

卒業論文

「THE 2014 ALMA LONG BASELINE CAMPAIGN の
データを用いた HL Tau 原始惑星系円盤の解析」

2018 年度
(平成 30 年度)

茨城大学理学部理学科物理学コース
電波天文観測研究室

15s2020x
佐藤景亮

概要

星形成に伴い現れる原始惑星系円盤は、惑星系の母胎であると考えられている。しかし、その円盤からどのように惑星が誕生するかは未だ解明されていない。そこで本研究では、HL Tau に付随する原始惑星系円盤の内側と外側の性質の違いに着目し、直感的に理解しやすい物理量である面密度を求めることで、惑星形成の現場を探った。その際、問題となるのが光学的厚みであるが、ALMA による多波長の観測データを使って解析を行うことで、その問題をおおよそ克服し、円盤内側ほど面密度が高いという結果が得られた。

目次

1	研究の背景・目的	2
2	解析データ	3
3	解析方法（方針）	4
4	結果	4
4.1	Band7+Band6	5
4.2	Band7+Band6+Band3	8
4.3	Band7+Band6+Band3 using Python	12
5	考察	16
5.1	惑星形成の可能性	16
5.2	円盤のモデル化	17
6	まとめ	17
7	謝辞	18
8	参考文献	18
付録 A	imsmooth	19
付録 B	imsubimage	20
付録 C	imregrid	21
付録 D	immath	22

1 研究の背景・目的

原始惑星系円盤とは、星形成の過程で生じる原始星周りの円盤であり、惑星系の母胎であると考えられている。今回の研究対象である HL Tau は、地球から約 140pc の距離にある牡牛座内の若い星で、まさに原始惑星系円盤を有していると考えられており、惑星形成の初期段階における研究価値は大いにある。

ALMA(Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) は、チリのアタカマ砂漠に建設された電波干渉計であり、ミリ波・サブミリ波領域では世界最大の基線長を誇り、分解能・感度ともに世界一となる。その ALMA の高い空間分解能による多波長観測で HL Tau に付随する円盤の詳細な構造が明らかとなった(図 1)。The ALMA Partnership et al. (2015) の論文によると、その円盤で見られるギャップ構造は偶然できたものではなく、惑星形成の過程で生じたものであると考えられている。

これを踏まえ本研究では、円盤中心からの距離に依存したより詳細な物理量を求めることで、円盤全体の構造を探ることを目的とした。

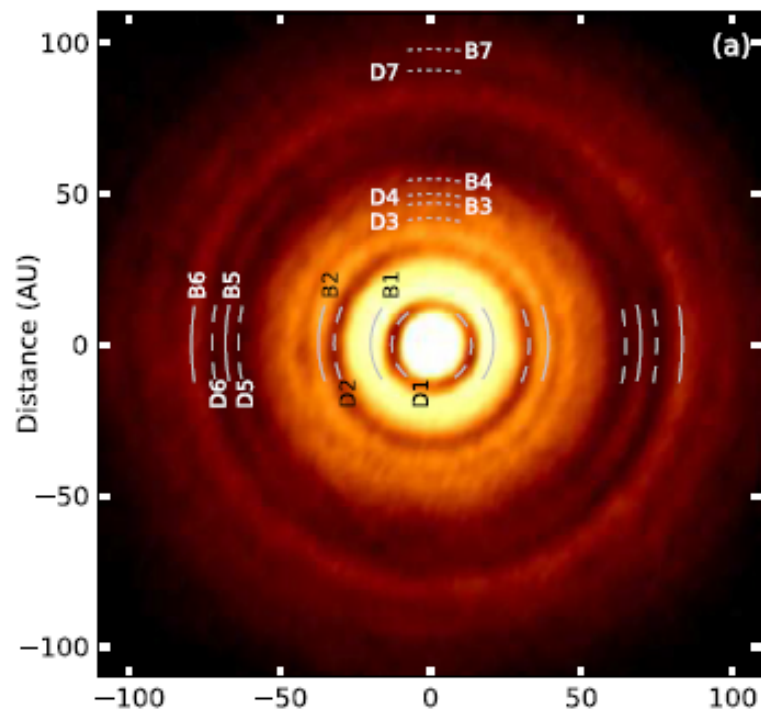


図 1 The ALMA Partnership et al. 2015 での解析により得られた HL Tau の P.A. と inclination から調整した face-on で見た場合に想定される 1.0mm(Band7+Band6) イメージ。Dark リングと Bright リングが交互に現れるギャップ構造が確認できる。

2 解析データ

今回の解析で用いるデータは、2014 年 10 月 14 日から 2014 年 11 月 14 日に行われた基線長範囲 15m-15.2km の ALMA による HL Tau のダスト連続波イメージである (図 2)。カラーバーは中心星により温められたダストが放った熱放射の放射強度 (インテンシティ) を示している。観測波長は 2.9mm(Band3), 1.3mm(Band6), 0.87mm(Band7) で、ビームサイズはそれぞれ 85.3×61.1 milli-arcsecond(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、Band7 のビームサイズが最も小さく鮮明なイメージになっている。イメージの出力には CASA(Common Astronomy Software Applications) を用いた。

より詳細な各 Band の連続波パラメータを図 3 に示す。また The ALMA Partnership et al. (2015) の結果を用いて、HL Tau に対し P.A.= 138° , inclination= 46.72° を仮定し、円盤に交互に現れている 7 対の Dark リング、Bright リングを順に D1,B1,...D7,B7 と呼ぶこととする。

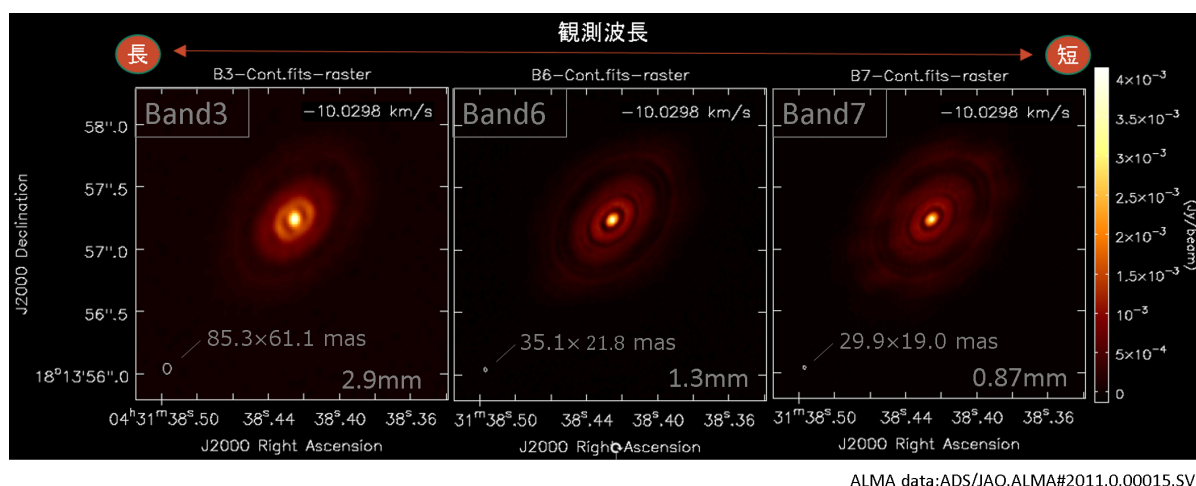


図 2 ALMA による 2014 年の Long Baseline Campaign で得られた HL Tau の 3Band 連続波イメージ

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
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

