

2022年度 学士卒業論文

原始惑星系ガス円盤の視線速度モデルと ALMA データとの比較

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

18S2001F 秋元 健吾

概要

原始惑星系円盤は、太陽系などの惑星系が形成される過程の円盤である。ガスとダストからなる分子雲が母体となり、その中の密度の高い領域が自己重力により収縮することによって中心星が生成される。その中心星の周りにガスとダストで構成された回転円盤が原始惑星系円盤であり、惑星が誕生する場であると考えられている。しかし実際に原始惑星系円盤の中で惑星がどのように誕生するのか分かっていない部分も存在する。そこでまずは、原始惑星系円盤中に含まれるガスがどのような運動をしているのかを理解することを試みた。

目次

第1章	研究背景	2
1.1	原始惑星系円盤とは	2
1.2	円盤の構造について	2
1.3	ガス円盤からの放射	2
1.4	本研究の目的	3
第2章	手法	4
2.1	方針	4
第3章	観測データ	9
3.1	観測概要	9
3.2	観測天体	9
第4章	結果	11
第5章	考察	12
第6章	まとめと今後の展望	18
付録A	降着円盤	19

第1章 研究背景

まずは原始惑星系円盤の概要、構造や円盤からの放射についてまとめた後、本研究の目的について説明する。

1.1 原始惑星系円盤とは

原始惑星系円盤とは、中心星と惑星系が形成される際に中心星の周りにできる、ガスとダストで構成された円盤のことであり、この中で惑星が形成されると考えられている。またこの中心星は主系列星より前の進化段階にある若い星々（Young Stellar Object）である。

ガスの成分は主に水素やヘリウム、ダストは氷や岩石などの固体微粒子から成り立つ。円盤質量の大半はガスが占めておりダストの質量はガスの1%程度しか存在しないが、惑星はこのダストが合体しながら成長することで形成される。

1.2 円盤の構造について

ガスやダストは円盤平面の動径方向の釣り合いにより中心星の周りでケプラー回転をしようとするが、ガスは中心に向かうほど圧力勾配力が働くことからケプラー角速度よりも少し遅く回転する。その影響により生じるガス抵抗を受けたダストは、ガスの圧力がより高い領域に向かって移動する。

従って、ガス円盤は中心星からの重力の鉛直成分とガスの圧力勾配によって、円盤を横から見たとき外にいくほど広がり散逸するような構造をしている。また円盤鉛直方向のガス密度はガウス関数的な分布になっており、ダストはこのガス密度の高い領域に集まるため mid-plane な構造をしている。[1]

1.3 ガス円盤からの放射

電波天文学の観測量には輝度という単位が用いられるが、輝度は単位立体角方向から到来して単位面積を単位時間内に通過する単位周波数当たりの電磁波エネルギーフラックスとして定義され、記号として I_ν が使われる。単位は $J s^{-1} m^{-2} Hz^{-1} sr^{-1}$ または $W m^{-2} Hz^{-1} sr^{-1}$ である。

方向ベクトル s を中心とする微小立体角 $d\Omega$ から到来する輝度 I_ν の電波が、 θ だけ傾いた面素 $d\sigma$ を通過する電力 dW は、微小周波数帯域 $d\nu$ あたり

$$dW = I_\nu(s) \cos\theta d\Omega d\sigma d\nu$$

と表すことができる。[2]

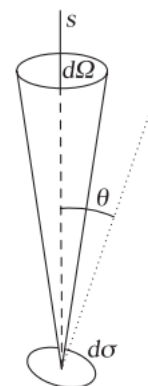


図 1.1: 輝度 定義

[2]

分子には様々な励起状態が存在し、それぞれ一定のエネルギー準位をとるが、分子はそれぞれの運動による衝突で、電磁波の放出・吸収とともに定常状態間で遷移する。励起状態には主に 3 つ、電子状態、分子の振動状態、分子の回転状態があり、それぞれの遷移には対応する波長・周波数の電磁波の放射・吸収がともなう。

- ・電子状態：電子の主量子数の変化とともに、主に可視光・紫外線領域の放射・吸収
- ・分子の振動状態：振動量子数の変化とともに、主に赤外線領域の放射・吸収
- ・分子の回転状態：回転量子数の変化とともに、主に電波領域の放射・吸収

以上のような、高励起状態から低励起状態へ遷移するときに放射される、エネルギーの差に相当する特定の波長・周波数の電磁波（線スペクトル）を輝線という。[3] ガス分布を調べる時、主に 2 原子分子 CO 分子の回転遷移による輝線を電波望遠鏡で観測する。

1.4 本研究の目的

本研究では、円盤内に含まれるガスの運動を理解するために、円盤中のガスが中心星重力によって純粋な回転運動（ケプラー運動）をしている場合に期待される各所の視線速度分布を導出し、若い星 SY Cha に対して得られた ALMA 望遠鏡による輝線観測データとの比較を行った。

第2章 手法

正確に視線速度分布を導出し画像化するため、プログラミングを活用した。言語は Python を用いている。今回の解析では、円盤の厚み方向の構造は動径方向の広がり比べて十分小さいと考えて無視し、完全な平面上の円盤を斜めから見た状況にあると仮定した。またガスの運動は、中心星の重力によって支配されているケプラー回転であると仮定した。

