

すばる次世代広視野補償光学系赤外線カメラ とのシナジー

秋山 正幸 (東北大学)

すばる次世代補償光学系+装置検討 WG

背景：すばる次世代補償光学系検討 WG

2011年より、

- 1) すばるレーザーガイド星 + 188 素子補償光学系に続く次世代の補償光学系としてどのようなものが要求されるか、
- 2) HSC / PFS 時代の赤外線主力観測装置としてどのようなものが要求されるか、

について検討が始まった。

- WG メンバー

- 国立天文台

- 有本信雄、家正則、岩田生、臼田知史、大橋永芳、大屋真、児玉忠恭、高遠徳尚、高見英樹、滝浦晃基、田中壱、寺田宏、友野大悟、西村徹郎、服部堯、服部雅之、早野裕、美濃和陽典

- 東北大学

- 秋山正幸、大野良人

- 東京大学

- 本原顕太郎、田村直之

- JAXA

- 白旗舞

- 北海道大学

- 渡邊誠

背景：広視野補償光学システム検討報告書

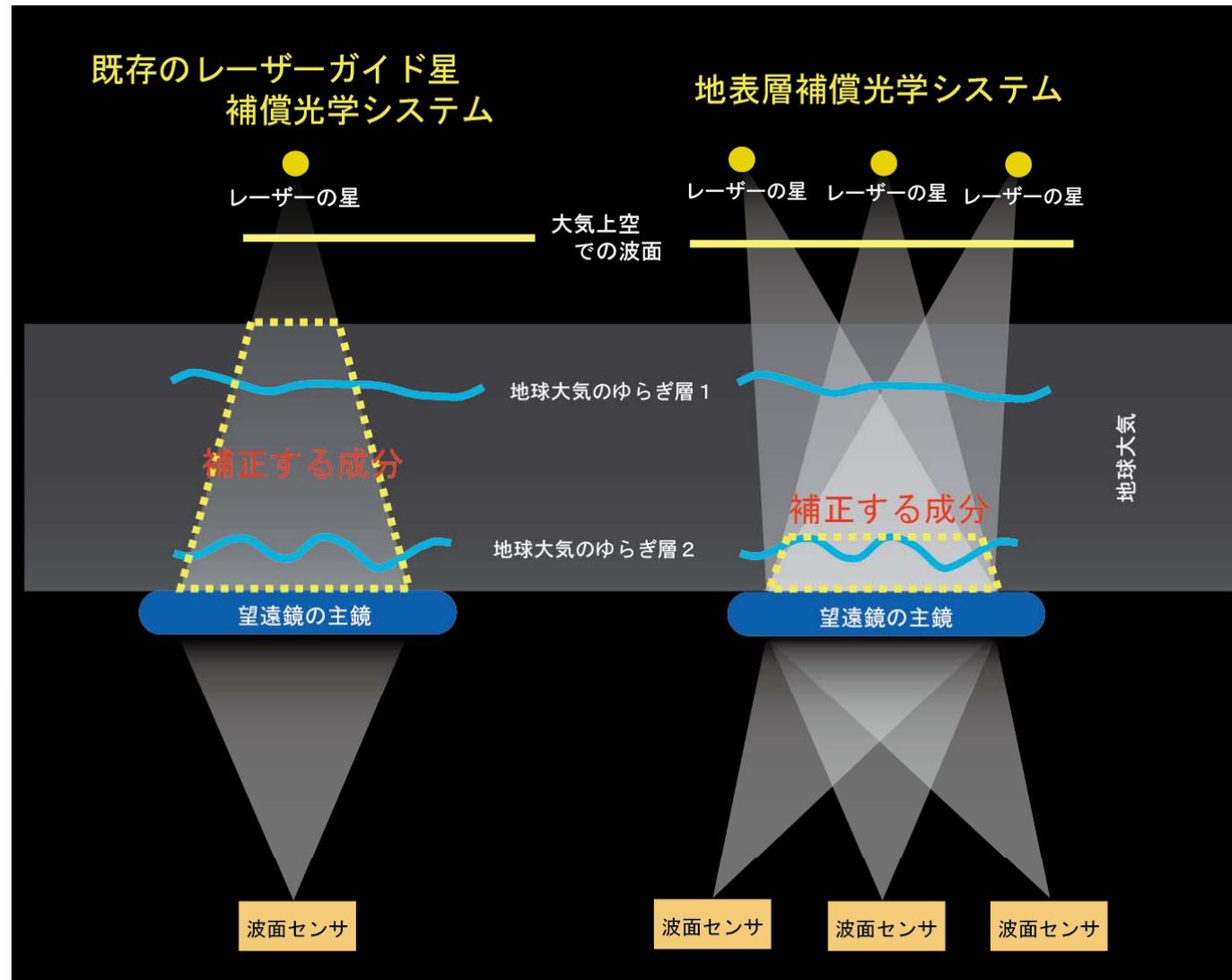
- 広視野補償光学系に重点を置いて検討を進め、岩田さん(国立天文台)を中心にすばる望遠鏡次世代広視野補償光学システム検討報告書としてまとめられつつある(近日中に公開)。
- 接地層補償光学系(Ground-Layer Adaptive Optics: GLAO)と多天体補償光学系(Multi-Object Adaptive Optics: MOAO)についてトレードスタディを行った。接地層補償光学系であれば $>20'$ 直径にわたる視野について近赤外線で $0.2''$ - $0.3''$ の補正性能が高確率で得られることが予想された。
- 撮像カメラの設計も行い、視野直径 $16'$ をカバーする実現可能な光学系の解があることがわかった。視野分割などを許せばさらに広視野も可能かもしれない。

背景：広視野補償光学システム検討報告書

- 広視野補償光学系に重点を置いて検討を進め、岩田さん(国立天文台)を中心にすばる望遠鏡次世代広視野補償光学システム検討報告書としてまとめられている。
- 2011/09 にはサイエンスワークショップも行い、さまざまなサイエンスケースがリストアップされた。中間赤方偏移の銀河の面分光探査などがメインサイエンスケースとしてシミュレーションなどの検討が進んでいる。
- 今回は WISH とのシナジーを考え、LAE 探査について重点を置いて予想限界などを紹介する。

