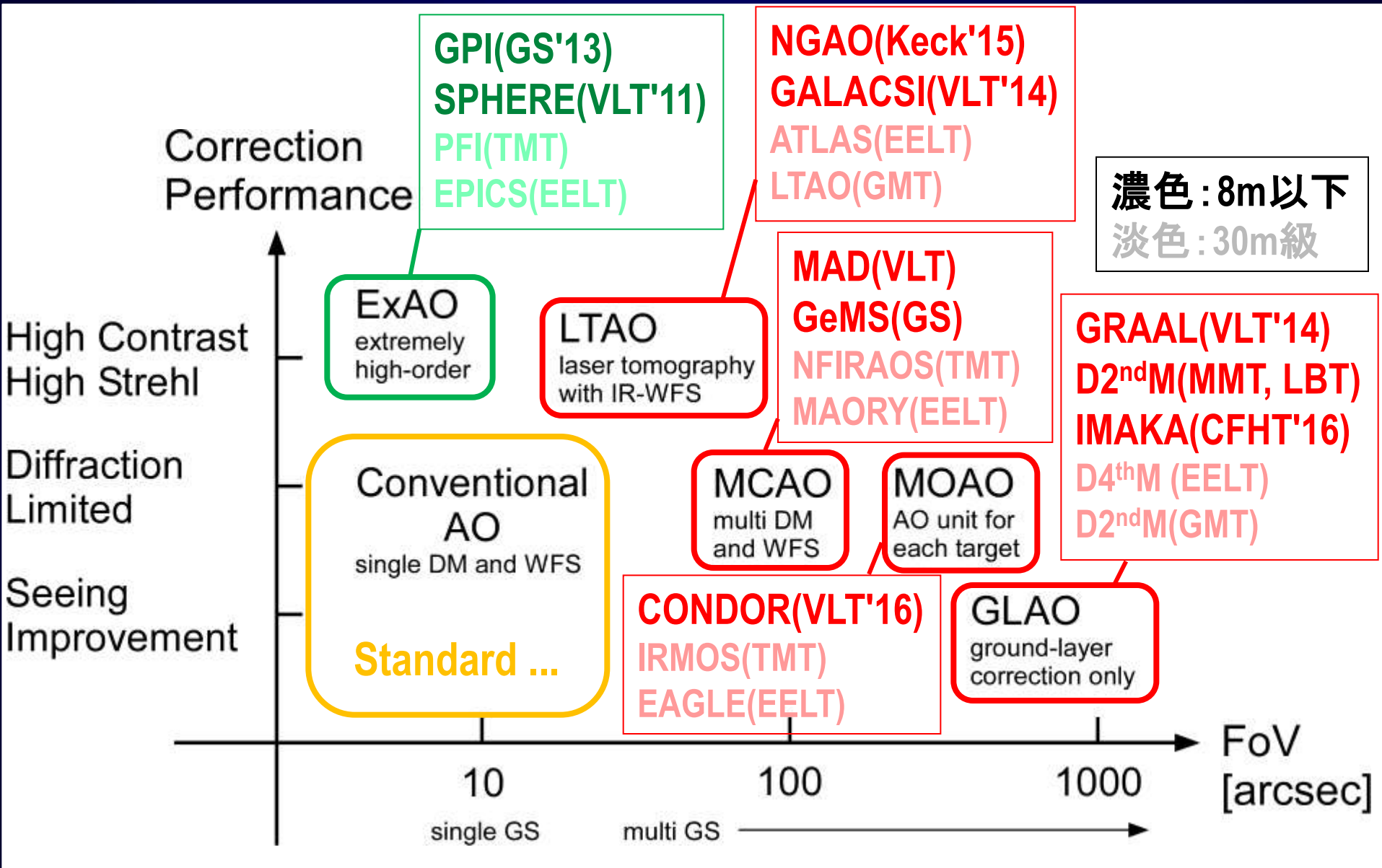
次世代AOの種類

より細かいゆらぎ
(素子数増)

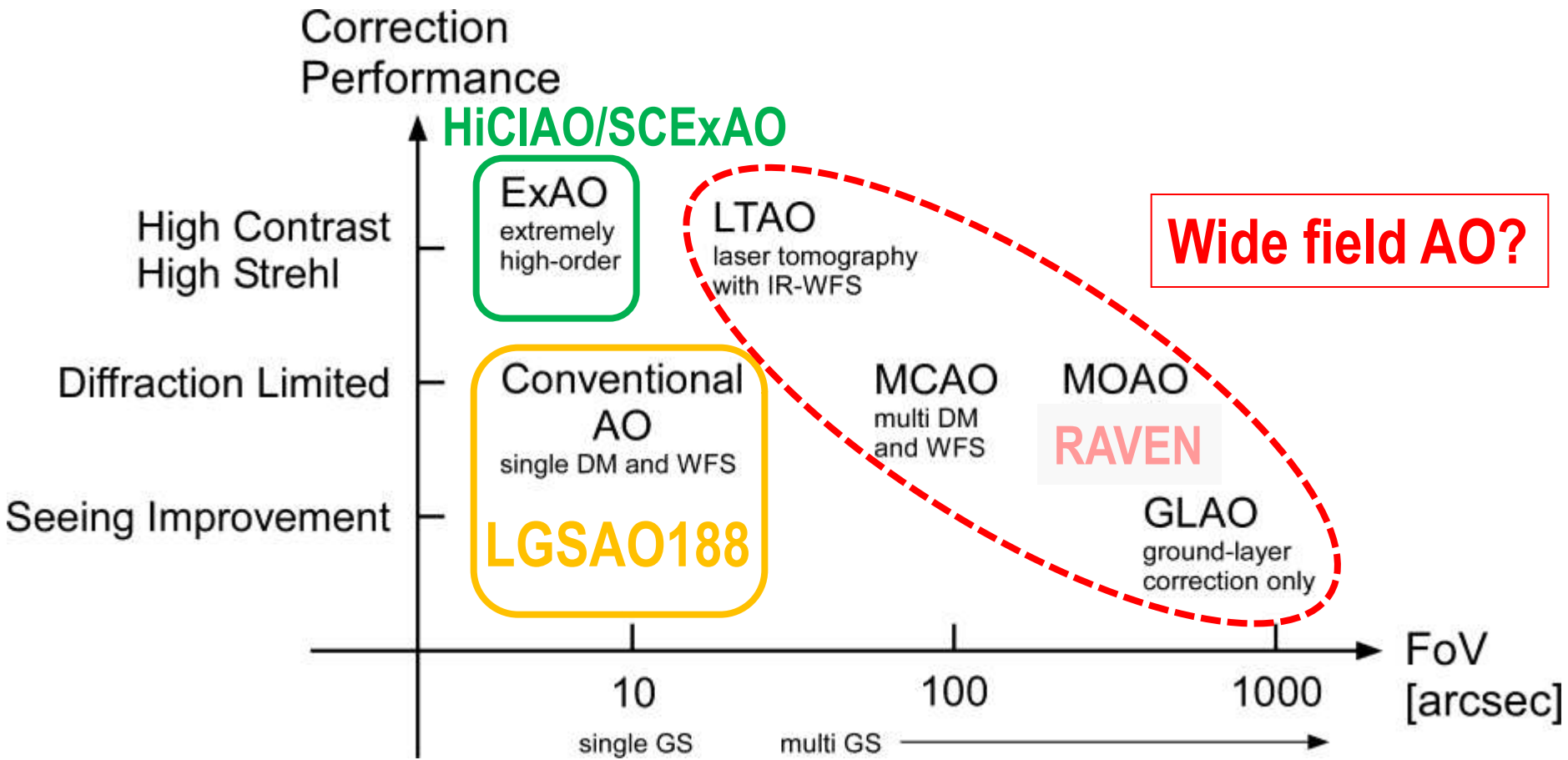


より多くのゆらぎ層
(可変形鏡・波面センサ数増)

世界のAOの分布



すばるのAOラインアップ

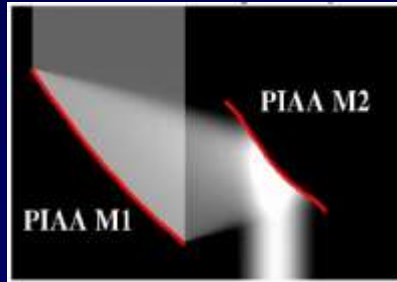
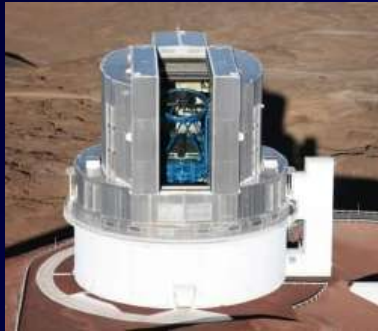


システム例: ExAO

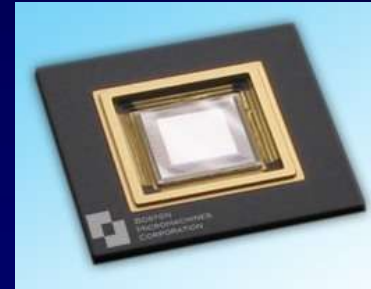
オンスカイ試験段階

SCEXAO (2011~)

