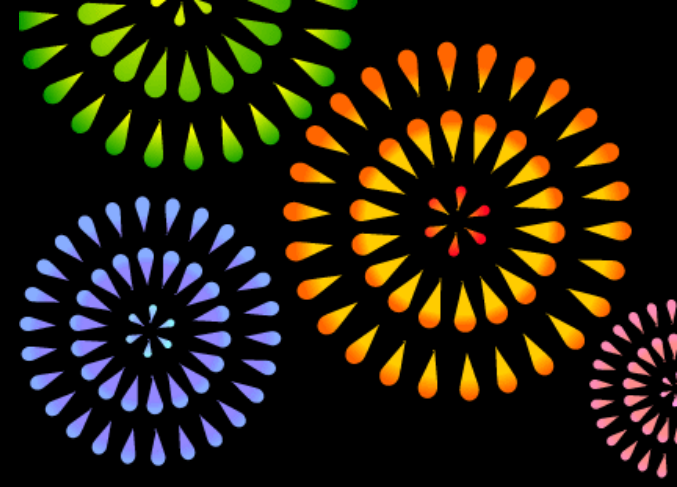


原始惑星系円盤の撮像観測 系外惑星形成の理解へ向けて

深川 美里
(大阪大学)



私たちが知っている惑星系

太陽系

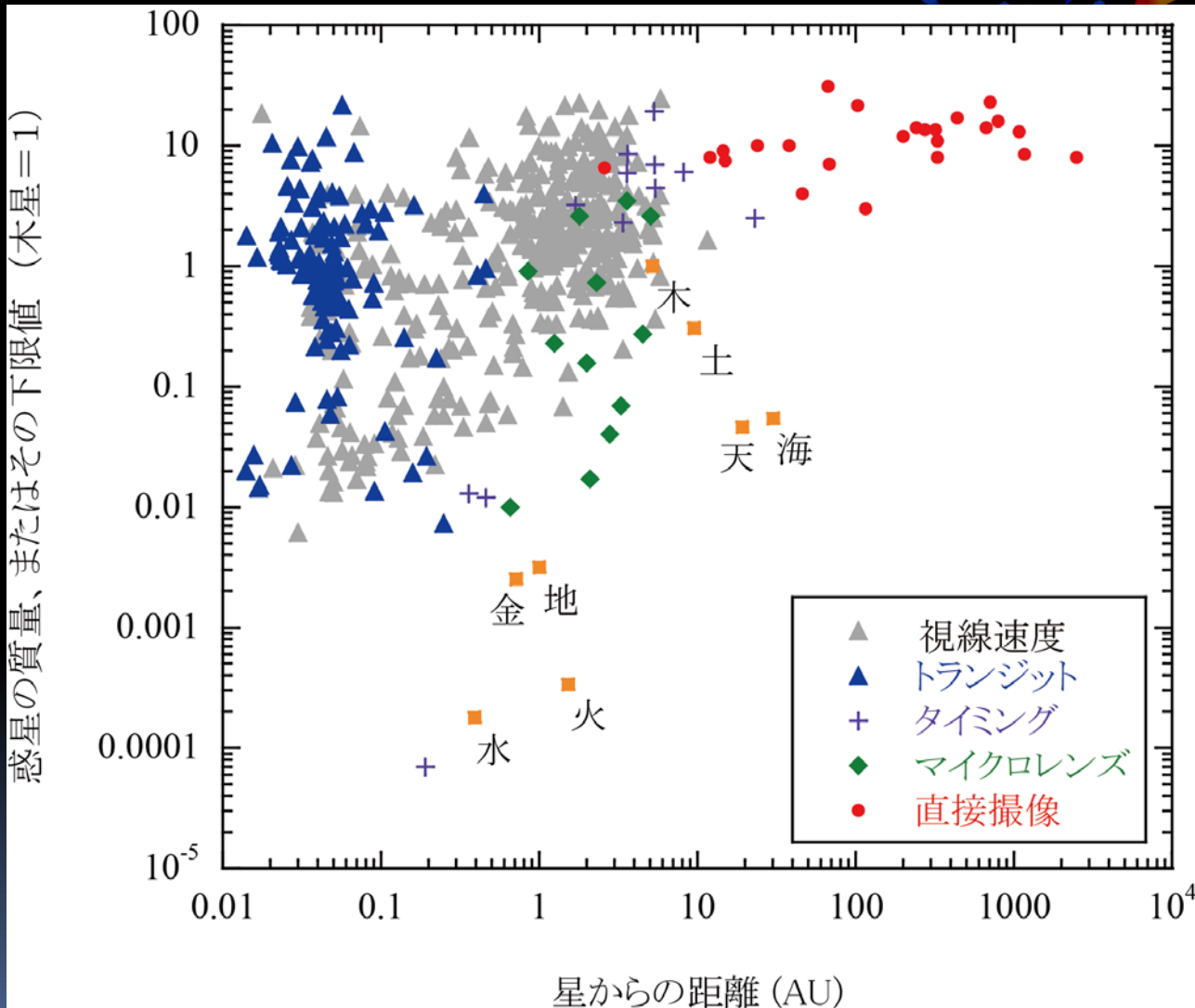


地球型（岩石）惑星

巨大ガス惑星

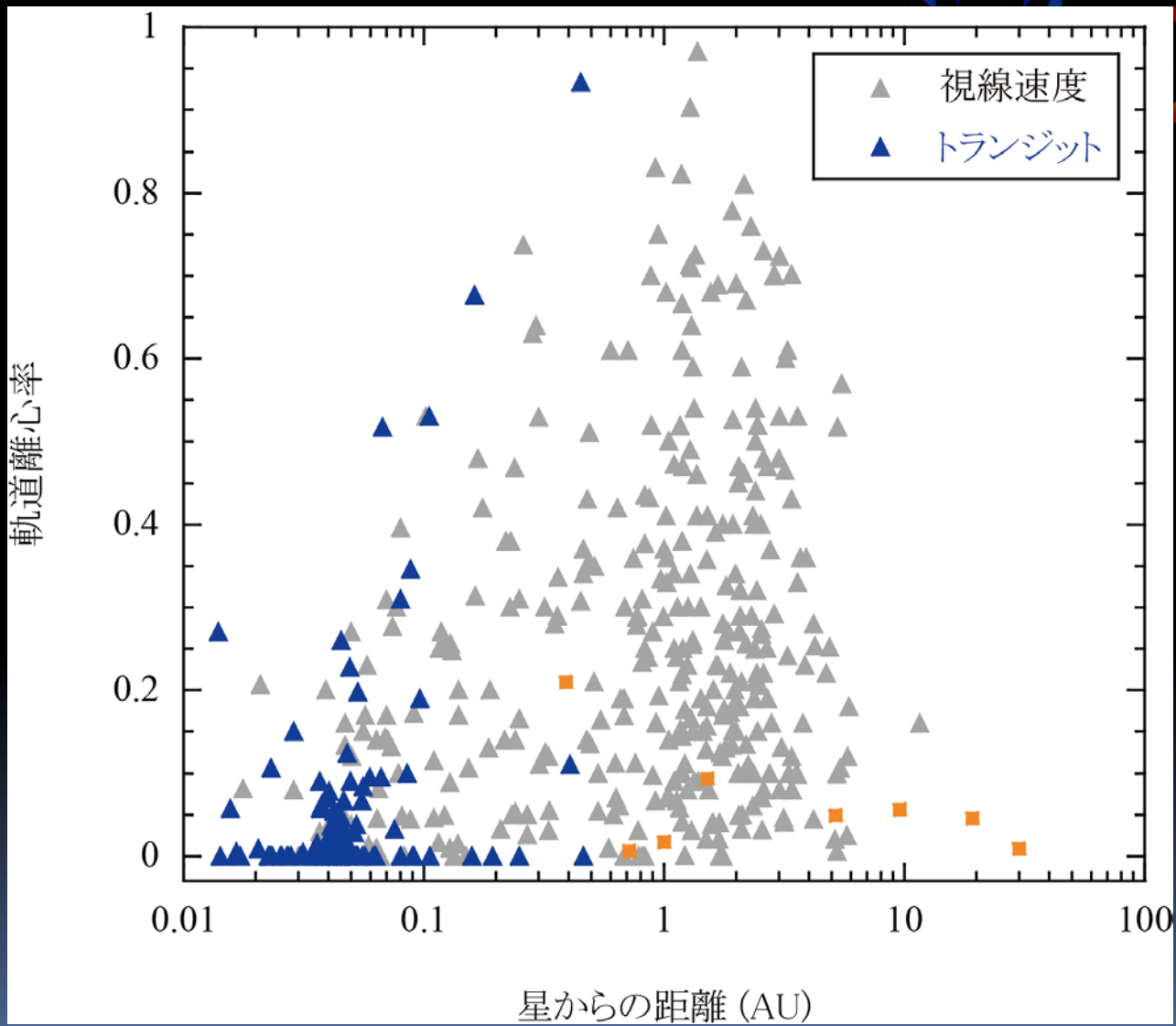
氷惑星

発見された系外惑星

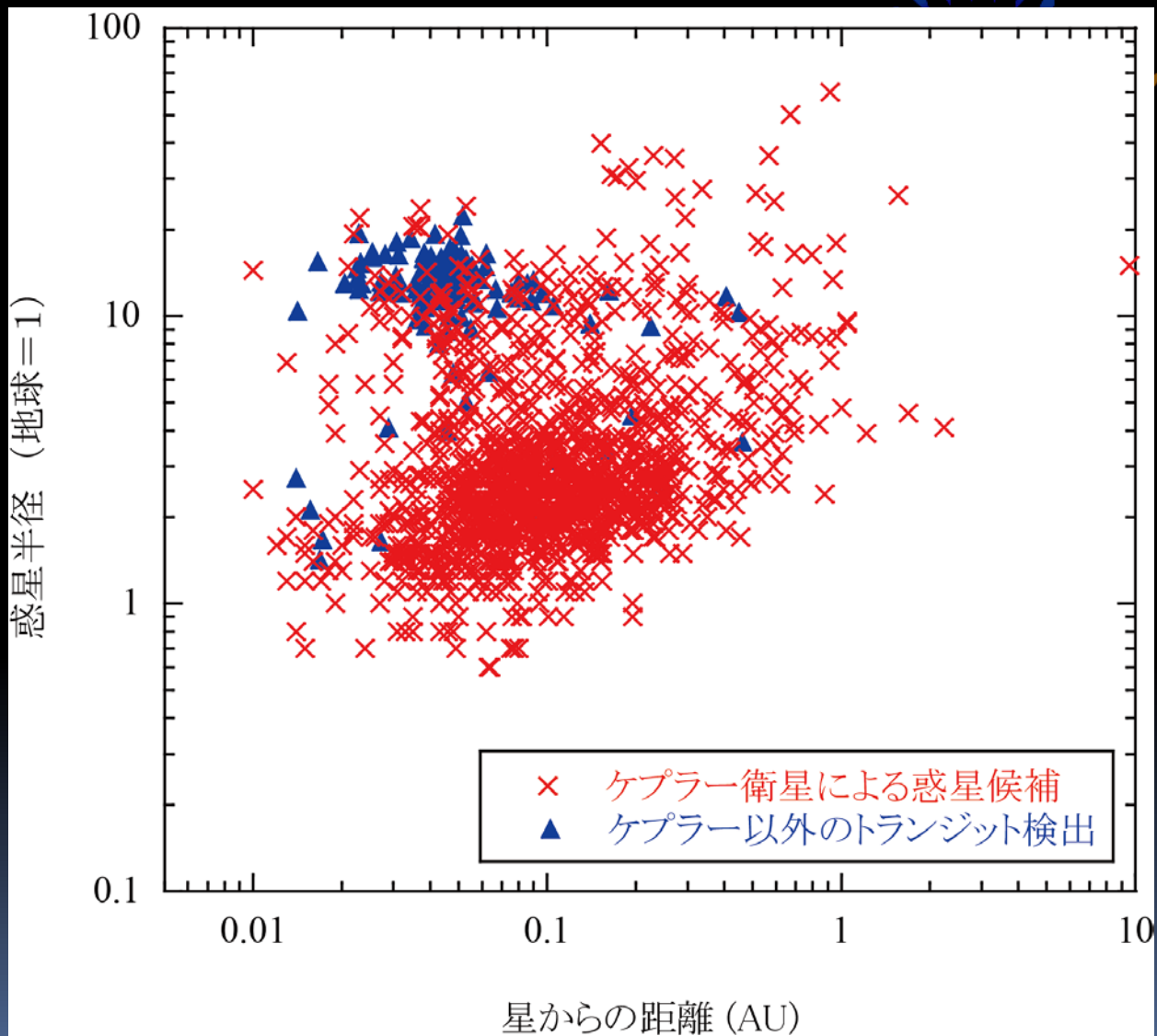


2011年4月末時点。データは <http://exoplanet.eu> より取得。

発見された系外惑星



発見された系外惑星



