

高コントラスト後処理法 Coherent Differential Imaging on Speckle Area Nulling (CDI-SAN) の開発状況

米田 謙太^a

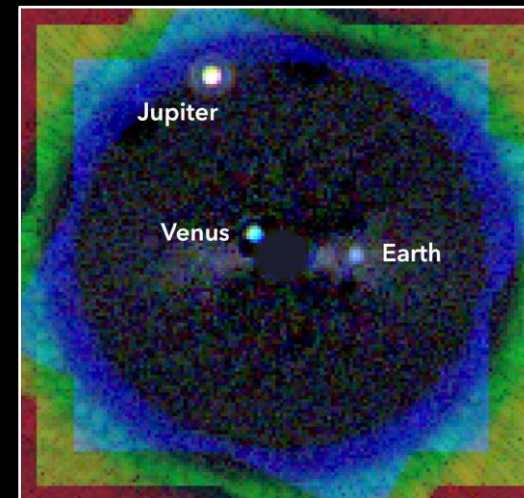
西川 淳^{a,b,c}, 早野 裕^{a,b}, 入部 正継^d, 山本 広大^e, 津久井 遼^f,
村上 尚史^{c,a}, 田中 洋介^{g,c}, 田村 元秀^{h,c,a}, 住 貴宏ⁱ, 山田 亨^j,
Olivier Guyon^{a,k,c}, Julien Lozi^a, Vincent Deo^a, Sébastien Vievard^{a,c}, Kyohoon Ahn^{l,a}

a: 国立天文台, b: 総合研究大学院大学, c: アストロバイオロジーセンター, d: 大阪電気通信大学,
e: 京都大学, f: 株式会社ロジストラボ, g: 東京農工大学, h: 東京大学, i: 大阪大学,
j: 宇宙航空研究開発機構, k: アリゾナ大学, l: 韓国天文研究院

研究背景

◆系外惑星：太陽以外の恒星を公転する惑星

- 現代天文学における重要な観測ターゲットのひとつ
- 発見数：7300個以上(2024年11月23日現在)
- 究極目標
 - ✓ 地球に似た惑星の発見
 - ✓ 生命活動の痕跡の検出



約41光年先に太陽系があった場合の直接観測のシミュレーション
(The LUVOIR Team 2019, arXiv:1912.06219)

地上望遠鏡の例



すばる望遠鏡
(©NAOJ)

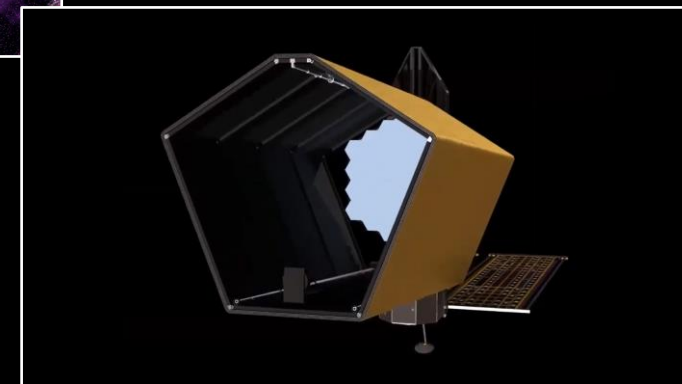


TMT
2030年代完成目標
(©NAOJ)

宇宙望遠鏡の例



Roman宇宙望遠鏡
2026年打上目標
(©NASA)



Habitable Worlds Observatory
(HWO)
2040年代打上目標
(©NASA)