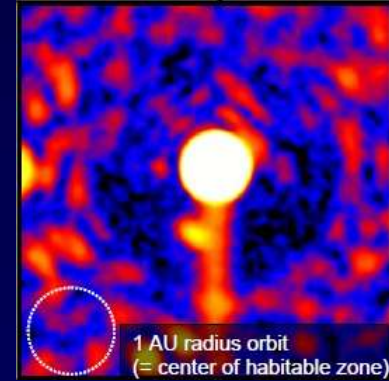
Subaru (8m) @ Hawaii



Phase-Induced
Amplitude Apodization
coronagraph

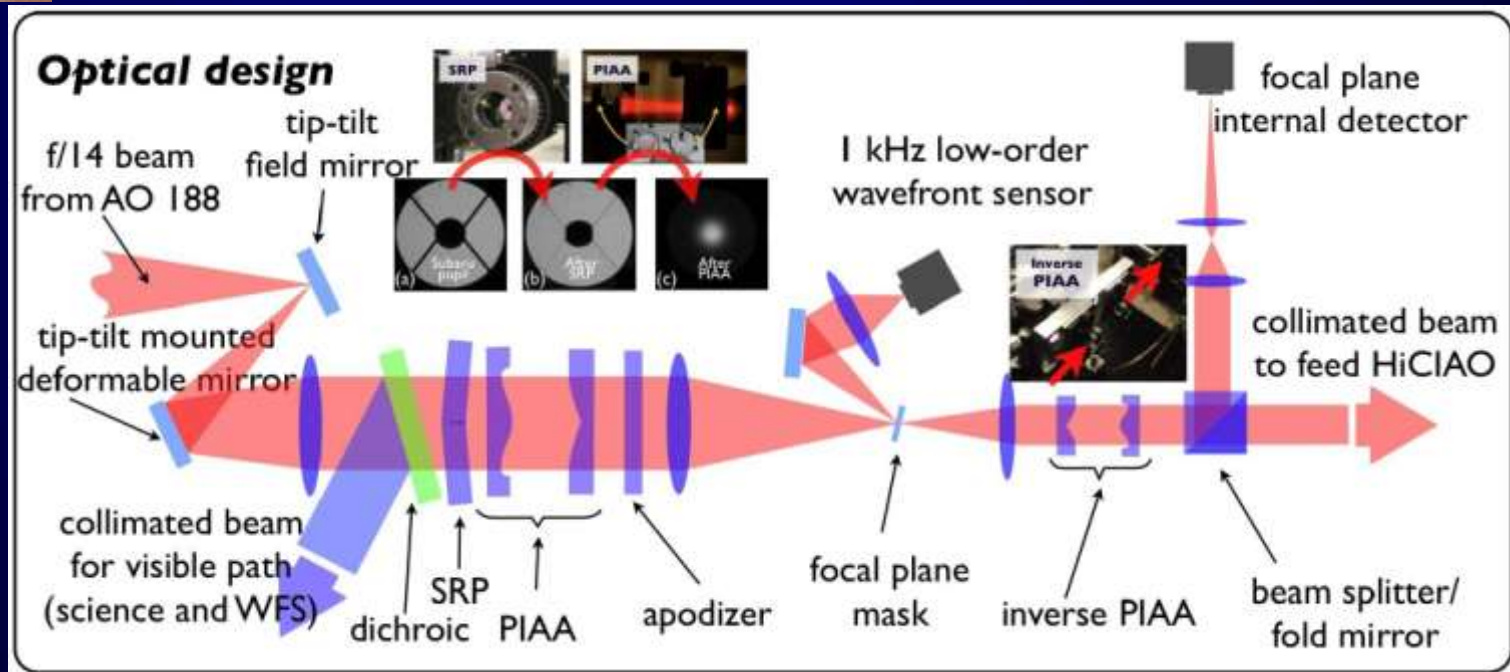


32x32 MEMS DM



0.5~3λ/D

- 2e-7 (raw w/ PIAA)
- 3e-9 (speckle cntrl)



システム例: MCAO

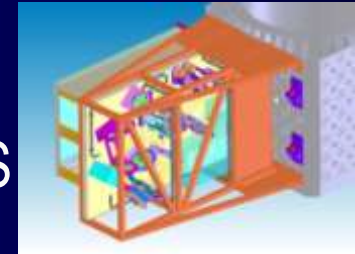
MAD (1stL: 2007/3)
VLT (4 x 8m) @ Chile

サイエンス段階

GeMS (1stL: 2011/4)
Gemini-S (8m) @ Chile

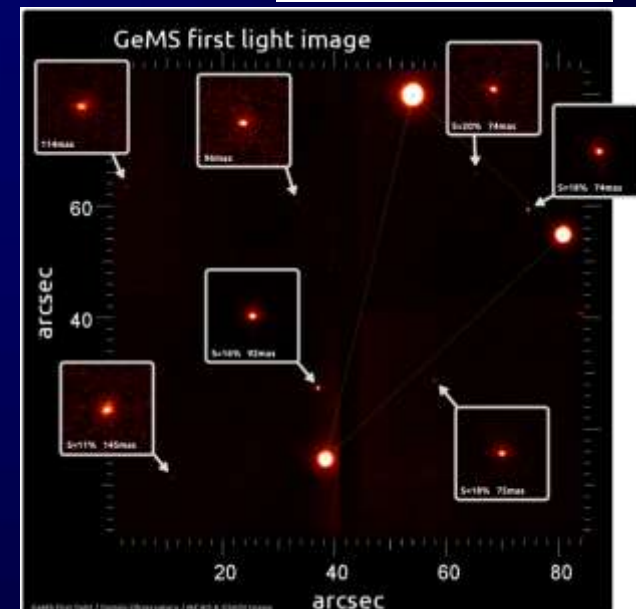
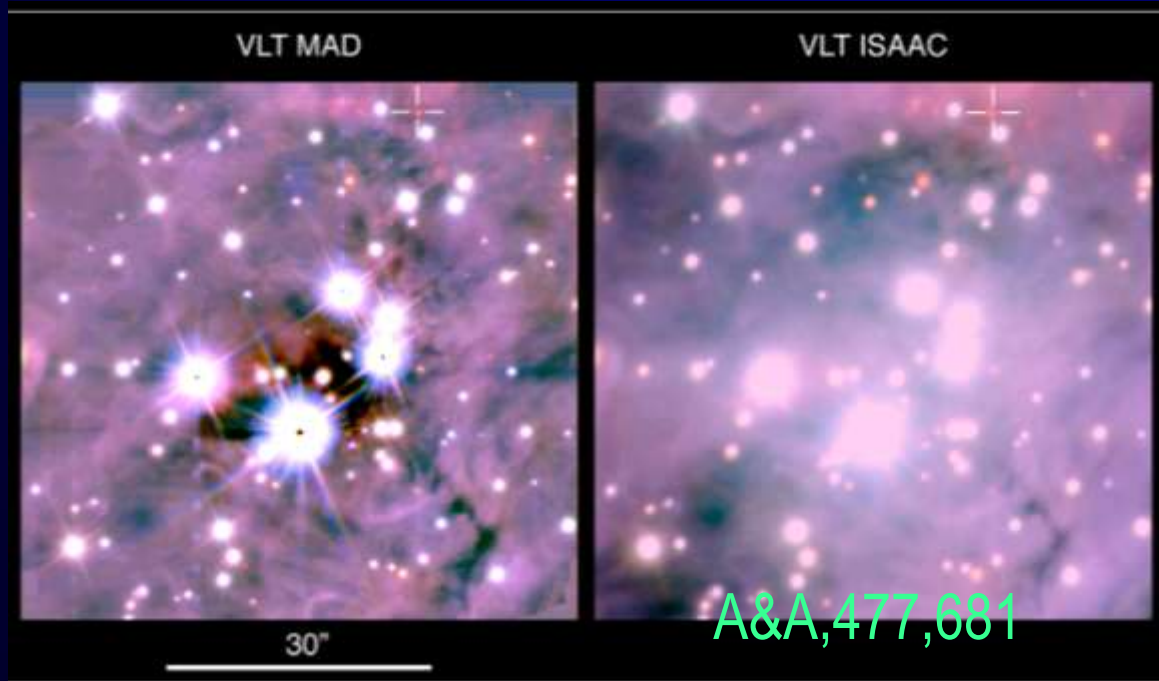
FoV: 1' (2') □
SR: 0.2 @ K

FoV: 1' (2') □
SR: 0.2 @ K
(spec. 0.8)



