

令和 6 年度学長裁量経費採択課題（詳細内容）

科研費獲得サポート重点研究費

公募分野	代表者		テーマ
2	理科教育講座	高橋 真聡	ブラックホール磁気圏における磁気プラズマ不安定性の理論的研究
プロジェクト概要		活動銀河中心核や天の川銀河の中心核には巨大ブラックホールが存在し、超高エネルギー輻射の放出や相対論的速度の宇宙ジェットプラズマ放出など、激しい天体現象が観測されている。このエネルギーはブラックホールの強重力場に起源し、電磁プラズマ相互作用によって生み出されていると考えられる。しかし、その機構の詳細は明らかにされていない。本研究では、ブラックホール周りの電磁流体について考察し、エネルギー発生機構や天体現象としての活動性を明らかにする。	
研究の目的		同上	
研究の方法		(1) 電子とイオンからなる二流体系についての摂動計算を実施し、プラズマ不安定性の考察を実施する（重力場の効果は小さいとする）。(2) 重力の効果が無視できない一般相対論的状況での二流体不安定性の条件式を新たに構築する。(3) 自転するブラックホール時空において真空のマックスウェル方程式を解いて、磁気圏（磁場と電場）の解析解を求める。(4) 得られた磁気圏について荷電粒子の軌道運動を解く。有効ポテンシャルを導入し、プラズマの閉じ込めや加速機構について調べる。	

研究の成果

(1)宇宙ジェットは磁氣的加速機構でよく説明できる(Takahashi, Kino, Pu 2021)。残された課題は、宇宙ジェットへのプラズマ供給機構であるが、未だに解明されていない。我々は、ジェットプラズマが排出された後の領域が真空中に漸近すると考え、磁気圏内に反平行磁場領域があるとプラズマが不安定性(二流体不安定性)を引き起こすことを示した(論文[1])。この不安定により降着円盤のガスが宇宙ジェット領域に侵入できるようになり、宇宙ジェットが形成されると期待する。(2)さらに、これをブラックホール近傍に適用するため、一般相対論に拡張した条件式を求めた(準備中)。この条件式には重力赤方偏移の効果が取り込まれており、ブラックホール固有の現象の解明が期待できる。

(3)ブラックホール周りの真空磁気圏解を求めた(論文[2])。宇宙ジェットの加速効率やプラズマ供給率の定量的考察のためには、磁気圏構造を自己矛盾なく解く必要がある。我々は、ブラックホール時空におけるマクスウェル方程式が複素変数を用いることで変数分離できることを利用して、磁場と電場の構造を解いた。定常軸対象の真空磁気圏にも関わらず、ブラックホールの自転の効果が磁気圏に電場を発生させることを明らかにした。この電場について、(4)回転軸と降着円盤の上空に深い負の静電ポテンシャル領域が発生し、「磁氣的ペンローズ機構（荷電粒子による磁気圏からのエネルギー抽出機構）」が可能であることを示した（執筆中）。この機構は超高エネルギー宇宙線のエネルギー源を探る上で、極めて興味深いものになっている。

[1] Koide, Shinji; Noda, Sousuke; Takahashi, Masaaki, “One-dimensional Linear Analysis and Numerical Simulations of Alfvén Waves in a Force-free Magnetosphere around a Kerr Black Hole” The Astrophysical Journal, 981, id.79(19 pp), 2025.

[2] Endo, Yota; Ishihara, Hideki; Takahashi, Masaaki, “Vacuum Magnetospheres around Kerr Black Holes with a Thin Disk”, arXiv:2501.00474, 2025