2.1 方針

円盤上の動径方向の釣り合いより、接戦方向の速度について式をまとめると

$$V = \left(\frac{GM}{r}\right)^{1/2}$$

となる。この速度は円盤回転軸を中心とした、円盤平面の座標系での速度である。

この座標系から、観測者視点で円盤を斜めから見た局所標準静止座標系 (LSR) に座標変換し、視線方向の速度成分を考えると

$$V = \left(\frac{GM}{r}\right)^{1/2} \cos\phi \sin i$$

と導出できる。この時、 ϕ は円盤平面の長軸からの角度、 i は視線と円盤回転軸がなす角である。

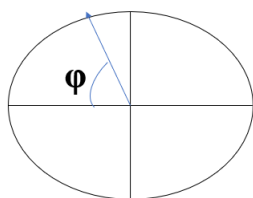


図 2.1: ϕ について

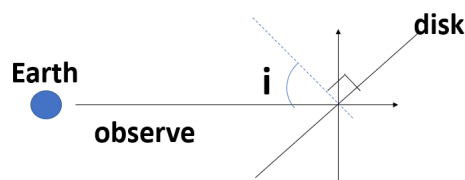


図 2.2: inclination について

この視線速度について、長軸方向に切った位置速度図 (PV 図) を描画すると、図 2.3 の通りケプラー曲線を描いていることが分かる。

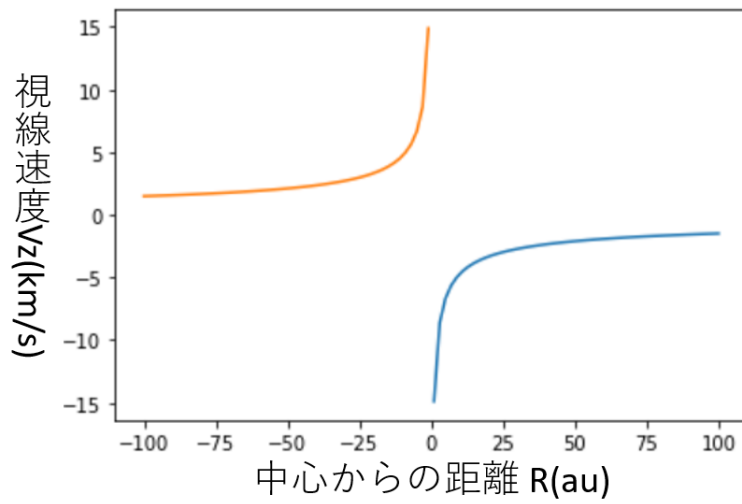


図 2.3: PV 図

PV 図は PA、Inclination を固定したものを描画した。
次に PA, Inclination をパラメータ化し視線速度の分布を円盤全体で見ることができるようにした。
まずは Beam を作る。

表 2.1: Beam 作成条件

1 pix	0.005''
長軸	0.128''
短軸	0.085''
Position Angle	4.7°

表 2.1 のように設定し、図 2.4 のような Beam が作成できた。

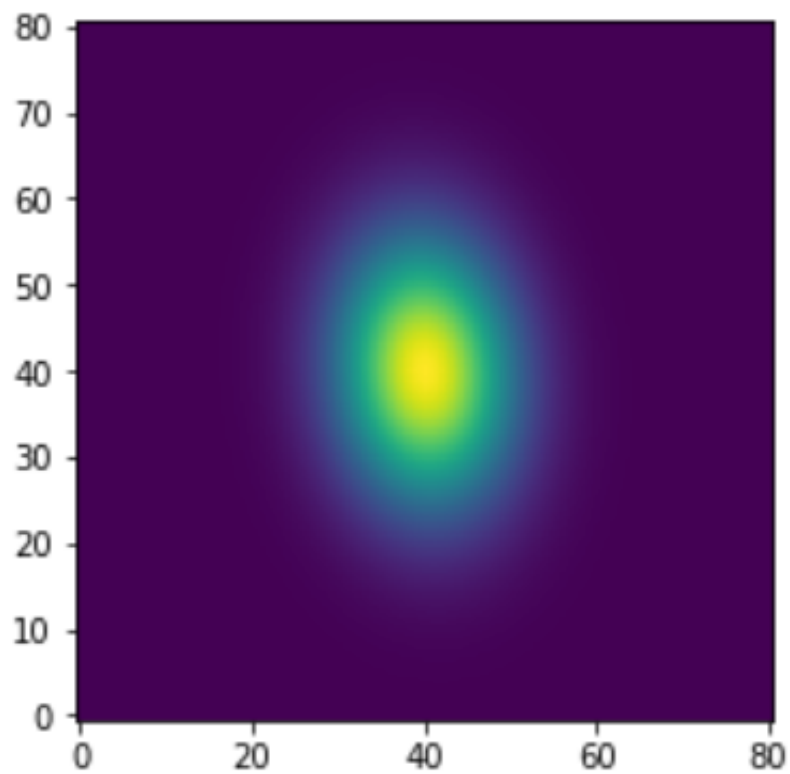


図 2.4: 作成した Beam 縦軸横軸ともにピクセル数

この Beam を、円盤の形に合わせて畳み込む。畳み込んだものに視線速度をプロットすると、図 2.5 のような分布図が作れる。

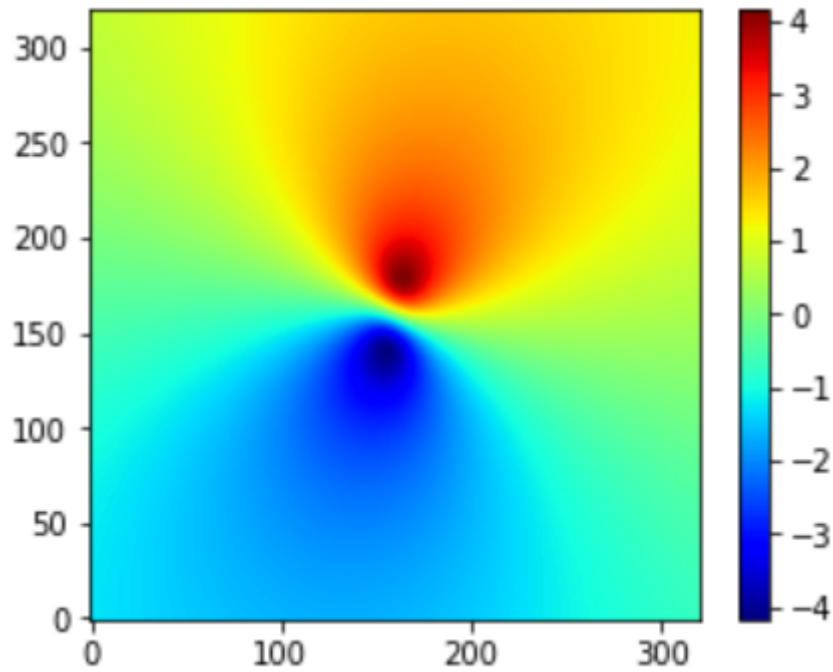


図 2.5: 畳み込んだ結果 縦軸横軸ともにピクセル数

最後に、データでは空白な領域があるためモデルもデータに合わせて同様な領域を作った。

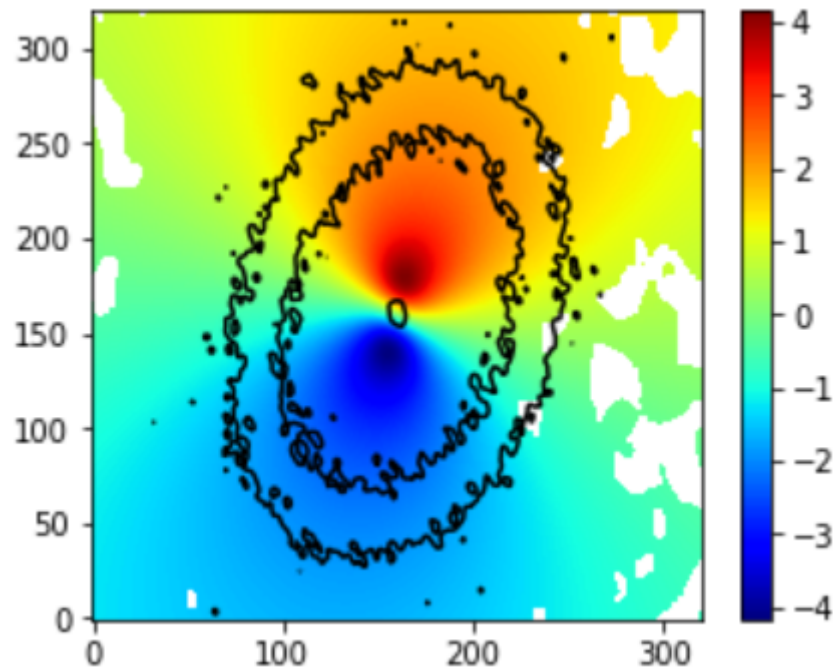


図 2.6: データに合わせたモデル 縦軸横軸ともにピクセル数

同時に、中心星 SY Cha の inner cavity なダスト円盤のリングの輪郭をおおまかに等高線表示し、その等高線を重ね合わせている。[4]

