

初代星・初代銀河研究会2024 11/13 14:10~

@信州大学 長野（工学）キャンパス 太田国際記念館

始原ガスによる ガスリッチデブリ円盤の 形成可能性

発表者：京都大学 M2 大山 航

共同研究者：

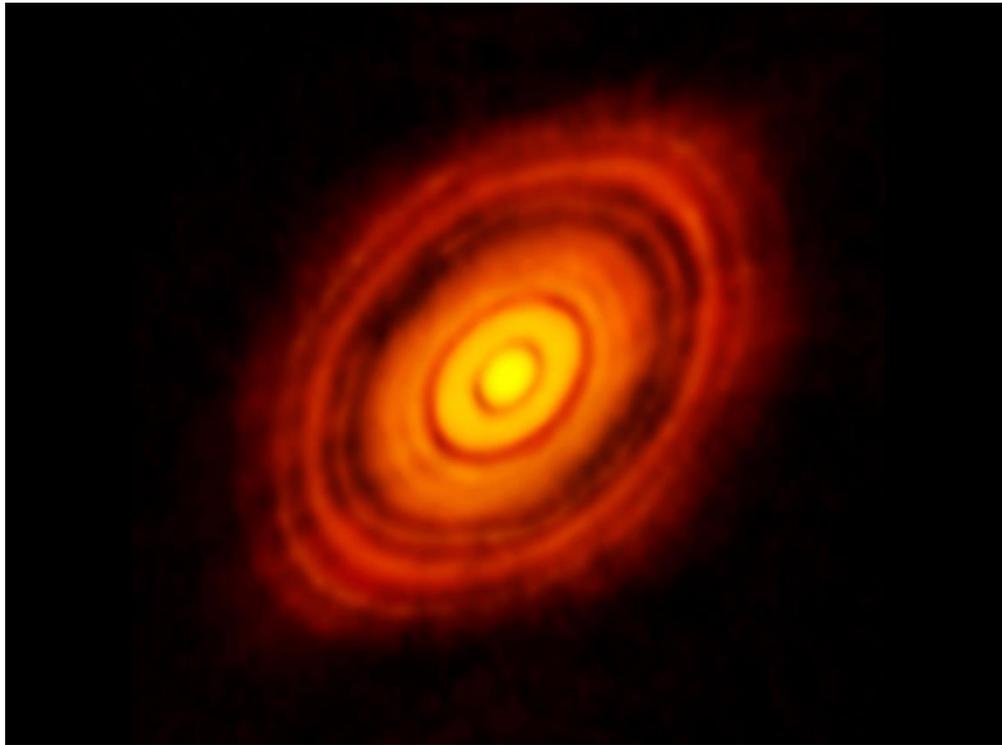
ミラノ大学 仲谷 峻平

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

原始惑星系円盤(Protoplanetary disks; PPDs)

- 数百万歳までの年齢の恒星の周りに観測される
- **ガスとダストによって構成される円盤**



分子雲コアの崩壊の過程で
一部のガスは円盤状に分布。

→**原始惑星系円盤(PPDs)**

PPDsのガス成分は
時間と共に散逸(後述)

惑星形成の舞台

Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

おうし座HL星

デブリ円盤

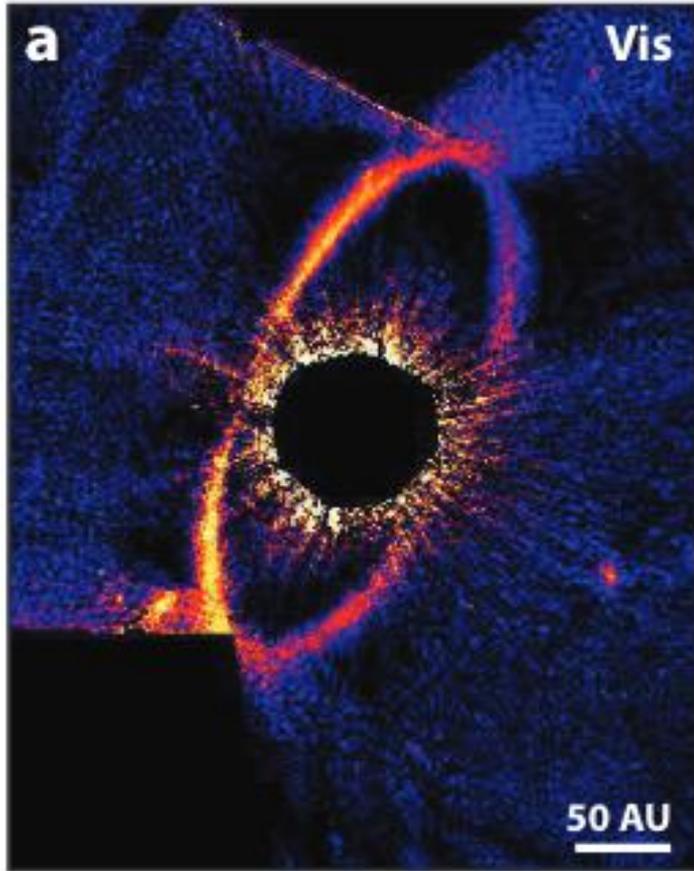
PPDsが進化しガス成分が散逸した
... 成れの果ての**ダストが支配的**な円盤

cf:カイパーベルト

1984年にベガ周りで初めて発見

PPDsの散逸後にみられる構造

ダストがリング状に分布
(微惑星衝突などで2次的に供給)

