

# 原始惑星系円盤における 近赤外線高分解能偏光観測

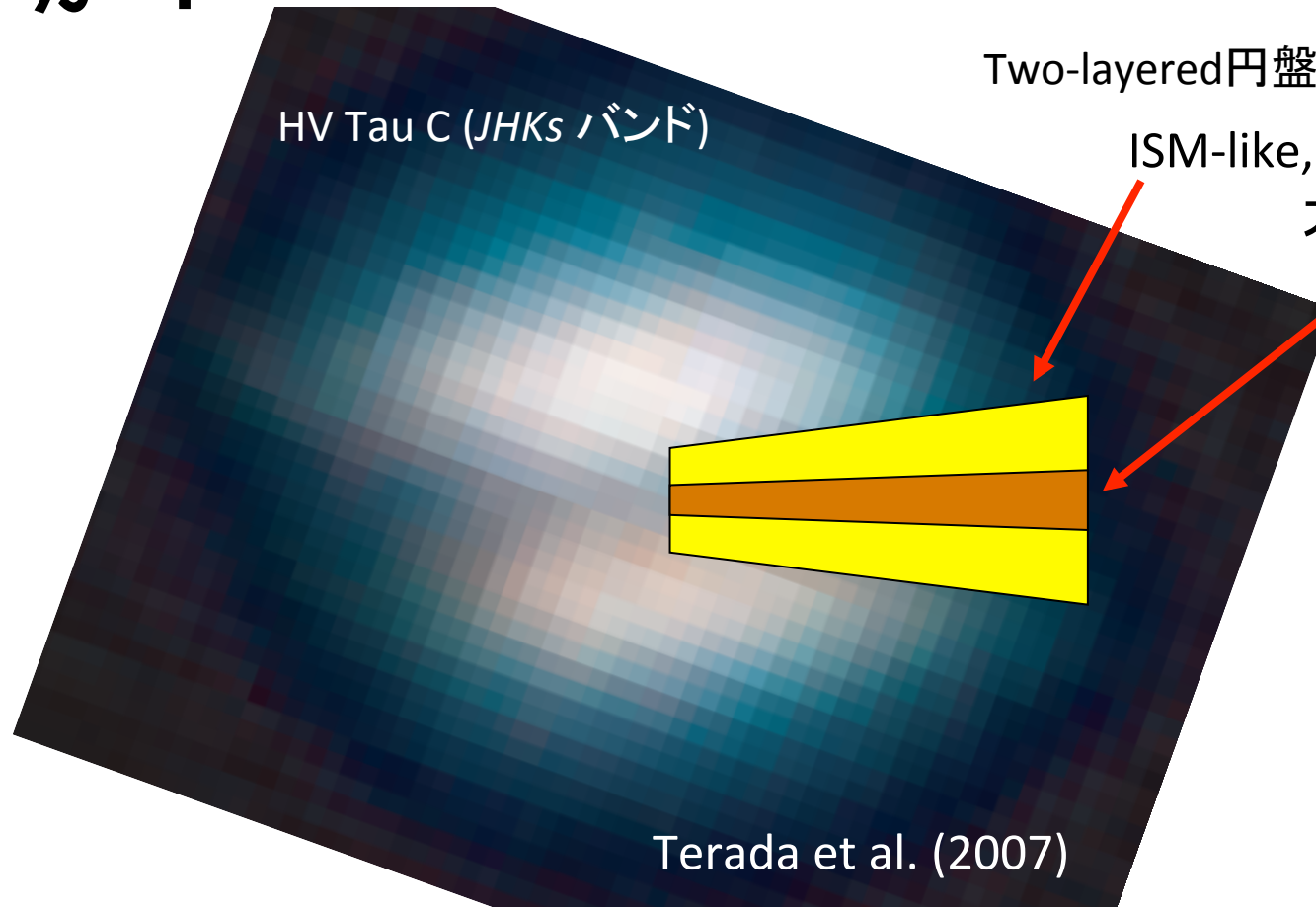
橋本淳

(自然科学研究機構 国立天文台/アストロバイオロジーセンター)

# 本日の話の流れ

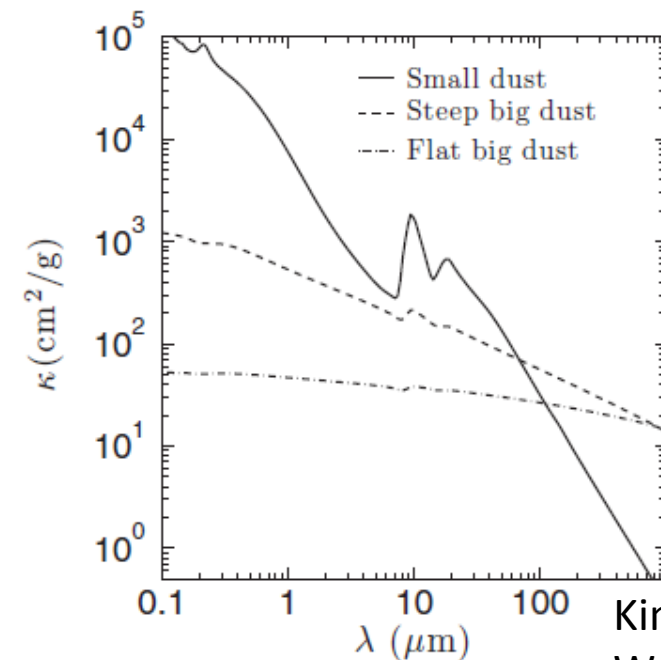
- すばる望遠鏡戦略枠観測 (SEEDS) までの近赤外線直接撮像観測
- SEEDSにおける原始惑星系円盤の観測
- 近年の極限補償光学と組み合わせた円盤の観測

# 近赤外線(1 $\mu\text{m}$ )は円盤のどこをトレースするか？



(e.g., D'Alessio et al. 2006)

### 固体微粒子の質量吸収係数

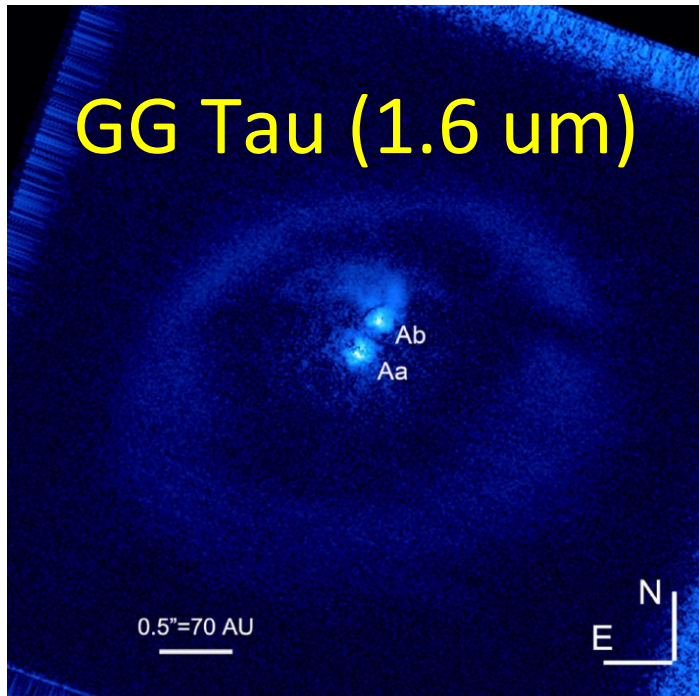


Kim et al. (1994);  
Wood et al. (2002)

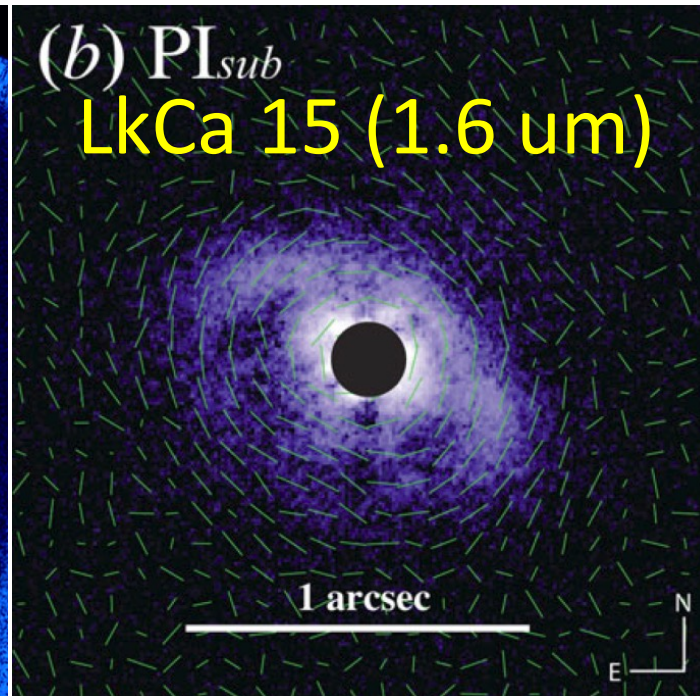
近赤外線観測: 円盤表面の小さな(<1 $\mu\text{m}$ )  
固体微粒子の幾何学的分布をトレース

# 近赤外線観測のメリットは何か？

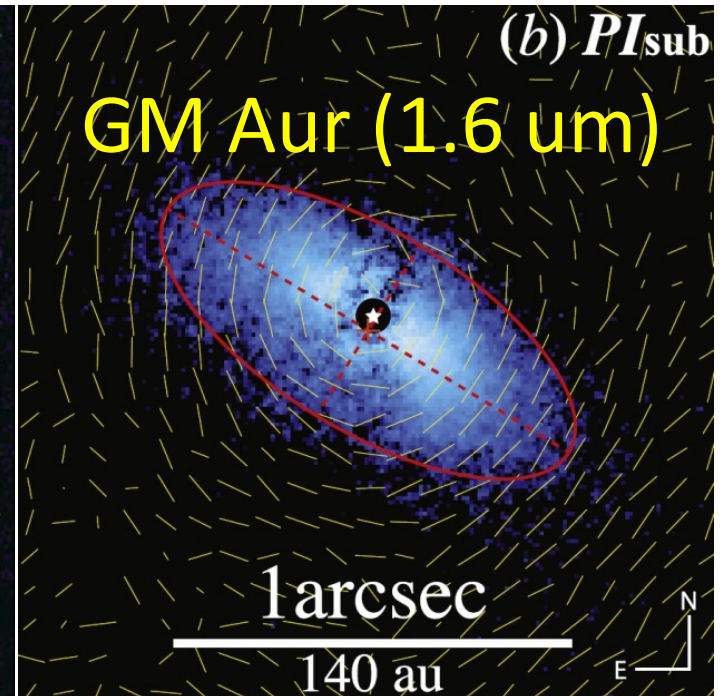
- サブミリ波観測と相補的
- 比較的容易に高空間分解能(0.05秒角程度)観測を達成可能
  - 観測時間1時間程度(オーバーヘッド込み)で十分なSN比の検出



Yang et al. (2017)



Oh et al. (2016a)

