

天文用補償光学システム開発の考え方

高見英樹

国立天文台
情報通信研究機構（宇宙光通信）

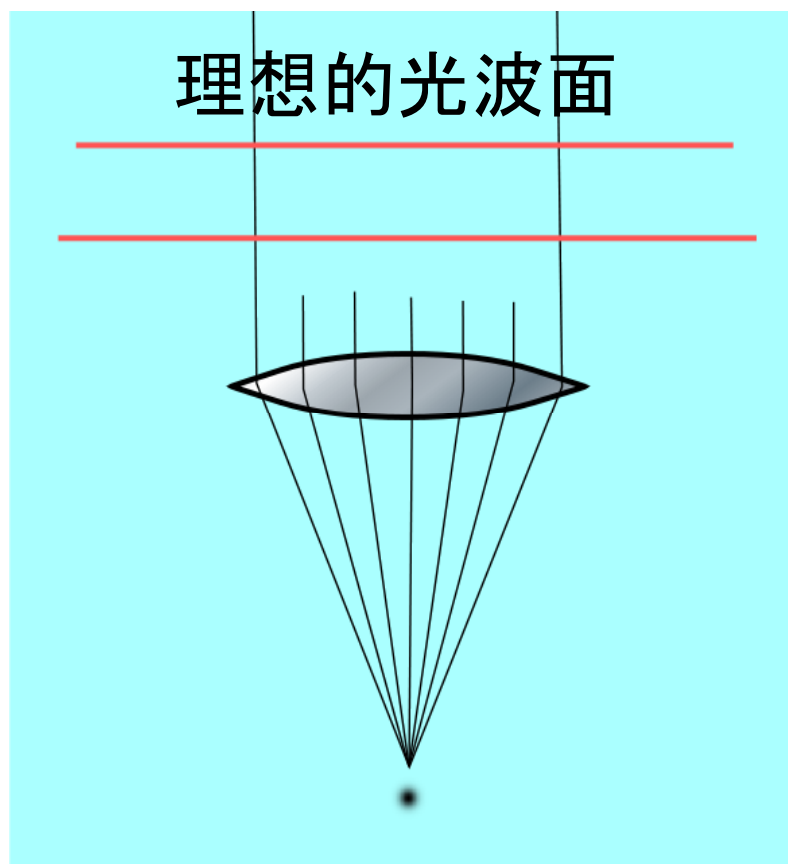
今日の話のモチベーション

AOの開発にはいろいろな要素があるが、それを整理して開発者の役に立てば嬉しい。特に日本のシーイング条件でのAOの開発でどう考えればよいか。

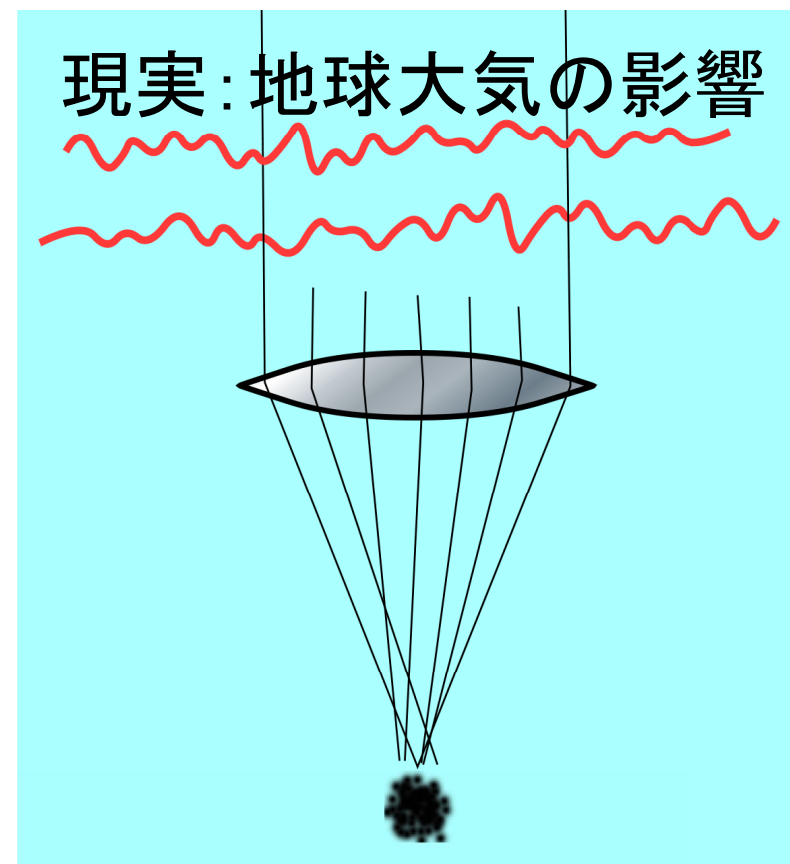
そうでない方には、AOが何で、どのように働くか、どんなサイエンスができるか、についてイメージをつかんでもらえると嬉しい。

第一部 補償光学とは

高解像度を邪魔するもの ⇒ 大気の揺らぎ



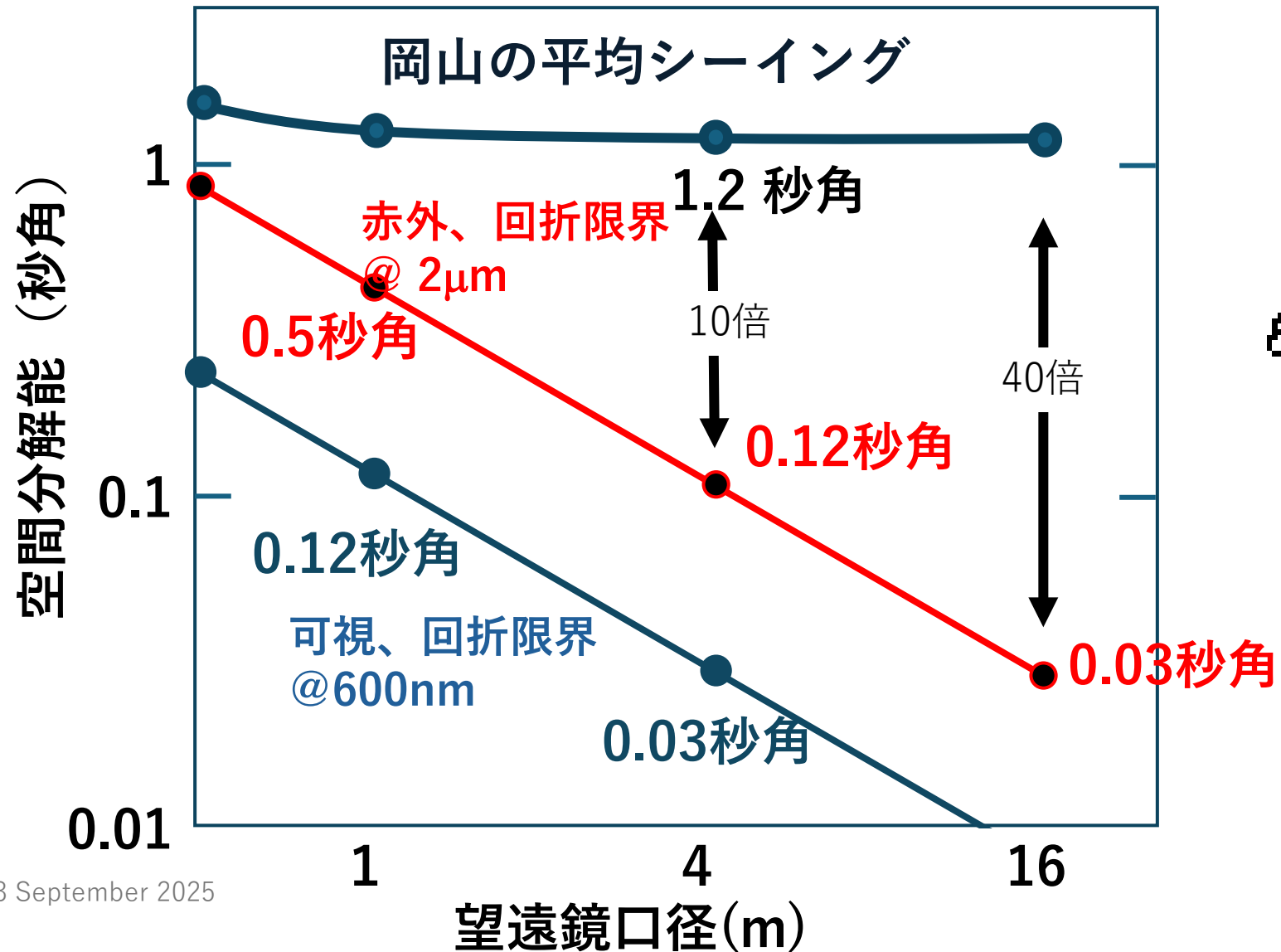
揺らぎなし(宇宙空間)



地上

レンズがデコボコしているのと同じ
更に悪いのはそれが時々刻々変化している

望遠鏡の空間分解能は、口径ではなく大気揺らぎによって決まってしまう。

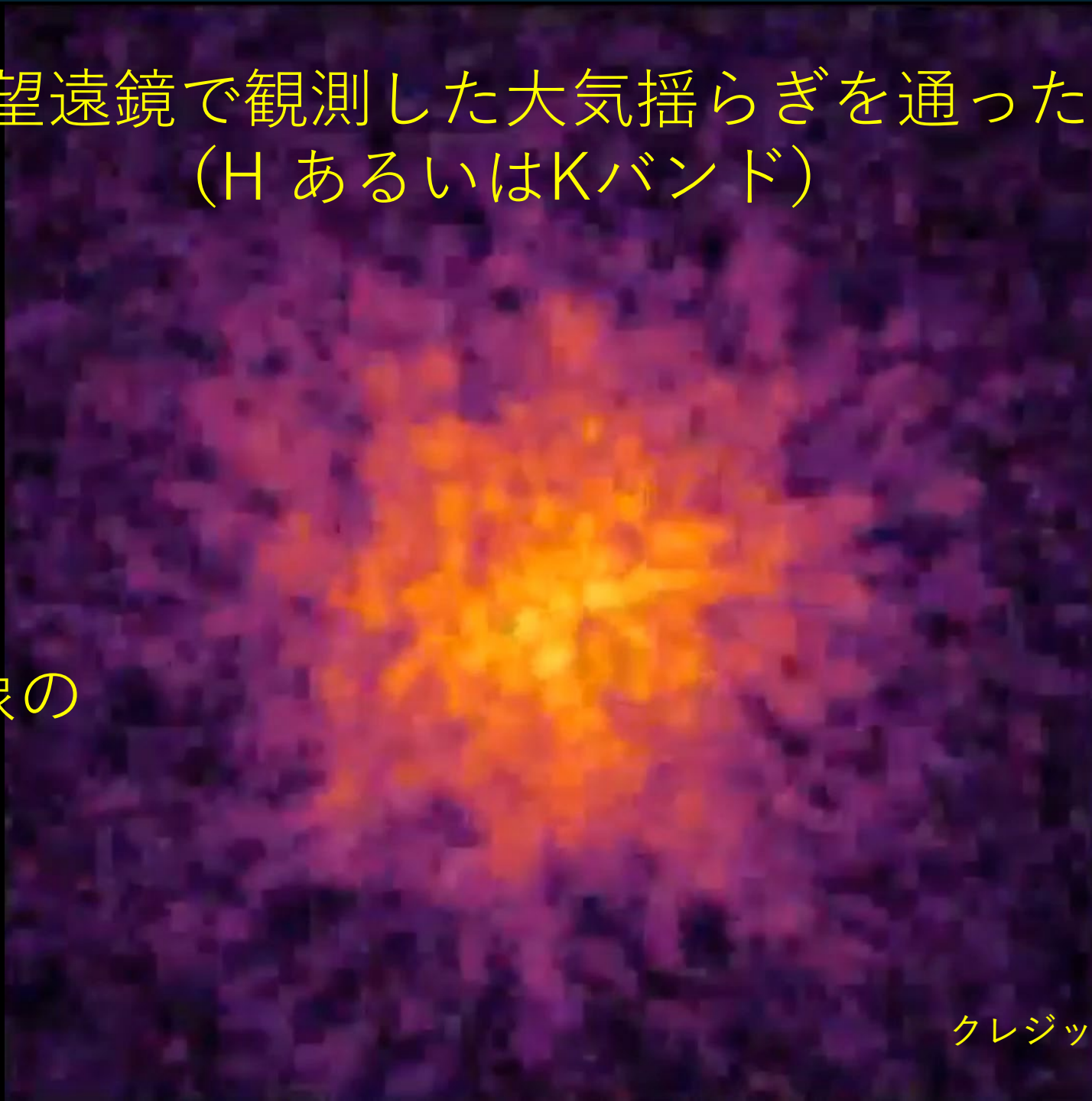


$$\theta = \frac{1.22\lambda}{D}$$

すばる望遠鏡で観測した大気揺らぎを通った星像
(H あるいはKバンド)



回折限界の像の
大きさ



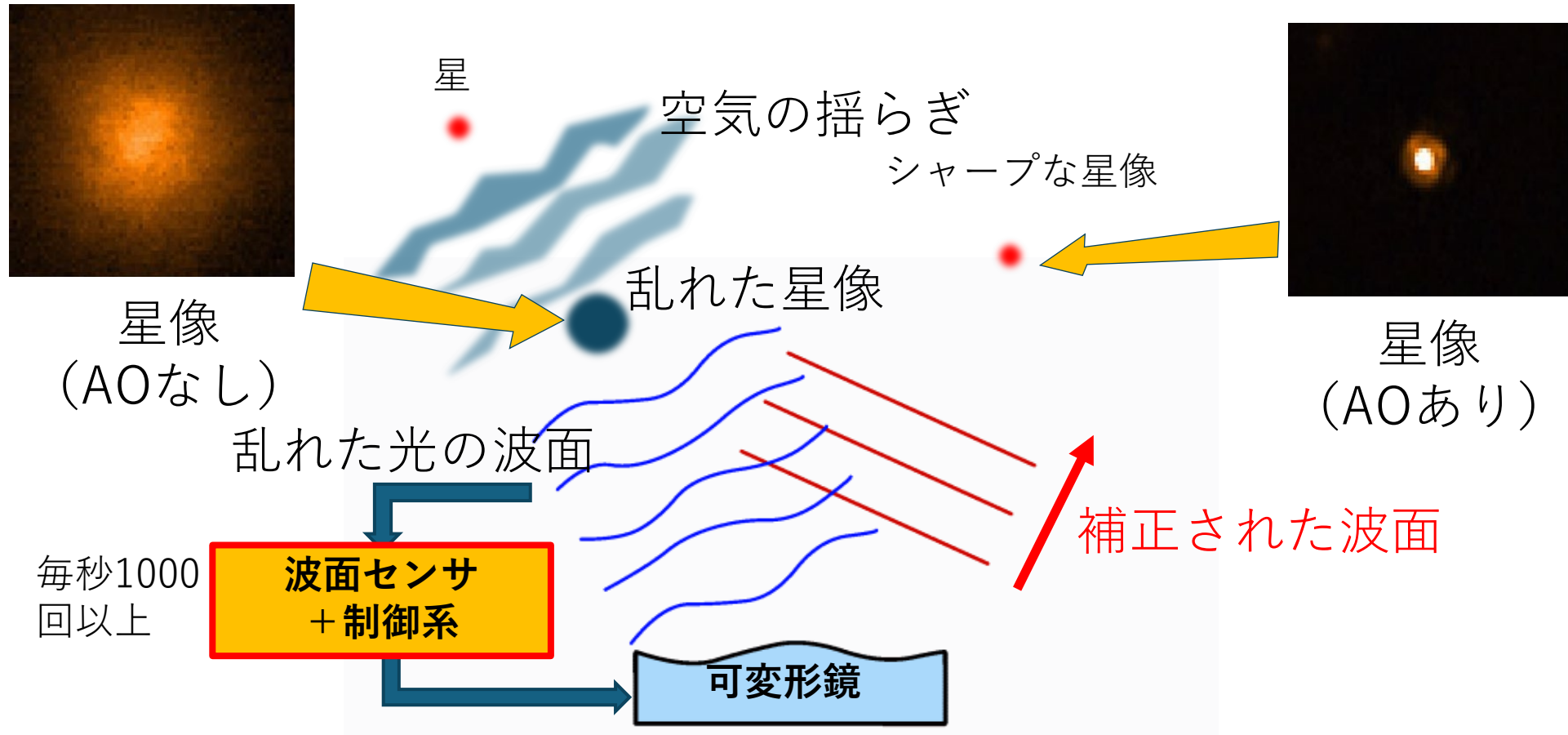
クレジット: Oliver Guyon

大気揺らぎで乱された星像 (Starfire Observatory, おそらく可視光)



