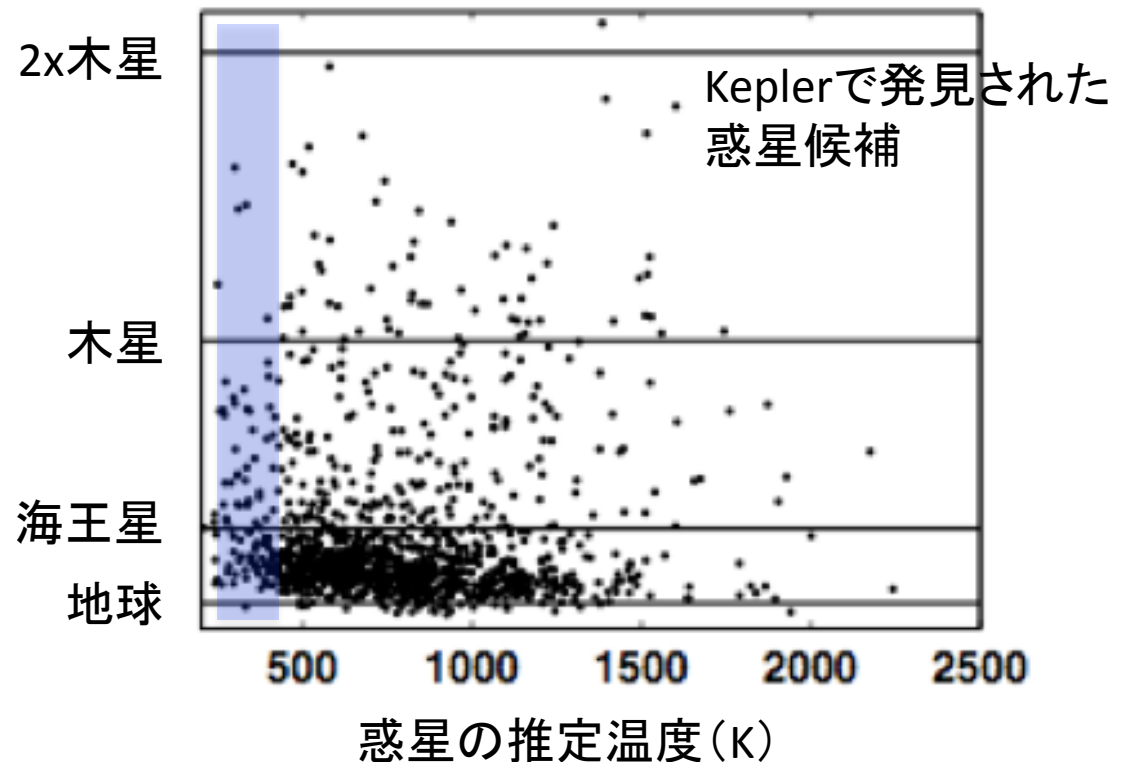
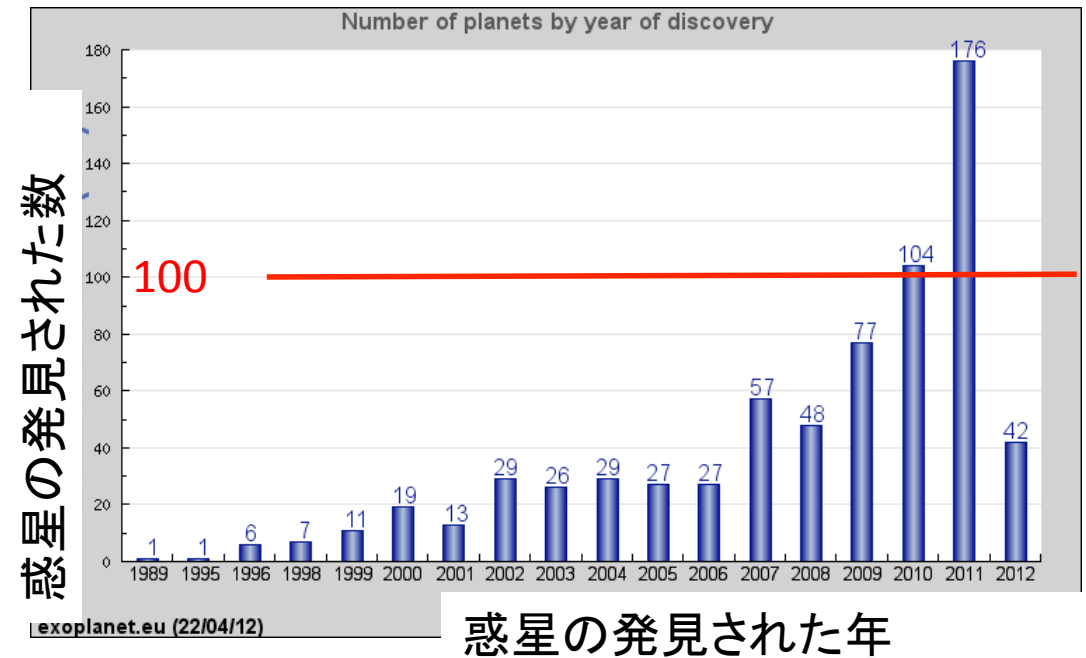


