

# 系外惑星観測に向けた バイナリ瞳マスクコロナグラフの開発

○櫛香奈恵(総研大、ISAS/JAXA)、  
塩谷圭吾、小谷隆行、中川貴雄、松原英雄(ISAS/JAXA)、  
Abe Lyu(UNSA)、佐藤平道(産総研)、山室智康(オプトクラフト)

# ABSTRACT

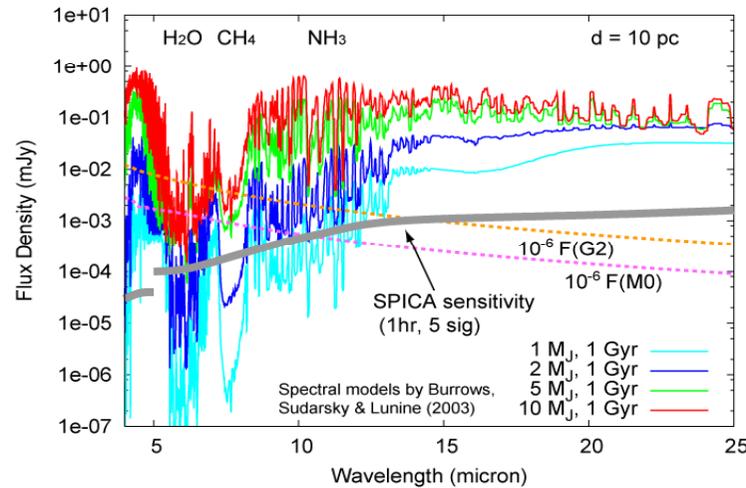
- ◇ 我々は、惑星系の多様性や形成過程を系統的に理解するために重要な、**系外惑星の直接観測を目指している。**
- ◇ 本研究では、系外惑星を直接観測するための高コントラスト撮像装置 (**バイナリ瞳マスク・コロナグラフ**) の開発をおこなった。
  1. このコロナグラフがマルチカラー／ブロードバンド光源においても広い波長域でコントラスト改善を生み出すこと、
  2. そして、新たに開発した、より実用化にふさわしい、自立型マスクが従来の基板マスクと同等のコントラスト改善性能を発揮したこと、  
を実証した。
- ◇ 本研究は、コロナグラフを実用化するために不可欠な課題であるのみならず、**実際のコロナグラフ観測に即した実証であるという点で新しい。**

# OUTLINE

- 本研究の背景
  - 系外惑星直接検出の重要性と困難さ
  - バイナリ瞳マスク・コロナグラフで直接観測に挑む
  - 本研究の目的
- 本研究の成果
  1. マルチカラー／ブロードバンド実験
  2. 自立型瞳マスク実験
- まとめ

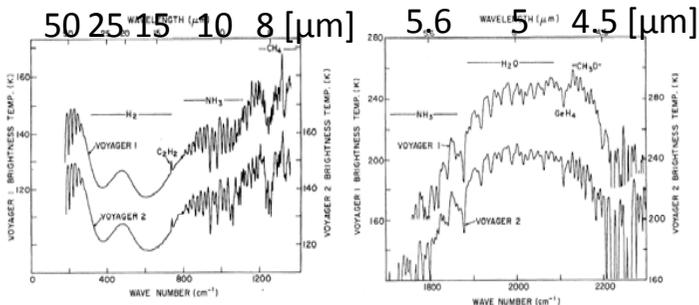
# 系外惑星直接観測の重要性

系外惑星自体の詳細情報（大気スペクトルなど）を得ることができる**直接観測は、惑星系の多様性や形成過程を系統的に理解するために重要である。**

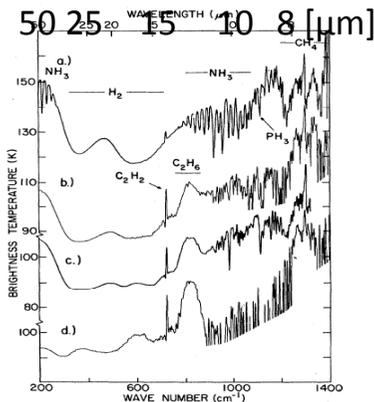


木星型惑星の大気スペクトル (シミュレーション)

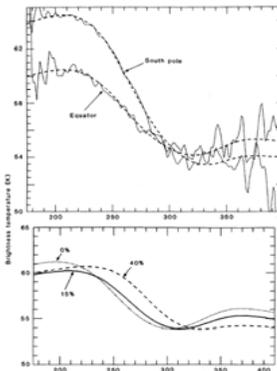
## Spectrum took by Voyagers



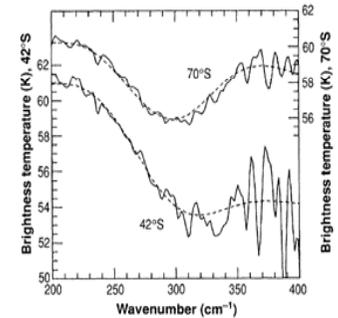
Jupiter (Hanel et al. 1979)



Saturn (Hanel et al. 1981)



Uranus (Hanel et al. 1986)