地表層補償光学系の概要

- 地表層は視野の方向によらず共通、地表層はナチュラルシーイングへの寄与の大きい。



地表層補償光学系の概要

- 地表層は方向によらず共通、地表層はナチュラルシーイングへの寄与の大きい。

Table 3.1: RAVEN シーイングモデル

percentile seeing	25%-ile (good)	50%-ile (moderate)	75%-ile (bad)	speed	direction
height	fractional contribution			wind	
0 km	0.6823	0.5960	0.4971	5.6 m/s	0°
0.5 km	0.0611	0.0963	0.1382	5.77 m/s	50°
1 km	0.0212	0.0325	0.0577	6.25 m/s	100°
2 km	0.0172	0.0372	0.0642	7.57 m/s	150°
4 km	0.0486	0.0684	0.0895	13.31 m/s	200°
8 km	0.0486	0.0684	0.0895	19.06 m/s	250°
16 km	0.0939	0.0826	0.0700	12.14 m/s	300°
fwhm	0.53''	0.66''	0.85''		
r_0	19.4cm	15.6cm	12.1cm		

note: fwhm and r_0 are defined at $0.5 \mu\text{m}$

地表層補償光学系シミュレーションの結果

かなり広視野に渡って一様な補正が可能である。比較的に短波長 (~800nm) にまで良い補正が期待される。

細いスリットを用いても高いスループットが実現できる。現状では MOIRCS で 0.8" スリットを用いているがそれを 0.4" まで細くすることが可能になり、背景光の影響を 1/4 にすることができる。(=口径が 2 倍になるのと同じ効果)

FWHM

Blue: 10'

Green: 15'

Red: 20'

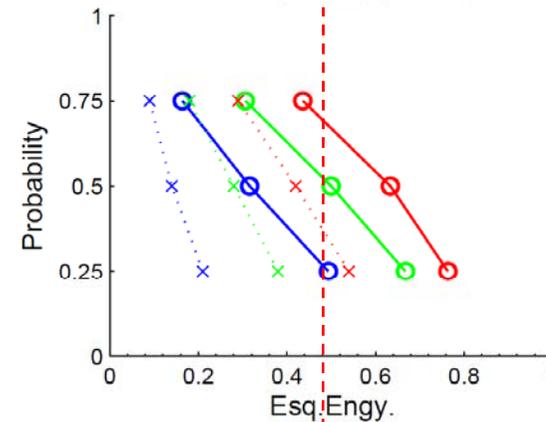
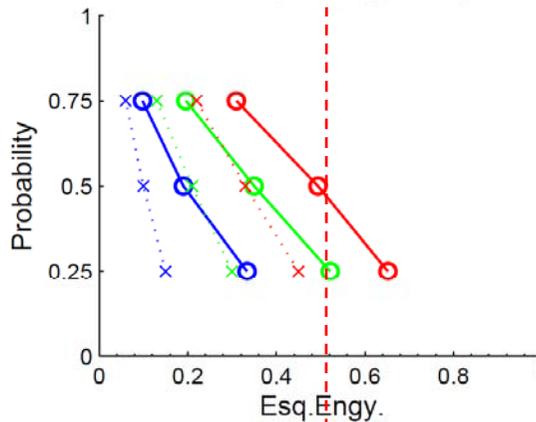
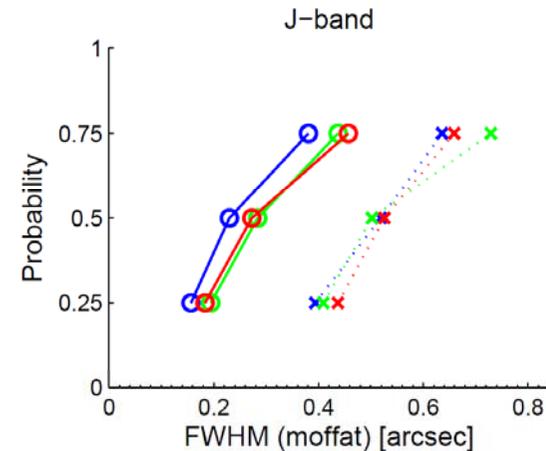
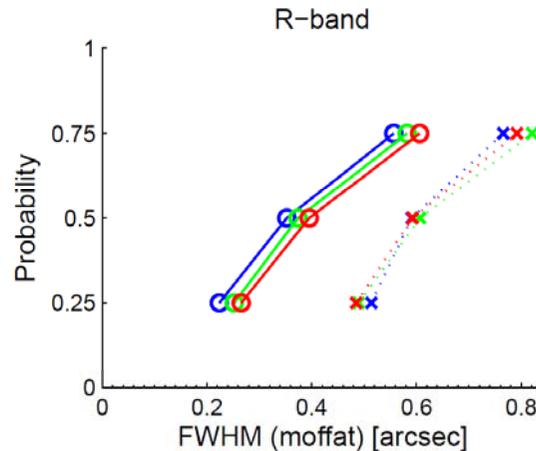
Ensquared E.

blue: 0.24"

green: 0.36"

red: 0.48"

