原始惑星系円盤の基礎的なシミュレーションと卒業研究に向けた展望

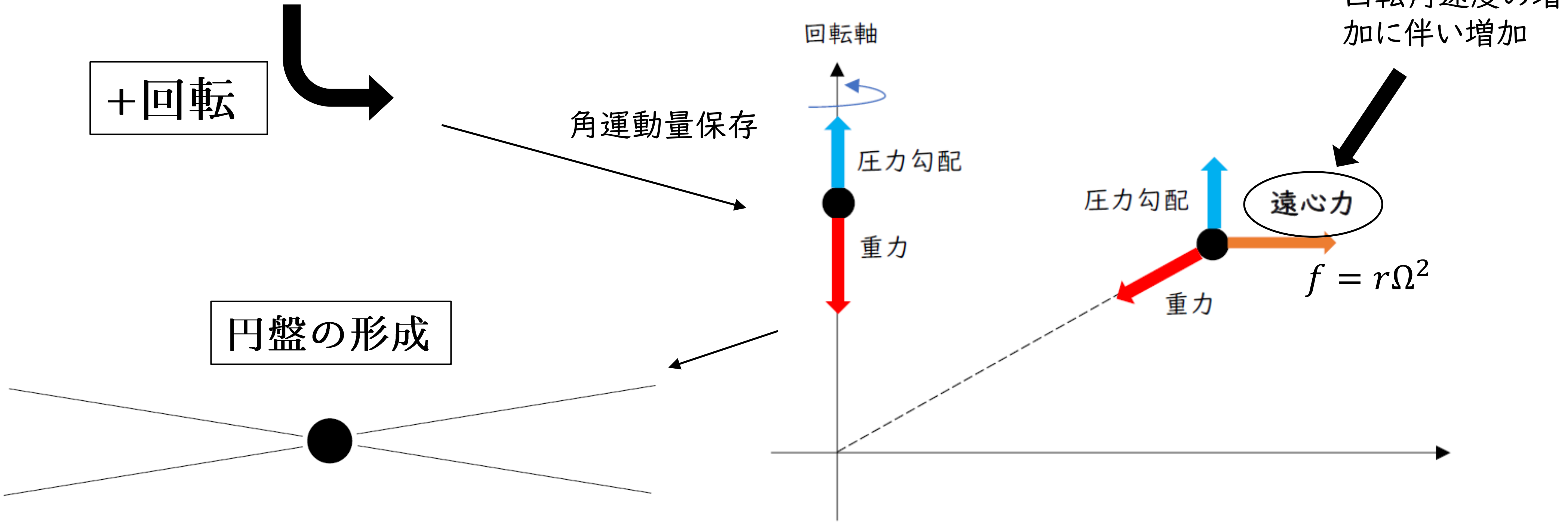
筑波大学

201610893 橋 拓海

原始惑星系円盤とは？

・太陽系やその他系外惑星はどのよう過程で形成されたか？

…分身雲コア⇒自己重力での落下⇒恒星の形成……



・もともと分子雲コアから生成されているのだから, 円盤の成分の殆どは水素やヘリウム.

⇒しかしその中に微量なダスト(FeやSiなど)が含まれており, それらは相互作用により合体成長していく. →微惑星の形成(~100万年)

⇒万有引力により微惑星同士が合体成長し, 原始惑星をつくる(~1000万年)

→この時点で殆どの原子惑星系円盤は観測できなくなる.

⇒繰り返される重力相互作用の結果, 最終的に現在の太陽系のように, いち恒星のまわりを公転する複数個の惑星と矮惑星, その他無数の小天体を持つ系が構成される.

原始惑星系円盤の物理量

・運動方程式(静水圧平衡)

$$-\frac{1}{\rho}\frac{dP}{dz} = \frac{GM}{r^2+z^2}\frac{z}{\sqrt{r^2+z^2}} \sim \frac{GMz}{r^3} \quad (z方向)$$

$$r\Omega_K^2 = \frac{GM}{r^2+z^2}\frac{r}{\sqrt{r^2+z^2}} \sim \frac{GM}{r^2} \quad (r方向)$$

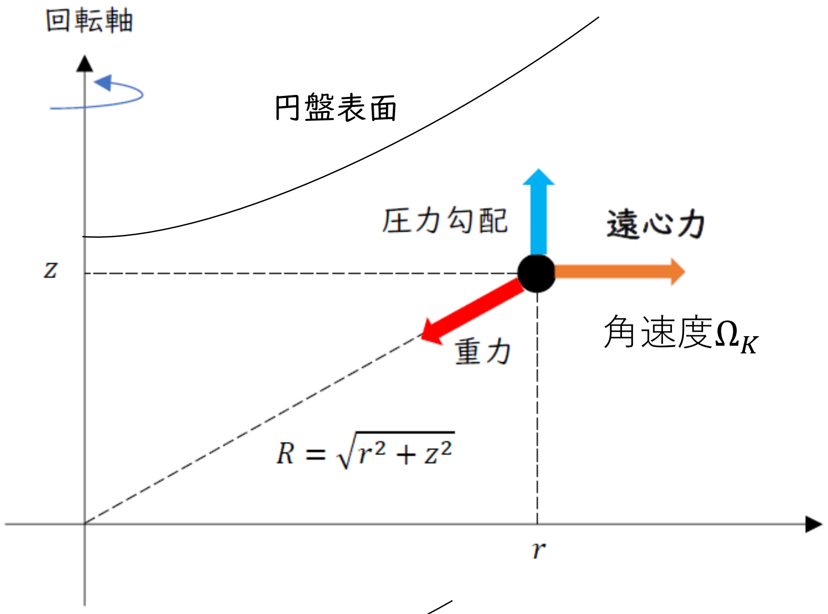
・音速の式

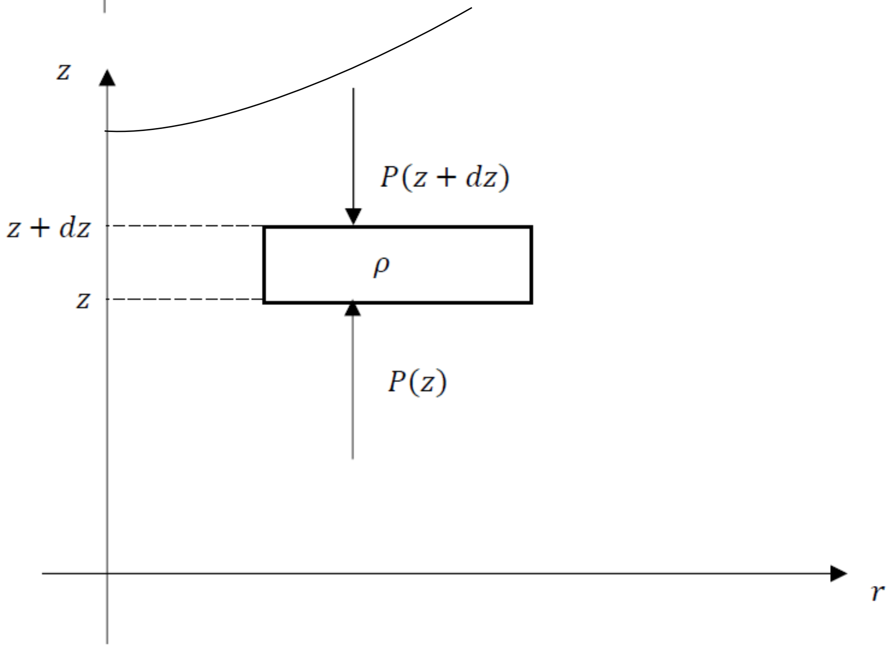
$$c_s = \sqrt{\frac{dP}{d\rho}} = \frac{P}{\rho}$$

