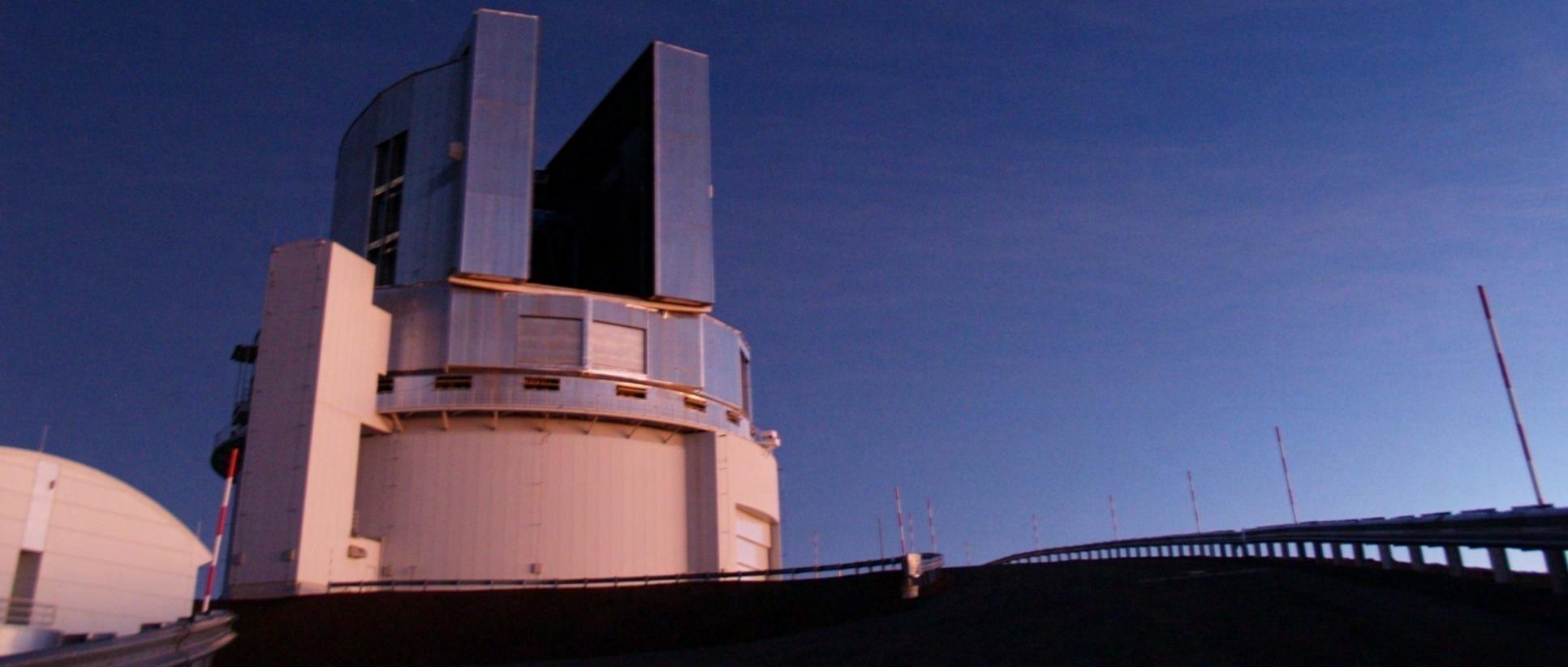


# TMT広視野補償光学 の実現に向けた国際協力

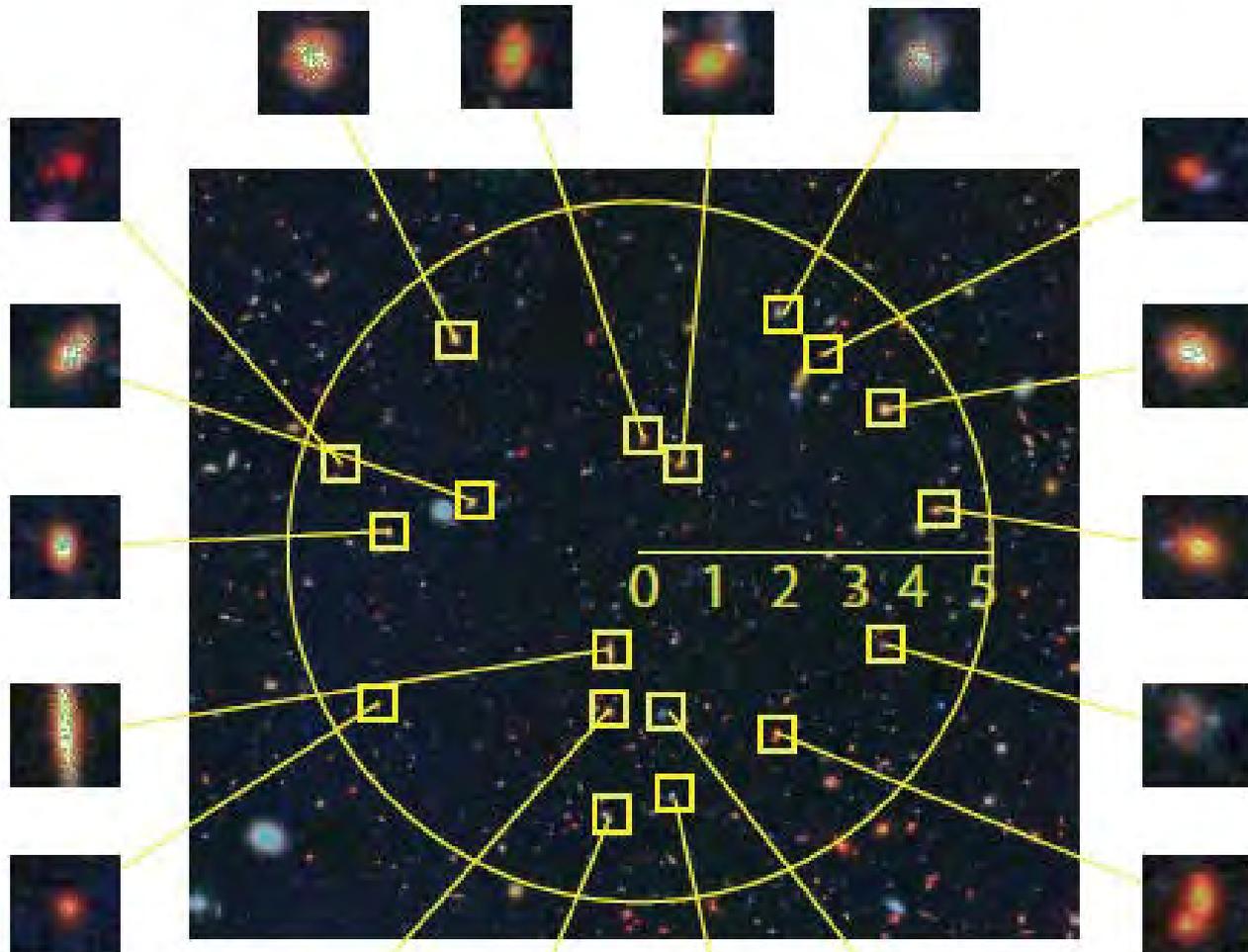
秋山 正幸 (東北大)



TMT-Analyzer for Galaxies in the Early universe : TMT-AGE

# 科学的課題

広視野 AO による近赤外線での多天体同時(面)分光  
観測装置 ( ~ TMT / IRMOS )



# 科学的課題

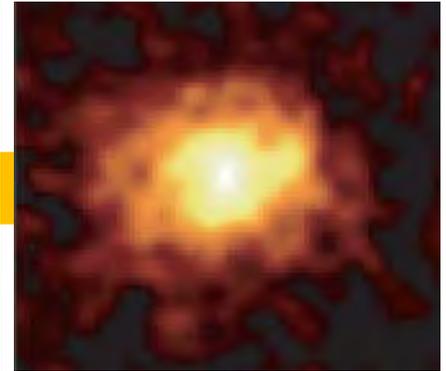
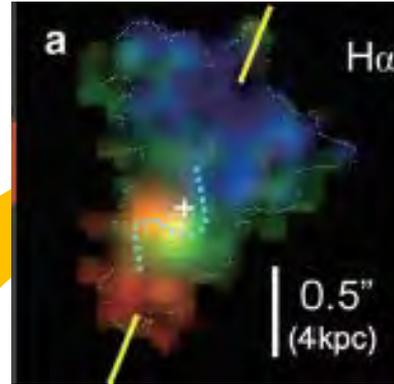
広視野 AO による近赤外線での多天体同時(面)分光  
観測装置 ( ~ TMT / IRMOS )

1. 赤方偏移 1-5 の銀河の内部構造の進化の探査と、  
銀河構造の確立過程の解明
2. 赤方偏移 6 を超えるような宇宙初期の銀河にお  
ける星形成のメカニズムの解明
3. 赤方偏移 8 を超えるような銀河/AGNの探査

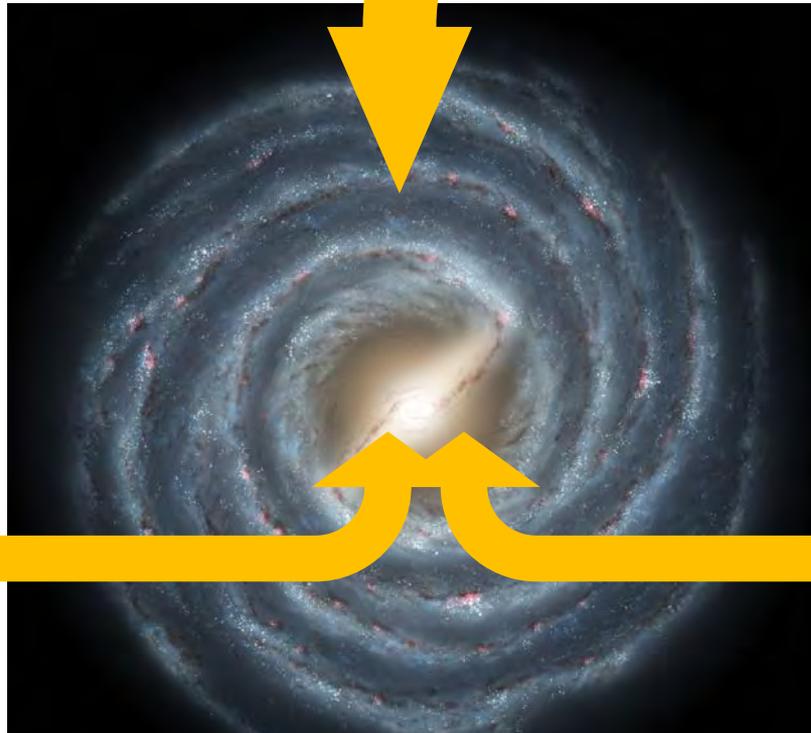
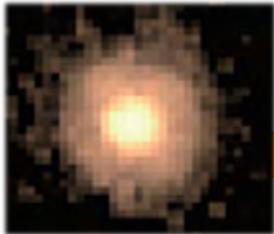
# 1. 銀河内部構造の確立過程