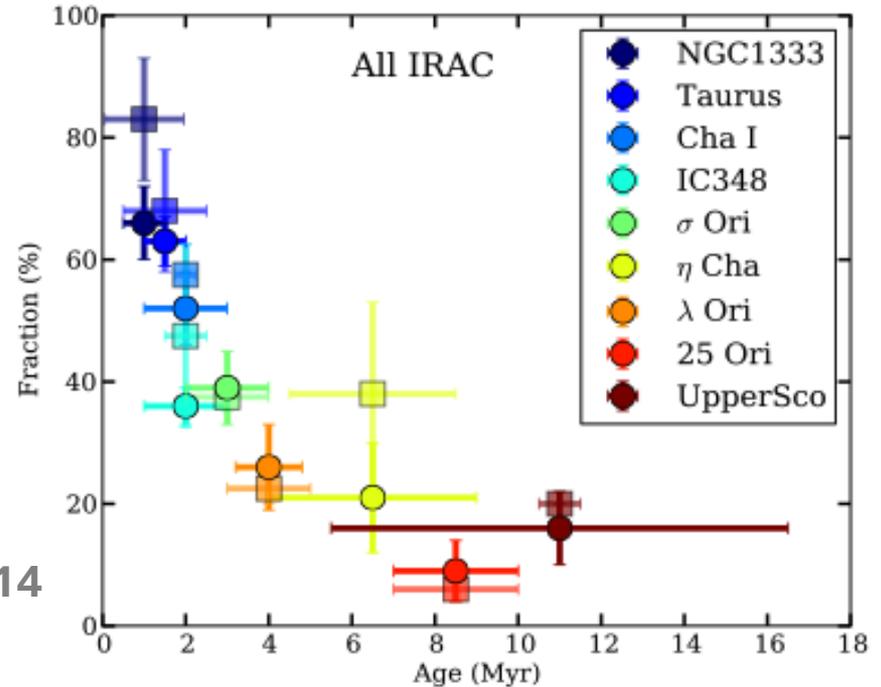


Herschel 70- μ m, ALMA 1.3mm; Hughes+2018 Kalas+ 2013

Fomalhaut

ガシリッチデブリ円盤

通常、原始惑星系円盤(PPDs)は数Myrで散逸



A. Ribas+ 2014

しかし、近年**10Myr以上の年齢**にも関わらず**ガスを保持するデブリ円盤**が発見されている。(20天体ほど、主に早期A型星周り)

