

系外惑星観測の現状と未来： 直接観測を中心として

2012年8月1日 17:30～18:30 星形成・惑星系

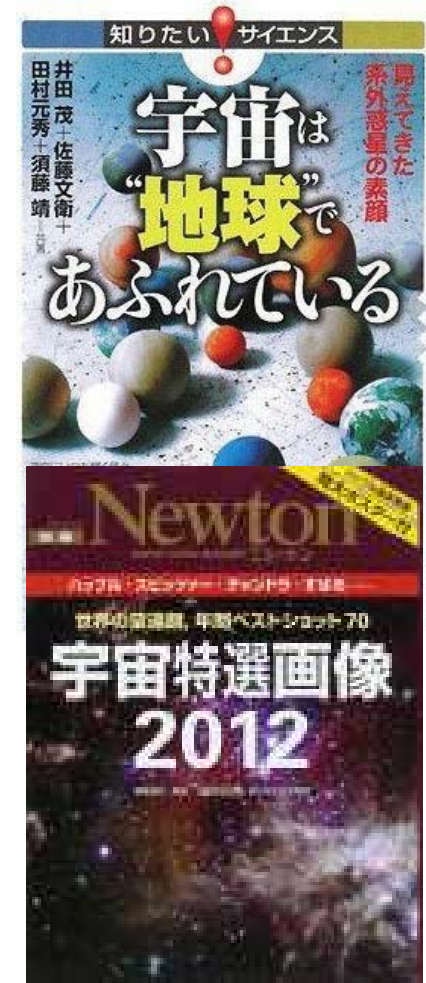
国立天文台・総研大

太陽系外惑星探査プロジェクト室

田村元秀

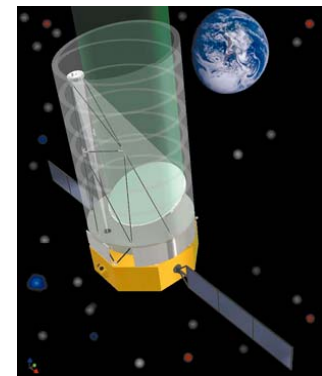
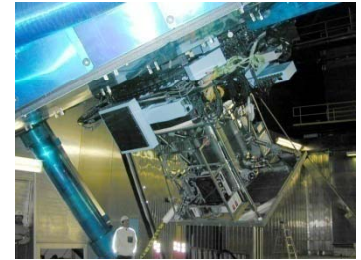
自己紹介：田村元秀

- 奈良県出身
- 京都大学理学部大学院修了、理学博士
- アメリカ国立光学天文台、ジェット推進研究所 (NASA/JPL) 研究員
- 現在、国立天文台 (三鷹)
- **太陽系外惑星探査プロジェクト室**創設、室長
- ★ 著書 (共著・単著)・論文・受賞
 - ★ 「宇宙は地球であふれている (技術評論社)」
 - ★ 「宇宙画像2012 (ニュートンプレス)」
 - ★ 「地球外生命体を探せ (NHK出版)」
 - ★ 「シリーズ 現代の天文学6, 9, 15巻章執筆 (日本評論社)」
 - ★ 「地球外生命9の論点 (講談社BB)」⇒最新の本
 - ★ 欧文論文発表 550編 (ADSデータベースによる)
 - ★ 日本天文学会林忠四郎賞、大和エイドリアン賞



現在の研究テーマ：観測天文学と 観測装置開発

- ◆ 専門：太陽系外惑星、星惑星形成、赤外線天文学
- ◆ 単に観測を行うだけでなく、そのための観測装置を開発し、他ではできないようなユニークな観測を目指す
- ◆ すばる望遠鏡用観測装置
 - ★ 「コロナグラフカメラCIAO」の開発
 - ★ 「新コロナグラフ HiCIAO」の開発
 - ★ 「地球型惑星探査装置IRD」の開発
- ★ 中小口径望遠鏡用サーベイ装置
 - ★ 「赤外線3色同時カメラ (SIRIUS)」の開発
 - ★ 「広視野偏光装置 (SIRPOL)」の開発
- ◆ 太陽系外惑星検出将来ミッション JTPF の検討
- ◆ 日本における太陽系外惑星科学の展開
- ◆ 特定領域研究代表 2004-2008



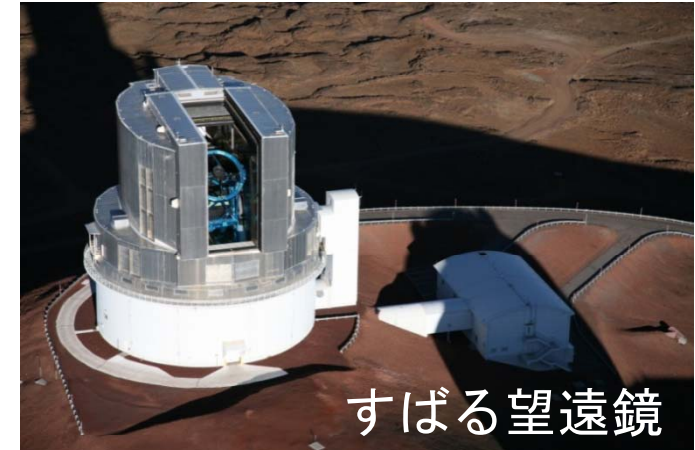
田村元秀

検索

話の内容

系外惑星最前線の紹介

- 新たな発見が続く系外惑星研究は我々の世界観を変えつつある
- 太陽系内惑星と系外惑星
- どのように探すのか？
- すばる望遠鏡
- ケプラー衛星
- ハビタブル惑星探し
- 系外惑星における生命

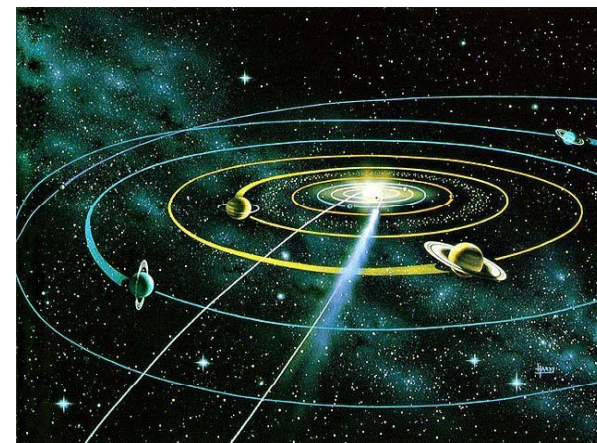
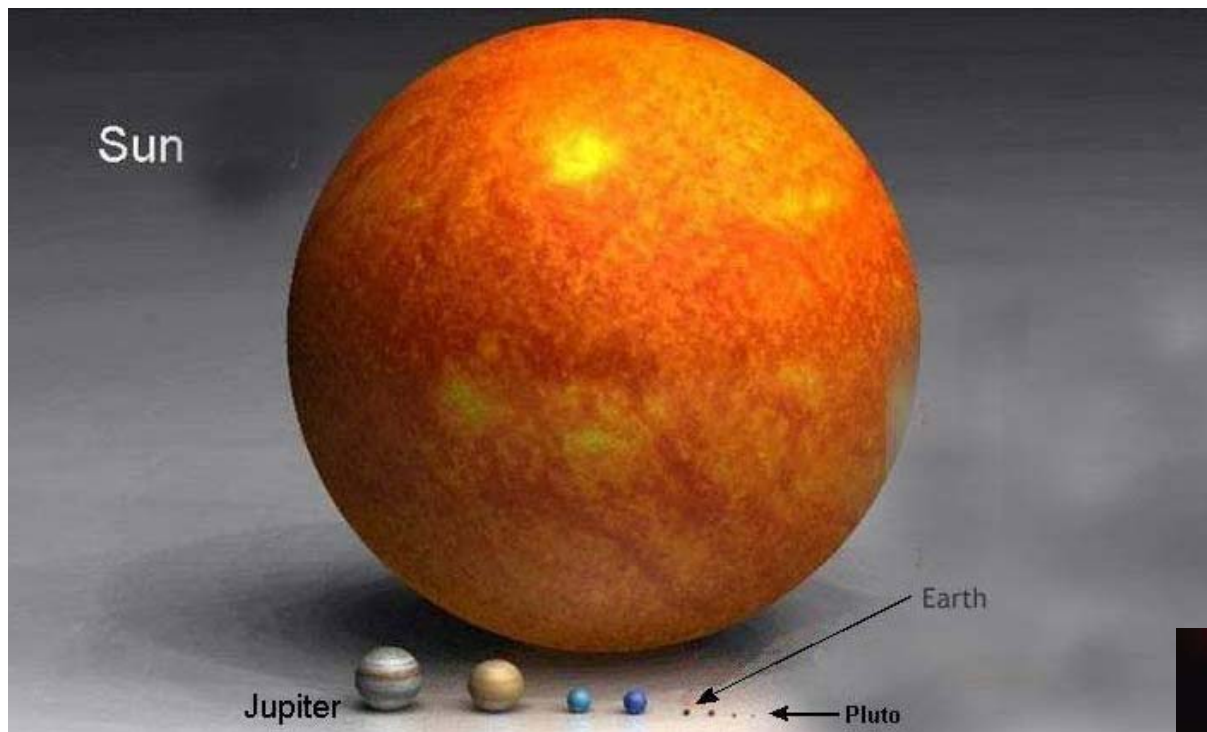


すばる望遠鏡



ケプラー衛星

「惑星」は、恒星と違い 生命の母体となりうる天体



太陽を周回（公転）する
太陽系内の惑星

木星質量～太陽質量/1000（大きさは約1/10）

地球質量～木星質量/300（大きさは約1/10）

惑星 ≡ 木星質量の10～30倍以下

かつ、恒星を周回

太陽のように自ら光る天体ではない（普通の言い方）
しかし、**赤外線では惑星も光っている**（ただし弱い ⇒ ）



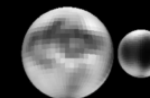
（左）可視光 （右）赤外線

太陽「系内」惑星：1995年までに知られていた惑星の「現在の分類」

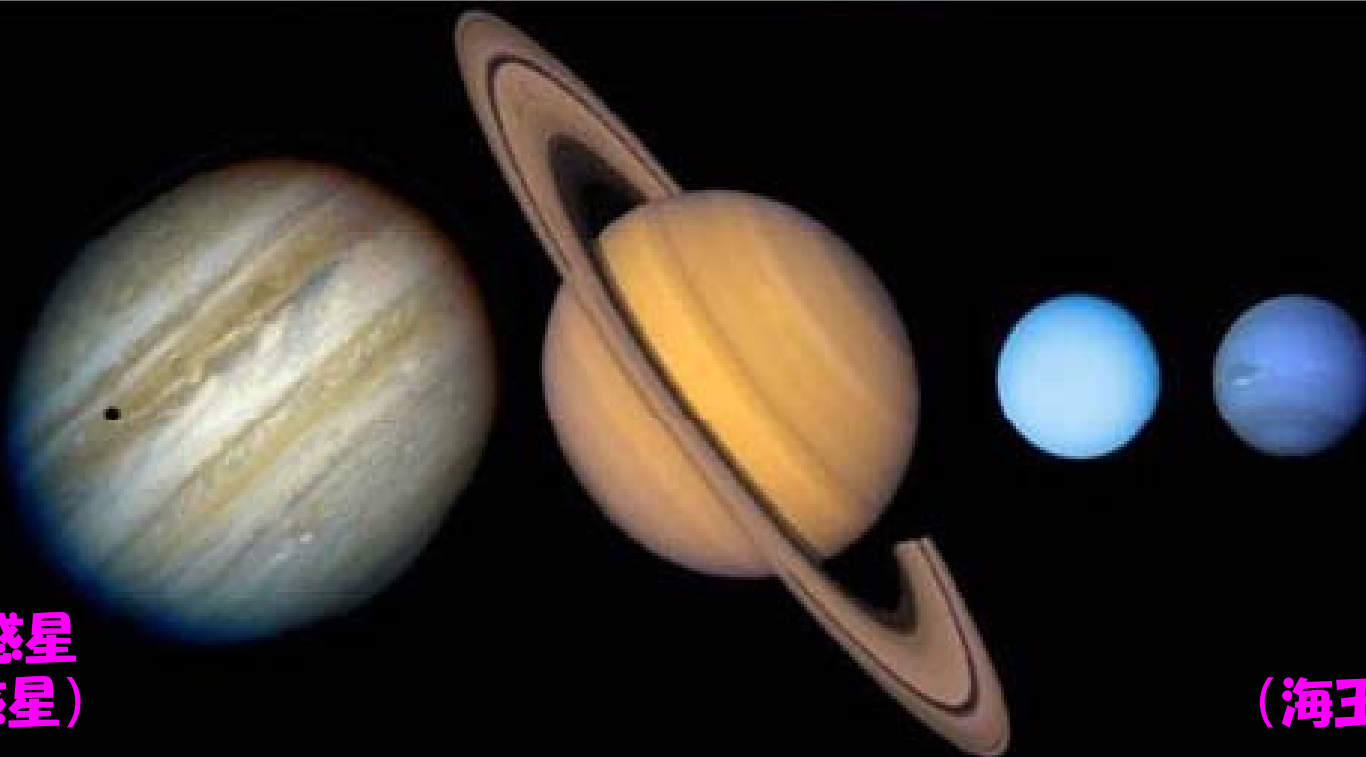


岩石惑星
(地球型惑星)
スケール10倍

準惑星



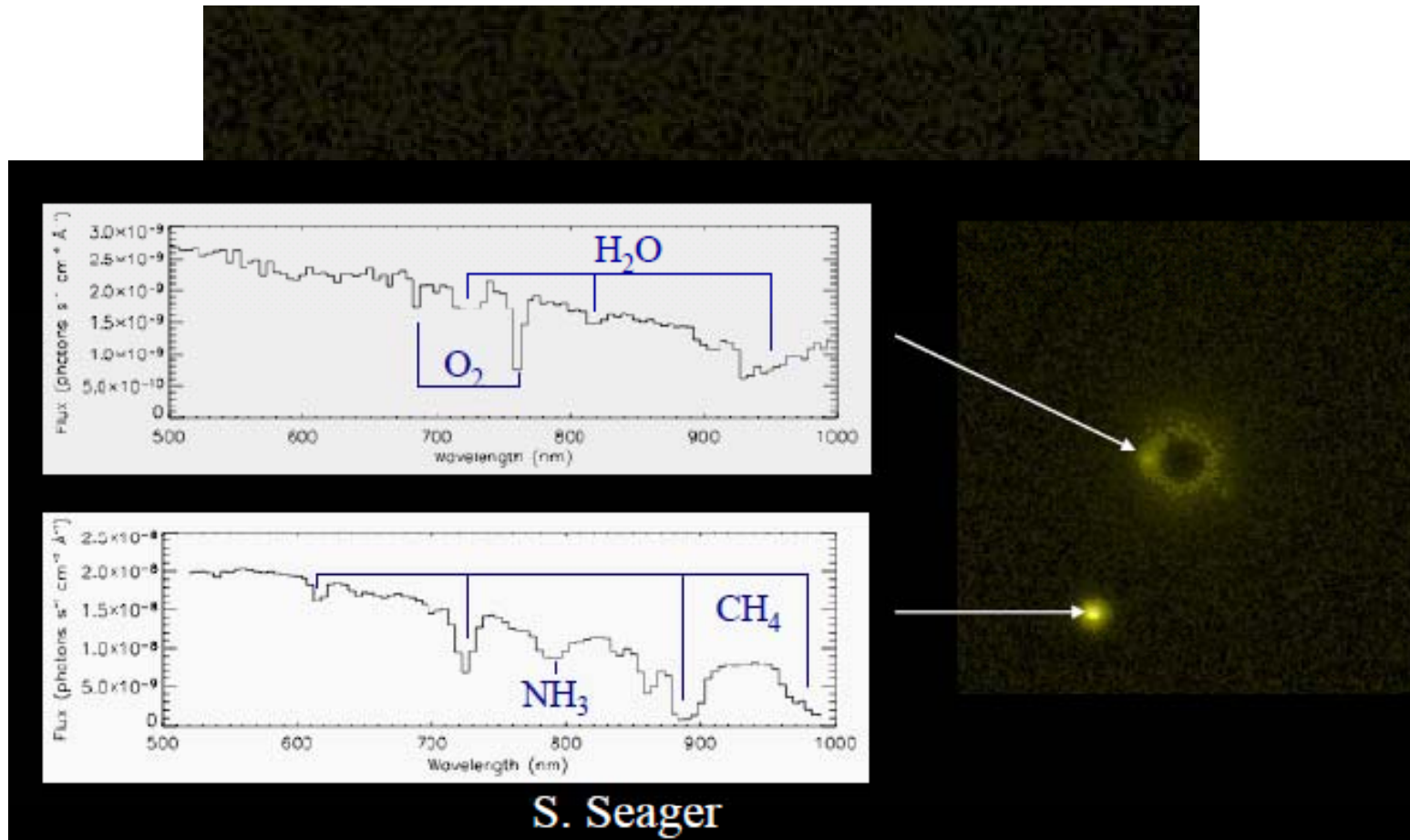
水金地火
木土天海
(冥)



