

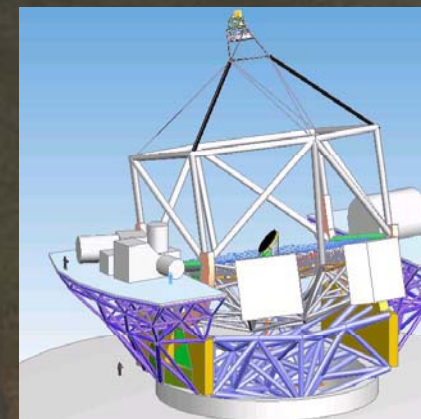


TMT多天体補償光学系 実現に向けた要素開発

秋山 正幸
(東北大学理学研究科・天文学専攻)

2012/12/17
第二回可視赤外線観測装置技術ワークショップ

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。



TMT 初期装置群

補償光学系

NFIRAOS

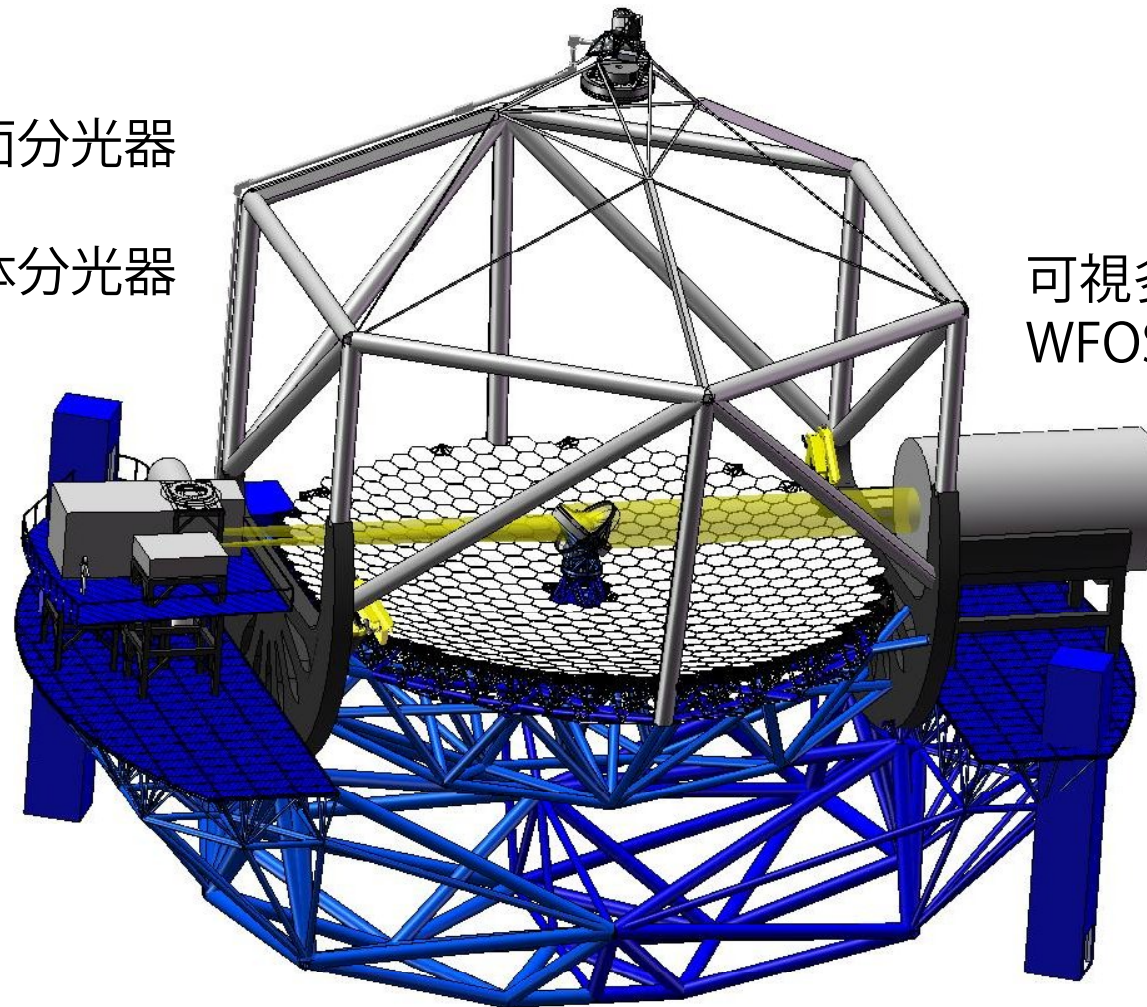
と

近赤外撮像面分光器

IRIS

近赤外多天体分光器

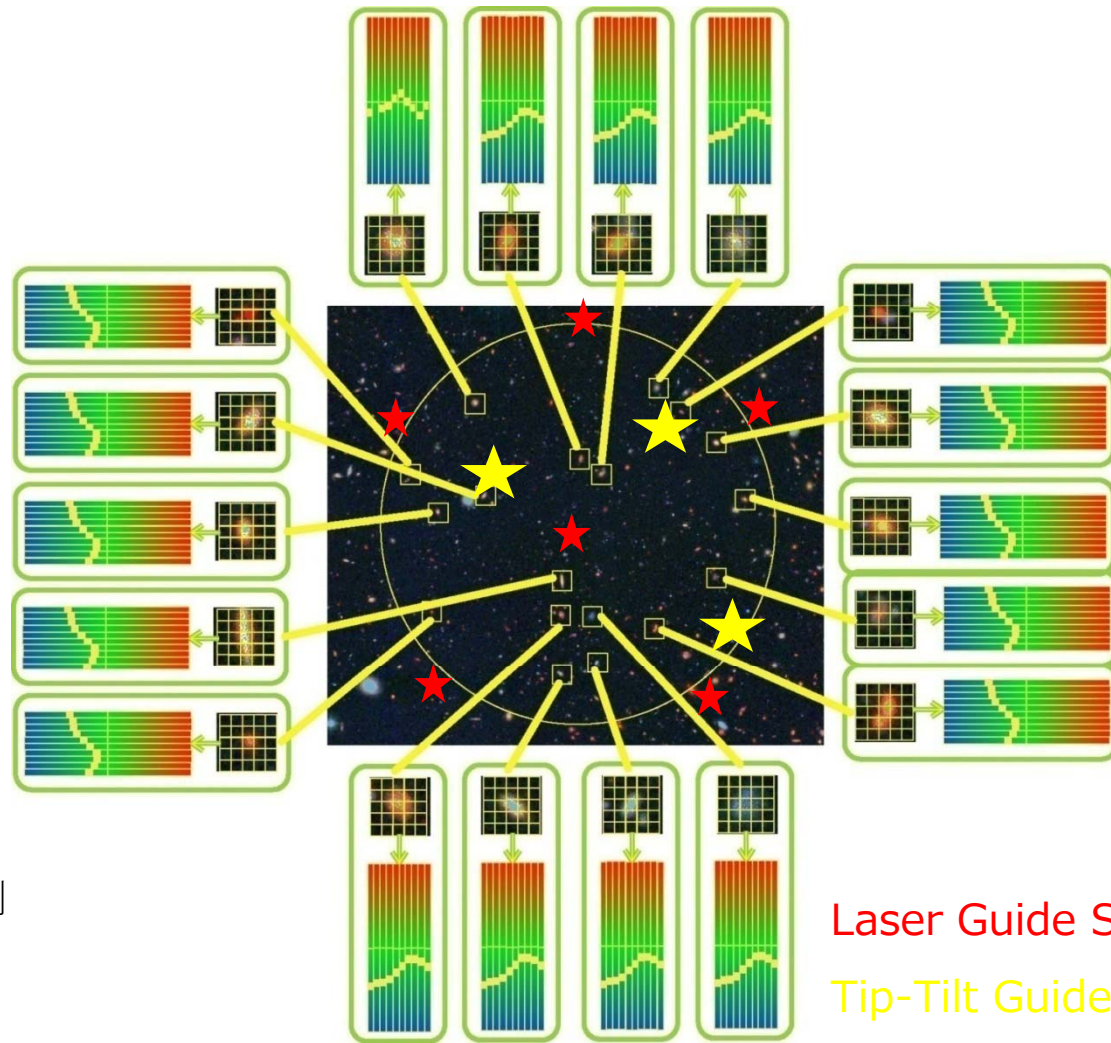
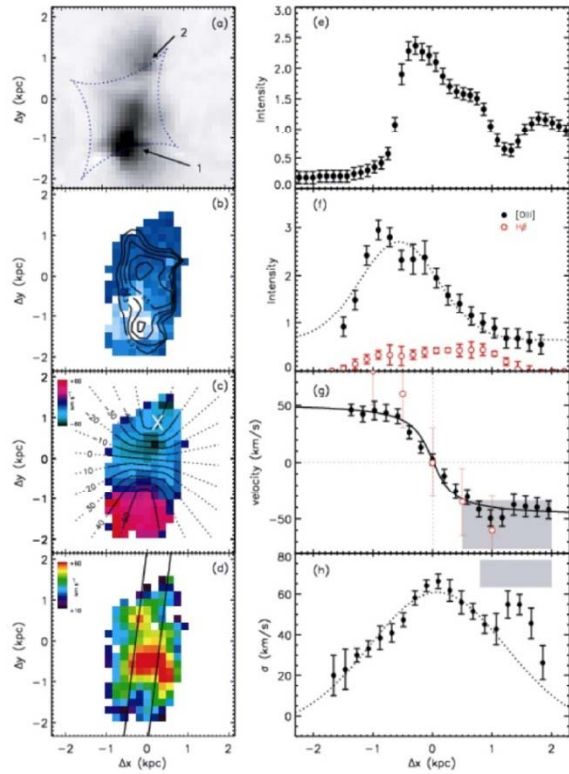
IRMS



可視多天体分光器

WFOS

科学目標：銀河の内部構造の進化



Laser Guide Star
Tip-Tilt Guide Star

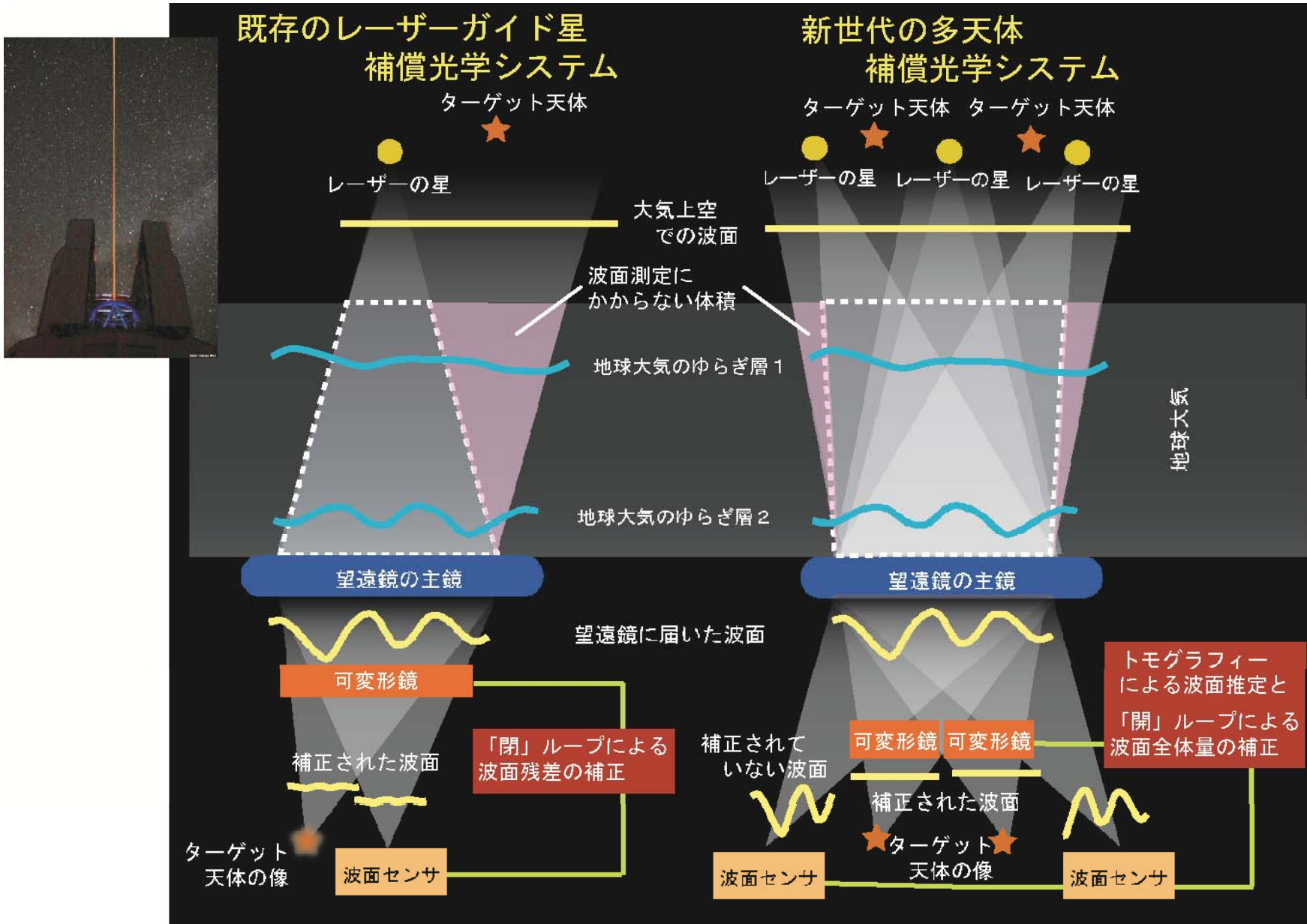
重力レンズを用いて有効的に 100pc (20-40mas) の分解能で $z=3$ 銀河を観測した例 (Stark et al. 2008 Nature, 455, 755)。この空間分解能を達成することで遠方の銀河が回転している様子が始めて確実に捉えられた。

