九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

Two-temperature Magnetohydrodynamic Simulations of Extra-Galactic Jets

大村, 匠

https://hdl.handle.net/2324/4474933

出版情報：Kyushu University, 2020, 博士（理学）, 課程博士
バージョン：
権利関係：

（様式６－２）

氏　　名	大村　匠
論　文　名	Two-temperature Magnetohydrodynamic Simulations of Extra-Galactic Jets (系外ジェット伝搬の 2 温度磁気流体シミュレーション)
論文調査委員	主　査　九州大学　教授　山本一博 副　査　九州大学　教授　鈴木　博 副　査　九州大学　准教授　町田正博 副　査　国立天文台　准教授　町田真美

論　文　審　査　の　結　果　の　要　旨

活動銀河から噴出する宇宙ジェットは、銀河中心の超巨大ブラックホールの重力エネルギーを動力とする現象で速いものでは、光速の 99%以上の高速で伝搬する現象である。その継続時間は数千万年以上に及び、また、飛来距離は数 Mpc に及ぶなど、長時間・長距離にわたって安定に存在している。ブラックホールから引き出された重力エネルギーは、ジェットの運動エネルギー、放射、磁気エネルギーなどに転換され、乱流や加熱、磁場として銀河間空間に供給される。その結果として、ジェットは、ジェットが駆動する乱流によって母銀河への質量降着を抑制し、母銀河の成長を阻害するなど、銀河進化に多大な影響を与えるだけではなく、銀河の大局構造の形成にも影響を与える。更に、ジェットが銀河間空間物質と相互作用する事による衝撃波やジェットの放射によって中性水素ガスを電離し、宇宙再電離にも寄与すると考えられている。

宇宙ジェットの未解決問題として、収束問題と安定性問題がある。宇宙ジェットは、ブラックホール半径の 100 億倍以上の長距離を細長い構造を維持した状態で伝搬するが、どのように収束を維持しているかが未解明である。また、ジェットは、非常に高速で伝搬するため、外環境との速度差などにより、Kelvin-Helmholtz 不安定性や電流駆動型のキンク不安定性など、様々な流体・磁気流体不安定性が発達し、ジェット構造に影響を及ぼす事が知られている。これらの不安定性をどのように抑えて安定にジェットが存在するかは、未だ明らかになっておらずこれを安定性問題と呼ぶ。また、これらの不安定性はジェットの物理量分布だけではなく、外環境の状況にも依存するため、ジェット研究においては大局的な数値シミュレーションを行う事が重要となってくる。

宇宙ジェット研究において、重要となる観点として、プラズマの 2 温度性がある。高密度で低温なプラズマにおいては、電子と陽子はクーロン衝突により瞬時に等温状態に緩和する。一方で、宇宙ジェットのように希薄で相対論的温度に達するプラズマでは、電子と陽子のクーロン緩和は非効率な状態になり、熱緩和時間は系の年齢に匹敵する。また、ジェットで多数形成される衝撃波は、陽子を効率的に加熱することもあり、ジェットの内部において電子と陽子はそれぞれ別々の温度を持つ 2 温度状態 となっている可能性が高い。観測量である輻射は電子が担っているため、観測と数値モデルとの比較には電子のエネルギーを正確に求めることが必要不可欠である 。しかし、これまでの多数の先行研究においては、ジェットの 2 温度性は考慮されてこなかった。そこで、本博士論文では、宇宙ジェット伝搬における 2 温度効果に着目した 3 次元磁気流体数値計算を行い、熱的電子温度分布から、電波放射、X 線放射量を概算し、観測と直接比較する事で、特にジェットの電波ローブと X 線放射との関係性を明らかにすることを目指している。

この論文では、ジェット噴出機構は問わず、ジェット半径程度に相当する領域からエネルギーを注入することで、1kpc から 100kpc までの範囲を伝搬するジェットの進化を追う。

最初に軸対称の 2 温度磁気流体計算を行い、ジェットの 2 温度性が構造に与える影響を調査した。ここでは、散逸する熱の分配率を一定とした場合のみを考えており、熱分配率をパラメータとして電子温度分布の違いを調べている。その結果、衝撃波によって陽子が選択的に加熱されること、ジェット全体の構造は 1 温度の場合と変わらず、ジェットダイナミクスは陽子が担っている事を明確にした。この時、電子と陽子の加熱率が等しい場合は、1 温度の結果と完全に一致する事、電子加熱率が下がると、衝撃波で 2 温度になったのちはクーロン緩和時間が長いために、2 温度状態が維持されることなどを明らかにした。

次に、散逸した熱エネルギーを電子と陽子に分配する過程として、衝撃波加熱と乱流加熱(Kawazura et al. 2018)を考慮した 3 次元の磁気流体数値実験を行った。ここでは、ジェットの安定性に対するジェット磁場強度の依存性を調査した。その結果、コクーン領域での電子の乱流加熱の重要性を示した。さらに、ジェット磁場の圧力が、ガス圧の 1%の場合は、流体計算の結果とほぼ同じ振る舞いをすること、磁気圧が 20%を超えると、電流駆動型キンク不安定性が発達すること、それに加えてジェットのバックフローとジェットビームが衝突する事によってジェットビームが破壊されジェットが大きく蛇行する原因となっている可能性を示した。また、磁場強度に依存する電子/陽子加熱率の効果によって、磁場が蓄積されやすいジェットコクーン境界(接触不連続面)で電子温度が高くなることが示された。

さらに、本博士論文では、数値計算結果のデータをもとに、観測される熱的 X 線放射分布、および電波シンクロトロン放射分布を算出している。その結果、ジェット先端の衝撃波が形成する電波放射量は、その周辺の熱的 X 線放射強度よりも低くなるという、観測の傾向を再現する事を示した。これは、電波放射を担う電子温度が陽子温度よりも低いという 2 温度性の証拠であることを初めて明確にした結果となっている。

以上の結果、この博士論文では、電子温度と陽子温度が異なる 1 流体 2 温度磁気流体数値計算コードを開発し、活動銀河から噴出する宇宙ジェットの 2 温度磁気流体数値計算を行い、ジェット磁場強度依存性を調査した。その結果、衝撃波による陽子の選択的な加熱と電子に対する乱流加熱の重要性、さらにジェットの蛇行の起源に対して、電流駆動型キンク不安定性の発達とジェット自身のバックフローとの相互作用の可能性を指摘した。また、数値計算結果を用いた擬似観測が観測結果を再現すること、X 線放射と電波放射のエネルギー不整合が 2 温度性に起因し、電子温度を反映する電波観測から推測された温度が陽子の温度より低いことに起因することを初めて明らかにした。ジェットの 2 温度性を考慮したこれらの成果は、当該分野に大きなインパクトを与えるものである。

よって、本研究者は博士（理学）の学位を受ける資格があるものと認める。