

回転軸と磁力線が一致していない場合の分子雲コア収縮時におけるアウトフローと質量降着

橋田 英之 (九州大学大学院 理学研究科)

Abstract

アウトフローやジェットは星形成過程において分子雲コアから質量、角運動量、エネルギーなどを再分配するという重要な役割を持っている。この研究では、回転軸と磁力線のなす角 α が $\alpha \neq 0$ で分子雲コアが収縮する時にできるアウトフローの形成を 3 次元理想 MHD シミュレーションを用いて行い、 α を変化させた時の時間発展を調べた。その結果、角度 α を増加させると、アウトフローの質量放出の効率は悪くなる事、また $\alpha \sim 90^\circ$ ではアウトフローは抑制される事がわかった。さらに、アウトフローは $\alpha \neq 0$ の時、歳差運動をし不安定になる傾向がある事もわかった。

1 Introduction

星形成時には、ジェットやアウトフローといった現象が見られる。これらの現象は大局的な磁力線が降着しているプラズマから重力エネルギーを抽出し、運動やポインティング流束といった形に変える事によって、ジェットが噴出していると考えられている。基本的な磁気流体力学的メカニズムによって噴出、収束するジェットやアウトフローの詳細な研究は Blandford&Payne(1982) において行われ、その後たくさんの研究者によって調べられた。しかし、いくつかの例外を除き、一般に収縮するコアとジェットの噴出は磁力線と回転軸のなす角 $\alpha = 0$ という簡単なモデルでのみ行われてきた。この研究では磁力線と回転軸が一致していない時の分子雲コアの収縮のシミュレーションを行い、基本的なアウトフローの特徴や質量降着について明らかにする事を目的とする。

2 Methods

シミュレーションは Godunov-type 法を用いて、理想 MHD 方程式の計算を行った。初期条件として、観測的に知られている分子雲コアのような $1M_\odot$ のコアを用い、数密度

$$n(r) = \frac{n_c}{1 + \frac{r}{r_0}} \quad (1)$$

で与えた。ここで r_0 は、 $r_0 \sim 1000AU$ でコアの内半径を表す。このコアを等温 ($T \sim 10K$) で中心の密度のおよそ 10% 程度の密度の外縁を持った温かく圧力平衡の媒質の中に配置した。初期磁場は分子雲を貫くように z 軸方向一様に配置し、磁場強度は分子雲の柱密度に比例させた。シミュレーションは次の 4 つのパラメーターで特徴づけられる。

1. 回転と重力のエネルギー比
2. 熱と重力のエネルギー比
3. 磁化度合い μ
4. 回転軸と磁力線のなす角 α

この研究では、 μ と α を変化させてシミュレーションを行った。

3 Results

初めは球状だった分子雲コアは重力収縮を経て、磁気張力によって磁場方向に平らになり、pseudo-disk(偽円盤)を作る。その後、等温収縮段階を経て、中心に落ち込む infalling envelope を作る。続いて 50-200AU の遠心力に支えられた円盤 (simple-disk) を作る。 α が大きくなると、角運動量輸送の効率が悪い厚い偽円盤ができ、遠心力で支えられた円盤を容易に作る事が出来た。一般に、アウトフローは