発見された系外惑星

- 木星より重い惑星が星の近傍を回っている
- 軌道離心率が大きい。逆行惑星も。
- 地球と同サイズの惑星候補が大量に見つかり始めている
- ハビタブル・ゾーンに惑星が見つかり始めている

➡ 系外惑星系は多様性に富む

(注：検出方法の制限により、系外惑星系の全体像は見えていない)

太陽系形成論から
汎惑星形成論へ

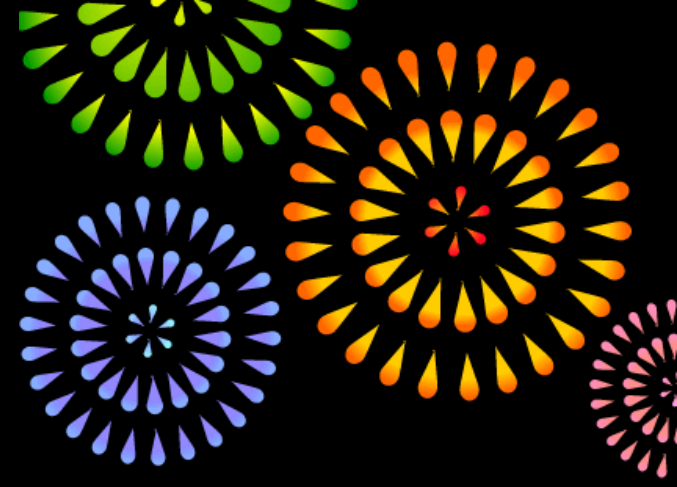
初期条件 = 原始惑星系円盤
密度・温度分布 (r, z)
赤外～電波観測



形成過程
コア集積
円盤自己重力不安定
...



結果 = 系外惑星系
質量、軌道 (a, e)、密度
視線速度、トランジット、
マイクロレンズ、撮像、
アストロメトリ...