Kral+ 2020, Hughes+ 2017

↑
ガシリッチデブリ円盤

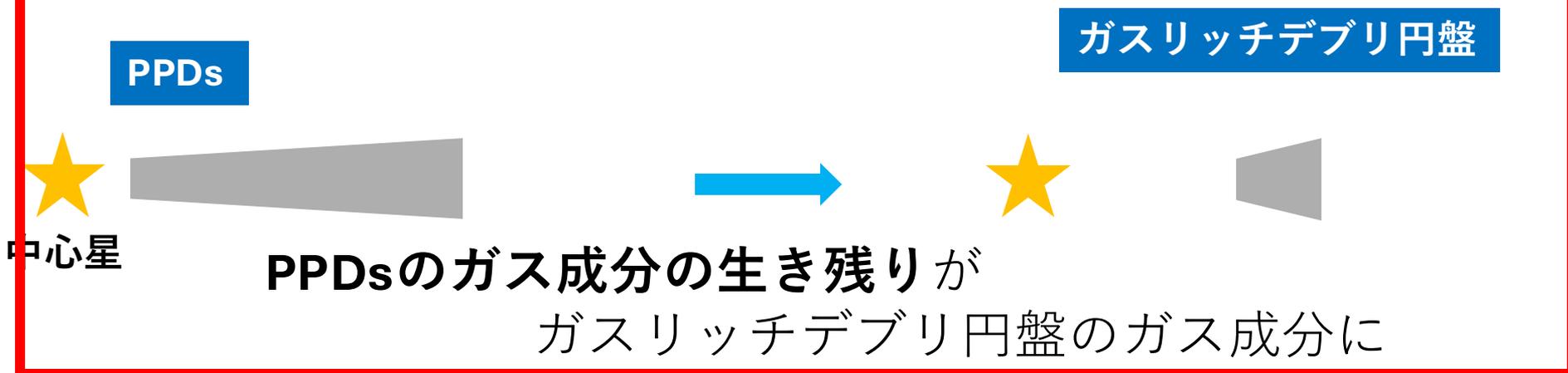
観測は主に**COガス**について
CO質量は最大で**0.06M_⊕**程度

Kóspál+2013

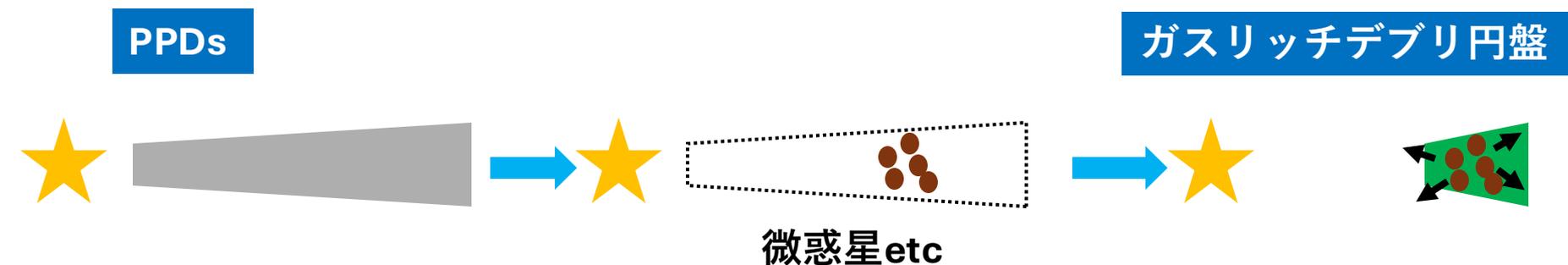
ガシリッチデブリ円盤の起源は未だ不明

ガシリッチデブリ円盤の起源

・始原ガス説 Nakatani+2023



・2次ガス説 Marino 2022, Kral+2016 など



一旦ガス円盤散逸後、微惑星などから2次的に供給

本研究の動機

現在2次ガス説は詳細に調べられている

(Kral+2016,2019; Moór+2019, Marino+2020,2022 など)

しかし 十分はやい円盤散逸を仮定しているが本当？
観測のCO質量の再現に大きい乱流粘性が必要
(PPDsでの強い場合の >1 桁上)

