



HOKKAIDO  
UNIVERSITY

# SLMを用いたダークホール技術に関する研究： 計算機シミュレーション

○米田謙太(北海道大 D2)  
村上尚史, 一圓光, 小池隆太(北海道大),  
西川淳(国立天文台/総研大/アストロバイオロジーセンター)

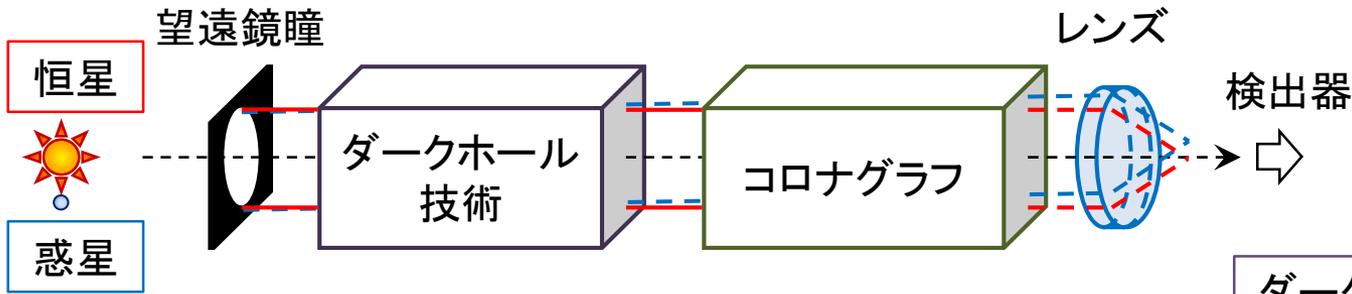
可視赤外線観測装置技術ワークショップ  
2020年12月2日

## ◆ 地球型系外惑星の直接観測

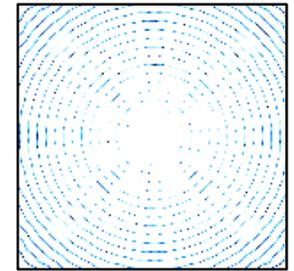
- 究極目標: スペクトル解析によるバイオマーカーの検出
- 問題: 恒星-惑星間のコントラスト
  - 光強度比 太陽型星: 地球型惑星 = **1:  $10^{-10}$**

## ◆ 高コントラスト観測装置

- 恒星光を除去し、惑星の観測を可能とする



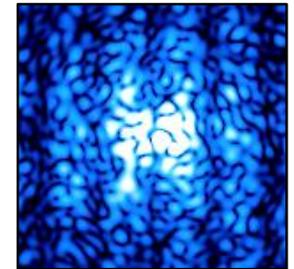
恒星回折光



コロナグラフ



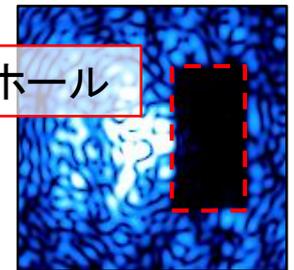
恒星散乱光(スペックル)



ダークホール技術



恒星スペックル除去



ダークホール

## ◆ 将来のスペースミッション

- LUVOIR
  - LUVOIR-A: 口径15m
  - LUVOIR-B: 口径8m
- HabEx: 口径4m

## ◆ 地球型系外惑星の直接観測

- 将来のスペースミッション: LUVOIR、HabEx
- 高コントラスト観測システム

## ◆ 高コントラスト観測システムテストベッドEXISTの開発

- 複数タイプのコロナグラフの実験が可能
- 空間光変調器 (SLM) を用いたダークホール技術



- ✓ ダークホールアルゴリズム
  - ①: Speckle nulling
  - ②: Electric Field Conjugation (EFC)
- ✓ SLMの制御可能範囲
- ✓ 数値シミュレーション
  - Broad/Deep survey モード



