

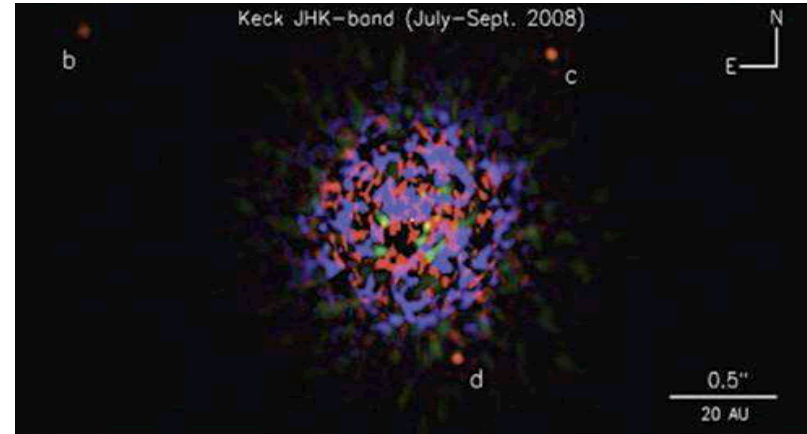
SCIの独自性の評価： JWSTと比較して

松尾太郎

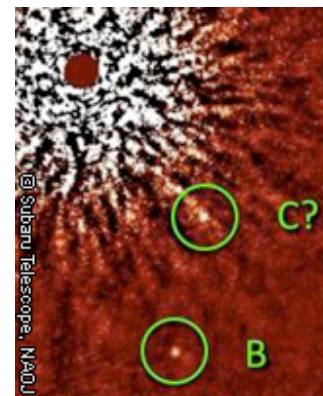
(国立天文台、系外惑星探査室)

Introduction

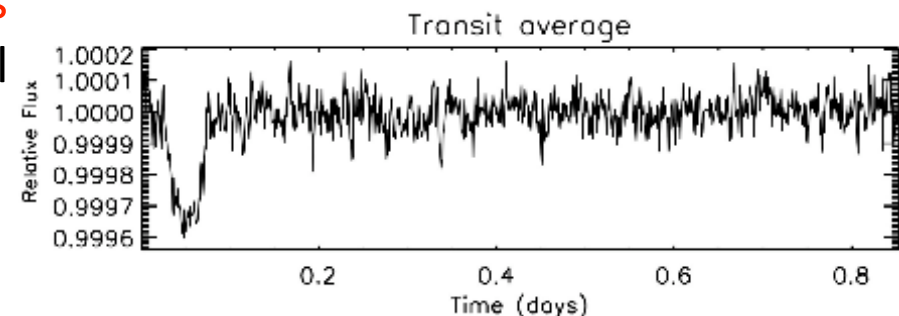
- More than 500 planets have indirectly been discovered by radial velocity, transit, and microlensing techniques.
- **The first direct images of exoplanets were published in 2008**, fully 12 years after the first indirect detection. Subaru/HiCIAO has revealed a companion around Sun-like star in 2009.
- CoRoT-7b has been confirmed as the first super Earth in 2009.
- The next milestone is to **characterize gas giants** and directly detect a terrestrial planet and search for life.



Near infrared Image of the exoplanets HR8799 b, c, d from Keck telescope (Marois et al. 2008)



H band image of GJ758 with HiCIAO (Thalman et al. 2009).



Light curve of CoRoT-7 (Leger et al. 2007)

Missions for direct detection of exoplanet

Now

2014

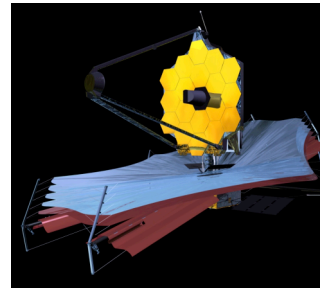
2018

2025~

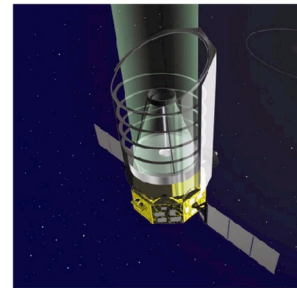
- **SPACE**



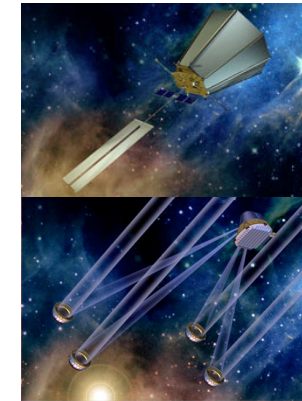
HST



JWST



SPICA



TPF

- **Ground**

Detection and Characterization of older planets

Now

2018

Search for life

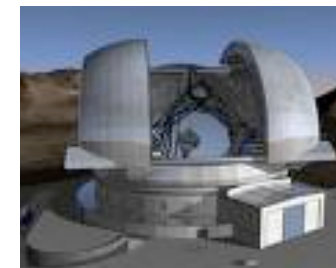


若い惑星系 (<500Myr) の
探査が進む！
+ ExAO
(in near future)

8m-class telescopes
(Subaru/HiCIAO, Gemini/GPI etc)
Detection of self-luminous planets.



