



ULTIMATE-START:
Subaru Tomography Adaptive optics
Research experiment

すばる望遠鏡
レーザートモグラフィ補償光学実験
の現状報告

秋山 正幸
(東北大学理学研究科
天文学専攻)

ULTIMATE-START チーム
ULTIMATE-Subaru チーム

多レーザーガイド星による トモグラフィック推定 を導入した補償光学の実現

1. すばる望遠鏡レーザートモグラフィック補償光学
可視光波長域 (>600nm) での補償光学
2. ULTIMATE-Subaru 地表層補償光学
超広視野補償光学
3. TMT 多天体補償光学 : TMT-AGE
多数ターゲットに最適化した補償光学

大気揺らぎトモグラフィーによる 高精度補償光学で達成できる点像関数

1個の自然星

1個のレーザー人工星

5個のレーザー人工星
を用いたトモグラ
フィー補償光学の場合

2200nm

1600nm

1200nm

線形

対数

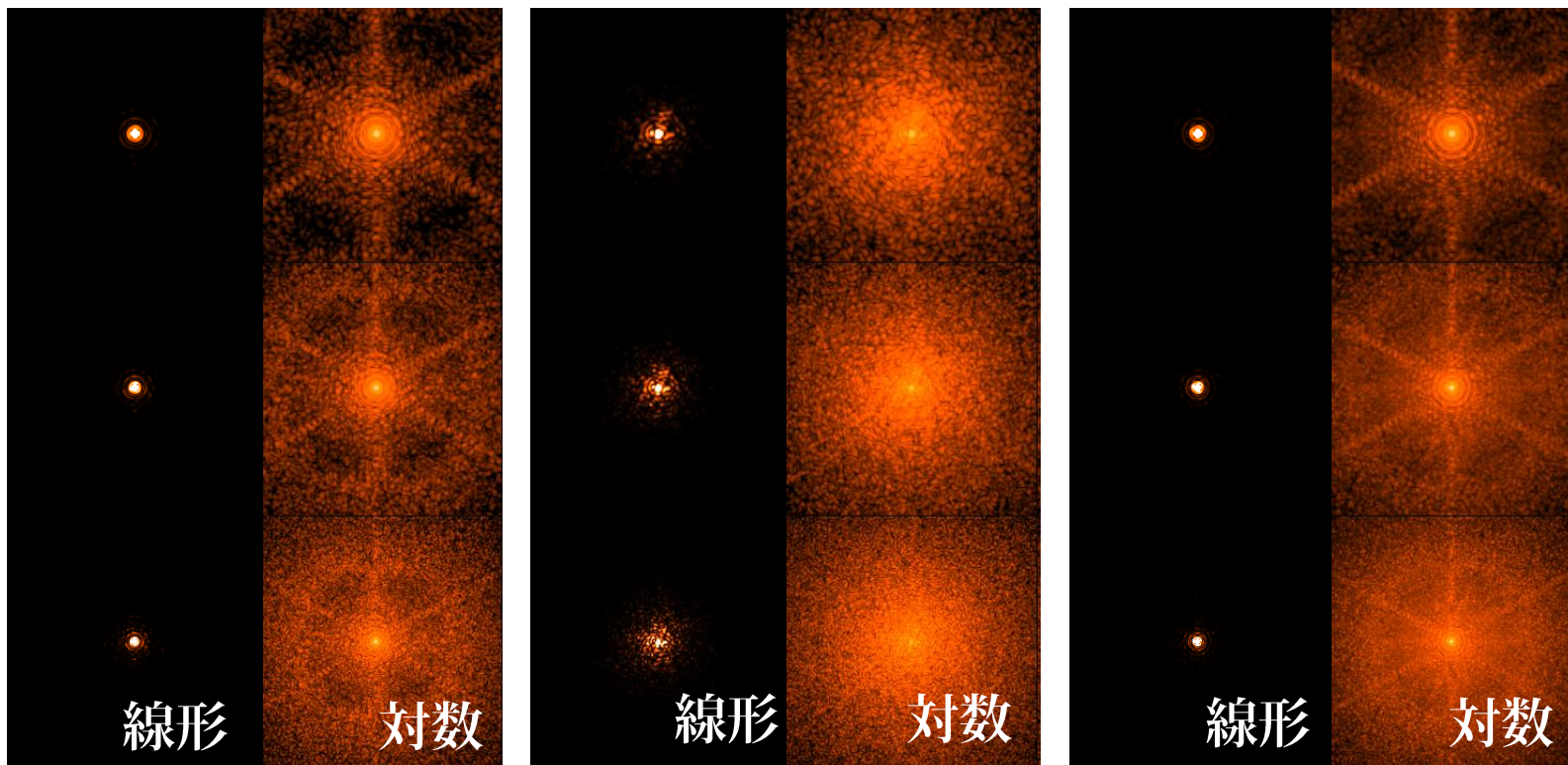
線形

対数

線形

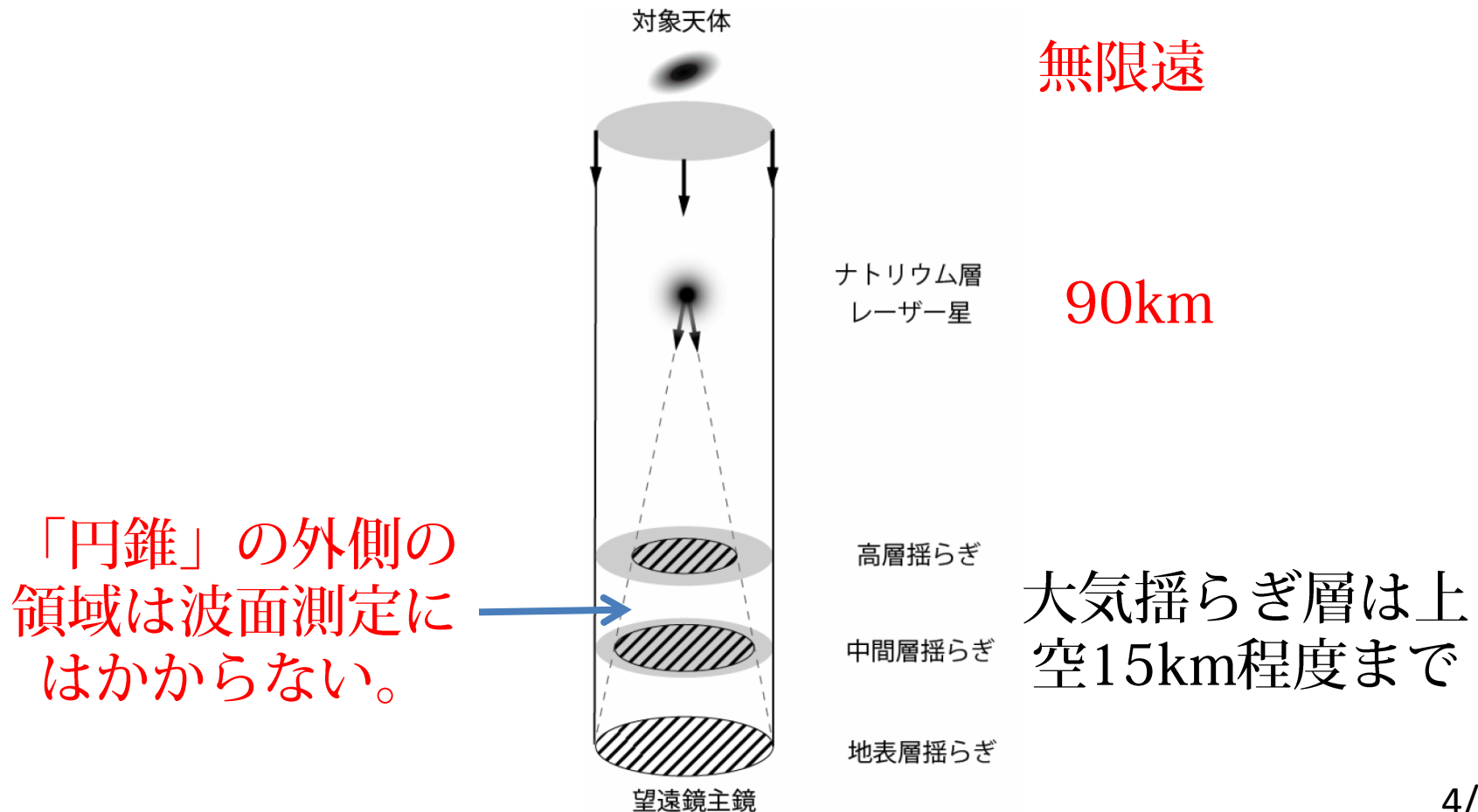
対数

1" x 1"



