



# 系外惑星探査の ロードマップ案

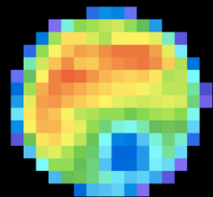
すばる、SPICA、JTPF

田村元秀

Visible Image



Temperature Image



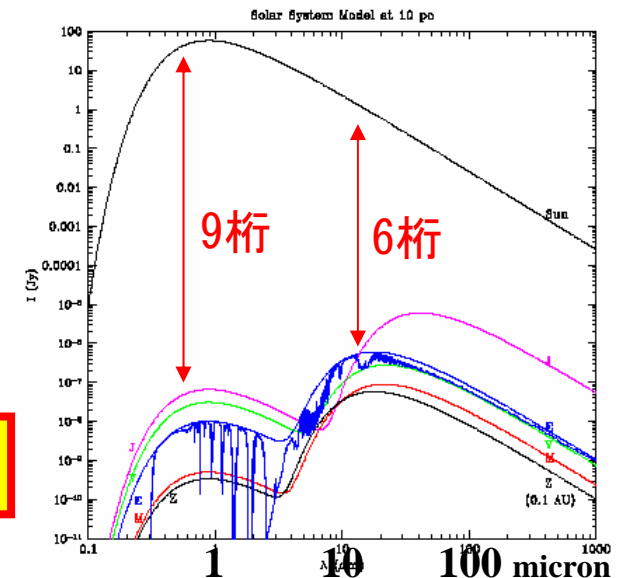
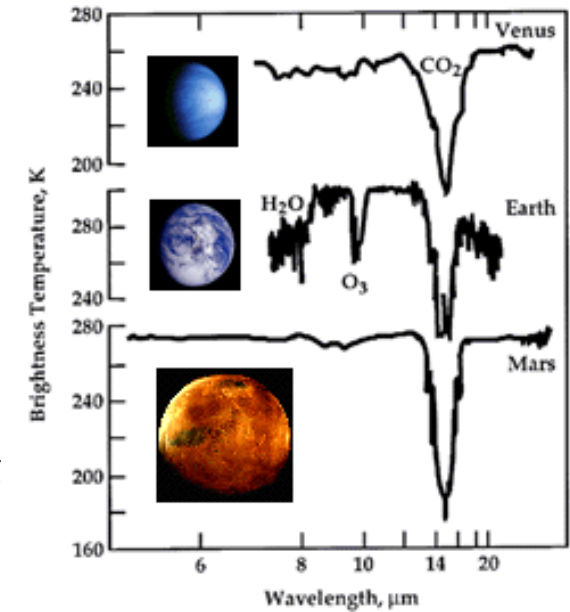
NAOJ/太陽系外惑星探査プロジェクト室  
JAXA/JTPF Working Group

光天連シンポジウム 2008. 8. 21 17:40-17:55

# 系外惑星の観測の意義と困難さ

- 1995年：恒星周回する系外惑星の間接発見
  - ドップラー法、トランジット法、重力レンズ法の成功
  - 今日までに約300個の系外惑星  
(最小は地球質量の約2倍まで-真の地球型は未検出)
- 全て間接検出、系外惑星を直接に撮像した**確たる例は無い**
  - 暖かい木星型巨大惑星の検出は、すばる望遠鏡などの地上巨大望遠鏡の至近のテーマ
- 次のマイルストーンは**地球型惑星の検出と生命の証拠**の検出
- しかし、技術的にはハードルが高い
  - 高解像度、高感度、高コントラストの実現
  - 約9桁(可視光)から6桁(赤外線)のコントラスト
- 新しい間接法の追求も必要

