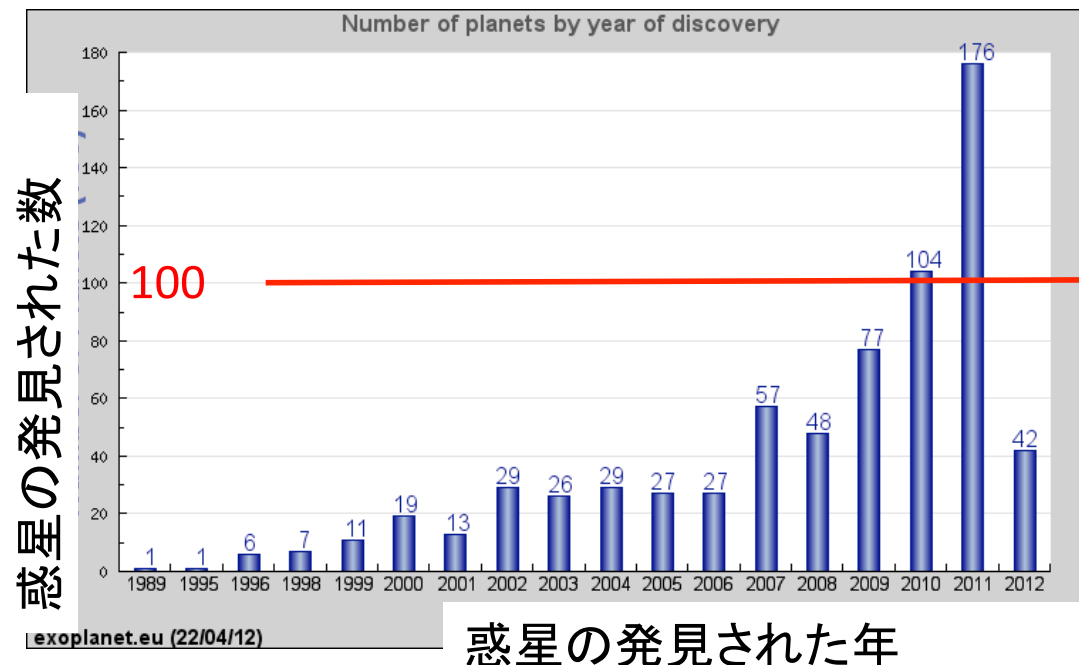


高コントラスト惑星探査カメラ

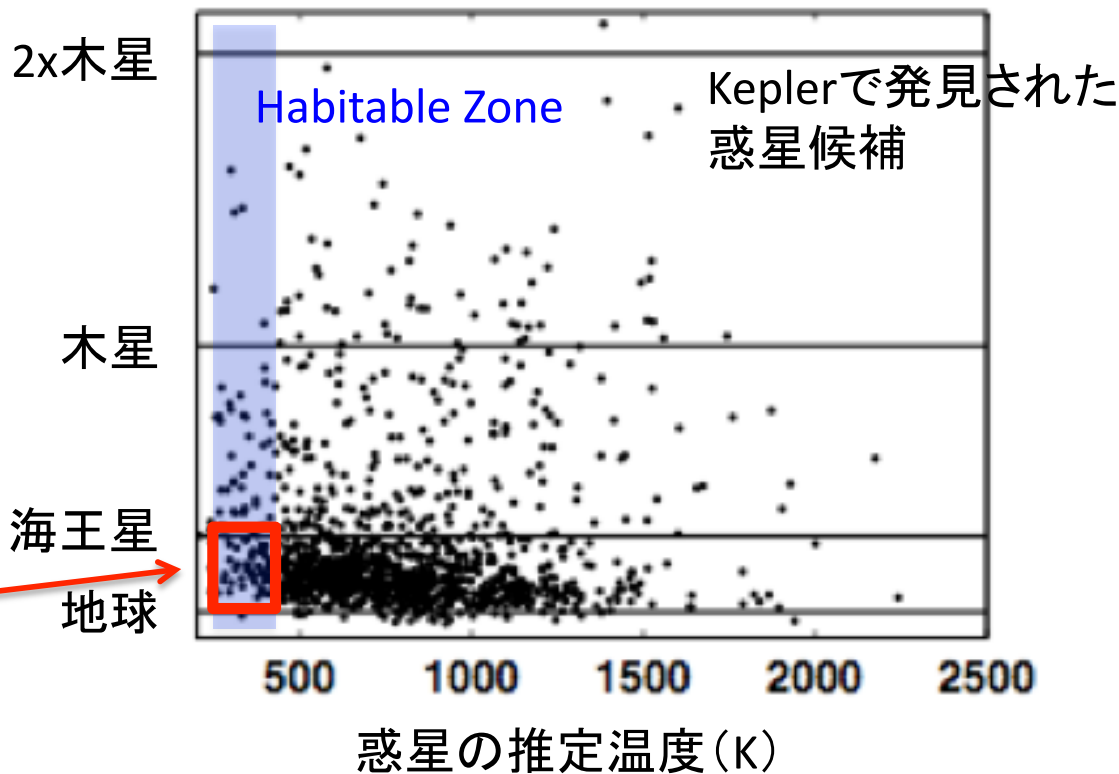
松尾太郎、夏目典明、木野勝、栗田光樹夫、岩室史秀、長田哲也(京都大学)、小谷隆行、田村元秀(国立天文台)、村上尚史(北海道大学)、河原創(東京大学)、入部正継(大阪電気通信大学)、大屋真(すばる望遠鏡) 他 SEITメンバー

