京大岡山3.8m望遠鏡における木星型系外惑星の直接撮像

国立天文台　太陽系外惑星探査室
松尾太郎

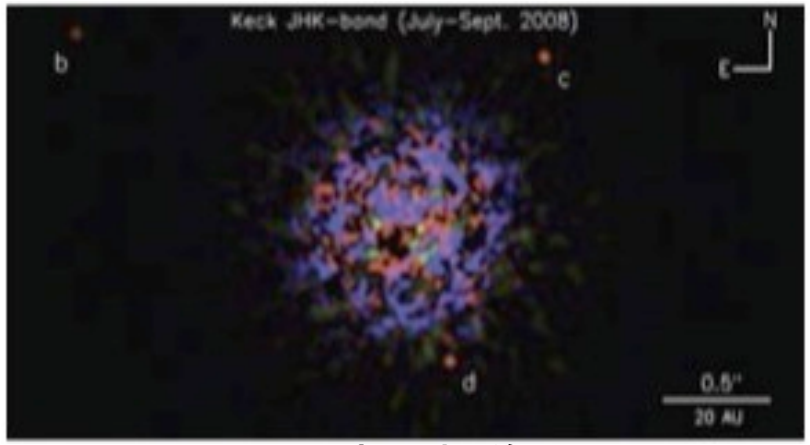
要旨

- 次世代大型望遠鏡（TMT）における世界初の地球型系外惑星の直接観測を行う装置（SEIT）を提案している。
- TMTと同じ分割式の京都3.8m望遠鏡でSEIT試作機の性能実証を行い、木星型系外惑星の直接観測を通して惑星進化の解明を目指す。

系外惑星研究の現状

- 1995年に初めて惑星が発見以来、ドップラー法などの間接法により500以上の系外惑星が検出。
- 2008年に巨大ガス惑星候補の直接観測に成功。
- Kepler望遠鏡の食を利用した観測による100を超える地球型惑星の間接的検出。

「惑星系の起源を理解するうえで非常に重要」



HR8799の周りで直接撮像された巨大ガス惑星（Marois et al. Science 2008）

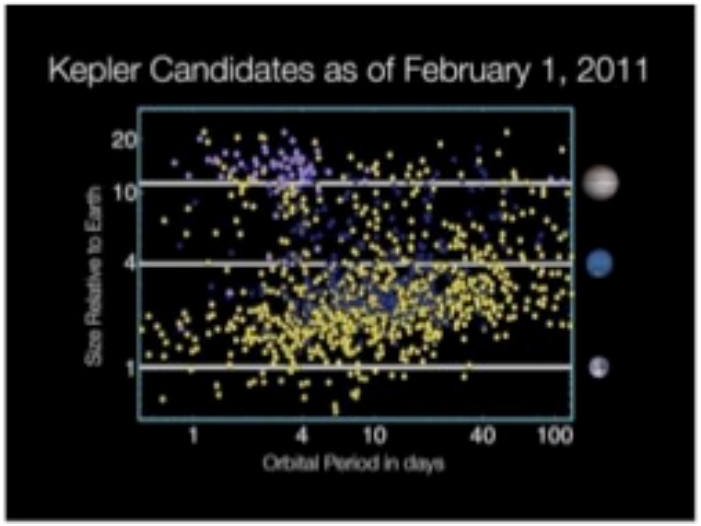
現状から言える事:

