星間17b

自己重力的な星周円盤の粘性降着進化

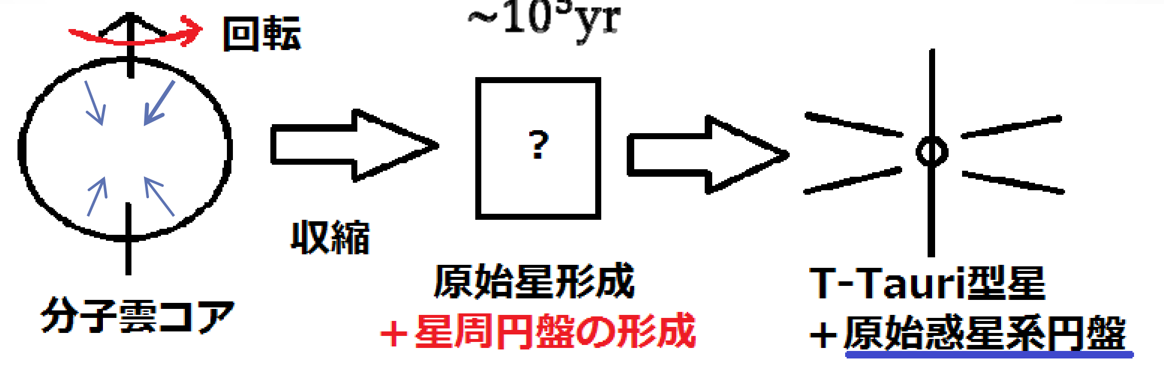
大谷卓也
大阪大学宇宙進化グループ D1
共同研究者　釣部通

概要

- 円盤形成時における微小な原始星と若い星周円盤の共成長を調べた。中心星の質量が小さく円盤自身の重力が重要となる主質量降着期において様々な初期条件のもと角運動量輸送の大きさを変え、円盤の面密度や星との質量比を系統的に求めた。
- 円盤面密度の半径分布や円盤と原始星の質量比の由来は何かについて研究する。観測的に見えない円盤形成時の物理を画一的に理解することを目的とする。ここでは現状の結果を報告する。

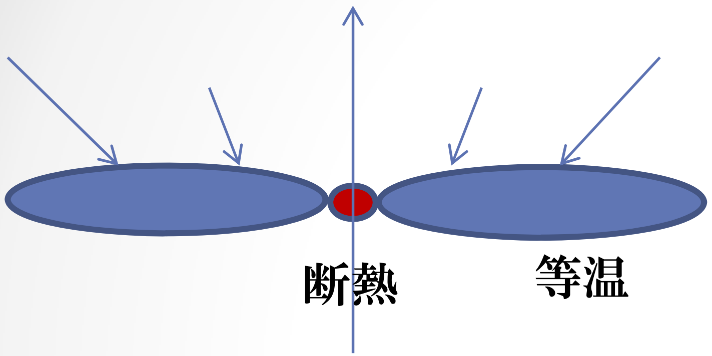
1.Introduction

- 星形成期において原始星は周りに円盤を持っている。原始星及びその周りの若い円盤はファーストコアを含む厚い雲の中で形成されるといわれているが、その形成過程は観測できないためよくわかっていない。
- 形成された後の円盤は星との質量比が非常に様々であることがわかっている。円盤の質量は星の10^{-3}から1程度と非常に幅広い。また惑星形成理論からも初期条件として様々な質量比の円盤が存在していることが要請されている(Kokubo&Ida2002)[1]。どうしてそのような質量比になるのか、円盤形成の画一的な理解が必要である。



回転分子雲コアからの星形成シナリオ

おおよそのシナリオ



Core+ heavy disk

- 角運動量輸送
- 質量再分配

Protostar + disk

どれくらいの降着量でどんなmass比になる？

- 回転している分子雲では、ガスは角運動量を持っているので収縮したガスは遠心力サポートを受ける。そのため直接中心星には降着せず、収縮したガスが一旦周りの円盤に降り積もる。この段階では断熱的な軽い中心領域(後に原始星へと進化する領域)と、重い円盤という姿になっている。このままでは十分な質量の星はできない(角運動量問題)ので、円盤の上ではトルクが働き角運動量が失われ円盤を通してガスが中心星へと降着すると考えられている。(質量再分配)
- 本研究では、円盤からの降着量に着目する。角運動量輸送の大きさを変え、広い範囲の円盤の上で起こる質量降着の大きさを求め原始星の成長や円盤の成長を調べた。角運動量輸送の素過程を問わず、どれくらいの角運動量輸送があればどのような質量比になるのかということを調べた。また、面密度等の物理量が降着を経たあとどのような半径分布になるのかということも調べ、まとめた。

