

原始惑星系円盤へ後期降着した 星間ガスは中心星に到達し得るか？ ：内側への質量輸送 VS 質量損失

京都大学 天体核研究室 D1 大山 航

共同研究者：

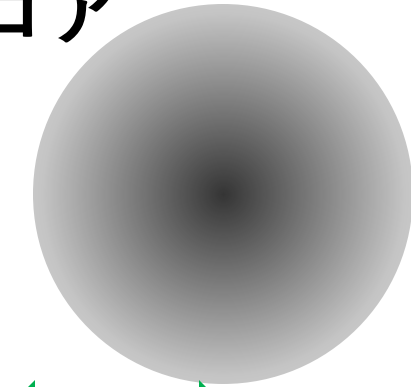
ミラノ大学 仲谷 峻平

京都大学 細川 隆史

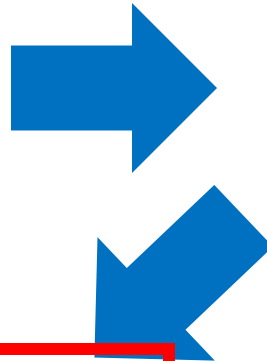
デュースブルクエッセン大学 三谷 啓人

円盤進化の従来のモデル

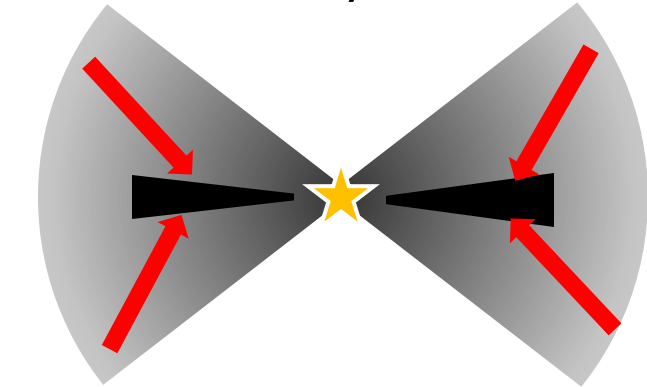
分子雲コア



~ 10^5 au



クラス0/I円盤



~ 10^{3-4} au

~数十万年

クラスII円盤



~ 10^2 au

~数百万年

クラスIII円盤



>1000万年

- クラスI円盤以前はエンベロープなど外部からの降着が存在
- クラスII以降は外部降着は止む

現状のクラスII円盤進化の理解

磁気円盤風

光蒸発

降着

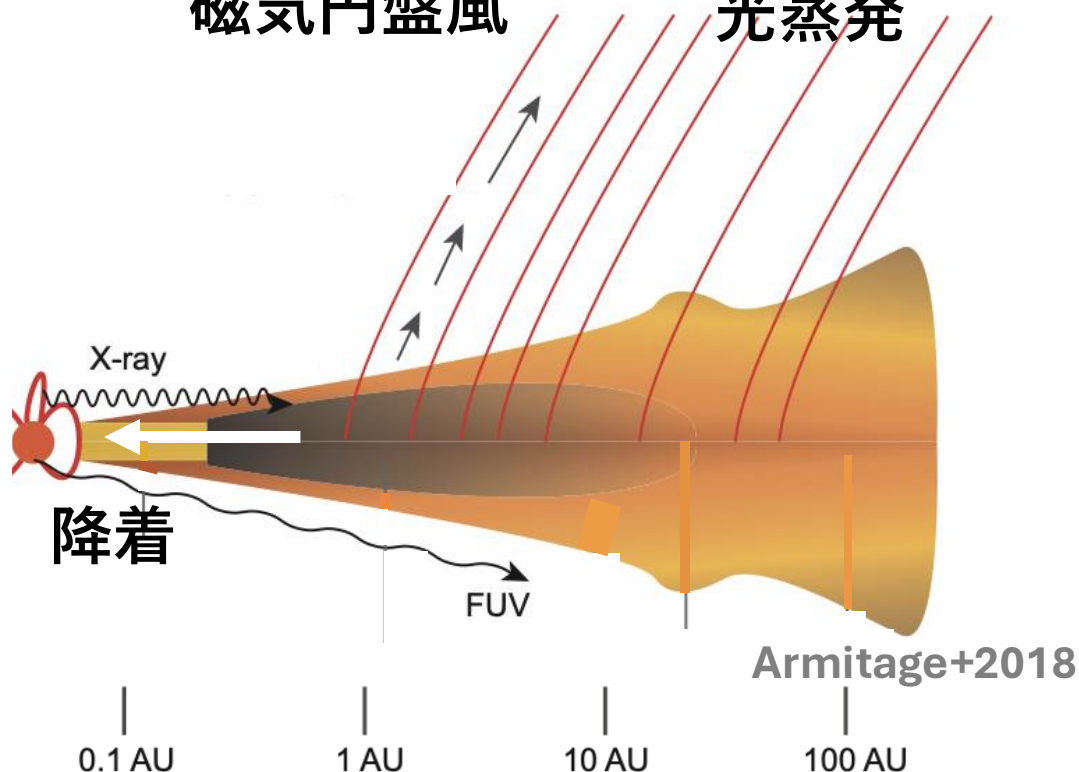
- 乱流粘性or磁気円盤風
での角運動量輸送で駆動

磁気(MHD)円盤風

- 磁場による円盤風

光蒸発

- 電磁波でガスがあぶられ、