TMT



E-ELT

30m-class telescope
Detection of "Earth-like" planets?

惑星探査における SCIの独自性

James Webb Space Telescope (JWST)

- 6.5m segment mirror;
- Three modes for JWST coronagraphy

	lambda	IWA	OWA	Dynamic Range	Filter (l / dl)
NIRCam/ Coronagraph (Krist 2007)	0.6-5.0 (μm)	$\sim 4l/D$ (500-750 mas)	$\sim 10''$	12.5mag	4, 10, 100
TFI/NRM (Sivaramakrish nan et al. 2009)	1.6-4.9	$\sim 0.5l/D$ (75 mas)	$\sim 0''.5$	10mag using closure phaseup to 12.5 mag after vis. cal.	100
MIRI/ 4QPM	10.65, 11.6, 15.5, 23.0	$\sim 2l/D$	$\sim 0''.4$	10 mag	20

- Combination of TFI/NRM with NIRCam/Cor. is very powerful method.

NIRCam : Near Infrared Camera (Univ. of Arizona)

TFI/NRM: Non Redundant Mask with Tunable Filter Imager

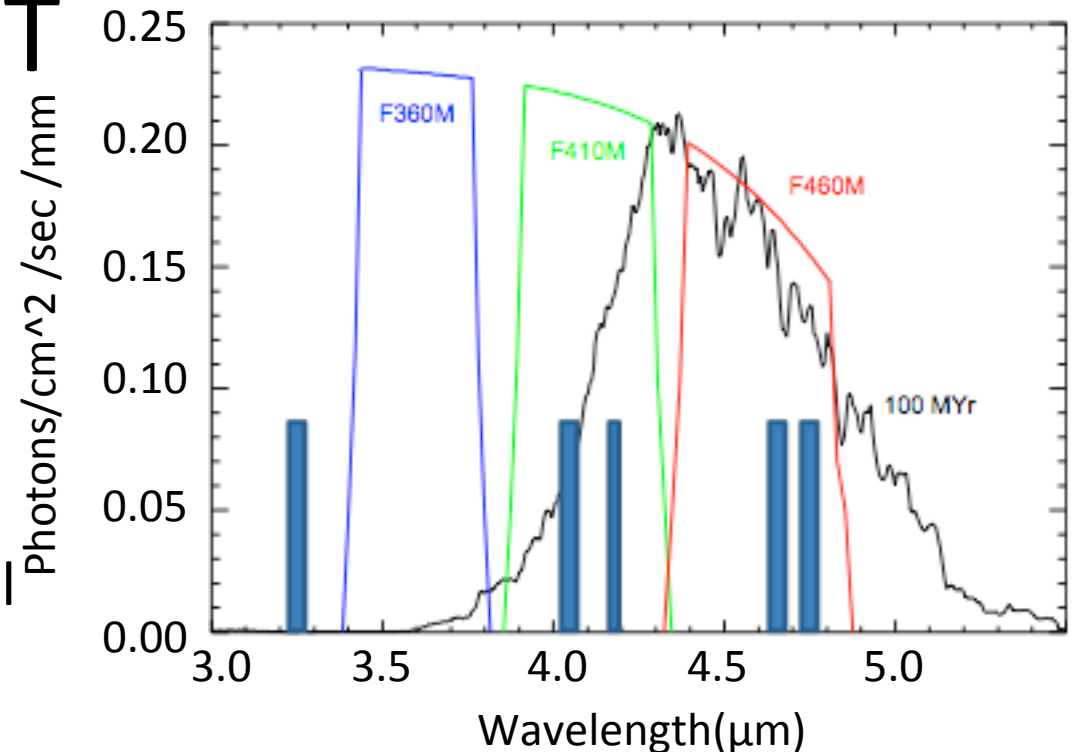
MIRI : Mid Infrared Instrument (ESA and JPL)

Strategy for JWST

- Planet survey at $4.6\mu\text{m}$ is suitable for study on emission from gas giants.
- **NirCam coronagraph and NRM with TFI at $4.6\mu\text{m}$** will be used for JWST planet search.