(円盤ガスは理想気体で, z方向に等温)

これらより,

$$\frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dz} = -\frac{\Omega_K^2}{c_s^2}z \quad \rightarrow \quad \rho = \rho_0 \exp\left[-\frac{z^2}{2}\frac{\Omega_K^2}{c_s^2}\right]$$





・柱密度(密度をz方向に全範囲積分した量)

$$\int_{-\infty}^{\infty}\rho dz=\int_{-\infty}^{\infty}\rho_0 \exp\left[-\frac{z^2}{2}\frac{\Omega_K^2}{c_s^2}\right]dz=\rho_0\sqrt{2\pi}\frac{c_s}{\Omega_K}\equiv\Sigma(r)$$

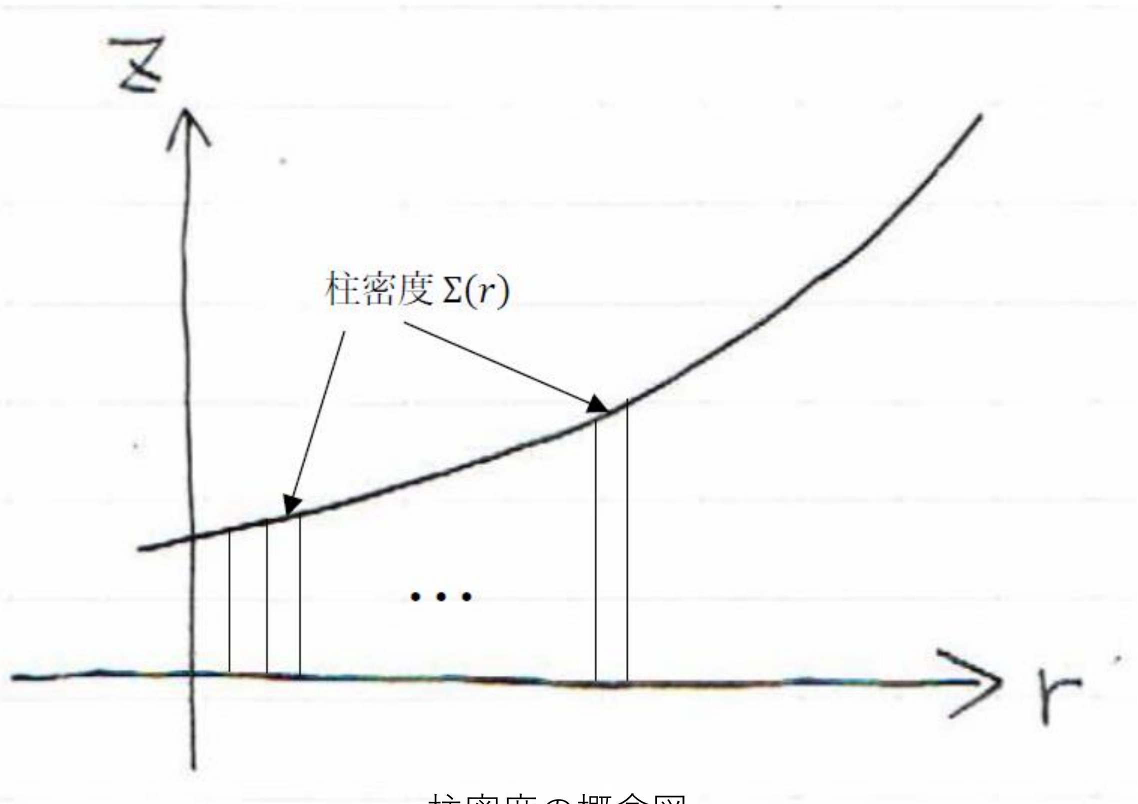
$$\therefore\quad \rho_0=\frac{\Sigma(r)}{\sqrt{2\pi}}\frac{\Omega_K}{c_s}$$

これを密度の式に代入すれば,

$$\rho=\rho_0\exp\left[-\frac{z^2}{2}\frac{\Omega_K^2}{c_s^2}\right]=\frac{\Sigma(r)}{\sqrt{2\pi}}\frac{\Omega_K}{c_s}\exp\left[-\frac{z^2}{2}\frac{\Omega_K^2}{c_s^2}\right]$$

Ω_K/c_sを$1/h$ と置き換えると,

$$\rho=\frac{\Sigma(r)}{\sqrt{2\pi}h}\exp\left[-\frac{z^2}{2h^2}\right]\qquad\cdots(1)$$



