



北海道大学

2020年12月2日(水)

可視赤外線観測装置技術ワークショップ

光渦を利用した 高感度波面センシング法の開発

須藤 星路 (北海道大学工学院D2)

村上 尚史¹⁾, 早野 裕²⁾, 服部 雅之²⁾,
玉田 洋介³⁾, 秋山 毅志⁴⁾,*, 稲垣 滋⁵⁾

北海道大¹⁾, 国立天文台²⁾, 宇都宮大³⁾, 核融合科学研究所⁴⁾,
General Atomics(現所属)*, 九州大学⁵⁾

光波面の位相プロフィール

- 反射物体の**表面形状**、透過物体の**屈折率分布**などの情報をもつ

様々な波面センサー

- シャックハルトマン波面センサー
- フィゾー干渉計
- ツェルニケ波面センサー
- ピラミッド波面センサー など

幅広い応用分野

- 光学素子の面形状計測
- 補償光学：天文観測(e.g., [1,2])
：バイオイメージング[3]
- 眼球の収差測定[4]
- プラズマ揺動計測[5]

[1] 服部雅之, 早野裕: 光学 **44**, 370 (2015).

[2] 国立天文台HP:

https://subarutelescope.org/Pressrelease/2002/01/16/j_index.html

[3] 玉田洋介: 光学 **44**, 384 (2015).

[4] 二宮さゆり: Med Imag Tech **23**, 47 (2005).

[5] 秋山毅志 他: プラズマ・核融合学会誌 **92**, 912 (2016).



- 計測したい波面位相が微小な場合
→計測が困難！
- 波面センサーの計測精度の向上
→様々な分野で有用であると期待

研究目的：新たな手法の波面センサーを提案

- 従来の波面センサーでは実現困難だった
微小な波面位相ゆらぎの計測を目指す。
- 天文学の太陽系外惑星の直接撮像装置
光渦コロナグラフ[6,7]を利用する。

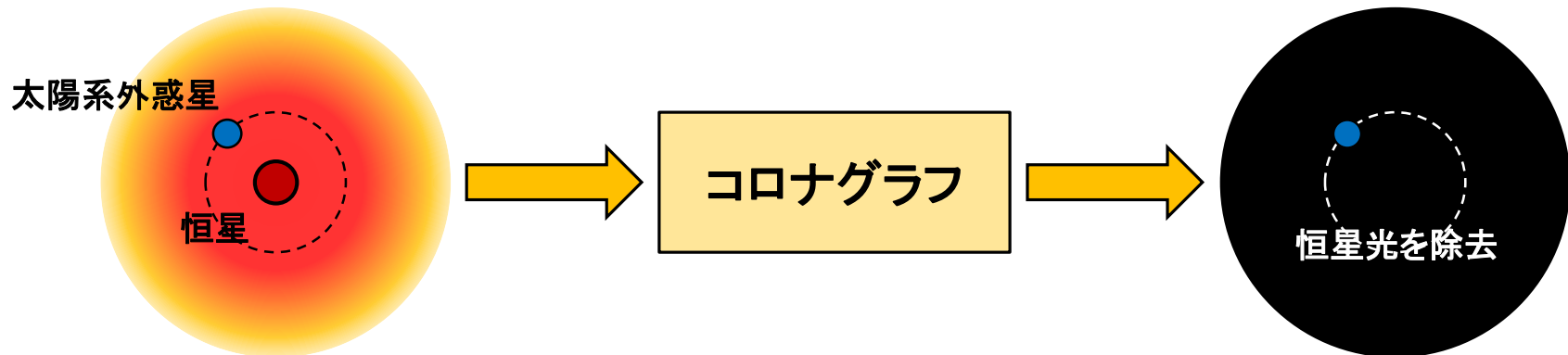
[6] D. Mawet, P. Riaud, O. Absil, and J. Surdej, ApJ **633**, 1191 (2005).

[7] G. Foo, D. M. Palacios, and G. A. Swartzlander, Opt. Lett. **30**, 3308 (2005).



問題点:恒星光が明るすぎる

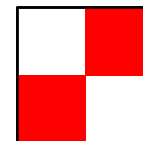
系外惑星が
直接撮像できる！



焦点面位相マスクコロナグラフ

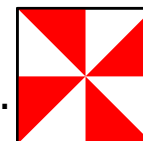
- 4分割位相マスク

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



- 8分割位相マスク

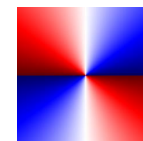
N. Murakami *et al.*, PASP **120**, 1112 (2008).



