

惑星系形成：

原始惑星系ガス円盤の構造・化学・進化

中本泰史 (筑波大学)

1. なぜ「原始惑星系ガス円盤」を考える必要があるのか
2. これまでの理解と今後の課題
 - 2-1 円盤内質量輸送
 - 2-2 円盤構造 / 化学
 - 2-3 散逸
3. まとめ

1. なぜ「原始惑星系ガス円盤」を考える必要があるのか

系外惑星学 = 「系外惑星」の研究：超長期的な課題

1. 系外惑星の発見 (済)
2. 系外地球型惑星の発見
3. 系外惑星の諸性質の探求
4. 系外惑星表面 / 内部構造の探求
5. 惑星上の生命の発見
6. 惑星上生命の諸性質の研究

：

惑星の固体成分に注目

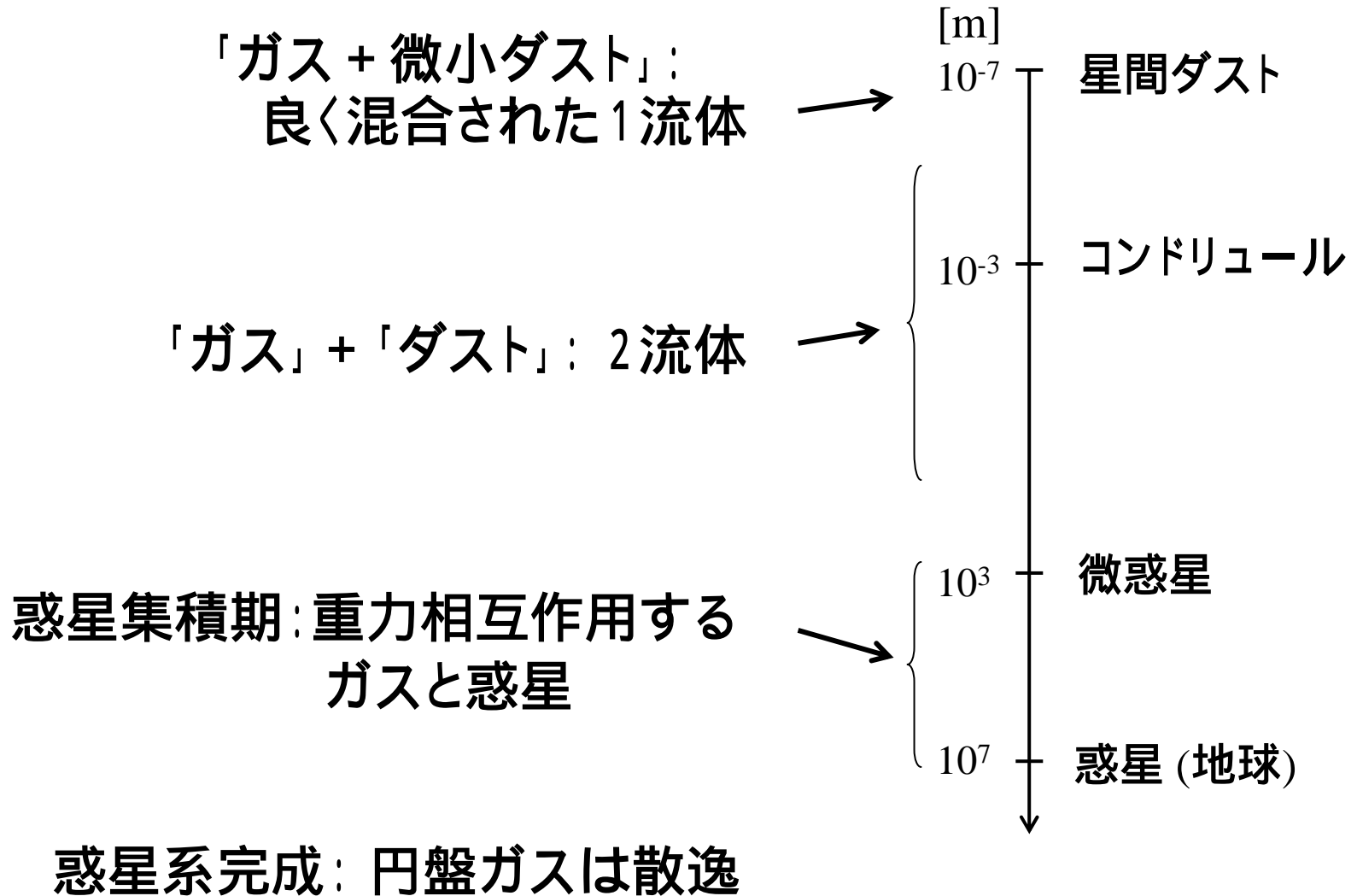
「惑星系」形成論 = 「惑星系」の形成過程の探求

- 太陽系の形成論
- 多様な惑星系の形成論

ポイント！

- * 惑星は集団で形成される 「惑星系」の形成
- * 惑星形成の場は「原始惑星系円盤」

円盤ガスとダスト(惑星)の関係

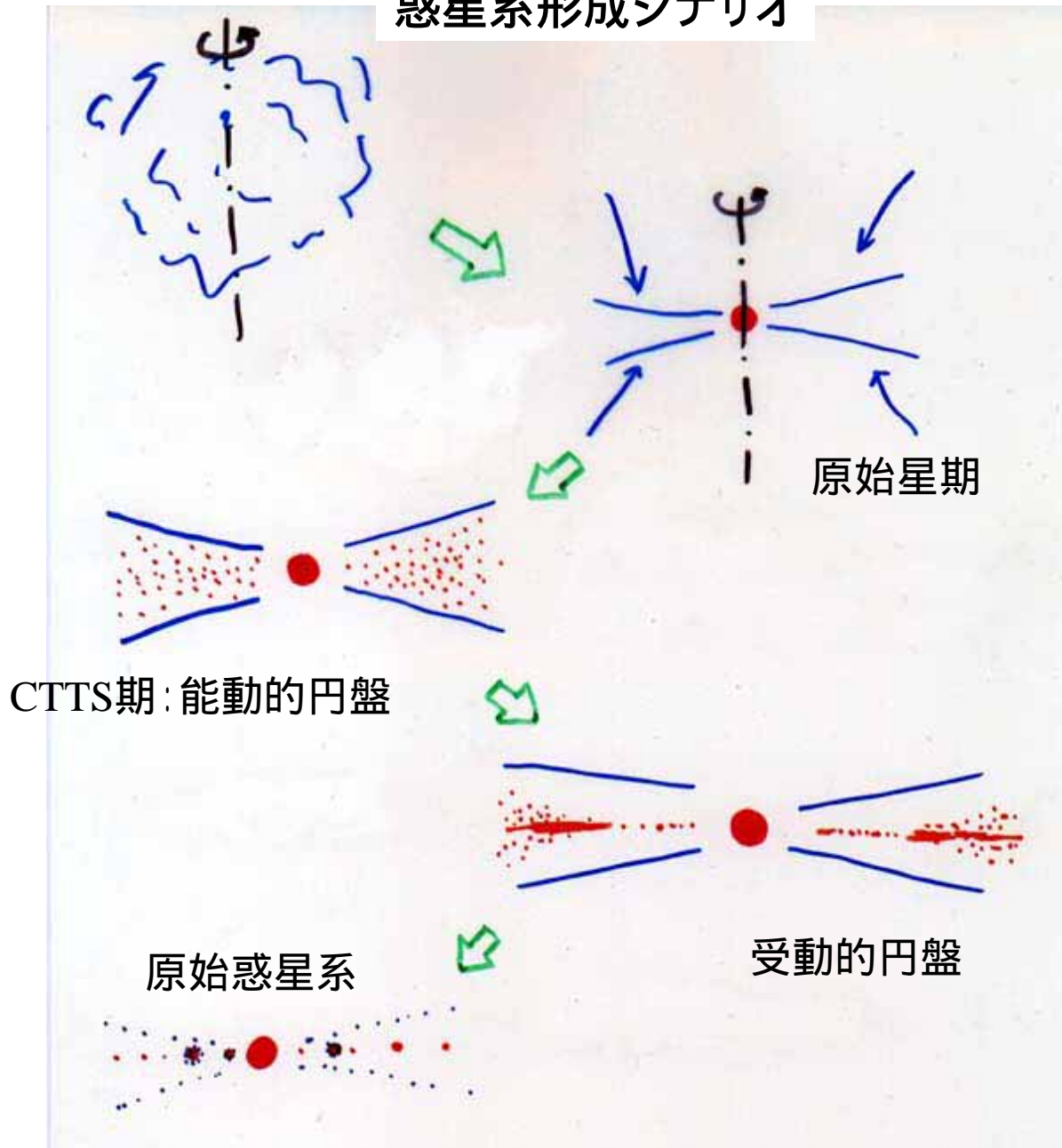