図 3 測定された連続波パラメータ (The ALMA Partnership et al. 2015 より抜粋)

3 解析方法（方針）

以下の3つの式を使って、各 Band のインテンシティから物理量（主に円盤中心からの位置 r の温度 T , 面密度 Σ ）を求める。

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

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

$$\kappa(\nu, r) = \kappa_0 \left(\frac{\nu}{\nu_0} \right)^\beta \quad (3)$$

ここで、 I_ν [Jy/beam] は放射強度、 τ は光学的厚み、 κ [cm²/g] はダストの mass opacity、 Σ [g/cm²] はダストの面密度、 β はダストオパシティ指数である。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、式 (2) はダストの光学的厚み、式 (3) は式 (2) を解くための仮定で、円盤の基準となっている Beckwith et al. (1990) の結果を用いた。具体的には、 $\kappa_0 = 10$ [cm²/g]、 $\nu_0 = 10^{12}$ [Hz] として計算する。

簡略化のため、位置 r に応じた放射が光学的に厚い ($\tau \gg 1$) 場合と光学的に薄い ($\tau \ll 1$) 場合に分けて考える。まず $\tau \gg 1$ のときを考えると、式 (1) は $I_\nu \approx B_\nu$ となり、放射は黒体放射と見なせるので輝度温度 T_b は実際の物理的な温度 T を与えると考えられる。しかし、 τ の情報は失われてしまうので面密度 Σ を求めることは厳しい。一方、 $\tau \ll 1$ のとき、式 (1) は $I_\nu \approx \tau B_\nu$ となり、輝度温度 T_b は物理的な温度 T より低く見積もられるが、 $\tau \gg 1$ の結果から T を仮定すれば、 τ から面密度 Σ を求めることができる。

これらをまとめると、以下の表のようになる。

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

この方針に従って解析を進める。

4 結果

2 節で示したイメージと 3 節で示した式を使って最終的に円盤の面密度 Σ を求めたが、試行錯誤しながら得た結果を、方法とともに説明する。また P.A.=138° 上の各 Dark リング、Bright リングの中心からの位置 r は、CASA を使って最も鮮明なイメージである Band7 から読み取った、

中心とその位置が張る角度より、HL Tau が地球から 140pc にあるとして求めた。その結果を表 1 に示す。またこの位置を各リングの位置としてこれ以降用いることとする。

リング名	D1	B1	D2	B2	D3	B3	D4	B4	D5	B5	D6	B6	D7	B7
位置 r(AU)	11.40	20.61	30.10	35.25	40.35	44.41	49.11	52.44	60.17	66.70	72.52	81.00	89.04	93.52

表 1 各リングの位置

4.1 Band7+Band6

まず初めに、ビームサイズが小さくギャップ構造がはっきりと見えている Band7 と Band6 のデータを使って、リング間の性質の違いを見つつ、円盤全体の性質を調べることが目標に解析した。イメージ上のインテンシティはその各ビームサイズで平均されてしまうので、Band7 と Band6 のデータを比較したり組み合わせたりする際、同じ条件にするには Band7 のビームサイズを Band6 のビームサイズに合わせる必要がある。その作業は CASA の task-imsmooth で実行した。詳しくは付録 A にまとめた。

得られた Band7 のイメージ (ビームサイズを Band6 に合わせたもの) と Band6 のイメージのインテンシティを以下の通り求めた。最初は傾向を掴むため CASA 上で表示された値を読み取った。読み取る値は表 1 で定めた各リングと中心の位置のもの (結果の図中の点が中心,D1,B1,...D7,B7 を示す) で、結果は図 4 である。図 4 を見ると、観測波長が短い (周波数が高い) と放射が強いこと、Dark リングでは放射が弱く、Bright リングでは放射が強いことがわかった。また全体的な特徴として円盤内側の放射がより強いことも読み取れた。これは放射が中心星により温められたダストの温度に特徴づけられる熱放射であり、当然内側のダストの方がより温められやすいことが原因であると考えられる。また観測量 (周波数、インテンシティ) のみから求められるスペクトル指数 ($\alpha \equiv \pm \frac{d \log I}{d \log \nu}$) のグラフについては図 5 に示す。Dark リングで極大、Bright リングで極小になっていることがわかる。またスペクトル指数 α は ~ 2 で光学的に厚いこと (黒体放射) を示す指標となる。

次に $T_b = \frac{c^2}{2k_B \nu^2} I_\nu$ より輝度温度を求めると、図 6 のようになった。Men'shchikov et al.(1999) によると、円盤の温度は r^{-q} ($q = 0.5 - 0.6$) というべき乗則で考えられる。より光学的に厚いと考えられる Band7、かつ Band6 でさえ厚い位置 (B1,B2,B3) を基準にべき乗則を適用すると $T_b \propto r^{-0.589}$ となる。この輝度温度 T_b を円盤の温度 T として仮定し、他の物理量を求めていった。

先ほど仮定した T を使って $I_\nu = B_\nu(1 - e^{-\tau})$ より光学的厚み τ を求めると、図 7 のようになった。注意として、光学的に厚く、解が求まらなかった Band7, Band6 の中心と Band7 の B1 リングについては光学的に厚いことを考慮して 5、Band6 の B1 リングはそれより小さい 4、Band7 の B6 リングについては輝度温度を見ると光学的に厚いが、スペクトル指数を見ると厚くはなく値を見積もることができなかったため、とりあえず 1.5 と仮定した。この光学的厚み τ の結果を見ると、B3 リングを除く全てのリングで Band7 の方が光学的に厚いことがわかり、かつ大まかに

Dark リングより Bright リングの方が光学的に厚いことも読み取れる。また全体として光学的に薄い ($\tau < 1$) 位置は少なく、当初の方針から面密度 Σ を求めることは難しいことがわかった。そこで Band3 の結果も取り入れた検討を行った。