惑星形成の初期条件

星形成の副産物：円盤

- 分子雲の重力収縮で星が誕生
- 角運動量保存→星形成の過程で必然的に生じる構造
- ケプラー回転
- 星は円盤からの質量供給で成長
- 円盤のガス、ダストが惑星の材料

原始惑星系円盤

- 原始太陽系星雲（太陽系最小質量円盤モデル）

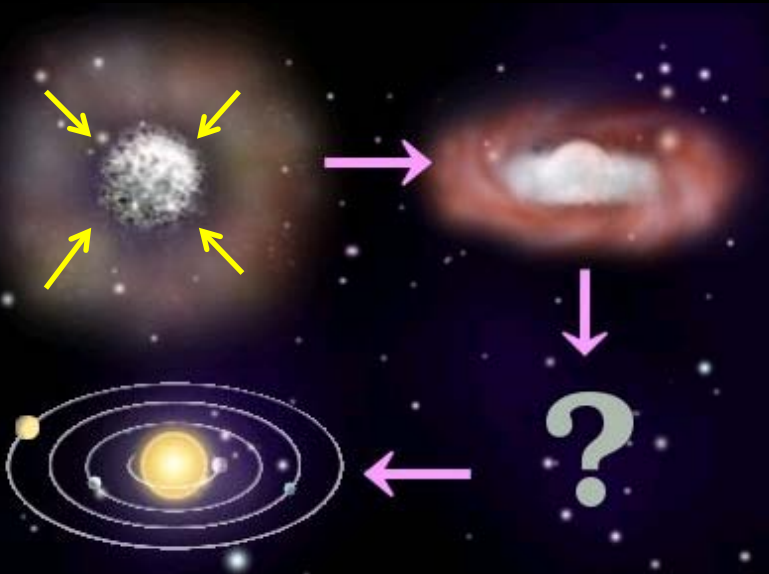
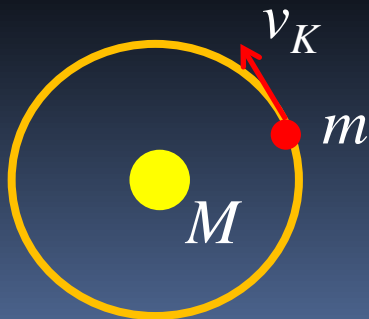


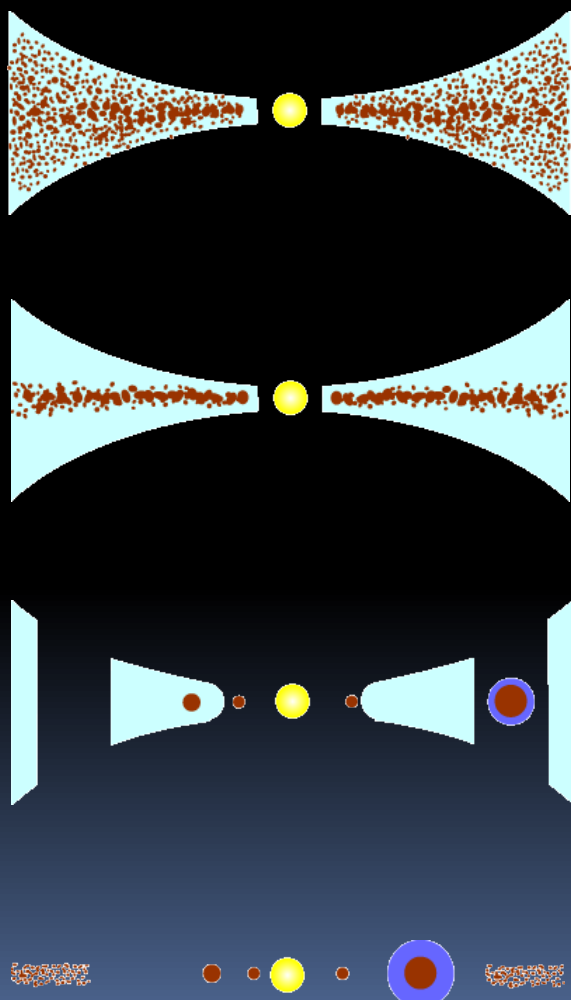
Illustration by M. Shimoura



$$\frac{GMm}{r^2} = \frac{mv_K^2}{r}$$

$$v_K = \sqrt{GM / r}$$

惑星形成仮説：コア集積



年齢 約100万年 (前主系列星)
原始惑星系円盤
重さは星の約 1%
ガスとダストが混じりあっている



ダストの合体成長、赤道面への沈降
微惑星へ



微惑星の衝突・合体で原始惑星が誕生
大きい惑星はガスを捕獲



年齢 > 1000万年 (主系列星)
惑星系 + デブリ (残骸) 円盤

惑星形成仮説：コア集積

- 京都モデルがベース（林 忠四郎ら: Hayashi et al. 1985）、太陽系形成の“標準理論”
- 最小質量モデルの場合、できる惑星の種類は、材料物質の豊富さや、円盤ガスの寿命によって決まる

スノーライン（雪線）

中心星が太陽の場合 2.7 AU

地球型惑星、岩石惑星

巨大ガス惑星

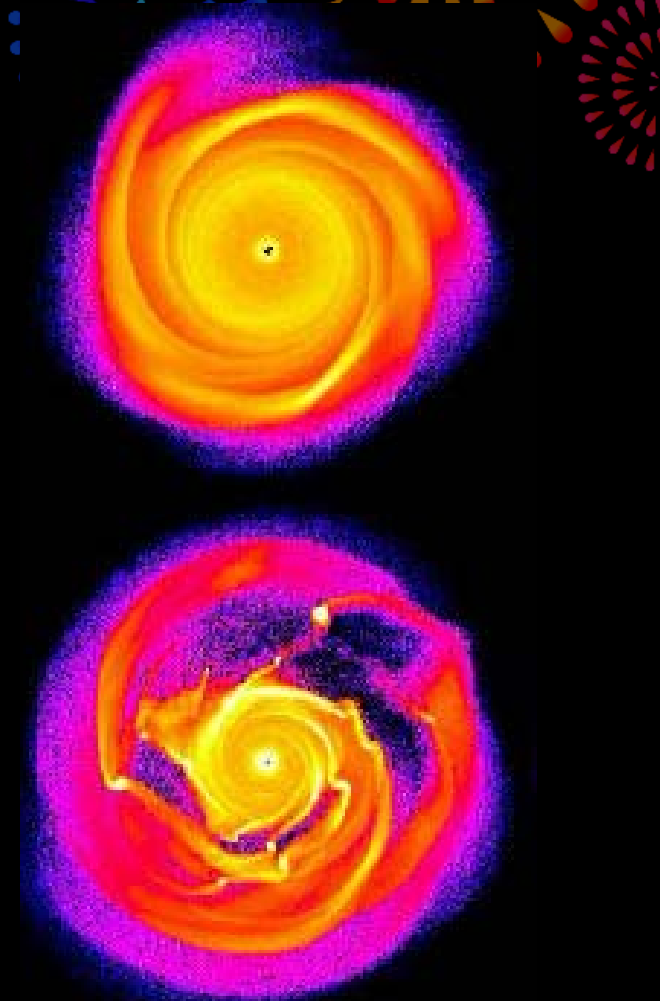
氷惑星

惑星形成仮説：自己重力不安定

- 円盤自らの重力で分裂、収縮して巨大ガス惑星となる（キャメロンらにより提案：Cameron 1978）
- 重く、冷たい円盤の外側で起こりやすい
- Toomre の Q パラメータ
 $Q < 1$ で不安定

$$Q = \frac{c_s \Omega_K}{\pi G \Sigma}$$

Σ : 円盤の面密度、 Ω_K : 回転の角速度
 c_s : 音速（温度の 0.5 乗）



Mayer et al. (2002)