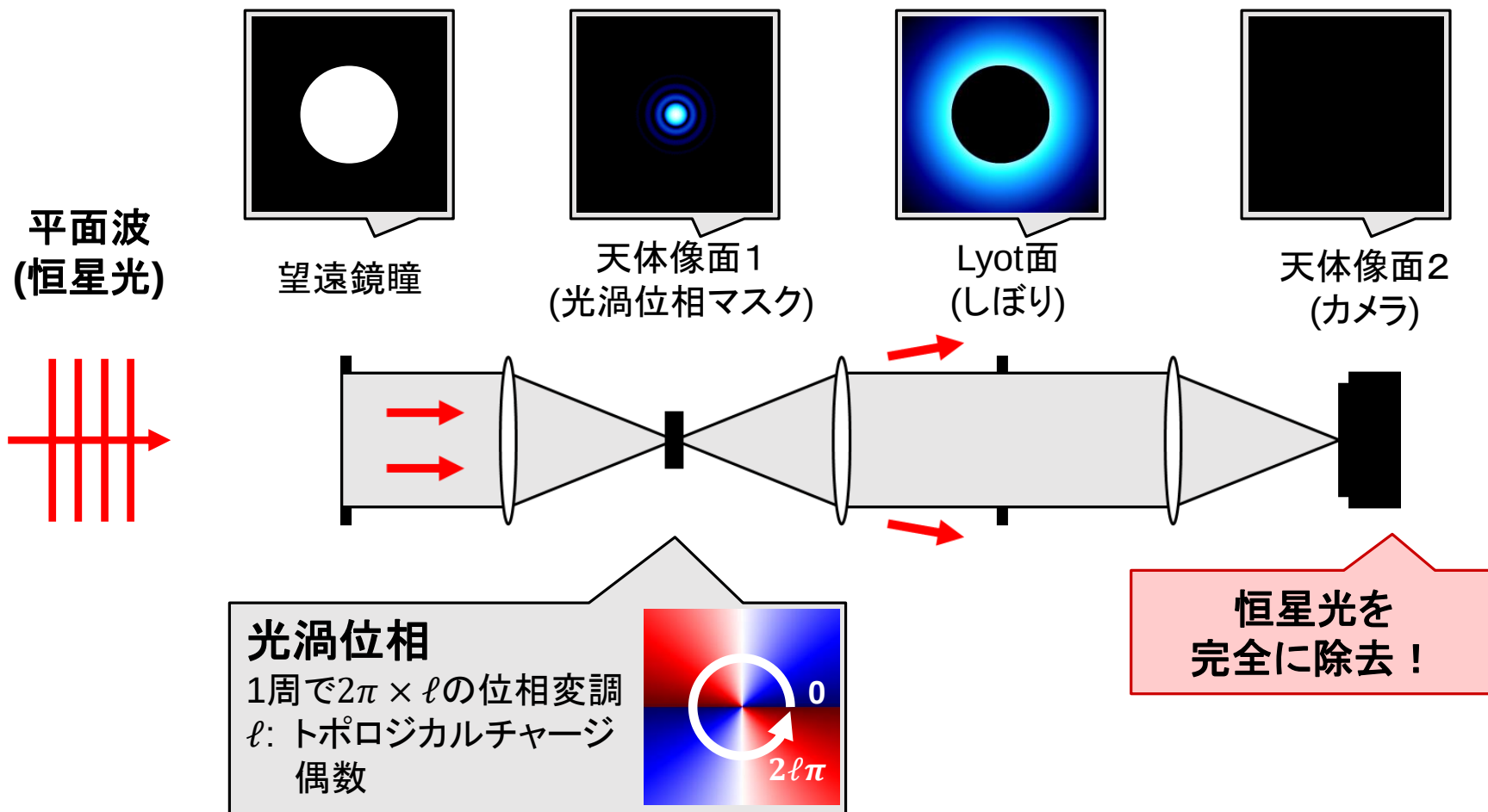
- 光渦位相マスク

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

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

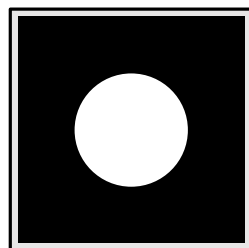


原理：光渦コロナグラフ

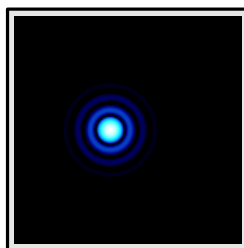


原理: 光渦コロナグラフ

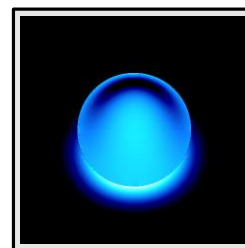
傾いた平面波
(惑星光)