巨大ガス惑星
(木星型惑星)

氷惑星
(海王星型惑星)

太陽系を5pcから直接観測 (オカルター)



← 10 arcseconds →

Simulation by Cash

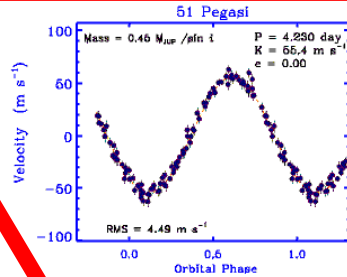
系外惑星検出方法

間接観測法

惑星からの光を直接見ているわけではない

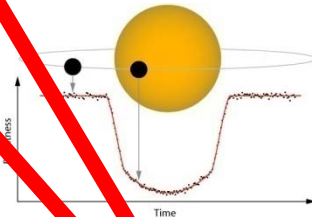
ドップラー法

惑星の公転運動による
恒星の**速度ふらつき**を
= 動径速度 (RV) 法 分光観測により検出



トランジット法

惑星が恒星の前面を
通過する際の**明るさの**
変化を検出 (食)

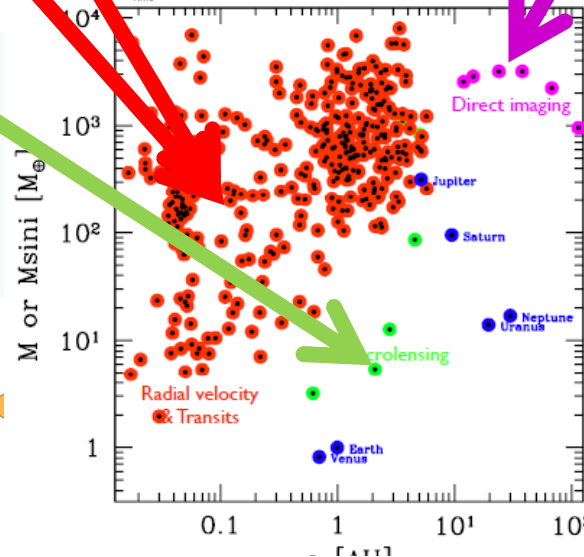


マイクロレンズ法

惑星を伴う恒星が背景の
恒星の近くを通過する際
の重力レンズ効果による
明るさの変化を検出

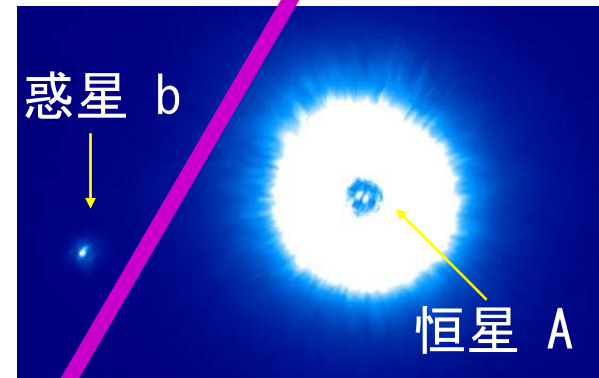
アストロメトリ法

惑星の公転運動による
恒星の**位置ふらつき**を検出



直接観測法

惑星と恒星を見分けて撮像する

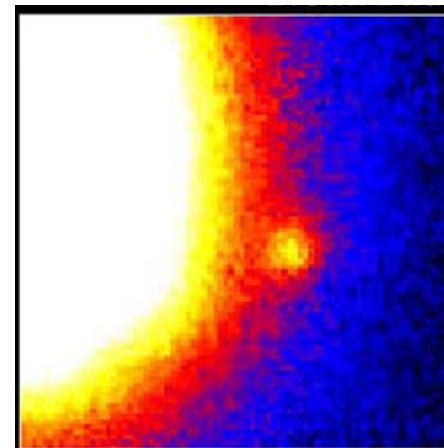
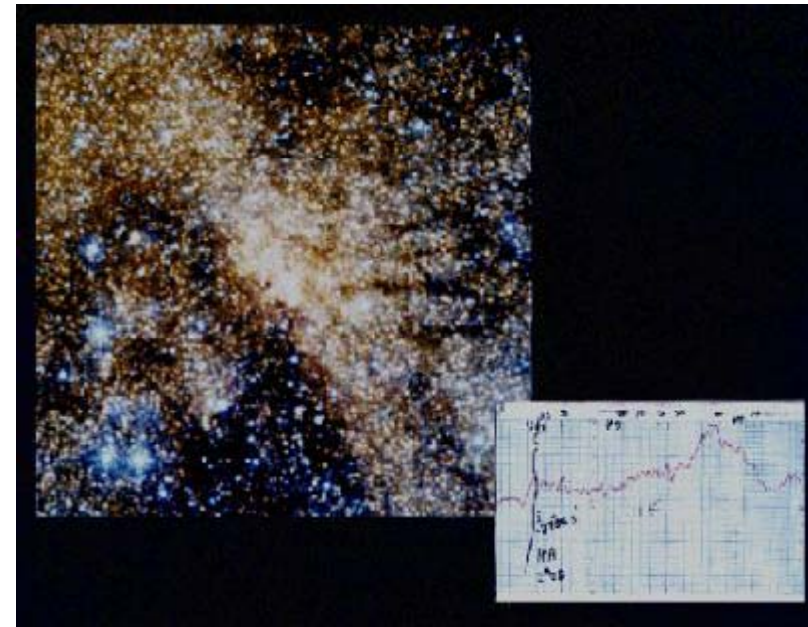


- 高解像度観測により、恒星と惑星を見分けて撮像
- 惑星からの放射を検出・撮像
- 恒星も惑星も点状天体として写る
- 究極の惑星観測法
- 2000年の時点では直接観測は未開拓+すばる完成

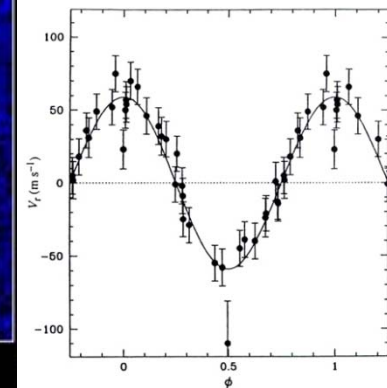
⇔ 手法の違いにより
観測されやすい惑星が異なる

70-90年の超低質量天体探査レース

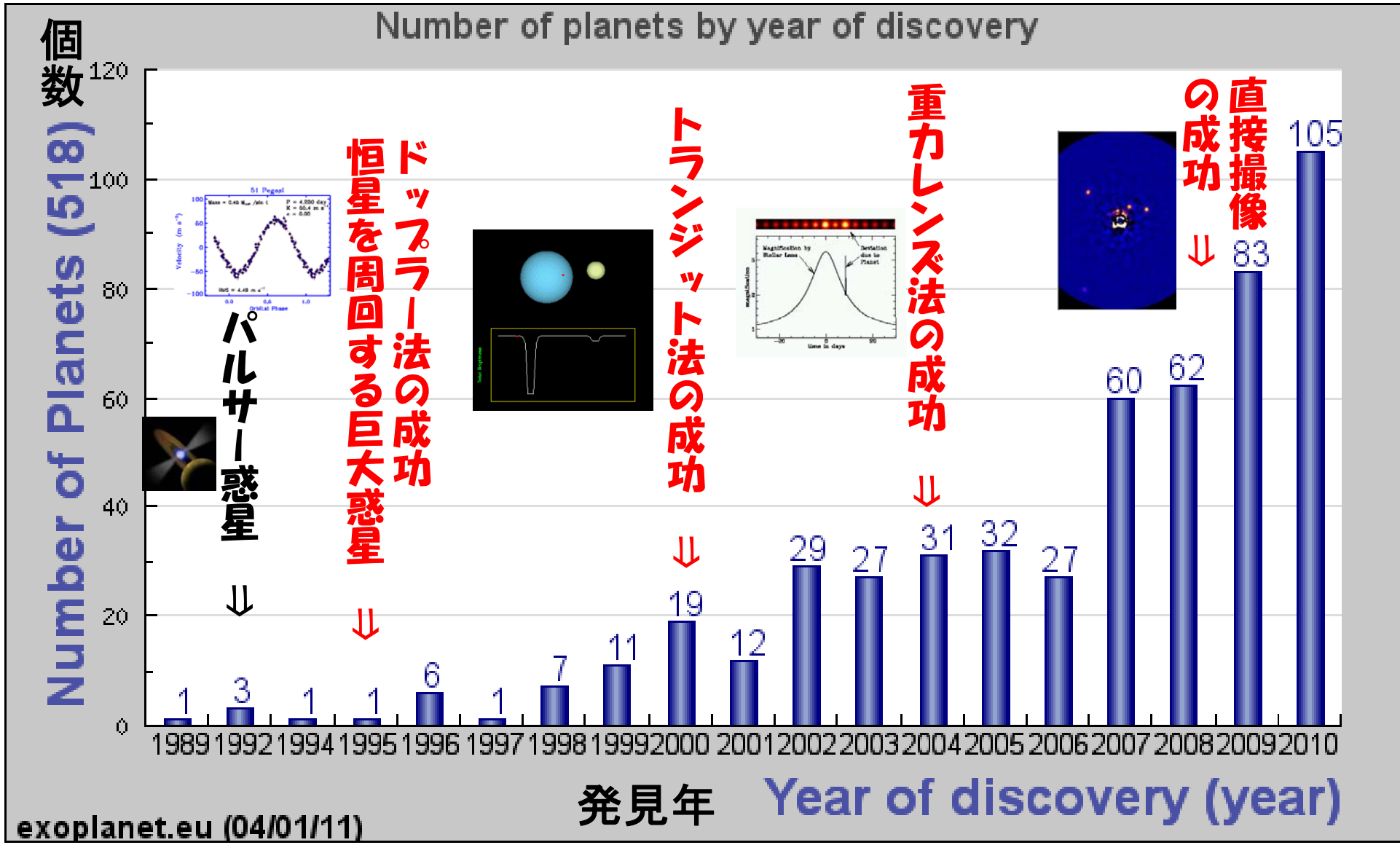
- 70年代からの探査競争
- 80年代の赤外線アレイの登場によって本格化
 - 0次元から2次元へjump
 - ポスドク時代 (1988-92)
- Becklin & Zuckerman (1988)
- Walker et al. (1995. 8)
- Rebolo et al. (1995. 9)
- Nakajima et al. (1995. 11)
- Mayor & Queloz (1995. 11)
- Tamura et al. (1998), Oasa et al. (1999); free floating planets (young)



Palomar Observatory
Discovery Image
October 27, 1994
PRC95-48 - ST Sci OPO - November 29, 1995
T. Nakajima and S. Kulkarni (CalTech), S. Durrance



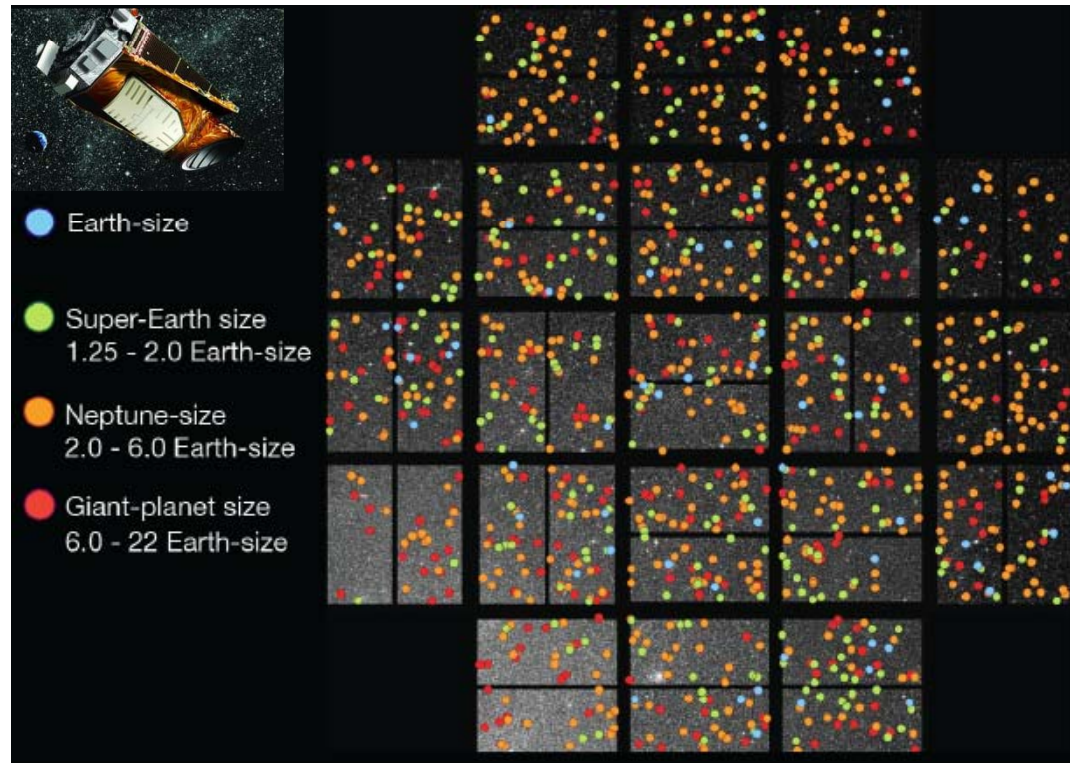
2010年までの15年間で500個を超えた系外惑星：年間報告100個の時代の到来



