



TOHOKU
UNIVERSITY

第9回 可視赤外線観測装置技術ワークショップ 2020
2020/12/1-2

ULTIMATE-START: すばる望遠鏡 レーザートモグラフィー 補償光学の開発

**寺尾航暉、秋山正幸、大金原、飯塚悠太（東北大）、美濃和陽典、
大屋真、大野良人（国立天文台）、山室智康（オプトクラフト）**

ULTIMATE-START (Subaru Tomography Adaptive optics Research experiment)

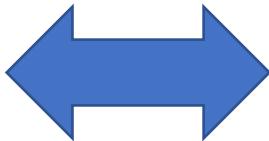
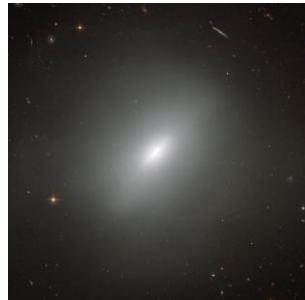
- **すばる望遠鏡でレーザートモグラフィー補償光学 (LTAO) を実現**
 - 4つのレーザーガイド星を4つの波面センサーで測定
 - 波面センサー系をAO188の後ろに配置
- **レーザーガイド星を用いた補償光学の性能向上**
- **可視光域 (> 600 nm) での補償光学の達成 (Strehl ratio ~ 0.1)**
 - ➔ 4つのレーザーガイド星を用いた大気揺らぎのトモグラフィー推定で実現
- **2021年度のファーストライトを目指**

Akiyama+20, SPIE

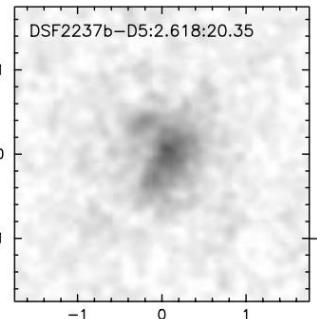
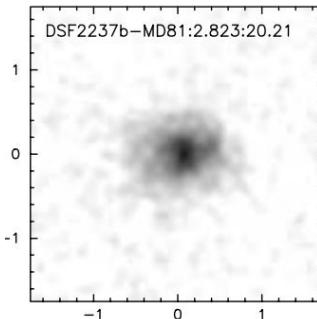
補償光学を用いたサイエンス

- 遠方宇宙での銀河の内部構造の観測（銀河の構造・形態進化）
- 面分光装置による銀河のガス運動・物理状態のマッピング
より高空間分解能での観測 → 地上観測では補償光学が必須

low-z galaxies ($z \sim 0$)



high-z galaxies ($z \sim 2-3$)



©NASA

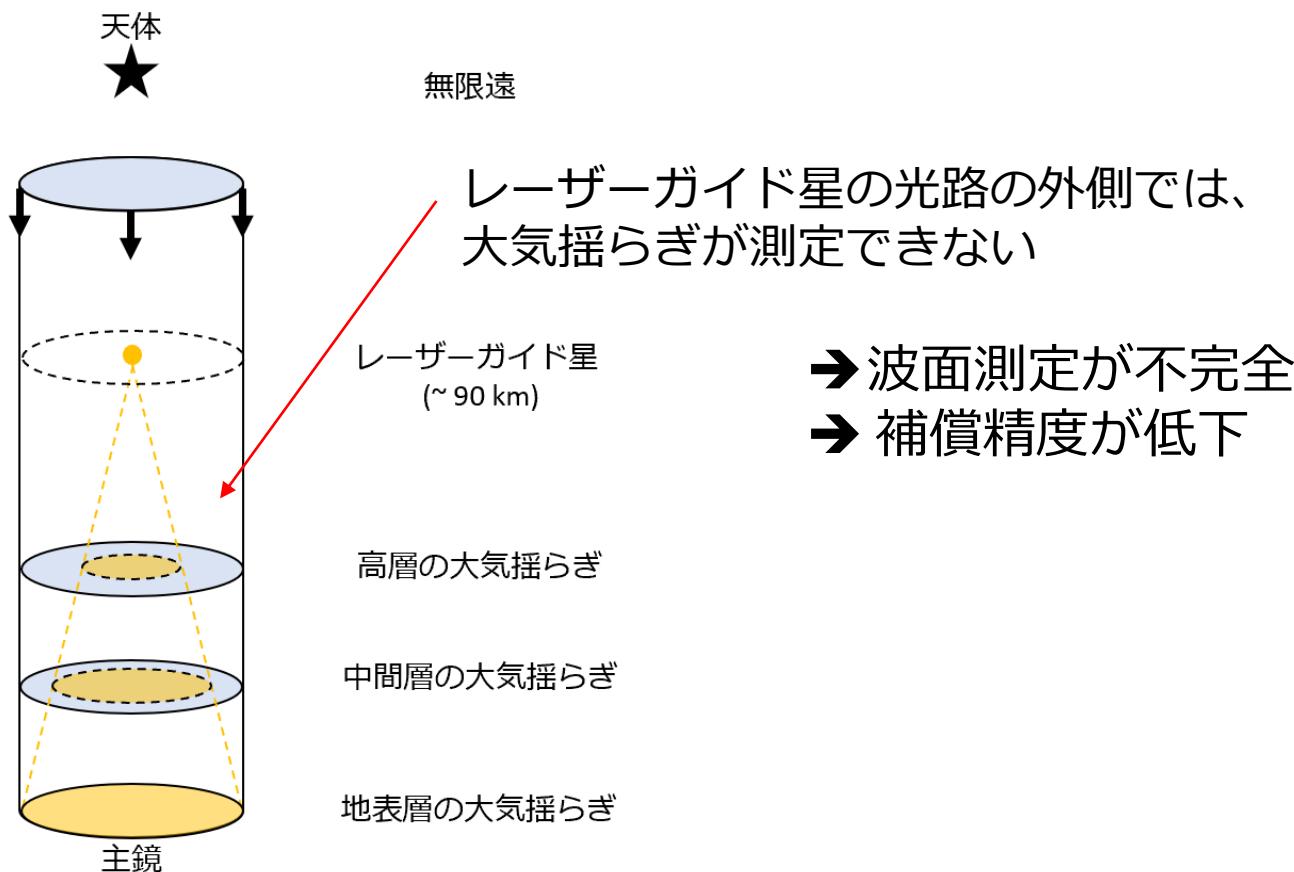
形態が大きく異なる

Akiyama+08

- 自然ガイド星 (NGS) による補償光学では、近くに明るい星がなかなか存在しないため、ターゲットが絞られてしまう
→ レーザーガイド星 (LGS) を用いた補償光学が必須

