

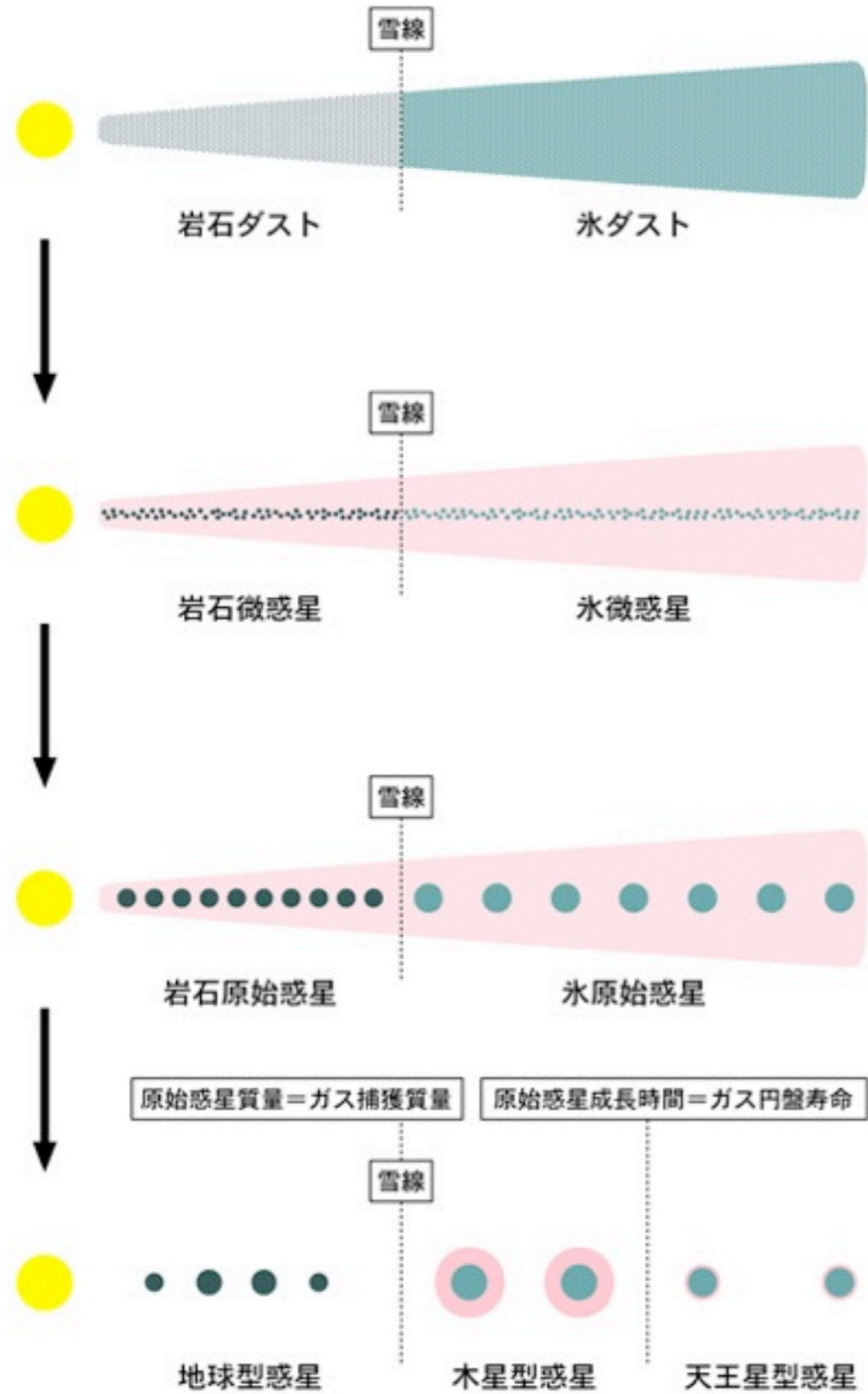
星団内における近傍の大質量星による 原始惑星系円盤の光蒸発散逸計算

京都大学宇宙物理学教室 博士一回

田村隆哉

共同研究者：野村英子・磯部洋明・犬塚修一郎(名大)

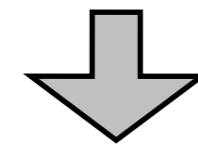
原始惑星系円盤の進化



理科年表より

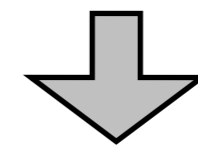
ダストの合体成長

微惑星の形成

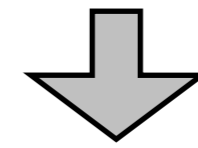


微惑星の衝突合体

原始惑星の形成

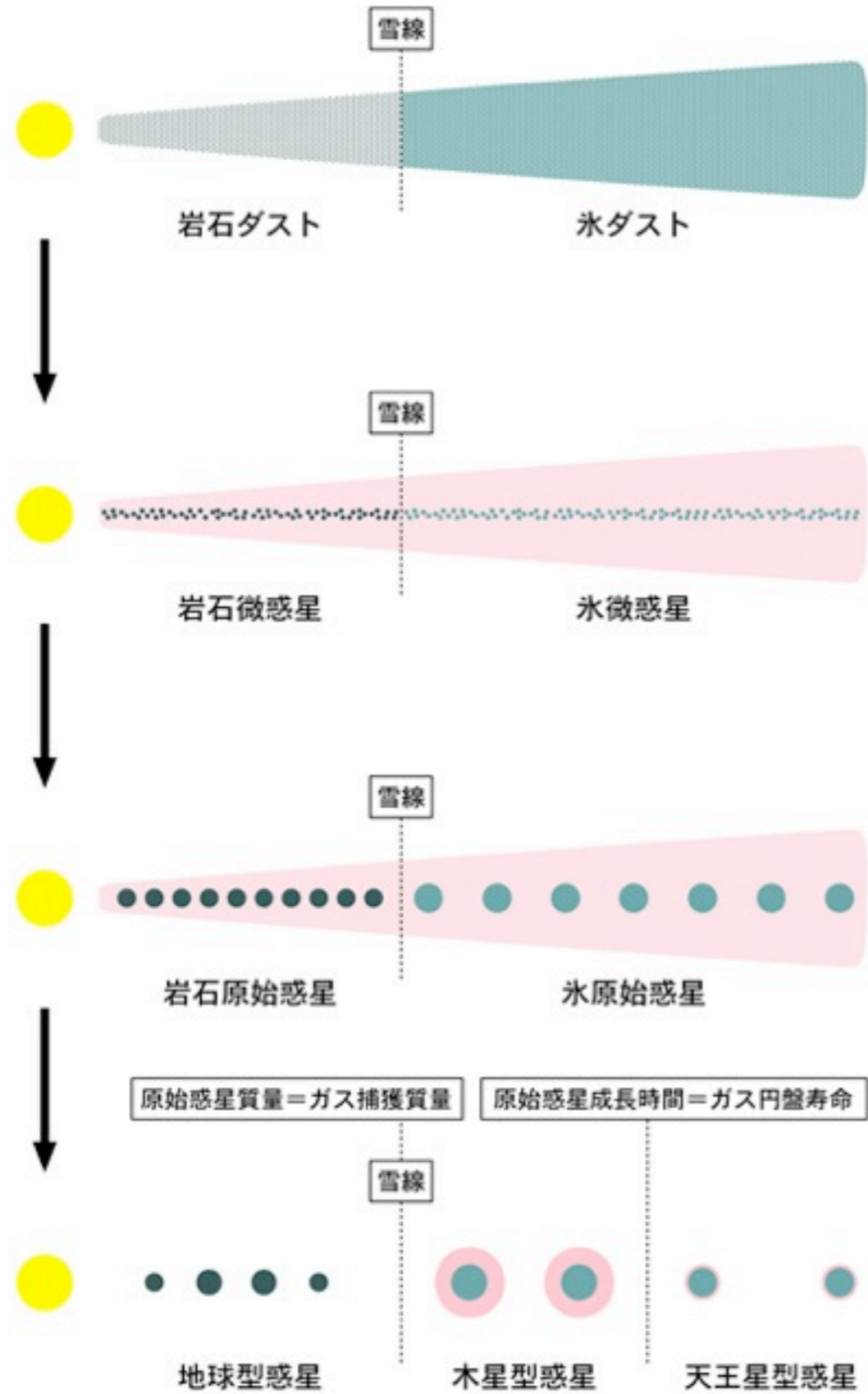


岩石惑星・ガス惑星の形成



円盤ガスの散逸 (1-10Myr)

原始惑星系円盤の進化



ダストの合体成長

微惑星の形成

ガス乱流

微惑星の衝突合体

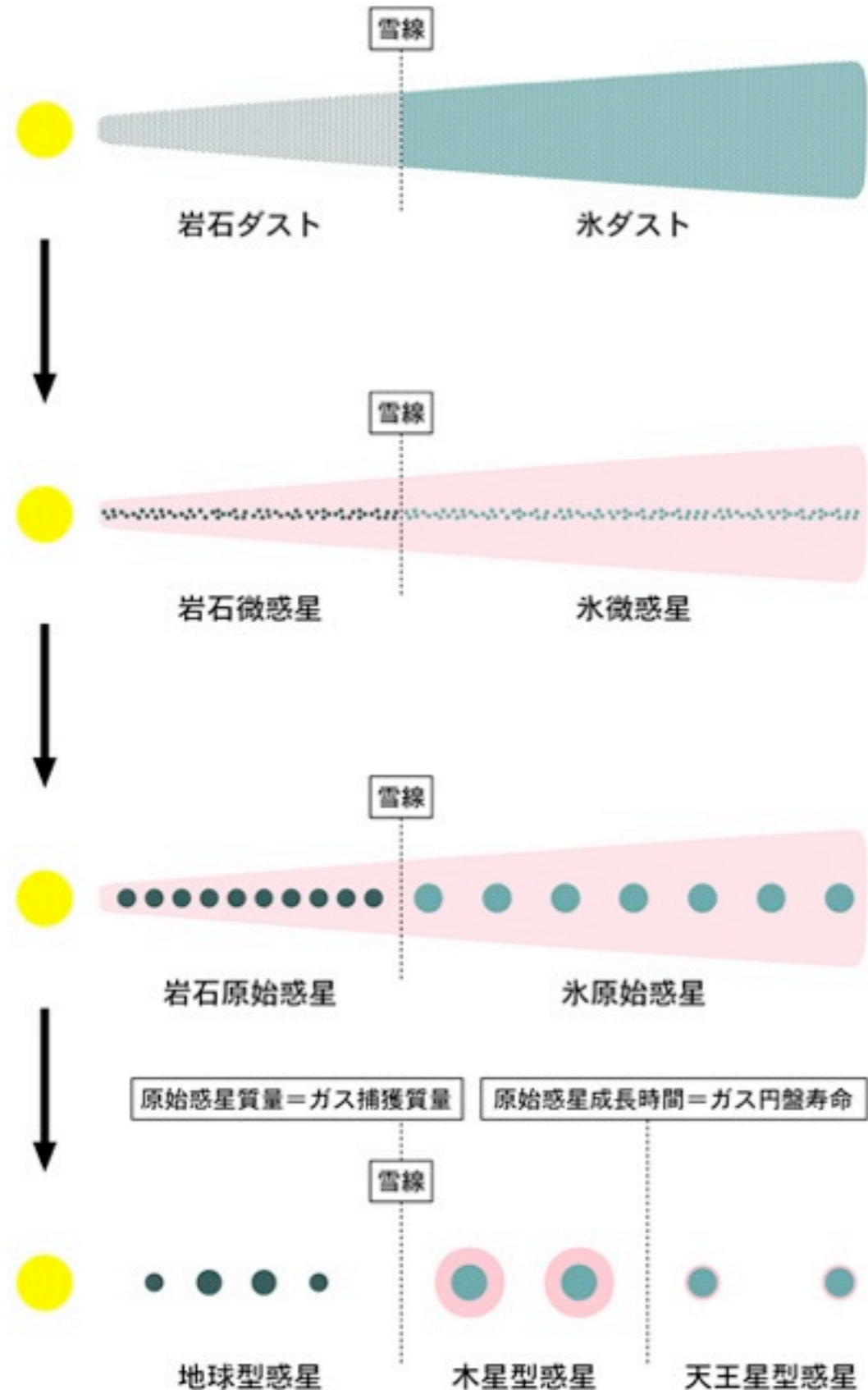
原始惑星の形成

岩石惑星・ガス惑星の形成

円盤ガスの散逸 (1-10Myr)