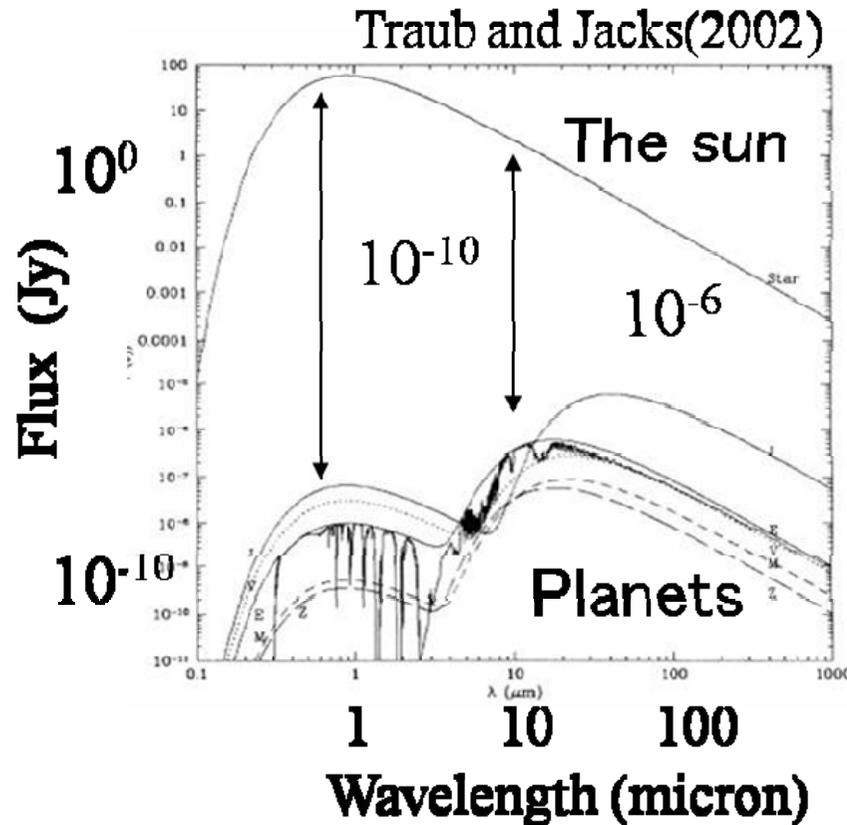


Neptune (Conrath et al. 1989)

# 系外惑星直接観測の困難さ

Q : しかし直接撮像の例は少ない (Kalas et al. 2008, Marois et al. 2008) 。なぜか？

A : 惑星の光に比べて主星の光が圧倒的に明るいから  
& 主星と惑星の離角が小さいから



例：5pcの距離から見た太陽系  
太陽-木星(5AU) 1"  
太陽-土星(10AU) 2"

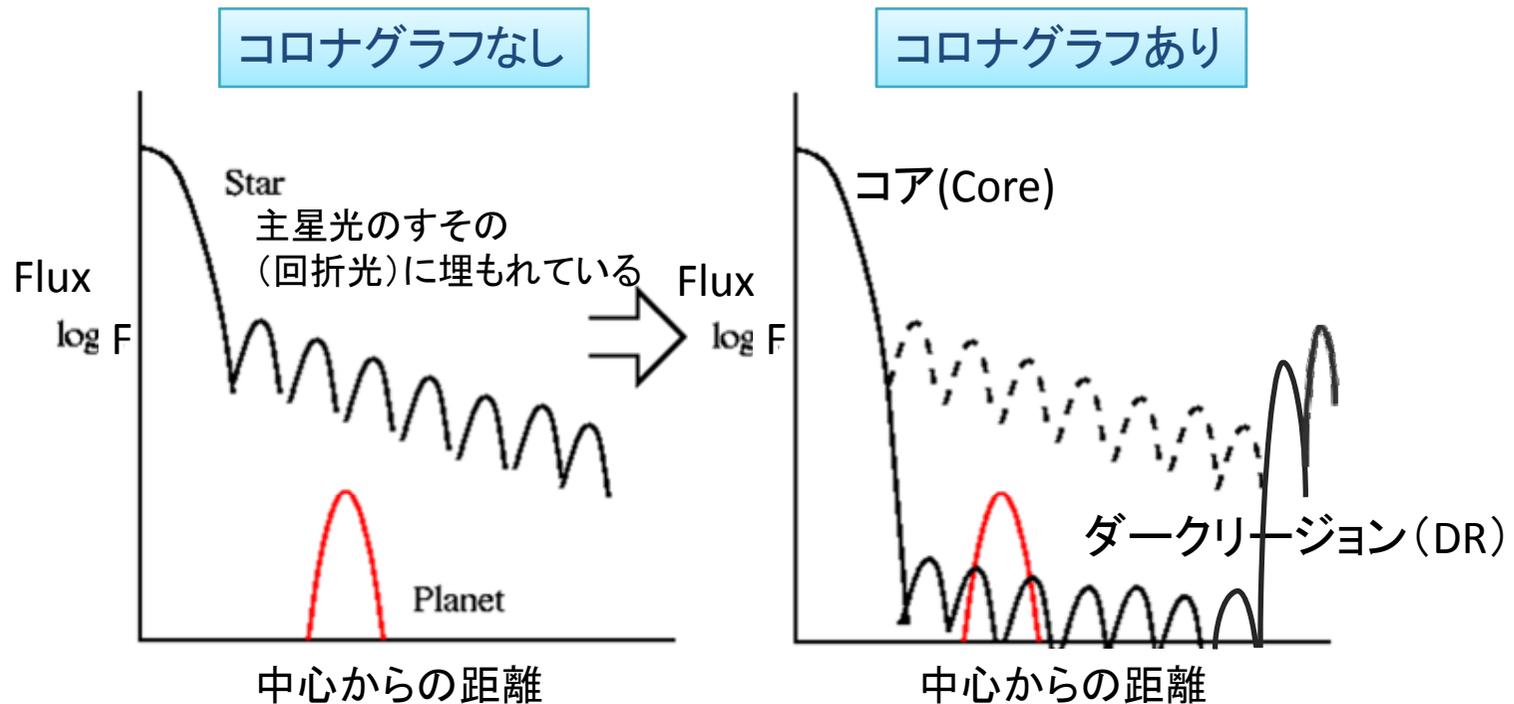
通常の望遠鏡では  
直接観測は困難！



高コントラスト観測装置が必要！

# コロナグラフによる直接観測

コロナグラフ: 主星光を選択的に、  
かつ大幅に低減する高コントラスト撮像装置



惑星位置における主星の回折光を選択的に低減することによって、  
高コントラスト観測を実現する！

# 本研究に用いたコロナグラフの方式

コロナグラフには様々な種類がある (e.g., Guyon et al., ApJ, 167, 2006)。  
本研究では、バイナリ瞳マスク方式のコロナグラフを用いた。

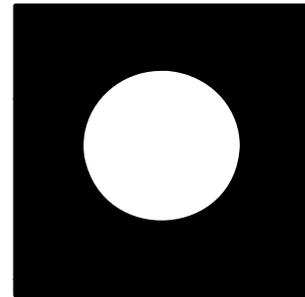
## バイナリ瞳マスク・コロナグラフとは？

- 瞳面（開口）における形を変えることによって、Point Spread Function (PSF)を変えるコロナグラフ  
(Vanderbei et al. 2004, Tanaka et al. 2006)