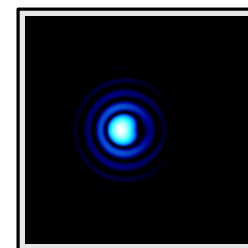
望遠鏡瞳



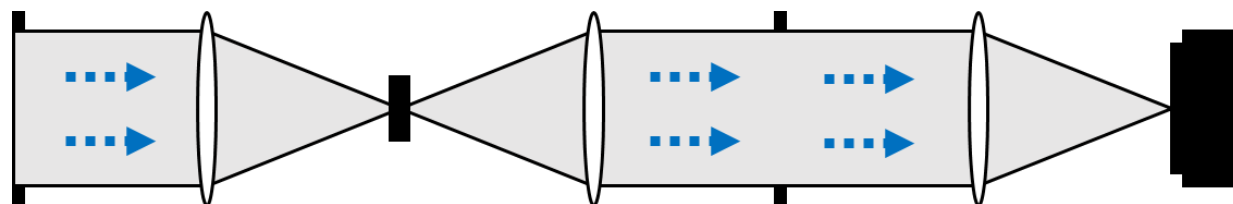
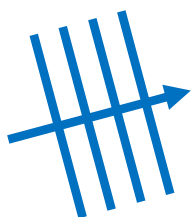
天体像面1
(光渦位相マスク)



Lyot面
(しぼり)

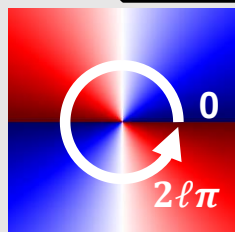


天体像面2
(カメラ)



光渦位相

1周で $2\pi \times \ell$ の位相変調
 ℓ : トポロジカルチャージ
偶数



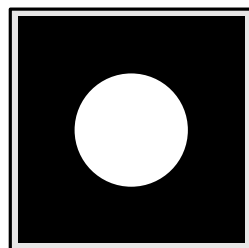
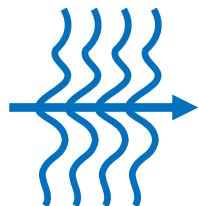
惑星光は
除去されない

直接撮像可能

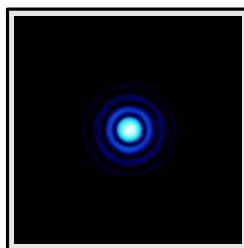


原理：光渦コロナグラフ

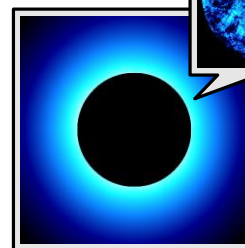
ゆらぎをもつ
波面



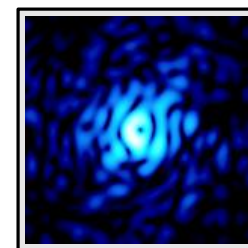
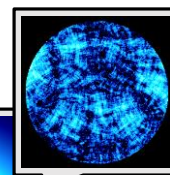
望遠鏡瞳



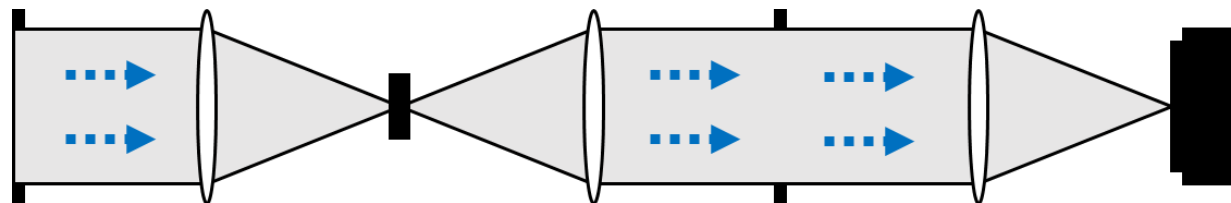
天体像面1
(光渦位相マスク)



