

卒業論文

FRANKENSTEIN を用いた HD163296 原始惑星系ダスト 円盤のビジビリティ解析

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

21s2019x 笹川成昭

目次

1	序論	4
1.1	原始惑星系円盤	4
1.2	HD163296 原始惑星系円盤	4
1.3	ダスト連続波放射	5
2	解析	6
2.1	解析データ	6
2.2	FRANKENSTEIN	6
3	結果	7
4	考察	9
5	まとめ・今後の展望	16

概要

原始惑星系円盤は惑星形成の母体となると考えられている天体である。原始惑星系円盤の構造を解明することは惑星形成の謎を解明するために非常に重要である。近年、非軸対称な構造を持つ原始惑星系円盤が見つかり、これらの構造が円盤の進化や円盤の構造に及ぼす影響はまだ十分に明らかになっていない。

本研究では、HD163296 原始惑星系円盤を対象に非軸対称の構造を浮き彫りにすることを目的に FRANKENSTEIN という公開されたコードを用いて ALMA を用いて観測が行われたダスト連続波データの解析を行った。

先行研究とほぼ同一の結果を得られた。また、ハイパーパラメータの組み合わせによる結果への影響の考察を行った。

1 序論

1.1 原始惑星系円盤

原始惑星系円盤は惑星形成の母体となる天体である。近年、非対称構造を持つ原始惑星系円盤が発見されており、これらの構造が円盤の進化や円盤の構造へ及ぼす影響についてまだ十分に明らかになっていない。これらの構造を解析することは、原始惑星系円盤への理解を深めるために重要である。非対称構造による影響を理解することで、円盤の進化や円盤の構造を予想する足掛かりになると考えられる。また、非対称構造は惑星と原始惑星系円盤の重力相互作用によって生まれる可能性も考えられ、この構造を解析することによって、観測では直接検出することが難しい惑星の位置や重力相互作用によって生まれる構造を推定することができると考えられる。

1.2 HD163296 原始惑星系円盤

HD163296 原始惑星系円盤は 101pc の距離にある原始惑星系円盤であり、様々な研究が行われている天体である。

この原始惑星系円盤の視線に対する軸の傾き角は 46.7° であり、天球面上における来たから東向きに図られた長軸の向き (position angle) は 133.33° である。

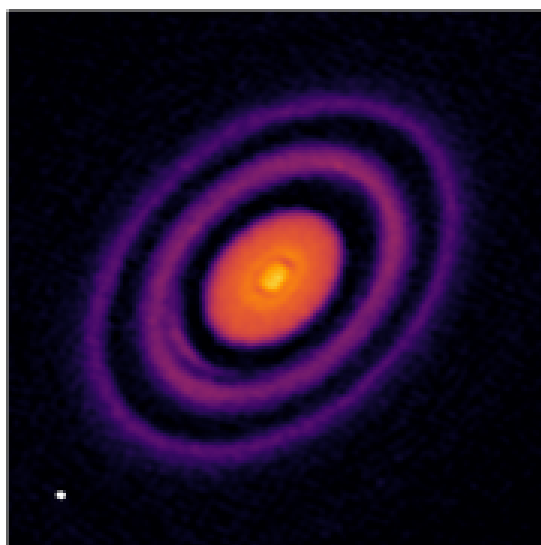


図1 HD163296 原始惑星系円盤の CLEAN イメージ [1]

1.3 ダスト連続波放射

電波の周波数に対するエネルギー分布をその電波のスペクトルと呼ぶ。電波のスペクトルは大きく分けて線スペクトルと連続スペクトルがある。本研究では、連続スペクトルの中でも固体微粒子 (ダスト) の連続スペクトルを扱う。

光学的厚み τ_ν は星間物質の密度 ρ と単位質量あたりの吸収係数 $\kappa_{\rho\nu}$ を用いて以下のように定義される。

$$\tau_\nu = \int \rho \kappa_{\rho\nu} ds. \quad (1)$$

$\tau_\nu < 1$ の時は光学的に薄い、 $\tau_\nu \geq 1$ の時は光学的に厚いという。

固体微粒子 (ダスト) からの放射の場合、光学的に薄い場合がほとんどである。ダストが単一温度 T で熱平衡状態にある場合、観測される電波強度 I_ν は以下のように表すことができる。

$$I_\nu = B_\nu(T)(1 - e^{-\tau_\nu}) \approx \tau_\nu B_\nu(T) \quad (2)$$

ここで B_ν は黒体放射の強度であり以下の式になる。

$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \left(\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1 \right)^{-1} \quad (3)$$

2 解析

2.1 解析データ

本研究で扱った連続波画像データは DSHARP HP 上 [1] に公開されている。このデータは ALMA を用いて周波数約 240GHz におけるダスト連続波放射の観測データである。この観測は 2014 年 6 月 4 日から 2017 年 9 月 9 日の間に行われている。

このデータは 240GHz 付近の複数の周波数で観測が行われており、この周波数毎にチャンネルとしてデータが分けられている。本研究では、チャンネル数が 1 となるように平均化を行ったデータを解析している。

