

せいめい望遠鏡による 太陽系外惑星の直接撮像観測 のための装置開発

○山本広大(京都大学)

SEICAグループ (長田哲也, 栗田光樹夫, 木野勝,
津久井遼, 渥美直也(京都大学), 入部正継, 藤田勝,
高橋陸(大阪電気通信大), 河原創(東京大学),
小谷隆行(ABC/NOAJ), 村上尚史(北海道大学),
田村元秀(東京大学/ABC/NOAJ))

目次

- 太陽系外惑星と観測手法
- 系外惑星直接撮像と(超)補償光学
- SEICA



Okayama Observatory, Kyoto University

SEIMEI
TELESCOPE



目次:

せいめい望遠鏡による 太陽系外惑星の 直接撮像観測 のための装置開発

■ (太陽)系外惑星

- ◆ 歴史
- ◆ 形成と進化モデル
- ◆ パラメータ分布 (質量、軌道長半径(周期))
- ◆ 検出・測定手法

■ 系外惑星の直接撮像と(超)補償光学

■ SEICA (Secound-generation Exoplanet Imager with Coronagraphic Ao)

系外惑星：発見



2019ノーベル賞!!

- 1995: 主系列星に惑星質量天体を発見
- 2010's- : *Kepler*の時代 (※トランジット法)
- 2020's- : *Gaia* の時代へ (※アストロメトリ法)

過去25年の惑星発見数の推移 (<http://exoplanet.eu/>, 2020/11/8現在)

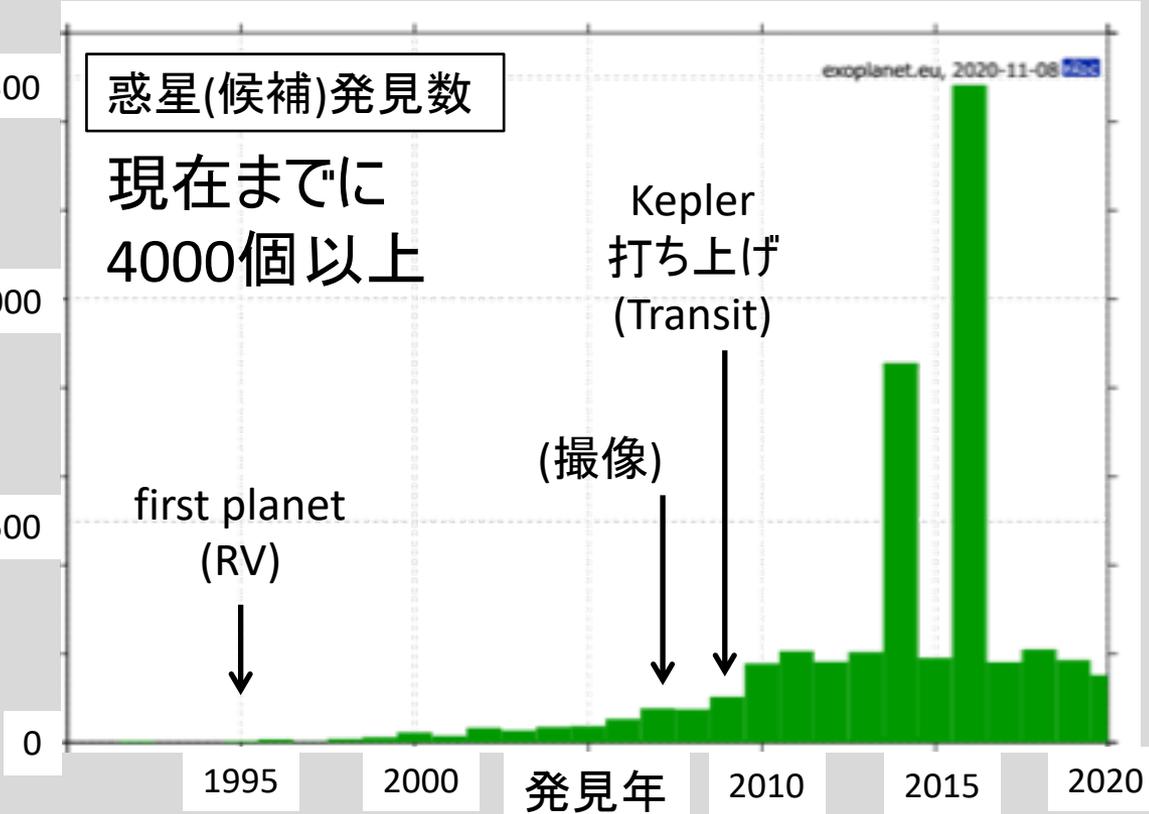
【系外】惑星

核融合していない
→質量<13M_J

Sun	Gliese 229A	Teide 1	Gliese 229B	WISE 1828	Jupiter
5800 K	3600 K	2600 K	950 K	300-500 K	125 K
G2	M1	M8	T7	>Y2	
Spectral Class					

スペクトル型 L T Y 惑星

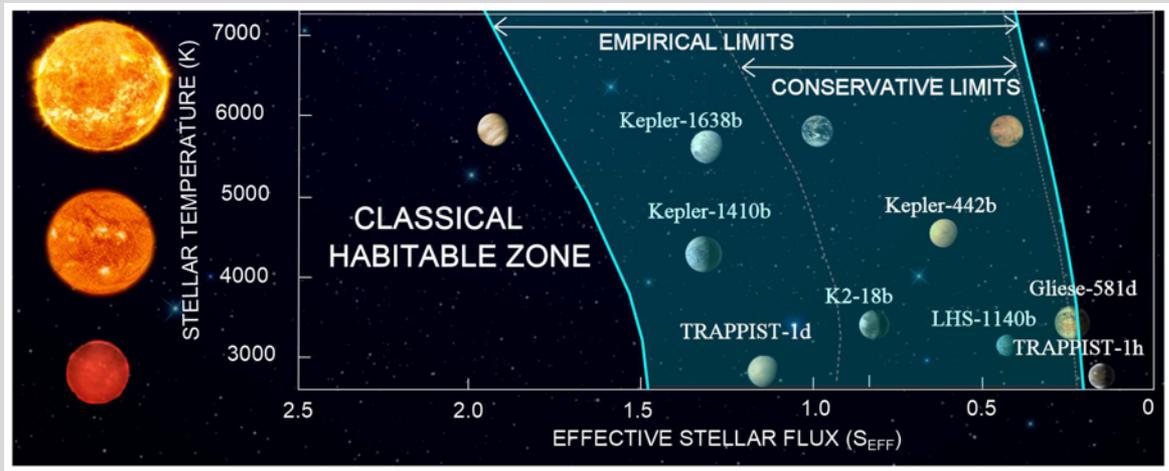
褐色矮星[13-78M_J]



系外惑星：発見：ハビタブル惑星

■ ハビタブルゾーン: “地球型(岩石)惑星であれば液体の水が可能な、生命の生存に適していると思われる軌道範囲

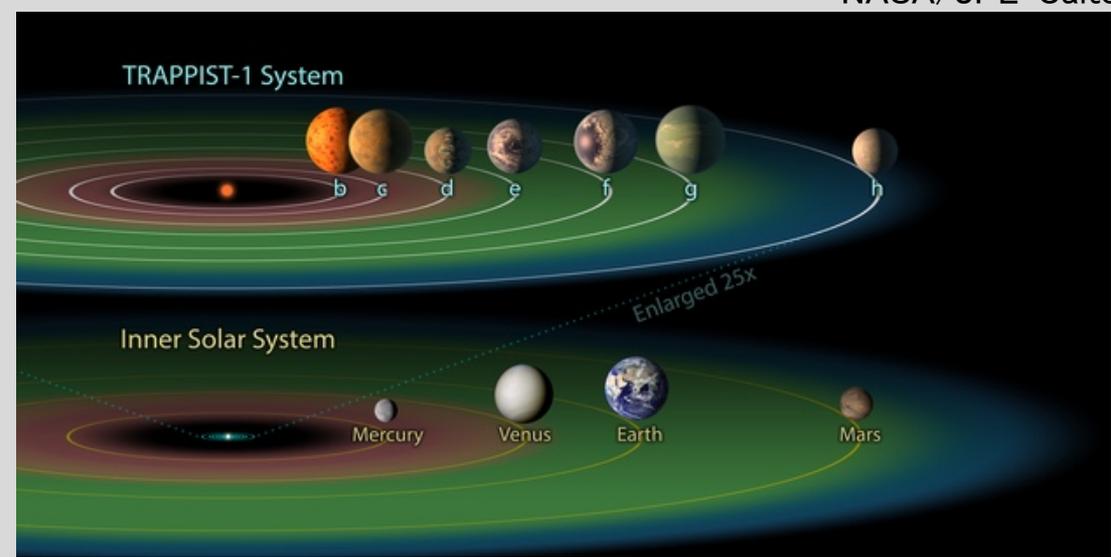
(Encyclopedia BRITANNICA)



NASA/JPL-Caltech

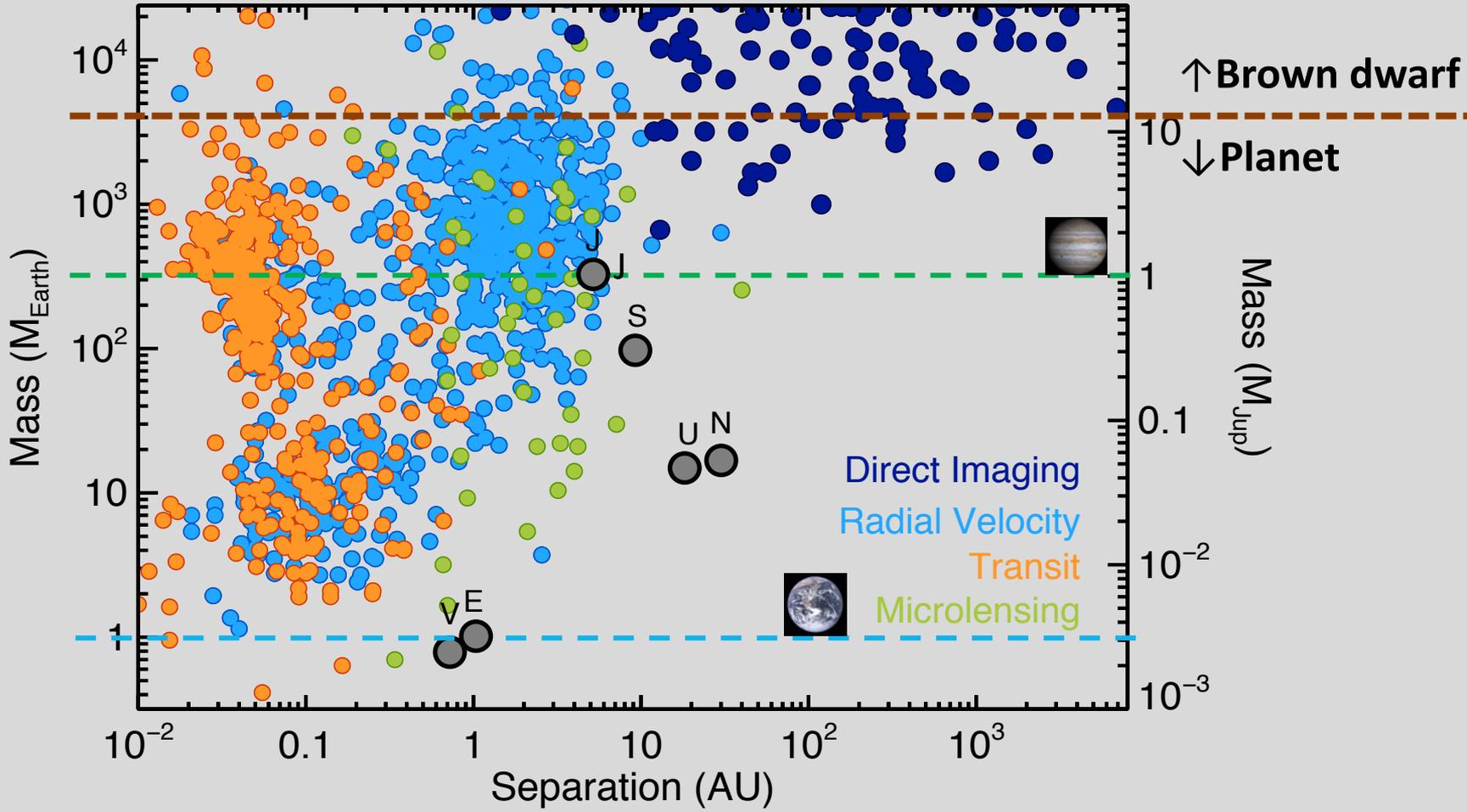
Ramirez 2018

- Glise 581g (2010)
- Kepler-186f(2014)
- TRAPPIST-1系(2016)
- Proxima B (2016)
- etc...