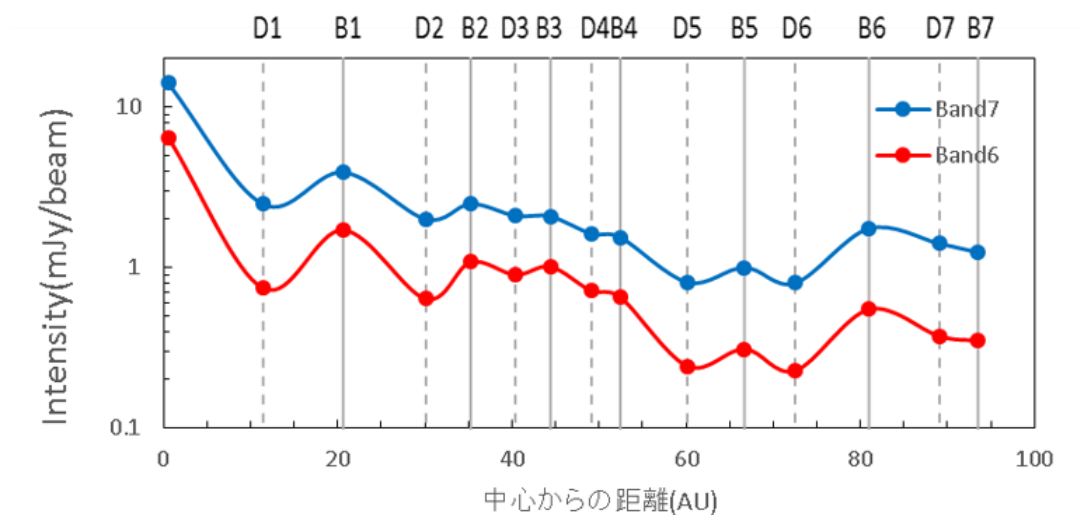


図 4 Band7,Band6 Intensity

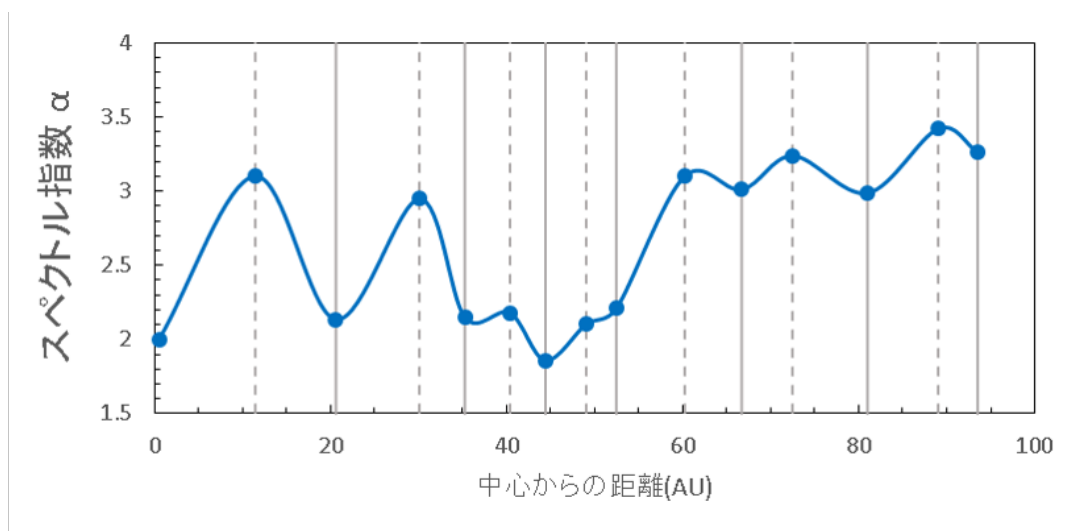


図 5 Band7-Band6 Spectral Index α

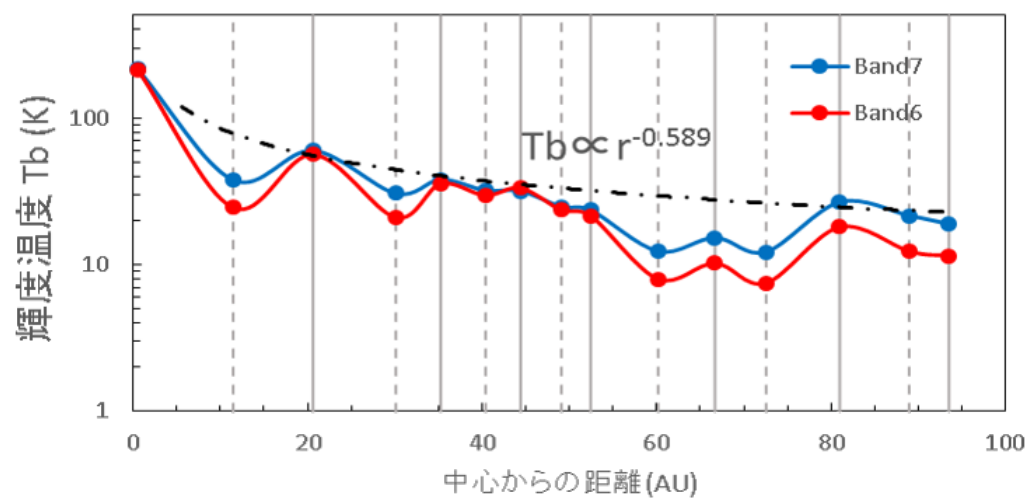


図 6 Band7,Band6 Brightness Temperature T_b

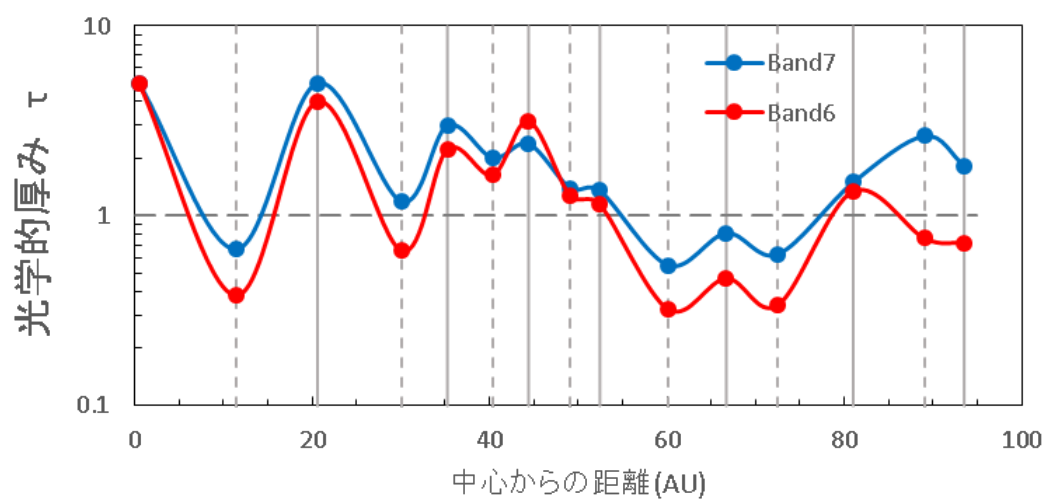


図 7 Band7,Band6 Optical Thickness τ

4.2 Band7+Band6+Band3

4.1 節の結果を踏まえ、より光学的に薄いと予測される Band3 のデータも取り入れた解析を行った。その際、ビームサイズを全て Band3 に合わせる必要がある（方法は付録 A を参照）ので、細かいリング間の性質の違いは見られないと予測されたが、今回は円盤全体の構造を調べることにのみ焦点を置いた。また前節同様、初めは傾向を掴むため CASA 上で表示された各リングにおけるインテンシティを読み取った。結果は図 8 である。図 8 を見ると、前節に比べ、やはりリング間の差はほとんど見えなくなっているが、全 Band において中心に近いほど放射が強いことは読み取れる。また Band7-Band6, Band6-Band3 のスペクトル指数 α のグラフを図 9 に示す。図 9 より、Band7 より Band3 の方が光学的に薄いことは明らかで、さらに $r < 30\text{au}$ では Dark リングと Bright リングの光学的厚みの違いも見取れる。

光学的に薄いレイリーゼーンズ領域では $\beta = \alpha - 2$ より、ダストオパシティ指数 β を求めることができる。この関係式は輻射輸送方程式から確かめられる。また比較的光学的に薄い Band6-Band3 のスペクトル指数 α の結果を用い、Band6, Band3 の周波数と仮定する温度ではレイリーゼーンズ近似は成り立つことを利用した。結果は図 10 である。この β についての詳しい議論は次節で行う。

前節同様 $T_b = \frac{c^2}{2k_B\nu^2} I_\nu$ より輝度温度を求めると、図 11 のようになった。今回も円盤の温度をべき乗則で仮定すると $T_b \propto r^{-0.591}$ となり、これを円盤の温度とした。

