

RAVENを用いた複タイムステップ トモグラフィ推定の開発

大野 良人 (東北大学 / JSPS DC2)

目次

1. 最終ゴール：TMT-AGE
2. 多天体補償光学オンスカイ実証装置「RAVEN」
3. 複タイムステップトモグラフィ推定の開発

TMT-AGE

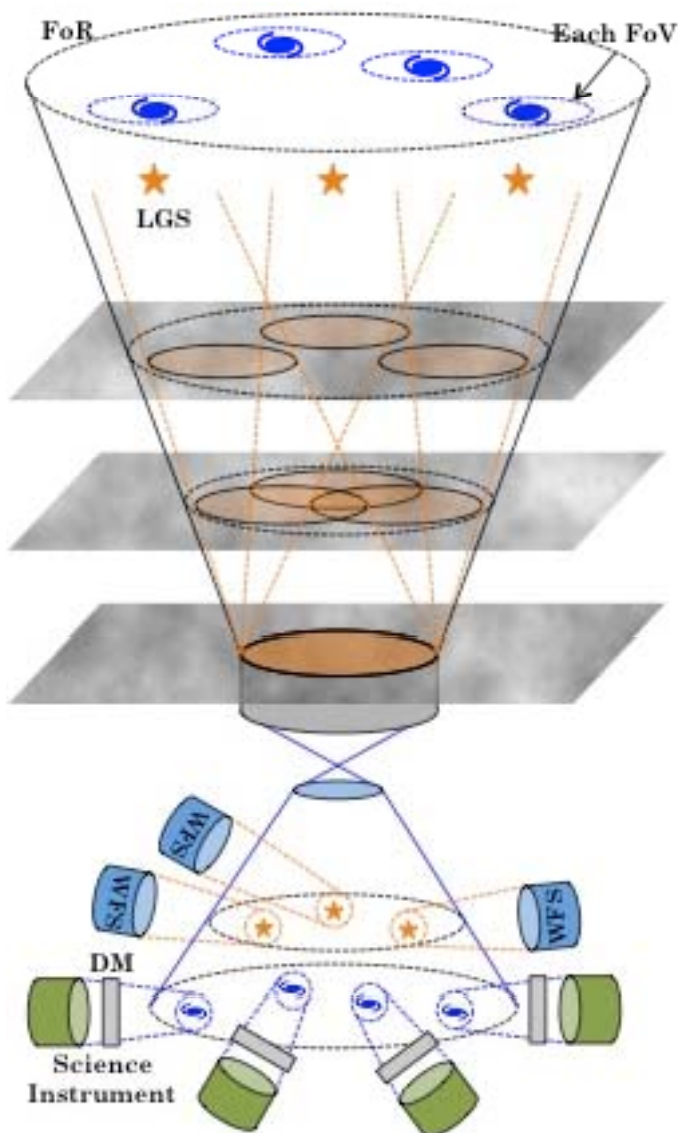
TMT-AGE : Analyzer for Galaxies in the Early universe

1. 銀河の内部構造の形成過程を明らかにする。
z > 1-5の銀河を空間的に分解して分光 (面分光)を行う。
1. 銀河形成期での激しい星形成の物理過程を明らかにする
z > 5の銀河の光を積分して分光する
1. 将来のスペース望遠鏡で見つかる宇宙初期での銀河の候補天体のフォローアップ観測
z > 8の銀河の光を積分して分光する。

普遍的な描像を明らかにするために、たくさんの銀河を観測して**統計的**に議論する

高い**集光力** ・ 高い**空間分解能** ・ 高い**観測効率**

TMT+広視野補償光学



多天体補償光学

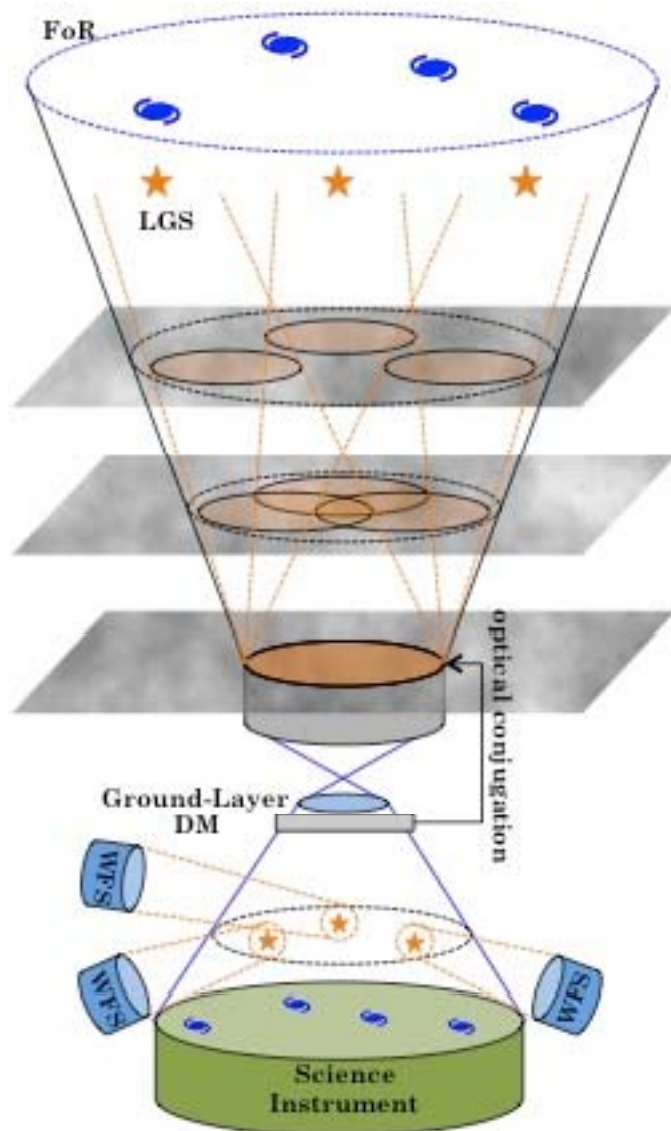
(Multi-Object Adaptive optics, MOAO)

- 複数のガイド星、トモグラフィ推定
- 5'の視野内の10~20個の天体に対して同時に補正を行う。
- 観測効率の向上

技術的課題

- 開ループ制御
- 波面センサー、DMのダイナミックレンジ
- トモグラフィ推定、計算速度

TMT+広視野補償光学

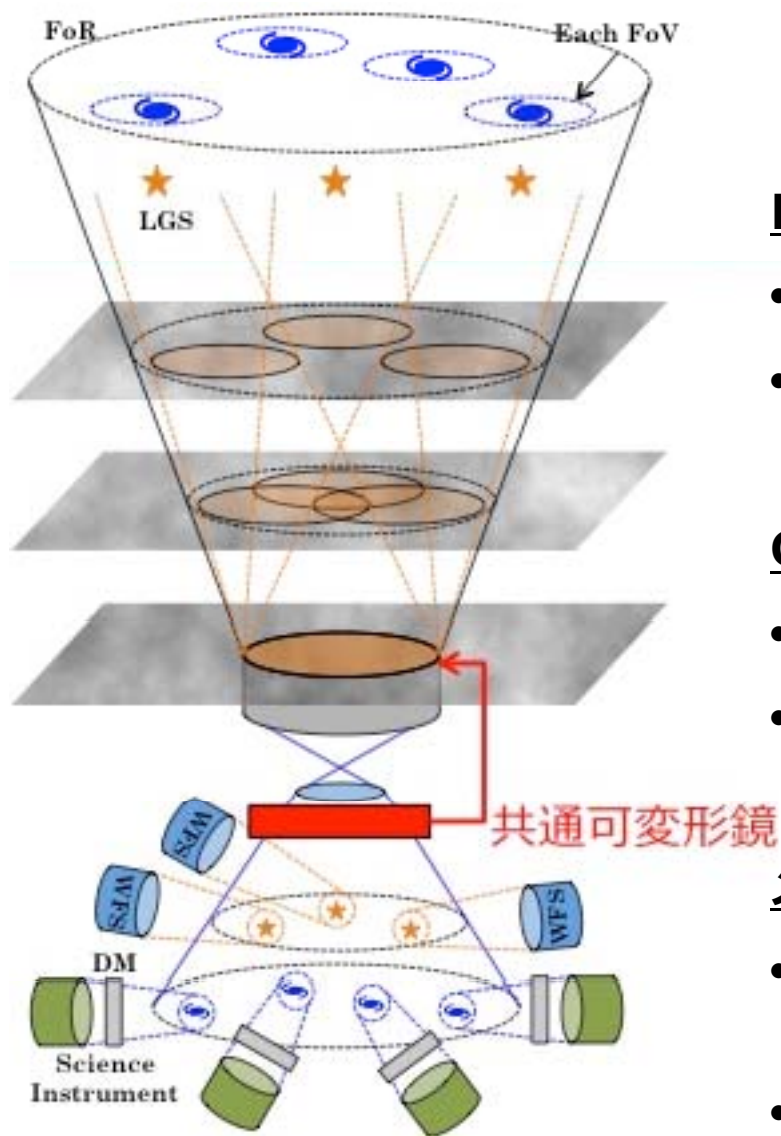


地表層補償光学

(Ground-Layer Adaptive optics, GLAO)

