

原始惑星系円盤の散逸過程： 理論と観測の現状

國友 正信
名古屋大学



この講演で触れること・触れないこと

内容：中小質量星周りのガス円盤の進化・散逸過程

- 円盤寿命の観測
- 円盤進化機構（主に中心星からの照射による光蒸発理論）
- 議論：磁場駆動円盤風（少し）

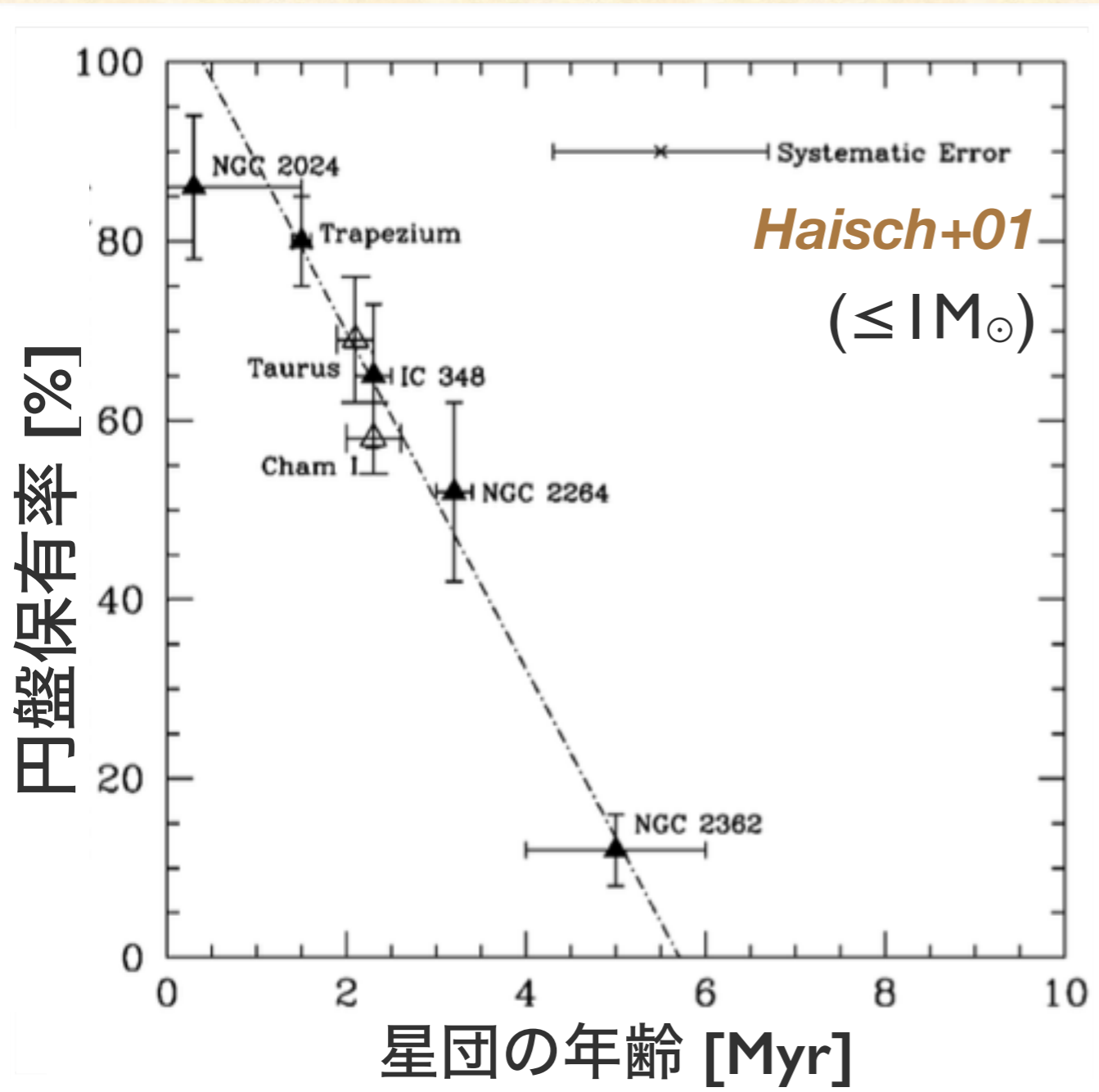
触れないこと：

- 近傍大質量星からのUVによる光蒸発 山川さんポスター, *Adams+04*
- 恒星風や恒星遭遇などの効果 *e.g., Hollenbach+00*
- ダストの進化 *e.g., Takeuchi+05, Alexander+Armitage07, Miyake+16*
- 円盤風の直接的な観測的制約 (*e.g., [NeII], [OI]* など)
e.g., Ercolano+Pascucci17

円盤寿命の観測

円盤寿命の観測

(近赤外の超過から)



- 円盤保有率が星団年齢とともに減少

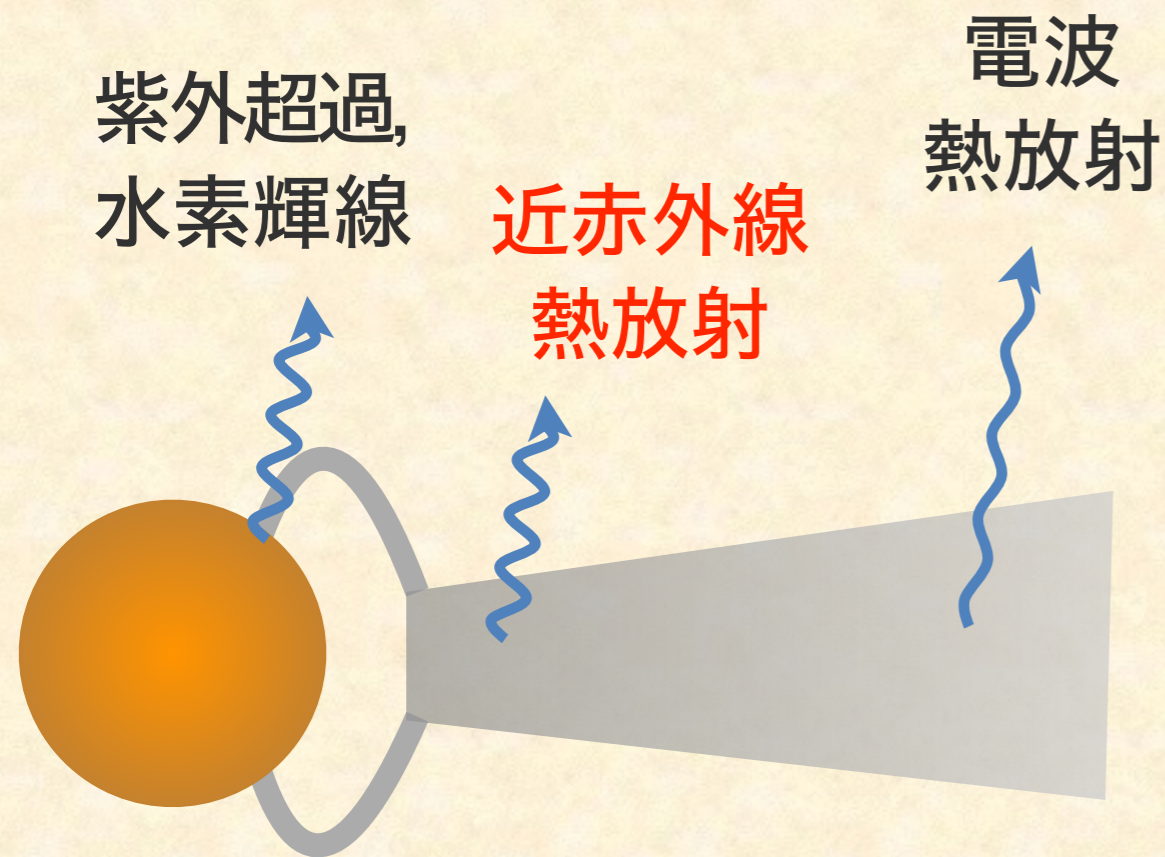
→ ほとんどの星は~3-5Myrで

円盤を失う

※近赤外→~1000Kのダスト熱放射

see also Hernandez+07, Mamajek09,
Fedele+10, Kraus+12, Ribas+14

円盤寿命の観測



- 円盤保有率が星団年齢とともに減少

→ ほとんどの星は**~3–5Myr**で
円盤を失う

※近赤外→~1000Kのダスト熱放射

- 中心星へのガス降着・外側円盤の冷たいダスト（電波観測）もほぼ同時期になくなる

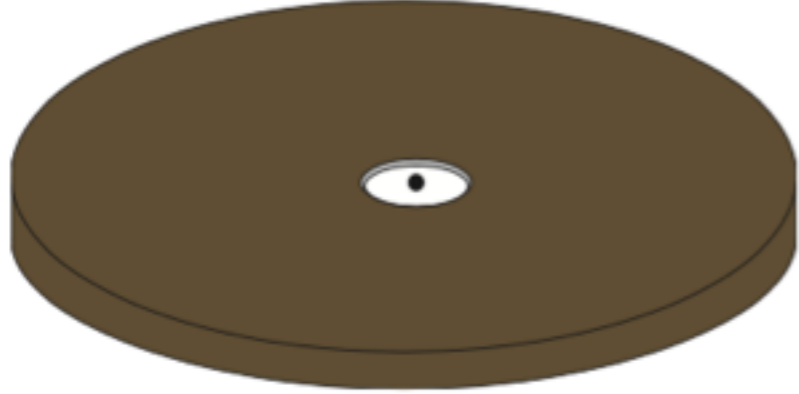
降着：*Muzerolle+00, Fedele+10, Ingleby+14*
電波：*Mathews+12, Andrews+Williams05, 07*

前嶋さんポスター

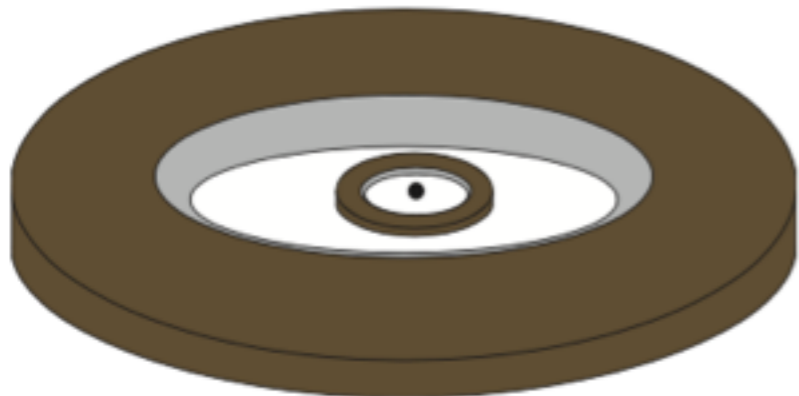
数千回転した後、内側から外側まで速やかに散逸

短い遷移円盤期

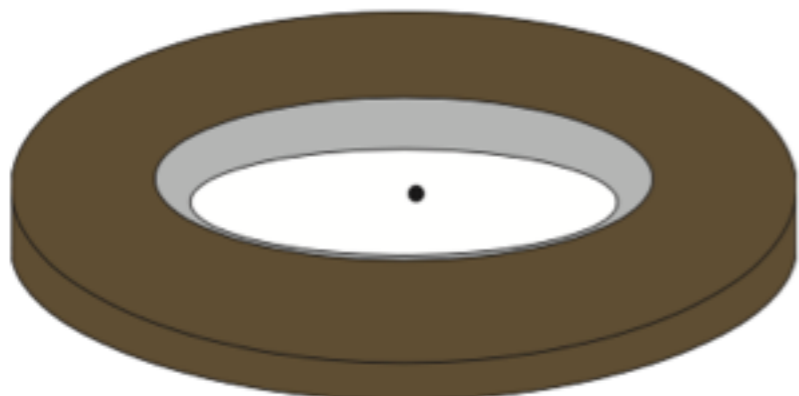
Espaillet+14, PPVI



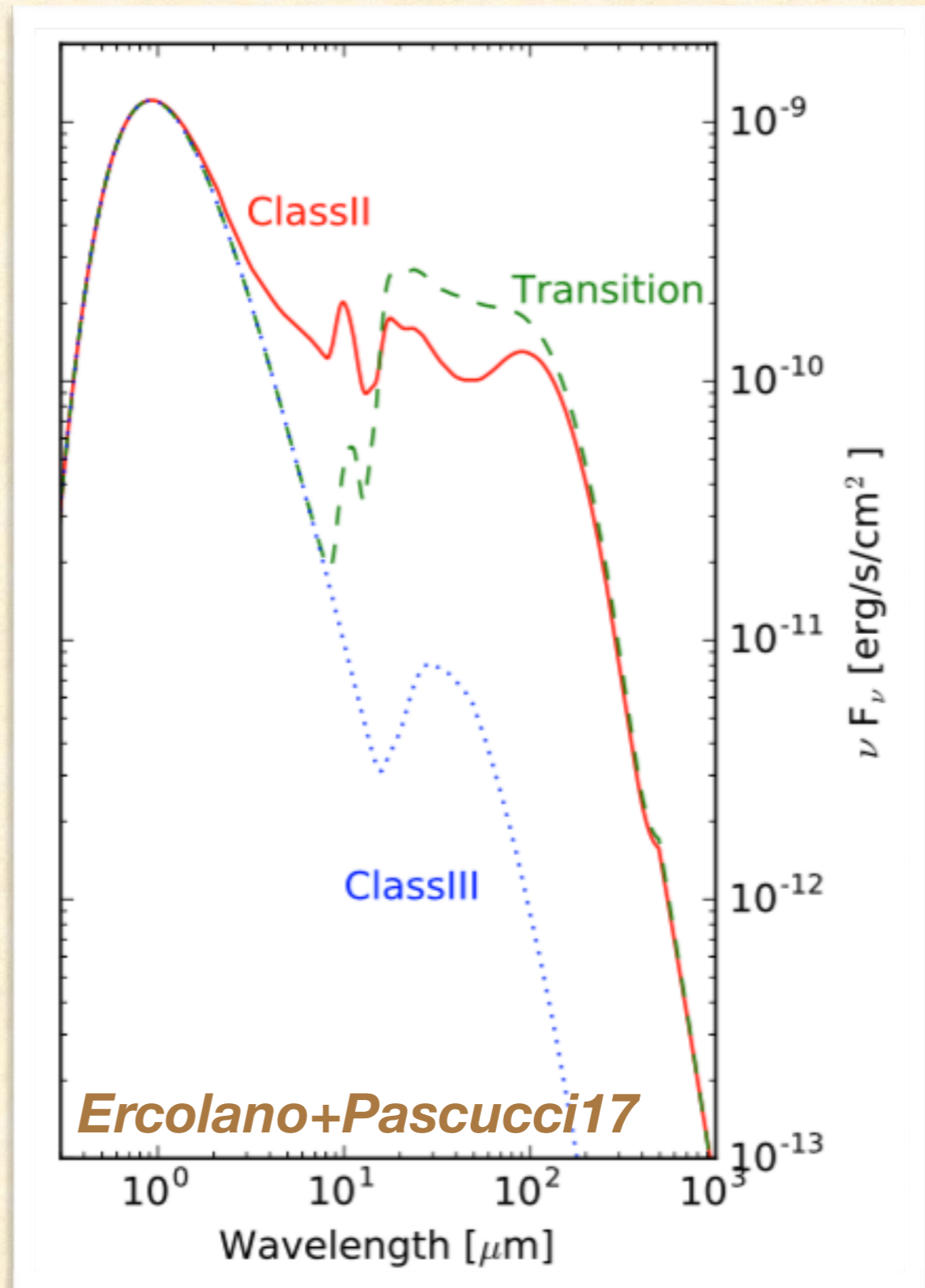
Full Disk



Pre-Transitional Disk

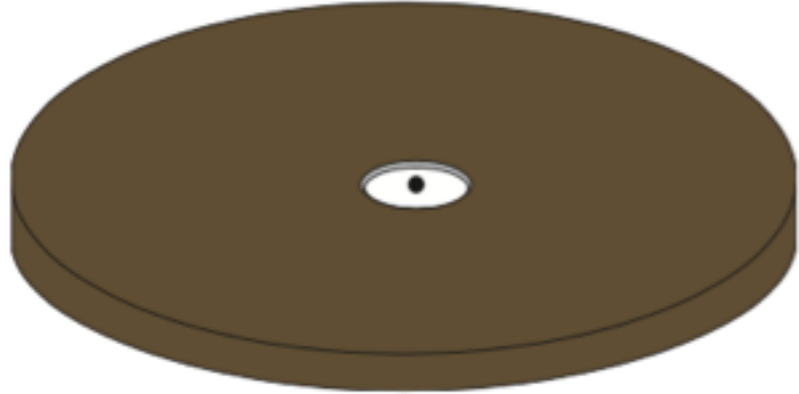


Transitional Disk

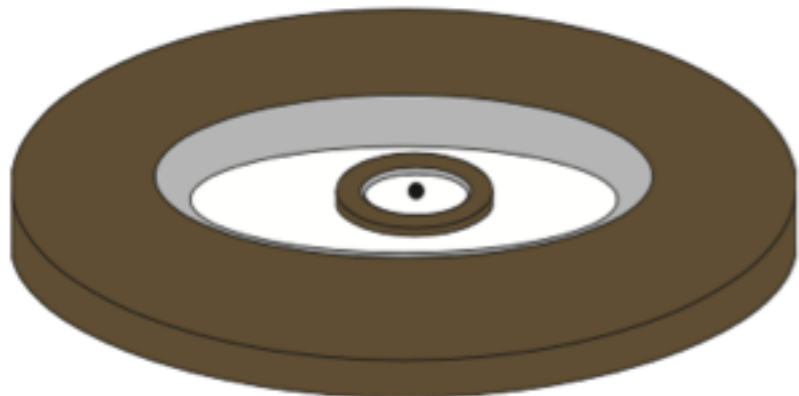


短い遷移円盤期

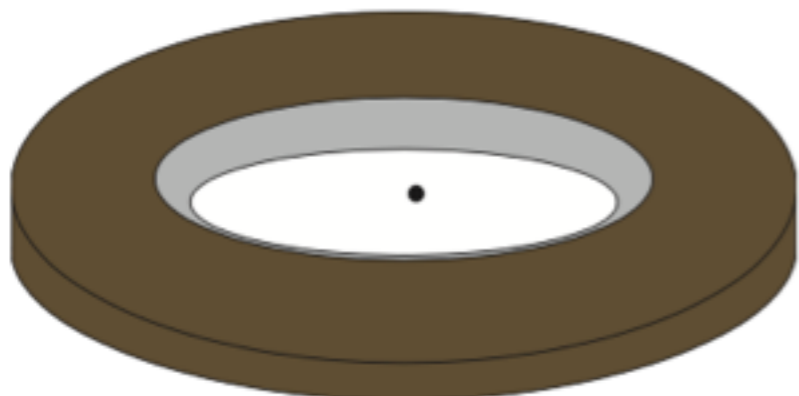
Espaillet+14, PPVI



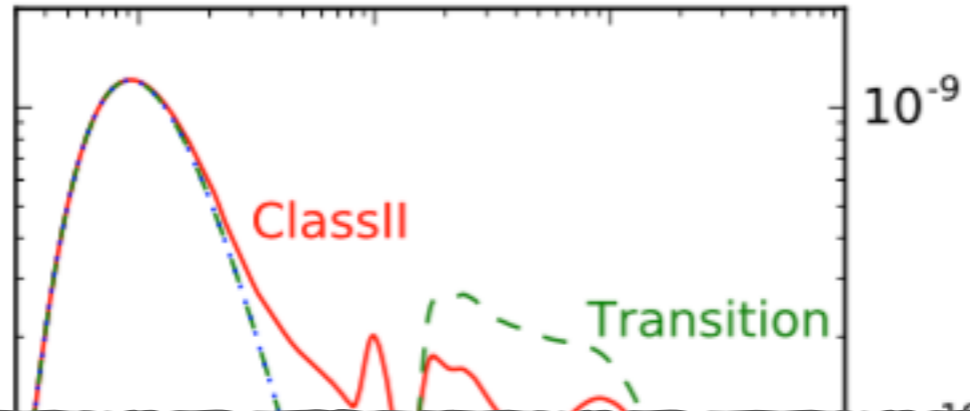
Full Disk



Pre-Transitional Disk



Transitional Disk



- 遷移円盤が検出されている
→ **inside-out的な散逸**
- 遷移円盤の個数は**~10%**程度
→ **散逸期は非常に短い (~0.1 Myr)**

Ercolano+Pascucci17

*Espaillet+14, PPVI, Skrutskie+90,
Muzerolle+10, Koepferl+13*

観測事実のまとめ

円盤散逸機構に対する観測からの要請：

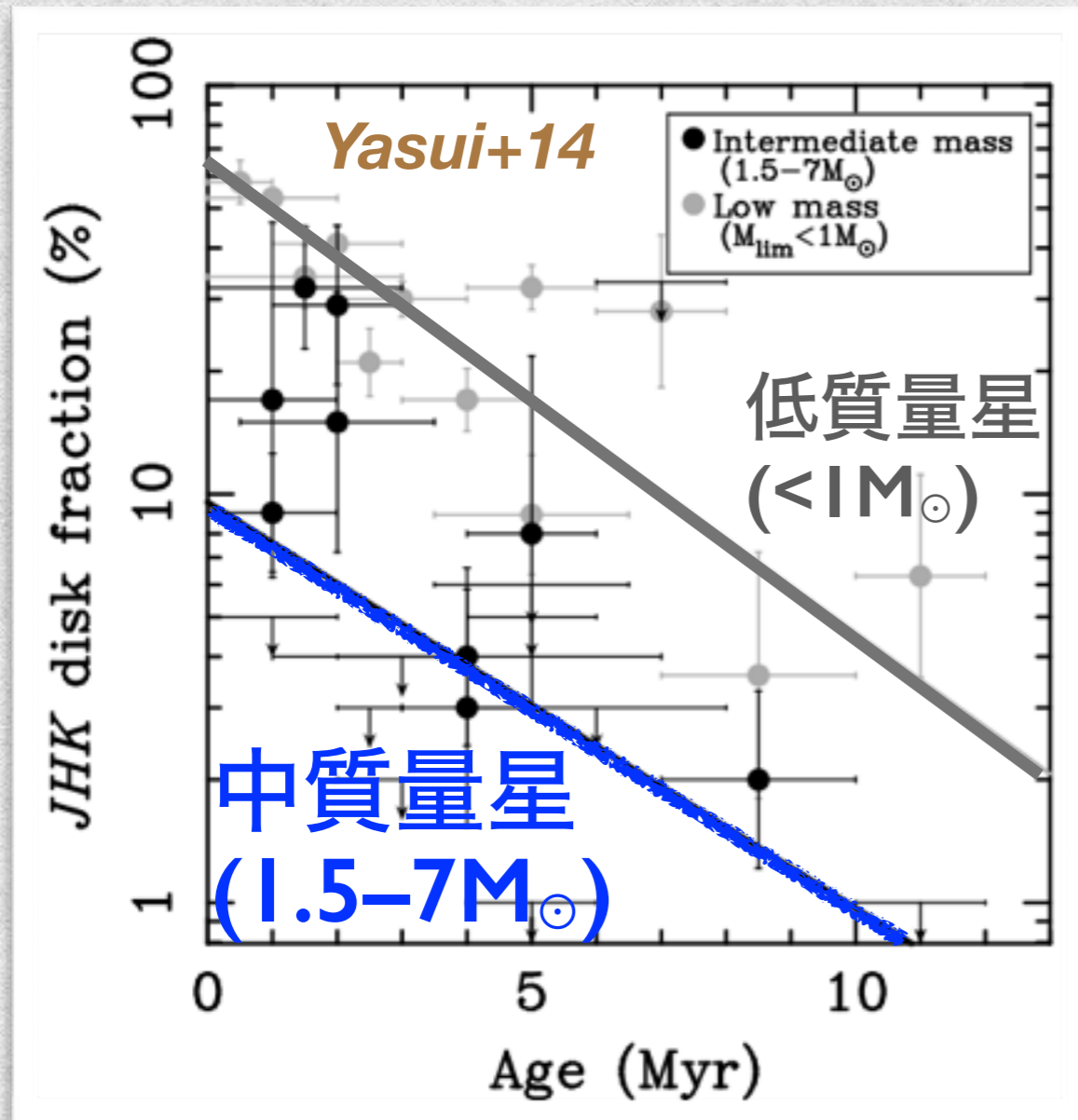
原始惑星系円盤には two-timescale 的, inside-out 的な散逸機構が存在するはず

近年の進展：

- 金属量への依存性 *Yasui+09*
- 中心星質量への依存性 *Yasui+14*
- 星団内の星の年齢のばらつき *Takagi+14, 15*
- 他にも連星のコンタミの影響など
Kraus+08, 11