Turbulent / High-density  
disks at high-z

Typical galaxy seen  
in the local universe



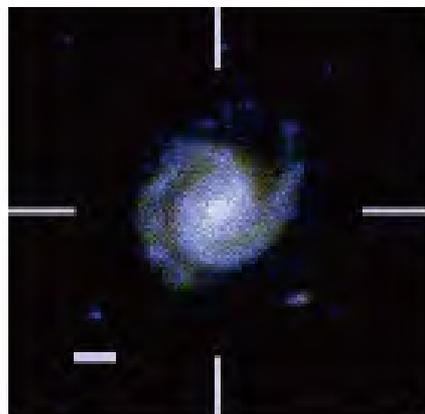
Very compact  
galaxies at  
high-z



Clumpy  
galaxies at  
high-z



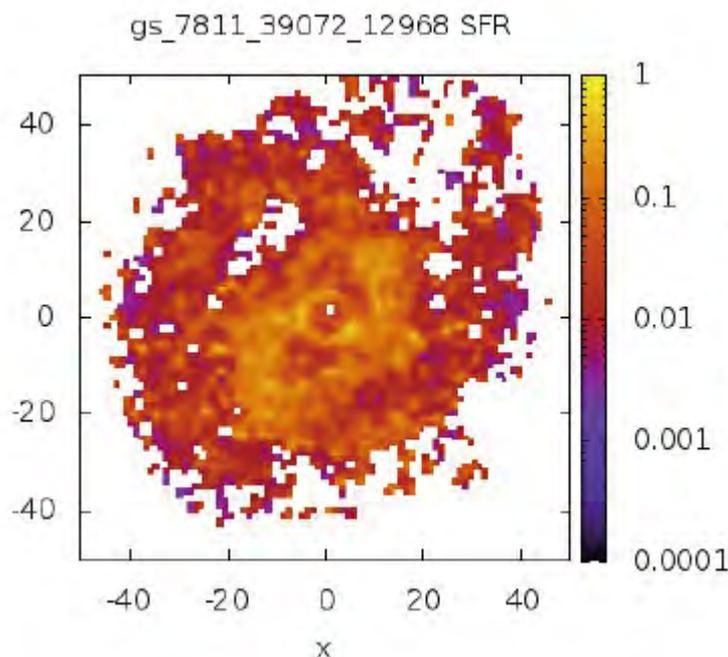
# 1. 銀河内部構造の確立過程



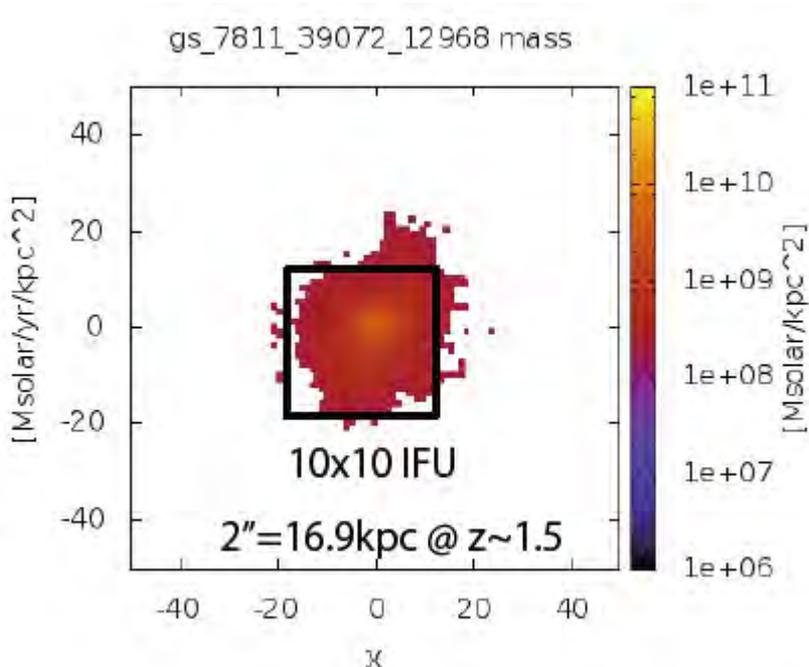
Example image of a massive galaxy at  $z=1.0$

Even if we put this galaxy at  $z=1.5$ , TMT IFU spectroscopy can detect Ha-line / stellar continuum from the colored regions shown below.  
(10h SN=10 R=3,000)

## Gas dynamics

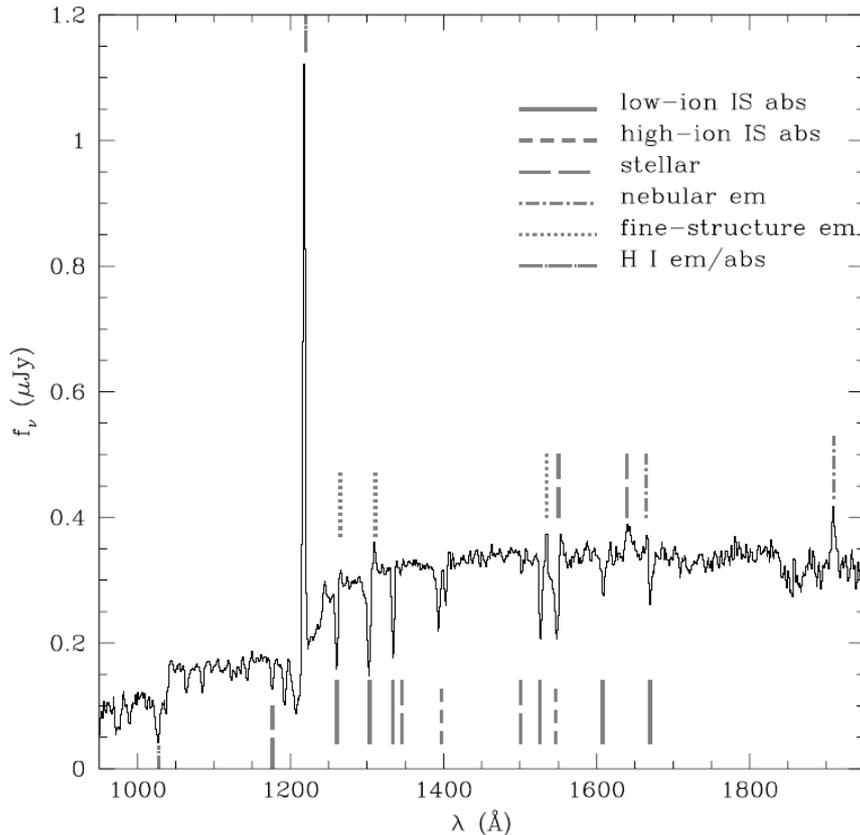


## Stellar dynamics



## 2. 宇宙初期の銀河中での星形成

Average of rest-UV spectra of  $z \sim 3$  star-forming galaxies



Shapley et al. 2003

- Rest-frame UV features of star-forming galaxies

- Low-ion IS abs line:

- Distribution and dynamics of neutral gas

- High-ion IS abs line:

- Distribution and dynamics of ionized gas

- Stellar emission:

- High-mass star contents

- Nebular emission:

- Galaxy rest-frame

### 3. 形成期の銀河の探査

- 2020年代の多波長の衛星は形成期の銀河の探査のため、広視野の観測を目指す。広視野赤外：Euclid, WFIRST, SPICA,,  
広視野 X 線：Athena, STARX,,
- これらの探査で見つかる形成期の銀河、超大質量ブラックホール候補のフォローアップのためには広視野、近赤外線多天体分光器が必要。
  - Subaru/Suprime-cam – Keck/DEIMOS
  - WFIRST – TMT/TMT-AGE

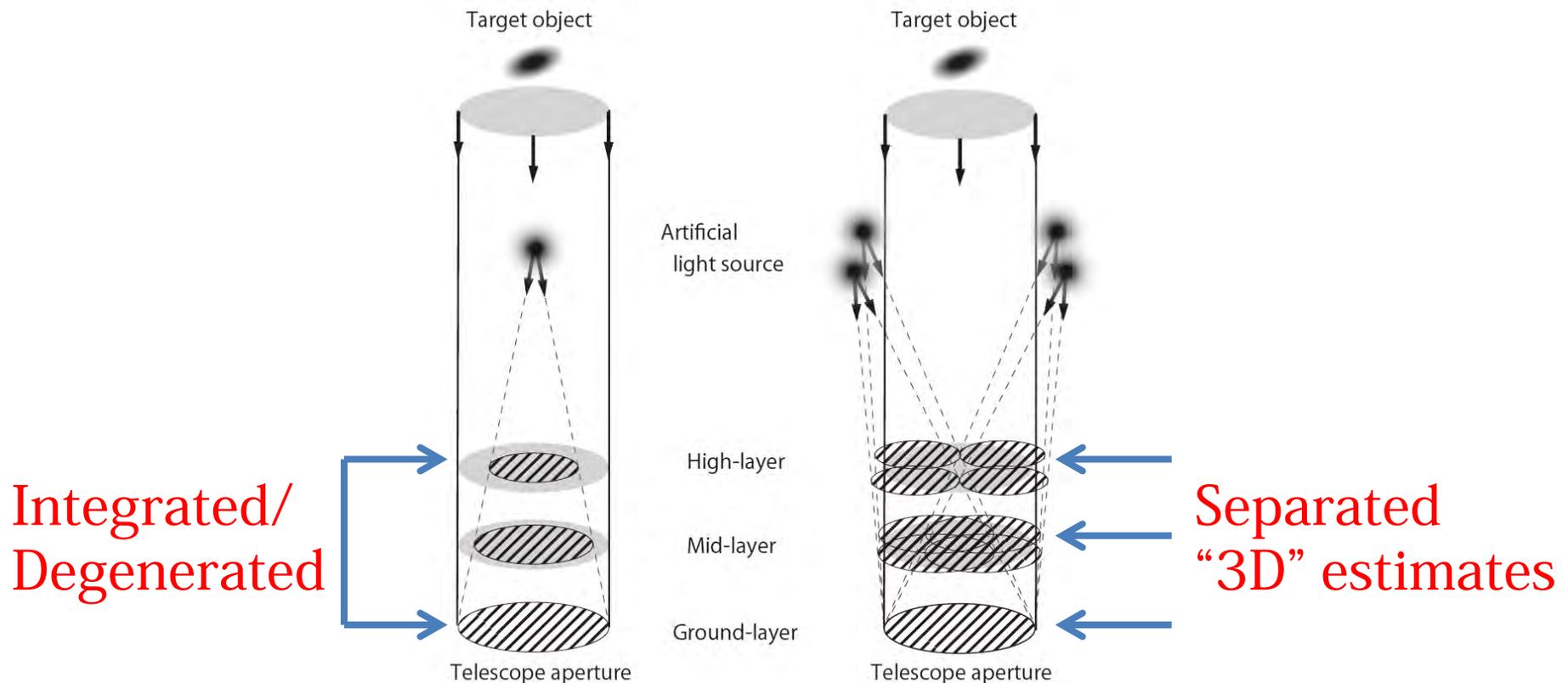


# 仕様まとめ

1. Spatially-resolved spectroscopy of  $z=1-5$  galaxies.
  - 補償光学による高空間分解能の多天体面分光器。
  - $0.05 \times 0.05''$  sampling IFUs with  $2''$  FoV
  - $R=10,000$  spectroscopy for  $v \sim 30 \text{ km/s}$
2. Integrated spectroscopy of  $z > 5$  galaxies.
3. Follow-up spectroscopy of candidates of  $z > 8$  galaxies
  - 広視野、補償光学による高感度の多天体分光器。特に赤側の可視光から長い波長をカバー。
  - $0.3 \times 0.3'' - 0.5'' \times 0.5''$  aperture integrated spectroscopy
  - $R=3,000$  ( $5\text{\AA}$  resolution,  $2\text{\AA}/\text{pix}$ ) for absorption/emission lines with rest-frame EW of  $1\text{\AA}$ .

