

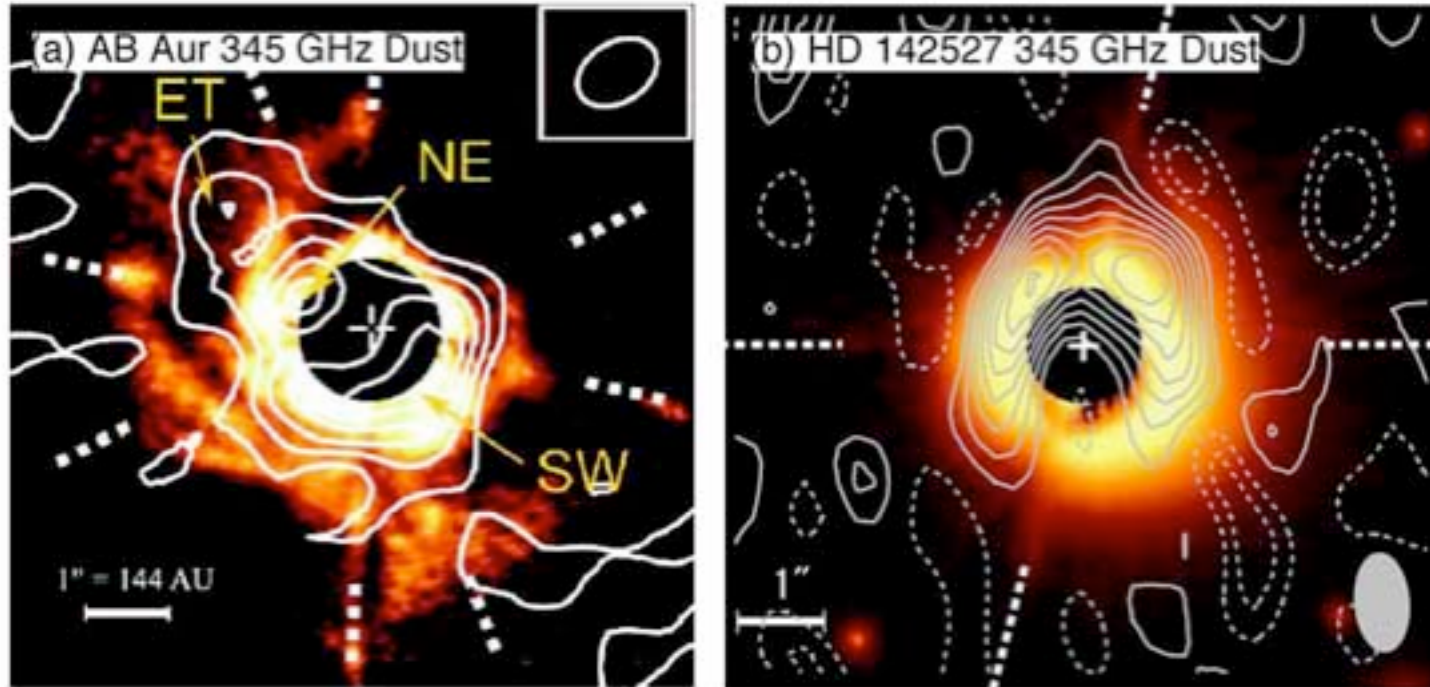
原始惑星円盤の振動

1次元多波長輻射流体 数値シミュレーション

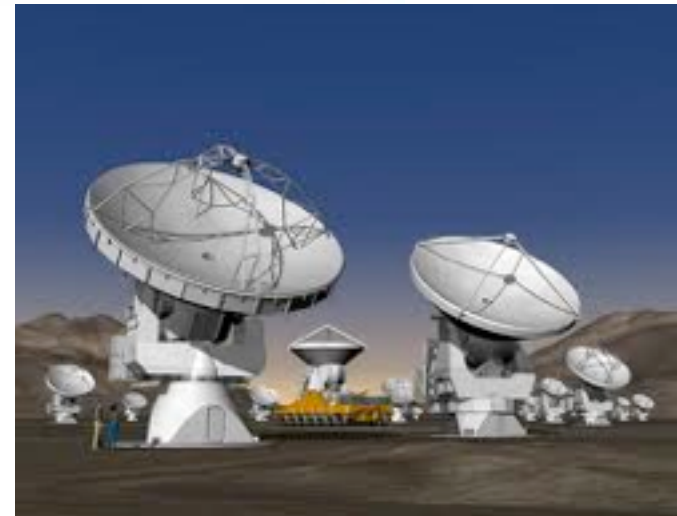
熱い上層と冷たい円盤本体が反対方向に振動する。

花輪 知幸、原田 哲弥 (千葉大)

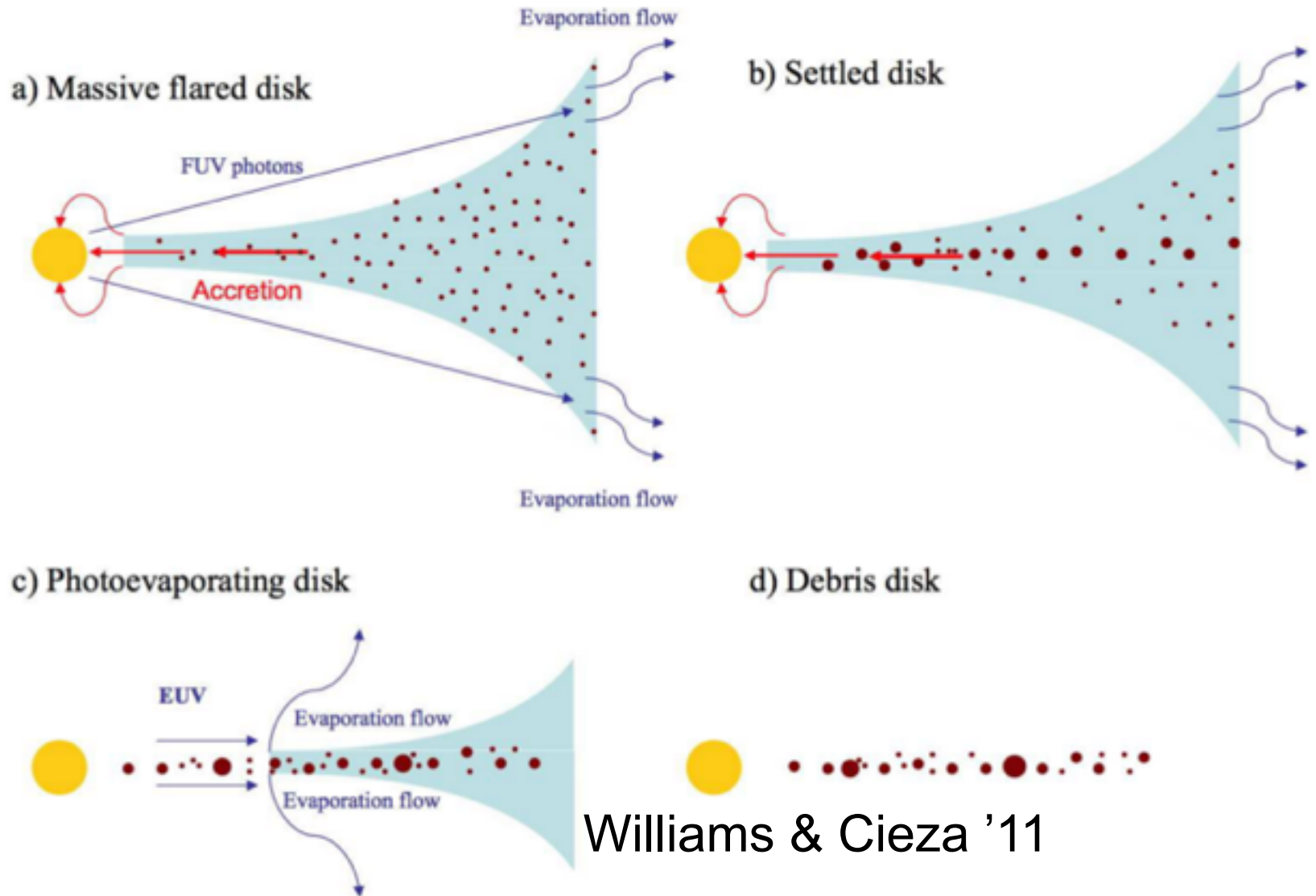
原始惑星円盤の多波長撮像



Lin+06 & Ohashi+07 taken with SMA
overlaid on Fukagawa+02 (Subaru)
Much better images will be taken
with ALMA