Lyot面
(しぼり)

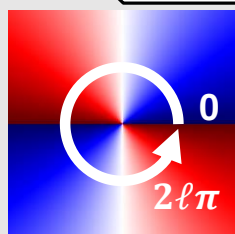


天体像面2
(カメラ)



光渦位相

1周で $2\pi \times \ell$ の位相変調
 ℓ : トポロジカルチャージ
偶数



完全には
除去されない

波面ゆらぎに敏感

補償光学による
波面制御が必要



北海道大学

原理: 光渦を利用した波面センシング法

光渦コロナグラフ: 波面ゆらぎに敏感

波面センシングに利用

ϕ : 微小な位相収差

$$\boxed{E_0 e^{i\phi}}_{\text{波面電場}} \approx \boxed{E_0}_{\text{平面波成分}} + \boxed{iE_0\phi}_{\text{位相収差成分}}$$

波面センシング
における問題点
平面波成分由来の
ノイズが計測を阻害

$C[]$: コロナグラフ演算子

$$C[E_0 e^{i\phi}] \approx \cancel{C[E_0]} + iC[E_0\phi] = E_{\text{meas}}$$

位相収差成分
のみを計測

$$E_{\text{retr}} = C^{-1}[E_{\text{meas}}] + E_0$$

平面波成分に起因する
ノイズを回避して
波面センシングが可能



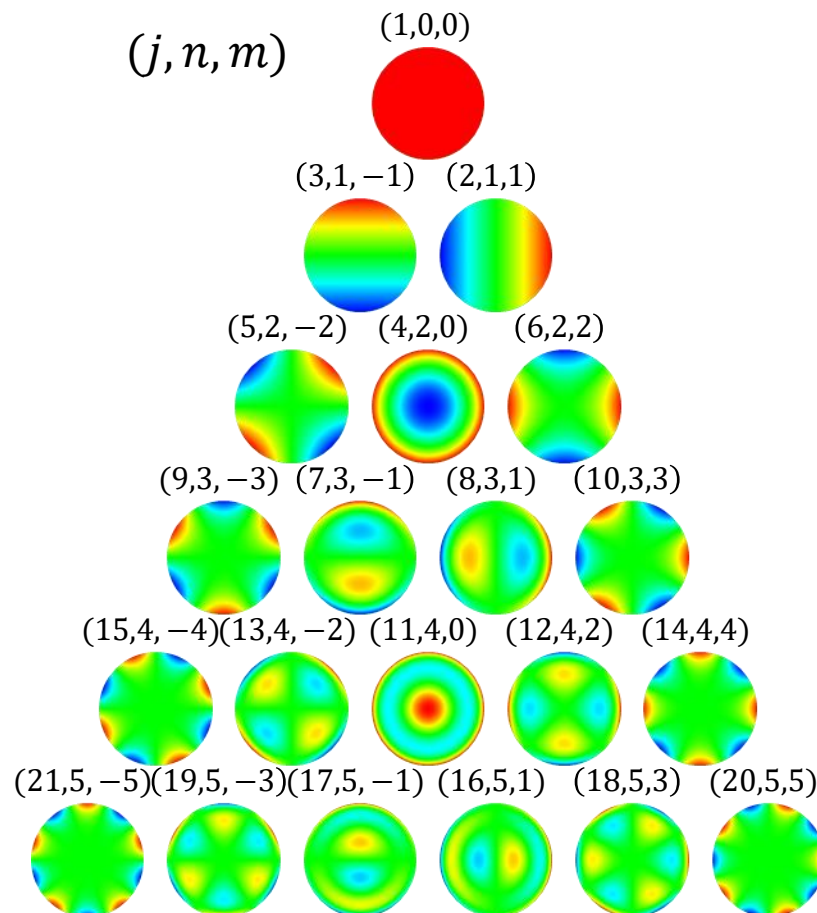
数値シミュレーション: Zernike位相の復元

Zernike多項式

- ・ 2次元極座標における直交多項式
- ・ 動径 r , 方位角 θ の関数

$${}_jZ_n^m(r, \theta) = \begin{cases} R_n^m(r) \cos(m\theta) & m \geq 0 \\ R_n^{|m|}(r) \sin(|m|\theta) & m < 0 \end{cases}$$

