

活動銀河中心からの電磁流体ジェット発生 の 3 次元シミュレーション

平成 12 年度 国立天文台 天文学データ解析計算センター
大規模シミュレーションプロジェクト

カテゴリ: B、プロジェクト番号: 0045(nmn45)
中村 雅徳、内田 豊、廣瀬 重信 (東京理科大 理)

1. 研究概要

近年の X 線及び電波天文学の発展に伴い、我々の想像を遥かに越える大規模かつ激しい天体活動現象の実態が様々な階層の天体において明らかになってきた。その中でも、最も大きなスケールと激しいエネルギー解放を引き起こしていると考えられている現象の一つに『活動銀河核 (AGN) からの電波ジェット現象』が挙げられる。ジェット現象とは、電波銀河、セイファート銀河、及びクェーサーなどの活動銀河の中心から双極方向に放出される高速プラズマガスの流れの総称であり、(i) 速度が光速近くにまで達する、(ii) 数 Mpc もの長さに渡りその構造を維持している、ものもしばしば見られる。最近では理論・観測の両面から、降着円盤と呼ばれる中心天体の回りを回転しながら莫大な重力エネルギーを解放して中心へ落ち込んでいくガス円盤がジェットの生成に関して大きな役割を担っていると考えられており、この解放するエネルギーの一部が何らかの要因でジェットのエネルギーへ転換されるものという認識が高まってきている。AGN ジェットからの放射の多くはシンクロトロン放射であると考えられており、偏波観測によりジェットの構造と相関するような大域的な磁場構造の存在も明らかになってきた。ジェットの構造に関しては、(i) 大きなうねりを持つもの (Wiggle 構造)、(ii) 輝線状に、又はジェットの端点に非常に強いシンクロトロン放射を発しているもの (Hotspot) 等の特異な特徴を持っている。局所的に強いシンクロトロン放射は、ジェット中における衝撃波の形成がこれを説明するのではという説もある。Wiggle 構造に関しては、中心天体と降着円盤を含む『ジェットのエンジン』部分の歳差運動が構造を決定するという考えや、ジェット自体の運動が周囲のガスと相互作用することによって生まれる Kelvin-Helmholtz 不安定性等の理論がこれまで展開されてきたが、いずれもまだ確定的なものとはなっていない。我々は、電波ジェットの大域的な Wiggle 構造について電磁流体数値シミュレーションによりその理論的解明を目的としたものである。

2. 研究背景

本研究は Uchida と Shibata により提唱された、AGN 形成過程における降着円盤形成に取り込まれた大域磁場と円盤との相互作用による電磁流体力学的 (MHD) ジェット加速機構に基づいて、これをジェット発生部分から遠方への伝播過程へ適用したものである。この理論によると、差動回転しながら中心天体へ質量降着をしているガス円盤は、大域磁場を捻り上げ、磁場の方位角 (トロイダル) 成分を連続的に生成する。この磁場の捻れは大振幅 Torsional Alfvén Wave Train (TAWT) として円盤の回転軸方向 (大域磁場に沿った方向) へ伝播していく。これと共に、トロイダル磁気圧勾配により降着円盤ガスは加速を受けて円盤から放出されるという過程が、2 次元軸対称 MHD 数値シミュレーションによって初めて明らかになった。磁気制動により円盤ガスの角運動量が円盤外コロナへと輸送されることにより、円盤ガスは効率良く重力エネルギーを解放し、質量降着プロセスが維持され磁場を捻り続けることが可能となるのである。

この機構により生み出された MHD ジェットは、自身の持つトロイダル磁場成分によって自己収束をしながら細長い構造を維持し、伝播していくものと考えられる。

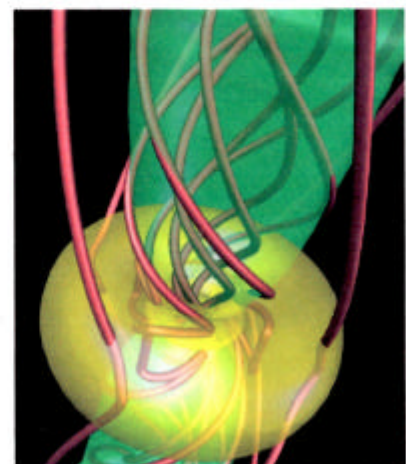


図 1: MHD ジェットの生成

3. 研究成果

我々は銀河間空間における TAWT の伝播を 3 次元 MHD シミュレーションにより考察した。AGN において生成された TAWT は大局磁場をピンチしながら伝播していき、そのフロント部分にはバウショック (ファストモード衝撃波) が形成される。AGN 形成に残り残された周辺銀河間ガス領域と TAWT が遭遇すると、Alfvén 速度の減少によってバウショックと後方より近付くスローモード衝撃波の間にトロイダル磁場の集積が起こってポロイダル磁場を中心方向に強くピンチし、さらに前面のガスを強く圧縮し、より強固な衝撃波面を形成していくことが判った。