- 複数のガイド星、地表層のみ補正
- 地表層はすべての方向で共通のゆらぎ、支配的な成分(60%>)
- 10'>の広い視野でseeingの改善

TMT+広視野補償光学



多天体補償光学+地表層補償光学
(MOAO + GLAO)

MOAO Mode

- 視野5'、回折限界に近い補償
- 高い空間分解能、多天体面分光

GLAO Mode

- 視野10'、Seeingの改善
- 広い視野、多天体分光

メリット

- 波面センサーや個別可変形鏡に必要なダイナミックレンジを小さくできる。
- 補正されたガイド星を用いることができる。

TMT-AGE

TMT-AGE : Analyzer for Galaxies in the Early universe

1. 銀河の内部構造の形成過程を明らかにする。

MOAO modeの高い空間分解能による多天体面分光観測
視野5'、50masサンプリング

1. 銀河形成期での激しい星形成の物理過程を明らかにする

GLAO modeの広い視野を用いた多天体分光観測
視野10'、150masサンプリング

1. 将来のスペース望遠鏡で見つかる宇宙初期での銀河の候補天体のフォローアップ観測

GLAO modeの広い視野を用いた多天体分光観測
視野10'、150masサンプリング

※ 一度に10~20天体の多天体観測を行う。

TMT-AGE

TMTで視野10'のMOAO+GLAOシステムを実現するために……

❖ TMTで視野10'のGLAO部分の光学系の設計

➡ **高田発表**

❖ MOAOの技術的課題の実証 (開ループ制御、トモグラフィ推定)

➡ すばる望遠鏡での実証 「RAVEN」
(**本発表**)

❖ トモグラフィ推定アルゴリズムの開発

➡ 複タイムステップ：**本発表**
経験的再構成：**山崎発表**

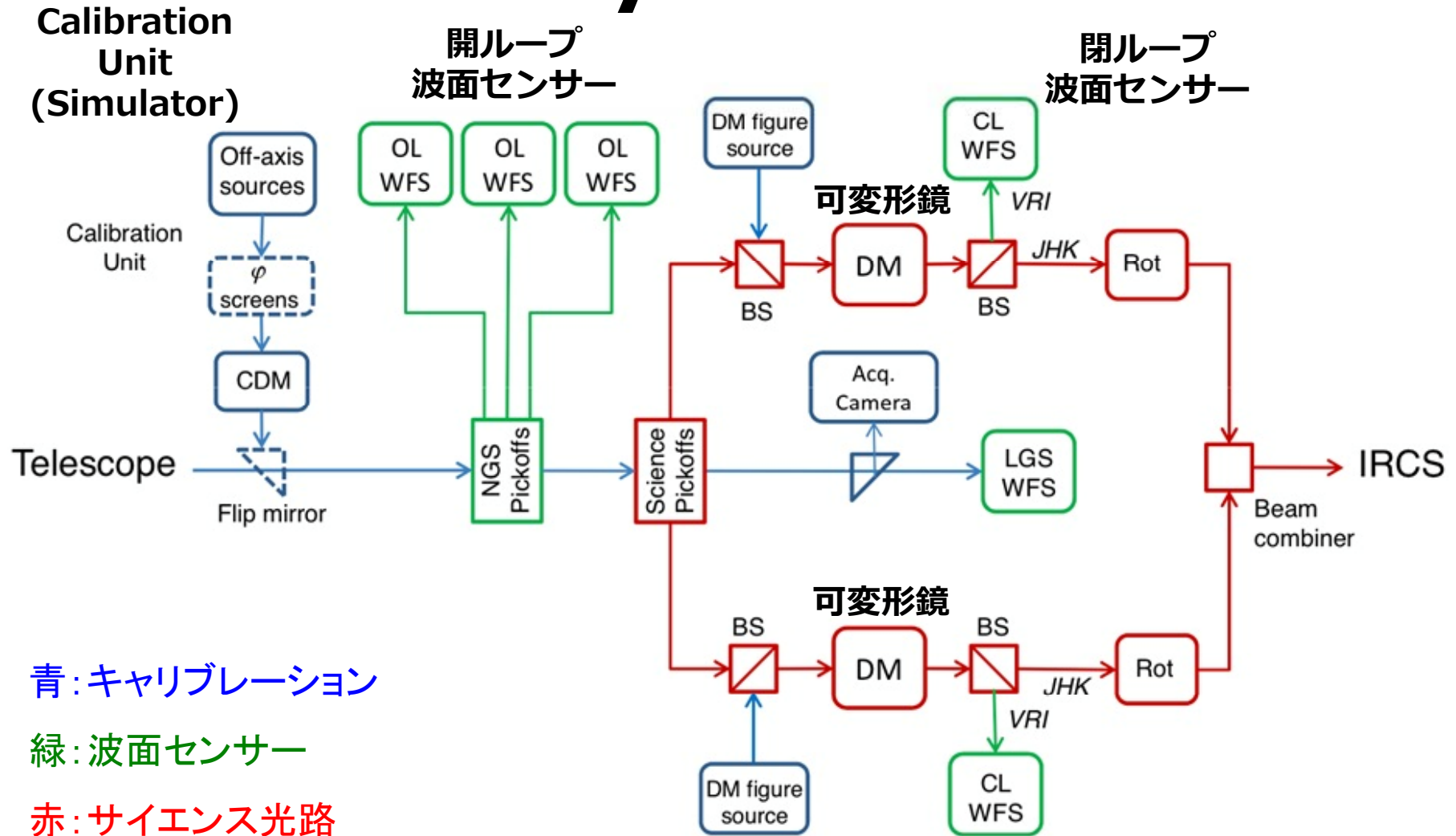
多天体補償光学の-onsカイでの実証

RAVEN

RAVEN

- MOAOの技術的&科学的実証試験機 (8mクラスでは世界初)
 - ✓ **技術的** : 開ループ制御、アライメント、キャリブレーション、コントロール、トモグラフィ推定
 - ✓ **科学的** : 透過効率、オーバーヘッド、科学観測オペレーション、サイエンス観測
- カナダと日本の国際協力
- 3回の試験観測 @Subaru望遠鏡
 - ✓ with IRCS (近赤外撮像、分光) & レーザーガイド星
- 3つの自然ガイド星(直径3.5'以内)と1つのレーザーガイド星でトモグラフィ推定
- 直径2'の視野内にある2つの天体に対して補正を行う。(各サイエンスチャンネルの視野は4")
- 目標性能 : Ensquared Energy 30% > in 140mas slit
- 目標透過効率 : AO188の80%以上

System



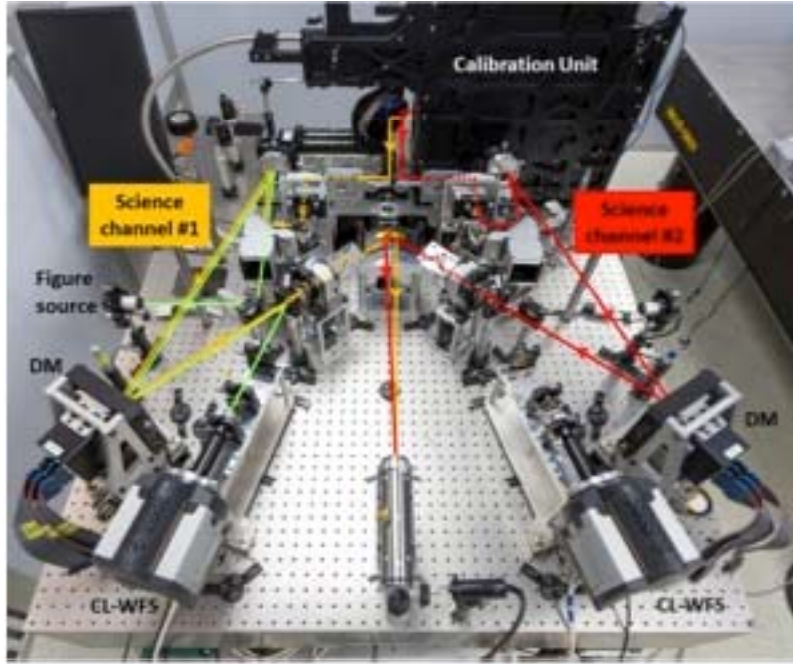
青: キャリブレーション

緑: 波面センサー

赤: サイエンス光路

Functional optical block diagram of Raven.