**第2の地球探しのための日本のロードマップが必要**



# Possible Exoplanet/Disk Exploration Approaches in Japan

1999

2008

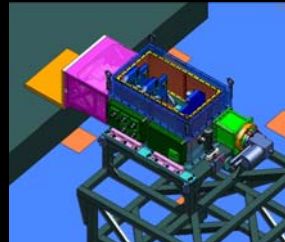
~2014

~2020

*Ground*

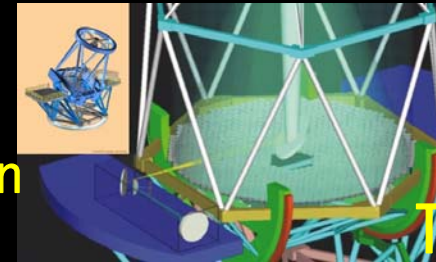


1. Indirect detection of exoplanets  
Doppler (N2K survey, RM effect)  
Transit ongoing



**SEEDS project**

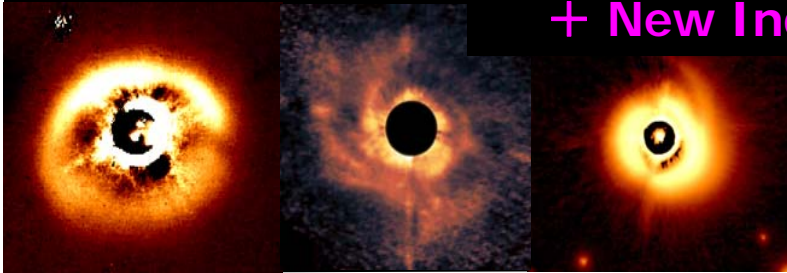
Subaru/  
- A0188 &  
ExAO/  
- HiCIAO  
- Next-Gen Doppler



**TMT 30m**

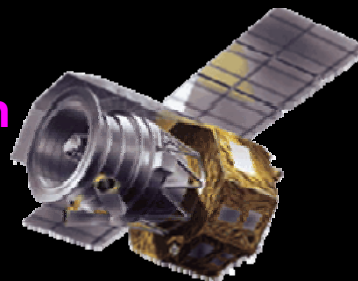
2A. Direct imaging of disks & young massive planets  
+ New Indirect Approach

4. Direct observations of Earth-like planets ?



*Space*

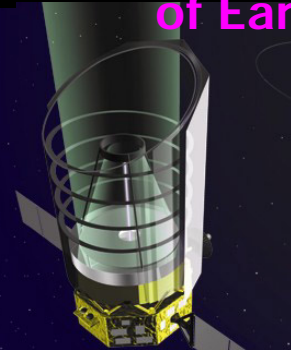
2B. Disk evolution & Exo-zodi  
- disk late stage  
- spectroscopy



**AKARI 0.7m**

3. Spectroscopy of disks & old planets  
coronagraph & transit

**SPICA 3.5m**



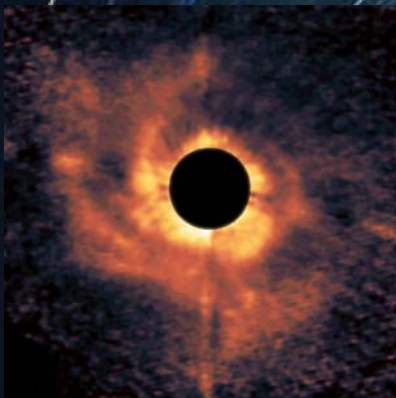
**JTPF 3.5m**



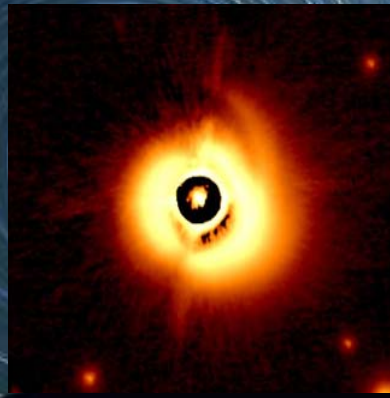
# Subaru has an A0 Coronagraph since 2001

◆ CIAO + 36-actuator AO at Cass.

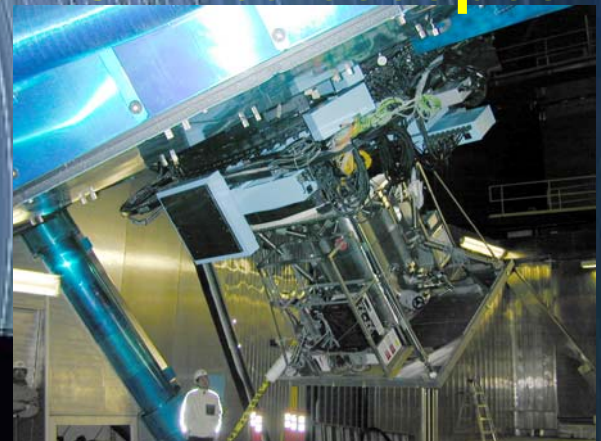
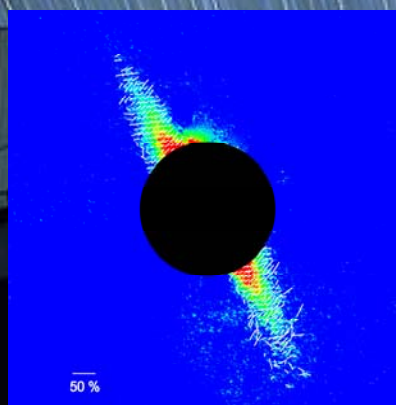
★ First dedicated cold coronagraph on 8-m telescopes



