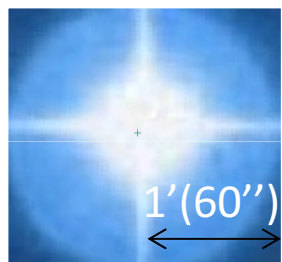


極限補償光学装置の進捗

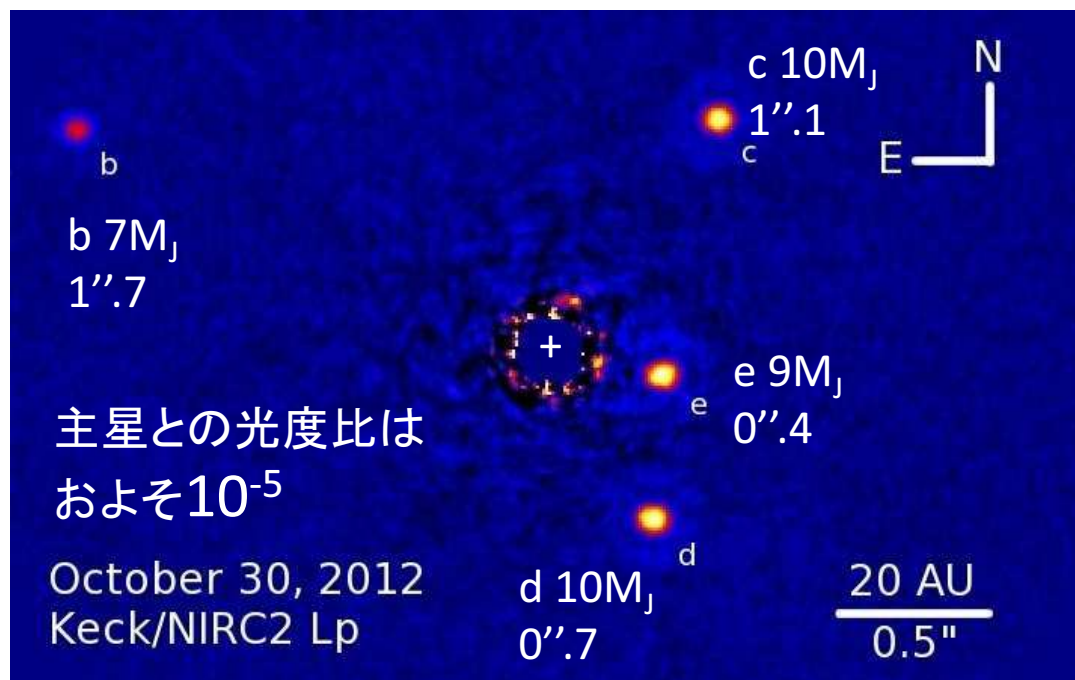
2015/01/24
技術検討会

波面センサ(WFS)開発: 山本広大(京都大)、
計算機開発: 中村祐一(大阪電通大)



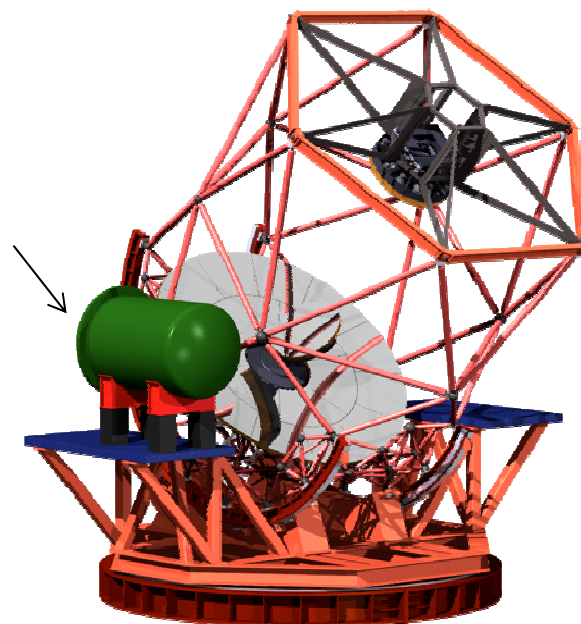
明るい恒星の近傍(~ 1 秒角)の暗い($\sim 10^{-5}$)惑星を検出、観測する。

→太陽系外惑星の観測装置SEICAを開発中。



HR8799 (Currie+2014)

SEICA



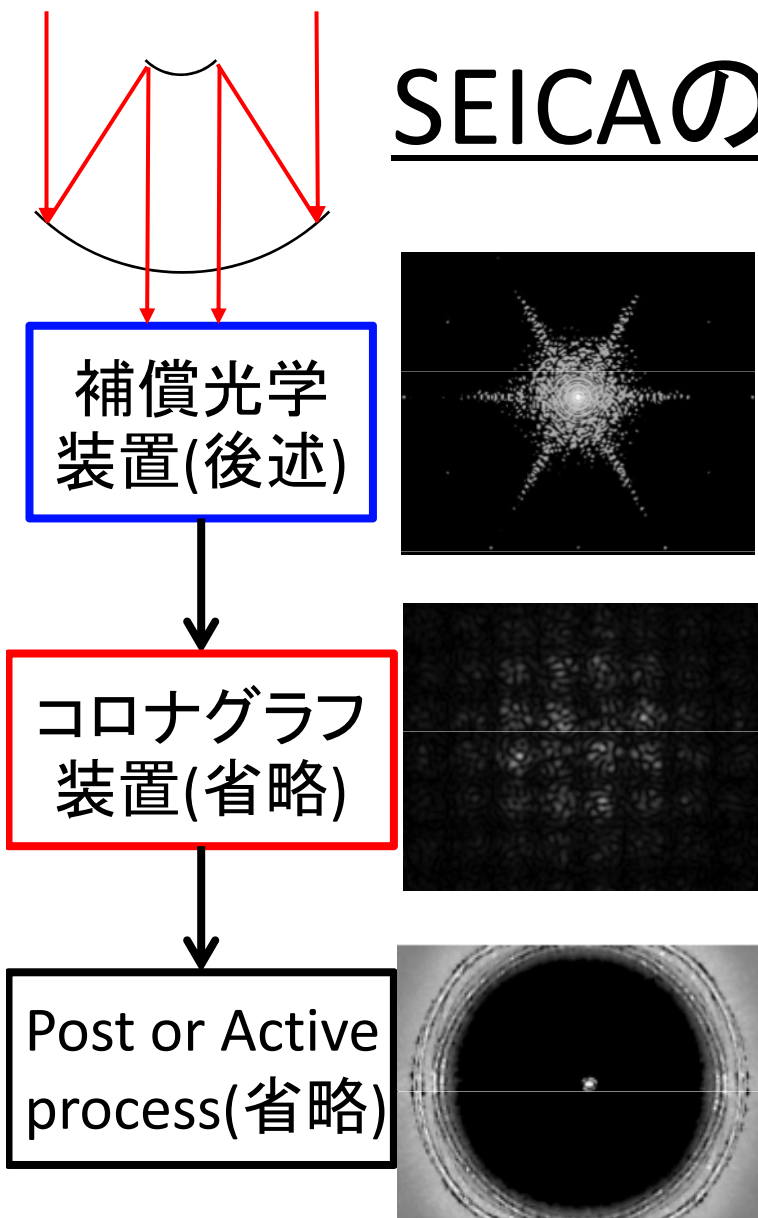
極限補償光学装置の進捗

本日の発表

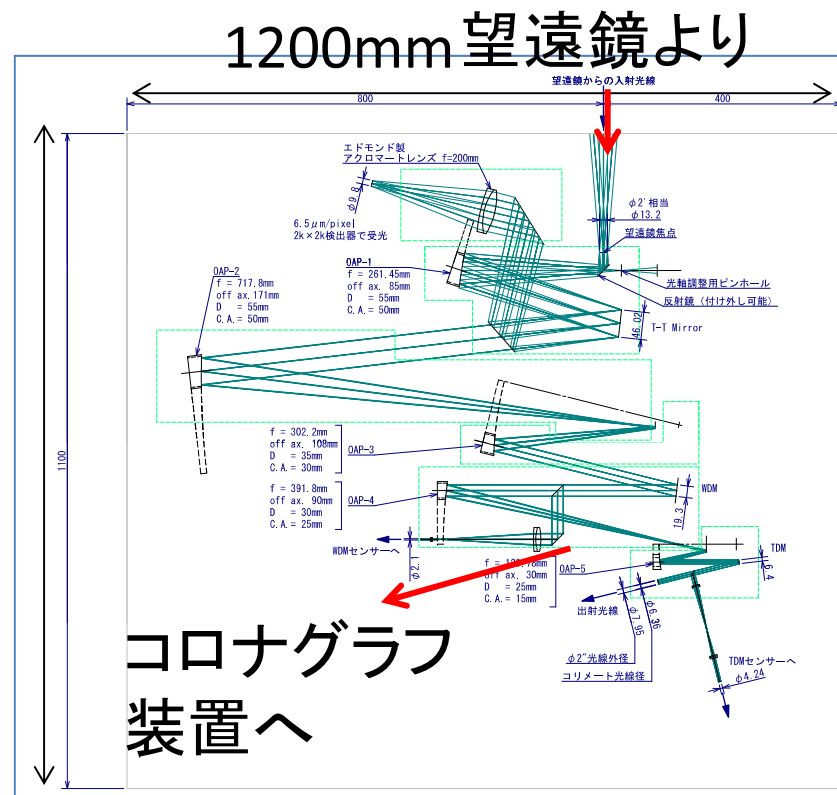
- 惑星撮像装置SEICAについて
- 計算機の進捗(中村)
- 高次波面センサの進捗
- 補償光学装置で狙う天体について
- まとめ