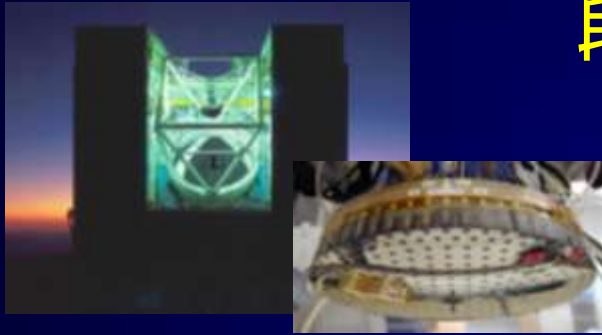
2DM, 3NGS

3DM, 5LGS



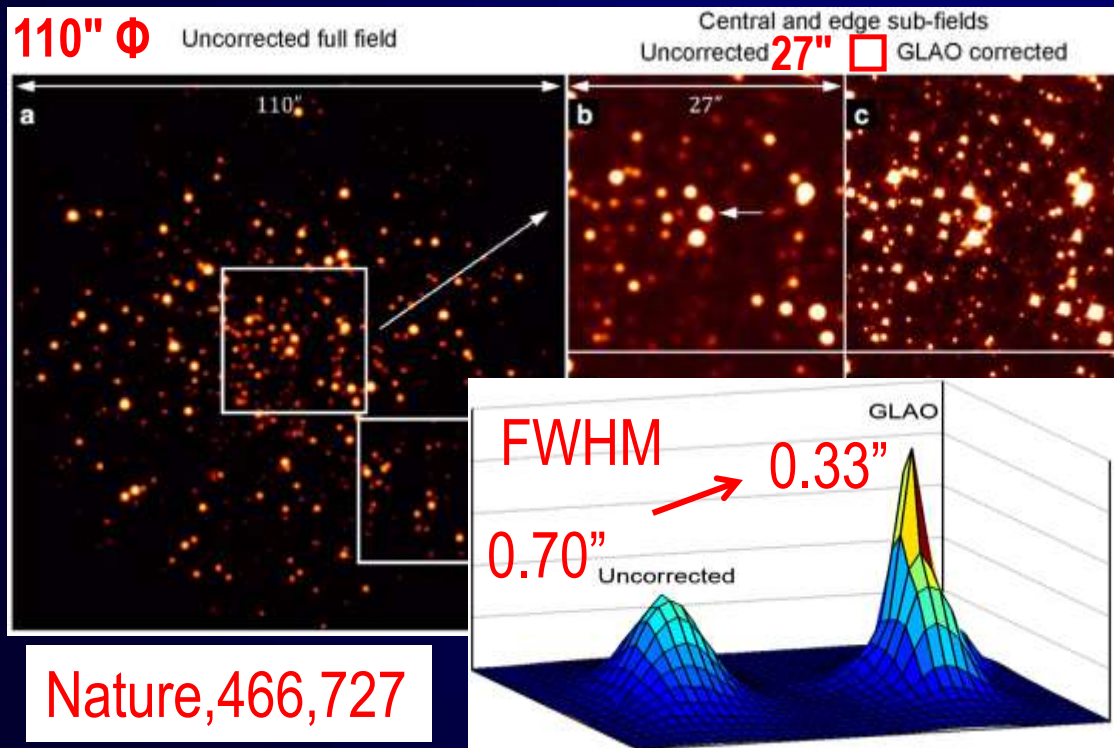
システム例: GLAO

MMT (6.5m) @ Arizona **コミッショニング**
段階

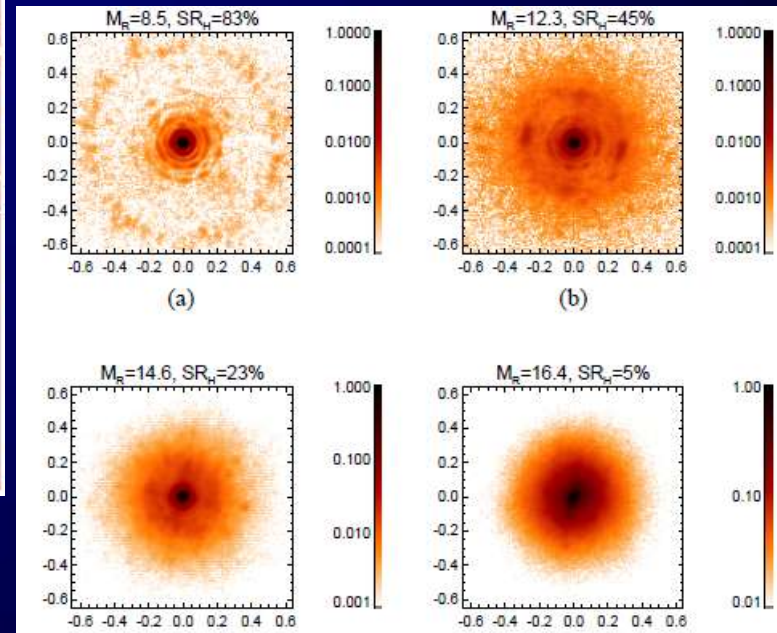


FoV: 1.8' ϕ (カメラ)
FWHM: 0.2" @ K
0.3" @ J,H

LBT (2 x 8m) @ Arizona



可変副鏡SCAO: SR>80% @ H



システム例: GLAO

検討段階

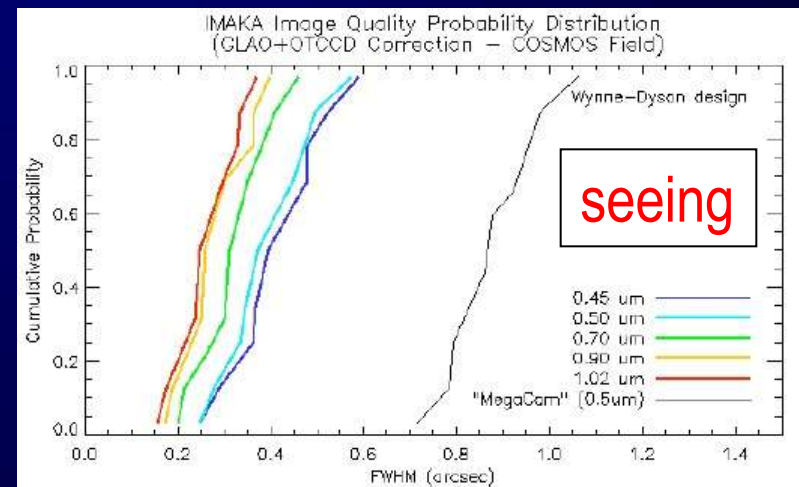
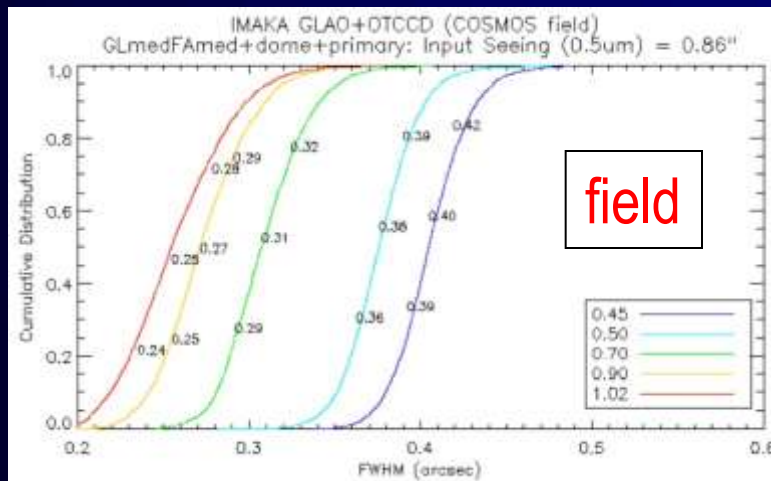
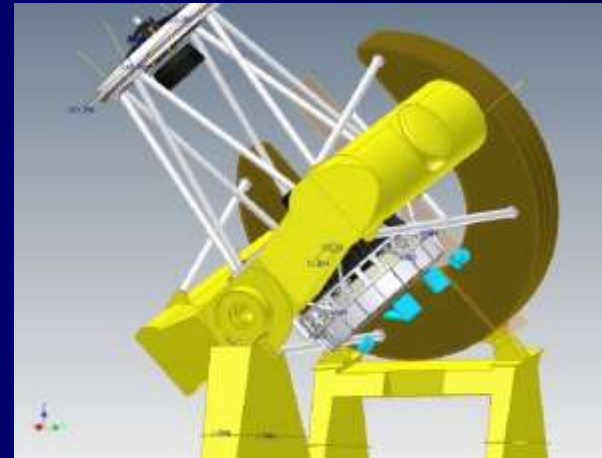
IMAKA

CFHT (3.6m) @ Hawaii

- 可変副鏡を使わない
 - 可視 (OTCCD)
- FoV: 1° ϕ 相当
FWHM: 0.2-0.4" @ 可視



OR



システム例: MOAO

テストベッド段階、30m望遠鏡への発展

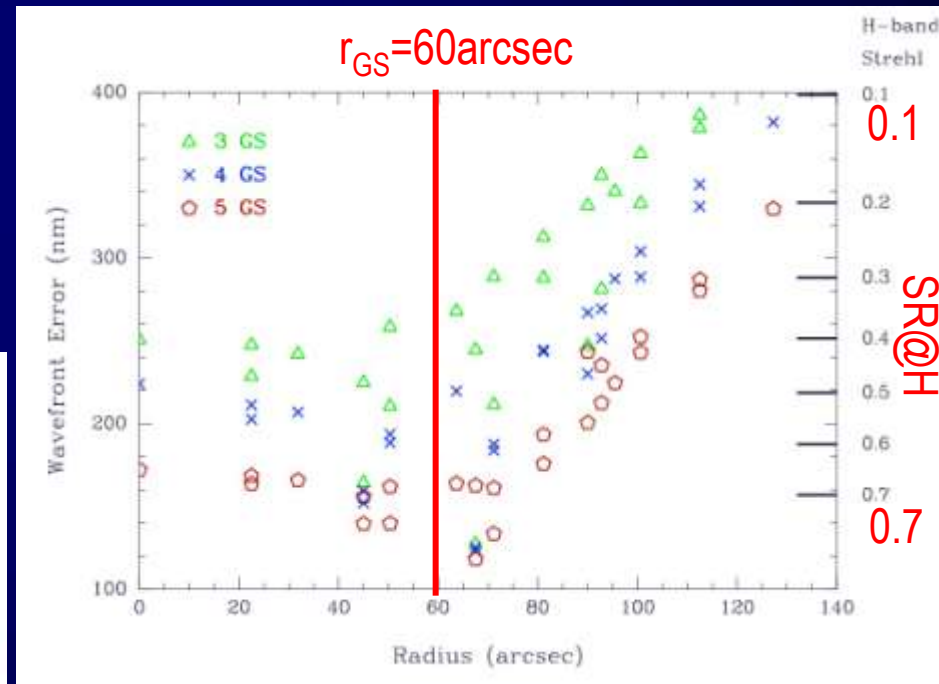
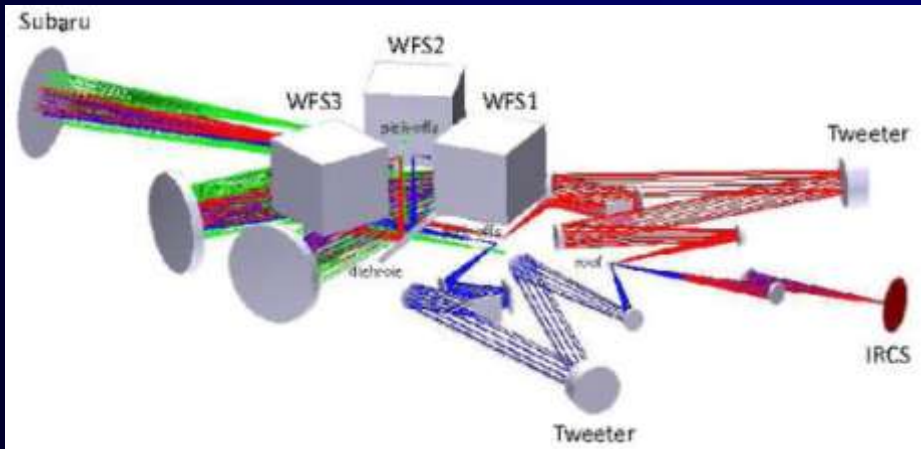
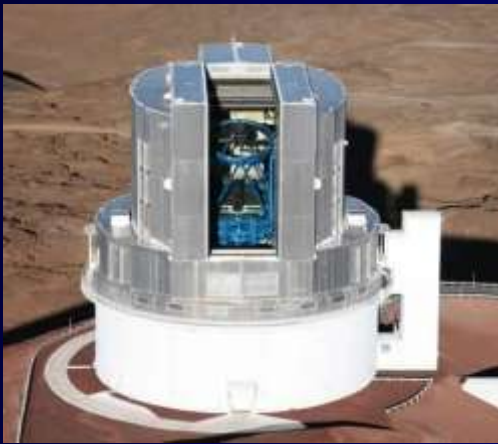
RAVEN (1stL: 2013~)

