

可視赤外線観測装置技術ワークショップ2024

26 November 2024

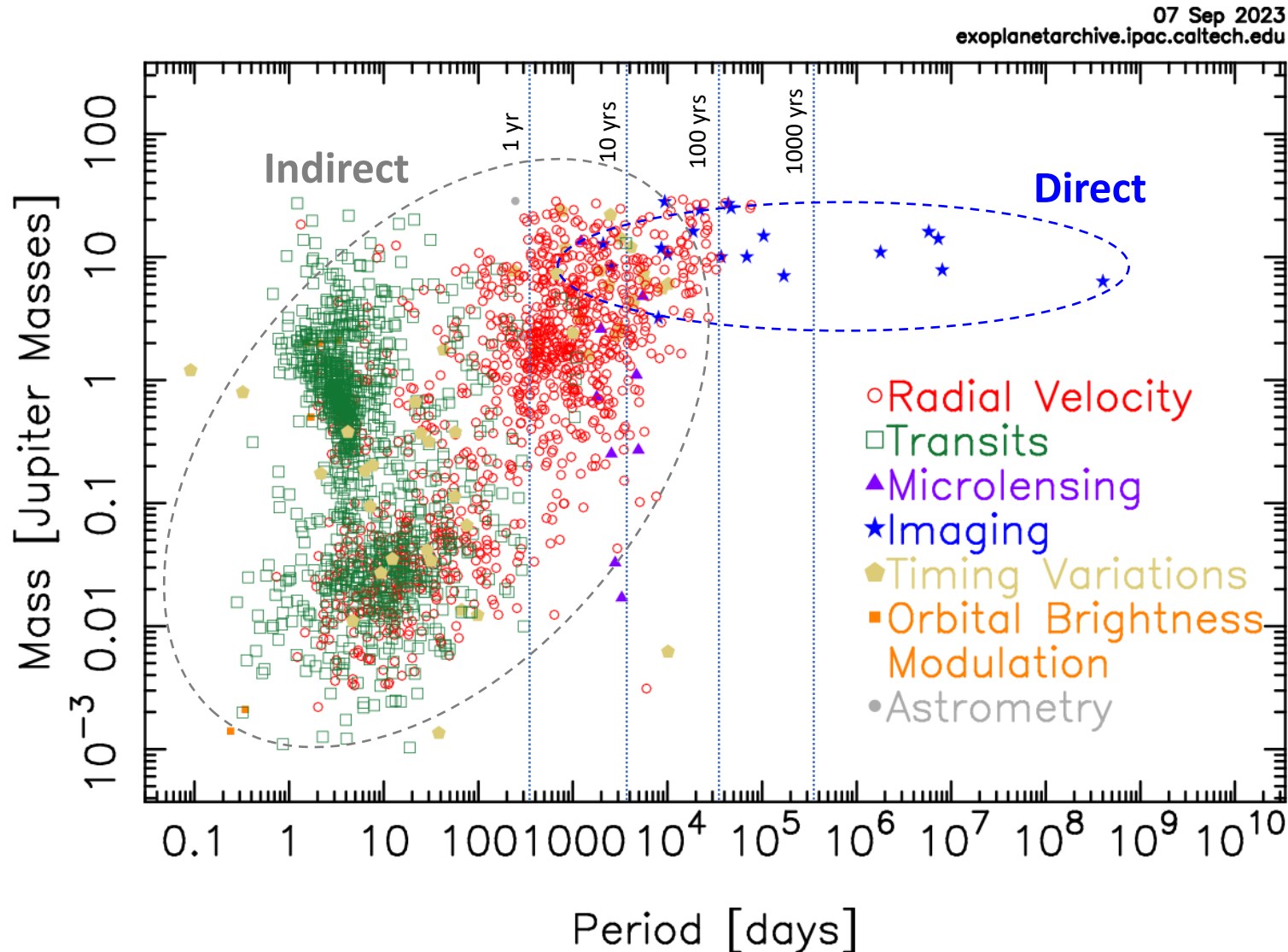
# フォトリクス技術による将来コロナグラフの開発

村上尚史(北海道大学 → アストロバイオロジーセンター)

## Acknowledgments:

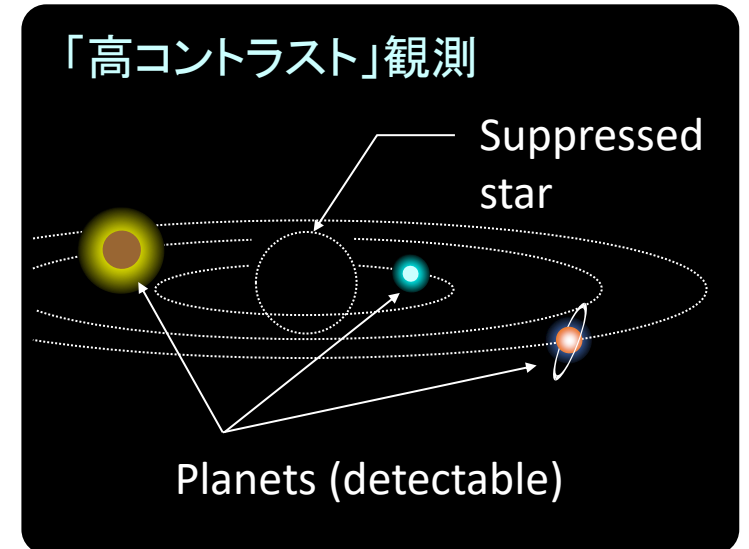
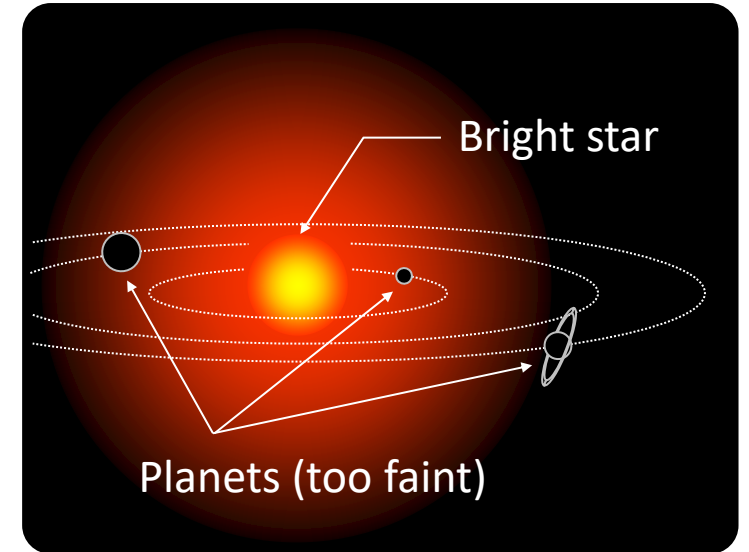
本研究は、西川淳氏、米田謙太氏(国立天文台)、田中洋介氏(東京農工大)、村松大海氏(東京農工大OB)、小室佑介氏、土生圭一郎氏、林寛昭氏、浅野瑞基氏(北海道大学OB)他、多くの皆様のご協力により行われています。

# Introduction – Discovery of Exoplanets



Data from “NASA Exoplanet Archive” <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/index.html>