コア集積 対 自己重力不安定

コア集積

- 軽めの円盤（星の1%）
- 形成に時間がかかる（1000万年は最低必要）
- 星の近傍でないとは形成が難しい（雪線のすぐ外側、数 AU）
- 星の金属量と惑星の存在率に相関

自己重力不安定

- 重い円盤（星の10%）
- すぐに作れる、非常に若い(10万～100万年)星に惑星が付随していてもおかしくない
- 星から遠く離れた場所に形成されやすい(10—100 AU)
- 円盤形状に特徴がある（スパイラル）

円盤質量（密度分布）や詳細構造、惑星の存在場所が
手がかりに



原始惑星系円盤の撮像観測

へびつかい座
星形成領域



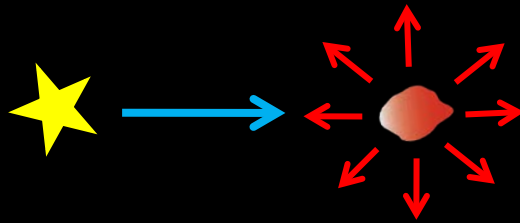
Star Formation in the Rho Ophiuchi Cloud

Spitzer Space Telescope • IRAC • MIPS

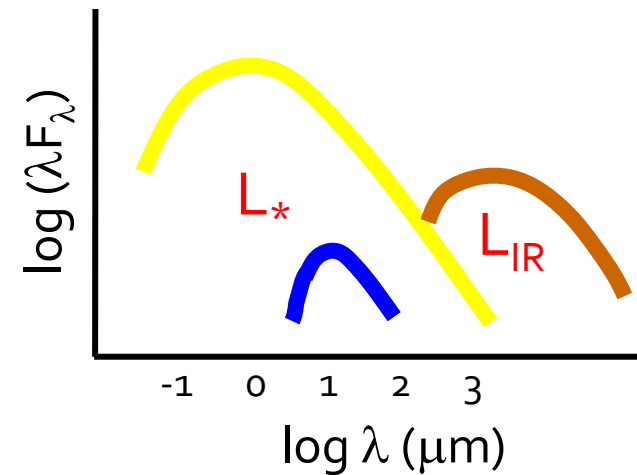
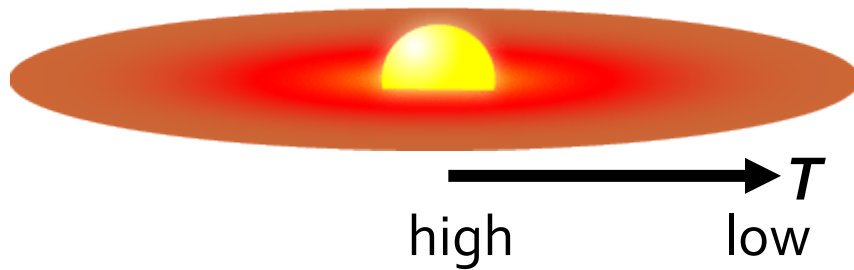
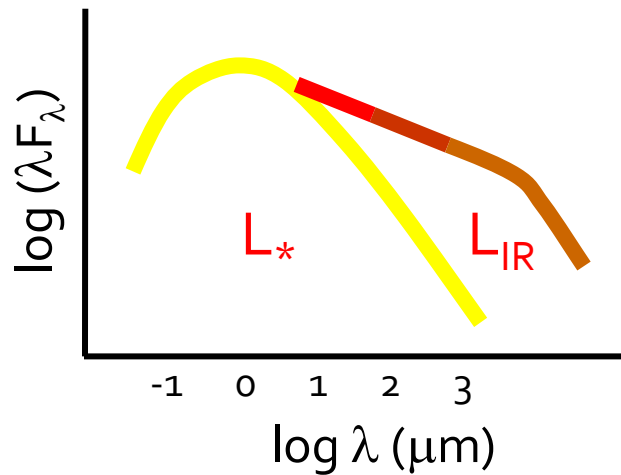
NASA / JPL-Caltech / L. Allen (Harvard-Smithsonian CfA) & D. Padgett (SSC-Caltech)