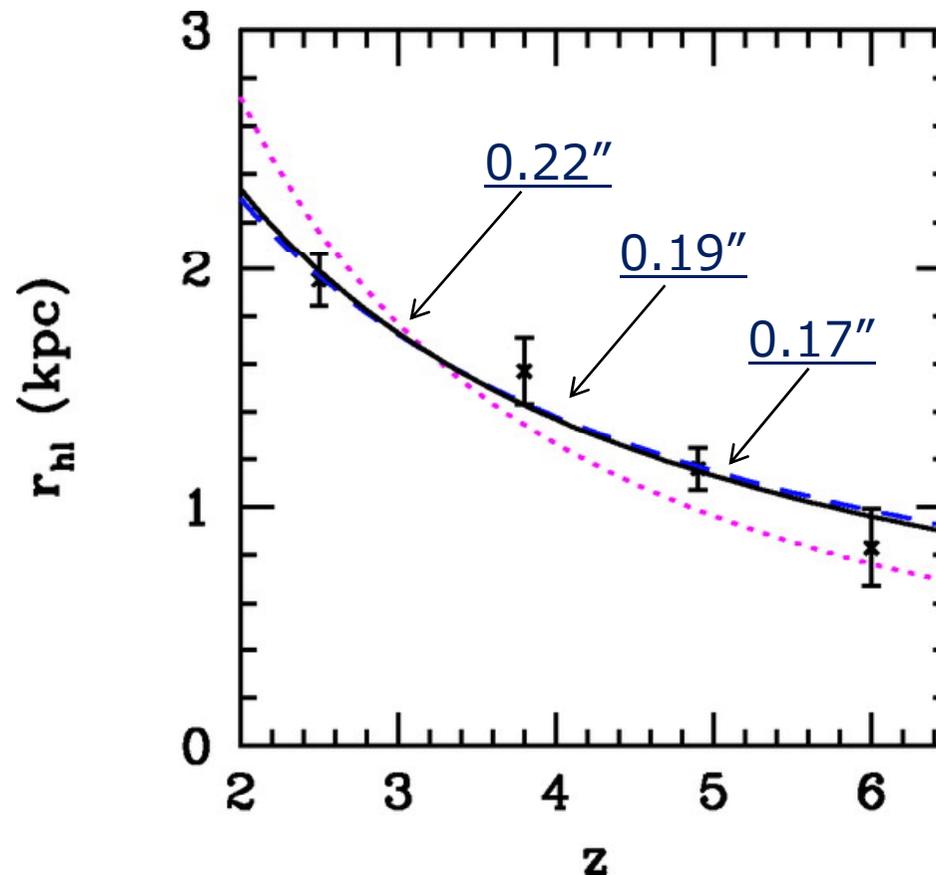
大屋さんによる計算
(Subaru, NAOJ)

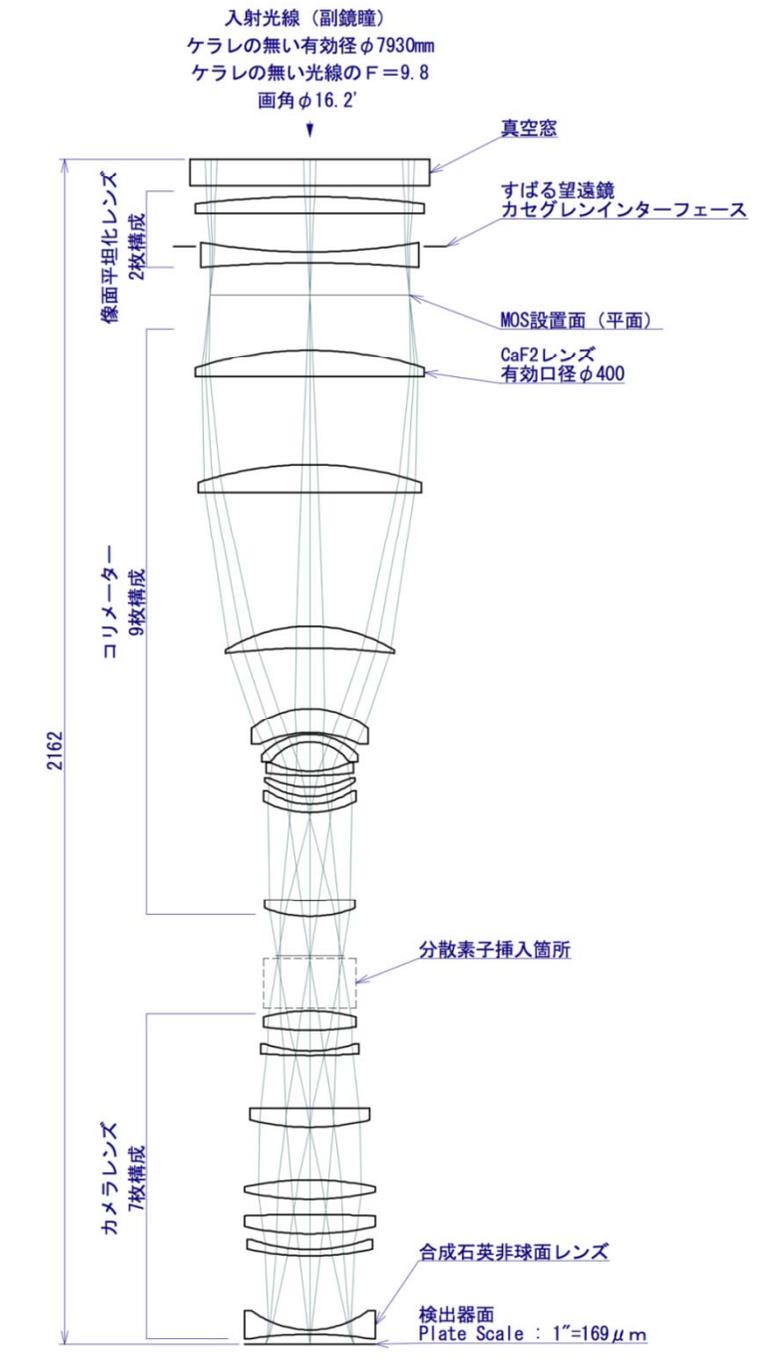


遠方銀河のサイズは 0.2" 程度の補正とベストマッチ

- 0.2" 程度まで補正を行い、それにマッチしたサンプリング(開口、スリット)を行うことで広がった遠方銀河の検出効率を最大にすることができる。

➤ 16m サーベイ望遠鏡へ!