原始惑星円盤の進化

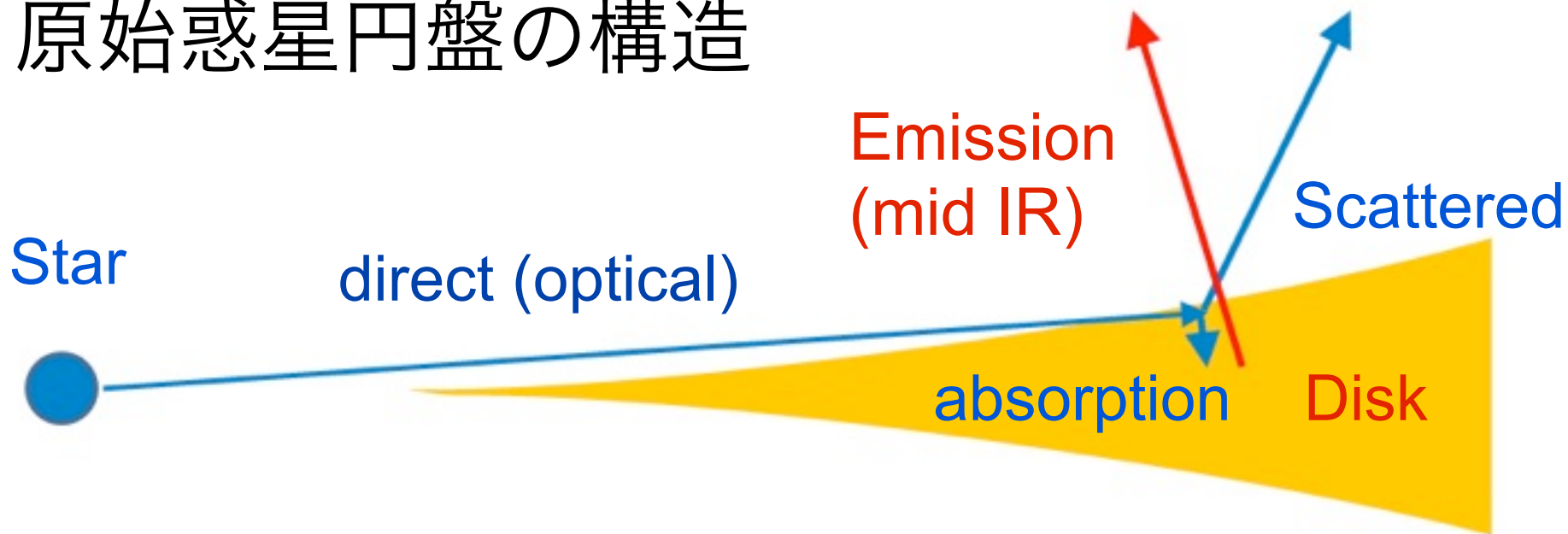


Williams & Cieza '11

鉛直方向の構造

- 力学的な釣り合い 重力と圧力勾配
- 熱的な釣り合い 加熱と冷却
- 不安定?
 - D'Alessio (1999)
 - Dullemond (2000)
 - Watanabe & Lin (2008)
 - 力学的釣り合いあるいは熱的釣り合いを仮定

原始惑星円盤の構造

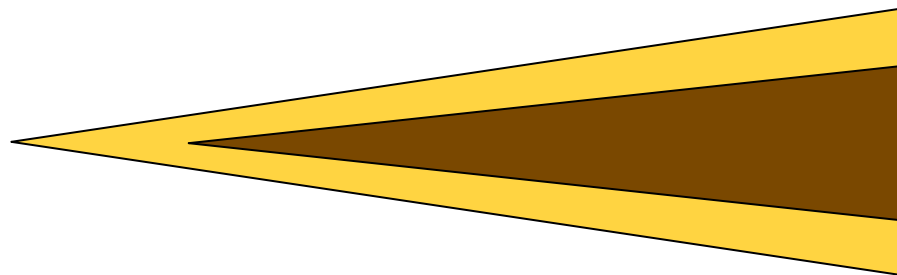


Two Layer Model

Chiang & Goldreich '97

5

Hot Surface Layer + Cool Main Disk



$$T_s \gg T_d$$

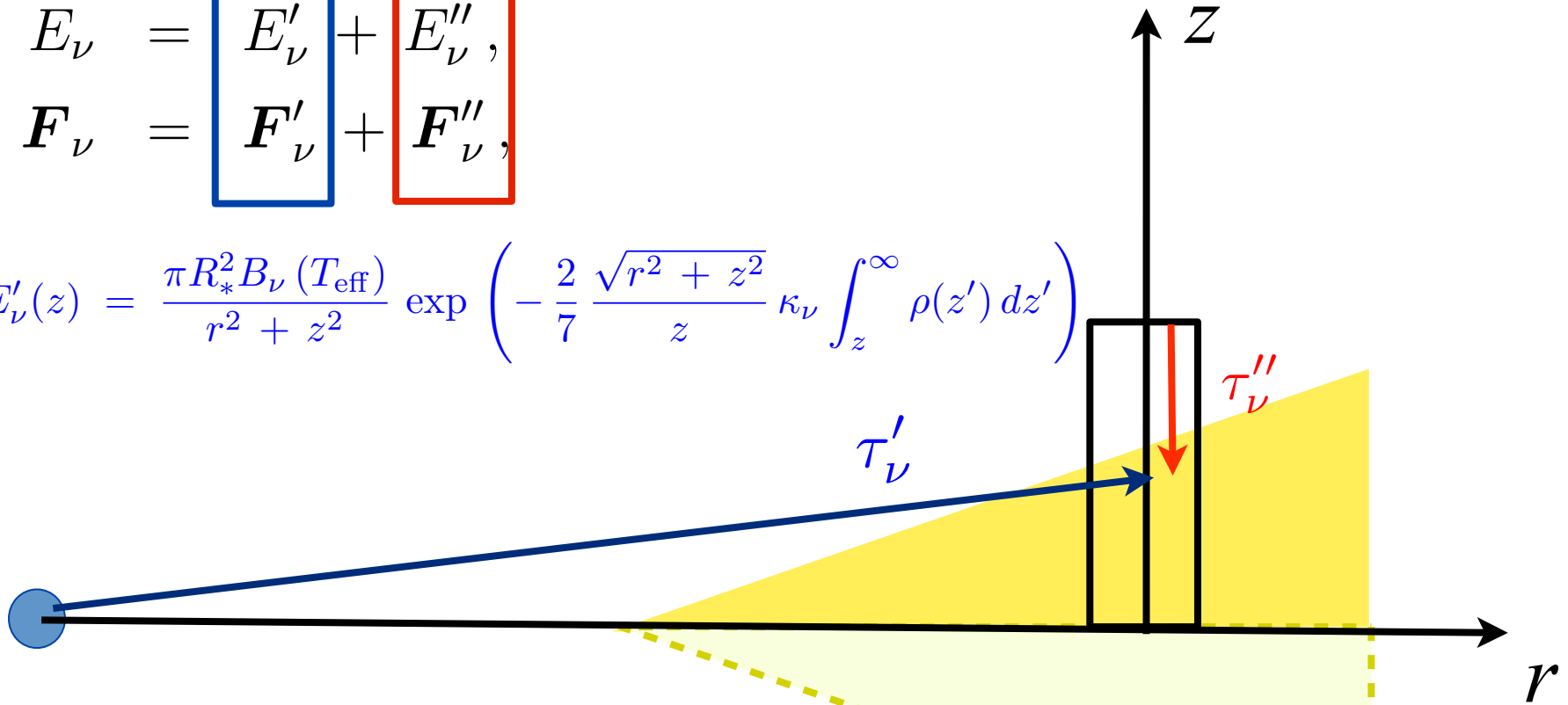
1次元 Grazing Recipe

stellar scattered+emission

$$E_\nu = E'_\nu + E''_\nu,$$

$$F_\nu = F'_\nu + F''_\nu,$$

$$E'_\nu(z) = \frac{\pi R_*^2 B_\nu(T_{\text{eff}})}{r^2 + z^2} \exp\left(-\frac{2}{7} \frac{\sqrt{r^2 + z^2}}{z} \kappa_\nu \int_z^\infty \rho(z') dz'\right)$$



$$\frac{\partial E''_\nu}{\partial t} + \frac{\partial F''_\nu}{\partial z} = \rho c \left[\kappa_{\nu,a} \left(-E''_\nu + \frac{4\pi B_\nu}{c} \right) + \kappa_{\nu,s} E'_\nu \right],$$

$$\frac{\partial F_\nu}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (c^2 \chi''_\nu E''_\nu) = -\rho c (\kappa_{\nu,a} + \kappa_{\nu,s}) F''_\nu,$$

M1 model Eq.

輻射輸送流体力学方程式

assumption : $T_{\text{gas}} = T_{\text{dust}}$ $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z) = 0,$

$$\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{P}{\partial z} + \frac{GMz}{(r^2 + z^2)^{3/2}} = 0,$$

$$T \frac{ds}{dt} = \int_0^\infty \kappa_{\nu,a} [cE_\nu - 4\pi B_\nu(T)] d\nu.$$

$$\alpha \frac{\partial E''_\nu}{\partial t} + \frac{\partial F''_\nu}{\partial z} = \rho c \left[\kappa_{\nu,a} \left(-E''_\nu + \frac{4\pi B_\nu}{c} \right) + \kappa_{\nu,s} E'_\nu \right],$$

$$\alpha \frac{\partial F_\nu}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (c^2 \chi''_\nu E''_\nu) = -\rho c (\kappa_{\nu,a} + \kappa_{\nu,s}) F''_\nu,$$

