

 **ULTIMATE-START:** 
Subaru Tomography  Adaptive optics
 Research experiment 

ULTIMATE-START: 東北大学での組み 上げ試験とすばるへの持ち込みに 向けた検討

寺尾 航暉、秋山 正幸、大金 原、赤澤 拓海（東北大学）、美濃和 陽典、
大野 良人、大屋 真（国立天文台）、山室 智康（オプトクラフト）

ULTIMATE-START

(Akiyama+20, SPIE)

(Subaru Tomography Adaptive optics Research experiment)

・ **すばる望遠鏡でレーザートムグラフィー補償光学 (LTAO) を実現**

① **レーザーガイド星 × 4**

- 20W の高輝度レーザー (589 nm, TOPTICA社)
- 副鏡の裏に設置し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

② **波面センサー × 4**

- AO188@NslR の後ろに波面センサー系を設置
- 4つのレーザーガイド星の波面測定
 - 大気揺らぎを高さ方向に分解する
 - トモグラフィー推定

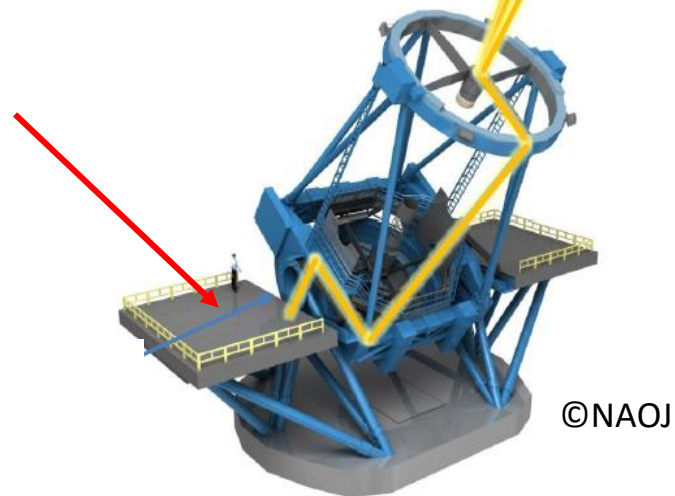
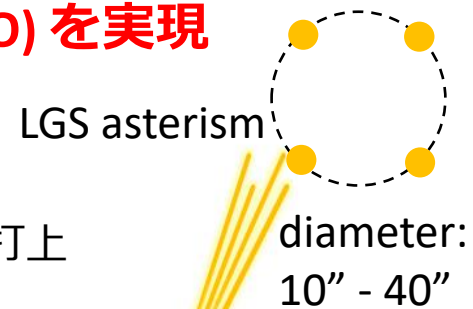
③ **AO188 アップグレード**

- 188 素子 DM → ALPAO 64 × 64 素子DM

・ **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) での補償光学の実現 (FWHM ~ 0".05)**

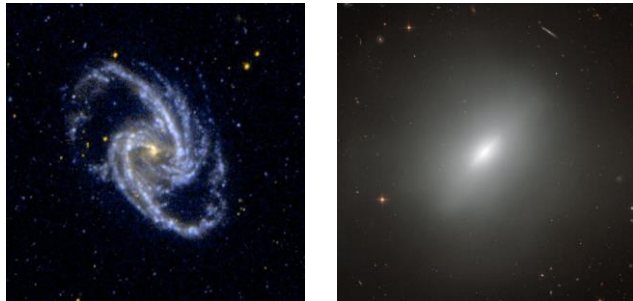
・ **2022年のファーストライトを目標**



補償光学を用いたサイエンス

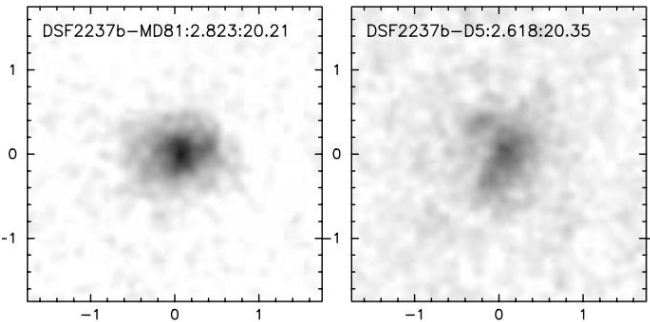
- 遠方宇宙での銀河の内部構造の観測（銀河の構造・形態進化）
- 面分光装置による銀河のガス運動・物理状態のマッピング
 - 高空間分解能での観測が必要 → 地上観測では**補償光学が必須**

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



©NASA

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



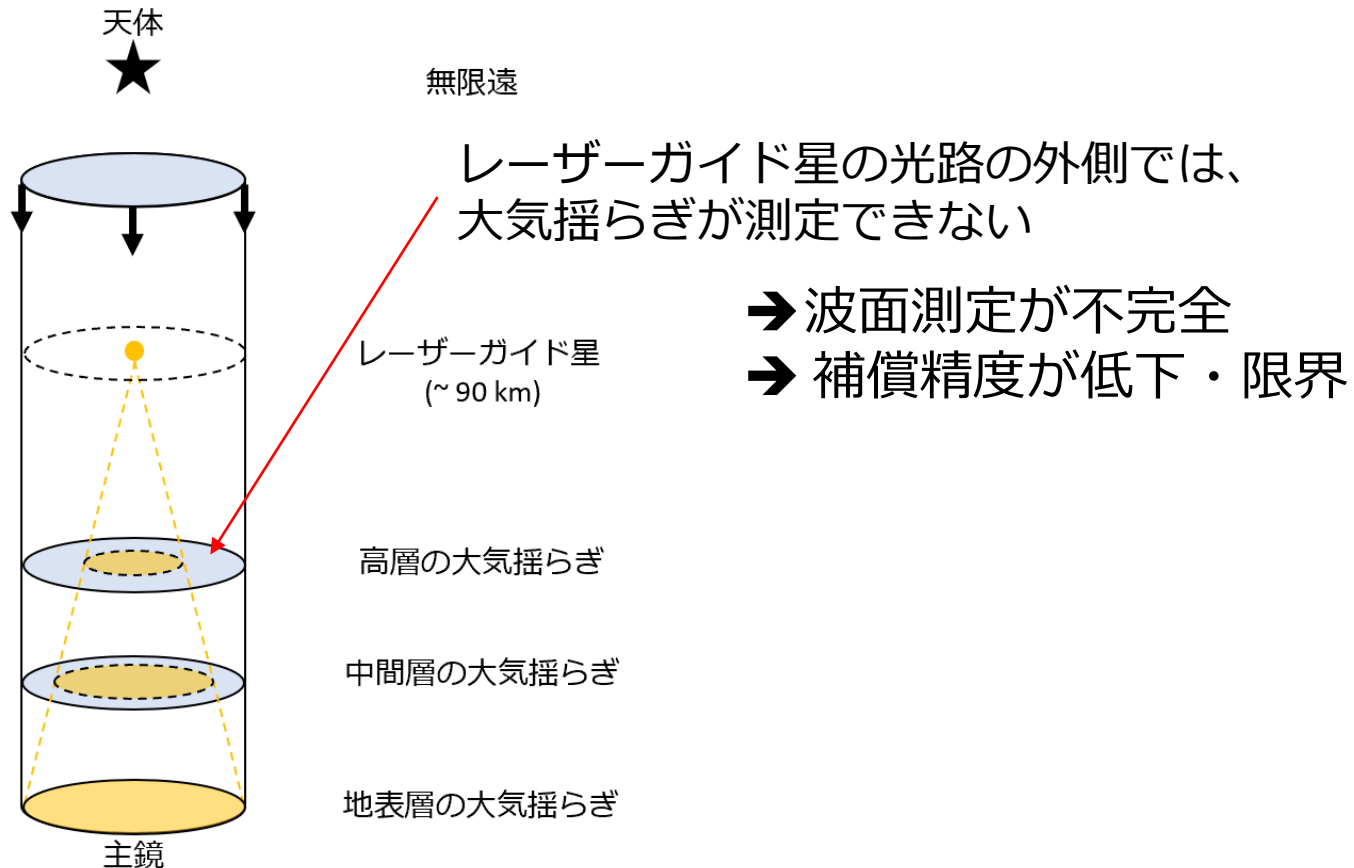
形態が大きく異なる

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

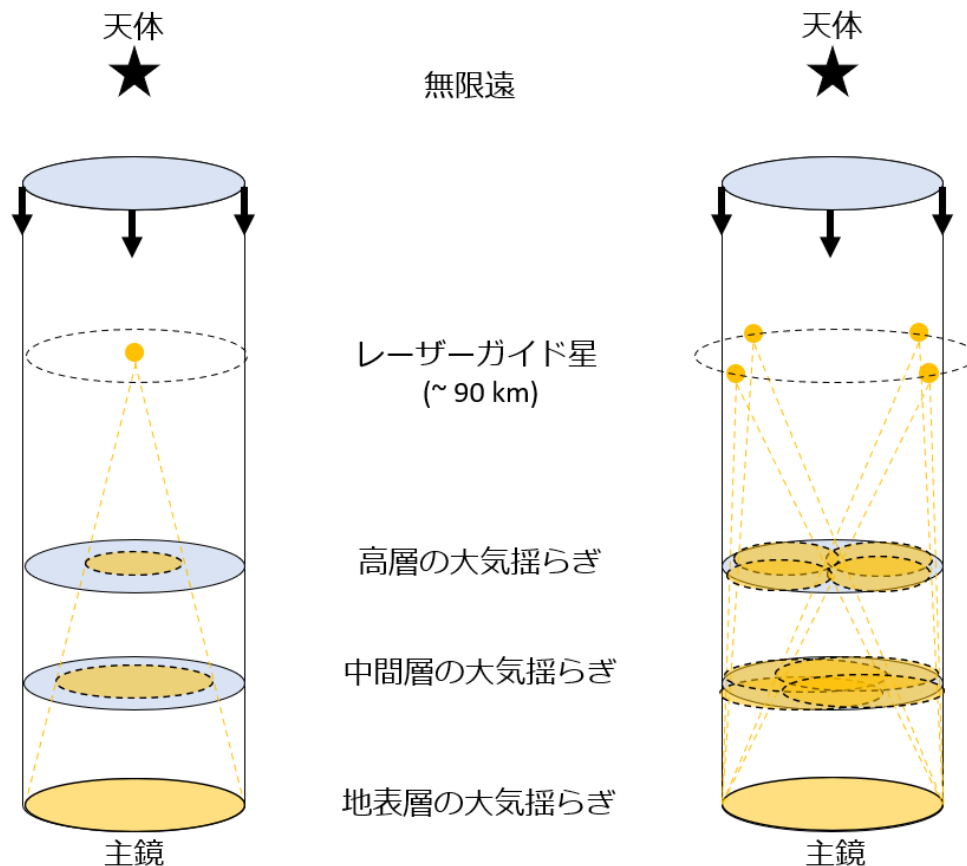
単一レーザーガイド星による補償光学

- 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)