装置仕様概略 (TMT-IRMOS)

波長	0.8-2.4um	
視野	5分角直径の視野	
空間サンプリング	0.05x0.05秒角、2.2秒角視野	~2000 空間素子数
分光器の数	20台の IFU	天体の密度
波長分解能	1000-20000 (一度に1オクターブをカバー)	
感度	スカイバックグラウンド	R~20,000 程度まで

これらの値は現状での目安であり、科学目標に基づいて技術的に可能な仕様を設定することが現在の可能性検討の目的である。

多天体補償光学系と要素技術

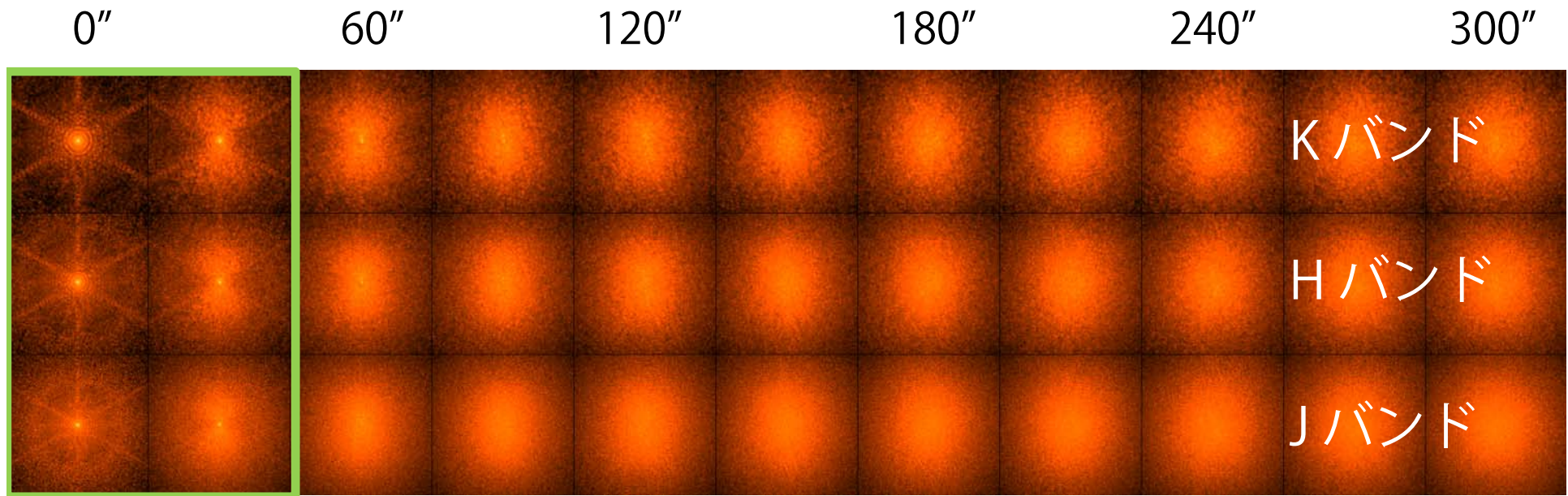


NFIRAOS and IRMOS

- 初期補償光学系 NFIRAOS = 多層共役 AO
 - High Strehl ratio correction in 10-30" fov.
 - IRIS : IFU spectrograph + 17.2"x17.2" imager
 - IRMS: NIR multi-slit spectrograph with 120"x120" fov : Keck MOSFIRE

- 次期補償光学系としての提案 IRMOS = 多天体同時 AO
 - Simultaneous correction optimized for each object within $d=5'$ fov.
 - IFU observation of ~ 20 objects simultaneously.

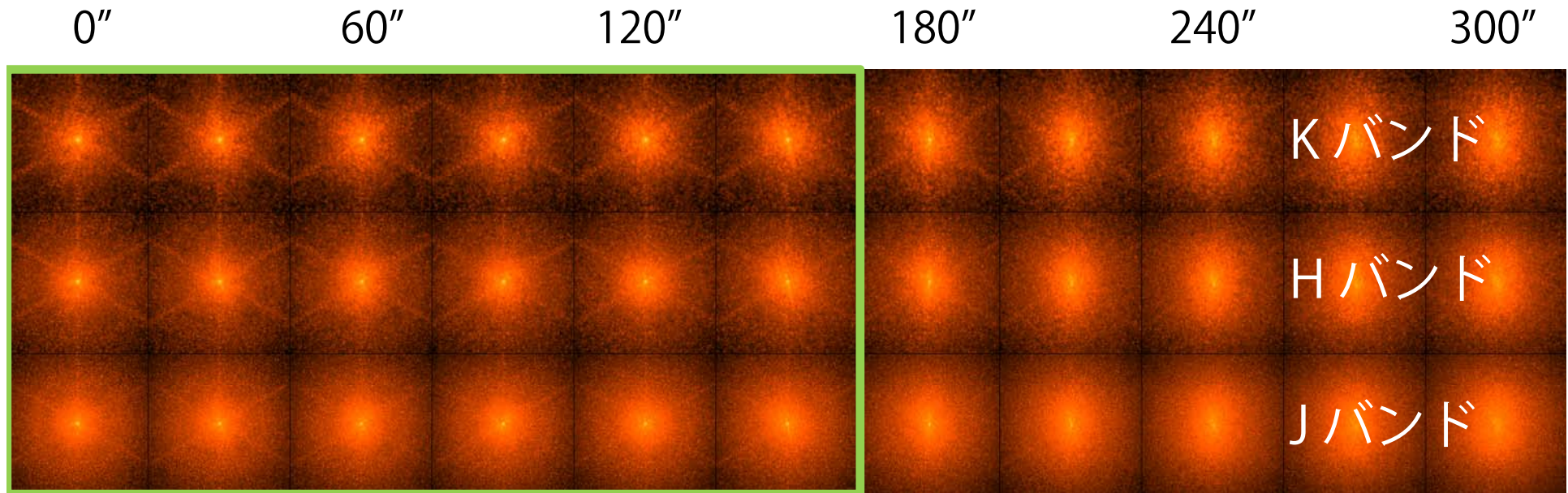
AO-PSF シミュレーション : 初期(多層共役)補償光学系の場合



- NFIRAOS PSFs in 1"x1" scale, from 0" to 300".
- From bottom to top : J, H, K-band
- PSFs are shown in log-scale (faint end enhanced)
- Ensquared Energy within 0.05" ~50% up to 30"

- IRIS:
 - IFU 0.004"/element 0.5"x0.5" fov – 0.05"/element 2.2"x4.6" fov
 - Imager 0.004"/pixel with 17.2"x17.2" fov

AO-PSF シミュレーション : 多天体補償光学系の場合



- TMT-MOAO6 PSFs in 1"x1" scale, from 0" to 300".
- From bottom to top : J, H, K-band
- PSFs are shown in log-scale (faint end enhanced)
- Ensquared Energy within 0.05" ~50% up to 150"

TMT戦略的基礎開発研究経費

可能性検討と概念設計

2015年度までの要素開発でTMTへ向けた装置提案として概念設計に至ることを計画している。内容は

- R&D 1. 地表層+多天体補償光学系のシミュレーションに基づくシステム検討 (大野発表を参照)
- R&D 2. 大可変形鏡製作の基礎検討
- R&D 3. オープンループ補償光学系の on-sky 実証実験
- R&D 4. 地表層+多天体補償光学系の実験室実証、高速なトモグラフィ計算の実現
- R&D 5. 多天体補償光学系 RAVEN の on-sky 実証試験
- R&D 6. 小型多素子大ストローク可変形鏡の開発

TMT戦略的基礎開発研究経費

現在の体制

1. 東北大学補償光学系グループ

性能シミュレーション、要素技術開発、RAVEN開発への参加

秋山 正幸、大野 良人 (M2)、増田 貴大 (M1)