speed reduction : $\alpha = 10^{-4} \rightarrow c = 30 \text{ km s}^{-1}$

陽解法で計算。時間ステップ Δt が大きいときは平衡に近づくように設計されている。

41 色モデル

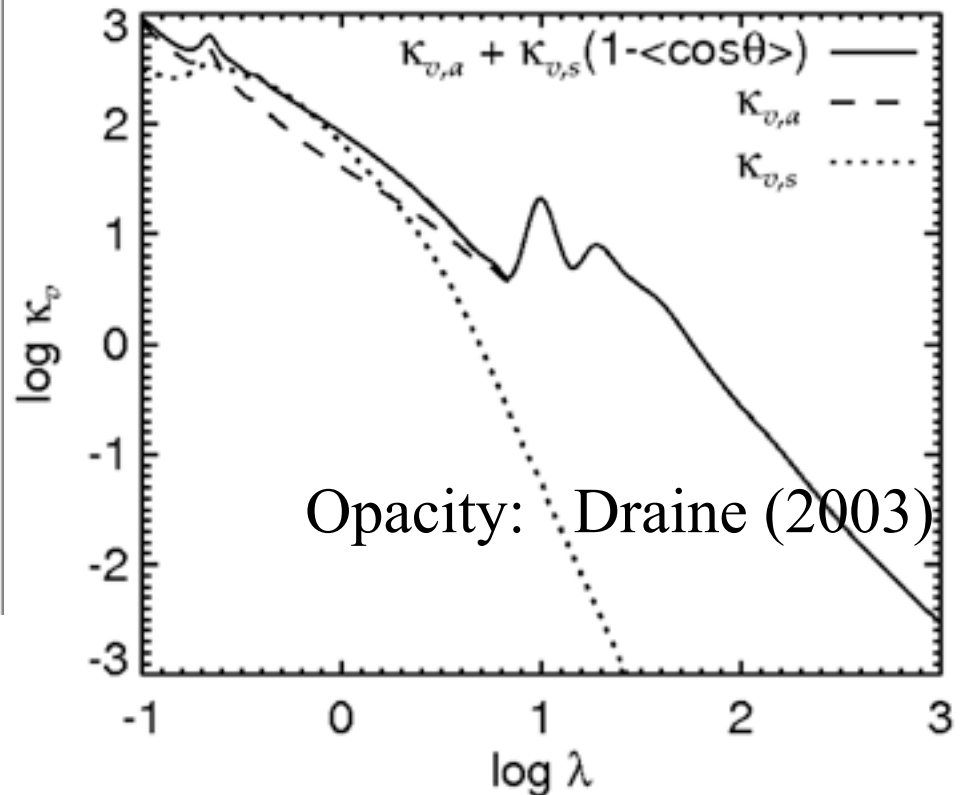
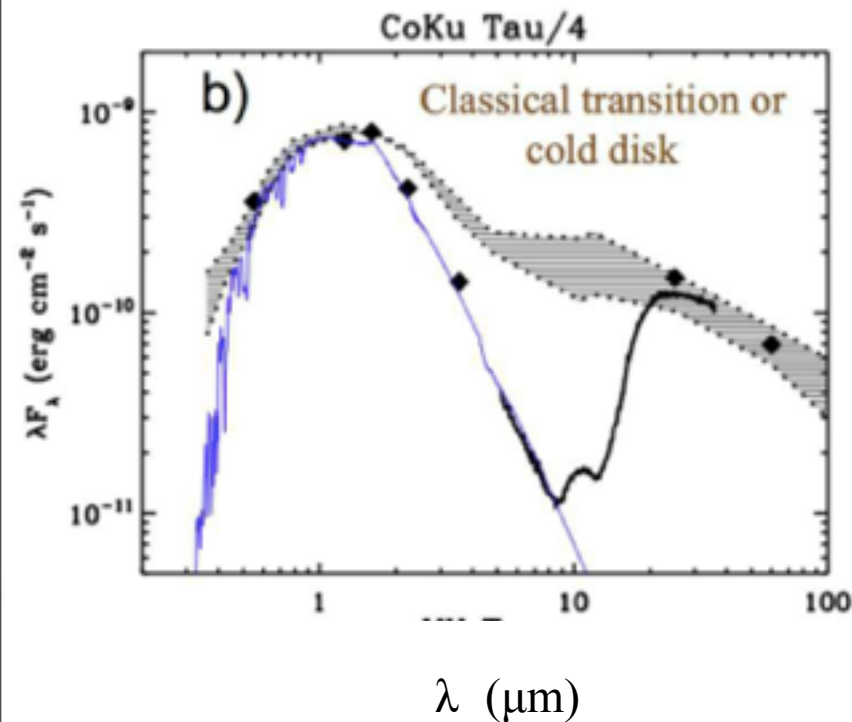
$$0.1 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 1 \text{ mm}$$

$$\Delta \log \lambda = \Delta \log \nu = 0.1$$

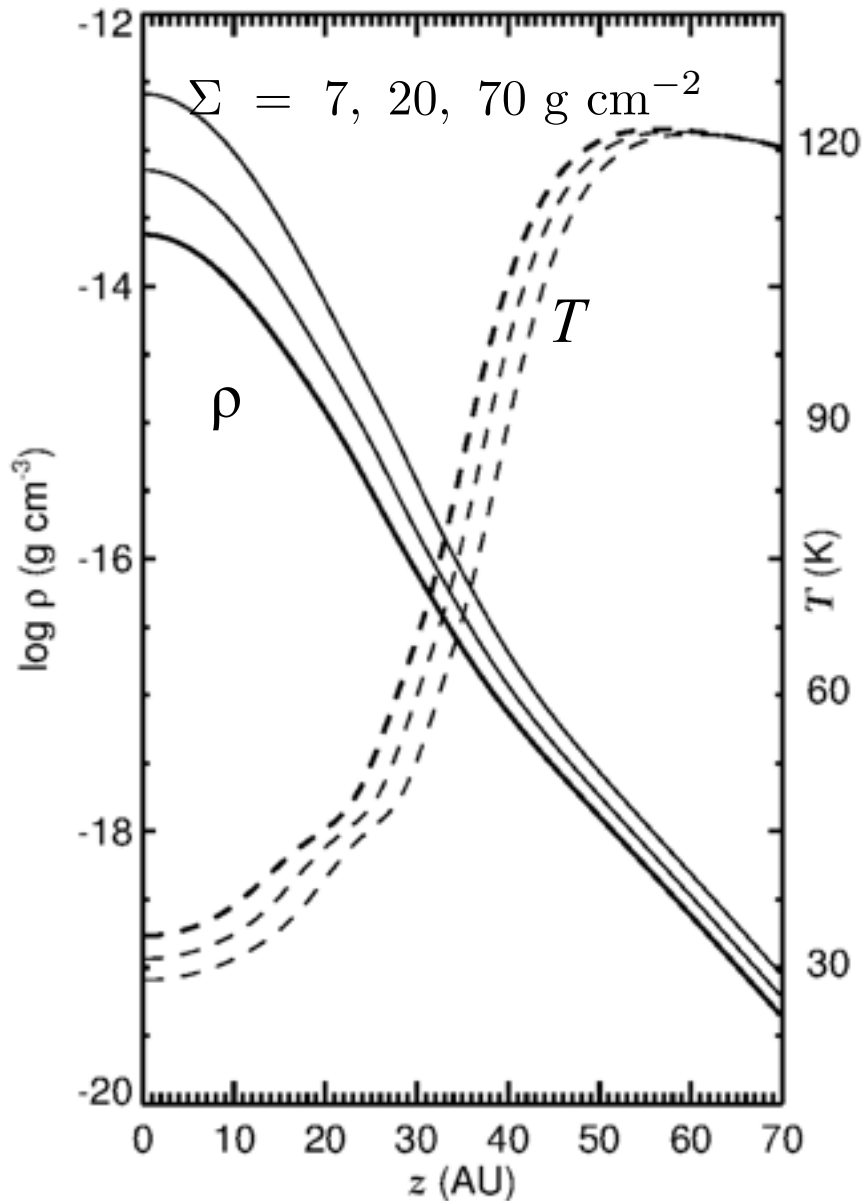
$$M^* = 2.2 M_{\odot}$$

$$T_{\text{eff}} = 6250 \text{ K}$$

$$R^* = 3.8 R_{\odot}$$



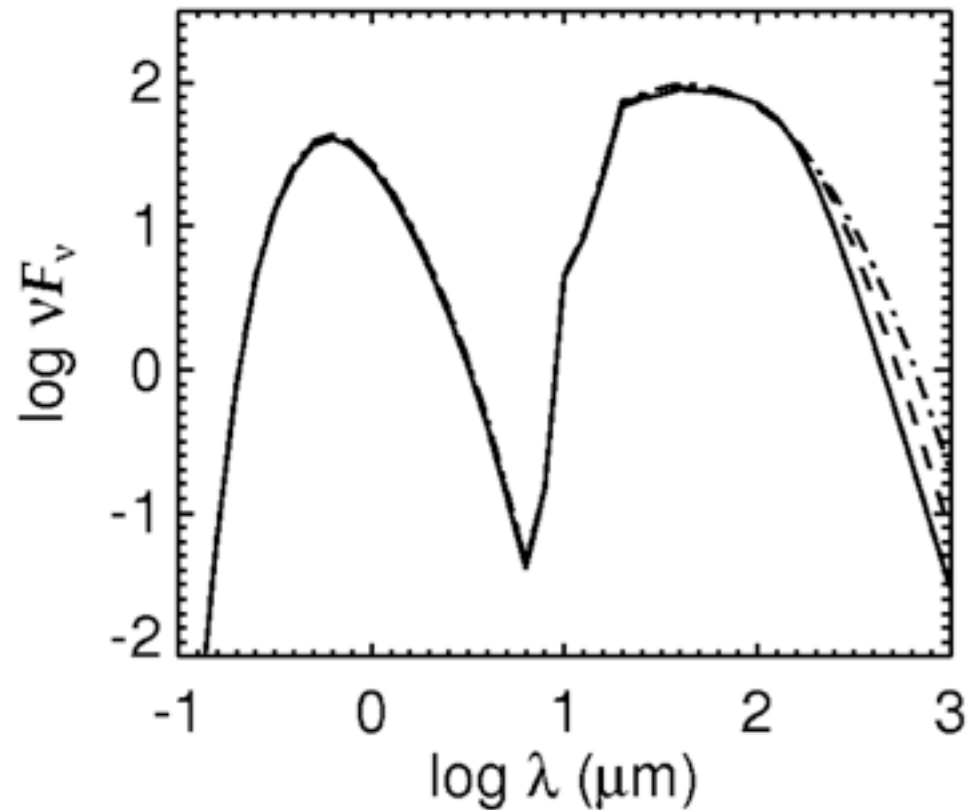
初期モデル (平衡解)