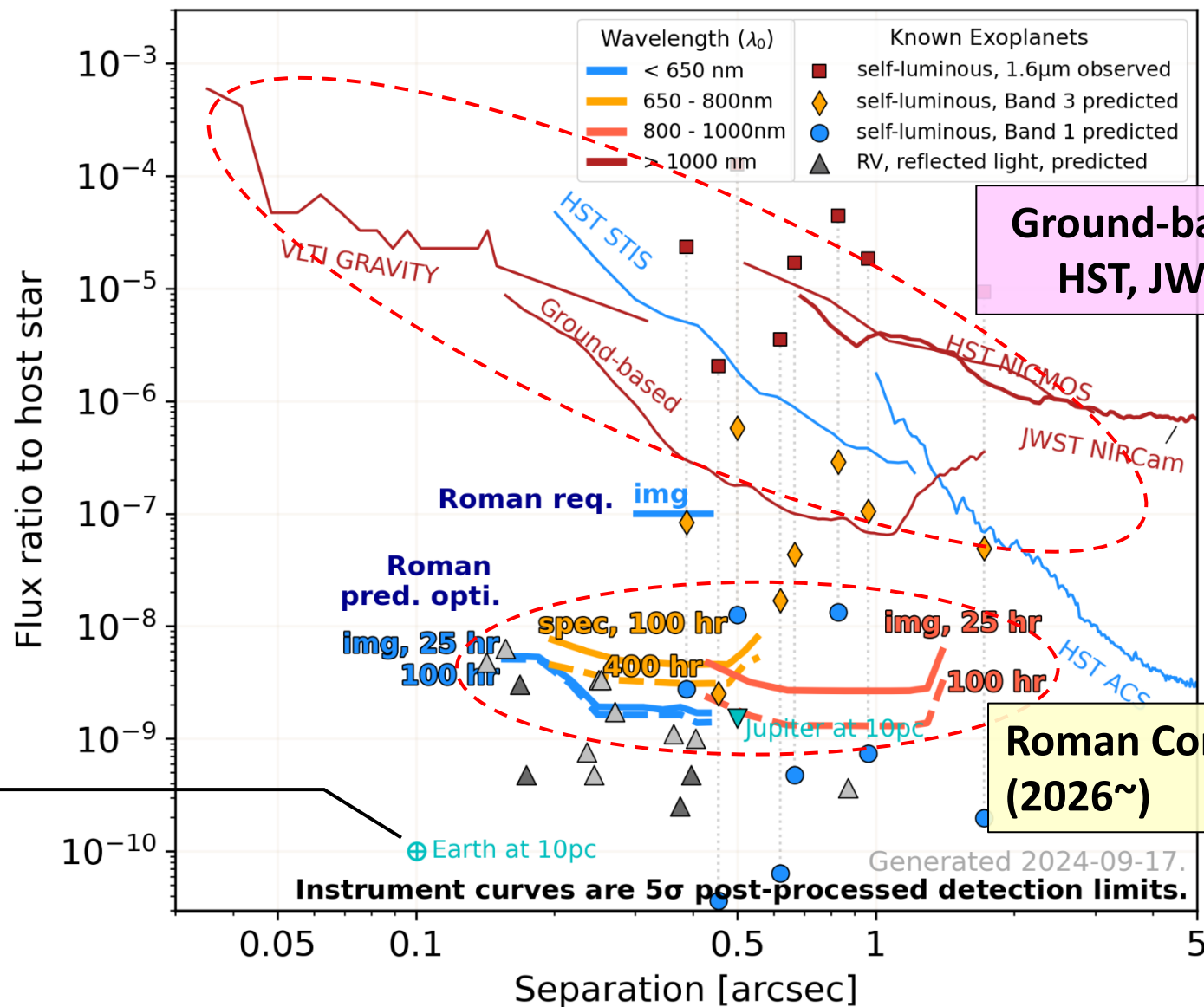
直接観測の問題:  
大きな恒星/惑星フラックス比



# Introduction – Toward Exploration of “Earth2.0”

<https://github.com/nasavbailey/DI-flux-ratio-plot/>

Copyright 2021 California Institute of Technology



**Ground-based,  
HST, JWST**

**Roman Coronagraph  
(2026~)**

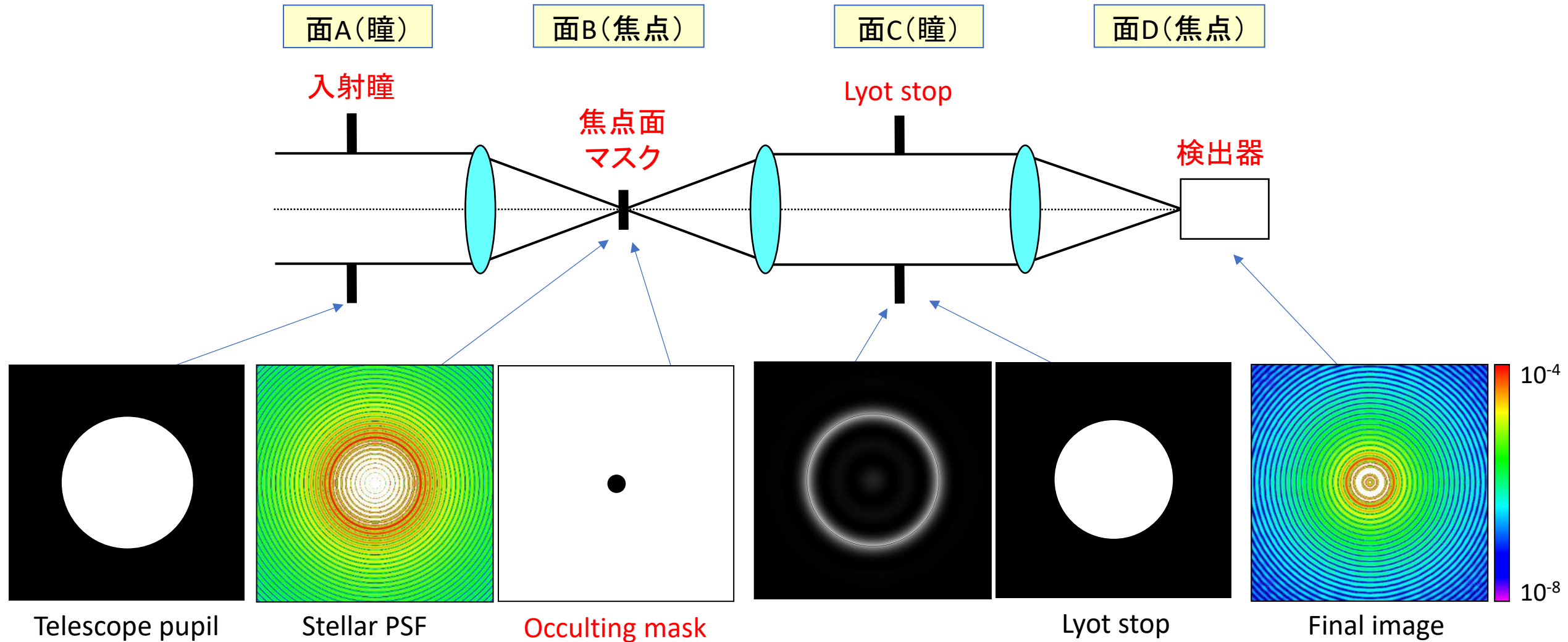
**Earth at 10 pc  
→ HWO, 2040s~?**

Artist's concept (Credits: NASA)

<https://www.nasa.gov/press-release/nasa-to-make-announcement-about-wfirst-space-telescope-mission>

# “Classical” Lyot Coronagraph

[Ref] Lyot (1939), MNRAS, **99**, L580.

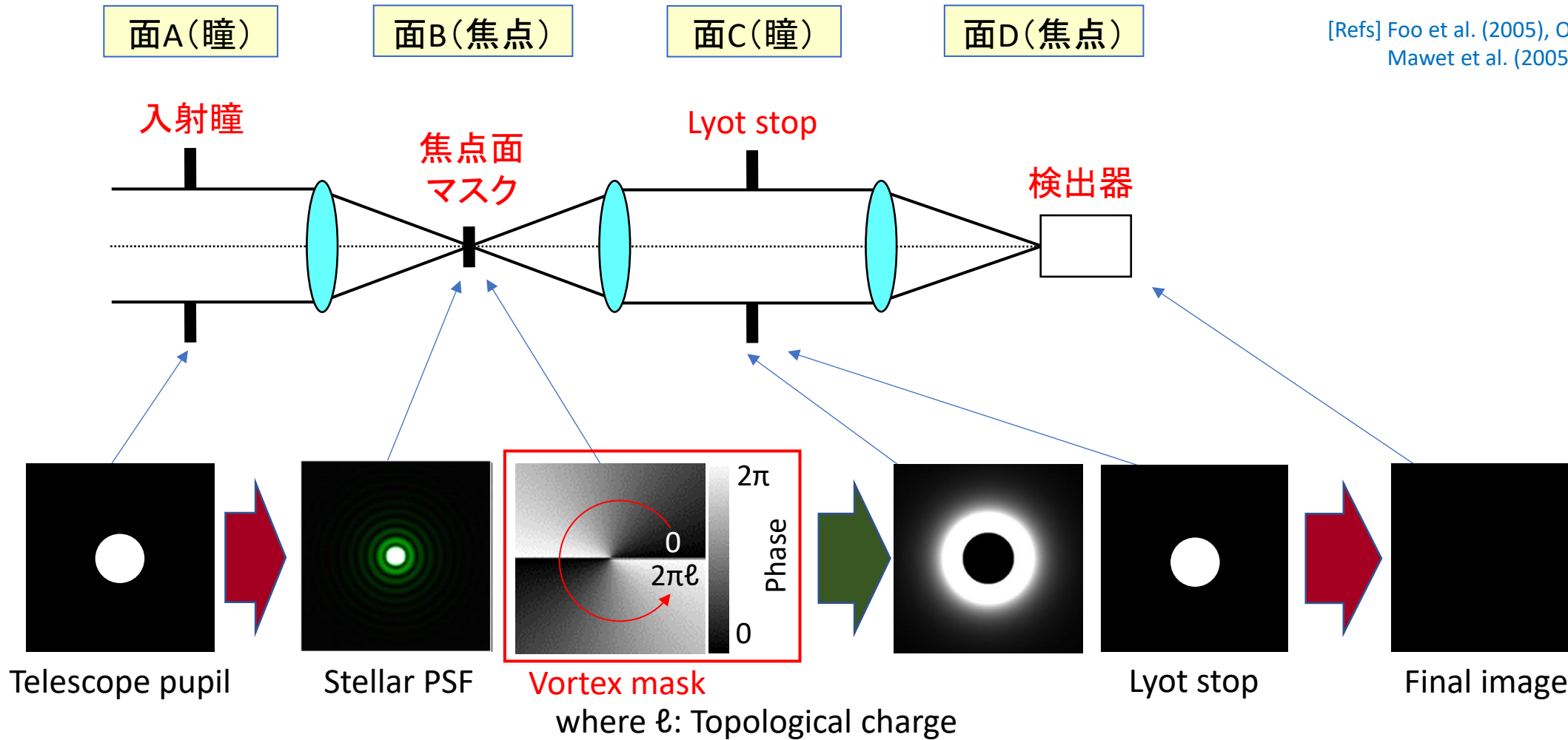


- 掩蔽マスクで恒星を隠す
- 恒星光を完全に除去できない



多くの発展型コロナグラフ

# Vortex Coronagraph



[Refs] Foo et al. (2005), Opt. Lett., **30**, 3308  
Mawet et al. (2005), ApJ, **633**, 1191

