

原始惑星系円盤構造の観測と 惑星形成への示唆

武藤恭之
(工学院大学)

目次

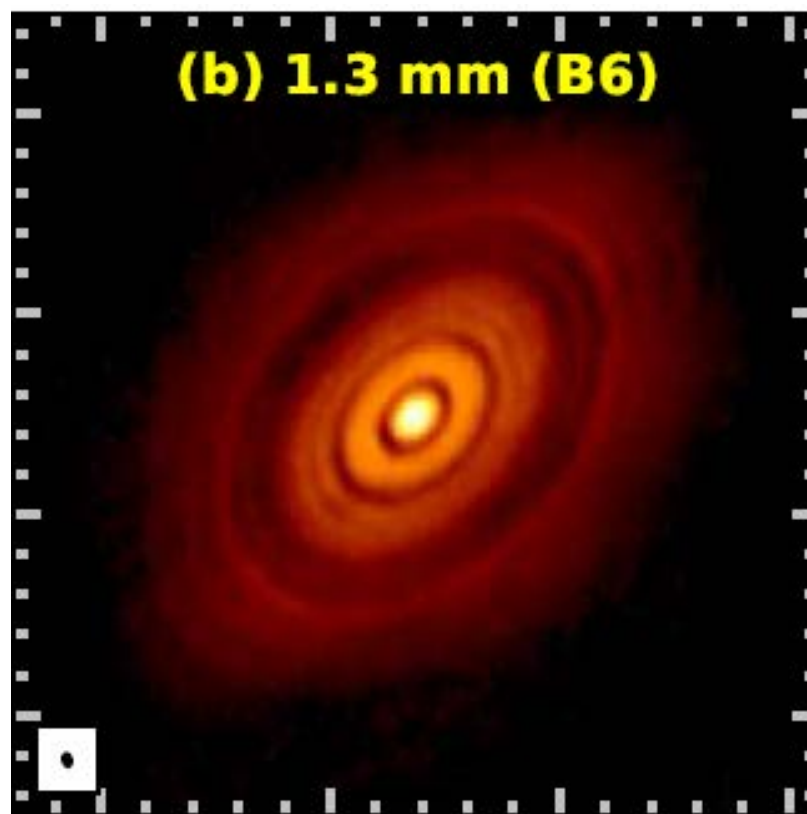
- Introduction
 - 原始惑星系円盤と惑星形成の諸問題
 - 原始惑星系円盤におけるダストとガスの分布
 - 円盤観測で見えるもの
- 原始惑星系円盤の全体構造の観測
- 原始惑星系円盤の詳細構造の観測と物理過程
 - 円盤ギャラリー
 - HD 142527: 大きな穴を持つ非軸対称天体
 - 円盤構造・ダストの性質
 - 三日月構造を持つ天体とロスビー波不安定性
 - WL17: 若くして進化した天体？

- Introduction

- 原始惑星系円盤と惑星形成の諸問題
 - 原始惑星系円盤におけるダストとガスの分布
 - 円盤観測で見えるもの
- 原始惑星系円盤の全体構造の観測
- 原始惑星系円盤の詳細構造の観測と物理過程
 - 円盤ギャラリー
 - HD 142527: 大きな穴を持つ非軸対称天体
 - 円盤構造・ダストの性質
 - 三日月構造を持つ天体とロスビー波不安定性
 - WL17: 若くして進化した天体？

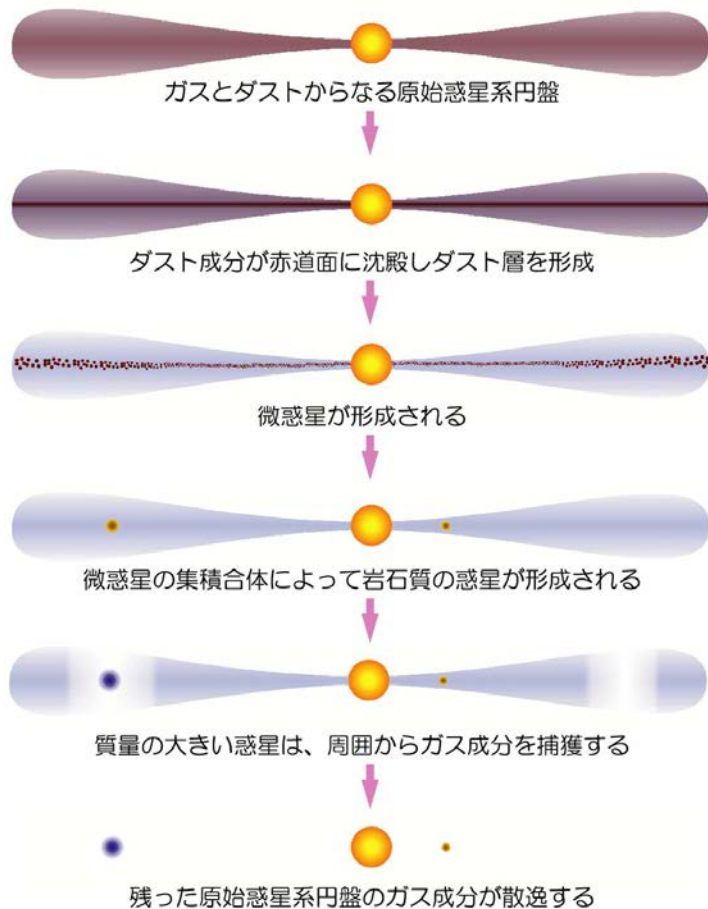
原始惑星系円盤

生まれたての星の周囲の円盤



原始惑星系円盤と惑星形成

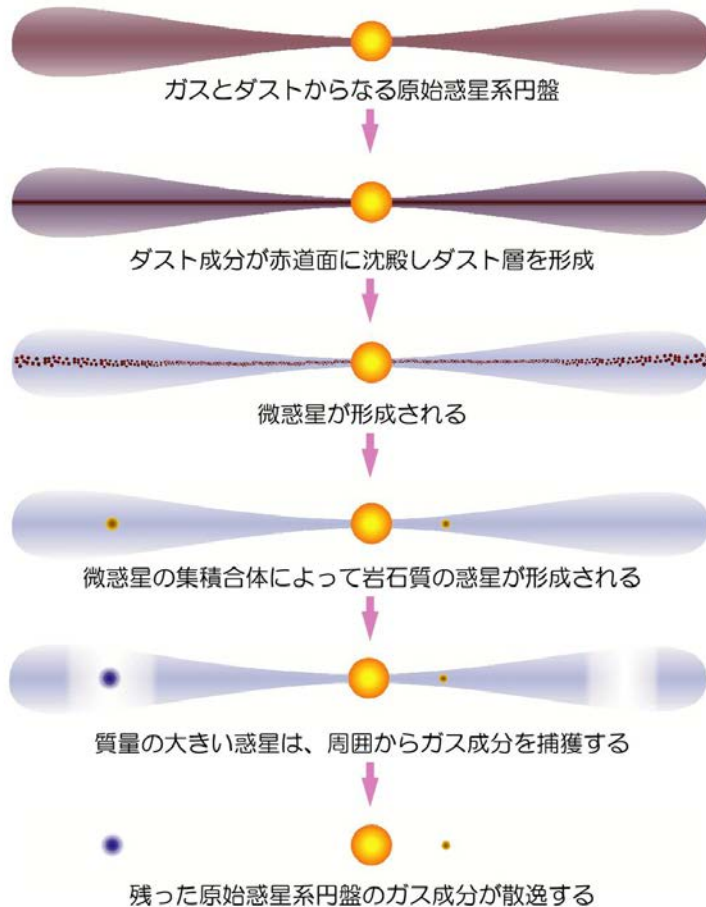
惑星系形成の標準的なシナリオ（京都モデル）



- 原始惑星系円盤は、ガスとダストからなっている
- ダストの成長により、惑星が形成される
 - 微惑星 (~1km)
 - 原始惑星 (~1000km)
- ガス散逸により、最終的な惑星の姿に
 - 円盤の寿命 $\sim 10^{6-7}$ yr
 - ガス惑星形成時間の制限

惑星形成の諸問題

惑星系形成の標準的なシナリオ（京都モデル）



Copyrighted by T. Ikeda, 1999

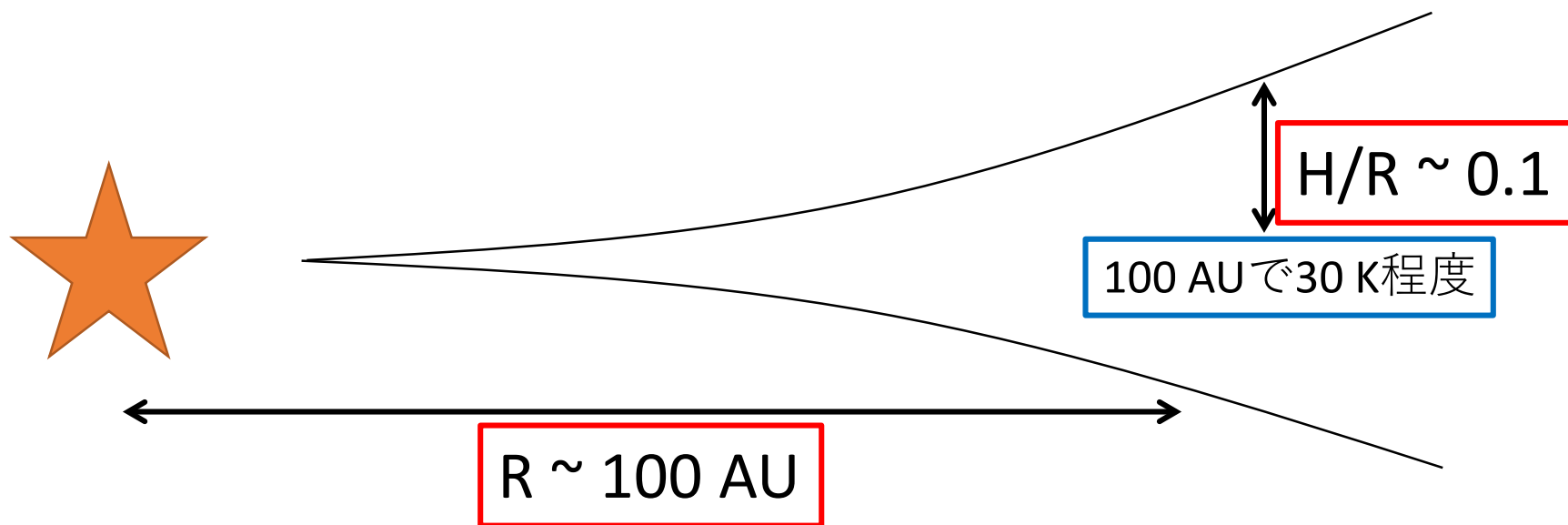
- 原始惑星系円盤の基本構造
- ダストと円盤ガスの相互作用
- 惑星と円盤ガスの相互作用

• Introduction

- 原始惑星系円盤と惑星形成の諸問題
- 原始惑星系円盤におけるダストとガスの分布
- 円盤観測で見えるもの
- 原始惑星系円盤の全体構造の観測
- 原始惑星系円盤の詳細構造の観測と物理過程
 - 円盤ギャラリー
 - HD 142527: 大きな穴を持つ非軸対称天体
 - 円盤構造・ダストの性質
 - 三日月構造を持つ天体とロスビー波不安定性
 - WL17: 若くして進化した天体？

原始惑星系円盤の基本的構造

- ガス構造：第ゼロ近似で
 - 動径方向のつり合い \rightarrow ケプラー回転 $\Omega^2 = \frac{GM}{R^3}$
 - 厚み方向のつり合い \rightarrow スケールハイト $H = \frac{c_s}{\Omega} \ll R$

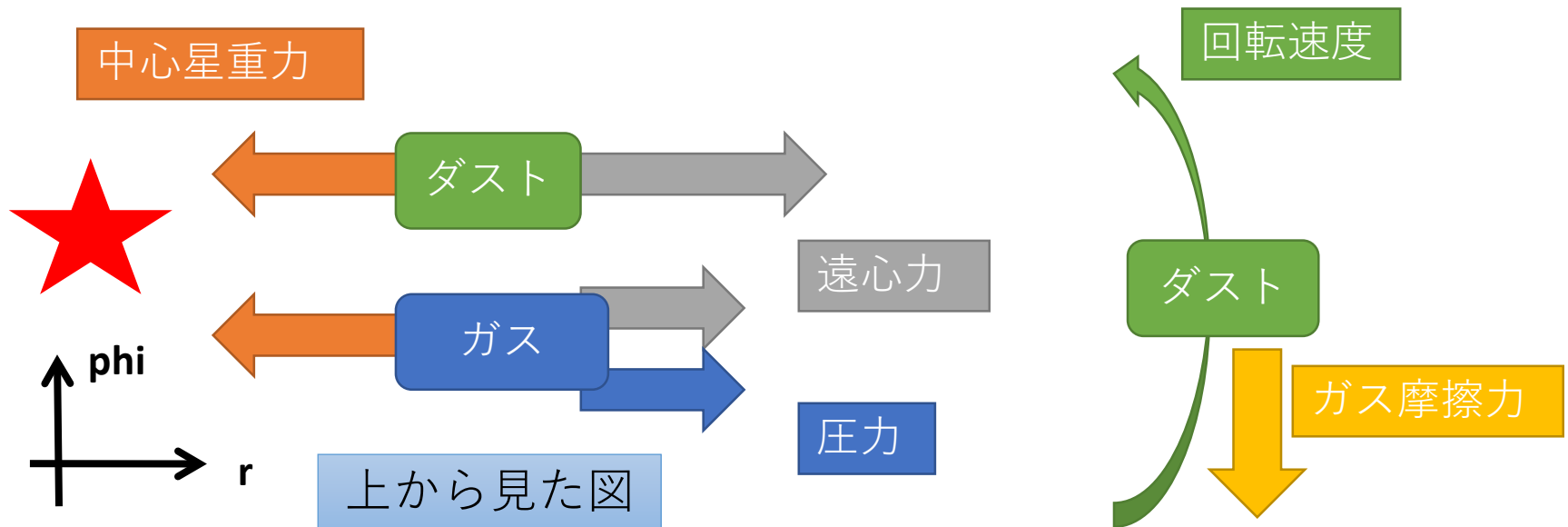


原始惑星系円盤中のダストの ふるまい

- まずは、「ガスとダストがよく混ざっている」と考える
- 惑星形成 = ダスト集積
- ガスは、簡単に **clumping** しない
 - 重力不安定を起こすくらい重い円盤が必要
- ダストとガスがよく混ざっていてもダメ
 - ダストの運動とガスの運動が違ふことが必要