2. これまでの研究による理解

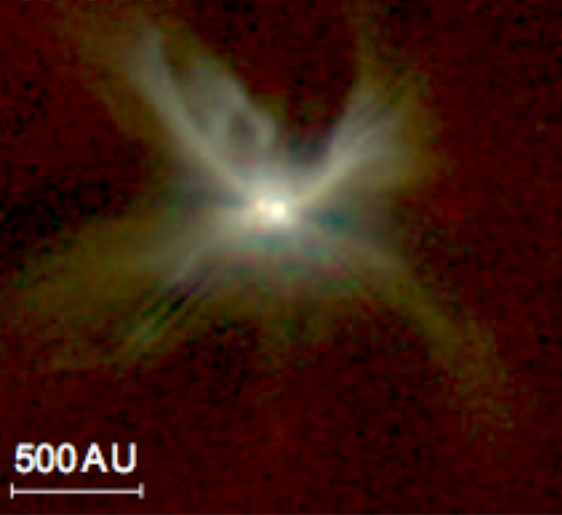
星(惑星系)形成過程研究の現状

		質量	
		中小質量星	大質量星
多重度	単独星		×
	多重星	×	×

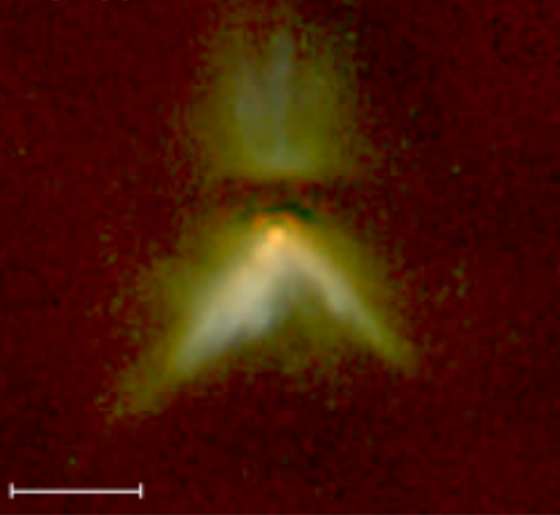
惑星系形成シナリオ



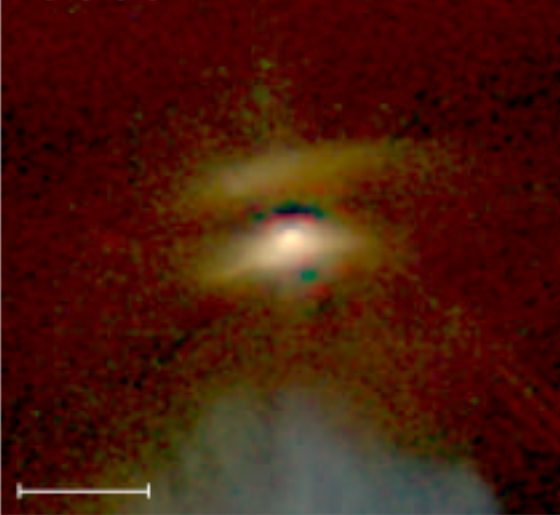
CoKu Tau1