→始原ガス説の検証が必要！

本研究の動機

ガスリッチデブリ円盤の形成が始原ガス説で可能

→ **PPDsの寿命**の多様性→多様な惑星形成

PPDsのガス成分は惑星形成において重要な要素

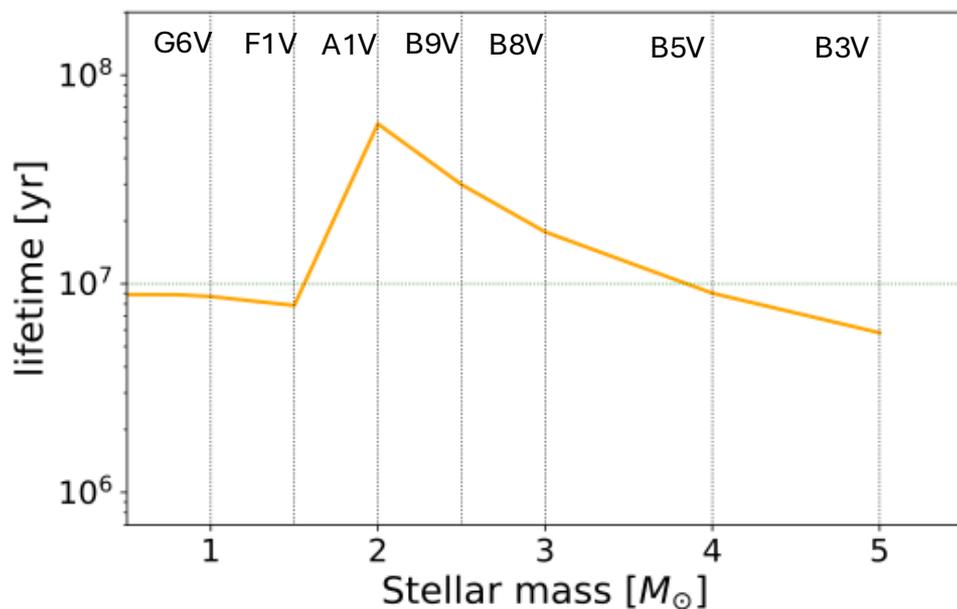


惑星移動の駆動要因

ガス惑星の材料 など

先行研究:Nakatani+2023

微小ダスト枯渇で、光電効果駆動のFUV(<13.6eV)による
光蒸発を無視できる状況を考えて



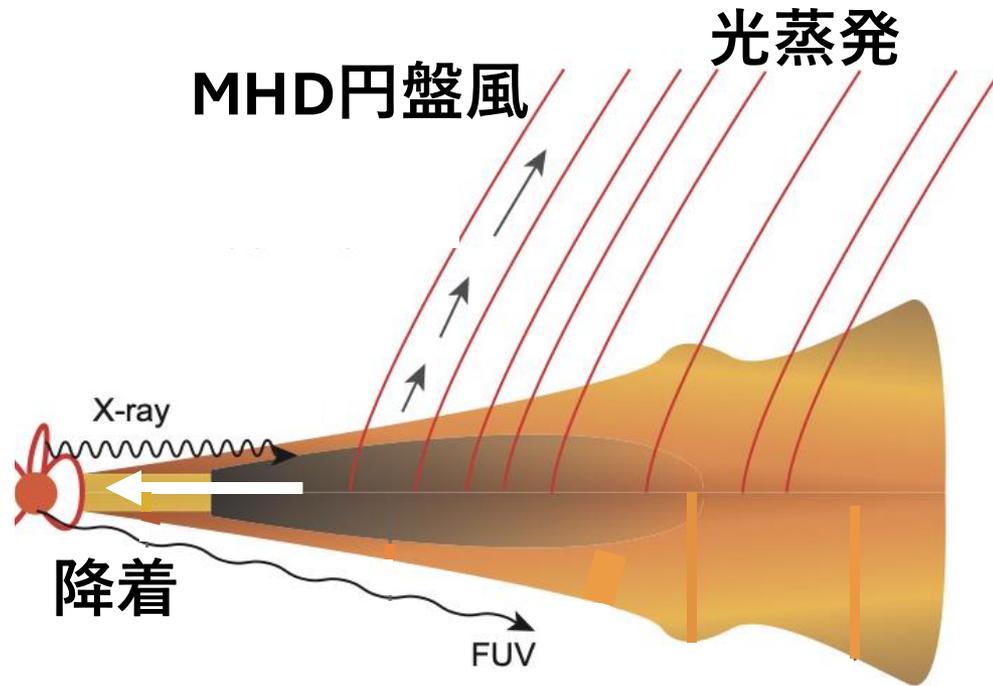
円盤寿命が10Myr以上
→ 始原ガス説を支持

2M_⊙の場合寿命が最大
→ 早期A型星周りで
ガスリッチデブリ円盤が
見ついていることと一致

Nakatani+2023

この先行研究では0次元で円盤寿命を計算

円盤散逸の機構



光蒸発、円盤風、降着によって散逸

*一般に

最初、降着で散逸

最後、光蒸発で円盤消失

0.1 AU 1 AU 10 AU 100 AU

本研究の計算方法

円盤散逸を**1次元モデル**で解く→空間分布を扱うことができる

マスター方程式

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