- **Targets:**

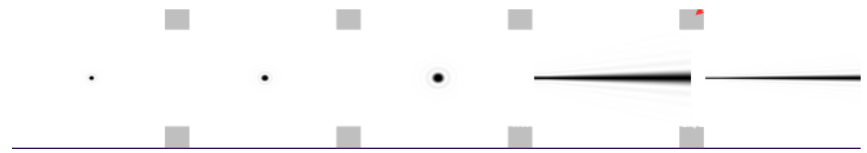
- a. 100 nearby ($<10\text{pc}$) M-type stars with $< 1 \text{ Gyr}$
- b. **650 young stellar objects** (mainly FGK-type) with **1-100Myr** based on Spitzer FEPS and SIM database



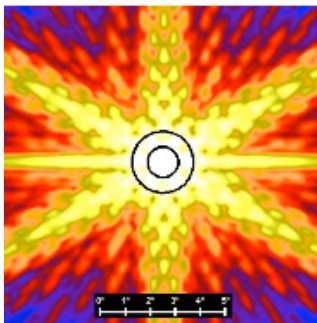
Spectrum of 100Myr-old, 2MJ planet,
from Baraffe et al. (2003)

JWST Coronagraphy @ $\lambda < 5\mu\text{m}$

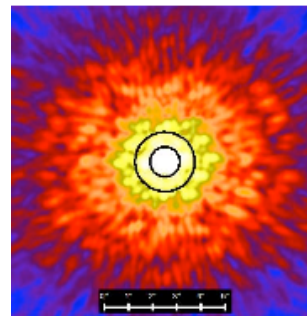
- NIRCam/Coronagraph
- High contrast but limited IWA
(with roll subtraction)



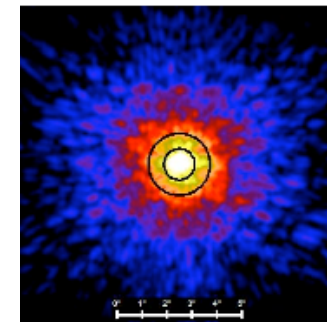
Lyot CoronagraphのOcculting Spot



No Coronagraph



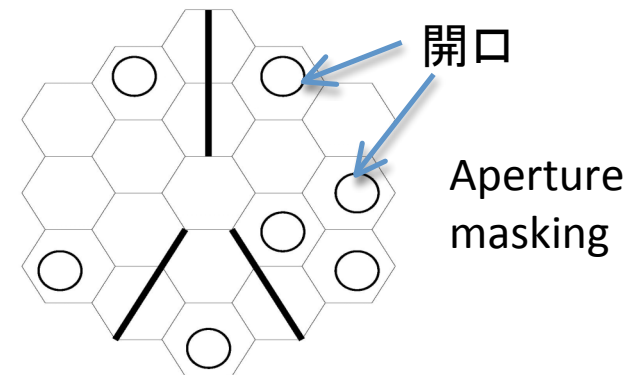
Coronagraph (spot)



Coronagraph + roll subtraction

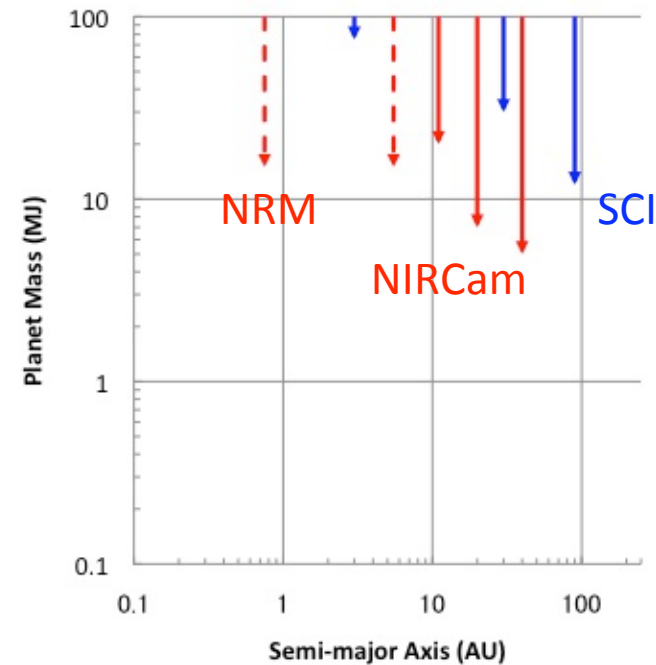
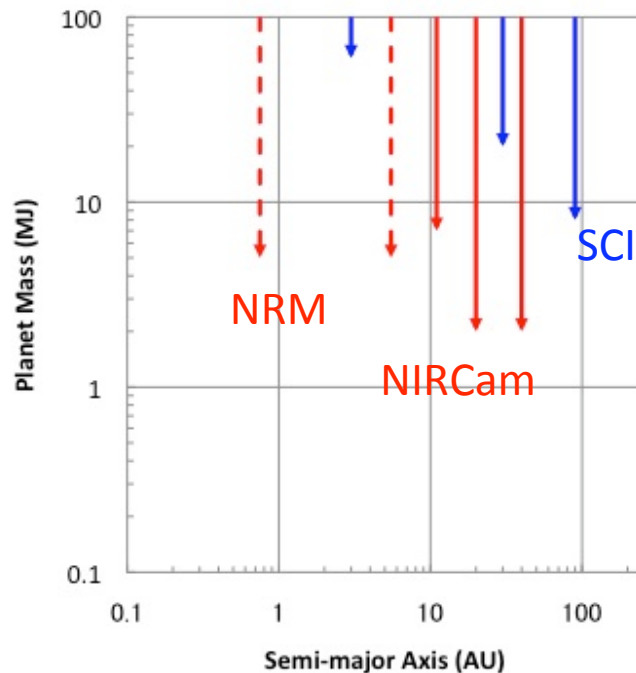
光源(惑星)は
回転。
スペックルを
検出面に固定
(like ADI)