2011年：ケプラー衛星革命

合計約3000個の惑星+候補（ケプラー衛星だけで約2300個の候補）

個数
（前頁の1/30スケール）



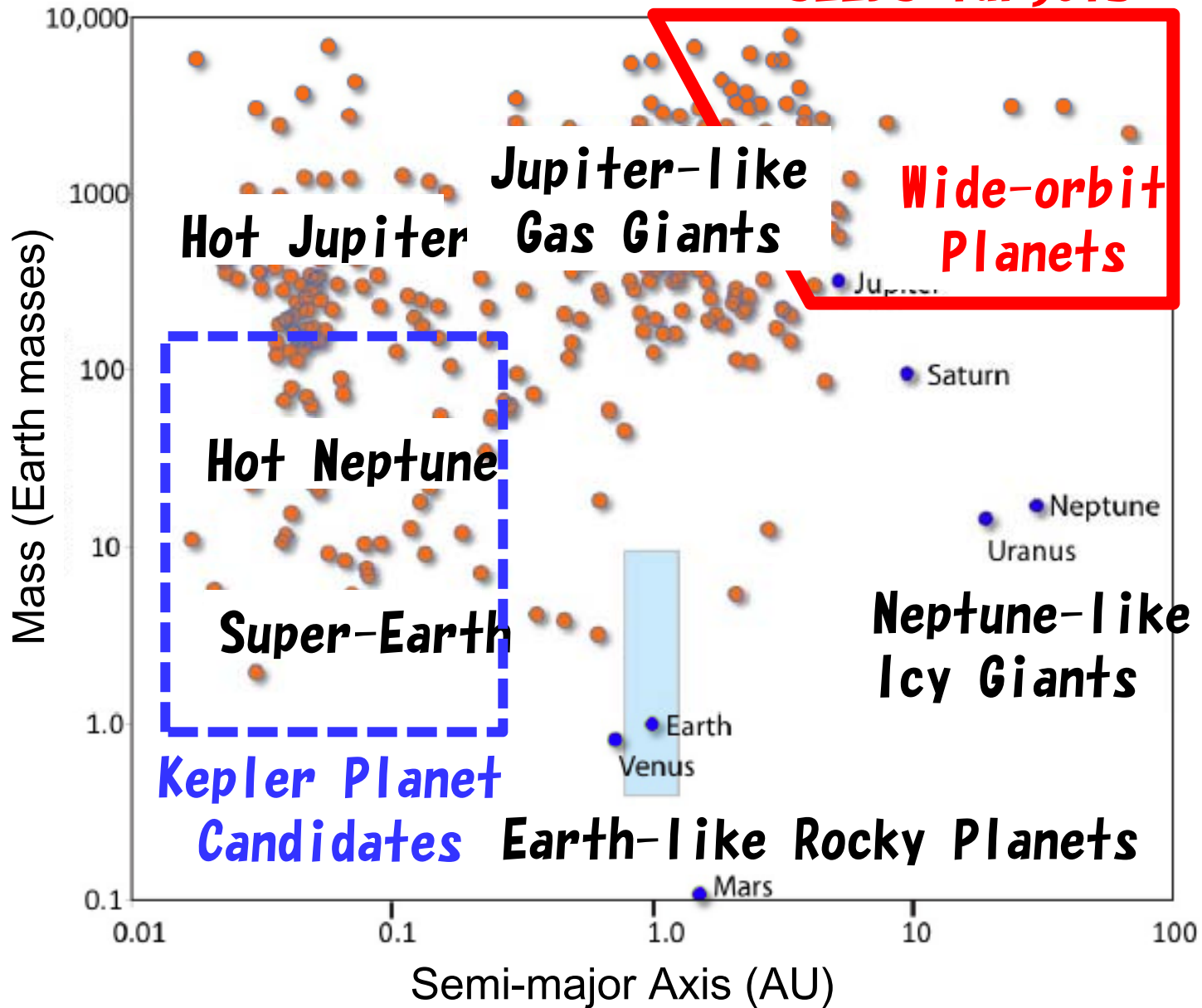
いっぽう、惑星形成理論は混沌の時代へ

2月に1235個、9月に546個、12月にも545個で、合計2326個。
HARPSも9月に新たに一度に約50個新惑星。合計で、ケプラー惑星以外に700個以上。

発見年 2011

系外惑星の多様性

SEEDS targets

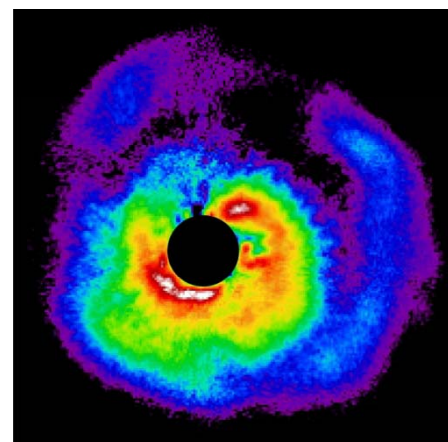
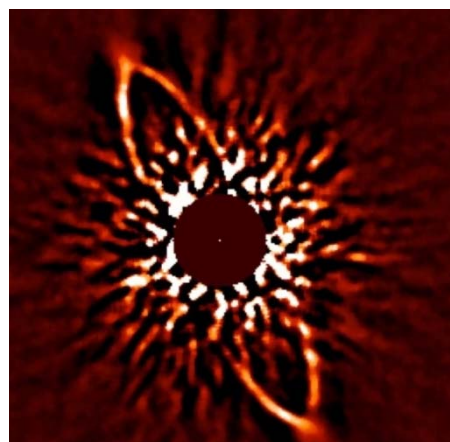
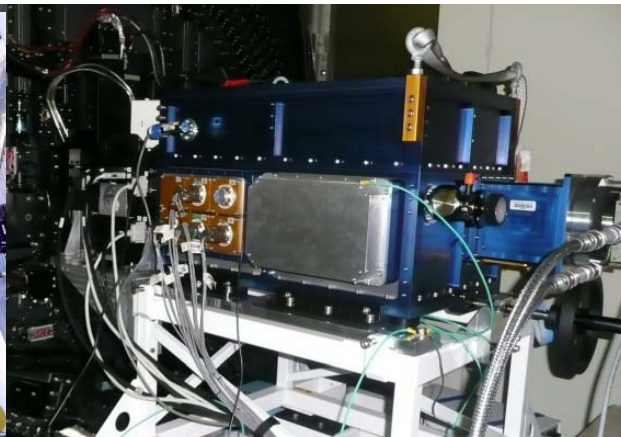
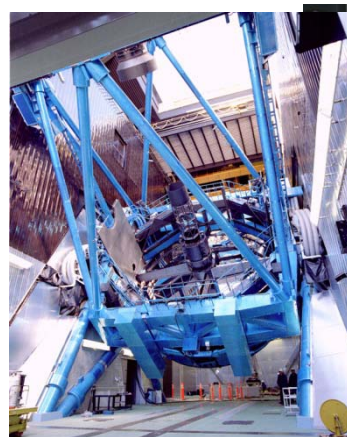
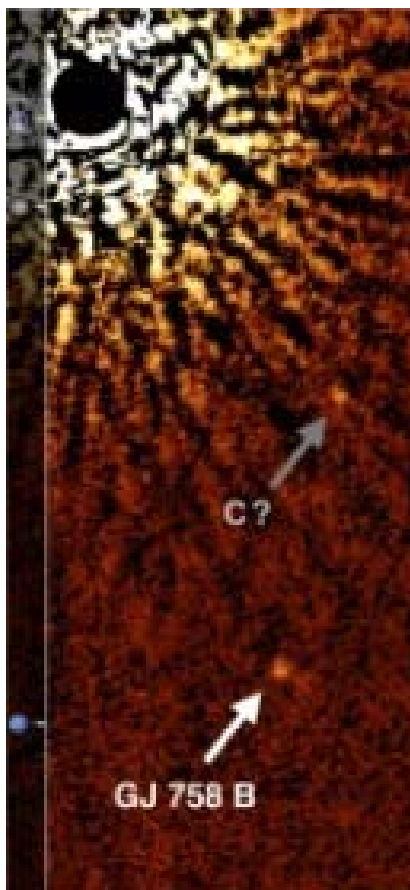


惑星を

写せ

すばる望遠鏡等では巨大惑星が 直接に画像に「写せる」！

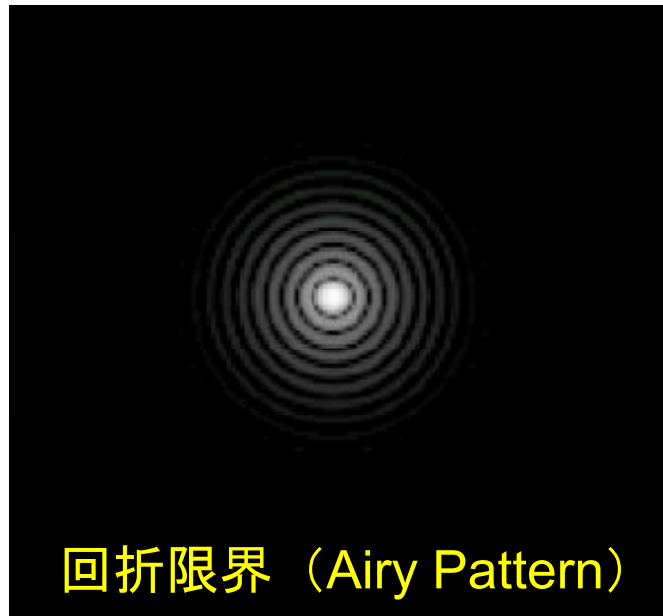
- 新装置：HiCIAO（ハイチャオ）
- 太陽に似た恒星のまわり
- 世界で最も軽い惑星も
- 惑星の誕生現場も写せる



系外惑星探査最前線

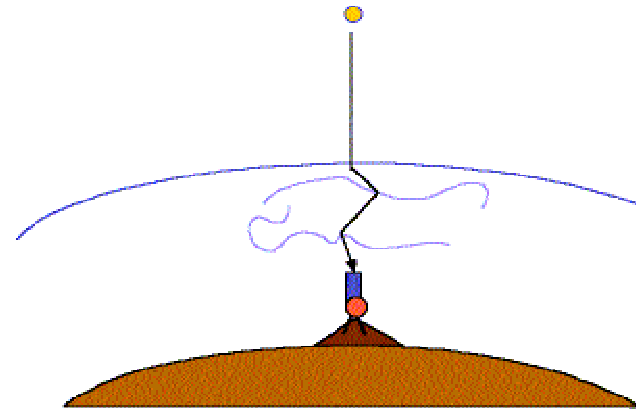
大気の揺らぎをリアルタイムで直す補償光学技術

大気の無い宇宙空間にある
望遠鏡で星を見た場合



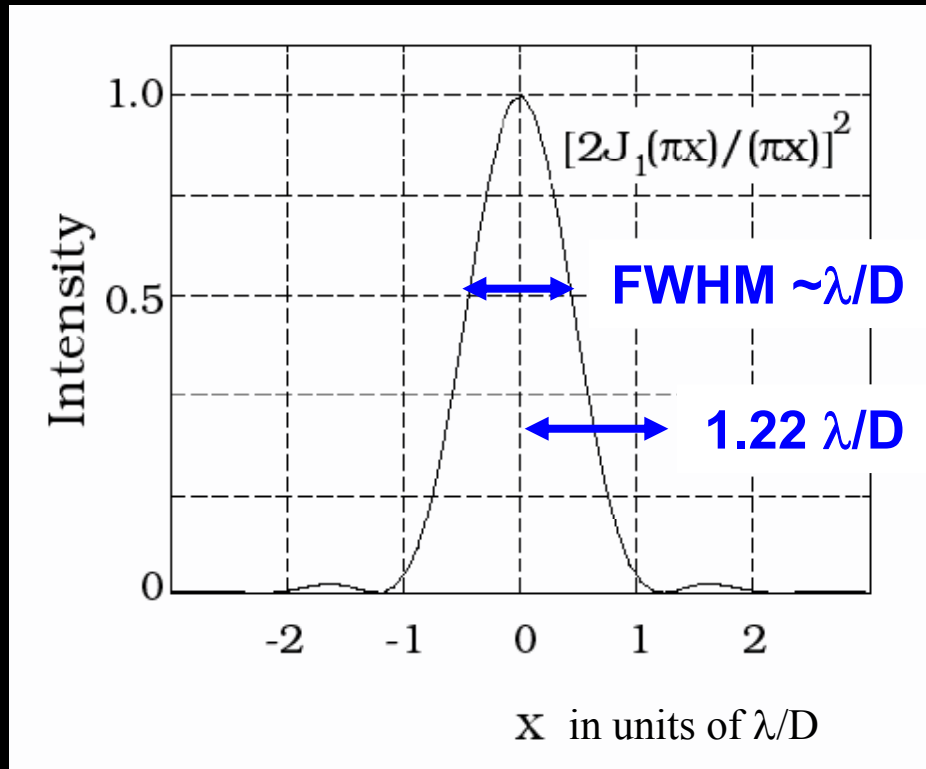
回折限界 (Airy Pattern)

地上の望遠鏡で星を見た場合



スペックル (Speckle)

完全な望遠鏡とそうでない場合

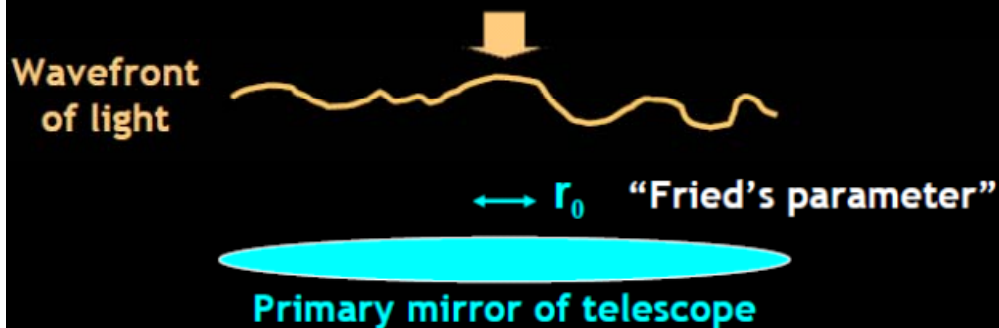


- 点源のPSF (Point Spread Function) の FWHMは回折限界の場合 $\theta \sim \lambda / D$ (次頁)