ssc2008-03a

円盤ダストを調べる



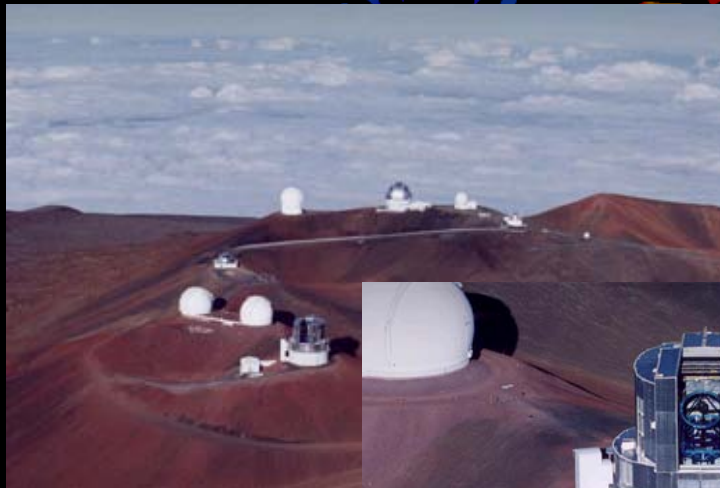
あたたまったダストによる放射



統計的な議論には有用だが、個々の円盤の真の構造をほとんど反映しない。

円盤の撮像観測

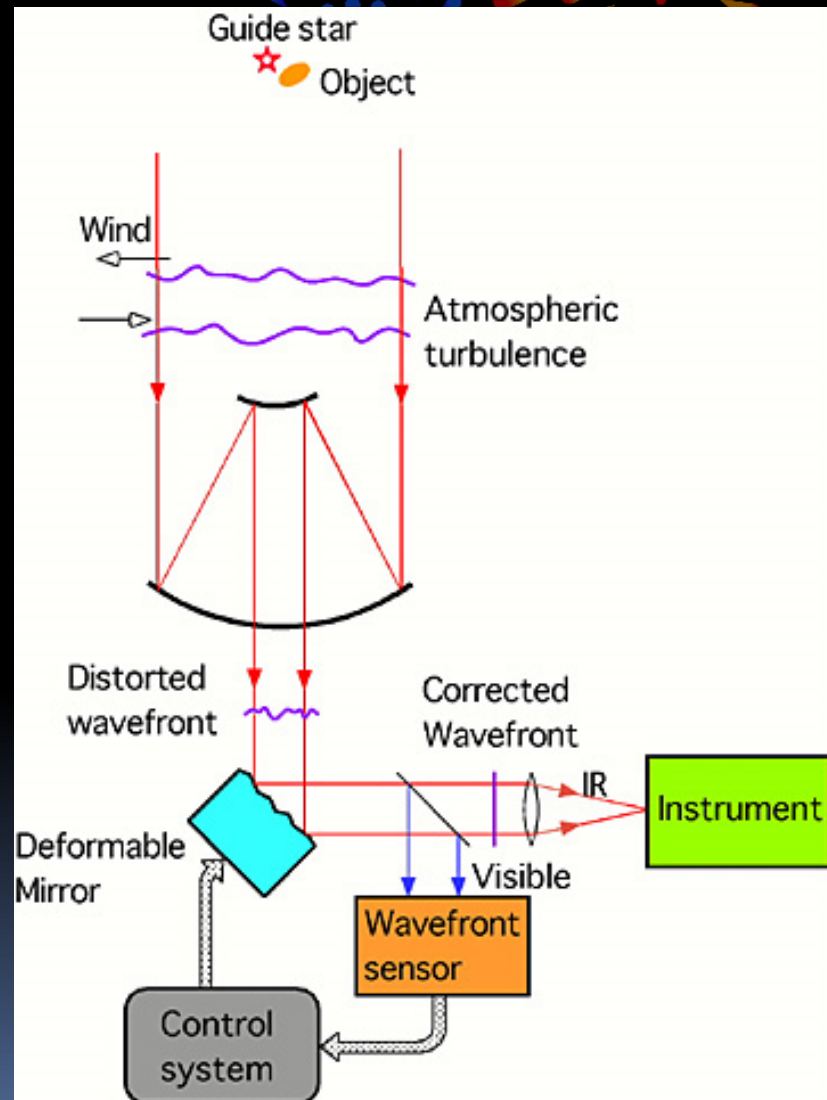
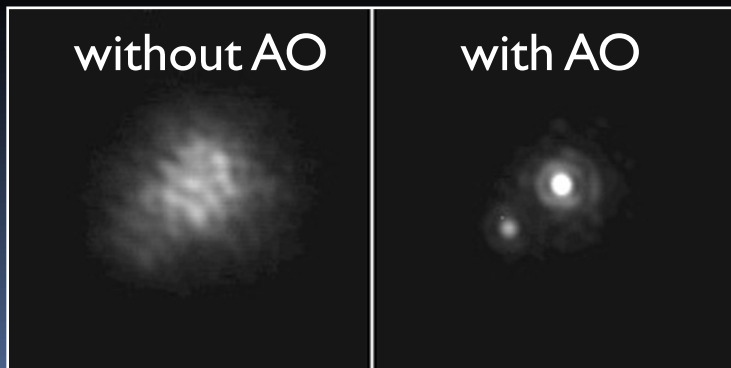
- 必要なのは高い空間分解能
- 欲しい分解能 $0.''1$ (~ 10 AU)
 - 円盤サイズ $R \sim 100$ AU
 - 星形成領域までの距離 140 pc
- 回折限界 $\sim \lambda/D$
- 可視光・近赤外線
 - 問題点：大気ゆらぎ
(マウナケアで $\sim 0.''6$)
 - 解決方法
 - ハッブル宇宙望遠鏡
 - 大口径望遠鏡 + 補償光学



Subaru 8.2 m 望遠鏡
(マウナケア山頂)

円盤の撮像観測

- 補償光学 (Adaptive Optics)
 - 大気ゆらぎをリアルタイムでモニターし、可変鏡で波面の歪みを補正
 - すばる + 補償光学
→ 近赤外線 $1.6 \mu\text{m}$ で $0.05'' (= 7 \text{ AU})$



散乱光で円盤を観る

可視光・近赤外線で観測できるのは...

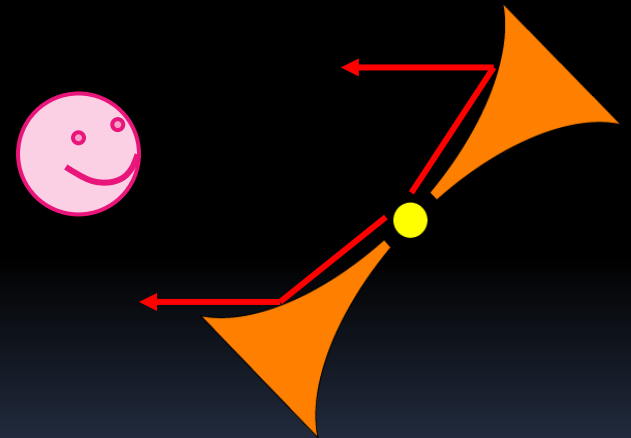
- 円盤ダストによる散乱光
- 外側： $R > \sim 30 \text{ AU}$
- 上層（円盤は密度が高いため、赤道面付近まで見通せない）

→ 幾何構造

- 鉛直方向に平坦 vs. フレア
- 手前 vs. 奥

→ ダストの情報

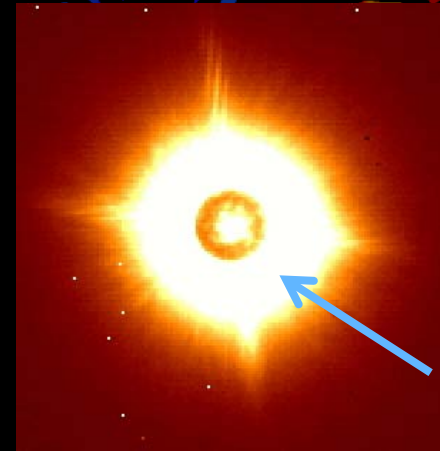
- 大きさ
- 組成、空隙率など



観測・解析方法

「星の光をいかに取り除くか」

- 可視・近赤外線では星の方が円盤より明るい
- コロナグラフだけでは不十分



星の光



Star + Disk
(Target)

—



Star
(PSF Reference)

=



Disk!!