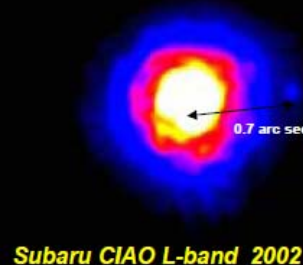
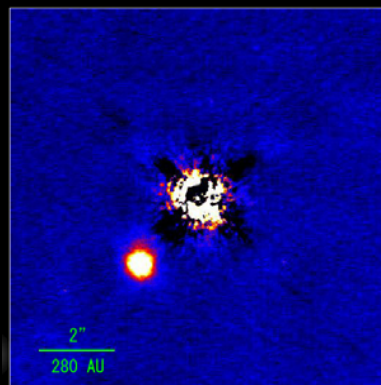
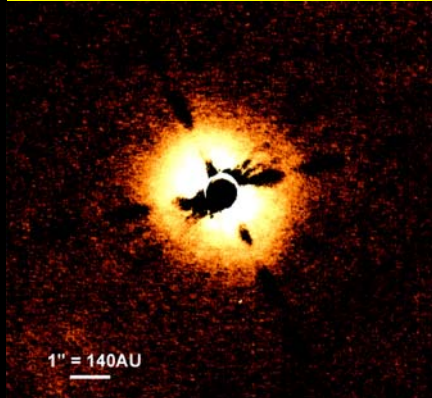
Diversity of proto-Planetary disks



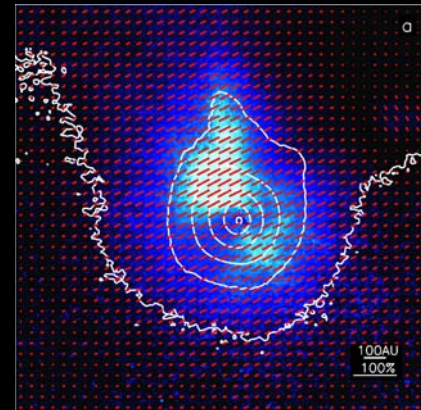
Young very low-mass Companion



Compact disk around massive YSOs



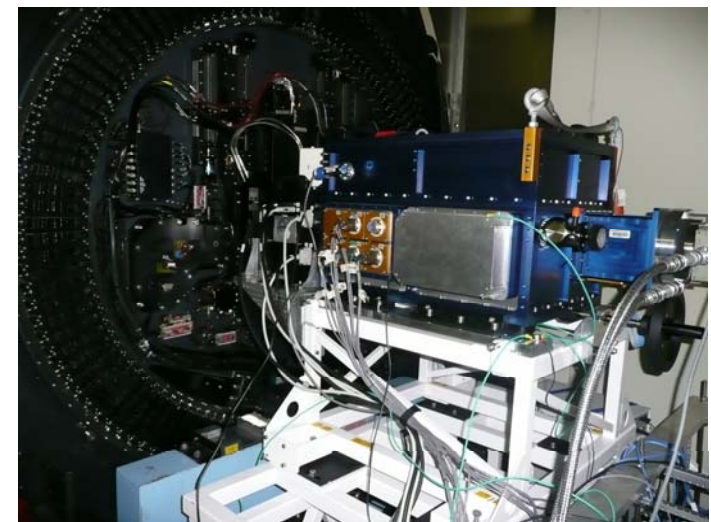
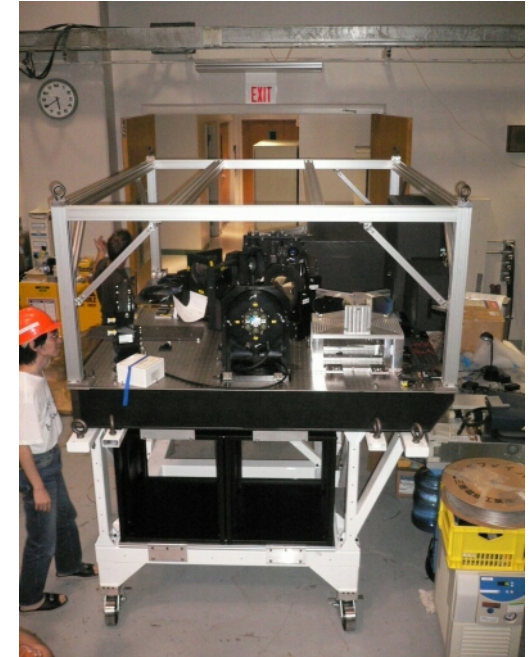
Subaru CIAO L-band 2002