研究背景

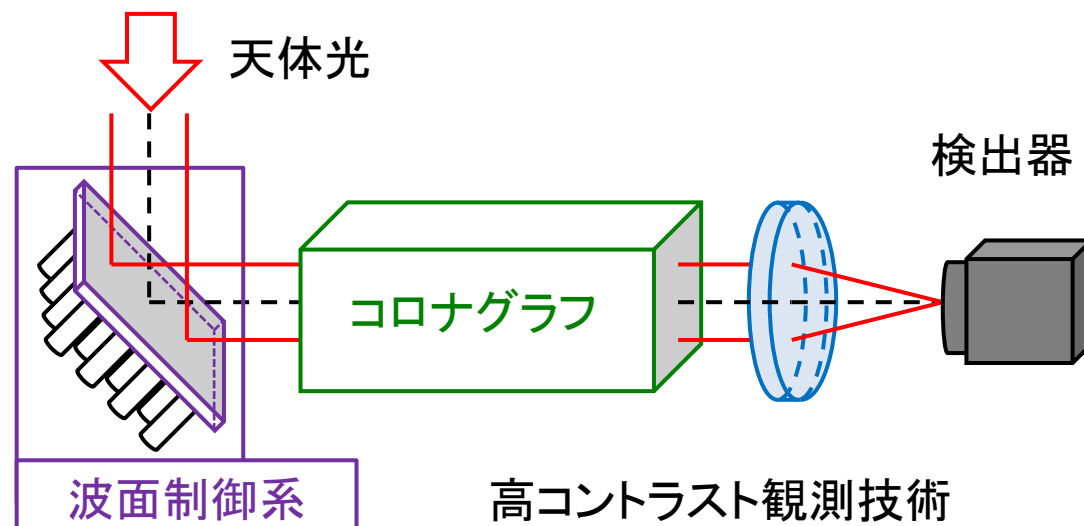
◆系外惑星の直接観測

- 問題: 近傍の明るい恒星が惑星の観測を妨げる

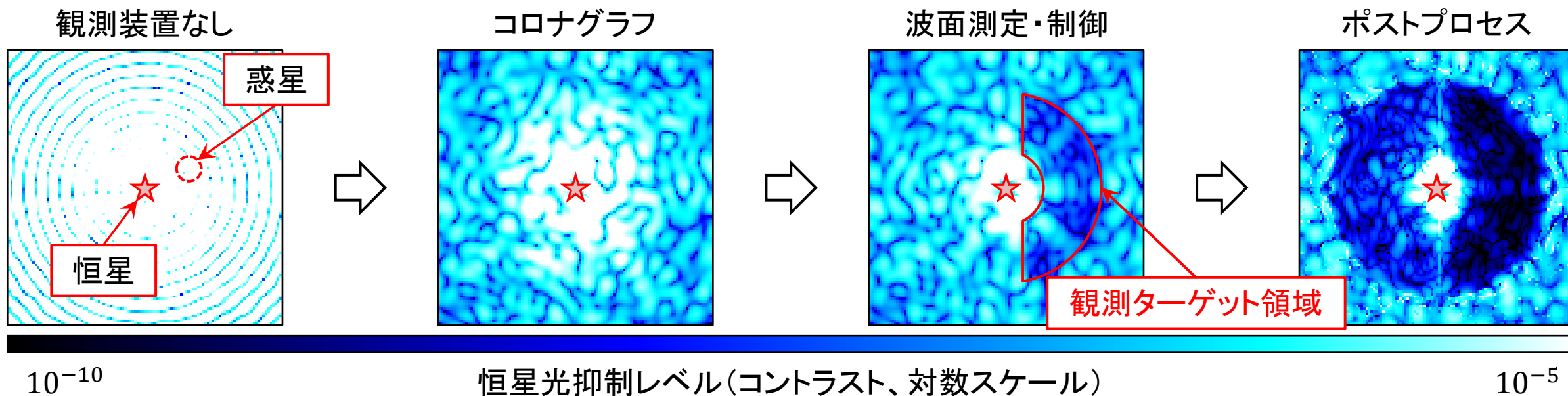
✓ **可視光強度比 太陽:地球 = $1:10^{-10}$**

- 高コントラスト観測技術

- ① **コロナグラフ**: 恒星回折光を抑制
- ② **波面測定・制御**: 恒星散乱光を抑制
- ③ **ポストプロセス**: 残留する恒星光をさらに抑制



数値シミュレーション



研究目的と発表概要

◆目的: 新たなポストプロセス技術 **Coherent Differential Imaging on Speckle Area Nulling (CDI-SAN) 法^[1]**の開発

- 従来波面測定・制御技術の問題: 制御も高速に変動する恒星散乱光(スペックル)が残留する
 - ✓ 恒星散乱光の変動の原因
 - 地上: 大気揺らぎ
 - 宇宙: 望遠鏡の温度変化に伴う装置の変形
- 最終目標: 地球型惑星の直接観測を目指せるコントラストの達成
 - ✓ 達成コントラスト: $10^{-9} - 10^{-10}$
 - ✓ CDI-SAN法によるコントラスト改善率: **2~3桁 (0.01 - 0.001)**