SEICAの構成+進捗状況

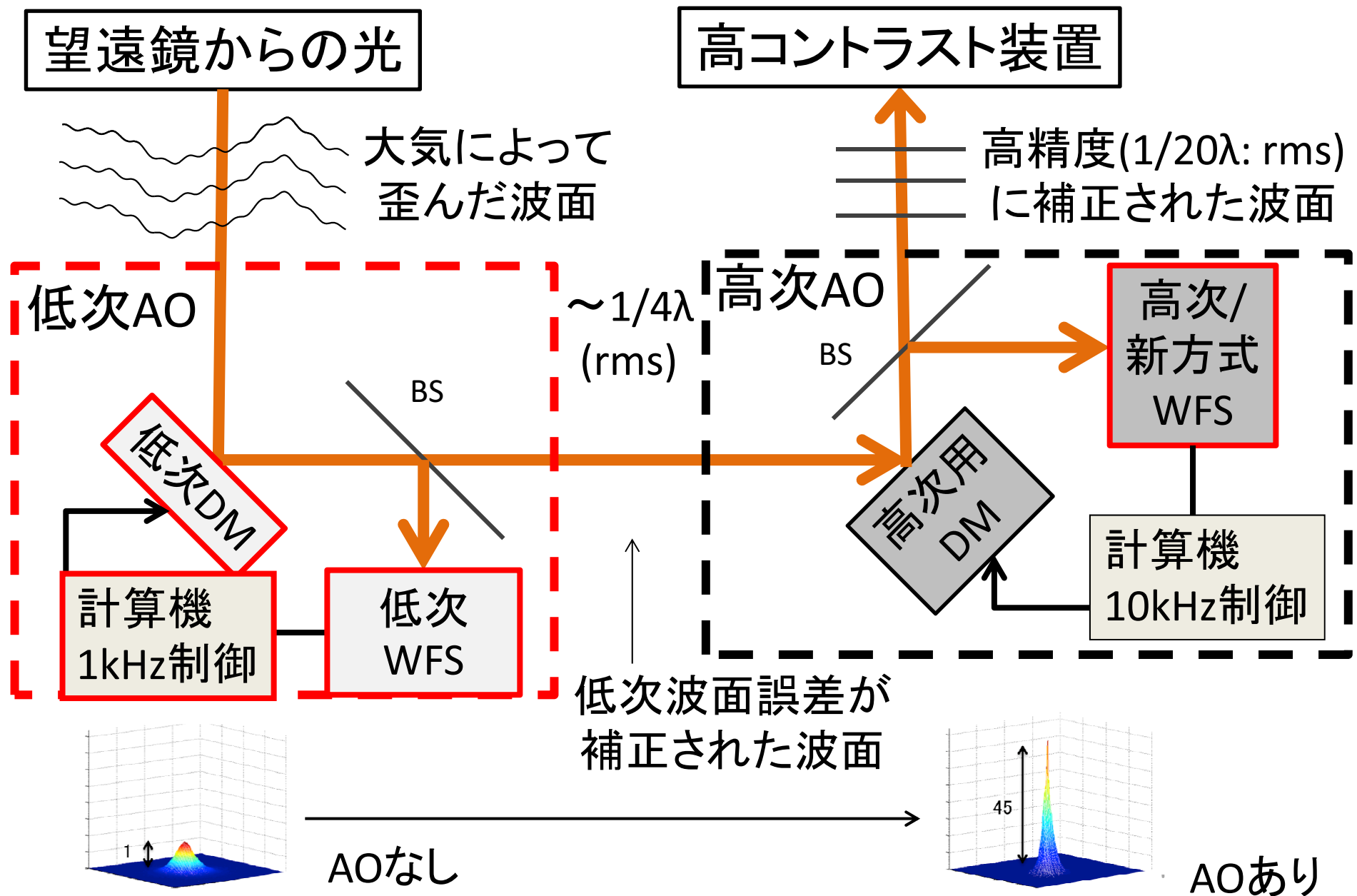
- 補償光学系の光学設計完了
- 筐体の詳細設計中。
- 波面センサ(後述)の評価試験。
- 今後: キャリブレーション、調整手段の検討、コロナグラフ製作、T/T鏡の試験。



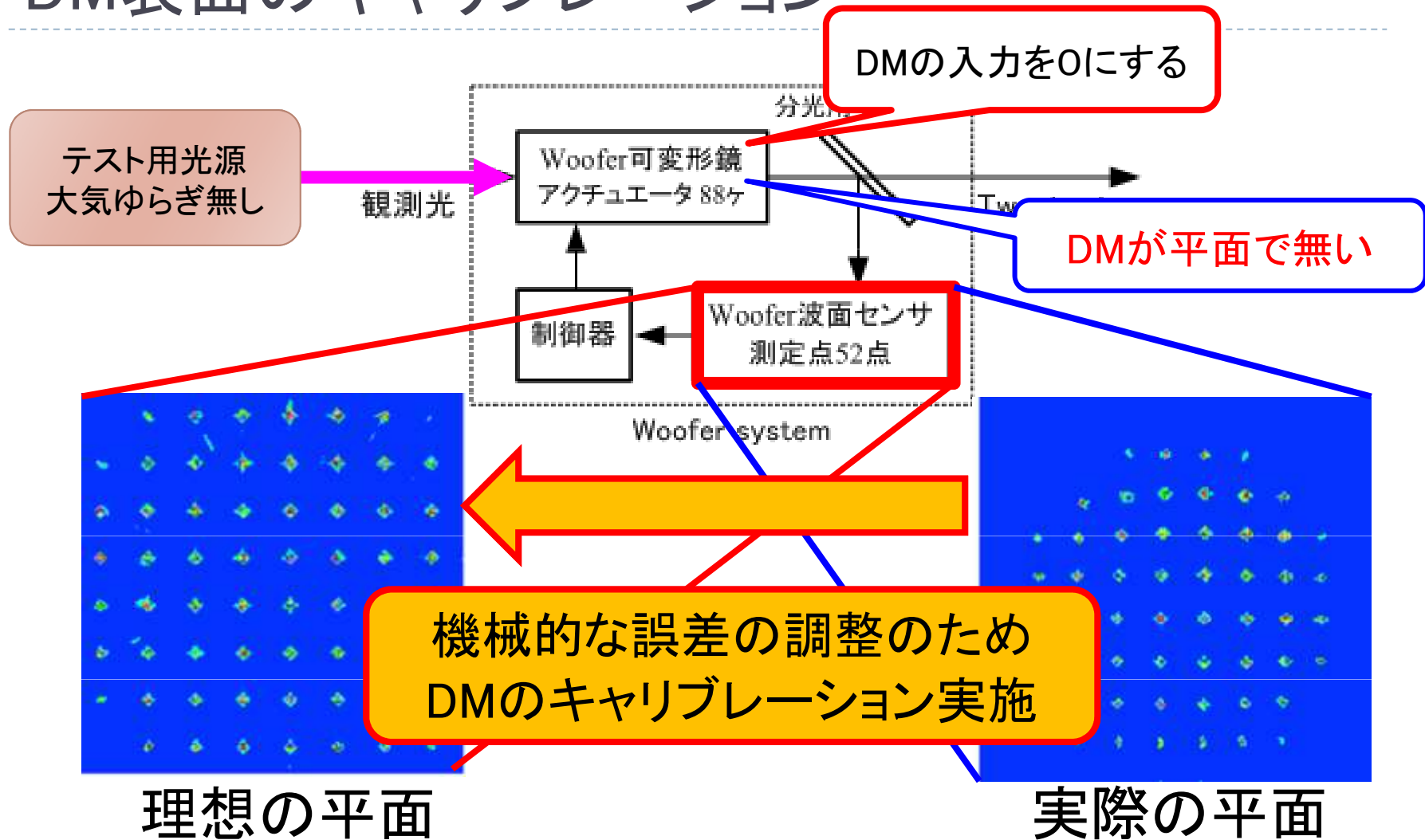
段階的に高コントラストの撮像を実現



補償光学(AO)装置の構成

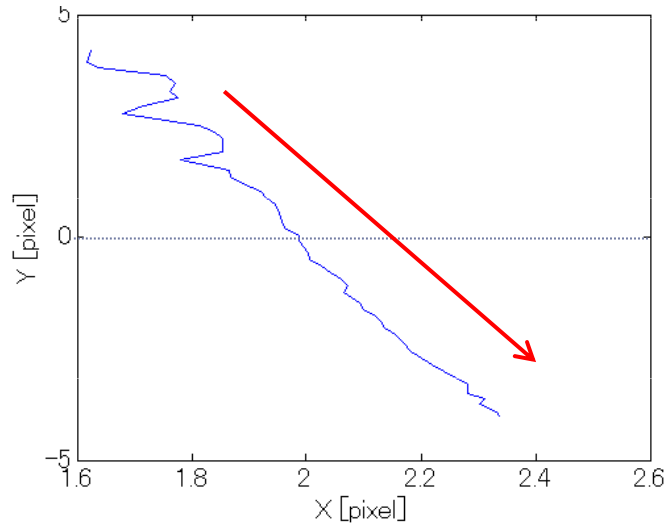


DM表面のキャリブレーション

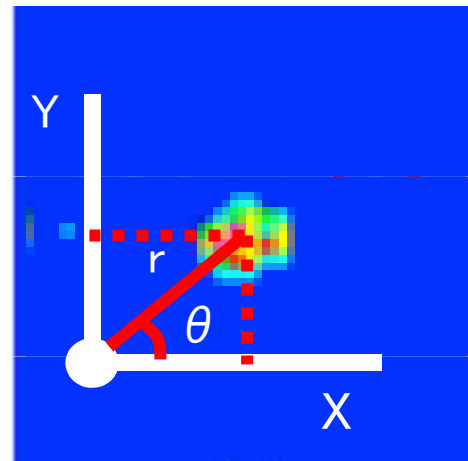


DM表面のキャリブレーションの方法(案)