1 . 宇宙において「地球型」惑星は普遍的な存在。

➔ 次の最大のマイルストーンは、「地球型」惑星の直接検出とそこに存在するかもしれない「生命現象」の確認。

2. 地球型惑星の観測成果は全て欧米によるもの。（Kepler望遠鏡は1996年に計画）

➔ 将来日本が地球型惑星の直接観測で世界と勝負するには、この10年の取り組みが重要。



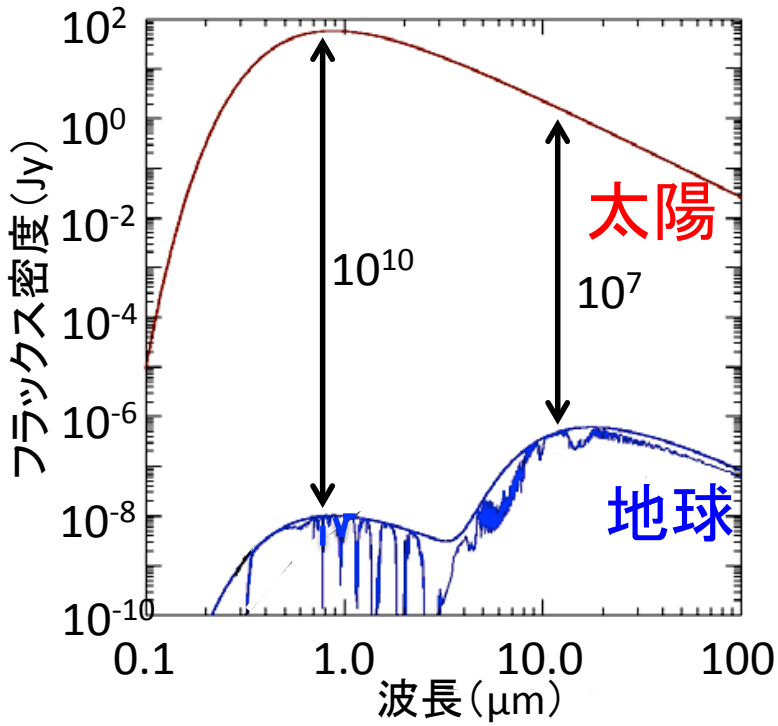
Kepler望遠鏡により発見された惑星の半径と周期

直接観測

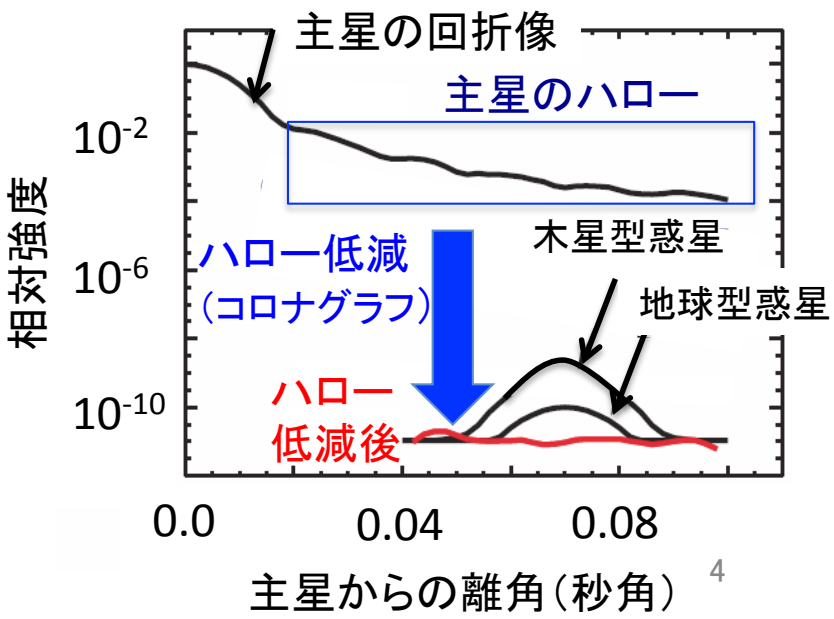
- 地球は可視光・近赤外線では反射光で、中間赤外線では自身の熱放射で輝く。
- 可視光では10の10乗、赤外線では10の7乗の強度比（コントラスト）
- 惑星光は主星のハローに埋もれている。

➔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。

- 惑星の大気組成や表層の環境を検証。



10pcから観測した太陽と地球のスペクトル



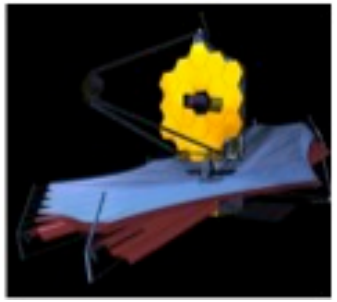
系外惑星研究の展望、特に直接撮像

- 宇宙

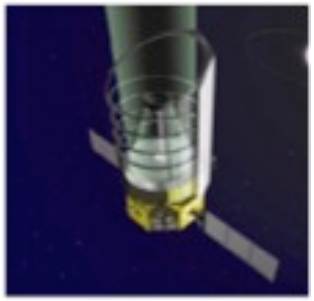
現在 → 2018-19 → 2018 → 2025~

HST

1.



JWST



SPICA

3.

TPF

年老いた冷たい惑星の撮像・分光

- 地上

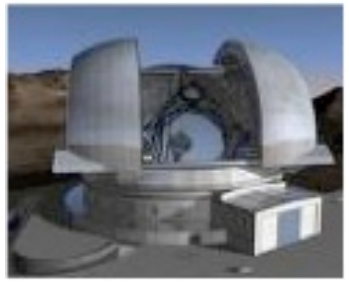
現在 → 2018 → 生命痕跡の探査

8m級望遠鏡
(Subaru/HiCIAO, Gemini/GPI etc)
若く温かい惑星の撮像・分光

+ 極限補償光学
(近い将来)

2.

TMT



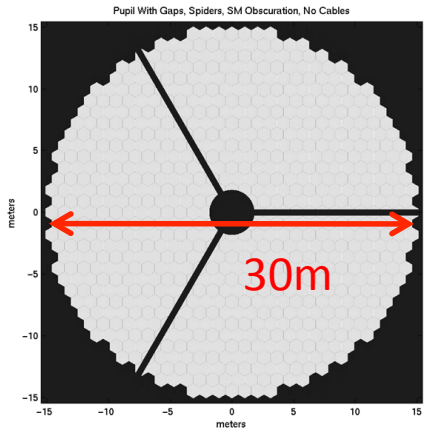
E-ELT

次世代大型望遠鏡
世界初の地球型惑星の直接撮像

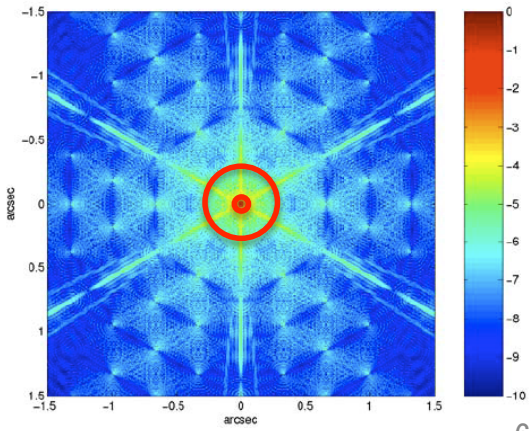
次世代望遠鏡

	Thirty Meter Telescope (TMT)
場所	マウナケア山頂
参加国	アメリカ、カナダ、日本、中国、インド（日本は1/4パートナー）
ファーストライト	2018年
観測装置	ファーストライト装置は3つで決定済み。 第2期装置は完全な白紙。
主鏡	30m分割式（1枚は六角形、対角距離で1.44m）492枚