クレジット Robert Fugate

この問題を解決する画期的な技術：補償光学



乱れた光の波面のズレを打ち消すように、可変形鏡の表面をミリ秒でサブミクロンの精度で凹凸させる。
(原理は、音波でいうとノイズキャンセレーションヘッドホンと同じ)

すばる望遠鏡・ナスミス焦点の補償光学装置

望遠鏡からの光



補償光学

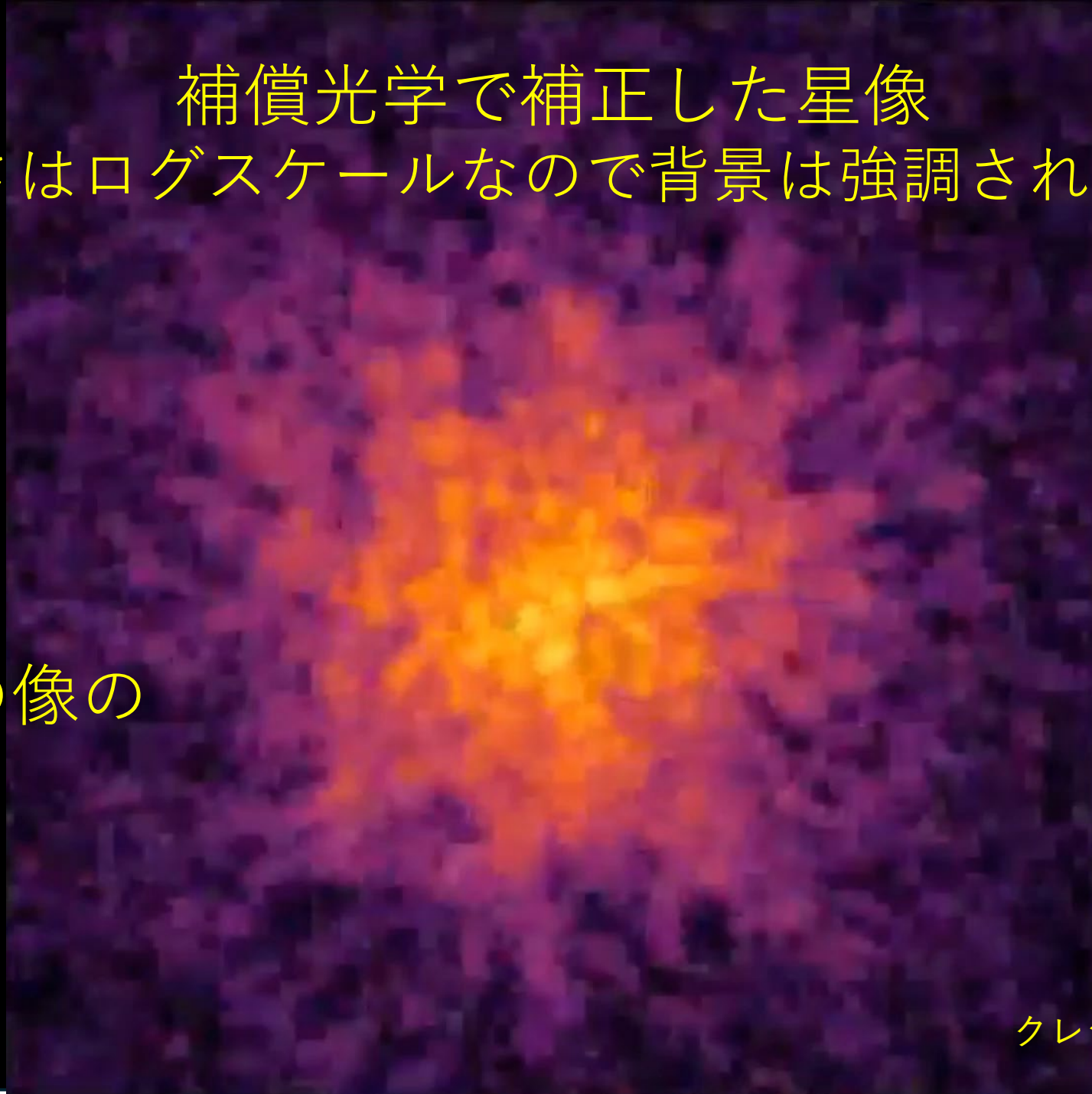
カメラ

2006年から、現在も改良を続けている。

クレジット: Oliver Guyon

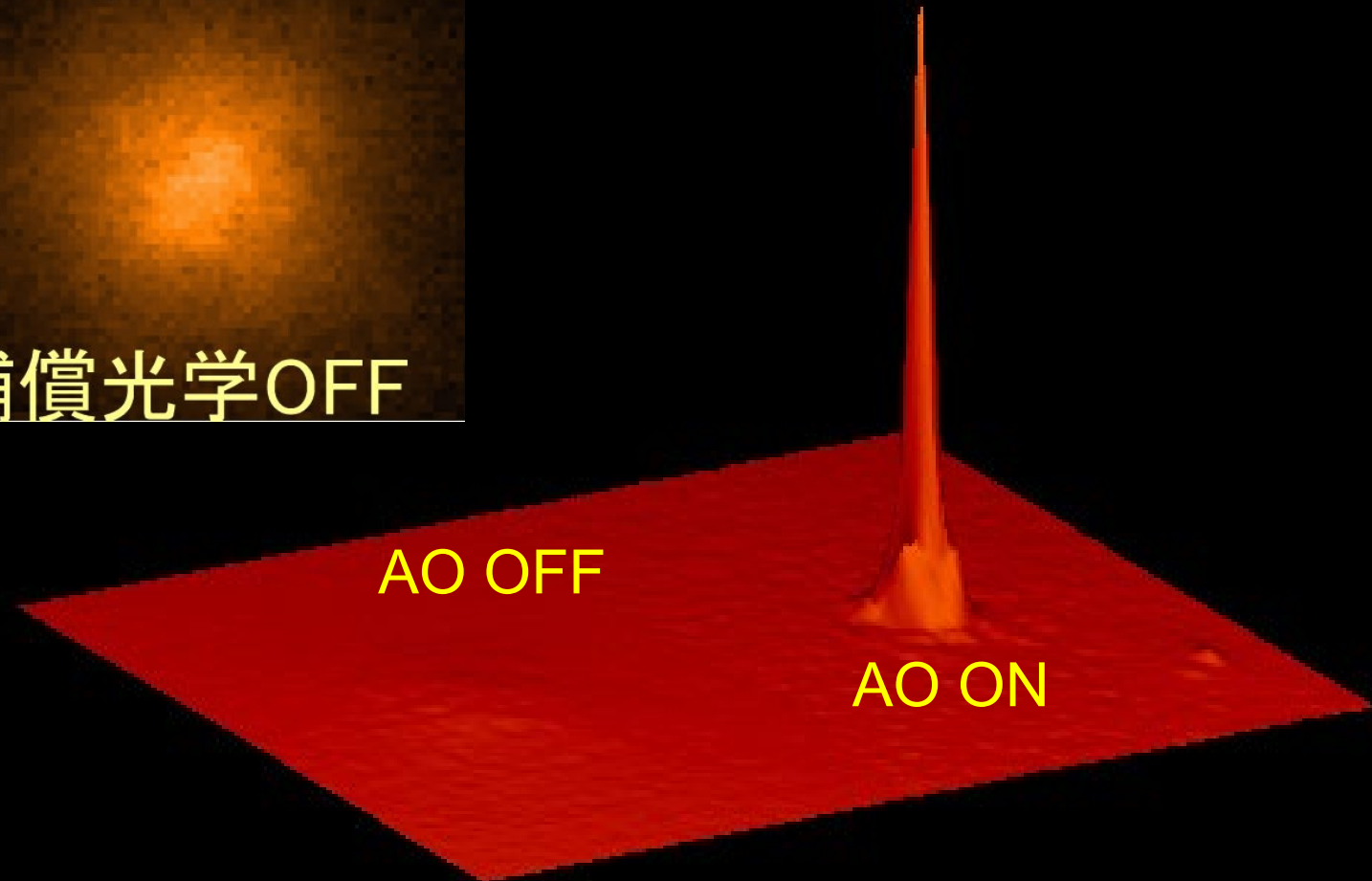
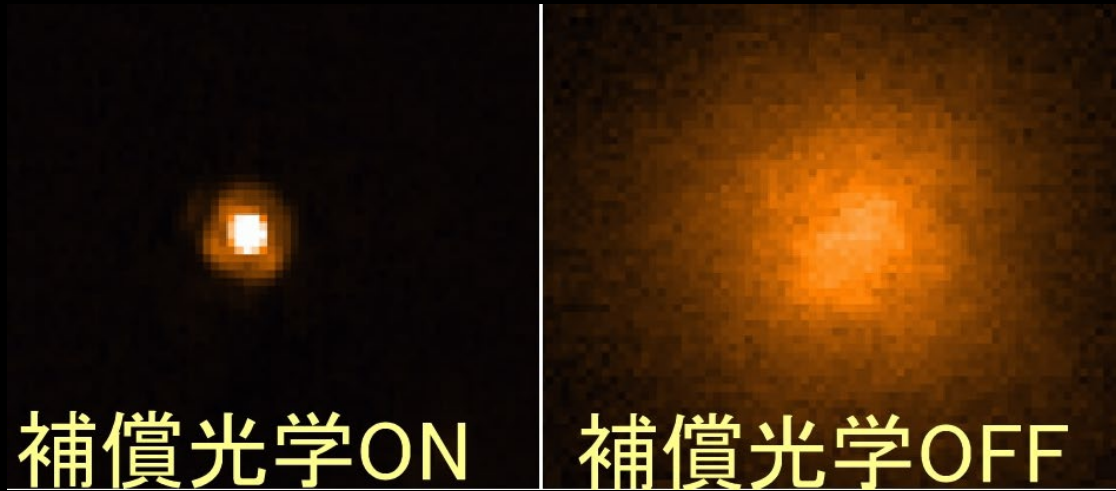
補償光学で補正した星像
(明るさはログスケールなので背景は強調されている)

●
回折限界の像の
大きさ



クレジット: Oliver Guyon

すばる望遠鏡補償光学による時間平均された補正像 (2006)



補償光学によるサイエンス



惑星

恒星

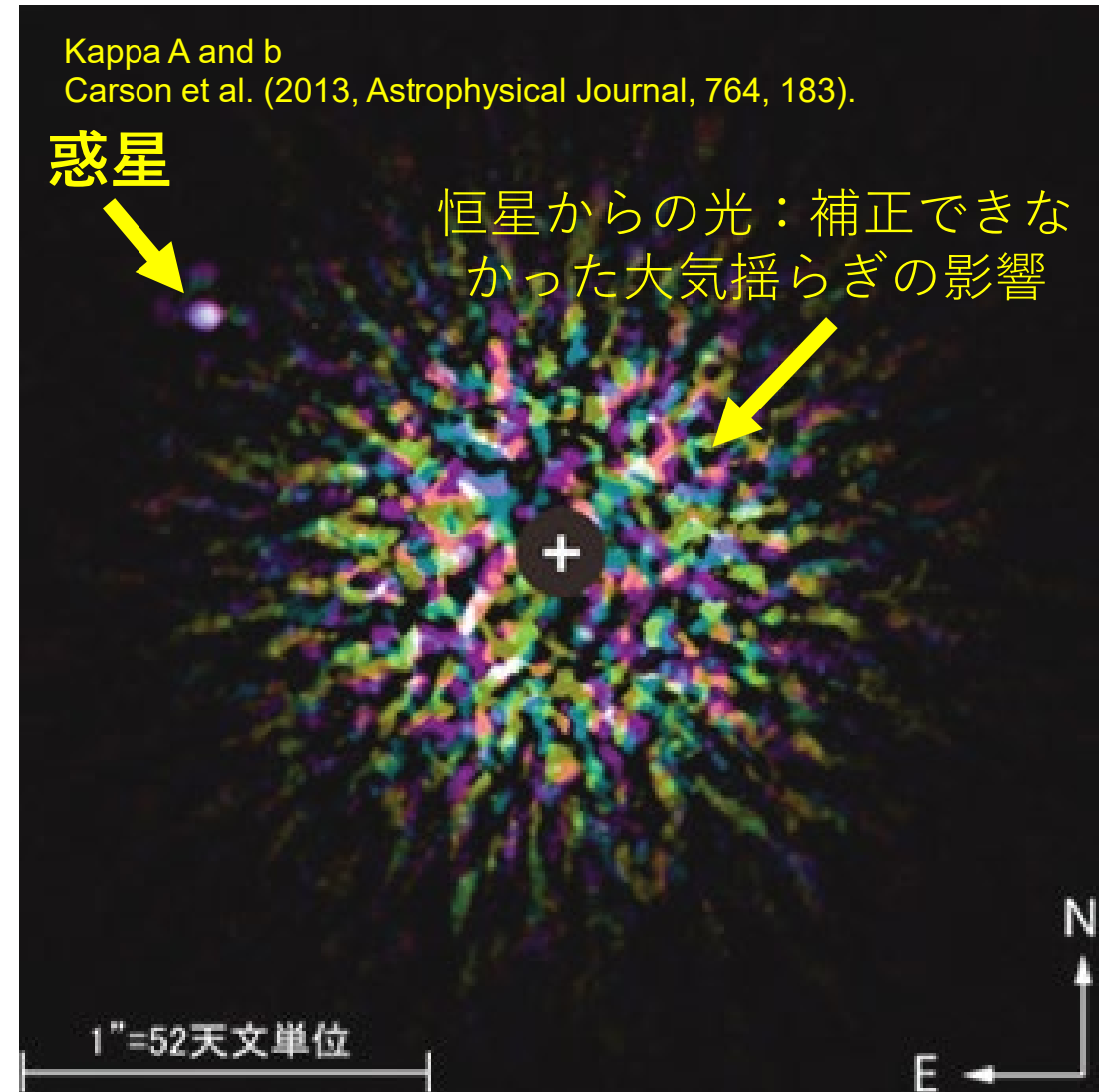
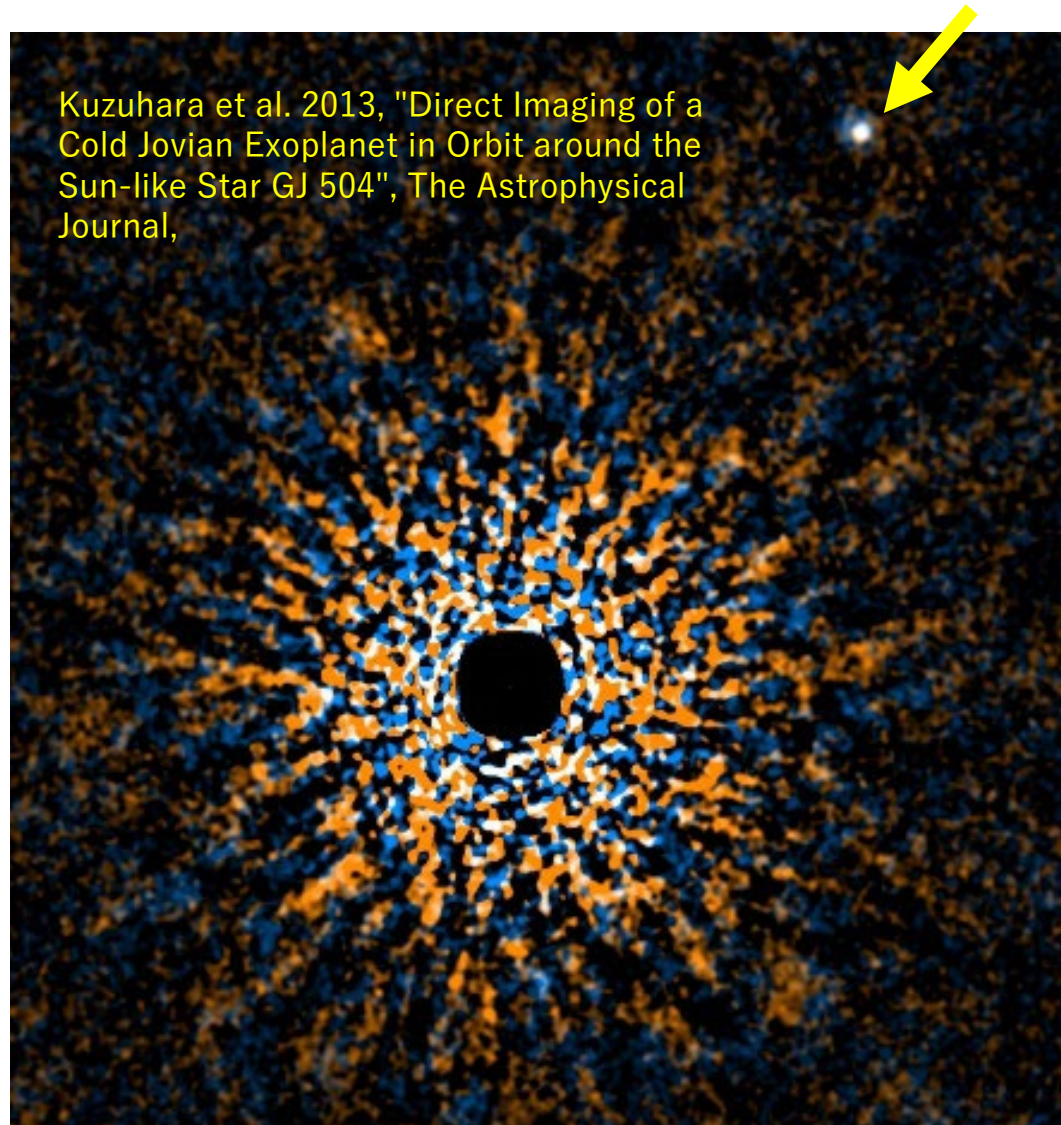
惑星