◆発表概要

- 研究背景
- CDI-SAN法の原理
- 室内実証実験 (@ NAOJ)
 - ✓ 実験光学系
 - ✓ 実験結果
- まとめ

CDI-SAN法の原理^[1]

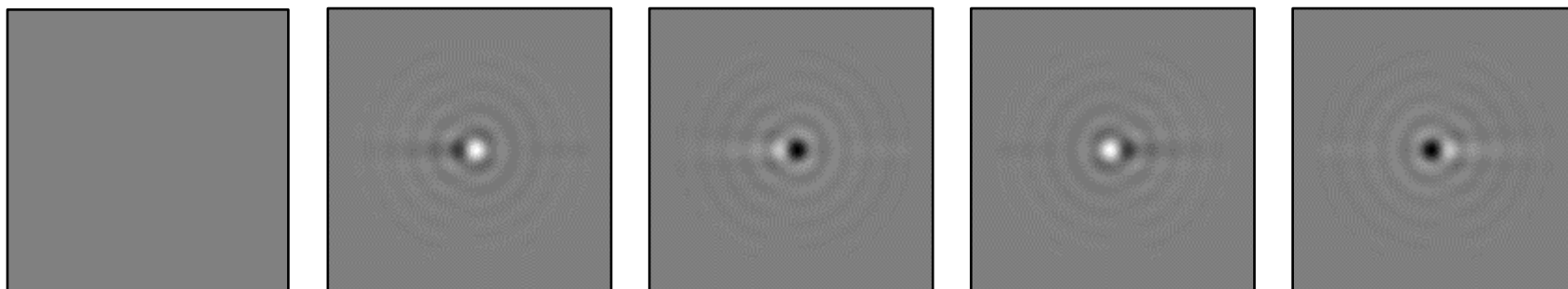
◆波面変調を利用して、変動する残留恒星スペckルを抑制するポストプロセス技術

➤ 5種類の波面変調と同期して、焦点面強度 $I_0(x, y, t)$, $I_{1,2}^{\pm}(x, y, t)$ を測定

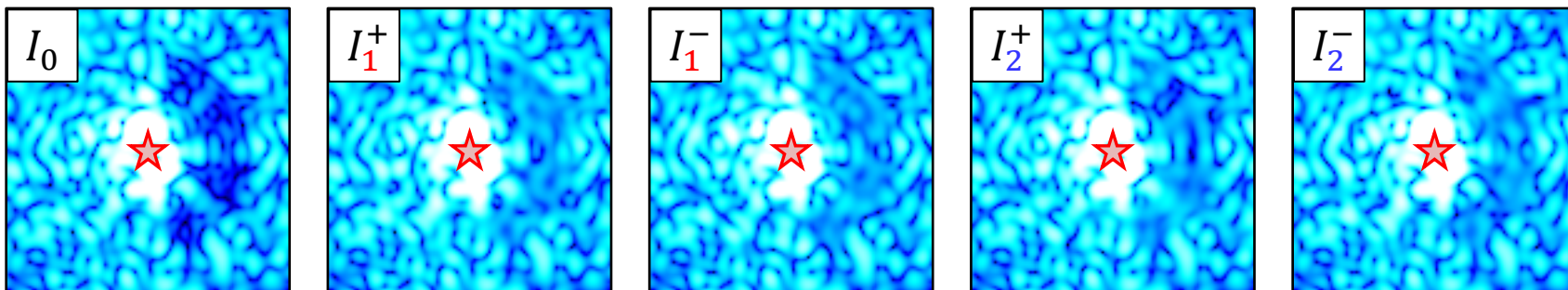
✓ $I_0(x, y, t) = I_s(x, y, t) + I_p(x, y) = |E_s(x, y, t)|^2 + I_p(x, y)$

✓ $I_{1,2}^{\pm}(x, y, t) = |E_s(x, y, t) \pm \Delta E_{1,2}(x, y)|^2 + I_p(x, y)$