観測・解析方法

ダストに当たって散乱された光は偏光するが、星の光は無偏光

- 感度が高い
- ダストの性質にも制限を加えられる

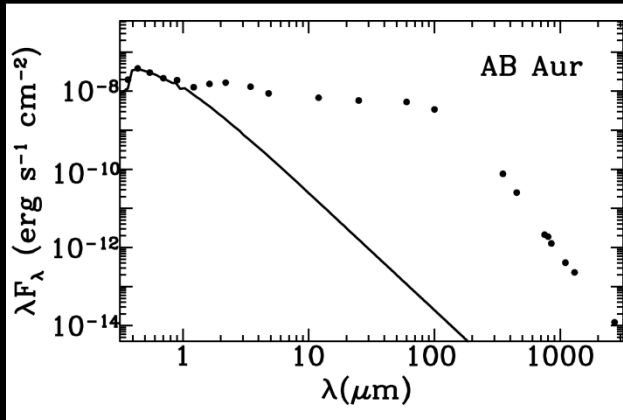


$$\text{観測量: 偏光強度} = \text{偏光度} \times \text{強度}$$

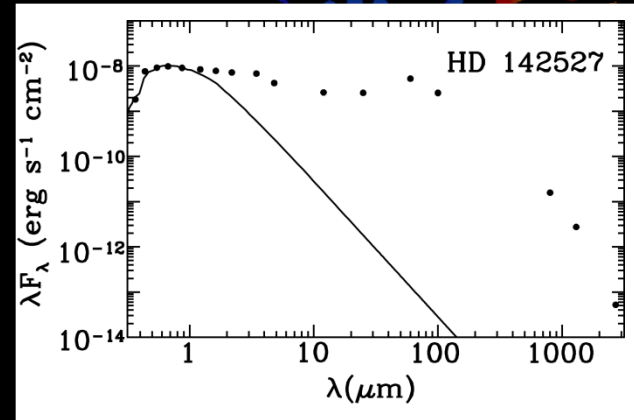


觀測結果

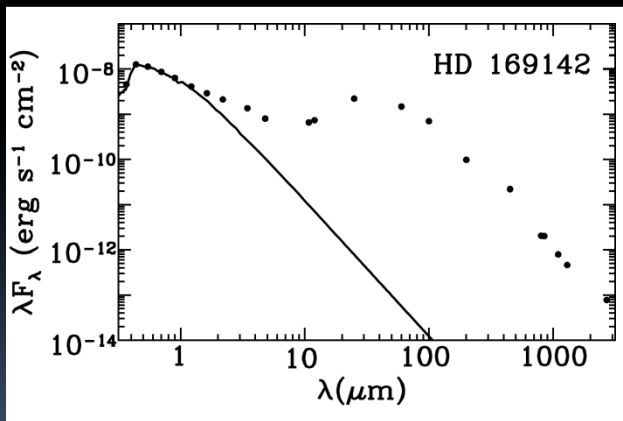
原始惑星系円盤の空間分解例



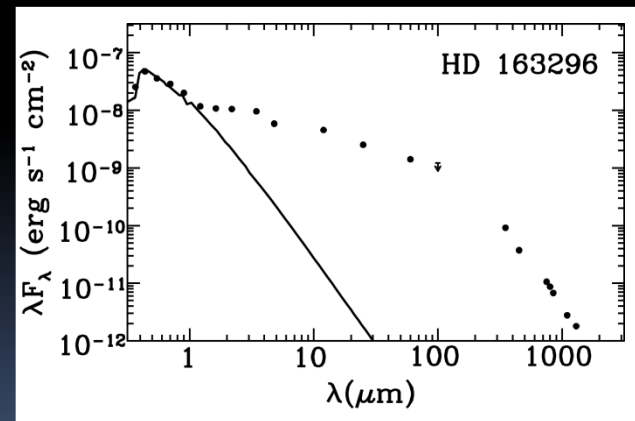
AB Aur (3 Myr)



HD 142527 (5 Myr)

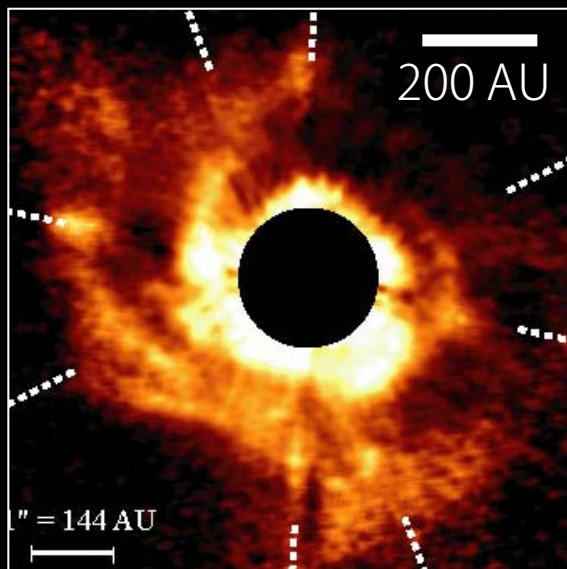


HD 169142 (8 Myr)

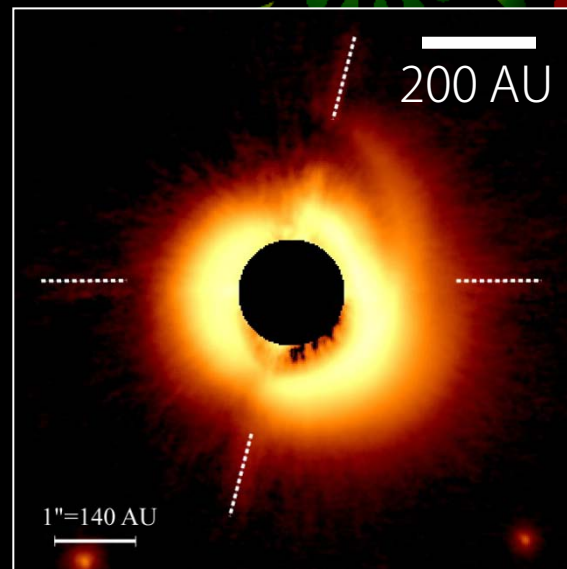


HD 163296 (4 Myr)

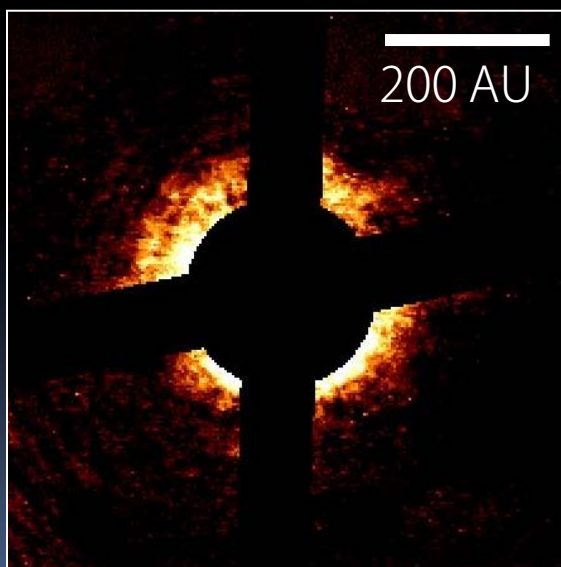
近赤外線
1.6 μm



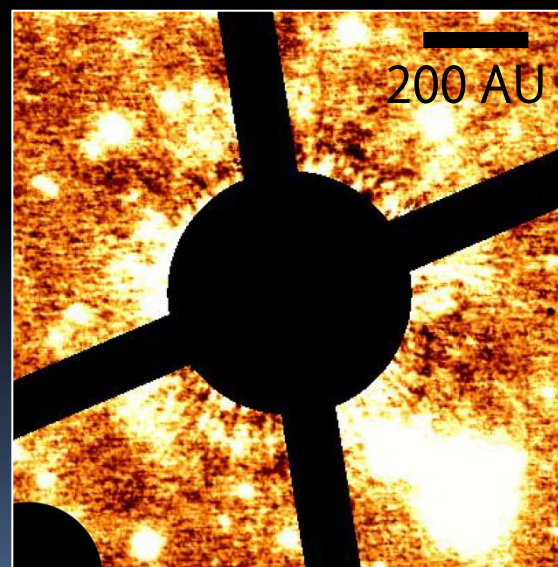
AB Aur (3 Myr)



HD 142527 (5 Myr)



HD 169142 (8 Myr)

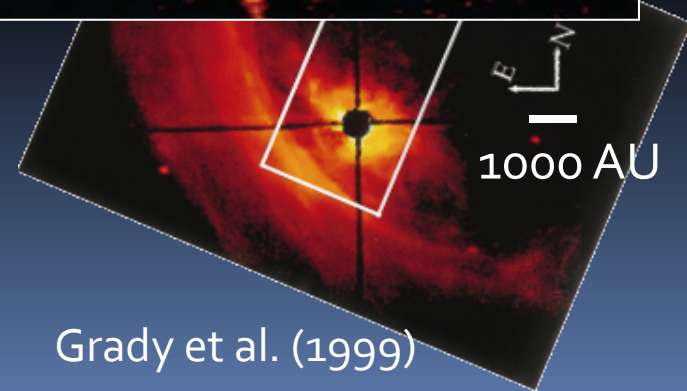
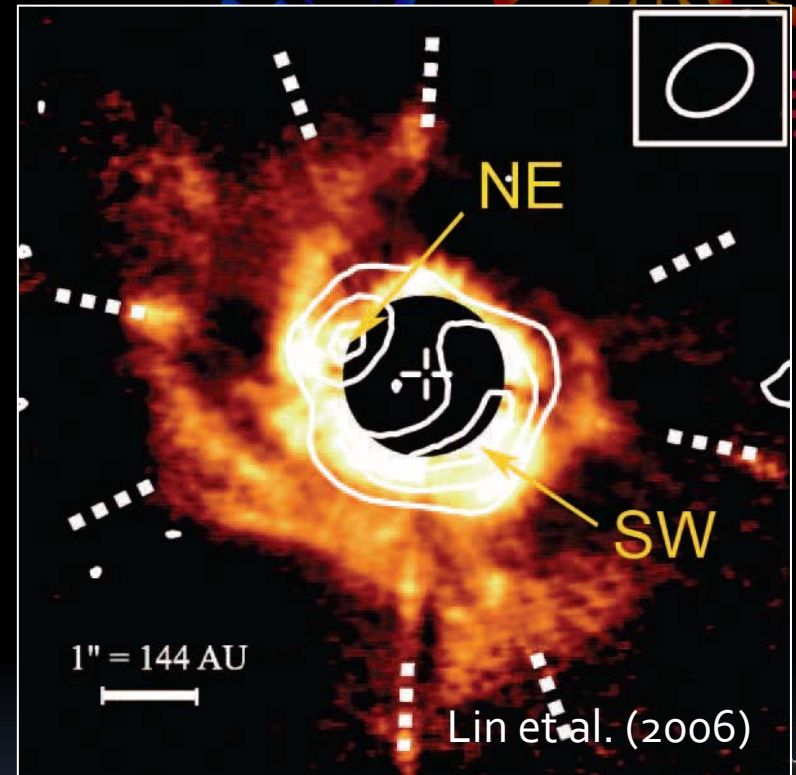