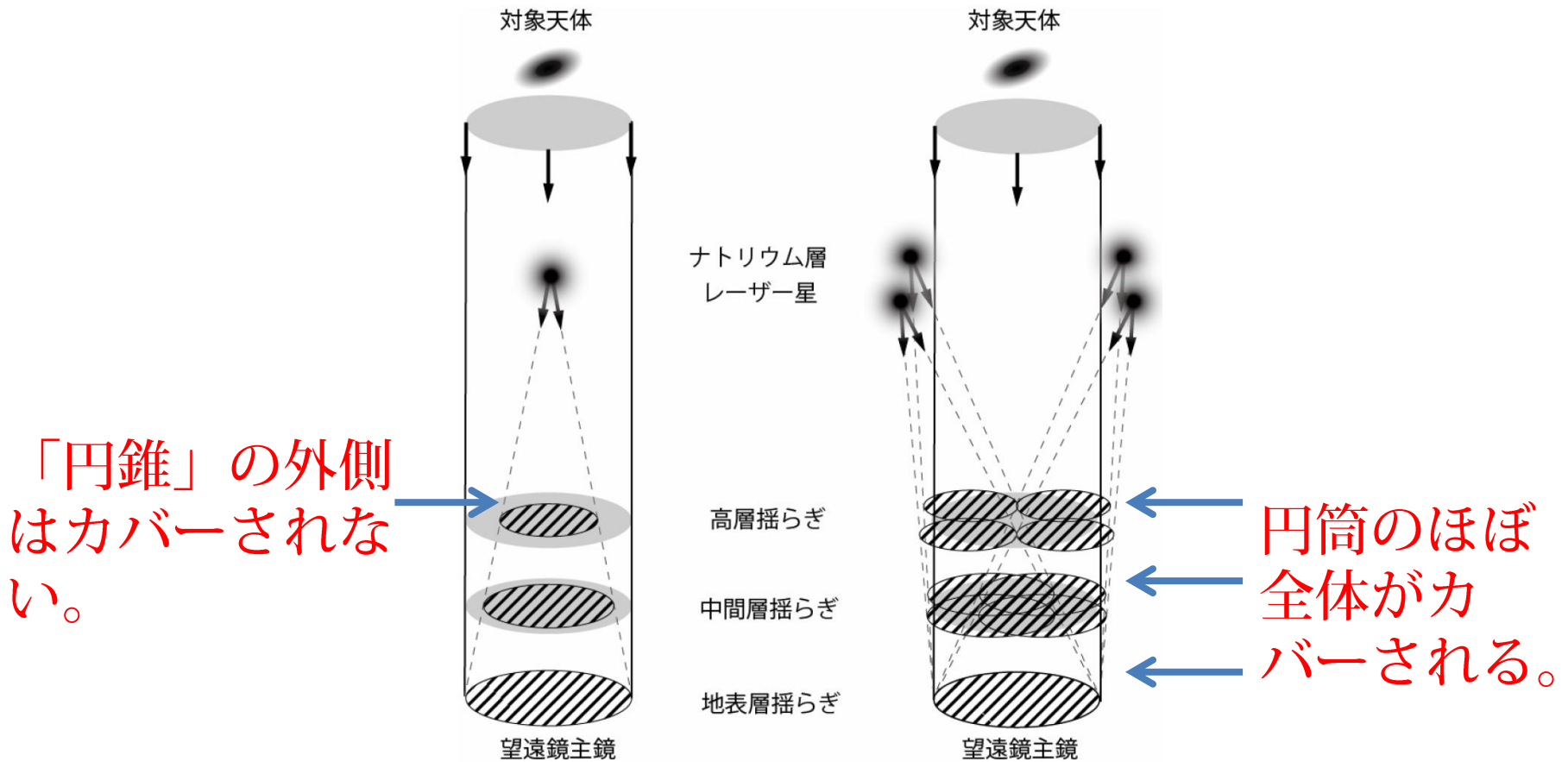
レーザー人工星を用いた補償の制限

- 天体からの光は無有限遠から来る平行光とみなせ、「円筒」の光路を通ってくるが、レーザー人工星は望遠鏡よりも90km上空の有限な距離に存在し、「円錐」の光路を通ってくる。