2. すばる望遠鏡補償光学系グループ

システム検討、光学系基礎設計

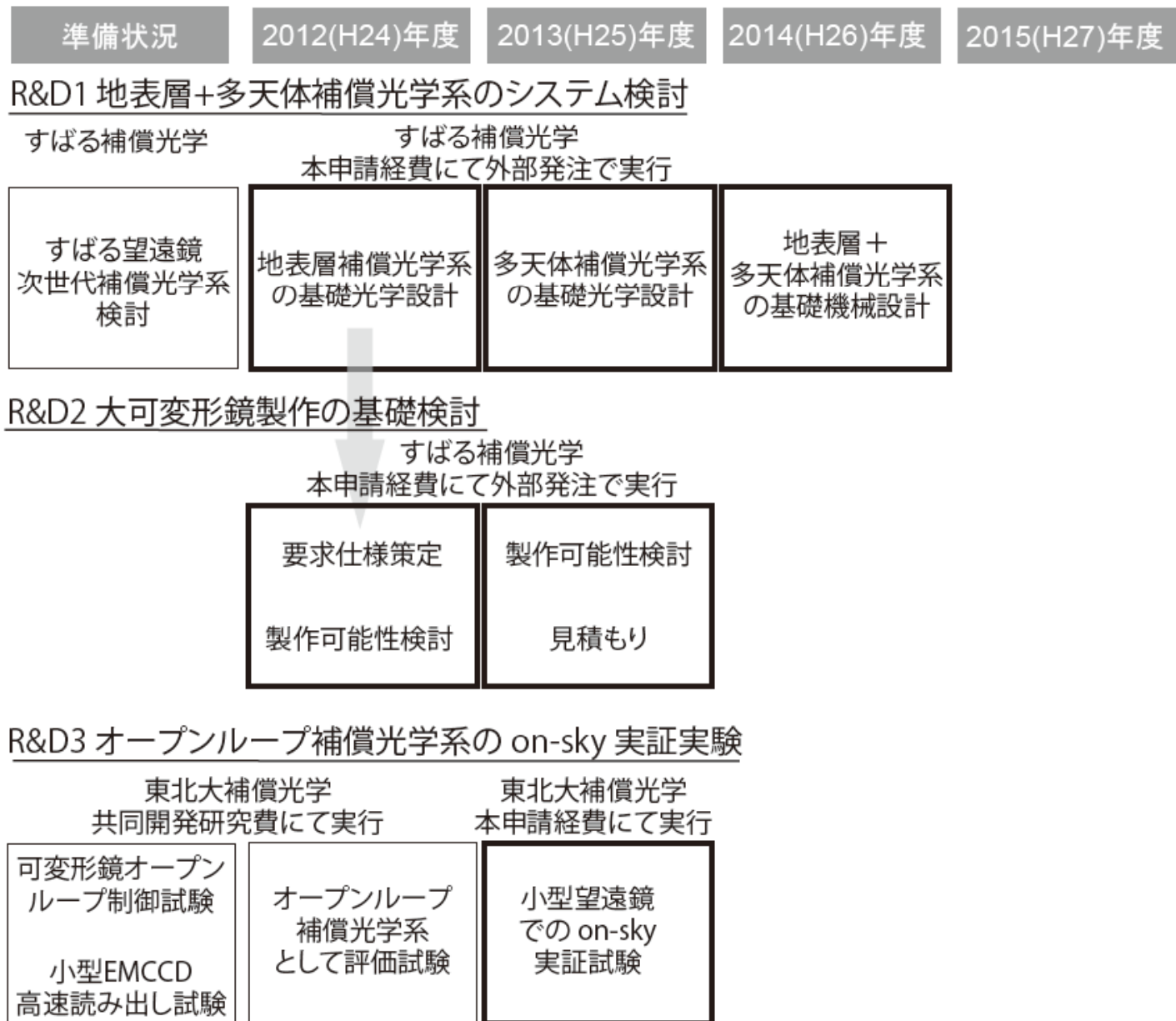
大屋 真、早野 裕、尾崎 忍夫、岩田 生、高見 英樹

3. 東北大学光 MEMS グループ

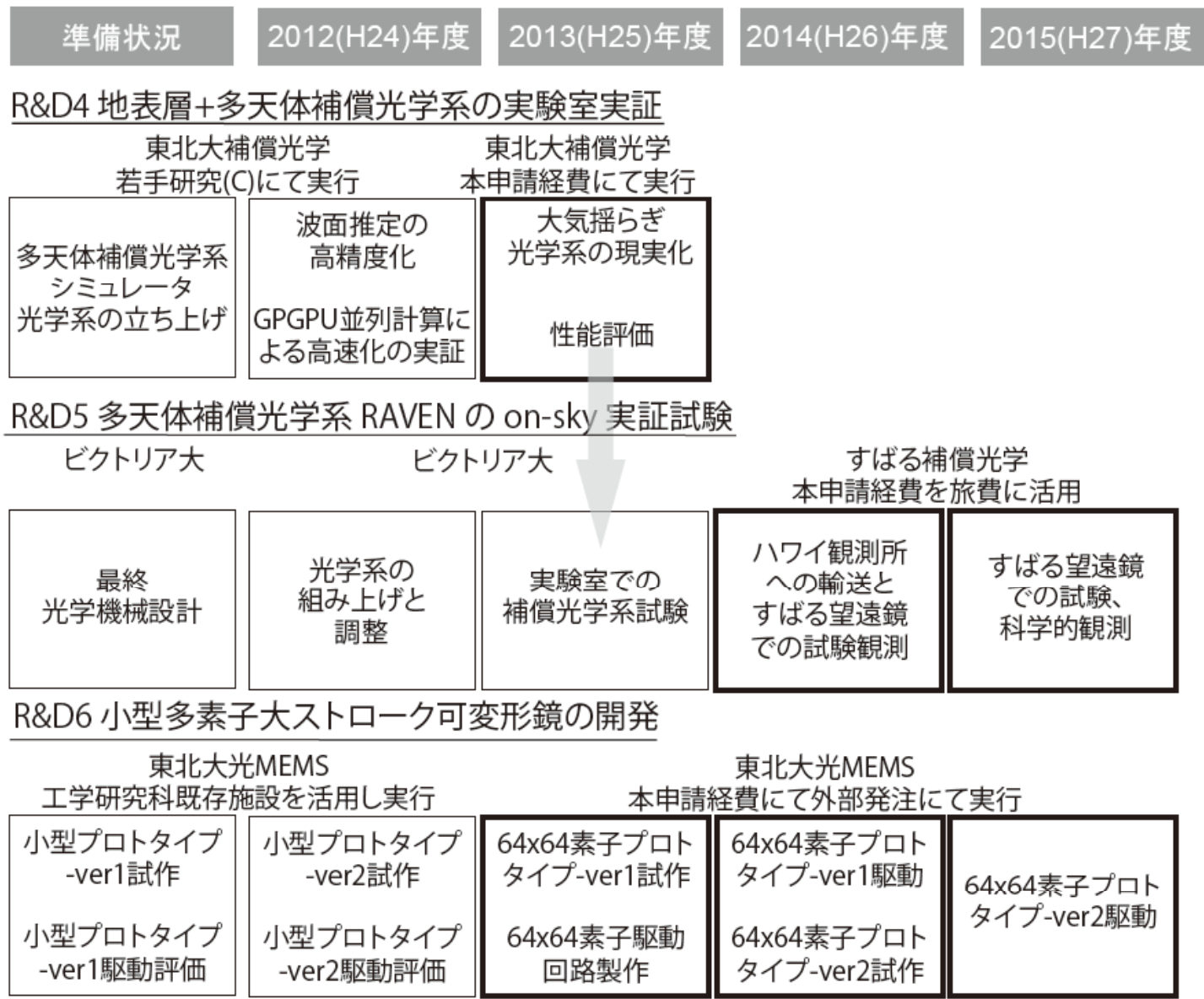
MEMS 可変形鏡の開発

羽根 一博、呉 同 (D2)

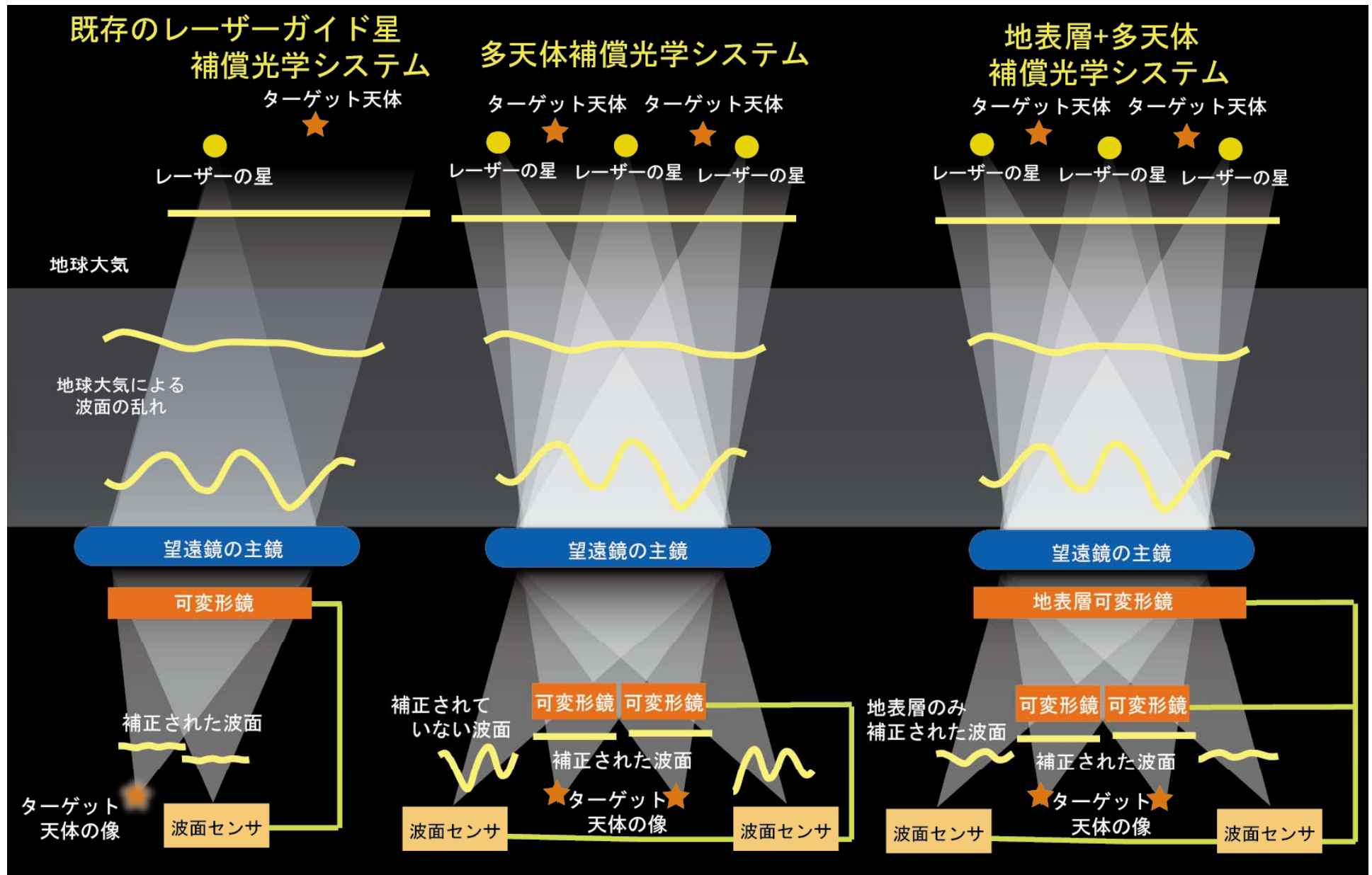
年次計画



年次計画



改良版の多天体AOシステム

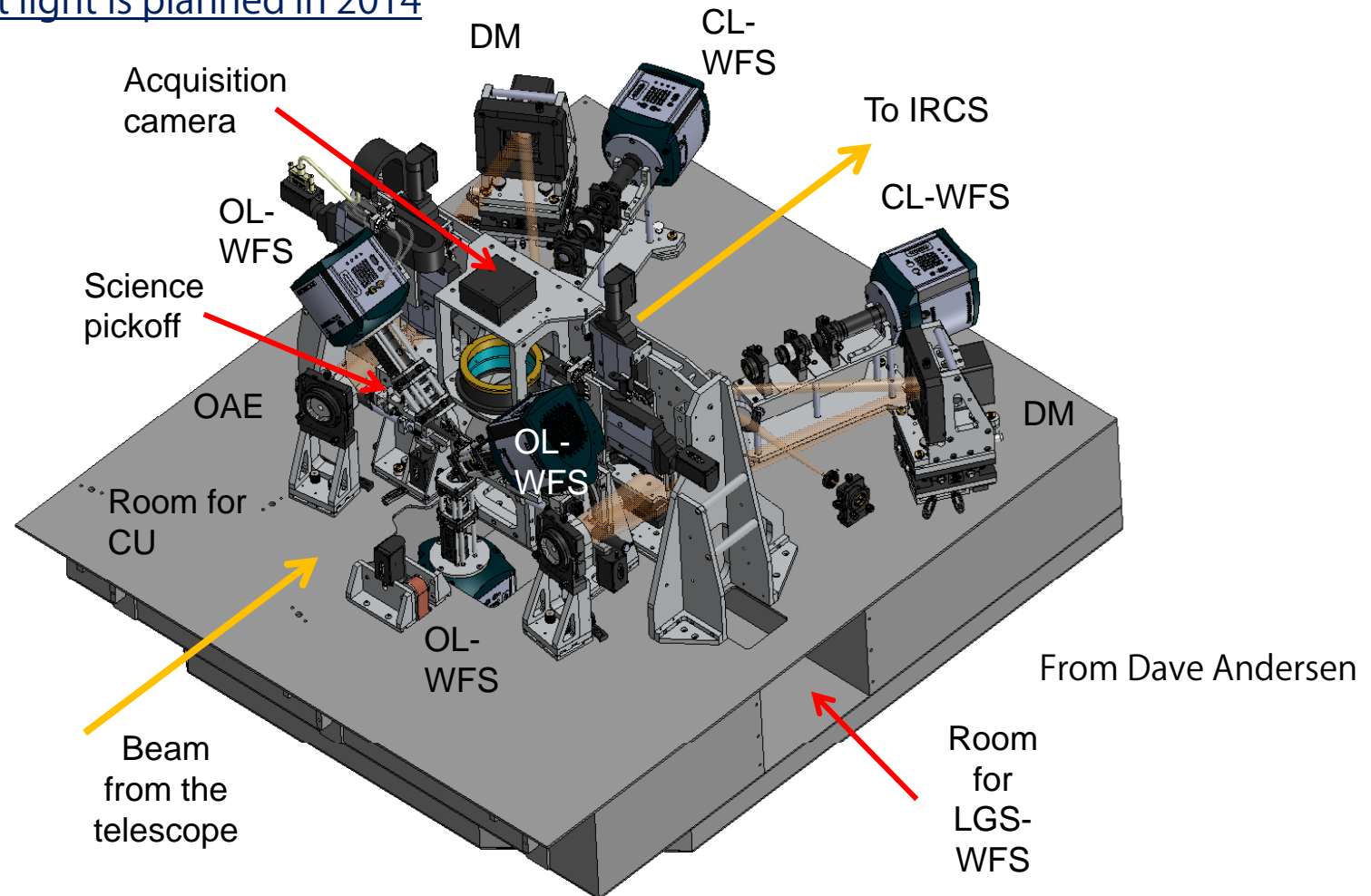


RAVEN collaboration: MOAO Science Verification on Subaru

RAVEN MOAO is a bring-in instrument to Subaru telescope led by University Victoria group (PI: Colin Bradley)