TMT想像図



TMT主鏡



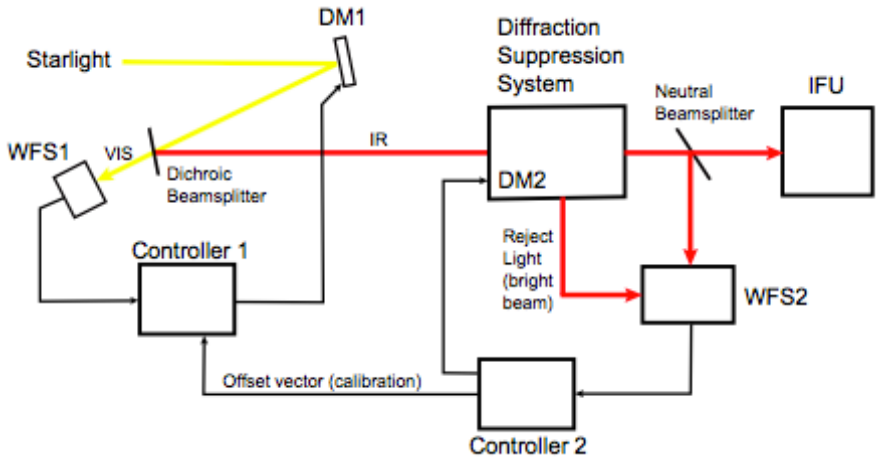
TMTの点源回折像

次世代望遠鏡における従来の提案

- 系外惑星の直接観測のために2つの装置が提案されている。

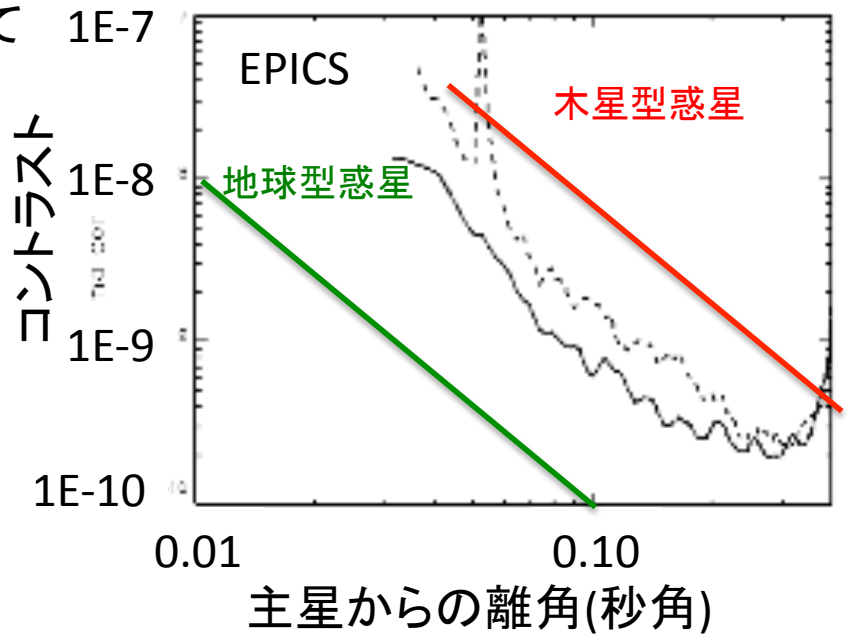
8m級望遠鏡の高コントラスト装置を次世代の望遠鏡にそのまま応用。
➔ 木星型系外惑星の反射光検出に留まる。

・方法
- 大気擾乱により乱れた波面を補償光学で整えて
コロナグラフで主星の光を選択的に低減。



PFIのブロック図（PFI Feasibility reportより）

PFIとEPICSの性能は同程度



Kasper et al. (2010)

Second-Earth Imager for TMT (SEIT)

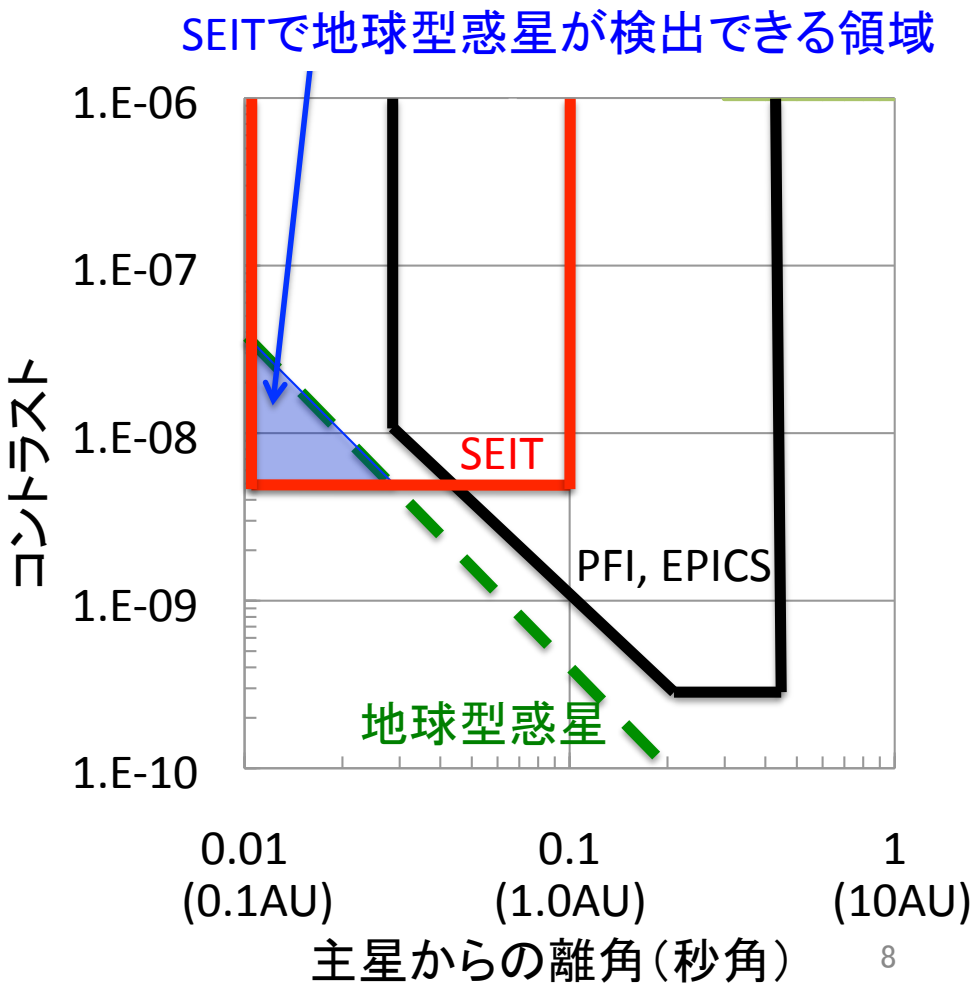
松尾太郎、田村元秀、成田憲保（国立天文台）、小谷隆行（宇宙科学研究所）、
村上尚史、馬場直志（北大）、滝澤謙二、皆川純（生物基礎研究所）、生駒大洋（東工大）