塵の円盤

太陽系外の惑星（想像図）

クレジット: 国立天文台

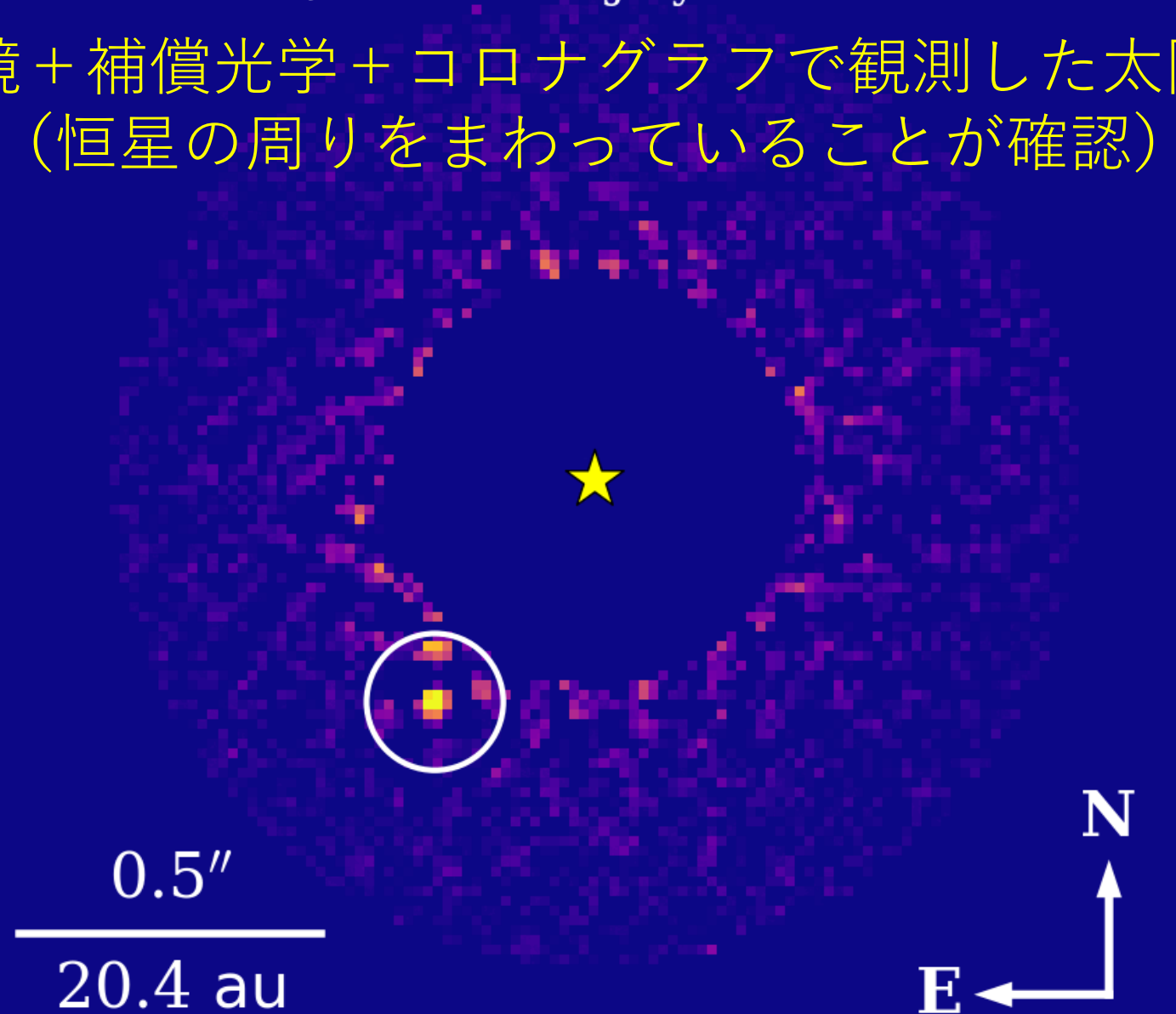
すばる望遠鏡が発見した太陽系外の惑星 (恒星からはかなり離れている、太陽－海王星の距離くらい)

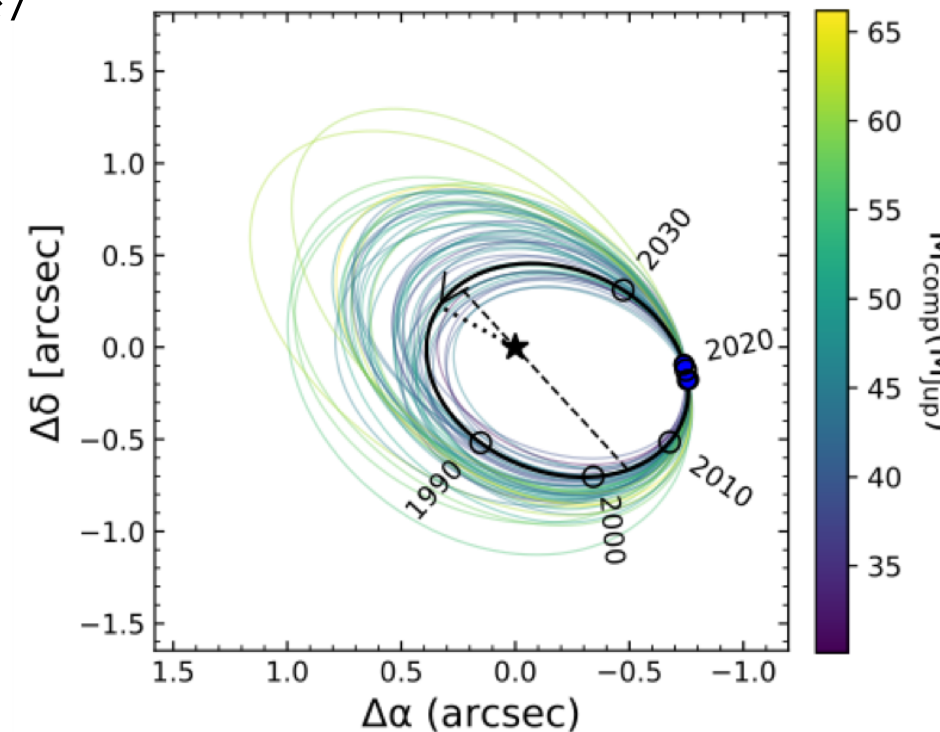
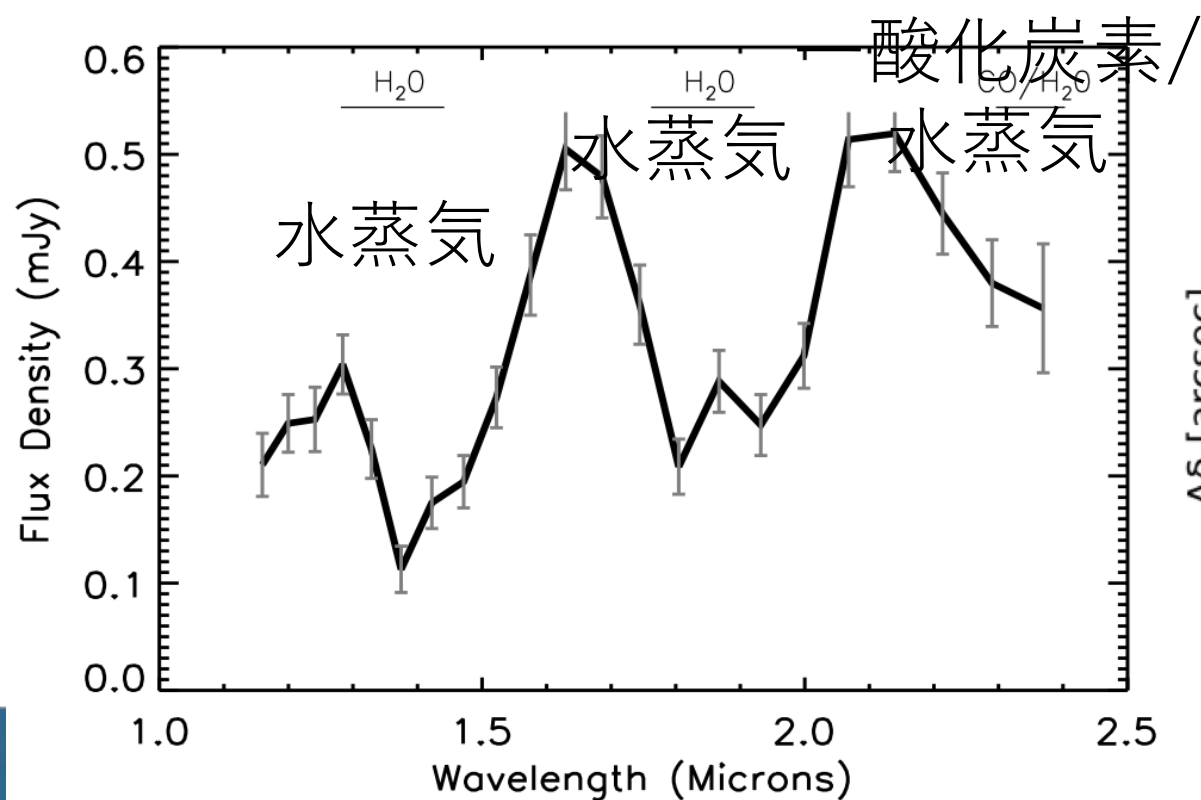


SCEXAO/CHARIS 29 July 2020

すばる望遠鏡＋補償光学＋コロナグラフで観測した太陽系外の惑星
(恒星の周りをまわっていることが確認)

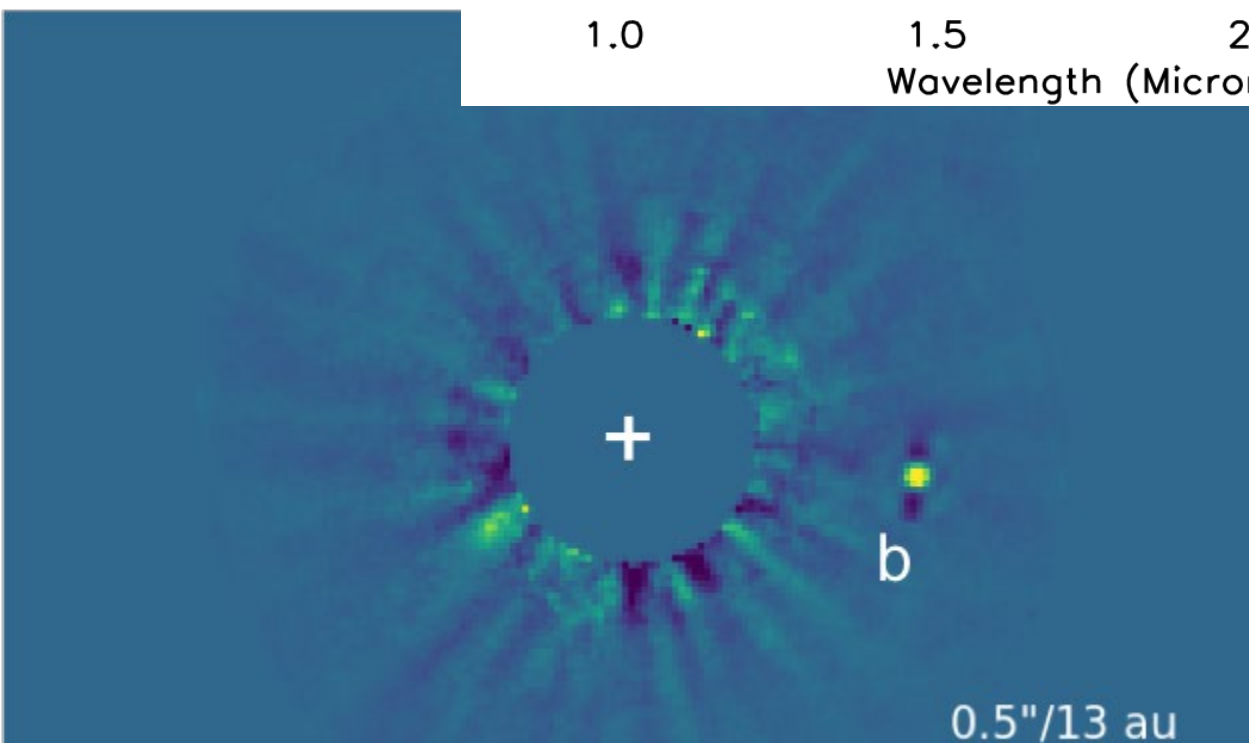
HIP 99770 b
Direct Imaging and
Astrometric Detection of a
Gas Giant Planet Orbiting an
Accelerating Star, Currie et
al. 2023