rms ノイズは 1.12×10^{-5} Jy/beam、白いコントアは 5σ 以上の放射を示している。
以降、比較に用いる図には白いコントアを重ねている。

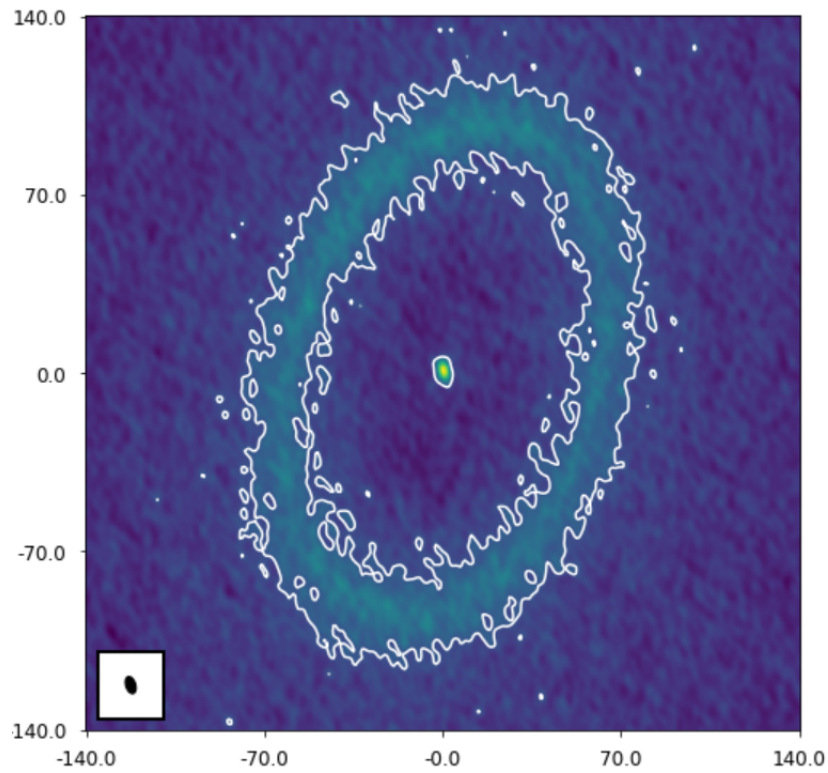


図 2.7: SY Cha のダスト円盤 縦軸横軸ともに au
[4]

このようにして円盤全体の視線速度分布モデルを作ることが出来た。

第3章 観測データ

3.1 観測概要

自分で作ったモデルとの比較のため、ALMA(Atacama Large Millimeter/submillimeter Array)望遠鏡で観測された実際のデータを用いた。今回は、SY Cha の ^{12}CO (J=3-2) 輝線放射の観測データを使用している。円盤ガスの存在形態は分子雲であり水素分子 (H_2) が最も多く存在するが、水素分子は電気双極子モーメントを持たないため電波を放射しない。そのため、分子雲中で水素分子に次いで多い一酸化炭素分子 (CO) の回転遷移で放射される電波を主に観測している。

3.2 観測天体

天体の詳細は以下のとおりである。[5]

表 3.1: 観測天体のパラメータ

観測コード	2018.1.00689.S
天体名	SY Cha
赤経 (ICRS)	10: 56: 30
赤緯 (ICRS)	-77: 11: 39
Inclination	51.1°
Position Angle	-15.4°
Mass	0.78 Solar Mass
Distance	183 pc
Beamsize	$0.145'' \times 0.110''$

データのピクセル数は、モデルに合わせてカットした。

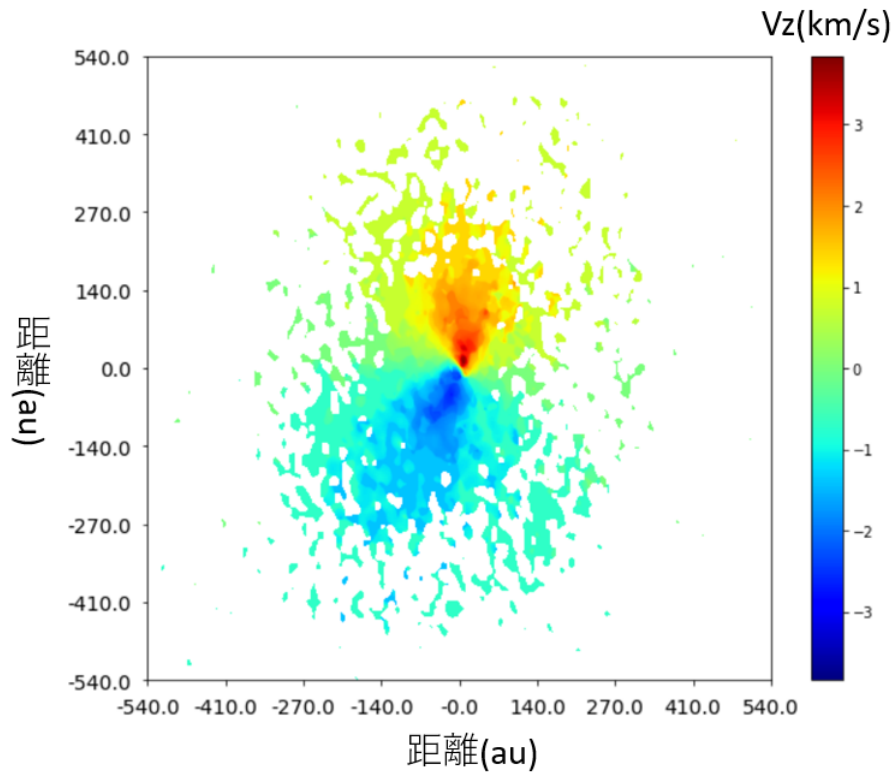


図 3.1: 中心星 SY cha の momoent 1 map
[4]

