

2020年12月2日

可視赤外線観測技術ワークショップ@ オンライン

ハビタブル系外惑星探査に向けた コロナグラフ試験機の構築

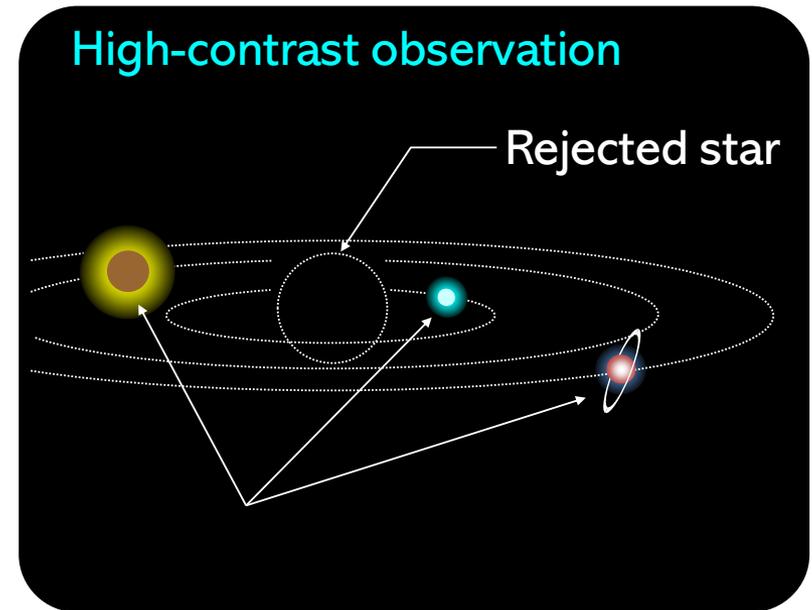
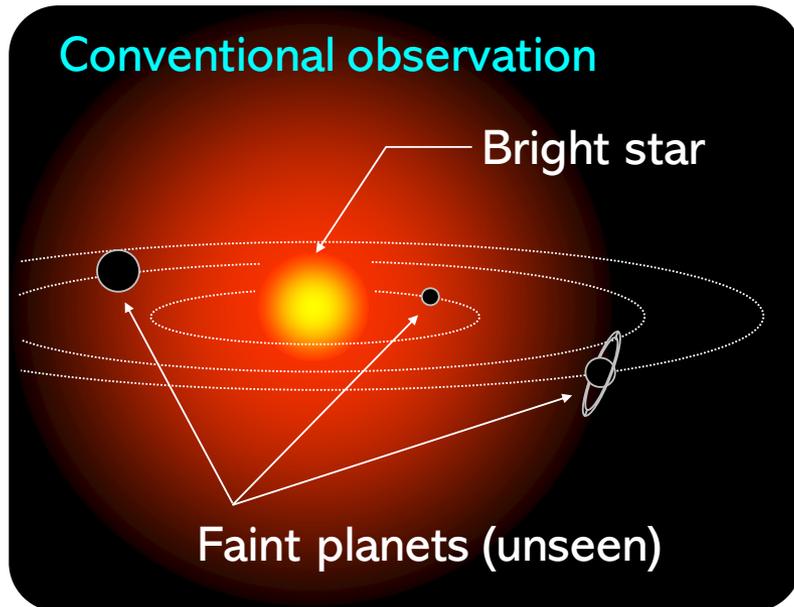
村上尚史(北海道大学 大学院工学研究院)

共同研究者

米田謙太, 須藤星路, 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)

イントロダクション – 系外惑星の直接観測

- 現状：主に地上大望遠鏡が活躍
 - 高コントラスト観測により恒星光除去
 - 質量：roughly 数~10木星質量
 - 軌道：roughly 10~数10天文単位
- 究極目標：
 - 恒星周りのハビタブルゾーンに地球型惑星を発見(右図)
 - 惑星光分析によるバイオシグネチャー(生命の痕跡)検出



課題1: 恒星・惑星間離角が小さい

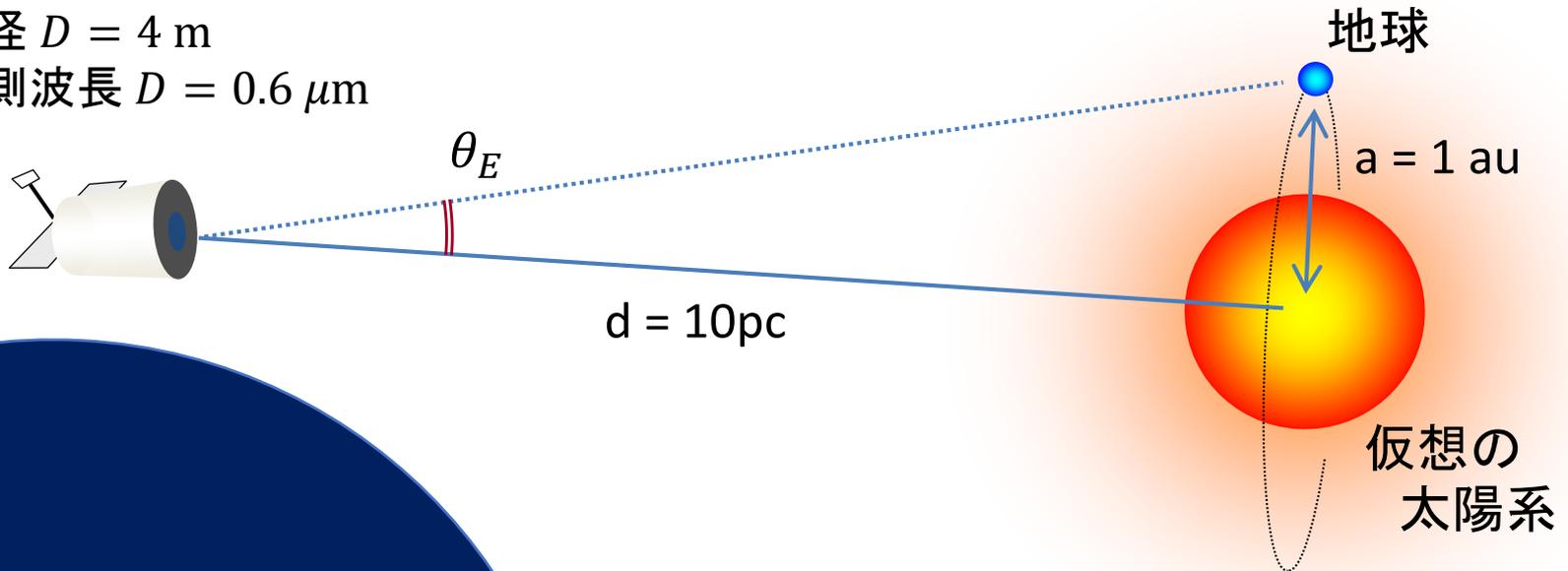
- 10pc遠方の太陽-地球間の離角: $\theta_E \approx \frac{a}{d} \approx 4.85 \times 10^{-7}$ rad
- 望遠鏡解像度: $\theta_R \approx \frac{\lambda}{D} \approx \frac{0.6 \times 10^{-6}}{4.0} \approx 1.5 \times 10^{-7}$ rad