TAWT フロントの減速によって後方へのトロイダル磁場の集積が Kruskal-Shafranov 臨界を超えた時、軸対称分布していた電流密度はしだいに非軸対称な分布へと移行していく。これと共に、磁力線は折れ曲がっていく様子が我々の計算によって明らかになった。電流を含むジェットの流れには MHD ヘリカル不安定性が引き起こされ、ジェットの密度分布もうねり構造に変化してヘリカルな速度場が生じた。不安定性の成長においては、磁気エネルギーのパワーを解析したところ、 $m = 1$ 、すなわちキンクモードが他に比べ圧倒的に卓越して成長することも判った。

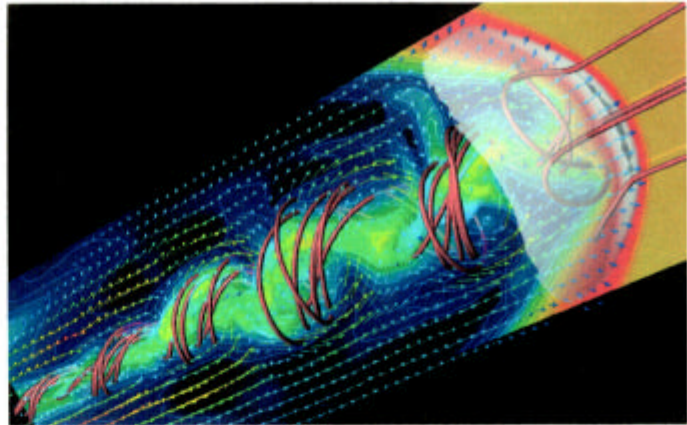


図 2: MHD ジェットにおける Wiggle 構造の形成

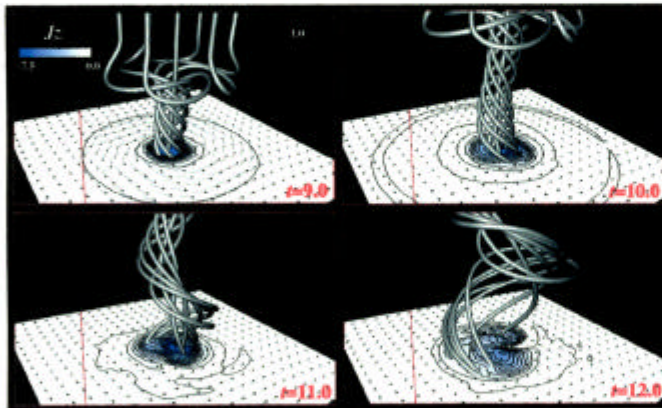


図 3: 電流駆動型ヘリカルキンク不安定性の成長の時間発展

ジェットの遠方での振舞 (Wiggle 構造やホットスポットの形成) が MHD 機構によるものだとすれば、ジェットの生成に関しても MHD モデルが確定的なものとなり得る。偏波観測から得られる磁場の 3 次元構造と我々の計算結果とを比較、考察することによって我々の提唱する MHD 機構の重要性はより明白になると考える。

References

- (1) Y. Uchida and K. Shibata, *Publ. Astron. Soc. Jpn.* **37**, 515 (1985).
- (2) Y. Todo, Y. Uchida, T. Sato, and R. Rosner, *Astrophys. J.* **403**, 164 (1993).
- (3) R. Matsumoto, Y. Uchida, S. Hirose, K. Shibata, M. Hayashi, A. Ferrari, G. Bodo, and C. Norman, *Astrophys. J.* **461**, 115 (1996).
- (4) M. Nakamura, Y. Uchida, and S. Hirose, *New Ast.* **6**, 61 (2001).

4. まとめ

我々の結果において TAWT の伝播は AGN ジェットの収束性や大局的 Wiggle 構造の決定に本質的な役割を担っていることが明らかになった。降着円盤と磁場の相互作用によって降着円盤の重力エネルギーの一部は、ジェットのエネルギーとして主に、Poynting Flux の形で引き抜かれ、遠方へ運ばれるものと考えられる。ジェットの端点においては、トロイダル磁場の集積による強いシンクロトロン放射を生じ、これが Hotspot に対応するものと我々は考える。