千葉大学理学部物理学科

卒業論文

ミリ波・サブミリ波で検証する
原始惑星系円盤 TW Hya と
HD 163296 のダスト分布モデル

令和 4 年 3 月　提出

宇宙物理学研究室

千葉 めぐみ

千葉大学理学部物理学科

卒業論文

ミリ波・サブミリ波で検証する
原始惑星系円盤 TW Hya と
HD 163296 のダスト分布モデル

令和 4 年 3 月　提出

宇宙物理学研究室

千葉 めぐみ

要約

ミリ波・サブミリ波領域において多くの原始惑星系円盤が観測されている。観測結果を再現するような温度や密度の分布モデルが発表されているが、これらによる放射強度の値は波長により異なる。そこで、ある一波長で観測を再現可能なモデルは他の波長でも同様に再現可能であるか、またそのときにダスト分布を決める条件は何か、これらを調べることを目的に本研究を行った。そのために、円盤のダスト分布モデルに関する先行研究を参考に 4 種のモデルを作成し、HD 163296 と TW Hya の2天体を検証した。モデルは波長 1.3 mm の観測結果を再現するものとし、波長を 0.87 mm と 2.1 mm に変更した場合の結果をそれぞれの波長の観測結果と比較した。その結果、温度が全体的に高く、密度が低く光学的に薄いという条件のモデルが、複数の波長で再現可能であった。このことから、温度と面密度の積が一定であり、オパシティは HD 163296 において $\kappa_{2.1\,\mathrm{mm}} : \kappa_{1.3\,\mathrm{mm}} : \kappa_{0.87\,\mathrm{mm}} = 0.8 : 1 : 1.1$ という比になる、という結果が得られた。

目次

要約 i
第 I 章: 序論 1
原始惑星系円盤 1
観測 1
本研究の目的 1
第 II 章: 計算方法 3
輻射輸送理論 3
計算モデル 3
温度分布 4
密度分布 6
オパシティ 11
第 III 章: 結果 13
HD 163296 13
TW Hya 16
第 IV 章: 考察およびまとめ 19
光学的厚み 19
温度と密度の条件 20
オパシティの条件 21
まとめ 23
謝辞 25
参考文献 27

第 1 章　序論

原始惑星系円盤:

原始惑星系円盤とは、若い恒星の周りを回転するガスや塵(ダスト)で形成された円盤である。ここから惑星が生まれると考えられている。放射強度は、中心の恒星からの距離のみに依存する分布として見ることができる。さらに軸対称なリング構造を持つことがあり、暗い部分はギャップ、明るい部分はリングと呼ばれる。例えば、TW Hya は地球から近い距離にある原始惑星系円盤であり、円盤の半径が 60 au (Andrews et al. 2016)、地球からの距離が 60 pc (Gaia Collaboration et al. 2016) 程度である。

観測:

恒星は可視光で観測されるが、原始惑星系円盤は赤外線から電波にわたる領域で観測される。多くの原始惑星系円盤は、チリ・アタカマ砂漠に建設された大型電波干渉計、アルマ望遠鏡により観測されている。アルマ望遠鏡は 1 cm（31.3 GHz）から 0.3 mm（950 GHz）のミリ波・サブミリ波の観測を行う。解像度は 0.01 秒角程度で、円盤の構造を観測するのに十分な分解能を持つ。本研究では、アルマ望遠鏡の Band4, 6, 8 に対応する波長 2.1 mm, 1.3 mm, 0.87 mm の3種類の観測結果を参考にした。

本研究の目的:

観測された放射強度の分布を元に、天体のダストの温度分布や密度分布を想定することができる。これまでの研究により、密度や温度分布のモデルが複数の論文で示されている。同一の天体でも波長によって放射強度は異なる。そこで、一つの波長で観測を再現するモデルは他の波長でも再現可能か、また再現可能な場合に密度や温度の分布はどのようであるか、これらを調べることを目的として本研究を行った。

本研究では、2天体を3波長で検証する。1つめの天体は HD 163296 で、「アルマ望遠鏡大規模観測計画 (ALMA Large Program)」により 2017 年に観測された。中心星は

A1Vep 型星である。もう一つの天体は TW Hya で、地球から最も近い原始惑星系円盤である。中心星は A6 型星である。各天体の情報は表1の通りである。

表1. 本研究で取り上げた天体

天体名	**HD 163296**	**TW Hya**
距離 [pc]	101	60
円盤の傾き	46.7°	7°
中心星質量 [$M_\odot$]	2.04 (1)	0.8 (5)
0.87 mm 観測年 [年]	2016 (2)	2015 (6)
1.3 mm 観測年 [年]	2017 (3)	2017 (7)
2.1 mm 観測年 [年]	2017 (4)	2015 (8)

Note. 括弧内の番号は次の参考文献に対応する。(1) Andrews et al. 2018 (2) Dent et al. 2018 (3) Isella et al. 2018 (4) Guidi et al. 2019 (5) Boekel et al. 2016 (6) Andrews et al. 2018 (7) Tsukagoshi et al. 2019 (8) Tsukagoshi et al. 2016

第２章　計算方法

輻射輸送理論:

観測された円盤からの放射強度は、I_ν [Jy / beam] と表記する。単位に含まれる Jy について、1 Jy は 1 m^2 の面積に 1 Hz あたりのエネルギーの流量が 10^{-26} W であるときの電波放射の強さを表す。beam は望遠鏡のビームサイズに対応する。放射強度 I_ν [Jy / beam] は、黒体輻射の輝度 B_ν [$\mathrm{W \cdot m^{-2} \cdot Sr^{-1} \cdot Hz^{-1}}$] と同じ次元である。

放射強度 I_ν は輻射輸送方程式

$$\frac{dI_\nu}{ds} = -\kappa_\nu \rho [I_\nu - B_\nu(T)] \tag{1}$$

に従う。ここで、s は視線方向に沿った座標を表し、$B_\nu(T)$ はプランクの放射公式より温度 T のみの関数である。放射強度を決定するには、未知数である温度 $T(r,\varphi,z)$、空間密度 $\rho(r,\varphi,z)$、オパシティ κ_νを決定する必要がある。温度分布と密度分布は中心星を原点とする三次元円筒座標 (r,φ,z) で示す。未知数 $T(r,\varphi,z)$、$\rho(r,\varphi,z)$、κ_ν を指定するために、次のセクションで述べる 4 種のモデルを作成した。 RADMC-3D (C.P. Dullemond, 2020) というソフトを使用し、Python により輻射輸送計算を行った。本研究は、散乱の無い場合を想定している。計算結果は画像として出力し、観測結果と比較した。計算を行うためのコード作成と実行の手順は、国立天文台の片岡章雅さんによる web ページ (planetexperience2020_ver1.0 (nao.ac.jp)) を参考にした。以下ではこのページを Kataoka と表記させていただくことがある。

計算モデル:

計算モデルは、主に片岡さんの web ページ (Kataoka)、Isella et al. (2016) 、de Gregorio-Monsalvoet al. (2013) を参考にして作成した。円盤は軸対称なリング構造であるとし、φ に依存しない分布を指定している。モデル名は参考にした文献などの著者名から取らせていただいた。片岡さんの web ページ (Kataoka) に掲載された計算コードと同様の形のモデルは、Kataoka (C)モデルと Kataoka (Si)モデルである。温度は r のみ