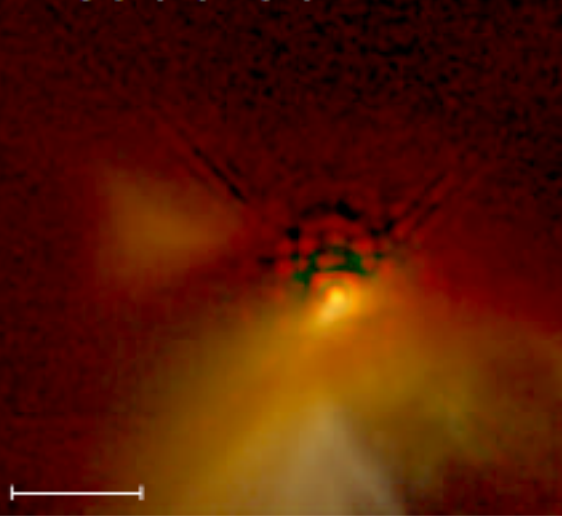
DG Tau B



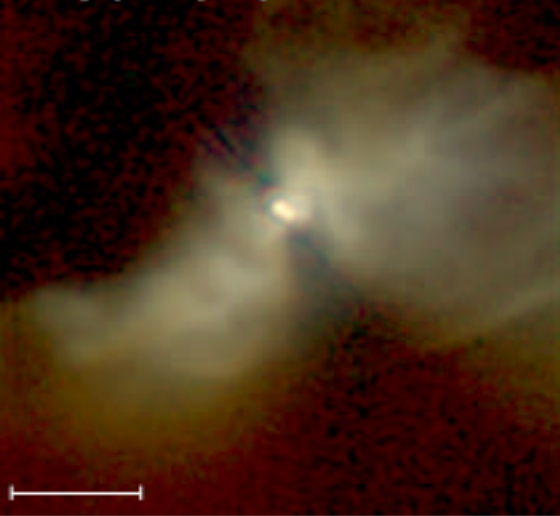
Haro 6-5B



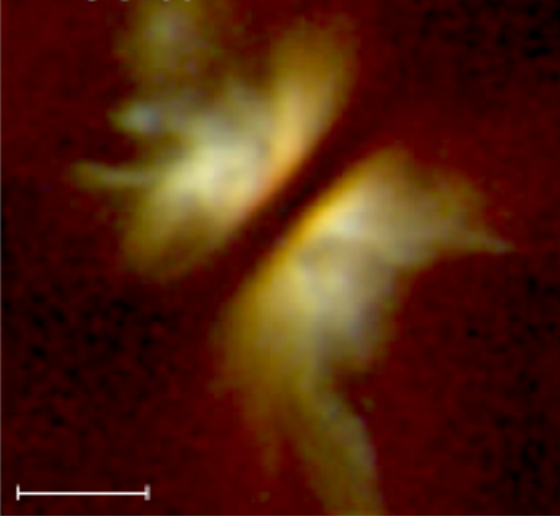
IRAS 04016+2610



IRAS 04248+2612

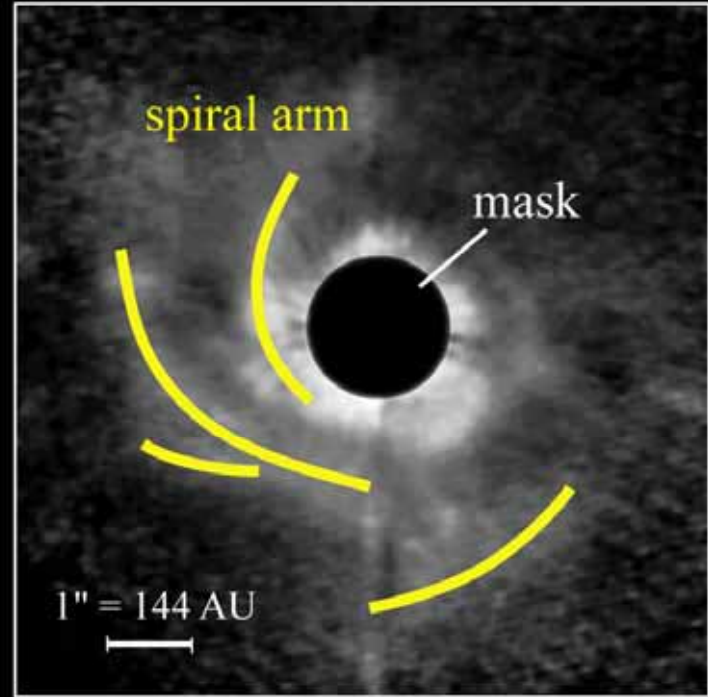
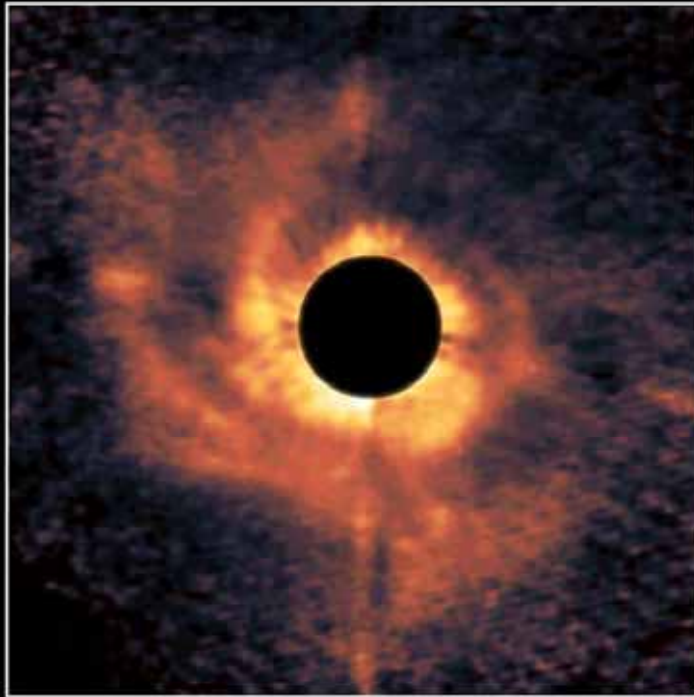


