

2013年度 第43回天文天体物理若手夏の学校

2013年7月29日 宮城蔵王ロイヤルホテル



原始惑星系円盤の愉しみ

武藤恭之

工学院大学 基礎・教養教育部門

導入

— 系外惑星研究の発展と惑星形成 —

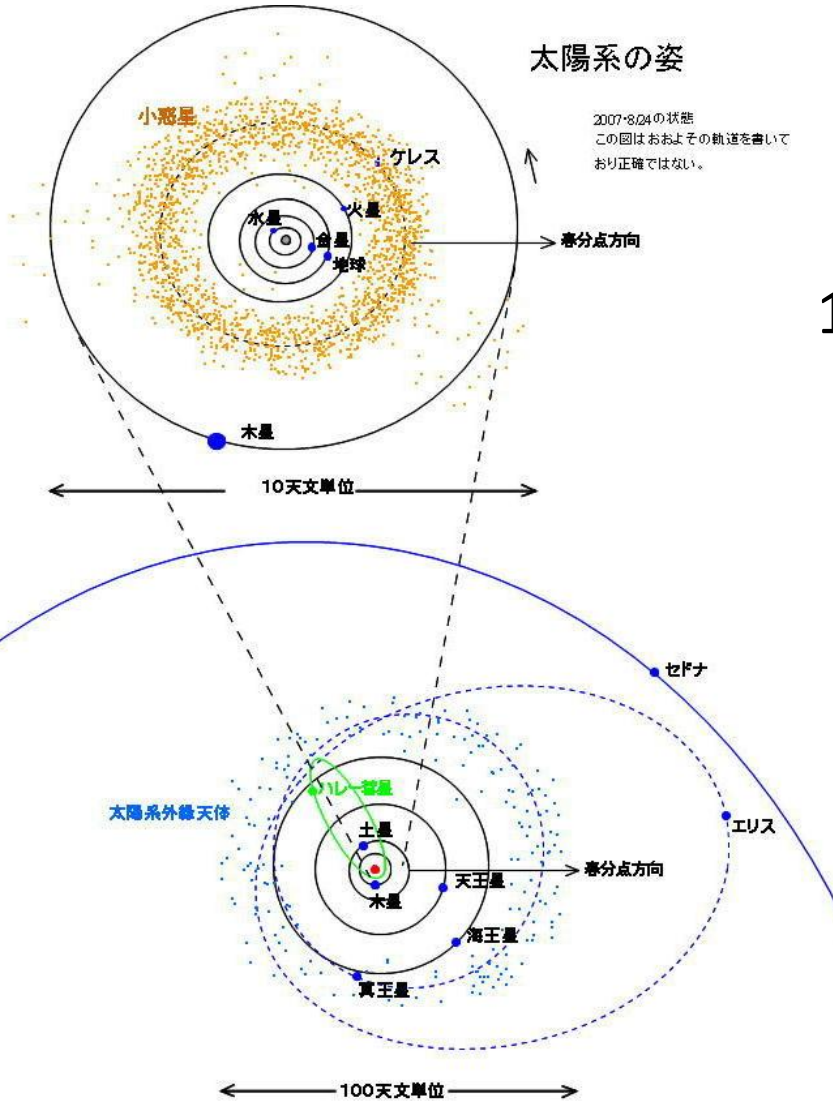
惑星科学：1995年以前

- もっぱら、「惑星系」といえばわれわれの太陽系のことを指す
- 「いかに太陽系ができたのか？」を説明しようとする
 - 対立する二つの説がある(今も残っている)

太陽系

太陽系の姿

2007-8.24の状態
この回はおおよその軌道を書いて
おり正確ではない。



1天文単位 (1AU)
= 太陽・地球間距離
= 1.5×10^{13} cm

系外惑星の発見

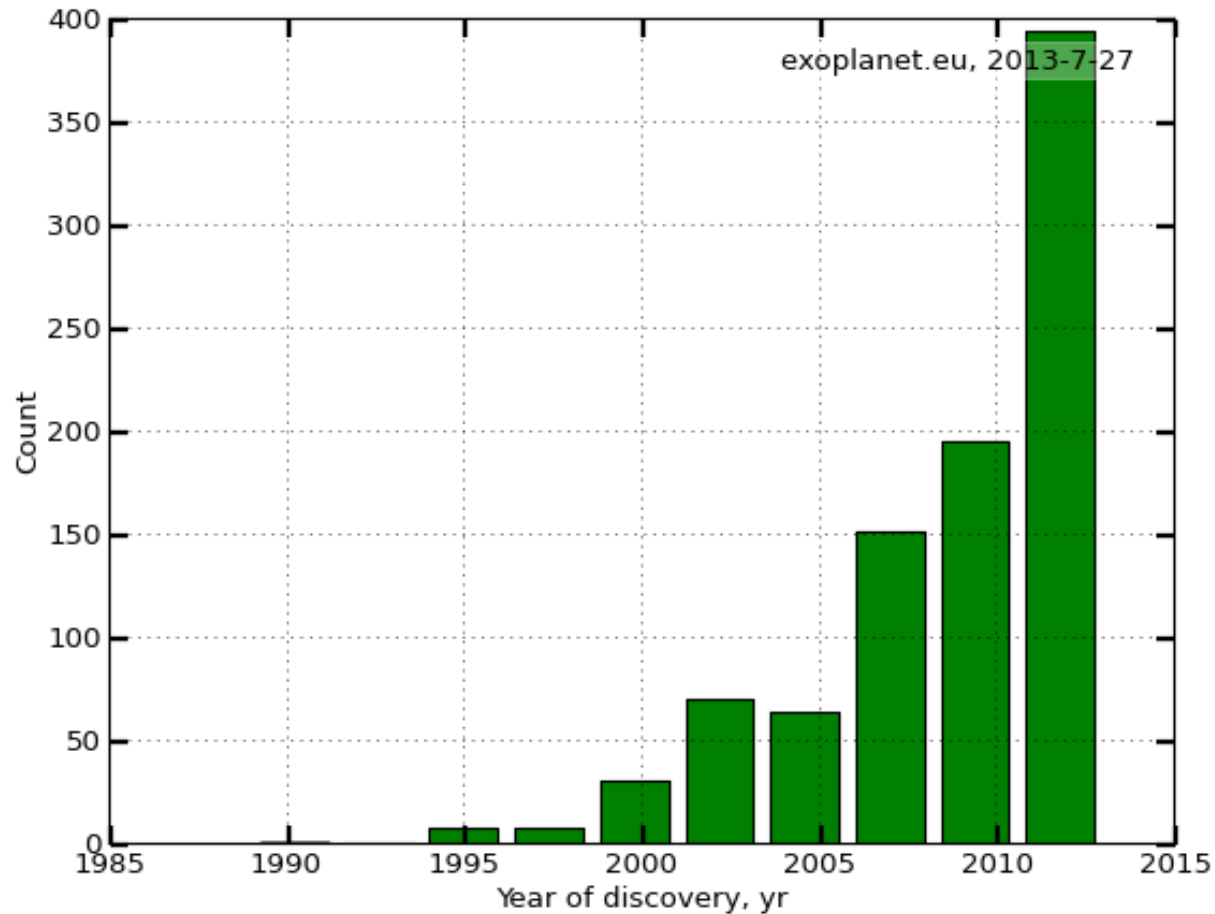
A Jupiter-mass companion to a solar-type star

Michel Mayor & Didier Queloz

NATURE · VOL 378 · 23 NOVEMBER 1995

系外惑星の発見数

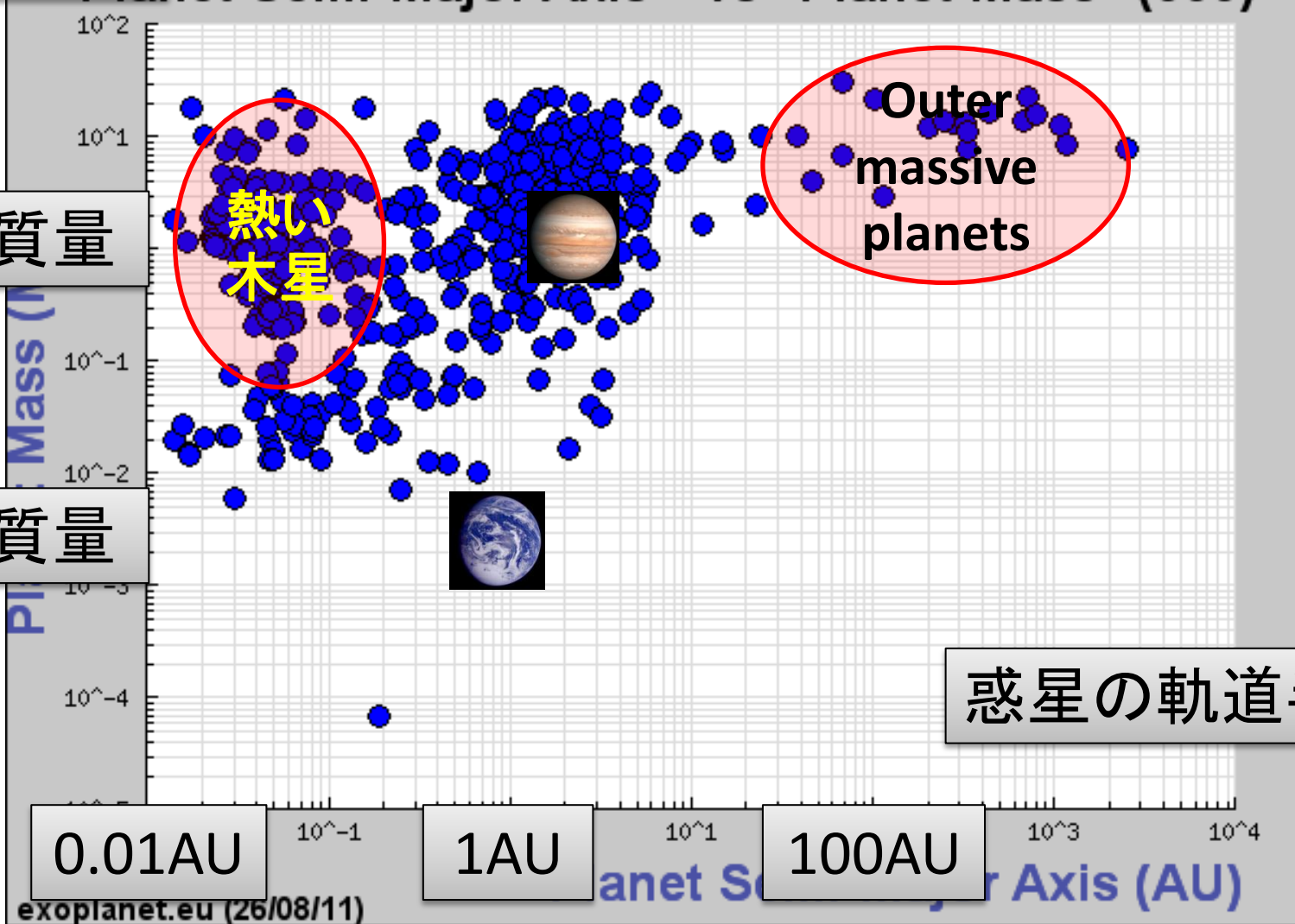
2013年7月27日現在 925個



多様な系外惑星系

惑星質量

Planet Semi-Major Axis" vs "Planet Mass" (566)