太陽系外惑星の現状

- 1995年に初めて惑星が発見から、現在までに800を超える惑星が発見。発見数は年間100を超えるペース。



- Kepler衛星により「水をもつ可能性のある地球程度の大きさの惑星」が数十個発見された。

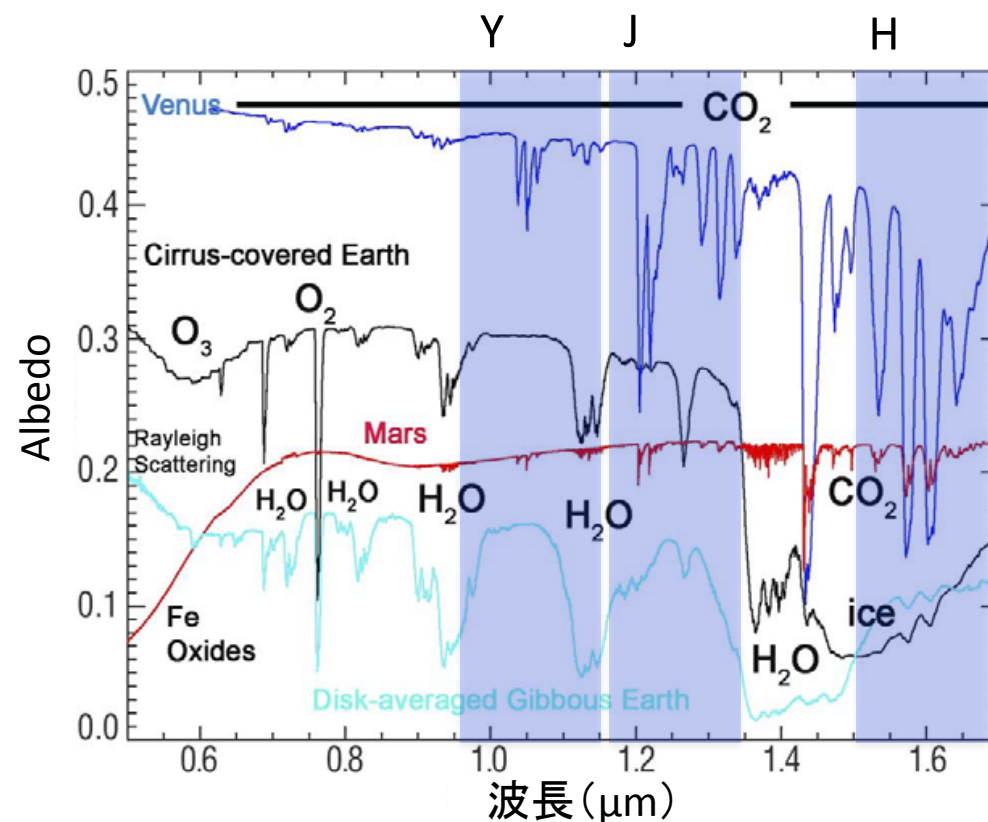


惑星を直接「見る」 ことで得られるもの



宇宙から見た地球

- 惑星からの光を見ることができれば、惑星の大気や環境を探ることができる。
- 惑星大気の組成
 - 環境 (CO_2 , H_2O)、
生命の痕跡 (O_2)
- 惑星の反射率 (アルベド)
 - 表層の組成 (雲、海、陸 etc)
- 温度

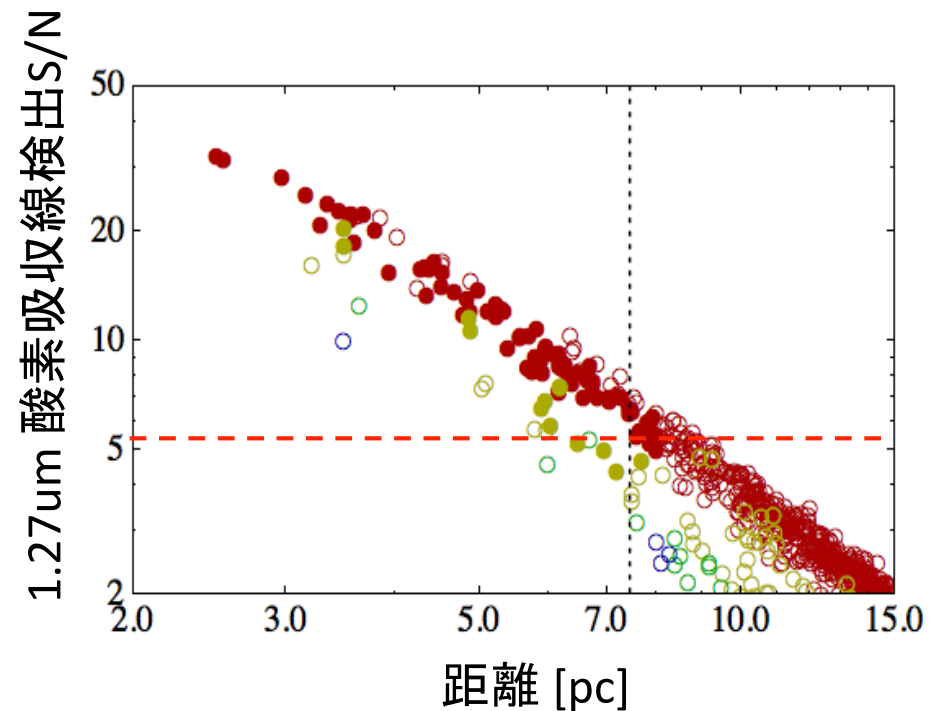
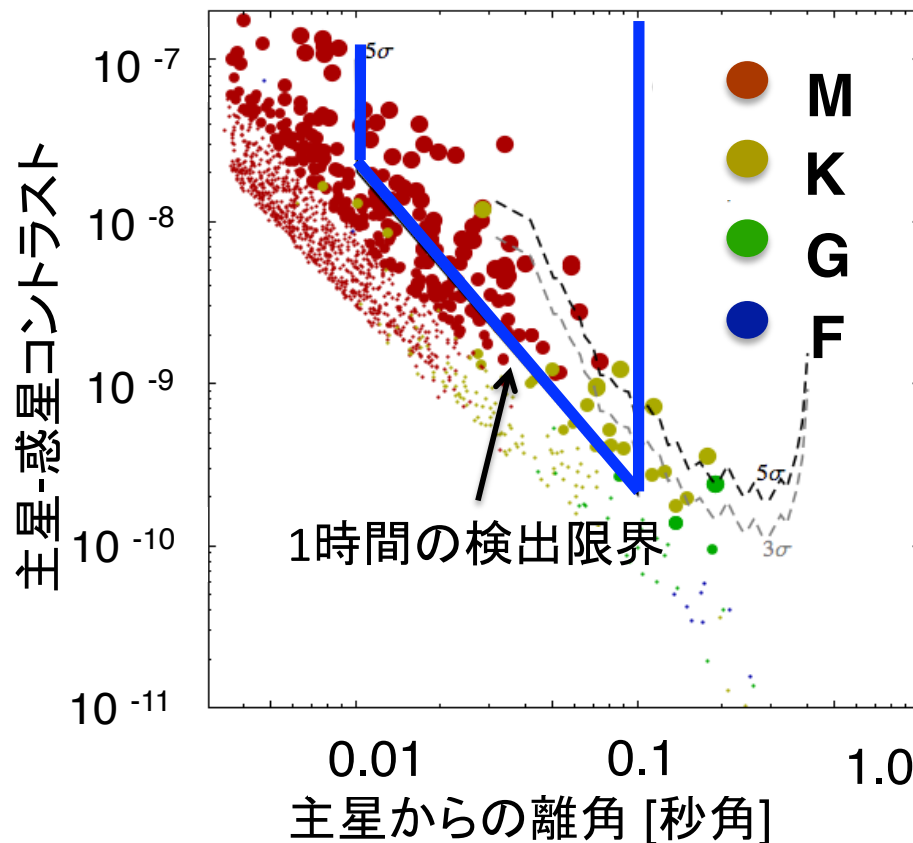


太陽系惑星の理論的スペクトル

(Meadows et al. 2005)

TMTで地球型惑星を狙えるか?