IRAS 04302+2247



**Young Stellar Disks in Infrared
Hubble Space Telescope • NICMOS**

AB Aur



Protoplanetary Disk Surrounding the Star AB Aurigae

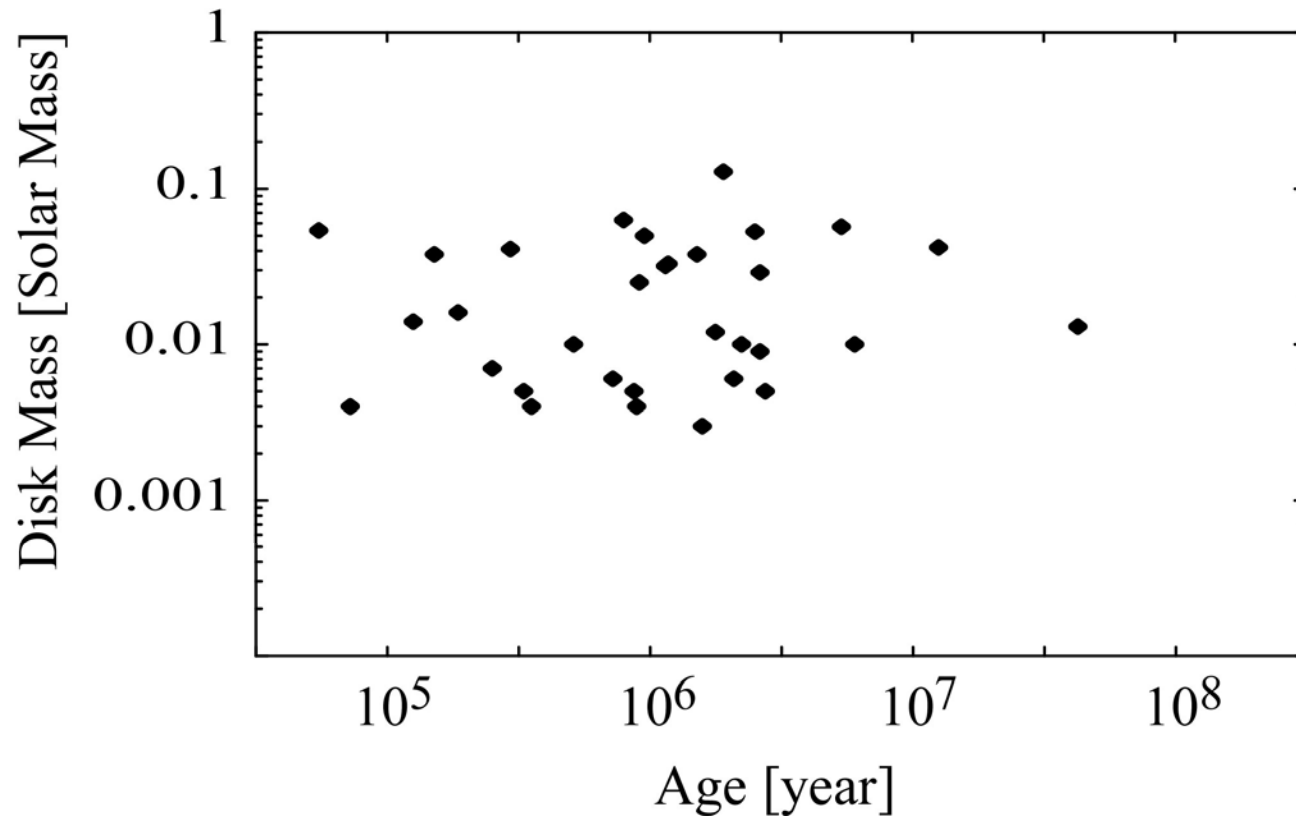
Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan

Copyright © 2004 National Astronomical Observatory of Japan. All rights reserved.

CIAO+AO (H)

April 18, 2004

円盤質量 - 年齢 (ダスト連続波観測から推測されたガス質量)



Beckwith et al. 1990

キーポイント

[1] 質量の移動

質量(ガス, ダスト)の空間分布を決める
惑星系の骨格を決める

[2] ガス円盤の構造 / 化学

ガス密度, 温度, 組成
惑星の特性を決める

[3] 散逸

ガスが無くなる機構, 時期, 場所
最終的に, 惑星および惑星系の姿を決める

[1] 円盤降着(円盤内質量移動)を引き起こす原因

- * MRI (磁気回転不安定)
- * 重力不安定に基づく渦状腕の発生と,
それによる重力トルク
- * 木星等の惑星による密度波の生成と,
それによる重力トルク

現在はMRIが有力視されている。

しかし, MRIが作用するためにはある程度の電離度が必要

Dead Zoneの存在の示唆

重力トルク

- 非軸対称な重力により，角運動量が輸送される
- 非軸対称な密度分布が形成されるためには，ある程度重い円盤の自己重力が必要

$$Q \equiv \frac{c_s \Omega}{\pi G \Sigma} \approx \frac{H}{R} \frac{M_*}{M_{\text{disk}}}$$

($Q < 1$ のとき，軸対称モードで重力不安定)