# HiCIAO – High Contrast Instrument for the Subaru next generation Adaptive Optics

## HiCIAOとは...

- ◆ NAOJとUH IfAの協力で製作
- ◆ コロナグラフ, 差分撮像, AO188を利用
- ◆  $5 \times 10^{-6}$  のcontrast (従来より10倍良い) を実現
- ◆ コロナグラフと差分撮像光学の両方を備えた最初
- ◆ モジュラー形式の設計: 最新技術を反映したアップグレードが容易
  - ◆ PIAA Coronagraph, MEMS補償光学, 位相マスク Coronagraphによるアップグレード (後述)
- ◆ 2007. 10: ラボでのアセンブルは終了。
- ◆ 2007. 12: AO無ファーストライト。
- ◆ **SEEDS** (Subaru Strategic Exploration of Exoplanets and Disks with **HiCIAO/AO188**) という戦略的観測枠として採択。2009から。
  - ◆ 約500個の星を5年でサーベイし、1AU-10AUの巨大惑星検出と同じ領域の円盤構造を解明





# HiCIAOの近未来アップグレード計画（2008-2010）

- HiCIAO は8-mクラス望遠鏡の中で唯一フレキシブルな高コントラスト撮像プラットフォーム  
GeminiとVLTの“Extreme-AO” 計画はリジッド設計のためアップグレードが難しい
- HiCIAO は、それらより先に完成
- 高コントラスト撮像技術は日進月歩，そのためのラボ試験も進んでいる  
(すばるにおけるPIAA Coronagraphなどの開発を含む)
- 最新の技術をサイエンスに活かす  
円盤内側 (<5 AU) における惑星の進化

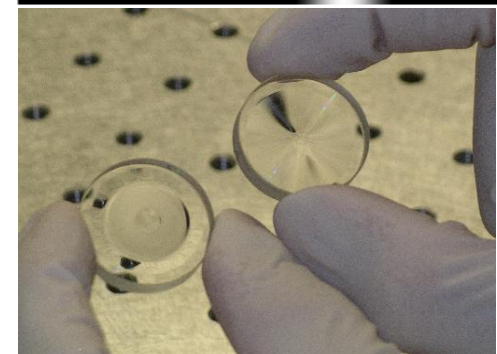
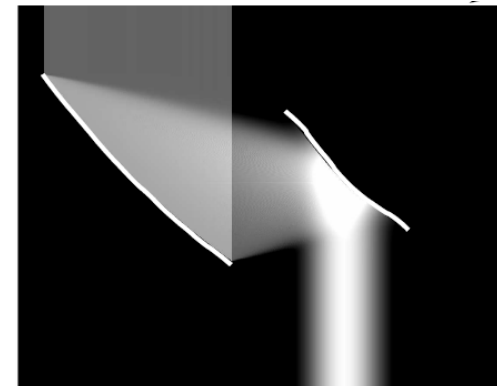
## → HiCIAOアップグレード計画

中程度のコスト・短期間で進める戦略が良い

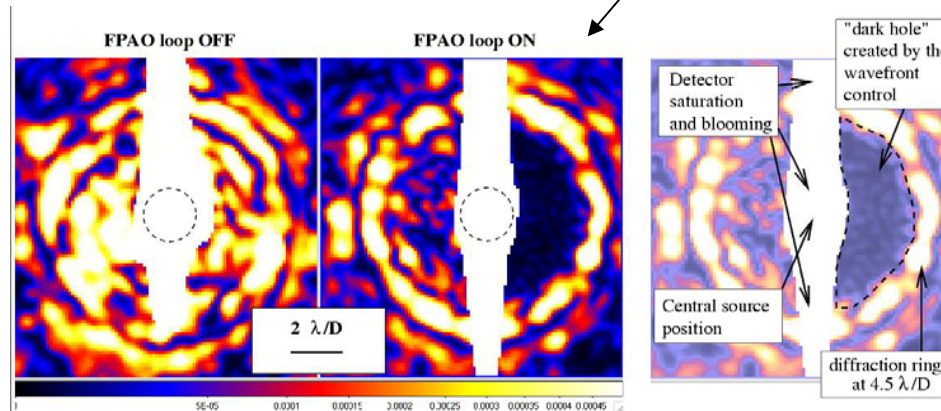
- (1) 高効率なPIAA Coronagraphにする
- (2) 1024素子の可変鏡付加波面の「細かい」補正