散逸する効果



降着や光蒸発によって散逸 Manara+2023 etc

降着は乱流粘性 or MHD円盤風のトルクで駆動

どちらが支配的かは未だ重要な未解決問題

多くの理論研究において外部降着は無視。

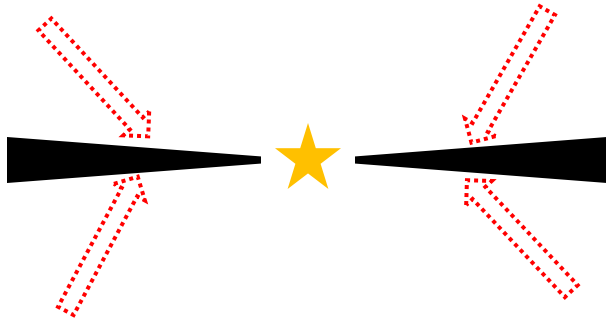
後期星間ガス降着

従来クラスII円盤は孤立系とされてきたが、
最近この段階で**星間ガス降着の兆候**が観測されている。

→後期星間ガス降着

古典的描像

クラスII円盤（～数百万年）



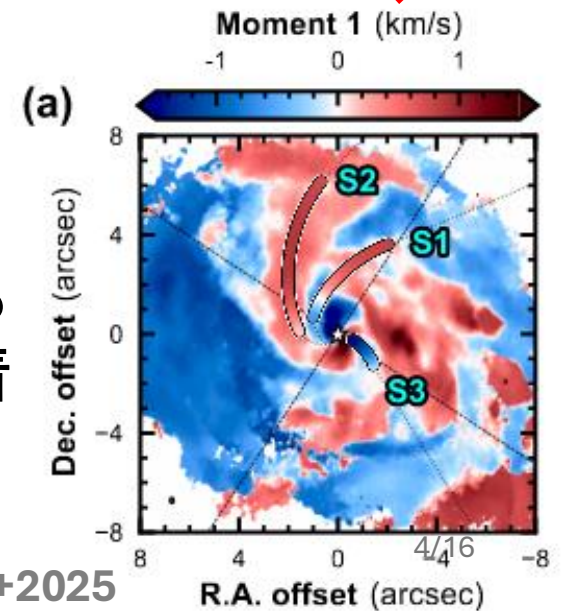
外部からの降着がない
孤立系

最近の観測



e.g. AB Aurigae

この段階でも
星間ガス降着
があるかも



後期星間ガス降着の重要性

- 円盤進化の描像を大きく変える。

円盤寿命が伸びるかも？

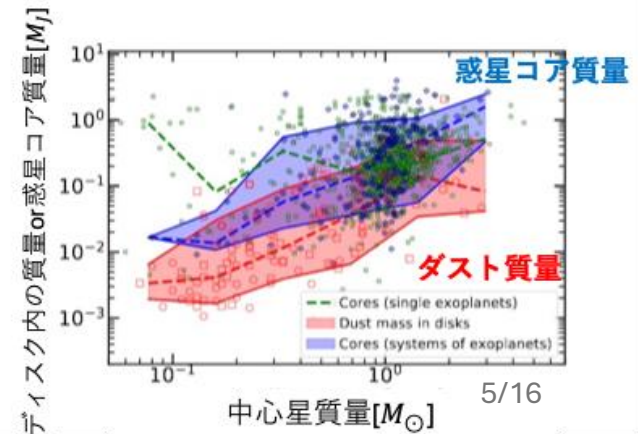
円盤ガス分布が変わるかも？

円盤の化学組成に影響？

- 惑星形成のための材料の供給

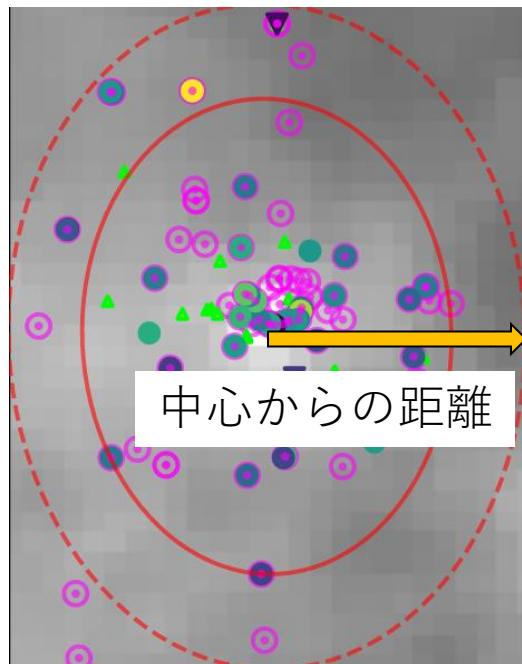
近年課題になっている、原始惑星系円盤に惑星系を作る十分な材料がないことへの解決策？