円盤寿命の観測：中心星質量・金属量の影響

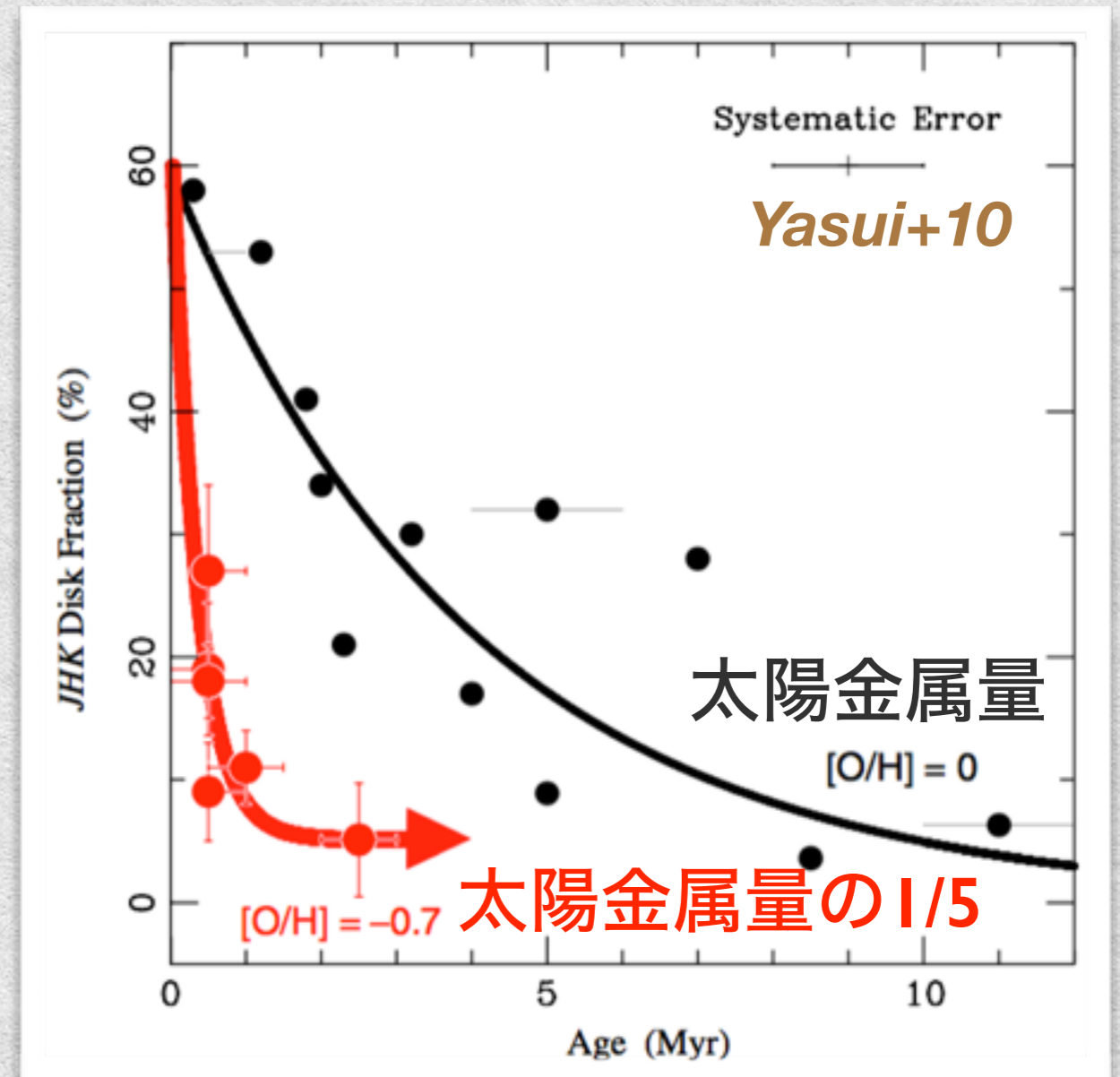
- 高質量星 → 短い円盤寿命



See also Hillenbrand+92;
Hernandez+05; Ribas+15

※ただし中間赤外ではより長寿命

- 低金属量 → 短い円盤寿命



See also Yasui+09, 16a,b,c,
Kalari+Vink15

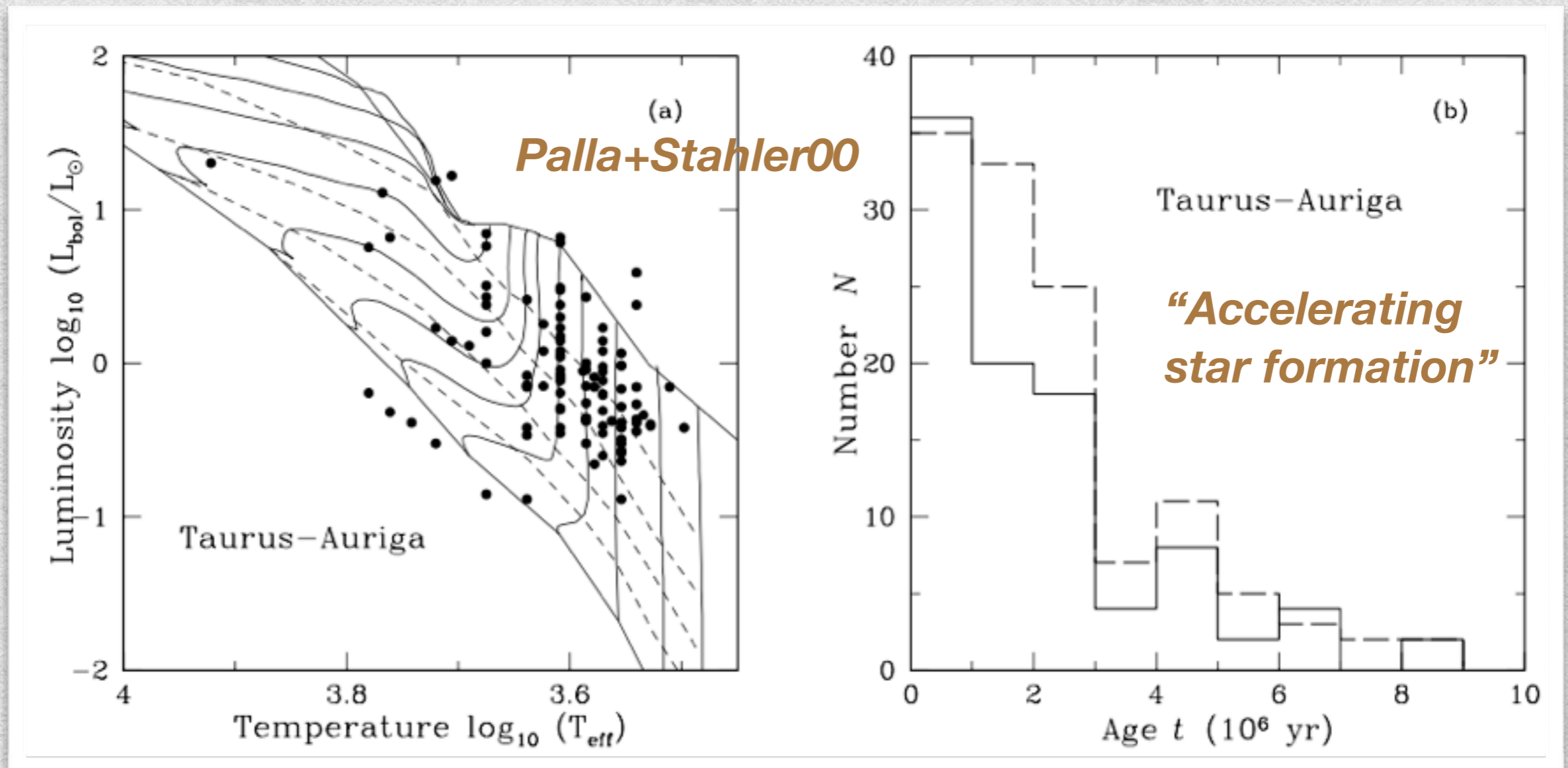
→仲谷さん講演

星団の Age spread 問題

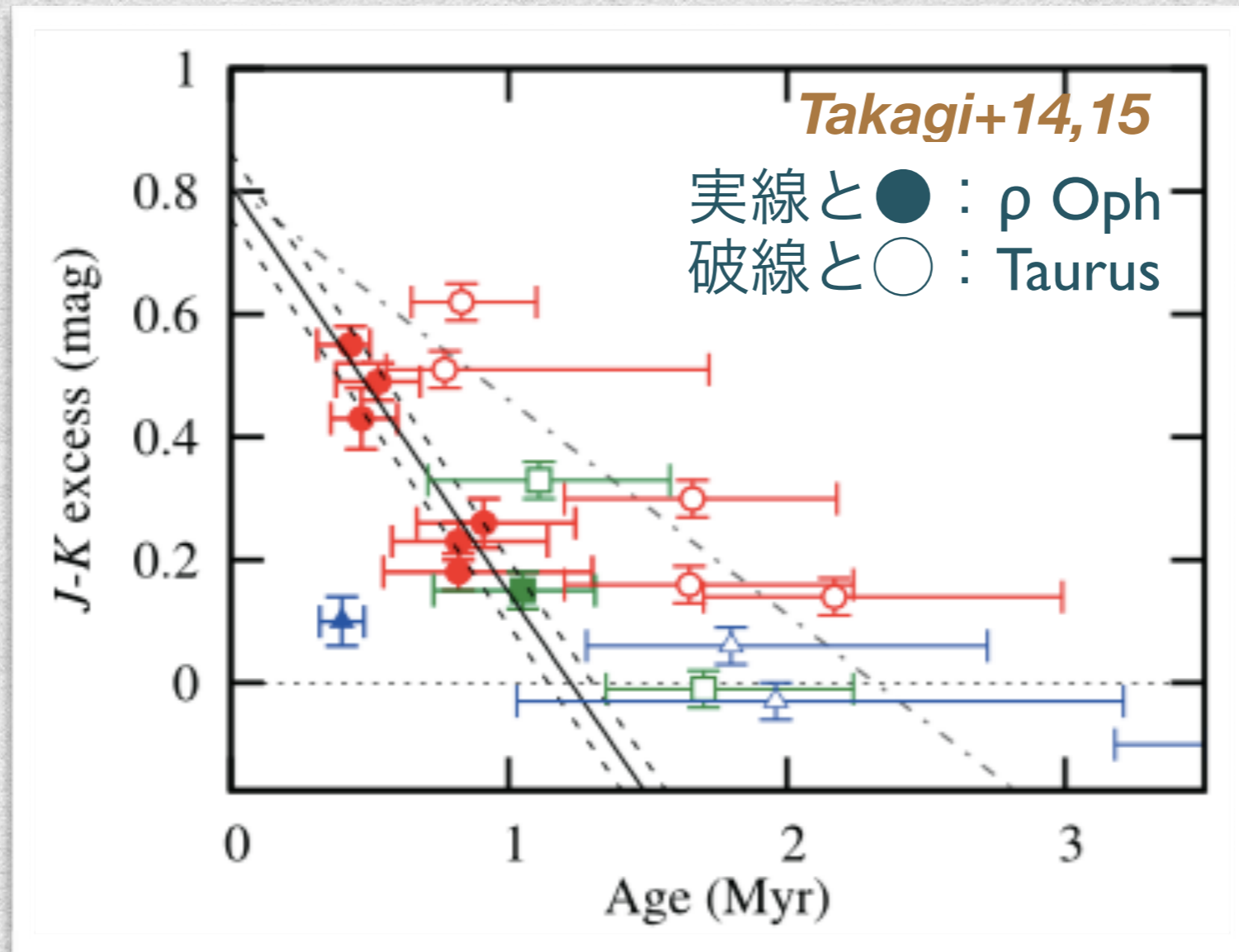
円盤寿命の算出方法では、「星団内の星が全て同一年齢」であると仮定
↔ しかし、若い星団内の星の年齢には大きなばらつき (~10Myr)

星団の年齢推定は注意する必要がある

*e.g., Hillenbrand09,
Soderblom+14, PPVI,
Inutsuka+15*



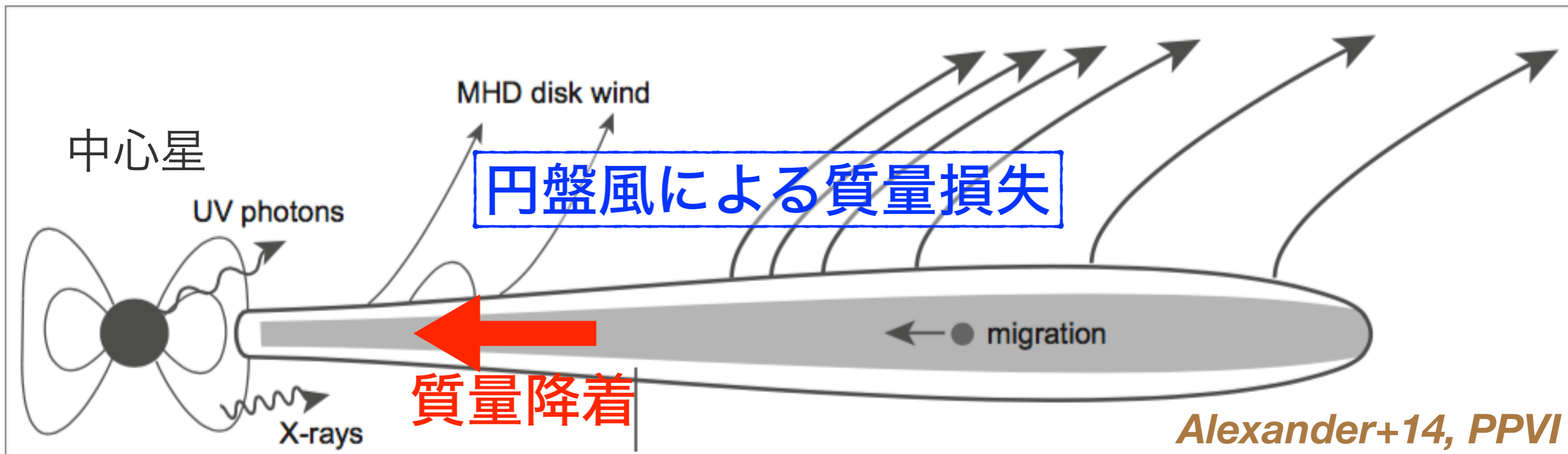
星団の Age spread を用いた円盤寿命算出法



- 星団内の個々の星の赤外超過量を決定, その減衰から円盤寿命を推定する新たな手法
- **円盤寿命 : ~1-2Myr 程度**
(従来の算出方法と大きくは変わらない)

円盤進化機構

円盤進化過程



中心星への降着

- 乱流粘性
- 磁気制動
- 重力不安定

円盤風

- 熱的円盤風（光蒸発）
- 磁気遠心力風
- 磁気乱流駆動円盤風

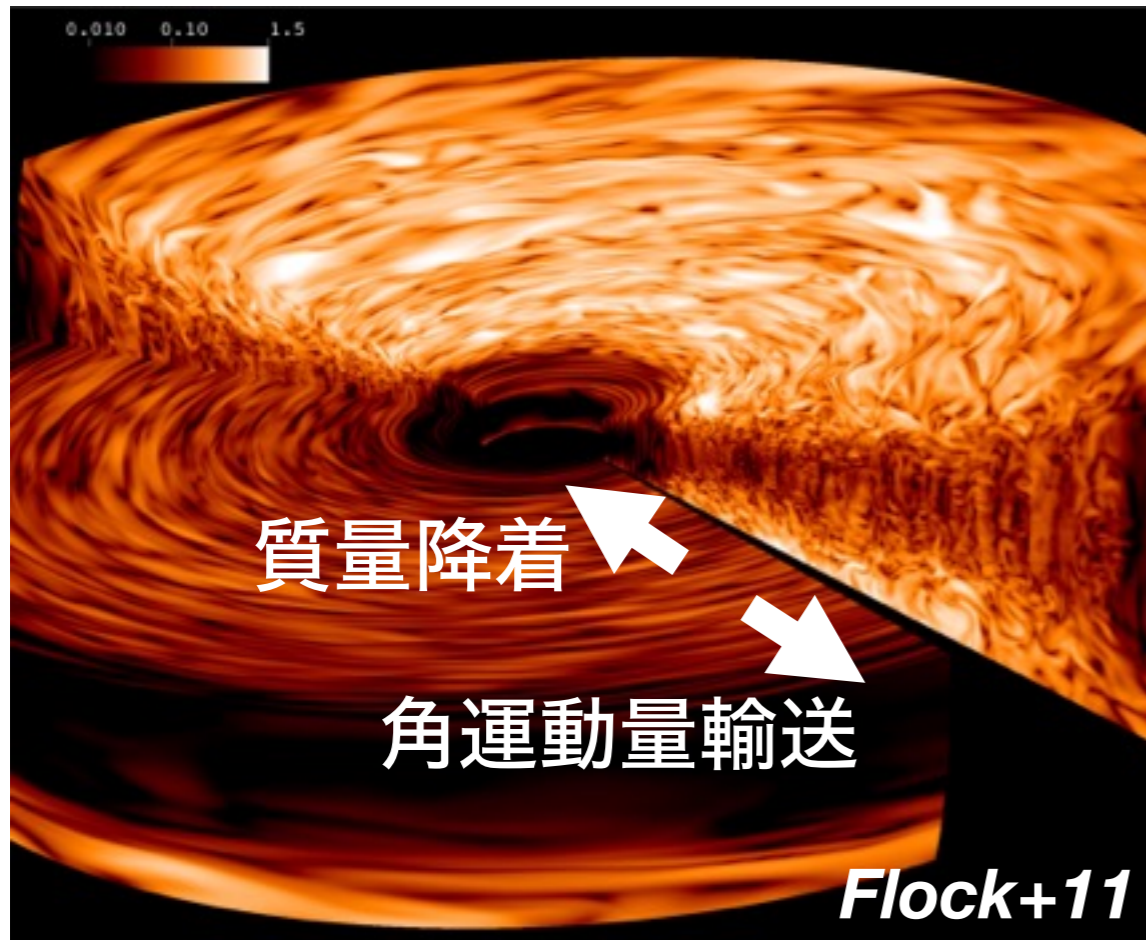
※ 近傍大質量星による光蒸発， 恒星風， 恒星遭遇などもある

See Hollenbach+00

粘性降着

磁気乱流 → 乱流粘性による角運動量輸送

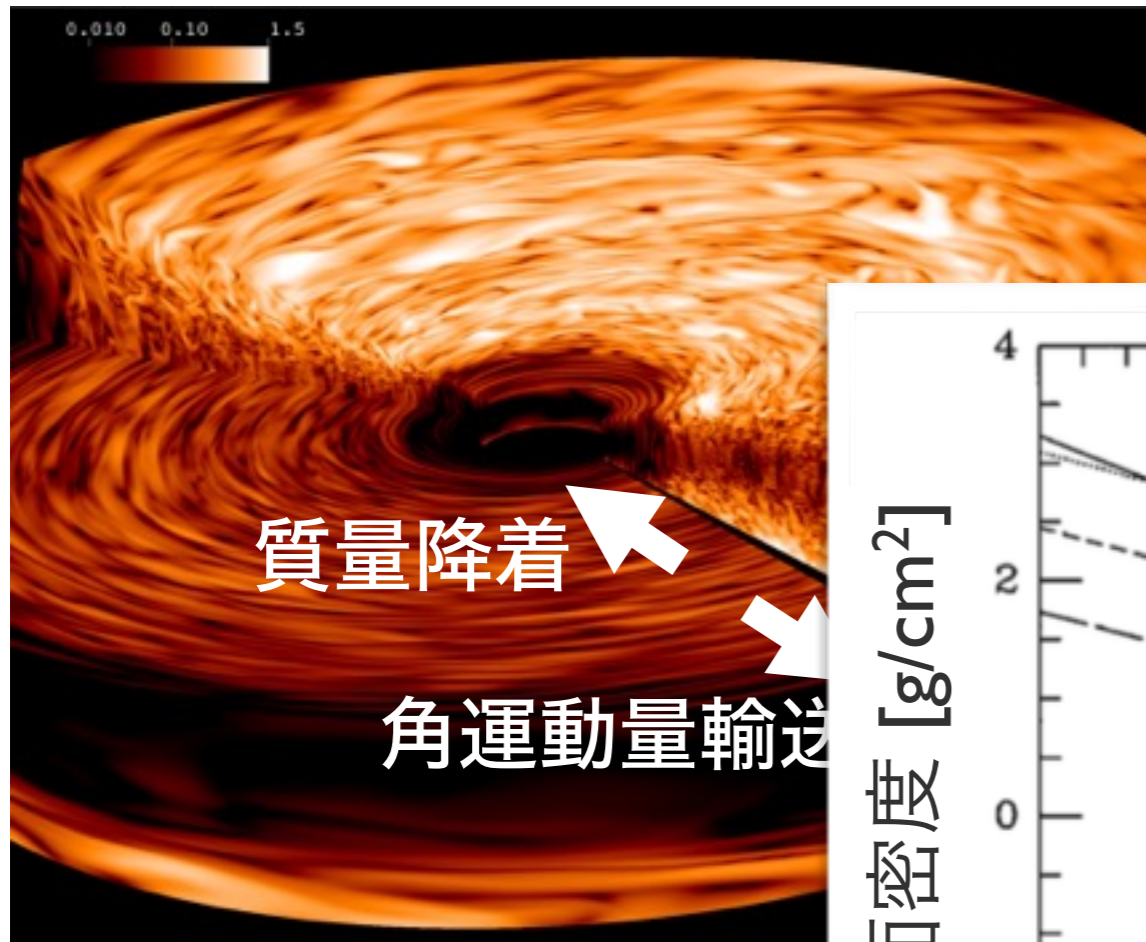
e.g., 磁気回転不安定性 *Balbus+Hawley91*



粘性降着

磁気乱流 → 乱流粘性による角運動量輸送

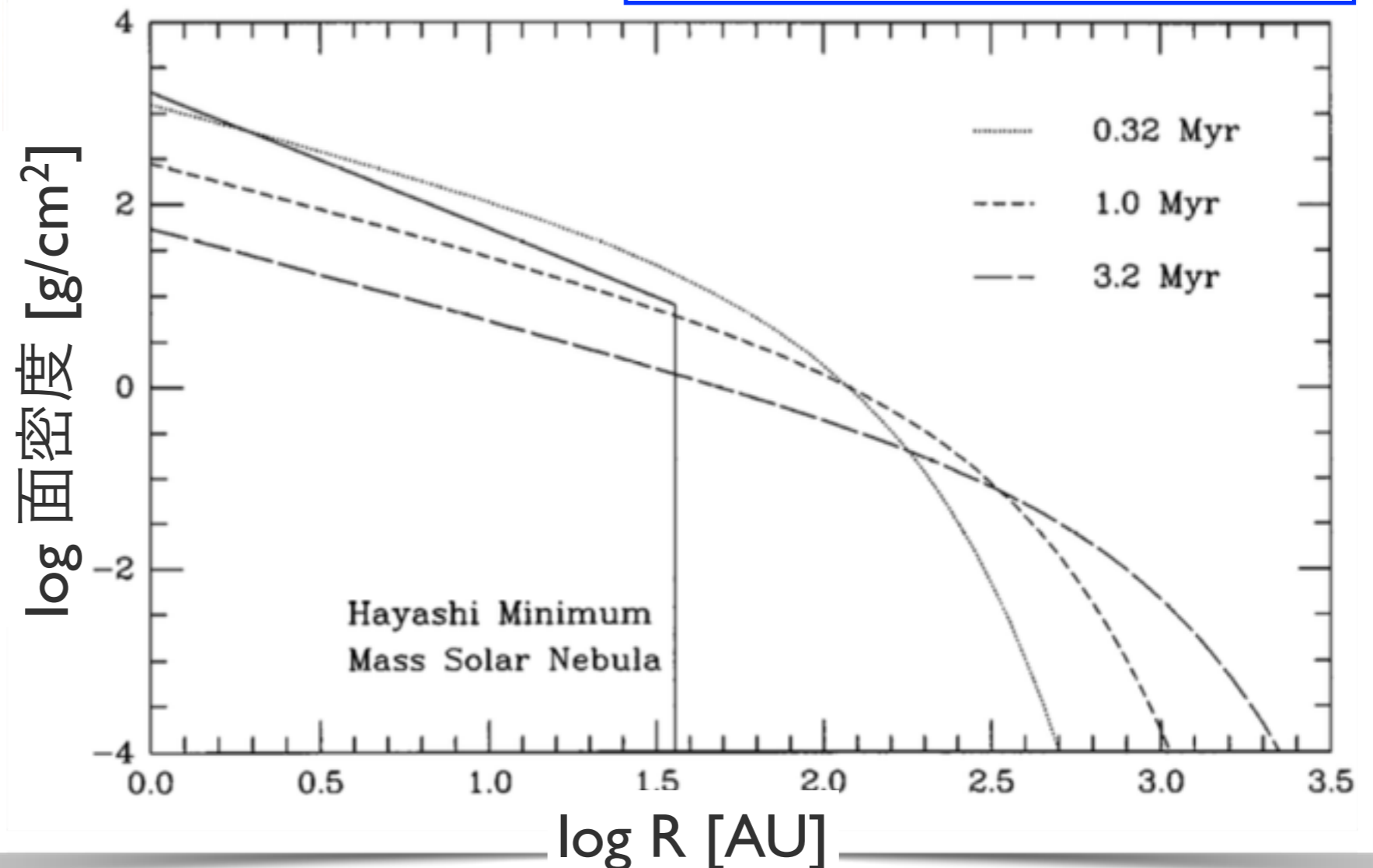
e.g., 磁気回転不安定性 *Balbus+Hawley91*



$$t_\nu \sim \frac{R^2}{\nu} = \frac{1}{\alpha \Omega_K} \left(\frac{H}{R} \right)^{-2}$$

~1 Myr for $R=100\text{AU}$,
 $\alpha=0.01$, $H/R=0.1$

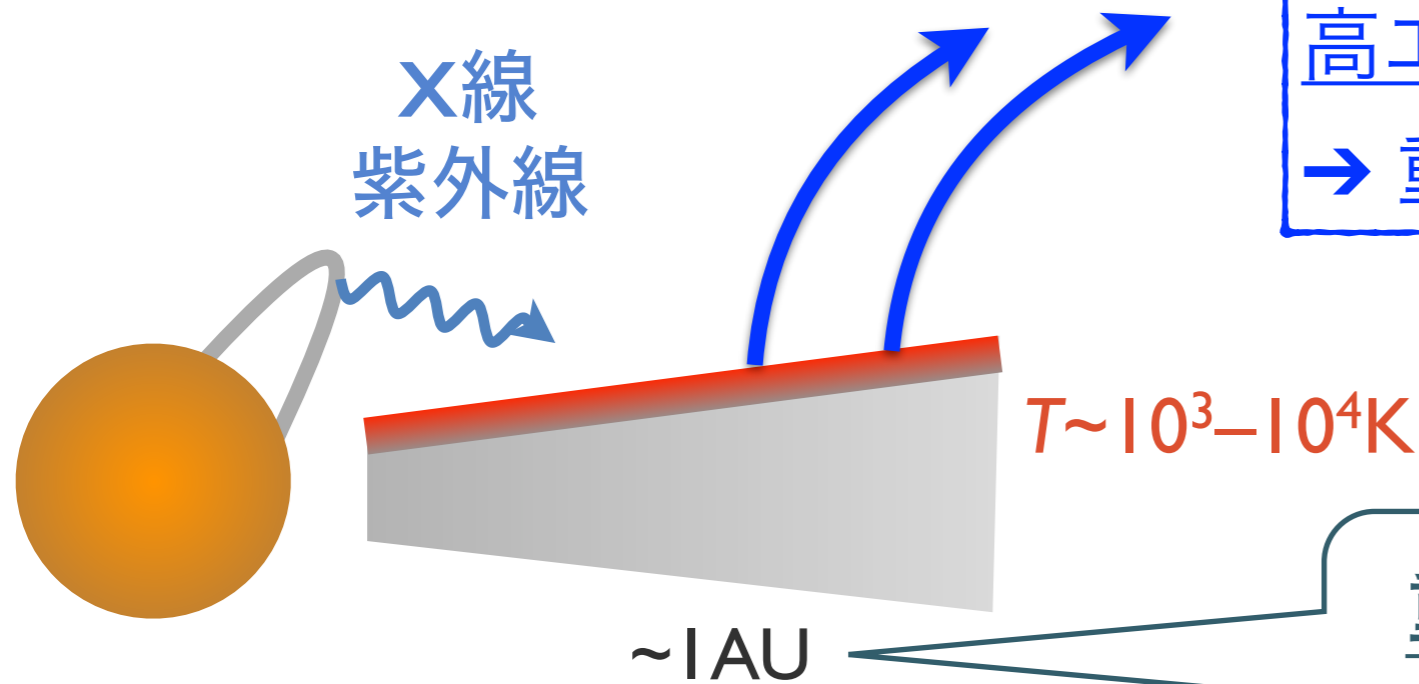
拡散現象なので速やかな
散逸にはならない



Shakura+Sunyaev73

Lynden-Bell+Pringle74

光蒸発



光蒸発：

高エネルギー光子が円盤表層を加熱
→ 重力を振り切って系外に流出

高エネルギー光子

- FUV (遠紫外線; 6–13.6eV)
- EUV (極端紫外線; 13.6–100eV)
- X線 (0.1–10keV)

重力半径 R_g

Shu+93

⇔ 熱エネルギー = 重力ポテンシャル

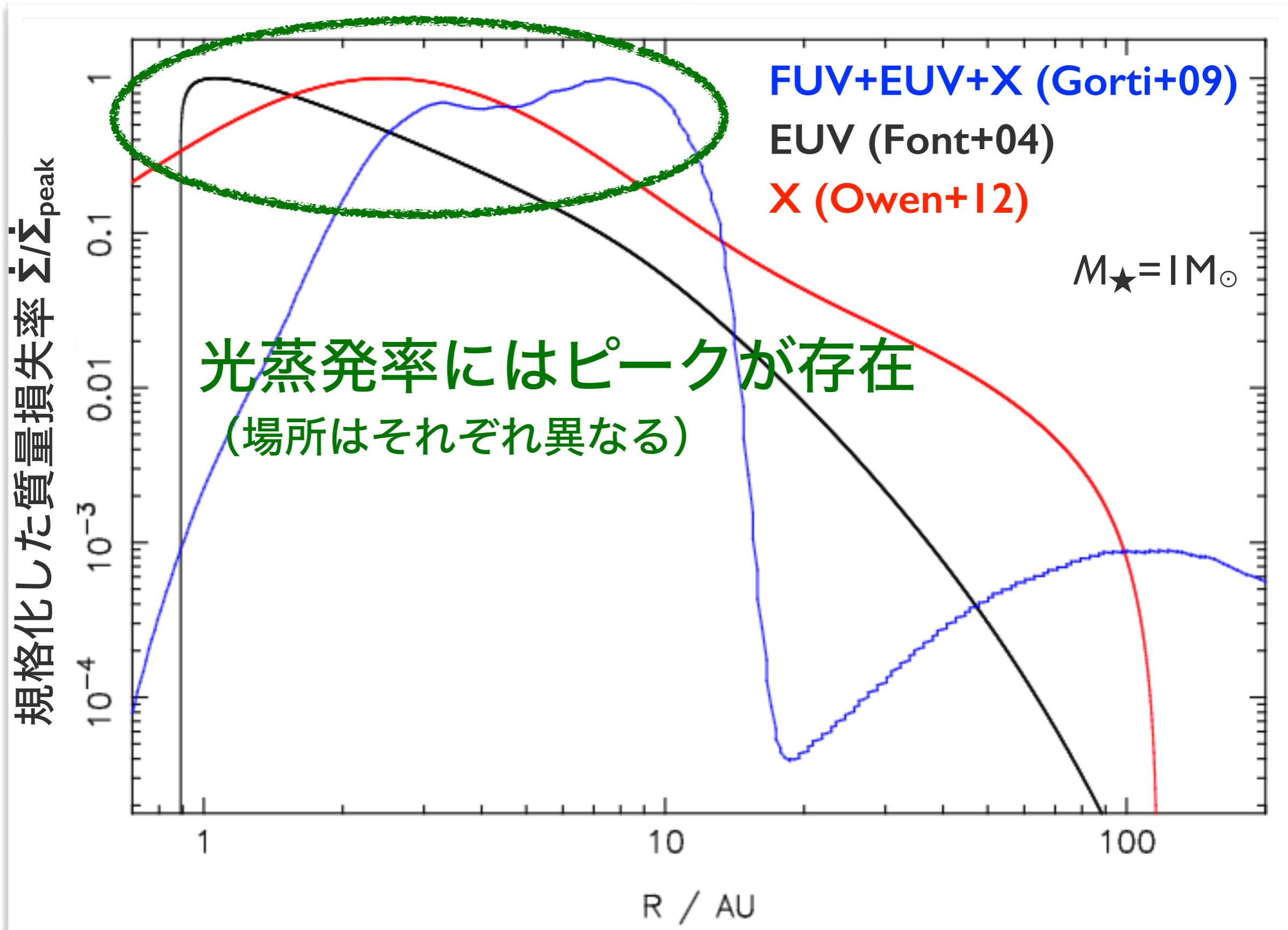
$$\rightarrow R_g \equiv \frac{GM_\star}{c_s^2}$$

