

## JTPF WG

第2の地球を探す

田村元秀 光天連シンポジウム

国立天文台

&

JTPF WG

天文台・宇宙研・名大他



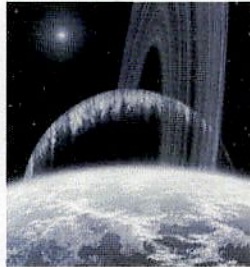
- イントロ: 系外惑星検出法
- サイエンスドライバー
- JTPF-WGの活動と成果
- ロードマップ

## 系外惑星の発見

- ✓ 1995年: ドップラー法による発見 (間接法)
  - ✓ 51 Peg by Mayor and Queloz
  - ✓ 約100個の系外惑星候補天体が発見されている
  - ✓ 同じ年に褐色矮星が (直接法により) 発見された
  - ✓ 注意: パルサー惑星の発見、Lathamの発見
- ✓ 2000年: トランシット法による独立な間接法での確認
  - ✓ HD209458 by Charbonneau et al.
  - ✓ 半径+質量⇒確かにガス惑星
- ✓ 2002年: 惑星大気の直接検出
  - ✓ HD208458 by Charbonneau et al.
  - ✓ トランシットに同期したNa吸収線の時間変化

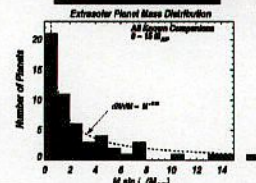
## 系外惑星検出方法

- ✓ ドップラー法
- ✓ アストロメトリ法
- ✓ トランシット法
- ✓ マイクロレンズ法
- ✓ パルサー法
- ✓ 偏光法等...
- ✓ 直接撮像・分光



## ドップラー法 (radial velocity)

- 主系列星の約5%が3 AU以内に巨大惑星を持つ
  - サンプルは2-3000個
  - 楕円軌道 ( $e > 0.1$ )を持つものも多い
- 多くは約木星質量 ( $< 1$  土星質量まで発見)
- 系外惑星「系」が存在する
  - ups And, 47 Umaなど
- しかし、太陽系のようなシステムはどの程度普遍的か不明
  - ⇒ 小久保さんの講演によれば 普遍的かも
- 将来ももつばら地上
- 1 m/s精度⇒巨大惑星が限度



Marcy, Butler, Fischer et al;  
Mayor, Queloz et al; Cochran, et al.

## アストロメトリ法

- Keck ---天王星 (5 AU) <10 pc. (長周期)
- FAME ---木星 (5 AU) <50 pc⇒cancelled!
- SIM ---天王星 (5AU) <250 pc; 3x地球 <10 pc
- GAIA ---天王星 (5 AU) <10 pc、ターゲットは多数



Prospects for Astrometric Detection of Planets

Facility	Start-End Dates	Largest Reliable Orbit (Half Period)	Accuracy for Planet Detection ( $\mu$ as)	Limit Mag (Mag)	Number of Targets	Dist (pc) to detect Jupiter @ 5 AU (500 $\mu$ as at 10 pc)	Dist (pc) to detect Uranus @ 5 AU (23 $\mu$ as at 10 pc)	Dist (pc) to detect Earth @ 1 AU (0.3 $\mu$ as at 10 pc)
Keck-I	2003-2025	13 AU	30	17	$10^3$	160	10	---
FAME	2005-2010	5 AU	~200	9	$10^4$	~50	1	---
SIM	2008-2013	5 AU	1	10	$10^3$	>1,000	230	3
GAIA	2012-2017	5 AU	~30	10	$0.5 \times 10^6$	~160	~10	---

スペースアストロメトリによる地球型惑星「間接」検出が本命

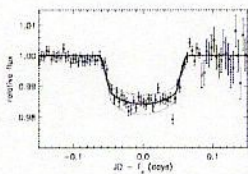
## トランジット法



惑星	周期 (年)	軌道半径 (AU)	継続時間 (時間)	幾何学的確率	減光比
水星	0.2	0.4	8	1.2%	0.001%
金星	0.6	0.7	11	0.7%	0.008%
地球	1	1	13	0.5%	0.008%
木星	12	5	30	0.09%	1%
土星	30	10	40	0.05%	0.8%
天王星	84	19	57	0.02%	0.1%

## トランジット法による最初の発見

- ✓ 速度変動のデータに合わせて惑星の食を初めて検出 (Charbonneau et al. 2000, Henry et al. 2000)
- ✓ duration=2.5 hr
- ✓ マイクロレンズ探査の「副産物」としても多数発見されつつある (Udalsky et al. 2002)