ALMA 望遠鏡から得られるデータは空間二次元+周波数（速度）一次元であり、周波数ごとに空間的な輝度分布が分かる。（チャンネルマップ）

その観測した輝度に速度の重みを付けて、空間二次元の各ピクセルごとに平均的な速度を求めたものを速度場図（moment 1）といい、今回はこの速度場図をモデルとの比較に用いる。

$$\text{moment 1} = \langle v \rangle = \frac{\int v I_\nu d\nu}{\int I_\nu d\nu}$$

第4章 結果

まずはモデルの視線速度分布と ALMA データを同じピクセル数で並べ、次にデータ [4] からモデルを引いた速度成分の残差を見る。以下、縦軸横軸ともに単位は au。

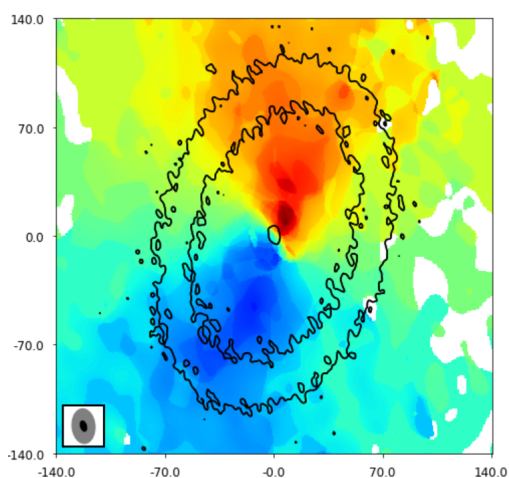


図 4.1: データ

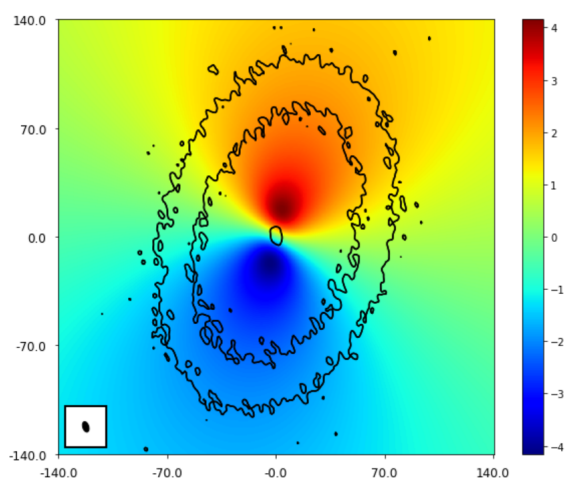


図 4.2: モデル

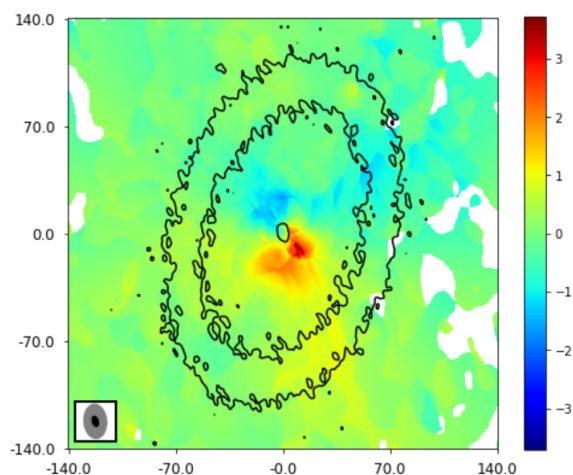


図 4.3: データからモデルを引いた残差

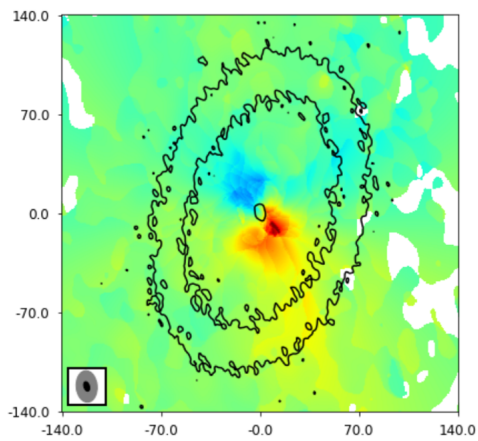
図 4.3 を見てみると、中心星近辺で速度の差が見られる箇所がある。特に顕著な箇所として、中心より左上の領域においてデータの方が正の成分が小さく、下の領域においてデータの方が負の成分が小さくなっている。

第5章 考察

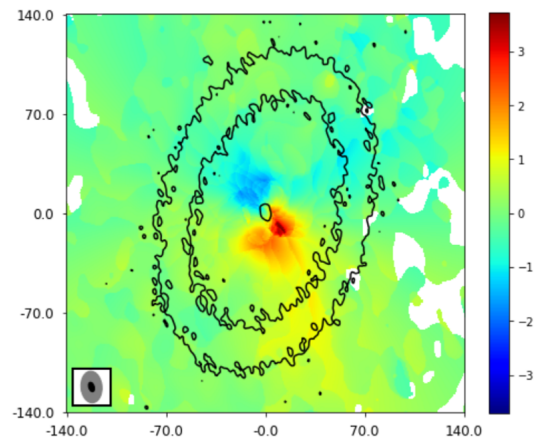
データとモデルの速度分布が完全に一致しない理由として、そもそもモデルはあらかじめ Beam をコンボリューションしたものに速度をプロットしているのに対し、データは観測した輝度に周波数の重みを付けたものを積分し、ピクセル毎に平均速度を求めているという違いがある点がある。

また、厚みのある円盤でガスは中心にいくほど外向きに圧力勾配力が生じる。その影響でガスはケプラー角速度より少し遅く回転するという理由があり、全体的に $V(\neq 0) < |\pm 1|$ の差がある領域が多いと考えられる。

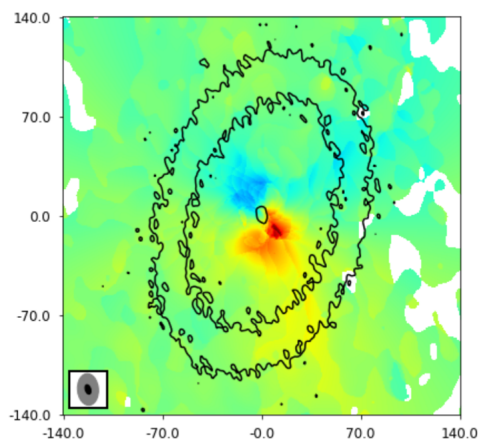
モデルとデータを比較してみると、データの方が若干右回りに傾斜しているように見えた。そこで、作成したモデルにどれほどの誤差があるのかを調べるため、モデルで設定した Position Angle -15.4° の値を少し変え、 $-10.4^\circ \sim -35.4^\circ$ で比較して見る。