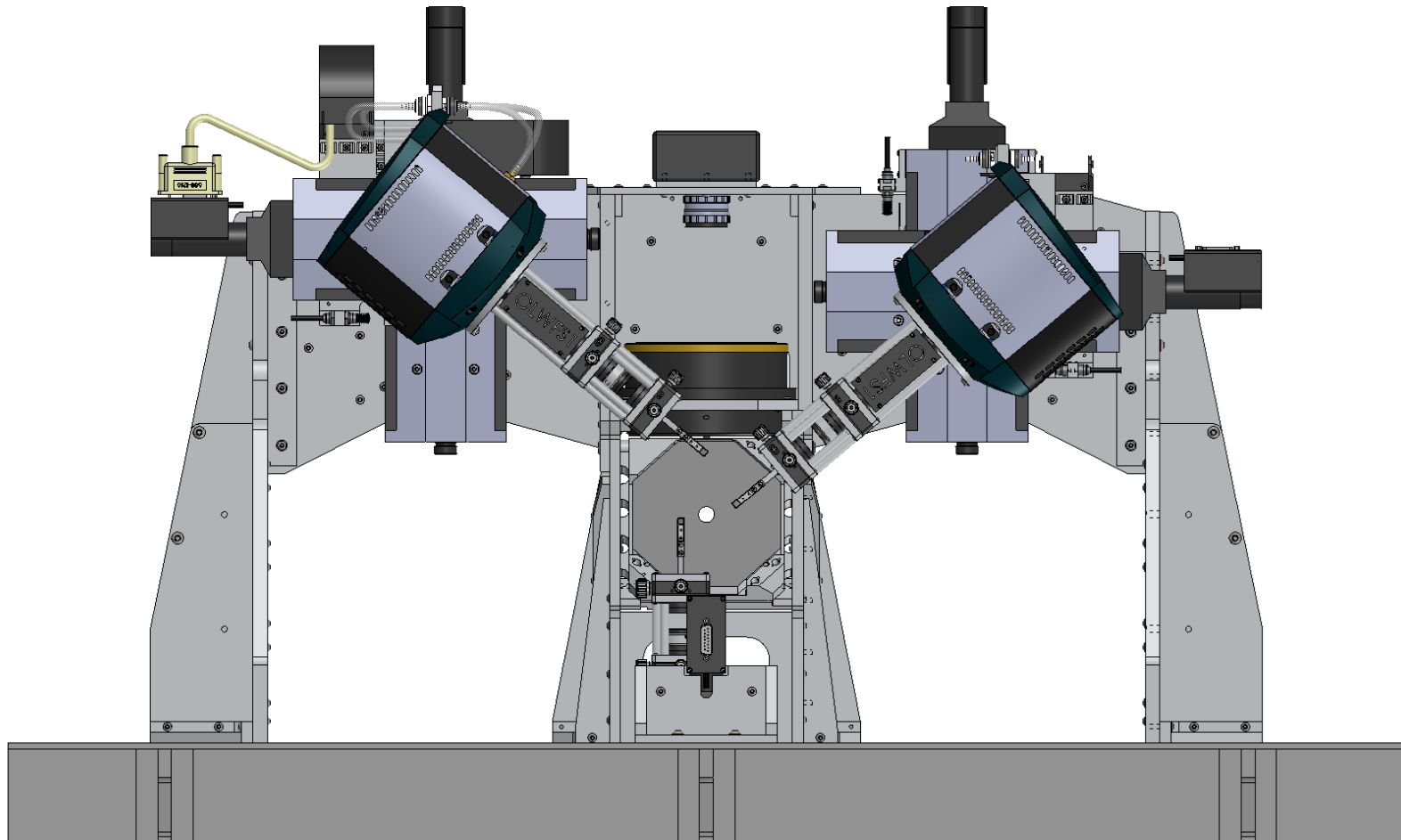
3 NGSs + 1 LGS for tomographic correction in 2 science paths.

First light is planned in 2014



RAVEN collaboration: MOAO Science Verification on Subaru

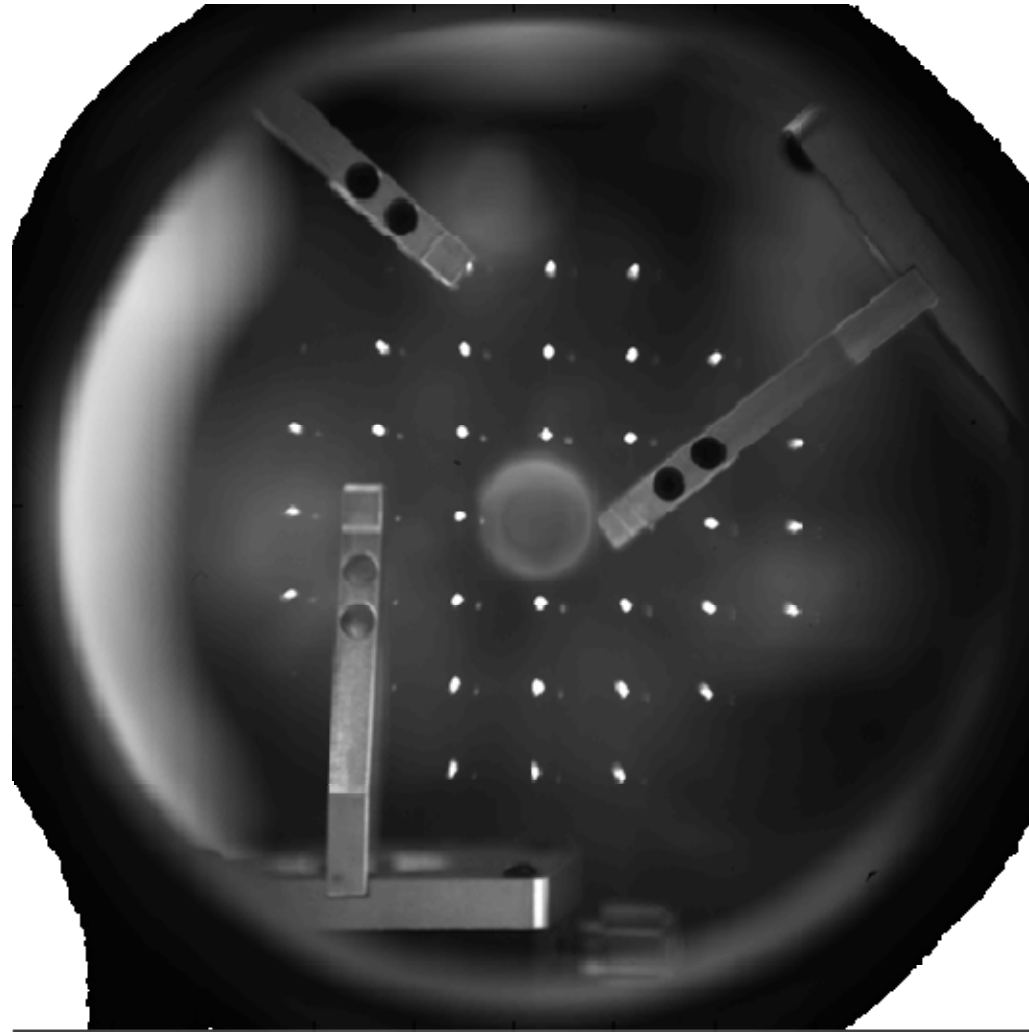
Open-loop wavefront sensor design



From Colin Bradley

RAVEN collaboration: MOAO Science Verification on Subaru

Real open-loop wavefront sensor



From Colin Bradley

TMT-多天体補償光学系の可変形鏡への要求仕様：概略

TMT の補償光学系に要求される基本的仕様は開口のサイズと大気揺らぎの性質から、

1. 素子数 ~ 64×64 素子
2. 高空間周波数のストローク = $4\mu\text{m}$
3. 低空間周波数のストローク = $20\mu\text{m}$

である。大気揺らぎは低空間周波数でより強いパワーを持つために、開口が大きくなるほど大きなストロークが要求される(ただし、カットオフ周波数はある)。

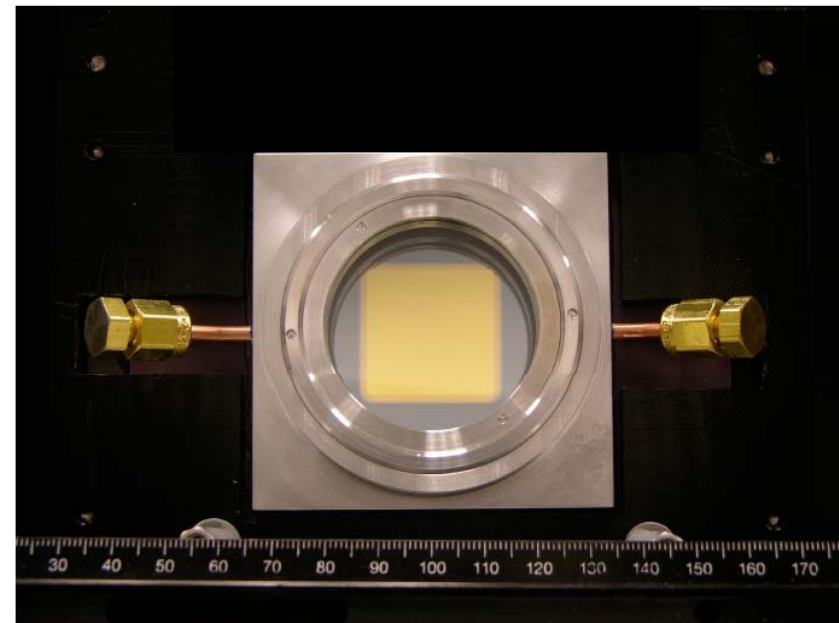
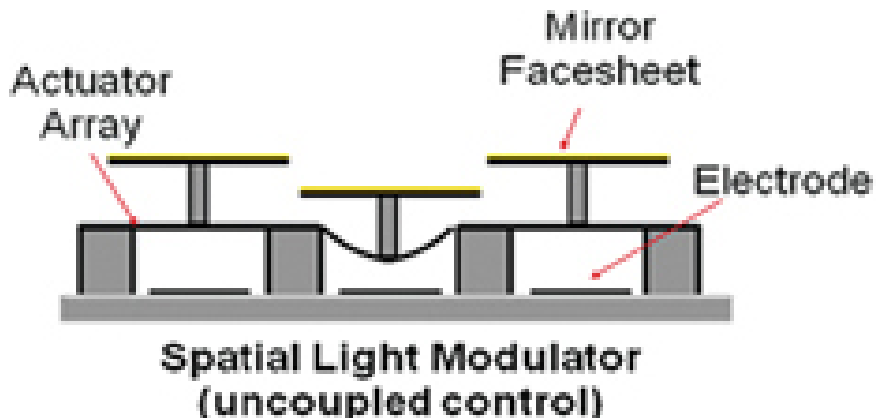
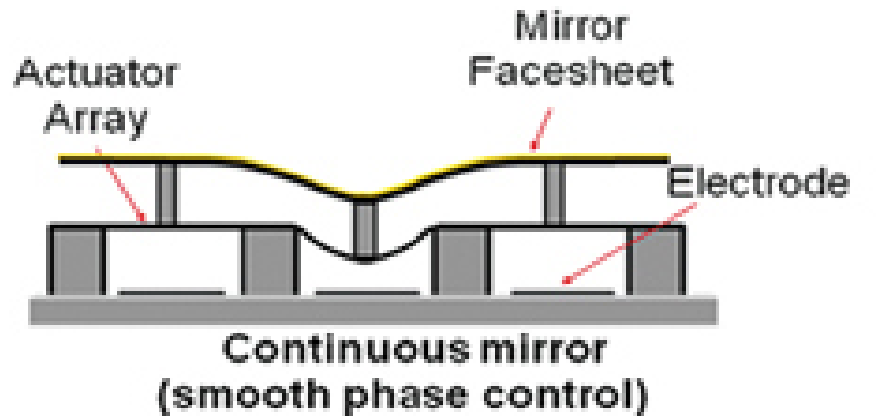
多天体補償光学系ではそれぞれの面分光ユニットが可変形鏡を持つ必要があり可変形鏡のサイズは 30mm 角程度が望まれる。

TMT-多天体補償光学系の可変形鏡への要求仕様：詳細

Element count	1024 = 32x32 (goal: 4096 = 64x64)
Pitch	300 ~ 1,000 um
Aperture size	10~ 30mm (goal: 20~ 60mm)
Fill factor	98%
Actuator yield	> 99%
Stroke (overall)	20 um
Stroke (at highest spatial freq.)	4 um
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

小型多素子可変形鏡の現状

- MEMS 技術による小型多素子可変形鏡については現状では Boston Micromachines の独壇場であり、素子数の最大は 25mm角 4092 素子、ストローク 3.5 μ m、ピッチ 400 μ m。高周波数のストロークは十分大きいですが、低周波数のストロークは足りない。これまでの検討ではストロークの大きい piezo 可変形鏡を低周波数の揺らぎを補正するように併用する (Woofer-Tweeter system) ことが提案されているが、必要な光学系が増える問題がある。