いずれも、すばるのラボで開発進行中。

PIAA coronagraph optics and  
PIAA lenses for HiCIAO



Laboratory  
demonstration of  
high accuracy  
“fine” wavefront  
correction with  
1024 actuators DM



# HiCIAOの近未来アップグレード計画

(3) 4分割位相マスク (FQPM)  
→ 8分割位相マスク (EOPM)

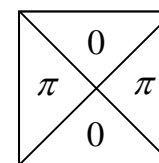
国立天文台・北大のラボで開発中。

→ 至近UGはいずれも2年位でできる予定

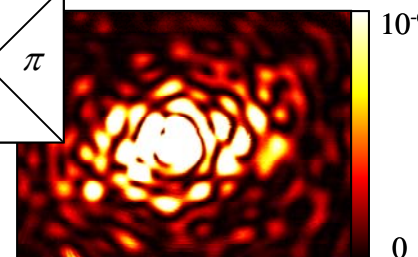
- 将来の道標：TMT (Thirty Meter Telescope) へ

30m口径の圧倒的な集光力と解像度 +  
HiCIAO/Subaruでの経験を活かした

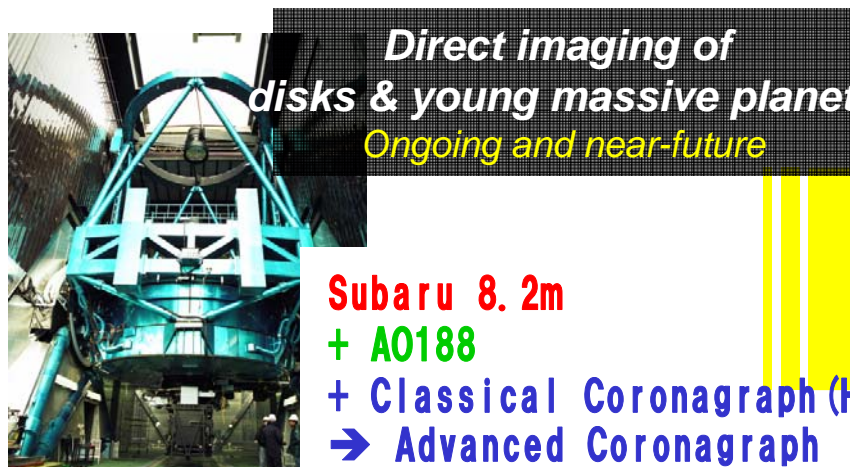
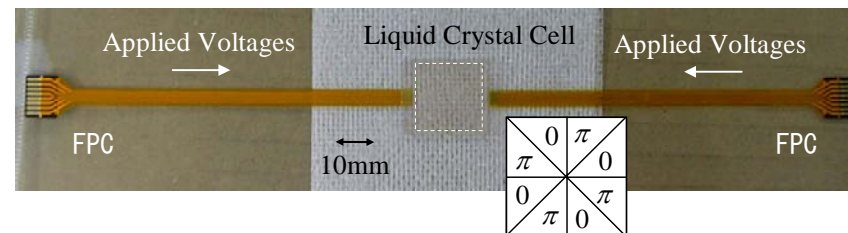
超高コントラスト技術 → **系外地球型惑星** 検出へ