Manara+2018



後期星間ガス降着率と中心星降着率 に相関があるかも? Winter+2024a

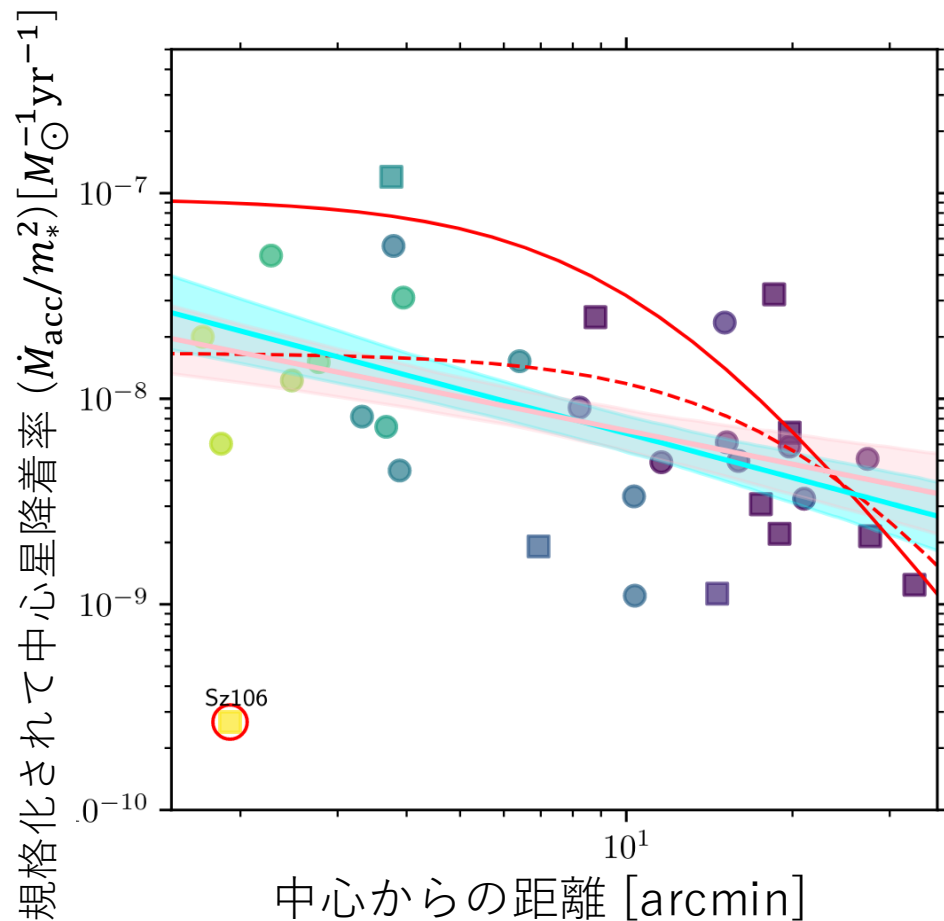
Lupus 3



星間ガス密度 \uparrow (中心)

\rightarrow 中心星降着率 \uparrow

Winter+2024a



降着した星間ガスが中心星降着すると考えると整合的

後期降着した星間ガスは 中心星に到達できるか？

磁気円盤風

光蒸発

降着

星間ガス降着

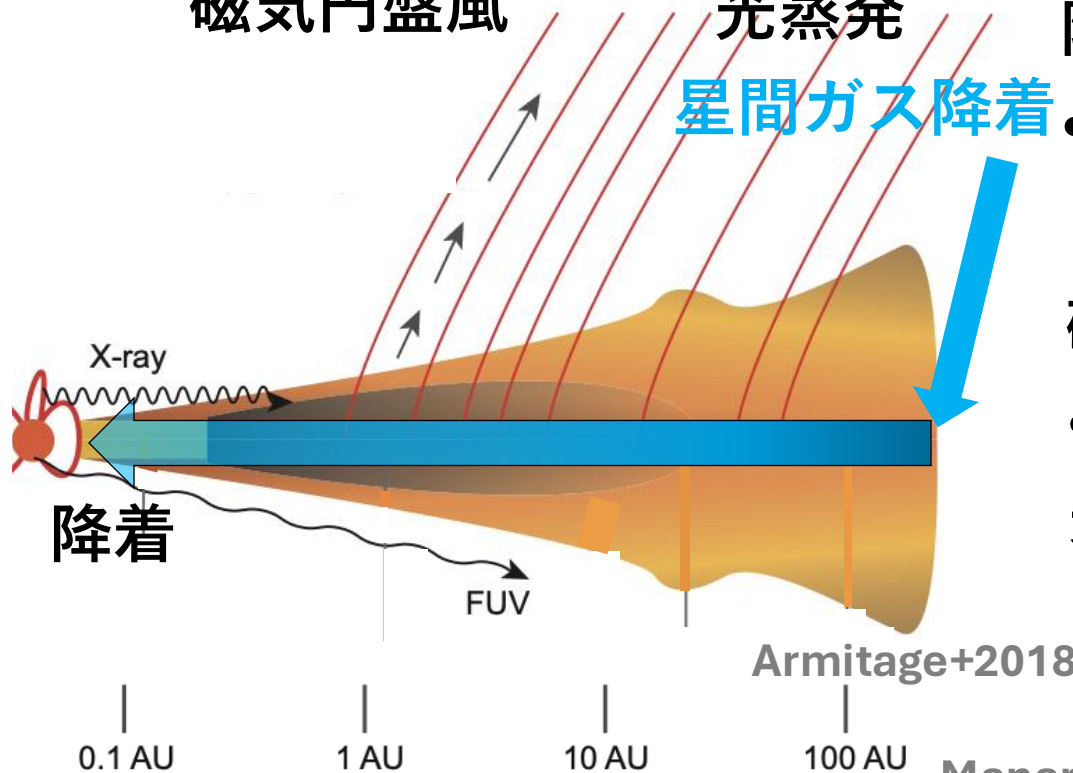
...乱流粘性,磁気円盤風トルク
での角運動量輸送で駆動

磁気円盤風

...磁場による円盤風

光蒸発

...電磁波でガスがあぶられ、
散逸する効果



光蒸発などでガス散逸が起こる

→ 星間ガス降着したガスも散逸し中心星へ到達しないかも

降着した星間ガスが中心星へ到達し、Winter+2024の結果が再現できる条件は？

計算方法

円盤面密度進化を**1次元モデル**で解き、
星間ガスが中心星に到達する条件を明らかにする

マスター方程式

Lynden-bell+Pringle 1974, Clarke+ 2001, Suzuki+ 2016

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{2}{r \Omega} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \Sigma \overline{\alpha_{r\phi}} c_s^2 \right) + r^2 (\rho c_s^2)_{\text{mid}} \overline{\alpha_{\phi z}} \right\} \right]$$

