

地上望遠鏡による太陽系外惑星の 撮像観測のための 極限補償光学系開発

○山本広大(京都大学)

～山本 イズ 何?～

◆ 専門: 赤外線天文学/系外惑星撮像観測
/装置開発/補償光学

名古屋大学: 和泉氏の同僚

気球搭載型遠赤外線干渉計(FITE)開発

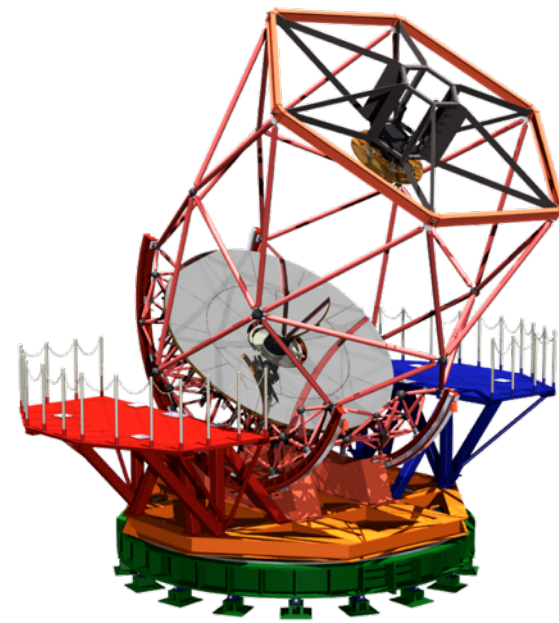
大阪大学: すばる望遠鏡で系外惑星観測

[Pleiades星団の観測]

京都大学: (3.8m望遠鏡用)補償光学装置の開発

開発キーワード: 干渉, 偏光, 波面計測

京大岡山3.8m望遠鏡



なぜ(太陽)系外惑星？十今回の発表

◆研究の究極のゴール：**地球外生命体はいる？** ホントの究極ゴール

生命って何？

は手に負えない
けれど理解は
深まる.....

→太陽系外にも生命がすめる？(Habitable zone)

→(太陽)系外惑星ってどんなの？(characterization)

→どうやって系外惑星を探査？(remote sensing)

→系外惑星を直接みてみたい！！(direct imaging)

→補償光学が必要→自分で作りたい！！→**開発だ！**

◆発表：**補償光学がなぜ必要で、どういう問題をどう
いう方法で解決しているか。**

- ・1秒角=1/60分角=1/3600度
≒4.9 μ rad
- ・波長(λ)は近赤外1–2 μ m
- ・Dptからnmへの変換は
 ϕ 10cm程度の素子を想定

	補償光学	重力波検出	比
ターゲットの距離	1–1000pc	~200Mpc	1 : 20万–2億
制御精度(角度)	~0.01秒角	~nrad	10 : 1
制御精度(速度)	~10kHz	~10Hz	1000 : 1
制御精度(波面)	~ λ /20~50nm	~ μ Dpt~10nm	5:1

導入:系外惑星検出::手法

◆1995年(主系列星周りで)初の系外惑星検出

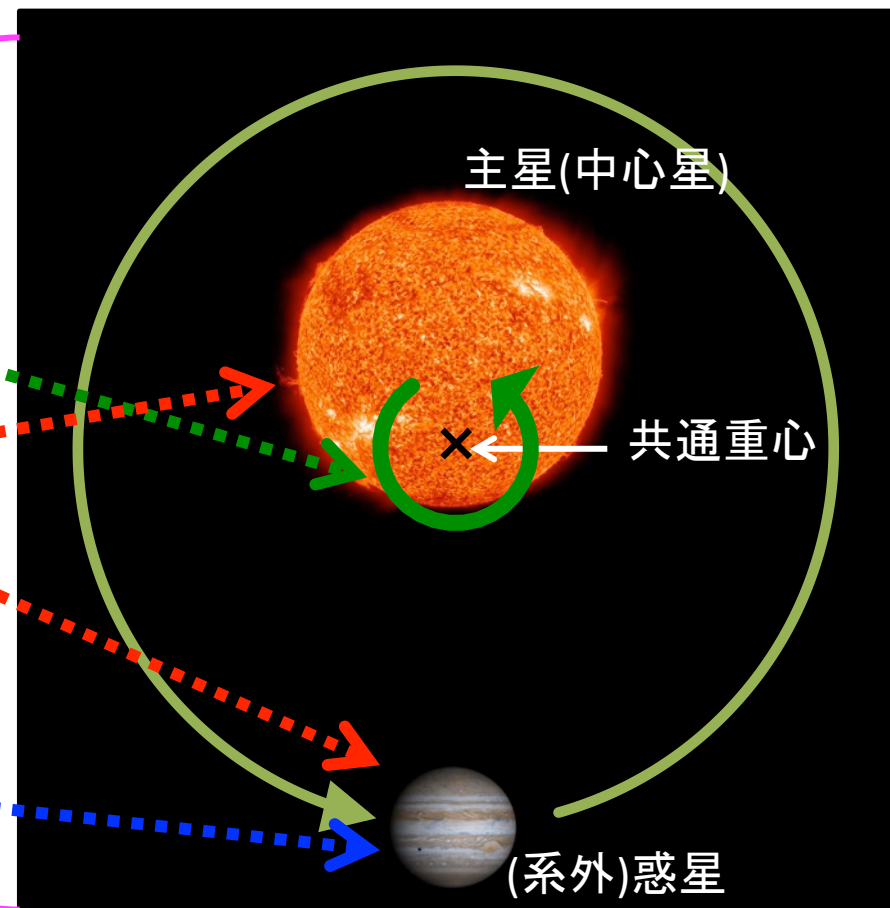
◆主な観測手法

－間接的

- ◆ 視線速度(RV)法
- ◆ アstrometry法
- ◆ トランジット法
- ◆ 重力マイクロレンズ法

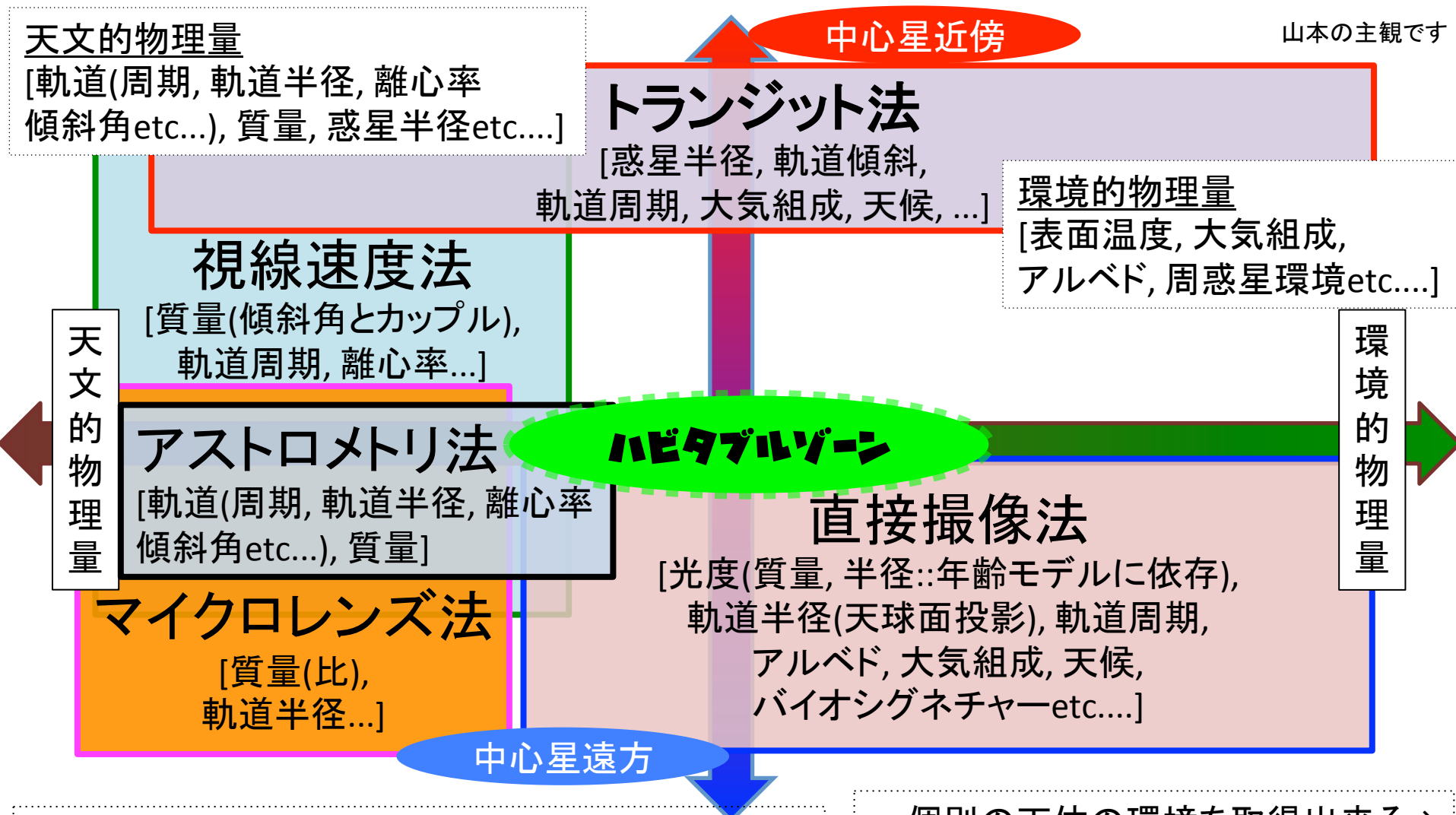
－直接的

- ◆ 直接撮像
- ◆ (トランジット分光)



導入:系外惑星検出::特徴

山本の主観です



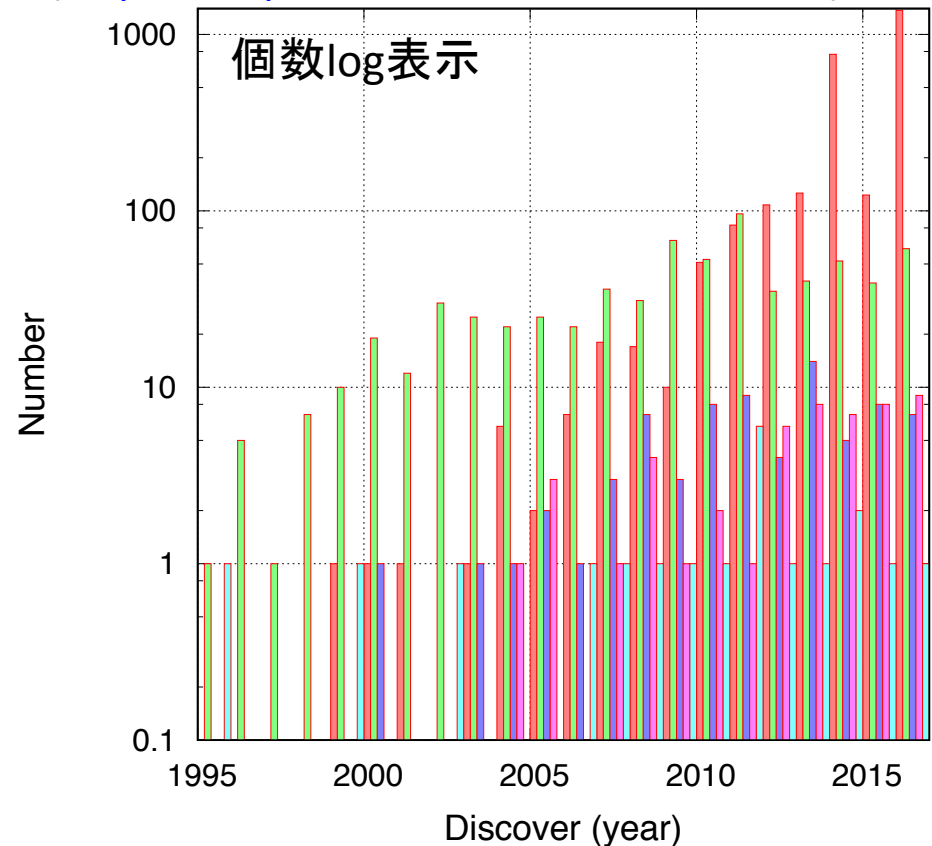
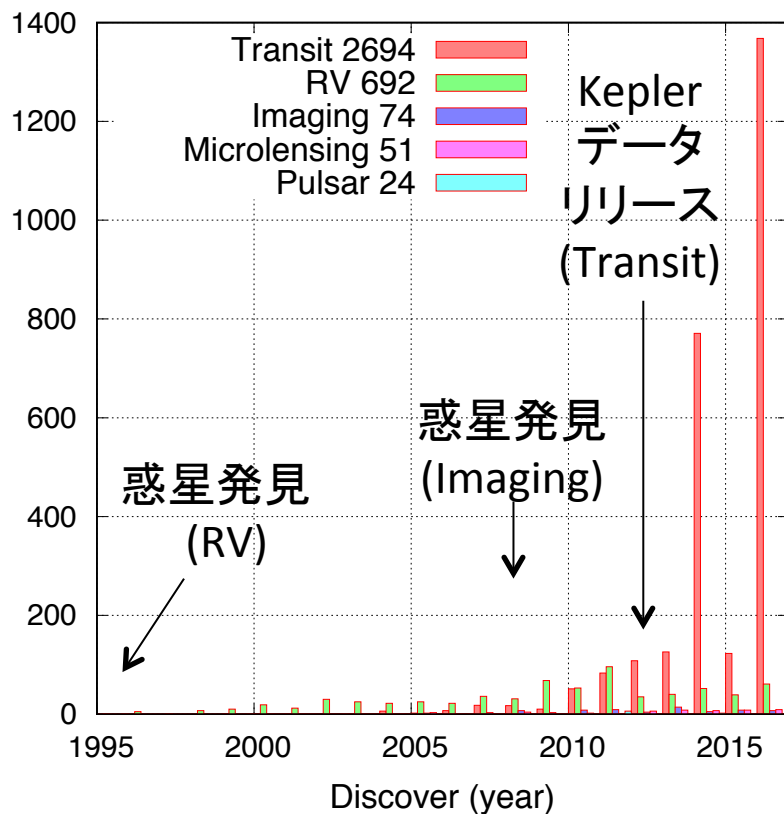
←サーベイ観測による惑星系の発見に適している
: 惑星存在率(質量/軌道周期依存性)
(トランジット法, アストロメトリ法, マイクロレンズ法)

個別の天体の環境を取得出来る→
ハビタブルな惑星を調べるには
直接撮像観測しかない

導入:系外惑星検出::推移

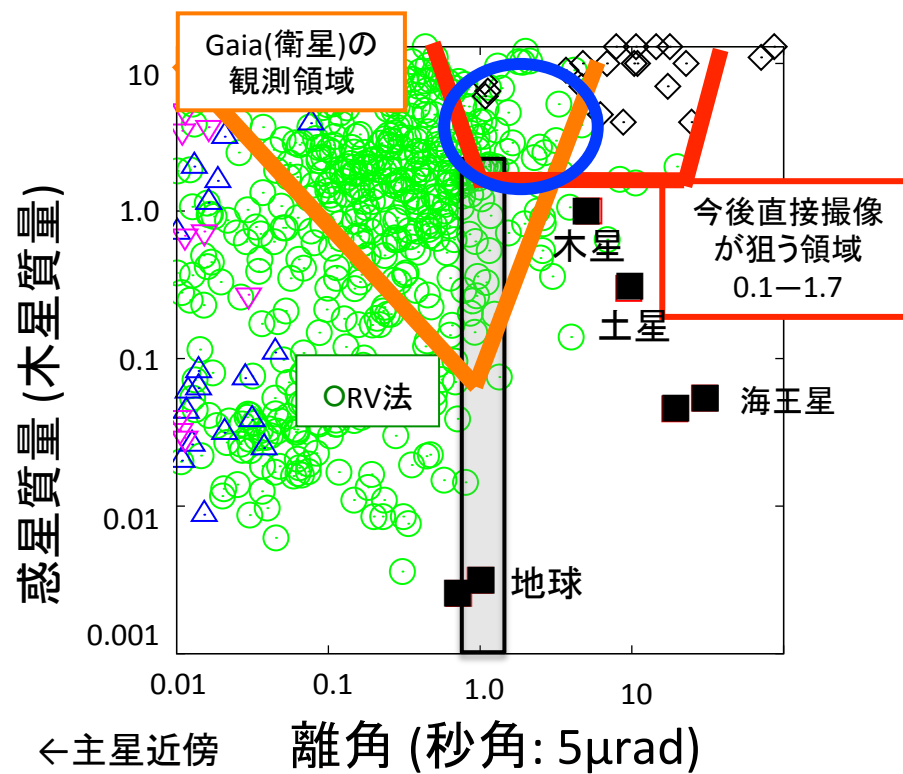
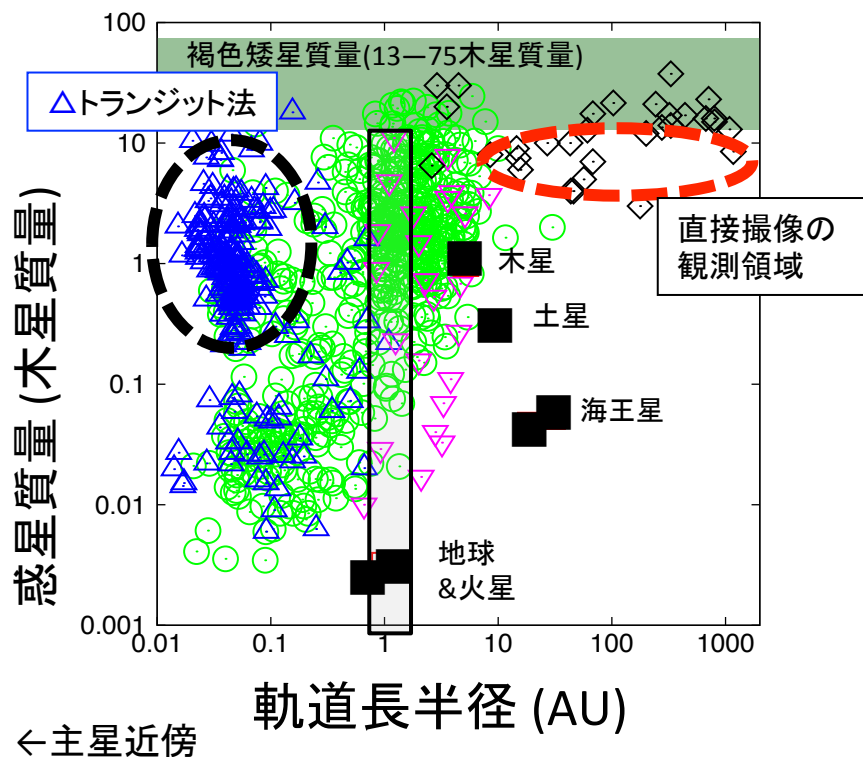
- ◆ 1995年の「惑星」発見以来3000個以上(候補)報告
 - ◆ 観測例の大半(~9割)はトランジット法
 - ◆ 直接撮像観測では10-20例程度(下グラフは含候補)

過去20年間の惑星発見数の推移(<http://exoplanet.eu/>, 2016/12/15現在)



導入: 系外惑星検出:: まとめ

- ◆ 検出数は増加。質量、惑星半径、軌道長半径などの分布、惑星存在率などは明らかに
- 主に間接法で、今後はほぼ観測衛星へ
- ◆ 直接撮像は既発見惑星のcharacterizationへ



直接撮像: 困難さ1

1. 惑星が暗い:

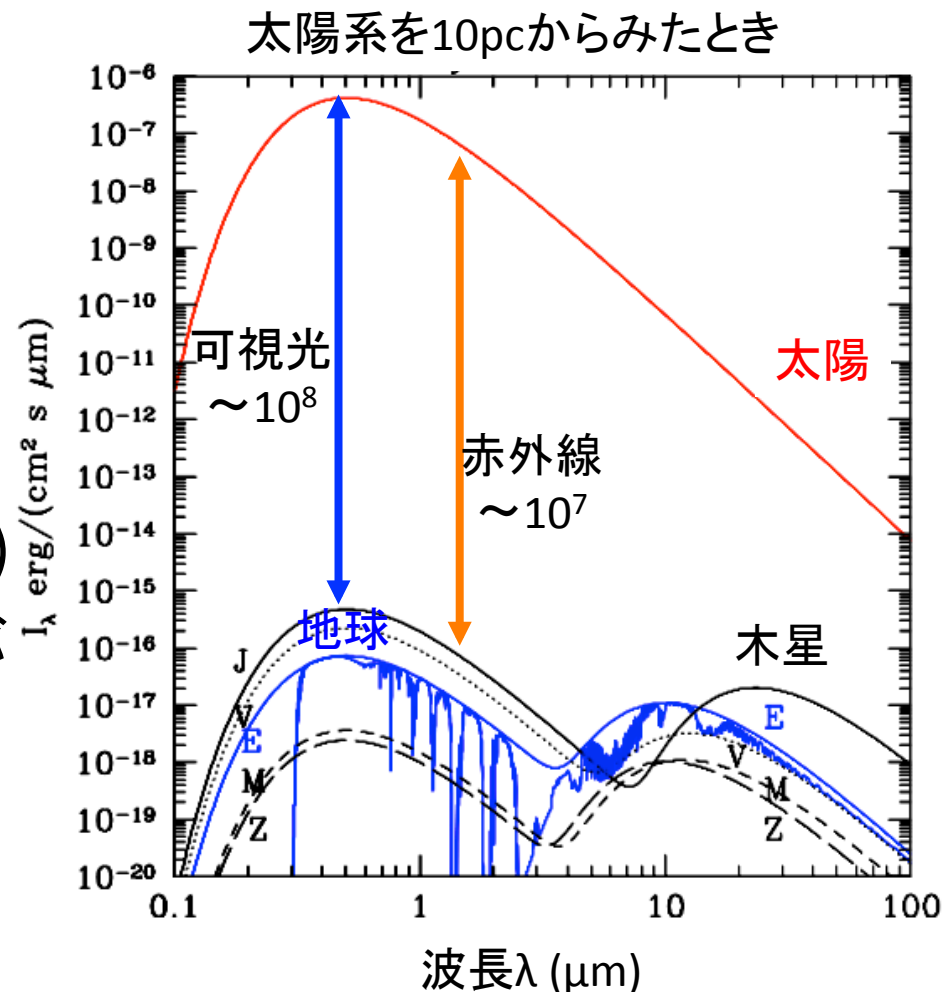
- 木星 $\sim 22\text{mag}$
- 地球 $\sim 27\text{mag}$

2. 恒星と惑星が近い:

- 太陽-木星 ~ 0.5 秒角 ($3\mu\text{rad}$)
- 太陽-地球 ~ 0.1 秒角 ($0.5\mu\text{rad}$)

3. 恒星と惑星の明るさの比が大きい:

- 木星/太陽 10^{-7}
- 地球/太陽 10^{-9}



1, 2 \rightarrow 大口径 (分解能は口径(D)に比例、感度は D^4 に比例)
 3 \rightarrow 高コントラスト装置/技術 (コロナグラフ等: 後述)
 が必要

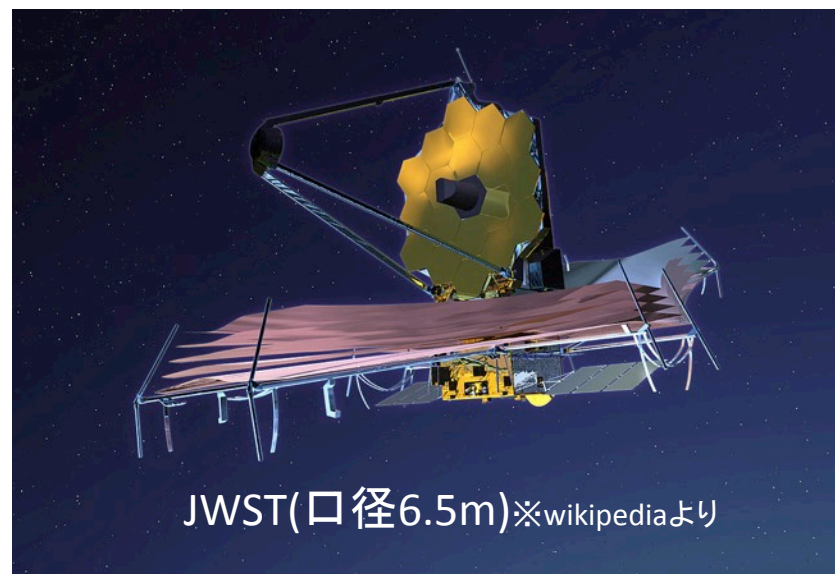
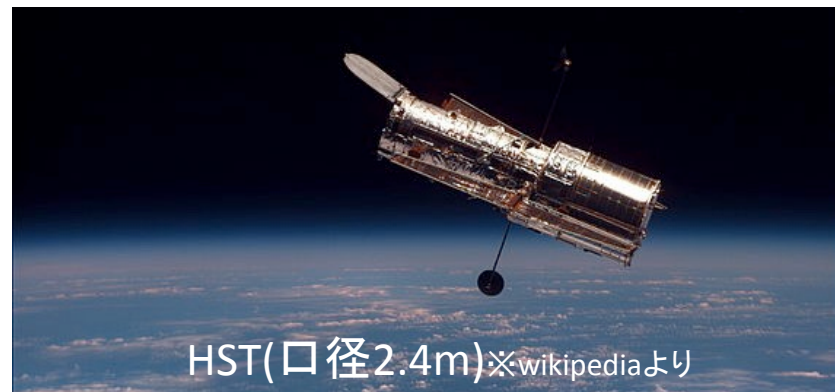
直接撮像: 宇宙望遠鏡

◆メリット:

- 大気がないので天候などによらない高精度な観測が可能(後述)

◆デメリット:

- 高コスト(>>100億)
- 長開発期間(>10年)
- 大口径化が困難
- (専用望遠鏡でなければ)観測時間が短い/少ない
- 最先端技術の適応も困難

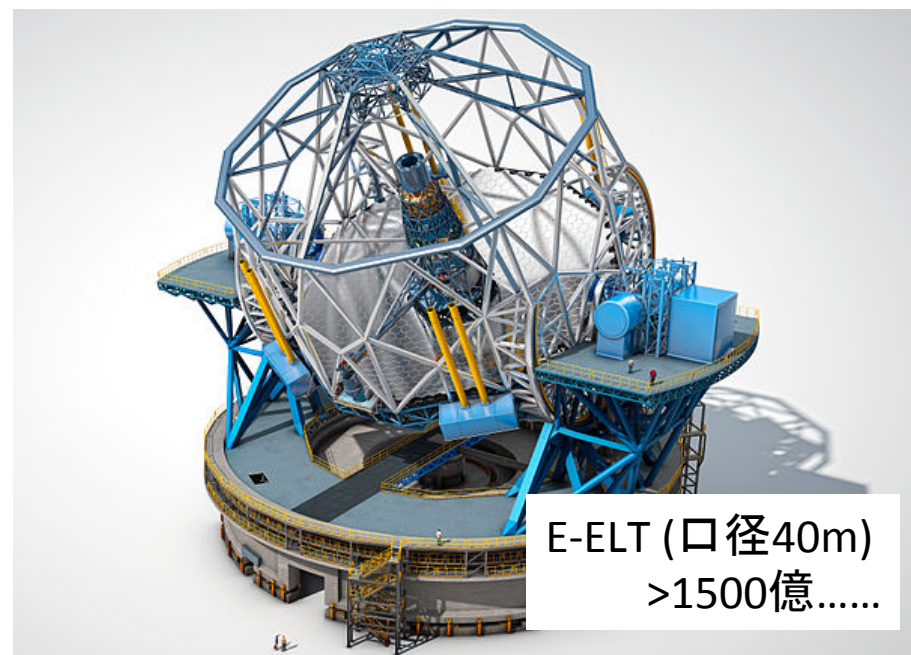
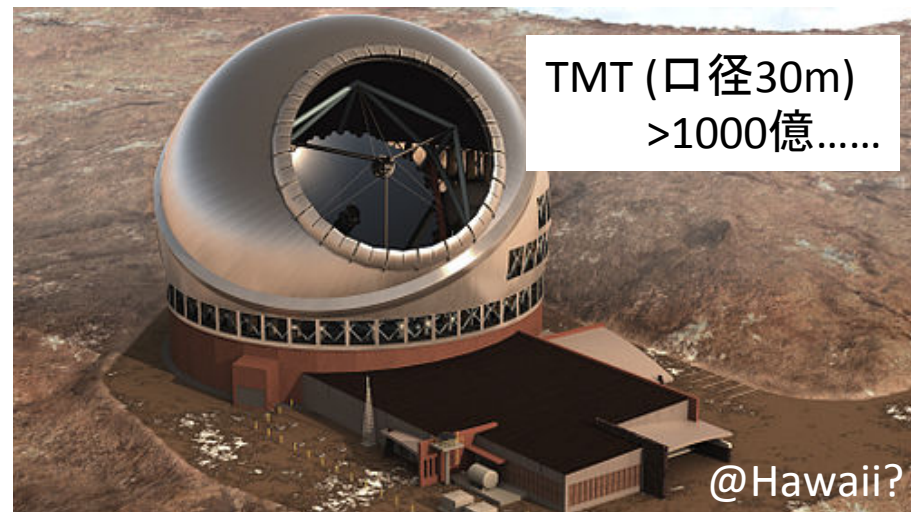


専用望遠鏡開発はほぼ動いていない

直接撮像: 地上望遠鏡1

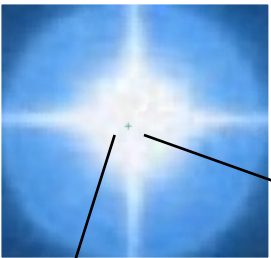
- ◆ メリットデメリットは宇宙望遠鏡と反転
- ◆ but コスト $\propto D^{2.45}$
 - 8m \rightarrow 30m で25倍に
- ◆ 各種問題で遅延.....
- ◆ 惑星撮像専用運用も困難...

- ◆ 第2の地球観測には30m級以上が必要だが...



直接撮像: 地上望遠鏡2

1'(60'')

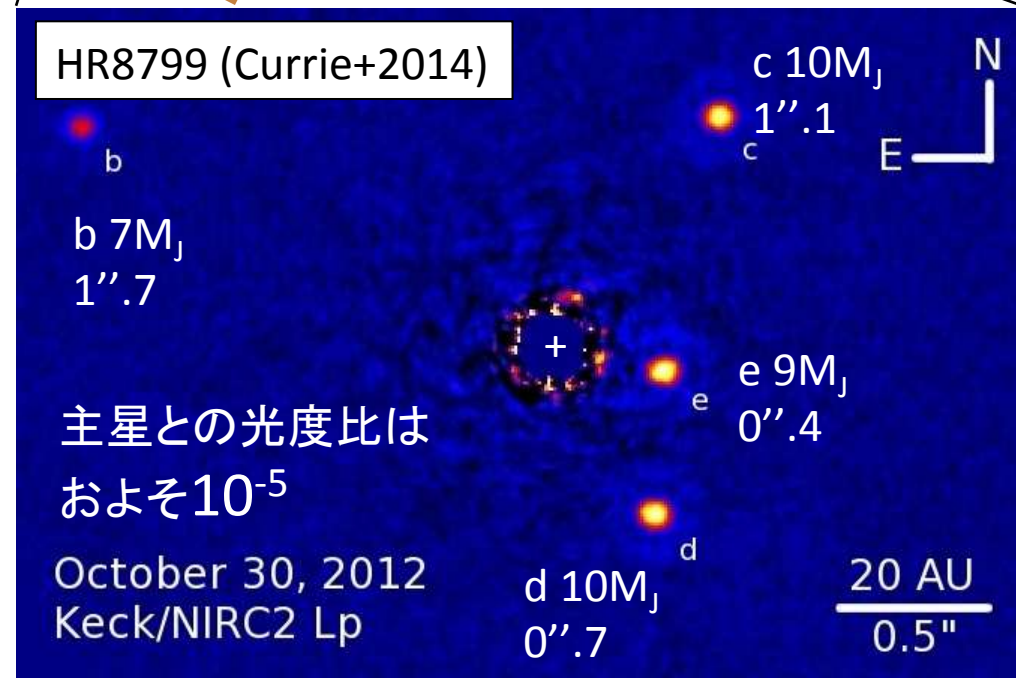


高コントラスト装置無し



◆4-8m望遠鏡でもやれることはまだまだある。

- 木星型惑星の検出、温度や大気組成/天候の観測など
- 要素技術開発
- 大口径がかえって不利になることも(後述)



高コントラスト装置あり(口径10m)

wikipediaより



Gemini
(口径8.1m)

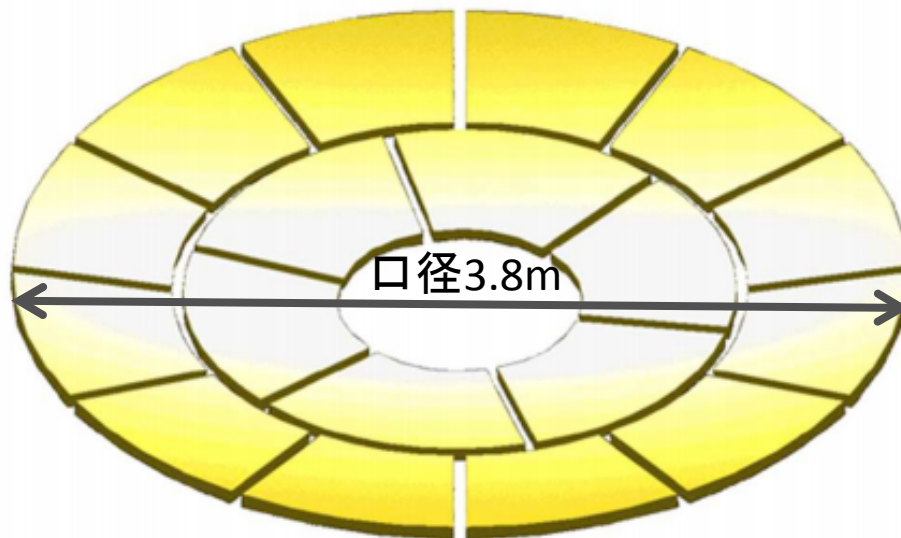
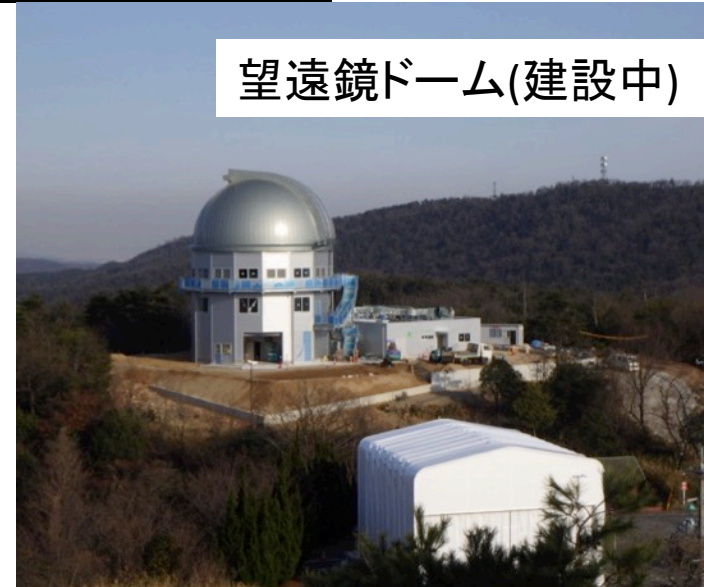
VLT @チリ
(口径8.2m)

直接撮像: 地上望遠鏡3

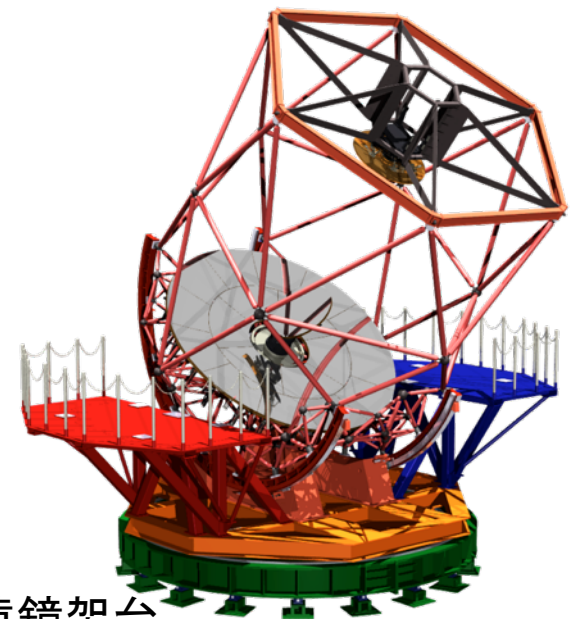
◆ 京大岡山3.8m望遠鏡

- 岡山天体物理観測所(標高370m)
- 軽量架台(~10t)
- 口径**3.8m**/18枚分割主鏡
 - ◆ 国内最大/国内初の分割鏡
- 年間100—300晩の観測

望遠鏡ドーム(建設中)



主鏡形状 [内周6枚, 外周12枚]



望遠鏡架台

直接撮像: 困難さ2



◆地球大気の影響:

– 星の瞬き = 陽炎 = 星像/波面乱れ

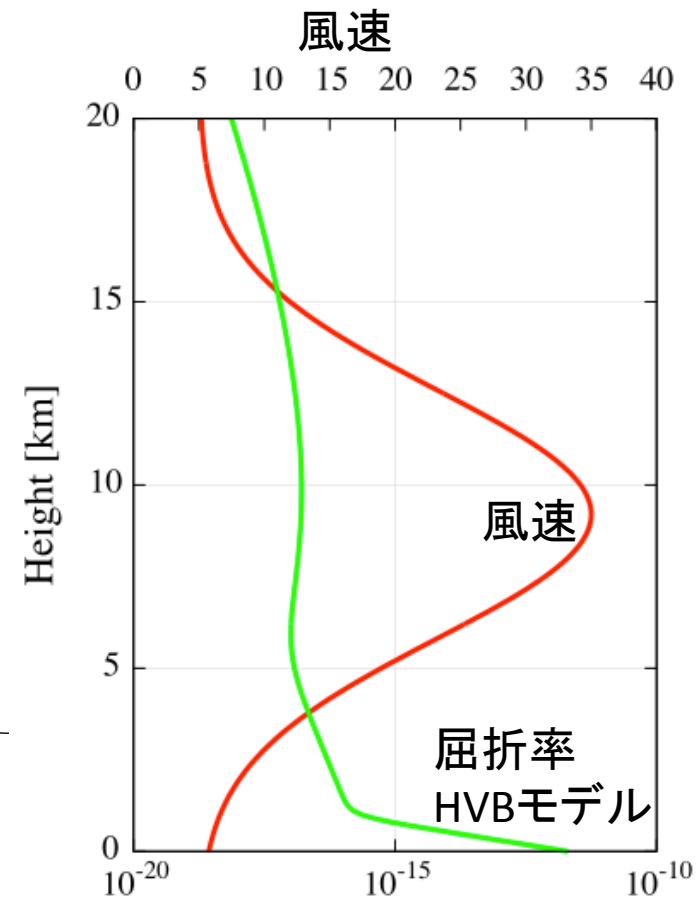
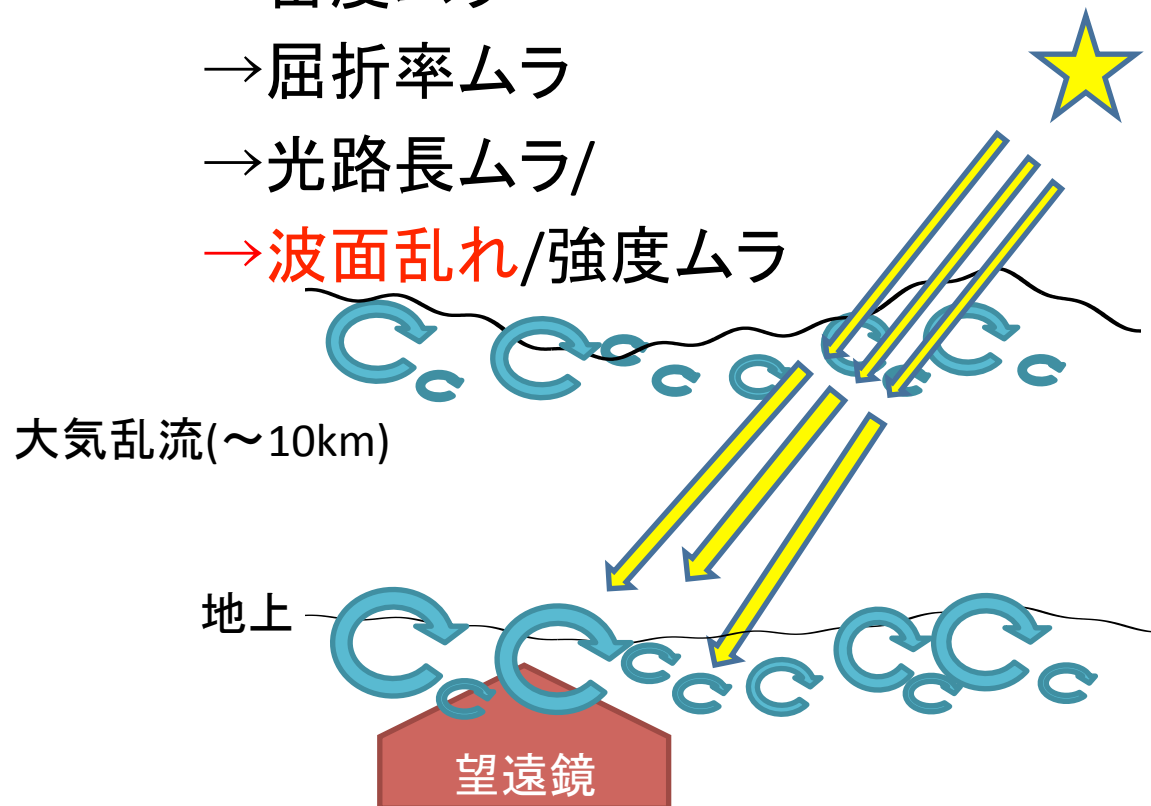
→ 温度ムラ(地表やオゾン層)

→ 密度ムラ

→ 屈折率ムラ

→ 光路長ムラ/

→ **波面乱れ**/強度ムラ

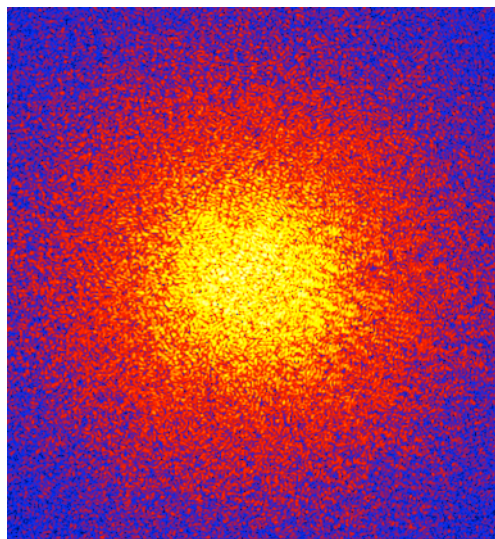
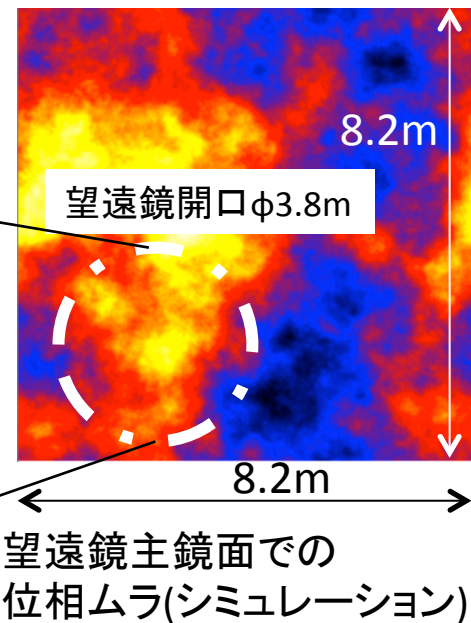
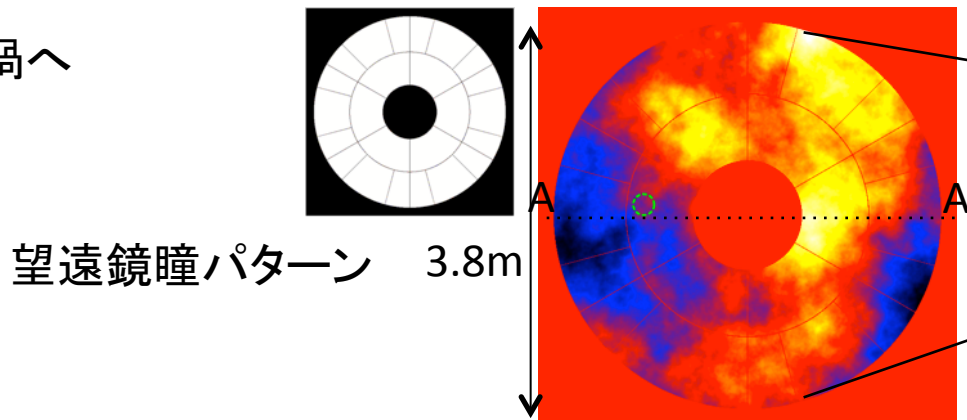
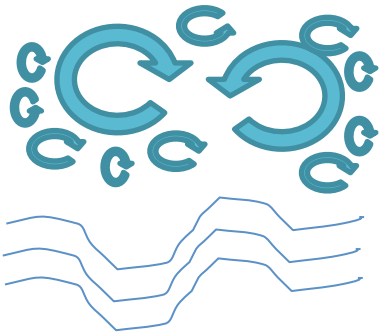


弱 ← 屈折率の構造定数 → 強

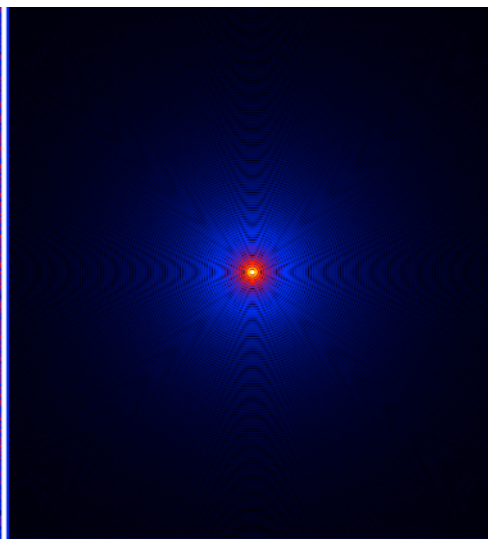
直接撮像: 大気による波面乱れ

- ◆ 乱流は大きな塊から小さな塊へエネルギーが移っていく→Kolmogorovモデルetc.

