

論文審査の結果の要旨

氏名 白川 慶介

降着円盤は、さまざまな天体で見られる基本的な構造で、天の川銀河の中心ブラックホールの周囲にも存在すると考えられている。そこでは、乱流渦粘性による角運動量の再配分によりガスが落下し輻射のエネルギー源となる。その乱流は励起と散逸のつりあいで強度が決まるが、励起機構として現在もっとも広く受け入れられているのが磁気回転不安定性 (magneto-rotational instability、以下 MRI) である。一方散逸は、磁気リコネクション (磁力線つながり) が重要な素過程のひとつであると考えられている。天の川銀河の中心ブラックホール降着円盤ガスは、イオンと電子とで温度が異なると推測されることから、無衝突プラズマ状態にあると考えられている。そのような状態では、圧力が非等方になり、不安定性成長に影響する可能性がある。しかし無衝突プラズマの MRI 研究はいまだ十分ではなく、今後、観測データを詳しく解釈するには理論研究を進めていく必要がある。

本論文では、無衝突プラズマにおける MRI と磁気リコネクションとについて数値シミュレーションにより詳しく調べた研究が報告されている。無衝突状態の物理を記述し、かつ不安定が十分発展する長時間を追跡できる方法としてハイブリッドシミュレーションという手法を採用している。これはイオンを超粒子、電子を流体として扱う方法で、広く用いられている手法ではあるが、申請者を含むグループが改良を加えた計算コードを今回用い、より安定長時間計算を可能にしている。本研究は、無衝突プラズマという新しい枠組みでの降着円盤乱流研究の端緒であり、この分野の今後の展開に大きな第一歩を記したことが高く評価できる。

第 1 章は先行研究のレビュー、最後の第 5 章でまとめと将来展望とが与えられている。論文の主要な結果は第 2 章から第 4 章までに記述されている。

第 2 章では、円盤子午面内を想定した 2 次元平面での MRI について調べた。十分に発展した非線形段階において、2 次元 MRI の最終発展解であるチャンネル流が磁気リコネクションにより破壊されるようすが見られた。また同時に非熱的イオンの発生も見られた。衝突プラズマを扱う磁気流体では見られなかった

もので、今回無衝突効果を取り入れたことで新しく見つかった現象である。これは、磁場垂直方向により強い非等方圧力が MRI により現れたことで、磁気リコネクションが促進されたため起こったと解釈できる。さらに乱流粘性応力の強さ（いわゆる α パラメータ）を調べたところ、磁気流体より大きな値がえられた。これは無衝突プラズマでの、より効率よい角運動量輸送を意味しており天体物理学的にも重要な示唆である。

第 3 章では、降着円盤を模した差動回転状況下での磁気リコネクションに注目し、特に円盤子午面内での、回転軸方向反平行磁場にはさまれた電流シートの 2 次元発展を調べた。結果、回転方位角成分磁場が、電流シートに対して非対称に成長するのが見られた。これは Hall 効果と差動回転とがあいまって起こったと解釈できる。また同時に磁場のつなぎかわり点（リコネクション X 点）が空間的に移動する現象が見られ、電流方向と回転軸との外積でその方向がきまっている。この移動でより差動回転効果が効き、回転方位角成分磁場が強められることがわかった。さらに、円盤が薄くて MRI の線形発展が困難な状況下でも、磁気リコネクションによる非線形効果で、不安定がトリガされることがわかった。これらの現象は、1 成分磁気流体では見られないものである。回転方位角磁場の増強は強い乱流発展につながり角運動量輸送をより効率よくする可能性があることを示した。

第 4 章では、同じく磁気リコネクションに注目し、今度は円盤赤道面内での回転方位角方向の反平行磁場にはさまれた電流シートの 2 次元発展を調べた。円盤動径方向には、回転シア速度の追加分を考慮に入れた周期境界をとった。この結果、動径方向に周期的に存在する複数の電流シート間で非線形な相互作用が起こり、磁気リコネクション効率が上昇し、磁場の効率よい散逸が見られた。

論文は共同研究の部分があるが、論文提出者が主体となって研究を行っており、本人の寄与が十分にあると考えられる。

以上の理由により、博士（理学）の学位に十分に値すると認める。