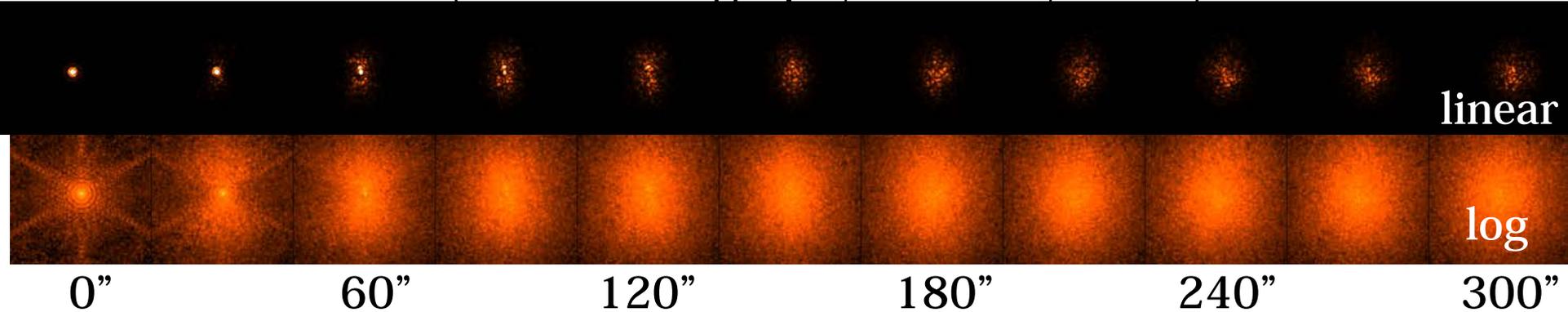
# トモグラフィーによる広視野補償光学

鍵となるのはトモグラフィーによる大気揺らぎの  
高さ構造の推定



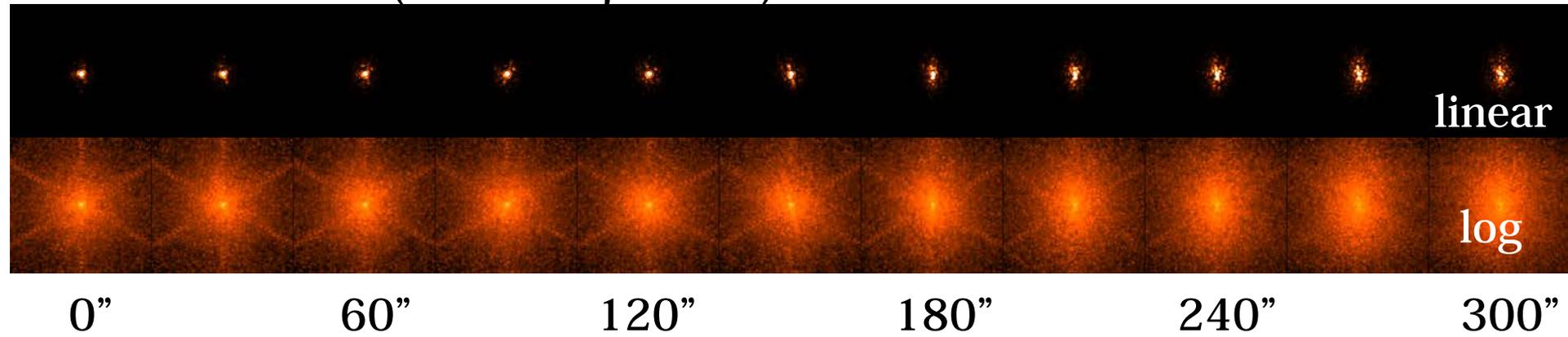
# Point Spread Function with tomographic AO in the wide-field mode

Narrow-field mode (“Laser Tomography Multi Layer AO”)



- Ensquared Energy within  $0.05''$  ~50% up to  $30''$

Wide-field mode (“Multi-Object AO”)



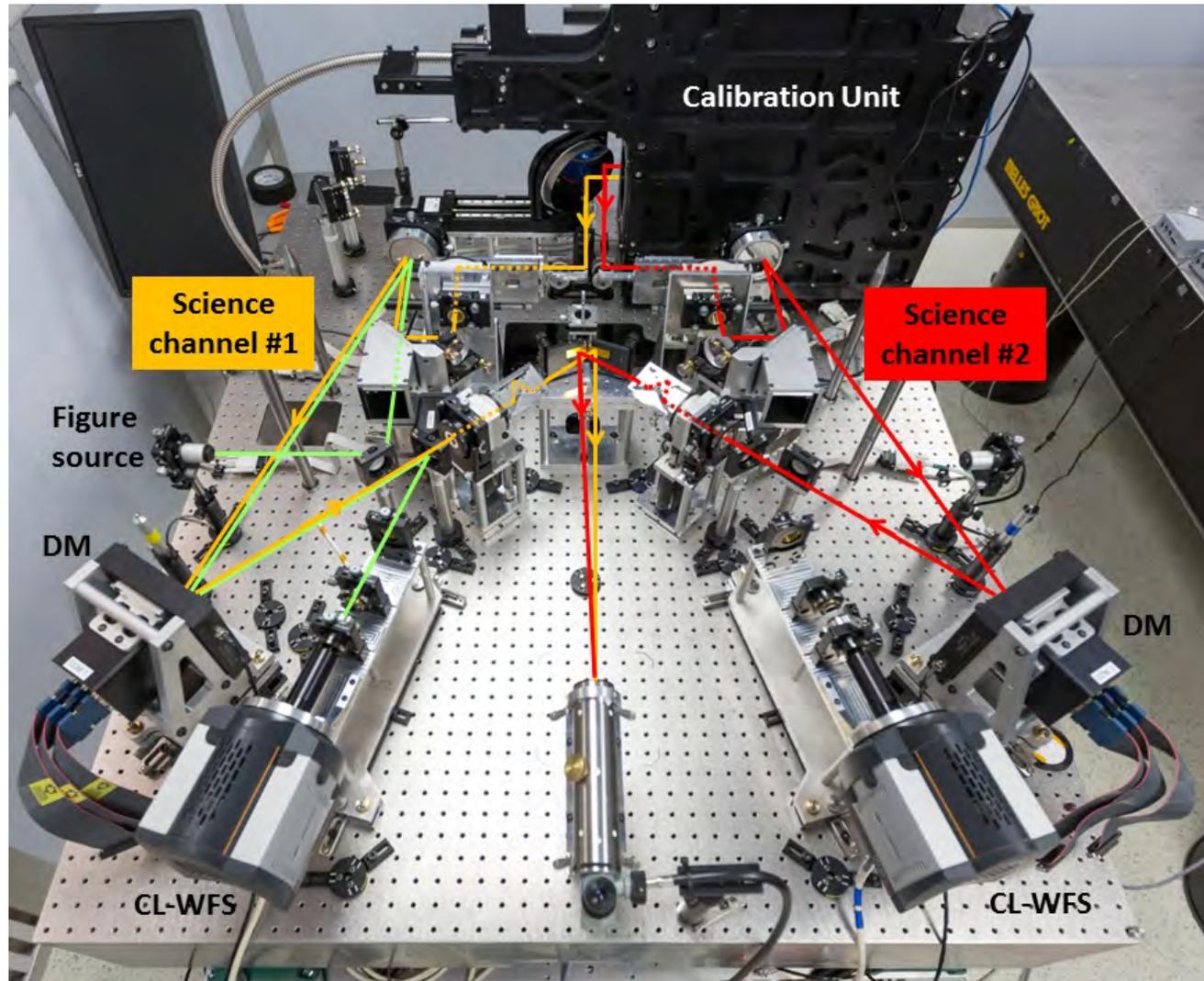
- Ensquared Energy within  $0.05''$  ~50% up to  $150''$  (25 time larger area)



カナダ・ビクトリア大、HIA との国際協力による  
すばる望遠鏡を用いたトモグラフィー推定による補償光学の実証

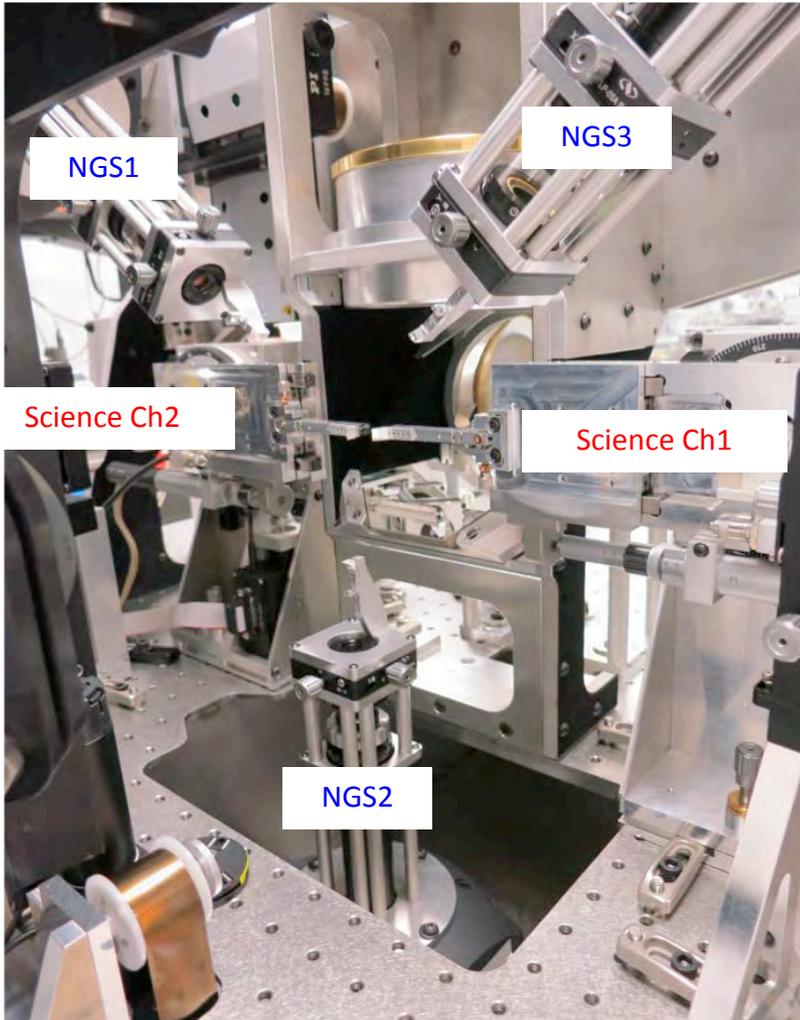
# Tomographic AO on-sky demonstration : RAVEN

- On-sky demonstrator of tomography AO system on the Subaru telescope



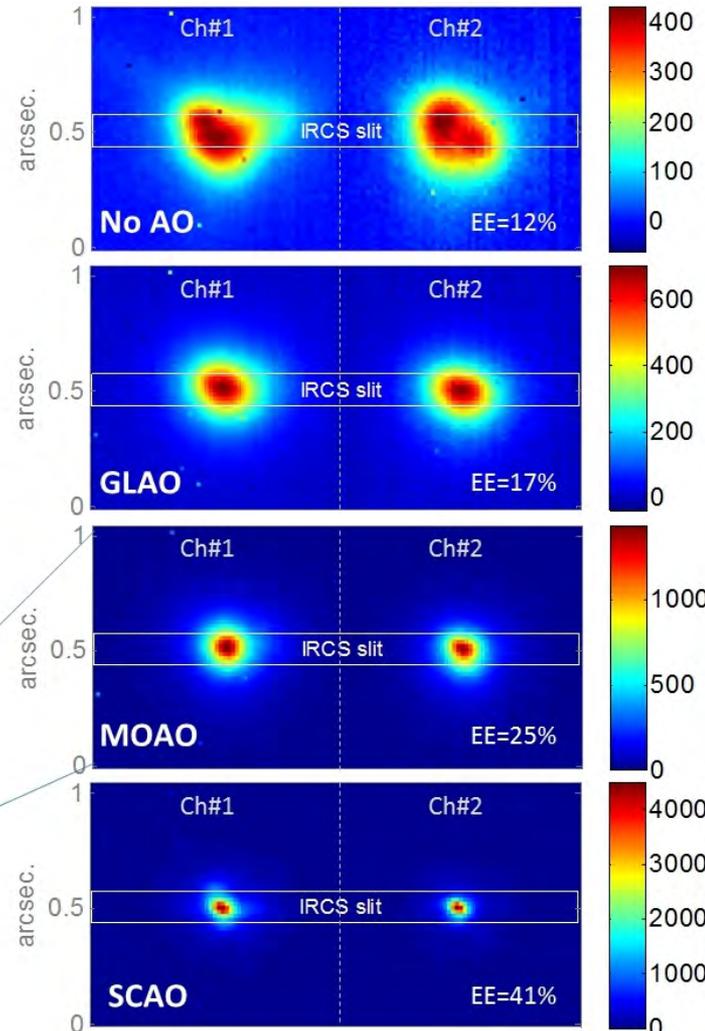
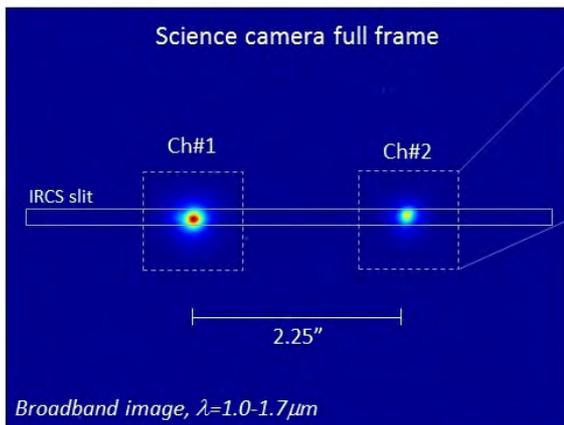
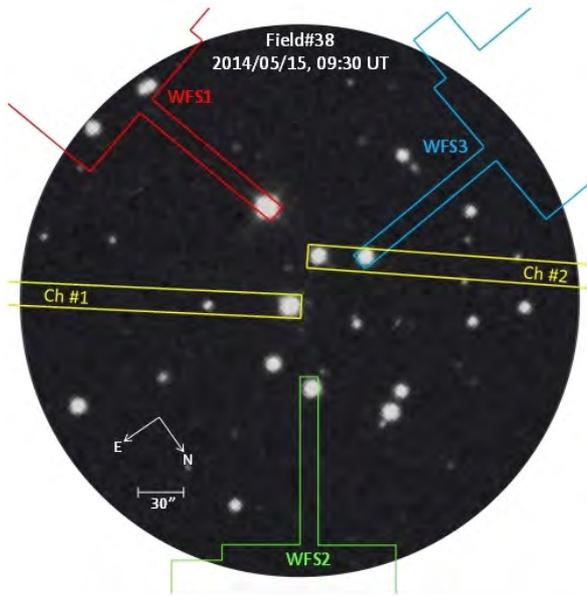
# Tomographic AO on-sky demonstration : RAVEN