に依存する一次元分布、密度は r, z に依存する二次元分布で、carbon amorphous のオパシティを使用したものには (C)、astronomical silicates のオパシティを使用したものには (Si) と記載した。オパシティについてはこの章の最後で説明する。HD 163296 の構造に関する Isella et al. (2016) を参考にしたモデルは、Isella モデルとした。温度分布と密度分布ともに r, z に依存する二次元分布である。astronomical silicates のオパシティでの結果のみを示す。de Gregorio-Monsalvo et al. (2013) を参考にしたモデルは、表記の都合上名前の一部をモデル名とさせていただき、Gregorio モデルと呼ぶ。温度分布と密度分布ともに r, z に依存する二次元分布であるが、温度分布とオパシティは Isella モデルと共通である。以上 Kataoka (C) モデル、Kataoka (Si) モデル、Isella モデル、Gregorio モデルの4種を作成した。各モデルの変数については表 4 に改めて示す。

温度分布:

各モデルの温度分布は以下のように指定した。

Kataoka モデルは片岡さんの web ページ (Kataoka) に記載されたコード同様に r_0 を基準としたべき関数

$$T_{\mathrm{dust}}(r) = T_0 \left(\frac{r}{r_{\mathrm{c}}}\right)^{p_T}$$

とした。T_0、r_{c}、p_T はパラメータとした。

Isella モデルと Gregorio モデルでは、HD 163296 では Isella et al. (2016) より

$$T_{\mathrm{dust}}(r,z) = \begin{cases} T_{\mathrm{a}}(r,z) + [T_{\mathrm{m}}(r) - T_{\mathrm{a}}(r,z)] \cos\left(\dfrac{\pi z}{2 z_{\mathrm{q}}(r)}\right)^{2d(r)} & \text{, if } |z| < z_q \\ T_{\mathrm{a}}(r,z) & \text{otherwise} \end{cases}$$

とした。これは、de Gregorio-Monsalvo et al. (2013), Rosenfeld et al. (2013) を参考にした関数である。円盤中央面の温度は $T_{\mathrm{m},0}$、r_0、q_{m} をパラメータとして

$$T_{\mathrm{m}}(r) = T_{\mathrm{m},0}\left(\frac{r}{r_0}\right)^{-q_{\mathrm{m}}}$$

円盤表面の温度は $T_{\mathrm{a},0}$、q_{a} をパラメータとして

$$T_{\mathrm{a}}(r,z) = T_{\mathrm{a},0}\left(\frac{\sqrt{r^2+z^2}}{r_0}\right)^{-q_{\mathrm{a}}}$$

と表す。2つの層の移り変わりに関する関数は

$$d(r) = d_0(r - r_0) + C$$

$$z_{\mathrm{q}}(r) = z_{\mathrm{q},1}\left(\frac{r}{r_1}\right)^{q_z}\exp\left[-\left(\frac{r}{r_2}\right)^2\right]$$

である。C、d_0、q_z、r_0、r_1、r_2、$z_{\mathrm{q},1}$ をパラメータとしている。

TW Hya では、似た温度分布である Huang et al. (2018)より

$$T_{\mathrm{dust}}(r,z) = \begin{cases} T_{\mathrm{a}}(r,z) + [T_{\mathrm{m}}(r) - T_{\mathrm{a}}(r,z)]\cos\left[\dfrac{\pi z}{2z_q(r)}\right]^4 & z < z_q \\ T_{\mathrm{a}}(r,z) & z \geq z_q \end{cases}$$

を使用した。これは Dartois et al. (2003) と Andrews et al. (2012)を参考にした関数である。このとき、中央面のスケールハイト H_{mid} を用いて $z_q = 4.15H_{\mathrm{mid}}$としている。この温度分布を使用したモデルは、Isella*モデル、Gregorio*モデルなどと記載する。数式に現れるパラメータの値は表 3 にまとめた。

円盤は薄く、大半のダストは円盤中央面に存在する。その中央面と円盤表面の温度分布を Kataoka モデルと比較すると図1の通りになる。全体として Kataoka モデルより Isella モデルの温度が高い。

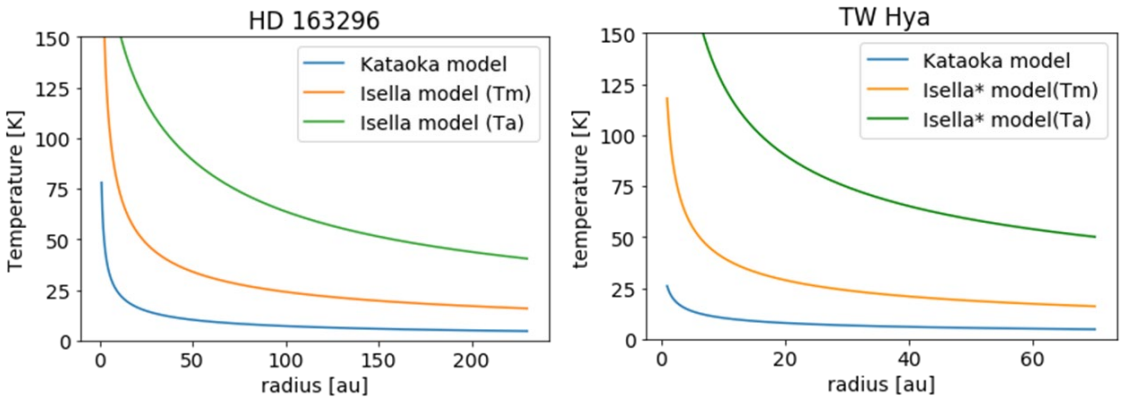

図1. 中央面における温度分布。左が HD 163296、右が TW Hya のモデル。TW Hya では、Isella*モデルと表記している。Kataoka モデルは青線、Isella モデルの円盤中央面の温度 T_{m} はオレンジ、円盤表面の温度 T_{a} は緑の線で示した。

密度分布:

密度分布は、円盤のギャップやリングを再現するため、滑らかな分布にリング構造を加えている。滑らかな面密度分布の関数を $\Sigma_{\mathrm{dust}}(r)$とし、後述のように各モデルで異なる。リング構造は、中心から i 番目のリングの中心半径を r_{ci} 、幅を w_i、中心面密度を Σ_{ci} として、ガウス分布

$$\Sigma_{\mathrm{r},i}(\mathrm{r}) = \Sigma_{ci}\exp\left[-\frac{(r-r_{ci})^2}{2{w_i}^2}\right]$$

とする。これらの和をとり、面密度分布は $\Sigma_{\mathrm{dust}}(r) + \sum_i \Sigma_{r,i}(r)$ とした。リング構造のパラメータは表 2 に示す。

各モデルの滑らかな密度分布 $\Sigma_{\mathrm{dust}}(r)$、空間密度分布 $\rho_{\mathrm{dust}}(r,z)$は以下のように指定した。

Kataoka モデルは片岡さんと Dullemond & Dominik, 2005 より面密度 $\Sigma_{\mathrm{dust}}(r)$ は r_{c} を基準としたべき分布、空間密度 ρ_{dust} はスケールハイト h を使用したガウシアンを掛けたものとし、

$$\Sigma_{\mathrm{dust}}(r) = \Sigma_{\mathrm{c}}\left(\frac{r}{r_{\mathrm{c}}}\right)^{-\gamma}$$

$$\rho_{\mathrm{dust}}(r,z) = \frac{\Sigma_{\mathrm{dust}}(r)}{\sqrt{2\pi}h} exp\left[-\frac{z^2}{2h^2}\right]$$

$$h(r) = \sqrt{\frac{k_{\mathrm{B}}T_{\mathrm{dust}}}{m_{\mathrm{H}}\cdot 2.34}} \Bigg/ \sqrt{\frac{Gm_{\mathrm{star}}}{r^3}} \Bigg/ f_{\mathrm{set}}$$