系外惑星：主星からの距離と質量分布

Bowler+2016



観測手法によって得意な分野が異なる

系外惑星: 観測手法

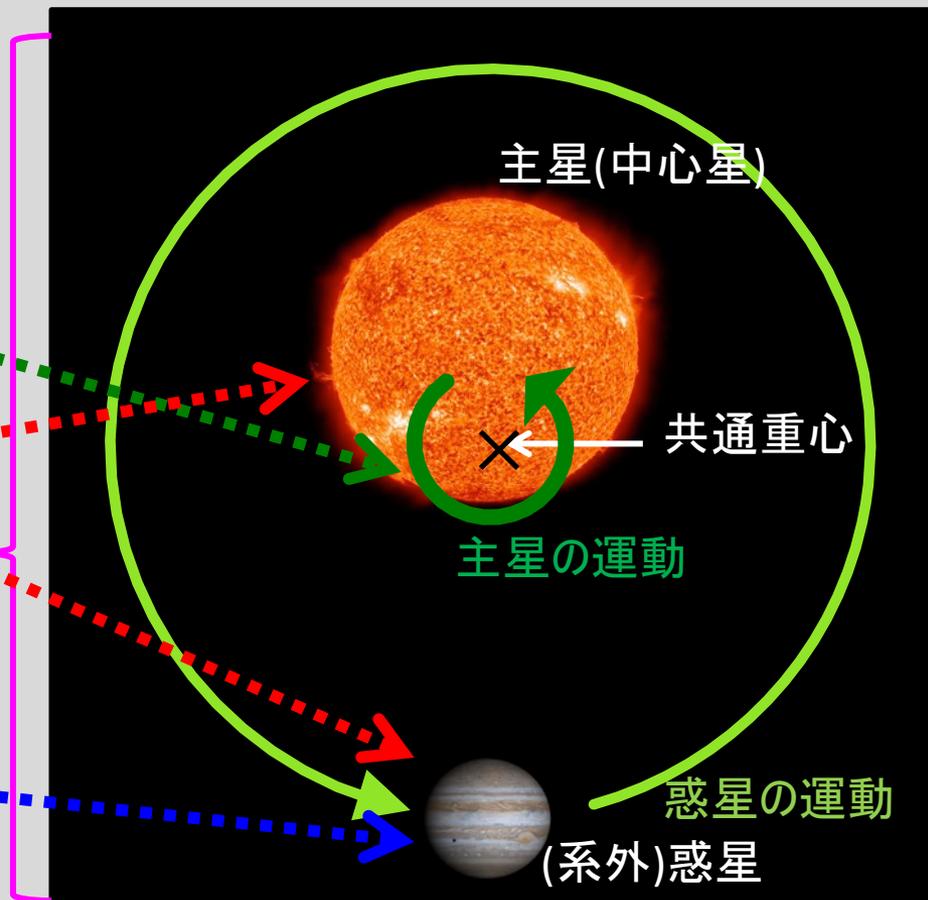
◆ 主な観測手法

– 間接的

- ◆ 視線速度(RV)法
- ◆ アstrometry法
- ◆ トランジット法
- ◆ 重力マイクロレンズ法

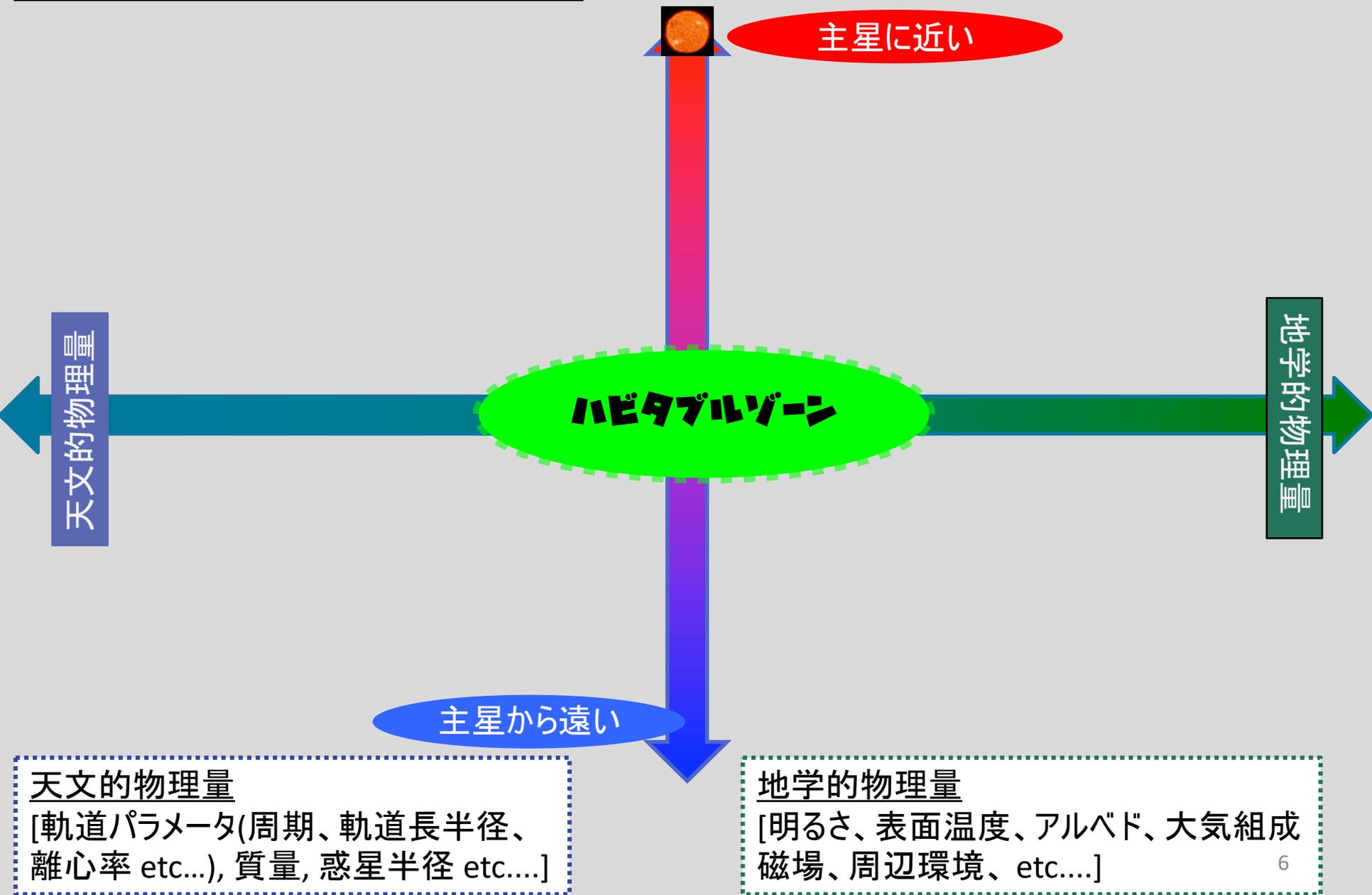
– 直接的

- ◆ 直接撮像
- ◆ (トランジット分光)



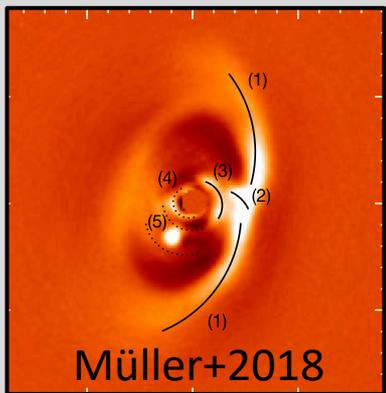
系外惑星：手法：

山本の主観です



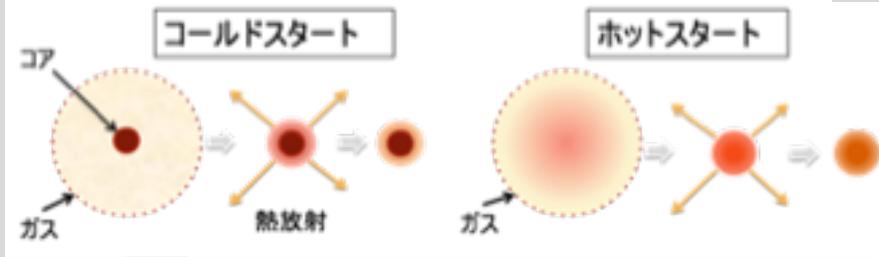
系外惑星：手法：撮像観測

山本の主観です



主星に近い

◆ モデル依存のため質量が決定できない



天文的物理量

地学的物理量

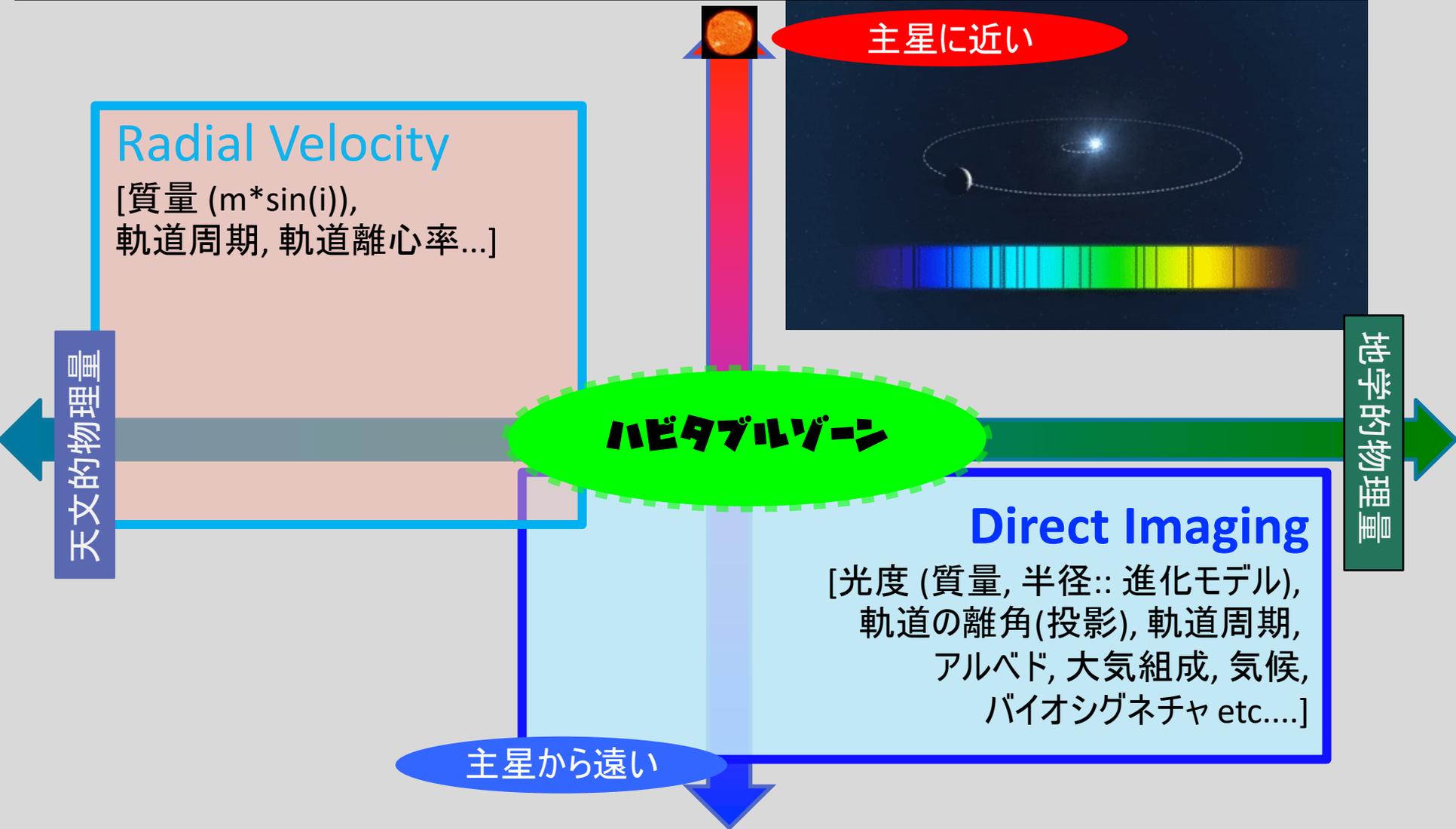
ハビタブルゾーン

Direct Imaging
[光度 (質量, 半径:: 進化モデル),
軌道の離角(投影), 軌道周期,
アルベド, 大気組成, 気候,
バイオシグネチャ etc....]

主星から遠い

系外惑星：手法：比較：RV

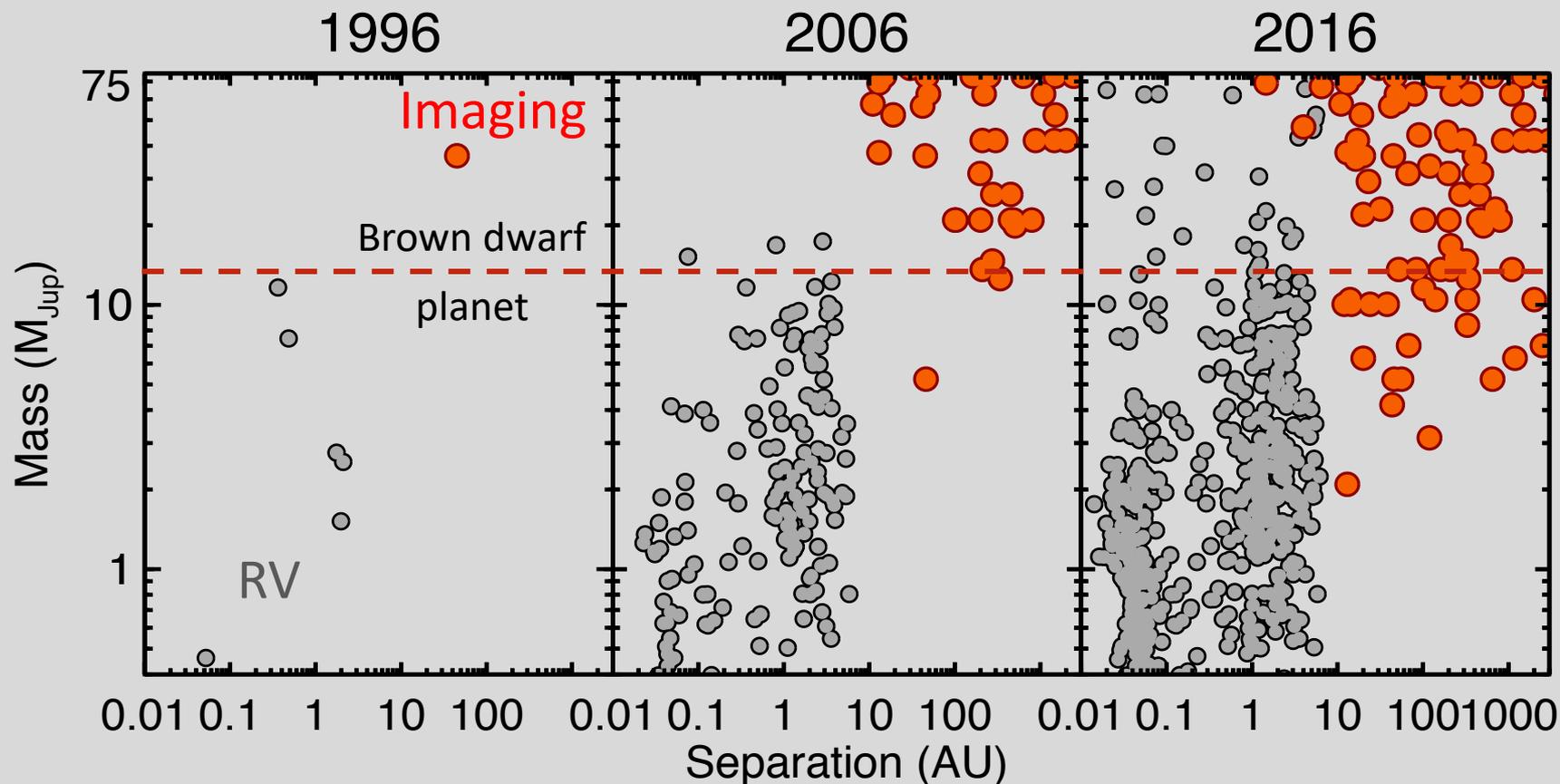
山本の主観です



- ◆ どちらも膨大な観測には不向き (数個～数十個 / 晩)
- ◆ RV惑星の直接撮像が可能になりつつある→パラメータの充実

系外惑星: 手法: 比較: RV

Bowler 2016



相補的な分布 [close - 軽: RV \leftrightarrow wide - 重: DI]

→ 特異的なパラメータ [mass, luminosity, temperature...]

→ 真の“比較惑星学”へ!!

系外惑星: 手法: 比較: トランジット

山本の主観です

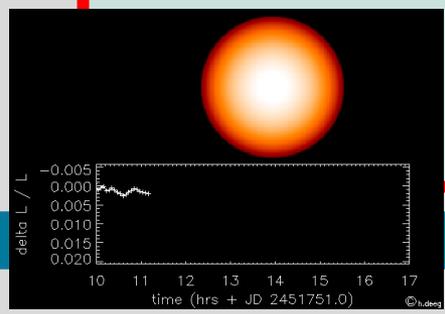


主星に近い

Transit

[半径, 軌道傾斜角, 軌道周期, 大気組成, ...]

- ◆ 一度に膨大な観測が可能 (数十万天体)
- ◆ RV観測と相性が良い(相補的)
- ◆ 反射光検出 (近傍高温)
- ◆ Population調査 (Kepler / TESS)



天文的物理量

ハビタブルゾーン

地学的物理量

Direct Imaging

[光度 (質量, 半径:: 進化モデル), 軌道の離角(投影), 軌道周期, アルベド, 大気組成, 気候, バイオシグネチャ etc....]

- ◆ 主星に依存しないスペクトル検出
- ◆ 反射光検出 (遠方低温)

主星から遠い

◆ 重ならない観測領域(近←→遠)で大気組成、温度などをそれぞれ測定可能

系外惑星：手法：比較：マイクロレンズ 山本の主観です



主星に近い

- ◆ 一度に膨大な観測が可能 (数百万天体)
- ◆ 浮遊惑星を検出可能
- ◆ 地学的な物理量測定はほぼ不可能
- ◆ 他手法による追観測はほぼ不可能
- ◆ Population調査 (遠方: 銀河)

ハビタブルゾーン

天文的物理量

地学的物理量

Microlensing
[mass (ratio),
orbital semi-major axis...]