柱密度の概念図

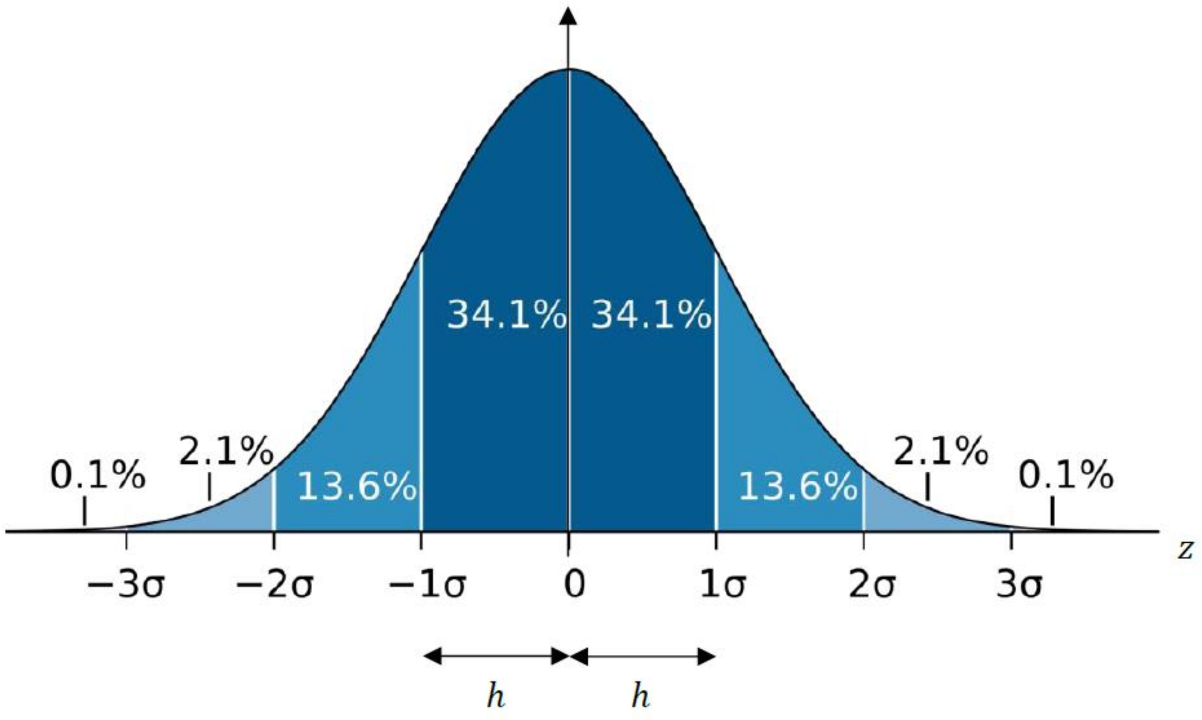
c.f 正規分布

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{z^2}{2\sigma^2}\right]$$

密度の式

$$\rho = \frac{\Sigma(r)}{\sqrt{2\pi}h} \exp\left[-\frac{z^2}{2h^2}\right] \qquad \cdots (1)$$

$\downarrow$ 比較する…



正規分布関数の概要

正規分布における標準偏差 $\boldsymbol{\sigma}$ が
密度分布の $\boldsymbol{h}$ に対応.

$\Rightarrow \boldsymbol{h = \frac{c_s}{\Omega_K}}$ を "スケールハイト"とし, 円盤の厚み(の半分)を表す量として用いる.

重要な物理量をまとめると

・密度, 柱密度 $\rho = \frac{\Sigma(r)}{\sqrt{2\pi}h}\exp\left[-\frac{z^2}{2h^2}\right] \quad \cdots(1)$

・スケールハイト $h = \frac{c_s}{\Omega_K} \quad \cdots(2)$

円盤の密度やサイズに関する情報を得る

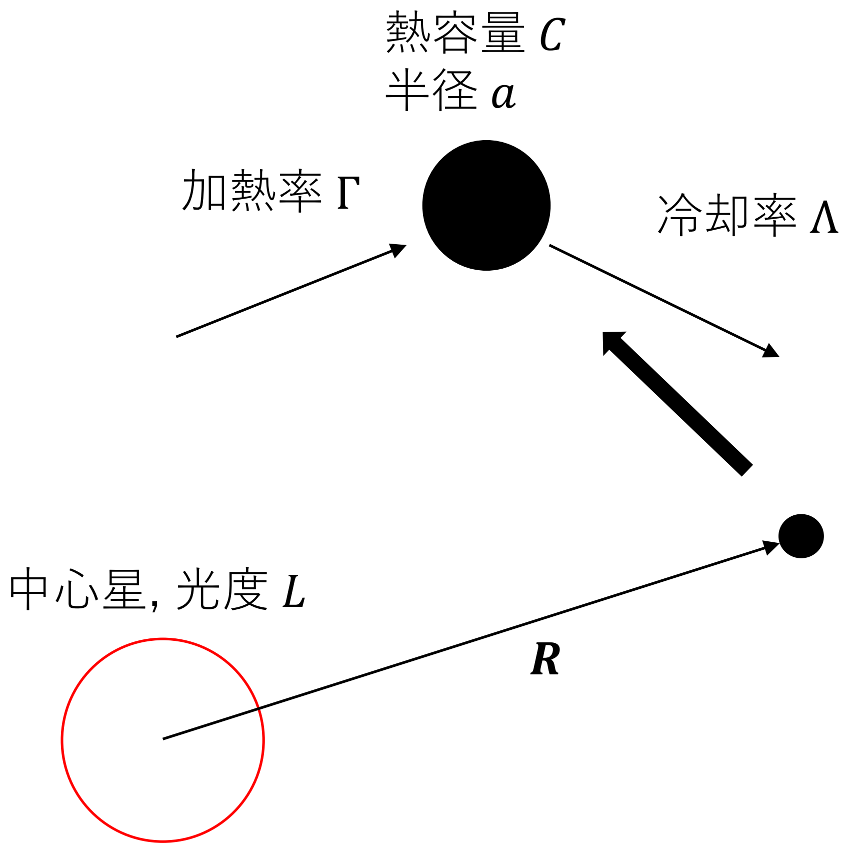
輻射輸送計算で円盤の温度を得る

$$c_s \sim 1.0 \times 10^5 \left(\frac{r}{1AU}\right)^{-1/4} \left(\frac{L}{L_\odot}\right)^{1/4} \ cm\ s^{-1}$$

$$\Omega_K \sim 3.0 \times 10^6 \left(\frac{r}{1AU}\right)^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{M}{M_\odot}\right)^{\frac{1}{2}} \quad cm\ s^{-1}$$

ダスト粒子の温度

- 円盤のz方向には等温を仮定
- 1粒子内における温度は一定(円盤に比べ小さすぎるため)



物体の温度 T の時間変化は

$$C\frac{dT}{dt} = \Gamma - \Lambda$$

加熱率 Γ は

$$\Gamma = Q_{vis}\pi a^2 \frac{L}{4\pi R^2}$$

Q_{vis}：規格化された吸収係数

冷却率 Λ は

$$\Lambda = Q_{IR} 4\pi a^2 \sigma_{SB} T^4$$

Q_{IR}：規格化された放射係数

輻射平衡のもとでは

$$0 = Q_{vis}\pi a^2 \frac{L}{4\pi R^2} - Q_{IR} 4\pi a^2 \sigma_{SB} T^4 \qquad \cdots (3)$$

式(3)より, ダスト微粒子の温度は

$$0 = Q_{vis}\pi a^2 \frac{L}{4\pi R^2} - Q_{IR}4\pi a^2 \sigma_{SB} T^4 \qquad \cdots(3)$$

$$\therefore \quad T = \left(\frac{Q_{vis}}{Q_{IR}} \frac{L}{16\sigma_{SB}\pi R^2}\right)^{1/4} \qquad \cdots(4)$$

ステファンボルツマン係数 $\sigma_{SB} = 5.70 \times 10^{-8}\ \mathrm{W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}}$ と太陽光度$L_\odot = 3.84 \times 10^{26}\ \mathrm{W}$ を使い, 微粒子が黒体と見なせるとして温度を決めると,

$$T \sim 280 \left(\frac{L}{L_\odot}\right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{R}{1\mathrm{AU}}\right)^{-\frac{1}{2}} \qquad \mathrm{K}$$

となる.

ダストはガスに比べ量は非常に少ないが, 放射の吸収能力は1000倍ほどであるため, 円盤の温度を考えるときは, まずダストの温度を考える必要がある.

⇒ところが, ガス分子は熱運動によりダストと衝突を繰り返し, エネルギーのやり取りをする. 故に最終的に**ダストの温度が円盤の温度**となる.