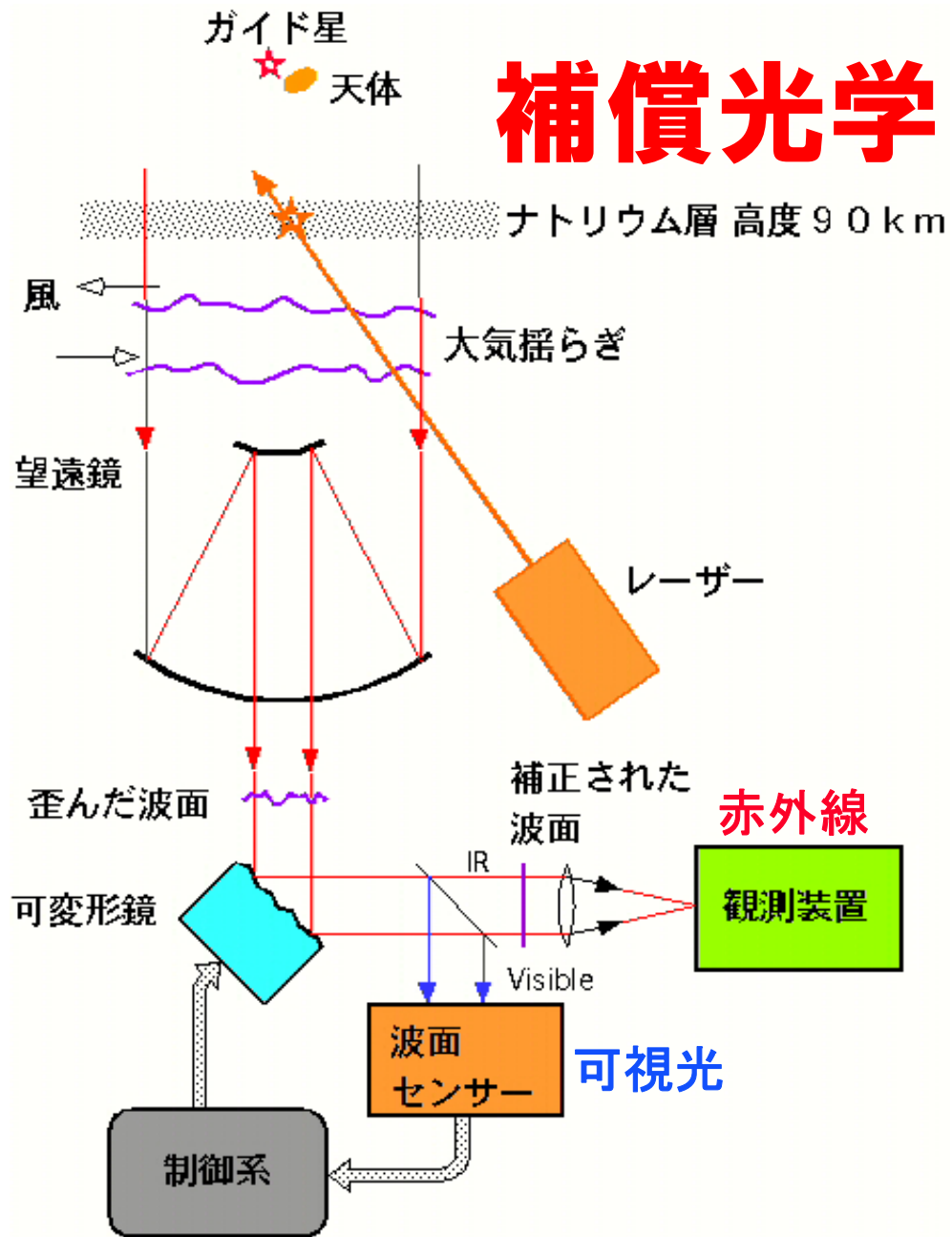
- たとえば $\lambda / D = 0.02 \text{ arcsec}$ for $\lambda = 1 \mu\text{m}, D = 10 \text{ m}$

コヒーレント長 r_0 : 光の位相ずれ平均自乗が1ラジアン²になる距離 ($r_0 \sim 15 - 30 \text{ cm}$; 良観測サイトの場合、フリードパラメータとも言う)

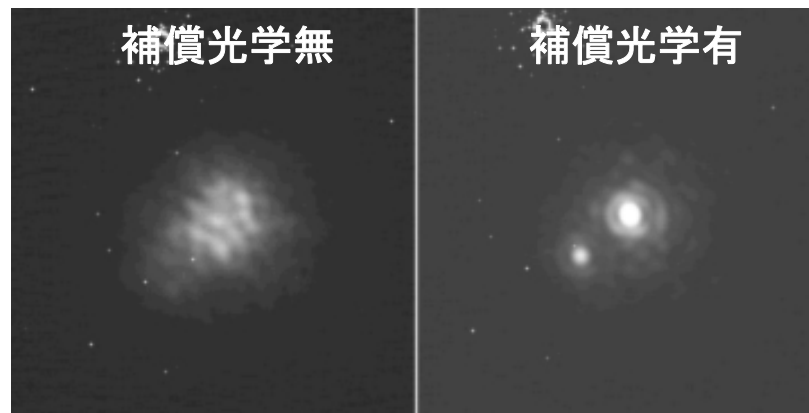
$r_0 = 10 \text{ cm} \Leftrightarrow \text{FWHM} = 1 \text{ arcsec}$
at $\lambda = 0.5 \mu\text{m}$
と覚えると良い



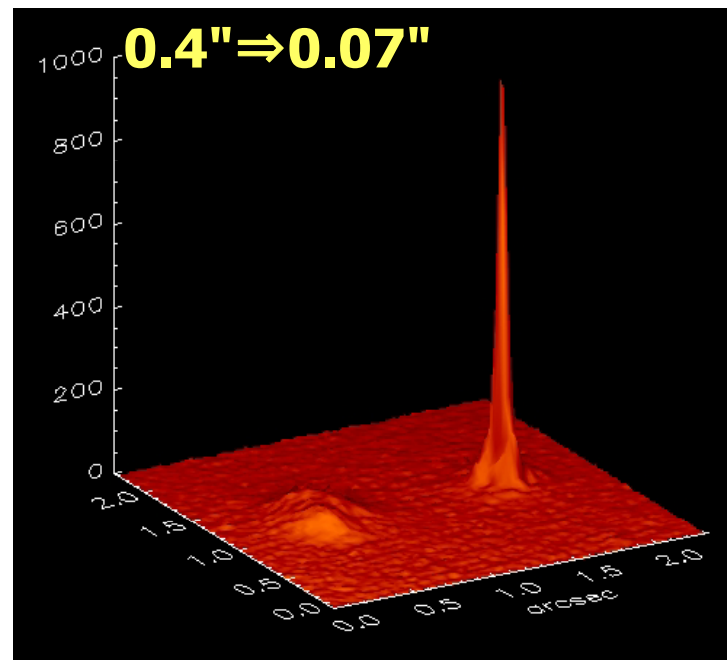
補償光学 (Adaptive Optics) の原理



補償光学系の概念図

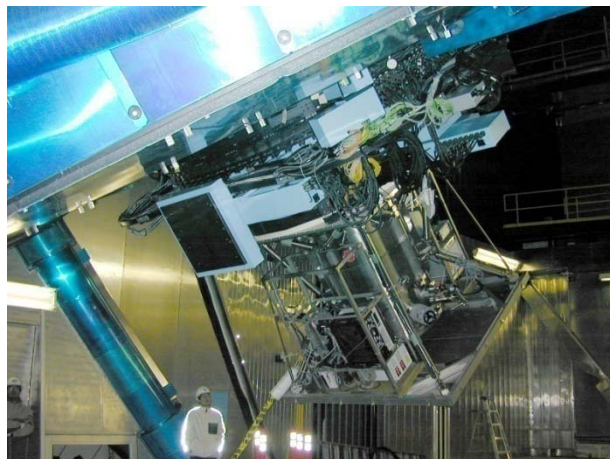
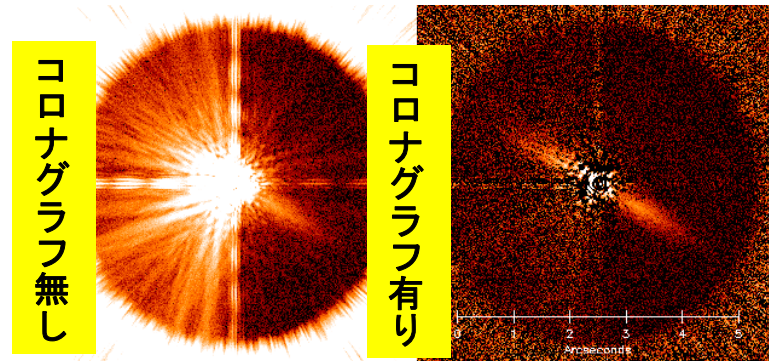


2重星BS1852の像改善 (0.3秒角離れている)

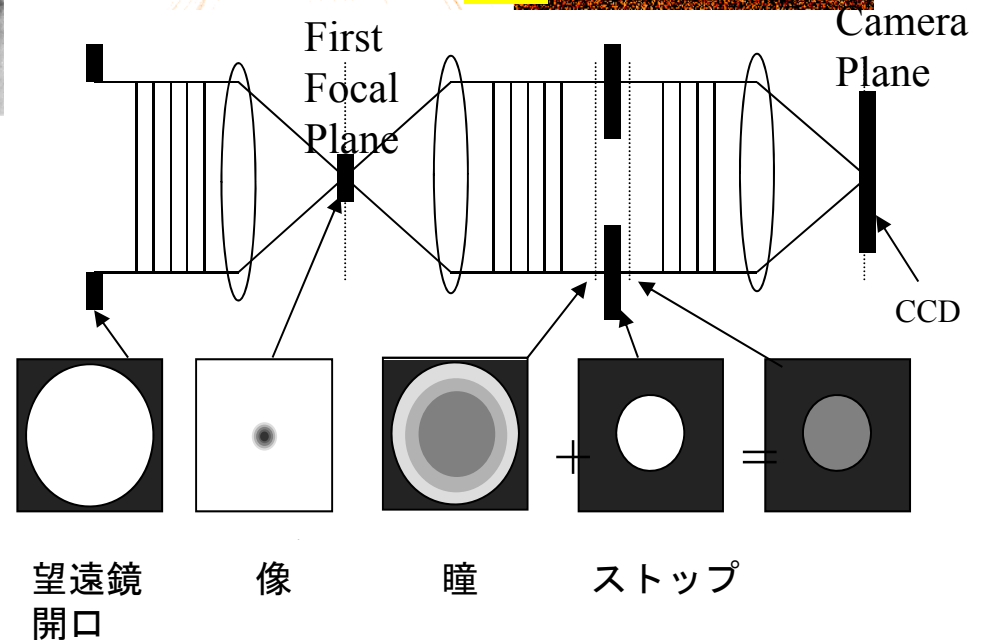


コロナグラフとは？

明るい天体の近くの暗い天体（円盤や惑星）を調べるための工夫 = 人工皆既恒星食



すばる望遠鏡用コロナグラフCIAO



コロナグラフ： ステラーコロナグラフの最初の成功例

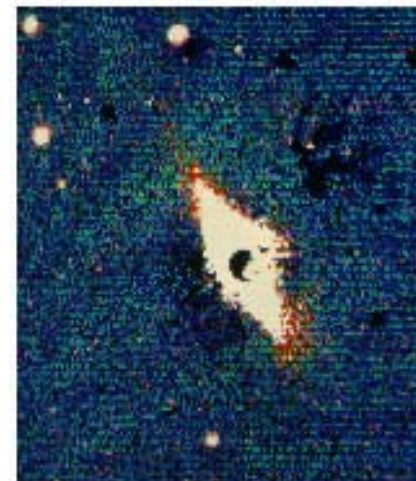
- β Picの円盤の発見 (Smith & Terrile 1984)

- Dupont 2.5m telescope at Las Campanus

- 0.89 μm

- Occulting mask=7" (100 λ /D)

- Science, 226, 1421



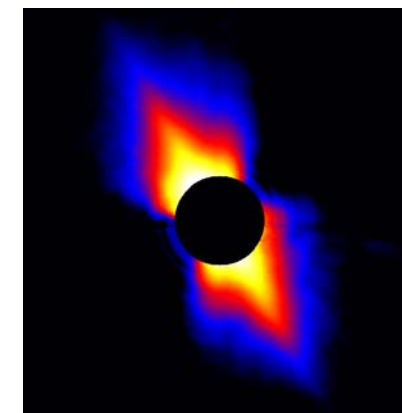
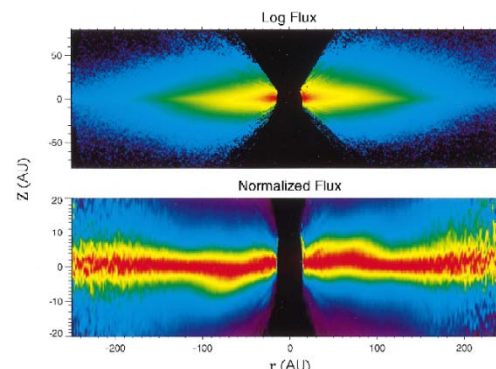
- Tip/Tilt利用コロナグラフ (Golimowski et al. 1992)

- ~5" mask

- スペースコロナグラフの利用

- HST, Heap et al. 2000

- 1" wedge

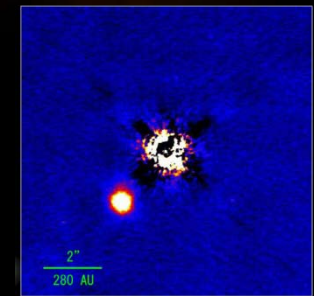
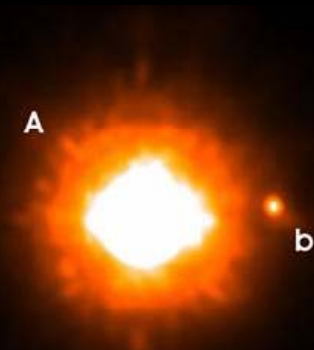


Declination=-51° , V~K~3.5mag, d=19pc, t~20Myr

直接観測の第一の波

2004–2005年頃の直接観測手法の展開の例
として巨大惑星候補の直接撮像に関する代
表的3論文

- Evidence for a co-moving sub-stellar companion of GQ Lup
by Neuhäuser, Guenther, Wuchterl et al. 2005
- A Young Brown Dwarf Companion to DH Tauri
By Itoh, Hayashi, Tamura et al. 2005
⇒共に、遠方にある巨大惑星候補
- A giant planet candidate near a young brown dwarf
by Chauvin, Lagrange, Dumas et al. 2004
⇒褐色矮星の二重星の一種？