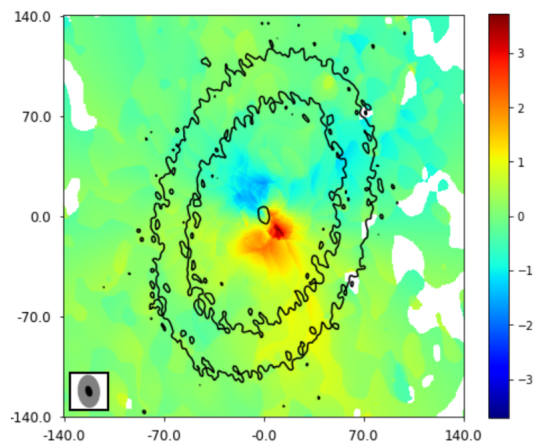
PA -10.4°



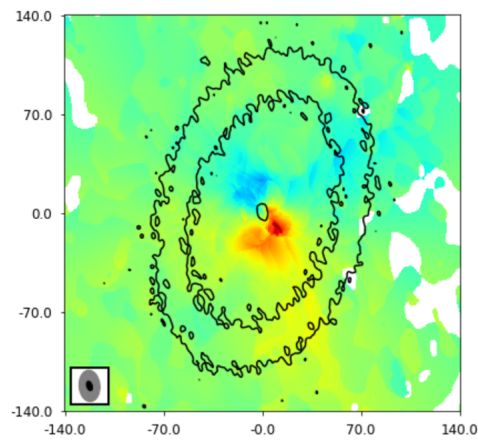
PA -11.4°



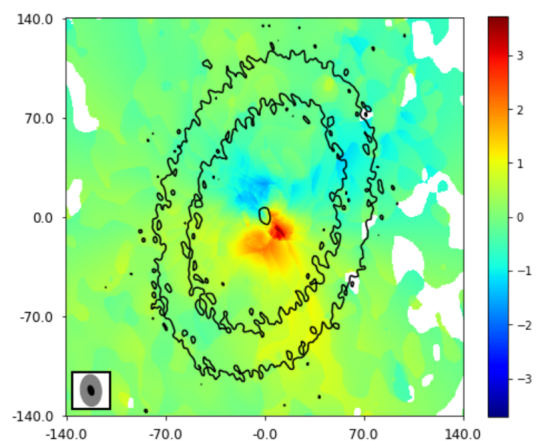
PA -12.4°



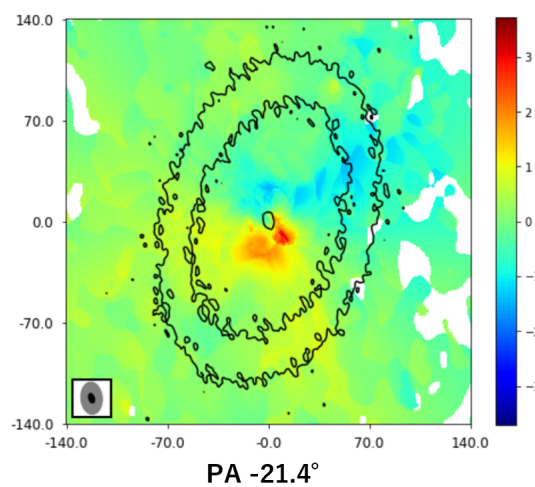
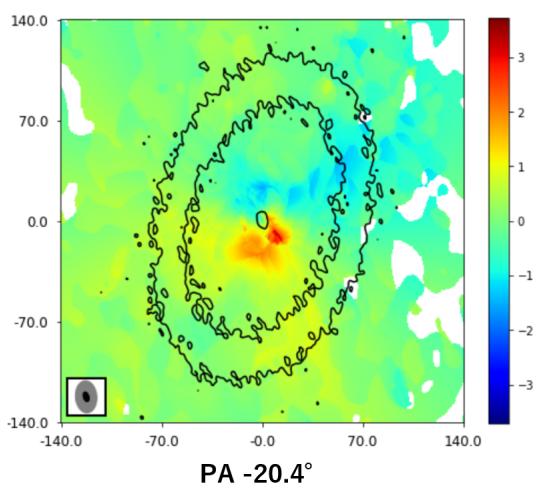
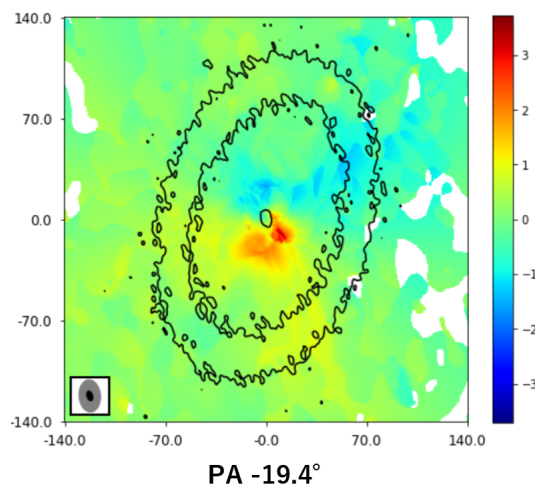
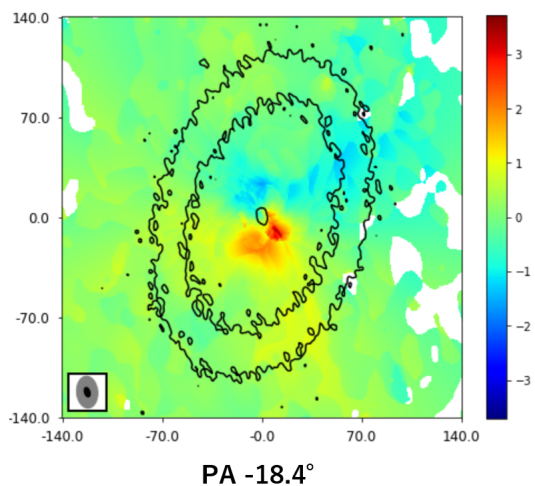
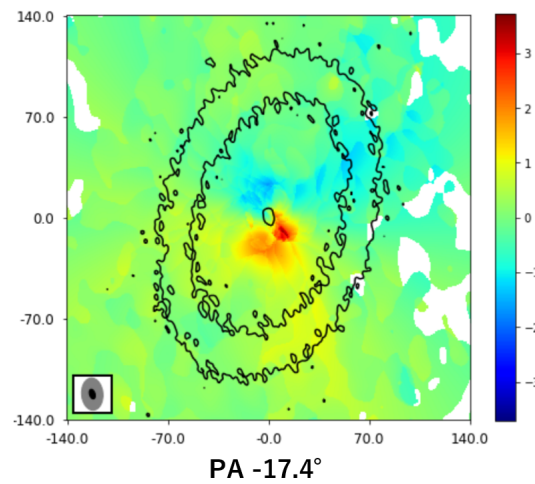
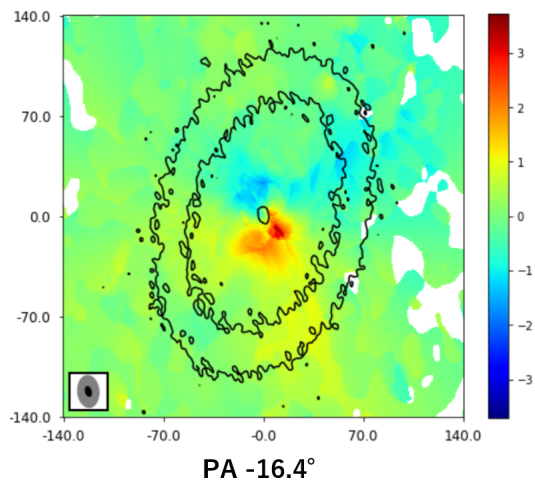
PA -13.4°