HD 163296 (4 Myr)

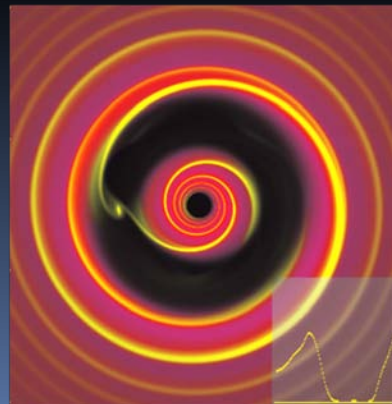
Fukagawa+
(2004, 2006,
2010)

Case 1: AB Aurigae “Spiral Arms”

- 広がった円盤 (半径 580 AU)
+ 周囲に物質が残存
- 中心 (半径 80 AU 付近) にダストの穴
- なぜスパイラル構造が？
 - 別の重力源：伴星 (確認されていない)、惑星
 - 円盤が重力的に不安定



計算例
(Armitage 2005)



Case 1: AB Aurigae “Spiral Arms”

- 円盤が重力的に不安定かどうか

$$Q = \frac{c_s \Omega}{\pi G \Sigma} \leq 1$$

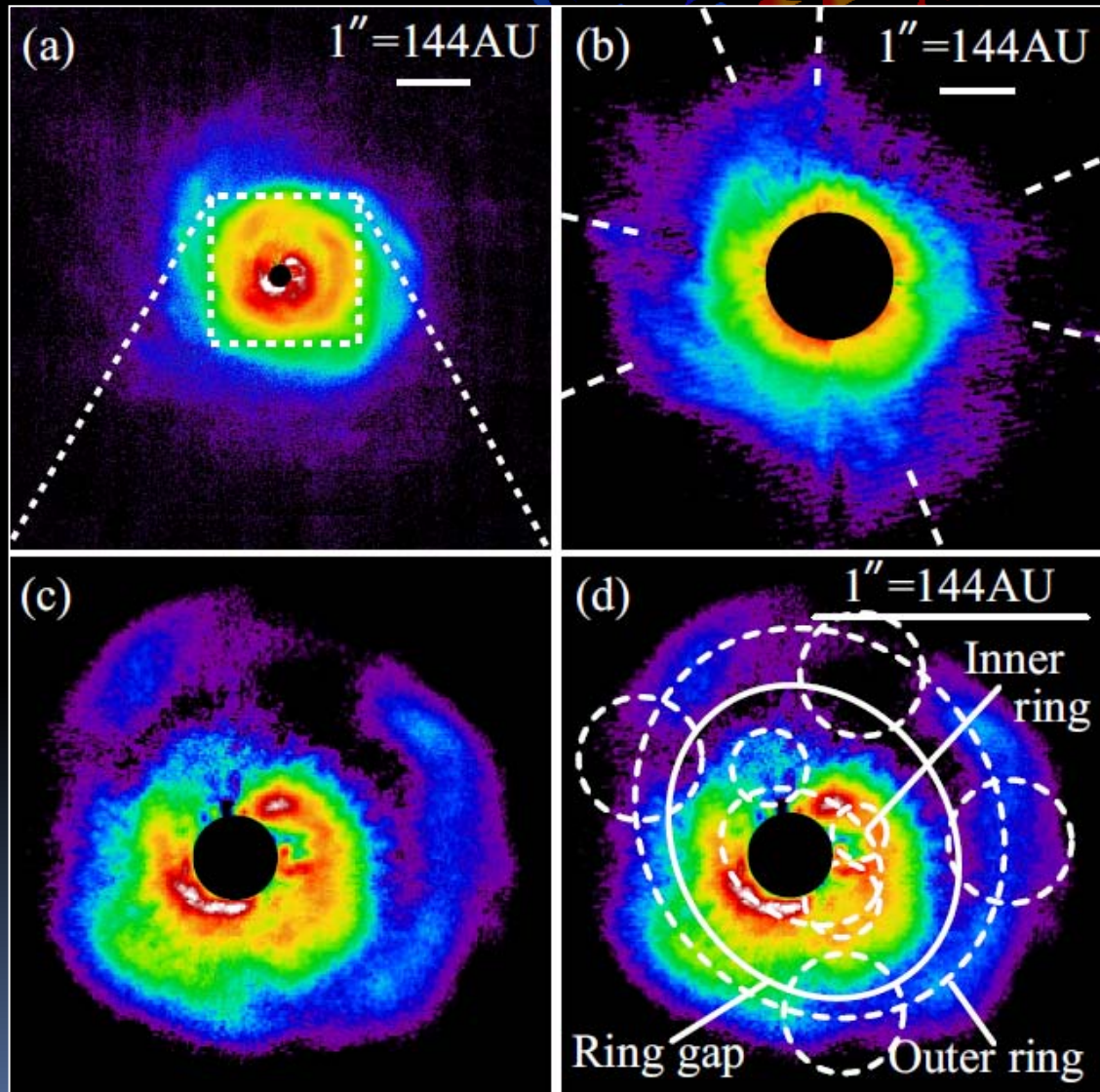
$$M_d = \frac{F_v d^2}{\kappa_v B_v(T)}$$

⇒ Q は 2 程度になり得る：ぎりぎり不安定？

- 周囲に残存している物質が円盤に降り積もる
- 初期円盤質量が大きいから不安定を起こしやすい
- スパイラル構造が示唆すること
 - 惑星の存在
 - これからの惑星形成（重力不安定性、腕の部分にものが集まることによる惑星形成の手助け）
- 惑星？重力不安定？
 - スパイラルの時間変化を調べるのが一つの方法