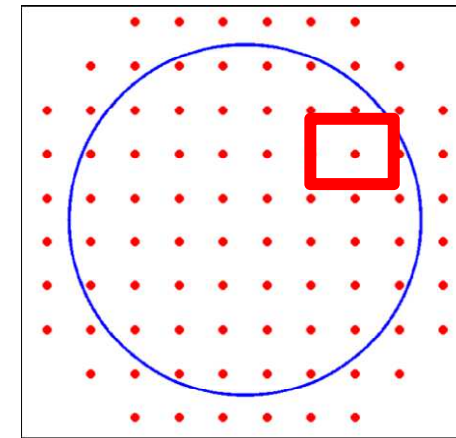
DMの入力値を大きくすると
結像点の位置が動く



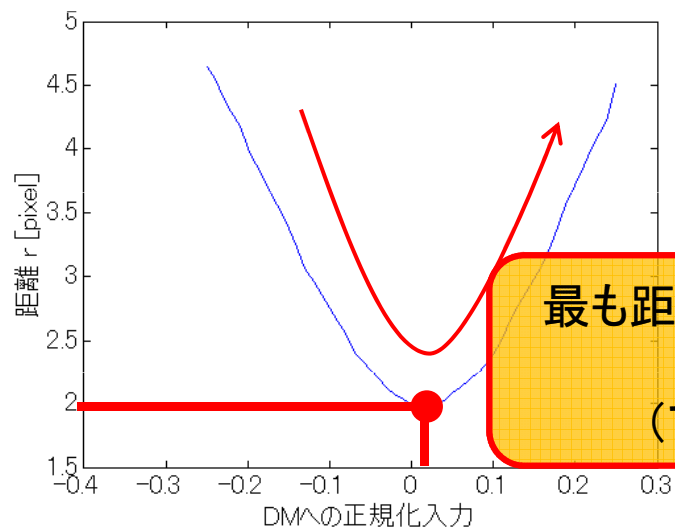
DM動作時の
WFSの結像点(重心)の移動量を測定



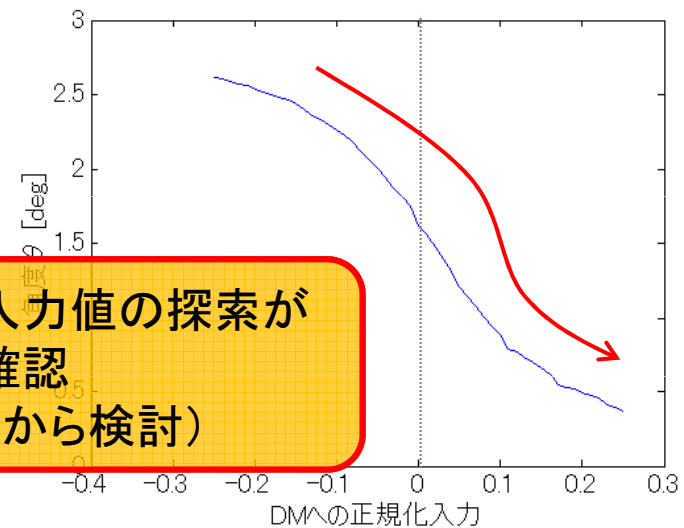
WFS 17



DM NO.32

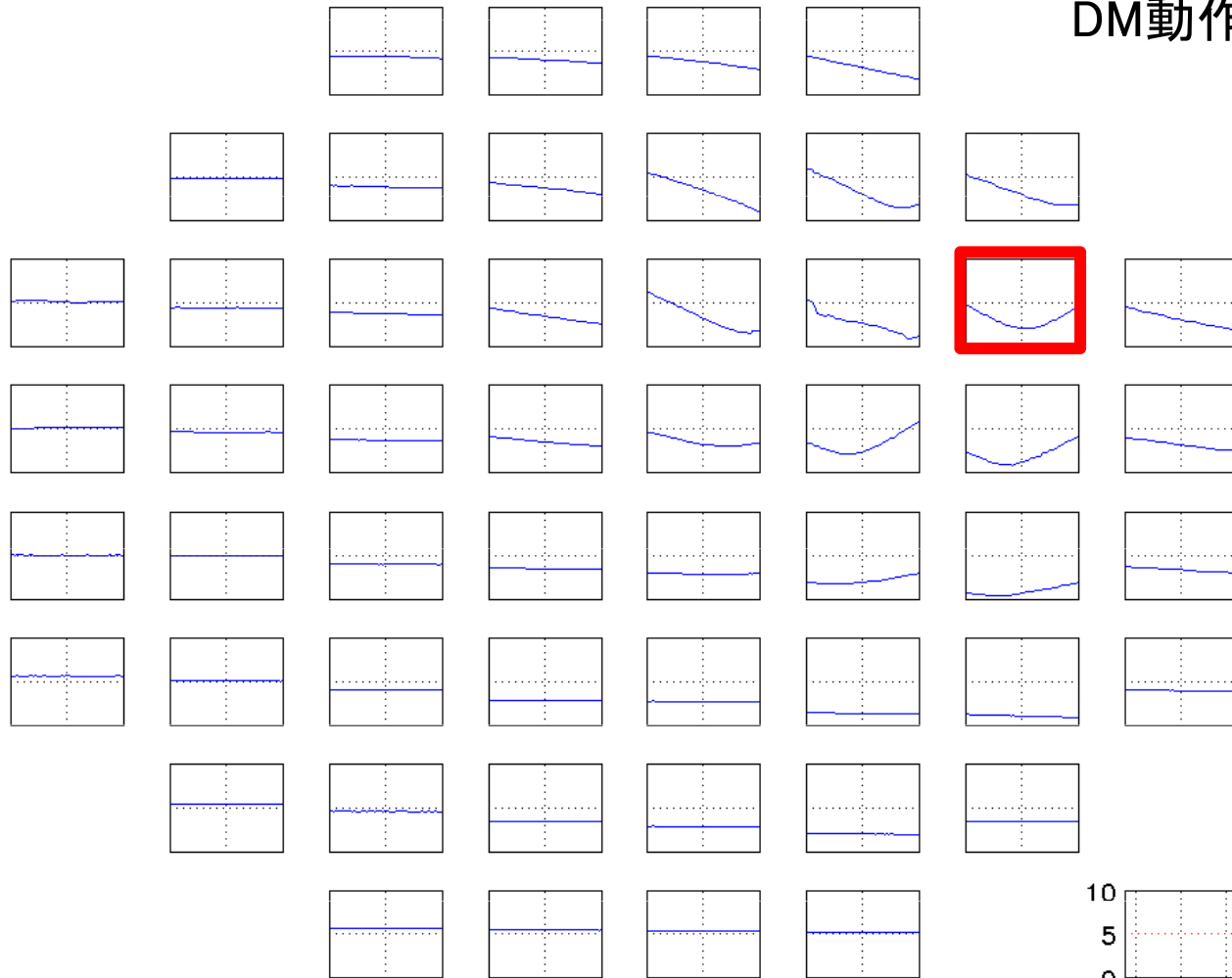


最も距離が小さくなるDM入力値の探索が
可能なことを確認
(アルゴリズムはこれから検討)