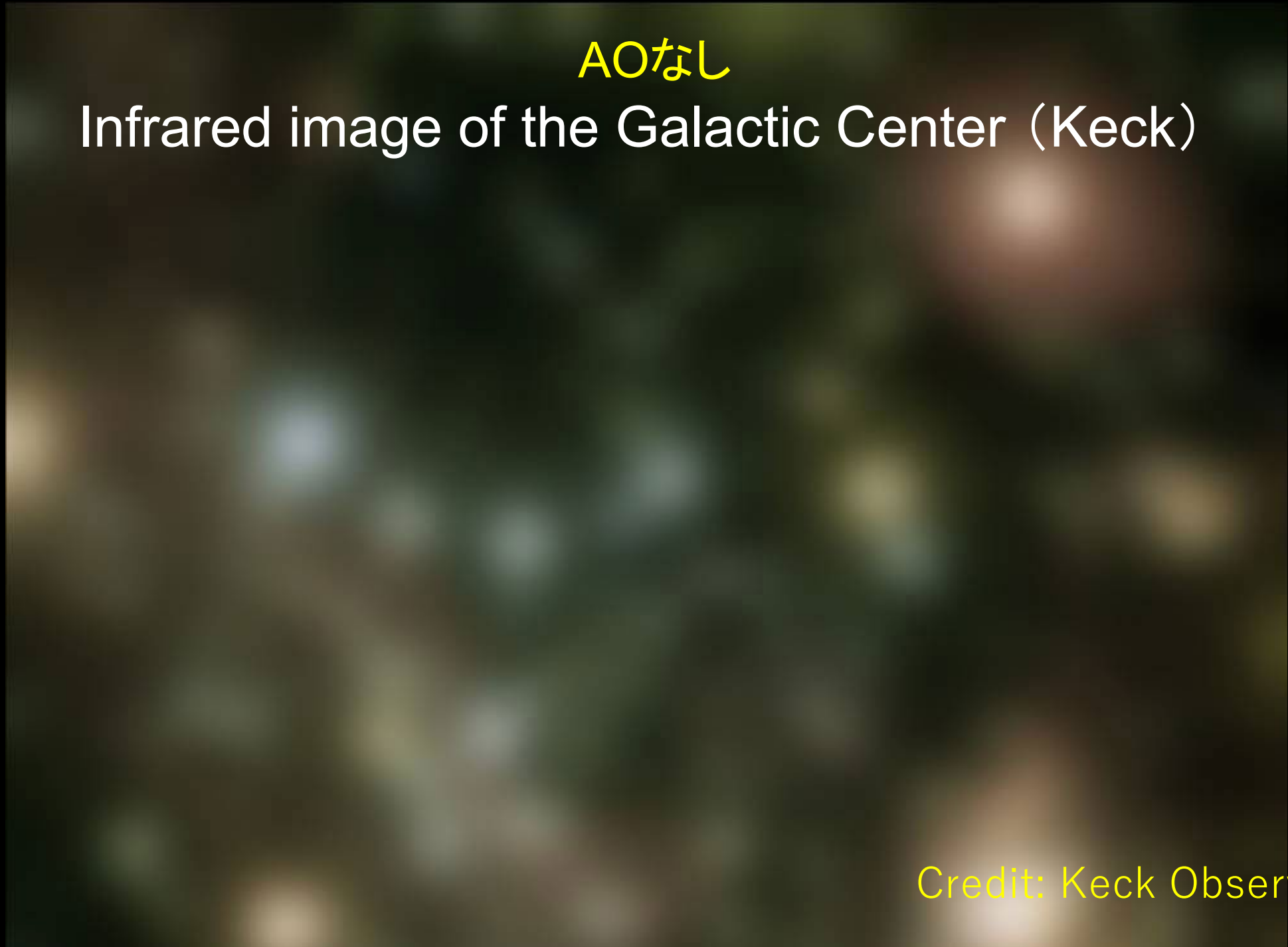
すばる望遠鏡＋補償光学系で
観測した系外惑星のスペクトルから、惑星に存在する気体がわかる

Currie, T. et al.
(2020)



AOなし

Infrared image of the Galactic Center (Keck)



Credit: Keck Observatory

AOあり

Credit: Keck

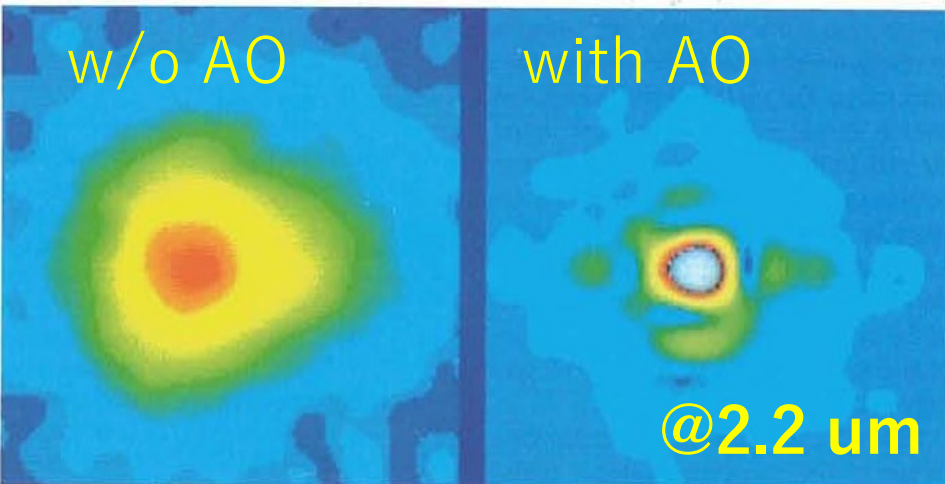
Infrared image of the Galactic Center (Keck)



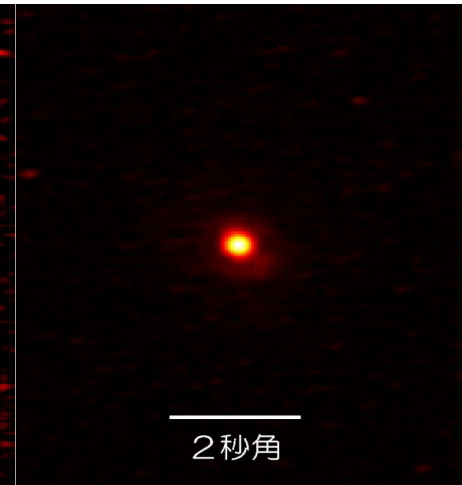
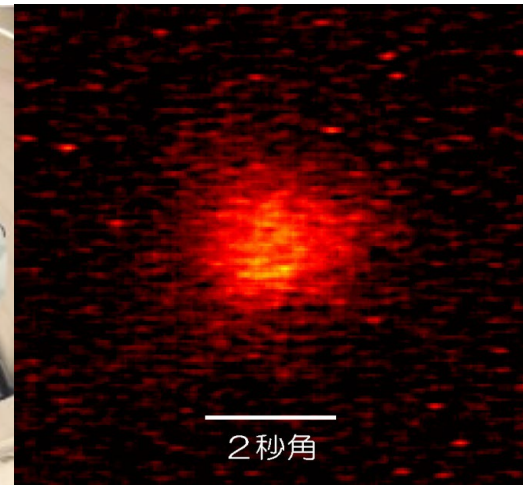
Penrose、Genzel、Ghez、が銀河中心BHの研究でノーベル賞受賞（AO観測）2020

AOの歴史

- 1953 Babcockが補償光学（AO）の概念を提案
- 1970～80年代：米軍が、人工衛星観測のためのAOシステムを開発（Hardy 達）
- 1989 ESOの3.6m望遠鏡で、初の天文学用AOシステムが稼働
- 1995 米軍の1.5m望遠鏡で、初のレーザーガイド星AO観測
- 1997 日本で初めての天文AO試験（国立天文台三鷹1.5m（現かなた望遠鏡））
- 2000 すばる望遠鏡の最初のAO36
- 2006 第二世代すばるAO188 => 2024 AO3000。 GLAO（開発中）
- 2020 Penrose、Genzel、Ghez、が銀河中心BHの研究でノーベル賞受賞（AO観測）



ESOによる初の天文AO（1989）

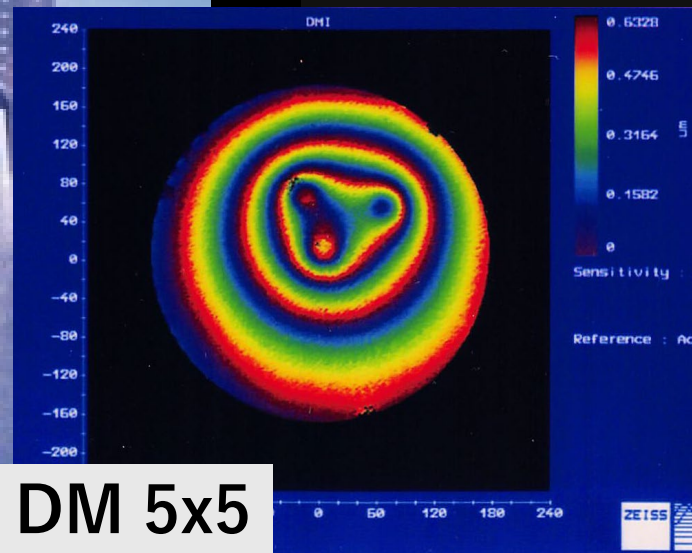


国立天文台による初の天文AO（1997）

メンブレン
DM 5x5

最初の実験室でのAO閉ループ
@CRL(現NICT) 1993 年

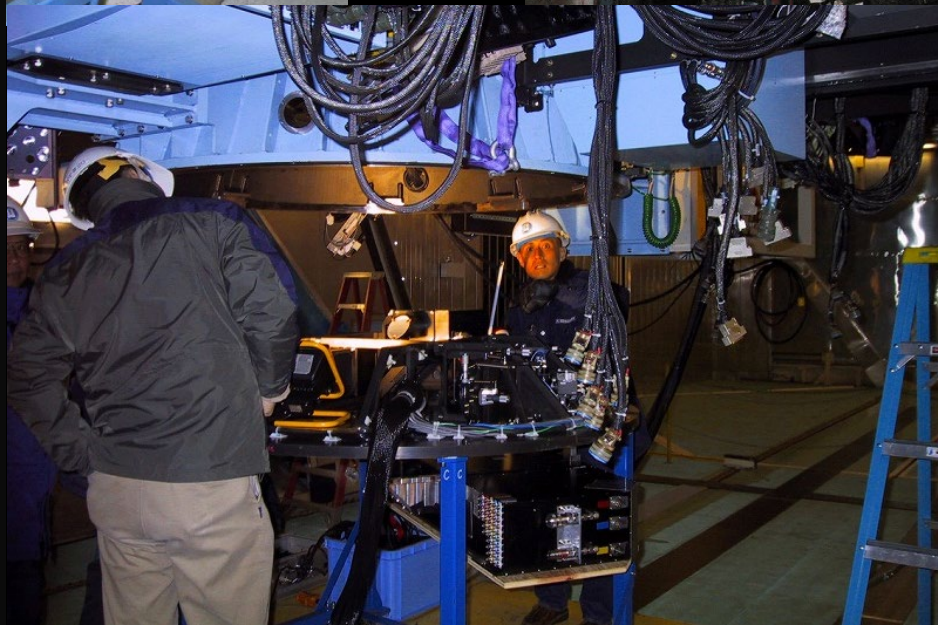
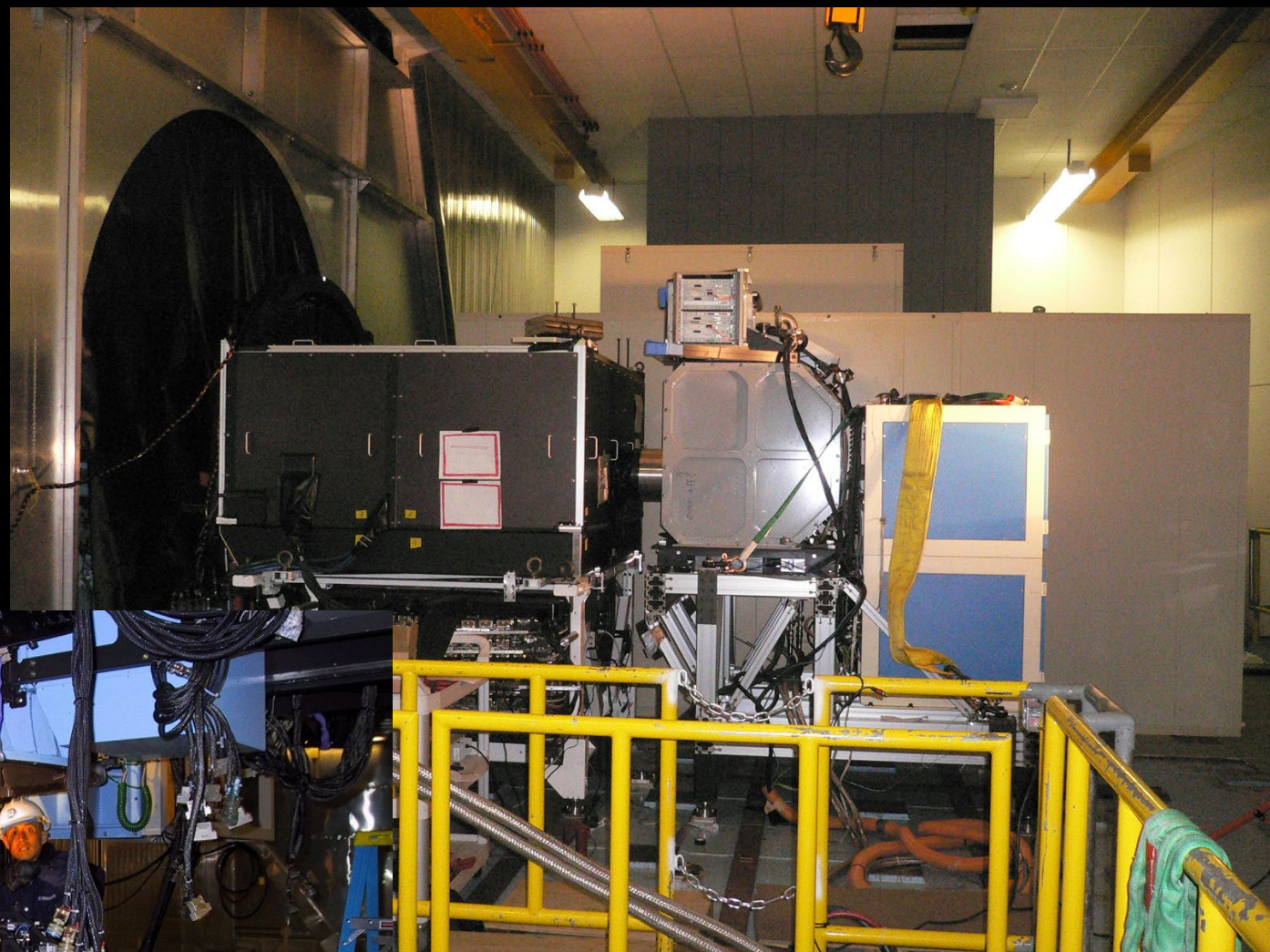
曲率WFS