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

粘性による降着 円盤風による降着

$-\dot{C}_w (\rho c_s)_{\text{mid}}$
円盤風による質量損失

$-\dot{\Sigma}_{\text{photo}} (L_X, \Phi_{\text{EUV}})$
光蒸発

恒星進化に伴う**輻射の時間変化**(次スライド) をモデルに組み込む

初期円盤質量は**中心星質量の0.1倍**

中心星輻射の時間進化

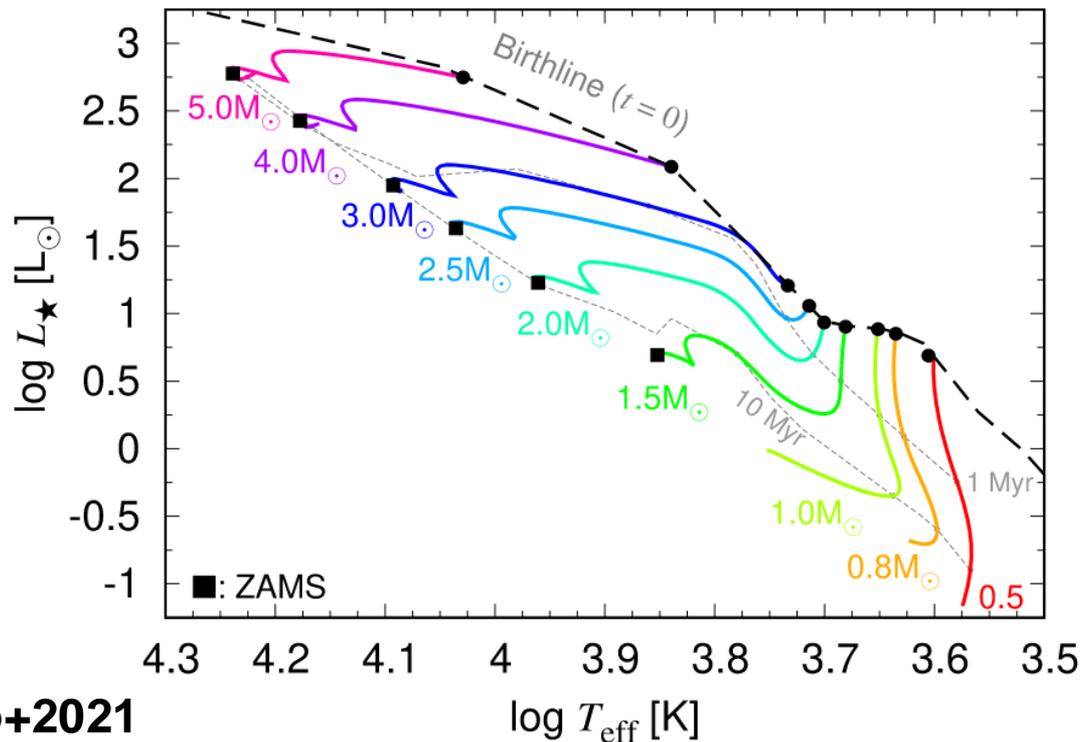
星進化

$\leq 3M_{\odot}$ の時, 恒星は**最初全て対流層**. (Hayashi track).

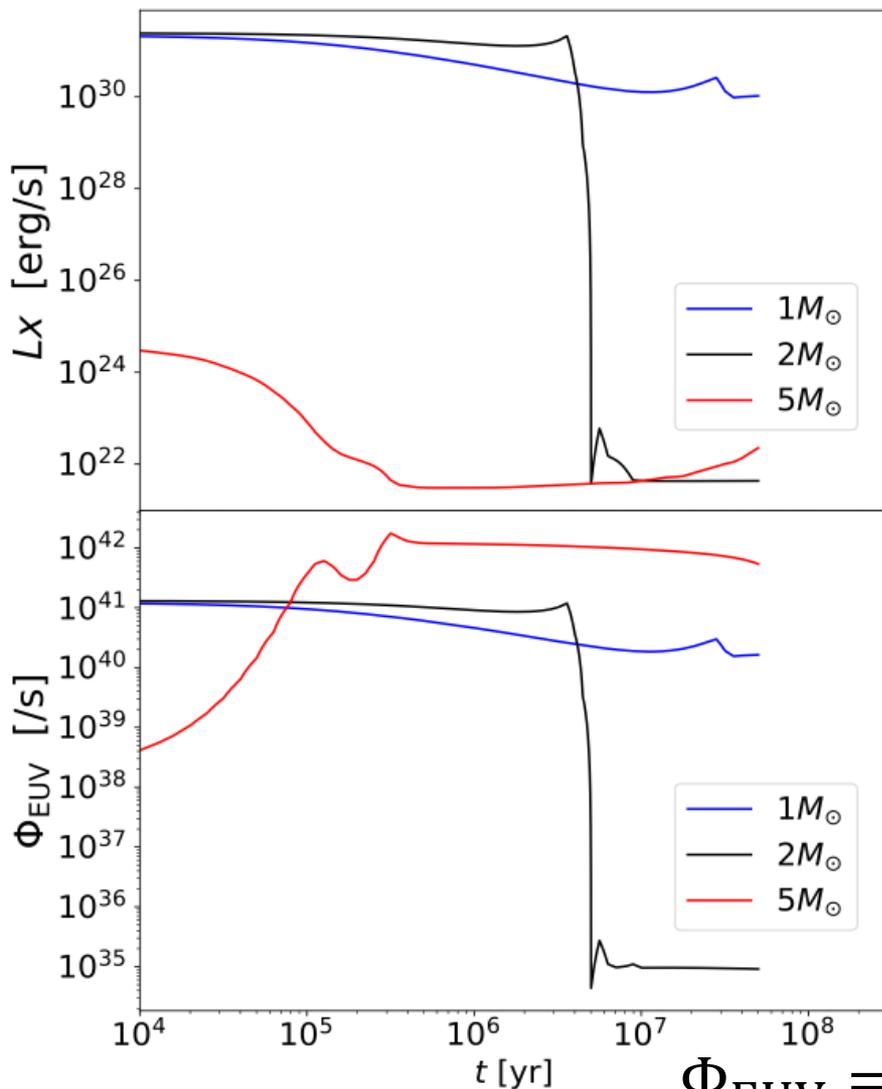
→その後、放射層が出現

&対流層が小さくなる (Heney trackへ; 温度上昇のため)

($> 3M_{\odot}$; 高温のため最初から放射層が存在)



中心星輻射の時間進化



経験則から表面对流層とX線の間に
関係が知られている

1 M_{\odot}

輻射(X-ray, EUV)は高い状態で維持
(表面对流層維持のため)

2 M_{\odot}

~4Myrで、X線, EUVの放射量減少
(表面对流層消失により)

