

|   |   |    |      |
|---|---|----|------|
| 京都大学  | 博士 ( 理学 )   | 氏名 | 竹内 駿 |
| 論文題目  | The Nature of Super-Eddington Outflow around Black Holes<br>(ブラックホール周りの超エディントン噴出流の特性) |    |      |
| (論文内容の要旨)   |   |    |      |
| <p>本論文は、極めて明るく輝くブラックホール降着天体から噴き出すガス流について、大局的輻射流体および輻射磁気流体シミュレーションを実行して得られた新知見を報告するものである。</p> <p>宇宙には、古典的な限界光度、エディントン光度を超えて輝く降着天体がいくつも見つかっている。このような天体、超エディントン天体は、宇宙の多階層で多大な影響を与えていると考えられている。超エディントン天体のダイナミクスを理解するには、物質と輻射の多次元相互作用とその時間発展を解く必要があり、計算機の発達により、近年ようやく可能になった分野である。本学位論文は、ブラックホール周りの超エディントン降着流が生み出す噴出現象 (超エディントン噴出流) に着目し、大局的輻射流体・輻射磁気流体シミュレーションを実行して明らかになった三つのテーマ (新タイプの輻射磁気流体ジェット、クランプ状の噴出流、クランプ生成の輻射流体不安定機構) について論じている。</p> <p>1. 新タイプの輻射磁気流体ジェット</p> <p>宇宙ジェットの形成理論は長年研究されているにも拘わらず、明るい降着流から噴出するジェットの駆動源が輻射なのか磁場なのかという問題に対する決定的な答えは得られていなかった。申請者は、超エディントン降着流の大局的2次元輻射磁気流体シミュレーションを実行し、強烈な輻射圧が、ジェットを相対論的速度まで加速し、降着流の動径方向には磁場が効率的に働いてジェットを収束していることを明らかにした。こうして、輻射と磁場がカップルして初めて相対論的なジェットが形成されることを例証した。この結果は、降着流の光度が高いときに相対論的ジェットが形成されるというマイクロクエーサーの観測事実とも符合する。</p> <p>2. クランプ状の超エディントン噴出流</p> <p>申請者は、超エディントン噴出流の大規模構造を調べるため、広い領域での大局的2次元輻射磁気流体シミュレーションを初めて実行し、噴出流はブラックホールから数百倍のシュバルツシルド半径の距離において、クランプ状となることを発見した。さらに解析の結果、クランプのサイズは10シュバルツシルト半径程度、光学的厚みにして1程度であり、クランプの電子密度やサイズ、カバリングファクターが、活動銀河核に存在する幅広い輝線領域のガス塊の観測量とよく一致することを示した。</p> <p>3. クランプ形成の輻射流体力学不安定機構</p> <p>前項の解析で明らかになったクランピーな噴出流の形成機構を明らかにするため、</p> |   |    |      |

申請者は超エディントン平行平板大気というシンプルな状況を設定し、その安定性を2次元輻射流体シミュレーションを実行して調べた。その結果、初期には輻射流体力学的なレイリー・テイラー不安定が発生して細かい擾乱が成長するものの、それらは合体して、やがて光学的厚みが1程度のクランプサイズの揺らぎが成長することを発見した。輻射圧とガス圧の反相関が特徴的な波長をもたらす原因であると特定し、前述のクランピーな噴出流も同様の状況にあることを確認した。

(論文審査の結果の要旨)

電磁波輻射は宇宙の中でさまざまな役割を演じる。それは天体の情報をわれわれに伝達するだけでなく、輻射圧やエネルギー輸送を通じて、天体の形成や活動性に影響しているケースも多々見られる。エディントン光度を超えて光っているブラックホール天体においては、星形成活動の抑制や金属汚染という形で、宇宙の多階層で多大な影響を与えていると考えられており、そのダイナミクス解明は天文学喫緊の課題である。しかし、そのような超エディントン天体のダイナミクスを支配するのは物質と輻射の多次元相互作用であり、これまで定性的な議論しかなされていなかった。研究をさらに進めるには、大規模多次元輻射磁気流体シミュレーションしか手がない。それが近年の計算機の発達により可能になったのである。

本学位論文では、未解明のブラックホール周りの超エディントン噴出現象に着目して、先駆的でかつ独創的なシミュレーション研究を行い、新しい知見をいくつも見いだした点が極めて高く評価できる。以下、項目別にその画期的な点を述べる。

1. 新タイプの輻射磁気流体ジェット

宇宙ジェットの発見から1世紀近くが経過したが、その形成・駆動機構はいまだ決定打に欠けている。特に、輻射エネルギーが圧倒的である明るい降着流において磁場がどのような役割を演じているのか、未解明の課題であった。

申請者は、この歴史的難問に大局的2次元輻射磁気流体シミュレーションにより取り組み、磁場によって収束され、輻射圧により加速されたジェットが噴出していることを発見した。ことに、輻射エネルギーが磁場エネルギーを圧倒している中にも、円盤の動径方向においては磁場の力が卓越していることは予想外の発見であり、世界的な注目を浴びた。ブラックホール天体においては、その光度が激しく増加したときに相対論的ジェットが形成されることが知られており、その観測事実をみごとに説明する。今後の発展が期待される発見となった。

2. クランプ状の超エディントン噴出流

活動銀河核などのブラックホール天体の周囲には、クランプ状のガスが浮遊していることが、その吸収スペクトルや激しい光度変動から示唆されている。しかし、その形成機構は、謎に包まれていた。

申請者は、計算領域(面積)を従来の10倍以上にも広げた大局的2次元輻射磁気流体シミュレーションを実行し、超エディントン降着流から広角に噴出される噴出流が、ブラックホールから十分離れた領域において普遍的にクランプ状となることを発見した。また、クランプのサイズは光学的厚みが1の程度であること、輻射と物質の間に反相関があること、その分布は、活動銀河核の周りに存在する幅広い輝線領域のガス雲の分布を説明しうることを示した点が画期的である。最後の結論については、まだまだアイデアの段階で、完璧な証明とはいえないものの、今後の研究における新しい方向性を示したという点で、極めて重要な結論と言える。

### 3. クランプ形成の輻射流体力学不安定機構

申請者は、前述の超エディントン噴出流におけるクランプ形成の物理機構を探るため、磁場がゼロの平行平面大気という簡単化を行ったうえで、超エディントン大気の安定性をシミュレーションにより調べ、クランプ形成に成功し、その輻射流体に特有な機構を明らかにした。さらに線形解析によりその裏付けをした。この結論は、従来の説を大きく塗り替えるものであること、ブラックホール天体に限らず、新星爆発や巨大質量星等、超エディントン噴出流に普遍的に成り立つものであることが、高く評価される。また、多様な研究手法を使い分けていることは、独立した研究者として成熟した力量を示すものといえる。

よって、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、平成26年1月17日、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。なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、専門雑誌に未発表の部分が発表されるまでの間、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。