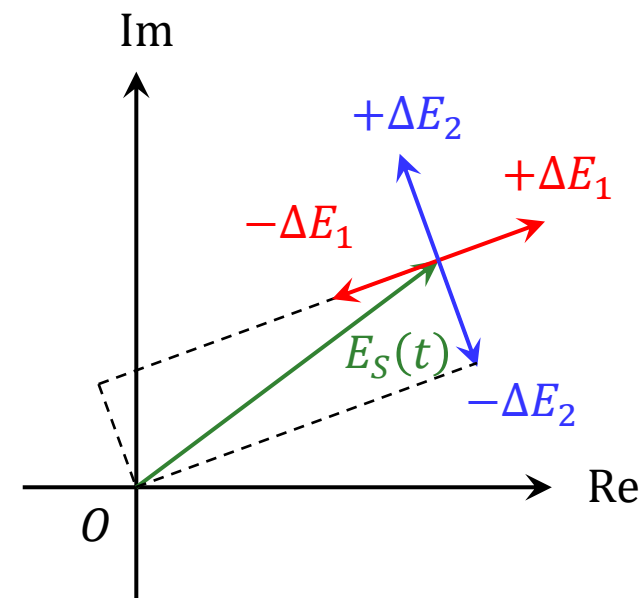
CDI-SAN用 瞳面変調振幅



焦点面強度



焦点面における1点(x_i, y_i)の電場



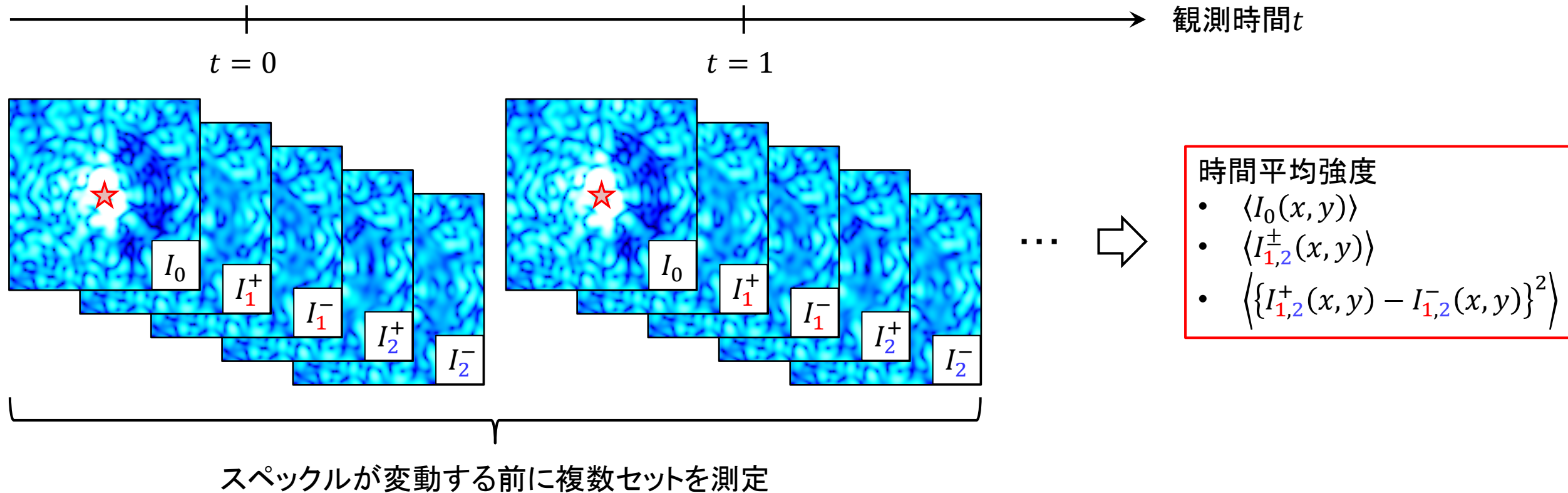
正対性: $|+\Delta E_{1,2}| = |-\Delta E_{1,2}|$

直交性: $\pm\Delta E_1 \cdot \pm\Delta E_2 = 0$

CDI-SAN法の原理^[1]

◆波面変調を利用して、変動する残留恒星スペックルを抑制するポストプロセス技術

- 焦点面強度 $I_0(x, y, t)$, $I_{1,2}^{\pm}(x, y, t)$ の測定を繰り返し実行
 - ✓ $I_0(x, y, t)$, $I_{1,2}^{\pm}(x, y, t)$ 複数セットを、スペックルの変動よりも高速に測定
 - ✓ 各時間平均強度を算出