$$\theta_E \approx 3 \frac{\lambda}{D} : \text{解像度のおよそ3倍の離角}$$

望遠鏡

- 口径 $D = 4$ m
- 観測波長 $\lambda = 0.6 \mu\text{m}$



課題2: まぶしい恒星が障害となる

惑星/恒星の反射光コントラスト(可視・近赤外)

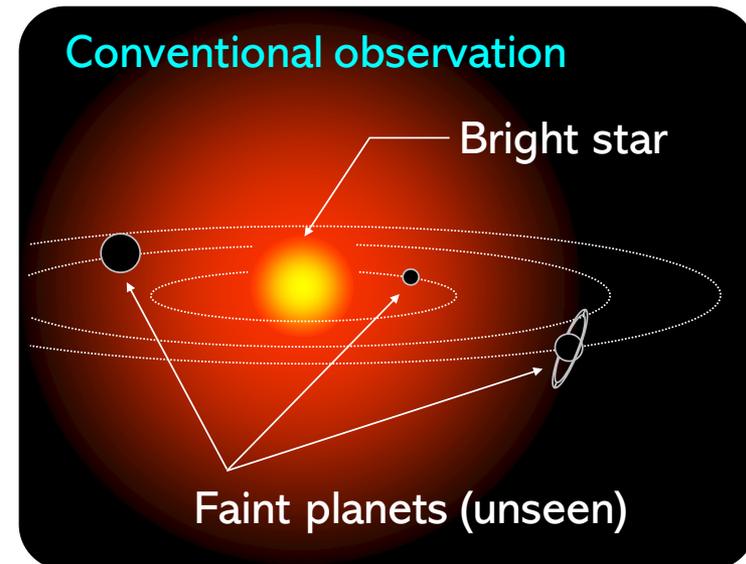
$$C_{vis} = p\phi(\alpha) \left(\frac{r_p}{a}\right)^2$$

p : 幾何アルベド (geometric albedo)
 $\phi(\alpha)$: 位相則 (phase law)
 a : 惑星・恒星間距離 (軌道長半径)
 r_p : 惑星半径

【数値例】

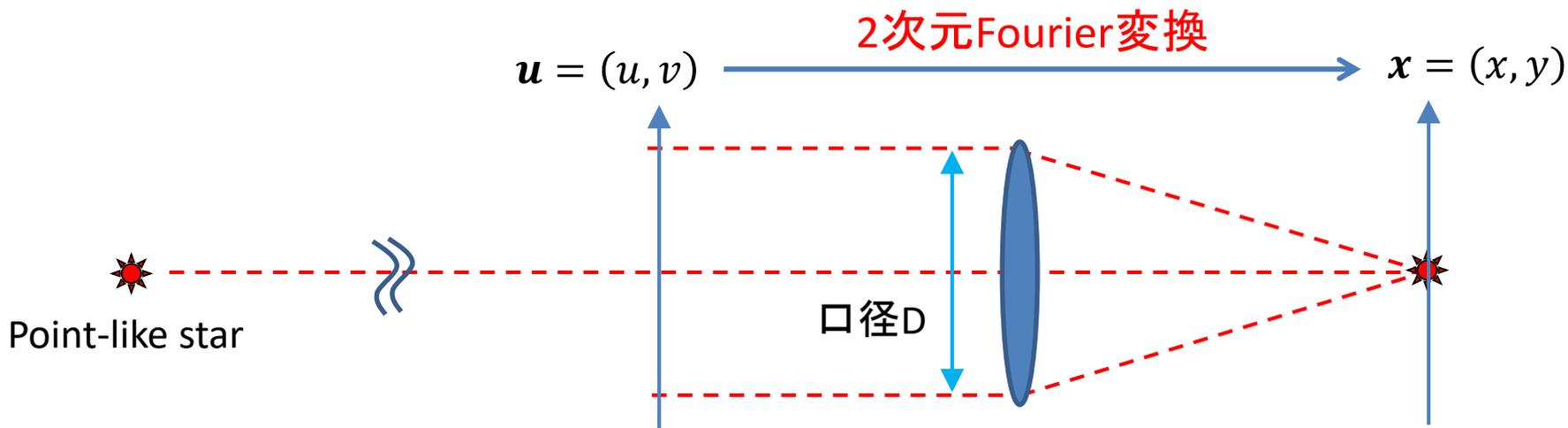
地球／太陽のコントラスト(半月状態 $\alpha = \pi/2$)

$$\begin{aligned} C_{vis} &= p\phi(\alpha) \left(\frac{r_p}{a}\right)^2 \\ &\approx 0.37 \times 0.32 \times \left(\frac{6.4 \times 10^3 \text{ km}}{1.5 \times 10^8 \text{ km}}\right)^2 \\ &\approx 2 \times 10^{-10} \end{aligned}$$