Pick-off Arms



# Tomography AO on-sky demonstration : RAVEN

- 3個の自然星の波面計測の情報を用いて、2個のターゲットについてそれぞれに最適化した補償を行う。補償された光を IRCS を用いて観測。



No AO

Partly corrected

Tomography AO

AO correction  
with target itself

Target object

## 大気揺らぎ高さプロファイルを実時間測定し、 トモグラフィー推定行列を構築

- Tomography matrix are constructed with

1. Configurations of the reference light sources
2. Turbulence height profile

Cannot be fully separated with the limited measurements.

Turbulence height profiles are used to set up the turbulence layer altitudes and strength of each layer

3. Wind height profile (for predictive estimation)

Artificial light source

High-layer

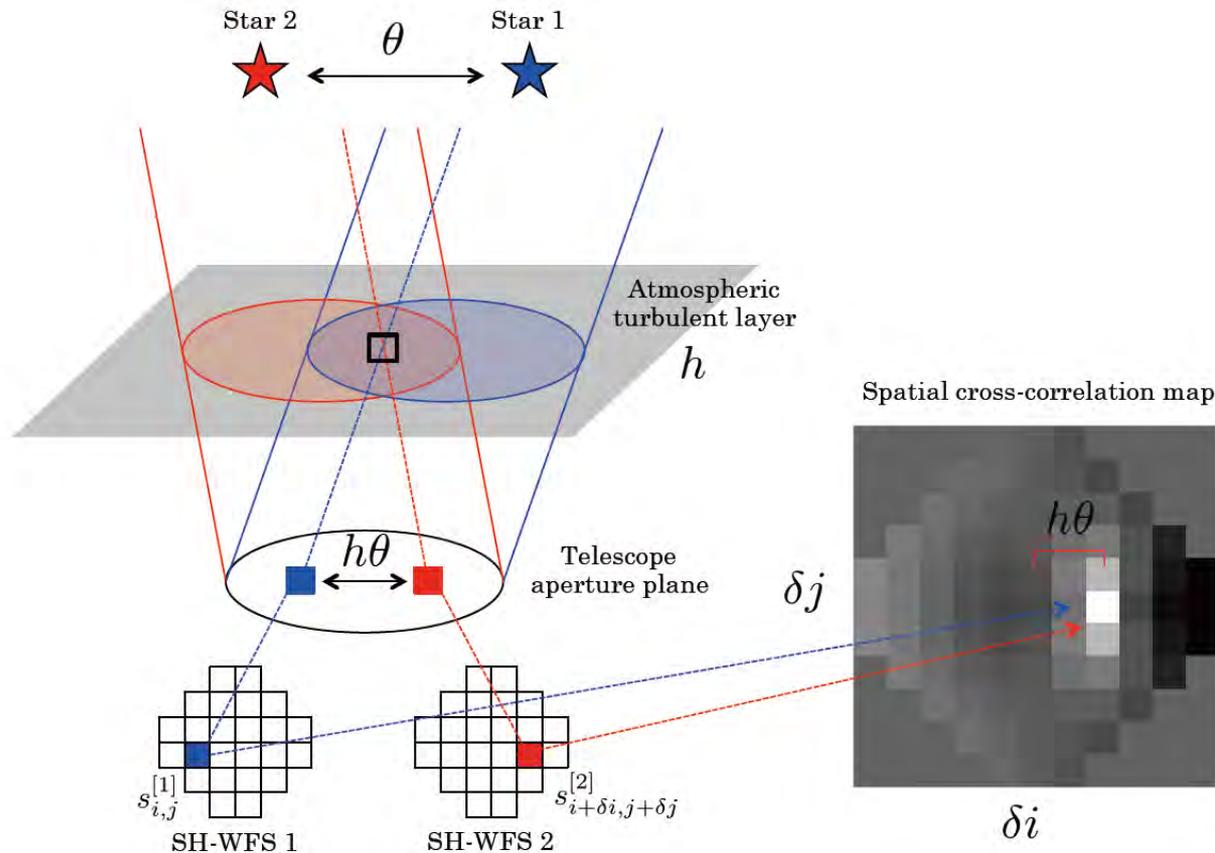
Mid-layer

Ground-layer

Telescope aperture

CTスキャンのトモグラフィーと異なり、測定方向の数が少なく、方向の違いも小さい (= 悪条件の逆問題)。事前情報を与えることが必要。

# Tomographic AO ingredient I : Turbulence height profile

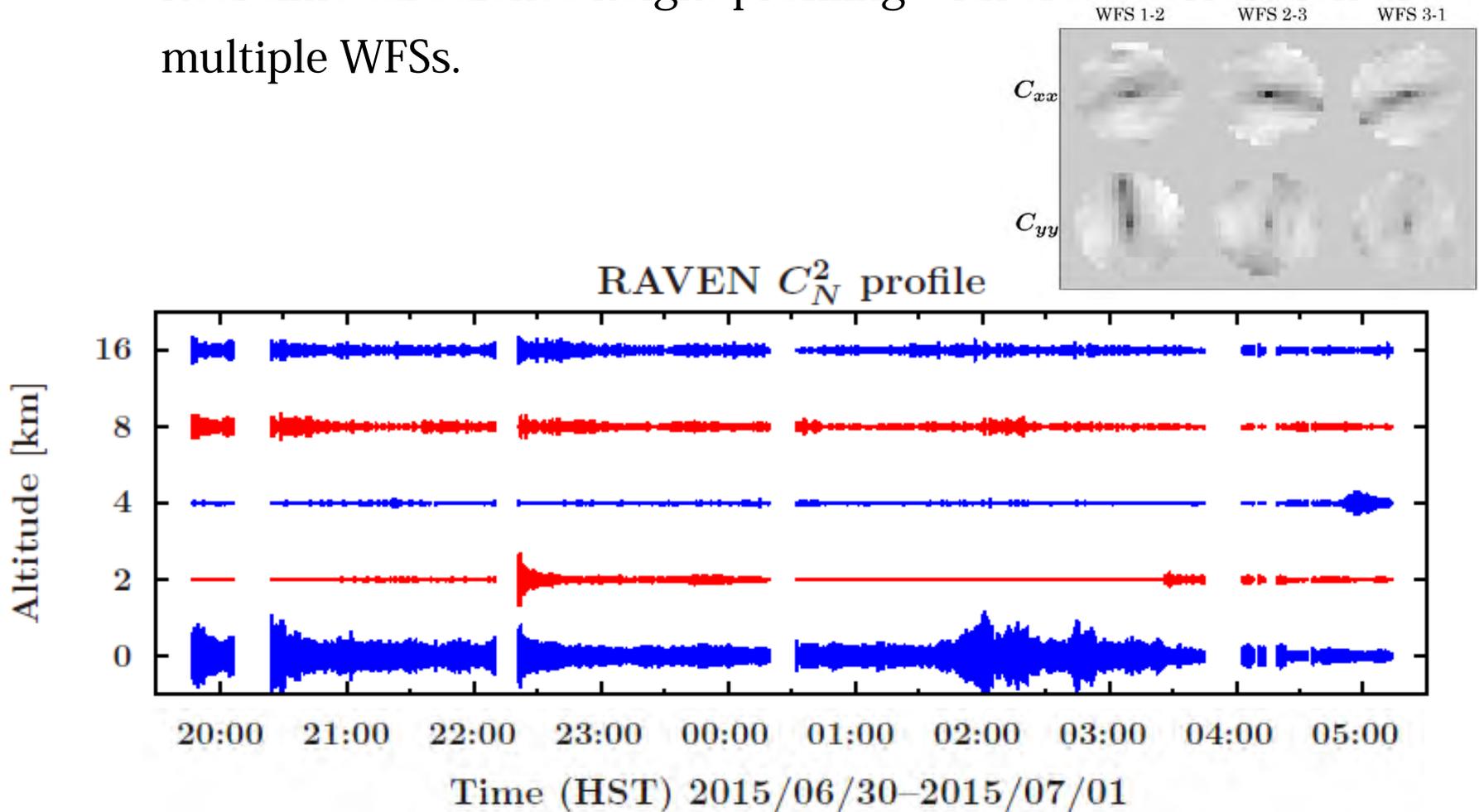


Ono et al. 2016

- Turbulence height profile can be estimated with taking cross-correlation between two WFSs monitoring two different reference stars.