理科年表より

原始惑星系円盤の進化



ダストの合体成長

微惑星の形成

ガス乱流

微惑星の衝突合体

原始惑星の形成

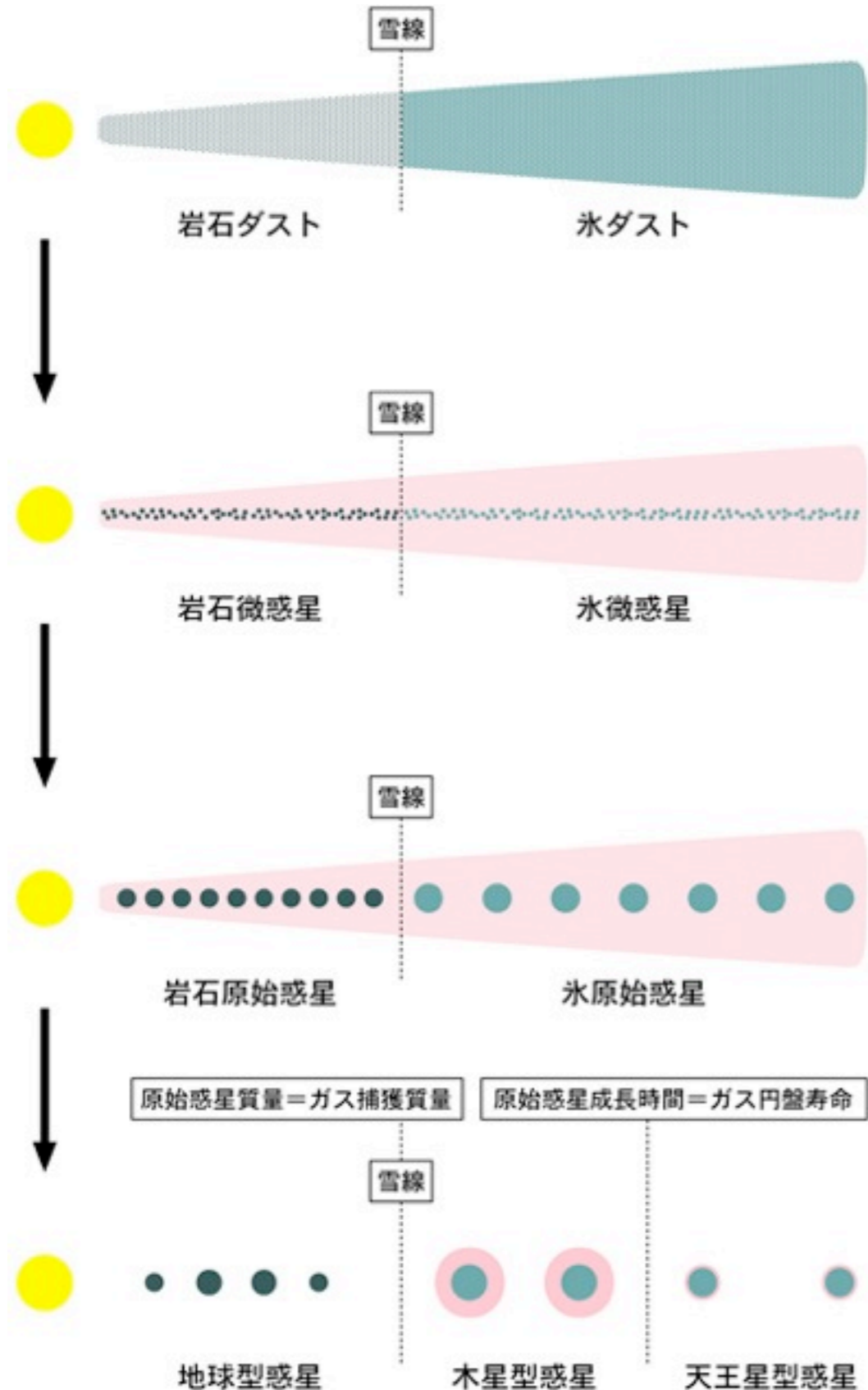
ガスとの重力相互作用による惑星落下

岩石惑星・ガス惑星の形成

円盤ガスの散逸 (1-10Myr)

理科年表より

原始惑星系円盤の進化



ダストの合体成長

微惑星の形成

ガス乱流

微惑星の衝突合体

原始惑星の形成

ガスとの重力相互作用による惑星落下

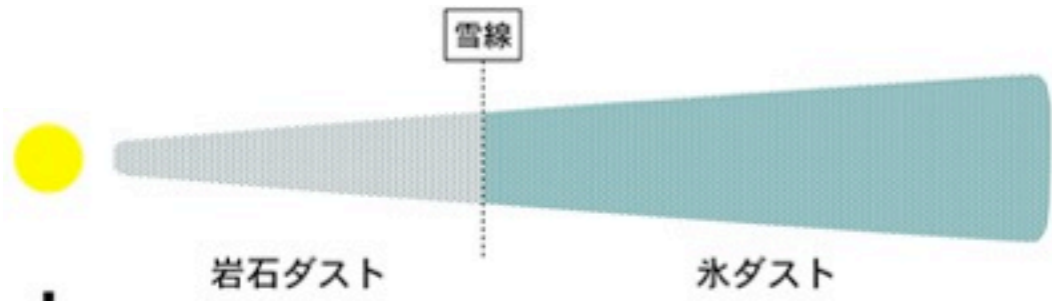
岩石惑星・ガス惑星の形成

木星型惑星と天王星型惑星の違い

円盤ガスの散逸 (1-10Myr)

理科年表より

原始惑星系円盤の進化

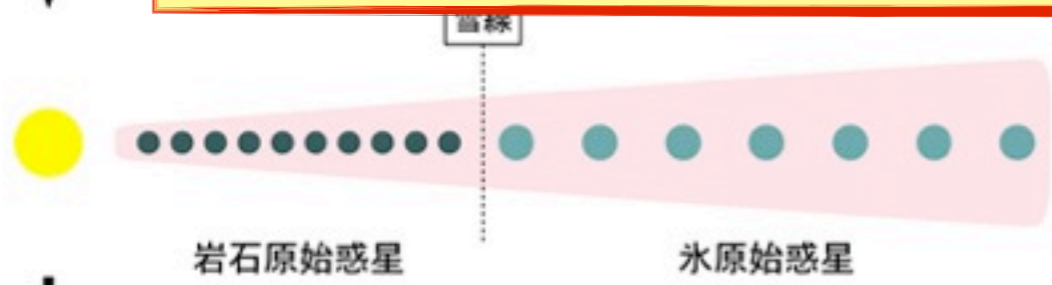
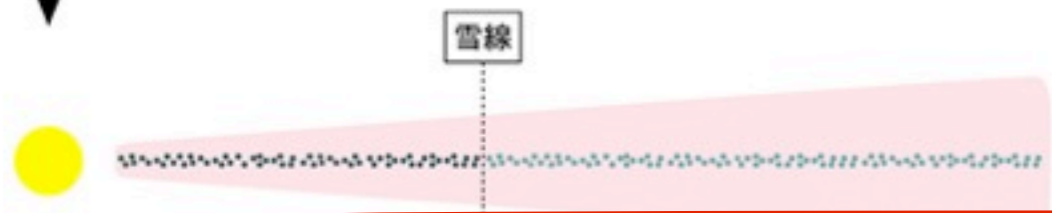


ダストの合体成長

微惑星の形成

ガス乱流

ガス円盤の進化が重要

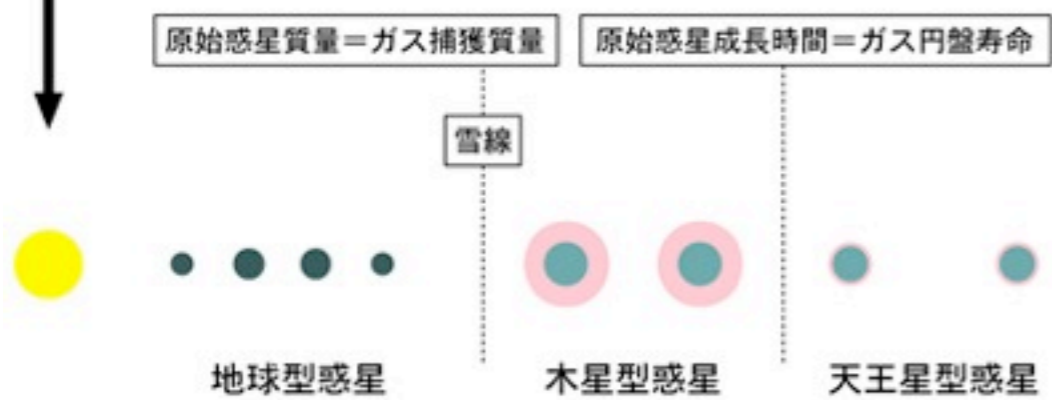


ガスとの重力相互作用による惑星落下

岩石惑星・ガス惑星の形成

木星型惑星と天王星型惑星の違い

円盤ガスの散逸 (1-10Myr)

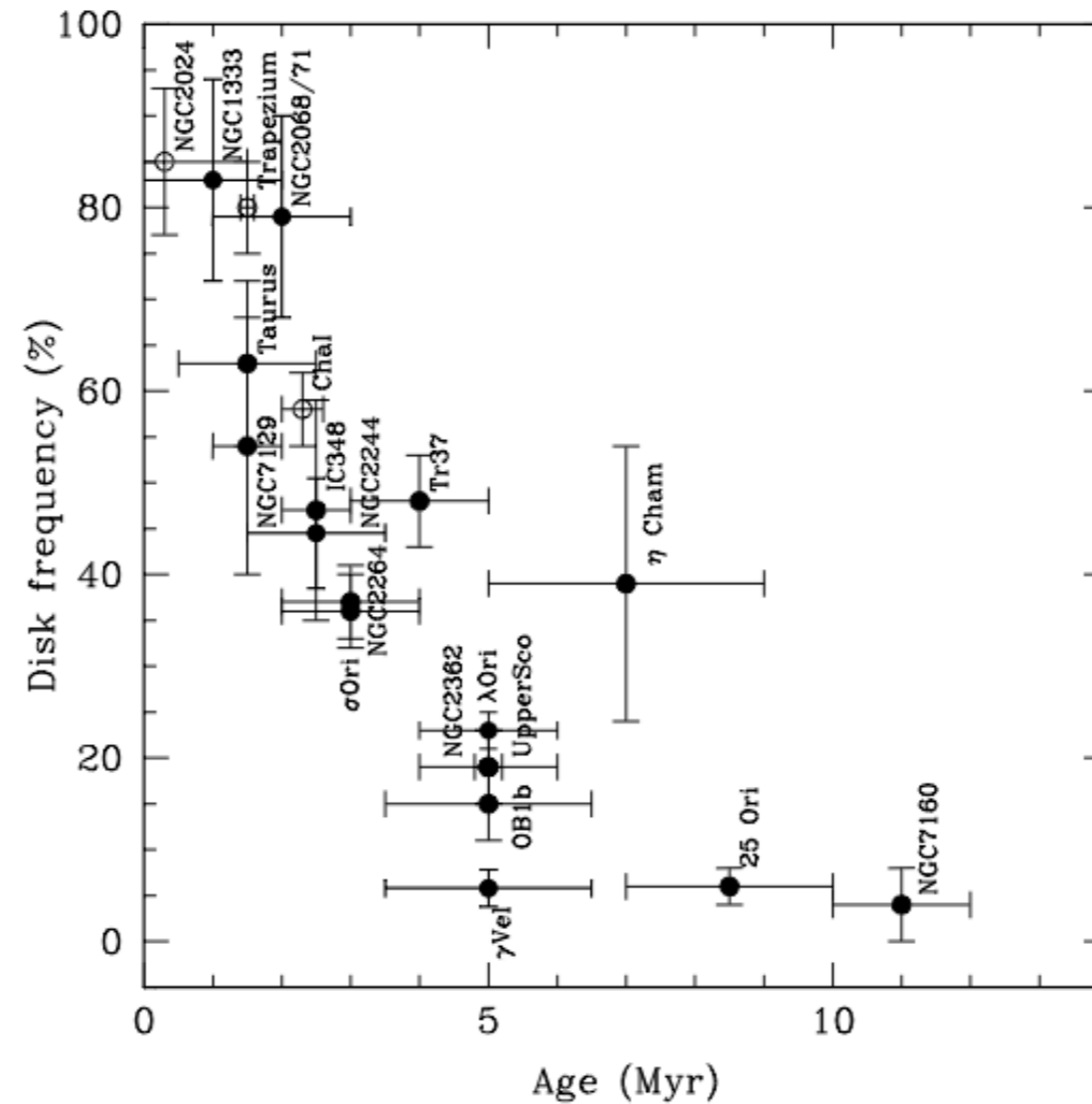


理科年表より

目次

- 過去の研究
- 星団内の円盤の面密度進化の計算
- 光蒸発流と電離面形成計算
- 観測との比較によるモデルの検証
 - 電離面半径の比較
 - 円盤半径の比較
- まとめ

