

# 新しい高コントラスト後処理法 Coherent Differential Imaging on Speckle Area Nulling (CDI-SAN)

第11回 可視赤外線観測装置技術ワークショップ 2022、 Dec. 21-23

西川 淳 (国立天文台/総研大/ABC) ,  
米田謙太 (国立天文台) ,  
早野 裕 (国立天文台/総研大) ,  
入部正継 (大阪電気通信大) ,  
山本広大, 津久井 遼 (京都大) ,  
村上尚史, 浅野瑞基 (北海道大) ,  
村松大海 (東京農工大学/国立天文台)  
田中洋介 (東京農工大学/ABC)

本研究は、学術変革研究「散乱透視学」の計画研究A03-8  
「光波の時空間における計測・変調・制御を駆使した地球型惑星検出に迫るイメージング」  
(早野, 西川, 入部, 服部, 山本、米田) の課題の一つとして推進しています。

# 地球型系外惑星の 反射光スペクトル バイオシグナチャーの探索

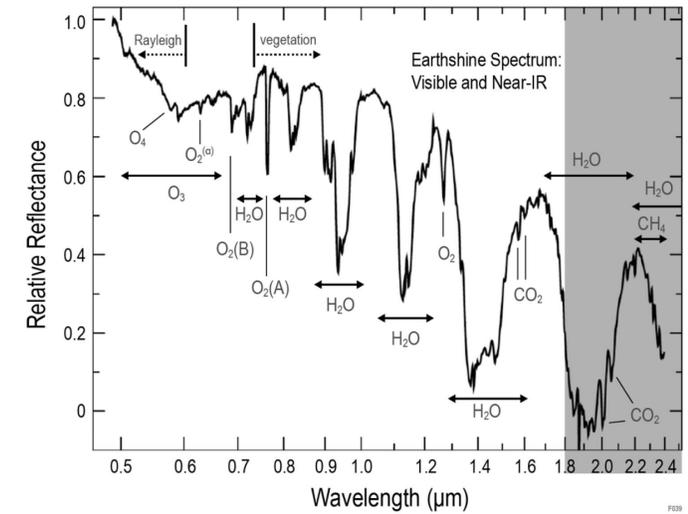
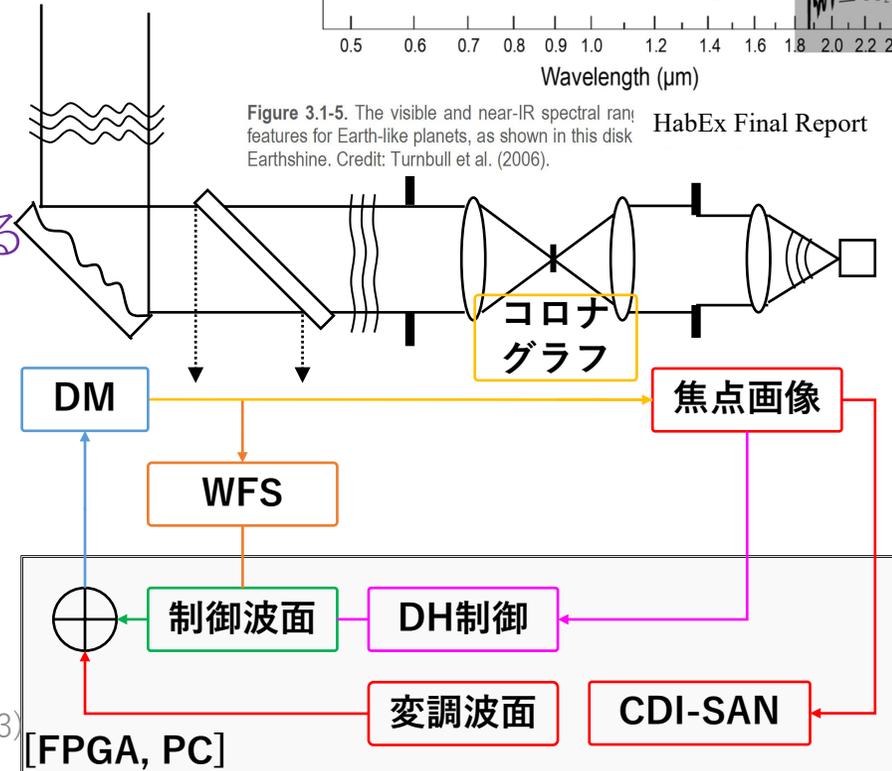


Figure 3.1-5. The visible and near-IR spectral range features for Earth-like planets, as shown in this disk Earthshine. Credit: Turnbull et al. (2006). HabEx Final Report

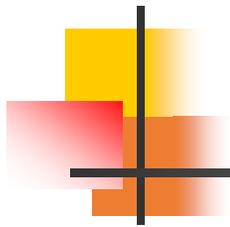


## ■背景

- 今後の宇宙・地上（超）大型望遠鏡の目標の一つ
  - 地球型系外惑星の光を分光し生命の兆候を探查
- 系外惑星の反射光スペクトルの取得

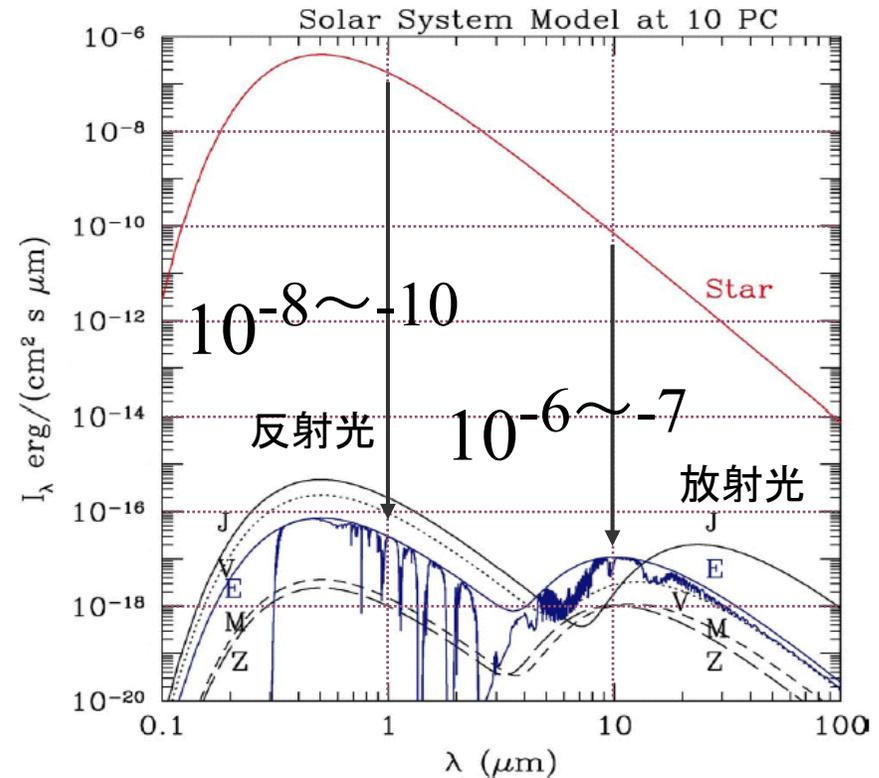
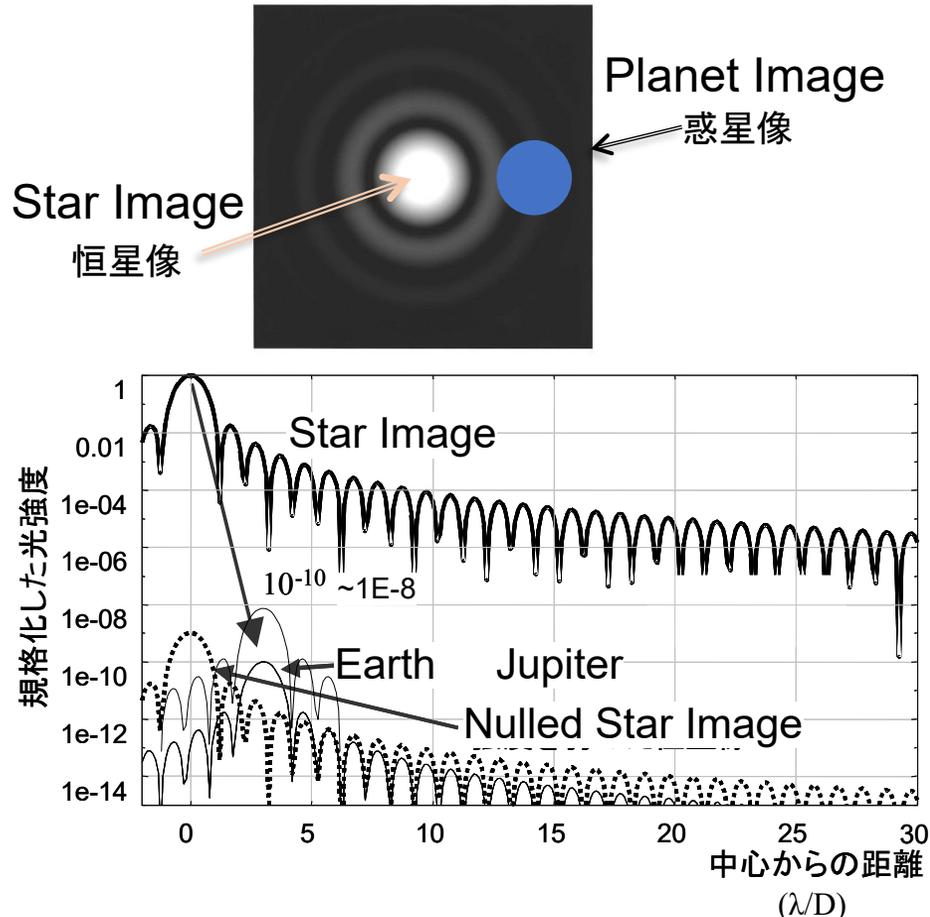
## ■必要な要素