レーザーガイド星による補償光学

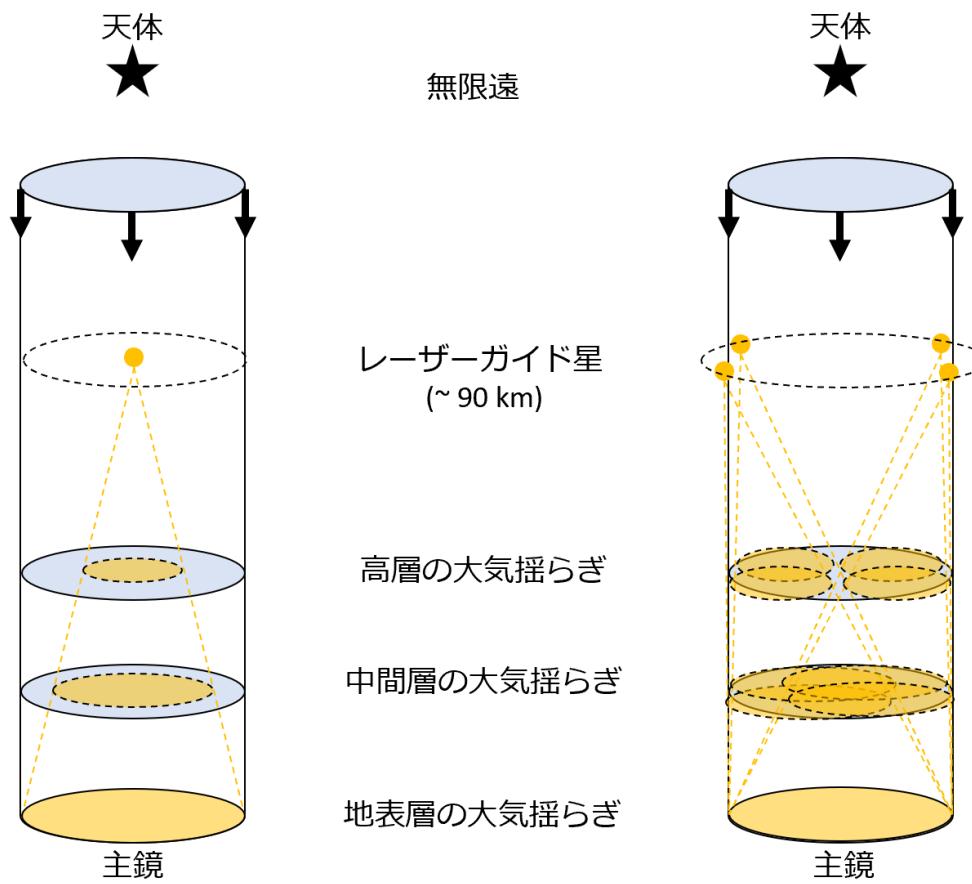
- 観測天体は無限遠に存在するため、平行光として円筒状の光路を通る
- レーザーガイド星は有限の高度にしか作成できないため、1つのレーザーガイド星を用いた補償光学では天体の光路全体をカバーできない（コーン効果）



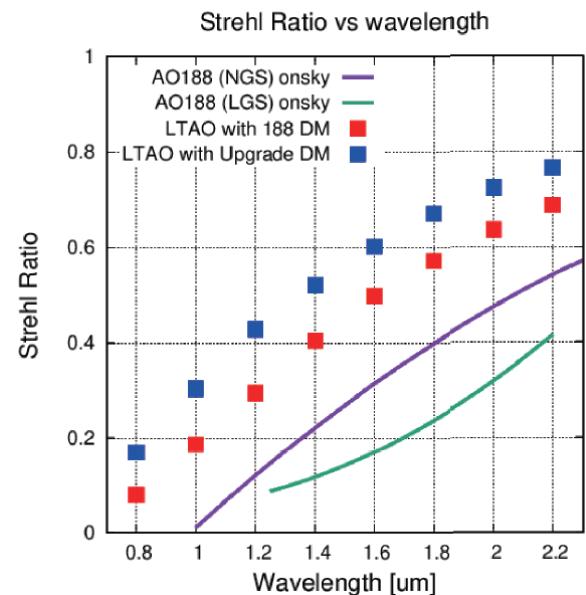
レーザートモグラフィー補償光学 (LTAO)

- 複数のレーザーガイド星で天体の光路全体をカバー
→ コーン効果の低減
- トモグラフィーの手法で大気揺らぎを高さ方向に分解
→ 波面測定の精度向上

(大金さん講演も参照：大気揺らぎプロファイルの推定)



シミュレーションによる
LTAO 性能評価 (by 大野さん)



- 可視光でも SR~0.1 を達成

ULTIMATE-START (Subaru Tomography Adaptive optics Research experiment)

LGS asterism
diameter:
10" - 40"

① レーザーガイド星 × 4

- 20W の高輝度レーザー (589 nm, TOPTICA社)
- 副鏡の上に設置されたレーザー送信望遠鏡から4本のビームを打上
- 最大直径 40" で LGS を配置