木星質量

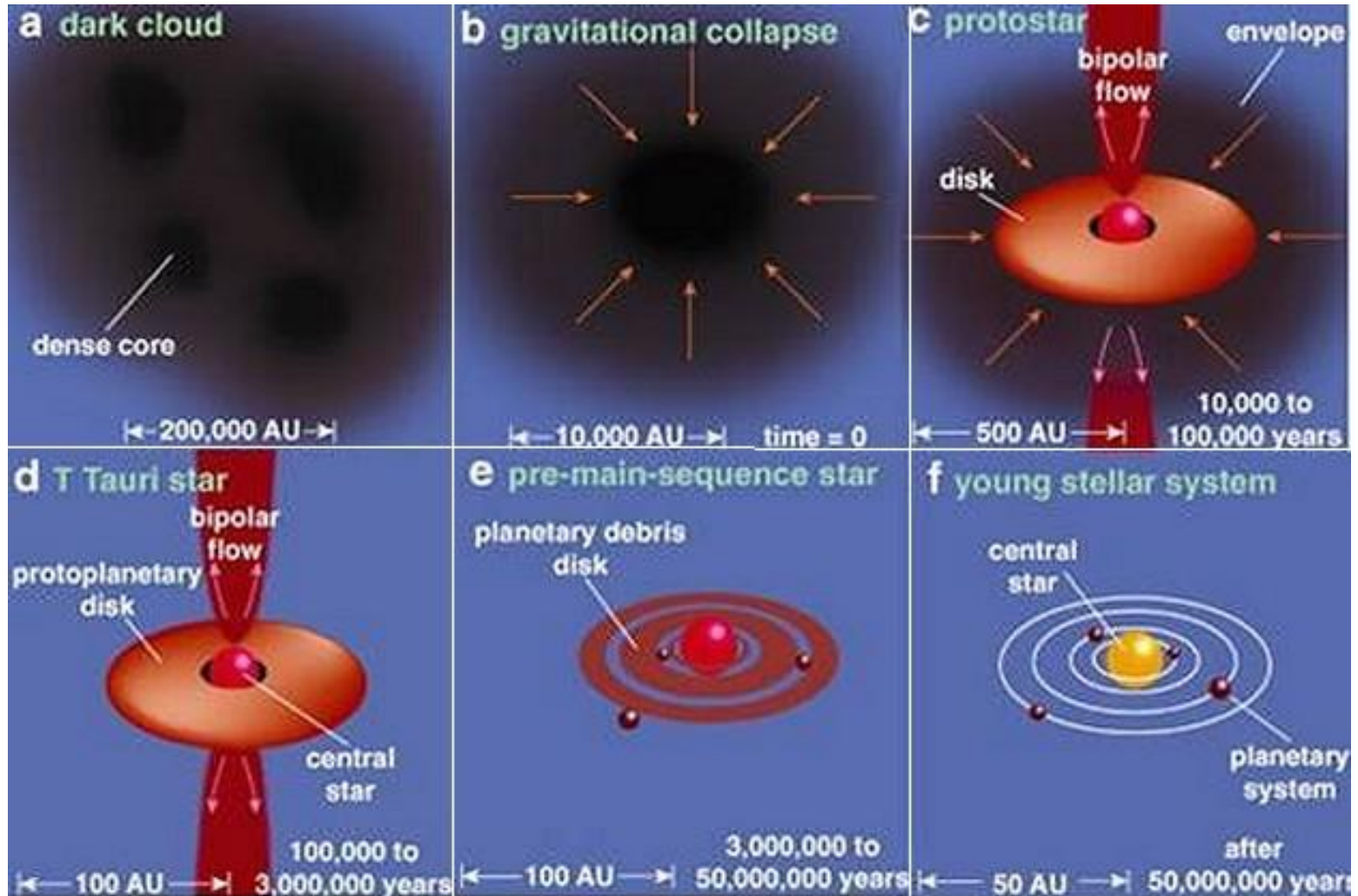
地球質量

惑星の軌道半径

大きな問題

- 私たちの太陽系は、普遍的なものなのか？
- (太陽系を含む) 惑星系が、どのように作られたのか？

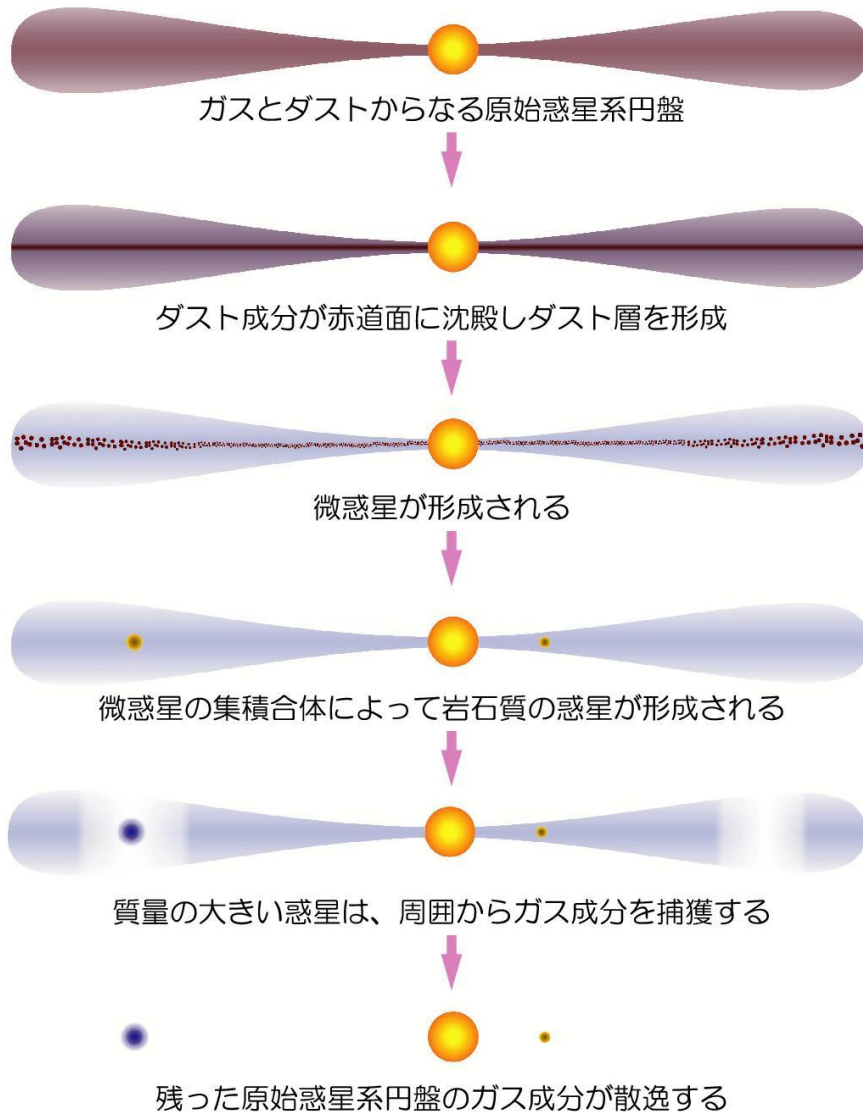
星・惑星形成のあらすじ



惑星形成の標準モデル

- コア集積モデル
– 京都モデル
– ダスト(μm)が出発
→ 微惑星(km)
→ 原始惑星(1000km)
– 「塵も積もれば山となる」モデル

惑星系形成の標準的なシナリオ (京都モデル)



Hayashi et al. 1985

原始惑星系円盤の基本的性質

- 成分は、ガスとその1/100程度のダスト
 - ダスト集積＝惑星形成
- 円盤質量は、中心星の1/100程度
- 円盤の拡がりは、100 AUスケール
- 面密度 (最小質量円盤モデル)

$$\Sigma = 1600\text{g/cm}^2 \left(\frac{r}{1\text{AU}}\right)^{-3/2}$$

- 円盤の厚み (スケールハイト)

$$H = 0.05\text{AU} \left(\frac{r}{1\text{AU}}\right)^{5/4}$$

- 寿命
 - 100万～1000万年程度

原始惑星系円盤の力学過程 — 固体とガスの相互作用 —

惑星形成とは何か

- ガス円盤の中で、固体が1 μm 程度から数1000kmにまで成長する過程である
- 状況に応じて、さまざまな物理過程
 - 固体同士の相互作用
 - 考える固体の大きさによって、物性 and/or 重力
 - 固体とガスの相互作用
 - 固体がガスから受ける摩擦力(物性)
 - 固体とガスの間の重力相互作用(重力)
 - 周囲のガスの流体力学的進化
 - 星と円盤との相互作用
 - 星の輻射や磁場の影響

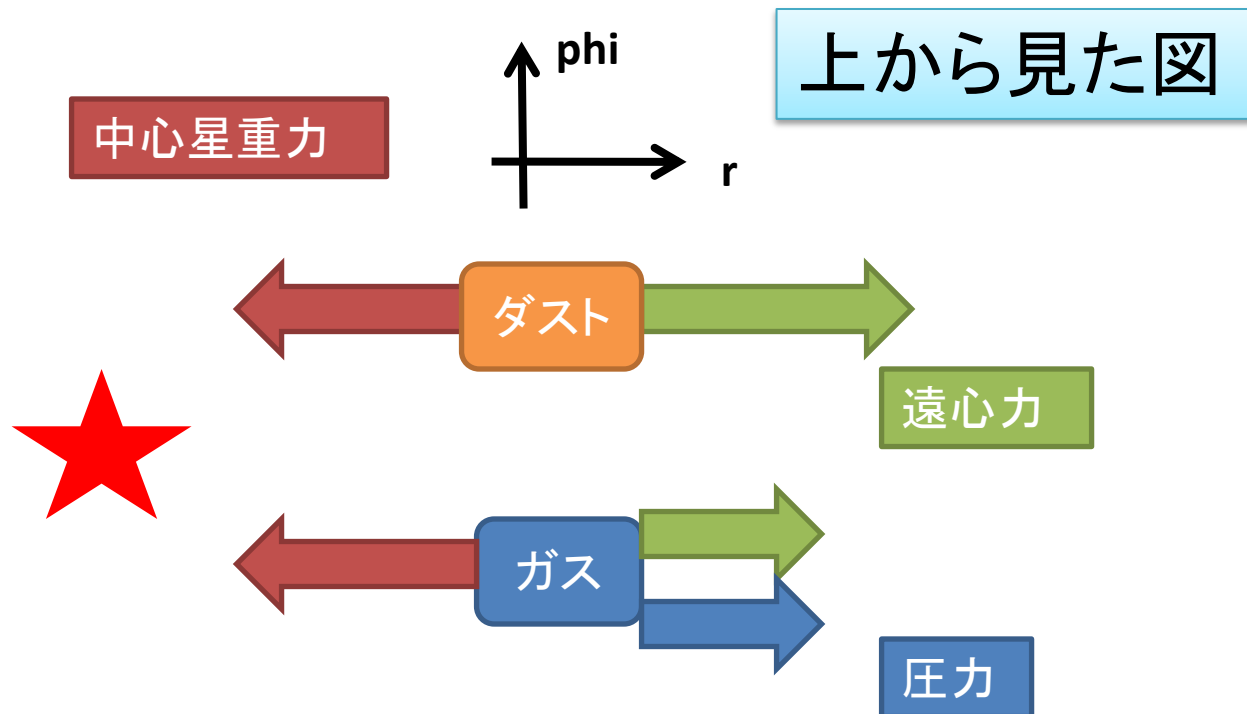
固体どうしの衝突(相互作用)