である。Σ_{c}、r_{c}、γ、f_{set} をパラメータとしている。スケールはイト h は、ボルツマン定数 k_{B}、ダストの温度 T_{dust}、水素原子質量 m_{H}、重力定数 G、中心星質量 m_{star} を用いている。f_{set} はダストがガスに対してどれくらい沈殿しているかを表すパラメータである。

Isella モデルでは、面密度は Isella et al. (2016)より

$$\Sigma_{\mathrm{dust}}(r) = \Sigma_{\mathrm{c}}\left(\frac{r}{r_{\mathrm{c}}}\right)^{-\gamma} \exp\left[-\left(\frac{r}{r_{\mathrm{c}}}\right)^{2-\gamma}\right]$$

とした。空間密度は Kataoka モデルと同様のスケールハイトを用いたガウシアンを使用している。

Gregorio モデルは、de Gregorio-Monsalvo et al. (2013) より面密度は Isella モデルと同じ形であるが、Andrews et al. (2009) より基準点の密度は円盤の質量 M_d を用いて

$$\Sigma_0 = (2-\gamma)\frac{M_d}{2\pi {r_0}^2}$$

とした。空間密度はガウス分布で、

$$\rho_{\mathrm{dust}}(r,\theta) = \frac{\Sigma_{\mathrm{dust}}(r)}{\sqrt{2\pi}rh} exp\left[-\frac{(\pi/2-\theta)^2}{2h^2}\right]$$

としている。ここで、z の代わりに用いた θ は三次元極座標の値を表す。この関数では無次元のスケールハイト

$$h = h_0 \left(\frac{r}{r_0}\right)^{\psi}$$

を用いている。

各モデルの滑らかな面密度を比較すると、図2のように、Kataoka モデルでは比較的全体の面密度が高く半径による変化が少ない分布、Isella モデルでは中心付近の密度が高く周辺では低い分布、Gregorio モデルは全体的に密度が低い分布となっている。

表 2. リング構造のパラメータ

天体名	i	r_{ci}	w_i	Σ_{ci}(Kataoka)	Σ_{ci}(Isella)	Σ_{ci}(Gregorio)
HD 163296	1	10	2.0	−0.25	−0.3	−0.07
	2	30	7.0	0.2	0.22	0.07
	3	48	16	−0.34	−0.29	−0.1
	4	67	5.0	0.31	0.31	0.09
	5	86.4	10	−0.23	−0.09	−0.05
	6	100	4.0	0.2	0.25	0.07
	7	145	16.7	−0.08	−0.008	−0.01
TW Hya	1	0	5.0	−0.4	−0.05	−0.008
	2	25	2.5	−0.19	−0.029	−0.007
	3	41	1.5	−0.13	−0.02	−0.004
	4	49	1.5	−0.07	−0.01	−0.001
	5	56	5.0	−0.1	−0.01	−0.0015

Note. r_{ci} は、TW Hya については Tsukagoshi et al. (2019)、HD 163296 については Huang et al. (2018) を参考に決めた。w_i と Σ_{ci} は、観測を再現できるよう調整した。各モデルで滑らかな面密度分布が異なるため、Σ_{ci} はそれぞれ異なる値を用いた。

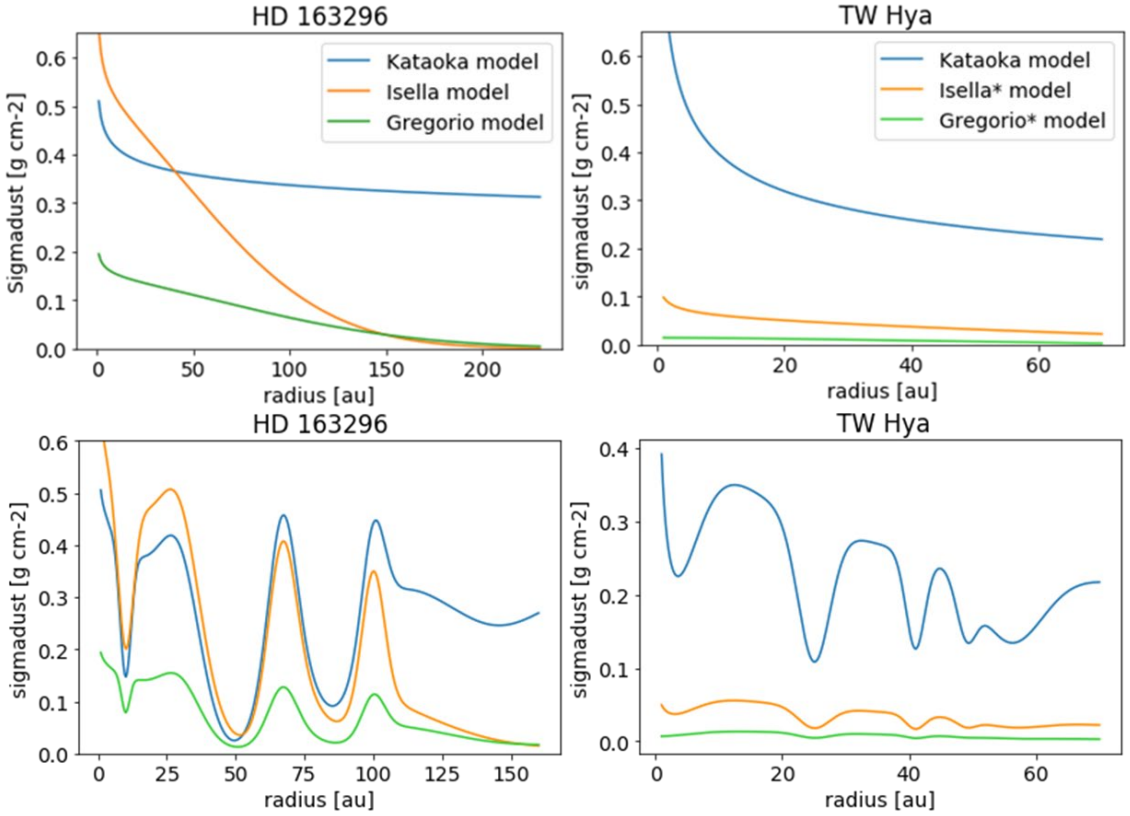

図2. 面密度の分布。左列は HD 163296、右列は TW Hya で用いたモデル。上行は滑らかな分布のみ、下行はリング構造を追加した分布。

表 3. 温度、密度分布に使用したパラメータ

モデル	パラメータ	HD 163296	TW Hya
Kataoka モデル	r_c	1	1 (c)
	T_0	26	26 (c)
	p_T	−0.4	−0.4 (c)
	Σ_c	0.51	0.784
	γ	0.09	0.3
Isella モデル	r_0	100 (a)	10 (d)
	r_1	200 (a)	
	r_2	800 (a)	
	$T_{m,0}$	24 (a)	40 (d)
	$T_{a,0}$	68 (a)	125 (d)
	q_m	0.5 (a)	0.47 (d)
	q_a	0.6 (a)	0.47 (d)
	$z_{q,1}$	63 (a)	
	q_z	0.3333 (a)	
	d_0	0.0034 (a)	
	c	2.5 (a)	
	$r_{0,sig}$	90 (a)	90
	Σ_c	0.42 (a)	0.04
	γ	−0.1 (a)	−0.01
Gregorio model	r_0	125 (b)	55
	γ	−0.1 (b)	−0.01
	h_0	1.1375	1.1375
	ψ	0.13	0.13