2.2 FRANKENSTEIN

FRANKENSTEIN(以下 Frank) は Jennings et al(2020) で公開されたコードである。

Frank はビジビリティデータが軸対称であると仮定し、2 次元ビジビリティデータを直接フィッティングすることによって一次元輝度分布を得る解析手法である。軸対称を仮定したことによりビジビリティデータをフィッティングした関数を 2 次元フーリエ変換ではなく、ハンケル変換を用いることができる。

$$I_\nu = \int V_\nu(q) J_0(2\pi qr) 2\pi q dq \quad (4)$$

$$V_\nu = \int I_\nu(r) J_0(2\pi qr) 2\pi r dr \quad (5)$$

この解析手法 4 つのハイパーパラメータ $R_{\max}, N, \alpha, w_{\text{smooth}}$ を定める必要があり、それぞれの働きは以下のようになっている。

- $R_{\max}$: フィッティングを行う最大の半径を定める。先行研究 [3][4] では円盤の最大半径の約 1.5 倍としている。
- N : ハンケル変換を行う際に合わせる点 (コロケーションポイント) の数。離散ハンケル変換を行う際にコード上では級数化して行うため扱う級数の数。
- α : スペクトル全体に掛かり、ノイズの働きを抑えるパラメータ。
- w_{smooth} : 輝度分布に掛かる平滑化のパラメータ。

コロケーションポイントの数により、over fitting が起こることがあるため、Frank では non-parametric Gaussian process を用いて正則化を行い、これを回避している。

	$R_{\max}$	N	α	w_{smooth}
本研究	2.9	250	1.05	10^{-4}
先行研究 [4]	2.9	500	1.01	10^{-4}

表 1 ハイパーパラメータの組み合わせ

3 結果

図 2 は frank パッケージ内の make_clean_comparison_fig というモジュールを用いて作成した。ここで CLEAN は DSHARP PHP 上 [1] で公開されている HD163296 の continuum profile を用いている。(a) はビジビリティを fittng したものをハンケル変換して得られた半径方向 r に対する輝度分布。(b) は基線方向でのビジビリティの fittng の結果。(c) は (a) で示した frank の結果を二次元輝度分布に変換した画像。(d) は (a) で示した franke の結果を clean beam でたたみ込んだ二次元輝度分布に変換した画像。(e)(a) で示した CLEAN を二次元輝度分布に変換した画像。

図 2 で示した結果から frank を用いて解析した結果が CLEAN によって得られた結果とおおむね一致していることがわかる。ビジビリティフィットと CLEAN のハンケル変換の結果では、大きな差は見られないが、輝度分布では中心付近で大きな差が出ていることがわかる。これは CLEAN の解析過程でつぶれてしまったギャップが frank を用いた解析でははっきりと示されている。これは前述した frank の利点である高解像度で解析を行うことが可能であることを示している。今回の fittng は IdeaPad Slim 5 14IAH8 を用い、CPU は Intel Core i5-12450H であり、クロック数は 2GHz コア数は 8 で実装 RAM は 16GB である。今回の解析は約 2 分ほどで結果が得られた。

本研究で用いたハイパーパラメータは表 1 で示した組み合わせを用いている。これは表で示した先行研究 [4] とは異なるハイパーパラメータの組み合わせであったが、先行研究とほぼ一致する結果が得られた。