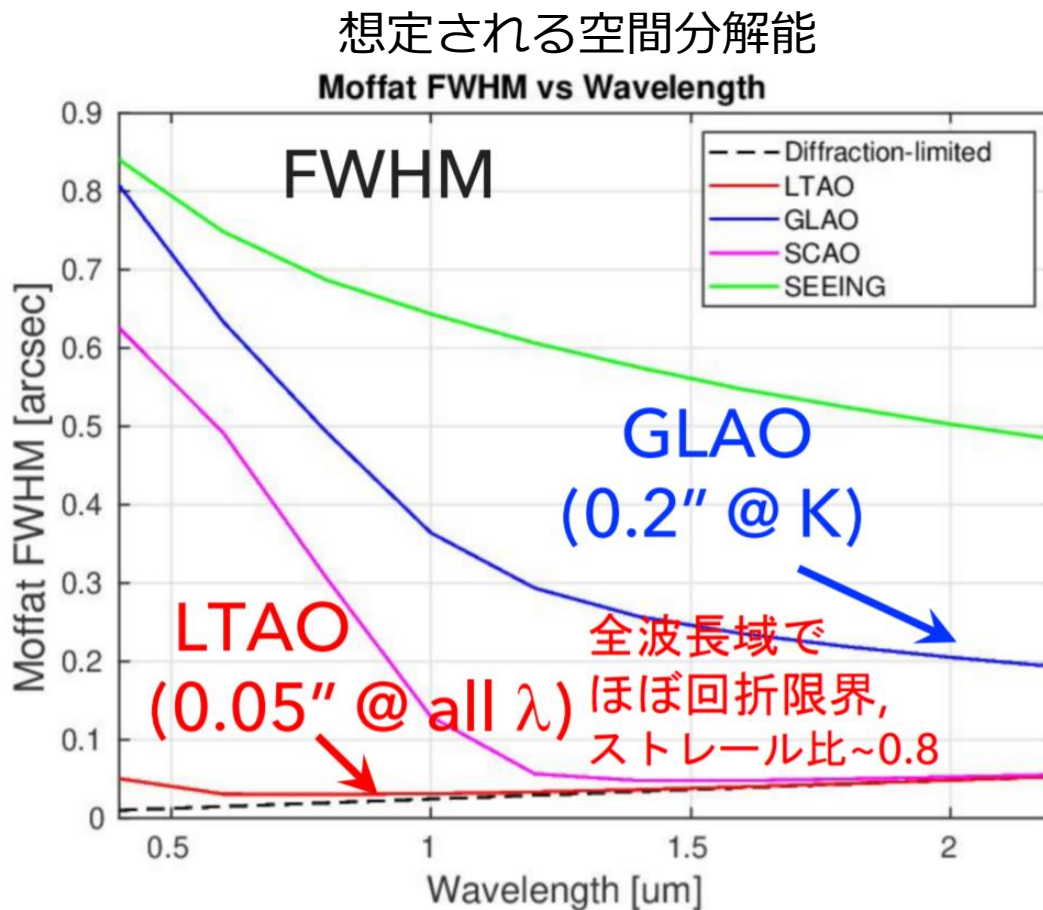
レーザートモグラフィー補償光学 (LTAO)

- 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)



LTAO で実現する補償性能

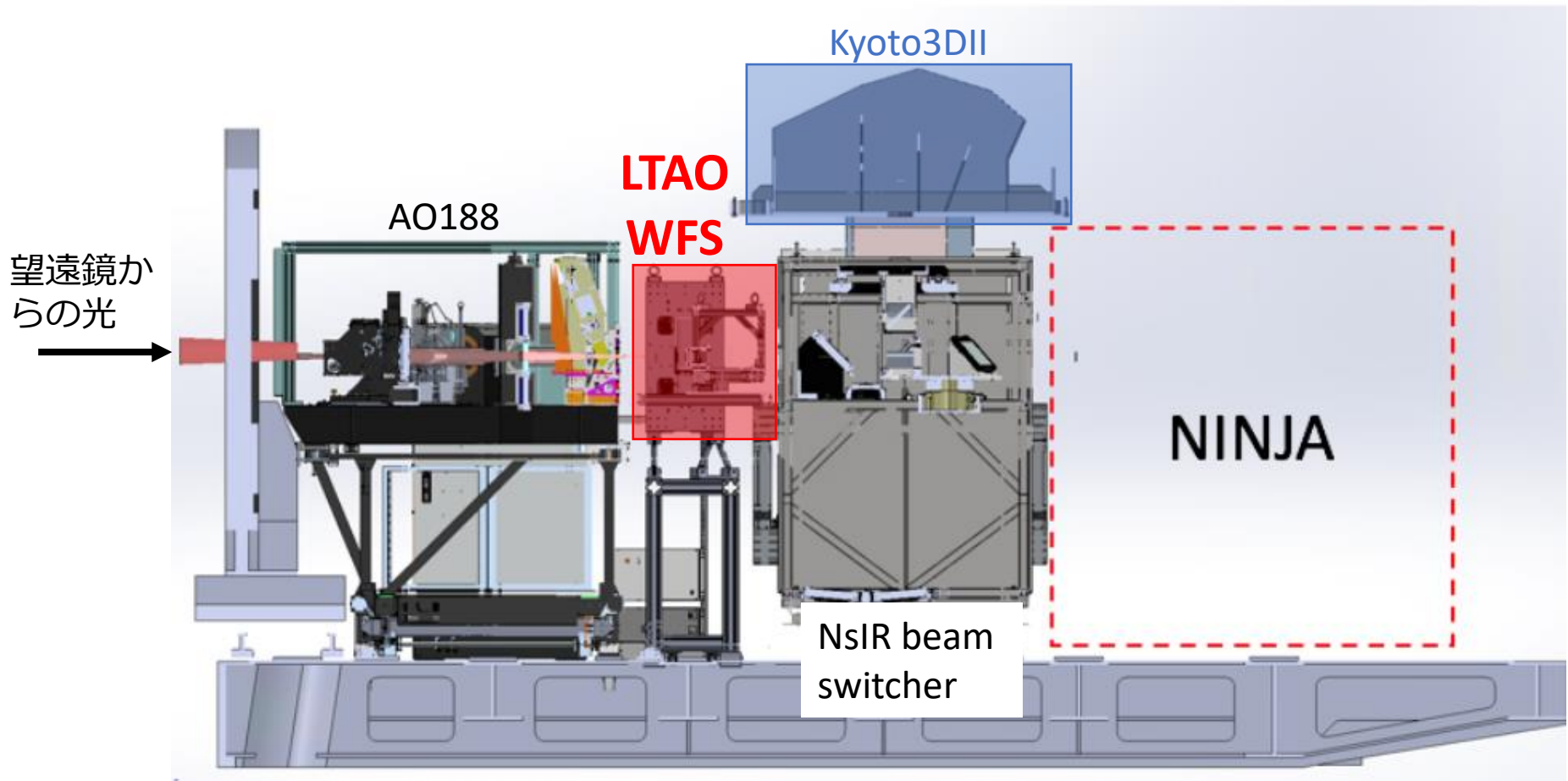
- サイエンスパスの波長 : > 600 nm
- 空間分解能: **0.05 arcsec @可視光・近赤外**
 - ✓ 回折限界を目指す
- FoV: < 40"