陶山徹さん(長野市立博物館)による計算

ガスと固体の相互作用（摩擦）

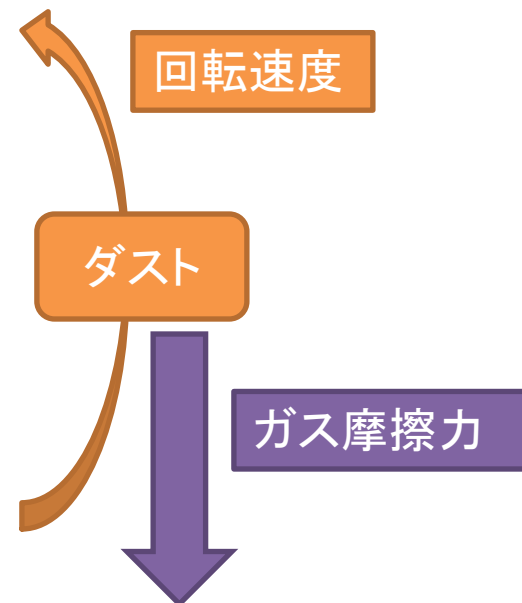
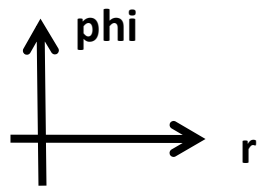
- 原始惑星系円盤は、回転する薄い円盤
- ガス・ダストそれぞれに力のつり合い



ガスの影響を受けたダストの運動

- ダストはガスから向かい風を受ける
- 角運動量を抜かれ、中心星に向かって落下

一般に、ガスの圧力が高い場所にダストが集まる



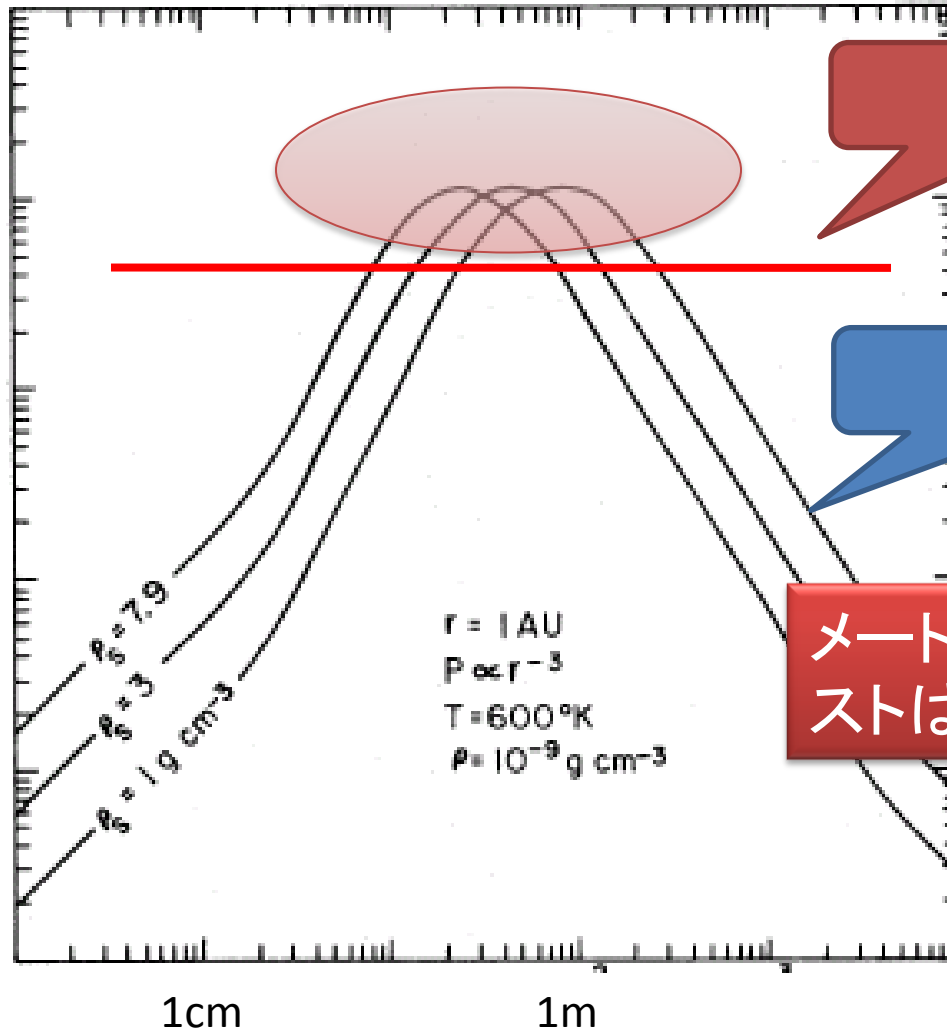
ダストの落下問題

一般に、円盤は内側の方が高圧 → 中心星に向かってダスト落下

時間スケール

10^3 yr

10^5 yr



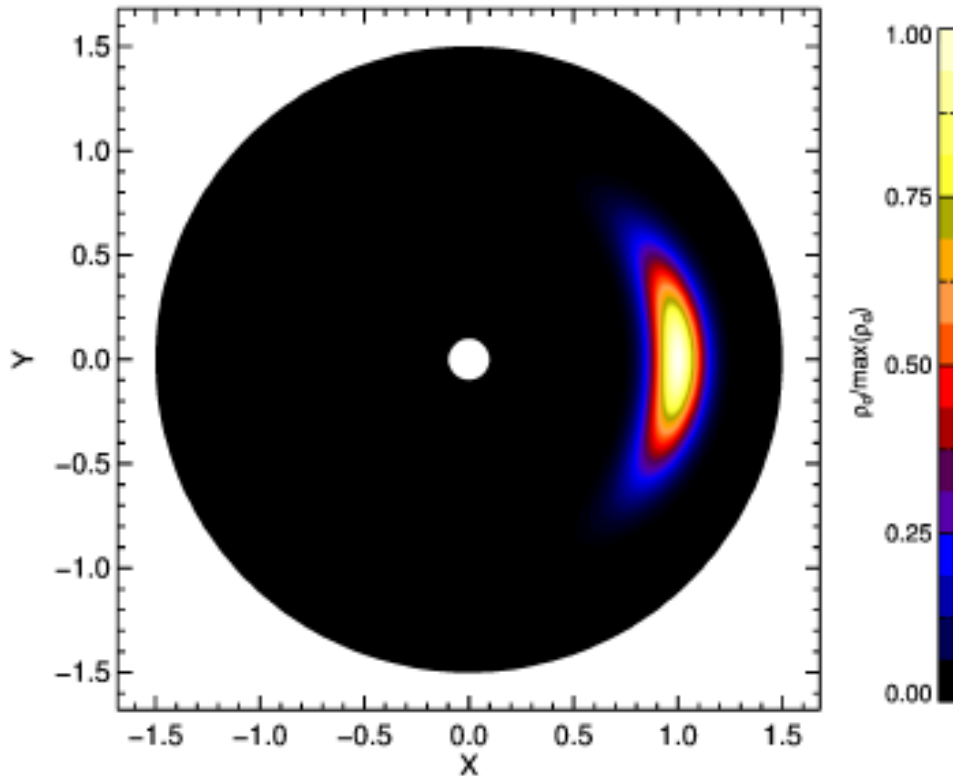
成長時間

落下時間

メートルサイズのダストは落下が速い!

ダストの
大きさ

ダストの渦へのtrap

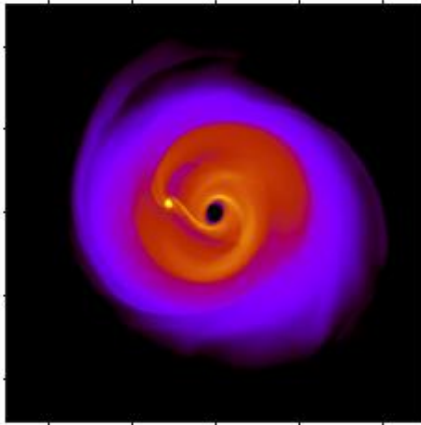


- 円盤中のどこかに高圧領域
- そこに、ダストが集まってくる

ガスの流体力学的構造

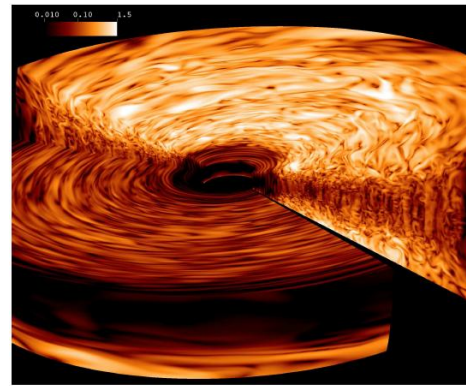
乱流:

自己重力

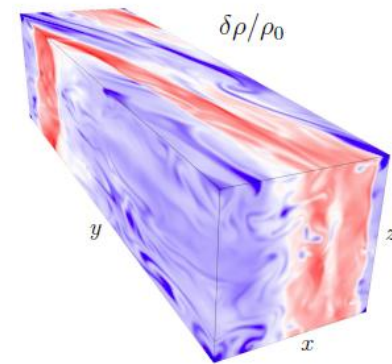


Boley 2009

磁気回転不安定性

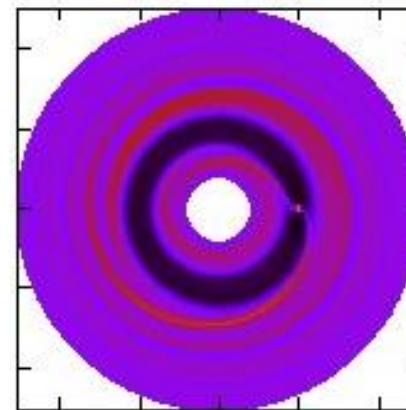
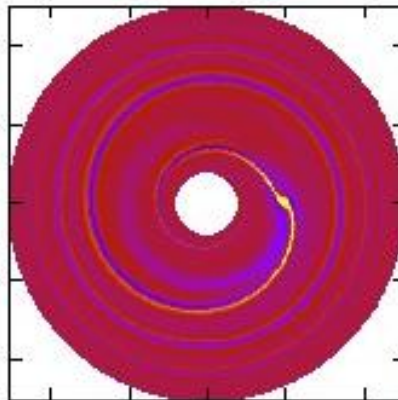