粘性による降着 円盤風による降着

$$- \underbrace{C_w (\rho c_s)_{\text{mid}}}_{\text{円盤風による質量損失}} - \underbrace{\dot{\Sigma}_{\text{photo}}(L_X, L_{\text{FUV}}, \Phi_{\text{EUV}})}_{\text{光蒸発率}} + \underbrace{\dot{\Sigma}_{\text{infall}}(r)}_{\text{外部からの星間ガス降着}}$$

Σ ; 面密度, ρ ; 密度, c_s ; 音速,

$\overline{\alpha_{r\phi}}$; 乱流粘性の α , $\overline{\alpha_{\phi z}}$; 磁気円盤風の α ,

C_w ; 磁気円盤風の質量損失率を表すパラメータ

外部からの
星間ガス降着
250au内に一定に
降着させる。

中心星質量: $0.2 M_{\odot}$, 初期円盤質量: 中心星質量の1%

計算方法

パラメータ

* 星間ガス降着率(\dot{M}_{infall})

$$\dot{M}_{\text{infall}} = 5 \times 10^{-10} M_{\odot}/\text{yr} \sim 5 \times 10^{-7} M_{\odot}/\text{yr}$$

* 粘性パラメータ α ($\alpha_{r\phi}$)

粘性が強い場合: $\alpha_{r\phi} = 8 \times 10^{-3}$

粘性が弱い場合: $\alpha_{r\phi} = 8 \times 10^{-5}$

* MHD円盤風の強さを表す α ($\alpha_{\phi z}$)

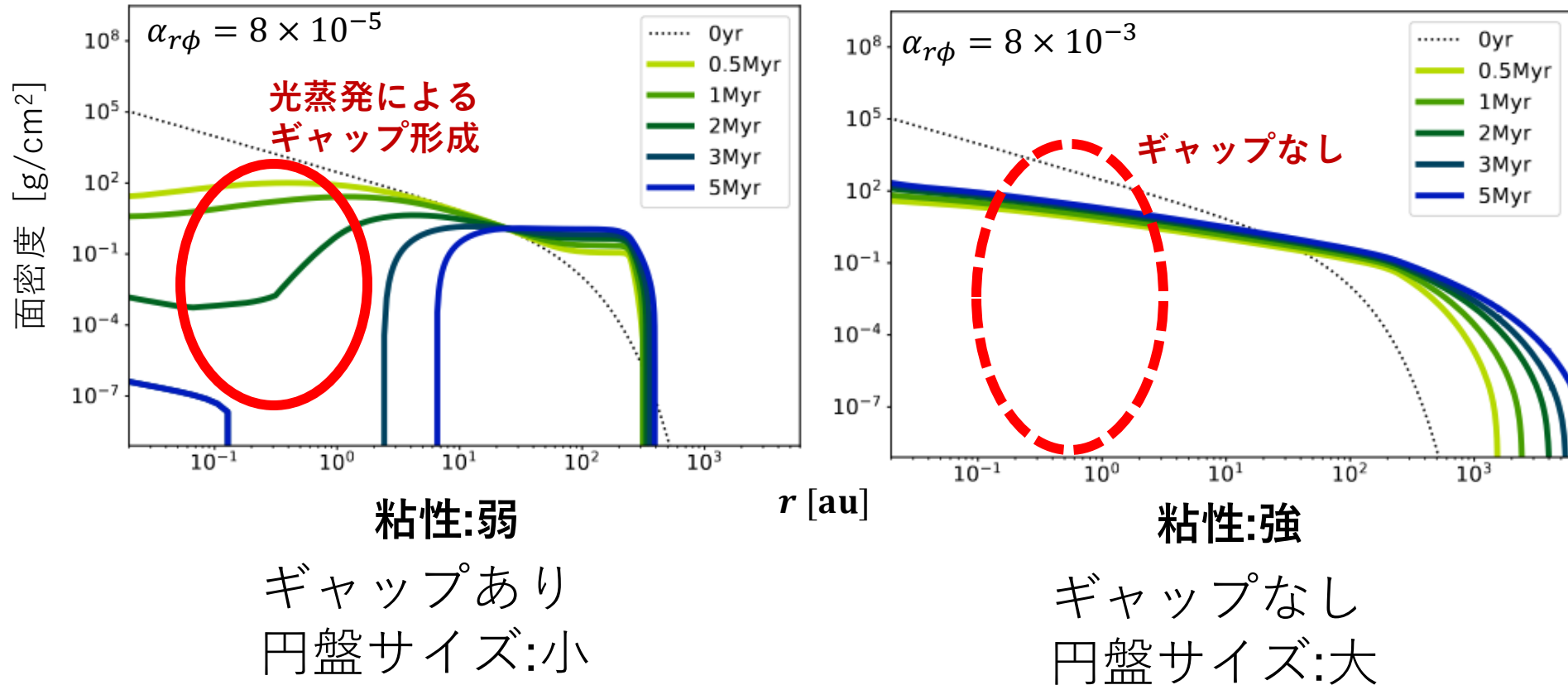
面密度(Σ)依存する場合: $\alpha_{\phi z} = \min \left[10^{-5} \left(\frac{\Sigma}{\Sigma_{\text{initial}}} \right)^{-0.66}, 1 \right]$