大野さんシミュレーション
計算結果

LTAO 波面センサー系@Subaru/NsIR

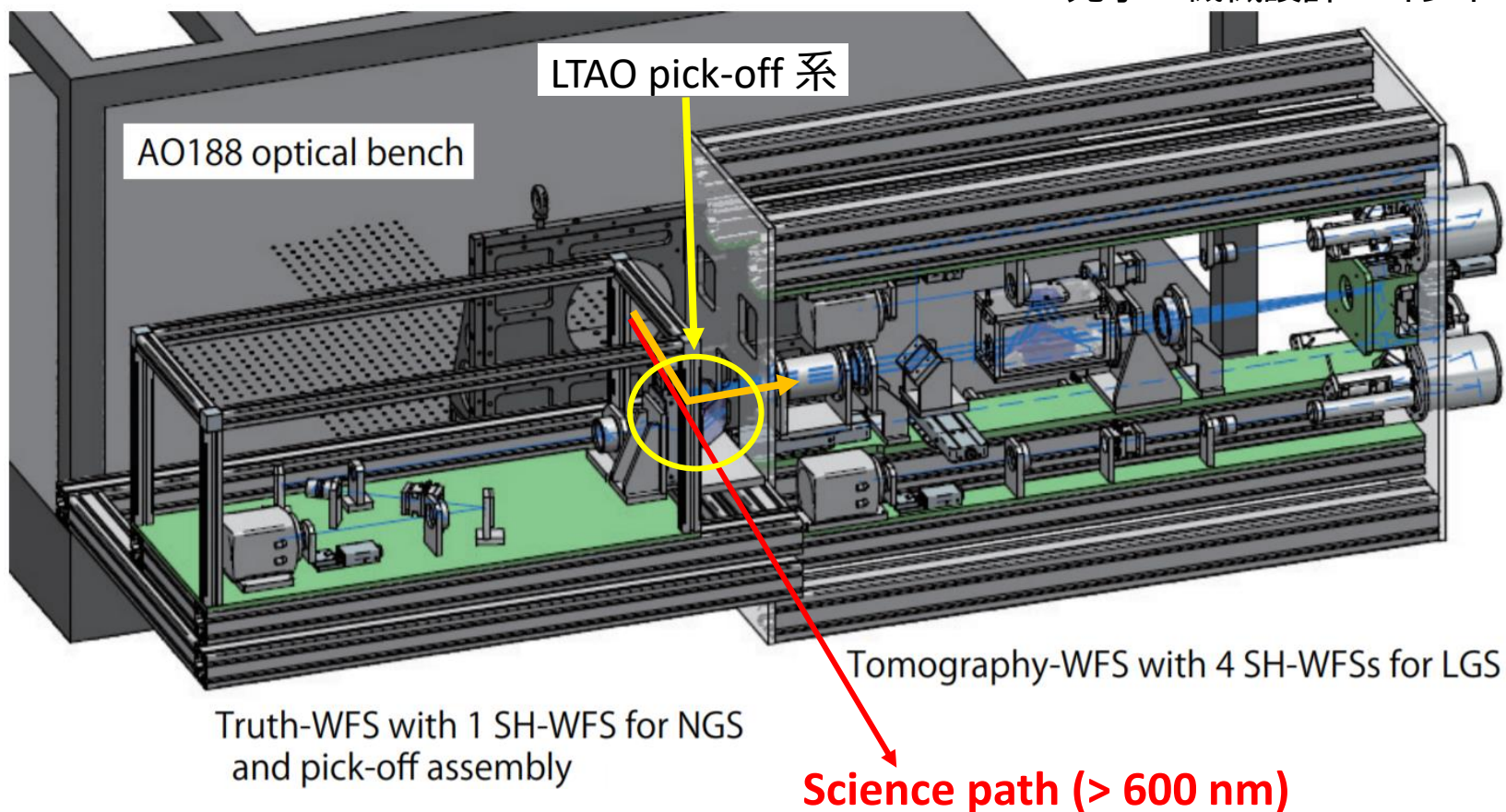
- AO188 の後ろに波面センサー系を設置
- AO188波面センサー(低次成分)、LTAO波面センサー(トモグラフィック推定、高精度波面推定、高次成分) → AO188 DM で波面補正
- ビームスイッチャーで観測装置を切り替え (IRCS, Kyoto3DII)



LTAO 波面センサー系@Subaru/NsIR

- 4 台のシャックハルトマン波面センサー系 + 1 台の Truth WFS 系
 - 検出器：Hamamatsu OrcaFlash 4.0 v2 (sCMOS)
- BSでレーザーガイド星の光のみ LTAO 波面センサー系へ ($\lambda \sim 589 \text{ nm}$)
- 2 枚目のプレートはBSによる光軸ズレの調整用。反射光 ($\sim 2\%$) を Truth WFS へ

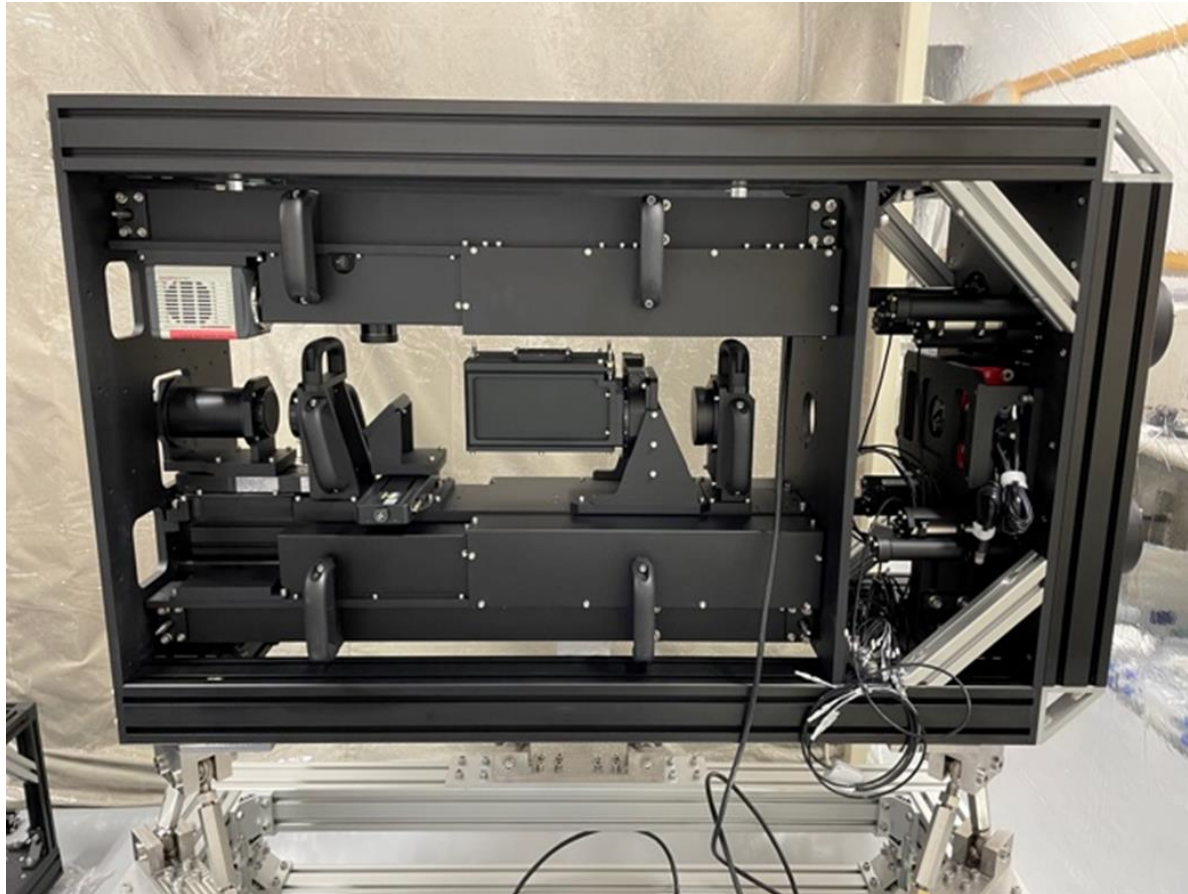
光学・機械設計：オプトクラフト



LTAO 波面センサー系：東北大学での組み上げ試験

- LTAO WFS 系

- 光学系・機械系は完成。東北大学で組み上げ・光学調整試験中
- 調整用治具を用いた各コンポーネントでの光学調整



焦点調整系 + 視野回転系

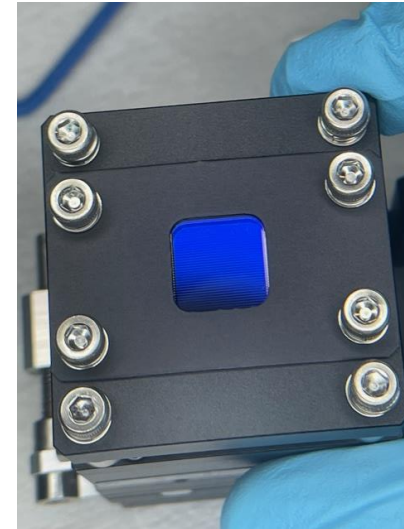
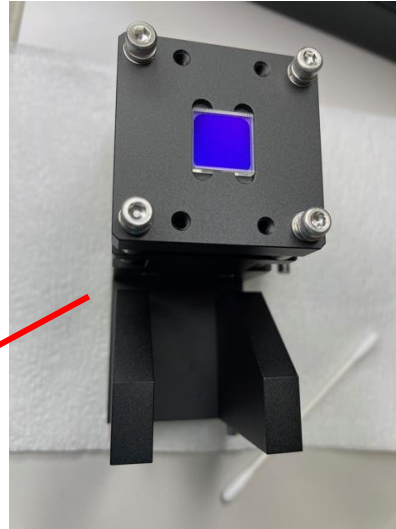
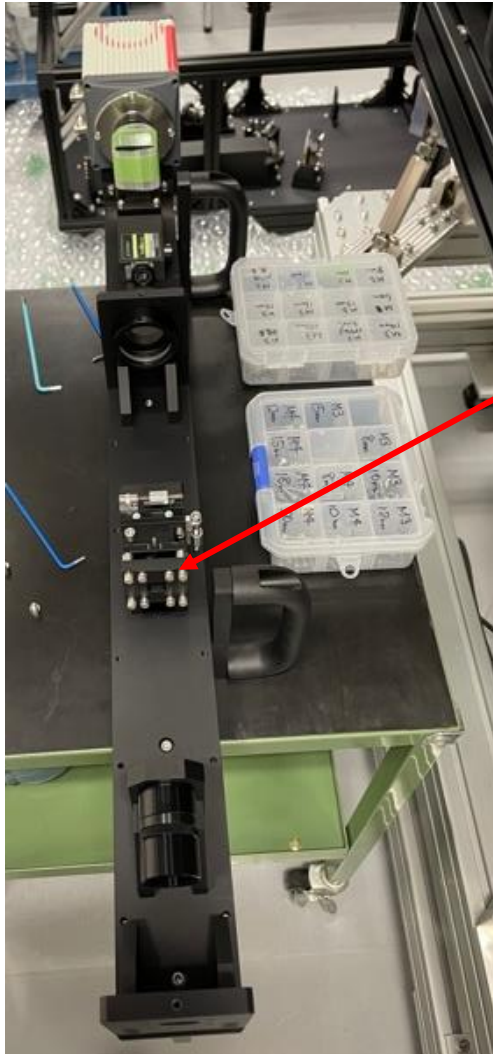


