

見えてきた惑星形成

深川 美里
国立天文台・チリ観測所（三鷹）

内容

1. イントロダクション
系外惑星、惑星形成分野の大目標、
重要になる観測パラメータ
2. 最近の観測の紹介
 - a. すばる（大口径望遠鏡＋補償光学）等を用いた円盤ダストによる散乱光の観測
 - b. ALMA 等による円盤構造の詳細観測
 - c. HL Tau で見えた複数の溝
3. 今後（すぐに）重要になる観測



2 YEARS OF EXOPLANETS

5,583 DISCOVERIES **1,879 CONFIRMED**

PLANET

20 YEARS OF EXOPLANETS

NEWS

SCIENCE & TECHNOLOGY

IMAGES & VIDEO

INTERACTIVES

ExEP

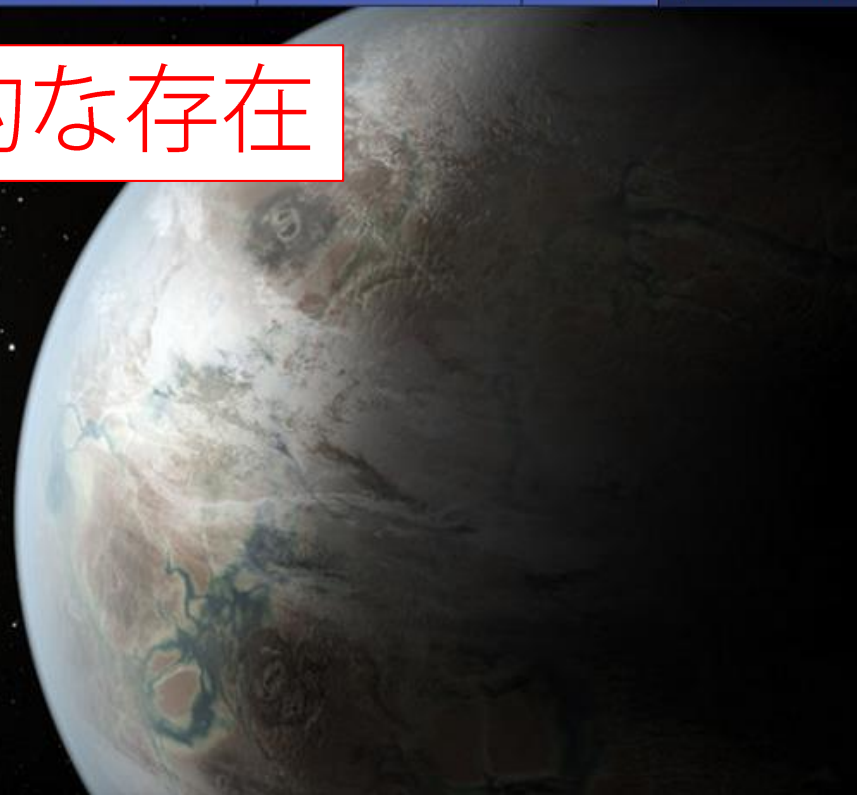
SEARCH

惑星は普遍的な存在

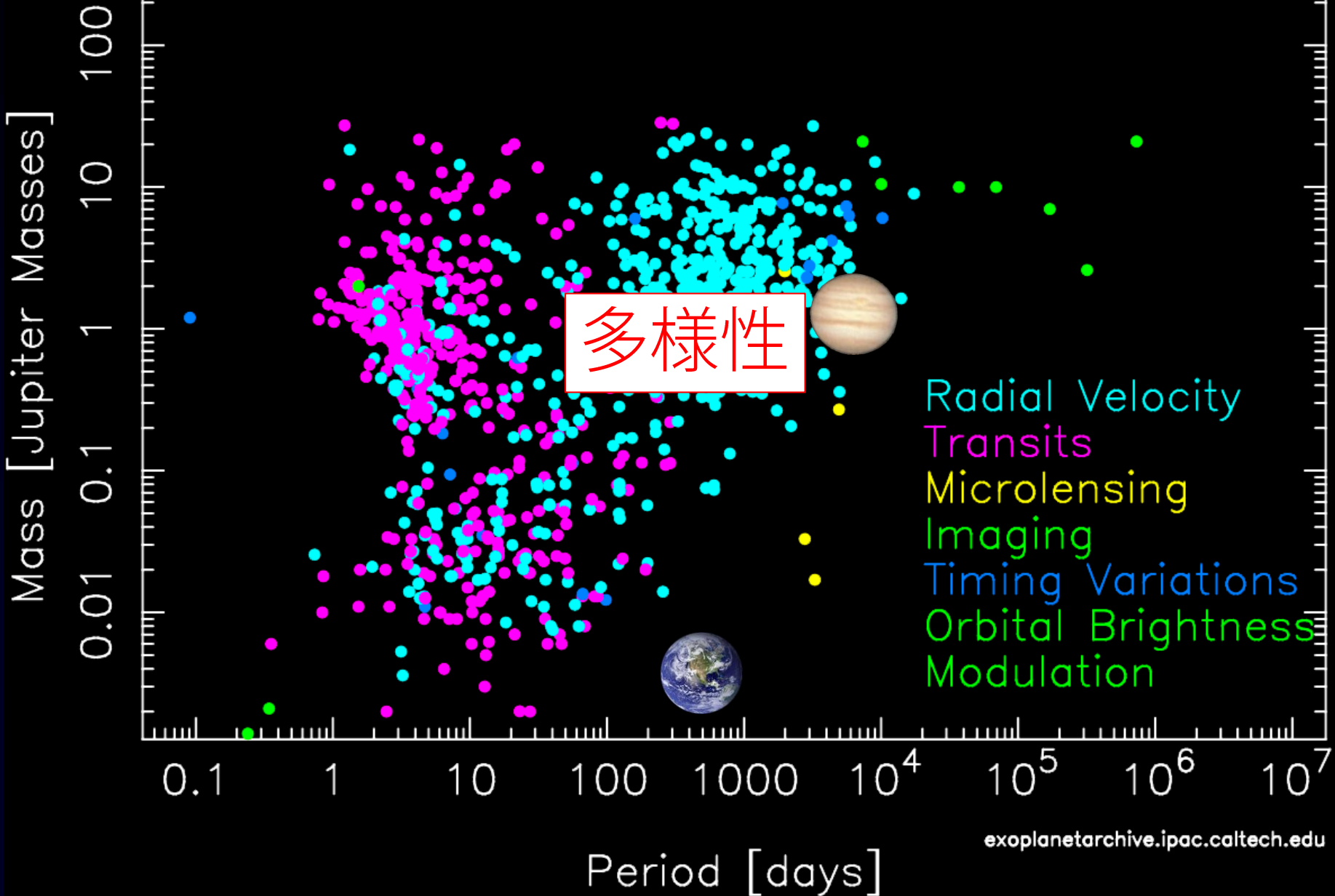
TOP STORY

NASA's Kepler Mission Discovers Bigger, Older Cousin to Earth

NASA's Kepler mission has confirmed Kepler-452b as the first near-Earth-size planet in the "habitable zone" around a sun-like star.



Mass – Period Distribution





Subscribe

News & Features

Topics

Blogs

Videos & Podcasts

Education

Citizen Science

Space



Ex

M

Se

Alien

By Le

For t

pictu

our s

orbit

is the

prom

hunt

scien

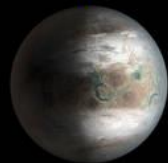
and c

planetary systems.

Kepler-452 System

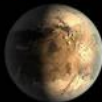
Kepler-186 System

太陽系惑星に似た系外惑星が見つかり始めている



Kepler-452b

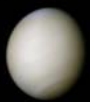
Kepler-186f



Mercury



Venus



Earth



Mars



NASA Ames/JPL-CalTech/R. Hurt

Artistic Concept

Science User Portal

Star Twin

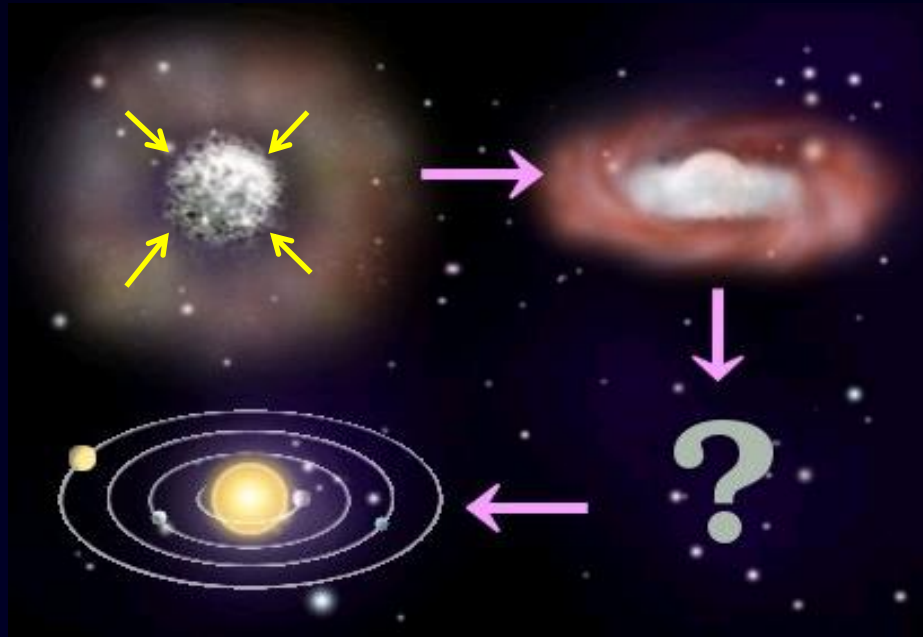
System 2.0

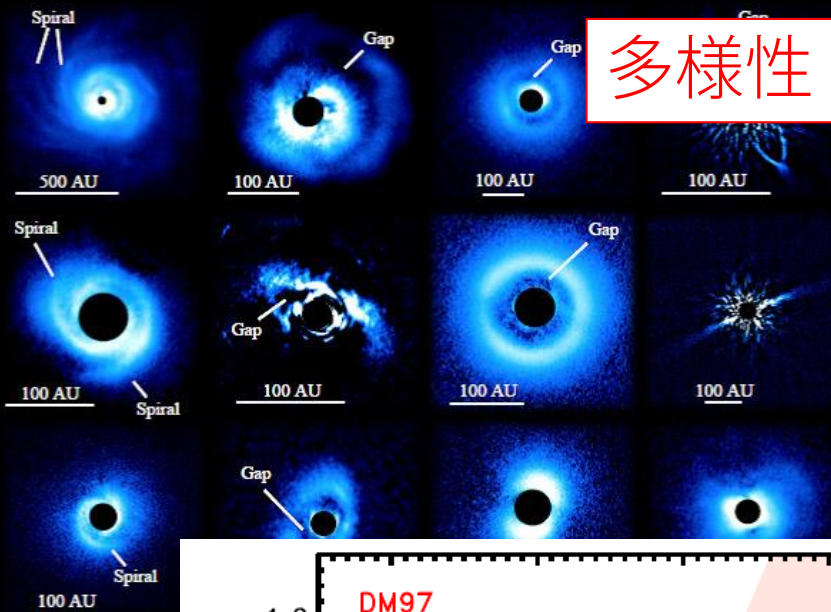
A big question

太陽系はどのように形成されたのか？



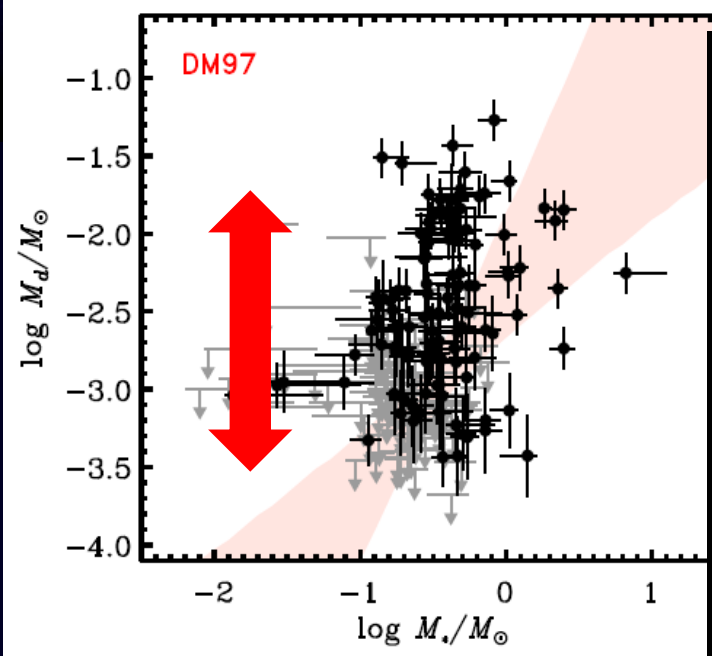
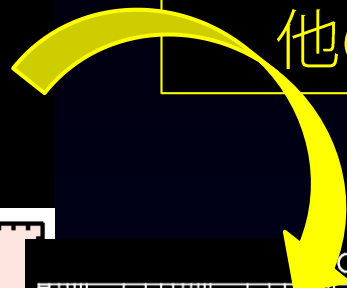
(銀河系の) 系外惑星系はどのように形成されたのか？
太陽系らしさの起源は？



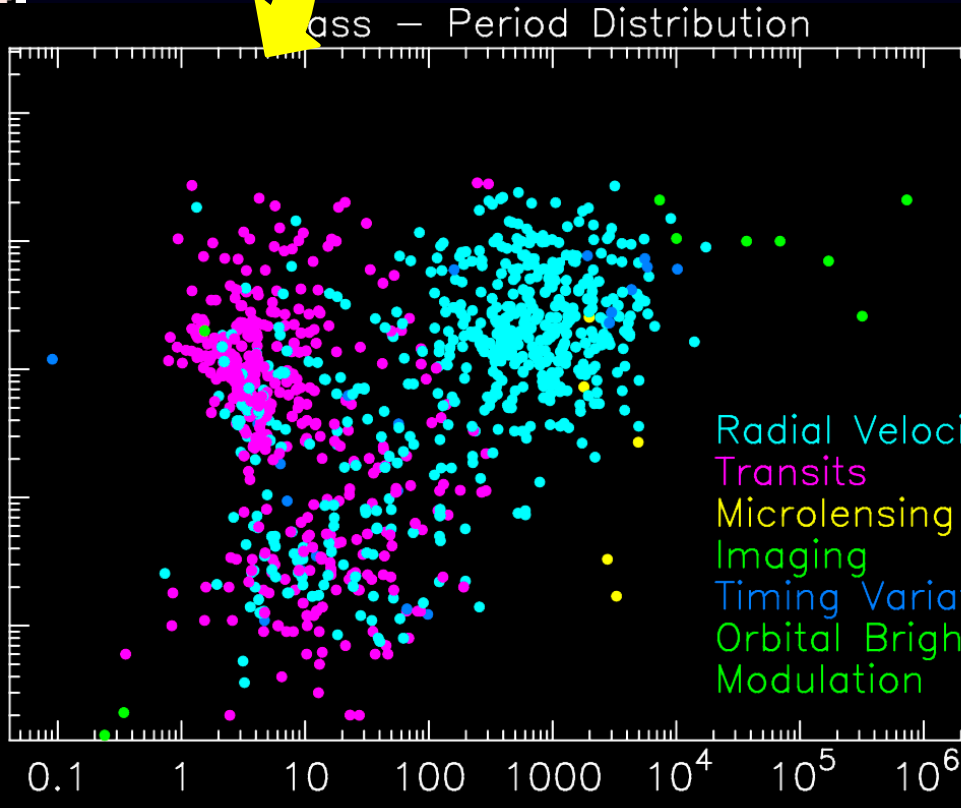


多様性

1. 形成
 2. 軌道移動
- 円盤との相互作用
他の惑星との相互作用



Andrews et al. (2013)