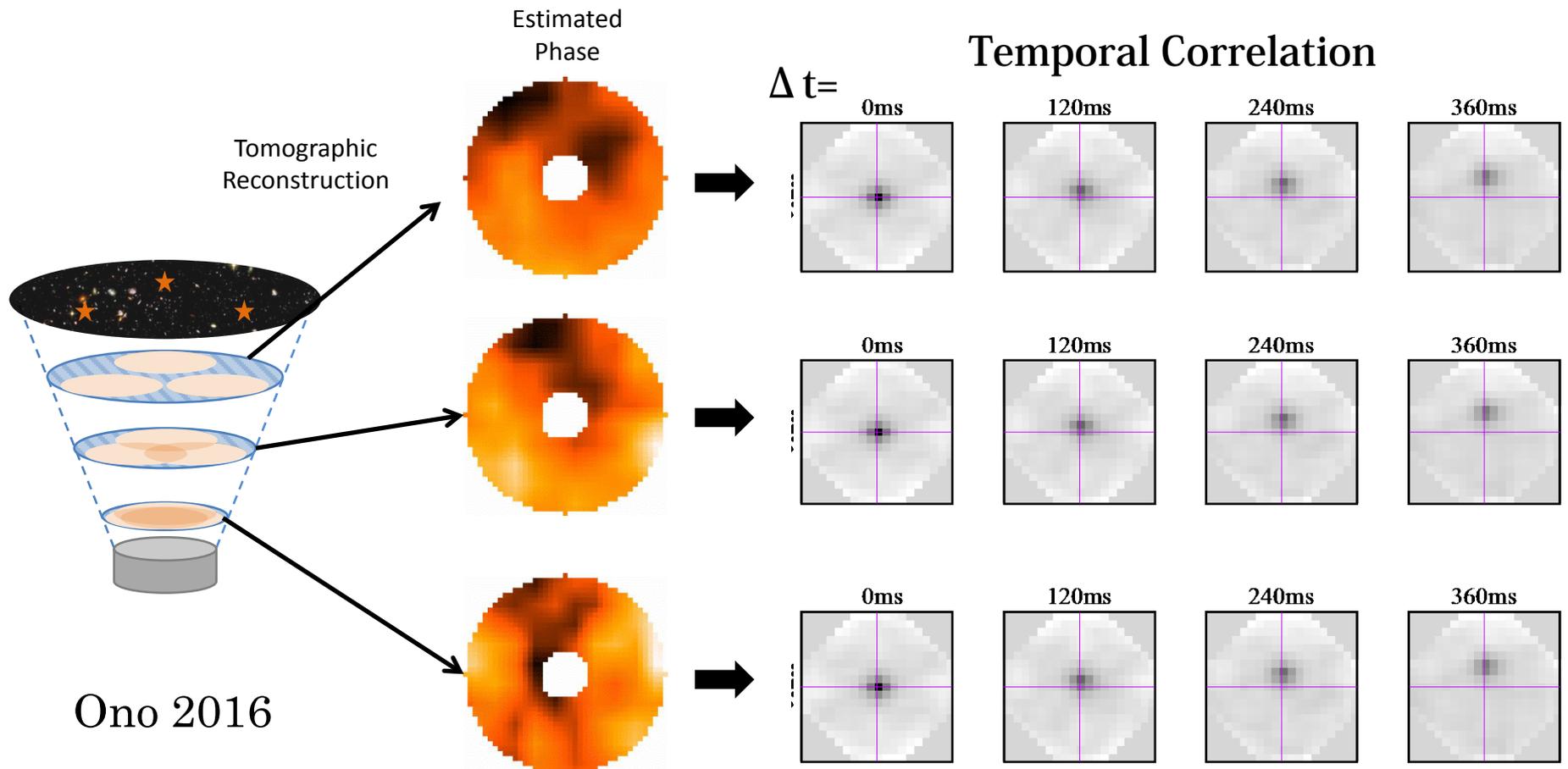
# Tomographic AO ingredient I : Turbulence height profile

- Real-time turbulence height profiling with cross-correlation of multiple WFSs.

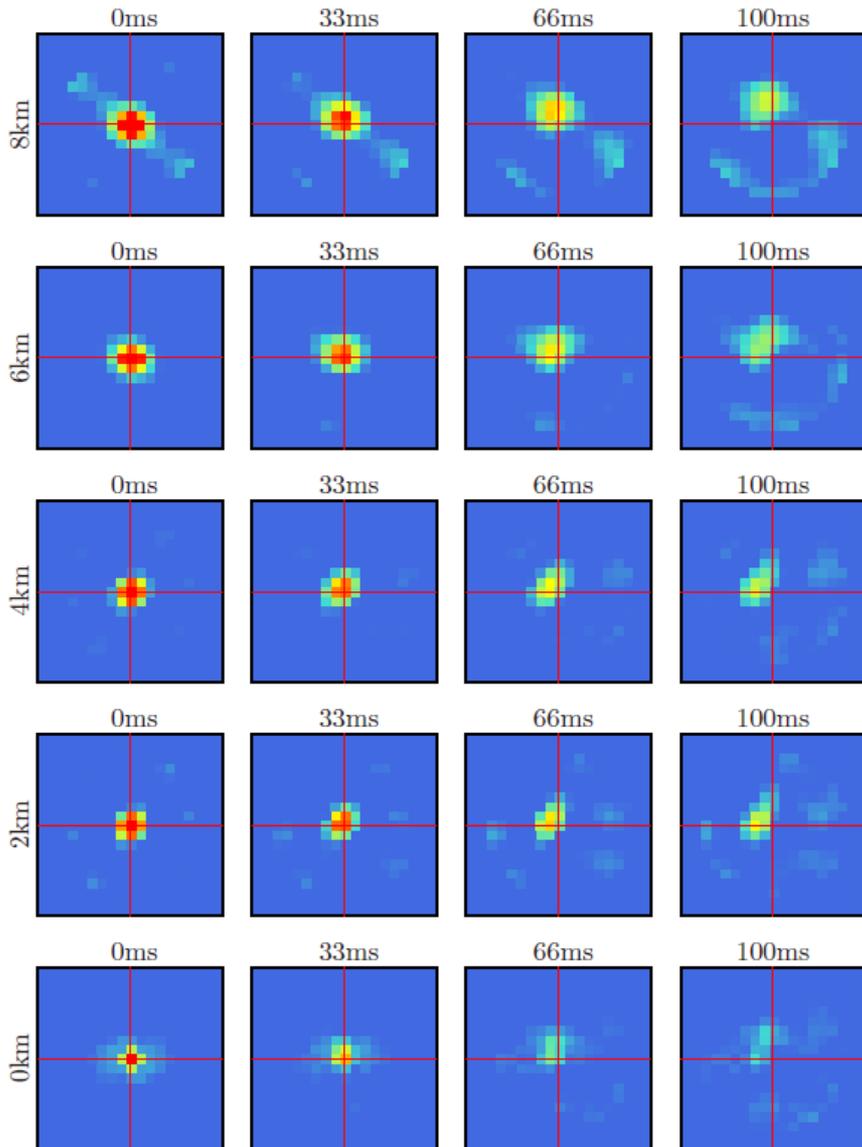


# Tomographic AO ingredient II : Wind profile

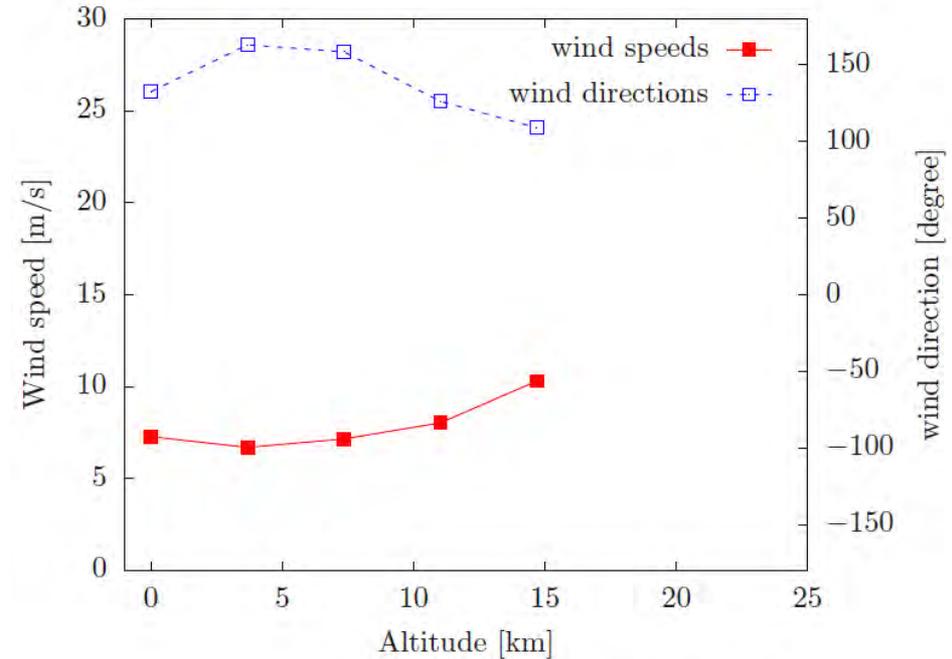
- Wind direction and velocity of each turbulence layer can be estimated with cross-correlation of wavefront sensor data at two different time steps.



# Tomographic AO ingredient II : Wind profile



- Cross-correlation 結果(左)と求めた大気風プロファイル(下)



# Tomographic AO ingredient II : Wind profile

- Result of a real-time wind profiling above Subaru.

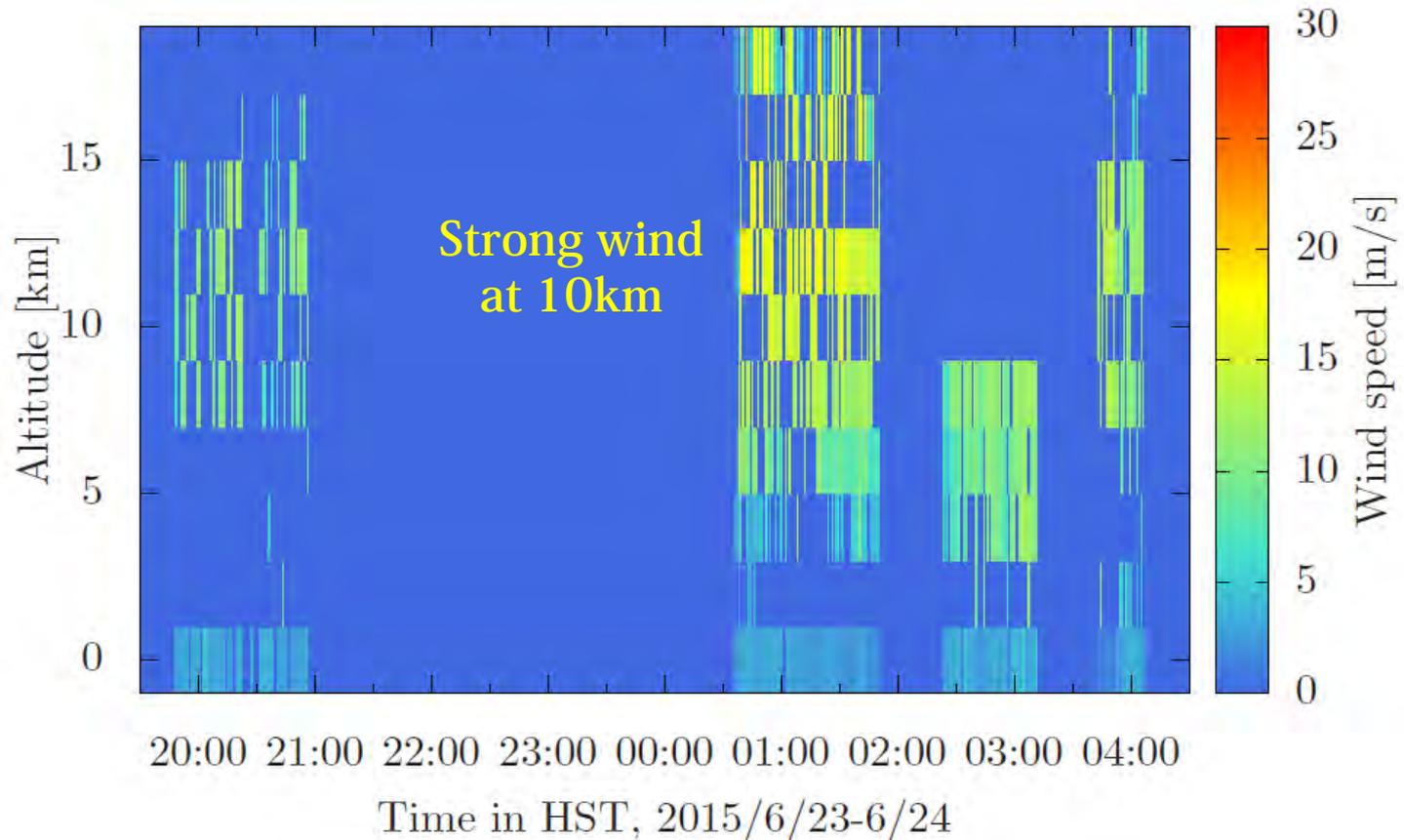
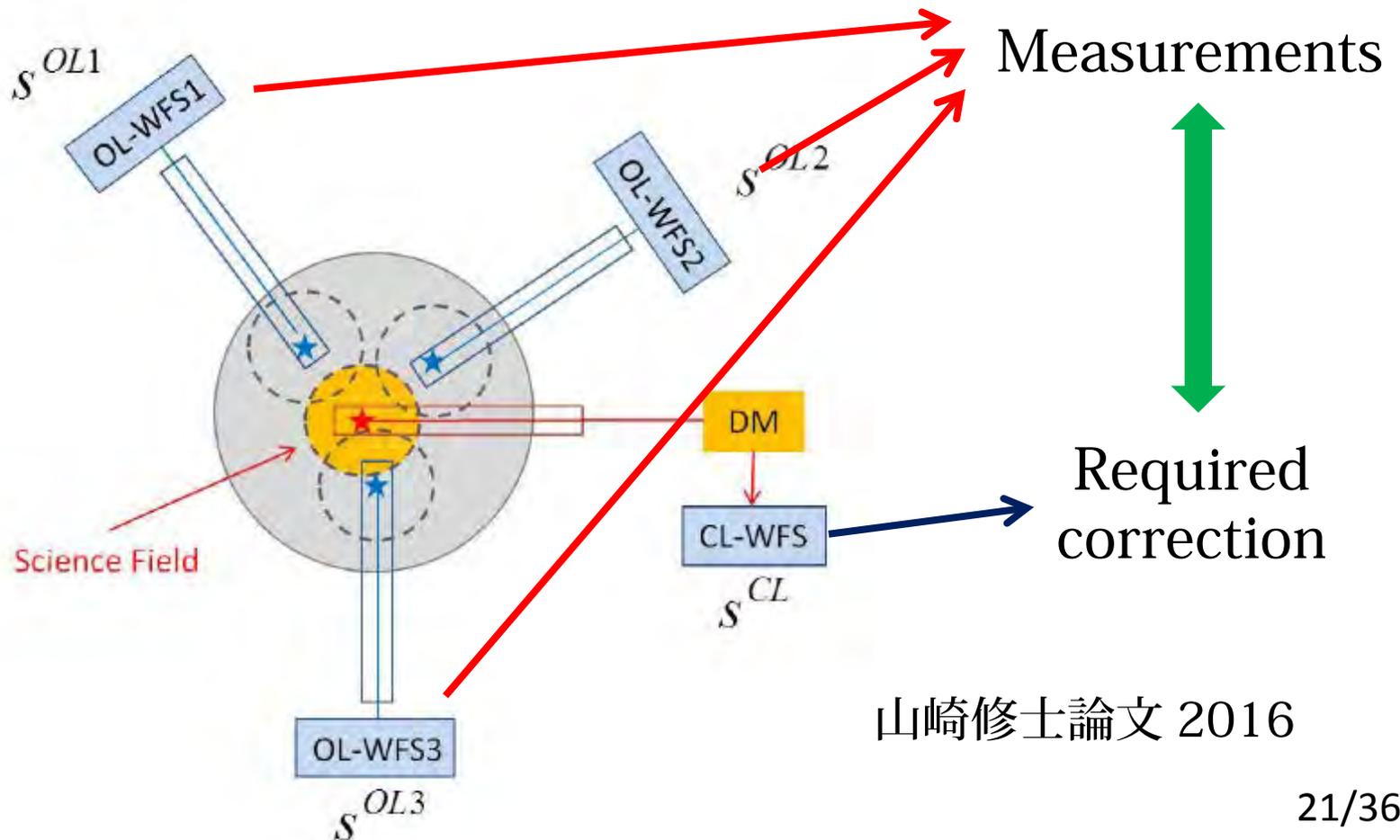