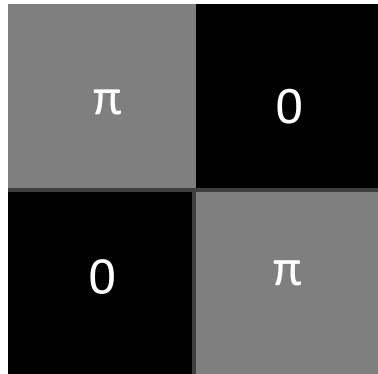
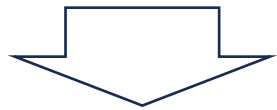
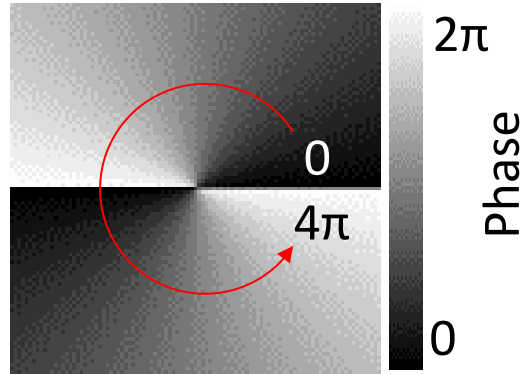
- 光渦を利用した恒星光除去
- 理論上, 偶数チャージ光渦により完全除去

# Discretized Vortex Phase Masks

恒星近傍に迫れる



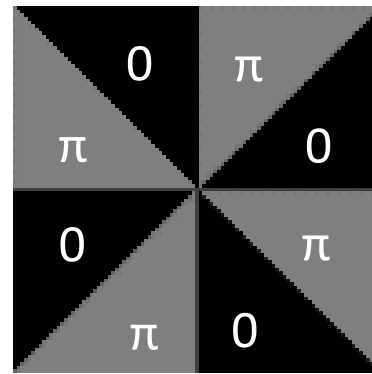
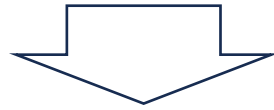
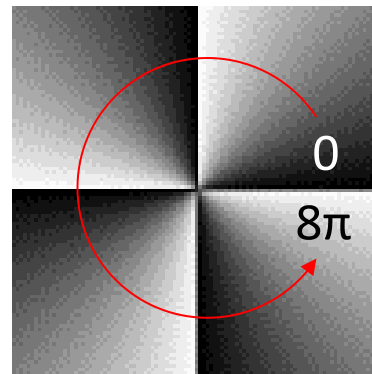
Charge 2



4-quadrant phase mask  
(4QPM)

Rouan et al. (2000), PASP, **112**, 1479

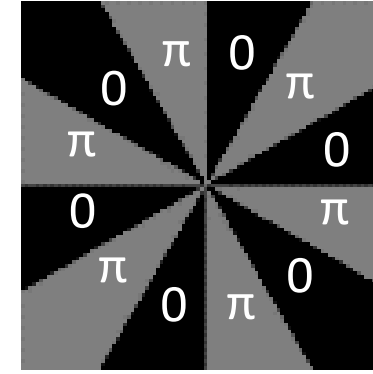
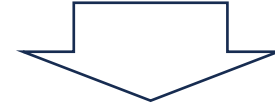
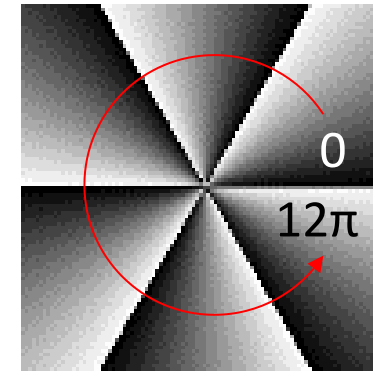
Charge 4



8-octant phase mask  
(8OPM)

Murakami et al. (2008), PASP, **120**, 1112

Charge 6



12-sector phase mask  
(12SPM)

Carlotti et al. (2009), A&A, **504**, 663

低次収差, 恒星サイズにロバスト



Vortex phase masks

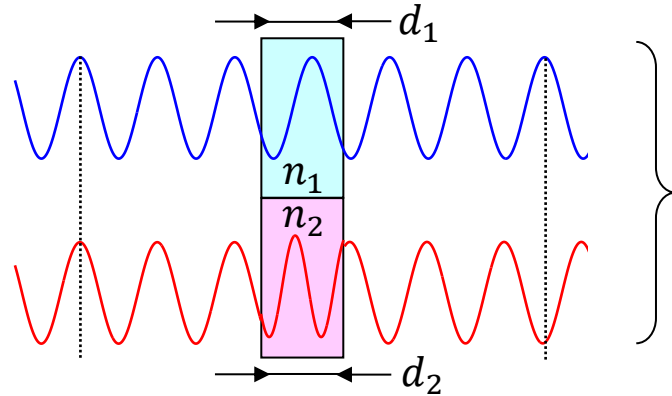
Foo et al. (2005), Opt. Lett., **30**, 3308

Mawet et al. (2005), ApJ, **633**, 1191

Discretization

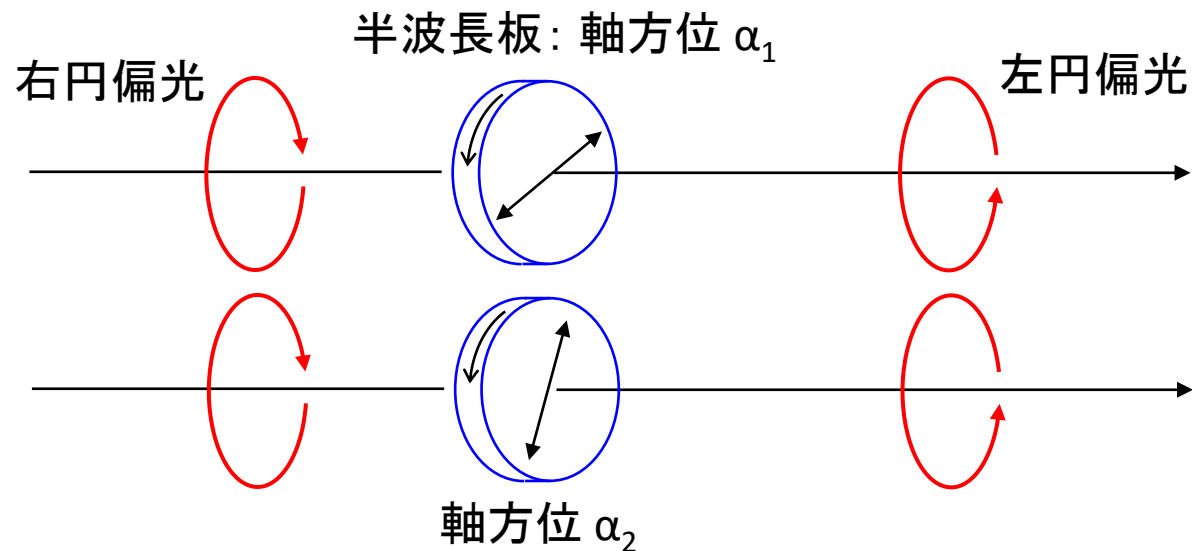
# Two approaches for phase masks

誘電体材料による位相変調  
→「スカラー」位相マスク



$$\text{Phase difference } \Delta\phi = \frac{2\pi(n_2d_2 - n_1d_1)}{\lambda} \quad (\text{Depends on wavelength})$$

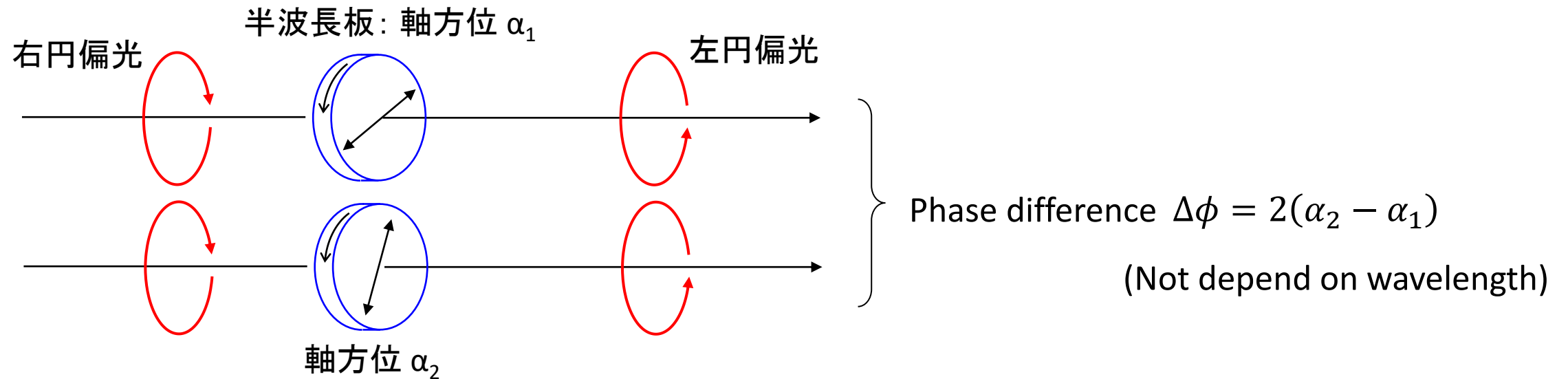
半波長板による位相変調  
→「ベクトル」位相マスク



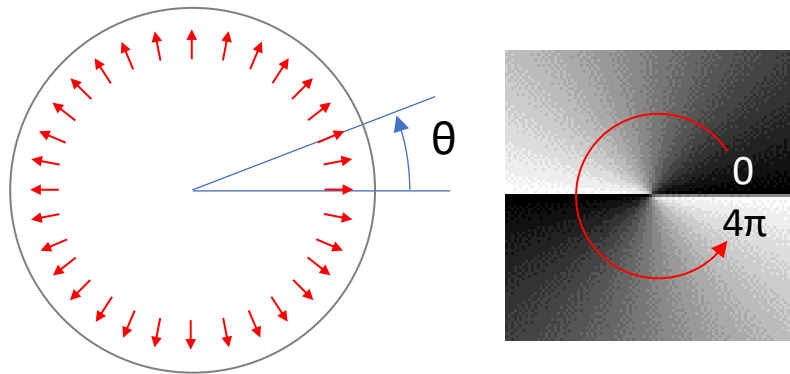
$$\text{Phase difference } \Delta\phi = 2(\alpha_2 - \alpha_1) \\ (\text{Not depend on wavelength})$$