円盤の寿命



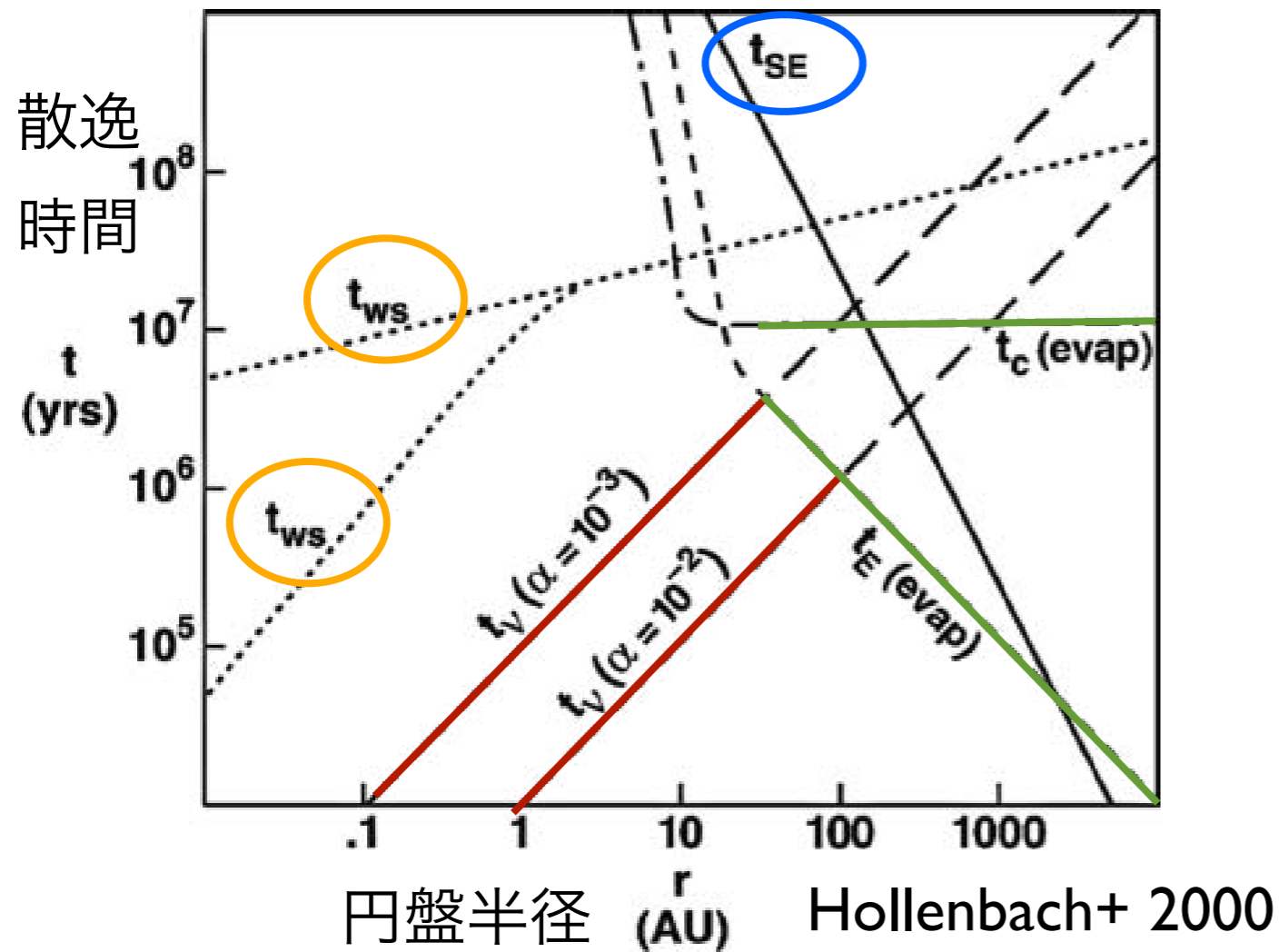
Hernandez+ 2008

円盤の寿命 1-10 Myr

注意：ダストの近赤外放射を見ているために
ガスの散逸時間とは異なる可能性がある

円盤ガスの散逸機構

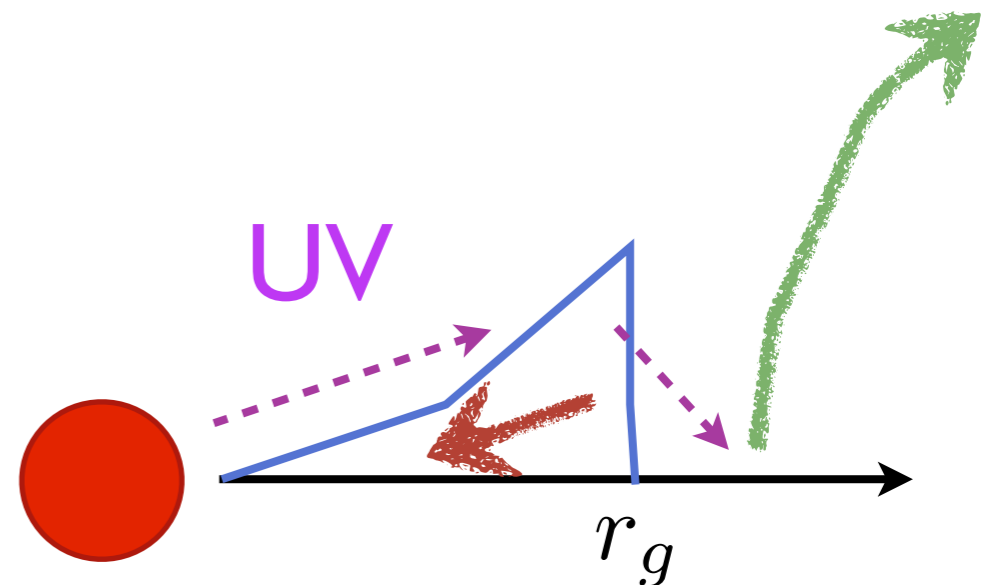
様々な機構による円盤ガスの散逸時間



- t_{ws} : 恒星風
- t_{se} : 恒星の接近遭遇
- t_v : 粘性降着
- t_e : 光蒸発

円盤内側 : 粘性降着

円盤外側 : 光蒸発

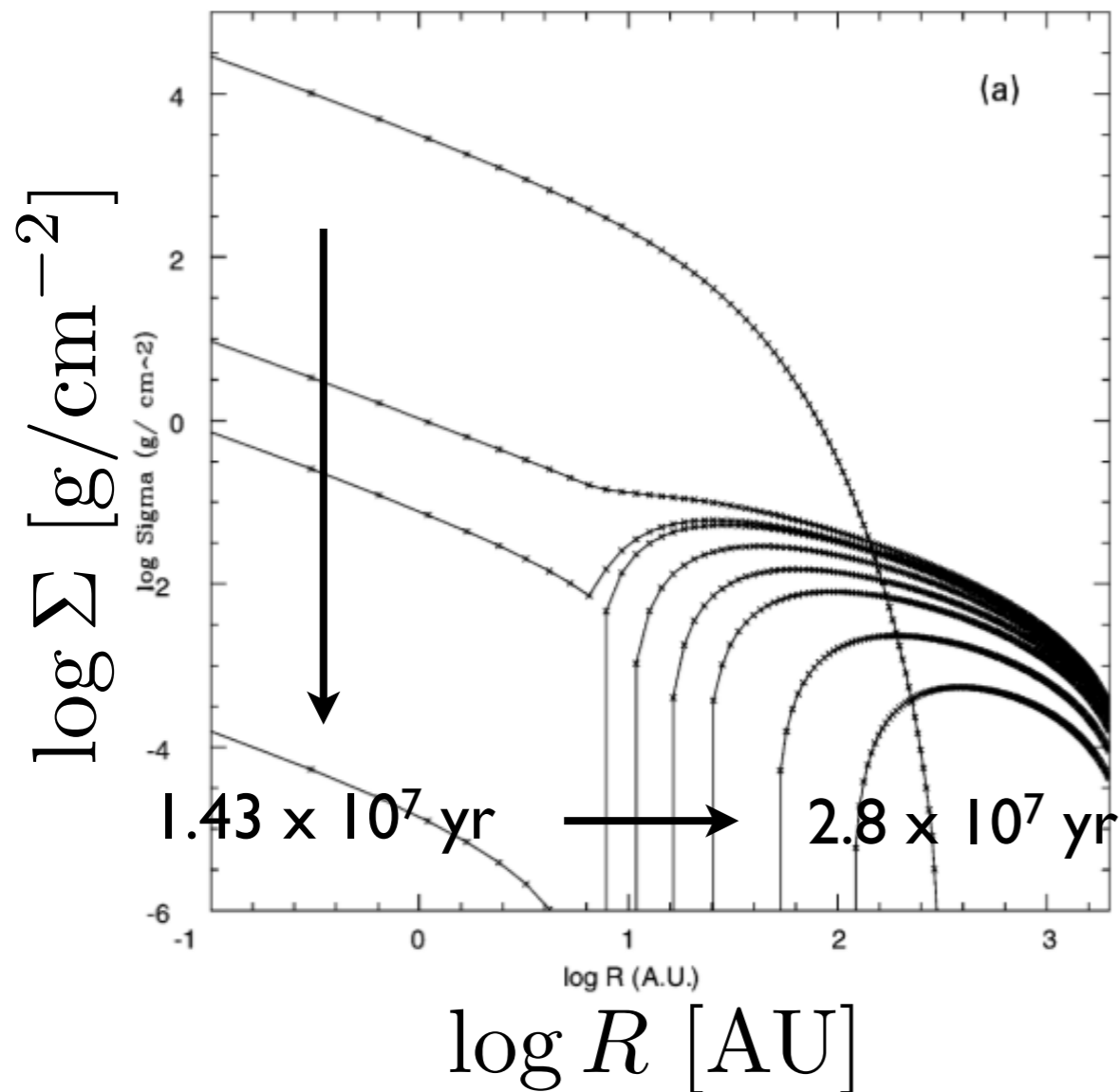


光蒸発と粘性降着による円盤進化

過去の研究

Clarke+ 01

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} = \underbrace{\frac{3}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^{1/2} \frac{\partial}{\partial r} (\nu \Sigma r^{1/2}) \right]}_{\text{粘性降着}} - \underbrace{\dot{\Sigma}_{pe}}_{\text{光蒸発}}$$



- **中心星**からの照射のみを考慮
- 特に**EUUV** ($> 13.6 \text{ eV}$)のみを考慮
- 円盤内側に**穴**ができる
- 円盤ガスは $\sim 10^7 \text{ yr}$ で散逸

光蒸発と粘性降着による円盤進化

過去の研究

Gorti + 09

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} = \frac{3}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\underbrace{r^{1/2} \frac{\partial}{\partial r} (\nu \Sigma r^{1/2})}_{\text{粘性降着}} \right] - \underbrace{\dot{\Sigma}_{pe}}_{\text{光蒸発}}$$

- **中心星**からの照射のみを考慮
- EUV(>13.6eV)、**FUV**(数eV)、X線を考慮
- 円盤内側に穴ができる
- 円盤ガスは**~10⁶ yr**で散逸(FUVが光蒸発には効く)

光蒸発と粘性降着による円盤進化

過去の研究

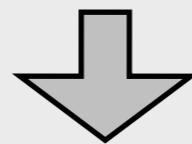
Gorti + 09

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} = \frac{3}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\underbrace{r^{1/2} \frac{\partial}{\partial r} (\nu \Sigma r^{1/2})}_{\text{粘性降着}} \right] - \underbrace{\dot{\Sigma}_{pe}}_{\text{光蒸発}}$$

- 中心星からの照射のみを考慮
- EUV(>13.6eV)、FUV(数eV)、X線を考慮
- 円盤内側に穴ができる
- 円盤ガスは $\sim 10^6$ yrで散逸(FUVが光蒸発には効く)

星の多くは星団内で形成される。

(Lada & Lada 2003)