Note. 数値の横の記号は次の参考文献である。(a) Isella at al. (2016), (b) de Gregorio-Monsalvo et al. (2013), (c) Tsukagoshi et al. (2016), (d) Huang at al. (2018)

オパシティ:

オパシティ κ_ν は不透明度とも呼ばれる量である。周波数に依存し、円盤内にある固体微粒子であるダストの成分と大きさによって決まる。ダストはケイ素 Si や炭素 C などで構成されていて、最大半径 0.1 μm から数 mm のものが存在する。実際に天体ではどのようなダストが分布しているのかは明らかになっていない。本研究では比較のために2種類のオパシティデータを使用した。一つ目は、RADMC-3D でモデル例として使用されている無定形炭素 carbon amorphous (Preibisch et al. 1993)である。二つ目は、de Gregorio-Monsalvo et al. (2013) による HD 163296 のモデルを参考にして使用した、半径 1 mm の astronomical silicates (Draine et al. 2003)である。散乱効果は考えずに計算を実行した。図3に波長依存性を示す。

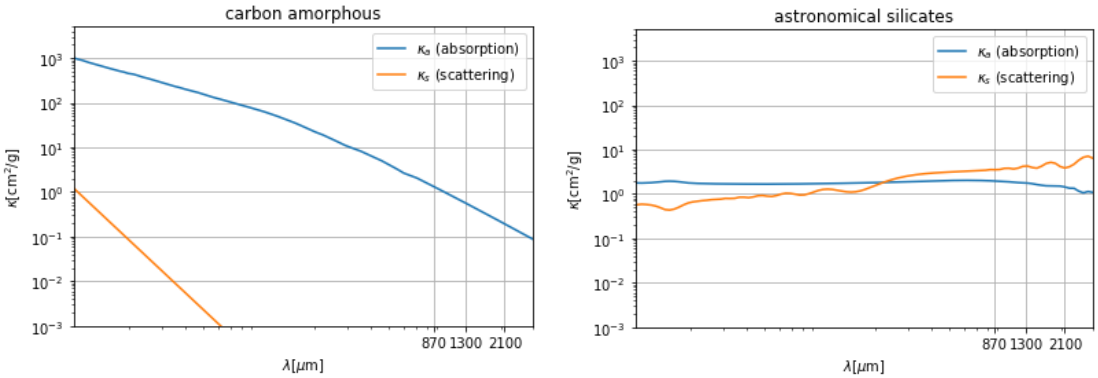

図3. 使用したオパシティの波長依存性。左が carbon amorphous、右が astronomical silicates のデータ。本実験で使用した波長には印を付けている。

以上の4種のモデルの変数とオパシティについてまとめると、表 4 に示す通りである。

表 4. 各モデルの温度と密度の変数、オパシティ

<table>
<tr><th>モデル名</th><th>温度 T</th><th>密度 ρ</th><th>オパシティ κ_ν</th></tr>
<tr><td>Kataoka(C)モデル</td><td rowspan="2">r</td><td rowspan="2">r, z</td><td>carbon amorphous</td></tr>
<tr><td>Kataoka(Si)モデル</td><td rowspan="3">astronomical silicates</td></tr>
<tr><td>Isella モデル</td><td rowspan="2">r, z</td><td>r, z</td></tr>
<tr><td>Gregorio モデル
(de Gregorio-Monsalvo)</td><td>r, z</td></tr>
</table>

第３章　結 果

はじめに各モデルで波長 1.3 mm の観測結果をできる限り再現できるように調整した。それらのモデルは変更せずに、各波長の観測結果にカラースケールとビームサイズを合わせて画像を出力し、再現が可能か調べた。

HD 163296:

はじめに作成した波長 1.3 mm の結果は、比較のため放射強度の一次元プロットを観測結果 (Huang et al. 2018) と並べ図4のように示す。Gregorio モデルと Isella モデルでは観測に近い結果を再現できたが、Kataoka モデルでは半径 100 au 以上で観測より大きな放射強度の値が出ている。これは、半径が大きい部分での密度が高いためであると考えられる。

また、図5のように観測結果とモデルによる画像を並べた。左から波長 0.87 mm, 1.3 mm, 2.1 mm の結果である。最上部の画像は、Dent et al. (2018)、Isellaet al. (2018)、Guidi et al. (2019) より引用した観測結果である。それ以下はモデルにより作成した画像で、上から Gregorio モデル、Isella モデル、Kataoka (Si) モデル、Kataoka (C) モデルの順に並べている。波長 1.3 mm での画像は、Gregorio モデルと Isella モデルでは観測に近い結果を得ることができた。波長 0.87 mm では Gregorio モデルの再現度が最も高い。波長 2.1 mm の結果は Gregorio モデルと Isella モデルの再現度が比較的高い。これらの結果から、HD 163296 について4モデルの中では、Gregorio モデルが最も観測を再現できた。