# 極限高コントラスト装置

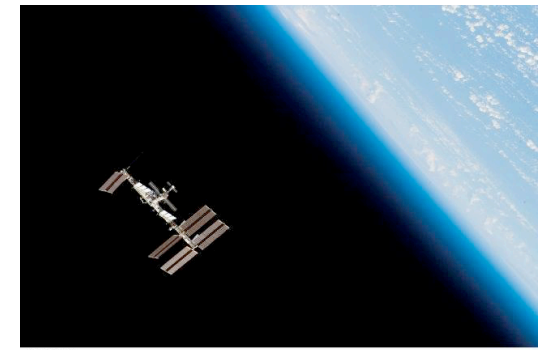
松尾太郎、夏目典明、栗田光樹夫、木野勝 他

# 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。

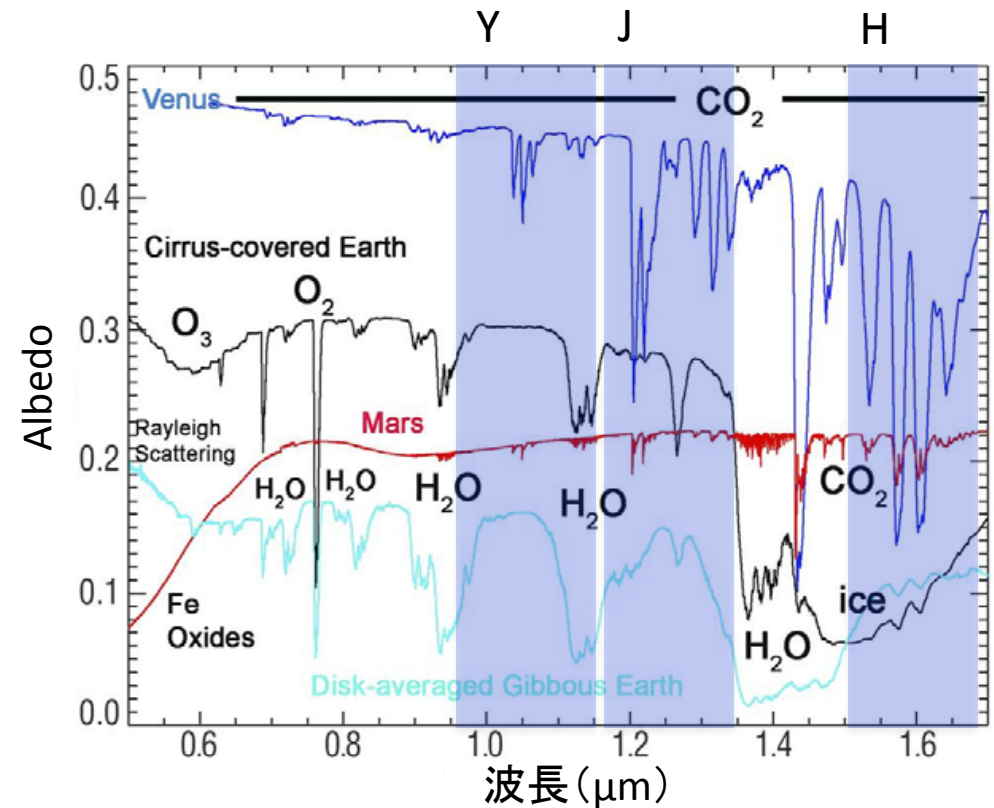


# 惑星を直接「見る」 ことで得られるもの



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 ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ )、  
生命の痕跡 ( $\text{O}_2$ )
- 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)

