

|           |                                                                                                                                   |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 氏 名       | 木 暮 宏 光                                                                                                                           |
| 学位(専攻分野)  | 博 士 (理 学)                                                                                                                         |
| 学 位 記 番 号 | 理 博 第 2996 号                                                                                                                      |
| 学位授与の日付   | 平 成 18 年 3 月 23 日                                                                                                                 |
| 学位授与の要件   | 学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当                                                                                                           |
| 研究科・専攻    | 理 学 研 究 科 物 理 学 ・ 宇 宙 物 理 学 専 攻                                                                                                   |
| 学位論文題目    | The Study of Astrophysical Jets and Accretion Disks by Three-Dimensional MHD Simulations<br>(3次元MHDシミュレーションによる、宇宙ジェットと降着円盤に関する研究) |
| 論文調査委員    | (主 査)<br>教 授 柴 田 一 成    助教授 上 田 佳 宏    教 授 長 田 哲 也<br>寺 澤 敏 夫 (東京大学大学院理学系研究科教授)                                                   |

### 論 文 内 容 の 要 旨

本博士論文は、宇宙ジェットの生成機構やその性質、安定性に関して電磁流体(MHD)シミュレーションを用いて解明しようとするものである。宇宙ジェットとは、活動銀河核やX線連星、原始星など様々な空間スケールで観測されている。その性質には共通点が多い。ジェットの速度は中心天体の脱出速度と同程度であり、非常に長距離に渡って細く絞られた形状が維持されているものが多い。従って共通の生成機構が働いているのではないかと考えられる。近年の観測により、ジェットの回転やジェットの周りのヘリカル磁場が発見され、電磁流体モデルが有力視されている。ジェットのエネルギー源は、中心天体へと回転しながら落ち込むプラズマが形成する降着円盤の重力エネルギーである。電磁流体モデルでは、磁場を介して円盤の角運動量の一部がジェットへと運ばれ、円盤のプラズマはさらに降着を起こす。このように磁場と降着円盤との相互作用は、ジェット生成機構の本質であると考えられる。

これまでの研究では、降着円盤の回転軸の周りの軸対称性を仮定したものがほとんどであり、そのためジェットの3次元安定性を議論することが出来なかった。本博士論文では3次元シミュレーションを行う事により、ジェットの3次元安定性を調べた。またこれまでの軸対称シミュレーションや定常理論とジェットの性質に関して比較を行った。具体的には降着円盤の回転速度に擾乱を加えて、それが円盤内部でどのように成長するのか、ジェットは生成されるのか、されるのであればどのような非軸対称構造が現れるのか、ジェットの性質に違いはあるかなどを明らかにした。降着円盤内部では、角運動量輸送を伴う磁気回転不安定性によって、非軸対称構造が成長した。非線形段階において、まず $m=2$ ( $m$ は方位角方向の波数)のモードが成長を見せる。円盤内部での非軸対称構造生成直後に、ジェット内部でも同様の構造が現れる。つまり降着円盤内部の不安定性を起源とした非軸対称構造がジェットへと伝播する様子を初めて明らかにした。しかし重要な事は、ジェット内部の非軸対称モードのパワースペクトルが、円盤が約1.5回転する時間スケールで、ほぼ一定に落ち着くという事である。つまりジェットは非軸対称構造を持つが、ジェット内部でそれが成長する事はなく安定であるという事である。そしてジェットの性質に関しては、ジェットの最大速度や質量放出率、質量降着率の初期磁場強度依存性は、軸対称2次元の場合とほぼ同じであることを示した。

さらにこれまでの非定常シミュレーションでは行われていなかった、初期磁場強度が非常に弱い場合の計算も行っている。その場合、円盤の回転による磁場の捻れは、すぐにはコロナへと伝播せずに円盤内部で蓄えられる。磁場のトロイダル成分はポロイダル成分の100倍にも達し、その後に円盤内部から浮上し、ジェット状の噴出を起こす。ジェットの収束機構に関しては、磁場が比較的強い場合とは異なり、ガス圧勾配が支配的である。つまり、磁場強度の弱い磁束管が周りのプラズマのガス圧によって閉じ込められている状況である。双極方向の加速に関しては、磁気浮力がジェットの加速に効いている事が明らかになった。

## 論文審査の結果の要旨

本博士論文は、宇宙空間で最も大きなエネルギー解放現象の一つである宇宙ジェットに関して、MHD モデルの非定常計算を3次元に拡張したものである。特に降着円盤の時間発展も含めて解いたジェットの3次元計算は稀であり、その詳細な解析は世界で初めてである。近年、盛んに観測的・理論的研究が進んでいる $\gamma$ 線バーストも、ジェットであるという事が明らかになりつつあるため、その方面への応用も期待される研究である。

これまでの軸対称シミュレーションでは、さまざまな MHD 不安定性の非軸対称モードに対する安定性に関しては議論する事が出来なかった。一方観測的には、近年の観測装置の分解能向上によって、ジェットの噴出現場はかなり迫る事が出来つつある。幾つかの観測では、実際にプロップが非軸対称に運動するなどの非一様性が発見されている。一方ジェットの大局的な構造は、AGN ジェットの場合にはキロパーセクからメガパーセクにまで及び維持されていることから、基本的には安定であると言える。そのような観点から、ジェット内部には降着円盤内部の不安定性を起源とした非軸対称構造が存在することと、それでもジェットで非軸対称構造は成長することなく安定であることを示した本博士論文の研究結果は、非常に重要であると言える。初期磁場強度が弱い場合の計算においては、これまで幾つかの論文で示唆されてはいたが明確に実証された事がない、磁気浮力による円盤からの磁気フラックスの浮上とジェット状の噴出を初めて示した。

さらに申請者は、セミラグランジュ法の1種である CIP 法と、非圧縮 MHD 波であるアルフヴェン波を安定に解く事が可能な MOC-CT 法を組み合わせた CIP-MOC-CT コードを独自に3次元へと拡張を行った。また将来必ず必須となる、一般相対論の効果を含めたコードの作成を念頭に置き、直交曲線座標系でのコードを作るなどこれまでにない試みを行っている。つまりシミュレーションを行うのみでなく、そのツールとなるコード開発にも大きな成果を示している。

以上のように本博士論文は、宇宙ジェットの非軸対称構造の存在とジェットの大局的な安定性を示し、また磁気浮力加速という新たなジェットの生成機構も明らかにした非常に独創的で重要なものであると言える。従って本論文は博士(理学)の学位論文として十分に価値のあるものと認める。なお、主論文及び参考論文に報告されている研究業績を中心とし、これらに関連した研究分野について口頭試問を行った結果、合格と認めた。