

国立天文台 天文学データ解析計算センター
成果報告書 (平成 17 年度)

提出期限：平成18年3月20日(月)17:00 必着

応募カテゴリ（いずれかを選択） B

システム（いずれかを選択） VPP

プロジェクト ID: wtk03b

研究代表者 (現在のユーザ ID : kuwabrtk)

氏名	桑原匠史		
所属機関名	情報通信研究機構		
連絡先住所	〒 184-8795 東京都小金井市貫井北町 4-2-1		
電話番号	042-327-6873		
E-mail	kuwabrtk@cc.nao.ac.jp		
職または学年	技術員		
研究代表者が学生の場合には指導教官の氏名			

研究課題名

(和文)	強く捻られた磁力線を伴う場合のジェット生成維持機構の研究
(英文)	The jet formation and continuation under the strongly twisted magnetic field

研究分担者

[illegible]

成果に関連して出版、もしくは印刷、投稿中の論文リスト

(1) このプロジェクト（同様の過去のプロジェクトも含む）での成果

今年度中に出版された論文、国際会議集録、国際会議、学会、研究会発表、その他出版物（印刷中、投稿中の場合はその旨を記載すること）

< 学会発表 >

“The Stability Analysis of MHD Jets Emanating from Accretion Disks”

Kuwabara, T., Goto, S., and Matsumoto, R. 2005, Meeting of Japan Society of Fluid Mechanics, AM05-08-002

< 研究会発表 >

“降着円盤と磁場の相互作用により形成される磁気流体ジェットの実験的安定性”

桑原匠史, 後藤修一, 松元亮治 2005, STE 研・NICT 合同シミュレーション研究会

(2) これまでのプロジェクトの今年度中の成果

今年度中に出版された論文、国際会議集録、国際会議、学会、研究会発表、その他出版物（印刷中、投稿中の場合はその旨を記載すること）

評価資料として利用いたしますので、様式・順序は任意ですが、学術論文については題名、著者、発行年月、雑誌名、巻、ページが記載されていること。

< 出版論文 >

“Parker-Jeans Instability of Gaseous Disks Including the Effect of Cosmic Rays”

Kuwabara, T., and Ko, C.M. 2006, ApJ, 636, 290

成果の概要

1. はじめに

降着円盤から噴出するジェットの加速メカニズムとして、磁気流体 (MHD) 加速モデルが有望視されており、多くの研究が行われてきた。磁気流体加速には、磁場の強さにより磁気遠心力加速と磁気圧加速の二つが存在する。前者は、比較的磁場が強いときに起こる加速で、磁力線が円盤の回転軸方向から 30° 以上傾いているとき、遠心力により磁力線に沿ってジェットが加速され、後者は比較的磁場が弱いときに起こる加速で、磁力線が円盤の回転により強く捻られ磁気圧が強くなり、磁気圧勾配によりジェットが加速される。特に、磁気圧加速によりジェットが加速されている場合には、磁場が非常に強く捻られるため、キンク不安定性が成長しジェットが安定して存在出来なくなるのではないかと懸念がある。

ジェットの安定性を調べるためには数値シミュレーションによりジェットの時間発展を追いかける手法が有効である。この手法による研究は、円盤内部を計算領域に含めず、円盤を境界条件として与える方法と、円盤を計算領域に含めて計算する方法に分けられる。前者は、非常に長い時間に渡り数値的に安定してジェットの時間発展を追跡出来るが、円盤からの質量供給の取り扱いに問題が残る。一方後者は、数値的には不安定になり易いが、円盤まで含めて計算するためにより現実に近い計算結果が得られる。前者の方法での研究は、Ouyed et al. 1997、Ustyugova et al. (1999)、Nakamura & Meier (2004) 等により行われている。Nakamura & Meier (2004) は磁気流体ジェット中で成長する不安定性について、キンク ($m=1$) 不安定性が他のモードに比べて最も成

長が早いこと、キンク不安定性の driving force はジェットを取り囲む磁場の磁気張力であることを示した。今回、我々はジェットの安定性を詳しく調べるため円盤まで計算領域に含めて散逸性 MHD 数値実験を行った。