# Two approaches for phase masks

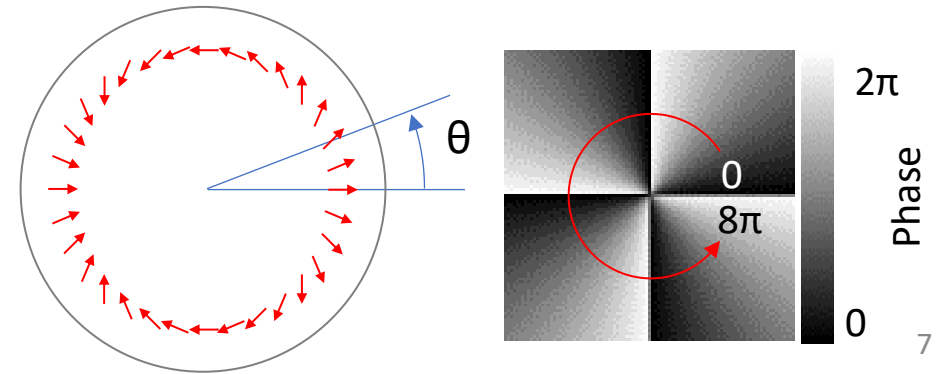
半波長板による位相変調 → 「ベクトル」位相マスク  
(Geometric phase, a.k.a. Pancharatnam phase)



Charge-2 vortex ( $\ell=2$ ): 半波長板の軸方位  $\alpha = \theta$



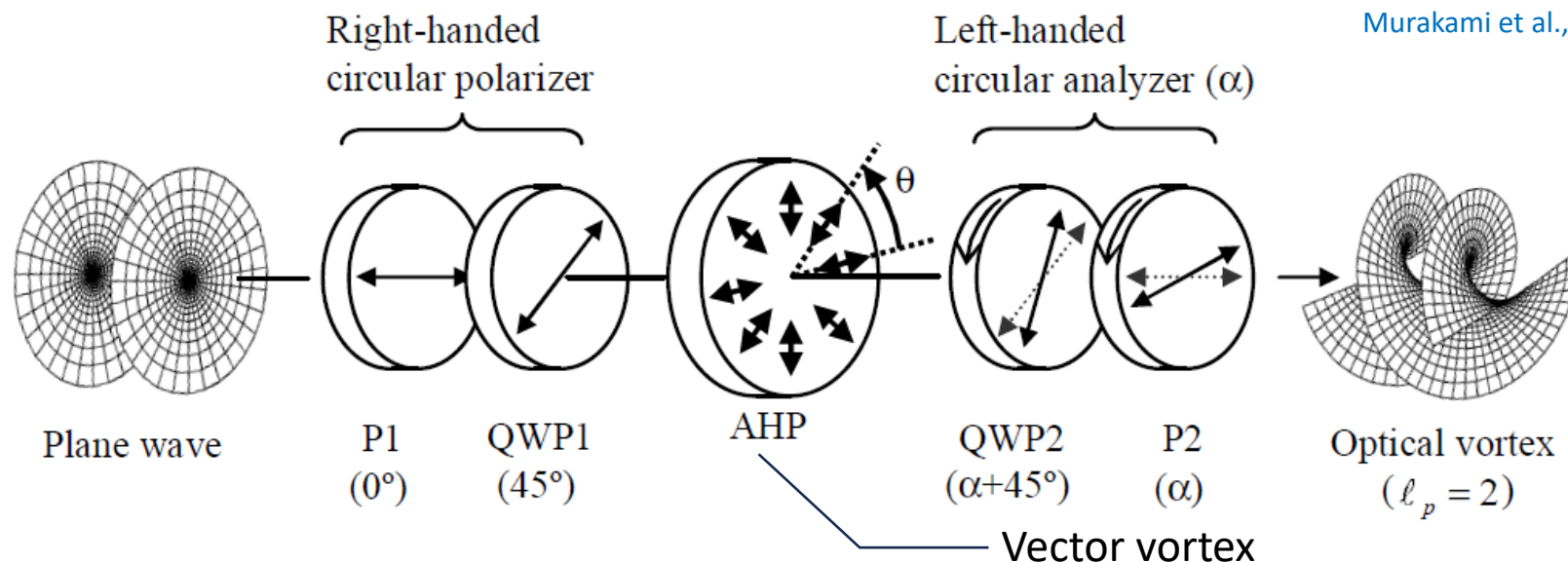
Charge-4 vortex ( $\ell=4$ ): 軸方位  $\alpha = 2\theta$



# Two approaches for phase masks

半波長板による位相変調 → 「ベクトル」位相マスク  
(Geometric phase, a.k.a. Pancharatnam phase)

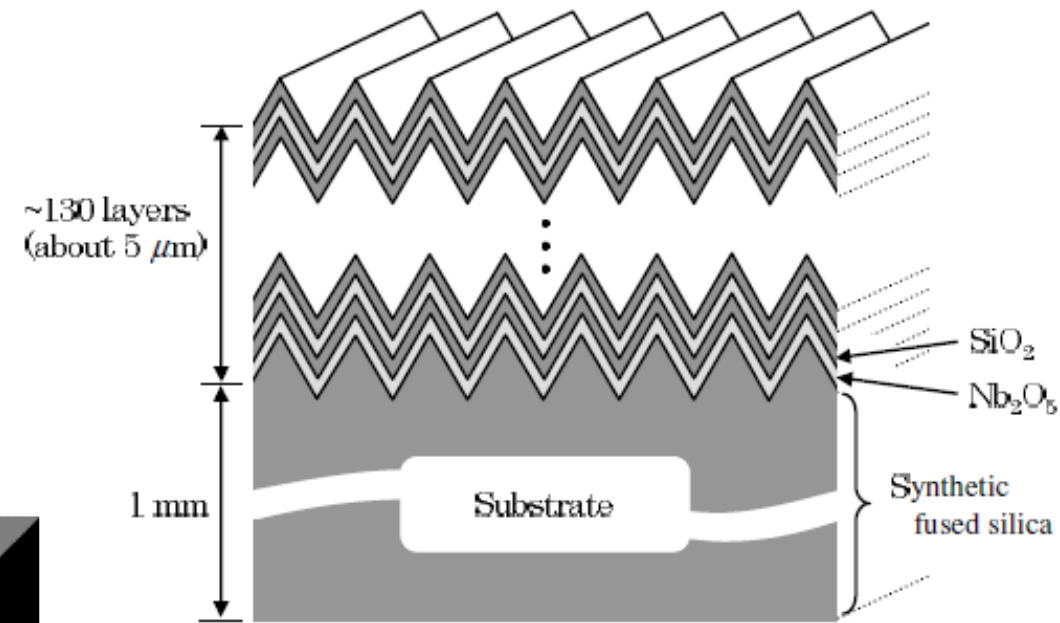
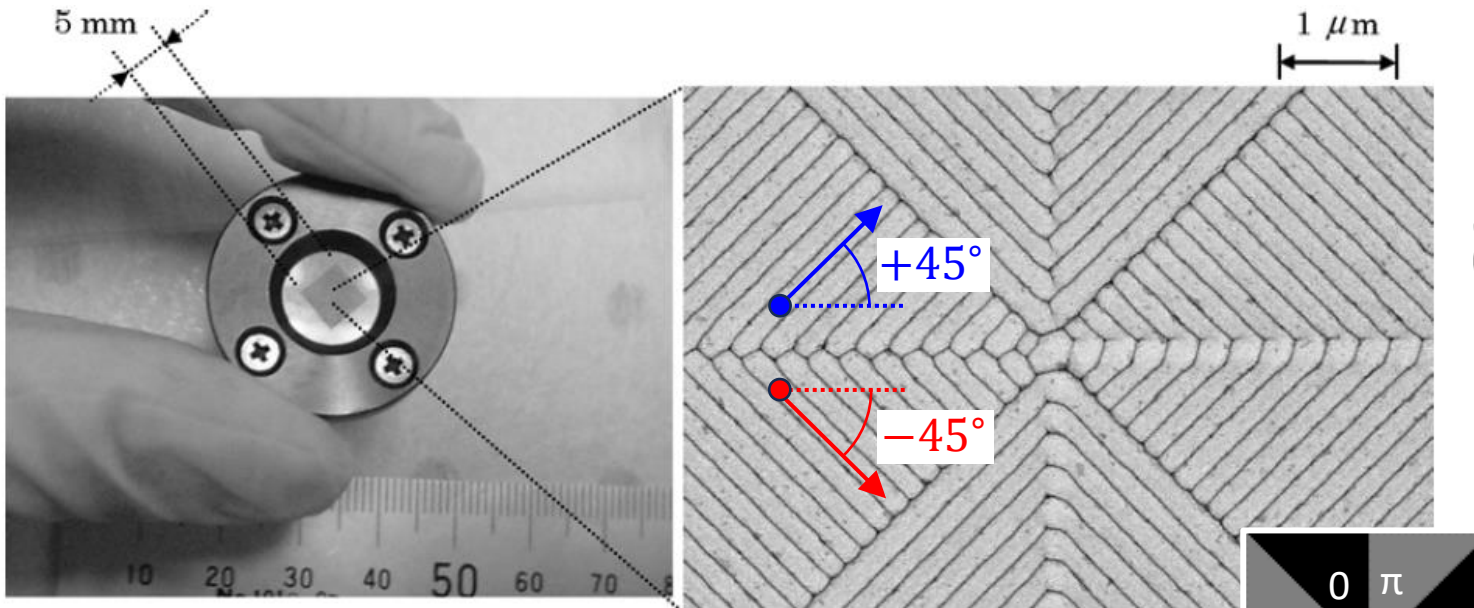
- 位相は半波長板の軸方位で決まる (本質的に波長非依存)
  - 半波長板に波長依存性？
    - 円偏光フィルタにより広帯域化が可能 (下図)
  - 1/4波長板 (QWP) に波長依存性？
    - 2つのQWPが同じ特性であれば良い (Murakami+2013)