- 高コントラスト コロナグラフ（直接撮像光学系）
    - 主星の回折光を消光する
  - ダークホール制御（+超補償光学@地上）
    - 焦点面のスペックルが消えるように波面制御する
  - Post-processing（Differential Imaging 差分法）
    - 生コントラストのスペックルレベルより暗い惑星を抽出する
    - 従来の差分法は1.5桁程度の改善
    - CDI-SAN ホトンノイズ限界に近い改善が可能
- CDI: Coherent Differential Imaging 干渉差分撮像法  
 SAN: Speckle Area Nulling スペックル領域消光法



# Exo-Planet Parameters

太陽-地球系 @ 10pc 離角  $0.1'' \sim 3 \lambda/D$  ( $\lambda=0.65\mu\text{m}$ ,  $D=4\text{m}$ ) **ピーク強度比  $1\text{E}-10$**   
 赤色矮星-地球型惑星 @ 4pc 離角  $0.02'' \sim 3 \lambda/D$  ( $\lambda=1\mu\text{m}$ ,  $D=30\text{m}$ ) **強度比  $1\text{E}-8$**

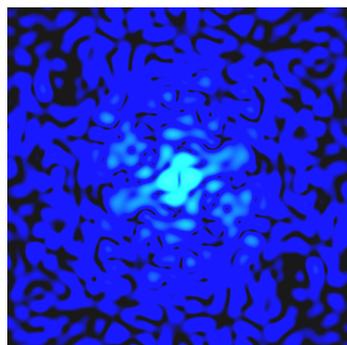


Traub and Jucks, AGU Geophysical Monograph, 130, 369 (2002)

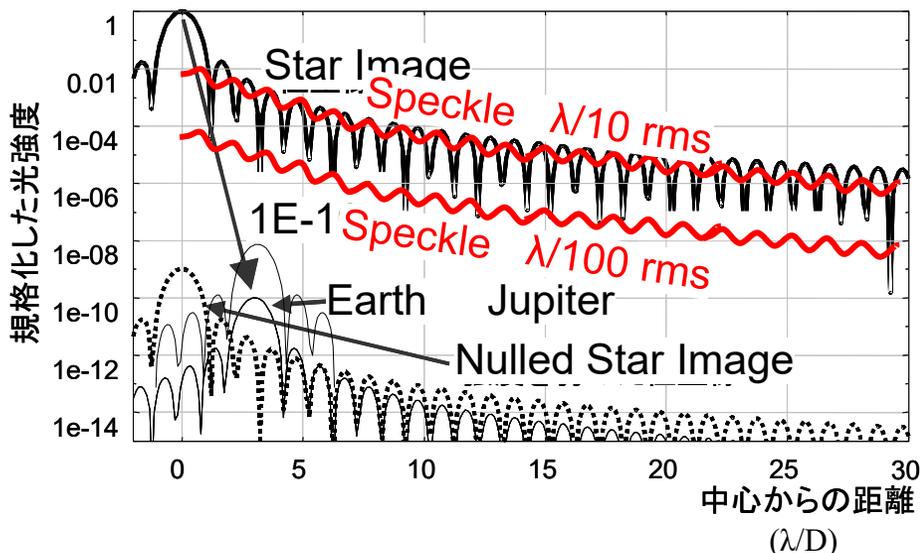
口径  $D=3.5\text{m}$ 、波長  $\lambda=0.6\mu\text{m}$  の場合、惑星離角  $0.1'' = 2.8\lambda/D$

# Exo-Planet Parameters

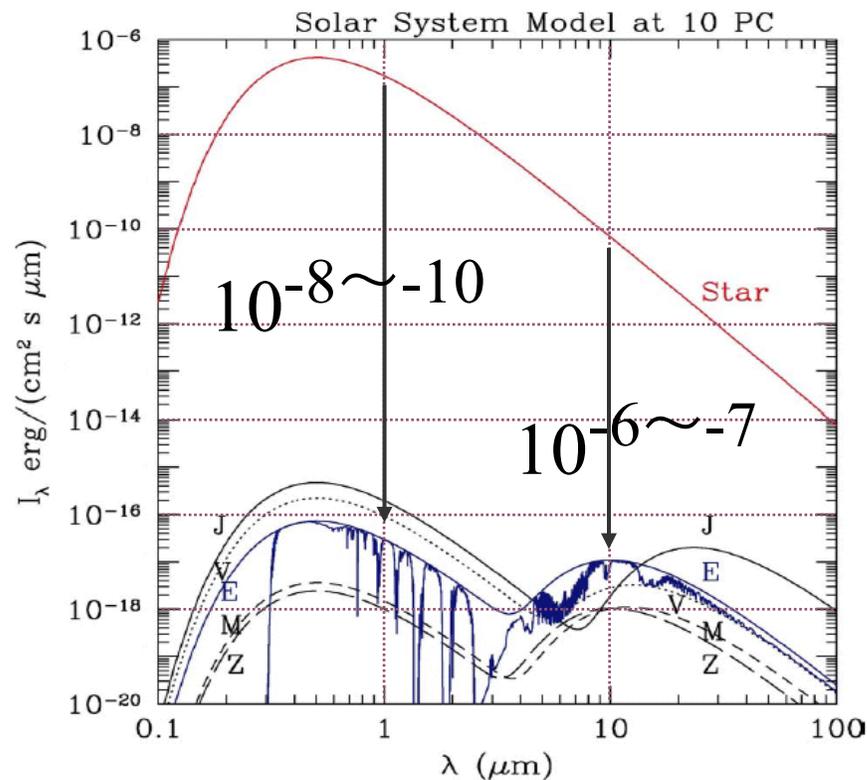
太陽-地球系 @ 10pc 離角  $0.1'' \sim 3 \lambda/D$  ( $\lambda=0.65\mu\text{m}$ ,  $D=4\text{m}$ ) **ピーク強度比  $1\text{E}-10$**   
 赤色矮星-地球型惑星 @ 4pc 離角  $0.02'' \sim 3 \lambda/D$  ( $\lambda=1\mu\text{m}$ ,  $D=30\text{m}$ ) **強度比  $1\text{E}-8$**



Speckle



口径 $D=3.5\text{m}$ 、波長 $\lambda=0.6\mu\text{m}$ の場合、惑星離角 $0.1''=2.8\lambda/D$



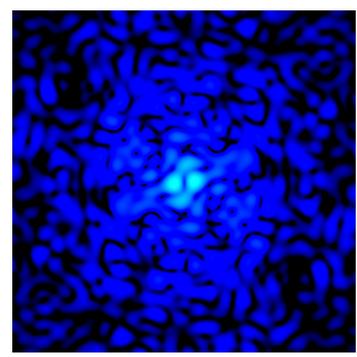
Traub and Jucks, AGU Geophysical Monograph, 130, 369 (2002)

地上での  
生コントラスト  
 $1\text{E}-3 \sim -5$   
後処理が重要

# Exo-Planet Parameters

太陽-地球系 @ 10pc 離角 0.1" ~ 3 λ/D (λ=0.65μm、D=4m) **ピーク強度比 1E-10**  
 赤色矮星-地球型惑星 @ 4pc 離角 0.02" ~ 3 λ/D (λ=1μm、D=30m) **強度比 1E-8**

NASA Roman Space Telescope (2026)