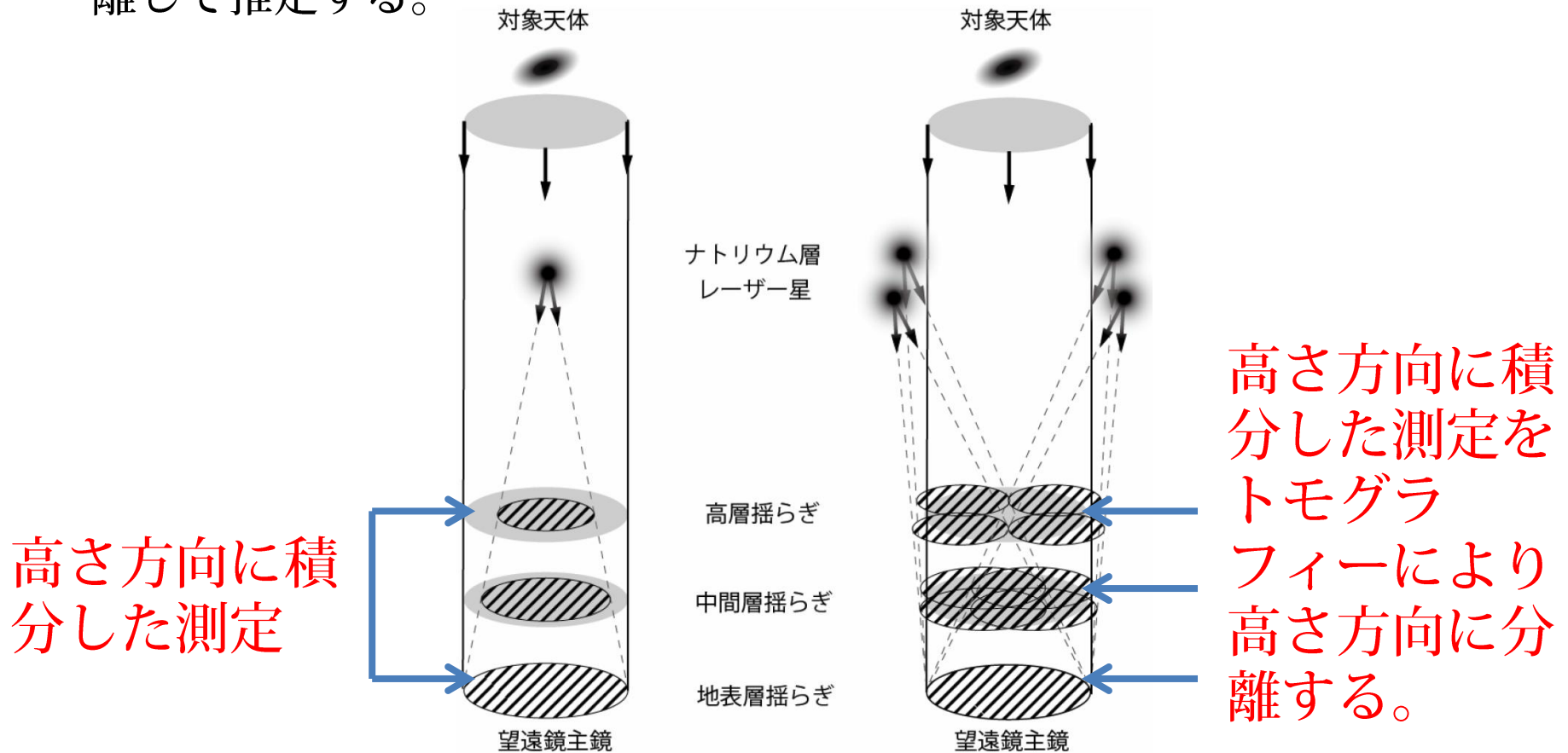
複数のレーザーガイド星による補償光学

- 複数のレーザー人工星を配置することで、円筒の光路をほぼ完全にカバーすることができる。



大気揺らぎのトモグラフィー推定を用いた 高精度補償光学

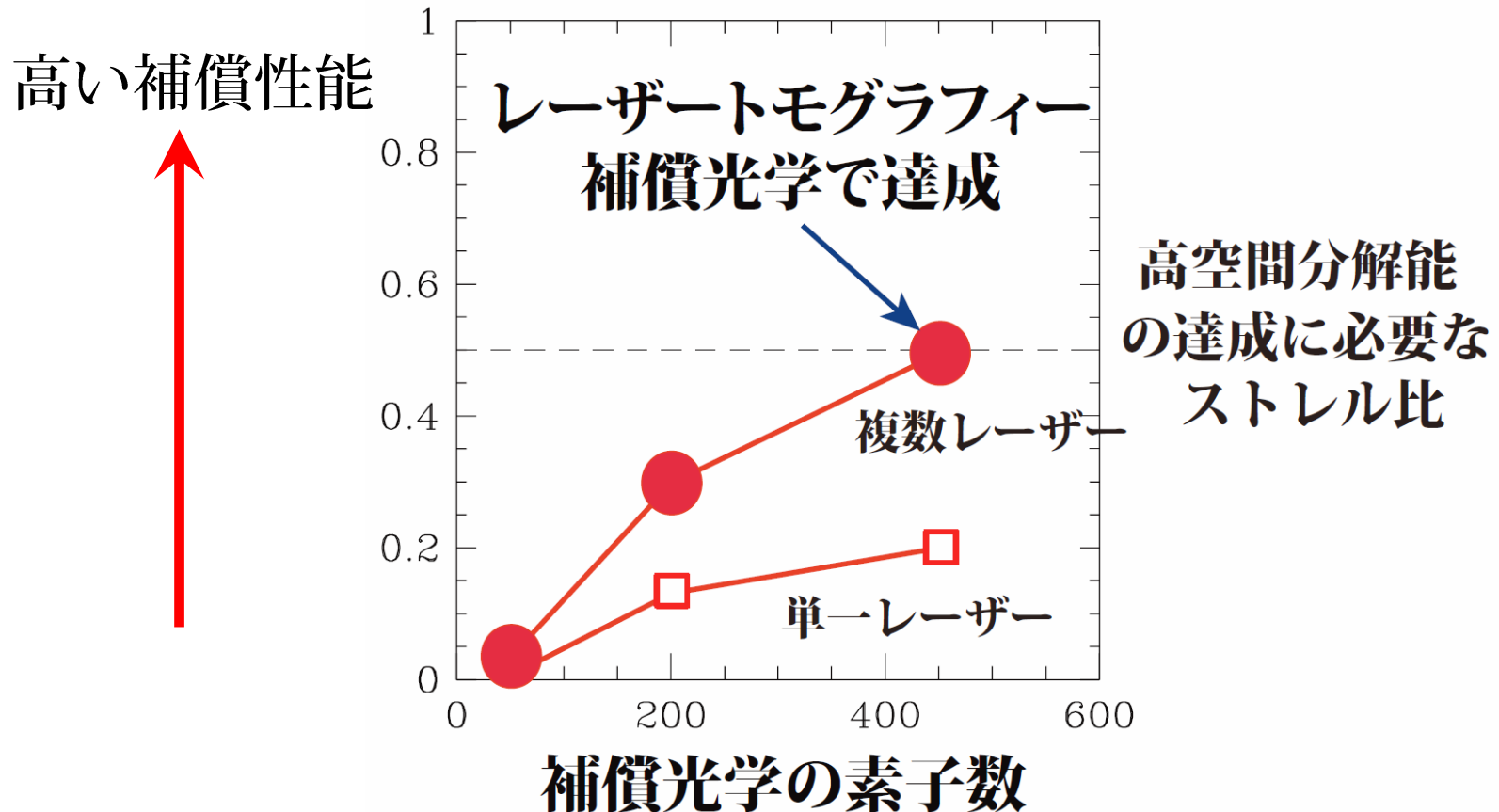
- 一つの光源を用いて測定した場合に得られるのは大気揺らぎの影響を高さ方向に積分したものである。複数のレーザー人工星を用いた測定をトモグラフィーの手法で解析し、高さ方向の大気揺らぎの構造を分離して推定する。



可視光での補償性能

- 高精度補償光学が実現できれば、これまで実現していない可視光での高空間分解能観測も可能になる。

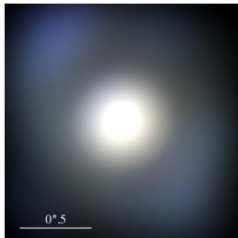
可視700nm でのストレル比



レーザー補償光学の現状

100億年前の銀河の見え方のシミュレーション

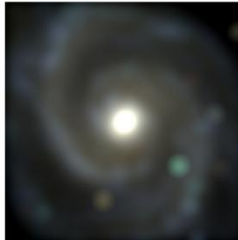
0.6秒角



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

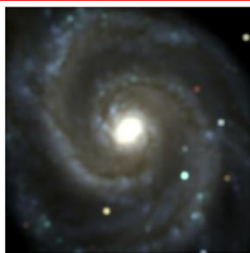


ハッブル宇宙望遠鏡 (赤外線)