第1世代すばるAO36(2000)

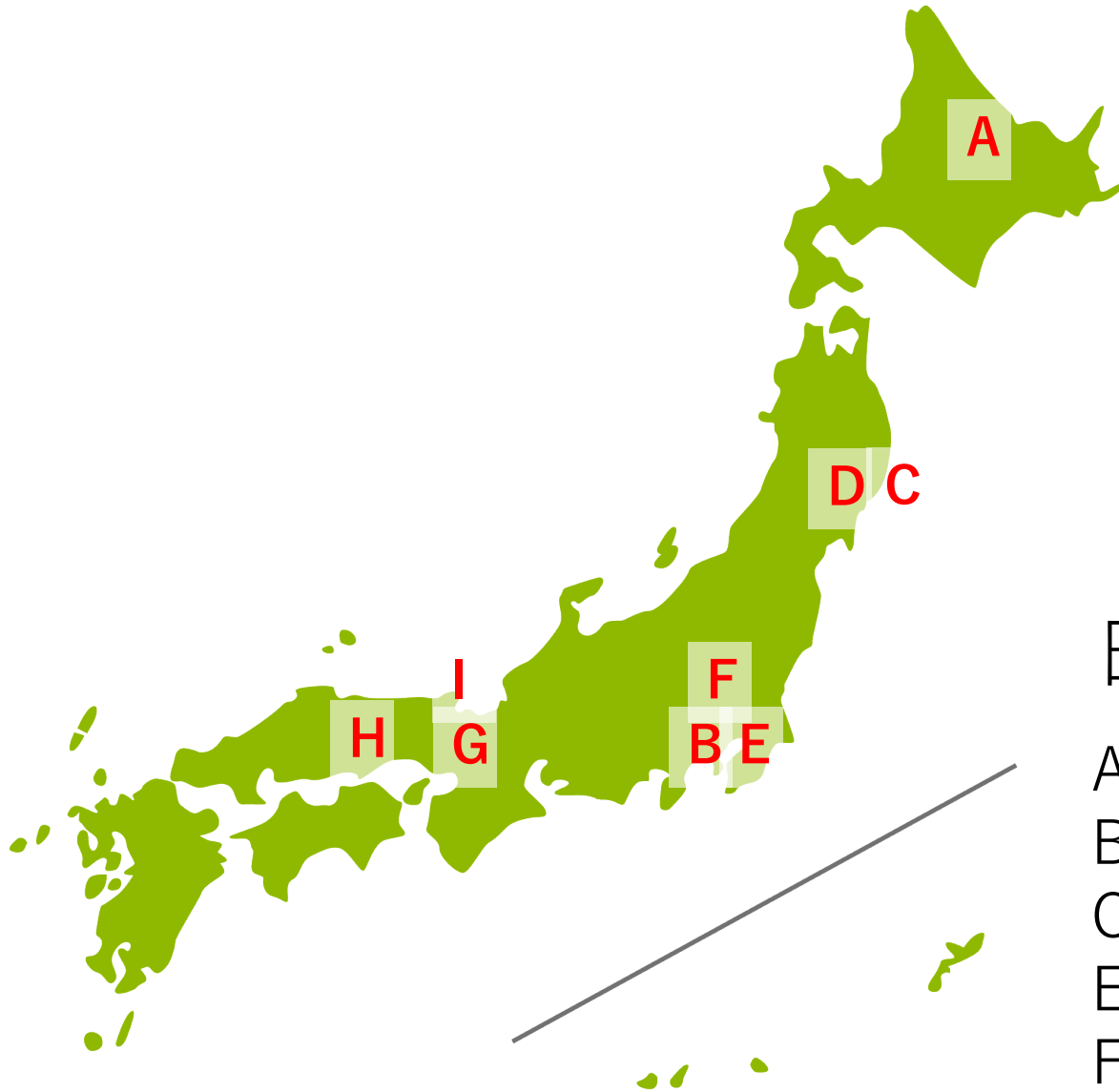
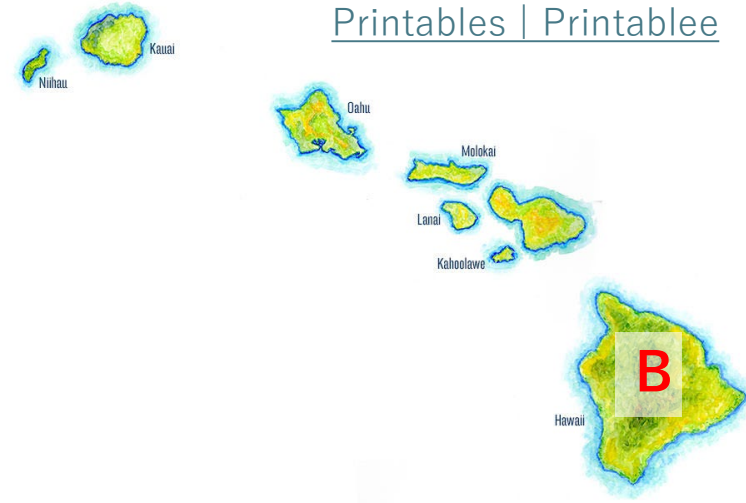


第2世代すばるAO188(2006~)



第二部

天文用補償光学システム開発の考え方
(特に、日本で使う場合)



日本の主な天文AO開発

- | | | |
|------|----------------|-------|
| A: | 北見工大 | 国内観測 |
| B: | 国立天文台(三鷹、ハワイ) | 海外 |
| C&D: | 東北大学 (天文、惑星科学) | 海外 |
| E: | NICT | 光通信 |
| F: | 東京大学 | 海外、国内 |
| G: | 京都大学・大阪電通大 | 国内 |
| H: | 岡山理科大 | 国内 |
| I: | 京都産業大学 | 国内 |

システムの最適化が補償光学を開発するカギ

○AOの原理はシンプルであるが、どのように作るべきかの選択は単純でない。

○システムの最適化が重要
観測地の環境（シーイング、風速、大気揺らぎの高さ分布）、望遠鏡の口径、目指す補正性能、科学的な目的（狭い視野で高性能、広い視野で補正など）、によって大きく変わる。

○誤差配分
波面誤差残差の配分の式から表される。それをもとに簡単な分析をすると、どのようなもの（可変形鏡、波面センサ、制御、サイズ、など）を作らないといけないかがわかる。考えは簡単。

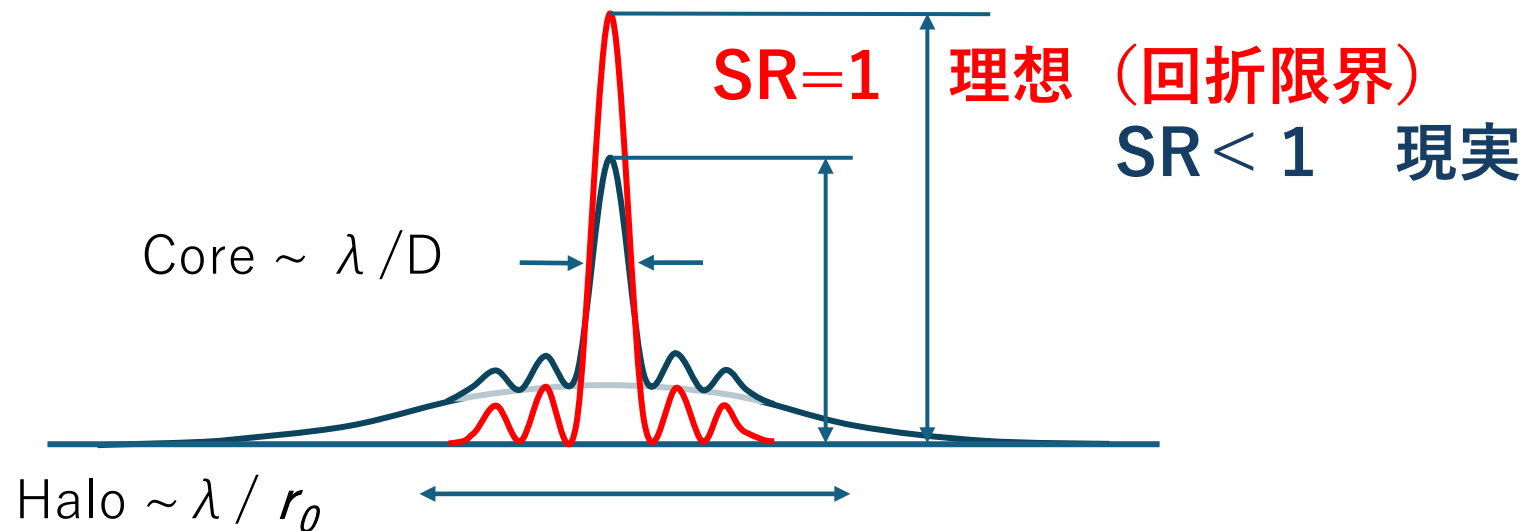
補償光学の性能ストレーリング比とは、波面誤差との関係

$$\text{Strehl ratio (SR)} = \exp(-\sigma_{total}^2) \sim 1 - \sigma_{total}^2$$

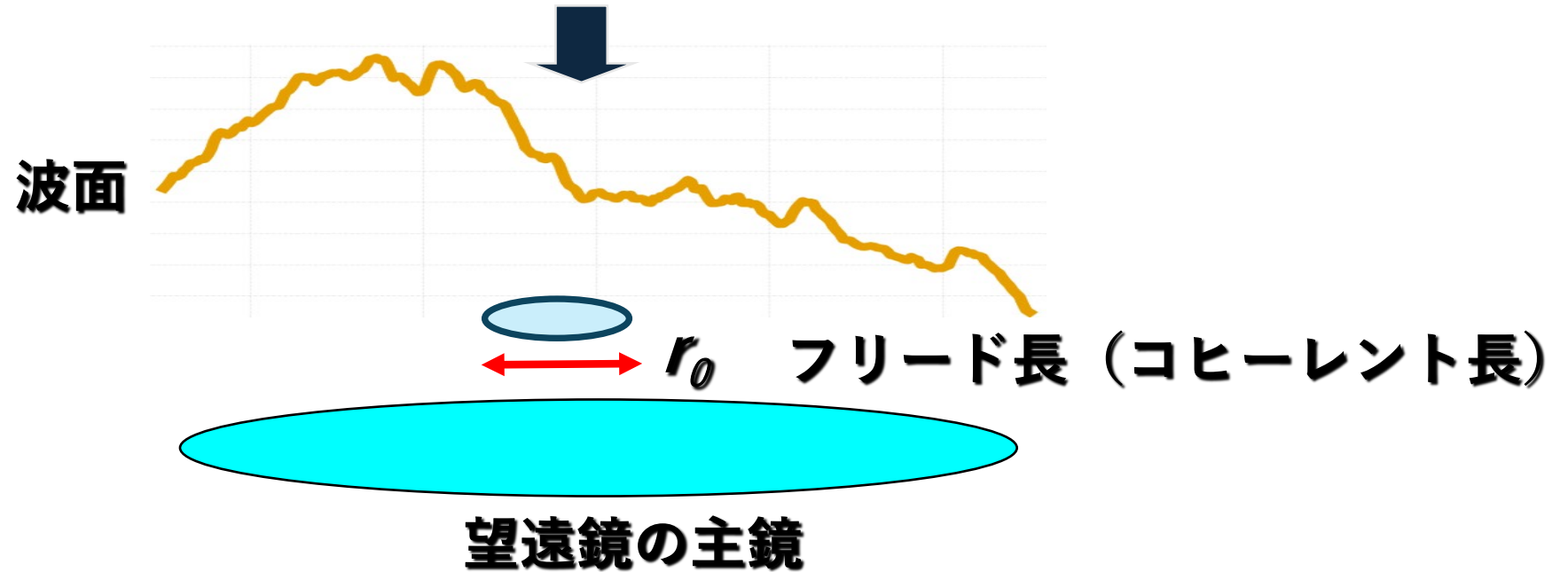
σ_{total}^2 全体の波面誤差 (rad^2 in rms) $\sigma_{total}^2 < 1$ の時に成り立つ

例: 波面誤差が 0.1λ (rms) $\times \frac{2\pi}{\lambda}$ のとき

$$\Rightarrow \sigma_{total}^2 = \left(\frac{2\pi}{10}\right)^2 = 0.39 \quad \Rightarrow \quad SR = 0.67 \quad (\text{かなり良い補正})$$



Fried長（コヒーレント長） r_0 とは



“Fried長” r_0 : は、その範囲内で波面揺らぎの大きさの自乗平均が 1 rad^2 になる大きさ

ちなみに、シーイング $\theta = \frac{\lambda}{r_0}$ $r_0 \sim \lambda^{6/5}$

AOの波面誤差は、いくつかの要素の足し合わせ

$$\sigma_{total}^2 = \sigma_{DM-fitting}^2 + \sigma_{WFS}^2 + \sigma_{temporal}^2 + \sigma_{anisoplanatism}^2 + \sigma_{others}^2$$

可変形鏡の素子数と
望遠鏡口径

波面センサの雑音

制御の時間遅れ

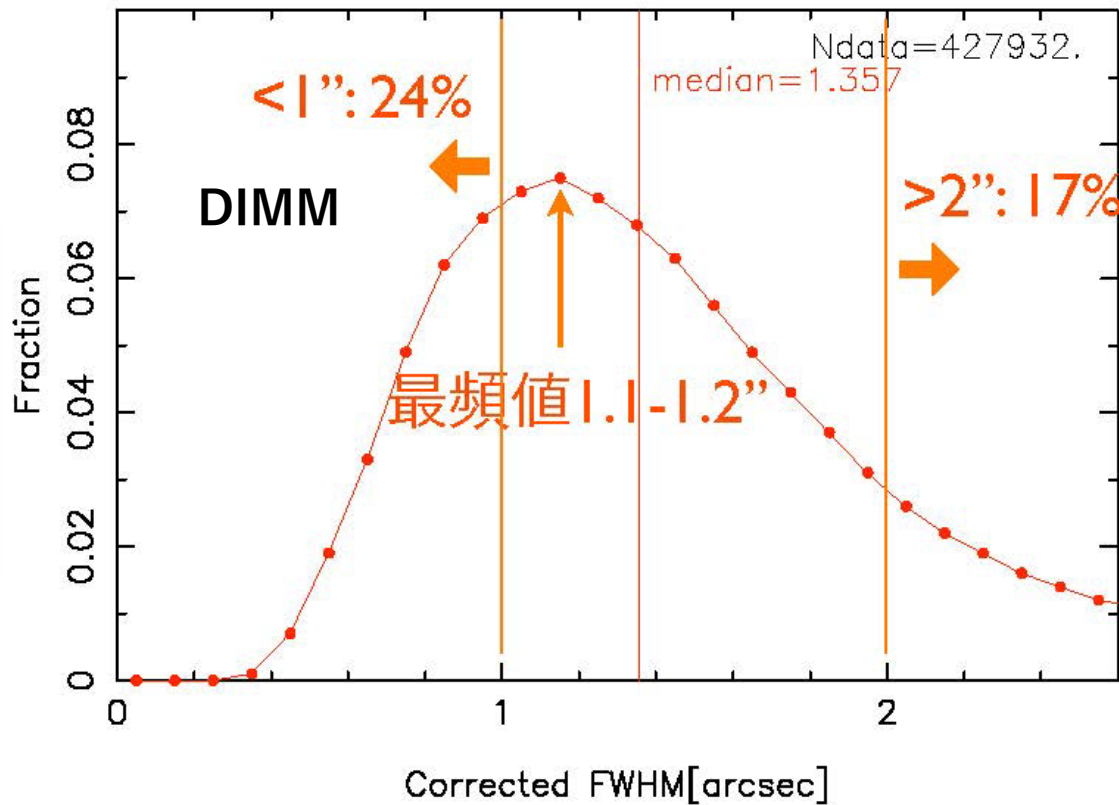
大気揺らぎの高さ

これを0.5程度以下にしたい

$$SR = \exp(-\sigma_{total}^2)$$

日本国内のシーイング

岡山観測所（浅口市）



岡山天体物理観測所のシーイング測定
2004/11-2005/10 by DIMM (measured
outside the dome)