## ◆ 焦点面位相マスク型

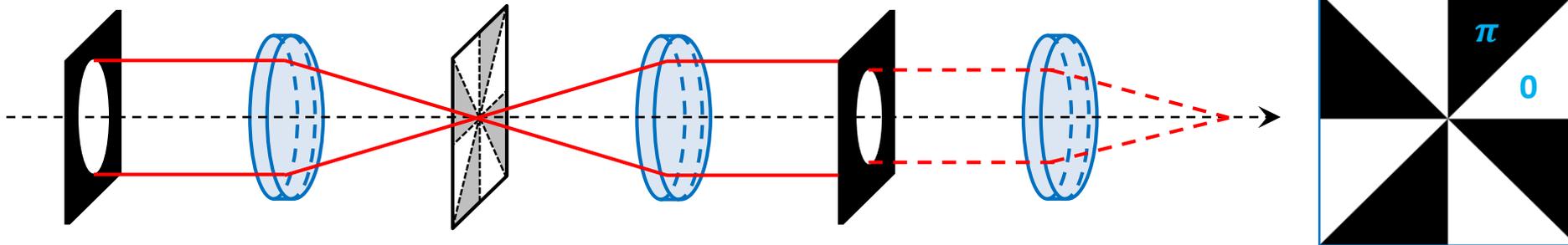
➤ 8分割位相マスク<sup>[1]</sup>、光渦マスク<sup>[2,3]</sup>など

望遠鏡瞳

焦点面位相マスク

Lyotストップ

8分割位相マスク



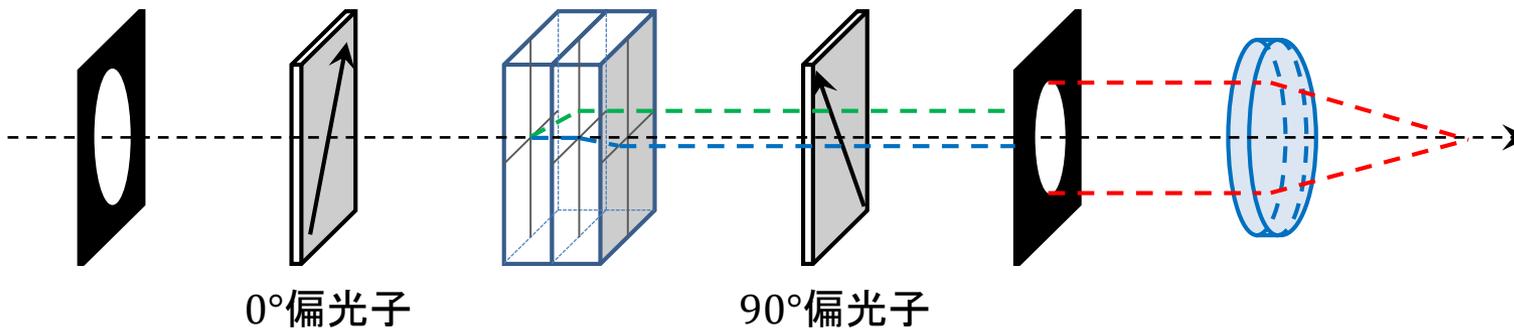
## ◆ ナル干渉計型

➤ サバール板横シヤリング・ナル干渉計 (SPLINE)<sup>[4]</sup>

望遠鏡瞳

サバール板

Lyotストップ



[1] Murakami et al., Publ. Astron. Soc. Pacific, **120**, 1112 (2008).

[3] Mawet et al., Astrophys. J., **633**, 1191 (2005).

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

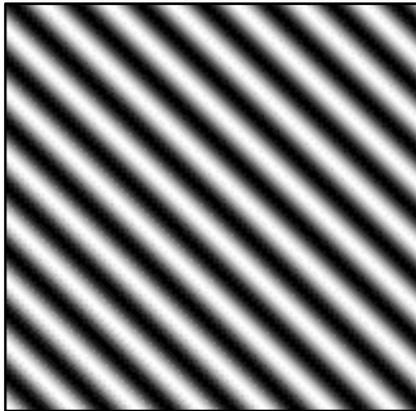
[4] Murakami & Baba, Opt. Lett., **35**, 3003 (2010).