# 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

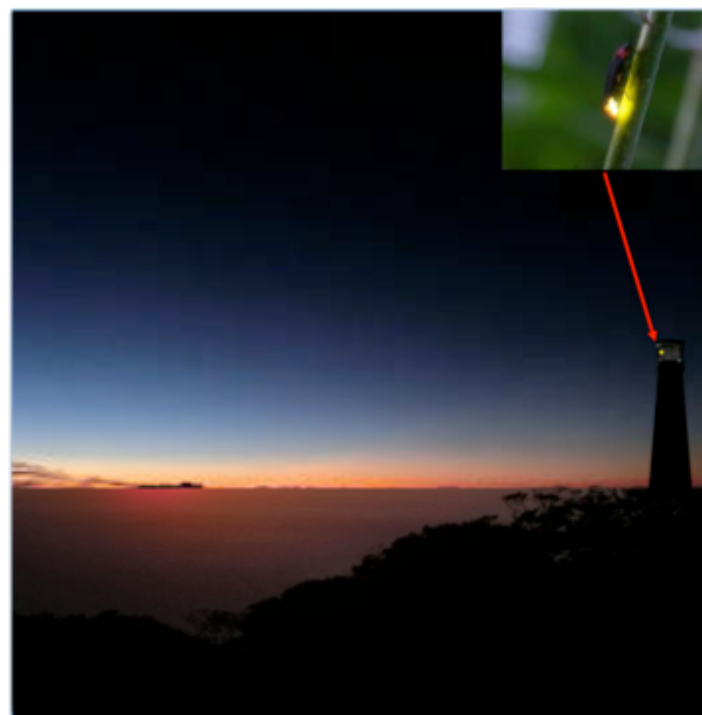
# 直接観測

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**



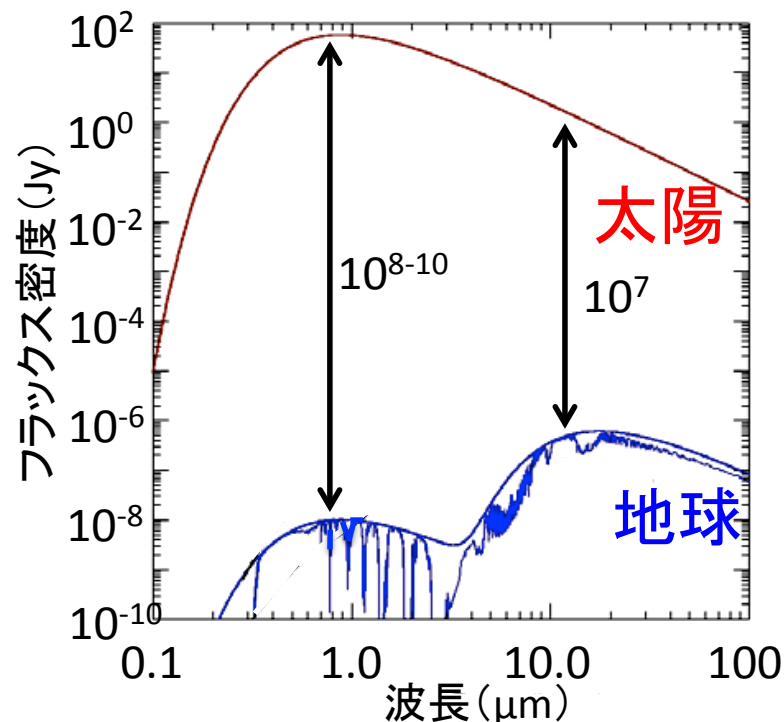
灯台のあかりがともっている時



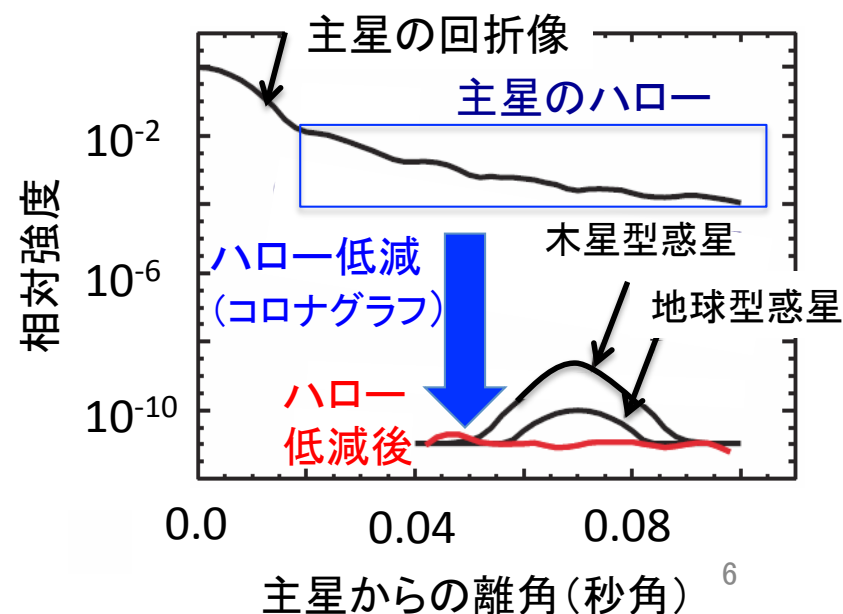
灯台のあかりが消えている時

# 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。
  - 可視光では10の8-10乗、赤外線では10の7乗の強度比(コントラスト)
  - 惑星光は主星のハローに埋もれている。
- 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。

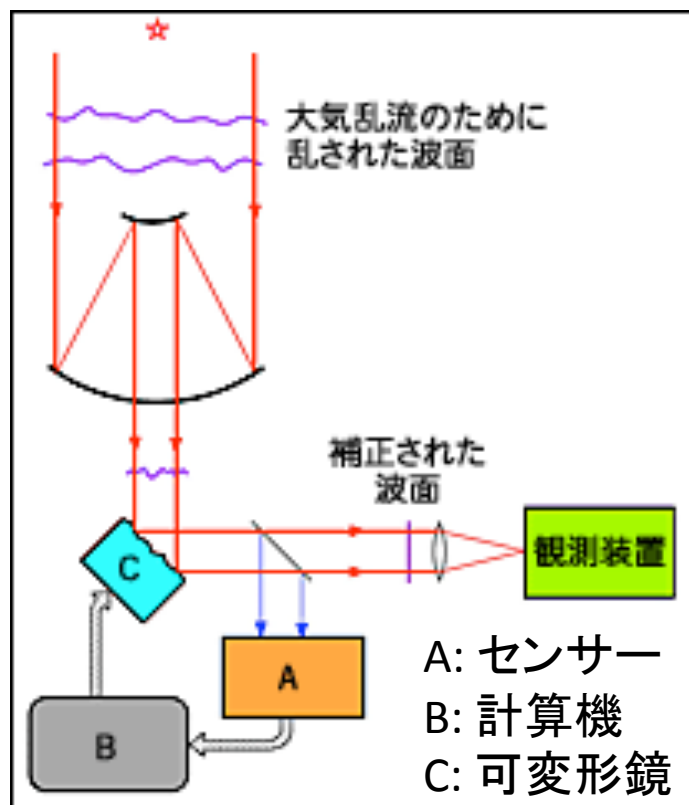


10pcから観測した太陽と地球のスペクトル

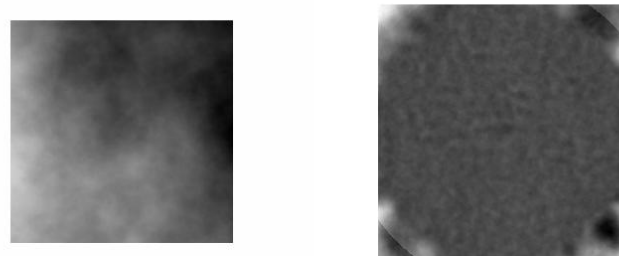


# 補償光学装置

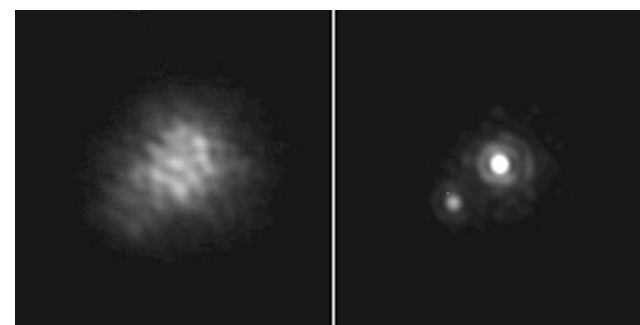
地上から観測すると、大気乱流によって天体からの光は乱される  
→ リアルタイムに波面を補償する。



波面補償光学装置の概念図  
(国立天文台)



波面補償前の位相(左)と  
波面補償後の位相(右)



AO36の波面補償前の像(左)と後の像(右)