Subaru (8m) @ Hawaii

FoR: 2' ϕ

SR: 0.7 @ H-band

open-loop 試験は済
on-sky tomographyはまだ



システム例: LTAO

検討段階、30m望遠鏡への発展

NGAO

Keck (10m) @ Hawaii

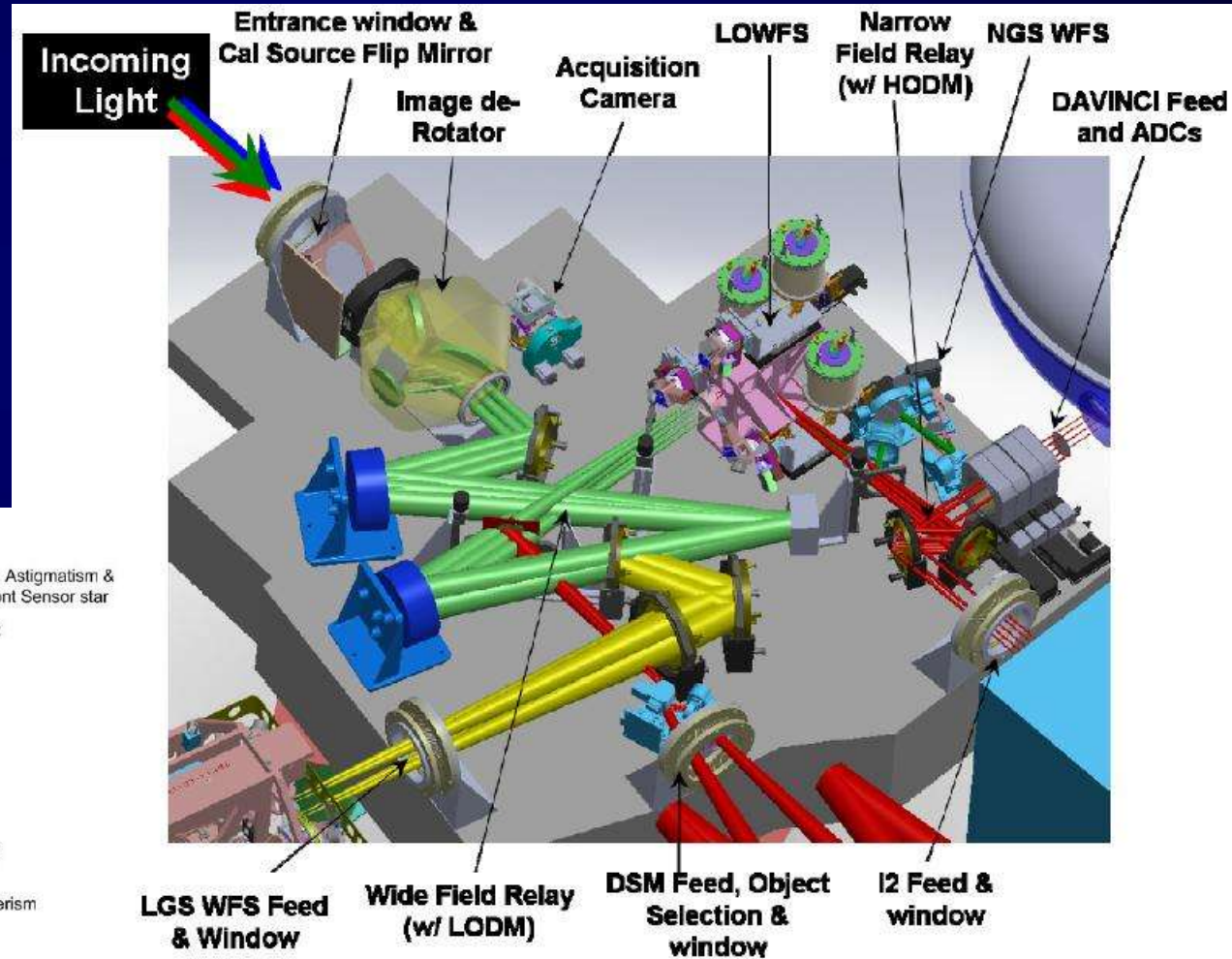
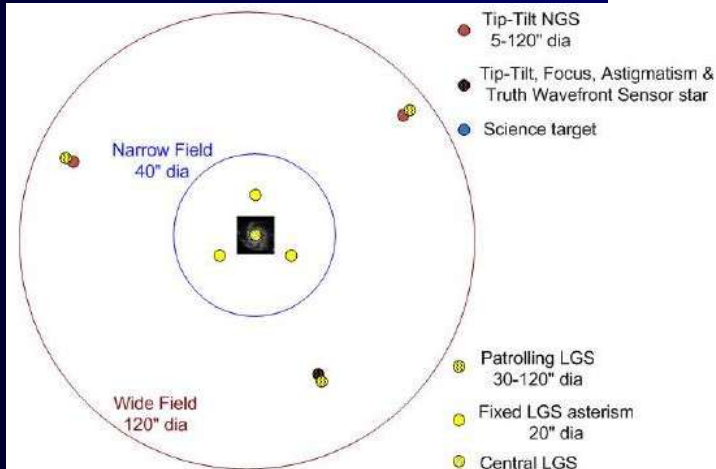


Figure 6: Perspective view of the AO bench with major components labeled.