現在のレーザー補償光学を用いたすばる望遠鏡での観測

現状の限界

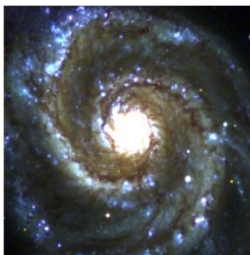
0.06秒角



すばる望遠鏡の赤外線での回折限界

本研究で開拓

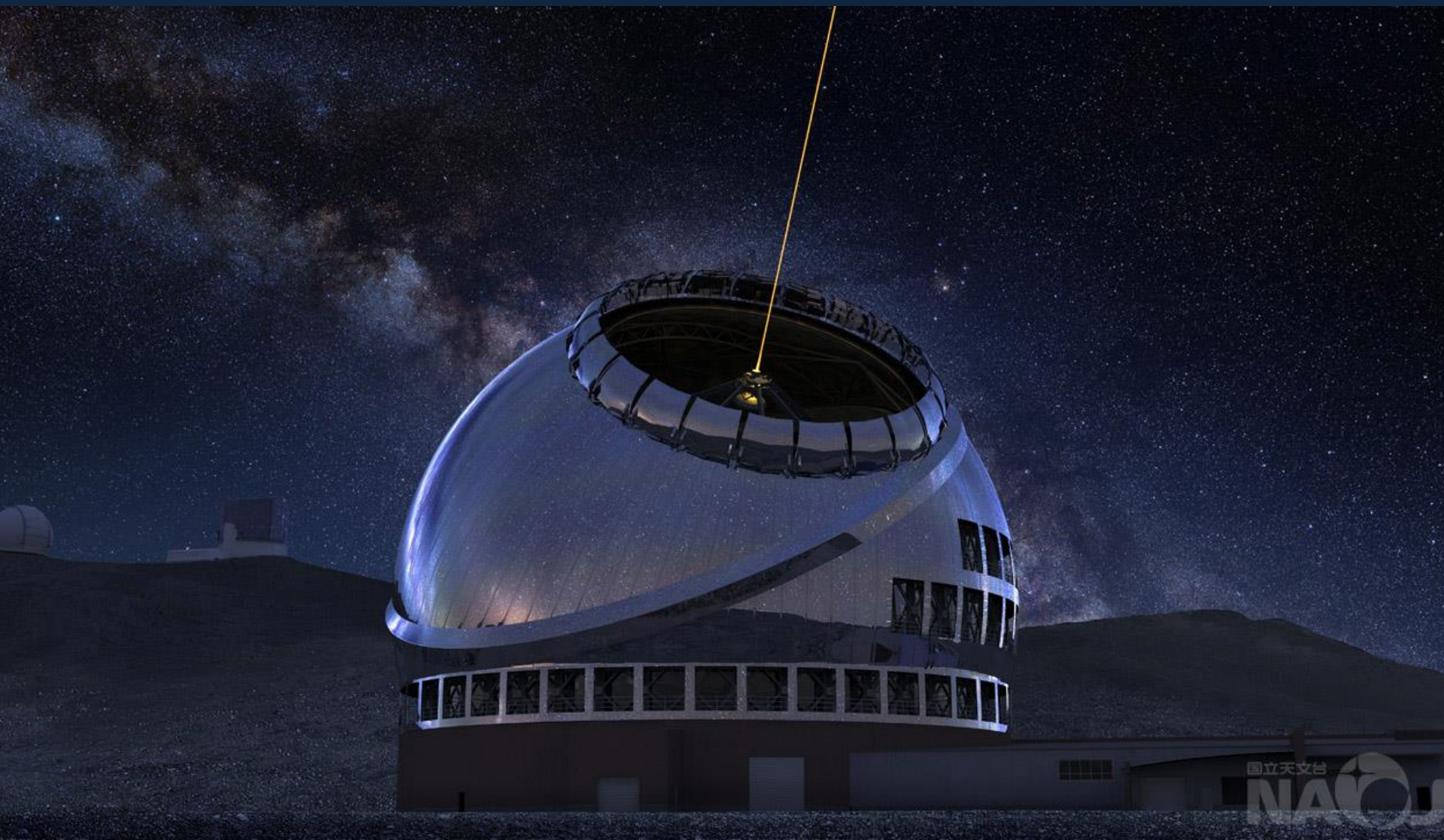
0.02秒角



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は
世界的にも未開拓分野

次世代地上超大型望遠鏡では特に円錐効果が大きくなるのでトモグラフィック補償光学が基盤技術となる



ULTIMATE-START 概要

① レーザーガイド星×4

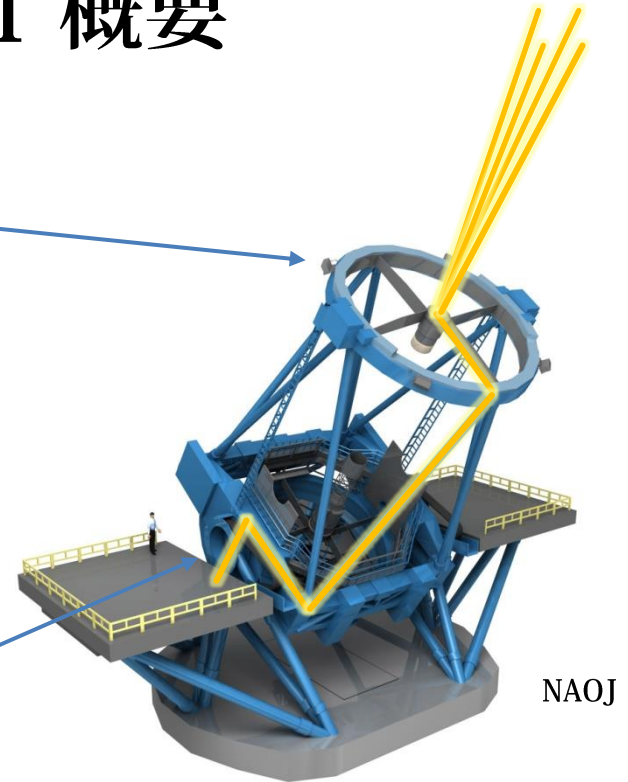
- 20Wの高輝度レーザー (589nm, TOPTICA社)
- 副鏡の上にある1つのレーザー送信望遠鏡から4本のビームを打上。

赤外ナスミス台

② 波面センサー×4

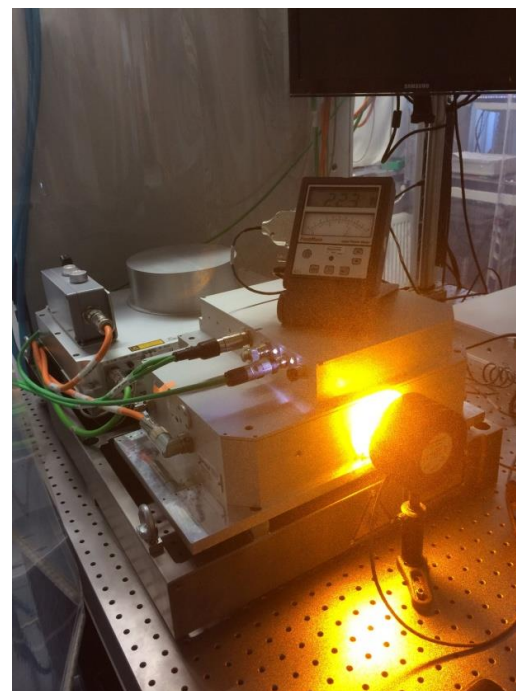
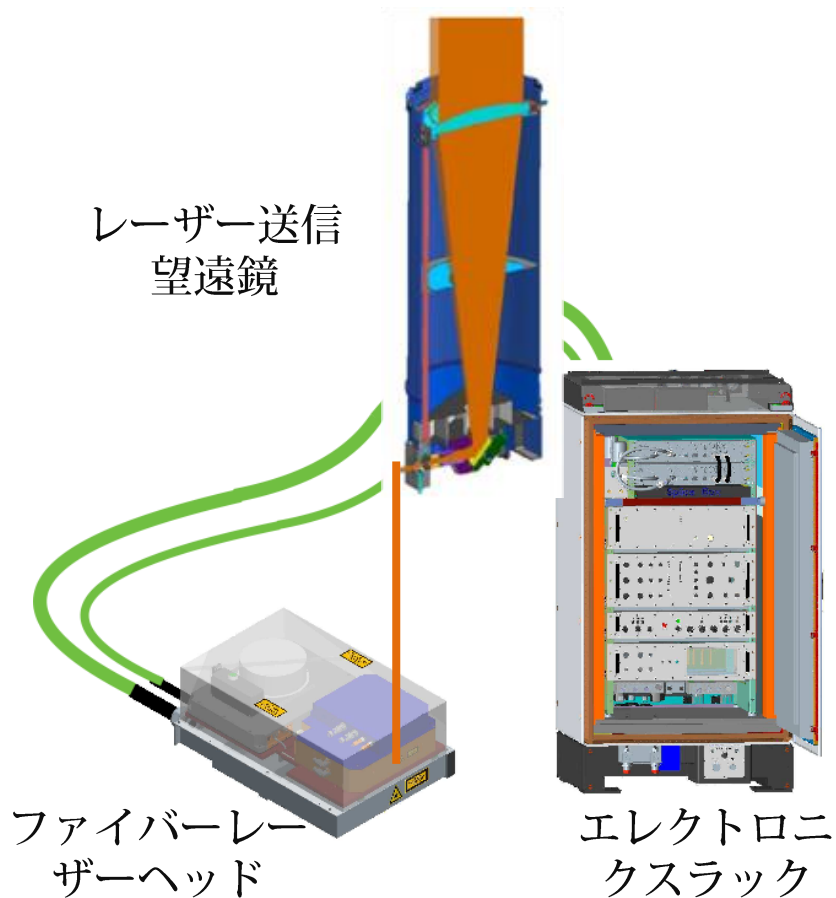
- 4つのレーザーガイド星の波面測定
- 波面センサーの設置場所