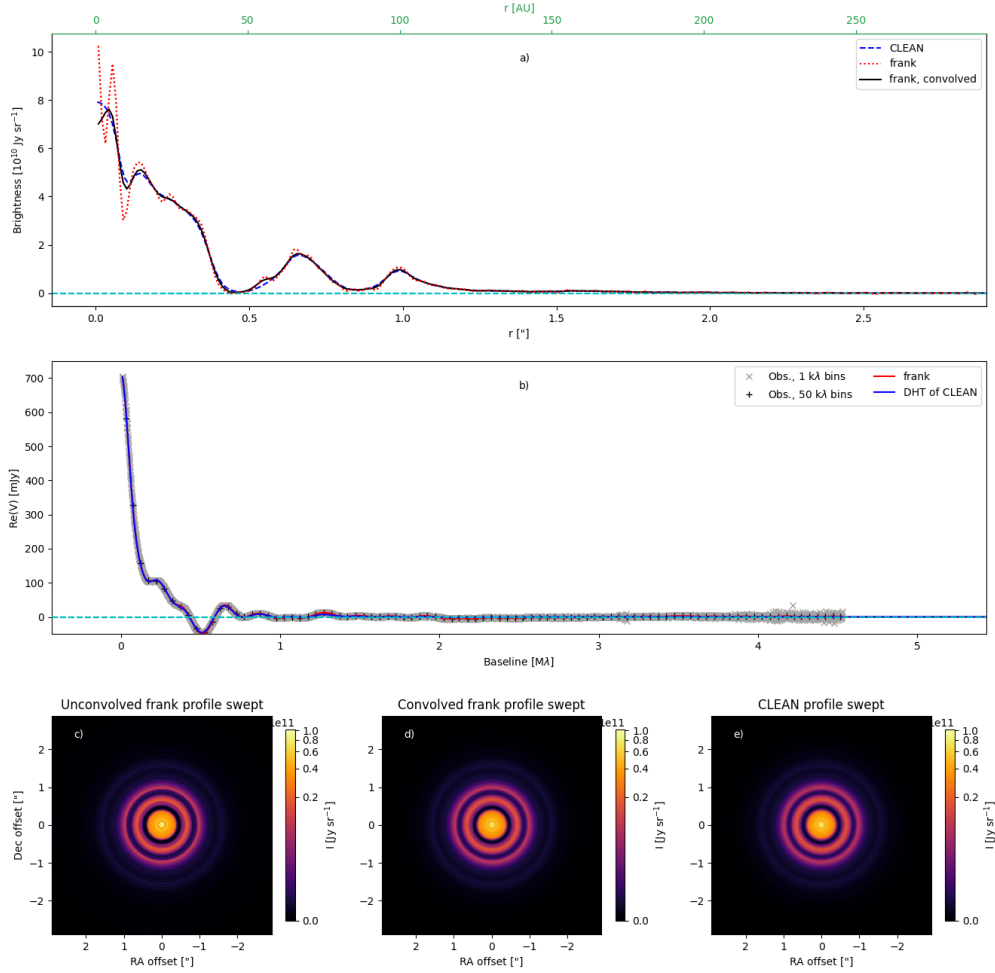


図 2 (a) 動径方向の輝度分布をプロットしたもの。中心付近では CLEAN との違いが大きい r が増加するにつれ一致している。(b) ビジビリティのフィッティングの結果を示したもの。ここでの DHT of CLEAN は (a) で示した CLEAN をハンケル変換した結果を示している。(c)(a) で示した frank の結果を二次元輝度分布に変換した画像。(d)(a) で示した frank の結果を clean beam でたたみ込んだ二次元輝度分布に変換した画像。(e)(a) で示した CLEAN を二次元輝度分布に変換した画像。

4 考察

今回、先行研究とは異なるハイパーパラメータの組み合わせでほぼ一致する結果が得られたが、これらのハイパーパラメータが解析結果にどのような影響を及ぼすかを考える。

図3では図2の(a)と同様に半径方向 r での輝度分布を示した。また、図4では基線方向に対する Power spectrum density を示した。図3と図4は横方向で α 、横方向で w_{smooth} が変化している。

図3,4には R_{max} と N を固定し $\alpha = 1.05, 1.3, 1.5, w_{\text{smooth}} = 10^{-4}, 10^{-2}, 10^0$ とハイパーパラメータを変更した際の解析結果を示した。

これらを見ると輝度分布では α の影響が出やすく w_{smooth} の影響が少ないことがわかる。図3では α の値を上げていくと導出された輝度分布のノイズが原因とみられるがたつきが小さくなっているが、円盤の最も内側での輝度が極端に下がっている。 α は輝度分布全体に掛かり、ノイズの影響を軽減する働きがあるが、 α が大きくなることによってノイズによる影響ではないと考えられる円盤の最も内側での輝度にまで影響が現れている。

図4では図3では見られなかった w_{smooth} の影響が強く出ている。 w_{smooth} は平滑化のパラメータであるため、小さな w_{smooth} では見られていた構造が大きい w_{smooth} では見られなくなっている。また、 α の影響も確認でき、 $w_{\text{smooth}} = 10^0$ では形が大きく変わっていることがわかる。

本研究では、先行研究[4]と同様に複数チャンネルあるデータをすべて1チャンネルになるよう平均化を行ったが、その際には幅広い周波数に含まれるデータがすべて平均化されている。この影響が結果へどのような影響を及ぼすか調べるため、周波数の近いもの同士で4つに分けて平均化を行い、解析を行った。

その結果が図5-8である。今回用いたハイパーパラメータは図2と同一にしてある。これらを見ると図2の結果とほぼ一致している。つまり、平均化による結果への影響は少ないといえる。

しかし、図5には図6-8には見られない解析結果が3M λ 付近で見られる。これらの原因を調べるため図5の平均化に使ったチャンネルを1チャンネル毎に解析した結果が図9-12である。これらを見ると、同じハイパーパラメータを使ったにもかかわらず図9ではover fittingが起こっている。原因として考えられるのは、図9の(b)を見ると違った結果が出ていた3M λ 付近から約4.5M λ までのビジビリティの振れ幅がほかチャンネルの結果よりも大きいことがわかる。これは1チャンネルのデータのノイズが他チャンネルよりも大きいことが原因と考えられる。以上のことから、平均化によってノイズが大きいデータによる影響が抑えられていたことがわかる。