LTAO 波面センサー系：東北大学での組み上げ試験

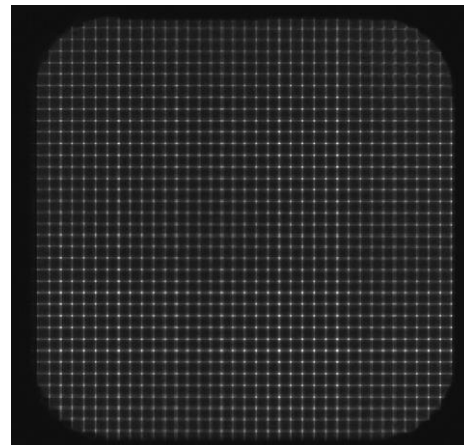
- 調整用治具を用いた各コンポーネントでの光学調整

✓ SHWFS系

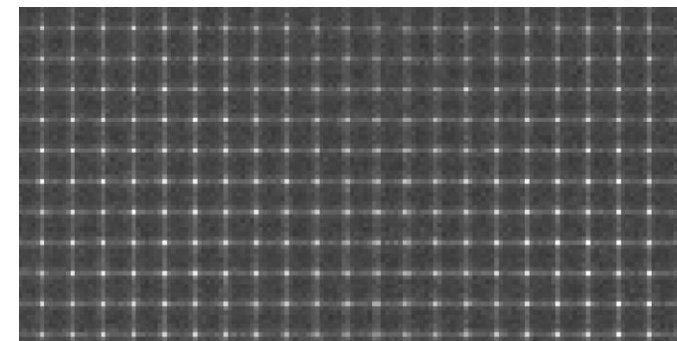
MLA の取付



MLAスポット画像



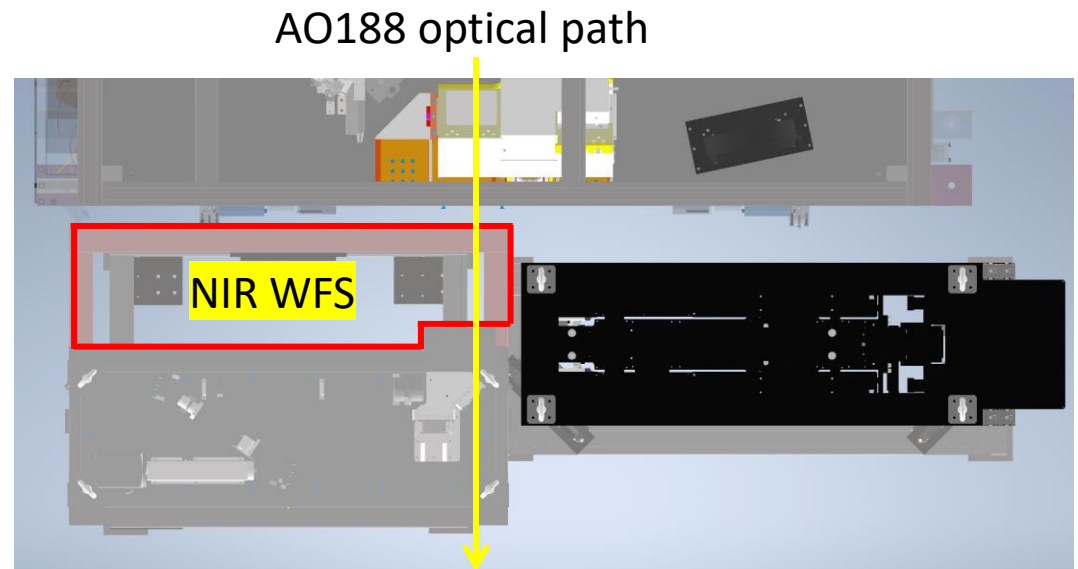
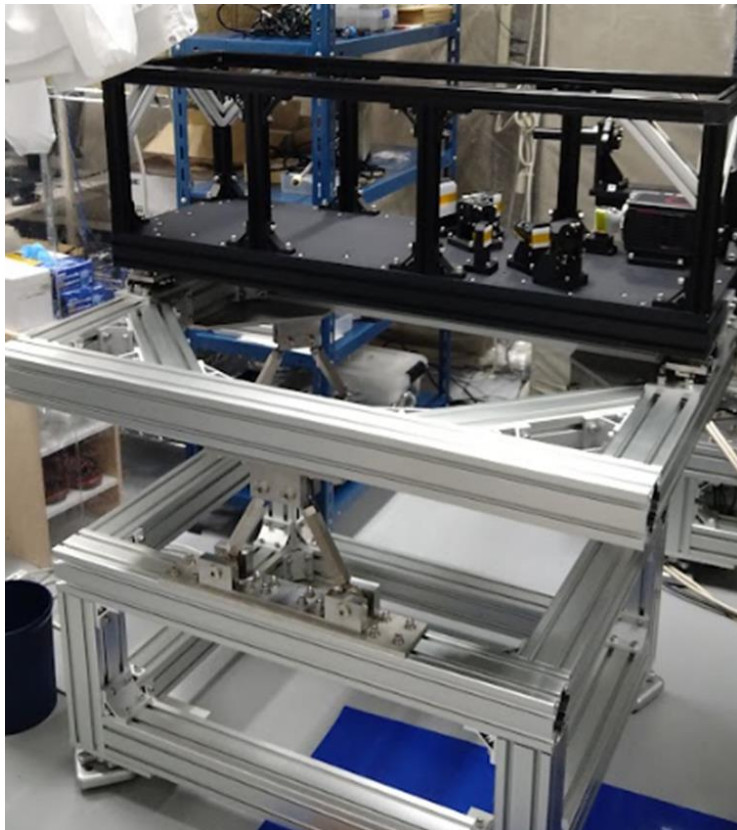
拡大図



LTAO 波面センサー系：東北大学での組み上げ試験

● Truth WFS 系

- 波面センサー系を載せるフレームが完成
 - 東北大学実験室にて光学調整中
- サポートフレームは近赤外線ピラミッド波面センサー系と共用（赤線）
 - SCExAO チームが開発中 (AO188 アップグレード計画の一つ)