○ 地球型惑星は主星からの反射光により輝くので、主星に近づくほど明るくなる。
➔ 内側の惑星ほど、感度とコントラストの面で検出が有利（緑の点線）

従来の考え方：
○ より高いコントラストで惑星を観測
➔ 太陽型星周りでの惑星探査

SEITの考え方：
○ より主星に近い惑星を観測
高いコントラストは不要。

TMTの大口径を最大限に活かした主星超近傍の惑星探査。



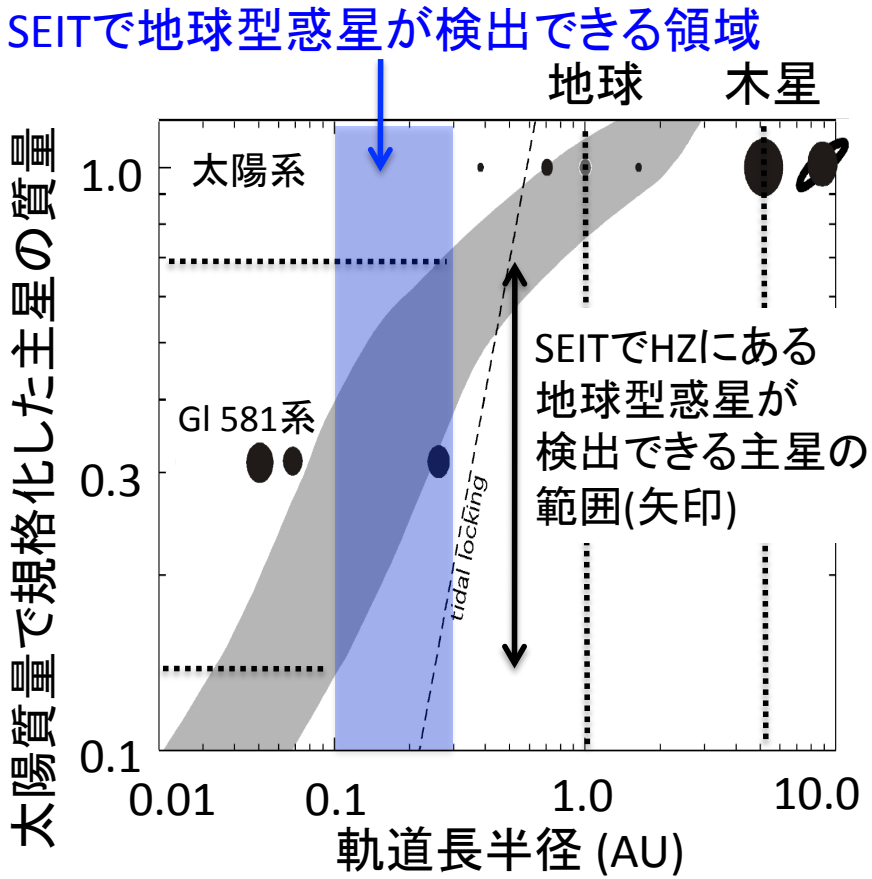
ハビタブルな惑星の観測

- 低温度星周りのハビタブルな「1」地球質量の惑星の直接撮像

○ Habitable Zone(HZ): 生命を育む「液体の水」が惑星表層に存在し得る領域（灰色）

○ SEITにより主星近傍（10pcで0.1から0.3AU）の地球型惑星を観測（青色）。

➔ SEITはK型星からM型星のHZにある地球型惑星が検出できる。



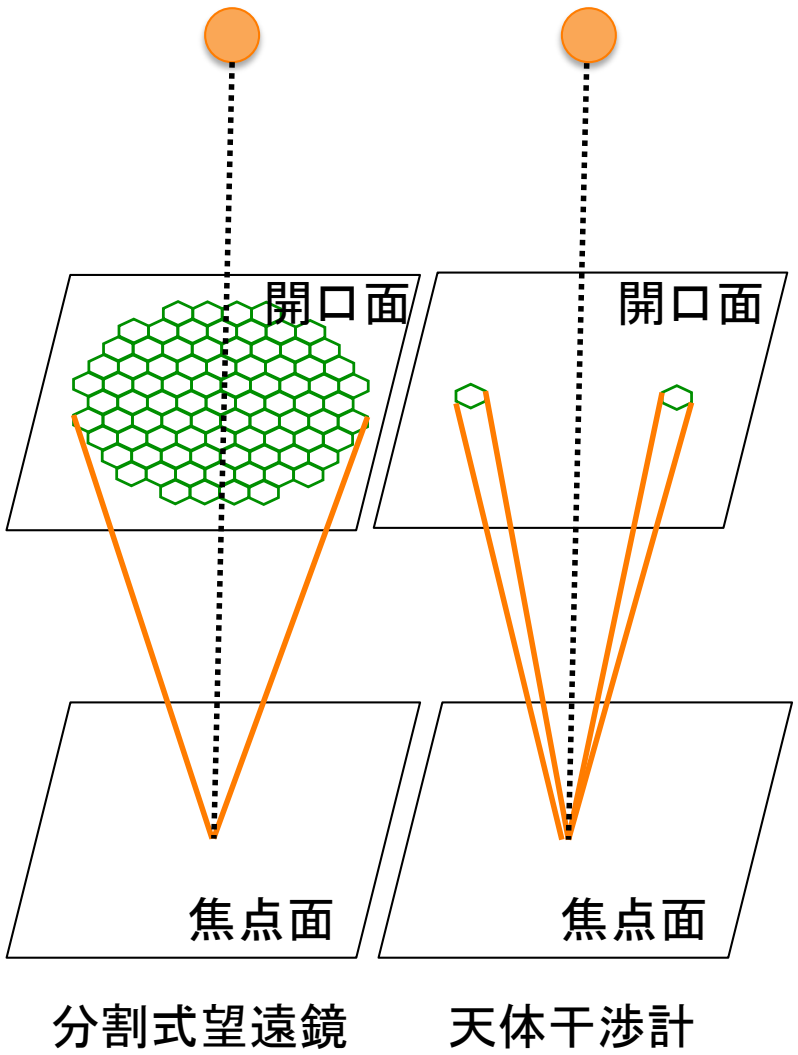
要求仕様

- 主星との離角10mas（1.5l/D@J band）で10の8乗の高いコントラスト
- 分割式望遠鏡で有効に働く高コントラスト装置

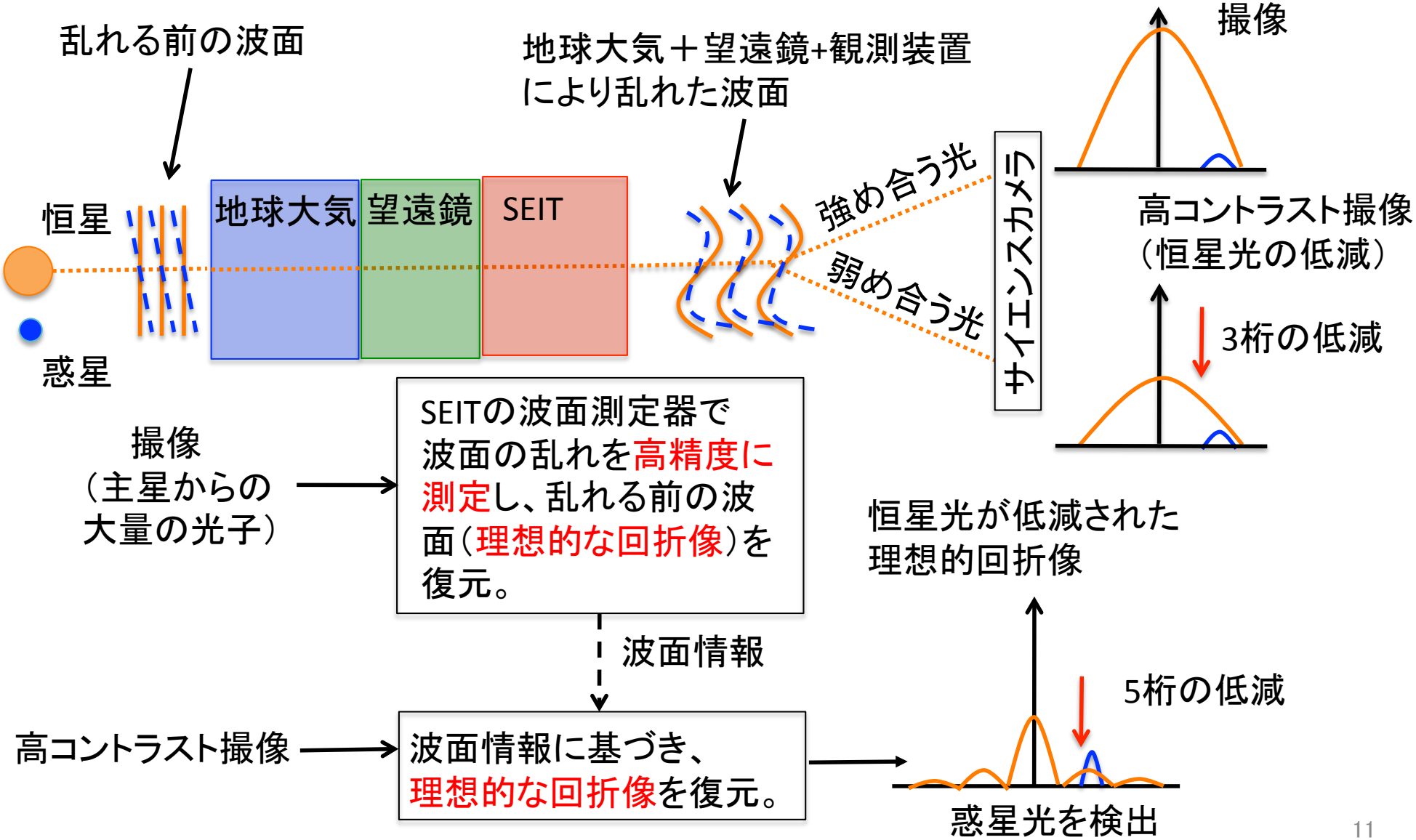
着眼点：

天体干渉計は、天体からの波面を分割し、干渉。（分割式望遠鏡を一部マスクしたものと同じ）。干渉計は空間分解能の点で有利。