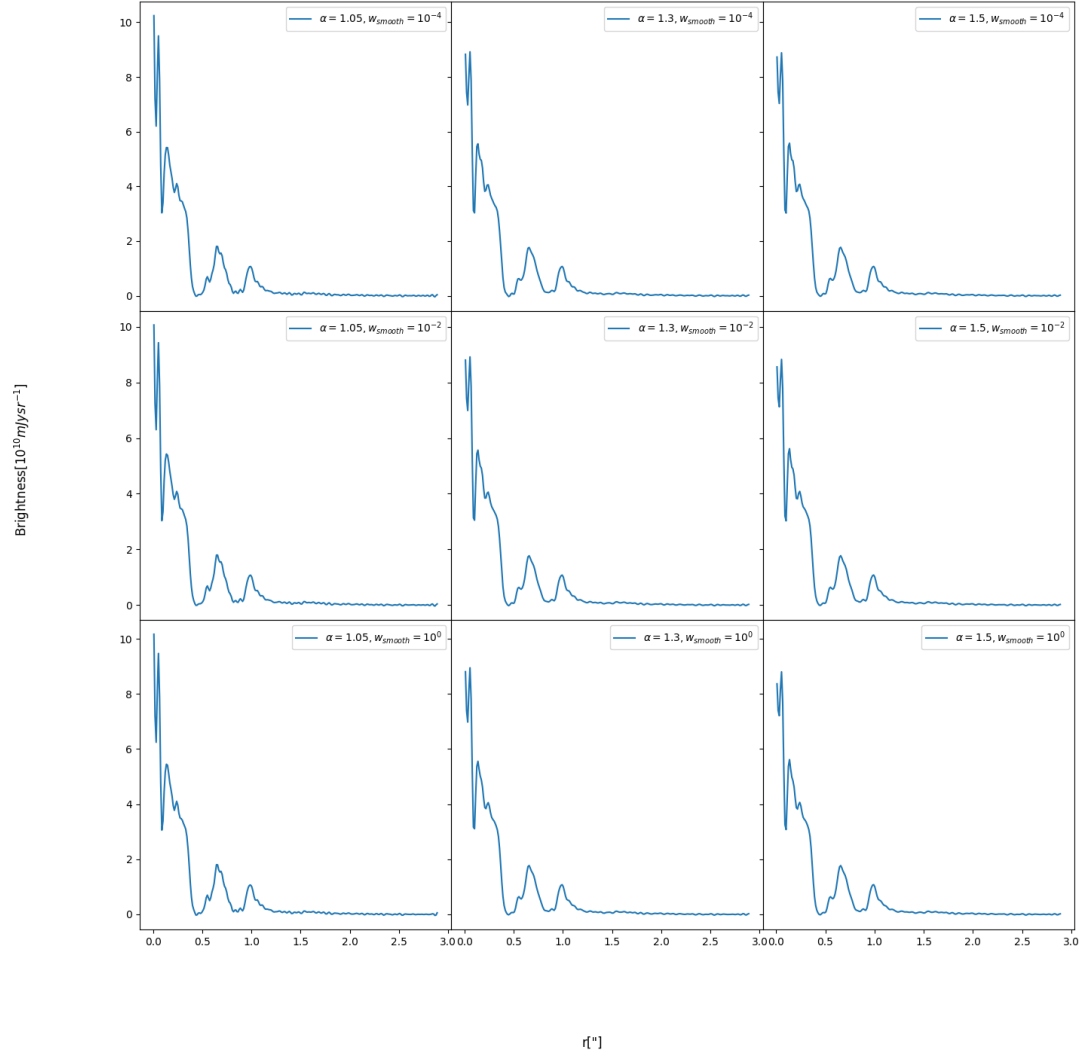


図3 α と w_{smooth} を変えた際の Brightness profile の解析結果。

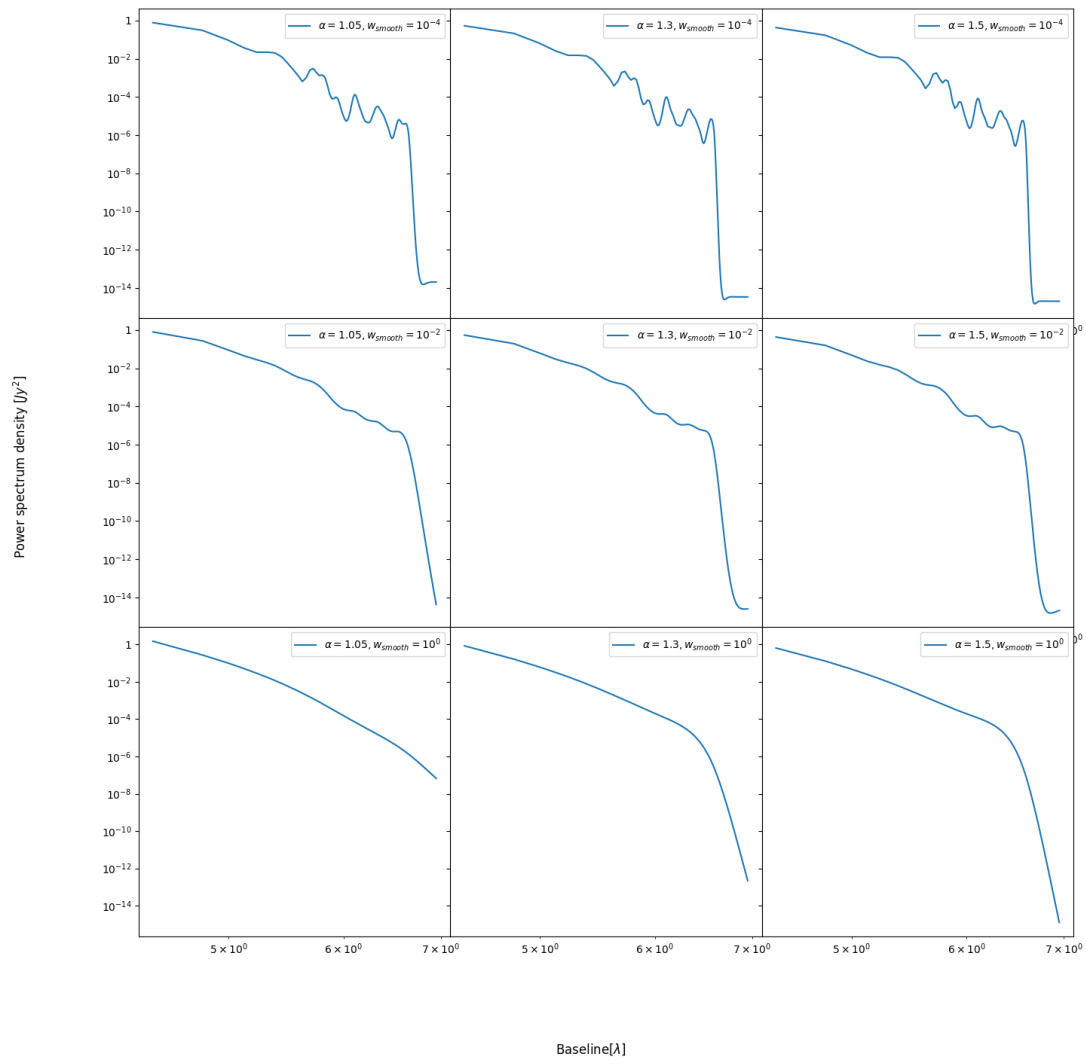


図4 α と w_{smooth} を変えた際の Power spectrum density の解析結果。輝度分布とは異なり、 w_{smooth} の影響がわかりやすく出ている。