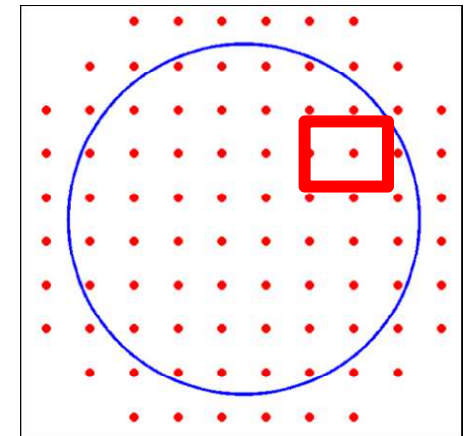


DM表面のキャリブレーション

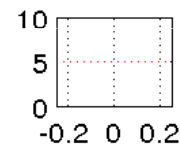
DM:32 From -0.25 to 0.25



DM動作時のWFSの移動量を測定

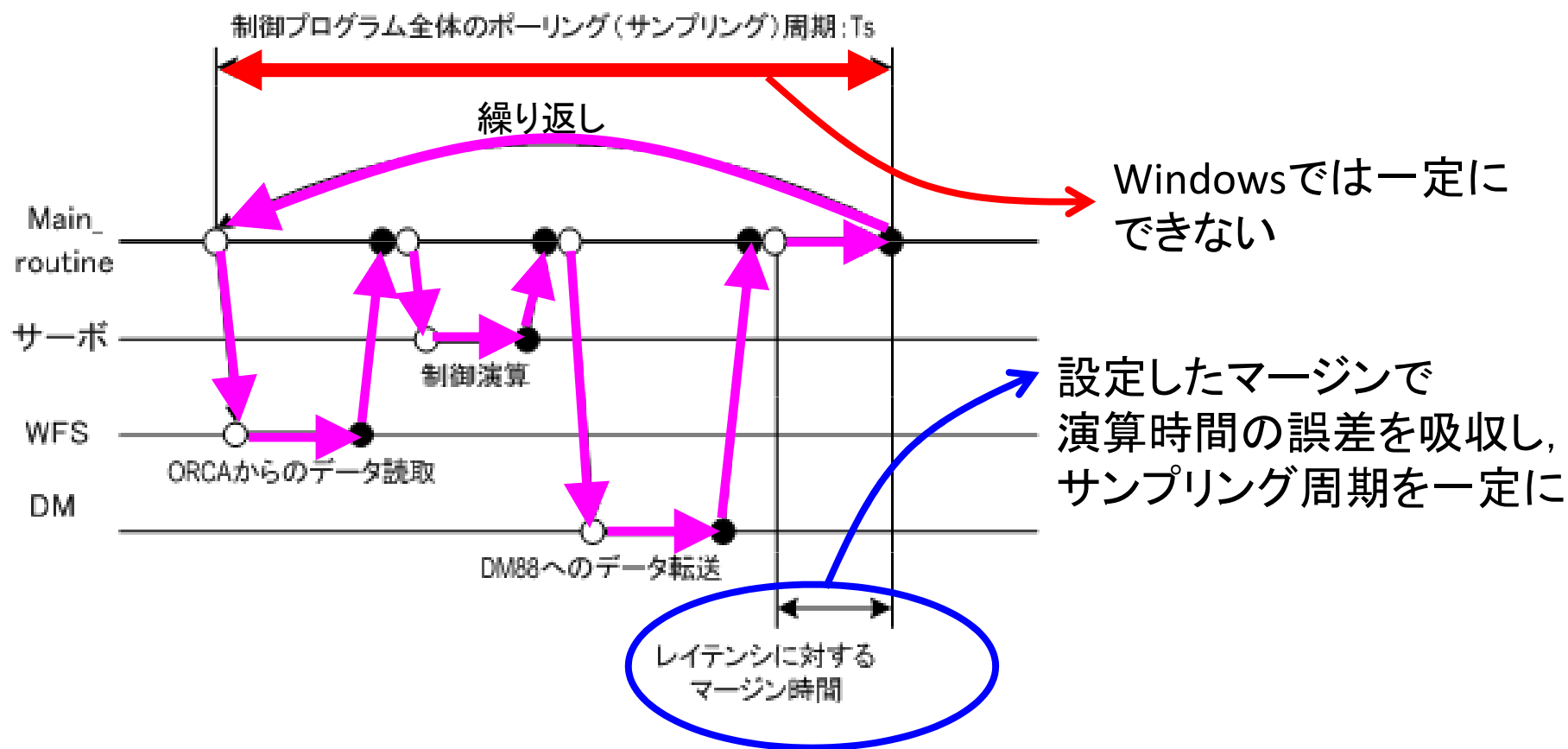


DM
NO.32



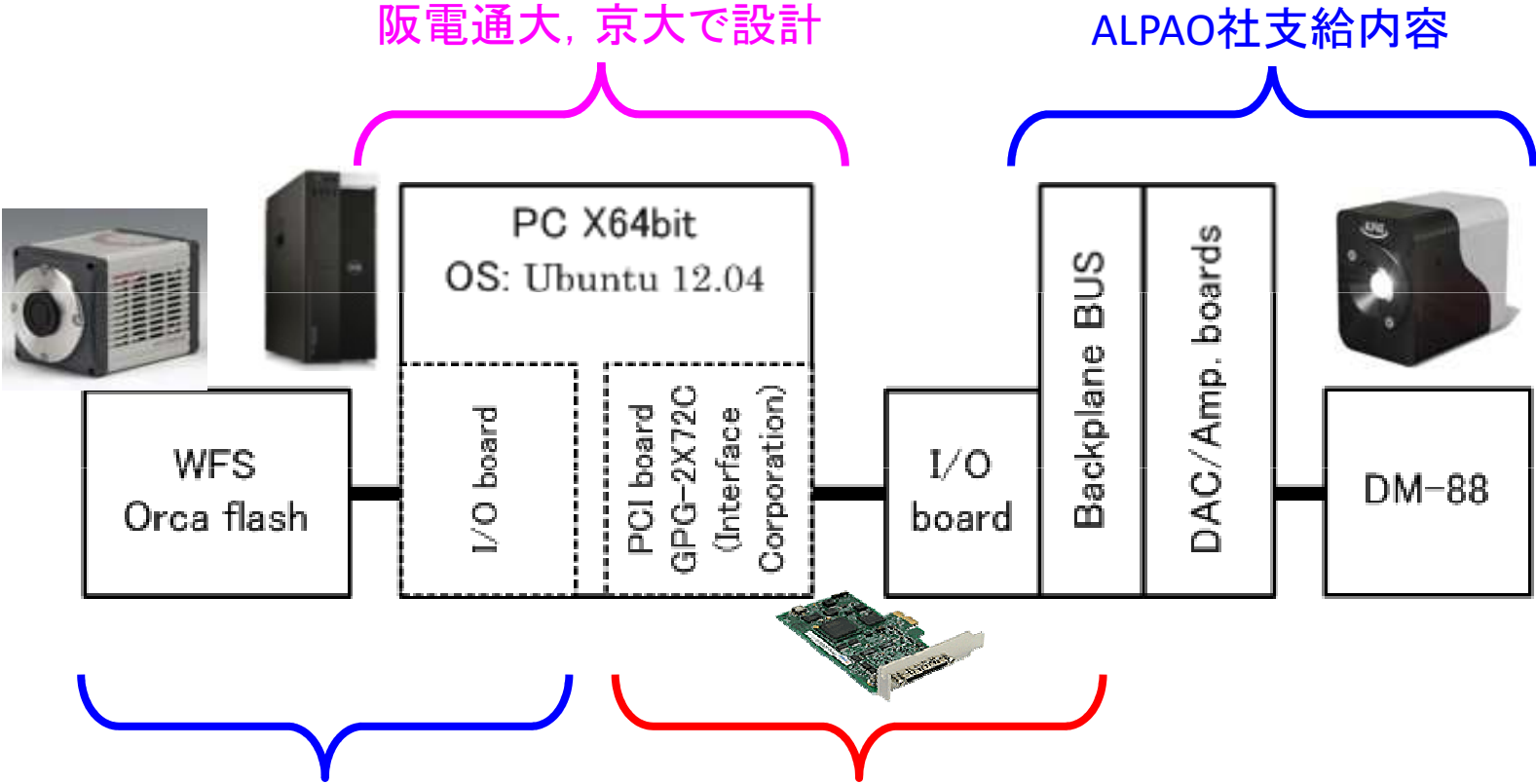
Linux-OSによるリアルタイム制御システム開発

目的: Windows OSに起因するサンプリング周期の変動を排除



Linux-OSによるリアルタイム制御システム開発

目的: Windows OSに起因するサンプリング周期の変動を排除



浜ホトからデバイスドライバ受取り

ステップワン(ソフト設計)様でクラスライブラリ設計

高次波面センサ(Tweeter WFS)開発状況

- ファーストライト時点ではシャックハルトマンセンサ(SHWFS)を採用(今回は省略)。
 - 低次WFSのスケールアップ
- SHWFSより**高速、高感度、高精度**の波面測定が行える点回折干渉計(PDI)方式の波面センサ(後述)を開発中。(SHWFSと置き換える)
 - 本PDI波面センサに必要なピンホール-偏光ビームスプリッタ(後述)の開発。
 - 予算申請中。
 - 他方式と性能を比較した論文執筆中。

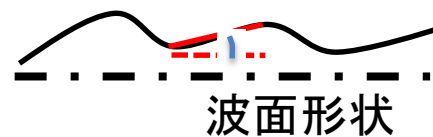
波面センサ(WFS)

- 波面の「幾何学的情報」を計測するか「形状(位相)」を測定するか。

WFS (波面センサ)による波面エラーの計測

A. 幾何学的計測

計測対象の波面
理想的な波面



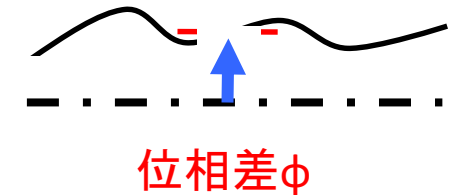
理想的波面に対する形状計測。
でも形状は直接計測できない

- 傾斜は形状の1次微分
- 曲率は形状の2次微分

シャックハルトマンセンサ(Gemini/GPI)
曲率センサー(HiCIAO/AO188)etc...