5 M_{\odot}

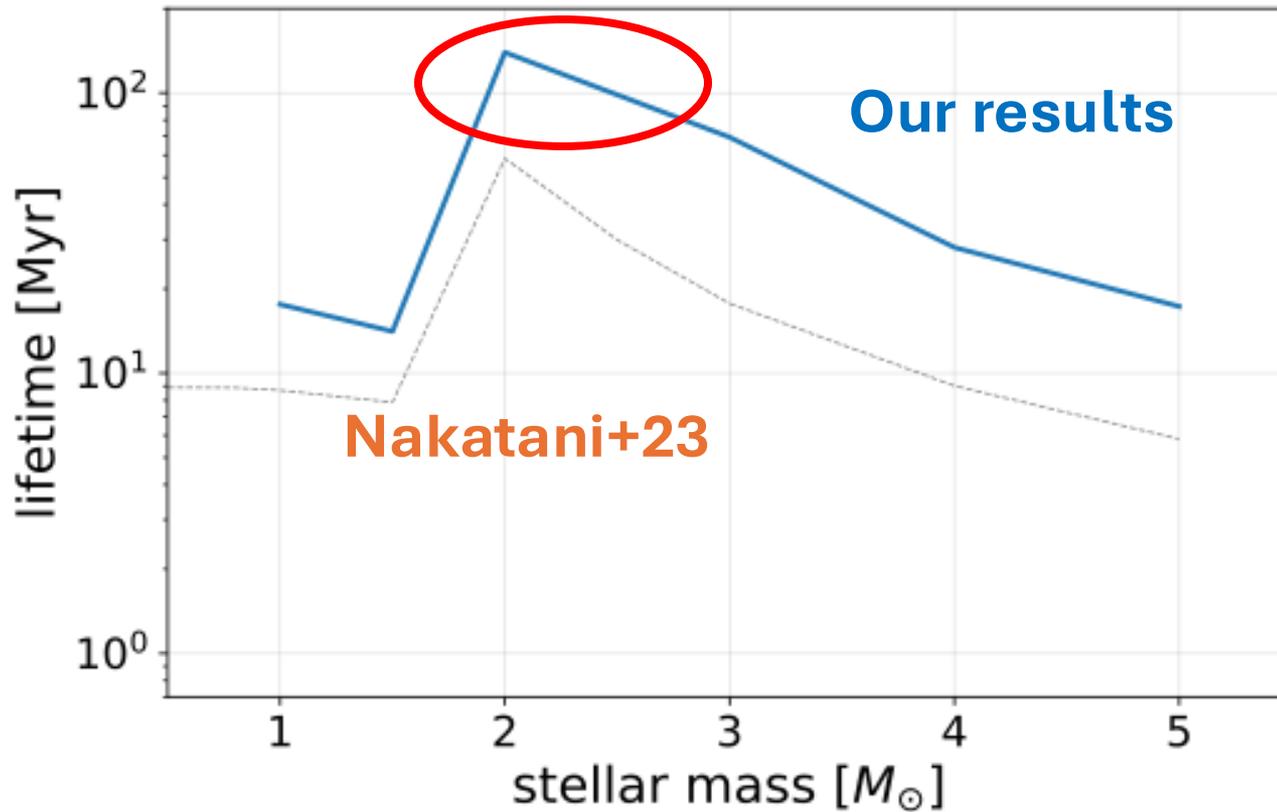
放射層が存在しX線放射量は小さい。
光球由来のEUVは大きい。
(高温のため)