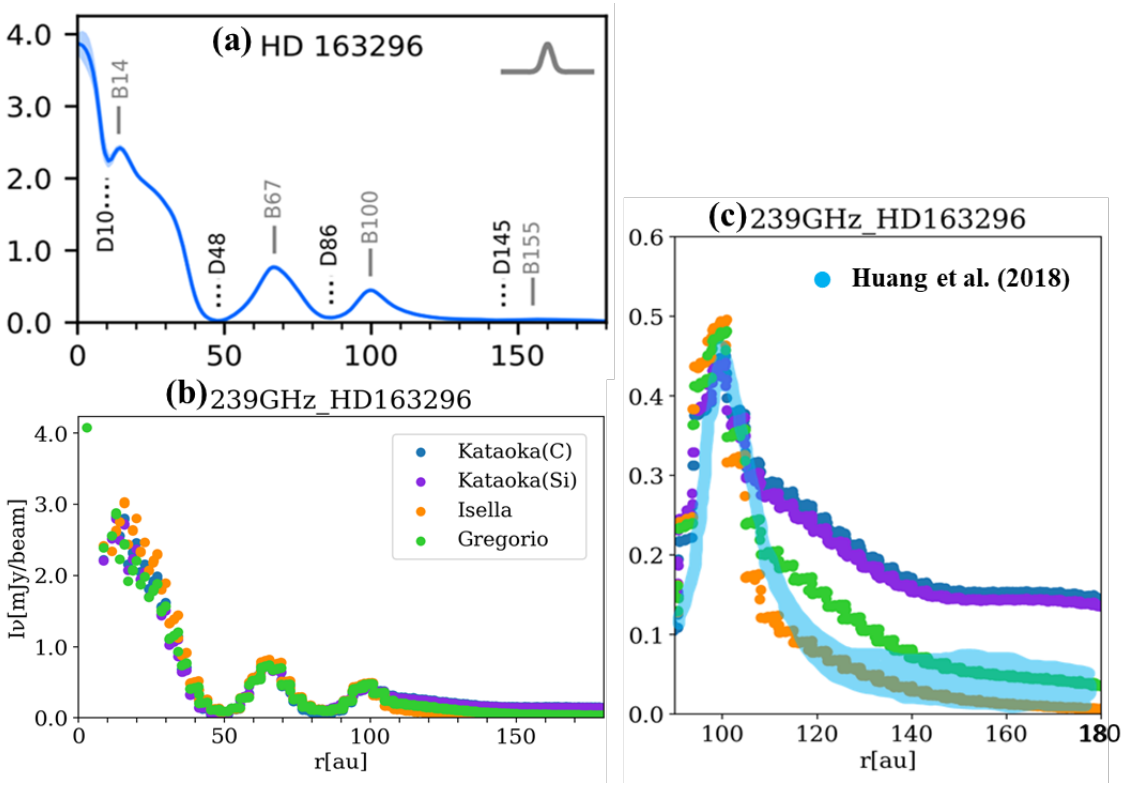

図4. HD 163296 の波長 1.3 mm における放射強度分布。(a) Huang et al. (2018) より引用した、観測された放射強度分布。(b) 4 モデルで作成した放射強度分布。(c) 半径 90 au 以上のプロット図。水色の範囲は、(a) のグラフの該当範囲を外挿したものである。

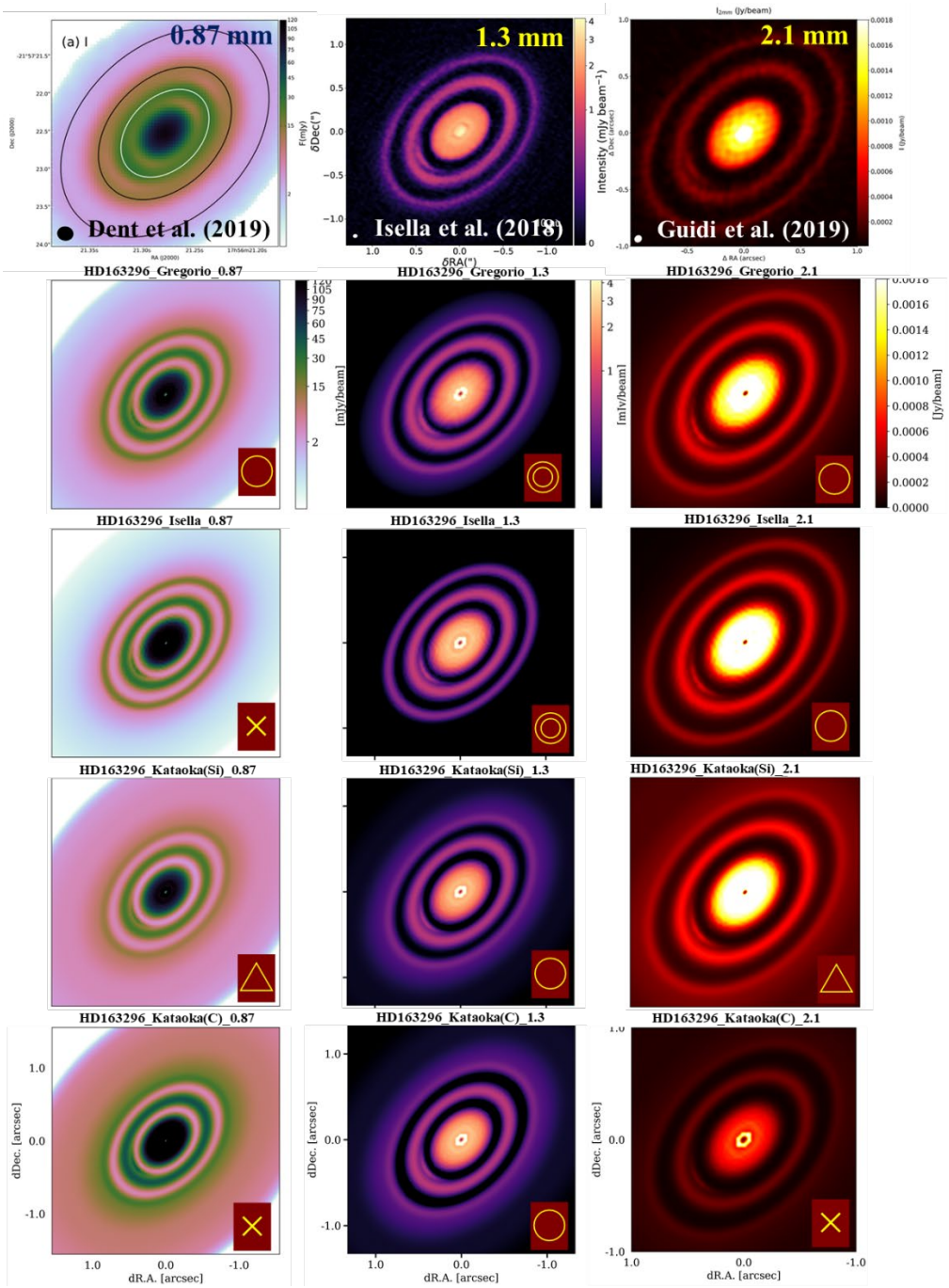

図5. HD 163296 のダスト分布。左の列から順に波長 0.87 mm, 1.3 mm, 2.1 mm の結果である。1 行目の画像は、Dent et al. (2019)、Isella et al. (2018)、Guidi et al. (2019) より引用した観測結果である。それ以下はモデルにより作成した画像で、2 行目は Gregorio モデル、3 行目は Isella モデル、4 行目は Kataoka(Si)モデル、5 行目は Kataoka(C)モデルの順に並べている。再現度合いが高い結果から順に◎、○、△、×と記載した。

TW Hya:

同様にして図6のように波長 1.3 mm の放射強度を一次元グラフに表して観測結果 (Tsukagoshi et al. 2019) と並べた。TW Hya は 10 au 以下で値のばらつきがあるものの、4モデル全てにおいて再現可能であった。

3波長で観測と4モデルの画像は図7の通りである。観測結果の図は左から Andrews et al. (2016)、Tsukagoshi et al. (2019)、Tsukagoshi et al. (2016) より引用した。波長 1.3 mm の画像は、4モデル全てにおいて再現可能であったが、波長 0.87 mm では4モデル全てが観測より小さい値となった。波長 2.1 mm では Gregorio モデルで最も再現できた。総合的に TW Hya においても Gregorio モデルでの再現度が高い。