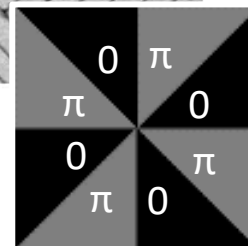
[Note]  $0/\pi$ 位相マスクは, 直線偏光フィルタも可能 (QWPsが不要)

# Photonic-crystal Phase Mask

- フォトニック結晶による位相マスクの開発
  - 高 & 低屈折率の周期的ナノ構造
  - 基板に凹凸パターン形成(周期  $\sim \lambda/2$ )  $\rightarrow$  凹凸パターンを維持したままスパッタ成膜
    - 空間変化する波長板の製造: 高精細なパターンニング



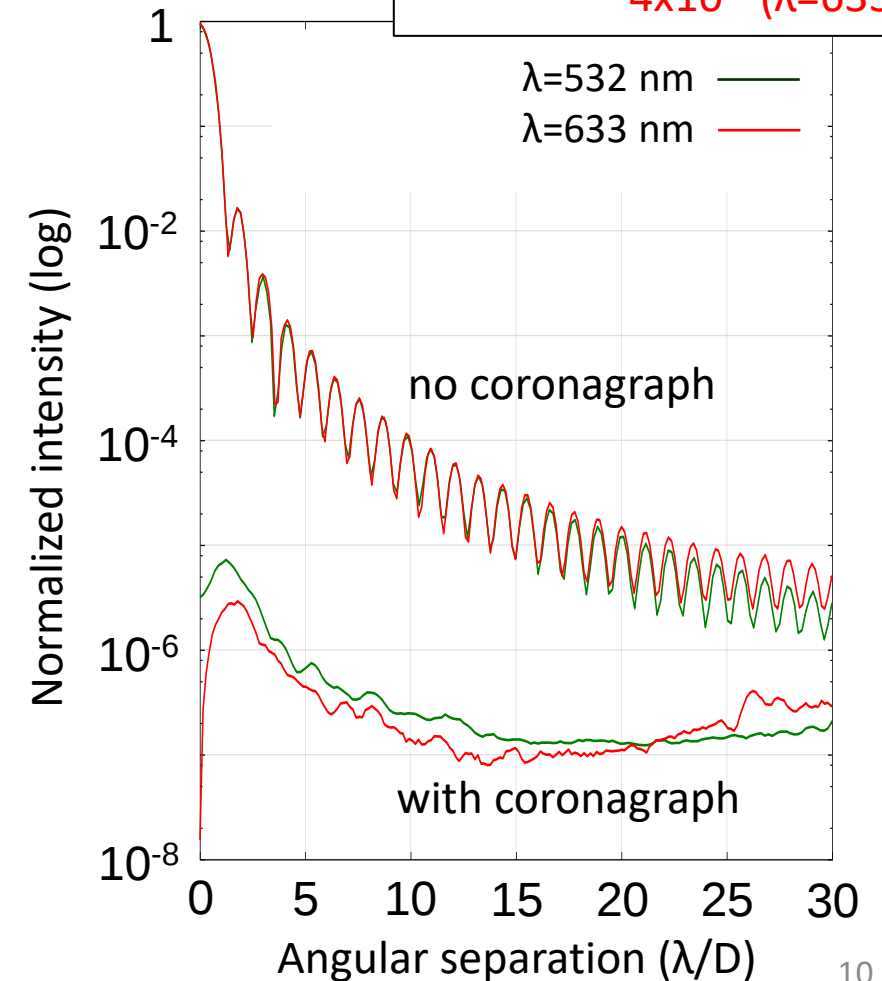
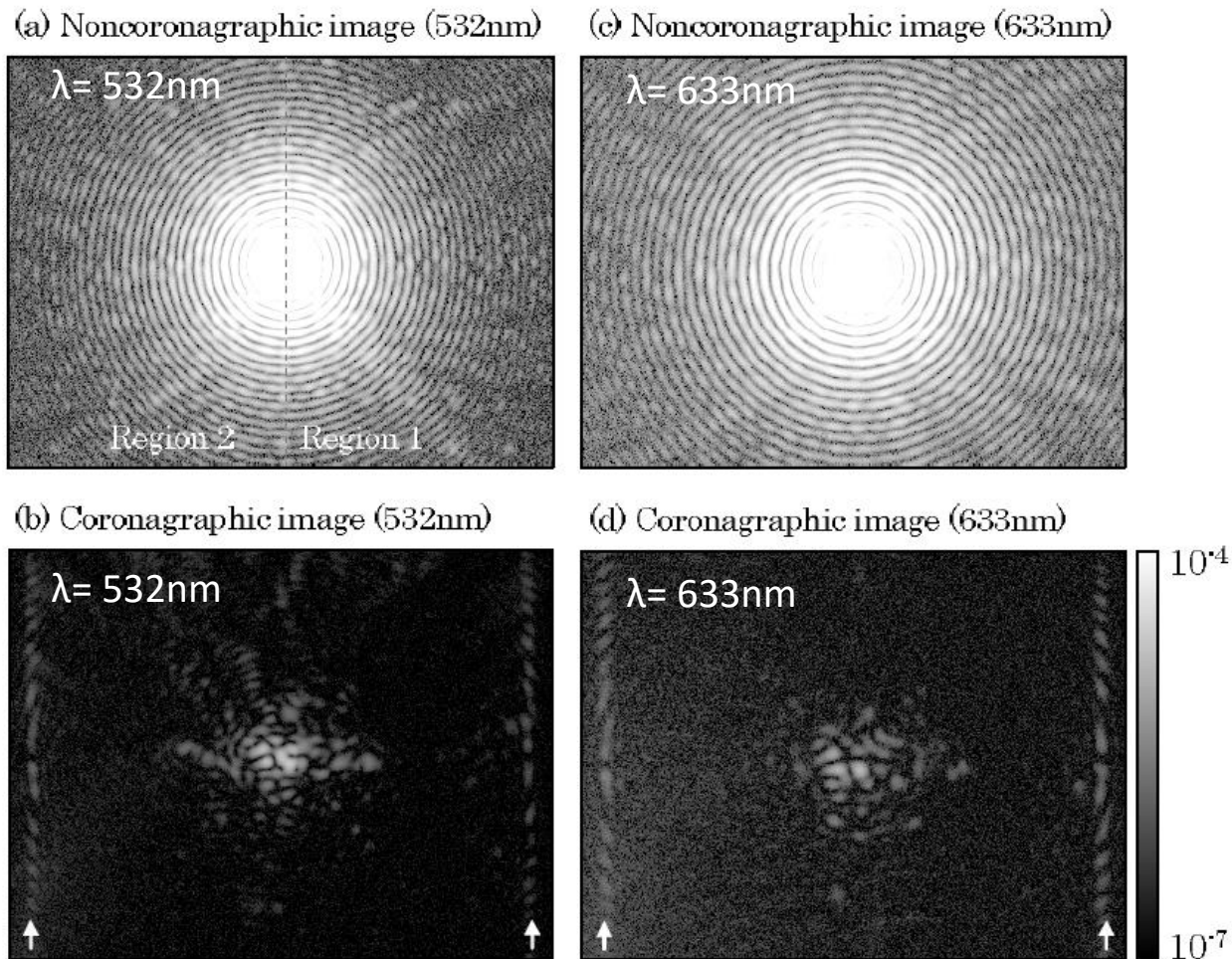
Murakami et al. (2010), ApJ, **714**, 772  
Fabricated by Photonic Lattice, Inc.