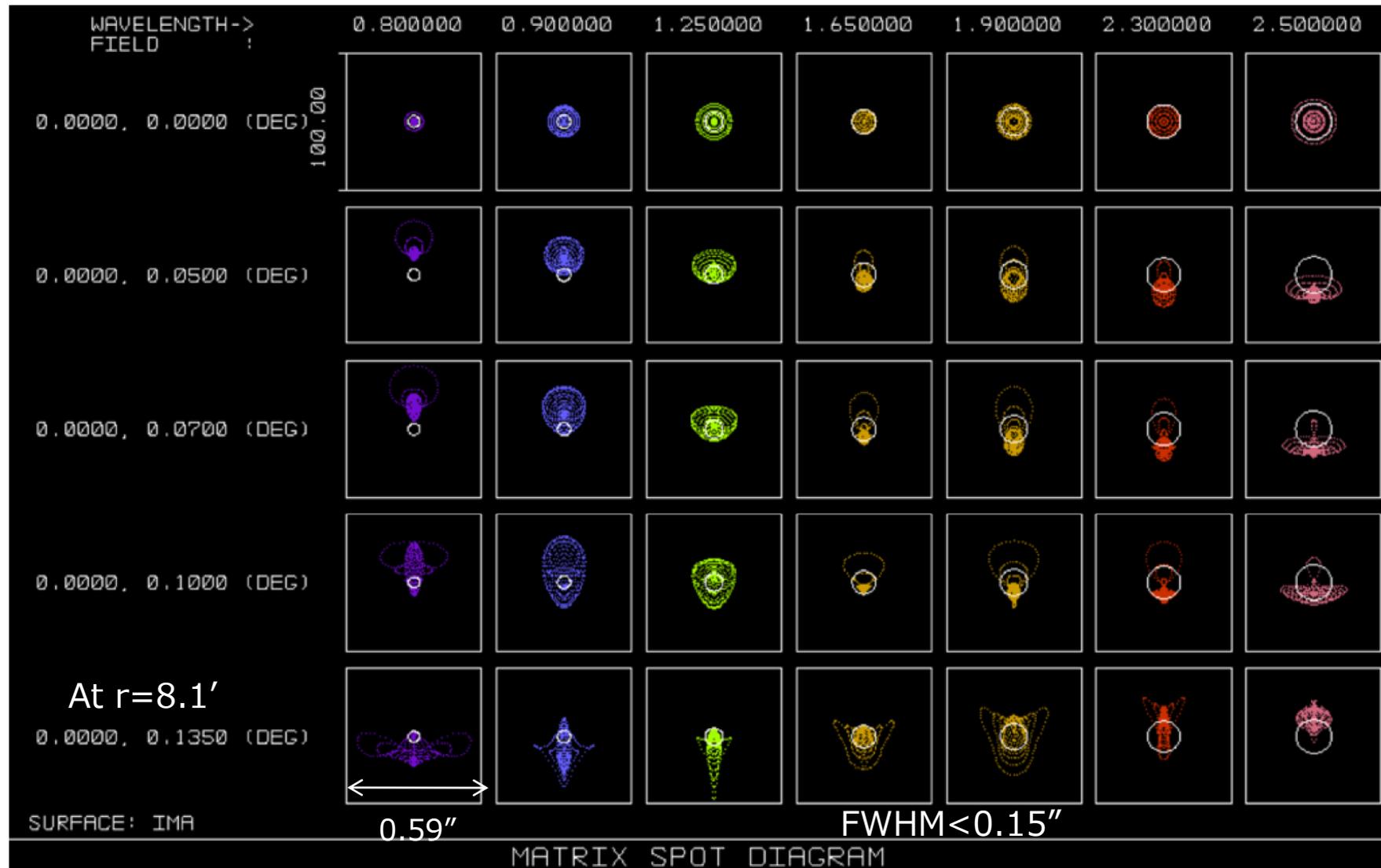


広視野光学系の検討

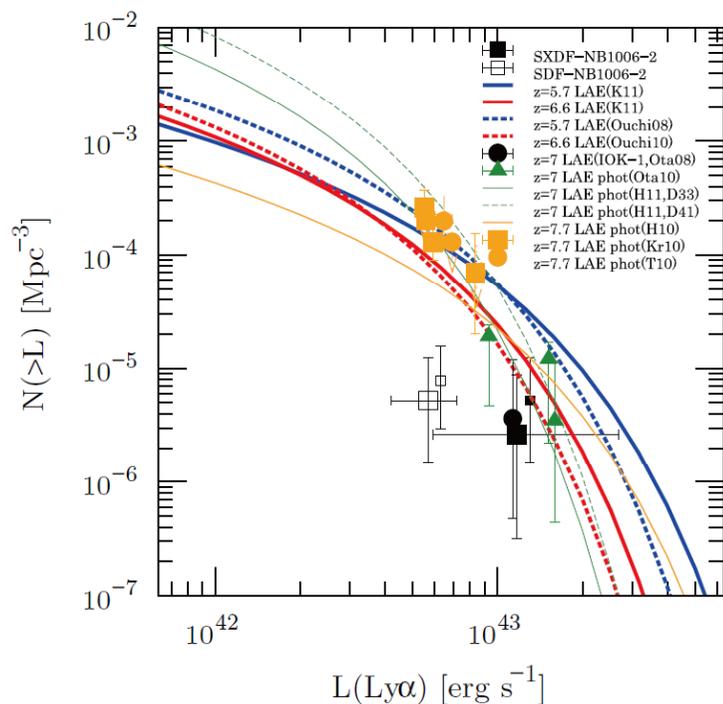
- すばる望遠鏡の副鏡のパラメータの変更を許した設計案 (オプトクラフト 山室さんによる)。
- 視野直径 16.2arcmin。
- Hawaii 4 RG ($15\mu\text{m}=0.09''/\text{pix}$) x 4 個でカバーできる。
- 現在の検討では視野サイズのリミットは第1レンズのCaF₂のガラス材のサイズリミット(直径400mm程度)で決まっている。視野分割やレンズ分割などを検討すれば視野をさらに広げることは可能であろう(今年度の検討課題)。

Figure 5.8: (B)-2 (望遠鏡光学パラメータ変更あり、平面化レンズあり) の場合の光路図

広視野光学系の検討: スポットダイアグラム



8-10m 地上望遠鏡でのフロンティア



$z=7.3$ LAE

Subaru Scam(red-sensitive CCD)

NB1006, 22h exp.