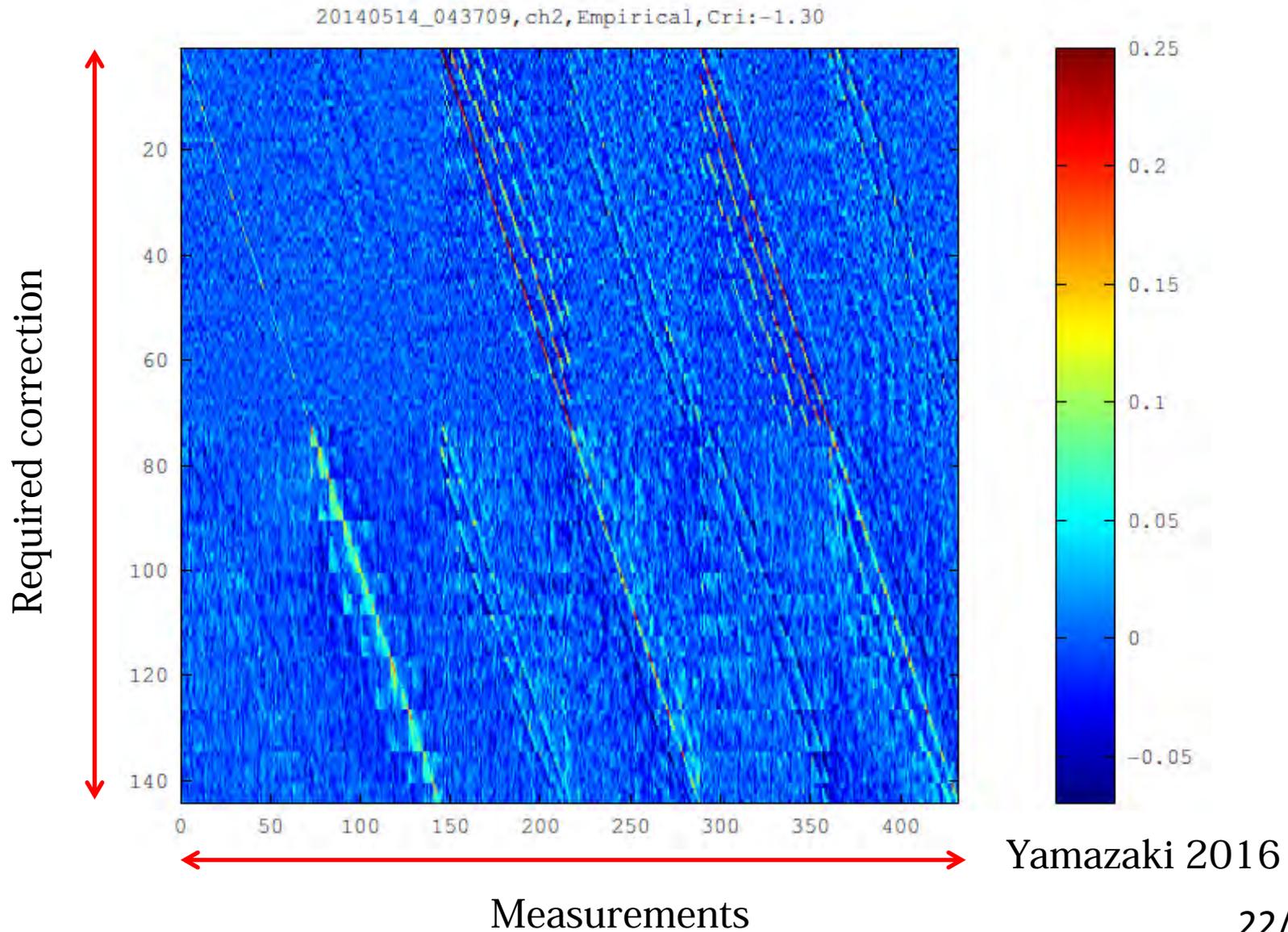
Figure. 6.12: Wind speed profile on June 23–24th, 2015.

# トモグラフィー推定行列の「答え合わせ」

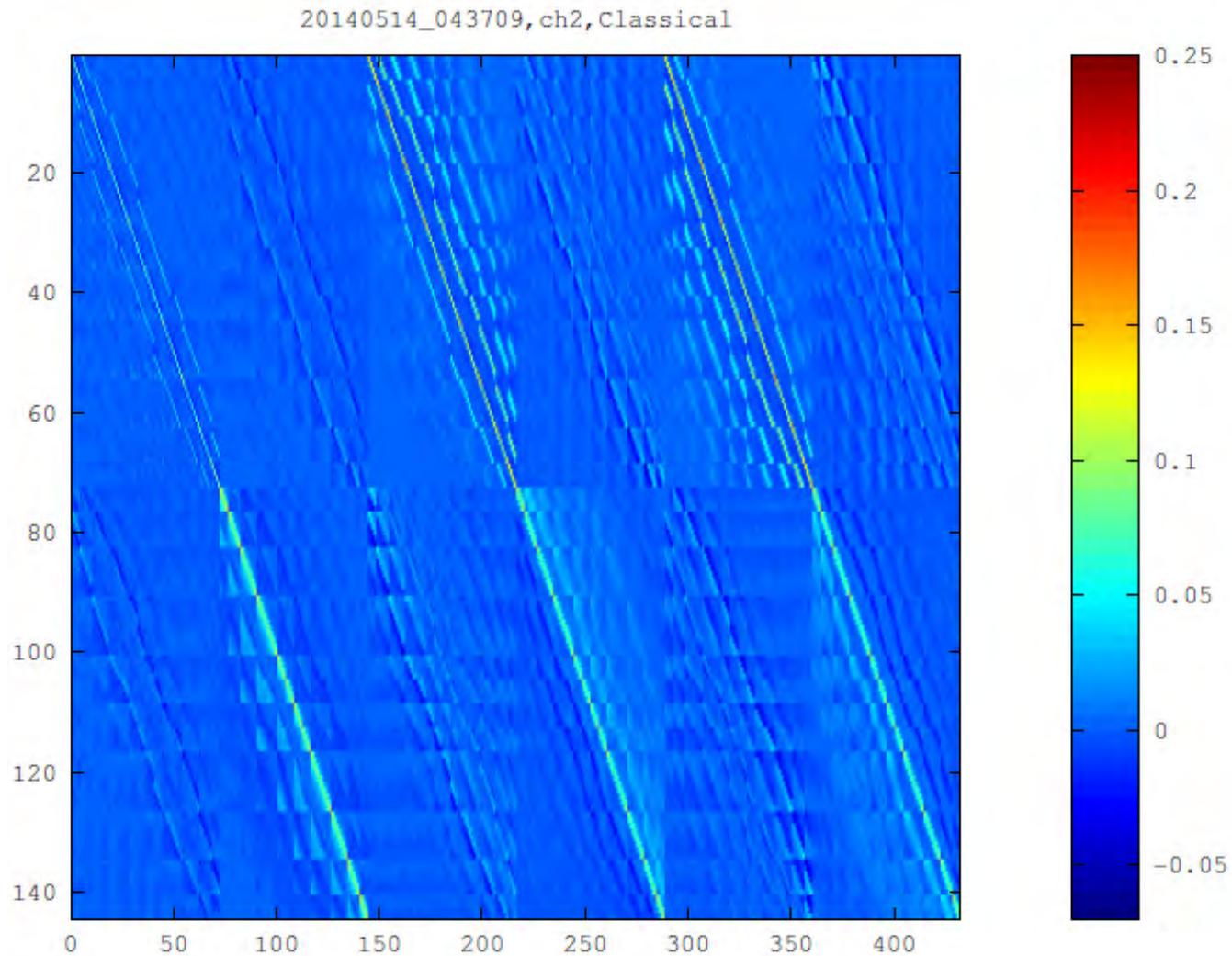
- “Cross-check” tomography estimation with the WFS measurements from tomography WFSs and the WFS in the target optical path : “Learn & Apply” method.