原始惑星系円盤における ガスとダストの力学

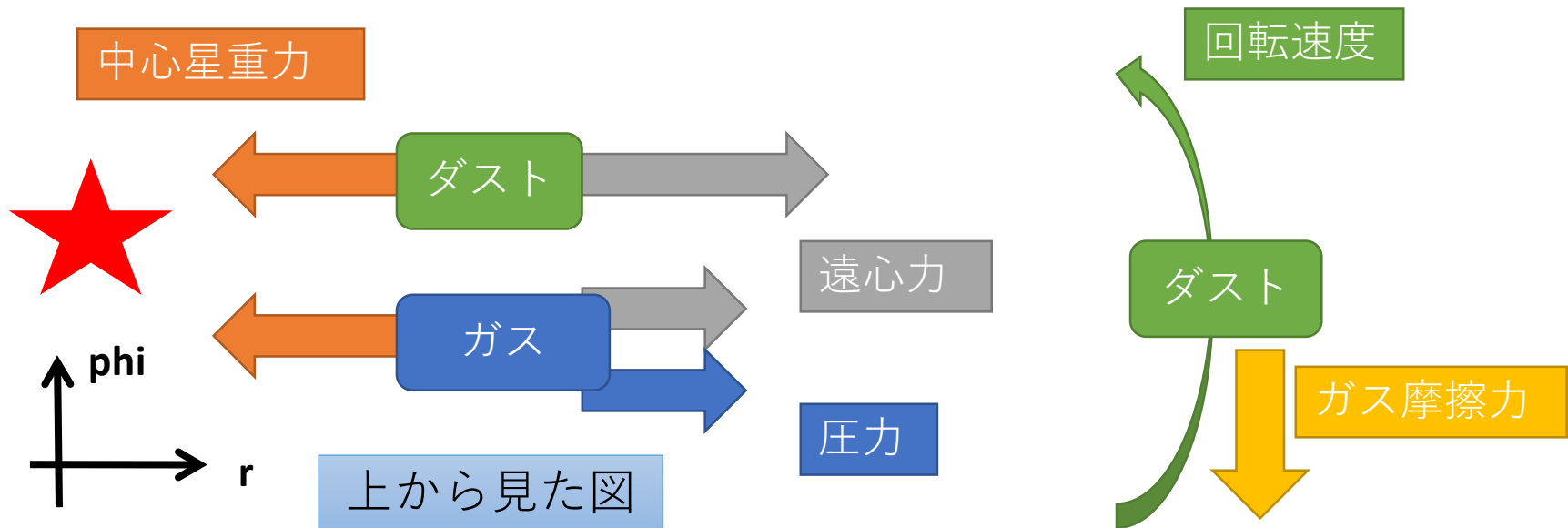
- ガスにかかる力
 - 中心星重力・遠心力・ガス圧力
 - (自己重力・乱流粘性・磁気圧力・磁気張力・ダスト摩擦力)
- ダストにかかる力
 - 中心星重力・遠心力・ガス摩擦力・(自己重力)



円盤内のダストの運動

- ガスは圧力勾配を感じるが、ダストは感じない
- 外向きの圧力勾配がある場合
 - ガスはKepler回転に比べてゆっくり回転
 - ダストは向かい風を受け、角運動量を失う

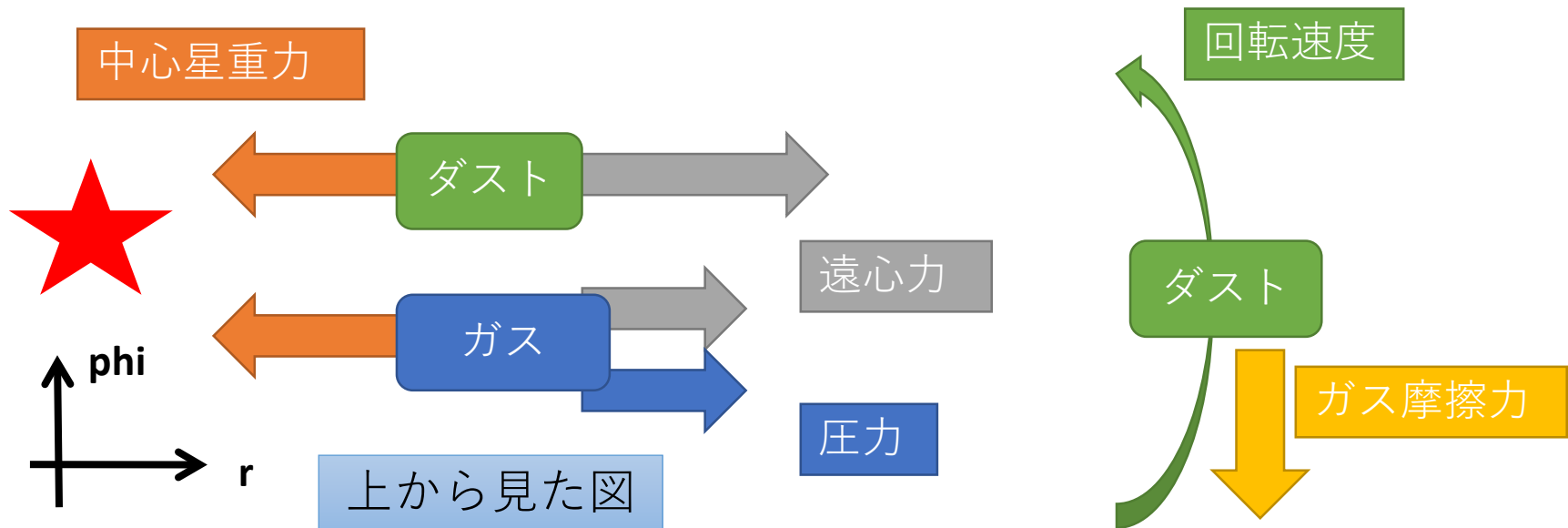
ダストは、ガス圧力の高い場所集まる



円盤内のダストの運動

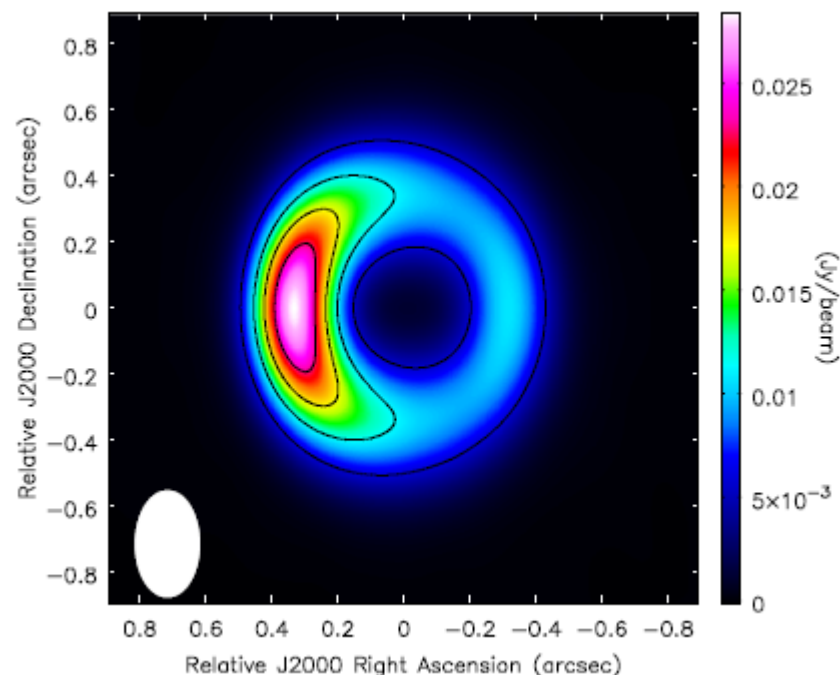
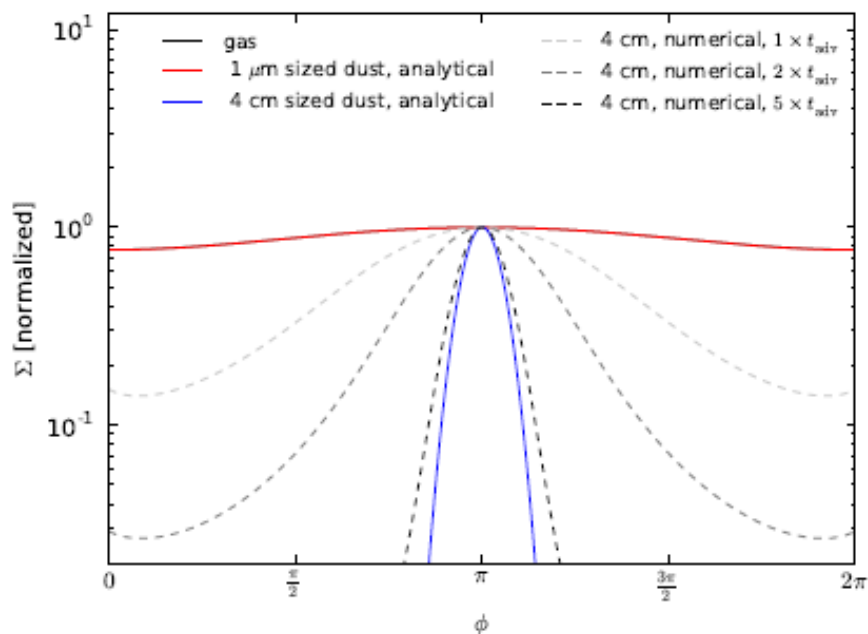
- 円盤内で最も「動きやすい」ダスト
 - 摩擦が「中途半端に」効くダスト
 - 数 AU の場所で ~1m 程度、~100 AU の場所で ~1mm 程度

$$a_{\text{Ep}}(\tau_s) = \frac{\tau_s \Sigma_g}{\sqrt{2\pi} \rho_\bullet} \approx 30 \text{ cm } \tau_s \Sigma_{150} \left(\frac{r}{5 \text{ AU}} \right)^{-1.5} \quad \text{Youdin and Lithwick (2007)}$$



高圧領域へのダストの集積

- 微惑星形成を効率的に起こす可能性
- ダストの大きさ（摩擦の効き具合）によって、ガスとダストは大きく異なる分布になりうる

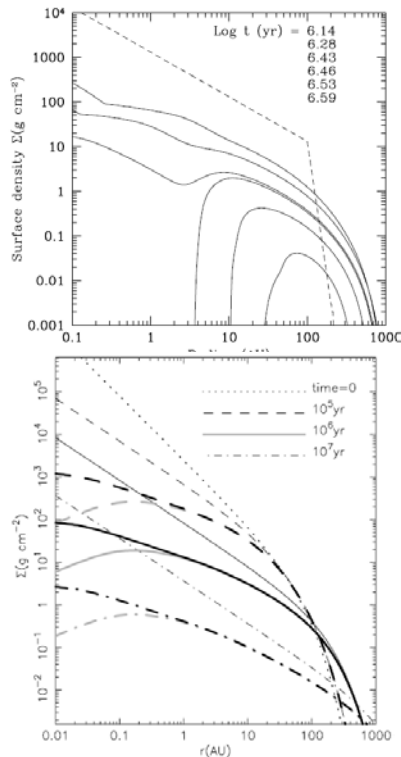


Birnstiel+13

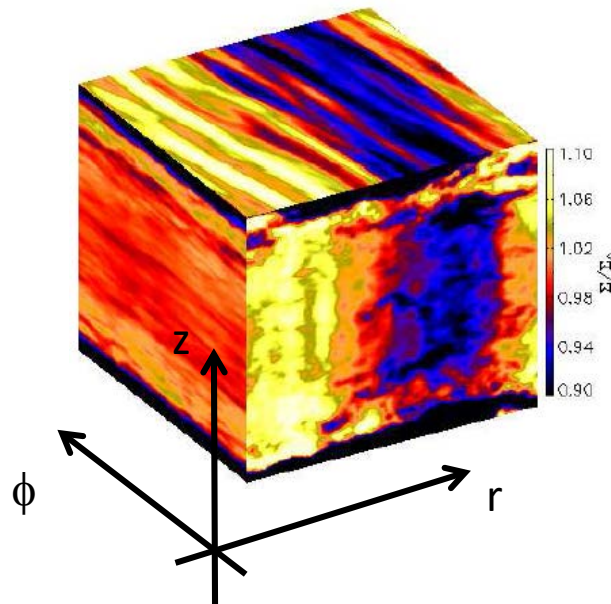
*注: 方位角方向の変化に対するモデル

円盤における高圧領域の形成

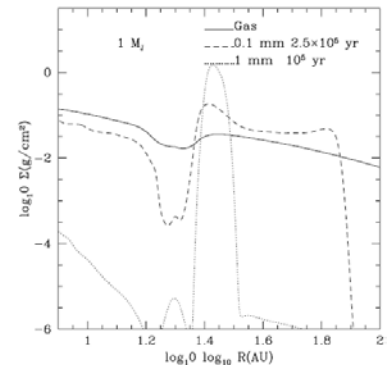
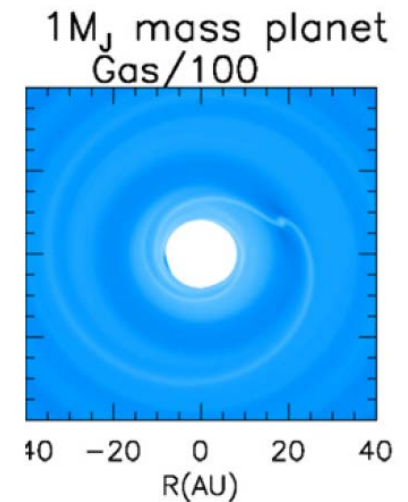
- 円盤進化と「内縁」の形成
- (磁気) 流体力学的不安定性
- 円盤・惑星相互作用とギャップ形成