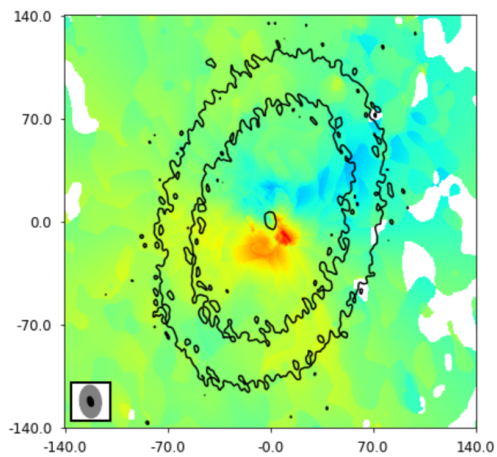


PA -14.4°

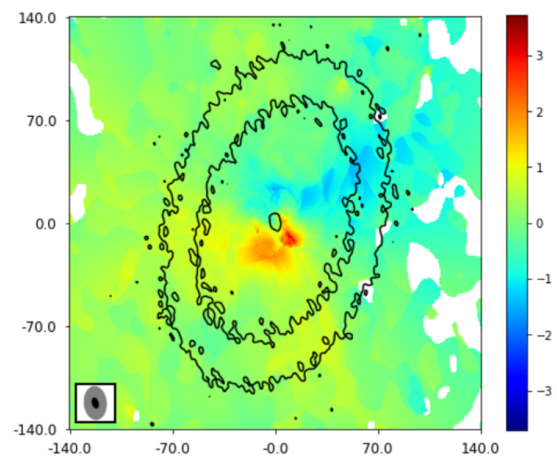


PA -15.4°

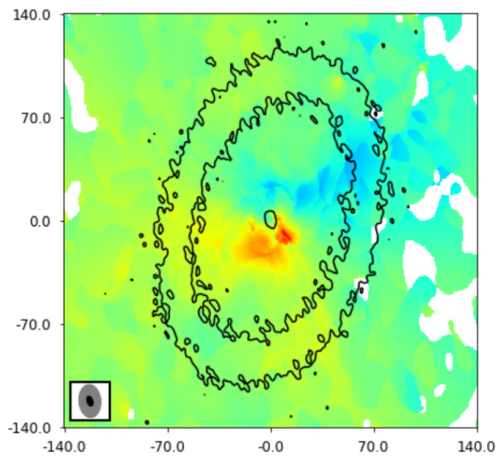




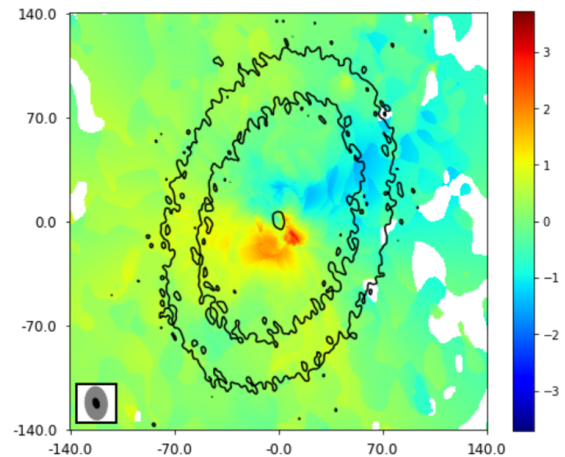
PA -22.4°



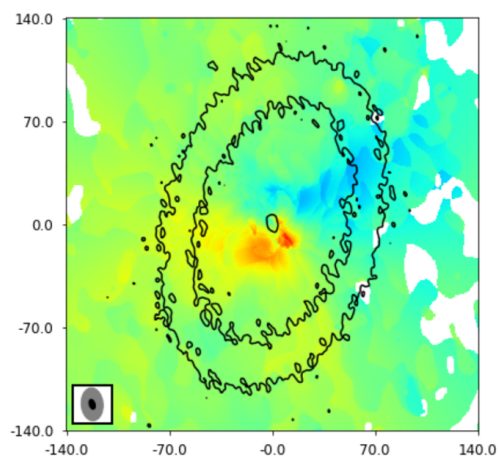
PA -23.4°



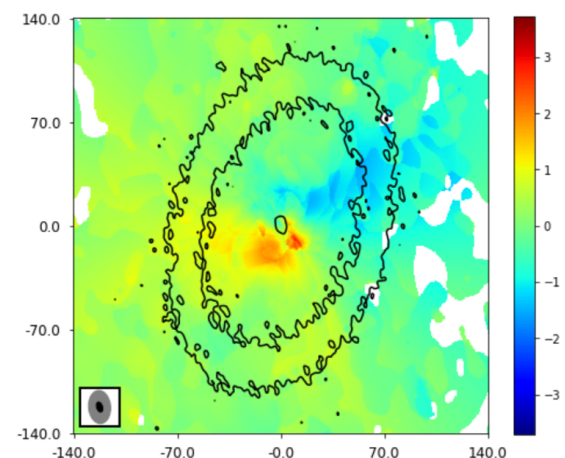
PA -24.4°



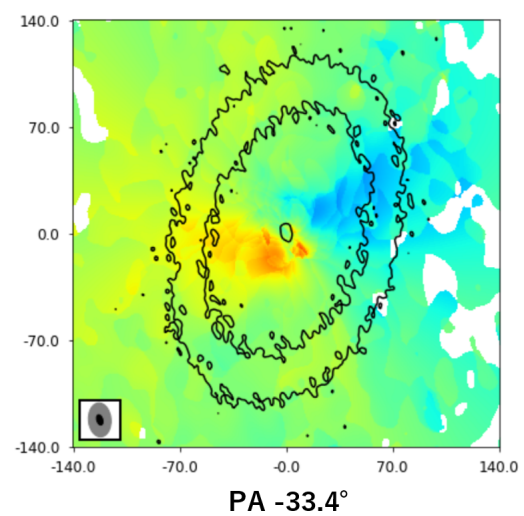
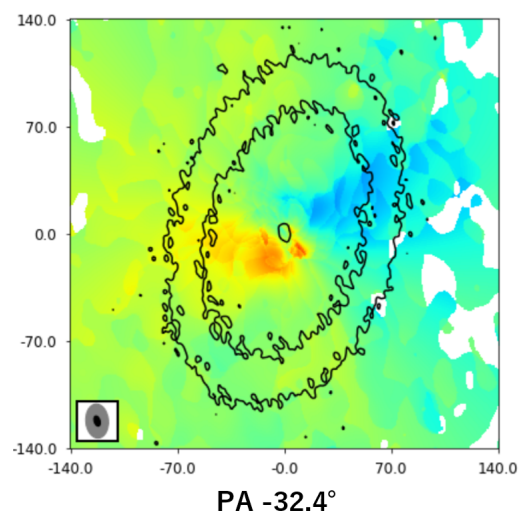
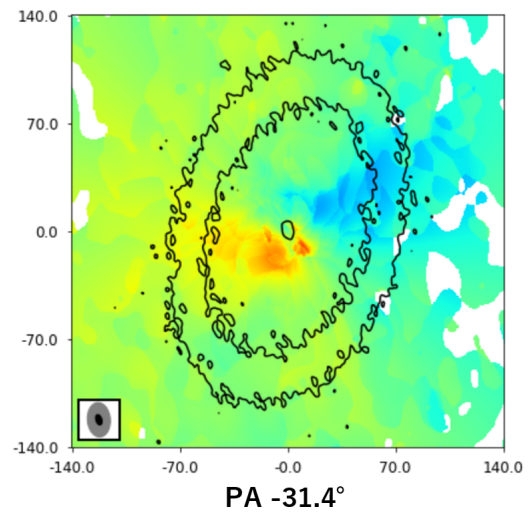