卒業研究に向けて

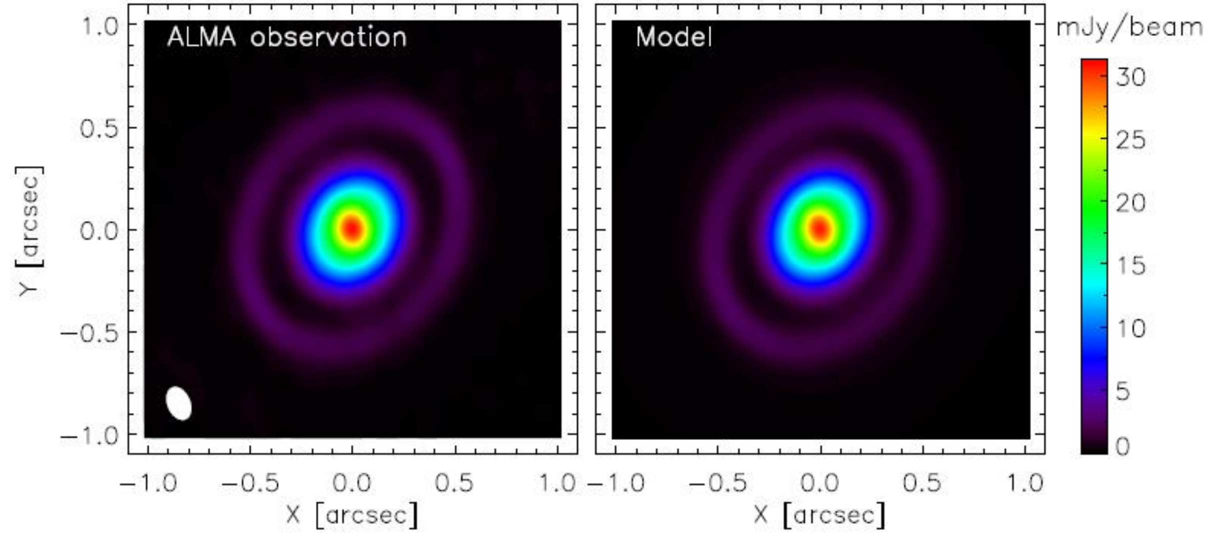
・目標

原子惑星系円盤”MRW480”のModel構築と理論的考察.

・MRW480とは？

おうし座ぎょしゃ座暗黒星雲に存在するハービッグ Ae型星.

質量$2.0M_{\odot}$の前主系列星で, 原子惑星系円盤を持つ.



MRW480(Y.Liu et al.)

Y.Liu et al.(2018) をもとに, Modelの構築を行う.

初期値として柱密度とスケールハイトを仮定し, 輻射流体計算から温度と輝度を得て, ALMAによる観測データと比較し, その比率から柱密度とスケールハイトを修正し, 観測データに近付けていく.

⇒30回ほどの反復操作で収束する見込み.

輻射流体計算にはRadMC3dを用いる.

⇒中心星から大量の光子をランダムに放ち, ダストによる散乱, 吸収, 放射の過程を経て最終的にダストの温度を得る.

・柱密度とスケールハイトの設定

まず大前提として, ダスト粒子をそのサイズにより, SGPとLGPの2つに分けている.

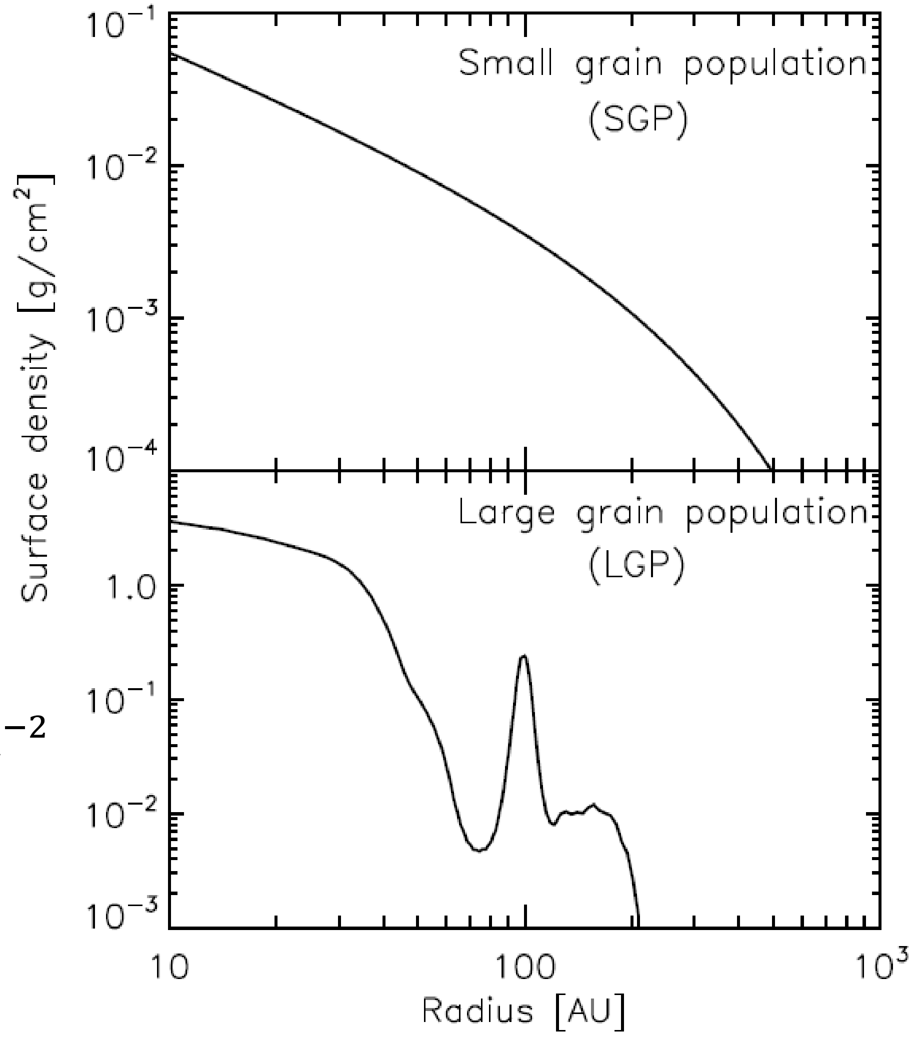
$$\begin{cases} a_{max} = 2\ \mu m & (SGP) \\ a_{max} = 3mm & (LGP) \end{cases}$$
$$a_{min} = 0.01\ \mu m$$

また, ダストの構成粒子は炭素25%, アモルファスシリコン75%としている.

$$\Sigma_{SGP}(R) \propto \left(\frac{R}{200\mathrm{AU}}\right)^{-\gamma} \exp\left[-\left(\frac{R}{200\mathrm{AU}}\right)^{2-\gamma}\right] \quad \mathrm{g\ cm^{-2}}$$

$$\rho_{SGP}(R,z) \propto \frac{\Sigma_{SGP}(R)}{h_{SGP}(R)} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z}{h_{SGP}(R)}\right)^2\right]$$

$$h_{SGP} = H_{100} \times \left(\frac{R}{100\mathrm{AU}}\right)^{\beta} \quad \mathrm{AU}$$



Surface Density(Y.Liu et al.)