2.Model

- 軸対称 thin disk とする。
- 中心より外側、遠心力と重力が釣り合う力学平衡面より内側の円盤を考える。(ファーストコア内の化学発展は考えず、半径の大きい範囲のみに着目する。)
- 圧力を無視し、十分ゆっくりと降着する($v_r \ll v_\varphi$)と仮定する。
- 円盤は分子雲収縮の履歴を踏まえている。外側では等温の円盤から中心への降着を考えるため、ここでは角運動量輸送のない等温分子雲収縮の自己相似的な解(Saigo&Hanawa1998)[2]における円盤の面密度分布および角運動量分布を初期条件に採用する。円盤の外側境界は、等温円盤の重力と遠心力が釣り合う力学平衡面[2](時間に比例して広がる)を用いる。回転中心に質量がない状態から円盤を通した質量降着による中心星の成長と円盤の質量再分配を計算する。
- 素過程は問わず、角運動量輸送の効果を実効的な α 粘性として扱う。
- 温度はRHDの局所計算を用いず、球対称収縮の研究で用いられるバロトロピック条件を用いる。

基礎方程式

- **質量保存の式** $$r\frac{\partial\Sigma}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial r}\left(r\Sigma v_r\right)=0$$
- **運動方程式** $$\frac{\partial v_r}{\partial t}+v_r\frac{\partial v_r}{\partial r}=-\frac{c_s{}^2}{\Sigma}\frac{\partial\Sigma}{\partial r}-F_r+\frac{v_\phi{}^2}{r}$$
- **角運動量保存式** $$r\frac{\partial}{\partial t}\left(\Sigma r v_\phi\right)+\frac{\partial}{\partial r}\left(r\Sigma v_r r v_\phi\right)=\frac{\partial}{\partial r}\left(\nu\Sigma r^3\frac{\partial\Omega}{\partial r}\right)$$
- **重力について** $F_r \equiv \frac{GM}{r^2}$ $, M = M_* + M_{disk}$ $M_{disk} = \int_0^r 2\pi r\Sigma dr$

  中心星重力+円盤重力

近似
- 圧力を無視
- 遠心力＝重力 (十分にゆっくりと降着する)

粘性：αモデル

$$\nu=\alpha c_s h \qquad h\sim\frac{c_s}{\Omega}$$

$$\frac{\partial\Sigma}{\partial t}=-\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{1}{\frac{\partial\left(r v_\phi\right)}{\partial r}}\frac{\partial}{\partial r}\left(\nu\Sigma r^3\frac{\partial\Omega}{\partial r}\right)\right)$$

- thin disk

- 温度条件(barotropic)　(十分に密度が濃いところでは断熱的になる)

$\rho > 10^{-13}(\mathrm{g/cm^3})$ではバロトロピック条件　$T \propto \rho^{\gamma-1}$

$\rho < 10^{-13}(\mathrm{g/cm^3})$で等温、$c_s = 0.20(\mathrm{km/s})$

(自己相似解との比較のため、結果では全領域を等温にしたものにも触れる。)

- 初期条件　j :角運動量　M(r):半径rより内側の円盤質量

$$\Sigma = \Sigma_1 r^{-1}, M_{disk}(r) \propto r$$

Saigo&Hanawa(1998)[2]

$$j = \omega \frac{GM(r)}{c_s}$$

分子雲の角運動量を保持

Matsumoto et al.(1997)[3]

