

宇宙ジェットのMHDシミュレーション

上原 一浩 (京大理)
プロジェクトID: mku81c

1 イントロダクション

宇宙には、原始星ジェットや近接連星系ジェット、AGNジェットなど、星から銀河までさまざまなスケールのジェットがある。これらには(1)ジェットの速度は中心天体の脱出速度程度、(2)ジェットは非常によく収束している、(3)中心天体のまわりには降着円盤が存在していると考えられている、といった共通の性質がみられ、同じ物理が働いているのではないかと考えられる。しかし、ジェットの加速、収束といった問題は未解決である。

これらの問題を解決するため、これまで非定常MHDシミュレーションを用いた宇宙ジェットの研究は数多くなされてきた。それらの研究の多くは回転軸方向に一様な磁場を仮定してきた。しかし、中心天体と円盤の相互作用を考慮することはジェットの形成や角運動量輸送、質量降着を考える上で非常に重要であり、一様磁場の研究だけでは不十分である。

これまでに、双極子磁場を仮定した非定常MHDシミュレーションが行われてはいる (Hayashi et al.1996, Goodson et al. 1999, Romanova et al. 2002) が、磁場の強さへの依存性は調べられていない。依存性を調べることはジェットの性質を明らかにするために重要である。そこで我々は、磁場形状として双極子磁場を考え、ジェットの速度や質量降着率などがどのように磁場の強さへ依存しているかを調べるために非定常MHDシミュレーションによって広範囲のパラメータサーベイを行った。

2 方法

円柱座標を使用し、軸対称を仮定。中心天体のまわりをケプラー回転する降着円盤をおき、コロナは等温で静水圧平衡とする。初期磁場として中心天体が双極子磁場をもつとし、その磁気モーメントは円盤の回転

軸に一致しているとする。また、中心天体の回転は考慮していない。重力は中心天体のみを考え、円盤の自己重力は考えない。

抵抗は、異常抵抗モデル $\eta = \eta_0((v_d/v_c)-1)^2$ を使う。ここで、 $\eta_0 = 0.01$ 、 $v_d = J/\rho$ 、 $v_c = 0.001$ 、 J は電流密度である。中心天体の表面の境界は、 $0.1 < r < 0.2$ の領域では $r = 0.1$ で滑らかに初期値に近づくように減衰させ、 $r < 0.1$ の領域は初期値に固定する。

磁場の強さのパラメータ $E_{mg} = V_{A0}^2/V_{K0}^2$ は円盤内縁での磁場のエネルギーと重力エネルギーの比である。 V_{A0} 、 V_{K0} はそれぞれ、円盤内縁でのアルフベン速度、ケプラー速度である。今回我々がパラメータサーベイを行った範囲は、 $2 \times 10^{-9} \leq E_{mg} \leq 2 \times 10^{-4}$ である。

全ての計算はメッシュ数 300×300 で行った。計算法は CIP-MOCCT 法を使用した。

3 研究成果

図1、図2はそれぞれ典型例 ($E_{mg} = 2 \times 10^{-6}$) の温度分布と密度分布の中心付近 (4×4) を拡大したものである。時間は 2π で円盤内縁の1回転である。矢印は速度ベクトルを表し、矢印の大きさ1は円盤内縁のケプラー速度である。白線は磁力線を表している。

ジェットは円盤内縁のケプラー速度程度であり、ジェットの先端にはバウショックが見られる。カレントシートにおいてジュール加熱が起こり、ガスが高温になっている。一方、その外側では低温な円盤のガスが放出されていることがわかる。リコネクションジェット（高温部）と円盤からのジェット（低温部）の境界ではケルビン-ヘルムホルツ不安定が起きていることがわかる。また、磁気回転不安定によって質量降着が起きている。

図3、図4はそれぞれ典型例の温度分布と密度分布の全体図 (15×15) である。始め、斜め上に出ていたジェットが、しだいに軸方向へ収束していく様子がよくわかる。また、円盤のガスが遠方まで運ばれていく様子もみられる。

図5は質量降着率と質量放出率の時間変動を表している。質量降着、質量放出どちらも間欠的におきることがわかる。質量降着の周期は円盤内縁の0.5回転程度で、磁気回転不安定によって質量降着が起きていることを示している。

