

次世代超大型望遠鏡における地球型系外惑星の直接撮像

~Direct Imaging of Earth-like Exoplanets with
Extremely Large Telescope~

松尾太郎、SEITメンバ他

メンバ

- 23名の研究者・大学院生から構成される。

SEIT Working Group

研究代表者: 松尾太郎 (京都大学)
共同研究者: 田村元秀 (東京大学/NAOJ)

サイエンス検討班

総括: 河原創 (東京大学)

成田憲保 (NAOJ)
高見道弘 (ASIAA)
藤井友香 (東工大/ELSI)
生駒大洋 (東京大学)
玄田英典 (東工大/ELSI)
武藤恭之 (工学院大学)
濱野景子 (東京大学)

観測装置検討班

総括: 小谷隆行 (NAOJ)

夏目典明 (京都大学)	村上尚史 (北海道大学)
木野勝 (京都大学)	木田学武 (北海道大学)
栗田光樹夫 (京都大学)	入部正継 (大阪電通大)
石川久美 (理研)	西田秀哉 (大阪電通大)
大屋真 (すばる望遠鏡)	岩室史秀 (京都大学)
長田哲也 (京都大学)	馬場直志 (北海道大学)
	西川淳 (NAOJ)

国際協力

Planet Formation Imager
(Bruce Macintosh (LLNL))

LICK FIRST project
(Franck Marchis (SETI))

SCEXAO project
(Olivier Guyon (Arizona))

青: 大学院生

内容

- 背景:

系外惑星研究の現状とこれから

- サイエンス:

地球型惑星の直接観測・キャラクタリゼーション

- 技術:

直接観測の現状

地上からの超コントラスト光学系

- SEIT計画

背景

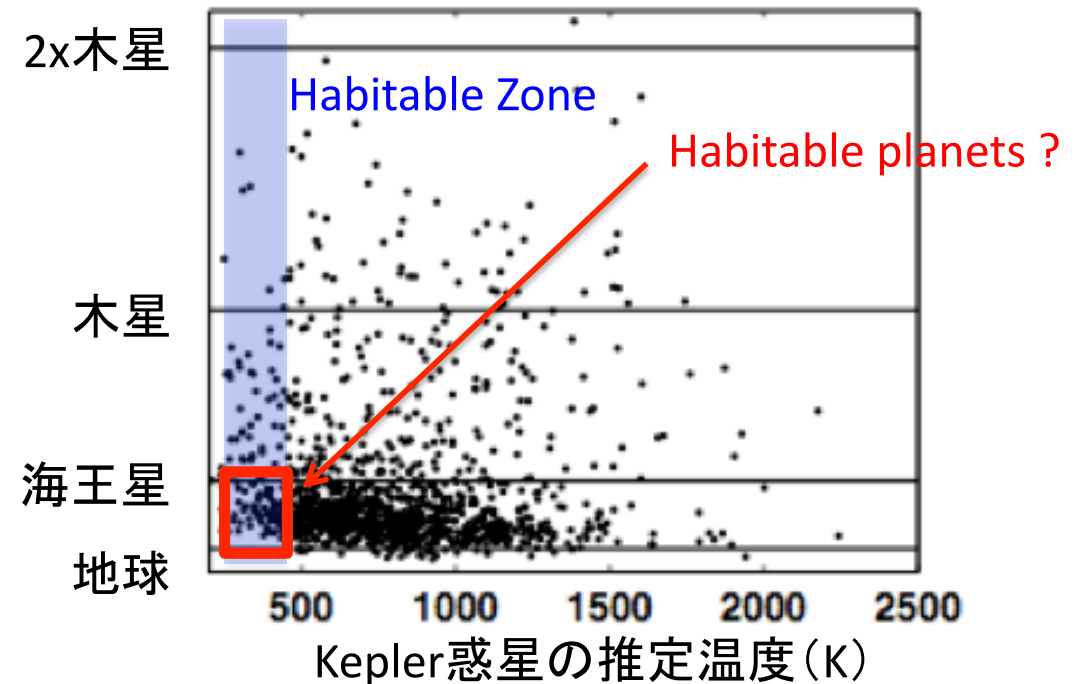
将来の系外惑星研究

- Kepler衛星により惑星表層に「液体の水」を有する可能性のある惑星が数十個発見されている。

→ 地球型惑星は豊富に存在

- 直接観測による惑星候補の撮像に複数成功。

→ 将来の系外惑星研究における究極的目標は、「**地球型惑星のキャラクターゼーション**」。



Kepler衛星によって発見された
惑星候補の半径と推定温度
(Boroucki et al. 2011)

惑星を直接「見る」ことで得られるもの

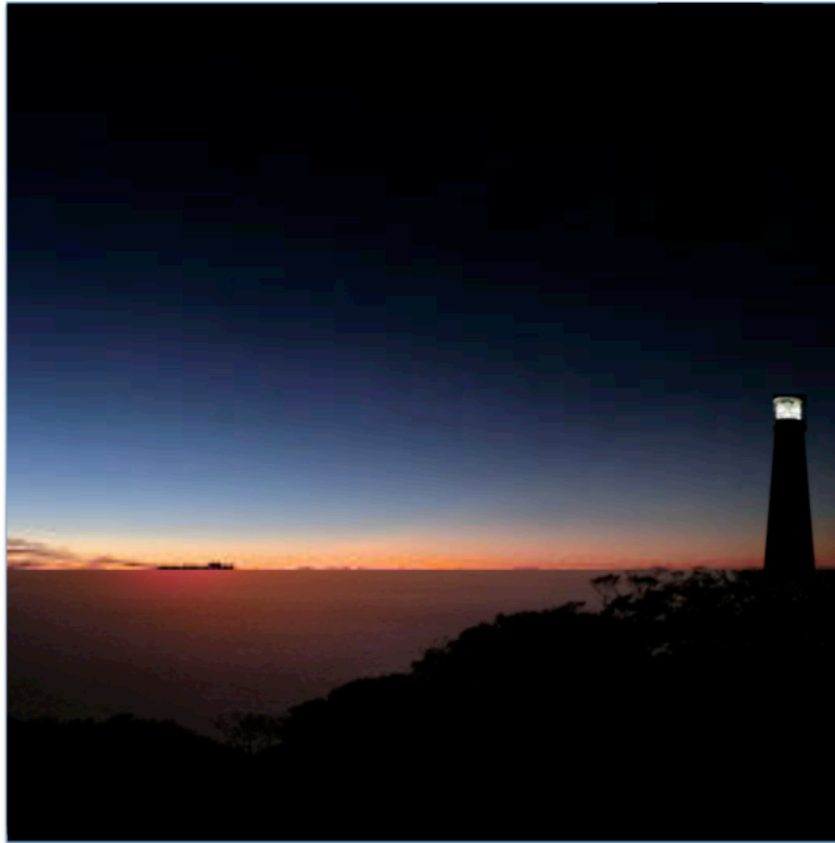
- 惑星からの光の観測で惑星の大気や表層を探ることができる。
- 惑星大気の組成
環境(CO_2 , H_2O)、
生命の痕跡(酸素)
- 惑星の表層
表層の組成(植物、雲、海、
陸)
- 温度



かぐやから見た地球 (Jaxaより)

直接観測

惑星の直接観測は、遠くにある灯台（主星）のまわりを飛ぶ
ほたる（惑星）に例えられる。

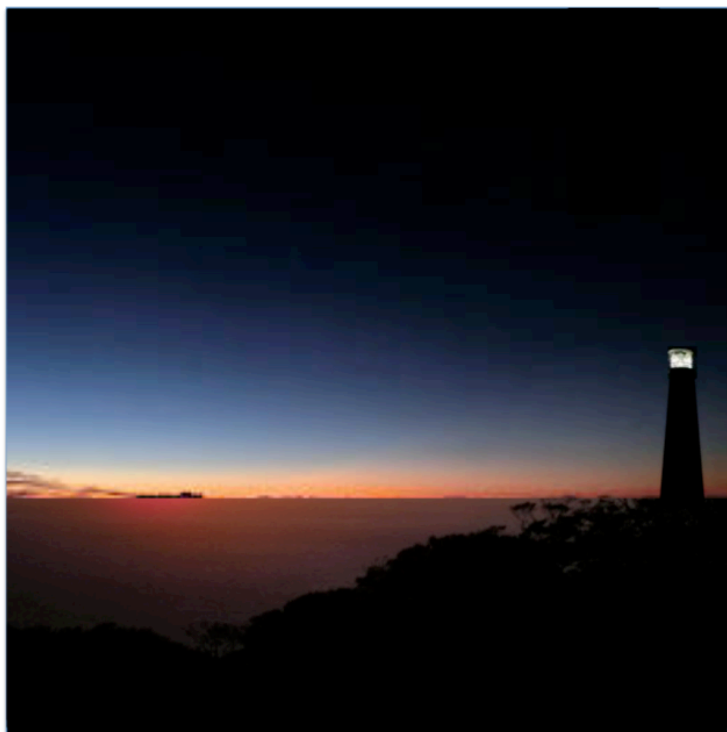


灯台のあかりがともっている時

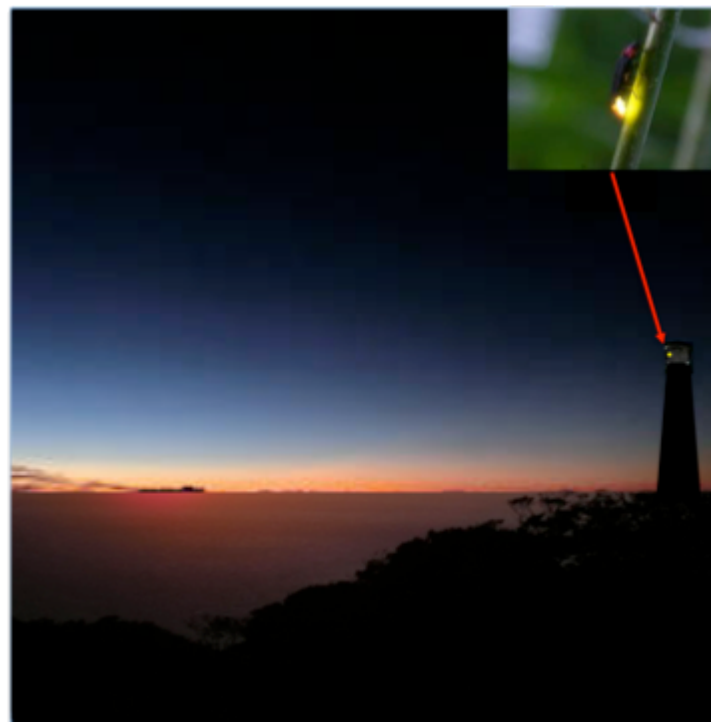
直接観測

遠くにいるほたるを見つけるためには、どうすればよいか？

1. 暗いほたるを見つけるための**高い感度**
2. 灯台とほたるを分解する(見分ける)ための**高い空間分解能**
3. 灯台とほたるの高い強度比を解消するための**高いコントラスト**



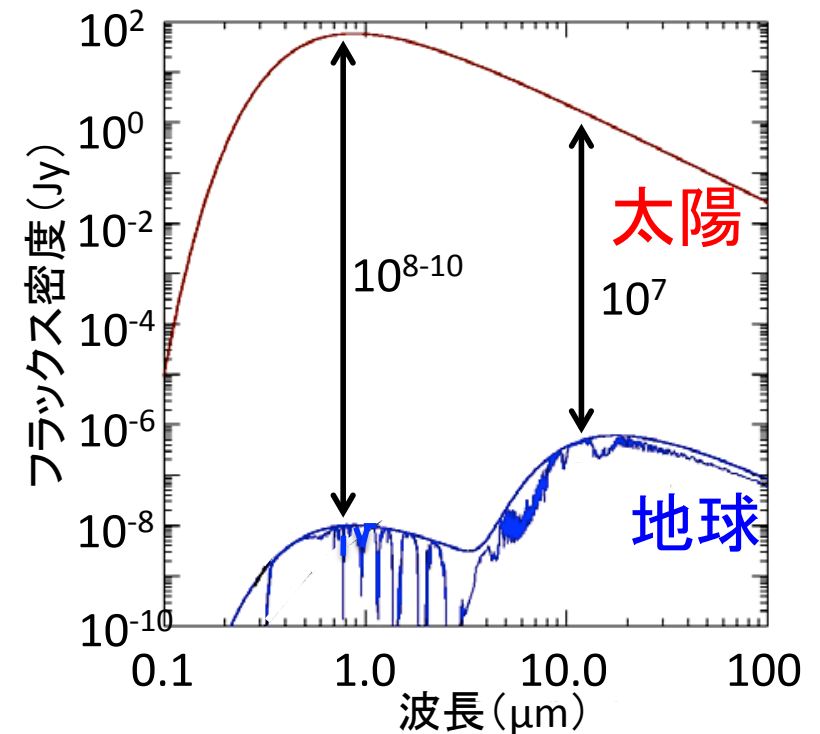
灯台のあかりがともっている時



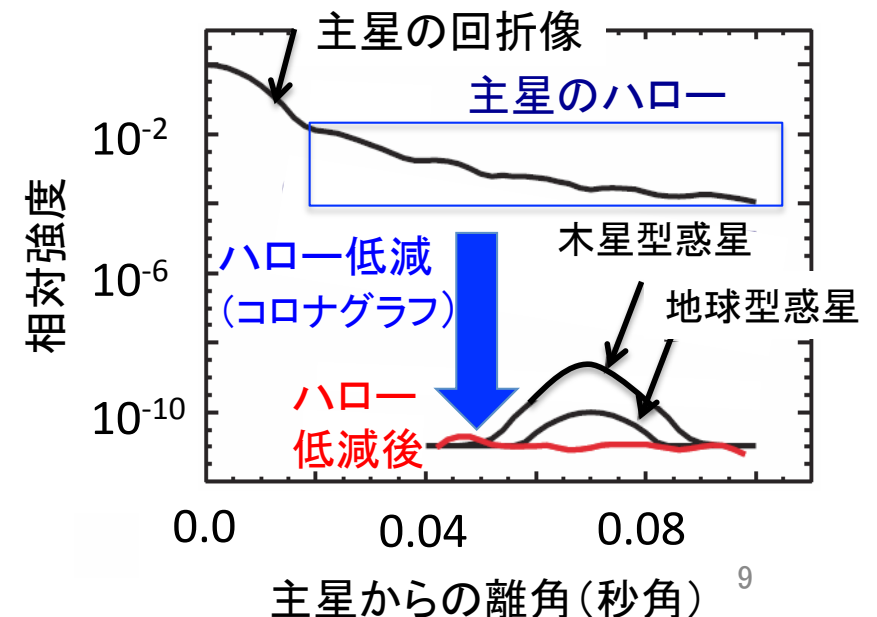
灯台のあかりが消えている時

直接観測

- 地球は可視光・近赤外線では反射光で、中間赤外線では自身の熱放射で輝く。
- 必要コントラスト:
 - 10^{8-10} 乗 (反射光)
 - 10^7 乗 (熱放射)
- 惑星光の主星のハローに埋もれる
→ 主星のハローだけを選択的に低減する、特殊な装置「コロナグラフ」が必要。



10pcから観測した太陽と地球のスペクトル



直接観測のプログラム

Current

2018?

2023

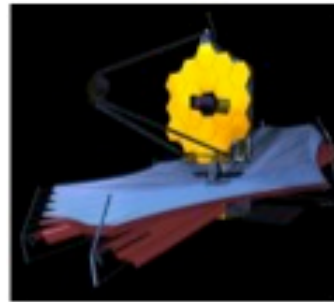
? (after 2025)

• SPACE

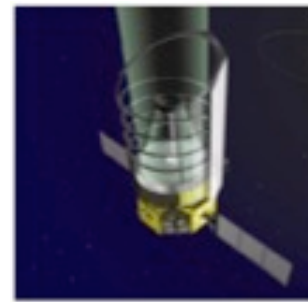


HST

1.



JWST



SPICA

3.



TPF
生命探査

• Ground Now



8m-telescopes
(Subaru/HiCIAO etc)

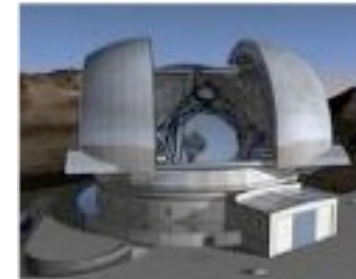
若い星周りの温かい巨大ガス惑星探査

+ ExAO
(もうすぐ!)

2.



TMT



E-ELT
Extreme Large Telescopes
地球型?・木星型?

直接観測のプログラム

Current

2018?

2023

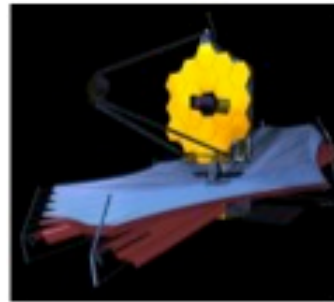
? (after 2025)

• SPACE

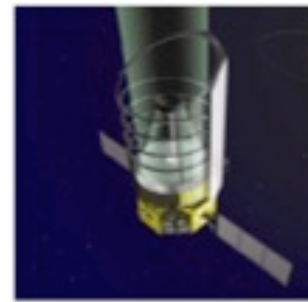


HST

1.



JWST



SPICA

3.



TPF 無期限延期
生命探査

• Ground Now



8m-telescopes
(Subaru/HiCIAO etc)

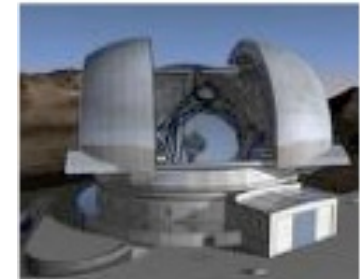
若い星周りの温かい巨大ガス惑星探査

+ ExAO
(もうすぐ!)

2.