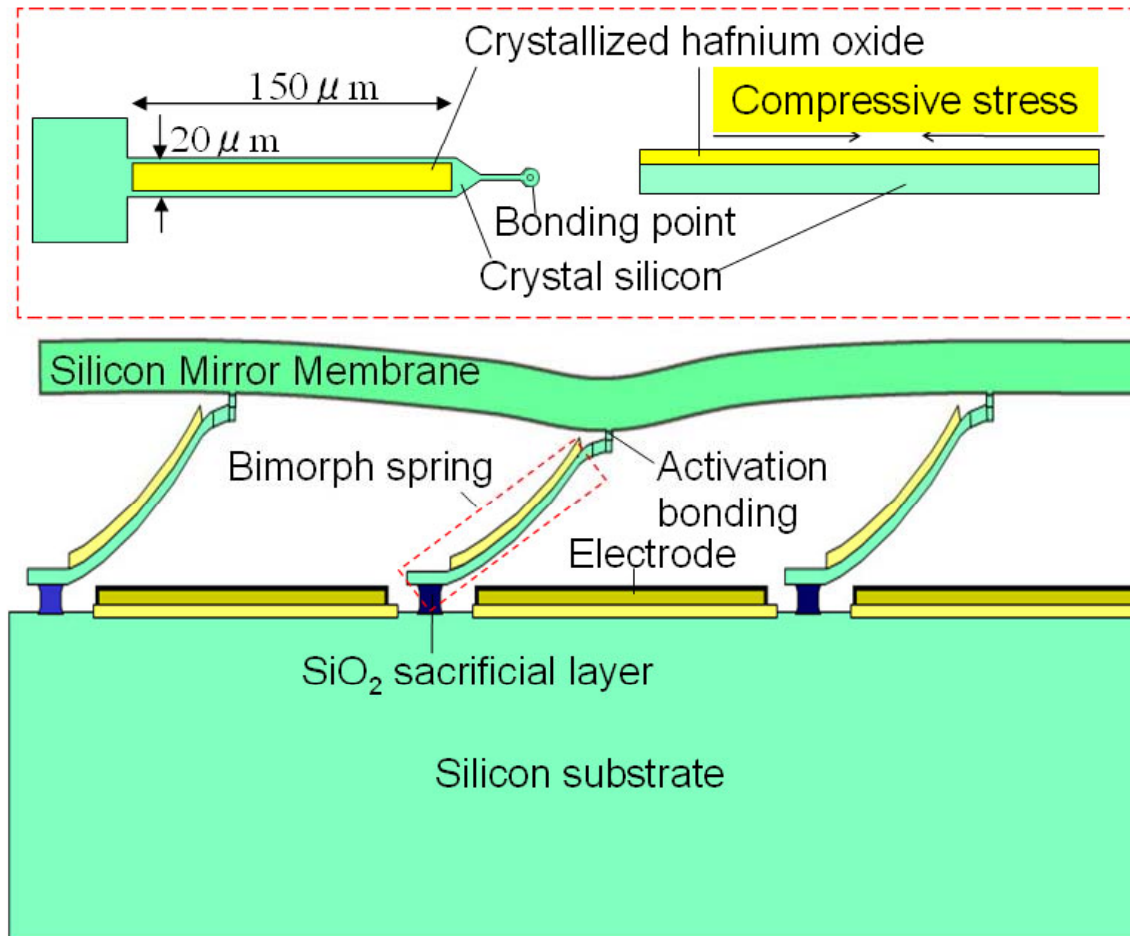
Boston Micromachines, AO4ELT2 presen, webpage.

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 (D2)

We propose a new structure membrane MEMS-DM using

Si/HfO₂ Bimorph spring

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**.

High-stroke MEMS-DM Structure

小型大ストローク多素子 MEMS 可変形鏡の製作プロセス

(a) Actuator chip

(1) Silicon DRIE (Form bonding point)



(2) Silicon DRIE (Form Electrode)



(3) HfO2 Liftoff



(4) Annealing (HfO2 crystallization)

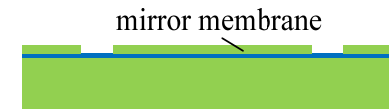


(5) Au/Cr deposition and patterning



(b) Mirror chip

(1) Silicon DRIE (Form mirror membrane)



(2) HfO2 liftoff



Si



SiO₂



HfO₂

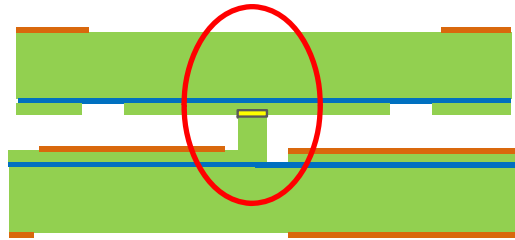


Au/Cr

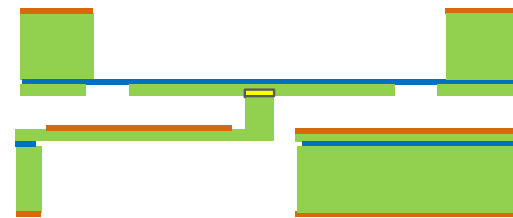
小型大ストローク多素子 MEMS 可変形鏡の製作プロセス

(c) Bonding and release

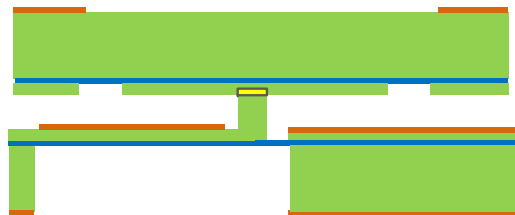
(1) Au-Si eutectic bonding



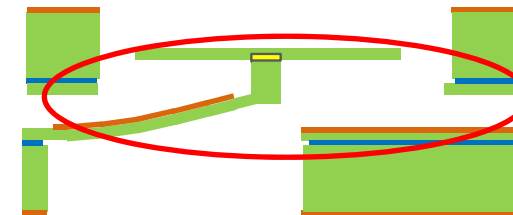
(4) SiO₂ Dry Etching (CHF₃)



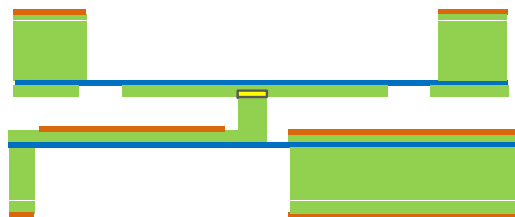
(2) Actuator chip handle layer etching



(5) SiO₂ Dry Etching (CHF₃)