図6はそれぞれ、ジェットの最大速度 V_{zmax} (左上) ・ 質量放出率 M_w (右

上)・質量降着率 M_a (左下)・質量放出率/質量降着率 M_w/M_a (右下)の初期磁場の強さへの依存性を示している。

ジェット最大の速度はおよそ $V_{zmax} \propto E_{mg}^{1/2}$ となり、一様磁場の場合 $V_{zmax} \propto E_{mg}^{1/6}$ (Kudoh et al.1998,Kato et al. 2002) とは異なる依存性を示すことがわかった。これは、リコネクションジェットを速度をジェットの最大速度としてとらえていると考えられる。リコネクションジェットはアルフベン速度でできるが、リコネクションポイントでの密度は磁場の強さには依存していないので、アルフベン速度は磁場の強さに比例する。したがって $V_{zmax} \propto V_A \propto E_{mg}^{1/2}$ となる。

質量放出率と質量降着率はおよそ $M_w, M_a \propto E_{mg}^{1/2}$ となり、一様磁場での依存性と同様の結果となることがわかった。また、質量放出率/質量降着率には明らかな磁場の強さへの依存性はみられなかった。

4 まとめ

本研究によって我々は、磁場構造が双極子磁場の場合で、次のことを明らかにした。(1) 回転軸方向に細く絞られたジェットが発生すること、(2) ジェットの速度は円盤内縁のケプラー速度程度であり観測と一致すること、(3) ジェットの最大速度は双極子磁場のほうが磁場に対する依存性が強いこと、(4) 質量放出・質量降着は間欠的に起こること、(5) 質量放出率・質量降着率の磁場の強さへの依存性は一様磁場の場合と同様であること

参考文献

- Goodson,A.P.,Bohm,K.H.,&Winglee,R.M.,1999,ApJ,524,159
Hayashi,M.R.,Shibata,K.,&Matsumoto,R.,1996,ApJ,468,L37
Kato,S.X.,Kudoh,T.&Shibata,K.,2002,ApJ,565,1035
Kudoh,T.,Matsumoto,R.&Shibata,K.,1998,ApJ,508,186
Romanova,M.M.,Ustyugova,G.V.,Koldoba,A.V.,&Lovelace,R.V.E.,2002,ApJ,578,420