Flock et al. 2011



Heinemann and Papaloizou 2009

円盤・惑星相互作用: スパイラル形成・ギャップ形成

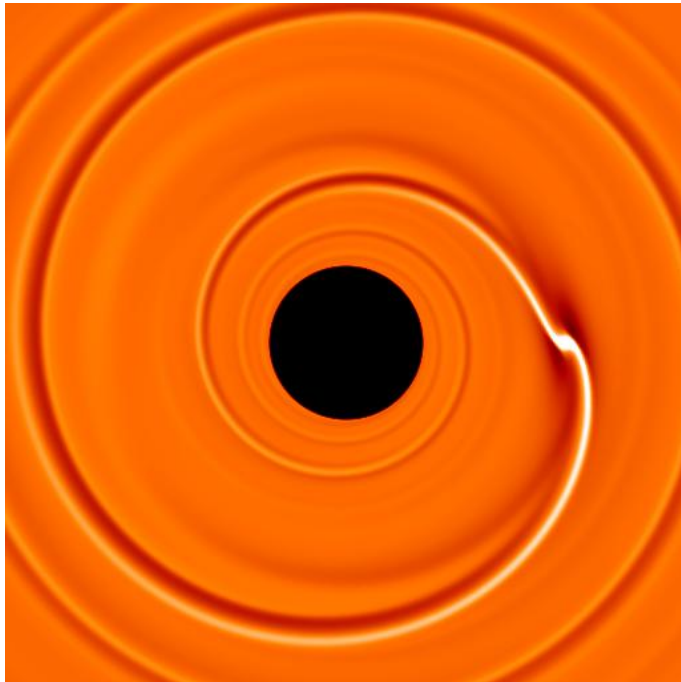


FARGO simulation

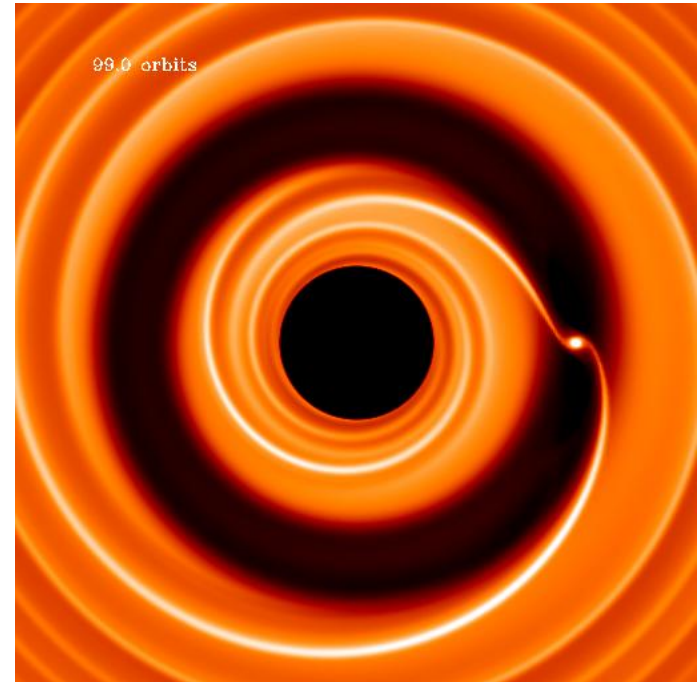
円盤・惑星相互作用と惑星移動

- 惑星と円盤の重力相互作用

軽い惑星

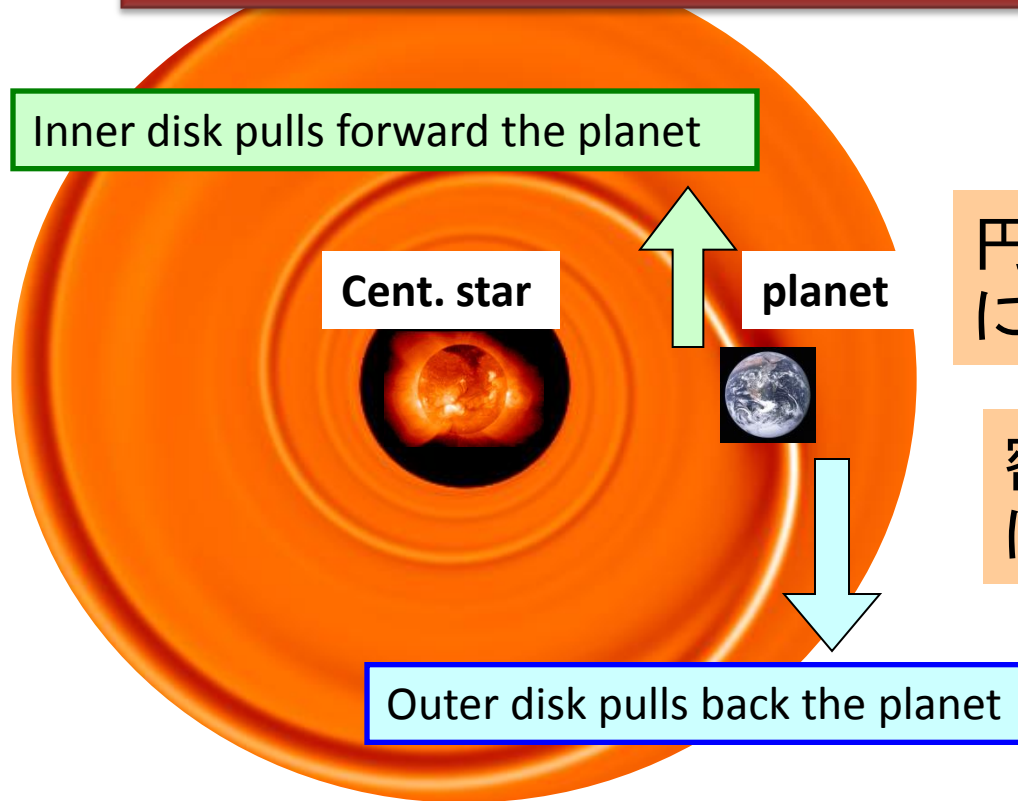


重い惑星



惑星移動

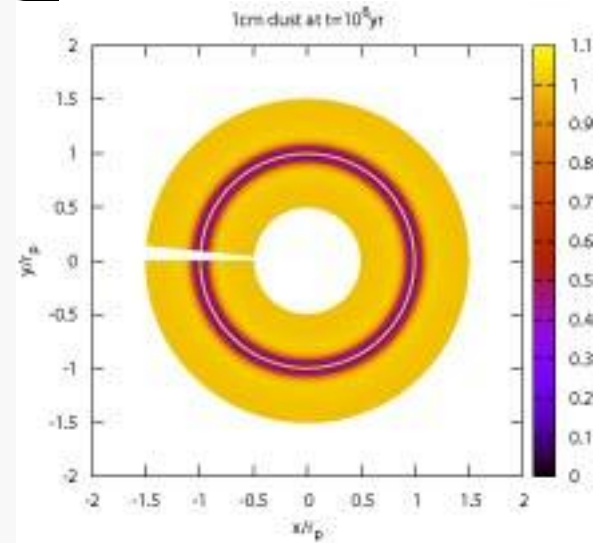
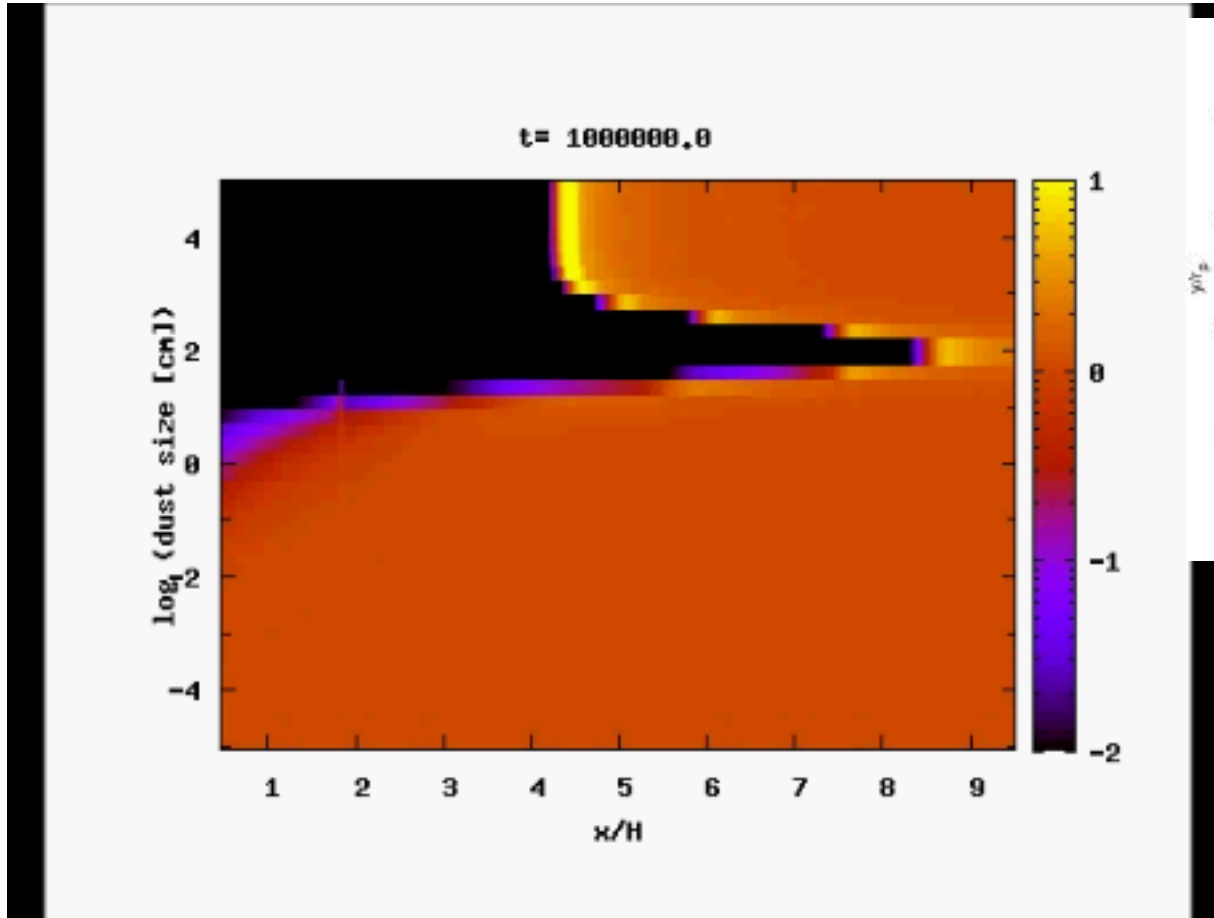
典型的に、 $10M_E$ の惑星 @ 5AU で 10^5 年
円盤の寿命に比較して短い



円盤と惑星の重力相互作用
による密度波の励起

密度波の反作用で、惑星
に重力的なトルクがかかる

惑星 + ガス + ダスト = ダストギャップ



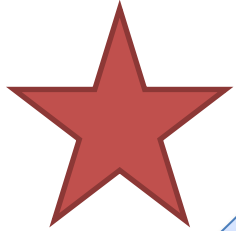
原始惑星円盤の力学：小まとめ

- 原始惑星系円盤は、ガスとダストからなる、薄い回転円盤
- その中で起こる現象
 - ガスの流体力学的進化
 - ダスト同士の衝突
 - ガスとダストの間の相互作用
 - 惑星重力によるガス・ダスト分布の再配置
- ダストや惑星は、円盤内を常に動いている
 - 円盤にさまざまな「模様」を作る
- 今回取り上げなかった話題（けれど、重要）
 - 星と円盤の相互作用：円盤散逸・内縁
 - 化学反応