- 2021年にすばる望遠鏡に続く次世代の大型望遠鏡TMTはファーストライトを迎える。地球型惑星探査ができる最初の機会である。
- TMTに理想的な高コントラスト装置を搭載すれば、K、M型星の周りの**100の地球サイズの惑星を直接観測し、大気分光から酸素の吸収線を検出できる。**



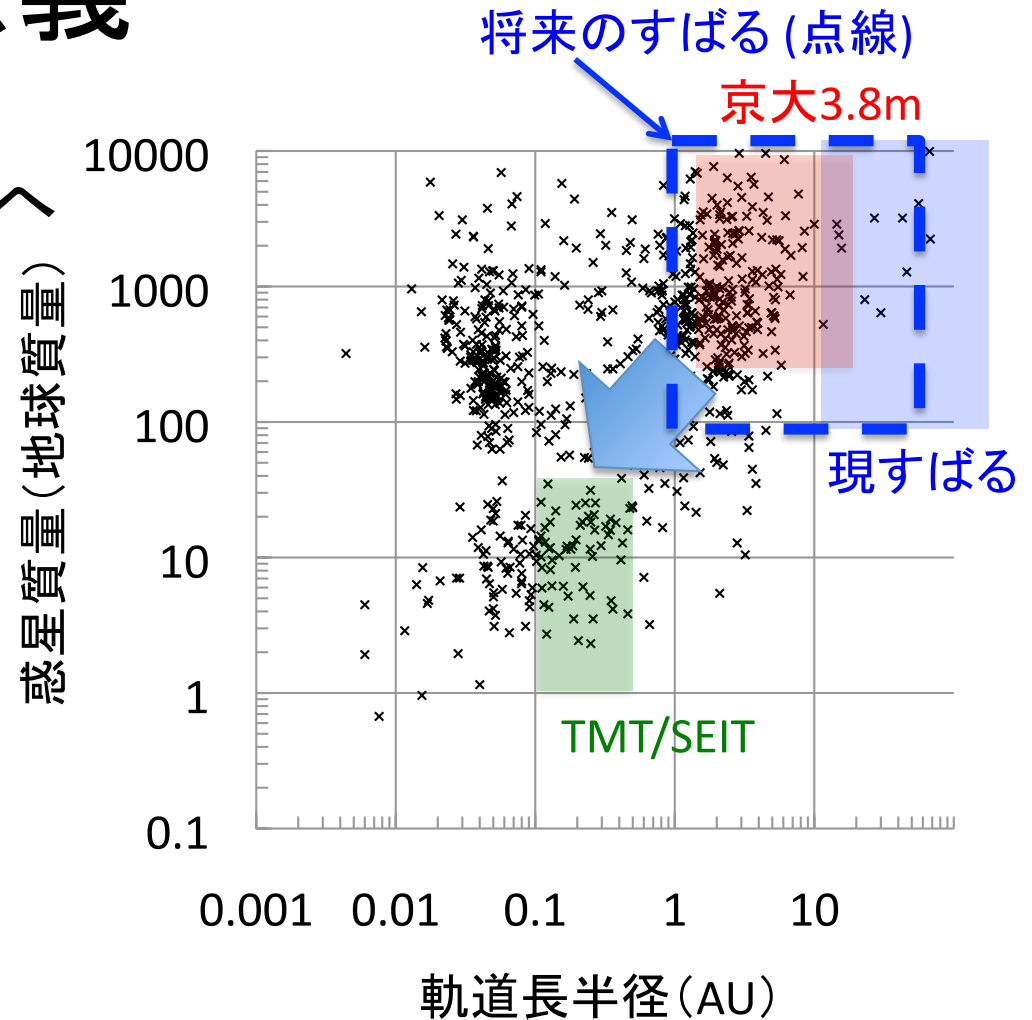
5時間積分での1.27um酸素吸収線検出のS/N

意義

○ 京大3.8m望遠鏡からTMT(30m)へ

世界初の
「分割式望遠鏡での極限補償光学
による超高コントラスト実験」

→ 京大望遠鏡での実証は
地球型系外惑星の直接観測の
重要なマイルストーン



これまでに発見されている惑星の
質量と軌道長半径分布

赤:京大3.8m、青:すばる、緑:TMT
の10pcにおける検出限界

目指すサイエンス

高コントラスト実証を通して目指すサイエンス

「惑星探査から惑星・惑星系のキャラクターゼーションへ」

望遠鏡の占有性を活かして、

- 惑星検出から「惑星の形成・進化」の解明へ
- 惑星のキャラクターゼーション

1. 惑星進化の解明

背景:

直接観測で発見された惑星の質量推定は進化モデルとの照合により行なう。

惑星の進化モデル(上図)には

大きな光度の不定性があり、

惑星の推定質量に

大きな不定性が伴う。

手法:

次期位置観測衛星(GAIA)では

木星軌道付近に「若い」惑星を発見し、
質量を精密に決定する(下図)。

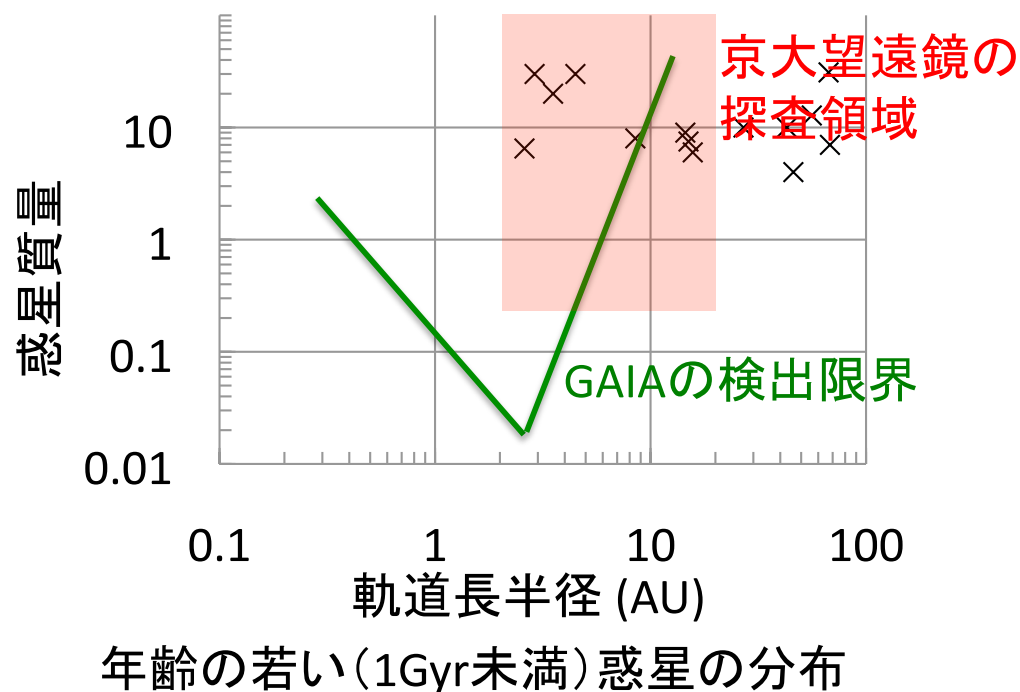
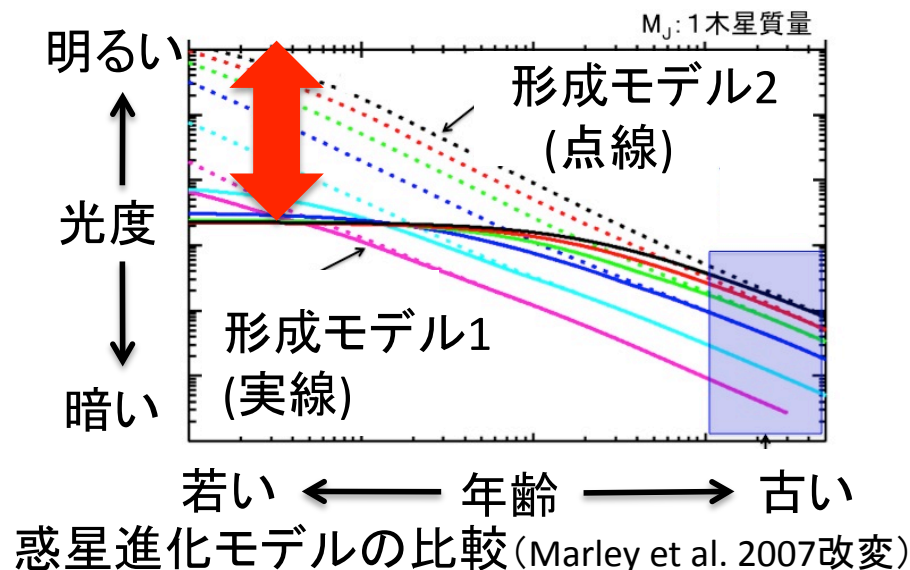
望遠鏡の占有性を活かして、