2. 計算モデル

計算は、初期に鉛直方向の一様磁場に貫かれた、重力ポテンシャル中を角運動量一定で回転するトーラスに、 $m=1$ の非軸対称摂動をトーラスの回転速度に与えた状態を初期状態とする。トーラスを取り巻くコロナは等温球対称とし、コロナの温度はトーラスの温度よりも高温とする。計算ユニットは、長さはトーラスの初期密度が最大となる半径 r_0 、速度は r_0 でのケプラー回転速度 V_{K0} 、時間は r_0/V_{K0} 、密度は r_0 での初期密度 ρ_0 とする。また、初期の熱エネルギーと重力エネルギーの比、磁気エネルギーと重力エネルギーの比を、 $E_{th} = V_{S0}^2/(\gamma V_{K0}^2) = 5 \times 10^{-2}$ 、 $E_{mg} = V_{A0}^2/V_{K0}^2 = 5 \times 10^{-5}$ とする。ここで、 $\gamma = 5/3$ は比熱比、 V_{S0} 、 V_{A0} は r_0 における音速、Alfvén 速度である。初期のコロナとトーラスの密度比は $\rho_h/\rho_0 = 10^{-3}$ とする。本講演では電気抵抗値の違う二つのモデルの計算結果について発表する。電気抵抗値は一樣で、 $\eta = 1.25 \times 10^{-2}$ (diffusive model)、 $\eta = 6.67 \times 10^{-3}$ (mildly diffusive model) とする。

計算は、トーラスの回転軸付近で成長する不安定性を正確に捉えるために Cartesian 座標で行い、トーラスの赤道面で対称境界を置き、トーラスの上半分を計算する。それ以外の境界は全て自由境界とする。計算領域は、 $-12.8 < x < 12.8$ 、 $-12.8 < y < 12.8$ 、 $0 < z < 15.3$ で、トーラスの回転軸と z 軸を同じ方向に取る。メッシュ数は $N_x \times N_y \times N_z = 350 \times 350 \times 193$ とし、メッシュサイズは $-1 < x < 1$ 、 $-1 < y < 1$ 、 $0 < z < 1$ では 0.01 とし、それより外側では不等間隔とした。ポテンシャルは、相対論的效果は無視して Newton ポテンシャルを用い、singularity を避けるために $R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} < 0.2$ でポテンシャルをソフトニングした。

3. 結果

計算結果は図 1 が示すように mildly diffusive, diffusive どちらのモデルにおいてもトーラスの回転に伴い磁力線が捻られ、捻れの伝搬に伴いジェットが形成される。また、初期には mildly diffusive, diffusive の両モデルにおいて不安定性が成長するが diffusive モデルでは時間が経過するにつれてジェットは完全に安定となる。一方、mildly diffusive モデルでは時間が経過しても完全には安定とはならず、ある程度までは不安定となるが、ジェットを破壊するには至らないという結果が得られた。質量放出率、質量降着率は mildly diffusive, diffusive の両モデルとも、時間の経過に従い準定常状態へと近づく。このことから、不安定性の成長が大きい mildly diffusive モデルでもトーラスから噴出するジェットは不安定性により破壊されることなく、安定して存在していることが判る。

また、形成されるジェットの回転速度成分をみると、ジェットの回転軸から少し離れた場所で大きな値を示し、回転軸付近では小さくなるという鞘状の構造持ち、不安定性はこの鞘の中で成長することが判った。更に、このジェット中で成長する不安定性は不安定性の成長条件を調べてみると Kelvin-Helmholtz 不安定性ではないことが判り、キンク不安定性であることが予想される。

このキンク不安定性の成長のメカニズムを調べるために、遠心力と磁気張力の釣り合いを調べてみると、キンク不安定性が成長しはじめる頃には主に遠心力の非対称性が強く、このことによる力のつり合いの崩れが不安定性の成長のきっかけとなっていることが判った。また、不安定性がある程度抑えられてくると遠心力と磁気張力の釣合が保たれる傾向にあることも判った。

更にジェットの安定性を確かめるために magnetic twist angle $\Phi \equiv LB_\phi/(rB_z)$ と toroidal Alfvén Mach number $M_{A\phi} \equiv V_\phi/V_{A\phi}$ を調べた。ここで、 L は不安定性の波長、 B_ϕ は円柱座標での磁場