# Lab. Demonstration using two lasers (at NAOJ)

- ☺ 2波長で強力な恒星モデル光(回折光)除去 but...
- ☹ 残留スペックル (散乱光由来) → 後述

- 80PM w/ 偏光フィルタ
- 残留光レベル @  $5\lambda/D$ 
  - $7 \times 10^{-7}$  ( $\lambda=532\text{nm}$ )
  - $4 \times 10^{-7}$  ( $\lambda=633\text{nm}$ )

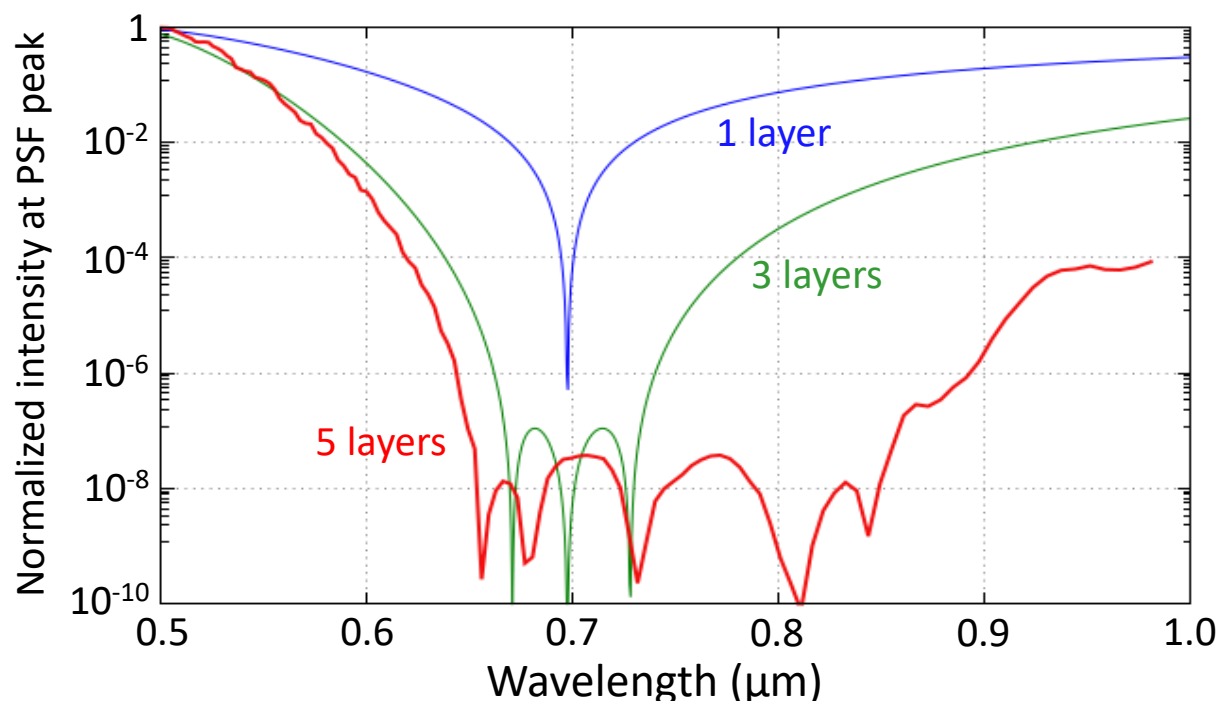


# Broadband Coronagraphic Masks

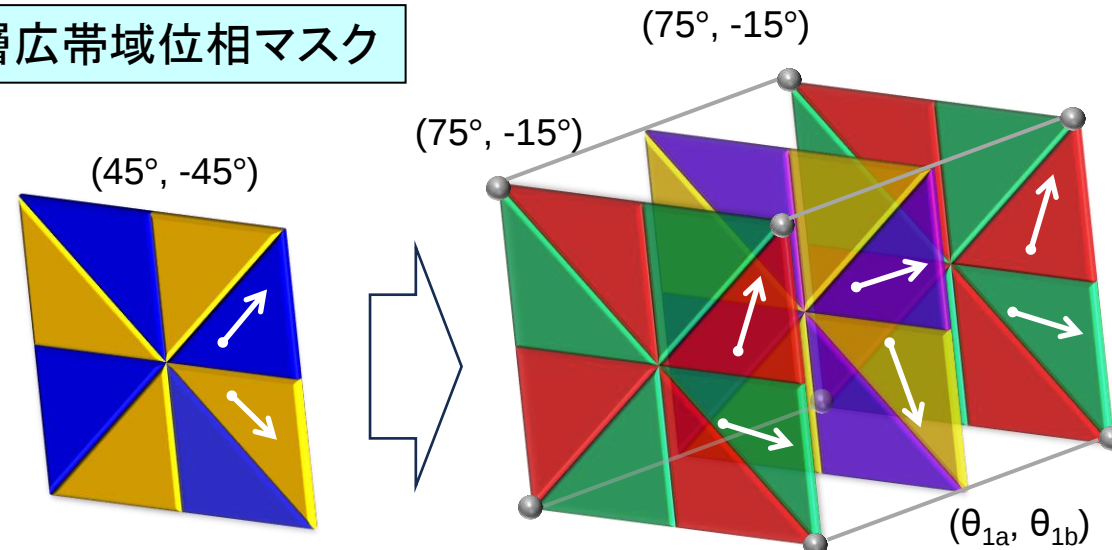
- 将来の地球型系外惑星の探査, および分光観測に向けて
  - 広帯域位相マスクの開発
  - 6次 (charge 6) マスクの開発

## Expected performance of the multi-layer PC-8OPM (example)

Murakami et al. (2020), Proc. SPIE, 11443, 114432M.



## 3層広帯域位相マスク



## Fabricated 3-layer charge-4 mask (8OPM, NIR design)

Nishikawa et al. (2020), Proc. SPIE., 11447, 114474T.

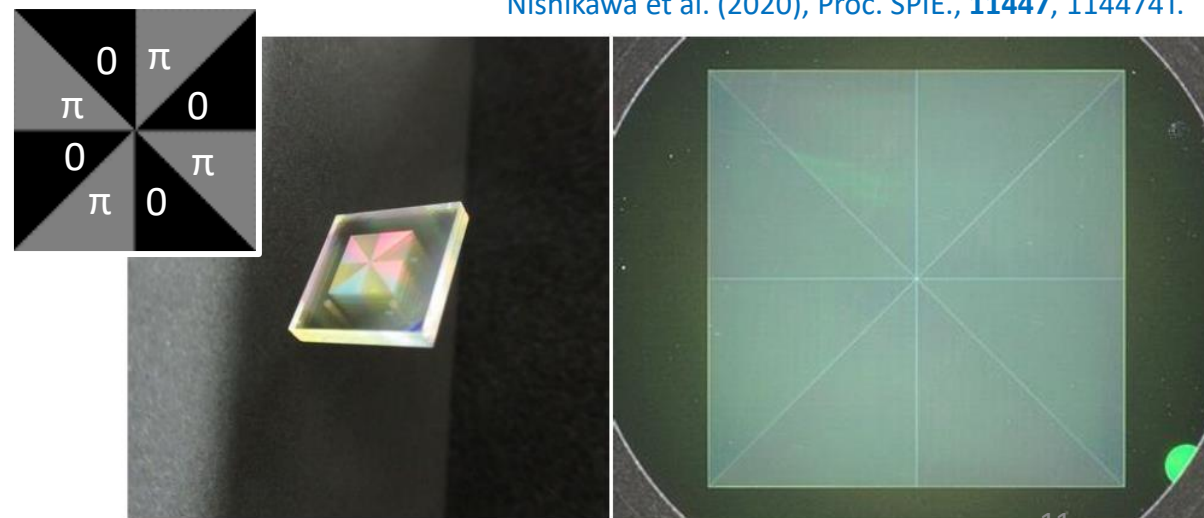
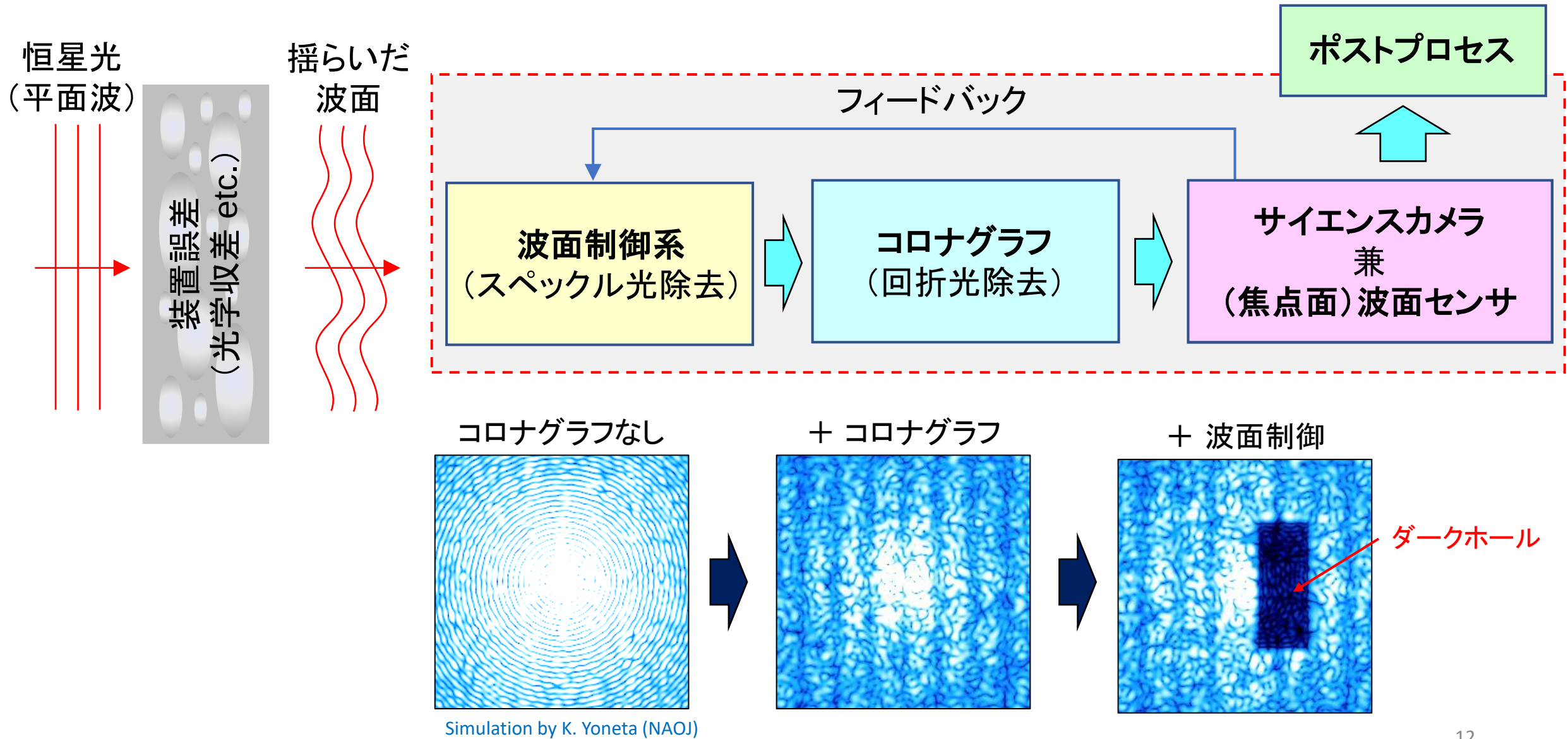


Figure 1. Three-layer IR 8OPM optimized for J,H and Ks band just after gluing.