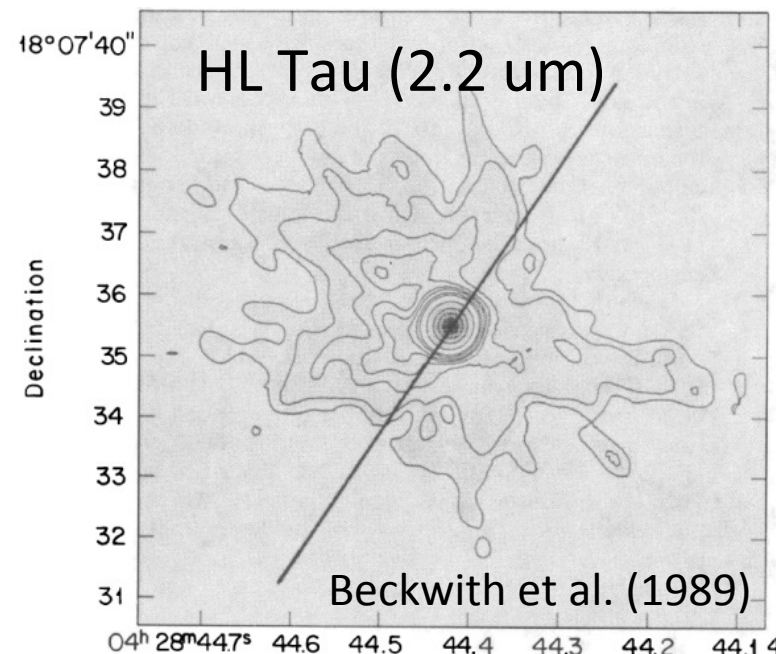
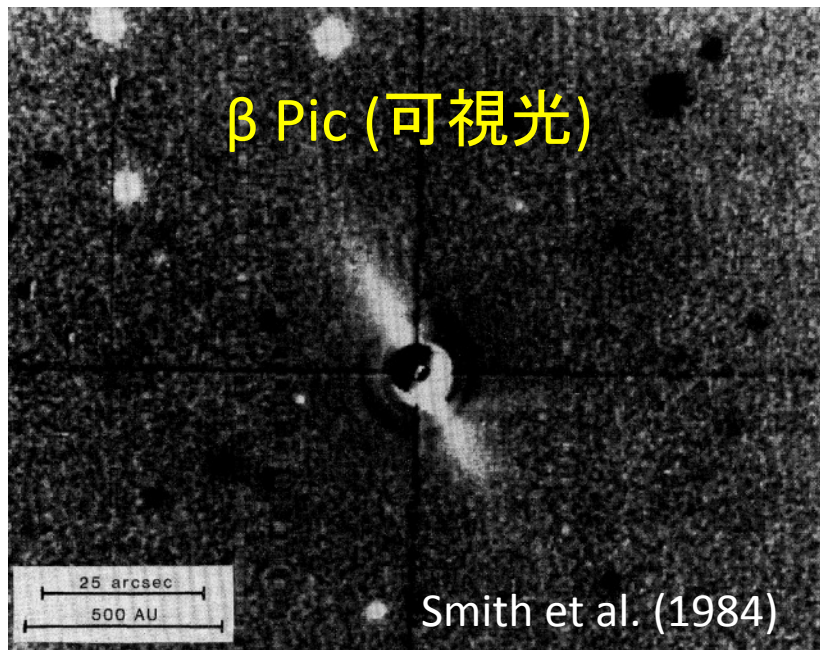


Oh et al. (2016b)



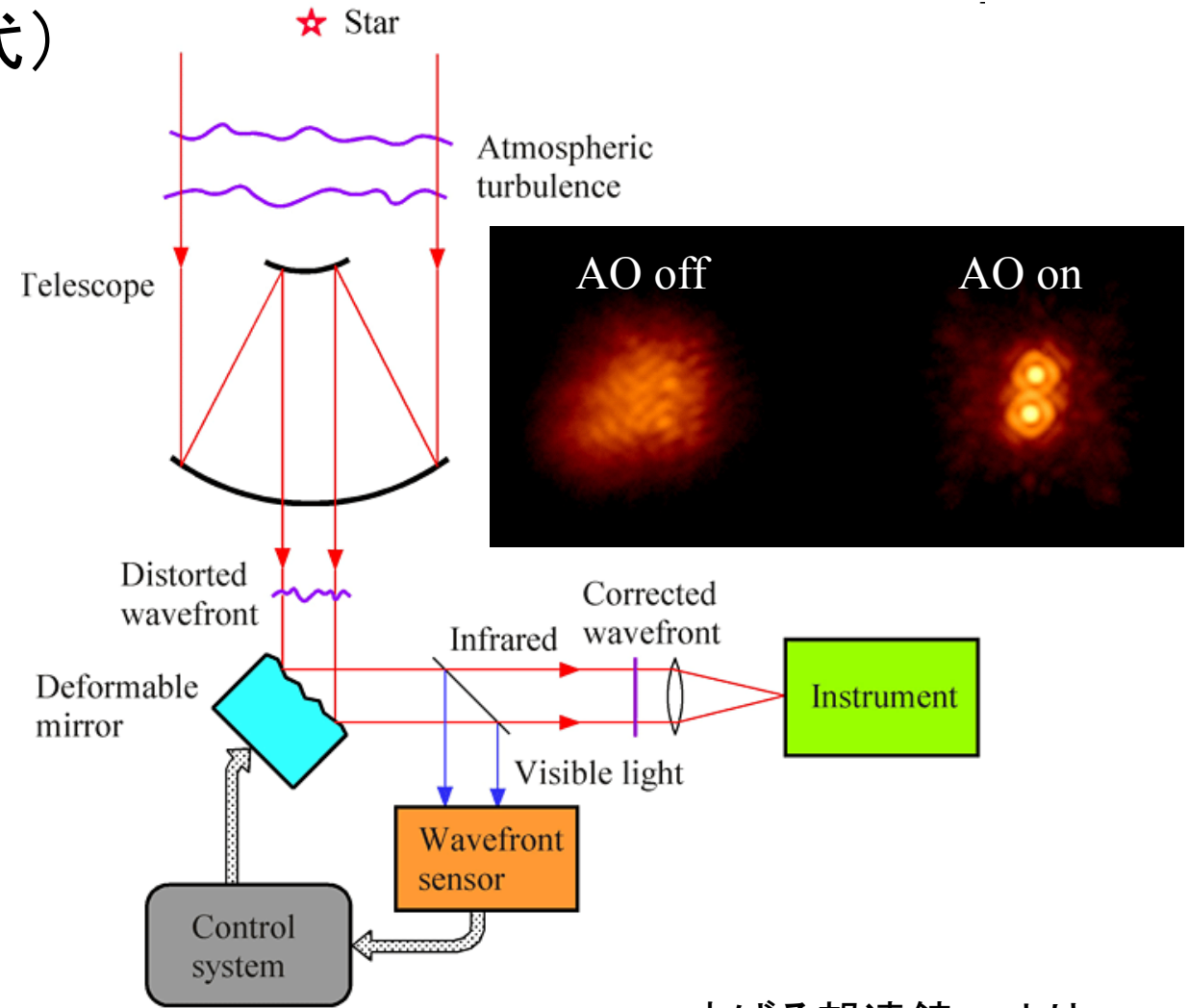
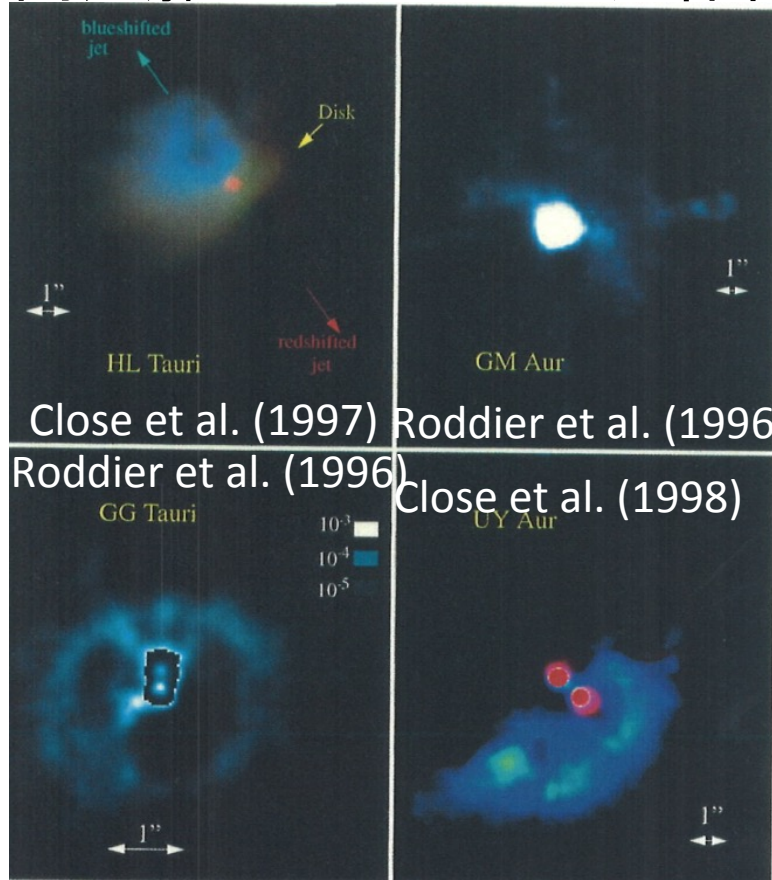
# 可視・近赤外線直撮像の小史(1)

- ハッブル宇宙望遠鏡 (HST; 1990年打ち上げ) 以前は数天体のみ
  - シーイングの影響で空間分解能1秒角程度
  - 可視・近赤外線では中心星が明るい



# 可視・近赤外線直撮像の小史(2)

- HSTや補償光学の登場(1990年代)
  - 0.1秒角程度の空間分解能
  - 空間分解されたYSOは10天体程度



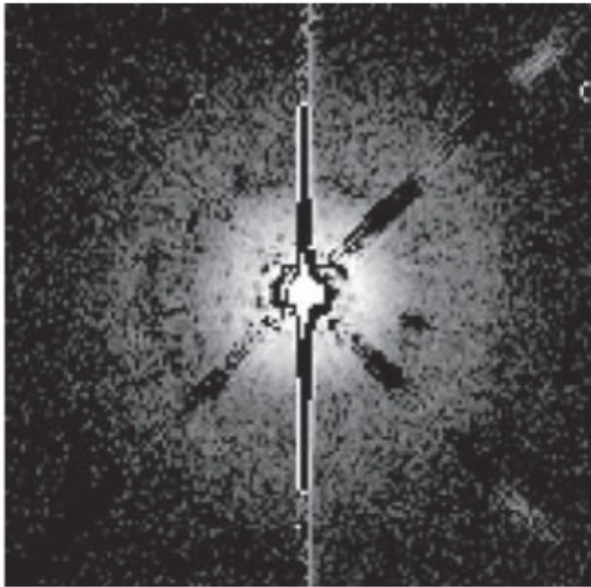
すばる望遠鏡HPより

Schematic diagram of adaptive optics

# 可視・近赤外線直撮像の小史(3)

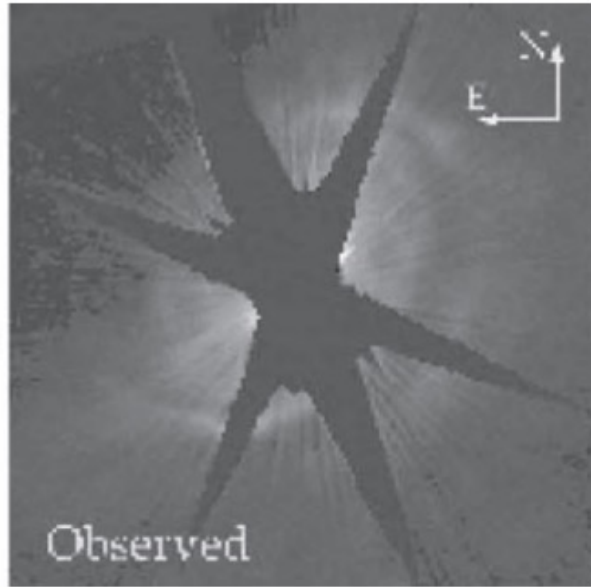
- 2000年代の直接撮像
  - 0.1秒角程度の空間分解能
  - スパイラルやギャップ構造など

TW Hya (可視光)



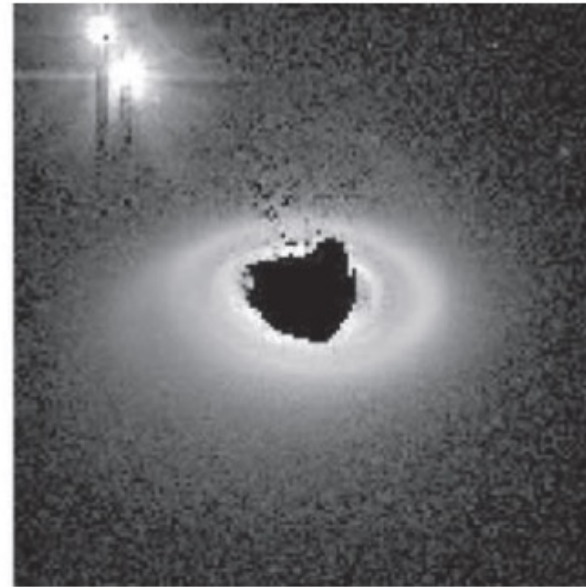
Krist et al. (2001)