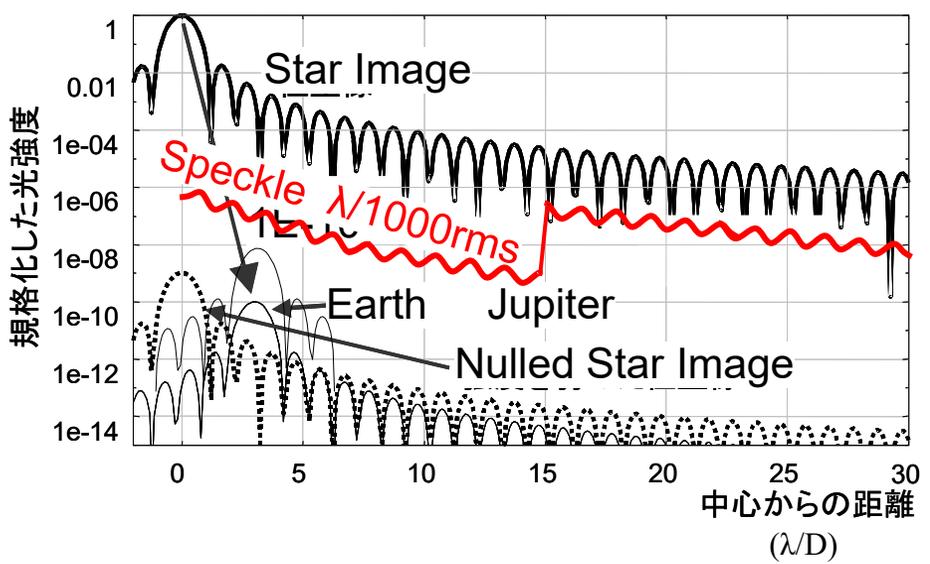


Speckle

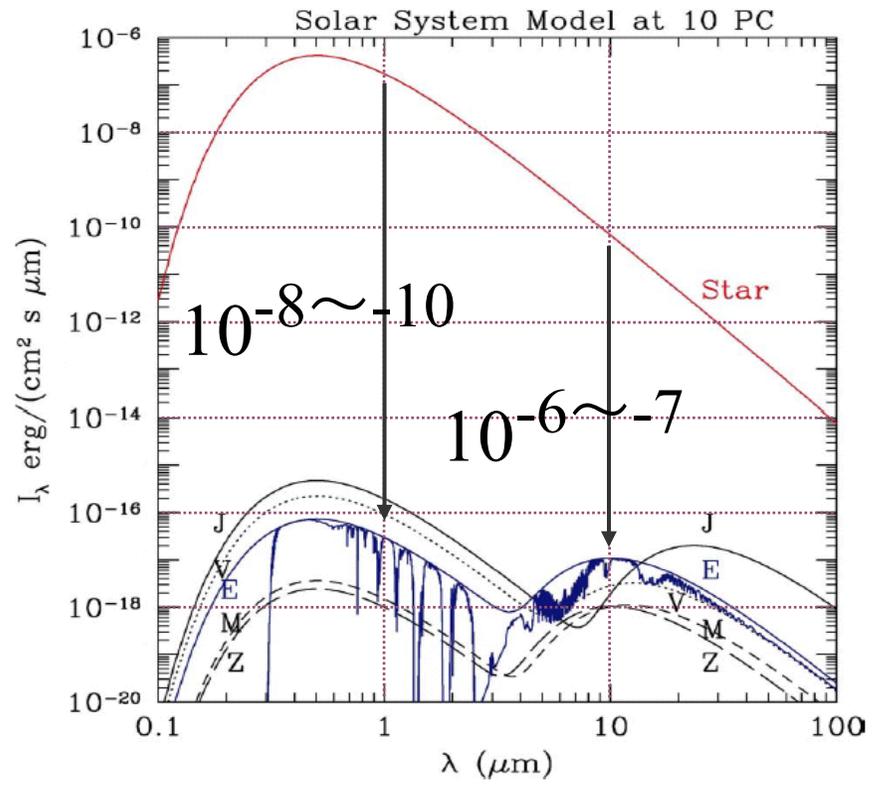
宇宙での  
生コントラスト  
1E-8?

後処理が重要

~ -11



口径D=3.5m、波長λ=0.6μmの場合、惑星離角0.1"=2.8λ/D

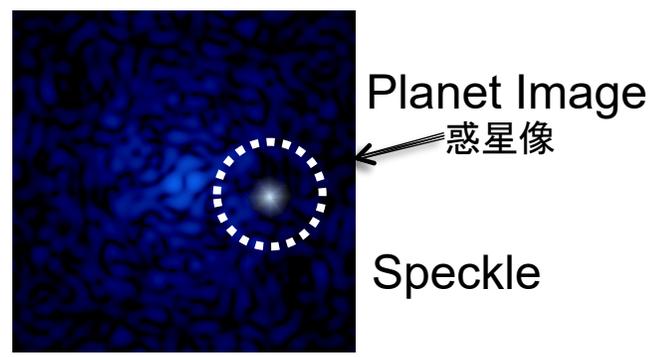


Traub and Jucks, AGU Geophysical Monograph, 130, 369 (2002)

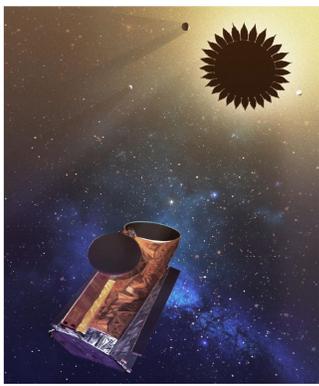
# Exo-Planet Parameters

太陽-地球系 @ 10pc 離角 0.1" ~ 3 λ/D (λ=0.65μm、D=4m) **ピーク強度比 1E-10**  
 赤色矮星-地球型惑星 @ 4pc 離角 0.02" ~ 3 λ/D (λ=1μm、D=30m) **強度比 1E-8**

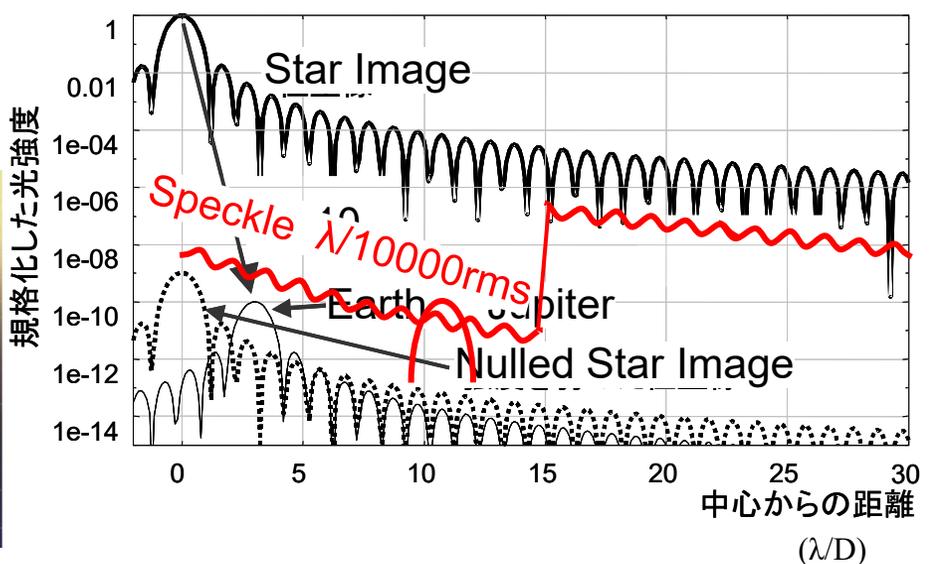
NASA Roman Space Telescope (2026)



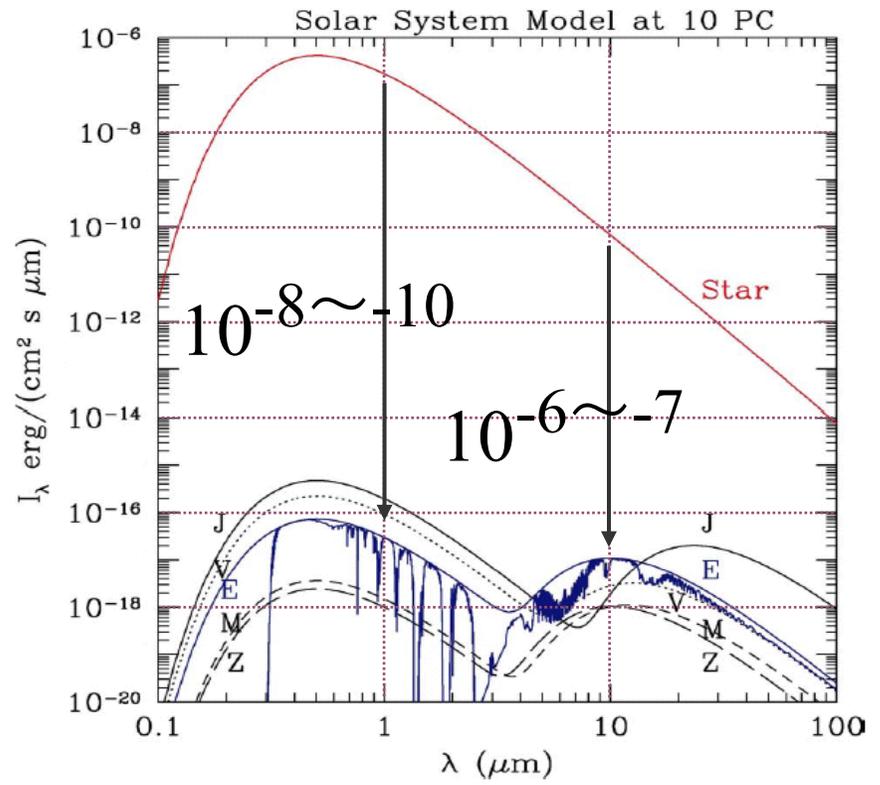
宇宙での生コントラスト 1E-8? ~ -11



NASA HabEx 2030' ⇒ Habitable Worlds Observatory '40

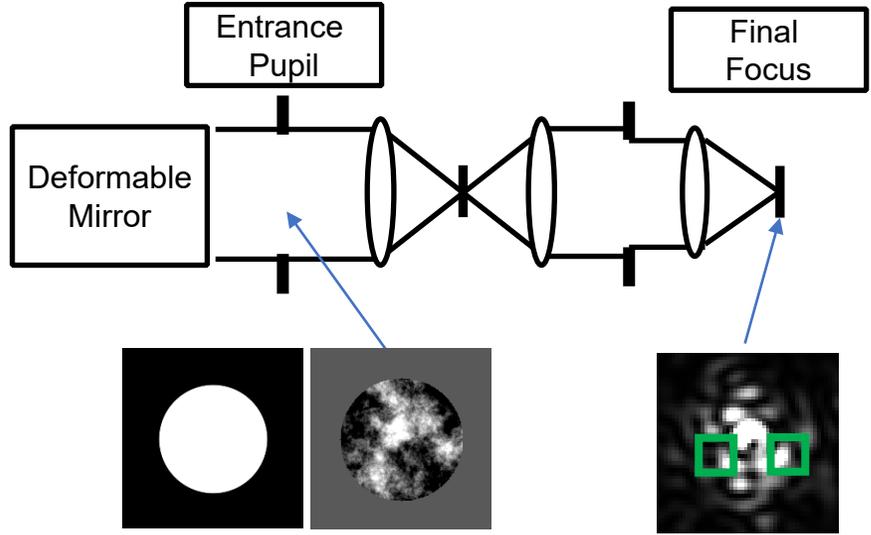


口径D=3.5m、波長λ=0.6μmの場合、惑星離角0.1"=2.8λ/D

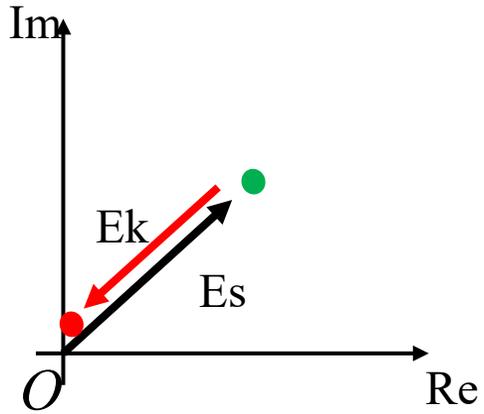


Traub and Jucks, AGU Geophysical Monograph, 130, 369 (2002)