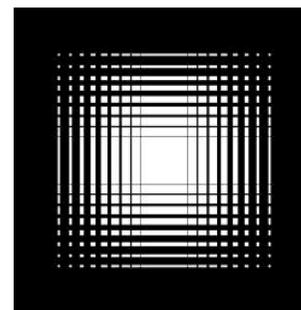
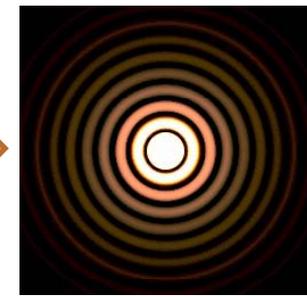
## バイナリマスクの原理的な利点

- 波長依存性が小さい
- ポインティング誤差に対して強い

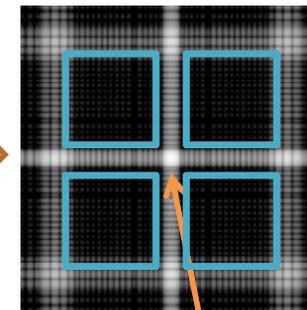
瞳（望遠鏡の開口）



像 (PSF)



Dark Region (DR)



Core

## マスクのデザインを工夫する

→ 中心星のCoreのすぐそばに回折光を低減した領域(DR)を作り出している

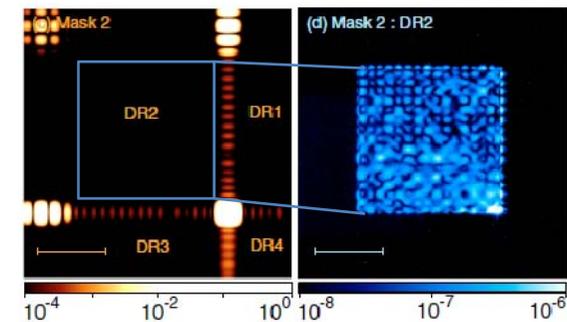
# これまで我々のグループでおこなわれた 可視光レーザー原理検証実験

- 大気中・常温・バイナリマスク (設計コントラスト $10^{-7}$ )  
(ガラス基板上にアルミ蒸着したもの)

→ コントラスト\*  $1.1 \times 10^{-7}$  (設計限界) を達成!  
設計限界の残存パターンを確認  
(Enya et al. 2007)

\* Coreのピーク値に対するDRの領域平均の比

- 実験で得られたPSF (左: Core, 右: DR)

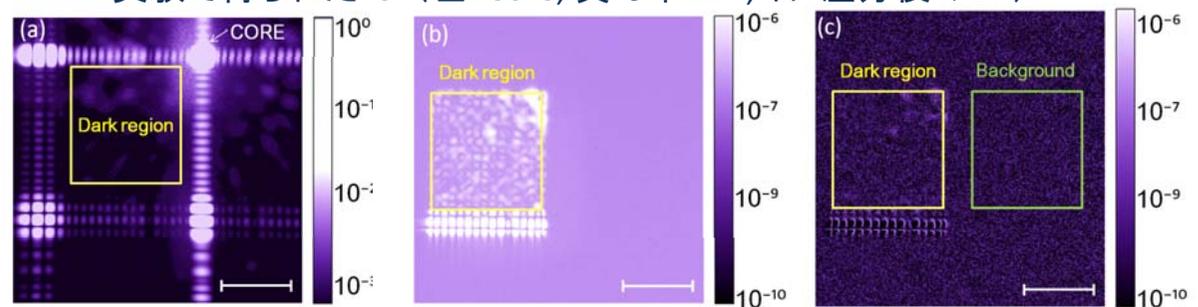


- 真空中・温度コントロール・バイナリマスク・星像差分法

→ 温度安定性を高め、差分法を用いた結果、差分前のコントラストより2ケタ改善し、  
差分後のコントラスト\*\*  $1.3 \times 10^{-9}$  を達成! (Haze et al. 2011)

\*\* Coreのピーク値に対するDRの分散( $\sigma_{\text{signal}}$ )の比

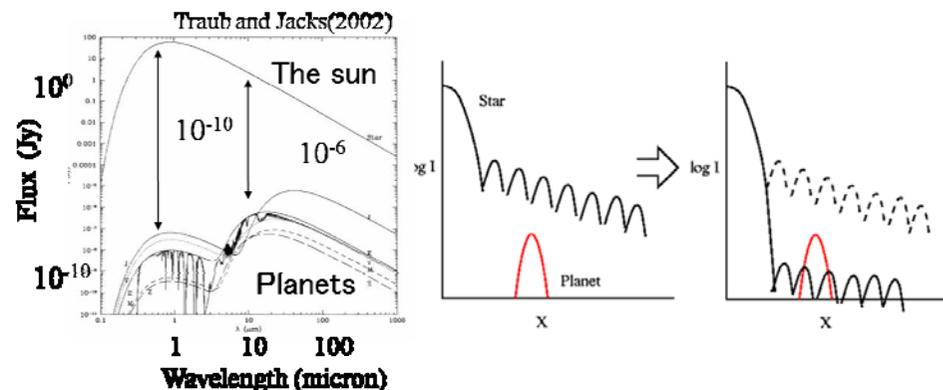
- 実験で得られたPSF (左: Core, 真ん中: DR, 右: 差分後のDR)



# スペースコロナグラフで直接観測に挑む

- **スペースに行くと、コロナグラフに非常に大きな利点がある！**

- 宇宙ではコロナグラフの大敵である大気擾乱の影響を受けずに観測ができる
- 中間赤外線波長をターゲットにすることができる
  - 地上では大気吸収されている
  - 可視域に比べコントラストにおいて直接検出に大変有利



## 次世代赤外線宇宙望遠鏡SPICA

(Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics)に  
コロナグラフを搭載する計画がある。



(2020年代初頭打ち上げ予定)

- ◇ SPICAは系外惑星の高コントラスト観測にとって、絶好のプラットフォームになる
- ◇ しかし、コロナグラフ実現には望遠鏡特有の大きなハードルもある（振動擾乱、広帯域の分光観測を可能にする要請など）