「世界に先駆けて」これらの惑星を直接観測し、

惑星の明るさと質量の相関

を世界で初めて明らかにする。

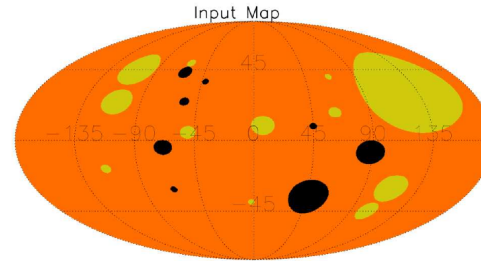
→ 惑星進化モデルを観測的に制限する



2. 惑星のキャラクターゼーション

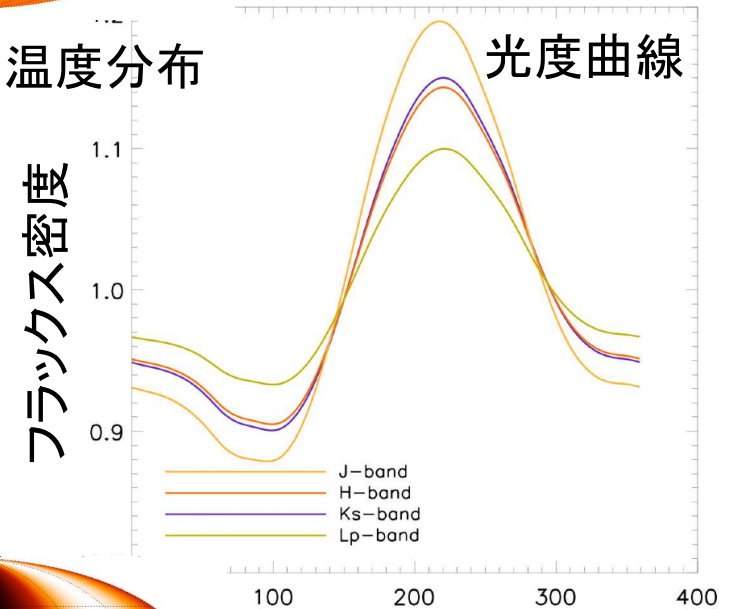
望遠鏡の占有性を活かして
木星軌道付近の惑星の
キャラクターゼーションを行なう

- 木星型惑星の温度マッピング
- 木星型惑星の分光

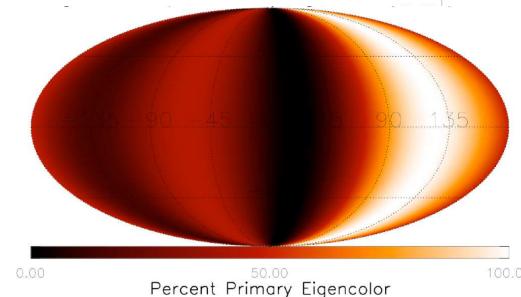


(橙: 1000K、黄: 1200K
黒: 800K)