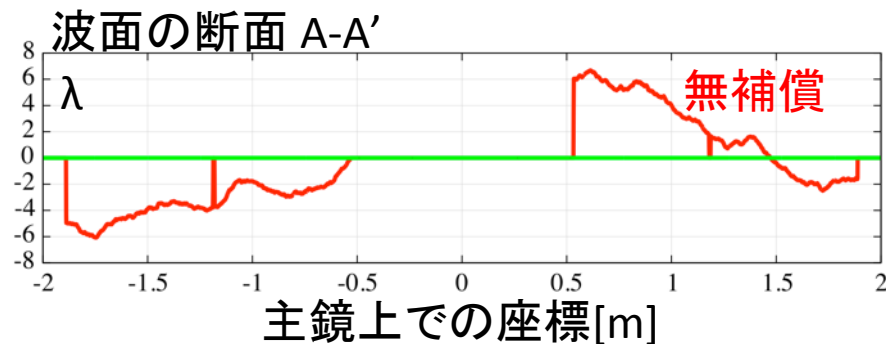
大きな渦から小さな渦へ



大気乱流による像



回折限界像

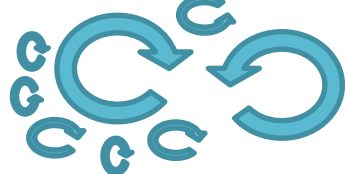


大気乱流像のピーク値は
回折限界の～1.8%

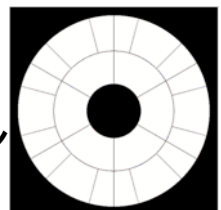
直接撮像: 大気による波面乱れ

◆ 乱流は大きな塊から小さな塊へエネルギーが移っていく → Kolmogorovモデル etc.

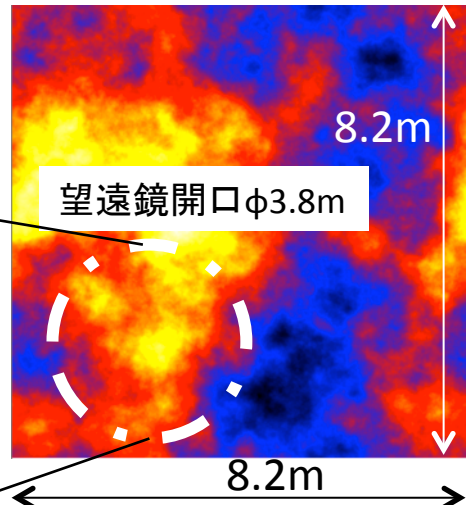
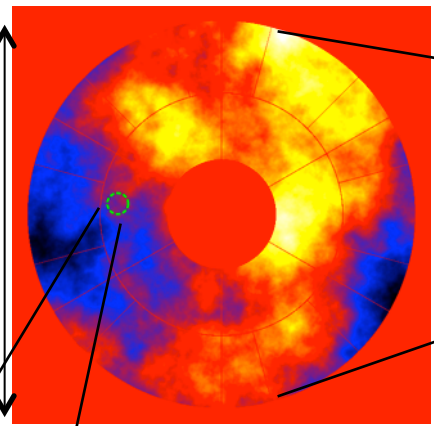
大きな渦から小さな渦へ



望遠鏡瞳パターン



3.8m



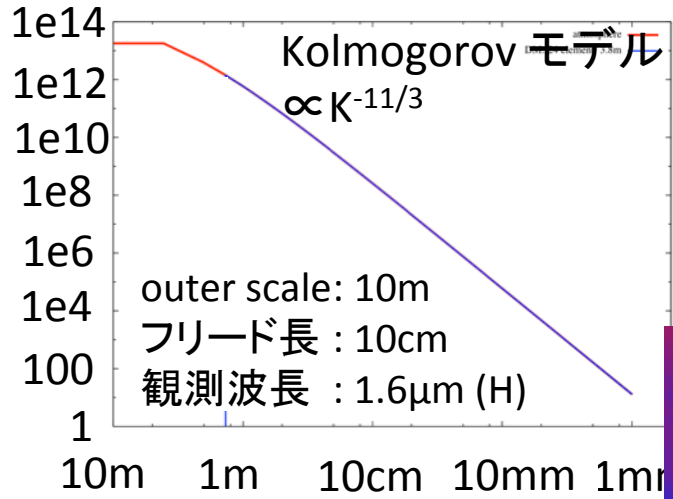
望遠鏡開口φ3.8m

8.2m

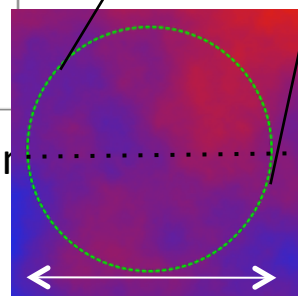
8.2m

望遠鏡主鏡面での位相ムラ(シミュレーション)

大気乱流のパワースペクトル

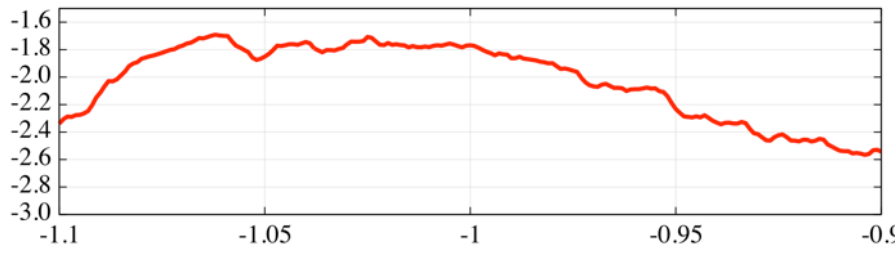
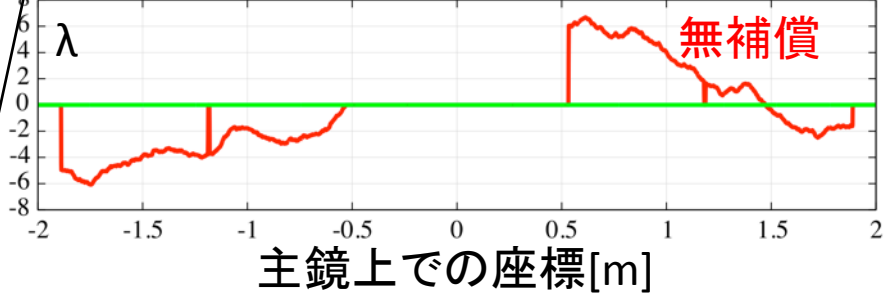


小 ← 空間周波数 k → 大



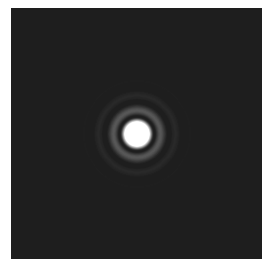
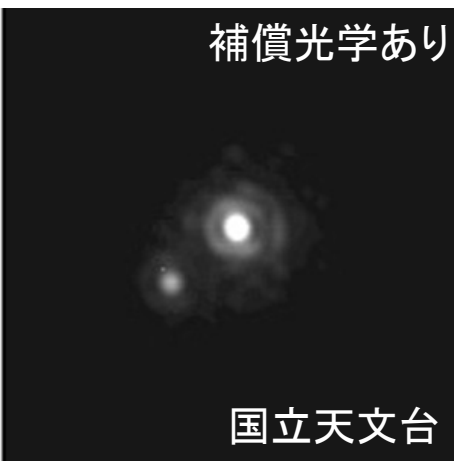
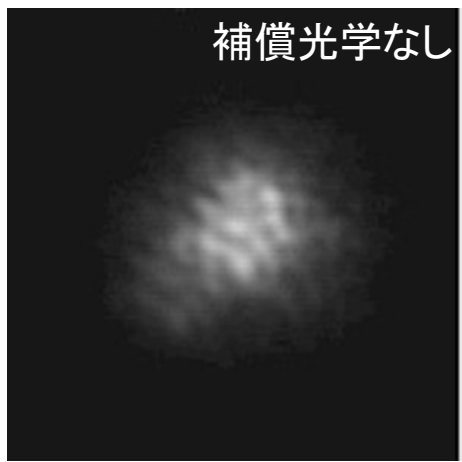
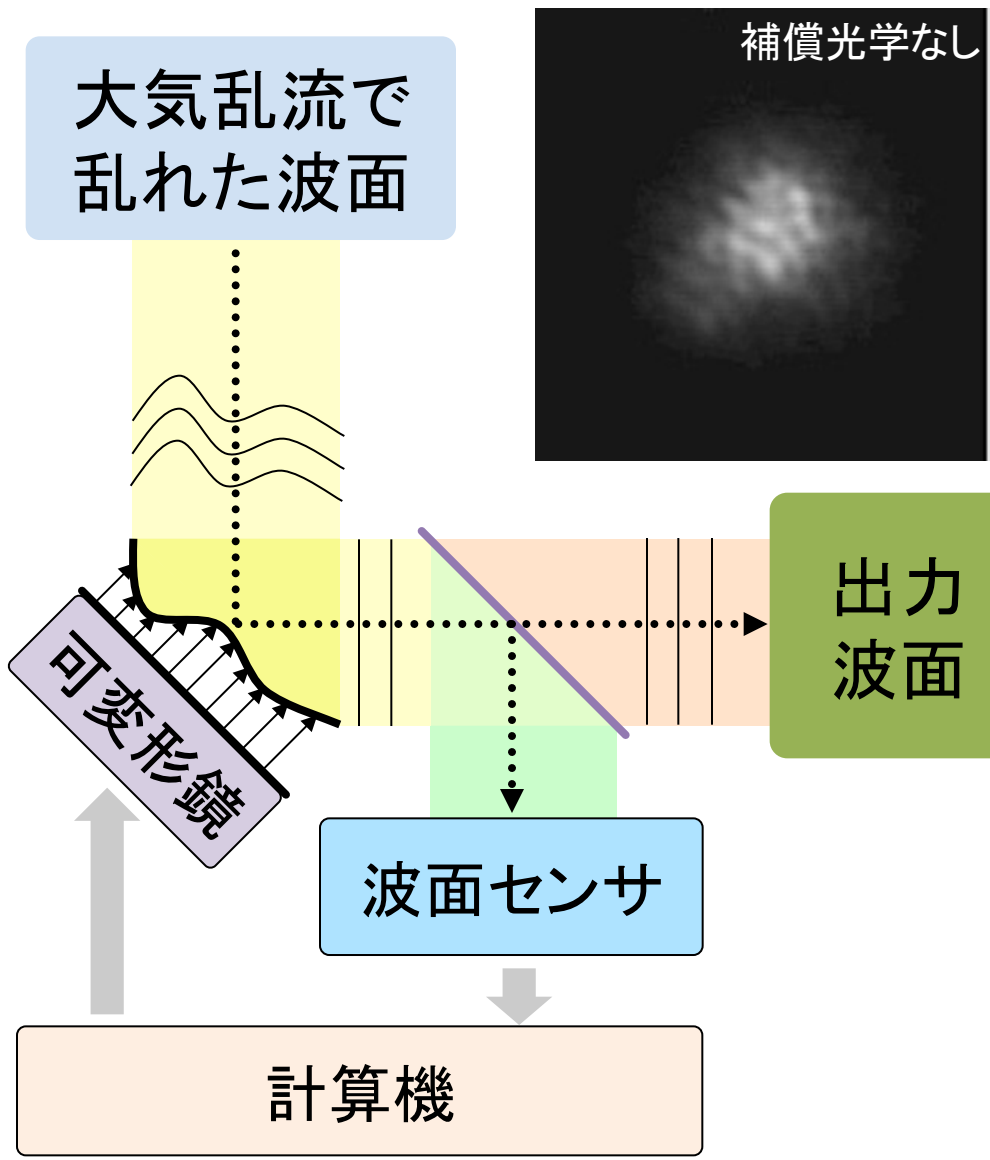
20cm

波面の断面



おおよそ平面と見なせるスケールがフリード長

直接撮像: 補償光学(Adaptive Optics)



補償光学で波面を補正

◆補償光学の3要素

1. 波面センサ(WFS)
 - ◆リアルタイム計測
2. 可変形鏡(DM)
 - ◆リアルタイム補正
3. 計算機

直接撮像: SEICAの開発

SEICA [Second-generation Exoplanet Imager
with Coronagraphic Ao]

- ◆ 京大岡山3.8m用惑星撮像装置
- ◆ 木星型太陽系外惑星の直接撮像

→ 0".2—0".3で $10^{-5} \sim -6$

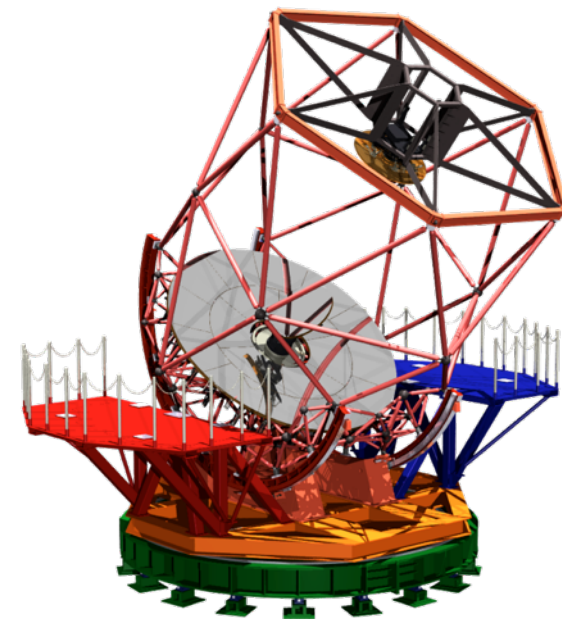
- ◆ 先進技術のテストベッド

- ◆ FPGA制御:

- ◆ PDI WFS: 新方式波面センサ

- ◆ SPLINE: 新方式コロナグラフ

- ◆ ポストプロセス

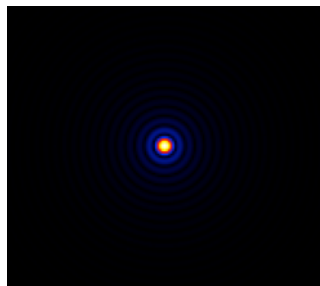


→ 高コントラスト装置

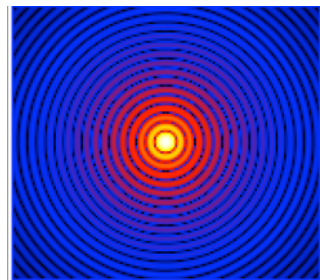
高コントラスト装置: コロナグラフ1

◆ 光軸上の光[主星光]を低減:

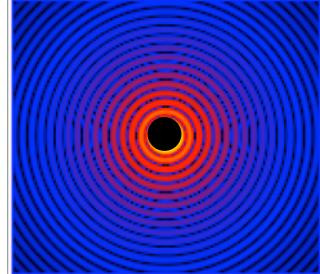
- 主星像のみのマスクでは不十分
- **ハローの抑圧が主目的**[Lyot stop]



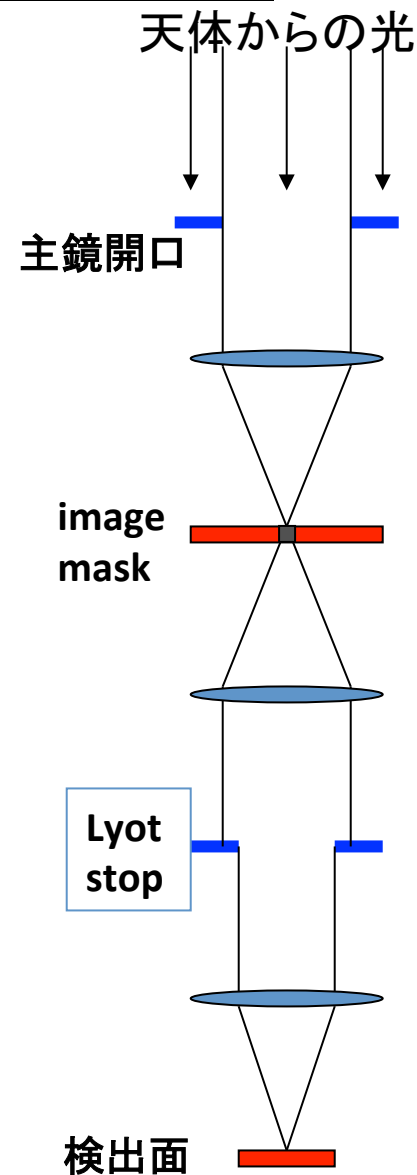
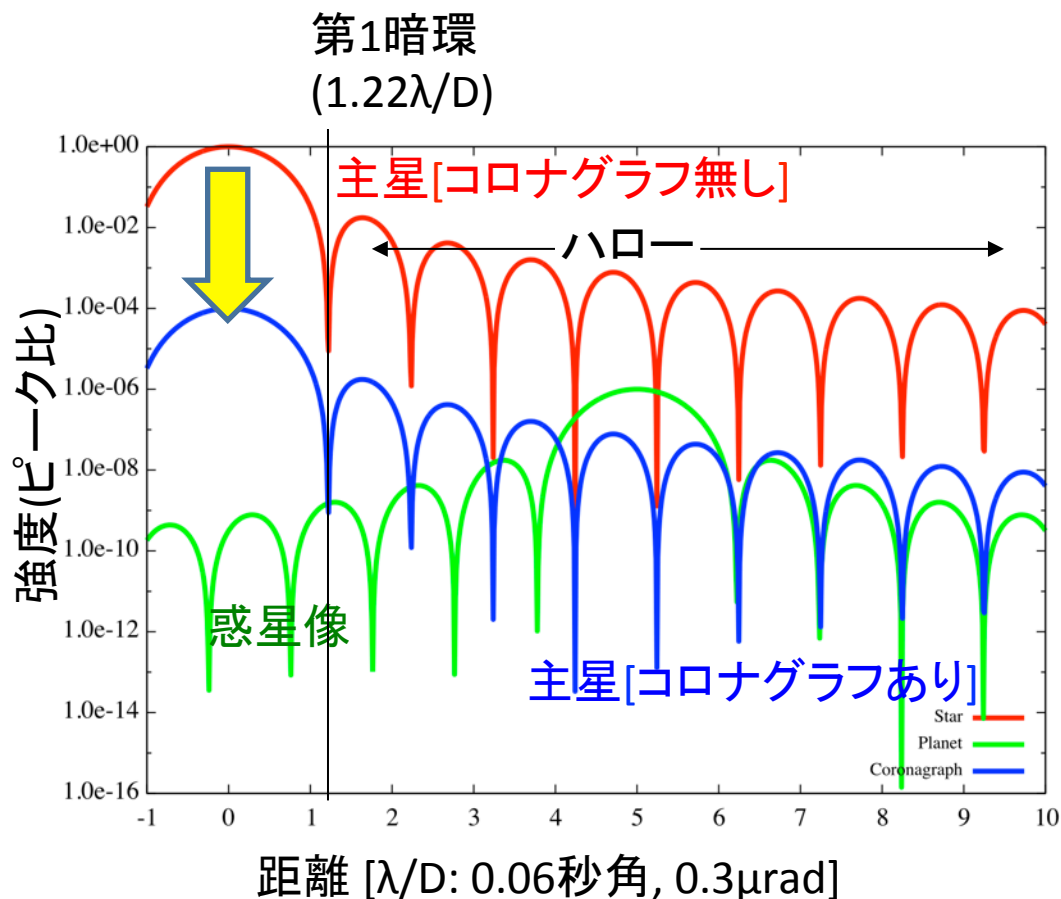
回折限界(線形表示)



回折限界(対数表示)



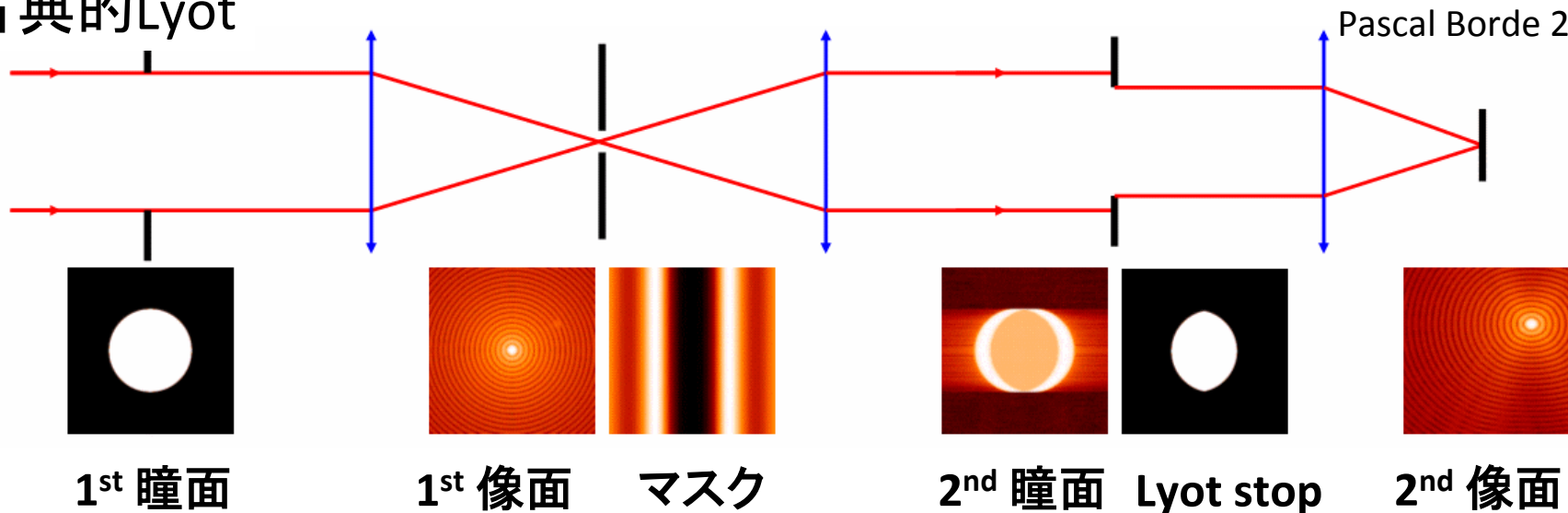
主星像のみマスク
(対数表示)



古典的コロナグラフ

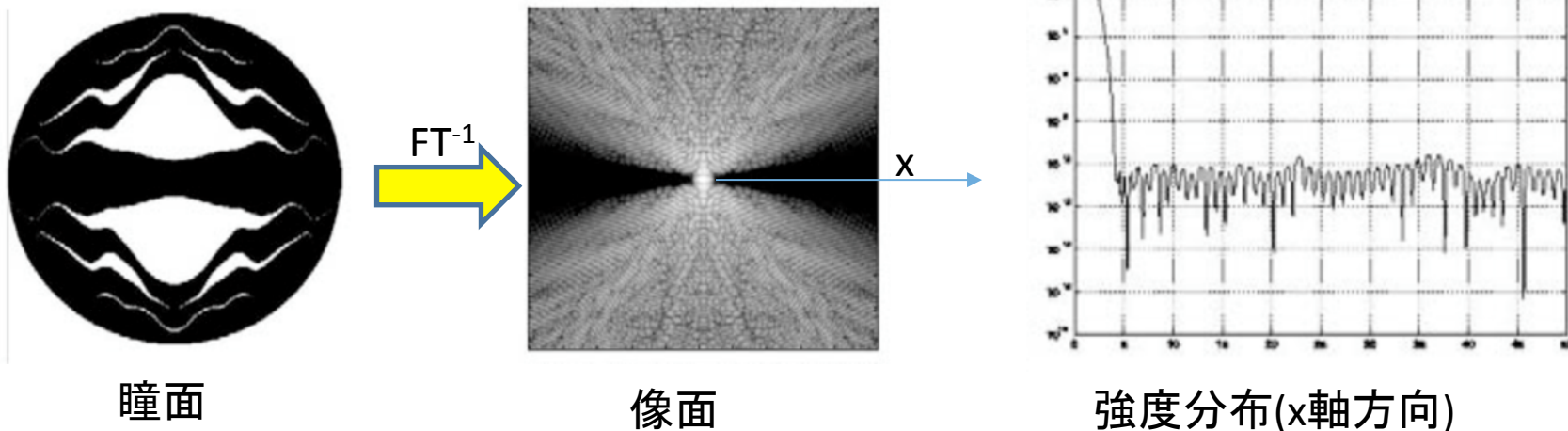
高コントラスト装置: コロナグラフ2

◆ 古典的Lyot



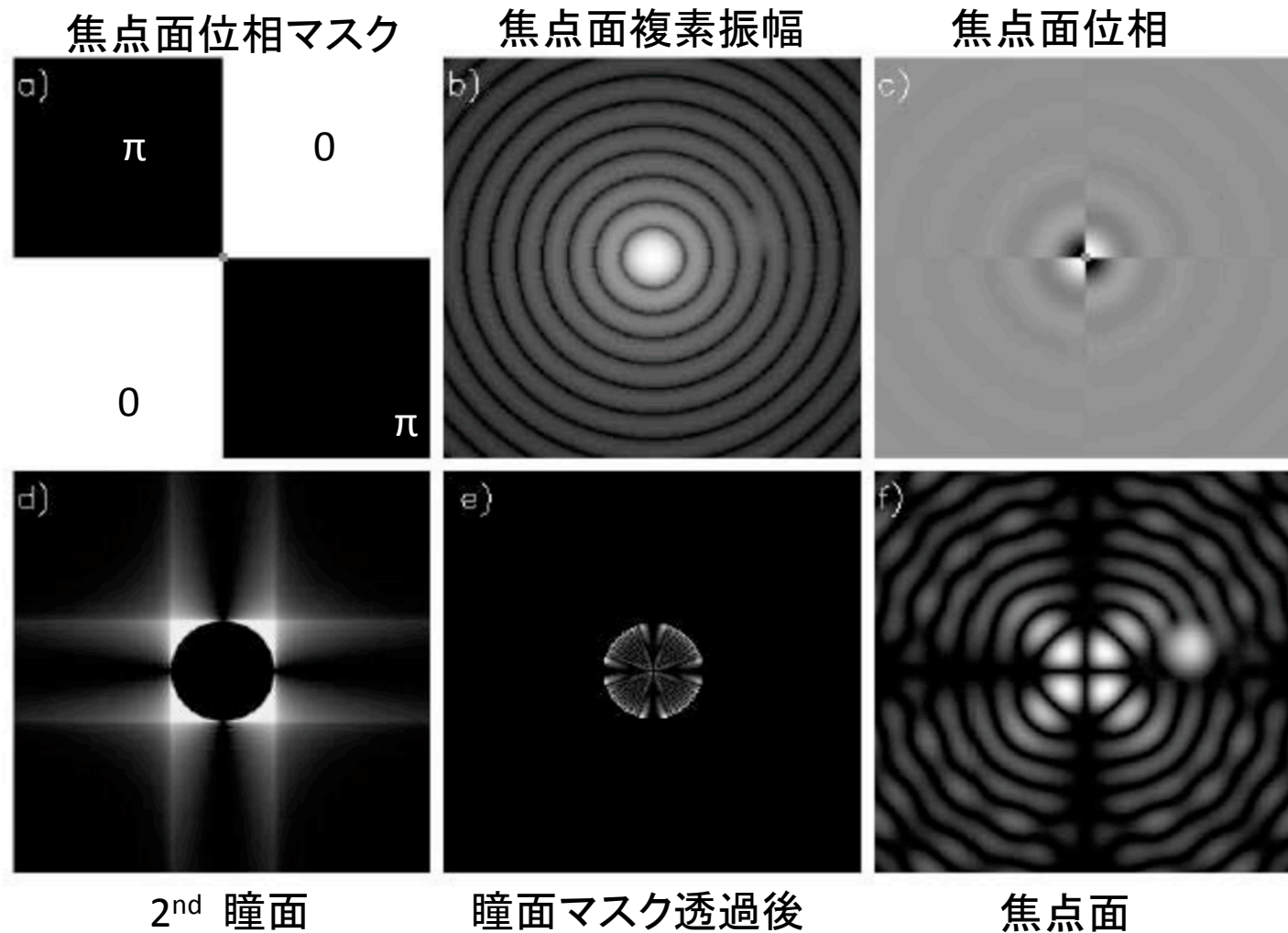
Lyot 焦点面で強度変調させることで恒星光を低減

◆ pupil apodization: 瞳面に振幅マスク



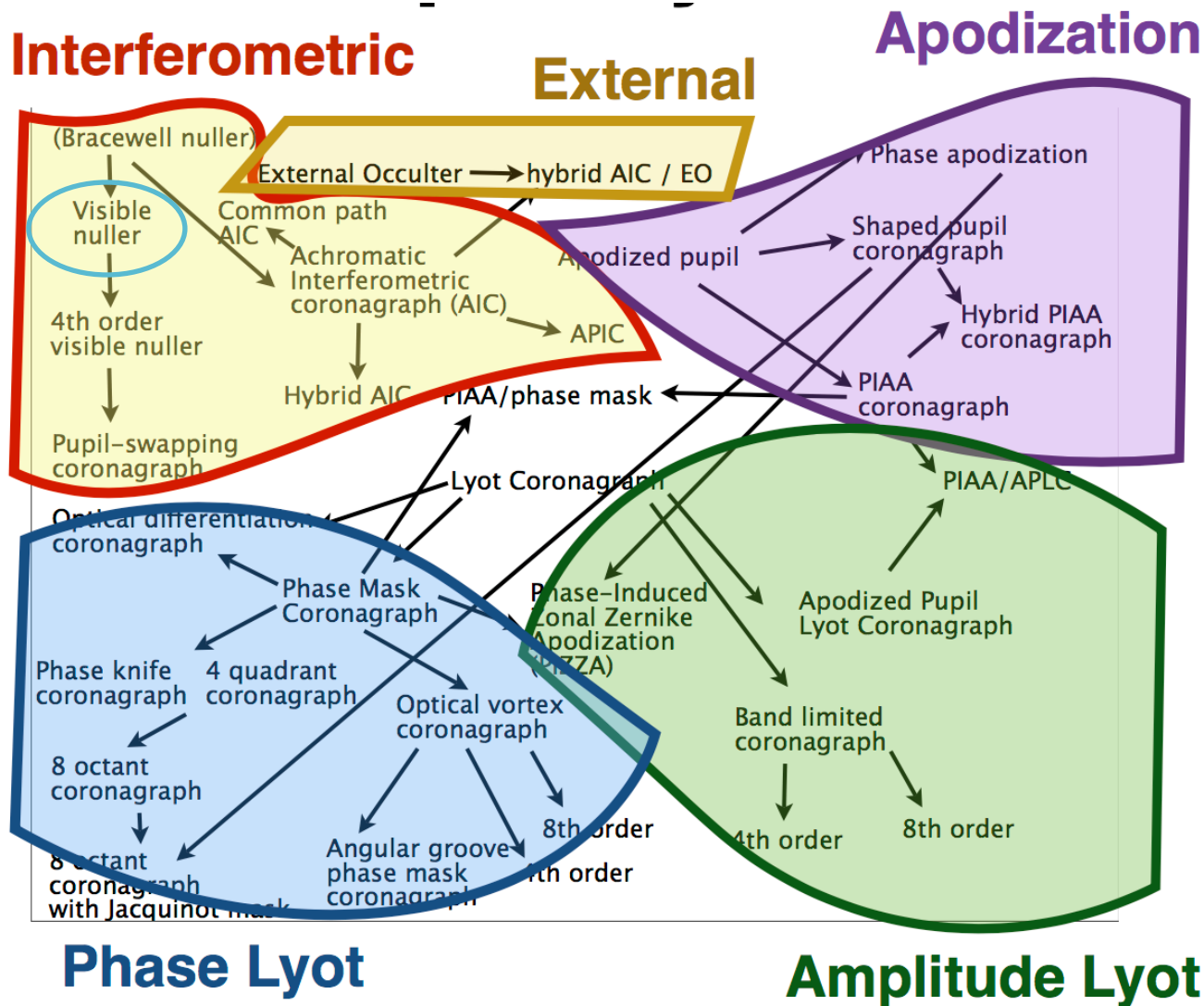
高コントラスト装置: コロナグラフ3

◆ 4 Quadrant Phase Mask: 焦点面に位相マスク



高コントラスト装置: コロナグラフ4

◆瞳面や焦点面で、位相や振幅に変調を与える



より内側
 より広い範囲
 より深く
 実現性の高さ
 などで、
 たくさんの方式
 がある。

Phase Lyot

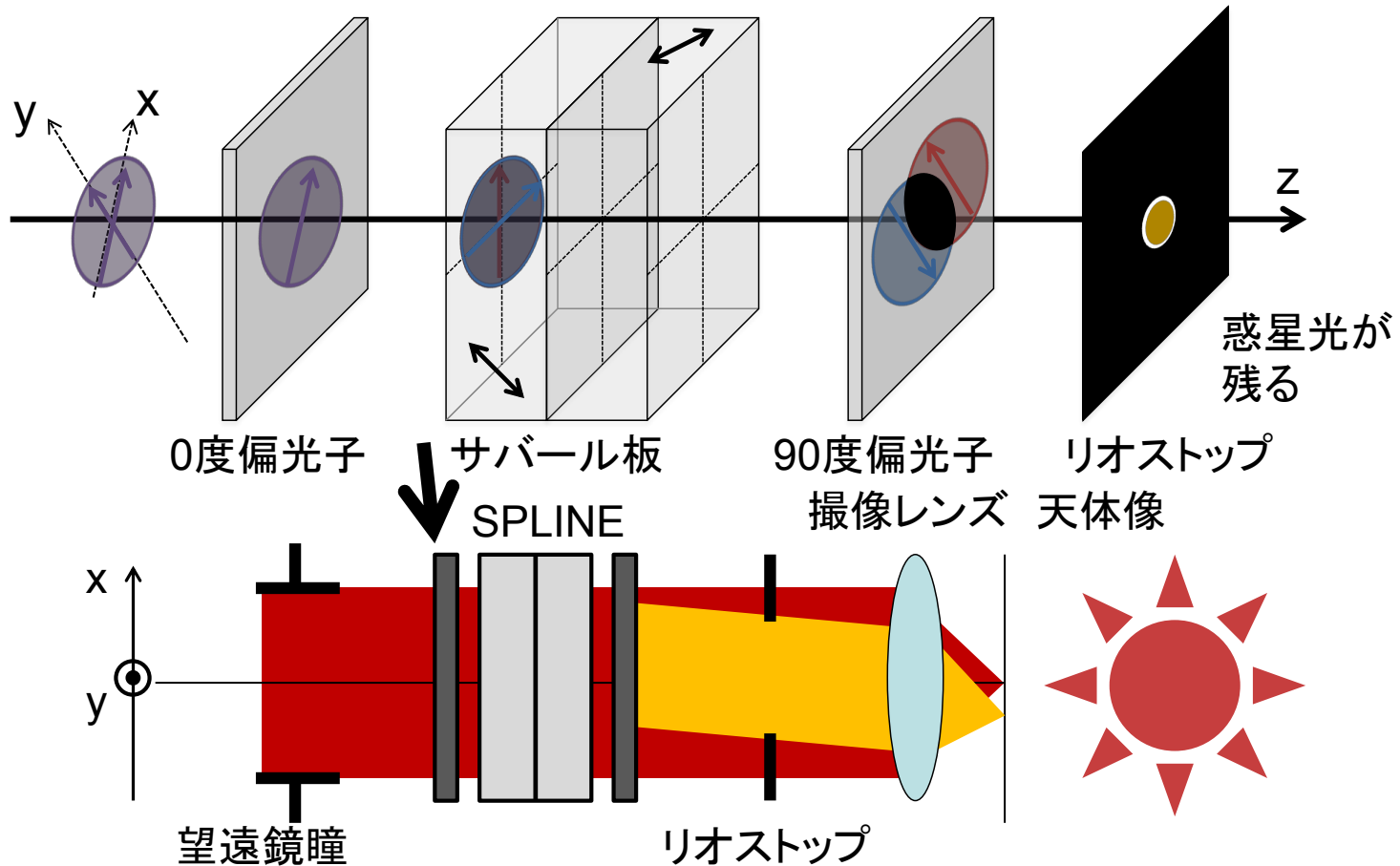
Amplitude Lyot

高コントラスト装置: SPLINE1

◆SEICA用コロナグラフ

北海道大学黒田君天文学会スライドより

Savart-Plate Lateral-shearing Interferometric Nuller for Exoplanets



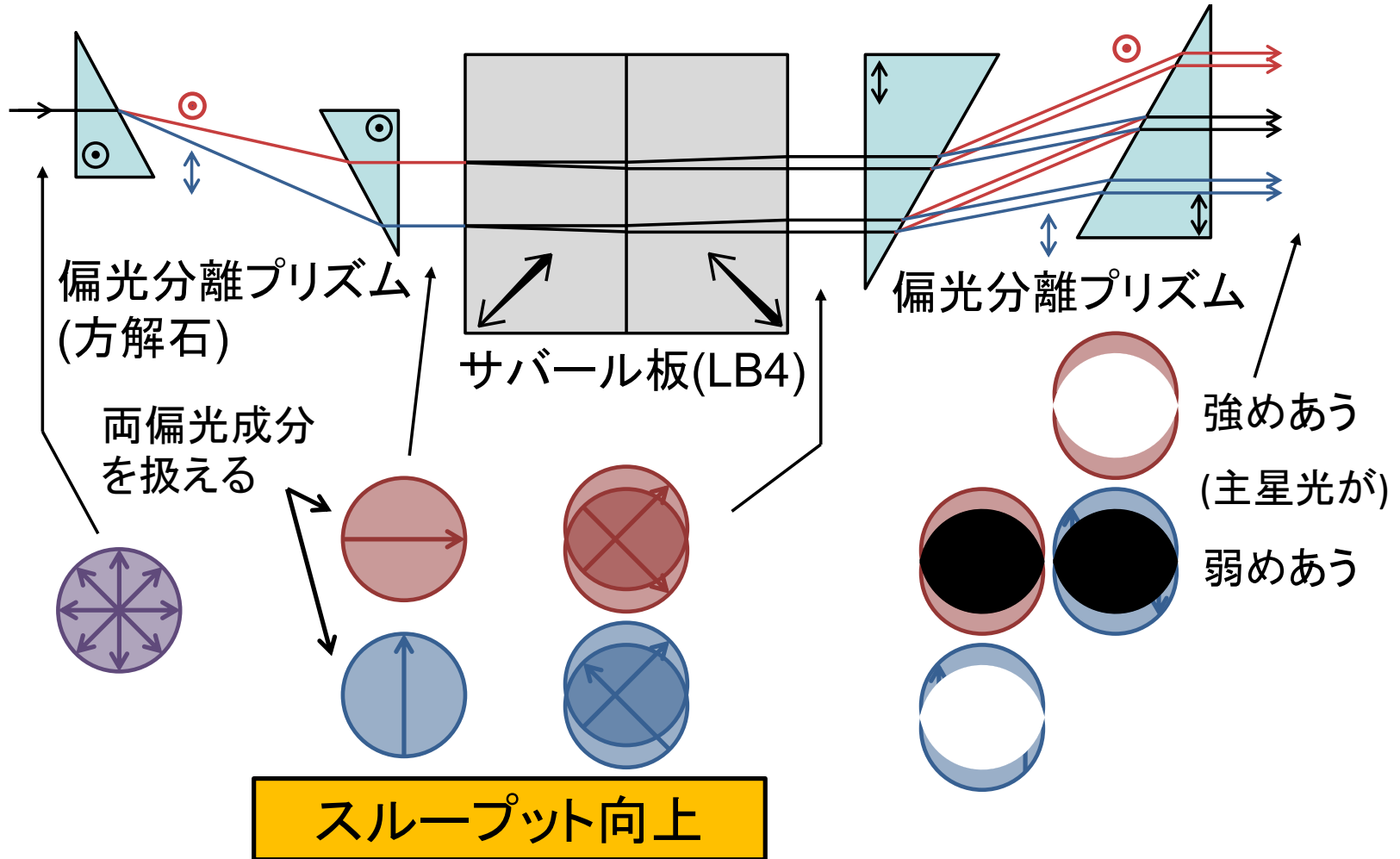
光軸上の光のみ打ち消す(正確には光軸&位相差が整数倍になる光路が打ち消される)