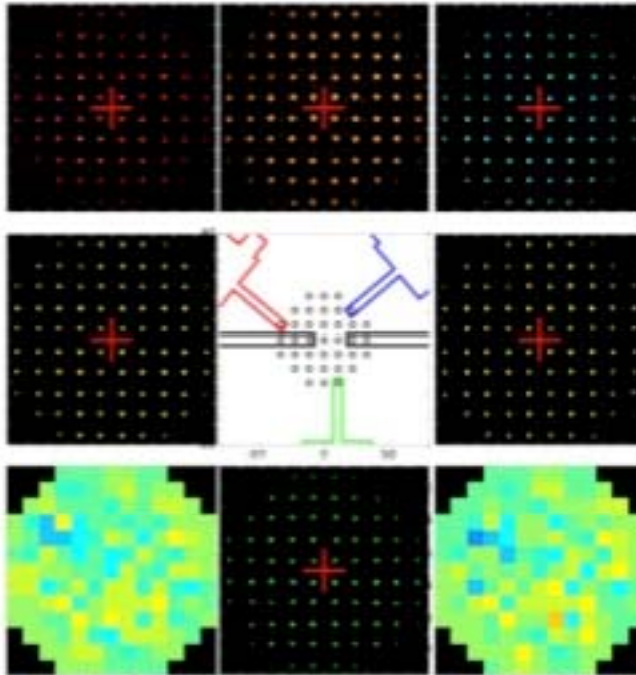
Optical bench



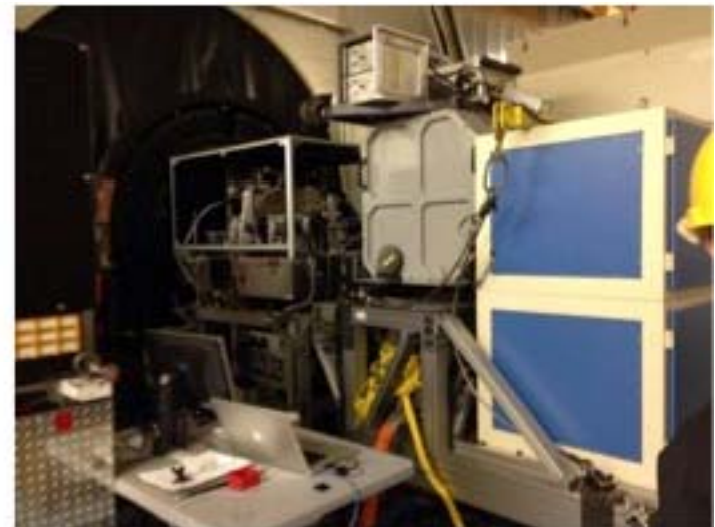
Pick-off arms



Control GUI



RAVEN and IRCS@ NsIR



Science

同時性

スカイや参照星を一度に観測することで、高精度なスカイ引きや大気吸収の補正を行う

1. High resolution spectroscopy of metal-poor star
2. Spectroscopy of prototypical IR-luminous merging galaxy, NGC6240

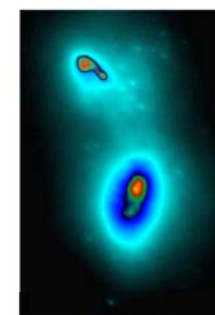
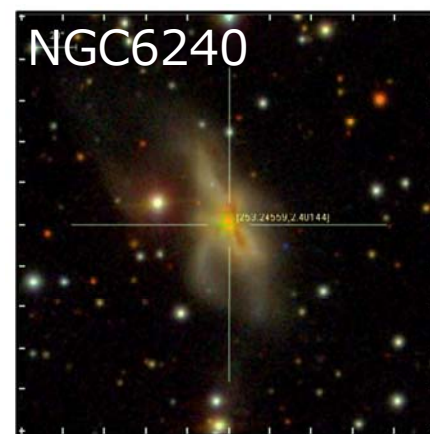


Figure 3. Keck adaptive optics image of NGC 6240 in the J' band taken from Medling et al. (2011). The dark blue nuclear region in the north and small nuclei, which are separated by about 1", have each been overlaid to highlight their interior structure. The more diffuse image of the rest of the galaxy's nuclear region seen in a separate color map. Many individual young star clusters can be seen outside of the two nuclei (Phillips et al. 2007). In this image, north is up and east is to the left.

Keck AO imaging
Medling et al. 2011, ApJ, 743:32

多重性

離れた領域をAOで補正しながら一度に観測する

3. Observation of the center of a near elliptical galaxy.

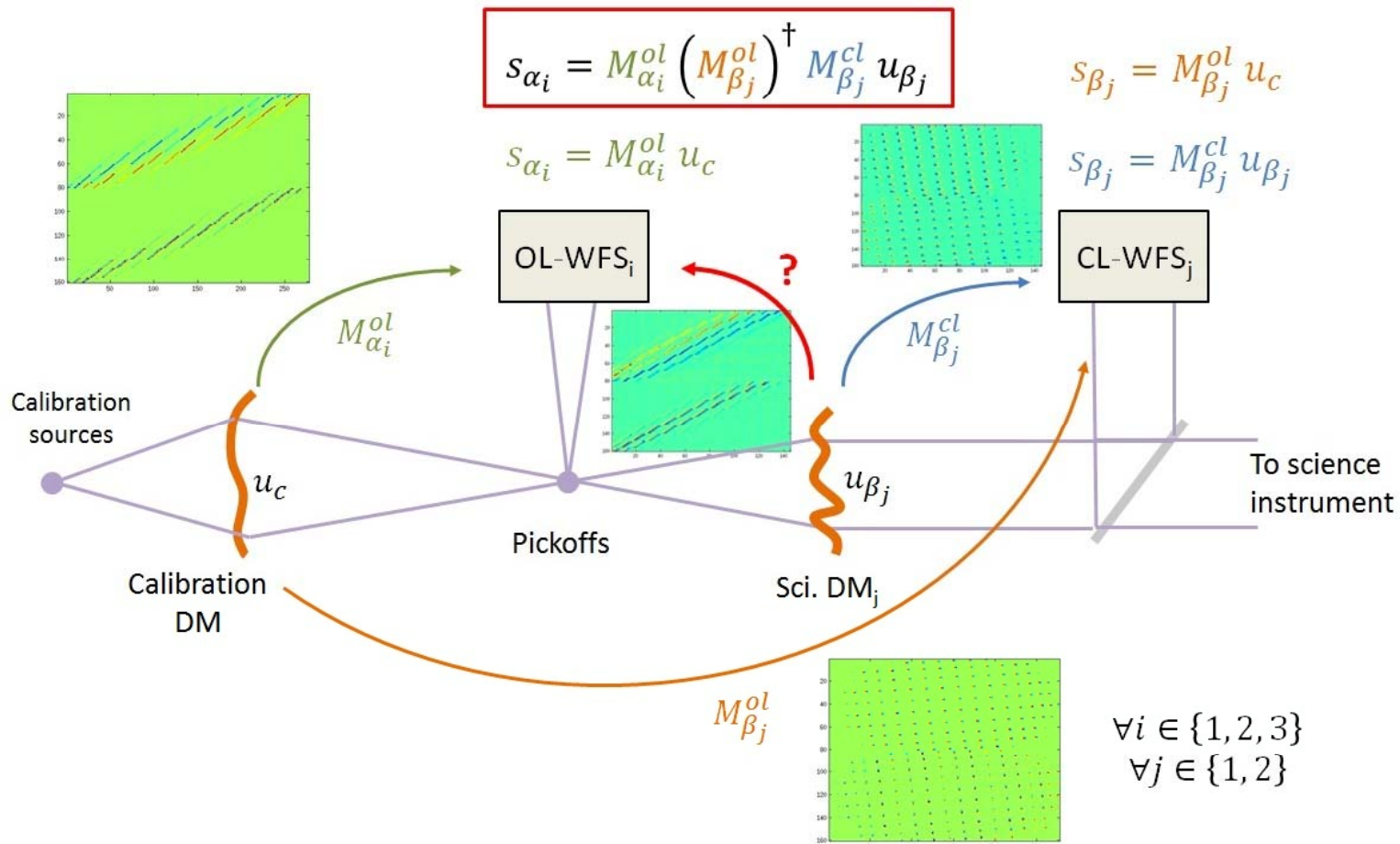
Davidge et al. (2015)

PSFの一様性

4. Imaging of host galaxies of high-redshift QSOs.

Calibration

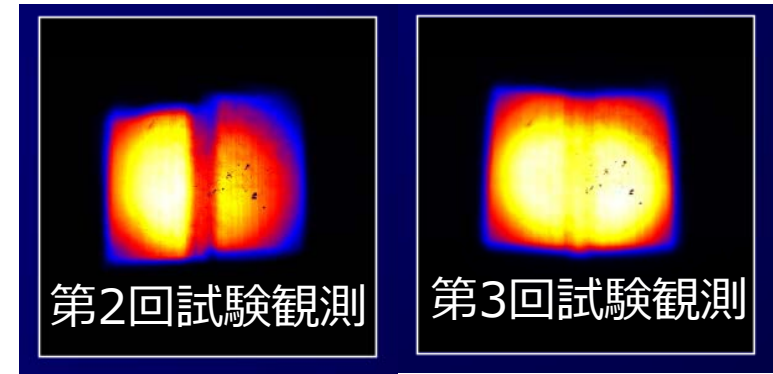
- 3つのオープンループWFS、2つのサイエンスDMをつなぐ
Interaction Matrixの作成。