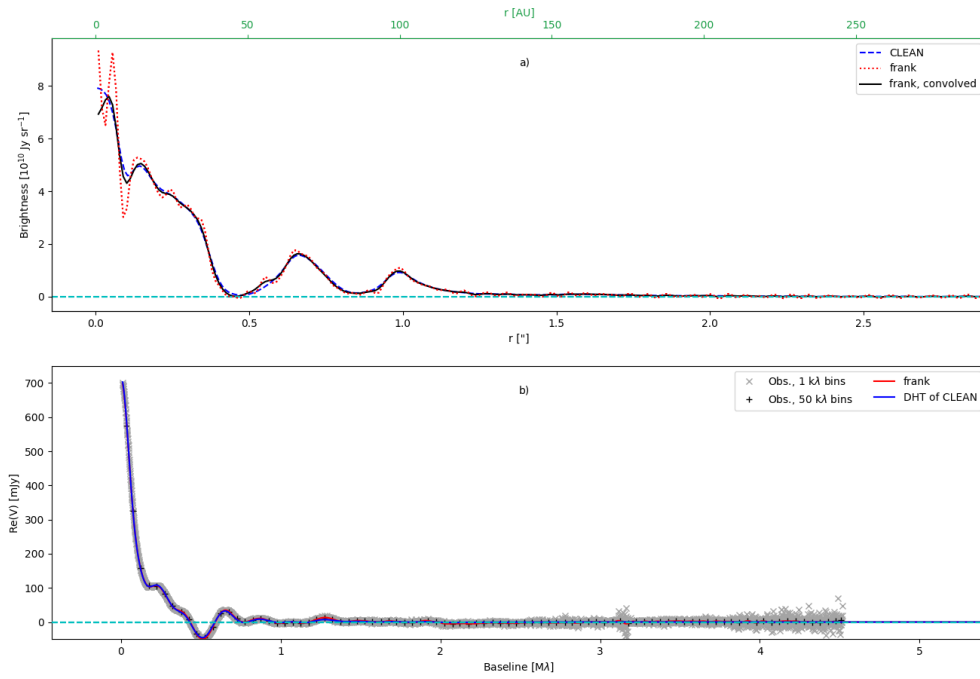


図5 1-4チャンネルで平均化を行ったデータの解析結果

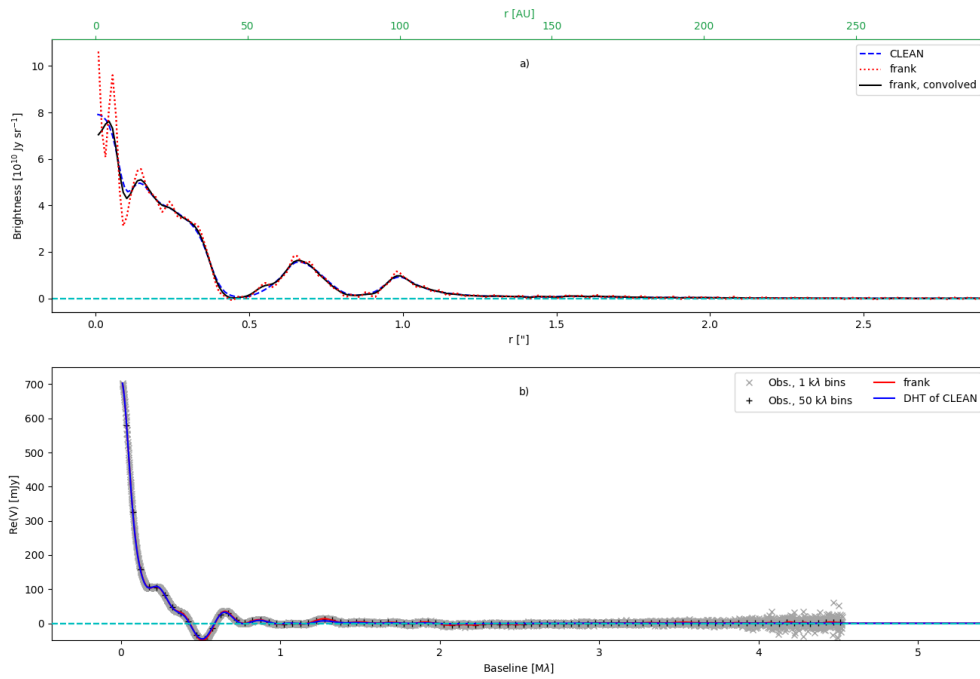


図6 5-8チャンネルで平均化を行ったデータの解析結果

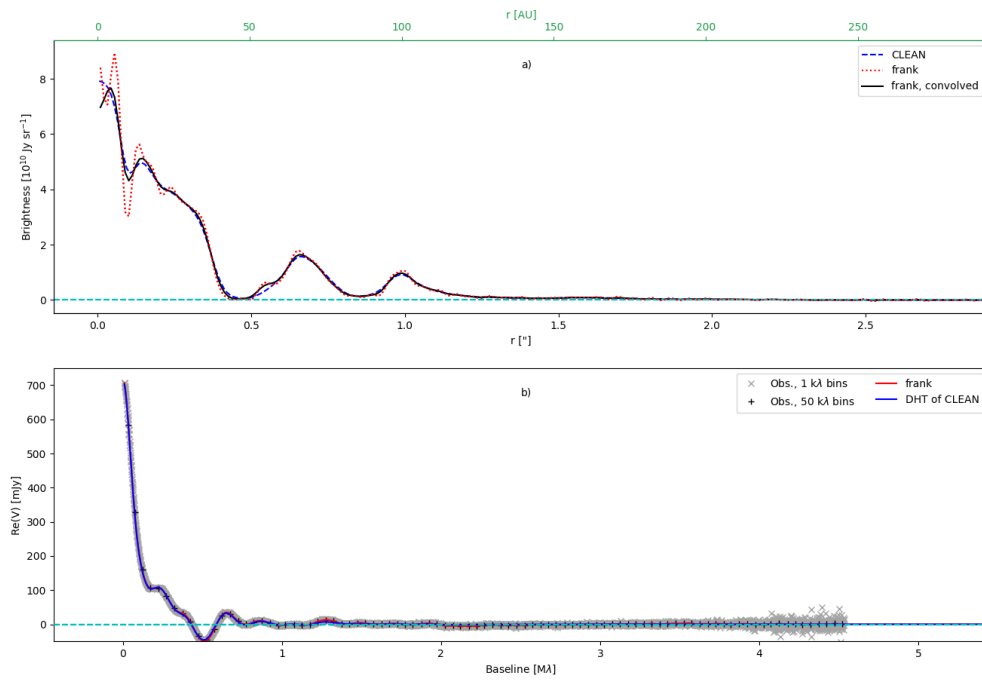


図7 9-12チャンネルで平均化を行ったデータの解析結果

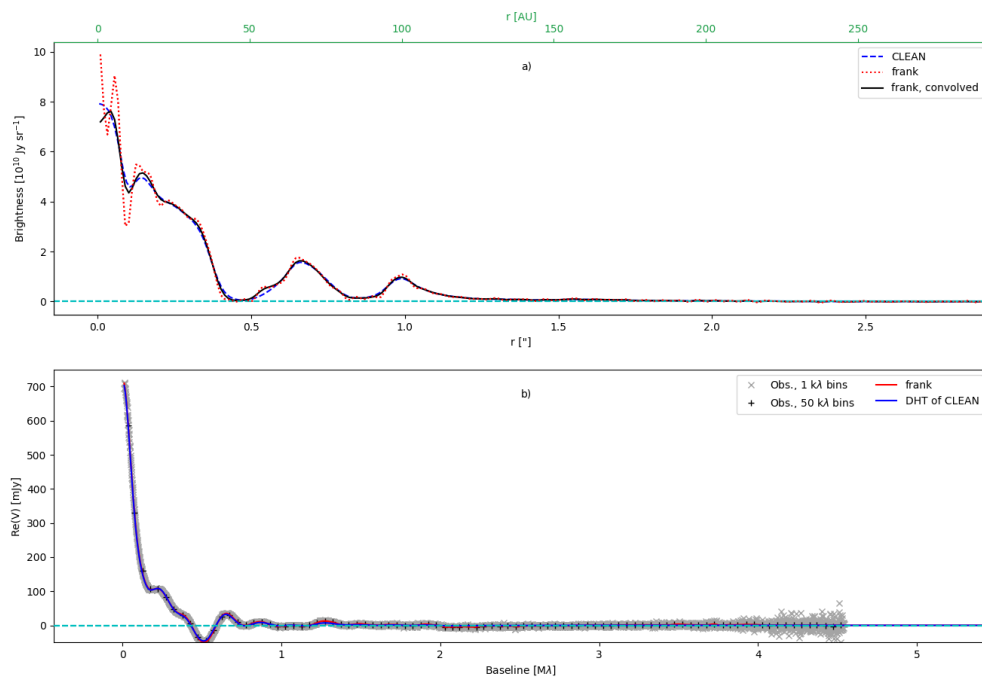


図8 13-16チャンネルで平均化を行ったデータの解析結果

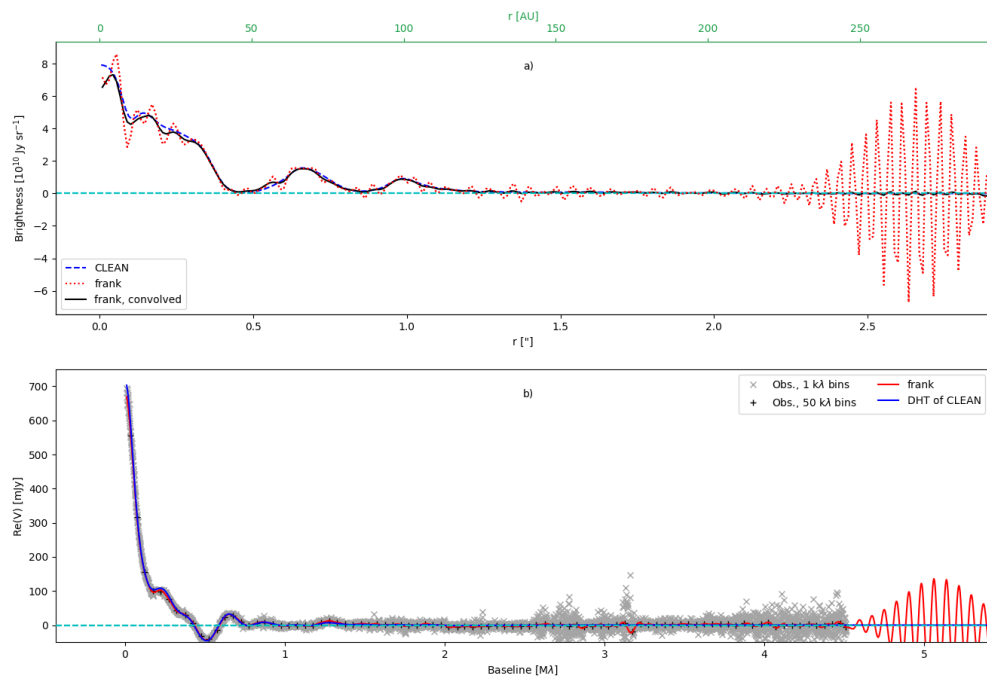


図 9 1 チャンネルの解析結果

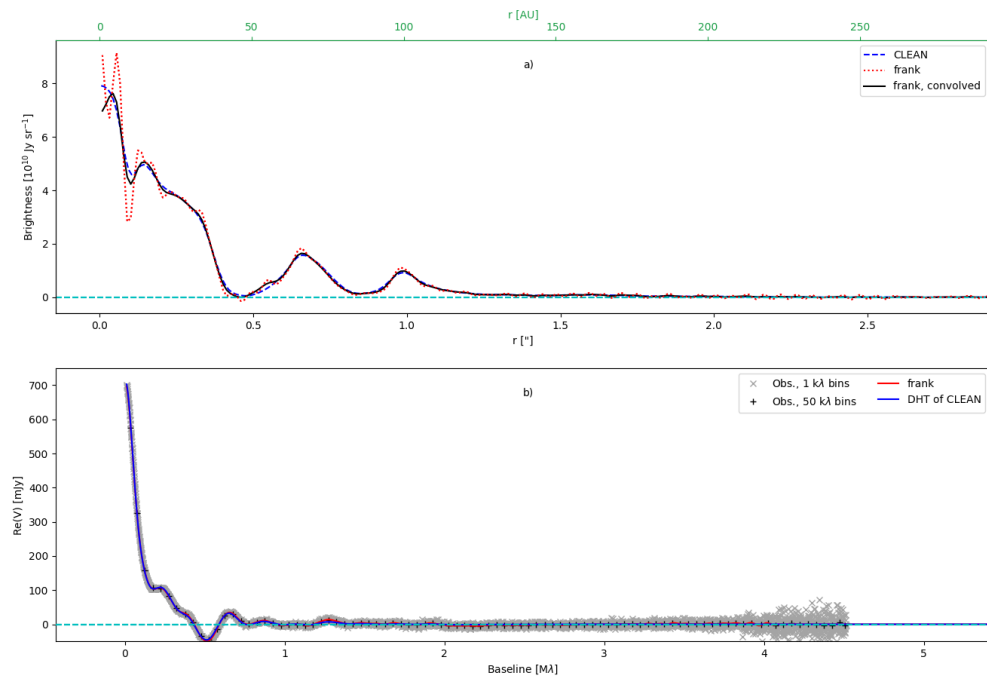


図 10 2 チャンネルの解析結果

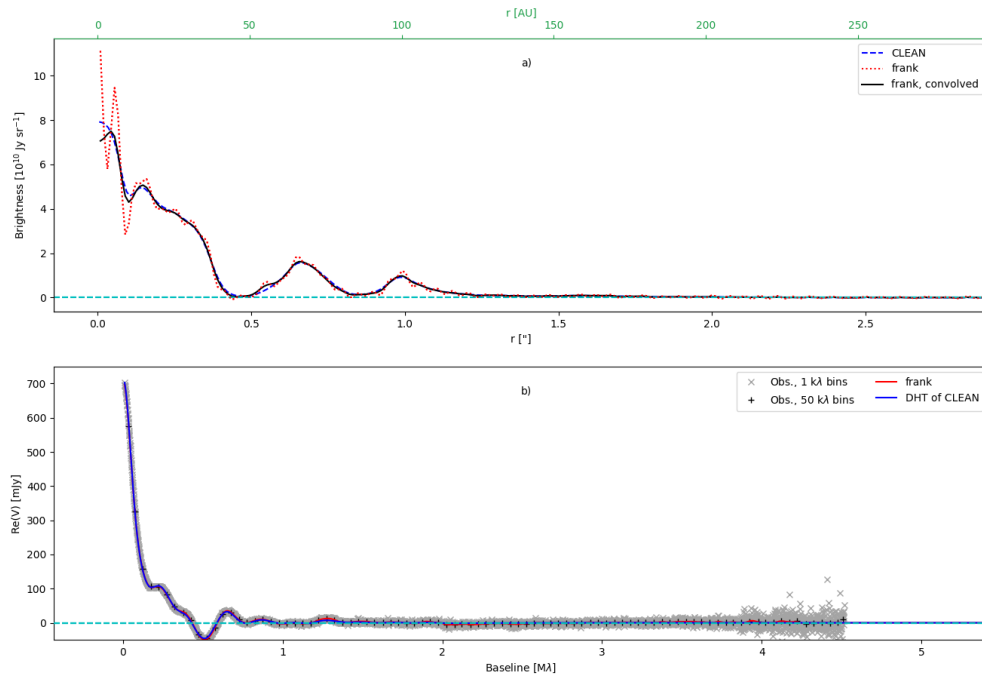