※サバール板は方解石を二枚貼り合わせて光路差無く偏光成分で異なるshearを起こさせる

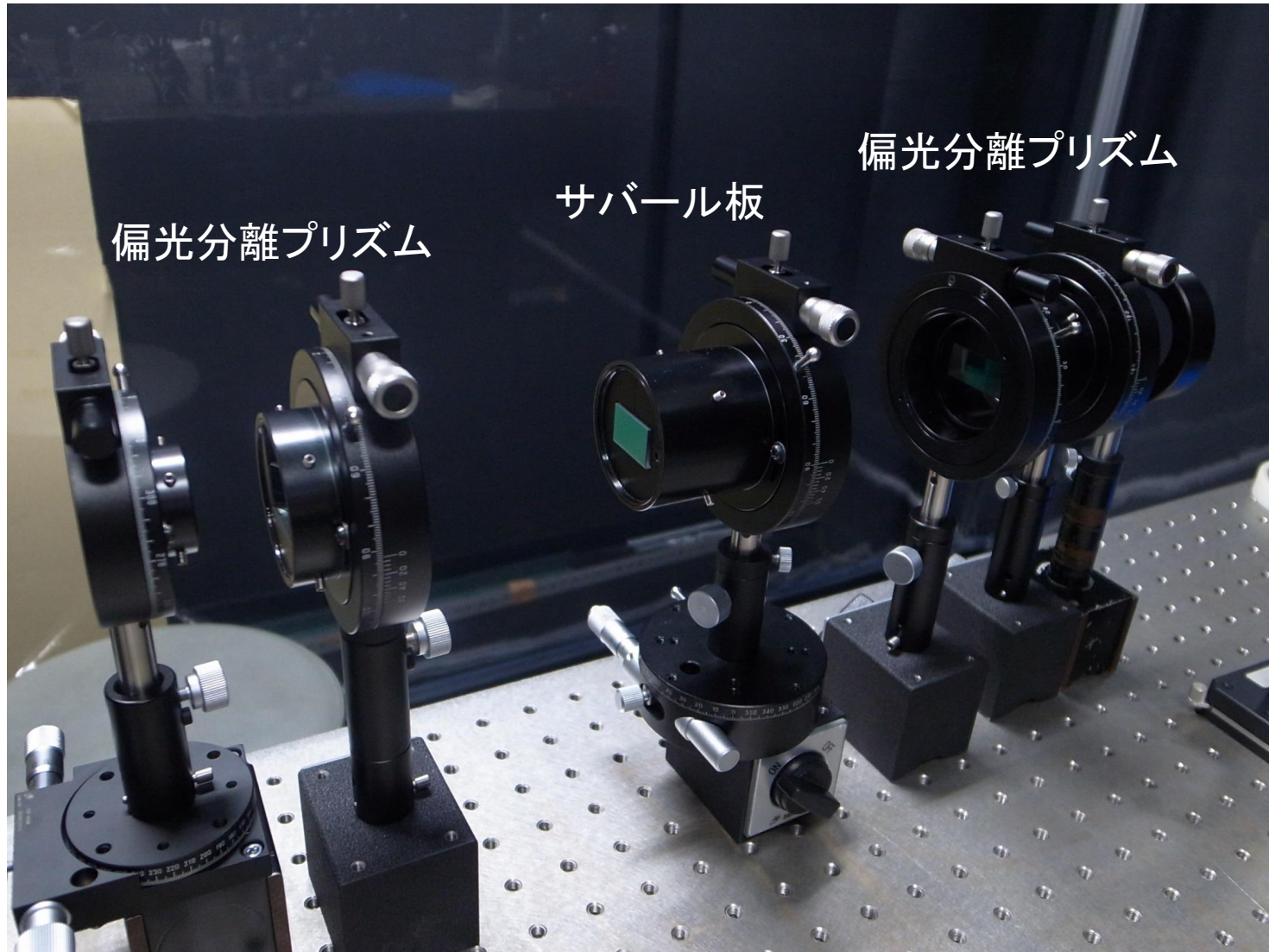
高コントラスト装置: SPLINE2

◆SEICA用に、より高効率化

北海道大学黒田君学会スライドより



高コントラスト装置: SPLINE3



実証試験は完了。搭載実機のための治具や構造体の設計/試験中

補償光学: AOパラメータ1

◆ 目標 10^5-6 のコントラスト

◆ コロナグラフ: SPLINE:: 瞳面干渉型コロナグラフ

◆ ポストプロセス: スペックルナリング

◆ コロナグラフ + スペックルナリング

- 平面波で性能を発揮 → 高精度波面補正

- 光軸上の強度を抑圧 → 高精度星像安定

◆ コロナグラフからの要求

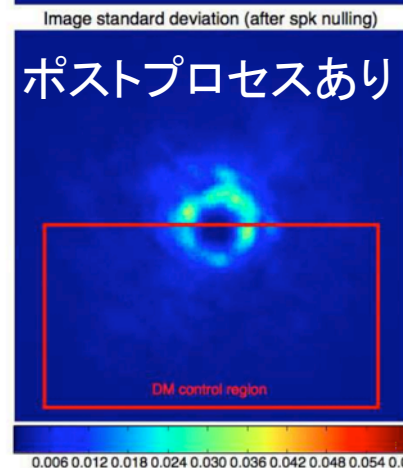
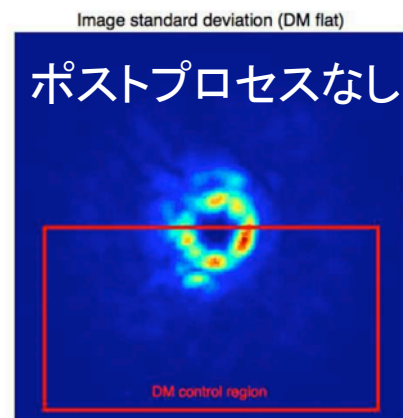
◆ 星像安定性: $< 10\text{mas} \doteq 48\text{nrad}$

◆ Strehl比: > 0.9 (回折限界は > 0.8)

◆ → 波面残差 $\lambda/20$

~ 60nm (rms; @Jバンド [$1.2\mu\text{m}$])

スペックルナリング



補償光学: AOパラメータ2

大気乱流で
乱れた波面

仕様を決定する

1. WFS測定点数
2. DM制御点数
3. 制御速度

Deformable
Mirror (DM)



可変形鏡

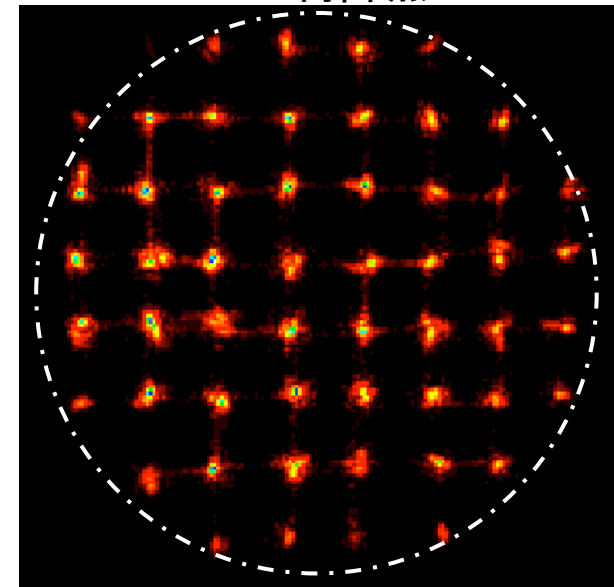
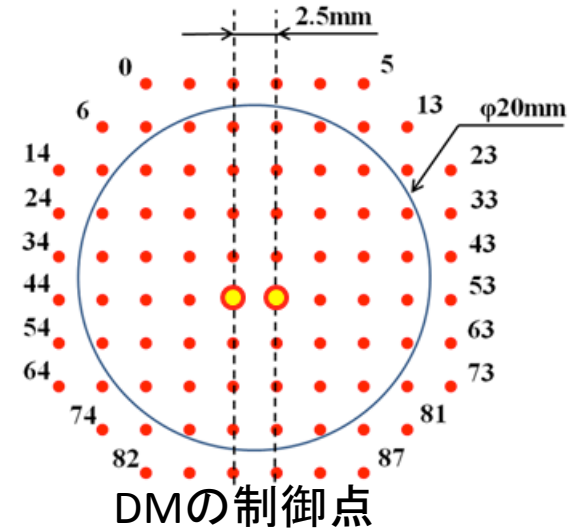
出力
波面

波面センサ

計算機



Wavefront sensor



SH-WFSの測定点



補償光学: AOパラメータ3

◆制御点数:

– 岡山のフリードパラメータ

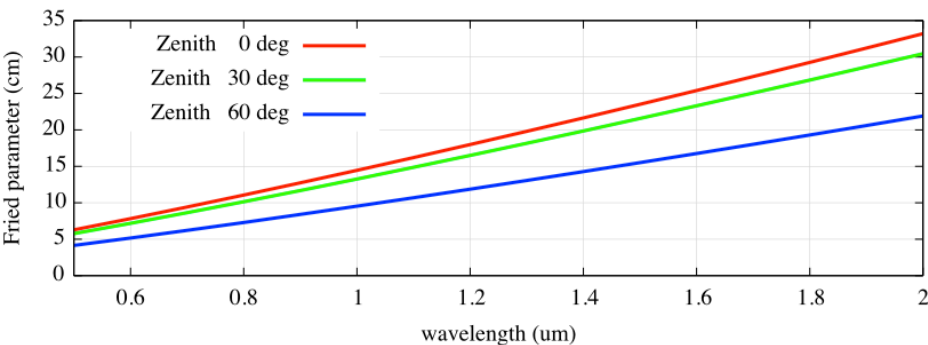
$r_0 \cong 10\text{cm}$ (@800nm)

$\cong 15\text{cm}$ (@1.2 μm : Jバンド)

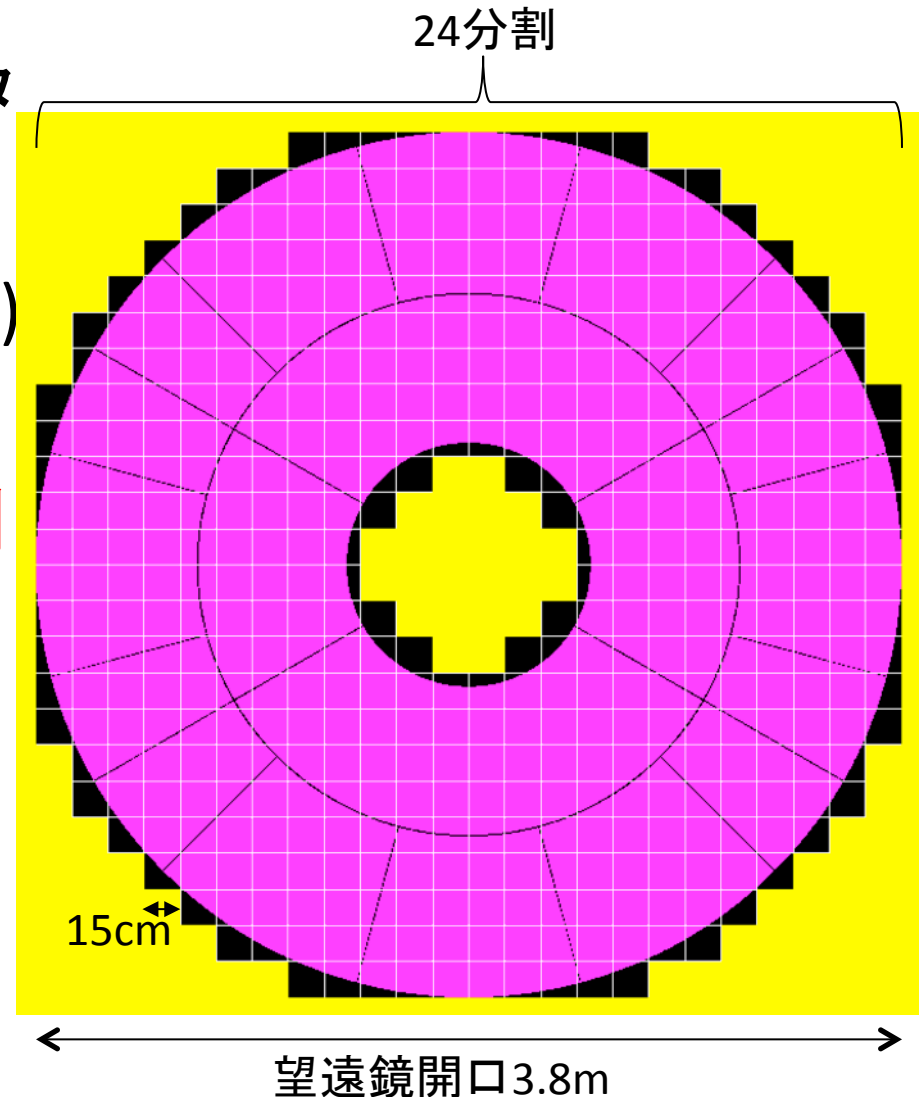
– $3.8\text{m}/15\text{cm} = 25$ 分割

→ DM分割数: 1次元 **24分割**

計 **492素子**



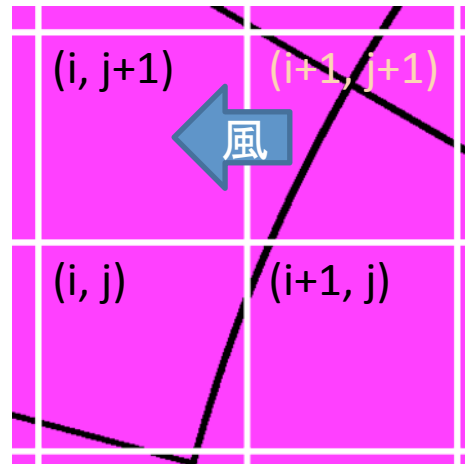
$$r_0 \propto \lambda^{6/5}, r_0 \propto (\cos \gamma)^{3/5}$$



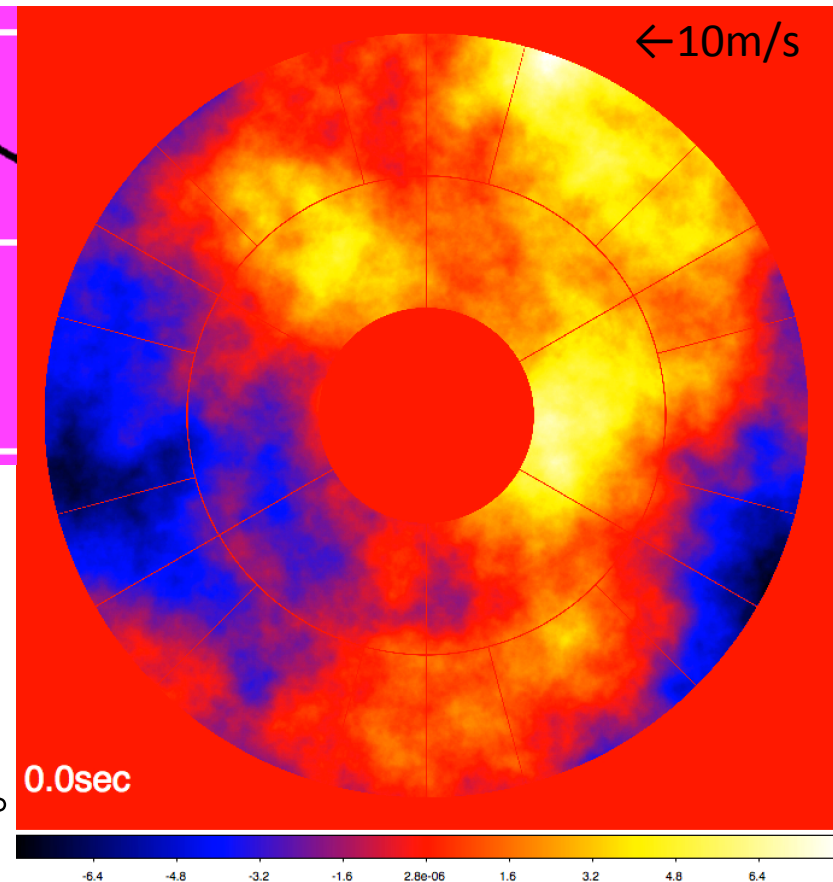
補償光学: AOパラメータ4

◆制御速度:

- ◆位相ムラは「凍結」されている
- ◆24素子で風速10m/sのとき0.016秒で隣の素子へ
- ◆1/10素子分の移動に抑圧
→1.6msecの制御
- ◆サンプリング速度
1.6/10 msec=6kHz以上で制御ループ



分割部分の移動



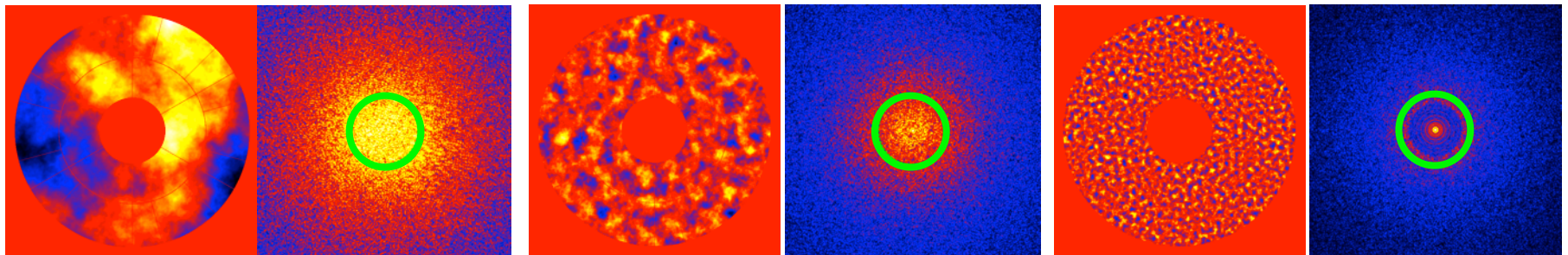
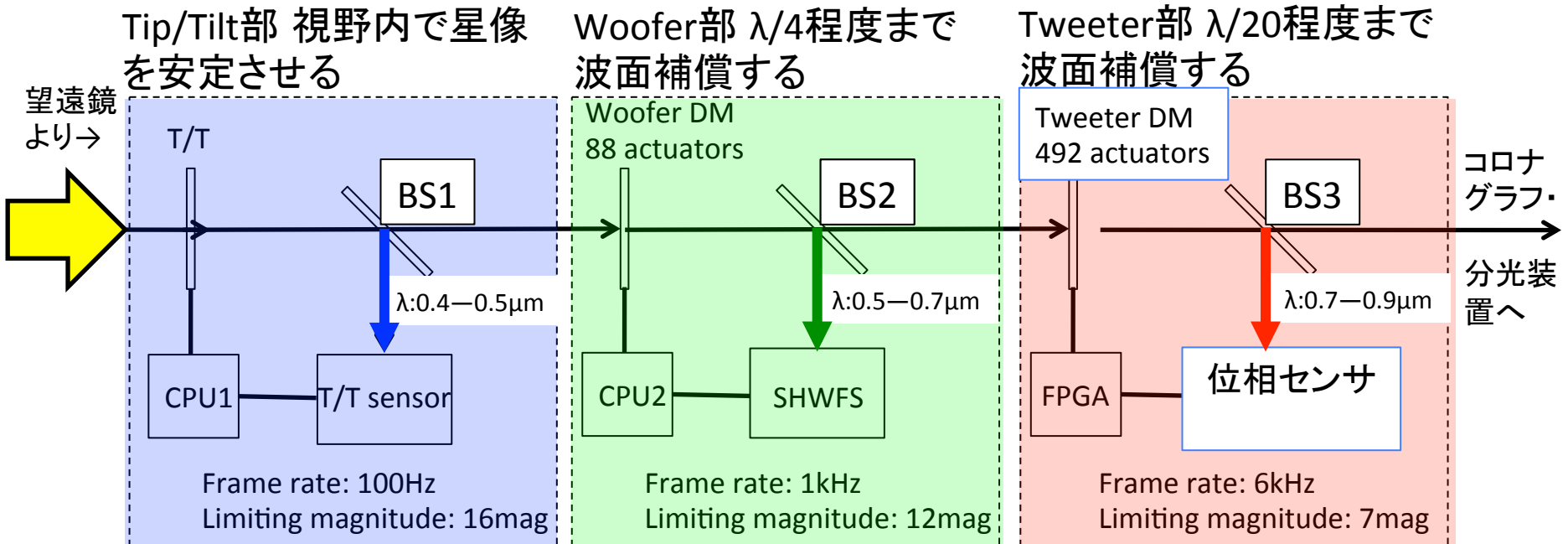
凍結された位相ムラの風による移動

AOパラメータまとめ

SEICA-ExAO: 10masの安定性、 $\lambda/20$ の高精度
5—10kHzの高頻度、24素子の高空間周波数

補償光学: SEICAのAO部分

◆ 目標: 高精度($\lambda/20$), 高頻度 (5—10kHz), 高空間周波数 (24分割)



無補正

Woofer AO後

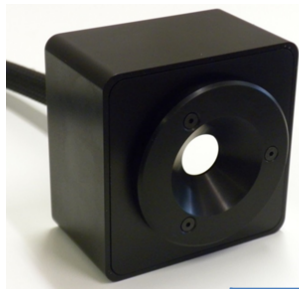
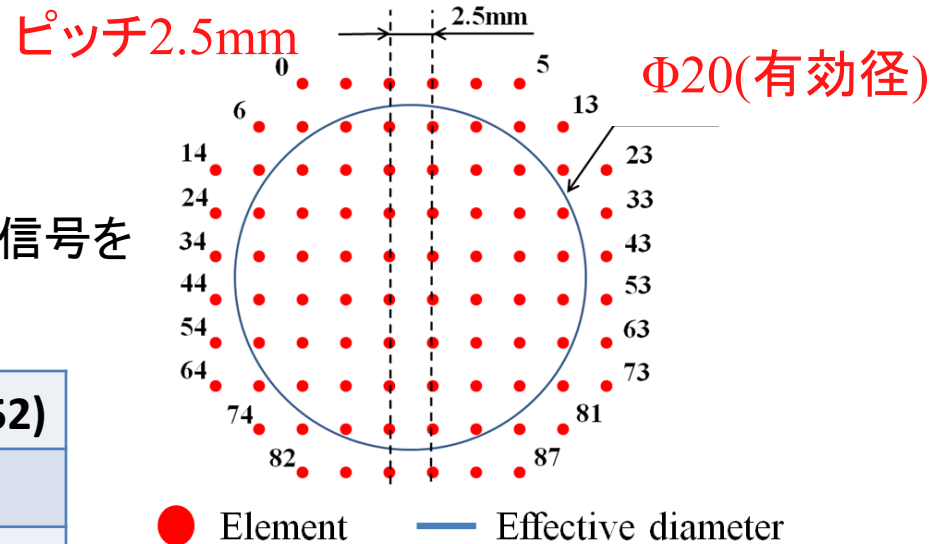
Tweeter AO後

→ DM, WFS, 制御の話へ

補償光学: 可変形鏡(DM)

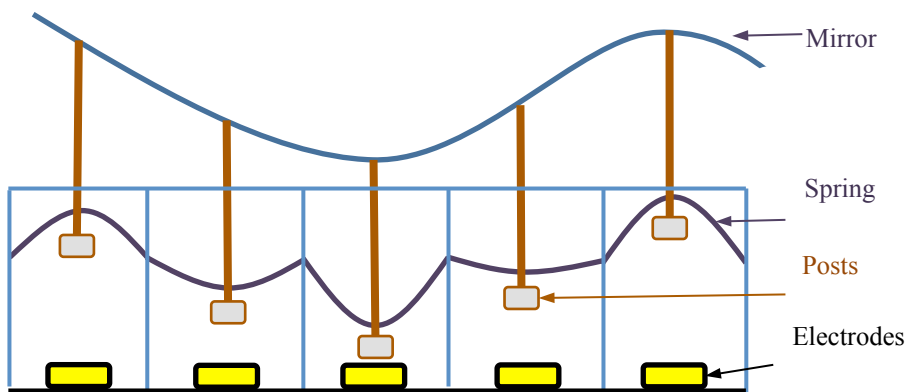
◆ 可変形鏡の動作 (Alpao DM88-25)

– メンブレン方式



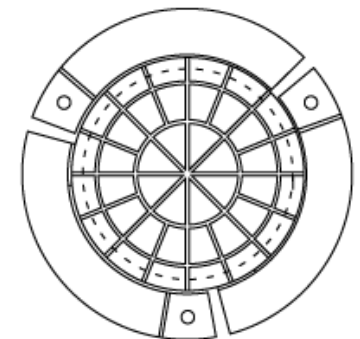
正規化された制御信号を
司令して制御

要素数	88 (有効系内52)
有効径	20mm
要素間隔	2.5mm



Actuation principle of DM

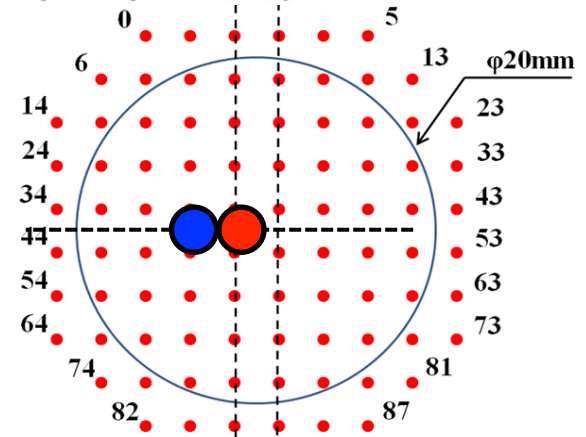
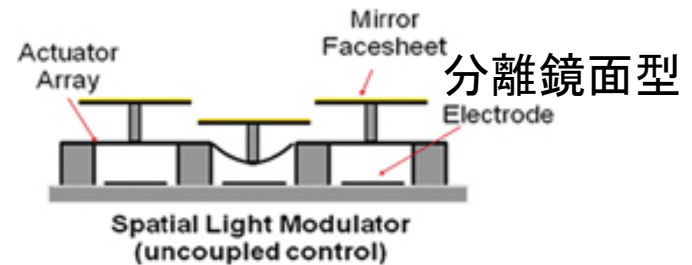
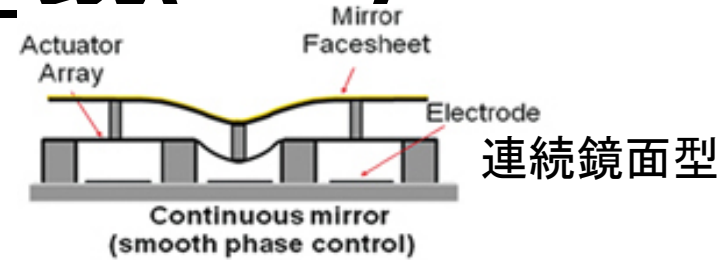
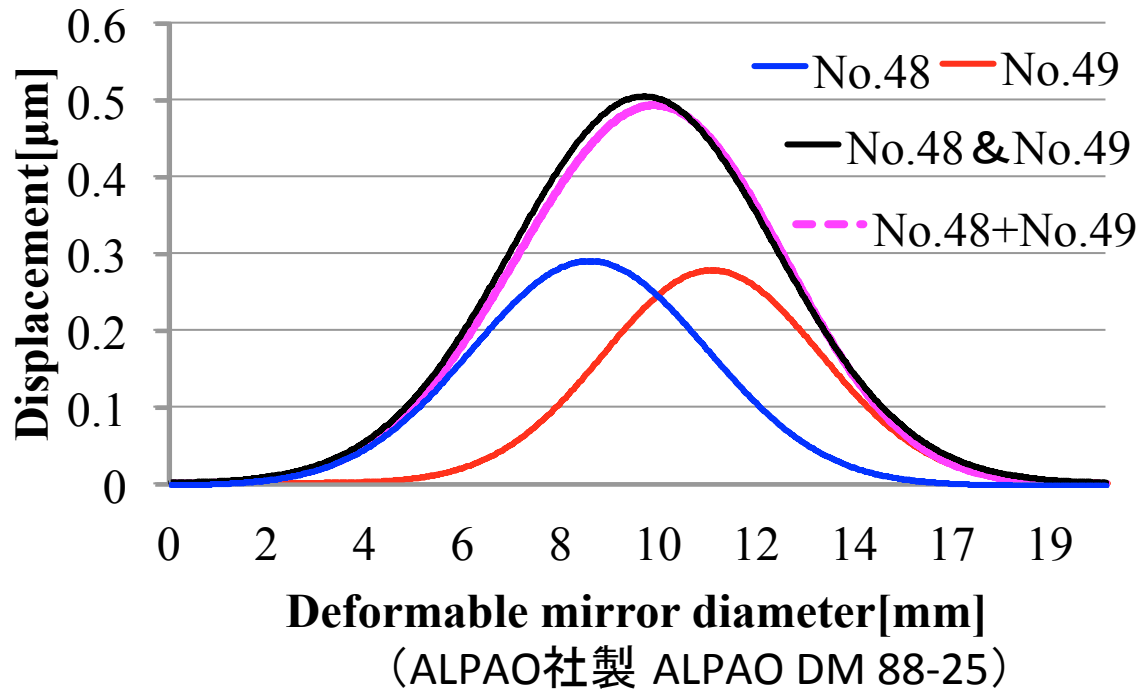
他のタイプ: Thorlab: DMP40/M-P01



アクチュエータパターンが異なる

補償光学: 可変形鏡(DM)

◆ 可変形鏡の動作 - メンブレン方式



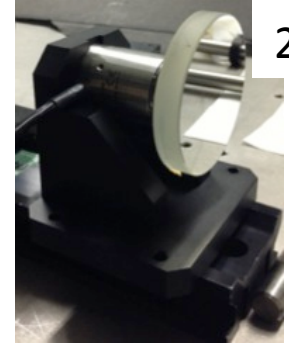
● Element — Effective diameter

◆ DM素子を複数同時に動作させた際の関係

◆ 複数素子の変形の重ね合わせによって形状が決定

◆ 1素子の出力が他素子にも伝藩→高周波成分を発生させない

補償光学:可変形鏡(DM)



T/Tミラー

3段階で4つの条件を満たす補正

1) 位置安定性: TipTiltミラー系

~10mas, 100Hz

T/T補正後の波面残差は~2um(rms)

2) 低時間・空間周波数補償: Woofer系

8素子(88素子), 1kHz,
ストローク11.3um

Woofer DM
φ20mm, 88素子

3) 高時間・空間周波数補償: Tweeter系

24素子(492素子), 8.5kHz,
ストローク1.5um

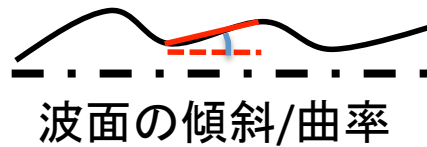
Tweeter DM
φ6.4mm, 492素子

補償光学: WFS方式

WFS (波面センサ)による波面形状(エラー)の計測方法

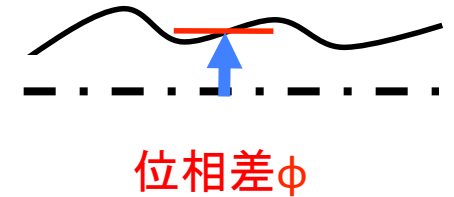
A. 幾何学的計測

計測対象の波面
理想的な波面



B. 直接位相計測

計測対象の波面
理想的な波面

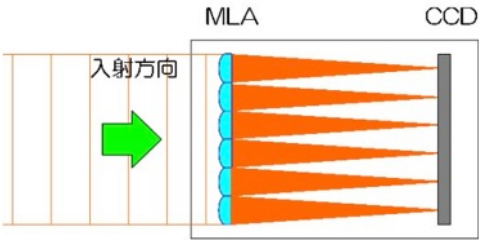


	幾何学的計測	直接位相計測
取得量	傾斜・曲率	参照面との位相差
長所	<ul style="list-style-type: none"> ・測定可能なレンジが大きい ・光学系が比較的簡素 ・採用実績が多い 	<ul style="list-style-type: none"> ・形状測定で誤差伝藩がない ・多点・高精度で有利 ・計算が簡単(ex. 差分2回と除算1回)
短所	<ul style="list-style-type: none"> ・形状計測で誤差伝藩が生じる <ul style="list-style-type: none"> - 傾斜は1階積分 - 曲率は2階積分 ・SHWFSは重心計算が必要 →素子数大で不利 	<ul style="list-style-type: none"> ・測定レンジが小さい $\pm 1\lambda$、$\pm \pi$ [rad] ・最低3つの位相差測定(ex. 0, π, $\pi/2$, $-\pi/2$)が必要
使用例	シャックハルトマンセンサ (ex. GPI) 曲率センサ(ex. HiCIAO/AO188)	fixed-ピラミッドセンサ(ex. SCExAO) Zernikeセンサ(ex. Palomar) 点源回折干渉計センサ (ex. SEICA)

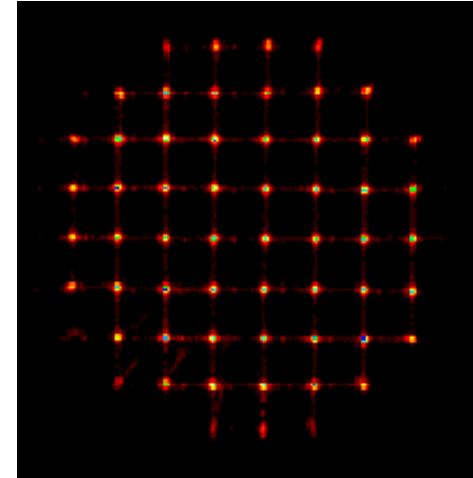
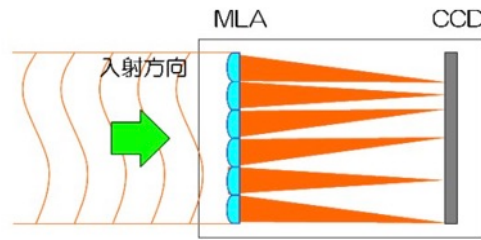
補償光学: WFS方式:: SHWFS

◆幾何学的測定[傾斜測定]: シャック=ハルトマンWFS

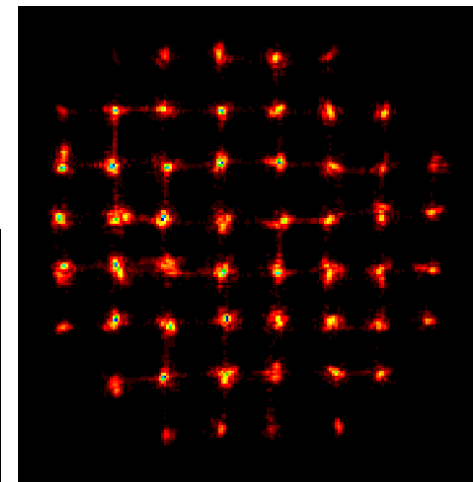
● 理想波面の光束



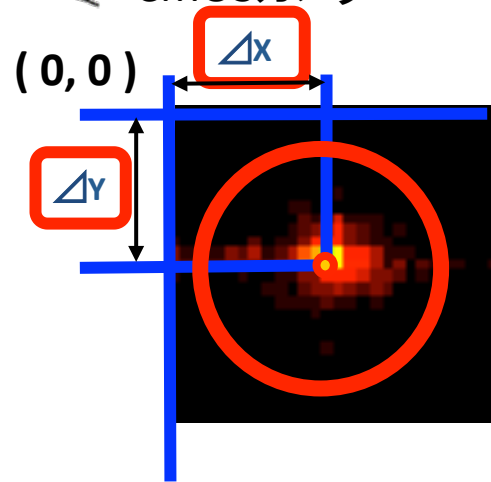
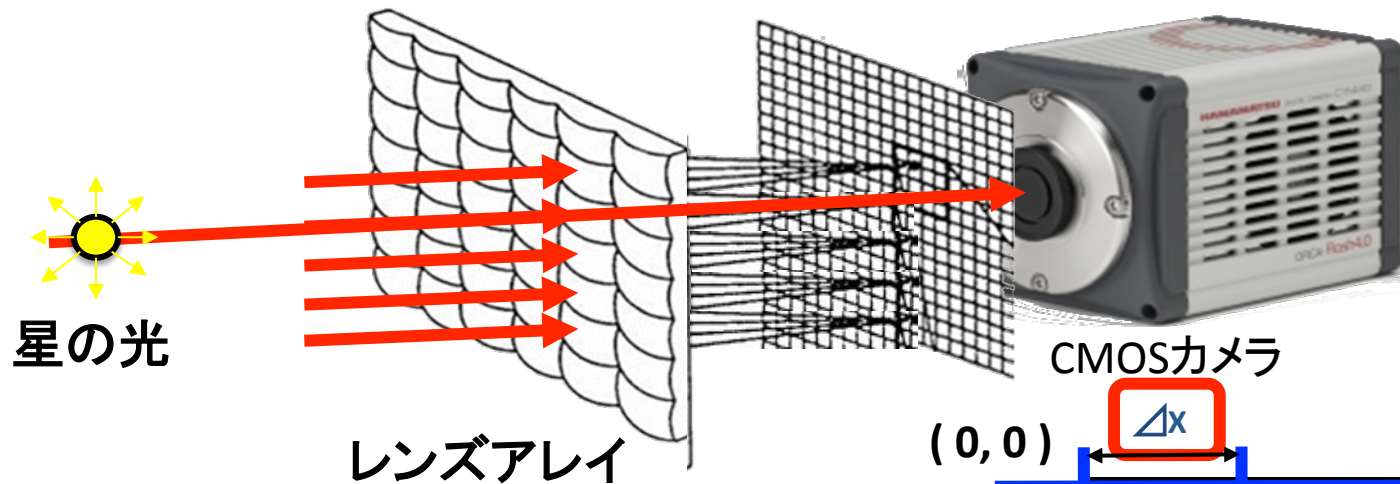
● 波面収差のある光束



理想波面(参照波面)



測定波面(大気乱流)



モーメントからスポットの「重心」を検出
→傾斜を測定
→1階積分で波面再構成[積分誤差...]