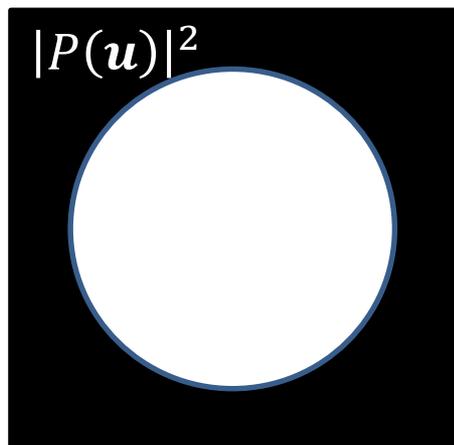


恒星回折光の問題

- 望遠鏡瞳と焦点像の関係

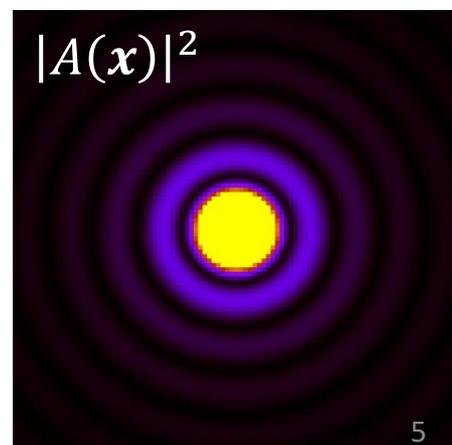


望遠鏡瞳: (u, v) 面



Fourier変換
 $A(\mathbf{x}) = \mathcal{F}[P(\mathbf{u})]$

観測像: (x, y) 面

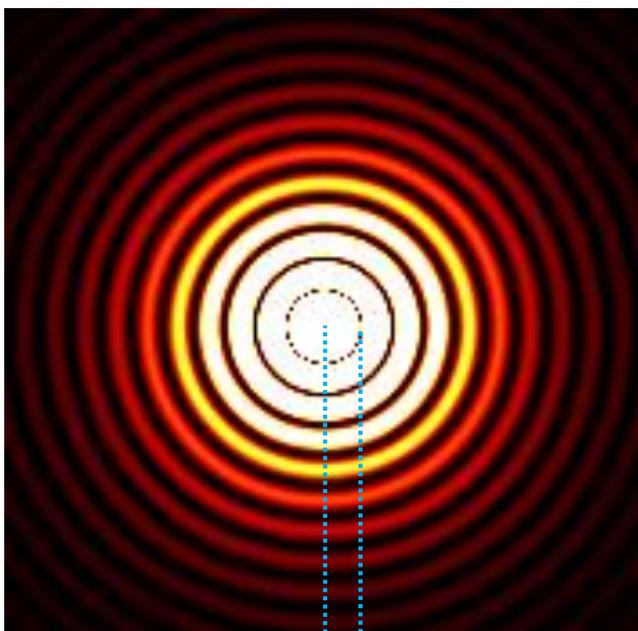


逆Fourier変換
 $P(\mathbf{u}) = \mathcal{F}^{-1}[A(\mathbf{x})]$

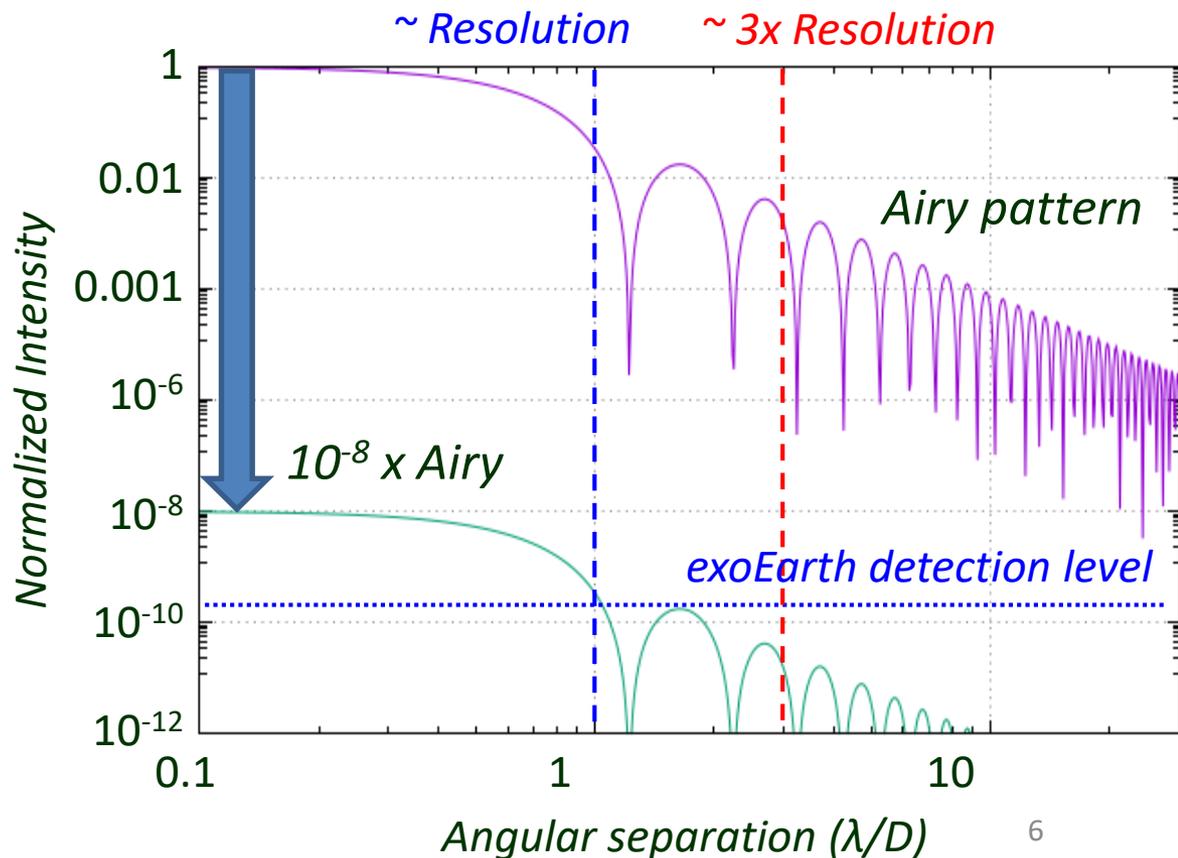
恒星回折光の問題

- 恒星の回折限界像 (PSF)
 - 解像度 $\sim \lambda/D$ (λ : 波長, D : 望遠鏡口径)
 - 回折リングにより微弱な惑星の検出が妨げられる
 - 発展的なコロナグラフが必要(隠すのではなく、消す)