Gorti and Hollenbach (2009)
Suzuki, Muto, Inutsuka (2010)



Johansen, Youdin, Klahr (2009)



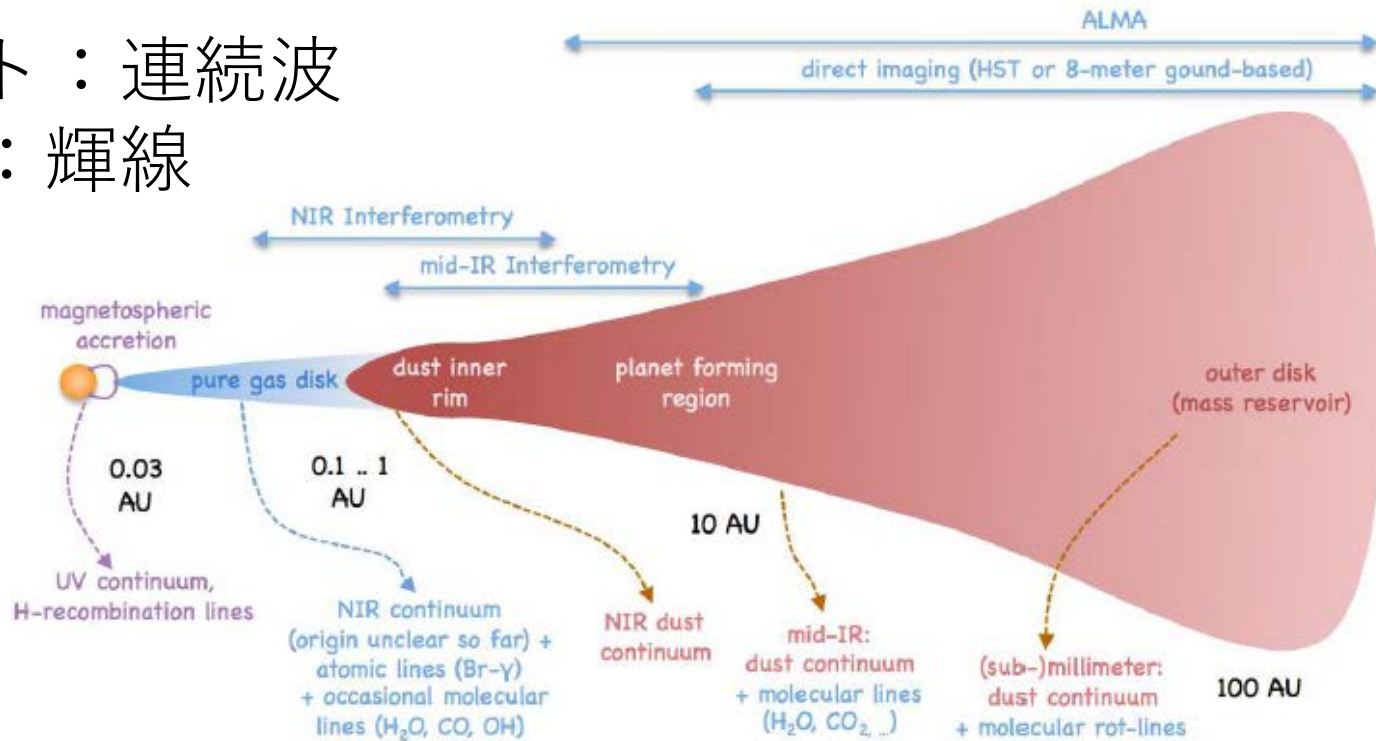
Zhu+ 2012

• Introduction

- 原始惑星系円盤と惑星形成の諸問題
- 原始惑星系円盤におけるダストとガスの分布
- 円盤観測で見えるもの
- 原始惑星系円盤の全体構造の観測
- 原始惑星系円盤の詳細構造の観測と物理過程
 - 円盤ギャラリー
 - HD 142527: 大きな穴を持つ非軸対称天体
 - 円盤構造・ダストの性質
 - 三日月構造を持つ天体とロスビー波不安定性
 - WL17: 若くして進化した天体？

円盤観測で見えるもの：熱放射

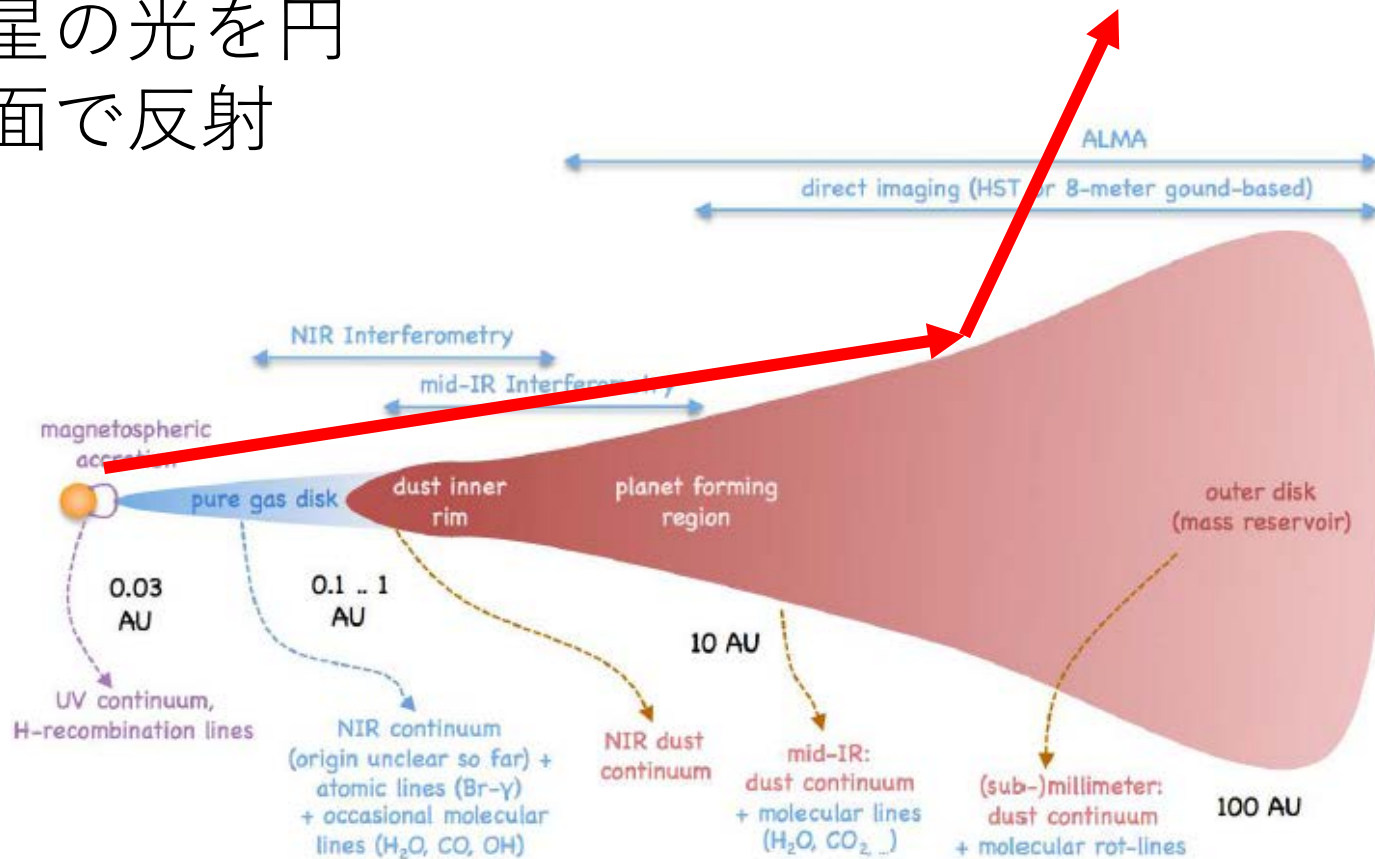
ダスト：連続波
ガス：輝線



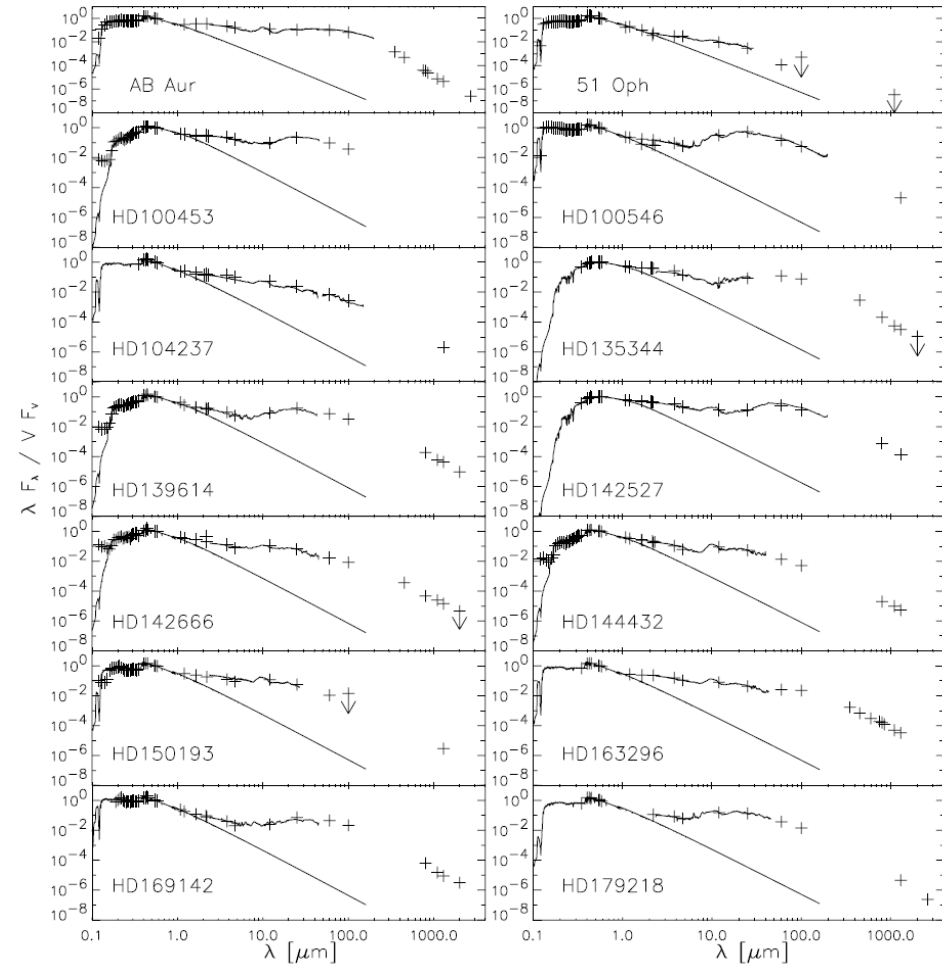
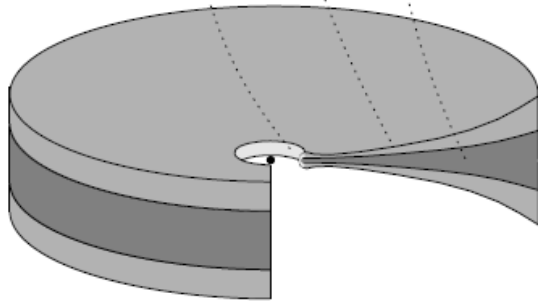
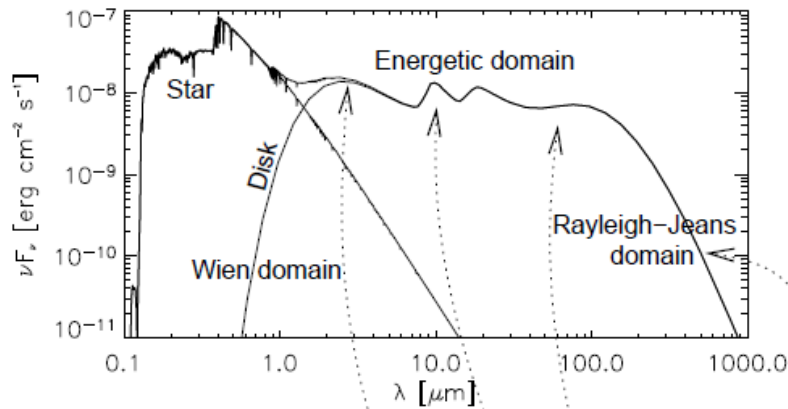
- 内側が温かい ➡ 短波長（～赤外線）
- 外側が冷たい ➡ 長波長（～電波）

