

卒業論文

「ALMA 望遠鏡観測データを用いた HL Tau 原始惑星系円盤の解析」

2020 年度
(令和 2 年度)

茨城大学理学部理学科学際理学コース
電波天文観測研究室
17s60181 小峯龍也

概要

原始惑星系円盤は、ガスとダストからなる星形成の過程で現れる円盤状の構造であり、惑星系の母体であると考えられている。しかし、原始惑星系円盤から惑星がどのように誕生するのかは未解明の部分も多く、より詳細な解析が望まれる。そこで本研究では、原始惑星系円盤の一つである HL Tau に付随する円盤を解析天体とし、面密度、光学的厚みなどの物理量を求めることで、惑星形成の物理的特徴を探った。結果として先行研究で推定される値の範囲で各物理量を求めることができた。原始惑星系円盤の標準的なモデルとは必ずしも一致しない点があり、更なるデータの解析が必要である。

目 次

1	研究の背景・目的	2
2	解析データ	3
3	解析手法	4
4	結果	6
4.1	Band 6+Band 7	6
4.2	Band 3+Band 6+Band 7	10
5	考察	13
6	まとめ	16
	謝辞	16
	参考文献	16
	付録 A imsmooth	17
	付録 B imregrid	18
	付録 C exportfits	19

1 研究の背景・目的

原始惑星系円盤とは、星の形成過程で生じる中心星の周囲に存在する円盤であり、ダストやガスで構成されている。この原始惑星系円盤に存在するダスト微粒子から発生する熱放射を解析することで惑星形成のシナリオを構成していく情報を得ることができる。

おうし座にある HL Tau は、地球から 140 pc の位置にあり、傾き角が 45° と円盤構造が見えやすい点、また領域内の T タウ型星付随円盤としては、ミリ波で最も明るいという点で、惑星系円盤の構造や形成過程を調べるために非常に適している。

ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) は、チリのアタカマ砂漠に建設された大型電波干渉計であり、ミリ波・サブミリ波のような波長の短い電波を用いることで、銀河、星、惑星系の形成、宇宙における物質進化などを解明することが主目的である。この ALMA の高い空間分解能による他波長観測によって、HL Tau に付随する円盤の詳細な構造を得ることができた (図 1)。こちらのイメージでは、中心から動径方向に依存したギャップ構造を確認することができる。The ALMA Partnership et al. (2015) では、このギャップ構造は惑星形成の過程で生じていると、考えている。

本研究では HL Tau に対して取得された ALMA 長基線観測データ (2011.0.00015.SV, PI:observatory, ALMA) を用いて、円盤中心から動径方向に依存する物理量を解析し、その定量的な値から構造を推定することを目的とした。

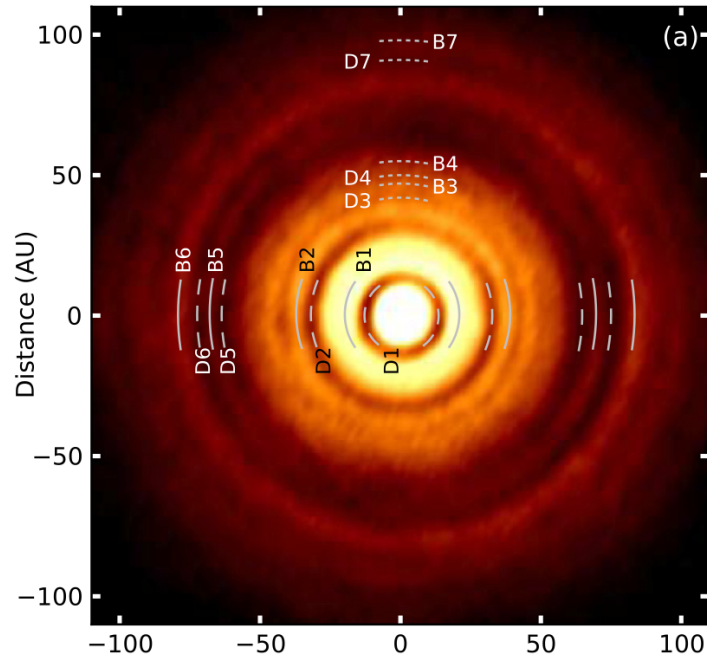


図 1: The ALMA Partnership et al. (2015) での解析で得られた HL Tau に付随する原始惑星系円盤 (Band 6+Band 7) イメージ。イメージが face-on になるように傾き角を用いて調整されている。

2 解析データ

今回、解析に用いるデータは、2014年10月14日から11月14日まで行われたALMAによって観測されたHL Tauのダスト連続波データである(図2)。イメージの出力には、CASA(Common Astronomy Software Application)を用いた。画像のx軸・y軸は、それぞれHL Tauの赤経・赤緯を示しており、カラーバーはダストによる熱放射の放射強度(Intensity)を示している。観測に用いた波長は、2.9 mm (Band 3), 1.3 mm (Band 6), 0.87 mm (Band 7)で、ビームサイズはそれぞれ 85.3×61.1 mas, 35.1×21.8 mas, 29.9×19.0 masである。干渉計の分解能は $\frac{\lambda}{b}$ (λ :観測波長, b :最大基線長)に比例するため、Band 7で得られるイメージがビームサイズが最も小さく鮮明なイメージで、Band 3で得られるイメージがイメージサイズが最も大きく不鮮明なイメージになっている。

より詳細な各バンドの連続波パラメータは The ALMA Partnership et al.(2015) より抜粋する(表1)。

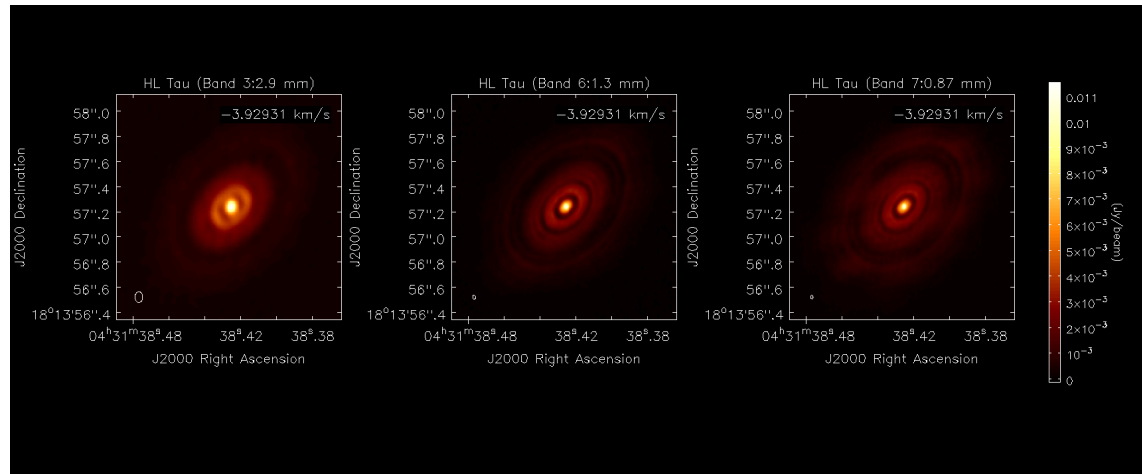


図2: ALMA で得られた3バンドの連続波イメージ(左から Band 3,Band 6,Band 7)