➔干渉計の原理を応用した「主星光を低減させる装置（コロナグラフ）」と「波面測定装置」を組み合わせ、新しい観測方式を創案。



観測方式

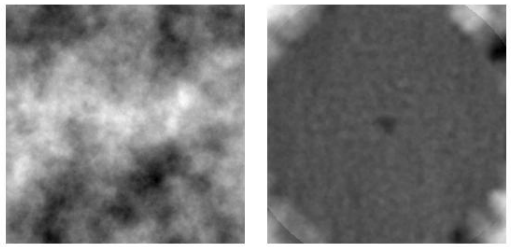


（* 従来の手法では、主星光はコロナグラフにより低減されるので方式の応用ができない）

シミュレーション

- 設定：

- 恒星と惑星の強度比: 10^6
- 惑星の角距離： 10mas



大気の
位相スクリーン

補償光学による
位相補償

- AOシミュレーション（0.5msec 2千枚）

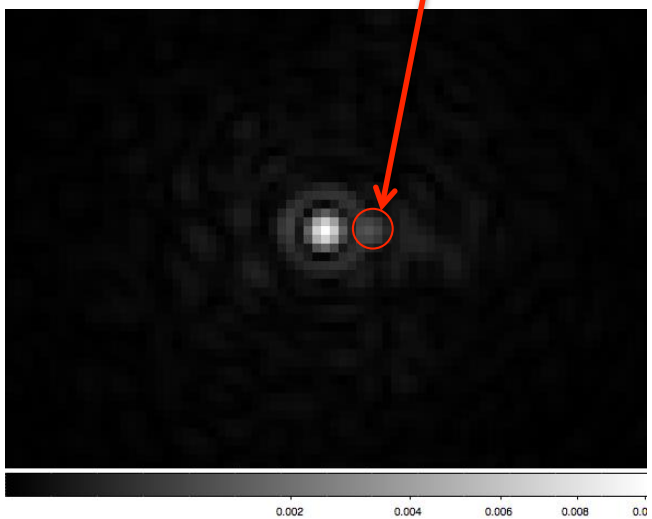
1時間の予想されるコントラスト：

$$\sim \sqrt{3600} \times 10^6 = 1.7 \times 10^8$$

➔要求仕様を満たすことを確認。

惑星検出

視野
~0”.1



シミュレーション結果（1秒積分）

実現までのシナリオ

実験室 ➔ 京都3.8m望遠鏡 ➔ TMT

目標：2022にファーストライト

2011-2012: 室内実験・予備設計予算
（若手連携分野間プロジェクト。単年度800万）
2013-2016: 中口径用の装置予算
（小型科研費、留置金等）
2017-2022: TMT用装置詳細設計・製作予算
(大型科研費＋国内TMTプロジェクト予算（＋国際協力）)