# Dark Hole Control



(SN)

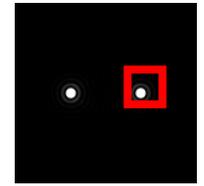


## Speckle Nulling (SN)

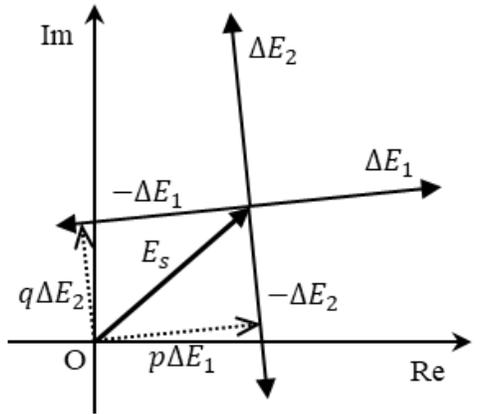
Trauger 2004 SPIE 5487, 1330



$$A \sin(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r})$$



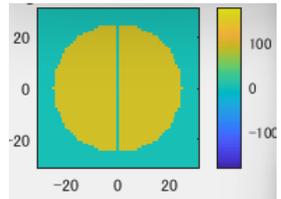
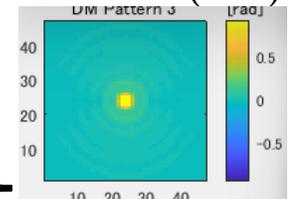
(SAN)



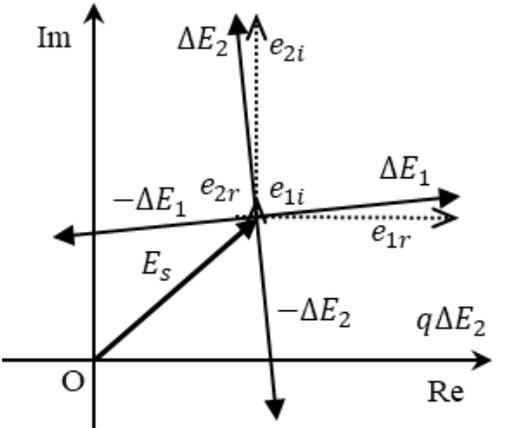
## Speckle Area Nulling (SAN)

Oya 2015 OR 22, 736-740

$$\begin{aligned} &\Sigma A \cos(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) \\ &\Sigma A \sin(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) \end{aligned}$$

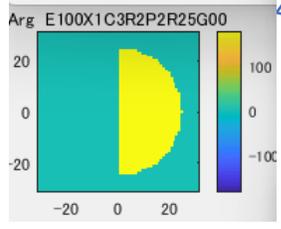
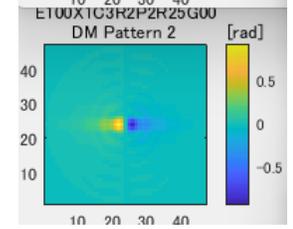


(EFC)



## Electric Field Conjugation (EFC)

Giveon 2011 SPIE8151,10



# Dark Hole Control

# SN(1~多数点同時)とSAN

$$\begin{cases} I_0 = |E_s|^2 + I_p \\ I_1^+ = |E_s + \Delta E_1|^2 + I_p \\ I_1^- = |E_s - \Delta E_1|^2 + I_p \\ I_2^+ = |E_s + \Delta E_2|^2 + I_p \\ I_2^- = |E_s - \Delta E_2|^2 + I_p, \end{cases}$$

$$\begin{cases} |\Delta E_1|^2 = (I_1^+ + I_1^- - 2I_0)/2 \\ |\Delta E_2|^2 = (I_2^+ + I_2^- - 2I_0)/2 \end{cases}$$

## (SAN)

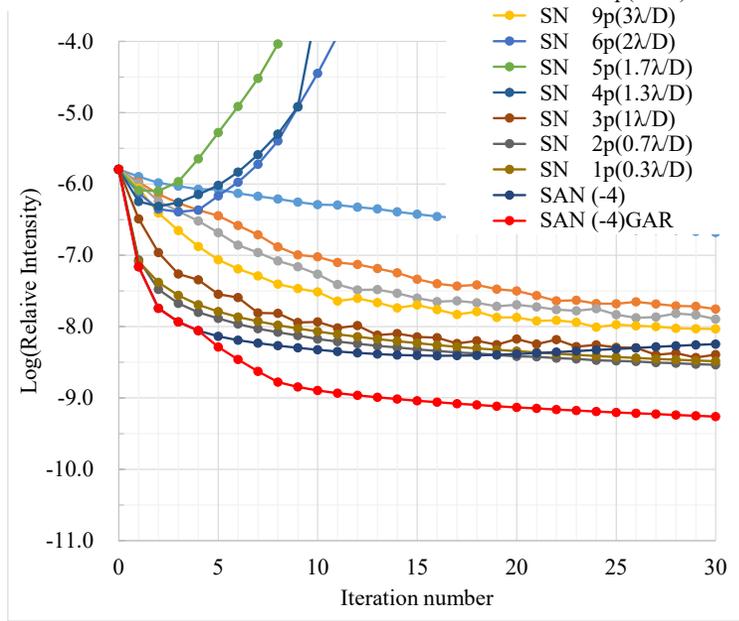
$$\begin{cases} E_s = p\Delta E_1 + q\Delta E_2 \\ p = (I_1^+ - I_1^-)/2 (I_1^+ + I_1^- - 2I_0) \\ q = (I_2^+ - I_2^-)/2 (I_2^+ + I_2^- - 2I_0), \end{cases}$$

## (EFC)

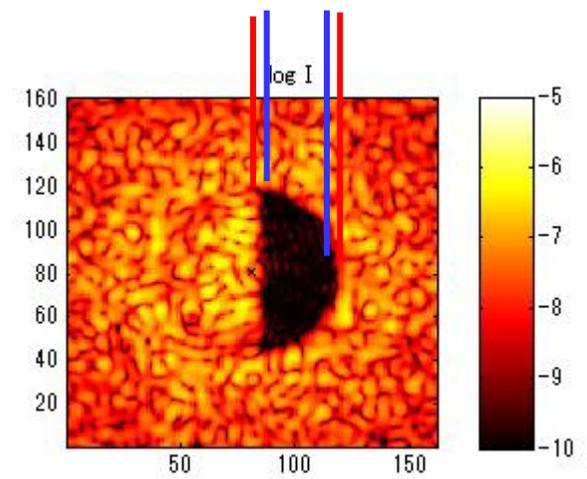
$$\begin{aligned} E_s &= e_{sr} + e_{si}i \\ \Delta E_1 &= e_{1r} + e_{1i}i \\ \Delta E_2 &= e_{2r} + e_{2i}i \end{aligned} \quad \begin{pmatrix} e_{1r} & e_{1i} \\ e_{2r} & e_{2i} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_{sr} \\ e_{si} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (I_1^+ - I_1^-)/4 \\ (I_2^+ - I_2^-)/4 \end{pmatrix}$$

偏角はモデルが必要

$E_s(x, y) = G \varphi(\xi, \eta)$  DM形状を最小二乗的に解く

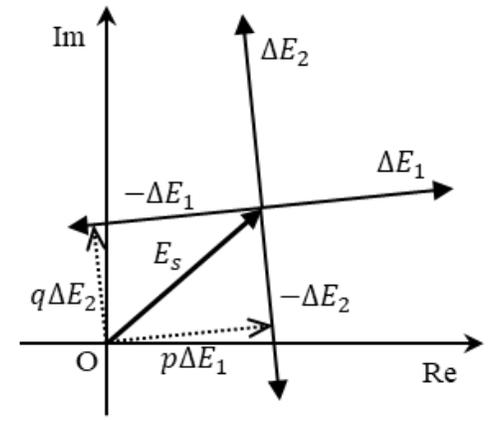


DM 形状は変調波の係数倍  
 $\Sigma -pA \sin(k \cdot r)$  モデル無依存  
 $\Sigma -qA \cos(k \cdot r)$



評価領域  
 SN制御領域  
 2-12λ/D  
 SAN制御領域  
 0.7-13.3λ/D  
 ⇒(GAR)  
 2-12λ/D

## (SAN)



## Dark Hole Control (生コントラスト) の限界

	時定数	生コン	波面誤差	光子数
宇宙望遠鏡	30分	1E-9	λ / 10000	100Photons
宇宙望遠鏡	3分	1E-7	λ / 1000	100Photons
地上望遠鏡	15ms	1E-5	λ / 100	100Photons

The Coherent Differential Imaging on Speckle Area Nulling (CDI-SAN) method for high-contrast imaging under speckle variation

$$\begin{cases} \langle I_0 \rangle = \langle I_s \rangle + I_p \\ \langle I_1^+ \rangle = \langle |E_s + \Delta E_1|^2 \rangle + I_p \\ \langle I_1^- \rangle = \langle |E_s - \Delta E_1|^2 \rangle + I_p \\ \langle I_2^+ \rangle = \langle |E_s + \Delta E_2|^2 \rangle + I_p \\ \langle I_2^- \rangle = \langle |E_s - \Delta E_2|^2 \rangle + I_p \end{cases}$$