近傍の大質量星からの紫外線



Trapezium 星団

大きさ：～ 0.8 pc

年齢：～ 10^6 yr

円盤の固有速度：～ 3 km/s

観測 (電離面・円盤半径)との
比較によるモデルの検証が
可能

Trapezium 星団

大きさ : ~ 0.8 pc

年齢 : $\sim 10^6$ yr

円盤の固有速度 : ~ 3 km/s

観測 (電離面・円盤半径)との
比較によるモデルの検証が
可能



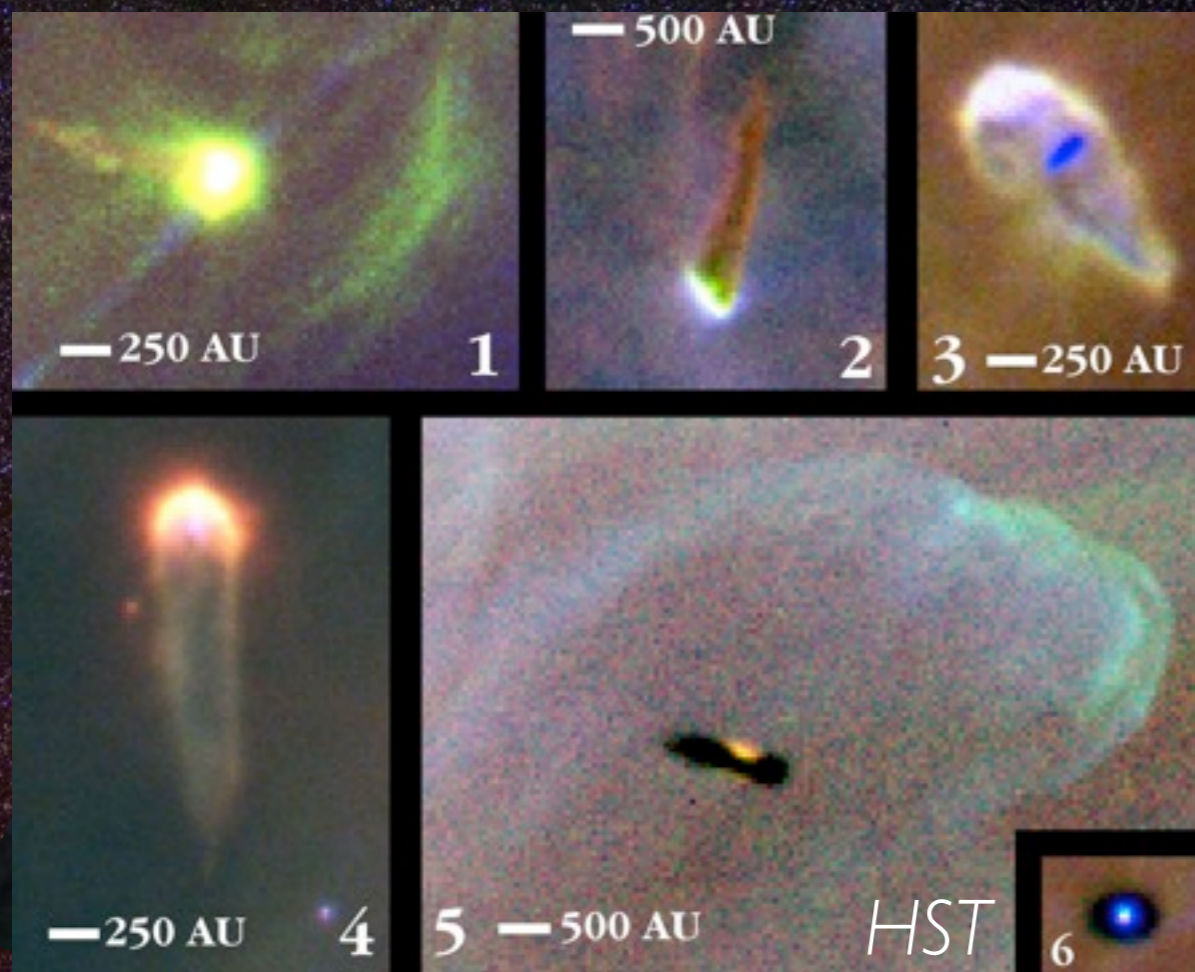
HST

Trapezium 星団

大きさ：～ 0.8 pc

年齢：～ 10^6 yr

円盤の固有速度：～ 3 km/s



観測 (電離面・円盤半径)との
比較によるモデルの検証が
可能

HST

目次

- 過去の研究
- 星団内の円盤の面密度進化計算
- 光蒸発流と電離面形成計算
- 観測との比較によるモデルの検証
 - 電離面半径の比較
 - 円盤半径の比較
- まとめ

星団内の円盤面密度進化

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} = \underbrace{\frac{3}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^{1/2} \frac{\partial}{\partial r} (\nu \Sigma r^{1/2}) \right]}_{\text{粘性降着}} - \underbrace{\dot{\Sigma}_{\text{pe}}}_{\text{光蒸発}} \quad \dot{\Sigma}_{\text{pe}} = 2n_0 m_H c_s$$

粘性降着：粘性拡散によって、ガスが中心星に落ちる

降着円盤の方程式は

$$\begin{cases} \frac{\partial \Sigma}{\partial t} = \frac{1}{2\pi r} \frac{\partial \dot{M}}{\partial r} \\ \dot{M} \equiv -2\pi r \Sigma v_r \end{cases}$$

粘性トルクから $\dot{M} = 6\pi \sqrt{r} \frac{\partial}{\partial r} (\sqrt{r} \nu \Sigma)$

粘性降着による面密度進化の式は

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} = \frac{3}{r} \frac{\partial}{\partial r} \sqrt{r} \frac{\partial}{\partial r} (\sqrt{r} \nu \Sigma)$$

星団内の円盤面密度進化

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} = \frac{3}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^{1/2} \frac{\partial}{\partial r} (\nu \Sigma r^{1/2}) \right] - \dot{\Sigma}_{\text{pe}} \quad \dot{\Sigma}_{\text{pe}} = 2n_0 m_H c_s$$

粘性降着 光蒸発

光蒸発：中心星からの脱出速度(=音速)を持つガスが散逸

重力エネルギーと熱エネルギーの釣合

星団内の円盤面密度進化

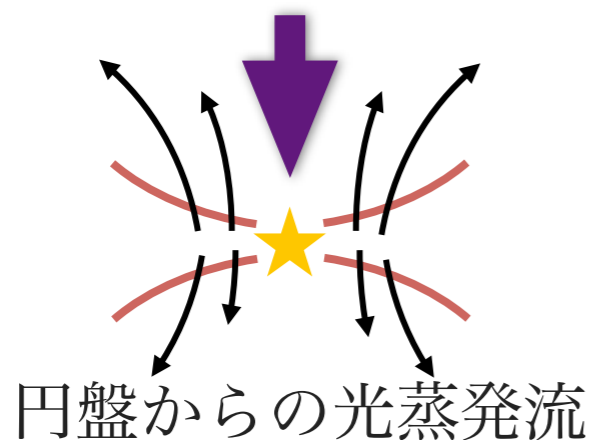
$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} = \underbrace{\frac{3}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^{1/2} \frac{\partial}{\partial r} (\nu \Sigma r^{1/2}) \right]}_{\text{粘性降着}} - \underbrace{\dot{\Sigma}_{\text{pe}}}_{\text{光蒸発}} \quad \dot{\Sigma}_{\text{pe}} = 2n_0 m_H c_s$$

光蒸発：中心星からの脱出速度(=音速)を持つガスが散逸

重力エネルギーと熱エネルギーの釣合

$$\frac{2\gamma}{\gamma - 1} c_s^2 \sim \frac{GM_*}{r} \quad (\gamma = 7/5)$$

大質量星からの紫外線



$$T_{\text{pe}} = 3770\text{K} \left(\frac{r}{1\text{AU}} \right)^{-1} \left(\frac{M_*}{M_\odot} \right)$$

e.g., Gorti & Hollenbach(2009)

円盤の鉛直構造

ガス温度分布

局所熱平衡 ($\Gamma_{\chi} + \Gamma_{pe} + L_{gr} - \Lambda_{line} = 0$)

Γ_{pe} : 中心星と大質量星からの紫外線加熱
(ダスト上の光電加熱)

Γ_{χ} : 中心星からのX線加熱(水素の電離)

Λ_{line} : 輻射冷却(Ly α , OI, CII, CO遷移線)