図 11 3 チャンネルの解析結果

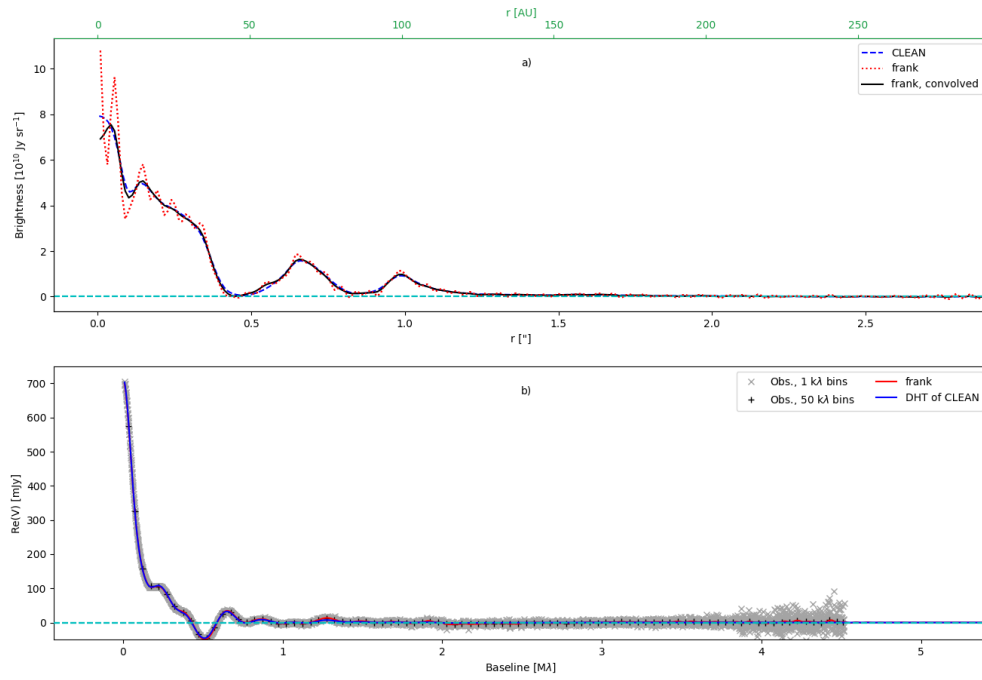


図 12 4 チャンネルの解析結果

5 まとめ・今後の展望

まとめ

FRANKENSTEIN を用いて DSHARP の HP 上に公開されている HD163296 のダスト連続波データについてピジビリティ解析を行った。

- 今回先行研究とは、異なるハイパーパラメータの組み合わせで解析を行ったが、ほぼ一致する結果が得られた。
- 今回の解析結果から CLEAN では見られない構造が円盤中心付近の動径輝度分布中に見られた。この構造は先行研究でも見られている。
- ハイパーパラメータの解析への影響を見るため、様々なハイパーパラメータの組み合わせで解析を行い考察を行った。 α は輝度分布と Power spectrum に影響を与え、 w_{smooth} は power spectrum への影響はよく見られるが、輝度分布への影響は少ないことがわかった。