強い場合: $\alpha_{\phi z} = 10^{-3}$

面密度進化

星間ガス降着の面密度進化への具体的影響のパラメータによる違いを見る。

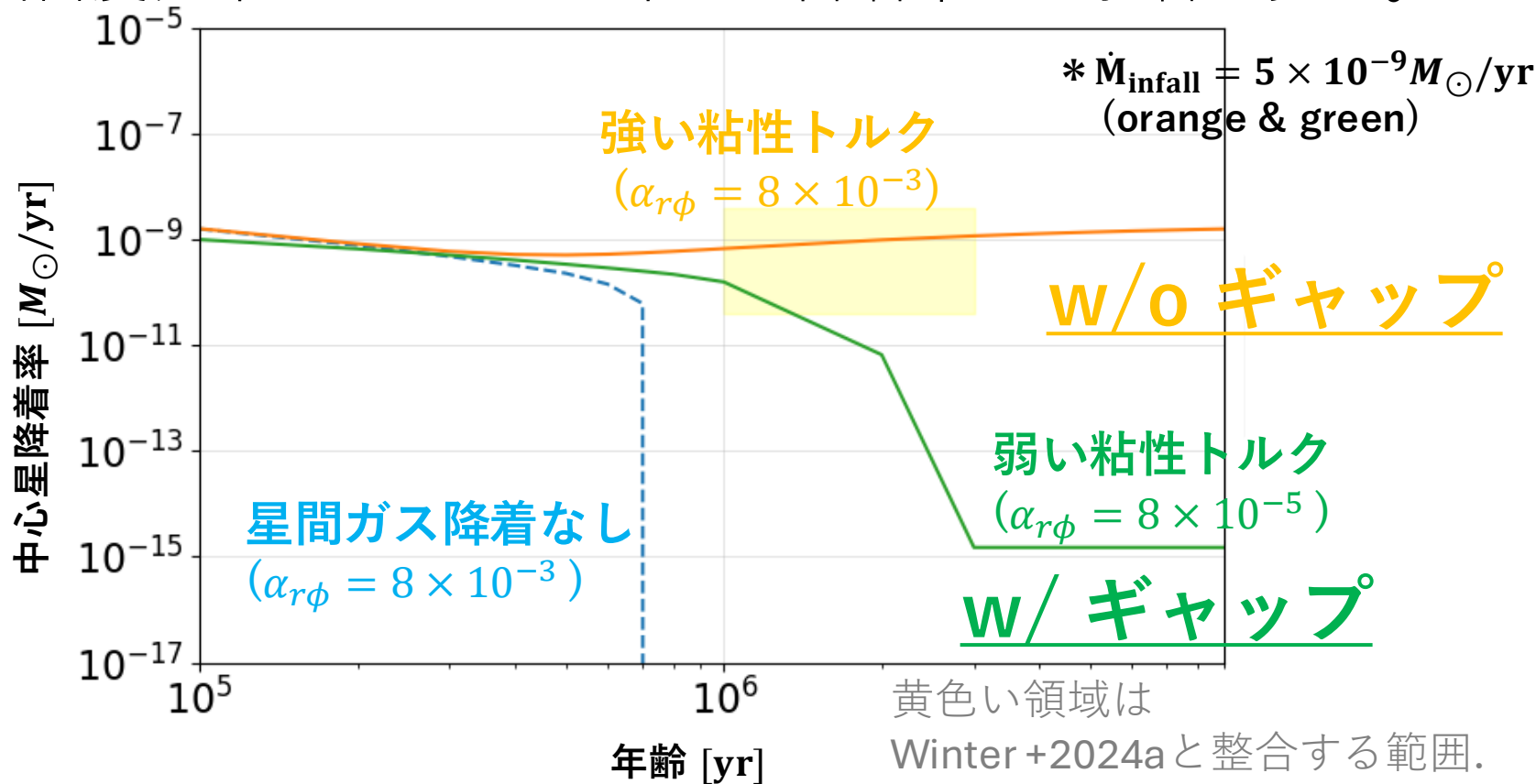
$$\dot{M}_{\text{infall}} = 5 \times 10^{-9} M_{\odot}/\text{yr}$$