TMT



E-ELT

Extreme Large Telescopes

最初の地球型惑星の直接検出

間接的検出のプログラム

○間接的検出法による地球型系外惑星探査は
2020年までにかなりの進展が予想。

A. 赤外線視線速度法

2014年にすばる望遠鏡にIRD (Infrared Doppler)が搭載
すばる以外の複数の4-8m級望遠鏡でも一斉に観測を開始

B. トランジット探査法

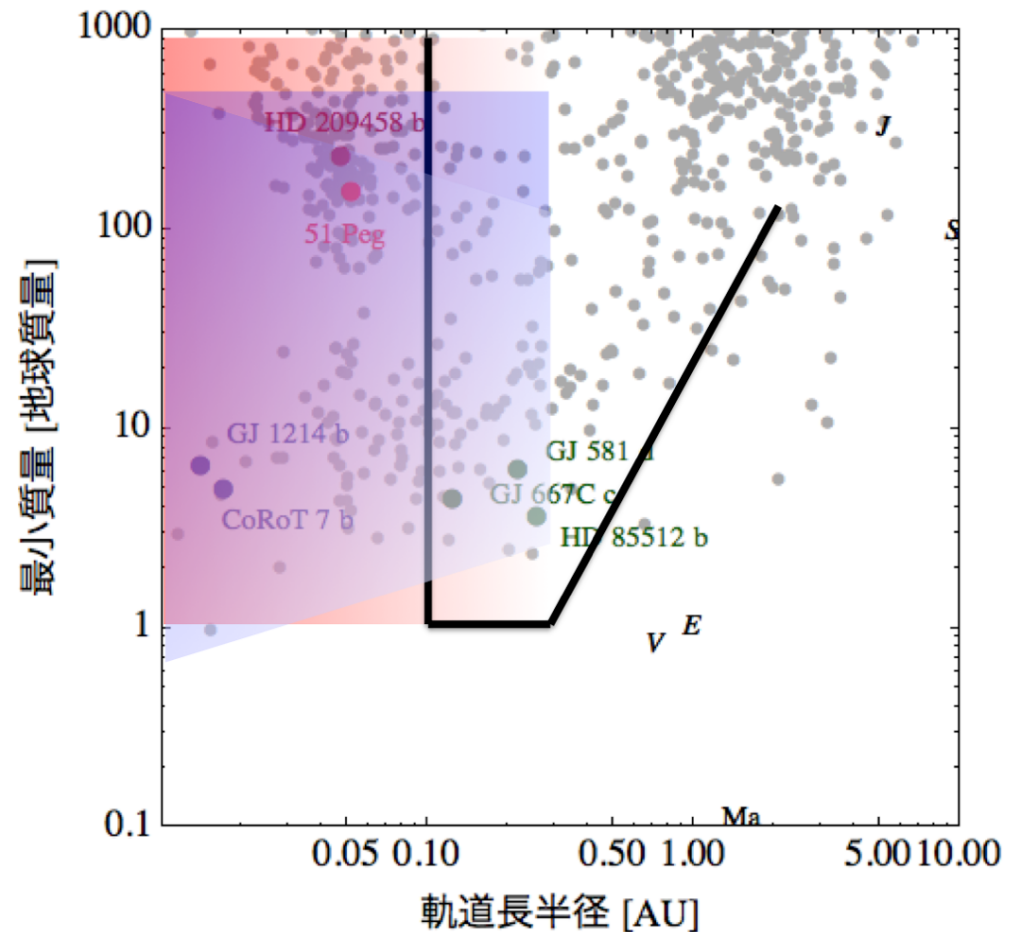
TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite) : approved
ケプラーの後継機として2017年の打ち上げ。
全天50万個の近傍の明るい星について探査。
(周期が短い惑星に感度がある)

晩期型星周りのHabitable Zoneにある地球型系外惑星が中心
(TESSはG, K型星の探査もするが、HZの惑星には感度がない)

科学的目標：
～ 第2の地球の発見を目指して～

地球型系外惑星の直接観測

- TMTの理論的な性能
 - 0.1-0.3AUの地球型惑星
 - 0.1-0.8AUのスーパーアース(10倍の地球半径)の検出が可能。
- IRDおよびTESSの検出された惑星のフォローアップ観測が可能。

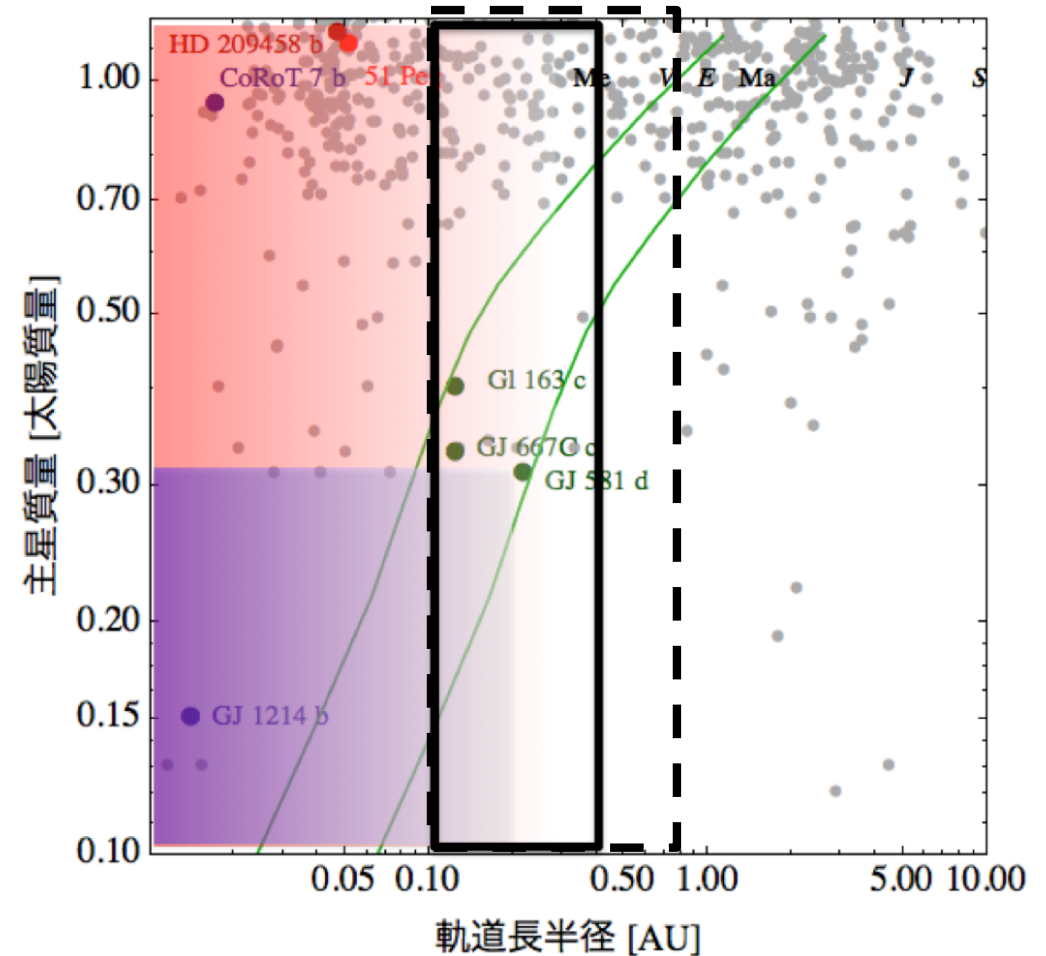


SEIT(黒の線)、IRD(青)、TESS(赤)の検出限界と
発見された系外惑星の質量-軌道長半径分布

Habitable Planets

実線: 地球型惑星
点線: スーパーアース

- 晩期型星(0.2-0.7太陽質量)周りのHabitable Zoneの地球型惑星の検出。
- スーパーアースについては、G, K型星周りの周りで検出可能。
- IRDおよびTESSも晩期型星周りのHabitable Planetを検出。

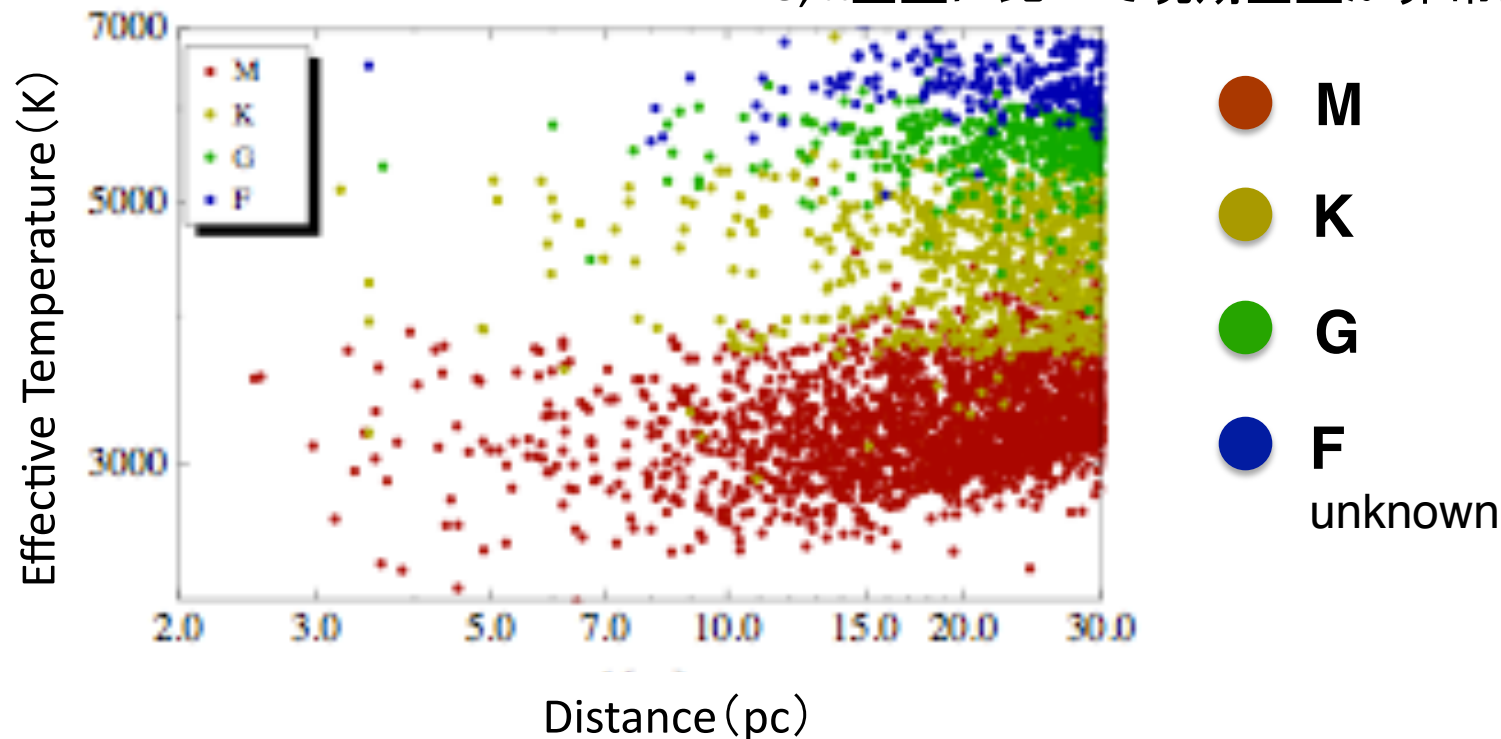


Habitable Zone (緑線) と SEIT、IRD、TESS の比較

晩期型星はターゲットとして有望か？

- Catalogue (~3690) : Lepine & Gaidos 11, LSPM (L'epine & Shara 2005), Gliese & Jahreiß (1991) and the Hipparcos and Tycho Catalogues (Perryman & ESA 1997), NStars (Gray et al. 2003; Gray et al. 2006), Casagrande et al. (2008), and Casagrande et al. (2010)
- Criteria : 1.Single Star, 2. dec > -40°
→ # of samples : ~1000個

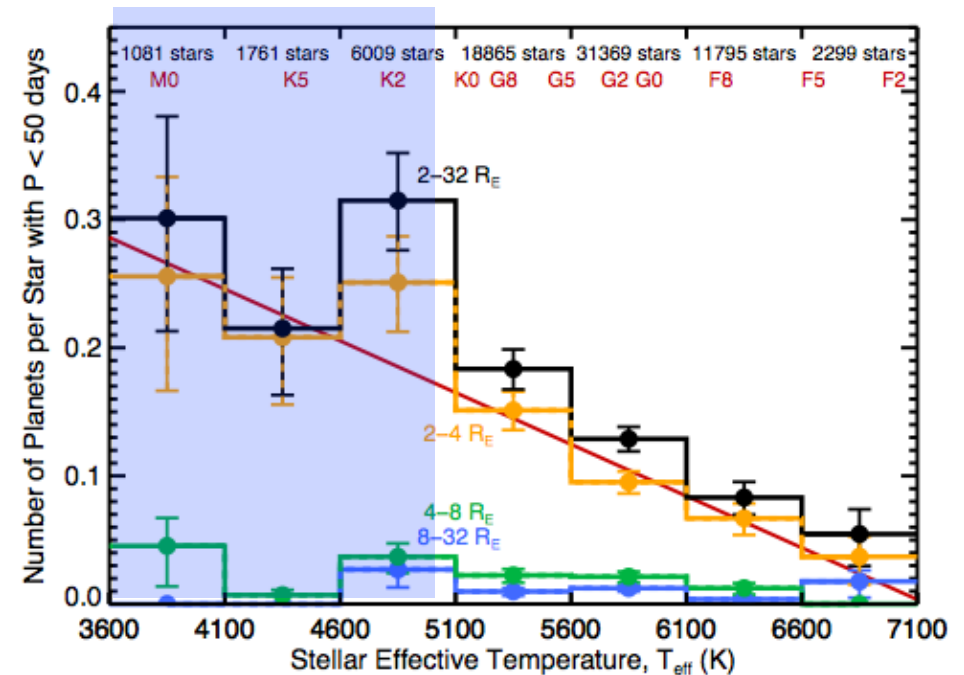
地球型惑星探査としてのサンプルは15pc以内。
G, K型星に比べて晩期型星が非常に多い。



晩期型星はターゲットとして有望か？

SEITで中心に狙うターゲット

- 晩期型星になるほど、半径の小さい惑星の存在確率が高くなる。(形成論との整合性も)
 - M0やK5型星では、スーパーアースの存在割合が20-30%にもなる。
- ➔ 全サンプル数が1000なので、300程度のスーパーアースを検出できる。



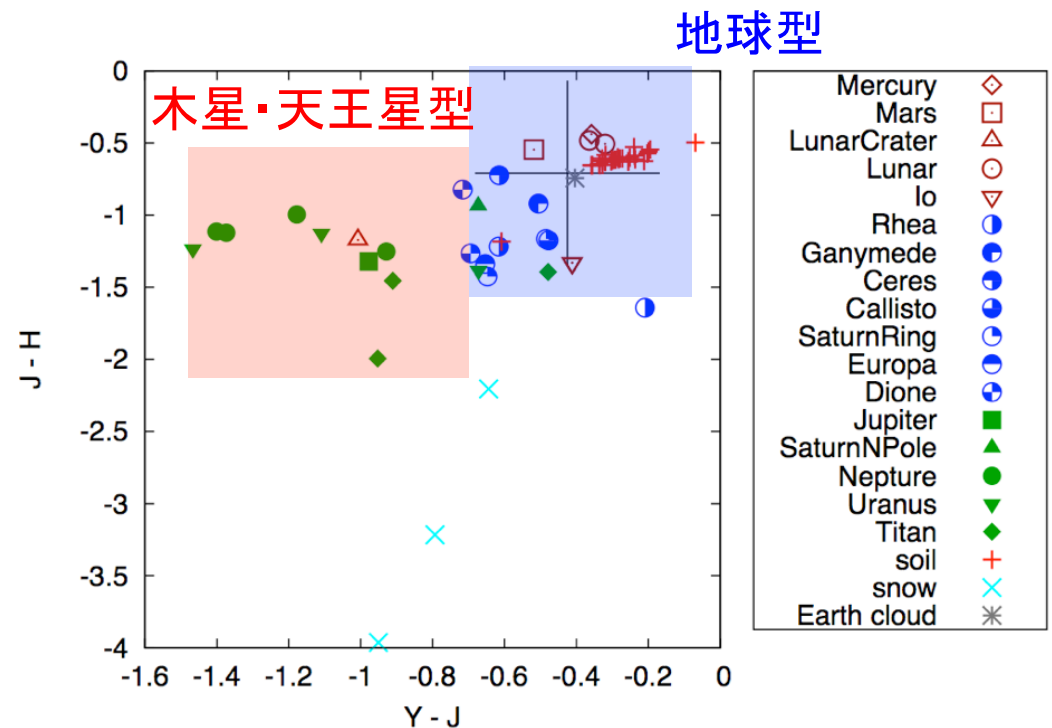
1つの星あたりに50日未満周期の惑星の存在数

Howard et al. (2011)

表層環境

藤井(東工大/ELSI)

- Color-Colorにより表層環境の検証が可能。
- 地球型(土壌)と木星・天王星型(H/He大気)の分離が可能。

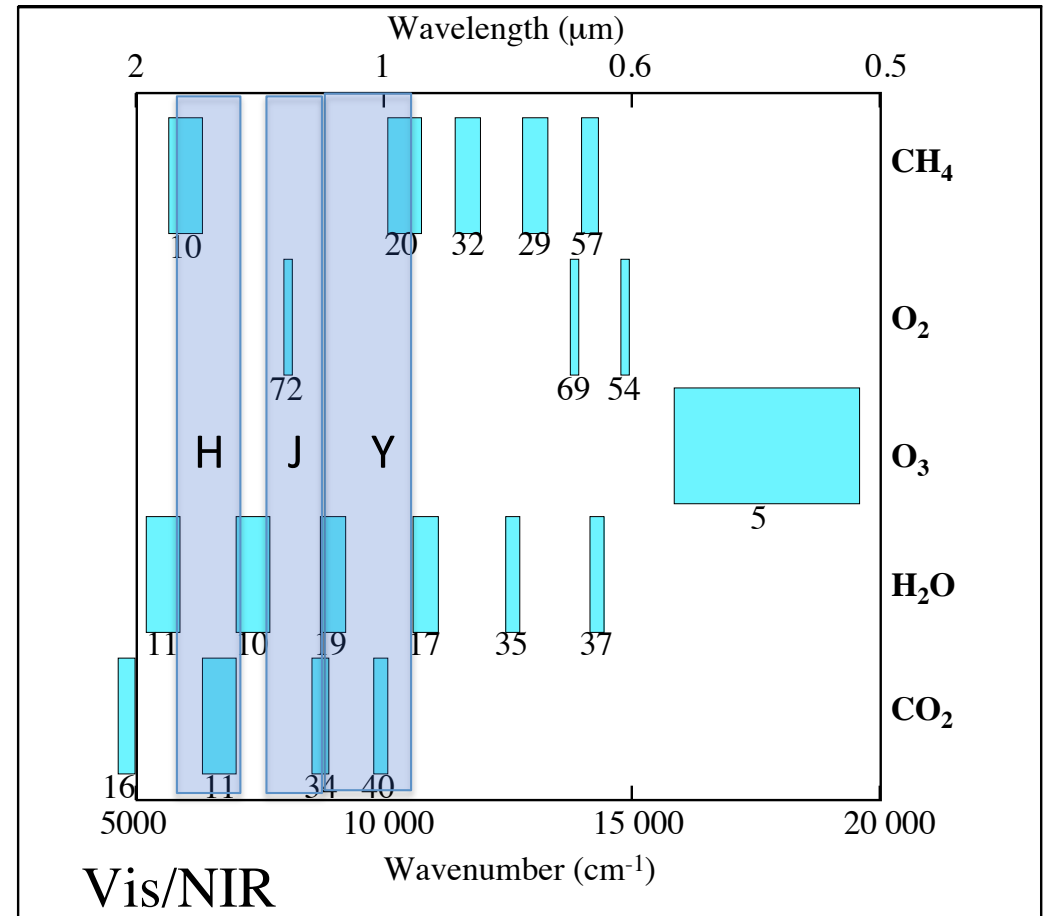


太陽系惑星と組成のColor-Colorダイアグラム

惑星の大気分光

SEITの観測バンド

- 観測バンド: Y, J, H バンド
(観測装置の冷却無し)
- 様々な分子の吸収線
 - H_2O (1.05-1.1 μm): 今後の検討
 - O_2 (1.27 μm)
 - CO_2 (1.5-1.6 μm)
 - CH_4 (1.7-1.8 μm)

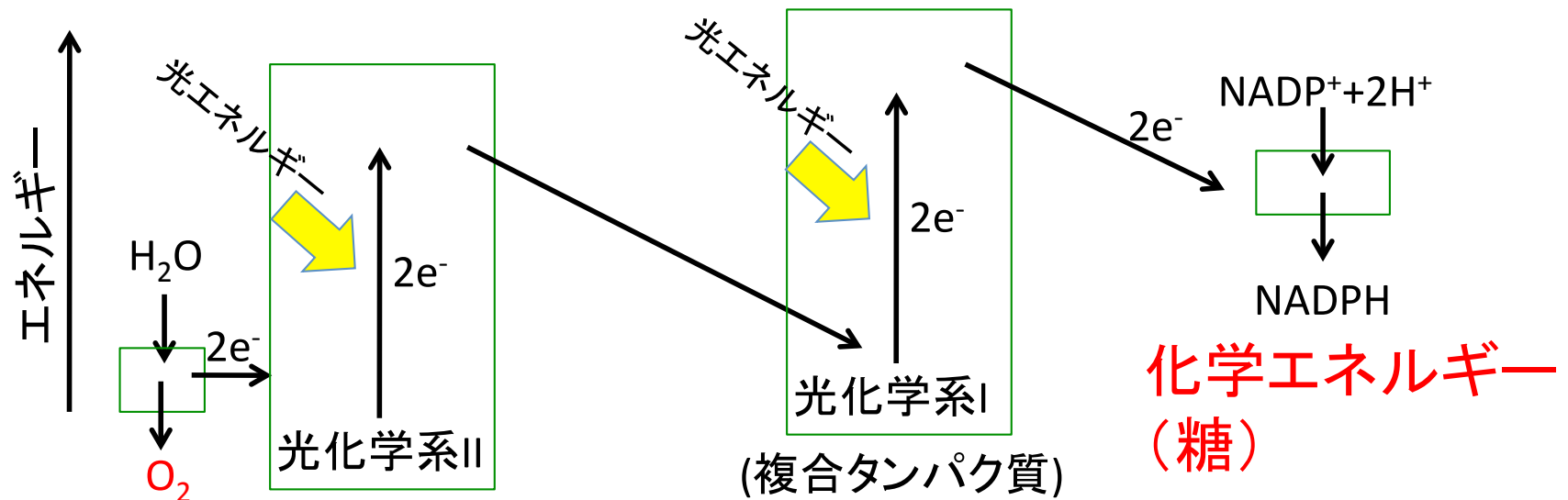


波長分解能

(Selsis (2004)の論文改訂)

光合成

- 地球大気に含まれる豊富な酸素は光合成の副産物。
- 光合成とは、光エネルギーを化学エネルギーに変換する反応(代謝)
- (水の電気分解により酸素が発生。)