赤外ナスミス台

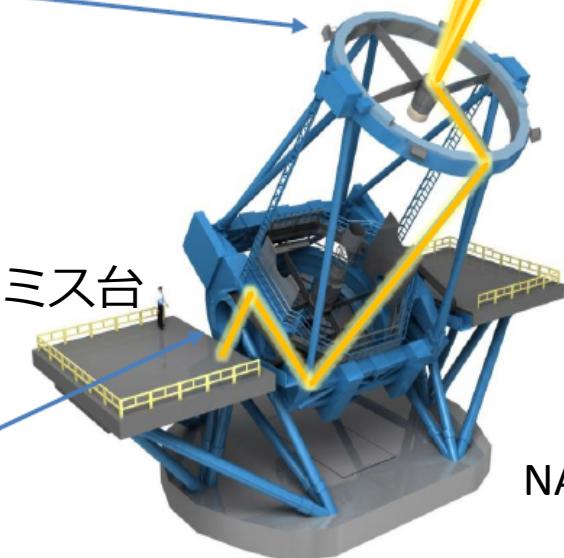
NAOJ

② 波面センサー × 4

- 4つのレーザーガイド星の波面測定
- AO188 の後ろに波面センサー系を設置

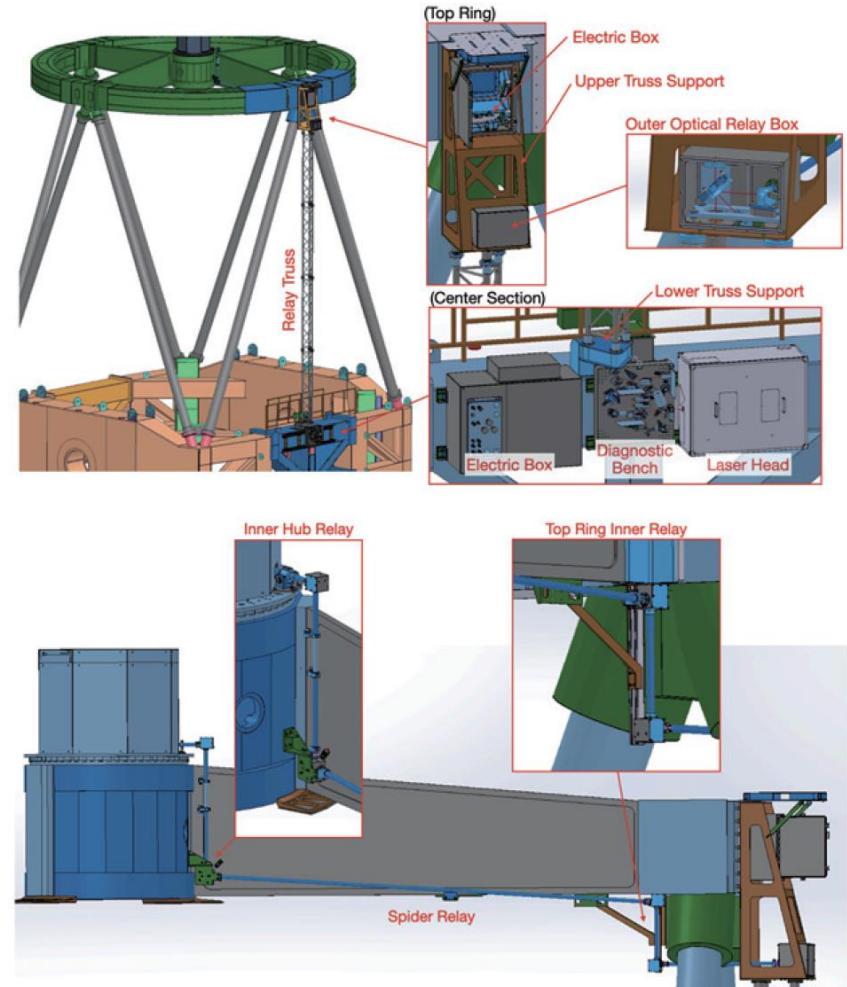
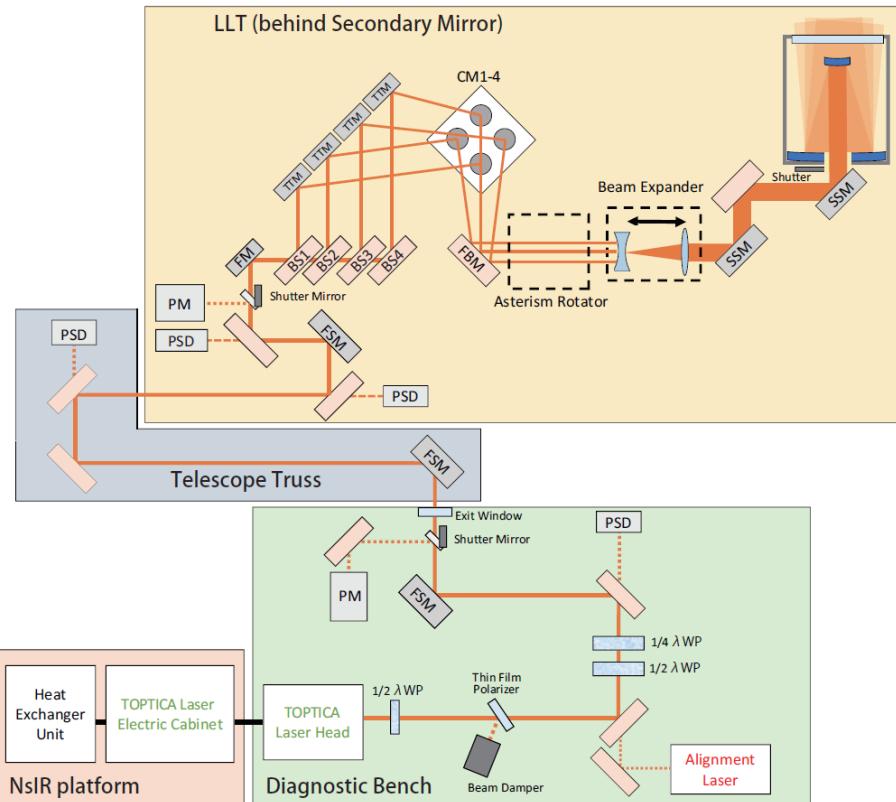
③ AO188 アップグレード