表1: 観測されたHL Tau 連続波パラメータ。The ALMA Partnership et al. (2015) より抜粋。

Source	Position ^b		rms (μ Jy beam ⁻¹)	Peak ^c (mJy beam ⁻¹)	Flux Density ^c (mJy)	Size ^c (mas x mas (deg))
	R.A. (J2000)	Decl. (J2000)				
2.9 mm (Band 3, 101.9 GHz) 85.3 $\times$ 61.1 mas, P.A. = -179°						
HL Tau	04:31:38.4253 (0.0002)	18:13:57.240 (0.004)	9	4.13 (0.03)	74.3 (0.4)	$\sim$ 1750
XZ Tau A	04:31:40.09714 (0.00004)	18:13:56.674 (0.001)	24	1.99 (0.04)	2.71 (0.08)	$<$ 54
XZ Tau B	04:31:40.08218 (0.00007)	18:13:56.845 (0.001)	24	1.30 (0.04)	1.83 (0.08)	$<$ 54
LkH α 358	04:31:36.15383 (0.00007)	18:13:42:919 (0.002)	26	1.07 (0.03)	3.7 (0.1)	150 $\times$ 84 [+170] (6 $\times$ 3 [3])
1.3 mm (Band 6, 233.0 GHz) 35.1 $\times$ 21.8 mas, P.A. = $+11^\circ$						
HL Tau	04:31:38.42548 (0.00008)	18:13:57.242 (0.001)	11	6.48 (0.03)	744.1 (1.5)	$\sim$ 1960
0.87 mm (Band 7, 343.5 GHz) 29.9 $\times$ 19.0 mas, P.A. = -176°						
HL Tau	04:31:38.4254 (0.0001)	18:13:57.242 (0.001)	23	11.56 (0.07)	2140.8 (3.7)	$\sim$ 1960
1.0 mm (Combined Band 6+7, 287.2 GHz) 33.5 $\times$ 21.1 mas, P.A. = $+9^\circ$						
HL Tau	04:31:38.42545 (0.00009)	18:13:57.242 (0.001)	12	9.79 (0.04)	1441.5 (1.8)	$\sim$ 1960

3 解析手法

はじめに、各バンドの放射強度を比較するためにビームサイズとピクセルサイズを合わせる必要がある。これは、イメージ上の放射強度はそれぞれのビームサイズによって平均されてしまうので、各バンドの条件を同じにするためである。このビームサイズとピクセルサイズの調整は使用するバンドの数や組み合わせで変化するので、今回解析に用いる Band 6+Band 7, Band 3+Band 6+Band 7 の二つの組み合わせについてサイズを揃えた (図 3, 図 4)。ここで、サイズの調整作業は CASA のタスク `imsmooth`, `imgred` を用いた。詳しくは付録でまとめる。

表 2: 2つのバンドを組み合わせた放射強度マップのリサイズ結果

バンド名	Band 6 + Band 7
ピクセル数	1600 × 1600
ビームサイズ	0.047'' × 0.033'' (P.A. = −43.6°)

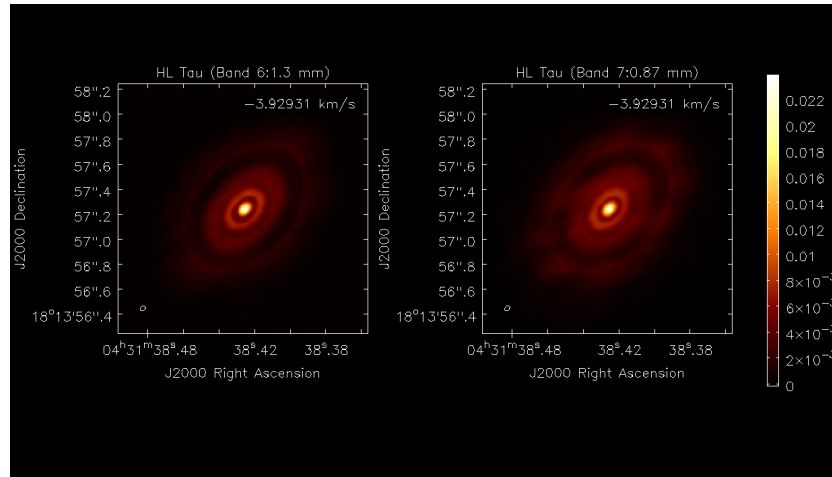


図 3: 2つのバンドでリサイズした画像イメージ

表 3: 3つのバンドを組み合わせた放射強度マップのリサイズ結果

バンド名	Band 3 + Band 6 + Band 7
ピクセル数	1600 × 1600
ビームサイズ	0.11'' × 0.080'' (P.A. = −43.6°)

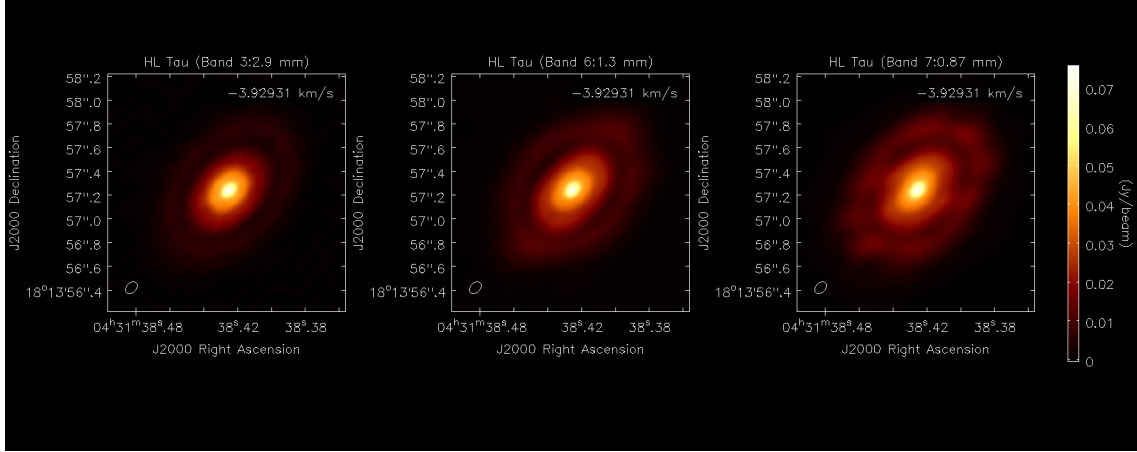


図 4: 3つのバンドでリサイズした画像イメージ

次に、新たに作成された放射強度イメージから、以下の3つの式を用いて動径方向(r)に依存した各バンドの物理量(温度 T 、ダストオパシティ指数 β 、面密度 Σ)を求める。

$$I_\nu(T) = B_\nu(T(r))[1 - \exp(-\tau)] \quad (1)$$

$$\tau(\nu, \tau) = \frac{\kappa \Sigma(r)}{\cos i} \quad (2)$$

$$\kappa(\nu, \tau) = 1[\text{m}^2/\text{kg}] \cdot \left(\frac{\nu}{10[\text{Hz}]} \right)^{\beta(r)} \quad (3)$$

ここで、 $I_\nu[\text{Jy}/\text{sr}]$ は放射強度、 τ は光学的厚み、 $\kappa[\text{m}^2/\text{kg}]$ はダストの吸収断面積である。また $B_\nu(T)$ は温度 T のプランク関数である。

式(1)は輻射輸送方程式で、式(2)は光学的厚みは吸収断面積と面密度の積に比例すること表している。式(3)は吸収断面積を得るための仮定で、基準となっている数値は Beckwith et al. (1990)で示されている値を用いた。

また式(1)は、天体のダストが光学的に厚い場合($\tau \gg 1$)と、光学的に薄い場合($\tau \ll 1$)について近似することができる。光学的に厚い場合、式(1)は $I_\nu(T) \approx B_\nu(T)$ となり、この放射は黒体放射とみなすことができる。よって温度 T は、黒体放射の式で求められる輝度温度 T_b に一致し容易に求めることができる。ただし、光学的に厚い点で近似を行うことにより、 τ や Σ の情報は失われてしまい、物理量の推定が難しくなってしまう。一方、光学的に薄い場合は $I_\nu(T) \approx \tau B_\nu(T)$ は τ の情報を含んでいるが、温度 T を直接求めることができなくなる。実際には距離 r に依存した放射強度 I_ν のグラフから光学的に厚い点を仮定し、フィットした温度 T を与えることで精度良く物理量を求めていく。

以上をまとめると以下に示した通りになる。

	$I_\nu(T) = B_\nu(T)[1 - \exp(-\tau)]$
$\tau \gg 1$	$I_\nu(T) \approx B_\nu(T)$
$\tau \ll 1$	$I_\nu(T) \approx \tau B_\nu(T)$