木曾観測所（東京大学）

2-5 秒角 (Tarusawa 1998)
2.9 秒角 @R & I バンド (Minezaki 1998)
3.8 秒角 @R & I band (Nishiura 2002)

波長の定義: R (660nm)、I (805nm)

<http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/kisohp/RESEARCH/symp2005/Pdf/isogai.pdf>

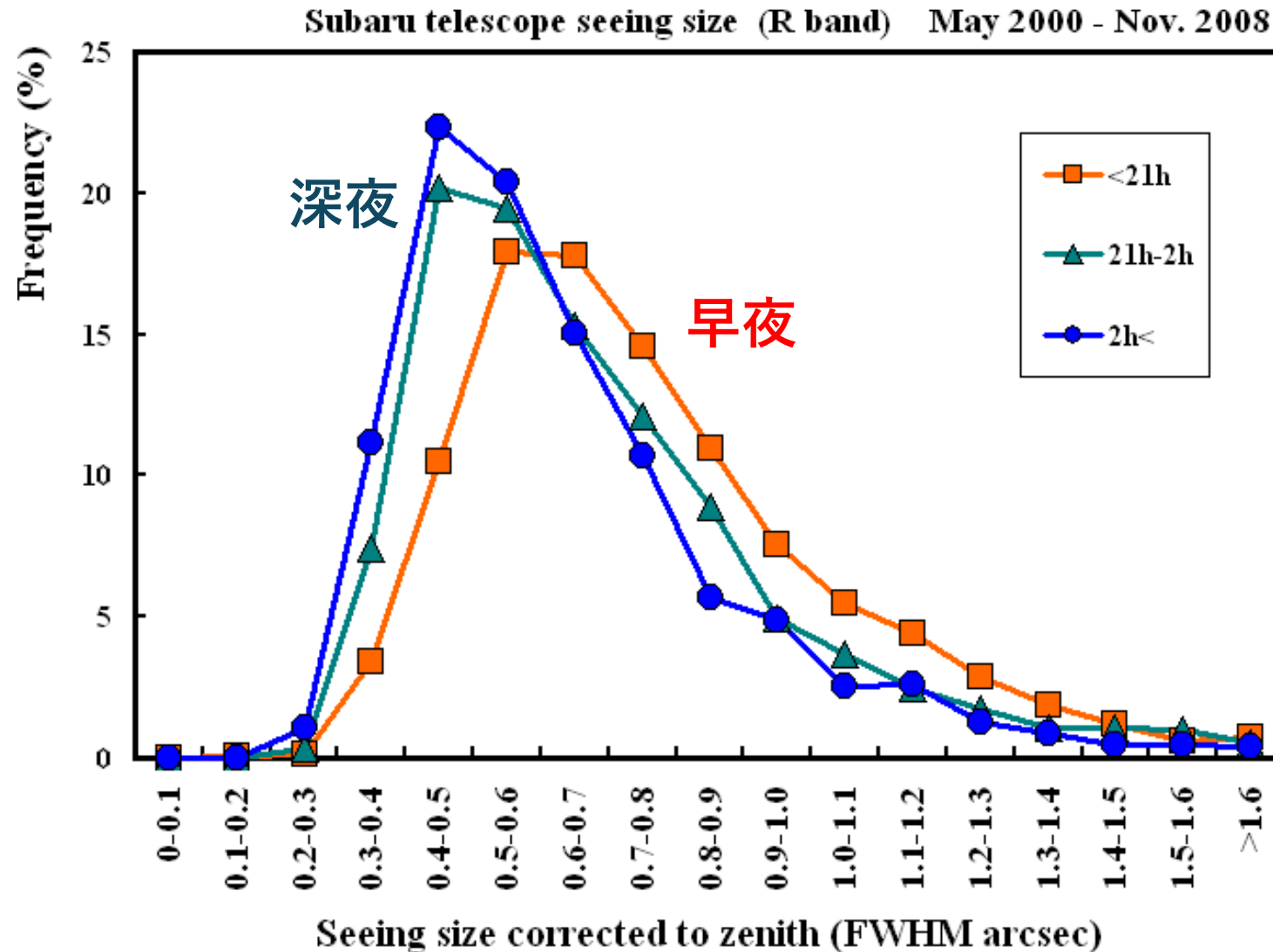
シーイング1.2秒角のとき

$r_0 =$

10cm @600nm

30cm @1.6 μ m

マウナケア山のシーイング

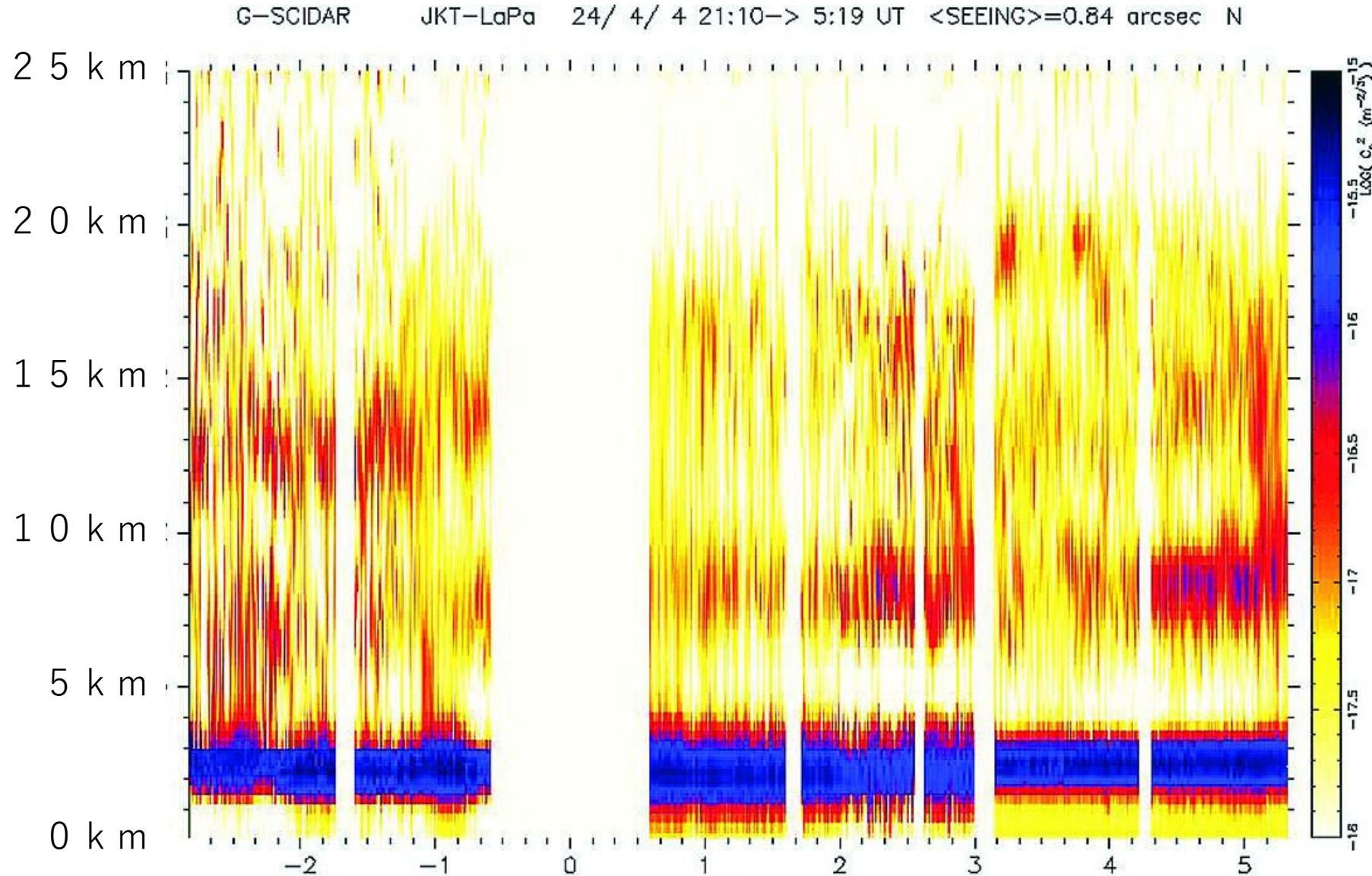


世界的な好適地の一つ。

時間帯によっても変動する
(夜になると地面、ドーム
内が冷えて揺らぎが減る)

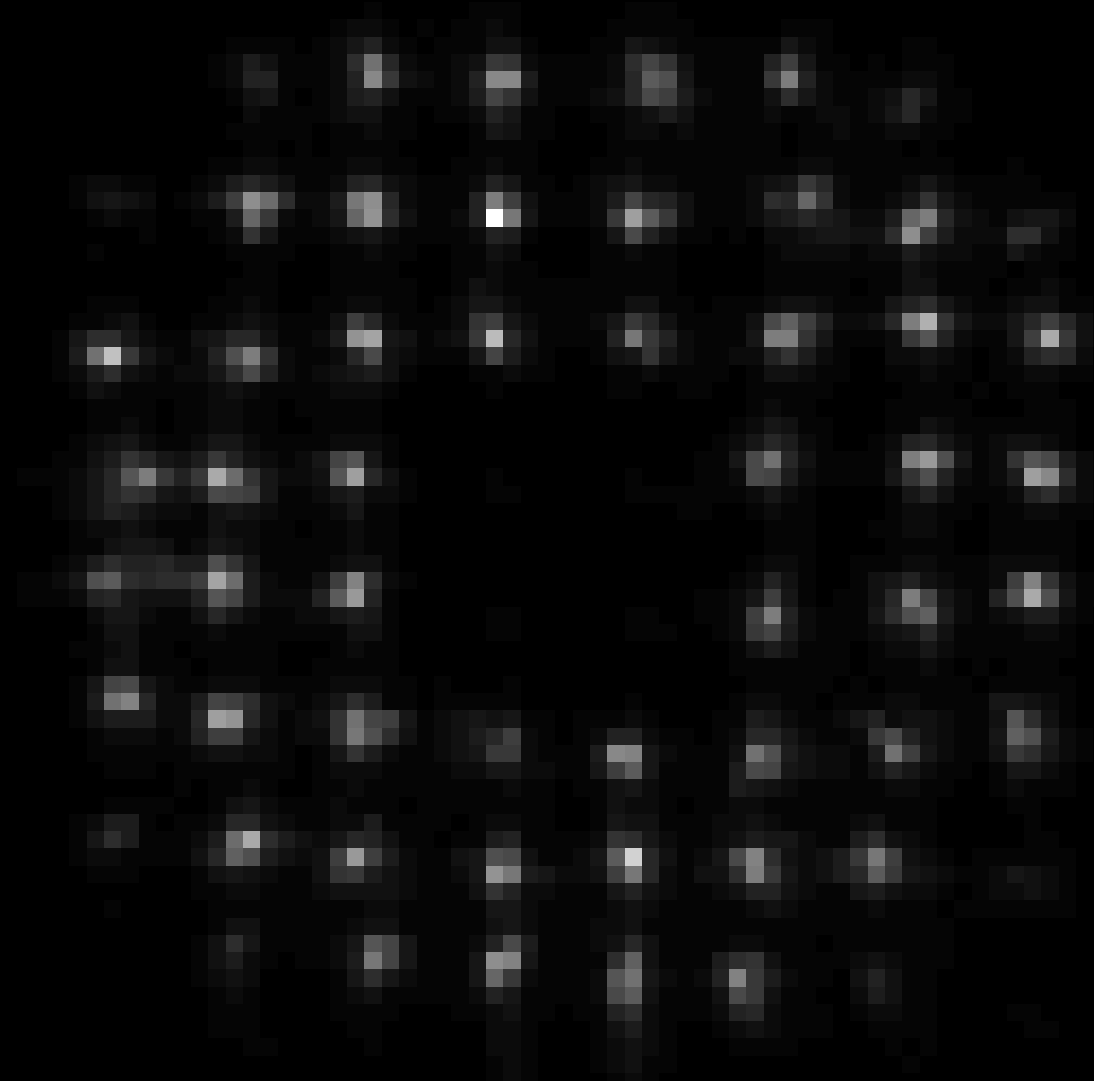
大気揺らぎの高さプロファイルの例

低層が強いが、高層も寄与しており、時間変化がある



cute-SCIDAR group, J. J.
Fuensalida, PI

シャックハルトマンセンサの実際の信号の例



Credit: Cyril Cavadore

AOの波面誤差は、いくつかの要素の足し合わせ

$$\sigma_{total}^2 = \sigma_{DM-fitting}^2 + \sigma_{WFS}^2 + \sigma_{temporal}^2 + \sigma_{anisoplanatism}^2 + \sigma_{others}^2$$