- 188 素子 DM から ALPAO 64 × 64 素子DMへの更新



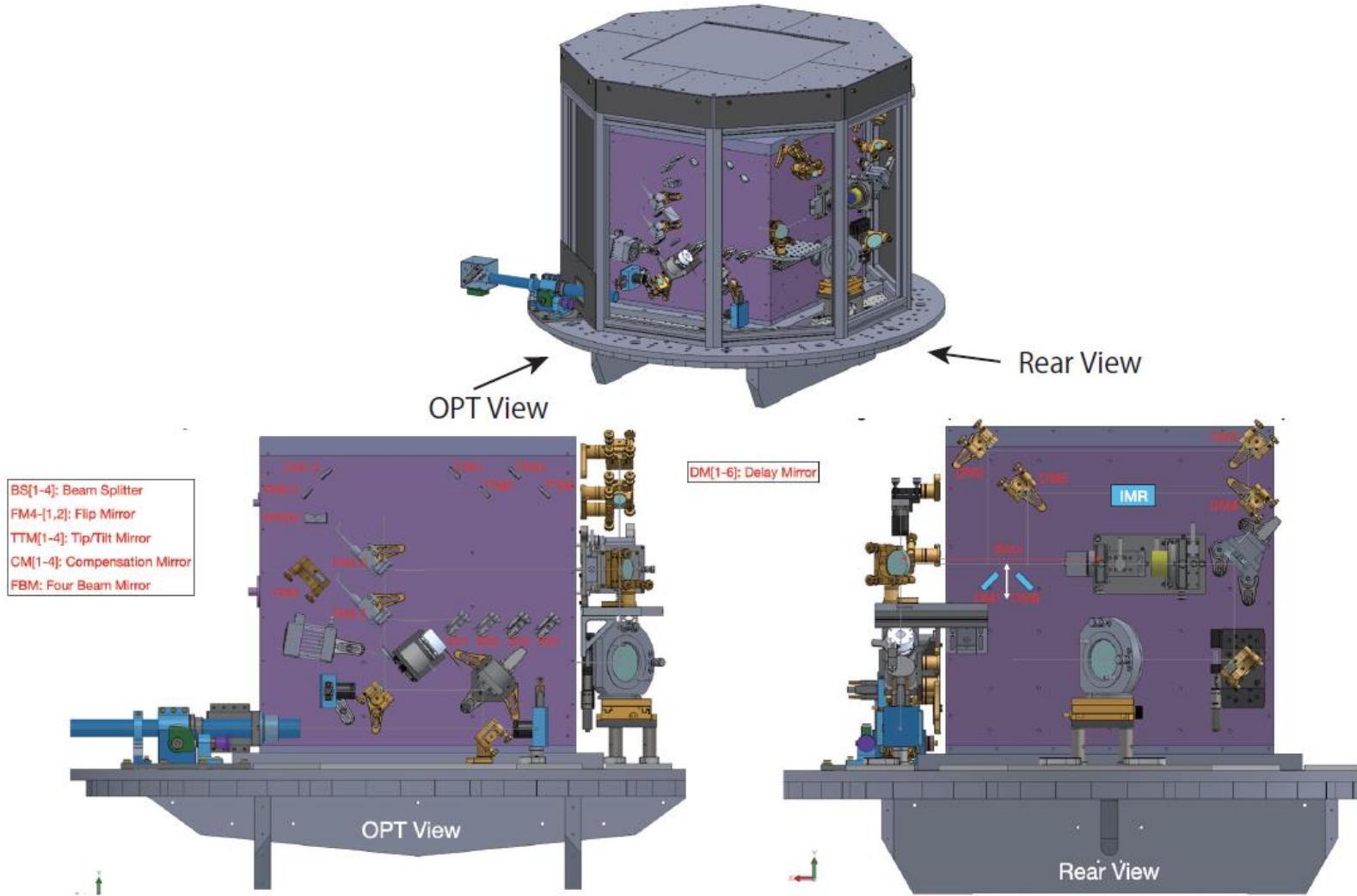
レーザー送信系

- 高輝度レーザー (TOPTICA 20W) の試験は終了
- レーザーリレー系・打上望遠鏡の製作中
- 単一レーザーガイド星光源として、すばる望遠鏡にインストールする作業を進めている