粘性が弱い場合、
ギャップができやすい&円盤サイズが小さくなる

中心星降着率の時間進化

円盤面密度分布の違いによる中心星降着率への影響を見る。



* ギャップ形成されているモデルは中心星降着率が桁で小さい
→降着率の強化には少なくともギャップがないことが必要。

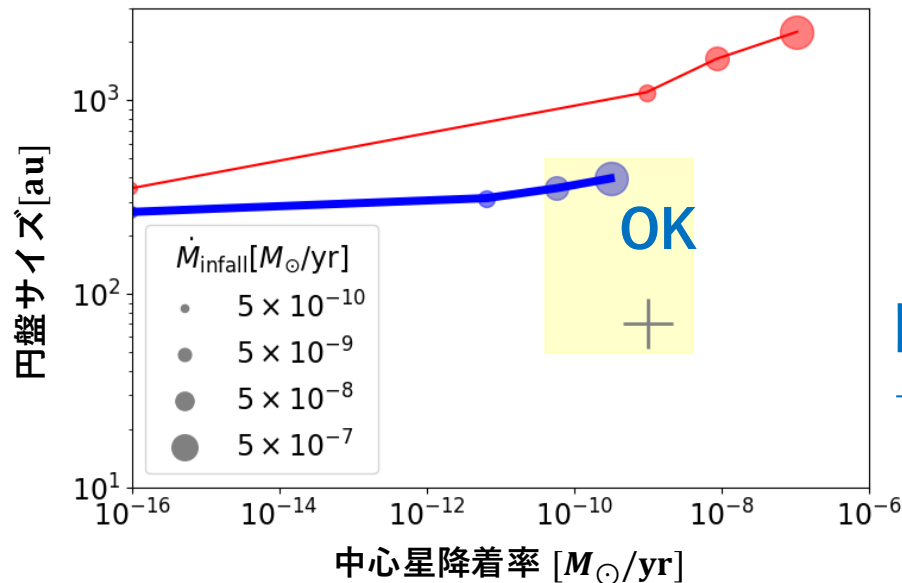
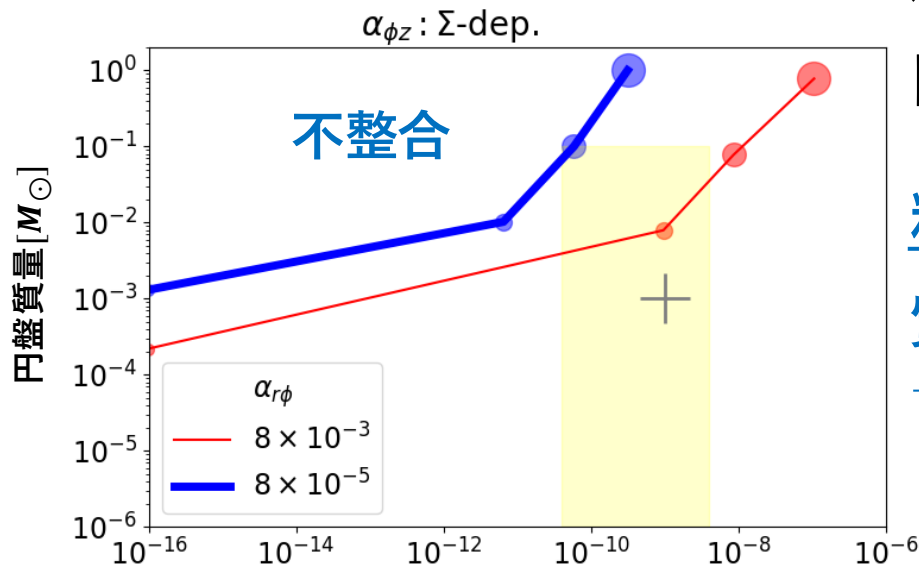
観測との比較

他の条件を明らかにするため、
円盤質量&半径の観測値と比較。

粘性が弱い場合

質量輸送が非効率

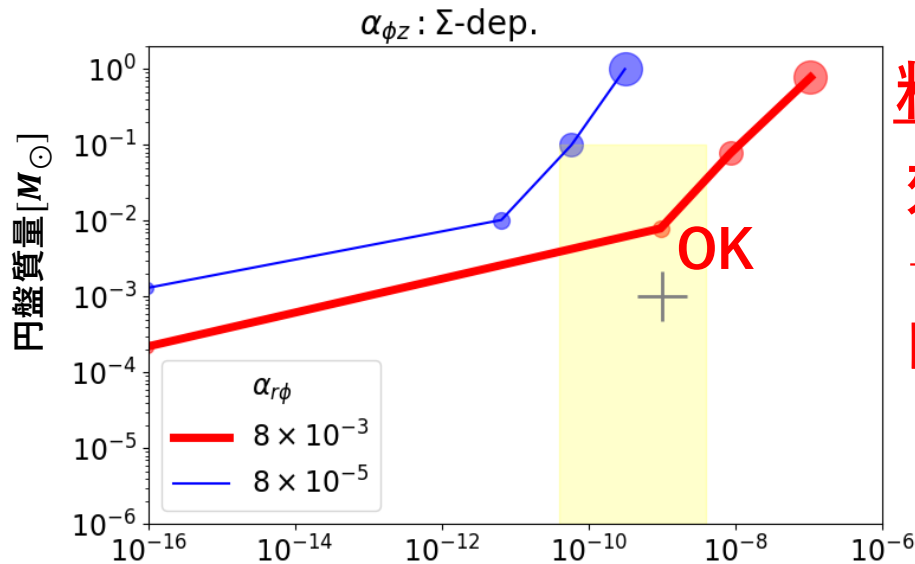
→十分な降着率のためには、
非現実的な大質量円盤が必要



円盤はそこまで大きくなり
→観測と一致

黄色い領域(Winter+ 2024a,b, Ansdell+2018,
Deng+2025, Tabone+2025).