# 次世代の高コントラスト用装置

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。

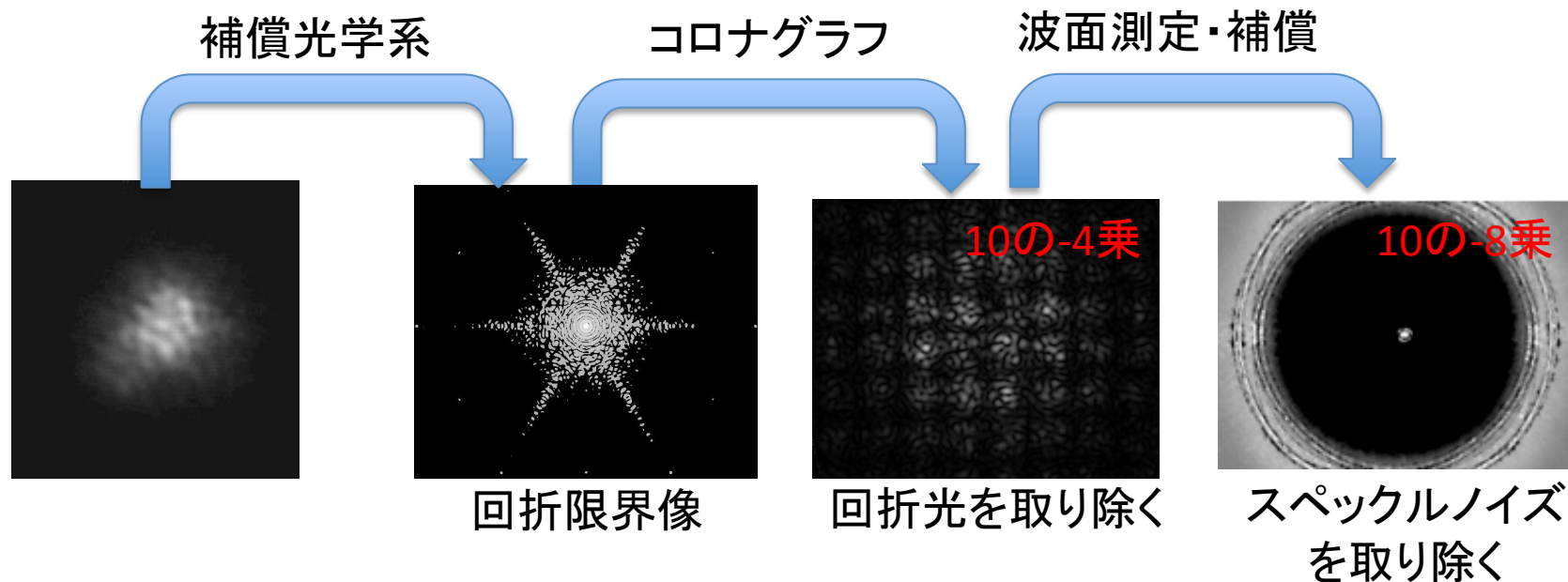
補償光学: 主星の回折光の成分を増加させる。

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。

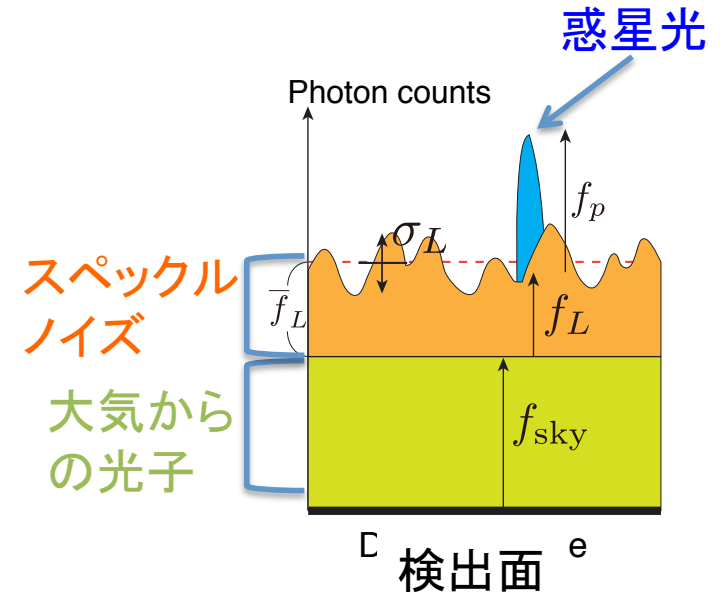
→ これらを有機的に結びつけることが重要。



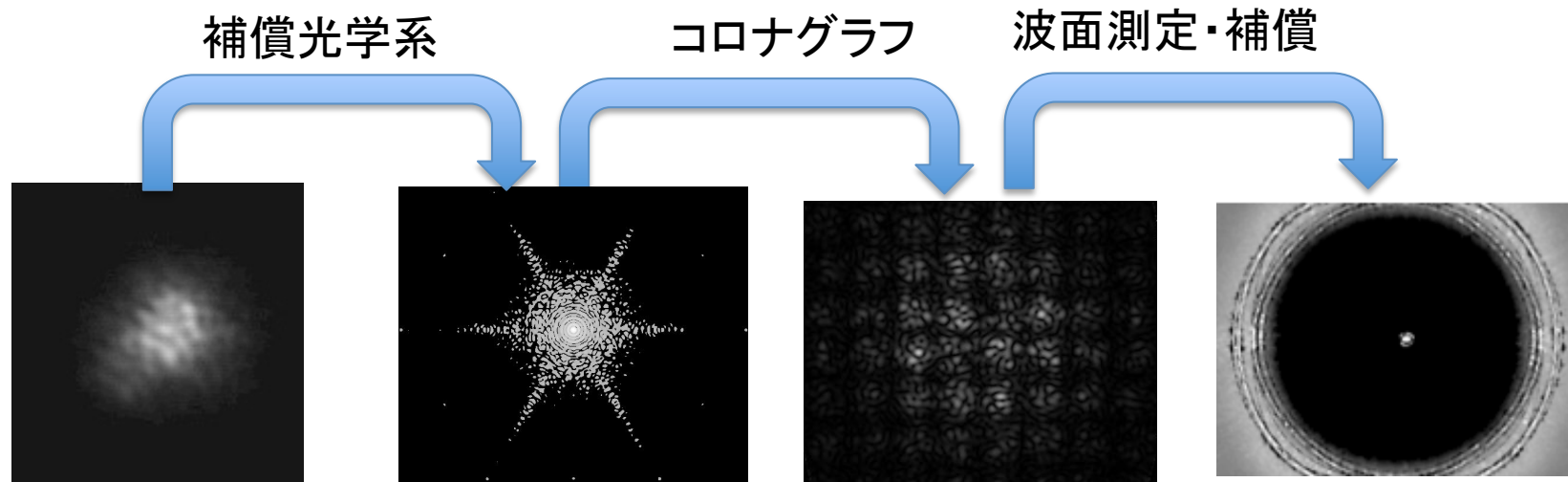


# 究極的なコントラストは何で決まるか？

- 検出面には、「スペックルノイズ」、「大気  
の光(背景光)」、「惑星光」が入射。
- 惑星光は光波の歪みに起因するスペ  
ックルノイズに埋もれる。(背景光はオフセットな  
ので検出には効かない。)
- 光波の測定・補償精度がそのコントラ  
ストを決定する。