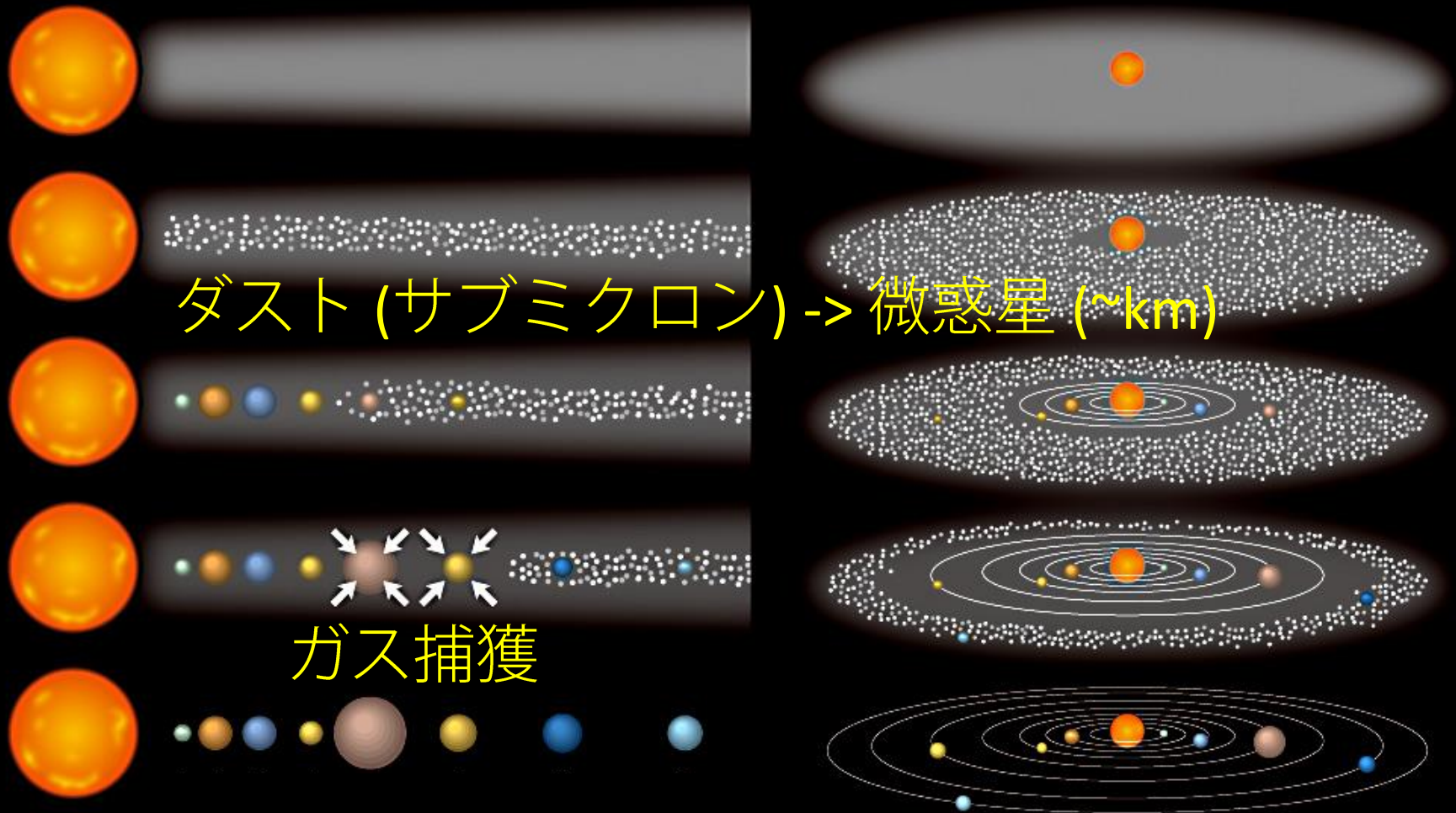


Radial Velocity
Transits
Microlensing
Imaging
Timing Variations
Orbital Brightness Modulation

Credit: NAOJ

巨大ガス惑星の形成 微惑星形成～コア集積 (標準理論)

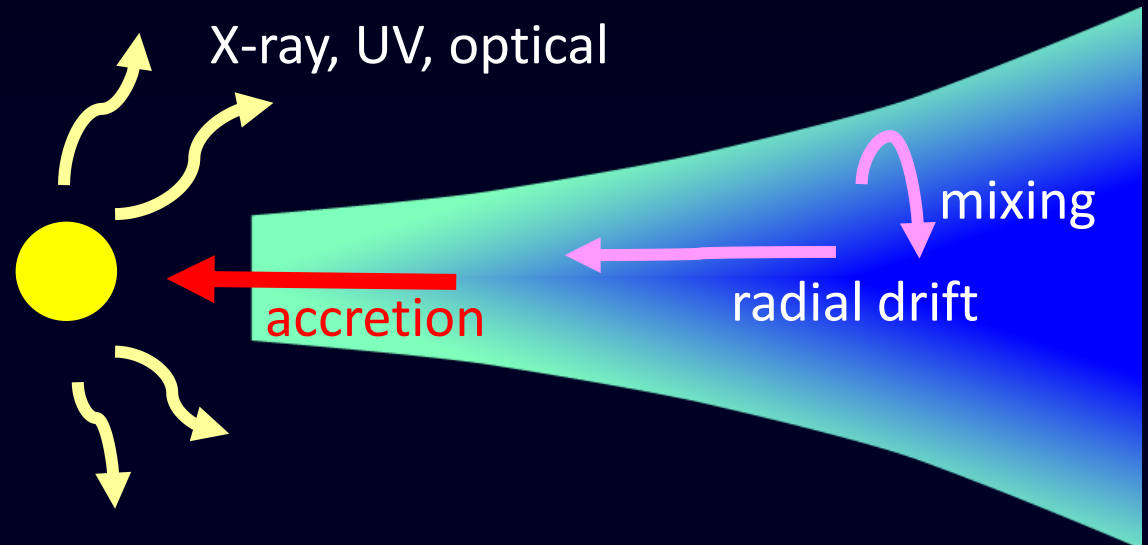
時間がかかる：約10 Myr, >~1 Myr



惑星形成の初期条件 軌道の初期進化

- 面密度 (円盤質量) → 最大惑星質量、それが形成される場所
- 円盤物質の化学進化 → 惑星大気組成
- 円盤の寿命、場所ごとの物質質量 → 惑星形成のタイムスケール、円盤ガスとの相互作用による軌道進化

物理・化学的性質
 $\rho(r, z), T(r, z), X(r, z)...$

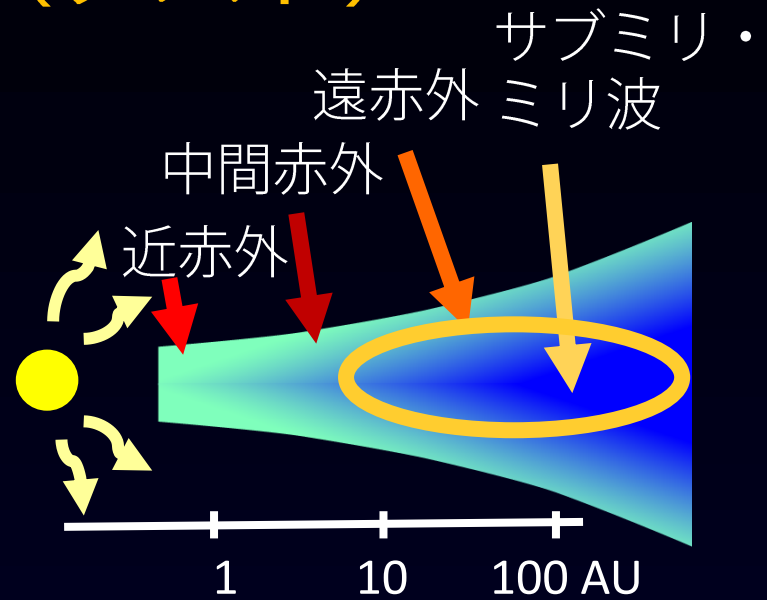


原始惑星系円盤の観測に重要な パラメータ

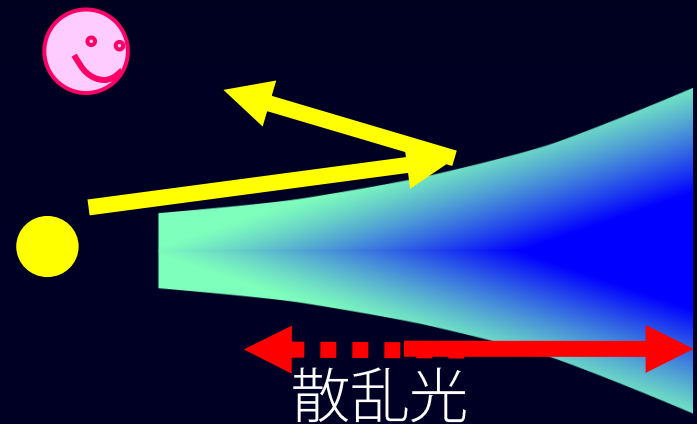
1. 高い空間分解能
 - 近傍星形成領域 140 pc
 - ~5 AU を分解したいと思うと ~30ミリ秒角が必要
(ALMA, extreme adaptive optics on 8-10m class telescope)
2. 長波長 (低周波)
 - 赤道面は密度が高い。
サブミリより短い波長だと、光学的に厚い
 - ダストはそのサイズに応じた波長で光る
3. 星の近傍に迫る能力
 - <~10 AU、ハビタブルゾーン

円盤の観測 (ダスト)

- 星にあたためられたダストからの放射
赤道面をみるなら電波
→例えば ALMA



- 円盤ダストが散乱した光
→例えばすばる、Gemini,
VLT (, TMT)



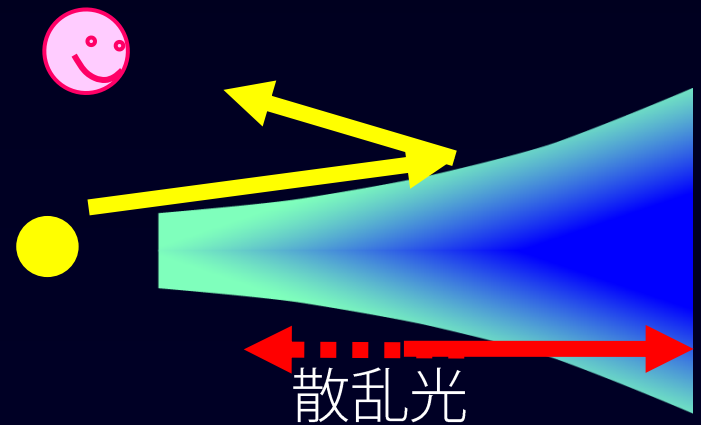
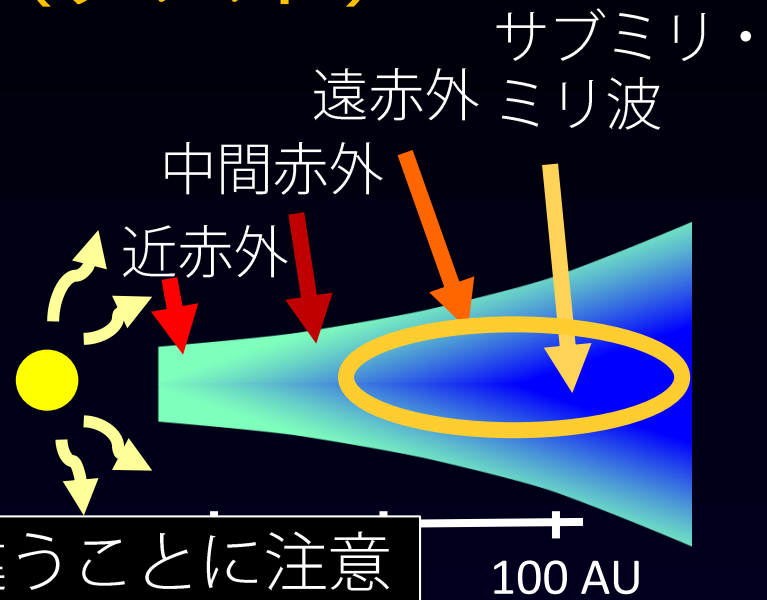
円盤の観測 (ダスト)

- 星にあたためられたダストからの放射
赤道面をみるなら電波
→例えば ALMA



見る場所、ものが違うことに注意

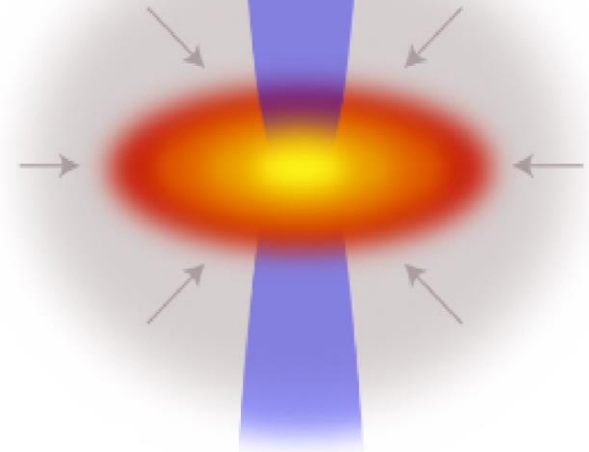
- 円盤ダストが散乱した光
→例えばすばる、Gemini,
VLT (, TMT)



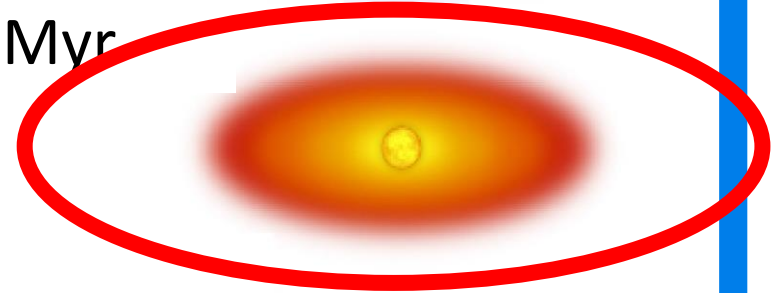
頻繁に観測される 進化段階

- 年齢 1~10万年
 - 光学的に厚く、ガスが豊富
(Class II)
1. これから惑星ができる
 - 形成の初期条件
 2. 形成が終わった直後
 - 生まれたばかりの惑星の軌道
 - 若い惑星、周惑星円盤