原始惑星系円盤の観測
— 円盤直接撮像観測の
進展とこれから —

円盤観測で見えるもの

- 内側が熱く、外側が冷たい
- 赤外では光学的に厚い
- 電波では光学的に薄い



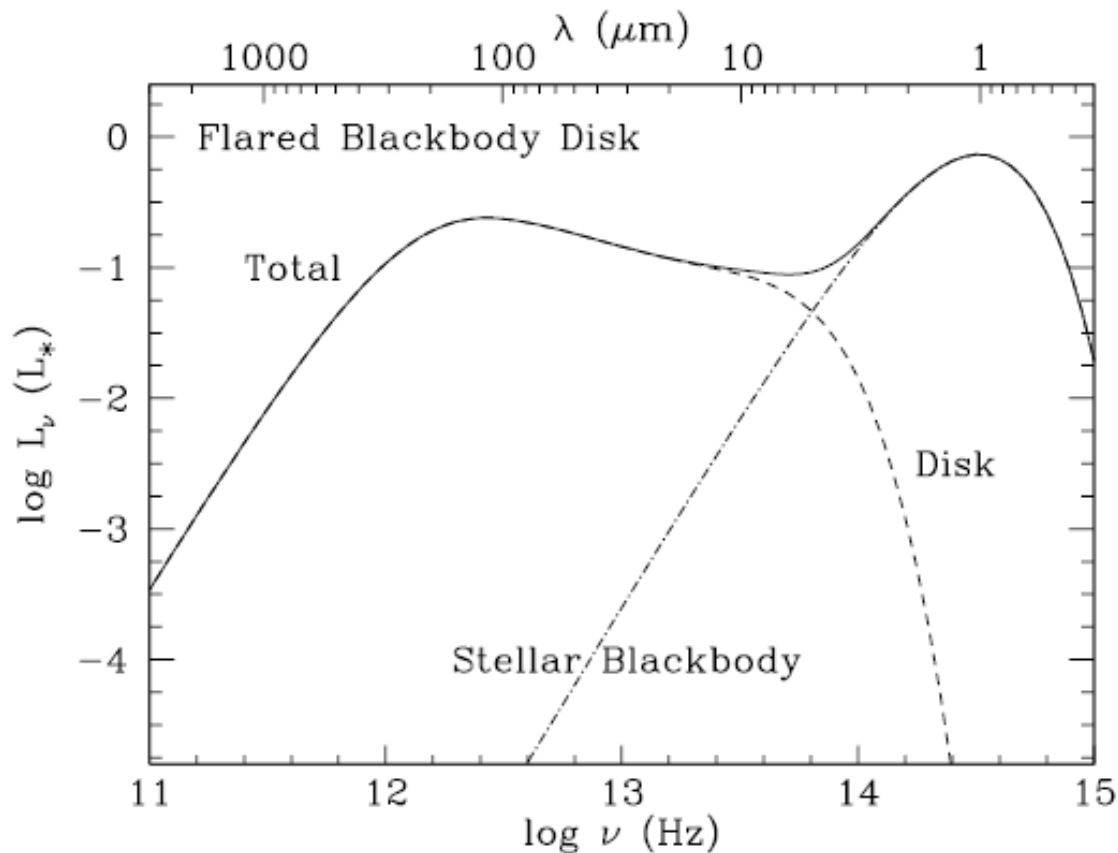
～数AU以下
近赤外線熱放射

～数10AU
中間赤外線熱放射

～100AU以遠
電波熱放射

～100AU
赤外線散乱光

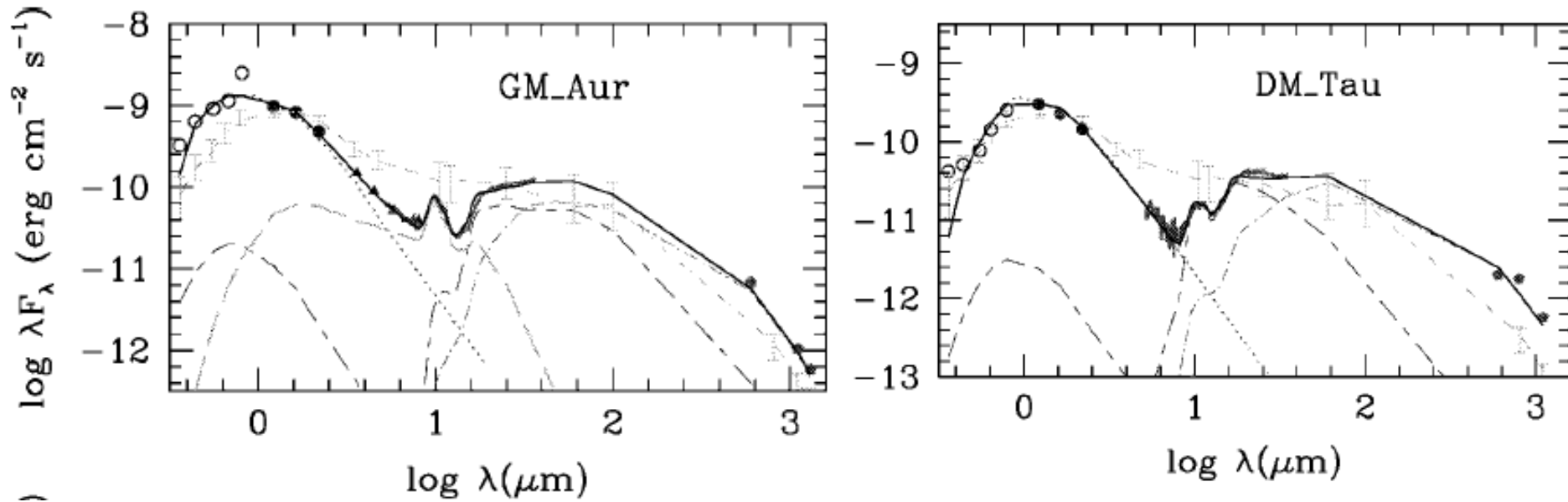
典型的なSED



- 星＋円盤
- 円盤は低温
 - 長波長側
- 円盤の場所による温度の違い
 - 波長の違い

SEDで探る円盤構造の例

遷移円盤天体



短波長(近赤外)のexcessが少ない
→ 円盤の内側部分にダストが存在しない

円盤の直接撮像観測

- 今のところ、近赤外線と電波が主な観測波長
- 近赤外線： 円盤表面の散乱光
 - 分解能が ~ 0.1 秒角 = 14AU
- 電波： ダストの熱放射 / 分子輝線
 - 電波干渉計で、高い空間分解能を得る
 - 分解能が ~ 0.4 秒角 (SMA) = 56AU
 - これからのALMA観測で、分解能が格段に上がる

典型的な距離：
140pc

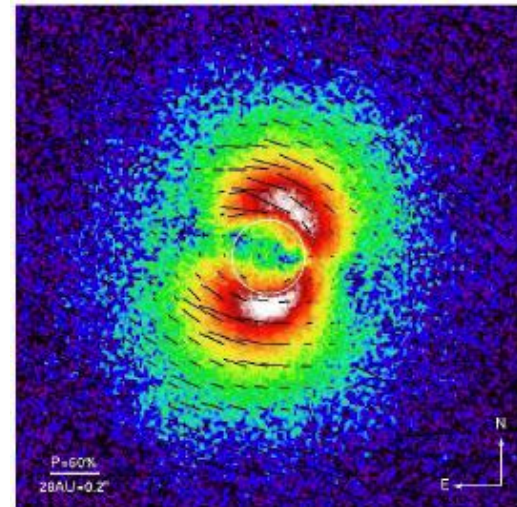
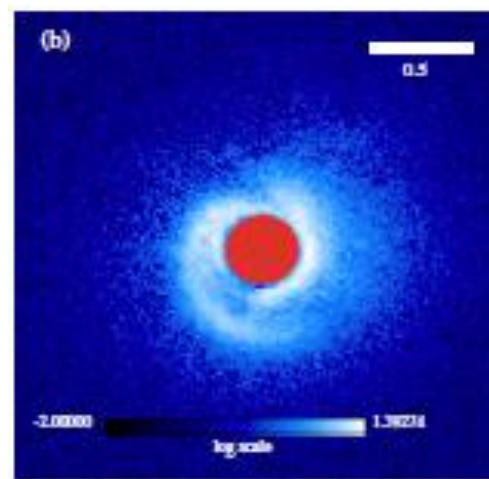
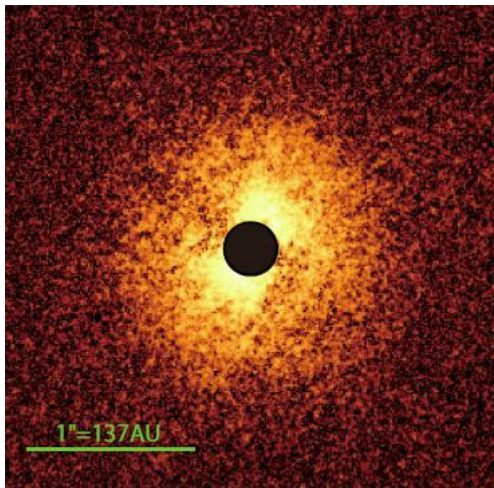
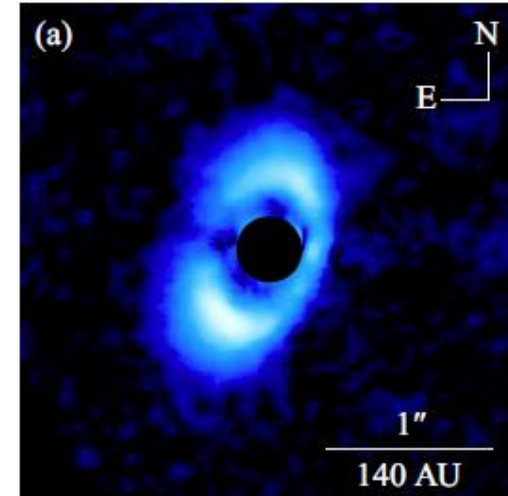
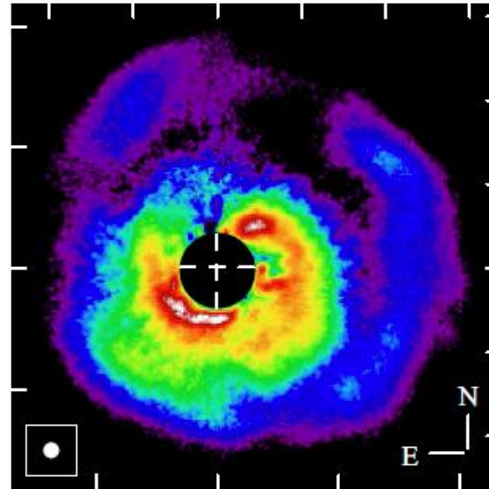
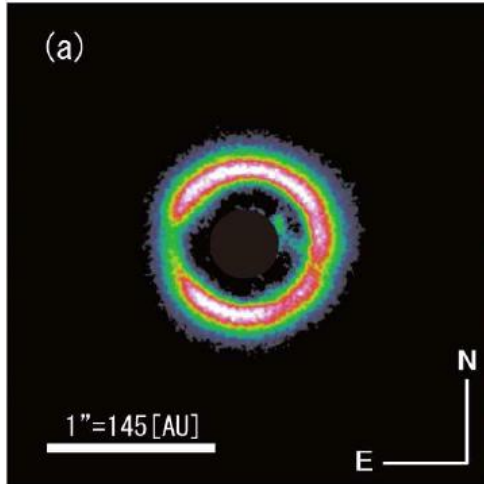
Strategic Exploration of Exoplanets and Disks with Subaru/HiCIAO