Direct Imaging
[光度 (質量, 半径:: 進化モデル),
軌道の離角(投影), 軌道周期,
アルベド, 大気組成, 気候,
バイオシグネチャ etc....]

主星から遠い

- ◆ 遠方領域(～数—数百 AU)での惑星分布の利用

系外惑星：手法：比較：アストロメトリ

日本の主観です

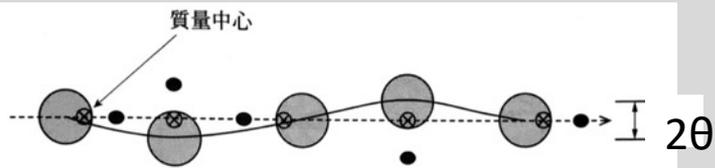


図 5.1 惑星の公転による主星の位置のズレを測るアストロメトリ法.



主星に近い

- ◆ 一度に膨大な観測が可能
- ◆ HZ付近の惑星検出にもっとも適している
- ◆ 軌道パラメータがほぼ決定可能
- ◆ Population調査 (地球近傍: Gaia)

Astrometry

[orbital parameters, mass]

天文的物理量

地学的物理量

ハビタブルゾーン

Direct Imaging

[光度 (質量, 半径:: 進化モデル), 軌道の離角(投影), 軌道周期, アルベド, 大気組成, 気候, バイオシグネチャ etc....]

$$\theta = \frac{a_1}{d} = \frac{m_2 a_2}{m_1 d}$$

$$= \frac{m_2 [M_J] a [AU]}{m_1 [M_\odot] d [pc]} [mas]$$

1mas = 0.001arcsec

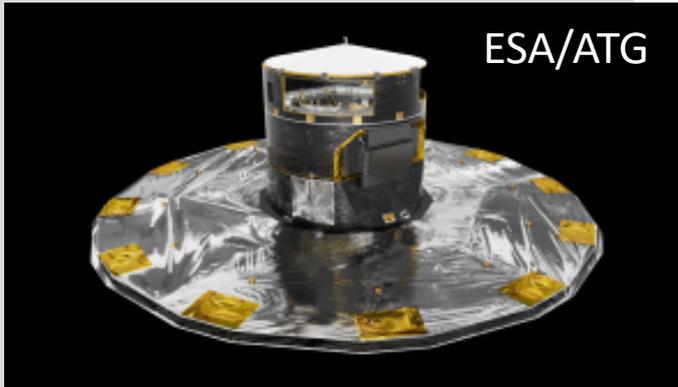
主星から遠い

- ◆ Astrometryで検出された惑星の追観測が可能

Gaia衛星によるアストロメトリ

■ 惑星検出数の見積 (5年間)

- ◆ <500pc
- ◆ 1–15 M_J
- ◆ **21000 ± 6000個**
- ◆ 10年観測なら
70000個



検出の期待値

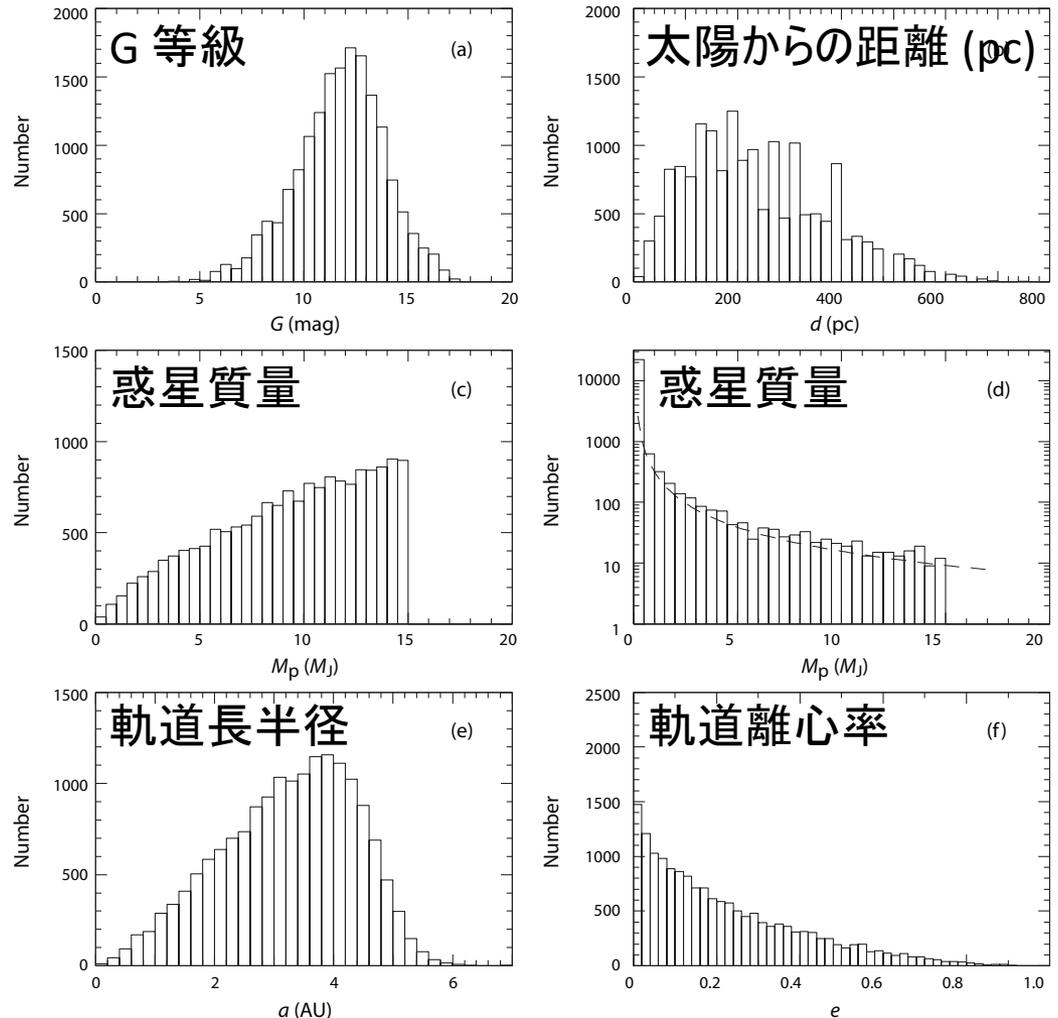


Figure 2. Histograms of the predicted planet detections with *Gaia*, for $\alpha > 2 \sigma_{\text{fov}}$, as a function of (a) G magnitude; (b) distance d ; and (c) planet mass M_p , where the rising distribution up to the adopted occurrence threshold of $15 M_J$ contrasts with the mass distribution for the simulated planets ((d), which is a 1 in 10^4 re-sampling of the simulated planet distribution, showing the $M_p^{-1.31}$ power-law behavior as the dashed line); (e) semi-major axis a ; (f) eccentricity e .

系外惑星まとめ

- 発見から25年、約4000個の候補が報告
- 宇宙望遠鏡での大規模サーベイによりPopulationが明らかに (Kepler/TESS/Gaia/Nancy Grace Roman ST)
- 地球型惑星が豊富に発見
- ハビタブルゾーンの惑星も多数発見 (TRAPPIST-1系等)

■ 発見ではなく
詳細な観測へ
→そのために
撮像観測

宇宙望遠鏡

トランジット

■ Kepler

■ TESS

マイクロレンズ

■ Nancy Grace Roman ST

アストロメトリ

■ Gaia



目次:

せいめい望遠鏡による 太陽系外惑星の 直接撮像観測 のための装置開発

■ (太陽)系外惑星

■ 系外惑星の直接撮像と(超)補償光学

- ◆ 撮像観測の難点

- ◆ 高コントラスト撮像観測

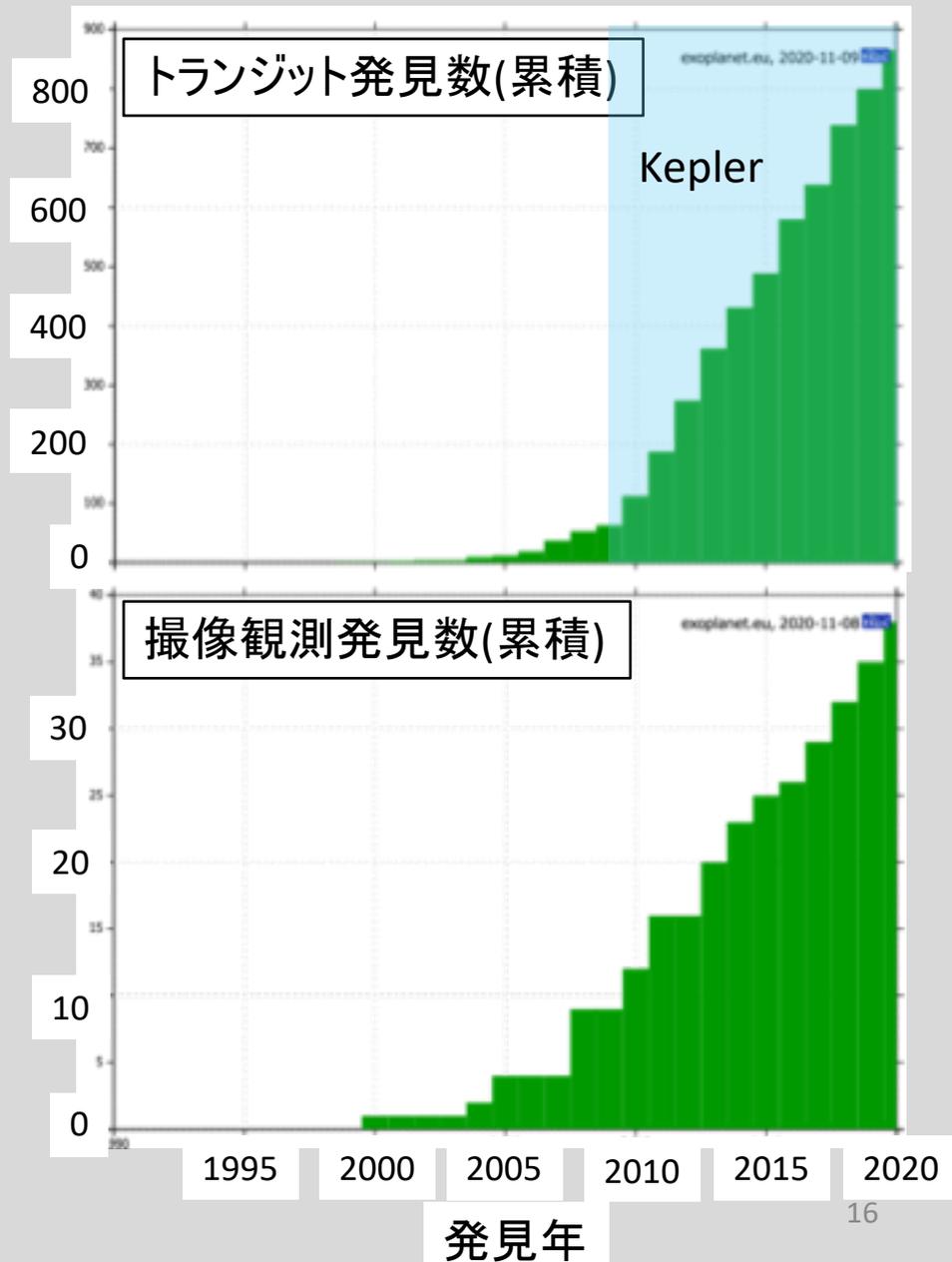
- ◆ 宇宙望遠鏡 vs 地上望遠鏡

- ◆ 超補償光学

■ SEICA (Secound-generation Exoplanet Imager with Coronagraphic Ao)

撮像観測: 比較

- >4000個: 惑星候補
- ~1200個: 惑星質量
- トランジット: 約900個
- 撮像観測: 約40個
- (アストロメトリ: >20000個)
- 撮像観測のブレークスルーがない
(発見自体がブレークスルーだったが.....)



撮像観測: 比較

■ >4000個: 惑星候補

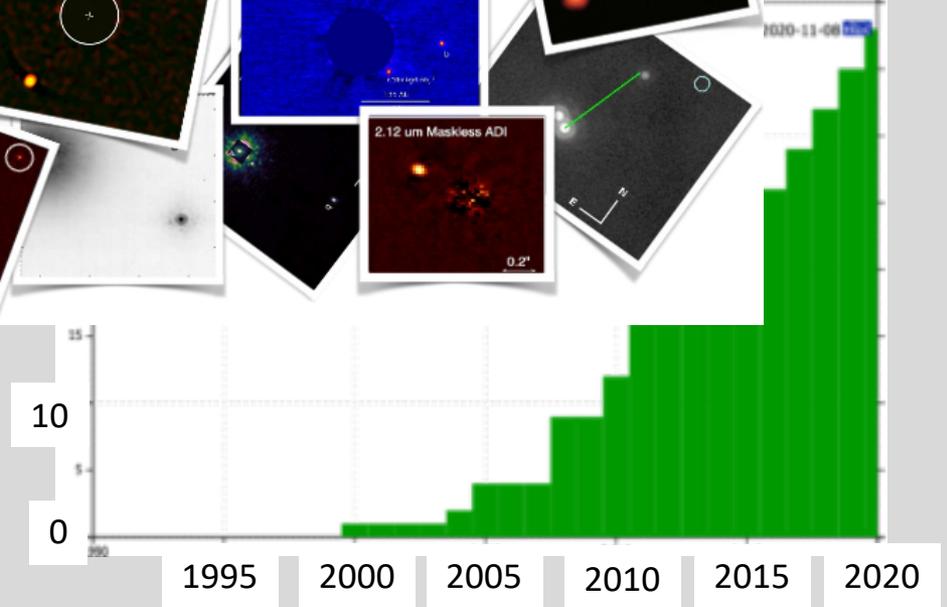
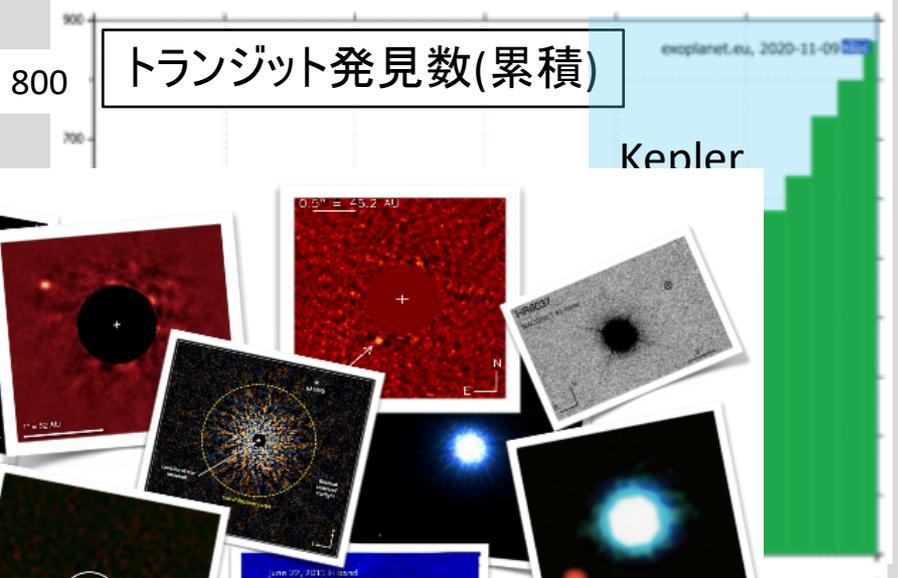
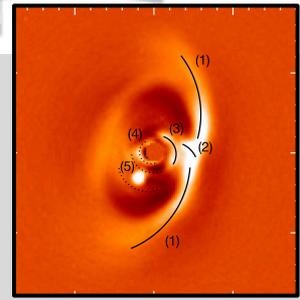
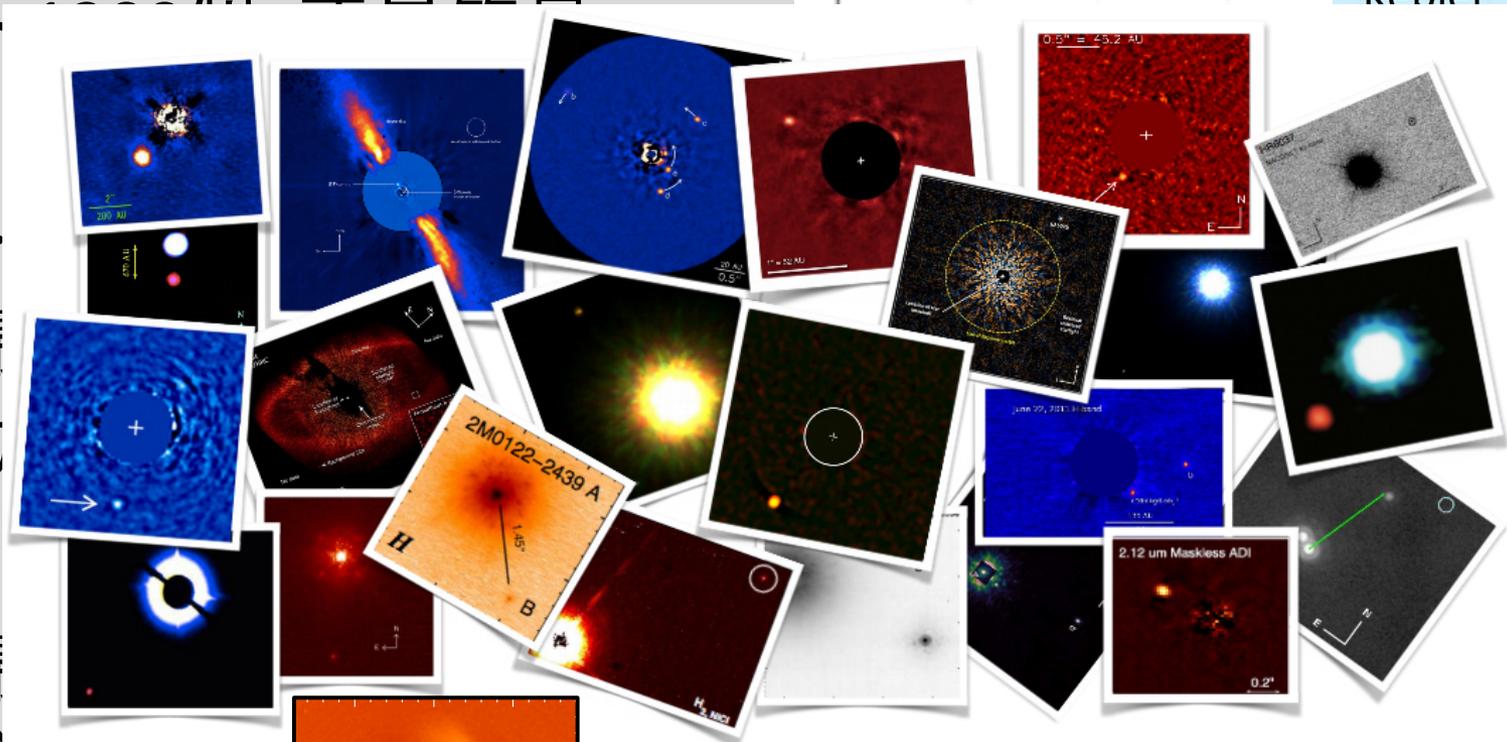
■ ~1000個: 惑星系