A0188の前のAG/SH→A0188の後ろ



高輝度レーザーの実装

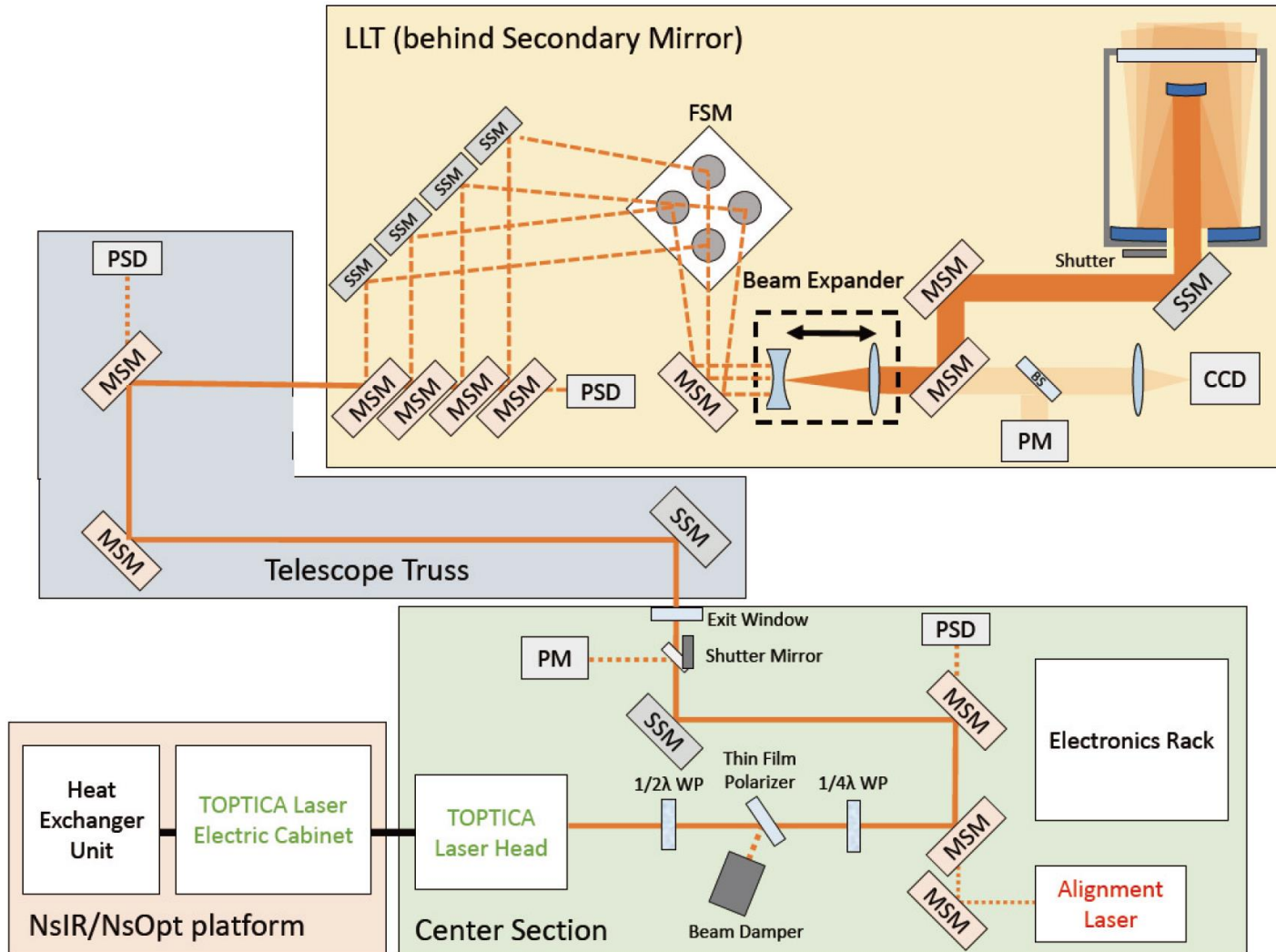
既に高輝度が得られることを確認されており、実装を待つ。



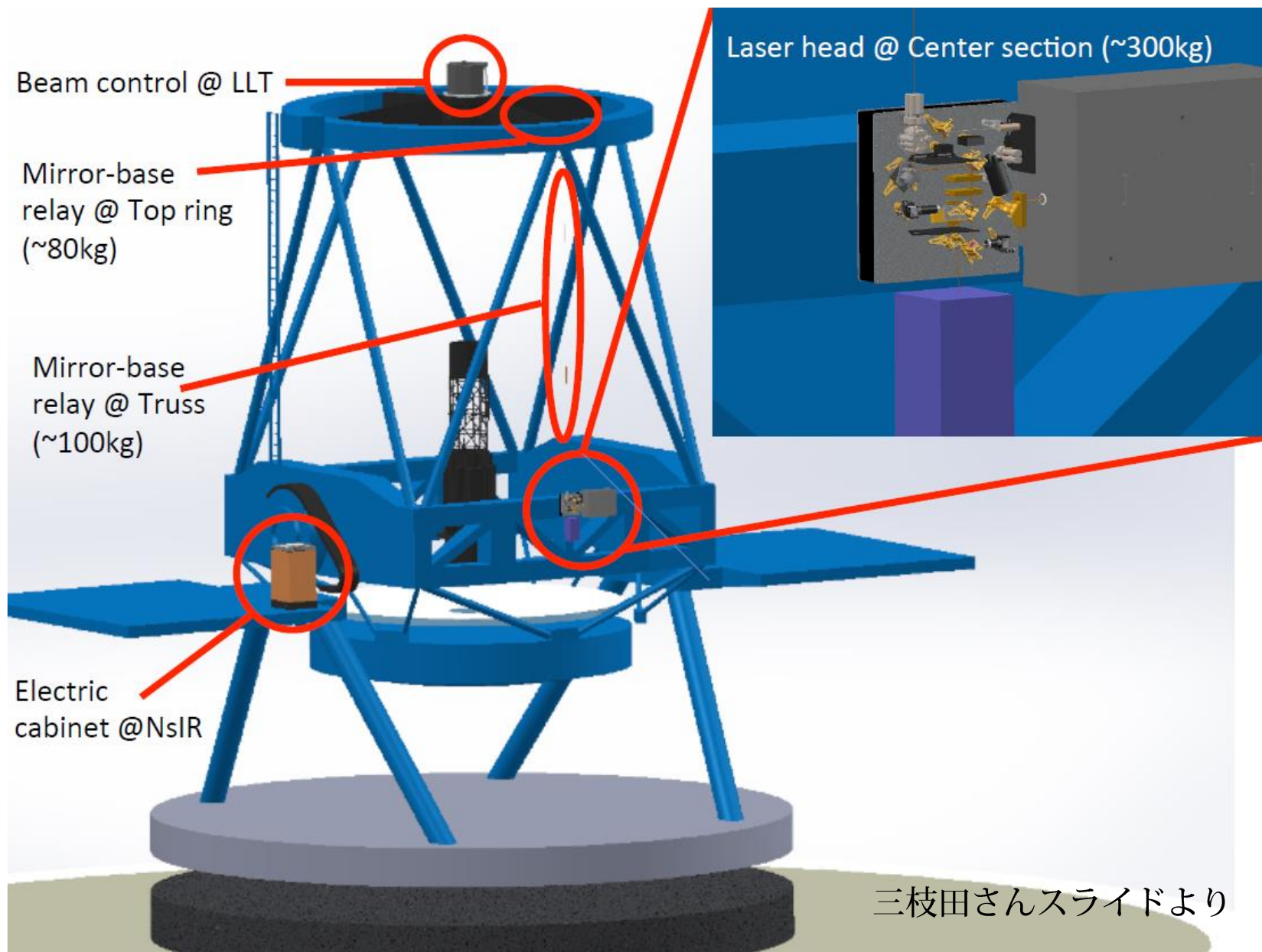
- TOPTICAのファイバーレーザーをすばる望遠鏡に実装し、現在用いているレーザーガイド星に対して **10倍以上の明るさ** を達成する。