B. 位相計測

計測対象の波面
理想的な波面

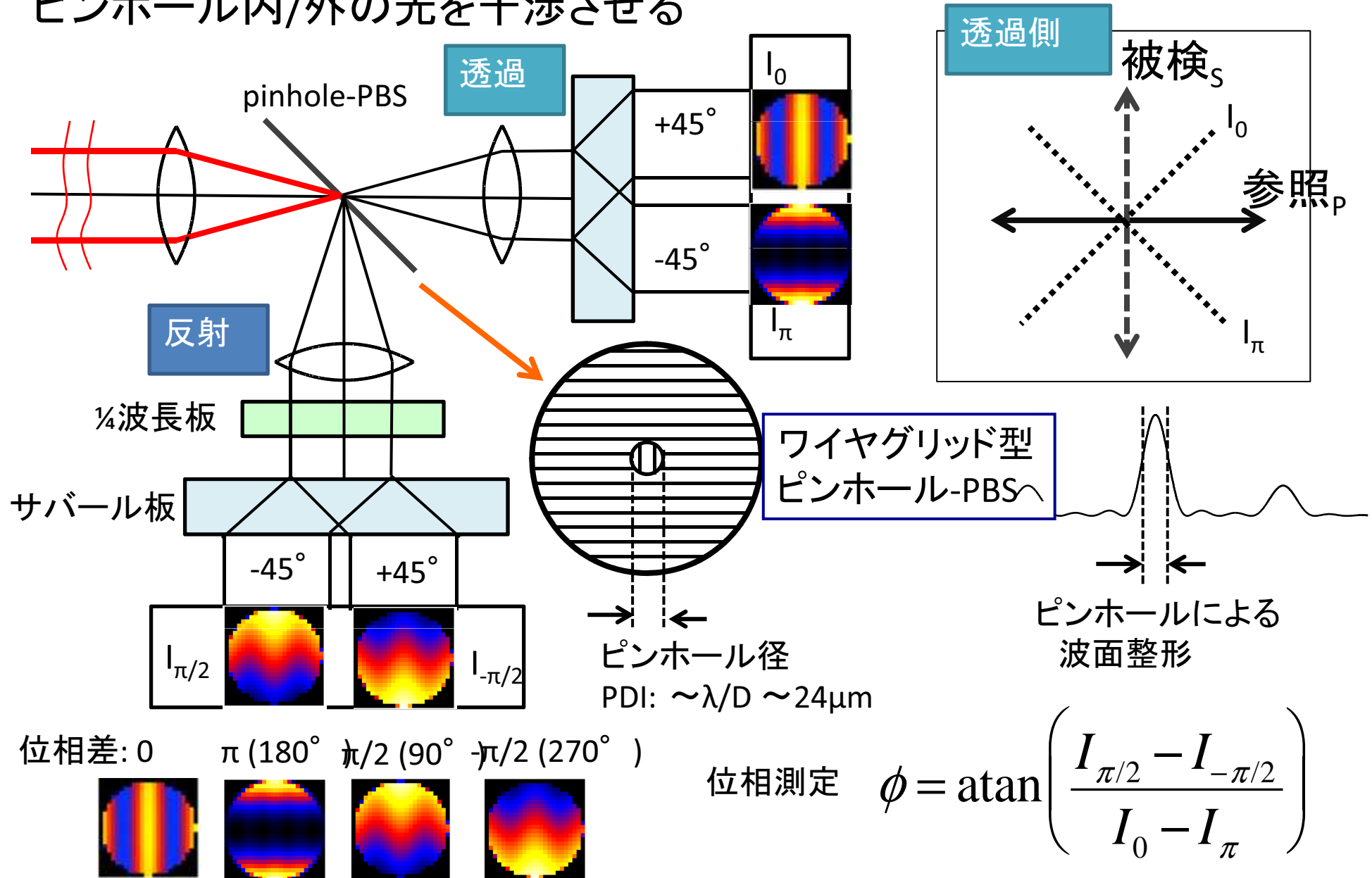


理想的な波面に対する
波面の進み/遅れ(位相差)の直
接計測

ピラミッドセンサ(SCEXAO)
ツェルニケセンサ(Palomar)
点回折干渉計センサーetc...

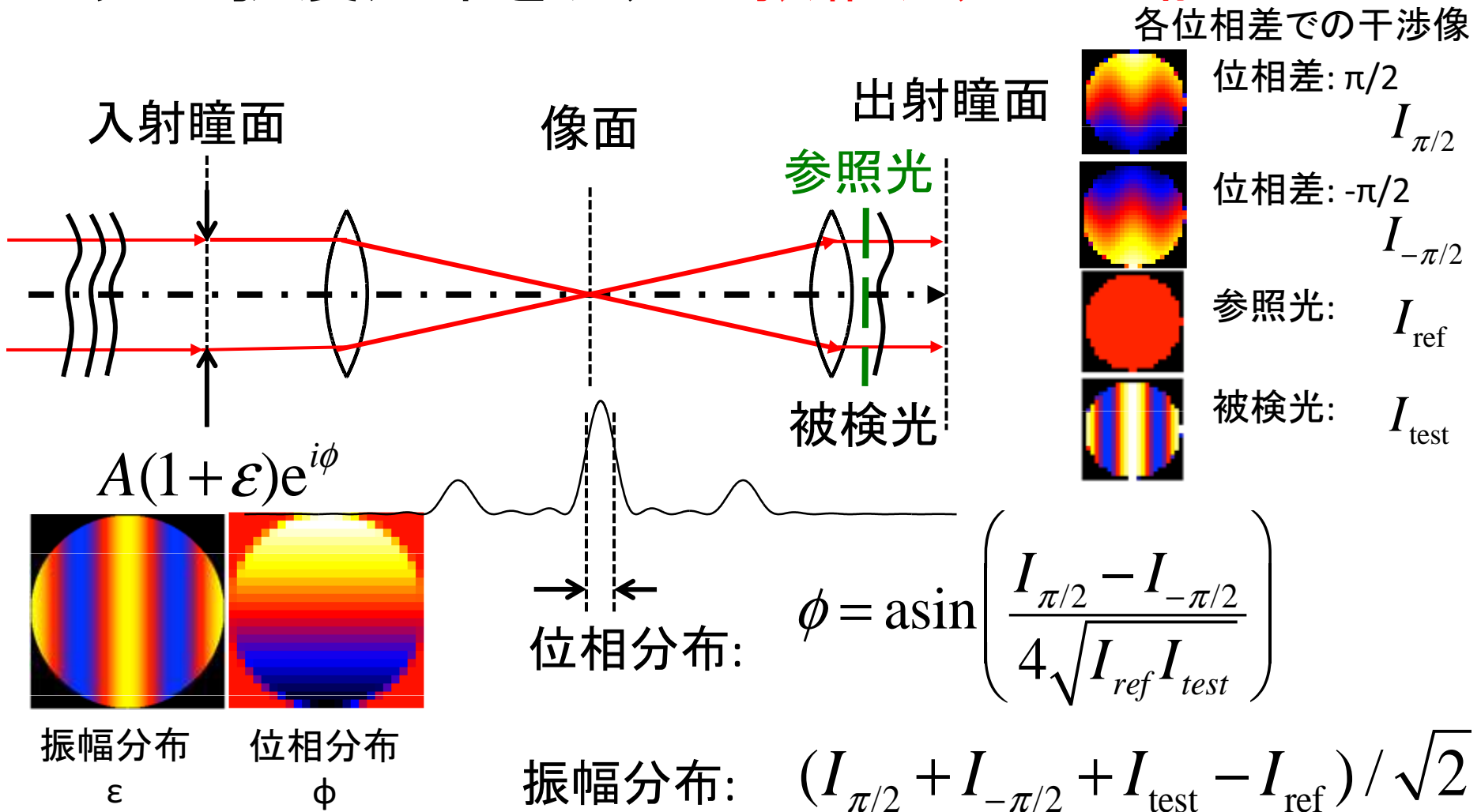
点回折干渉計(PDI)波面センサ

ピンホール内/外の光を干渉させる



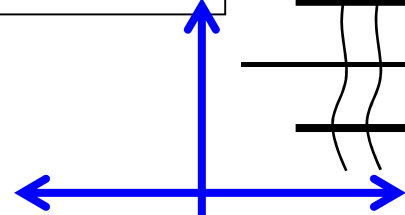
位相振幅同時測定PDI(paPDI)

- PDIの0, π 位相差の干渉の代わりに参照光、被検光の強度分布を測定→**振幅測定が可能**



paPDIWFS

被検光

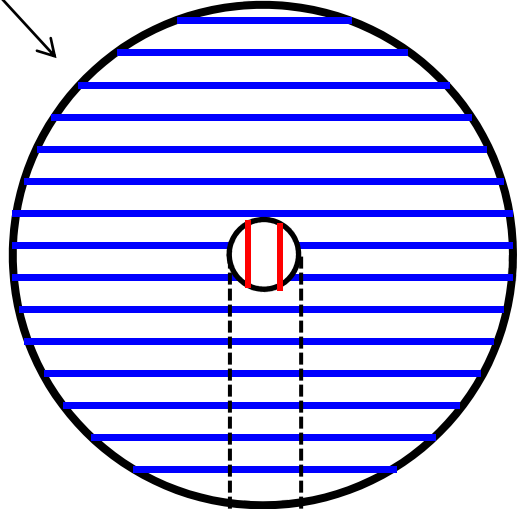
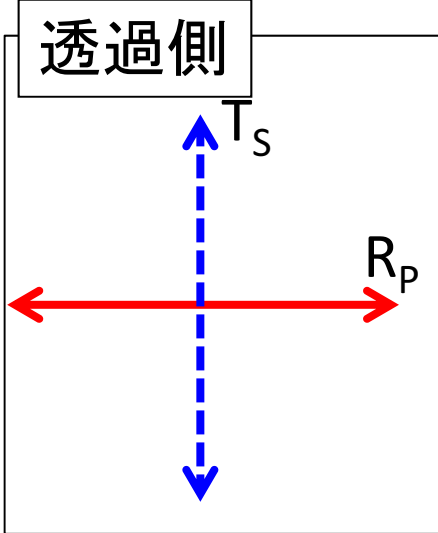
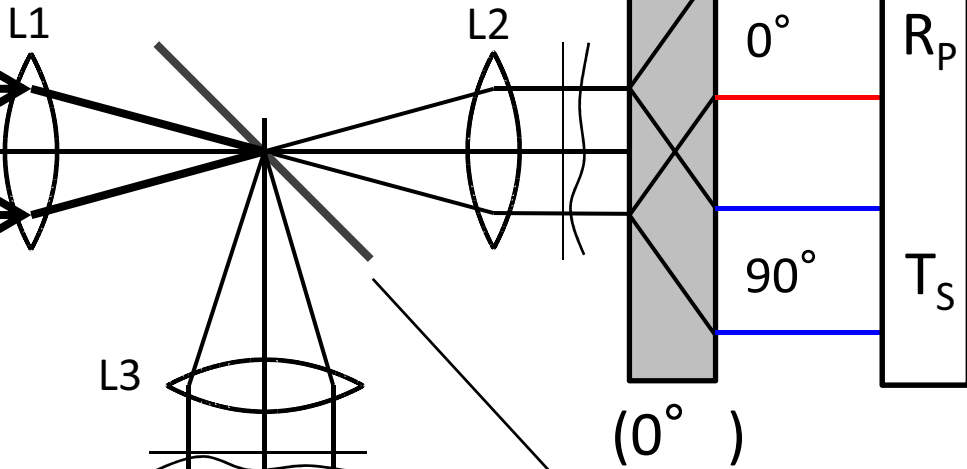
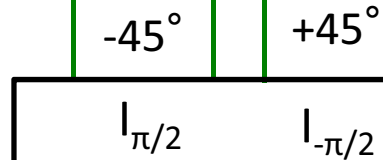
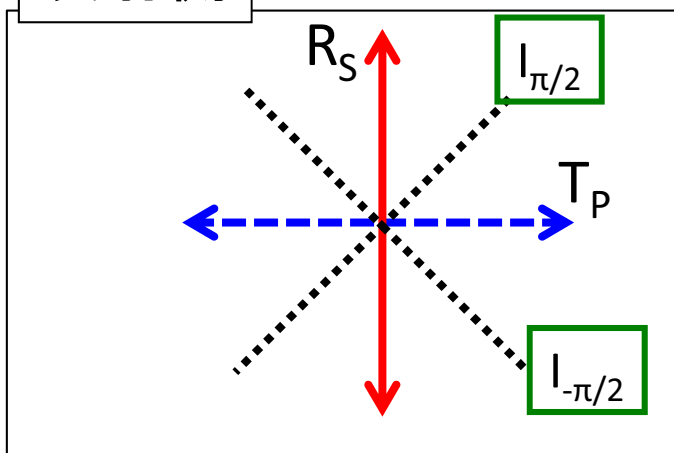