- ・ n : 動径次数
- ・ m : 方位角次数
- ・ j : モード次数、Noll次数[8]



数値シミュレーション: Zernike位相の復元

		チャージ2		チャージ4	
	Zernike 位相	復元位相	Lyot面 強度分布	復元位相	Lyot面 強度分布
$j=2, Z_{n=1}^{m=1}$					
$j=4, Z_{n=2}^{m=0}$					
$j=6, Z_{n=2}^{m=2}$					
$j=8, Z_{n=3}^{m=1}$					

チャージ2の光渦: すべてのZernikeモードが測定可能

北海道大学

数値シミュレーション: 波面センシングの実証

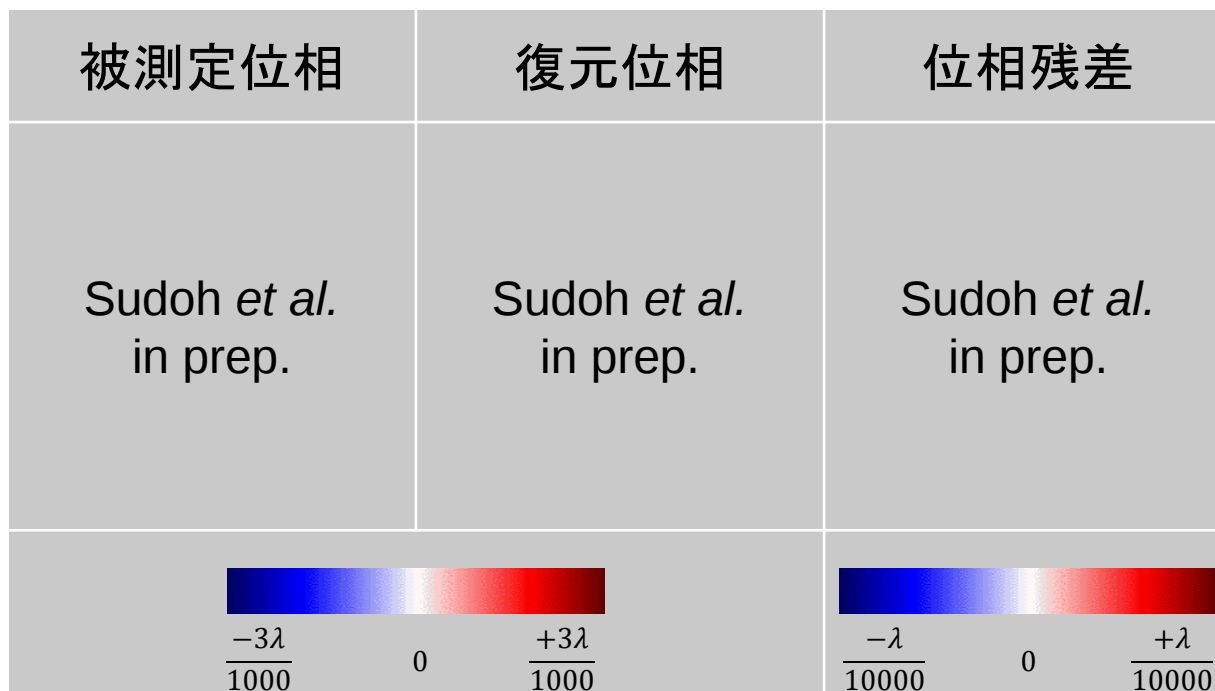
●被測定波面

- ・ランダムな位相ゆらぎ
- ・Zernike多項式で展開($j \leq 136$)
- ・ $\lambda/1000$ rms

●復元波面

- ・位相残差: $\lambda/33000$ rms

仮定したランダムな波面ゆらぎを復元



目的

●新たな手法の波面センサーを提案

- ・既存の波面センサーでは実現困難だった
微小な波面位相ゆらぎの計測を目指す
- ・太陽系外惑星の直接撮像装置「**光渦コロナグラフ**」を利用する
- ・**平面波成分に起因するノイズを回避**した波面センシングが可能

数値シミュレーションから得られた知見

- チャージ数2の光渦位相が最適である
- ランダムな位相ゆらぎの復元を実証した



今後の展望

- **原理実証のための実験光学系**を構築中
任意の位相波面発生に液晶空間光変調器を利用
- 実測定において性能を制限する要因の考察