Woofer AOでのWFSに採用

補償光学: WFS方式:: 直接位相計測

干渉を用いる

◆ マツハツェンダ型

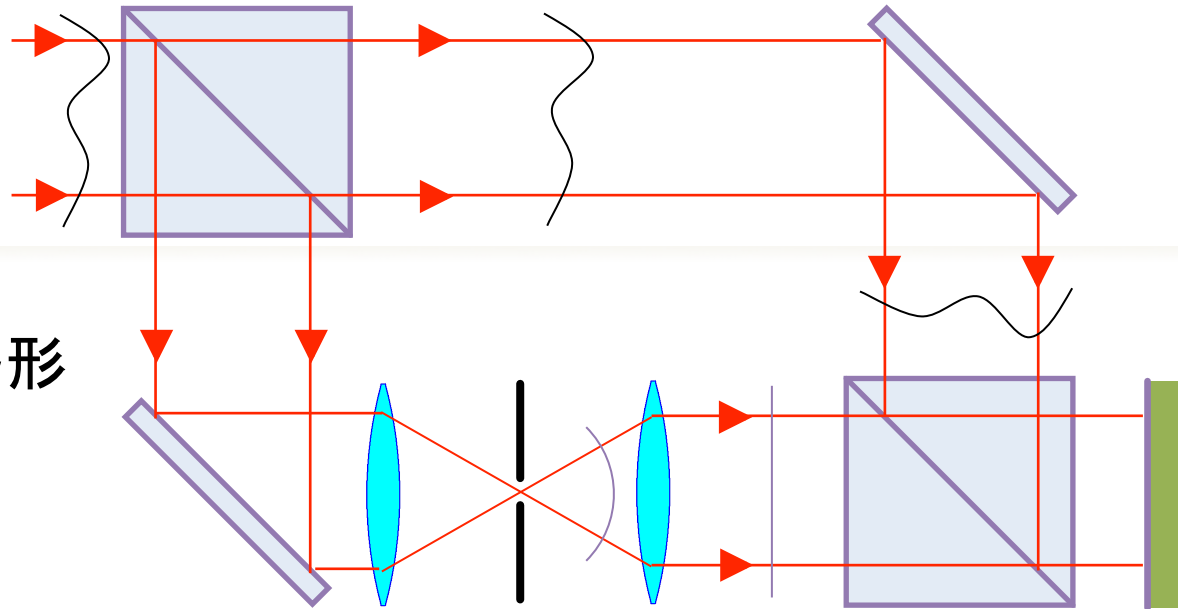
- 光路を2つに分割
- 片側のみ波面を整形
- 結合させ干渉
- 位相差を与えて
4つの干渉像を取得

- 非共通光路が長い

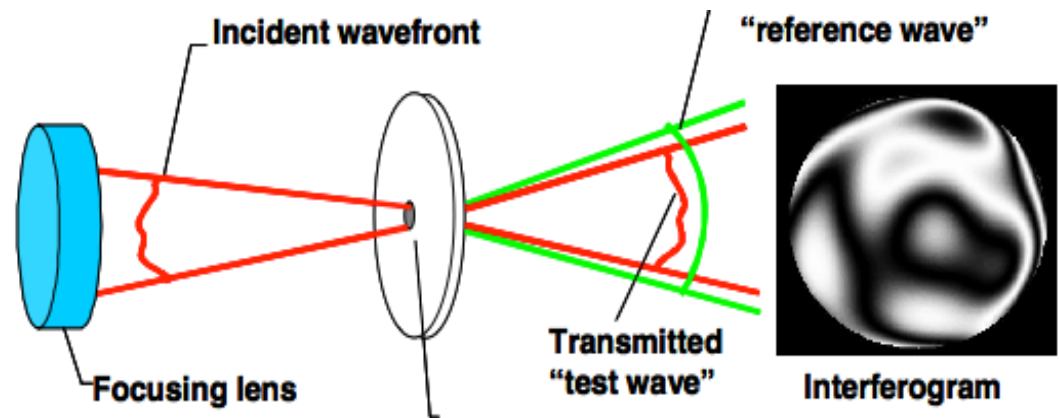
◆ 点回折干渉系型

- ピンホールで整形
- 非共通光路なし
- 光路が単純で安定

- 瞬間で1位相しかとれない



Mach-Zehnder型



Point Diffractor
点回折干渉計型

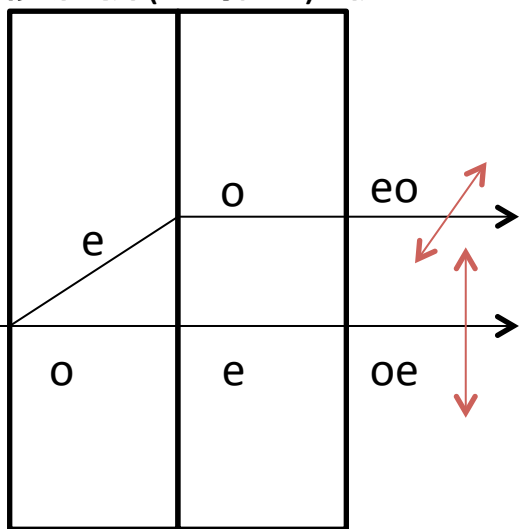
Smart & Steel 1975

補償光学: 4位相同時測定用の素子

1. サバール板

偏光方向によって光線を「同一面内で」分割する

複屈折(方解石)2枚



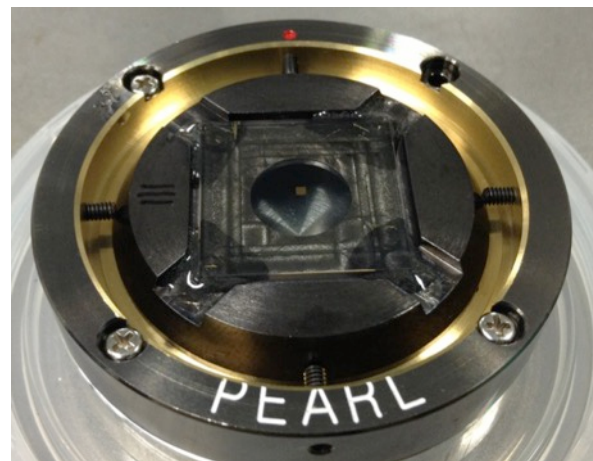
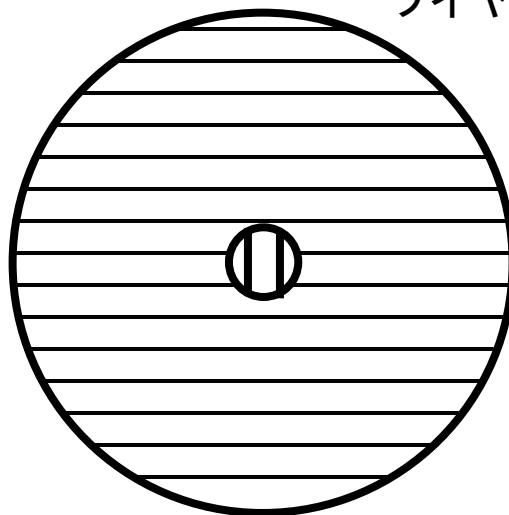
	eo光	oe光
偏光方向	↔	↕

光路差がない

2. 点源回折干涉偏光ビームスプリッタ(PPBS)

偏光方向によって光線を「反射と透過に」分割する

ワイヤグリッド型のBS

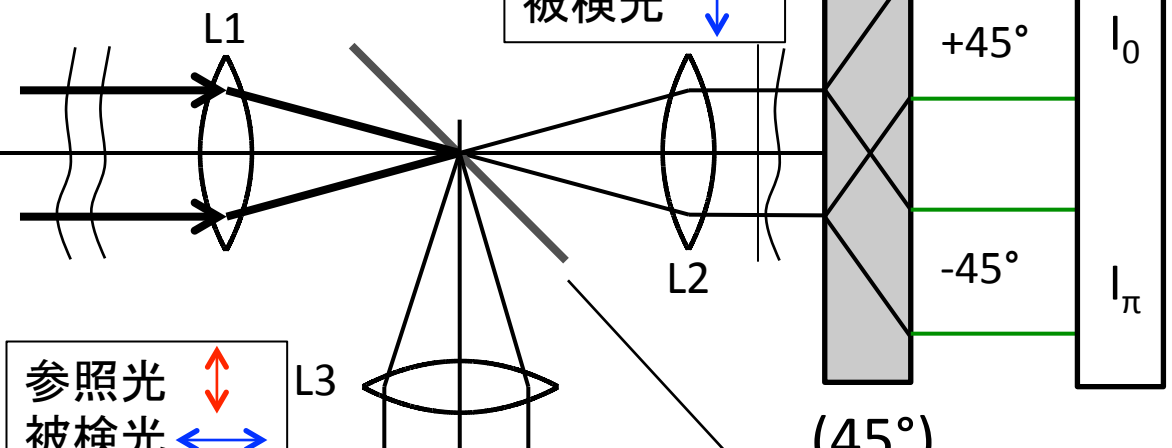


偏光方向	ピンホール内	ピンホール外
↔	反射	透過
↕	透過	反射

PDIWFS

Incident

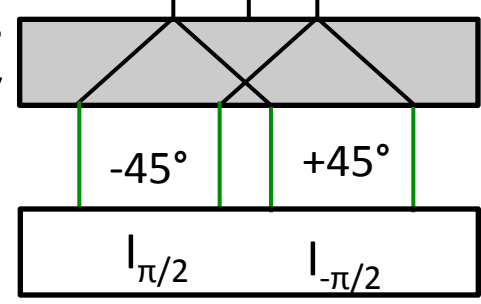
参照光 \leftrightarrow
被検光 \updownarrow



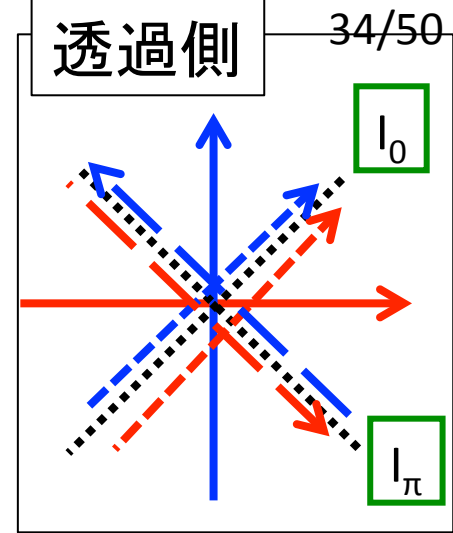
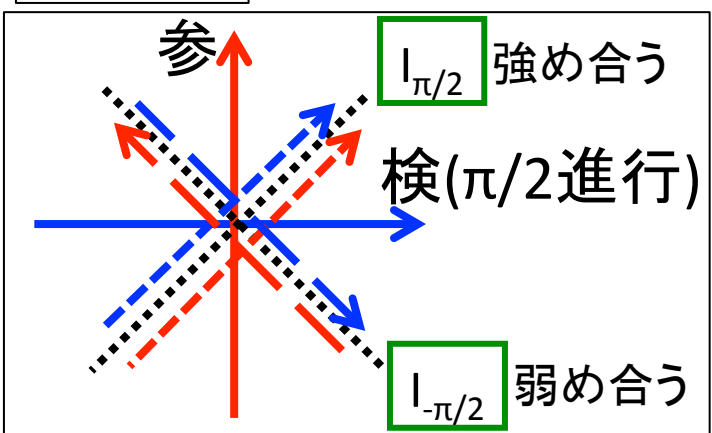
参照光 \updownarrow
被検光 \leftrightarrow

1/4波長板

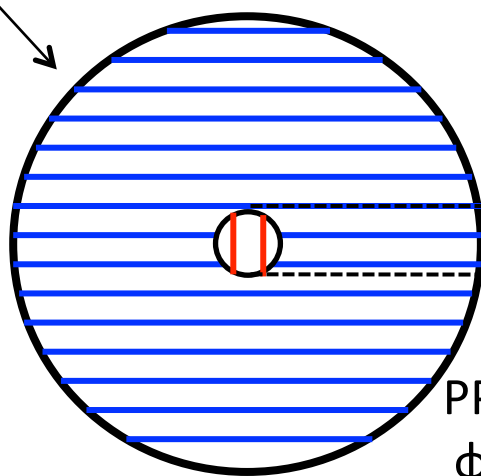
サバール板
(45°)



反射側



(45°)



グリッドと
直交成分 \rightarrow 透過
平行成分 \rightarrow 反射

ϕ

PPBSピンホール径
 $\phi = 0.3\lambda/D$ (PDI)

4位相(0, π , $\pi/2$, $-\pi/2$)の同時取得が可能

波面形状 ϕ

$$\phi = \text{atan} \left(\frac{I_{\pi/2} - I_{-\pi/2}}{I_0 - I_{\pi}} \right)$$

SEICAの光学設計: WFS選択

◆ Woofer: シャックハルトマンWFS

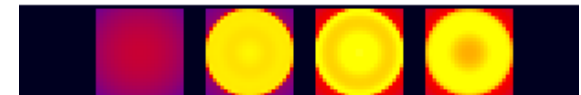
- 8x8 (52点), 1000fps
- 測定精度 $\pm 0.1\mu\text{m}$, 測定限界12等@ $0.5\text{--}0.7\mu\text{m}$



◆ Tweeter: 点回折干渉計WFS (位相計測)

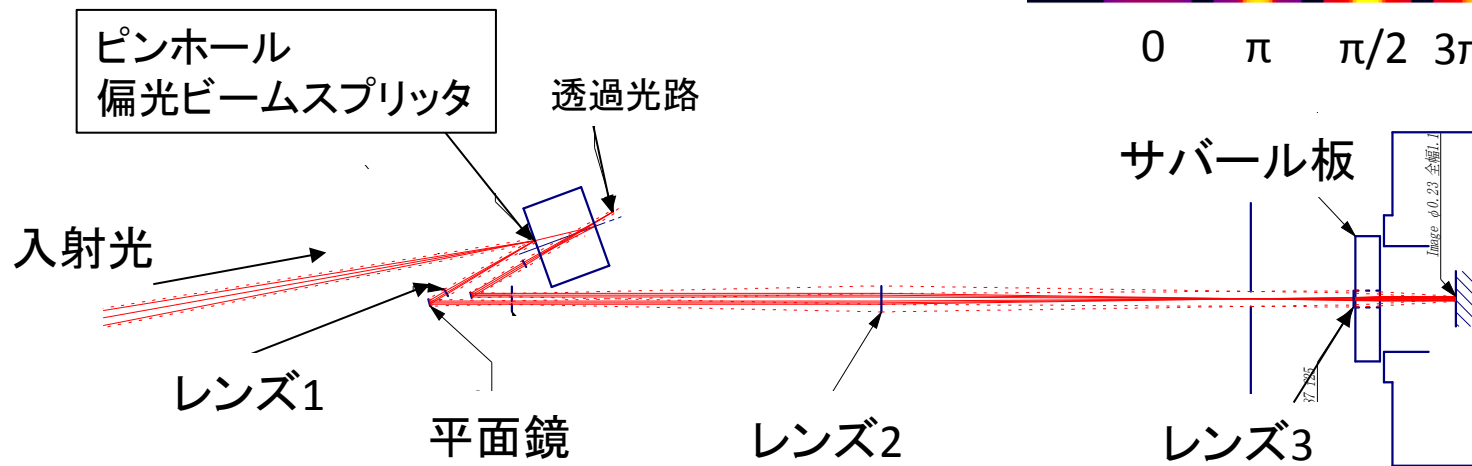
- 天体の光自身を用いた参照光と被検光の干渉から波面計測
- 24x24 (492点), 8500fps, $\lambda/20$

4位相差を1つの検出器で同時取得



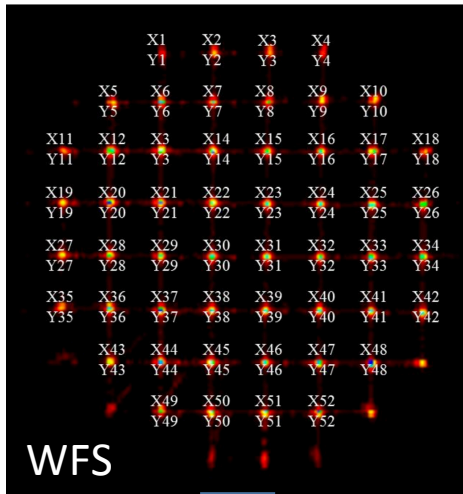
0 π $\pi/2$ $3\pi/2$

点源回折干渉計設計案



補償光学: 制御系

- ◆ WFSの入力(52素子)からDMへの出力(88素子)
 - SH-WFSはx, yの波面傾斜を測定→ $52 \times 2 = 104$ 要素



WFS入力値とDM出力値間の連立方程式

$$DM1 = a_{1,1}X_1 + a_{1,2}X_2 + \dots + a_{1,52}X_{52} + a_{1,53}Y_1 + a_{1,54}Y_2 + \dots + a_{1,104}Y_{52}$$

$$DM2 = a_{2,1}X_1 + a_{2,2}X_2 + \dots + a_{2,52}X_{52} + a_{2,53}Y_1 + a_{2,54}Y_2 + \dots + a_{2,104}Y_{52}$$

⋮

$$DM88 = a_{88,1}X_1 + a_{88,2}X_2 + \dots + a_{88,52}X_{52} + a_{88,53}Y_1 + a_{88,54}Y_2 + \dots + a_{88,104}Y_{52}$$

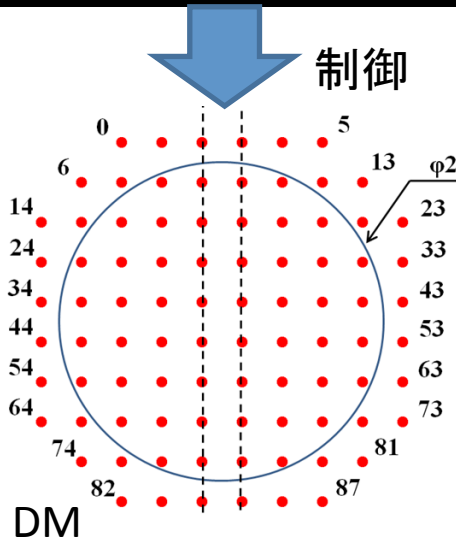
前もって $u = M y$ から M を測定

$$\begin{bmatrix} DM1 \\ DM2 \\ \vdots \\ DM87 \\ DM88 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{1,1} & \dots & a_{1,104} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{88,1} & \dots & a_{88,104} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X1 \\ \vdots \\ X52 \\ Y1 \\ \vdots \\ Y52 \end{bmatrix}$$

↑ DM値 ↑ 作用行列 ↑ WFS値

$$y = M^+ u$$

M : 作用行列
 M^+ : 作用行列の
 疑似逆行列
 y : DMの司令値
 u : WFS測定値

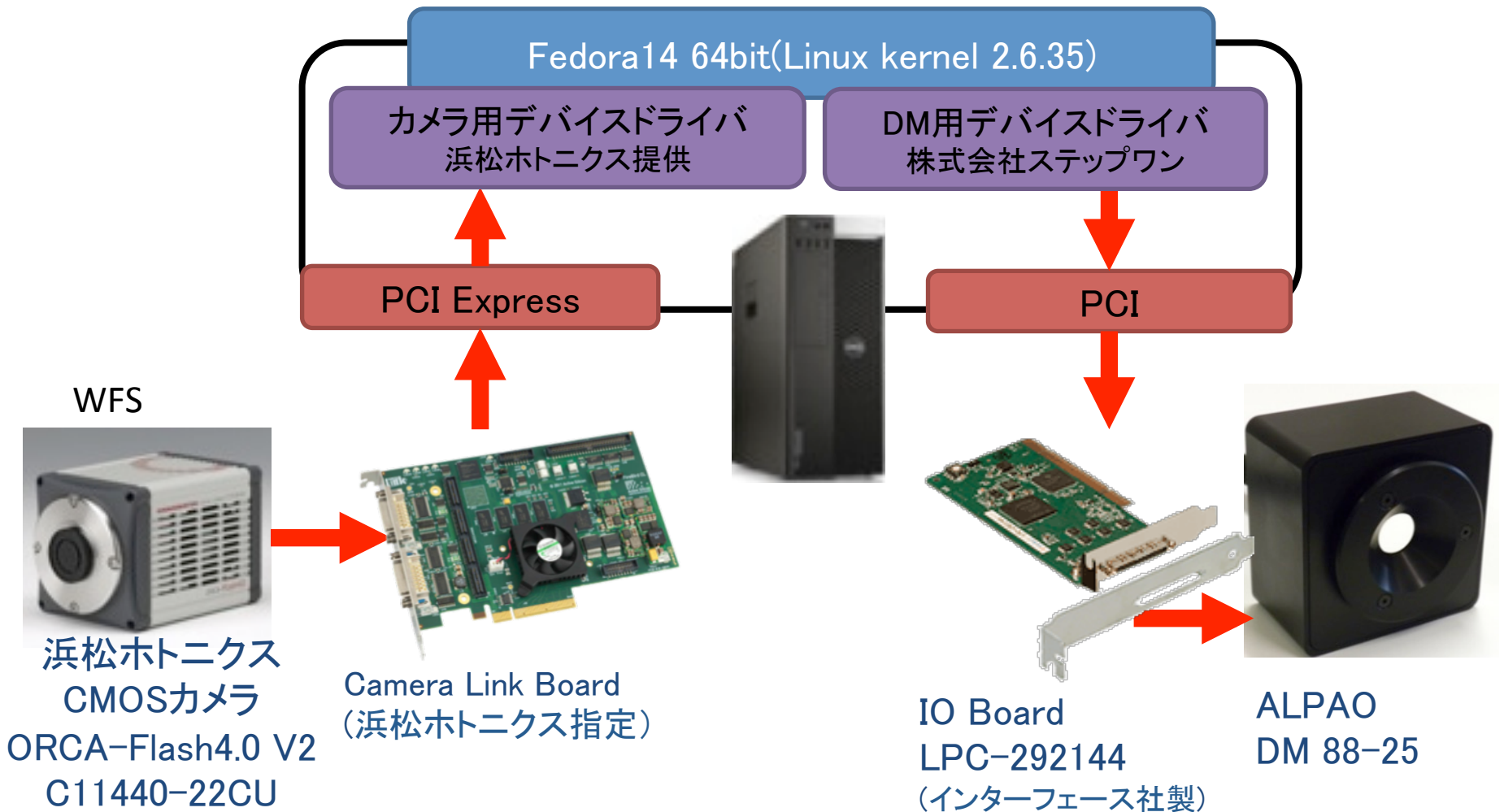


現状ではZonal 制御

補償光学: 制御系

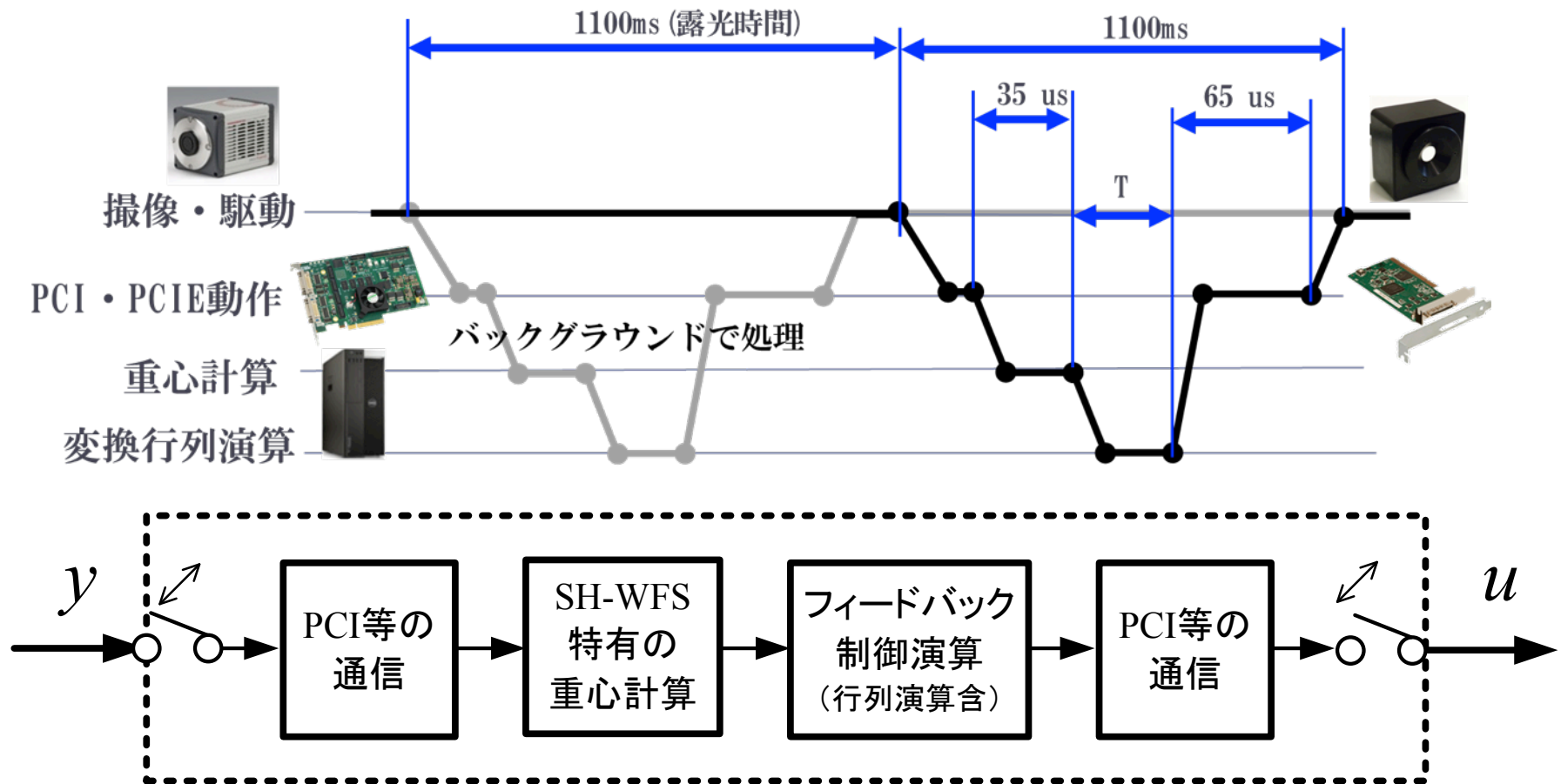
◆Woofer AOでは専用PC制御

–リアルタイム性確保のためLinux



補償光学: 制御系

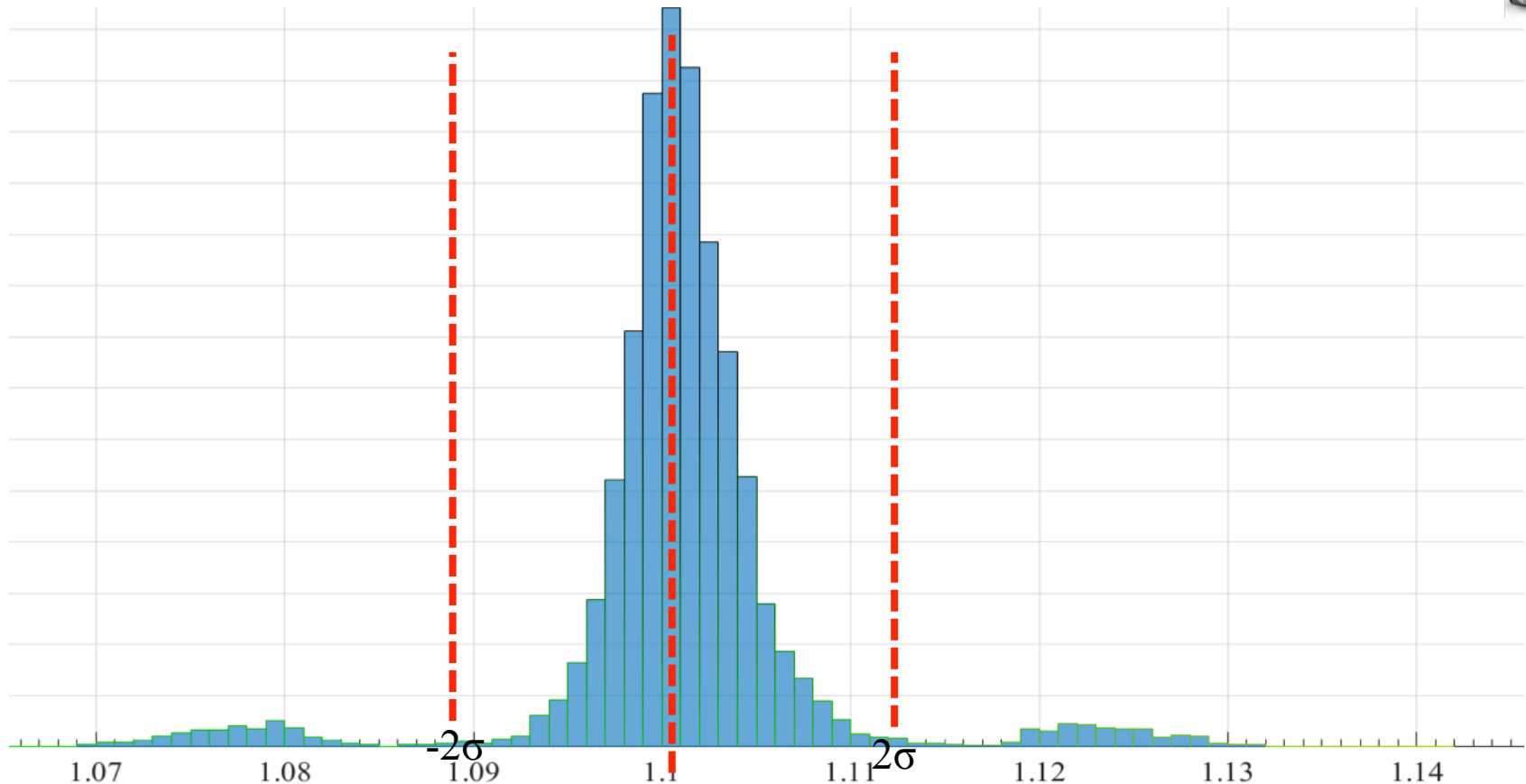
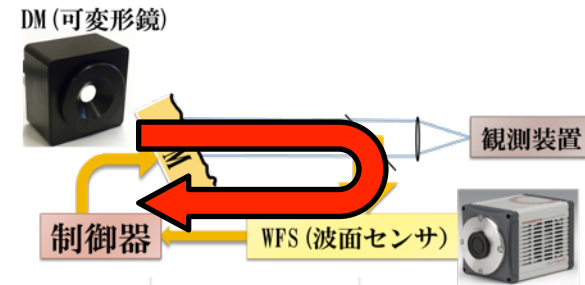
◆ 開発した制御装置の性能確認



補償光学: 制御系:: 制御速度

◆ 実時間性を確保[900—1.1kHz]

→ Tweeter系では遅い.....

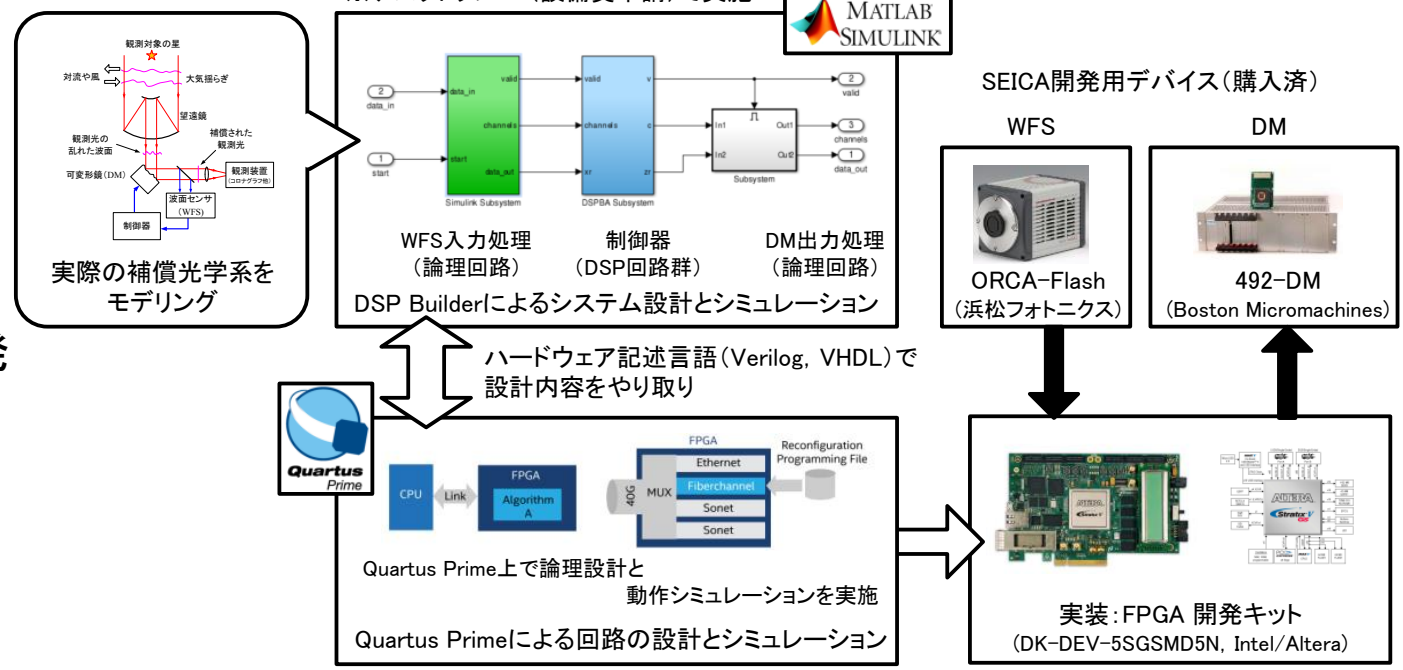


実時間性測定ヒストグラム

補償光学: 制御系:: 高精度/高速化

- ◆ 現在はP制御のみなので、PID(PI?)へ移行
- ◆ Tweeter AO用にFPGAを用いたハードウェア計算
 - 多入力多出力(984→492)でも高速(~10kHz)が可能

※デスクトップPC(設備費申請)で実施



FPGA制御系の開発

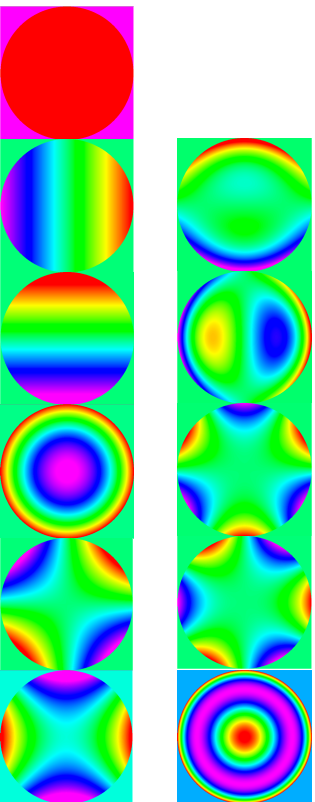
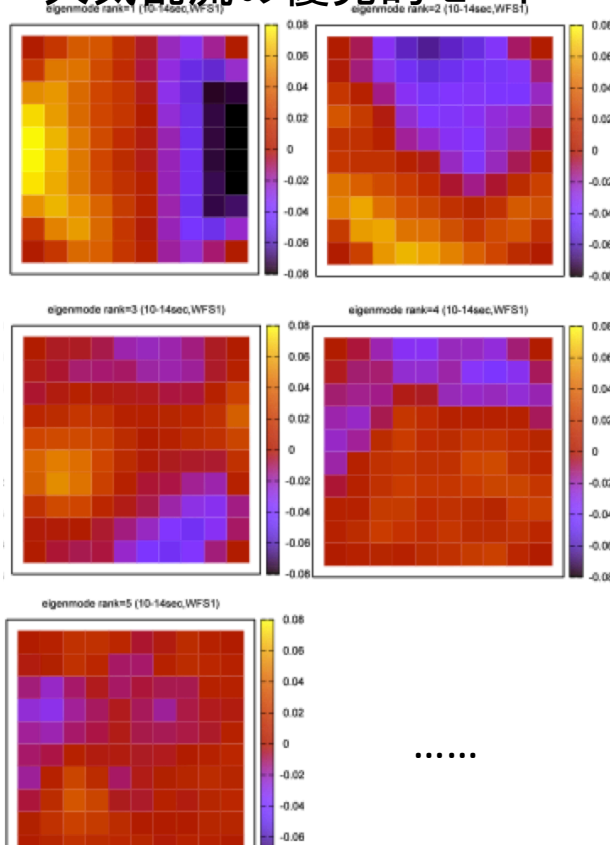
◆ 入力制御をzonal -> modalへ

- 測定誤差の抑制 ←→ 計算時間の増加

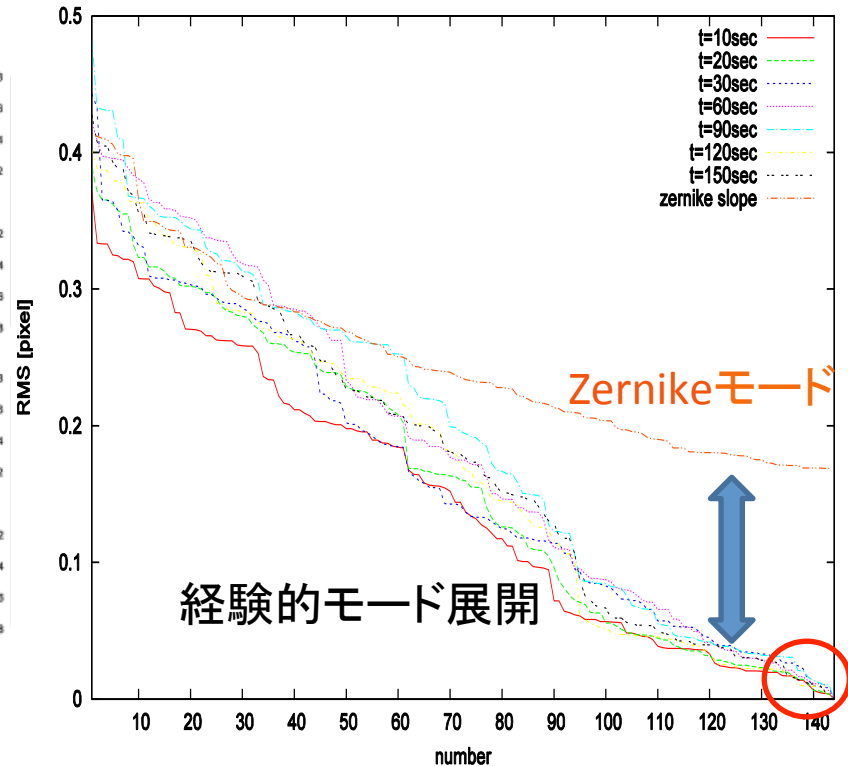
補償光学: 制御系

- ◆ 測定波面をモード展開して制御値を算出
 - 各素子でのエラーが平均化される
 - KL展開などで有効なモードから制御できる

Zernikeモード

観測から得られた
大気乱流の優先的モード

RMS (sample:10-14sec)



SEICA光学系設計:概観

天体から



地球大気



望遠鏡 (主-第三鏡)

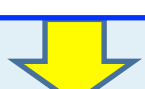


SEICA

前置光学系



ExAO



コロナグラフ

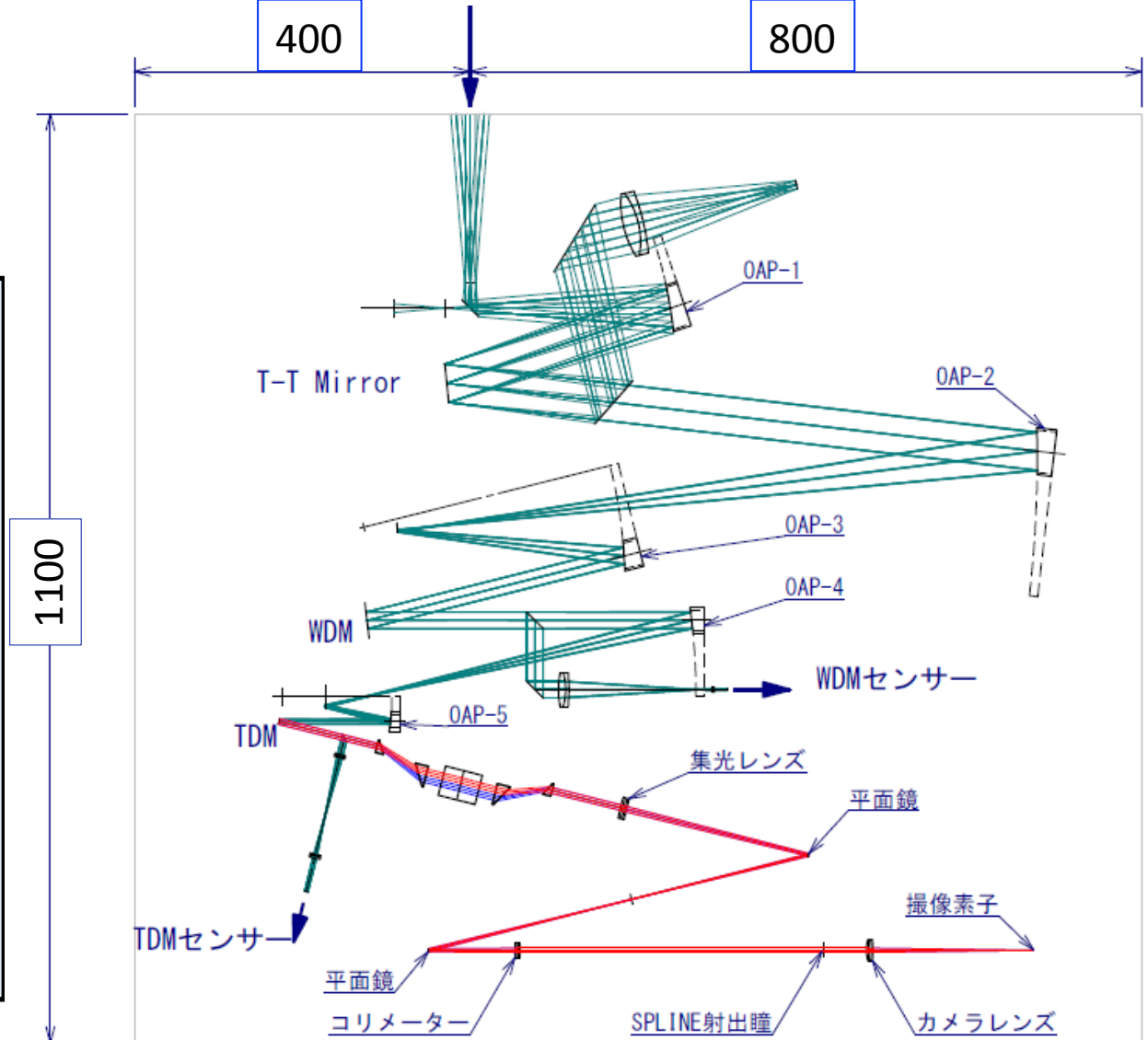


赤外カメラ

望遠鏡→前置光学系からの入射光線

400

800



SEICA光学系設計:概観

天体から



地球大気



望遠鏡 (主-第三鏡)



SEICA

前置光学系



ExAO



コロナグラフ



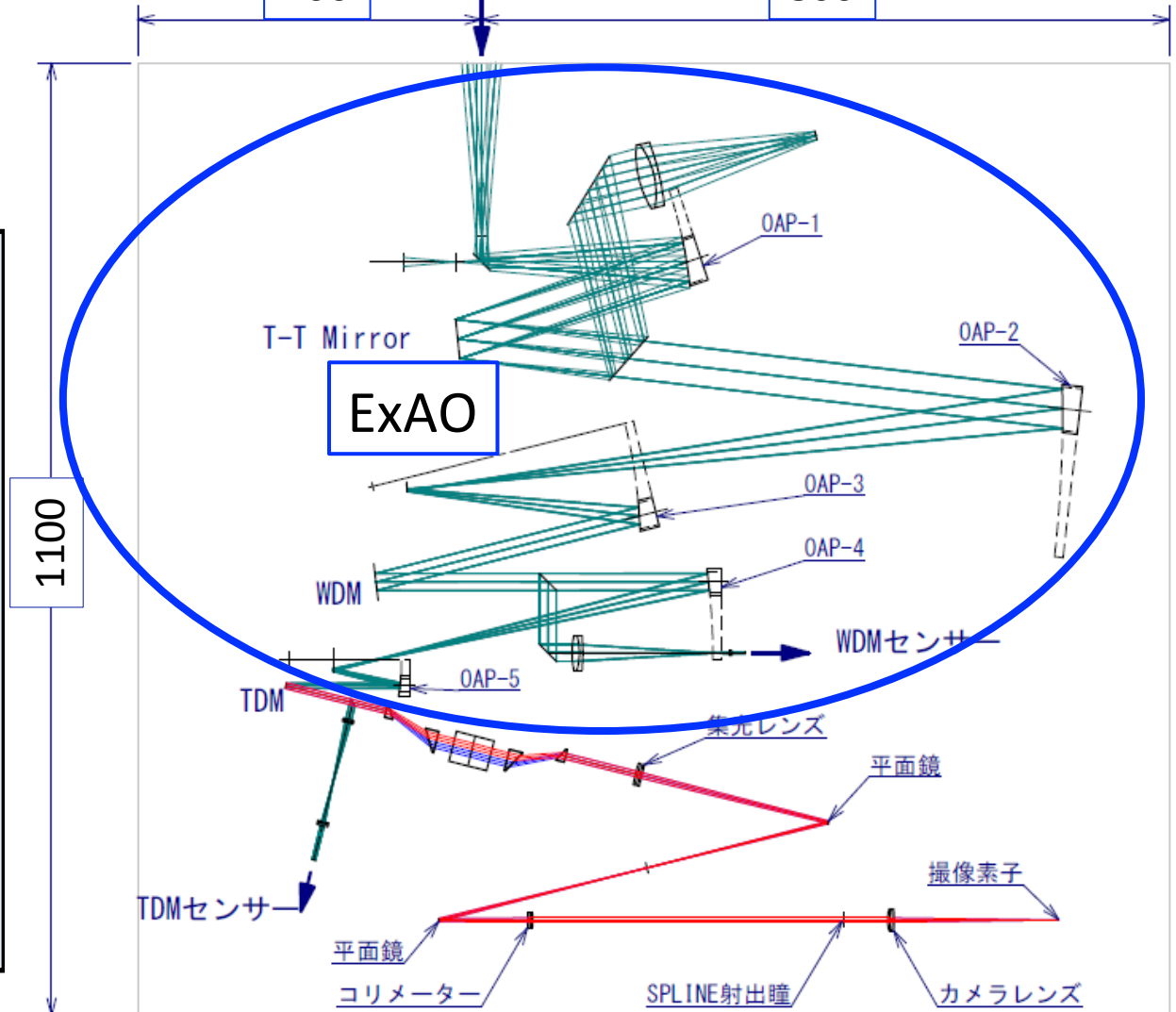
赤外カメラ



望遠鏡→前置光学系からの入射光線

400

800



SEICA光学系設計:概観

天体から



地球大気



望遠鏡 (主-第三鏡)