円盤観測で見えるもの：散乱光

中心星の光を円盤表面で反射

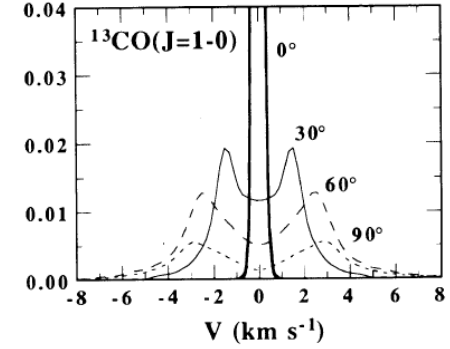
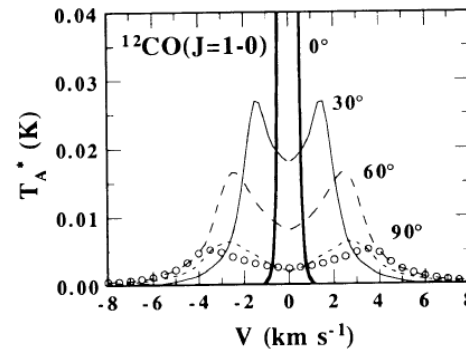
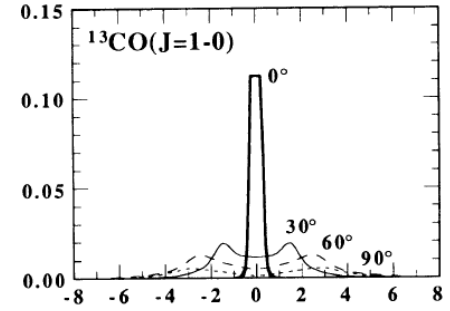
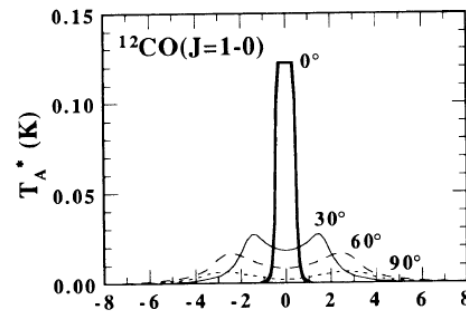
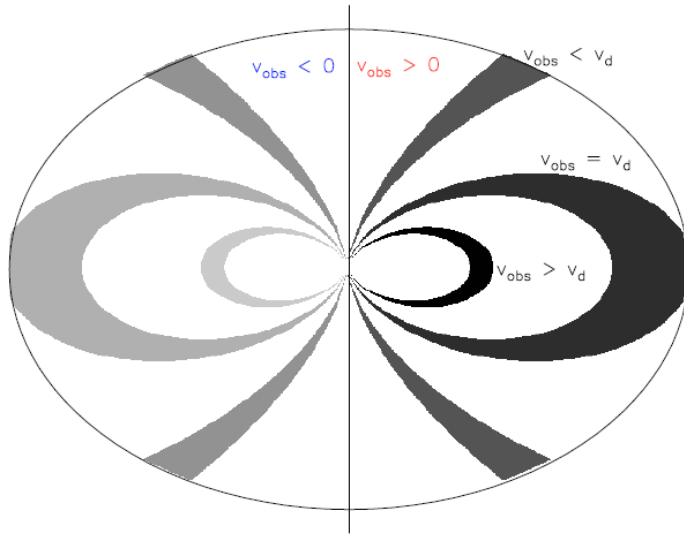


円盤天体のSED



- ダストの熱放射
- 円盤天体は赤外～ミリ波で超過を示す

ガス輝線観測



- Kepler 回転する傾いた円盤からの放射
 - 典型的には、double peak 構造の line profile
 - チャンネルごとのイメージは butterfly pattern

円盤の観測的な probe

- 空間分解能 @ $d=100$ pc
 - 近赤外線、最大 ~ 0.1 秒 = 10 AU with 8-m class telescopes
 - 中間赤外線 ~ 0.4 秒 = 40 AU
 - ミリ波・サブミリ波、最大 ~ 0.1 秒 = 10 AU with ALMA
- 円盤内縁など、中心星に近い領域 \sim 数AU
 - 近赤外線 \sim 中間赤外線熱放射
 - 空間分解はできない
- 外側円盤、中心星から ~ 100 AU
 - 表面構造は、近赤外線散乱光
 - 円盤中心面付近は、ミリ波・サブミリ波
 - (場合によっては) 空間分解可能

ALMA 望遠鏡

- ミリ波・サブミリ波帯で「高感度」かつ／または「高解像度」
- 原始惑星系円盤観測に適している



- Introduction

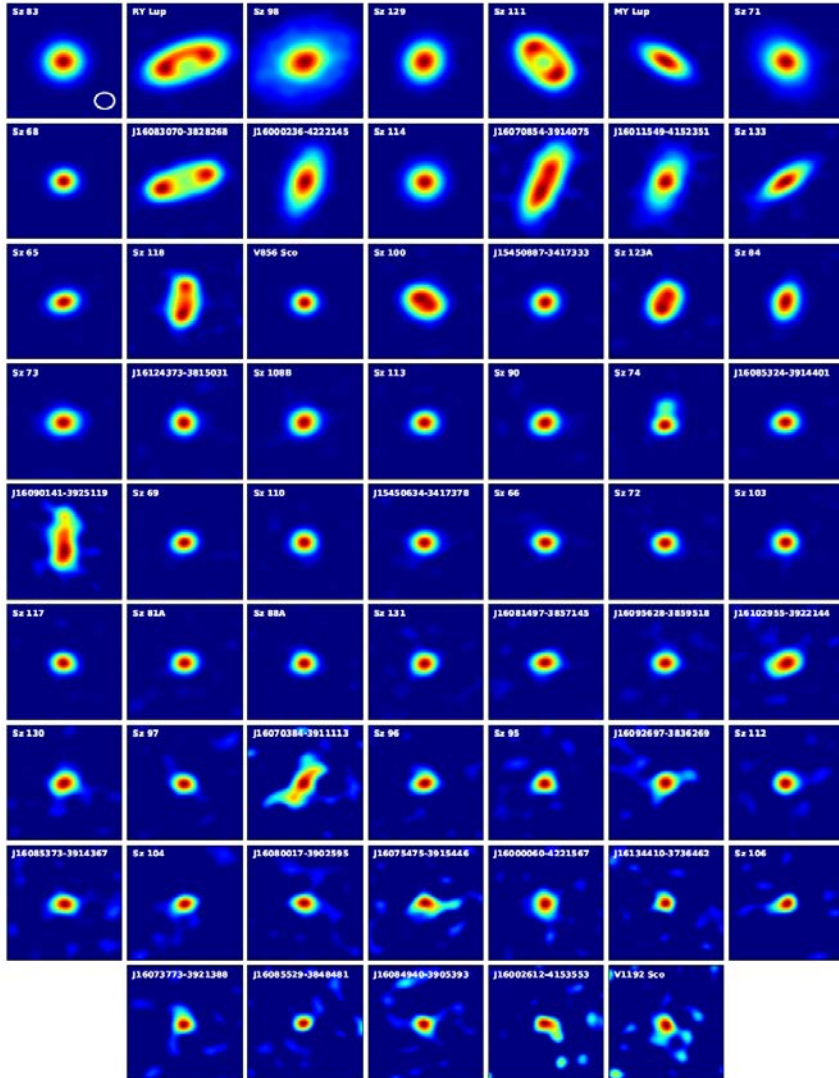
- 原始惑星系円盤と惑星形成の諸問題
- 原始惑星系円盤におけるダストとガスの分布
- 円盤観測で見えるもの

- 原始惑星系円盤の全体構造の観測

- 原始惑星系円盤の詳細構造の観測と物理過程

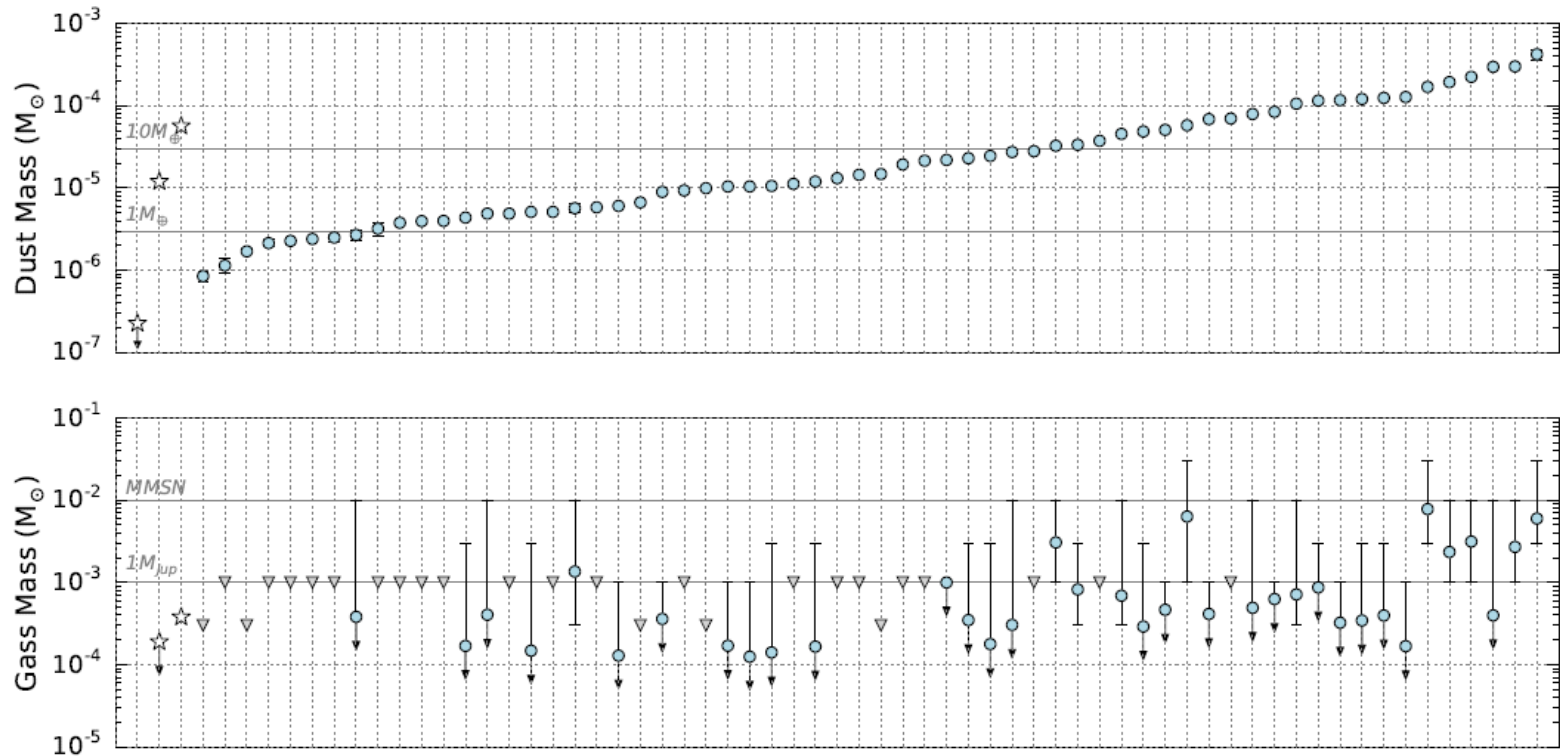
- 円盤ギャラリー
- HD 142527: 大きな穴を持つ非軸対称天体
 - 円盤構造・ダストの性質
- 三日月構造を持つ天体とロスビー波不安定性
- WL17: 若くして進化した天体？

円盤のガス・ダスト量



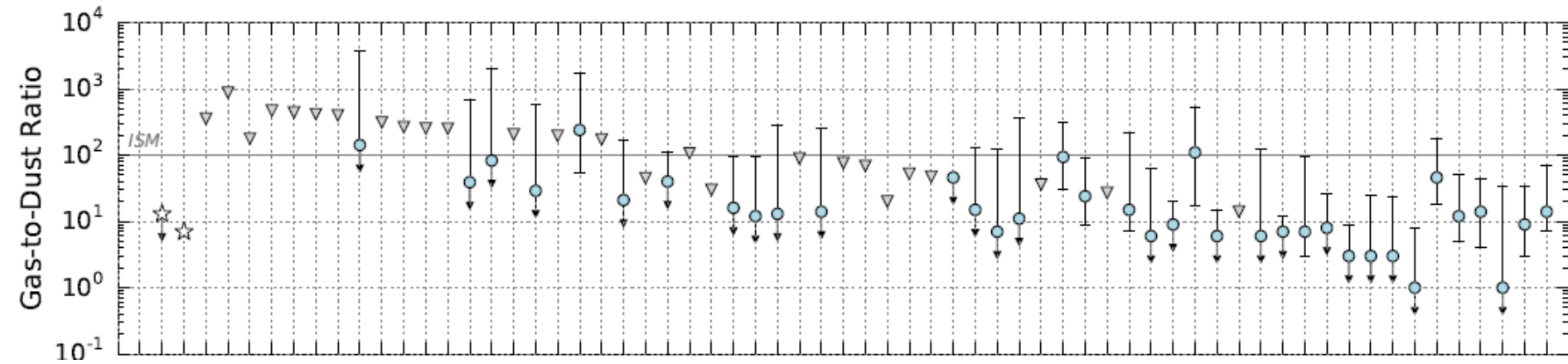
- ALMAの「高感度」を生かした、スナップショット・サーベイ観測
- 星形成領域の円盤を片っ端から（細かく空間分解せずに）撮る
- 原始惑星系円盤には、ガス・ダストがどの程度あるか？

ダスト量とガス量 (Lupus survey)