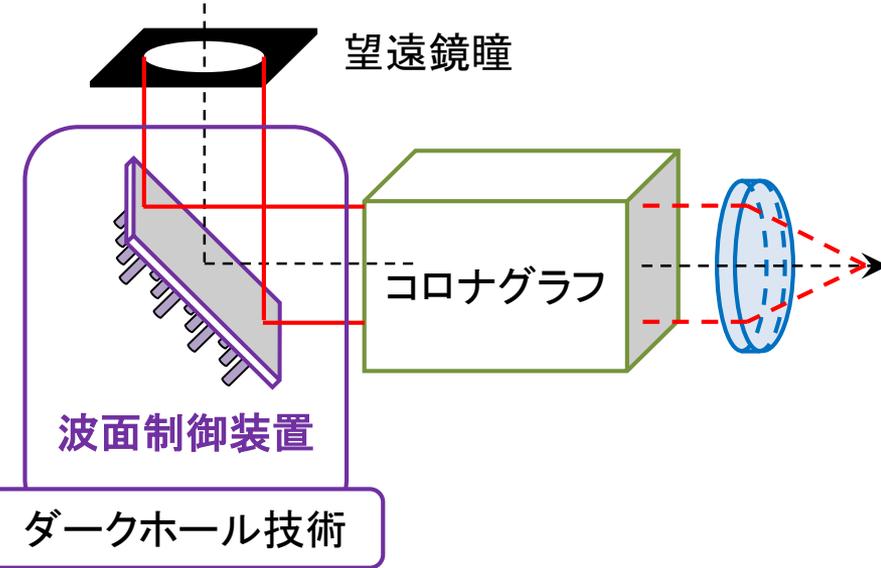
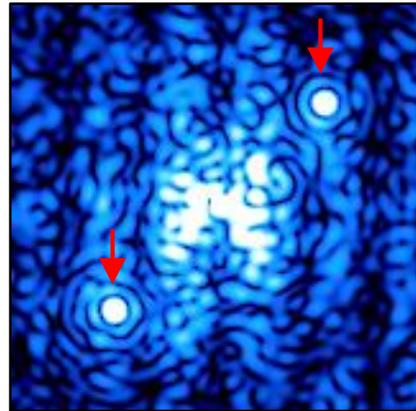
## ◆ アルゴリズム①: Speckle nulling<sup>[5]</sup>