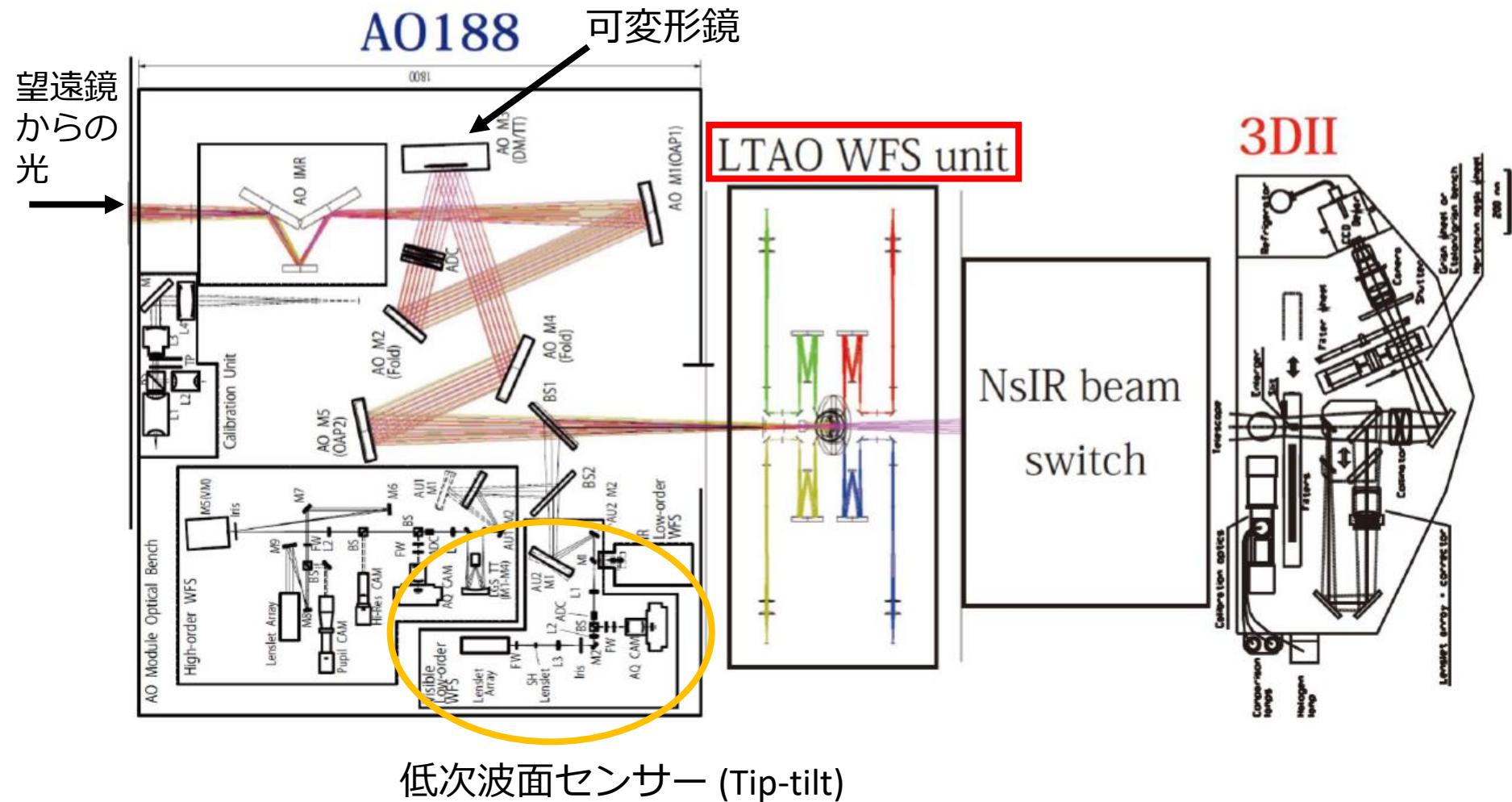
レーザー送信系

- 4分割レーザー打上望遠鏡の光学・機械設計は完了
- 製作進行中



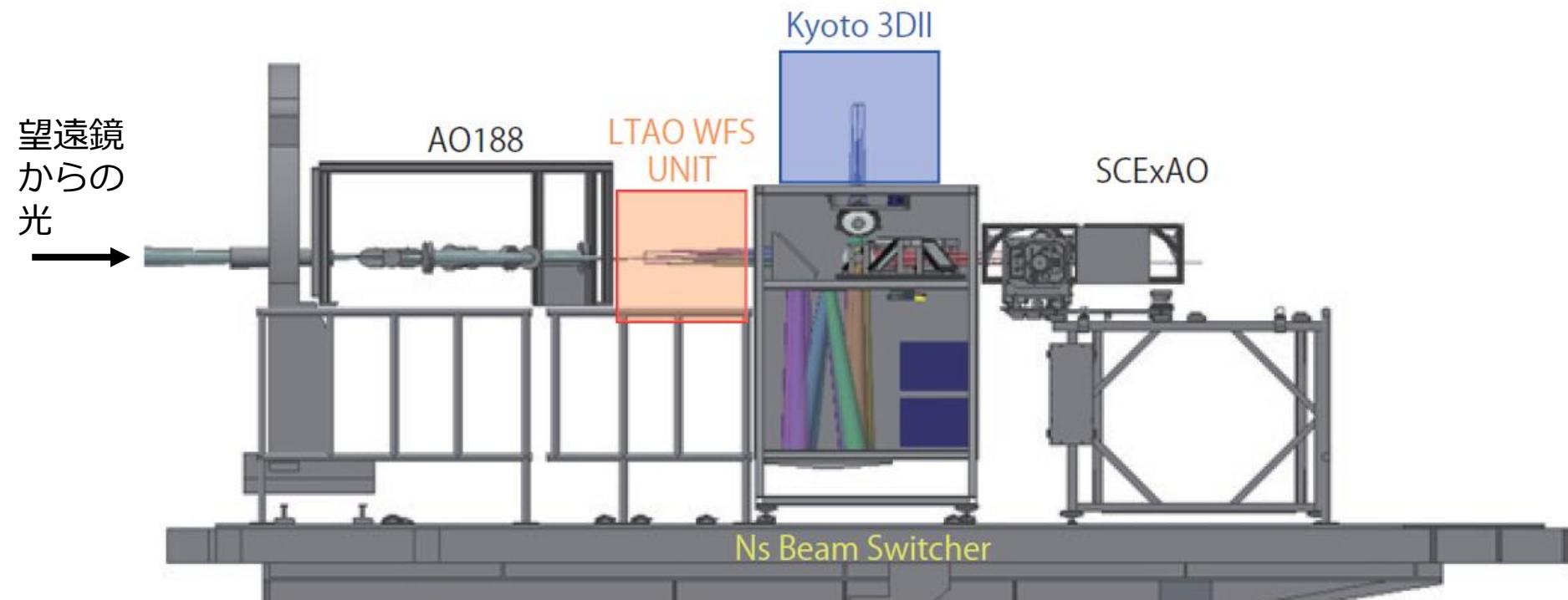
LTAO 波面センサー光学系 (赤外ナスミス台)

- AO188 の後ろに設置
 - ビームスイッチャーで観測装置を切り替え (IRCS, Kyoto 3D II)



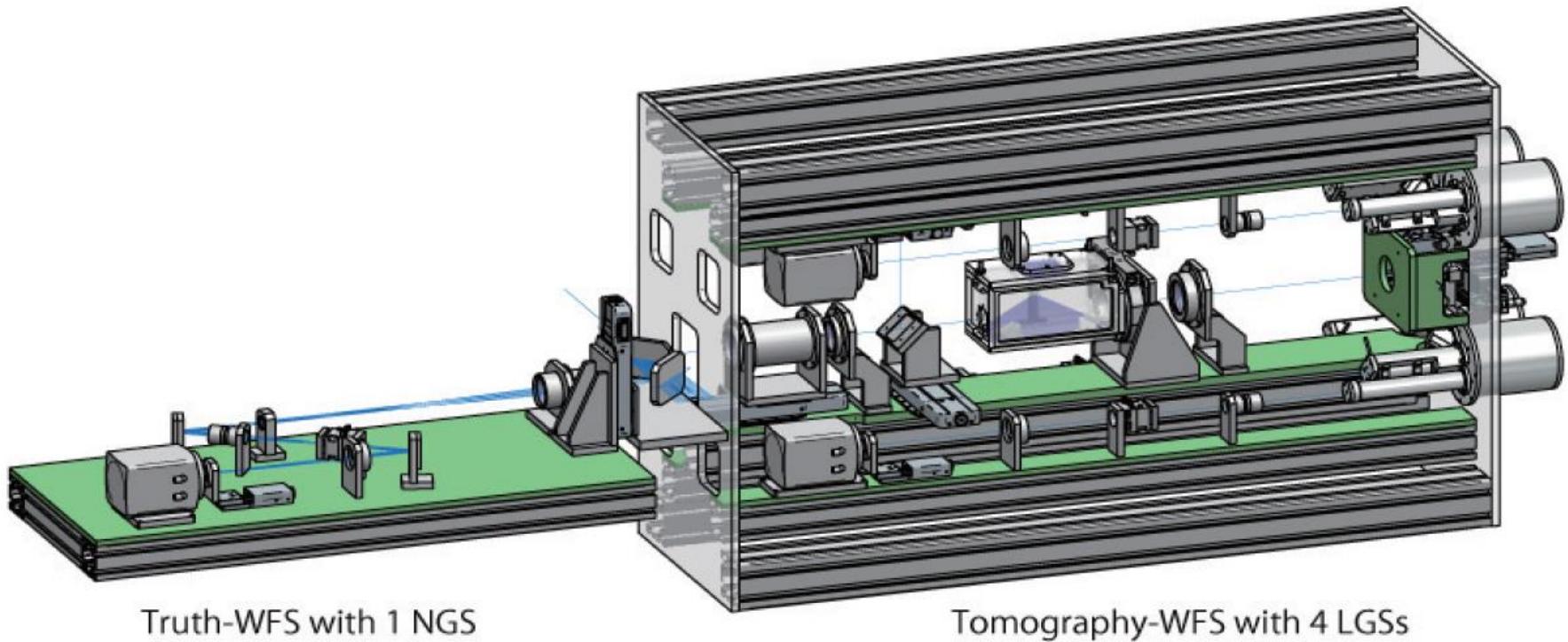
LTAO 波面センサー光学系 (赤外ナスミス台)

- AO188 の後ろに設置
- ビームスイッチャーで観測装置を切り替え (IRCS, Kyoto 3D II)