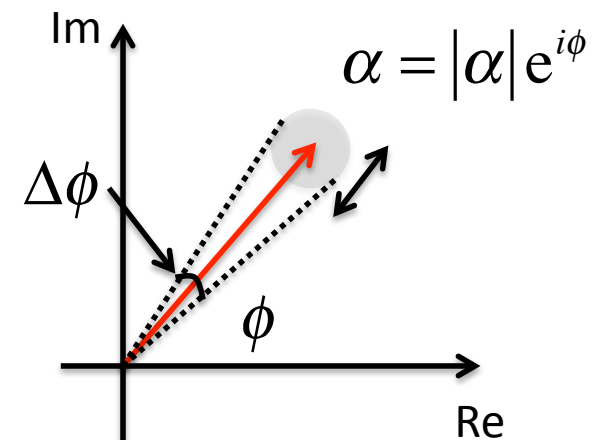
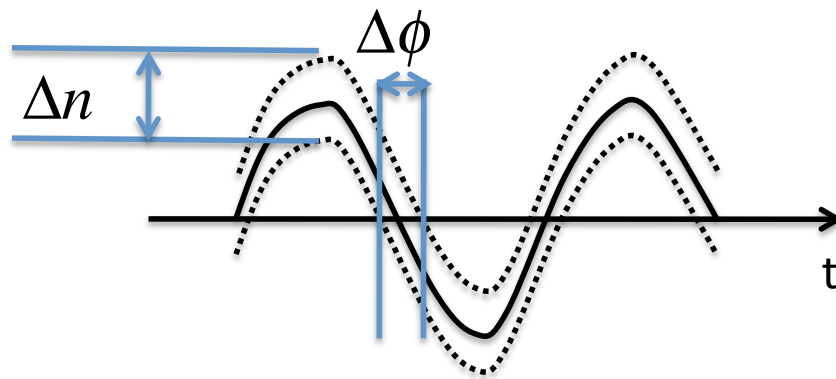


→ 測定・補償精度は  $\lambda/1000$  が目標



# What's the limitation on the contrast?

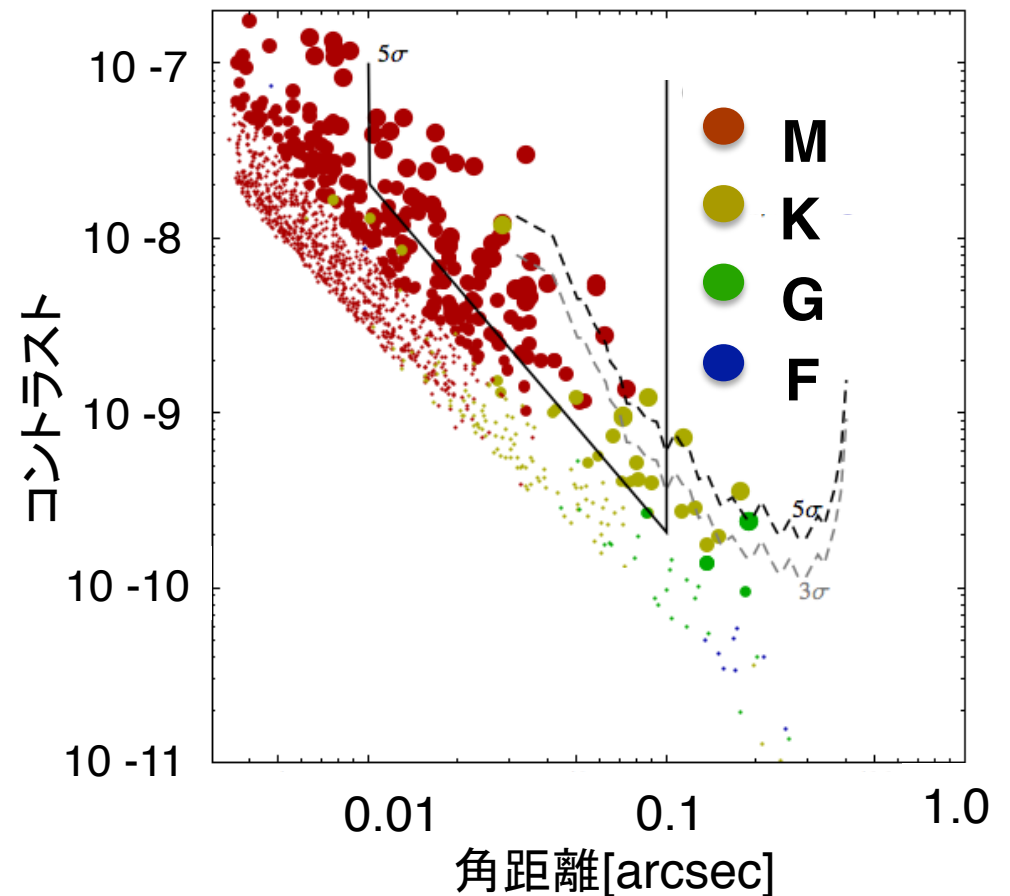
- Wavefront measurement : to determine both “amp” and “phase”
- Accuracy is ultimately limited by uncertainty relation.  
→ Photon noise limit



Phasor diagram of complex amplitude

# 次世代大型30m望遠鏡に 究極の性能の装置が搭載されれば

- 望遠鏡のサイズ
  - 入射光子数を決定
  - 到達コントラスト
- TMTでは、晩期型星を中心に数十個の地球サイズの惑星の検出が可能。



# 京大3.8m望遠鏡での惑星探査

- 方針：ひとつのフェーズを3-5年に設定し、「人」を育てること。
  - TMTは10年先のプロジェクトではあるが、中期目標を設定し、段階的に進めていく。
1. 「室内実験での実証(3年)」
  2. 「京大望遠鏡によるOn-sky実証(3-5年)」
  3. 「TMTの装置設計(3年)・インテグレーション(3年)」