➤ ダークホール領域のスペックルを1点(複数点)ずつ消す

変調波面



焦点面強度



✓ 正弦波形変調

- 振幅
- 空間周波数、方位角
- 位相



✓ 変調ピーク

- 振幅
- 位置
- 位相

➤ 利点

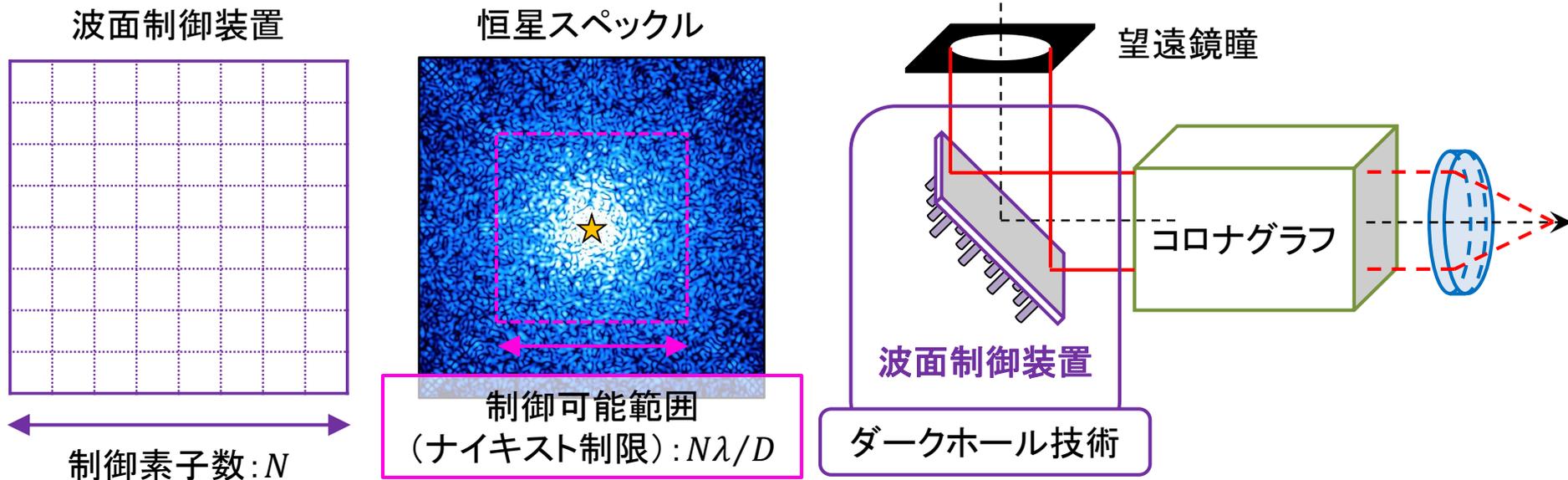
- ✓ アルゴリズムが容易

➤ 欠点

- ✓ 高コントラスト達成まで、制御回数が多い



## ◆ ダークホール範囲の制限



	波面制御装置	
	可変形鏡 (DM)	空間光変調器 (SLM)
制御素子数	少ない (e.g., $64 \times 64$ )	多い (e.g., $512 \times 512$ )
ナイキスト制限	狭い	広い

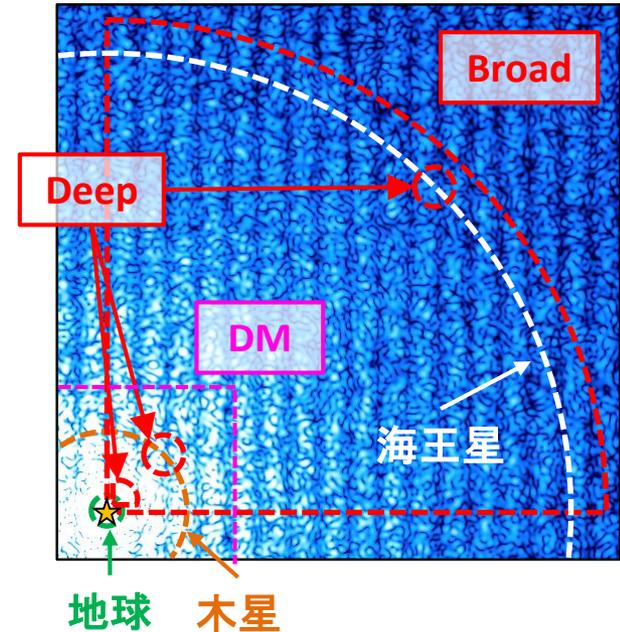
## ◆ 2つの観測モード

- Broad survey モード
  - ✓ 巨大ダークホール形成 (+ ポストプロセスADIなど)
  - ✓ 惑星発見、惑星系アーキテクチャ観測など
  - ✓ アルゴリズム: Speckle nulling
- Deep survey モード
  - ✓ ピンポイントダークホール形成
  - ✓ 極限高コントラストで惑星観測
  - ✓ アルゴリズム: Electric Field Conjugation

## ➤ 惑星離角

	軌道長半径 <sup>[7]</sup> [AU]	離角 $[\lambda/D]$ (@10pc, $\lambda = 500\text{nm}, D = 4\text{m}$ )
地球	1.0	3.9
木星	5.2	20
海王星	30.0	116

## ➤ 恒星、ダークホール位置

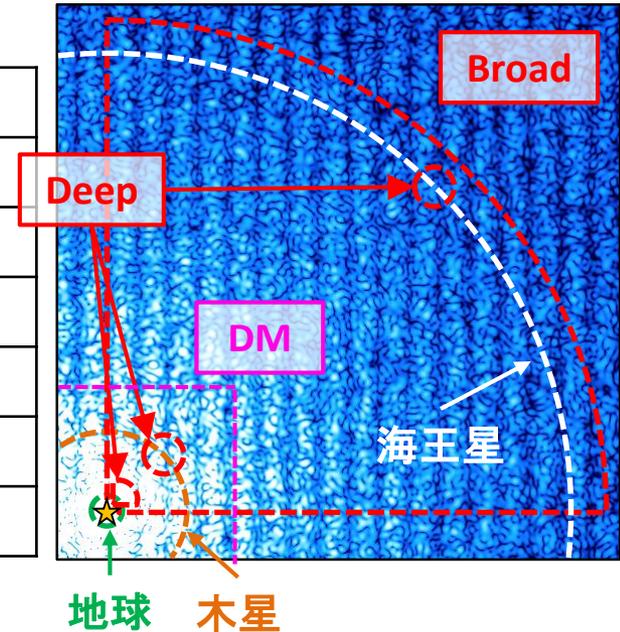


## ◆ 2つの観測モード

### ➤ シミュレーションパラメータ

		Broad survey	Deep survey
瞳直径 (SLMサイズ) [pixel]		256	64
コロナグラフ		SPLINE	
瞳面 初期収差	振幅 [% RMS]	2.0	
	位相 [nm RMS]	$\lambda/100$	
ダークホールサイズ [ $\lambda/D$ ]		内径:3, 外径:125	直径:10(2ヶ所)
ダークホールアルゴリズム		Speckle nulling	EFC