SEICA

前置光学系



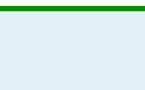
ExAO



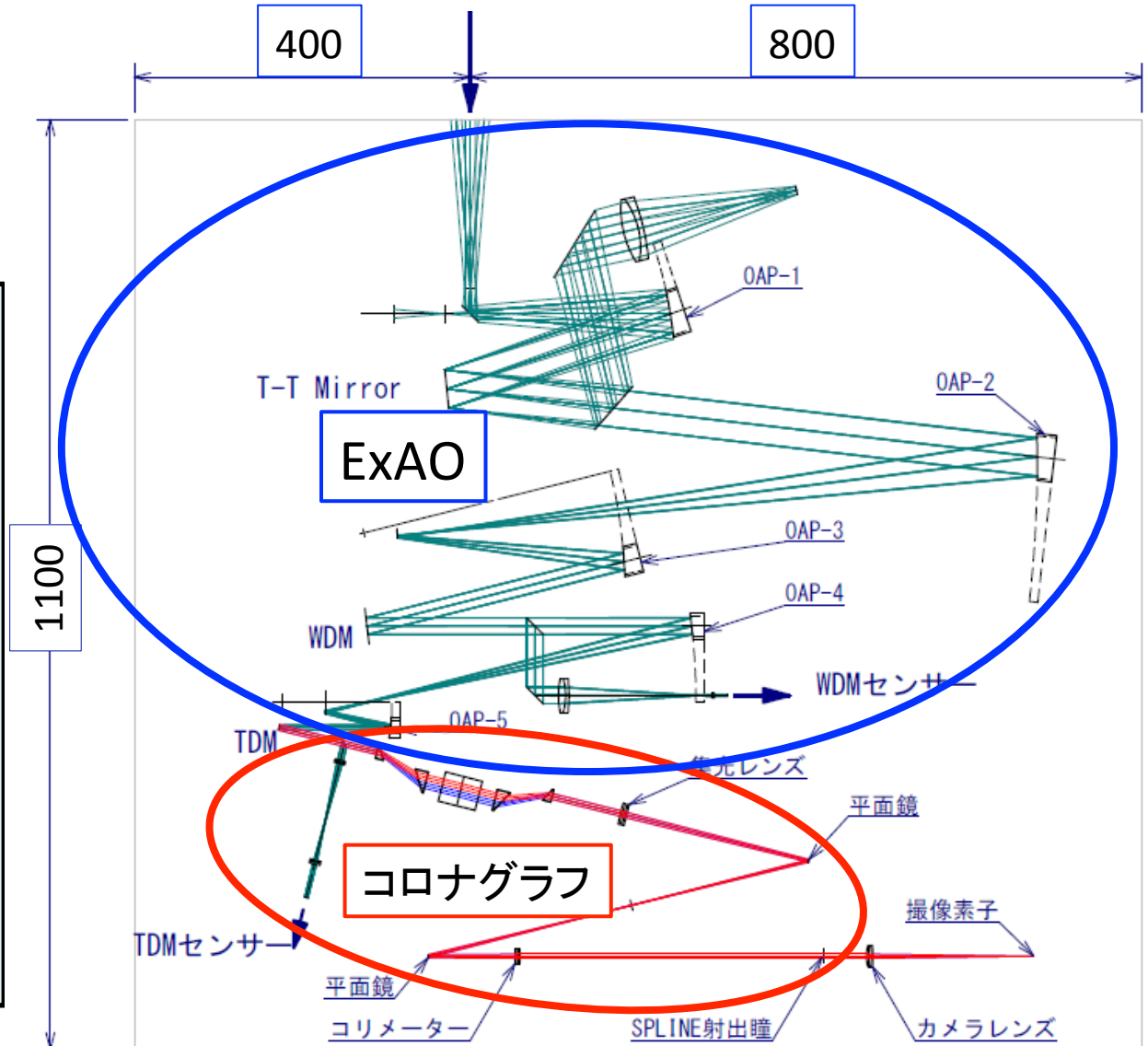
コロナグラフ



赤外カメラ



望遠鏡→前置光学系からの入射光線

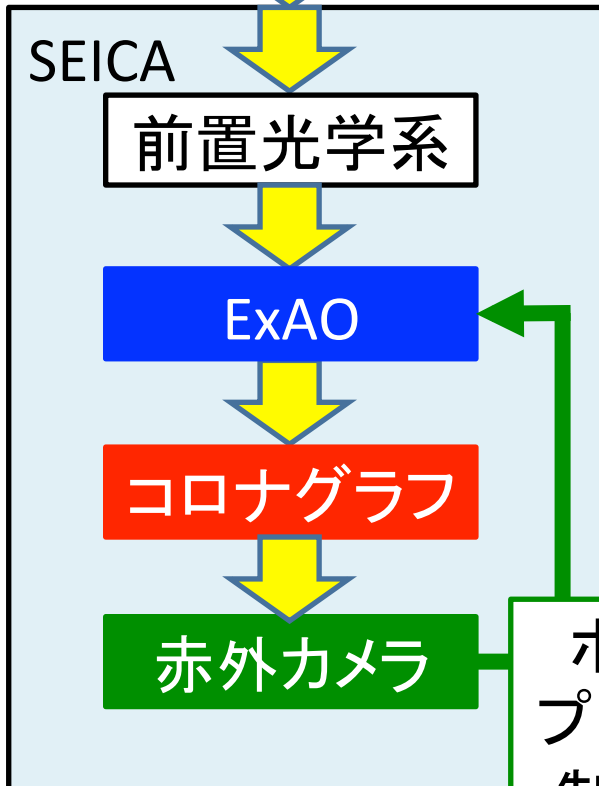


SEICA光学系設計:概観

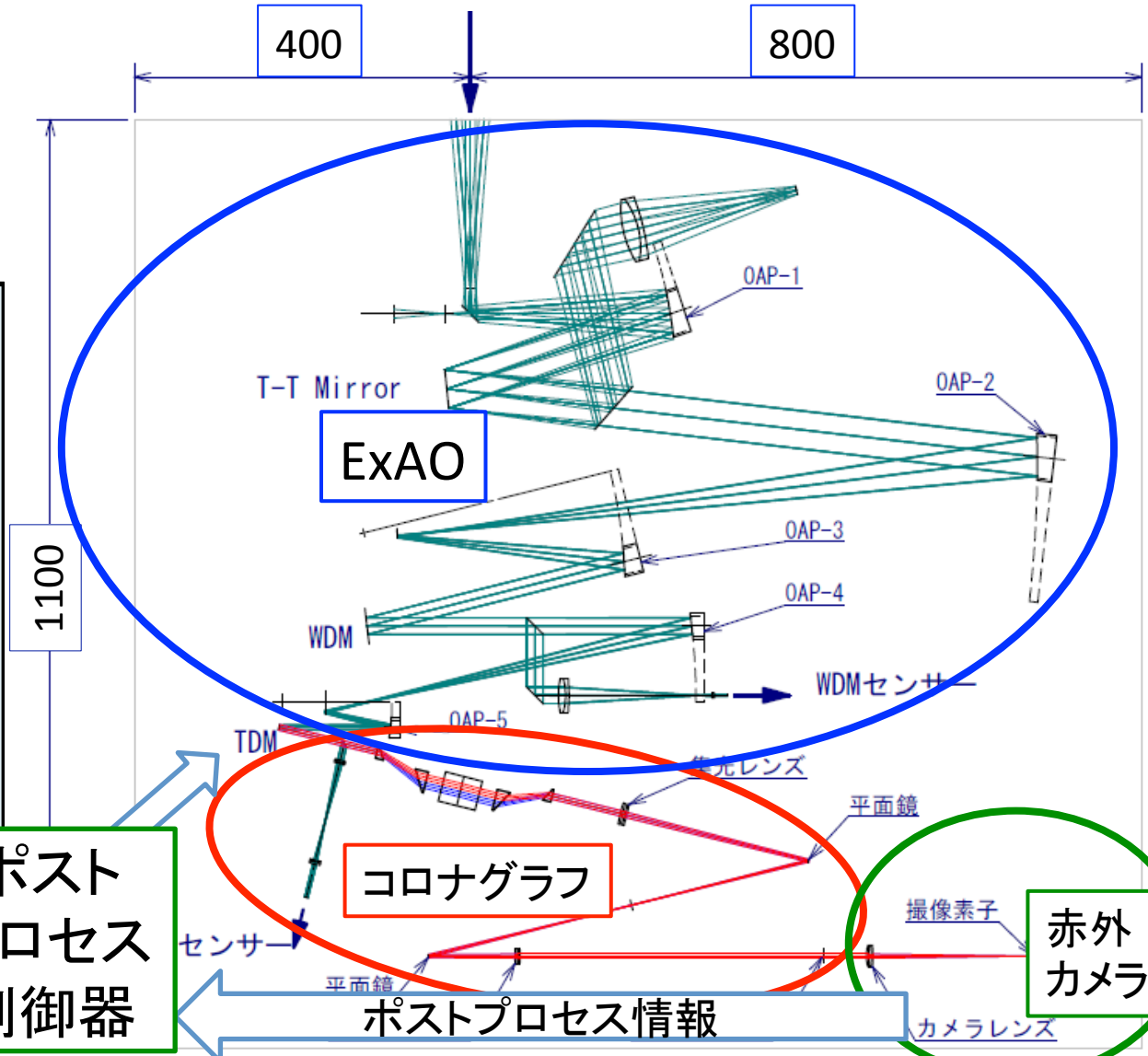
天体から

地球大気

望遠鏡 (主-第三鏡)



望遠鏡→前置光学系からの入射光線

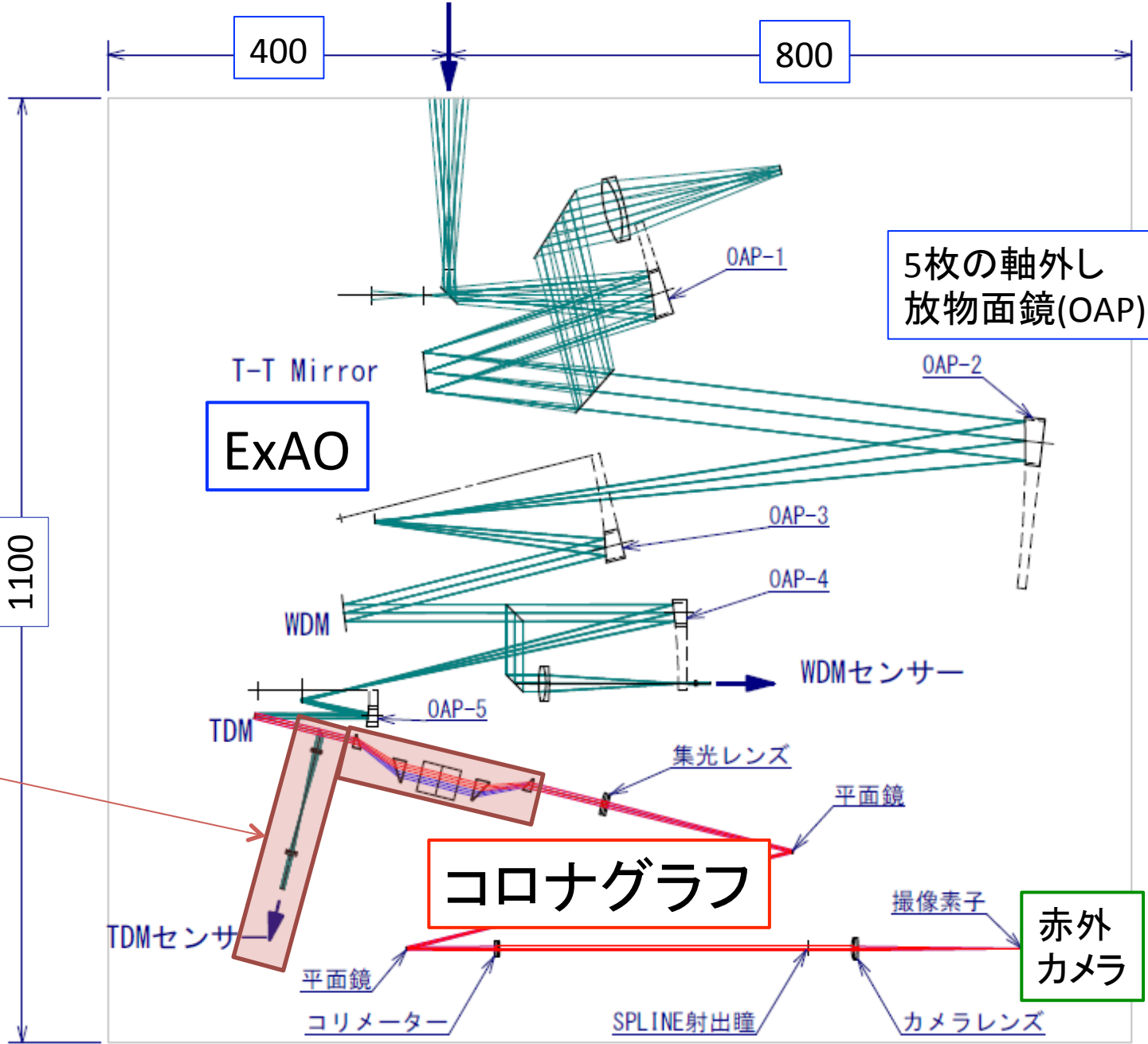


SEICA光学図

望遠鏡→前置光学系からの入射光線

光学系全体は
20°C±1.0°Cで

恒温部分
(中心20°C,
0.1°C:p-v)



5枚の軸外し
放物面鏡(OAP)

ExAO

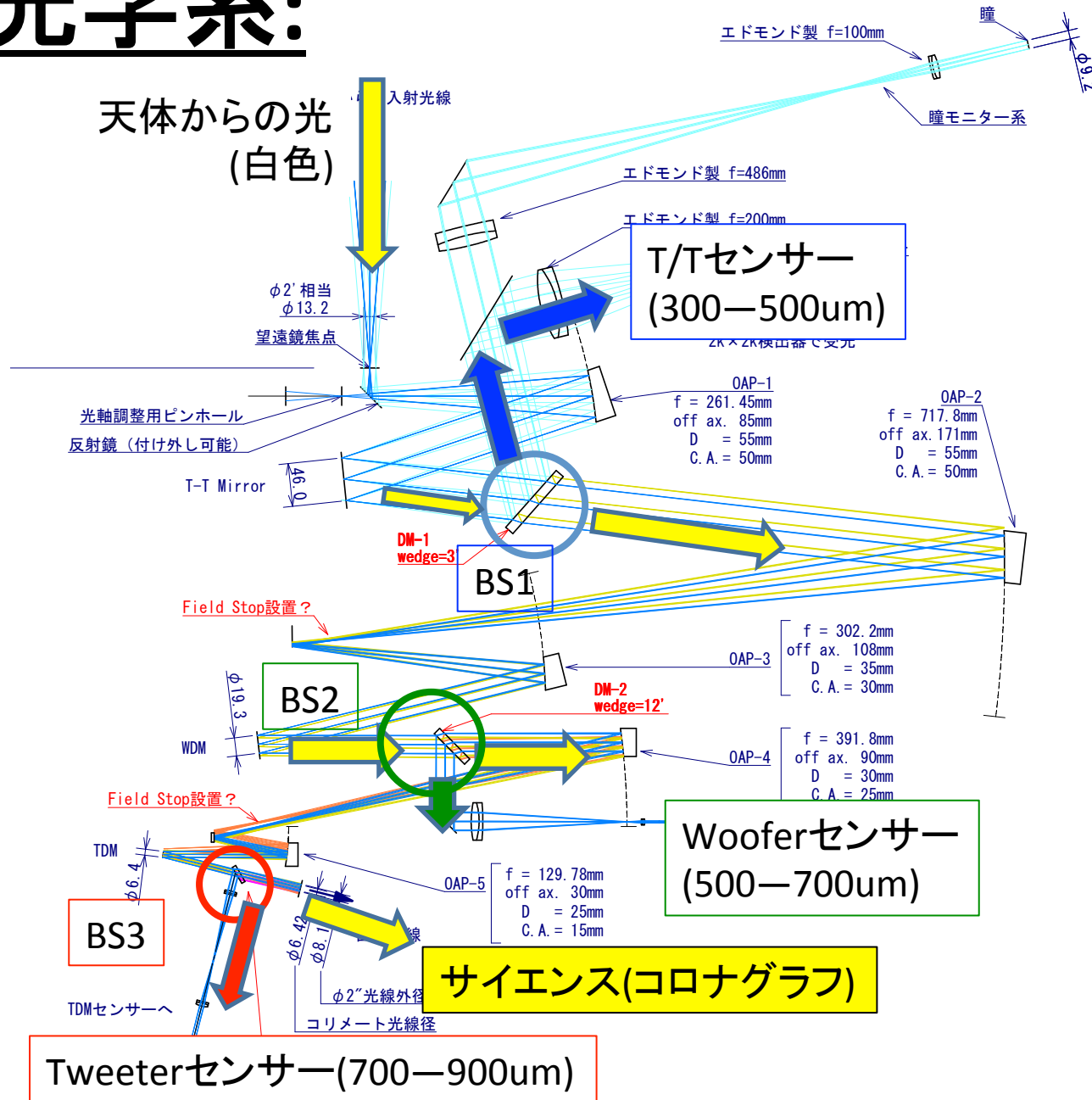
コロナグラフ

赤外
カメラ

SEICA光学系:

◆ダイクロイックミラー
(BS1, BS2, BS3)での
ゴースト+色収差
→WFSでは問題なし

ダイクロイックミラー
のウェッジ角
DM1: 3分角
DM2: 12分角
DM3: 18.9分角



Tweeterセンサー(700—900um)

サイエンス(コロナグラフ)

Wooferセンサー
(500—700um)

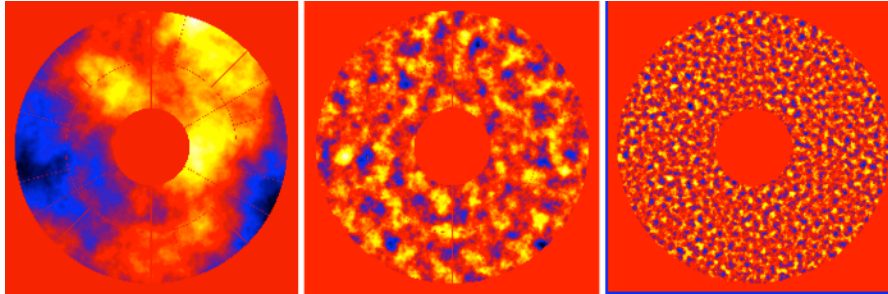
T/Tセンサー
(300—500um)

SEICA光学系: ExAO後コントラスト

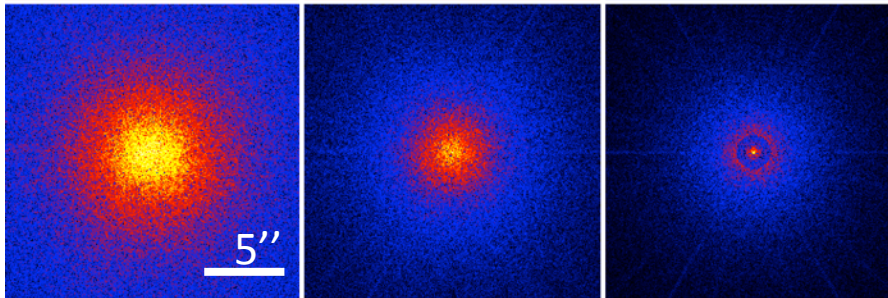
補償後の波面(一様強度,波面乱れ)を結像

無補償 ($\pm 5\lambda$) 低次 (PV: 2.5λ) 高次 (PV: λ)

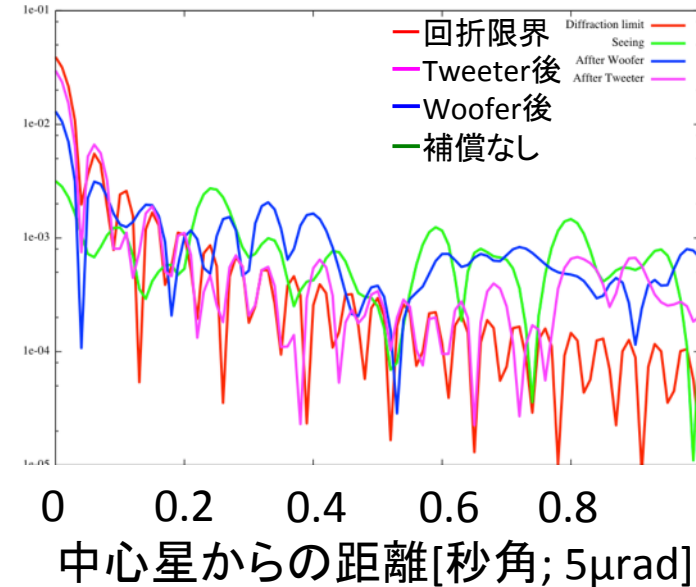
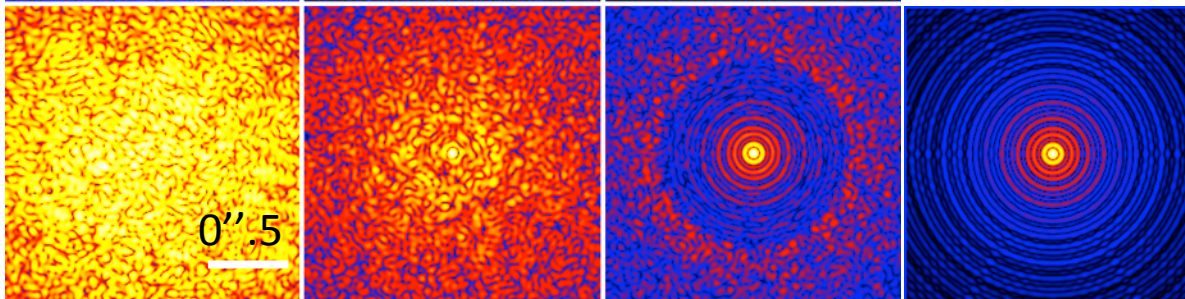
波面の乱れ



点源像
(全体:
半径20秒角)



点源像
(中心拡大:
半径1秒角)



Strehl比

1.7%

35%

84%

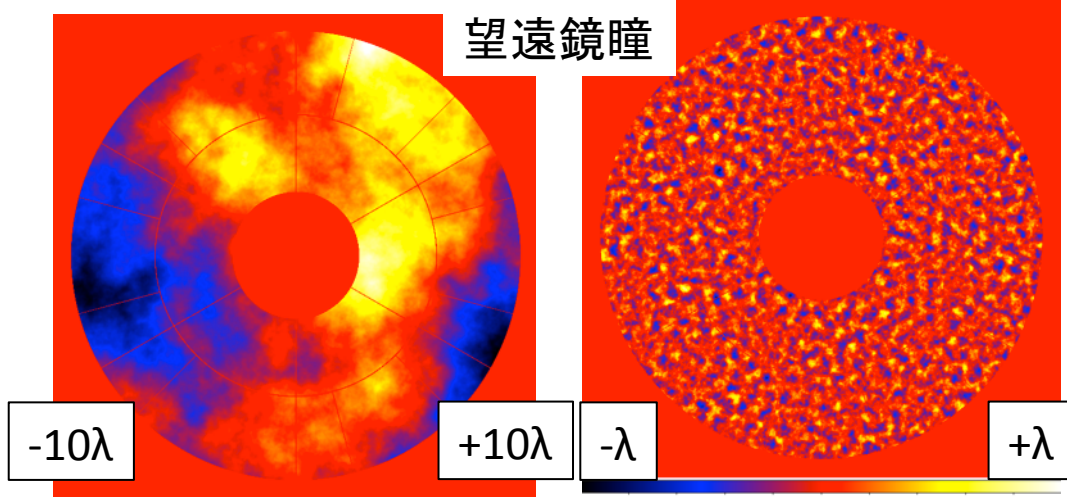
回折限界像

SEICA光学系: ExAO後コントラスト

乱流層: 高度10km
 フリード長: 10cm
 風速: 10m/s
 天頂角: 60度 (仰角30度)
 センサー波長: 0.8um (Tweeter)
 観測波長: 1.65um (Hバンド)
 波面測定: 8.5kHz (制御850Hz)
 補償点数: 差し渡し24素子
 計495素子

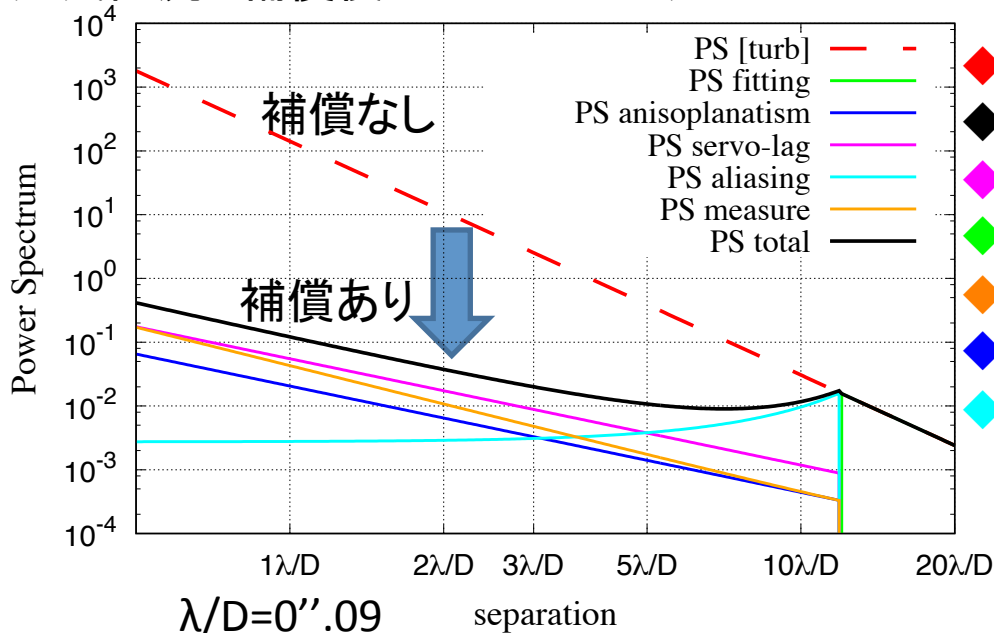
大気乱流のみ

ExAOによる補償



シミュレーション結果

大気乱流と補償後のパワースペクトル

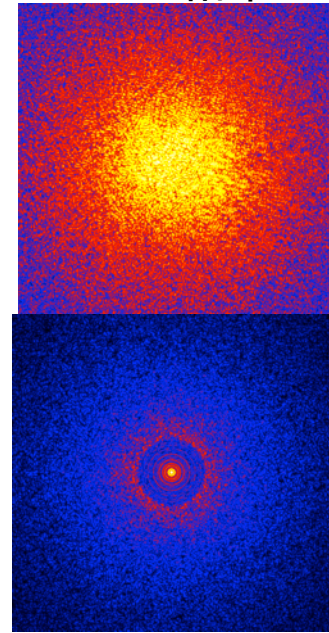


- ◆ : 補償なし
- ◆ : 補償後合計
- ◆ : 制御時間遅延誤差
- ◆ : フィッティング誤差
- ◆ : 測定誤差
- ◆ : 大気分散誤差
- ◆ : エイリアジング誤差

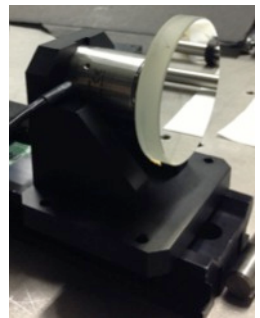
補償前

補償光学後の星像

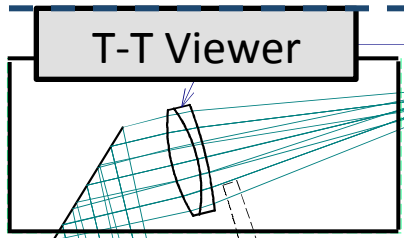
(SR=0.9)



ExAOパート



望遠鏡焦点



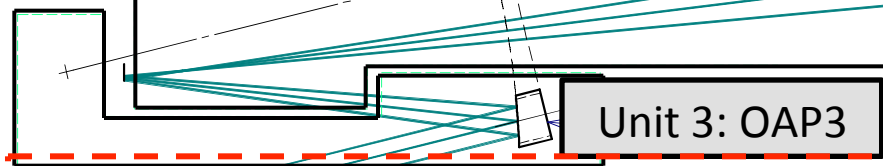
T/Tパート

軸外し放物面鏡(OAP)
要求設置精度 43/50
位置: 100um
角度: 1分角

T/T鏡

Unit 1: OAP1 (完了)

Unit 2: OAP2



Unit 3: OAP3

低次DM

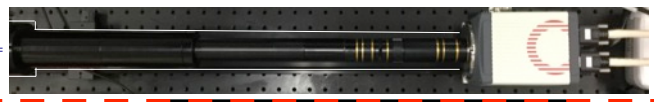
Unit 4: OAP4

Woofersパート

高次DM

Unit 5: OAP5

惑星撮像カメラ
(コロナグラフ・
ポストプロセス部)へ



Woofer
波面センサ(完了)

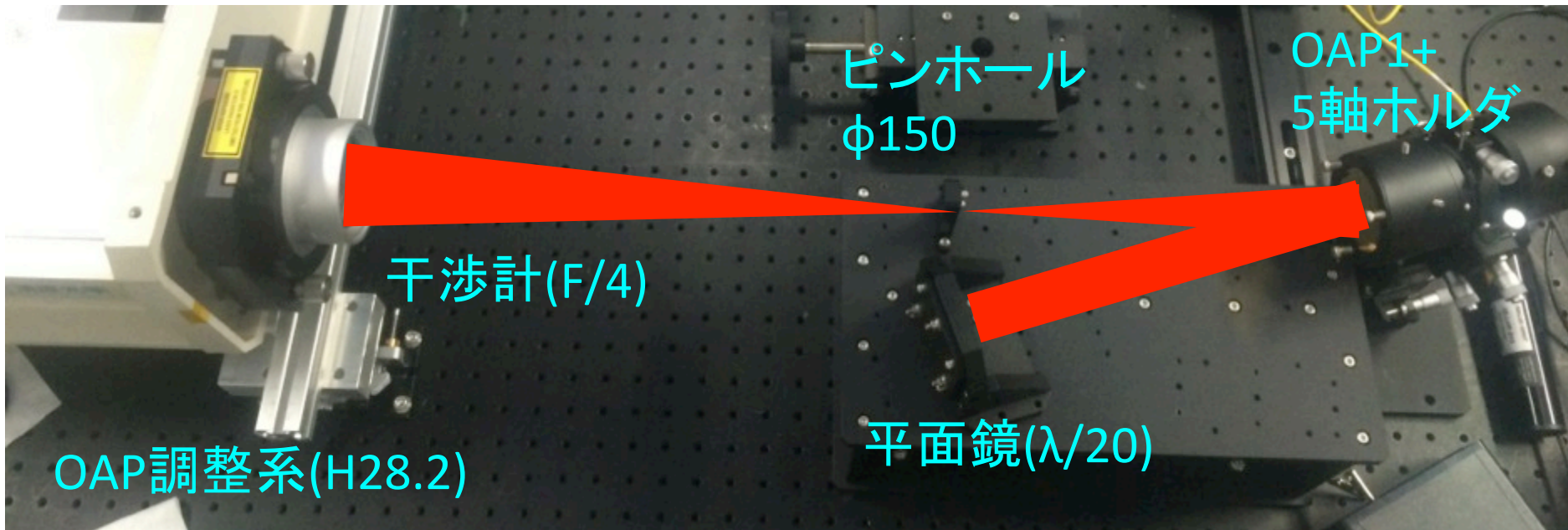
Tweeter
波面センサ

Tweeterパート

OAP1つにつきユニット1つを設定。
ユニット間の並進調整で組み立てていく

SEICAの実機製作: OAP調整

- ◆OAPの5軸自由度をピンホールでX-Y平面の2自由度に
- 1. 干渉計の焦点とピンホールを一致させる($\pm 75\mu\text{m}$)
- 2. ピンホールから広がった光をOAPで平行光へ。
- 3. 機械精度で設置された平面鏡で折り返しOAP→ピンホールへ(2自由度の調整)
- 4. 干渉計でOAPの3自由度調整を行う

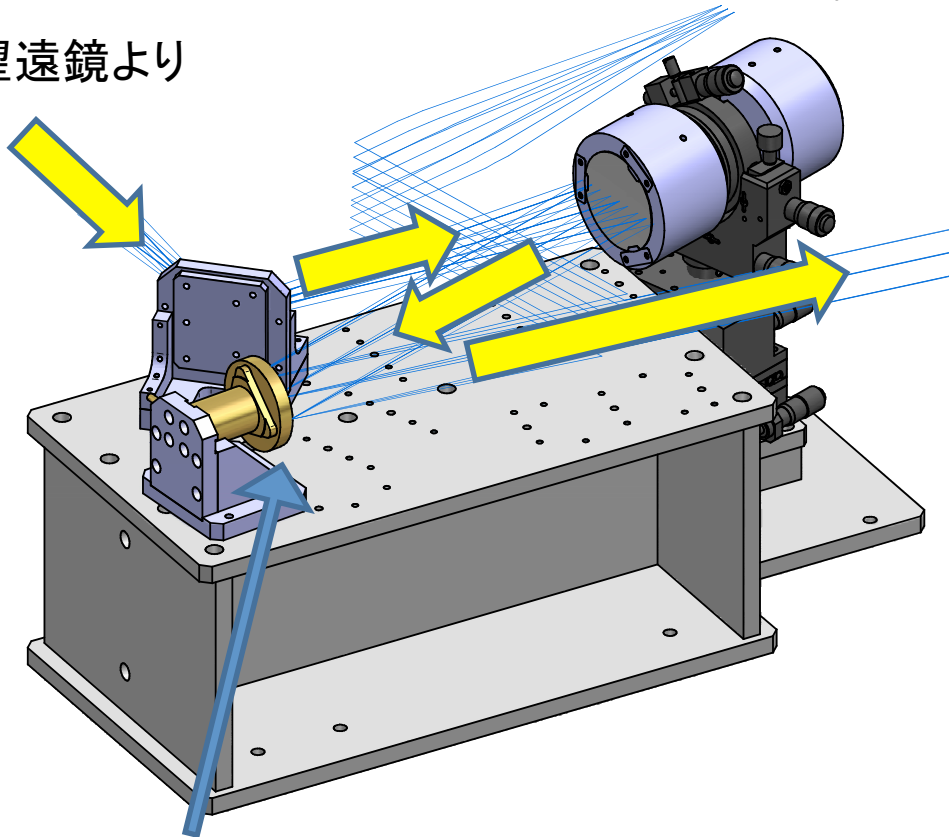


SEICAの実機製作: 調整例) Unit1

ユニット1

OAPホルダ
(X, Y, Z軸並進,
2軸回転ステージ)

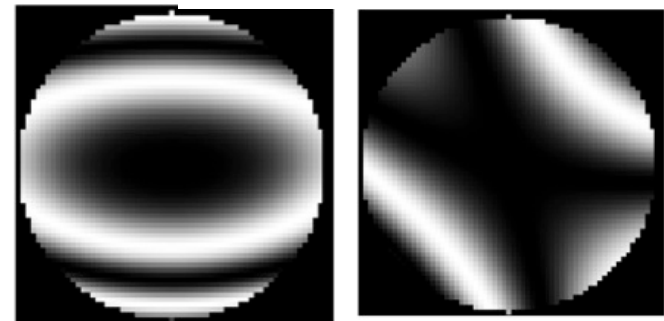
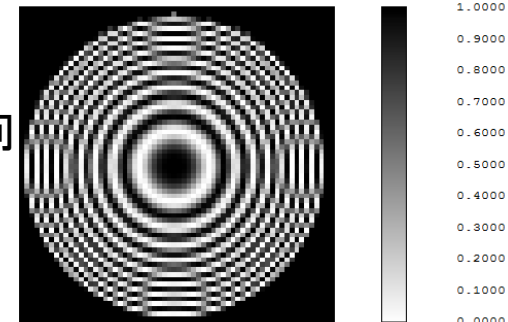
望遠鏡より



TTミラー

- ◆ 2自由度は光線がピンホールに戻る条件で拘束する
- ◆ 3自由度を干渉計の波面形状測定で拘束
 1. 波面形状を直交モードに分解
 2. 各モードの係数×変位量の行列を作成
 3. 逆行列を求めて調整量を推定

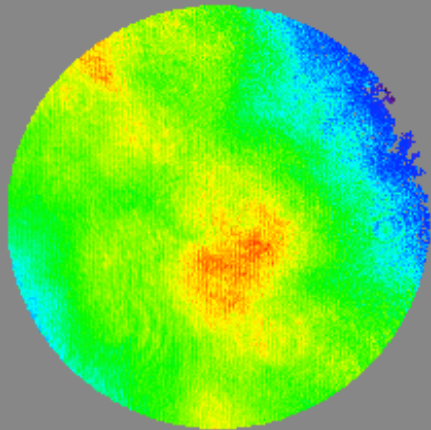
光軸方向
自由度



垂直方向傾き 水平方向傾き

OAP3自由度測定 of 直交モード

SEICAの実機製作: OAP調整結果



光源とピンホールの
要求設置精度

x, y : 100 μm

z : 1 mm

現在の設置精度

x, y : 75 μm

z : 0.1 mm

◆ 要求設置精度

◆ 位置精度: 100 μm

◆ 角度精度: 1分角

→ 波面精度で0.3 μm

◆ ユニット1の波面形状誤差

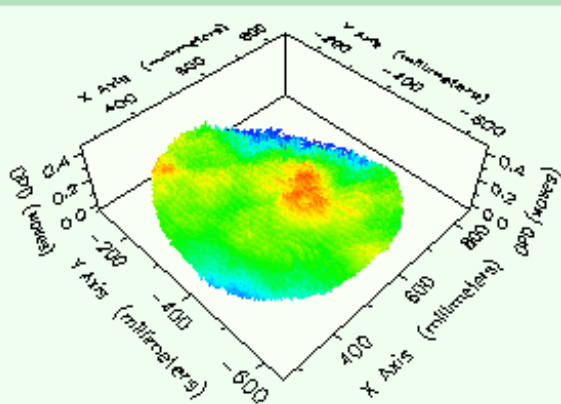
❖ OAP1の位置調整精度

❖ OAP1と平面鏡の鏡面精度

→ 0.10 \pm 0.02 μm (PV)

要求を満たす設置調整完了

IntelliWave: OPD Map [3A1,M,TMD] (waves)
FILE: INTELLIWAVE1.ESD



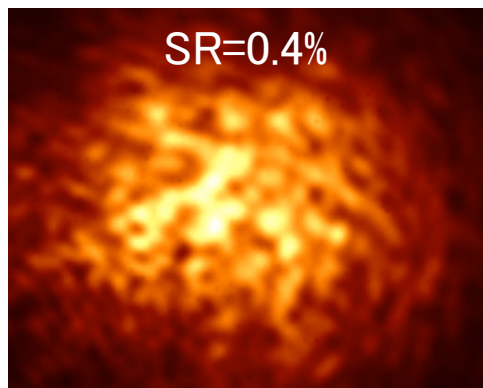
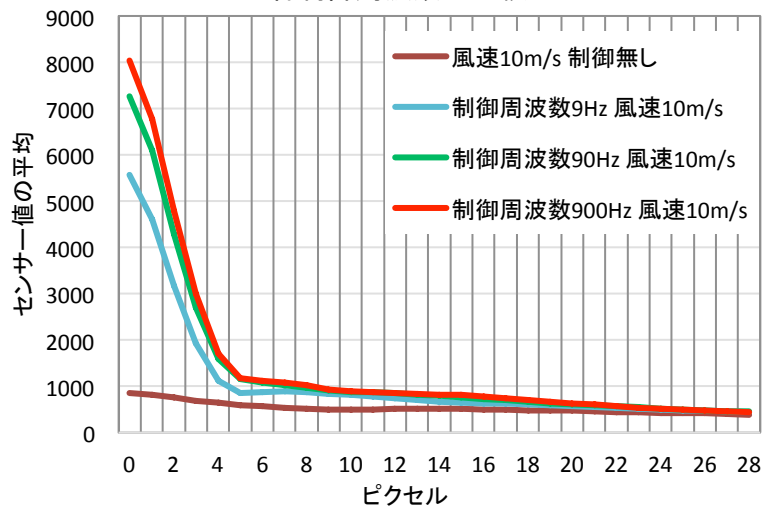
0.1 μm

0.0 μm

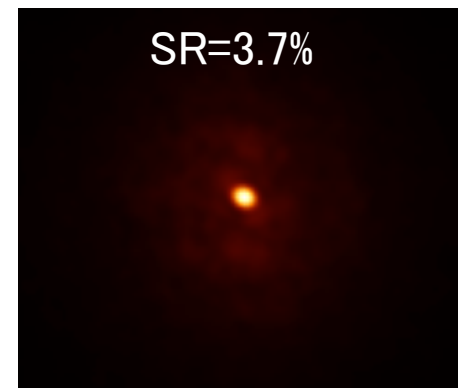
Range (PV) = 0.3085 waves, RMS = 0.0529 wa

ExAOパート:: 評価試験 星像モニタ

各制御周波数の比較

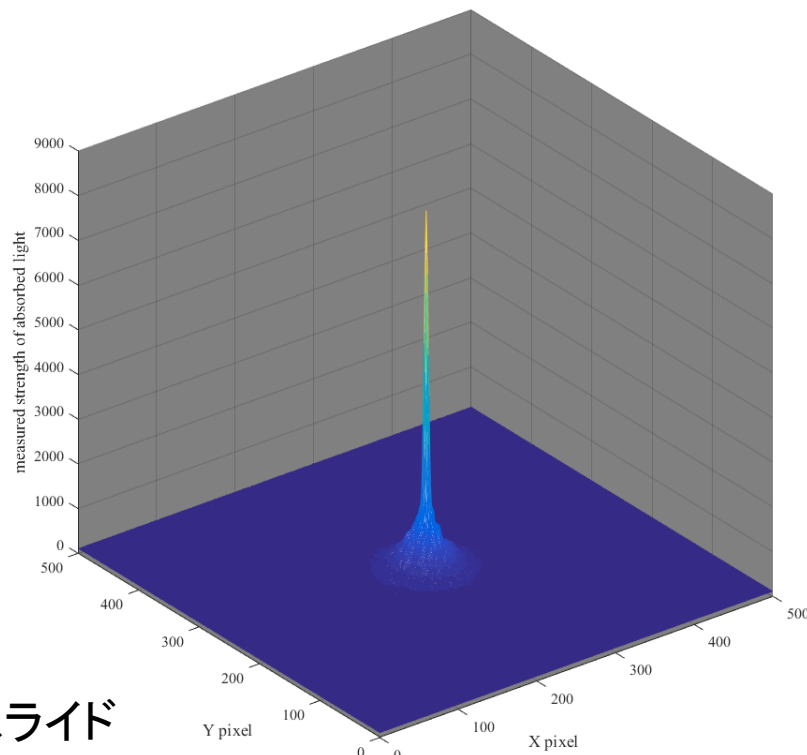
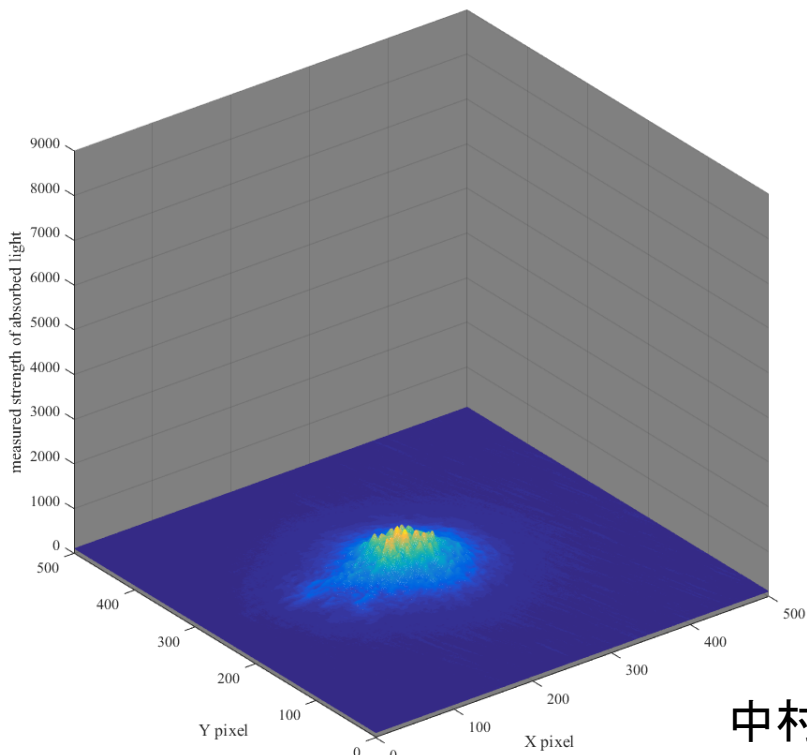