# Problem of Residual Stellar Speckles



# Lab. Testbeds at Hokkaido Univ.

- **Testbeds “FACET” and “EXIST”**

- 高コントラスト観測テクノロジー開発のための室内シミュレータ
- 多くの成果を創出 [Ref] → 撤収

[Ref] 米田謙太 他, 「系外惑星探査のための空間光変調器を用いたダークホール制御技術の研究開発」, 第11回 可視赤外線観測装置技術ワークショップ 2022

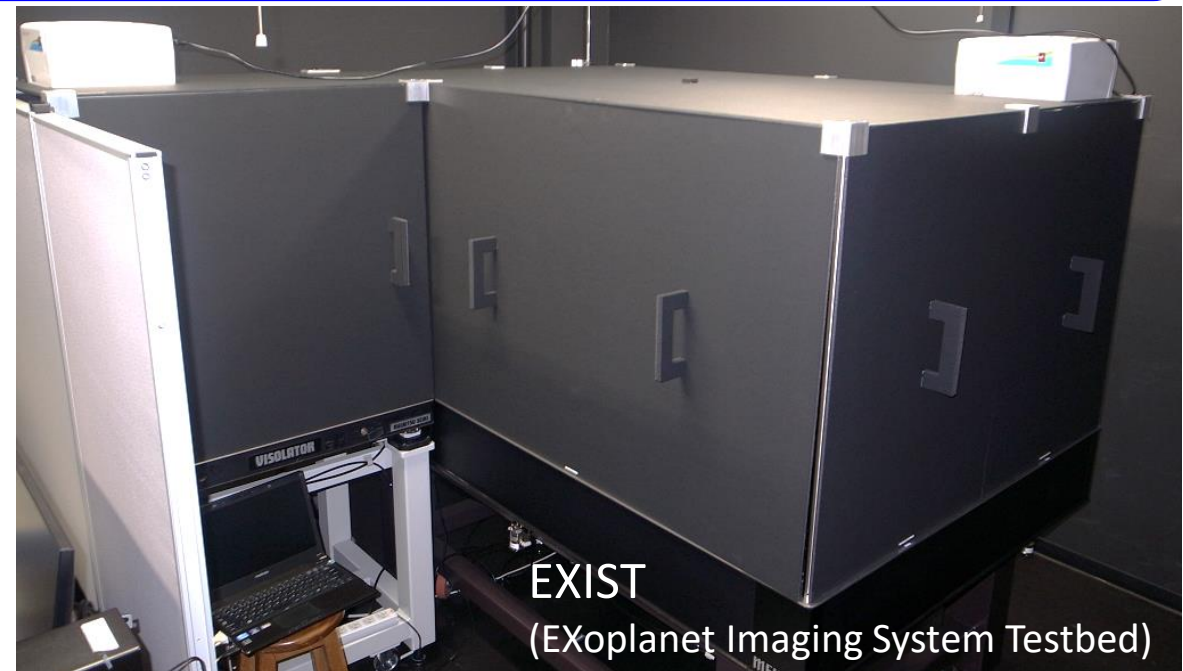


- **FACET: 要素技術開発**

- 波面センシング & 制御技術
- 多種コロナグラフ (e.g., 瞳面マスク, 焦点面マスク, Null干渉型コロナグラフ)

- **EXIST: システムレベルの実証試験**

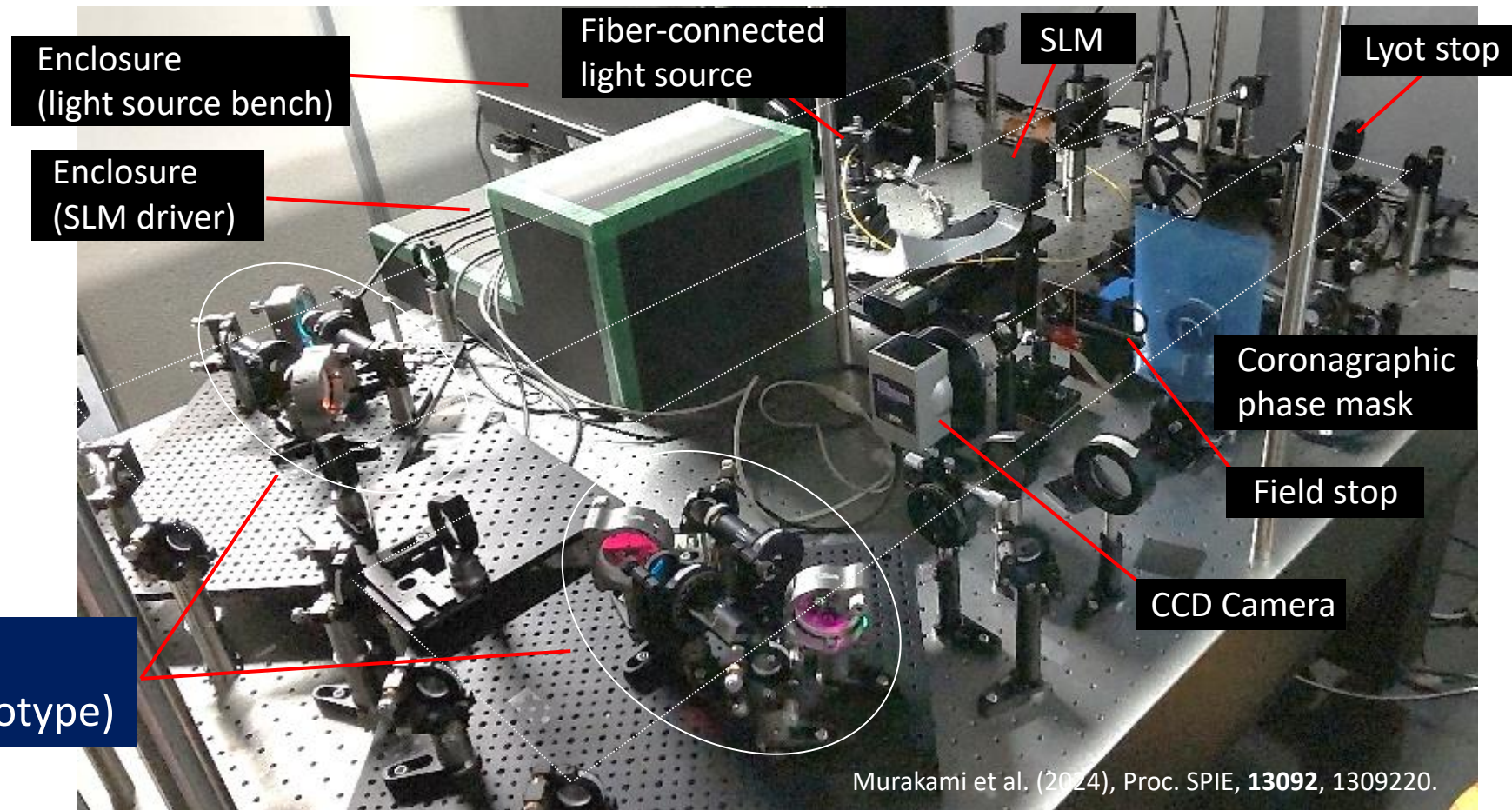
- 広帯域(多バンド)高コントラスト観測のための新規技術の提案



# Lab. Testbed “EXIST”

- Testbed “EXIST”

- 高コントラスト観測システムの室内シミュレータ(人工光源＋波面制御系＋コロナグラフ)
- Spatial light modulator (SLM) を用いた波面制御
- 広帯域波面制御のための新技術の開発



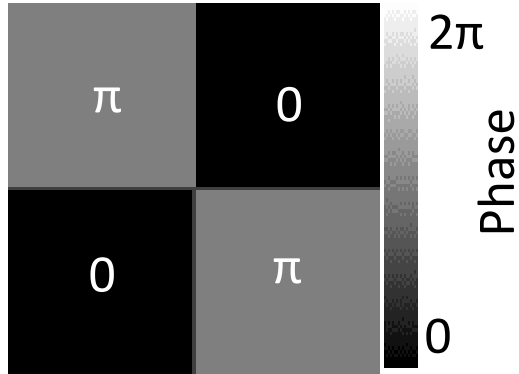
広帯域波面制御の  
新技術 (Gen. 1 prototype)

# Lab. Testbed “EXIST”

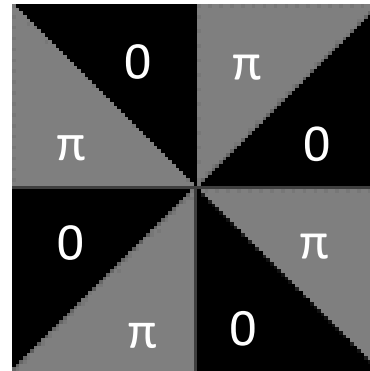
恒星近傍に迫れる



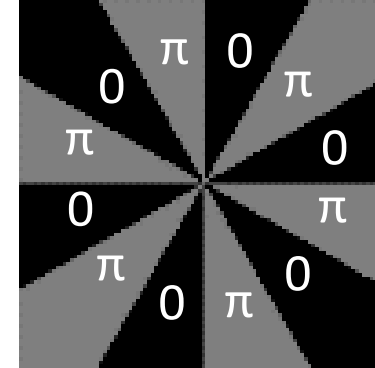
Charge 2 (4QPM)