CDI-SAN法の原理^[1]

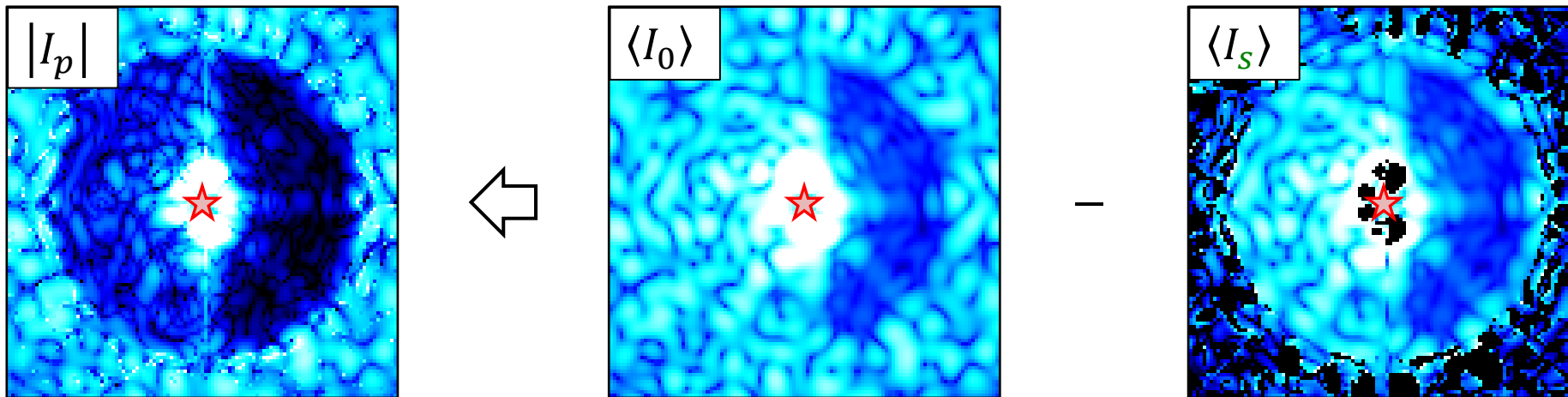
◆波面変調を利用して、変動する残留恒星スペckルを抑制するポストプロセス技術

- 得られた時間平均強度を用いた演算により**変動スペckルのみの時間平均強度**を求める

$$\langle I_s(x, y) \rangle = \frac{\langle \{I_1^+(x, y) - I_1^-(x, y)\}^2 \rangle}{8[\langle I_1^+(x, y) \rangle + \langle I_1^-(x, y) \rangle - 2\langle I_0(x, y) \rangle]} + \frac{\langle \{I_2^+(x, y) - I_2^-(x, y)\}^2 \rangle}{8[\langle I_2^+(x, y) \rangle + \langle I_2^-(x, y) \rangle - 2\langle I_0(x, y) \rangle]}$$

- 時間平均強度 $\langle I_0(x, y) \rangle = \langle I_s(x, y) \rangle + I_p(x, y)$ と変動スペckルの時間平均強度の差分を計算する

$$I_p(x, y) = \langle I_0(x, y) \rangle - \langle I_s(x, y) \rangle$$



室内実験光学系 @ NAOJ

半導体レーザ
($\lambda = 635 \text{ nm}$)

コロナグラフマスク
(8分割位相マスク)