### ➤ 恒星、ダークホール位置



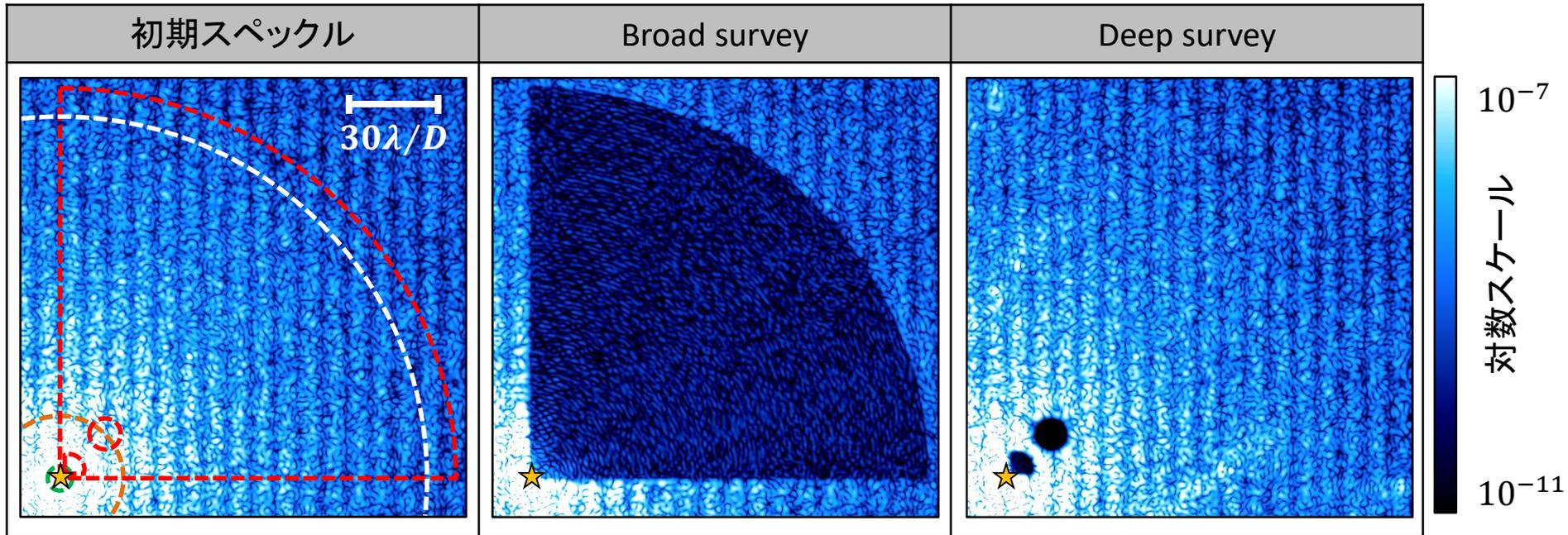
### ➤ 惑星離角

	軌道長半径 <sup>[7]</sup> [AU]	離角 [ $\lambda/D$ ] (@10pc, $\lambda = 500\text{nm}, D = 4\text{m}$ )
地球	1.0	3.9
木星	5.2	20
海王星	30.0	116

[7] NASA Science Solar System Exploration; <https://solarsystem.nasa.gov/planets/overview/>