HD 100546 (可視光)



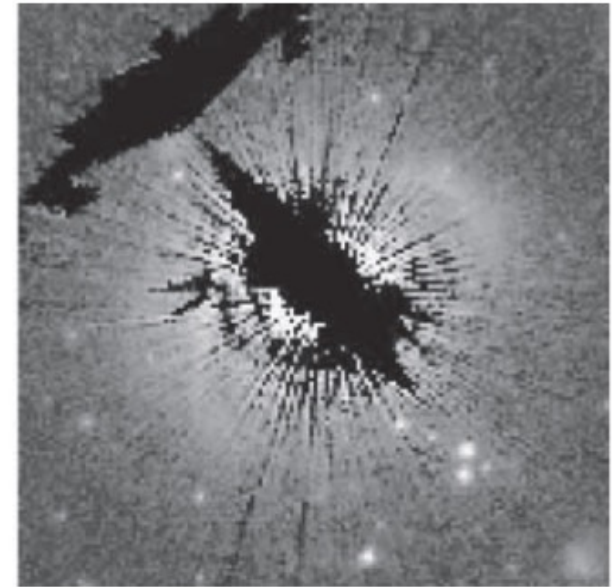
Grady et al. (2001)

HD 141569A (可視光)



Clampin et al. (2001)

HD 163296 (可視光)

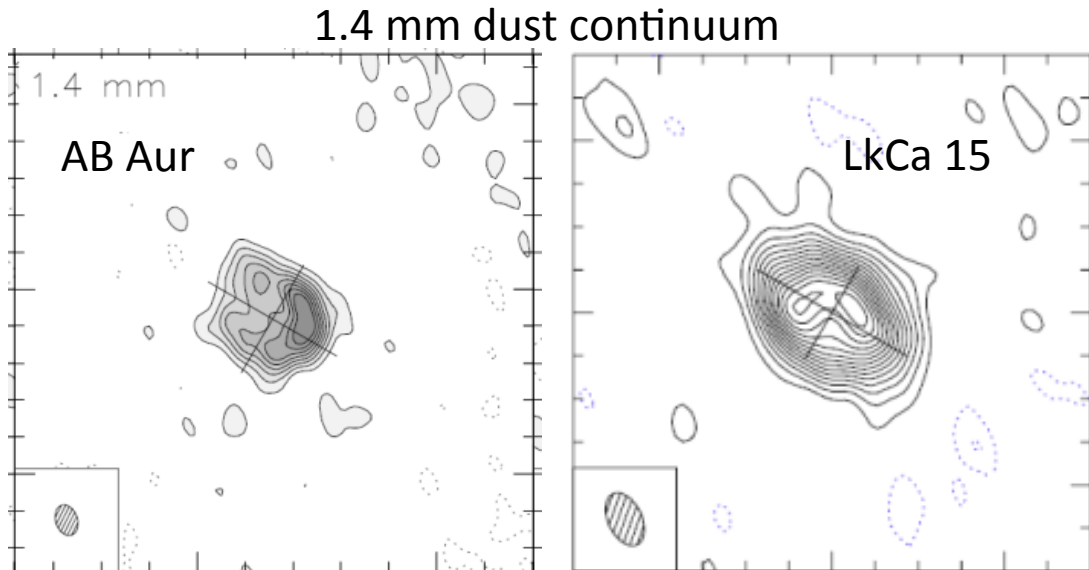


Grady et al. (2000)



# 可視・近赤外線直撮像の小史(4)

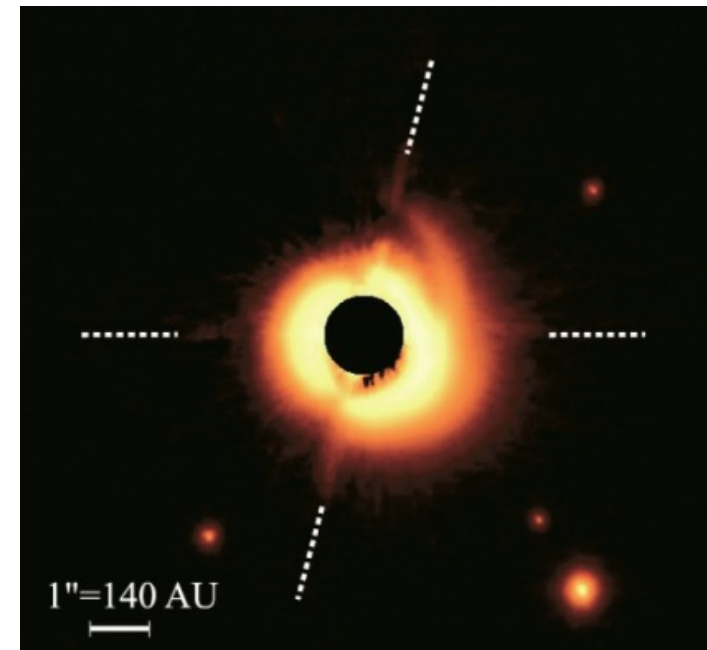
- 2000年代の遷移円盤(後述)の観測
  - 電波干渉計が先行
  - 可視・近赤外線観測は希少
    - 高コントラスト観測(SEEDS)が必要



Pietu et al. (2005)

Pietu et al. (2006)

HD 142527 (1.6  $\mu\text{m}$ )

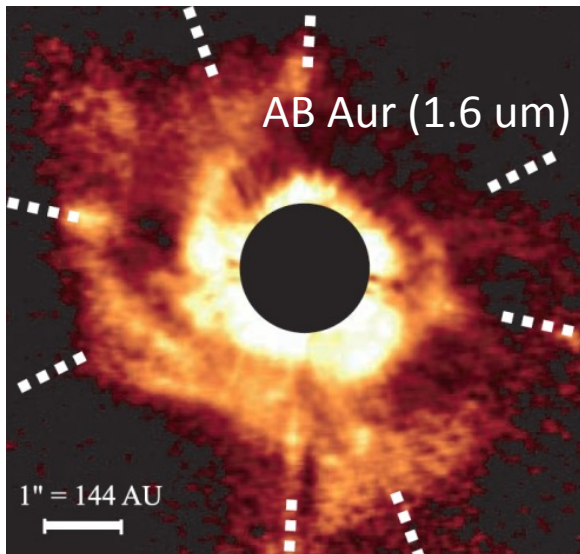


Fukagawa et al. (2006)

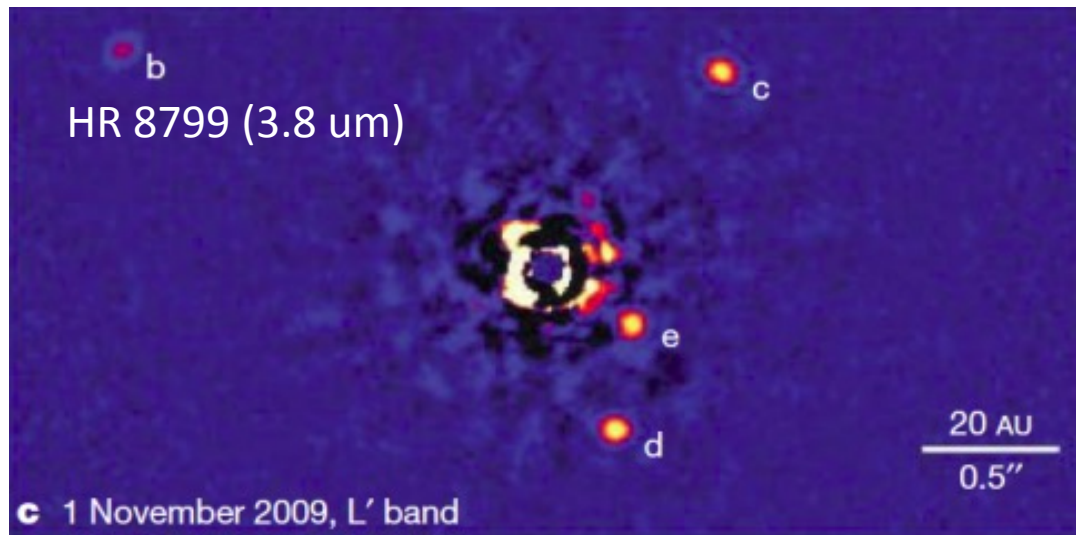


# SEEDSにおける原始惑星系円盤の観測

- すばる望遠鏡戦略枠観測 (SEEDS: Strategic Exploration of Exoplanets and Disks with Subaru )
  - 最初の“すばる戦略枠観測 (SSP)” (2009-2015)
    - PI: 田村元秀 (アストロバイオロジーセンター センター長)
  - 新しい高コントラストカメラ HiCIAO と 新補償光学装置 AO188
  - 5年で120夜かけて近傍の小中質量星500天体の直接撮像
    - RVやトランジット観測(半径数AUから数10AU)と相補的
  - 同じ軌道長半径の原始惑星系円盤と残骸円盤の直接撮像



円盤の形態と惑星形成の  
関連性の観測的研究



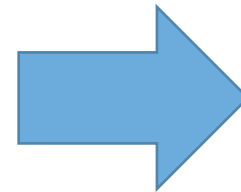
# 若い星の探査 (YSO) カテゴリー

SEEDSにおける5つのカテゴリー

円盤サーベイ		系外惑星サーベイ		
原始惑星系円盤	残骸円盤	~1-10Myr サンプル	~10-100Myr サンプル	~100-1000Myr サンプル

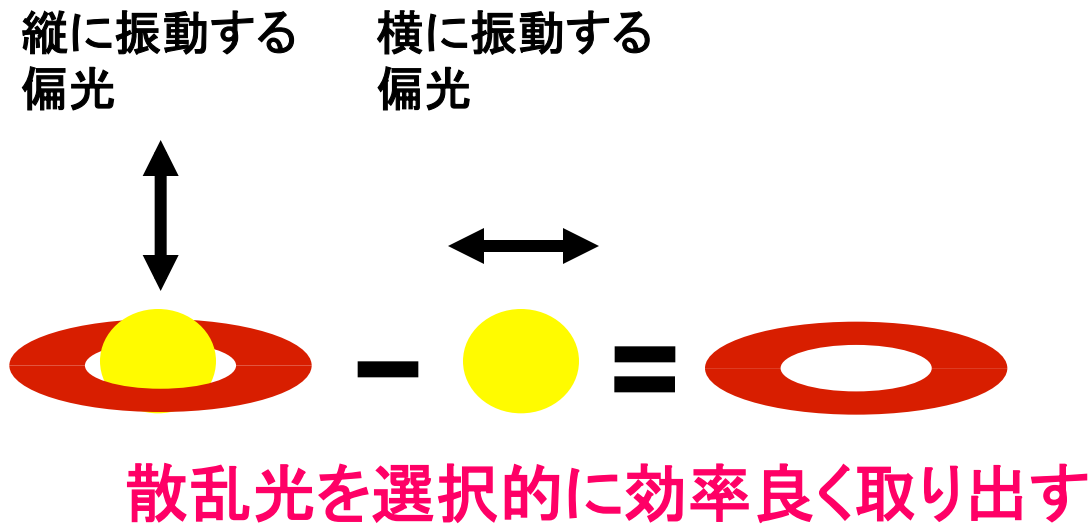
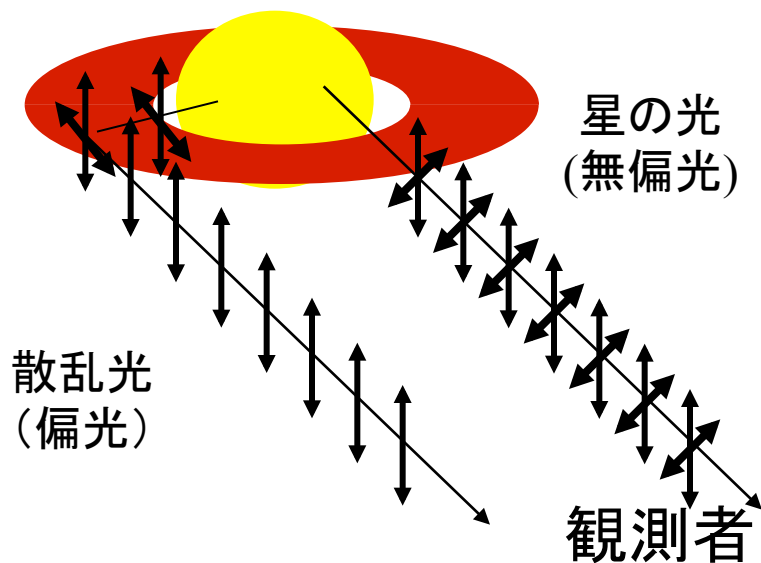
- YSOカテゴリーにおける7つの sub-category