なぜ、京都3.8m望遠鏡か？

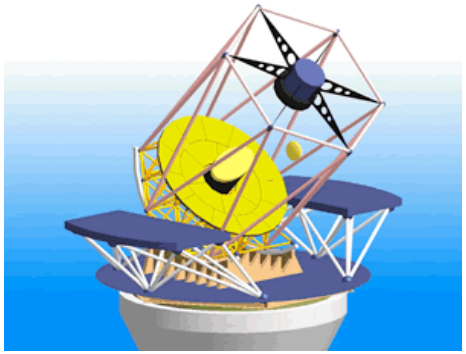
1. 分割式望遠鏡

京都3.8m望遠鏡はTMTと同じ分割式望遠鏡である。

強調すべきは、分割式望遠鏡で高コントラスト観測の成功例はない。提案する観測技術を京都3.8m望遠鏡に応用し、高コントラスト観測を成功させ、SEITの実現に大きく近づけたい。

2. 観測時間

観測装置の性能実証には、望遠鏡を通した天体観測を時間をかけて行うことが重要である。新型望遠鏡との組み合わせではなおさらである。共同利用が主目的のすばるやKeckではなく、共同利用が半分に限られた京都3.8m望遠鏡で初めて実現できる。



京大岡山3.8m望遠鏡

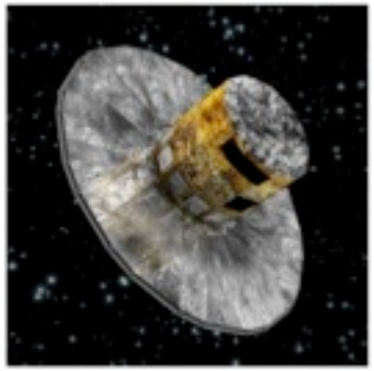
分割鏡での初の高コントラスト撮像（実証実験）

技術 →

TMT/SEIT

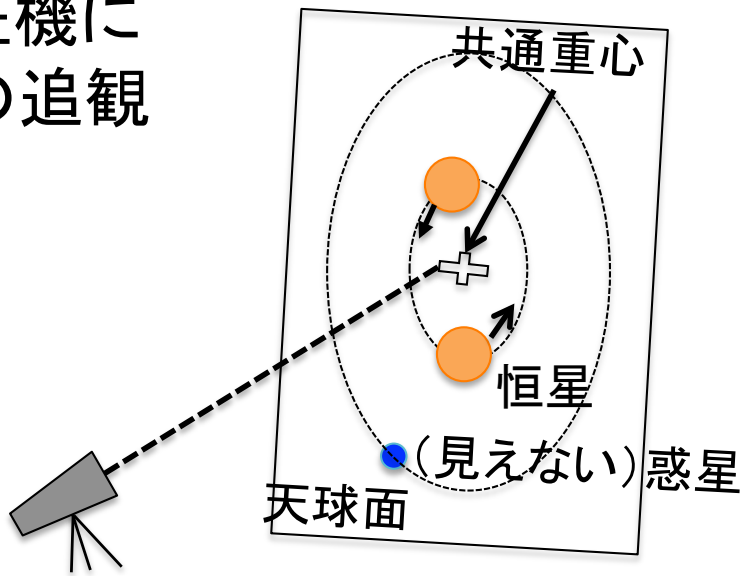
京都3.8m望遠鏡で目指すサイエンス

- 2013年打ち上げ予定の位置天文衛星（GAIA）は、高精度な恒星の位置変化の測定により木星質量の惑星が検出できる。また、力学質量が決定できる。
- 京都3.8m望遠鏡に搭載する性能実証機により、GAIAで検出された木星型惑星の追観測を行い、惑星進化を解明する。