Diffraction-limited PSF
(Airy pattern)



Airy disk (radius $\sim \lambda/D$)



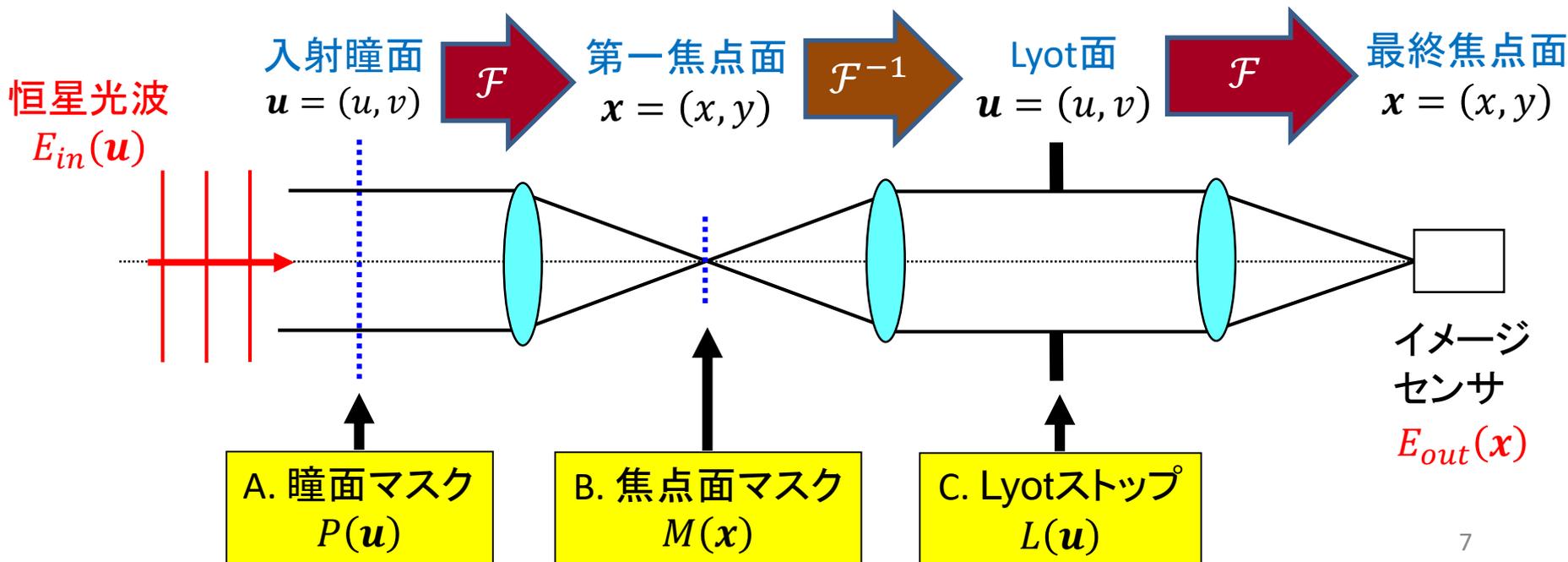
恒星回折光の問題

- コロナグラフの基本構成と役割

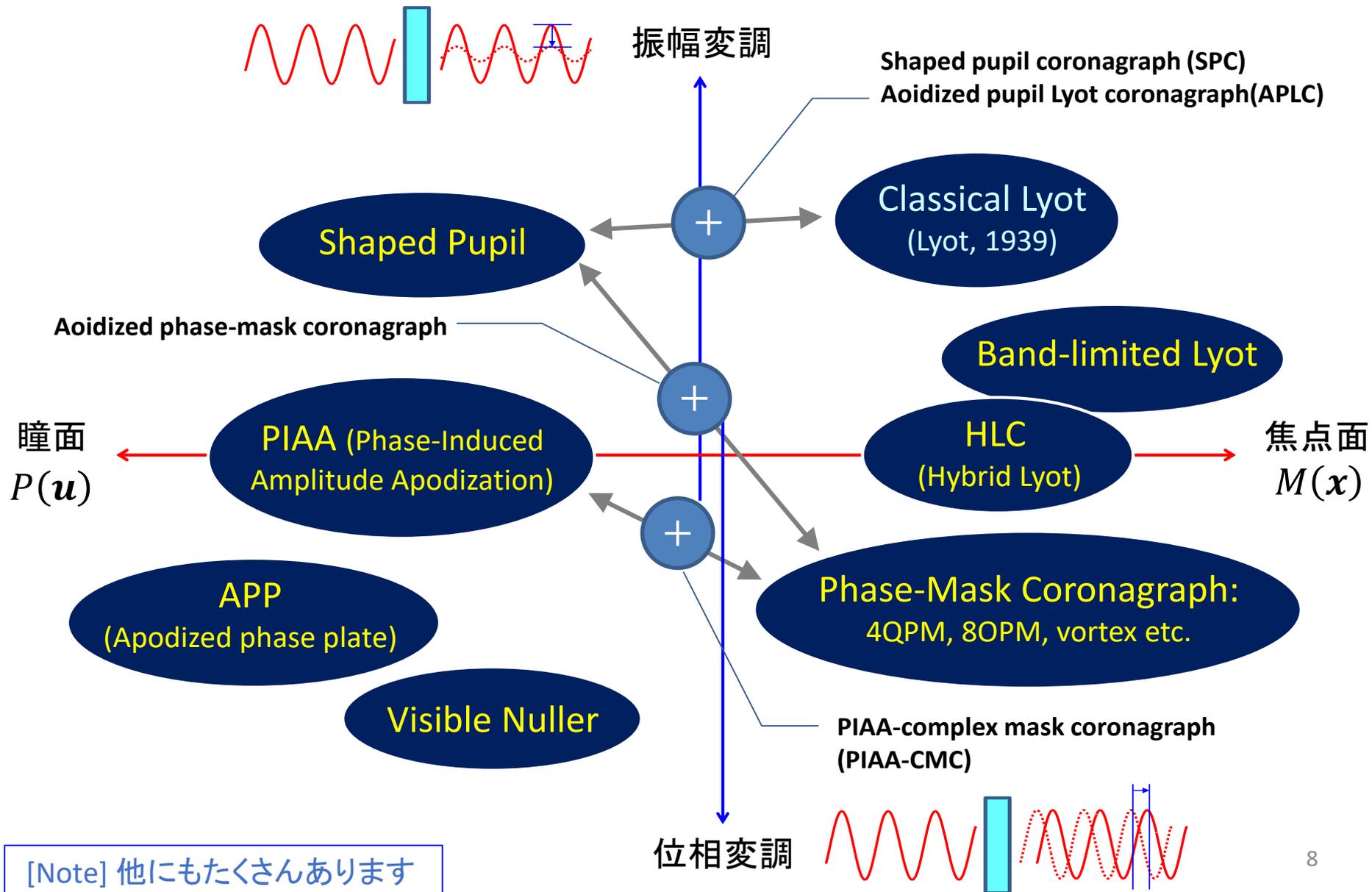
- 出力光波 $E_{out}(x)$ が(ほぼ)ゼロになるような光デバイスを置く