以上のような方針で解析を進める。

4 結果

4.1 Band 6+Band 7

はじめに、2節で得られた放射強度マップから動径方向に依存した平均放射強度の分布図を作成する(図5)。図1と図5を比較すると、HL Tau の円盤上で明るい領域は放射が強く、暗い領域では放射が弱いことや中心からの距離が大きくなるにつれ全体的に放射が弱くなることがわかる。これは HL Tau 円盤が中心星の熱放射に大きく影響を受けているためであり、動径方向での解析が有効であることが示唆される。また、バンド同士を比較することで Band 7 ほうが放射が大きいことがわかる。これはダストの吸収断面積(放射率)の周波数依存性が要因であると考えられ、観測波長の短い Band 7 の方が光学的に厚いことが推測される。

次に温度 T を決定する。ここでは The ALMA Partnership et al.(2015) より、全ての明るいリングの領域は光学的に厚いと仮定することで温度 T を求める。具体的には、一度 HL Tau 全領域で光学的に厚い ($I_\nu = B_\nu$ を適用) として輝度温度 T_b を求める。そしてここで得られた輝度温度の極大点が、実際の温度 T と一致すると考え温度を距離 r の冪乗でフィットすることにする。結果は図6のようになり温度 T は、 $T = 91.9 \cdot (r/10 \text{ au})^{-0.66}$ K の値を得た。具体的に極大点は、20.73 au, 37.84 au, 79.95 au の3点を用い、フィットには放射強度の結果からリングの明るい領域が Band 6 にくらべ、より光学的に厚いと思われる Band 7 を使用した。また、Carlos Carrasco Gonzalez et al. (2016) から温度 T は、 $T = (70 - 140) \cdot (r/10 \text{ au})^{-(0.5-0.6)}$ K であることが示されているため、その範囲を黄色で示した。

以上の結果から物理量を解析していく。光学的厚み τ は、 $I_\nu = B_\nu[1 - (-\tau)]$ に先ほど求めた温度 T を代入することで求めることができる。結果は、図7のようになった。Band 7 では解が求まらない点が複数存在した。これはフィットの結果、輝度温度 T_b が温度 T を上回っている点が存在しているからである。このことより、Band 7 での光学的厚み τ を計算に用いるダストオパシティ指数 β や面密度 Σ も同じ領域で解を得ることはできなかった。この結果を踏まえ、新たに Band 3 のデータを用いることで更なる検討を行った。

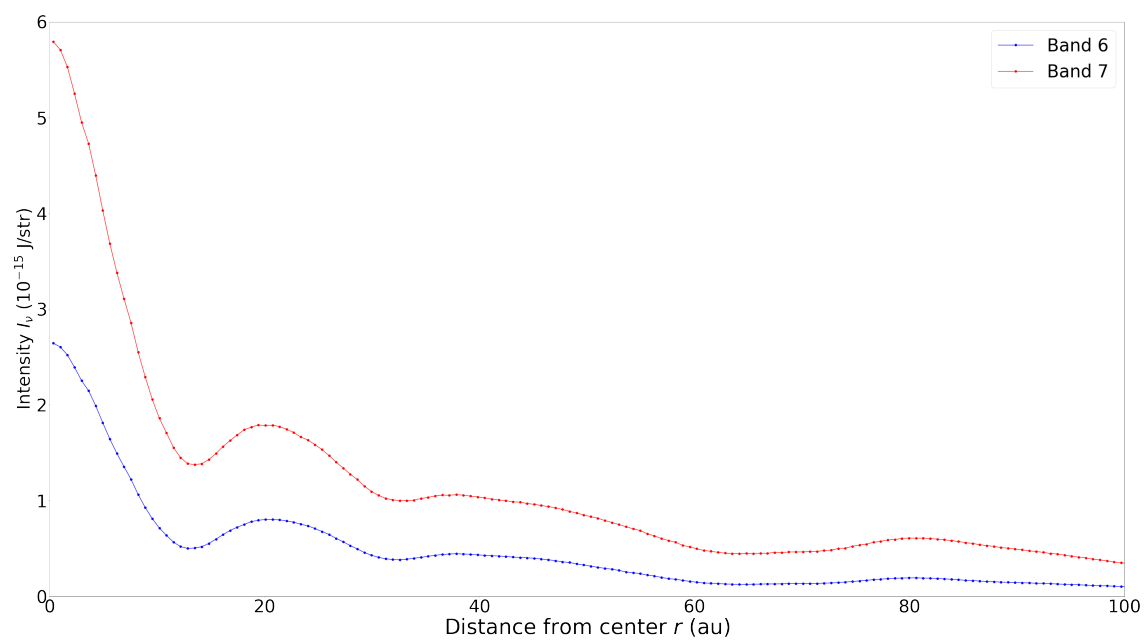


図 5: 放射強度 I

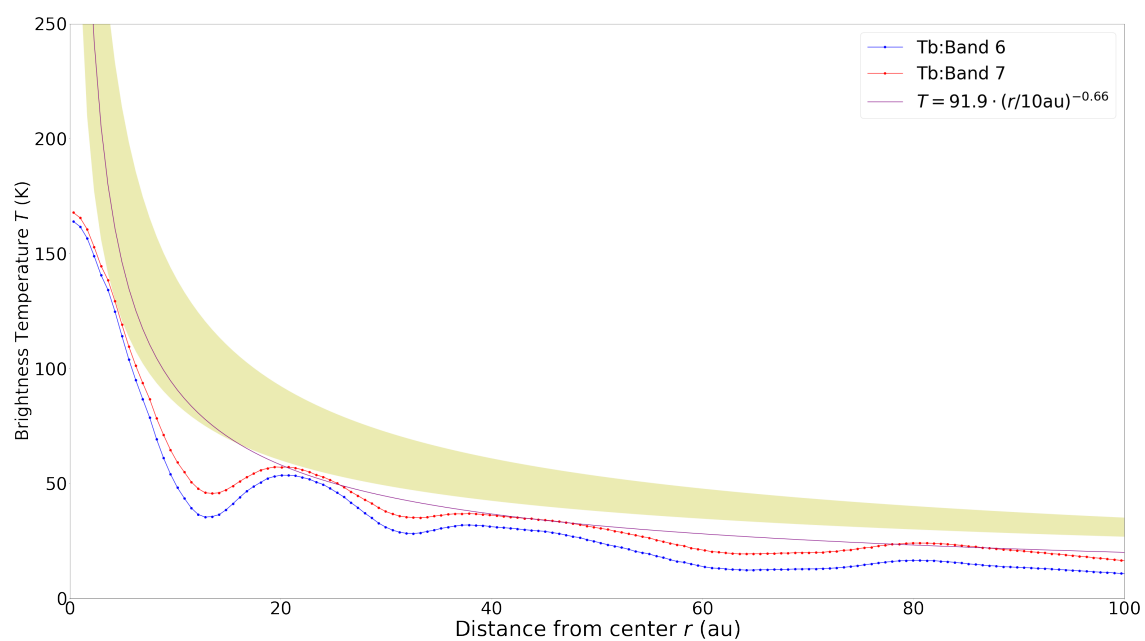


図 6: 輝度温度 T_b と温度 T (黄色の領域は $T = (70 - 140) \cdot (r/10 \text{ au})^{-(0.5-0.6)}$ K の範囲)