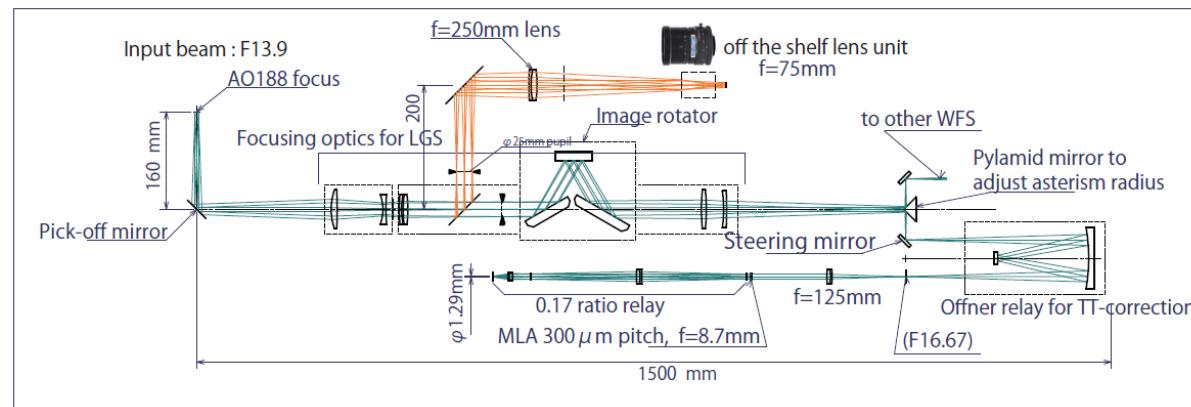
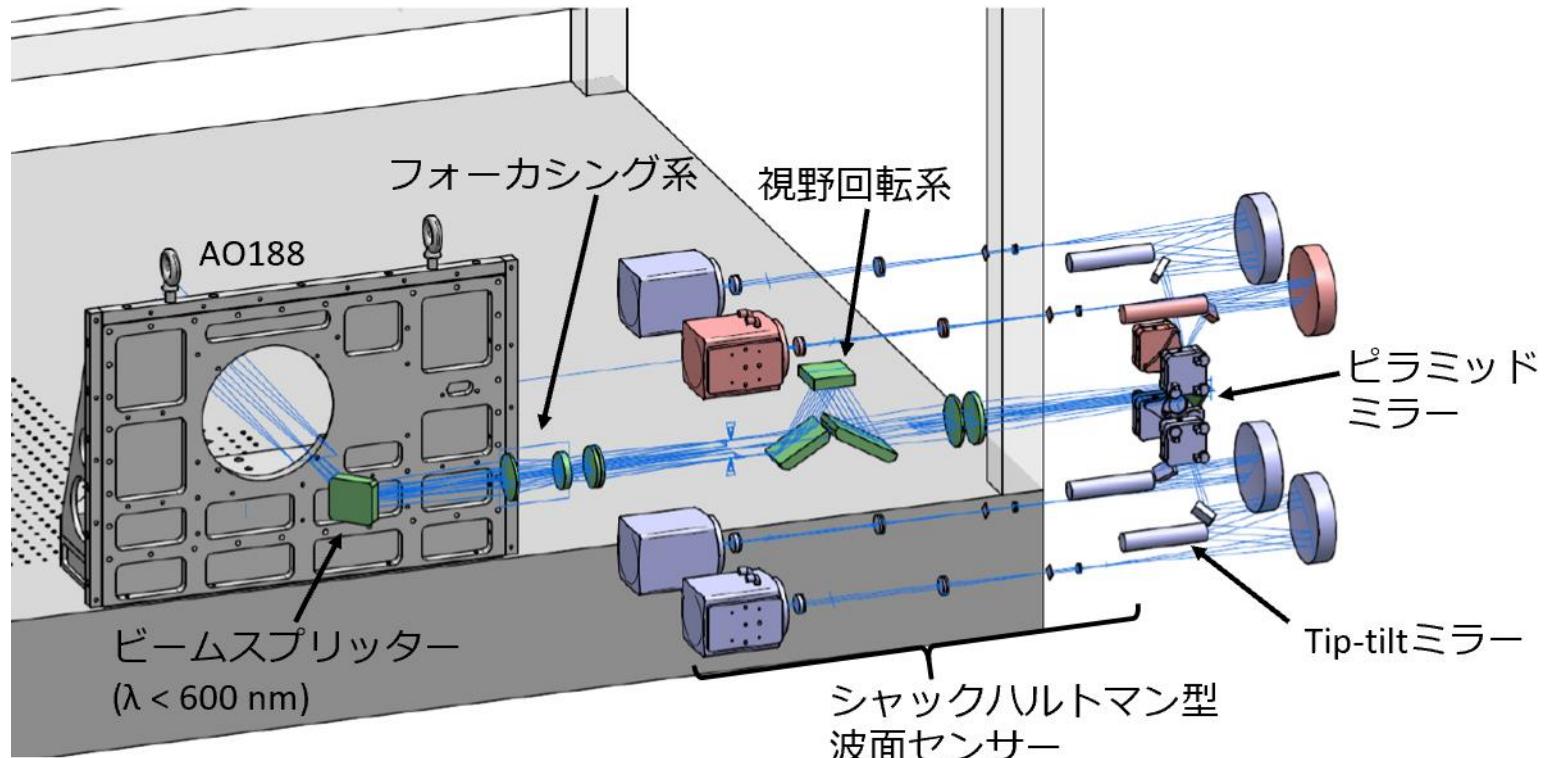
LTAO 波面センサー系：オプトクラフト

- 4 台のシャックハルトマン波面センサー + 1 台の Truth WFS
 - Hamamatsu OrcaFlash 4.0 v2
 - Truth WFS は明るい星を使って調整に用いる
- アルミニフレームとプレートで全体を保持
- 機械製作進行中（オフナー系は東北大にて調整中）