■ 卜

■ 撮

■ ()

■ 撮
がない



発見年

撮像観測: なぜそんなに難しいのか?

■ 3つの難点

※10 pcからみたとき

1. 惑星が暗すぎる

-  太陽: 4.8 mag
-  木星: 22 mag
-  地球: 27 mag

高感度

2. 惑星が主星に近すぎる

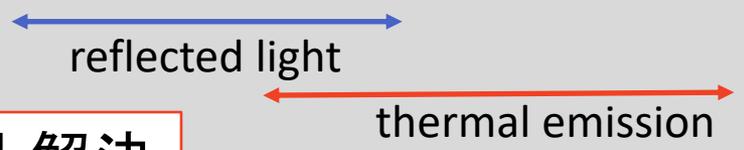
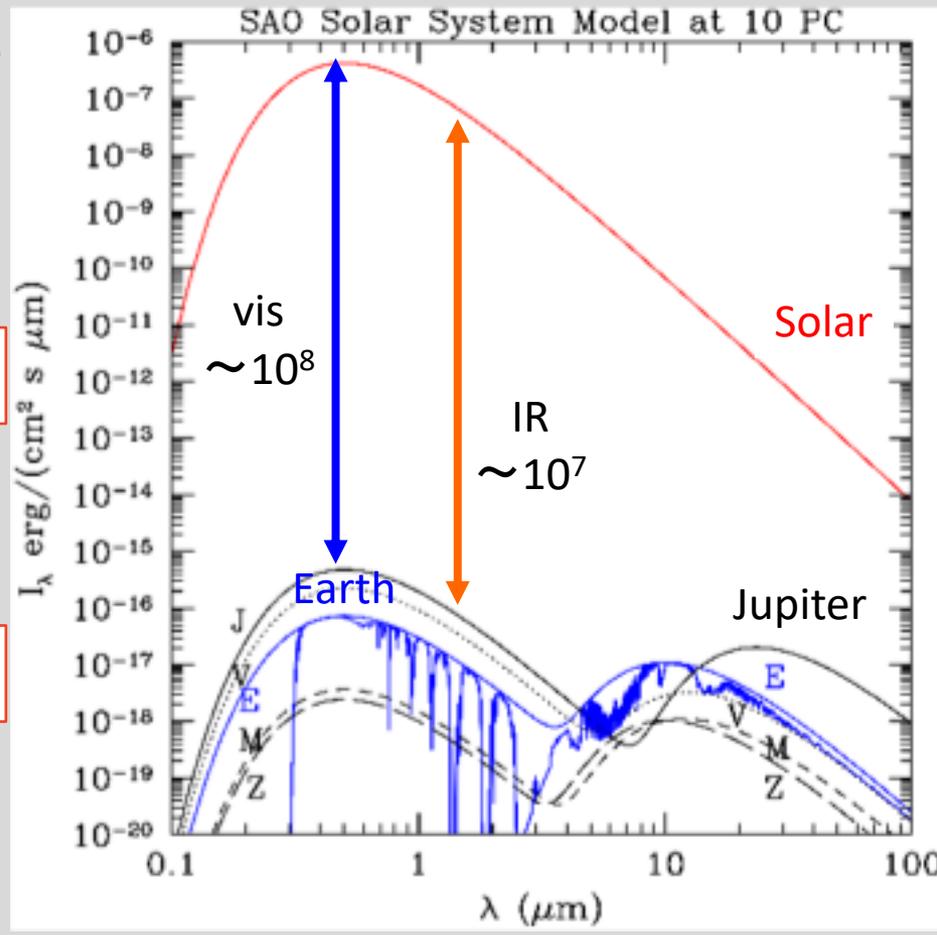
-  木星: 0".5
-  地球: 0".1

高分解能

3. 主星と惑星の明るさが違いすぎる

- ◆ 可視域: $10^8 - 10^{10}$
- ◆ 赤外域: $10^5 - 10^{10}$

高コントラスト解決

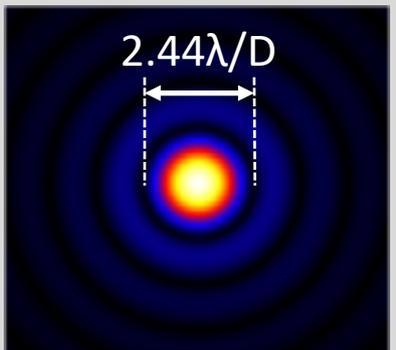


撮像観測: 感度と分解能の解決

■ 望遠鏡の角度分解能: $\theta = 1.22 \lambda / D$

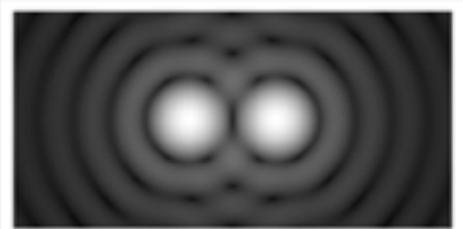
λ : 観測波長
 D : 望遠鏡口径

Jupiter: 0''.5
 Earth: 0''.1

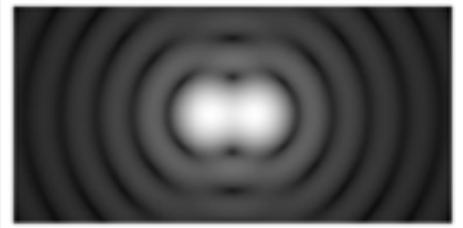


離角: d

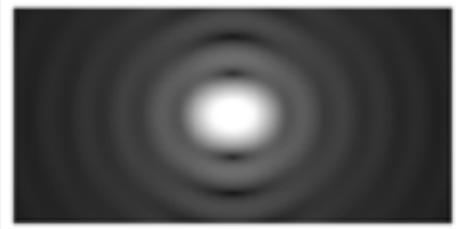
$d > \theta$
 分解



$d = \theta$
 [Rayleigh criterion]



$d < \theta$



θ [arcsec]		λ [μm]				
		0.5	0.8	1.2	1.6	10
D [m]	4	0.03	0.05	0.08	0.10	0.6
	8	0.02	0.03	0.04	0.05	0.3
	30	0.004	0.007	0.01	0.01	0.08
	40	0.003	0.005	0.008	0.01	0.06

→近赤外であれば8mあれば十分

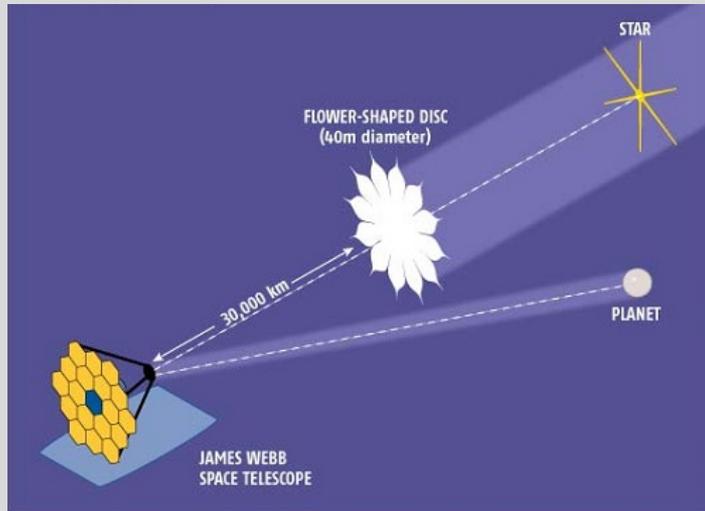
- 点源検出感度: $\epsilon \quad \epsilon \propto D^4$
- 望遠鏡が大きければ感度も増加

撮像観測: 高コントラストの解決

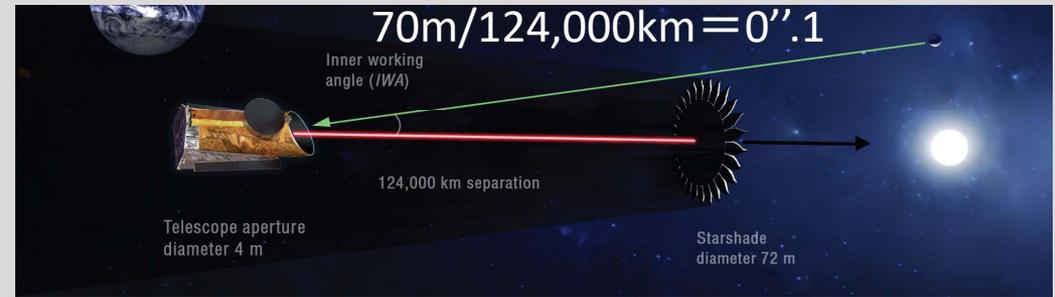
■ おおざっぱに3通りの解決策

1. Occulter: 掩蔽板(occulter)で主星を隠してしまう
2. Interferometer: 干渉で主星光をNullにする
3. Coronagraph: 望遠鏡光学系内マスクで主星を隠す

これらは相反しない



Occulterによる主星の掩蔽 (JWST)



Occulterによる主星の掩蔽 (HabEx)



VLT(左)と干渉装置gravity(右)

撮像観測：問題解決

■ 3つの難点

1. 惑星が暗すぎる
2. 惑星が主星に近すぎる
3. 主星と惑星の明るさが違いすぎる



大型望遠鏡!!

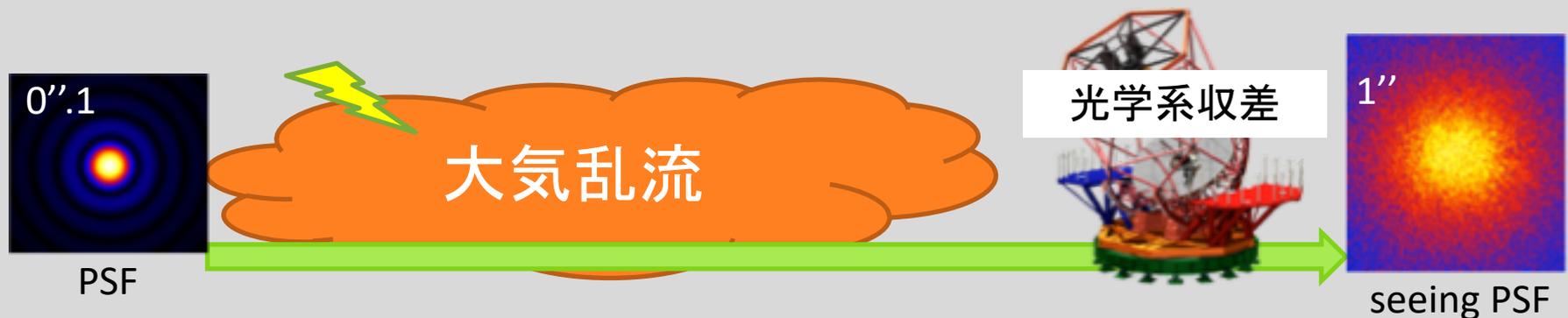


高コントラスト装置



撮像観測: 正気に戻る

- 高感度で 高分解能, 高コントラストな撮像には、
(できるだけ) 無収差で 波面エラーのない 観測が必要



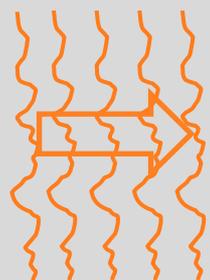
平面波



収差(aberration): 理想(空想)的な光学系からのズレ。
収差によって像がボケたり変形したりする。

波面エラー(WFE): 理想的な波面(平面/球面)からのズレ。
収差や他の要因(大気乱流など)によって生じる。

歪んだ波面



シーイング1''.1:

$$WFE=2.5\lambda = 2.0 \mu\text{m} (@0.8\mu\text{m}; \text{rms})$$

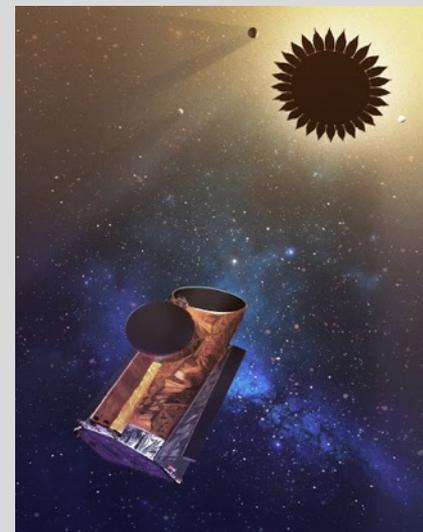
回折限界(SR=0.9):