時間平均されたスペckル強度

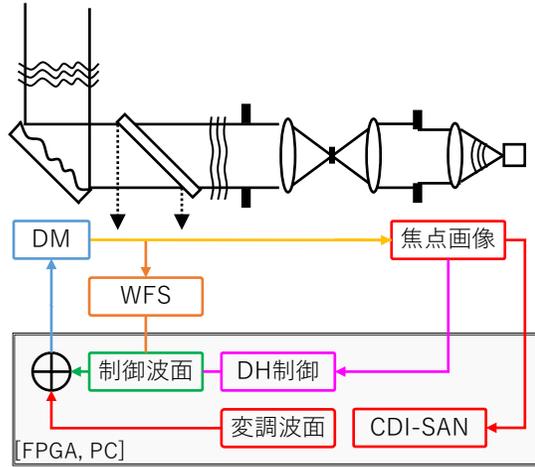
$$\langle I_s \rangle = \frac{\langle |\Delta E_1 \cdot E_s|^2 \rangle}{|\Delta E_1|^2} + \frac{\langle |\Delta E_2 \cdot E_s|^2 \rangle}{|\Delta E_2|^2}$$

$$= \frac{\langle (I_1^+ - I_1^-)^2 \rangle}{8(\langle I_1^+ \rangle + \langle I_1^- \rangle - 2\langle I_0 \rangle)} + \frac{\langle (I_2^+ - I_2^-)^2 \rangle}{8(\langle I_2^+ \rangle + \langle I_2^- \rangle - 2\langle I_0 \rangle)}$$

惑星強度

$$I_{p2} = \langle I_0 \rangle - \frac{\langle (I_1^+ - I_1^-)^2 \rangle - V_1^+ - V_1^-}{8(\langle I_1^+ \rangle + \langle I_1^- \rangle - 2\langle I_0 \rangle)} - \frac{\langle (I_2^+ - I_2^-)^2 \rangle - V_2^+ - V_2^-}{8(\langle I_2^+ \rangle + \langle I_2^- \rangle - 2\langle I_0 \rangle)}$$

$$\begin{cases} V_1^+ = \langle (I_{1a}^+ - I_{1b}^+)^2 \rangle / 4 \\ V_1^- = \langle (I_{1a}^- - I_{1b}^-)^2 \rangle / 4 \\ V_2^+ = \langle (I_{2a}^+ - I_{2b}^+)^2 \rangle / 4 \\ V_2^- = \langle (I_{2a}^- - I_{2b}^-)^2 \rangle / 4 \end{cases}$$

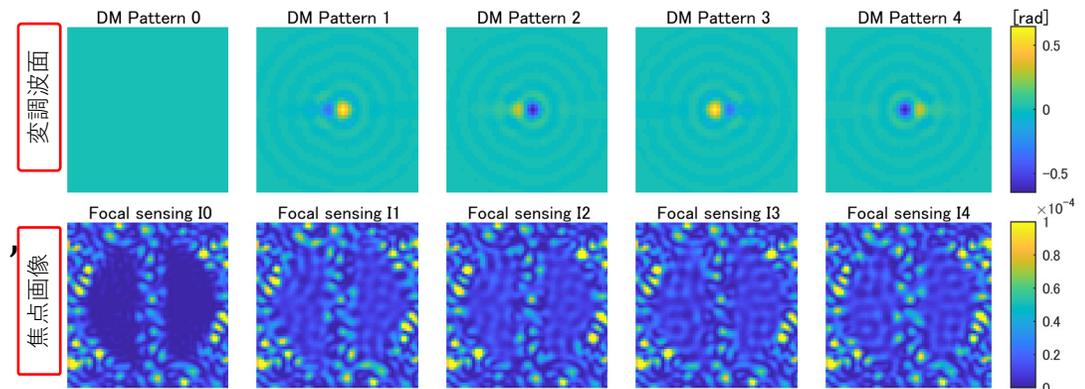


Total Integration time $Nt_0$			
Coherence time ( $t_0$ ) <sub>t=1</sub>	Coherence time <sub>t=2</sub>	...	Coherence time <sub>t=N</sub>

set <sub>s=1</sub>	set <sub>s=2</sub>	...	set <sub>s=M</sub>
--------------------	--------------------	-----	--------------------

$I_0$	$I_1^+$	$I_1^-$	$I_2^+$	$I_2^-$	five intensities half exposure
$I_{0a}$ $I_{0b}$	$I_{1a}^+$ $I_{1b}^+$	$I_{1a}^-$ $I_{1b}^-$	$I_{2a}^+$ $I_{2b}^+$	$I_{2a}^-$ $I_{2b}^-$	

DMに±変調波1、±変調波2を出力しながら画像取得  
t0=15ms, M=2, ⇒ 1.3kfps



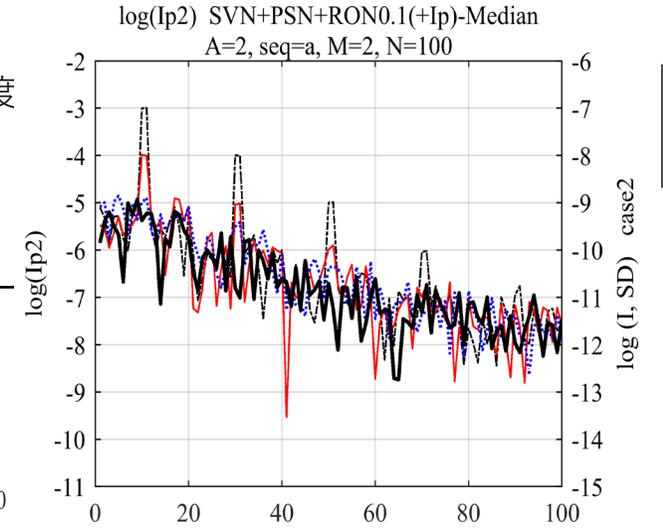
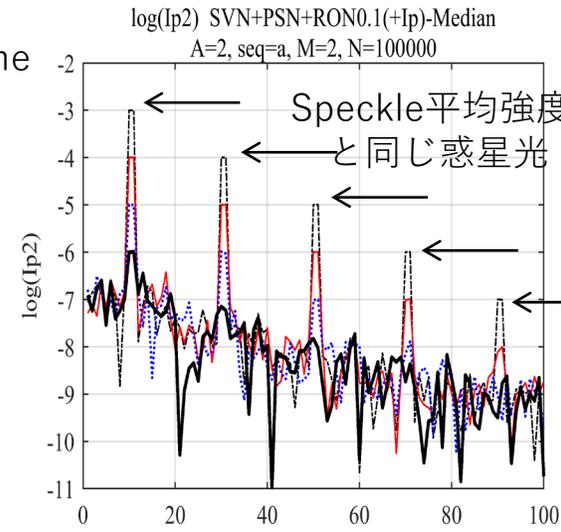
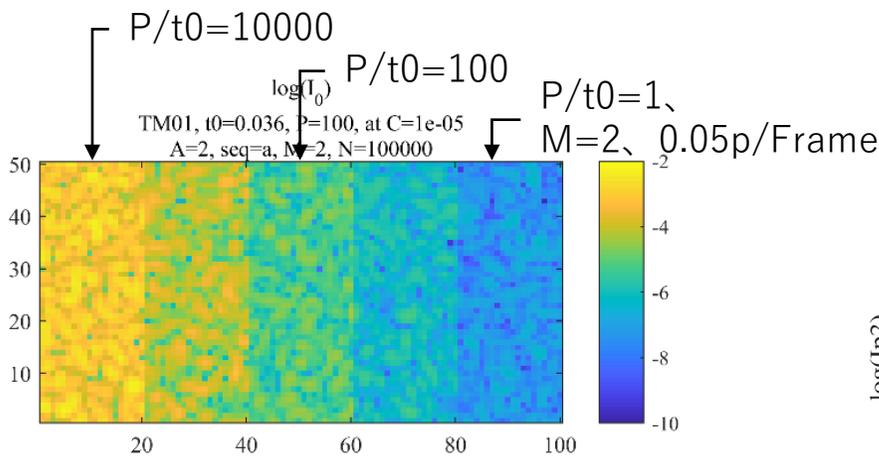
CDI-SAN

Simulation

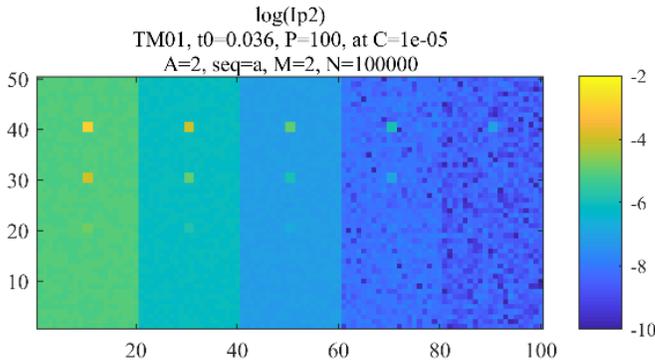
(恒星光+惑星光)