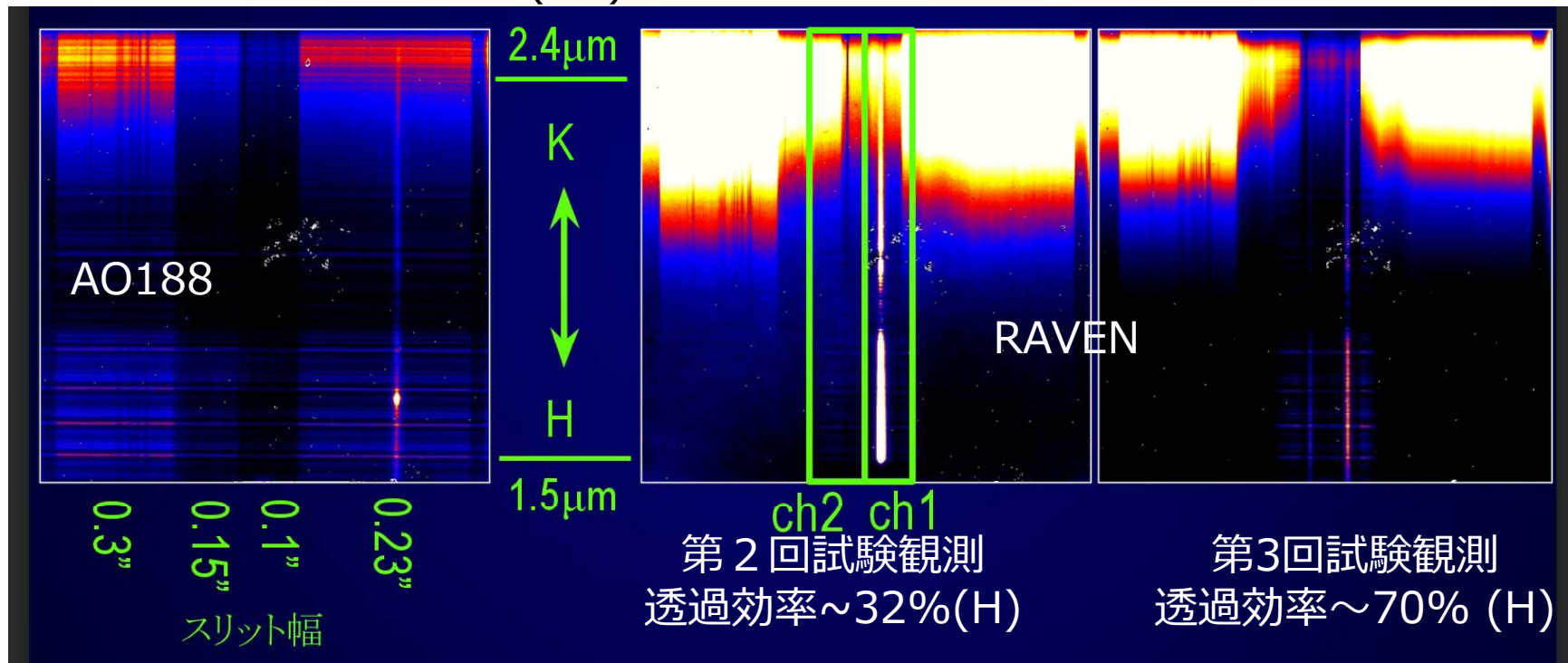
Alignment

- 第2回試験観測で透過効率の低下、背景放射の増加、各チャンネルごとに差が見られた
- 各チャンネルの**瞳ずれ**、RAVENとIRCSの**瞳ずれ**が原因。
- 第3回試験観測では改善された

撮像フラット画像 (H-band)

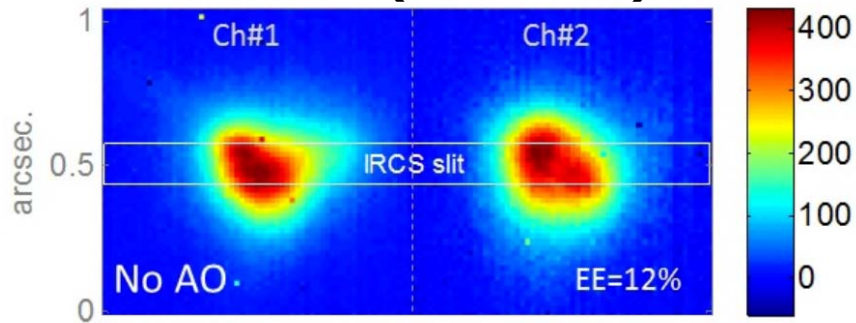


グリズムフラット画像 (HK)

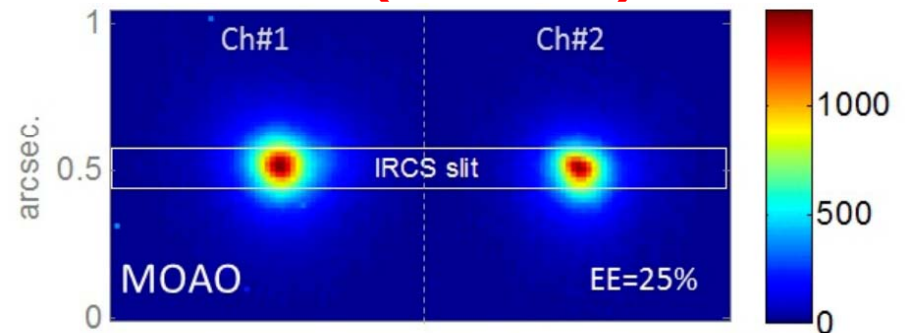


MOAO

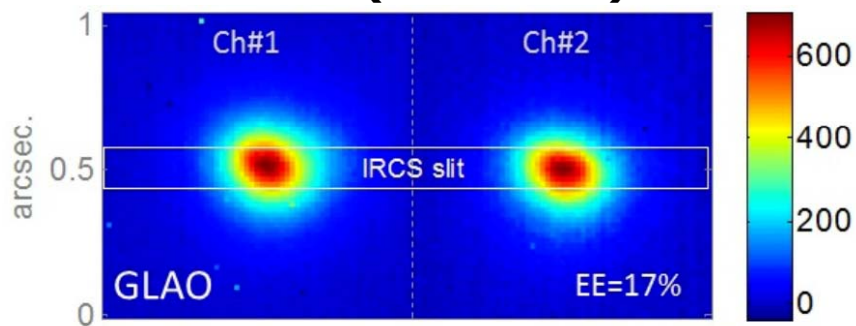
補正なし (EE=12%)



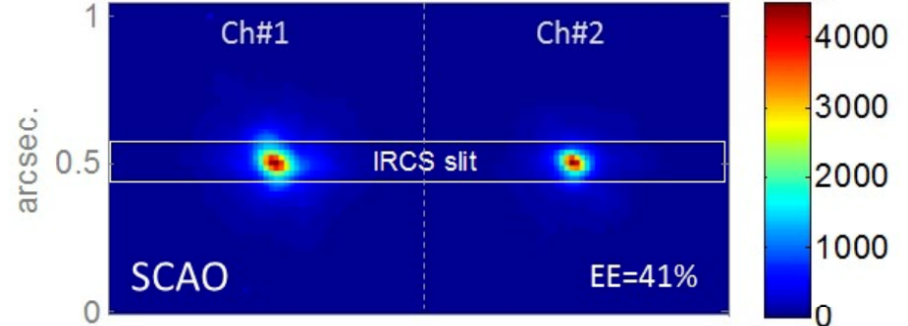
MOAO (EE=25%)



GLAO (EE=17%)



SCAO (EE=41%)