$$WFE=\lambda/20 = 0.08 \mu\text{m} (@1.6\mu\text{m}; \text{rms})$$

1/25へ

宇宙望遠鏡 vs. 地上望遠鏡

- 30 m級望遠鏡が建設されつつある
- 専用宇宙望遠鏡も



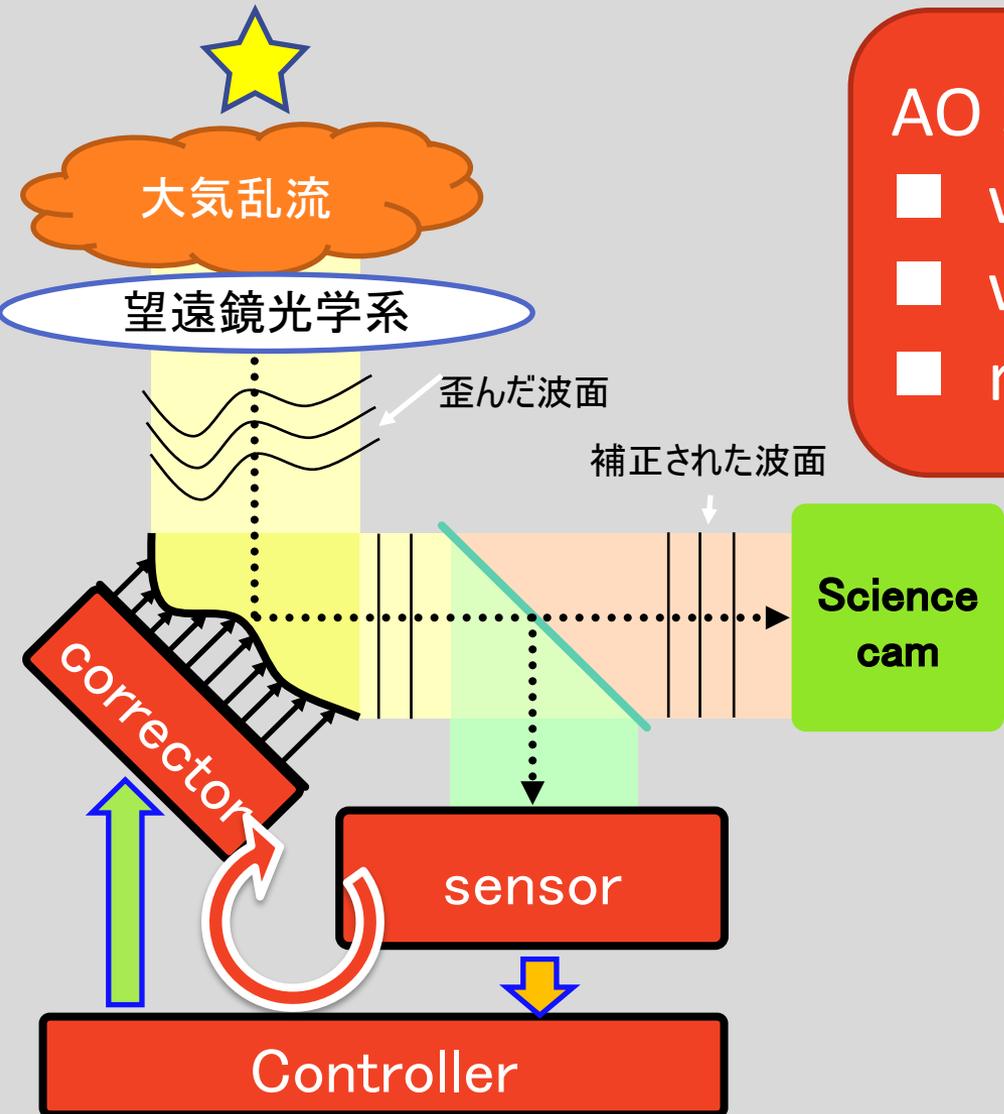
HabEx

	advantage	disadvantage
space-based	地球大気がない!!	高コスト (> \$10 B) 長期の開発 (> 10 年) サイズの制限 (~10 m)
ground-based	大口径 (専用なら)観測が多く取れる 最新技術を採用	地球大気がある!!

とはいえ、超大型望遠鏡と宇宙望遠鏡では差がなくなりつつある

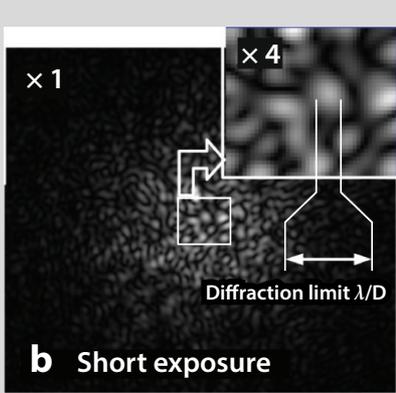
撮像観測: 補償光学(Adaptive Optics: AO)

■ AO: 大気乱流による波面エラーをリアルタイム補正する

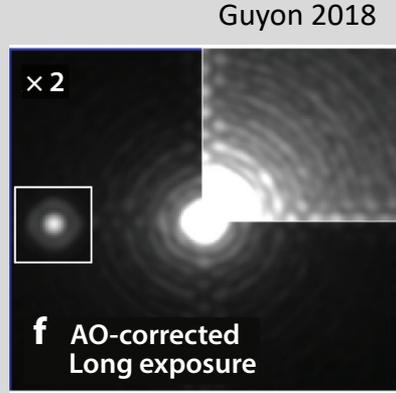


AO 3つの主要要素

- wavefront sensor
- wavefront corrector
- real-time controller



AOなし



AOあり

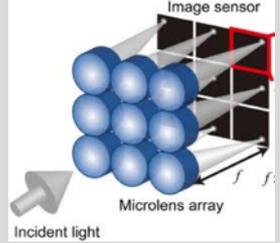
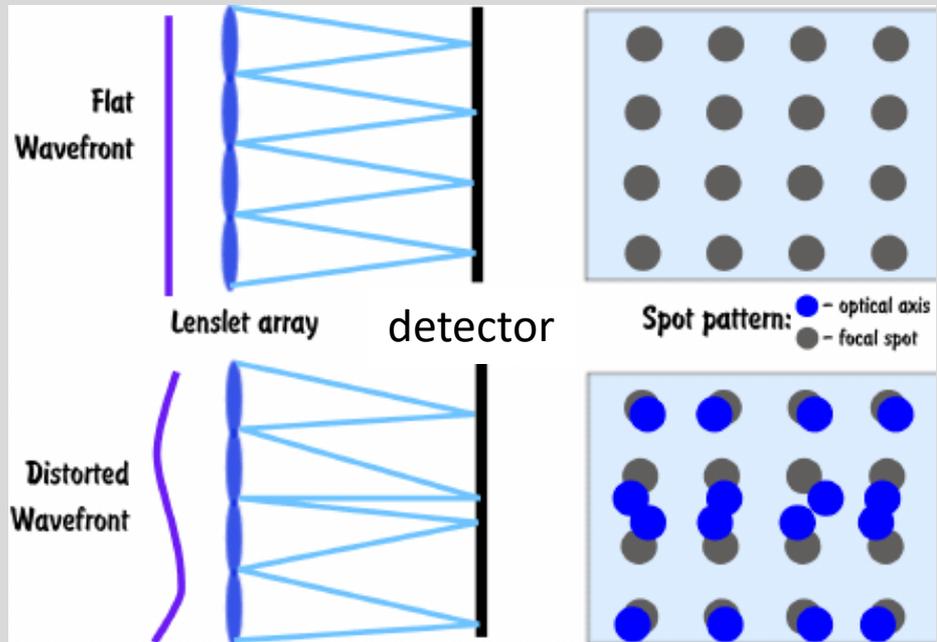
Guyon 2018

撮像観測: AO: 波面センサ

■ 波面センサ (WFS): 大気と光学系由来の波面エラーを計測

Shack-Hartmann WFS

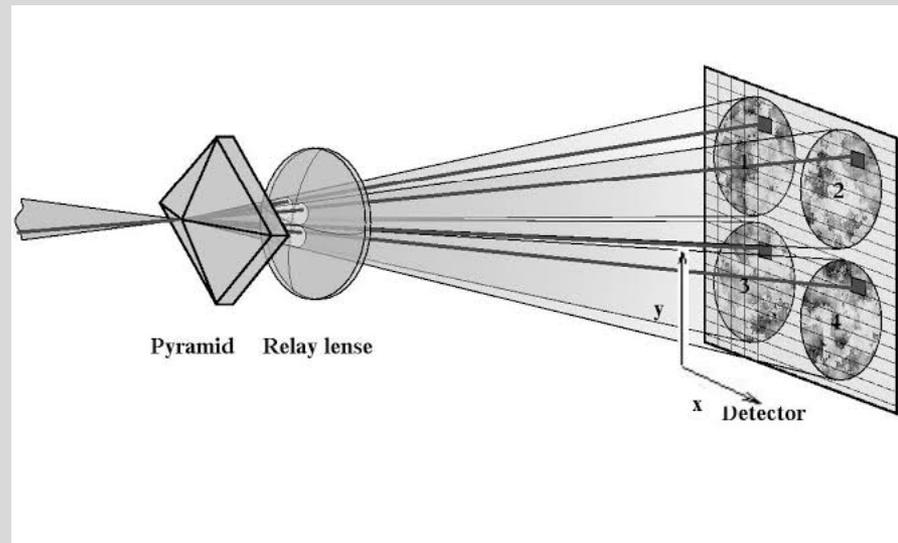
マイクロレンズによる星像の位置変動からWFEを計測



マイクロレンズ

pyramid WFS

ピラミッドプリズムによる分割された瞳強度から WFSを計測



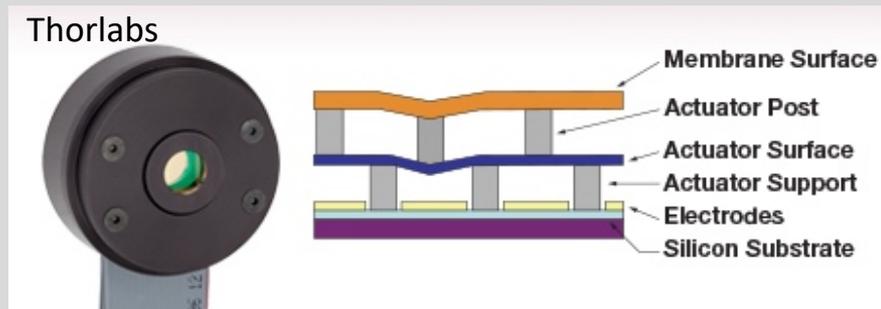
(恒星からの)限られた光子で**高速・高精度**の計測を両立させるのが困難

WFSは望遠鏡主鏡や大気乱流層に共役な面や、焦点面に置かれる

撮像観測: AO: 波面補正と制御

■ Corrector: 主に可変形鏡 (DM) によって波面エラーを補正

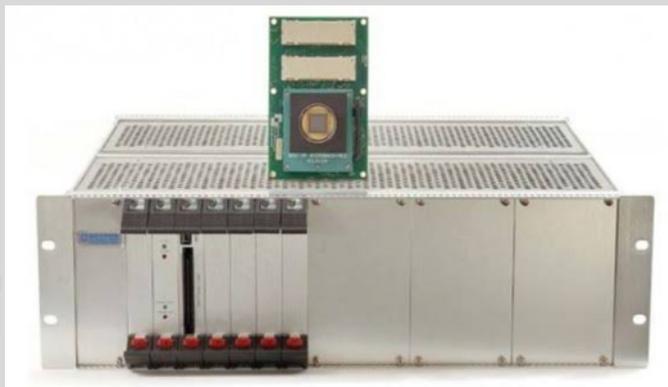
■ Controller: WFSの測定値からDMの制御量を計算



■ DMへの司令は大気乱流の変化に追従出来るよう高速制御が必要

$V = 10 \text{ m/s}$ シーイング1".0
 $r_0 = 0.15 \text{ m @ } \lambda = 0.8 \mu\text{m};$
 \Rightarrow コヒーレンス時間 $\tau_0 = 4.65 \text{ ms}$

コヒーレンス時間中に10回の制御
 \rightarrow ループ速度 $> 2.5 \text{ kHz}$



撮像観測: AOを用いた観測対象

- 近赤外 (0.7—2.5 μm): 若く(<1 Gyr) 重たい (> M_J)
木星型惑星からの熱放射 (数千K)

◆現在のターゲット: [性能: 100—10000 Hz, $\lambda/20$ — $\lambda/4$]

- 中間赤外 (2.5—25 μm): 適度な温度(>300 K) の
岩石惑星からの熱放射

◆WFE は近赤外よりゆるくなる \leftrightarrow 高背景光で分解能が悪い

- ハビタブル惑星からの反射光

◆宇宙望遠鏡のターゲット: [性能: $\sim\lambda/100$]

θ [arcsec]	λ [μm]				
	0.5	0.8	1.2	1.6	10
D 8	0.02	0.03	0.04	0.05	0.3
30	0.004	0.007	0.01	0.01	0.08

撮像観測: AOの世代

	Telescope	AO/Instruments	1 st Light	λ (μm)	Coronagraphs	Diff. techniques
1 st Gen. ↑	Palomar	PALAO/PHARO	2000	1.1 – 2.5	CLC/4QPM/OVC	ADI
	Subaru	CIAO	2000	0.9 – 5.0	CLC	ADI
	Keck	NIRC2-OSIRIS-NIRSPEC	2001	0.9 – 5.0	CLC/OVC	ADI
	VLT	NACO	2002	1.0 – 5.0	CLC/FQPM/APP/OVC	SDI/PDI/ADI
	Gemini-N	ALTAIR/NIRI	2003	1.1 – 2.5	CLC	ADI
	VLT	MACAO/SINFONI	2004	1.0 – 2.5		IFS
	Gemini-S	NICI	2007	1.1 – 5.0	CLC	SDI/ADI
	Subaru	AO188/HiCIAO	2008	1.1 – 2.5	CLC/PIAA/8QPM	SDI/PDI/ADI
	Palomar	PALAO/PHARO-P1640	2009	1.1 – 1.7	APLC/OVC	IFS/ADI
↓ 2 nd Gen.	LBT	FLAO/LMIRCAM	2012	1.0 – 5.0	CLC/OVC	ADI
	Magellan	MagAO/VisAO-CLIO	2012	0.6 – 5.0	CLC	ADI
	Gemini-S	GPI	2013	1.1 – 2.3	CLC/ALC	IFS/ADI/PDI
	VLT	SPHERE	2014	0.5 – 2.3	CLC/ALC/4QPM	IFS/ADI/PDI
	Subaru	SCEXAO/HiCIAO-CHARIS	2016	0.5 – 2.2	PIAA	IFS/ADI/PDI