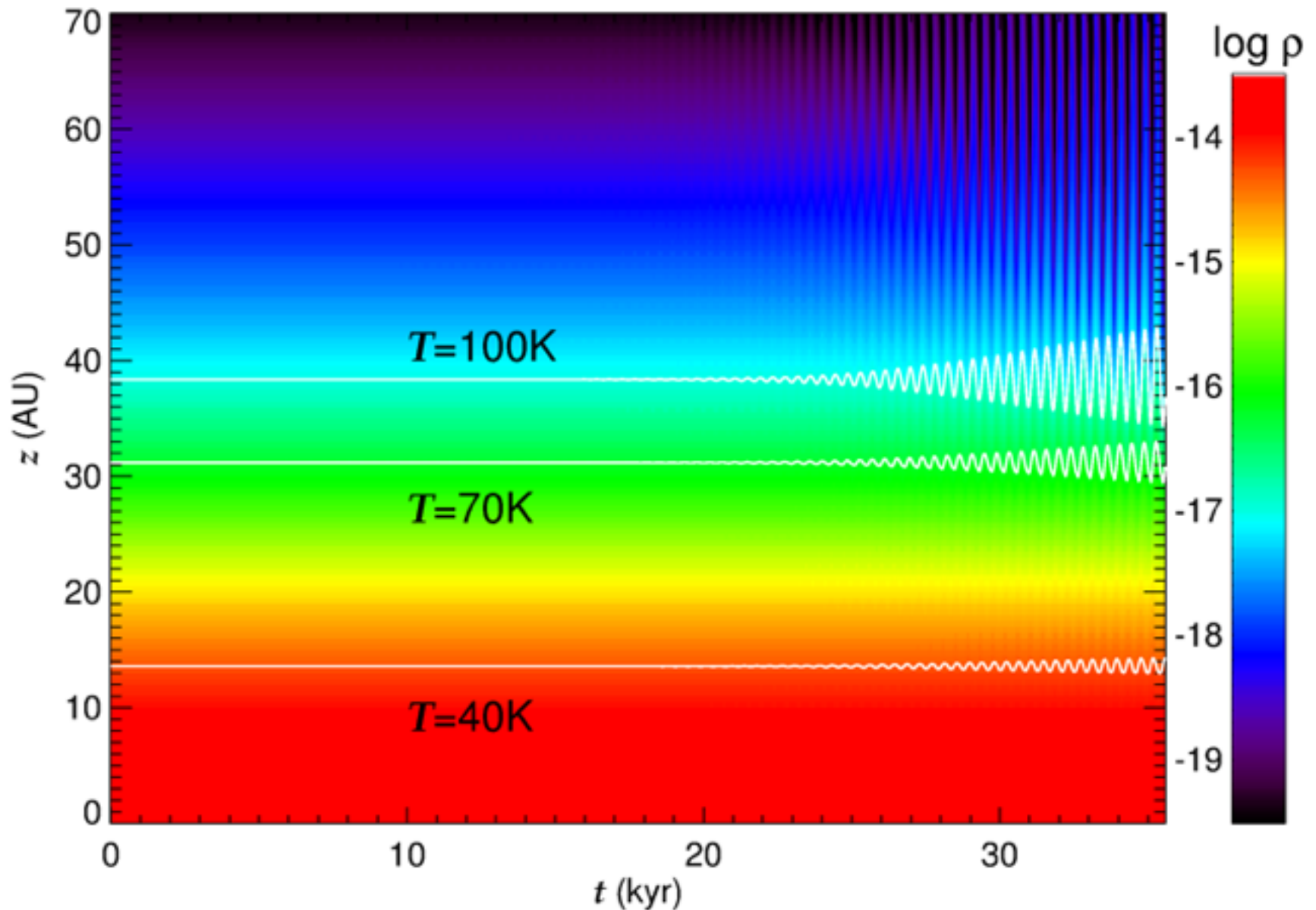
Model 1: $\Sigma = 7 \text{ g cm}^{-2}$

$r = 100 \text{ AU}$

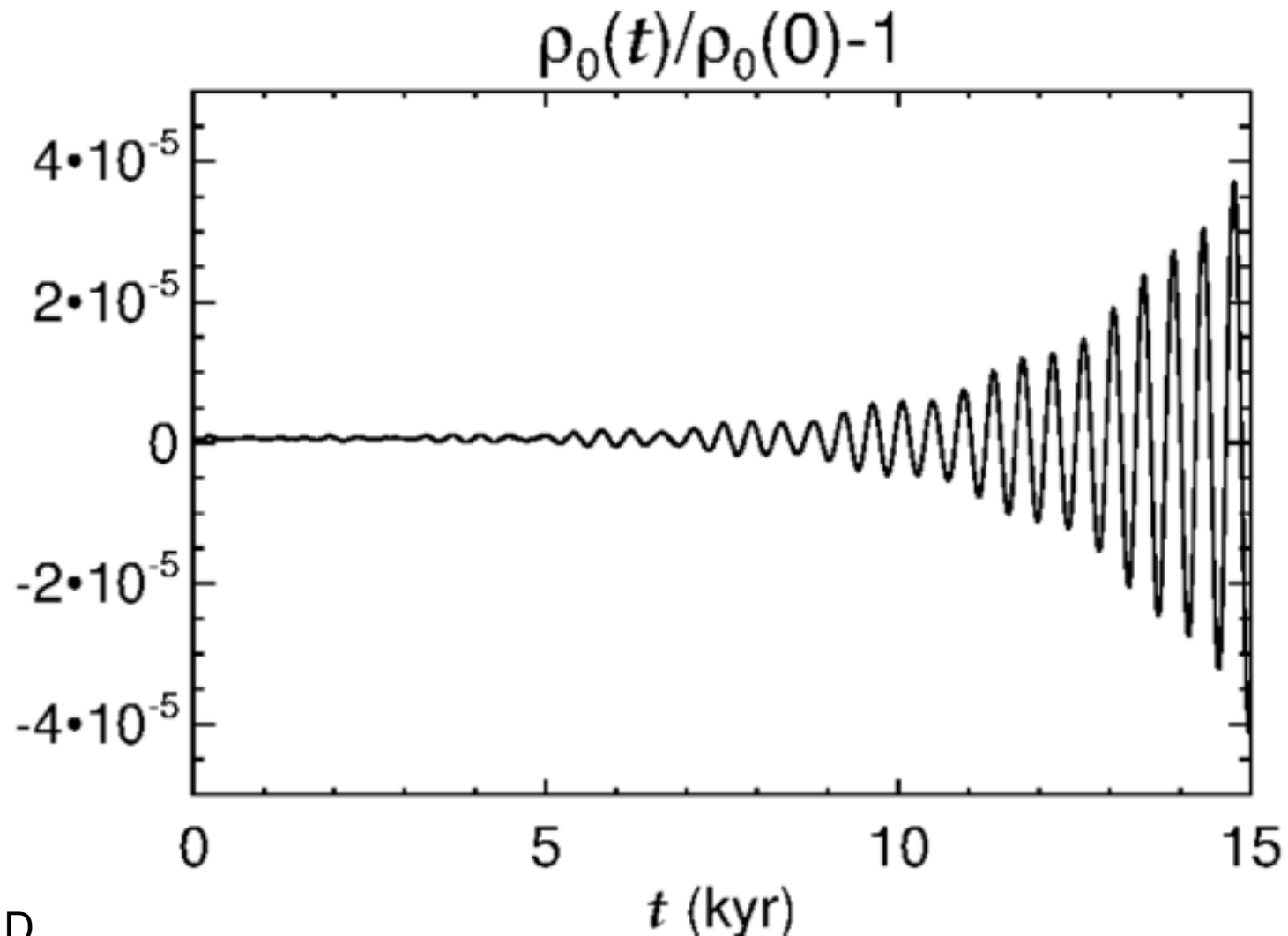
$z_{\text{max}} = 70 \text{ AU}, \Delta z = 0.5 \text{ AU}$