仮定した T を使って、 $I_\nu = B_\nu(1 - e^{-\tau})$ より光学的厚み τ を求めると、図 12 のようになった。注意として、Band7 の B1 リングの値は 5 で B6 リングの値は 1.5、Band6 の B1 リングの値は 4 とした。このグラフを見ると、Band7, Band6 ではほぼ全てのリングにおいて光学的に厚く、Band3 では内側のリング ($r < 30\text{au}$) を除いて光学的に薄いことがわかる。よって Band3 から面密度 Σ を求める。

$\tau = \frac{\kappa \Sigma}{\cos i}$ より、Band3 の τ を用いて面密度 Σ を求めた。ここで、 β の値は $r > 30\text{au}$ の平均である $\beta \sim 1.18$ を用いた。この理由についても次節で詳しく説明する。結果は図 13 である。先ほども述べたように、Band3 のデータであっても $r < 30\text{au}$ においては $\tau > 1$ となる部分もあるため信頼性に欠けるが、内側ほど高い面密度であるという全体の傾向は捉えることができた。

まとめると、光学的に厚い Band7 から円盤の温度を推定し、光学的に薄い Band3 から面密度を求めるという手順になった。しかし、このままではデータ点が少なく不十分であるため、次はプログラミングを使ったより正確な分布の導出を目標とし、さらなる議論の発展を考えた。