分子雲暴走収縮期の流体シミュレーション遠心力＝重力となったとき $\omega = 0.3$

パラメータ：α, c_s, ω

基本モデル

モデル	ω	円盤質量 (100AU)	中心星質量
A	0.2	0.1125	0
B	0.3	0.05	0
C	0.4	0.05625	0

3.結果

3.1 全領域を等温とした場合
面密度

Σ

論文執筆中のため、
図は削除します。

まずは、等温の場合について示す。
面密度と回転速度について示す。

$\alpha = 0.1$
$\omega = 0.3$

時間が経つと内側から次第に$\Sigma \propto r^{-1.5}$と変化した領域が生まれ、その領域が時間に比例して広がっている。内側の領域で原始惑星系円盤の標準モデルの面密度分布に漸近している。

定常解の一つと同じ半径依存性

回転速度

v_ϕ

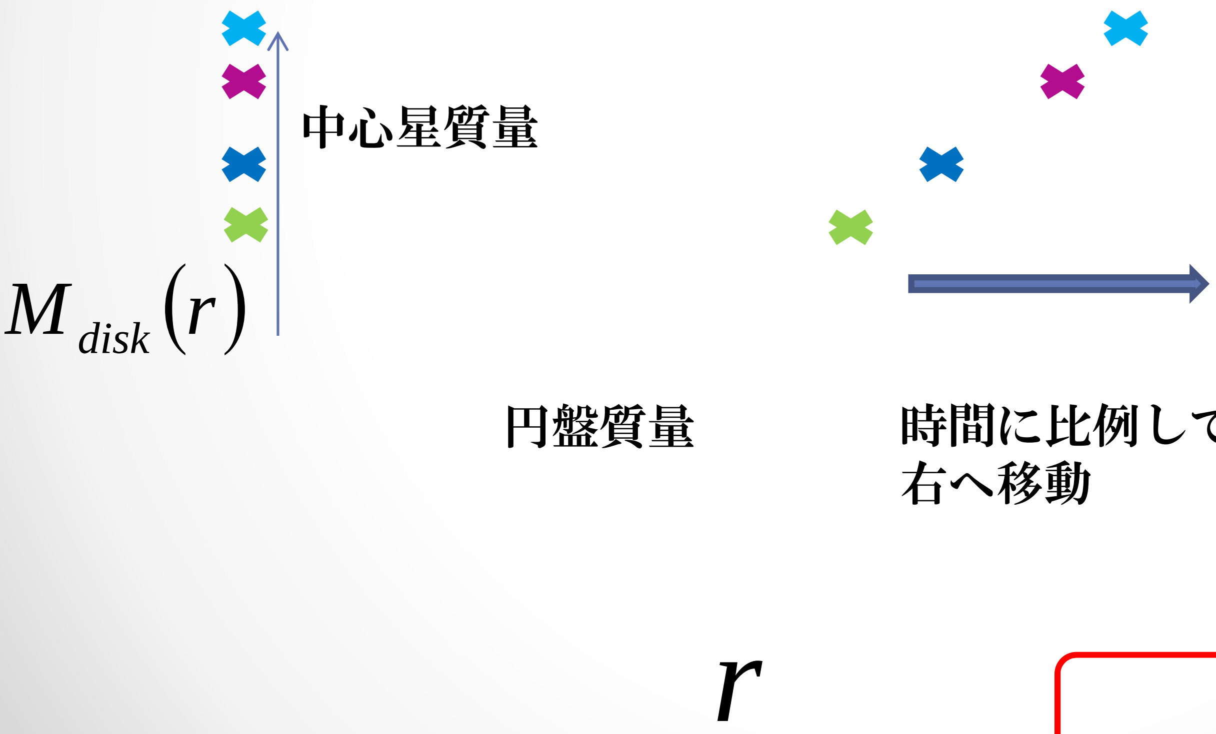
AU r

内と外で異なる半径依存性の回転をしている。
内：kepler型　外：等速度回転

中心付近では質点周りのケプラー速度になっている。これから、中心に大きな質量があり、重力を受けて回転していると考えられる。

次に、各物理量の空間分布から示唆された、内側と外側の領域をわけている原因について考察する。内側は質点周りの回転、外側では初期状態と同じように、円盤自己重力によって回転則が決まっていることが分かる。