観測画像の1例

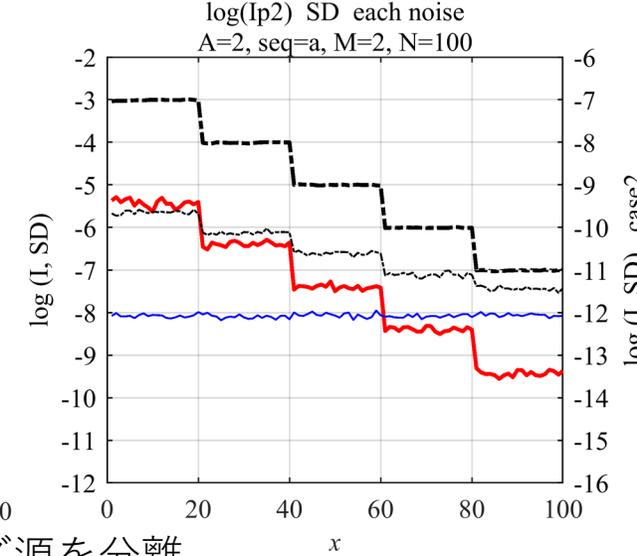
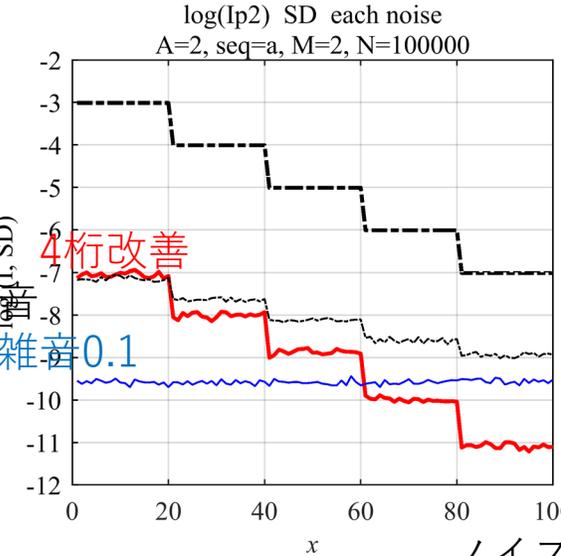
$$I = I_s + I_p$$



積分処理後  $I_{p2}$   
(100000回)  
(36ms  $\Rightarrow$  1時間)

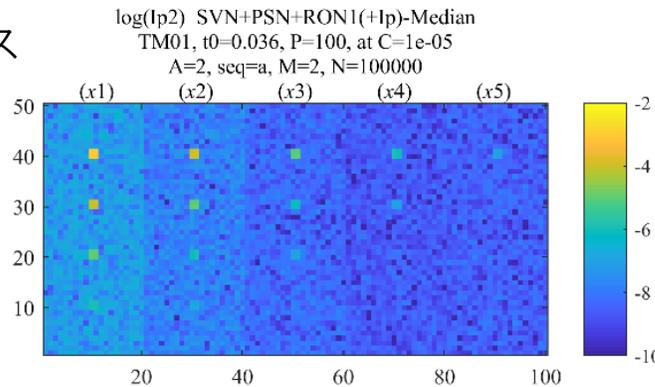


バイアスが見られる



電場変化 4桁改善  
光子雑音 読出雑音0.1

積分処理後 - バイアス  
 $I_{p2} - Median$



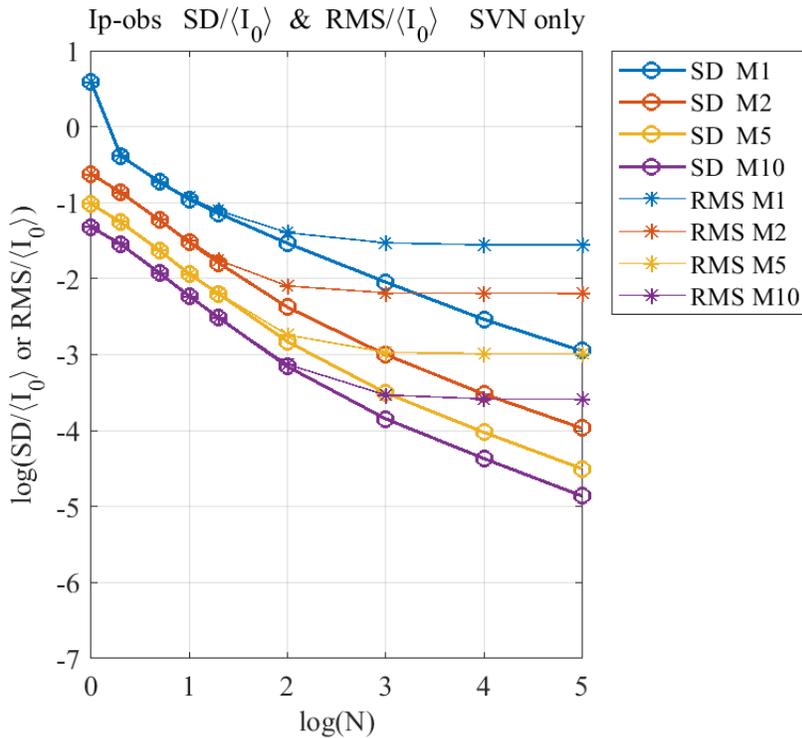
ノイズ源を分離

元の光子数次第で、  
ノイズが4桁~1.5桁抑制され惑星が出現

$1E-5$  (D=30m,  $t_0=36ms$ ,  $Q=0.2/4$ ,  $R=50$ , G1411, 1.2um)  
 $1E-9$  (D=9 m,  $t_0=3600s$ ,  $Q=0.2/4$ ,  $R=50$ , 10pcSun, 0.5um)

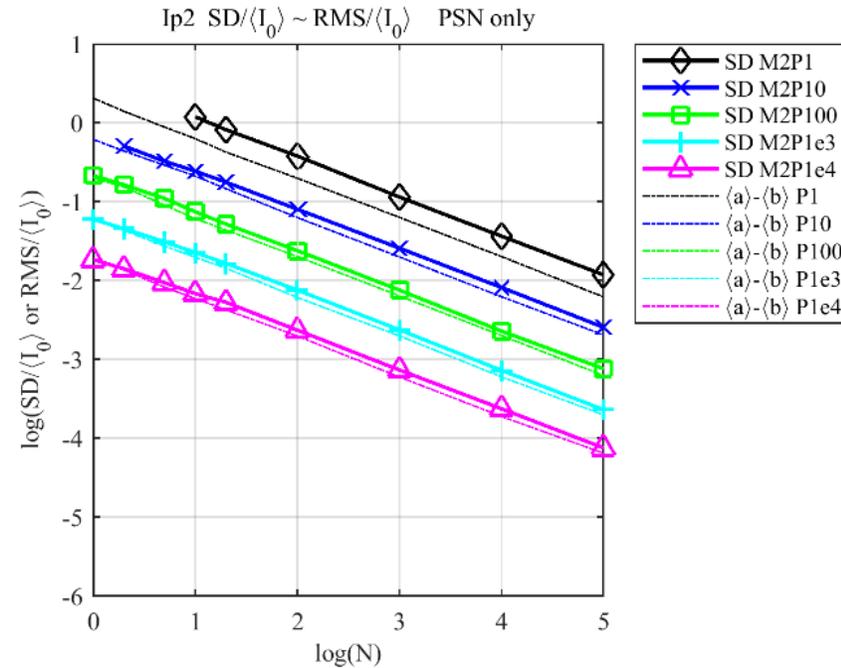
$I_{p2}$ の各ノイズの  
積分による減衰傾向

スペクトル変化雑音



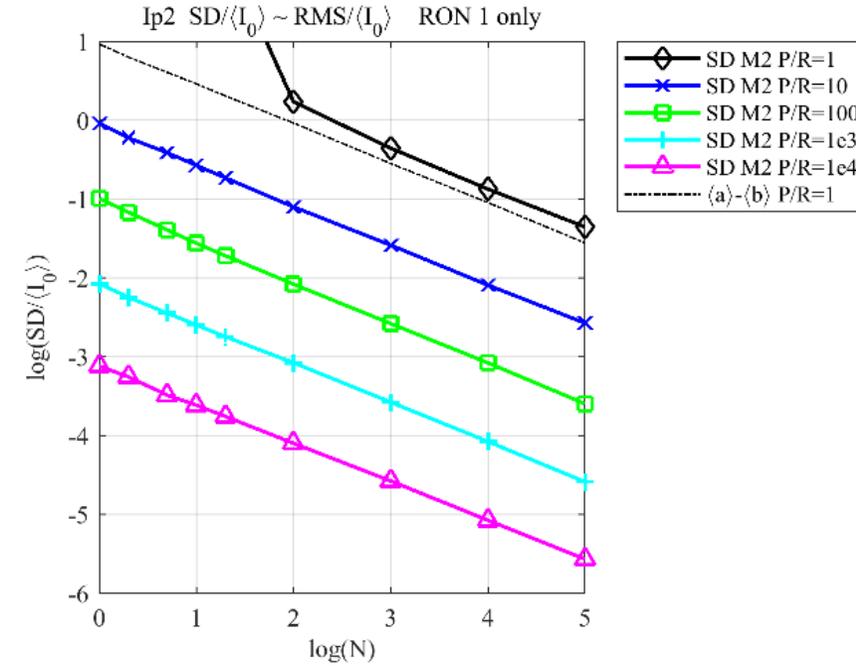
SDは順当に下がる  
変調回数 $M \geq 2$ が良い  
バイアスが残る(変調速度に依存)

光子雑音



光子雑音限界の1.2倍に収束  
(ほぼ究極の性能を持つ。)  
 $P/t_0 \leq 1$  ではやや大きい

読出雑音



読出雑音限界の1倍に収束  
 $RON > P/t_0$ の時にやや大きめ

# CDI-SAN法開発の今後

## ■ 数値計算で確認中の性能

広帯域の特性

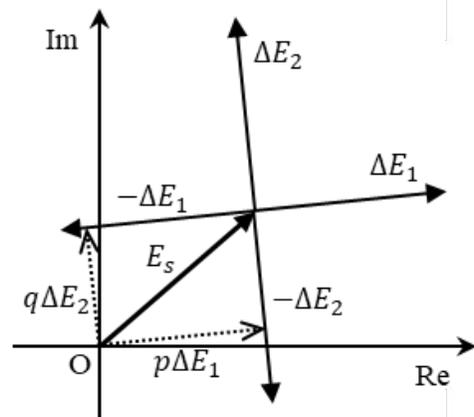
波長1.1倍で2pixずれる (@10λ/D)