FWHM 0.98"

24.83mag (5sigma)

(Shibuya et al. 2012)

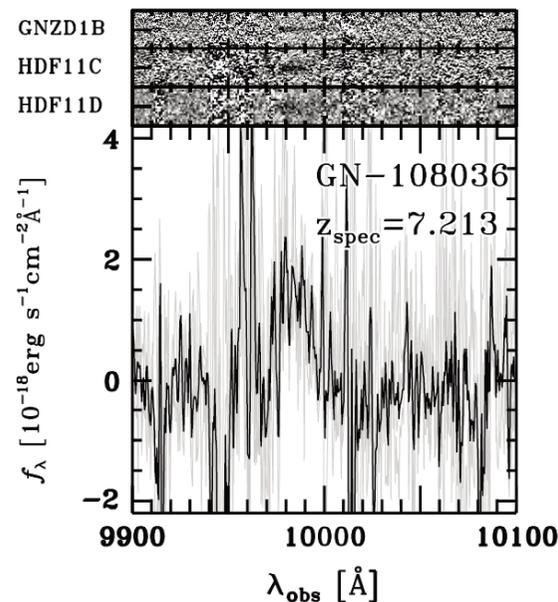


Figure 2. Spectrum of the $z = 7.213$ z -dropout galaxy, GN-108036. The top panels show its two-dimensional spectra obtained with the GNZD1B, HDF11C, and HDF11D masks. The size along the spatial axis is $5''$ for each two-dimensional spectrum. The HDF11D spectrum is binned in 2×2 pixels. A line is visually identified at $\simeq 9980 \text{ \AA}$ in the spectra of GNZD1B and HDF11C, whose exposure times are 5 hr and $\simeq 4$ hr, respectively, while the line is marginally seen in the spectrum of HDF11D, whose exposure time is 2 hr. In the bottom panel, we show the one-dimensional spectra. The gray solid lines are spectra obtained with individual masks. The composite spectrum is shown as the black solid line. All the one-dimensional spectra illustrate a line detection at around 9980 \AA , and the S/N of the line in the composite spectrum is $\simeq 6$.

$z=7.2$ LBG

Keck DEIMOS, 11h exp.

$f_{\text{Ly}\alpha} = 2.5 \times 10^{-17} \text{ erg/s/cm}^2$

$L_{\text{Ly}\alpha} = 1.5 \times 10^{43} \text{ erg/s}$

(Ono et al. 2012)

LAE 探査の比較

Calculations conducted by Ikuru Iwata (Subaru, NAOJ) based on Shin Oya (Subaru, NAOJ) GLAO simulated PSF

	Mirror [m]	Pix scale ["/pix]	FoV [arcmin ²]
Subaru / MOIRCS	8.2m	0.117	28
Subaru / GLAO+WFI	8.2m	0.117	177
JWST / NIRCcam	6.5m	0.0317	9.68
WISH	1.5m	0.155	840

For Subaru GLAO+WFI, three narrow band filters are assumed,

NB106 10600A with top-hat filter with $d=150\text{\AA}$ targetting LAEs @ $z=7.7$

Co-moving volume: $5.0e+3 \text{ Mpc}^3 / \text{fov}$

NB134 13400A with top-hat filter with $d=190\text{\AA}$ targetting LAEs @ $z=10.0$

Co-moving volume: $4.0e+3 \text{ Mpc}^3 / \text{fov}$

NB155 15500A with top-hat filter with $d=220\text{\AA}$ targetting LAEs @ $z=11.8$

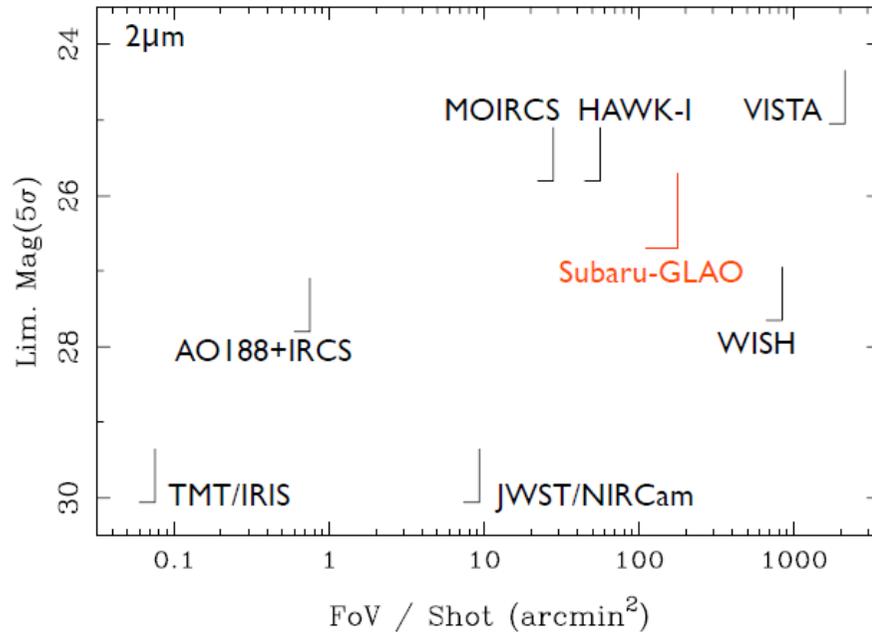
Co-moving volume: $3.4e+3 \text{ Mpc}^3 / \text{fov}$

JWST has narrow-band filter above 16000A

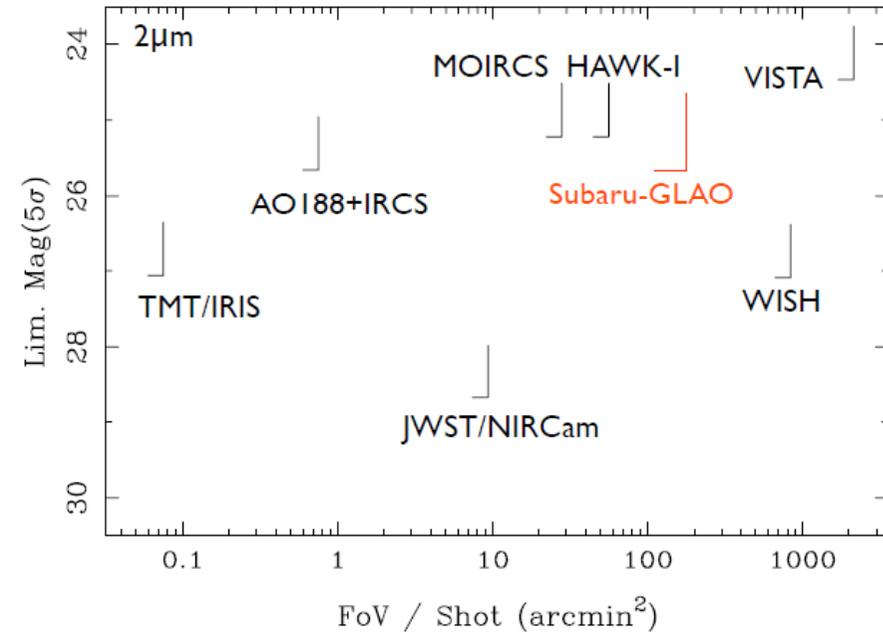
ブロードバンド撮像の検出限界 (10000s 露出, 5sigma, AB).