複タイムステップトモグラフィ 波面再構成の開発

トモグラフィ推定

逆問題

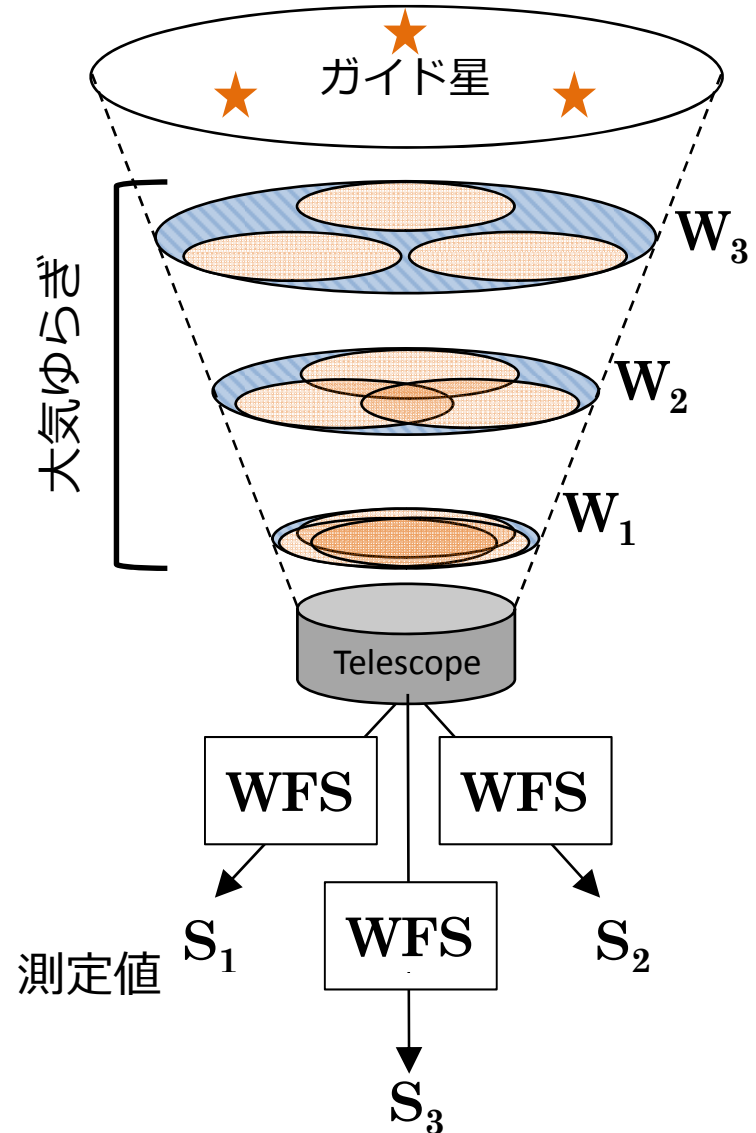
$$\begin{pmatrix} S_1(t) \\ S_2(t) \\ S_3(t) \end{pmatrix} = \mathbf{H} \begin{pmatrix} W_1(t) \\ W_2(t) \\ W_3(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_1(t) \\ e_2(t) \\ e_3(t) \end{pmatrix}$$

測定誤差



$$W(t) = \mathbf{H}^\dagger S(t)$$

\mathbf{H}^\dagger : 再構成行列



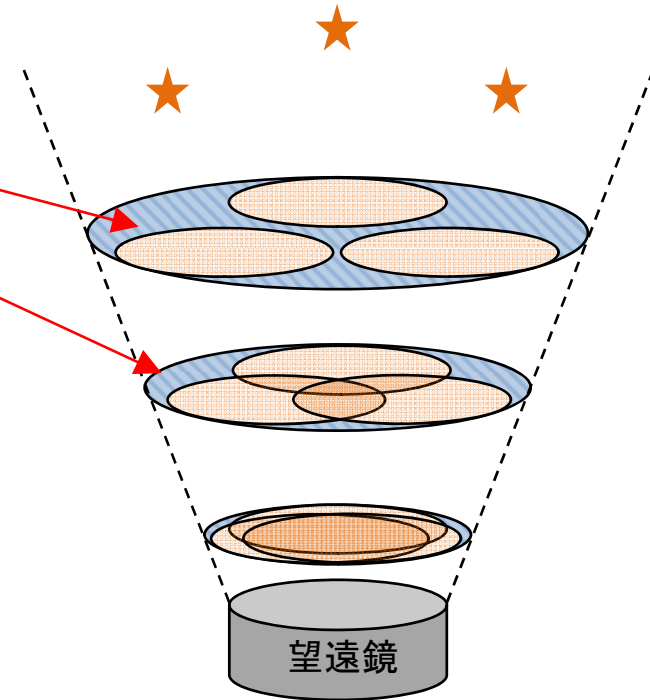
トモグラフィにおける情報不足

◆ 測定できない領域

- ✓ ガイド星の光が通らない領域は全く情報がない。
- ✓ 推定エラーの原因となる。

◆ 縮退している領域

- ✓ 波面センサーで測定できるのは、ガイド星の方向の積分された位相ゆらぎ。
- ✓ トモグラフィ推定で高さごとの位相ゆらぎに変換するためには、複数の光路で測定されている必要がある。



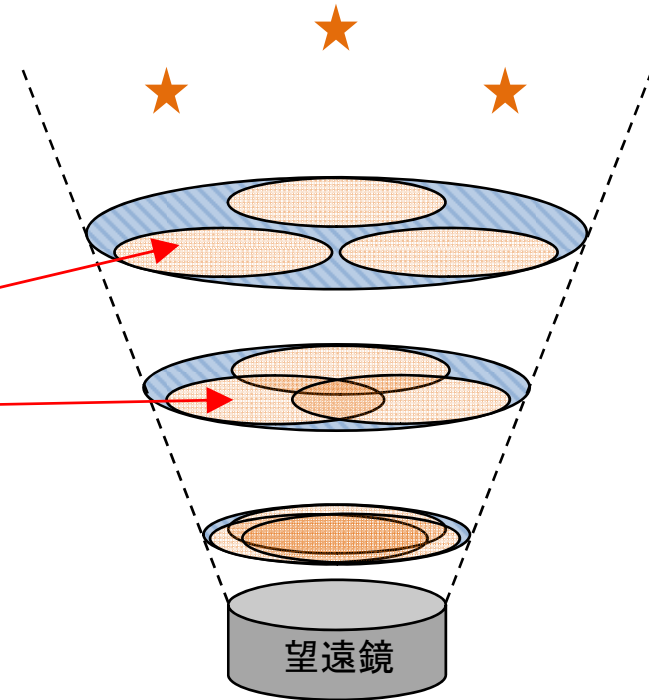
トモグラフィにおける情報不足

◆ 測定できない領域

- ✓ ガイド星の光が通らない領域は全く情報がない。
- ✓ 推定エラーの原因となる。

◆ 縮退している領域

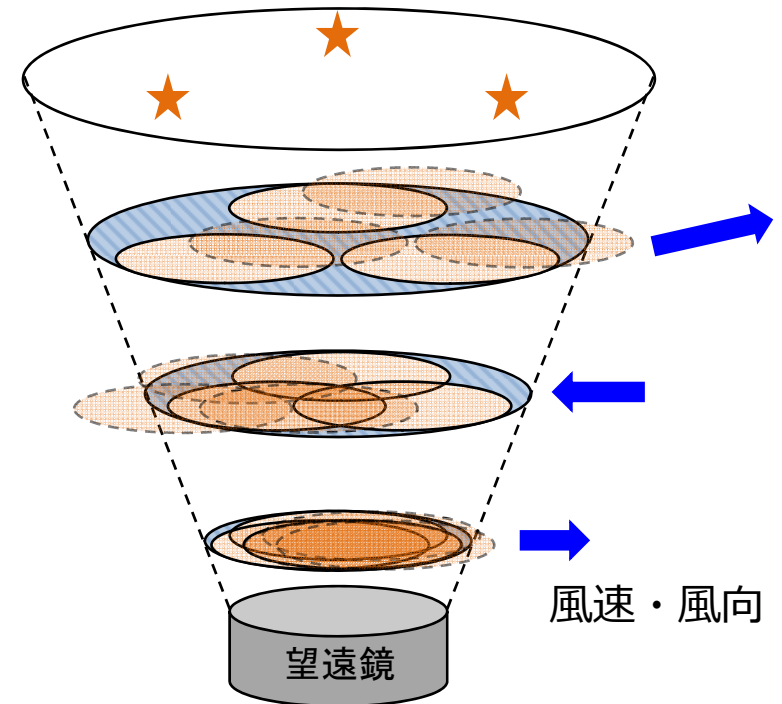
- ✓ 波面センサーで測定できるのは、ガイド星の方向の積分された位相ゆらぎ。
- ✓ トモグラフィ推定で高さごとの位相ゆらぎに変換するためには、複数の光路で測定されている必要がある。