# コロナグラフ実用化の課題

- これまでの実験結果から、高コントラストを発揮することは確かめられた。
- しかし、系外惑星の直接観測に向けてバイナリ瞳マスク・コロナグラフを実際の望遠鏡に搭載するためには、以下が現実的には問題点になる可能性がある。

1. 実際の観測では、単色光ではなく、マルチカラー／ブロードバンドである。
2. これまで用いてきたガラス基板マスクは、基板透過率による光のロスがある、基板反射によるゴーストがある、さらに基板屈折率の波長依存性の影響を受ける。

# 本研究の目的

本研究の目的は、実用化に向けたコロナグラフの開発実証である。  
そのために、本研究で行なった可視光実証実験は大きくわけて2つである。

## 1. (マルチカラー／ブロードバンド実験)

バイナリ瞳マスク・コロナグラフが広い波長域でコントラストを改善することを、マルチカラー／ブロードバンド光源を用いて実証する

## 2. (自立型瞳マスク実験)

新たに開発した、より実用化にふさわしい、自立型マスクが優位なコントラスト改善性能を発揮することを実証する

# 1. マルチカラー／ブロードバンド実験

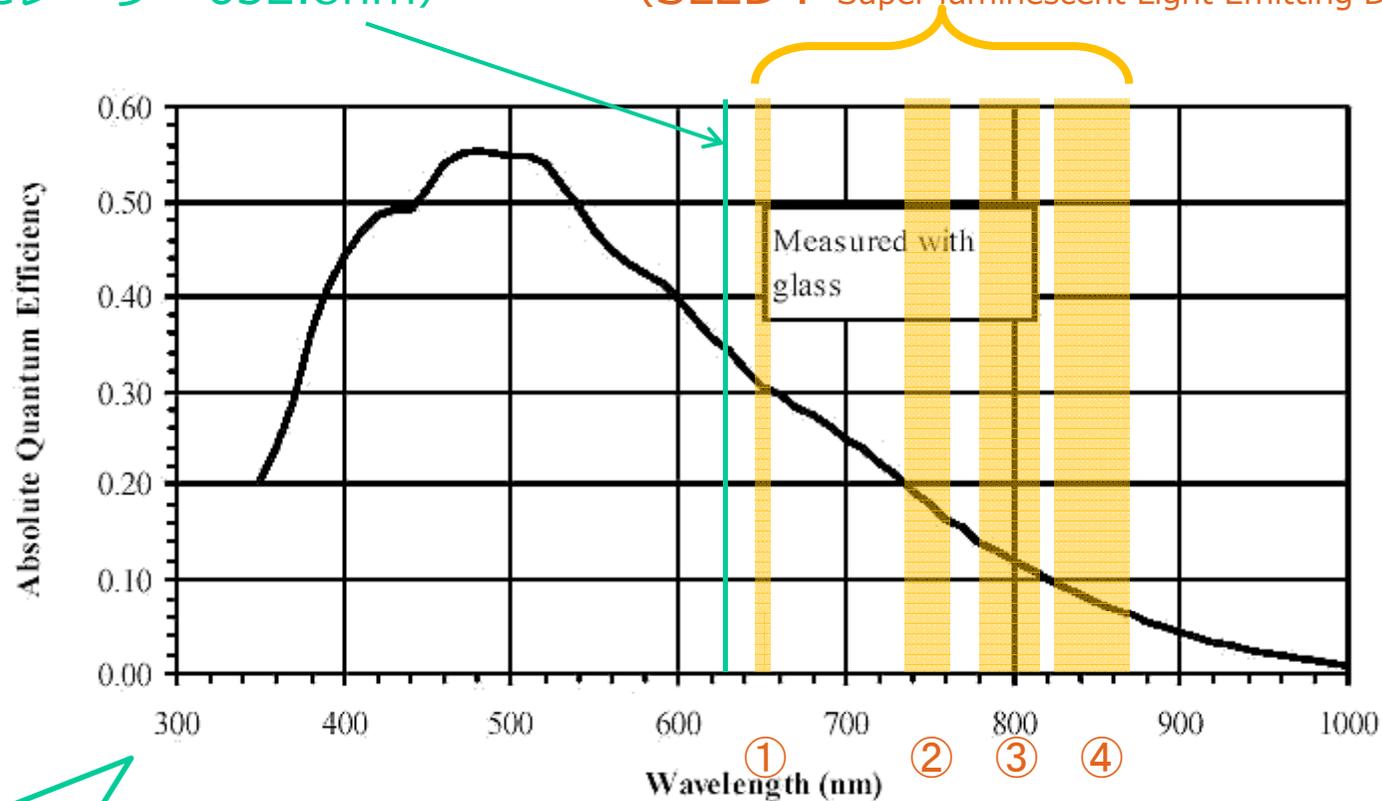
目的：バイナリ瞳マスク・コロナグラフが広い波長域でコントラストを改善することを、マルチカラー／ブロードバンド光源を用いて実証する

# マルチカラー化・ブロードバンド化

従来：単色レーザー光源  
(He-Neレーザー632.8nm)

⇒

今回：マルチカラー化・ブロードバンド化  
(SLED： Super Luminescent Light Emitting Diode)