・パラメータは以下のようにおく.

$$
\begin{cases}
\gamma = 1.0 \\
\beta = 1.08^{+0.02}_{-0.02} \\
H_{100} = 12^{+2.1}_{-0.7}\ \mathrm{AU} \\
R_{in} = 0.15\ \mathrm{AU} \\
R_{out,SGP} = 750\ \mathrm{AU} \\
R_{out,LGP} = 200\ \mathrm{AU}
\end{cases}
$$

LGPの密度分布とスケールハイトは, 円盤が複雑な構造をしている為に簡単な式では表せない. そこで, まずスケールハイトについて

$$h_{LGP} = \Lambda\, h_{SGP} \quad , \quad \Lambda = 0.25^{+0.04}_{-0.04}$$

とし, 初期値として100AUにおけるスケールハイトを

$$H_{100} = 10\ \mathrm{AU}\,, \quad \beta = 1.1,$$

と置いて, SGPの式に代入する. そして反復試行の後に柱密度を徐々に修正し, 最終的な値を決定する.

基礎的なシミュレーション

目的

・輻射流体計算プログラムRadMC3dとPythonに慣れる.

・原子惑星系円盤のシミュレーション方法について, その一般的な方法を辿り, 理解を深める.

⇒基礎的な円盤として, 太陽系復元モデル(Hayashi et al. (1985))を採用.

Dust

現在の太陽系に対し, 地球型惑星(Si, Fe)と木星型惑星(氷, ケイ酸塩, Fe)の固体粒子の推定量をすりつぶし, 滑らかなダスト面密度分布を仮定.

Gus

太陽に落ちた水素・ヘリウムガスを, 太陽の元素組成と同じであると仮定. 滑らかな面密度分布を得る

手順

・ガス, ダスト双方について, まずスケールハイトと柱密度を決定する. まず柱密度については, 既に与えられているものを用いる.

$$\Sigma_{dust} = 7f_{ice}\left(\frac{r}{1\mathrm{AU}}\right)^{-3/2} \quad \mathrm{g\ cm^{-2}}$$

$$\Sigma_{gus} = 1700\left(\frac{r}{1\mathrm{AU}}\right)^{-3/2} \quad \mathrm{g\ cm^{-2}}$$

$$f_{ice} = \begin{cases} 1 \quad (r < r_{ice}) \\ 4.2 \quad (r > r_{ice}) \end{cases}$$

$$r_{ice} = 2.7 \quad \mathrm{AU}$$

f_{ice}はH_2Oの凝結による効果であり, 火星-木星間に存在する.

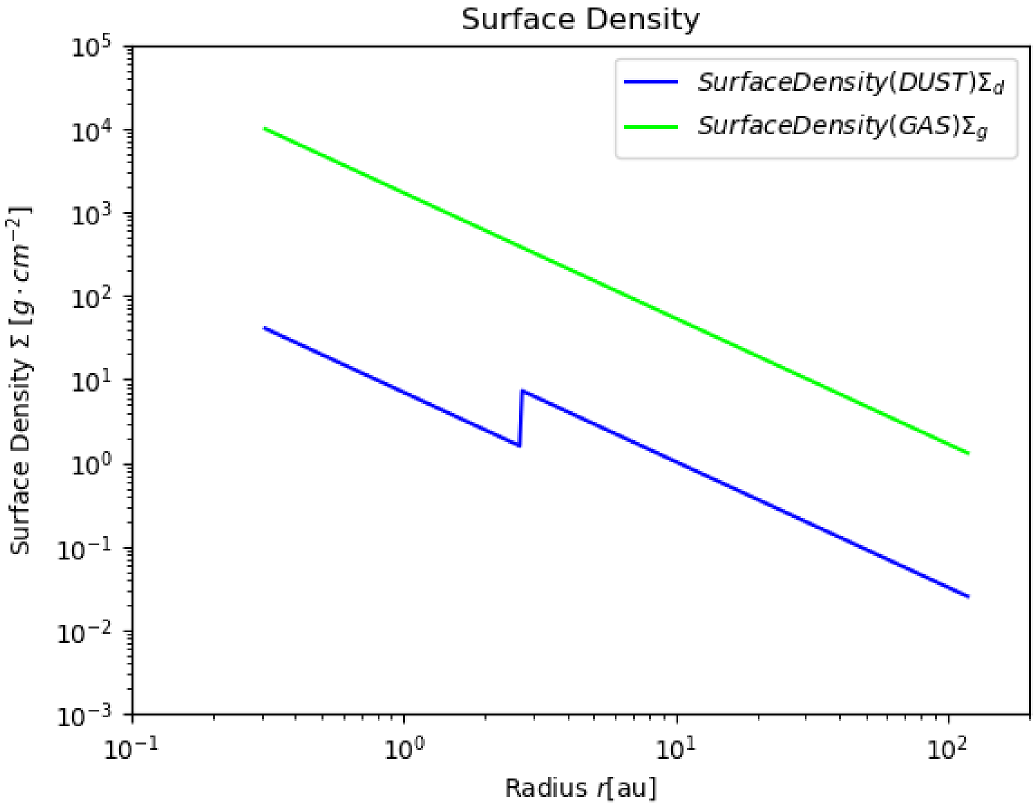
$$\rho = \frac{\Sigma(r)}{\sqrt{2\pi}h}\exp\left[-\frac{z^2}{2h^2}\right] \quad \cdots(1) \qquad h = 0.03\left(\frac{r}{1AU}\right)^{5/4} \quad \cdots(5) \qquad T = 280\left(\frac{L}{L_{\odot}}\right)^{\frac{1}{4}}\left(\frac{r}{1\mathrm{AU}}\right)^{-\frac{1}{2}}\ \mathrm{K} \quad \cdots(6)$$

スケールハイトはガスのそれであり, ダストは降着の影響でこれよりも小さくなると考えられる. しかし, 現時点で決定づける指標が存在しない為, この値をそのまま用いた.

円盤は円柱座標を用いて扱い, 構造は方位角方向に回転対称かつ, 円盤の高さ方向についても左右対称とする.

計算を行う範囲は, 動径方向に$0.3 \sim 120$ AU , 高さ方向に$0 \sim 4$ AU とした.

また, モンテカルロ法により放射する光子数は1.0×10^6 とした.