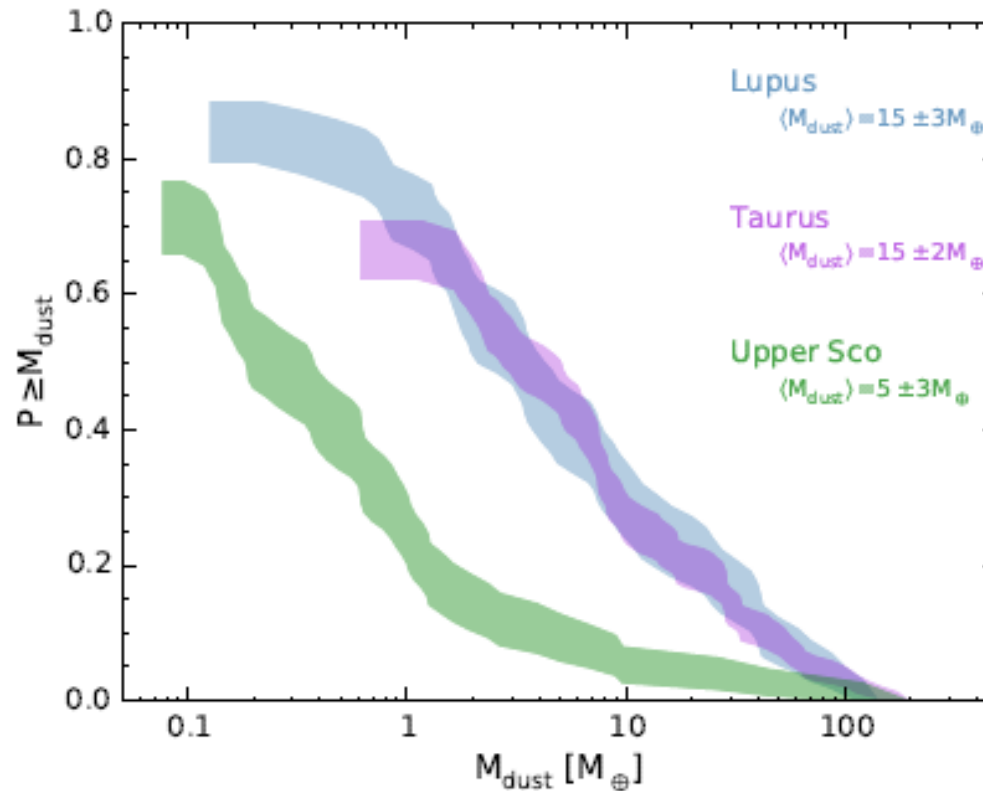
- ダスト質量は様々な値
- ガス質量には、あまり variation が無い

ガス・ダスト比 (Lupus Survey)



星間空間よりもガスが少ない（ダストが多い）傾向
※ CO でのガス量を見積もり

領域の比較



- Lupus (1-3 Myr)と Taurus (1-2 Myr) は近いが、 Usco (5-10 Myr) はダストが少ない

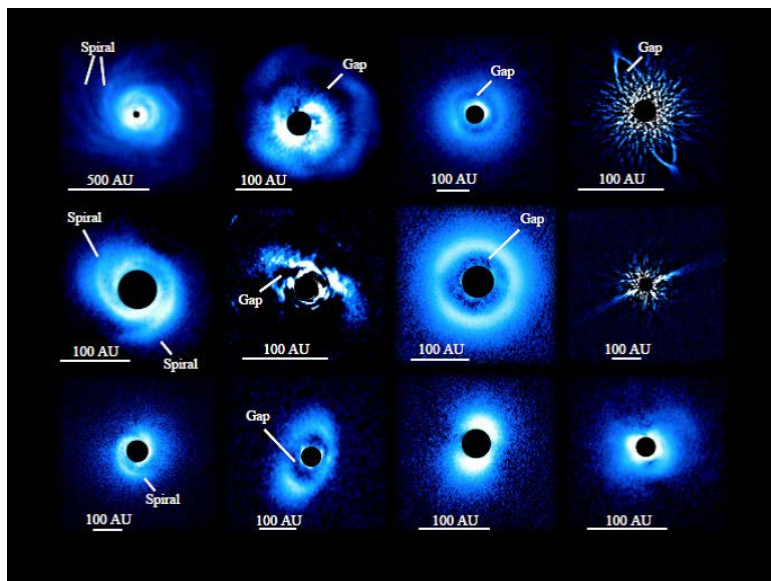
- Introduction

- 原始惑星系円盤と惑星形成の諸問題
- 原始惑星系円盤におけるダストとガスの分布
- 円盤観測で見えるもの
- 原始惑星系円盤の全体構造の観測
- 原始惑星系円盤の詳細構造の観測と物理過程
 - 円盤ギャラリー
 - HD 142527: 大きな穴を持つ非軸対称天体
 - 円盤構造・ダストの性質
 - 三日月構造を持つ天体とロスビー波不安定性
 - WL17: 若くして進化した天体？

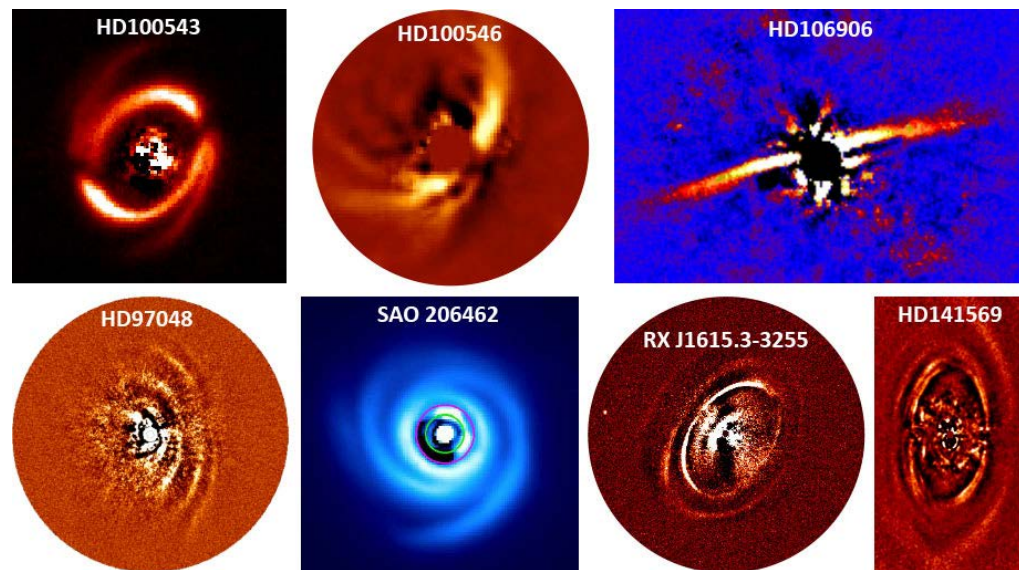
力学構造の空間分解

- 力学過程で重要な長さスケール
 - 円盤の厚み程度の長さスケールの構造
 - 半径100 AUの場所で、10 AU程度 \sim 0.1 秒角
- 8mクラスの光学・赤外線望遠鏡
- ALMAによるサブミリ波観測
- 「構造」に関するキーワード：
 - リング・ギャップ・スパイラル...

原始惑星系円盤の構造： 近赤外線偏光撮像観測



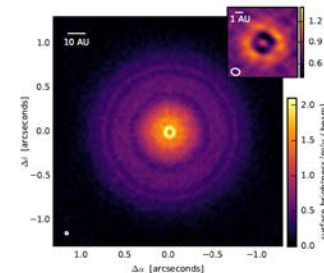
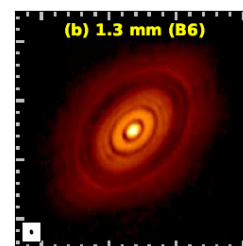
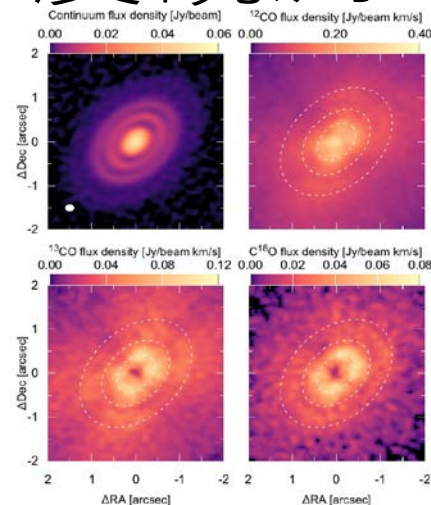
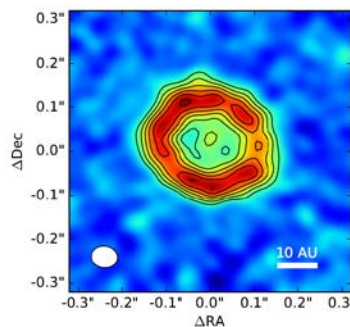
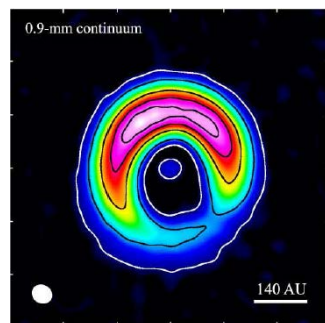
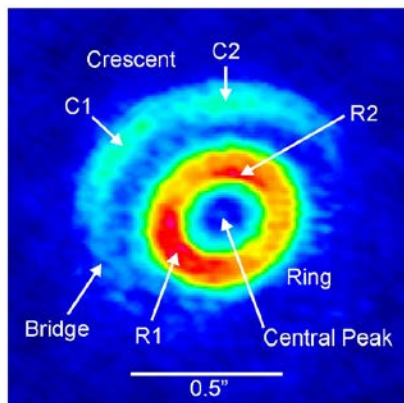
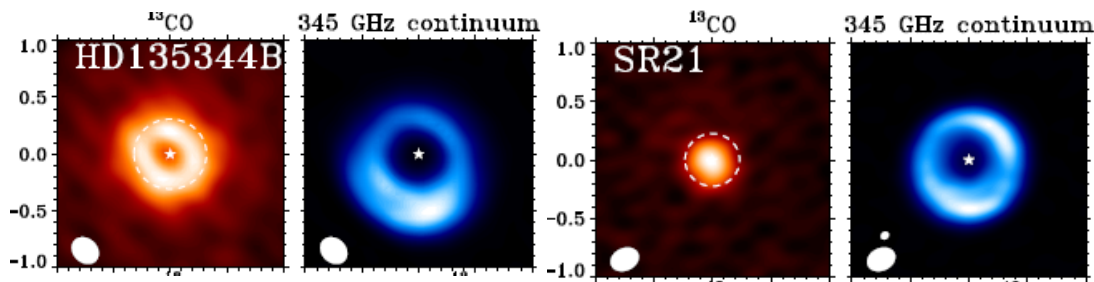
Subaru/HiCIAO



VLT/SPHERE

原始惑星系円盤に様々な構造を発見

原始惑星系円盤の構造： サブミリ波高解像度観測



原始惑星系円盤に様々な構造を発見

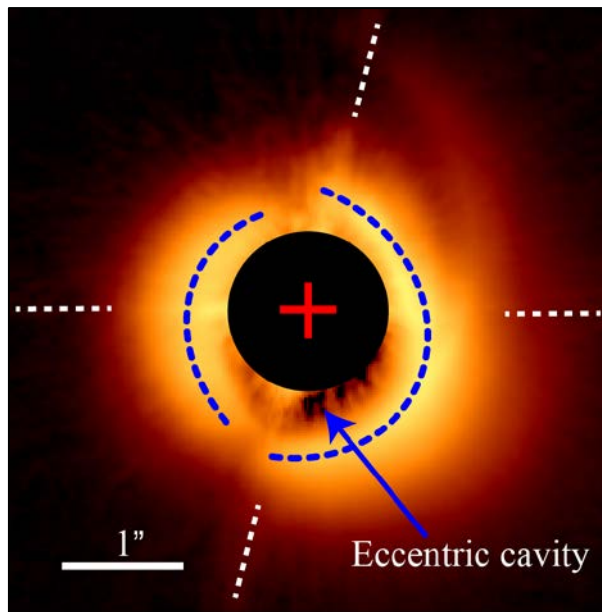
Van der Marel+15, ALMA Partnership 15, Fukagawa+13,
Andrews+16, Isella+16, Sheehan and Eisner 2017, Krauss+17

- Introduction

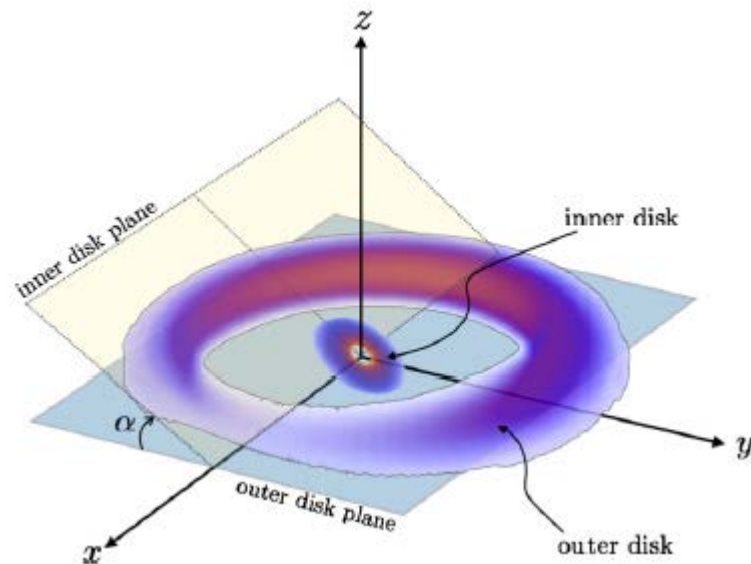
- 原始惑星系円盤と惑星形成の諸問題
 - 原始惑星系円盤におけるダストとガスの分布
 - 円盤観測で見えるもの
- 原始惑星系円盤の全体構造の観測
- 原始惑星系円盤の詳細構造の観測と物理過程
 - 円盤ギャラリー
 - **HD 142527**: 大きな穴を持つ非軸対称天体
 - 円盤構造・ダストの性質
 - 三日月構造を持つ天体とロスビー波不安定性
 - WL17: 若くして進化した天体？