これらの領域はMOAOの視野を広げるほど増え、トモグラフィ推定の精度を大きく下げる。

複タイムステップトモグラフィ推定

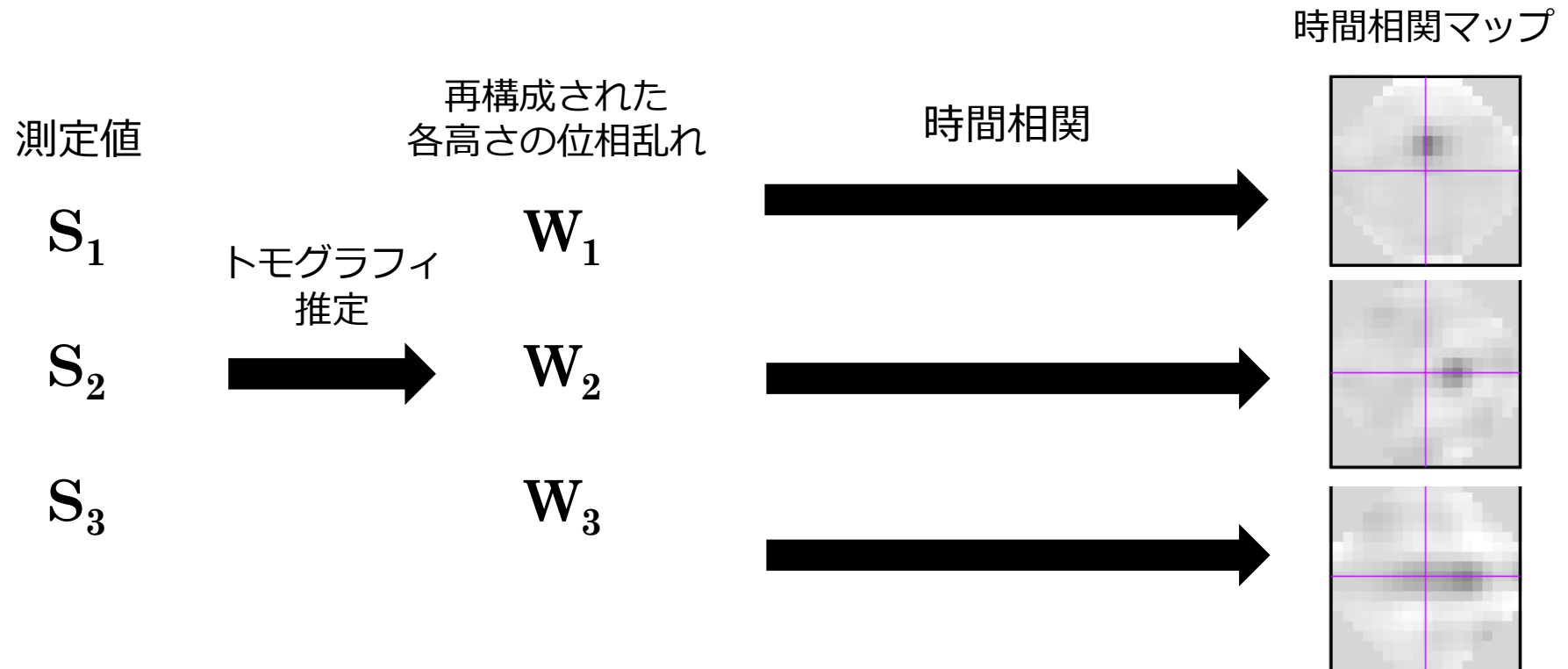
- 短い時間の間ならば、大気ゆらぎは風速によって移動しているとみなせる。
(Frozen flow)
- 前のタイムステップで測定された領域も時間とともに移動していく
- 複数のタイムステップの測定値を同時に用いることで、情報を増やして推定精度を向上させる。
複タイムステップトモグラフィ推定
- 各高さでの風速、風向の情報が必要



$$\begin{pmatrix} \mathbf{S}(t) \\ \mathbf{S}(t-\Delta t) \end{pmatrix} = \mathbf{H}' \mathbf{W}(t) + \begin{pmatrix} \mathbf{e}(t) \\ \mathbf{e}(t-\Delta t) \end{pmatrix}$$

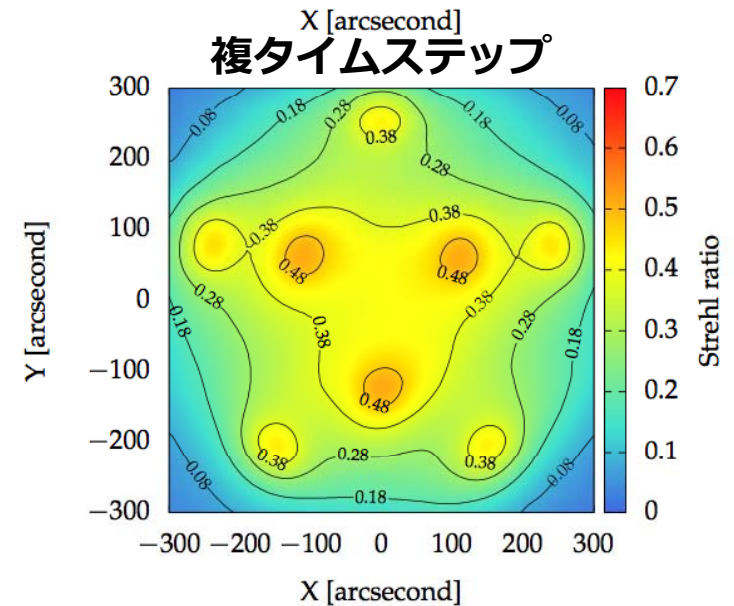
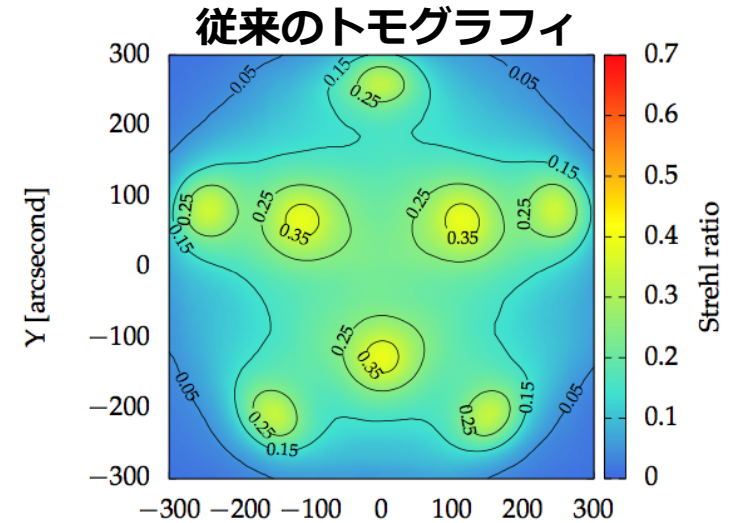
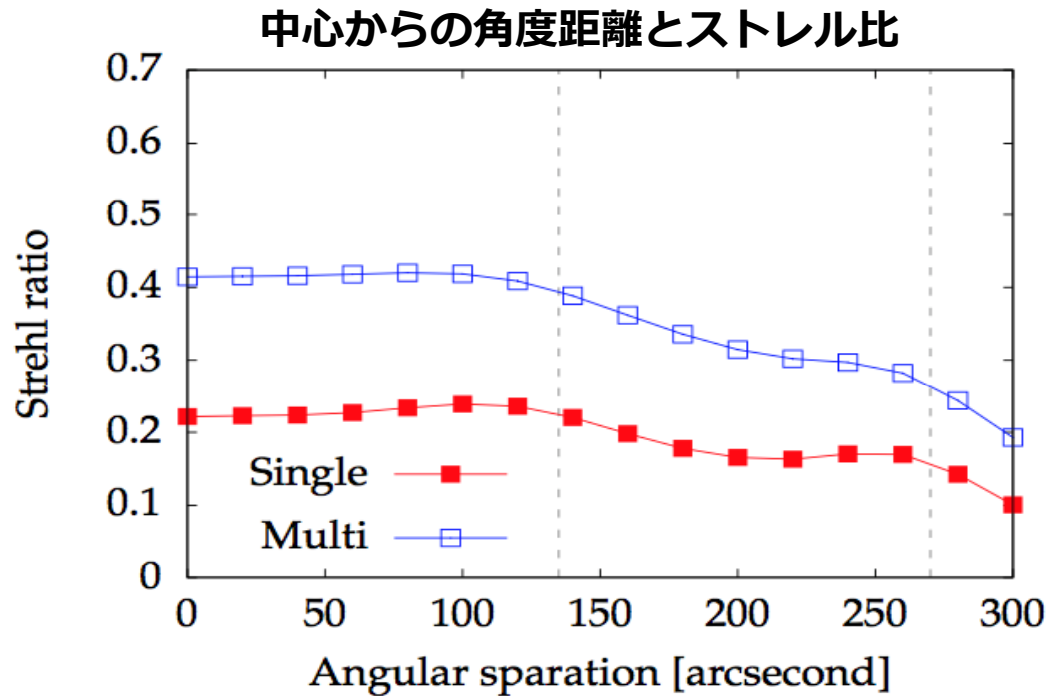
風速推定

- トモグラフィ推定がで再構成された各高さの位相乱れも時間とともに風速で移動していく。
- 各高さごとに時間相関を計算
- ピークの位置の中心からのずれから風速、風向を推定する