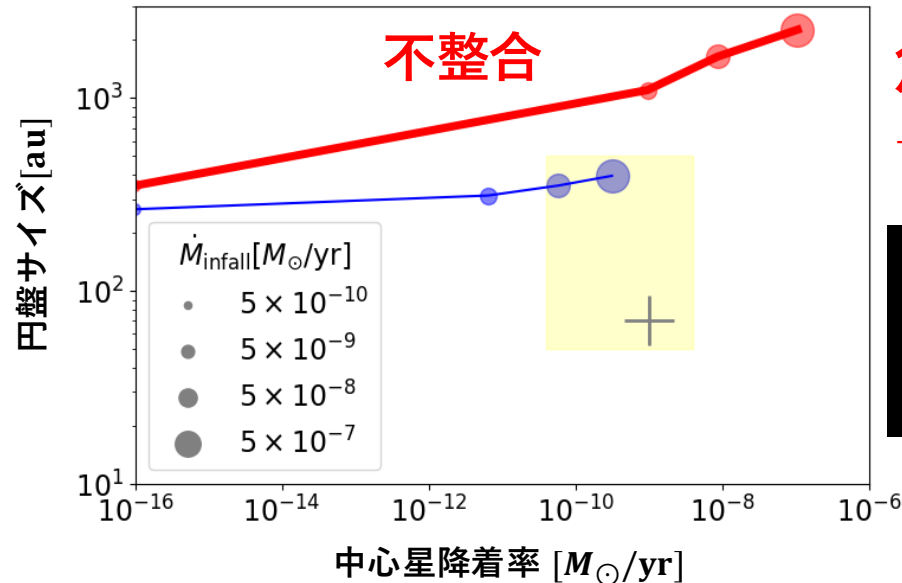
観測との比較



粘性が強い場合

効率的な質量輸送

→ 観測と一致する円盤質量の範囲内で、十分な降着率を実現



角運動量が円盤外側へ

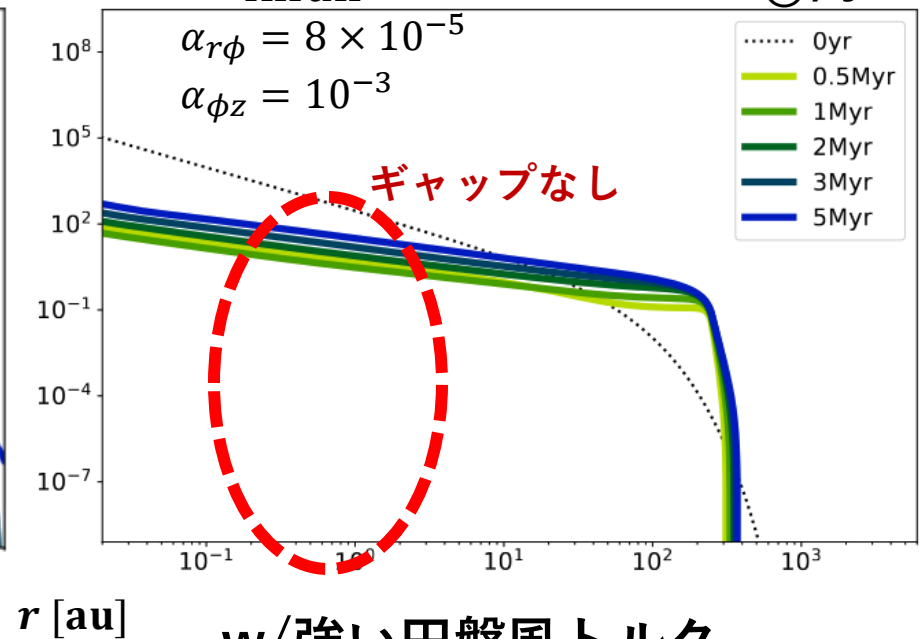
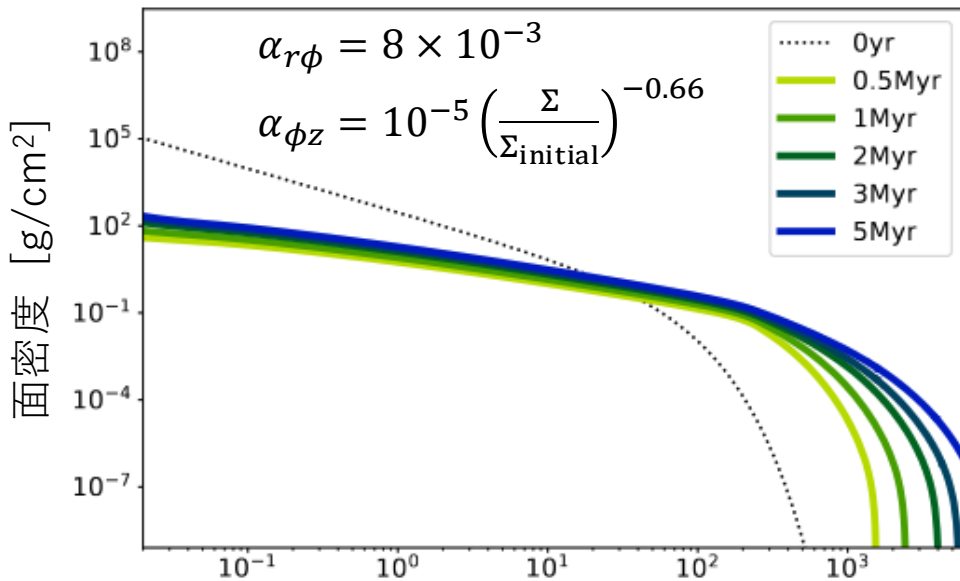
→ 円盤半径が大きくなりすぎる。