1%波長幅で3桁改善可能か？

地上コントラストでの変調波面

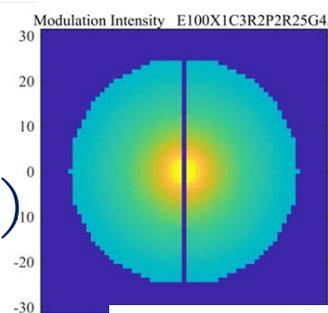
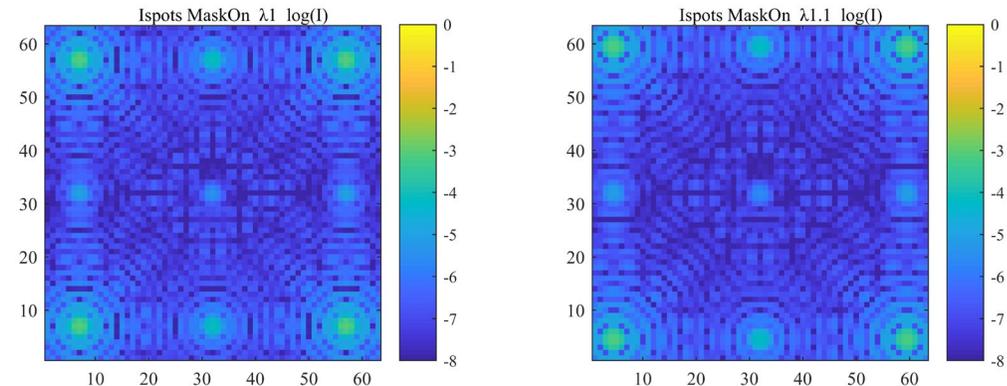
±ΔEの正対性、直交性、(現在2%)

波長依存性

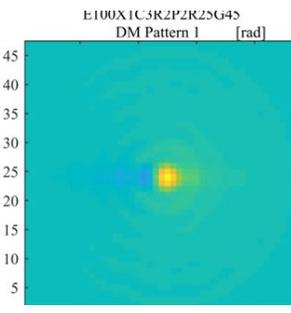


## ■ 実証実験が進行中

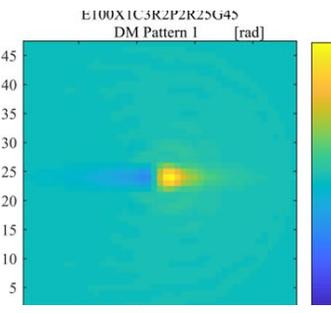
現状の結果は非公開



目標値

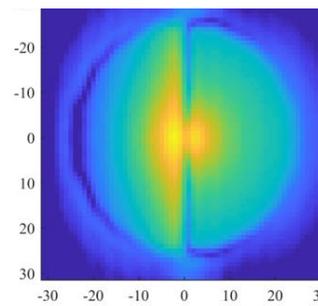
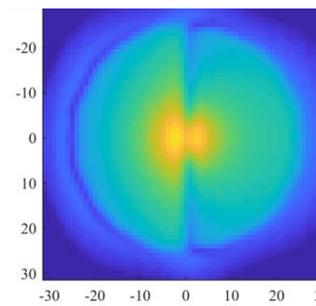
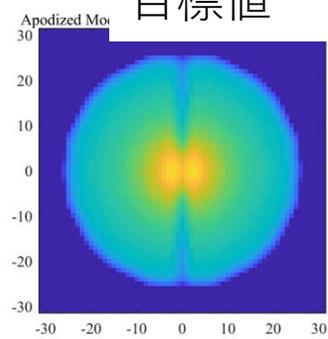


初期値

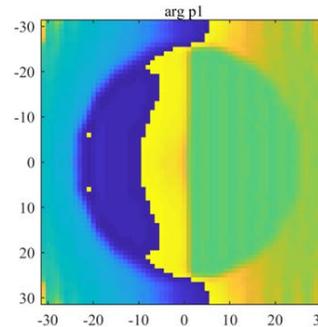
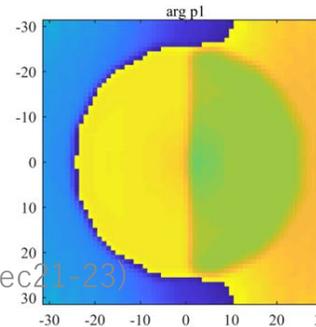
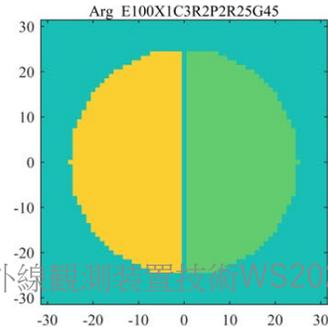


調整後

波面位相



焦点面  
電場  
強度



偏角

## CDI-SAN法の開発の今後

### ■ 数値計算で確認予定

広帯域の特性

$\Delta E$ の非同一性の影響

大気揺らぎの場合の相関性によるコントラスト向上

...

### ■ 実証実験

進行中・相談中

国立天文台三鷹 (DM) (PC, FPGA)

北大 (液晶SLM)

Subaru (DM)