$$\Phi_{\text{EUV}} = \Phi_{\text{EUV,ph}} + \Phi_{\text{EUV,mag}}$$

光球由来 EUV

磁気由来 EUV

結果:円盤寿命の質量依存性



10Myr以上の寿命を実現

➡ ガスリッチデブリ円盤を**始原ガス説**で実現可能

2 M_{\odot} で寿命が最大

➡ **早期A型星周り**でガスリッチデブリ円盤が見つかること
& 先行研究(Nakatani+23)と整合的

面密度分布の進化

$1 M_{\odot}$, $5 M_{\odot}$

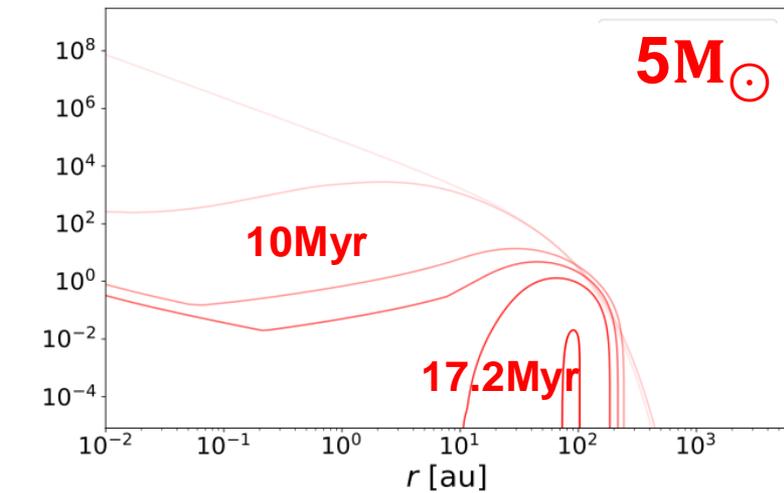
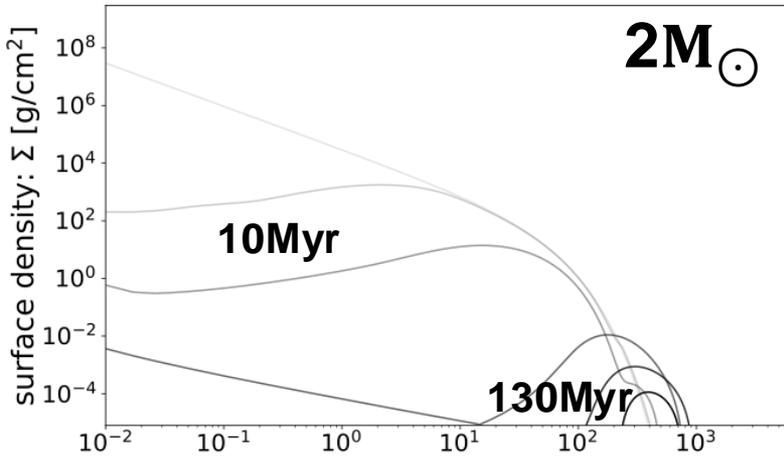
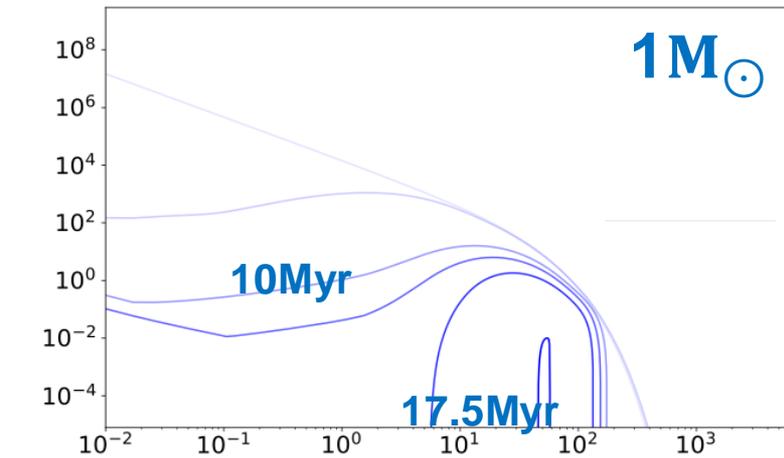
200au以遠の質量が早期に散逸
($\sim 10\text{Myr}$)