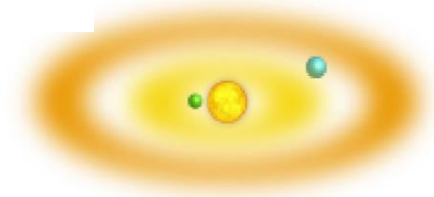
0.1 Myr



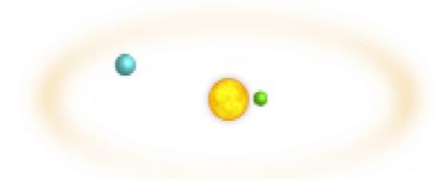
1 Myr



10 Myr

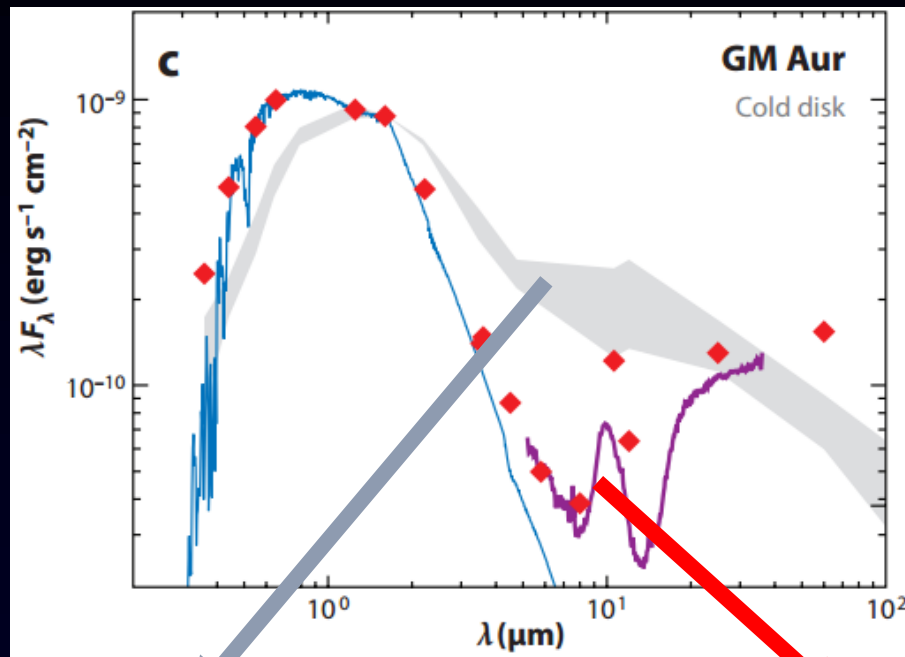


100 Myr

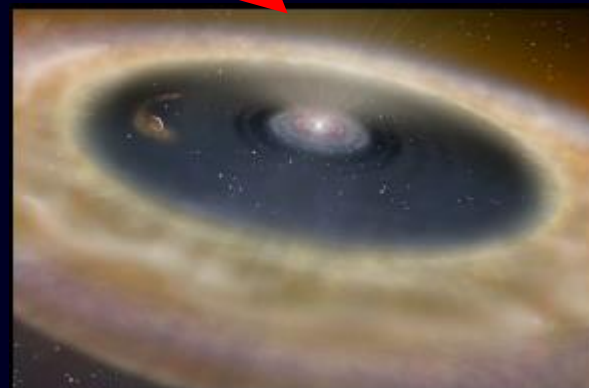
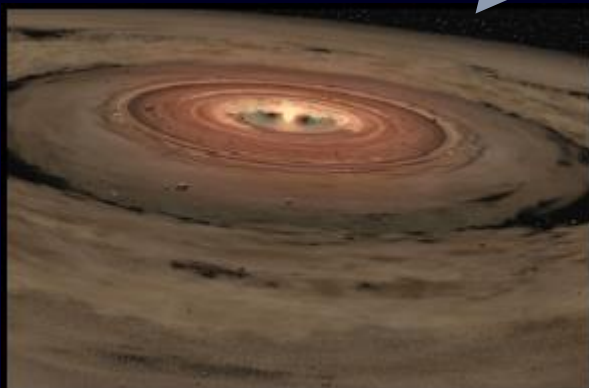


穴・ギャップを持つ円盤に見られる 構造の非対称性

“Transitional disks”

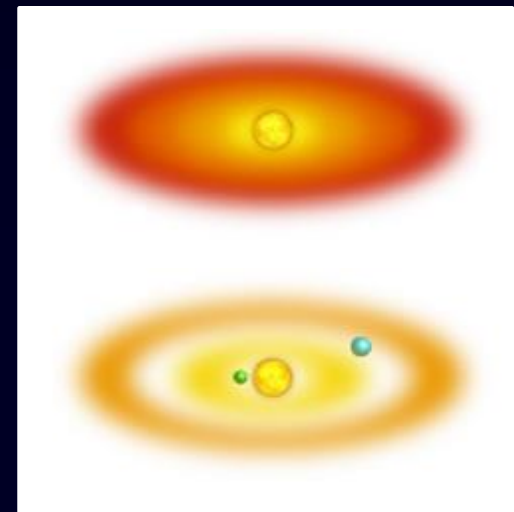
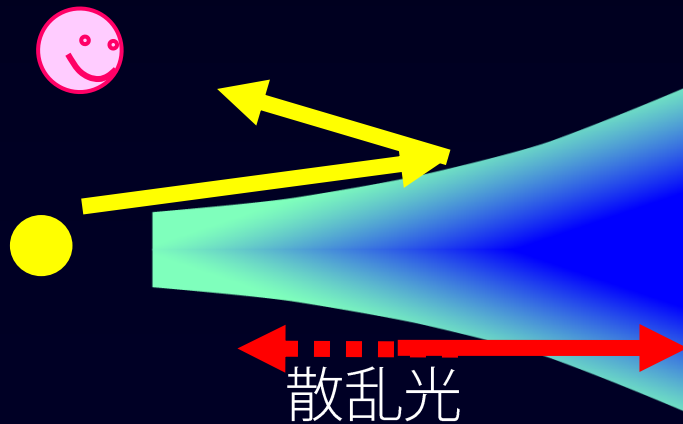


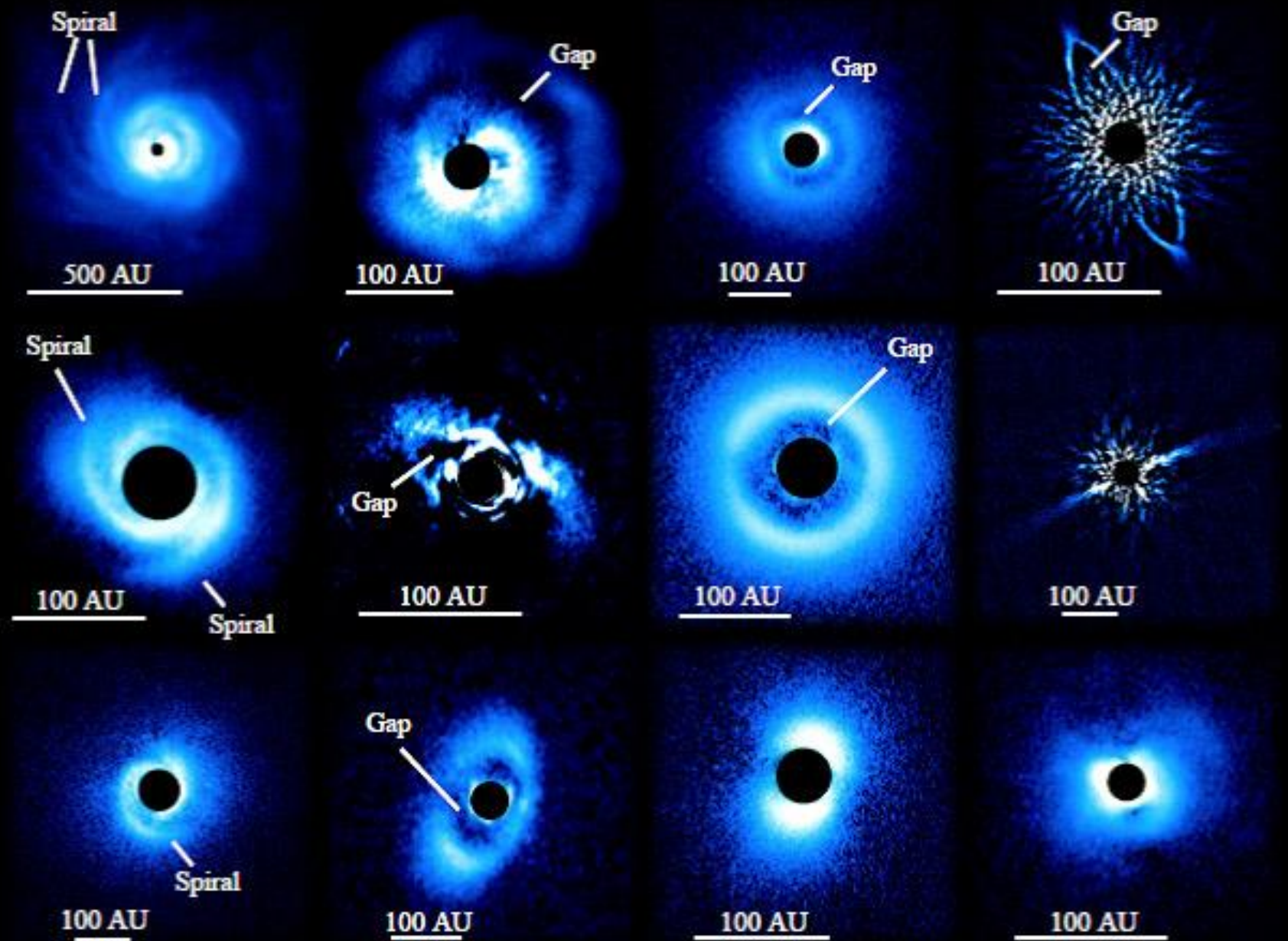
Williams & Cieza
(2011)



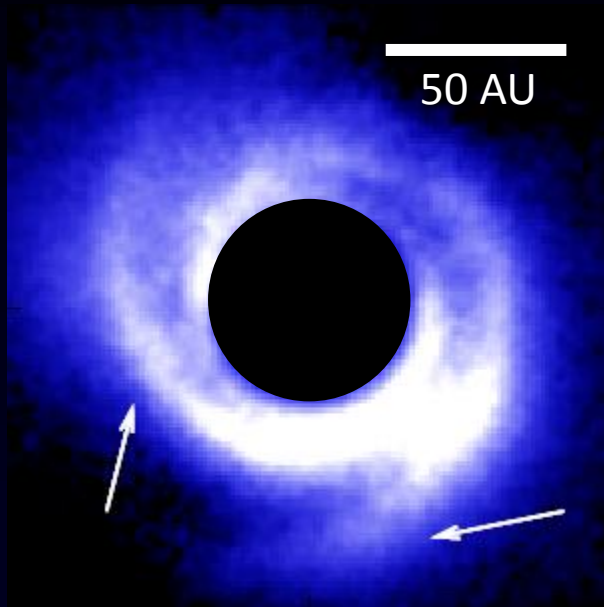


円盤表面のダストによる散乱光： すばる観測例

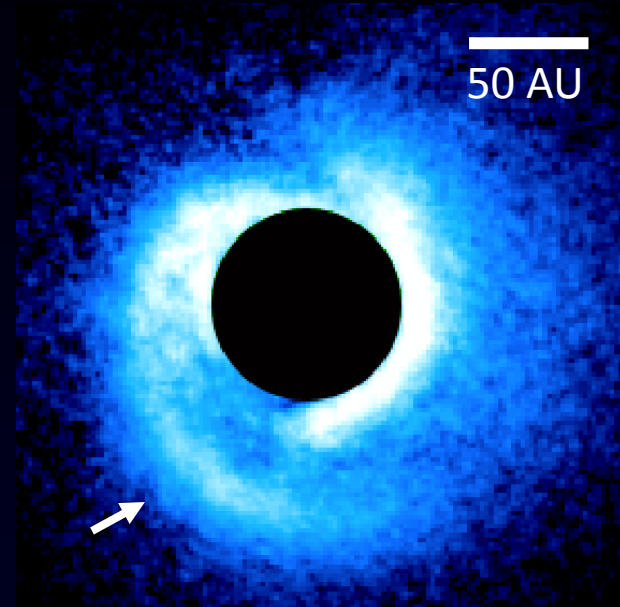




スパイラル

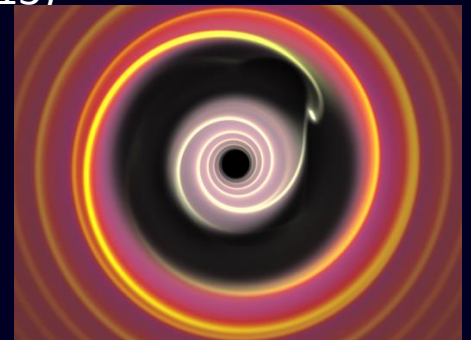


Muto et al. (2012)



Grady et al. (2013)

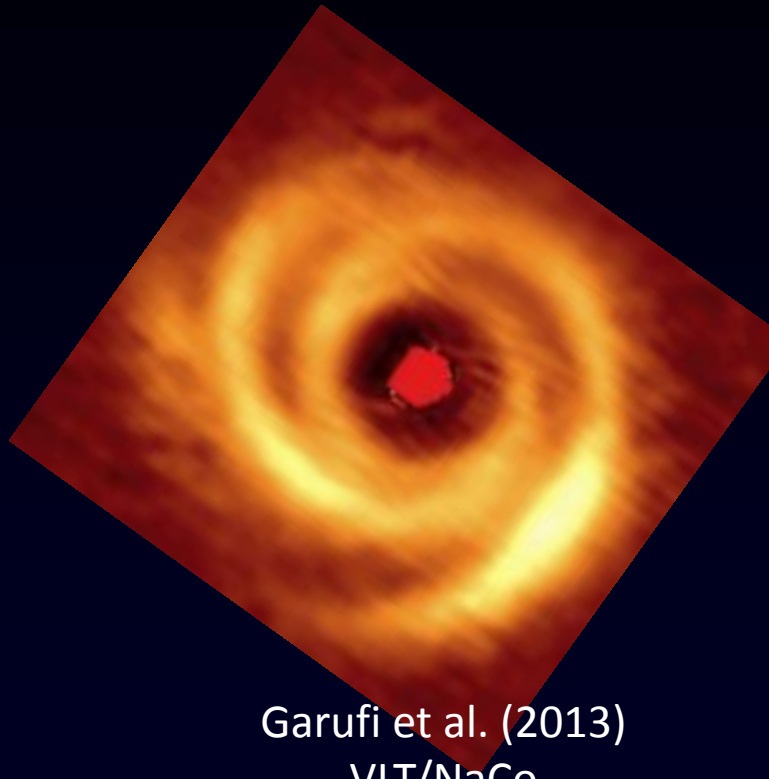
- 密度波理論の適用 (Muto et al. 2012)
- 惑星が作るパターン？