2MASSWJ1207334-393254



系外惑星探査最前線

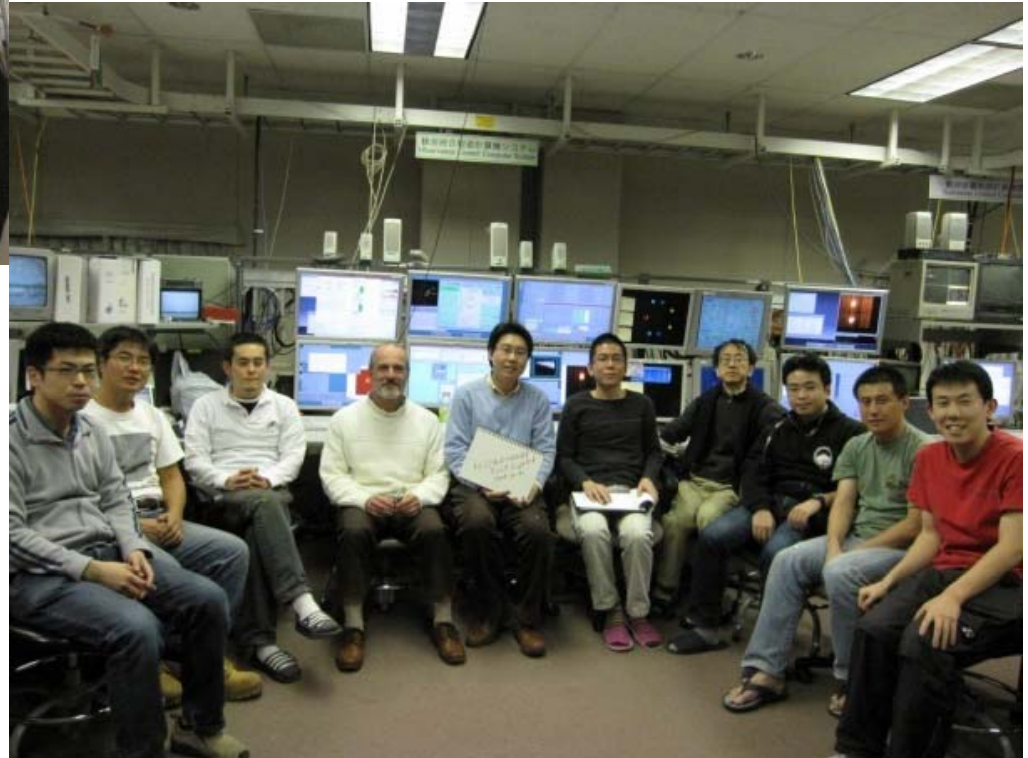
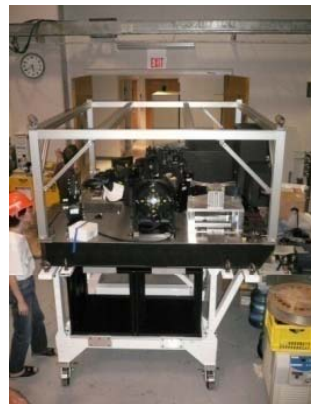
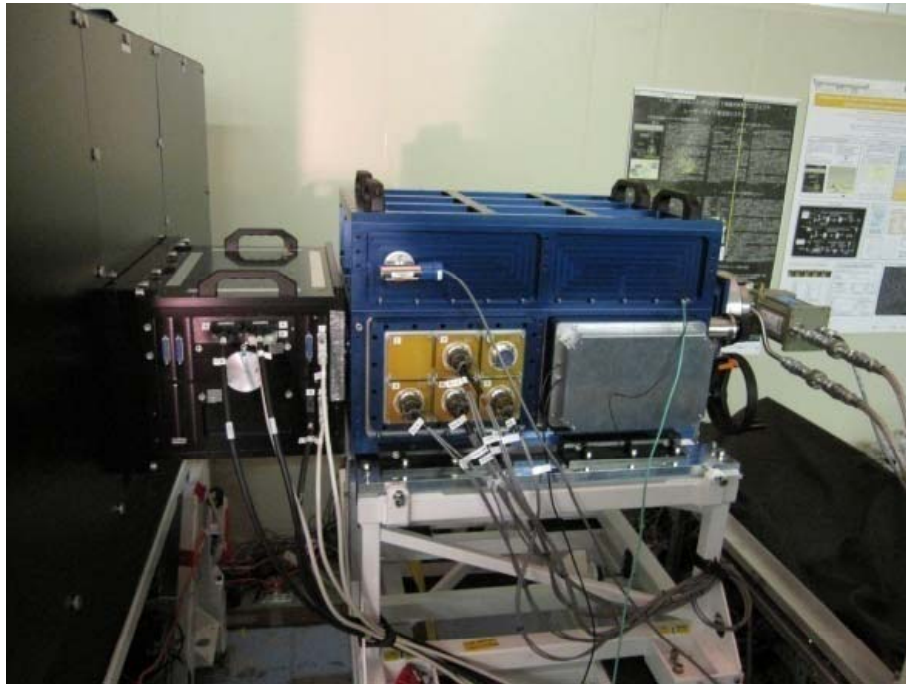
HiCIAO (ハイチャオ) 新コロナグラフ装置完成 (2005-2009)

CIAO (チャオ; 2000-) の後継機

望遠鏡は進化する

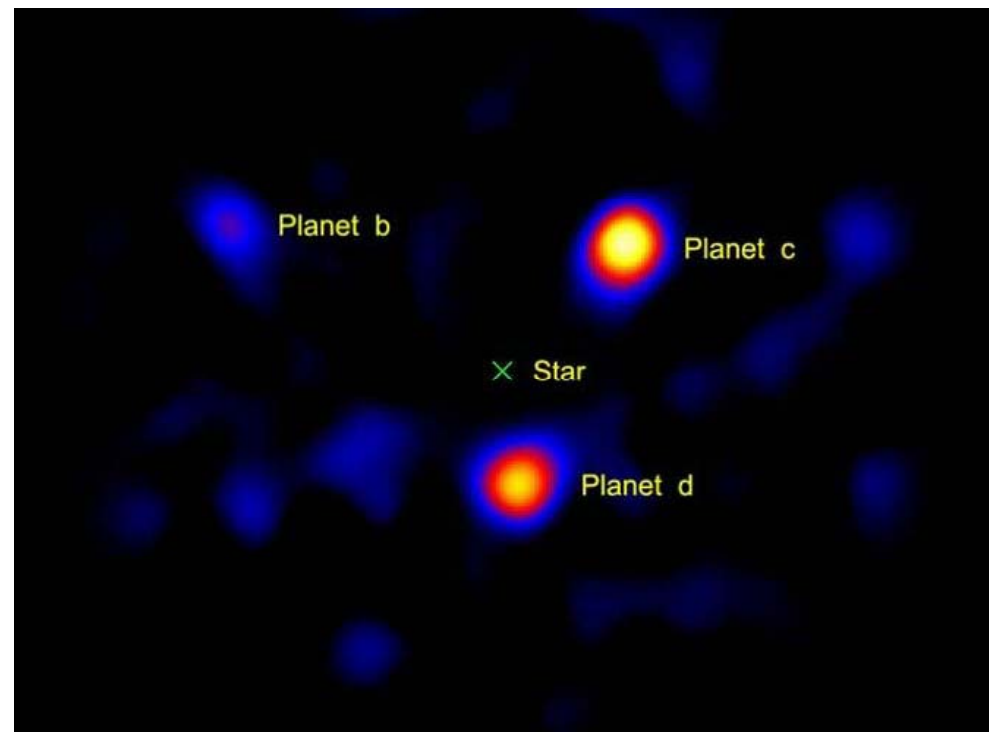
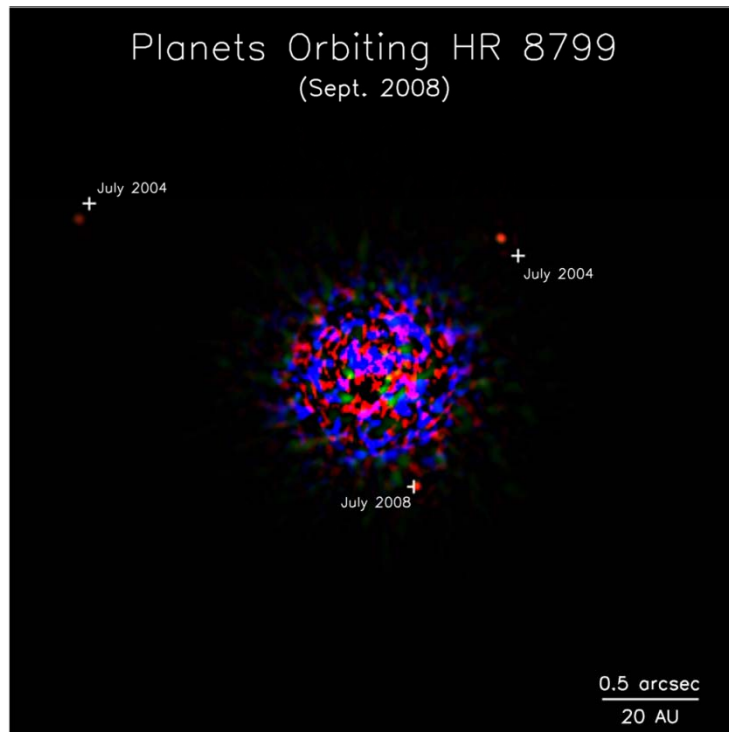
⇒

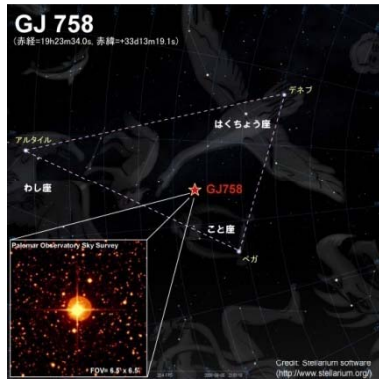
- ・ パロマー5m望遠鏡は60年以上
- ・ 観測装置の不断の開発がカギ



直接観測の第二の波：HR 8799

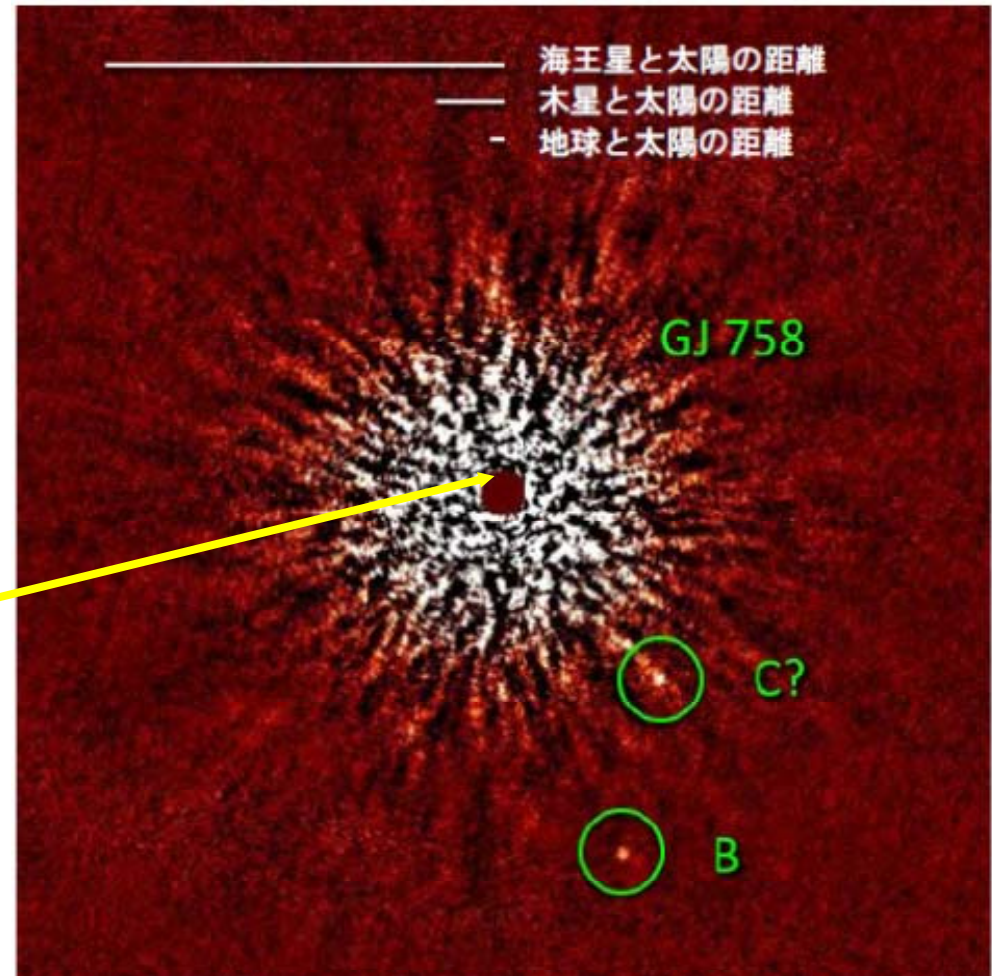
- A5V, 1.5Mo V=6.0 mag; Vega型星
- 39.4pc, 0.06Gyr
- HR8799 bcd (Marois+2008)
- Gemini/Keck imaging (Keck data in 2007)
- 2002: Subaru/CIAO detected HR 8799 b (Fukagawa+2009)
- 1998: HST/NICMOS detected HR 8799 b (Lafrenie+2009)





太陽型の恒星をめぐる 惑星候補を初撮像

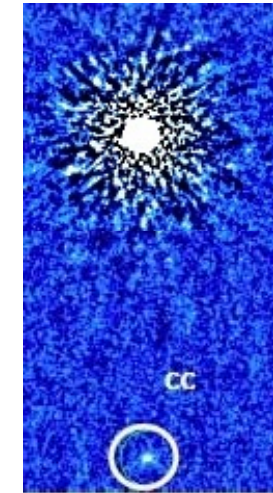
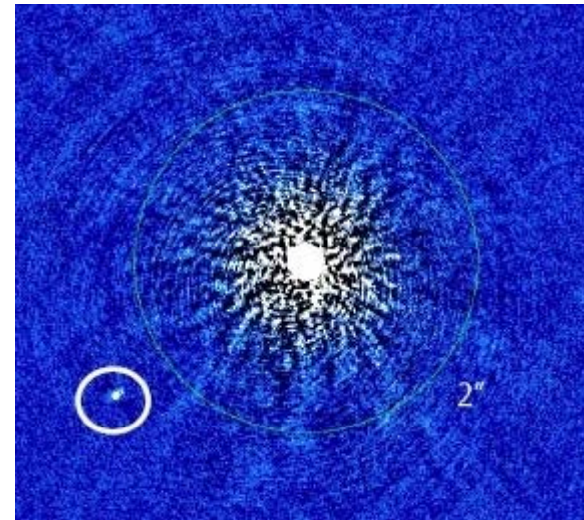
- こと座の方向
- 距離：50光年
- G9型恒星
 - 可視光で6等星
 - 質量：0.97太陽質量
 - 太陽型星
- 明るい中心星の影響を抑える観測およびデータ解析法を駆使
- 2009+2010年に出版
 - 中心付近の白黒の斑点は除去しきれないノイズ (スペckルノイズ)



惑星の放つ熱が波長1.6ミクロンの赤外線として見えている（反射光ではない）
また、白が明るく、黒が暗い意味の色（実際の色ではない）

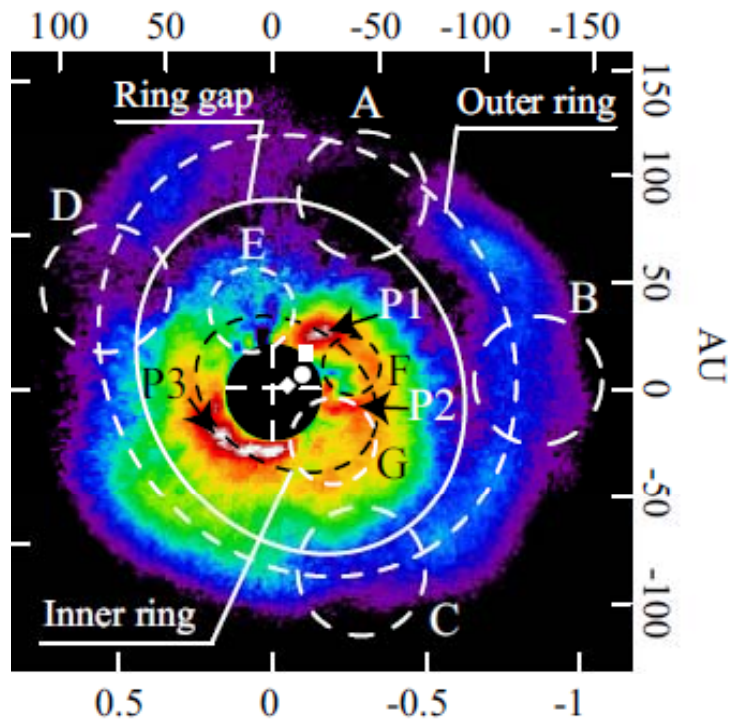
直接観測の第三の波：現在

- SEEDSプロジェクト
- 観測対象
 - 太陽近傍の若い恒星
 - 距離:70光年
 - 年齢:約1億年
 - 散開星団
 - プレアデス
 - 非常に若い星団
- 最有力候補
 - 3木星質量@海王星軌道、あらゆる直接法で最小質量惑星！