- Non-redundant Mask (NRM)
- Small IWA but not high contrast
- Not high sensitivity



$\lambda < 5\mu\text{m}$ でのJWSTとSPICAの惑星探査

- JWST → NIRCam+ NRMは非常に強力なツール
- SCI → 波面精度の不足のため高いコントラストが望めない



予想される検出限界: 1Gyr (左)、5Gyr (右)

SCIのコントラストカーブ: 小谷さんインプット

JWSTのコントラストカーブ: Beichman et al. (2009)

進化モデル: Burrows et al. (2003)

JWST Coronagraphy @ $\lambda > 10\mu\text{m}$

- JWST/MIRI

- Four Quadrant Phase Mask

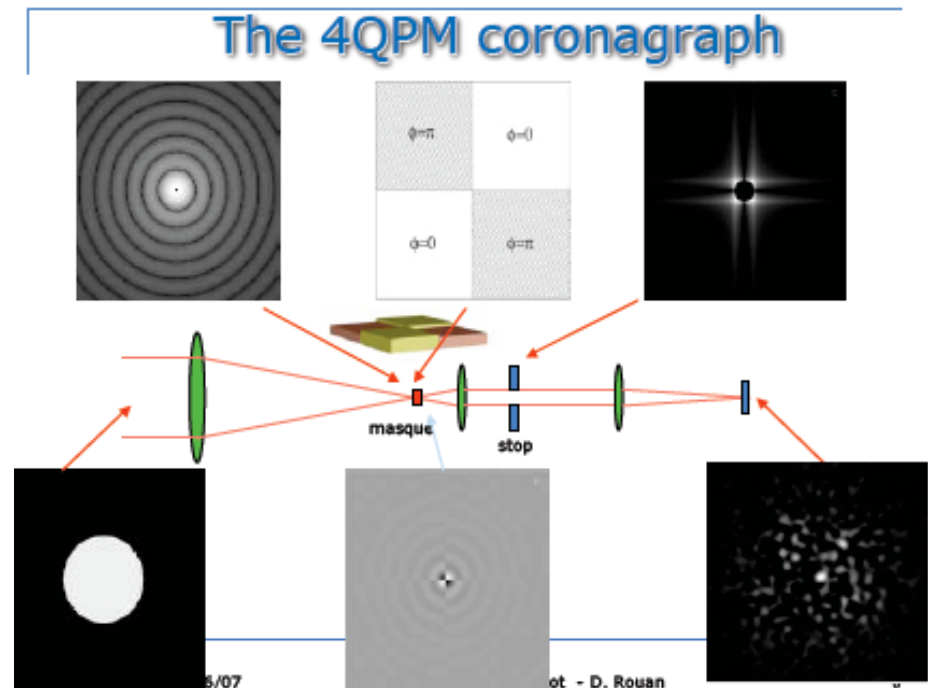
(imposes destructive phase shifts in image plane to suppress on axis source)

- unsuitable to segment mirror

- Tip-tilt error is very sensitive

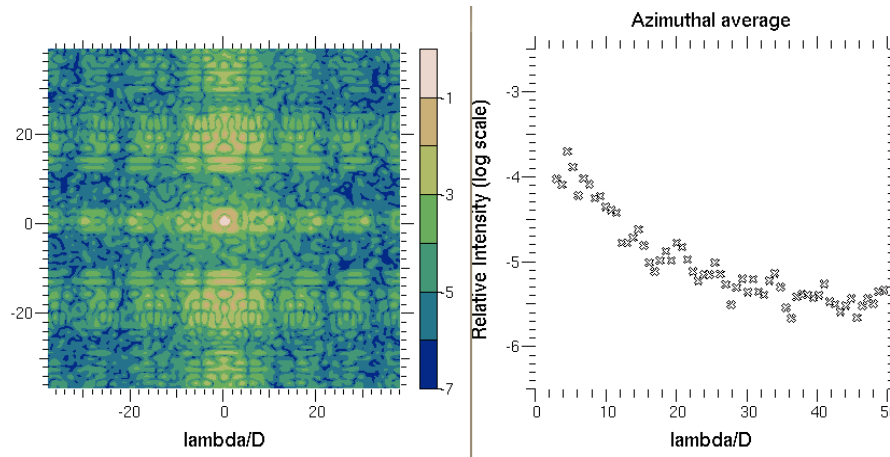
- Small IWA but low contrast

* 2010年の段階で2桁の
コントラストを実証
(ゴールは4桁)