1st Gen. AO system (~2010)

actuator: ~100

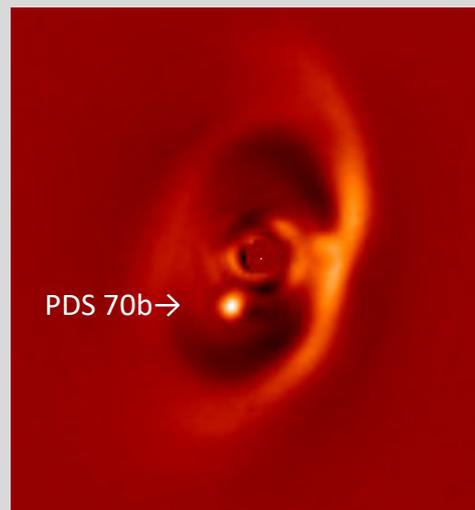
loop freq.: > 100 Hz



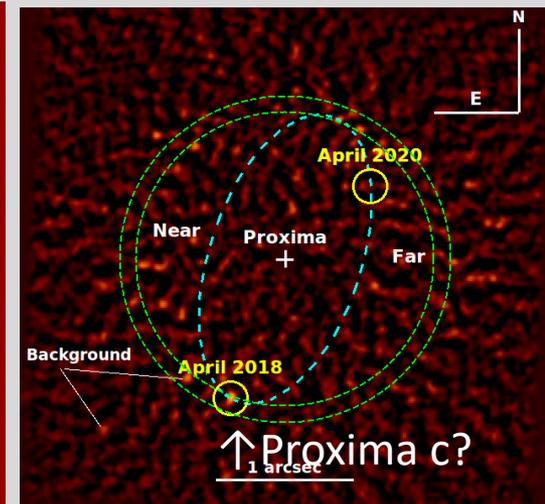
2nd Gen. AO system (2010~)

actuator: ~1000

loop freq.: > 1000 Hz



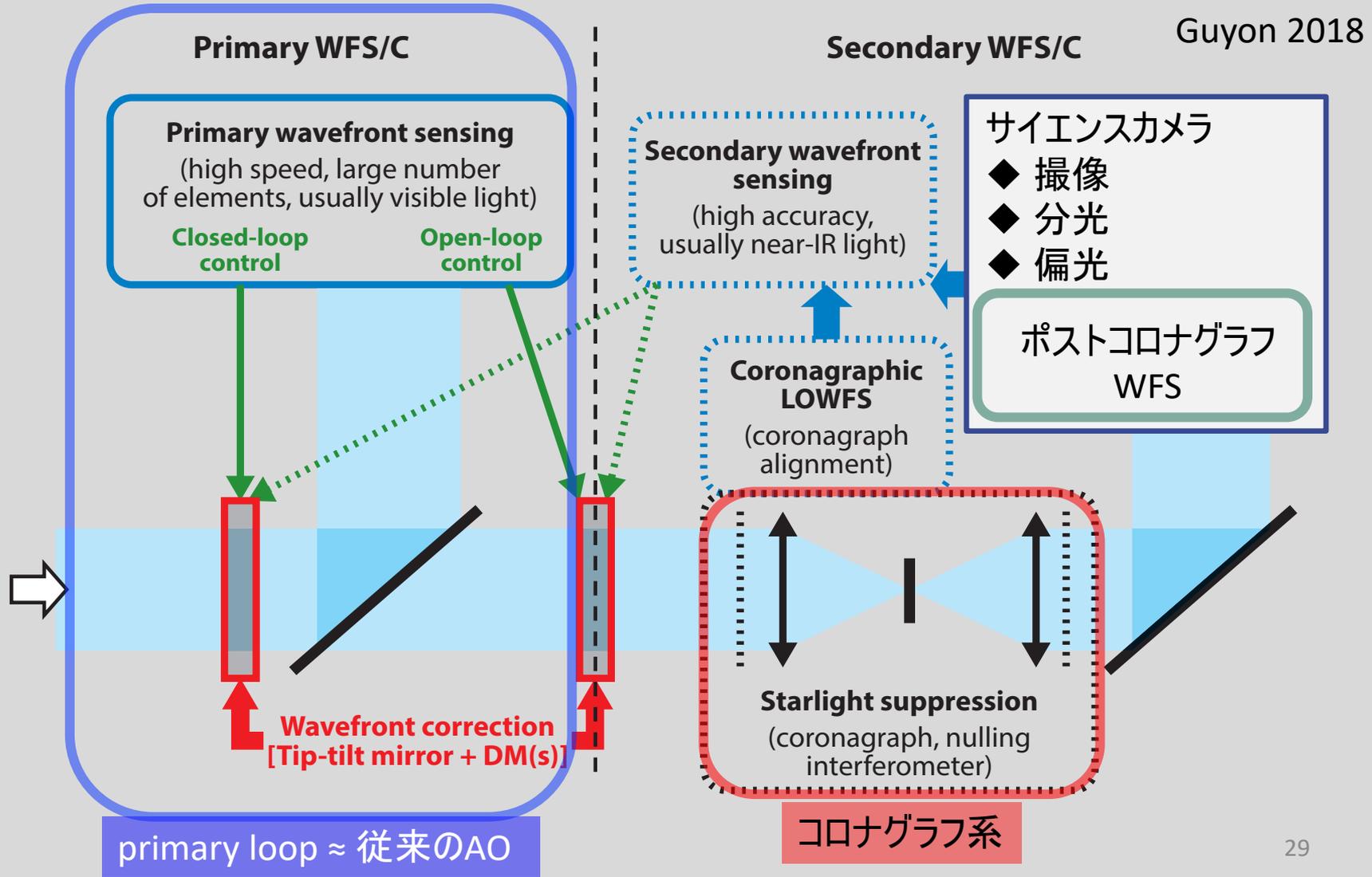
Müller +2018



Gratton +2020

撮像観測: Extreme AO (ExAO)

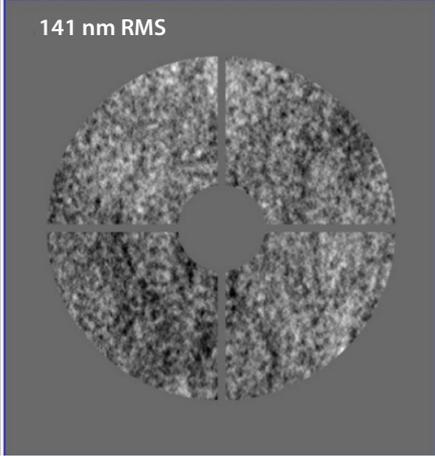
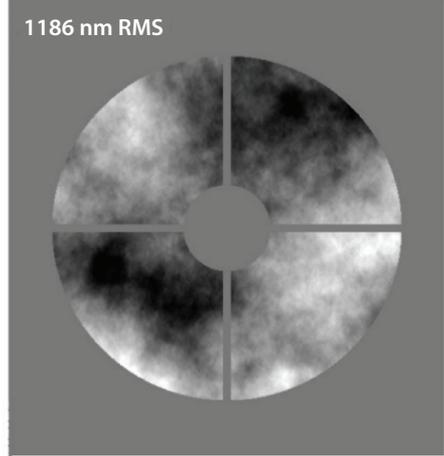
■ より早く, より高精度に: サイエンスに近い情報もフィードバック



Extreme Adaptive Optics

■ performance

Guyon 2018

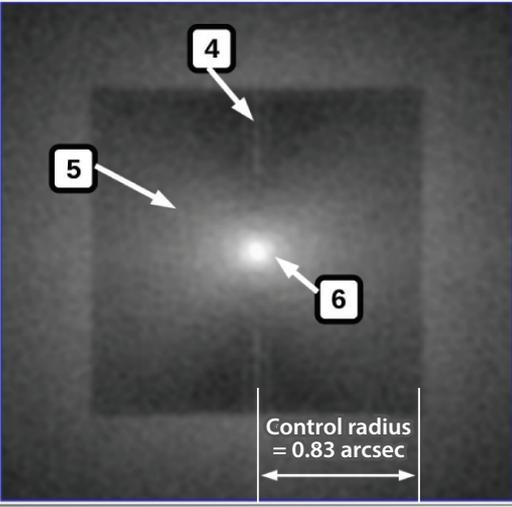
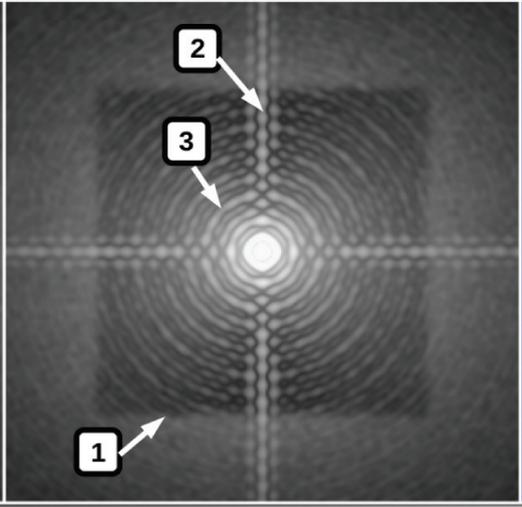
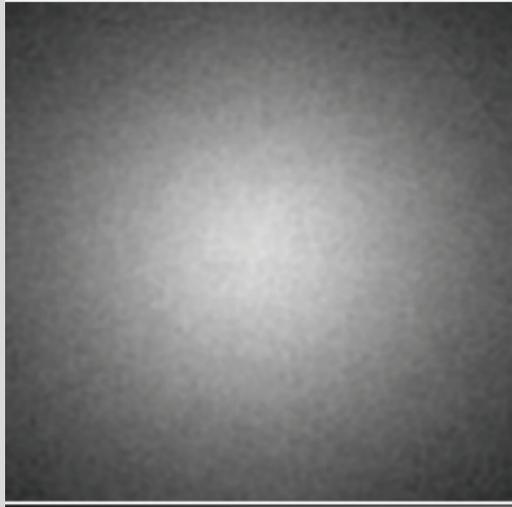


- 1 ExAO control radius
 - 2 Telescope spider diffraction
 - 3 Diffraction rings
 - 4 Ghost spider diffraction
 - 5 "Butterfly" wind effect
 - 6 Coronagraphic leak (low-order aberrations)
- Monochromatic PSFs, 1.65 μm
 No photon noise
 10 m s⁻¹ wind speed, single layer
 4-ms wavefront control lag

c No AO correction

d Extreme-AO correction

e Extreme-AO + coronagraph

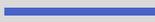


-4.7 -4.4 -4.1 -3.8 -3.5 -3.2 -2.9 -2.6 -2.3

Contrast (10-base log)

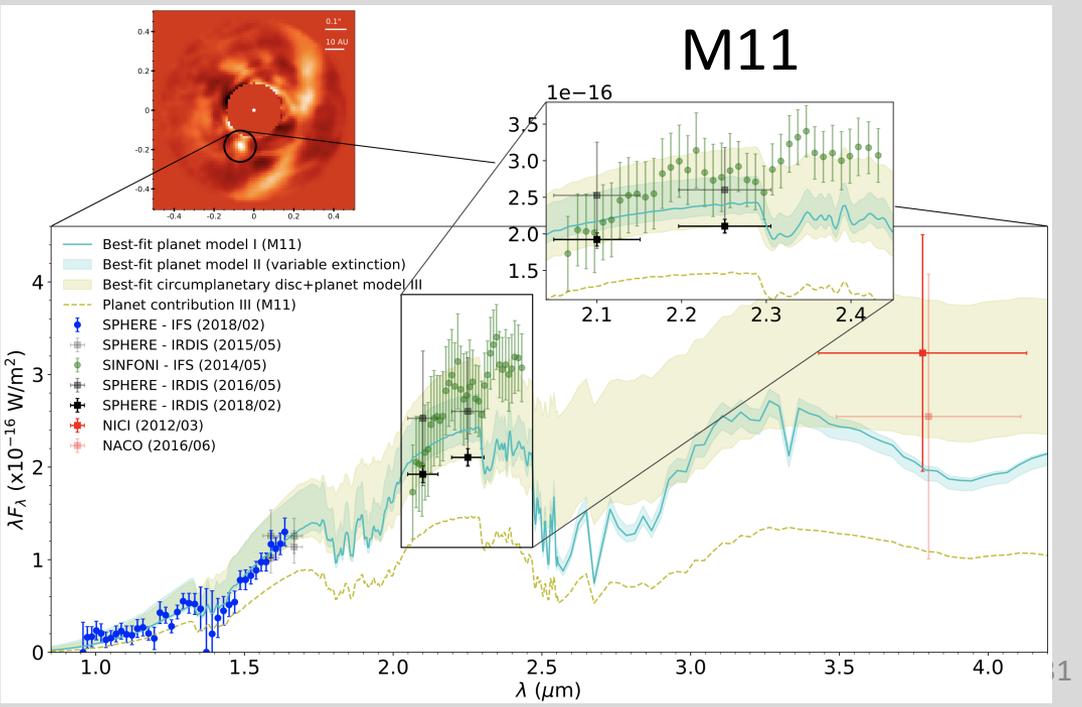
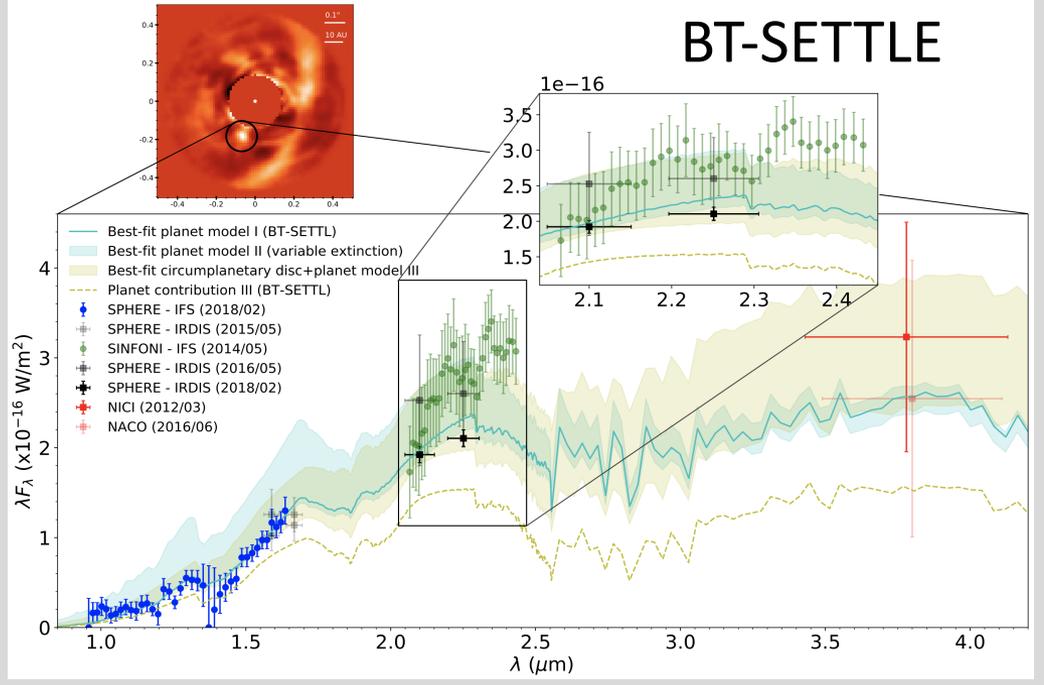
PDS 70 b

周惑星系円盤と思われる構造を検出/分光で解析

model	
	Type I (BT-SETTLE)
	Type II (variable)
	Type III (P+CPD)
	Type III (P)

compare exoplanet's atmospheric model

Christians+2019



目次:

せいめい望遠鏡による 太陽系外惑星の 直接撮像観測 のための装置開発

- (太陽)系外惑星
- 系外惑星の直接撮像と(超)補償光学
- SEICA (Secound-generation Exoplanet Imager with Coronagraphic Ao)

SEICA (Second-generation Exoplanet Imager with Coronagraphic Adaptive Optics)

熱放射

◆ 目的:系外惑星直接撮像

1. 0".2秒角以遠(2AU@10pc)で木星質量の惑星の検出 / キャラクターリゼーション
2. 惑星撮像装置(for TMT)に搭載する先進技術開発・実証

技術

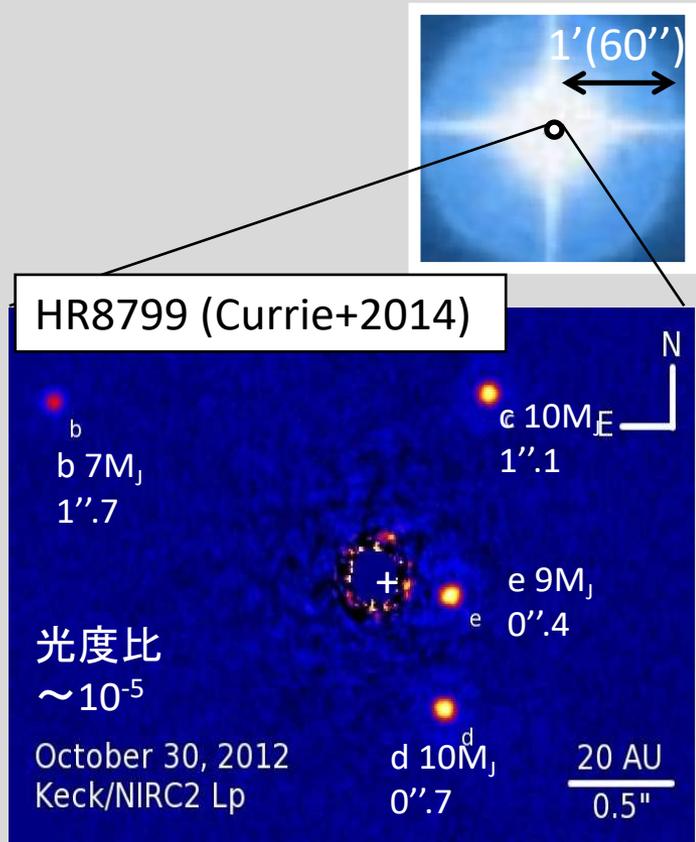
補償光学 ◆ FPGA controller for ExAO
 ◆ 直接位相計測型波面センサ

コロナグラフ ◆ ナリング干渉計型

ポスト-コロナグラフ ◆ スペックルナリング (SLM etc...)
 ◆ 瞳再配置撮像
 ◆ 高分散分光器 など検証中

◆ 分割主鏡ならではの
 高コントラスト技術 等....