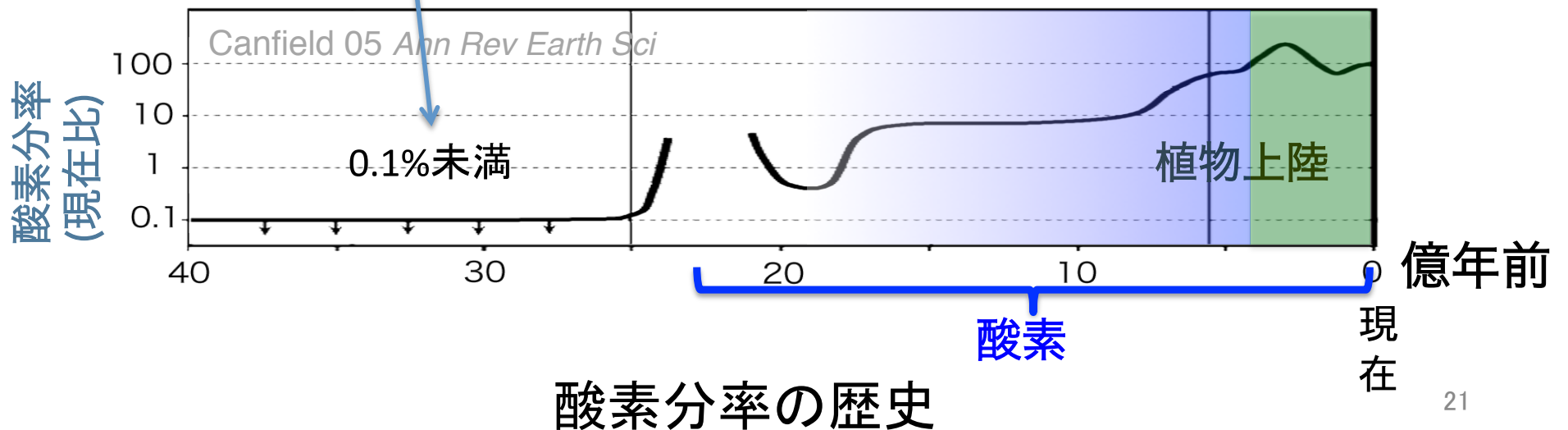
酸素分率の歴史

- 23億年を境に急激に酸素分率が上昇。
 - ➔ 現在の豊富な酸素は地球の酸素発生型光合成によって生成・蓄積

水蒸気の紫外線分解によって
微量な酸素が発生

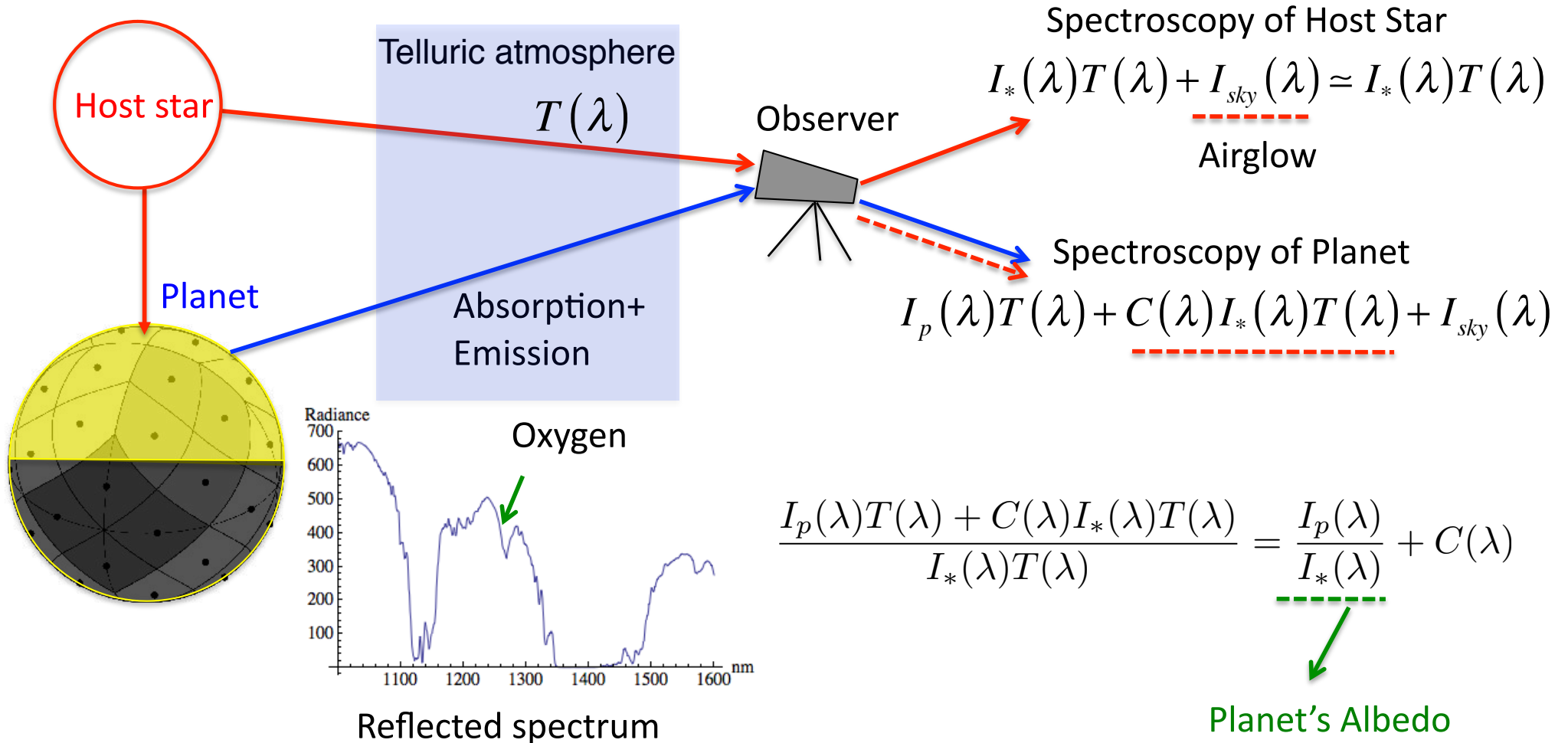


シアノバクテリア



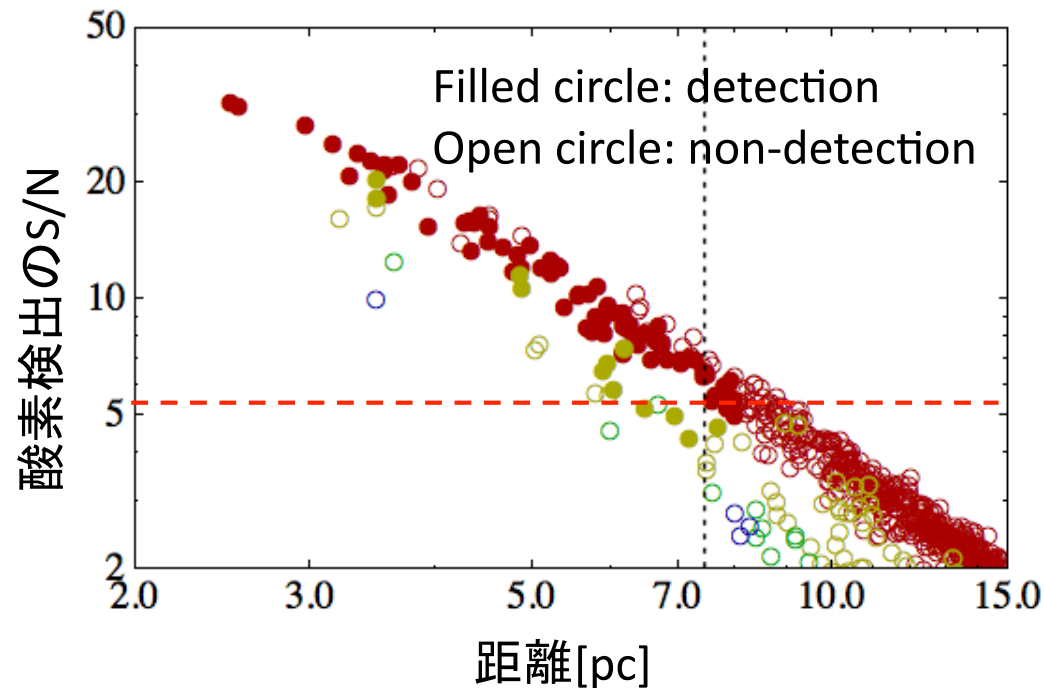
地球大気の吸収は問題か？

アルベドから大気組成を測定するため、主星と惑星の同時分光により取り除く



酸素の検出

想定: 波長分解能 ~ 50 (EW of 1.27 μm line: 2nm)



- 7pcより近傍の恒星の周りの惑星で酸素検出が可能
- ターゲット数: ~ 100 (M: 90, K: 10)

5時間の観測における酸素検出のS/N

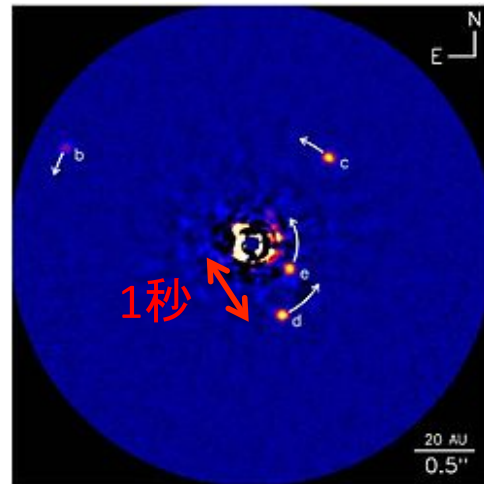
(kawahara et al. 2012)

技術：

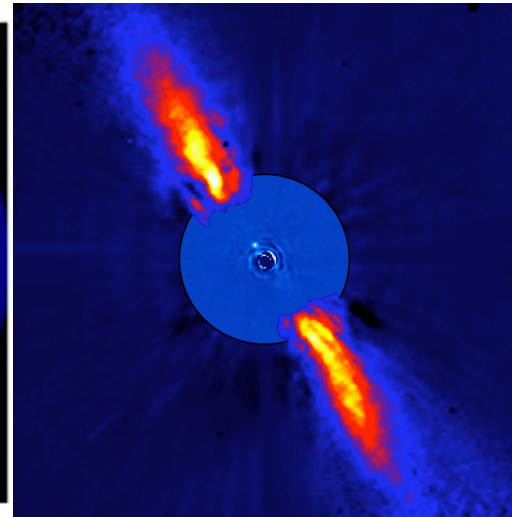
現状の装置でどこまで到達可能か？

第1世代: SEEDS, Keck, VLT/NACO etc.

- 第1世代: 太陽系外惑星の直接観測の成功
 - ➔ 若い恒星周りの温かい巨大ガス惑星の撮像
 - 離角: 0.5秒以遠、コントラスト: $\sim 10^{5-6}$



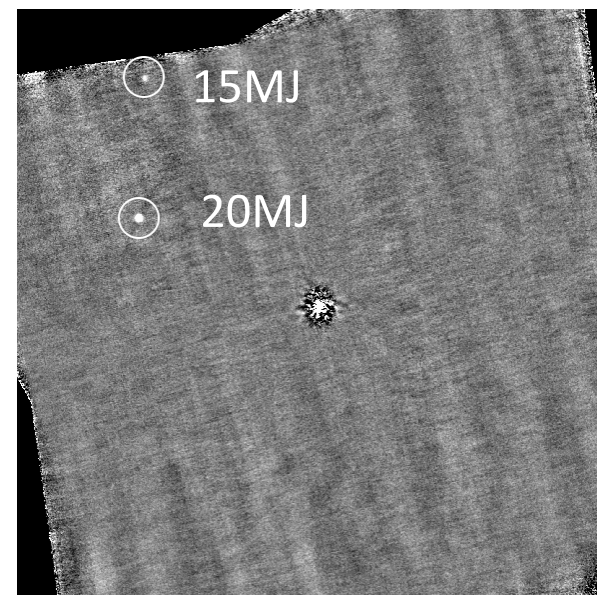
HR8799
(Marois et al. 2010)



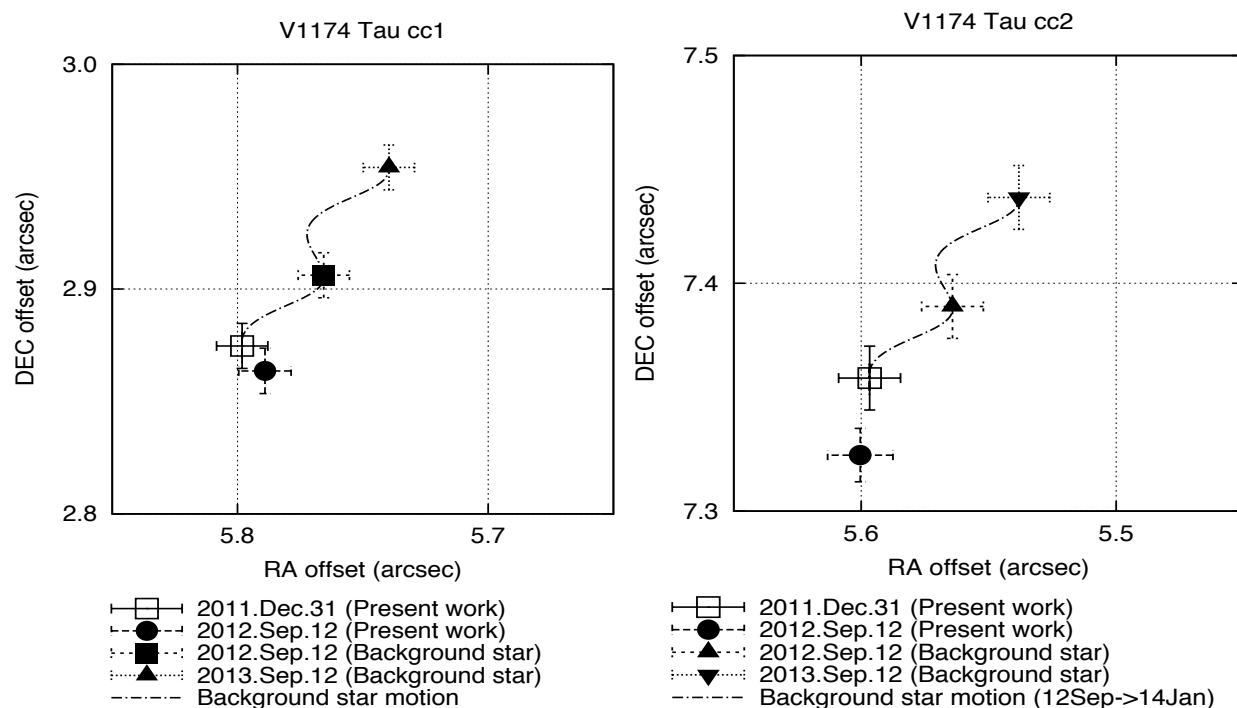
B Pictoris
(Lagrange et al. 2008)

SEEDS Open Cluster

- 2009年から4年にかけて(年齢の決まっている)Pleiades散開星団、近傍のMoving Groupを40天体観測。
- 観測方法: Angular Differential Imaging
- 15MJ、20MJの伴星候補検出に成功。



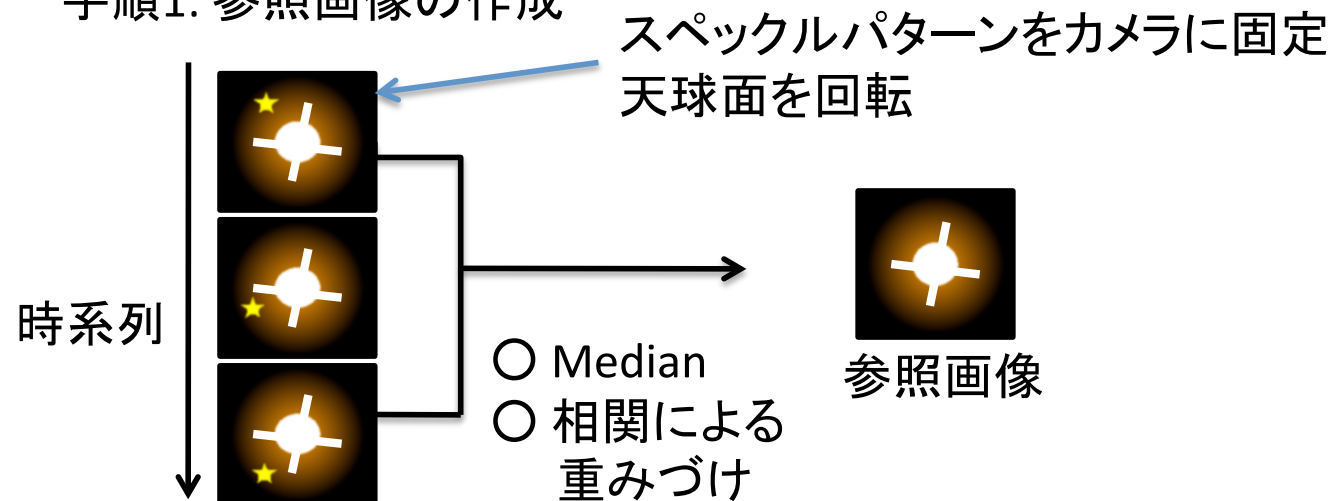
V1174 Tauの観測結果



固有運動測定
(山本他、準備中)

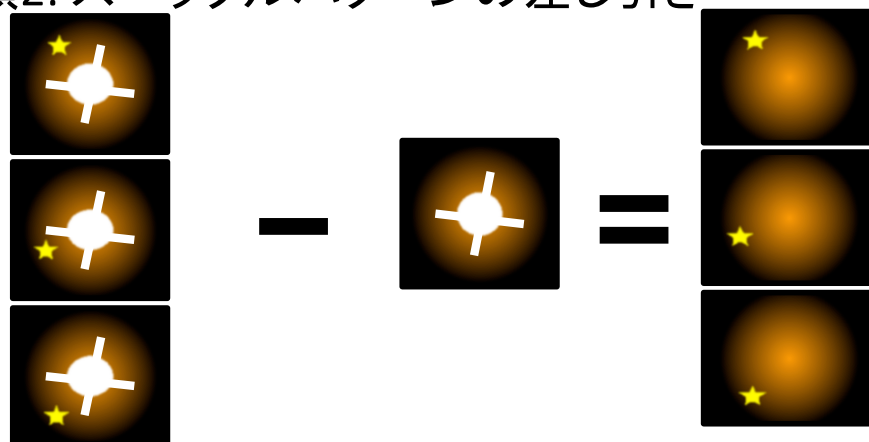
ADI観測

手順1: 参照画像の作成

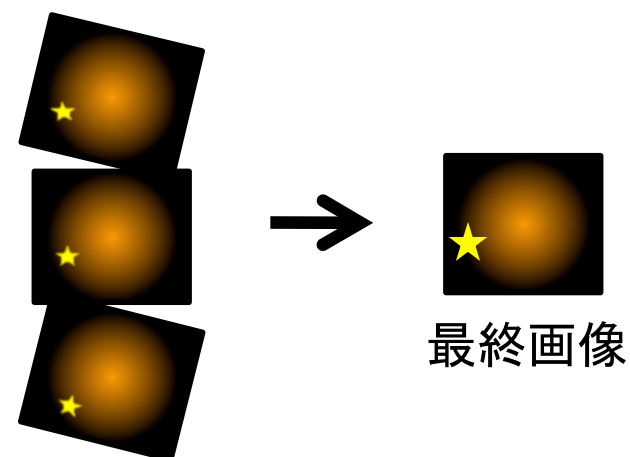


取得される画像

手順2: スペックルパターンの差し引き

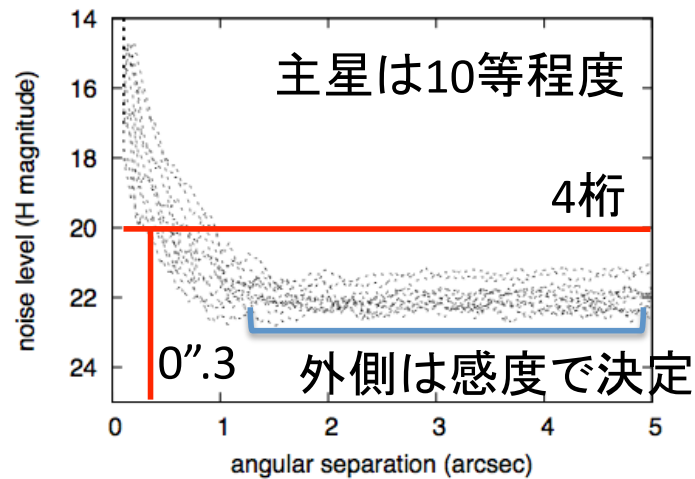


手順3: 回転・結合

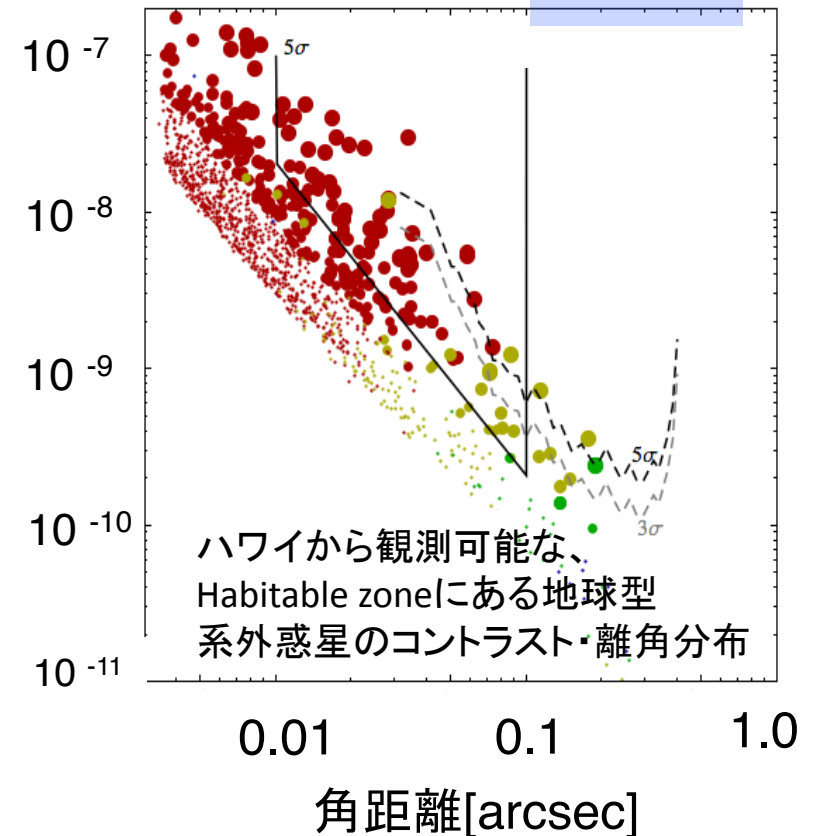


30m望遠鏡へ適用すると・・・

30m望遠鏡版
AO188/HiCIAO



コントラスト



様々な恒星周りでの
AO188/HiCIAOの検出限界 (1 σ)
(山本他 PASJ, 2013)