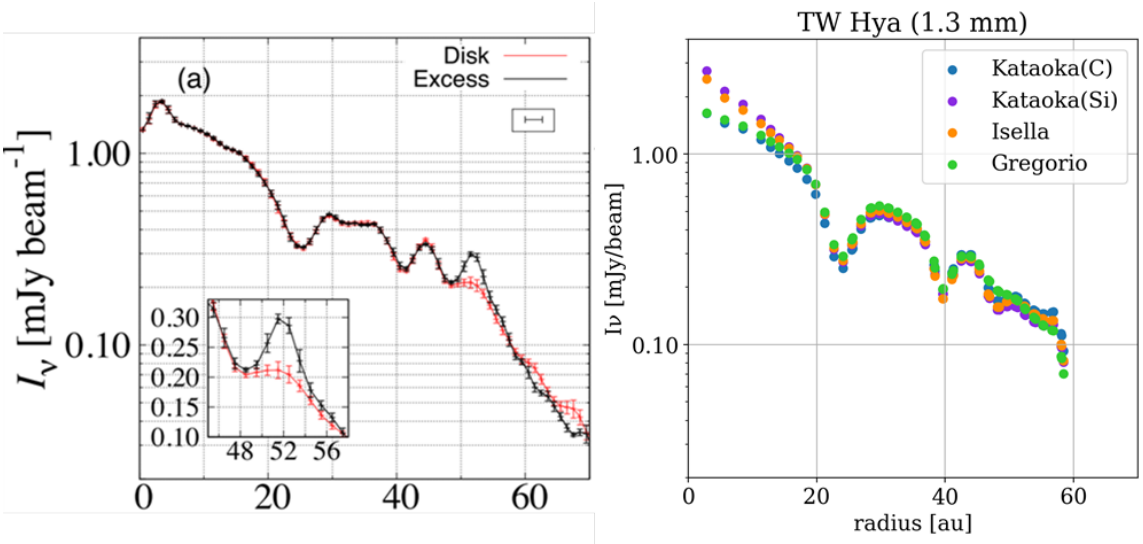

図6. TW Hya の波長 1.3 mm における放射強度分布。左は、Tsukagoshi et al. (2019) より、観測された放射強度分布。右は、4 モデルで作成した放射強度分布。

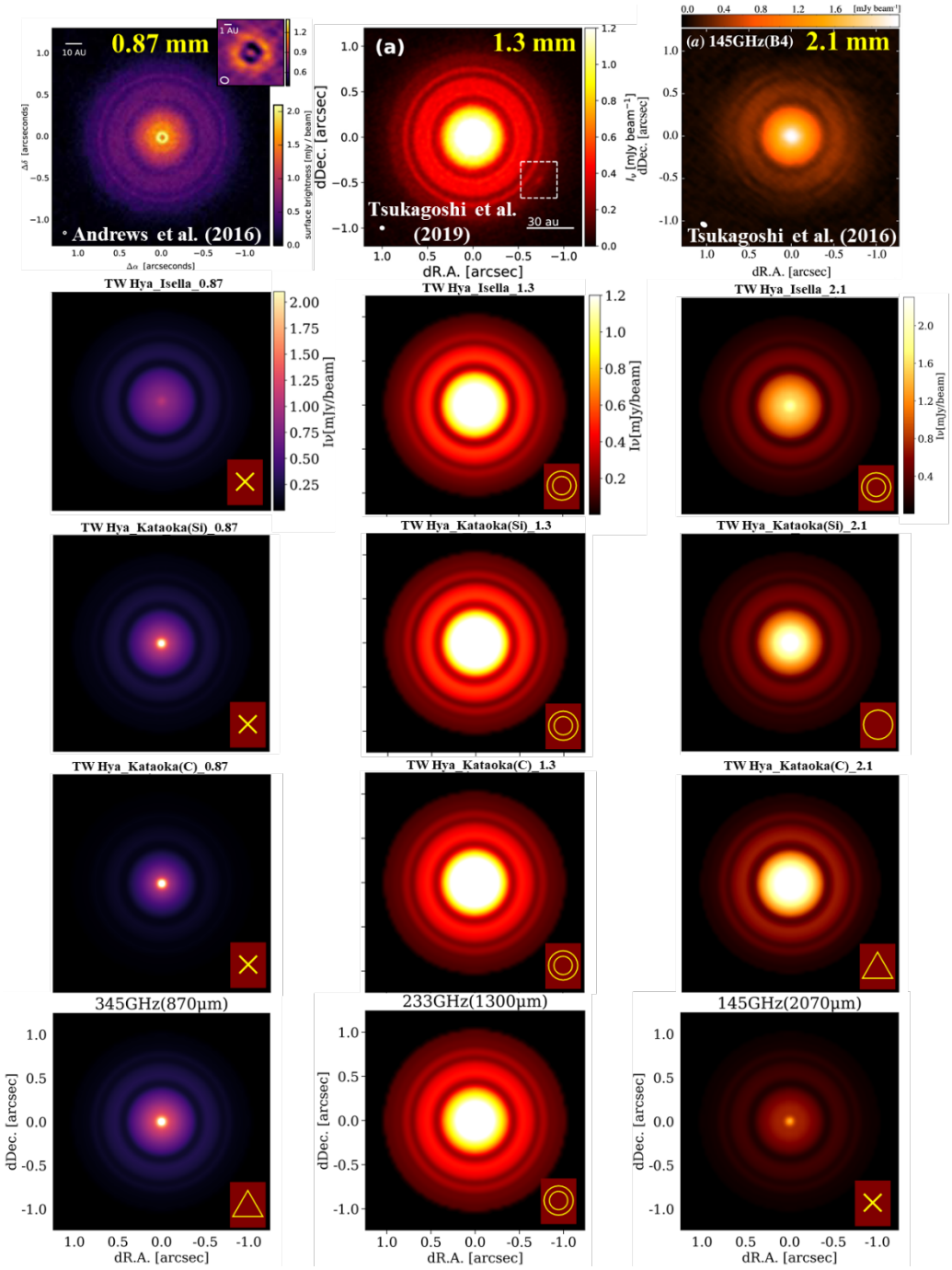

図7. HD 163296 のダスト分布。左の列から順に波長 0.87 mm, 1.3 mm, 2.1 mm の結果である。1 行目の画像は、Andrews et al. (2016)、Tsukagoshi et al. (2019)、Tsukagoshi et al. (2016) より引用した観測結果である。それ以下はモデルにより作成した画像で、2 行目は Gregorio モデル、3 行目は Isella モデル、4 行目は Kataoka(Si) モデル、5 行目は Kataoka(C)モデルの順に並べている。再現度合いが高い結果から順に◎、○、△、×と記載した。

第４章　考察およびまとめ

光学的厚み:

光学的厚み τ_ν は、円盤の不透明度合いを決める量である。$\tau_\nu < 1$ のとき「光学的に薄い」と言われ、半透明な状態である。円盤が薄いとき、

$$\tau_\nu = \int \kappa_\nu \rho(r,z) ds \approx \kappa_\nu \Sigma(r)/\cos\theta_{\mathrm{incl}}$$

と近似される。ここで、θ_{incl} は円盤の視線方向からの傾きである。本実験の波長帯では、オパシティ κ_ν は波長が小さいほど大きい値となるため、光学的厚み τ_ν も同様に波長が小さいほど大きい値となる。上の式により波長 1.3 mm における光学的厚み τ_ν を計算した結果が図8である。観測を再現可能であった Gregorio モデルは、半径に関わらず $\tau_\nu < 1$で光学的に薄い。この条件の下で温度が一定の場合、輻射輸送方程式 (1) の解は、

$$I_\nu(r) = B_\nu\big(T(r)\big)\{1 - e^{-\tau_\nu}\} \approx B_\nu\big(T(r)\big)\tau_\nu \approx B_\nu\big(T(r)\big)\kappa_\nu \Sigma(r) \qquad (2)$$