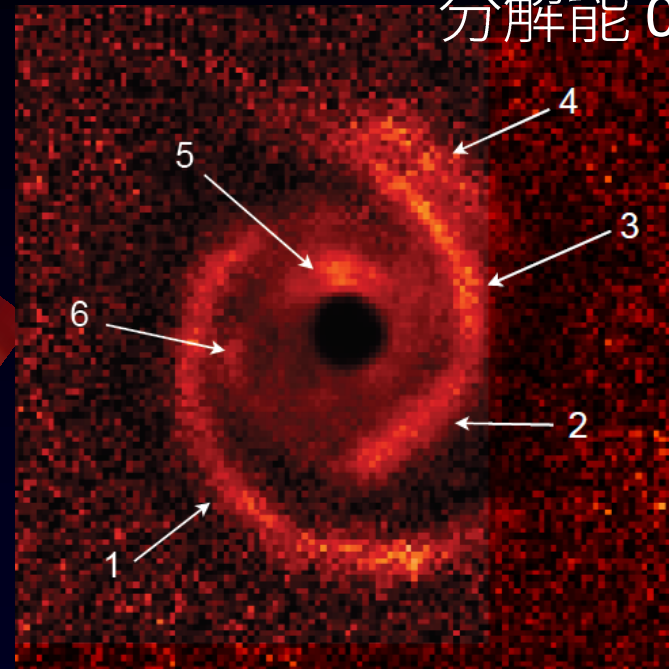
惑星との相互作用でできる
渦状の構造

スパイラル

1.04 micron,
IWA 0."093,
分解能 0."027

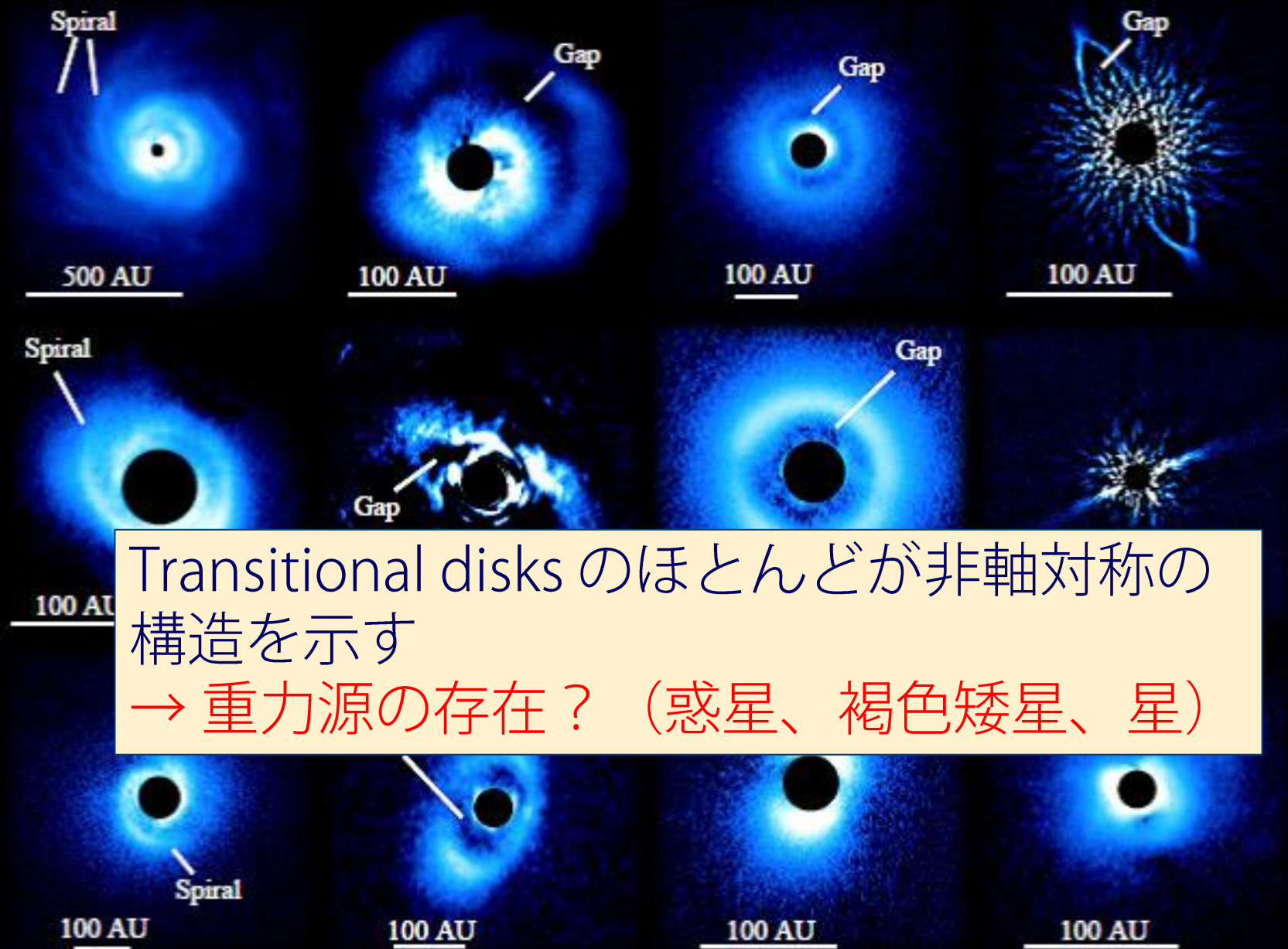


Garufi et al. (2013)
VLT/NaCo



Benisty et al. (2015)
VLT/SPHERE
(de-projected, multiplied by r^2)

- より内側へ迫り、高い空間分解能を得るならば
Gemini/GPI, VLT/SPHERE

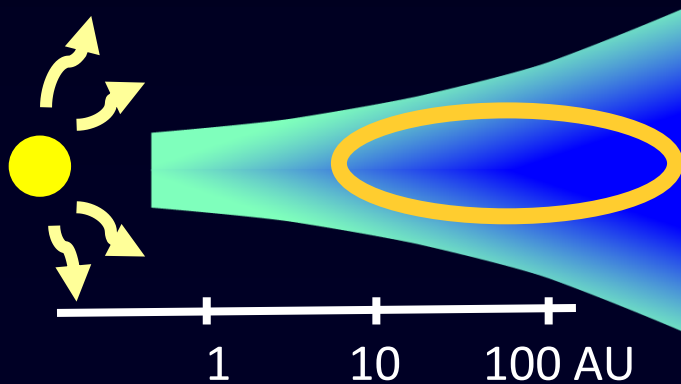


Transitional disks のほとんどが非軸対称の構造を示す

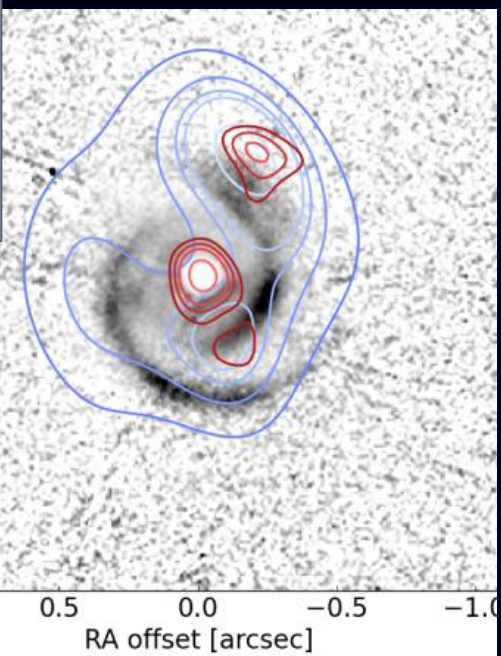
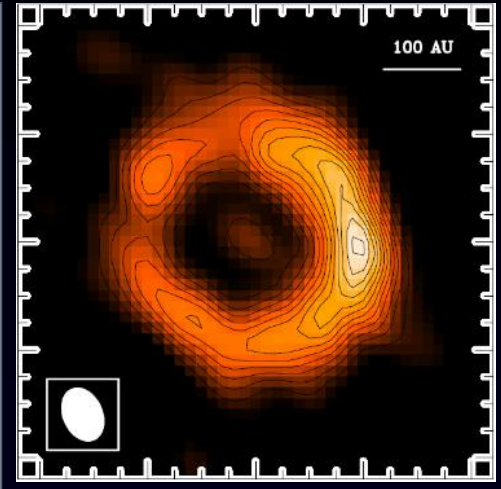
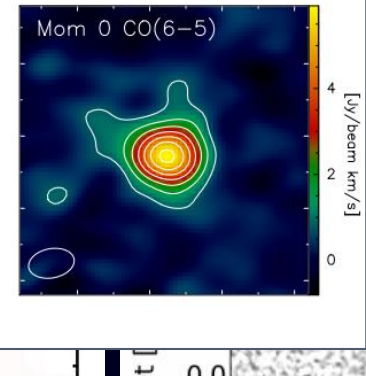
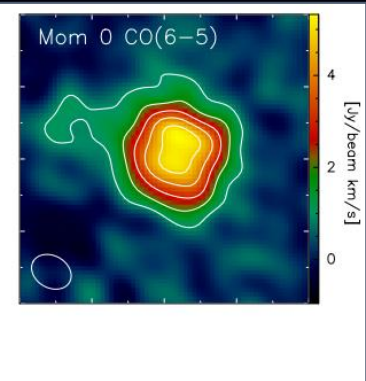
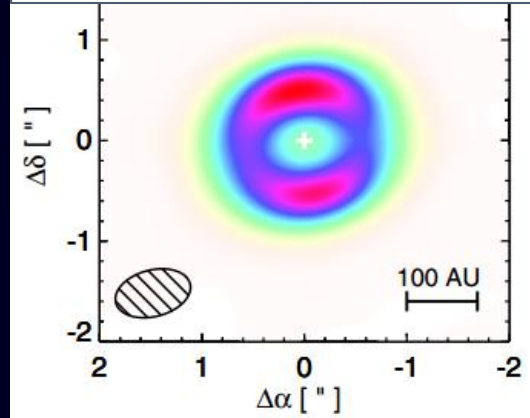
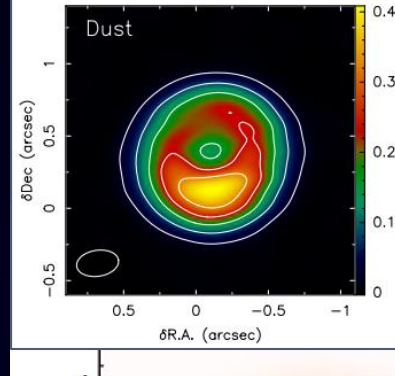
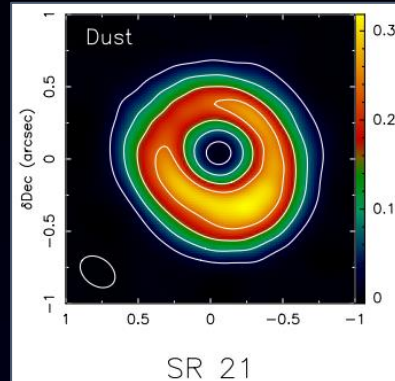
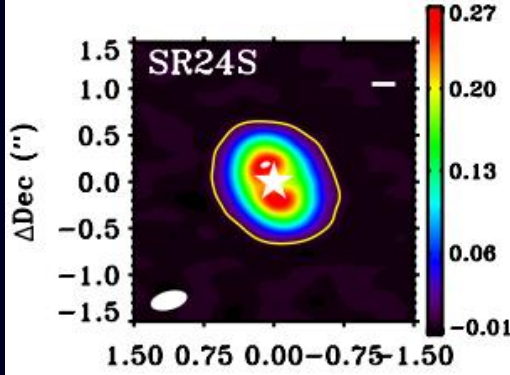
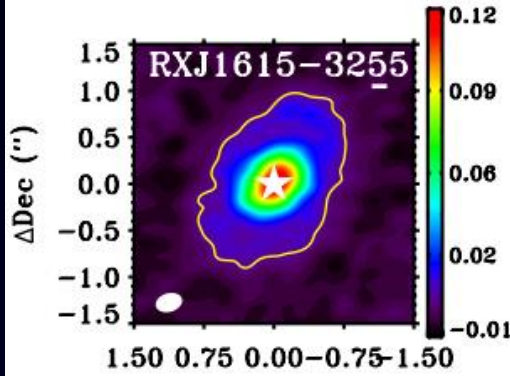
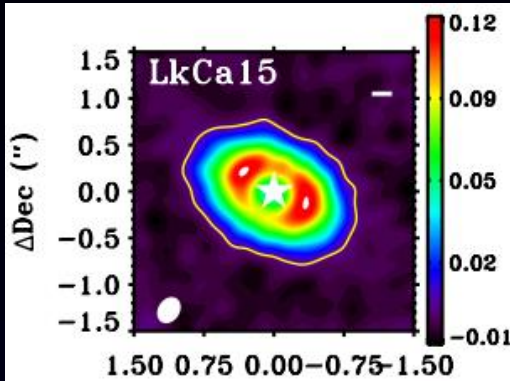
→ 重力源の存在？（惑星、褐色矮星、星）



円盤からのダスト、ガス放射 ALMA等による観測例



Transitional Disks

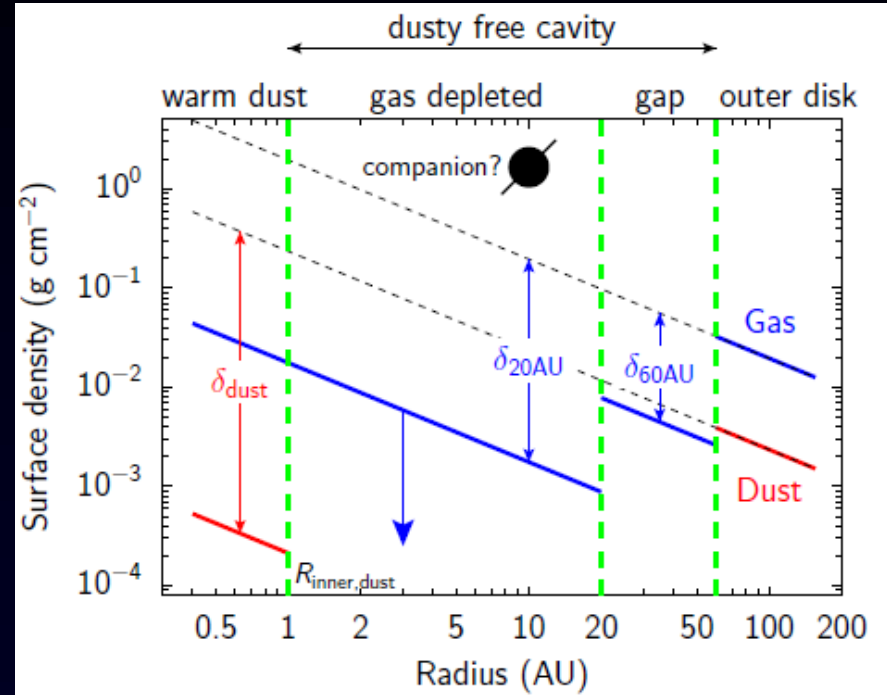


Tang et al. (2012), van der Marel et al. (2015), Perez et al. (2014), Marino et al. (2015), Zhang et al. (2014) [ALMA, VLA, PdBI]