- すばる望遠鏡搭載のHiCIAO/AO188を用いた、円盤・惑星直接撮像プロジェクト
- 5年間で120夜観測、現在およそ2/3
- 円盤：偏光撮像により、高角度分解能で中心星近傍まで迫れる
- 円盤は、遷移円盤天体を中心に観測



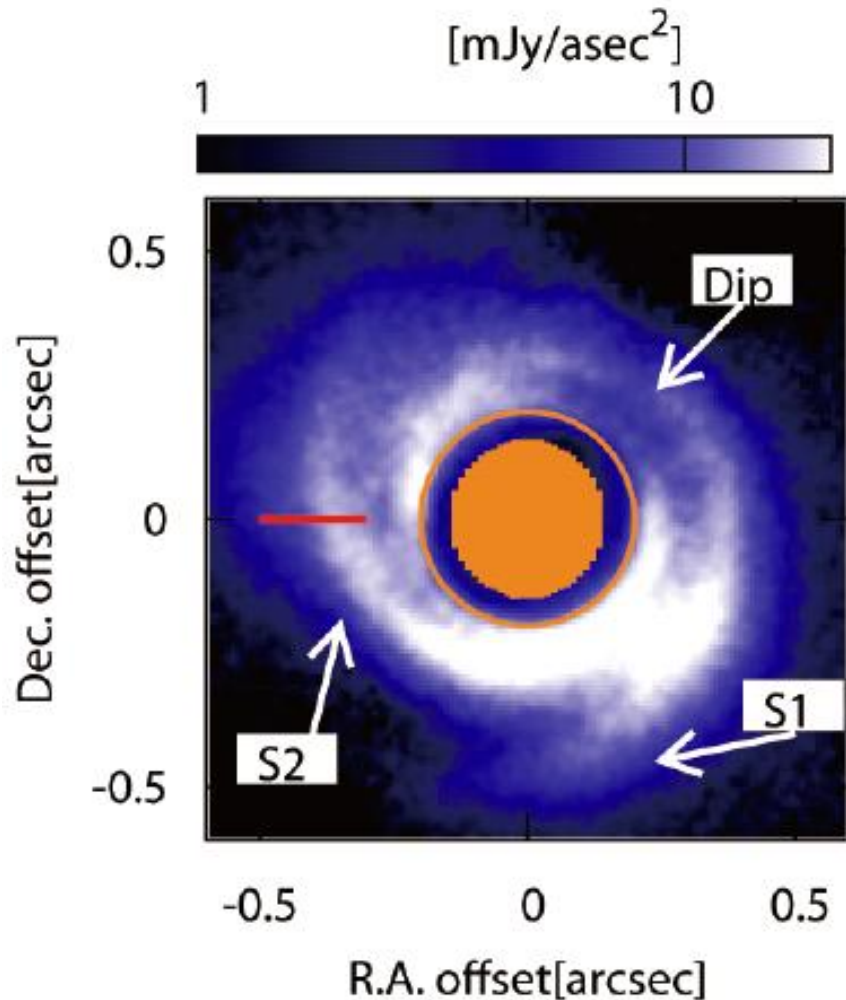
S E E D S

SEEDS Gallery



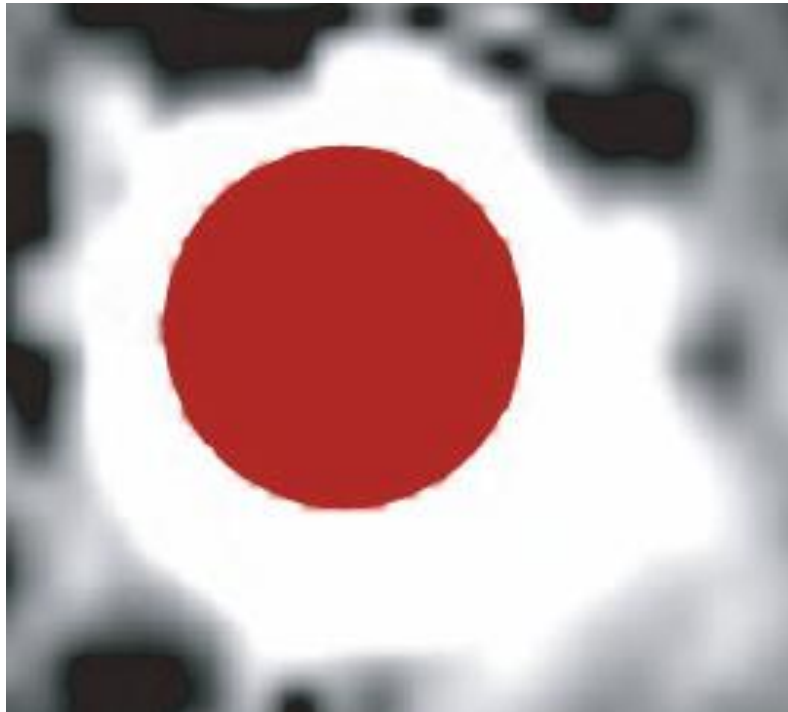
Mayama et al. (2012), Hashimoto et al. (2011, 2012), Kusakabe et al. (2012), Grady et al. (2013), Tanii et al. (2012)

SEEDSで見つかったスパイラル構造

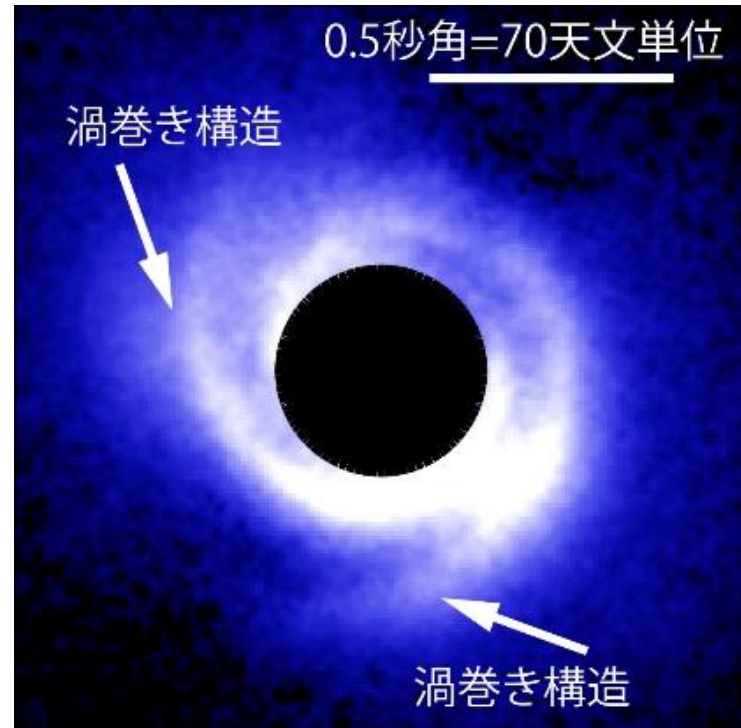


- SAO 206462周囲の円盤
- 分解能: 0.06秒程度
- 「穴」の部分に散乱光成分
– 46AU~0.3''
- スパイラル状の構造

観測技術の発展



BEFORE:
2009年 ハッブル宇宙望遠鏡



AFTER:
2012年 すばる望遠鏡

スパイラル構造：密度波理論によるモデル

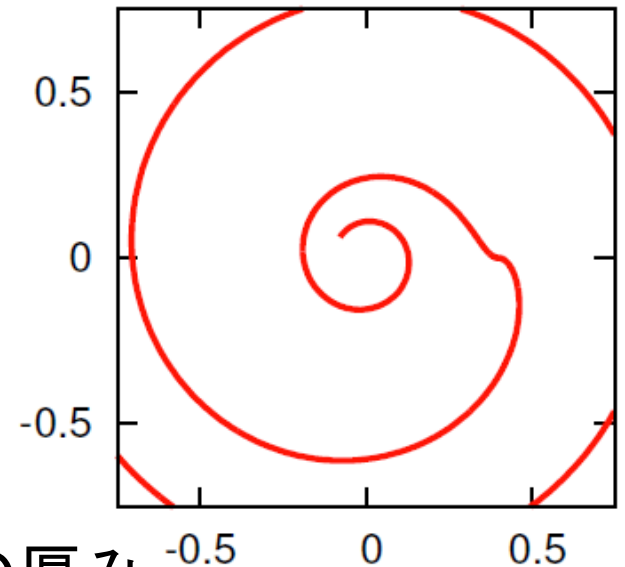
- スパイラルの「形」にのみ注目
- 円盤にたつ「音波」を測定
 - 円盤の音速(温度)がわかる

$$\Omega(r) \propto r^{-\alpha} \quad \text{円盤の回転則}$$

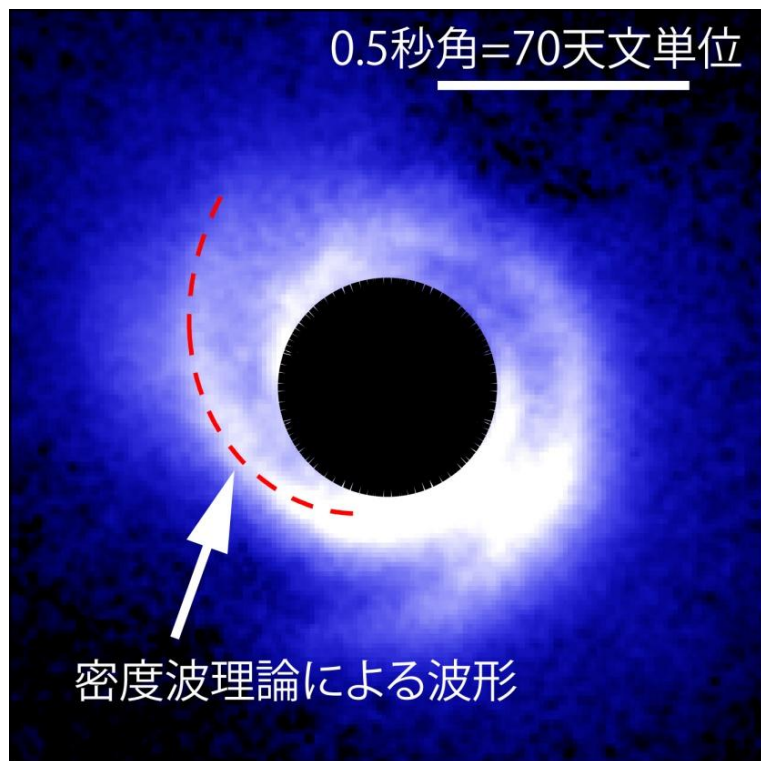
$$c(r) \propto r^{-\beta} \quad \text{円盤の温度分布}$$

$$h_c \equiv \frac{H(r_c)}{r_c} \quad \text{共回転半径での円盤の厚み}$$

$$\theta(r) = \theta_0 - \frac{\text{sgn}(r - r_c)}{h_c} \times \left[\left(\frac{r}{r_c} \right)^{1+\beta} \left\{ \frac{1}{1+\beta} - \frac{1}{1-\alpha+\beta} \left(\frac{r}{r_c} \right)^{-\alpha} \right\} - \left(\frac{1}{1+\beta} - \frac{1}{1-\alpha+\beta} \right) \right]$$