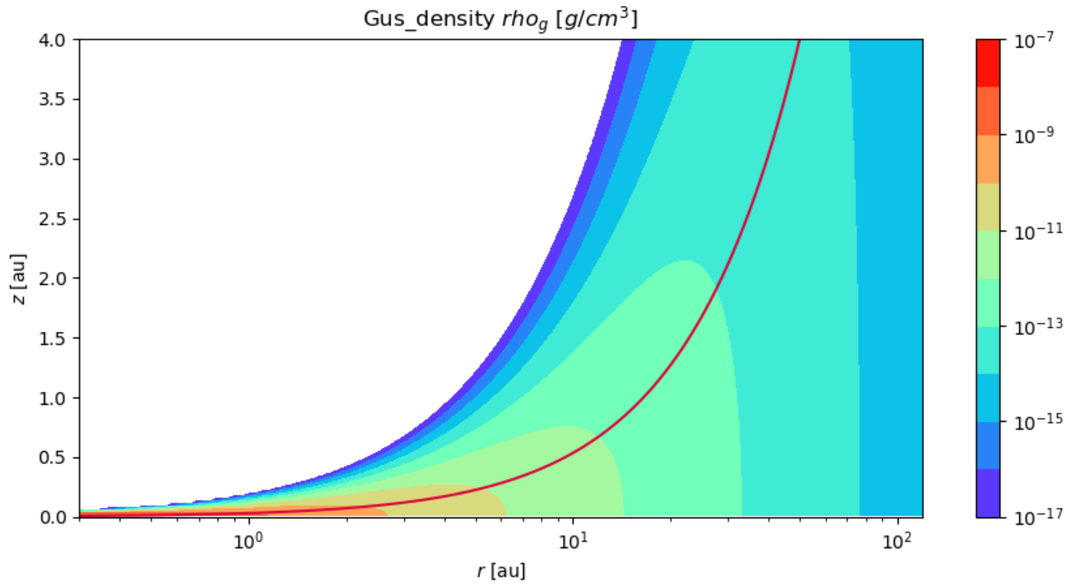


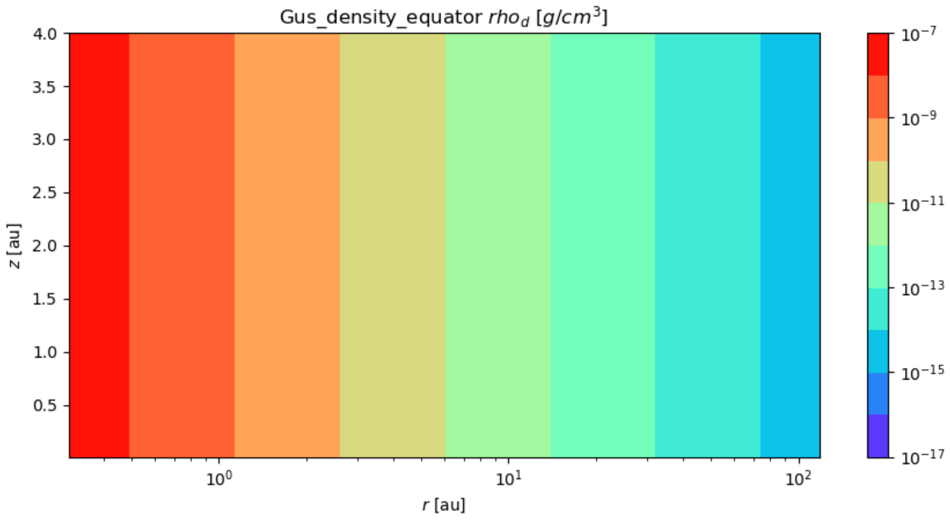
結果

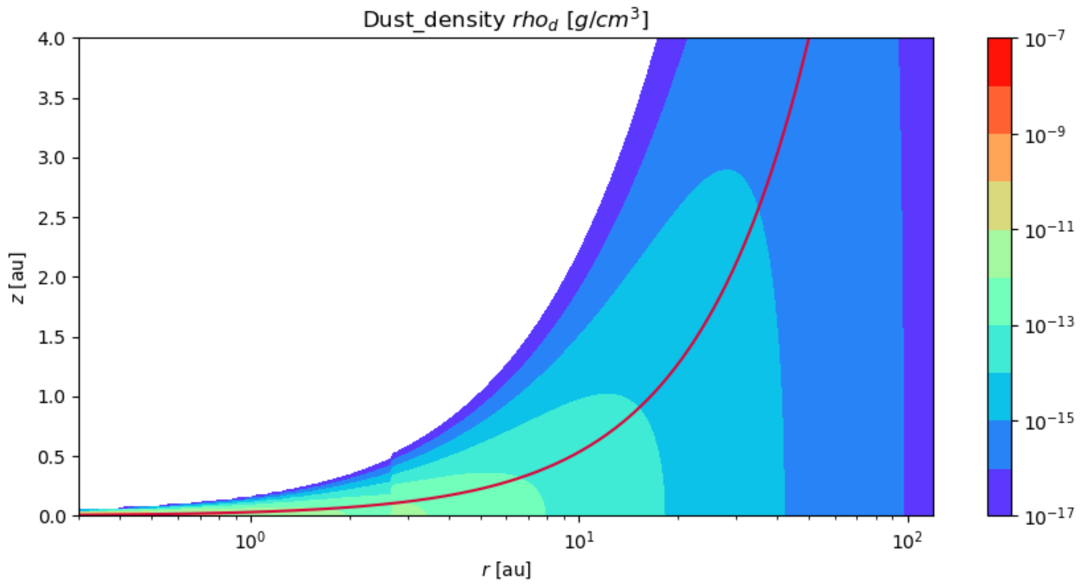
・密度分布 $\rho(r,z)$

※赤道面のガス密度分布

$$\rho_{equator} = \rho(r,0) = 1.4 \times 10^{-9} \left(\frac{r}{1\mathrm{AU}}\right)^{-11/4} \quad g\ cm^{-3}$$