臨界半径 R_c *Liffman03, Font+04*

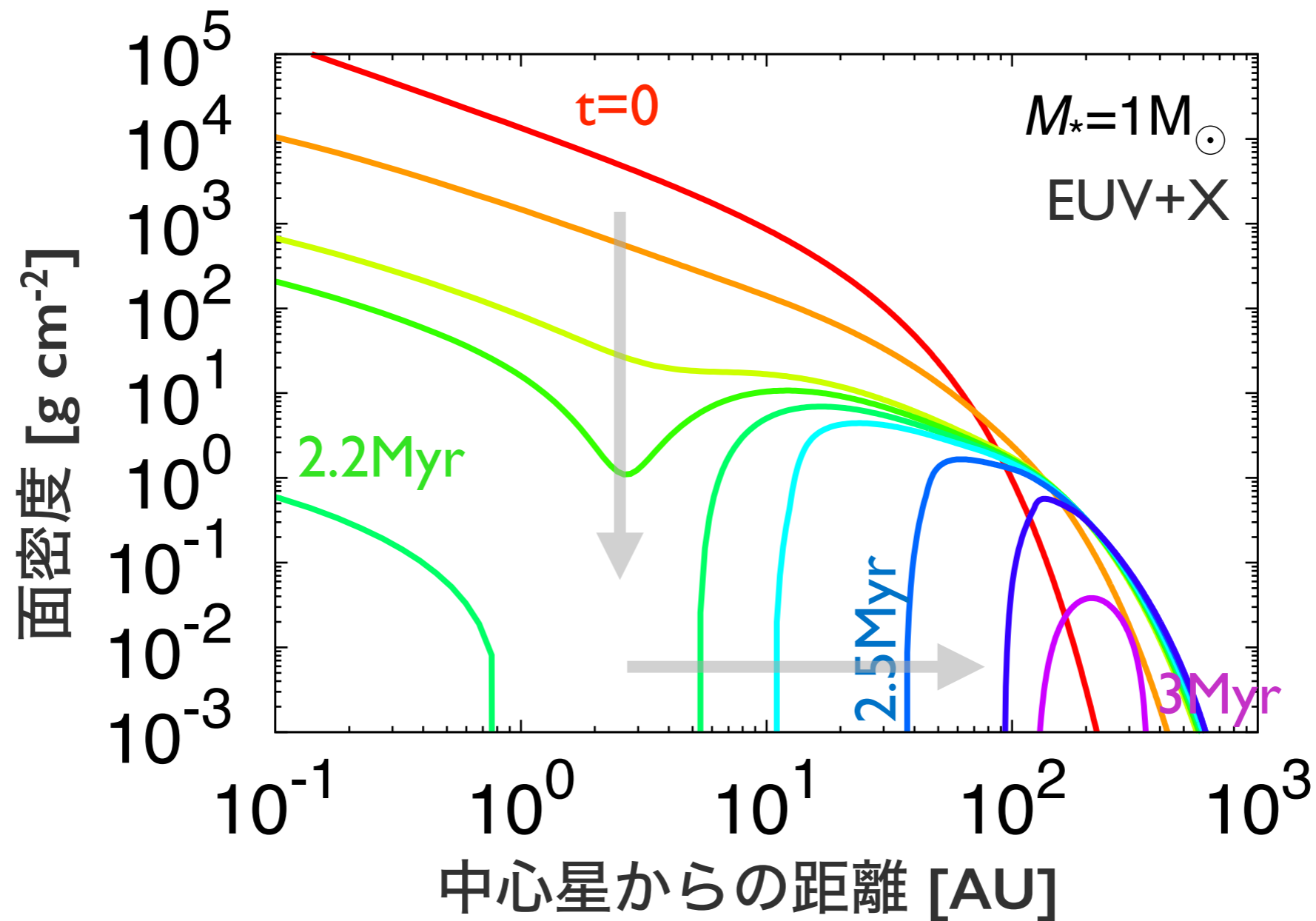
圧力勾配による寄与などを考慮
すると $R_c = 0.2R_g$

$R > R_c$ でガスは流出可能

光蒸発による質量損失率のプロファイル



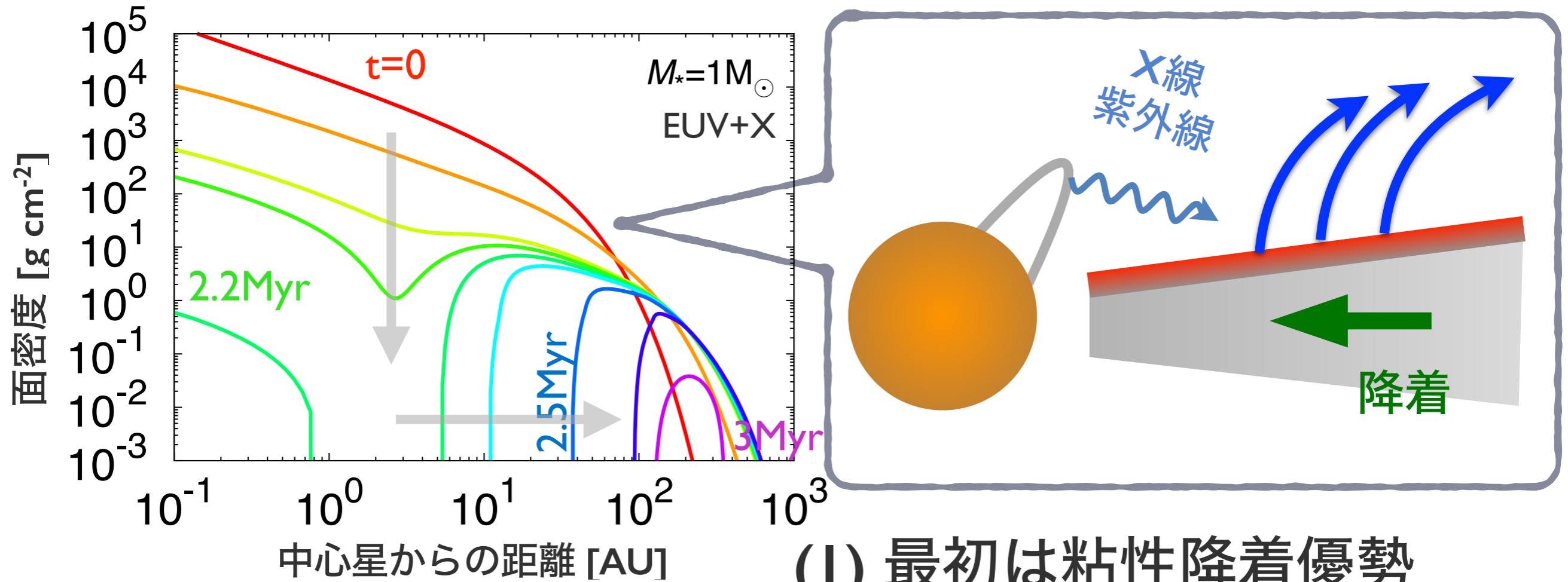
粘性降着 + 光蒸発の円盤進化の例



Clarke+01

「 \sim Myrの後にinside-out的な速やかな散逸」
→ 観測と整合的

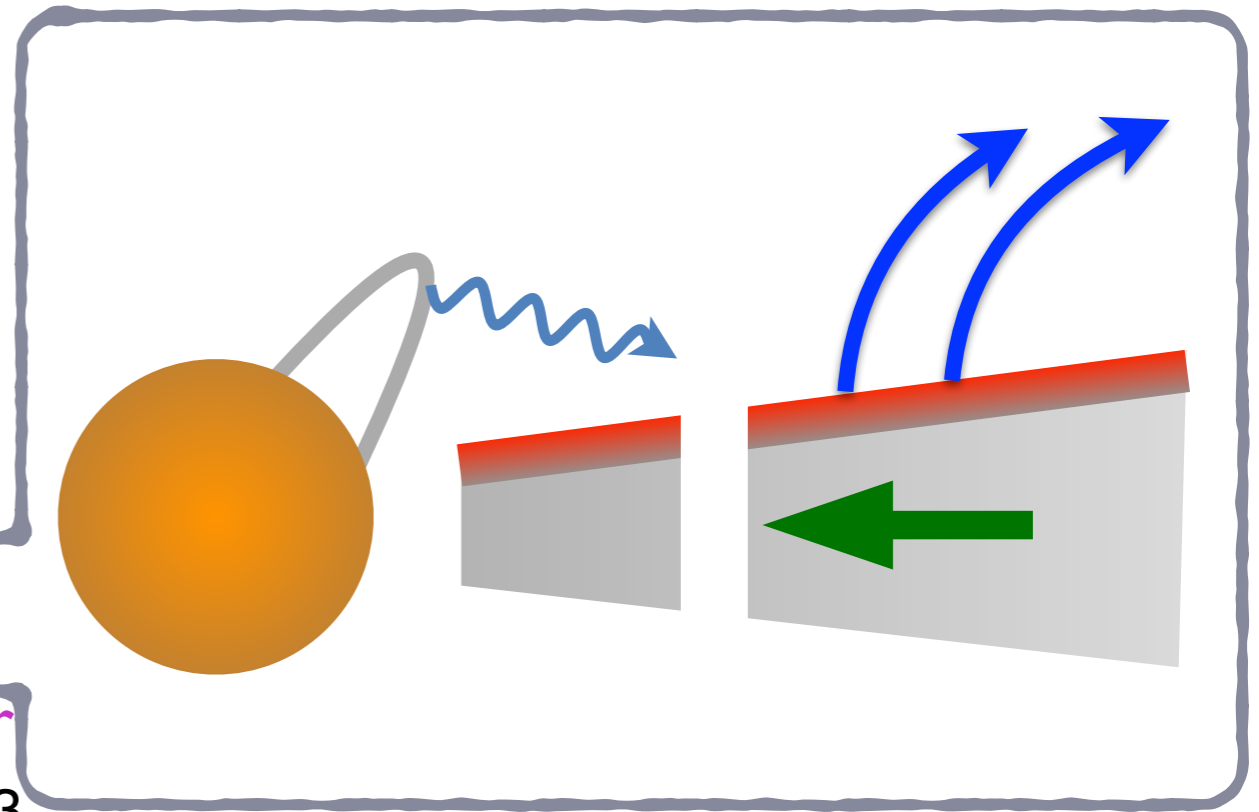
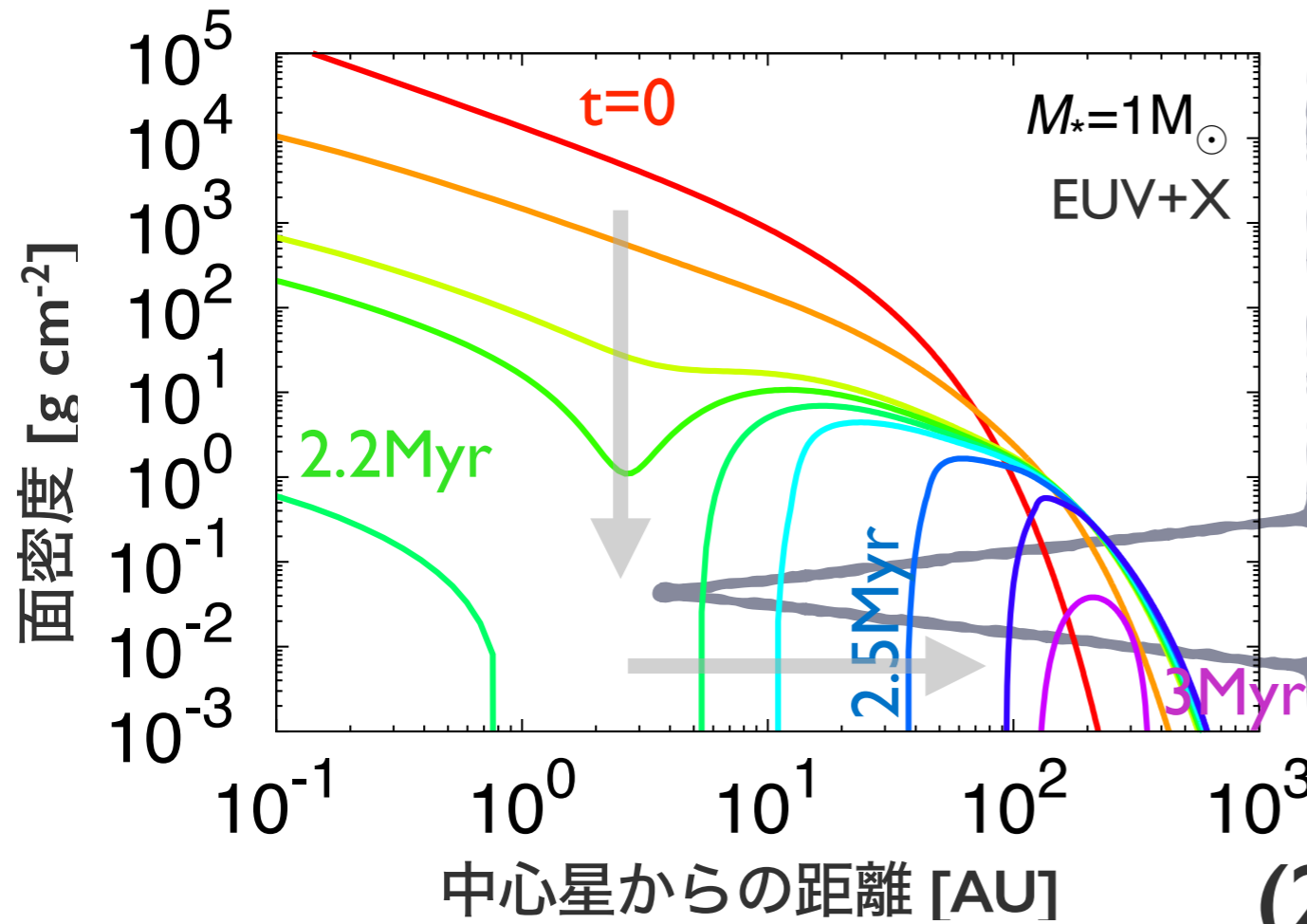
粘性降着 + 光蒸発の円盤進化の例



(I) 最初は粘性降着優勢

降着率 > 光蒸発率

粘性降着 + 光蒸発の円盤進化の例



(2) 降着率 ~ 光蒸発率 になるとギャップが空く

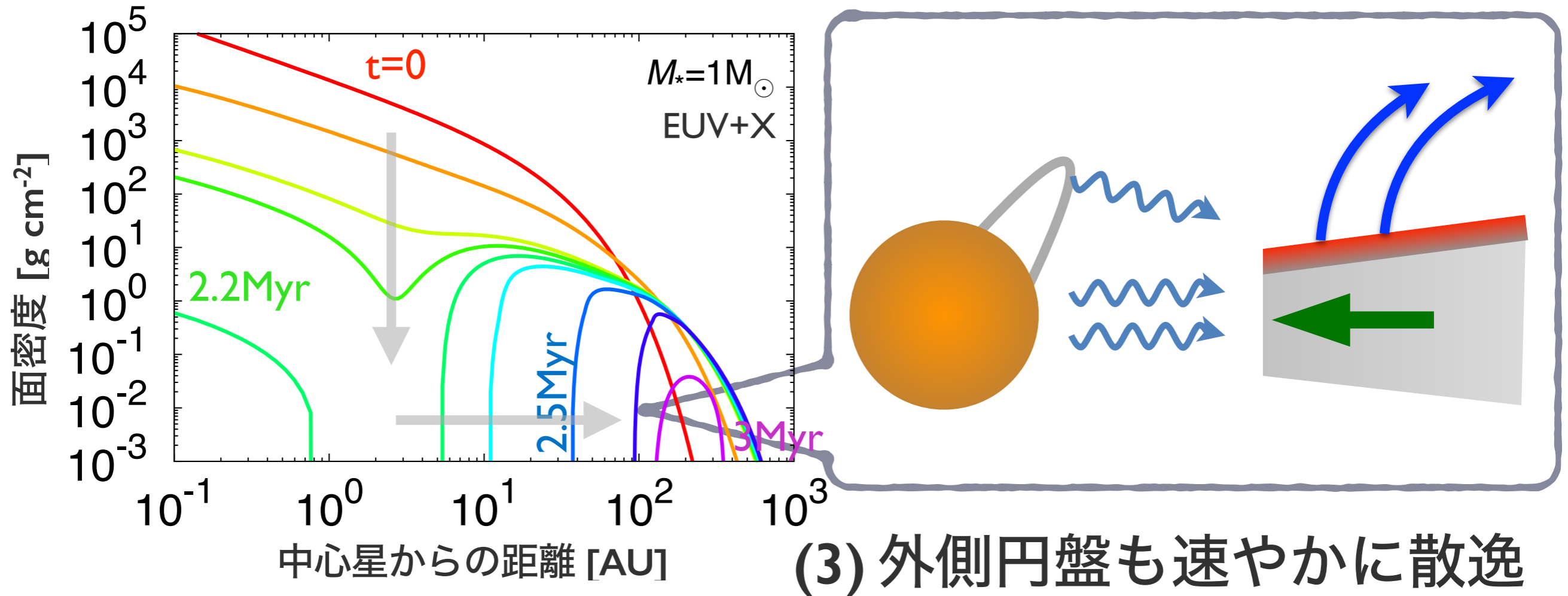
とギャップが空く

内側円盤は速やかに降着

$t_v \sim 1000 \text{ yr at } 1 \text{ AU}$

いつ・どこでギャップが空くかは光蒸発率に依存

粘性降着 + 光蒸発の円盤進化の例

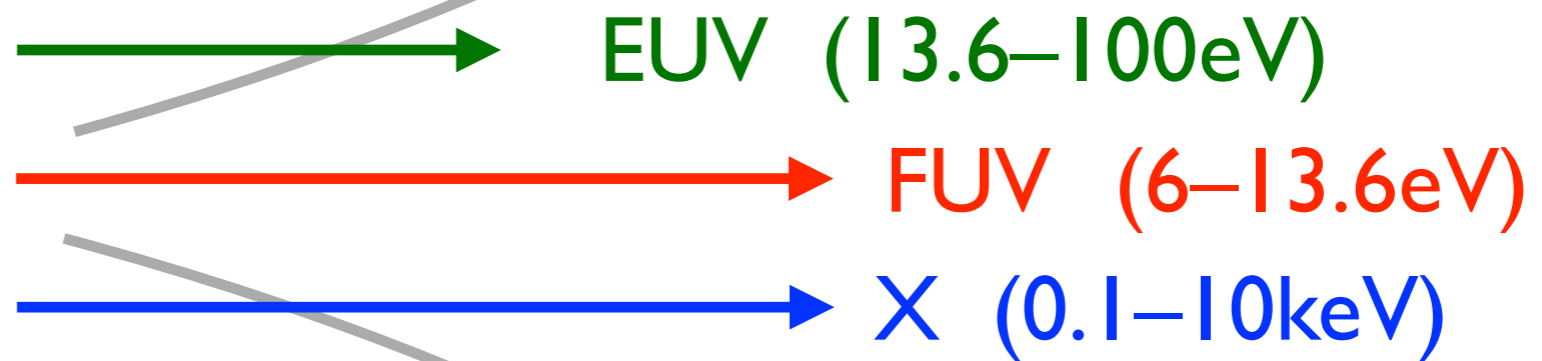
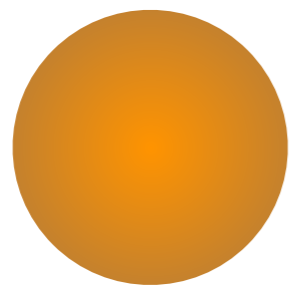


いつ・どこでギャップが空くかは光蒸発率に依存

粘性降着 + 光蒸発のモデルで
観測から要請される散逸過程を実現

ただし定量的な議論のために
光蒸発理論の精密化が必要

→ まず光蒸発機構を概観し、
課題と近年の進展について紹介



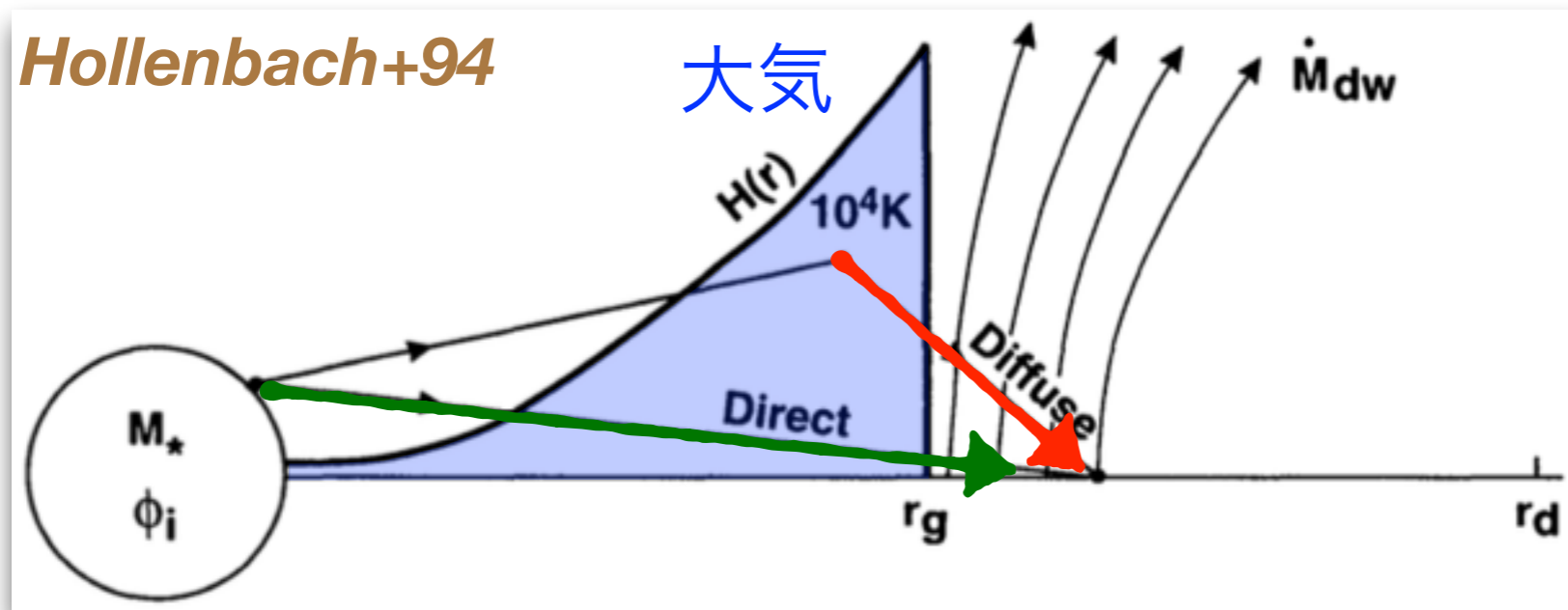
光蒸発率 $\dot{\Sigma}$ = 密度 \times 速度
 ↑
 音速

光蒸発機構

EUV : $\sim 10^4\text{K}$ のほぼ等温の電離層 (cf. HII領域) $\rightarrow R_c \sim 2\text{AU}$

$$\dot{M}_{\text{EUV}} \sim 10^{-10} M_{\odot}/\text{yr}$$

- 水素の電離 \rightarrow 電子が周囲を加熱. 放射冷却の強い温度依存性 $\rightarrow \sim 10^4\text{K}$
- 吸収断面積大, しかし再結合による再放射がある (拡散光)



*See also Font+04,
Alexander+06*

光蒸発機構

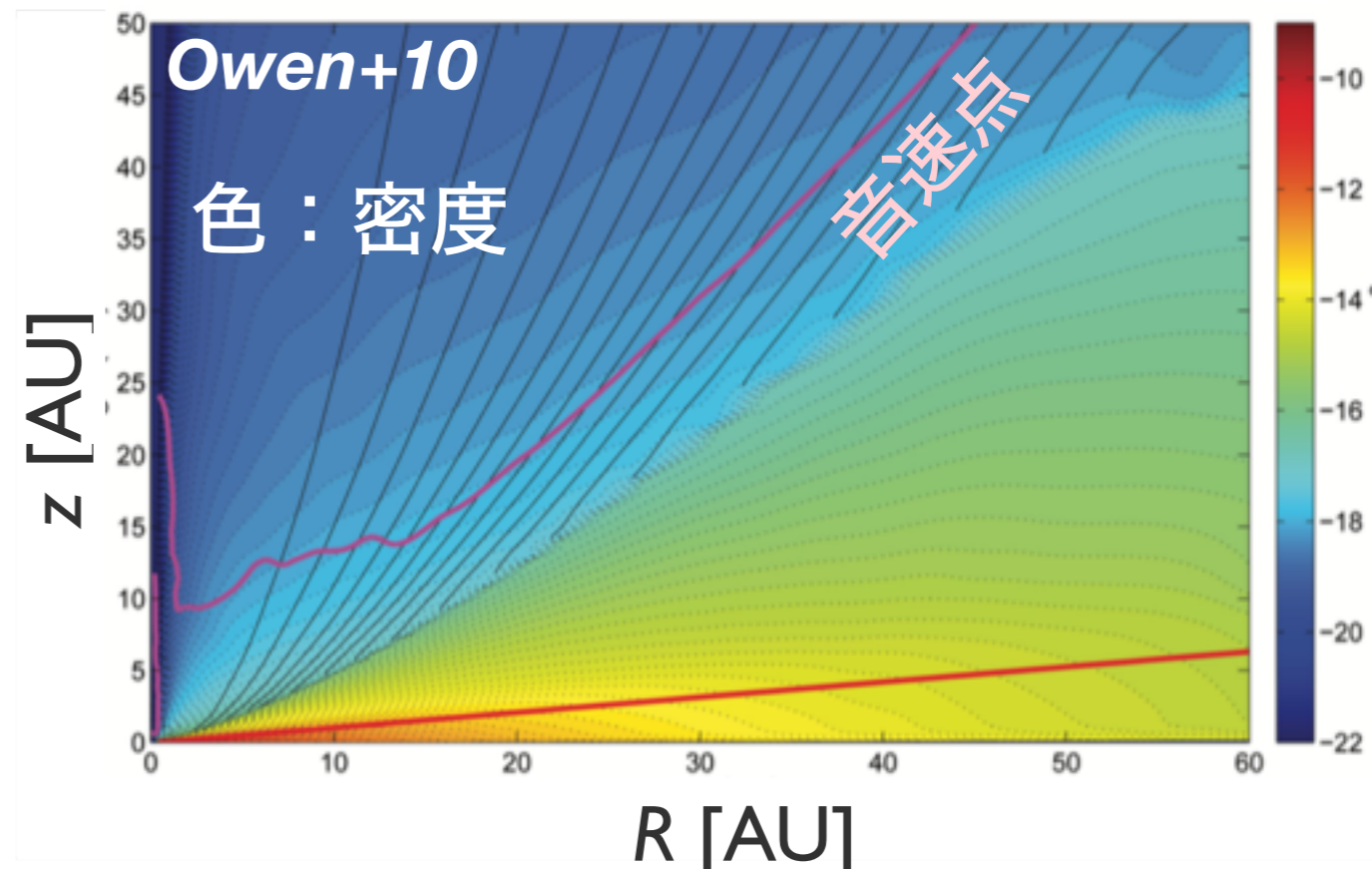
EUUV : $\sim 10^4\text{K}$ のほぼ等温の電離層 (cf. HII領域) $\rightarrow R_c \sim 2\text{AU}$

$$\dot{M}_{\text{EUUV}} \sim 10^{-10} M_{\odot}/\text{yr}$$

X : 主に $\sim 3000\text{--}5000\text{K}$ の層からガスが流出. EUUVより低温だが深くまで浸透し, flowの密度は大きい $\rightarrow \dot{M}_X \sim 10^{-8} M_{\odot}/\text{yr}$