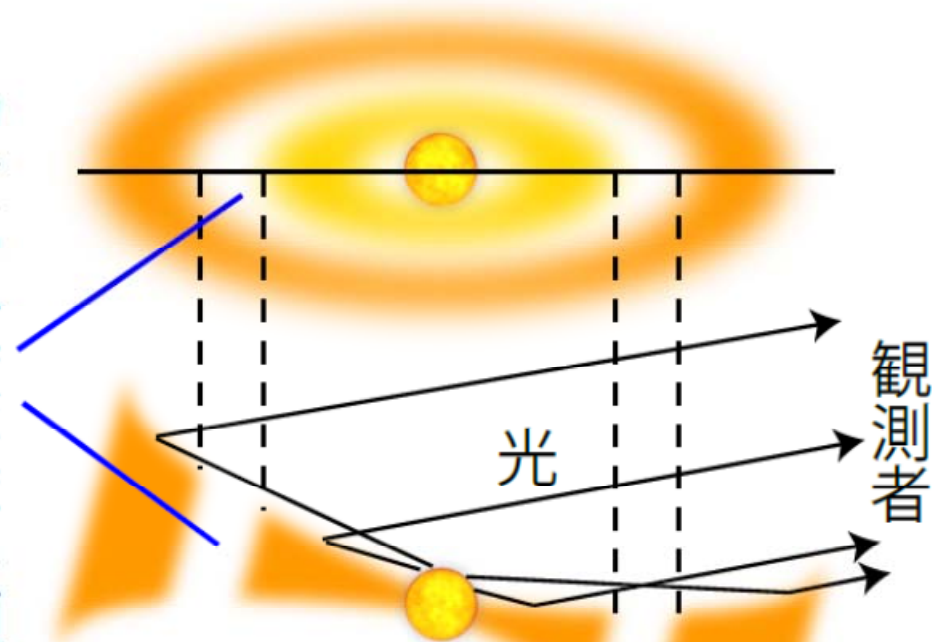


HiCIAOは、現在、惑星誕生現場の最も 詳細な構造を調べることの出来るツール

- ぎよしゃ座AB星の最も高解像度、高コントラスト画像
 - 4Myr, 2.4Mo, 144pc
- Hashimoto+11 の観測（近赤外線）で見えている部分
 - 円盤自身の輝きは近赤外線では微弱
 - 円盤表面に反射した恒星の光を偏光撮像観測



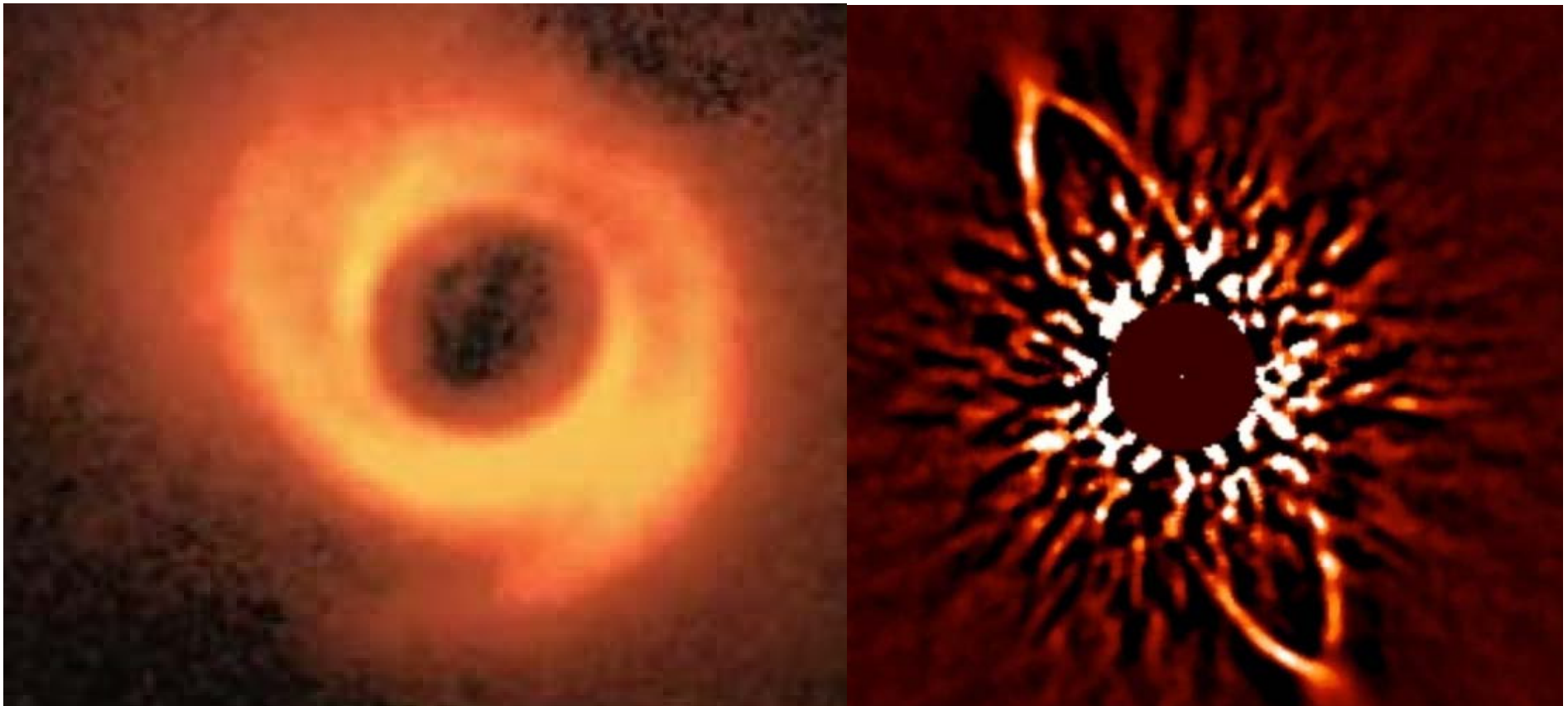
物質の密度が薄い領域



円盤詳細構造 ⇒ 惑星存在の証拠

20個程度の新しい円盤構造を発見

- 海王星の内側にギャップや溝構造があることは普通のような
- やはり、惑星が生まれていることの証拠だろう
- わずか100万年で惑星が生まれる？（定説は1000万年以上必要）



**地球型惑星
を探索**

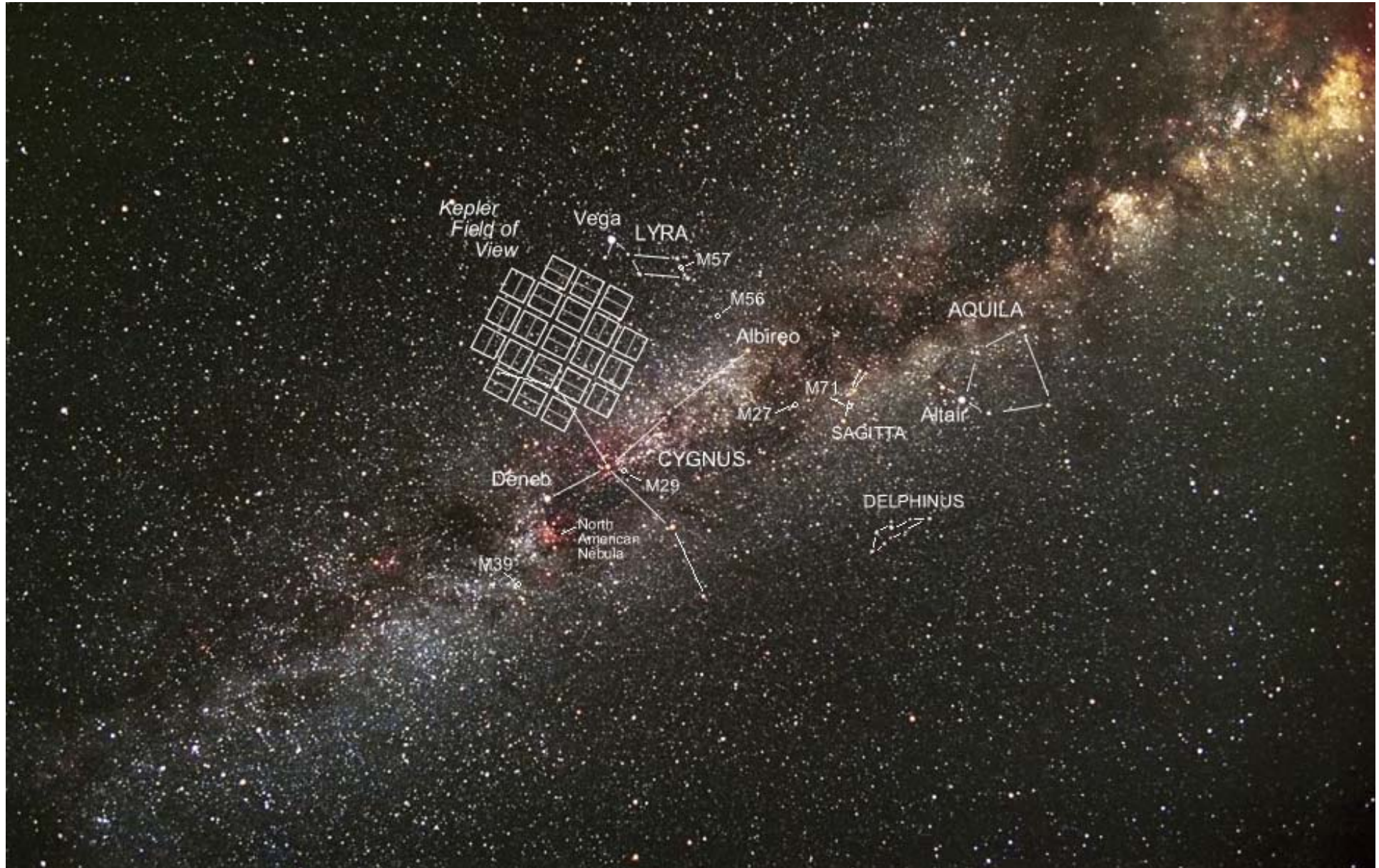
ケプラーミッション

- NASA初の系外惑星観測専用の宇宙望遠鏡計画
- 太陽-地球のような惑星系の発見が目標
- 白鳥座付近の15万個以上の主系列星を3.5年以上にわたってモニターし続ける
- 95cm望遠鏡とCCD 42個によるトランジット惑星探査
- 2009年3月7日に打ち上げ