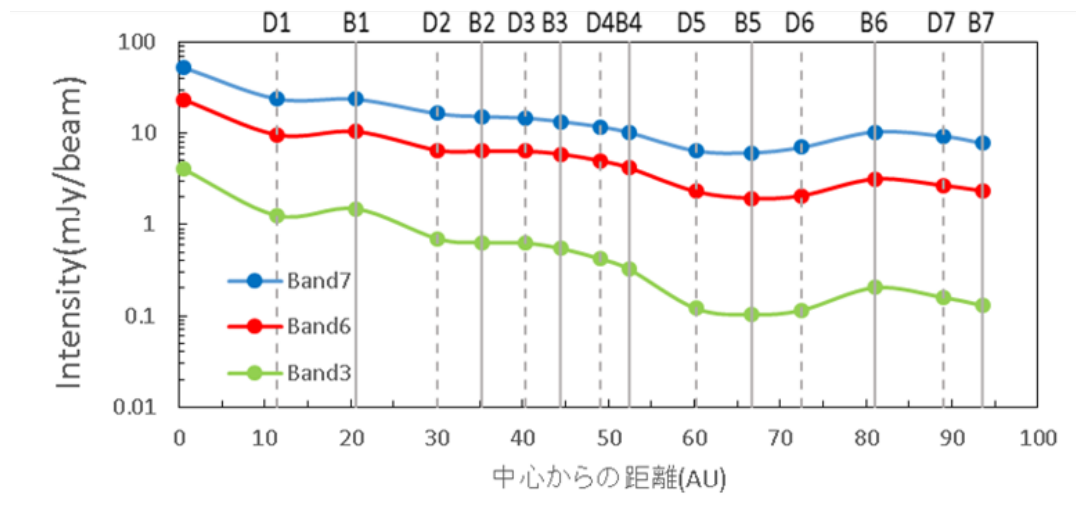


図8 Band7,Band6,Band3 Intensity

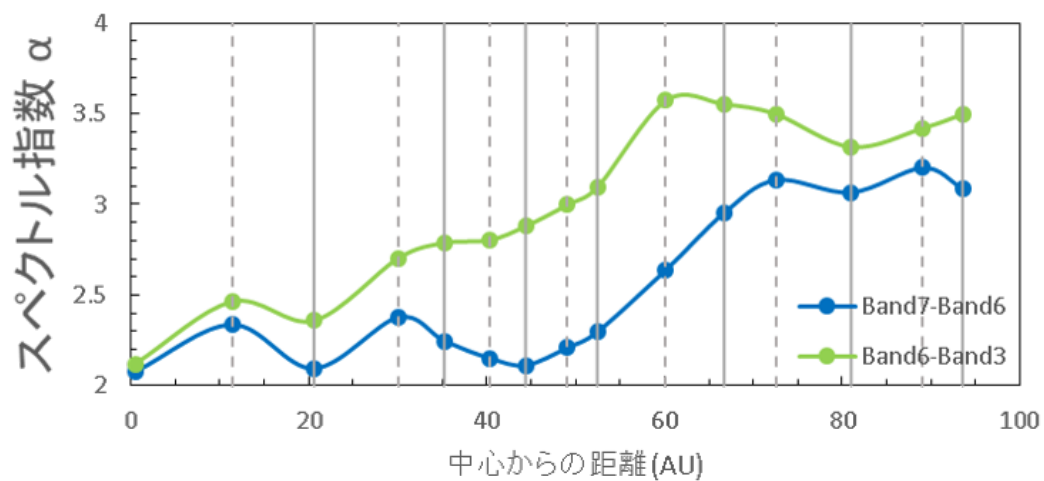


図9 Band7-Band6,Band6-Band3 Spectral Index α

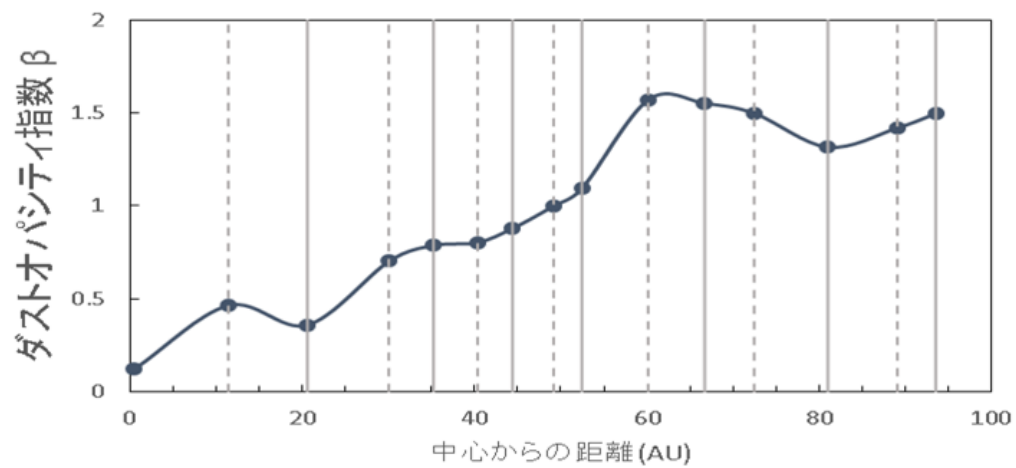


図 10 Band6-Band3 Dust Opacity Spectral Index β

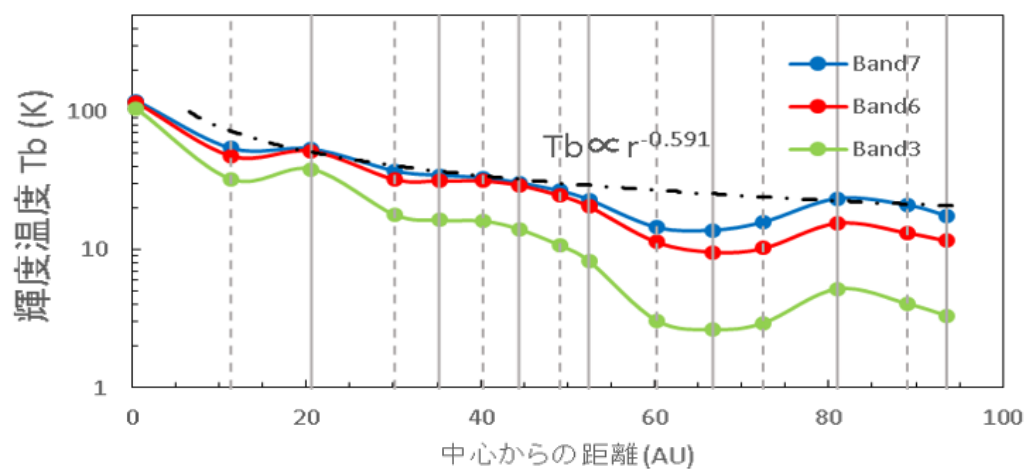


図 11 Band7,Band6,Band3 Brightness Temperature T_b

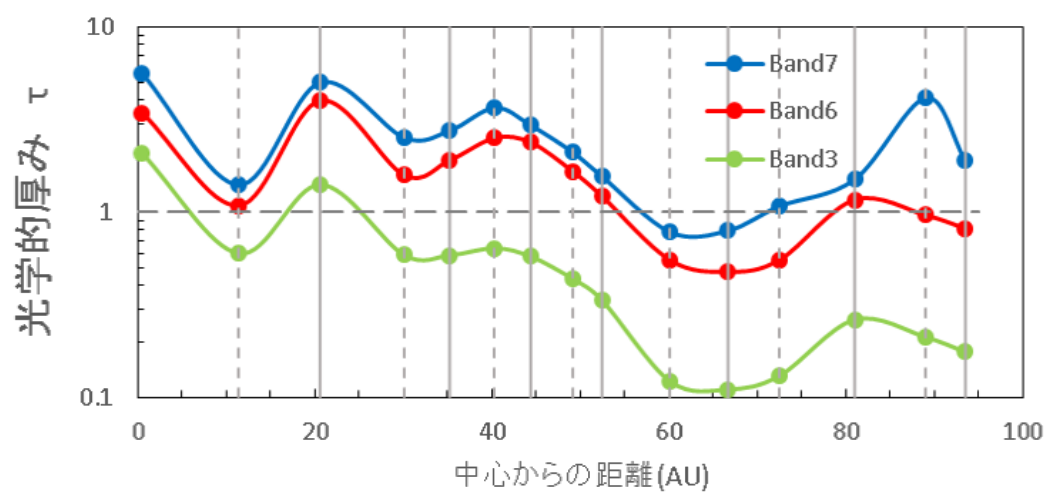


図 12 Band7,Band6,Band3 Optical Thickness τ

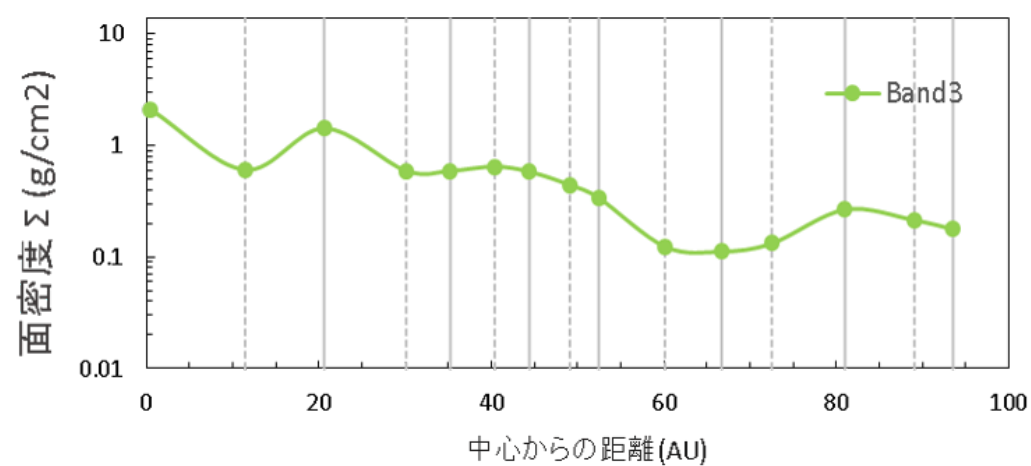


図 13 Band3 Column Density Σ

4.3 Band7+Band6+Band3 using Python

方針は定まったので、より正確な分布を得るためにプログラミングを活用した。言語は CASA と相性の良い Python を用いる。準備として、CASA のタスクを使って各イメージのデータを整理することから始めた。Band7, Band6, Band3 のビームサイズを統一したイメージについて、ピクセル数・ピクセルサイズが異なっていたのを合わせた。簡単に手順を説明すると、task-imsubimage を使って Band3 のピクセル数を天体が見える程度に減らし、task-imregrid を使ってそのピクセル数・ピクセルサイズに Band6, Band7 のピクセル数・ピクセルサイズを統一した。詳しくは付録 B, C に記した。出力された 3 つのイメージから、P.A.=138°上のインテンシティを抽出するためのソースコードの一例を最末尾に記した。こうして抽出したインテンシティを図 14 に示す。その他の物理量についての基本的な導出方法は 4.2 節と同じであるため省略し、特筆すべき点について議論する。

図 16 について、ダストオパシティ指数は $\beta = \alpha_{\text{Band6}-\text{Band3}} - 2$ より求めた。この関係式は光学的に薄い条件下で使えるが、図 18 の光学的厚み τ のグラフ（仮定した T を超える T_b を持つ点においては値が決まらないので、光学的に厚いことを考慮しつつグラフの概形を崩さないという条件を満たすように推定した。 Σ の計算には影響しない。）を見ると、 $r < 30\text{au}$ では Band6, Band3 のどちらも光学的に厚く信頼できないデータ、 $30\text{au} < r < 60\text{au}$ では Band3 は光学的に薄い Band6 で光学的に厚いため信頼性に欠けるデータ、 $r > 60\text{au}$ ではどちらの Band も光学的に薄い信頼性の高いデータとなっている。しかし、仮にこの β のグラフの内側ほど値が小さい傾向が正しいと考えると、 β (ダスト成長の傾き) は小さいほどダストが成長していることを示すため、円盤内側の方がサイズの大きいダストが多いことになる。これは成長したダストが受ける摩擦抵抗が大きくなり、角運動量を失って中心星に向かって落ちている証拠と解釈できる。

図 19 の面密度 Σ について、オレンジ線（幅は 1σ の揺らぎを表す）は VLA により観測された HL Tau の 7.0mm のイメージから、Carlos Carrasco-Gonzalez et al. (2016) によって $\beta \sim 1.2$ を仮定し、導出された面密度である。この結果と比較するため、本研究においても、信頼性に欠く部分を含むが Band3 において光学的に薄い $r > 30\text{au}$ の平均である $\beta \sim 1.26$ を仮定して面密度を求めた。7.0mm のデータは Band3(2.9mm) より光学的に薄いと考えられるため、より正確な面密度分布が得られると期待できる。その分布と解析結果は大まかに一致し、面密度は円盤内側の方が大きいことが確かめられた。