NASA/JPL

SEICA@Seimei

### ■ 実装可能性 (DM同期検出器)

SCEXAO@Subaru

MagAO@Magellan

SEICA@Seimei

Roman Space Telescope

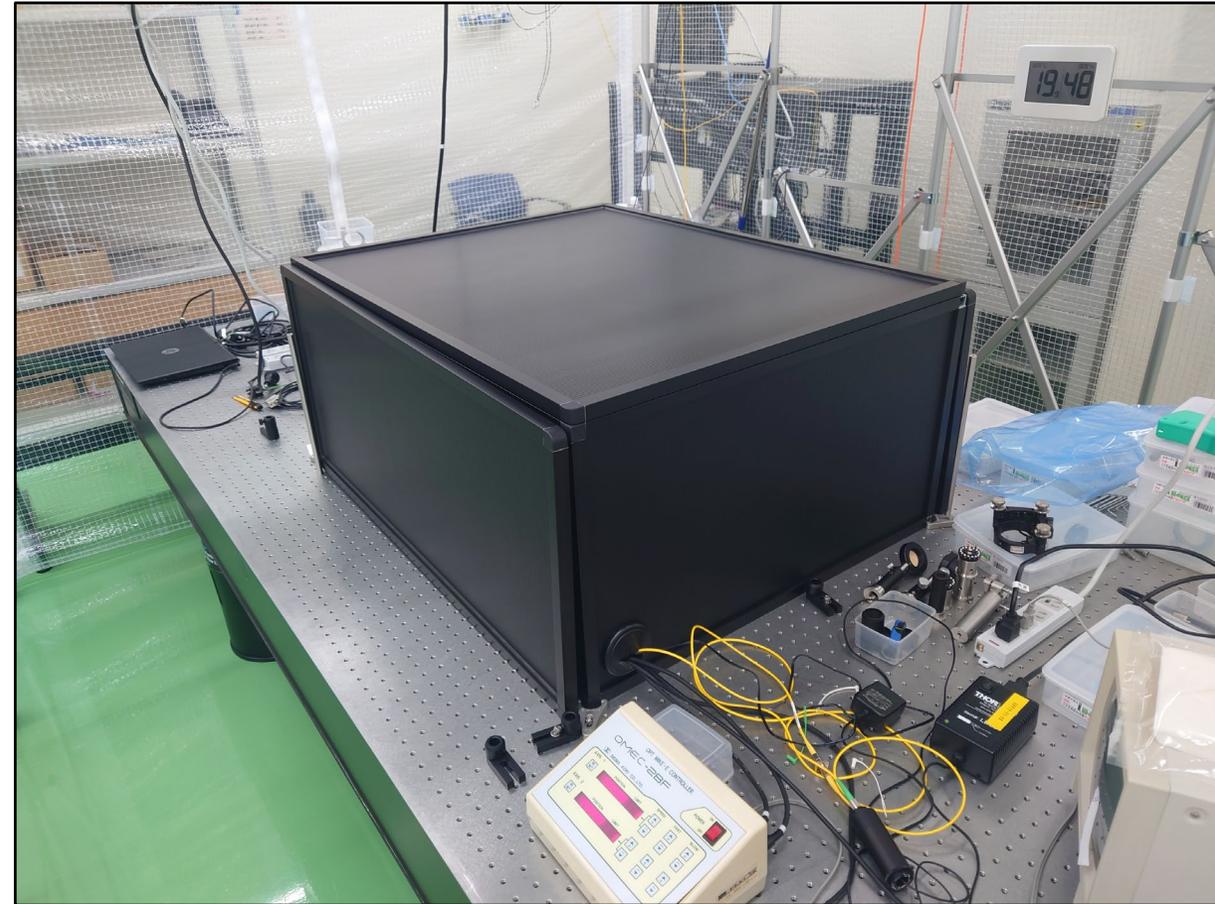
### ■ 将来実装可能性

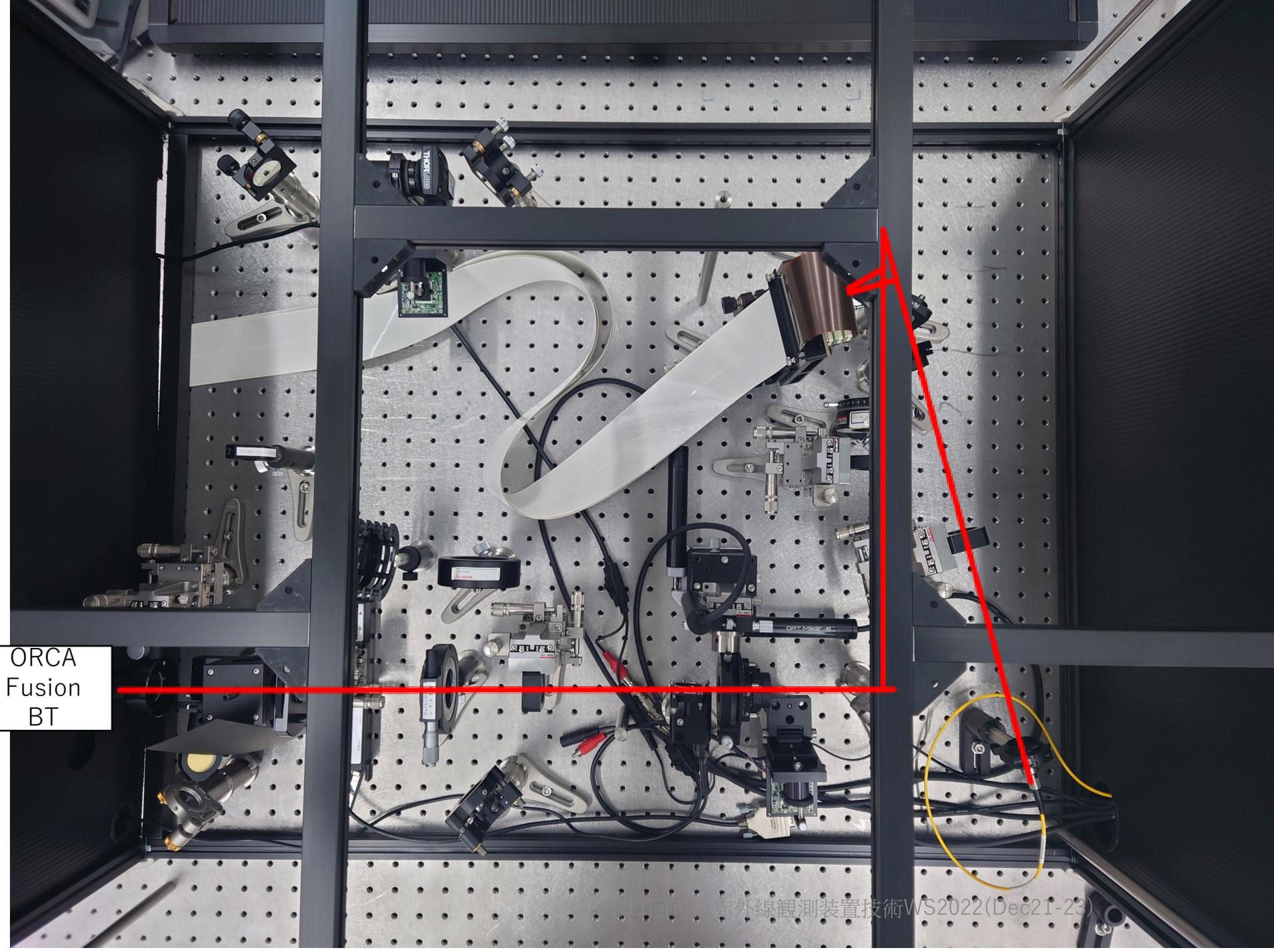
Any Telescope with DM & Synchronized detector

# 室内実証実験

## ◆室内の安定環境での原理実証

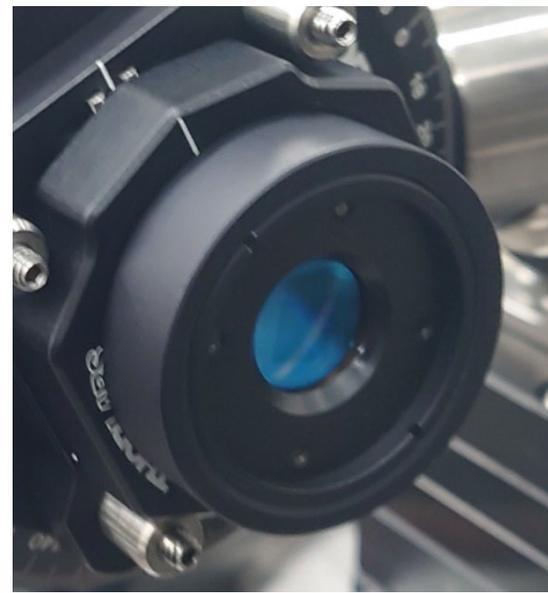
- クリーンブースの導電プラスチックダンボールボックス内に光学系構築（国立天文台）





ORCA  
Fusion  
BT

DM

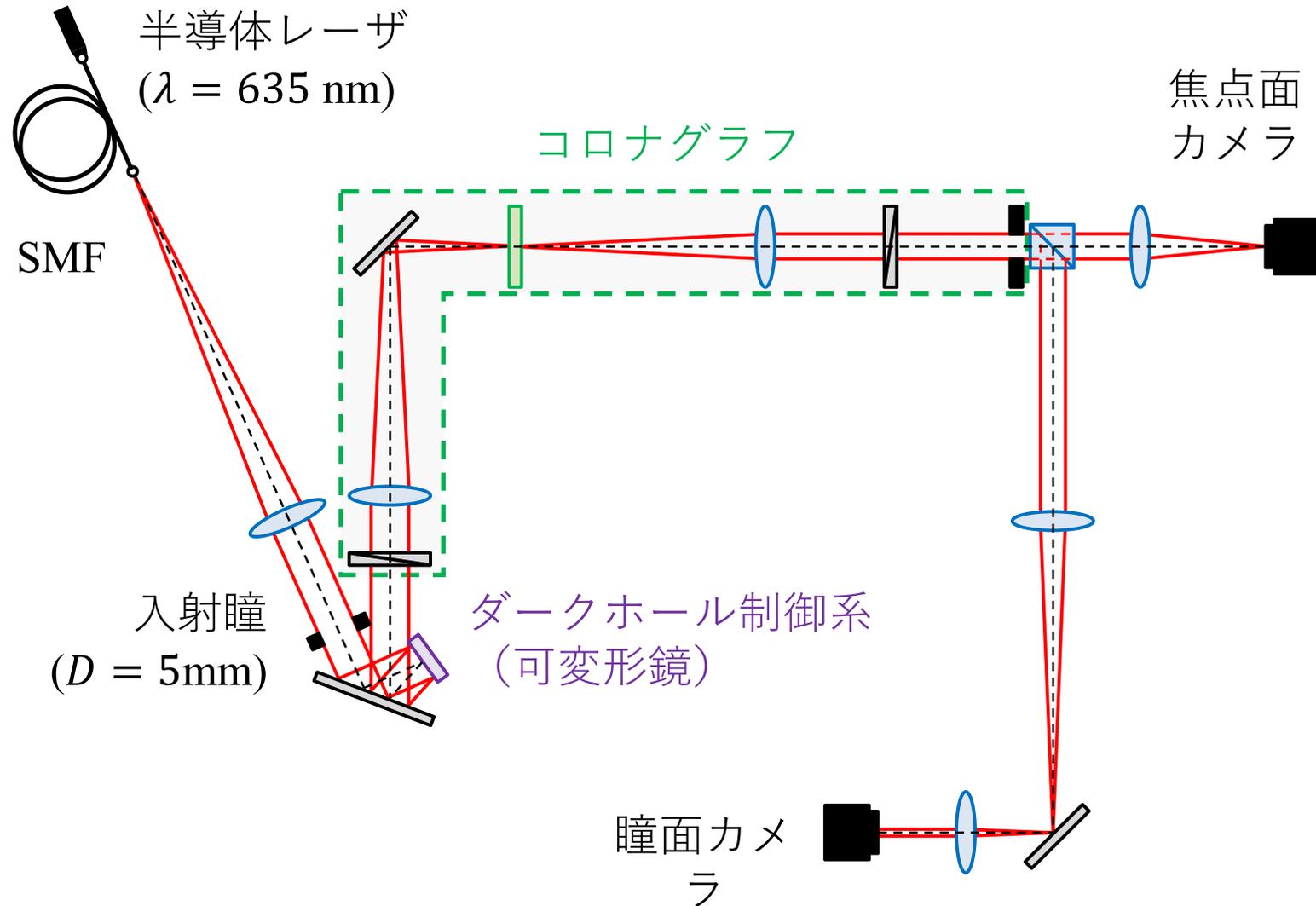


8分割位相マスク  
コロナグラフ

# 室内実証実験

## ◆実験光学系

- 恒星回折光
  - ✓ 8分割位相マスク
  - コロナグラフにより抑制
- 恒星散乱光
  - ✓ SAN法により
  - ダークホール形成
  - ✓ **CDI-SAN法により**
  - スペックル減算**



# 実験：まとめと今後の予定

## ◆まとめ

- 変動するスペックルを抑制するCDI-SAN法の原理実証
  - ✓ コロナグラフ + SAN法 + CDI-SAN法： $8.1 \times 10^{-6}$  →  **$1.8 \times 10^{-8}$**

## ◆今後の予定

- CDI-SAN法でコントラストが半分程度にしか改善されない原因の究明
  - ✓ 変調電場が $\pm\Delta E_1, \pm\Delta E_2, \Delta E_1 \cdot \Delta E_2 = 0$ となっていない可能性
    - 可変形鏡の電圧応答などにより、想定している変調ができていない
- FPGAを用いて、変動するスペックルの抑制を実現



**地上・宇宙望遠鏡へ実装：地球型惑星の直接撮像**