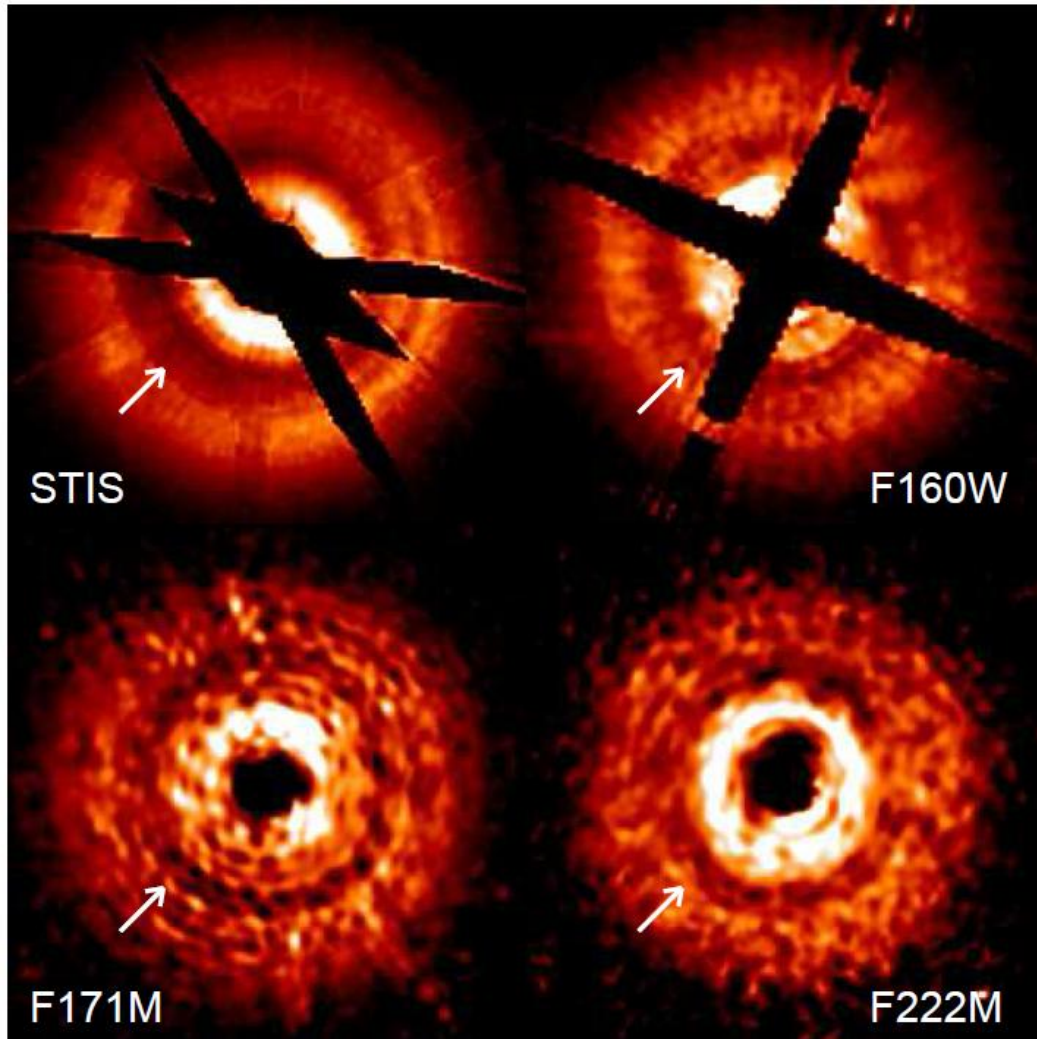


モデルフィットの結果



- パラメータの縮退は大きいものの
 - 波を励起する場所は外側にありそう
 - サブミリ観測で示唆されているような円盤モデルで、スパイラル構造を説明可能
 - 比較的「熱い＝厚い」円盤
 - $H/R \sim 0.1$
- もし惑星が励起している波だとすれば、0.5MJくらい？

HSTで見えたギャップ構造

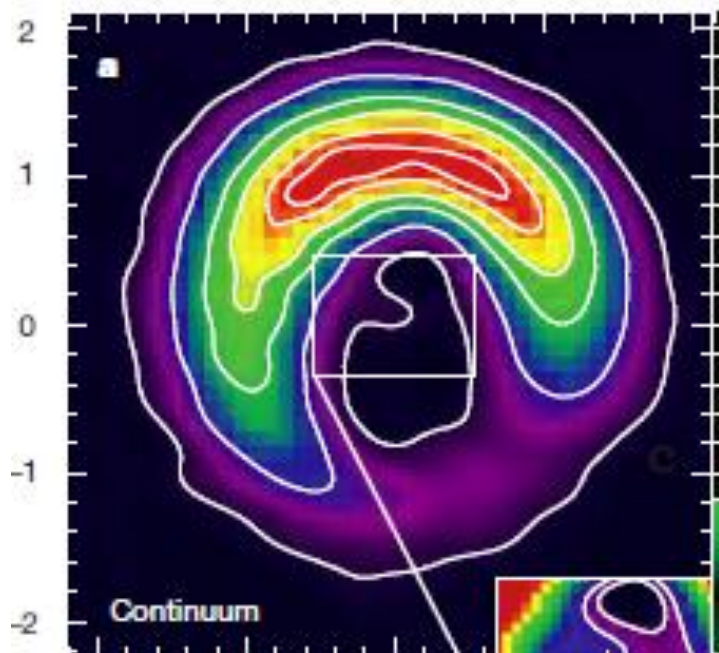


- TW Hya周囲の原始惑星系円盤
- 80AU付近で、少し暗くなっている
- 惑星でもあるか？

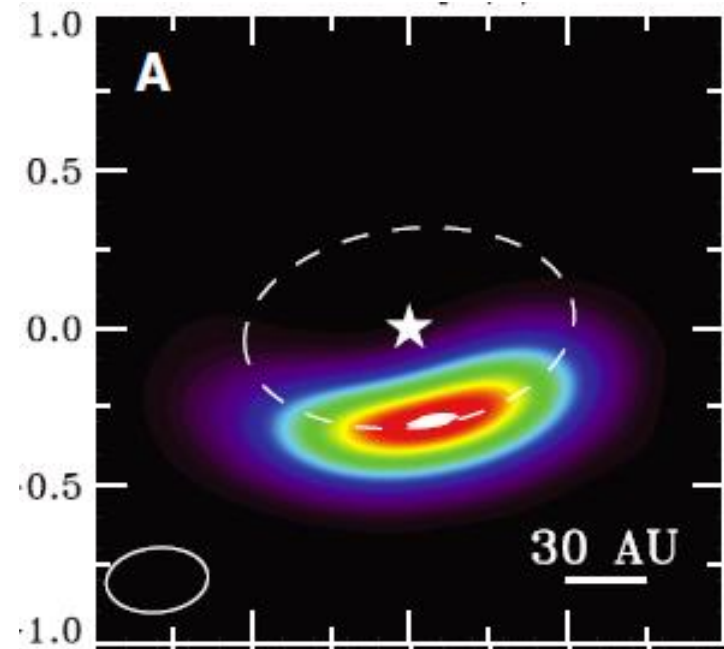
Debes et al. 2013

ALMA(電波)観測の現状

- Cycle 0の結果が出始めている
- 十分に驚くに値する成果

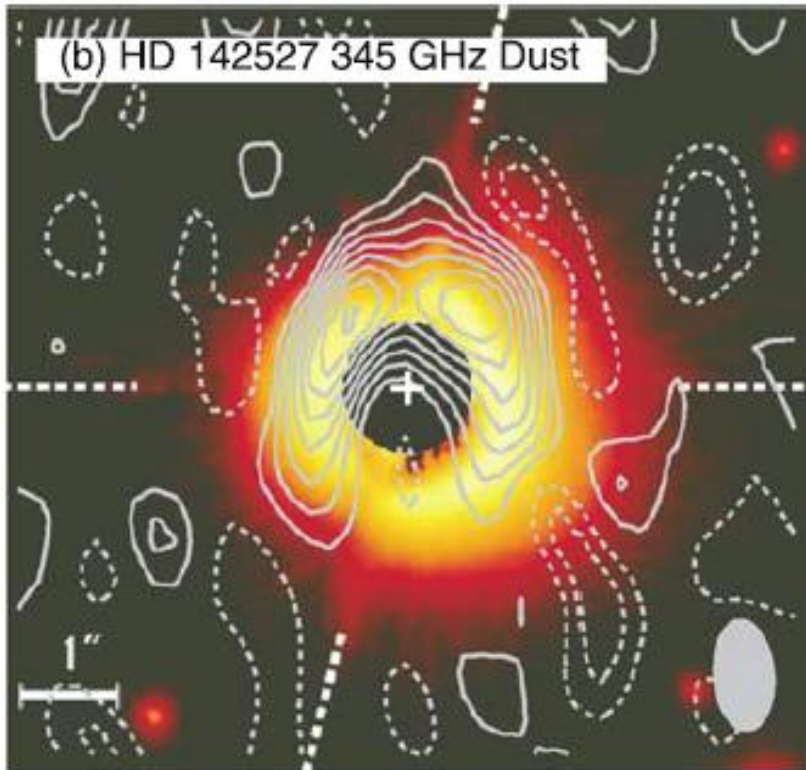


Casassus et al. 2013



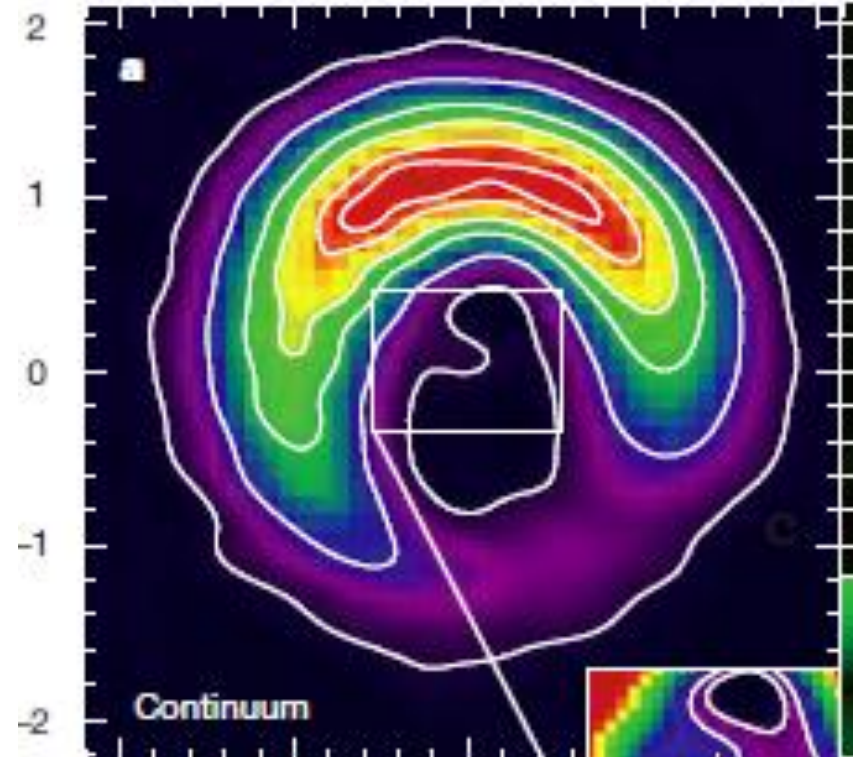
Van der Marel et al. 2013

ALMA望遠鏡の威力



BEFORE:
2008年 SMA望遠鏡
線が観測・色は近赤外線画像

Ohashi (2008)