# 実現までのシナリオ

目標：2020年代初頭のファーストライトを目指す

方針：ひとつのフェーズを3-5年に設定し、プロジェクトとして段階的に進め、また「人」を育てること。

2012-2014

2015-2017

2018-

実験室 → 京大3.8m望遠鏡 → TMT

なぜ京大3.8m望遠鏡か？

1. TMTと同じ分割式望遠鏡

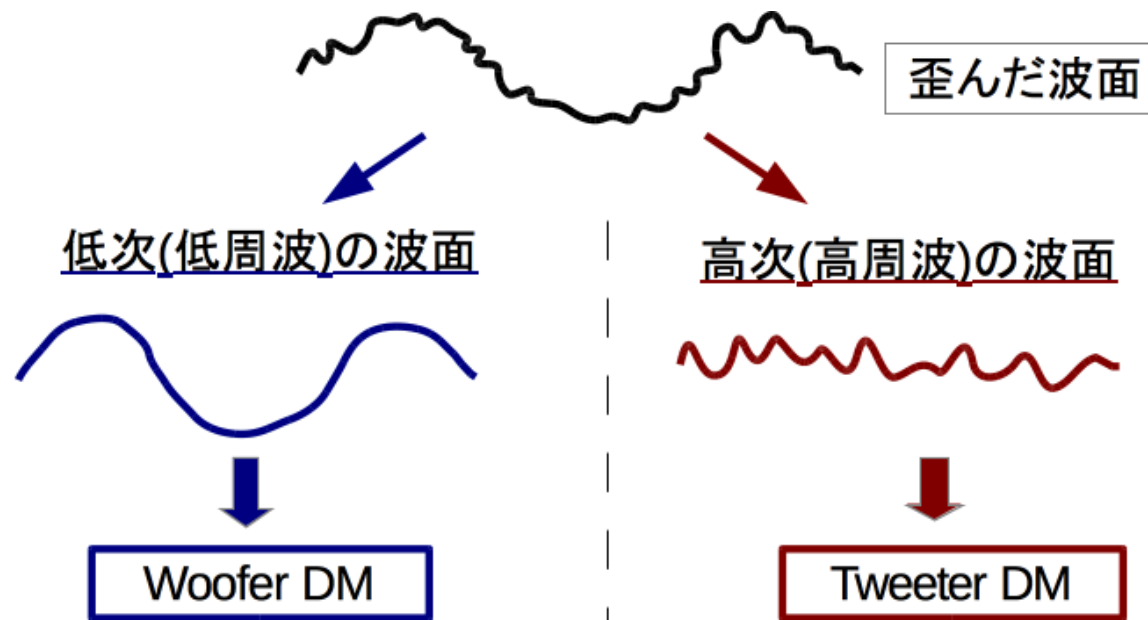
分割式望遠鏡での世界初の高コントラスト実験の実証を目指す。

2. 望遠鏡時間

テーマを絞って観測を十分に行なう事で、第一級のサイエンスができる。

# 大気を透過する波面

- 大気透過後の波面は空間周波数の-3乗

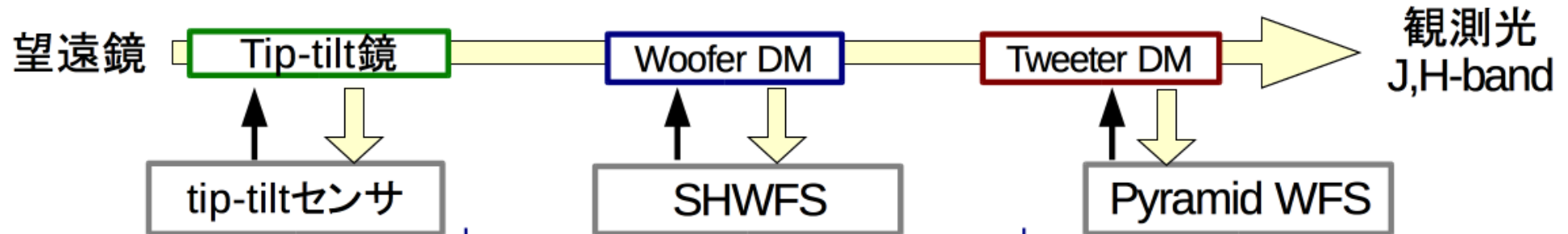


- 変形量: 大
- 可変形鏡の素子数: 少

- 変形量: 小
- 可変形鏡の素子数: 多

# 補償光学装置の構成

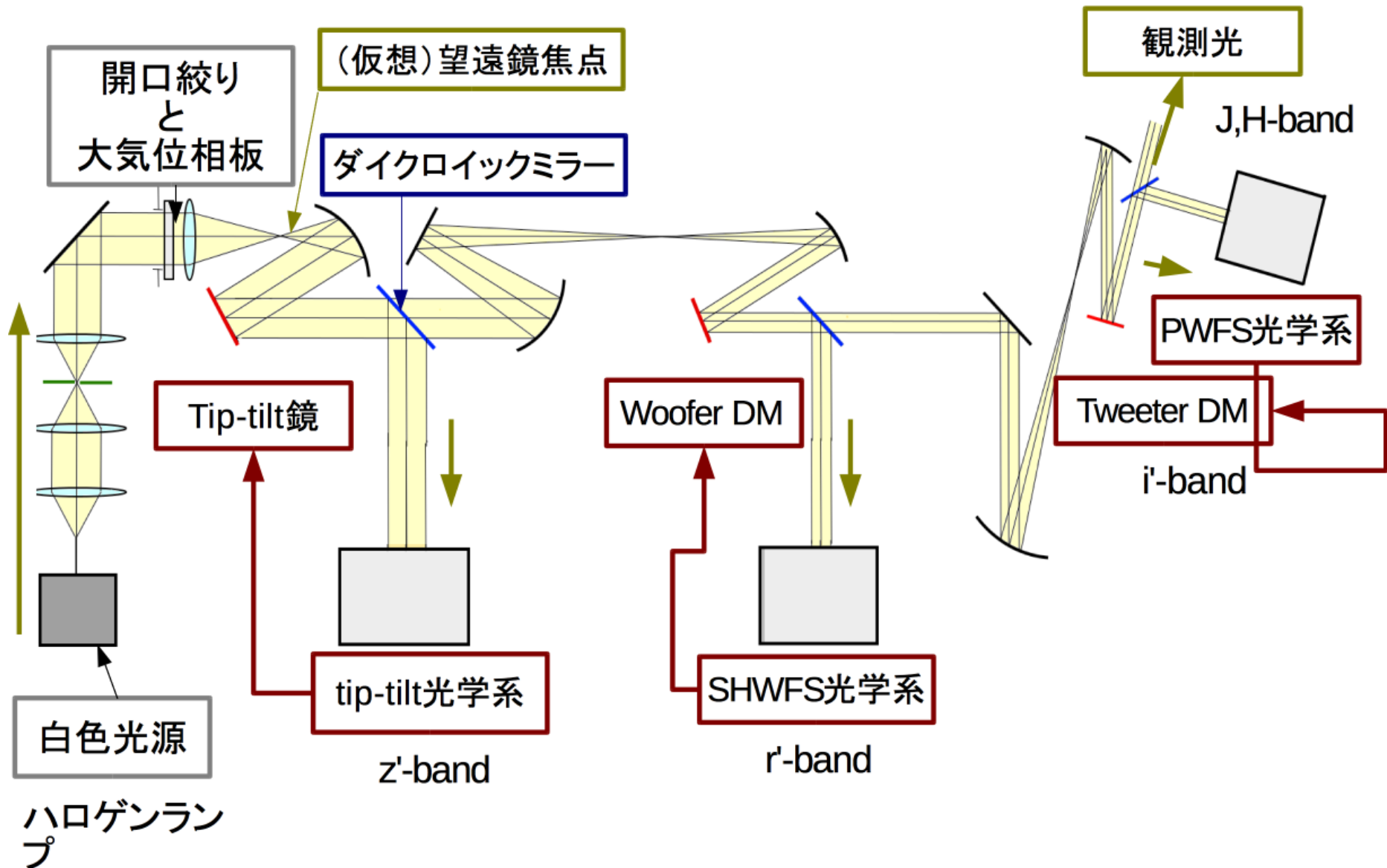
- 3段階それぞれでループを作り、波面誤差を補正する



- |  |   |  |
|--|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"><li>• tip-tilt補正</li><li>• PSD(浜フォト製)</li><li>• Tip-Tilt鏡(PI製)</li><li>• z'-band</li><li>• 限界等級=12等</li><li>• フィードバック周波数=200Hz</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>• 低次収差補正</li><li>• Zyla sCMOS(Andor製)</li><li>• Woofer DM88素子(ALPAO製)</li><li>• r'-band</li><li>• 12等</li><li>• 500Hz</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>• 高次収差補正</li><li>• Zyla sCMOS</li><li>• Tweeter DM1000素子(BMC製)</li><li>• i'-band</li><li>• 7等</li><li>• 1000Hz</li></ul> |
|--|---|--|