- 加熱源 : O, C, Feなどの重元素からの光電子 ($\sim 0.3\text{--}1\text{keV}$ が寄与)
- 吸収断面積はEUUVより ~ 3 桁小さい
Owen+10, 12

※温度の決定は厳密な
輻射輸送計算ではない



光蒸発機構

EUV : $\sim 10^4\text{K}$ のほぼ等温の電離層 (cf. HII領域) $\rightarrow R_c \sim 2\text{AU}$

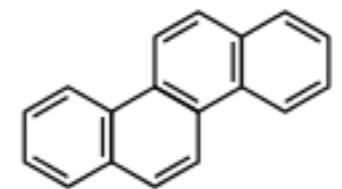
$$\dot{M}_{\text{EUV}} \sim 10^{-10} M_{\odot}/\text{yr}$$

X : 主に $\sim 3000\text{--}5000\text{K}$ の層からガスが流出. EUVより低温だが深くまで浸透し, flowの密度は大きい $\rightarrow \dot{M}_X \sim 10^{-8} M_{\odot}/\text{yr}$

FUV : $\sim 100\text{--}1000\text{K}$ の層から流出. $\dot{M}_{\text{FUV}} \sim \dot{M}_X \sim 10^{-8} M_{\odot}/\text{yr}$

- 加熱源 : ダスト・PAHsからの光電子, H_2 分子の励起・脱励起
- X線と同程度の吸収断面積

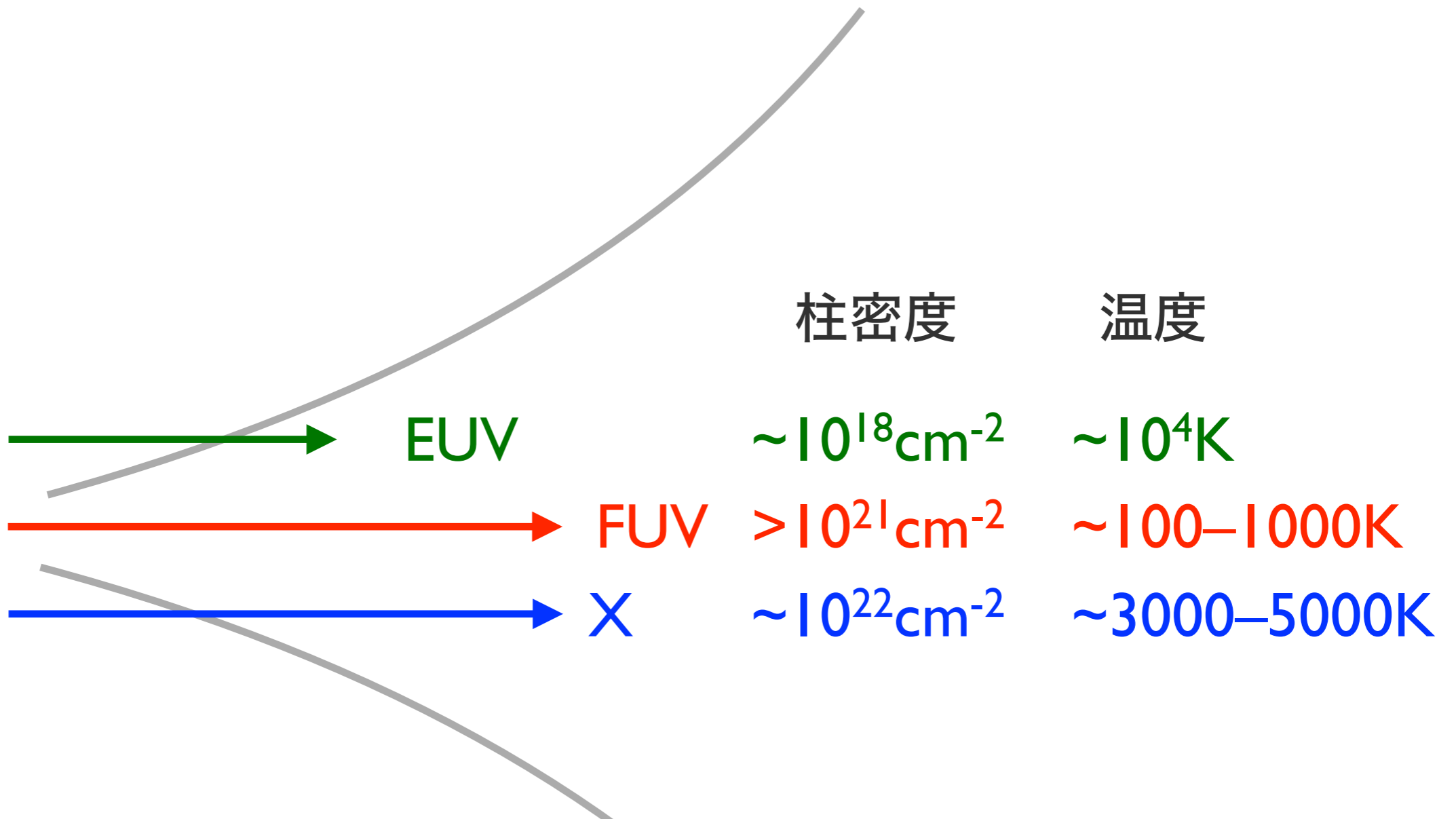
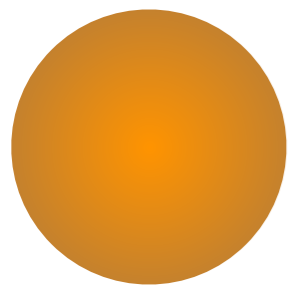
PAHs:



多環芳香族炭化水素

現状の理解

$$\dot{M}_X \sim \dot{M}_{\text{FUV}} \sim 10^{-8} M_{\odot} / \text{yr} \\ \sim 100 \dot{M}_{\text{EUUV}}$$



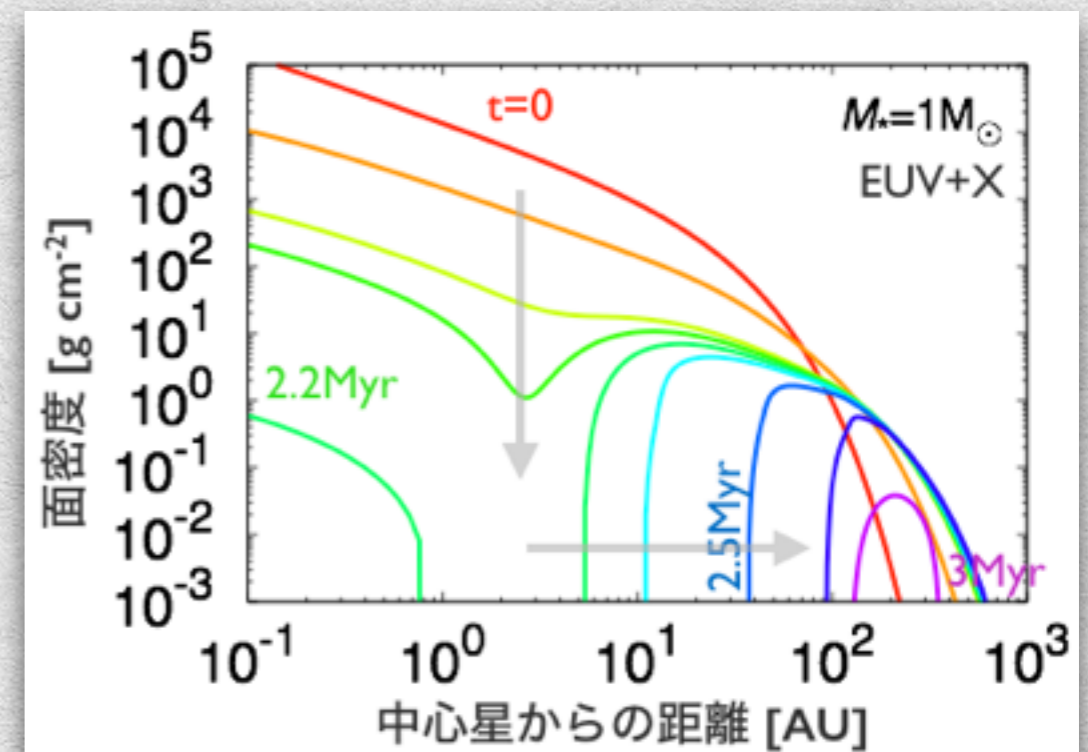
課題と近年の進展

● 光蒸発

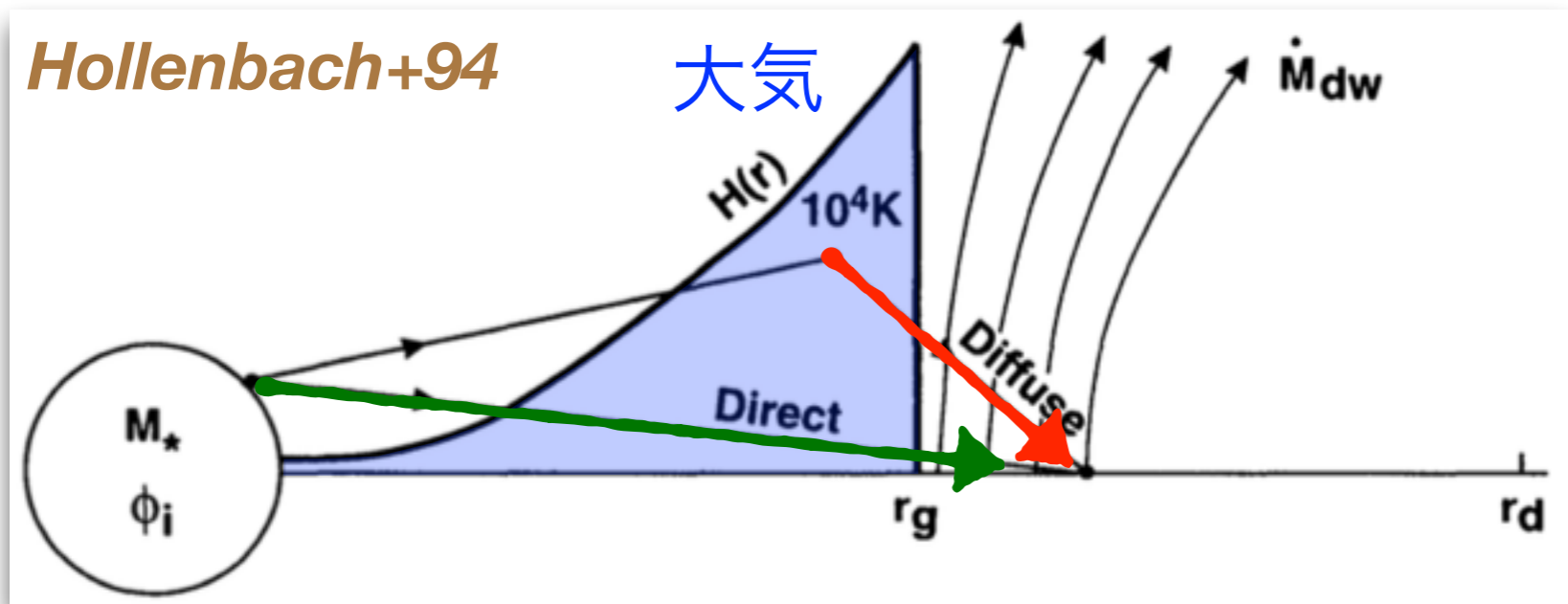
1. 化学反応と輻射輸送を同時に解く流体計算
 - 正確な質量損失率の決定
2. 穴空き円盤の散逸過程
3. 若い星のXUV光度と（X線）スペクトルの見積もり

● 降着

1. 粘性降着過程
2. 磁場駆動円盤風による角運動量輸送・降着過程

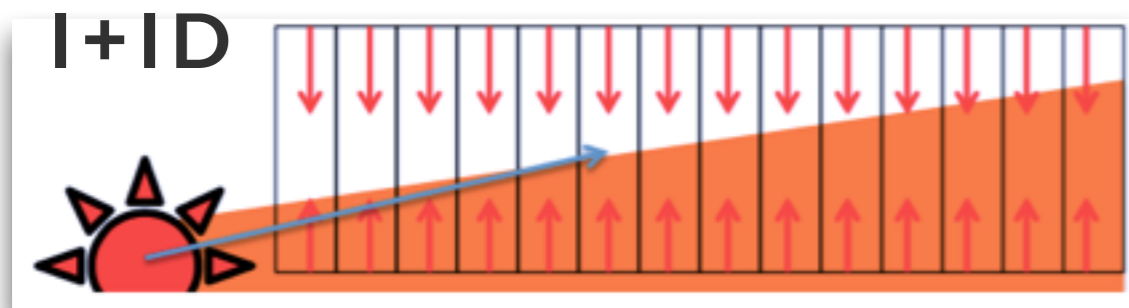
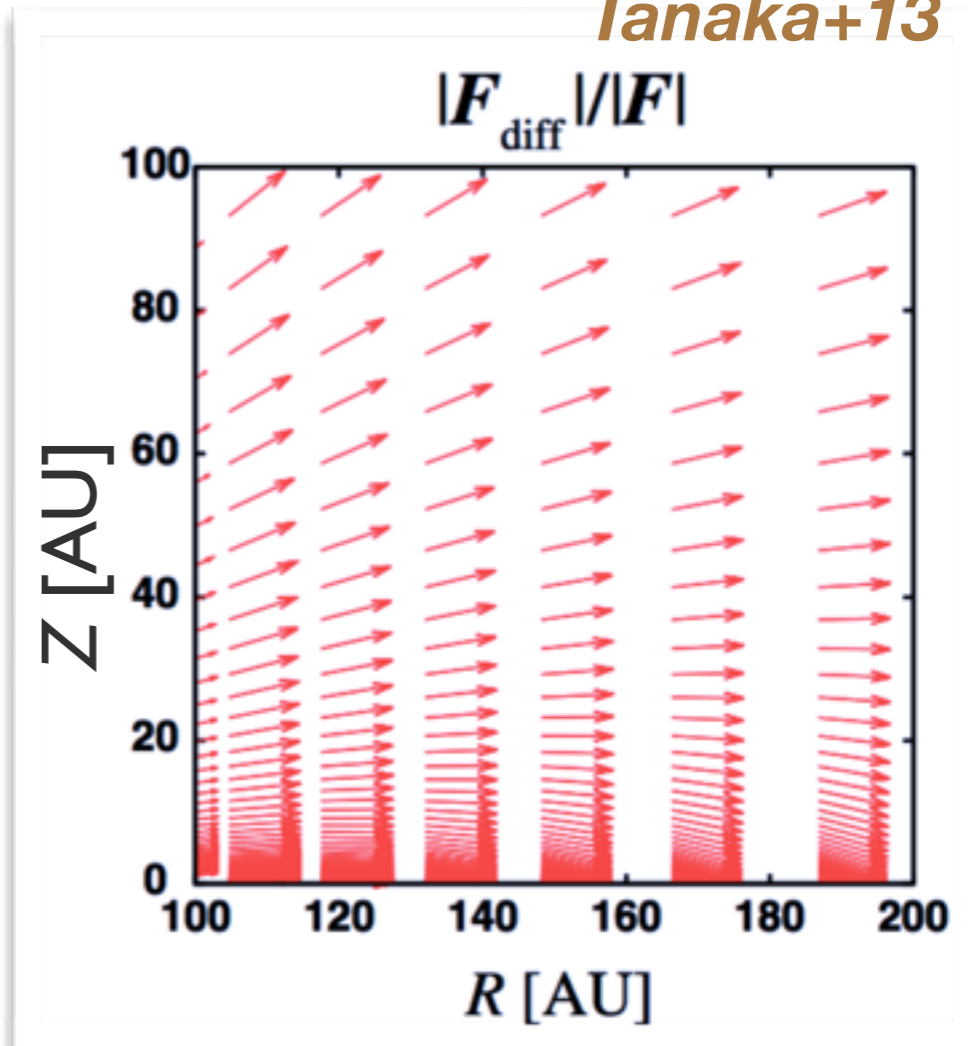


EUV光蒸発の2D輻射輸送計算



2D輻射輸送計算の結果

Tanaka+13



(c) 田中圭さん
@フロリダ大

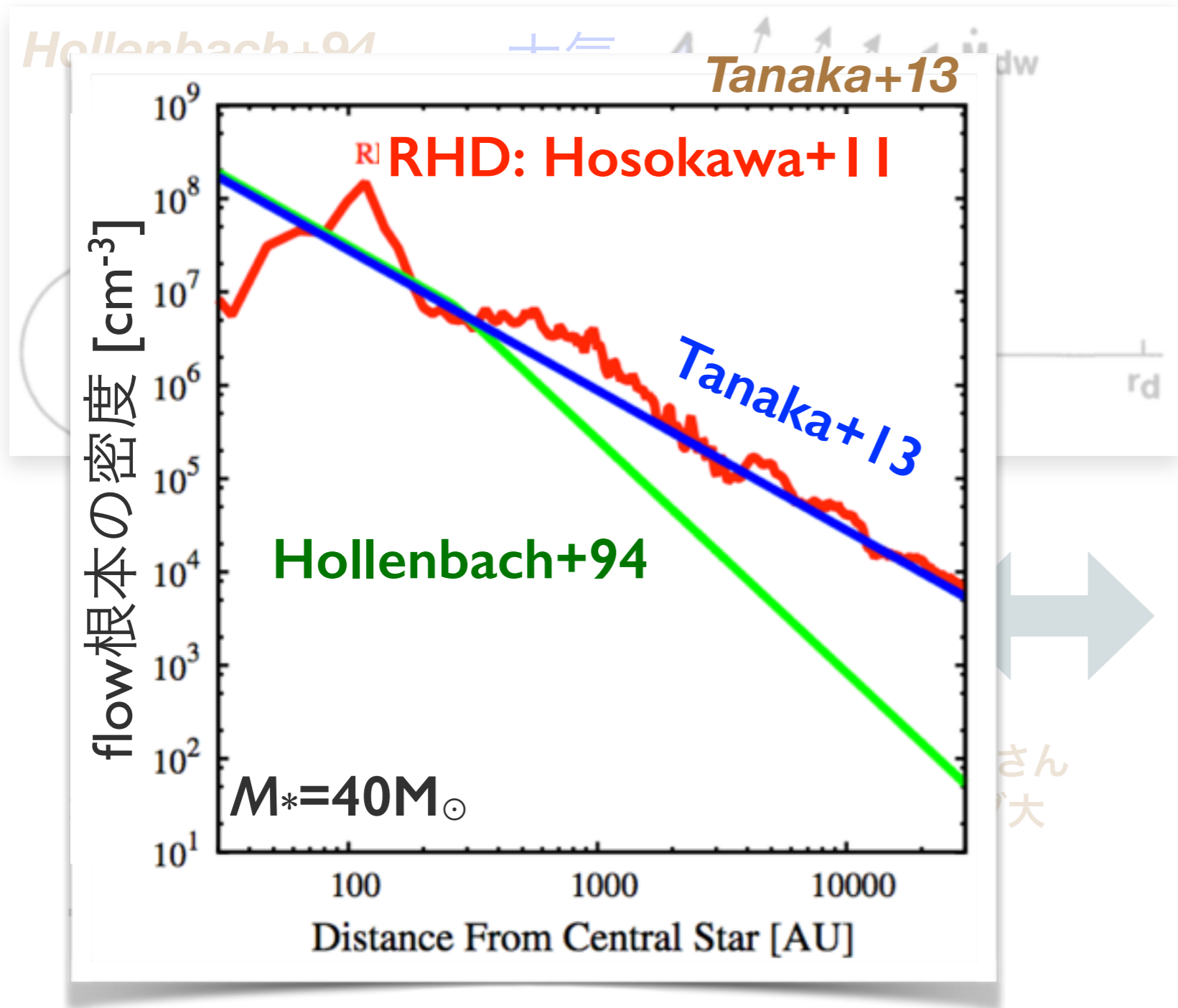
拡散光が重要であると仮定

→ 鉛直方向のみの輻射輸送計算

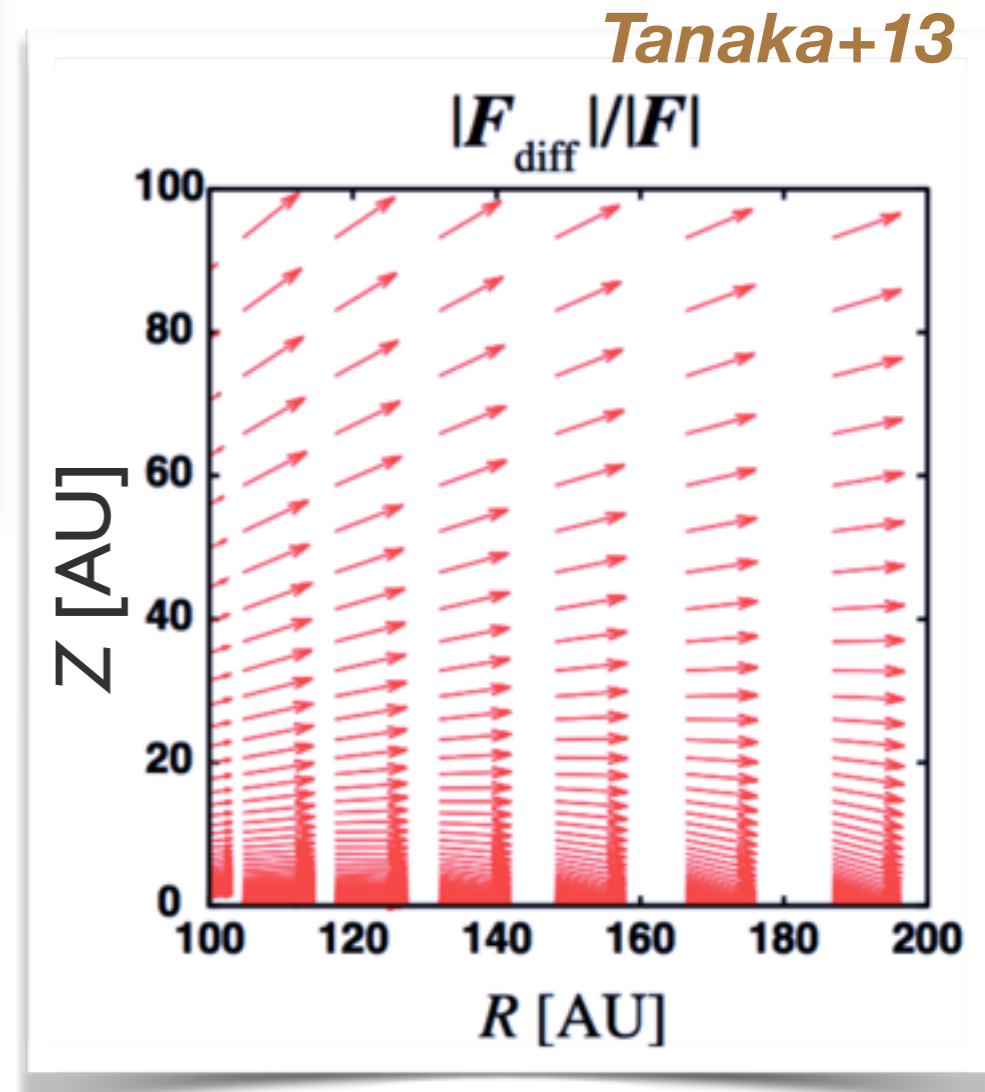
拡散光フラックス：
動径方向 ≫ 鉛直方向

→ **I+ID近似は不適當**

EUV光蒸発の2D輻射輸送計算



2D輻射輸送計算の結果



2D輻射輸送計算の結果

→ 外側での散逸率の見積もりに違い

拡散光フラックス：
動径方向»鉛直方向

→ I+ID近似は不適當

正確な質量損失率の決定

- XとFUVが重要：Owen+ (X), Gorti+ (FUV) の計算結果に依拠
- ただし, Owen+は温度決定を簡略化, Gorti+は流体計算をしていない, という問題あり

| Ingredients | Alexander et al. (2006) | Owen et al. (2010) | Gorti et al. (2009) |
|-----------------------|-------------------------|--------------------|---------------------|
| Hydrodynamics | Yes | Yes | No |
| Thermal Calculation | No | Yes | Yes |
| Chemistry Calculation | No | No | Yes |
| FUV heating | No | No | Yes |
| EUV heating | Yes | Yes | Yes |
| X-ray heating | No | Yes | Yes |

Ercolano+Pascucci17

自己無撞着な輻射流体計算から光蒸発率を見積もる必要

Alexnader+14, PPVI, Gorti+16, Ercolano+Pascucci17

正確な質量損失率の決定

DRAFT VERSION JUNE 15, 2017

Preprint typeset using L^AT_EX style emulateapj v. 2/16/10

Nakatani, Hosokawa+
(arXiv:1706.04570)

RADIATION HYDRODYNAMICS SIMULATIONS OF PHOTOEVAPORATION
OF PROTOPLANETARY DISKS: METALLICITY DEPENDENCE

RIOUEI NAKATANI¹, TAKASHI HOSOKAWA², NAOKI YOSHIDA^{1,3}, HIDEKO NOMURA⁴, AND ROLF KUIPER⁵

Draft version June 15, 2017

DRAFT VERSION JUNE 13, 2017

Preprint typeset using L^AT_EX style emulateapj v. 12/16/11

Wang+Goodman
(arXiv:1706.03155)

HYDRODYNAMIC PHOTOEVAPORATION OF PROTOPLANETARY DISKS WITH CONSISTENT
THERMOCHEMISTRY

LILE WANG¹ AND JEREMY J. GOODMAN¹

Draft version June 13, 2017

正確な質量損失率の決定

| Ingredients | Alexander et al. (2006) | Owen et al. (2010) | Gorti et al. (2009) |
|-----------------------|-------------------------|--------------------|---------------------|
| Hydrodynamics | Yes | Yes | No |
| Thermal Calculation | No | Yes | Yes |
| Chemistry Calculation | No | No | Yes |
| FUV heating | No | No | Yes |
| EUV heating | Yes | Yes | Yes |
| X-ray heating | No | Yes | Yes |

Nakatani+ Wang+

| | |
|---|---|
| ○ | ○ |
| ○ | ○ |
| ○ | ○ |
| ○ | ○ |
| ○ | ○ |
| × | ○ |

PLUTO

Athena++

2D

2D

ray-tracing

ray-tracing

see also Haworth+16
(近傍大質量星による光蒸発)