粘性で質量輸送するモデルでは
再現できない！

→ 粘性以外での質量輸送が必要

面密度進化 (w/ 強いMHD円盤風トルク)

$$\dot{M}_{\text{infall}} = 5 \times 10^{-9} M_{\odot}/\text{yr}$$

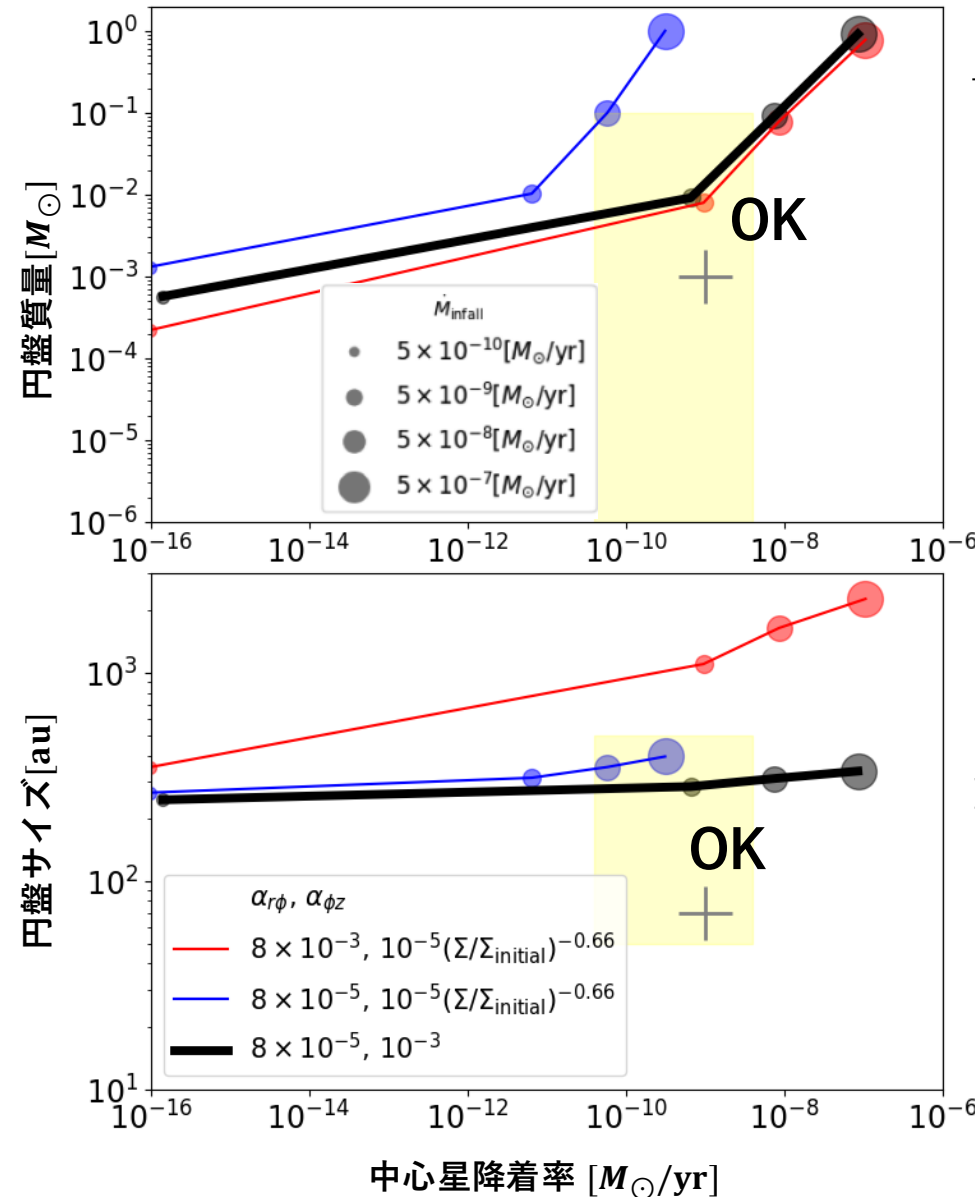


ギャップなし
&
円盤半径:大

w/強い円盤風トルク
ギャップなし
&
円盤半径:小

磁気円盤風トルクが強い場合、
ギャップができにくく、かつ円盤半径が小さくなる

観測との比較



強いMHD円盤風トルクの場合

星間ガス降着率をうまく取ると

$$(\dot{M}_{\text{infall}} = 5 \times 10^{-9} M_{\odot}/\text{yr})$$

→ 円盤質量 **OK**

円盤半径 **OK**

中心星降着率 **OK**

強い円盤風トルクだと観測と合致するパラメータ範囲内で星間ガス降着が中心星降着率に影響を及ぼすことが可能。

また、この時供給されるダスト質量は、

$$\dot{M}_{\text{infall,dust}} \times t_{\text{duration}}$$

$$\sim 5 \times 10^{-9} M_{\odot}/\text{yr} \times 0.01 \times 2\text{Myr}$$

$0.2 M_{\odot}$ 程度の惑星系に十分なダストが供給される。

まとめ

- Lupusで示唆された星間ガス降着によって中心星降着が増大される現象を再現するには強い磁気円盤風トルク ($\alpha_{\phi z} = 10^{-3}$) が必要。
→ 角運動量輸送が**磁気円盤風で支配**されていることを示唆。
- 観測値を再現する後期降着率だと、惑星系を形成するのに十分なダスト量が供給される。

粘性	円盤風トルク	中心星降着率	円盤質量	円盤半径
強い	Σ -dep	✓	✓	
弱い	Σ -dep	✓		✓
弱い	強い	✓	✓	✓