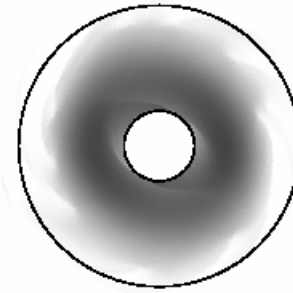


FIG. 10a

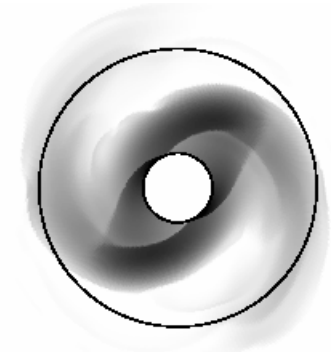


FIG. 10b

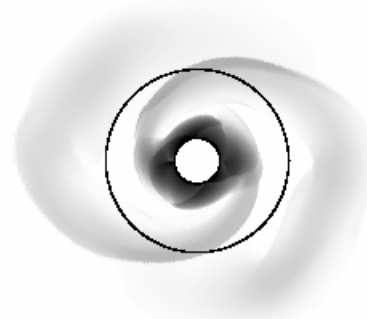


FIG. 10c

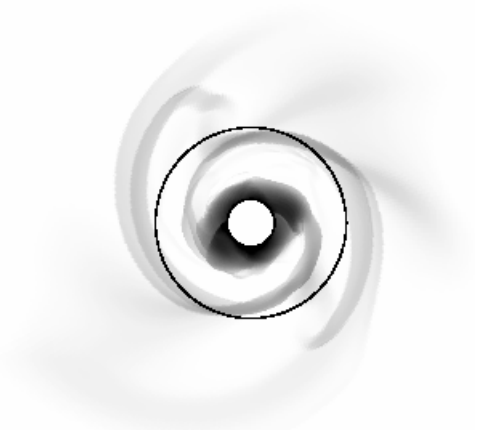
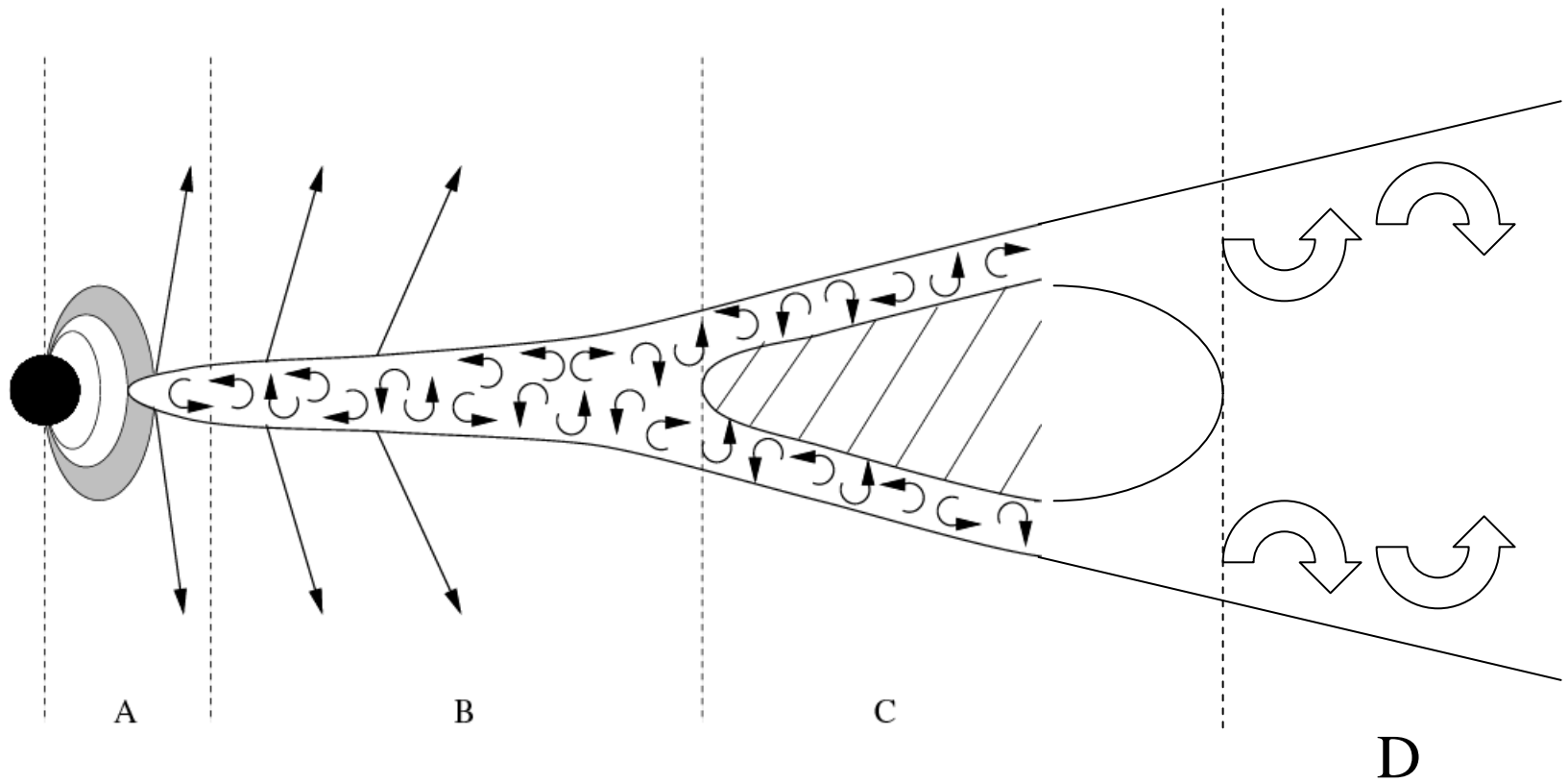