地球型系外惑星の直接観測は難しい・・・

ADI観測は何が問題か？

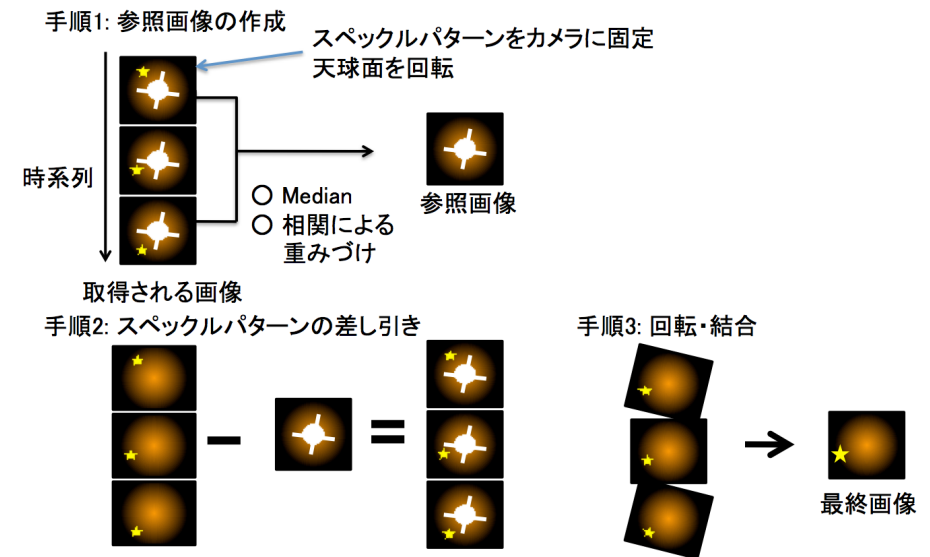
- 主星近傍での検出限界の改善なし
- 主星近傍では回転が不足！

→ 惑星は検出面で動かないので
惑星とスペックルが分離不可。

- 時間分解能(後で説明)
- 数フレームの情報を基に
スペックルを推定。

→ 数分より長いスペックルだけを除去。

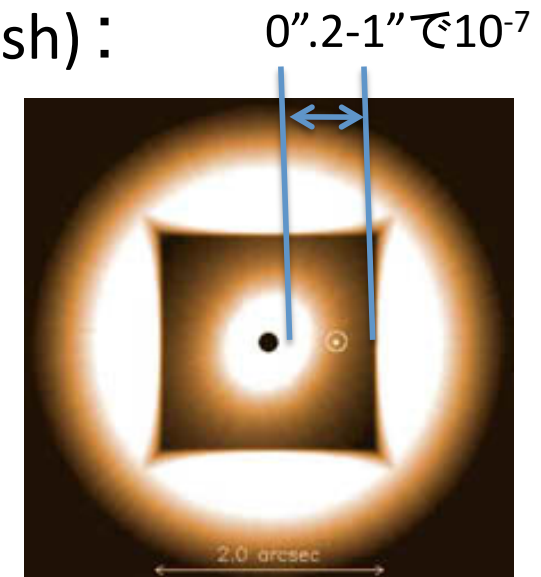
→ 主星近傍のコントラストの
改善にはつながらない



ADI観測の概要

第2世代: SCExAO, GPI, SHERE

- 「リアルタイム補償」が鍵。
 - 第2世代: 極限補償光学
 - 極限: より高次(小さい空間スケール)の揺らぎまで補償
 - Gemini Planet Imager (PI. B. Macintosh):
 - 2013年10月から観測開始?
 - 4000素子レベルの可変形鏡の搭載
- 波面誤差レベル: $\sim 20\text{nm}$
- $0''.2$ 以遠で 10^{-7} 乗のコントラスト



GPIのシミュレーション図
<http://planetimager.org>

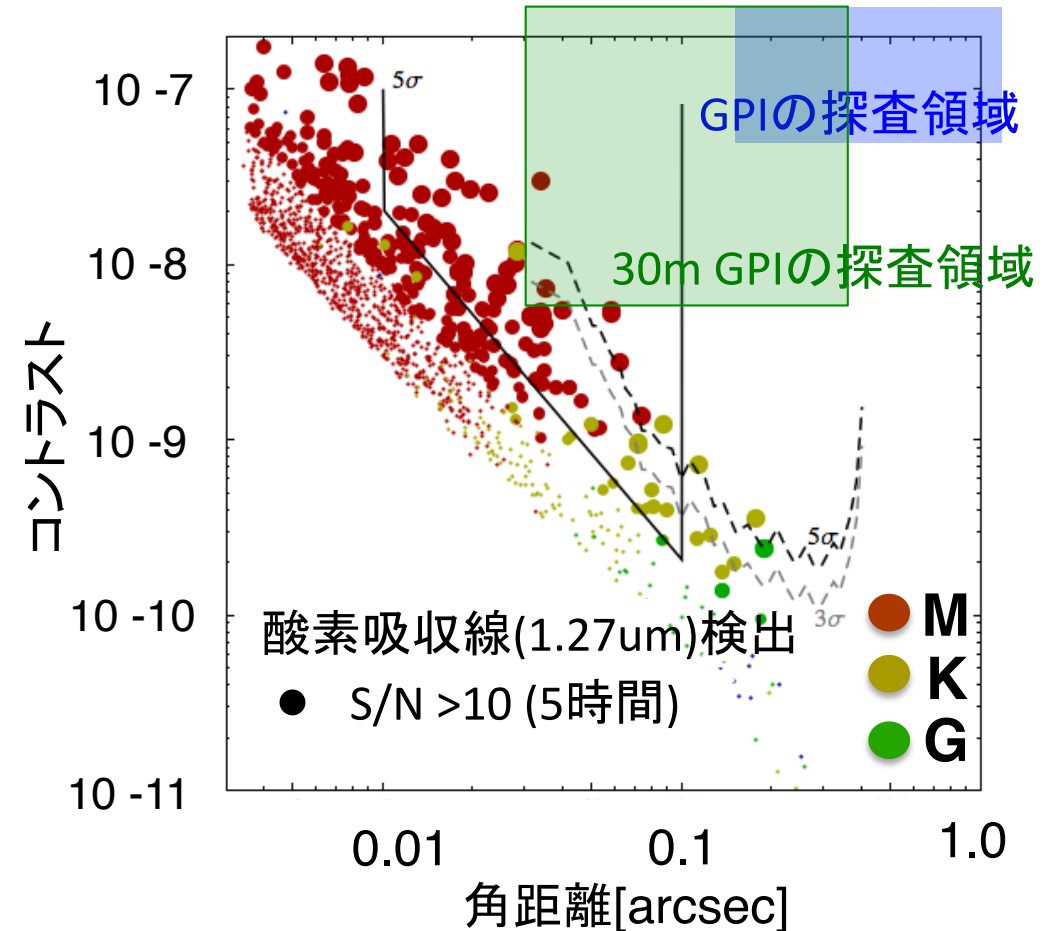
8mから30m望遠鏡へ

○ 8mと30m望遠鏡の比較

1. IWAの~4倍の改善
-> 惑星検出の要求コントラストの**1桁以上**の緩和
2. 入射光子数の16倍増加
-> 波面計測精度 ~ 4倍向上
-> **1桁コントラスト**の改善
3. 点源検出限界の**5等**改善
-> 地球型惑星の検出・分光

GPIをもっとしても数天体の地球型系外惑星が観測できるかどうか...

ハワイから観測できる近傍星周りのHabitable Zoneの地球型惑星を想定

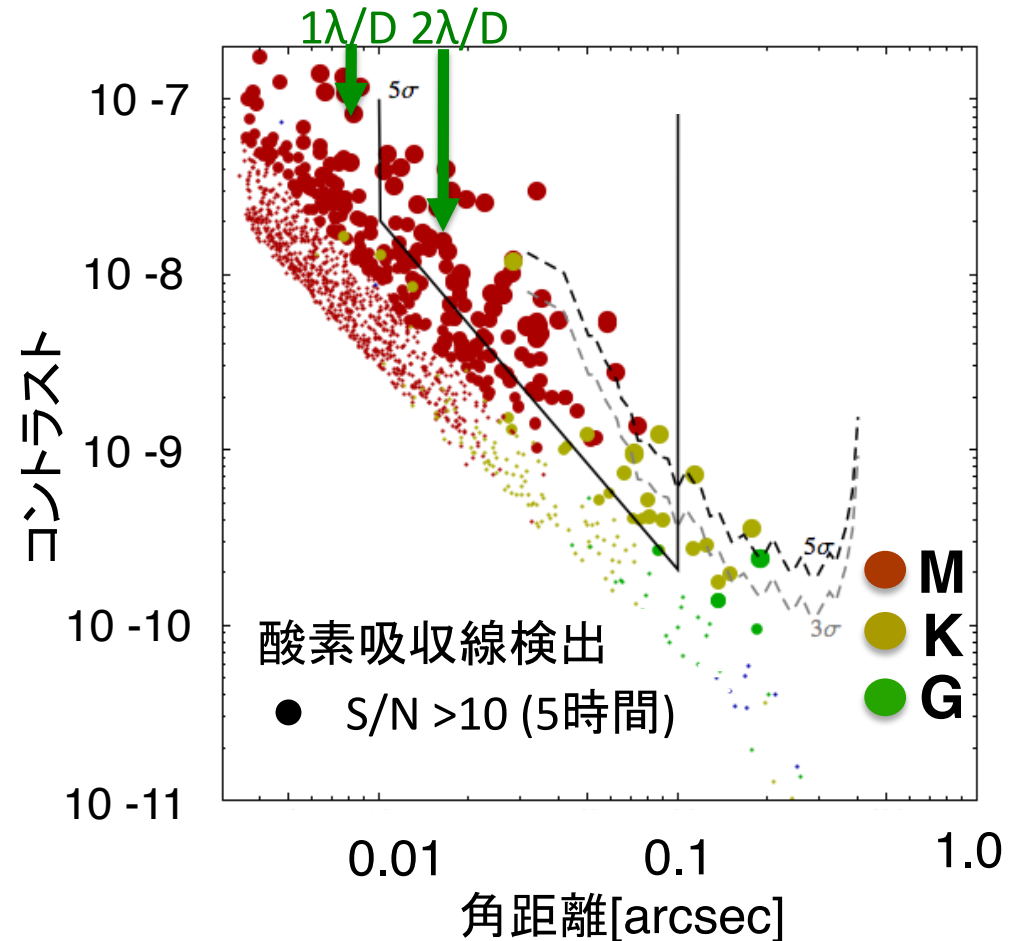


地球型惑星発見のために必要な角距離・コントラスト
Kawahara et al. (2012); Crossfield (2013)

仕様要求

- 主要観測バンドJでの
要求コントラスト(5σ)
 8×10^{-8} 乗 @ $1\lambda/D$ (8mas)
 2×10^{-8} 乗 @ $2\lambda/D$ (16mas)
→ 回折限界での高いコントラスト

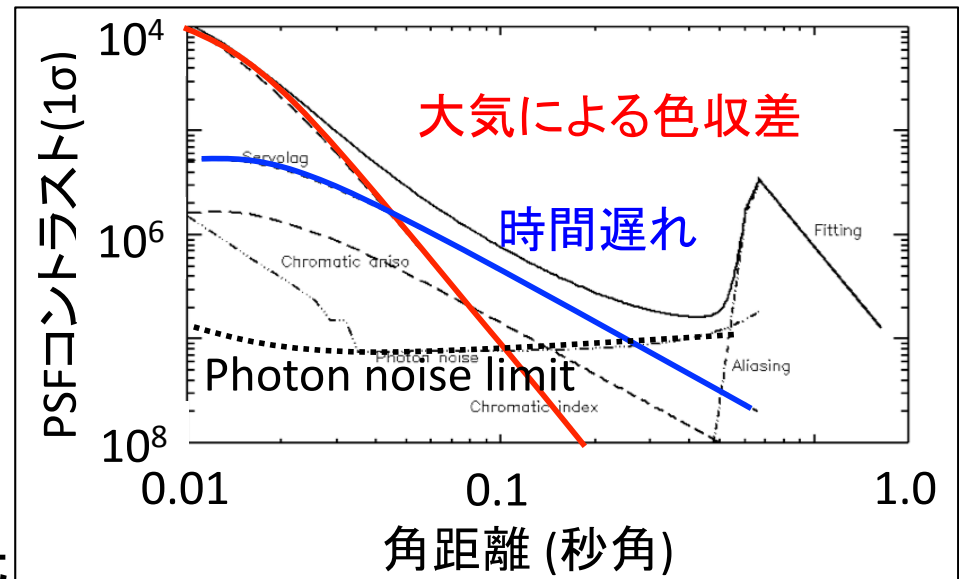
ハワイから観測できる近傍星周りの
Habitable Zoneの地球型惑星を想定



地球型惑星発見のために必要な角距離・コントラスト
Kawahara et al. (2012); Crossfield (2013)

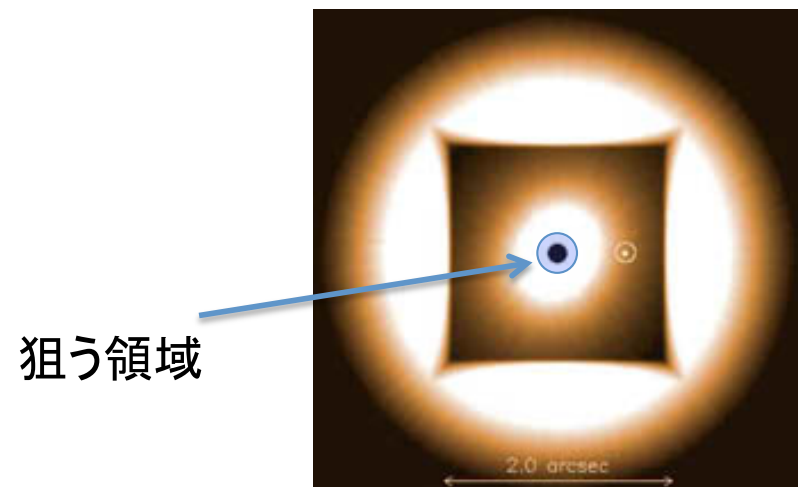
第3世代：？

- 主星からの散乱光の要因は、
 - 制御の時間遅れ
 - 色収差
- (補償光学系のセンサ波長は可視光
観測波長は近赤外線)



大気補償光学＋コロナグラフ後のコントラスト
(e.g., Verinaud+ 2008; Kasper+ SPIE 2012)

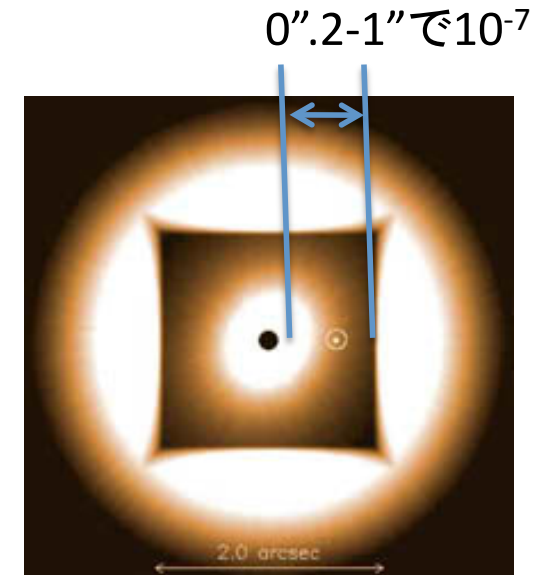
- 内側の惑星探査に特化した
新技術が必要！
- 鍵は、
 - 「計測・補償の**高速化**」、
 - 「**イメージング波長**での計測・補償」



GPIのシミュレーション図
<http://planetimager.org>

極限補償光学: SCExAO, GPI, SHERE

- 「リアルタイム補償」が鍵。
 - 極限: より高次(小さい空間スケール)の揺らぎまで補償
- GPI (Pl. B. Macintosh):
 - 2013年10月から観測開始?
 - 4000素子レベルの可変形鏡の搭載
 - 波面誤差レベル: $\sim 20\text{nm}$
 - $0''.2$ 以遠で 10^{-7} 乗のコントラスト
- SCExAO (Pl. O. Guyon)
 - ファーストライト済
 - 2000素子レベルの可変形鏡の搭載
 - 波面誤差レベル: $\sim 40\text{nm}$