すばる次世代広視野AO

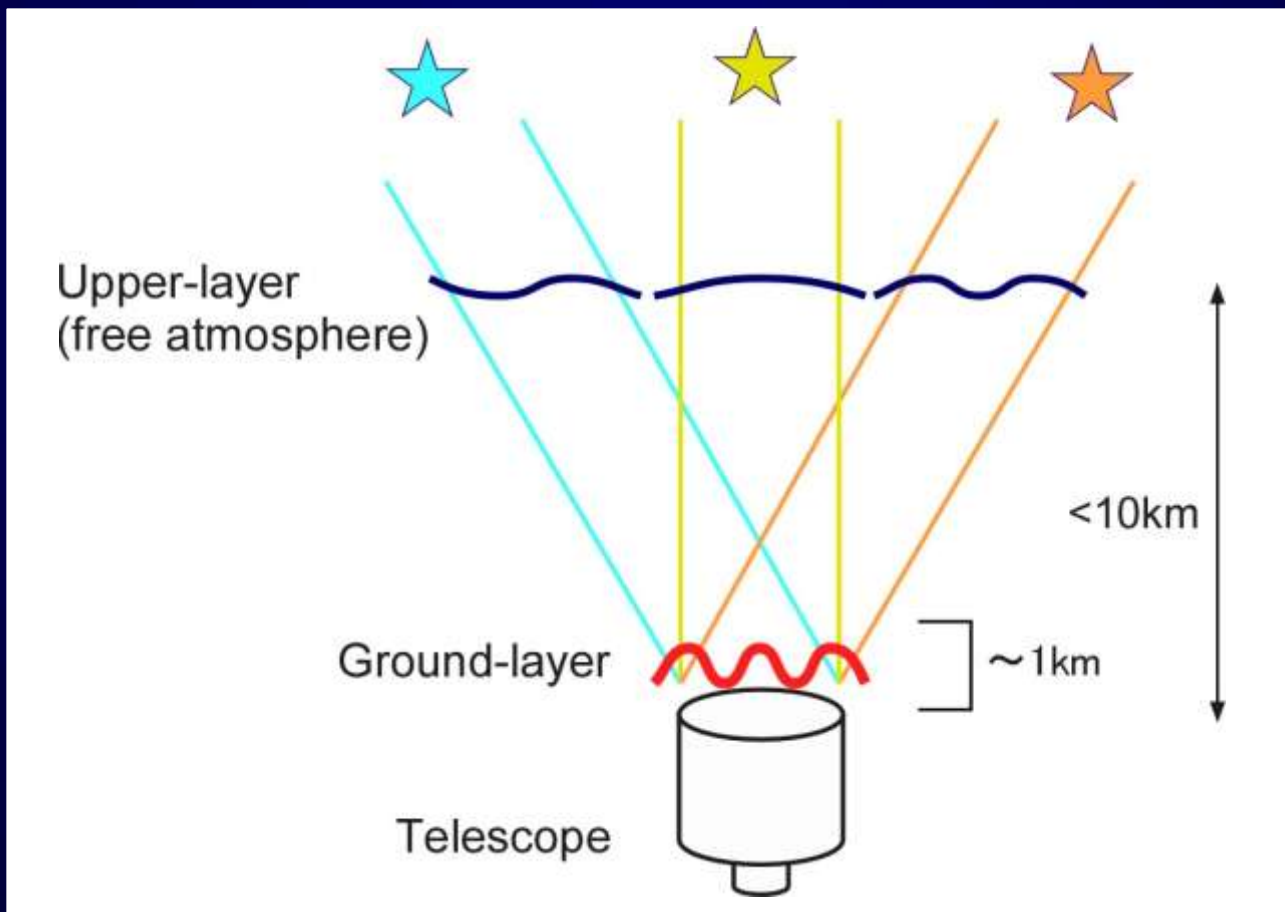
広視野AOを目指す理由

- シーイングリミットの広視野装置群
 - S-CAM, FMOS, MOIRCS (HSC, PFS)
 - データ、サイエンスの経験の蓄積
 - 主焦点装置を支える構造
- 他望遠鏡との関係
 - 8m級望遠鏡は何かしらの広視野AO計画がある
 - 30m級望遠鏡時代の相補性
(8mの集光力と角度分解能だけでは競争力がなくなる)

視野を広げる

- 大気の3次元構造を考慮しないといけない
- そのために複数のガイド星が必要

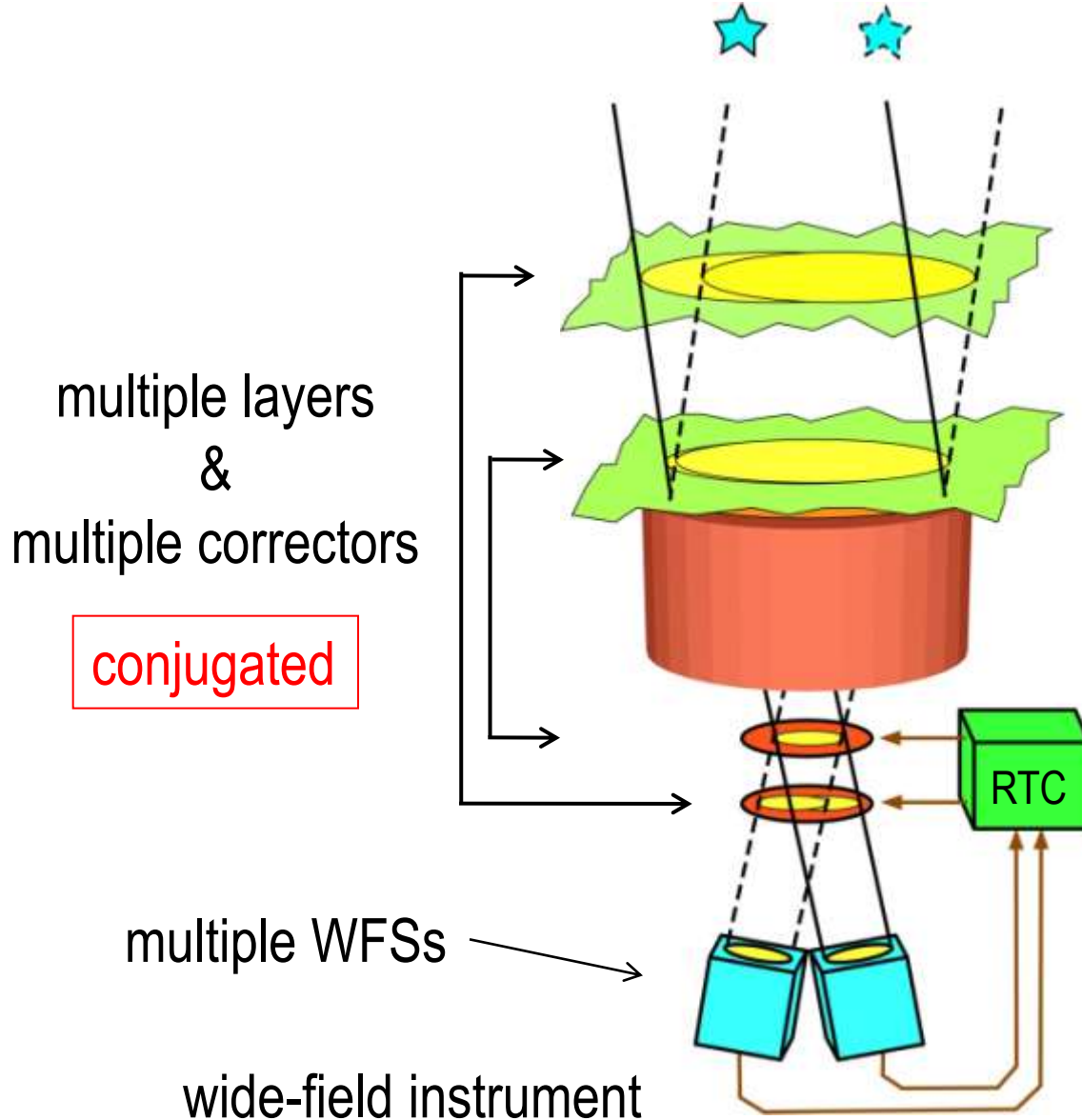
トモグラフィー



広視野AOの方式

- MCAO: Multi-Conjugate AO
 - 視野: 2分角、回折限界
 - サーベイ観測可能
- GLAO: Ground-Layer AO
 - 視野: 10分角、FWHM: < 0.4 秒角
 - サーベイ観測可能
 - 可変副鏡 (低放射率、オンソース高ストレール)
- MOAO: Multi-Object AO
 - FoR: 3分角、各視野: 数秒角、回折限界
 - ターゲット位置を先に知っておく必要あり
 - RAVEN (experimental w/ NGS) / CIRMOS