と近似できる。さらに、$h\nu/kT \ll 1$ の場合を考える。本実験の波長帯では、温度 Tは 10 ~ 20 K より十分大きい必要があるが、Gregorio モデルはほとんどの領域でこれを満たす。プランク関数 $B_\nu\big(T(r)\big)$ は

$$B_\nu(T(r)) \propto \frac{2h\nu^3}{c^2}\frac{1}{e^{h\nu/kT(r)} - 1} \approx \nu^3 \frac{kT(r)}{h\nu} \propto \nu^2 T(r)$$

のように近似できる。したがって、

$$I_\nu(r) \propto \nu^2 T(r)\, \Sigma(r)\kappa_\nu \qquad (3)$$

と表すことができ、放射強度は周波数の二乗、温度、面密度、オパシティの積に比例すると考えられる。

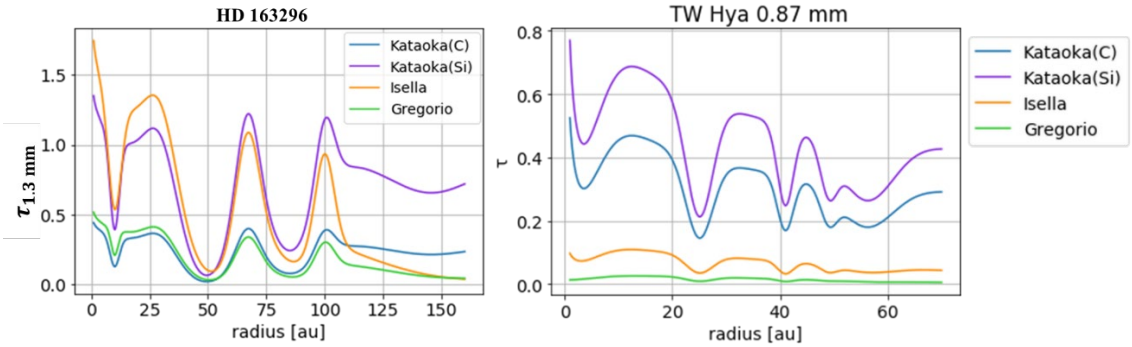

図8. 波長 1.3 mm における光学的厚み $\tau_{1.3\ \mathrm{mm}}$の計算結果

温度と密度の条件:

式 (3) が成り立つならば、波長に依存せず半径のみに依存するのが、積 $T(r)\,\Sigma(r)$ である。そのため、ある1波長において $I_\nu(r) \propto T(r)\,\Sigma(r)$ となるはずである。このことを検証するため、波長 1.3 mm において Gregorio モデルで積 $T(r)\,\Sigma(r)$ を一定にして、温度と面密度それぞれの値を変化させて画像を作成した。結果は図9に示した。すべての画像で観測の再現ができたことから、$I_\nu(r) \propto T(r)\,\Sigma(r)$ が成立することがわかる。Kataoka モデルと Isella モデルでも同様の操作をしたが、前者は全体的に温度が低く、後者は光学的に厚い範囲が多いため、このような性質は見られなかった。よって、観測を再現する $T(r)\,\Sigma(r)$ の値が決まる。ただし、温度と面密度のそれぞれの値は、光学的に薄く温度が十分に高いといった条件が成立する範囲で自由度があり、一意に決定することはできなかった。

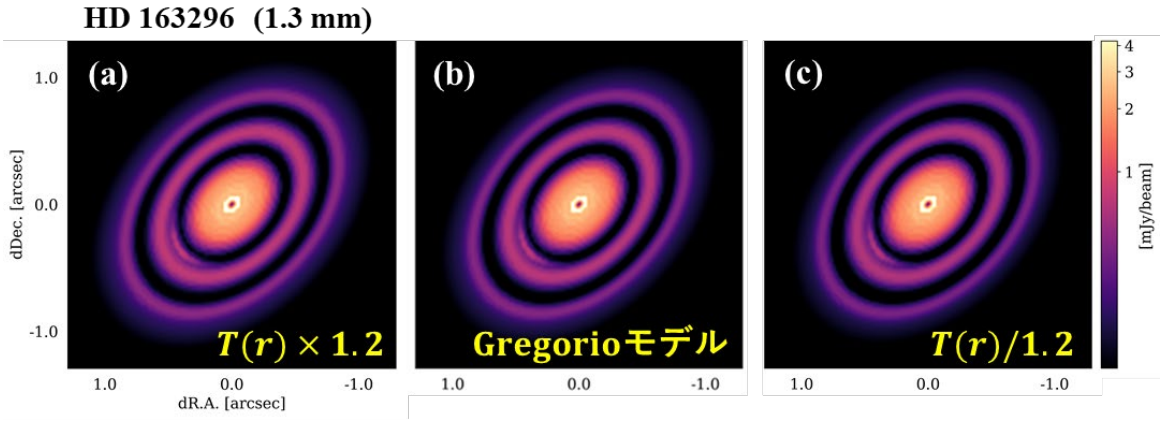

図9. (a) 温度の値を全ての点で 1.2 倍し、密度の値を全ての点の値を 1.2 で割った場合の放射強度分布。(b) Greorio モデルによる波長 1.3 mm における HD 163296 の再現画像。(c) 温度の値を全ての点の値を 1.2 で割り、密度の値を全ての点で 1.2 倍とした場合の放射強度分布。

オパシティの条件:

式 (2) の近似解が成り立つならば、波長依存のみを考慮すると $I_\nu(r) \propto B_\nu\big(T(r)\big)\kappa_\nu$ という関係が得られ、放射強度はプランク関数とオパシティの積に比例すると考えられる。このことを検証するため、再現が最もよくできた Gregorio モデルで HD 163296 の波長 0.87 mm と 2.1 mm の結果を、波長 1.3 mm の画像と同じカラースケールとビームサイズで表示し、図10 (a)(c) に示す。波長が短いほど、プランク関数 $B_\nu\big(T(r)\big)$ とオパシティ κ_ν がともに大きい値となるため、最も波長が長い 0.87 mm での放射強度が大きく出ている。波長 0.87 mm と 2.1 mm の結果は、カラースケールを調整することで、図10 (d)(e) のように波長 1.3 mm の画像と同様の結果が得られる。波長 1.3 mm を基準にして、前者はカラースケール全体を1/2倍、後者は3倍にした。よって、波長による放射強度の変化はほとんど半径に依存しないことが確認できる。このことから、波長 0.87 mm、2.1 mm の結果はそれぞれ、全ての点で波長 1.3 mm の放射強度の 2 倍、1/3 倍である。

プランク関数は既知の値であるため、$I_\nu(r) \propto B_\nu\big(T(r)\big)\kappa_\nu$ という関係と波長による放射強度の比からオパシティの比を求めル事が可能である。その結果、

$\kappa_{2.1\,\mathrm{mm}} : \kappa_{1.3\,\mathrm{mm}} : \kappa_{0.87\,\mathrm{mm}} = 0.8 : 1 : 1.1$ と求められた。オパシティを周波数のべき関数で近似すると、指数はおよそ 0.4 となる。ただし、同様の比率で波長依存性を持つならば他の物質のオパシティデータを採用しても再現が可能であることになり、オパシティの絶対的な値を求めることはできなかった。また、本実験ではオパシティは半径に依存しない量としているが、実際には円盤上の位置によりオパシティが異なる可能性がある。