GPIのシミュレーション図
<http://planetimager.org>

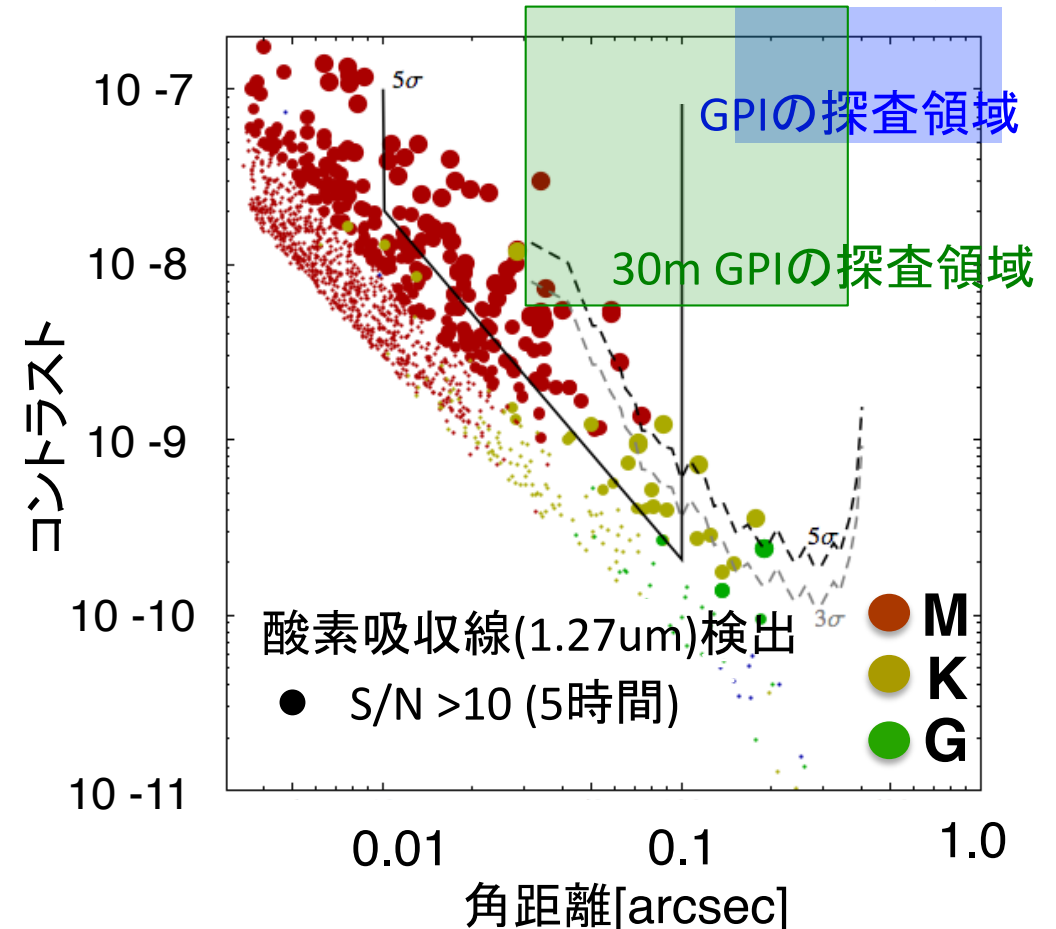
8mから30m望遠鏡へ

○ 8mと30m望遠鏡の比較

1. IWAの~4倍の改善
-> 惑星検出の要求コントラストの**1桁以上**の緩和
2. 入射光子数の16倍増加
-> 波面計測精度 ~ 4倍向上
-> **1桁コントラスト**の改善
3. 点源検出限界の**5等**改善
-> 地球型惑星の検出・分光

現状のGPIで既にスーパーアースの検出は可能である。
ただし、地球型惑星はもう少し

ハワイから観測できる近傍星周りのHabitable Zoneの地球型惑星を想定

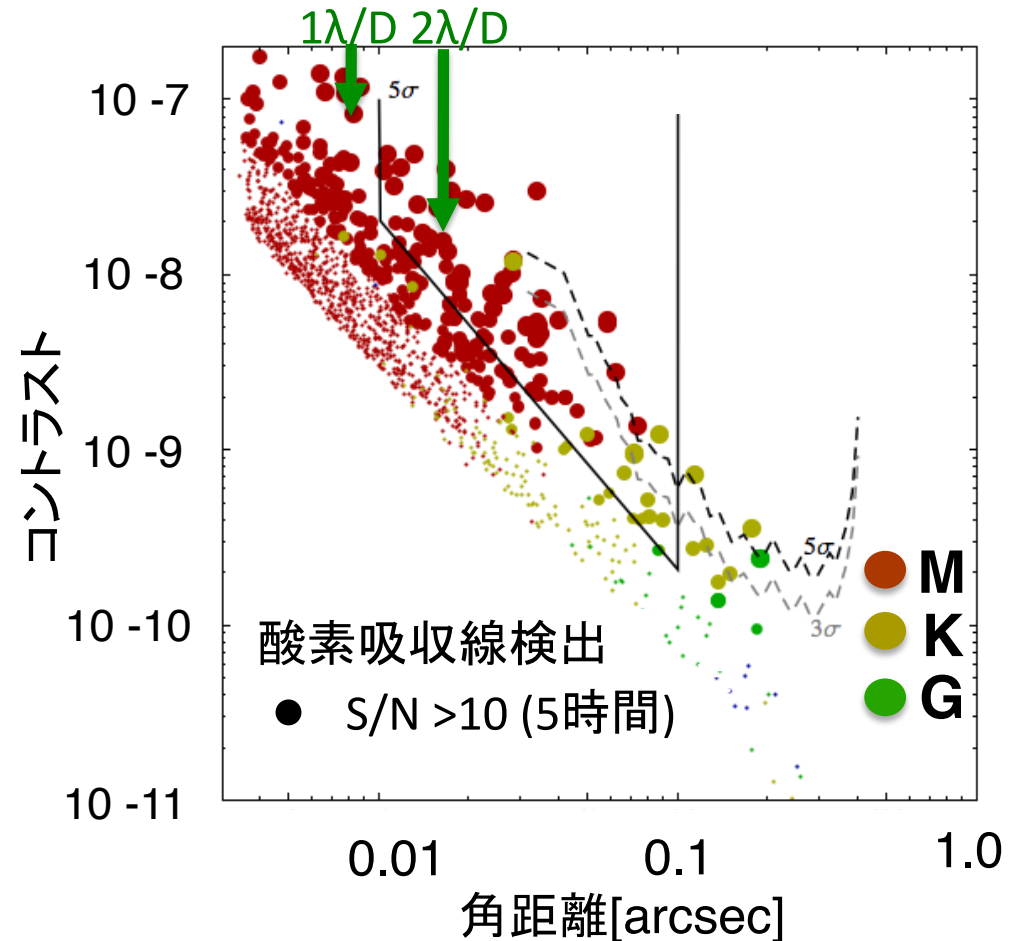


地球型惑星発見のために必要な角距離・コントラスト
Kawahara et al. (2012); Crossfield (2013)

仕様要求

- 主要観測バンドJでの
要求コントラスト(5σ)
 8×10^{-8} 乗 @ $1\lambda/D$ (8mas)
 2×10^{-8} 乗 @ $2\lambda/D$ (16mas)
→ 回折限界での高いコントラスト

ハワイから観測できる近傍星周りの
Habitable Zoneの地球型惑星を想定

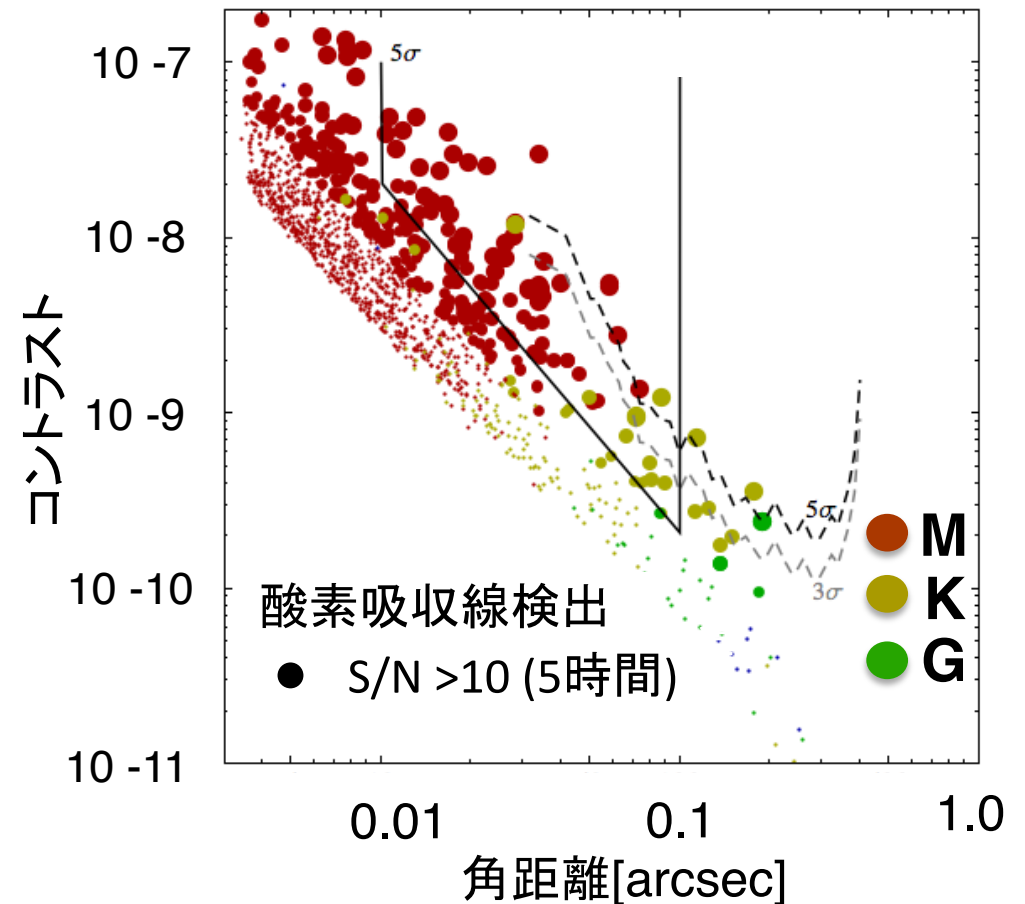


地球型惑星発見のために必要な角距離・コントラスト
Kawahara et al. (2012); Crossfield (2013)

仕様要求

ハワイから観測できる近傍星周りの
Habitable Zoneの地球型惑星を想定

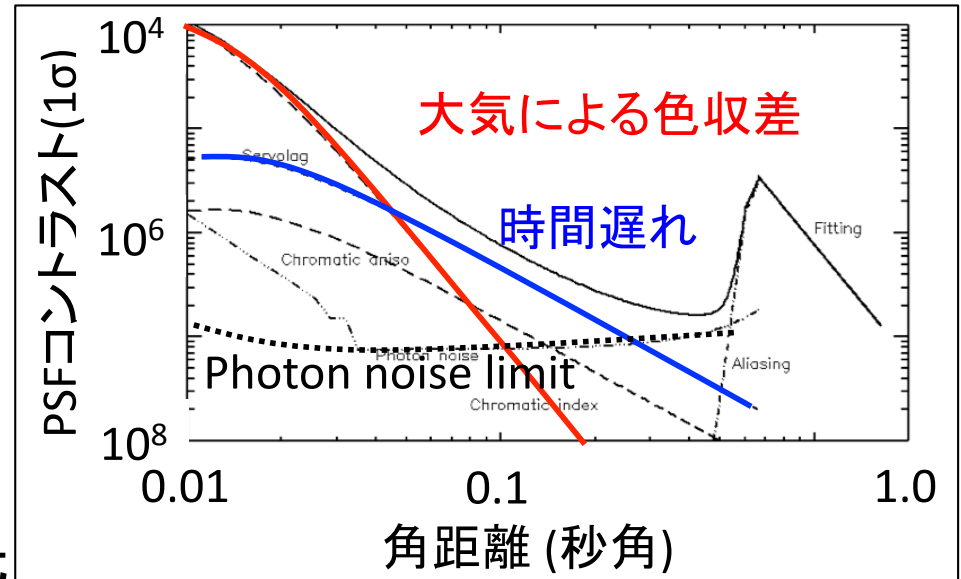
- 主要観測バンドJでの
要求コントラスト(5σ)
 8×10^{-8} 乗 @ $1\lambda/D$ (8mas)
 2×10^{-8} 乗 @ $2\lambda/D$ (16mas)
→ 回折限界での高いコントラスト



地球型惑星発見のために必要な角距離・コントラスト
Kawahara et al. (2012); Crossfield (2013)

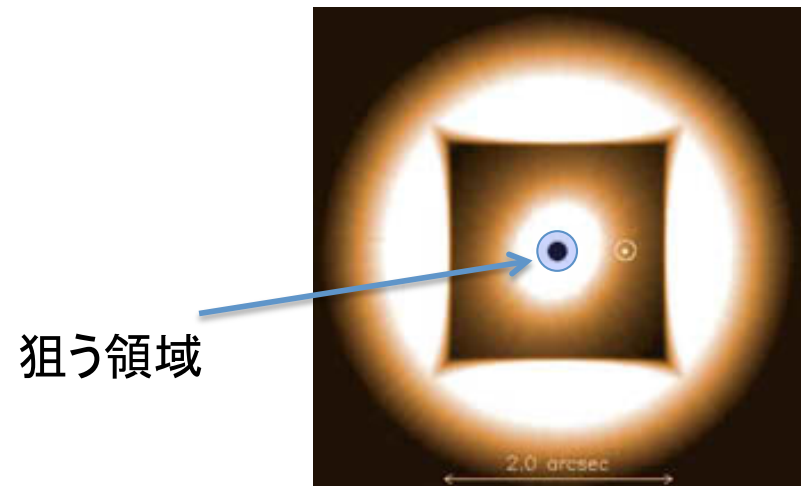
第3世代：？

- 主星からの散乱光の要因は、
 - 制御の時間遅れ
 - 色収差
- (補償光学系のセンサ波長は可視光
観測波長は近赤外線)



大気補償光学＋コロナグラフ後のコントラスト
(e.g., Verinaud+ 2008; Kasper+ SPIE 2012)

- 内側の惑星探査に特化した
新技術が必要！
- 鍵は、
 - 「計測・補償の**高速化**」、
 - 「**イメージング波長**での計測・補償」



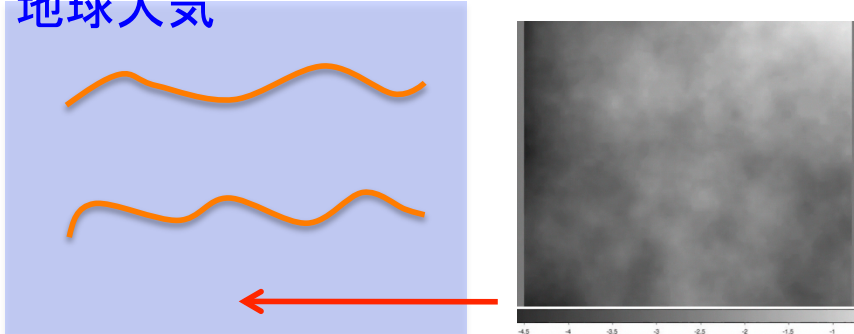
GPIのシミュレーション図
<http://planetimager.org>

高コントラスト観測装置



高コントラスト光学系

地球大気



主鏡

望遠鏡開口面での位相

- 光学収差の大きさによってコントラストが制限。

→ 大気・観測装置で発生する光学収差を高速・高精度に計測・補償。

- 高コントラスト光学系：

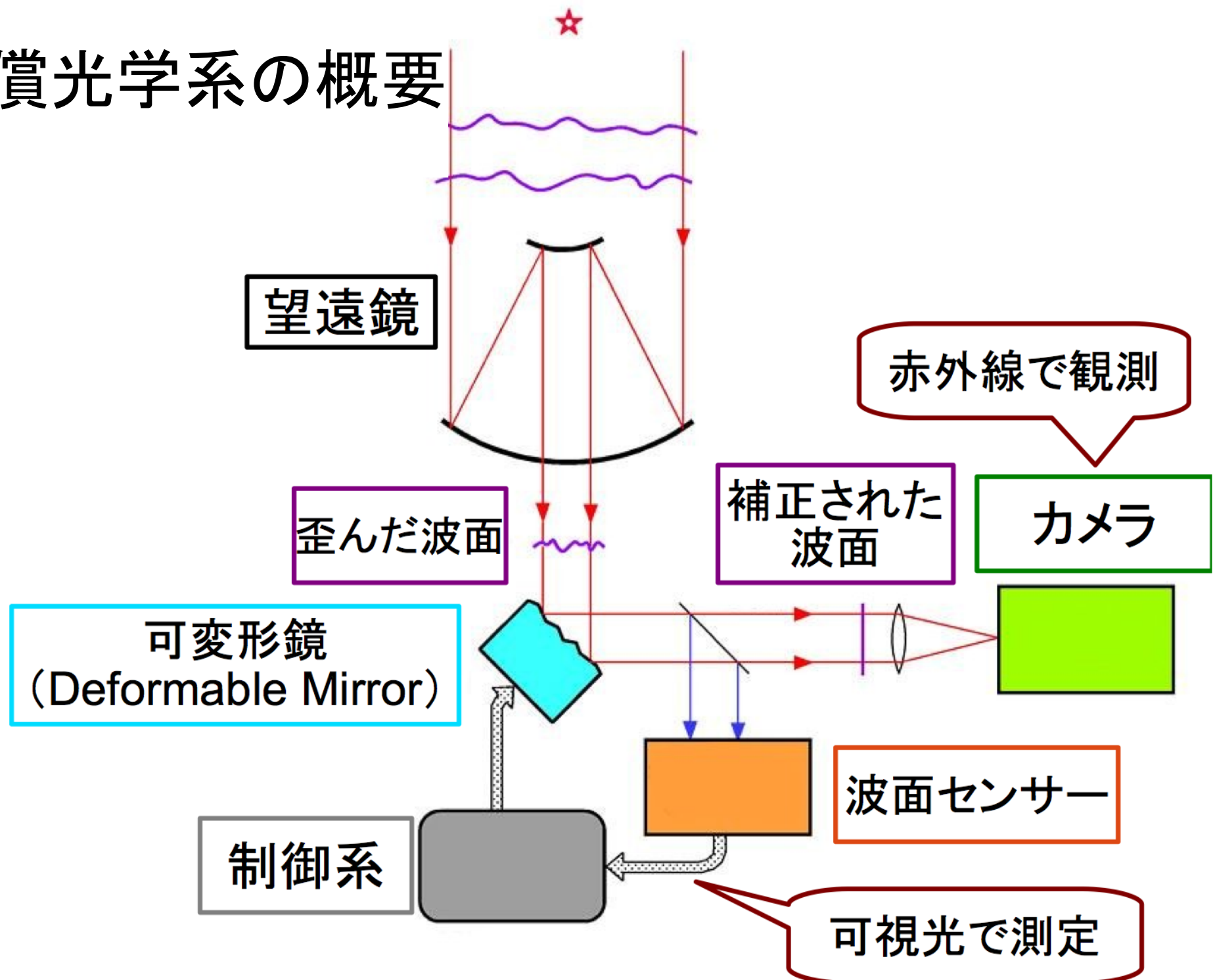
補償光学系：

- 可視光(0.6-0.9 μm)での波面計測
- 高次波面収差の超高速波面補償

サイエンス光学系：

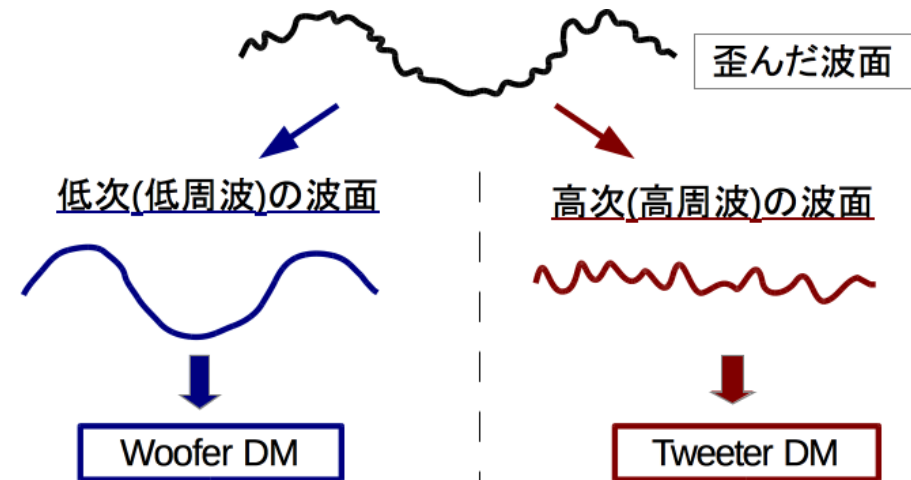
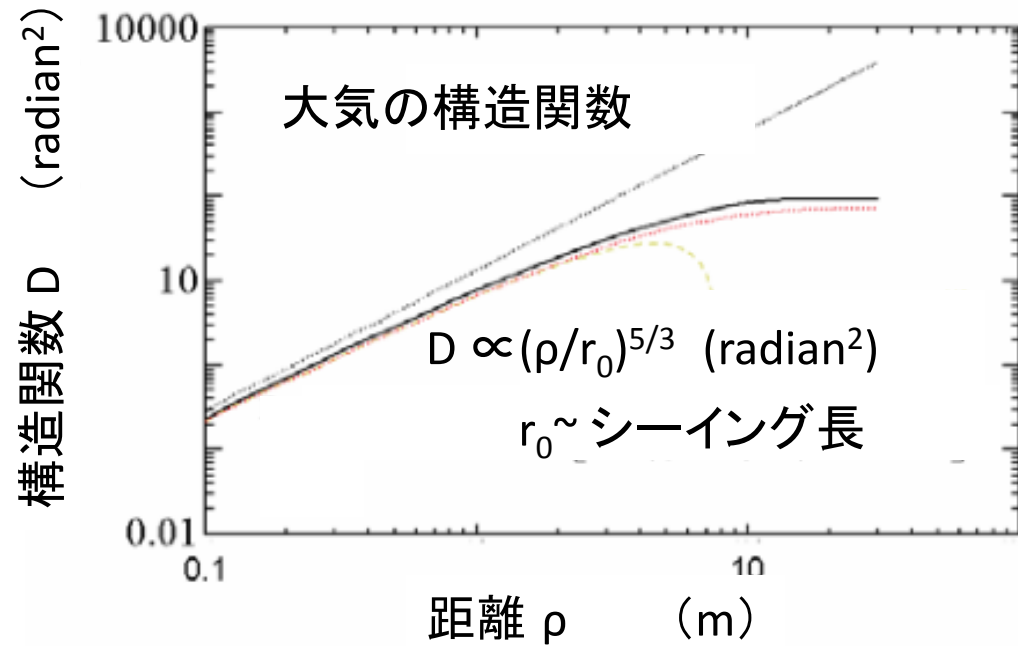
- Imaging波長 (Jバンド)での波面計測
- 色収差による低次高速波面補償