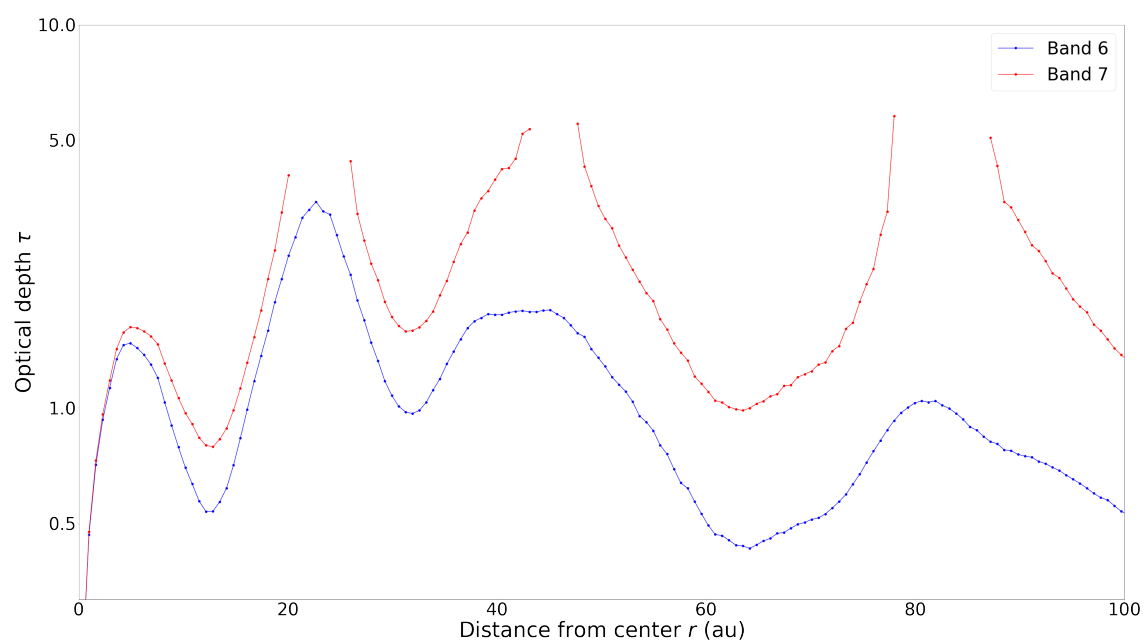


図 7: 光学的厚み τ

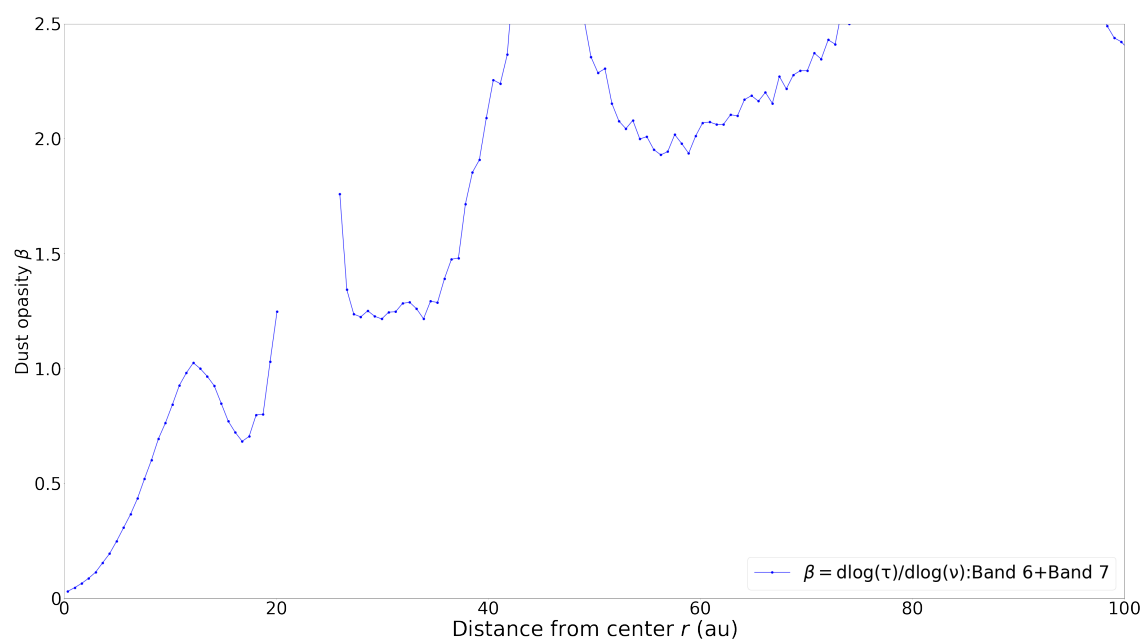


図 8: ダストオパシティ指数 β

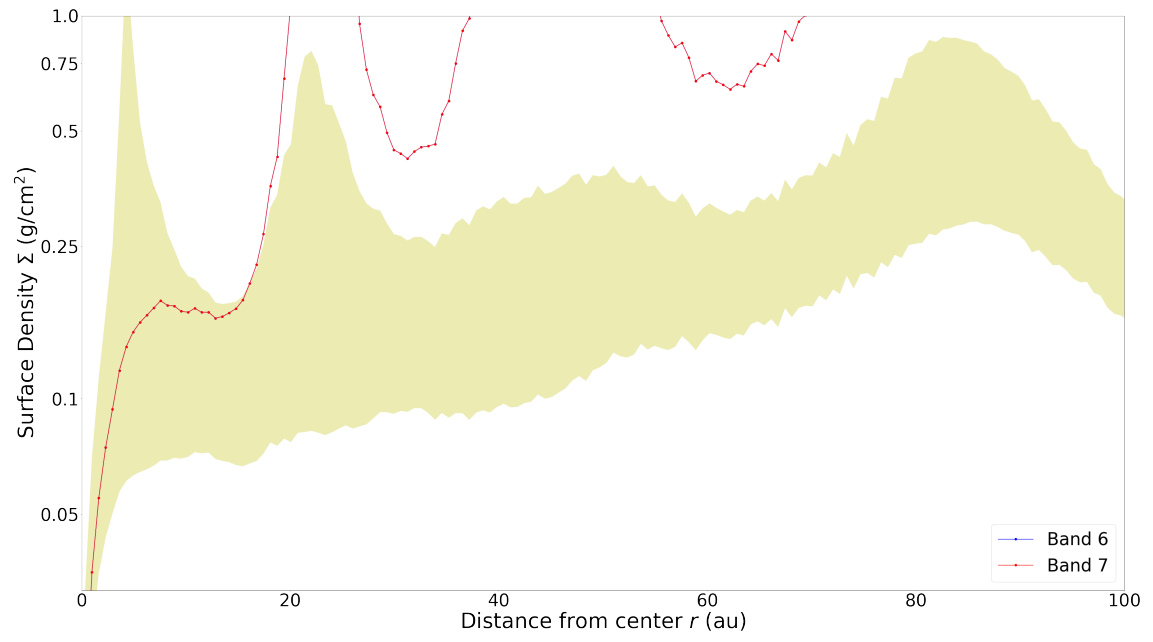


図 9: 面密度 Σ (黄色の領域は $T = (70 - 140) \cdot (r/10 \text{ au})^{-(0.5-0.6)}$ K で求められる面密度の範囲)

4.2 Band 3+Band 6+Band 7

4.1 節の結果を踏まえて、さらに光学的に薄い Band 3 のデータを加えて解析を行った。4.1 節と同様に 2 節で求めた放射強度マップから、放射強度の動径方向の分布図を作成した (図 10)。Band 3 は、Band 6, Band 7 に比べてビームサイズが大きく放射強度から円盤のギャップ構造を確認することは難しくなった。また、放射強度の平均値を求めるために用いる動径方向への積分範囲はビームサイズに依存しているため、放射強度は全体的に小さくなった。

この放射強度を用いて 4.1 節と同様に輝度温度 T_b と温度 T を求めた (図 11)。放射強度が小さくなったため、輝度温度 T_b は小さな値をとった。また、ここで求めた輝度温度 T_b では極大点を求めるのは難しかったため、4.1 節で求めた極大点の位置を使用することで Band 7 の輝度温度 T_b から温度 T を仮定した。温度 T は $T = 79.0 \cdot (r/10 \text{ au})^{-0.60} \text{ K}$ の値を得た。

以上から物理量を計算していく。仮定した温度分布 T からそれぞれのバンドについて光学的厚み τ を計算すると、図 12 のような結果を得た。Band 7 の値は、4.1 節と同様の理由で解を得ることができない点が存在したが、Band 3, Band 6 では温度 T に比べ輝度温度 T_b の値が全ての点で下回ったため解を得ることができた。ここで求めた光学的厚み τ の比と式 (2)、式 (3) からダストオパシティ指数 β を求め、この値からそれぞれの面密度 Σ を求めると以下のような結果を得ることができた (図 13, 図 14)。