- ◆ 設置場所:3.8mせいめい望遠鏡へ搭載
- ◆ 望遠鏡へのアクセスが容易



SEICA: 体制

◆ 5機関/10名でそれぞれ開発進行中

◆ 補償光学

- 全体光学系: 京都大学
- 波面センサ: 京都大学
- FPGA制御装置: 大阪電気通信大学

◆ コロナグラフ

- コロナグラフ系: 北海道大学

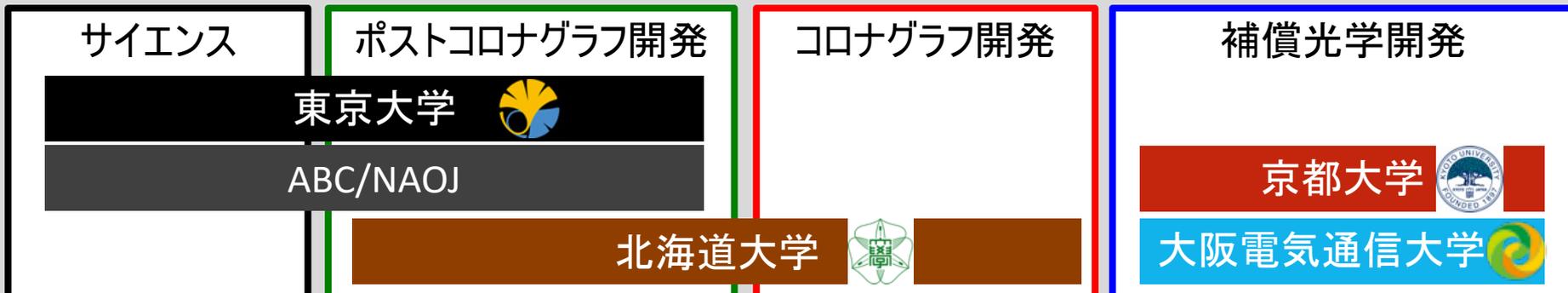
◆ ポストコロナグラフ

- スペックルナリング: 北海道大学
- 惑星RV分光器?: 東京大学/ABC

2020年度末

2021年度末

◆ 開発場所: 京都大学 → せいめい望遠鏡ドーム



SEICA: 要求仕様

◆ 目標 10^5-6 のコントラスト

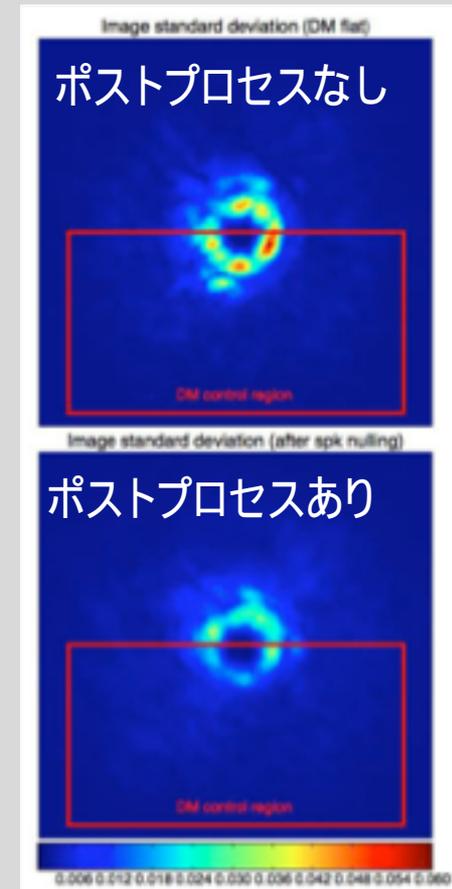
- ◆ コロナグラフ: SPLINE:: 瞳面干渉型コロナグラフ
- ◆ ポストコロナグラフ: スペックルナリング

◆ コロナグラフ + スペックルナリング

- **平面波** で性能を発揮 → 高精度波面補正
- **光軸上** の強度を抑圧 → 高精度星像安定

◆ コロナグラフからの要求

- ◆ 星像安定性: $< 10\text{mas}$
- ◆ Strehl比: > 0.9 (回折限界は > 0.8)
 - ◆ → 波面残差 $\lambda/20$
 - ◆ $\sim 60\text{nm}$ (rms; @Jバンド[$1.2\mu\text{m}$])

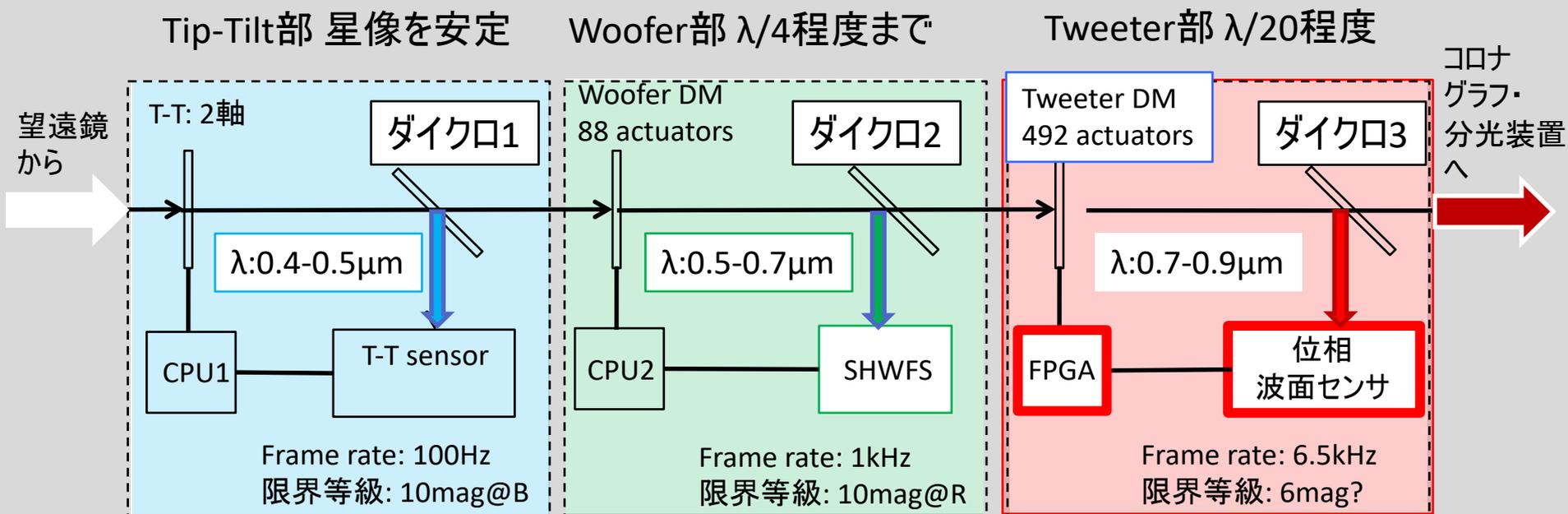


SCEXAO: Martinache+2014³⁵

SEICA: ExAOの仕様と構成

傾斜計測: Tip-Tilt + Woofer
低速、粗い波面制御

位相計測: Tweeter
高速、高精度波面制御



装置目標

高精度 (ストレーラ比0.9 \rightarrow $\lambda/20$; rms)
 \rightarrow 高周波 (5-10 kHz)
 \rightarrow 高空間周波数 (1辺24素子)

SEICA: ExAOの開発

- 新方式波面センサの開発: 点回折干渉計(PDI)
 - ◆ 位相計測のためSHWFSよりも多点で高速に高精度計測可能
 - ◆ 他位相計測より測定可能レンジが広い
- FPGAを用いた多点高速制御システムの開発
 - ◆ 従来の汎用PCでの制御と比べ、時間遅れ300→11 μ secに短縮
 - ◆ 6.5kHzでの制御ループが可能(最大90kHz)



波面センサ
[492測定点]



I/Oボード

PC → **FPGAボード**



転送
2.5 μ sec

従来65 μ sec

転送
7.9 μ sec

制御計算 0.7 μ sec

従来35 μ sec

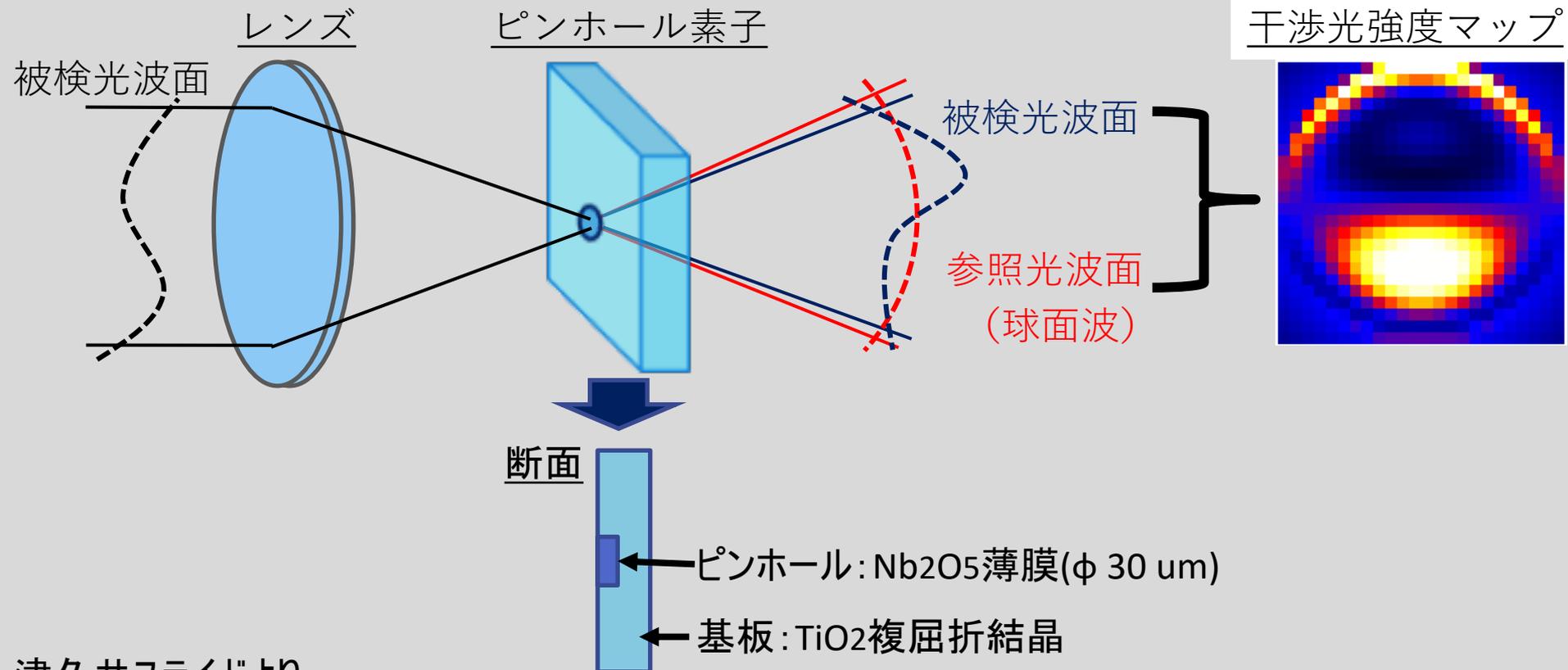


可変形鏡
[492制御点]

SEICA: 新方式波面センサの開発

Tsukui+2020

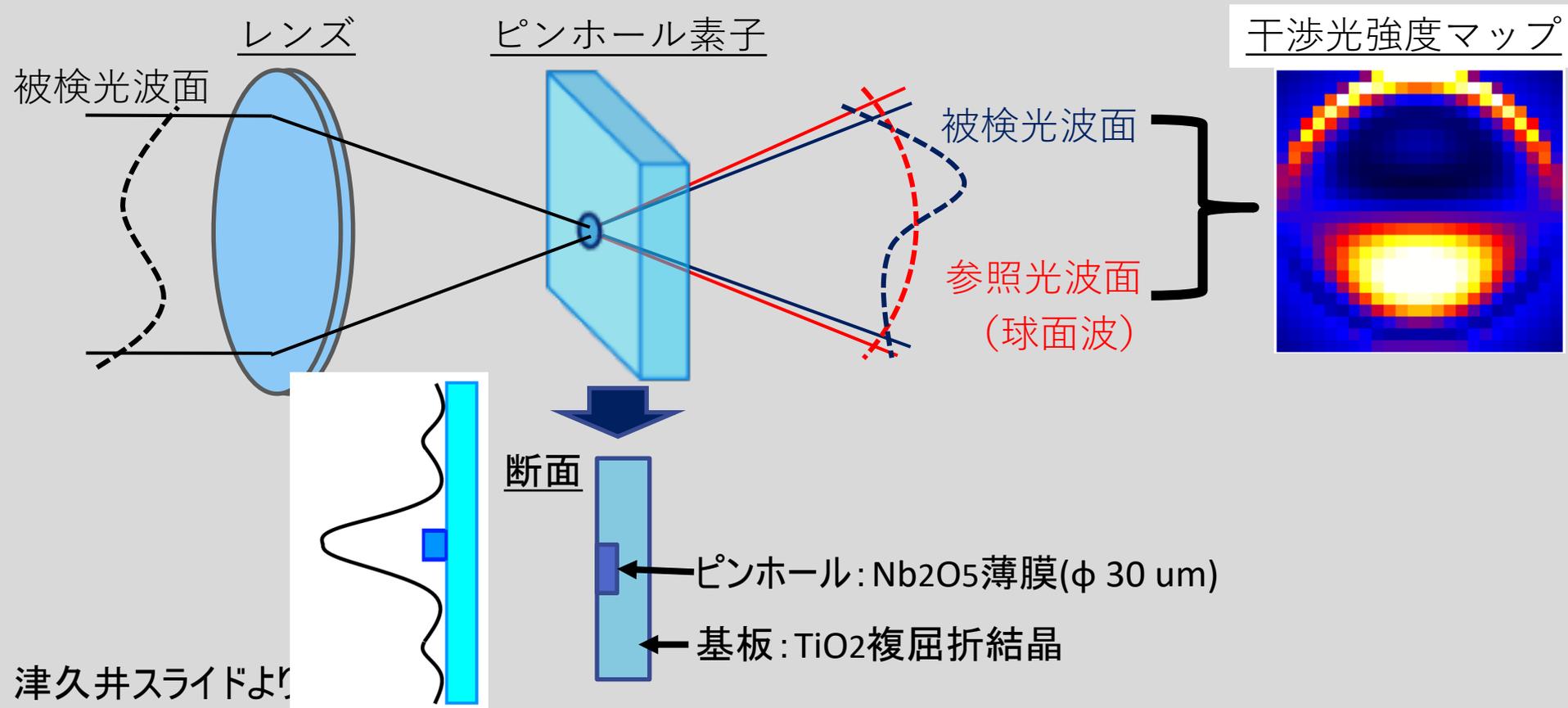
- 複屈折結晶を用いた点回折干渉計：可動部がなく安定
 - ◆ 3ステップ同時位相シフト → 高速かつ広レンジでの波面測定
 - ◆ 光の損失がほとんどない → 高精度な波面測定
- 東京工業大学にて結晶加工中