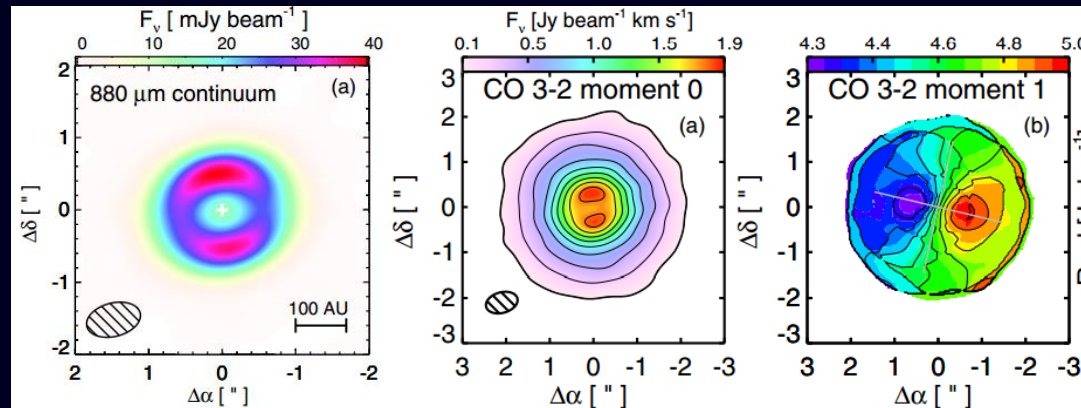
ガス

Bruderer et al. (2014)

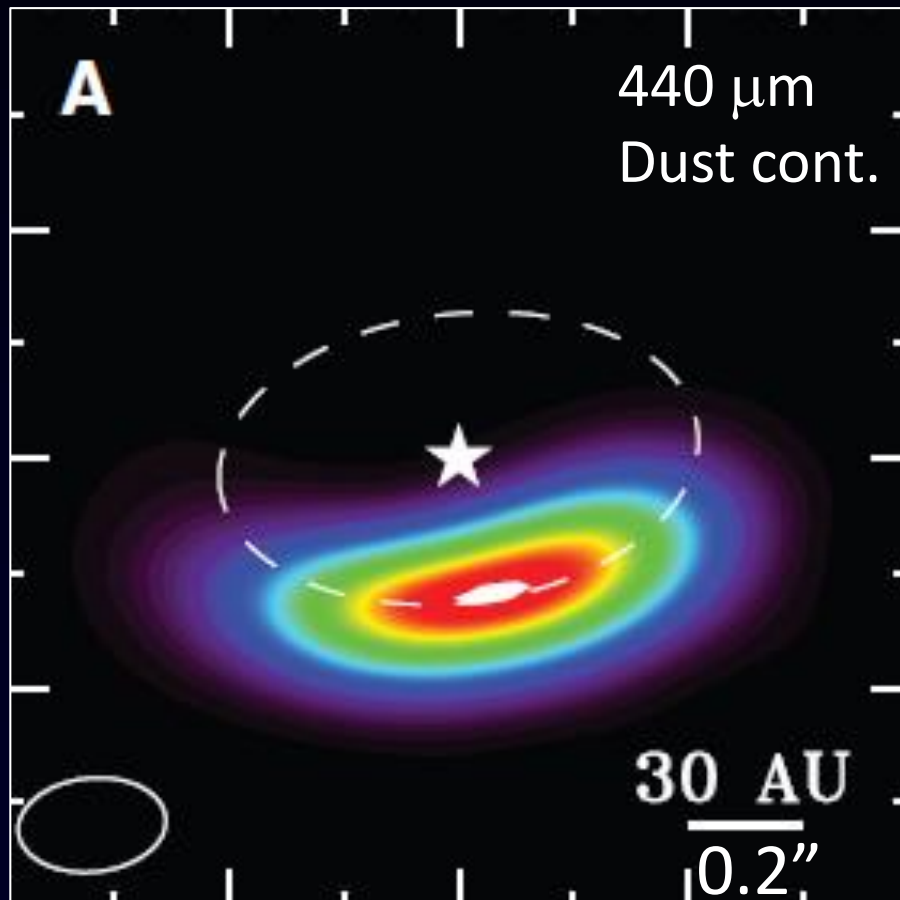
- 複数天体の観測から
 - ガスはダストの穴にも存在
 - 穴の外徑
 1. ガスの方が内側
 2. ガスとダストで一致



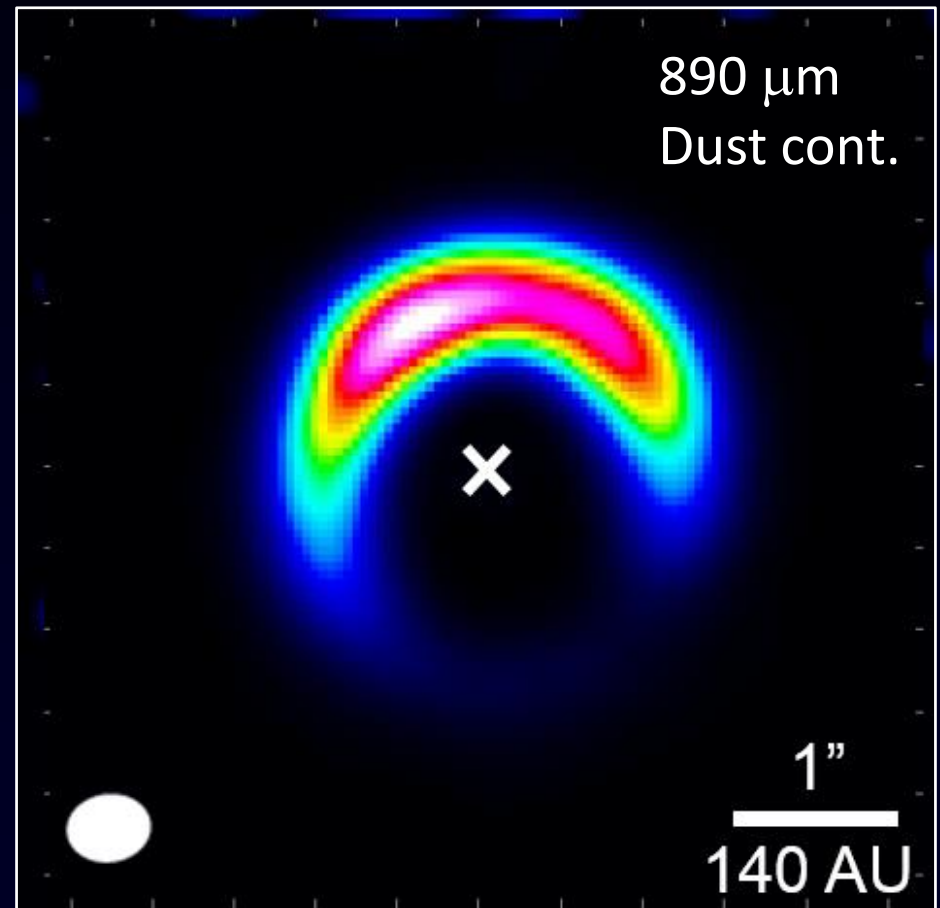
ダスト円盤 > 79 AU 以遠
 ガス円盤 > 31 AU 以遠
 (Zhang et al. (2014))



ダストの極端な非対称性

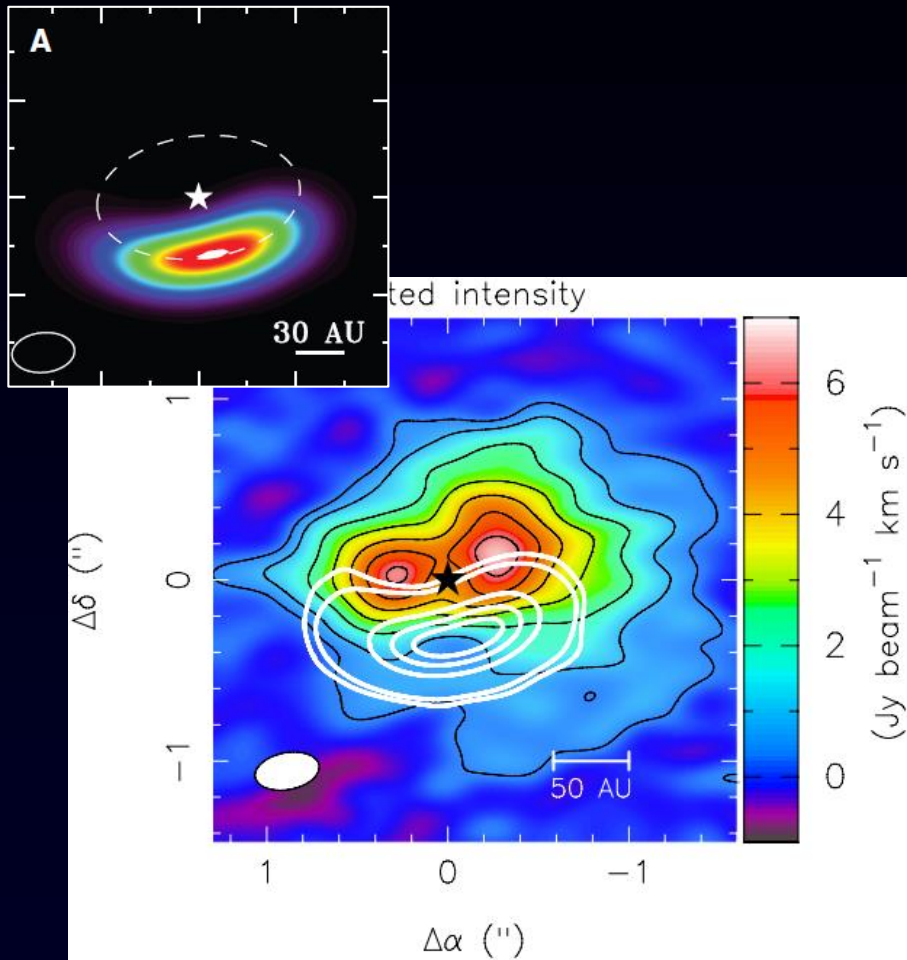


van der Marel et al. (2013)

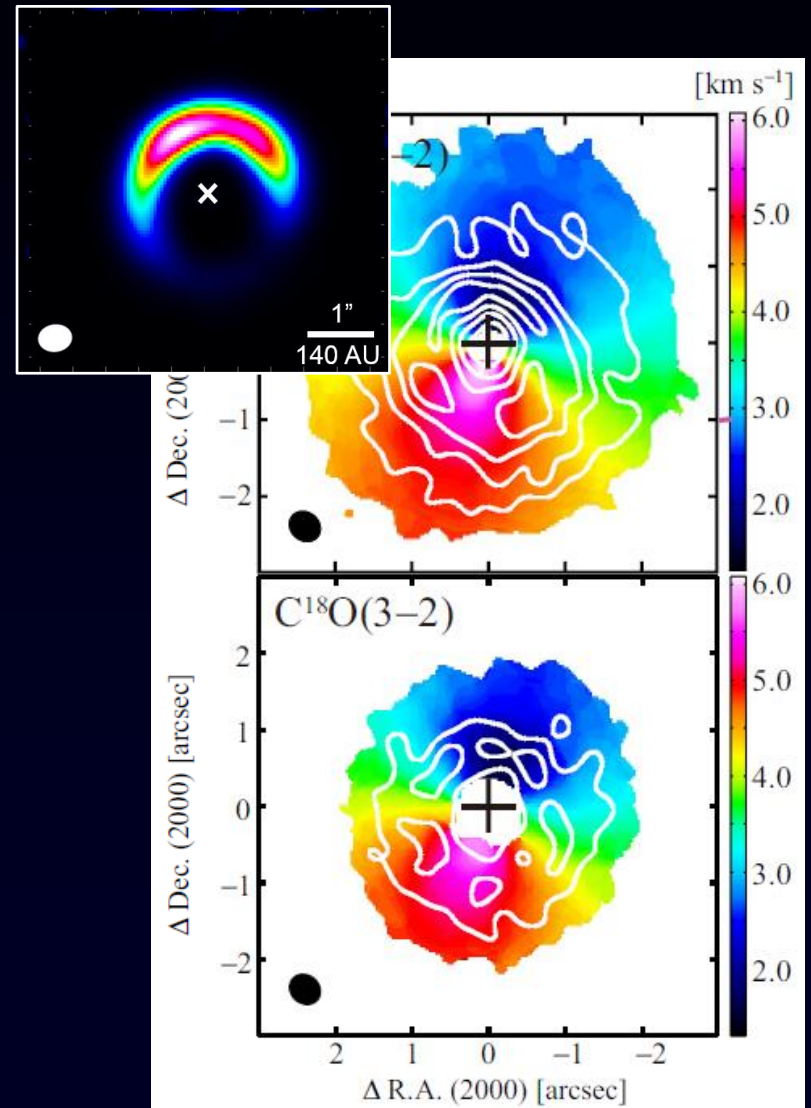


Fukagawa et al. (2013)

ガスの非対称性の方が弱い

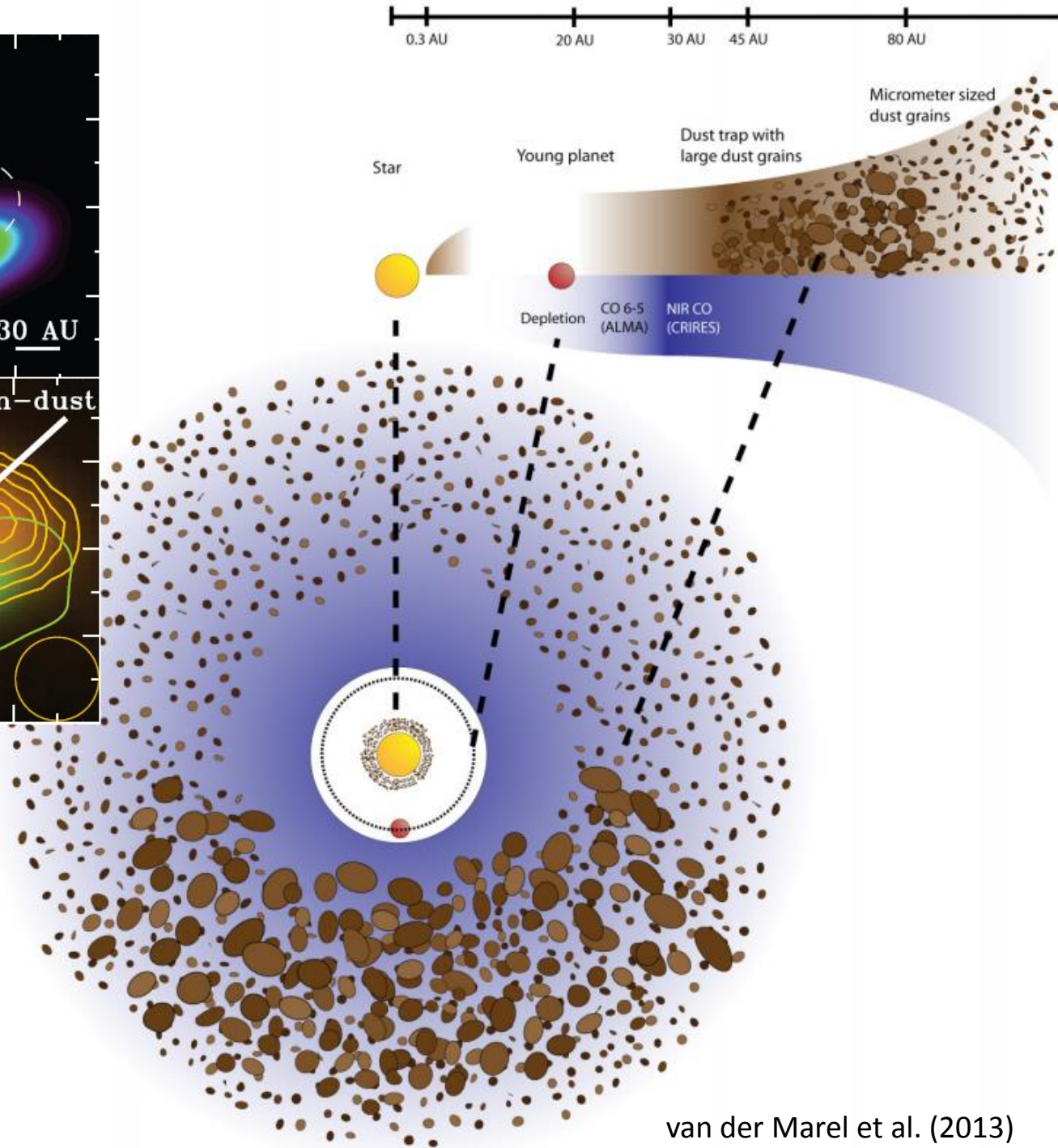
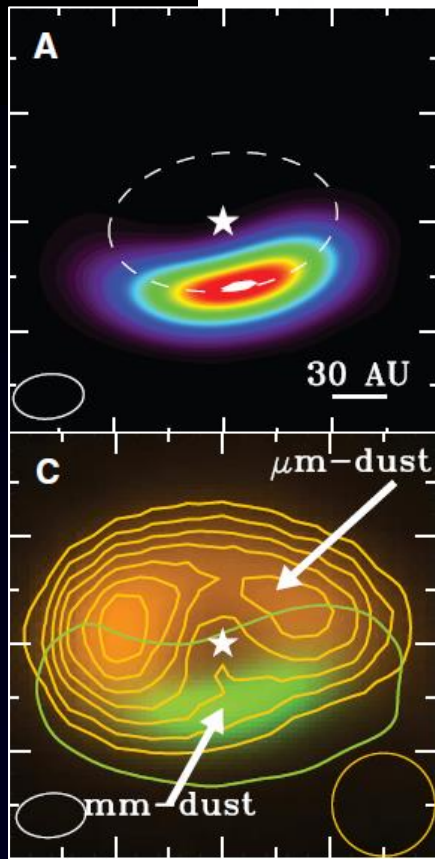