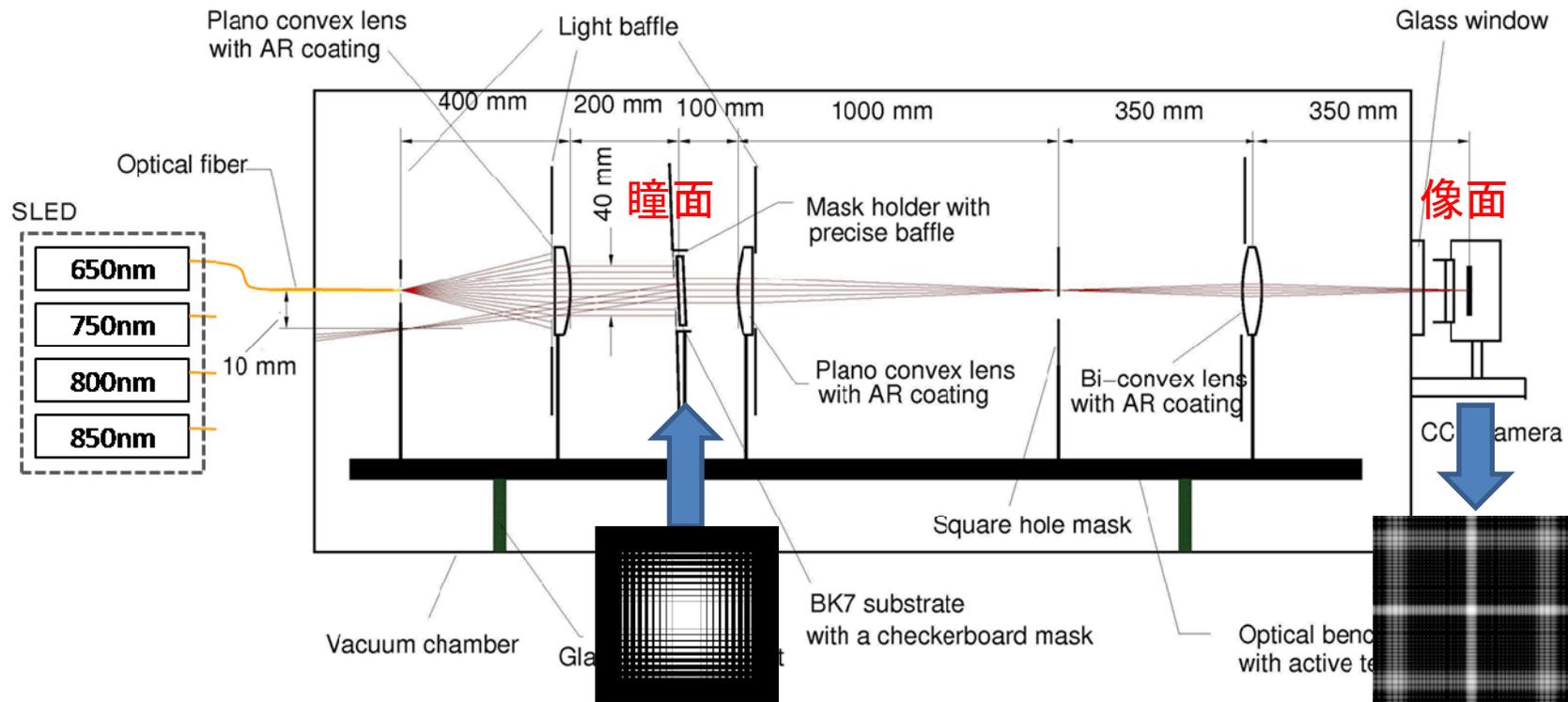


HOCTで使用している  
CCDカメラ(BITRAN, BJ-42L)  
の感度曲線

	$\lambda$	$\Delta\lambda$	power
①	650nm	8nm	1mW
②	750nm	21nm	3mW
③	800nm	25nm	5mW
④	850nm	55nm	5mW

# コロナグラフ光学系

- SLEDを光源として使用
- 光学系は光学ベンチ上に設置
- マスクはガラス基板上に微細パターンをアルミ蒸着したもの  
(大きさ:2mm, 設計コントラスト: $10^{-7}$ , 製作:産業技術総合研究所)

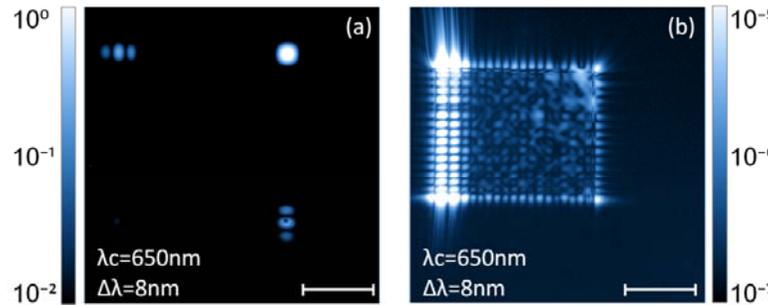


光源の波長を変えても、光学系のセッティングは変えない。

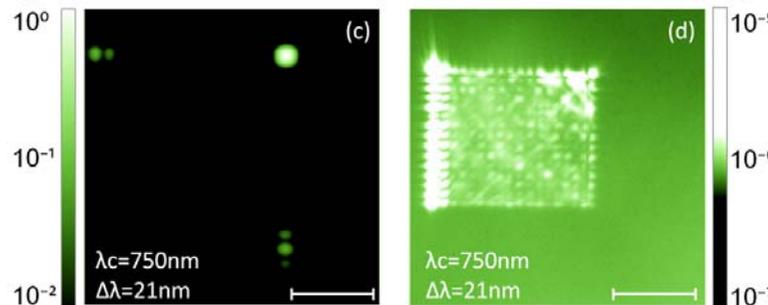
# マルチカラー・ブロードバンド光源の実験結果

実験から得られたPSF

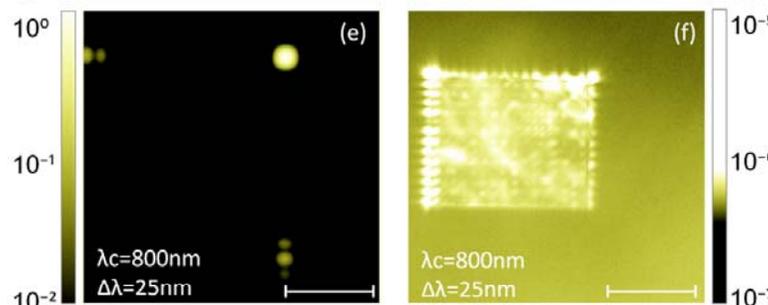
Contrast  
(650nm)  
 $3.1 \times 10^{-7}$



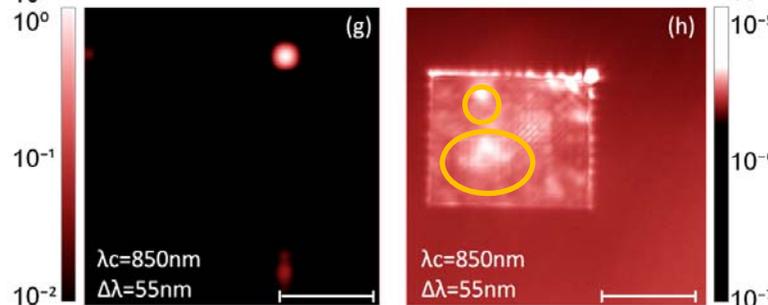
Contrast  
(750nm)  
 $1.1 \times 10^{-6}$