風速 10m/s 制御無し



風速 10m/s 制御周波数900Hz

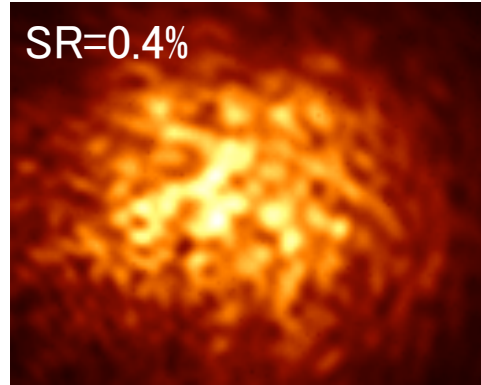
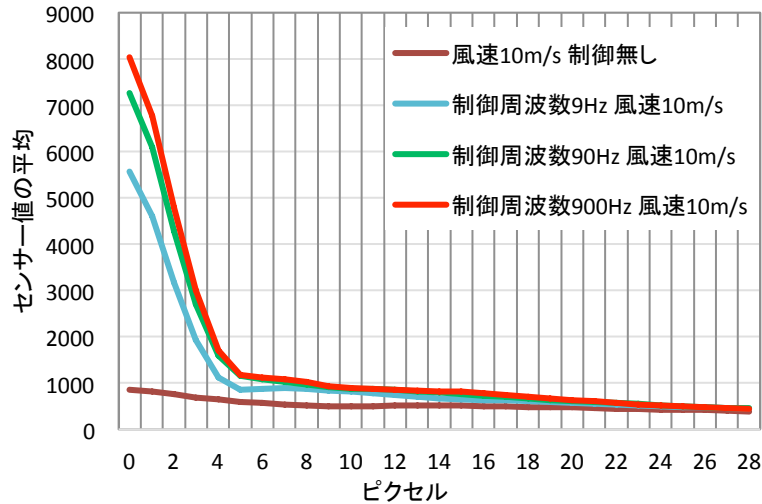
$\lambda = 633\text{nm}$ 風速10m/s 星像モニタ(16秒間平均 26fps)



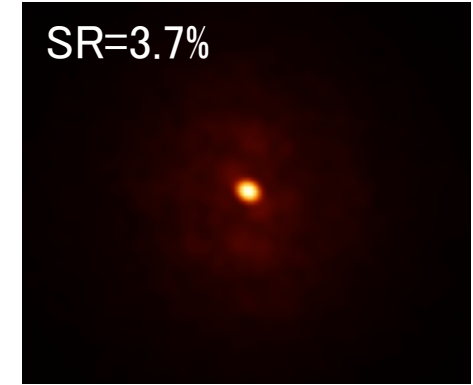
中村君スライド

ExAOパート:: 評価試験 SR測定

観測カメラの画像の比較



風速 10m/s 制御無し

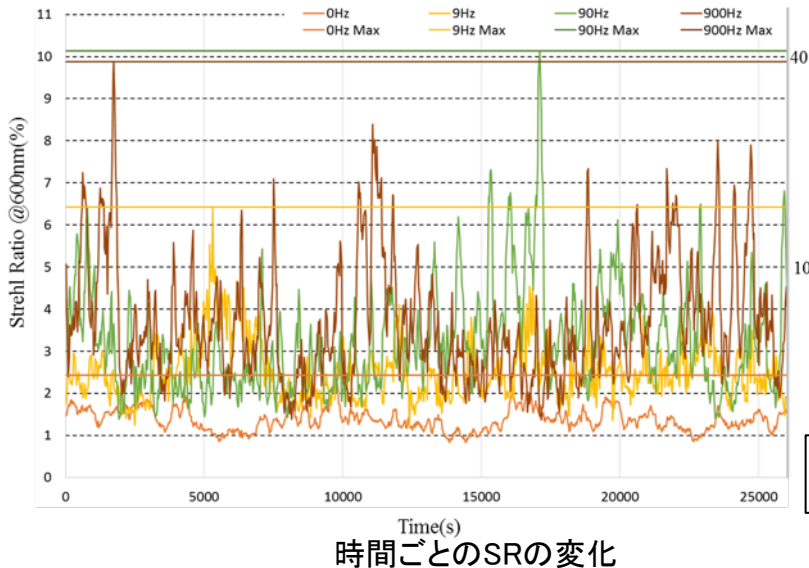


風速 10m/s 制御周波数900Hz

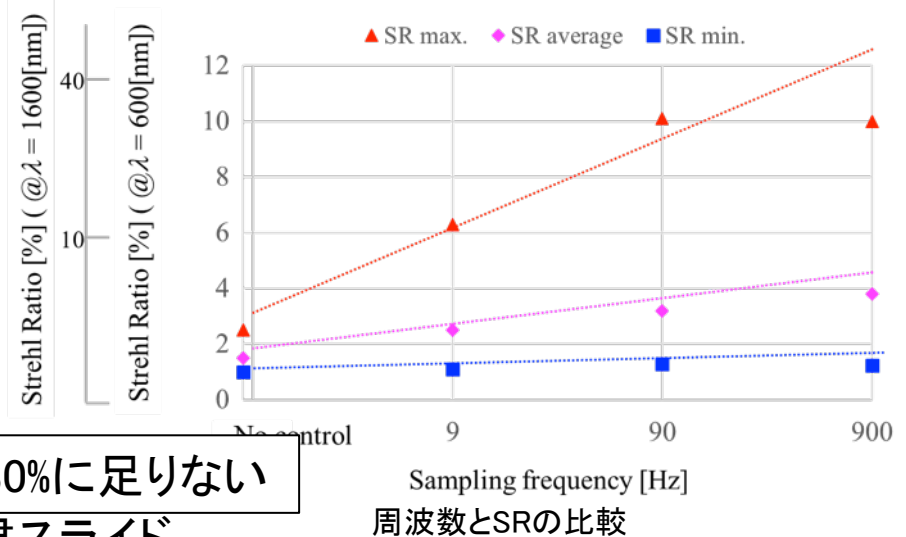
$\lambda=633\text{nm}$ 風速10m/s 星像モニタ(16秒間平均 26fps)

制御無しに比べてSRが上昇しているが
不安定なSR変動

制御帯域が高速化すると補償精度も向上



目標30%に足りない
中村君スライド



周波数とSRの比較

SEICA: 開発グループ

◆ Second-generation Exoplanet Imager with Coronagraphic Ao

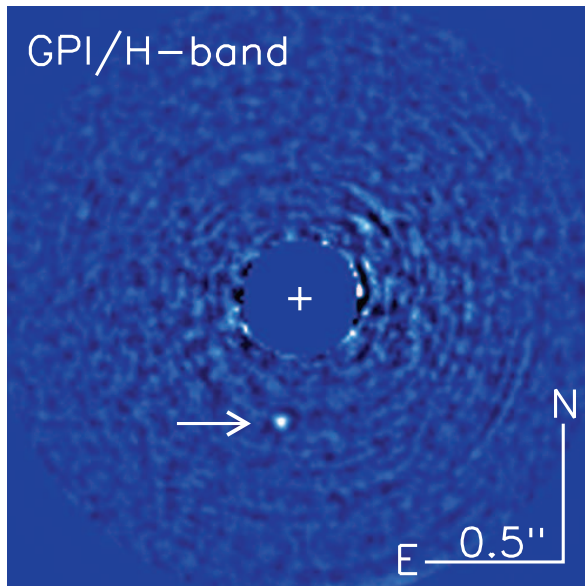
- 全体: 山本
 - 極限補償光学(ExAO)部: 木野, 森本(京大), 松尾(阪大),
入部, 中村(大阪電通大)
 - コロナグラフ部: 村上, 黒田(北大)
 - ポストプロセス部: 小谷(国立天文台), 河原(東大)
- 6拠点, 10名
隔週程度のビデオミーティング

SEICAの目標(他の動向)

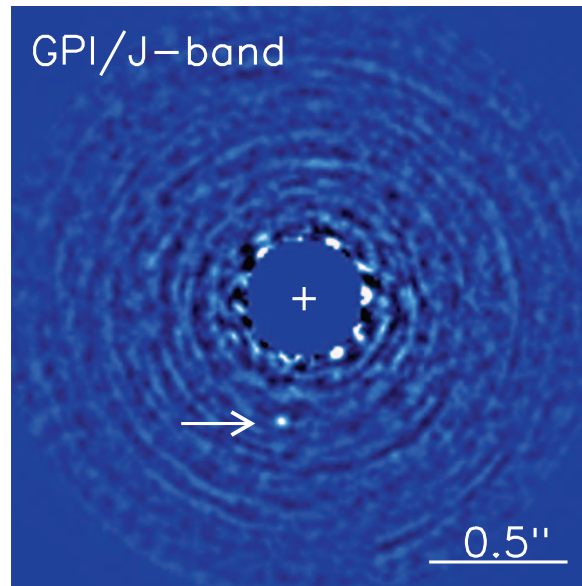
- ◆ Gemini Planet Finder (GPI)は3年間で600個の恒星での[発見]とキャラクタライズをする。
- ◆ 新しい木星質量伴星の検出。

GPIでの木星質量検出 (Macintosh+2015)

2014年12月 (1.65um)



2015年1月 (1.25um)



2015年1月 (3.8um, Keck)

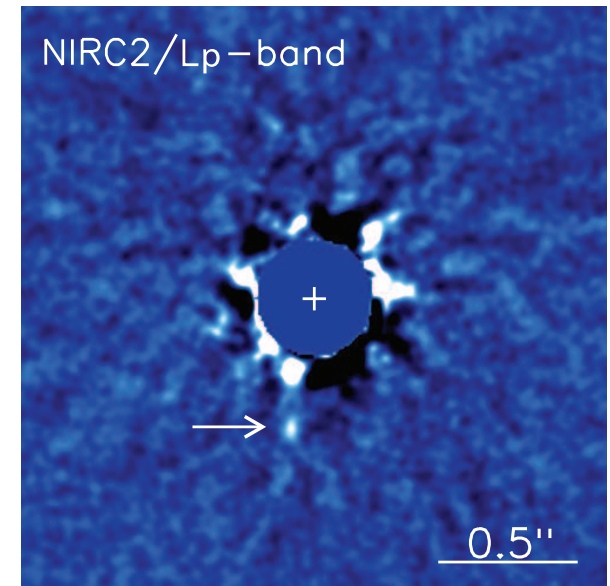


Fig. 1. Images of 51 Eri and 51 Eri b (indicated by the arrow) after PSF subtraction. (A) H-band GPI image from December 2014. **(B)** J-band GPI image from January 2015. **(C)** Lp-band NIRC2 image from January 2015.

バックアップ

惑星形成

分子雲 → 原始星/原始惑星系円盤 → 主系列星

コア集積 (CA) (Pollack+1996, Alibert+2004)

1. ダストが円盤赤道面に沈殿し微惑星を形成
2. 微惑星が成長して原始惑星になり、更に成長して巨大ガス惑星のコアを形成

3. 円盤ガスが散逸

~1000万年

巨大ガス惑星

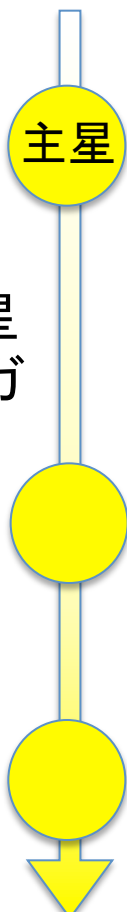
円盤自己重力不安定 (DI) (Boss1997, Vorobyov2013)

1. 質量の大きな円盤で密度の不安定性が発生
2. 円盤全体で不安定性が成長し、局所的な断片が形成される

3. 断片が収縮し巨大ガス惑星が形成

~1000年

巨大ガス惑星

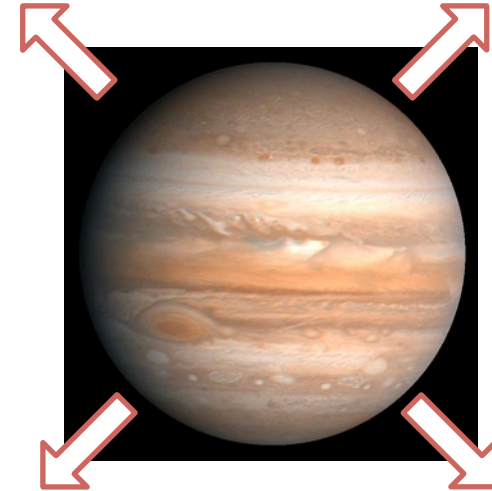


今後の直接撮像でなにを狙うのか？

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.....

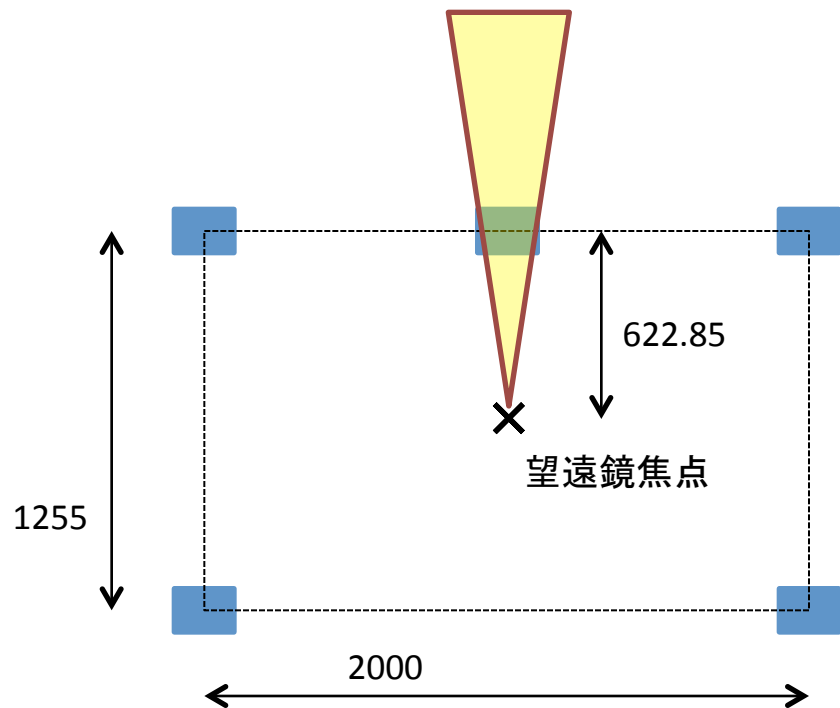
◆惑星の光度変動

- 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

ナスミス台ポート(1/2)

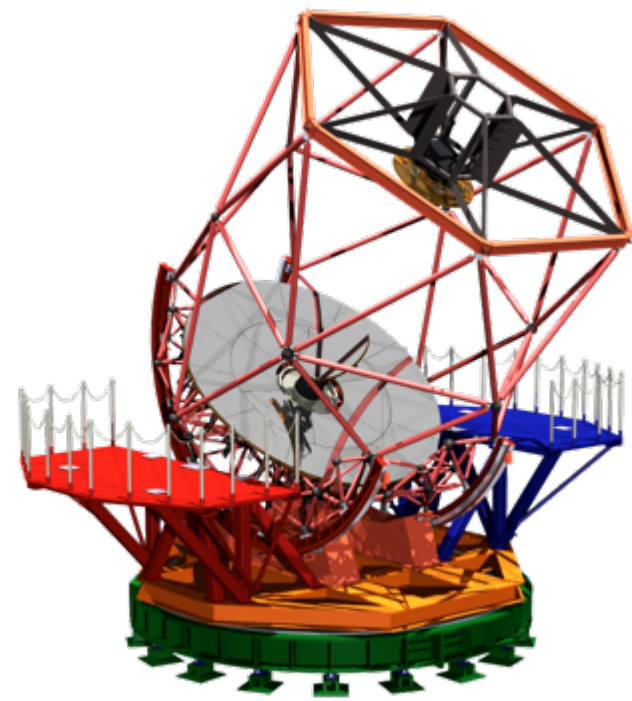
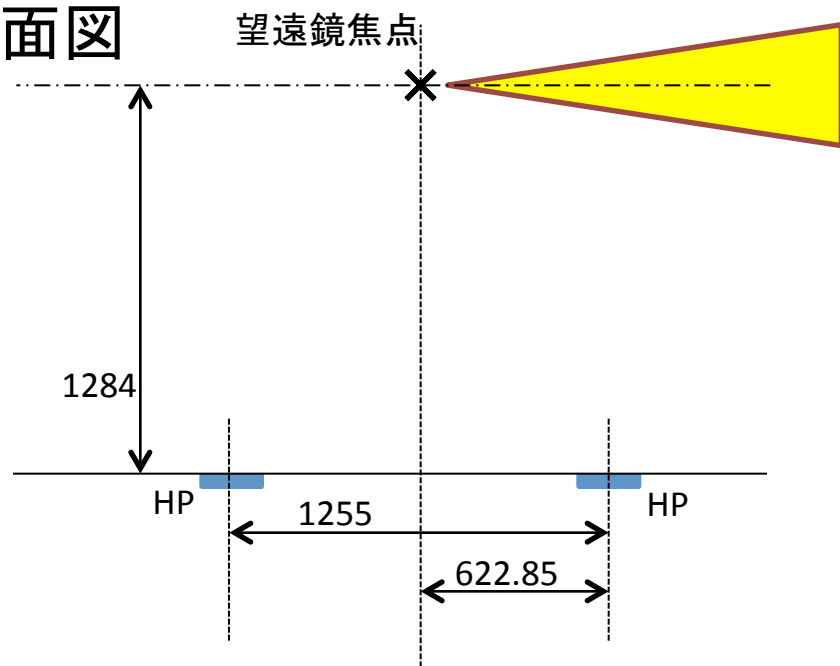
平面図



■ HPサイズ: 250x200

ナスミス台振動特性
観測中での加速度測定が必要
モデル解析？

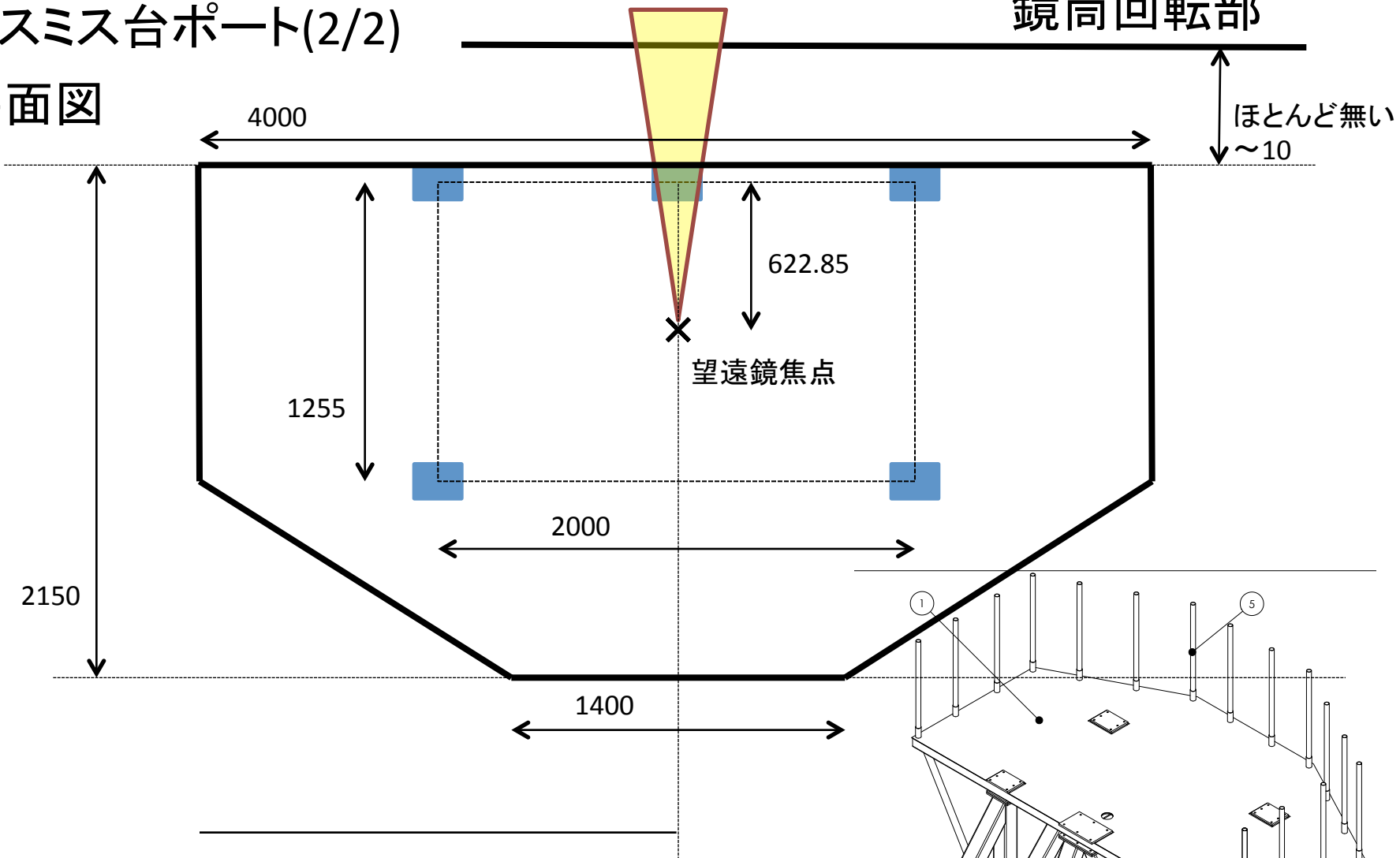
側面図



ナスミス台ポート(2/2)

平面図

鏡筒回転部



最大筐体サイズは~2000x2000

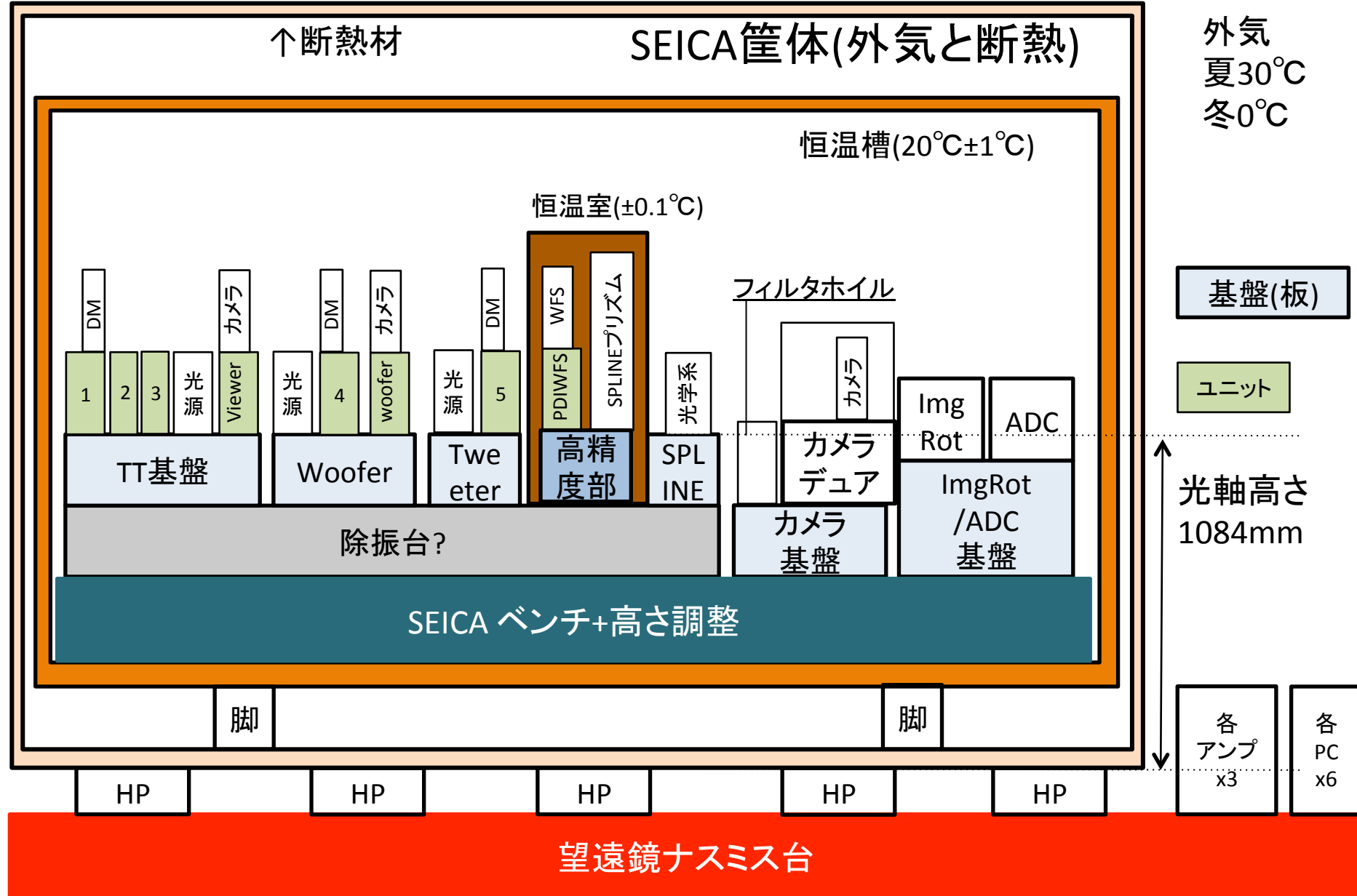
■ HPサイズ: 250x200



左右対称1組

各パートの接触関係案

※実際の高さを表しているわけではない
各ユニット上の光学系は省略



最大筐体サイズは~2000x2000x1500

稼働中・進行中の補償光学計画

プロジェクト	ピクセル数	波面センサタイプ	計測量	サンプリング
Subaru/AO188(日)	10^2	曲率センサ (CWFS)	形状	1kHz
Keck II/AO(米)	10^2	傾斜センサ (SHWFS)	形状	2kHz
LBT/副鏡AO(米)	10^2	Modulated Pyramid	形状	1kHz 第一世代
Palomar/3000(米)	10^3	傾斜センサ (SHWFS)	形状	2kHz
Gemini/GPI(米・加)	10^3	傾斜センサ (SHWFS)	形状	2kHz
VLT/ SPHERE(欧)	10^3	傾斜センサ (SHWFS)	形状	1kHz
Subaru/SCEXAO(米)	10^3	Non-modulated Pyramid	位相	2kHz
Kyoto3.8m/SEICA(日)	10^3	点源回折干渉計 (PDI)	位相と振幅	20kHz 第二世代

SEICAの光学設計: WFS選択

◆ Woofer: シャックハルトマンWFS

– 8x8 (52点), 1000fps

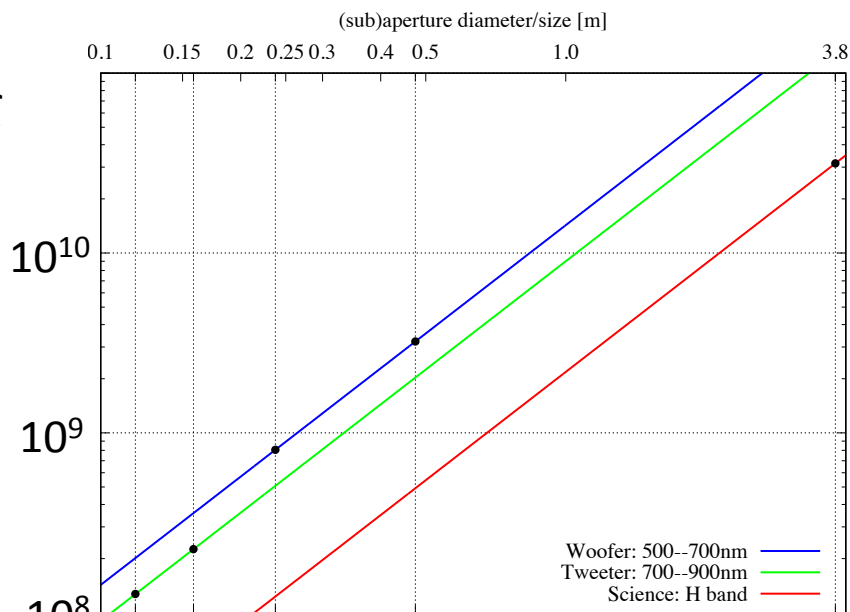
– 測定精度 $\pm 0.1\mu\text{m}$, 測定限界12等@ $0.5\text{--}0.7\mu\text{m}$



◆ Tweeter: 点源回折干渉計WFS (位相計測)

– 24x24 (492点), 8500fps, $\lambda/20$

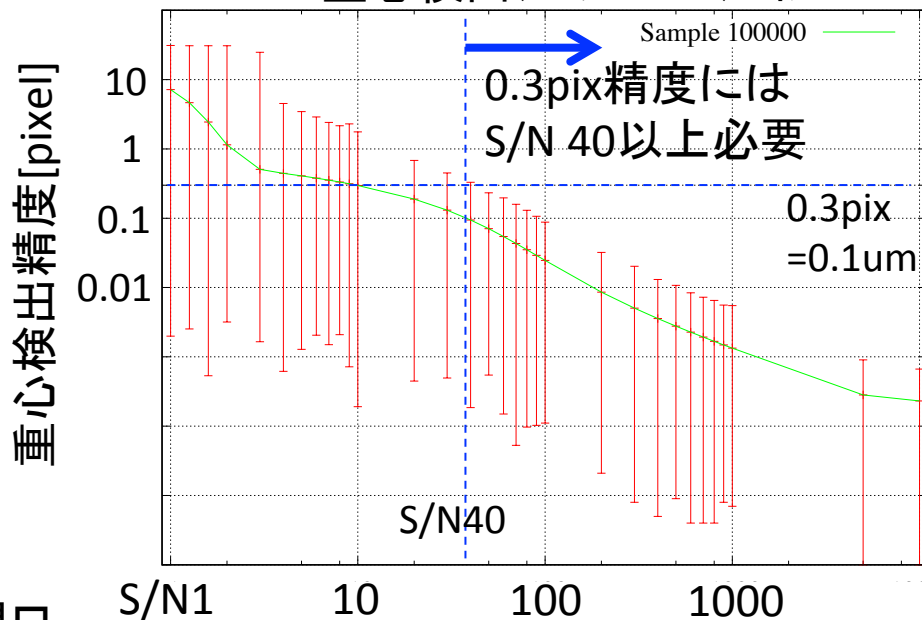
WFSのサブ開口毎の光子数/秒



16分割 8分割

望遠鏡開口

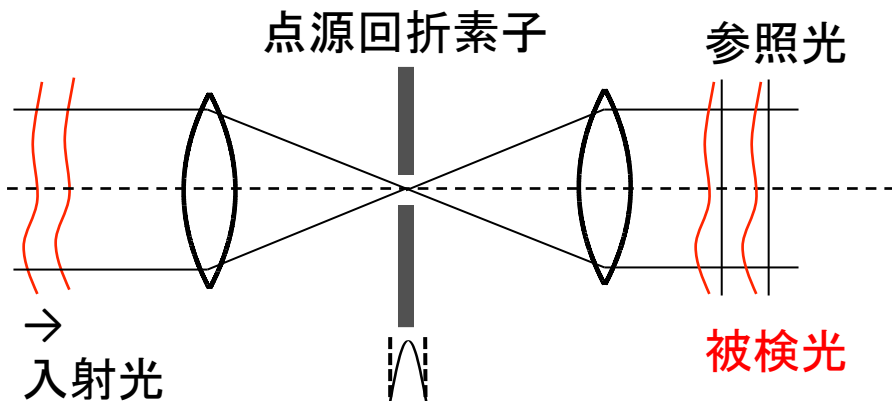
重心検出シミュレーション



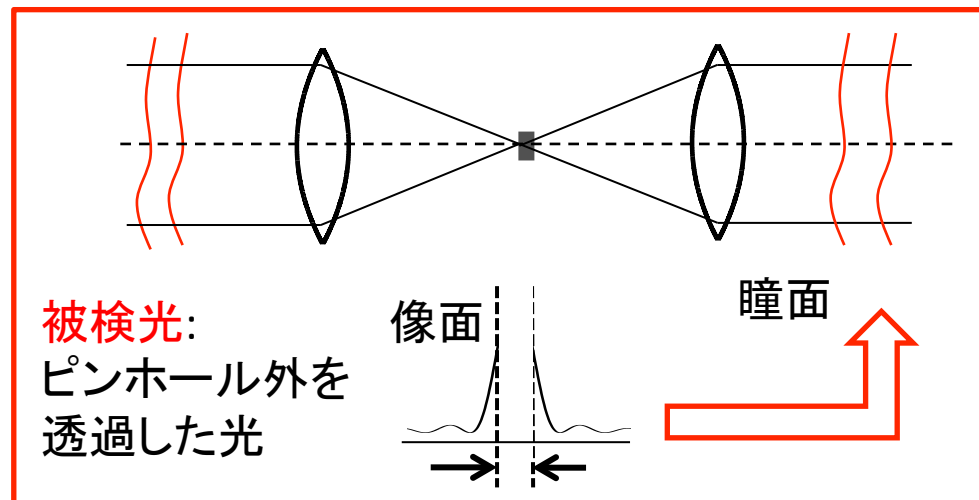
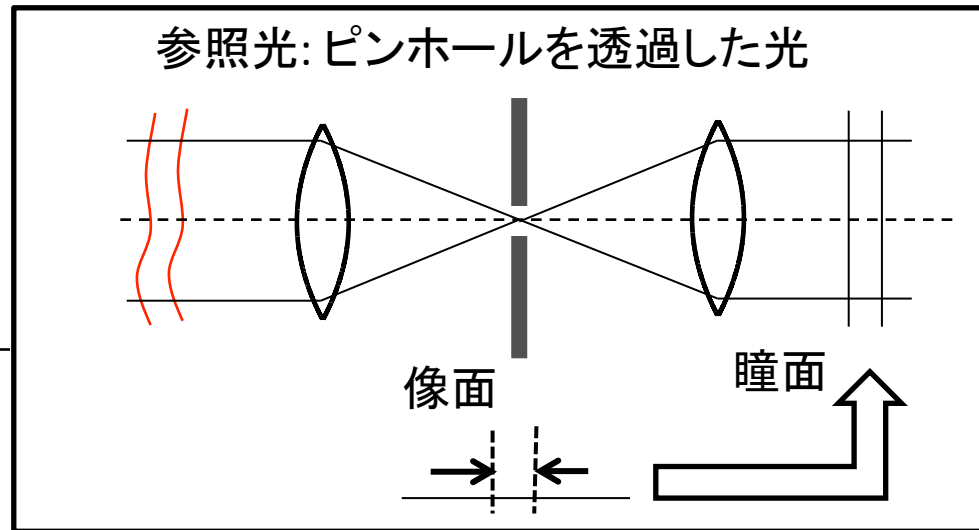
直接位相測定: 点源回折干渉計

◆ 点源回折干渉計(PDI)

- ピンホール内透過(参照光)とピンホール外透過(被検光)の干渉を測定。



- ピンホール径
エアーリー像の中心/外周で分離
- ・強度差
 - ・機械的ピストン
 - ・偏光



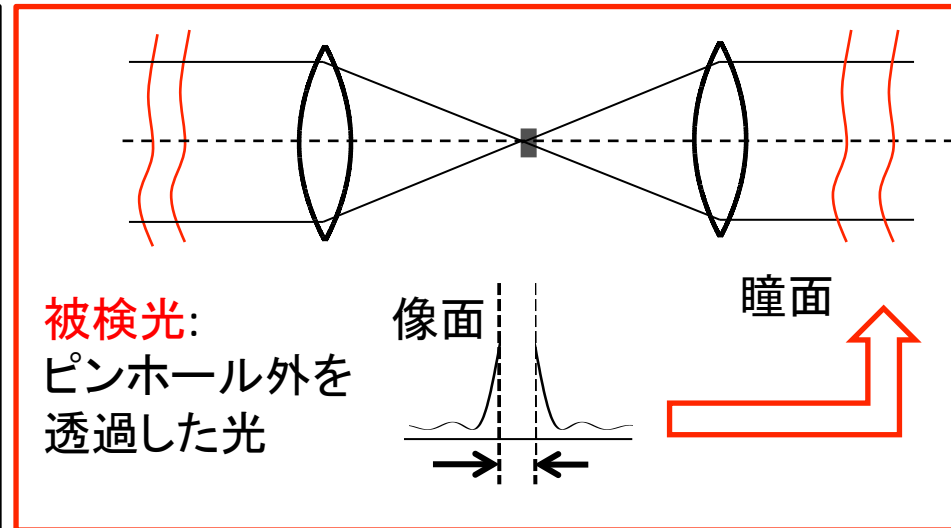
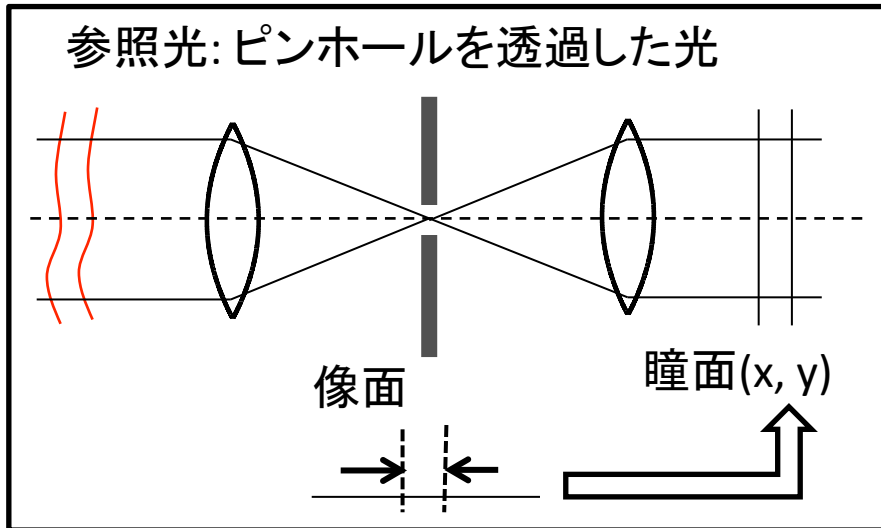
直接位相測定: 点源回折干渉計

◆ 点源回折干渉計(PDI): 理想的(非物理的)

入射光の電場 $E_{in}(x, y) = E_0[1+\varepsilon(x, y)] \exp [i\phi(x, y)]$

$\varepsilon(x, y)$: 強度分布

$\phi(x, y)$: 位相分布 (波面形状)



参照光振幅 $E_{ref} = E_0 \exp [i\phi_{ave}] \sim E_0$

被検光振幅 $E_{test} = E_0 [1+\varepsilon(x, y)] \exp [i\phi(x, y)]$

位相差0 $I_0(x, y) = 1/2 |E_{ref} + E_{test}|^2 = 1/2(I_{ref} + I_{test} + 2|E_{ref}||E_{test}|\cos\phi(x, y))$

位相差 π $I_\pi(x, y) = 1/2 |E_{ref} - E_{test}|^2 = 1/2(I_{ref} + I_{test} - 2|E_{ref}||E_{test}|\cos\phi(x, y))$

位相差 $\pi/2$ $I_{\pi/2}(x, y) = 1/2 |iE_{ref} + E_{test}|^2 = 1/2(I_{ref} + I_{test} + 2|E_{ref}||E_{test}|\sin\phi(x, y))$

位相差 $-\pi/2$ $I_{-\pi/2}(x, y) = 1/2 |iE_{ref} - E_{test}|^2 = 1/2(I_{ref} + I_{test} - 2|E_{ref}||E_{test}|\sin\phi(x, y))$

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

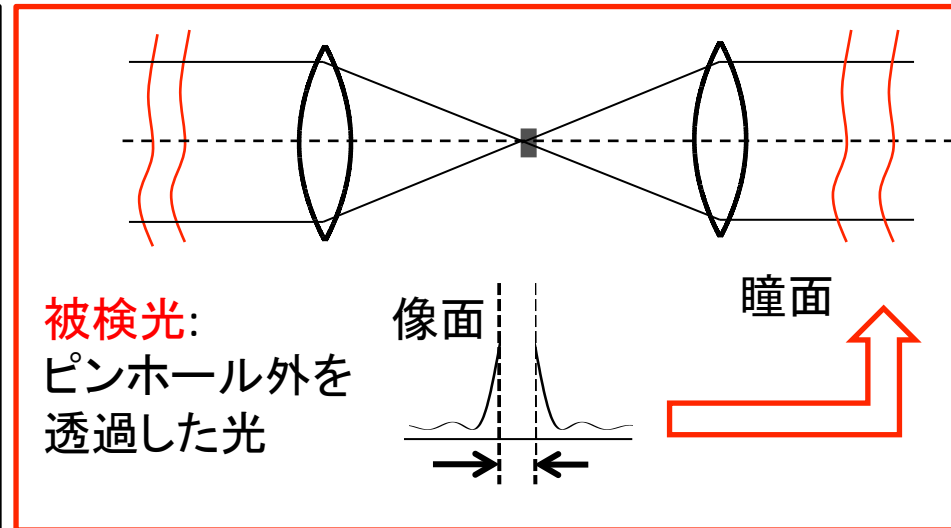
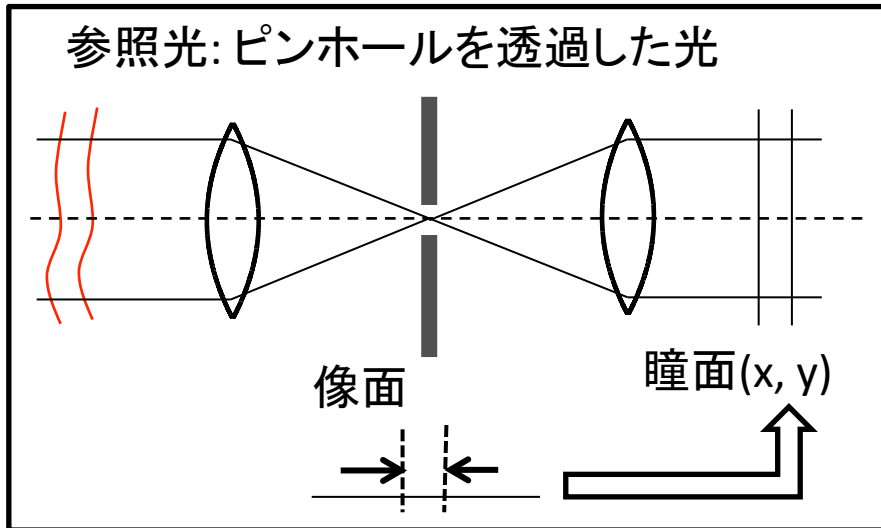
直接位相測定: 点源回折干渉計