Bruderer et al. (2014)



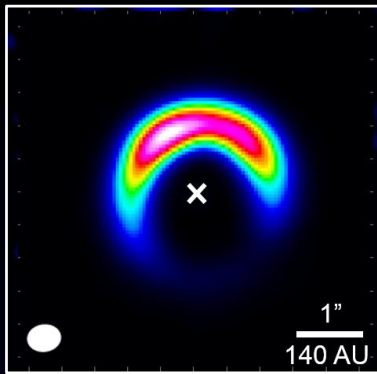
Fukagawa et al. (2013)

面密度分布は輻射輸送計算で確認



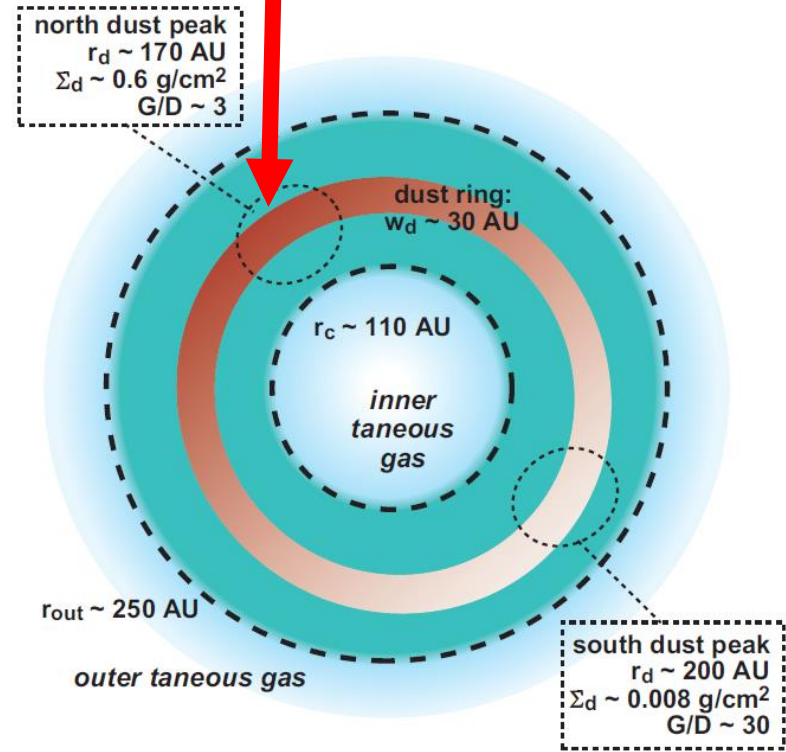
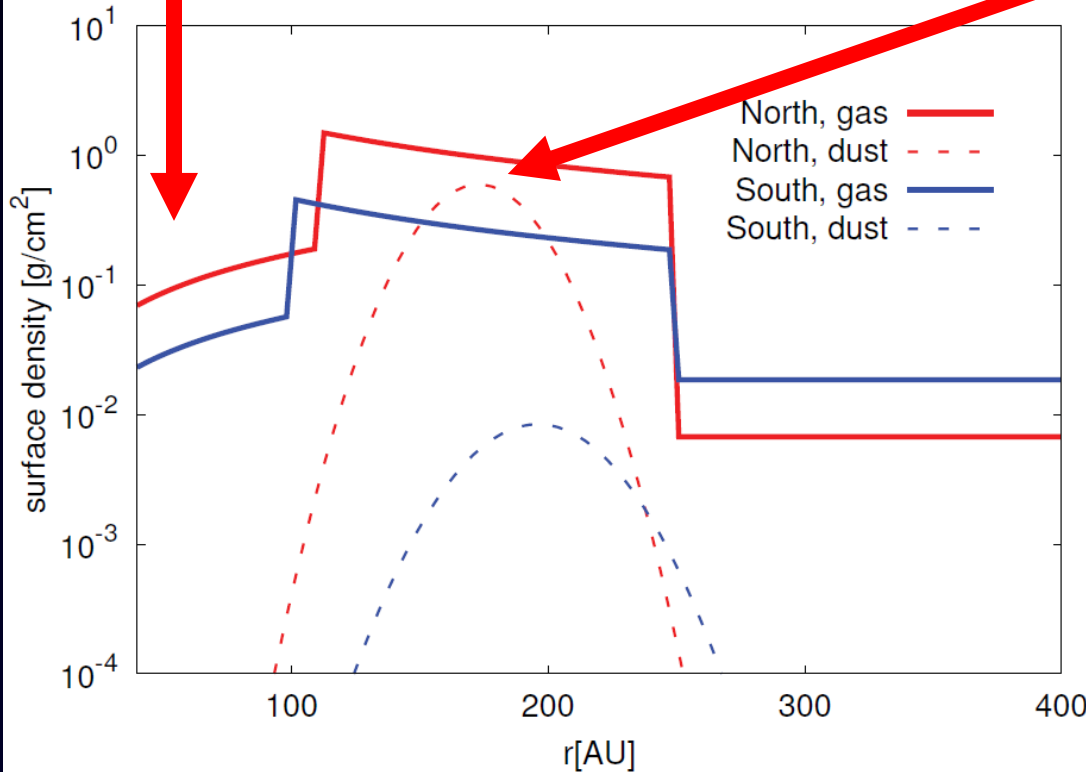
ダスト versus ガス

$^{13}\text{CO}(3-2)$, $\text{C}^{18}\text{O}(3-2)$, ダストの輻射輸送計算

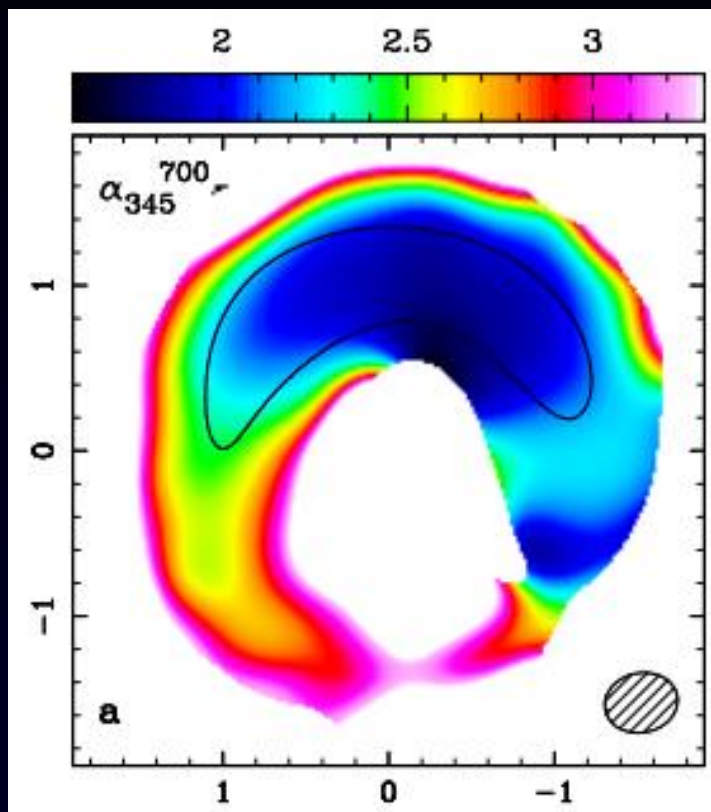


ガスのコントラストはダストより小さい

ガス・ダスト比 ~ 3
ダストが濃集

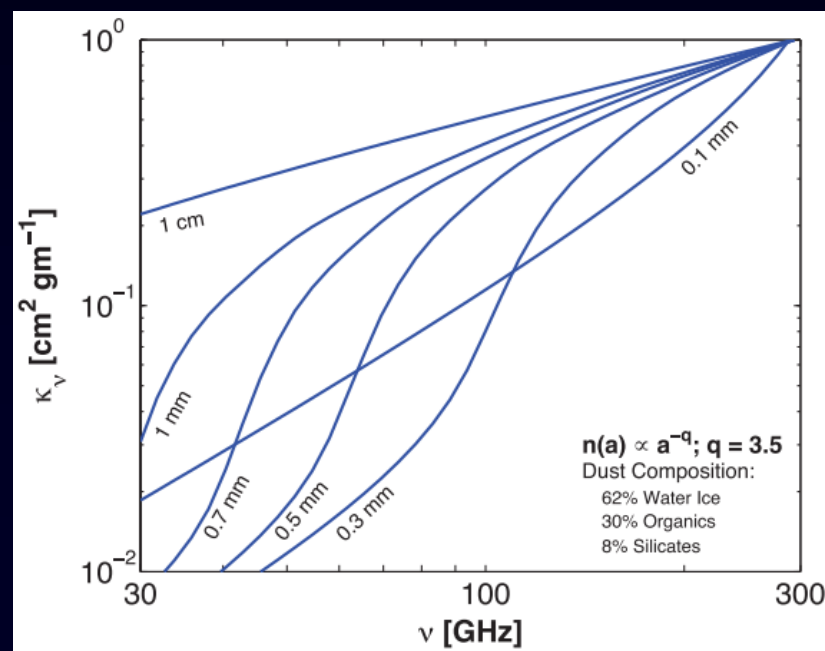


ダスト成長の兆候



Casassus et al. (2015)

- フラックス密度の比（opacity index β ）の変化
- ダストが集まっている領域で、ダストサイズが大きくなっているのではないかと



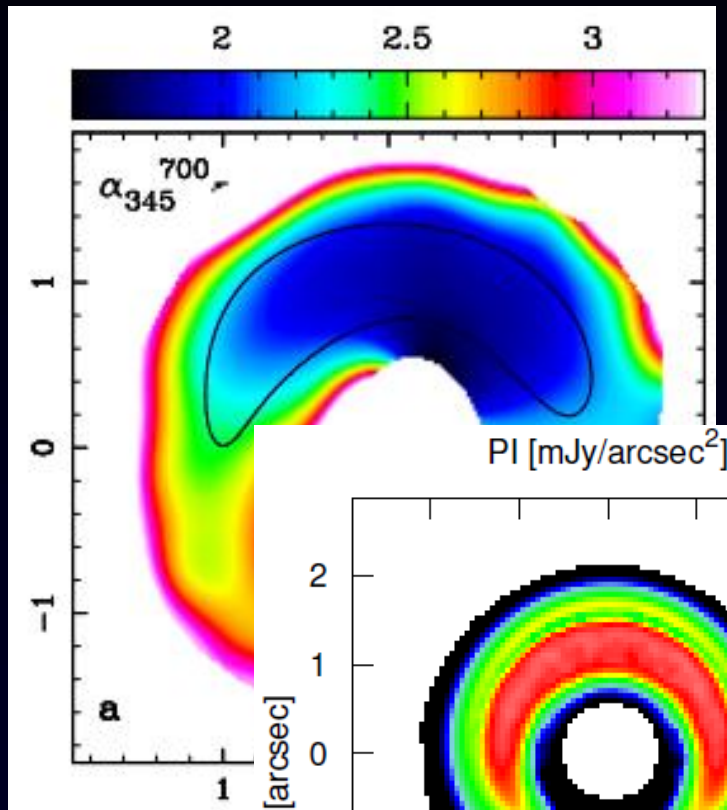
Perez et al. (2012)

$$M_{\text{disk}} \sim \frac{F_{\nu} d^2}{\kappa_{\nu} B_{\nu}(T_d)} \sim \frac{c^2}{2k} \frac{F_{\nu} d^2}{\nu^2 \kappa_{\nu} T_d}$$

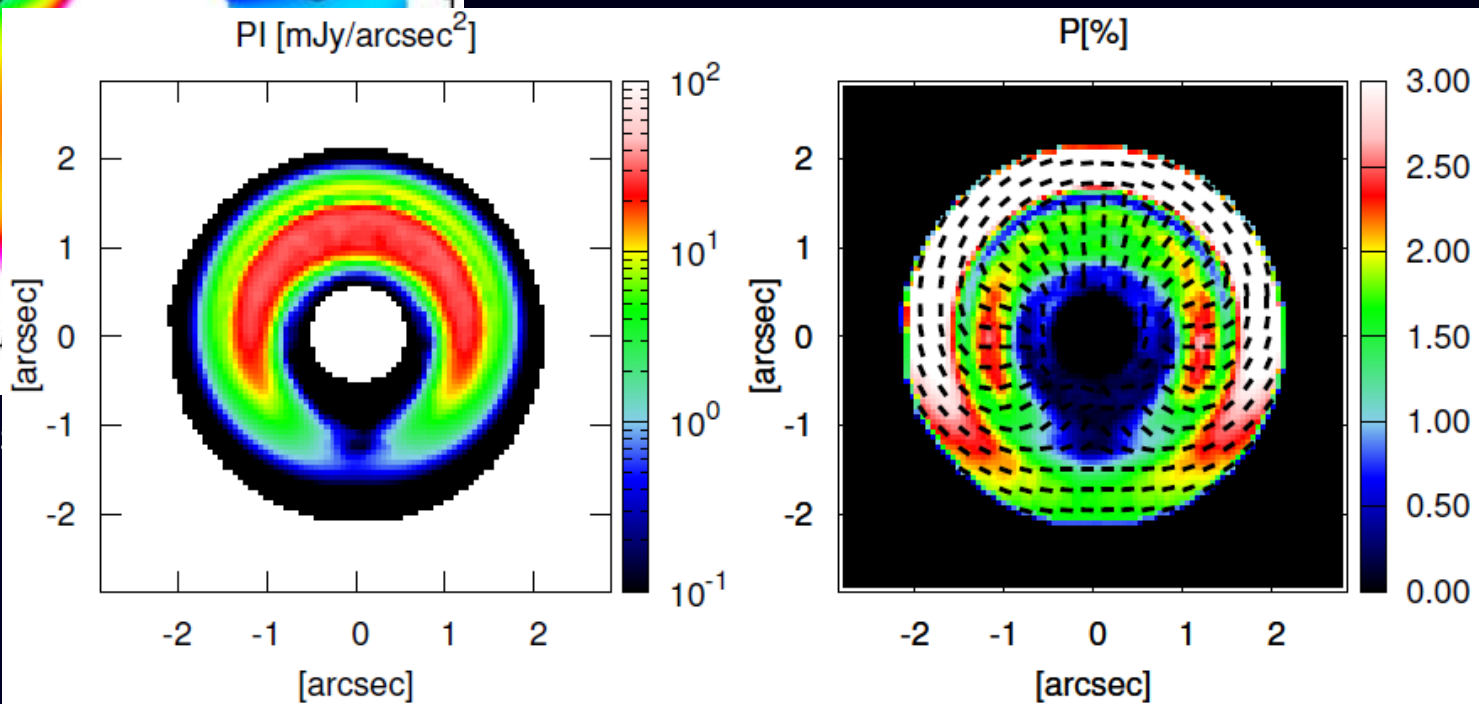
if $\kappa_{\nu} \propto \nu^{\beta}$, $F_{\nu} \propto \nu^{\alpha}$, $\alpha = \beta + 2$