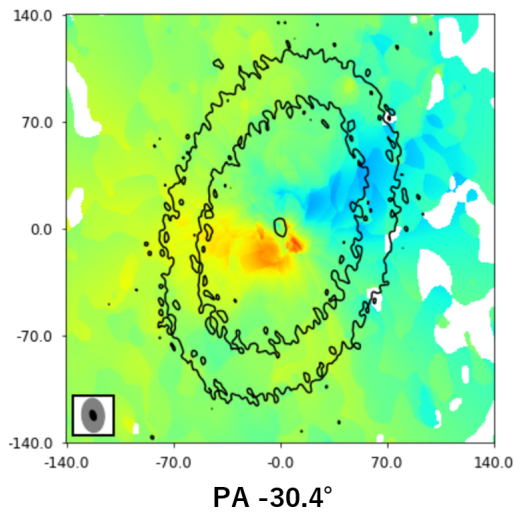
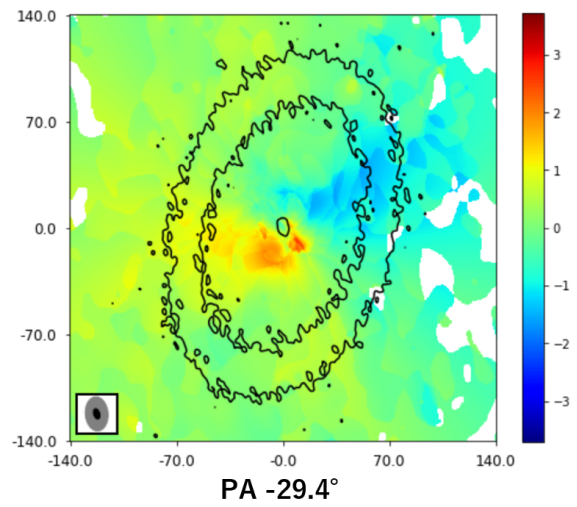
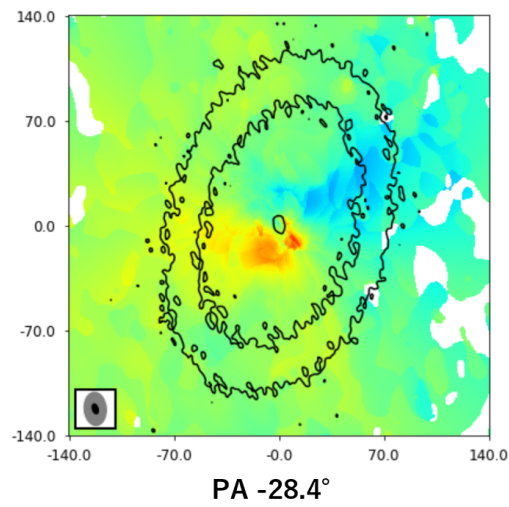
PA -25.4°



PA -26.4°



PA -27.4°



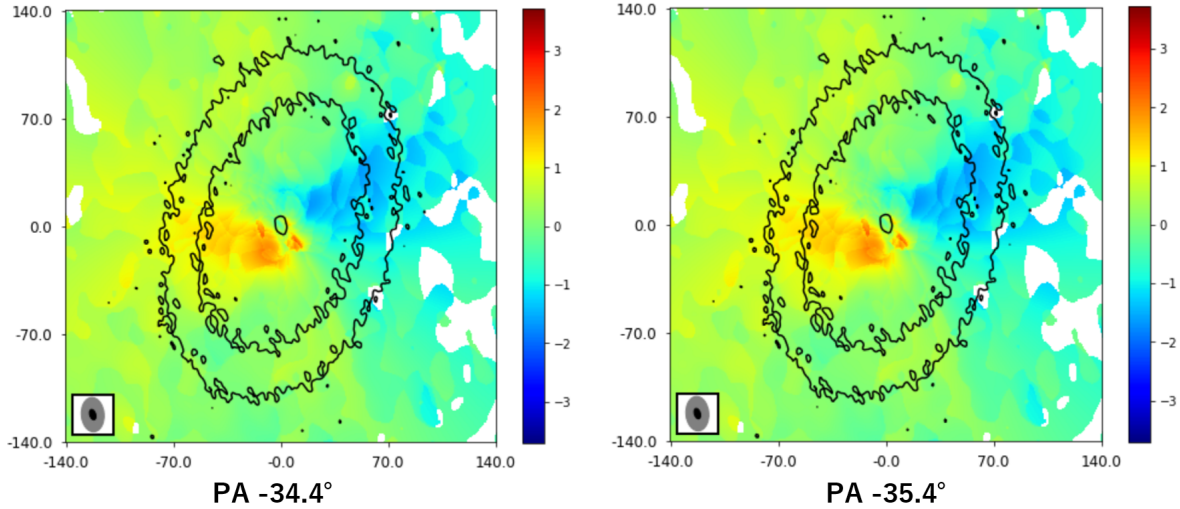


図 5.1: Position Angle 変更 -10.4 -35.4 の比較

モデルの Position Angle の設定値を変えてデータとの残差を比較した図について、モデルを右回りに傾けるごとに注目している箇所の残差が無くなっていく様子が分かる。(色が薄くなっている) モデルをデータより 15 度傾けたあたりでは、中心より右下部分は残差があるが、中心より左上部分は残差が無くなっている。