Model 1: 全体

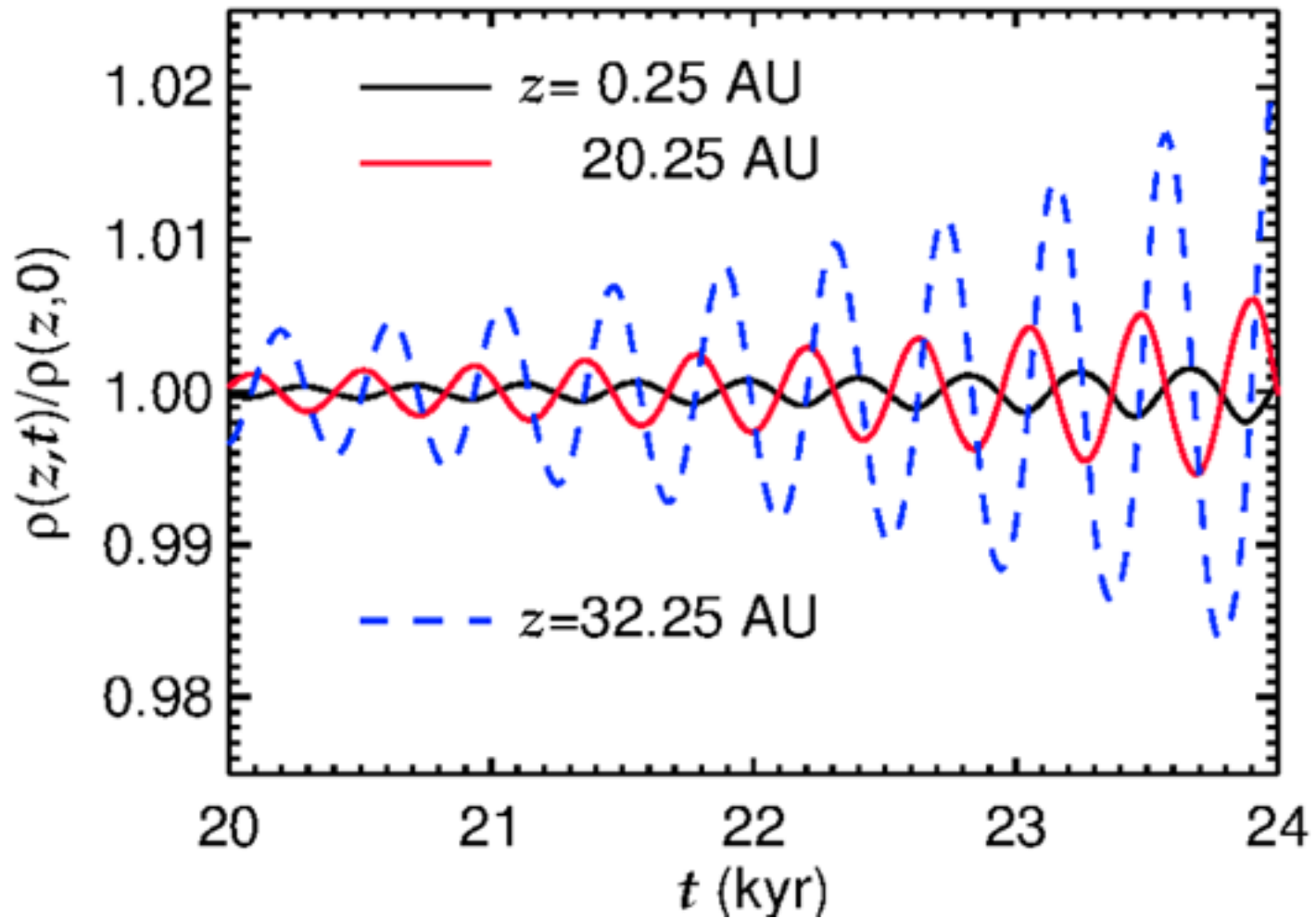


初期の密度ゆらぎ @ $z = 0.25$ AU



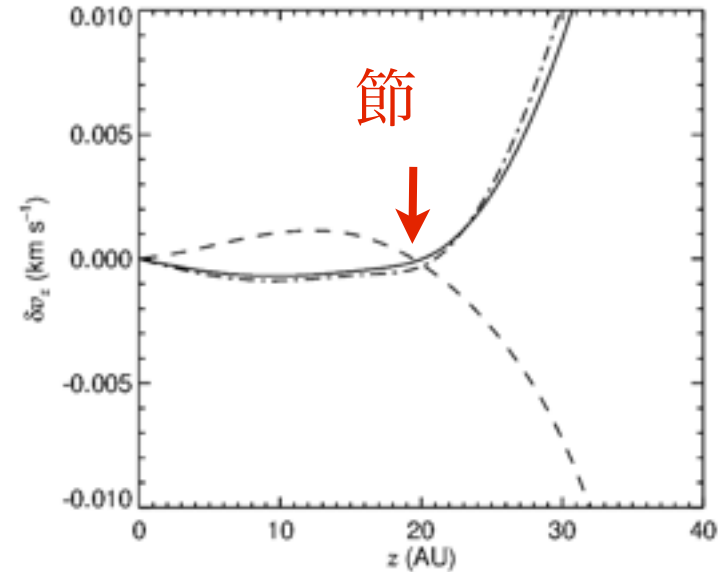
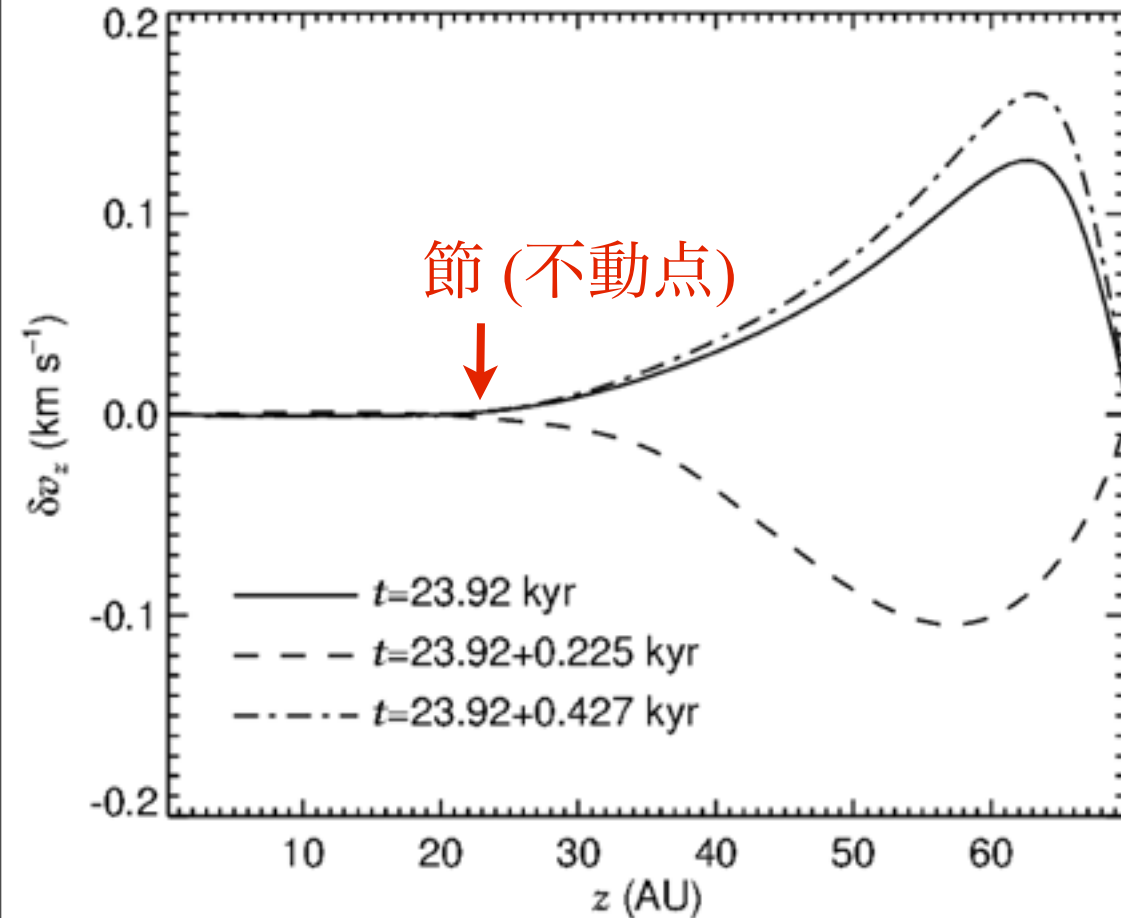
D

さまざまな高さでの密度変化



Period = 420 yr, e-folding growth timescale = 2,000 yr.