それを確認するため、質点以外の円盤の質量分布 $M_{disk}(r)$ の時間進化を示し、同時に中心の質量 M_* の値も点で示す。



$$M_{disk}(r) = M_*$$

となる半径付近で物理量の半径依存性が変わっている。特徴的な半径 r_* と名付ける。

$\alpha = 0.1$

$\omega = 0.3$

$$r_*(t) = 5.1 \times 10^{-4} t(AU)$$

他のパラメータに対しても速度を求めると

結果

参考)初期条件 $\Sigma(t=0)\propto r^{-0.5}$ この時も$\Sigma\propto r^{-1.5}$ に漸近

$\Sigma\propto r^{-1.5}$

1. 面密度は粘性降着による質量再分配を受けると、角運動量の大きさ、半径依存性といった初期条件によらず粘性係数によってきまる半径依存性に漸近する。特に等温で中心星の重力を受ける領域では原始惑星系円盤モデルの面密度、 $r^{-1.5}$ となった。

Σ

3.2バロトロピック条件あり

$\alpha = 0.1$

$\omega = 0.3$

Σ

等温の時とは異なる値

2. 面密度や回転速度、質量降着率は２つの特徴的な半径を境界にしてその前後で様子が変わっていた。中心星質量M_*と円盤質量M_{disk} が等しくなる半径r_* と、高密度のため断熱的になり音速が変わる半径r_{crit}である。

4.考察

- 等温、粘性降着円盤の自己相似解[4]との比較

$$\Sigma = \frac{c_s^2}{2\pi G q_0^2 r}$$ 外

$$\Sigma = \frac{1}{\pi G}\left(\frac{3\alpha c_s^5 t}{Q^3 r^3}\right)^{1/2}$$ 内

左はTsuribe(1999) [4]で得られた、中心星の質量が円盤からの降着で増加する降着円盤の自己相似解のうち、低温(圧力勾配による力を無視した)の条件を取り入れた面密度解である。3.1で時間変化していく半径分布に一致している。

回転速度によって決まる数

自己相似解は、等温・圧力なし・α粘性などの条件を課した上で解が存在することを示す。しかし自然がその解を取りうるのかは自明ではない。多彩な初期条件のもと計算を行っても初期条件を忘れて粘性係数で決まる値に漸近するということが分かった。

・質量比について

質量の時間変化、色の違いはαの違いに対応

実線：中心星質量
破線：円盤質量

M_{solar}

time(yr)

本研究の計算の範囲では、M_*、M_{disk} ともに時間とともに大きくなる。質量比M_*/M_{disk}は粘性係数 が大きいとき小さくなるという傾向があった。降着量が多くなるというために小さくなるという予想と合致する。α~1のとき$M_* \sim M_{disk}$ で、α<< 1 のとき$M_* \ll M_{disk}$ ということが分かった。粘性係数の大きさに依存するが、いずれも多くの場合で円盤質量の方が重いという結果になった。

今後：分子雲からの質量供給が無くなるなど境界条件を加える予定。
→円盤質量に上限があるので、M_{disk}が小さくなるはず。
αの値に対して定性的に質量比が分かるようにしたい。

Ref)
[1]Kokubo,E & Ida,S. 2002,ApJ,581,666
[2]Saigo,K & Hanawa,T. 1998,ApJ,493,342
[3]Matsumoto, T., Hanawa, T., & Nakamura, F. 1997, ApJ, 478, 569
[4]Tsuribe,T. 1999, ApJ,527,102

まとめ

- 円盤形成時における微小な原始星と若い星周円盤の共成長を調べた。
- 円盤面密度分布は、初期条件を忘れて粘性係数で決まる値に収束する。
- 面密度や回転速度、質量降着率といった円盤の物理量は、中心星質量M_*と円盤質量M_{disk}が等しくなる半径r_*と、高密度のため断熱的になり音速が変わる半径r_{crit}という２つの特徴的な半径を境界にして傾向が説明できる。
- M_*、M_{disk}どちらも時間とともに大きくなる。質量比M_*/M_{disk}は粘性係数 が大きいとき小さくなるという傾向があった。α~1のときM_*~M_{disk}で、α<<１のときM_* << M_{disk}ということが分かった。粘性係数の大きさに依存するが、いずれも多くの場合で円盤質量の方が重い。