ダスト成長の兆候

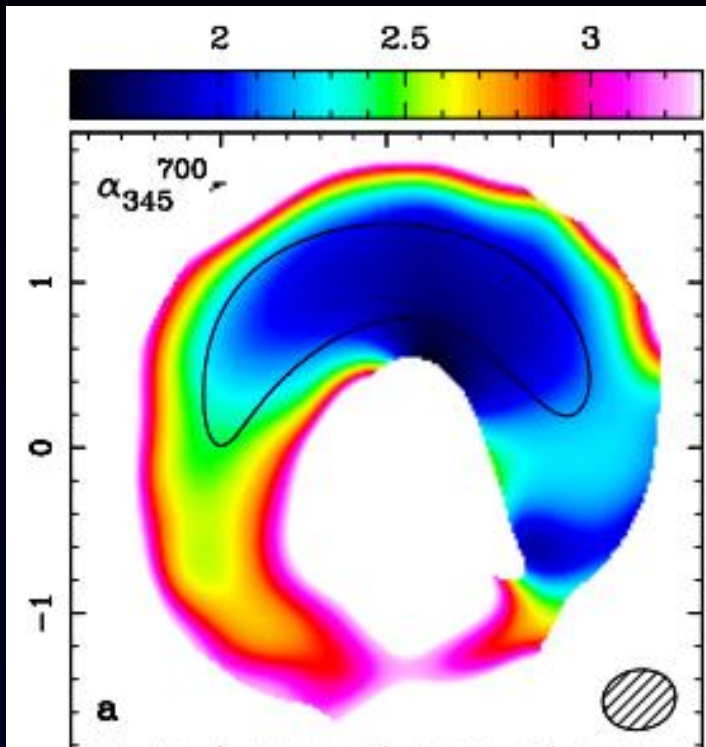
- 光学的に厚いと β は使えない
→ 偏光を使うアイデア (Kataoka et al. 2015)



Casa



ダスト成長の兆候

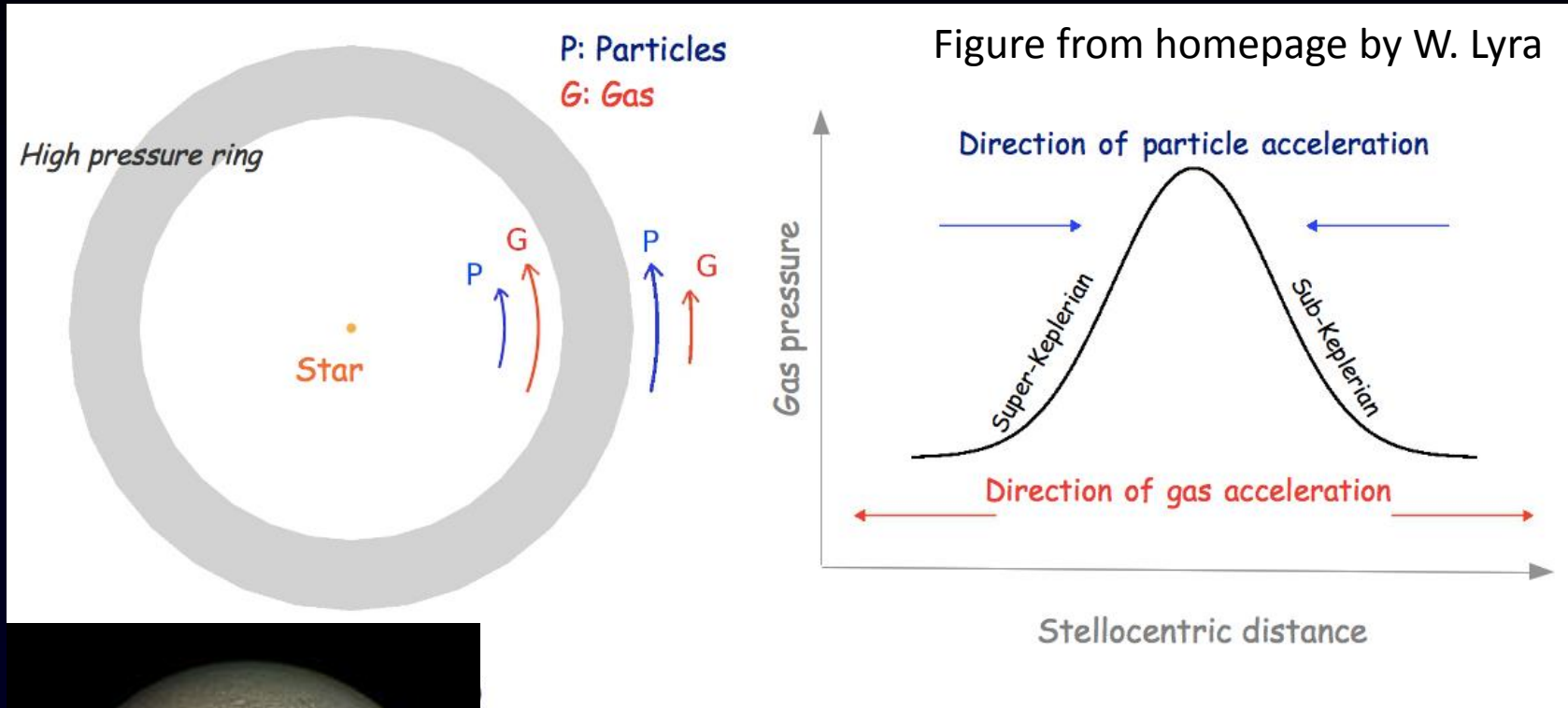


- フラックス密度の比（opacity index β ）の変化
- ダストが集まっている領域で、ダストサイズが大きくなっているのではないかと

サイズに応じて（動径方向だけでなく方位角方向にも）空間分布が偏る。

「ダスト・トラップ」

Dust (pressure) trap?



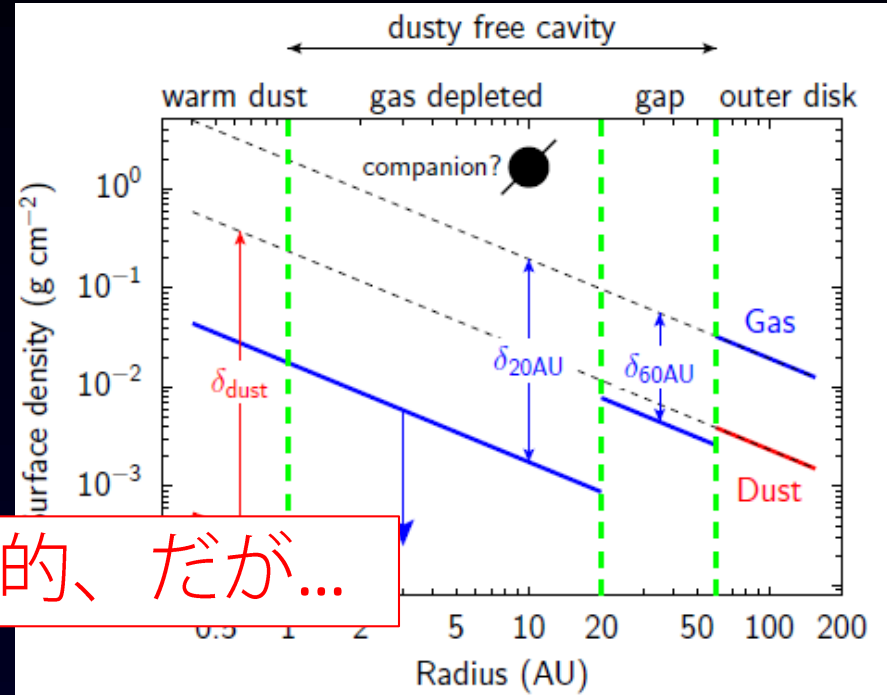
Vortex!

圧力最大の場所にダストが集まる

ガス

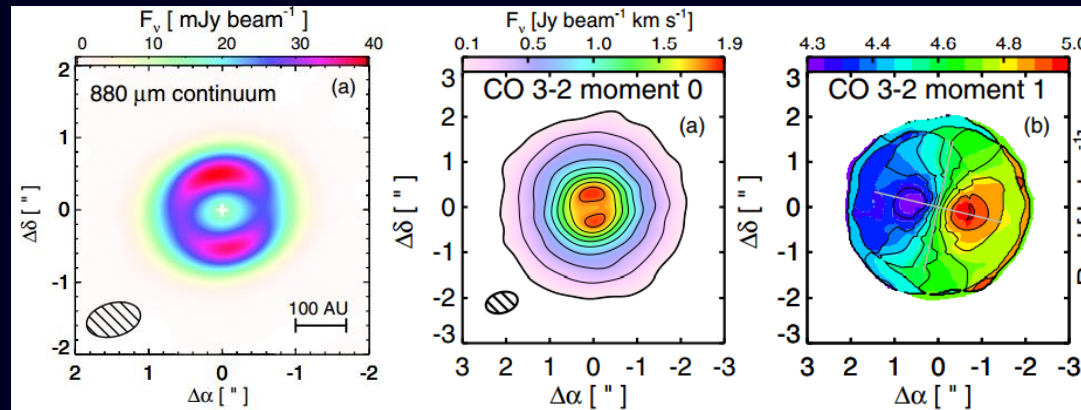
Bruderer et al. (2014)

- 複数天体の観測から
 - ガスはダストの穴にも存在
 - 穴の外徑
 1. ガスの方が内側
 2. ガスとダストで一致

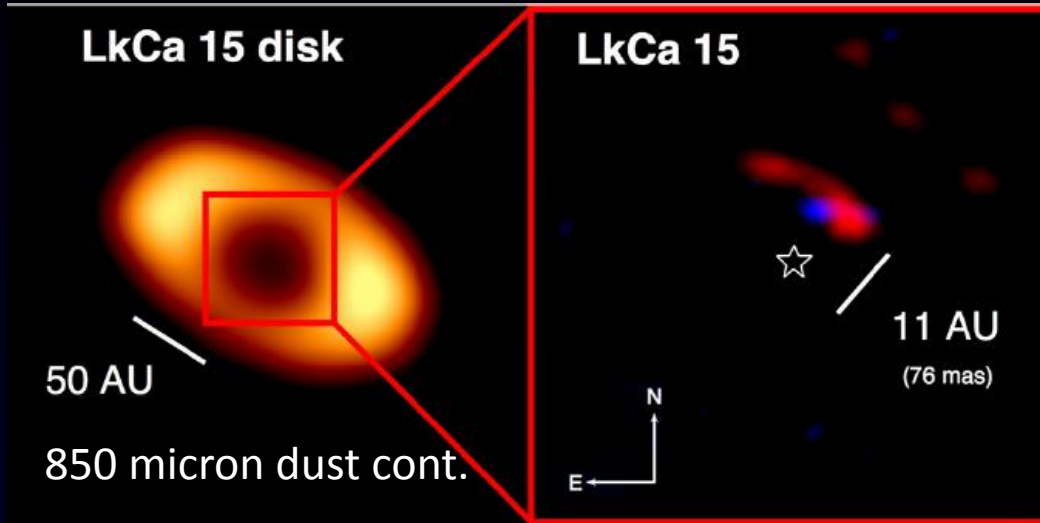


ダスト・トラップと整合的、だが...

ダスト円盤 > 79 AU 以遠
 ガス円盤 > 31 AU 以遠
 (Zhang et al. (2014))