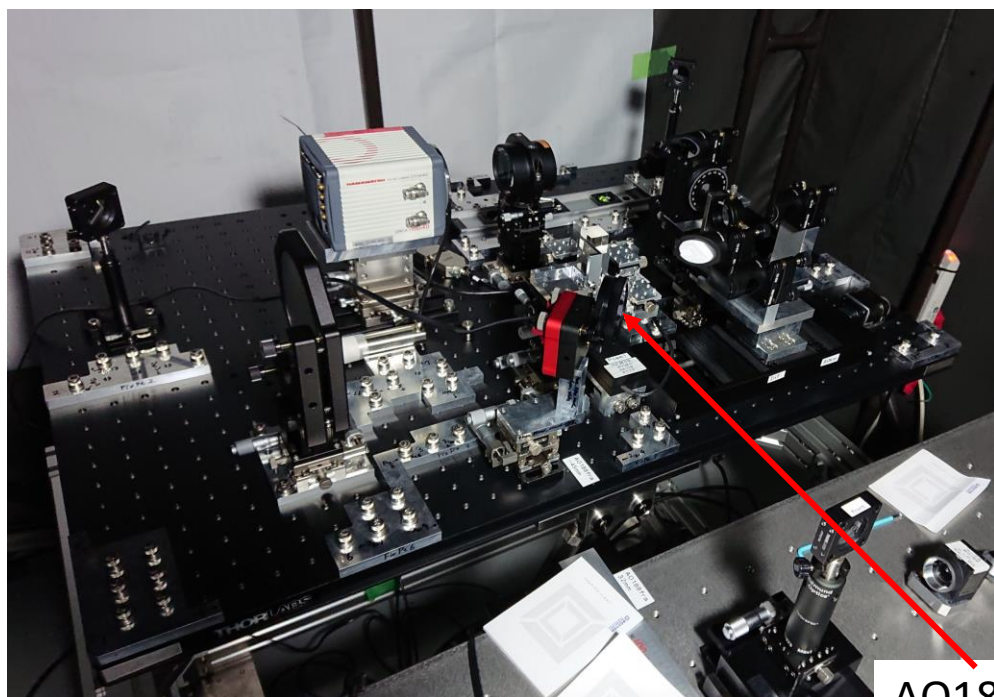


@Subaru/NsIR

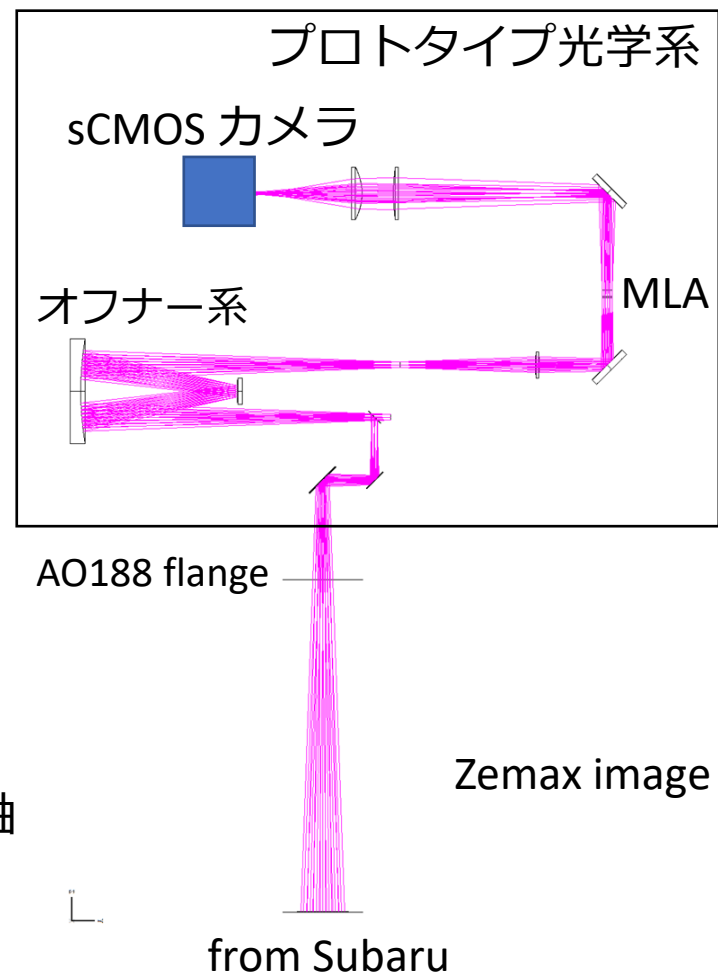
@東北大学実験室

SH 波面センサー：プロトタイプ試験

- 波面センサーカメラ 1 台でのプロトタイプ光学系（下図）
- 2021年5月にハワイへ持ち込んで試験を開始



AO188光軸

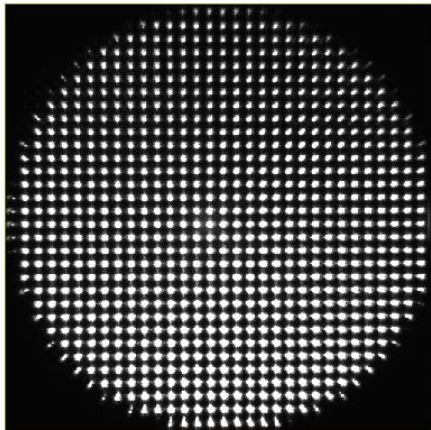


SH 波面センサー：プロトタイプ試験@Subaru/NsIR

- 2021年5月 - 6月, 11 - 12月
 - AO188 の後ろにプロトタイプ波面センサーを設置
 - AO188 搭載のキャリブレーションレーザーを用いて：
 - ✓ 光軸合わせの手順確認
 - ✓ 制御系のアップデート
 - ✓ 各光学系・カメラのキャリブレーション
 - ✓ 位相板を用いた疑似大気揺らぎ画像の取得
 - ✓ 重心計算・波面再構成手法の確認
 - 浜ホトカメラ：ローリングシャッター読み出し
→波面推定への影響評価