For broad-band imaging, observation from space can achieve much deeper flux limit thanks to low-background level or no OH line. (Ground-based observations have advantage in the size of FoV.)

Point Source, 10^4 sec



0.5" Extended Source, 10^4 sec

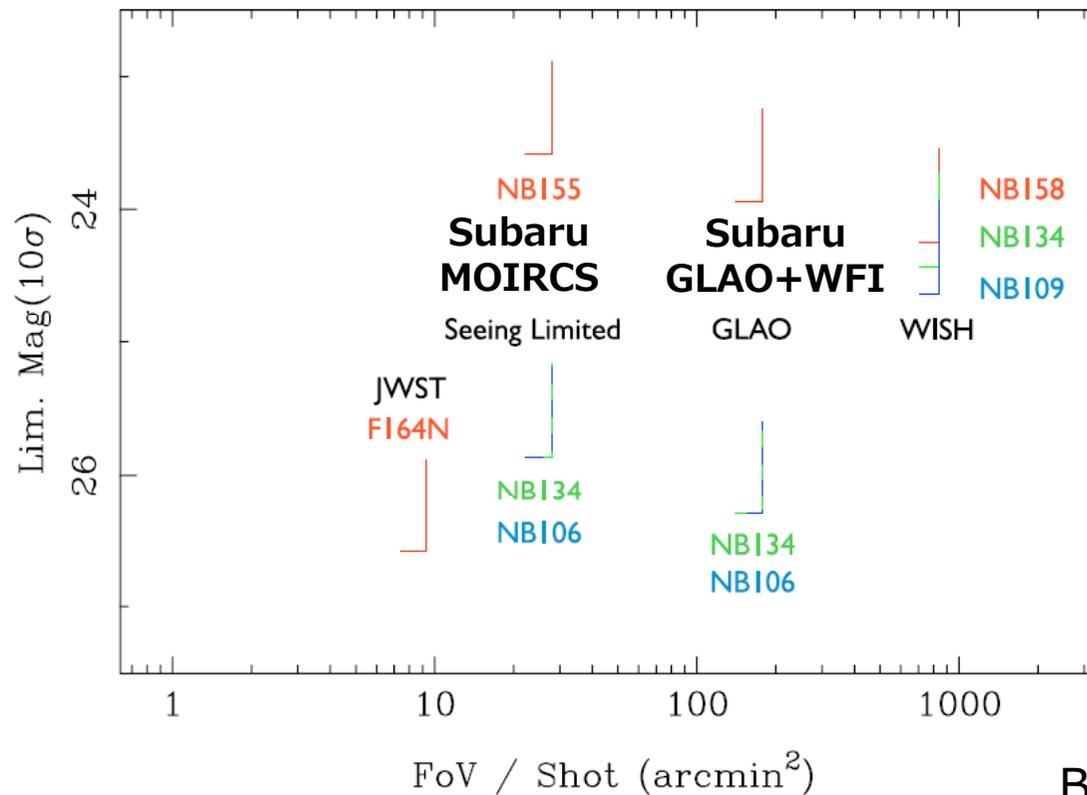


By I.Iwata

ナローバンド撮像の検出限界 (10h 露出, 10sigma, AB).

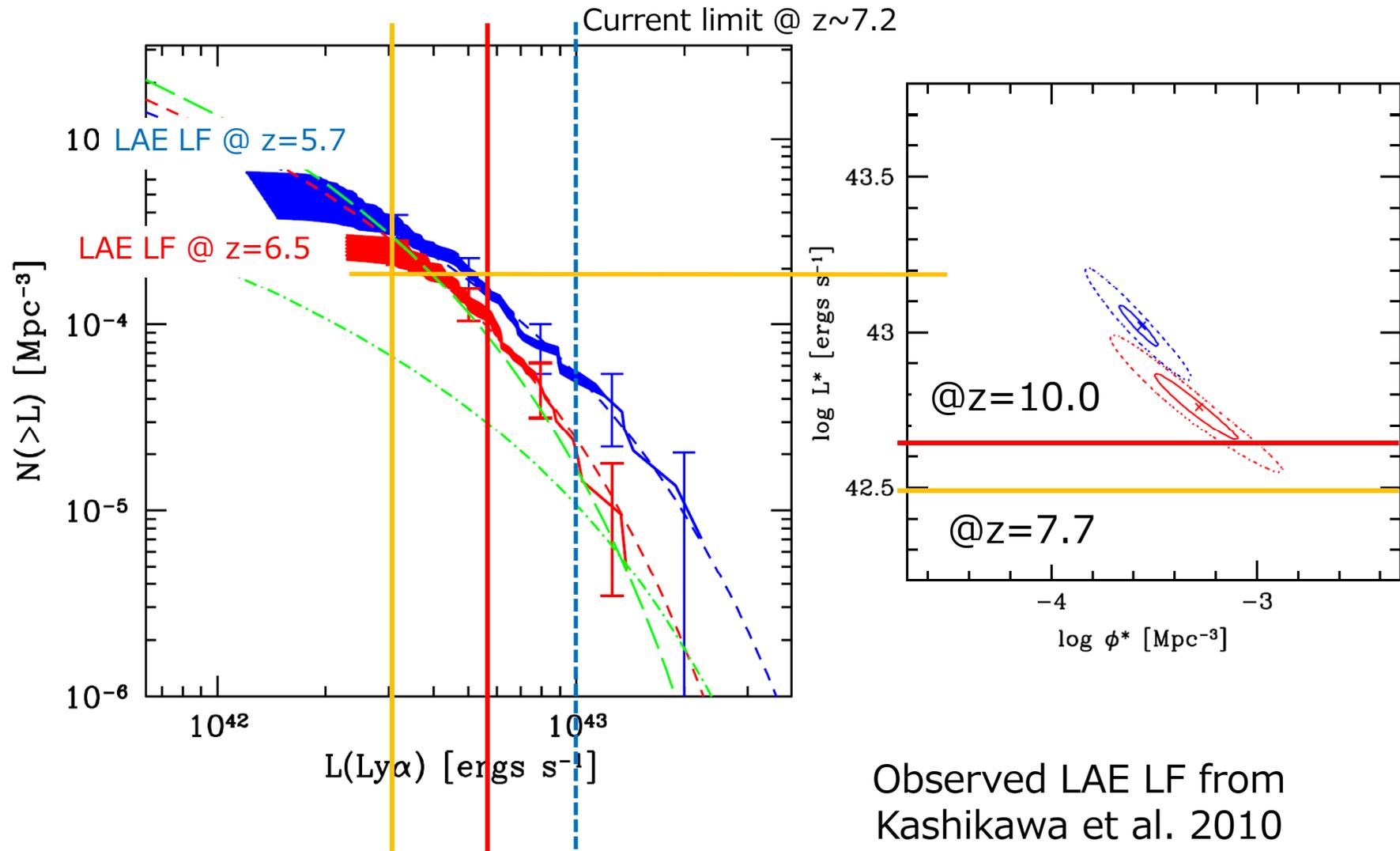
If narrow-band observation in between strong OH lines is assumed, ground-based observation can reach similar depth to the observation from space.
So continuum selections (like dropout) is better from space, but line selections (like Ly-alpha emitter) can be done efficiently from ground.