$$E_{out}(x) = \mathcal{F} \left[L(u) \times \mathcal{F}^{-1} \left[M(x) \times \mathcal{F} [E_{in}(u) \times P(u)] \right] \right] = 0$$

イメージセンサ
における光波場 Lyotストップ 焦点面マスク 瞳面マスク



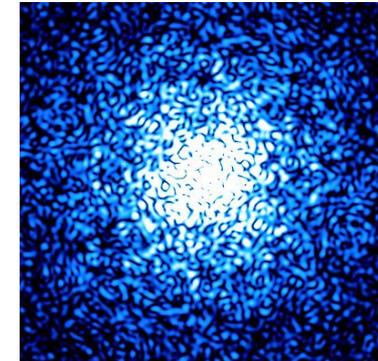
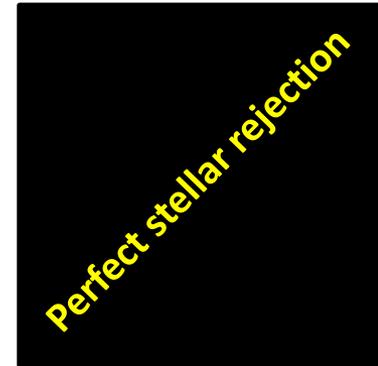
コロナグラフ - どこで何をするか



恒星散乱光の問題

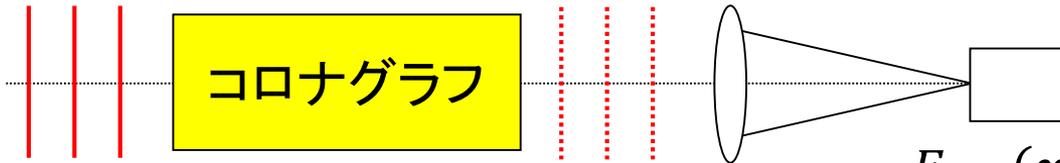
● 恒星の残留スペックルの問題

- ☺ 理想 (天体光が平面波): 恒星光を強力に除去
- ☹ 現実 (光波面乱れ): 恒星を除去できない
 - 要求面精度 $\sim \lambda/10000$ rms
 - スペース観測でも問題 (光学素子の面粗さ)



入射光 (平面波)

$$E_{in}(\mathbf{u}) = E_o(\text{Const.})$$

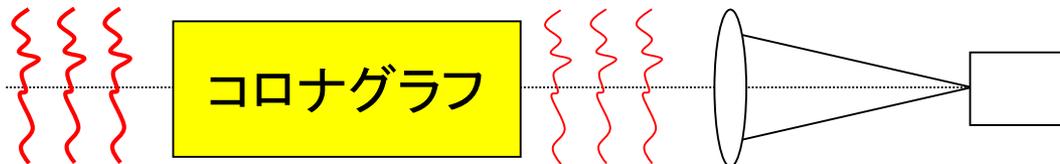


$$E_{out}(\mathbf{x}) = \underline{\underline{C}}[E_o] = 0$$

コロナグラフ
演算子

入射光 (乱れた波面)

$$E_{in}(\mathbf{u}) = E_o \underline{\underline{e^{i\phi(\mathbf{u})}}} \approx E_o + iE_o \phi(\mathbf{u})$$



$$E_{out}(\mathbf{x}) = \cancel{C[E_o]} + iC[E_o \phi(\mathbf{u})]$$

$$\equiv \underline{\underline{E_{sp}(\mathbf{x})}} \quad \text{スペックル}$$

恒星散乱光の問題

- コロナグラフに特化した**補償光学**

- コロナグラフ前に波面補正系(可変形鏡など) → 位相補正 $\phi_c(\mathbf{u})$
- 最終焦点面の**特定領域で光波がゼロとなるように**光波面制御

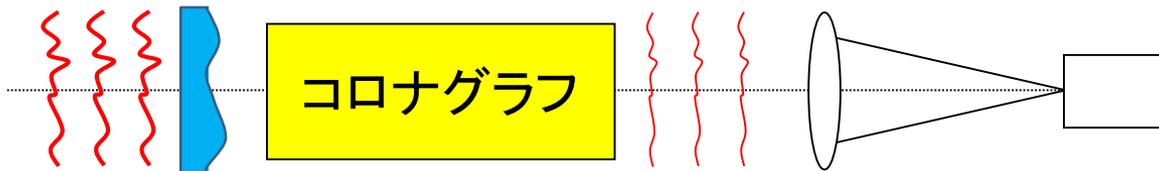
入射光(乱れた波面)を補正

$$E_{in}(\mathbf{u}) = E_o e^{i\phi(\mathbf{u})} \underline{e^{i\phi_c(\mathbf{u})}}$$

$$\approx E_o + iE_o\phi(\mathbf{u}) + iE_o\phi_c(\mathbf{u})$$

e.g., Electric Field Conjugation (EFC)