FIG. 10d

Laughlin et al. 1997

重力トルクは，重い円盤でのみ作用する

MRI乱流による円盤降着とDead Zone



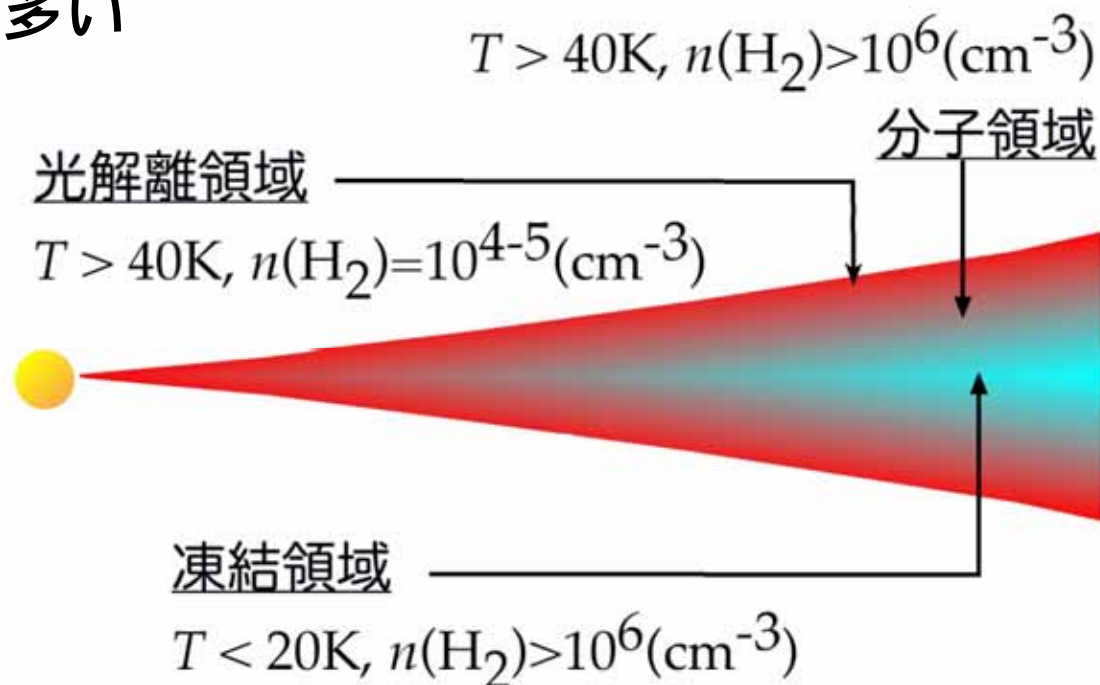
課題：円盤降着を引き起こす機構の解明

- ・ MRIの可能性について
円盤の温度, 密度, 電離度を観測
乱流運動の検出
- ・ 自己重力不安定について
円盤の温度, 密度を観測

[2] ガス円盤の構造 / 化学

- * 電波観測 --- 100AU以遠, 低温領域のガス
多くのガス分子がダストに凍結
- * 赤外観測 --- 1AU以内, 高温領域のガス

- ・ 分子雲の場合より有機物が1-2桁少ない
- ・ ラジカル分子が多い



課題

- ・ 分子組成の空間分布
高い空間分解能(0.1-0.01秒角)での観測
- ・ 多くの分子種の検出
高い感度の実現
- ・ 複数の遷移の観測
 H_2 , CO , H_2O , CH_4 , H_3^+ など(赤外)
ガス温度, 密度の直接推定

[3] 円盤ガスの散逸

考えられる散逸の機構

1. 円盤降着
2. Photoevaporation
3. 星風による吹き飛ばし

観測的にはほとんどわかっていない

A. Disk Accretion

$$\nu = \alpha c_s H$$

$$t_\nu \approx \frac{r^2}{\nu} \approx 10^5 \text{ yr} \left(\frac{\alpha}{10^{-2}} \right)^{-1} \left(\frac{r}{10 \text{ AU}} \right) \quad (\text{標準円盤モデルの場合})$$