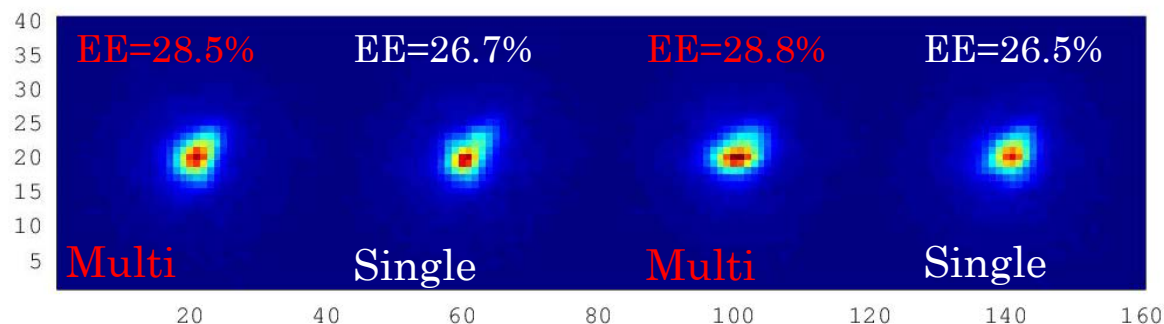
数値シミュレーション

- 口径30mでのMOAOの数値シミュレーションの結果
- 視野10′、8つのレーザーガイド星
- 約ストレル比が2倍向上した。
- 実験室実験でも成功した。

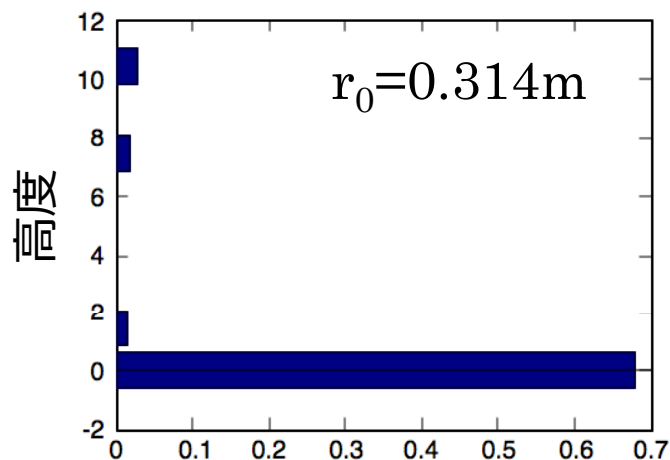


オンスカイでの結果

- 複タイムステップと従来の手法を交互に試した。
- 推定された風速はすべての高さでほぼ0
- Ensquared Energyは高くなったが、複タイムステップによるものではない？
- 他の時間帯でも今のところ改善は見られなかった。



大気ゆらぎプロフィール



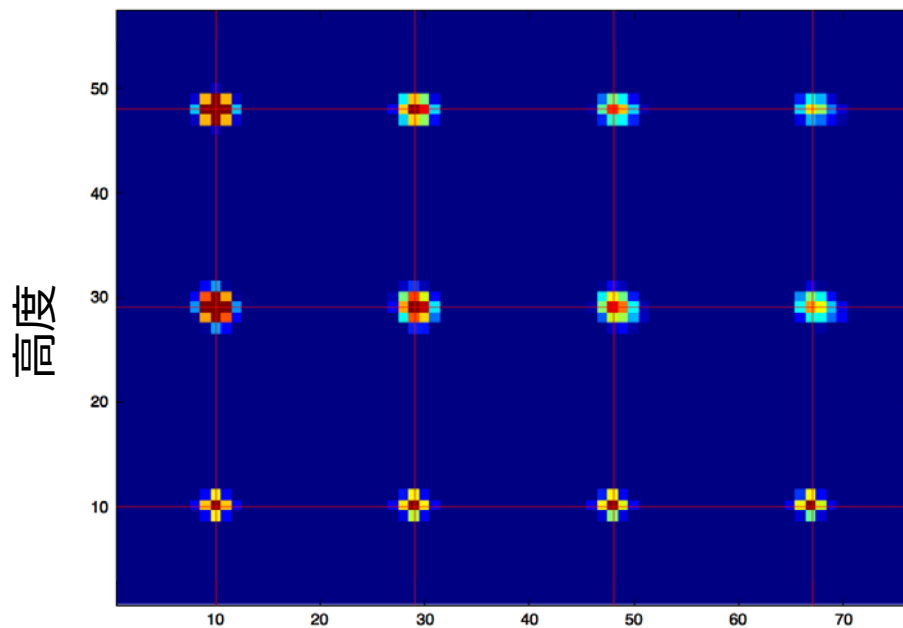
H [km]	X wind [m/s]	Y wind [m/s]
10.5	-0.00	0.00
7.5	0.37	0.25
1.5	-0.02	0.78
0	-0.08	0.26

オフライン解析

❖ 風速推定手法の改善

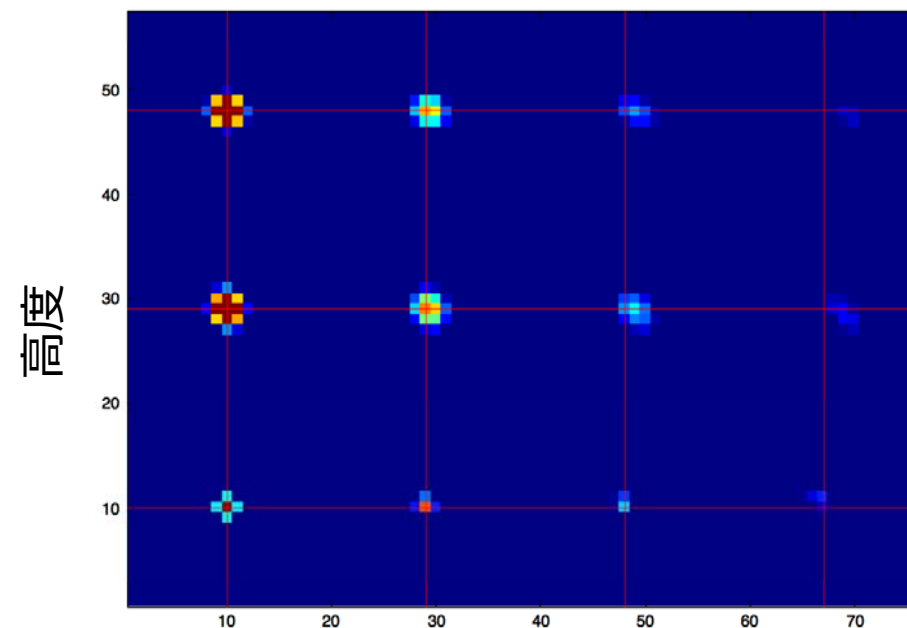
- すべての高さで相関マップの中心に強いピーク。このせいで風速がほぼ0に。
- 1秒ごとに平均を引いて、ゆっくり変化する成分を取り除いた