ダストオパシティ指数 β は、式 (2)、式 (3) から 2 つのバンドの光学的厚み τ の比と観測周波数 ν の比 $\beta = d\log\tau/d\log\nu$ で求めることができる。光学的厚み τ は Band 7 で解を得ることができない点が存在したため、ダストオパシティ指数 β で解を得ることができたのは Band 3, Band 6 のデータを使用したものだけであった。ここで得たダストオパシティ指数 β と式 (2)、式 (3) から面密度 Σ を計算する。面密度 Σ は Carlos Carrasco Gonzalez et al. (2016) で推定される温度領域から得られる面密度の範囲 (図中黄色の領域) に存在することが確かめられた。

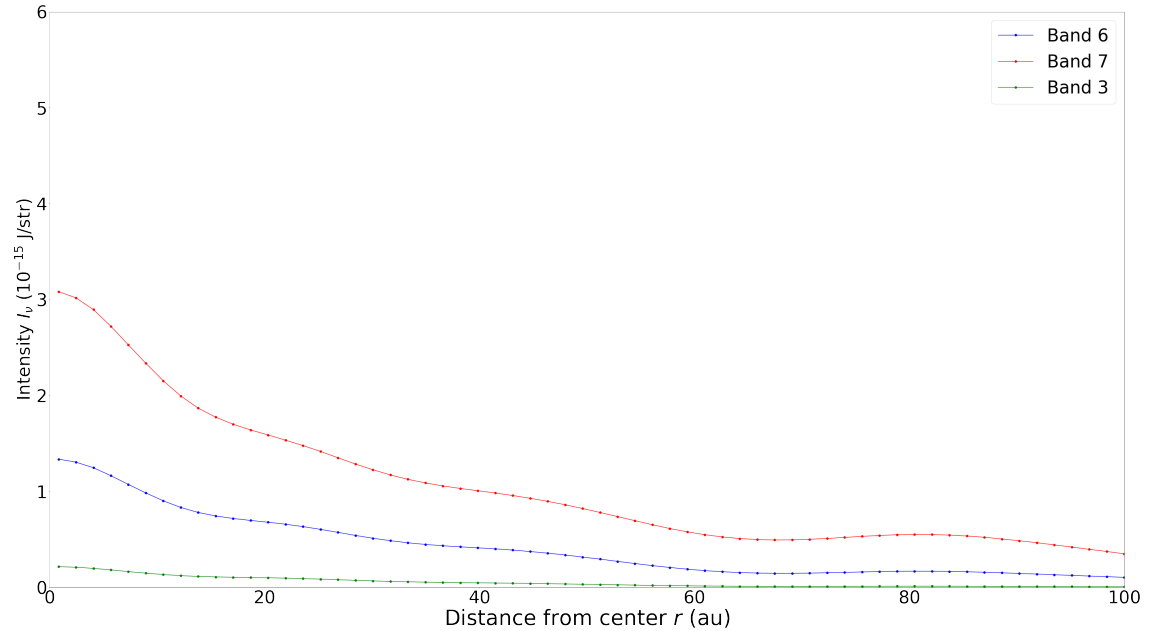


図 10: 放射強度 I

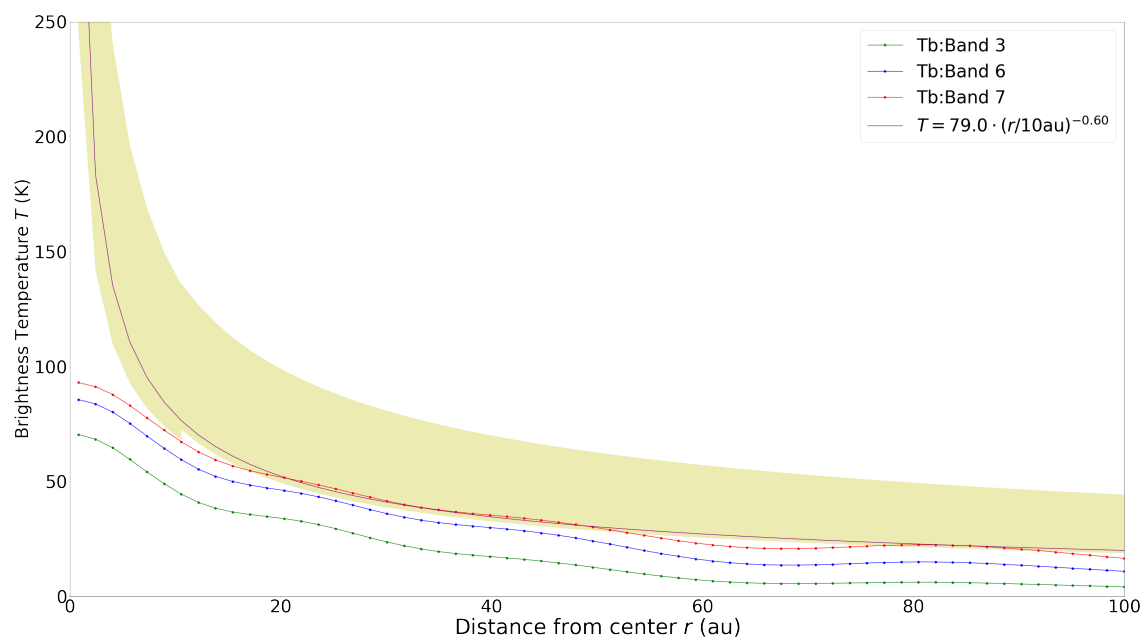


図 11: 輝度温度 T_b と温度 T (黄色の領域は $T = (70 - 140) \cdot (r/10 \text{ au})^{-(0.5-0.6)}$ K の範囲)