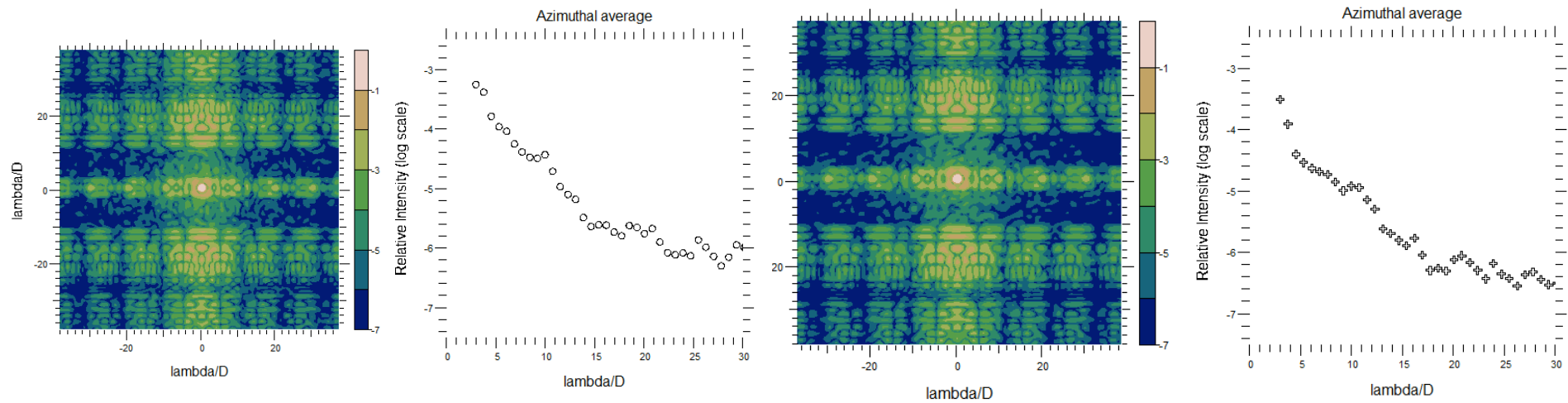


SCI at 10 and 15 μm

小谷さんのシミュレーション引用



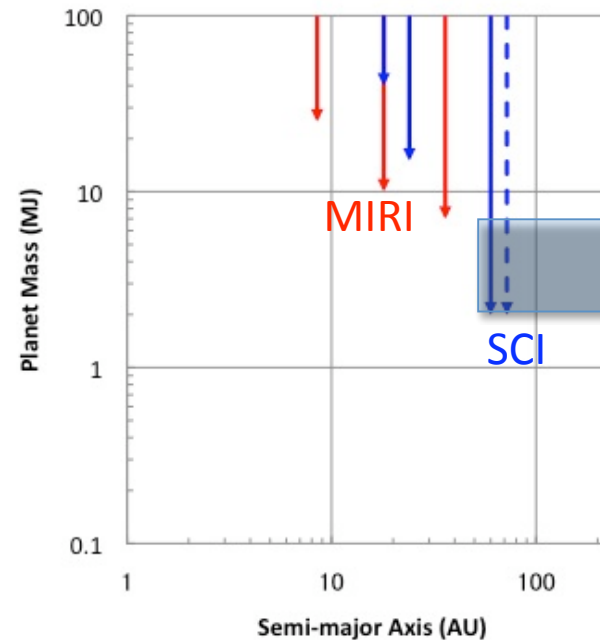
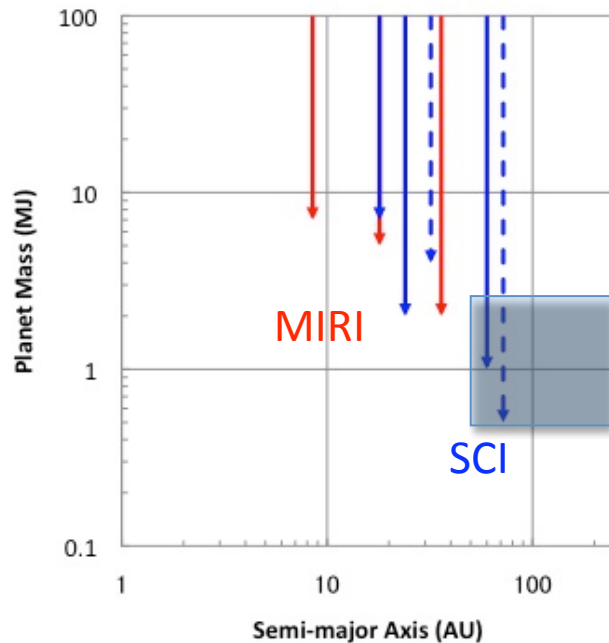
5 μm におけるCoronagraphic Image(左)とコントラストカーブ(右)