Wang+Goodman17, *submitted*

- EUV · FUV · X線全て考慮

EUV (+hard FUV*) が最も大事で、

$\dot{M} \sim 10^{-9} M_{\odot}/\text{yr}$

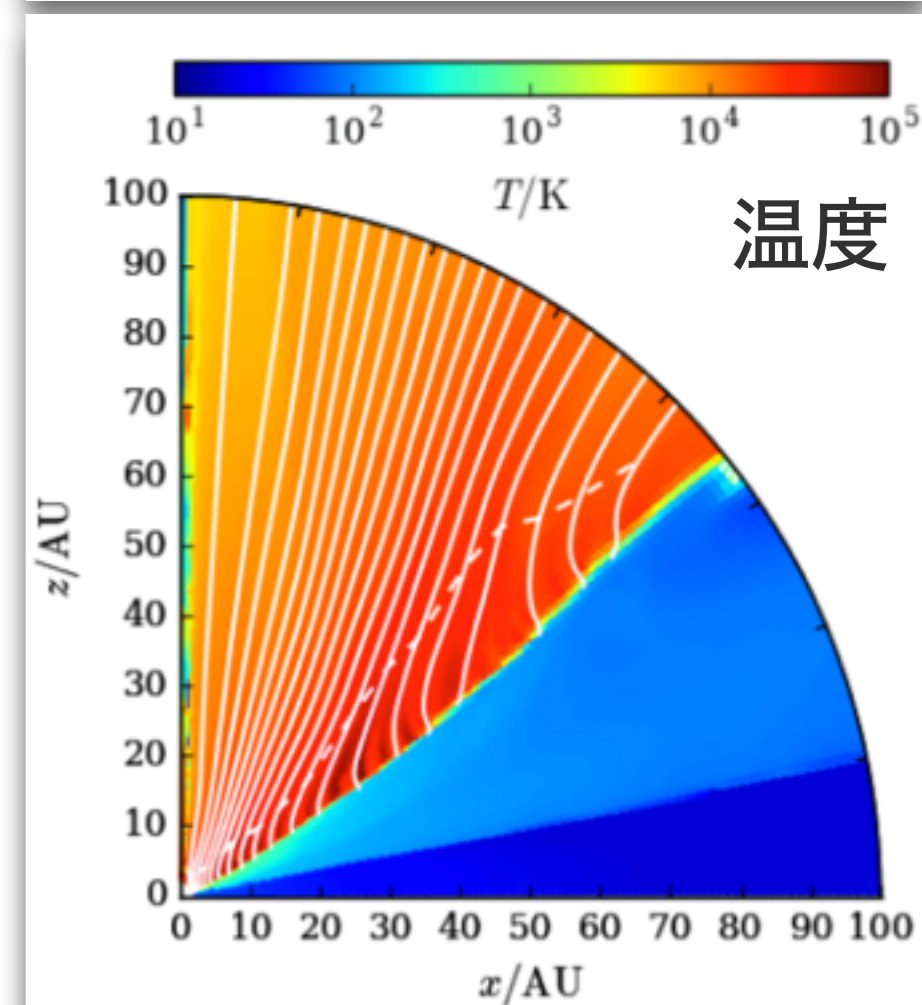
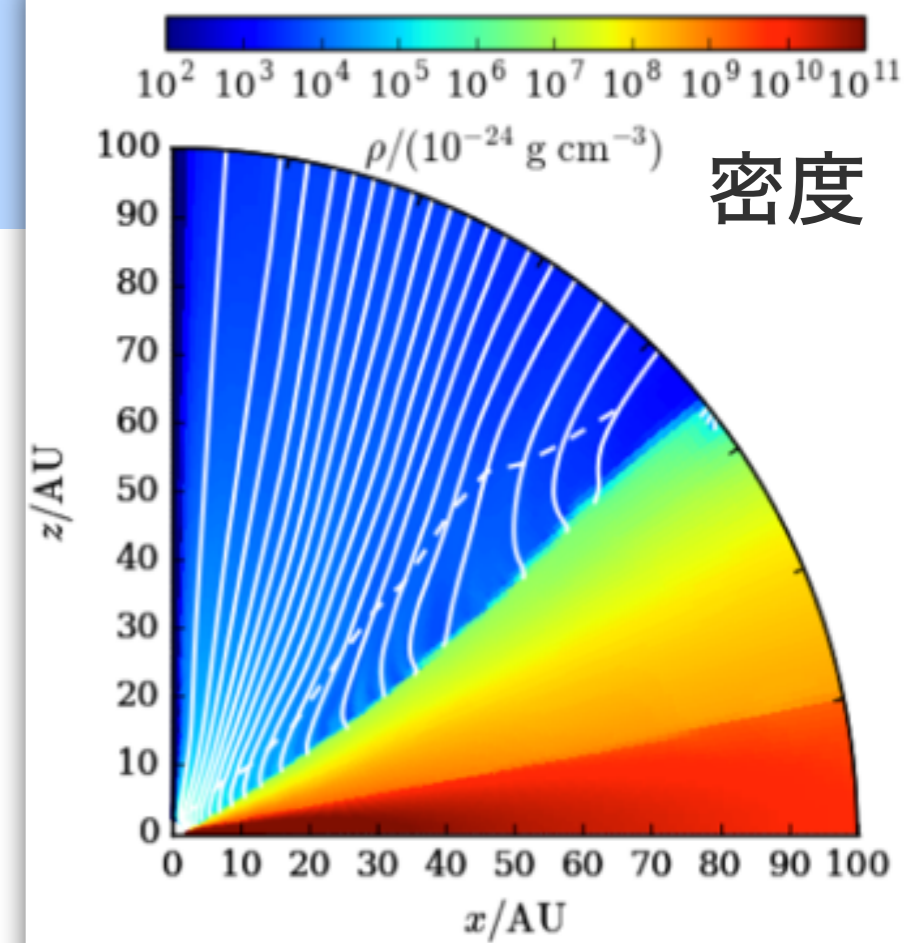
*11.2–13.6 eV,
H₂ pumpingによる加熱

これまでの理解より1桁小さい！

- Gorti+Hollenbach09では音速点の位置
(→密度・温度) の見積もりが不正確
→ 光蒸発率の推定に流体計算は必須
- Owen+の簡略化した温度推定より低温
→ 熱力学・化学反応は重要

※仮定しているダストサイズの影響大

※スペクトルなど改善点あり



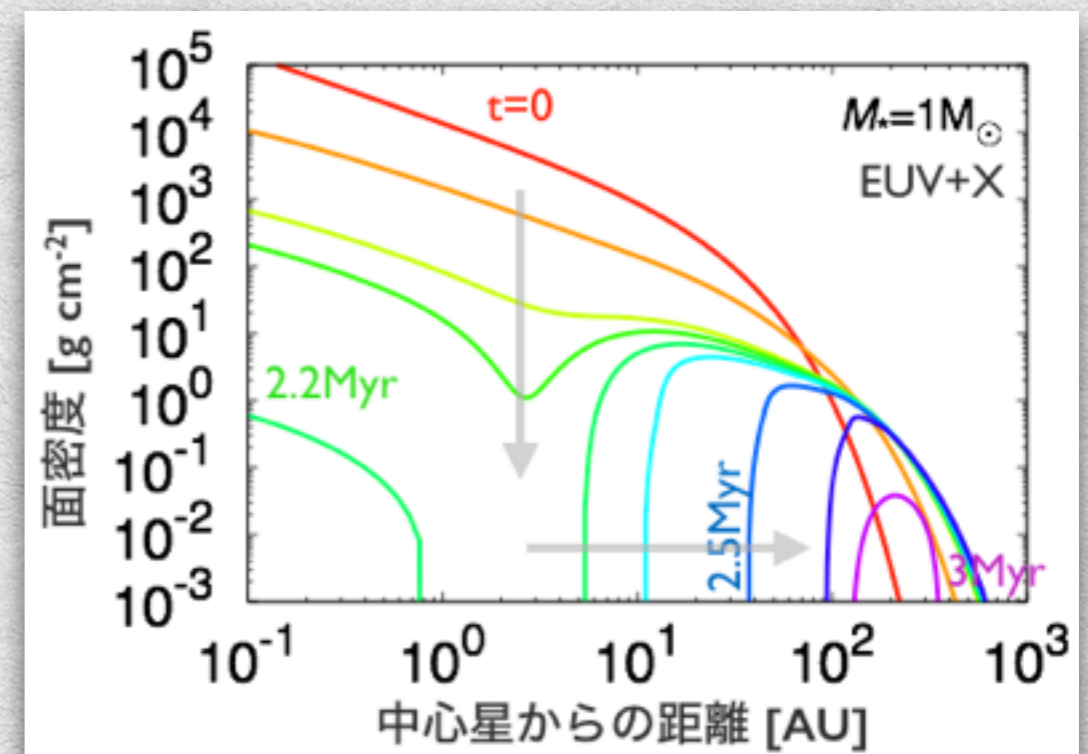
課題と近年の進展

● 光蒸発

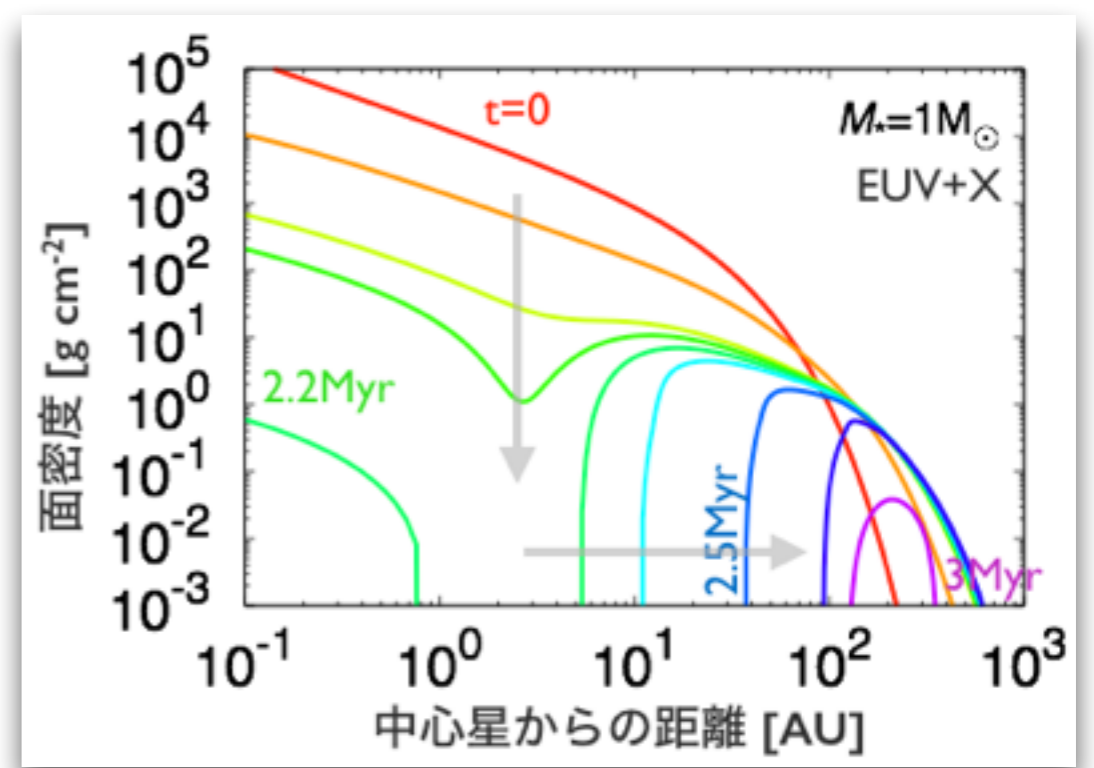
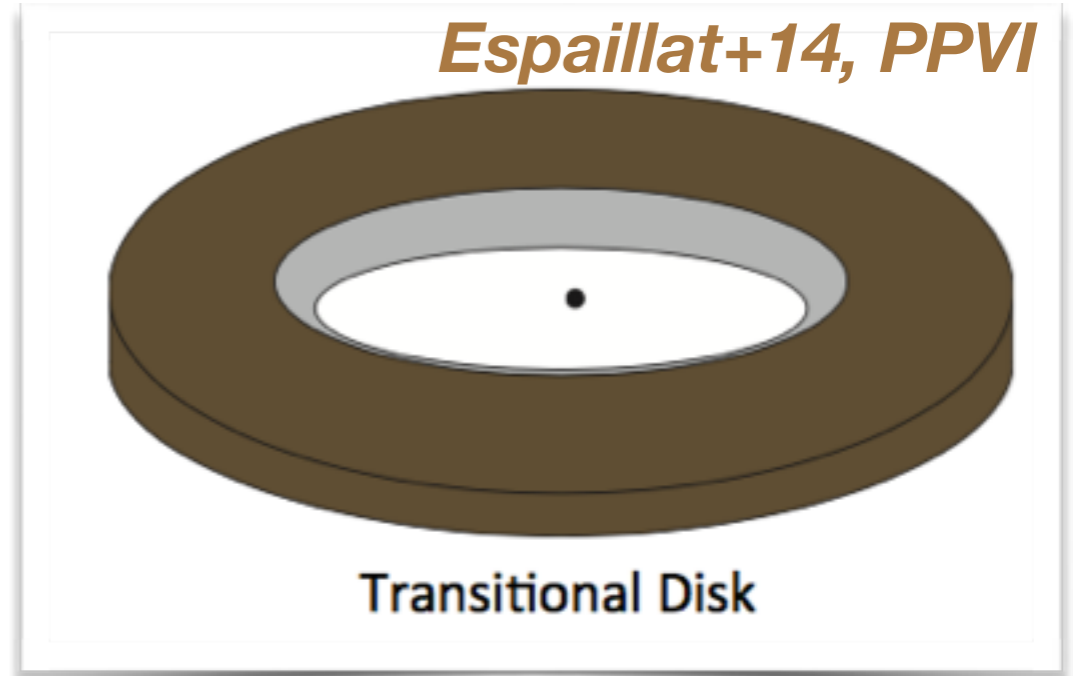
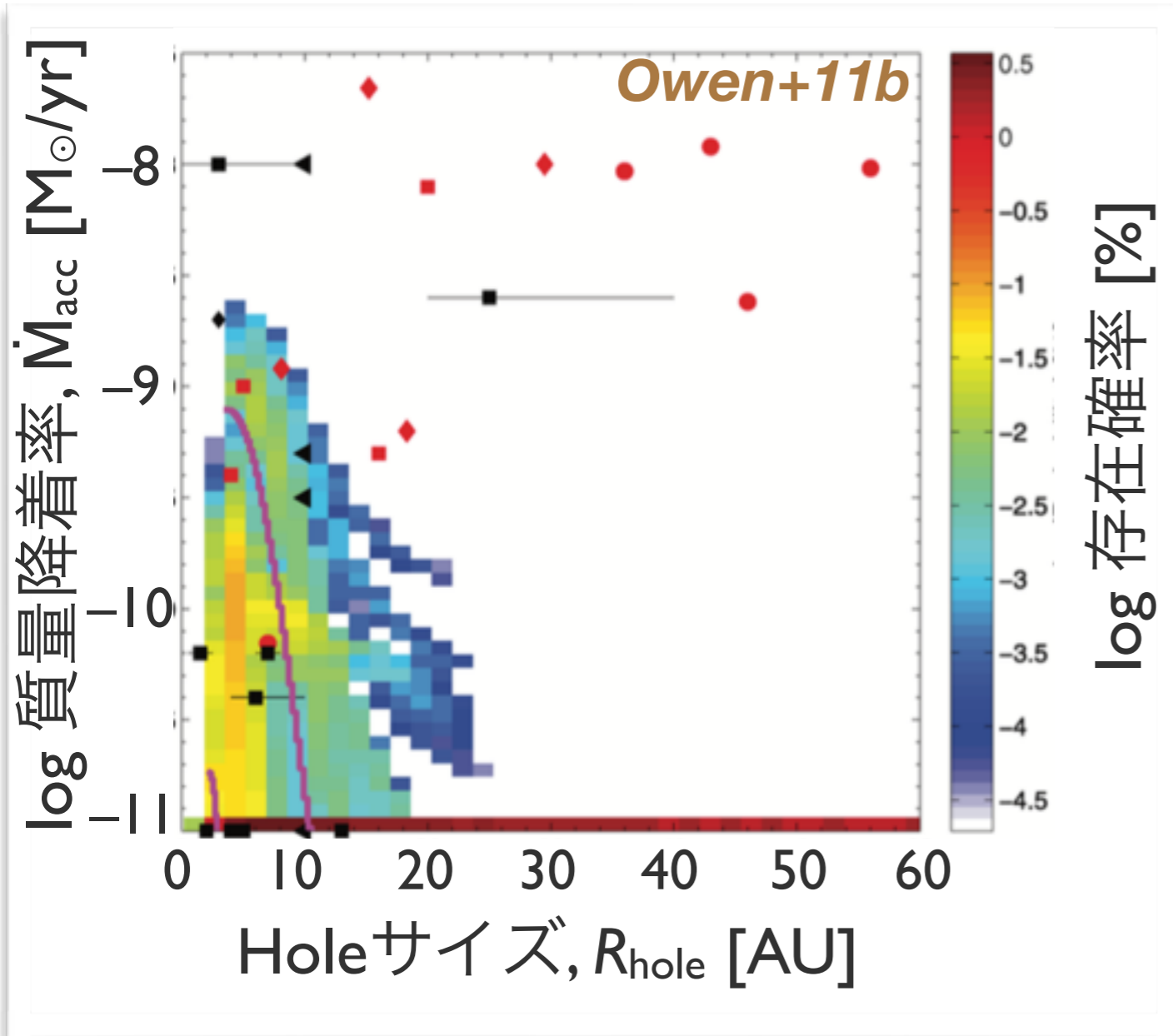
1. 化学反応と輻射輸送を同時に解く流体計算
 - 正確な質量損失率の決定
2. 穴空き円盤の散逸過程
3. 若い星のXUV光度と（X線）スペクトルの見積もり

● 降着

1. 粘性降着過程
2. 磁場駆動円盤風による角運動量輸送・降着過程

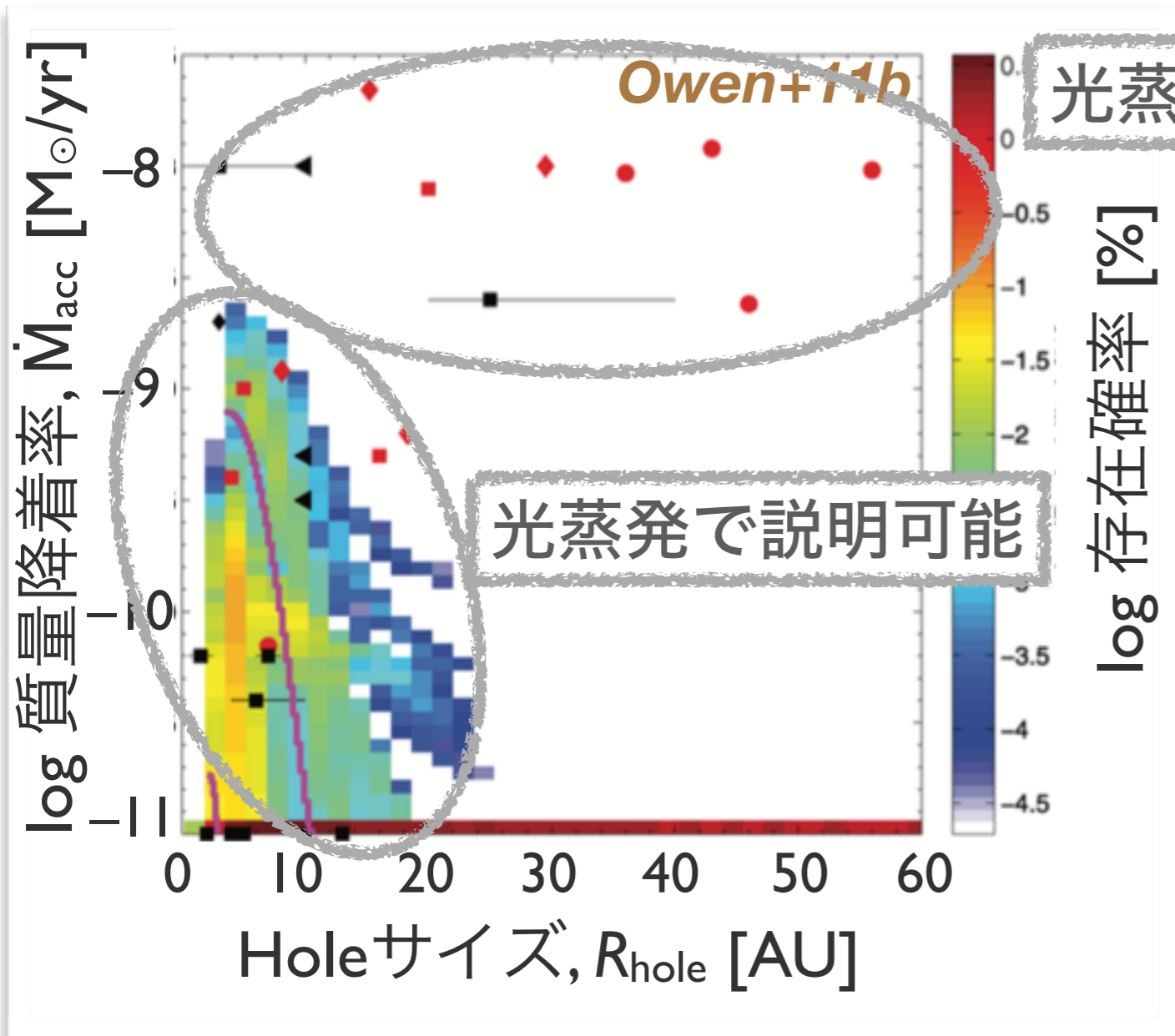


遷移円盤との比較



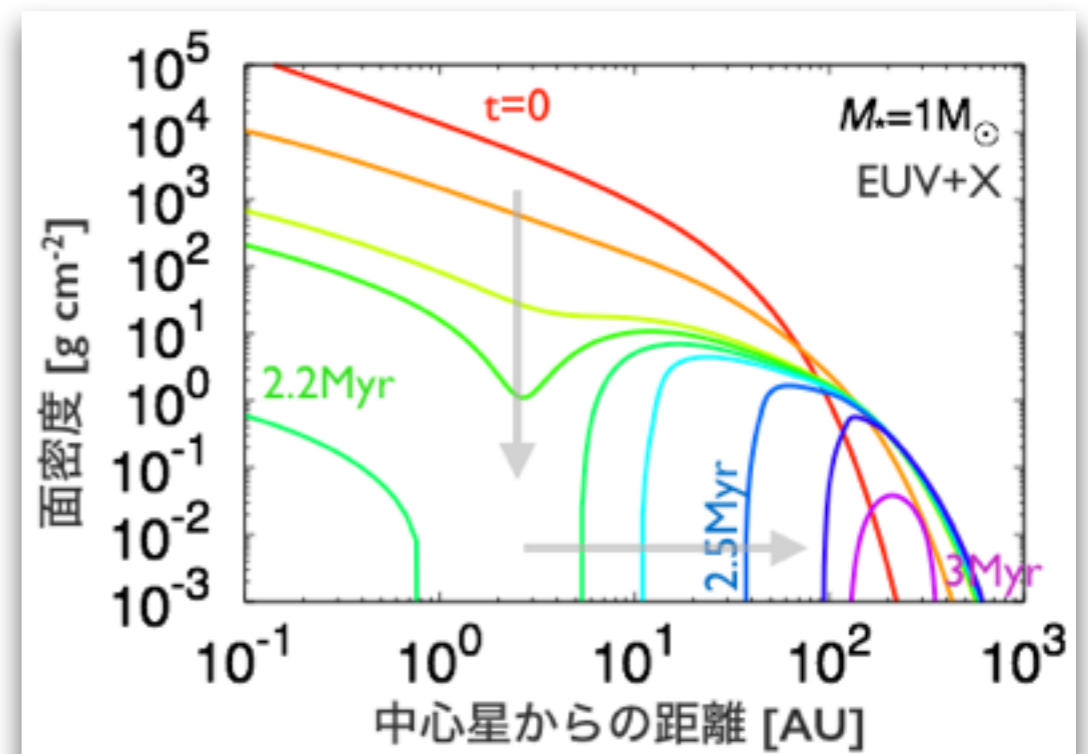
- 点：観測
- 色：滞在時間→検出確率（理論モデル）
- 線： $R_{\text{hole}}-\dot{M}$ 図上での“進化トラック”

遷移円盤との比較

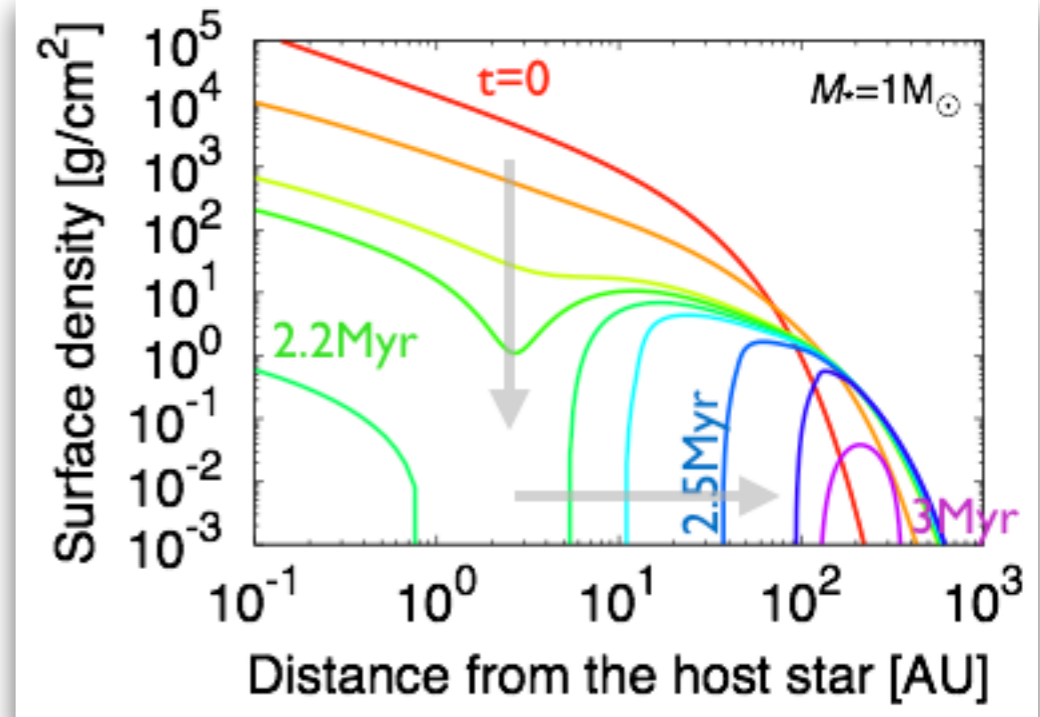
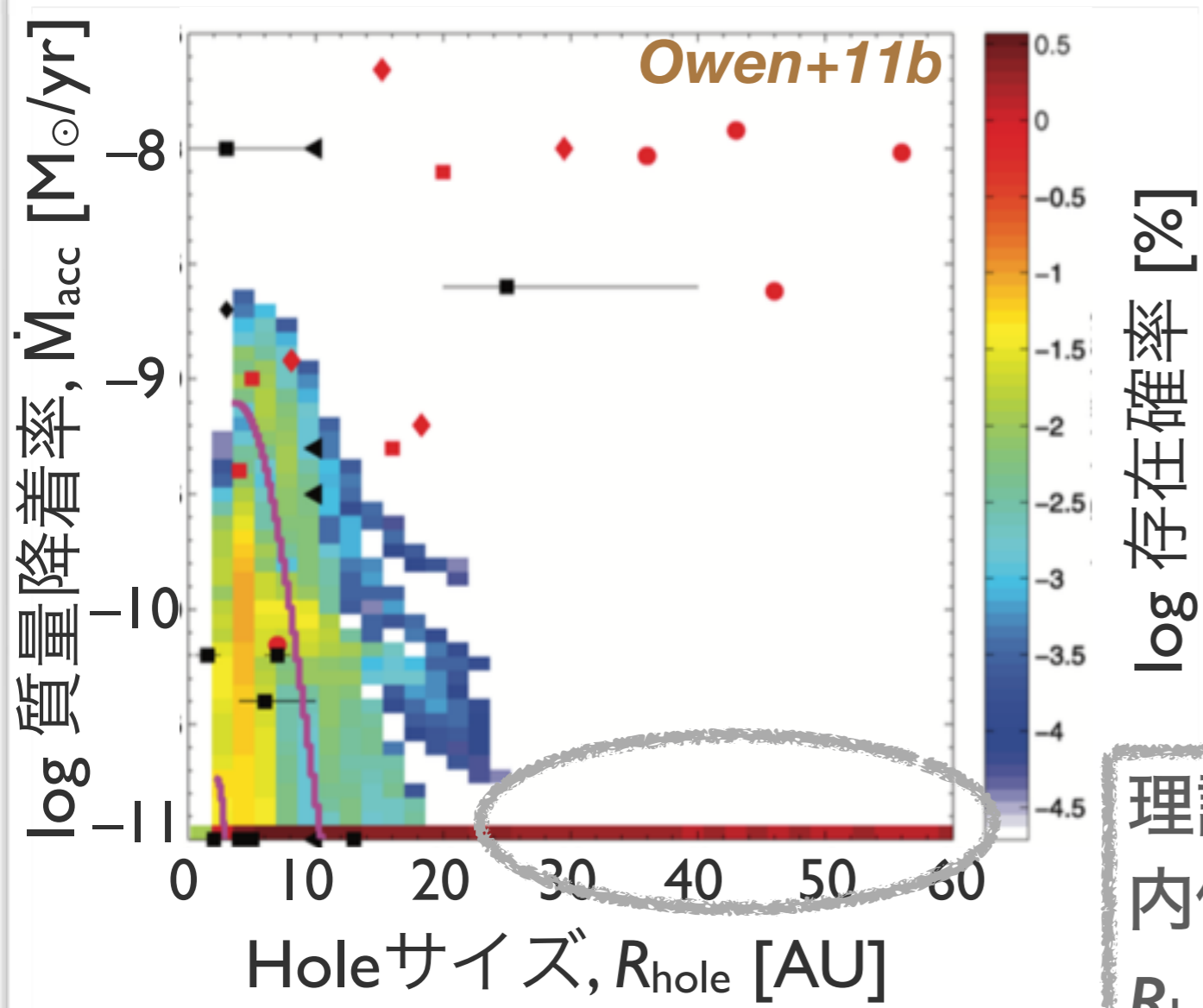