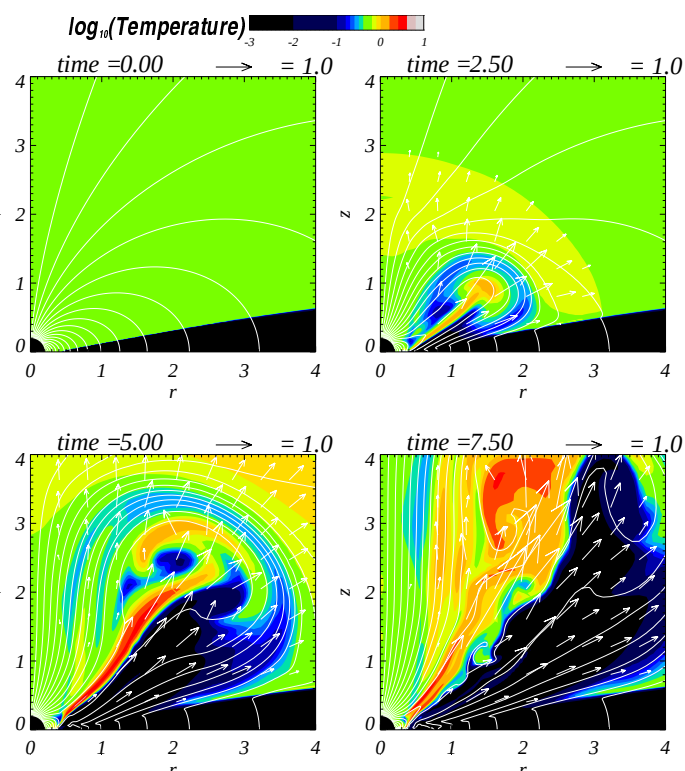


図 1: 温度分布:中心付近。 $E_{mg} = 2 \times 10^{-6}$ の場合。

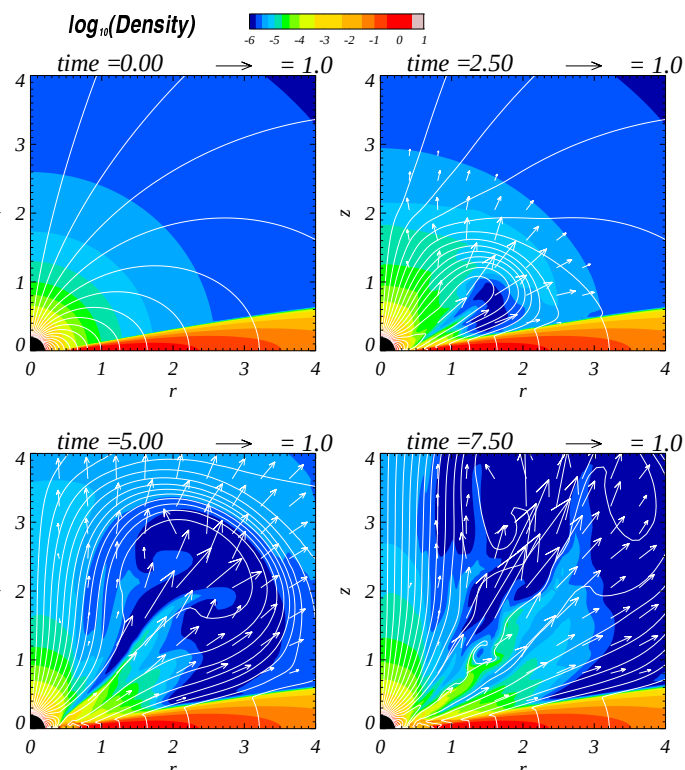


図 2: 密度分布：中心付近。 $E_{mg} = 2 \times 10^{-6}$ の場合。

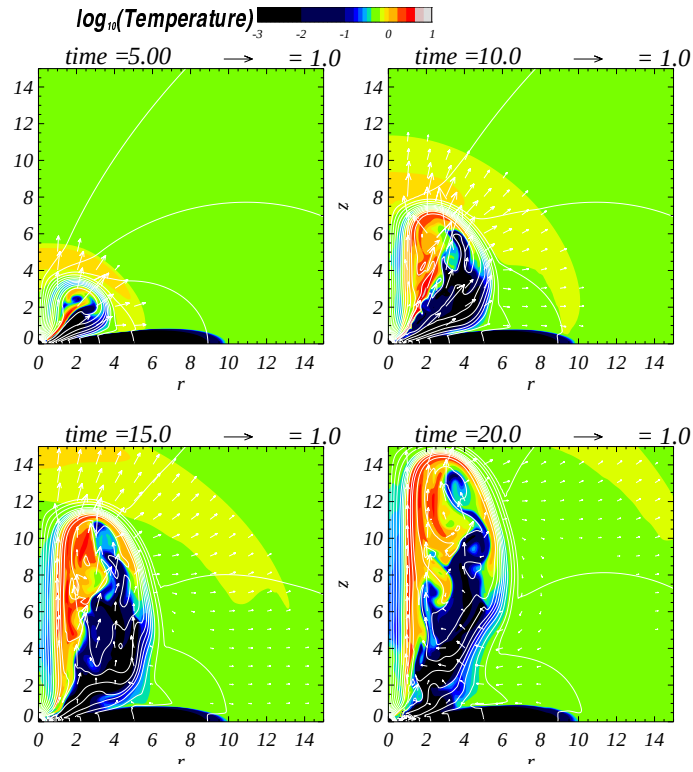


図 3: 温度分布。 $E_{mg} = 2 \times 10^{-6}$ の場合。

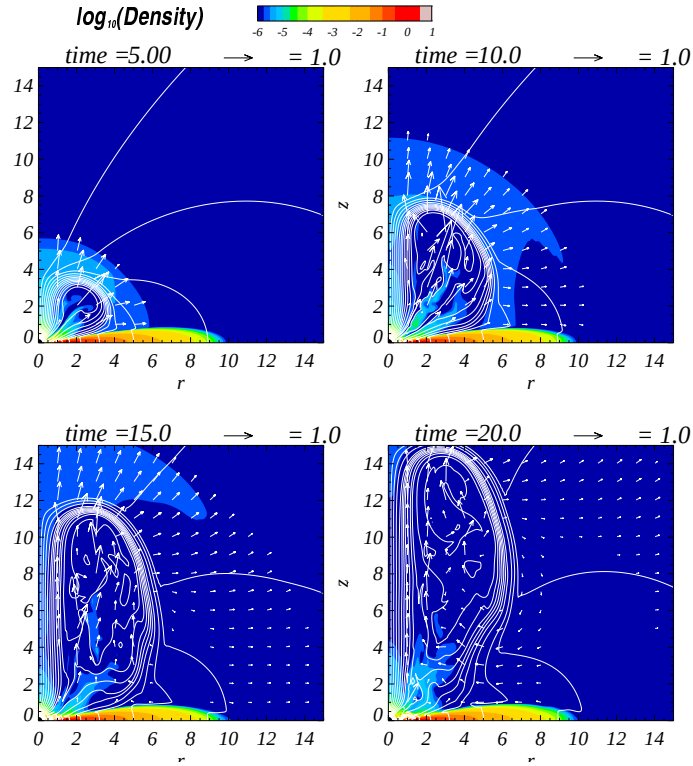