光蒸発が強いため

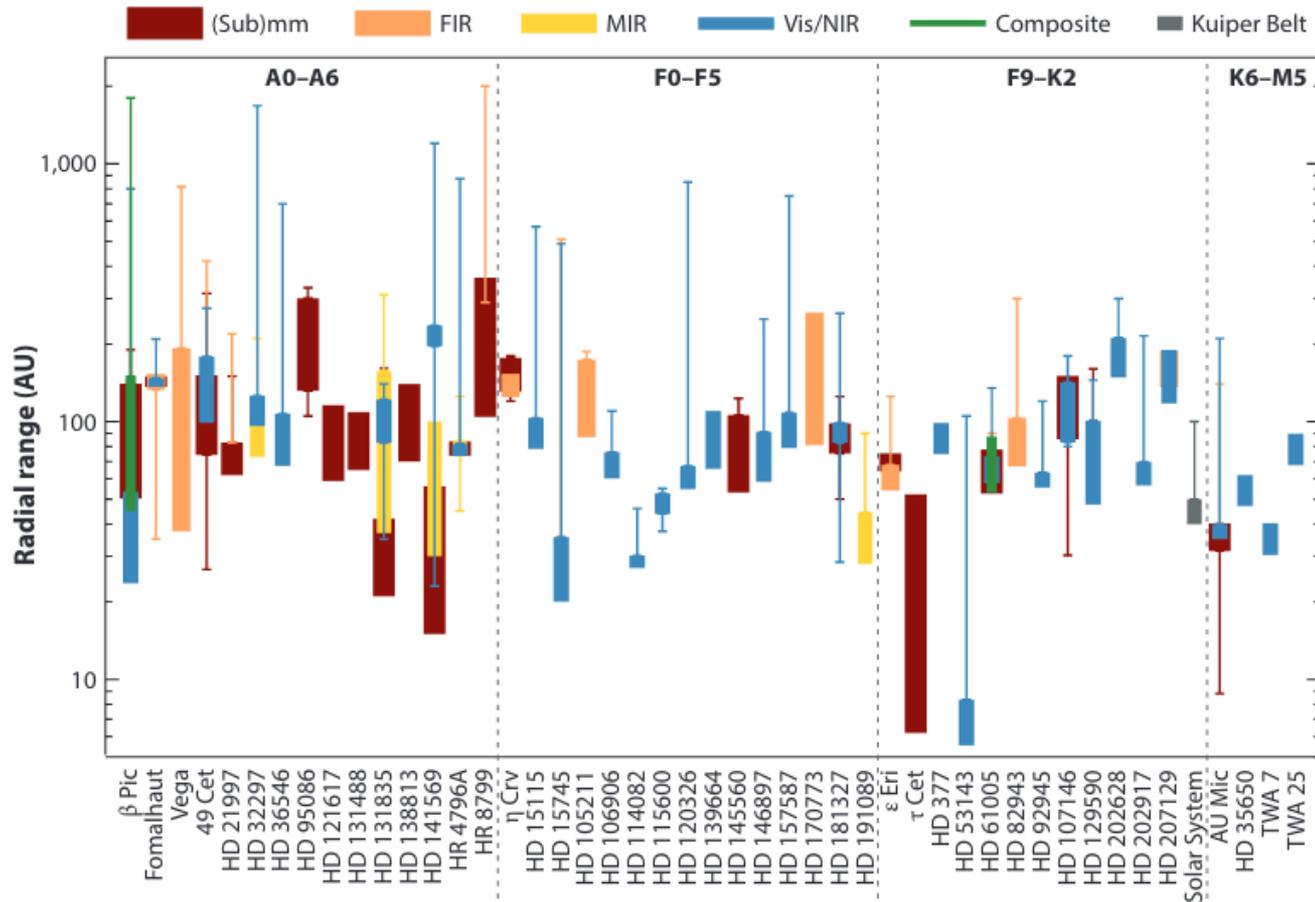
$2 M_{\odot}$

100~500auに質量が長く残存
→寿命が長くなる

光蒸発が弱いため



面密度分布の進化

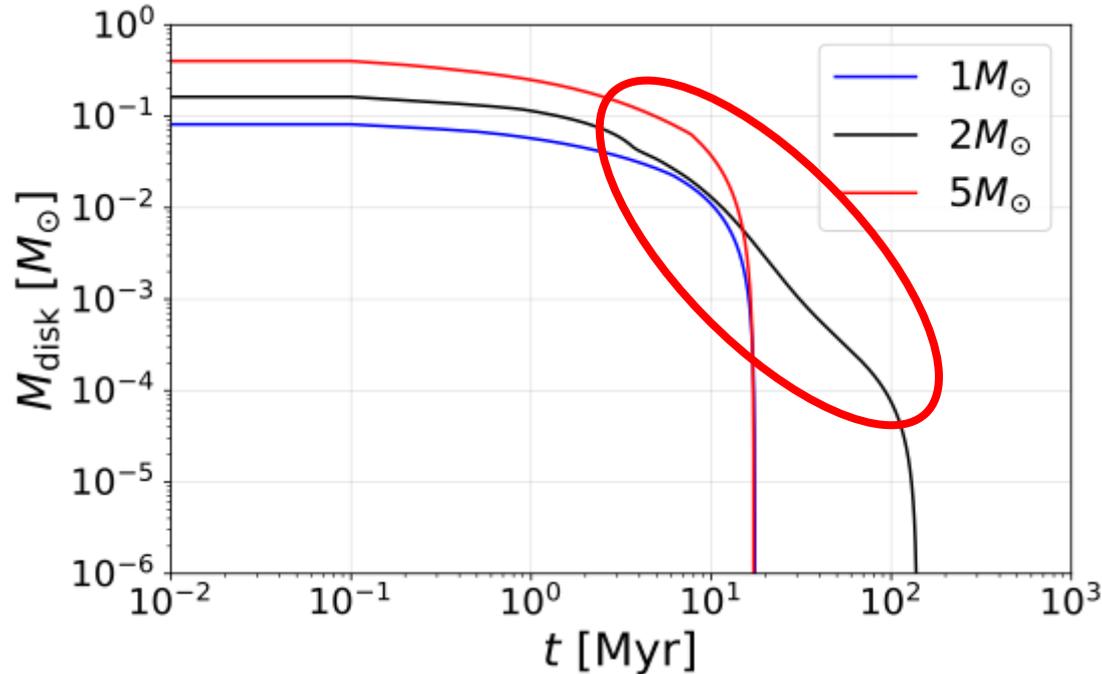


Huges+2018

デブリ円盤は10~100auに位置

↑我々のモデルでのガス成分の残存位置と一致!

円盤質量の進化



$2 M_{\odot}$

10Myr以降でゆっくり質量が減少する段階があり、その後~100Myrから急激な減少が起こる。

~50Myrのとき円盤質量は $10^{-4} \sim 10^{-3} M_{\odot}$

→CO質量は観測での最大値($0.06 M_{\oplus}$)と大体一致

1, $5 M_{\odot}$

$2 M_{\odot}$ であったゆっくり減少する段階がない

まとめ

- 1Dモデルを用いて、PPDsの寿命が10Myrを超えうる
ことが示された。またこれによってガスリッチデブリ
円盤が**始原ガス説**で説明できることが示された。
- **中心星輻射の進化**を考えることでガスリッチデブリ円
盤が早期A型星まわりでよく見つかることを再現でき
た。
- 観測と一致する**面密度分布**、**CO質量**の再現ができた。