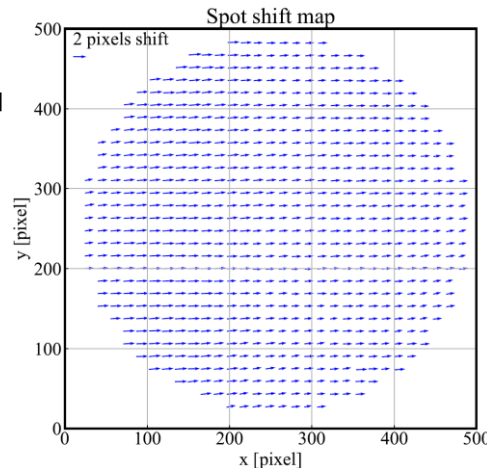
波面センサー画像
32 x 32 スポット



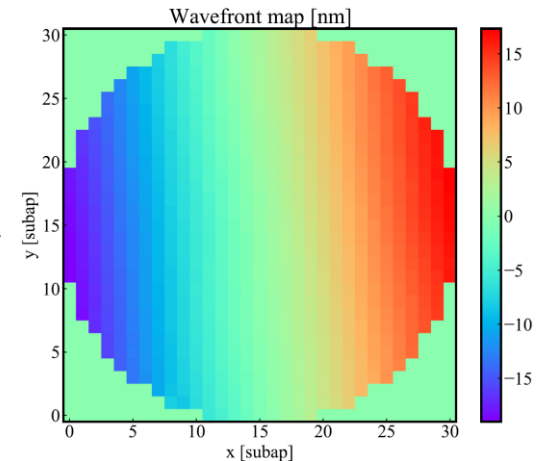
重心検出



重心移動量検出
例：tip/tilt

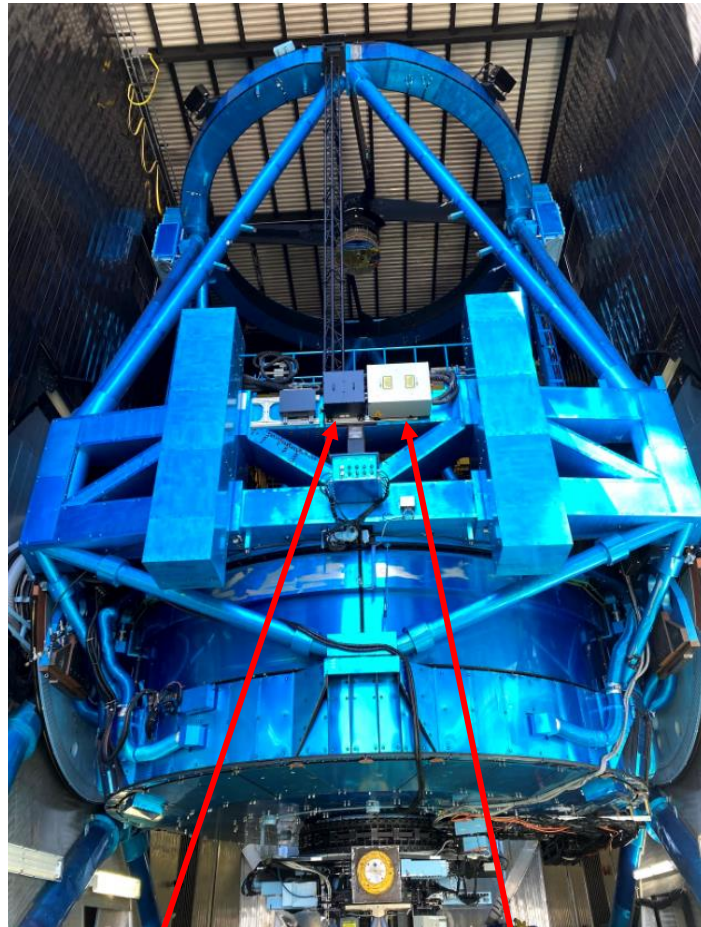


再構成した波面マップ



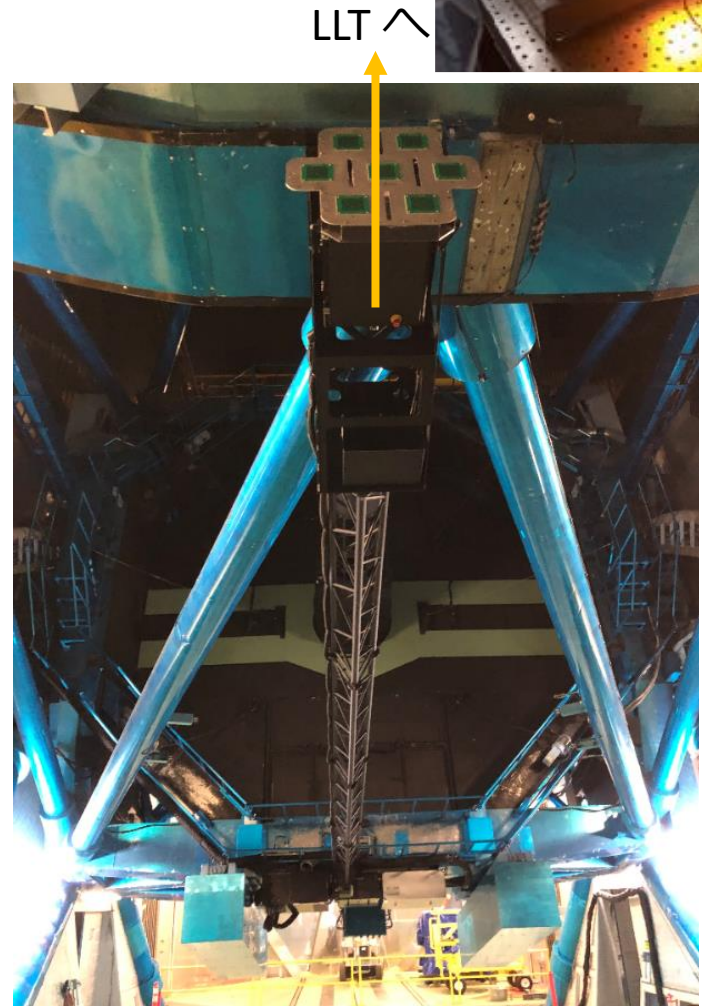
レーザー送信系

- 高輝度レーザー (TOPTICA 20W) の試験・インストール完了
- レーザーリレー系のインストールは完了。アライメント作業の最終段階。



リレー光学系

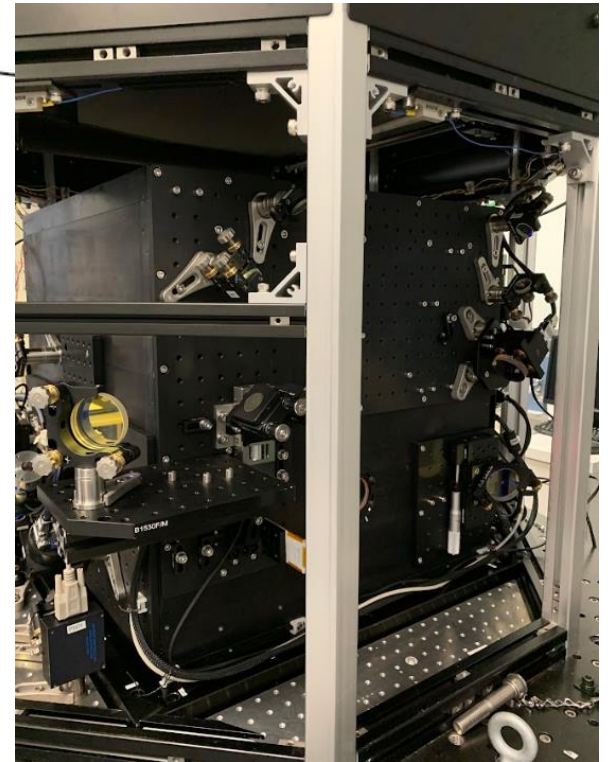
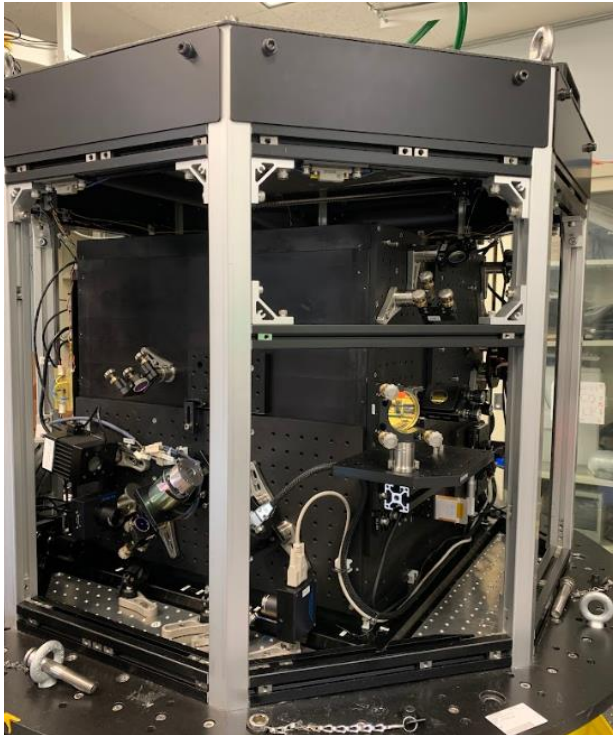
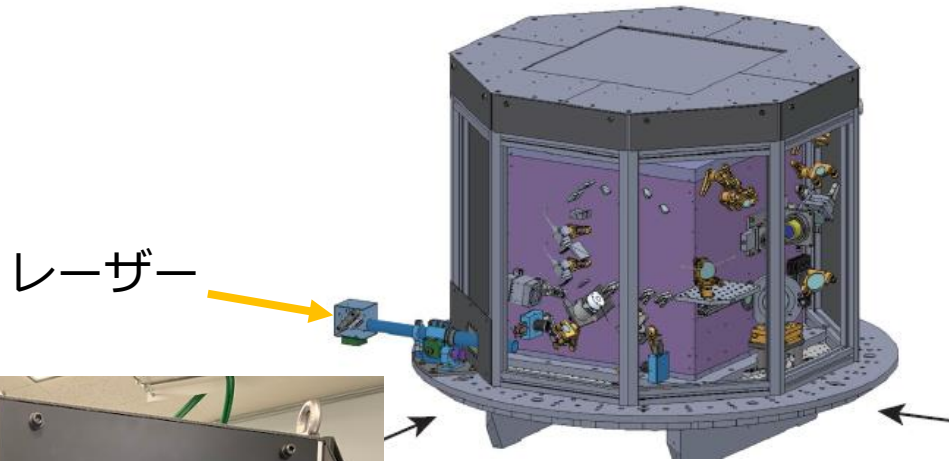
レーザーヘッド



LLT へ

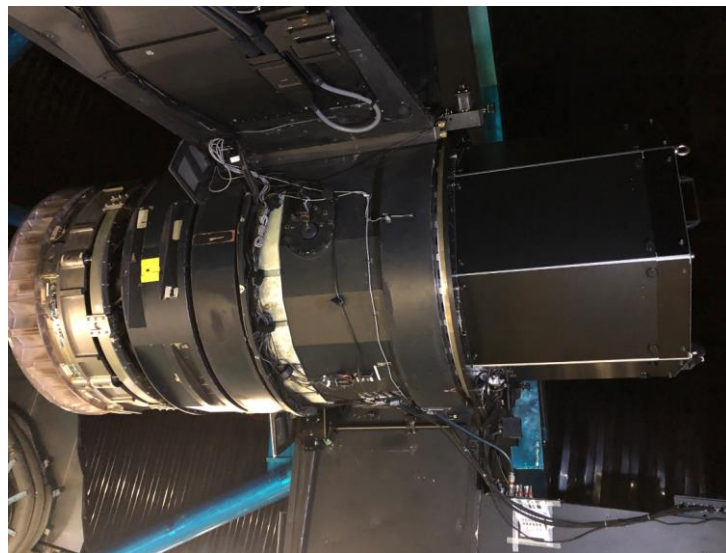
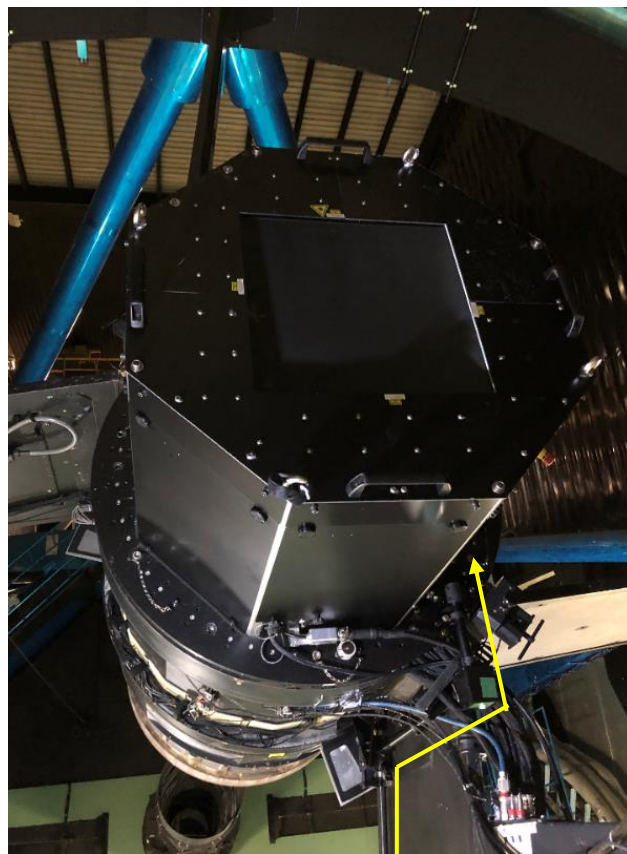
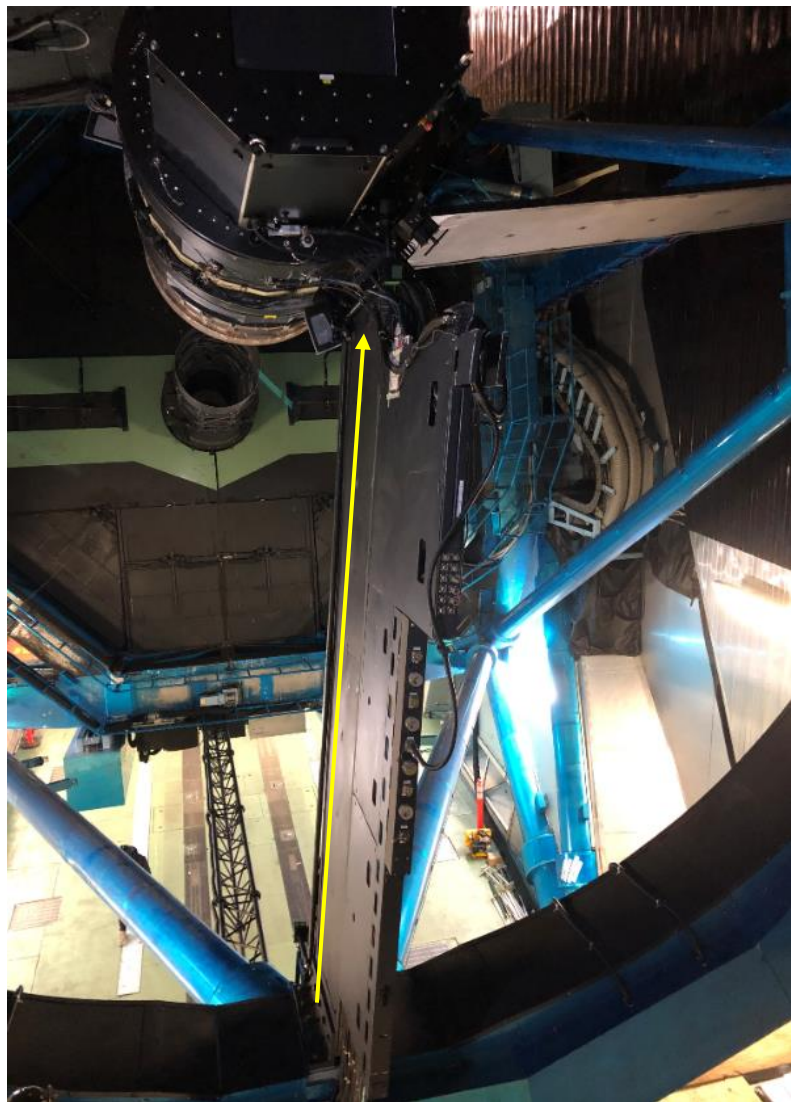
レーザー送信系