1/4波長板

サバール板

(45°)

反射側



ワイヤグリッド
ピンホール-PBS
ピンホール径 $\phi = \lambda/D$ (paPDI)

性能評価シミュレーション1. 位相測定

- 入力した波面の位相を測定。

入力: Zernike 収差の各モード

$$\phi(\rho, \theta) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} a_{nm} Z_n^m(\rho, \theta)$$

測定: PDIWFS

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left(\frac{I_{\pi/2}(x, y) - I_{-\pi/2}(x, y)}{I_0(x, y) - I_{\pi}(x, y)} \right)$$

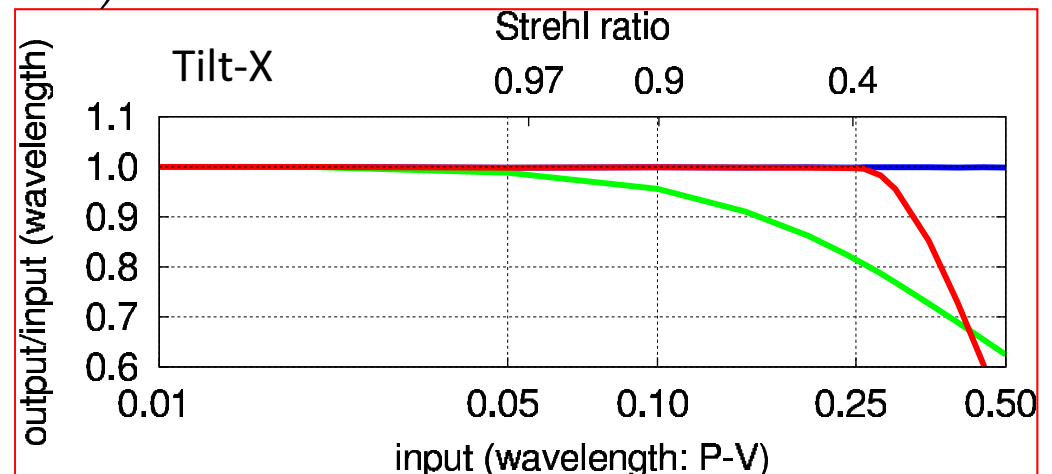
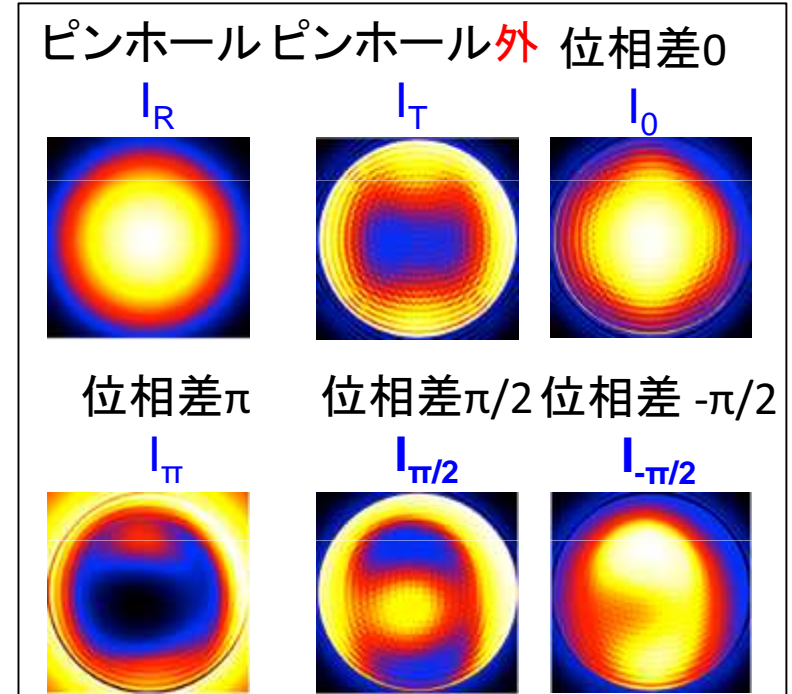
: paPDIWFS

$$\phi(x, y) = \sin^{-1} \left(\frac{I_{\pi/2}(x, y) - I_{-\pi/2}(x, y)}{4\sqrt{I_T(x, y)I_R(x, y)}} \right)$$

: ZWFS

$$\phi(x, y) = \frac{I_{\pi/2}(x, y) - I_{-\pi/2}(x, y)}{4A_0^2}$$

- 各WFSの、各モードでの振る舞いは同じ
- paPDIは $-\lambda/4 : \lambda/4$ で高精度測定可能
- ZWFSは $-\lambda/20 : \lambda/20$ 。
- ZWFSは[変動の大きさ $\ll 1$]

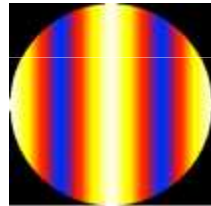


性能評価シミュレーション2. 強度測定

- 入射波面に(強度)振幅変化を与え、測定を模擬。

入力: 空間周波数2の強度変動

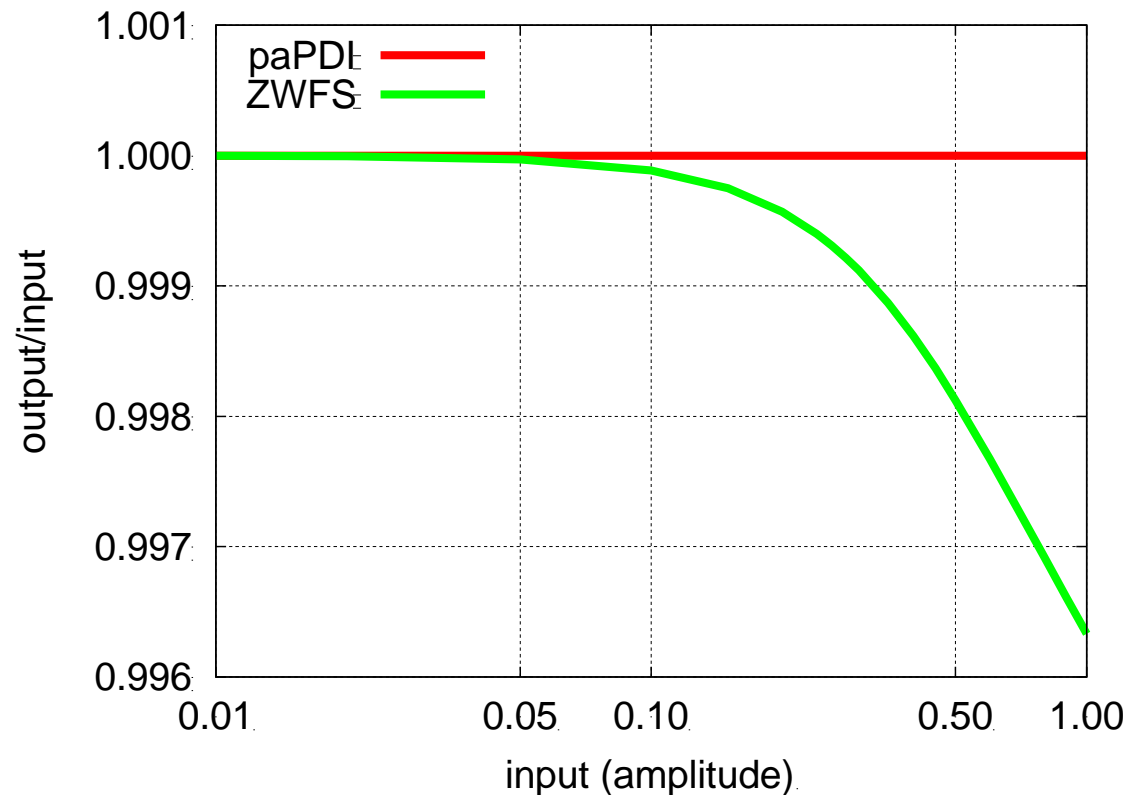
$$\varepsilon(x, y) = b \cos(2\pi f x)$$