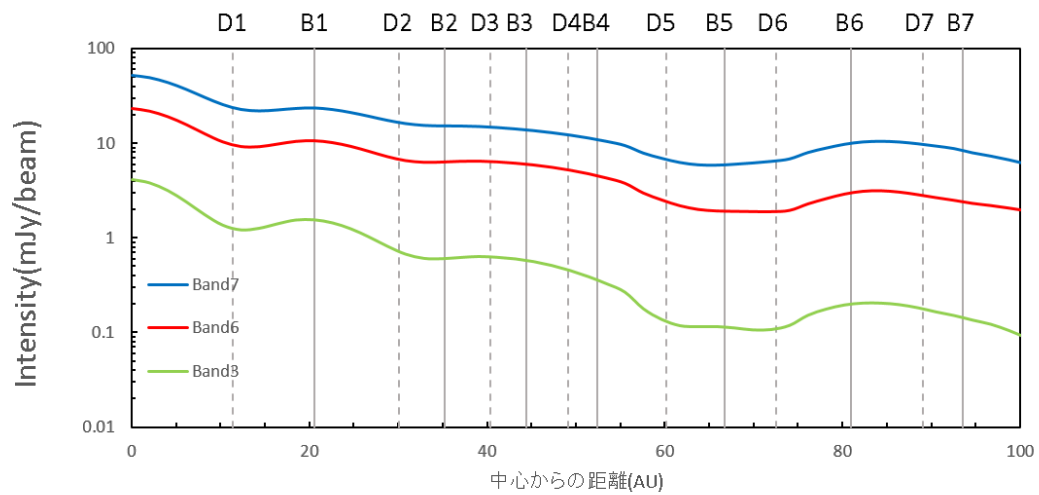


図 14 Band7,Band6,Band3 Intensity

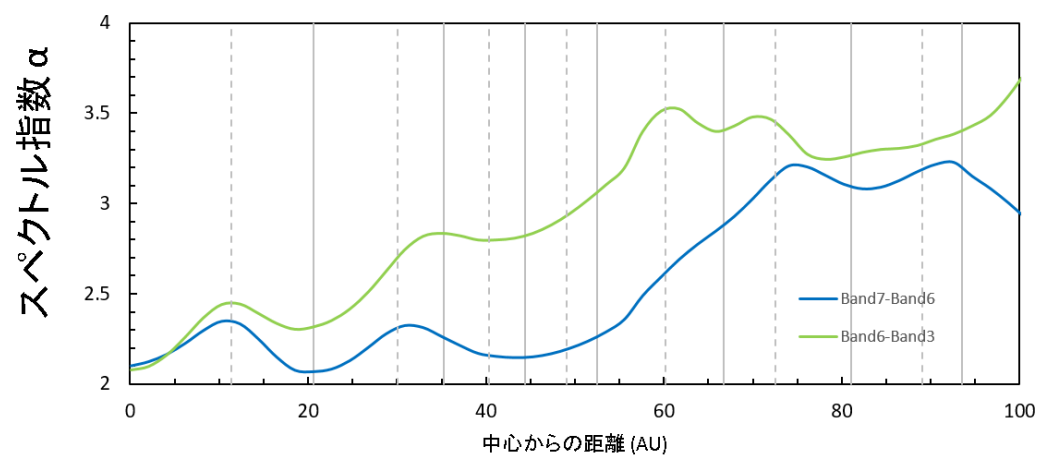


図 15 Band7-Band6,Band6-Band3 Spectrul Index α

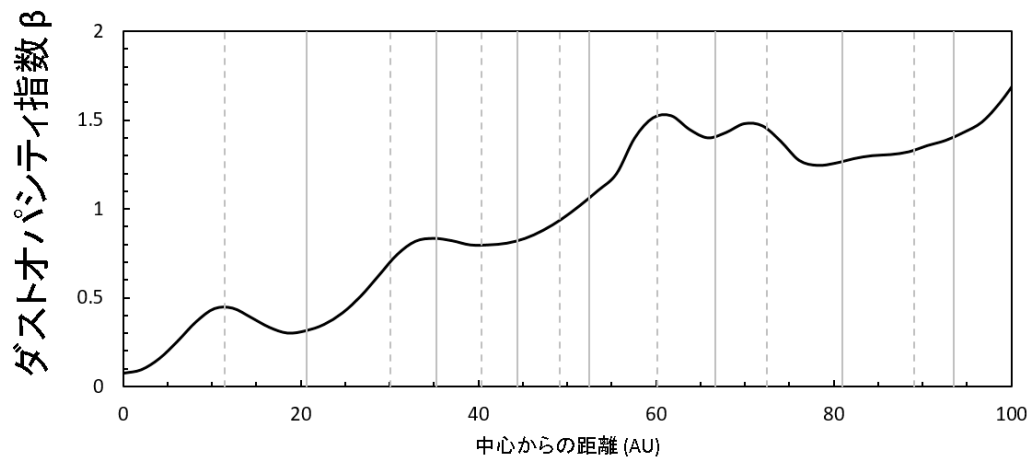


図 16 Band6-Band3 Dust Opacity Spectrul Index β

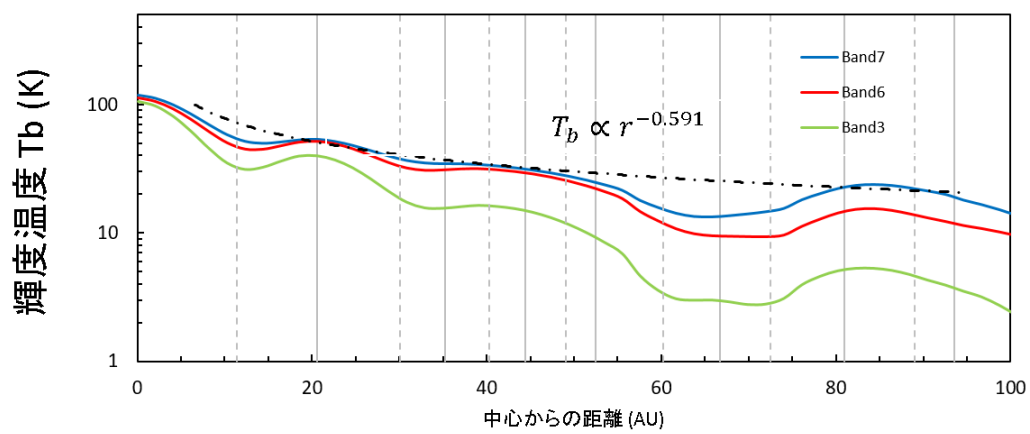


図 17 Band7,Band6,Band3 Brightness Temperature T_b

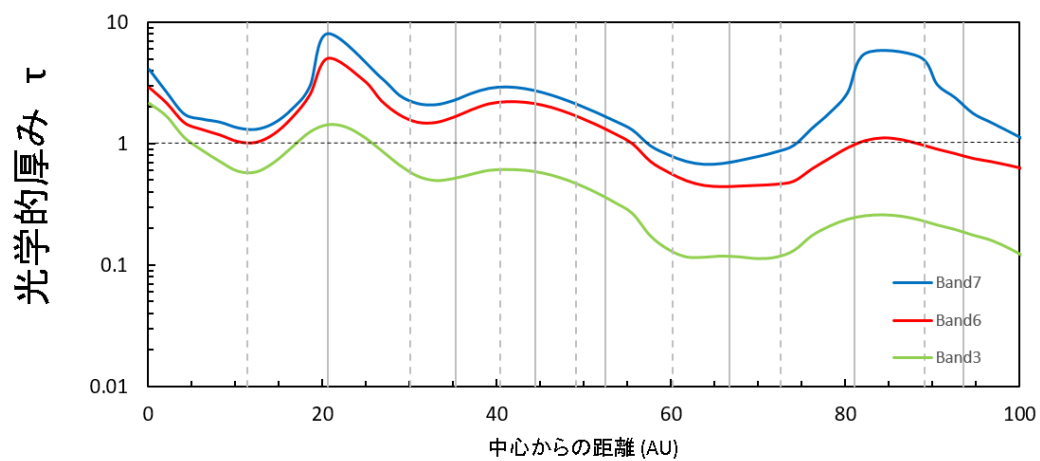


図 18 Band7,Band6,Band3 Optical Thickness τ

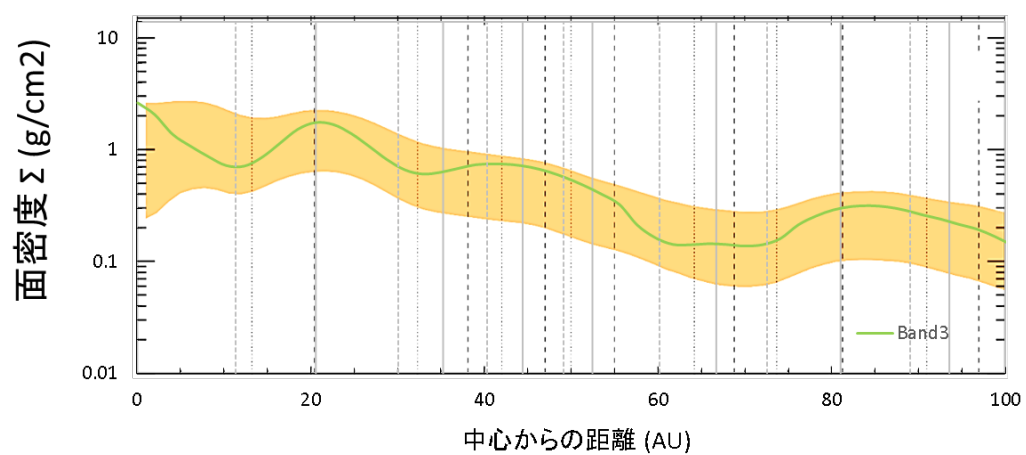


図 19 Band3 Column Density Σ

5 考察

5.1 惑星形成の可能性

図 20 に Band7-Band6, Band6-Band3 のスペクトル指数マップを示す。マップの作製方法は付録 D に記した。マスクのかけ方は https://casaguides.nrao.edu/index.php/Masking_images_for_analysis を参考にしたが、この方法はイメージが上書きされてしまうことと、一部間違いがあるため注意が必要であった。

Band7-Band6 のスペクトル指数マップを見ると、長軸上では全体的に $\alpha \sim 2$ で光学的に厚く、Band6-Band3 のスペクトル指数マップを見ると、内側ほど光学的に厚く外側ほど光学的に薄い点と、中心付近 ($r < 30\text{au}$) においては D1 リングと B1 リングの他のリング対では見られない光学的厚みの違いとが確認できた。