SEICA: 新方式波面センサの開発

Tsukui+2020

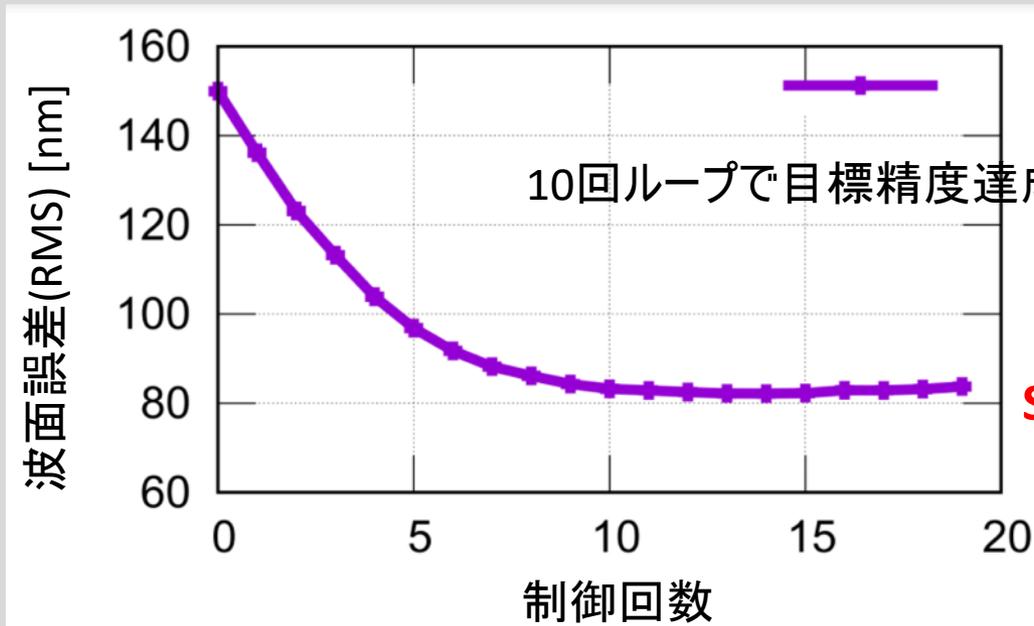
- 複屈折結晶を用いた点回折干渉計：可動部がなく安定
 - ◆ 3ステップ同時位相シフト → 高速かつ広レンジでの波面測定
 - ◆ 光の損失がほとんどない → 高精度な波面測定
- 東京工業大学にて結晶加工中



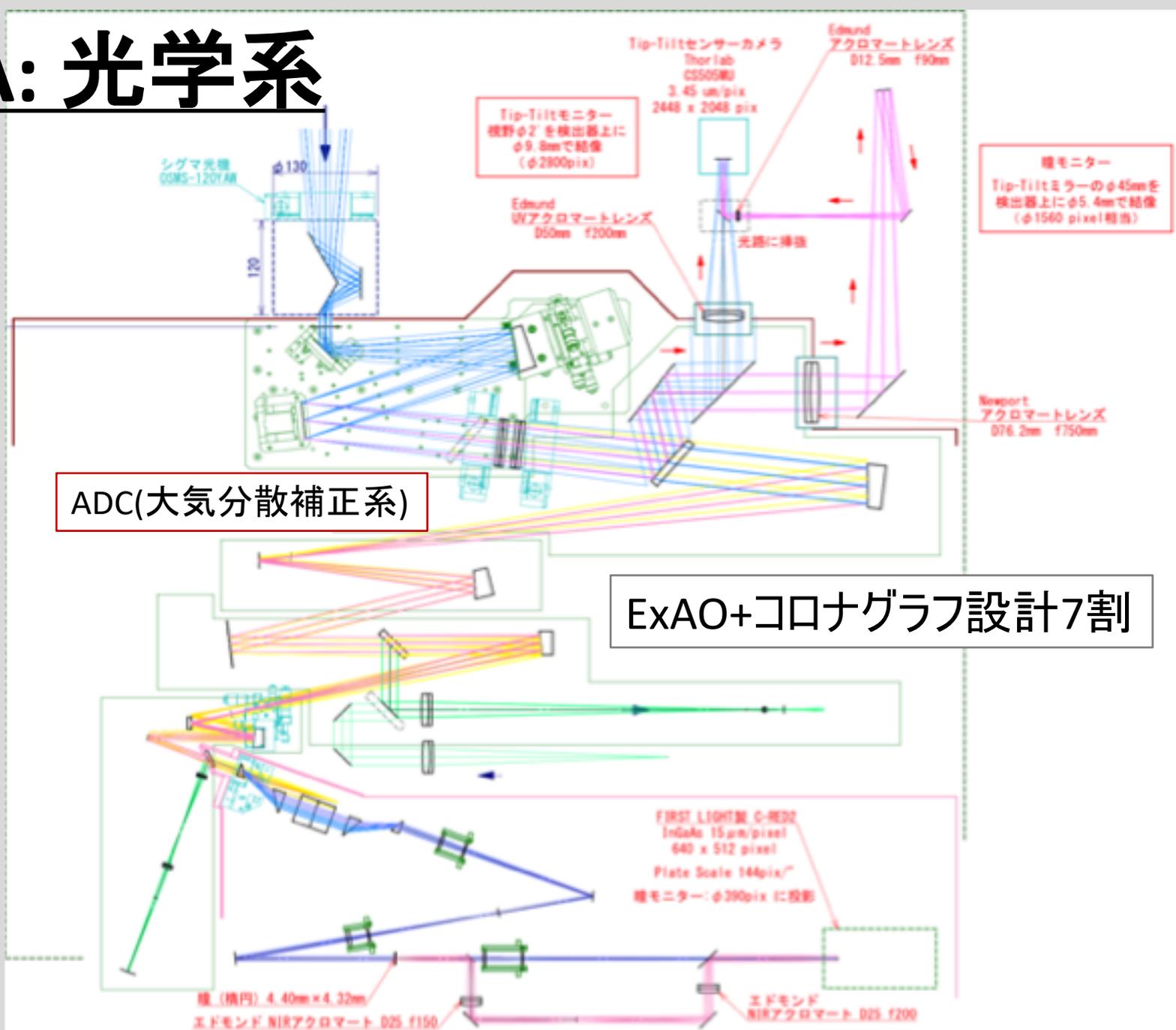
SEICA: ExAOシミュレーション

- 複屈折PDI波面センサを搭載したExAOのシミュレーション

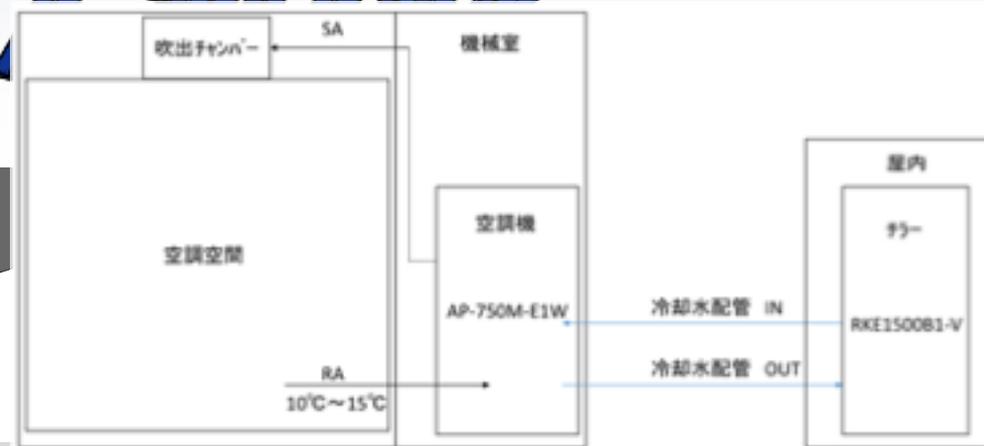
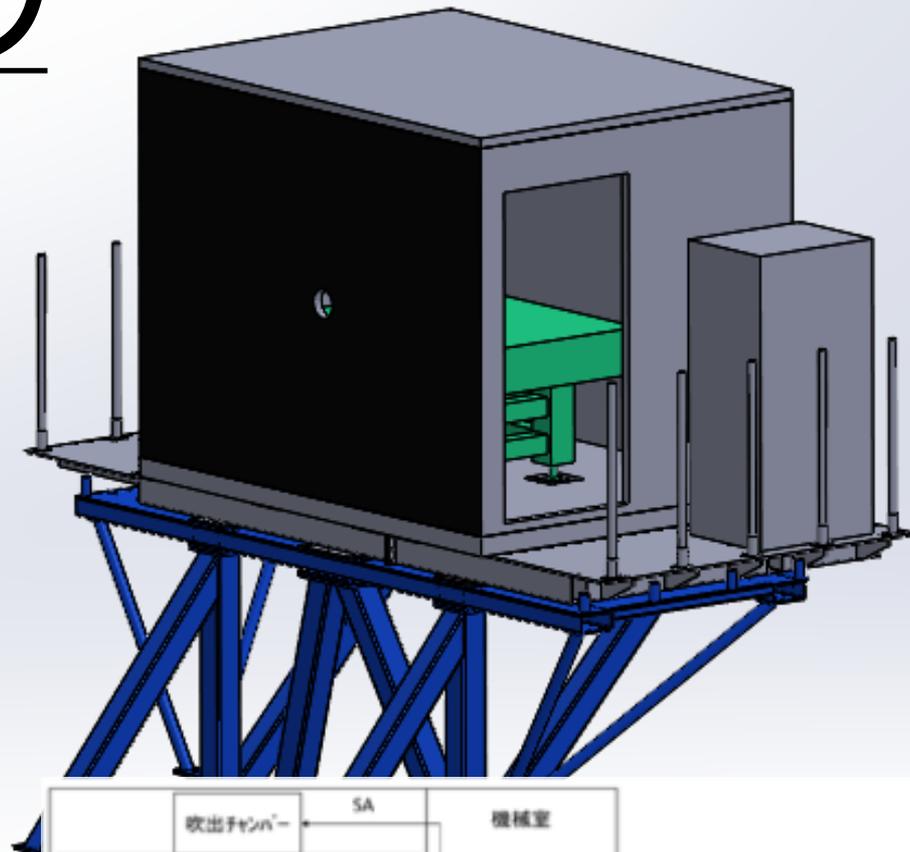
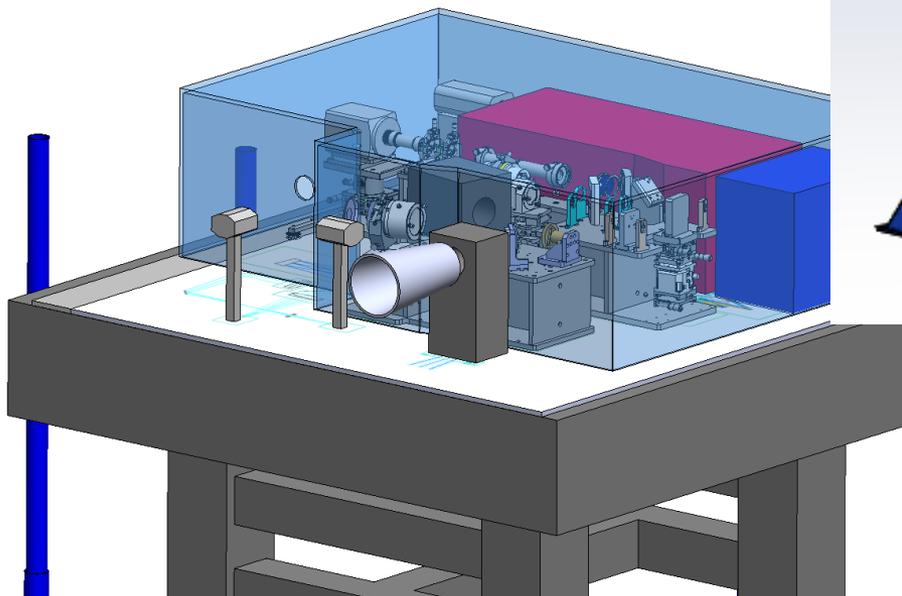
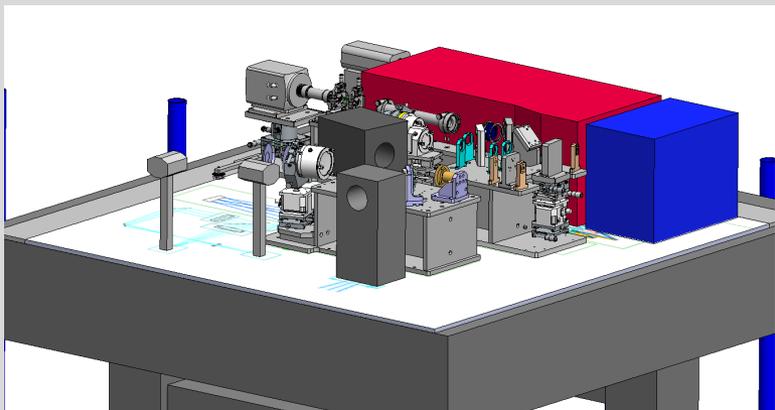
分割数	24x24
ループ速度	6.5 kHz
ゲイン	0.3
ガイド星等級	4.8 mag @ Ic-band
波面センサ用検出器	浜松 ORCA-flash 4.0 v2
入力波面誤差	P-V 1200 nm, RMS 150 nm



SEICA: 光学系



SEICA: 全景イメージ



SEICA: スケジュール

■ FY2020:

- ◆ 恒温設備の青ナス搭載
- ◆ 実機的设计製作[ImR + 校正光源 + ADC + TTカメラ + WooferAO] 試験
- ◆ TT光学系による望遠鏡搭載試験観測
- ◆ WooferAOまでの光学系の設計完了
- ◆ TweeterWFSの製作試験

■ FY2021:

- ◆ 恒温設備の運用試験
- ◆ Woofer + SHWFS Tweeterで試験観測

まとめ

- 太陽系外惑星は4000個以上報告されている。
- 間接的な手法によってどんな惑星がどれだけ分布しているかわかってきている。
- 個別の惑星をより詳細に観測するために撮像観測が必要
- 第2の地球探索のためには宇宙/超大型望遠鏡が必要
- ほかに観測で発見された惑星の観測は頑張れば、地上でもできるのではないか
- せいめい望遠鏡で系外惑星の直接撮像観測をめざす
- 21年度中のFLに向けて開発中