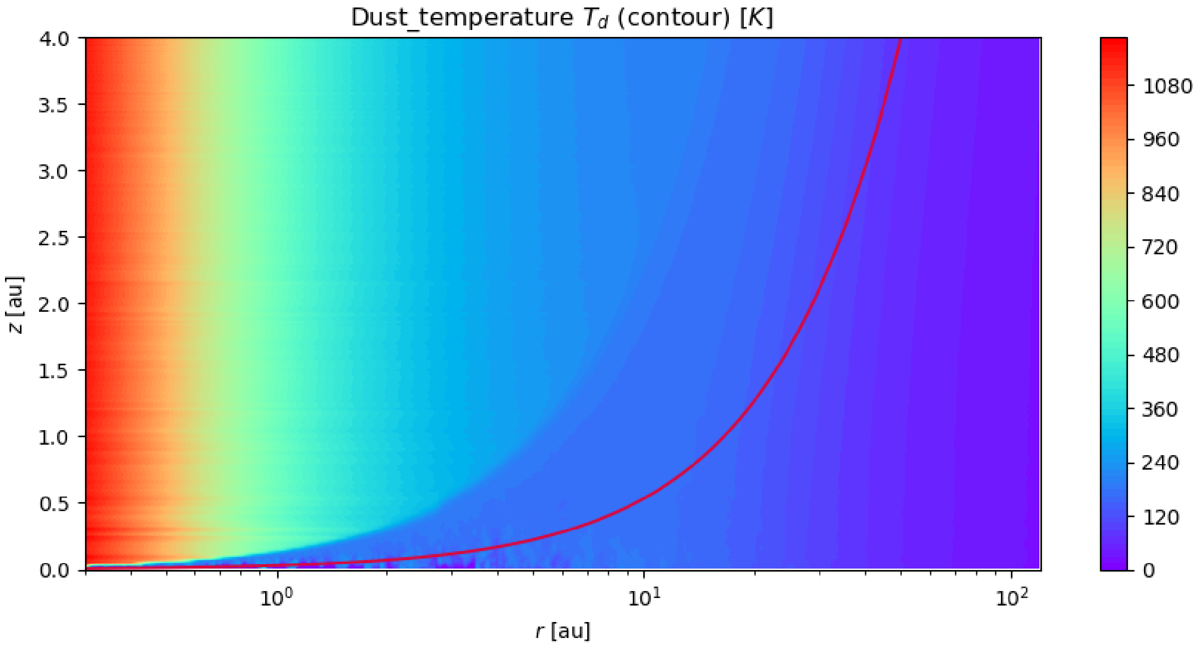






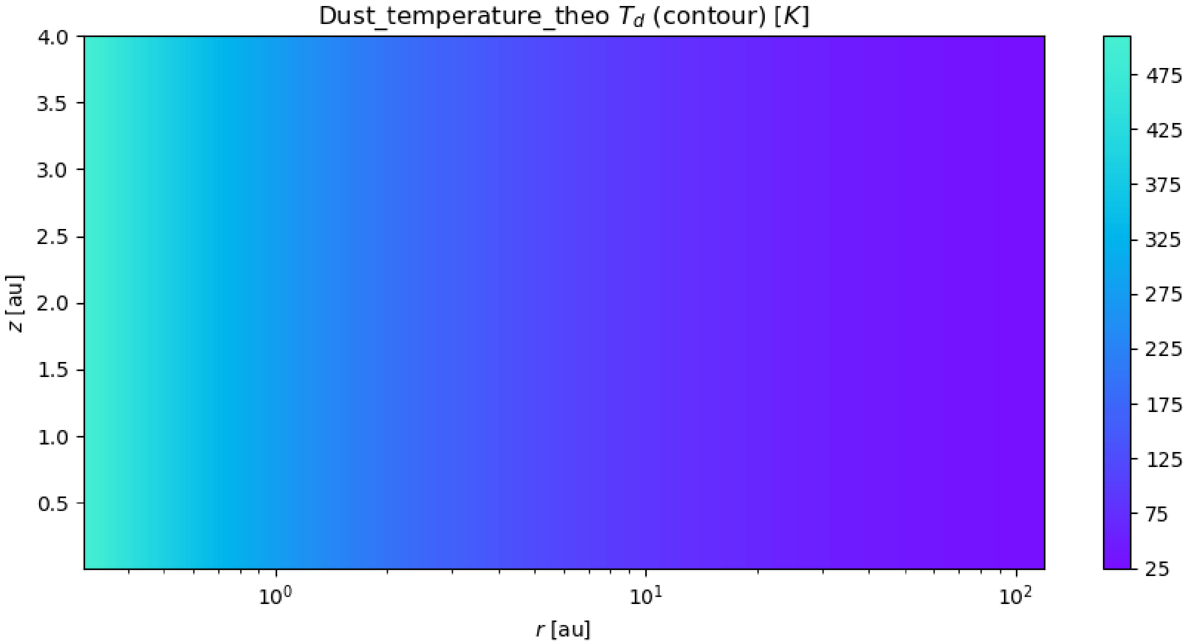
温度分布

RadMC3d
による結果



理論式(6)から
得た円盤温度

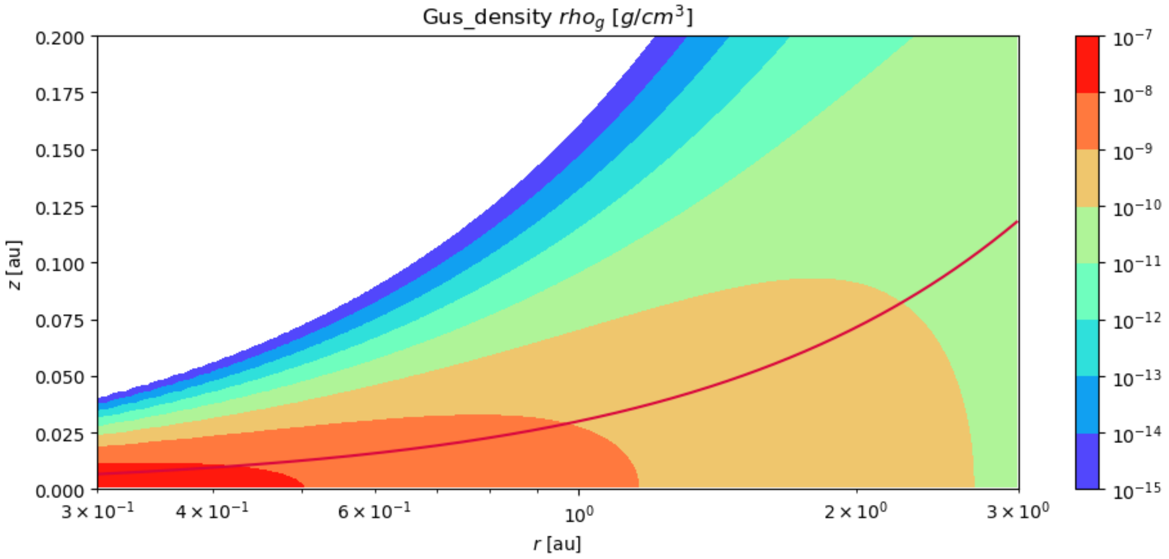
$$T = 280\left(\frac{L}{L_{\odot}}\right)^{\frac{1}{4}}\left(\frac{r}{1\mathrm{AU}}\right)^{-\frac{1}{2}}\ \mathrm{K} \quad \cdots(6)$$