Contrast  
(800nm)  
 $1.6 \times 10^{-6}$



Contrast  
(850nm)  
 $2.5 \times 10^{-6}$



●コロナグラフ無しの場合に比べて、どの波長においてもコントラスト改善効果があった。

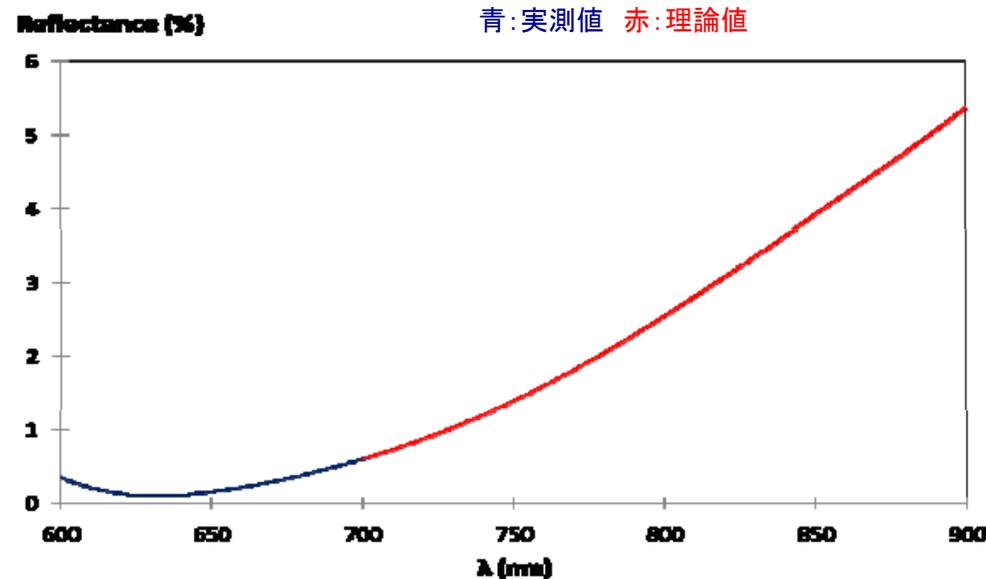
●長波長になるにつれて、コントラストが悪くなった。

●長波長では設計上期待される回折パターン以外の構造が見えた。

# マルチカラー・ブロードバンド光源の実験考察

長波長になるにつれて、コントラストが低下した！

本実験に用いたレンズ：シグマ光機の可視域用多層反射防止膜コート品  
750nm, 800nm, 850nmと波長が長くなると、反射率が上がる。



- 長波長でコントラストが低下することと consistent である。
- 考えられる対策：反射防止コートを長波長側に最適化されたものに変える。  
またはレンズ光学系を鏡に置き換える。

# マルチカラー／ブロードバンド実験のまとめ

- 今回初めて光源をマルチカラー化・ブロードバンド化した結果、すべての帯域でバイナリ瞳マスク・コロナグラフによるコントラスト改善が確認された。
- 瞳マスク方式は広い波長域で効くことを実証し、実際の望遠鏡に搭載する際の有効性（広帯域の分光機能など）を劇的に向上させた。

## 2. 自立型瞳マスク実験

目的：新たに開発した、より実用化にふさわしい、自立型マスクがコントラスト改善性能を発揮することを実証する

# 自立型バイナリ瞳マスク

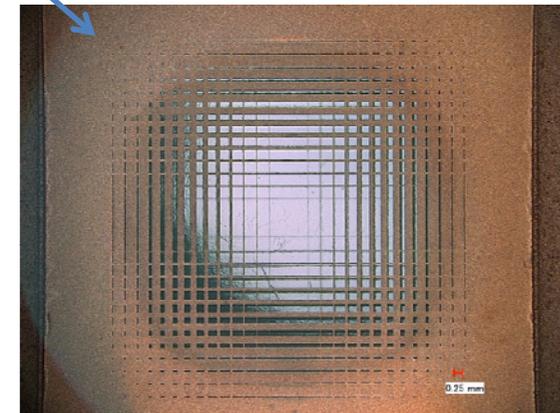
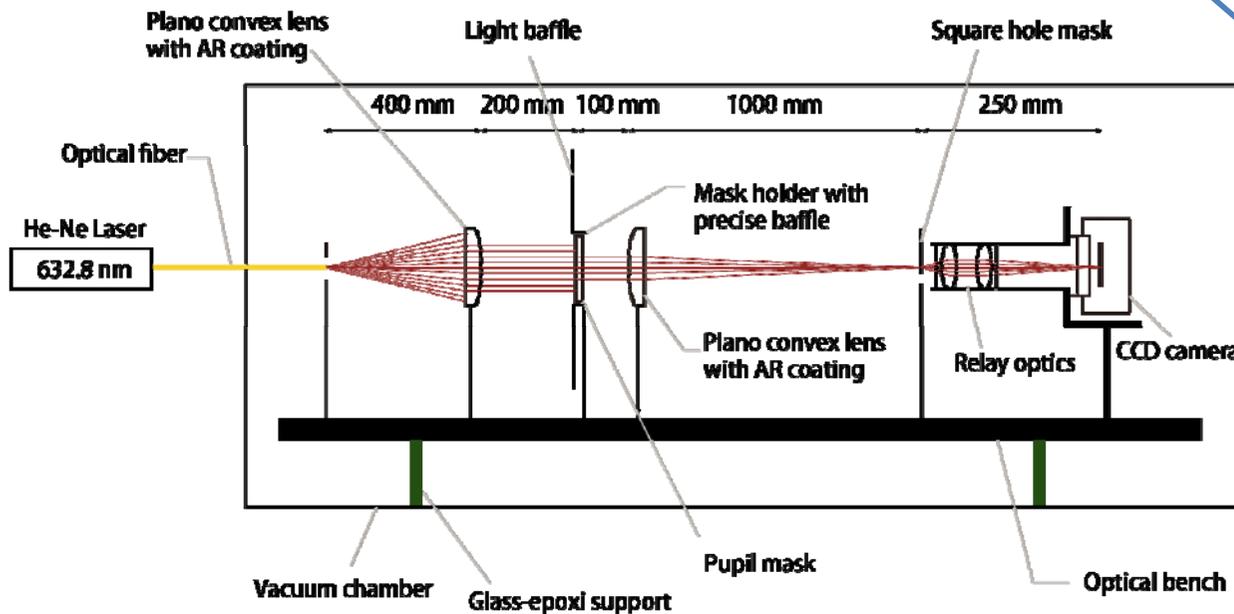
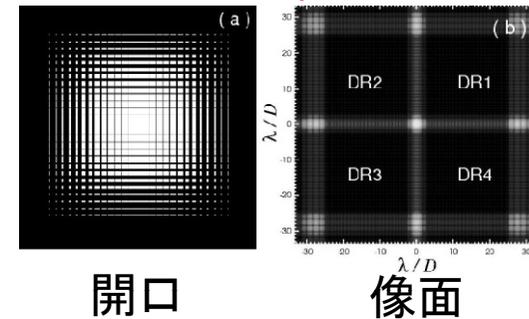
課題) これまで用いてきたガラス基板マスクは、