Charge 4 (8OPM)



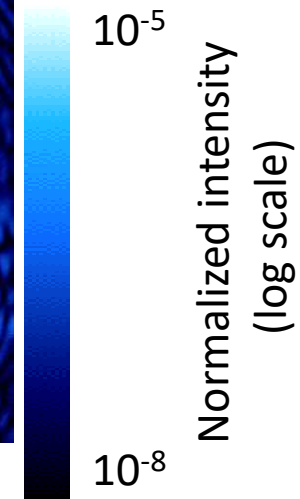
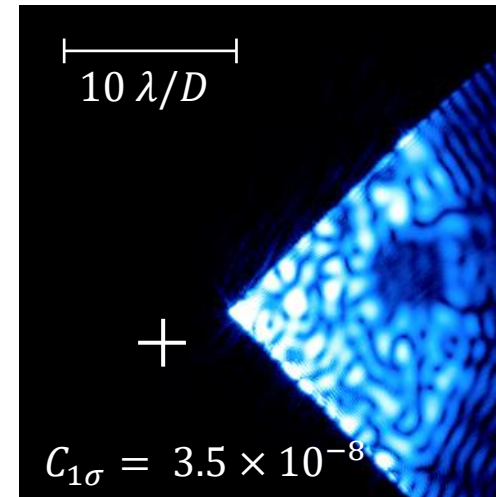
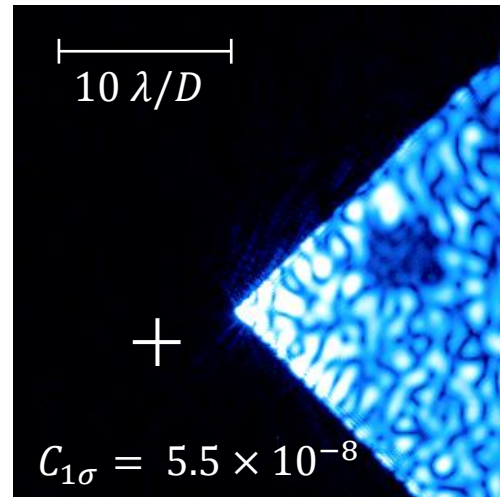
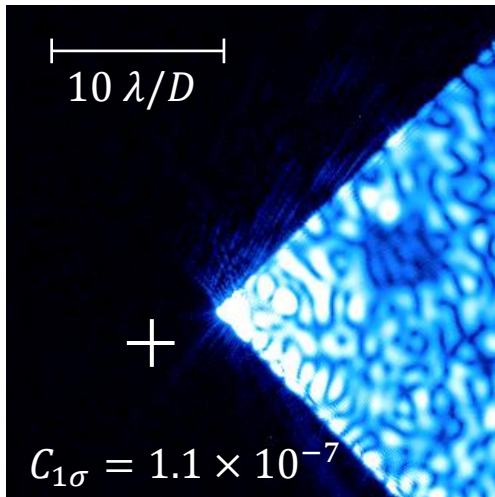
Charge 6 (12SPM)



低次収差にロバスト



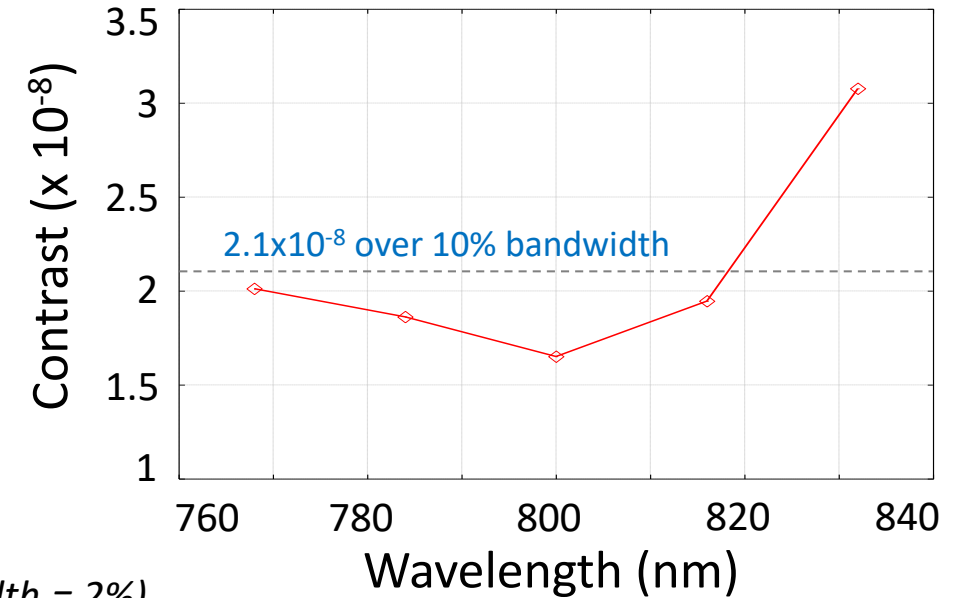
- 波長: 675 nm
- 単層位相マスク w/ 偏光フィルタ
- ダーク領域
  - 離角:  $15\text{-}20 \lambda/D$
  - 方位角: 15 deg



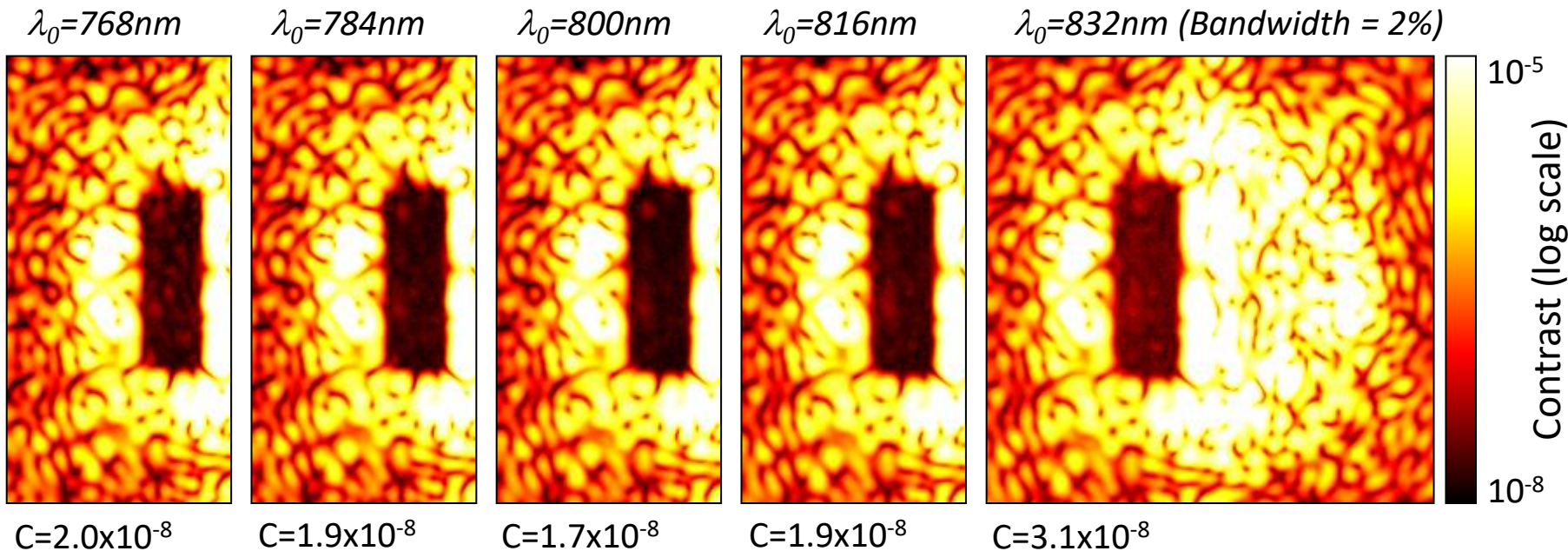
# Lab. Testbeds at JPL

## High-Contrast Imaging Testbed (HCIT) @ JPL

- 将来スペース計画に向けた, NASAの最先端観測シミュレータ
- 真空チャンバ (< mTorr), 安定環境 (~1mK)
- 可変形鏡による波面制御
- 様々なコロナグラフの試験が可能



得られた結果(単層8OPM w/ 偏光フィルタ, 白色光源+狭帯域フィルタ)



- 12年前の結果 → 諸々の技術が向上
  - 位相マスク
  - DM素子数
  - 波面制御技術
  - フィールドストップ etc.

# Summary

- **将来の地球型系外惑星探査に向けて**
  - Roman Space Telescope (2026年~): 技術実証機 Coronagraph Instrument
  - Habitable Worlds Observatory (2040年代を目指す): 広い波長域で $10^{-10}$ の恒星光除去が必要
- **フォトニック結晶によるコロナグラフ光デバイス(位相マスク)の開発**
  - 2波長レーザでスペックル限界性能
  - 真空テストベッドHCIT @ JPLでの試験
  - 非真空テストベッド, マスク評価システムの構築・試験 @ ATC/NAOJ, 北海道大学
- **今後の展望**
  - 広帯域マスク, 6次位相マスクの開発
  - 真空・波面制御試験 → 広い波長域で $10^{-10}$ の恒星光除去性能を目指す
  - 関連する新規技術の開発: e.g., 広帯域波面センシング & 制御技術