- r が大きくなると，時間がかかる

B. Photoevaporation

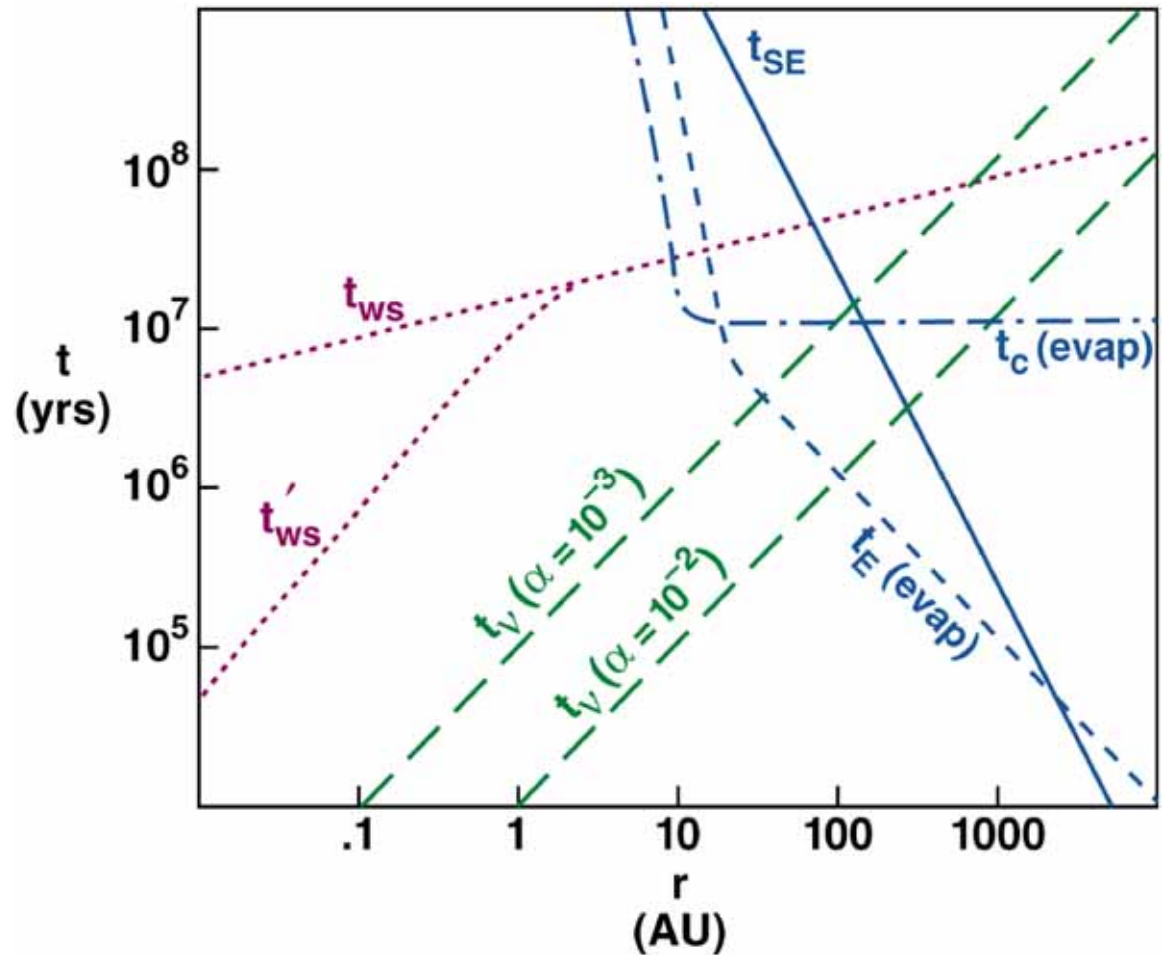
基本原理：

- EUV ($> 13.6 \text{ eV}$) により，Hが電離・加熱される： $T \sim 10^4 \text{ K}$

- $r_g \approx \frac{GM_*}{c_s^2}$ より遠方では，ガスの熱エネルギーが重力エネルギーよりも大きいので，ガスが熱的に流出する

$$r_g \approx \frac{GM_*}{c_s^2} \approx 10^{14} \left(\frac{M_*}{M_{\text{sun}}} \right) \text{ cm}$$

- 10 AU 以下では，
disk accretion が効く
- 10 AU以上では，
photoevaporation
by external star
が効く



$$t_{ws}' : \dot{M}_w \approx 10^{-6} \left(\frac{10^5 \text{ yr}}{t} \right) M_{\text{sun}} \text{ yr}^{-1} \text{ を仮定}$$

t_E (evap) : Trapezium condition を想定

課題

円盤ガス散逸の、時期、場所を観測的に明らかにする

空間分解した観測 --- 0.1-0.01秒角以上の解像度

輝線の観測 --- H₂の回転遷移など

JELT, 地上赤外干渉計など(特定の輝線)
ALMA (有望)

3. まとめ

原始惑星系ガス円盤の観測

[1] 質量の移動

質量(ガス, ダスト)の空間分布を決める

惑星系の骨格を決める

[2] ガス円盤の構造 / 化学

ガス密度, 温度, 組成

惑星の特性を決める

[3] 散逸

ガスが無くなる機構, 時期, 場所

最終的に, 惑星および惑星系の姿を決める