HD 142527: 大きな穴あき円盤

- HD 142527
 - 中心に大きな「穴」のある円盤（遷移円盤）
 - 傾いた inner disk の存在が示唆されている

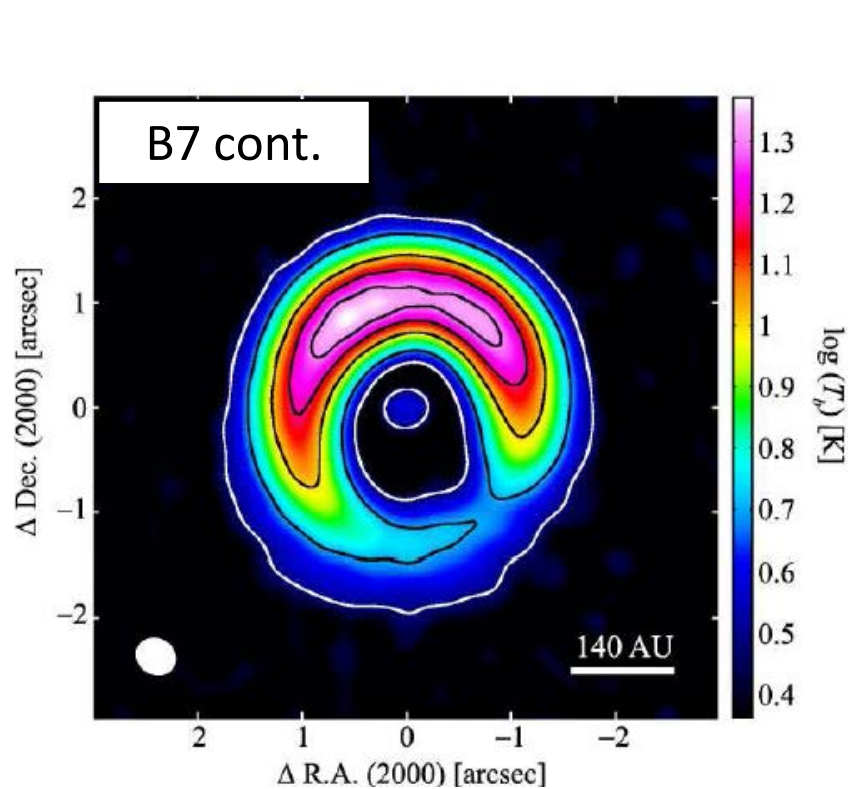


近赤外線散乱光
Fukagawa et al. 2006

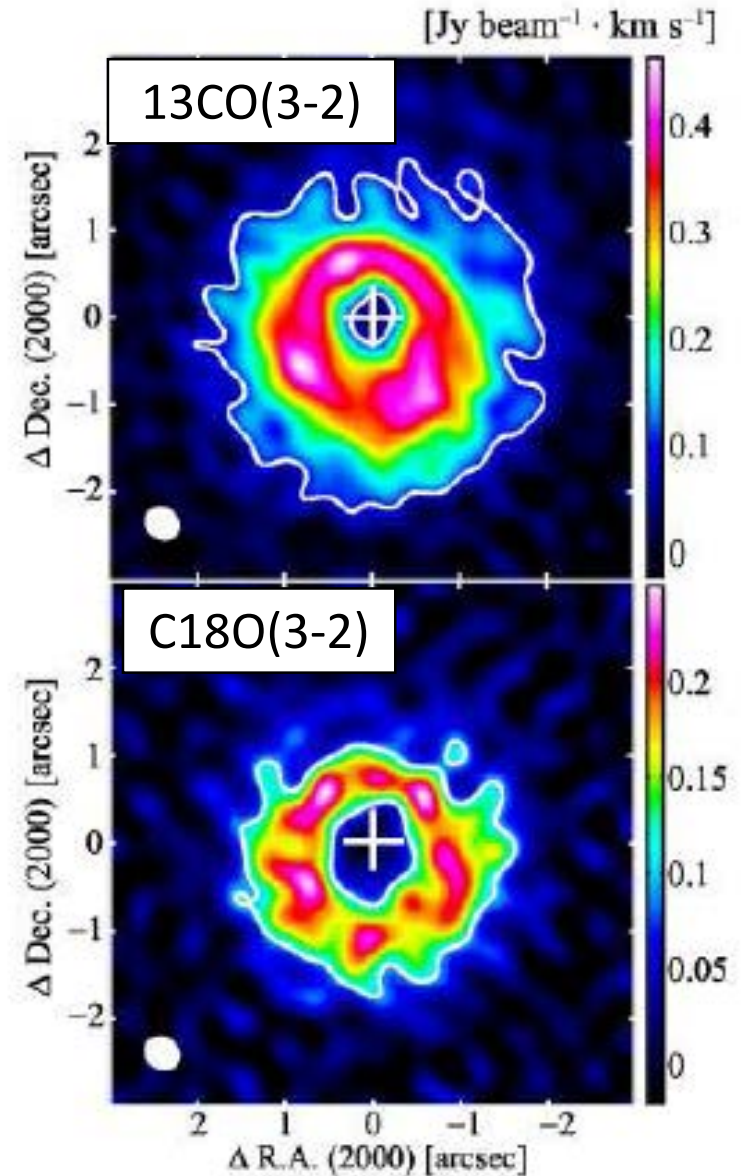


Marino et al. 2015

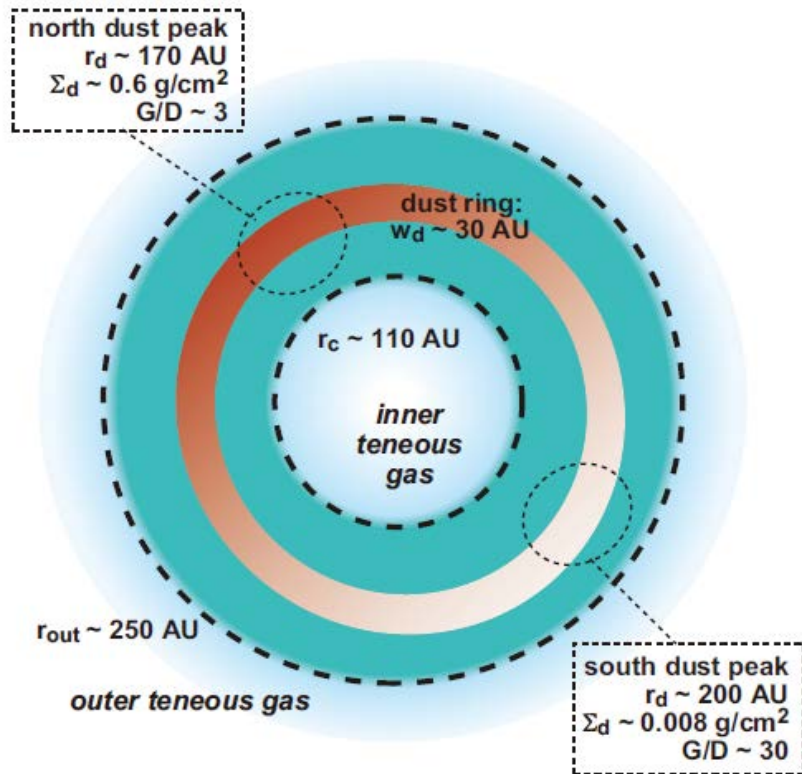
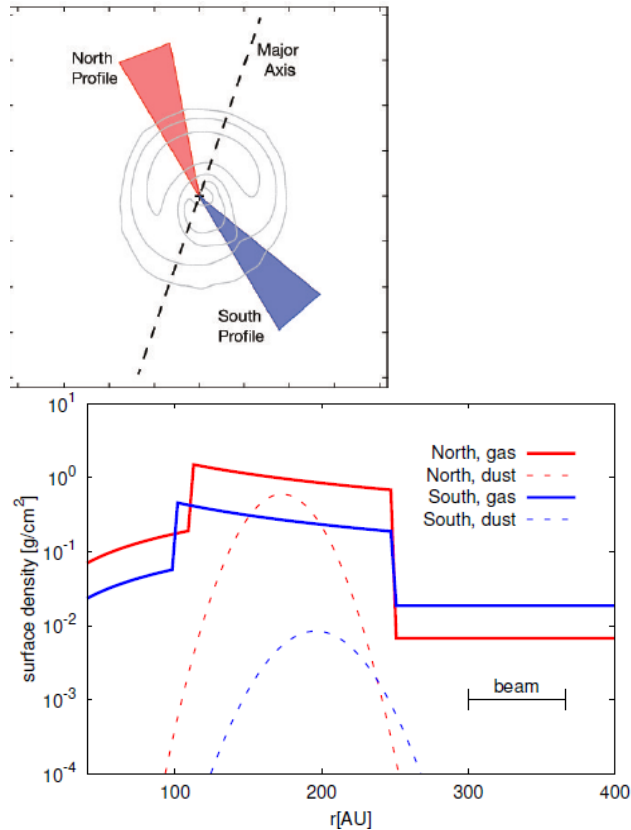
ALMA サイクル 0 観測



- ダストに比較して
 - ガス放射がより軸対称
 - ガス放射が外側まで広がる

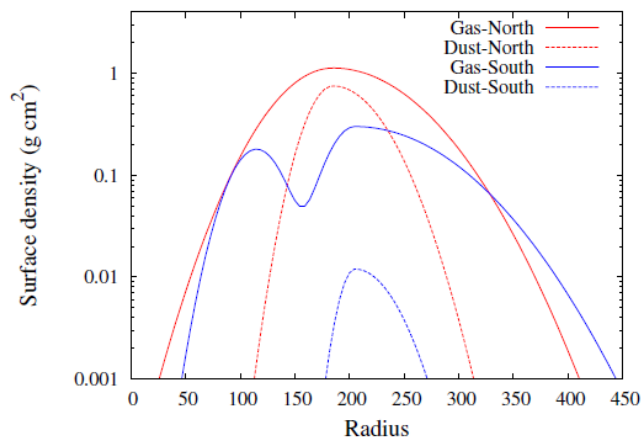
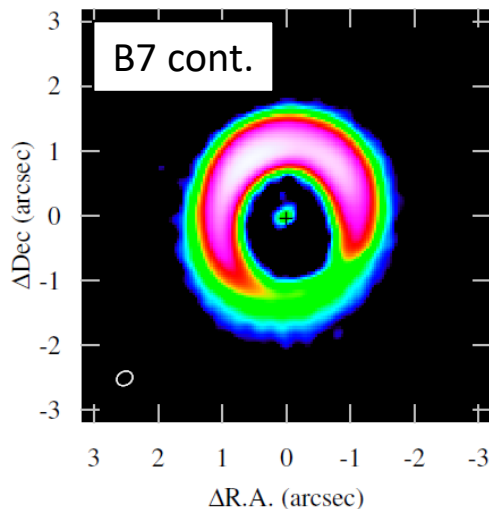


ガス・ダストの分布の見積り



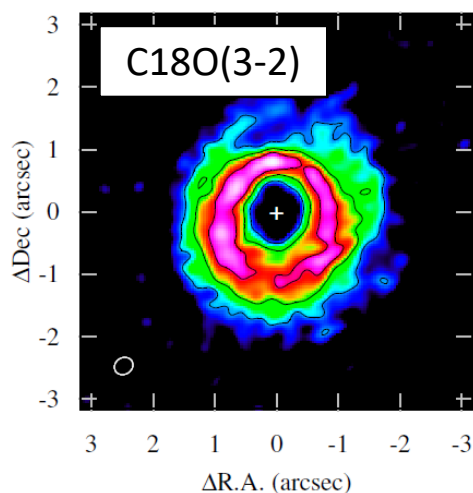
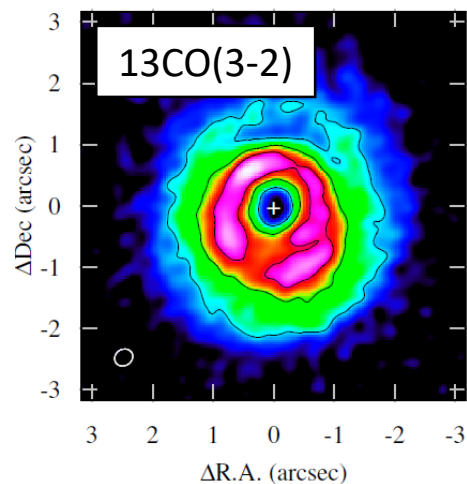
- 北側に大量のダストが集まっている領域
 - 惑星形成の現場？
- ダストで光学的に厚くなる

サイクル 1 観測



- 全体としては、サイクル 0 と似たような構造

- より細かい構造が見えてきている

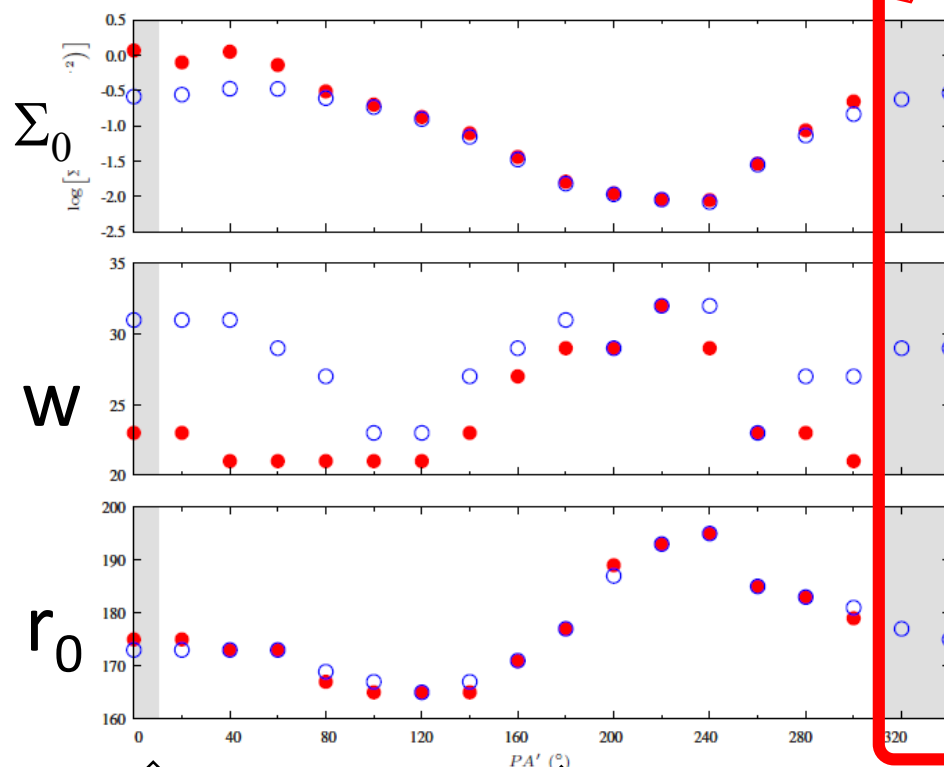
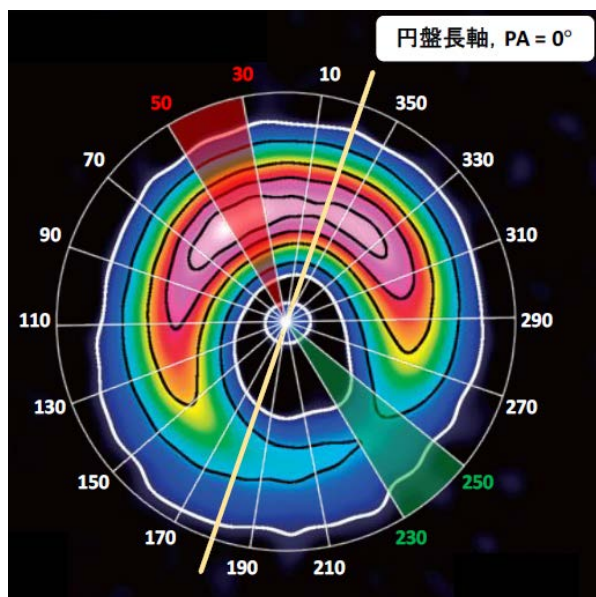