モデル惑星の温度分布



光度曲線



構築された温度マップ

公転の位相

Kostov & Apai 2012

次世代の高コントラスト装置

惑星を直接検出するための「高コントラスト装置」は

1. 補償光学、2. コロナグラフ、3. 波面測定・補償の3つから構成。

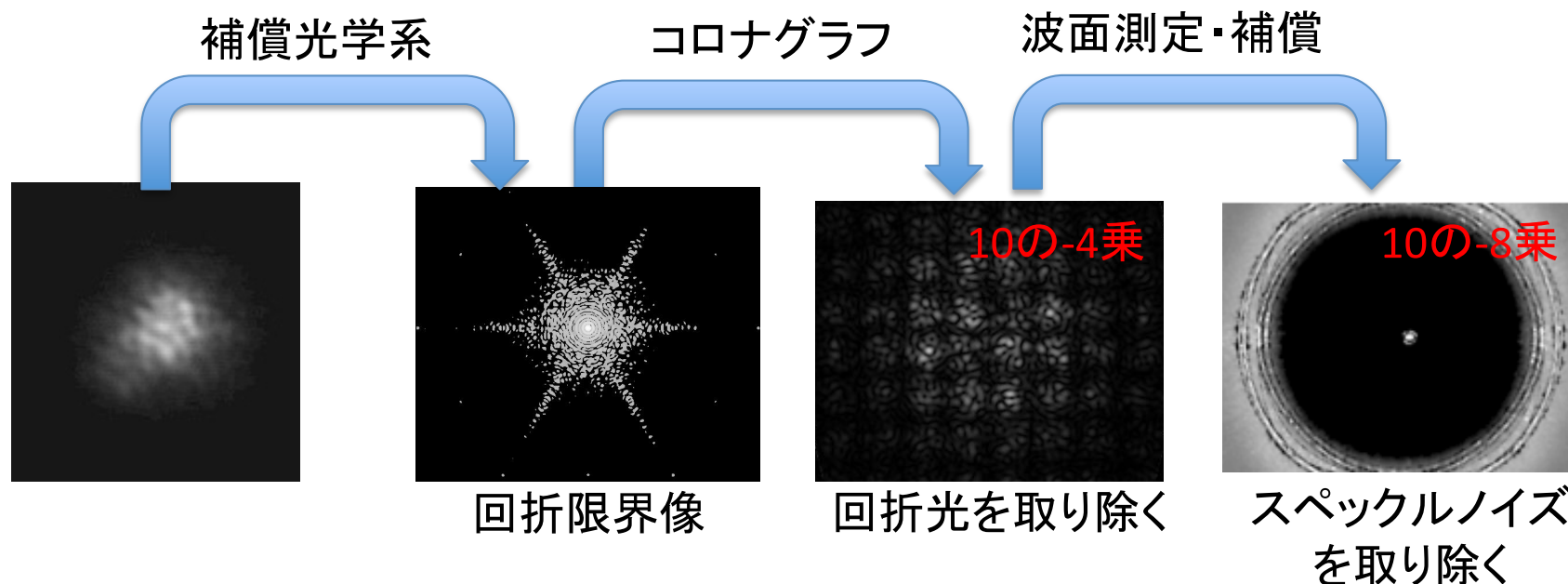
補償光学: 主星の回折光の成分を増加させる。

コロナグラフ: 主星の回折光の成分を取り除く。

波面測定: 回折光以外のスペックルノイズ起因の波面を測定し、フラットな波面を再生。

コントラストは波面収差でリミット。

→ これらを**有機的に結びつける**ことが重要。



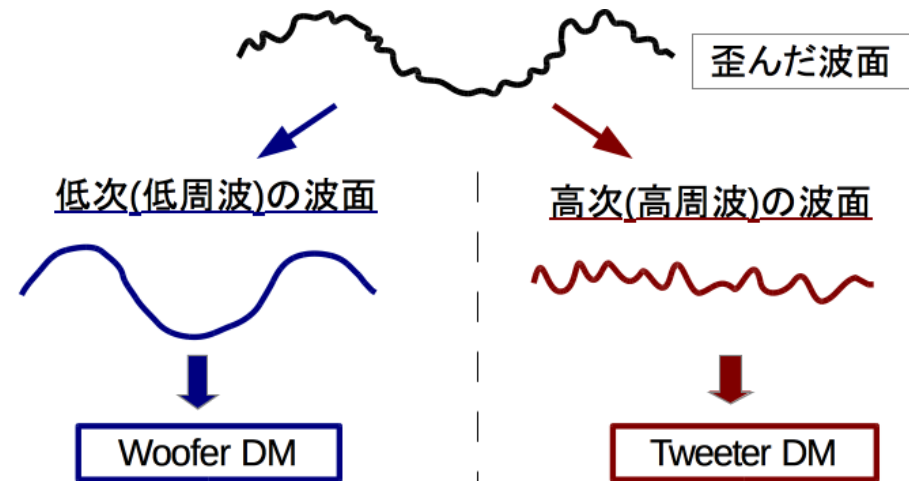
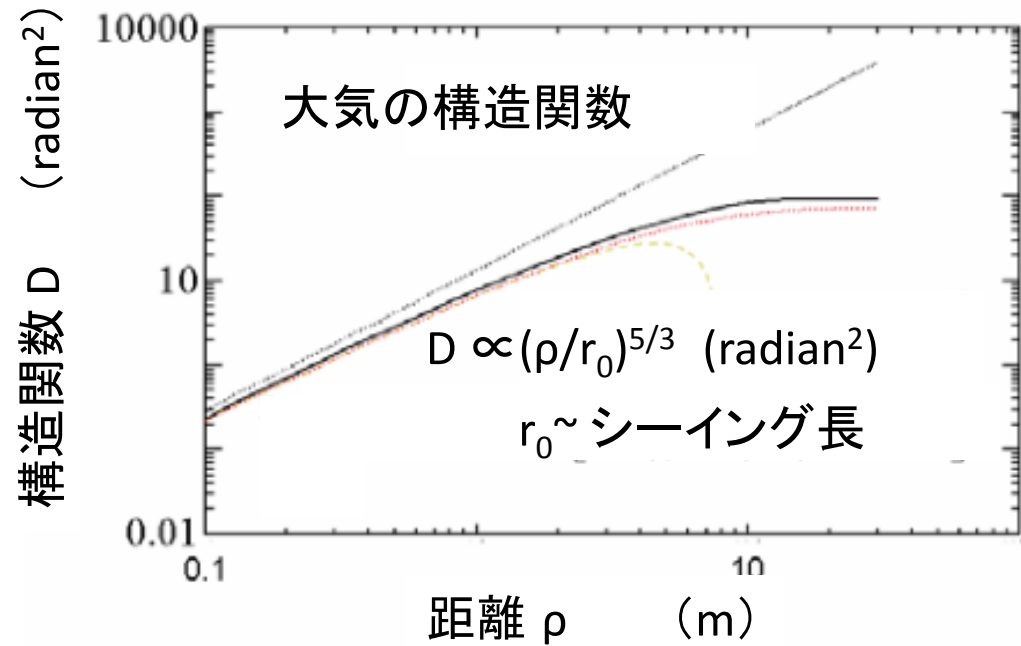
観測装置（補償光学系）の仕様設定

補償光学系と他の観測装置の結合を議論する為に、
以降は補償光学系に集中（高コントラスト光学系は省略）。

	目標値
波面精度 - Tip/Tilt補償後	1 λ (λ : 635nm)
- Woofer DM補償後	1/3 λ ; Strehl \sim 0.5
- Tweeter DM 補償後	1/20 λ ; Strehl \sim 0.9
視野	\pm 10 arcsec
観測波長 - Woofer DM 補償後	> 0.7 μ m
- Tweeter DM 補償後	> 0.9 μ m
透過率 - Woofer DM 補償後	\sim 0.83 (装置のみ)
- Tweeter DM 補償後	\sim 0.70 (装置のみ)

補償方法

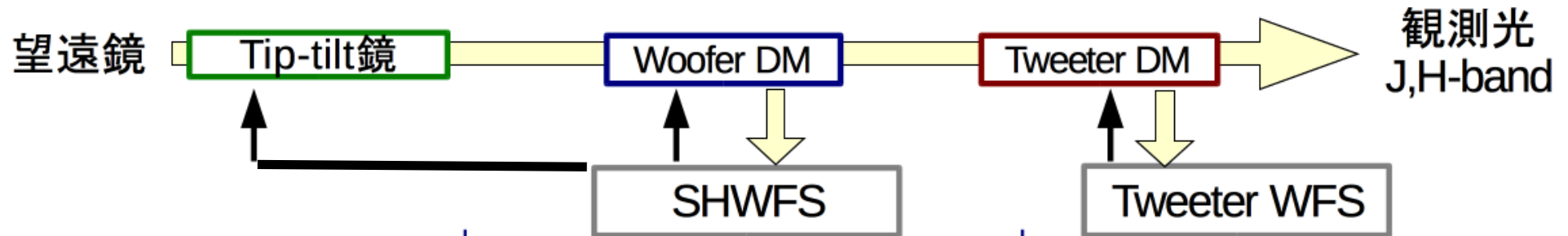
- 大気による光波の歪み
→ 低次ほど大きい
 - 1.2 arcsec
($\sim 10 \lambda$ @ $\lambda: 1.5 \mu\text{m}$)
- 2つの可変形鏡(DM)を用いて光波の歪みを補償
 - Woofer + Tweeter