- 4分割レーザー打上望遠鏡 (LLT) の光学・機械設計は完了。
- まずは1つのLGSを打ち上げる光学系を搭載して、2021年12月に打上試験



レーザー送信系

- LLT とスパイダー部分のリレー系

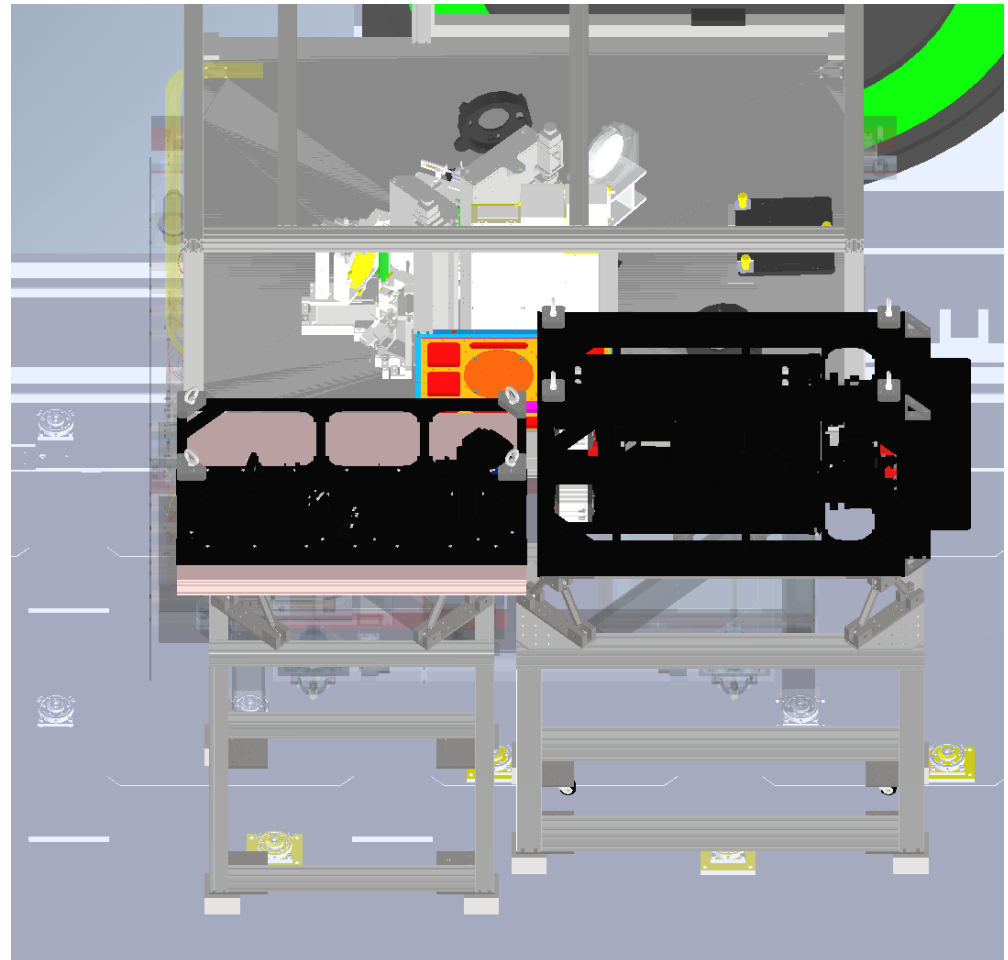
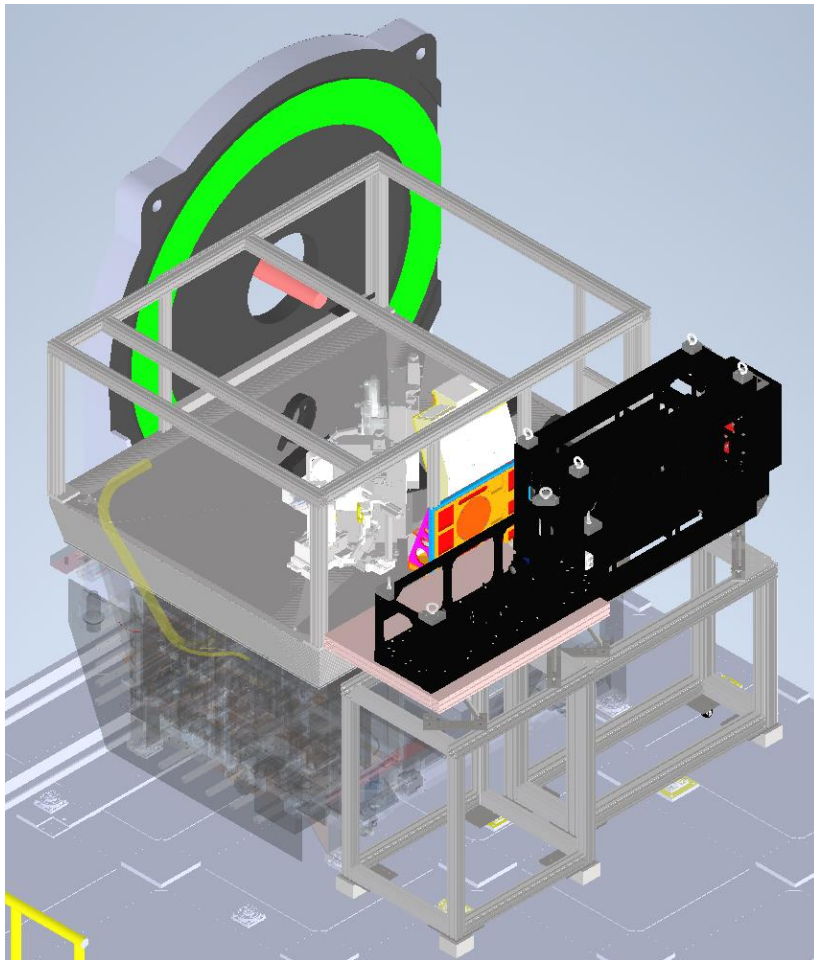


すばるへの持ち込みに向けた状況

- 持ち込み装置としてハワイ観測所にプロポーザルを提案
 - ・ レビューに向けて作業進行中
- 準備状況
 - ・ 波面センサー系の光学・機械部品はほぼ完成
 - ・ 東北大学実験室での組み上げ試験、アライメント調整・手順の確認
 - ・ プロトタイプをすばるに持ち込んで、試験観測による波面センサー系の性能評価、持ち込み手順や山頂での作業や運用の確認
- 検討事項
 - ・ すばるへの持ち込み、運用時の配置@NslR
 - ・ 4台の波面センサー系の制御システム
 - ・ AO188 を含めたループ制御の開発