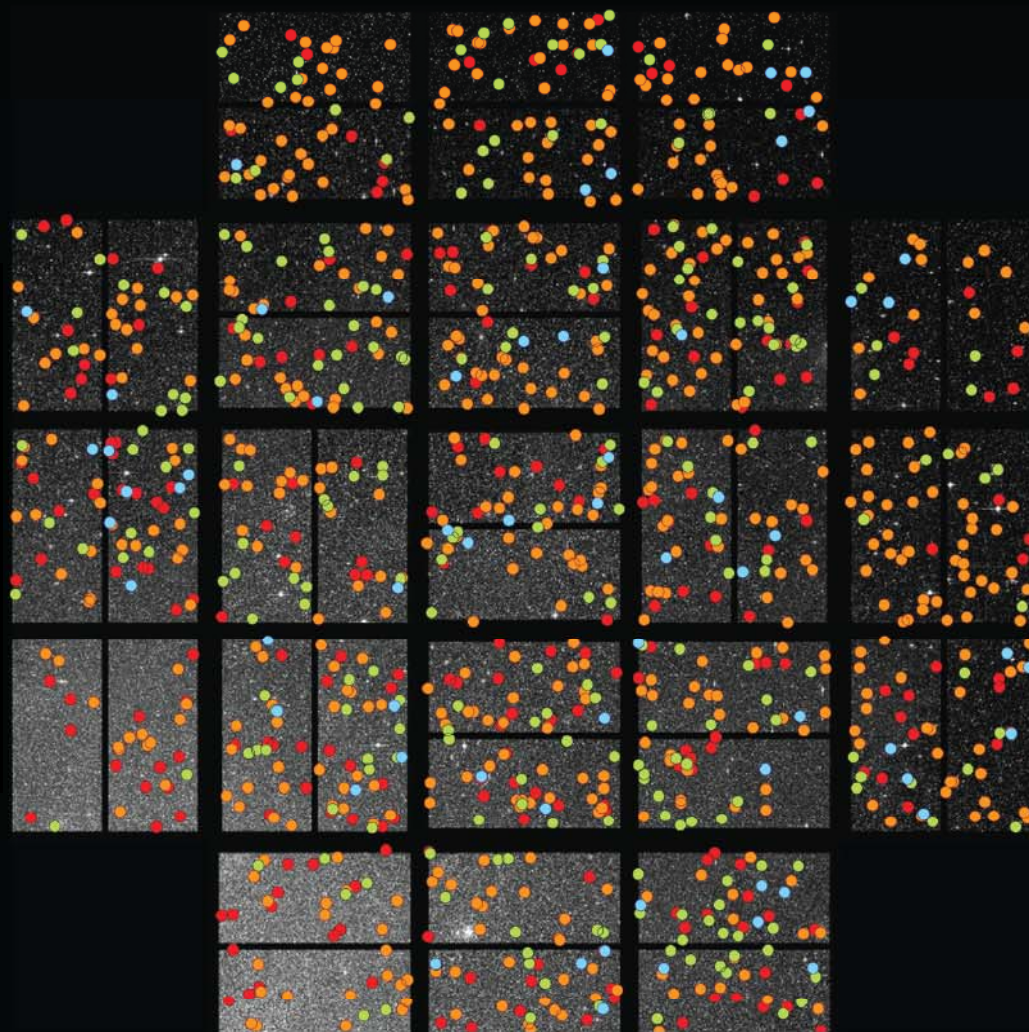
Kepler 打ち上げの様子

ケプラーの観測領域



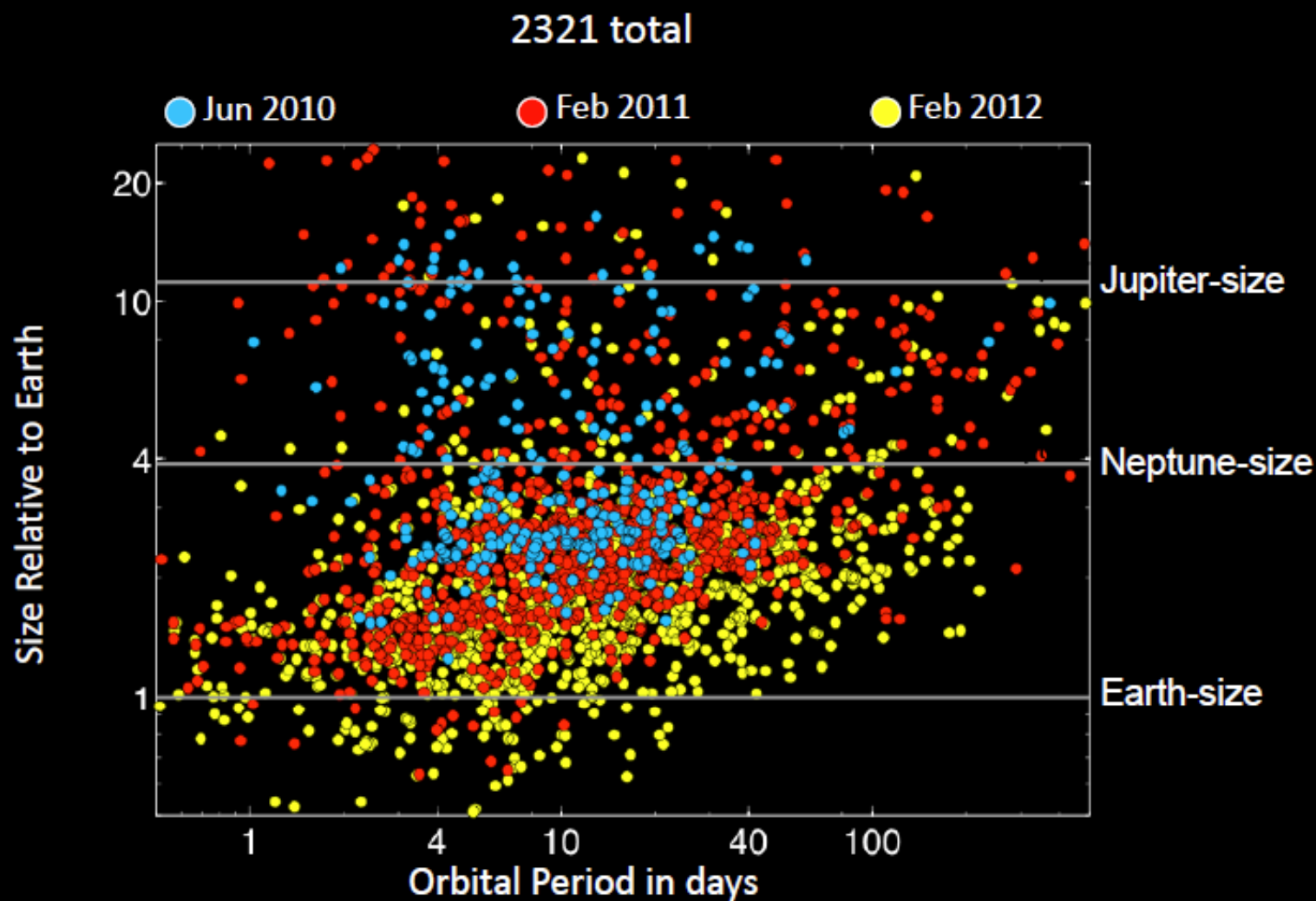
Keplerが最初の4か月で発見した惑星候補

- 地球サイズ
- スーパーアース
- 海王星サイズ
- 木星サイズ



1235個の惑星候補の発見

Keplerが2012年2月までに公表した惑星候補



2321個の惑星候補の発見

ケプラー衛星が発見した地球型惑星 (2012.2まで)

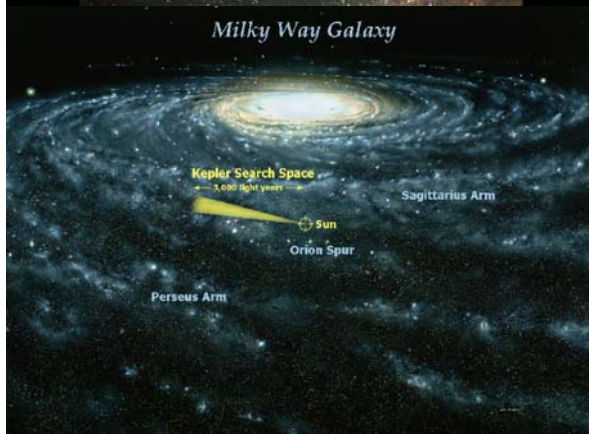
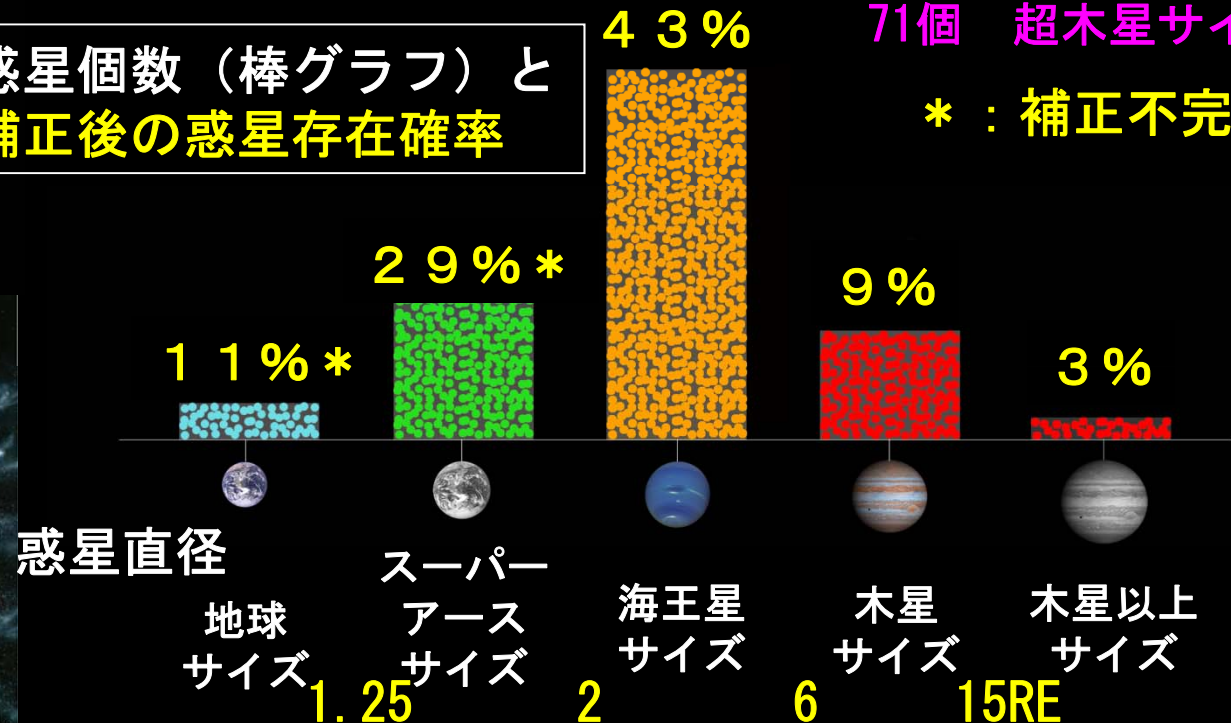
- ❁ 2321個の惑星候補。
- ❁ 48個がハビタブルゾーンにある。
- ❁ 何らかの惑星存在率=34%。

惑星候補の個数

246個	地球サイズ	1118個	海王星サイズ
676個	スーパーアースサイズ	210個	木星サイズ
		71個	超木星サイズ

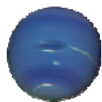
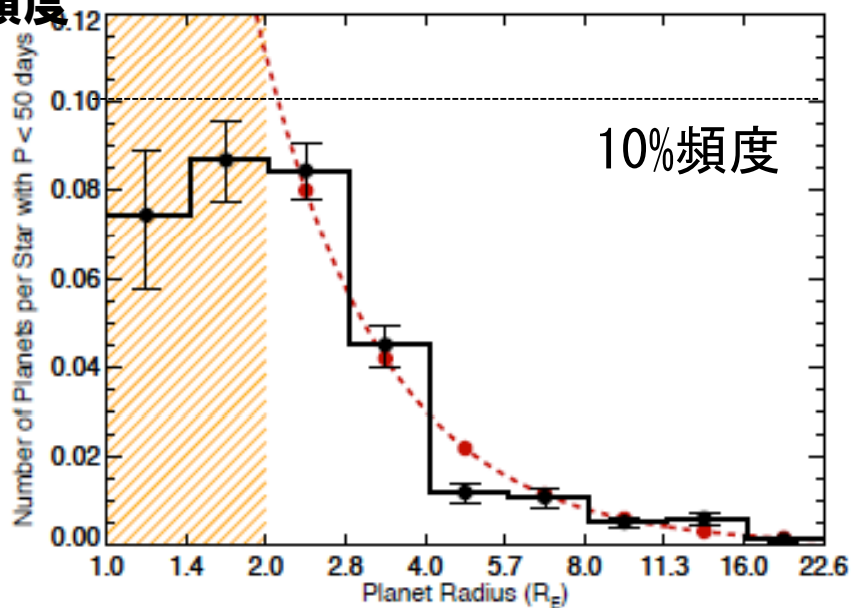
* : 補正不完全

惑星個数 (棒グラフ) と
補正後の惑星存在確率



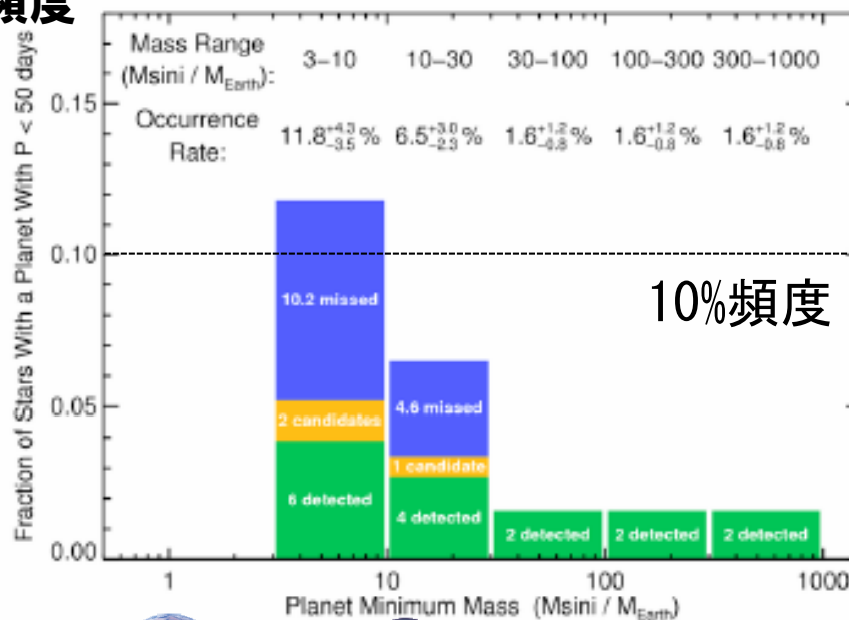
トランジット法とドップラー法の結果の比較

惑星頻度
トランジット法 (ケプラー衛星)
Howard et al. 2011c, ApJ submitted, arXiv:1103.2541



惑星半径

惑星頻度
ドップラー法 (ケック望遠鏡)
Howard et al. 2010, Science, 330, 653



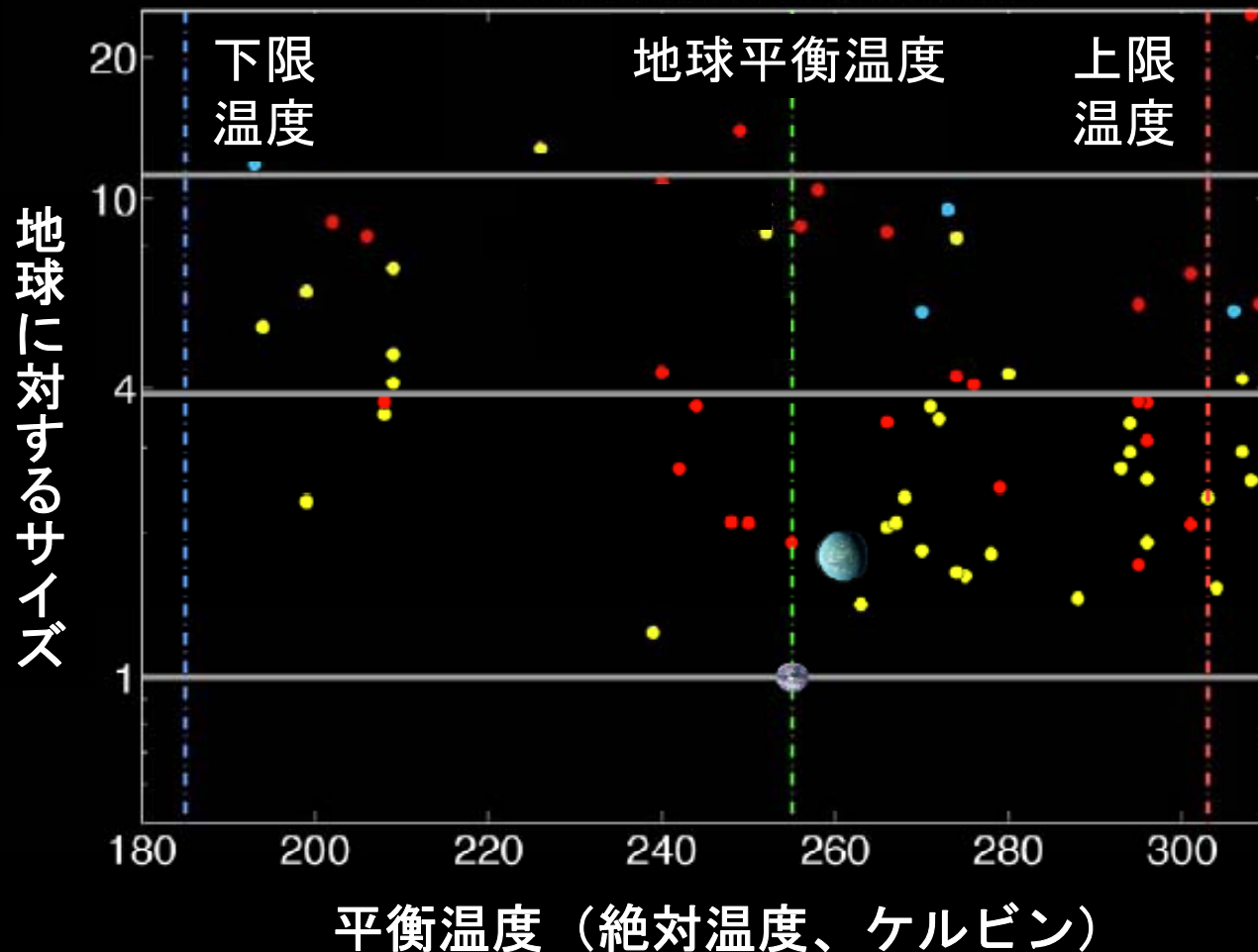
惑星質量

- 独立な2つの手法で、木星型・海王星型までの惑星頻度を決定
- 軽い惑星ほど急に数が増える傾向
- 海王星の数 = 木星の数の約5倍
- 1地球まではまだ未決着だが、さらに多い可能性が高い

ハビタブル領域にある惑星

ハビタブル領域 = 惑星表面で水が上達しないし凍らない領域

● Jun 2010 ● Feb 2011 ● Dec 2011



約50個の
ハビタブル惑星
(重いものも含む)