- 変形量: 大
- 可変形鏡の素子数: 少

- 変形量: 小
- 可変形鏡の素子数: 多

補償光学系構成

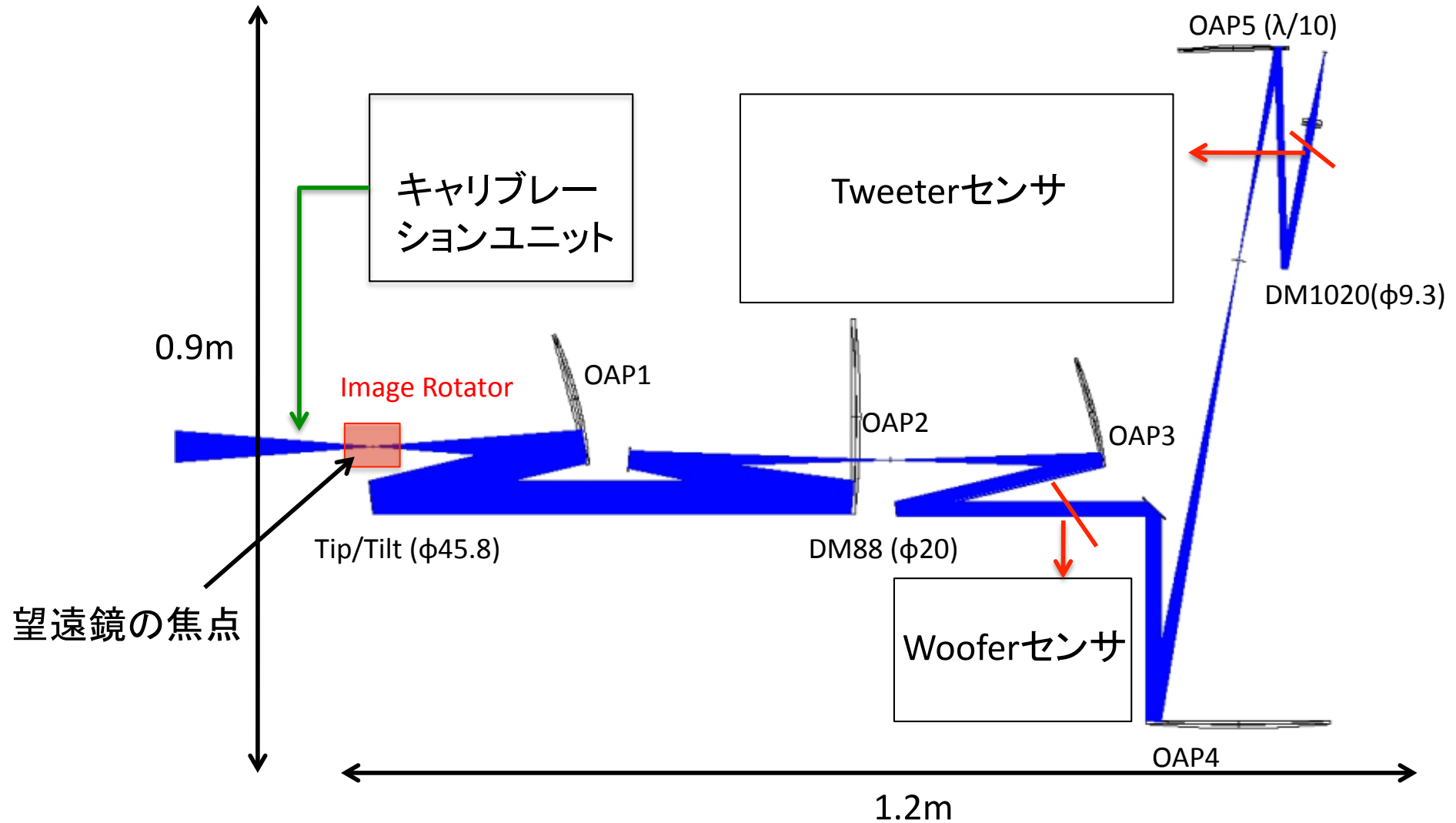


- tip-tilt補正
- 高速ステアリングマウント (PI製)
- r'-band
- 12等 (限界等級)
- 100Hz (フィードバック周波数)

- 低次収差補正
- Woofer DM88素子 (ALPAO製)
- r'-band
- 12等
- 500Hz
- SR=0.49

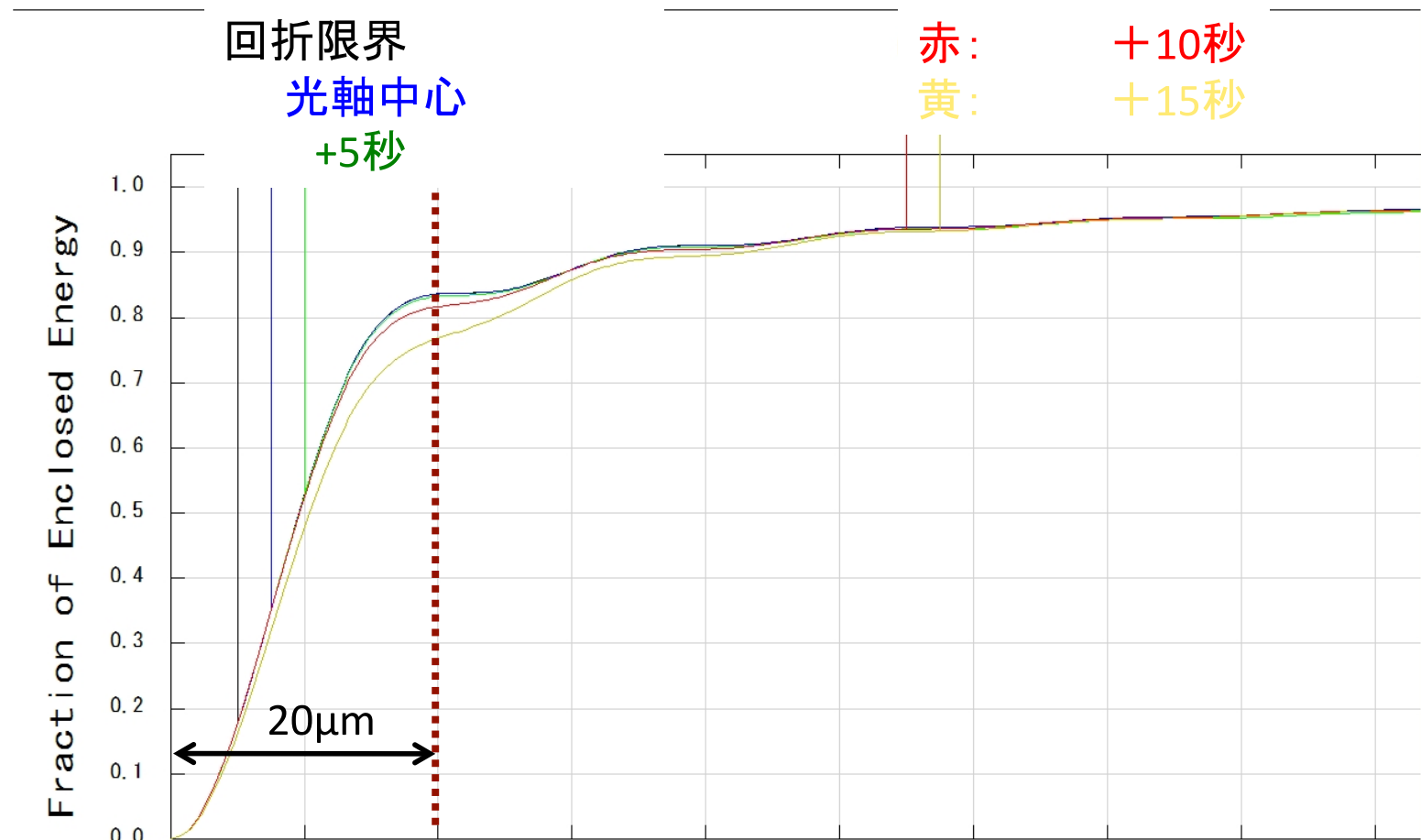
- 高次収差補正
- Tweeter DM1000素子 (BMC製)
- i'-band
- 7等
- 1000Hz
- SR=0.9