## ◆ 計算機シミュレーション結果

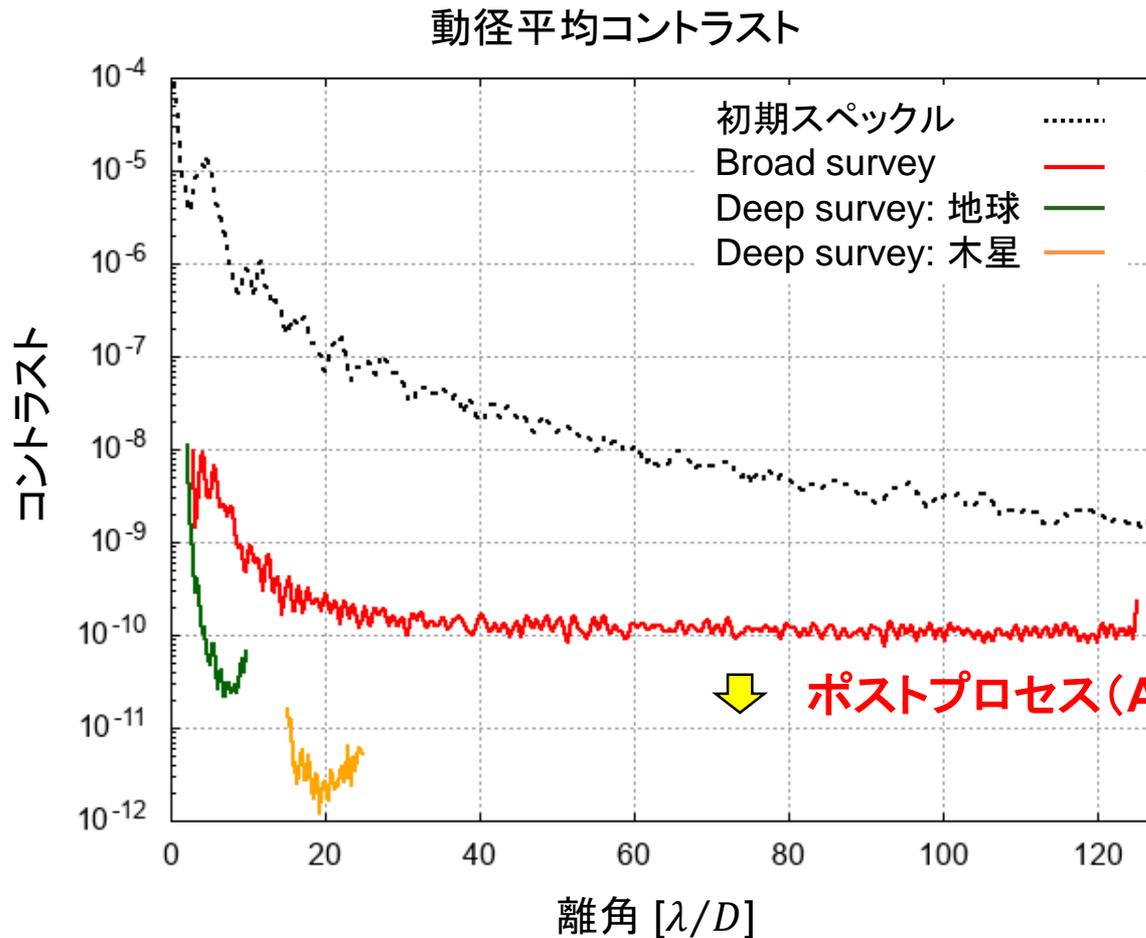
➤ 各モードで想定したダークホールの形成に成功



		初期コントラスト	最終コントラスト
Broad		$3.1 \times 10^{-8}$	$1.2 \times 10^{-10}$
Deep	地球	$6.3 \times 10^{-6}$	$3.6 \times 10^{-11}$
	木星	$1.4 \times 10^{-7}$	$2.2 \times 10^{-12}$

## ◆ 計算機シミュレーション結果

➤ 各モードで想定したダークホールの形成に成功



↓ ポストプロセス (ADIなど) で1桁向上

## ◆ 高コントラスト観測システムテストベッドEXISTの開発

- 複数タイプのコロナグラフの開発
- 空間光変調器 (SLM) を用いたダークホール技術の開発
  - ✓ 数値シミュレーション
    - Broad survey モード: **DMのナイキスト制限を大きく超えたダークホール形成**
    - Deep survey モード: **惑星位置で極限高コントラストを達成**

## ◆ 今後の展望

- テストベッドEXISTの構築
  - SLMを用いたダークホール技術の原理実証
    - ✓ Broad/Deep survey
    - ✓ 多素子を活かした独自制御技術  
(Yoneta et al., in prep.)
    - ✓ 連星系ダークホール技術  
(Yoneta et al., in prep.)
- など

テストベッドEXISTの外観 @北海道大