Borde & Traub (2006), ApJ, 638, 488
Give'on et al. (2007), Proc. SPIE, 6691, 0A-1



可変形鏡
など

$$E_{out}(\mathbf{x}) = \cancel{C[E_o]} + \underline{E_{sp}(\mathbf{x})} + \underline{iC[E_o\phi_c(\mathbf{u})]}$$

スペckル 補正項



- $E_{sp}(\mathbf{x})$ をセンシング
- 特定領域で $E_{out}(\mathbf{x}) = 0$ となるように $\phi_c(\mathbf{u})$ を制御

$$\therefore E_o\phi_c(\mathbf{u}) = iC^{-1}[E_{sp}(\mathbf{x})]$$

恒星散乱光の問題

コロナグラフに特化した補償光学



コロナグラフに特化した補償光学 ↔ 一般的な補償光学

1. 同一光路で波面センシング ↔ 別光路でセンシング
2. スペックルを消去するように光波面制御 ↔ 平面波となるよう補正
 - 性能の指標: コントラスト ↔ Strehl比
 - 残留スペックルに「穴」を形成 (ダークホール制御)

[Note] 別光路での低次波面センサ (LOWFS) も開発

北大におけるコロナグラフ試験機の構築

- 目的: 要素技術の基礎研究およびシステムレベルの開発
 - 将来スペースコロナグラフ時代を見据えた装置開発

FACET (FAcility for Coronagraphic Elemental Technologies)

- 特殊光学デバイスの基礎研究
- 光波面計測・制御アルゴリズムの基礎研究

要素技術の基礎研究へ
フィードバック



国内・国際
協力



技術統合
(システム化)



EXIST (EXoplanet Imaging System Testbed)

- 観測システムとして統合
- 「第二の地球」探査システムの観測性能を評価

コロナグラフ試験機1: FACET

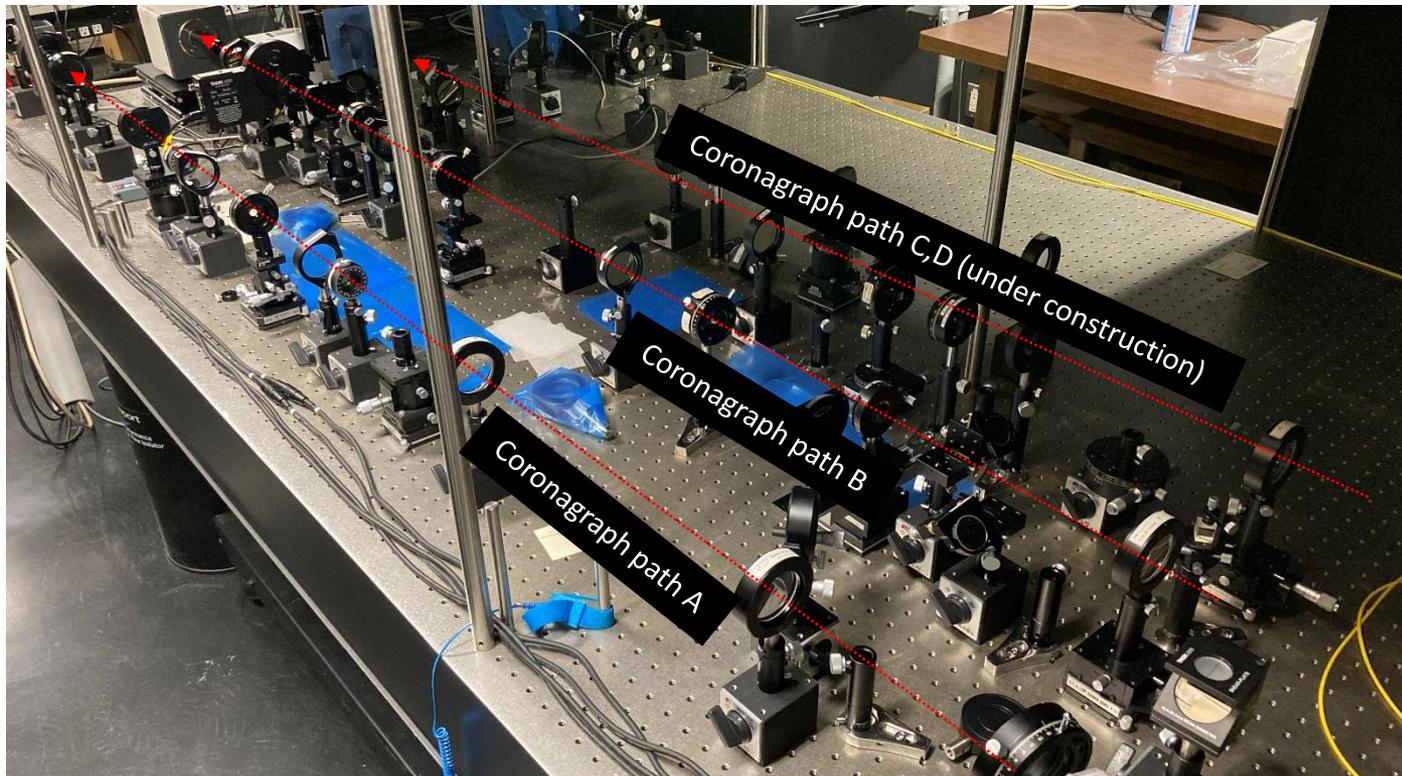
- 要素技術の開発

- コロナグラフ技術

- 共通光路VNC型コロナグラフ
 - 焦点面位相マスクコロナグラフ
 - アポダイズ位相マスクコロナグラフ

- SLMダークホール技術

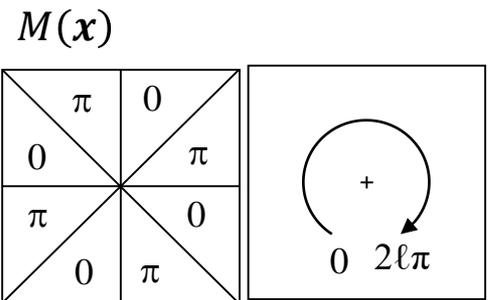
- DMの代用としての基礎開発
 - 多素子波面制御による特殊技術の独自提案と開発