補償光学系全体図



視野

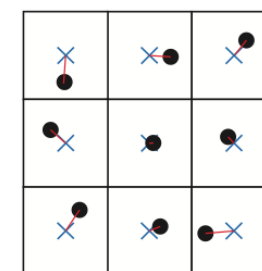
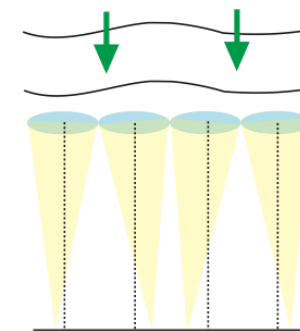
- 焦点、瞳の両方に対して収差を測定し、最適化を行なった。



Airy disk radius=20μm

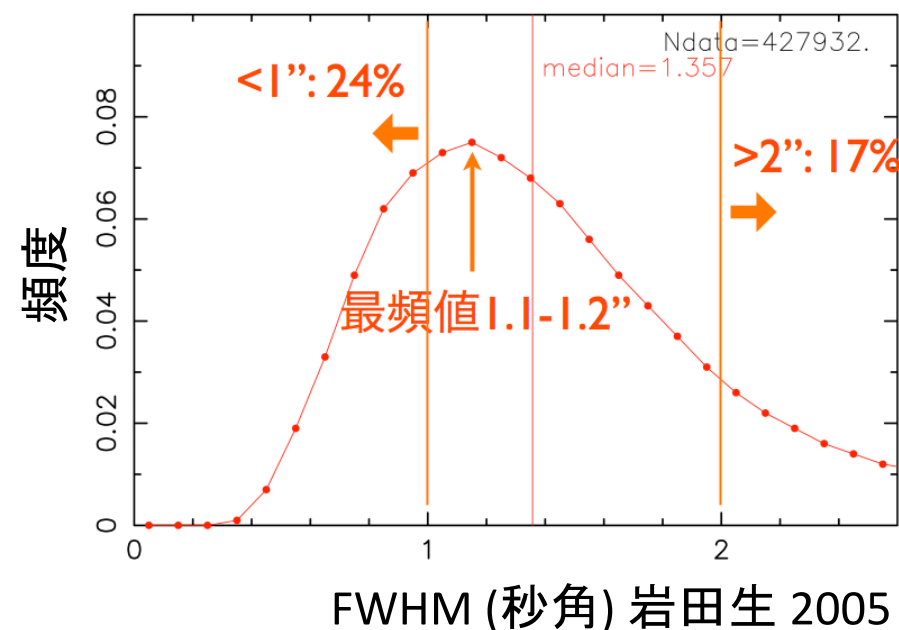
視野~±10秒

Woofler Sensor



SHWFSの原理

- 設計方針：
波面の大きな傾きまで測定可能なもの。
- 原理：
瞳での波面の傾きを焦点面上のスポットの位置として測定。
原点出しはキャリブレーション光源を使用。
- 設計結果：
± 3 arcsecまでの傾きまで測定可能。
→ Tip/Tiltセンサ省略
高速低ノイズセンサと組み合わせて
限界等級は $r' \sim 12$ 等で精度 $\lambda/3$



Tweeter Sensor

○ 設計方針:

Shack-Hartmann WFSは
波面の傾きから波面を再構築。



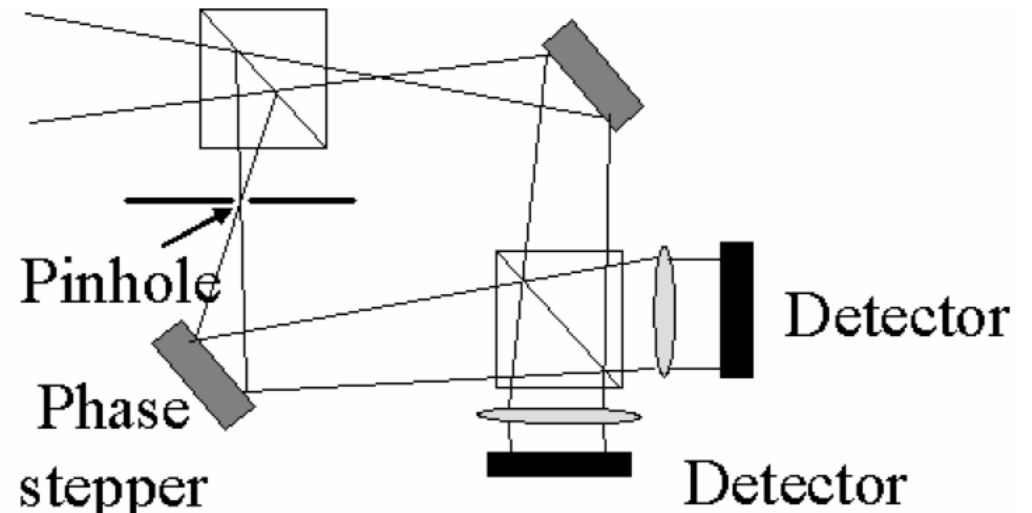
波面の大きな歪みに対しては、
測定感度がないが、精密な
位相測定が可能なセンサ。