速度ゆらぎ



円盤本体が圧縮されているとき、上空は膨らむのでより多くの輻射を吸収する。

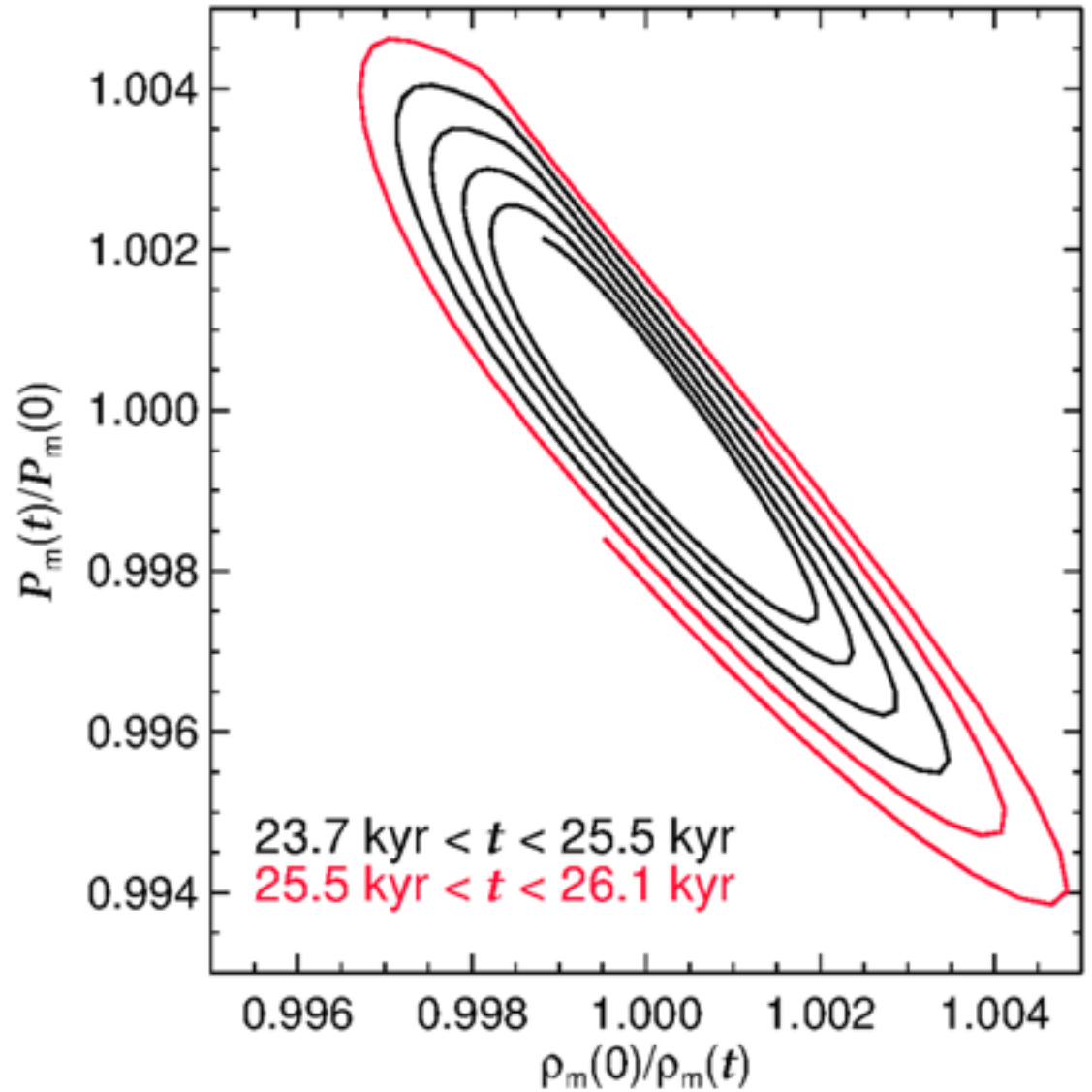
$z = 0.25 \text{ AU}$

熱機関

压力

$$\oint P dV > 0$$

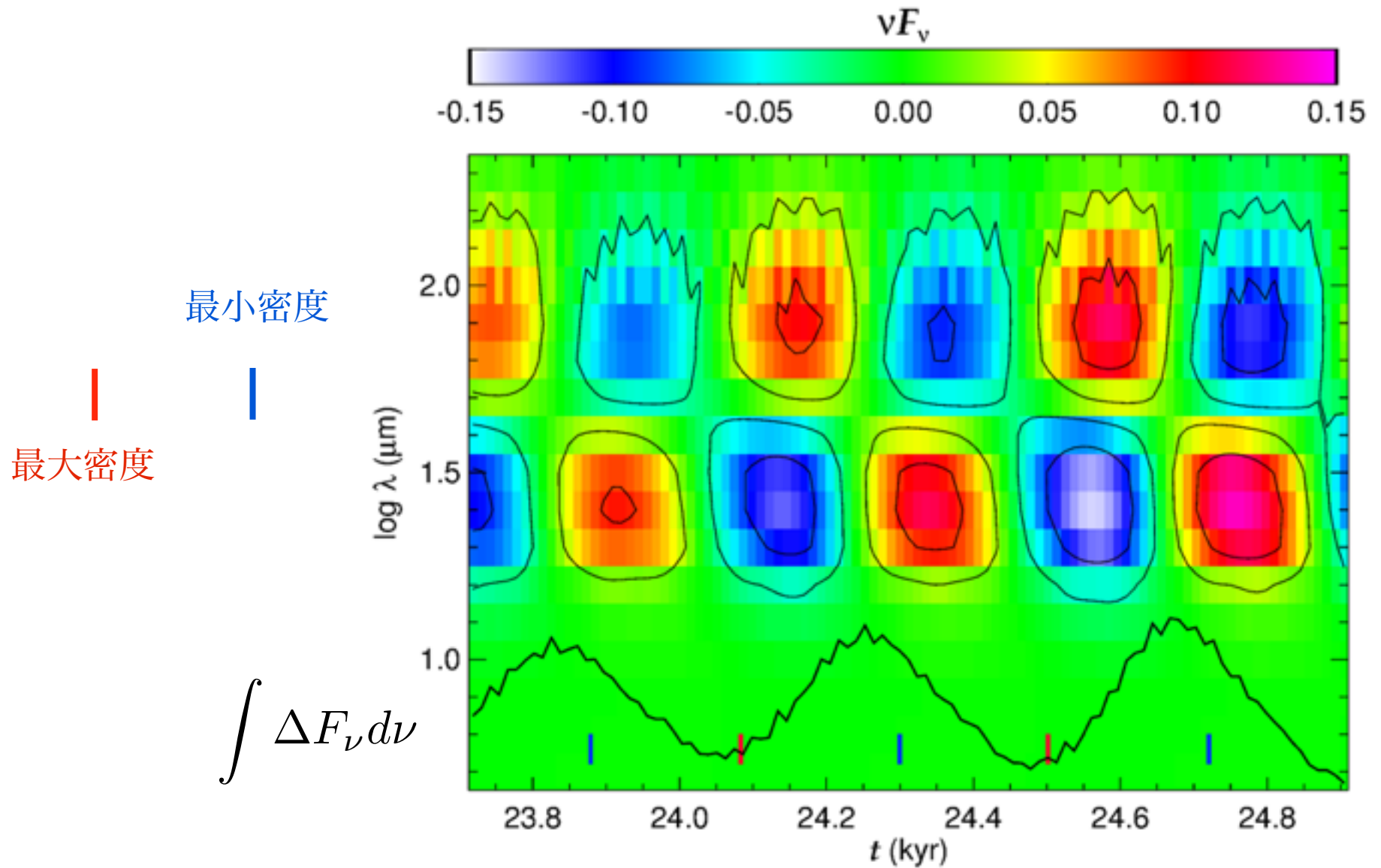
rotates clockwise



体積

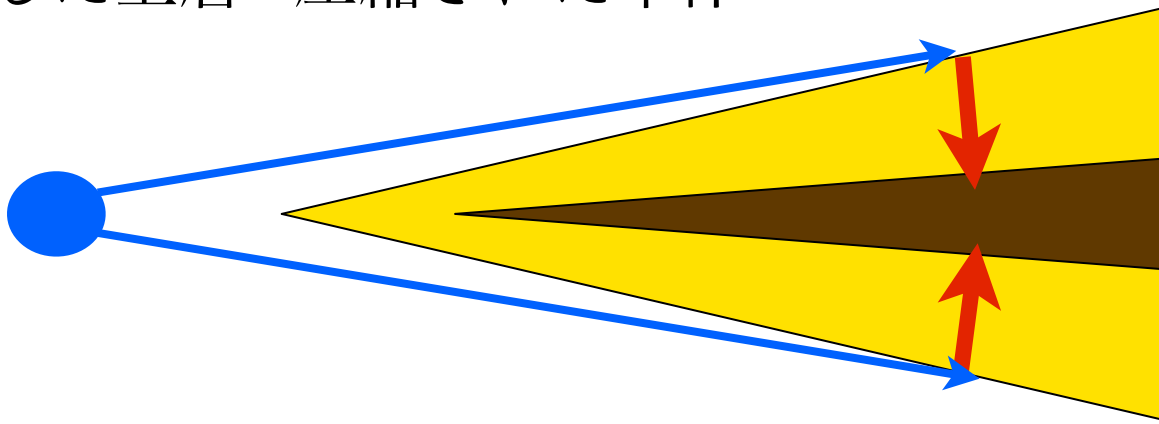
14

輻射流束のゆらぎ @ $z = 19.75$ AU