See also Morishima12,
Rosotti+13

- 点：観測
- 色：滞在時間→検出確率（理論モデル）
- 線： $R_{\text{hole}}-\dot{M}$ 図上での“進化トラック”



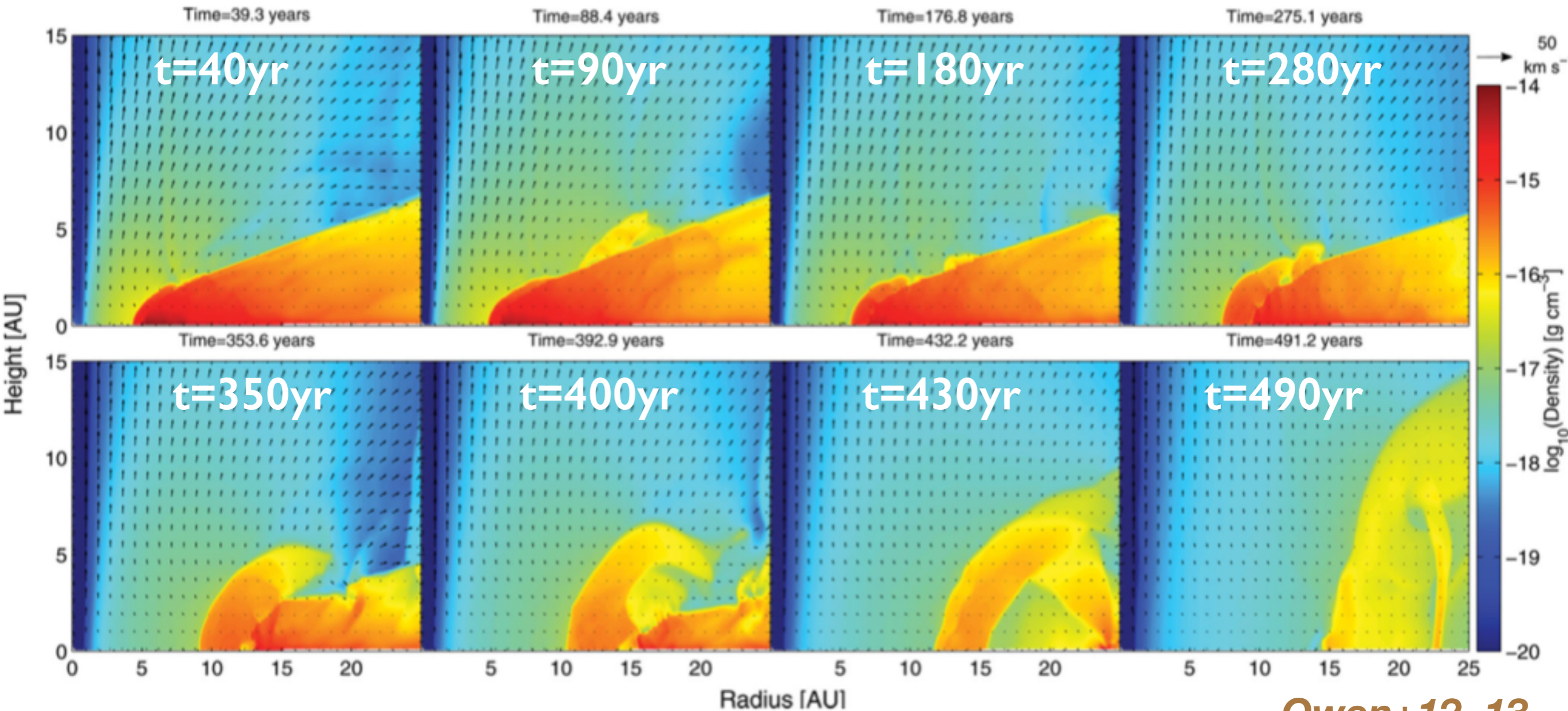
遷移円盤との比較



理論モデル：
 内側円盤が中心星に降着した後に
 R_{hole} 大・ \dot{M} ゼロの円盤が多数存在
 → 観測と不整合

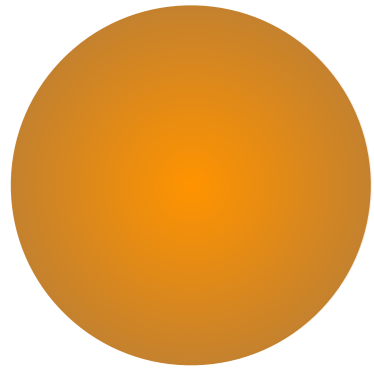
- 点：観測
- 色：滞在時間 → 検出確率 (理論モデル)
- 線： $R_{\text{hole}}-\dot{M}$ 図上での“進化トラック”

穴空き円盤の力学的散逸：Thermal sweeping

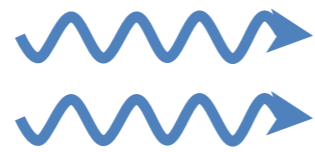


Owen+12, 13
(EUV+X光蒸発)

内側円盤が散逸した後に外側円盤を直接照射
→ <1000年で一気に散逸 (“Thermal sweeping”)



X線 $\sim 10^{22}\text{cm}^{-2}$

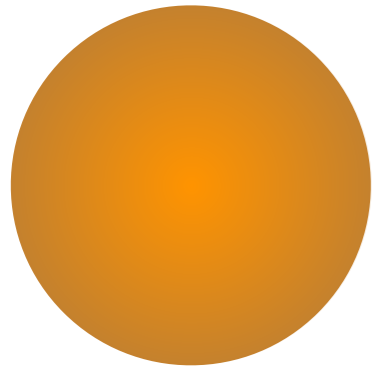


X線

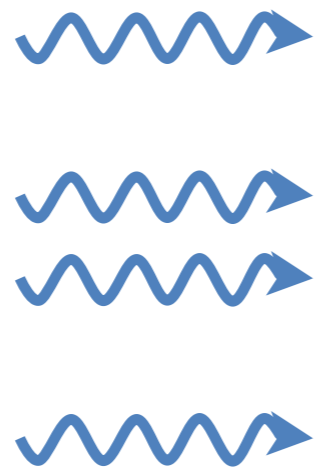


X線加熱領域

ダスト加熱領域

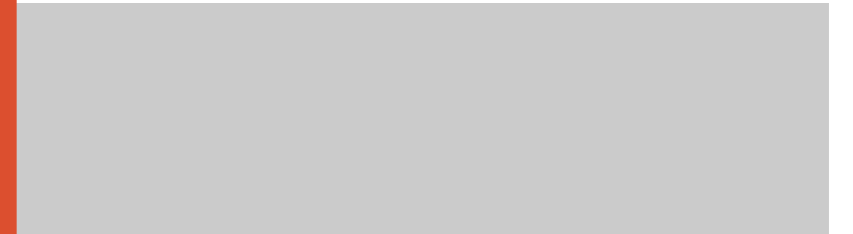


X線 $\sim 10^{22} \text{cm}^{-2}$

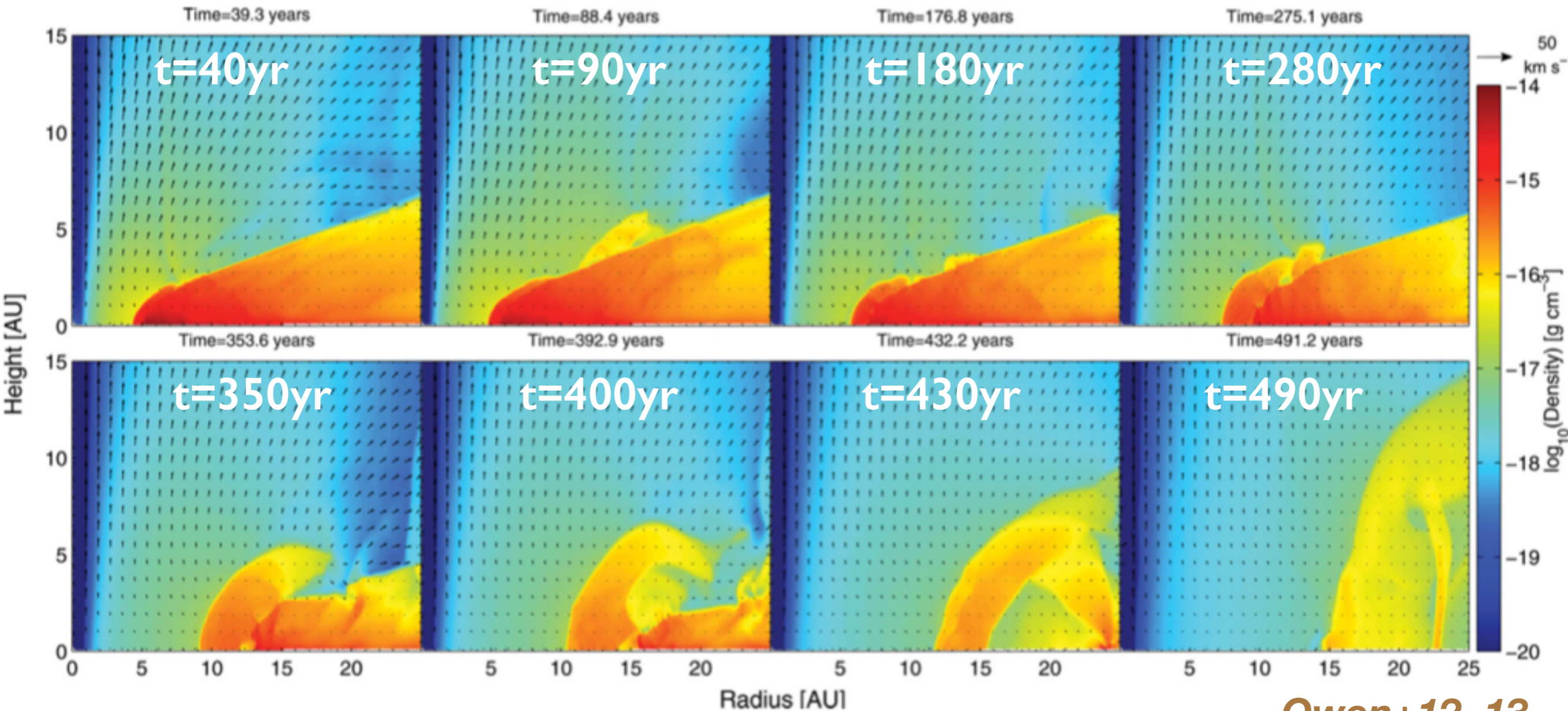


X線加熱領域

ダスト加熱領域



穴空き円盤の力学的散逸：Thermal sweeping



Owen+12, 13
(EUV+X光蒸発)

内側円盤が散逸した後に外側円盤を直接照射

→ <1000年で一気に散逸 (“Thermal sweeping”)

→ R_{hole} 大・ \dot{M} ゼロの遷移円盤の観測が検出されていないことと整合的に

ただし、多くの円盤で起こる機構か？ FUV光蒸発ではどうか？

Howarth+16

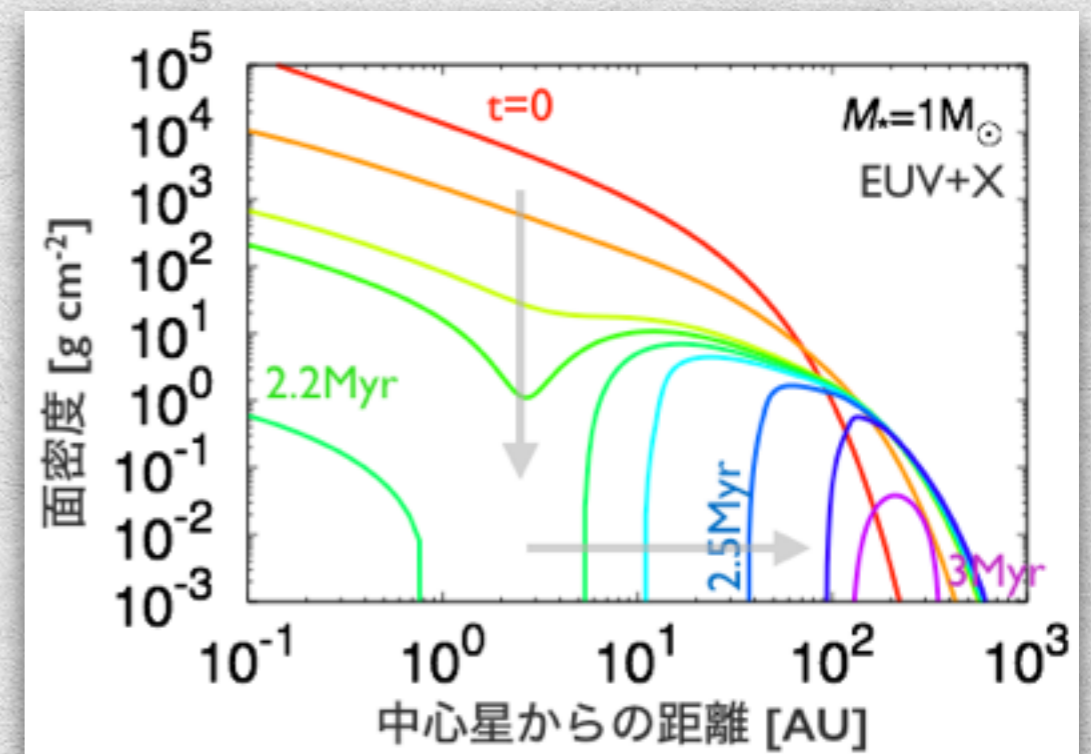
課題と近年の進展

● 光蒸発

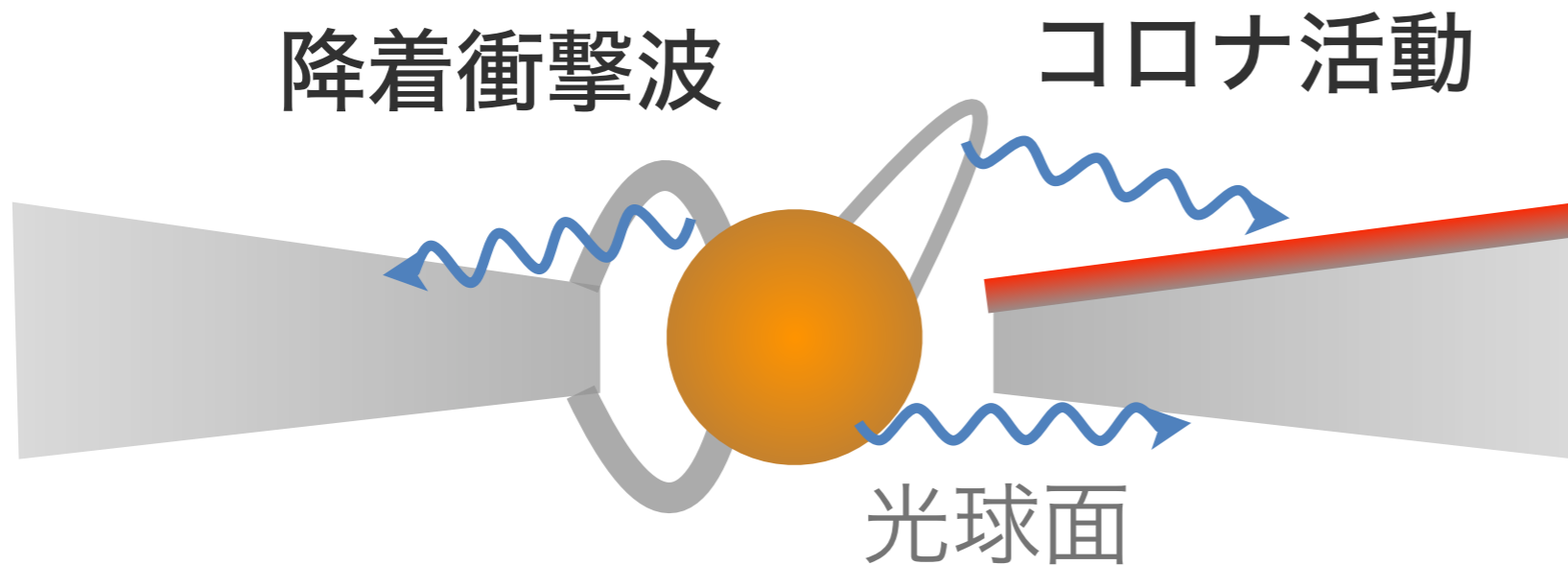
1. 化学反応と輻射輸送を同時に解く流体計算
 - 正確な質量損失率の決定
2. 穴空き円盤の散逸過程
3. 若い星のXUV光度と（X線）スペクトルの見積もり

● 降着

1. 粘性降着過程
2. 磁場駆動円盤風による角運動量輸送・降着過程



若い星のXUV光度

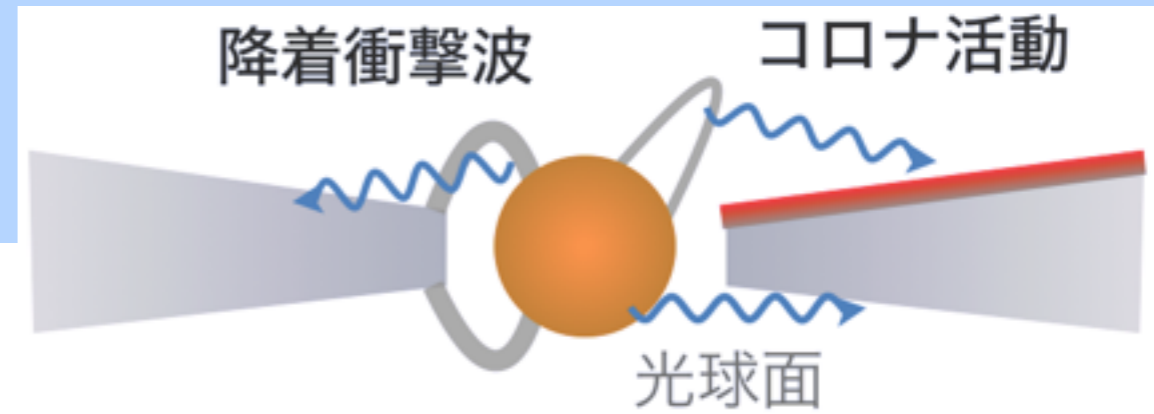


X線・紫外線光度は光蒸発率を決定する重要な要素

| | コロナ活動 | 降着 | 光球 | |
|-----|-------|-----|---------------|--|
| FUV | ◎ | ◎ | $>2M_{\odot}$ | $\approx 10^{30}$ erg/s? |
| EUV | ◎ | ? | $>2M_{\odot}$ | $\sim 10^{40}-10^{42}$ s ⁻¹ ? |
| X | ◎ | 少数? | × | $\sim 10^{28}-10^{30}$ erg/s |