- Binary カテゴリー (兵庫県立大学 伊藤氏)
- Massive disk カテゴリー (名古屋大学 深川氏)
- Lupus カテゴリー (茨城大学 百瀬氏)
- Oph カテゴリー (ABC 葛原氏)
- RCrA カテゴリー (ABC 日下部氏)
- USco カテゴリー (総研大 眞山氏)
- Taurus カテゴリー (ABC 橋本)



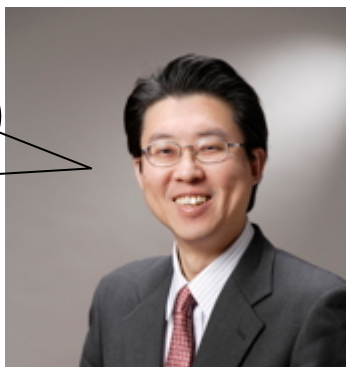
50人程度 (外国人を含む) の  
国際研究チーム

# 円盤観測の手法: Dual beam polarimetry

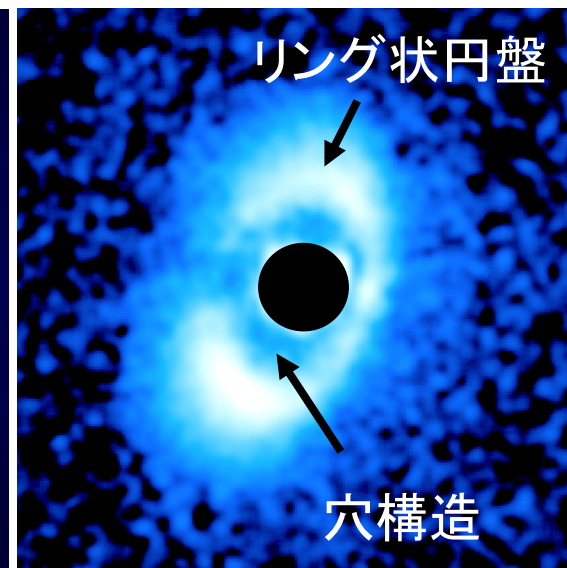


- 半径50AU以内の円盤構造を0.1秒角以下の空間分解能で観測可能

やっとハッブルに勝った♪



田村センター長

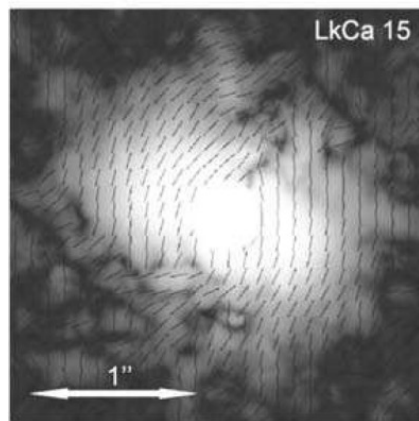


Hashimoto et al. (2012)

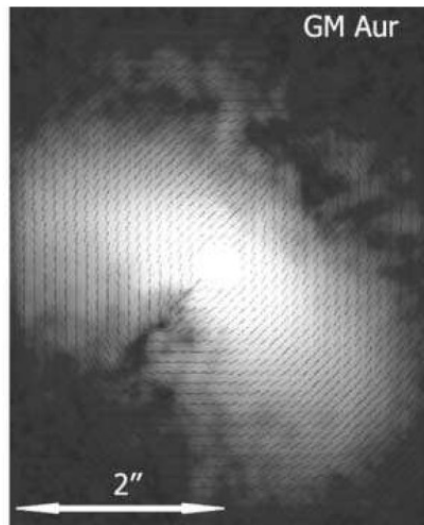


# Dual beam polarimetryの例

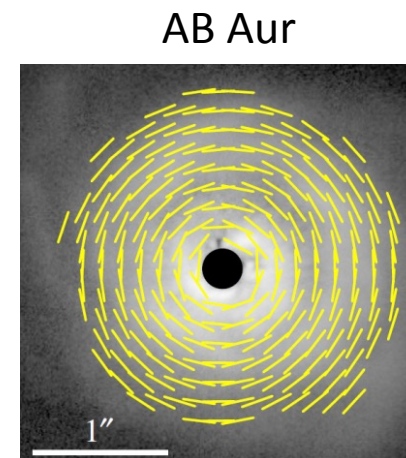
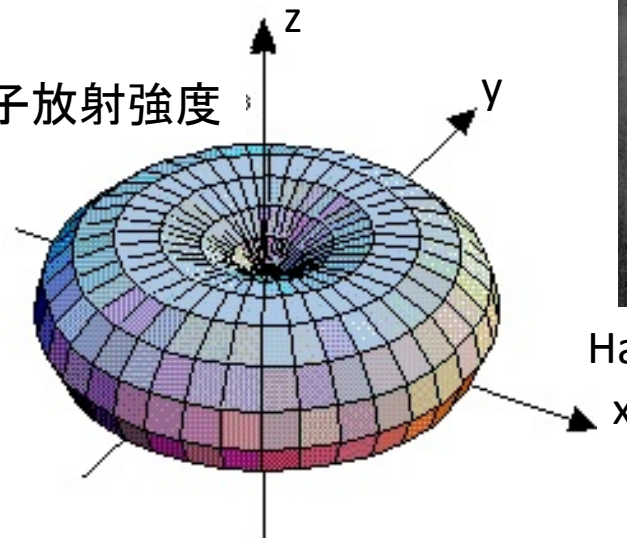
- SEEDSの5年以上前に8m級望遠鏡に搭載



Potter (2005)



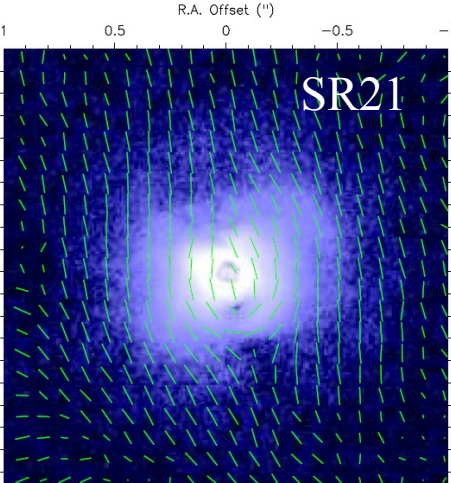
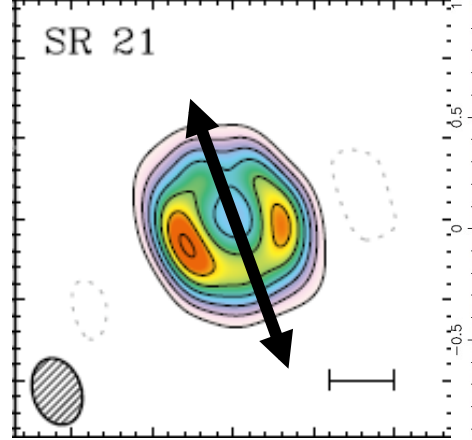
双極子放射強度



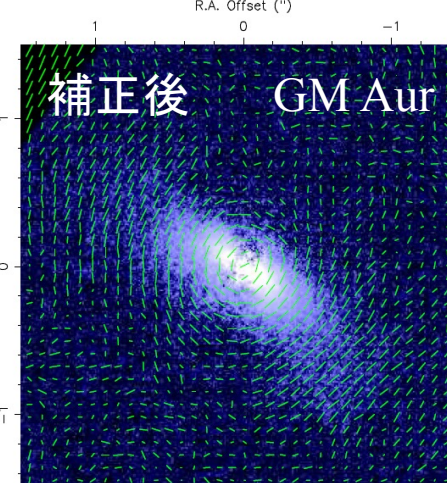
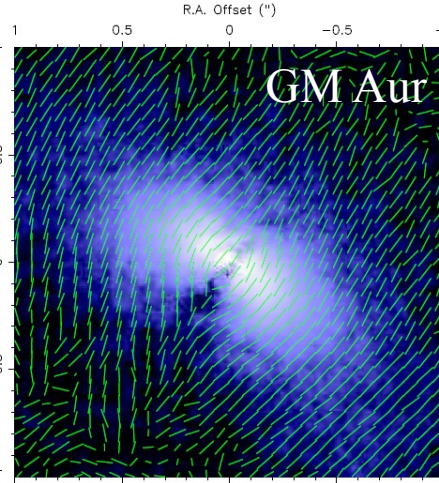
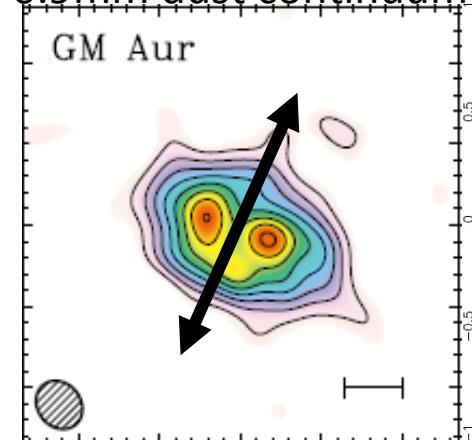
Hashimoto et al. (2011)

- SEEDSでも同様の偏光ベクトルパターン

0.9mm dust continuum



0.9mm dust continuum



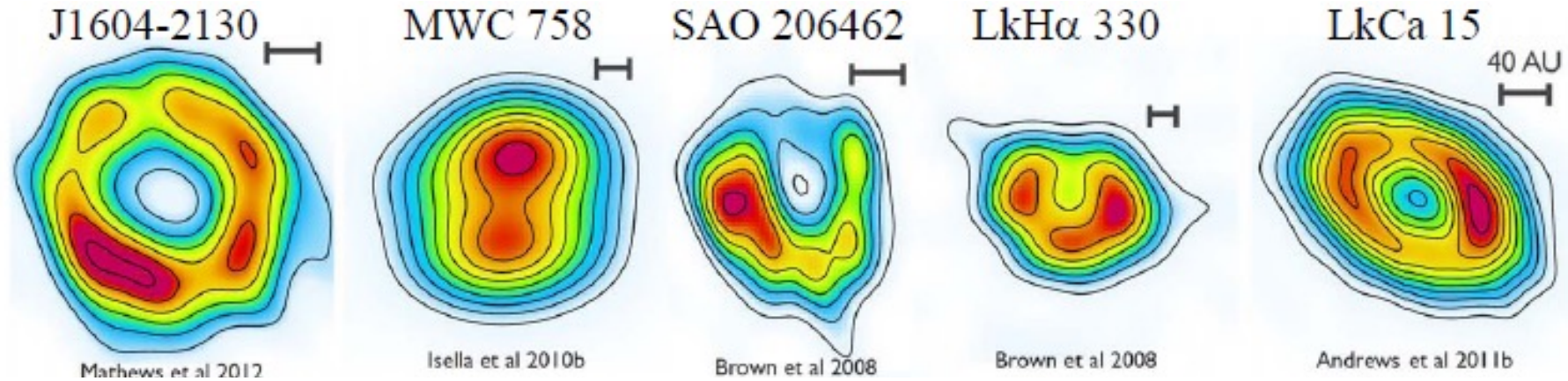
Andrews et al. (2011)

Andrews et al. (2011)