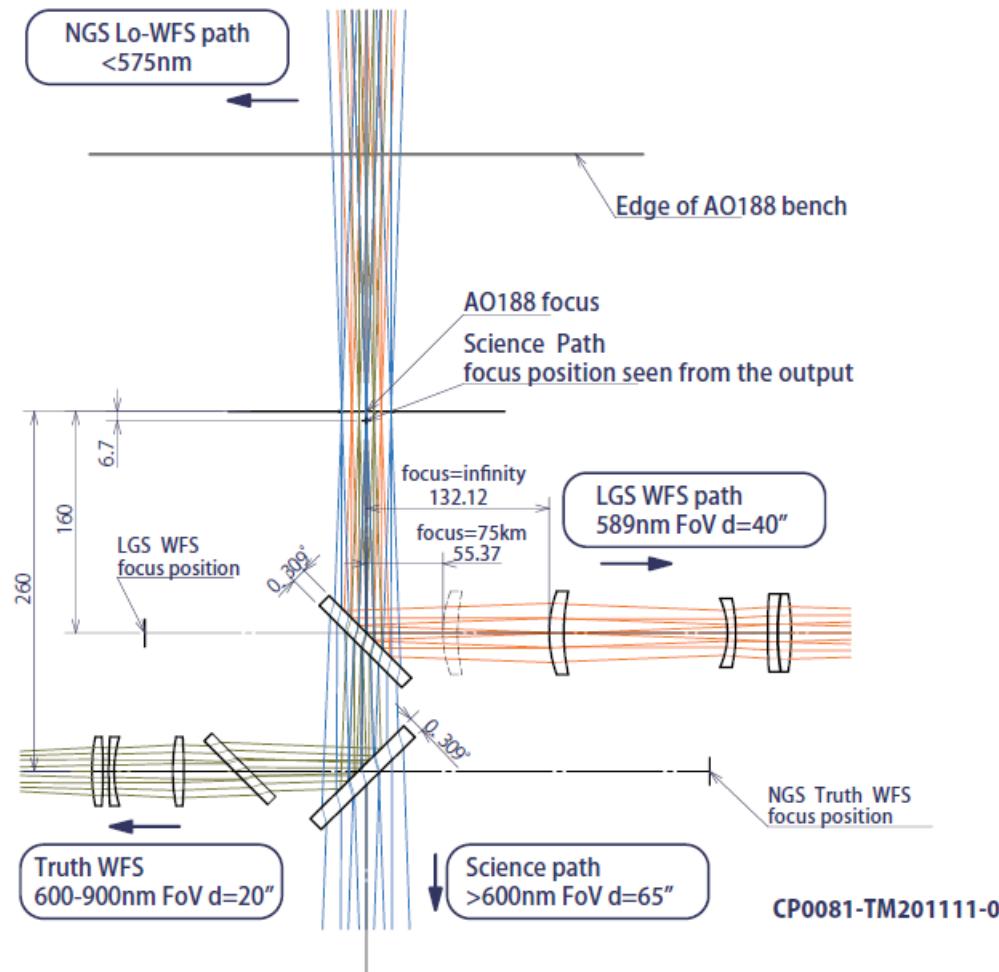
LTAO 波面センサー系：オプトクラフト

- 4台のシャックハルトマン波面センサー



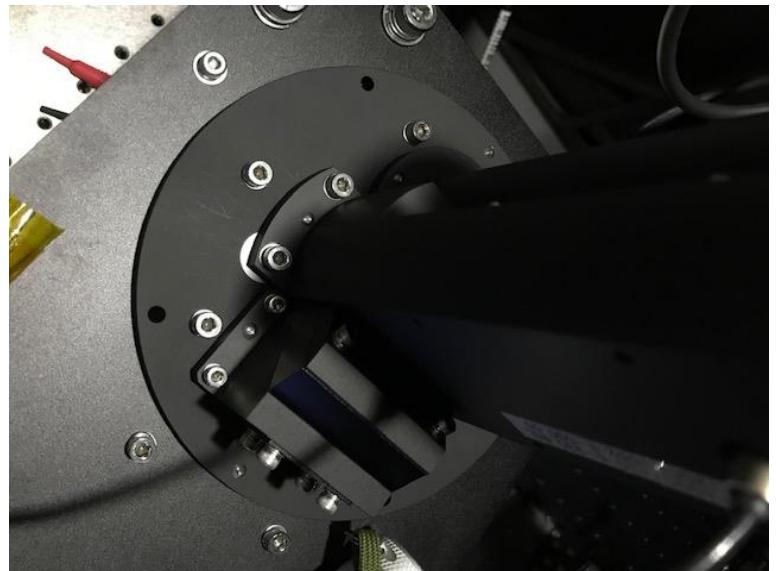
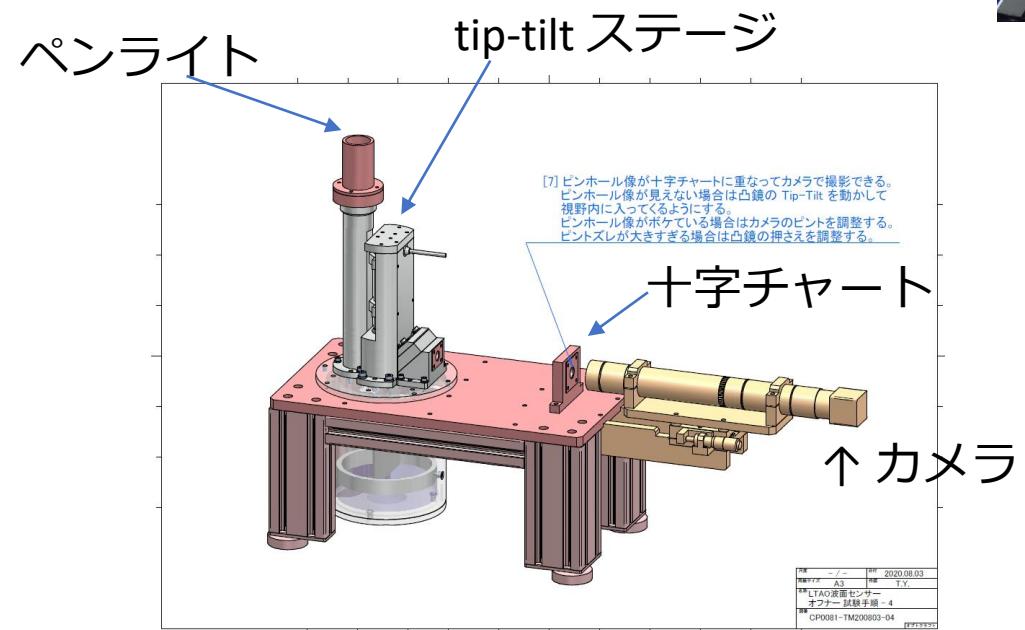
ピックオフ光学系

- 1枚目のビームスプリッター(合成石英)で波面センサー系へ($\lambda < 589 \text{ nm}$)
- 2枚目のプレート(合成石英)は光軸ズレの調整用。反射光を Truth WFS へ



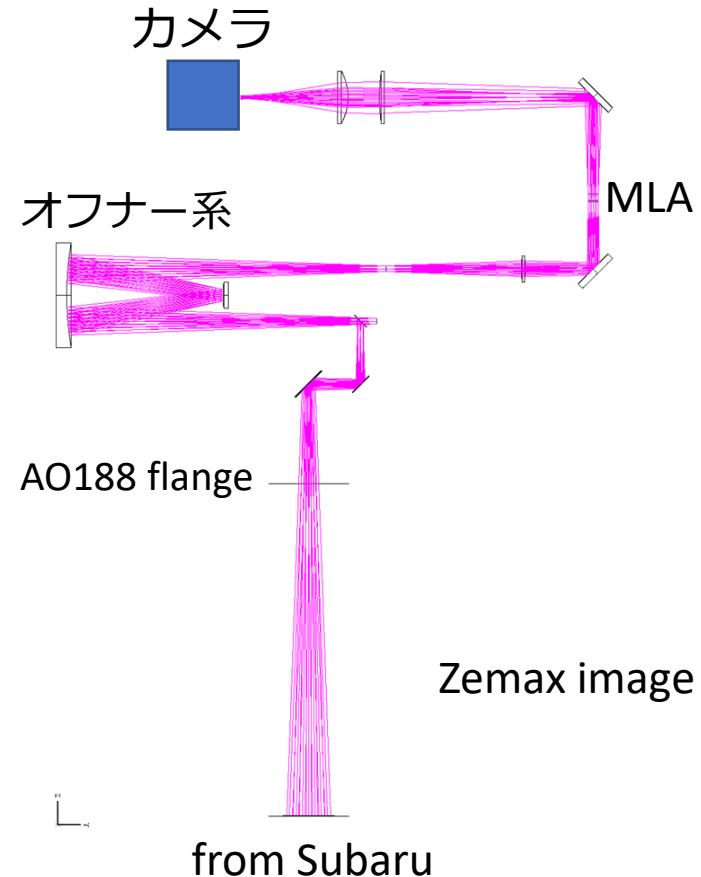
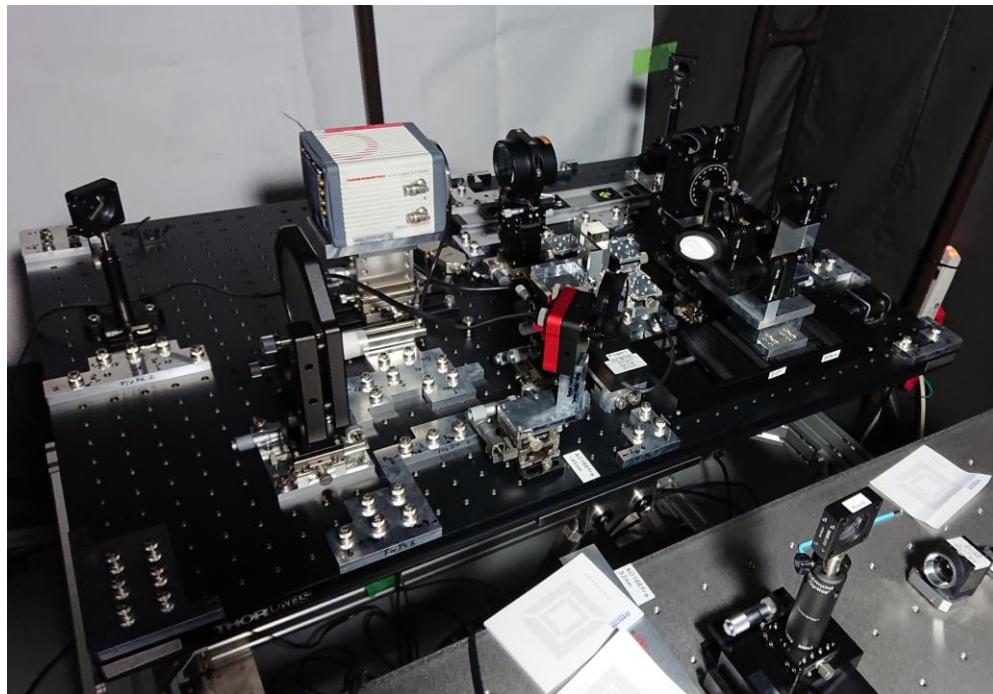
LTAO 波面センサー光学系：オフナー系