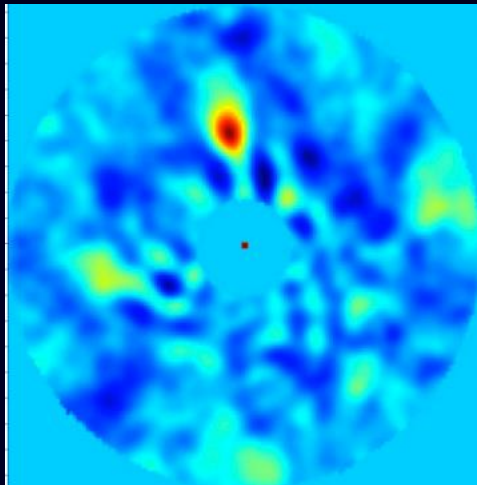


原始惑星は？

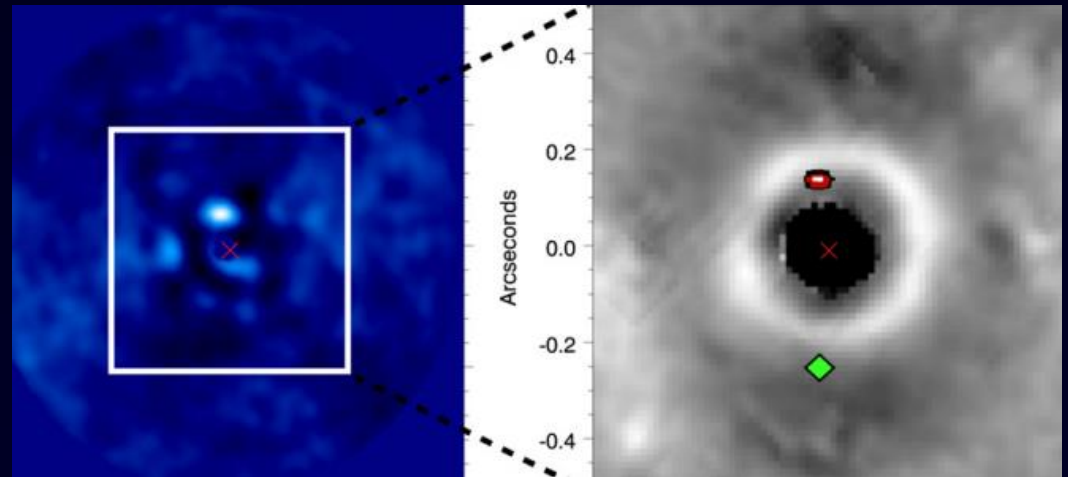


~6—15 Jupiter-mass
at ~20 AU

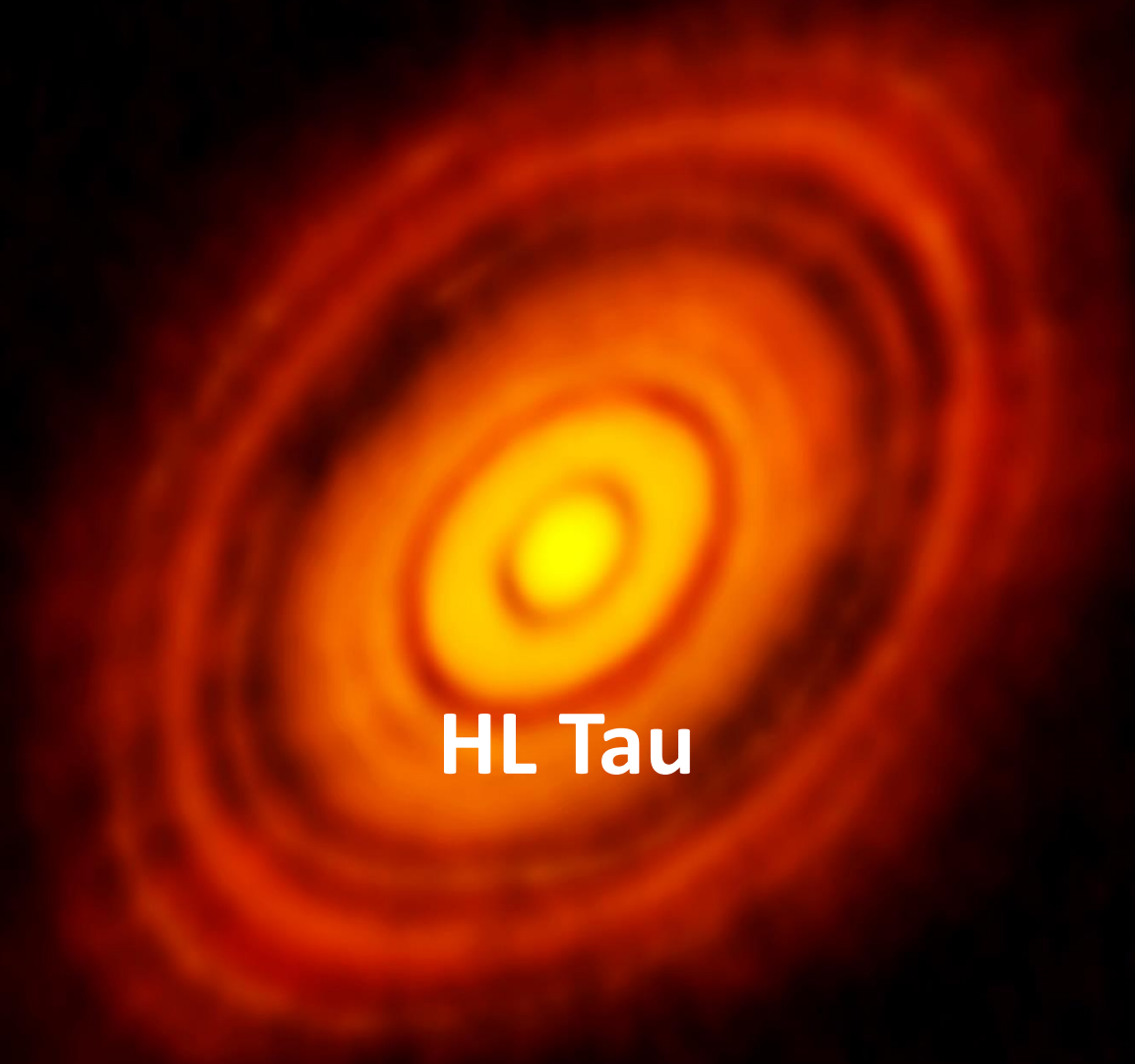
- 惑星の成長（降着）の研究がこれから進むはず



Giant planet at 53 AU



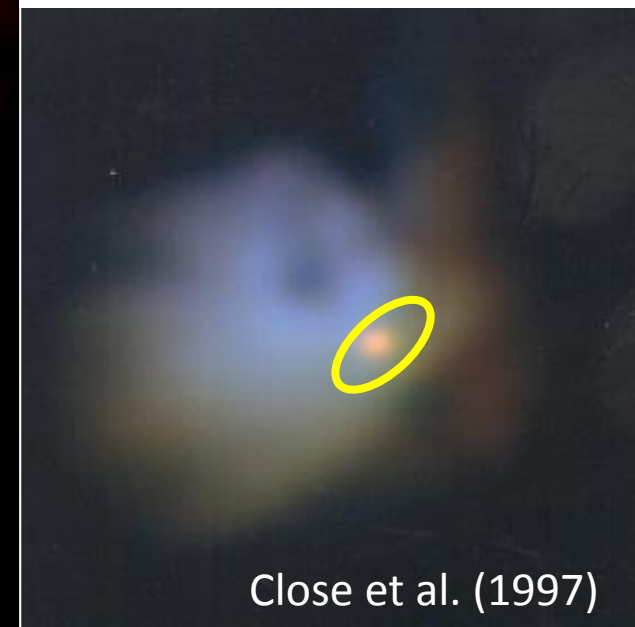
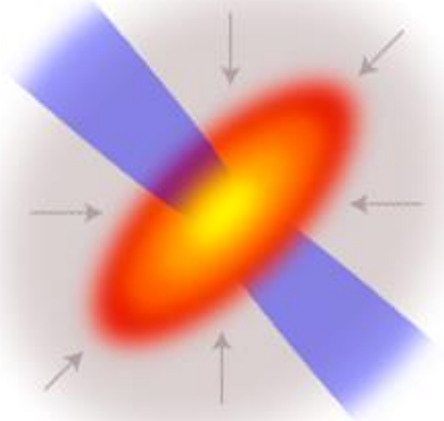
~30 Jupiter-mass at 23 AU



HL Tau

(b) 1.3 mm (B6)

0.1 Myr

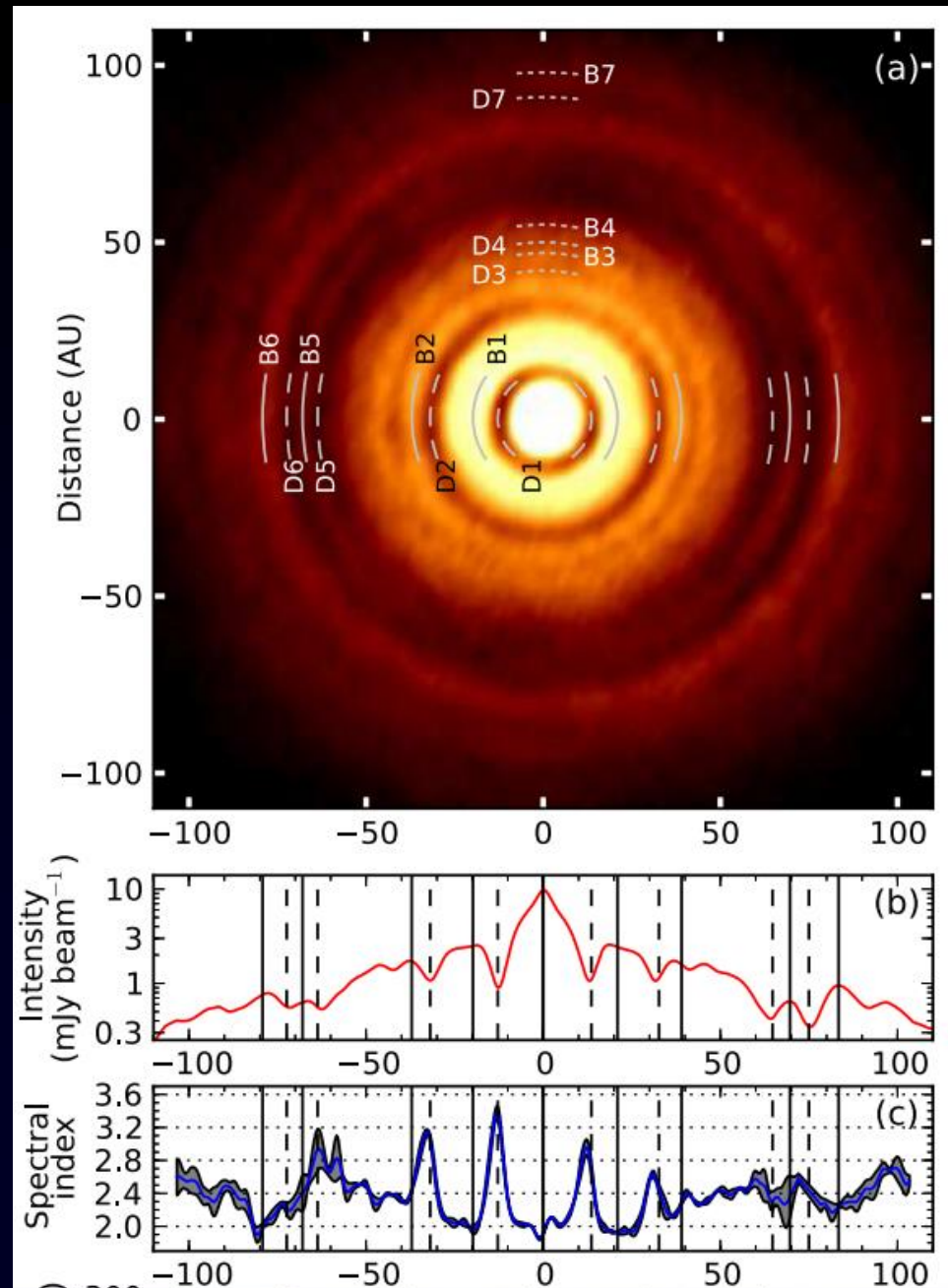
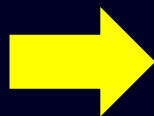


Close et al. (1997)

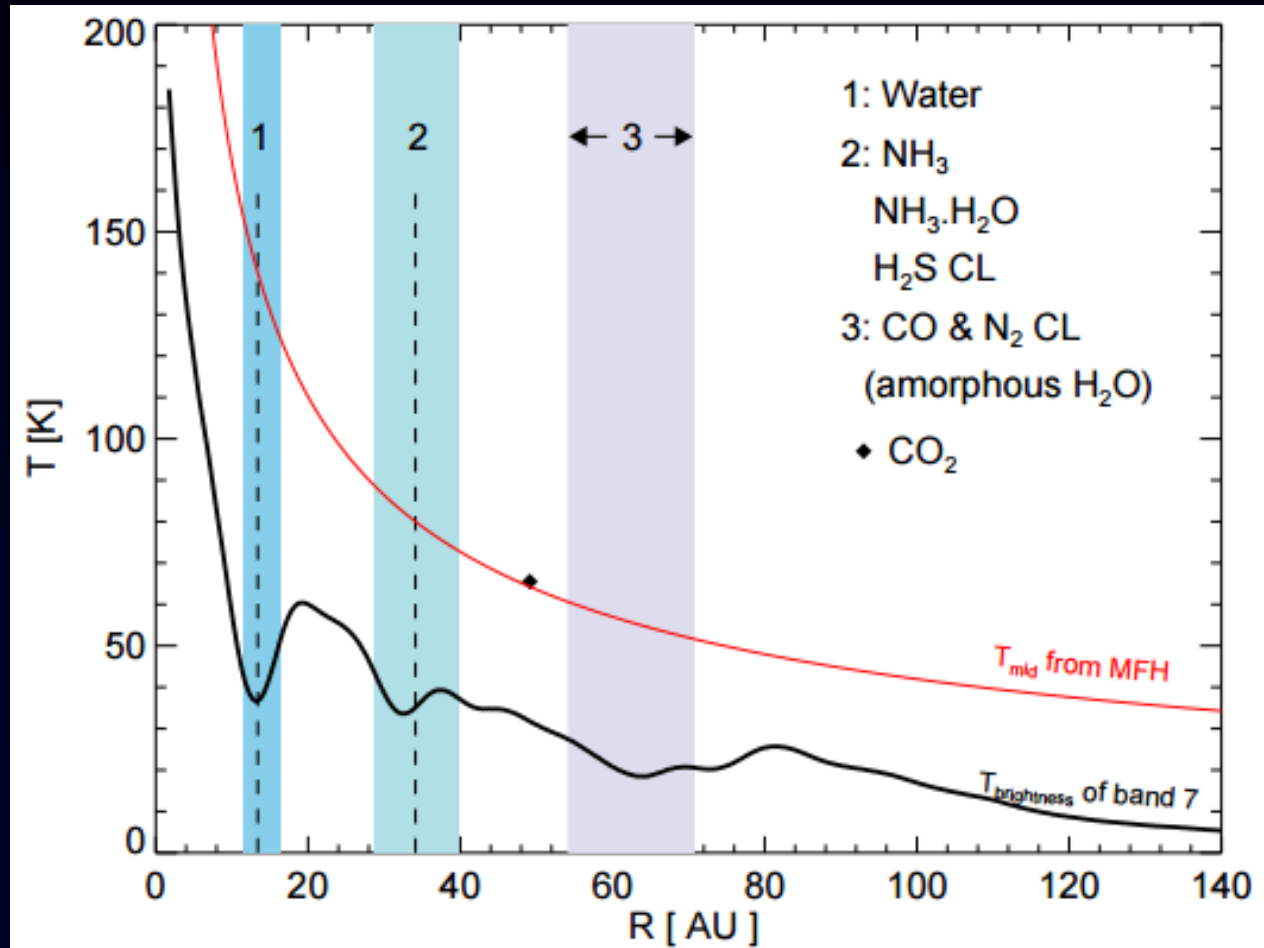
ALMA partnership (2015)

- 2.9, 1.3, and 0.87 mm
空間分解能 0."075 (10 AU)
– 0."025 (3.5 AU)
- 溝の場所
13, 32, ~42, ~50, 64, 74,
~91 AU
- 共鳴の関係
D1:D2:D3:D4 = 1:4:6:8

$\beta < \sim 0.8$ in the dark lane
→ ダスト成長?

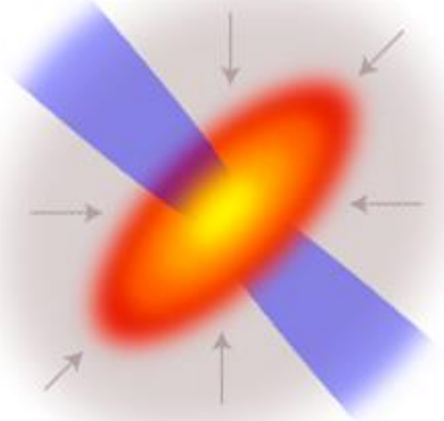


多数の溝の解釈：凍結線？



(b) 1.3 mm (B6)

0.1 Myr



惑星形成は、思っていたよりも早く始まる・進行する・完了するのではないか

Close et al. (1997)

今後

1. 年齢 $< \sim 1$ Myr での惑星形成とその普遍性
2. 周惑星円盤（成長する惑星、円盤との相互作用）
3. これまでに特徴ある構造が検出されていない円盤に対する新たな知見

スノーライン、円盤物質の化学進化・輸送（ガスとダストを一緒に考える）、円盤散逸過程...

“What is the dominant mechanism for planet formation?”