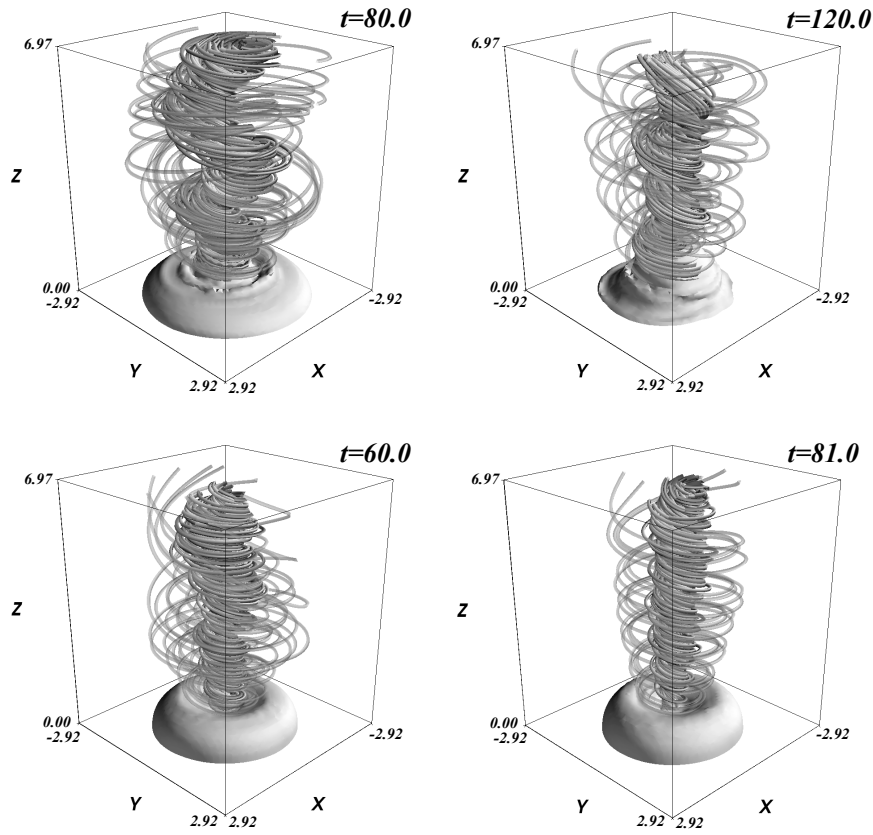


図 1: 磁力線と密度等値面 ($\log_{10} \rho = -1.5$ の時間変化。上 2 つの図は mildly diffusive の場合、下二つは diffusive model の場合を示す。

の toroidal 成分、 B_z は磁場の z 方向成分で、 $L = 2$ として Φ を計算した。Magnetic twist angle Φ は、ジェットを磁束管と見立てて、磁束管のキンクモードに対する不安定性を示す指標となるもので、ジェットの回転が無い場合、 $\Phi > 2\pi$ を満たすと磁束管は不安定になる。

結果は、ジェットの中心領域では $\Phi > 2\pi$ となっておりジェットはキンク不安定性に対して不安定であることになった。しかしながら、計算結果では、キンク不安定性はある程度成長するが、やがて安定化するのでこの結果とは合わない。この結果の違いは、 $\Phi > 2\pi$ で不安定という条件は磁束に沿った物質の流れを考慮しない場合の解析結果で、実際に螺旋運動しているジェットではこの値を越えていても遠心力によりキンク不安定性の成長が抑えられていると考えられる。

4. まとめ

鉛直一様磁場に貫かれた回転トーラスから噴出する磁気流体ジェットの安定性を電気抵抗の効果を含めた 3 次元散逸性 MHD 数値実験により調べた。結果として、電気抵抗が小さい場合に、キンク不安定性の成長がはっきりと現れること、キンク不安定性はある程度成長した後、成長が止まり、ジェットが不安定性により壊されてしまうことがないことが分かった。磁束管の安定性の指標となる magnetic twist angle Φ の不安定領域 ($\Phi > 2\pi$) においても、回転しながら噴出するジェットの遠心力の効果によりジェットは安定して存在出来る。また、ジェット中で成長するキンク不安定性の成長のきっかけは、初期にトーラスに与えた摂動による回転速度の非対称性が原因となり、

磁気張力と遠心力のバランスが崩れることであると分かった。