(3) Mirror chip handle layer etching

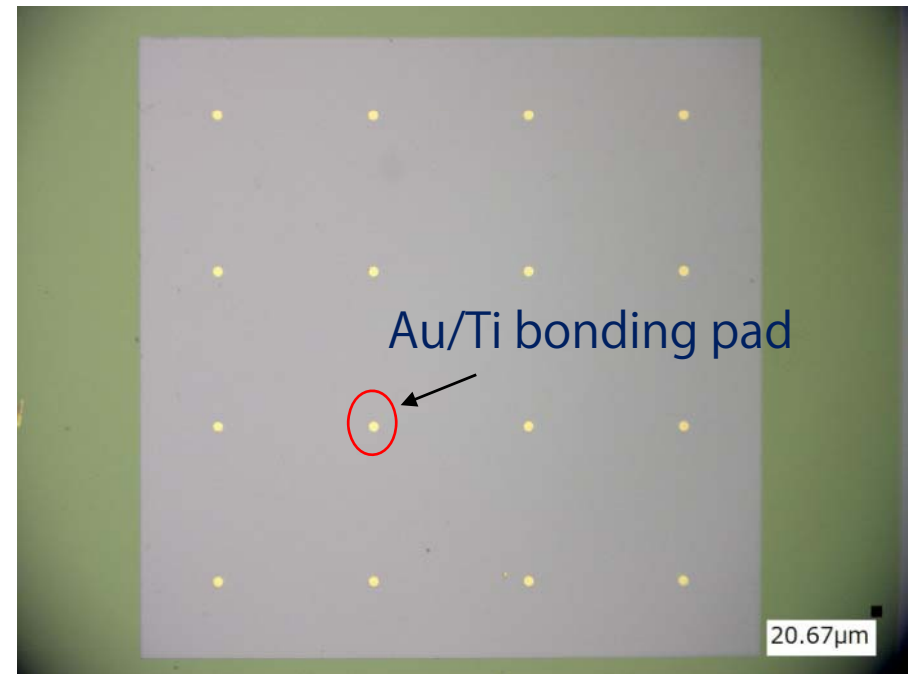


小型大ストローク多素子 MEMS 可変形鏡の小素子試作

- Actuator chip と Mirror chip を Au-Si の共晶化接合で接合する。



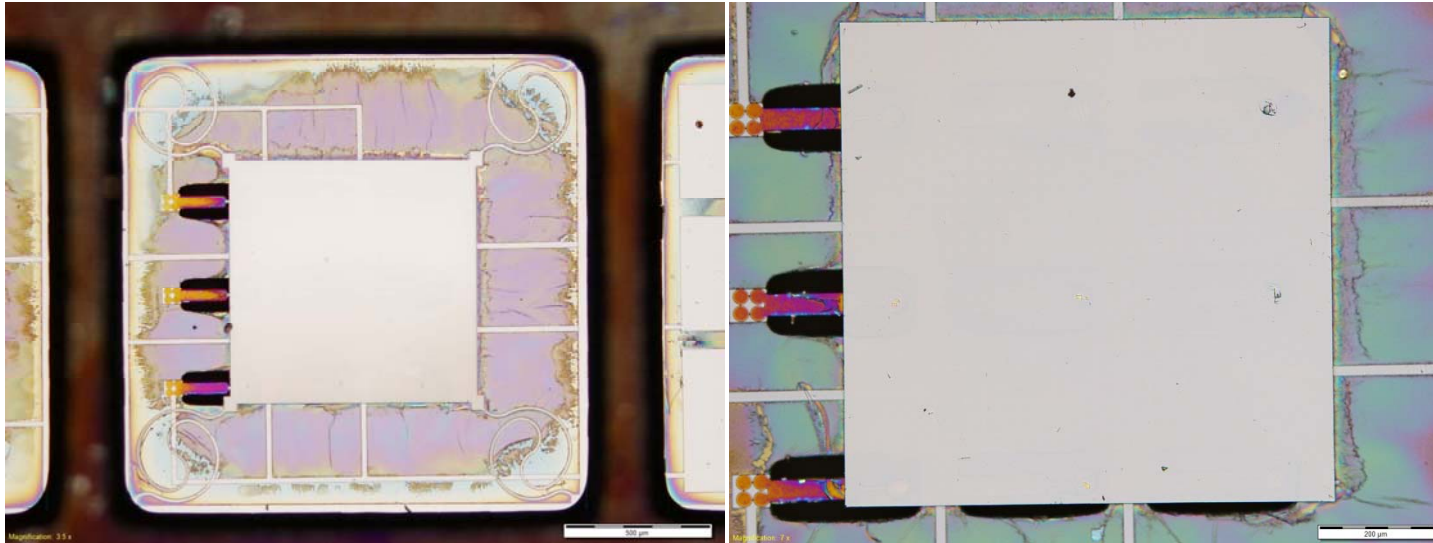
Actuator chip



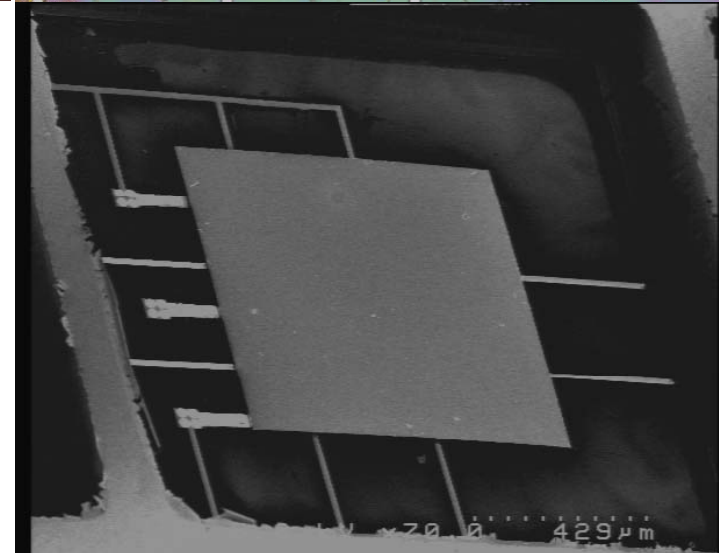
Mirror chip

小型大ストローク多素子 MEMS 可変形鏡の小素子試作

- 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。

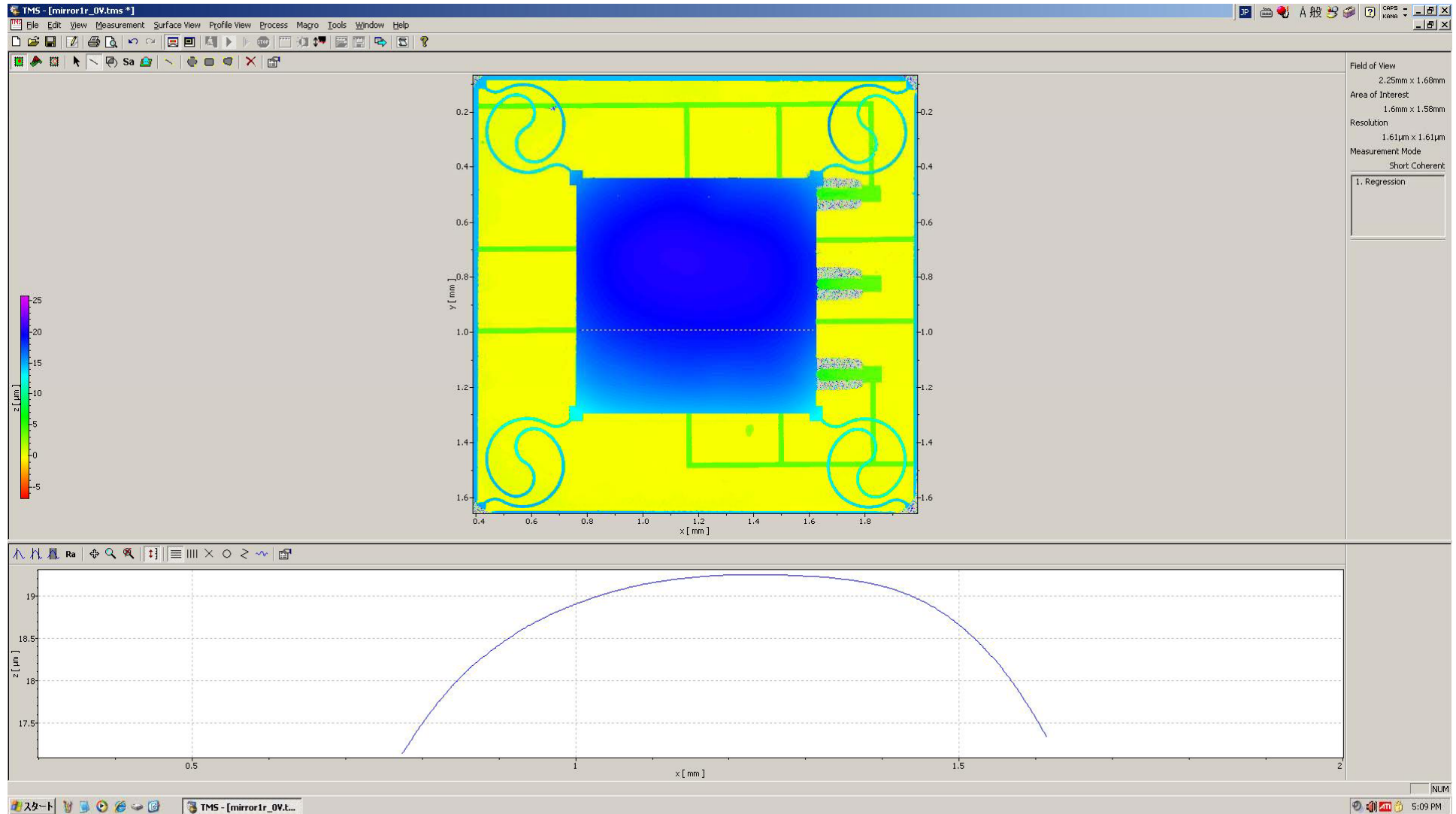


mirror with 2×2 electrode array



小型大ストローク多素子 MEMS 可変形鏡の小素子試作

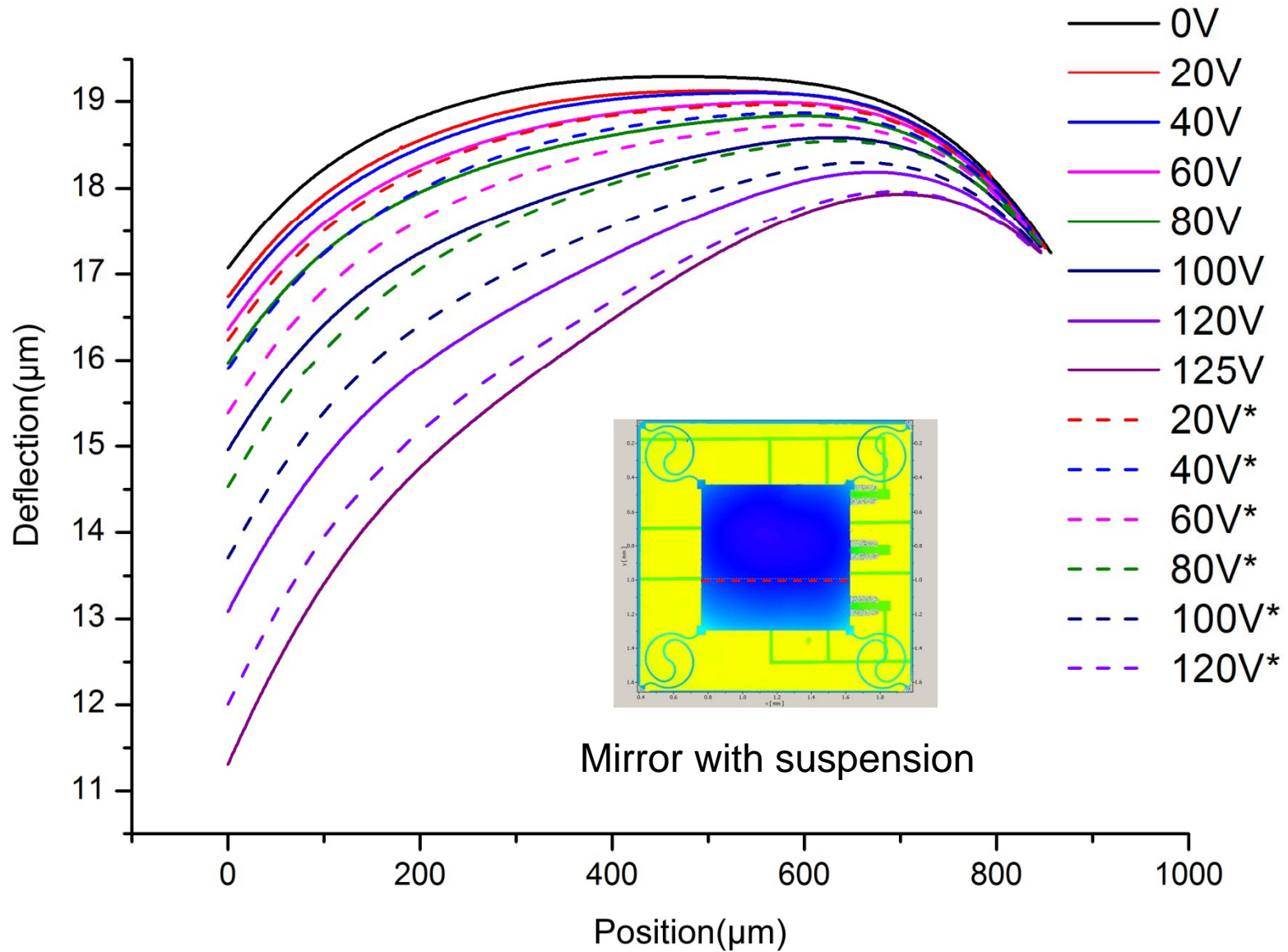
表面形状



Peak-valley value: $\sim 2\mu\text{m}$

Electrode gap: $20\mu\text{m}$

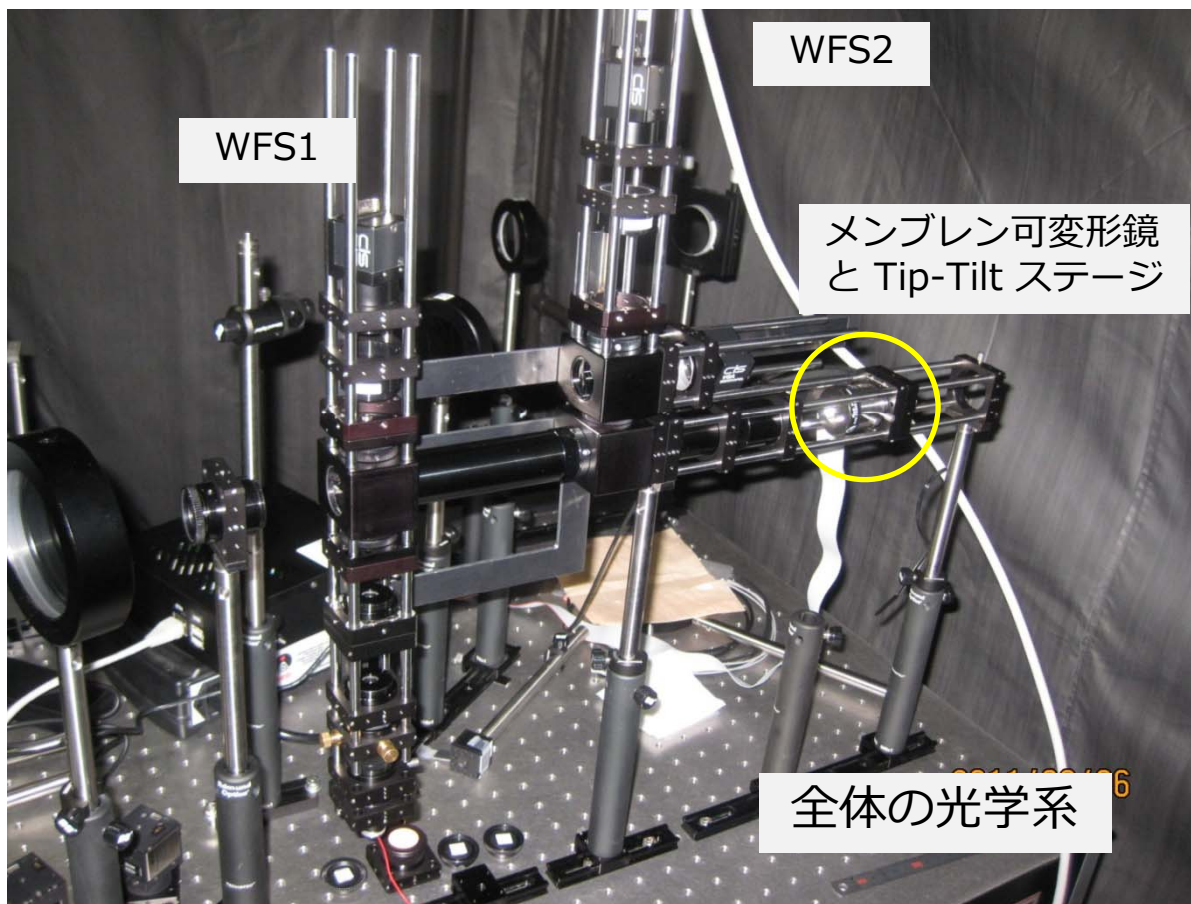
小型大ストローク多素子 MEMS 可変形鏡の小素子試作



開ループ補償光学系の試験



マイクロレンズアレイ



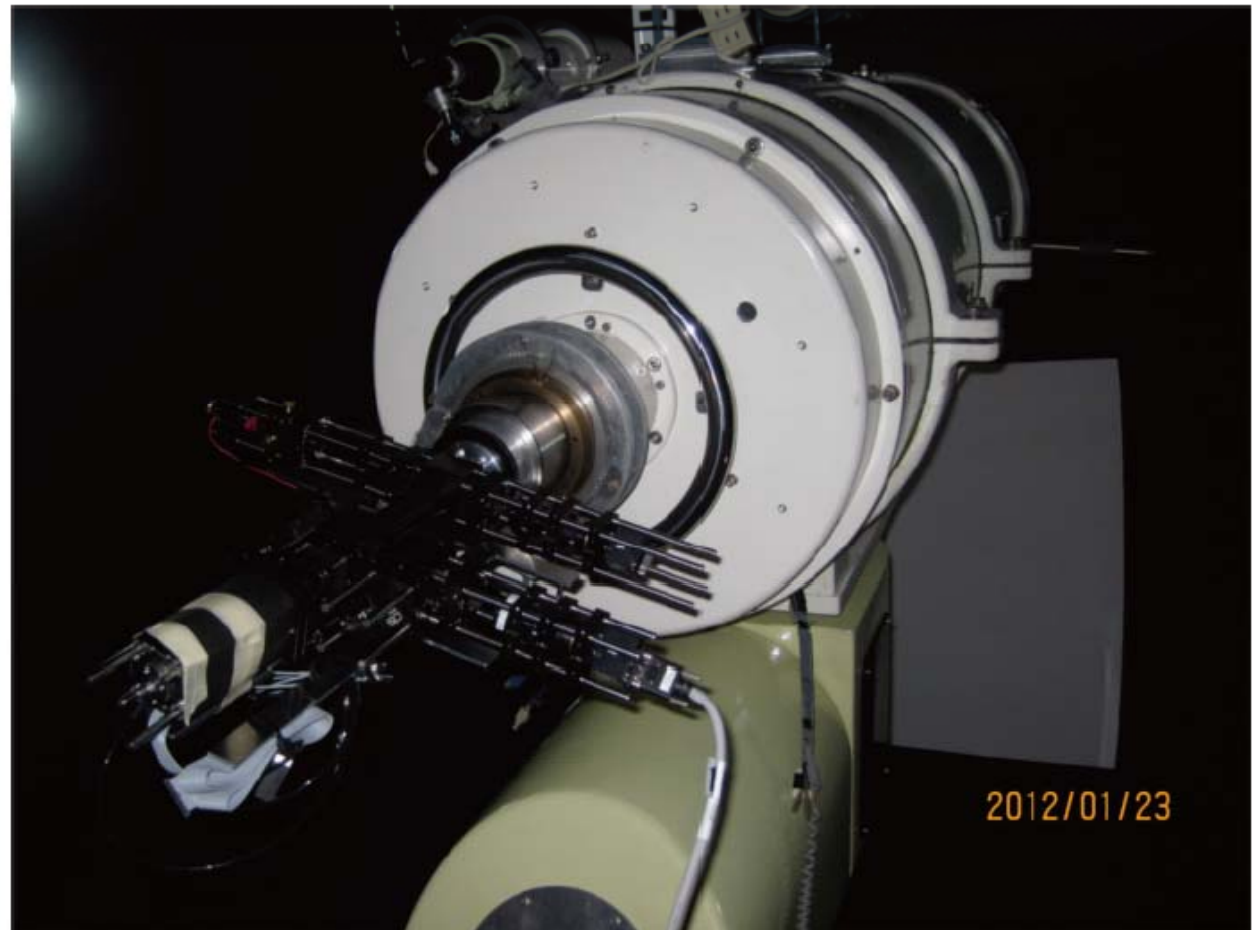
WFS1

WFS2

メンブレン可変形鏡
と Tip-Tilt ステージ

全体の光学系

開ループ補償光学系の試験



開ループ補償光学系の試験