全方位角のダスト分布

- 各方位角方向でのダスト分布モデル

$$\Sigma(r) = \Sigma_0 \exp \left[-\frac{(r - r_0)^2}{w^2} \right]$$

ダスト放射が明るすぎる

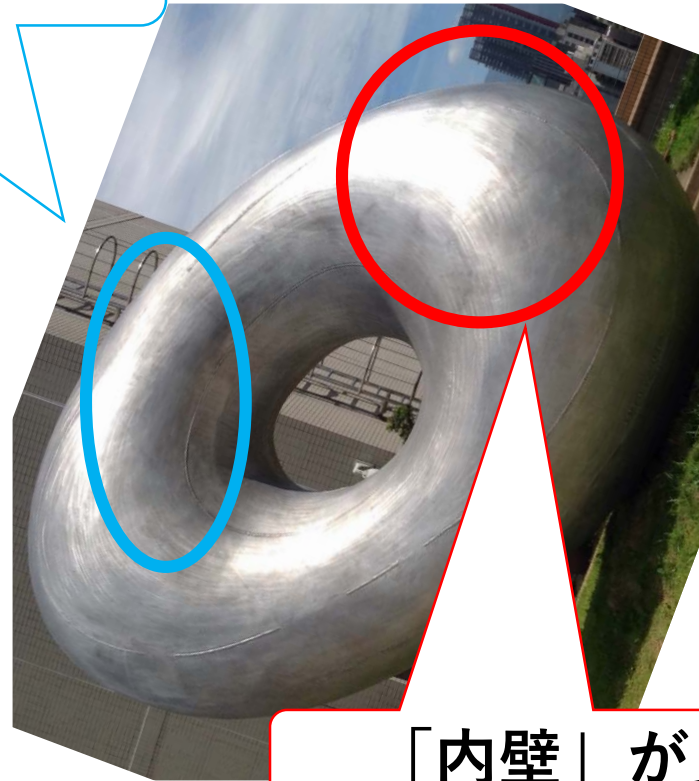
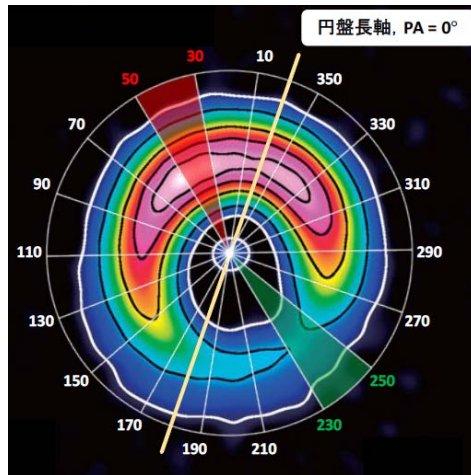


長軸

短軸

長軸

遠方側は「内壁」が見える



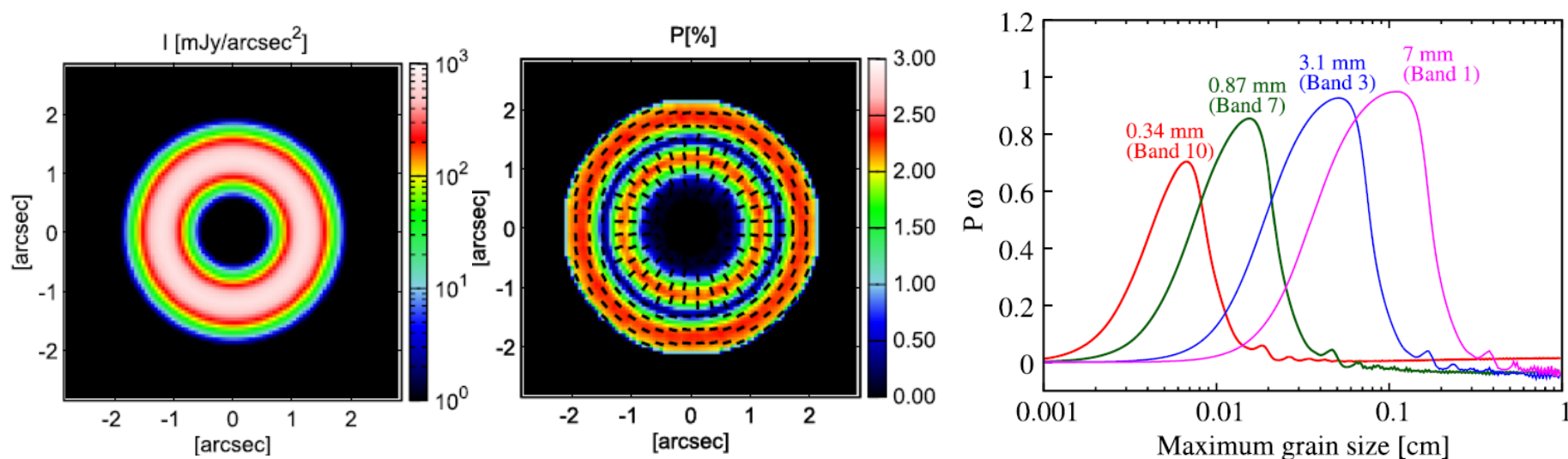
「内壁」が見えない

- 散乱の opacity が低い、成長したダストを考えると、解が存在
- 実際にそのようなダストがあるか？

Soon et al. 2017

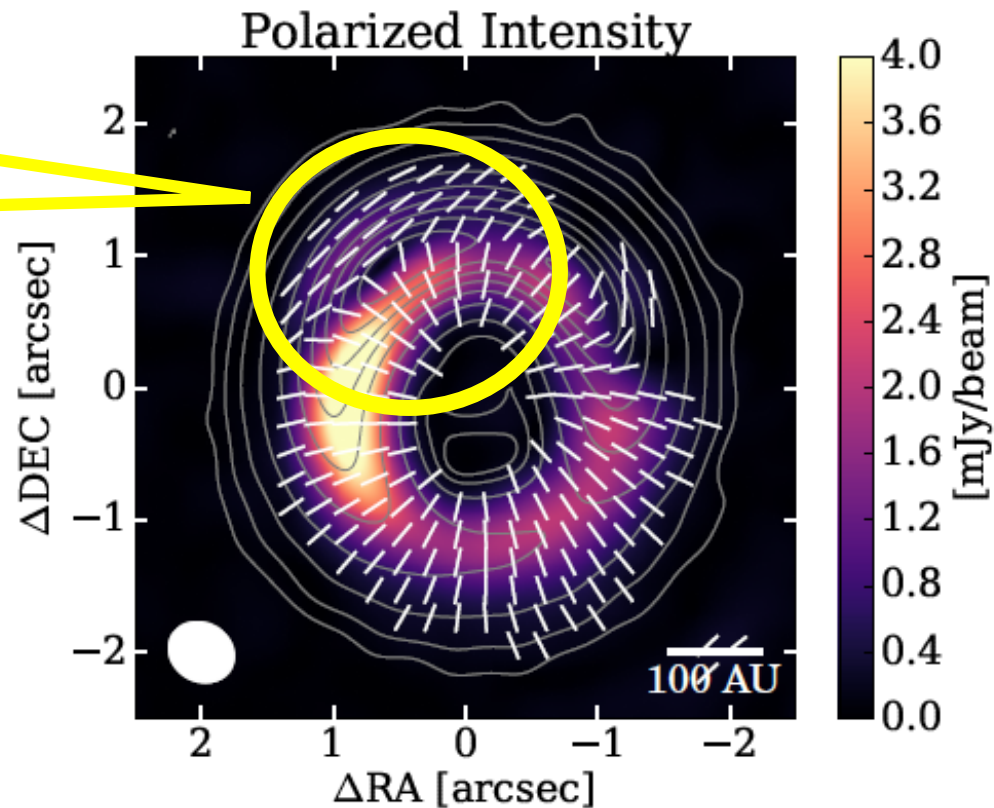
ダストの性質に迫る：散乱偏光

- 100 AU にある mm 程度に成長したダスト
 - 円盤内を「動きやすい」ダスト
 - ミリ波・サブミリ波の放射に最も効く
 - 波長＝サイズなので、散乱が効く → 偏光が効く
- リング円盤からの偏光 → ダストの大きさ



HD 142527 からのミリ波偏光

偏光方向の
変化



- 散乱偏光なら、偏光方向の変化を自然に説明
- ただし、南側の偏光度が強すぎる (~10 %)

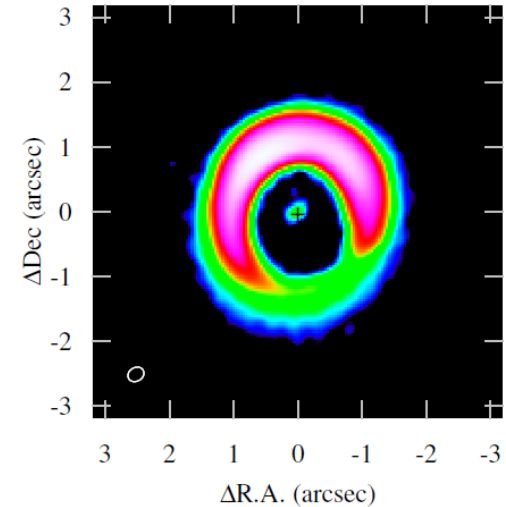
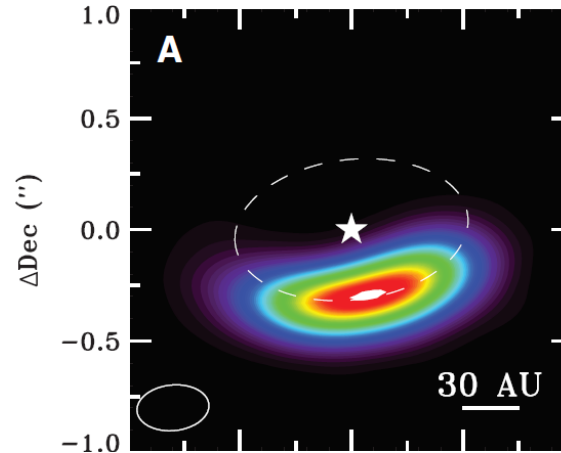
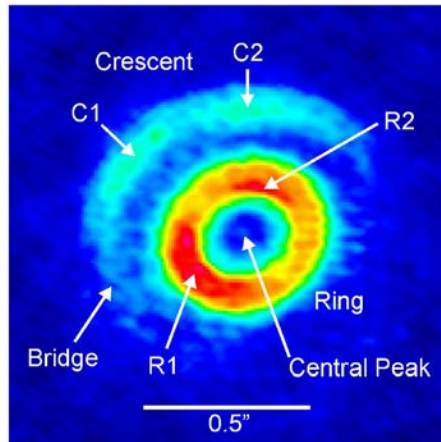
HD 142527 周囲の円盤

- ダストの非軸対称性の強さ ~50倍程度
- ガス分布の非軸対称性の強さ ~3倍程度
 - ダストが集まっている場所が存在
- ダストの全方位角モデル
 - 球形のダストに比較して、散乱の **opacity** が下がっていることを示唆
- 偏光観測
 - 散乱偏光が効いている可能性
 - ダストはある程度成長しているだろう
 - ただし、散乱偏光はすべてを説明できない

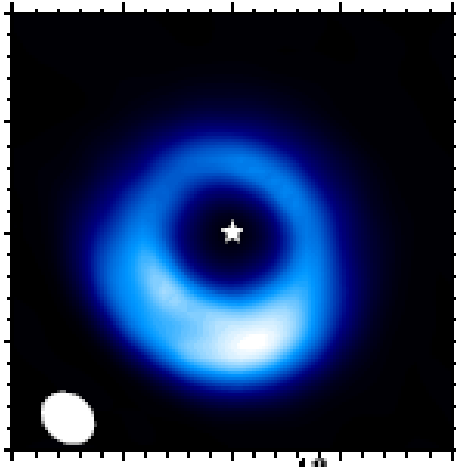
- Introduction

- 原始惑星系円盤と惑星形成の諸問題
- 原始惑星系円盤におけるダストとガスの分布
- 円盤観測で見えるもの
- 原始惑星系円盤の全体構造の観測
- 原始惑星系円盤の詳細構造の観測と物理過程
 - 円盤ギャラリー
 - HD 142527: 大きな穴を持つ非軸対称天体
 - 円盤構造・ダストの性質
 - 三日月構造を持つ天体とロスビー波不安定性
 - WL17: 若くして進化した天体？