# トモグラフィー推定行列 (実測)

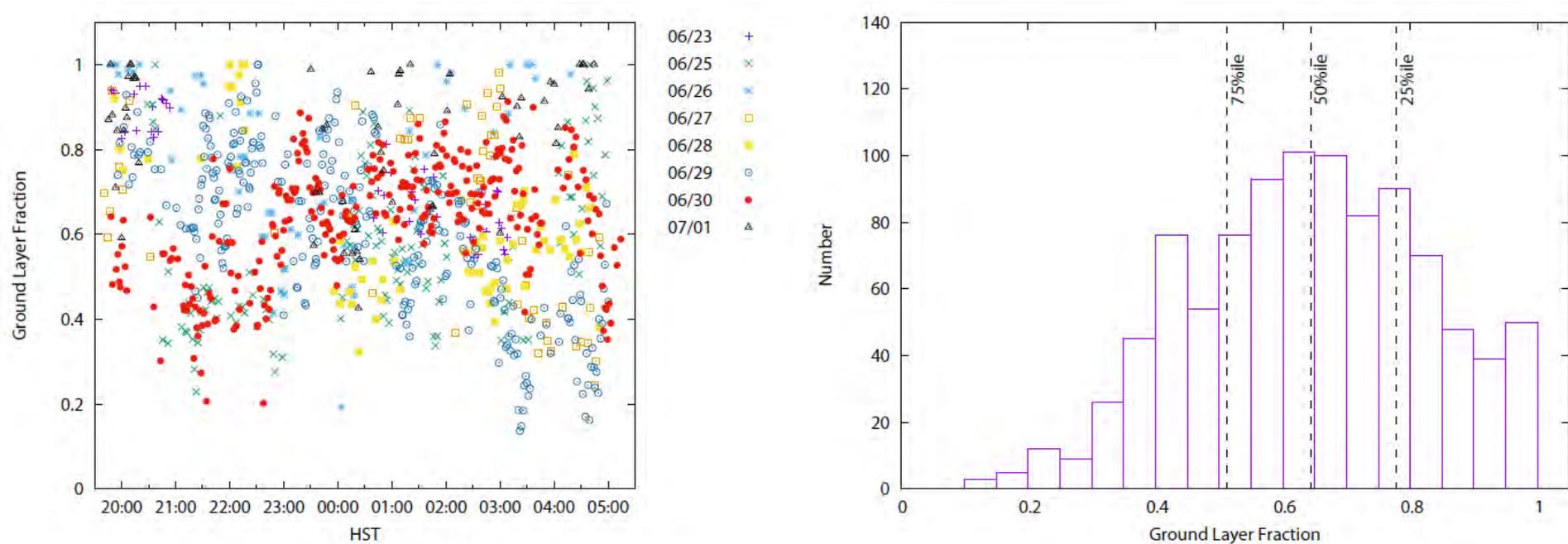


# トモグラフィー推定行列 (推定)



# Maunakea では特に地表層の揺らぎ成分が強い

- Fraction of ground-layer component ( $<0.5\text{km}$ ) measured by RAVEN data with SLODAR algorithm.



Ono et al. 2016, MNRAS

# RAVEN での国際協力

- 大屋 (TMT推進室)が中心となって調整。
- 東北大からは機械・光学系の製作には参加しなかったが、ビクトリア大・ハワイ観測所に院生を派遣して光学調整から参加。
- ソフトウェアを中心に貢献：大気プロファイリング、トモグラフィアルゴリズムとその実証。
- 修士論文(山崎) 1 本、博士論文(大野) 1 本、査読論文多数 (大野主著 1)、SPIE 論文多数。
- すばる望遠鏡レーザートモグラフィ補償光学へと展開。

*First run in May 2014.*

*Second run in Aug. 2014.*



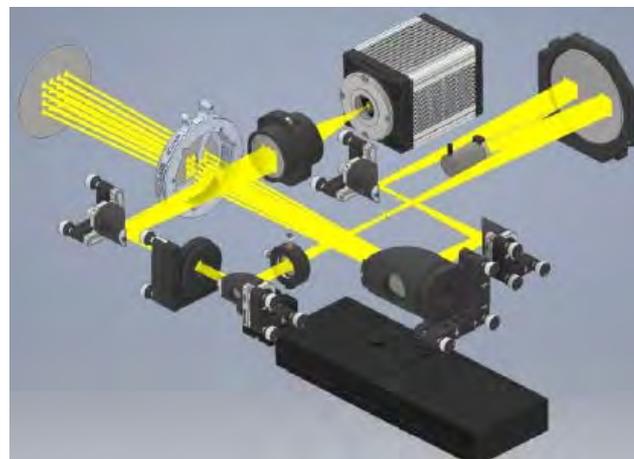
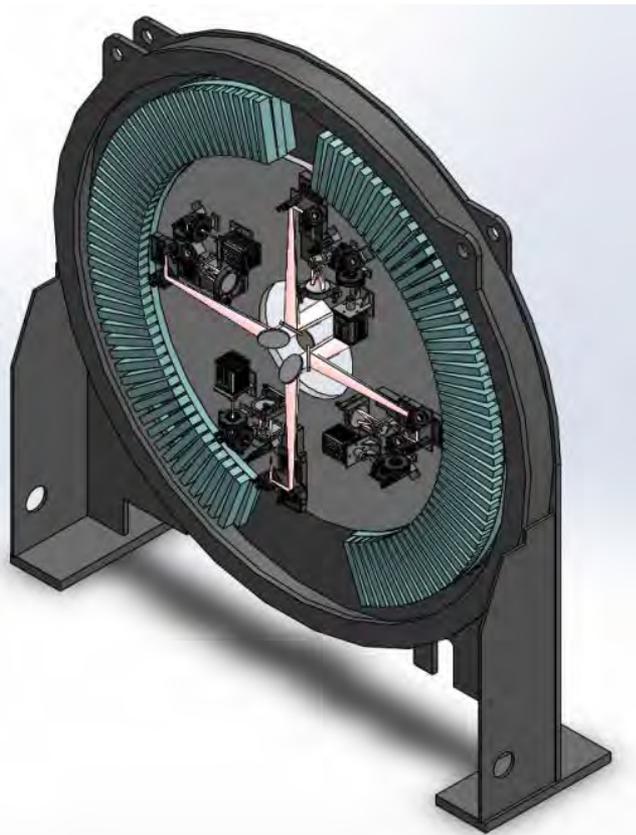
# TMT-AGE 実現に向けた今後の展開と国際協力：

1. すばるレーザートモグラフィ補償光学
2. ULTIMATE-SUBARU
3. ジェミニ南望遠鏡 GIRMOS



# 1. レーザートモグラフィ補償光学の実装

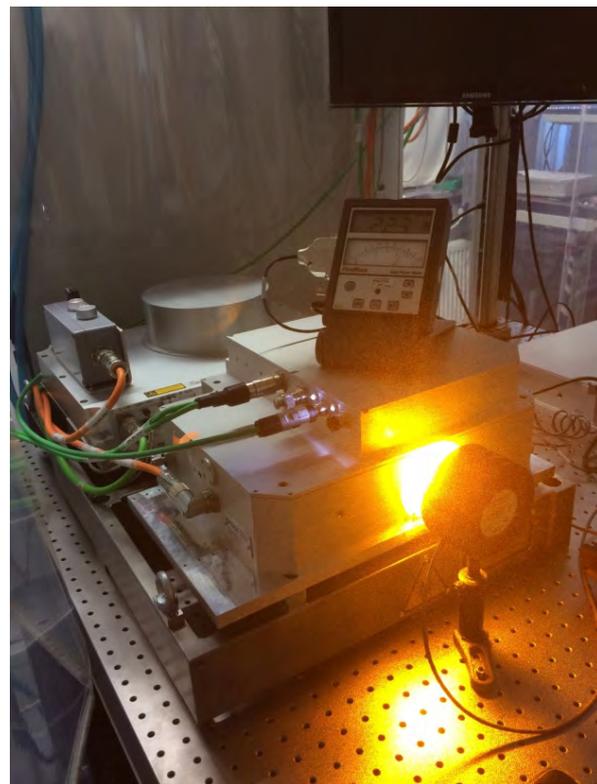
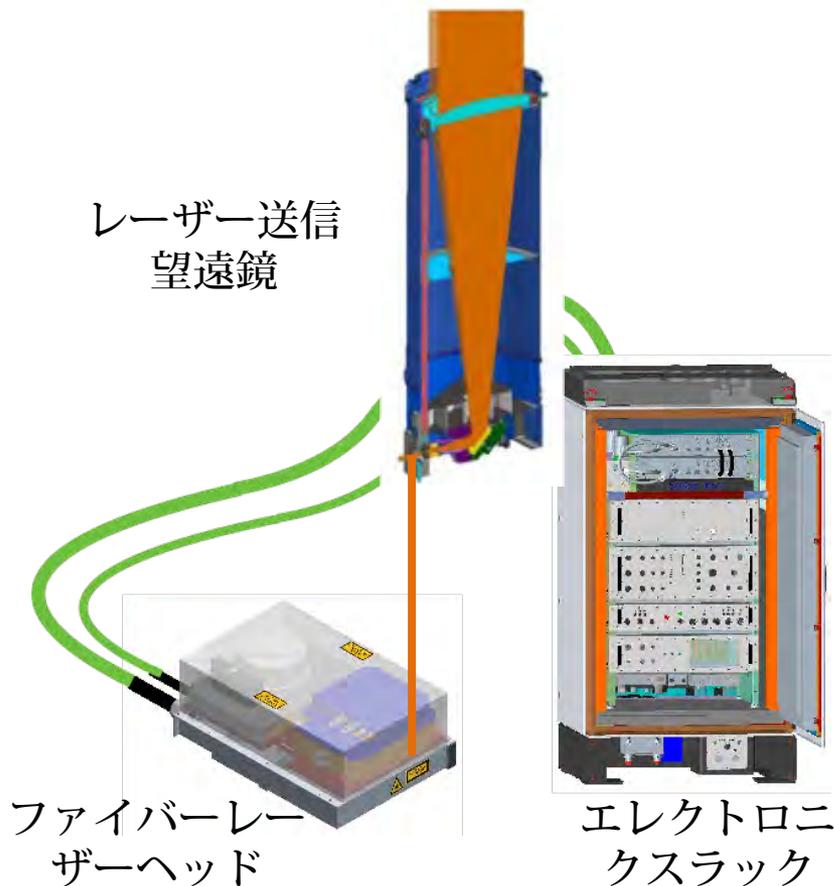
- 4個のレーザー光源とそれを測定する4台の波面センサーを実装し、トモグラフィ補償光学を実現する。



渡邊 (M2) を中心に波面センサーユニットの設計を進め、試作品の製作を開始している。  
櫻井 (M1) を中心に波面測定データの解析プログラムを開発中。  
波面センサー単体ですばる望遠鏡に持ち込んでの試験を予定している。