◆ 点源回折干渉計(PDI): 現実的

入射光の電場 $E_{in}(x, y) = E_0[1+\varepsilon(x, y)] \exp [i\phi(x, y)]$

$\varepsilon(x, y)$: 強度分布

$\phi(x, y)$: 位相分布 (波面形状)



参照光振幅

$$E_{ref} = E_0 \exp [i\phi_{ave}] \sim E_0$$

→ ピンホール回折による
強度・位相分布 $E_{pin}(x, y)$

被検光振幅

$$E_{test} = E_0 [1+\varepsilon(x, y)] \exp [i\phi(x, y)]$$

$$= E_{in}(x, y) - E_{pin}(x, y)$$

ピンホール部分欠損の影響がある

位相差0

$$I_0(x, y) = 1/2 |E_{ref} + E_{test}|^2 = 1/2 |E_{pin}|^2$$

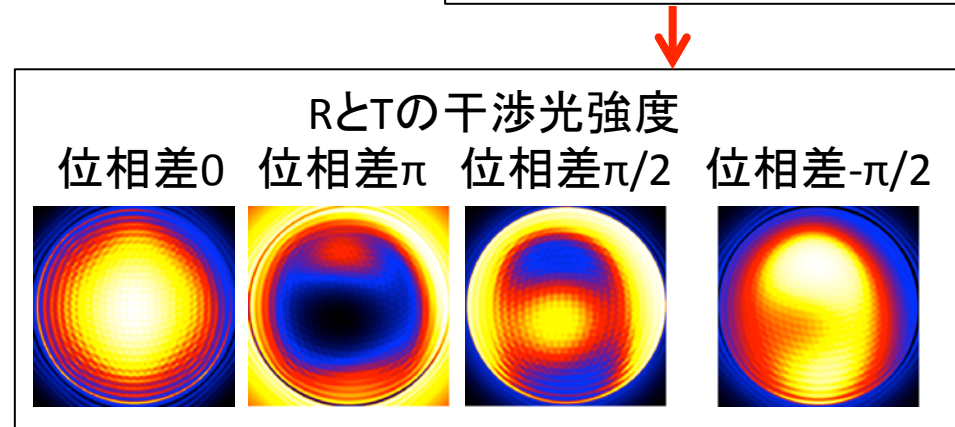
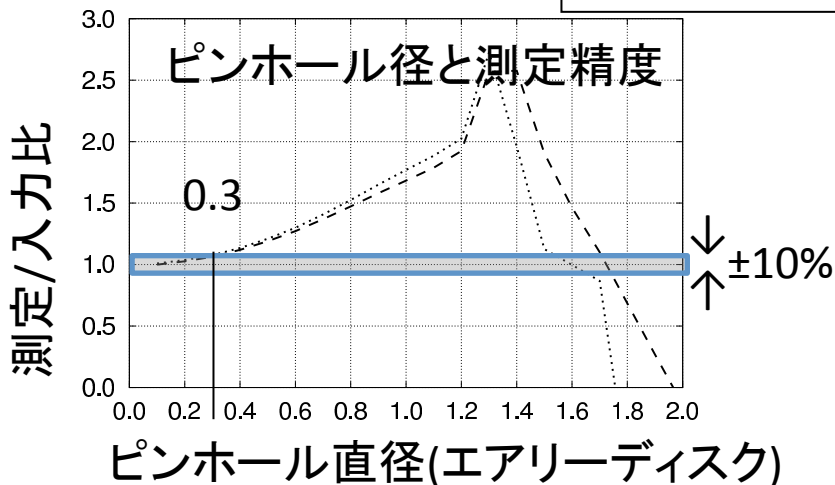
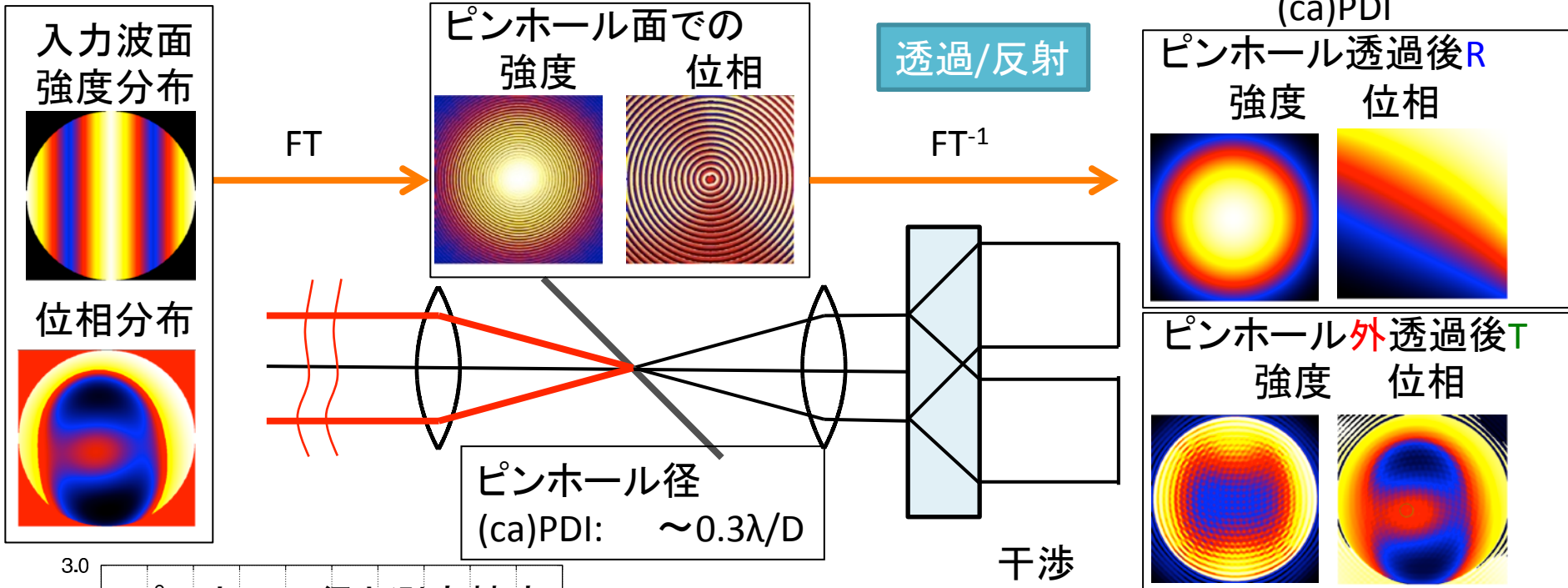
位相差 π

$$I_\pi(x, y) = 1/2 |E_{ref} - E_{test}|^2 = 1/2 |2E_{pin} - E_{in}|^2$$

従来通りの差し引きでは不十分で補正が必要になる(後述)。

WFSの性能評価シミュレーション

◆ 入力した波面の情報をどれだけ測定出来るか。



性能評価シミュレーション. 位相測定

◆ 入力した波面の位相を測定。

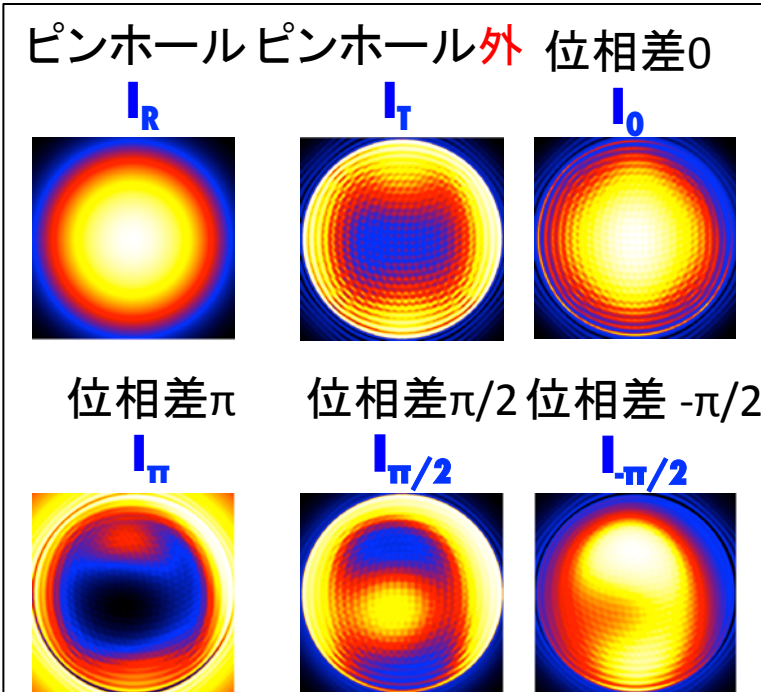
入力: Zernike 収差の8モード
(tip/tilt, 非点x-y, defocus, コマ, 球面)
0-1.0 λ(P-V)まで

測定: PDIWFS

$$\phi = \text{atan} \left(\frac{I_{\pi/2} - I_{-\pi/2}}{I_0 - I_{\pi}} \right)$$

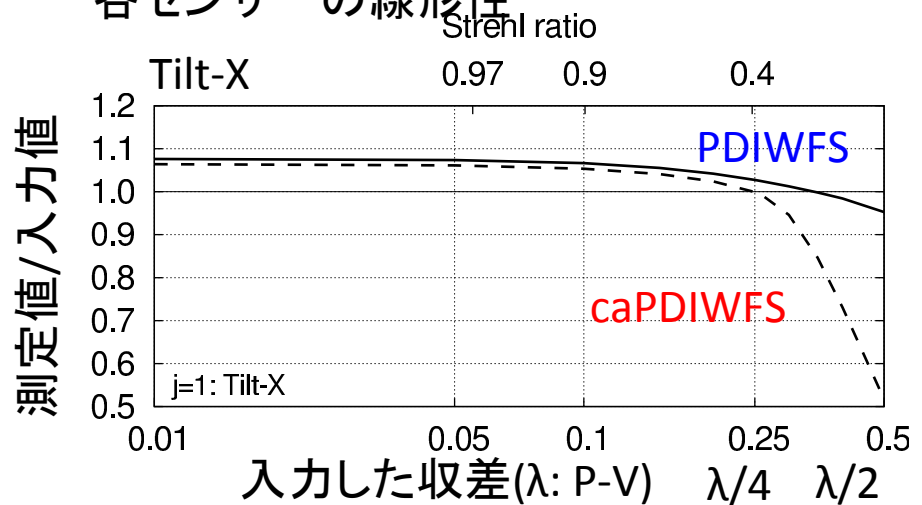
: caPDIWFS

$$\phi = \text{asin} \left(\frac{I_{\pi/2} - I_{-\pi/2}}{2\sqrt{I_{ref} I_{test}}} \right)$$



- 各WFSの、各モードでの振る舞いは同じ
 - caPDIは $-\lambda/4$: $+\lambda/4$ で高精度測定可能
 - PDIは $-\lambda/2$: $+\lambda/2$ で測定可能
- 両センサとも10%程度のずれがあるが、 $<\lambda/4$ の範囲で線形性が高いため、キャリブレーションが可能である。

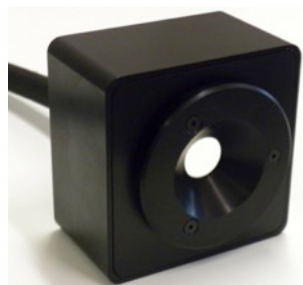
各センサーの線形性



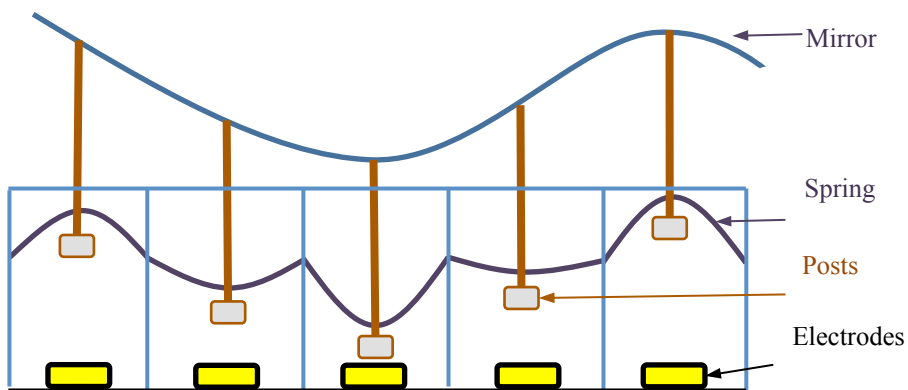
補償光学系の各素子

可変形鏡(DM: Deformable Mirror)

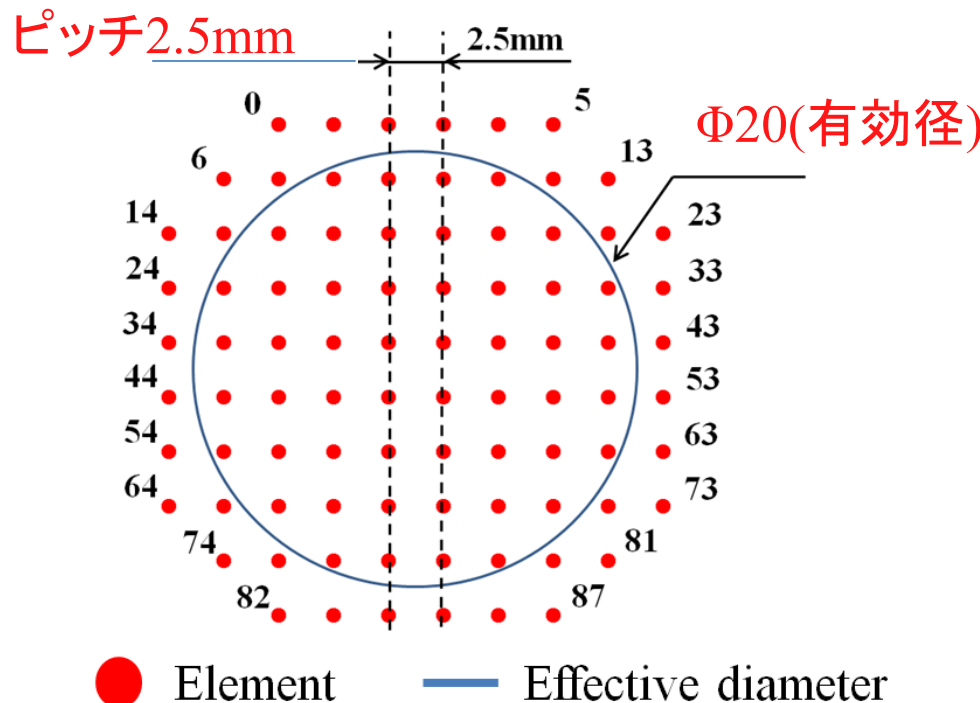
◆ (ALPAO社製 ALPAO DM 88-25)



Elements	88(52)
Effective diameter	20mm



Actuation principle of DM



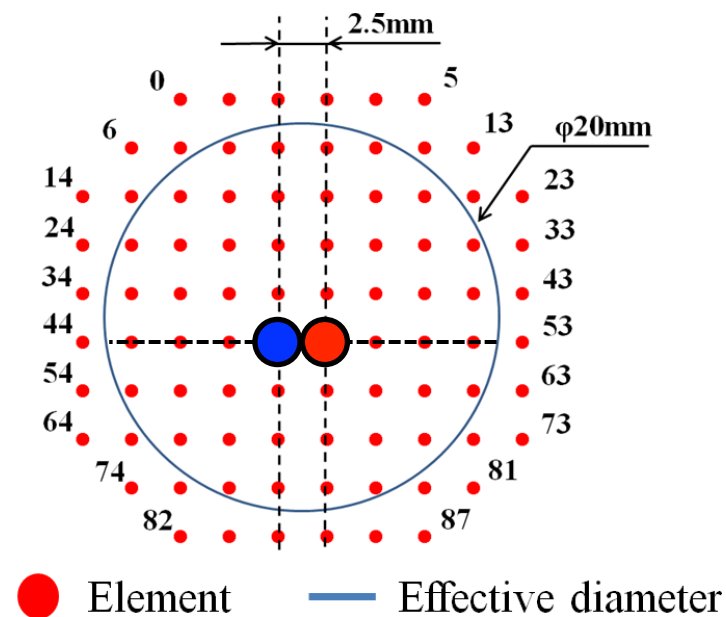
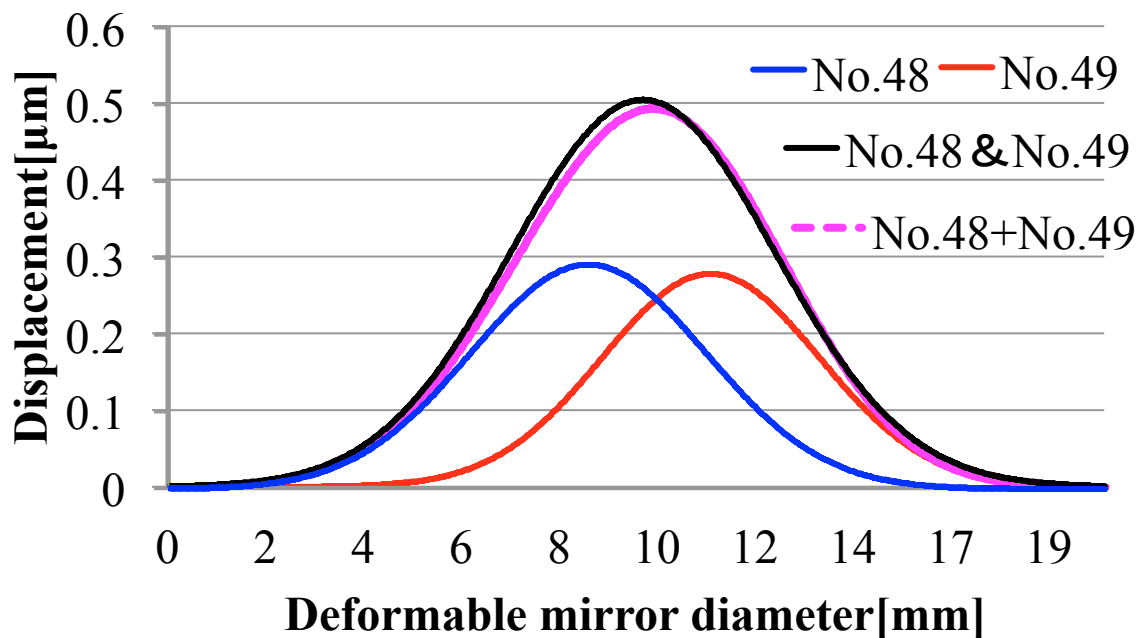
正規化された制御信号(-1~1)を
コンピュータから入力することで制御

補償光学系の各素子

可変形鏡(DM: Deformable Mirror)

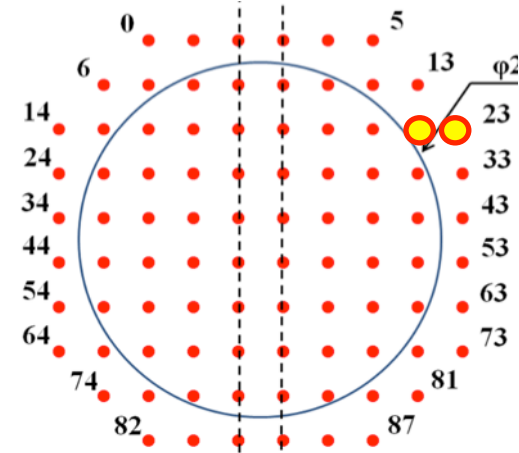
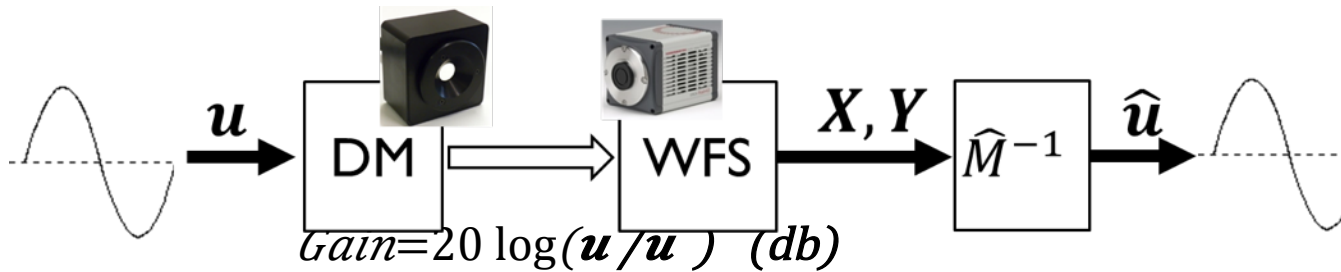
◆ (ALPAO社製 ALPAO DM 88-25)

◆ DM素子を複数同時に動作させた際の関係

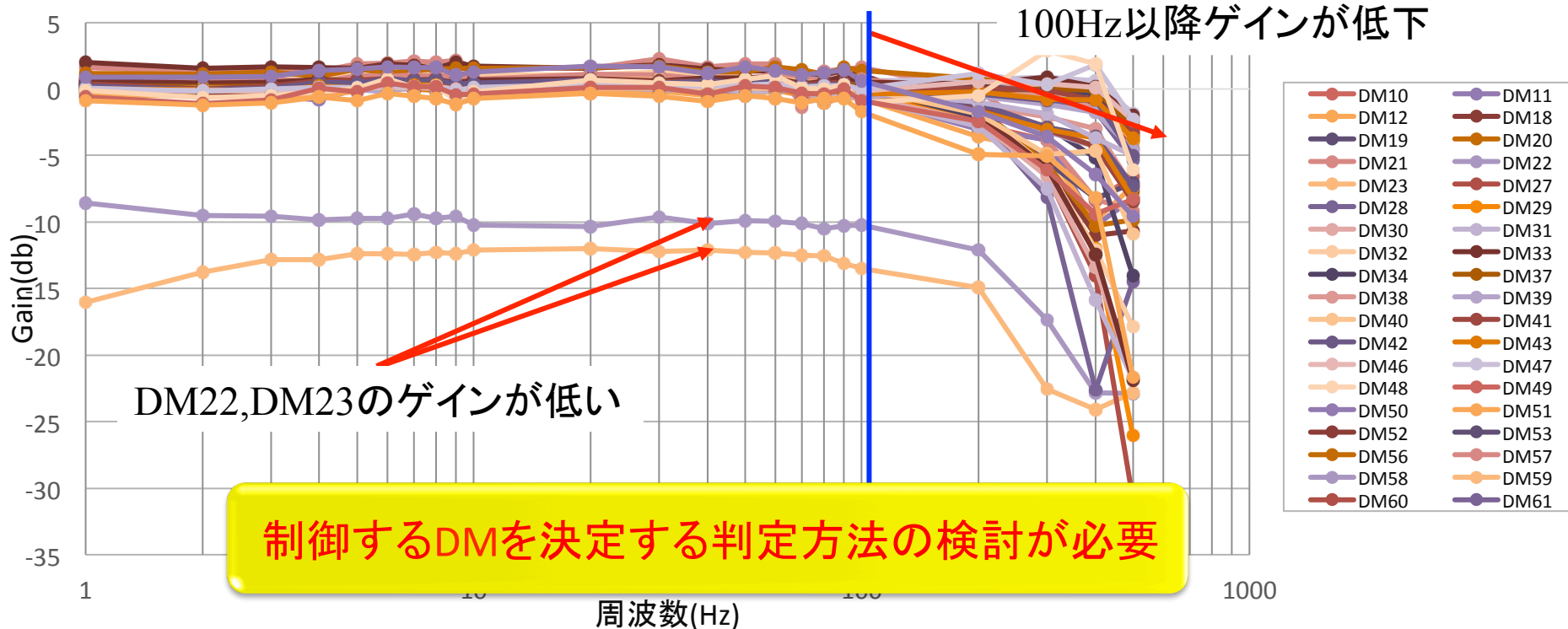


複数素子の変形の重ね合わせによって形状が決定

DMの周波数応答実

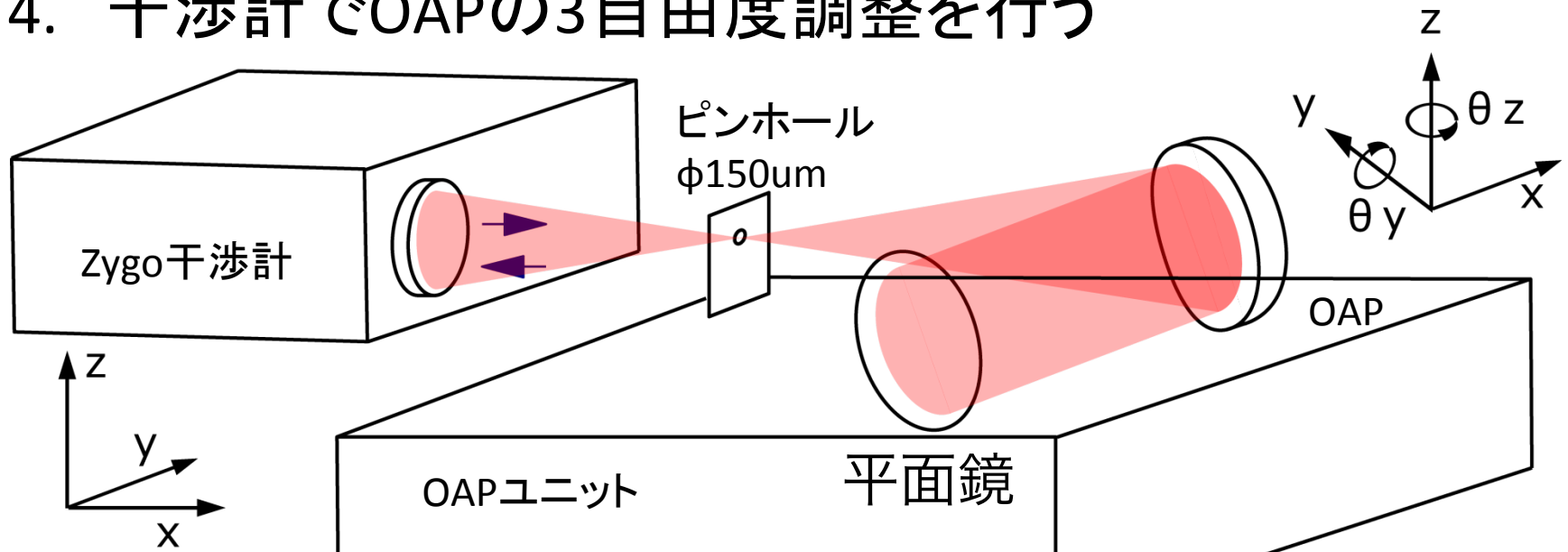


DMの周波数応答 (WFSのサンプリング周期 880Hz)



SEICAの光学系設計: OAP調整

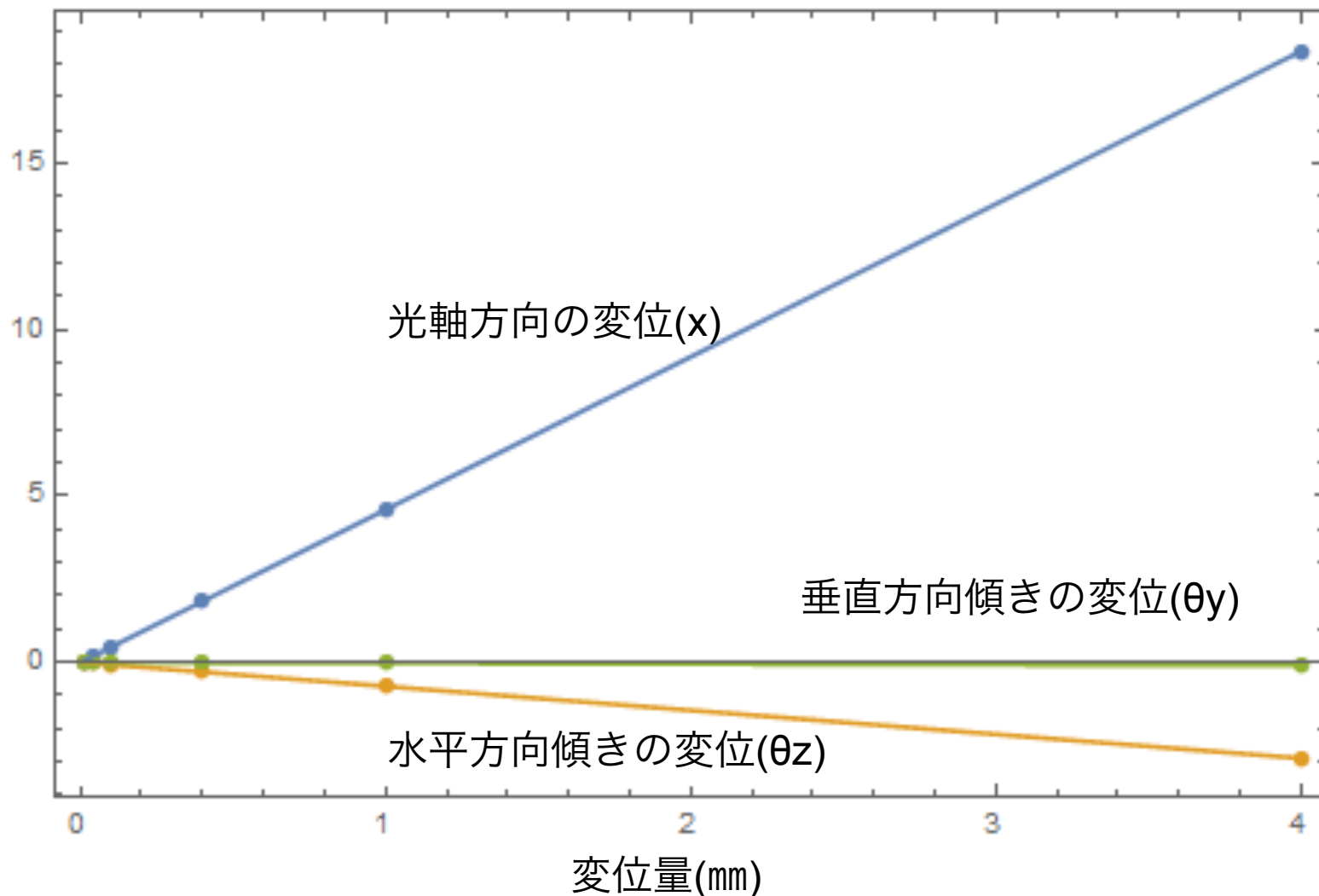
- ◆OAPの5軸自由度をピンホールでX-Y平面の2自由度に
 - ◆ピンホールは機械精度+干渉計で100um精度で設置
1. 干渉計の焦点とピンホールを一致させる($\pm 50\mu\text{m}$)
 2. ピンホールから広がった光をOAPで平行光へ。
 3. 機械精度で設置された平面鏡で折り返しOAP→ピンホールへ(2自由度の調整)
 4. 干渉計でOAPの3自由度調整を行う



調整値と各Zernike係数の線形性1/2

Zernike係数

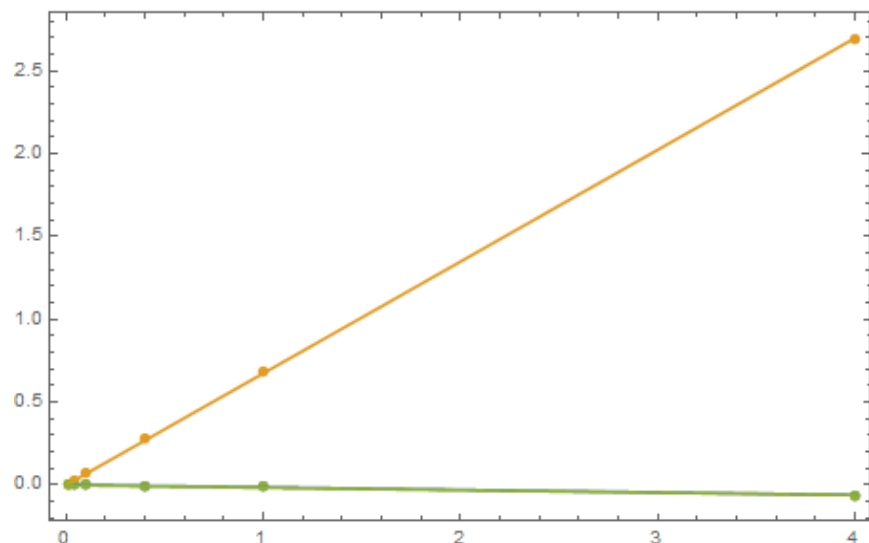
Defocusの変位量(A4)



調整値と各Zernike係数の線形性2/2

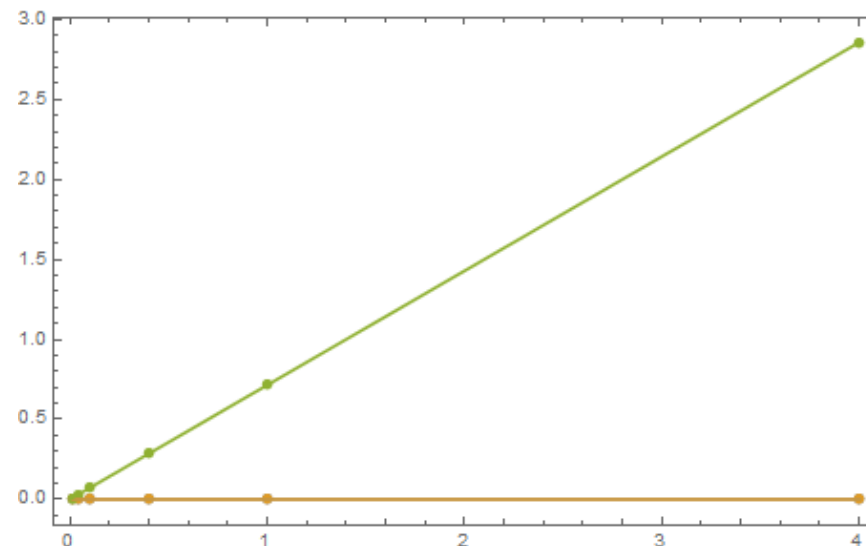
Zernike係数

横向きAsigmatizm の変位量(A5)



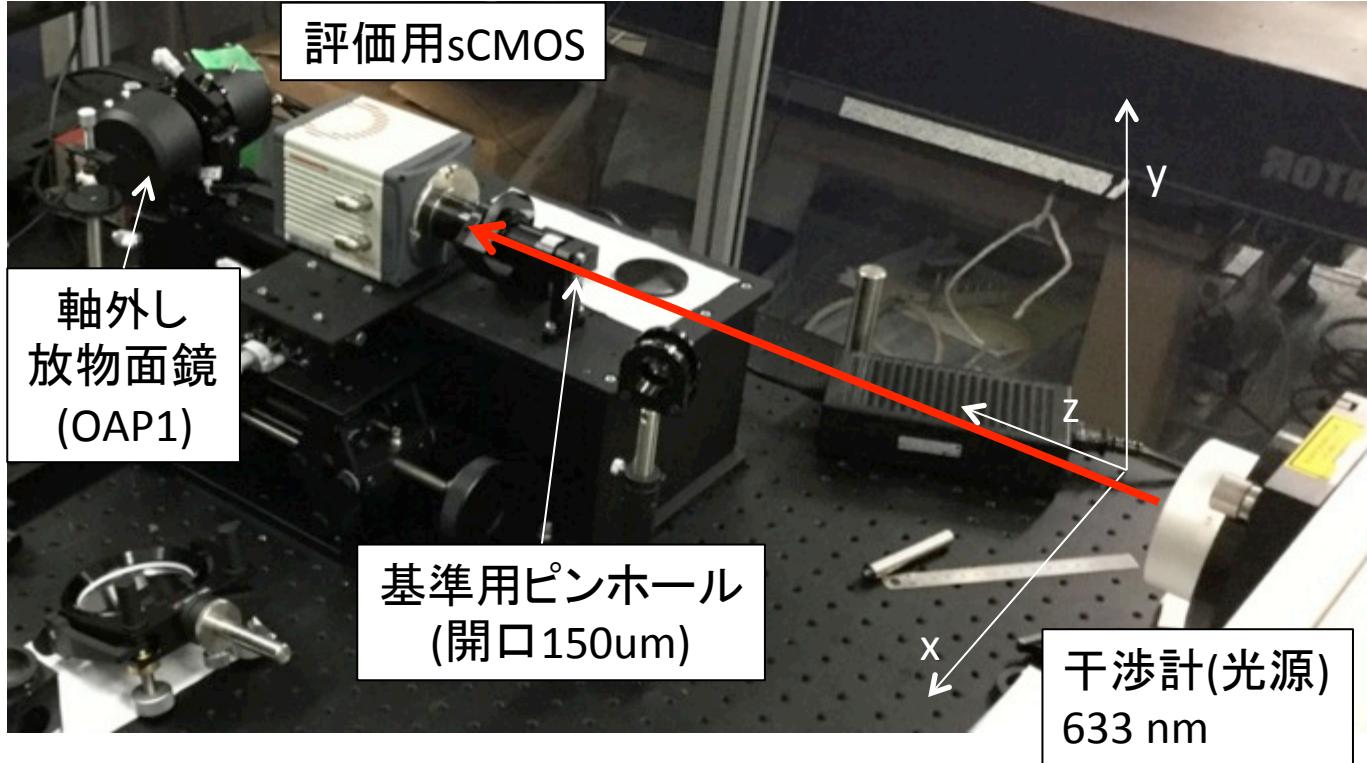
Zernike係数

斜め向きAsigmatizm の変位量(A6)



とりあえず、 $(A4, A5, A6) \leftrightarrow (x, \theta z, \theta y)$ の3成分で線形性が成り立つとみなす。

SEICAの光学系設計: Unit1調整



光源の要求設置精度

x, y : 100 um

z : 1 mm



現在の設置精度

x, y : 75 um

z : 0.1 mm

光源と調整の基準ピンホールの位置調整が完了した。
[前回まで]

[今回]
放物面鏡(OAP1)の位置調整完了
位置精度: 100um
角度精度: 1分角
要求精度を満たす。

現在

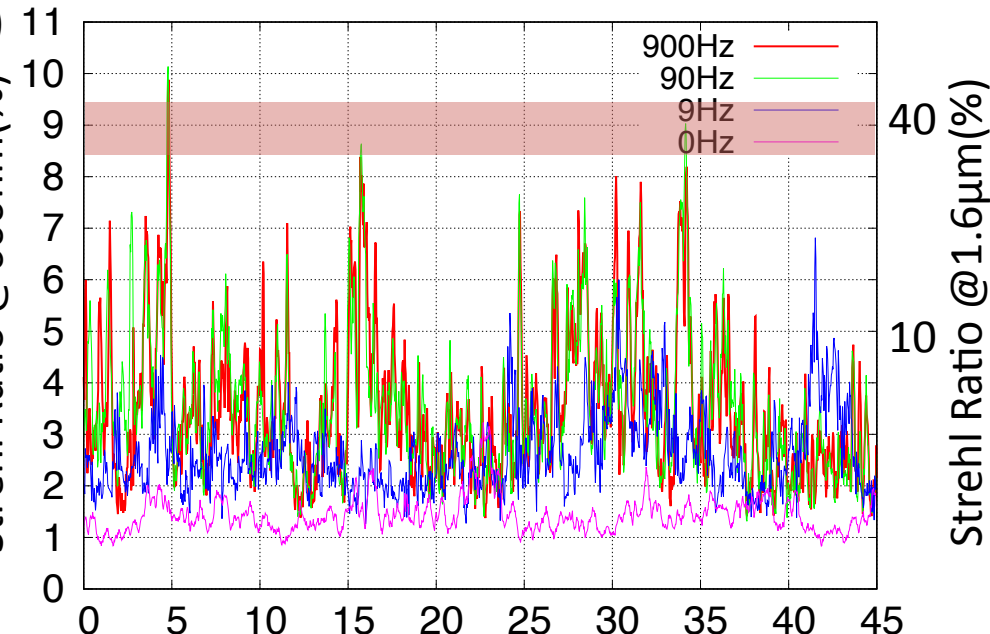
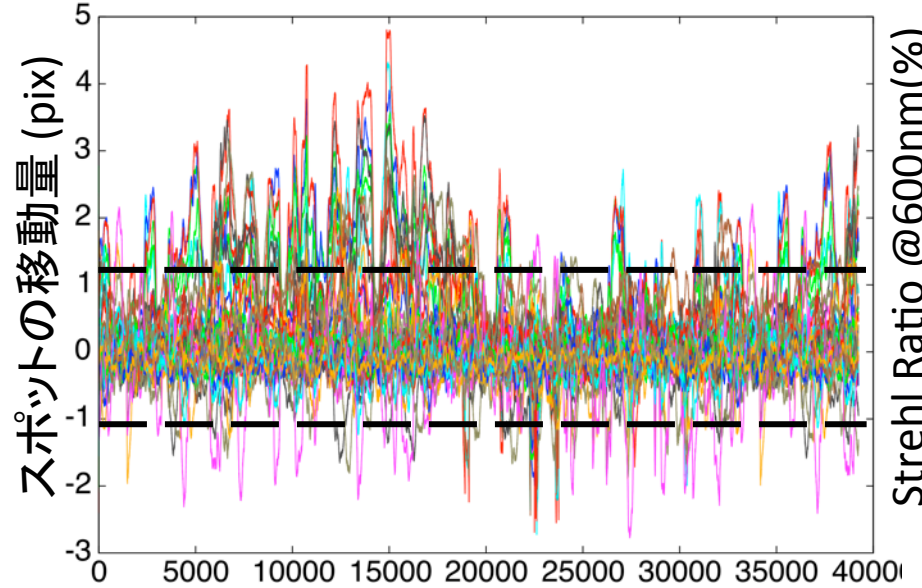
望遠鏡 → SEICA (OAP1) → T/T
→ リレー(OAP2)
→ Woofer(OAP3)
→ リレー(OAP4)
→ Tweeter(OAP5)

OAP1の調整によって、以降のOAP2~5の調整手順を確立させる。

SEICA: ExAOパート:: 現在の性能 (1/2)

◆ Woofer AOは $\lambda/4$ (rms): P-V: 1λ を目標 \rightarrow SR 10%

AO制御中のWFSのスポットの重心移動(52点)



時系列(フレーム数)

風速: 10m/s
制御: 900Hz

補償なしの場合
P-Vの中央値: 3'.4

波面の傾斜@サブ開口		
	rms (arcsec)	P-V (arcmin)
最大	39.5	4.2
最小	4.8	0.5
中央値	8.4	1.4

時間(秒)