○ 先行研究の問題点:

光学系の安定性

空間分解能の犠牲

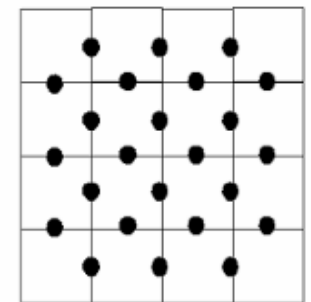
→ 時間と空間を両立することが
測定性能を上げる鍵



Detector 1			
0	π	0	π
π	0	π	0
0	π	0	π
π	0	π	0

Detector 2			
$\pi/2$	$3\pi/2$	$\pi/2$	$3\pi/2$
$3\pi/2$	$\pi/2$	$3\pi/2$	$\pi/2$
$\pi/2$	$3\pi/2$	$\pi/2$	$3\pi/2$
$3\pi/2$	$\pi/2$	$3\pi/2$	$\pi/2$

Grid of
Measured Phase

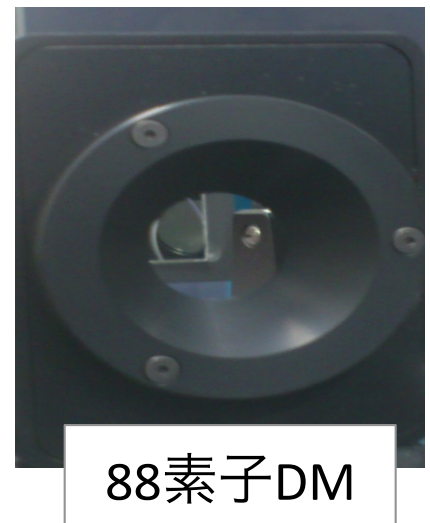
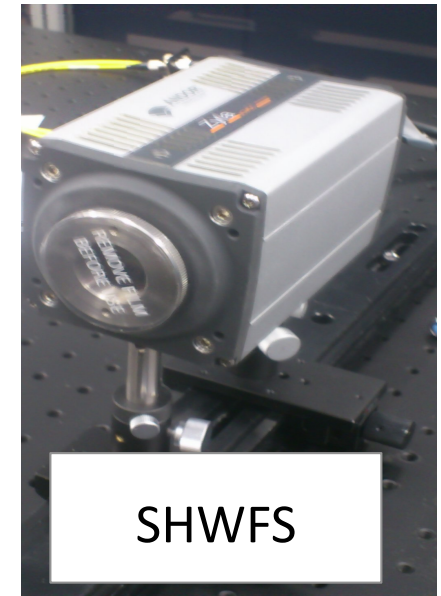
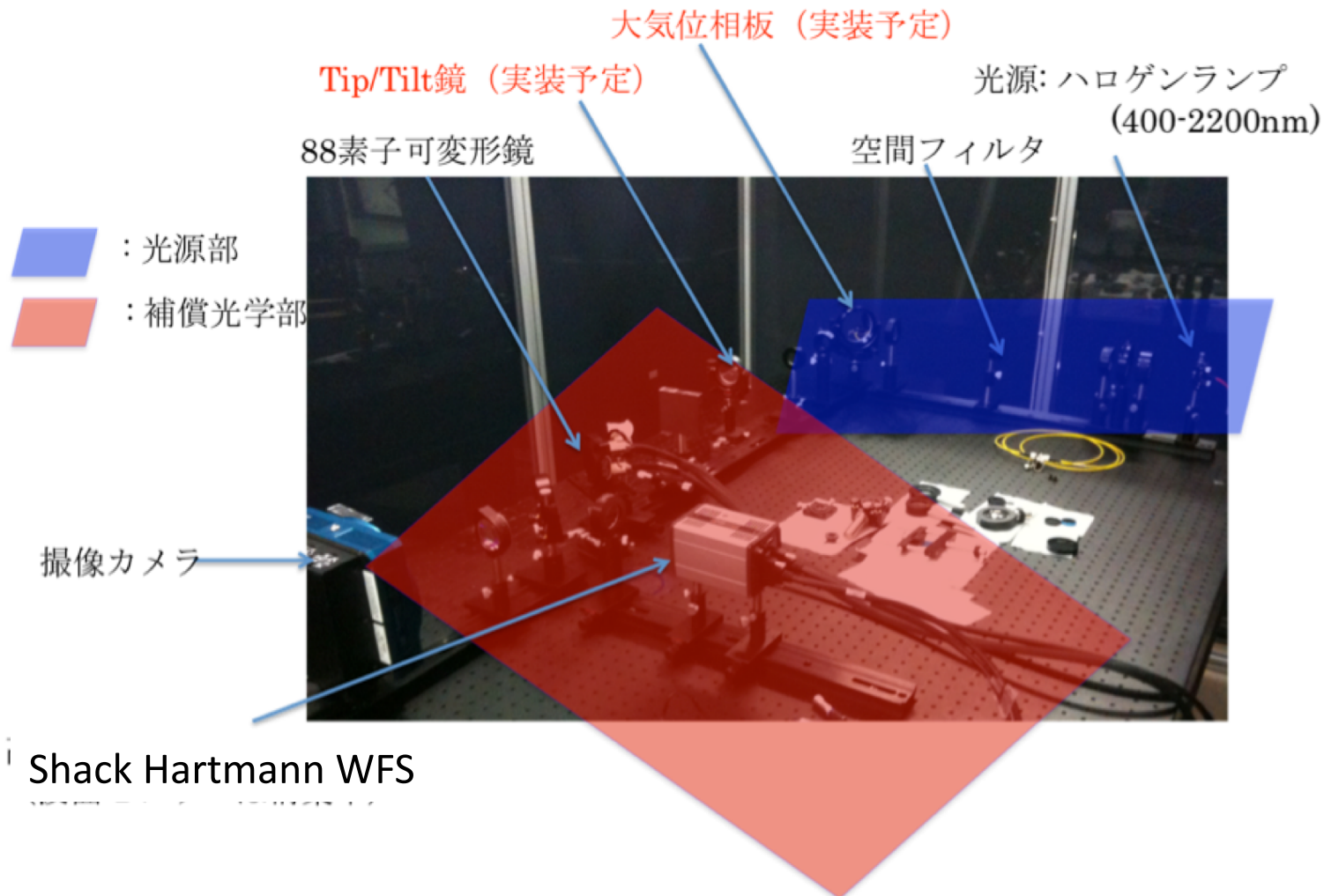


Self-referencing interferometer

(Angel 1994; Millerd 2004; Macintosh 2006)

室内実験

光学素子が揃っている所から随時組立中



Shack Hartmann WFS

今後

2013年度

- Conceptual Design Review (6-7月) → 最終仕様決定
- Woofer光学系の補償制御実験

2014年度

- Woofer+Tweeter光学系の補償制御実験

2015年度

- 補償光学系と高コントラスト系との組み合わせ

2016年度

- ファーストライト