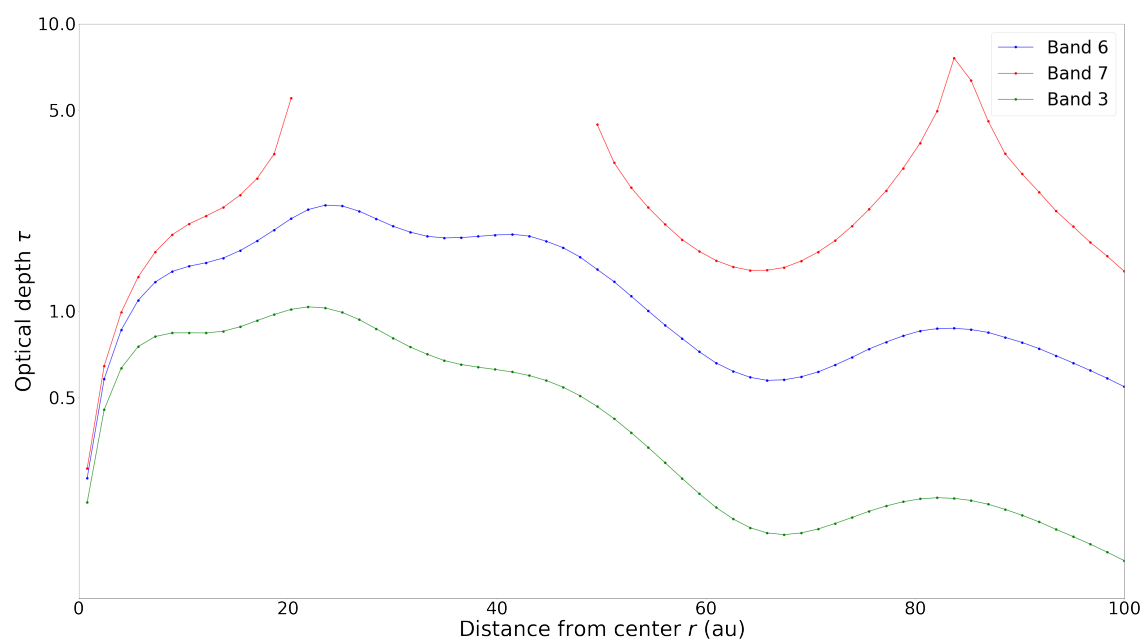


図 12: 光学的厚み τ

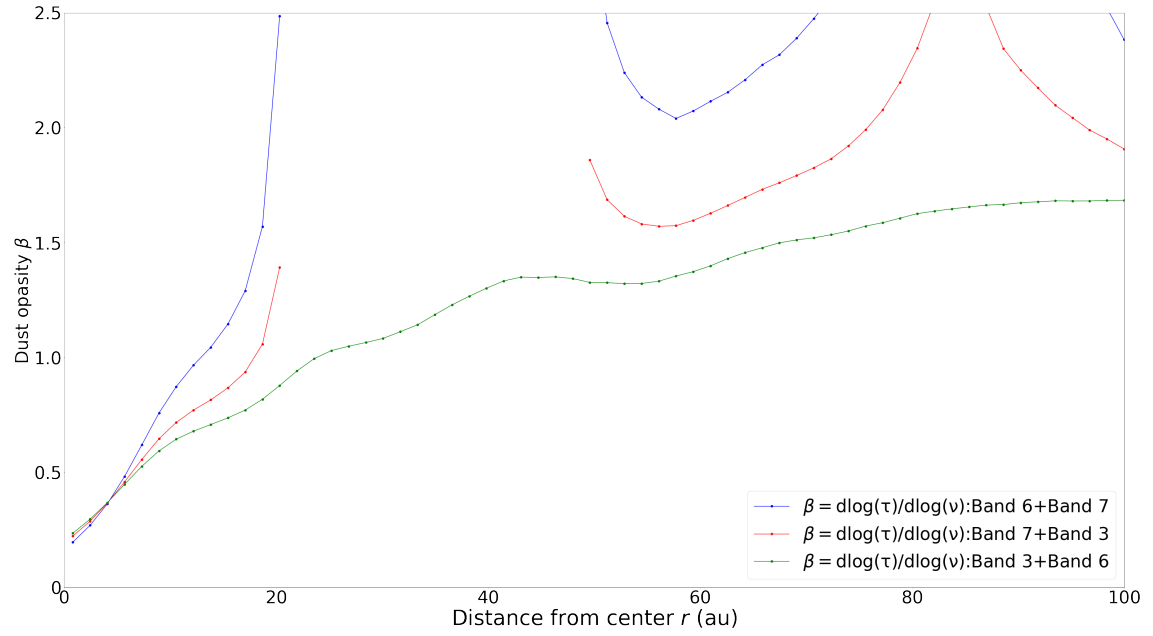


図 13: ダストオパシティ指数 β

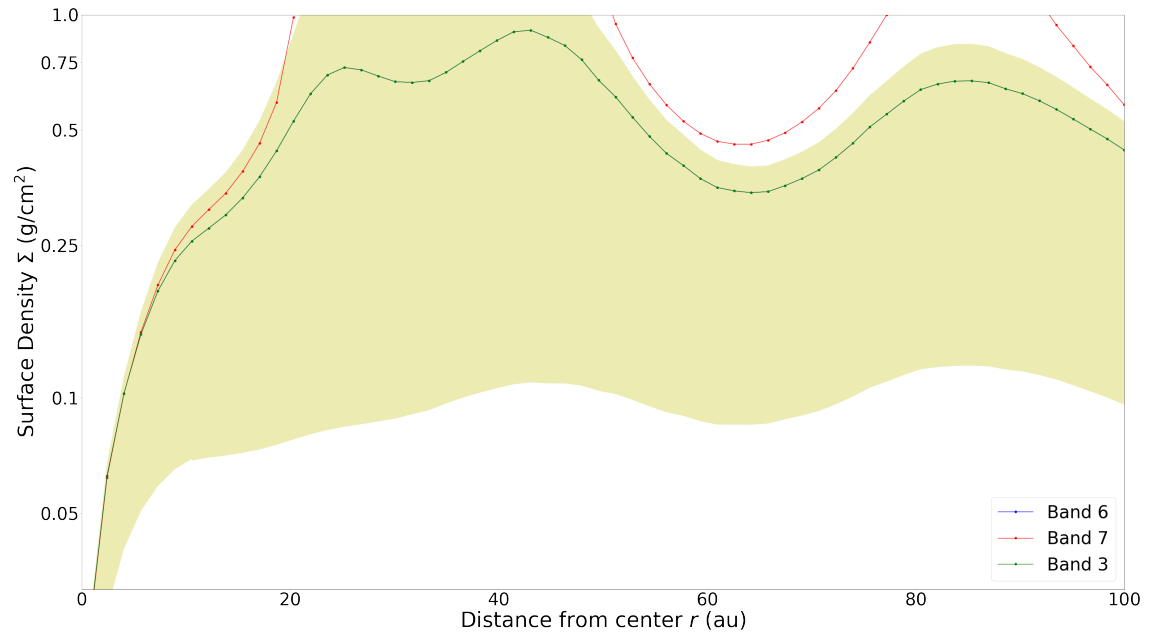


図 14: 面密度 Σ (黄色の領域は $T = (70 - 140) \cdot (r/10 \text{ au})^{-(0.5-0.6)}$ K で求められる面密度の範囲)

5 考察

円盤のモデルについて考察するため、主に4.2節で求められた面密度 Σ について、Carlos Carrasco Gonzalez et al. (2016) のデータと比較する (図 15)。先行研究では、これまで使用したバンドに加え、VLA (Very Large Array) で観測したさらに光学的に薄い 7.0 mm の観測データを用いて解析を行っている。データは、上から順に輝度温度 T_b 、光学的厚み τ 、面密度 Σ 、スペクトル指数 $\alpha = d\log I_\nu / d\log \nu$ となっている。また、4.1 節で述べた温度 T の仮定の他に、波長 7 mm での吸収断面積 $\kappa_{7\text{mm}} = 0.13 - 0.21 \text{ cm}^2\text{g}^{-1}$ 、ダストオパシティ指数 β を $\beta = \alpha - 2$ で求め、この式が適応できる条件 (光学的に薄い点) での平均値 (今回は $\beta \approx 1.2$) という仮定を用いて解析されている。

面密度 Σ は、さらに多角的な仮定を与えた先行研究の結果とも概ね一致する値をとっている。ただし、円盤中心部 < 10 au 付近ではかなり低い値が解析された。これはフィットの都合によるもので図 11 の温度分布からもわかるように、中心の温度が発散しているためである。実際の温度分布 T は輝度温度 T_b 程度になると推定され、見かけの等級 15.1 から 1 au での温度を計算すると、98.0 K と計算される。この式で用いた等級から光度を求める式 (4)、光度から温度分布を求める式 (5) を用いて温度分布 T_{mag} を求めると以下のようなになった (図 16)。ただし、現実的な値として推定するためには星の減光量を考慮する必要があり、このことは図 16 に示した T_{mag} が観測で得られた輝度温度よりも低く不適切であることから明らかである。

$$L_\star = 0.0813 D_\star^2 10^{-0.4m_\star} \cdot L_\odot \quad (4)$$

$$T_{\text{mag}}(r) = 280 \left(\frac{L_\star}{L_\odot} \right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{r}{1\text{au}} \right)^{-\frac{1}{2}} \text{ K} \quad (5)$$

また、円盤の面密度 Σ は古典的太陽起源論の林モデルから距離 r に比例して密度が低くなるとされているが、今回の解析では、みられなかった。このような結果が適切であるかを判断する上で大きな不定性を与えているのがダストオパシティ指数 β の見積もりである。先行研究ではスペクトル指数 α から求めているため、こちらの方法で再計算してみる。すると図 18 に示すような結果を得ることができた。ただし $\beta = \alpha - 2$ は、光学的に薄い点 ($\tau \ll 1$) のみに有効であるため、図 13 の値から光学的に薄い点は 60 au 以遠の領域の点 とし、図 17 のダストオパシティ指数 β の光学的に薄い点での値に $\beta = 1.15$ を採用した。この結果からは距離 r に応じて面密度 Σ は半径が小さくなるほど高くなる傾向が見て取れるため、より原始惑星系円盤の標準的なモデルに近い計算結果のようにみえる。しかし、一方でダストオパシティ指数 β はダストの成長の傾きを表しているものであり、値が小さいほどダストのサイズは大きいことが期待される。現在の研究では円盤内域の方がダストサイズは大きいとされ、ダストオパシティ指数 β について考えると、図 13 のような距離 r が大きくなるにつれ、ダストオパシティ指数 β が大きくなる計算結果の方がこのような予想に沿った結果であると言える。この二つの結果をもとに、より精度良くダストオパシティ指数 β を求めるためには全領域で光学的に薄いような長波長のデータからスペクトル指数 α を用いて平均を取らずにダストオパシティ指数 β を求めることが望まれる。