- 平均化による影響を見るため観測周波数の近い 4 チャンネルずつに分け、平均化を行い解析を行った。平均化による解析結果への影響としてノイズが大きいチャンネルのデータによる影響が抑えられていることがわかった。

今後の展望

今回、ハイパーパラメータを自分の手で定めているためデータや解析する天体に合わせ自動で定められるように改善していきたい。また、今回非対称成分を取り出すための解析を行えていないためこの解析を進めたいと考えている。

謝辞

本研究を進めるにあたって多くの方々のご指導、お力添えをいただきました。この場を借りて感謝を申し上げます。指導教員の百瀬宗武教授には研究を進める際に多くの助言を頂きました。ポスター発表の資料作成の際には、何度も添削をしていただきました。また、副指導教員の米倉覚則教授には電波天文学の基礎についてわかりやすく教えていただきました。大変感謝しております。博士後期課程の折原龍太さんには研究で行き詰った際に相談すると様々なアドバイスを頂きました。そのおかげで研究を進めることができました。

研究にかかわったすべての方々に深く感謝いたします。ありがとうございました。

参考文献

- [1] DSHARP DATA RELEASE(<https://almascience.eso.org/almadata/lp/DSHARP/#:~:text=DSHARP%20is%20a%20deep%2C%20high%20resolution%20%2835%20mas%2C,bright%2C%20and%20large%20protoplanetary%20disks%2C%20designed%20to%20asse>)
- [2] Huang et al.2018 ApJL,898,L57
- [3] Jennings et al.2020 MNRAS,495,3209
- [4] Jennings et al.2022 MNRAS,509,2780
- [5] 中井直正、坪井昌人、福井康雄 日本評論社 シリーズ現代の天文学 16 [第二版] 宇宙の観測 II ー電波天文学