可変形鏡の素子数と
望遠鏡口径

波面センサの雑音

制御の時間遅れ 大気揺らぎの高さ

0.5程度以下にしたい

$$SR = \exp(-\sigma_{total}^2)$$

全体で0.5以下を狙うと回折限界の像が得られる。そのためには、それぞれを0.1以下程度にする。バランスをとる。

高見が最初にAOを作ったときには、できていなかった。

では、日本での数字を入れるとどうなるか

○望遠鏡口径 D : 1~3.8m くらい

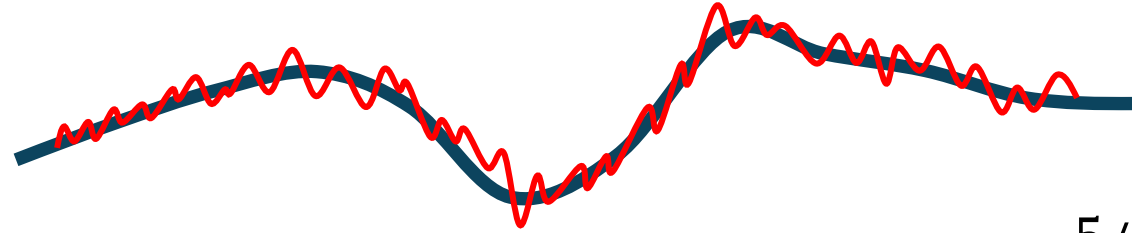
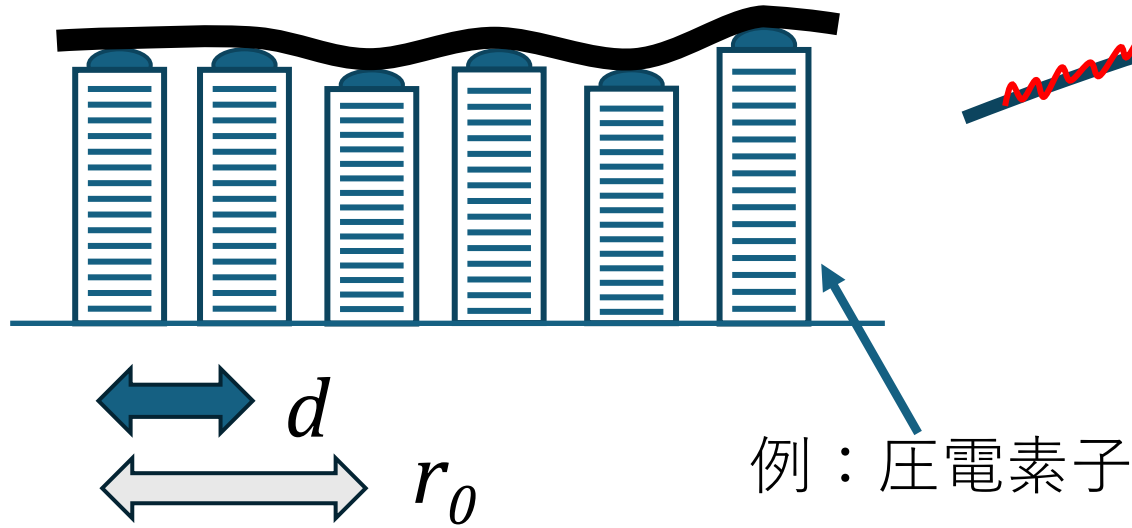
○コヒーレント長 r_0 : 岡山での条件
可視10cm (600nm、1.2秒角シーイング相当)
赤外30cm (1.6 μ m)

○風速 v : 10m/sec (変化が大きい、低層と高層で異なる。気象庁データ参照)

○揺らぎ層の高さ 数km (低層と高層の平均)

可変形鏡のフィッティング誤差

なめらかな表面の鏡



$$\sigma_{DM-fitting}^2 = a_F \left(\frac{d}{r_0} \right)^{5/3} \quad a_F = 0.28$$

d: 可変形鏡素子間隔

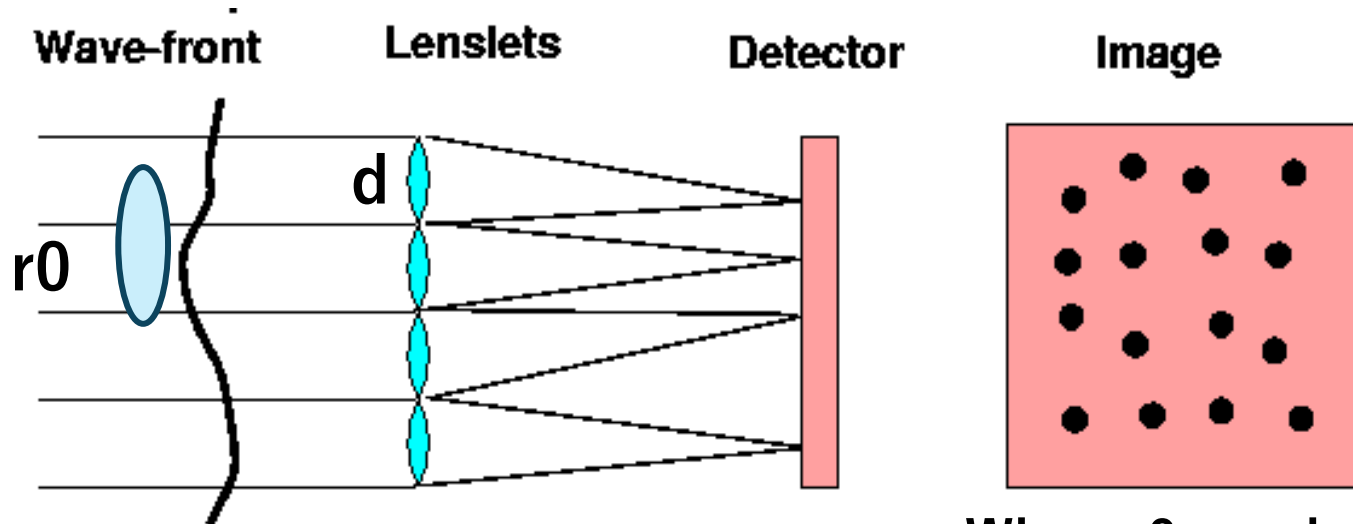
Hardy 1998

$$\sigma_{total}^2 = \sigma_{DM-fitting}^2 + \sigma_{WFS}^2 + \sigma_{temporal}^2 + \sigma_{anisoplanatism}^2 + \sigma_{others}^2$$

$\sigma_{DM-fitting}^2 < 0.1$ を目指すと $\Rightarrow d < 0.53 r_0$ が必要。

口径1m、 $r_0 = 10\text{cm}$ のとき、DMは19x19素子以上が必要。

シャックハルトマン波面センサの誤差



When $r_0 \gg d$, image size θ is λ/d

$$\sigma_{\text{res,noise}}^2 = \alpha \frac{f_{\text{bw}}}{f_{\text{samp}}} \left(\frac{\lambda_{\text{wfs}}}{\lambda_{\text{sci}}} \right)^2 \frac{1}{\text{SNR}^2}$$

Bello et al. (2003) A&A 410

$$\sigma_{\text{total}}^2 = \sigma_{\text{DM-fitting}}^2 + \sigma_{\text{WFS}}^2 + \sigma_{\text{temporal}}^2 + \sigma_{\text{aisoplanatism}}^2 + \sigma_{\text{others}}^2$$

波面センサの誤差は基本的には測定のスNR（読み出し雑音、フォトン雑音）で決まる。
 ⇒ ガイド星の等級の超概算 可視AO 6-8等星、赤外AO 11-14等星

天体



時間遅れ Time delay

現実に必要な制御周期は
 $< 0.2 \tau_0$ くらい

$$\sigma_{time\ delay}^2 = \left(\frac{\tau_{delay}}{\tau_0} \right)^{5/3}$$

< 0.1 を目指す

$$\tau_0 = 0.314 \frac{r_0}{v}$$

Hardy 1998

大気揺らぎ

補正の時間遅れ

風速 v (m/s)

望遠鏡

$r_0=10\text{cm}$ 、 10m/s のとき $\Rightarrow 1.6\text{kHz}$ 以上の制御周期が必要

$$\sigma_{total}^2 = \sigma_{DM-fitting}^2 + \sigma_{WFS}^2 + \sigma_{temporal}^2 + \sigma_{anisoplanatism}^2 + \sigma_{others}^2$$

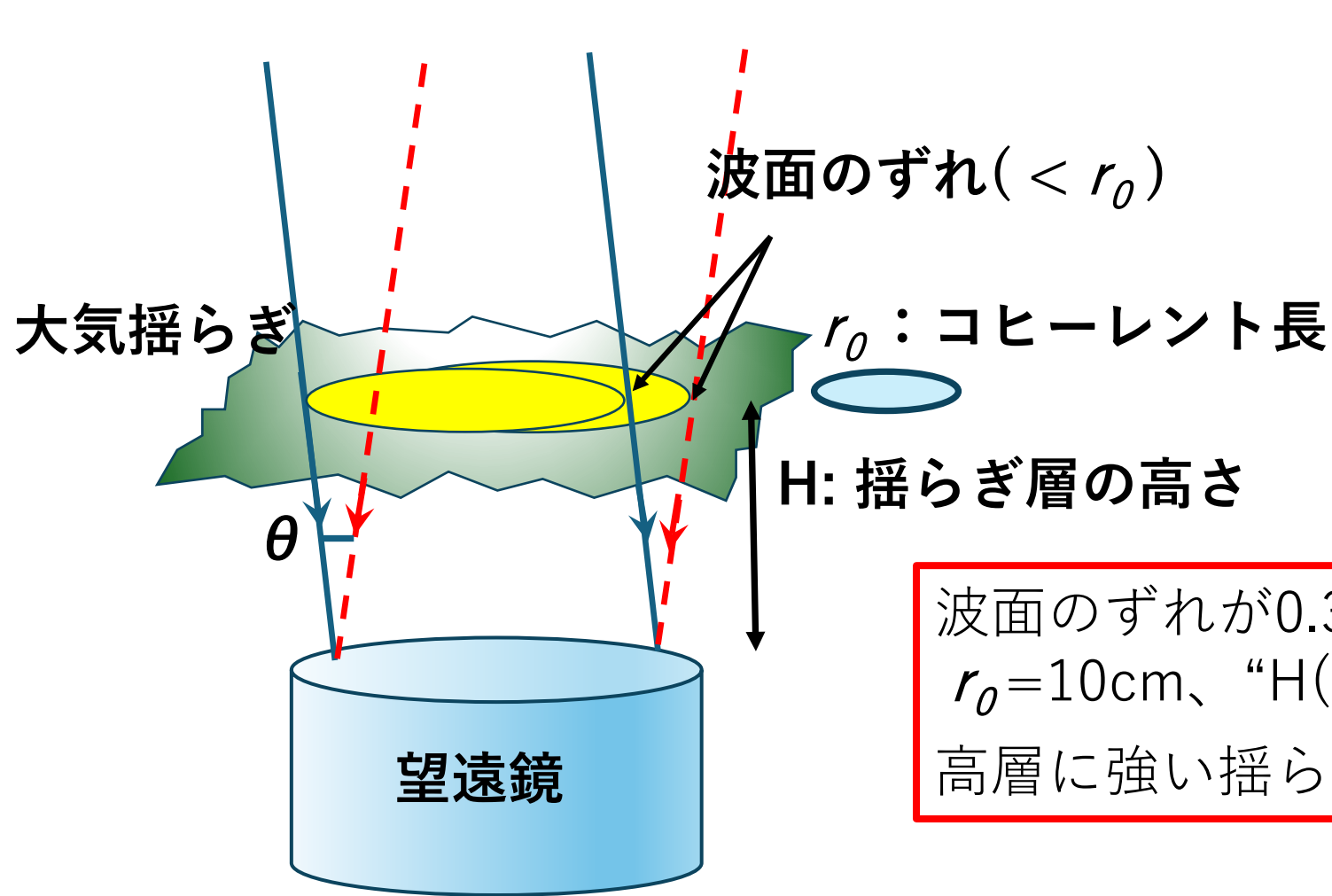
天体



ガイド星



アイソプラナティズム Anisoplanatism



$$\sigma_{anisoplanatism}^2 = \left(\frac{\theta}{\theta_0} \right)^{5/3}$$
$$\theta_0 = 0.314 \frac{r_0}{H} \quad \text{Hardy 1998}$$

波面のずれが $0.314 r_0$ になると、 $\sigma^2 = 1$ になる
 $r_0 = 10\text{cm}$ 、 H (平均) 3km $\Rightarrow \theta_0 = 2.2$ 秒角
高層に強い揺らぎがあると補正できる視野が狭い

36

$$\sigma_{total}^2 = \sigma_{DM-fitting}^2 + \sigma_{WFS}^2 + \sigma_{temporal}^2 + \sigma_{anisoplanatism}^2 + \sigma_{others}^2$$

日本の風速の高さ分布 はどうか

気象庁 過去の気象データ
の検索 (高層) 

冬 2025/1/1@館野
低層は10m/s
高層(200hPa~12km) は
70-80m/s

https://www.data.jma.go.jp/stats/etrn/upper/view/hourly_ust.php?year=2025&month=7&day=1&hour=9&atm=&point=47646&view=

【館野 2025年1月1日9時】

圧(hPa)	高度(m)	気温(℃)	相対湿度(%)	風速(m/s)	風向(°)
1013.3	26	5.9	46	1.5	280

指定気圧面

気圧(hPa)	ジオポテンシャル 高度(m)	気温(℃)	相対湿度(%)	風速(m/s)	風向(°)
1000	134	4.2	44	5	301
925	762	-0.2	51	14	292
900	981	-1.5	47	11	302
850	1432	-5.1	49	4	273
800	1906	-7.9	41	8	331
700	2937	-11.6	23	23	300
600	4114	-14.6	10	29	291
500	5471	-24.4	11	34	287
400	7056	-36.2	7	44	283
350	7973	-39.4	///	52	282
300	9031	-39.8	///	61	277
250	10271	-39.1	///	78	282
200	11794	-42.3	///	79	282
175	12688	-44.9	///	69	285
150	13703	-51.2	///	68	282
125	14880	-54.0	///	59	288
100	16288	-59.8	///	44	284

日本の風速の高さ分布 はどうか

気象庁 過去の気象データ
の検索 (高層)

夏 2025/7/1@館野
低層は数m/s
高層(200hPa~12km) は
11-13m/s

https://www.data.jma.go.jp/stats/etrn/upper/view/hourly_ustp.php?year=2025&month=7&day=1&hour=9&atm=&point=47646&view=

【野 2025年7月1日9時】

圧(hPa)	高度(m)	気温(℃)	相対湿度(%)	風速(m/s)	風向(°)
1011.4	26	27.9	81	1.5	240

指定気圧面

気圧(hPa)	ジオポテンシャル 高度(m)	気温(℃)	相対湿度(%)	風速(m/s)	風向(°)
1000	127	26.3	84	2	203
925	811	21.1	95	4	228
900	1048	21.4	62	4	220
850	1546	20.6	63	4	234
800	2068	16.6	80	5	273
700	3190	9.2	77	8	323
600	4455	3.2	47	12	314
500	5910	-5.5	65	10	318
400	7622	-17.2	66	12	314
350	8613	-23.7	53	12	309
300	9715	-32.1	68	11	315
250	10976	-41.9	///	13	305
200	12446	-54.0	///	11	288
175	13287	-60.7	///	11	287
150	14234	-65.1	///	15	306
125	15340	-67.8	///	13	334
100	16682	-69.8	///	5	339