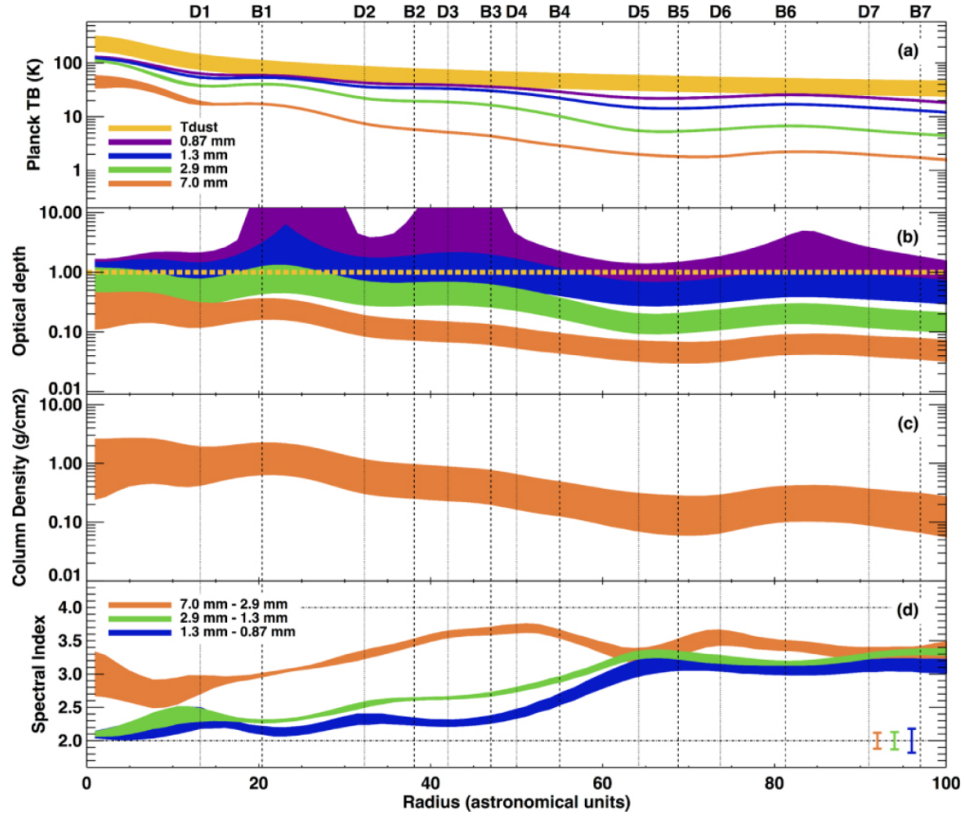


図 15: 先行研究によって推定されている各パラメータ (出典:Carlos Carrasco Gonzalez et al,2016,ApJL, 821,L16)