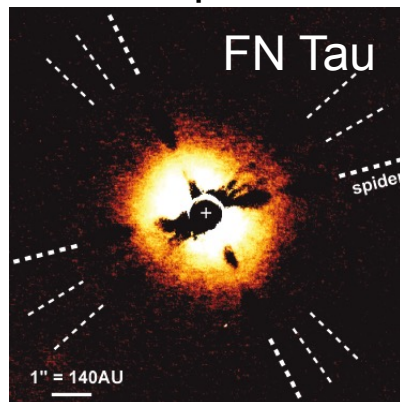


# 主な観測ターゲット

- 遷移円盤天体(サブミリ波ダスト連続波)

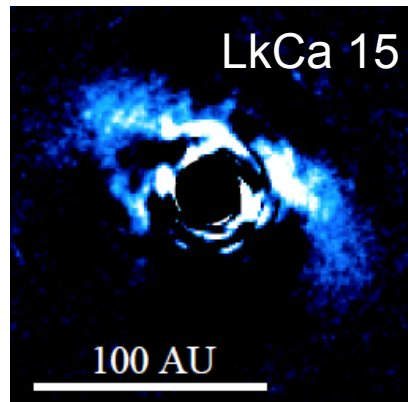


ガスが豊富な primordial disk



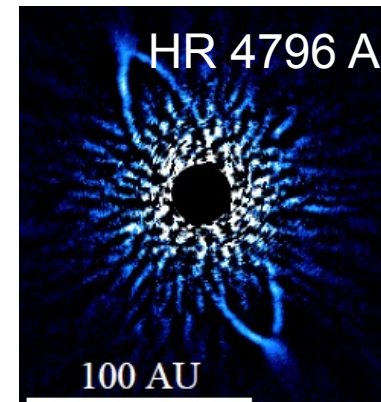
Kudo et al. (2008)

遷移円盤



Thalmann et al. (2010)

ガスが少ない debris disk



Thalmann et al. (2011)

- 惑星形成を理解する重要サンプル

# 観測結果および投稿論文数

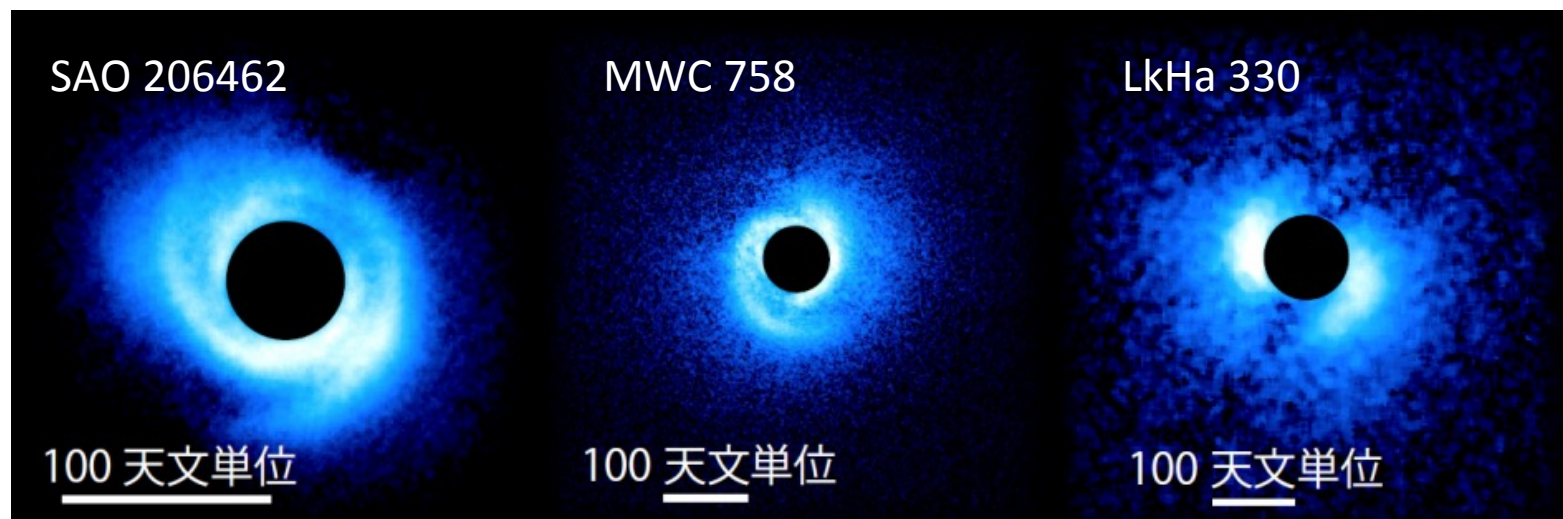
- **79天体**観測（フォローアップ等の重複を除く）
  - 円盤の検出数: 約**50**天体
  - 新規惑星の検出数: 0天体
  - 新規惑星候補天体: 1天体
- 投稿論文
  - 出版済み: **28**
  - 準備中: **15-20 前後**
- まとめ論文
  - 惑星探査 (Uyama et al. 2017)
  - 円盤探査 (Hashimoto et al. in prep.)

円盤模様

ギヤラリー

# SEEDS円盤探査の主な結果

- ミニスパイラル構造



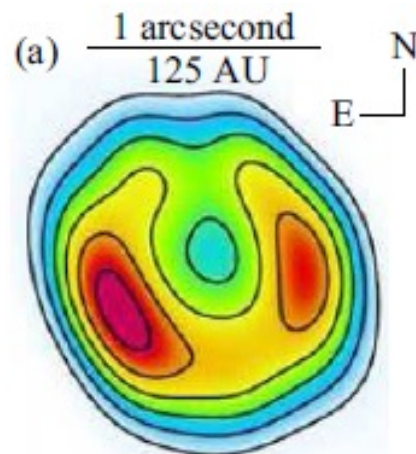
Muto et al. (2012)

Grady et al. (2013)

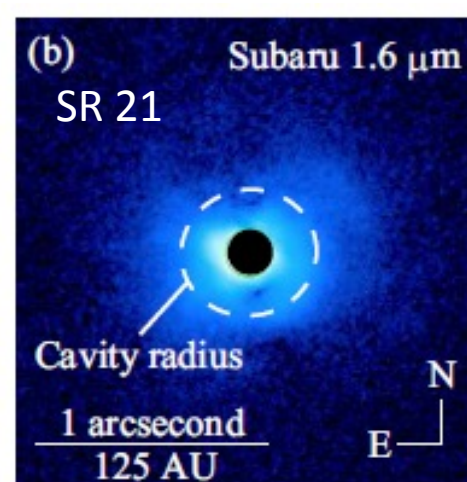
Akiyama et al. (2015)

- 近赤外線と電波における穴のサイズの違い

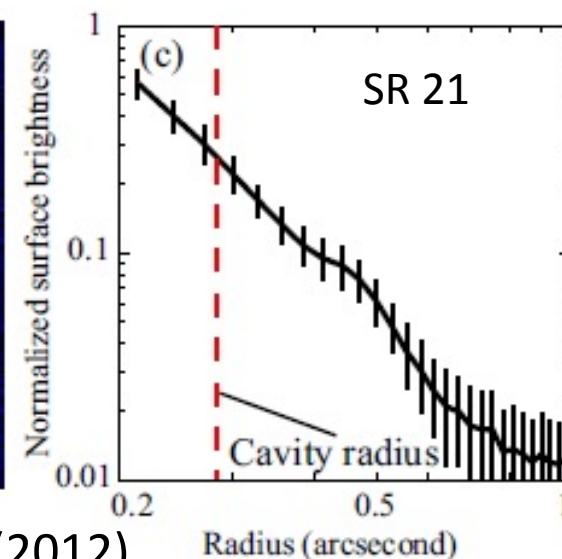
SR 21



Brown et al. (2009)



Follette et al. (2012)





# スパイラルを励起した惑星の位置 (Muto et al. 2012)

惑星によって励起される  
スパイラル構造の数値計算

- **密度波理論**

- 角速度  $\Omega(r) \propto r^{-\alpha}$

- 音速  $c(r) \propto r^{-\beta}$

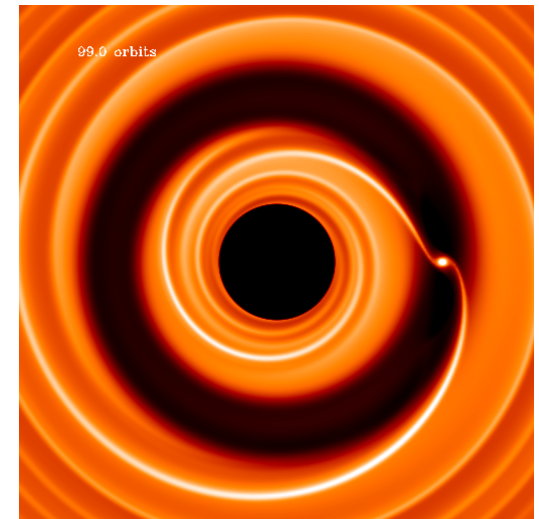
- **スパイラルの形状 :**

$$\theta(r) = \theta_0 - \frac{\text{sgn}(r - r_c)}{h_c} \times$$

極座標表示  $(r, \theta)$ .

$$\left[ \left( \frac{r}{r_c} \right)^{1+\beta} \left\{ \frac{1}{1+\beta} - \frac{1}{1-\alpha+\beta} \left( \frac{r}{r_c} \right)^{-\alpha} \right\} - \left( \frac{1}{1+\beta} - \frac{1}{1-\alpha+\beta} \right) \right]$$

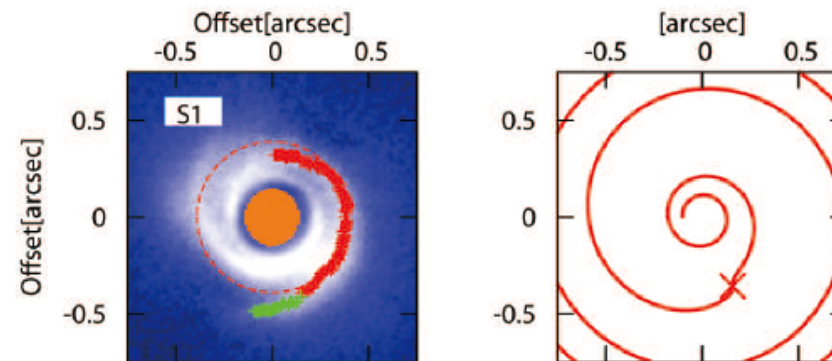
ここで  $r_c$  と  $\theta_c$  は惑星の位置を表し,  
 $h_c$  は惑星の位置における円盤のアスペクト比.



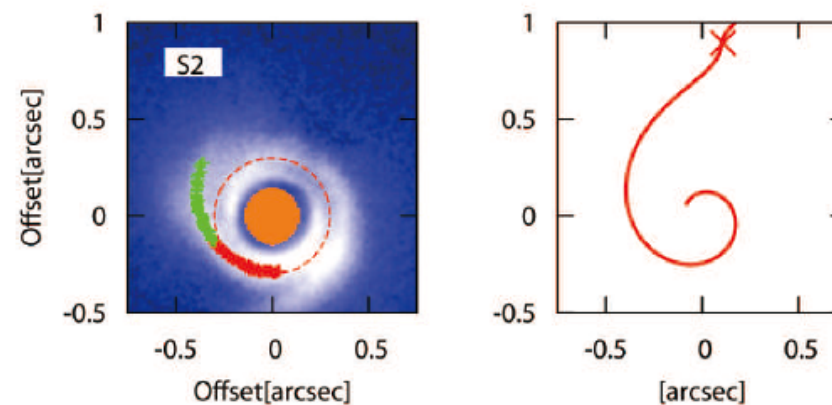
(Masset氏HPより)