10 μm (左)と15 μm (右)におけるCoronagraphic Imageとコントラストカーブ

>10 μm での惑星探査

- JWST → 分割鏡とFQPMの組み合わせはコントラストを得るのに不利
- SPICA → 5 μm に比べて高いSR。(比較的)高いコントラスト。



予想される検出限界: 1Gyr (左)、5Gyr (右)

SCIで新たに開拓できる領域

進化モデル: Burrows et al. (2003)

惑星探査におけるまとめ

- 若い惑星(<500Myr)はHバンドで明るいので、地上観測(SEEDS, +ExAO)で探査可能。
- JWSTやSPICAで狙うべきは、**年齢の進んだ惑星系**
- 1Gyrより年齢の進んだ惑星を狙うには、コントラストが緩和される10 μ mより長波長での観測が良い。
- 10 μ mより長波長において、SCIはMIRIに比べて外側で1桁高いコントラストが得られる。

メッセージ:

→ (空間分解能を犠牲にしても)

JWSTに比べて高いコントラストが得られる**10 μ mより長波長**の観測を活かして、**1Gyrより年齢の進んだ惑星系**の探査。

分光観測における SCIの独自性

James Webb Space Telescope (JWST)

- 6.5m segment mirror;
- Three modes for JWST coronagraphy

	lambda	IWA	OWA	Dynamic Range	Filter (l / dl)
NIRCam/ Coronagraph (Krist 2007)	0.6-5.0 (μm)	$\sim 4l/D$ (500-750 mas)	$\sim 10''$	12.5mag	4, 10, 100
TFI/NRM (Sivaramakrish nan et al. 2009)	1.6-4.9	$\sim 0.5l/D$ (75 mas)	$\sim 0''.5$	10mag using closure phaseup to 12.5 mag after vis. cal.	100
MIRI/ 4QPM	10.65, 11.6, 15.5, 23.0	\sim	$\sim 0''.4$	10 mag	20

- Combination of TFI/NRM and NIRCam/Cor. is very powerful method.

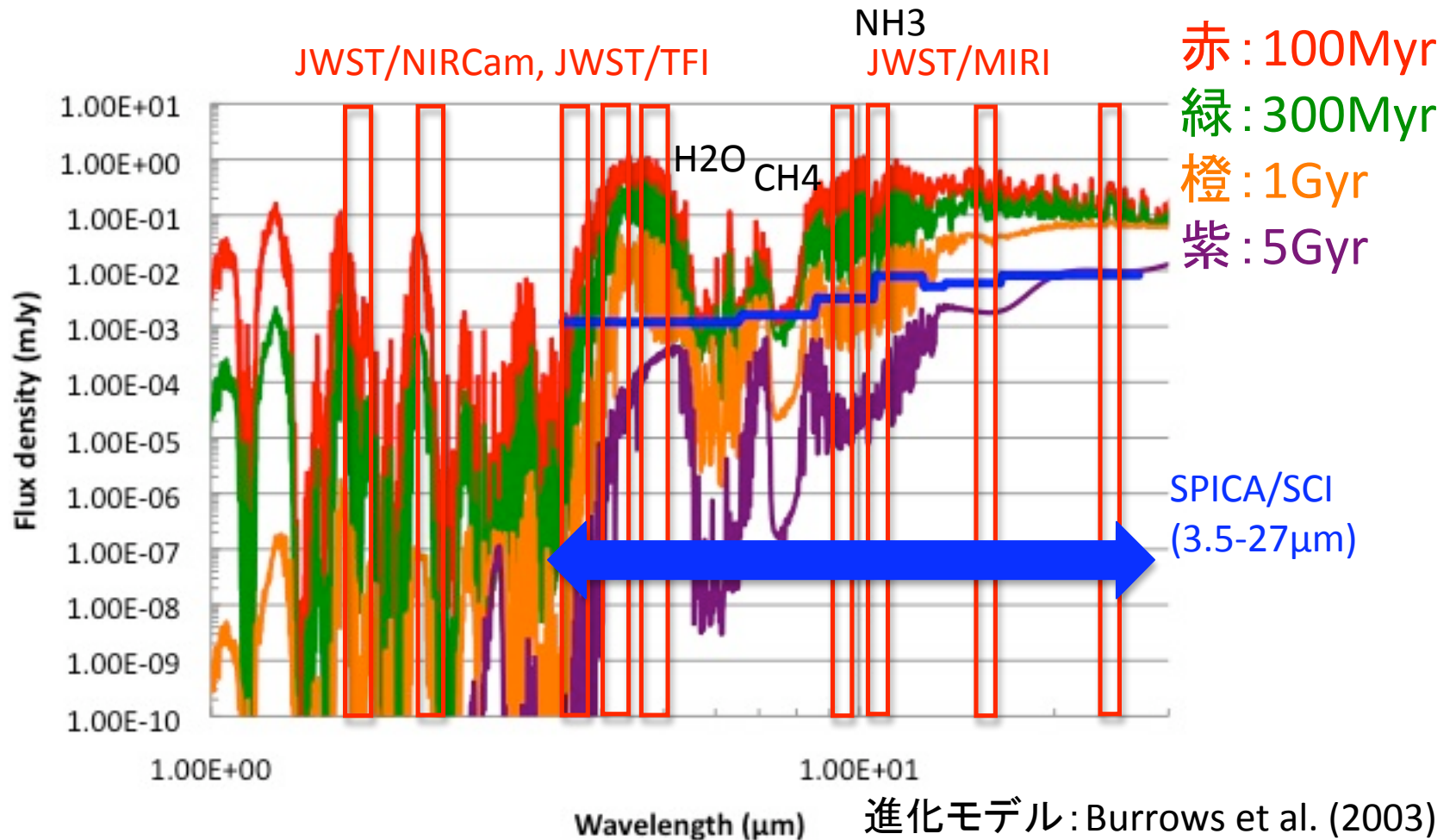
NIRCam : Near Infrared Camera (Univ. of Arizona)