データとして用いた SY Cha の円盤が実際どのような構造をしているかはまだ分かっていない部分もあり、モデルとデータとの間にどれほどの誤差があるかは正確には分からない。そのため、誤差がある場合とない場合の二通りに分けて考察する。

- ・誤差がある場合を考える。中心から離れた領域において、 $V < |\pm 1|$ 程度の残差はあるが、モデルとデータは概ねフィットしていることが図 4.3 から分かる。一方、中心に近い領域においては、上述したように図 4.3 で残差が顕著であった部分が、図 5.1 でモデルの Position Angle を傾けるごとに残差が 0 に近づき、フィットしていく様子を見ることが出来る。モデルは、完全な平面上の円盤を斜めから見た状況にあると仮定していたことを思い出すと、このデータの円盤は中心から離れた領域 (outer disk) と中心に近い領域 (inner disk) で Position Angle が異なった、少しねじれているような円盤であることが考えられる。

- ・誤差がない場合を考える。モデルでは仮定より、ケプラー回転をしているので円盤平面の動径方向に速度が無い状態。その状態において、モデルの視線速度 0 km/s の短軸の部分でデータでは視線速度の正負がある。図 4.3 の円盤中心付近を見てみると、左上 (円盤奥側) では負の値、右下 (円盤手前側) では正の値を示している。つまり、ガスが中心星に落ちていくような動きをしていると考えられる。以上より、SY Cha が中心星のガス円盤は降着円盤であると推察ができる。

第6章 まとめと今後の展望

ガスの運動の理解のため、今回のモデルとデータの比較では moment 1 map を用いたが、SY Cha の inner disk がどのような動き方、構造をしているのかを推定するためには、速度分散マップである moment 2 map などの他のマップも使用する必要がある。特に円盤の構造を推定するには複数輝線観測が威力を発揮することから、今回用いたデータは ^{12}CO 輝線であったが、円盤全体のガス運動を理解するためには、 ^{13}CO など他の同位体の観測データも用いて議論する必要がある。

今後は、実際の複数輝線観測データを用いた円盤厚み方向の構造の理解と、ガスの粘性・散逸や中心星が円盤に与える影響などを考慮した円盤動径方向の機構について理解しなければならない。

付 録 A 降着円盤

降着円盤とは、円盤中の回転しているガスが粘性の働きにより角運動量を失いながらゆっくりと中心星に落下する現象のあるガス円盤のことである。

標準降着機構として、まず回転している降着円盤では、ガス同士が互いに接している。その層の間で回転角速度の違いにより摩擦が働き、その摩擦によりガスは加熱され、電磁波を放射し始める。

また、摩擦は同時に角運動量の輸送にも働き、回転角運動量の速い内側の層は、遅い外側の層と相互作用して角運動量を少し失い、さらに内側の軌道へ移る。

遅い外側の層は角運動量を得て、同様にしてさらに外側へ伝えていき、自身は内側へ移る。

以上のようなシステムでガスは回転しながら中心の天体に向かって落下し、一方ガスの角運動量は円盤内部から外側へ輸送されていく。ガスは常に外部から補給され続けることで円盤の定常的な状態が保たれる。このような円盤の中心星は大質量星、高密度天体であることが多い。[6]

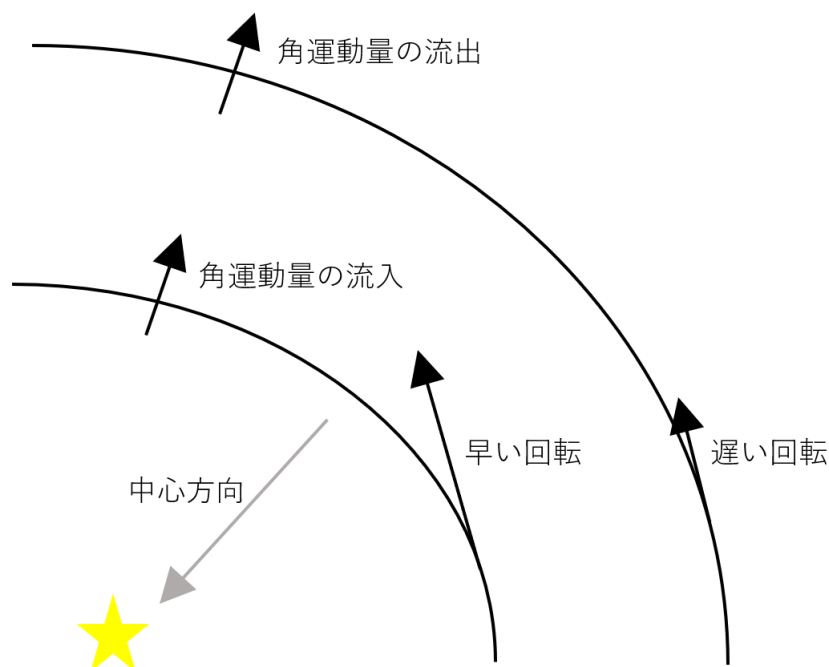


図 A.1: 降着円盤機構

参考文献

- [1] 百瀬宗武、原始惑星系円盤の電波観測入門（1）：惑星系の母胎を探る
- [2] 国立天文台編、干渉計サマースクール 2005 教科書
- [3] 中井直正他、シリーズ現代の天文学第 16 巻宇宙の観測-電波天文学
- [4] Orihara et al.2023
- [5] 折原龍太、修士学位論文 ALMA Band 6 high-resolution observations of the transitional disk around SY Cha
- [6] 福井純他、シリーズ宇宙物理学の基礎第 1 巻宇宙流体力学の基礎

謝辞

本研究を進めるにあたり、丁寧に指導してくださった多くの皆さまに深く感謝します。電波天文学の基礎を学ぶゼミなどでは、指導教員の百瀬宗武教授に丁寧な説明や指導をいただきました。特に研究室の先輩である折原龍太さんには、研究の進め方や解析での分からなかった点など、様々なことで相談に乗っていただきました。折原さんがいなければ研究を進めることが出来ませんでした。改めて深く感謝申し上げます。ありがとうございました。