L_{gr} : ガス・ダスト粒子間のエネルギー交

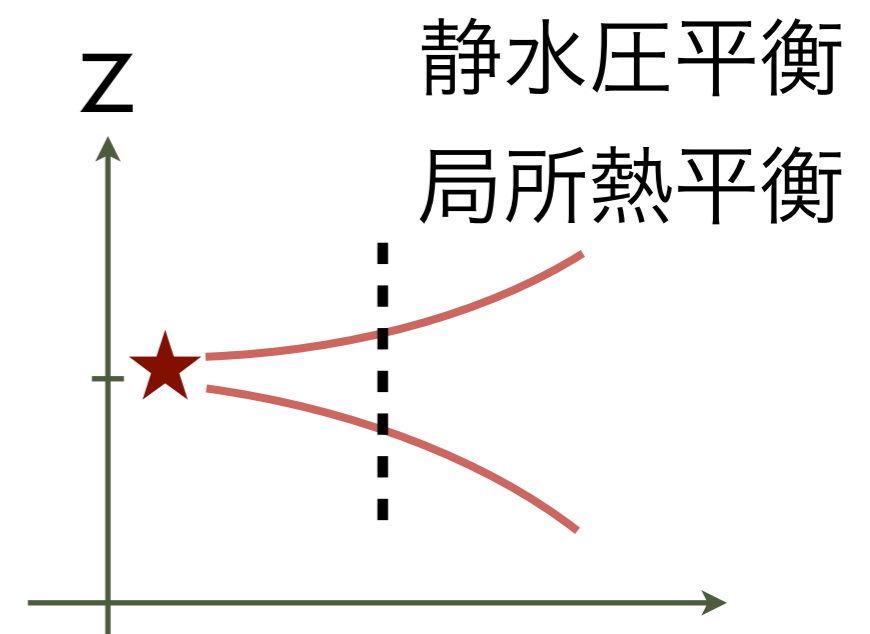
ダスト温度分布

局所輻射平衡

加熱源: 中心星と大質量星からの照射加熱
赤道面における粘性加熱

ガス密度分布

円盤鉛直方向の静水圧平衡

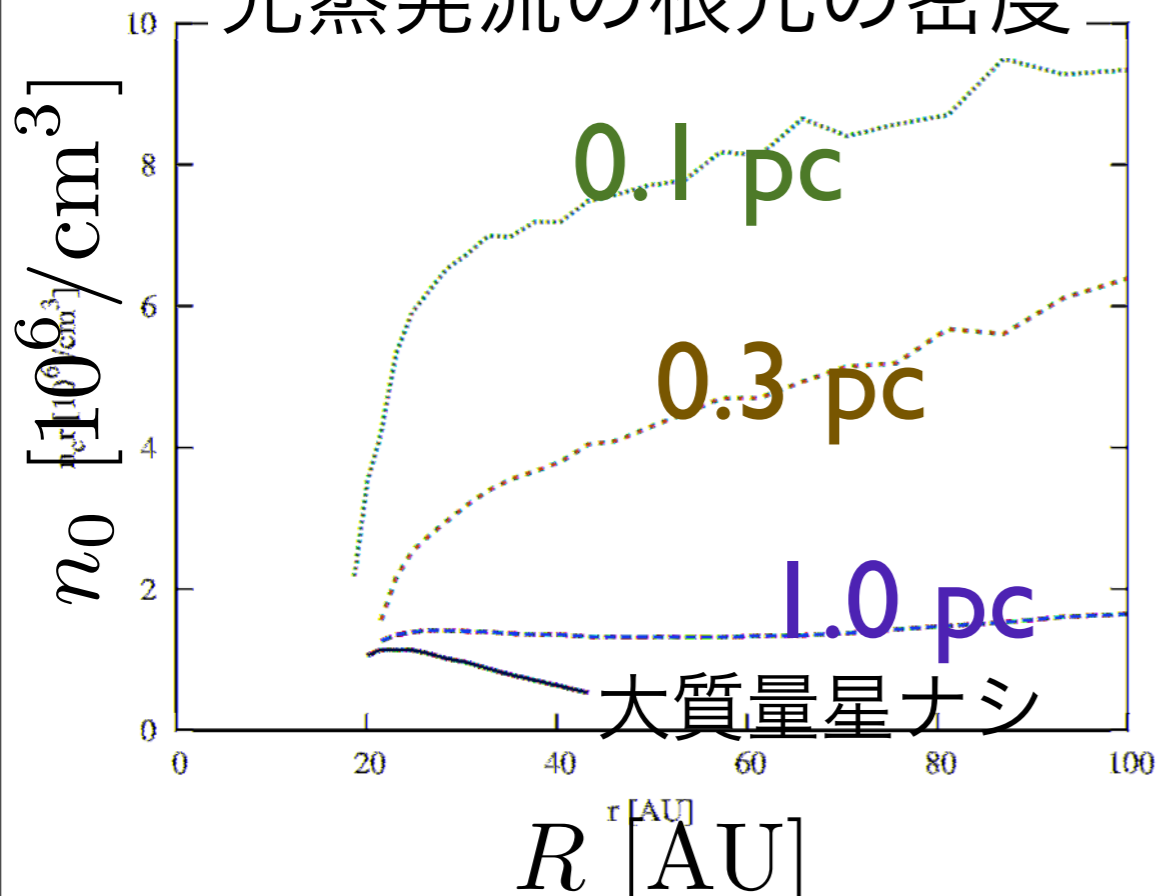


星団内の円盤面密度進化

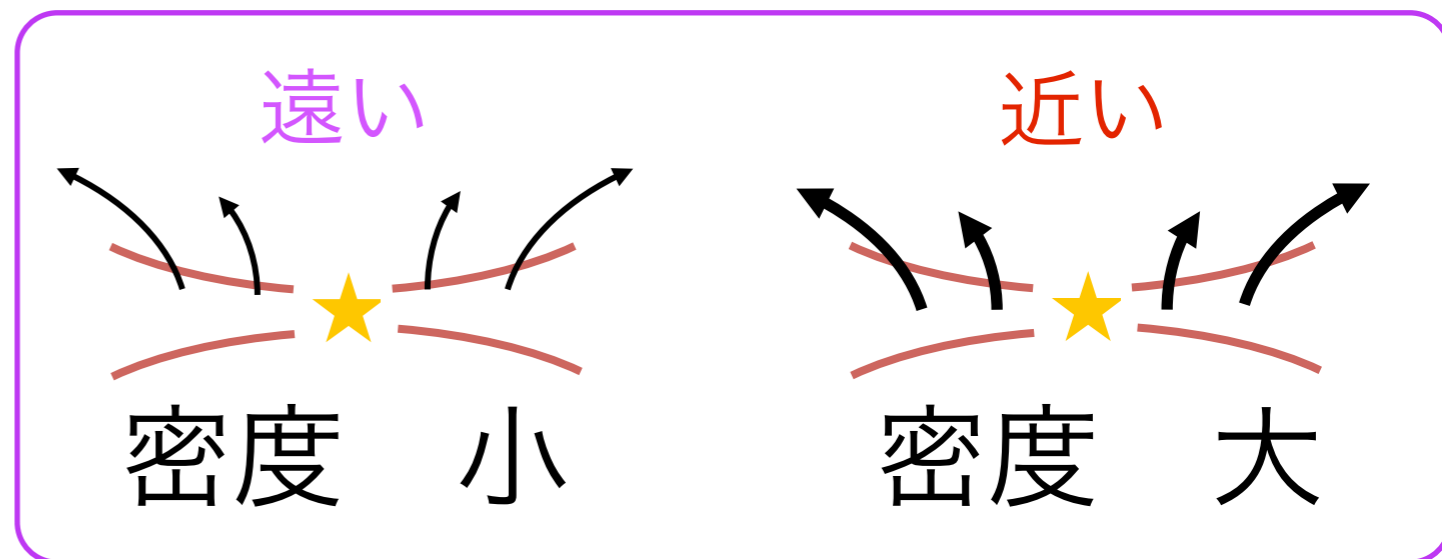
$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} = \underbrace{\frac{3}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^{1/2} \frac{\partial}{\partial r} (\nu \Sigma r^{1/2}) \right]}_{\text{粘性降着}} - \underbrace{\dot{\Sigma}_{\text{pe}}}_{\text{光蒸発}} \quad \dot{\Sigma}_{\text{pe}} = 2n_0 m_H c_s$$

$$T_{\text{pe}} = 3770\text{K} \left(\frac{r}{1\text{AU}} \right)^{-1} \left(\frac{M_*}{M_\odot} \right)$$

光蒸発流の根元の密度



大質量星に近いほど、
より密度の高い領域まで加熱される



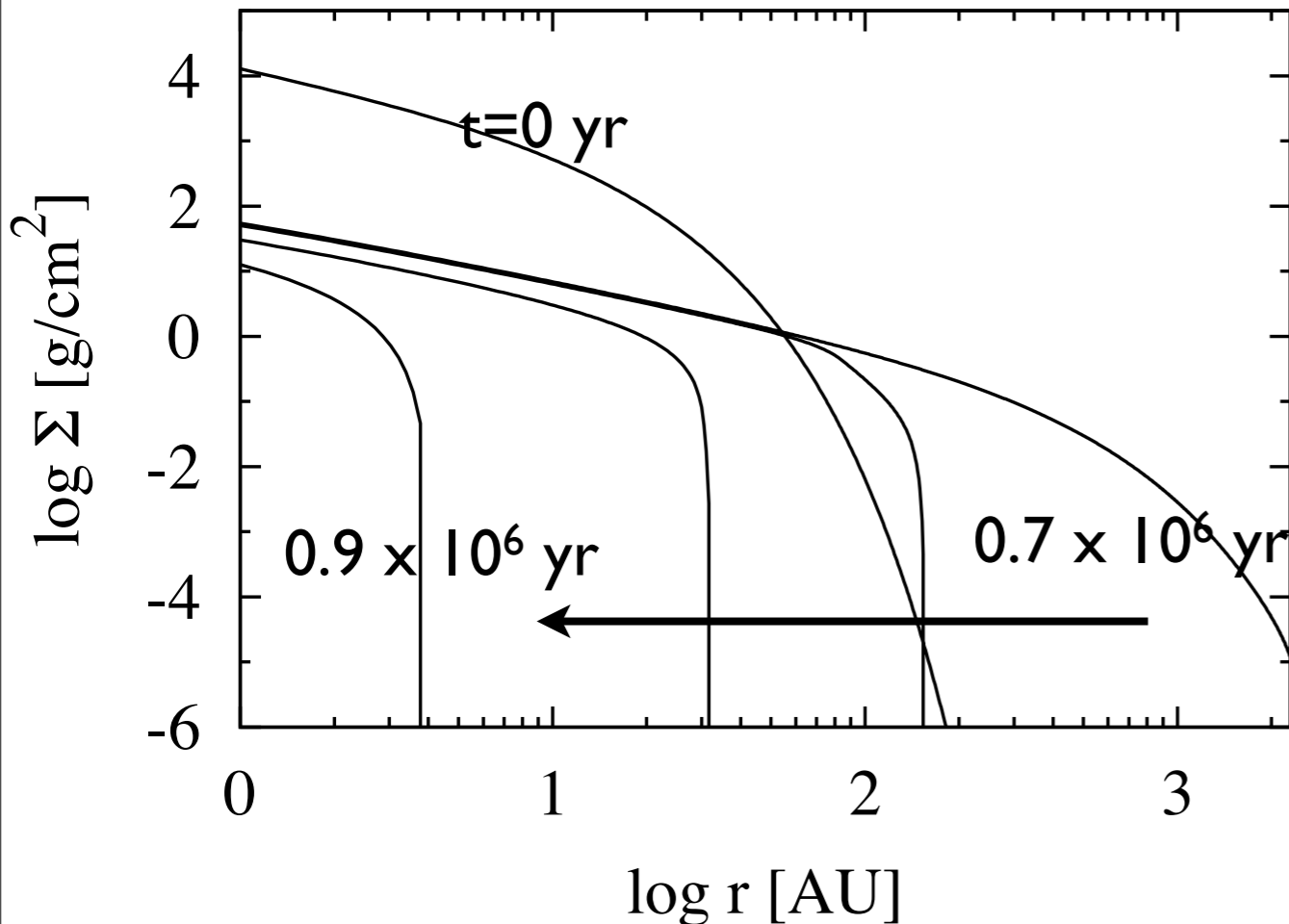
星団内の円盤面密度進化

星団内での円盤の運動(~ 3 km/s)

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} = \underbrace{\frac{3}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^{1/2} \frac{\partial}{\partial r} (\nu \Sigma r^{1/2}) \right]}_{\text{粘性降着}} - \underbrace{\dot{\Sigma}_{pe}}_{\text{光蒸発}} +$$