レーザー送信系

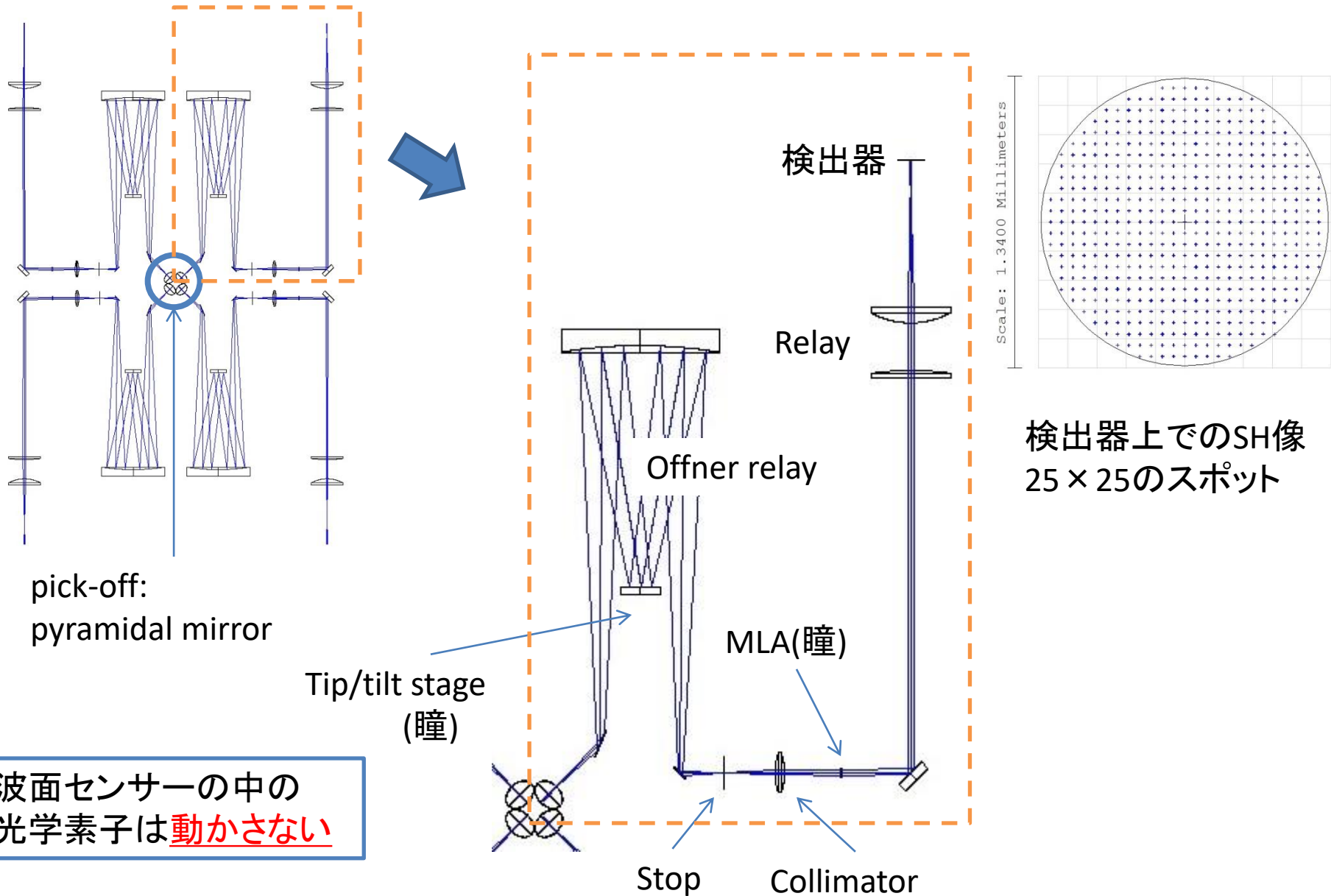
- 半径 5"-20" 角のサイズで 4 個のレーザーガイド星を送信する。送信望遠鏡は既存のものを利用する。