e.g., Gudel07, Ingleby+11, Kastner+02, Alexander+14, 高棹さん講演

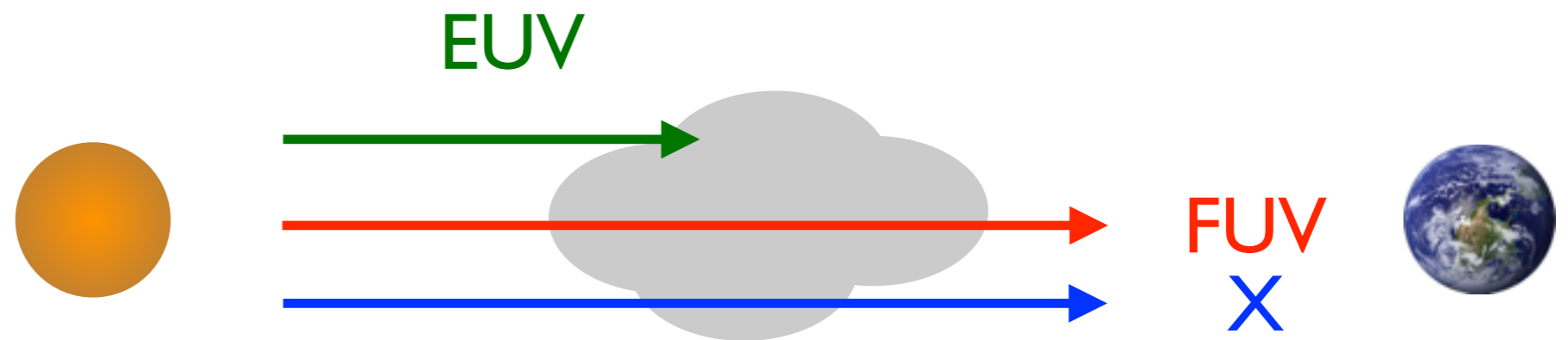
若い星のXUV光度



- EUV光度は不定性大

- 強い星間減光のため、観測例は近傍の数天体のみ
- 間接的に見積もる必要 *Pascucci+12*

*Herczeg07,
Espaillat+13*



- jet, wind, 降着流などで減光されずに円盤に到達できるか

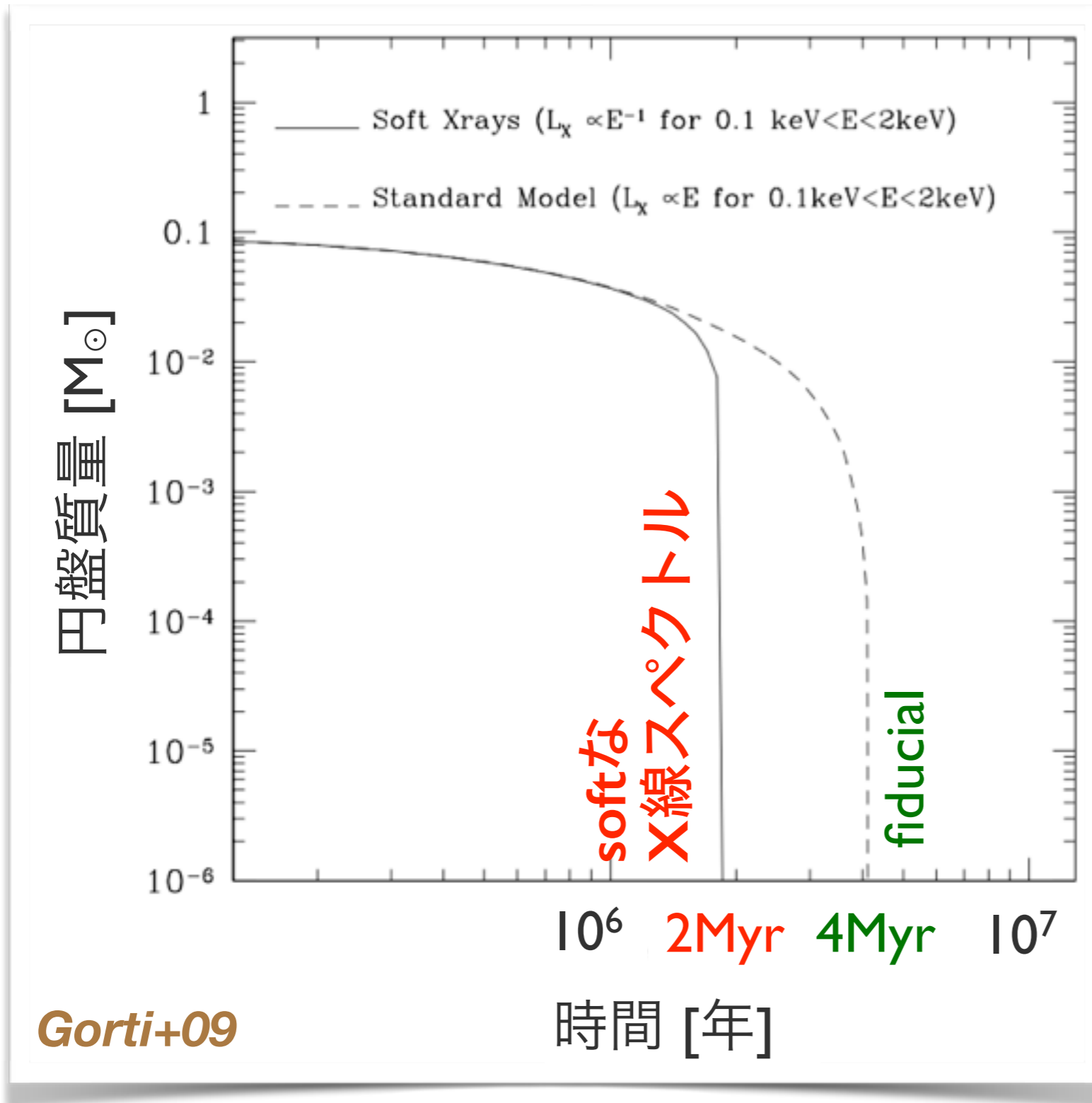
Alexander+05, 高棹さん講演

- 降着により軟X線が生成？

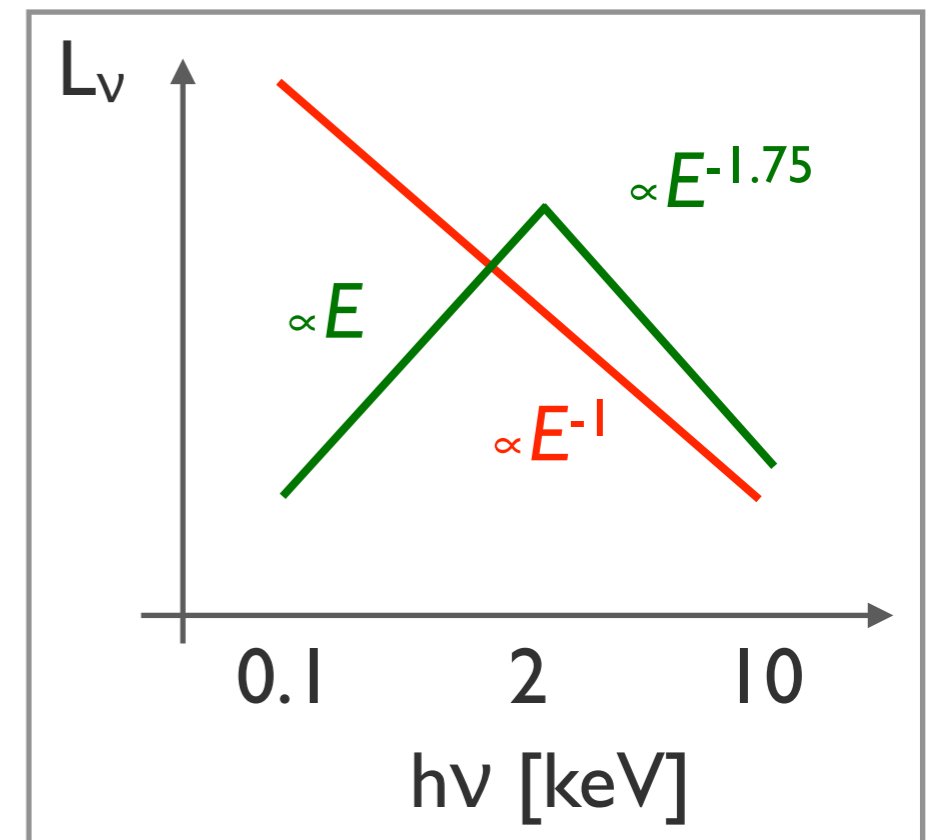
Kastner+02

- → スペクトルの硬さは光蒸発率に影響するため重要

光度だけではなく、スペクトルも大事



- 一般的には若い星のX線は $\sim 1 \text{ keV}$ あたりにピーク
- X線光度が同じでもスペクトル次第で光蒸発率は異なる



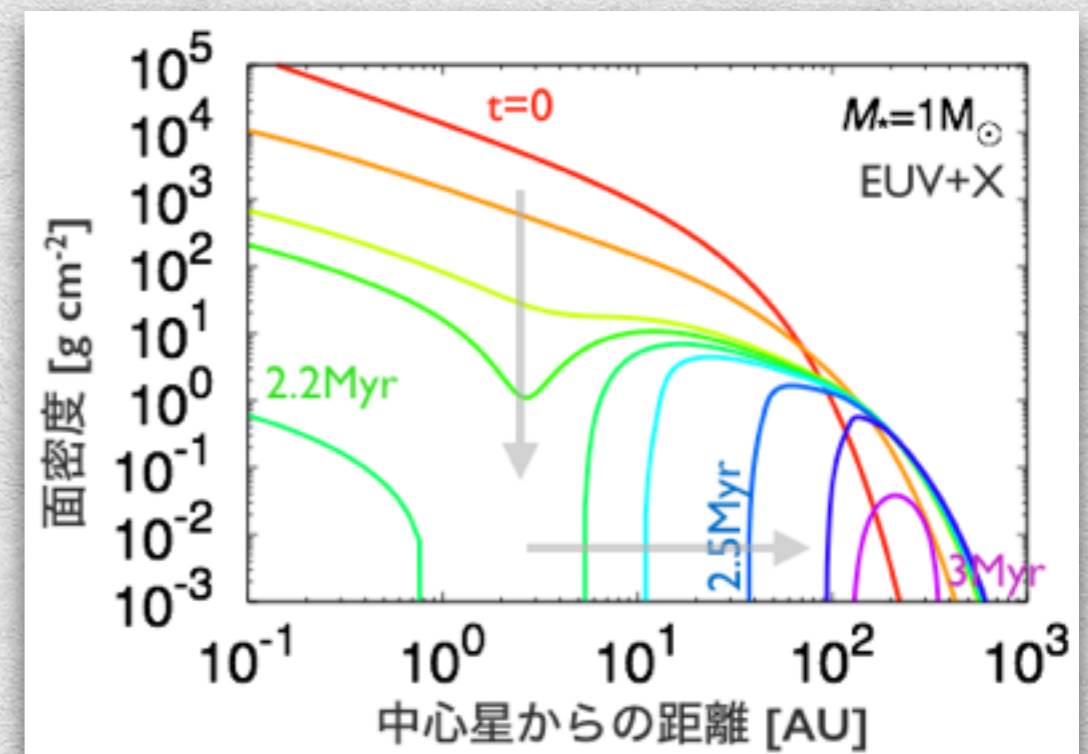
課題と近年の進展

光蒸発

1. 化学反応と輻射輸送を同時に解く流体計算
 - 正確な質量損失率の決定
2. 穴空き円盤の散逸過程
3. 若い星のXUV光度と（X線）スペクトルの見積もり

降着

1. 粘性降着過程
2. 磁場駆動円盤風による角運動量輸送・降着過程



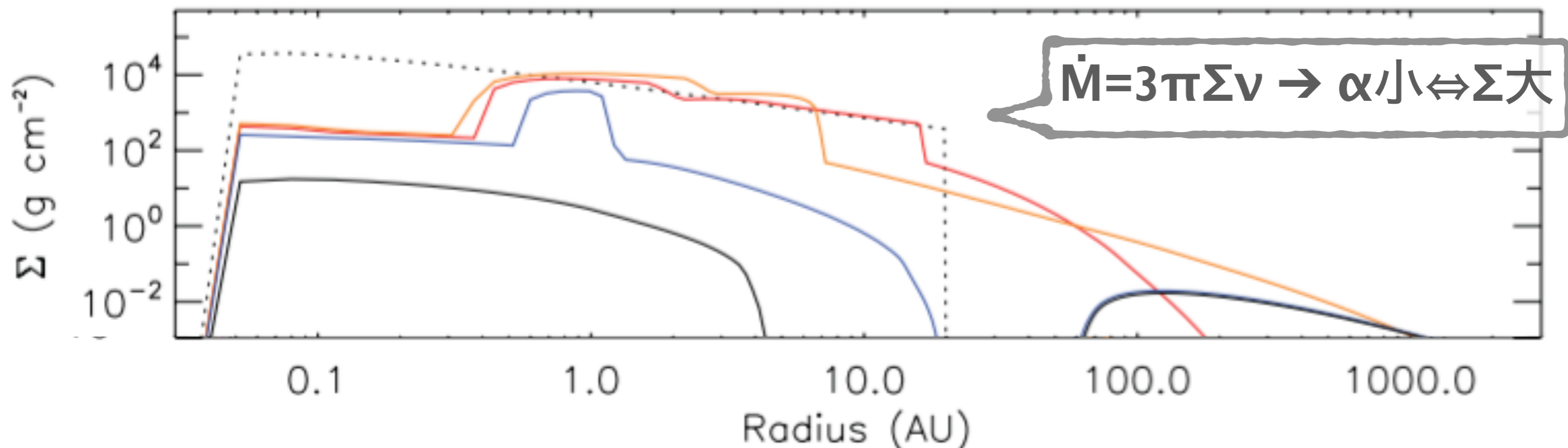
粘性降着の散逸過程への影響

- MRIは起きるのか？(非理想MHD効果による抑制?) *Turner+14*

α 粘性パラメータの値？

- Dead zoneの影響 (α 粘性パラメータの空間分布) *See also Bae+13*

Morishima I 2: 粘性降着 w/ MRI dead zone + X線光蒸発



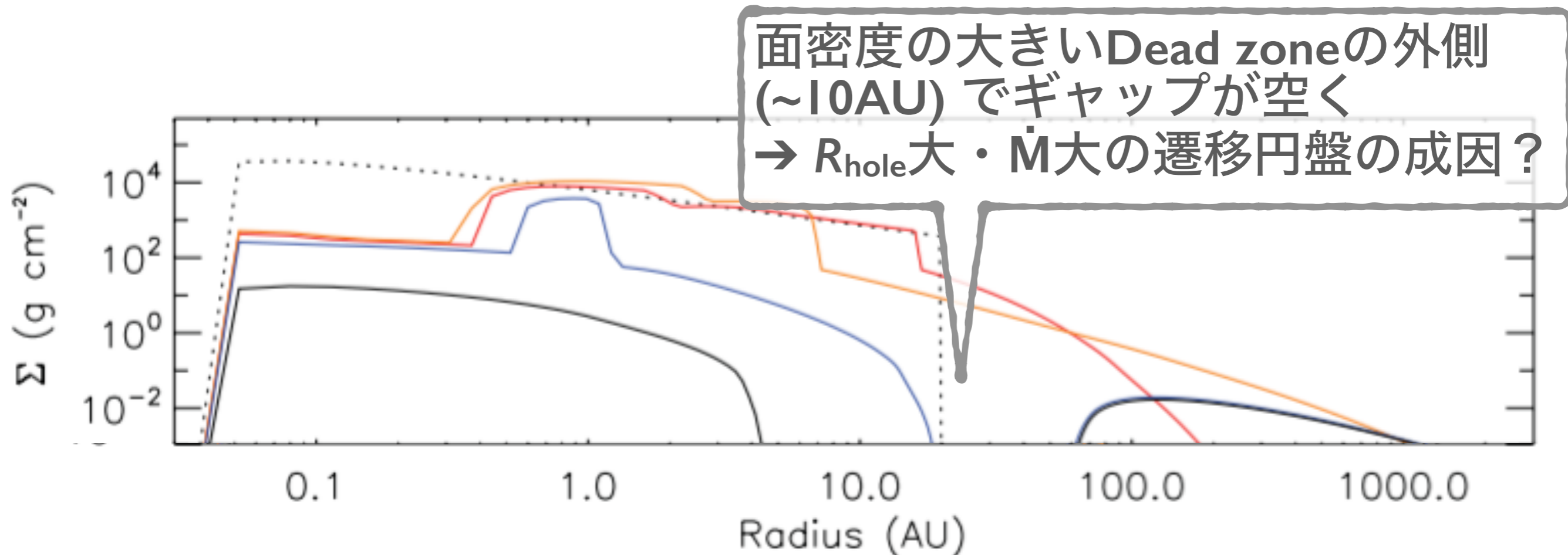
粘性降着の散逸過程への影響

- MRIは起きるのか？(非理想MHD効果による抑制?) *Turner+14*

α 粘性パラメータの値？

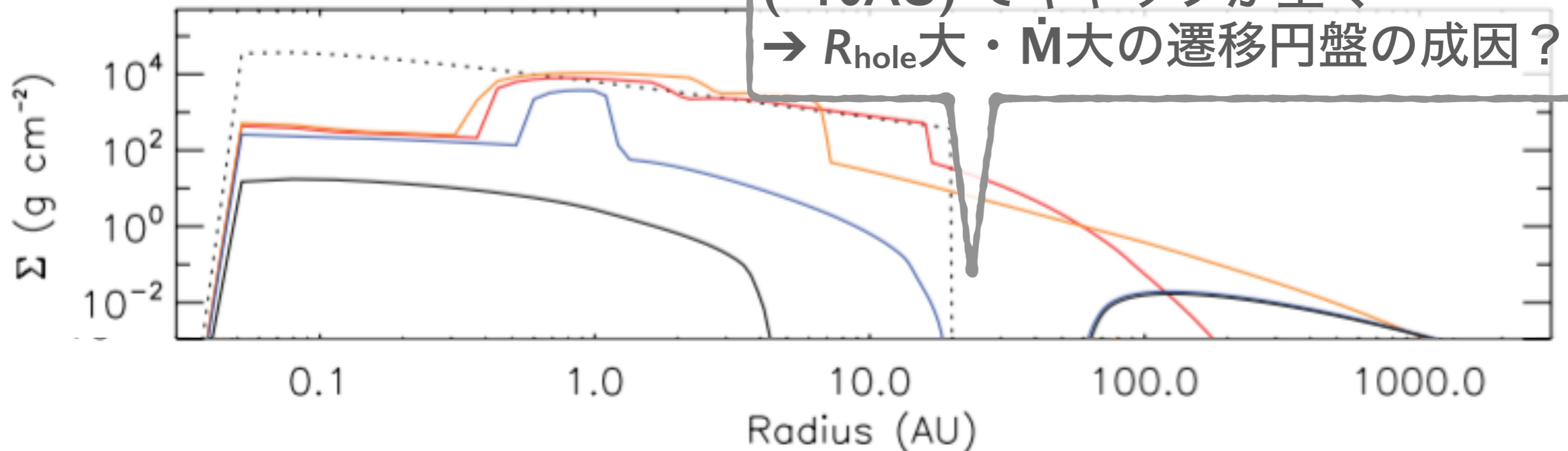
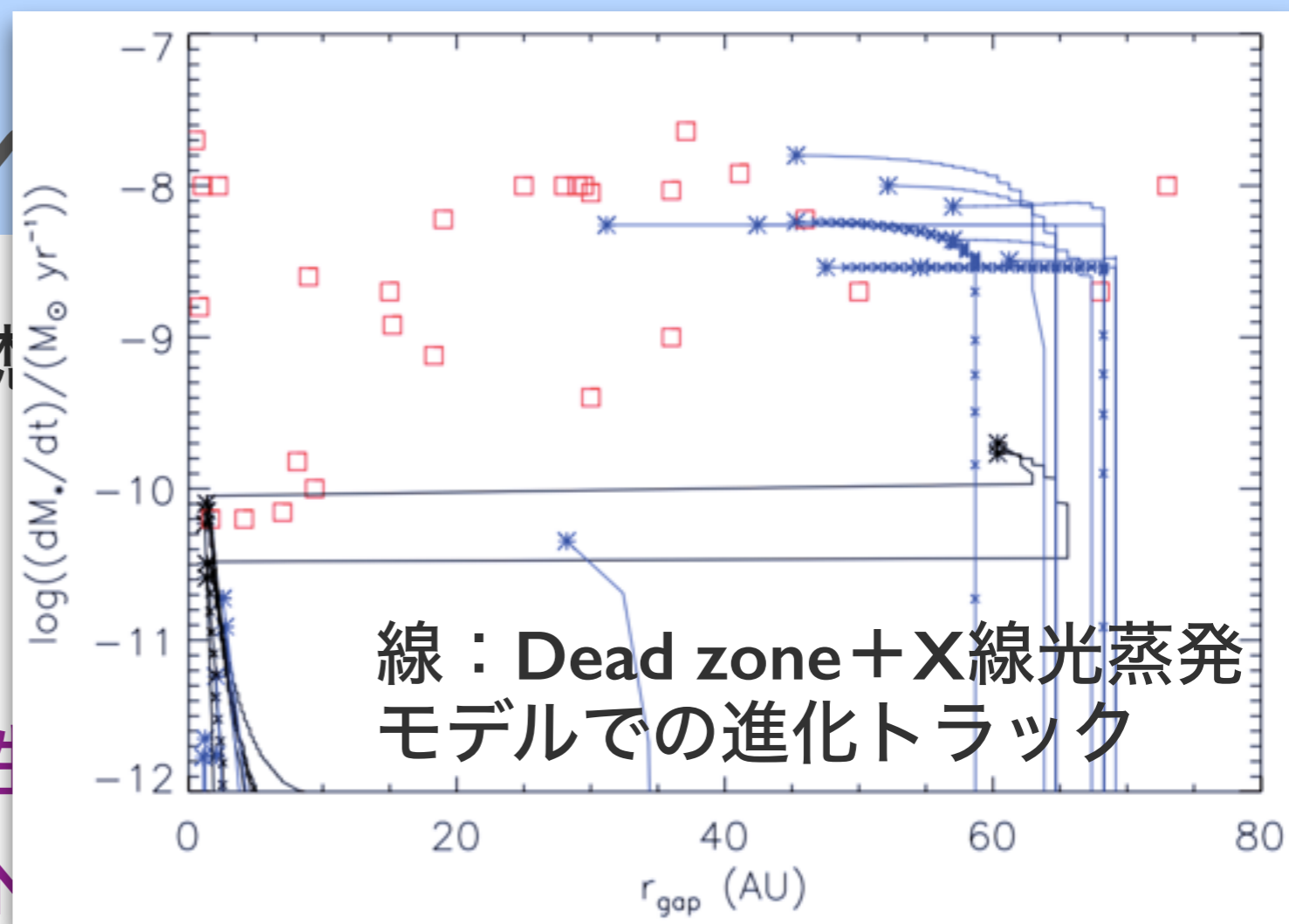
- Dead zoneの影響 (α 粘性パラメータの空間分布) *See also Bae+13*

Morishima I 2: 粘性降着 w/ MRI dead zone + X線光蒸発



粘性降着の散逸過程

- MRIは起きるのか？ (非理想)
- α 粘性パラメータの値？
- Dead zoneの影響 (α 粘性)
- Morishima I 2: 粘性降着 w/ MRI



磁場駆動円盤風

磁気遠心力風 *Blandford+Payne82*

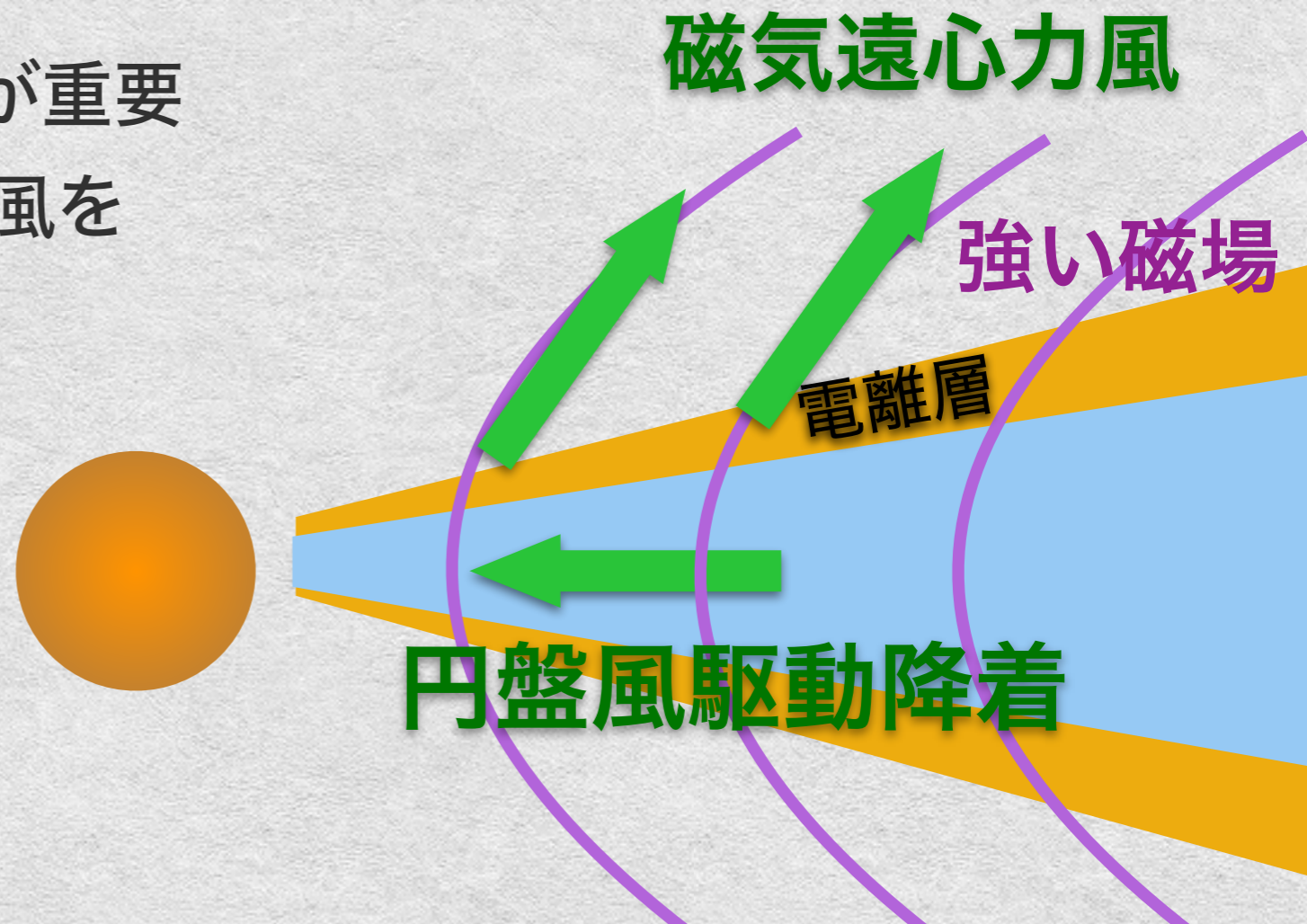
- 十分傾いた磁場に凍結したガスは遠心力により流出
- 重要な点：質量損失だけでなく角運動量輸送も駆動

e.g., Suzuki+16, 森さん講演

HL Tauの“ α パラドックス” → Bai16, Hasegawa+17, 奥住さんポスター

高エネルギー光子による電離が重要
→ 今後光蒸発と磁場駆動円盤風を
統合したモデルの構築が必要

Bai+16



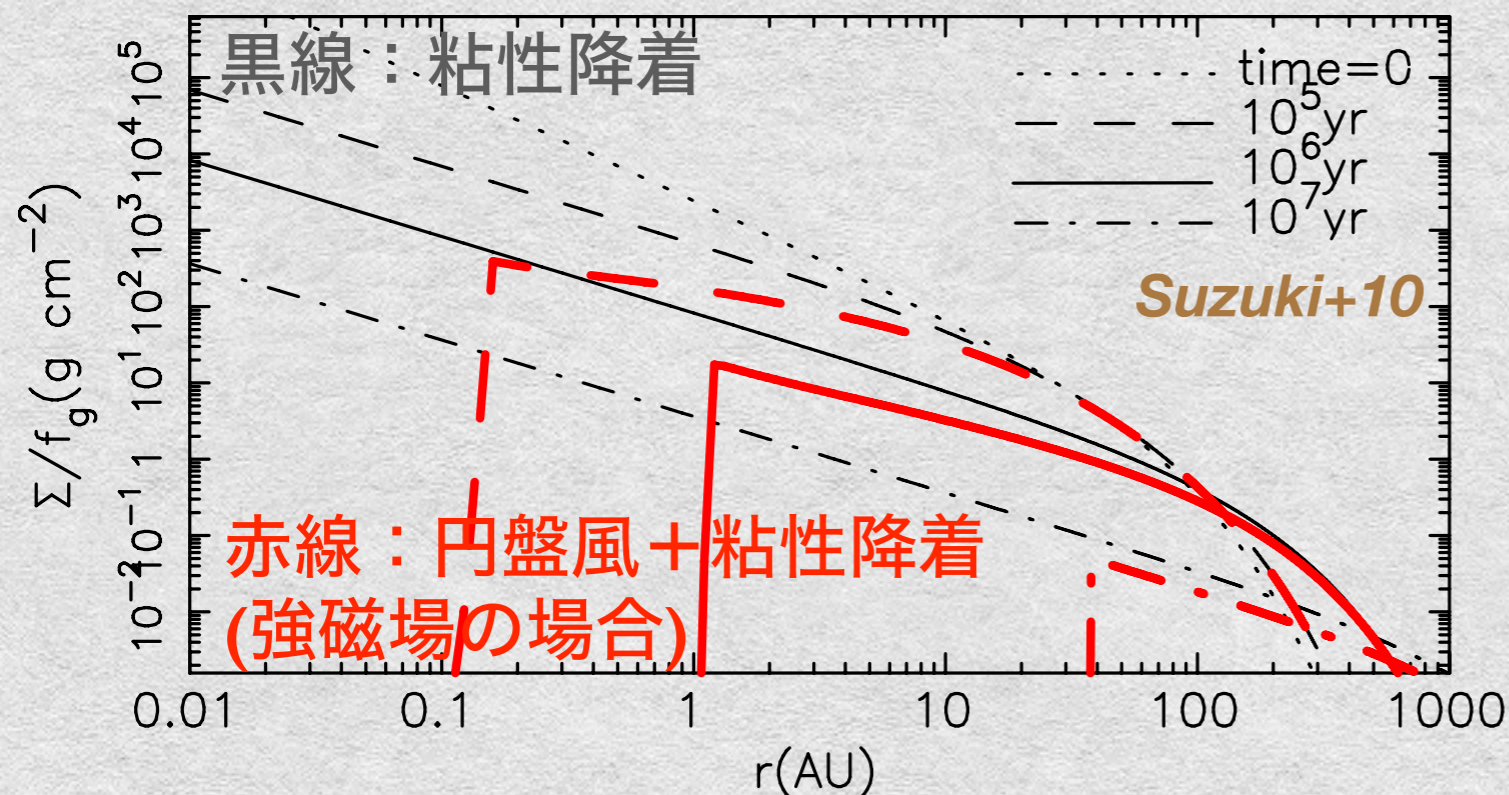
磁場駆動円盤風

磁気乱流駆動円盤風

MRI乱流が低速の円盤風を駆動

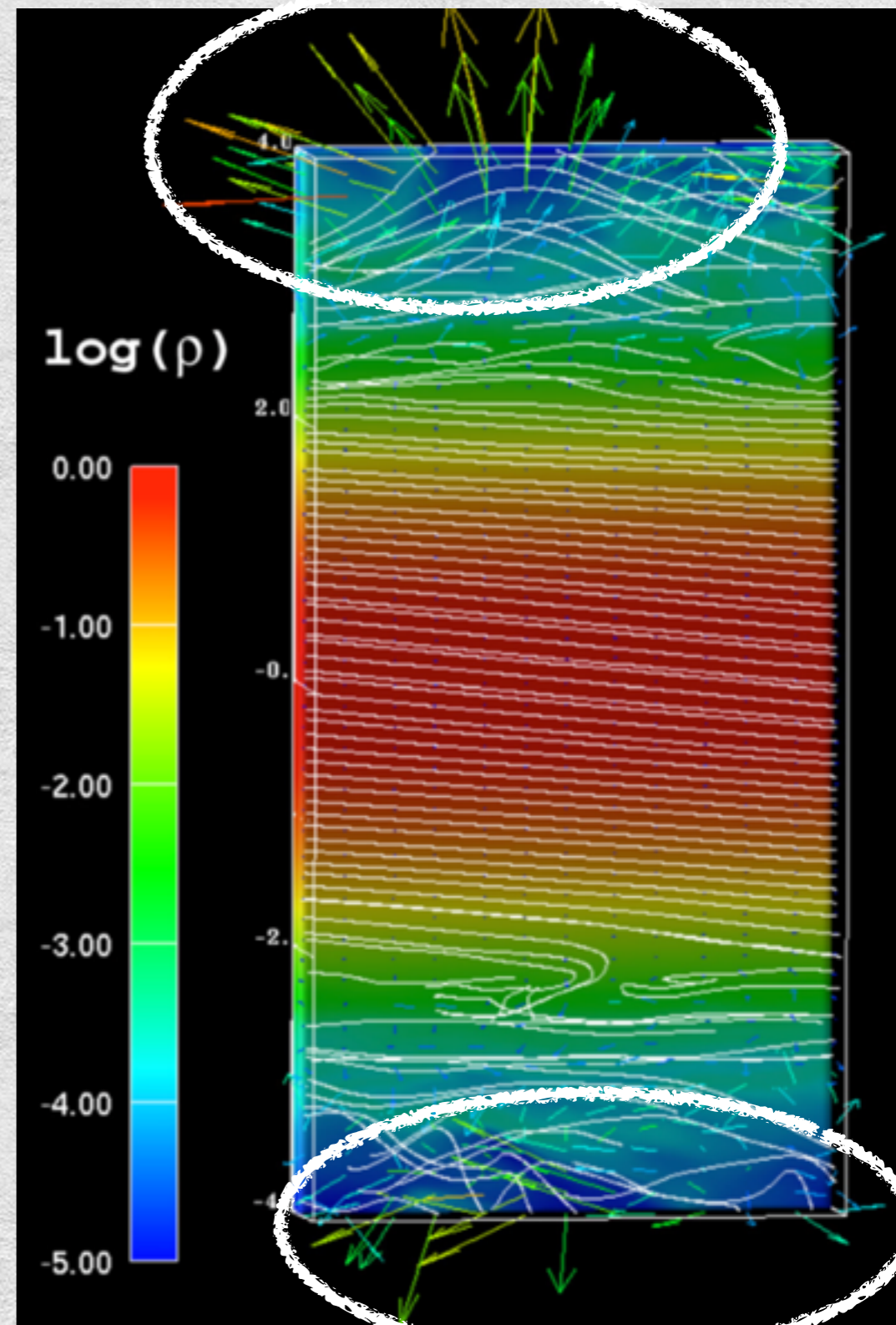
- Suzuki+Inutsuka09が発見
 - 降着による重力エネルギー解放が乱流のエネルギー源
- **円盤内側・初期段階**で特に重要
(光蒸発は**外側・後期段階**)