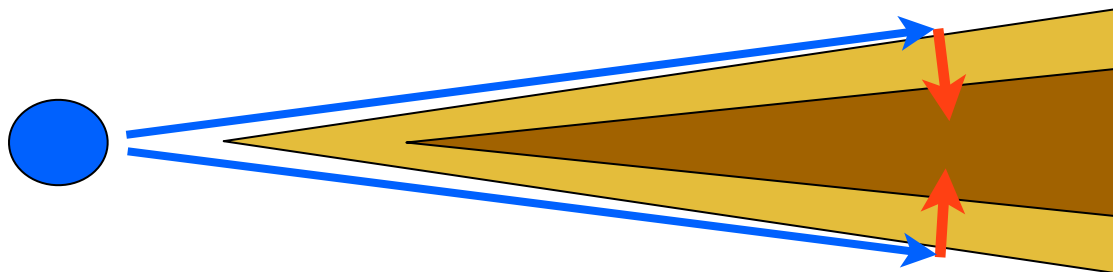
振動の励起機構

膨張した上層+ 圧縮された本体



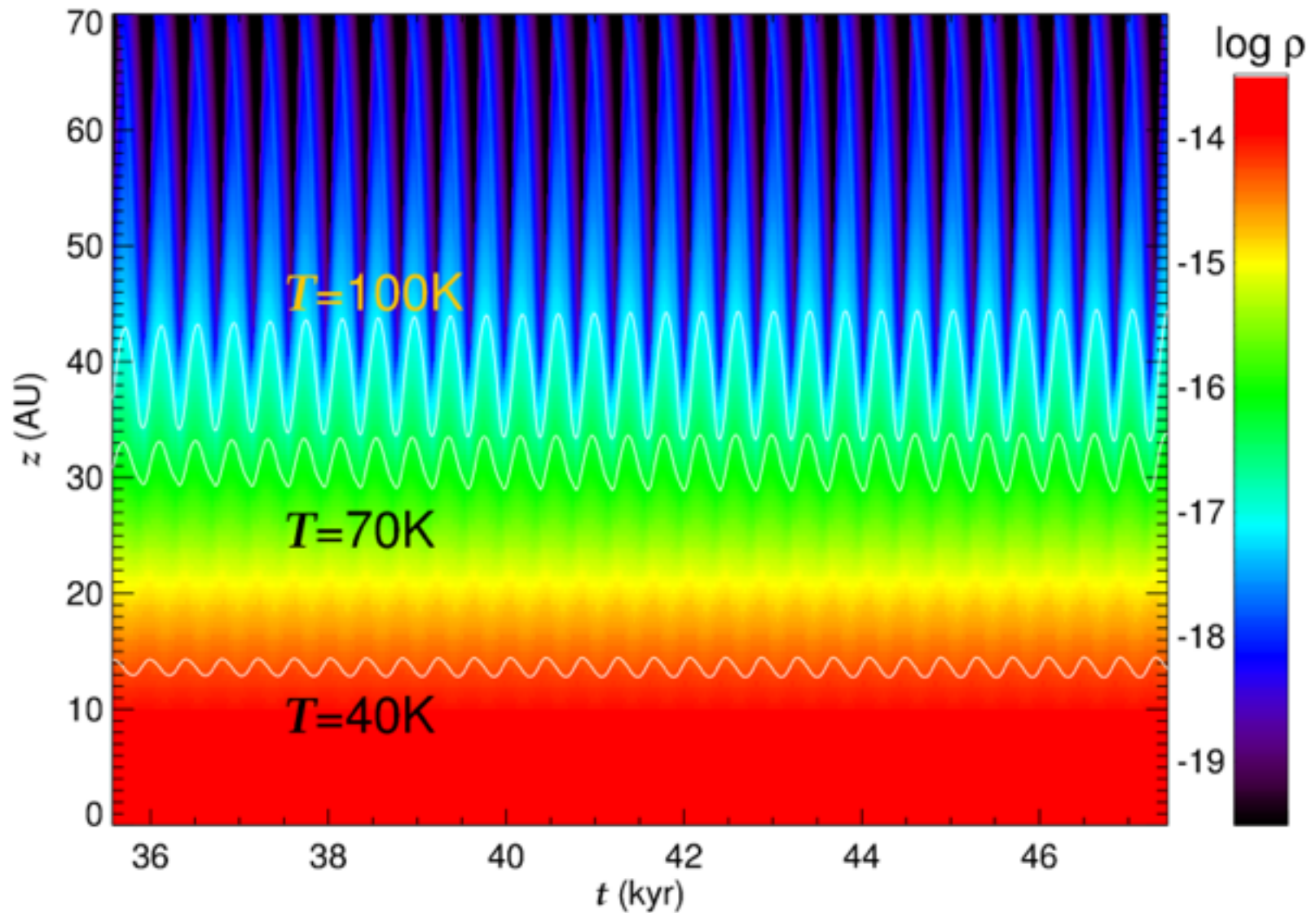
加熱過剰

へこんだ上層 + 膨張した本体

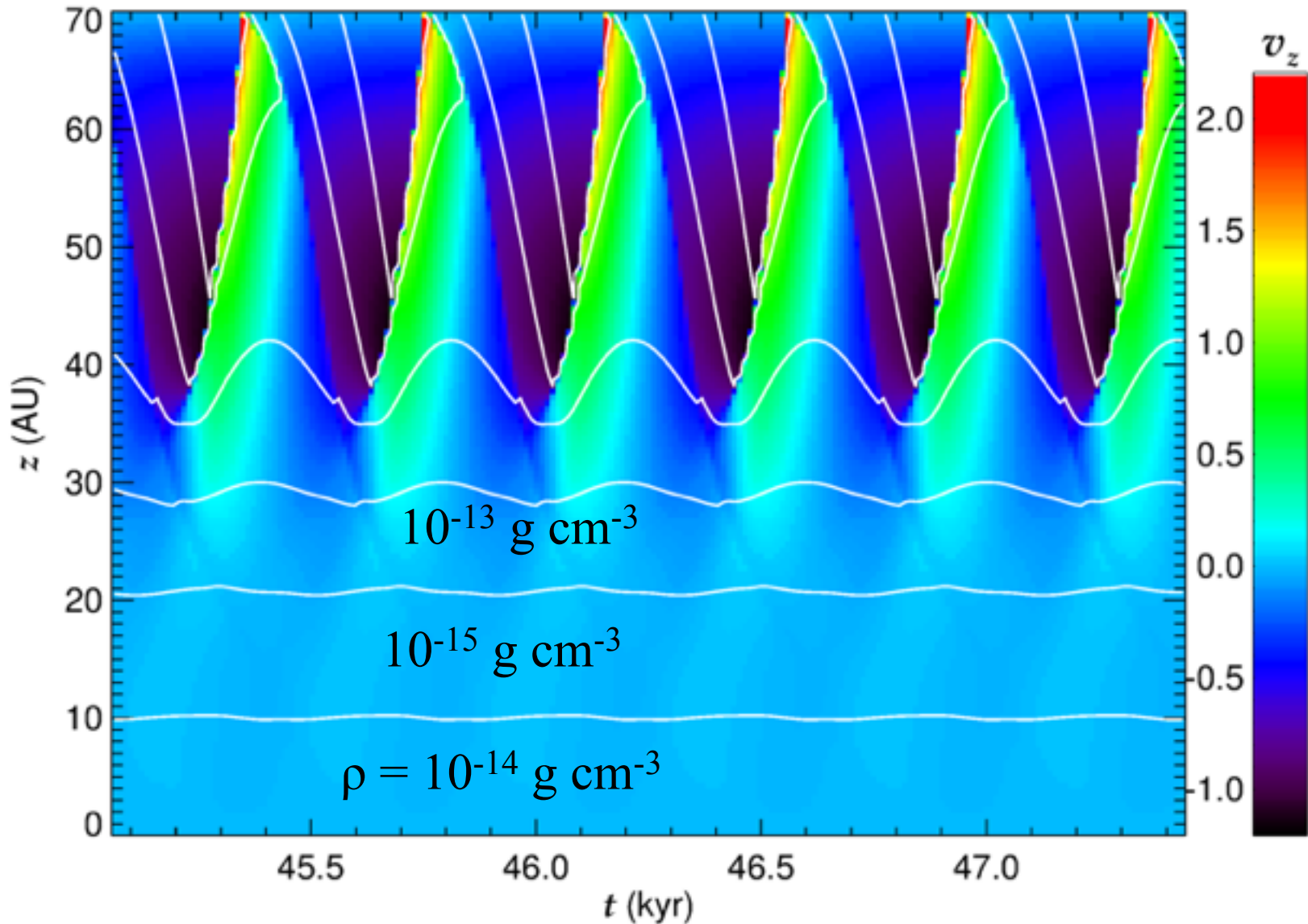


加熱欠乏

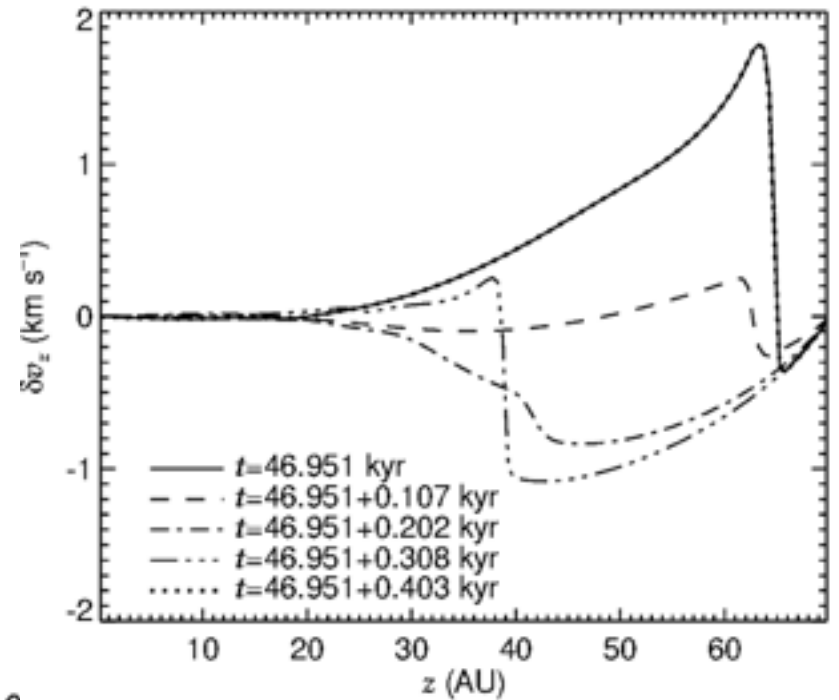
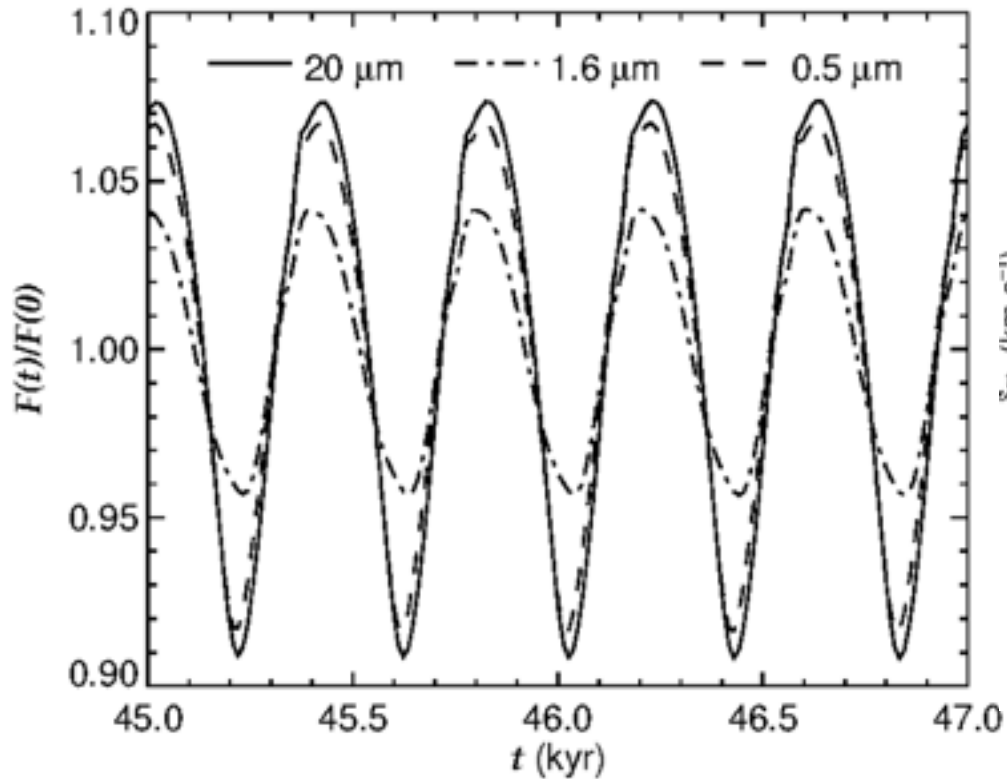
極限周期振動 (初期値によらない)