これらは図 18 の光学的厚みの結果とも一致しており、図 19 の円盤内側ほど面密度が高いという結果も考慮すると、内側ほど惑星を形成する材料が多く、D1 リングでは既に惑星が形成されている可能性もある。しかし、今回の解析結果だけではリングのギャップ構造が惑星に由来するものであるという証拠はなく、定量的に惑星形成の可能性について議論するためには、リングに焦点を当てた解析結果と組み合わせた各リングの幾何学的特徴や質量の見積もりが必要になると考える。

一方、Carlos Carrasco-Gonzalez et al. (2016) では、円盤内側の重力的不安定な Bright リングにクランプが形成され、そこに周り的高密度部分から質量が降着し、急速に成長する惑星形成の初期段階と捉えている。この仮説では、ギャップは惑星形成に起因するという考え方は否定される。様々な可能性を視野に入れた研究が今後必要である。

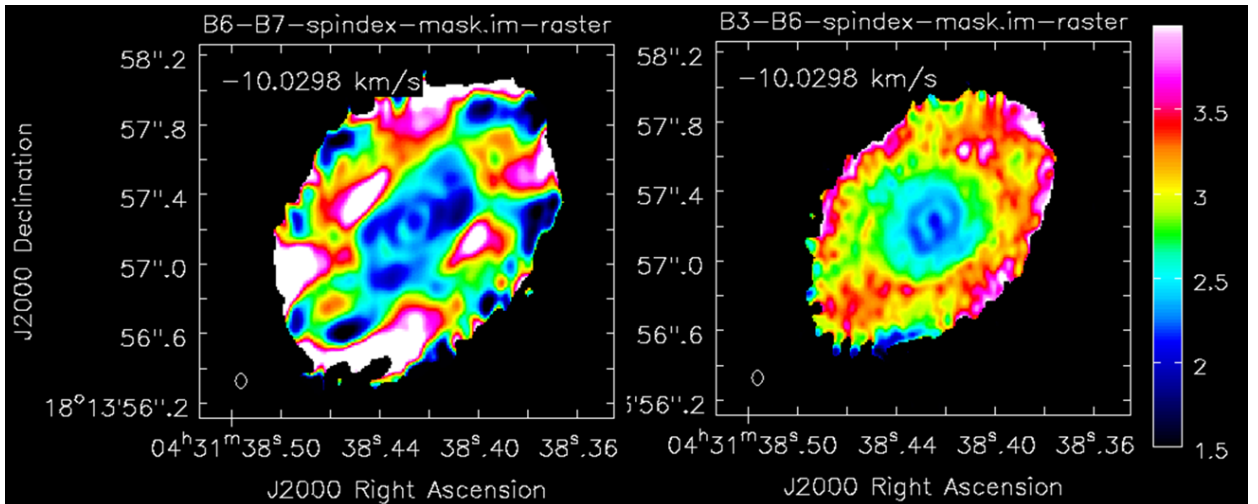


図 20 左:Band7-6 右:Band6-3 スペクトル指数マップ

5.2 円盤のモデル化

図 19 の面密度 Σ の結果は、Carlos Carrasco-Gonzalez et al. (2016) の結果と比較するため、 β つまりダストの成長率を円盤で一様と仮定して導出したものであるが、実際には円盤の位置に依存した β は、図 16 よりわかっているため、 β が変動する場合の面密度 Σ を求めることも可能である。その結果を図 21 中の黒線で示した。この結果を素直に受け入れると円盤外側ほど高密度になり、中心星へと周囲から質量が降着するような円盤モデルとは合致しない。この解釈・問題点としては、やはり β の信頼性が挙げられる。 β に関しては、4.3 節でも説明したように $r < 60\text{au}$ において信頼性に欠けるデータであり、その改善策として $\beta = \alpha - 2$ の見直し、もしくはより長い波長の観測結果を採用することを提案する。それでも円盤外側ほど高い面密度である結果が得られた場合には、HL Tau に対する輝度温度や面密度のモデルの再定義が必要になると考える。