See also Suzuki+16

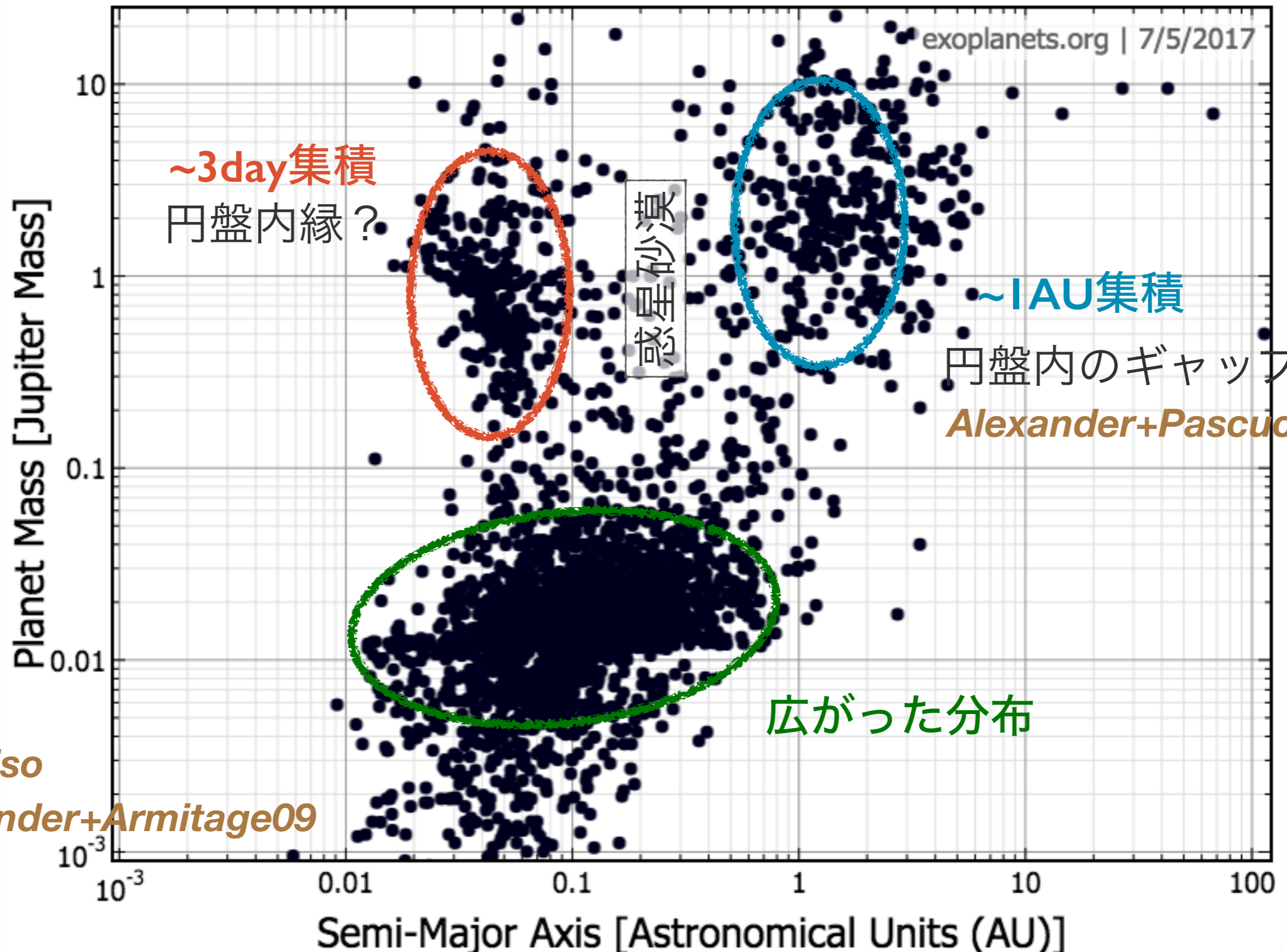


矢印：速度場, 線：磁力線

Suzuki+10



最後に：惑星形成への応用

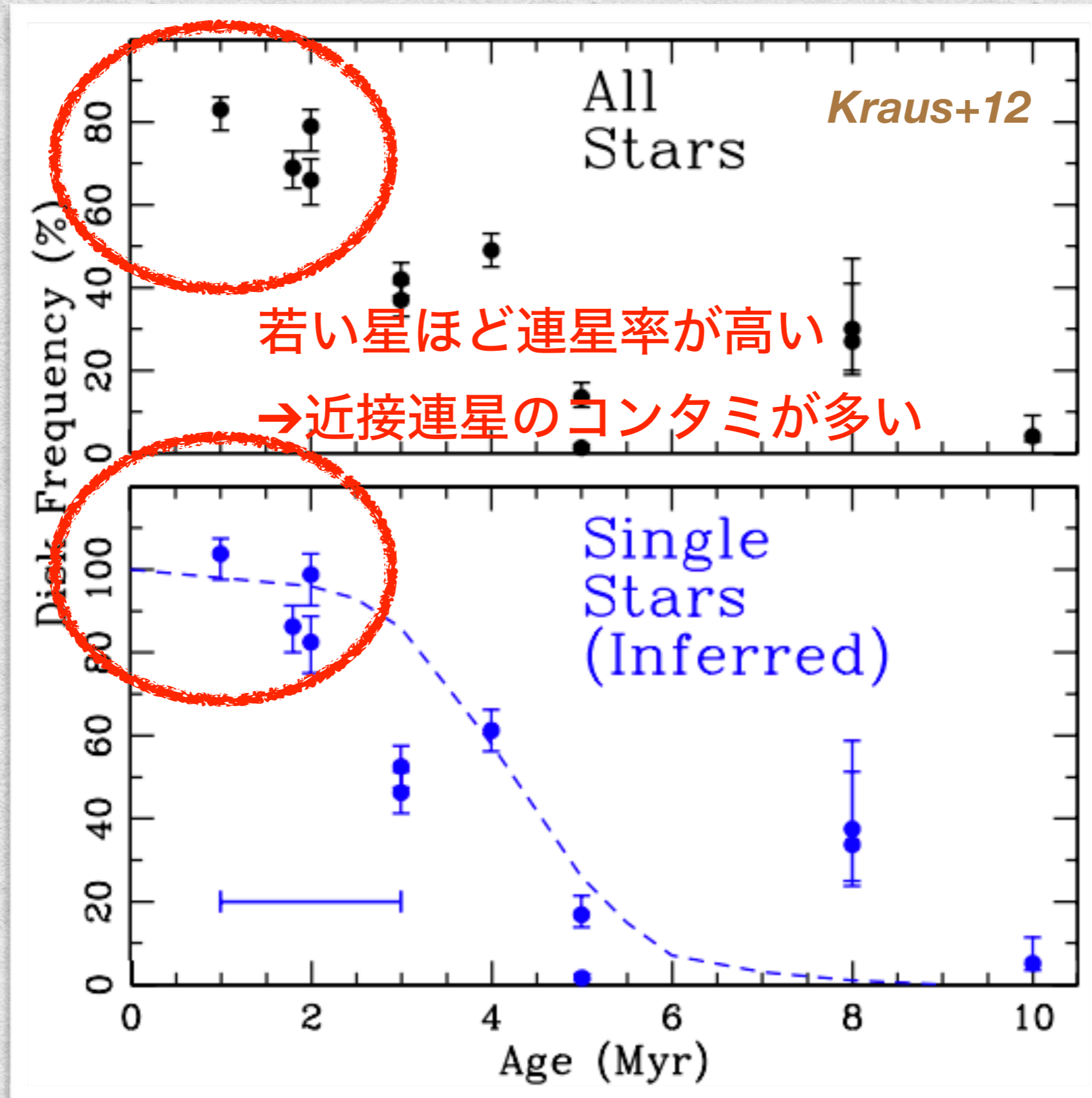


まとめ

- 観測：数Myrののち，素早い散逸を要請
 - $Z \cdot M_{\star}$ の環境効果もある
 - ただし星団の年齢は注意が必要
- 粘性降着＋光蒸発で観測と定性的には整合的な進化
 - FUV/X線で $\sim 10^{-8} M_{\odot}/\text{yr}$
 - 課題：
 - 理論：自己無撞着な輻射流体計算（先月2報 → 仲谷さん講演）
 - 観測：XUV光度の制約
- 磁場駆動円盤風による質量損失と角運動量輸送も円盤進化に重要

Appendix

円盤寿命の観測：近接連星の影響



XUV光度

- コロナ活動
 - 若い星のX線は~10Myrでほぼ一定（磁気活動の“Saturation”）
e.g., Flaccomio+03, Gudel07, Preibisch+05, Telleschi+07
- EUV光度は不定性大
 - 強い星間減光のため、観測例は近傍の数天体のみ *Herczeg07, Espaillat+13*
 - 間接的に見積もる必要 *Pascucci+12*
- 降着起源とコロナ起源の割合
 - 降着起源だけでは円盤にギャップを開けることは不可能
 - → 素早い散逸過程にはならない *Matsuyama+03*
 - 降着により軟X線が生成？ *Kastner+02*
 - → スペクトルの硬さは光蒸発率に影響するため重要
- jet, wind, 降着流などで減光されずに円盤に到達できるか
Alexander+05, 高棹さん講演

XUV光度

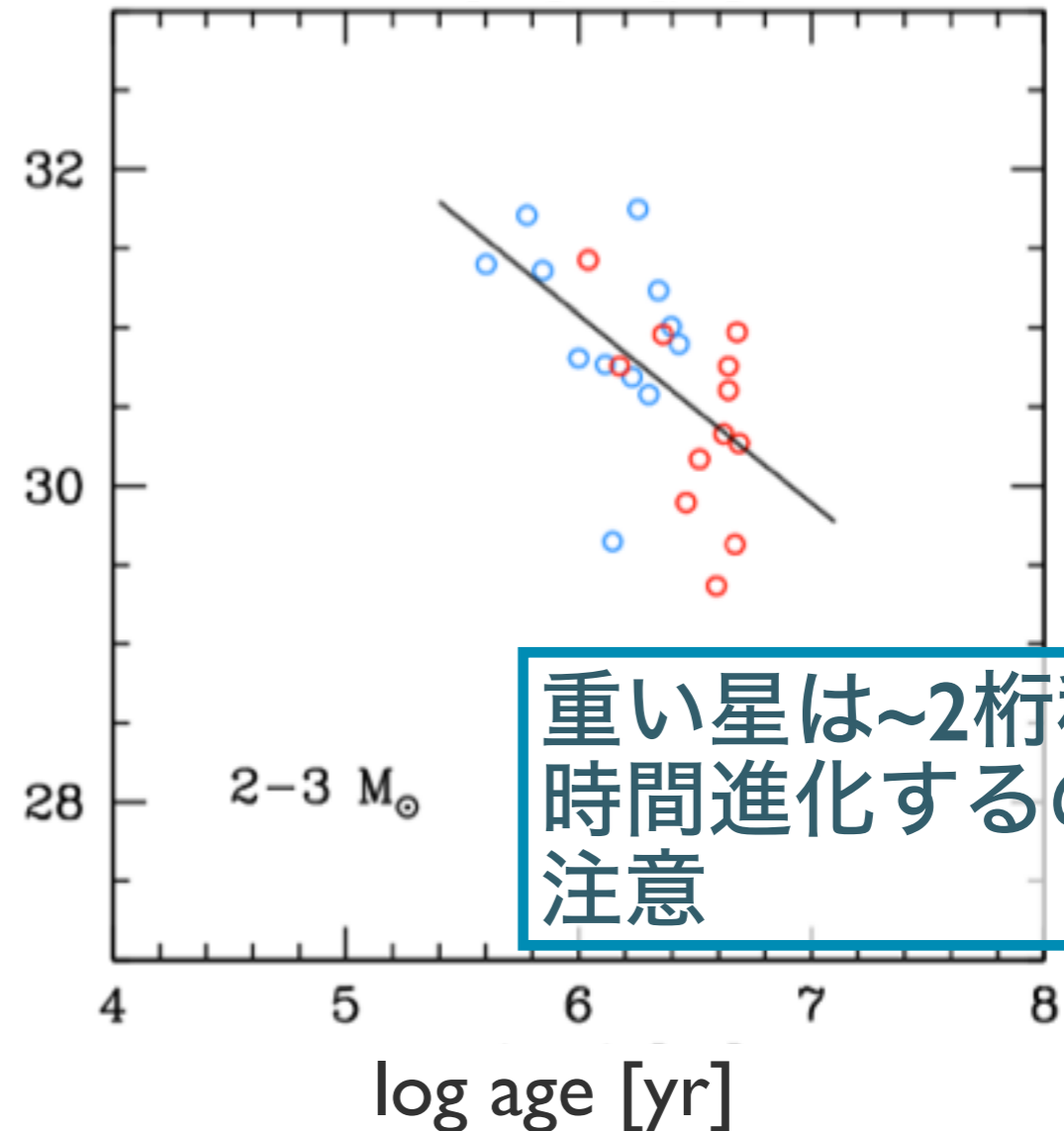
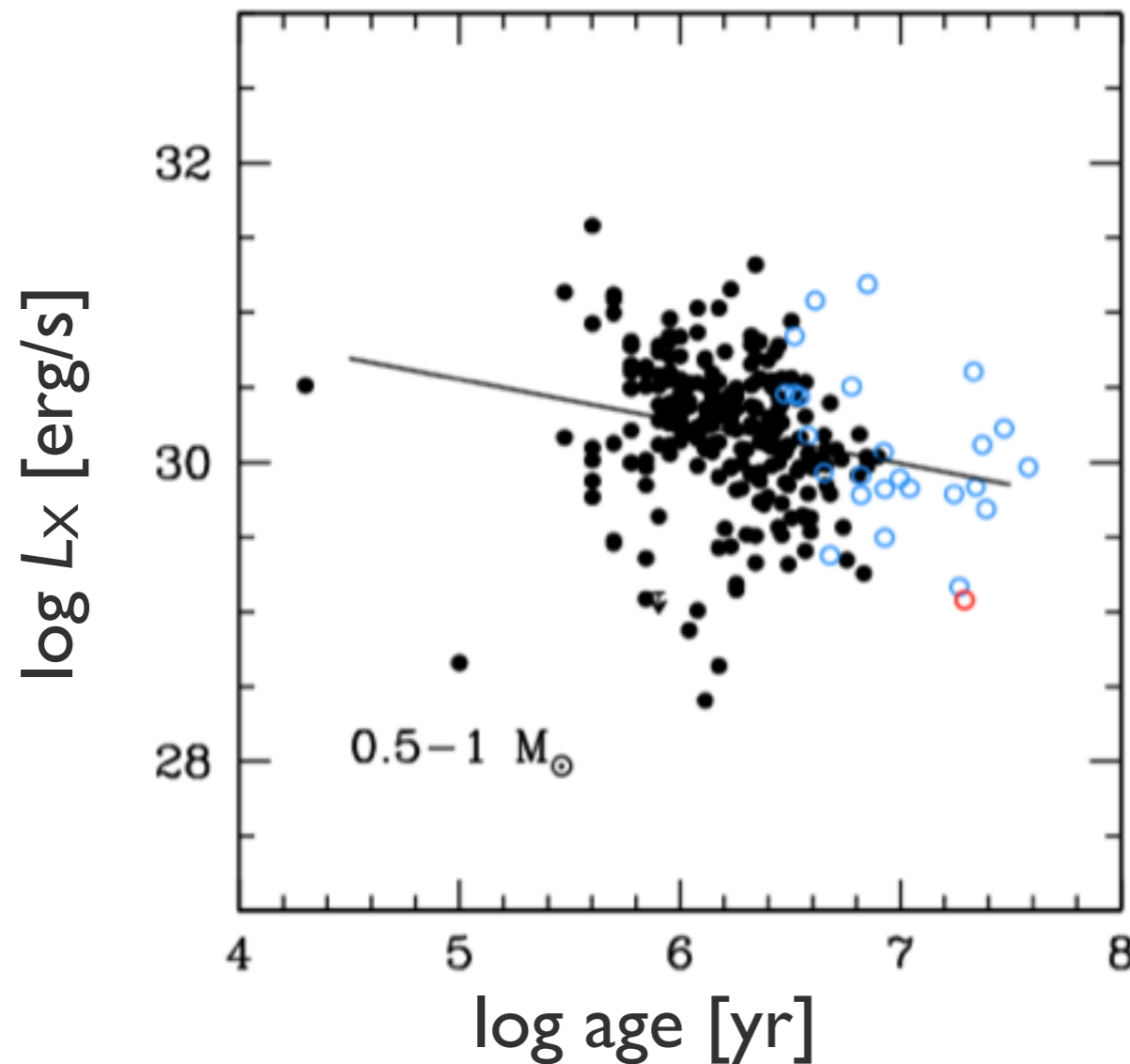
- コロナ活動

- 若い星は高速回転・活発な対流により強い磁気活動

- **若い星のX線は~10Myrでほぼ一定** (磁気活動の“Saturation”)

*e.g., Flaccomio+03, Gudel07,
Preibisch+05, Telleschi+07*

Gregory+16



重い星は~2桁程度
時間進化するので
注意

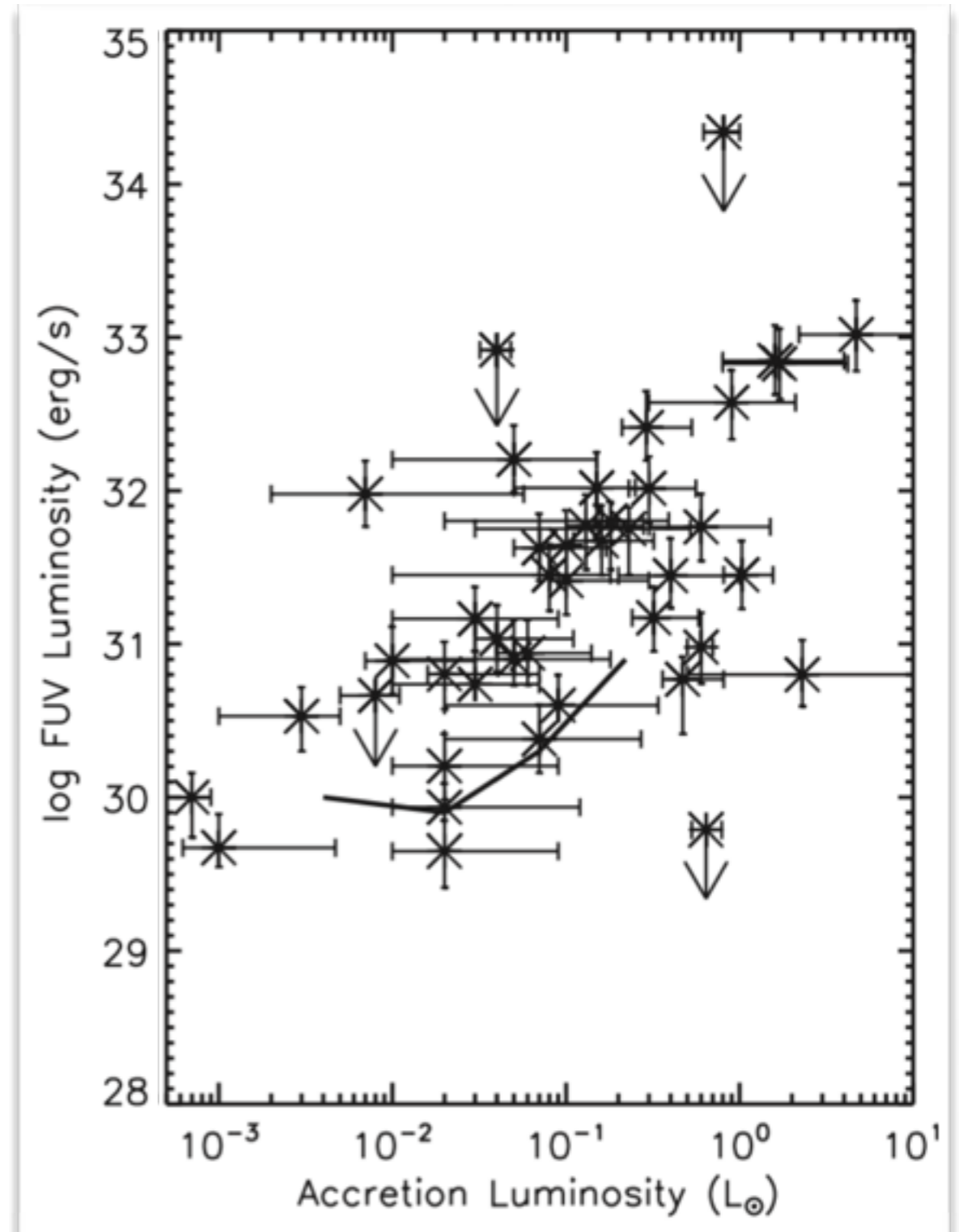
XUV光度

FUVと L_{acc} が相関

降着流の速度や構造→高棹さん講演

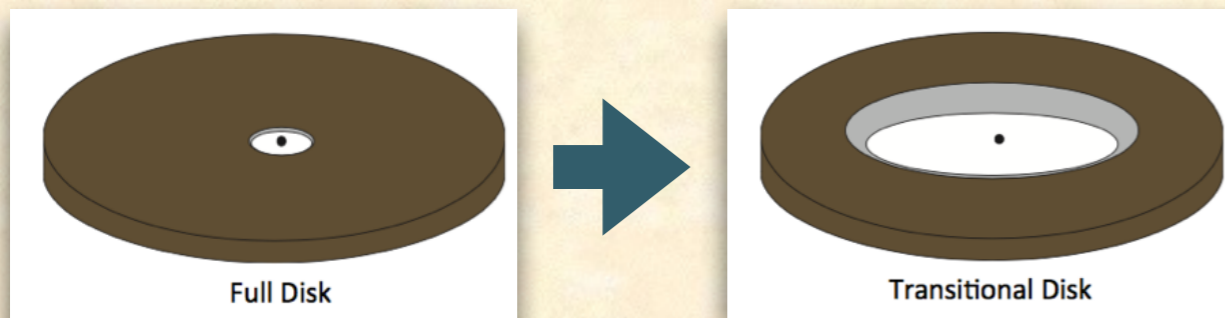
Calvet & Gullbring 1998

Ingleby+11



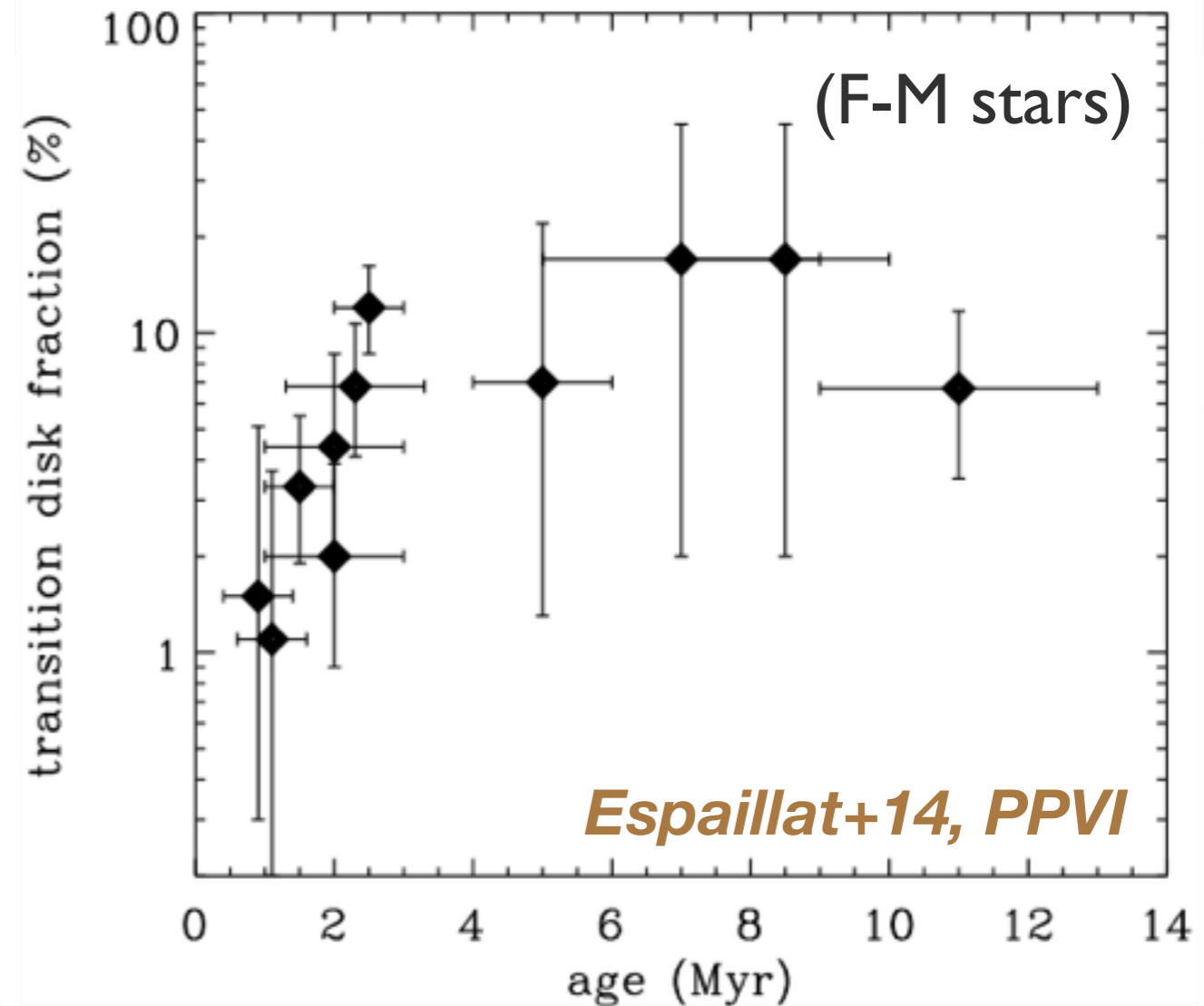
短い遷移円盤期

- 遷移円盤の個数は~10%程度
→ 円盤寿命 ~Myr と合わせると,
 - 散逸期は~0.1 Myr
 - inside-out的な散逸
- を示唆している可能性



ただし遷移円盤の成因の候補は
ガス円盤の散逸以外にもあるので注意：

- ダスト成長によるopacityの低下
- ダストのfiltration
- （複数）惑星によるギャップ生成



*See also Skrutskie+90,
Muzerolle+10, Koepferl+13*

遷移円盤の成因候補

Espaillet+14, PPVI

TABLE 2
OBSERVABLE CHARACTERISTICS OF PROPOSED DISK CLEARING MECHANISMS

| Mechanism | Dust Distribution | Gas Distribution | Accretion Rate | Disk Mass | L_X |
|------------------------|-------------------------|----------------------------|-----------------------|----------------------------|---------------|
| Viscous evolution | No hole/gap | No hole/gap | Low accretion | Low mass | No dependence |
| Grain growth | No hole/gap | No hole/gap | Unchanged | All masses | No dependence |
| Photoevaporation | R_h -radius hole | No/little gas within R_h | No/low accretion | Low mass | Correlated |
| $\sim 0.1 M_J$ planet | Gap | No hole/gap | Unchanged | All masses | No dependence |
| $\sim 1 M_J$ planet | Gap | Gap | $\sim 0.1 - 0.9$ CTTS | Higher masses ^a | No dependence |
| Multiple giant planets | Gap/ R_h -radius hole | No/little gas within R_h | No/low accretion | Higher masses ^a | No dependence |

NOTE.— Here we refer to the dust and gas distribution of the inner disk. Relative terms are in comparison to the properties of otherwise comparable disks around CTTS (e.g., objects of similar age, mass). ^aHigher mass disks may form planets easier according to core accretion theory (see chapter in this volume by *Helled et al.*). Observations are needed to test this.

遷移円盤：最新の観測例