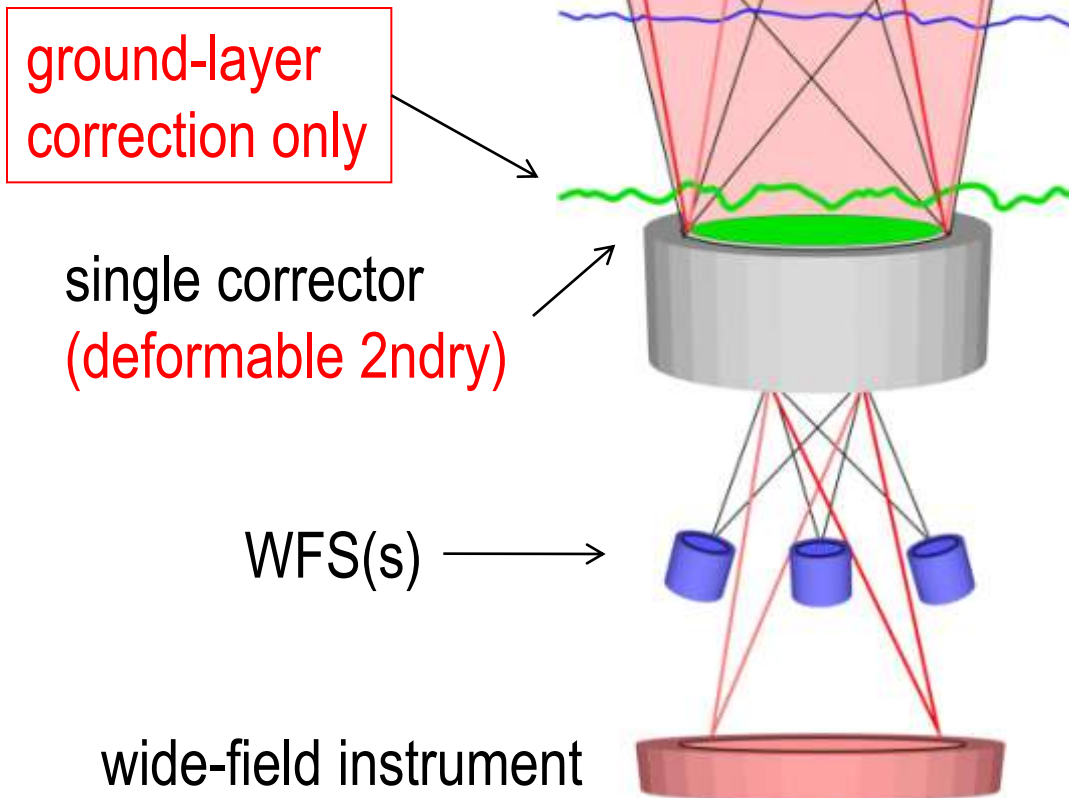
広視野AO: MCAO



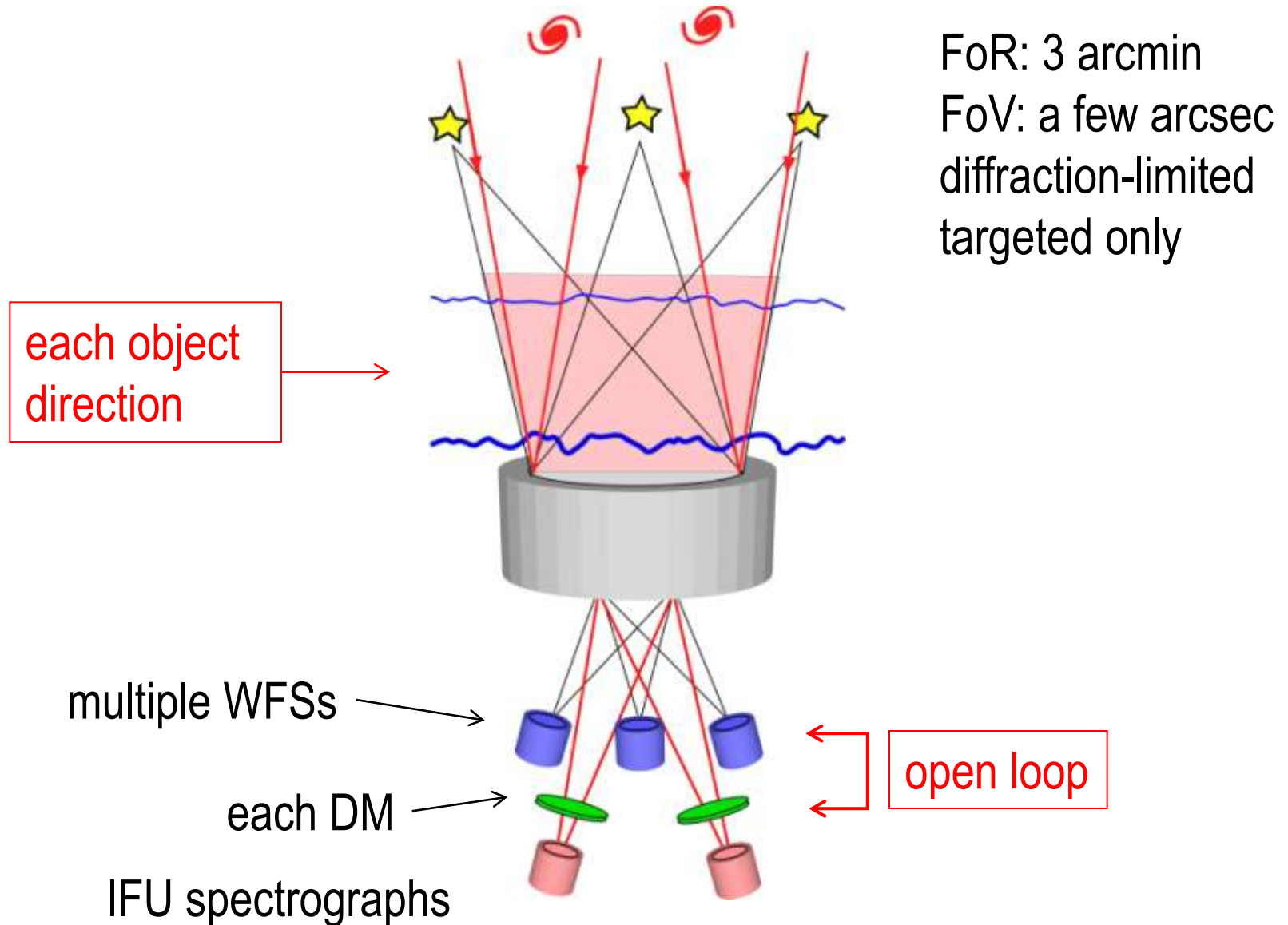
FoV: 2 arcmin
diffraction-limited
survey possible

広視野: GLAO

FoV: 10 arcmin
fwhm: < 0.4 [arcsec]
survey possible



広視野AO: MOAO

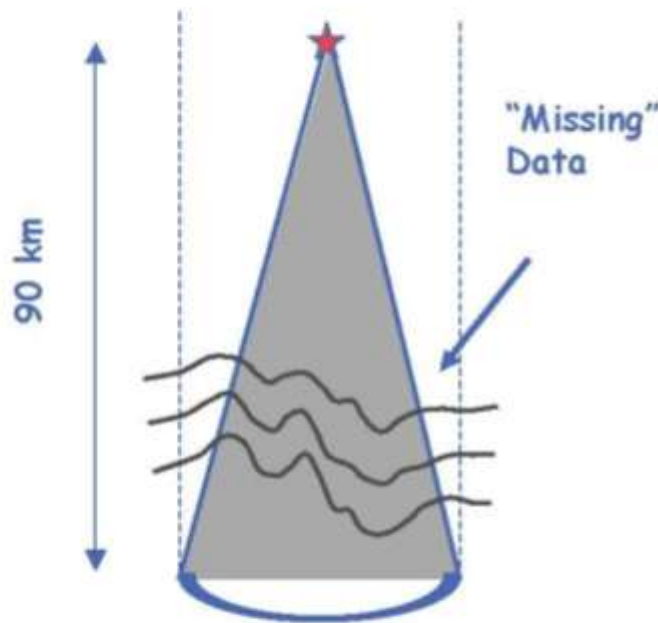


LGSコーン効果の低減: LTAO

AO tomography: measure turbulence and correct for “cone effect”

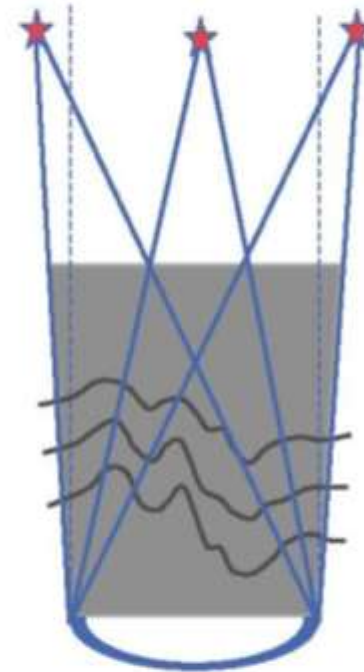


one laser guide star



Without tomography

multiple laser guide stars



With tomography

With AO tomography, measure 3D distribution of turbulence above telescope

GLAO or MOAO

なぜこの2つを選ぶのか？

- GLAO: 圧倒的な視野 ($5 \times 5 = 25$ 倍)
- MOAO: 観測天体に対する高ストレール
30m望遠鏡への発展

開発に興味のある人がいる

⇒ シミュレーションによる検討が進んでいる

MCAO、LATAO

システムが複雑な割に視野はあまり広くない

すばるのシーイング

広視野AOでは高さ方向も大切

TMT site seeing data (高度情報あり)



すばるのシーイング統計との差はドーム起因と仮定

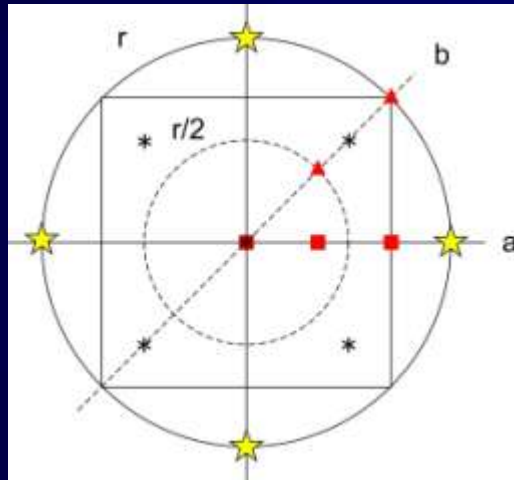
Table 3: Subaru Model Profiles for Raven

h km	Fractional 25%	Layer 50%	Strength 75%
r_0	19.4 cm	15.6 cm	12.1 cm
0	0.6823	0.5960	0.4971
0.5	0.0611	0.0963	0.1382
1	0.0212	0.0325	0.0577
2	0.0172	0.0372	0.0642
4	0.0757	0.0869	0.0833
8	0.0486	0.0684	0.0895
16	0.0939	0.0826	0.0700

GLAOとMOAOの両方の
シミュレーションで共通

GLAO: すばるシミュレーション

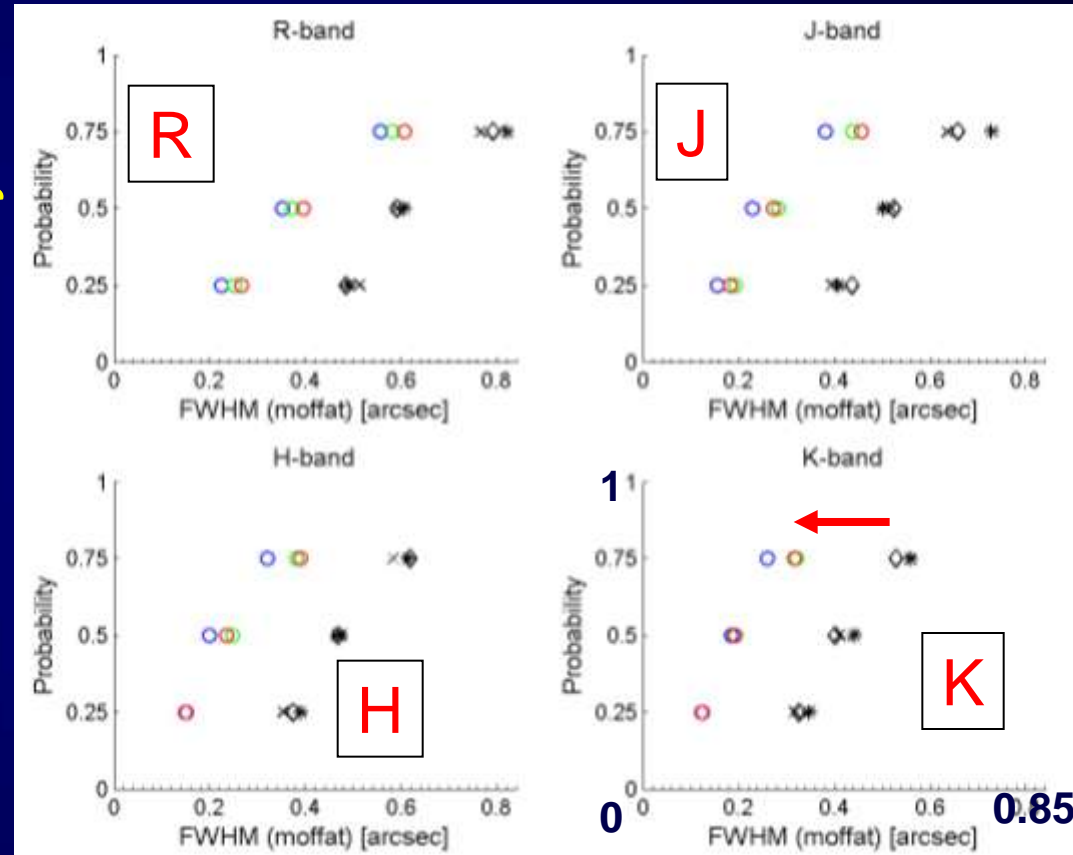
- 可変副鏡: 32 actuator across
- 4NGS (noise free)
- WFS: 32x32 SH