開発中のコロナグラフ

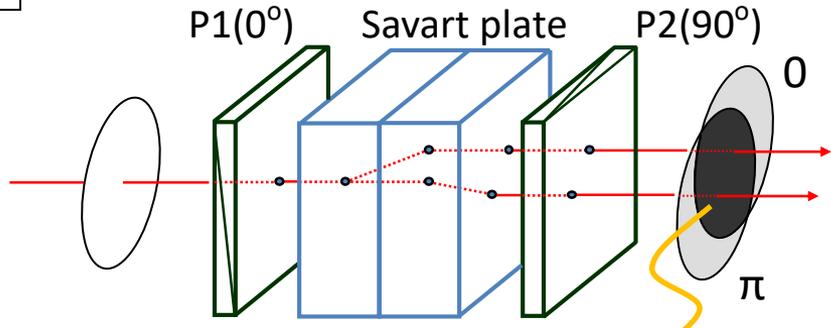
- **焦点面位相マスクコロナグラフ (Focal-plane phase-mask coronagraph)**
 - 焦点面で位相変調 / 前述の渦位相マスクの仲間
 - フォトニック結晶による位相マスク → 高精細な位相パターン
 - 8分割位相マスク・ベクトル渦マスク・・・など
 - 軸方位が空間変化する波長板で構成 → Pancharatnam位相変調
- **共通光路可視ナル干渉コロナグラフ (Common-path visible nulling coronagraph)**
 - 複屈折プリズム (Savart板) を利用した共通光路横シヤリング干渉計
 - 一方の光波に π 位相変調 → 打ち消し合う光波干渉により恒星除去
 - シンプル・高安定・アクロマティック

8分割位相マスクおよび
2次ベクトル渦マスク

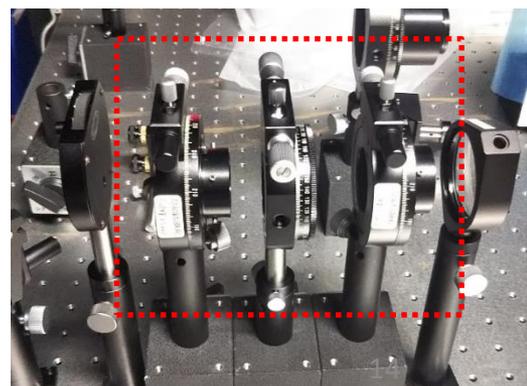


共通光路可視ナル干渉コロナグラフ

Murakami & Baba, Opt. Lett., 35, 3003 (2010).



アクロマティックな恒星除去



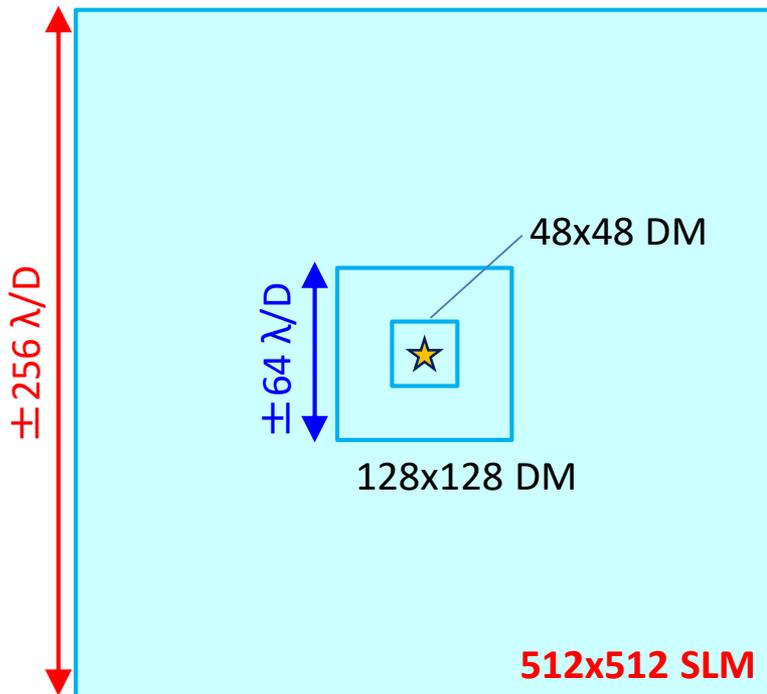
Murakami et al., (2010), Astrophys. J., 714, 772
 Murakami et al. (2013), Opt. Express, 21, 7400