Laboratory experiment of  
FQPM coronagraph



Manufactured EOPM using a liquid crystal device



*Direct imaging of  
disks & young massive planets  
Ongoing and near-future*

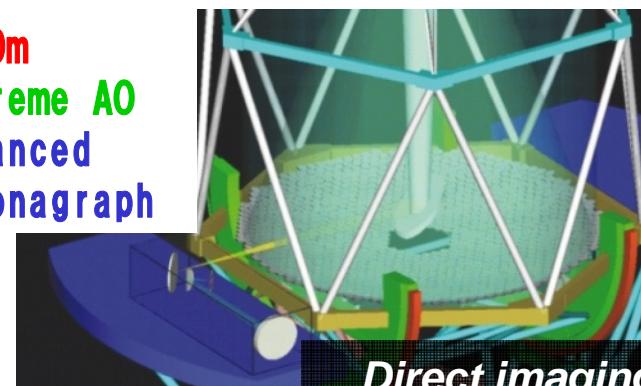
**Subaru 8.2m**

+ **A0188**

+ **Classical Coronagraph (HiCIAO)**

→ **Advanced Coronagraph  
(PIAA/MEMS AO/EOPM...)**

**TMT 30m**  
+ **Extreme AO**  
+ **Advanced  
Coronagraph**



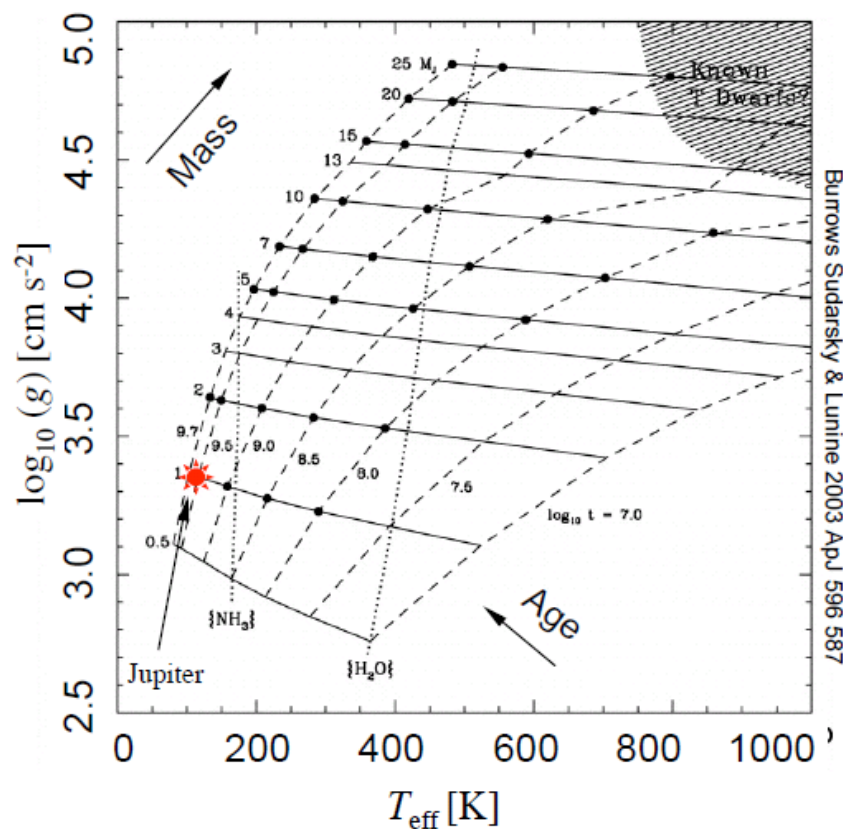
*Direct imaging of  
Earth-like  
planets*

# 系外惑星の分光 @すばる(2009-2014)

- ★ 巨大惑星および褐色矮星の面分光
- ★ 赤外IFU装置の開発
  - ★ Princeton大学と共同

## Spec. example

- ★ 0.8-2.2  $\mu\text{m}$  (z, J, H, Ks)
- ★  $R \sim 100$
- ★ 15 mas/pixel
- ★ 200  $\mu\text{m}$ /lenslet
- ★ 1.8"x1.8" FOV
- ★ total throughput  $\sim 30\%$
- ★ WFE  $< 50\text{nm}$





# 次期ドップラー装置@すばる (2009-2014)

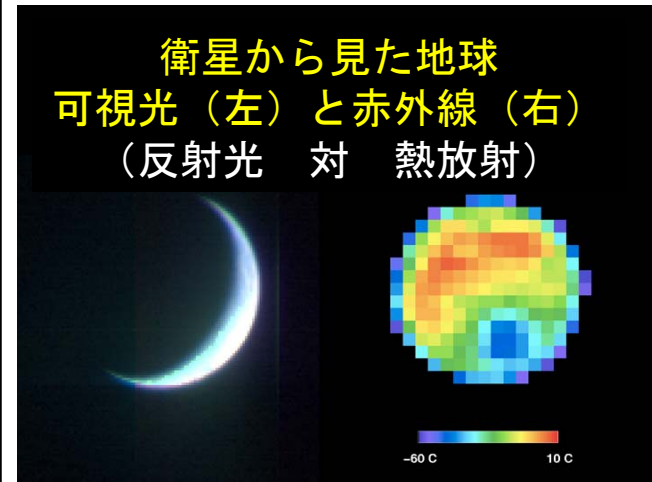
- ★ M型星のハビタブル地球型惑星
- ★ 10m/sの赤外ドップラー
  - ★ IRCS upgrade 進行中
- ★ 1m/sの赤外ドップラーの開発
  - ★ Next Killer for ESP studies
  - ★ or HDS upgrade?