TFI/NRM: Non Redundant Mask with Tunable Filter Imager

MIRI : Mid Infrared Instrument (ESA and JPL)

Wavelength coverage

JWSTはH₂O(6 μ m)、CH₄(7.4 μ m)、NH₃(10.5 μ m)に観測バンドが無い
SPICAは中間赤外線分光できる唯一の観測装置



惑星の進化モデルから予想される2MJの惑星スペクトル

比較を一言でまとめると

- JWSTは惑星探査に特化
 - SPICAは分光による惑星のキャラクターゼーションが有効
- ➔ SPICAはJWST観測後でも系外惑星分野に重要な進展をもたらすことが期待

Advanced Designなら

(伊藤さんの発表参照)

- 主星**近傍**の探査・分光観測も可能
 - **若い惑星から古い惑星までの探査による惑星系の進化**
- 世界初の**氷型惑星の直接観測**
- Advanced Designがあればもっとサイエンスが広がる...
 - 現在のリソースでAdvanced Designの性能に近づけられないか？

SCIによるスペックルサプレッション？

着眼点：

- 波長依存性の低いコロナグラフ
- 非常に安定したL2からの観測

アイデア：

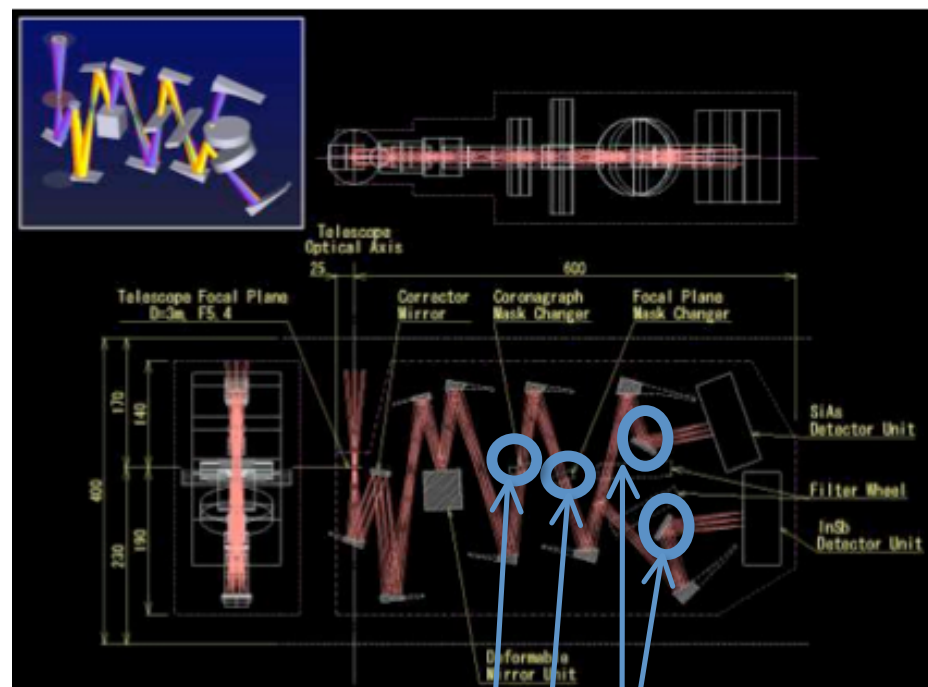
スペックルのライフタイムより短い期間に
フィルターホイールを回転させて、
数色のイメージを取得。
スペックルと惑星光を波長方向に分離。