# SAO 206462 への適用例

$$(r_c, \theta_0, h_c) = (0''.39, 204^\circ, 0.08)$$



$$(r_c, \theta_0, h_c) = (0''.9, 353^\circ, 0.24)$$

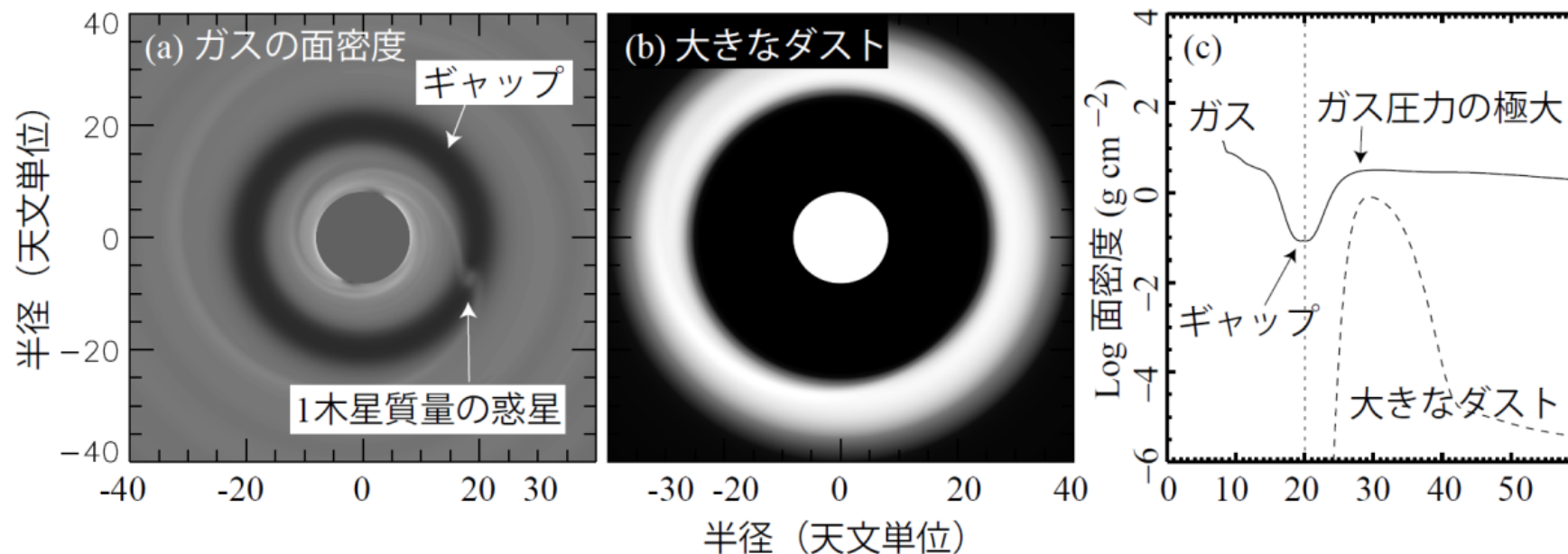


スパイラルの振幅:  $\sim 30\%$   $\rightarrow$  惑星の質量:  $\sim 0.5 M_{\text{Jup}}$

惑星が未検出でも、惑星の位置と質量を予想可能

# 穴構造の大きさの違いについて

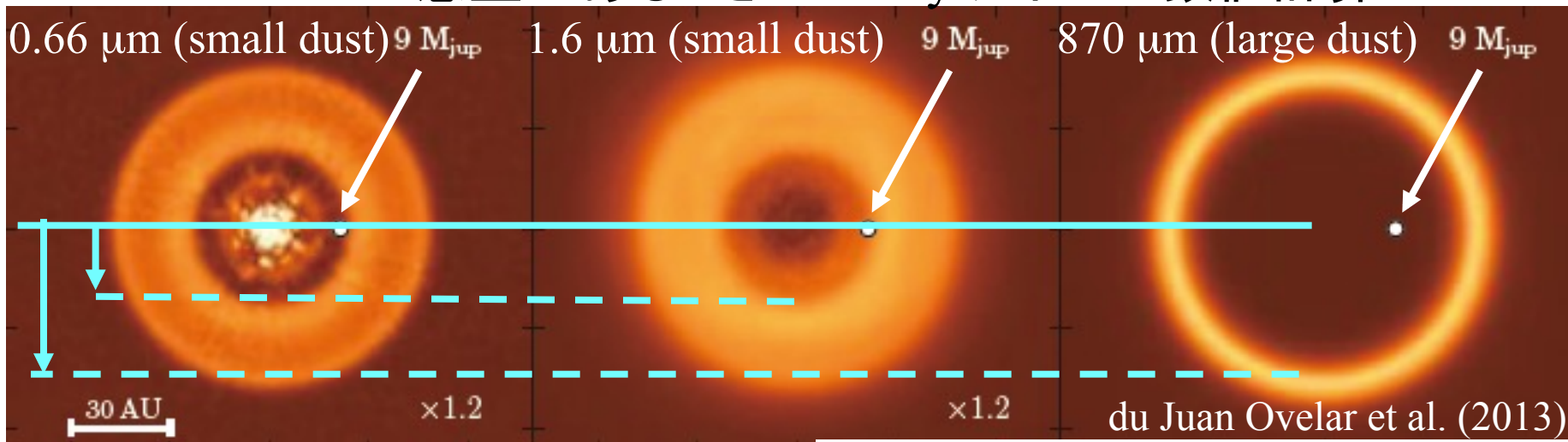
惑星が存在する場合のガスとダストの面密度分布の数値計算 (Z. Zhu提供)



- 惑星の存在を仮定すれば説明は可能
  - Rice et al. (2006); Pinilla et al. (2012); Zhu et al. (2012); de Juan Ovelar et al. (2013)
- 大きなダスト (mmサイズ) はガスの圧力極大半径にトラップされる
- ガスとカップルした小さいダスト ( $\mu\text{m}$ サイズ) はガスとともに中心星へ降着

# 穴の大きさから惑星質量を見積もる

惑星があるときのcavityサイズの数値計算

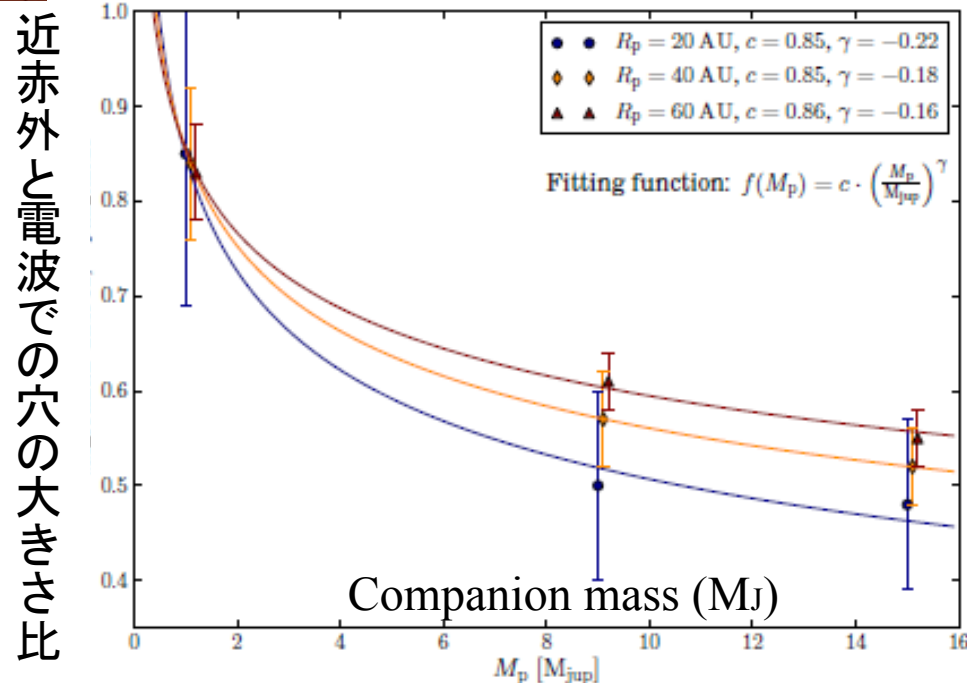


$R_{c\_0.66}$  = 壁の半径 (0.66  $\mu\text{m}$ )  
 $R_{c\_870}$  = ピークの半径 (870  $\mu\text{m}$ )

近赤外と電波の  
穴の大きさ比

$$\frac{R_{c\_0.66}}{R_{c\_870}} = c \cdot \left( \frac{M_p}{M_{\text{jup}}} \right)^\gamma$$

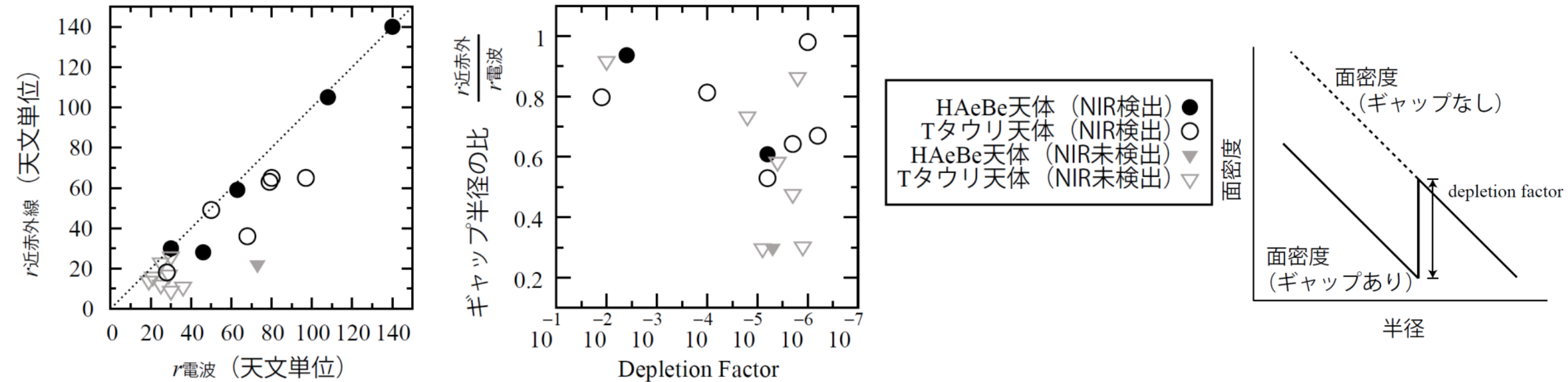
**惑星質量が予想可能:  
重いほど比が小さい**





# SEEDS観測天体への適用

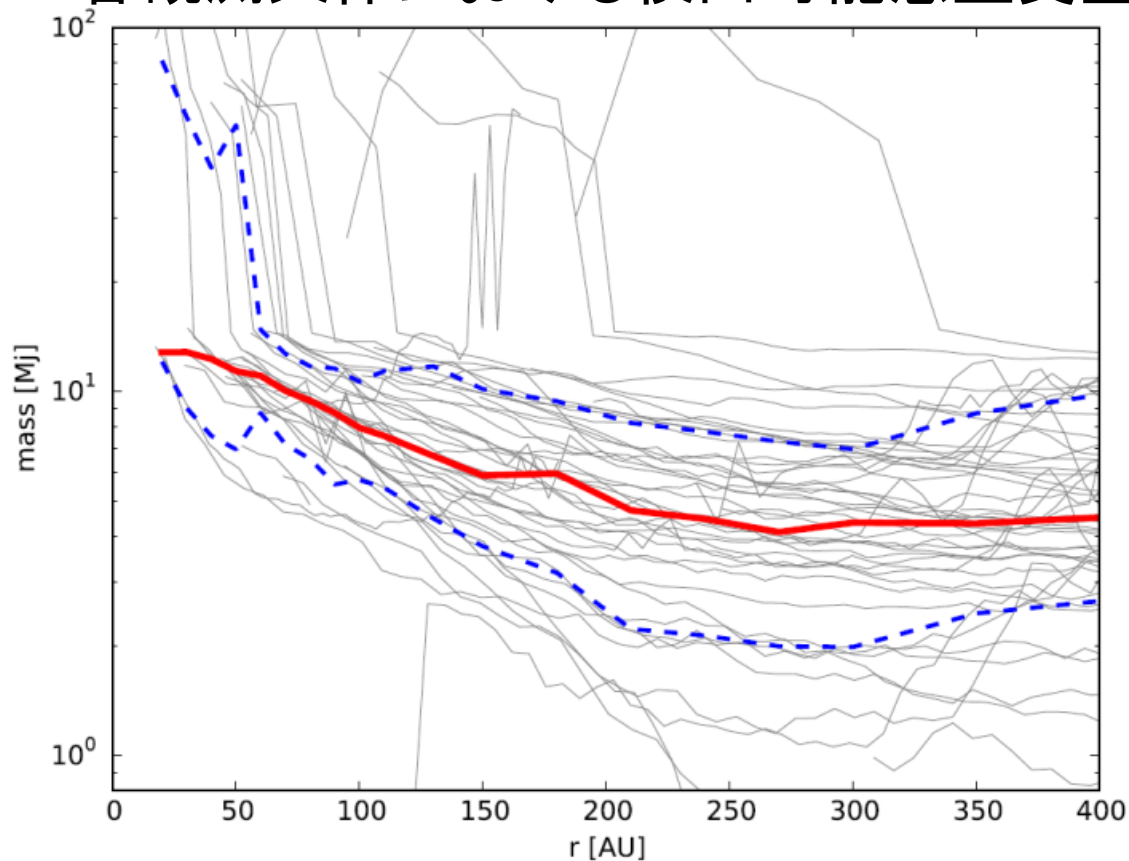
- 約40天体の観測例のうち、電波観測のある20天体を使用



- 電波における穴のサイズの方が大きい(左図)
- Depletion factorが小さいほど穴サイズ比が小さい(中図)
  - 惑星が重いほど穴サイズ比が小さい (du Juan Ovelar et al. (2013))
  - 惑星が重いほどDepletion factorが小さい(kanagawa et al. 2015)
- 惑星によって穴が形成された場合と矛盾はしない(Hashimoto et al. in prep.)