レーザー送信系の全体像

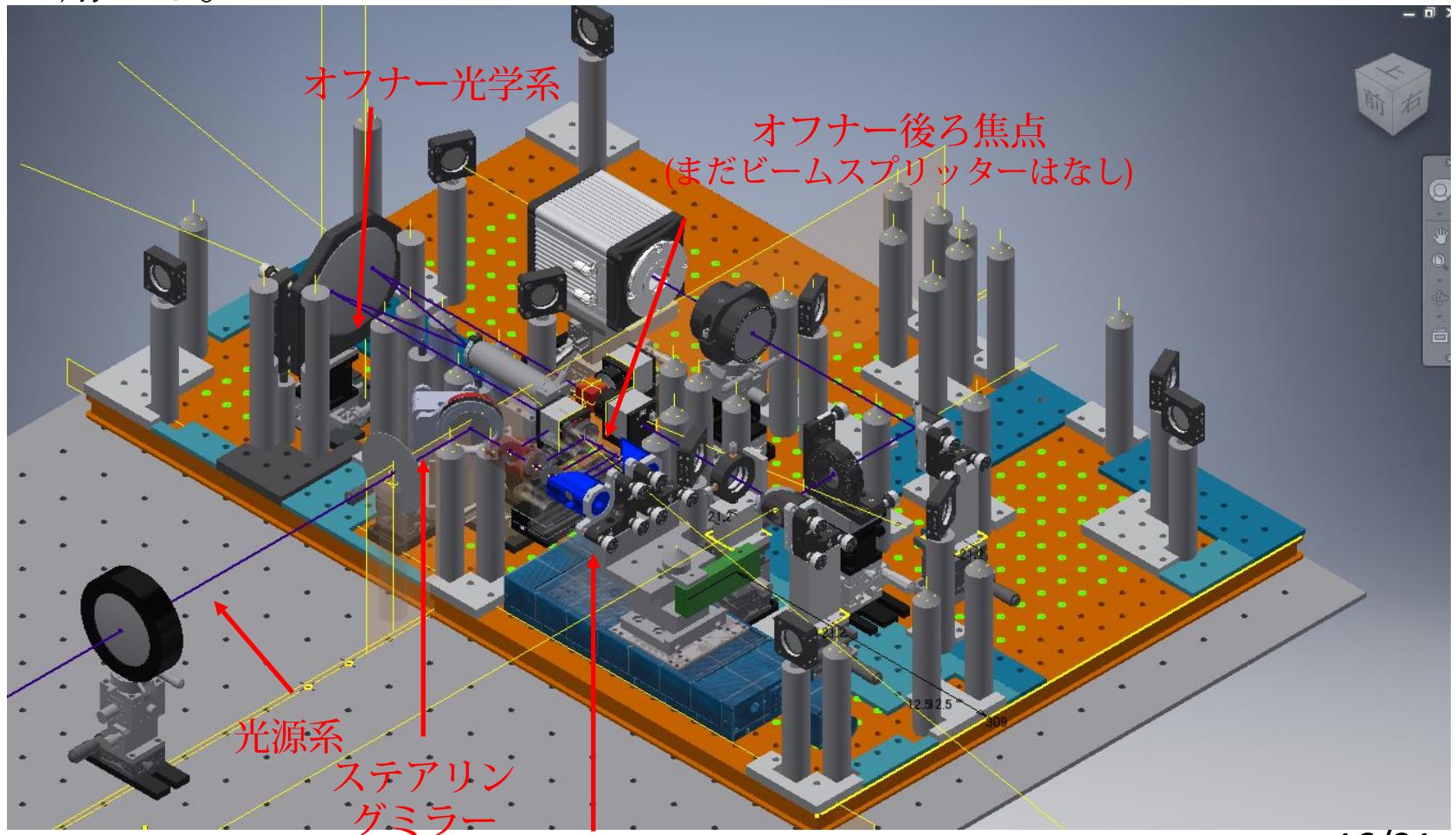


波面センサーの光学系



要素開発：シャックハルトマン波面センサー プロトタイプ

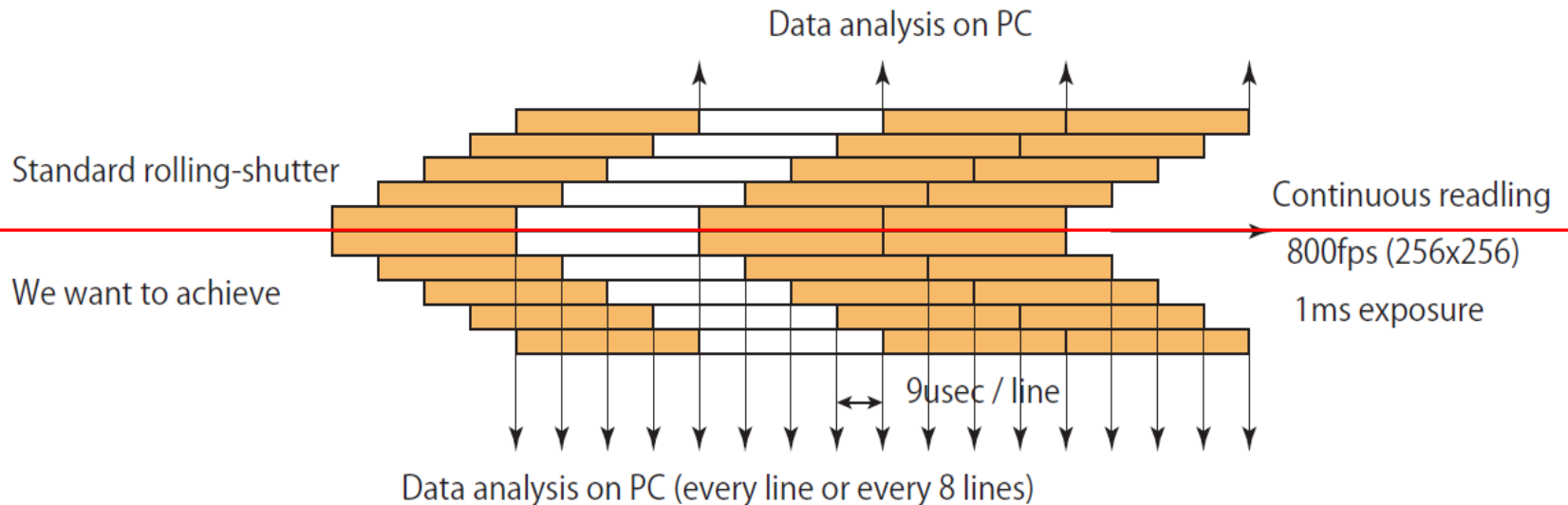
- シャックハルトマン波面センサーのプロトタイプを組み上げ中。調整にあたっての問題点の洗い出し、制御系の開発、レーザーの試験観測に用いる。



トロンボーン

要素開発：sCMOSセンサーの 行ごとの読み出しによるデータ遅延の最小化

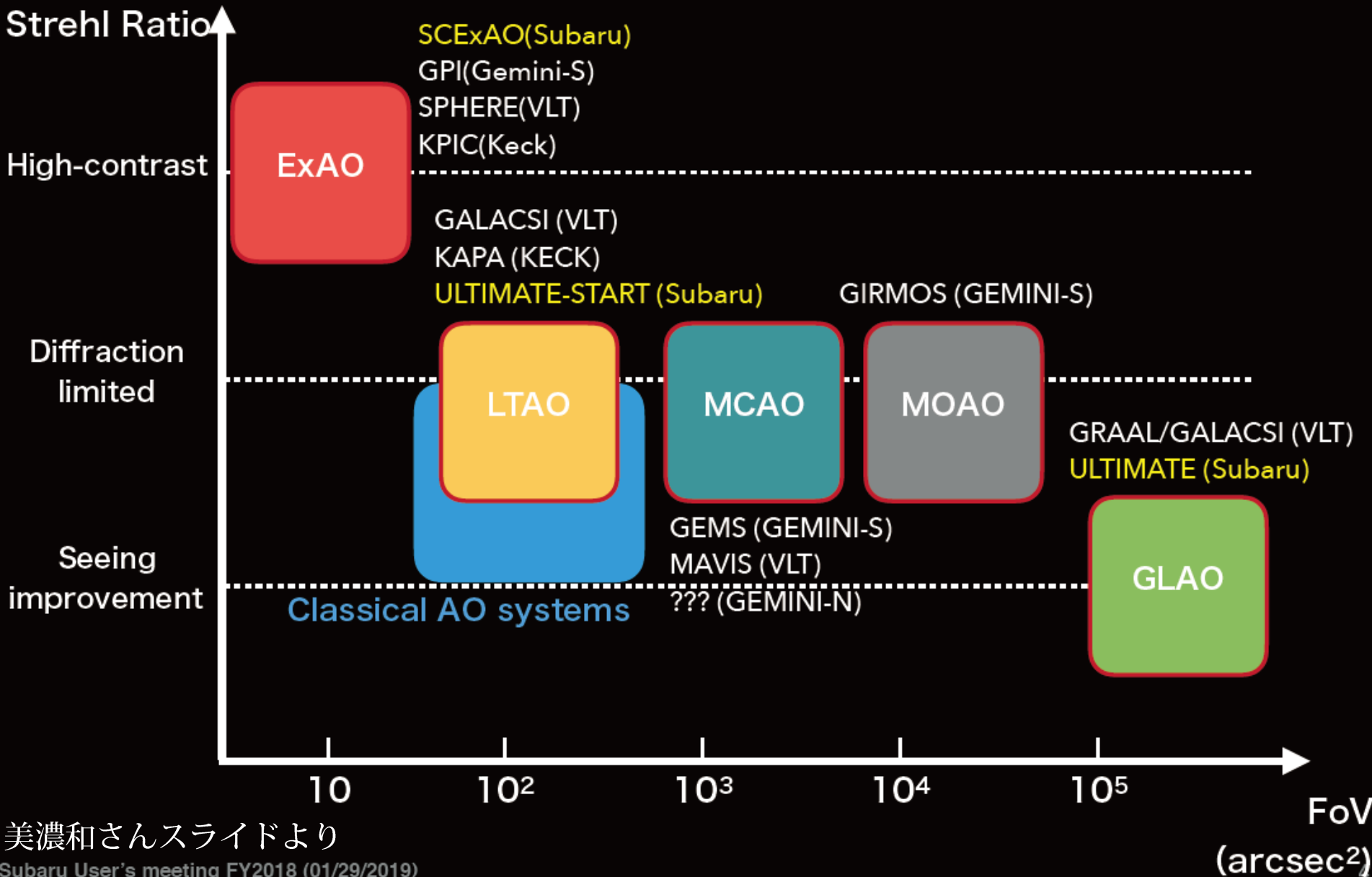
- シャックハルトマン波面センサーの検出器として浜松ホトニクス[®]のOrcaFlash 4.0 v2 を用いる。
- 上段に示すような全体の読み出しが終わってからのデータ処理ではなく、各行ごと(あるいは各8行ごと)のデータ処理によりデータ遅延を減らすことを考えている。



(smaller delay from the exposure is important in our application, real-time control)