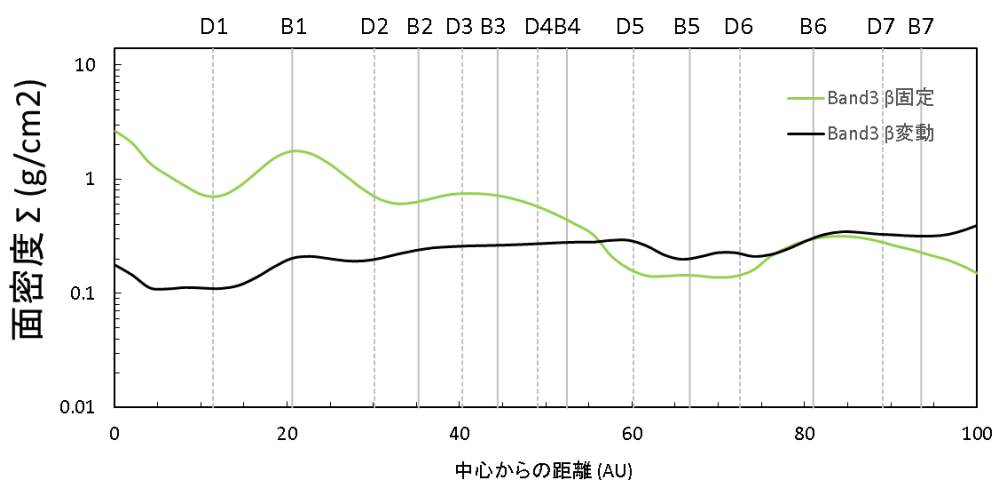


図 21 Band3 Column Density Σ (β 変動)

6 まとめ

円盤の諸量を求める際には、観測波長による光学的厚みの影響を十分考慮しなければならず、本研究の場合は Band3 のデータを取り入れることで、内側ほど面密度が高いという暫定的な分布を導出することができた。しかし、依然として光学的に厚く不明瞭な部分もあり、慎重に議論する必要がある。今後の展望として VLA による 7.0mm のデータも使った解析が必須となる。

また観測波長の長いデータを扱う分、ビームサイズは大きく個々のリングの情報はほぼ見えなくなった。リング由来の惑星形成の可能性を議論するためには、ビームサイズの小さいデータ（この場合 Band7 と Band6）を用いた解析結果と組み合わせることができる、より長波長の高解像度イメージが必要である。原始惑星系円盤の研究がさらに進み、太陽系の起源が解明されることを期待

する。

7 謝辞

最後に、進度に沿った適切でわかりやすい指導をしてくださった指導教官の百瀬宗武教授に深く感謝いたします。また、米倉覚則教授にはゼミ等で活発な議論の場を提供してくださいました。さらに、研究員の Soon Kang Lou 氏には様々な問題提起とその解決策をくださり、一層理解が深まりました。研究室の皆様にも大変研究しやすい環境を提供していただき、この場を借りてお礼申し上げます。

8 参考文献

James J. Condon & Scott M. Ransom, 「Essential Radio Astronomy」
The ALMA Partnership et al. 2015 ApJL 808, L3
Beckwith et al. 1990 AJ 99, 924
Men' shchikov et al. 1999 ApJ 519, 257
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 には変更するファイル名、ビームサイズを変えるため targetres は True、major, minor, pa にはそれぞれビームの長軸, 短軸, position angle、outfile には保存したいファイル名をそれぞれ挿入する。

```
# imsmooth :: Smooth an image or portion of an image
imagename      = 'B7-Cont.fits'      # 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      = True                # If gaussian kernel, specified
                                      # parameters are to be resolution of
                                      # output image (True) or parameters of
                                      # gaussian to convolve with input
                                      # image (False).
major          = '0.0351arcsec'      # Major axis for the kernels. Standard
                                      # quantity representation. Must be
                                      # specified for kernel="boxcar".
minor          = '0.0218arcsec'      # Minor axis. Standard quantity
                                      # representation. Must be specified
                                      # for kernel="boxcar".
pa             = '11deg'             # 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        = 'B7-imB6.im'        # Output image name. Must be specified.
overwrite      = False               # If true, overwrite (unprompted) pre-
                                      # existing output file.
```

付録 B imsubimage

イメージのピクセル数を変更する CASA のタスク

imagename には変更するファイル名、outfile には保存したいファイル名、上書き保存する場合は overwrite を True、box には縮小範囲の左下と右上の座標、dropdeg には座標以外の情報（周波数、ストークス）を落とすかどうかをそれぞれ挿入する。

```
# imsubimage :: Create a (sub)image from a region of the image
imagename      = 'B3-Cont/'          # Input image name. Default is unset.
outfile        = 'B3-Cont-imsub'     # Output image name. Default is unset.
overwrite      = True                # Overwrite (unprompted) pre-existing
                                     # output file?

box            = '3600,3600,4400,4400' # Rectangular region to select in
                                     # direction plane. Default is to use
                                     # the entire direction plane.
region        = ''                  # Region selection. Default is to use
                                     # the full image.
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.
dropdeg       = False               # Drop degenerate axes
verbose       = True                # Post additional informative messages
                                     # to the logger
```

付録 C imregrid

ある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 CASA のタスク

imagename には変更するファイル名、template にはピクセル数・ピクセルサイズを合わせる元となるファイル名、output には保存したいファイル名をそれぞれ挿入する。

```
# imregrid :: regrid an image onto a template image
imagename      = 'B7-imB3'          # Name of the source image
template       = 'B3-Cont-imsub/'   # A dictionary, refcode, or name of an
                                     # image that provides the output shape
                                     # and coordinate system
shape          = [-1]               # Shape of the output image. Only used
                                     # if template is an image. If not
                                     # specified (-1), the output image
                                     # shape will be the same as the
                                     # template image shape along the axes
                                     # that are regridded and the same as
                                     # input image shape along the axes
                                     # which are not regridded.

output         = 'B7-imB3-imreg'     # 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 D immath

スペクトル指数マップを作製する CASA のタスク

imagename にはピクセルサイズ等を合わせたイメージの 2 つのファイル名、mode には spix、outfile には保存したいファイル名をそれぞれ挿入する。

```
# immath :: Perform math operations on images
imagename      = ['B6-imB3-imreg-copy2', 'B7-imB3-imreg-copy'] # a list of
                                                         # input images
                                                         # mode for math operation (evalexpr,
                                                         # spix, pola, poli)
outfile        = 'B6-B7-spindex-3sigma-mask.im' # File where the output is
                                                         # saved
                                                         # Mask to use. Default is none.
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.
imagemd        = '' # An image name from which metadata
                                                         # should be copied. The input can be
                                                         # either an image listed under
                                                         # imagename or any other image on
                                                         # disk. Leaving this parameter unset
                                                         # may copy header metadata from any of
                                                         # the input images, which one is not
                                                         # guaranteed.
```

—— インテンシティを抽出するコード例

```
import astropy.io.fits as iofits
from astropy.wcs import WCS
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np

infile = 'B3-Cont-imsub.fits'
outfile = infile.replace('.fits','.eps')
print('infile =',infile)
print('outfile=',outfile)
list=iofits.open(infile)
pic = list[0]
header= pic.header
data = pic.data[0,0,:,:] #左からストークス、周波数、DEC、RA
wcs = WCS(header,naxis=2) #RA,DEC のみ取り出す
print(wcs)
max = np.nanmax(data)
print("max=",max)
maxind = np.nanargmax(data)
maxcoord = np.unravel_index(maxind, data.shape)
print(maxcoord)
plt.subplot(projection=wcs)
plt.imshow(data,cmap='afmhot',origin='lower') #イメージの設定

x=np.arange(402,456) #中心から約 109AU まで
y=1.11*x-27.22 #P.A.=138 の直線
plt.plot(x,y)
yy = [int(ii) for ii in y]
xx = [round(ii) for ii in x]
for jj in range(len(xx)):
    I=data[yy[jj],xx[jj]]
    print(I)

plt.xlim([300,500])
plt.ylim([300,500])
plt.colorbar()
plt.savefig(outfile,format='eps') #イメージを eps で保存
```