$r = 5'$
 $7.5'$
 $10'$

- ★: NGS
- : PSF評価点(GS方向)
- ▲: (対角方向)
- *: DM fitting

Accumulated Probability

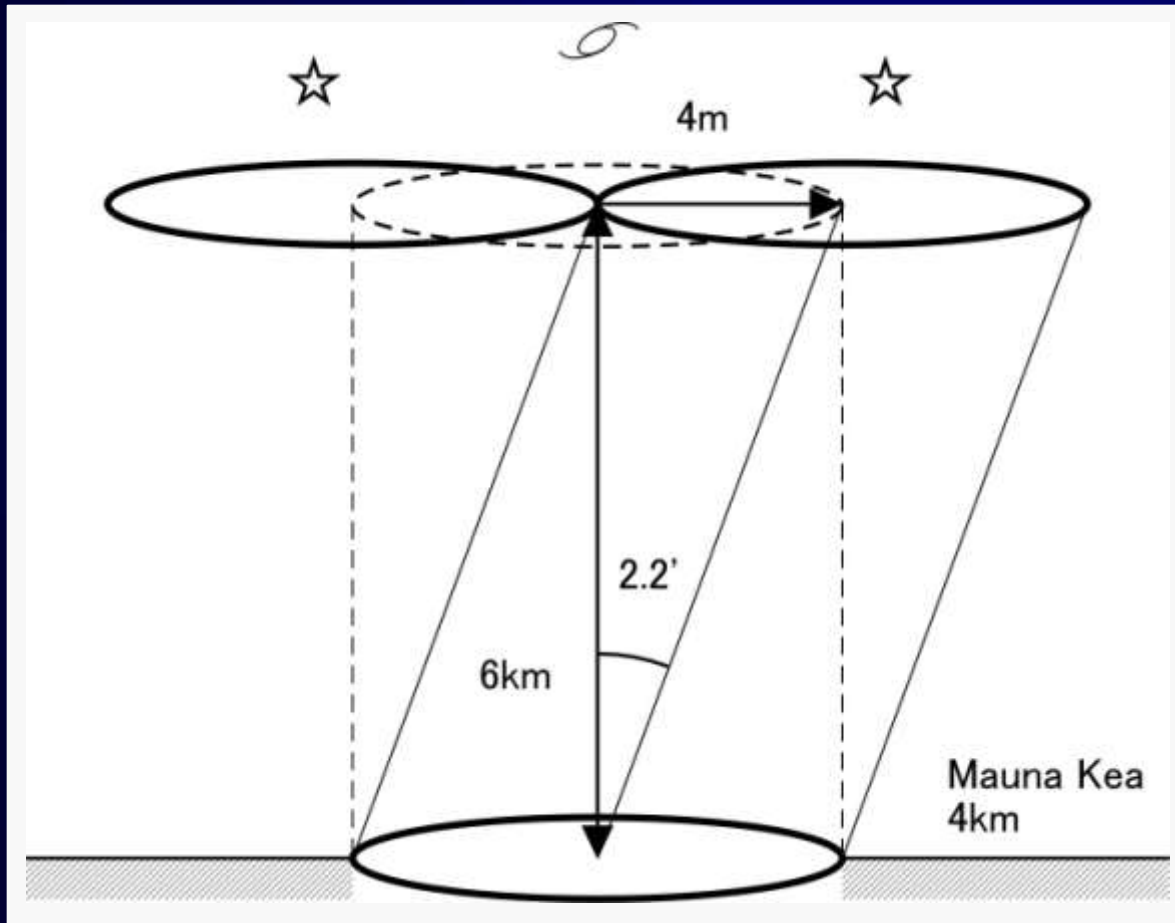


FWHM →

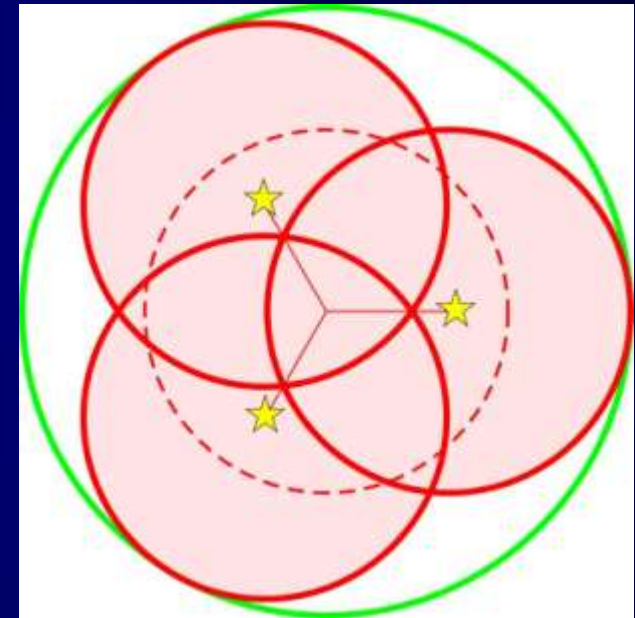
0.2 ~ 0.3"の改善

FOV: ○: $\phi = 10\text{arcmin}$ ○: $\phi = 15\text{arcmin}$ ○: $\phi = 20\text{arcmin}$
 Seeing: ×: $\phi = 10\text{arcmin}$ 、* : $\phi = 15\text{arcmin}$ 、◇: $\phi = 20\text{arcmin}$

MOAO: FoRの制限



ビームの重なり
(meta pupil)
at 6km (top view)



8m aperture
3arcmin FoR
3GS

MOAO: RAVENシミュレーション

- 2'~3' FoR, 3 NGS (r=45") + LGS (center)
- element # :10x10 (WFS: 10x10 SH, DM: 11x11)

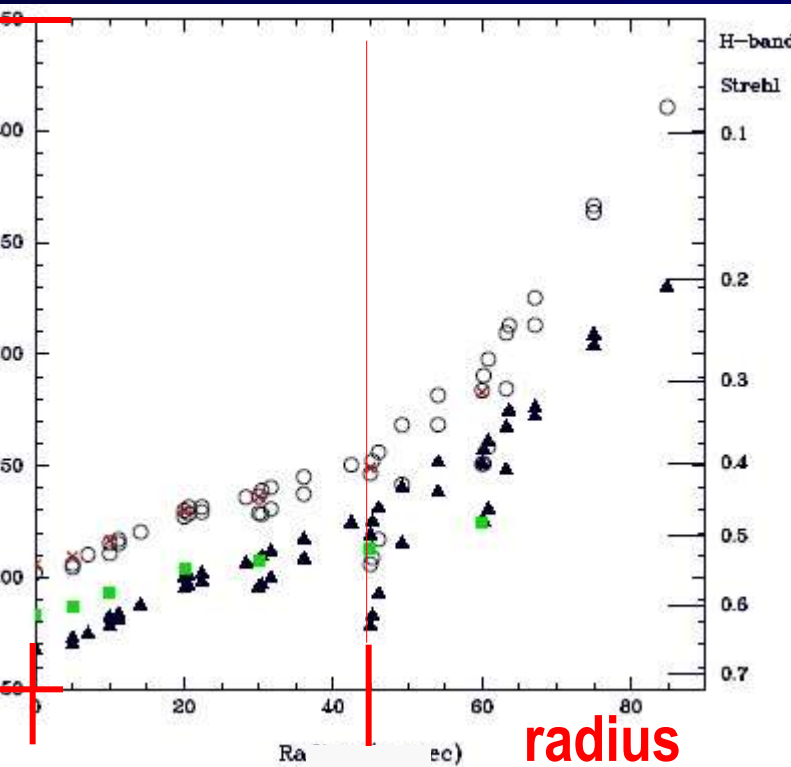
3 bright NGS + LGS

3 faint (R=14.5) NGS

450

WFE[nm]