補償光学系の概要



補償方式

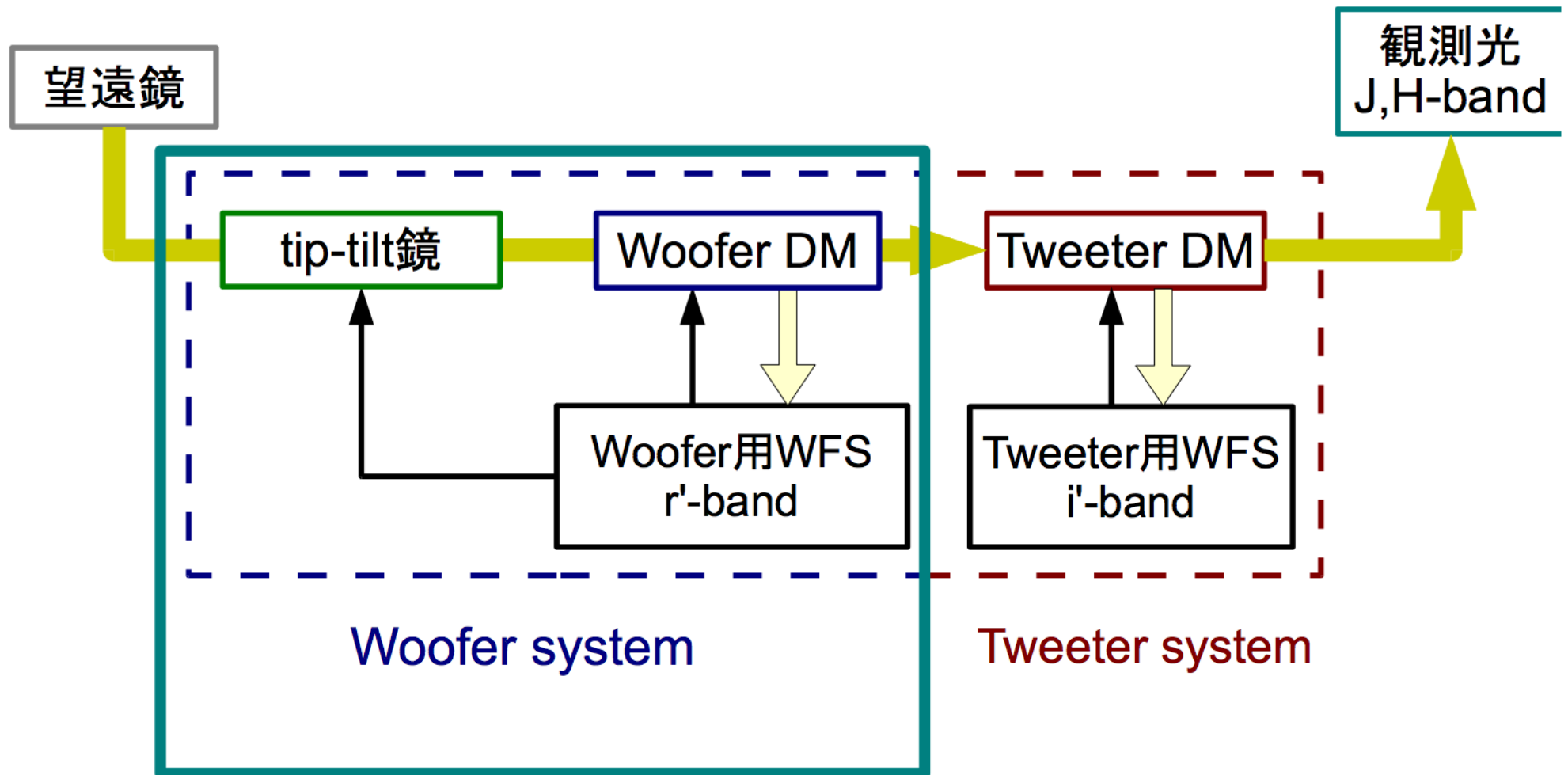
- 大気による光波の歪み
→ 低次(空間スケール:大)
ほど大きい
- 2つの可変形鏡(DM)を用
いて光波の歪みを補償
 - Woofer: 低次を補償
 - Tweeter: 高次を補償



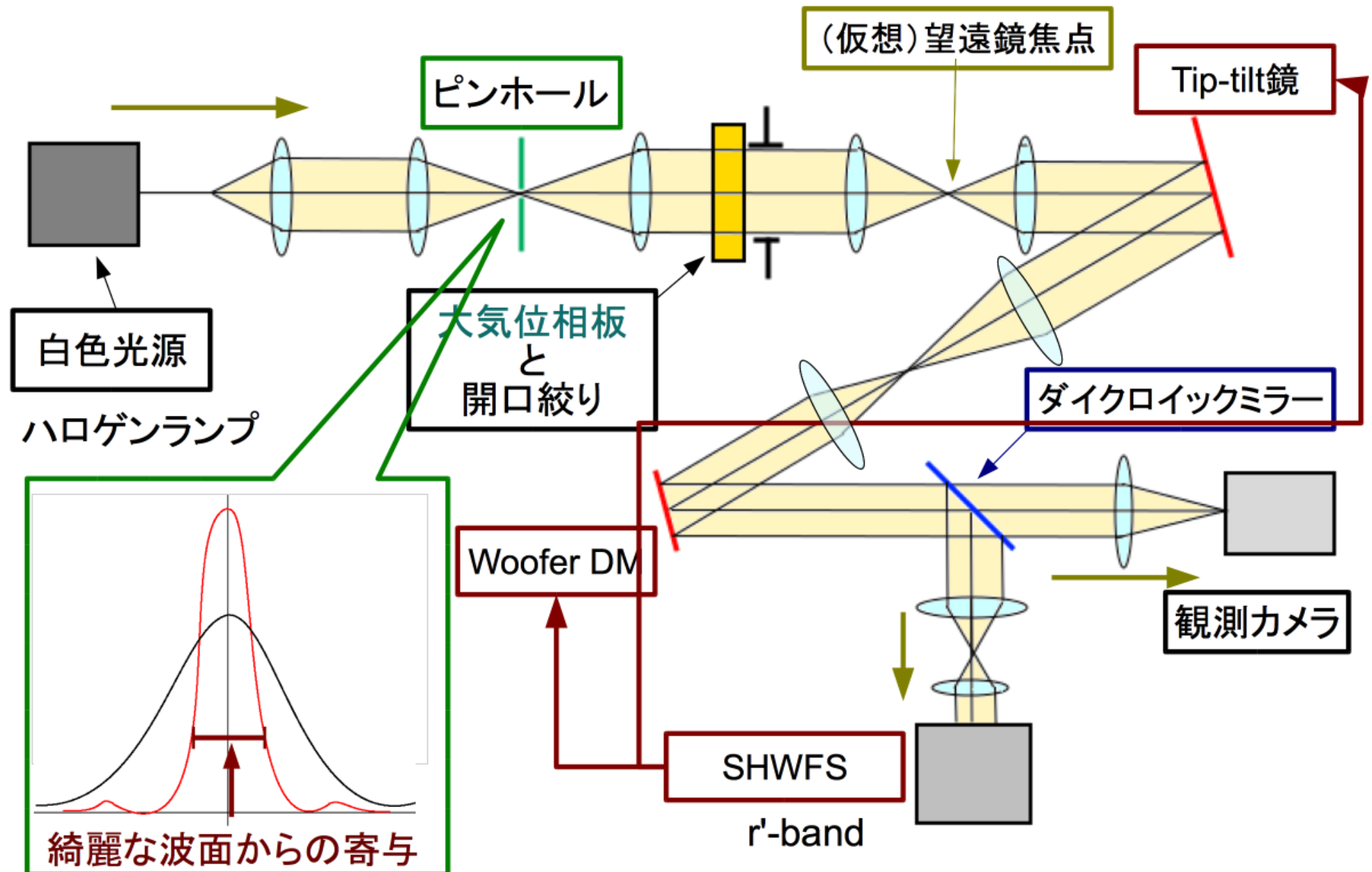
- 変形量: 大
- 可変形鏡の
素子数: 少

- 変形量: 小
- 可変形鏡の
素子数: 多

極限補償光学系



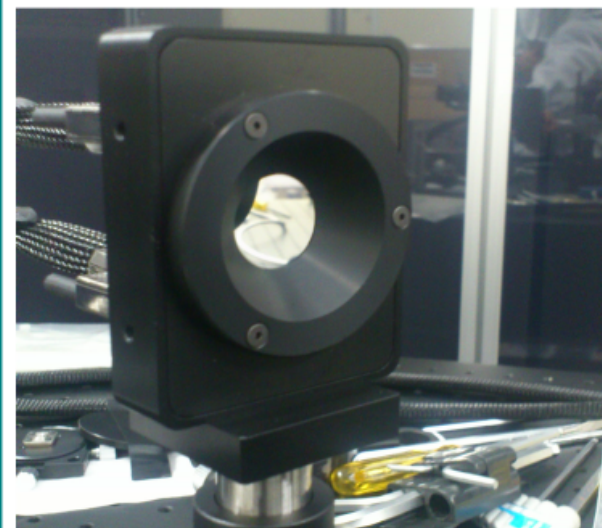
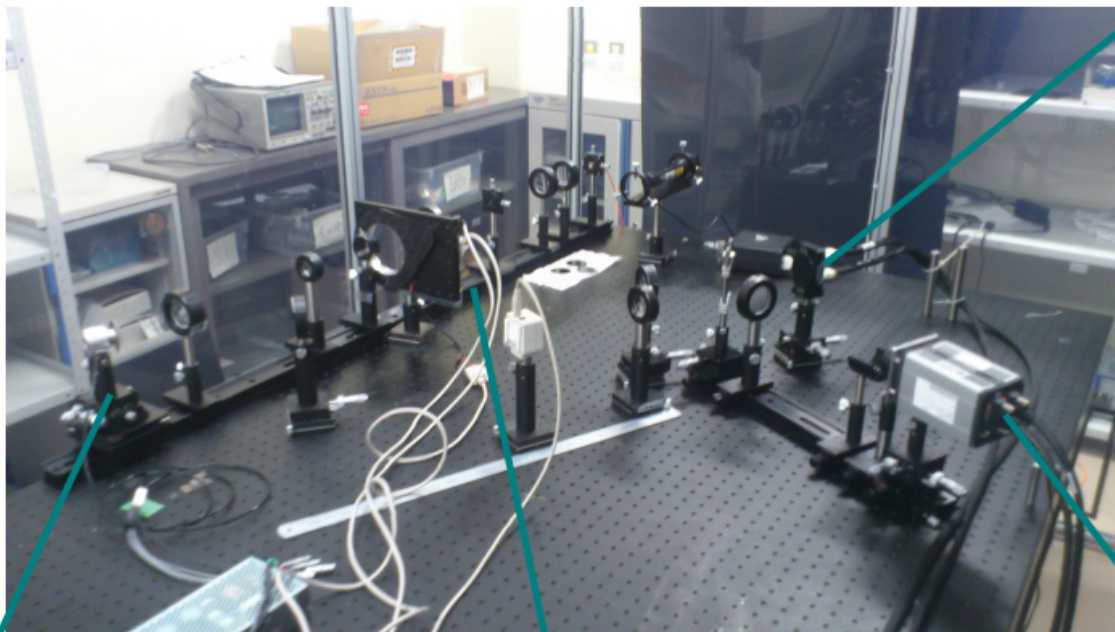
実験室での光学系



光学実験の様子



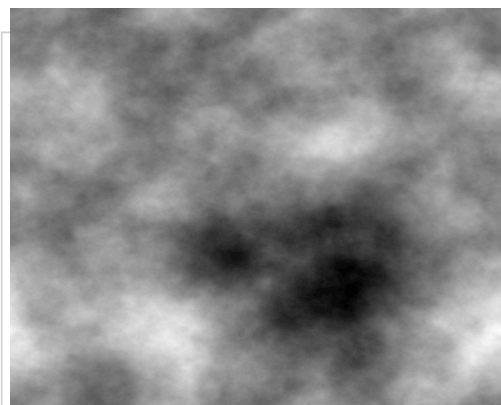
光学実験の様子



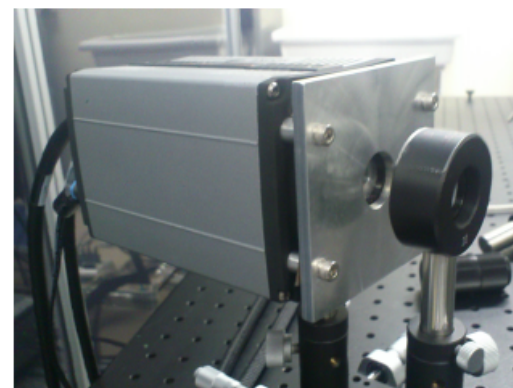
Woofer DM88



Tip-Tilt鏡



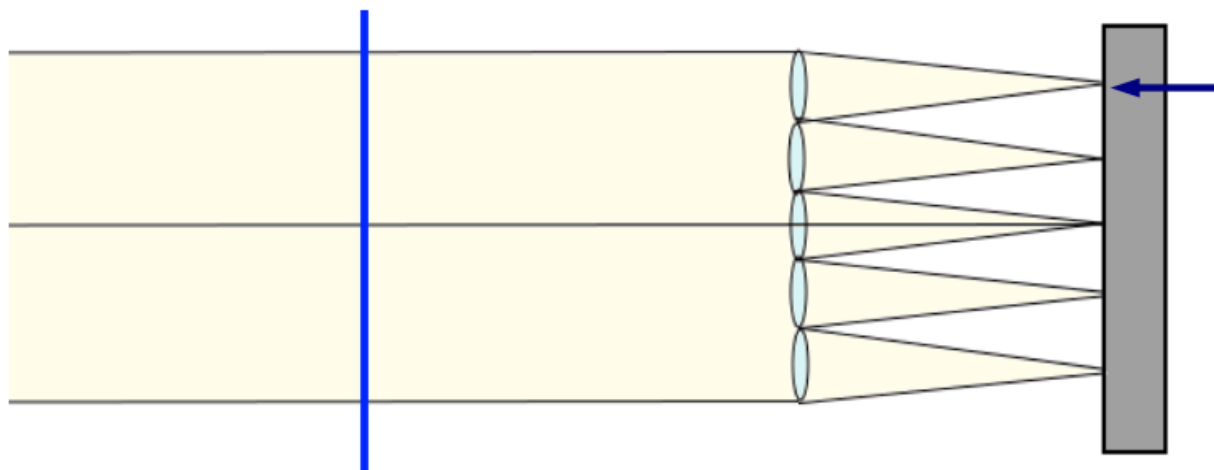
大気位相板



SHWFS

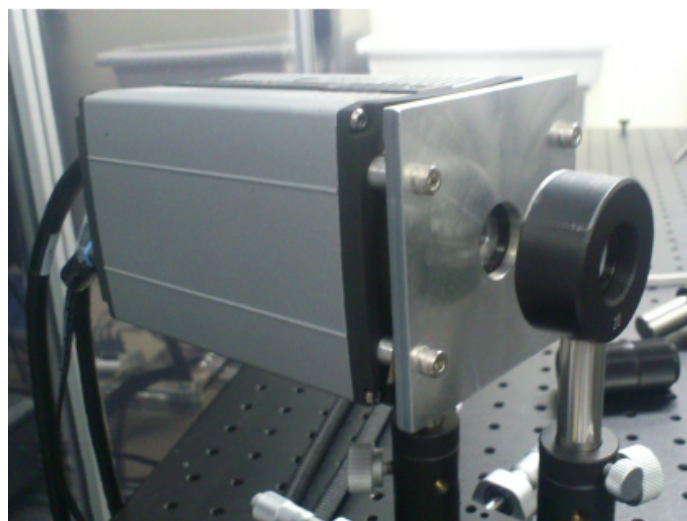
Shack-Hartmann 波面センサ

- Woofer用の波面センサ (Woofer DM, TipTilt鏡とループ)
- シンプルな光学系で、大きな波面誤差まで計測できる
- 波面の歪みを焦点の移動量として測定する



$$\frac{\partial W(x, y)}{\partial x} = \frac{\Delta x(x, y)}{f}$$
$$\frac{\partial W(x, y)}{\partial y} = \frac{\Delta y(x, y)}{f}$$

W: 波面形状
 $\Delta x, \Delta y$: 重心の移動量

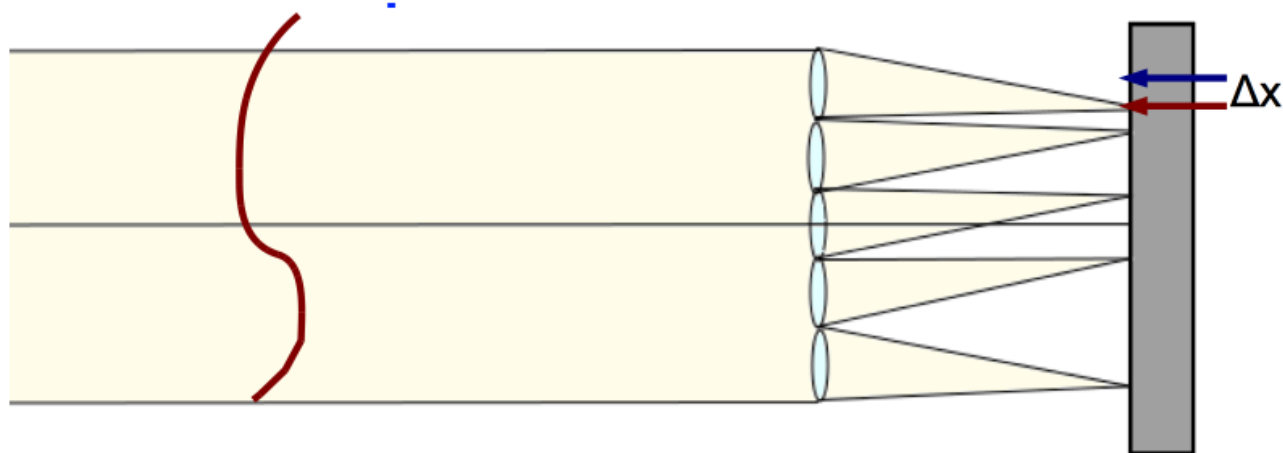


Andor社 sCmos camera Zylaに
マイクロレンズアレイを装着

観測波長	r'-band
限界等級	12等級
マイクロレンズアレイ	64枚, pitch=0.3mm, f=8.7mm

Shack-Hartmann 波面センサ

- Woofer用の波面センサ (Woofer DM, TipTilt鏡とループ)
- シンプルな光学系で、大きな波面誤差まで計測できる
- 波面の歪みを焦点の移動量として測定する