Kepler-22b: ハビタブル惑星

- 主星: ほぼ太陽と同じ性質、ただし、620光年も先にある恒星
- 惑星: 2.4 地球半径、軌道半径 0.85AU、公転周期 290日

Kepler-22 系

太陽系

水が本当にあるかどうかの確認は遠すぎてまだできない

ハビタブル領域

想像図

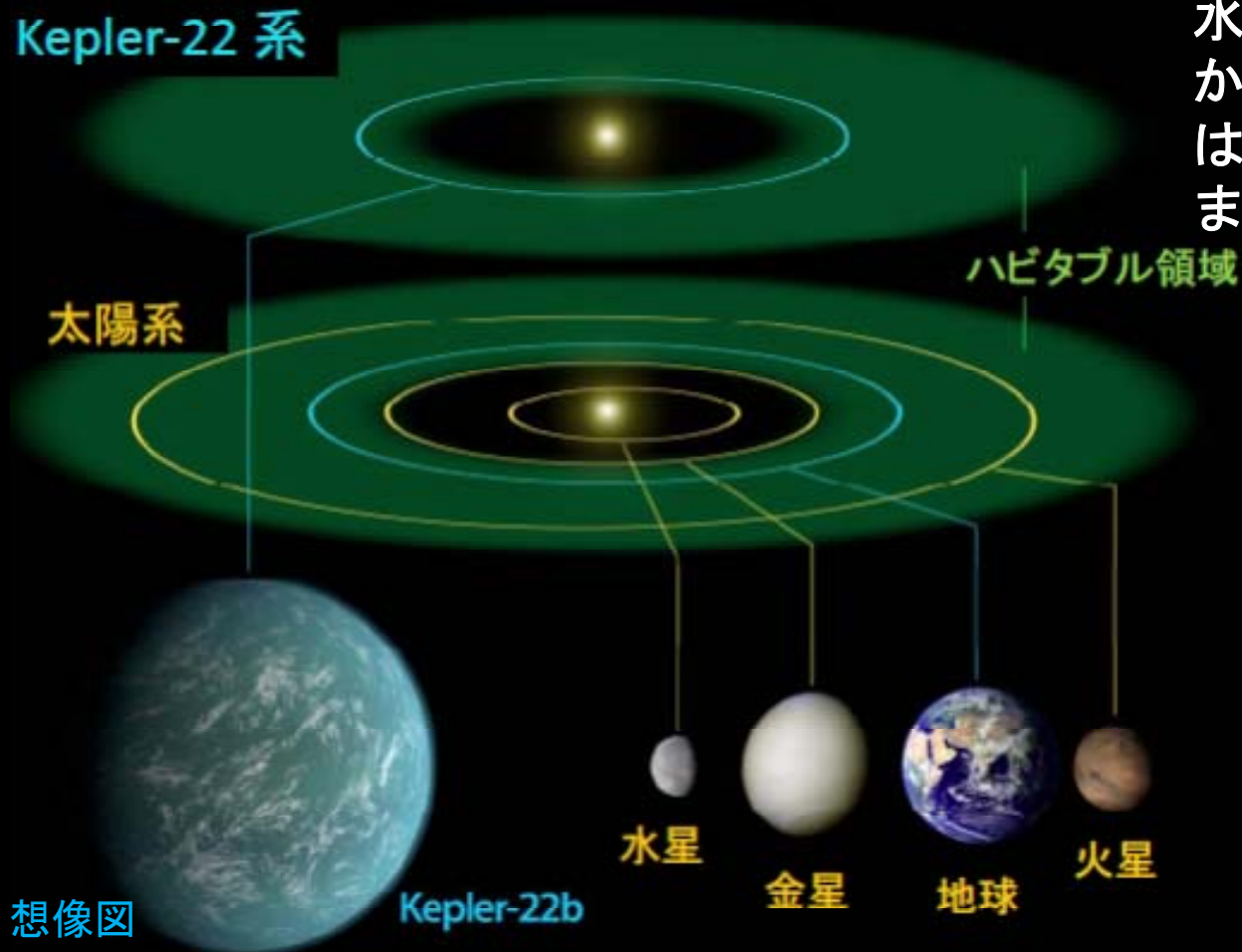
Kepler-22b

水星

金星

地球

火星



第二の地球の探し方

地球の特徴は遠くからどう見えるのか？

◆ **生命存在の指標**となる惑星大気のスpekトルの特徴をとらえる！

★ **オゾン（酸素）**

★ **水**

★ **二酸化炭素、メタンも重要**

★ **地上からは地球の大気が邪魔**

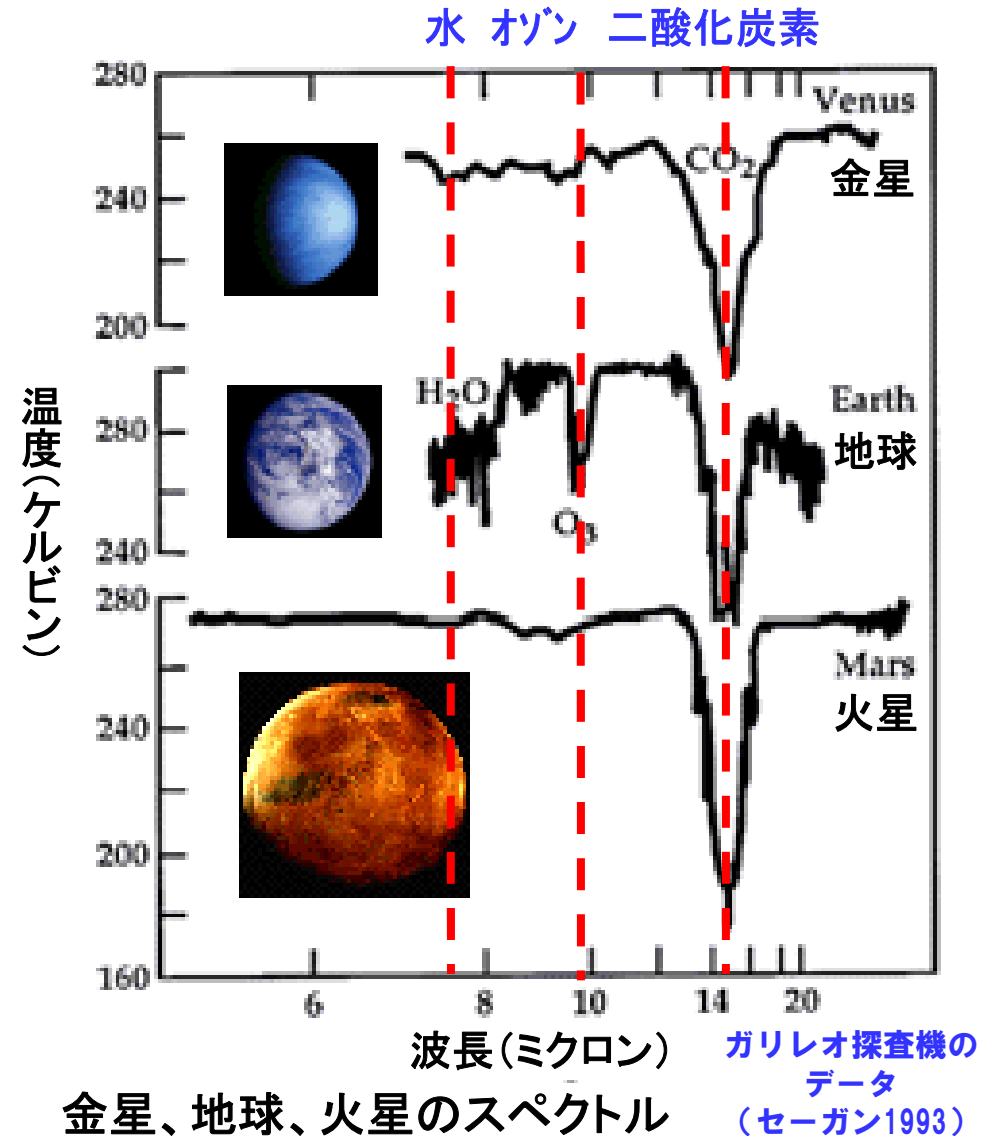
◆ **ミッション計画**

★ **TPF（米）**

★ **Darwin（欧）**

★ **JTPF（日）**

★ **2025年以降？**

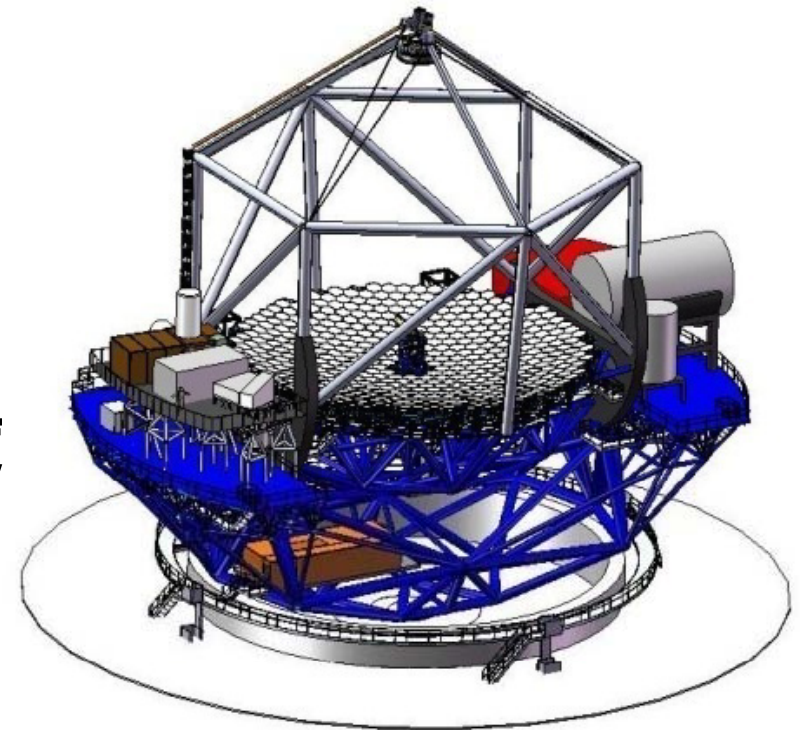
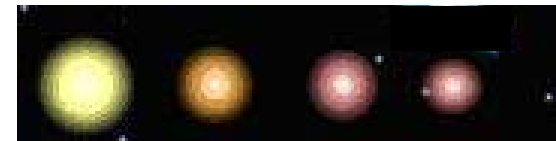


地上からの第二の地球の探し方

すばるから次世代の口径30m望遠鏡（TMT）への戦略

- 太陽より**軽い恒星**が重要なターゲット
 - ・ 数多くある（太陽型の10倍以上）
 - ・ 可視光では暗いが**赤外線**で**明るい**
- 世界で最初の「**第2の地球**」の撮像をめざす（2ステップ）
 - ・ まず「すばる」で**軽い恒星**の速度ふらつきを**赤外線**で測り「**1**」**地球質量の惑星**を**間接的に探す**
 - ・ 「TMT」で、それらを**直接に写す**
他に、生命証拠に迫るアイデアは？

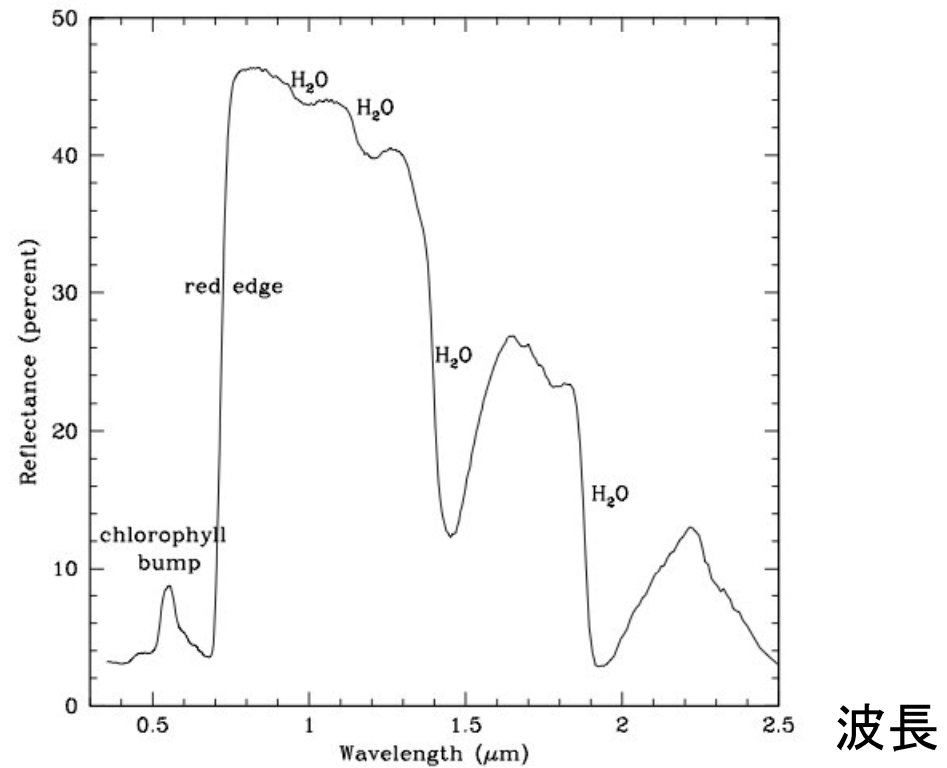
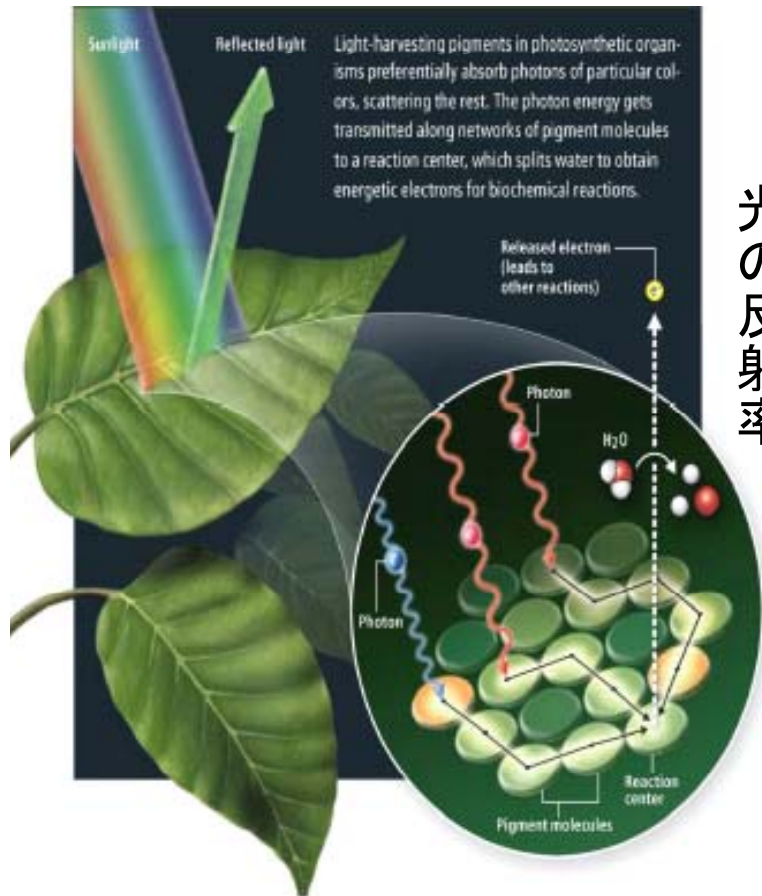
太陽 → 軽い星



TMT30m望遠鏡（2018年目標）

地球外植物を検出する？

地球の植物は**光合成**を行い
生命にとって重要な**酸素**を供給している
大陸や海とは異なる、**植物のスペクトル**を遠隔分析



地球を人工衛星から見たときのスペクトル
植物の「レッドエッジ」に着目



For further readings ...