e.g., Hartmann + 05



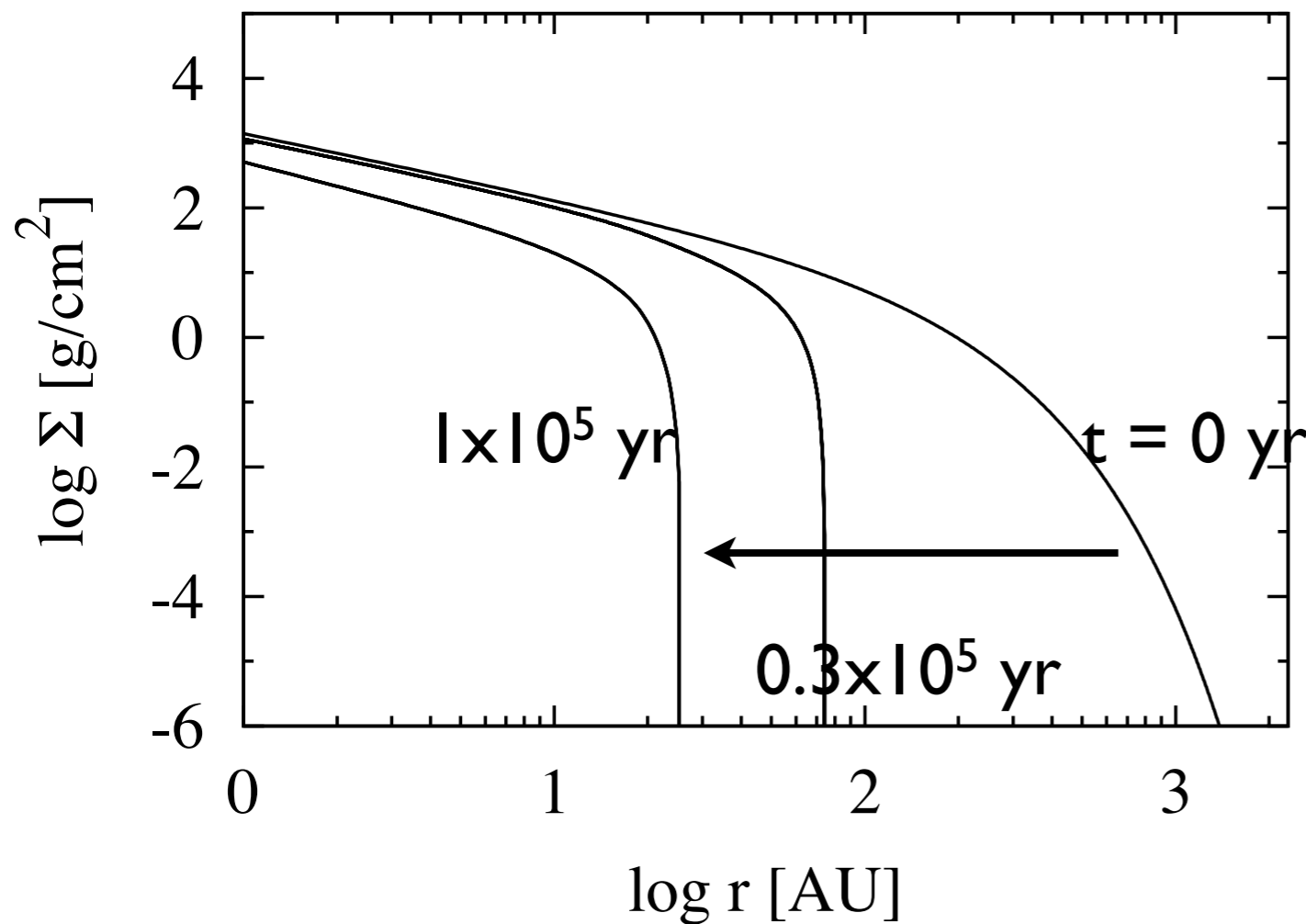
円盤外縁部から散逸していく
散逸時間： $\sim 10^6$ yr

光蒸発率

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

大質量星からの距離が変わら ない場合

$d = 0.15 \text{ pc}$

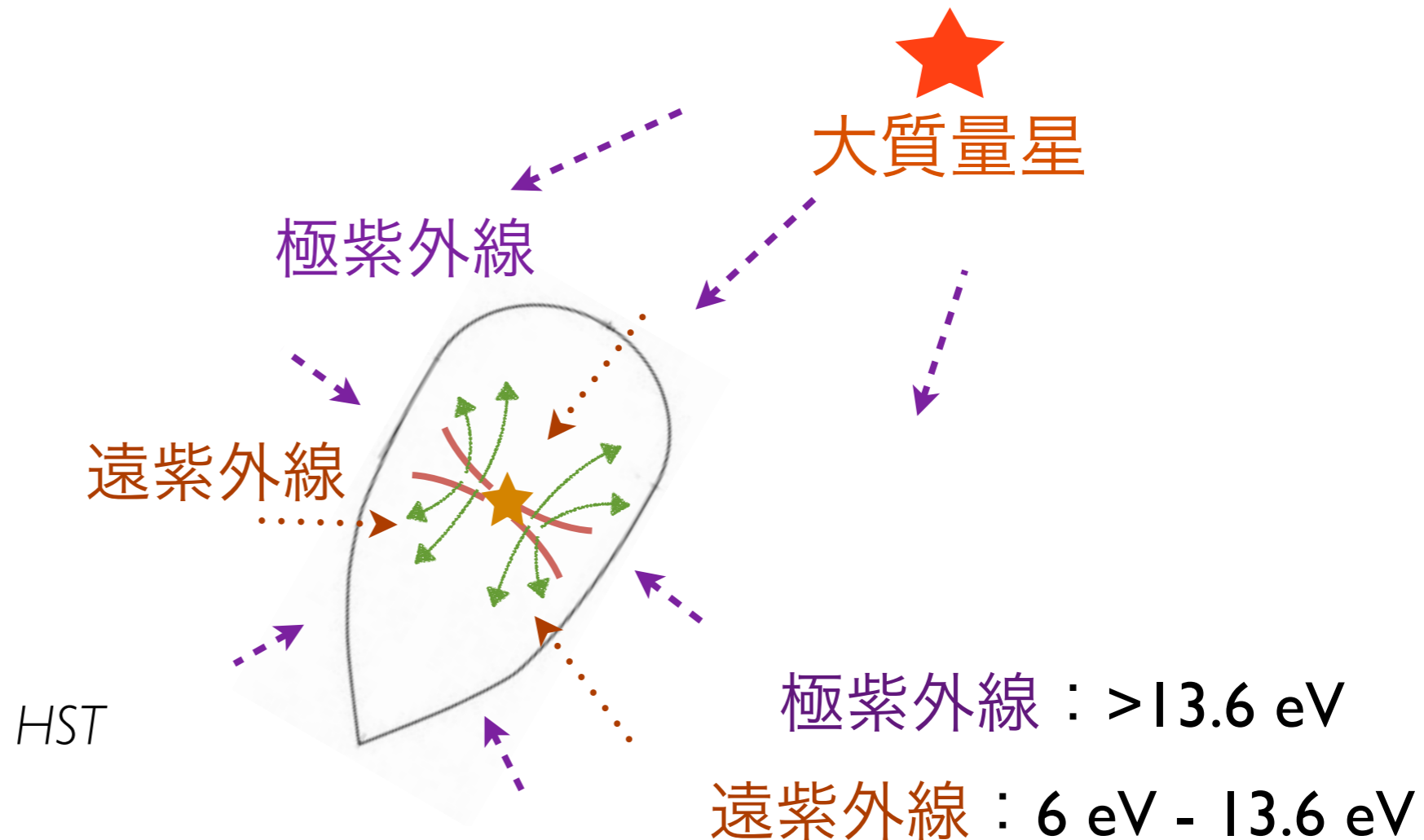
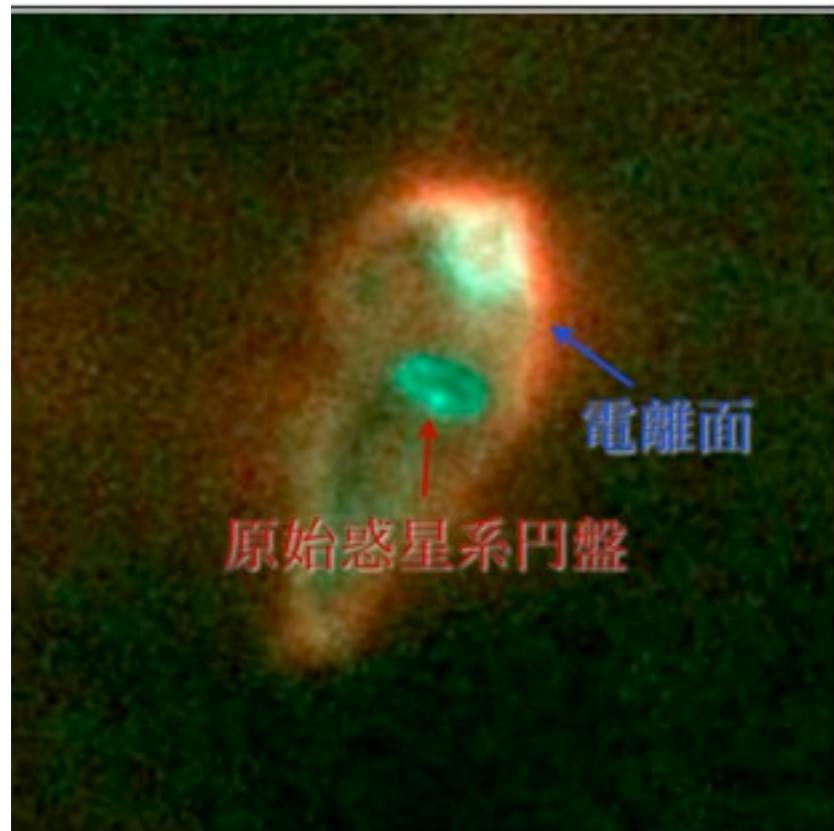


散逸時間 10^5 yr
< 星団の年齢 10^6 yr

目次

- 過去の研究
- 星団内の円盤の面密度進化計算
光蒸発率： $5 \times 10^{-7} M_{\odot}/\text{yr}$
- 光蒸発流と電離面形成計算
- 観測との比較によるモデルの検証
 - 電離面半径の比較
 - 円盤半径の比較
- まとめ

光蒸発流と電離面



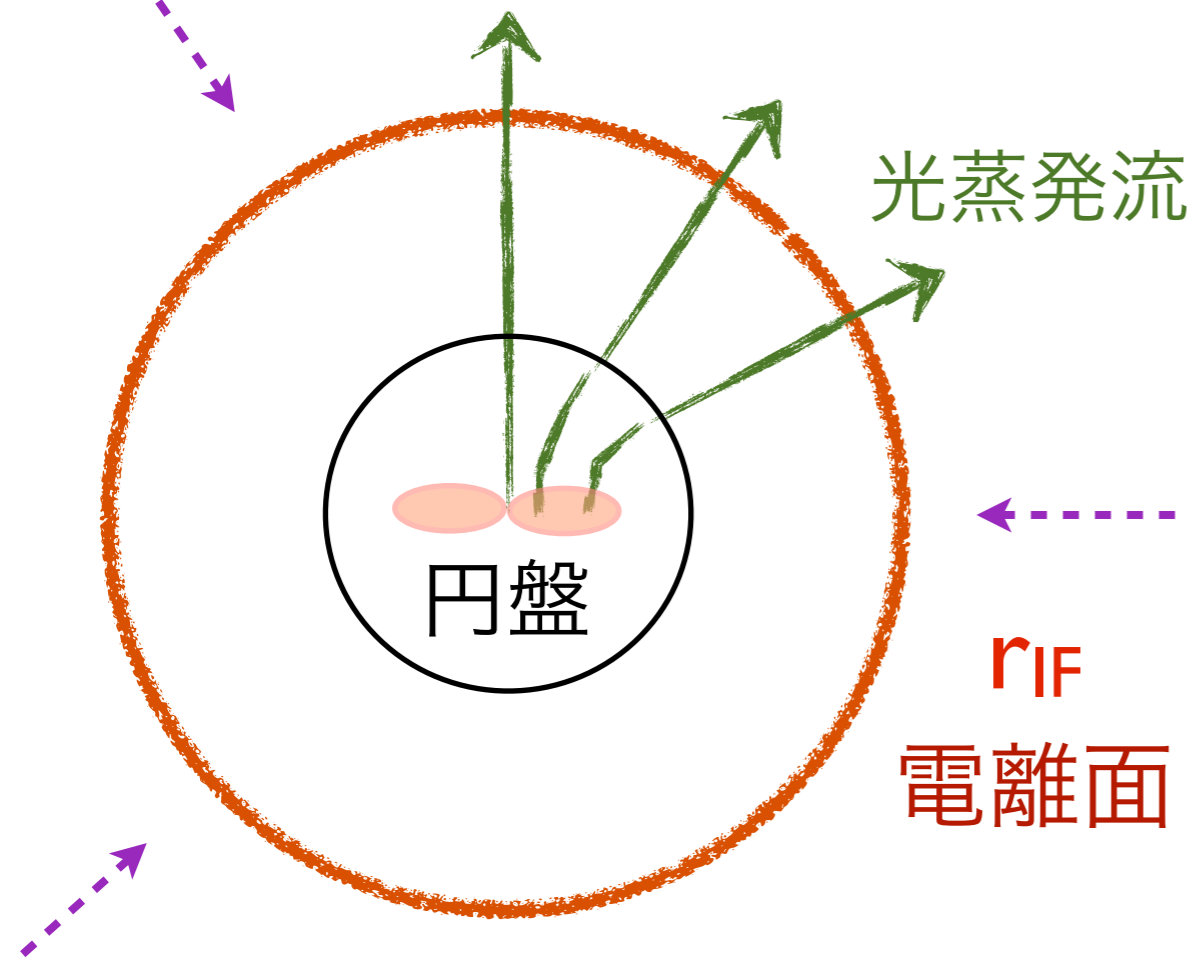
光蒸発流：大質量星からの遠紫外線による加熱

電離面：極紫外線による光蒸発流の電離

光蒸発流と電離面

球対称一次元流体計算

極紫外線



光蒸発流

円盤

r_{IF}

電離面

連続の式 運動方程式

エネルギー方程式

極紫外線による水素の電離と
水素の再結合の釣り合い

τ_d 光学的厚み

α 再結合係数

d 大質量星からの距離

n_{II} 電離水素密度

Φ_i 大質量星の極紫外線フラックス

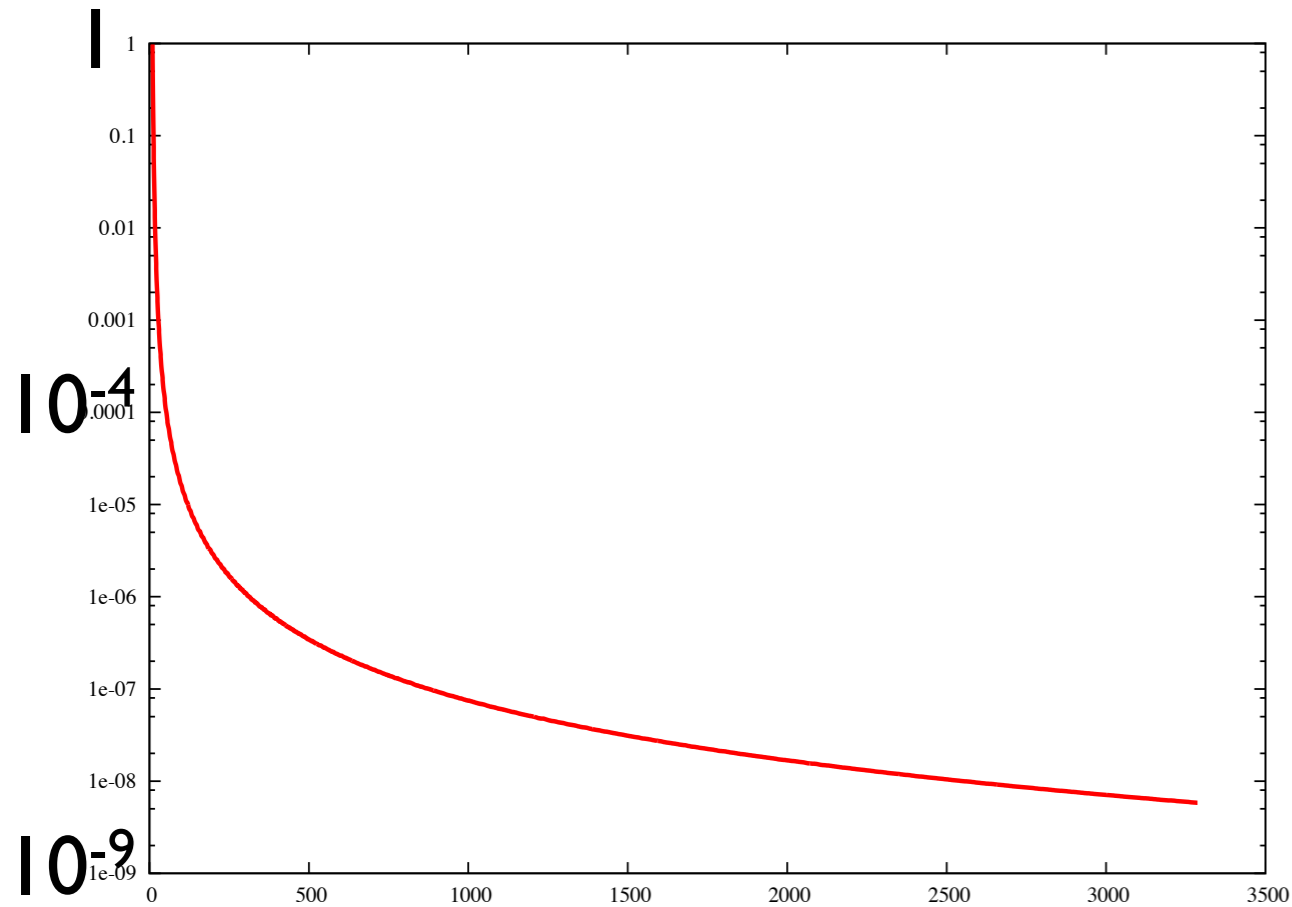
$$\frac{\exp(-\tau_d)}{4\pi d^2} \Phi_i = \int_{r_{IF}}^{\infty} n_{II}^2 \alpha dr$$