NBF, Point Source, 10hrs



By I.Iwata

Detection limit with 10h exp.



@ $z=7.7$ @ $z=10.0$

Subaru GLAO+WFI 10h limit

Observed LAE LF from
Kashikawa et al. 2010

Expected number per FoV with 10h exp.

No Evolution from $z=6.5$ i.e., ~Maximum Number

	Number / FoV			
	Seeing	GLAO	WISH	JWST
$z\sim 8$	0.5	8.3	0.2	--
$z\sim 10$	0.2	3.3	0.01	--
$z\sim 12$	3E-08	8E-06	7E-04	0.3

**Subaru
GLAO+WFI**

Based of SAM by Kobayashi et al.

	Number / FoV		
	Seeing	GLAO	JWST
$z\sim 8$	0.4	3.9	--
$z\sim 10$	0.03	0.5	--
$z\sim 12$	~0	~0	0.003

**Subaru
GLAO+WFI**

By I.Iwata

- The number density of LAEs brighter than L^* can be constrained up to $z\sim 10$.
 - Good constraints on the ionized fraction in the redshift range.
 - Further studies (Ly-alpha line profile, stellar population) can be done with $>30m$ telescopes.

WISH とのシナジー

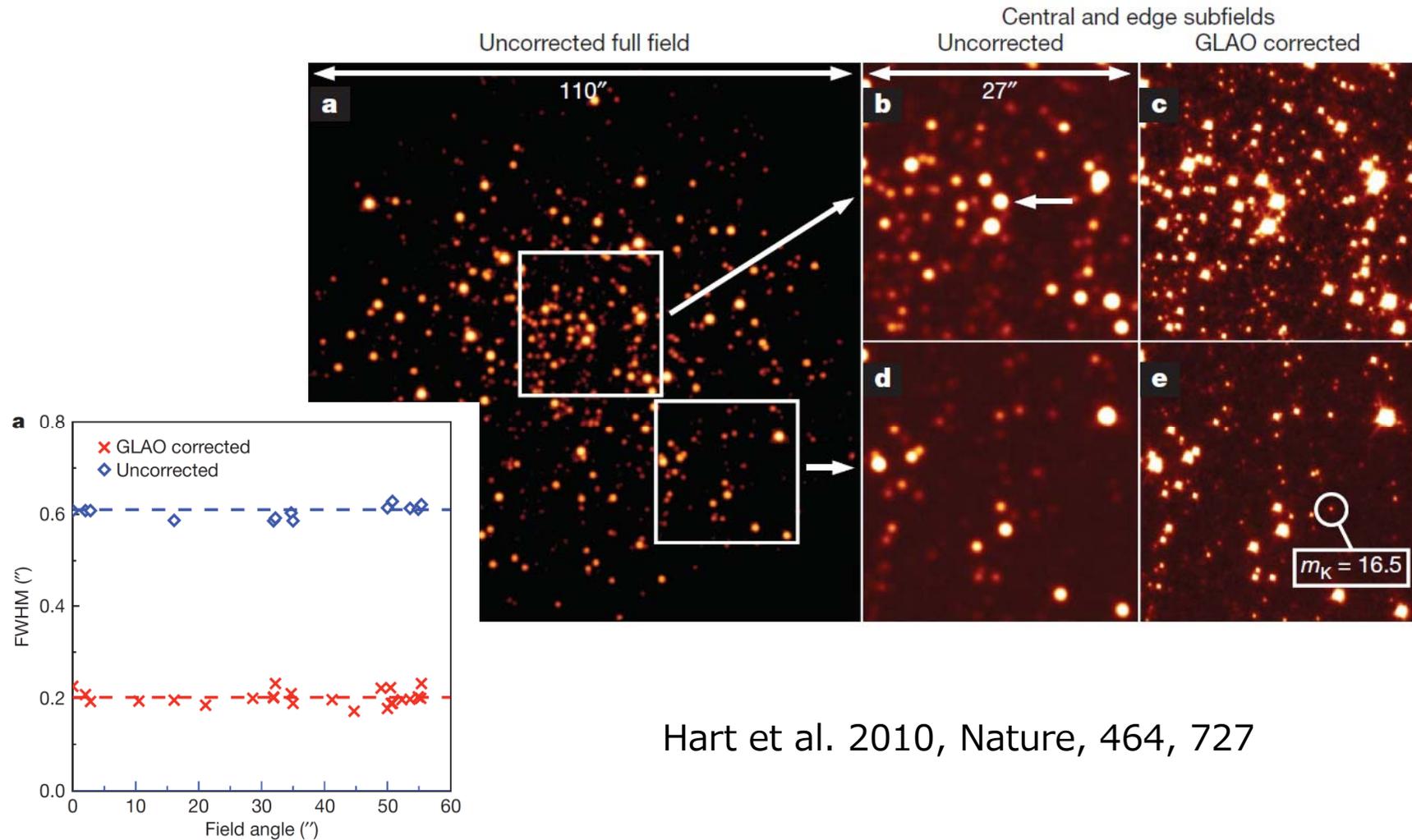
- 遠方銀河(LBG,LAE)について WISH でのブロードバンド探査 と
 - 1) すばる/GLAO でのナローバンド探査
 - 2) すばる/GLAO での多天体分光(中分散)フォローアップ
- WISH LBG サンプルの Ly α line での性質。