Subaru/NsIR での LTAO WFS 系の運用

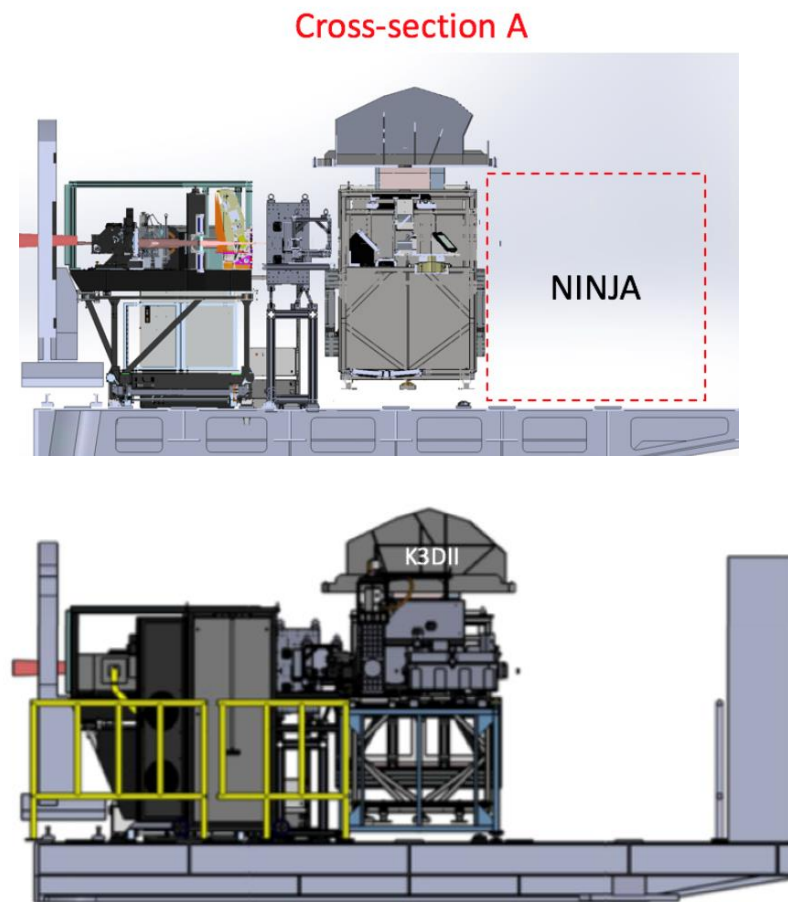
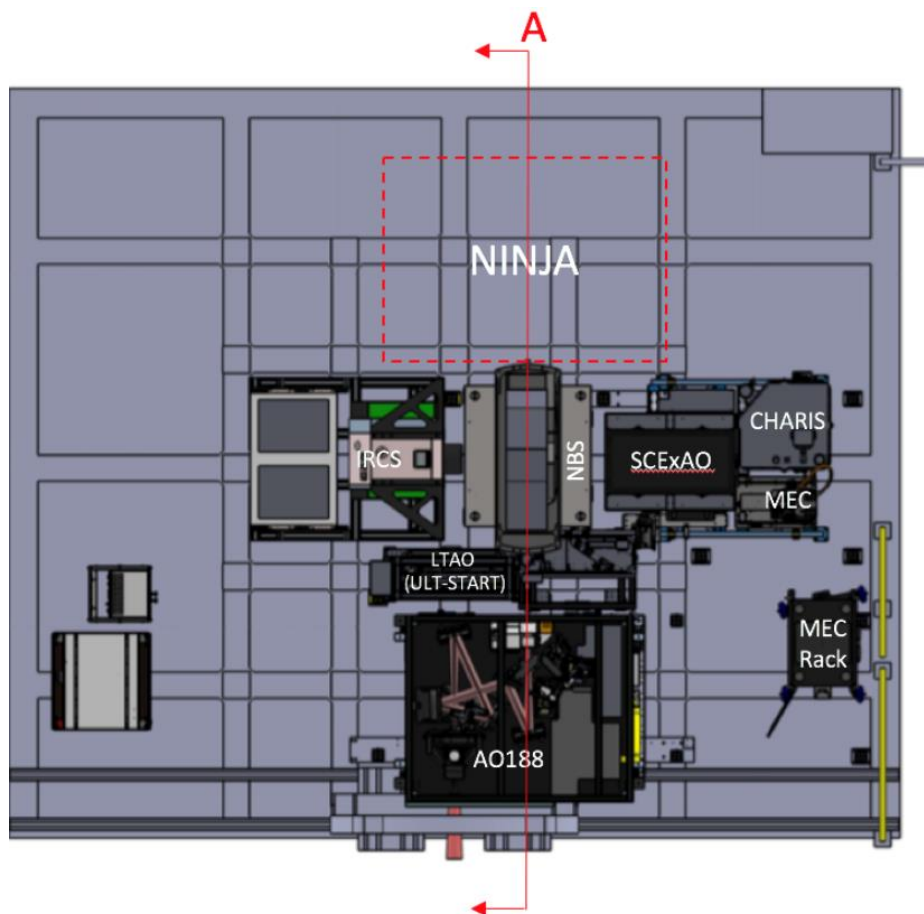
- A0188の後ろに波面センサー系を配置
 - LTAO 制御系、A0188 との通信・接続インターフェースは開発中
 - エレキ類や冷却水ホースなどの配置は検討中



Subaru/NsIR での運用

● NsIR での運用時の配置案

- LTAO で補正された光はビームスイッチャーによって各装置へ
 - IRCS, Kyoto3DII, SCExAO, NINJA (D-shooter)
 - 装置交換が無くなる → ナスミス装置のフレキシブルな運用が可能
 - ✓ 同時観測 (SECxAO + IRCS など)、半夜ずつの観測割り当てなど

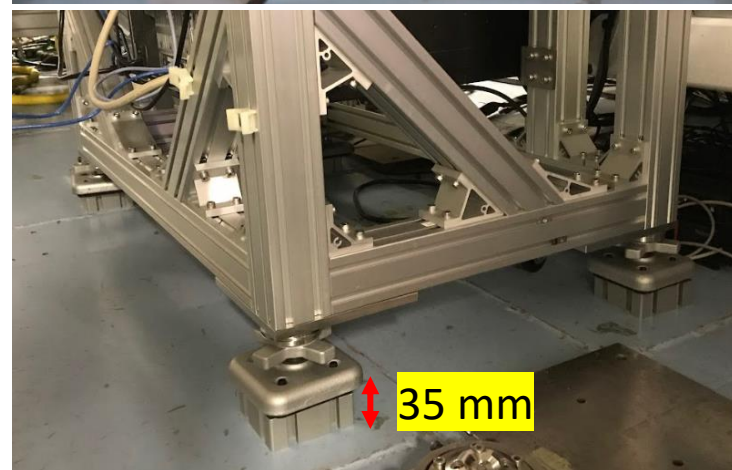
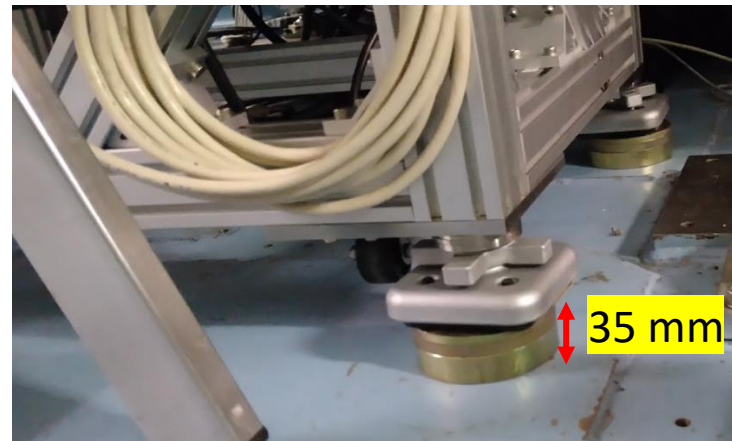
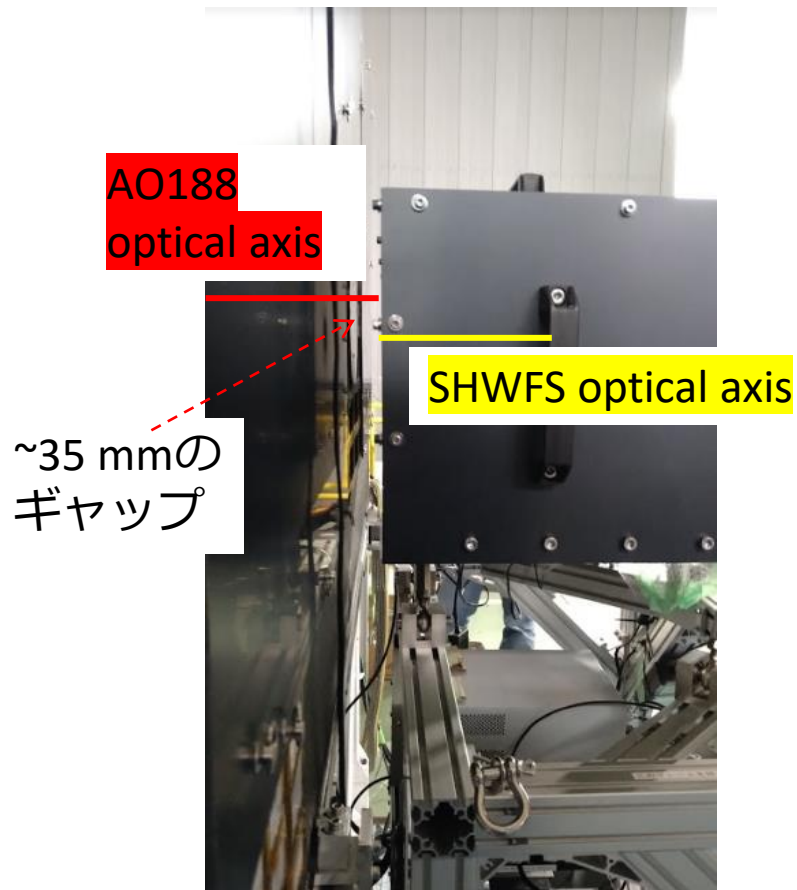


今後の予定

- 高輝度レーザー/送信系の搭載：2021年
- 1つのレーザーガイド星での波面センサープロトタイプのすばる試験観測：2021年12月、2022年1月
- LTAO波面センサー系の組み上げ試験@東北大学：2021年度内
- 4つのレーザーガイド星の打上：2022年
- LTAO波面センサー系のすばる望遠鏡への搭載：2022年
- AO188の変形鏡アップグレード (64 x 64 素子DM)：2022年
-- 2022年1月にハワイ観測所に納品予定
- LTAO + Kyoto 3D II による可視光面分光観測：2022年以降
※面分光観測に関する研究会を開催予定

Lessons learned

- SH 波面センサー：プロトタイプ試験 @Subaru/NsIR
 - AO188 光軸高さが想定よりも ~35 mm 高かった
 - プレートや余っていたフレームで高さを調整した
- 教訓：インターフェース情報の確認は念入りに



Lessons learned

- プロジェクト全体として

- 科研費でのプロジェクトの場合、採択時には概念設計から初期設計が終わっているくらいのスケジュールが理想的だが、現実には採択前に概念設計に入るのはリソース的に難しい。
- システムエンジニアリングが肝心になる規模のプロジェクトを成功させるにはシステムのソフトウェア開発が重要な要素だが、現実にはそのあたりはちゃんと予算の手当をしていなくてリソース確保が難しい。

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 12 月にすばる望遠鏡での新レーザーを用いたLGS 打上試験を LTAO プロトタイプ波面センサーで観測する準備を進めている
- 2022 年の LTAO 波面センサー系のすばるへの持ち込み、ファーストライトを目標としている