DIRECTION OF AO DEVELOPMENT AT THE EXISTING 8M TELESCOPES



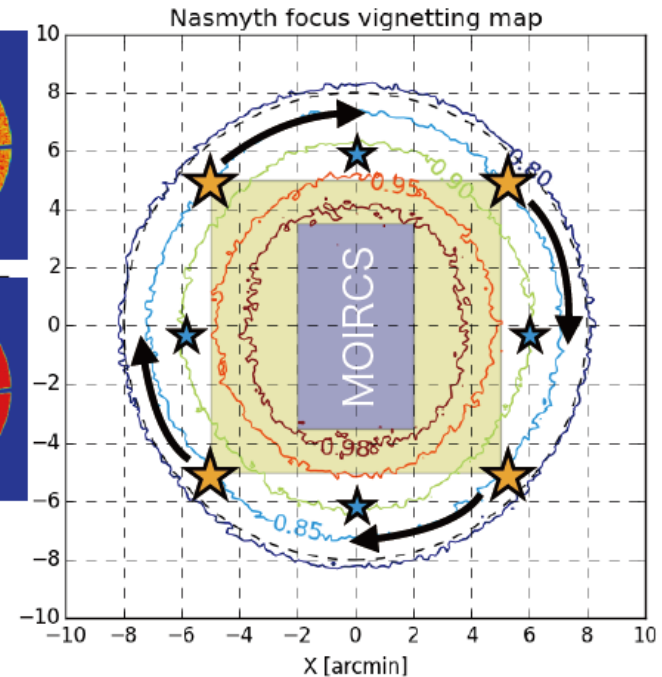
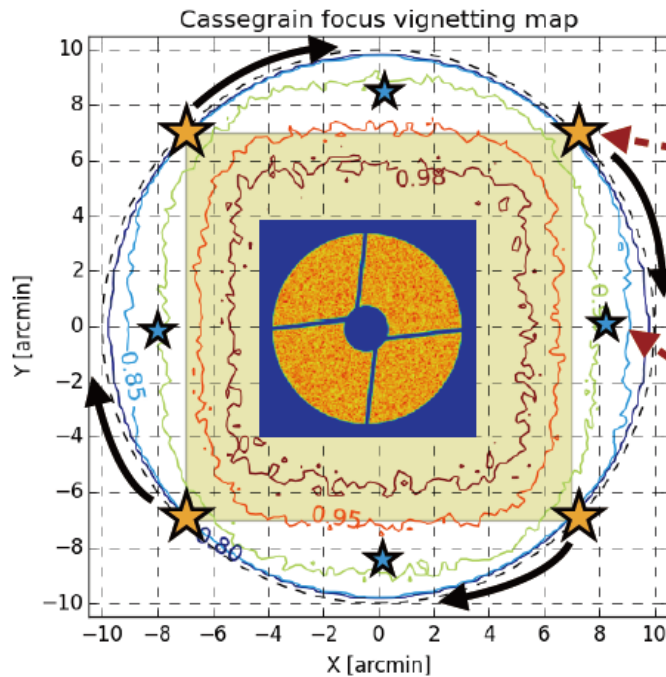
美濃和さんスライドより

ULTIMATE-Subaru : 地表層補償光学系

広視野の観測を可能にする。

Cassegrain Focus

Nasmyth Focus



$\phi \sim 20$ arcmin

Science FoV: $14' \times 14'$

$\phi \sim 14$ arcmin

Science FoV: $10' \times 10'$

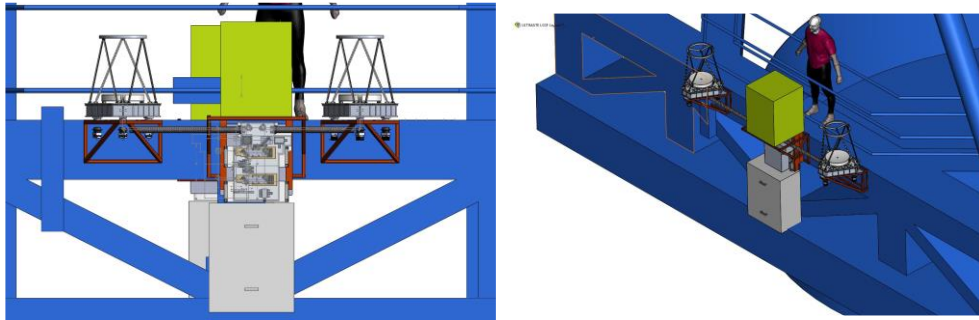
美濃和さんスライドより



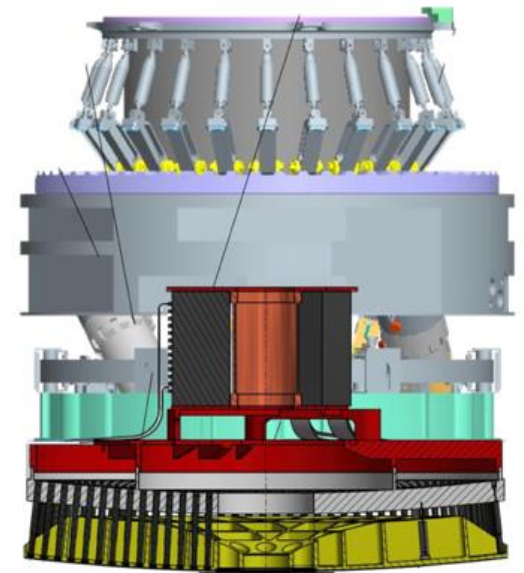
ULTIMATE-Subaru : 地表層補償光学系

概念設計レビューを 2018/10 に行った。次のステップとして国立天文台Aプロジェクトとして初期設計段階に開始する。

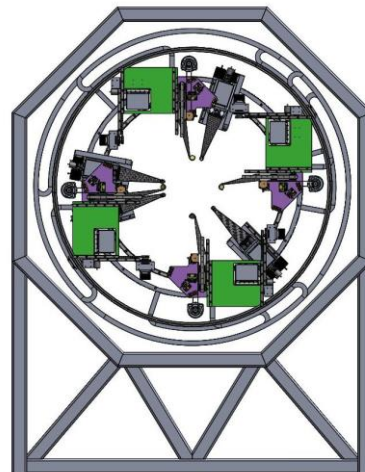
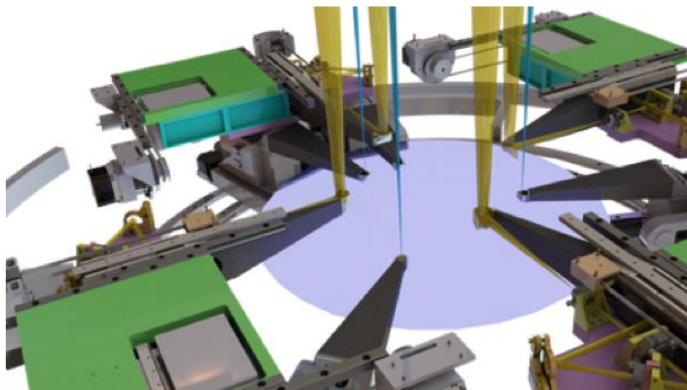
① レーザーガイド星×4



① 可変副鏡



③ 波面センサー×4



美濃和さんスライドより



まとめ：トモグラフィー補償光学の開発

- ✓ 1. 3個の自然ガイド星によるトモグラフィー：RAVEN
 - ← 4個のレーザーガイド星と波面センサーユニットの導入
- 2. 4個のレーザーガイド星によるトモグラフィー：
ULTIMATE-START
 - ← 多素子可変形鏡
- 3. 多素子可変形鏡による高精度補償 (w SCE_{ExAO})
 - ← 可変副鏡
- 4. 地表層補償光学系：ULTIMATE-Subaru
- 5. 広視野多天体補償光学系：TMT-AGE

補償光学の性能シミュレーション結果

- 高次波面誤差でRMS=100nm以下にすることが目標値。
- 波面センサー側の大枠の仕様はこれで決まる。