## Spec. example

- ★ 0.8-1.8  $\mu\text{m}$
- ★  $R \sim 50,000-70,000$ 
  - ★ CRIRES(100000), PHOENIX(80000), NIRSPEC(30000), IRCS/UHR(70000?)
  - ★  $1\text{m/s} \sim 1/3000\text{pixel}$
- ★ optics needs to be cooled (77K)
- ★ 77K optics module + 77K IR camera module + fiber

# JTPFとは？ その目標と手段

- ✓ **地球型系外惑星の直接検出を主**  
サイエンスドライバーとして、様々な天文分野への応用を追求する  
スペース将来計画(国際協力)
- ✓ 大別して2つのアーキテクチャー



## 可視光望遠鏡 (HCST)

- シャープな画像を得やすい  
可視光望遠鏡で第2の地球を探す
- クリーン、高コントラスト、かつ  
安定した星像性能を追求  
した望遠鏡

## 赤外線干渉計 (TBD)

- 恒星と惑星の明るさの  
コントラストが小さい  
中間赤外線波長で  
第2の地球を探す
- スペース赤外線ナノ  
干渉計望遠鏡

# 国際協力の状況

## 現状:

- 米: いわゆる**TPF**は無期限停止  
NASAは**小規模なもの**を希望 (約 \$500M)
- 欧: **Darwin** (赤外線干渉計),  
ESA Cosmic Vision落選。基礎開発費のみ。

->大ミッションの“Precursors”の検討に後退

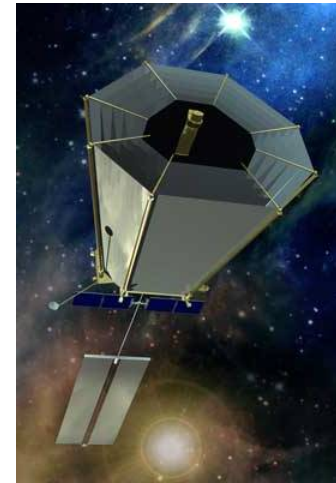
日本が参加できそうなものは:

- 1.2-2m telescope using coronagraph (PECO)
- **NASAで2009年に系外惑星小規模ミッションのCallがある予定**

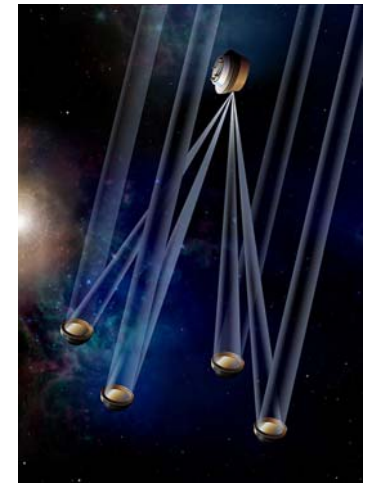
## 日本 (JTPF) はどうすべきか?

- **USA decadal report**への提言の状況を見つ  
つ、日米欧 (+アジア?) 数力国で中規模ミッションを  
検討すべきだろう。

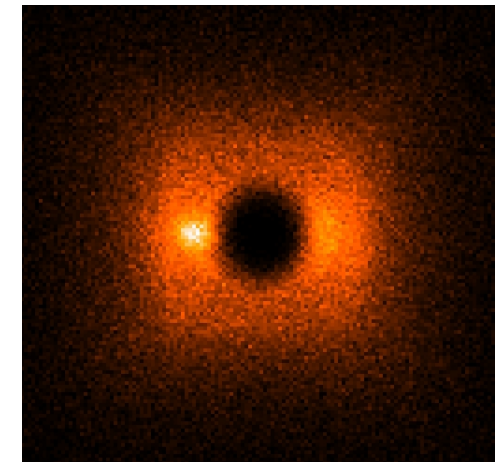
- ミッション方針が固まるまでは、ミッション  
に必須となる「コロナグラフ」と「補償光学」のR&D  
を「すばる+HiCIAO」をテストベッドにして推進す  
ることが重要。



Terrestrial Planet Finder  
Coronagraph (TPF-C)



Darwin IR  
Interferometer



Simulated TOPS image of a  
rocky planet around star Tau  
Ceti (planet is on the left)