- 基板透過率による光のロスがある、
- 基板反射によるゴーストがある、
- 基板屈折率の波長依存性の影響を受ける、

という問題点がある。

→Cuの金属薄板による、基板を用いない自立型瞳マスク開発した (豊和産業株式会社にて製作)

- Maskの設計コントラスト:  $10^{-10}$
- Maskの大きさ: 10mm
- Maskの厚さ: 2 $\mu$ m

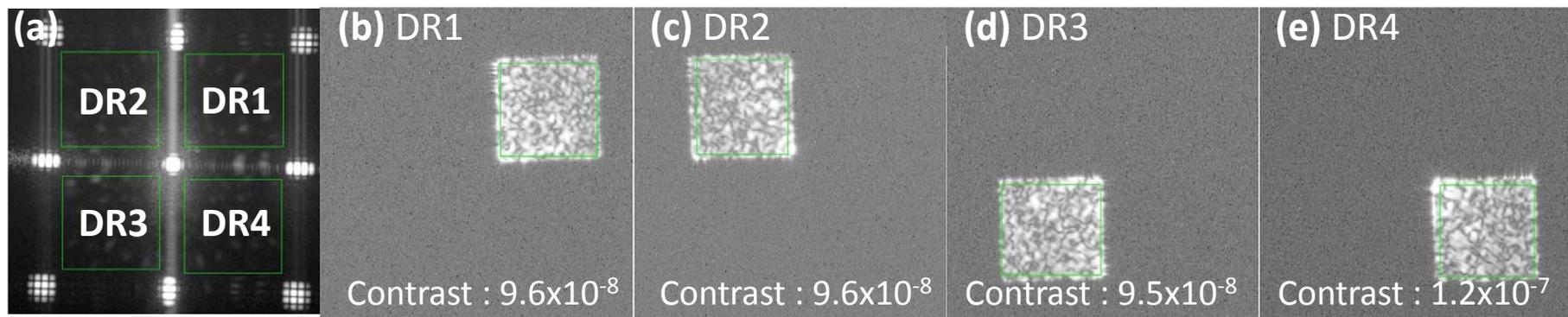


# 自立型マスクの実験結果

## 変更点

- 基板マスク→自立型マスクに変わった
- マスクサイズが2mm→10mmに変わった
- 設計コントラストが $10^{-7}$ → $10^{-10}$ に変わった

実験から得られたPSF



- 基板を用いない新しい自立型マスクによって、(平均) $1.0 \times 10^{-7}$ の高コントラスト観測に成功した。
- Speckleが主なlimiting factor である (設計コントラストは $10^{-10}$ ) 。
- Speckleの主要因としては、瞳マスク形状誤差と、マスク以外の光学系の誤差、を考える。

# 回転差分法

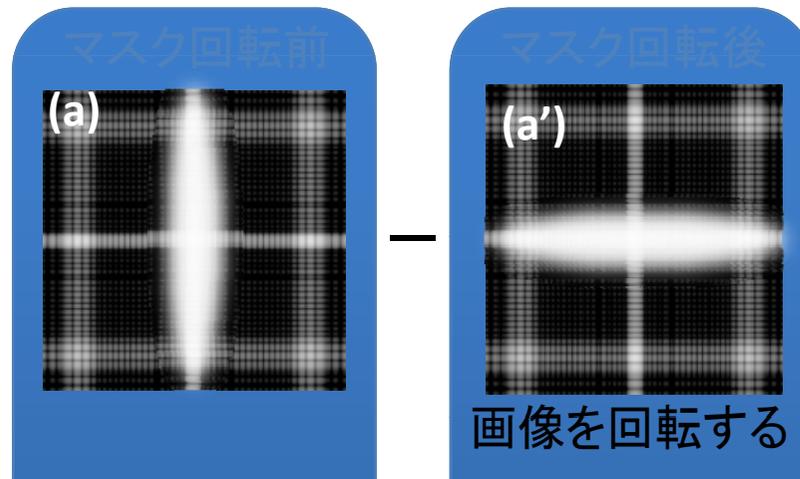
誤差要因を切り分ける為に回転差分法を導入した。

回転差分法：瞳マスクのみを光軸に対し90°回転し、回転前のPSFから差し引きする方法  
→マスク形状誤差由来のSpeckleは、マスクと一緒に（付随して）回るハズ！