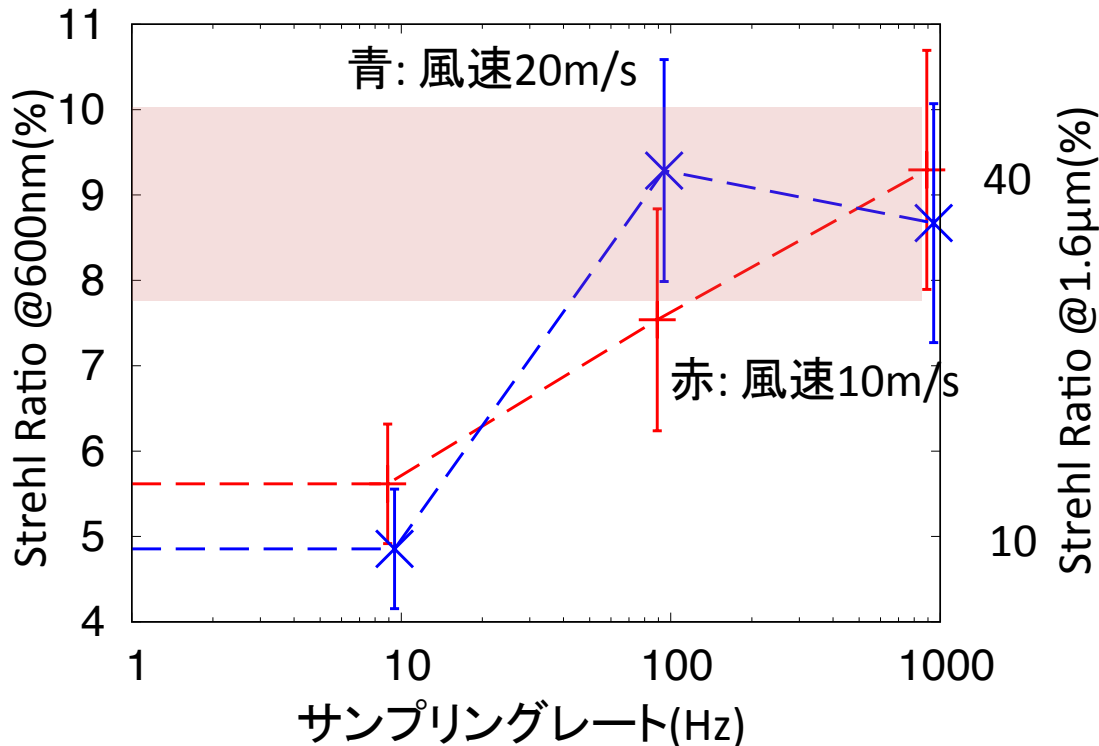
サンプルレート(Hz)	平均SR	1σ
900	3.5	1.4
90	3.3	1.3
9	2.6	0.7
0(制御なし)	1.4	0.3

SEICA: ExAOノパート:: 現在の性能 (2/2)

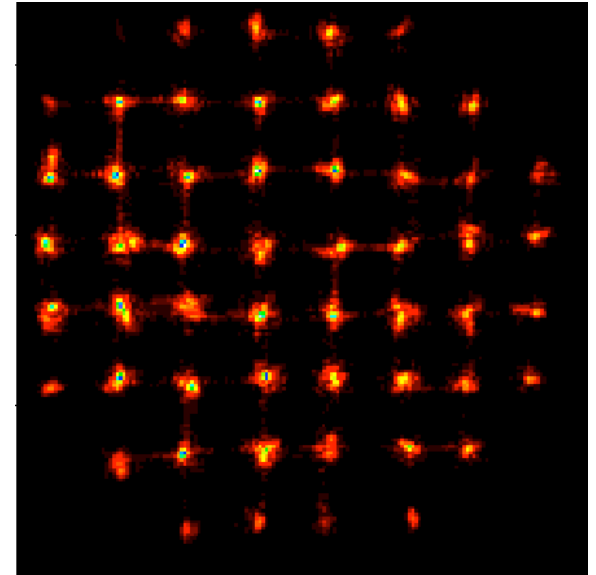
◆ Woofer AOの目標: $\lambda/4$ (rms): P-V: $1\lambda \rightarrow$ SR 10%

風速:: 10–20m/s

観測天体: 4-8等級(@500-700nm)



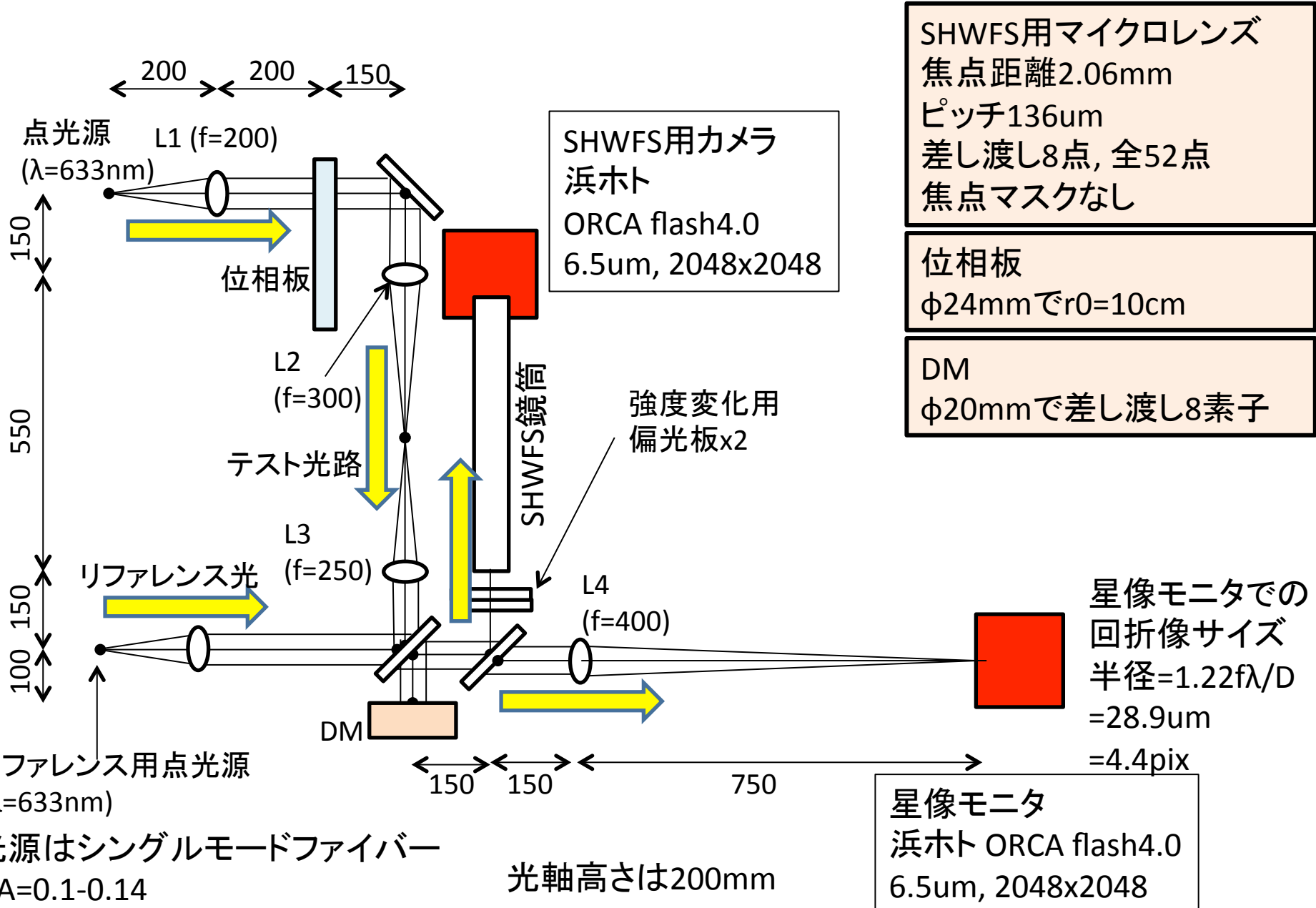
風速10-20m/sのとき
100Hzで性能が飽和



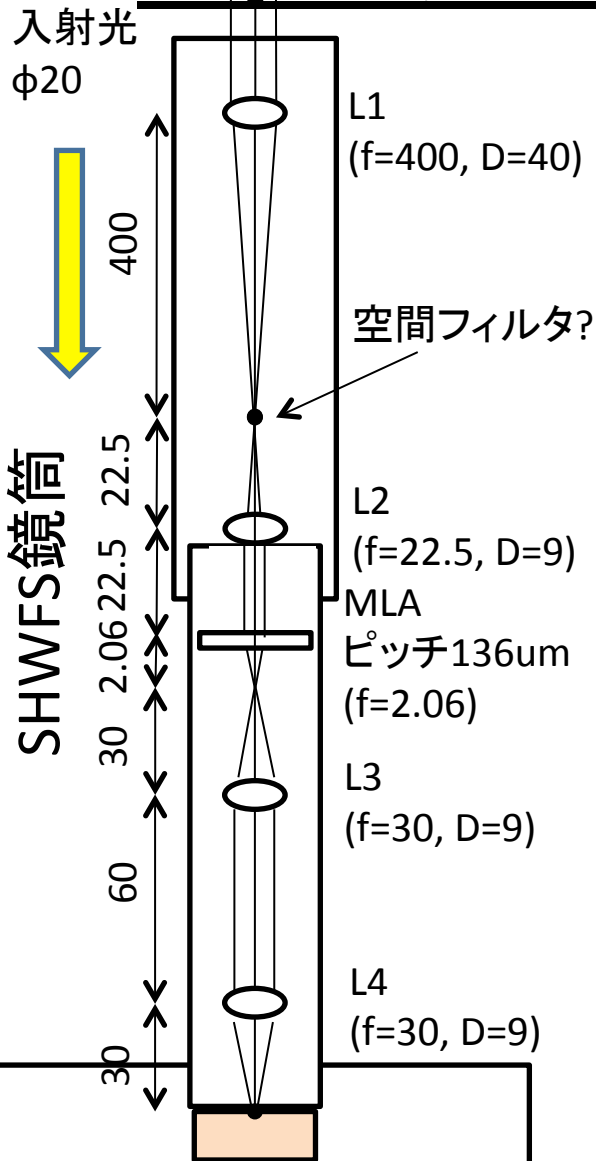
今後の改善

- 測定点数を増やす
 - 制御アルゴリズムの最適化
- 高精度化

SEICA: ExAOパート:: 性能評価試験



SEICA実機設計: 1.SHWFS構造体



sCMOS[浜ホトORCA flash4.0]
6.5um, 2048x2048

1. WFSスポット点数の変更:

- 鏡筒先端部(L1とL2)の取り替えで対応する。
- MLAを鏡筒をいじらずに変更、設置する。

2. MLの視野: 1スポットは21pix幅=片側10.5pix.

$$f_{ML} = 2.06\text{mm}, x = 68.25\text{um} \rightarrow \theta_{ML} = x/f_{ML} = 1.898\text{deg.}$$

$$\text{SHWFS入射波面(DM)では } \theta_{ML} * f_{L2}/f_{L1} = 6'.4$$

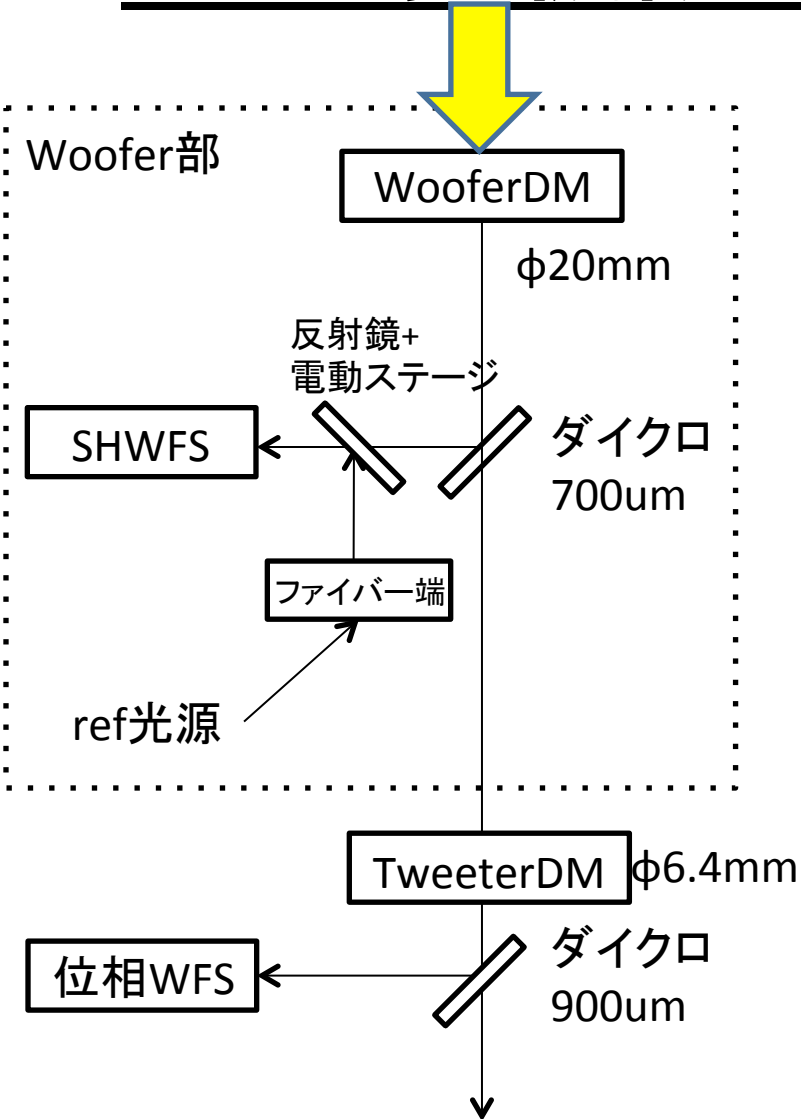
- WFSスポットを差し渡し16点にする場合、ビーム径を変更しない場合1つのML視野は3'.4。

3. SHWFS鏡筒に空間フィルタを入れるか?:

Woofers DMでは制御できない高空間周波数成分をマスクするための空間フィルタを検討。

1. 差し渡し8素子のDMの場合、最大で4空間周波数まで制御。 $1\lambda/D = 15.4\text{um}$ (@ $f_{L1} = 400\text{mm}$)なので、4空間周波数のときは、 $\Phi 123\text{um}$ 程度。
2. 1"のtip/tilt成分が乗る場合、空間フィルタ面では2mmのズレになる。空間フィルタを機能させるためには 0".01精度のtip/tilt制御が必要である。

SEICA実機設計: 2. Woofer構造体



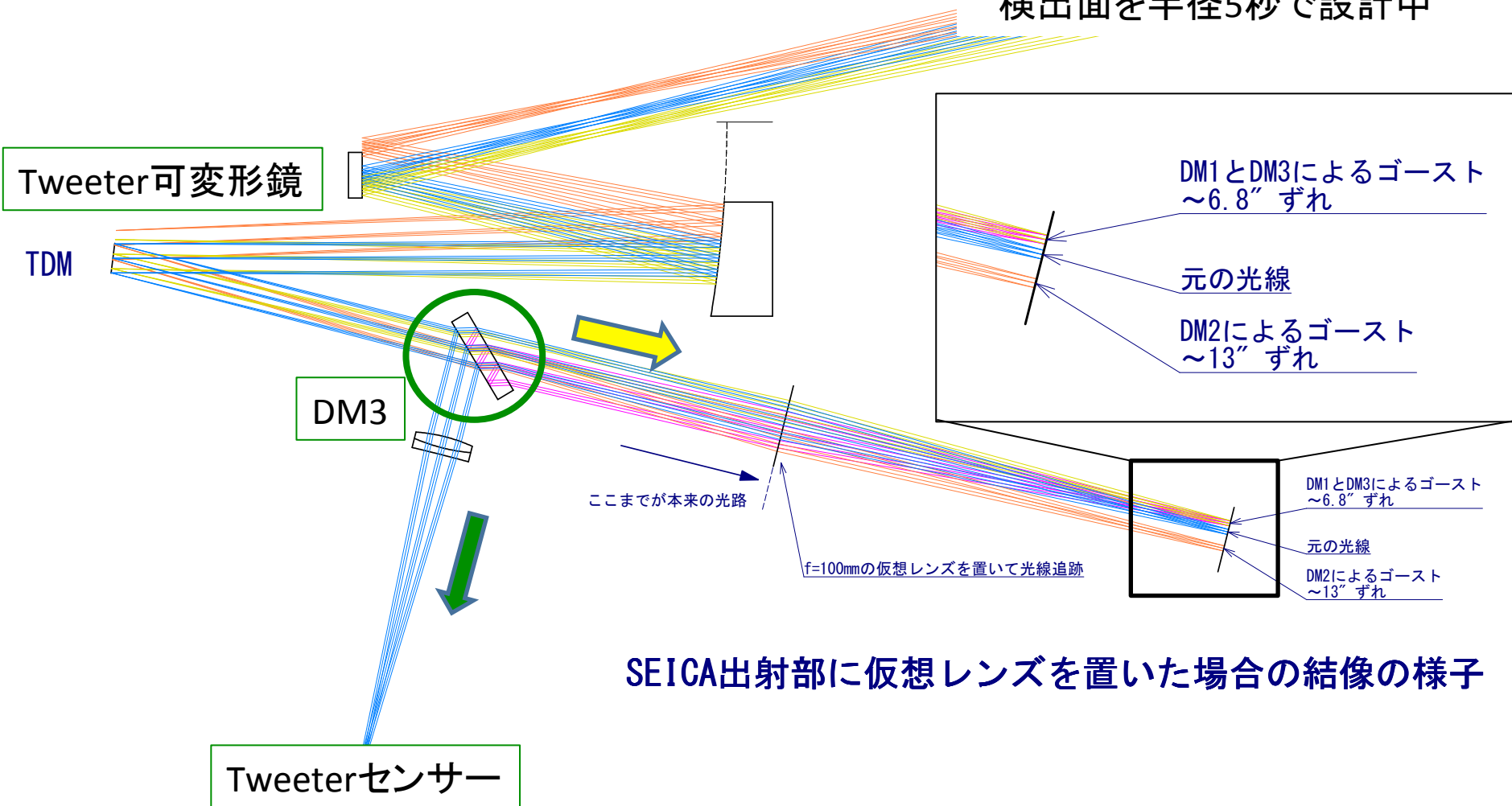
1. SHWFSは全長620mm程度。1arcminの設置精度は0.2mm程度
2. WooferDMでのビーム径は20mm
3. リファレンス光源はシングルモードファイバー端をレンズで平行光に。光軸の精度1arcminの時ファイバー端の設置精度は58um(f200mm)。
4. TweeterDMでのビーム径は6.5mm, ストロークは1.5um程度なので、最大許容誤差が47.6arcsec。1/5程度の安全率をとると10arcsec
5. SHWFSのリファレンス光源光軸とSEICA系の光軸(入射ピンホール)が一致させる。
→リファレンスの重心にオフセットでSEICA光軸と一致可能。リファレンス光軸の再現性がWoofer光軸の精度 σ_w となる。
6. Tweeter後の有効視野が4arcsecとなる設計。

AO設計:ゴースト像

◆ゴースト像

SEICA出射部付近の拡大図

ゴースト像は結像面で
6".8, 13"ずれる位置へ
→AOの視野は半径2秒、
検出面を半径5秒で設計中




SEICA出射部に仮想レンズを置いた場合の結像の様子

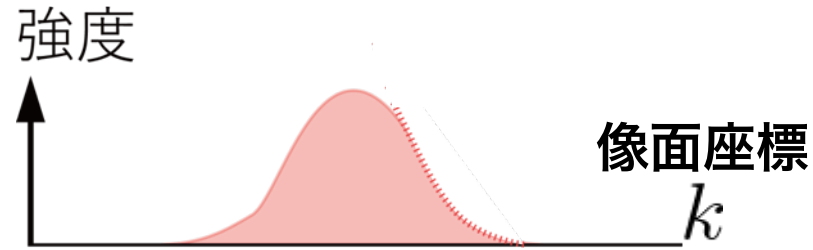
パワースペクトル

評価方法

波面形状から星像への変換


波面の長時間撮像

フーリエ変換
←→



瞳面での波面歪み


(Kolmogorovモデルを仮定)

$$\langle |\phi(x+r) - \phi(x)|^2 \rangle = 6.88$$

$$(r/r_0)^{5/3}$$

r_0 : フリード長

波面が一定とみなせる長さ

 $\ll 1$ radのとき
星像は近似的にパワースペクトル密度(PSD)

$$\langle I(k) \rangle \propto \langle |\tilde{\phi}(k)|^2 \rangle$$

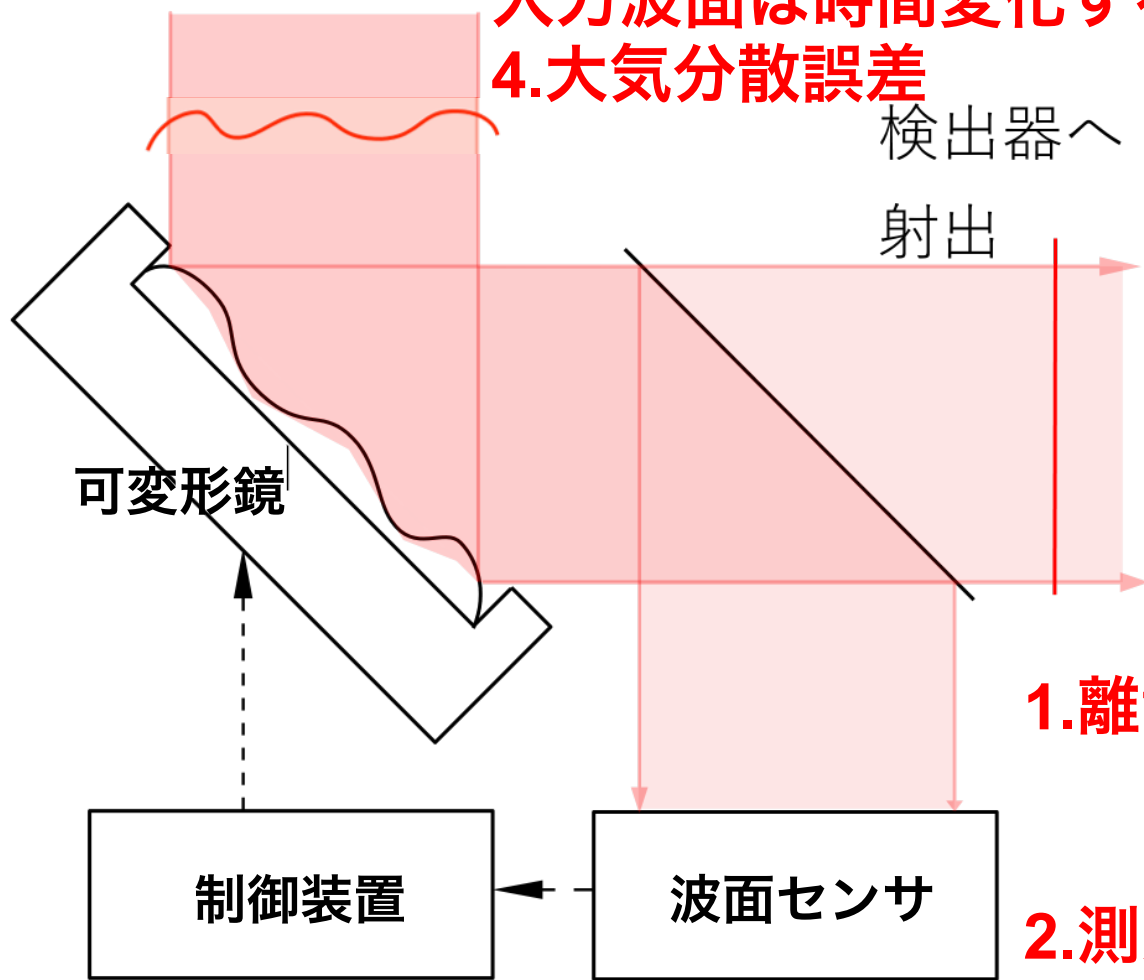
回折限界像のピーク強度を1と規格化

波面歪みの要因にわけて星像を導出

誤差要因

望遠鏡より入射

入力波面は時間変化する
4. 大気分散誤差



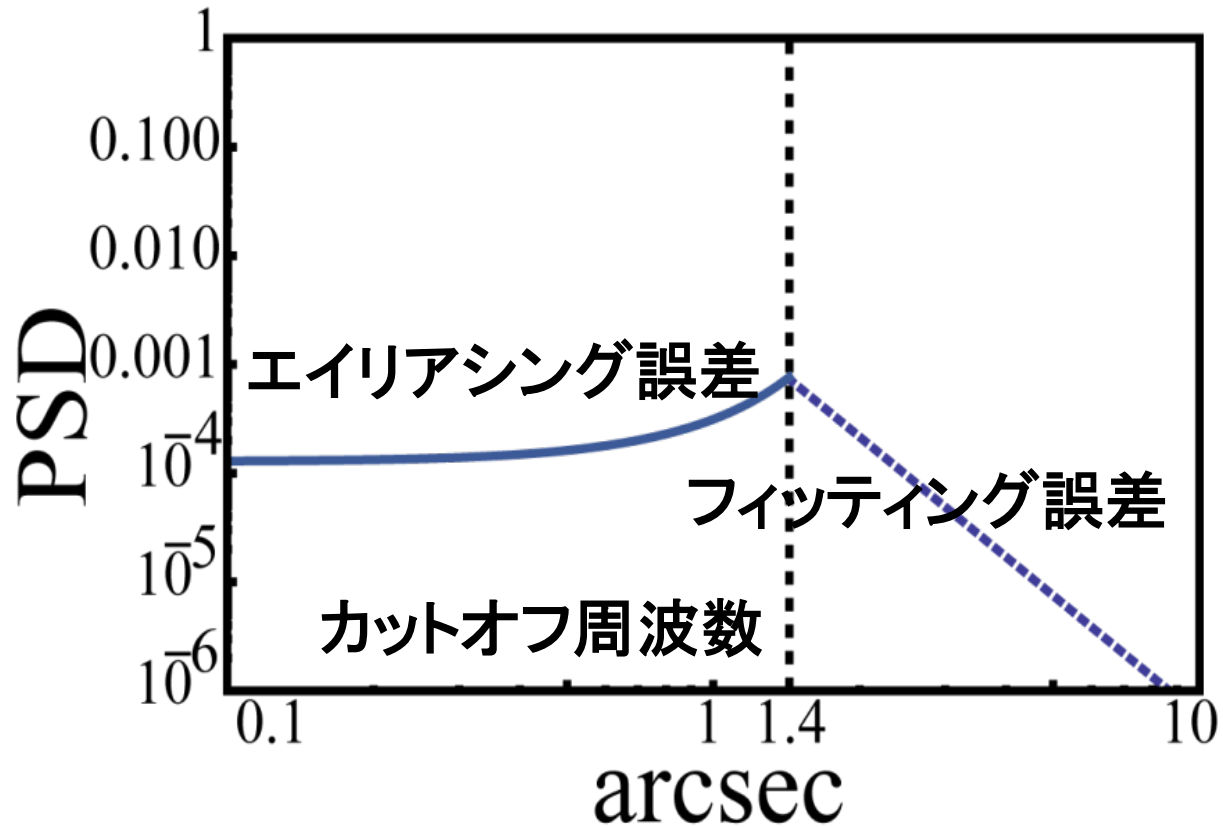
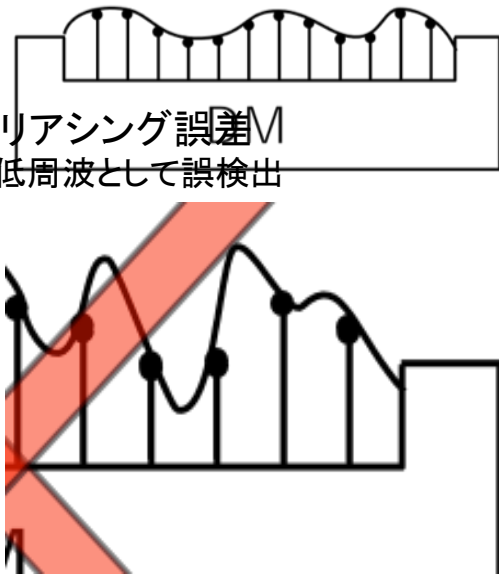
- 1. 離散化誤差
エイリアシング
フィッティング
- 2. 測定誤差
光子ノイズ
読出ノイズ

3. 制御遅延誤差

離散化誤差

- ◆ **フィッティング誤差**
DMの素子間隔×2よりも
高周波は補正不可

- ◆ **エイリアシング誤差**
高周波を低周波として誤検出

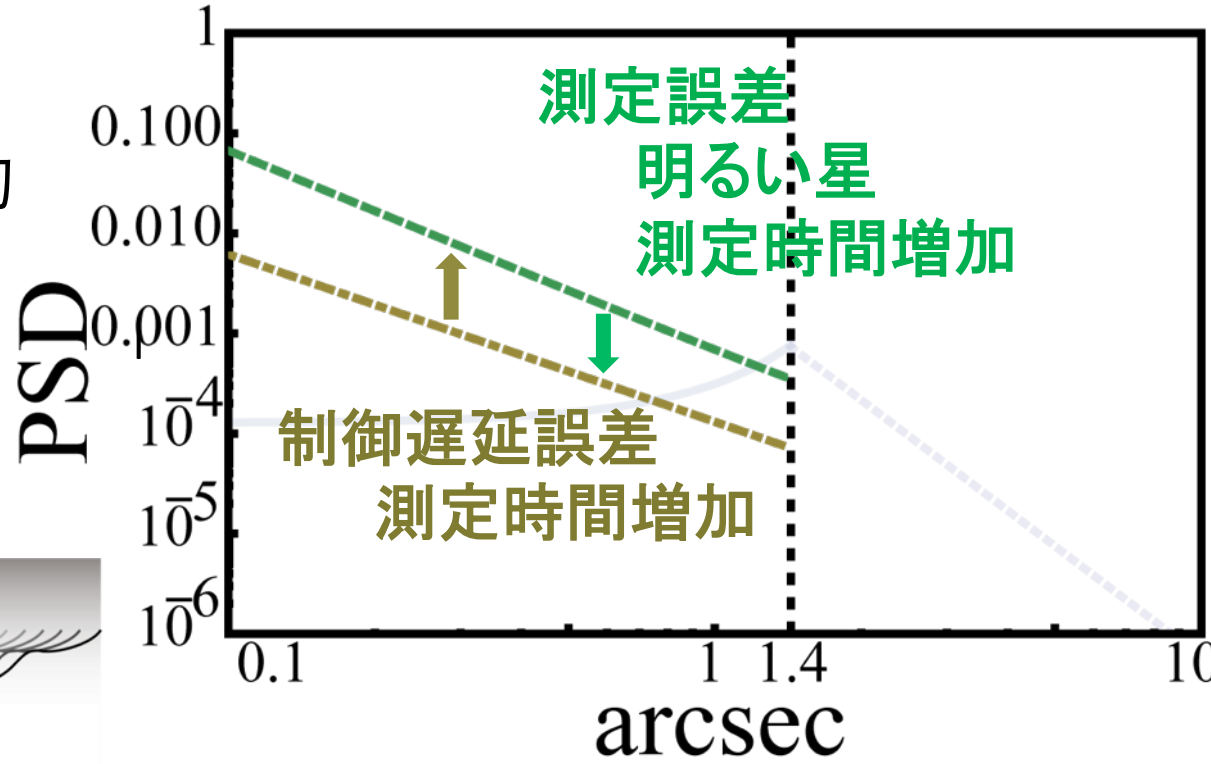
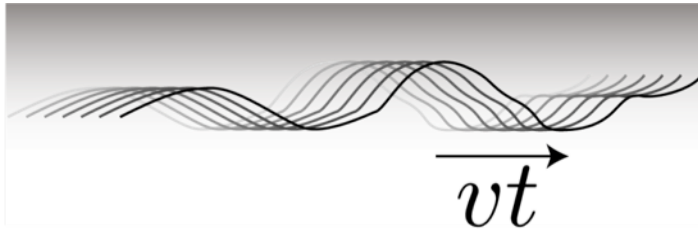


低周波成分 ← 主星から近い ↔ 高周波成分 遠い

測定誤差・制御遅延誤差

- 測定誤差
 - 光子数の統計的揺らぎ
 - 電気的な読み出しノイズ

- 制御遅延誤差
 - 乱流層が風で移動
 - 測定時間
 - 計算時間
 - 駆動時間

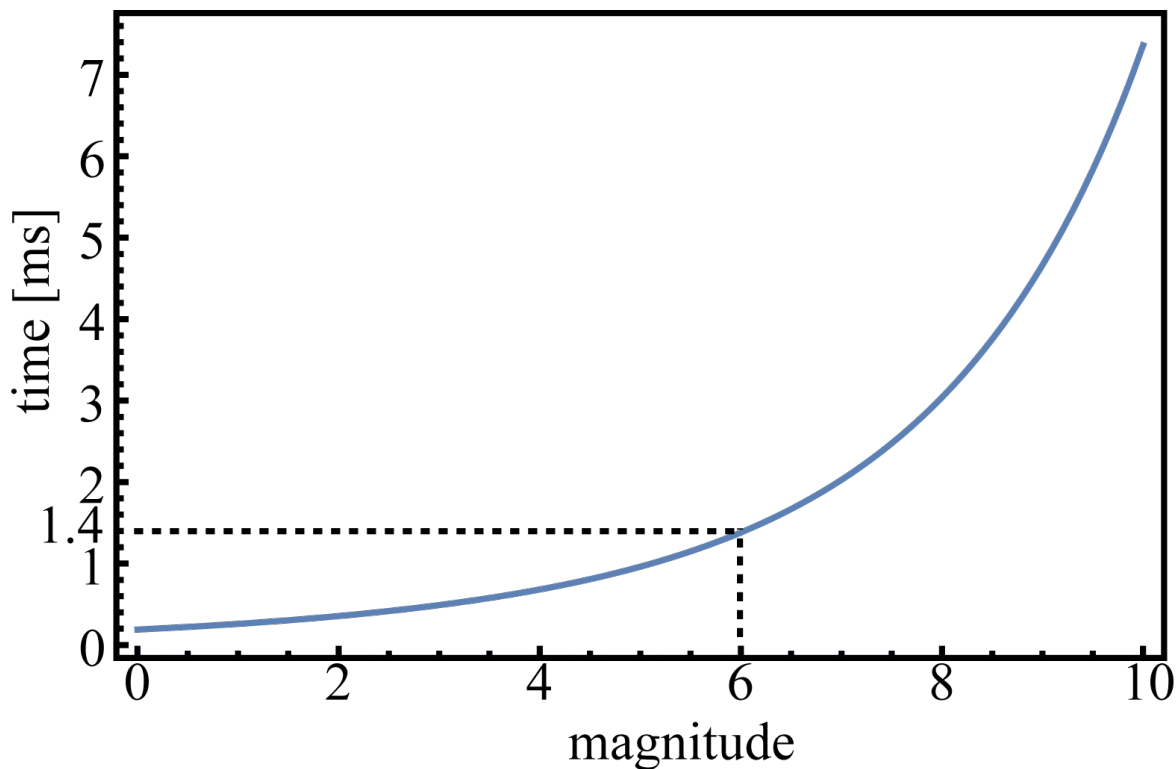


最適な測定時間

安定した制御のためには
制御遅延時間 $\approx 10 \times$ 測定時間

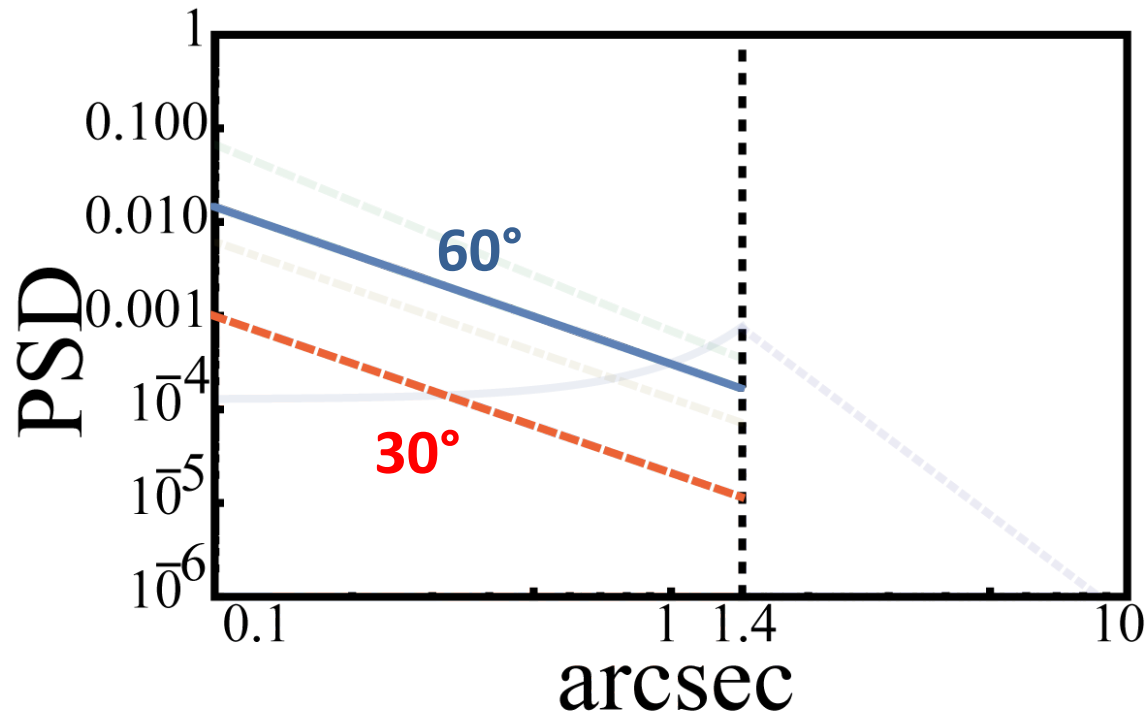
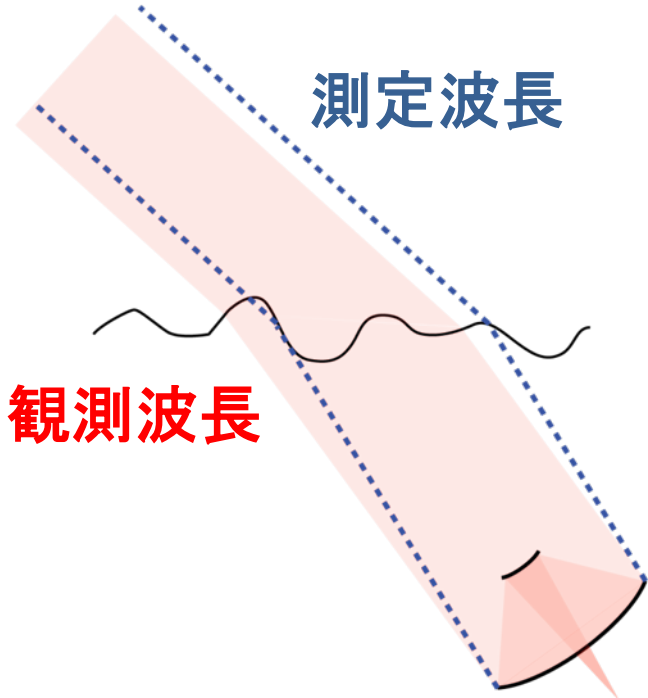
6等星の場合
最適な測定時間
1.4ms

星の等級に合わせて
測定時間を変えるべき



大気分散誤差

- ◆ 波長によって大気の屈折率が異なる
- ◆ 測定波長と観測波長で光路がずれる
- ◆ 天頂角が大きいほど影響大



Optical Vortex Coronagraph (OVC)

Phase in focal plane mask = $Cst \times PA$

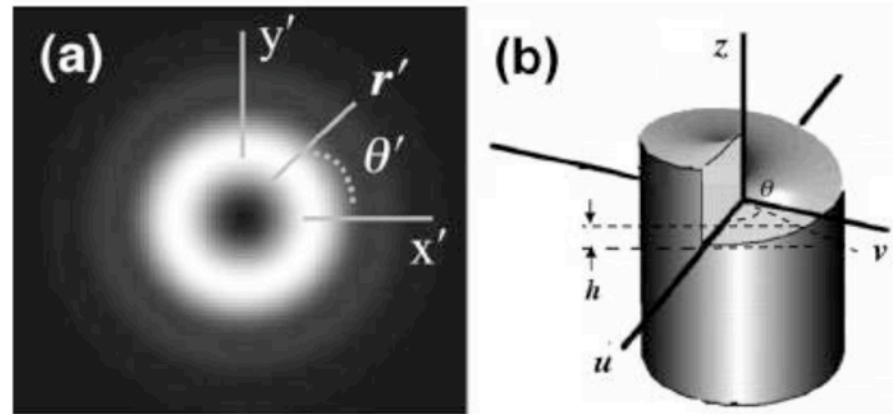
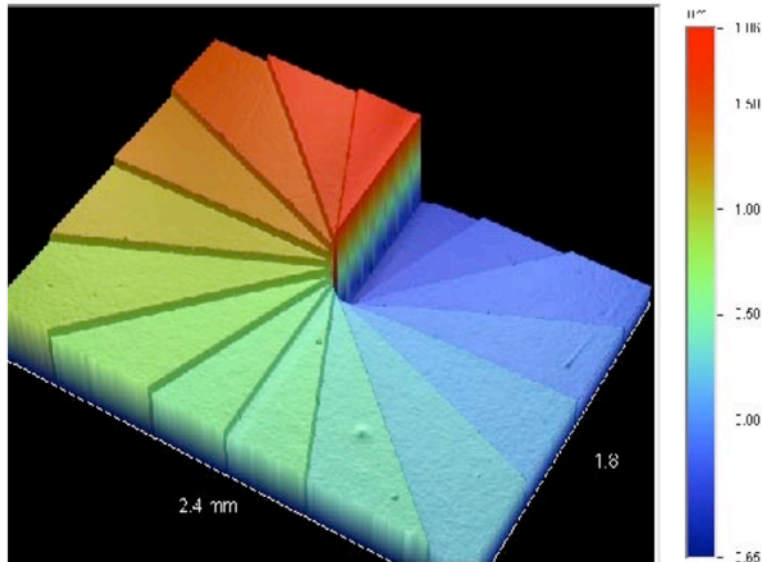


Fig. 2. (a) Intensity profile, $|U(x', y')|^2$ of a beam containing an optical vortex. (b) Surface profile of a VPM.

Palacios 2005, SPIE 5905, 196
 Swartzlander 2006, Opt. Letters
 Foo et al. 2005, Opt. Letters

Mawet et al. 2005, ApJ, 633, 1191
 (AGPMC)

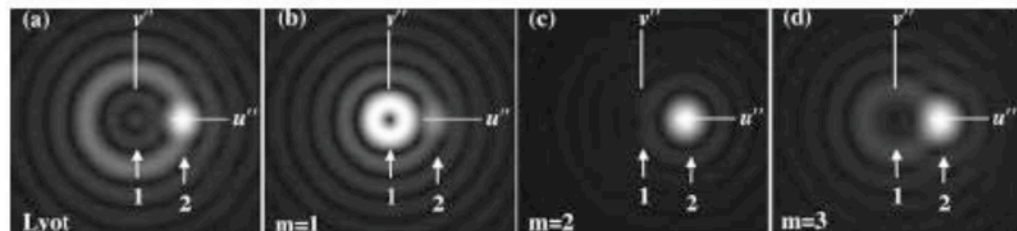


Fig. 3. Comparisons for $\alpha_2 = \alpha_{\text{diff}}$ and $A_1^2/A_2^2 = 100$. (a) Lyot coronagraph where $R_{\text{OM}} = r_{\text{diff}}$. (b), (c), (d) Vortex coronagraphs where $m = 1$, $m = 2$, $m = 3$, respectively. In (c) the starlight is essentially eliminated, revealing a high-contrast image of the planet when $m = 2$.