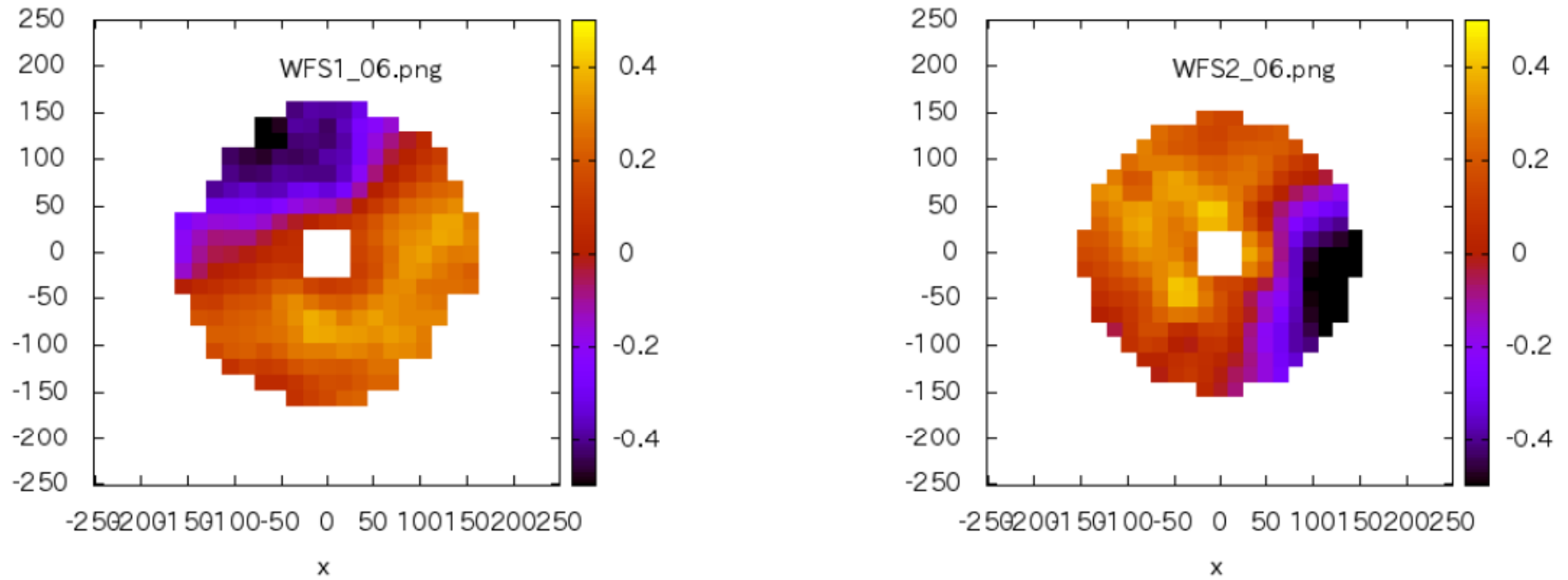


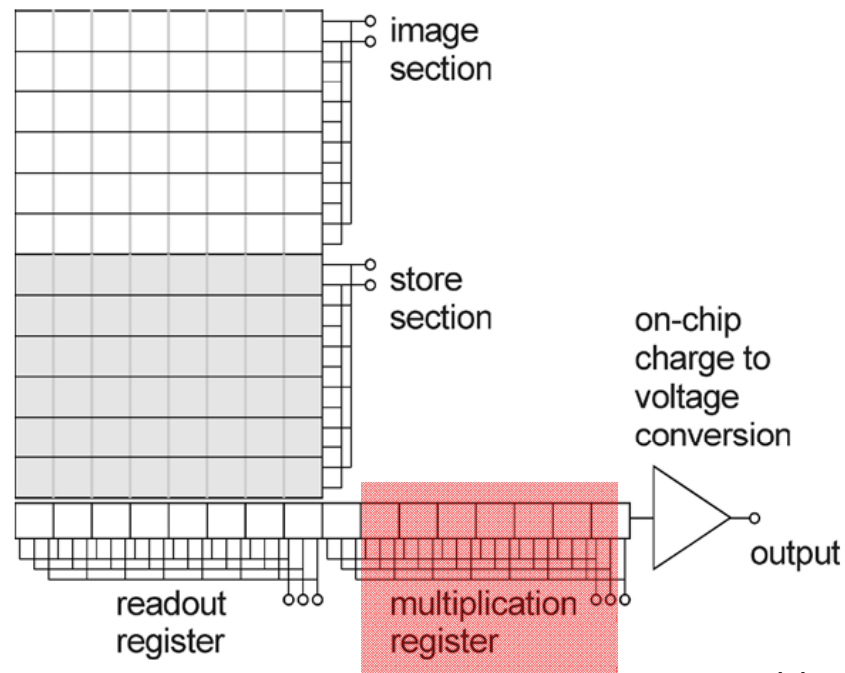
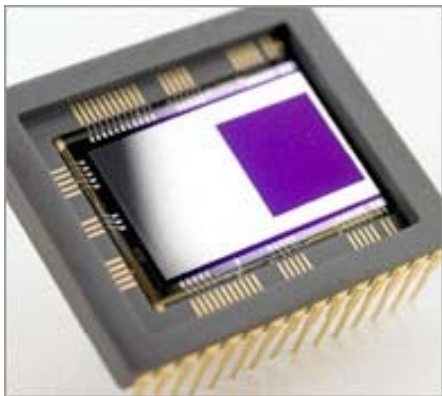
図 21 二つの波面センサで得られた波面の比較。左が WFS1、右が WFS2

電子増幅型CCDを用いた波面センサーの開発

天文補償光学系においてはターゲットが暗いので波面センサーに用いられる検出器は出来るだけ感度が高く、出来るだけノイズが低いことが求められる。

CCDでは~100%の感度が達成されている。>100フレーム毎秒の短い読み出し時間では冷却していれば暗電流は無視できる。読み出しに伴うノイズが低いことが重要になる。

電子増幅型CCDでは各ピクセルにたまった電荷を読み出す際に増倍して読み出すことで実効的な読み出しノイズを抑えることが可能である。



Robbins et al. 2003

Fig. 2. Schematic of the EMCCD arrays studied here.

電子増幅型CCDを用いた波面センサーの開発

電子増幅をおこなうことで、1-100 photons 程度の低照度においてもショットノイズの70%程度のノイズレベルを達成することができる。

電子増幅のランダムさと早い読み出しに伴う Clock Induced Charge が問題である。

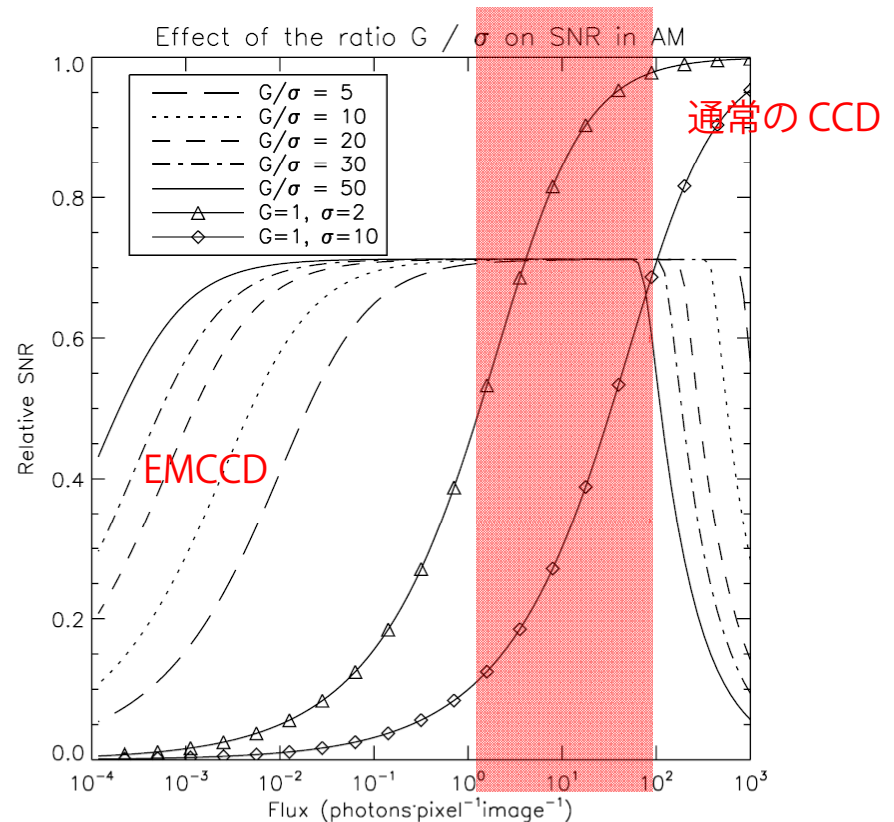
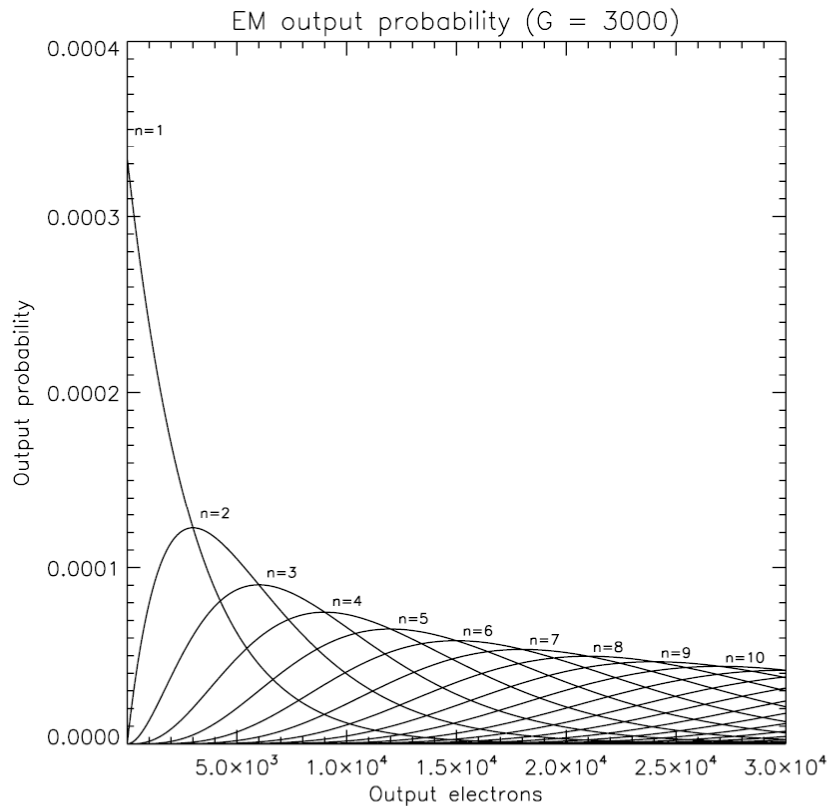
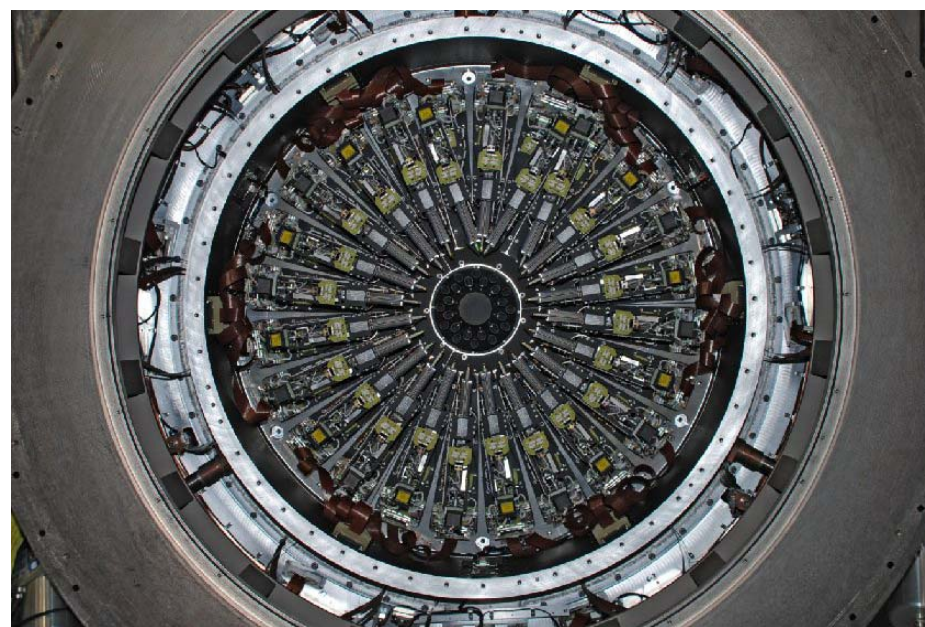
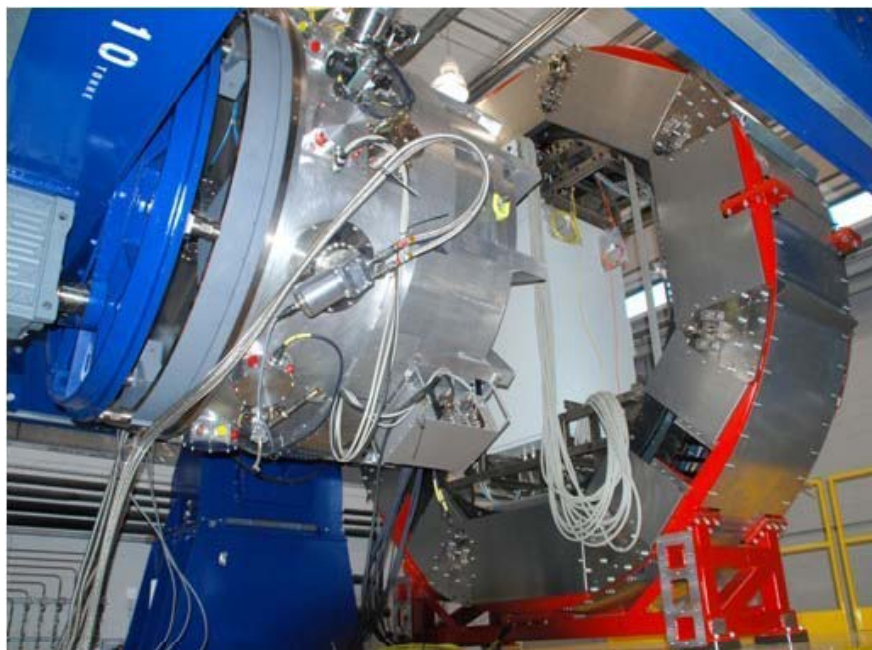