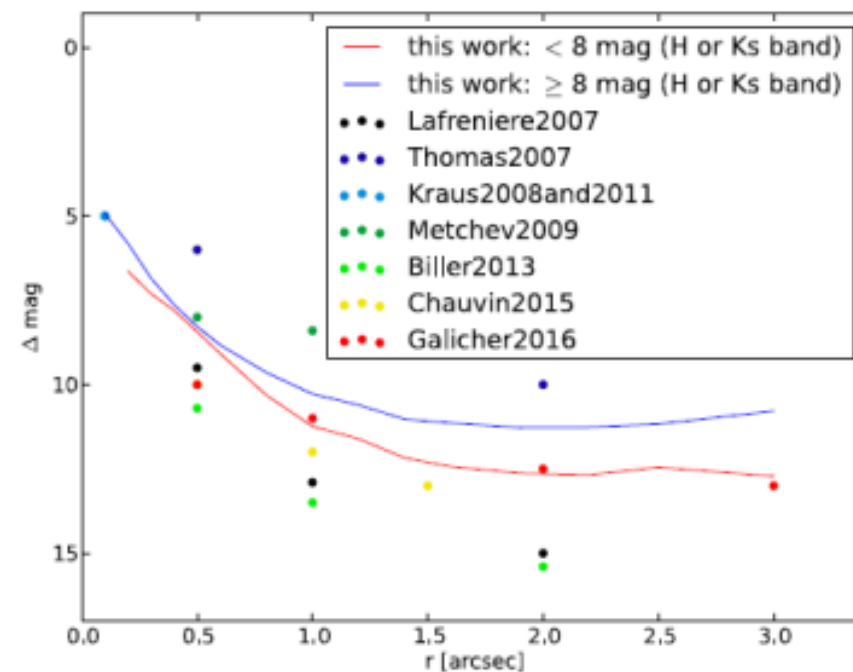
# 惑星探査

各観測天体における検出可能惑星質量



YSOカテゴリーの典型的な検出可能惑星質量:  
約10木星質量 @ 50 AU

先行研究とのコントラストの比較



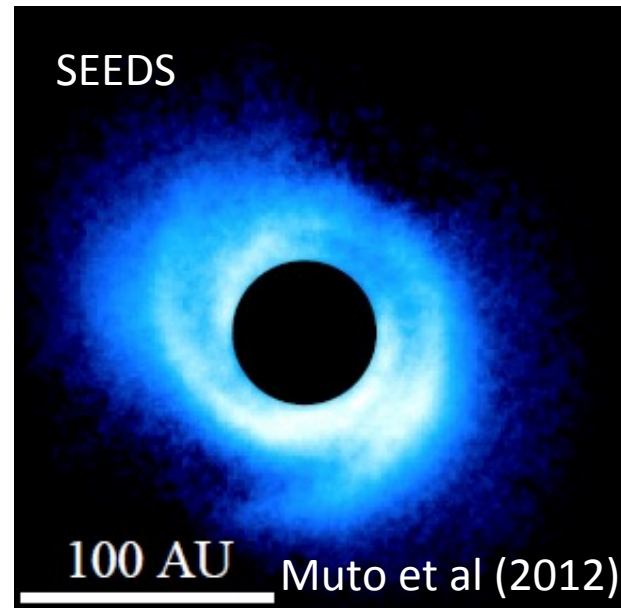
Uyama et al. (2017)

先行研究より若干悪い:  
円盤観測に重点をおいた  
観測方法をとっているため

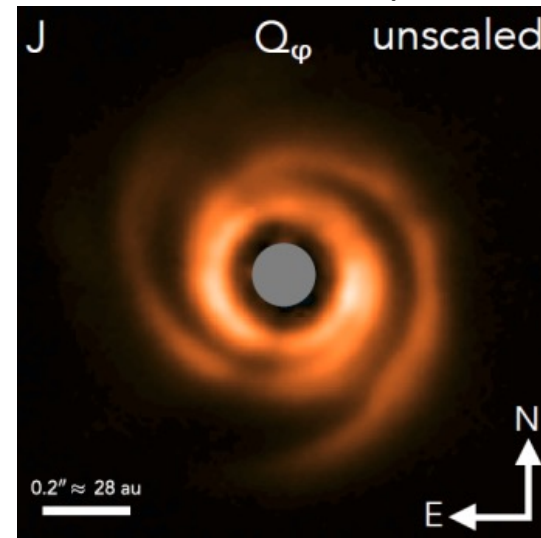
# 極限補償光学を組み合わせた円盤観測

- 極限補償光学 (SCEXAO@すばる, SPHERE@VLT, GPI@Gemini)
  - 数1000のアクチュエーターで波面誤差を補正
  - ほぼ回折限界像を得る(0.04秒角@1.6 $\mu$ m)

SAO 206462の比較例



極限補償光学 (VLT/SPHERE)

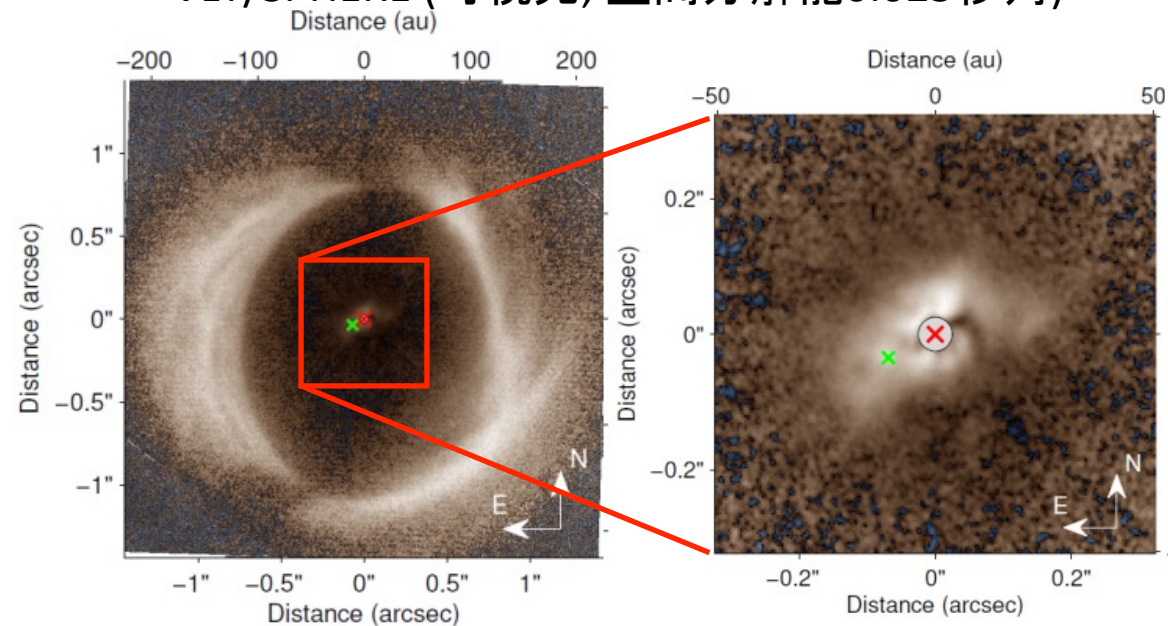


Stolker et al (2017)

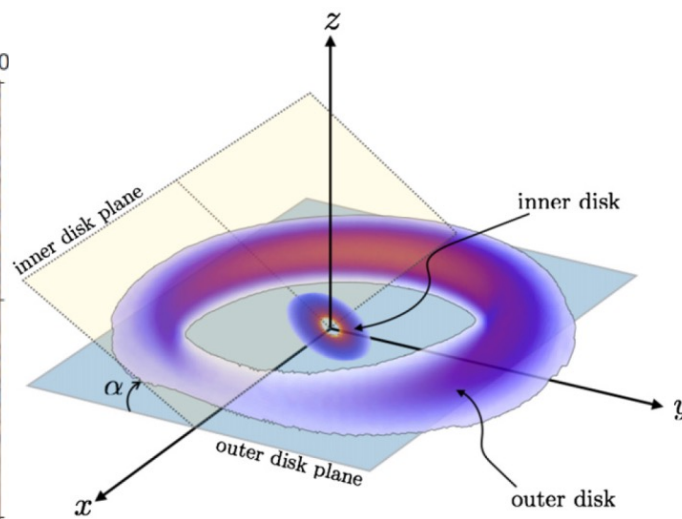
# 最近の極限補償光学の観測結果(1)

- HD142527のinner disk

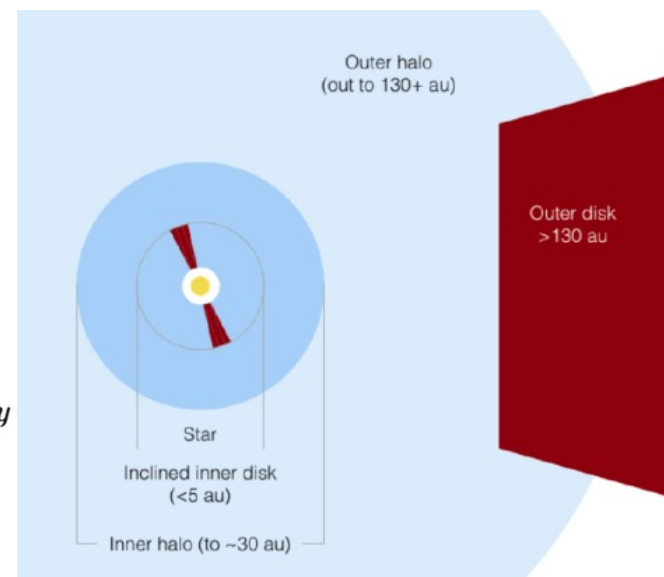
VLT/SPHERE (可視光; 空間分解能0.025秒角)



Avenhaus et al. (2017)



Marino et al. (2015)