回転差分法には2種類ある。

回転差分法1：マスクの向きが共通となるように差し引きする

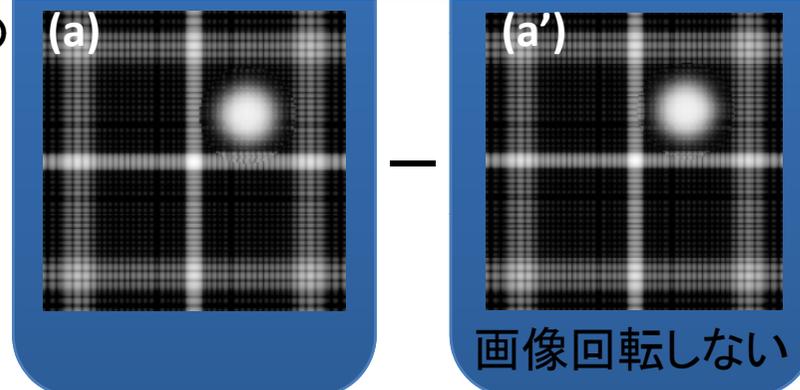
→マスク形状誤差由来のspeckleがキャンセルする



Speckleがマスク形状誤差のみの場合、コントラストが改善する。

回転差分法2：光路が共通となるように差し引きする

→マスク以外の誤差由来のspeckleがキャンセルする

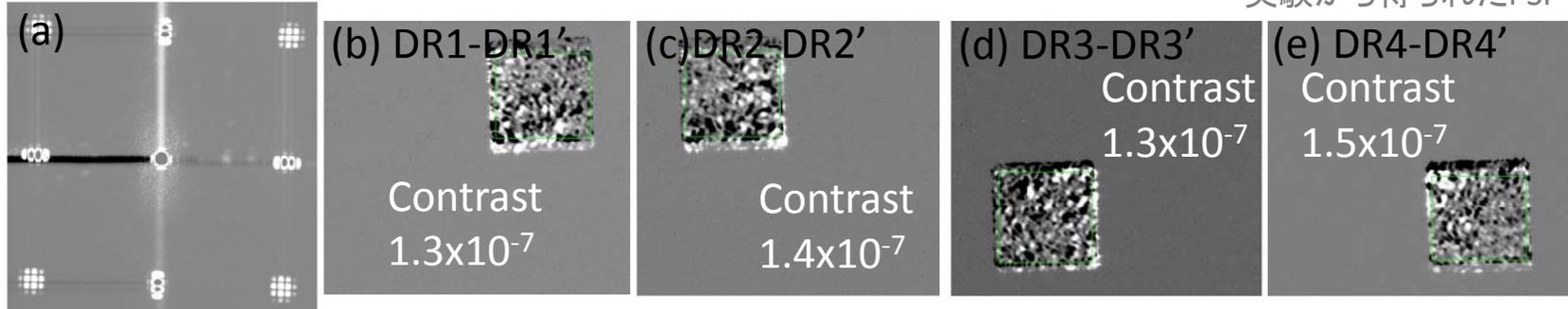


マスクの形状が完璧で、マスクの位置再現性が完璧な場合、コントラストが改善する。

# 回転差分法の結果

回転差分法 1 の結果 : コントラスト改善しなかった

実験から得られたPSF

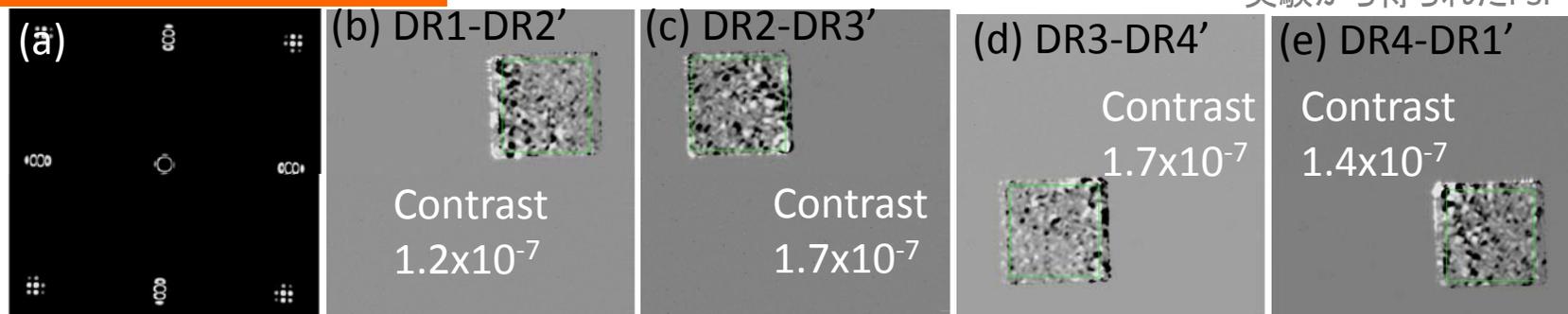


→ マスク形状誤差のみがspeckleの要因ではなかった！

(マスク以外の光学系の誤差要因(波面誤差、強度ムラ、迷光など)が存在する)

回転差分法 2 の結果 : コントラスト改善しなかった

実験から得られたPSF



→ マスク以外の誤差(波面誤差やマスクの位置再現性)、  
あるいはこれらとマスクの形状誤差の相乗効果が、speckleの要因

# 自立型瞳マスク実験のまとめ

- 基板を用いない新しい自立型マスクによって、 $1.0 \times 10^{-7}$ の高コントラスト観測に成功した。
- 回転差分法によって誤差要因に制約をつけた。
- 自立型マスクは基板マスクのような波長依存性が無いので、赤外線波長でも使用できる（例えばSPICAコロナグラフに適用できる）。

# まとめ

太陽系以外の惑星を直接観測するための高コントラスト撮像装置（**バイナリ瞳マスク・コロナグラフ**）の開発をおこなった。

## 1. （マルチカラー／ブロードバンド実験）

このコロナグラフがマルチカラー／ブロードバンド光源650, 750, 800, 850nm それぞれで、 $3.1 \times 10^{-7}$ ,  $1.1 \times 10^{-6}$ ,  $1.6 \times 10^{-6}$ ,  $2.5 \times 10^{-6}$ という通常の望遠鏡に比べて優位なコントラスト改善を生み出すことを実証した。

## 2. （自立型瞳マスク実験）

新たに開発した、より実用化にふさわしい、「自立型マスク」がコントラスト改善性能（ $1.0 \times 10^{-7}$ ）を発揮することを実証した。

本研究は、コロナグラフを実用化するために不可欠な課題であるのみならず、**実際のコロナグラフ観測に即した実証であるという点で新しい。**