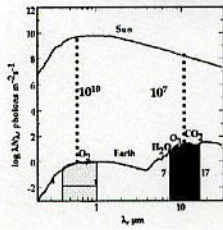
やはり、スペースからの超精密測光による地球型惑星間接検出が本命  
⇒ NASA/Kepler, ESA/Eddington

## 地球型惑星探査計画の主たる目標

- ✓ 地球型系外惑星の直接検出
  - ✓ 特にhabitable zoneにあるもの
- ✓ 太陽近傍 (例えば15pc以内) の約150個の星の完全サーベイ
- ✓ 約50個の天体の分光フォローアップ
  - ✓ 大気組成。特に、水と二酸化炭素
- ✓ 約5個の天体の高感度分光フォローアップ
  - ✓ 生命の指標。特に、酸素とメタン
- ✓ 単一目的ではなく、一般の高解像度望遠鏡でもある⇒多様な一般天文学への応用
- ✓ NASA/TPF, ESA/Darwinと基本的に同じ目標

## (地球型)系外惑星の直接 検出の困難さ

- ✓ 10 pc 離れたところにある太陽系：
  - ✓ 感度  
地球の明るさ  
V~29等級, N~20等級
  - ✓ 解像度  
地球・太陽の角距離  
d=0.1秒角
  - ✓ ダイナミックレンジ  
太陽・地球の明るさの比  
RV~10桁, RN~7桁
- ✓ 熱放射 vs. 反射光  
✓ どちらを狙うべきか？

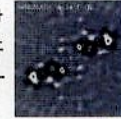


## 熱放射 or 可視光

地球型系外惑星を直接検出し、かつ  
分光スペクトルで特徴づける

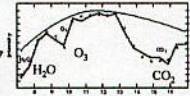
赤外ナリ干渉計

30光年の距離にある金星・地球・火星をシミュレーション



可視光コロナグラフ

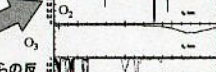
30光年の距離にある我々の太陽系をシミュレーション



惑星からの熱放射中間赤外線



惑星からの反射可視光・近赤外線



## JTPF: 背景

- ✓ 太陽系外惑星系の直接観測への関心は日本でも高い
  - ✓ すばるCIAOによる系外惑星探査観測
    - ✓ ティクス⇒原始惑星、巨大惑星、浮遊惑星質量YSO
  - ✓ すばるによる間接的系外惑星探査観測
    - ✓ ドップラー法、トランジット法
  - ✓ SPICAによる系外惑星探査観測
    - ✓ 中間赤外での分光・撮像
  - ✓ 惑星系形成などの強力な理論グループの存在
  - ✓ 系外惑星探査に関するワークショップとJTPFワーキンググループの立上げ (2001. 8. 7)
  - ✓ 宇宙物理学WGとして提案 (2002. 9. 25)
- ✓ 巨大惑星の直接観測の次の大きなステップは地球型惑星の直接観測！
  - ✓ せっかく始まった分野で、将来に繋がる道が日本にも不可欠

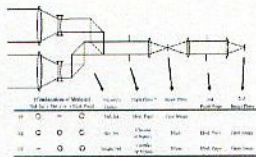


65 Tau すばるCIAO 別の円盤も近日公開予定

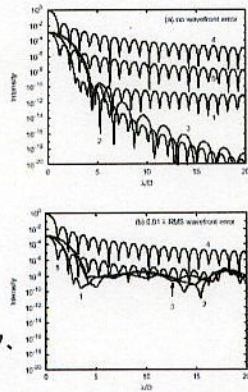
## JTPFの進め方案

- ✓ 難しい選択：反射光か？熱放射か？
- ✓ 当面2つの可能性の検討を並行して進めるべき
  - ✓ 中口径可視近赤高コントラストスペース望遠鏡の検討
    - ✓ NGSTと相補的 近赤外メイン、PSF汚い
    - ✓ SPICAと相補的 中間・遠赤外メイン、低解像度
    - ✓ 日本にとっては初のスペース可視近赤天文台としての意味が大きい ポストHSTでもある
  - ✓ JTPF ⇒ Planet Hunting Space Telescope (PHST) と呼びたい (個人案)
- ✓ 中間赤外干渉計のR&D
  - ✓ 技術的な興味は高い
  - ✓ オリジナルなアイデア (干渉計とコロナグラフの組み合わせなど) が出つつある
    - ✓ 天文台西川グループ+北大グループ
    - ✓ 願差がなければ、従来よりさらに3桁以上改善
- ✓ WGとして様々な相補的地上観測をプロモート

