

氏名	アハメド アハメド イブラハム アハメド アブダラ Ahmed Ahmed Ibrahim Ahmed Abdalla
学位(専攻分野)	博士(理学)
学位記番号	理博第3187号
学位授与の日付	平成19年5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	Long Term Simulations of Astrophysical Jets; Energy Structure and Quasi-Periodic Ejection (宇宙ジェットの長時間シミュレーション; エネルギー構造と準周期的噴出)
論文調査委員	(主査) 教授 柴田一成 准教授 戸谷友則 教授 長田哲也

### 論文内容の要旨

20世紀後半から近年にいたる天文観測の発展によって、宇宙の様々な活動天体で、細長く絞られた高速ガス流—ジェット—が噴出していることが、わかってきた。例えば、クェーサーを始めとする活動銀河の中心核、近接連星系のブラックホールや中性子星、さらには、生まれたばかりの星である原始星などである。最近では超新星やガンマ線バーストまでジェットが主役かもしれないという議論がされている。これらの天体からジェットがいかんして発生するか、という問題は、現代天文学最大の課題である。本論文の主題は、まさにこの宇宙ジェットの生成機構の解明である。さて、これらの天体は質量も大きさも千差万別だが、共通点がいくつかある。一つはジェットの形状が中心天体から反対方向に細長く伸びる双極ジェットの形をしていること、次に中心天体に向かって大量のガスが降り注ぎ(降着し)、ガスは降着円盤を形成していること、最後にジェットの速度は中心天体の脱出速度程度となっていること、などである。宇宙ジェットの理論は個々の天体の性質によらないこれらの共通の特徴を説明しなければならない。現在までのところ、定説と言える宇宙ジェット理論はまだないが、原始星から活動銀河まですべてを説明可能な有力なメカニズムの一つに、電磁流体機構がある(Blandford and Payne 1982, Uchida and Shibata 1985, Pudritz and Norman 1986ほか)。電磁流体機構とは、降着円盤を貫く磁力線が円盤の回転によってねじられ、そのときに発生した磁気力により円盤周辺のプラズマが円盤の回転軸方向に加速されてジェットとなり、ねじれた磁場による磁気張力によりジェットが細く絞られる、という機構である。この機構を非定常の電磁流体力学方程式を数値的に解いて初めて示したのは、Uchida and Shibata (1985), Shibata and Uchida (1986)であった。それ以後、この種の数値シミュレーションは世界的に数多く行われ、現在では、3次元や一般相対論への拡張、磁気拡散の効果、初期磁場形状依存性など数多くの効果が調べられているが、円盤の内部構造を解きつつ、ジェット形成の長期(円盤の数回転以上)にわたる進化を調べた研究はなかった。その理由は、数値計算を安定に長時間続けることが困難だったからである。本論文では、Kudoh et al. (2002)が開発した2次元軸対称電磁流体コードを用いて、宇宙ジェットの電磁流体機構を明らかにすべく、徹底的にパラメータサーベイを行った結果、ジェット形成の長時間発展を多くのパラメータ空間に対して調べることに初めて成功した。その結果、ジェットの形成が円盤の回転周期程度の時間間隔で準周期的に間歇的に起こること、その周期は磁場が強くなると短くなること、などを見出した。また、ジェット噴出の周期は、磁力線がねじられて、円盤表面の磁気エネルギーが局所的な円盤プラズマの回転エネルギーと同程度になるまでの時間で決まることも、明らかにされた。さらにジェットの速度の長期間平均速度は、定常理論の値の10分の1程度と遅くなるが、ジェットの速度や質量放出率などの磁場強度依存性(スケールリング則)は大体定常理論と一致することなども明らかになった。

### 論文審査の結果の要旨

宇宙ジェットは、活動銀河核、近接連星形、原始星など、重力収縮あるいは降着が起きている天体にあまねく見られる活動現象であり、天体の形成、起源、進化に深く関わる現代天文学最大の課題の一つである。本論文はこの宇宙ジェットの発

生機構を解明するために、現在有力と考えられている電磁流体機構について、2次元の非定常電磁流体シミュレーションを用いて詳しく調べた結果をまとめたものである。

これまで、宇宙ジェットの非定常電磁流体シミュレーションについては、降着円盤を含む計算と、降着円盤を境界条件として扱う計算の2流派存在してきた。後者は計算が比較的容易で長時間追いやすく、ジェットの定常構造を調べるために数多く調べられてきた。それに対し前者は降着円盤を含むので、計算量が膨大となり、また、数値不安定も起こりやすく、ほとんどの論文が円盤数回転以内のダイナミクスについて論じたものか、あるいは、ジェットがあまり発達しないような条件下で降着円盤のダイナミクスを主に調べたものが大部分であった。降着円盤は磁気回転不安定性のために、決して定常ではなく、激しい乱流状態にあることが最近の研究でわかってきたので、降着円盤を含む計算をしないと、ジェットの真のダイナミクスは明らかにならない。

本論文の著者は、わが国で開発された天体電磁流体現象を計算するのに適した2次元軸対称電磁流体コードを、降着円盤も含む宇宙ジェットの問題に適用し、パラメータ空間を徹底的に調べることにより、これまで誰も調べることのできなかった宇宙ジェットの長時間発展を明らかにすることに成功した。降着円盤内部をきちんと解きつつジェット形成の長時間のダイナミクスやエネルギー構造を丁寧に調べた点が重要である。その結果、円盤の非定常ダイナミクスの帰結として、ジェットの形成が円盤の回転周期程度の時間間隔で準周期的に間歇的に起こること、また、その周期は磁場が強くなると短くなること、などを見出した。ジェット噴出の周期は、磁力線がねじられて、円盤表面の磁気エネルギーが局所的な円盤プラズマの回転エネルギーと同程度になるまでの時間で決まる、ということも明らかにしている。これらは全く新しい発見であり、ジェットの内部に間歇的噴出が起源の衝撃波が多数生成されることを予言している。さらにジェットの速度の長期間平均速度は、定常理論の値の10分の1程度と遅くなるが、ジェットの速度や質量放出率などの磁場強度依存性（スケーリング則）は大体定常理論と一致することなども明らかにした。これらの成果は、宇宙ジェットの2次元非定常（非相対論）電磁流体シミュレーション研究としては、究極の結果の一つといえ、膨大な計算を辛抱強く行った著者の努力の賜物である。

以上の点を鑑み、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。