Ly α EW 分布 : reionization の進行、金属量

大規模構造、HI との相関

現状：接地層補償光学系の実際

- MMT での先駆的な結果、視野の中で一様な補正を実現することが出来た。ただし、まだ視野サイズは直径 2' 程度に限られる。



Hart et al. 2010, Nature, 464, 727

現状：接地層補償光学系に必要な要素技術 1

- 複数のレーザーの打ち上げとトモグラフィーによる地表層揺らぎの取り出し。MMT の接地層補償光学系は Rayleigh laser のシステムを用いていたが、すでに Gemini GEMS システムなどでは Na laser を複数打ち上げるシステムが立ち上がっている。



From
<http://www.gemini.edu/node/11603>

現状：接地層補償光学系に必要な要素技術 2

- 広視野に対して補正するために副鏡のところを可変形鏡を用いるのが最も光学的にはシンプルな解である。可変副鏡自体は大きな開発要素であったが、現在はボイスコイルアクチュエータと薄いシェル鏡を用いた可変副鏡の製作も定常的に行われつつある。MMTのほか、LBTでもすでに実装されている(左)。VLTに対しても製作が進んでいる(右)。

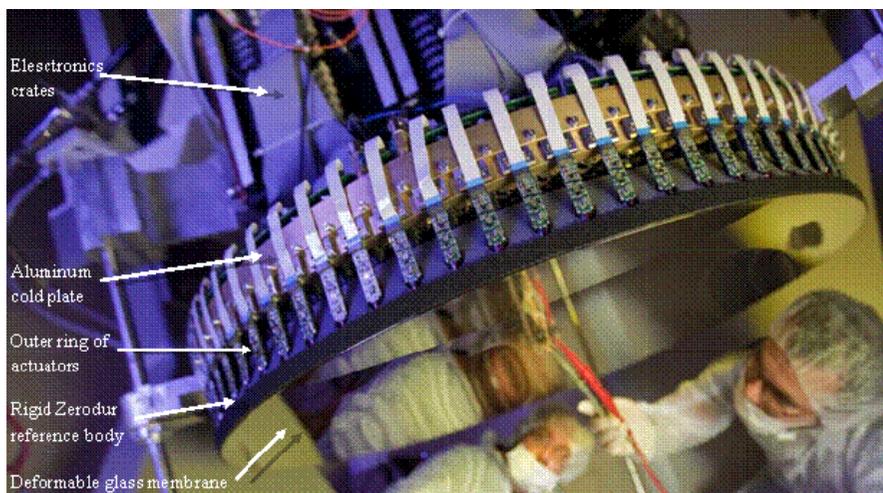
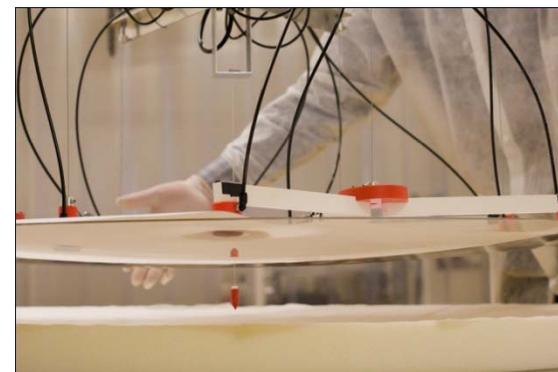
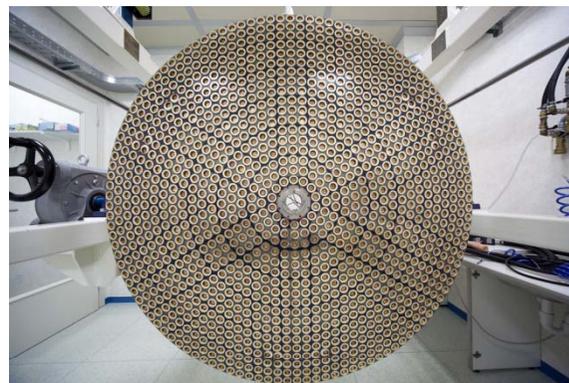


Fig. 4. The first ASM for the LBT, undergoing final tests at Arcetri Observatory in Florence.

From
<http://www.lbto.org/LBT%20Website%20General%20Public/adaptive%20optics.htm>



From
<http://www.eso.org/sci/facilities/ddevelop/ao/sys/dsm.html>

現状と今後

- 接地層補償光学系を実現するための要素技術は成熟しつつあり、現在の技術で装置としては実現可能である。
- 現在進行中の接地層補償光学系での視野サイズは最大で 7.5' x 7.5' (VLT/Hawk-I、撮像のみ) であるが、大規模なサーベイを行うには視野サイズが足りない。現在の Suprime-cam に匹敵する視野を確保したい。撮像カメラの光学系デザインはさらに検討を進める必要がある。
- 接地層補償光学系が非常に広視野 (>10') で有効かどうかは接地層の揺らぎの大きさと高さがどの程度であるかに依存する。現在のシミュレーションではこれまでの「マウナケア山頂での測定」からナチュラルシーイングについて接地層が大きく効いている、接地層の高さが <500m であるということが想定されている。「すばるのサイト」で実際にそうなっているかは確認を進める。

プロジェクト概略

- 複数の科研費+alpha で実行できると想定している。
- 現在想定しているタイムスケールとしては
 - 2020年 サイエンス運用開始
 - 2019年 エンジニアリングファーストライト
 - 2017~2019年 組立・試験
 - 2016~2018年 製造
 - 2016年3月 最終設計レビュー
 - 2014~2015年 詳細設計
 - 2014年3月 基本設計レビュー
 - 2013~2014年 基本設計および開発検討
 - 2013年 概念設計レビュー

プロジェクト：TMTとのシナジー

- 要素技術は TMT の多天体補償光学システムとの共通点が多く、TMTの第2世代装置のベースとなることが期待される。