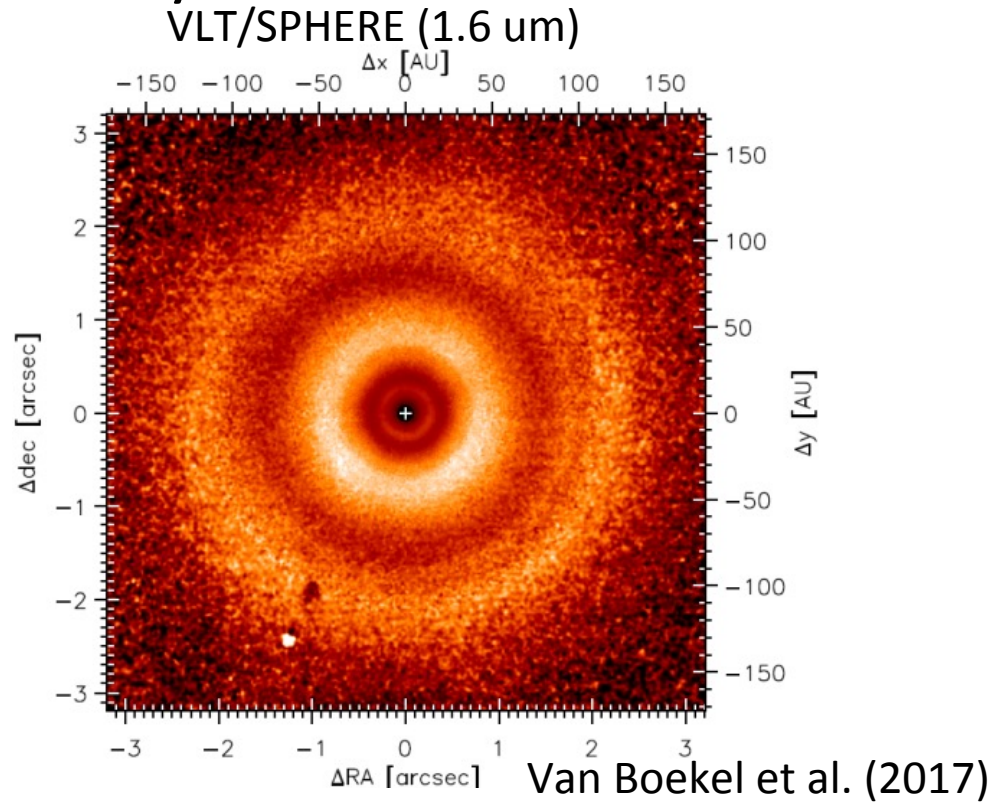
Avenhaus et al. (2017)

- Inner diskのPAとouter diskの影の位置が矛盾
- Inner diskを取り巻くhaloが存在する可能性がある

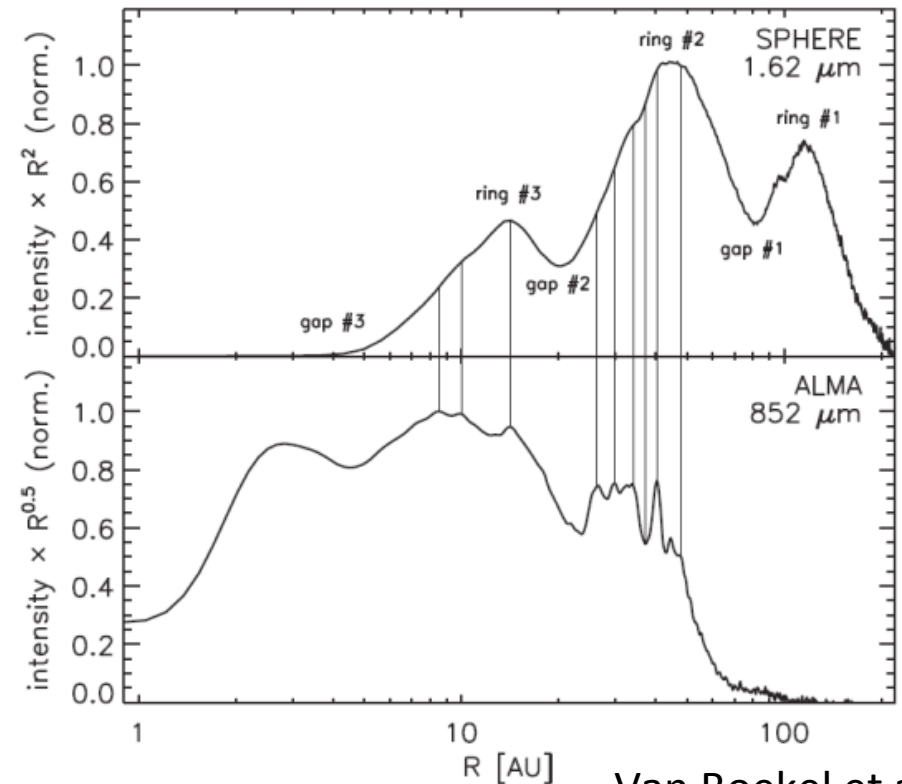


# 最近の極限補償光学の観測結果(2)

- TW Hyaの3つのギャップ構造



## ALMAとの比較

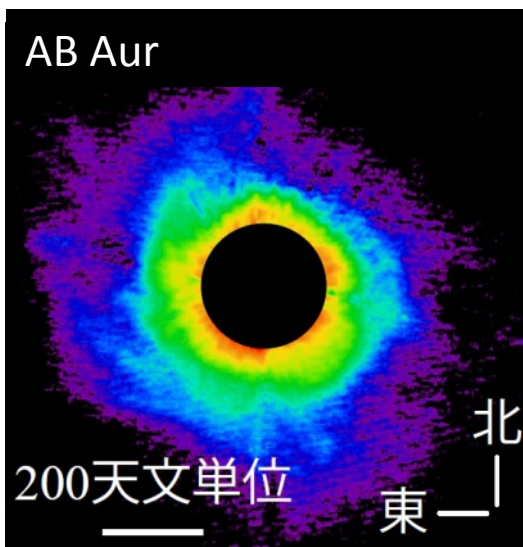


- Radial profileは矛盾しない
- モデリングからギャップにおけるガス密度は約5割減  
→ 数10地球質量の惑星の可能性

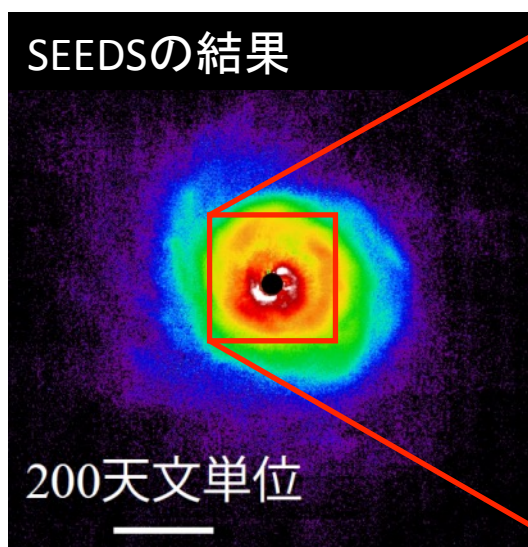
# すばるでの今後の円盤サーベイ

- 極限補償光学と偏光観測を組み合わせる計画
  - 現在は偏光モードなし(マンパワー不足?)
  - 新カメラ搭載でTTSの観測の可能性

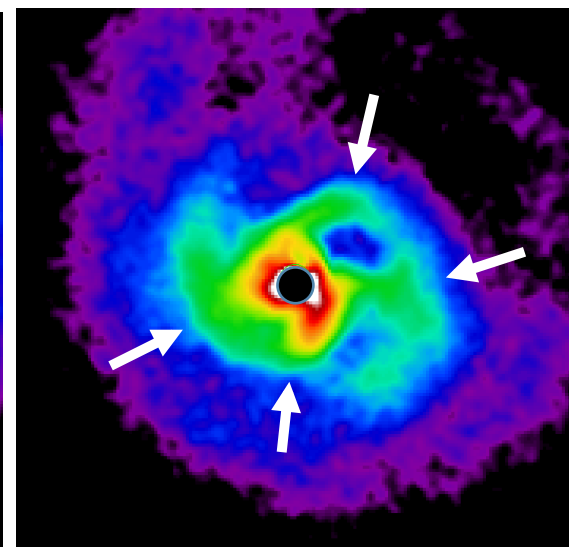
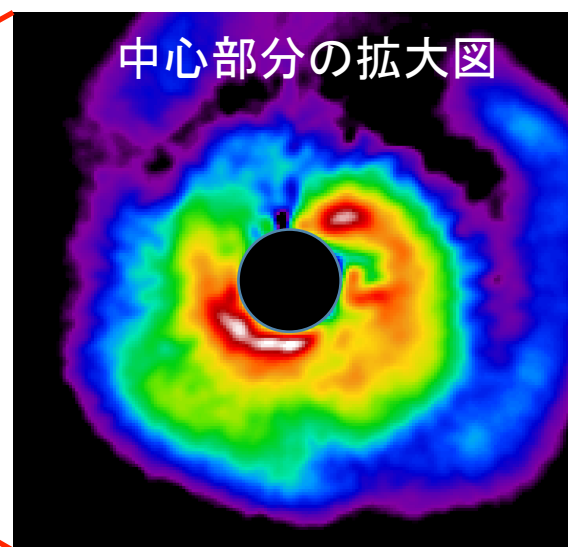
すばるにおけるAB Aurの観測結果の向上の様子



Fukagawa et al. (2004)



Hashimoto et al. (2011)



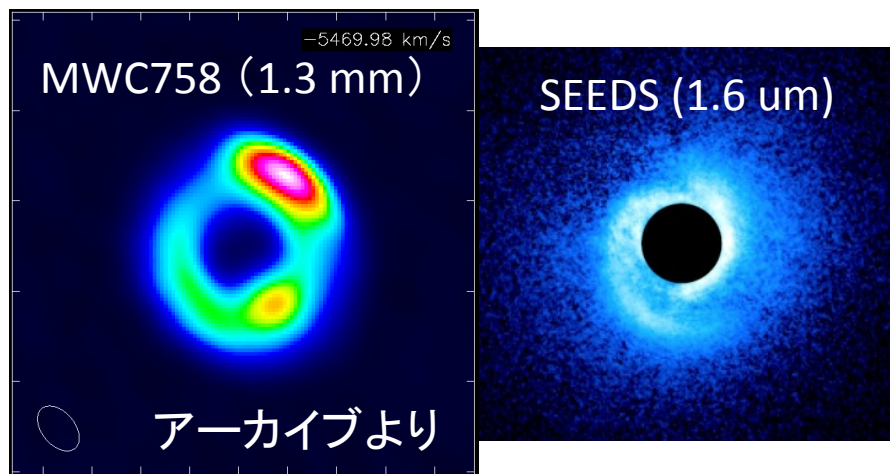
Kudo et al. in prep.

今後  
➡ ?

# 今後の課題

- 構造の総合的理解

- スパイラル: 惑星起源?, GI?, or MRI?
  - スパイラルの時間変化を追う; 電波との比較

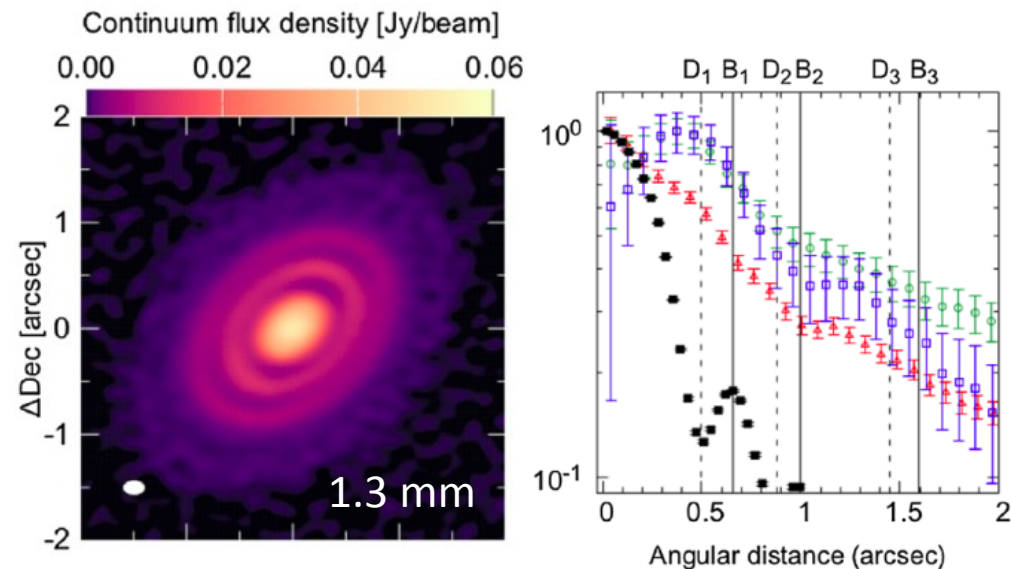


- ギャップ(穴構造): 惑星起源?, 光蒸発?, etc...
  - 各機構のモデルと観測を比較

- 近赤外と電波での構造の違い

- ギャップの位置

HD 163296の場合



Isella et al. (2017)