FIG. 1.—(Left) Output probability of the amplification register of an EMCCD, for a mean gain of 3000 plotted for various amount of input electrons, n . The overlapping regions are the result of the ENF induced by the multiplication process. (Right) Relative SNR as a function of the photon flux per image, the readout noise of the EMCCD and its operating gain. A saturation level of 200,000 electrons is assumed, the readout noise is 50 electrons unless noted, the dark noise and CIC are neglected.

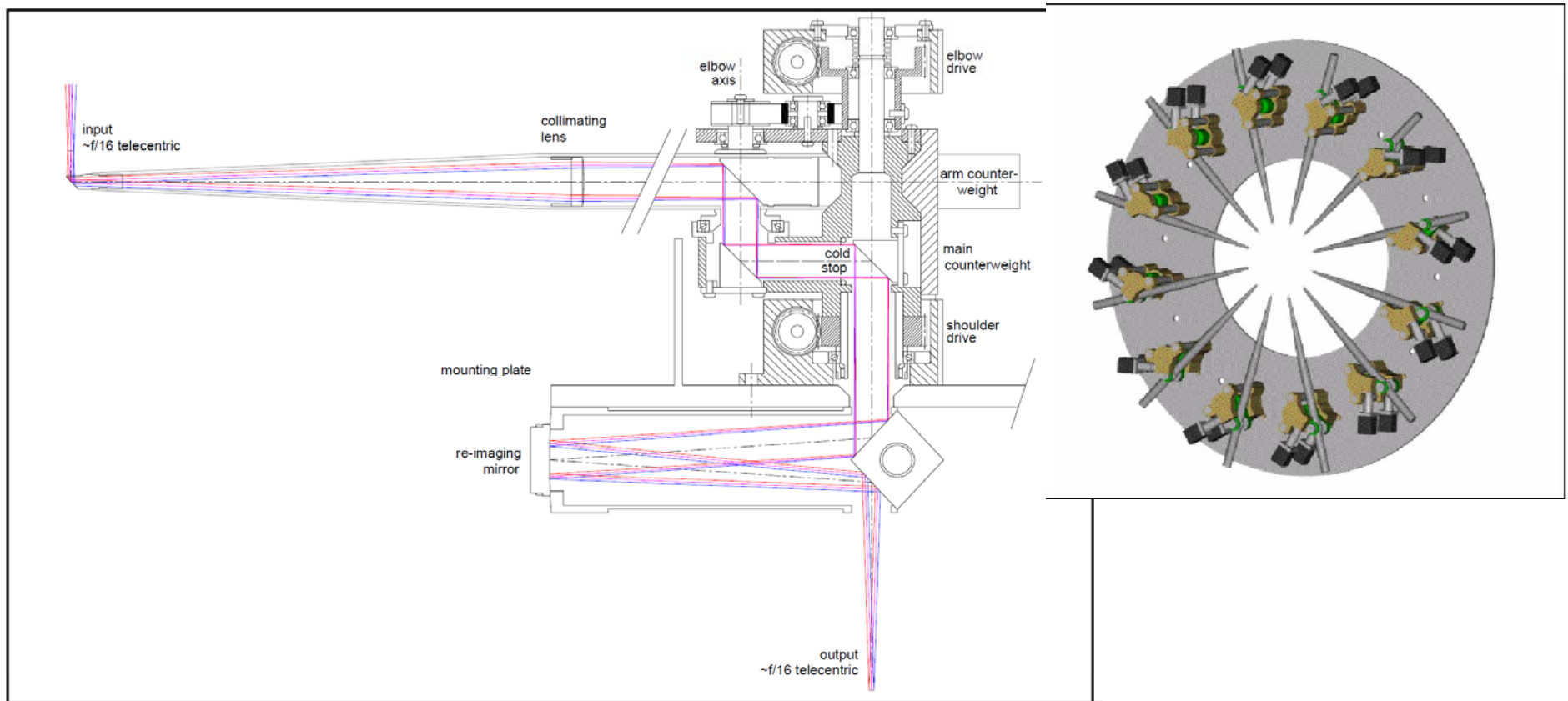
多天体面分光器部の想定：8m VLT/KMOS の例を元に

1.0-2.5 μm IFU で 7.2' 直径の 24 天体を面分光観測する。それぞれの IFU は 2.8" x 2.8" の視野を 0.2" サンプルングでカバーする。光学系は pick-off 部分 24 台、IFU 部分 24 台、スリット分光器部分 3 台、で構成される。Pick-off 部分以降は光学ベンチに固定されている。



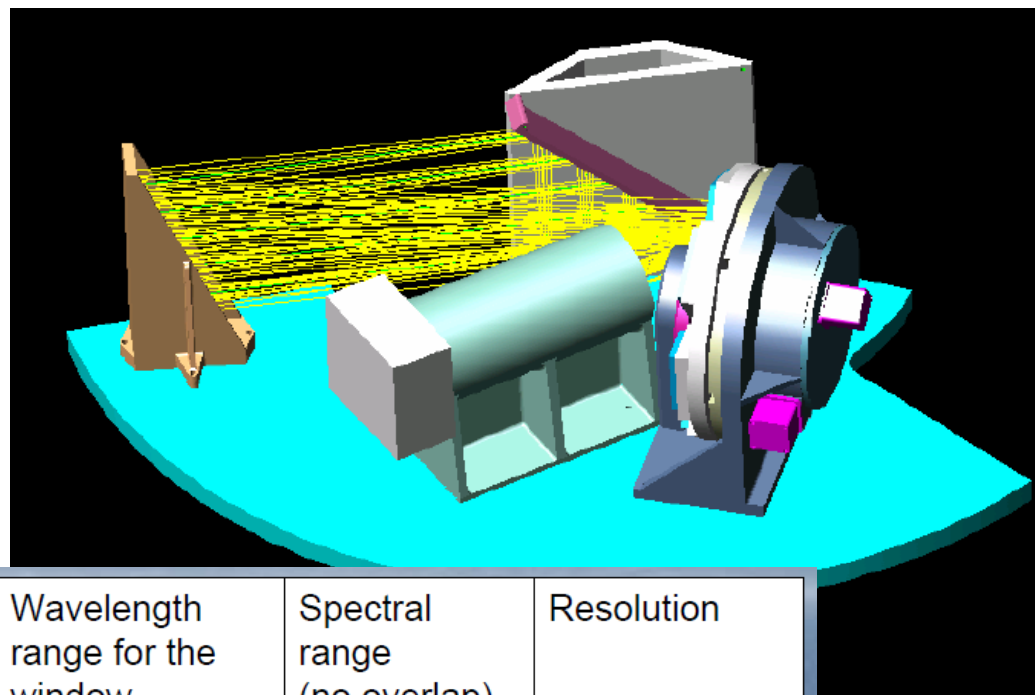
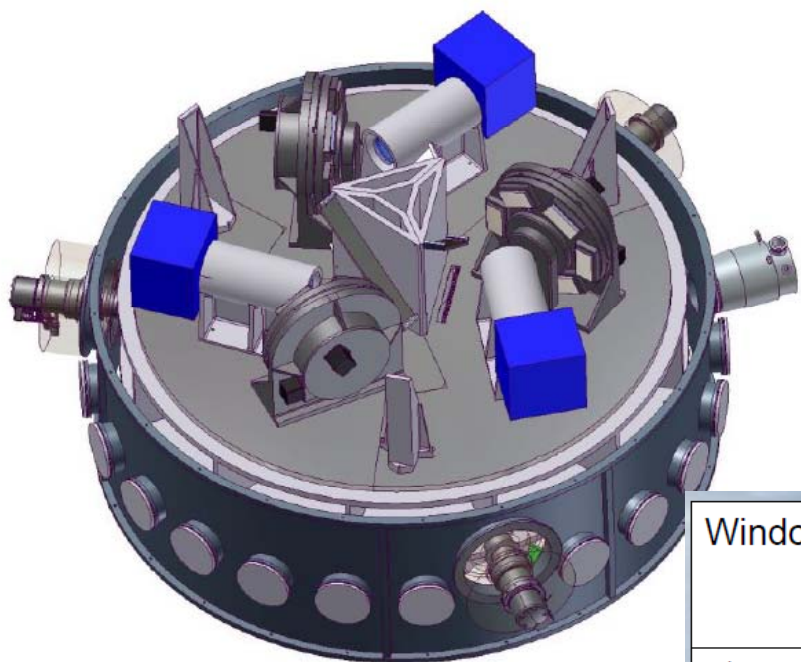
多天体面分光器部の想定：8m VLT/KMOS の例を元に

天体の pick-off 部分は 2 軸の回転機構で光学的には再結像系で cold-stop を持つ。



多天体面分光器部の想定：8m VLT/KMOS の例を元に

反射系のグレーティング分光器が3台で構成される。どちらの図も下面がスリット側。15面の反射+1枚レンズ+グレーティング+カメラ光学系。



Window	Wavelength range for the window	Spectral range (no overlap)	Resolution
z†	0.80-1.05um	0.25um	3380
J	1.05um-1.37um	0.32um	3380
H	1.45um-1.85um	0.4um	3800
K	1.95um-2.5um	0.55um	3750
JH	1.05um-1.85um	0.80um	1500
HK	1.45um-2.55um	1.10um	1500

まとめ

- R&D 1. 地表層+多天体補償光学系のシミュレーションに基づくシステム検討 (大野発表を参照)
- R&D 2. 大可変形鏡製作の基礎検討
- R&D 3. オープンループ補償光学系の on-sky 実証実験
- R&D 4. 地表層+多天体補償光学系の実験室実証、高速なトモグラフィ計算の実現
- R&D 5. 多天体補償光学系 RAVEN の on-sky 実証試験
- R&D 6. 小型多素子大ストローク可変形鏡の開発