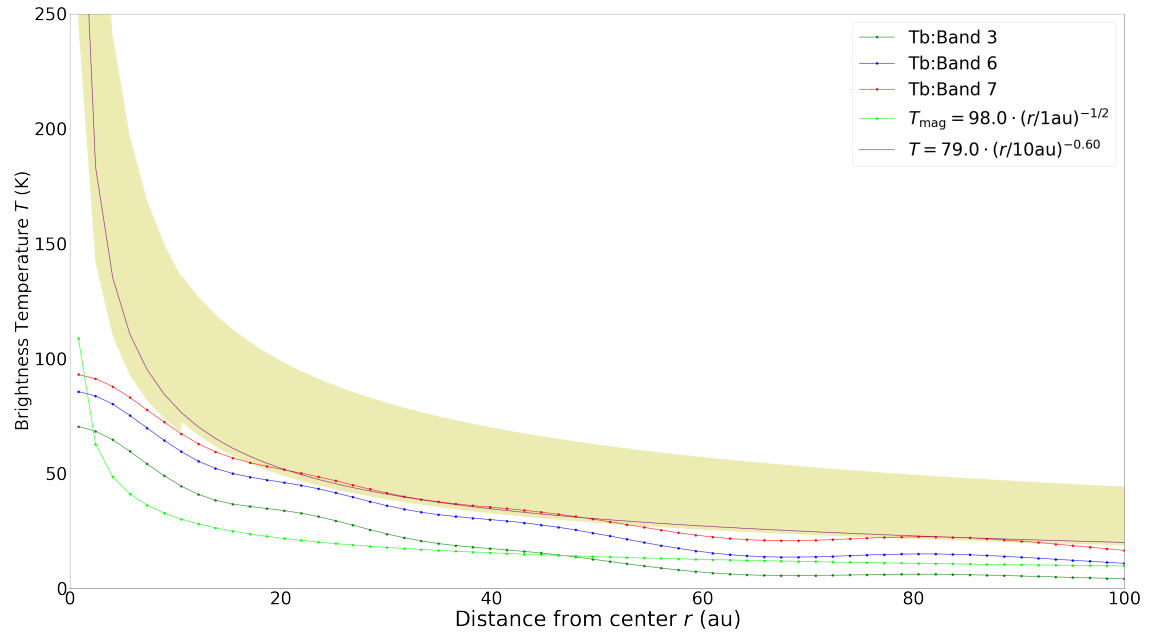


図 16: 見かけの等級から推定した温度 $T_{[mag]}$

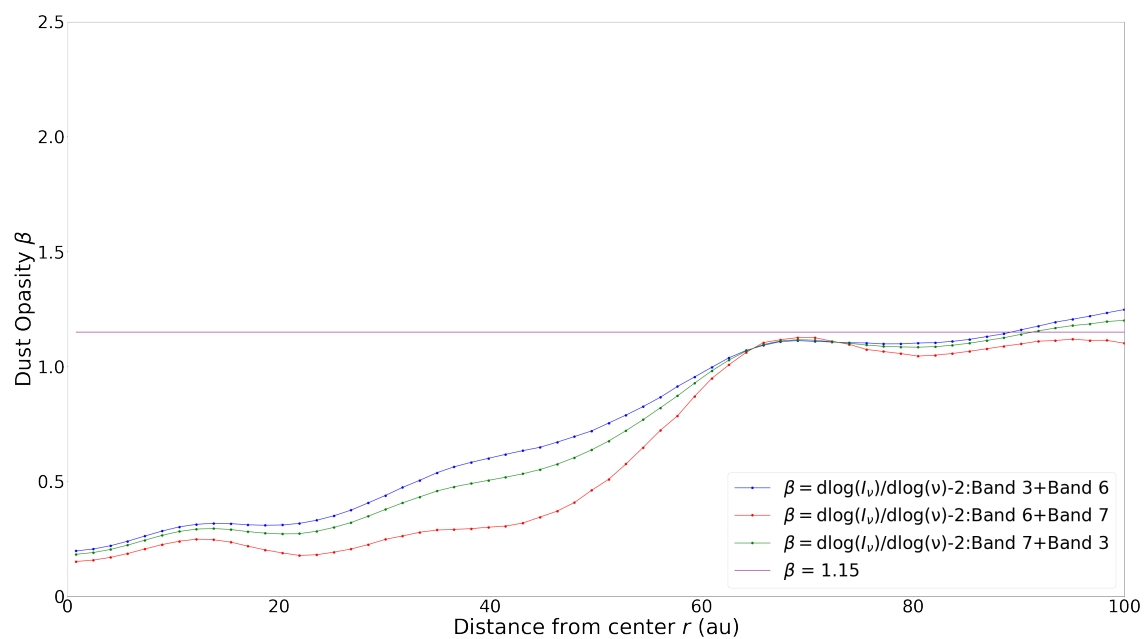


図 17: スペクトル指数 α から求めたダストオパシティ指数 β

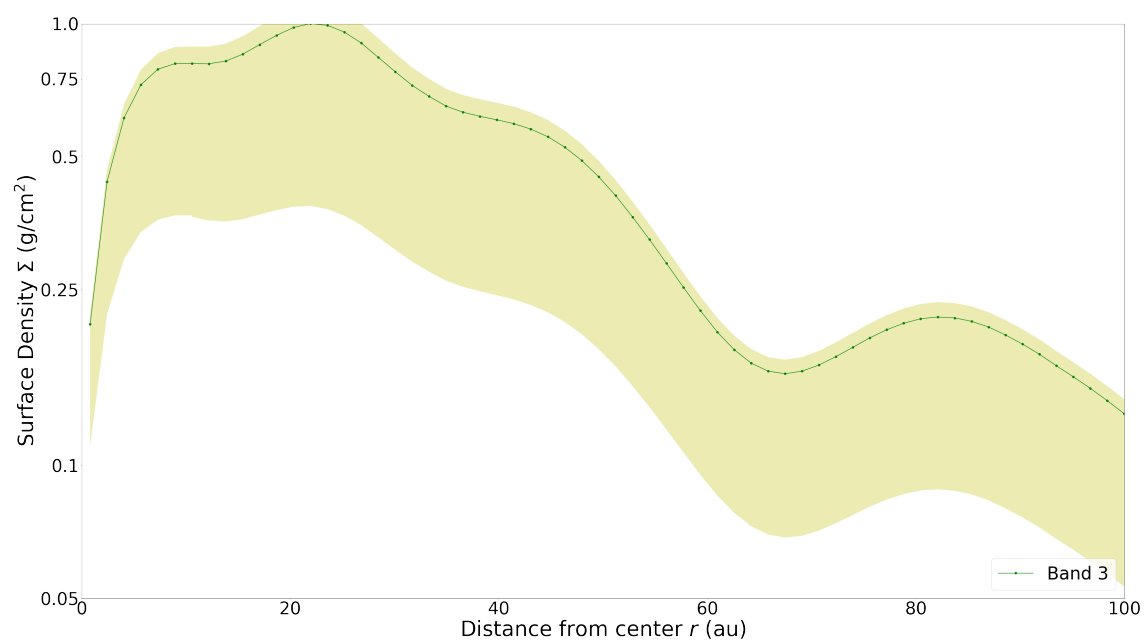


図 18: ダストオパシティ指数 β を固定した時の面密度 Σ

6 まとめ

円盤の物理量を求めるためには、観測波長による光学的厚みの影響が大きな要因になる。本研究では、Band 3 のデータを使用することで、先行研究で推定されている物理量の範囲に即した分布を定量的に一意に推定することができた。しかし、計算で得られた物理量、特に面密度の分布は標準的な円盤のモデルと一致するような結果ではなかった。今後の展望としては VLA を用いたより長波長のデータを用いた解析が望まれる。

また現在、次世代大型ミリ波センチ波干渉計 ngVLA (next generation Very Large Array) の計画立案が進められており、2024 年建設開始、2034 年に建設完了を目指した検討が進められている。こちらは観測波長域を約 3 mm–20 cm に設定しており、現在稼働している VLA の約 10 倍の感度と解像度が実現すると言われている。このような高解像度イメージを利用し、原始惑星系円盤の研究が格段に発展し、太陽系の形成過程が解明されることに期待する。

謝辞

最後に本研究にあたり終始適切な助言を賜り、熱心なご指導をいただいた百瀬宗武教授、ゼミ等でより深い知識を提供して下さった米倉覚則教授にこの場を借りてお礼申し上げます。また研究室の皆様、特に折原龍太氏には研究の知見のみならず、解析技法や技術に関し多大な助力をいただいたことに、感謝を述べたいと思います。皆様、本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] The ALMA Partnership et al. 2015 ,ApJL, 808, L3
- [2] Condon & Ransom, 2016, Essential Radio Astronomy (Princeton University Press)
- [3] Beckwith et al. 1990, AJ, 99, 924
- [4] Carlos Carrasco Gonzalez et al. 2016, ApJL, 821,L16

付録 A imsmooth

イメージのビームサイズを変更する CASA のタスク

imagename に変更するファイル名、targetres は True、major,minor,pa はそれぞれビームの長軸、短軸、ポジションアングル、outfile には保存したいファイル名を挿入

```
# imsmooth :: Smooth an image or portion of an image
imagename      = ''          # Name of the input image. Must be
                              # specified.
kernel         = 'gauss'     # Type of kernel to use. Acceptable
                              # values are "b", "box", or "boxcar"
                              # for a boxcar kernel, "g", "gauss",
                              # or "gaussian" for a gaussian kernel,
                              # "c", "common", or "commonbeam" to
                              # use the common beam of an image with
                              # multiple beams as the gaussian to
                              # which to convolve all the planes,
                              # "i" or "image" to use an image as
                              # the kernel.
beam           = ''          # Alternate way of describing a
                              # Gaussian. If specified, must be a
                              # dictionary with keys "major",
                              # "minor", and "pa" (or
                              # "positionangle"). Do not specify
                              # beam if specifying major, minor, and
                              # pa.
targetres      = False       # If gaussian kernel, specified
                              # parameters are to be resolution of
                              # output image (True) or parameters of
                              # gaussian to convolve with input
                              # image (False).
major          = ''          # Major axis for the kernels. Standard
                              # quantity representation. Must be
                              # specified for kernel="boxcar".
minor          = ''          # Minor axis. Standard quantity
                              # representation. Must be specified
                              # for kernel="boxcar".
pa             = ''          # Position angle used only for gaussian
                              # kernel. Standard quantity
                              # representation.
region         = ''          # Region selection. Default is to use
                              # the full image.
box            = ''          # Rectangular region to select in
                              # direction plane. Default is to use
                              # the entire direction plane.
chans          = ''          # Channels to use. Default is to use
                              # all channels.
stokes         = ''          # Stokes planes to use. Default is to
                              # use all Stokes planes.
mask           = ''          # Mask to use. Default is none.
outfile        = ''          # Output image name. Must be specified.
overwrite      = False       # If true, overwrite (unprompted) pre-
                              # existing output file.
```

付録 B imregrid

イメージのピクセル数・ピクセルサイズを他のイメージのピクセル数・ピクセルサイズに合わせるための CASA のタスク

imagenamen に合わせるファイル名、template にピクセル数・ピクセルサイズを合わせたい元のファイル名、output に保存したいファイル名を挿入

```
# imregrid :: regrid an image onto a template image
imagenamen = '' # Name of the source image
template = 'get' # A dictionary, refcode, or name of an
                  # image that provides the output shape
                  # and coordinate system
output = '' # Name for the regridded image
asvelocity = True # Regrid spectral axis in velocity
                  # space rather than frequency space?
axes = [-1] # The pixel axes to regrid. -1 => all.
interpolation = 'linear' # The interpolation method. One of
                           # "nearest", "linear", "cubic".
decimate = 10 # Decimation factor for coordinate grid
               # computation
replicate = False # Replicate image rather than regrid?
overwrite = False # Overwrite (unprompted) pre-existing
                   # output file?
```

付録 C exportfits

イメージを fits 形式に書き換える CASA のタスク

imagename にファイル名、fitsimage に書き換えた後のファイル名を挿入

```
# exportfits :: Convert a CASA image to a FITS file
imagename      =      ''      # Name of input CASA image
fitsimage      =      ''      # Name of output image FITS file
velocity       =      False   # Use velocity (rather than frequency)
                                # as spectral axis
optical        =      False   # Use the optical (rather than radio)
                                # velocity convention
bitpix         =      -32     # Bits per pixel
minpix         =      0       # Minimum pixel value (if minpix >
                                # maxpix, value is automatically
                                # determined)
maxpix         =      -1      # Maximum pixel value (if minpix >
                                # maxpix, value is automatically
                                # determined)
overwrite      =      False   # Overwrite output file if it exists?
dropstokes     =      False   # Drop the Stokes axis?
stokeslast     =      True    # Put Stokes axis last in header?
history        =      True    # Write history to the FITS image?
dropdeg        =      False   # Drop all degenerate axes (e.g. Stokes
                                # and/or Frequency)?
```