GAIA衛星の想像図

天体位置測定法：
惑星が存在すれば、恒星は惑星との共通重心を公転する。天球面上での恒星の位置変化を精密に測定し、間接的に惑星を検出する。



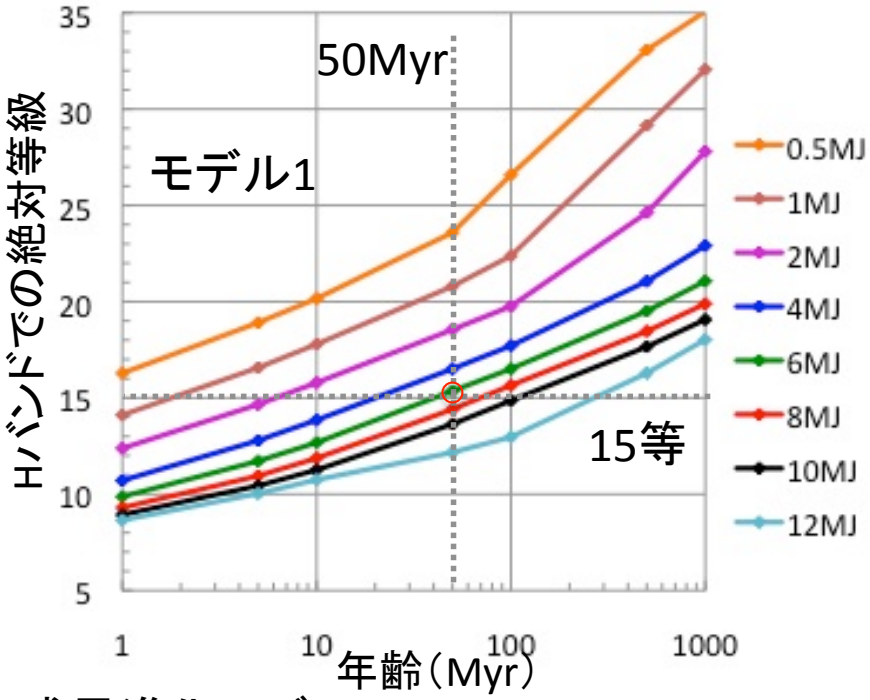
天球面:視線方向と垂直な面

天体位置測定法の概念図

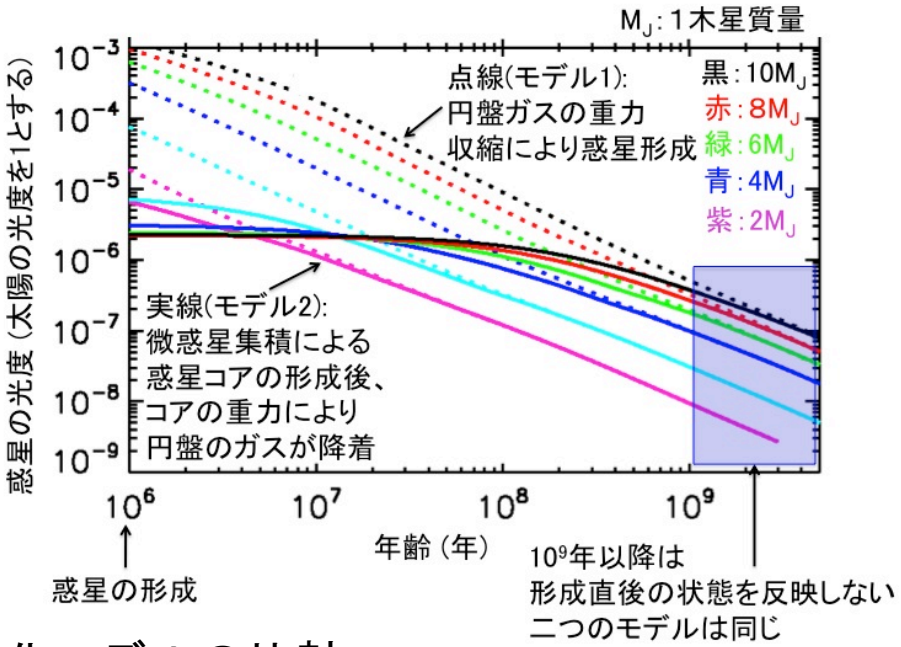
惑星質量の不定性

- 問題：直接撮像で検出された惑星候補の質量には大きな不定性が伴う
- 惑星質量の推定方法：
  観測と進化モデルを比較。
  例：50Myrの恒星の周りで15等級の明るさの伴星候補を発見
  ➔ 6木星質量
- 質量不定性の要因：
- 年齢の不定性（例: GJ758b）
- 惑星進化モデルの不定性。若い惑星ほど、進化モデルに大きな不定性がある。

➔ これまでに直接撮像により検出された惑星候補の質量には大きな不定性がある。



惑星進化モデル（Baraffe et al.2003より作成）



惑星進化モデルの比較（Marley et al. 2007の図を改変）

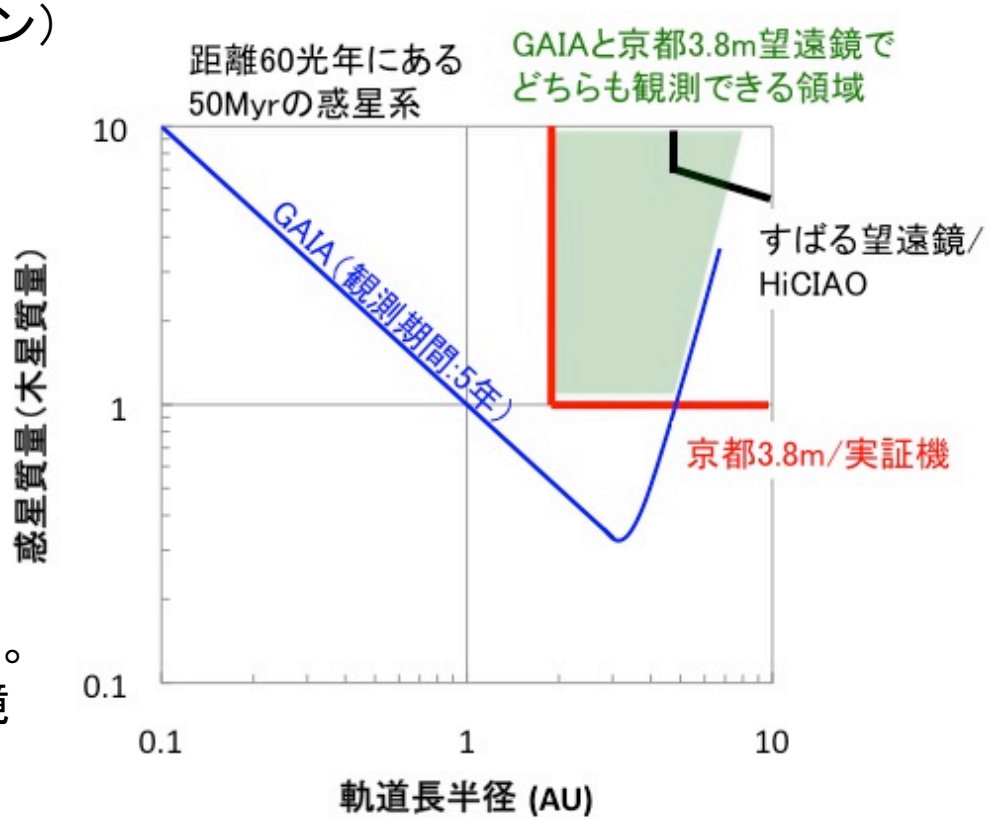
戦略

着眼点:
位置検出測定法と直接撮像は形成直後の若い惑星を検出できる。
GAIA衛星 ➔ 惑星の力学的質量
京都3.8m望遠鏡 ➔ 惑星の明るさ、温度(メタン)

鍵となるパラメータ:
どれだけ主星近傍まで惑星を観測できるか?
(HiCIAOでは内側が観測できないので、GAIAのパラメータスペースを埋められない。)
➔SEITの観測方式により初めてGAIAのパラメータスペースが埋められる!