AFTER:
2012年 ALMA望遠鏡
初期運用観測

円盤観測の現状：小まとめ

- 原始惑星系円盤は、長波長での星の黒体放射に対するexcessとして検出される
- 観測は、さまざまな波長で見ることが重要
 - 円盤の異なる場所を見る
 - SEDだけからも、空間的な構造についてある程度のことと言える
- 実際に空間分解した観測も可能になっている
- 円盤に、何らかの非軸対称性が見えてきている
 - どう解釈するか、今後の議論の深まりを期待

直接撮像のこれから

- 鍵は「高空間分解能」
- Full ALMAや、TMTなどの将来の大型望遠鏡計画で、どこまで行けるか？

原始惑星系円盤 @ 100AU

- 面密度 (最小質量モデル)

$$\Sigma_{\text{gas}} = 1.7 \text{g/cm}^2 \left(\frac{r}{100 \text{AU}} \right)^{-3/2}$$

- 円盤の厚み (スケールハイト)

$$H = 15 \text{AU} \left(\frac{r}{100 \text{AU}} \right)^{5/4}$$

- 円盤のアスペクト比

$$\frac{H}{r} = 0.15 \left(\frac{r}{100 \text{AU}} \right)^{1/4}$$

14 AU = 0.1" @ 140 pc

→ Subaru

原始惑星系円盤 @ 10AU

- 面密度 (最小質量モデル)

$$\Sigma = 50\text{g/cm}^2 \left(\frac{r}{10\text{AU}}\right)^{-3/2}$$

- 円盤の厚み (スケールハイト)

$$H = 0.8\text{AU} \left(\frac{r}{10\text{AU}}\right)^{5/4}$$

- 円盤のアスペクト比

$$\frac{H}{r} = 0.08 \left(\frac{r}{10\text{AU}}\right)^{1/4}$$

1.4 AU = 0.01" @ 140 pc

→ TMT, full ALMA

原始惑星系円盤 @ 1AU

- 面密度 (最小質量モデル)

$$\Sigma = 1600\text{g/cm}^2 \left(\frac{r}{1\text{AU}}\right)^{-3/2}$$

- 円盤の厚み (スケールハイト)

$$H = 0.05\text{AU} \left(\frac{r}{1\text{AU}}\right)^{5/4}$$

- 円盤のアスペクト比

$$\frac{H}{r} = 0.05 \left(\frac{r}{1\text{AU}}\right)^{1/4}$$

0.1 AU = 0.001" @ 140 pc

→ ???

直近で可能な観測：スパイラル

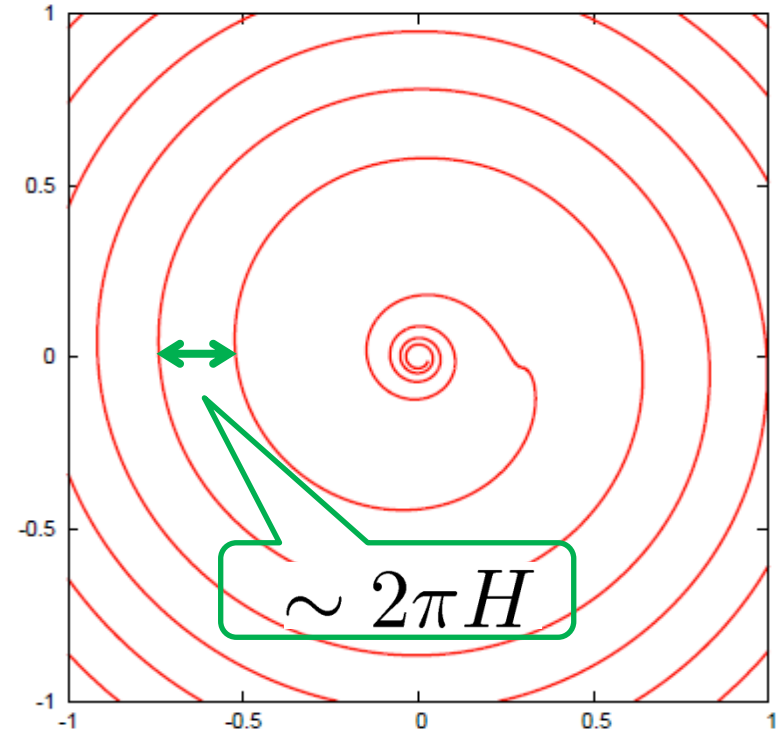
$$\phi(r) \sim \pm \frac{r}{H}$$

円盤の厚み程度の長さを
分解する必要がある

$$d = 140\text{pc}$$

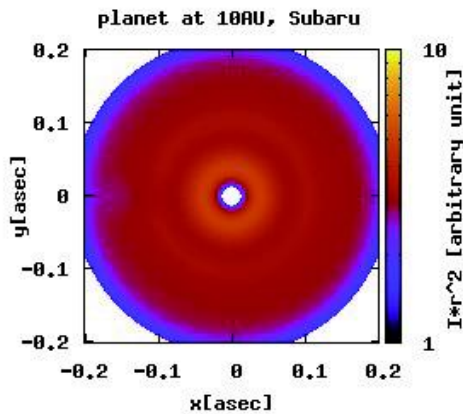
$$R = 100\text{AU}, H \sim 10\text{AU}$$

0.1秒角の分解能が必要
→ すばる、ALMA...

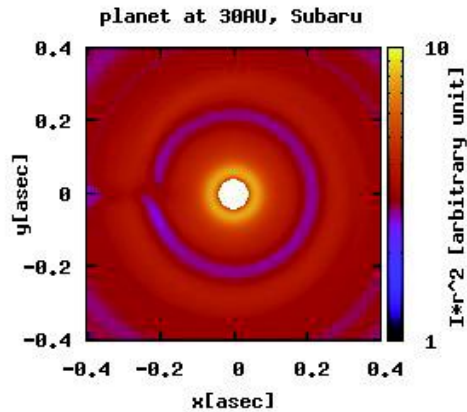


惑星の励起する円盤の構造

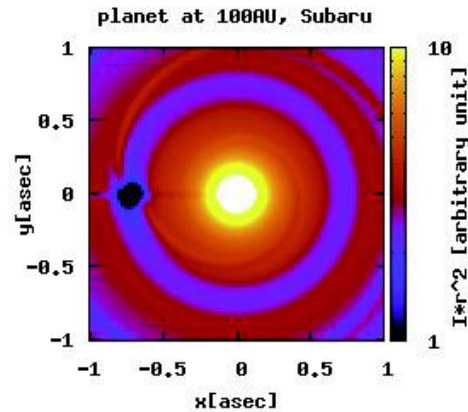
惑星@10AU



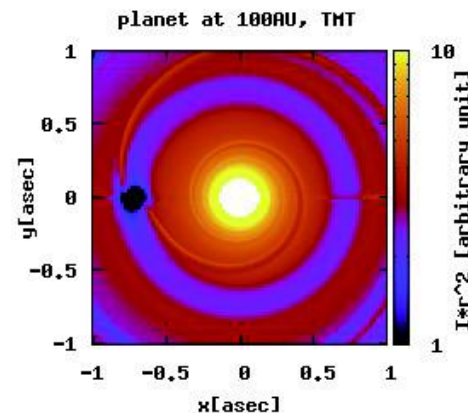
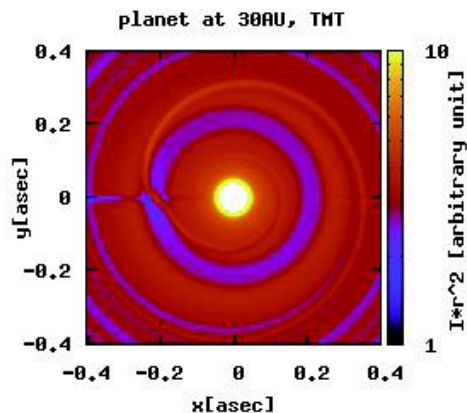
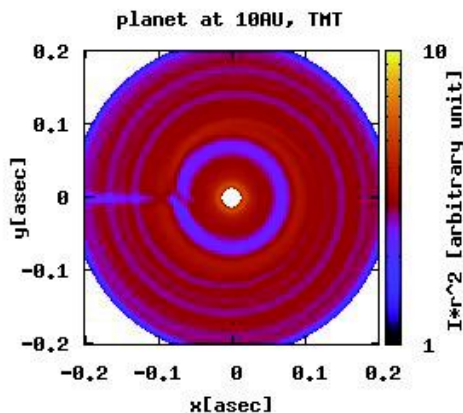
惑星@30AU



惑星@100AU



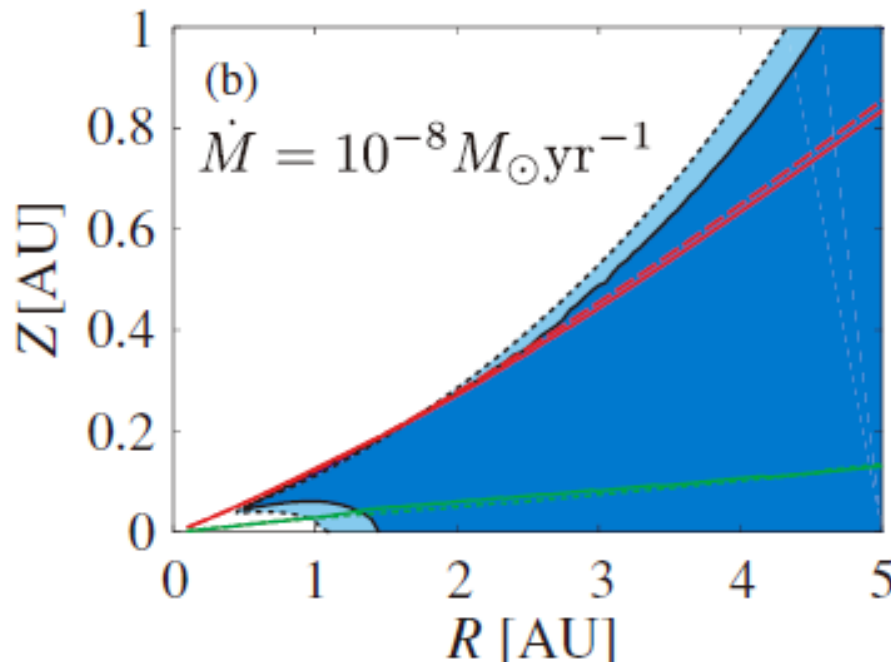
すばる



TMT

原始惑星系円盤の表面雪線

- 雪線： そこより遠方では、H₂Oが氷として存在する境界線
- 円盤内の温度輻射輸送を考えると、表面付近に雪線が存在する



Oka et al. 2011

まとめ

- 原始惑星系円盤は、惑星形成の母体
- ガス・ダストからなる、中心星の周囲を回転する薄い円盤
- さまざまな相互作用が起こる
 - 摩擦力・重力・輻射・化学反応...
- 観測も電波・赤外でどんどん進んでいる
- 惑星形成の現場が見られる日も遠くない？