水素の電離率 水素の再結合率

光蒸発流と電離面

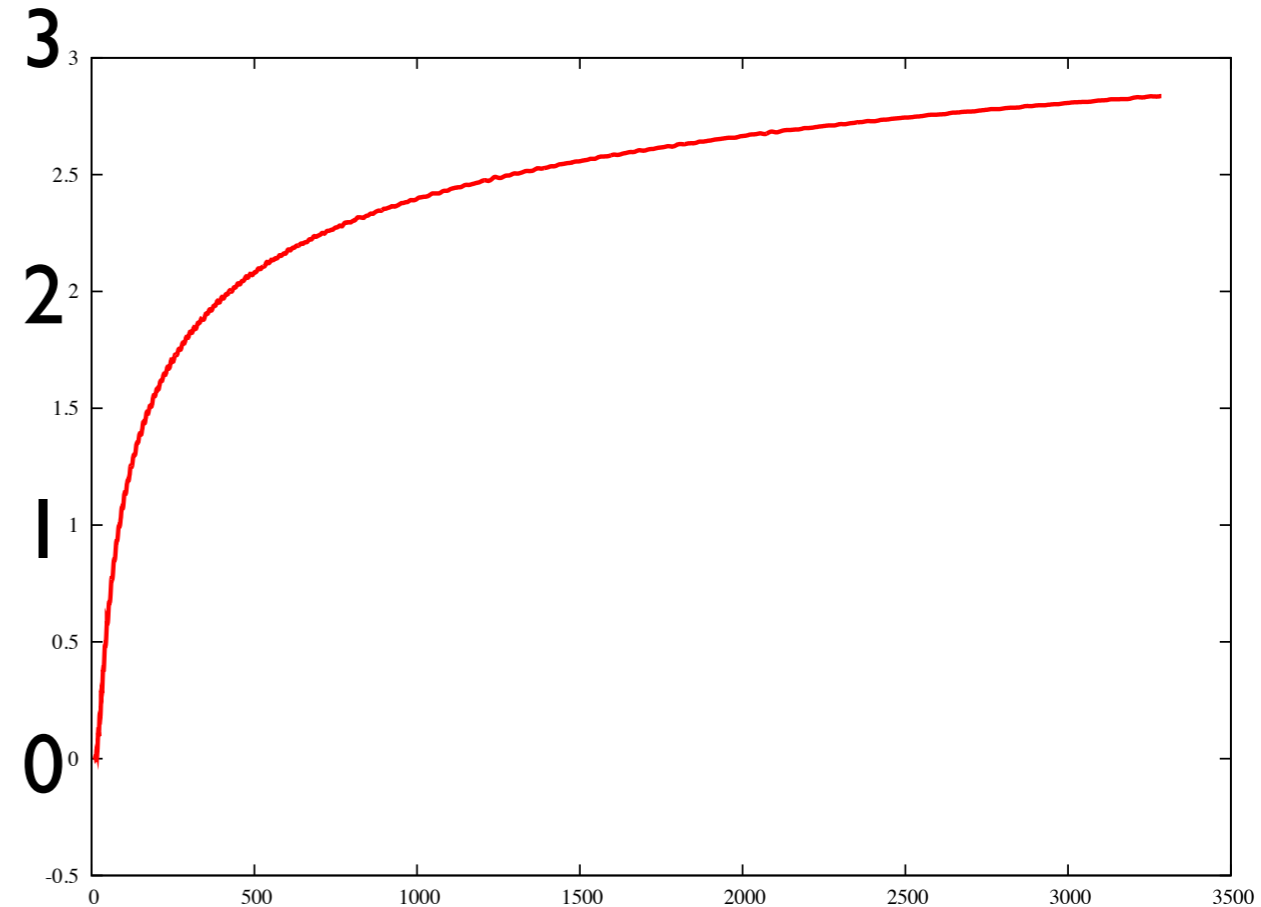
大質量星からの照射がない場合

密度



円盤からの距離

速度

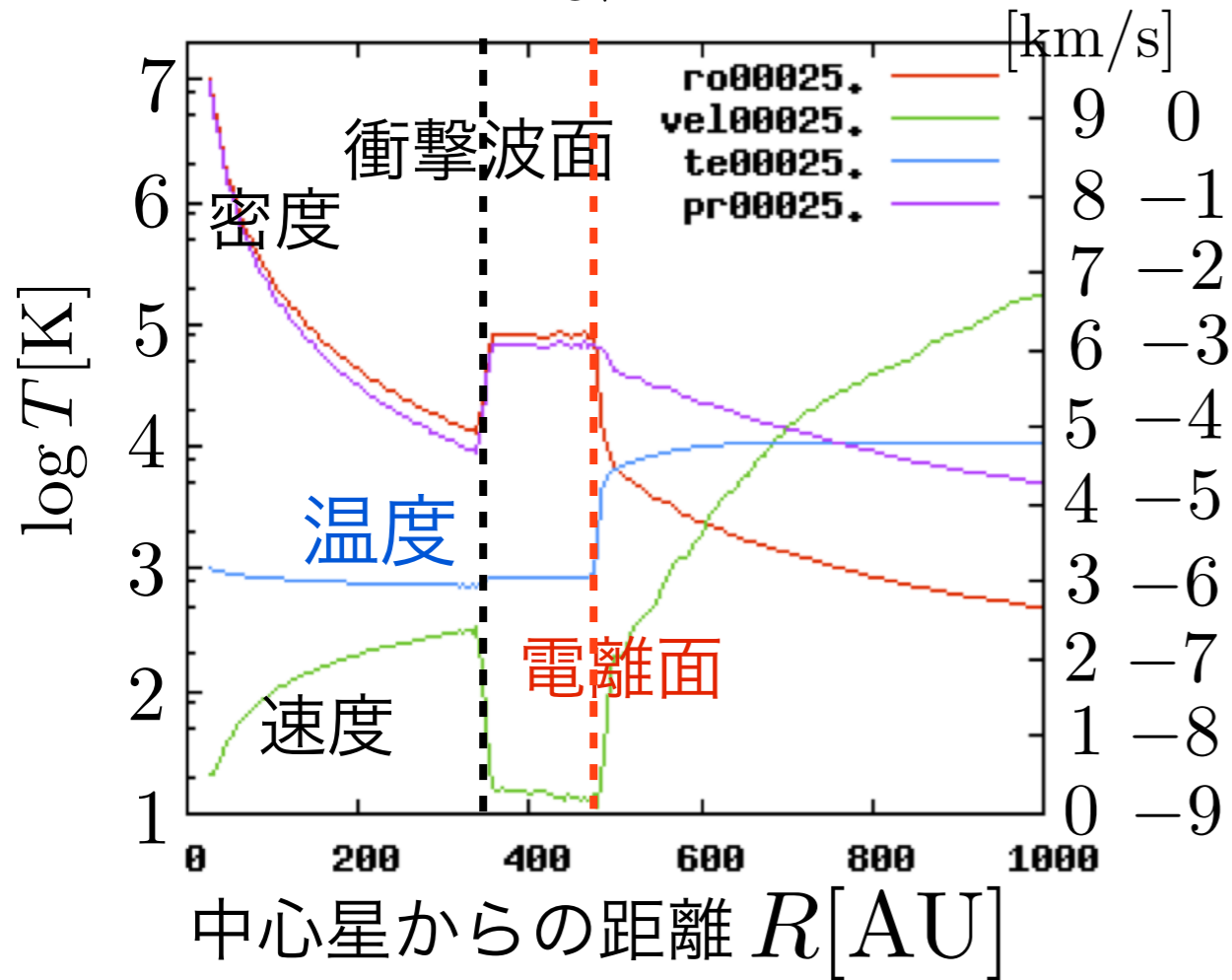


円盤からの距離

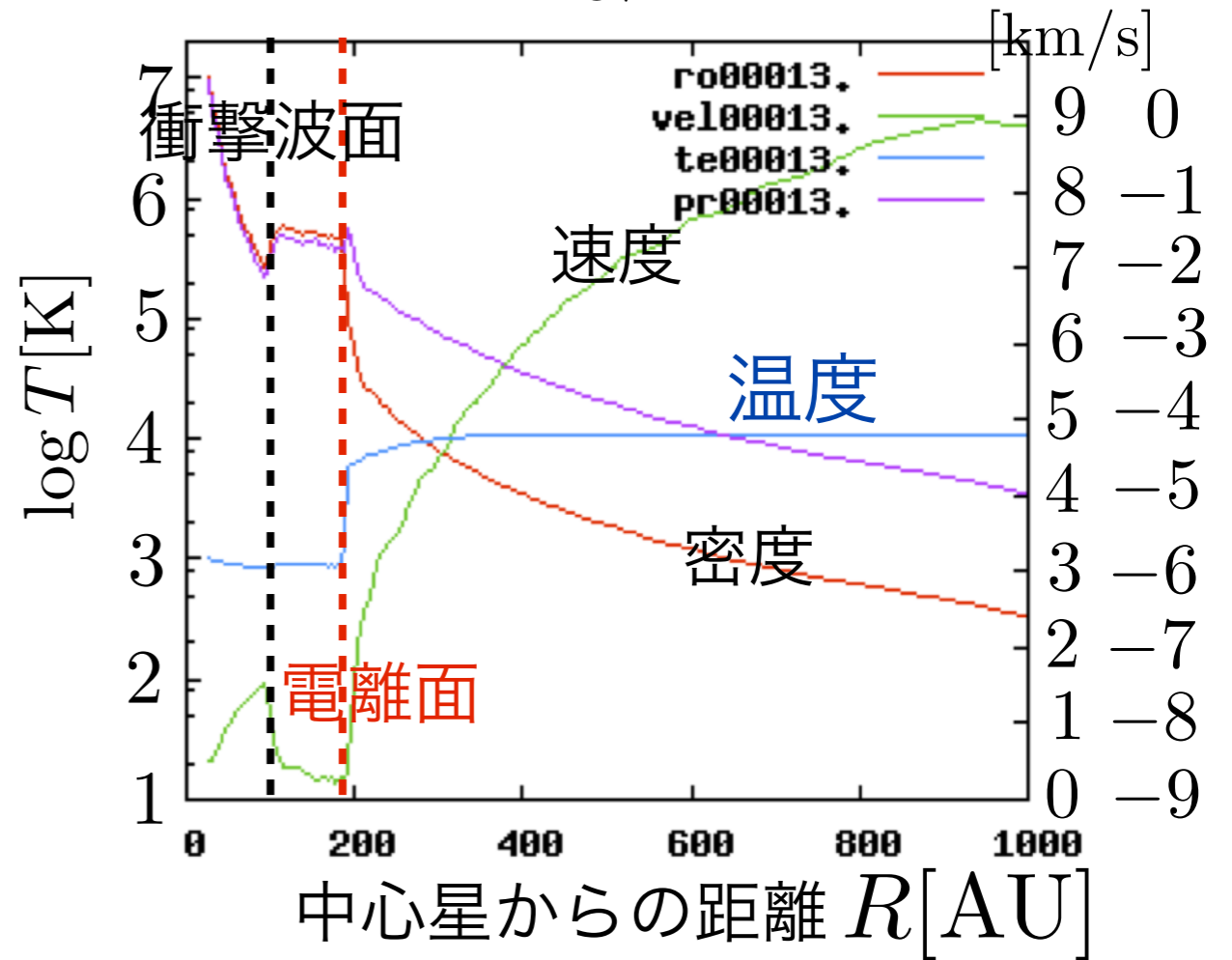
一次元の太陽風のParker解となっている

電離面形成計算

$\dot{M} = 10^{-6} M_{\odot}/\text{yr}, d = 0.3 \text{ pc}$ v ρ

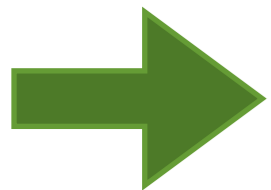


$\dot{M} = 8 \times 10^{-7} M_{\odot}/\text{yr}, d = 0.2 \text{ pc}$ v ρ



電離面の位置は

大質量星からの距離と円盤からの光蒸発率によって変化する。

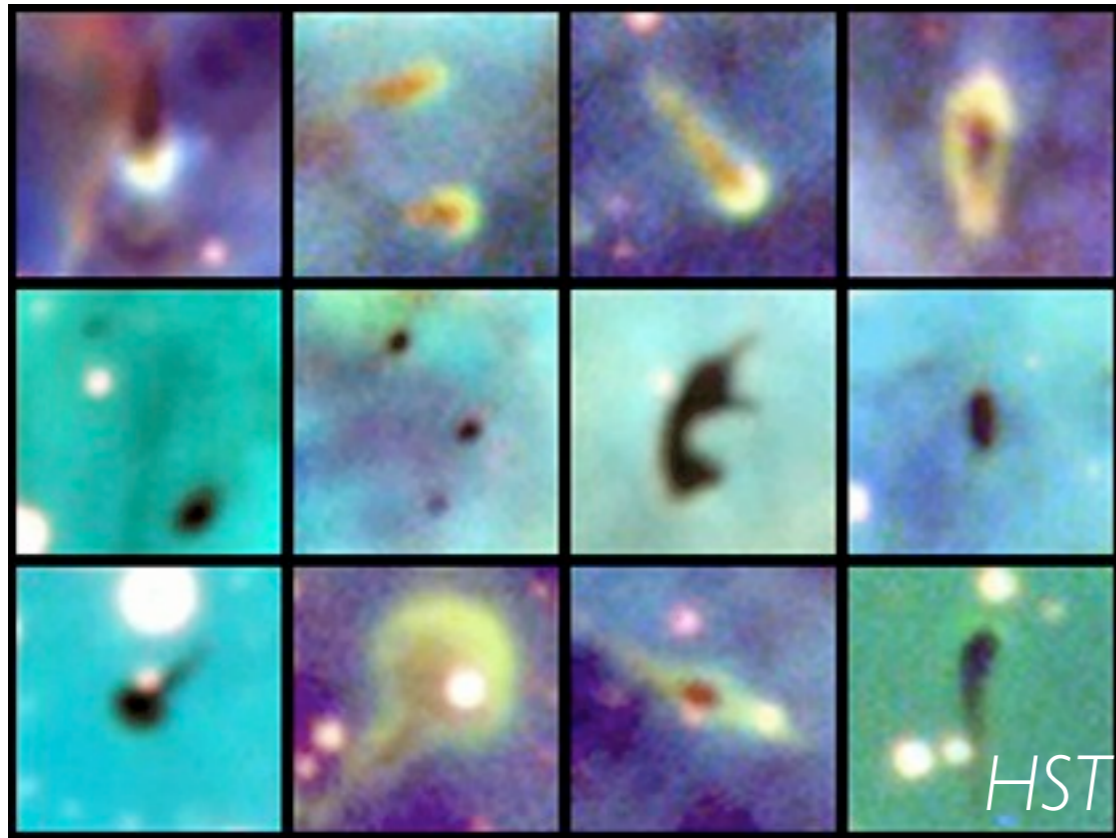


観測との比較によって、光蒸発率に制限が与えられる。

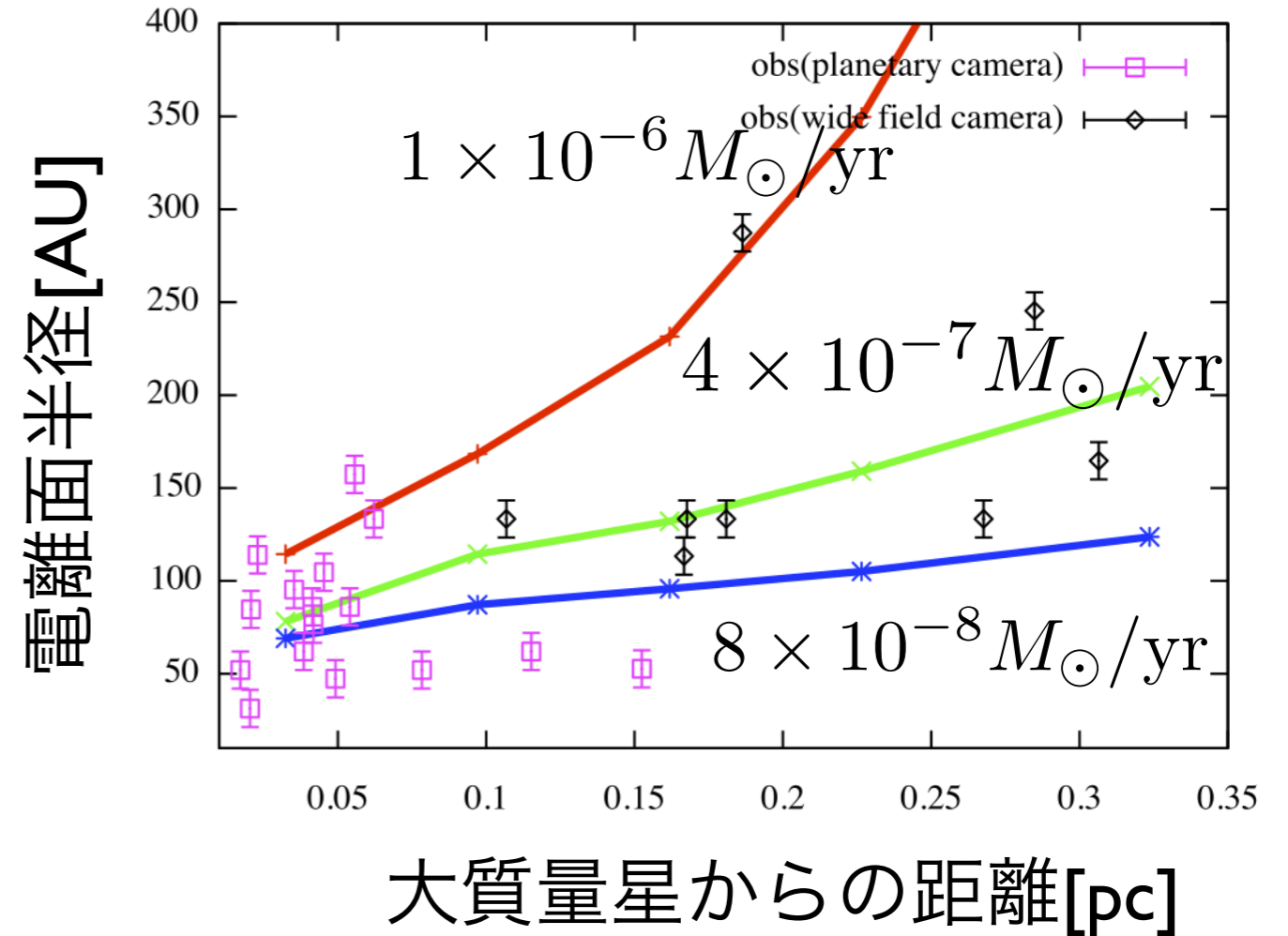
目次

- 過去の研究
- 星団内の円盤の面密度進化計算
質量放出率： $5 \times 10^{-7} M_{\odot}/\text{yr}$
- 光蒸発流と電離面形成計算
- 観測との比較によるモデルの検証
 - 電離面半径の比較
 - 円盤半径の比較
- まとめ

電離面半径：観測との比較



観測点はJohnstone+ 1998 (HST)より



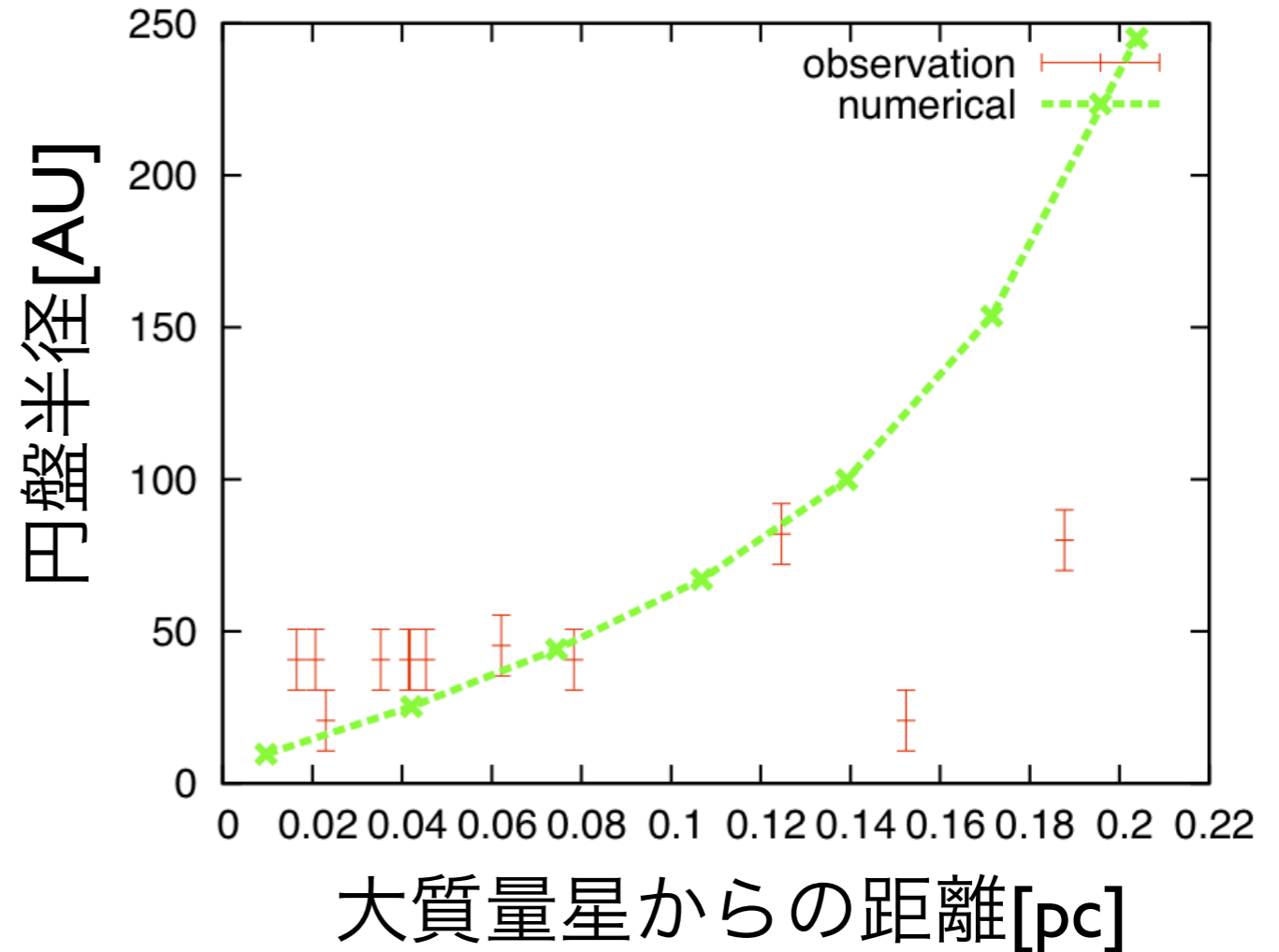