戦略:
年齢が精度よく決まっている近傍の若いMoving Group及び散開星団のメンバ星に着目。
GAIA衛星で発見された若い惑星を3.8m望遠鏡で明るさを測定。
➔ 惑星進化モデルに観測的な制限。
これまでに検出された「惑星候補」の質量に重要な知見。

＊直接撮像の検出限界は重力不安定モデル1(重力不安定)に基づいて導出



20pcにある恒星の周りでのGAIA(青)と京都3.8m望遠鏡(赤)の検出限界

京都3.8m望遠鏡における計画

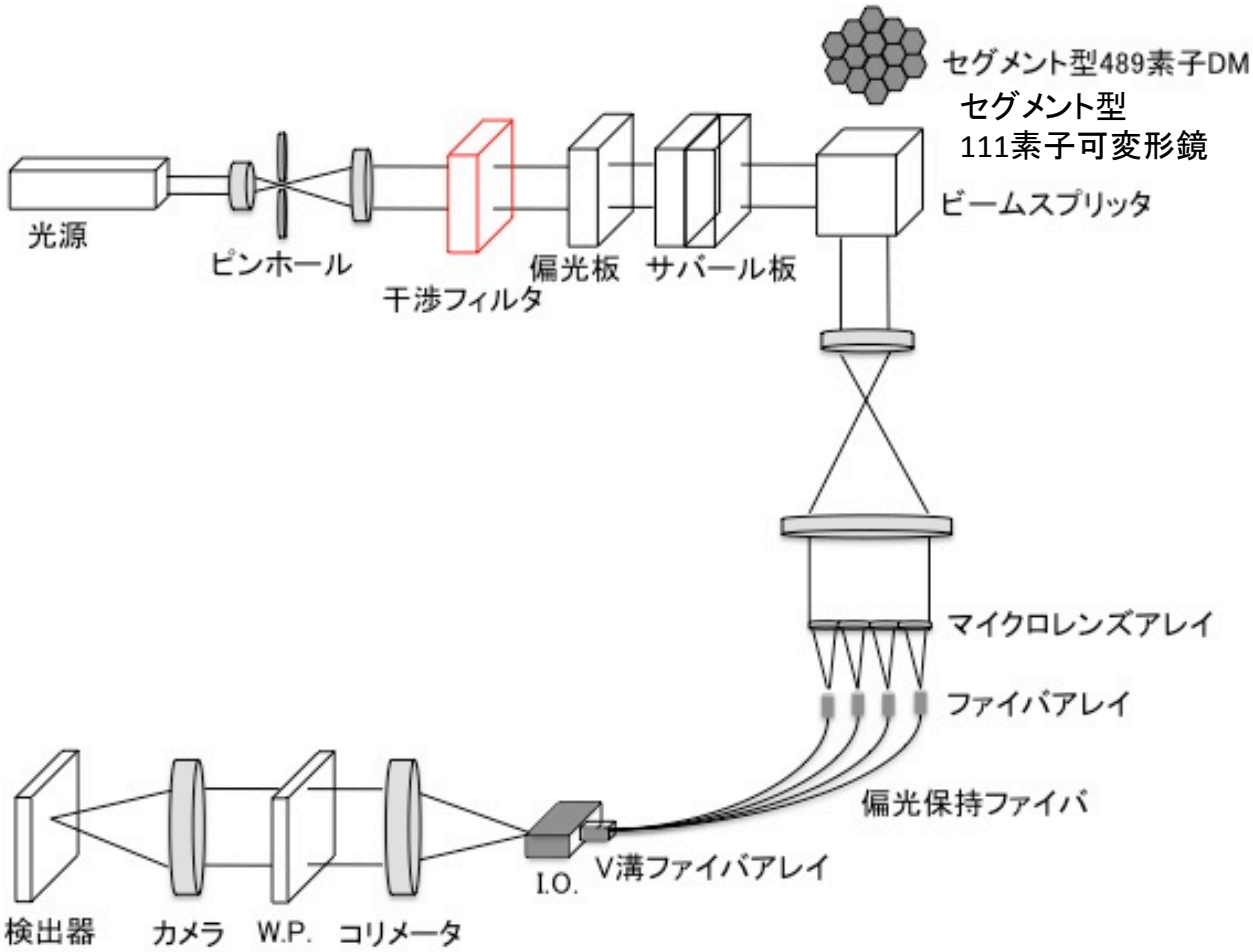
想定：2014年に京都3.8m望遠鏡のファーストライト（FL）
望遠鏡のFLと同時に「性能実証機のFL」を目指す。

- 2011年-2012年:　室内実験により手法の実証
- 2013年：組み立て開始　（小型科研費、留置金等）
- 2014：ファーストライト（目標コントラスト: 5等星で10^5、10等星で10^4）

➔ 50MyrのMoving groupで1.5AU以遠の3木星質量より重い惑星を観測

実験光学系

現状：光学調整を開始。2011年度以内に手法の実証を目指す。



地球型惑星と生命の探査：現状

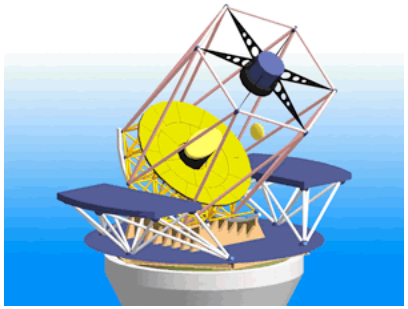
すばる望遠鏡/IRD（地球型惑星の検出）
● 2010-2014年度の科研費により推進。
2014年の観測に向けたサイエンス・技術検討を広いコミュニティにより行っている。

「検出」から「特徴づけ」へ →

TMT/SEIT（地球型惑星の特徴づけ）

技術実証 ↗

↑ 極限補償光学における国際協力



京大岡山3.8m望遠鏡（木星型系外惑星の探査）
●SEITの試作機を国内初の分割式望遠鏡で性能実証を行い、木星型系外惑星の観測を通して惑星進化の解明を行う。

Gemini Planet Imager (GPI)　から PFIへ
Subaru Coronagraphic Extreme AO (SCExAO)
●極限補償光学の実証実験

各望遠鏡に最適でユニークな系外惑星装置開発を進める