- ・ 東北大実験室にて、4台のオフナー系の光学調整を実施
- ・ シムを挟んでカメラ上の像の位置を調整



SH 波面センサー：プロトタイプ試験

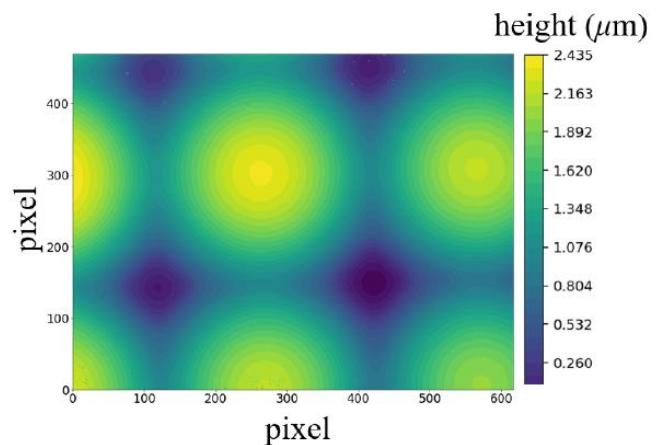
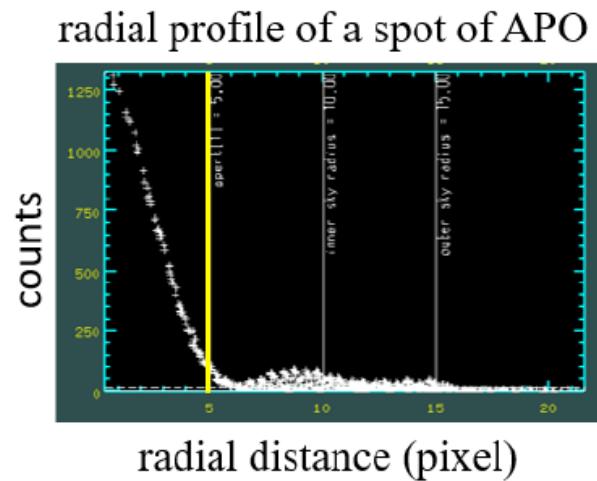
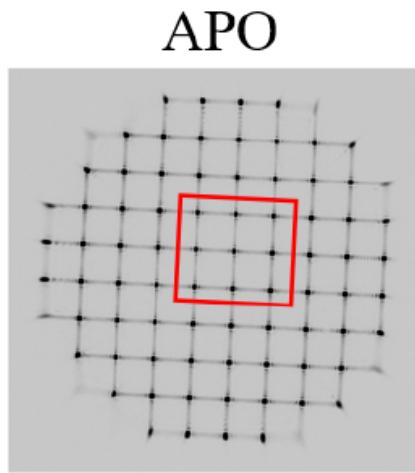
- 波面センサー 1台でのプロトタイプ光学系
- 東北大実験室にて、光学系の組み上げ、調整方法の確認、制御系の試験を進めている
- 2021年5月頃にすばる望遠鏡での試験観測を予定



SH 波面センサー：MLA 性能評価

Terao et al., SPIE 2020

- SH 波面センサーに用いる MLA: APO-Q-P300-R5
- 瞳像と各スポット像の第一暗環内の光量を比較して集光効率を測定
 - 集光効率 = 開口率 × 透過率 × (第一暗環 PSF 内に落ちる光/アパーチャーを通る光)
→ 73 % : 他の 7 つの市販 MLA と比較して問題ないことを確認
- レーザー干渉計でレンズ形状を測定、conic surface でフィッティング
→ 形状に問題ないことを確認



今後の予定

- 高輝度レーザー/送信系の搭載：2020年 – 2021年
- 4つのレーザーガイド星の打上：2021年
- AO188の可変形鏡アップグレード (3228 element DM) : 2020年 – 2021年
- 波面センサープロトタイプの作製、実験、すばるでの試験観測：2021年5月
- LTAO波面センサー系の設計、作製：2020年 – 2021年
- LTAO波面センサー系のすばる望遠鏡への搭載：2021年
- IRCSによる近赤外線撮像観測：2021 – 2022年
- LTAO + Kyoto 3D II による可視光面分光観測：2021年 – 2022年

ULTIMATE-START関連の SPIE 2020 発表

- **ULTIMATE-START : Subaru tomography adaptive optics research experiment project overview (Akiyama et al.)**
- Overview of AO activities at Subaru Telescope (Ono et al.)
- Atmospheric turbulence profiling with a Shack-Hartmann wavefront sensor (Ogane et al.)
- Measurements of image quality and surface shape of microlens arrays for Shack-Hartmann wavefront sensors (Terao et al.)

まとめ

- すばる望遠鏡で LTAO を実現する ULTIMATE-START 計画に関して、開発状況の報告と今後の予定について報告した
- 2021 年 5 月のすばる望遠鏡での LTAO プロトタイプ試験観測に向けて準備を進めている
- 2021 年度での LTAO ファーストライト、サイエンス観測を目標