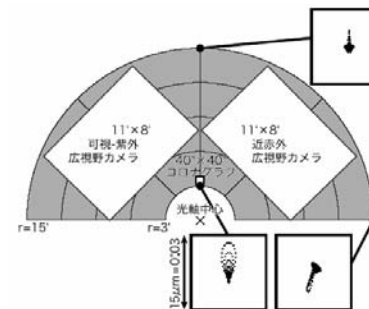
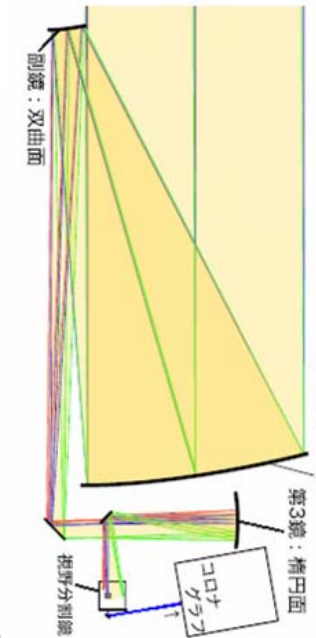
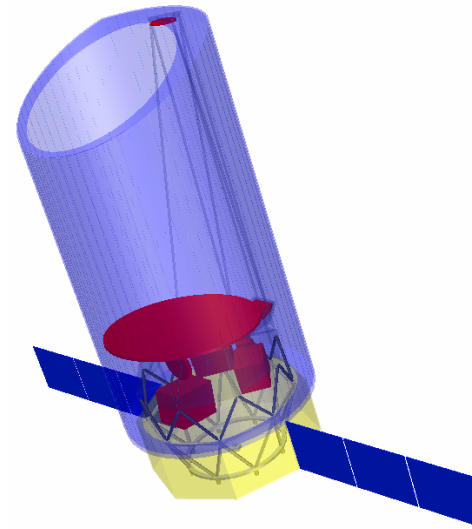


# JTPFのコロナグラフ望遠鏡案 (HCST)

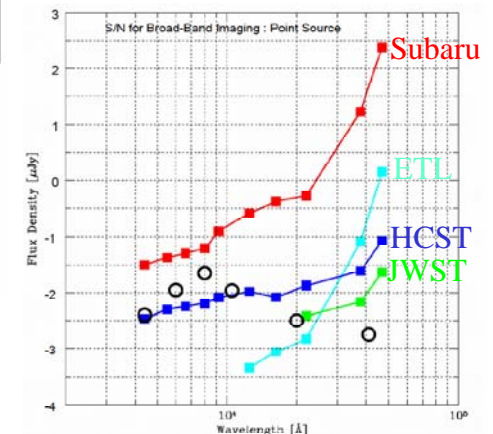
日本独自のTPFのアーキテクチャーとしては  
可視光の高コントラスト・スペース望遠鏡により  
クリーンかつ安定した画像を得ることを検討してきた。

Tele-scope	3.5m off-axis single aperture
Wave-length	optical and near-IR ( $\lambda_c = 0.5 \mu\text{m}$ , $\lambda \lambda = 0.2 - 5 \mu\text{m}$ ) w/ limited UV capability
Launch	~2020?
Lifetime	5-10 yr
Orbit	Sun-Earth L2
Instru-ments	Opt-NIR coronagraph
	Wide-field NIR/Opt instruments
	TBD: UV spectrometer

高価なR&D(例えばミラー開発)を避けるために、既存の技術+補償光学でどこまで行けるかを検討している。⇒ ただし、\$1Bクラス・ミッション。



Total FOV ~15'  
広い視野カメラ  
=ポスト・ハッブル



○=Earth at 8pc

# まとめ

- すばる (CIAO, HiCIAO, IFU/IRD)、あかり、SPICA、JTPF という明確なロードマップに基づいて系外惑星科学を追及したい
- JTPFオリジナルミッションとしては、ポストSPICAとしての地球型系外惑星の直接観測を目指す
- 基礎必須技術としての、コロナグラフ＋波面補償光学の実証実験が進み、日本発の新アイデアが発案・出版されるようになってきた
- 理論家、実験家を含めた活発なコミュニティを拡大してゆきたい
- 間接法の次の一手としての赤外ドップラー (IRD) や直接観測面分光 (IFU) は、post-HiCIAO, pre-TMT/SPICAのギャップを埋める

# まとめ

Subaru/NAOJ  
International Workshop  
"Exoplanets and Disks:  
Their Formation and Diversity"  
2009.3.9-12  
Keauhou Beach Hotel, Kona

To be announced soon!  
Stay tuned!!





(質疑応答 — Q:質問, A:回答, C:コメント — 氏名無しは発表者の発言, 敬称略)

(Q) 系外惑星探査には、TMTではなく、SPICAでのアプローチを考えているということか？ (家)

(A) マンパワーと予算があれば、コロナグラフ装置開発について手を挙げたいが、現在TMTへまわるほどの余裕はない。

(Q) SPICAのミラーについて... ??? (海老塚)

(A) 日本国内で製作精度を上げて行けないのでは、という懸念はある。一枚鏡は難しいだろう。

(C) 鏡を作る工場がヨーロッパにあると思えばよい。鏡の評価は日本が行うことになっており、サイエンスをどのように進めるかというキーを日本で押さえない。(中川)