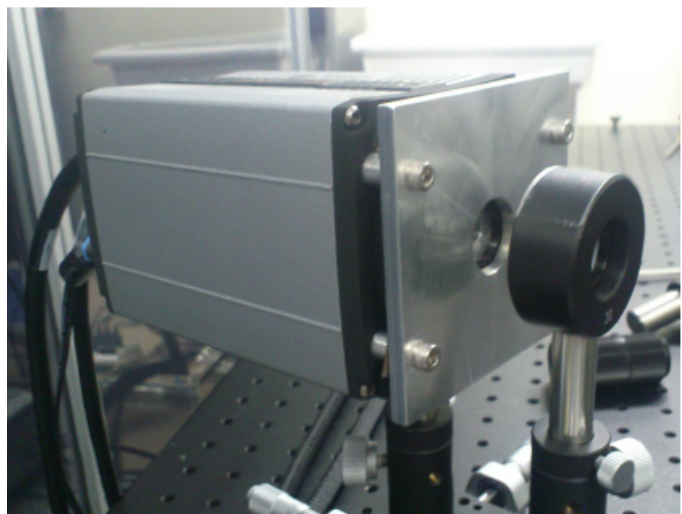


$$\frac{\partial W(x, y)}{\partial x} = \frac{\Delta x(x, y)}{f}$$

$$\frac{\partial W(x, y)}{\partial y} = \frac{\Delta y(x, y)}{f}$$

W: 波面形状

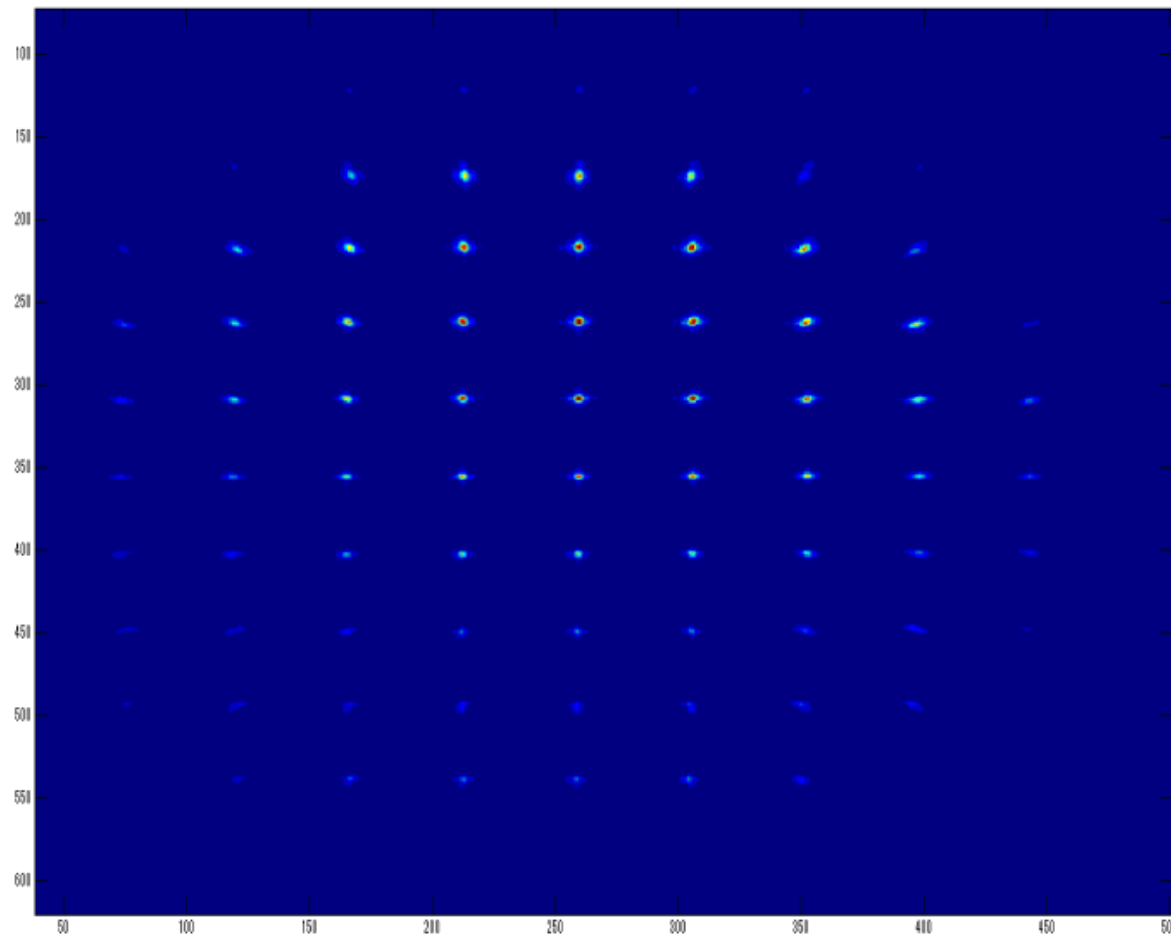
$\Delta x, \Delta y$: 重心の移動量



Andor社 sCmos camera Zylaに
マイクロレンズアレイを装着

観測波長	r'-band
限界等級	12等級
マイクロレンズアレイ	64枚, pitch=0.3mm, f=8.7mm

AO loopの構築



SHWFSの画像

SHWFS

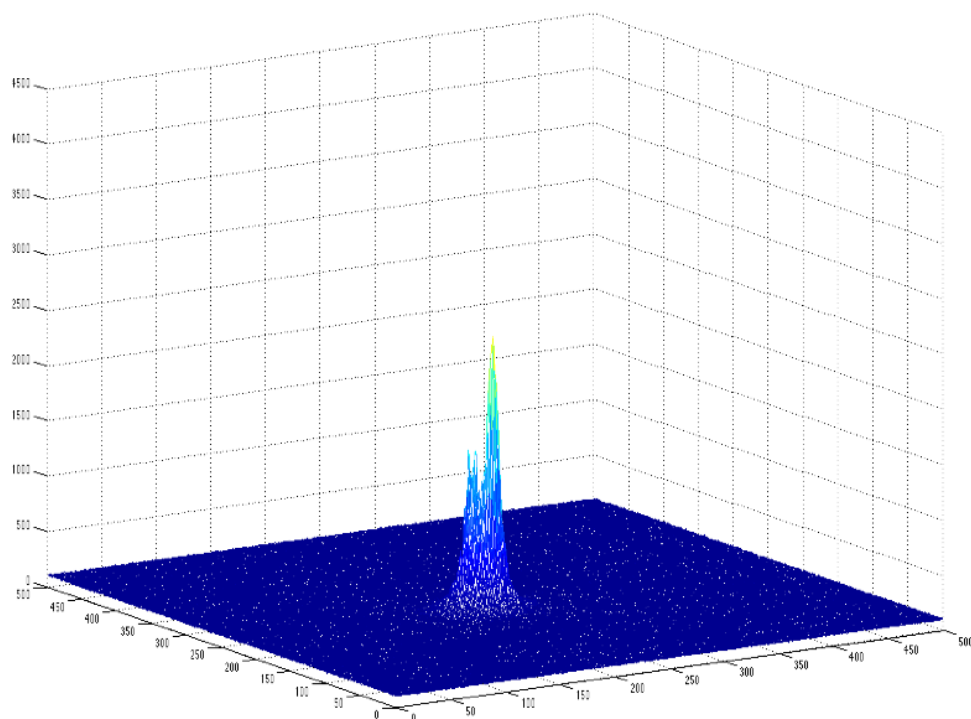
Matlab

重心移動量の計算
波面形状の計算

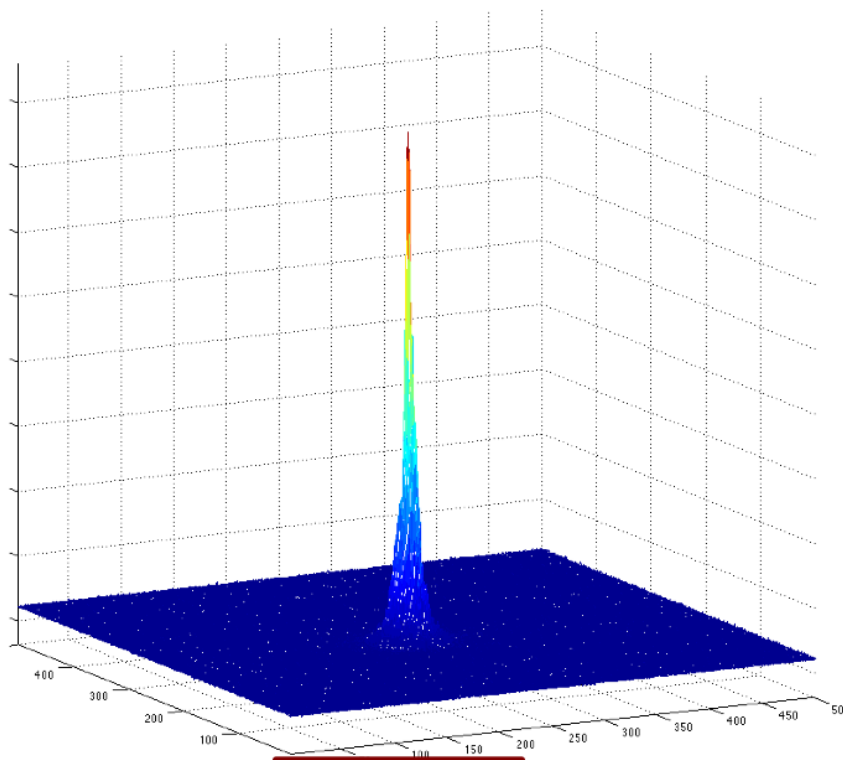
DM

結果

- リアルタイム補償によって風速3m/sの環境下においてシュトレール比0.31。



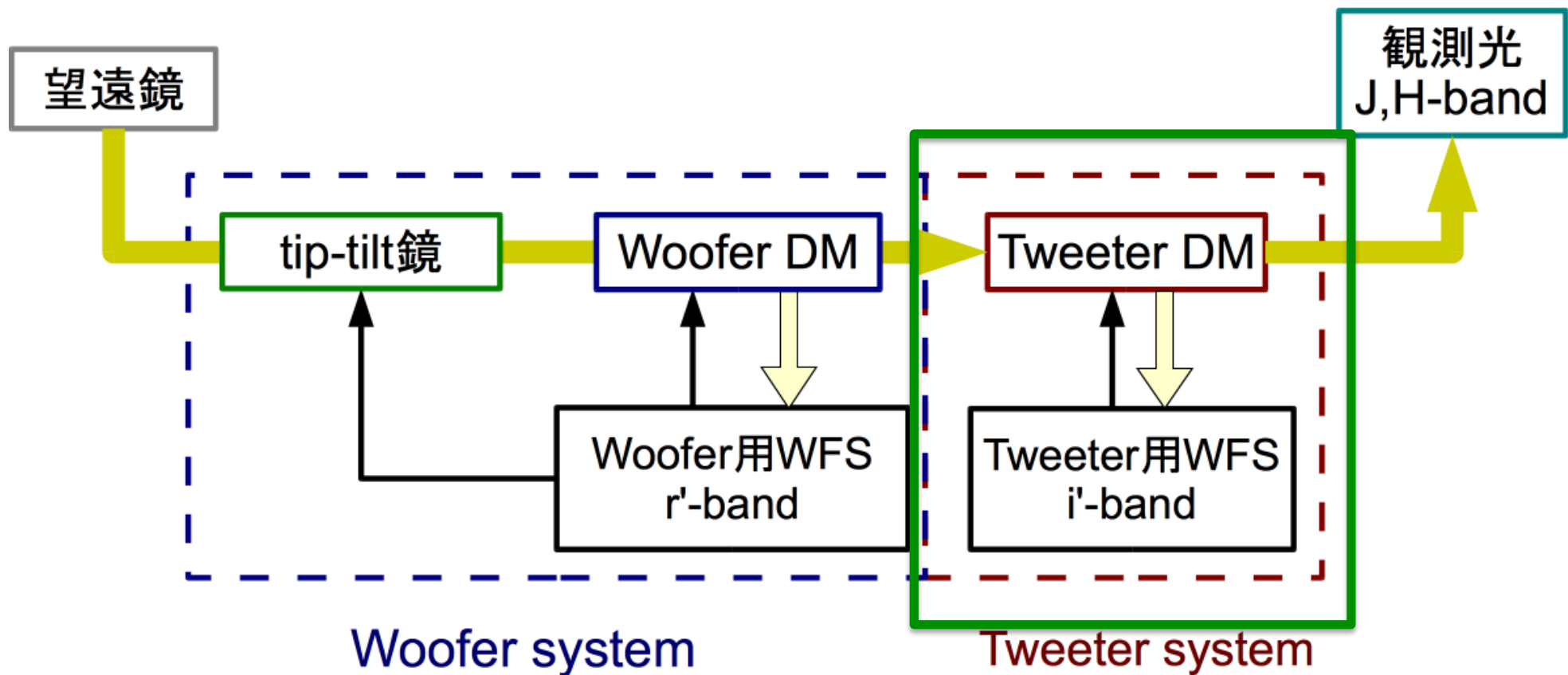
補正無し



補正有り

極限補償光学装置の構成

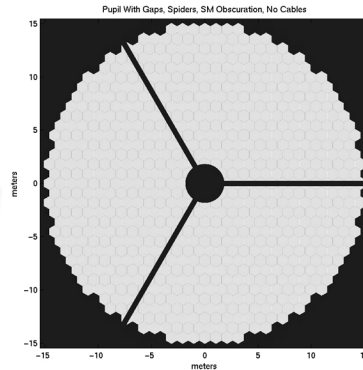
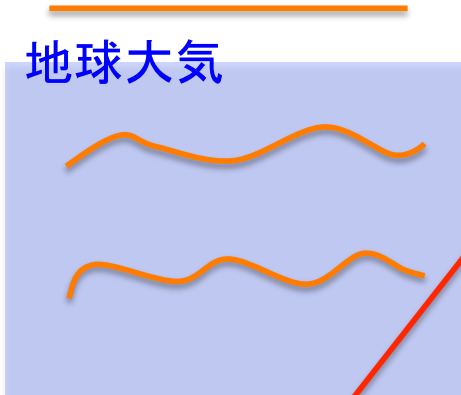
- 3つの鏡と2つのループで補正し、SR=0.9を目指す



極限補償光学系で十分か？



地球大気



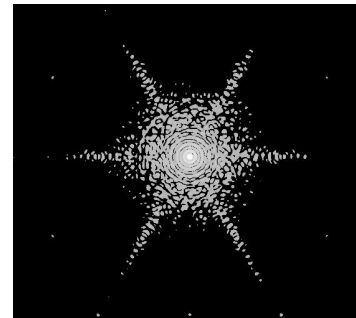
TMT主鏡

主鏡

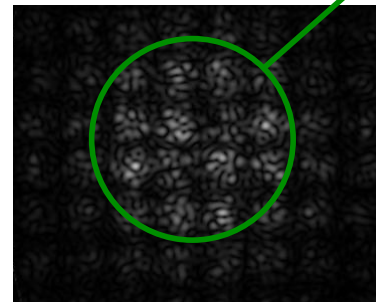
補償光学系

コロナグラフ

カメラ鏡

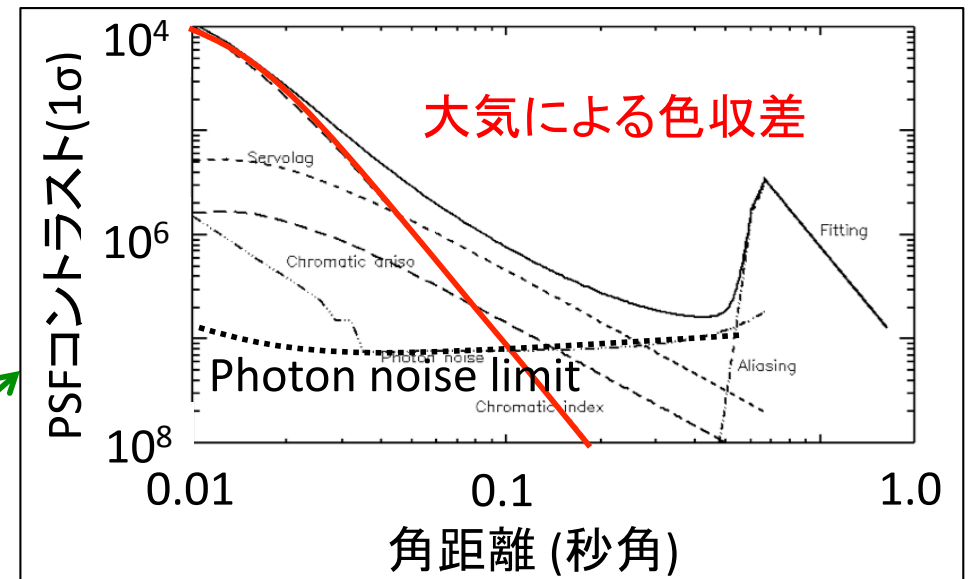


TMT回折像



コロナグラフ像

計測波長は可視光(800nm)
観測波長は近赤外線(1260nm)

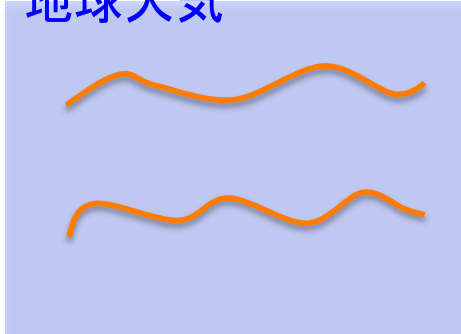


大気補償光学+コロナグラフ後のコントラスト
(e.g., Verinaud+ 2008; Kasper+ SPIE 2012)

サイエンス光学系



地球大気



主鏡

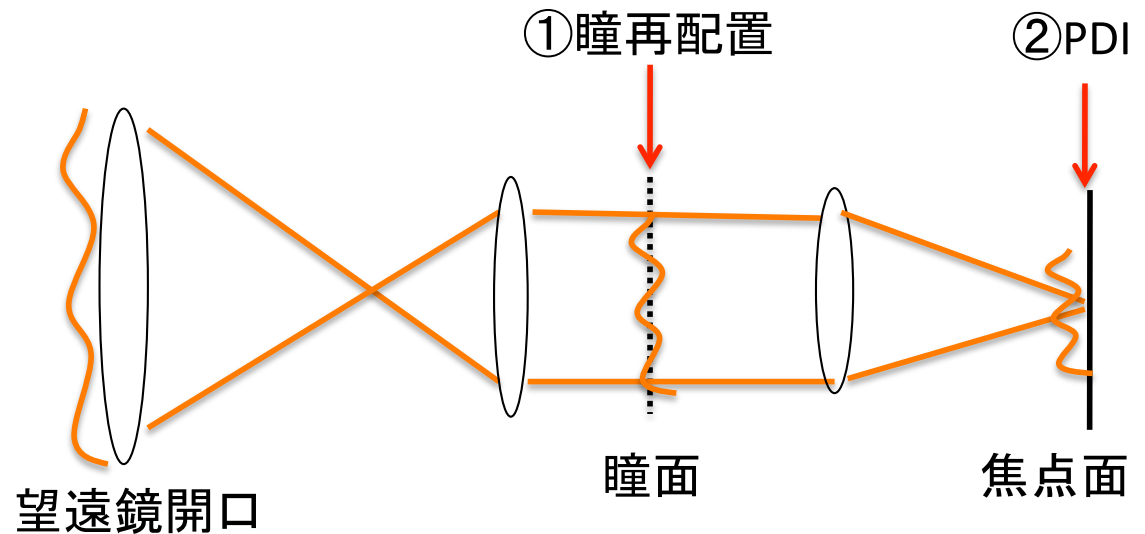
補償光学系

サイエンス
光学系

役割:

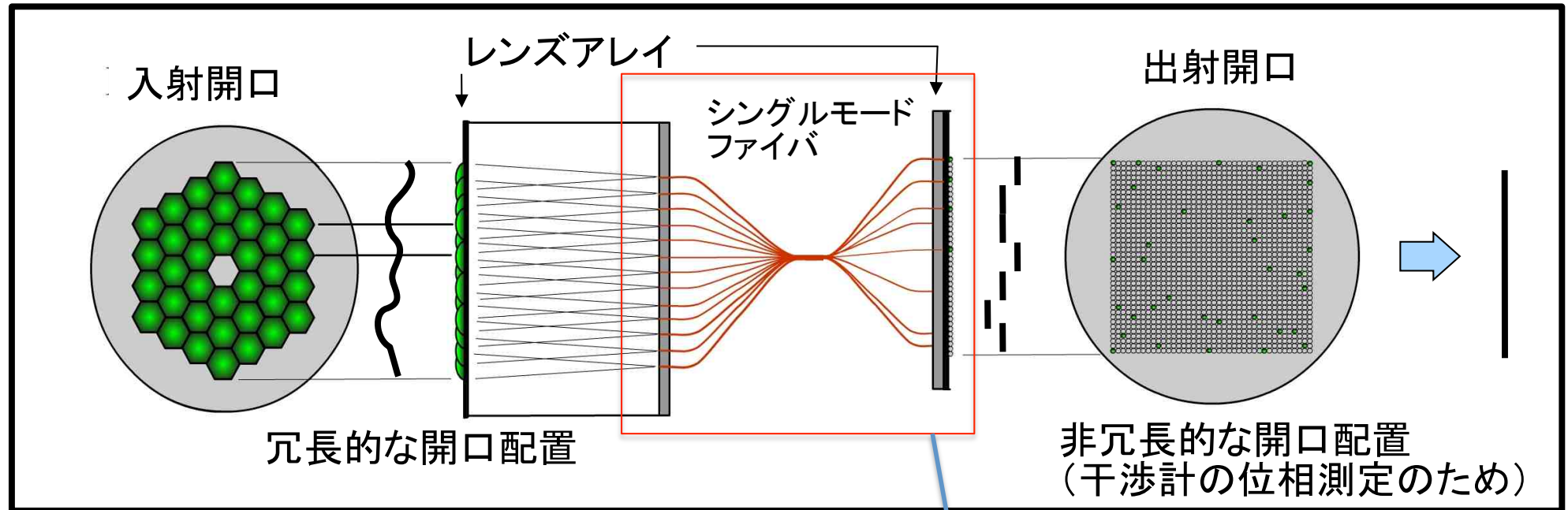
光波を計測しつつ、サイエンス像として取得する

候補	計測位置	波面センサ
①	瞳面	瞳再配置 (PRI)
②	焦点面	点源回折干渉 (PDI)



瞳再配置

小谷 (国立天文台)
(Perrin et al. 2006)



- 波面を複数の小開口に分割し、各開口をシングルモードファイバにより波面をクリーンにする(空間フィルタ)。波面の乱れは位相差に変換される。

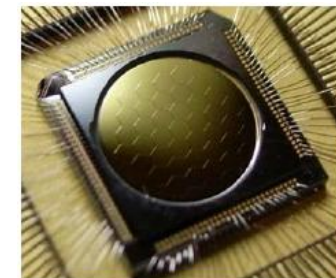
•役割:

- 高精度で波面の乱れを測定
- 光源から来る元の波面に再生

- コントラスト = フォトンノイズリミット(i.e. 完全なAO)

- 非常に小さなIWA($< \lambda / D$) and 高コントラスト撮像

これを分割式可変形鏡に置き換える

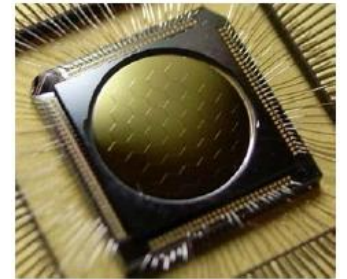


Alpao社 DM

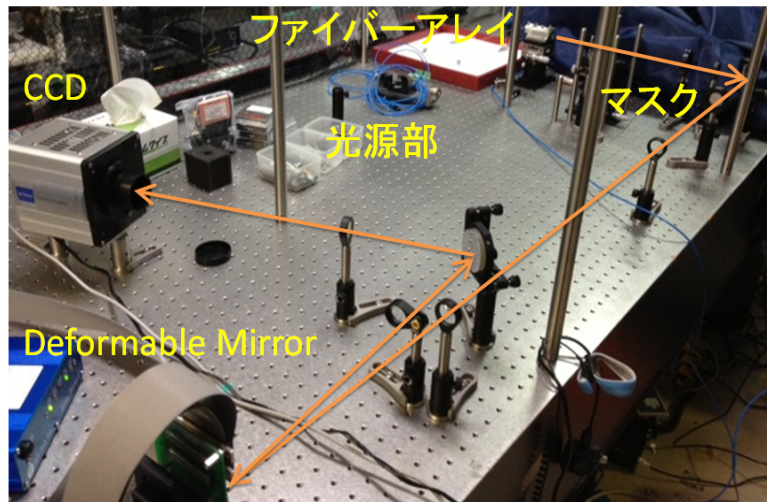
瞳再配置光学系の実験

小谷(国立天文台)

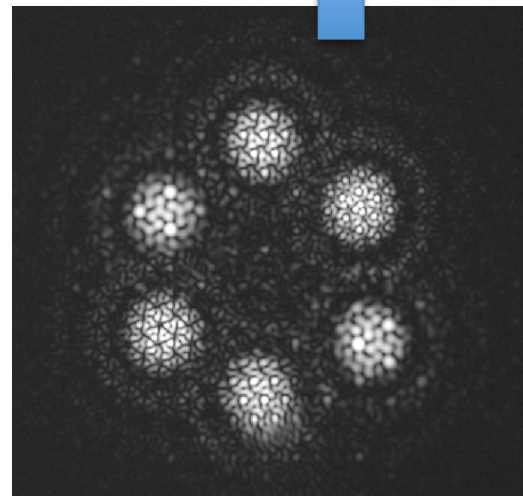
- ファイバー部分をセグメント型可変形鏡に置き換え
→ 装置の高安定化
- 現状のコントラスト 1/50
(高精度化によって1/1000を目指す)



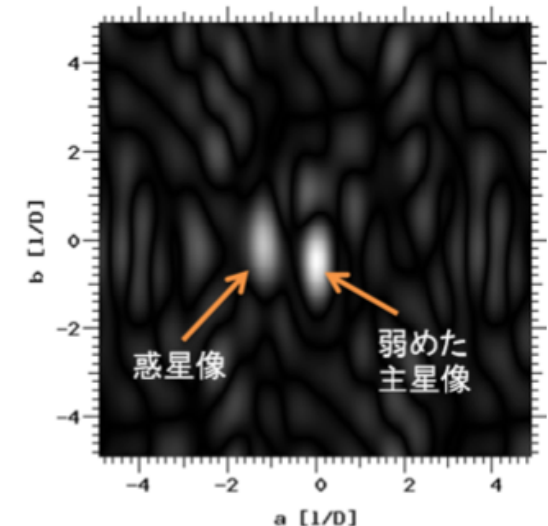
像の再生



光学実験の様子@国立天文台



取得された干渉縞



再生された像

シミュレーションの設定

ターゲット

5pcのM型星を想定。

大気 (Yorick-YAO)

6層モデル (Tokovinin 2005):

- C_n^2 fraction: {0.2, 0.1, 0.1, 0.2, 0.3, 0.1}
- Wind speed (m/s): {10, 12, 12, 10}
- Layer alt. (km): {0.5, 1, 2, 4, 8, 16}

可視光補償光学

Woofer:

- Sensor: SHWFS with 64x64 lenslet
- DM48x48 @ 600Hz
- $\lambda \sim 600 - 700 \text{ nm}$

Tweeter:

- Sensor: 4位相同時波面センサ
- DM144x144 @ 1.5kHz
- $\lambda \sim 700 - 900 \text{ nm}$

色収差加算

高コントラスト光学系

Sensor: 3Dカメラ

(焦点面波面センサ)

観測バンド: Jバンド

(0.01 μm ごとに計算)

可変形鏡: DM 32x32

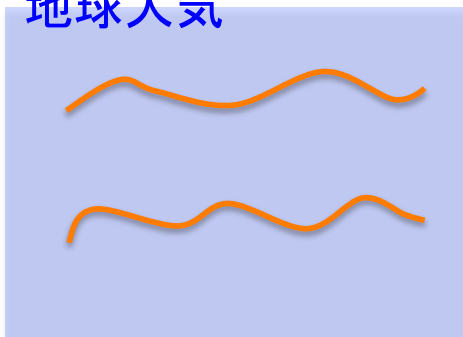
パラメータ:

A. 波長分解能: 20 と 100

B. 時間遅れ: 5msec – 0.25msec



地球大気



主鏡

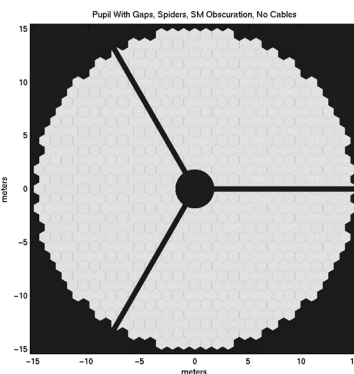
補償光学系

高コントラスト
光学系

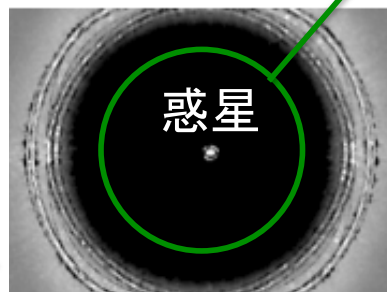
カメラレンズ

焦点面

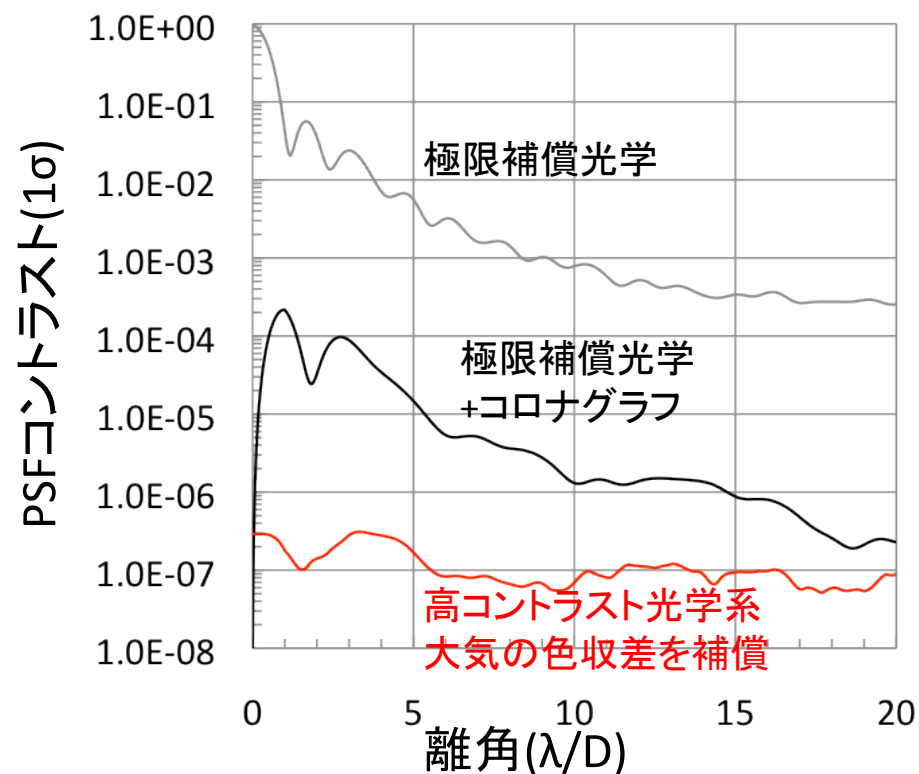
シミュレーション



TMT主鏡



生のコントラストで 10^{-6} から 10^{-7} 乗の
コントラストを達成可能。長時間観測に
よるポストプロセス込みで 10^{-8} 乗の到達。



焦点面でのコントラスト

SEIT計画の概要

Second-Earth Imager for TMT(SEIT)

- 23名のメンバで構成され、特に若手が中心となって進めている。

SEIT Working Group

研究代表者: 松尾太郎(京都大学)
共同研究者: 田村元秀(東京大学/NAOJ)

サイエンス検討班

総括: 河原創(東京大学)

成田憲保(NAOJ)
高見道弘(ASIAA)
藤井友香(東工大/ELSI)
生駒大洋(東京大学)
玄田英典(東工大/ELSI)
武藤恭之(工学院大学)
濱野景子(東京大学)

観測装置検討班

総括: 小谷隆行(NAOJ)

夏目典明(京都大学)	村上尚史(北海道大学)
木野勝(京都大学)	木田学武(北海道大学)
石川久美(理研)	西田秀哉(大阪電通大)
栗田光樹夫(京都大学)	岩室史秀(京都大学)
入部正継(大阪電通大)	馬場直志(北海道大学)
大屋真(すばる望遠鏡)	西川淳(NAOJ)
長田哲也(京都大学)	

国際協力

Planet Formation Imager
(Bruce Macintosh (LLNL))

LICK FIRST project
(Franck Marchis (SETI))

SCEXAO project
(Olivier Guyon (Arizona))

ファーストライトの時期

- ヨーロッパの次世代大型望遠鏡の地球型惑星探査
 - 晩期型星の地球型惑星の直接観測。
 - 2030年のファーストライトを目標。
- スペースからの探査
 - ヨーロッパL2/L3(2034)から2-3m望遠鏡の打ち上げの提案 → G型星のHZ惑星の探査

→ SEITは遅くても**2025年のファーストライト**が目標

スケジュール

実験室 → 京大4m望遠鏡でのOn-sky実験 → TMT/SEIT

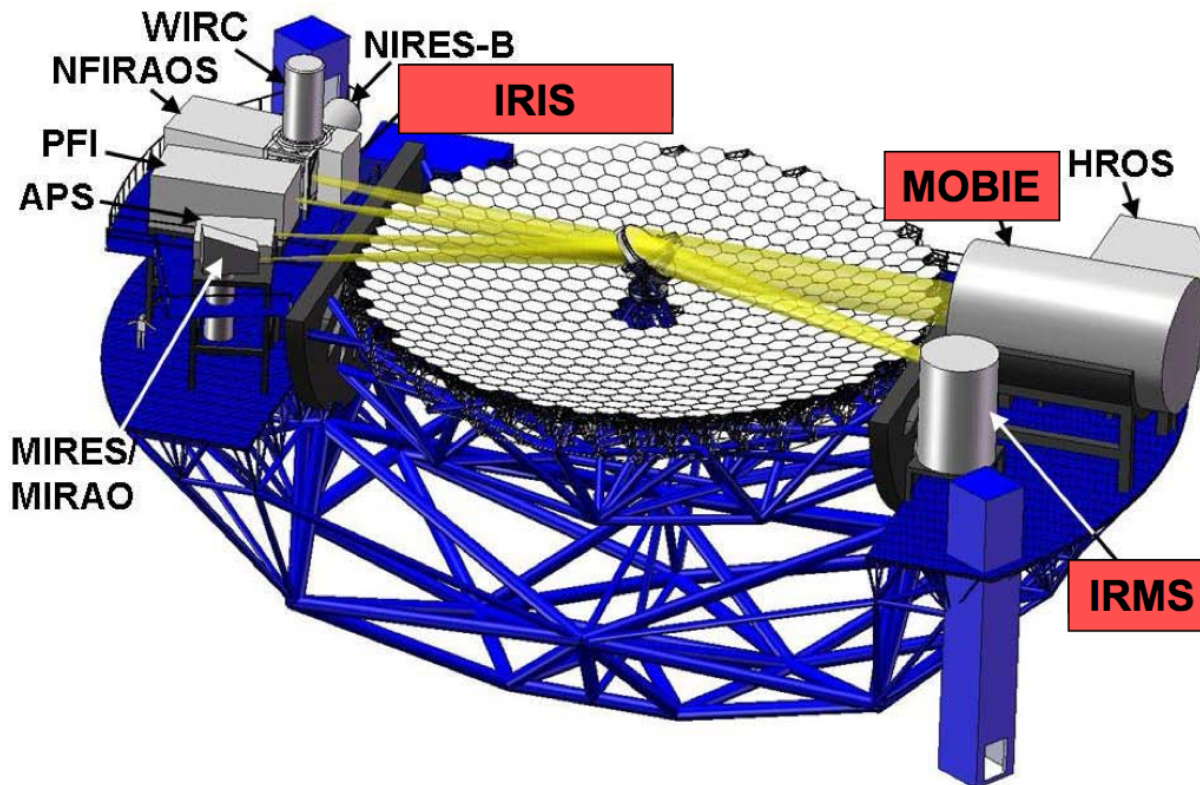
目標: 2025年のファーストライト

- 2010 プロジェクト開始
- 2011-12 Conceptual Design Phase
- 2013-15 実験室実験、
- 2014 TMT SACへ提案書提出
- 2016-18 京大4m望遠鏡でのOn-sky実験
- 2017-19 詳細デザイン
- 2019-22 日本での組み立て・調整
- 2023-24 ハワイでの組み立て・調整
- 2025 ファーストライト

実現までの戦略

- SEIT発足以前(2007年)に観測装置のSelectionが行なわれ、3装置がファーストライトを2022年に迎える。
- 第2期装置(2024~)の選定は、2015年に再度行なわれる

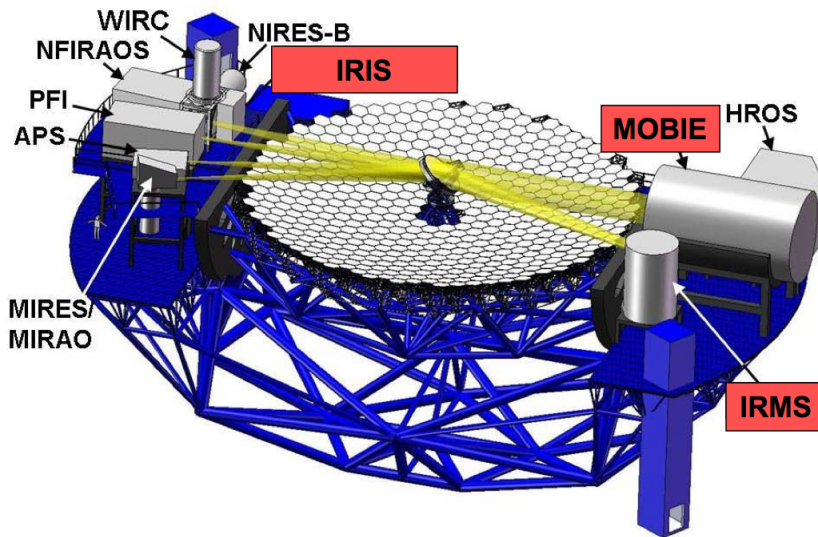
赤は第1期観測装置、それ以外は選定から外れる



IRIS: 高視野補償光学
近赤外線撮像 & 分光
PFI: 高コントラスト光学系
(GPIの後継機)

実現までの戦略

- SEIT発足以前に観測装置のSelectionが行なわれ、3装置がファーストライトを2022年に迎える。
- 第2期装置(2024~)の選定は、2015年に再度行なわれる



IRIS: 高視野補償光学
近赤外線撮像 & 分光
PFI: 高コントラスト光学系
(GPIの後継機)

戦略1:

- 第2期装置としてPFIと国際共同提案 (PFI側OK)

戦略2:

- IRIS AOをWoofers AOとして用いて
Tweeters AO以降を自ら製作

実現までの予算

- 第2期装置の場合：

全額：5.5億円

- 極限補償光学系：3.8億
- 高コントラスト光学系：1.7億

➔ 大型科研費で可能な範囲。

注：PFIの予算スタディを基に、地球型惑星探査に必要な機能だけを抜粋。

SEIT予算

- 獲得予算

	平成25年度	平成26年度	平成27年度
基盤A	1720	720	680
TMT戦略経費	670	500	500
基盤B	450	750	150
共同開発経費	350	?	?
新学術	300	-	-
挑戦的萌芽	240	50	-
若手分野間連携	120	-	-

- 申請中と申請予定

	平成25年度	平成26年度	平成27年度
新分野創成センター	200 (申請中)	?	?
光研究	250 (申請予定)	?	?

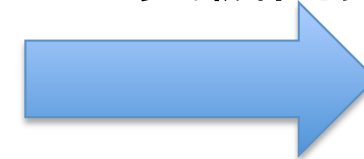
予算

- On-skyまで(平成27年度まで)の予算としてはある程度の見通しが立った。
- TMTに向けた開発は、平成28年度以降は大型の科研費(特推 etc.)の獲得を目指す。

- 獲得予算

	平成25年度	平成26年度	平成27年度
基盤A	1720	720	680
基盤B	450	750	150
共同開発経費	350	?	?
新学術	300	-	-
挑戦的萌芽	240	50	-
若手分野間連携	120	-	-

大型科研費による
SEITの実機開発



- 申請中と申請予定

	平成25年度	平成26年度	平成27年度
TMT基礎戦略	940 (申請中)	?	?
新分野創成センター	200 (申請中)	?	?
光研究	250 (申請予定)	?	?

まとめ

- 太陽系外惑星の研究は、地球型惑星の直接観測という目標に向う。
- 地球型系外惑星の直接観測の実現は、この10年間の技術開発が鍵。TMTがその最初の実機。