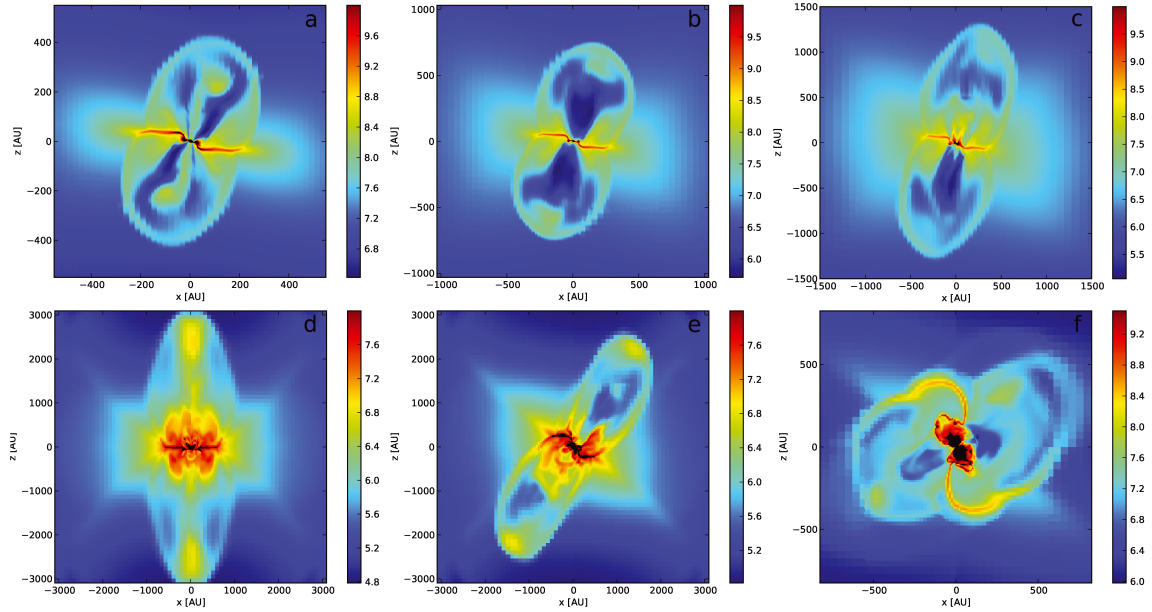


図 1: 上段は $\alpha = 20^\circ, \mu = 5$ の時の時間発展を表し、左から (a)20300yr, (b)21300yr, (c)22200yr を表す。下段は左から $\alpha =$ (d) 0° , (e) 45° , (f) 70° 、時間 27000yr の時アウトフローを表す。それぞれ色合いは密度 (cm^{-3}) を表す。

$\alpha \leq 80^\circ$ では遠心力に支えられた円盤の有無に関係なく噴射され、 $\alpha \sim 90^\circ$ では遠心力に支えられた円盤が存在したとしても噴射は抑えられる事が分かった。(図 1) また、回転軸と磁力線が一致しないケース ($\alpha \neq 0$) では、アウトフローは z 軸まわりを歳差運動する事が分かり、この効果は α が小さいほど大きい事が分かった。歳差運動は、kink-like の不安定を発生させてジェット的不安定の成長を促進する。結果として、歳差運動とこの不安定性はアウトフローをいくつかのクランプに分裂させる。また、これは断続的なアウトフローの放出と共に、階層的な構造と内部衝撃波を作り出す事が分かった。次に、質量降着について調べた所、pre-stellar コアの収縮が起こっている時の質量放出、質量降着の一般的な傾向は α の増加に伴って質量放出率は減少した。放出された質量を M_{out} 、降着する質量を M_{core} とし、その和を M_{inf} とすると時間初期では M_{inf} の時間変化は μ, α に寄らず一定になった。そして、質量放出率 \dot{M}_{out} は、 M_{core} に比例し、その比例係数は α によ

て変わる事がわかった。

$$\dot{M}_{out} = \tau_{ae} M_{core} \quad (2)$$

そのため、収縮初期段階ではコアの質量が小さいため、放出と降着では降着が優勢に働く事がわかる。また、放出と降着のタイムスケール τ_{ae} は

$$\tau_{ae} = \frac{\tau_0}{\cos \alpha} \quad (3)$$

と表され、 α が小さいほど短時間でアウトフローが噴出されることが分かった。ここで、 τ_0 は $\alpha = 0$ の時のタイムスケールを表す。

4 Discussion

シミュレーション結果から α を変えた時の特徴が分かった。今後は、Ciardi, A.& Hennebelle, P. (2010) と同様に回転軸と磁力線が一致していない時のアウトフローを長時間で計算を行い、実際に観測されているアウトフローと比較して検証する。

5 Conclusion

回転軸と磁力線が一致していない時 ($\alpha \neq 0$) の分子雲コアの収縮の 3 次元シミュレーションを行った所、回転軸と磁力線のなす角 α が増加するにつれてアウトフローの放出の効率は悪くなり、 $\alpha \sim 90^\circ$ ではアウトフローが抑制され、コアの質量は増加した。さらに、回転軸と磁力線が不一致な場合 ($\alpha \neq 0$) は、理想化されたモデル ($\alpha = 0$) では見られなかったような不安定の影響を受けやすい歳差運動するジェットが α が小さいときによく見られた。そして、質量放出率 \dot{M}_{out} はコアの質量に比例し、 α の減少と共にコアの表面を貫く磁束が減少するため \dot{M}_{out} も減少した。

Reference

Ciardi, A., & Hennebelle, P. 2010, MNRAS, 409, L39