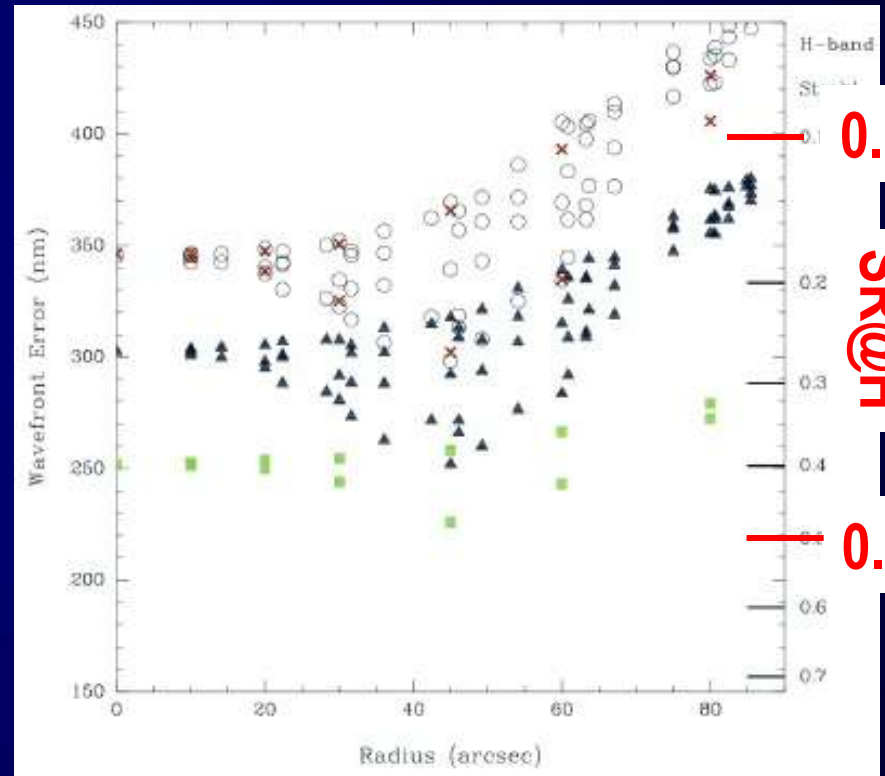
150



0"

45"

radius



0.1

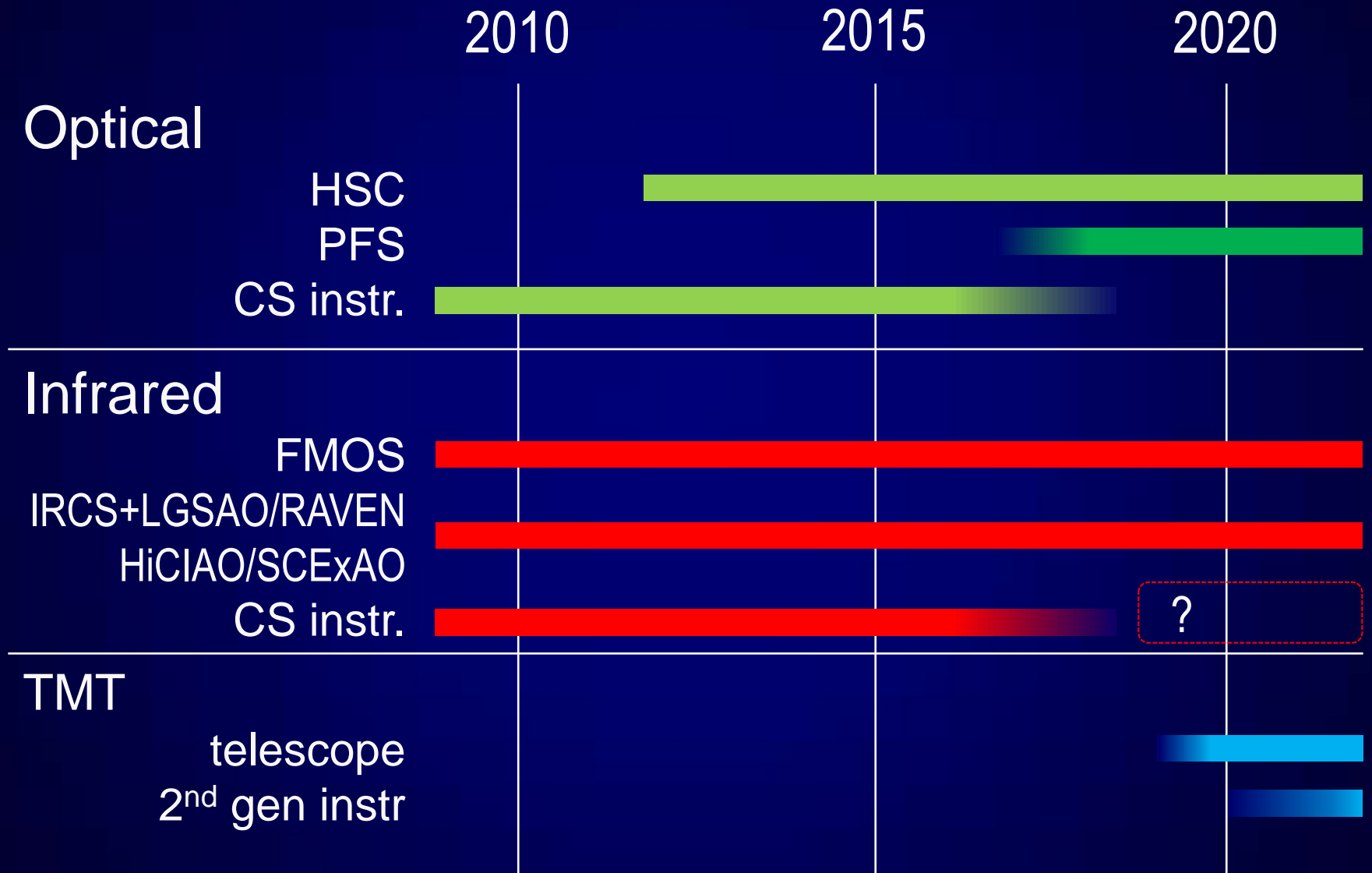
SR@H

0.5

X-axis: separation from the center of FOV in arcsec
 Y-axis left: WFE in nm: ○ all modes; ▲ TT removed
 right: SR × ; ■ EE

taken from RAVEN CoDR document

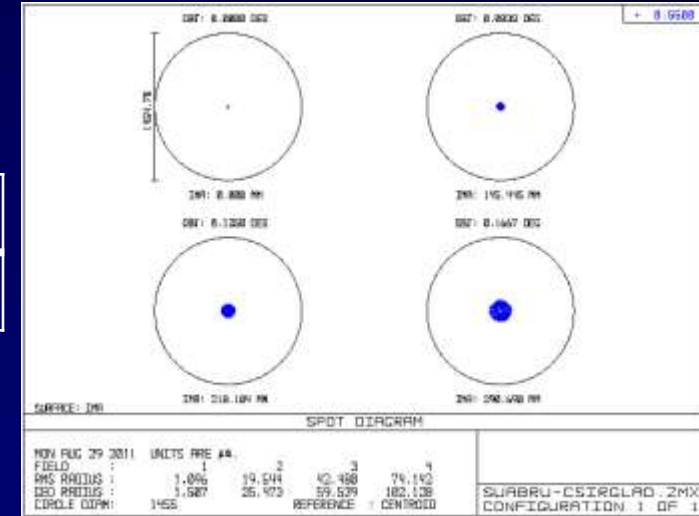
使用可能焦点



望遠鏡の光学特性

- 結像性能

FoV半径	0'	5'	7.5'	10'
像サイズ(RMS)	0.002"	0.038"	0.086"	0.149"

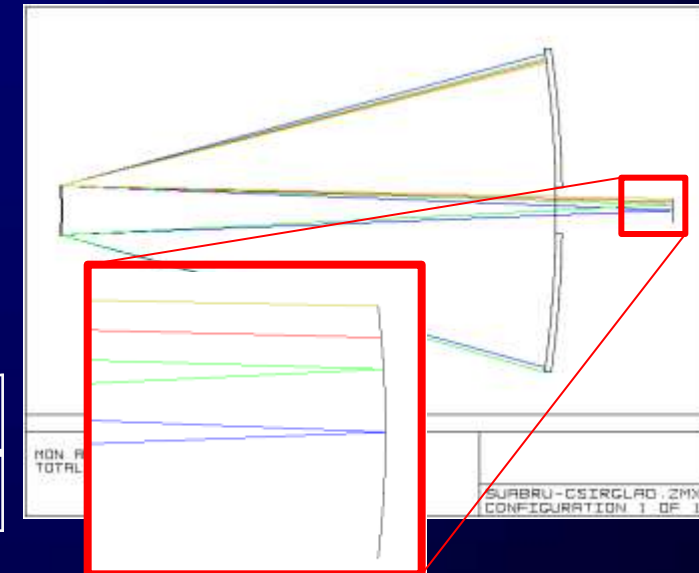


- 像面湾曲

曲率半径: 2.45 [m]

- ケラレ

FoV半径	0'	5'	7.5'	10'
ケラれない割合	97.6%	97.6%	97.6%	97.2%



GLAOとMOAOの比較

	GLAO	MOAO
視野	10分角	3分角
補正性能	シーイングの改善 ($< 0.4''$)	回折限界
サーベイ	Yes	No
使用焦点	Cs/Ns (w/WFS)	One port
像面補正	分光の場合焦点面で	各ユニットごと
付加価値	放射率減少、 補正向上	既存装置のアップグレード
MKの競合	赤外、可変副鏡は無し	Keck / TMT
TMTへ	後?	先?
予算	> 20 億円?	< 20 億円?

まとめ

- すばる次期赤外装置検討の一環として
広視野AOを考えている
 - 広視野群のデータサイエンスとのシナジー
 - 8m望遠鏡間の競争力の維持
 - 30m望遠鏡時代の相補性
- すばる広視野AOとして次の2種類を
候補に検討をすすめている
 - GLAO: 10分角以上の広視野
 - MOAO: オンソースの高ストレールと
30m望遠鏡への発展