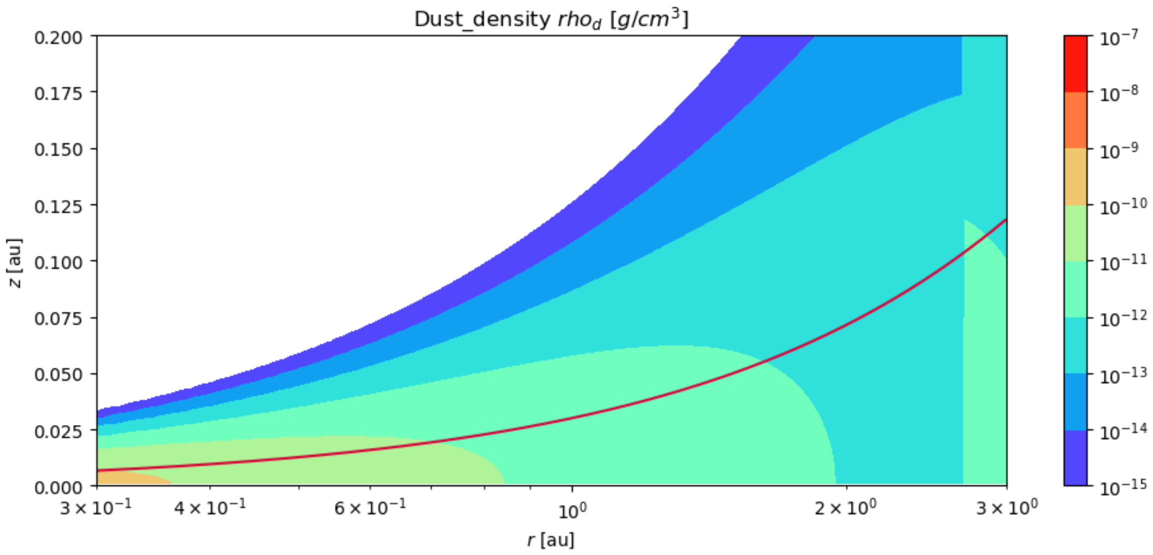


範囲を絞ってもう一度計算

計算を行う範囲を, 動径方向に0.3 ~ 3.0 AU , 高さ方向に0 ~ 0.2 AU とし, 細かく潰れてしまっている部分の密度分布と温度分布を得た.

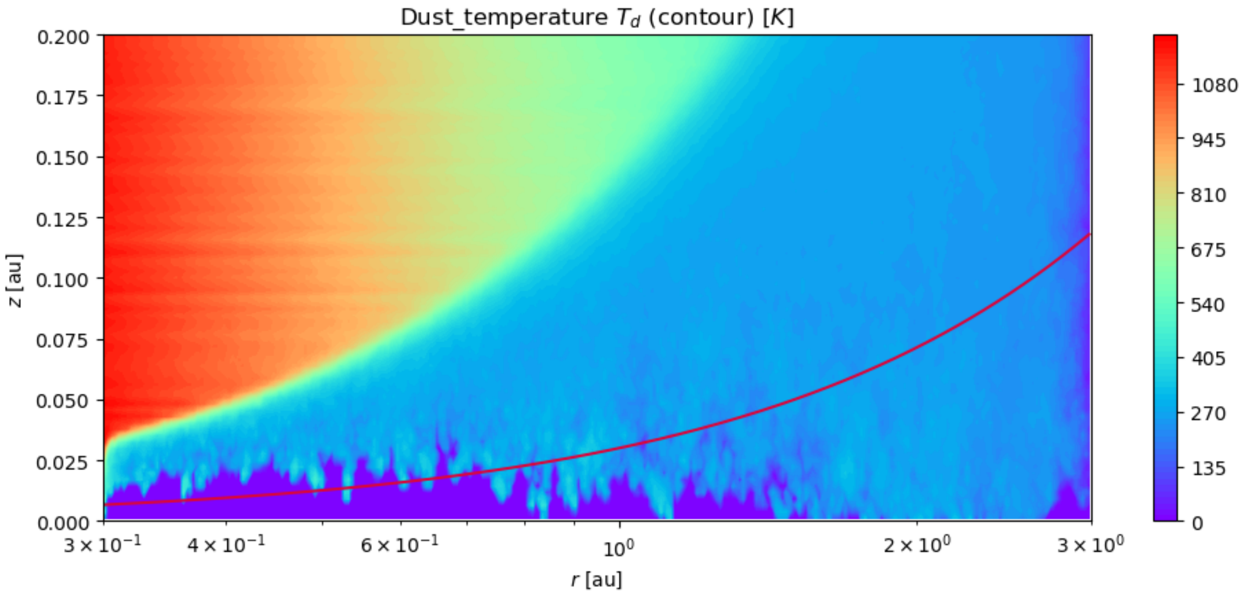
密度分布



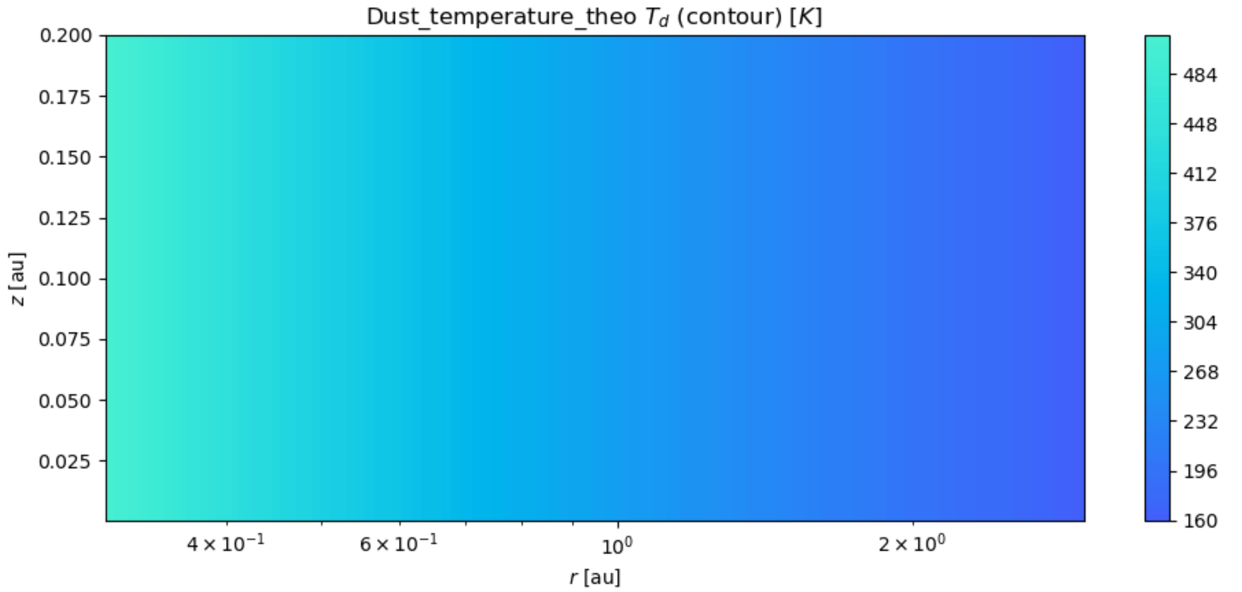


温度分布

RadMC3d
による結果



理論式(6)から
得た円盤温度



課題

・太陽系復元モデルに対するシミュレーションについて, ダストスケールハイトの設定の手順に大きな誤りがある. 早急にこれを修正する.

・温度分布について, 密度が $0\ g\ cm^{-3}$の部分に出現してしまっている温度分布の原因を探る. 現時点では全く不明である.

・スペクトルエネルギー分布(SED)を得て, シミュレーションを行った原子惑星系円盤に対する情報量を増やす.

・RadMC3dの計算方法に関する理解が遅れているため, Pythonの勉強と併せて進めて行く.