図 4: 密度分布。 $E_{mg} = 2 \times 10^{-6}$ の場合。

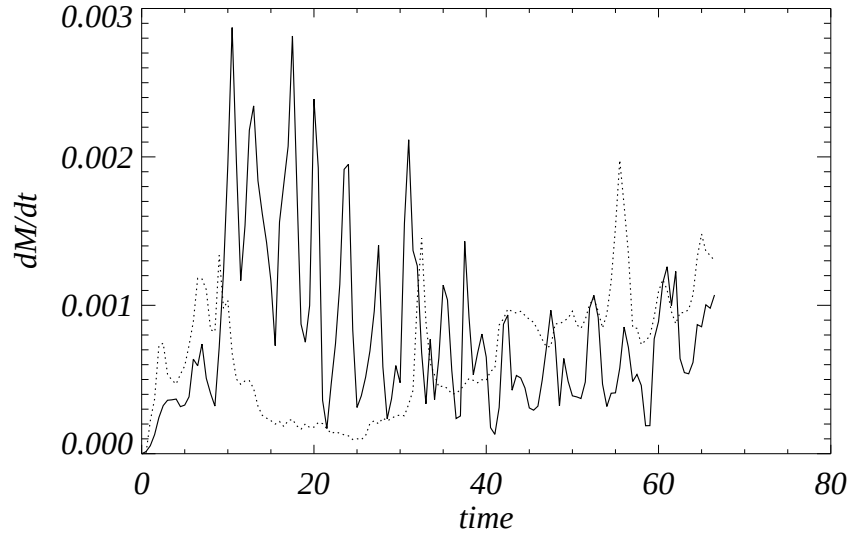


図 5: 質量降着率と質量放出率の時間変動。 $E_{mg} = 2 \times 10^{-6}$ の場合。実線は質量降着率、点線は質量放出率。質量放出率は 10 倍してある。

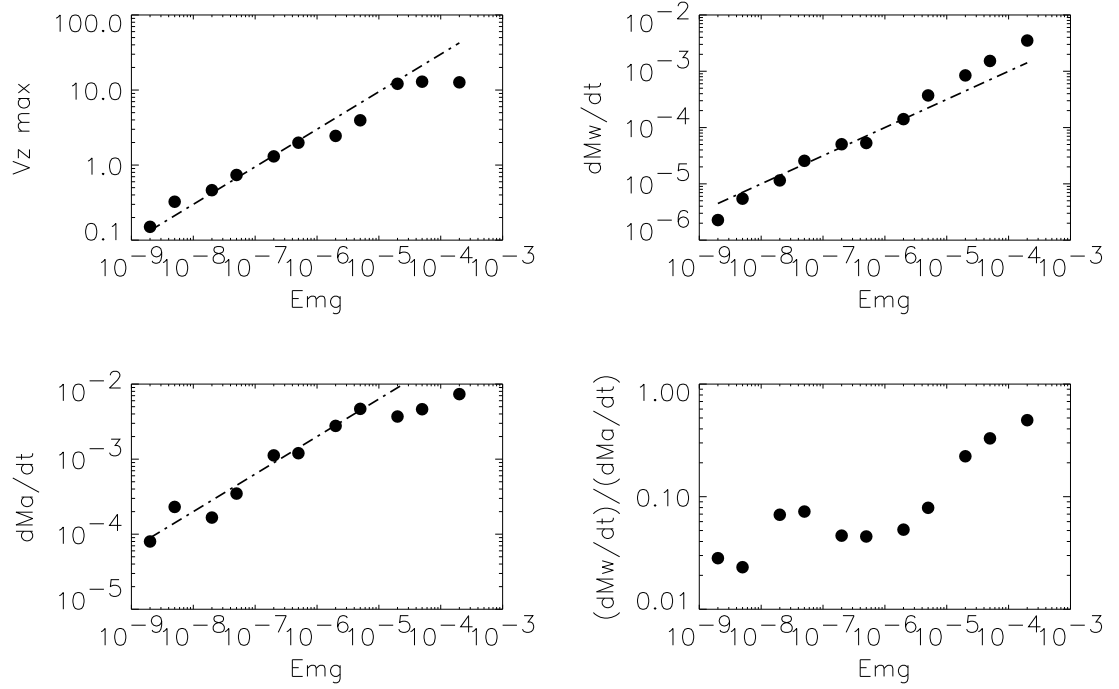


図 6: 初期磁場の強さへの依存性。ジェットの最大速度 V_{zmax} (左上) ・質量放出率 M_w (右上) ・質量降着率 M_a (左下) ・質量放出率/質量降着率 M_w/M_a (右下)。破線はどれも $\propto E_{mg}^{1/2}$ の線。