測定: paPDIWFS

$$\begin{aligned} &|A_0|^2 \{1 + \varepsilon(x, y)\}^2 \\ &= \frac{1}{2} (I_{\frac{\pi}{2}} + I_{-\frac{\pi}{2}} + I_T - I_R) \\ &\quad : \text{ZWFS} \end{aligned}$$

$$\varepsilon(x, y) = \frac{I_0(x, y) - I_{\pi}(x, y)}{4A_0^2}$$

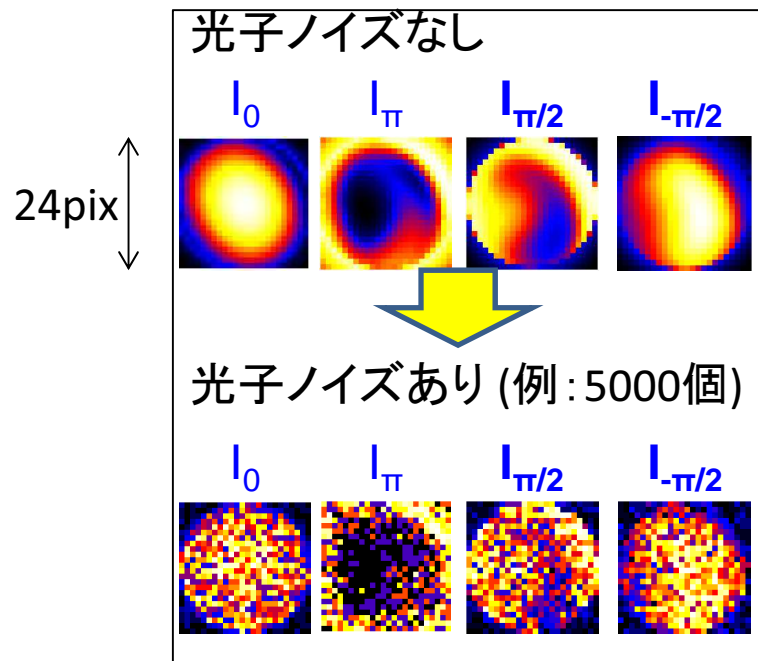


- paPDIは直接振幅を測定しているため、感度が入力に依存しない。
- ZWFSは[変動の大きさ $\ll 1$]。

性能評価シミュレーション3. フォトンノイズ

● 入射波の光子数の影響

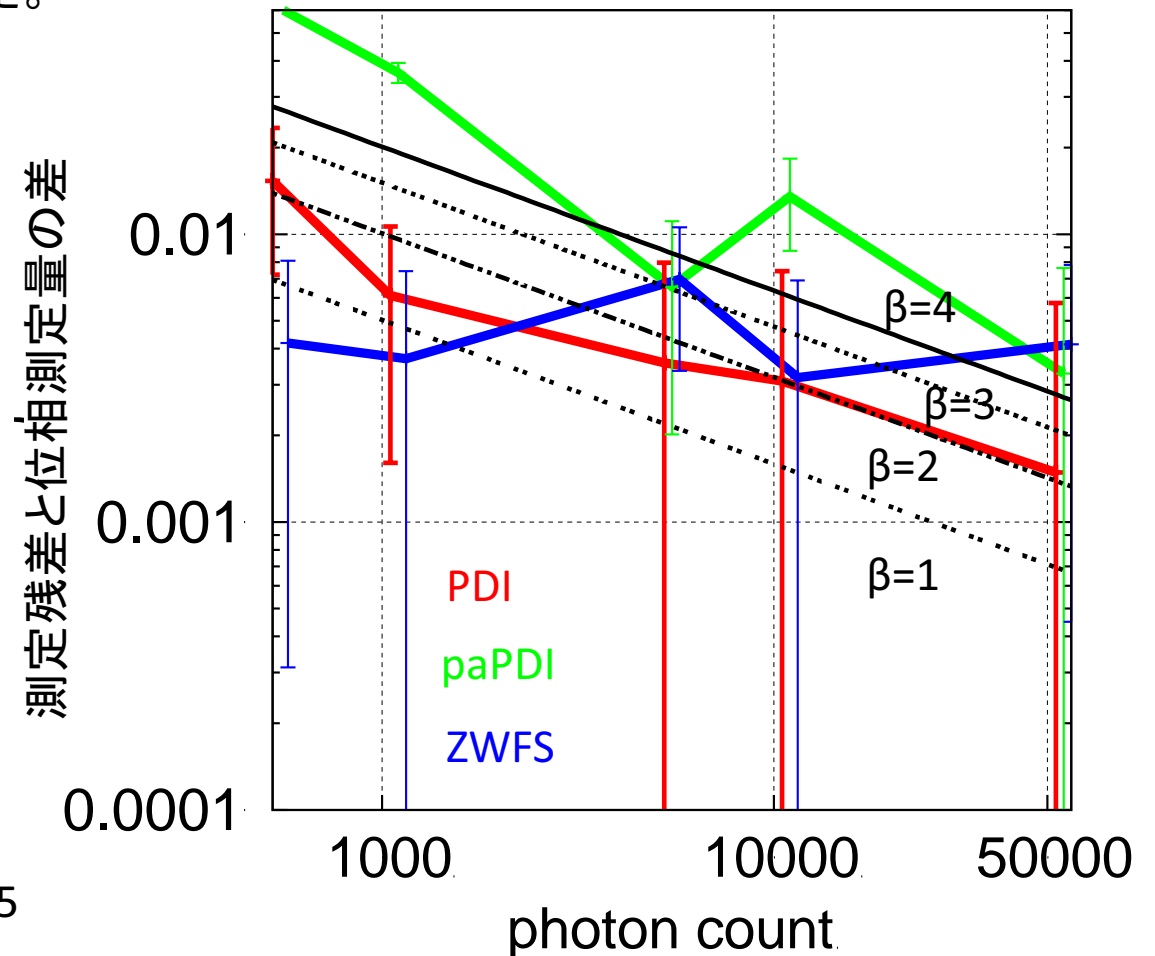
[検出面]を差し渡し24pixel, 総pixel数449個に分割。入射**総光子数**を変えて位相測定。



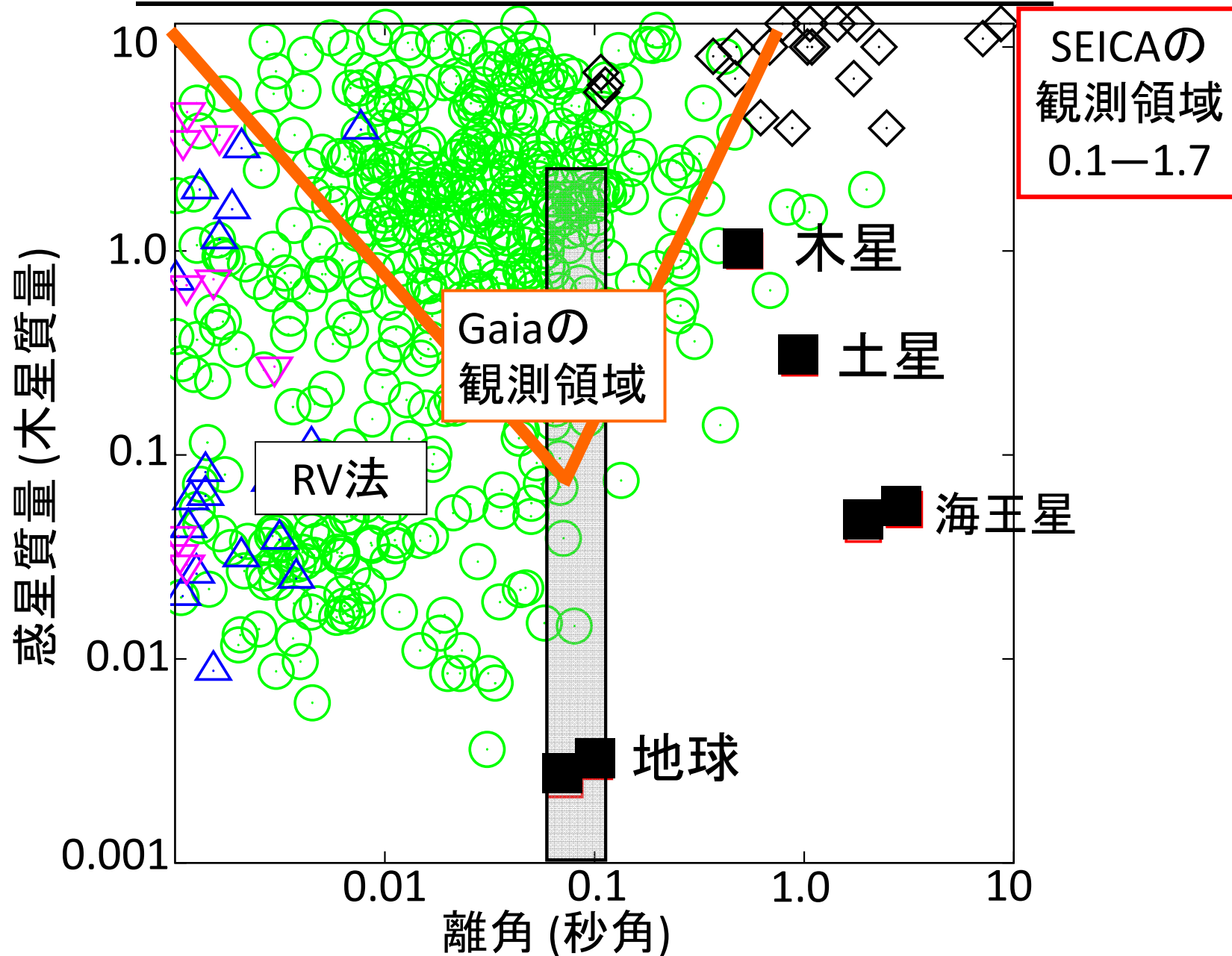
β は波面センサの感度の指標

$$\delta\varphi = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{\beta_p}{\sqrt{N_{\text{photon}}}} \quad \text{Guyon2005}$$