光蒸発率： $\sim 5 \times 10^{-7} M_{\odot}/\text{yr}$

面密度進化計算の光蒸発率は
電離面半径の観測と一致する

円盤半径：観測との比較



観測点はJohnstone+ 1998 (HST)より



電離面・円盤半径の観測とモデル計算がよく一致

円盤面密度進化は光蒸発モデルでよく説明できる

まとめ

- 大質量星近傍で、円盤は外縁部から散逸する。
円盤の大きさは大質量星からの距離に依存する。
- 電離面半径は光蒸発率に依存する。
光蒸発率は $\sim 4 \times 10^{-7}$ Msun/yrで、面密度進化計算の結果と一致。
- 星団内の円盤の半径、電離面半径の観測との比較によって、
光蒸発による円盤進化モデルの妥当性を示した。
- 星団内での円盤の運動を考慮することで、円盤の寿命と星団の
寿命が同程度のオーダーになることを示した。

議論

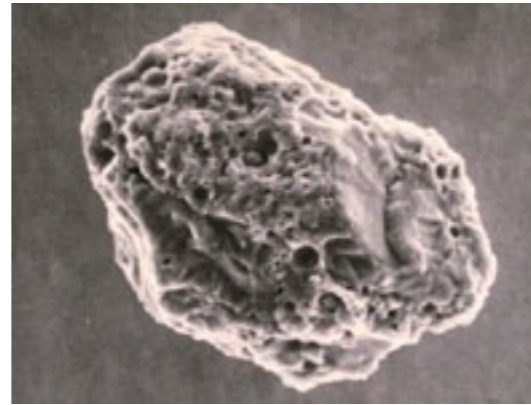
- 天王星、海王星が氷惑星となったのは、円盤外縁部で散逸が盛んだったためではないか。
-> 太陽系は星団内で誕生したのではないか。
- デブリ円盤： $>10\text{AU}$ に存在するダスト粒子、は比較的早いガスの散逸によって、微惑星の衝突がdumpされずに破壊が起こった結果できたものではないか。

展望

- (原始)惑星は円盤質量の一部をその大気とすることができる。この機構を取り入れた散逸計算を行う。
- 2次元輻射流体計算によって一次元光蒸発モデルの検証を行う。
また、光蒸発流の速度構造を調べ観測への示唆を与える。

太陽系は星団で生まれたか

Presolar grain



AGB stars, SNe由来と思われる元素が含まれた隕石。

本来は太陽形成の段階で溶けて元素比は一定になっているため、これらの存在は近傍の星の存在を示唆している。