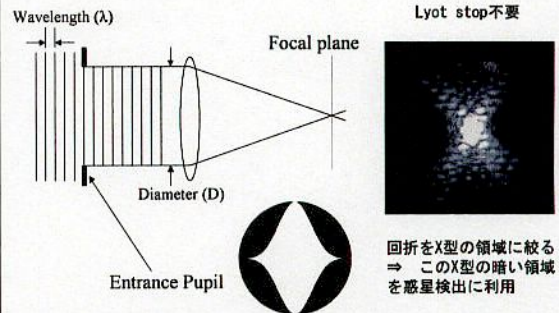
## JTPFの進め方案



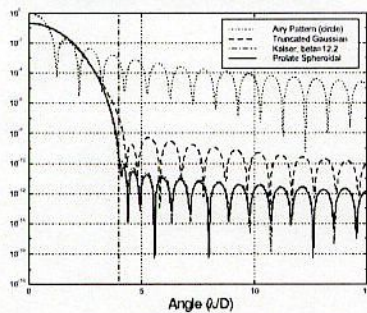
ナル干渉計、ナルコロナグラフ、shaped pupilの組み合わせが有効



## Shaped pupilの例: Spergel Pupil



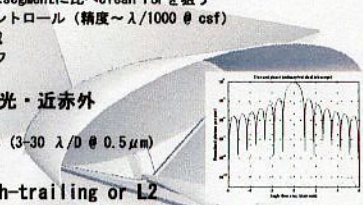
## Spergel pupil: PSF



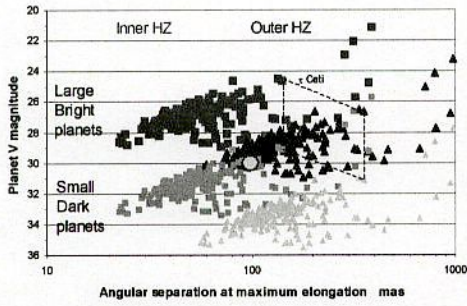
垂直な方向をカバーするために、2-3回望遠鏡を回転させる

## PHSTの一案

- ✓ 望遠鏡 3.5m
  - ✓ 問題は感度・解像度よりも高コントラスト
  - ✓ 本来は8mが必要だが、近傍の星のまわりの地球型感星検出に限定
  - ✓ 軽量一枚鏡 ( $\sim 25\text{kg/m}^2$ ), off-axisが望ましい
    - ✓ NGSTのようなsegmentに比べclean PSFを狙う
  - ✓ 補償光学波面コントロール (精度 $\sim \lambda/1000$  @ csf)
    - ✓ 鏡面誤差低減
    - ✓ 特殊コロナグラフ
    - ✓ 回折低減
- ✓ 波長 可視光・近赤外
  - ✓ 反射光を狙う
  - ✓ 1-10 AU @ 10 pc ( $3-30 \lambda/D$  @  $0.5 \mu\text{m}$ )
- ✓ 打上 HIIA
- ✓ 軌道 Earth-trailing or L2
- ✓ post-HST, post-SPICAと位置付けられる
  - ✓ SPICAと共通する開発要素
    - ✓ space AO coronagraph
    - ✓ light-weight mirror



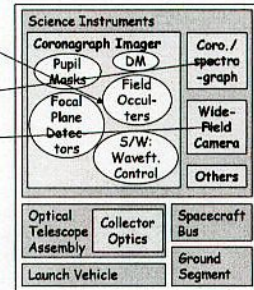
## ターゲット



水が液体であること; 地球の半径・アルベドの1/2 or 2倍

## PHST装置の一案

- コロナグラフ撮像装置
  - 可視・近赤外
- コロナグラフ分光器
  - 可視・近赤外
- 広視野カメラ
  - 可視・近赤外
  - deep survey for cosmology
- 半分の時間はgeneral astronomyに使用する



## PHSTのサイエンス

- ✓ 惑星の質量
  - ✓ 明るさ、色、アストロメトリ
- ✓ 惑星の分光
  - ✓ biomarkers - 中間赤外の場合と同様に有る
- ✓ 惑星の測光・変光
  - ✓ 気象学的変化 (Ford, Seager, Turner 2001)
  - ✓ 生物学的変化 (植物は可視近赤で見え方が違う)
- ✓ その他のサイエンス
  - ✓ 高コントラスト・高解像度・高感度を生かした、活動銀河核・クエーサー・重力レンズなど広い範囲の系外銀河の観測
  - ✓ 3-4m口径のHSTとして使用できる! (含むUV波長)

## A Roadmap to Planet Hunting Space Telescope (PHST)



## まとめ

- ✓系外惑星検出ミッションの重要性
- ✓日本における議論・検討の場としてのJTPF-WGの活動
- ✓ミッションの素案（特に、可視・近赤外コロナグラフの場合-PHST）
- ✓日本の将来ミッションにおける位置付けとそれに至るロードマップの一案
- ✓NASA/ESAとの国際協力の可能性