開発中のダークホール技術

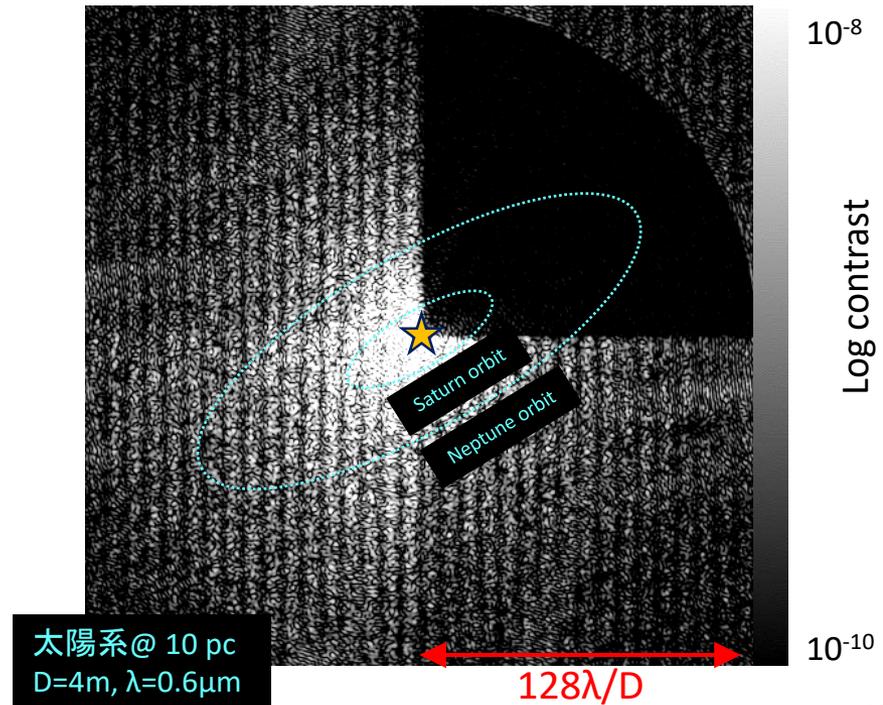
● 空間光変調器 (SLM) を用いたダークホール技術

- 512x512 SLMを使用
- 原理上、巨大ダークホール (radius $>200\lambda/D$) が可能
 - 複数コロナグラフでの原理実証 (シミュレーションおよび室内試験)

最大ダークホールサイズ (Nyquist制限)



巨大ダークホール形成
(シミュレーション by K. Yoneta)



コロナグラフ試験機2: EXIST



Sept 2019

光学ベンチインストール

Nov 2019

(簡易)クリーン環境・光学系設計

Jan 2020~

光学系構築開始

Aug 2020

反射系から屈折系へ光学系案を変更

Dec 2020

光学系前半構築

~April 2021

光学系後半構築(予定)

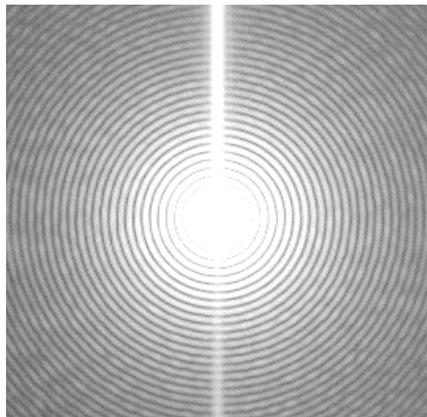
May 2021~ (?)

実証試験スタート(予定)

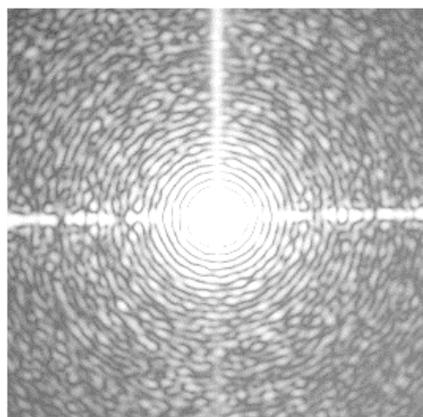
コロナグラフ試験機2: EXIST

- システムレベルの高コントラスト観測実証試験
 - 目標: 米欧テストベッドと比肩する 10^{-9} レベルコントラスト
 - 複数のコロナグラフを試験
 - SLMダークホール制御の開発
 - 多素子の特長を活かした独自の制御法提案とその開発
 - 広帯域ダークホール制御、連星系観測などの検討
 - 屈折系から反射系へ

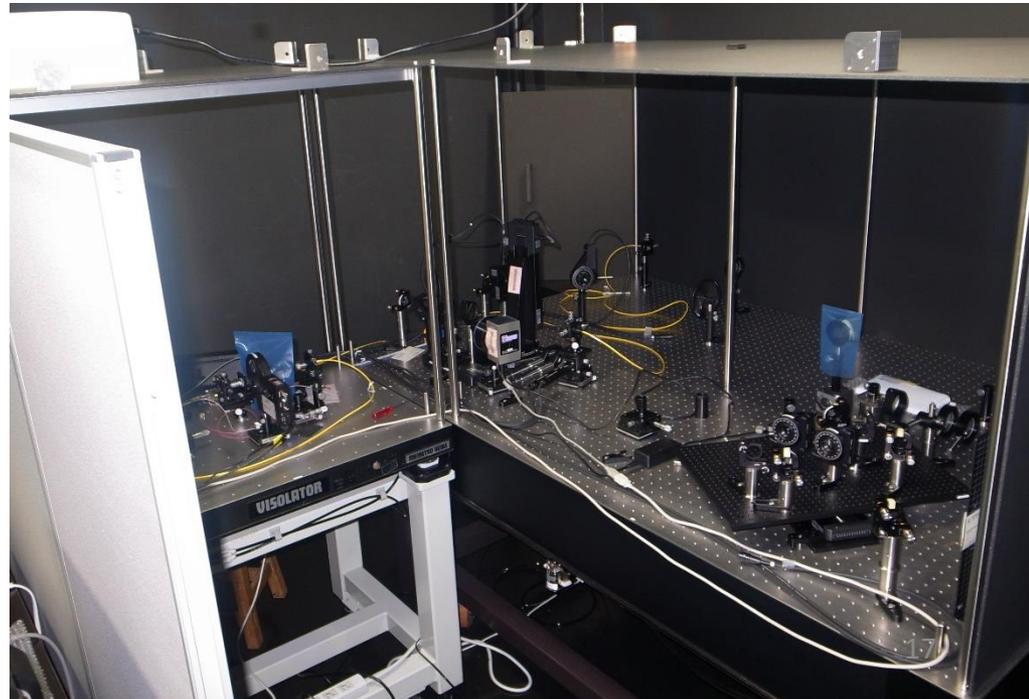
Lens



OAP



屈折系 vs 反射系のPSF評価 (by K. Yoneta)



まとめ

- **太陽系外惑星の直接観測に必要なこと**
 - 恒星回折光を除去するコロナグラフ
 - 恒星散乱光(残留スペックル)を除去する補償光学
- **将来のスペースコロナグラフ**
 - 究極目標: 太陽型星のハビタブルゾーンに地球型惑星の発見およびバイオシグネチャー(生命の痕跡)の検出
- **北海道大学での取り組み**
 - 専用テストベッド FACET, EXIST 構築に着手
 - FACETによる要素技術開発 + EXISTによるシステムレベルの実証試験を目指す
 - 各種コロナグラフデバイス
 - SLMを利用したダークホール制御