上空は吹き飛ばされる(はず)



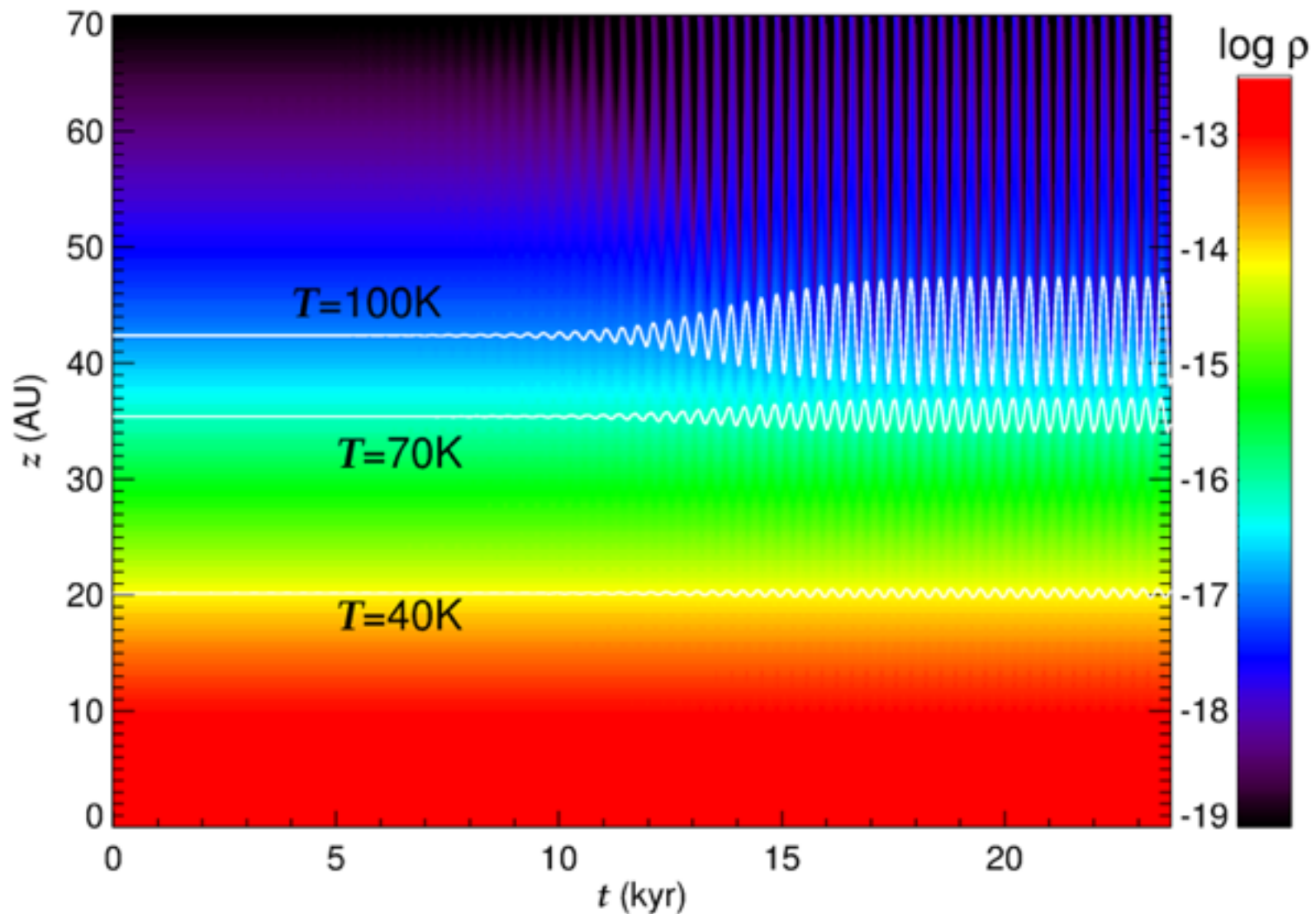
光度変化と質量放出



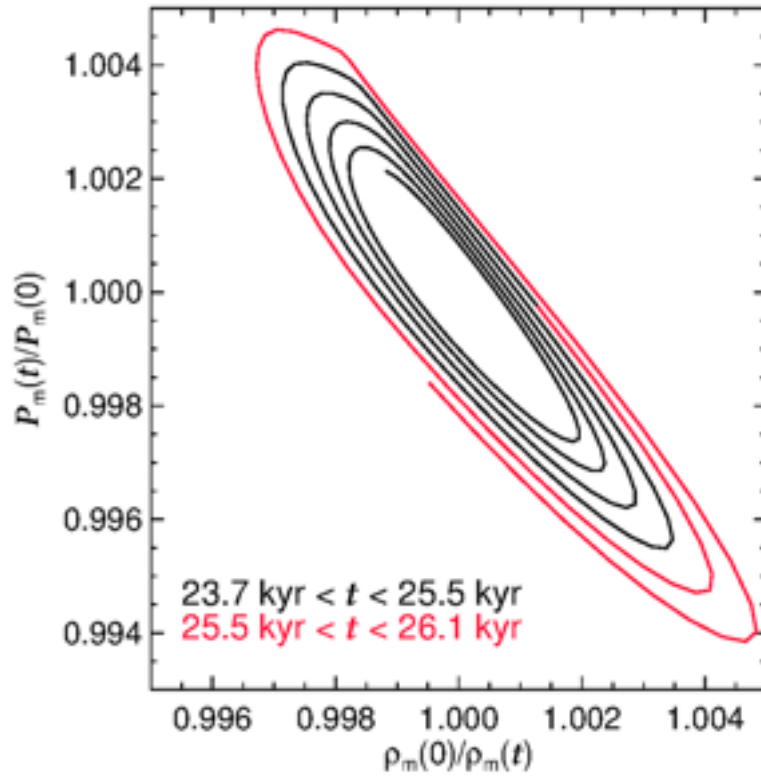
輝線にはドップラー効果

ケプラー周期の2/3で振動.

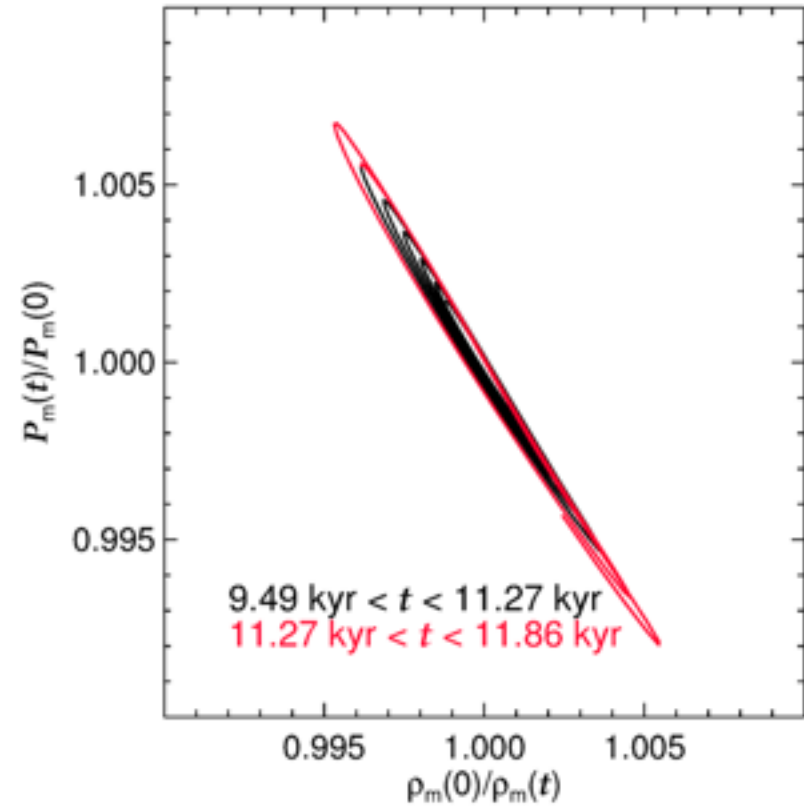
面密度が高いモデル ($\Sigma = 70 \text{ g cm}^{-2}$)



PV 図



$\Sigma = 7 \text{ g cm}^{-2}$



$\Sigma = 70 \text{ g cm}^{-2}$ 断熱的

$$\tau_{\text{th}} \gg \tau_{\text{dyn}}$$

進化への影響とまとめ

- 原始惑星系円盤は、節のある振動モードに対して不安定。
- 熱放射、反射とともに振動と同期して変化する。実際の円盤では「リング」として見える可能性がある(2次元モデルが必要)。
- ドップラー効果で輝線が変化
- ガスの放出、ダストの巻き上げ