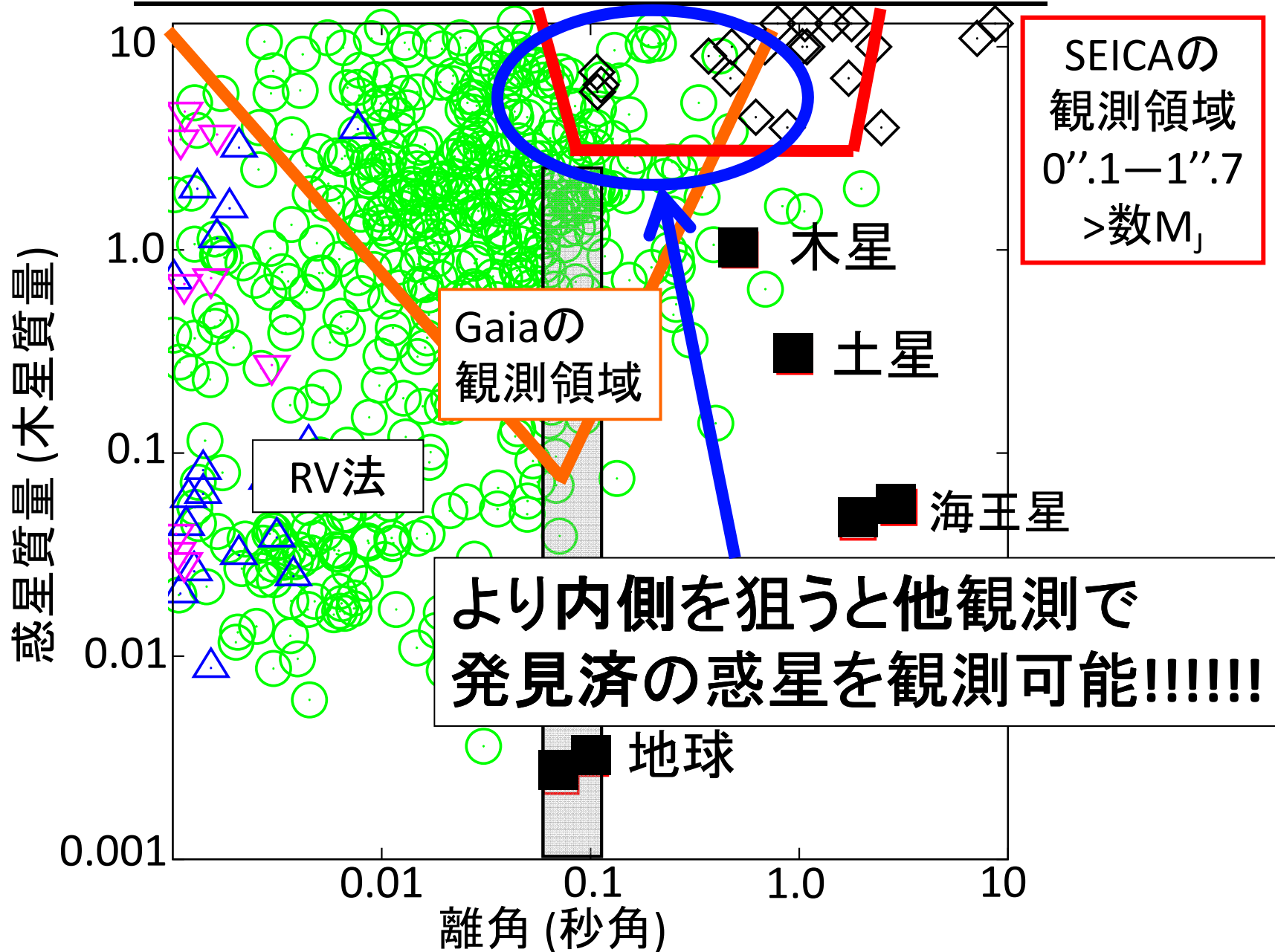
位相 ϕ が 0.1λ の時
各光子数、センサで26回シミュレーション



SEICAで狙えるサイエンス



SEICAで狙えるサイエンス



まとめ

- 極限補償光学装置の開発
 - 低次用波面センサ: 性能評価おわり。実機製作へ。
 - 制御用計算機: 実装中。
 - 高次用波面センサ: 性能評価おわり。実機製作へ。
 - 新方式波面センサ: 性能評価。ピンホール-PBSの製作。予算提案中。

	位相測定 レンジ(P-V)	測定可能な Strehl 比	振幅測定	光子ノイズ の影響	特色
PDI	$\pm\lambda/2, \pm\pi$	>10%	-	ほぼ無し	位相を高精度で測定出来る
ZWFS	$\pm\lambda/10, \pm\pi/5$	>90%	$\ll 1$	ほぼ無し	簡単な計算で位相・振幅を導出出来る。
PD	$\pm\lambda/4$	100%	制限無し		低次元で高精度で測定出来る

まとめ

- 位相と振幅を測定出来る波面センサを提案した。
- 測定原理の実証ができた。
- シミュレーションにより、光子ノイズの影響を評価した。
 - PDI, r-ZWFSは先行研究と矛盾がない。

	位相測定 レンジ(P-V)	測定可能な Strehl 比	振幅測定	光子ノイズ の影響	特色
ZWFS	$\pm\lambda/10,$ $\pm\pi/5$	>90%	$\ll 1$	ほぼ無し	簡単な計算で位相・振幅を導出出来る。
paPDI	$\pm\lambda/4,$	>40%	制限無し		低Strehl比でも測定出来

今後の直接撮像でなにを狙うのか？^{9/20}

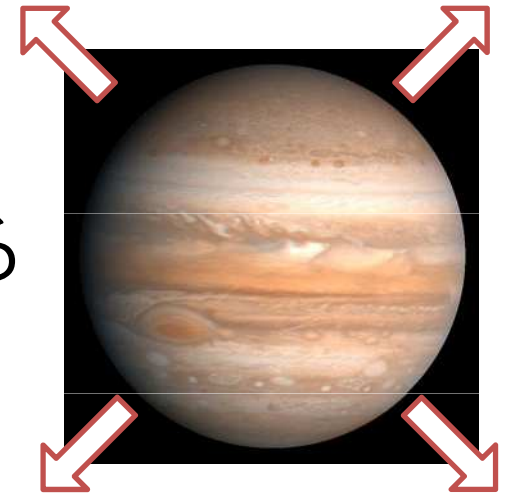
他観測で存在と質量が分かっている惑星

- 惑星熱放射 (30—35個)

- 従来：光度→[モデル]→質量

- 我々：質量、光度が別々に測定出来る

→モデルの検証



- 惑星(大気)反射光 (~5個)

- (直接撮像では)検出されていない

- 熱放射と違い惑星の温度に依存しない。

さらに.....

- 惑星の光度変動

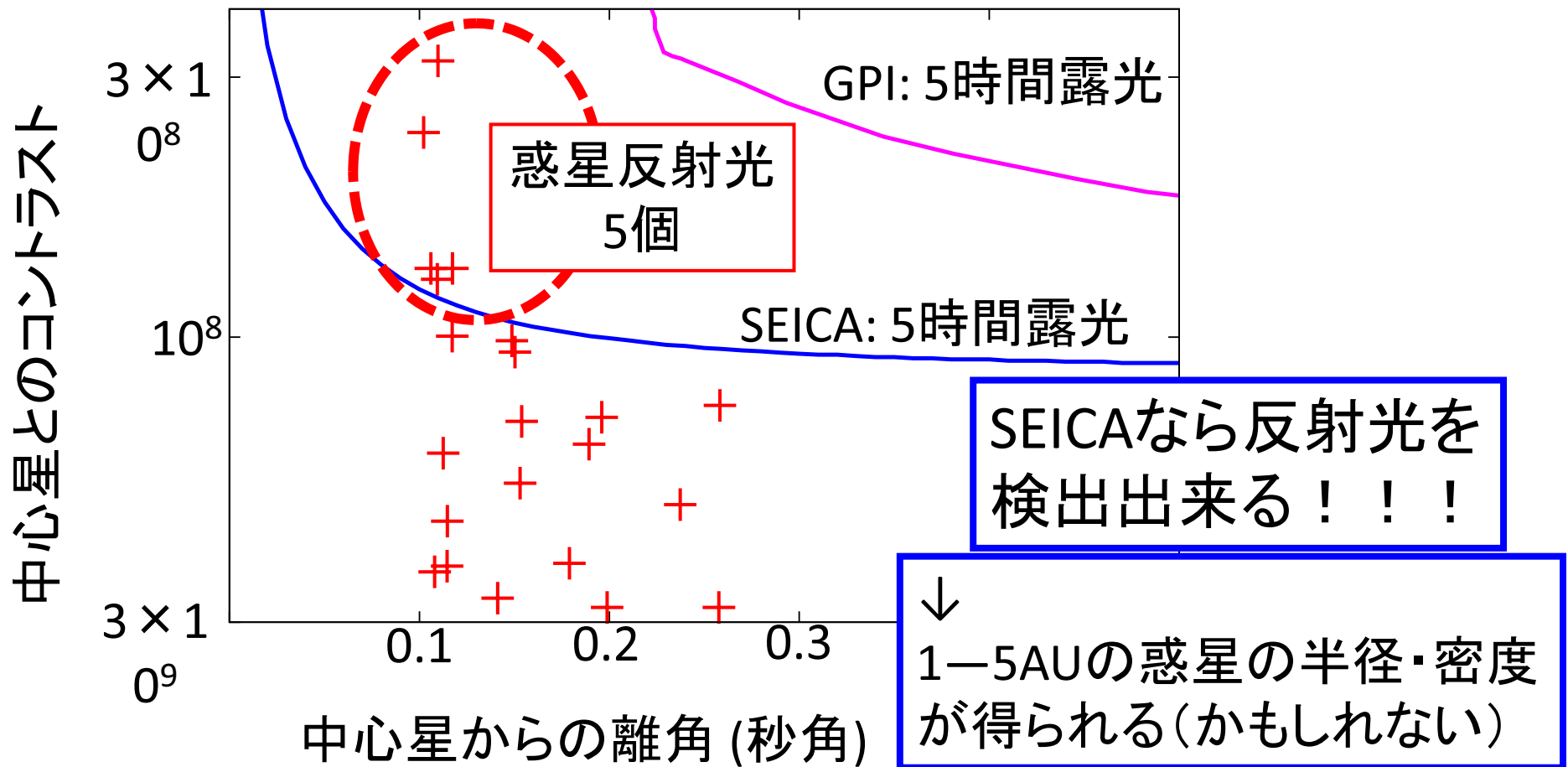
- 雲の有無、自転周期 etc...

どれくらい惑星を
検出出来るのか？

→40個くらい

2. より内側の惑星探査(大気反射光)^{10/20}

- 反射光は $I_p = I_* p \phi(\alpha) \left(\frac{r_p}{a}\right)^2$ でアルベド p , 惑星半径 r_p 、軌道長半径 a だけに依存。



さらに進んで分光

- 高コントラストなので分光装置を搭載したとき
分子線検出、自転速度検出が狙える！！