(疑似)面分光によるスペックルサプレッション

- ➡ 1桁程度のコントラスト改善?
- ➡ 多色のイメージも取得可能

問題：

- 各フィルターにより生じる波面エラーの違い (non-common path error)
 - ➔ 主星光低減後なので影響はない
- 冷凍器の振動によるPSFの安定性
 - ➔ ホイールの回転周期 \ll 冷凍機振動 (100Hz) \rightarrow PSFが太るだけ



SCIの光学系

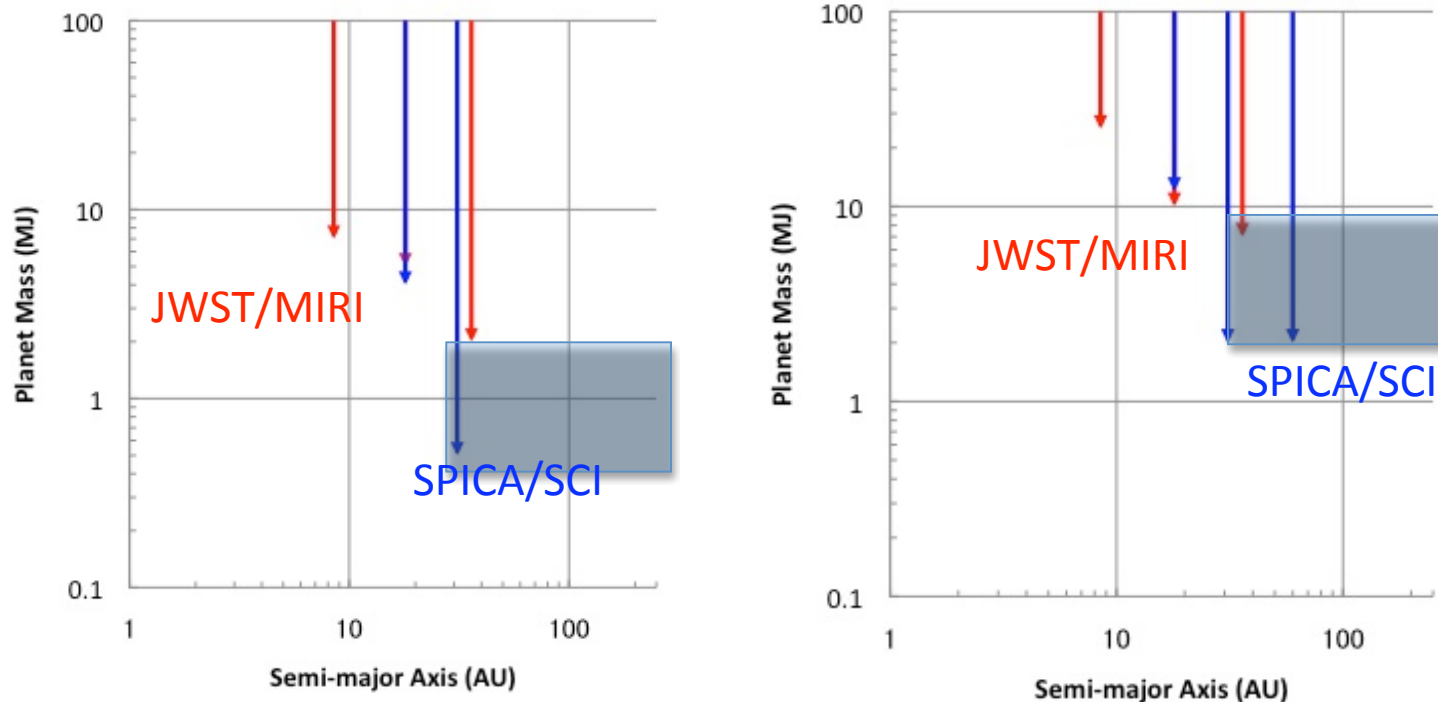
フィルターホイール
オカルティングマスク
バイナリ瞳マスク

JWSTのスペックルサプレッションとの比較

- Roll subtractionは外側(>2")ほど働く。
- (疑似)面分光は内側でも十分に働く。
- JWST/MIRIは位相マスク(FQPM)採用のため、波長依存性が強く、この手法は使用できない。

SCIの新たな惑星探査領域

- 主星近傍に迫る探査が可能に



予想される検出限界: 1Gyr (左)、5Gyr (右)

SCIで新たに開拓できる領域

進化モデル: Burrows et al. (2003)

まとめ

- 惑星の探査とキャラクターゼーションについてJWSTとSPICAの比較
 - SCIの10 μ mより長い波長での観測は古い惑星系の探査において重要
 - SCIで初めて本格的なキャラクターゼーションができる
- (疑似)面分光はSCIで初めて可能になる手法。
 - (検討課題はあるが) Advanced Designの性能に近づけることのできる有望な手法。
 - 氷型惑星の直接観測、年齢の進んだ惑星系で20AU付近に迫れる(RV法とのシナジー)。