ホーム

防災情報

各種データ・資料

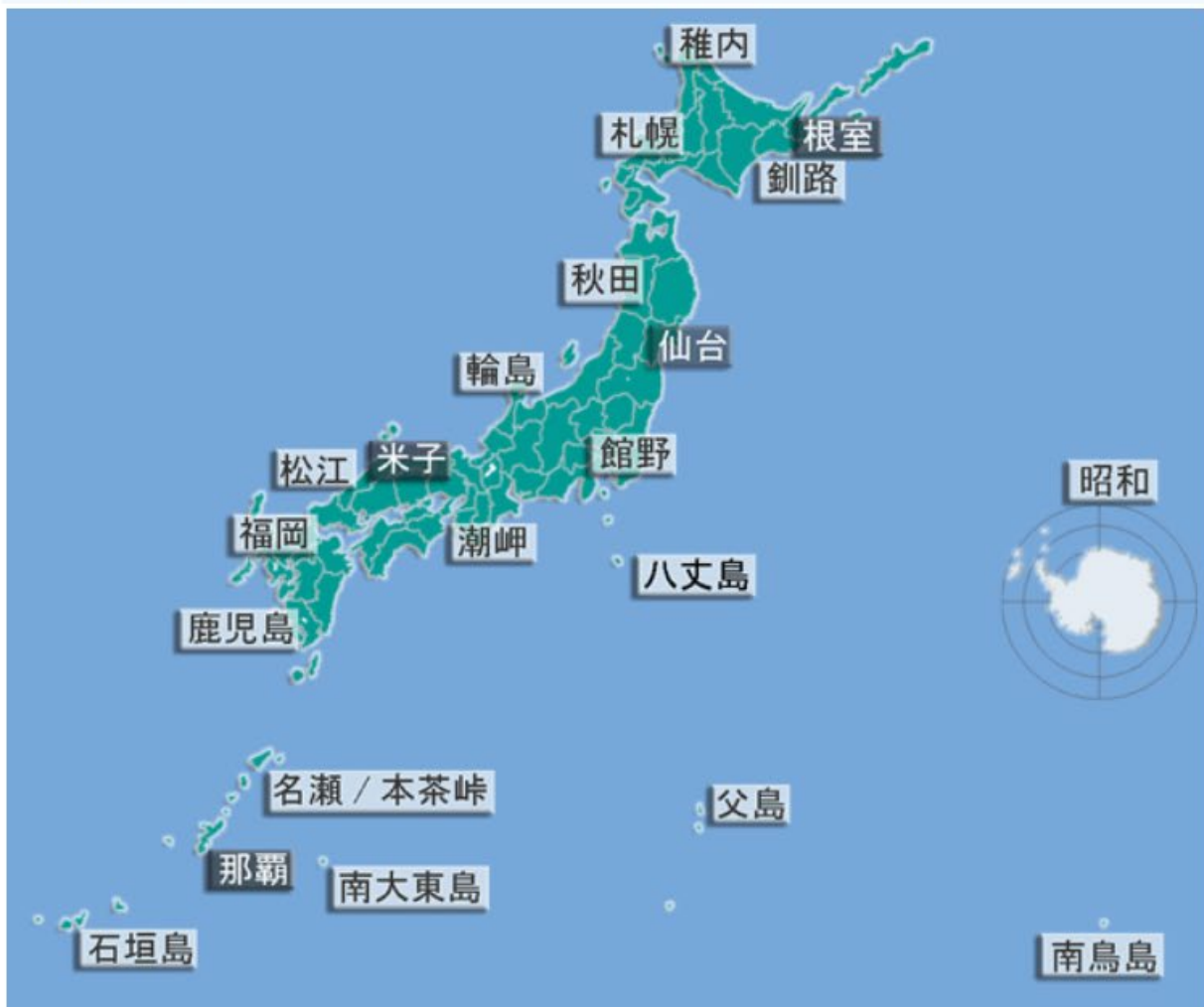
地域の情報

知識・解説

各種申請・ご案内

[ホーム](#) > [各種データ・資料](#) > [過去の気象データ検索（高層）](#) > 地点の選択

地点の選択

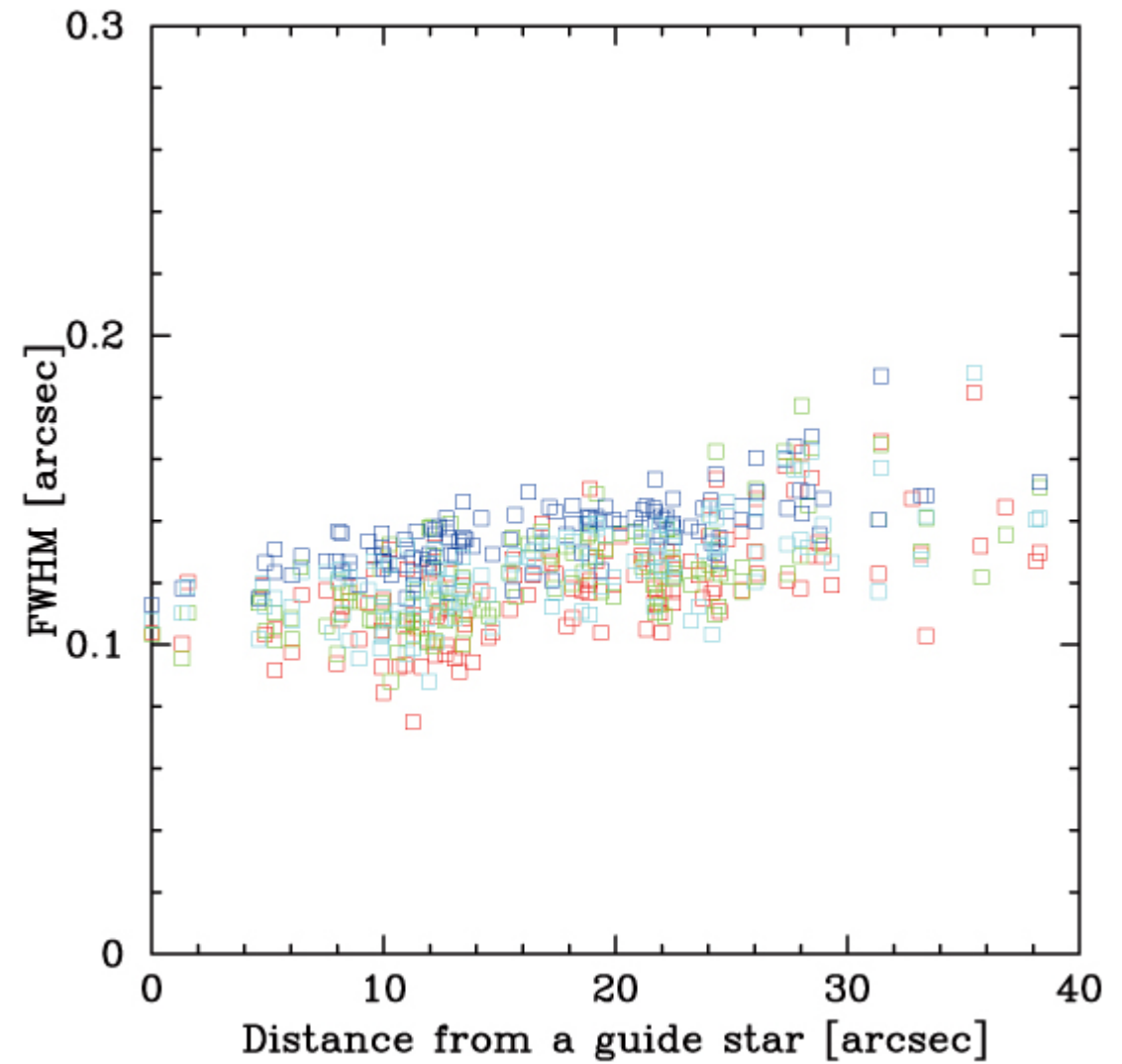
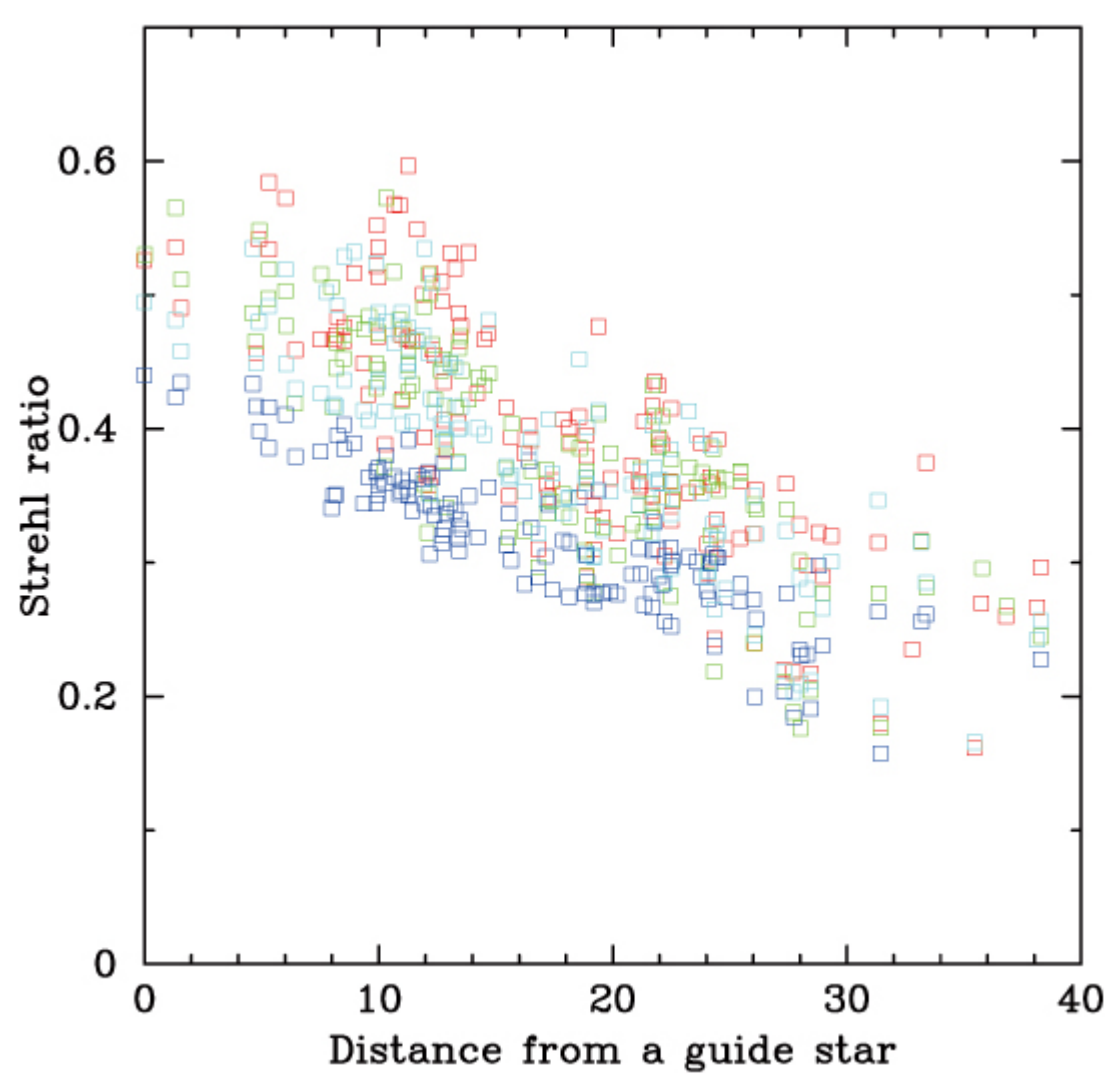


地点
ローマ字
緯度
経度
気圧計の高さ



南鳥島

AOの補正が効く視野：マウナケア、A0188での実測値



マウナケアで波長 $2.2\mu\text{m}$ では、 $r_0 \sim 0.9\text{m}$ であるので、先の見積もりより10倍広い

低コストWFS素子はないのか？

全製品 / カメラ / USBカメラ / Teledyne Imaging FLIR/IIS Blackfly S USB 3.1 カメラ

FLIR Blackfly S カメラ BFS-U3-23S3 白黒 C

[Teledyne FLIR](#) の更なる情報へ



FLIR/IIS Blackfly S USB 3.1 カメラ
(前面側)

商品コード #12-747 お問い合わせ 類似するカメラ

1 **¥58,900**

カートに加える

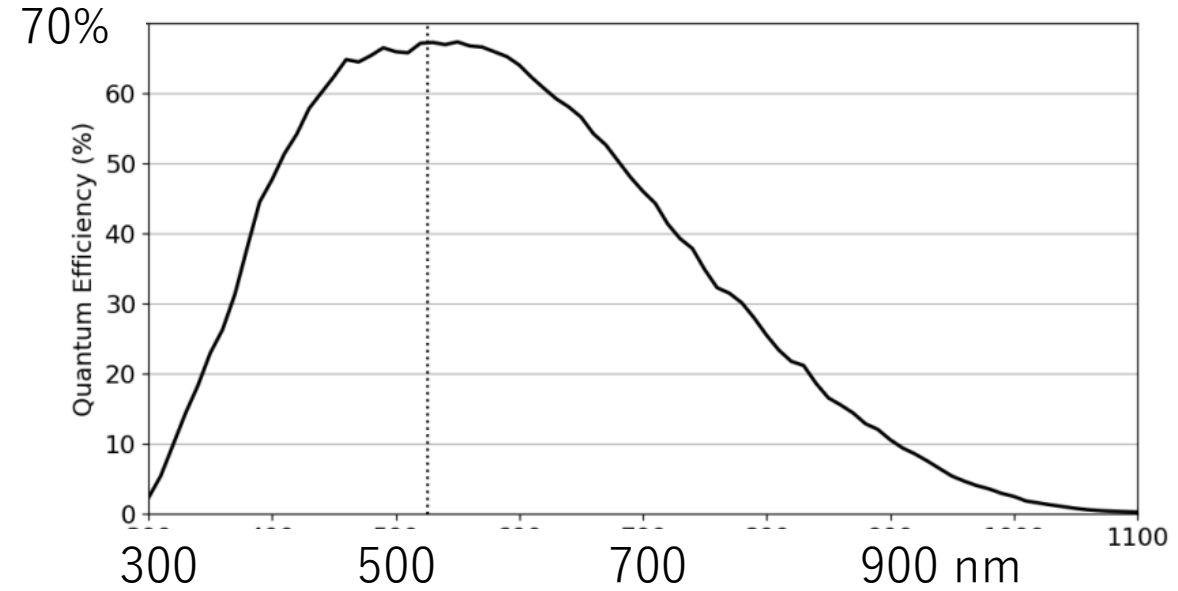
数量 1+	クイック見積り
¥58,900	見積依頼する

+ お気に入りリストに加える ☐ 比較する

- 1920x1200素子 163fps
- 120x120素子で1.4kfpsで読出し（見積）
（SHセンサで、12x12～15x15サブア
パーチャ）
- 読み出し雑音 $\sim 2.4e^{-}/pix$
- Peak QE 66%

低コストで低雑音
産業用素子（Sony製）
のおかげ

Blackfly S BFS-U3-23S3M Spectral Response Curve



使ったことはないのですが。

低コストセンサと、読出し雑音 0 のセンサ性能比較

SHセンサのS/N

必要フォトン数
低コストカメラ
24e-/サブアパーチャ

必要フォトン数
EMCCD ノイズゼロ、
実効QEが $1/\sqrt{2}$

1	24.5	1.4
2	50.0	5.7
3	76.6	12.7
5	133.1	35.4
10	295.2	141.4

○可視光観測の場合、波面センサのS/N=5-10で使う。
センサの感度の違いは、0.8~1.4等 結構いける

○赤外1.6um観測の場合、S/N~2程度で良い。
センサの感度の違いは、~2.5等程度 差が大きい

$$\text{SNR} = \frac{N_\gamma}{\sqrt{N_\gamma + \sigma_r^2}} \text{ を解いた結果。}$$
$$\text{SNR} = \sqrt{QE_{\text{eff}} N_\gamma} \Rightarrow N_\gamma = S^2 \sqrt{2}.$$

まとめ

○天文補償光学の紹介 約35年の歴史、着実に、技術課題をクリアしつつ進歩している。

○補償光学システムを開発するためには、シーイング、観測波長、風速、大気揺らぎの高さ、などに合わせてシステム最適化することが重要。

○誤差配分の式を利用すると比較的容易に基本的な最適化ができる。すばる初期のAOではやっていなかった（反省）。

○日本のシーイング（岡山、1.2秒角）でシステム設計を試みた。東京のシーイング（～3秒角）だと設計が難しくなる。日本国内の大気揺らぎの高さ情報のデータがない（世界ではデータを取りつつある）。

○近年低コストのWFS用の二次元センサが出てきたので、読出し雑音なしのセンサ（高価）とガイド星に必要な等級を比較した。赤外観測では限界等級の差が増える。