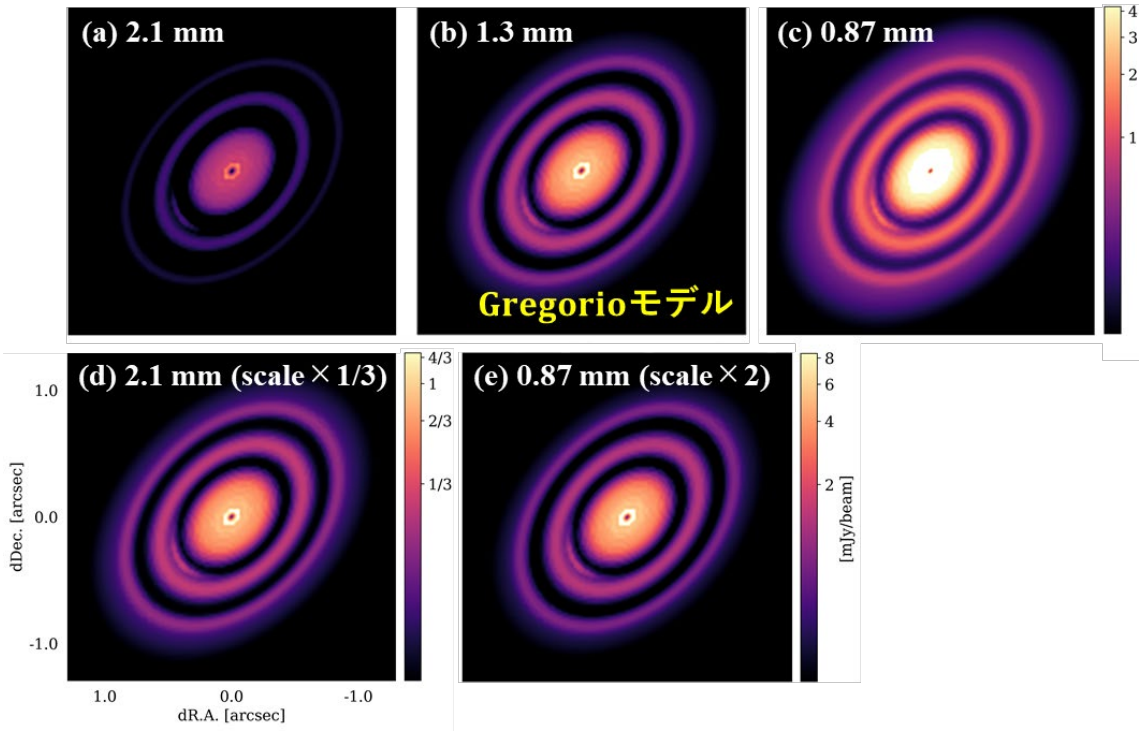

図 10. Gregorio モデル結果の波長による比較 (a) 波長 1.3 mm の結果と同じカラースケールとビームサイズで表示した波長 2.1 mm の結果。(b) 波長 1.3 mm における Gregorio モデルの結果。(c) 波長 1.3 mm の結果と同じカラースケールとビームサイズで表示した波長 0.87 mm の結果。(d) カラースケール全体を 1/3 倍にした波長 2.1 mm の結果。(e) カラースケール全体を 2 倍にした波長 0.87 mm の結果。

まとめ:

・波長 1.3 mm で原始惑星系円盤を再現するモデルは、0.87 mm と 2.1 mm で再現可能か、再現可能な場合にはどのようなダスト分布かを調べることを目的とする。文献を参考にモデルを作成し、各波長の観測結果と比較した。

・4モデルの中では Gregorio モデルの再現性が最も高い。

・光学的に薄い条件で、積 $T(r)\cdot\Sigma(r)$ が一定になる。条件を満たす範囲で自由度があるため、温度と面密度は一意に決定できない。

・HD 163296 における Gregorio モデルの結果から、オパシティの比は $\kappa_{2.1\,\mathrm{mm}} : \kappa_{1.3\,\mathrm{mm}} : \kappa_{0.87\,\mathrm{mm}} = 0.8 : 1 : 1.1$ と求められた。ただし、比は求められるが絶対的な値が不明なため物質の種類は決定できない。さらに、半径依存性の考慮が必要な可能性がある。

謝辞

本研究にあたり、指導教官の花輪知幸教授には興味深い研究テーマへの着想をいただき、終始熱心なご指導をいただきました。心より感謝いたします。松本洋介准教授には Python の扱い方に関して助言をいただき、感謝申し上げます。宇宙物理学研究室の皆様には、多くのご助言と激励をいただきました。本当にありがとうございました。

参考文献

論文:

Andrews, S. M., Wilner, D. J., Hughes, A. M., et al. 2012, ApJ, 744, 162

Andrews, S. M., Wilner, D. J., Hughes, A. M., Qi, C., & Dullemond, C. P. 2009, ApJ, 700, 1502

Andrews, S. M., Wilner, D. J., Zhu, Z., et al. 2016, ApJL, 820, L40

Andrews, S. M., Huang, J., Pérez, L. M., et al. 2018, ApJL, 869, L41

van Boekel, R., Henning, Th., Menu, J., et al. 2016, ApJ, 837,132

Dartois, E., Dutrey, A., & Guilloteau, S. 2003, A&A, 399, 773

de Gregorio-Monsalvo, I., Ménard, F., Dent, W., et al. 2013, A&A, 557, A133

Dent, W. R. F., Pinte, C., Cortes, P. C., et al. 2019, MNRAS 482, L29–L33

Draine, B. T. 2003, ApJ 598, 1017.

Dullemond, C. P. & Dominik, C. 2005, A&A, 434, 3

Gaia Collaboration, Brown, A. G. A., Vallenari, A., et al. 2016, arXiv:1609. 04172

Guidi, G., Isella, A., Testi, L., et al. 2019, ALMA2019: Science Results and Cross-Facility Synergies

Huang, J., Andrews, S. M., Cleeves, L. I., et al. 2018, ApJ, 852, 122

Huang, J., Andrews, S. M., Dullemond, C. P., et ai. 2018, ApJL, 869, L42

Isella, A., Guidi, G., Testi, L., et al. 2016, PhRvL, 117, 251101

Isella, A., Huang, J., Andrews, S. M., et al. 2018, ApJL, 869, L49

Preibisch, Th., Ossenkopf, V., Yorke, H. W., Henning, Th. 1993, A&A 279, 577

Rosenfeld, K. A., Andrews, S. M., Hughes, A. M., et al. 774, 16 (2013).

Tsukagoshi, T., Nomura, H., Muto, T., et al. 2016, ApJL, 829, L35

Tsukagoshi, T., Muto, T., Nomura, H., et ai. 2019, ApJL, 878, L8

Web サイト:

C.P. Dullemond. “RADMC-3D 2.0”. Heidelberg University. 2020. https://www.ita.uni-heidelberg.de/~dullemond/software/radmc-3d/, (最終閲覧日 2022. 3. 11)

片岡章雅. “planetexperience2020_ver1.0”. 国立天文台. https://sci.nao.ac.jp/MEMBER/kataoka/data/planetexperience2020_ver1.0.html, (最終閲覧日 2022. 3. 11)

書籍:

かくあき. 現場で使える！Python 化学技術計算入門　NumPy/SymPy/SciPy/pandas による数値計算・データ処理手法. 翔泳社, 2020.

掌田津耶乃. データ分析ツール Jupyter 入門. 秀和システム, 2018.

中久喜健司. 科学技術計算のための Python 入門　開発基礎、必須ライブラリ、高速化. 技術評論社, 2016.