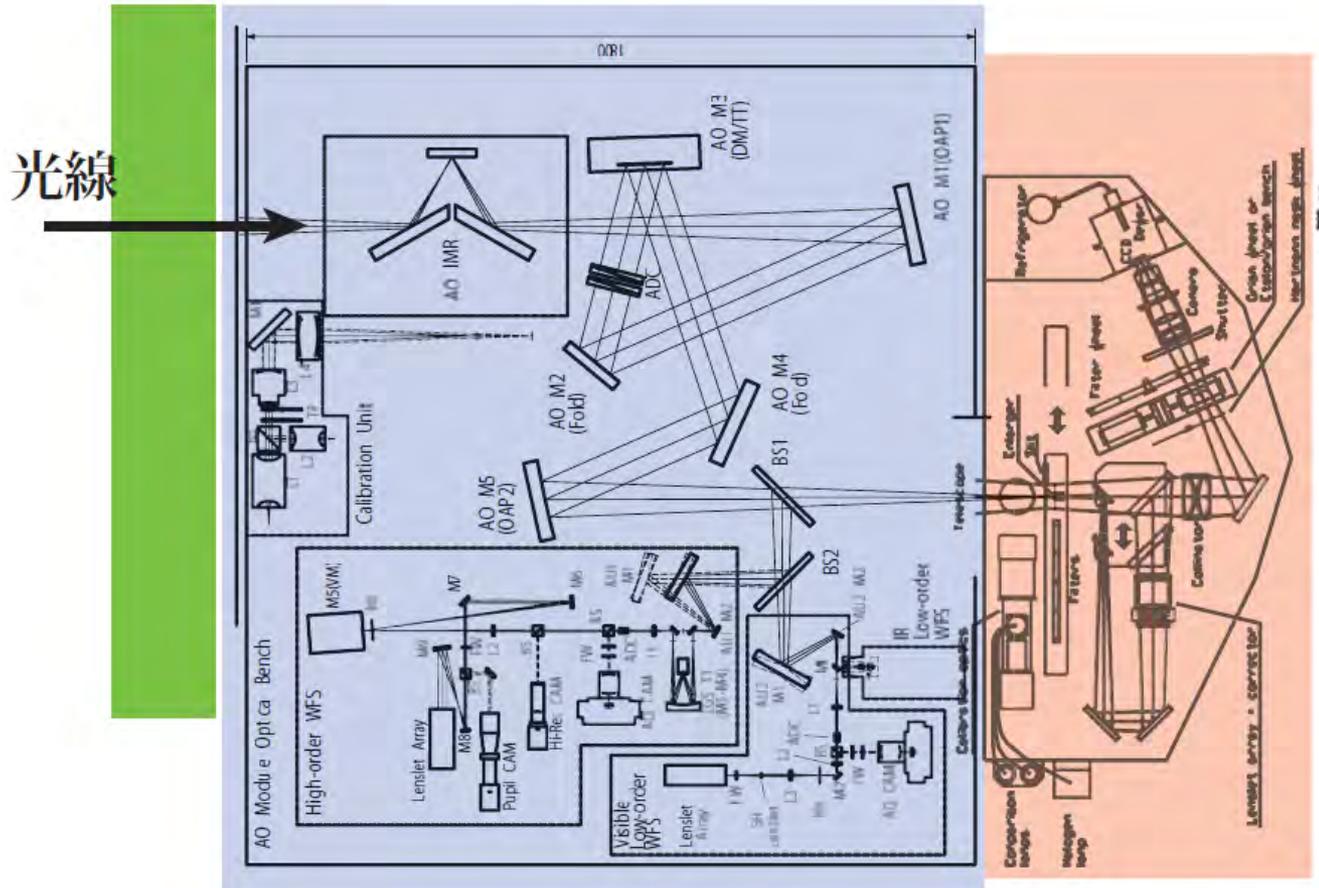
# 1. 高輝度レーザーによるレーザーガイド星の実現

実験室では既に高輝度が得られることを確認し、実装を待つ。



- 新開発のファイバーレーザー光源を導入し、4個のレーザーガイド星に分岐する。
- 複数レーザーガイド星の開発の実績のあるオーストラリア国立大学 Francois Rigaut のグループとの議論も展開中。

# 1. レーザートモグラフィ補償光学による 可視高空間分解能観測



- AO188 の可変形鏡を更新し、可視光面分光観測装置 3DII と組み合わせて高空間分解能の面分光観測を実現する。



### 3. ジェミニ南望遠鏡 GIRMOS

- ジェミニ南望遠鏡の多層共役補償光学 GEMS に搭載する多天体の面分光装置。
- TMT/IRMOS 実現に向けた基礎開発としてカナダ・トロント大学のSuresh Sivanandam を PI として提案中。

我々としては

- トモグラフィー補償光学の実装部分に貢献したいということで参加中。

# 展望

2010年代後半

すばる望遠鏡  
トモグラフィック補償光学

高精度補償の実現  
可視光補償光学の実現

中間赤方偏移銀河の星系の力学  
近傍銀河のブラックホール探査

科研費規模

2020年代前半

すばる望遠鏡  
ULTIMATE-Subaru

広視野補償光学の実現

遠方銀河形態の探査  
再電離期銀河の探査

科研費+国際協力

2020年代後半

TMT  
広視野多天体分光器

広視野補償光学の発展

WFIRST/ATHENA/SPICA追求  
初代大質量ブラックホール  
初代銀河

国際協力+TMT運営費

ジェミニ南望遠鏡  
GIRNOS

国際協力の主導と参加：

カナダ・ビクトリア大学

オーストラリア国立大学 Francois Rigaut ら

カナダ・トロント大学 Suresh Sivanandam ら

# (日本の)大学研究室としての国際協力

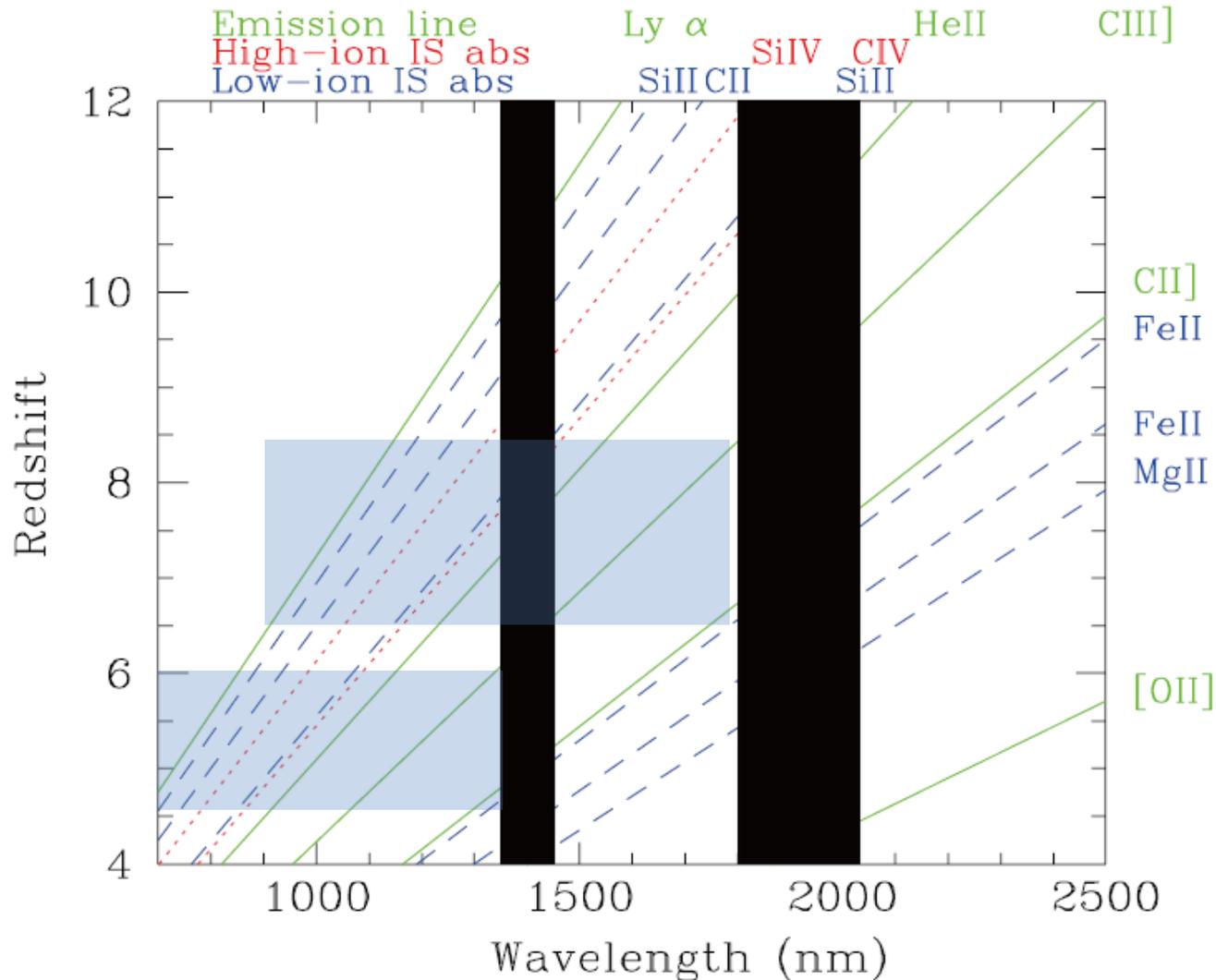
- 院生を派遣できることは大きな原動力であり、それを生かして win-win にしたい。いつでもどこでも人材は貴重。
- 派遣/受け入れをするための枠組み (協定校への中期・長期海外派遣、単位互換、国際共同大学院) はそれなりに選択肢が作られている。
- 光学・機械系の一部を引き受けた国際協力は下地作りが必要。

極限補償光学の開発との連携などを含め  
国内での協力体制も広げていきたいと考えてい  
ます。よろしくお願ひします。



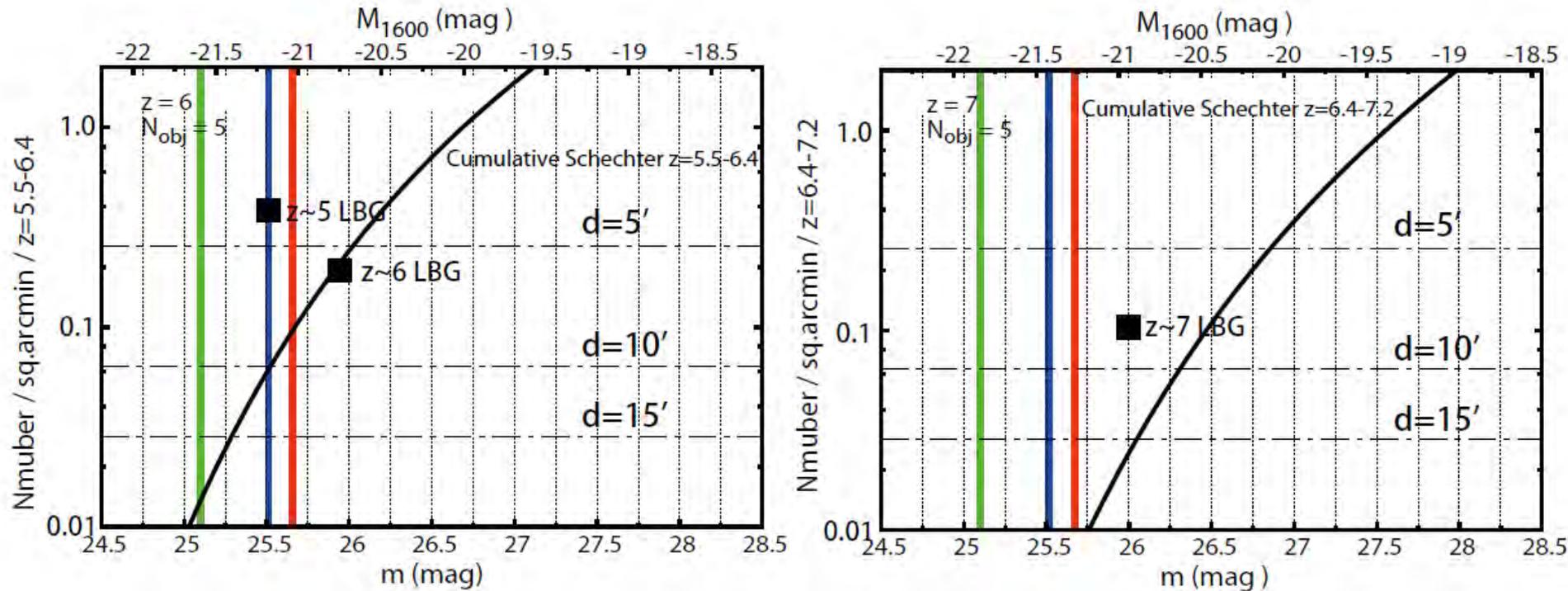
# Diagnostic lines for high-z galaxies

- Most of the redshifted UV diagnostic lines fall within 700-1800nm for galaxies at  $z > 5-9$ .



# Number density

- Red (MOAO), blue (GLAO), green (seeing-limit) lines show the detection limits for each system.
- Number density of luminous  $z\sim 6-7$  LBGs is not so high.



Filled squares from Bouwens et al. 2014,  
 V-dropout for  $z\sim 5$ , i-dropout for  $z\sim 6$ , and Y-dropout for  $z\sim 7$

# Tomography matrix construction with the real-time measurement

- Tomography matrix are constructed with
    - Configurations of the reference light sources
    - Turbulence height profiles
    - Wind height profiles
- Updates every 10 min

The last two parameters are estimated in real-time atmospheric monitoring with the same WFS measurements

How to check whether the derived tomography matrix is optimal or not ?