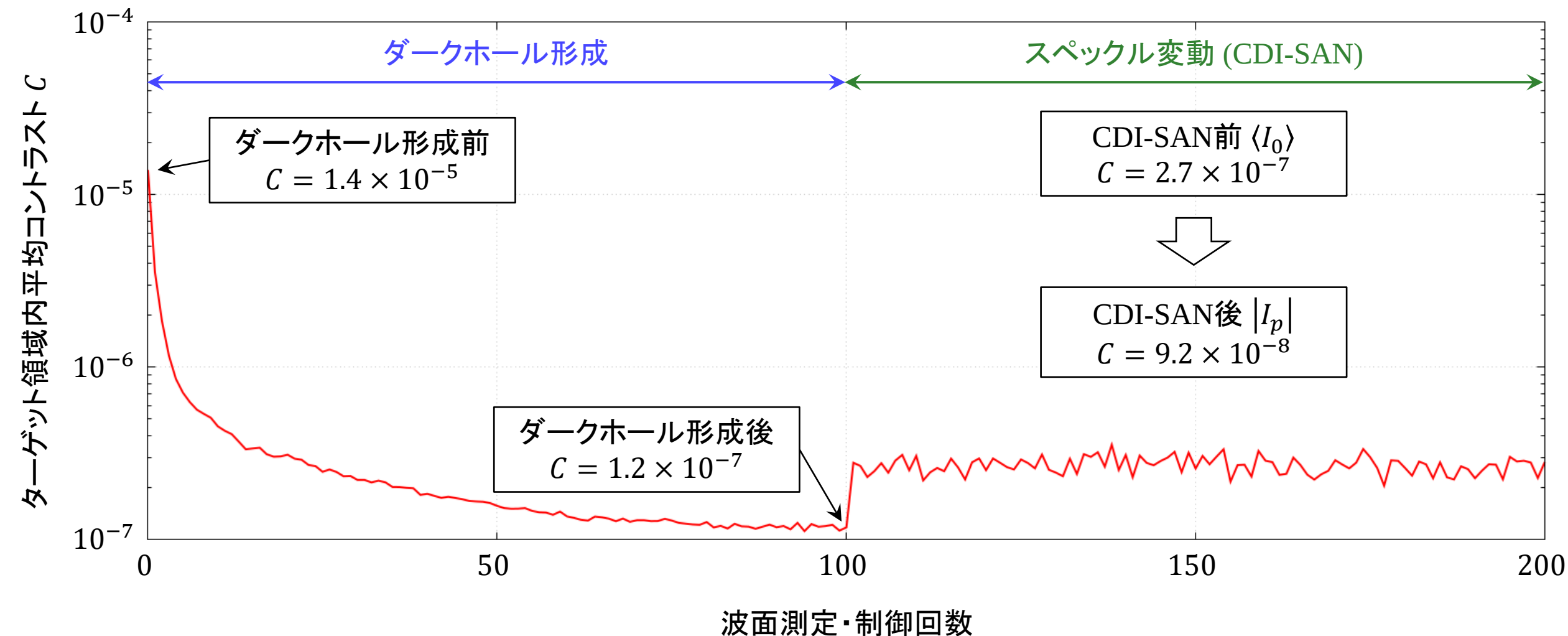
焦点面カメラ

入射瞳
($D = 7 \text{ mm}$)

DM(BMC製)	492-1.5-DM
ストローク	$1.5 \text{ }\mu\text{m}$
Gray level	14 bit (16 bit)
位相分解能 (出荷試験データから計算)	$\approx 2\pi/2300 @ 635 \text{ nm}$ ($\approx 2\pi/9300$)

室内実験結果

◆CDI-SAN法によって変動するスペックルを抑制(改善率:0.34)



まとめと今後の展望

◆目的: 変動するスペックルを抑制する新たなポストプロセス技術CDI-SAN法の開発

◆結果: **CDI-SAN法によって変動するスペックルを抑制**

- コントラスト改善率: **0.34** ($C = 2.7 \times 10^{-7} \rightarrow C = 9.2 \times 10^{-8}$)
 - ✓ コントラストは 10^{-7} 前後に留まる
 - DMの位相分解能によって、コントラストが制限されている可能性

◆今後の展望

- 実証実験
 - ✓ DMのgray levelを16 bitに設定 → 高い位相分解能での実験
 - ✓ 焦点面マスク (field stop) の導入 → ダークホール周囲からの散乱光の抑制
 - ✓ FPGAの導入 → 1 kHzレベルでの高速波面制御
 - ✓ OAPを用いた反射型光学系の構築 → 広い波長域での実験
- 実観測装置
 - ✓ せいめい望遠鏡/SEICAへのFPGA制御のCDI-SAN法の導入を検討中
 - ✓ 宇宙望遠鏡への導入を提案中

ご清聴、ありがとうございました。

本研究は、JSPS科研費20H05893の助成を受けたものです。
また室内実験は、国立天文台先端技術センターの設備を利用して行いました。