三日月構造円盤



345 GHz continuum

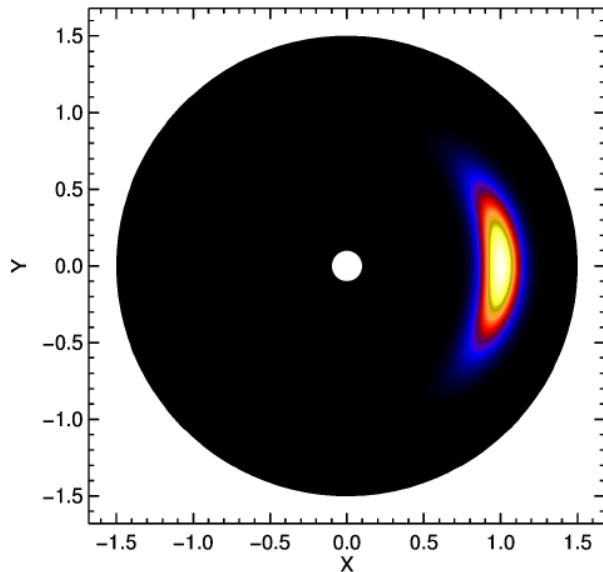


- 非軸対称構造を持つ円盤が、他にも見つまっている

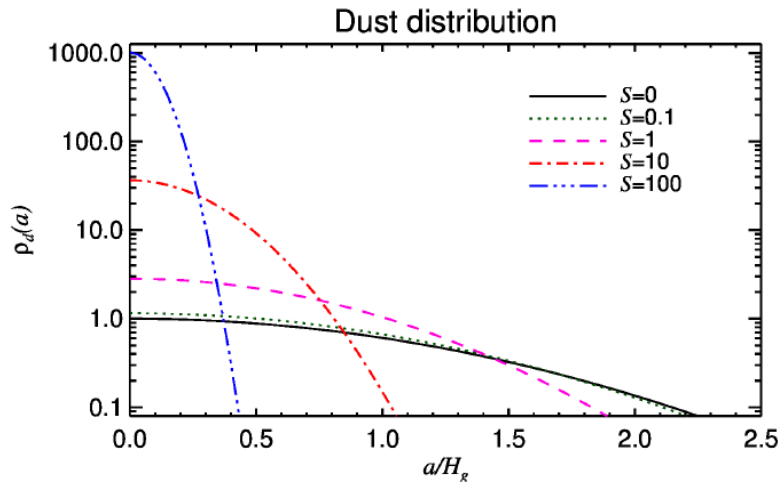
ロスビー波不安定性

- 円盤に（強い）リング状構造があると、非軸対称の不安定性が起こり、渦が形成
- 高圧領域の形成 ➡ ダスト集積につながる
- パラメータサーチの解析中

渦にトラップされたダスト分布



- 渦の解析解 + ダスト運動
- ダスト分布を解析的に与えることが可能
 - 観測的な予測が可能

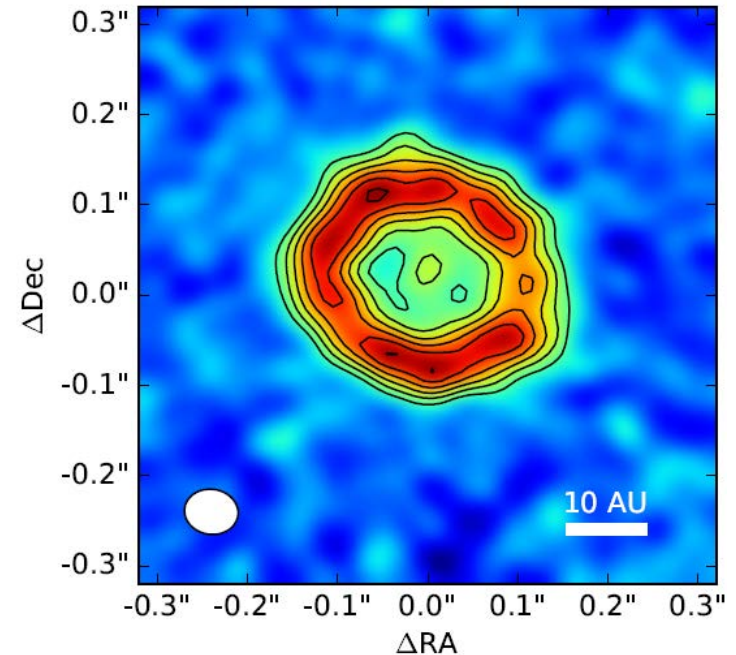


- Introduction

- 原始惑星系円盤と惑星形成の諸問題
 - 原始惑星系円盤におけるダストとガスの分布
 - 円盤観測で見えるもの
- 原始惑星系円盤の全体構造の観測
- 原始惑星系円盤の詳細構造の観測と物理過程
 - 円盤ギャラリー
 - HD 142527: 大きな穴を持つ非軸対称天体
 - 円盤構造・ダストの性質
 - 三日月構造を持つ天体とロスビー波不安定性
 - **WL17: 若くして進化した天体？**

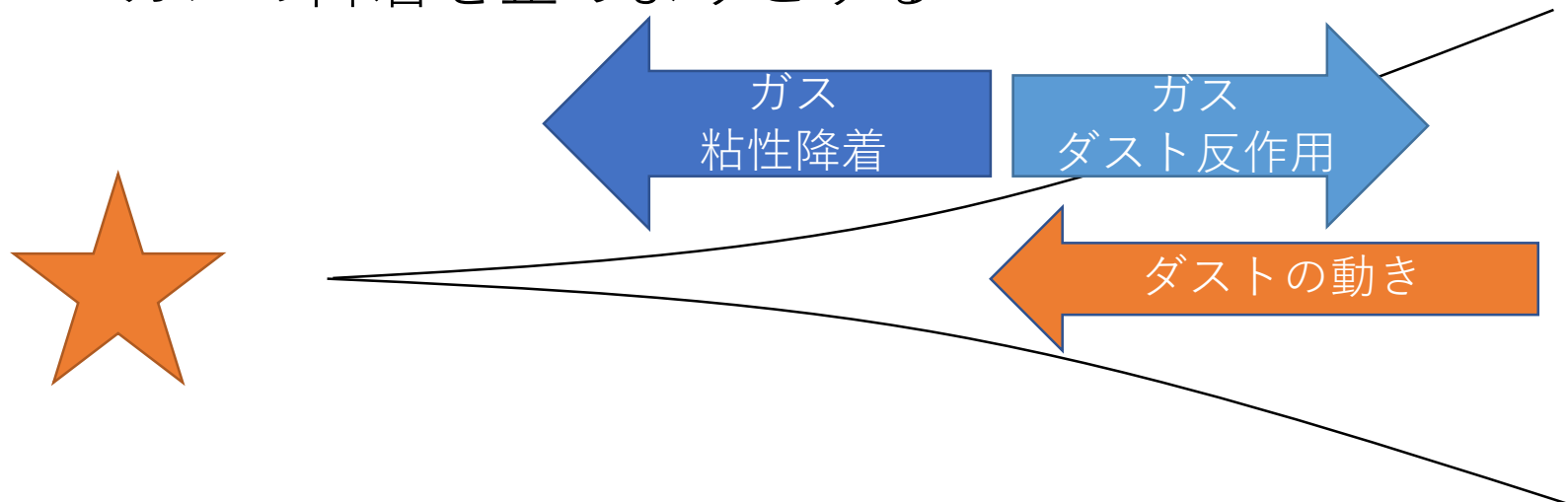
WL17: 若くして進化した円盤

- 年齢 0.5 Myr と推定
- ALMA のダスト連続波観測で、中心に穴構造が見つかった
 - 円盤進化がはやい？

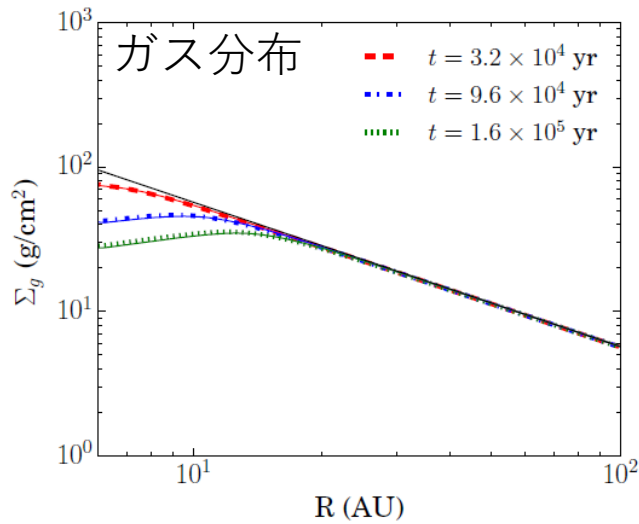


ダスト・ガスの相互作用を考慮した円盤進化

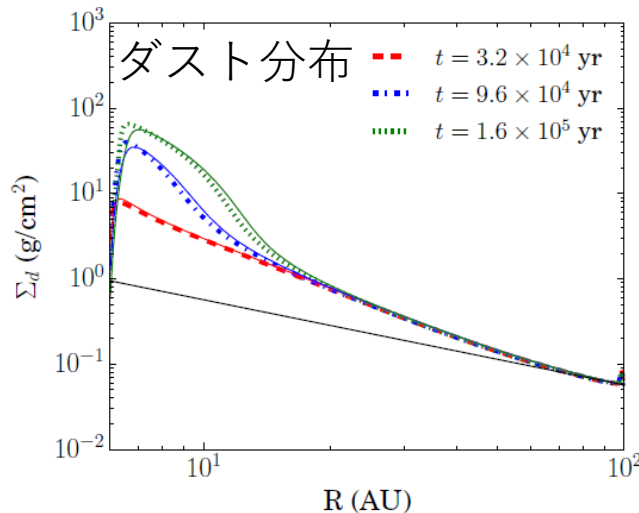
- ガスは基本的には降着円盤として進化
- ダストは、ガス摩擦の影響で中心星に向かって落下
- ダストからガスへの反作用
 - ガスの降着を止めようとする



ダスト・ガスの相互作用を考慮した円盤進化

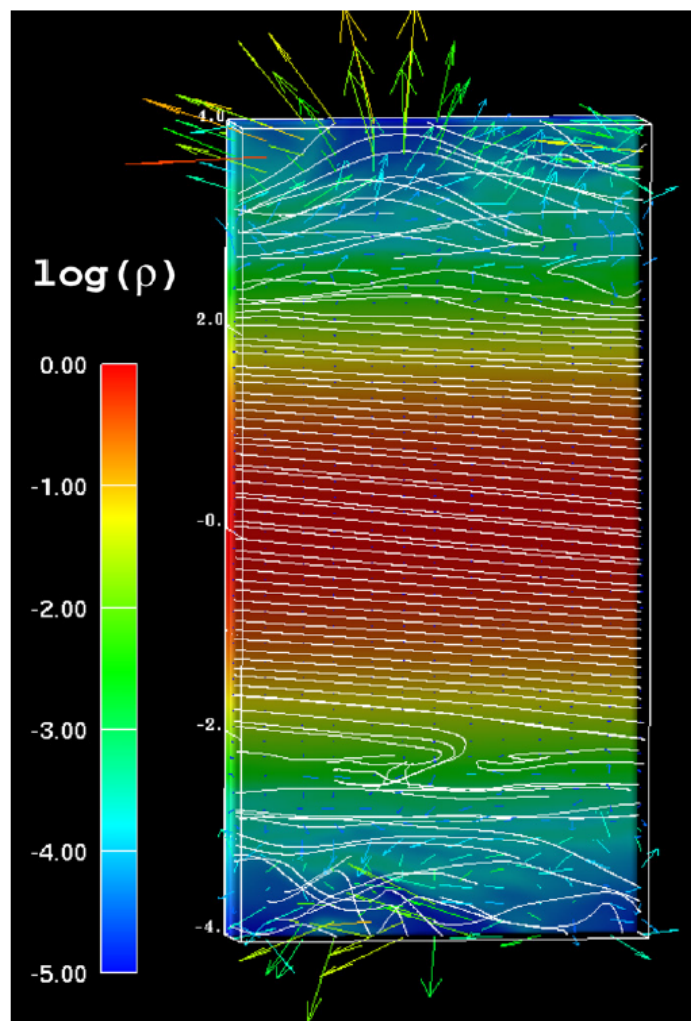


← $\alpha = 10^{-3}$
初期のダスト・ガス比 = 0.01 の場合



- ダストの反作用を考慮すると、ガス分布の中心に穴構造
- ダストが**10 AU** 付近にたまる
- 中心付近でダスト成長が進めば、「穴」に見える
- もともと、ある程度成長したダストは必要

円盤風の影響を考慮した円盤進化



- MRI による、乱流駆動の円盤風
- 力学的なタイムスケールで円盤風の強さが決まる
- 円盤の中心ほど早い進化
- 円盤風を考慮した円盤進化を解析中

Suzuki et al. 2010

Takahashi and Muto, in prep.

まとめ

- 原始惑星系円盤の観測
 - ALMA の「高感度・高解像度」で、多様性に富む原始惑星系円盤の姿が見えてきた
- 原始惑星系円盤の全体構造
 - ISM とは異なった円盤のガス・ダスト量の統計
- 原始惑星系円盤の詳細構造
 - リング状構造・非軸対称構造
 - ガス・ダスト分布やダストの性質を探る手掛かり
 - 惑星形成の手がかりへ
 - 若い段階の円盤にも構造が見いだされてきている
 - 早い段階での円盤進化
 - 星形成段階からのつながりを考慮したモデル

現状とこれから

- 観測側から
 - 「個別天体の高解像度データ」がたまりつつある
 - 「低解像度サーベイ」が行われている
 - 目指すは「高解像度サーベイ」
 - 新しいデータ解析手法を考えていく必要？
- 理論側から
 - 個別天体を説明するモデルが多数
 - 様々な物理過程
 - ダスト成長
 - ダストとガスの相互作用
 - 円盤の不安定性など
 - 全体を説明するストーリーを、観測に基づいて立てていけるかどうか？