時間相関の時間差 \longrightarrow 大



以前の手法で結果

時間相関の時間差 \longrightarrow 大



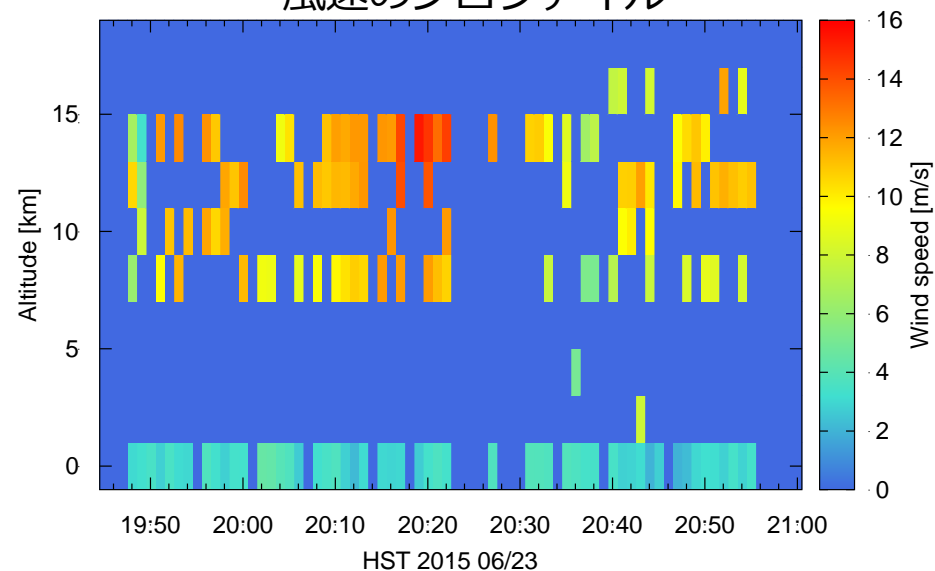
新しい結果

オフライン解析

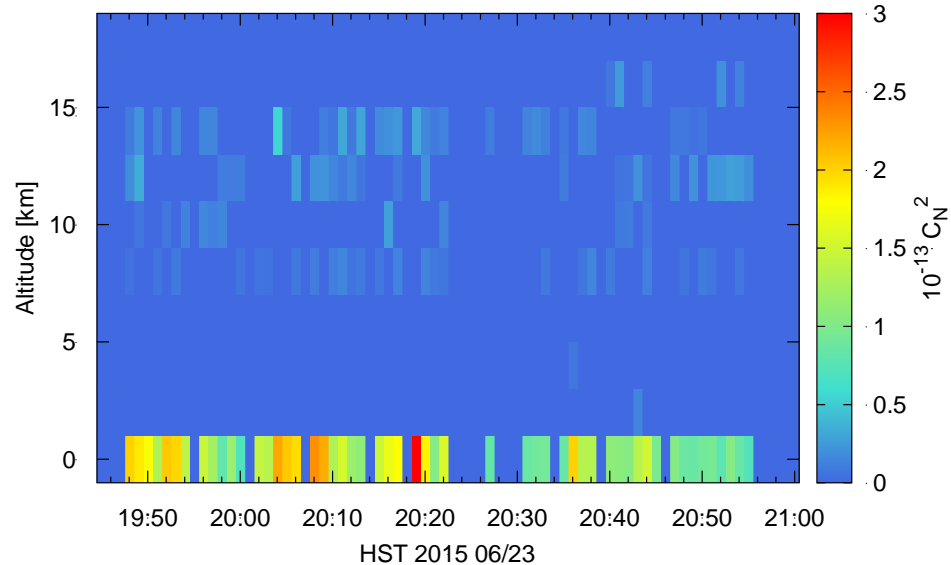
大気ゆらぎ強度、風速、風向の高さプロファイルの時間変化

(約1時間)

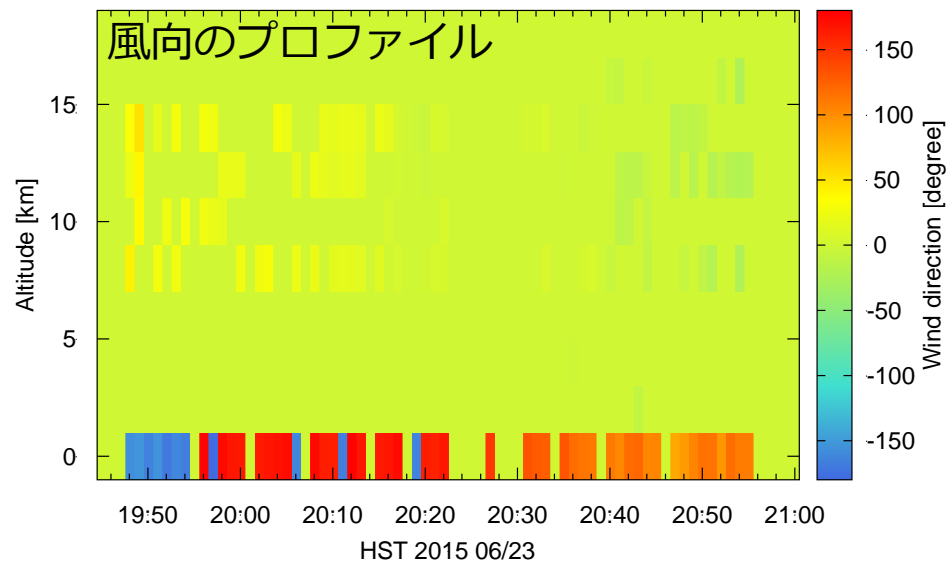
風速のプロファイル



大気ゆらぎ強度プロファイル



風向のプロファイル

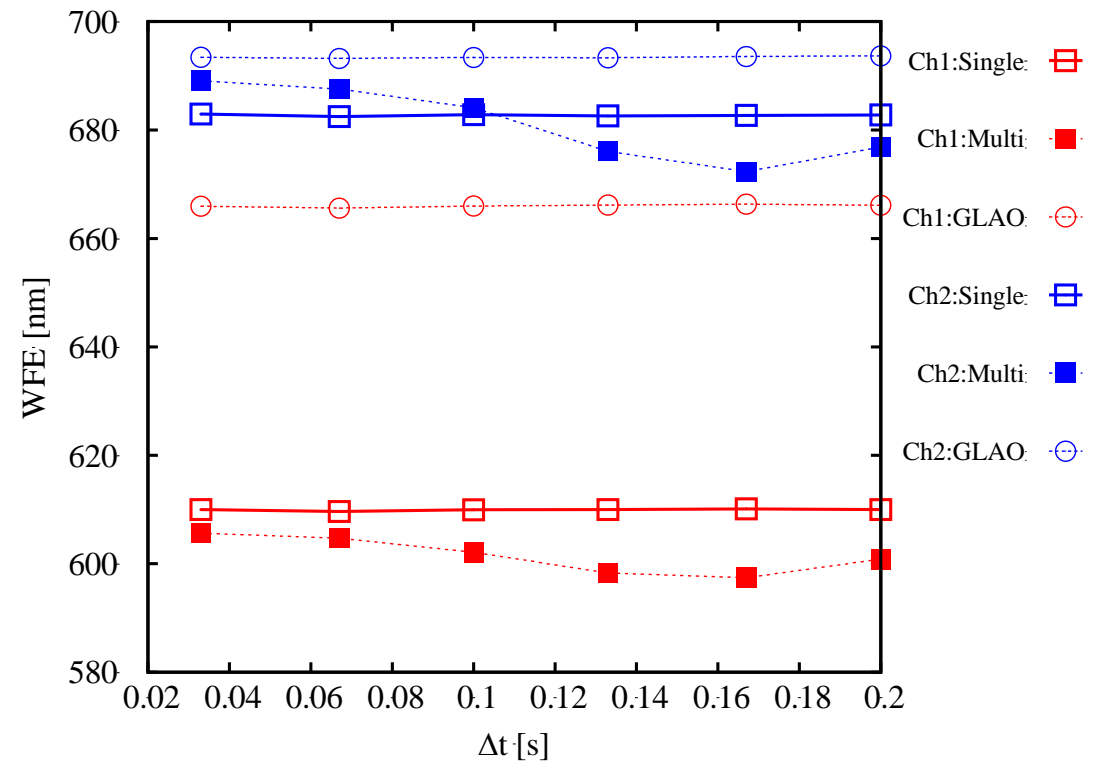
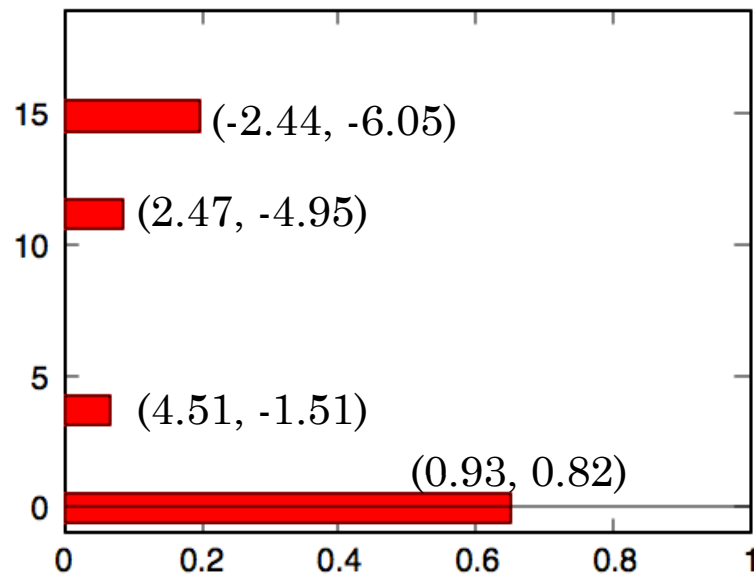


オフライン解析

◆ 複タイムステップトモグラフィ推定の評価

- オンスカイで取得された波面センサーのデータからトモグラフィを計算して、波面残差を評価した。
- いくつかの時間帯では、複タイムステップ手法による改善が見られた

大気ゆらぎプロファイル



まとめ

◆ TMT-AGE プロジェクト

- ❖ MOAO+GLAOで遠方銀河の性質を統計的に明らかにする
- ❖ MOAO mode : 直径5'の視野内で回折限界に近い補正
- ❖ GLAO mode : 直径10'の広い視野内でModerateの補正

◆ 多天体補償光学の-onsカイ試験機「RAVEN」

- ❖ onスカイでのMOAOの実証に成功
- ❖ 今後は試験観測で得られたデータからさらなる解析を行う
- ❖ 室内実験装置としてはまだまだ活躍予定

◆ 複タイムステップトモグラフィ推定

- ❖ onスカイでは今のところ改善が見られなかった。
- ❖ 風速推定手法の改善を行い、onsカイのデータから風速を検出した
- ❖ さらに多くのデータで解析を行い、性能評価を行う。