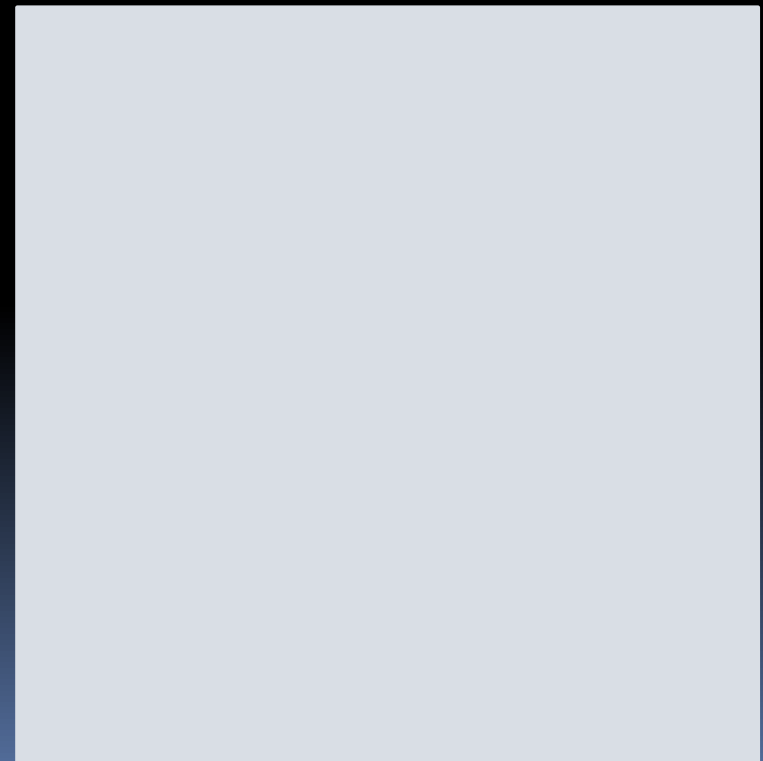
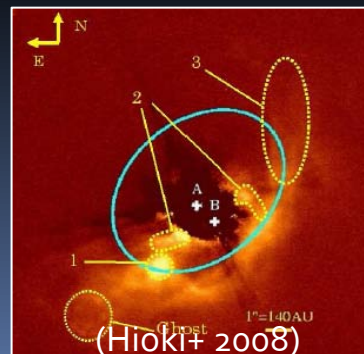
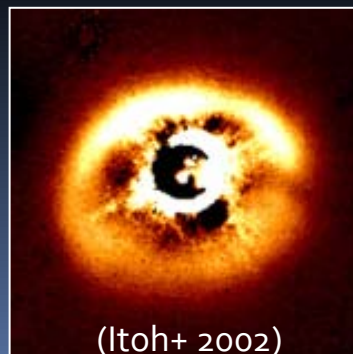
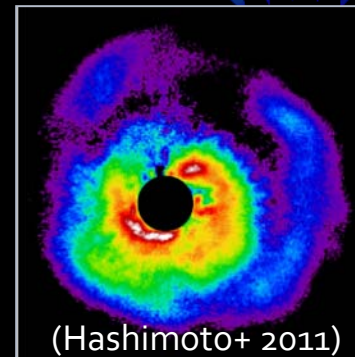
Case 1: AB Aurigae “Spiral Arms”

- Subaru 1.6 μm 画像
- 解像度 $0.''06 = 8 \text{ AU}$
- 半径 22—554 AU
- より星近傍へ
(時間変化の観測にも有利)
- 複雑、非軸対称構造

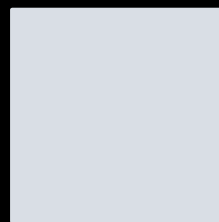
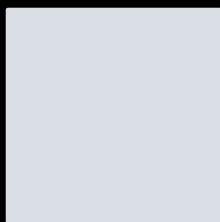
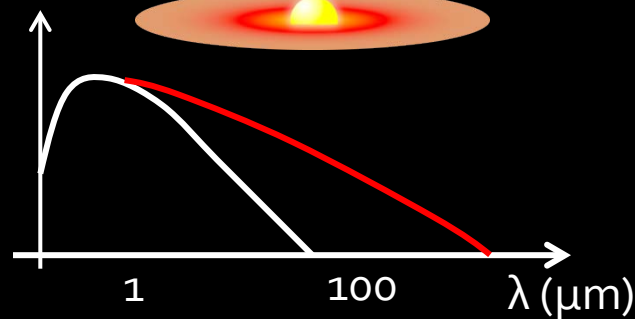
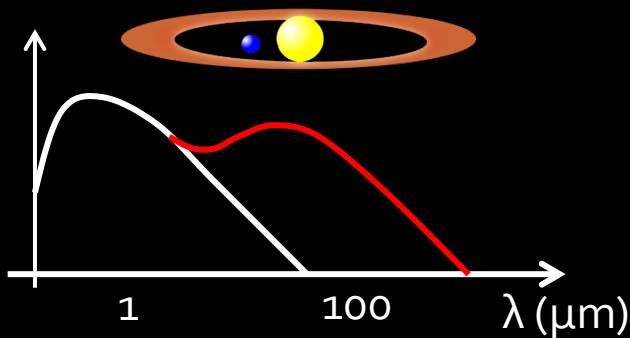
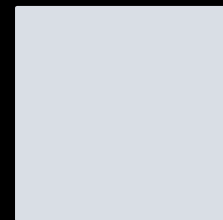
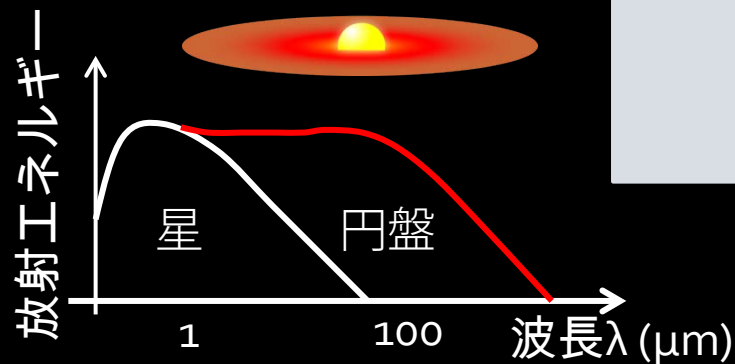
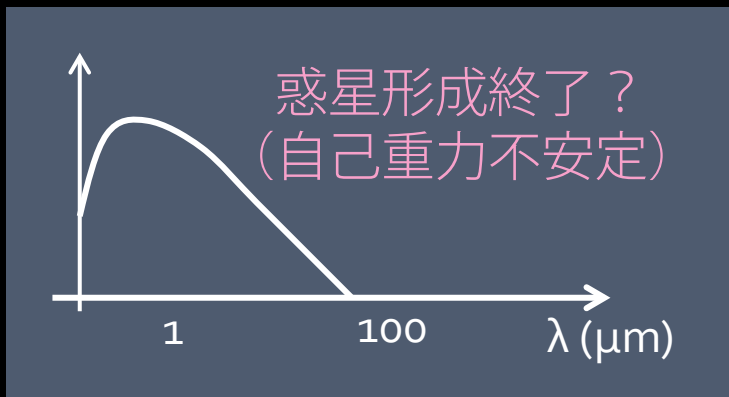


Holes, arms... it's a zoo

- 円盤構造を決めるもの
 - 年齢 (進化)
 - 星の質量
 - 星形成環境(初期円盤質量、大質量星の有無)
 - 伴星の有無
 - 進化のパスは1本ではない
 - 多様性
- (注：サンプル数を増やす必要有)



円盤の進化 (100~1000万年)



時間 t

まとめ

- 円盤の直接撮像（大口径望遠鏡＋補償光学、HST）
 - 10 AU 以下の構造を分解することが可能になった
 - 最近では半径 20～30 AU まで迫れるようになった
 - 豊かな構造が顕著に
 - ◆ 穴、ギャップ、スパイラル...
 - ◆ 惑星起因である可能性を示唆する特徴が多い
 - 軸対称、定常モデルからの脱却が必要
- 今後の展望
 - 円盤内で実際に何が起きているかを知りたい
 - 進化のダイアグラムを描きたい
 - サンプル数を増やす
 - 個々の円盤の詳細観測
 - ◆ 多波長での高分解能観測(ALMA)、時間変化