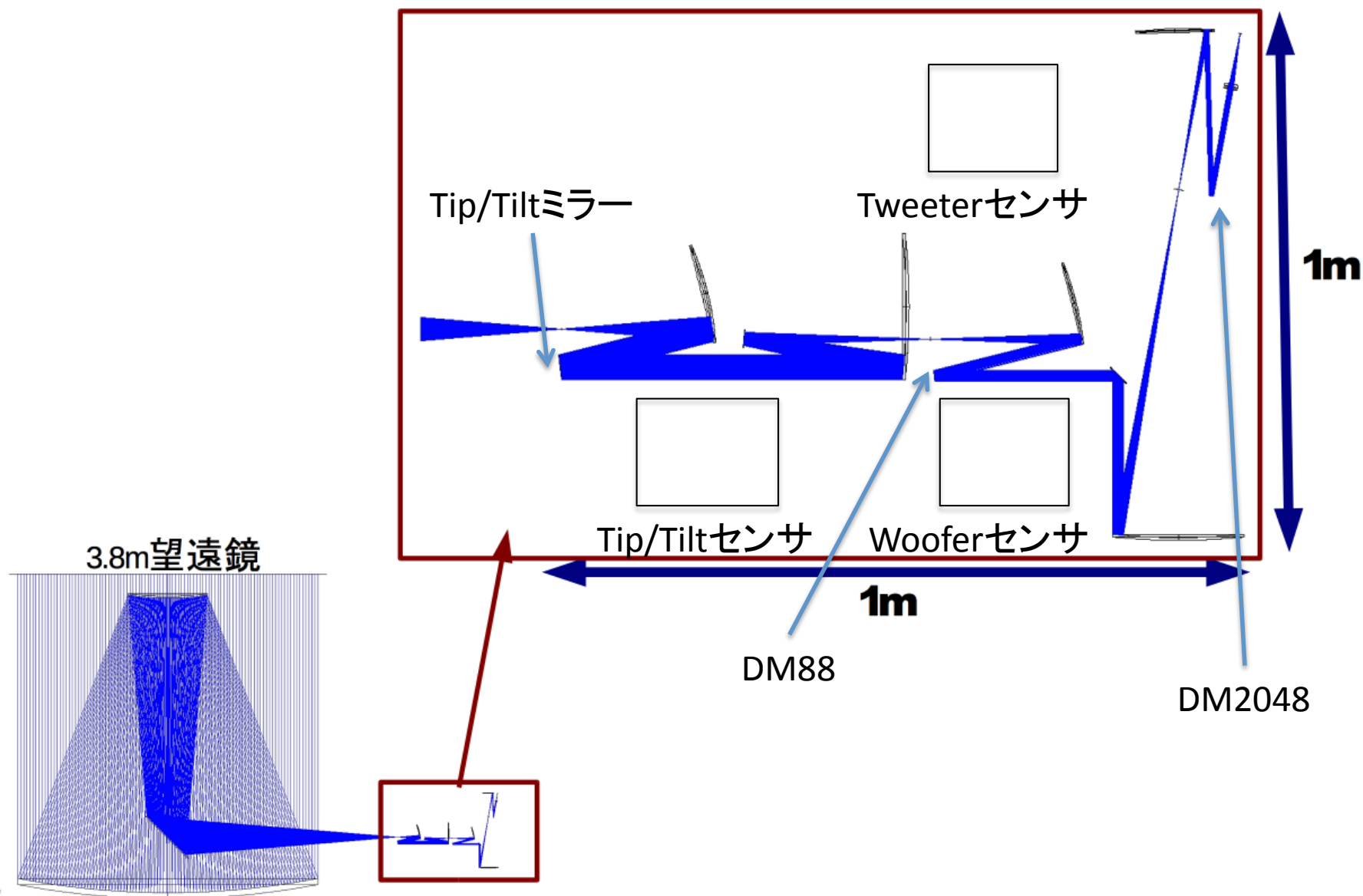
来年度までに基礎実験終了

# 実験室での光学系



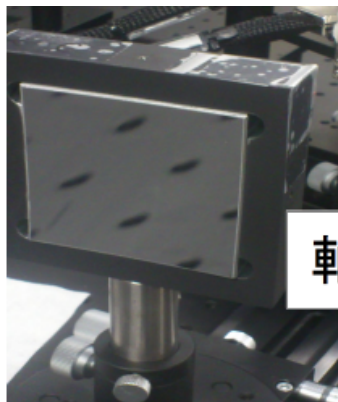
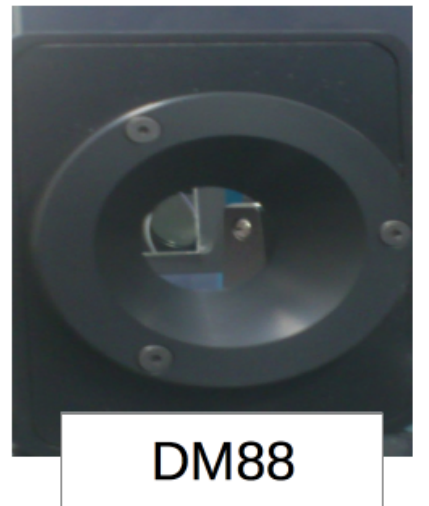
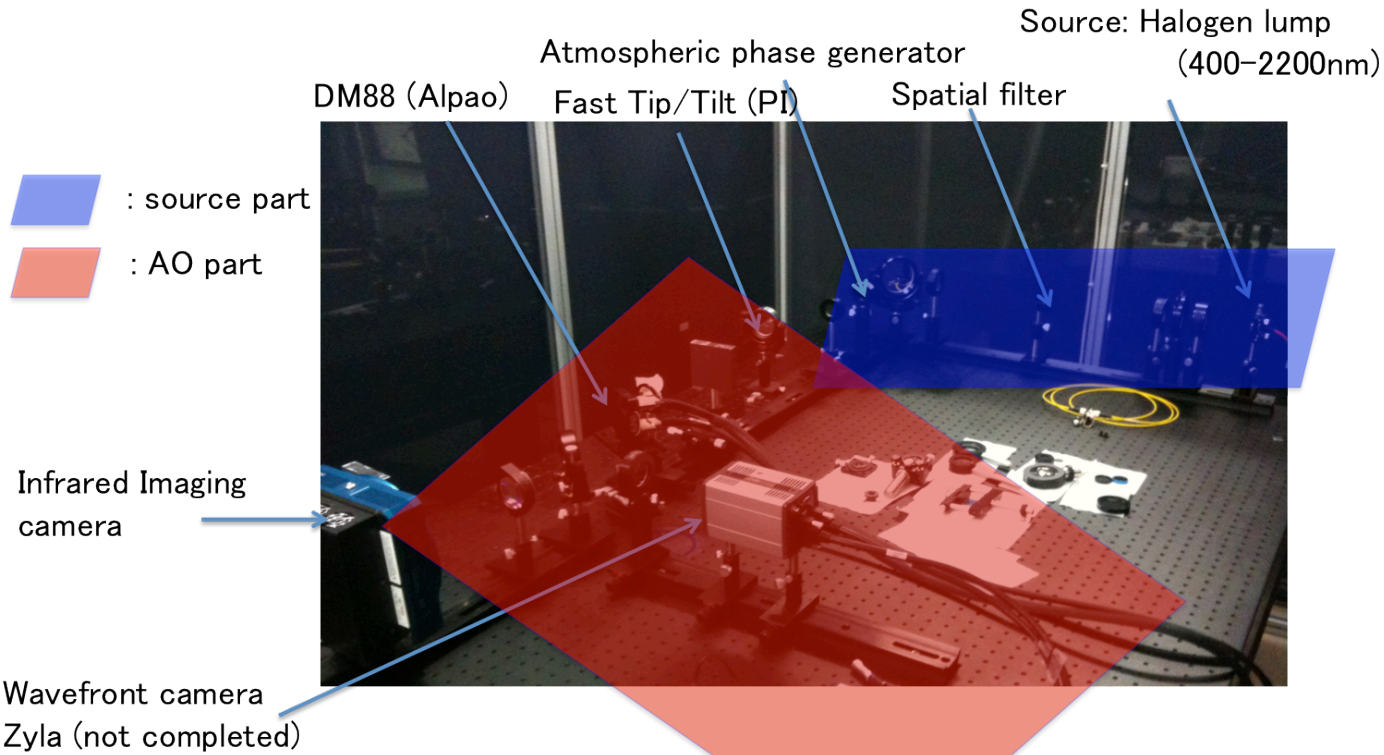


# 補償光学の光学系の配置図



# 実験室

光学素子が揃っている所から組立中



# 「できること」と「できないこと」

- できること:
  - 仕様要求の決定、概念設計、
  - 光学系の構築、波面センサーの構築
- できないこと:
  - ひとつのシステムとして統合
  - 波面制御