

学位申請論文公開講演会

日時：2025 年 2 月 6 日(木) 14:30~

申請者：北島 歆大 (T_A 研)

場所：物理会議室 (C207)

題目：相対論的流体力学の粒子法的数値計算法の開発及び高速噴流の解析

主論文の要旨

本論文では、特殊相対論的流体力学の解析手法として Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)法の開発および、この手法を用いた真空中への高速噴流の解析について報告する。SPH 法は、流体を離散的な粒子として表現し、各粒子が周囲の粒子との相互作用を通じて流体運動を記述するという数値流体力学の手法である。この特性のため、真空を含む領域を扱うことができる。

特殊相対論的流体力学の解析においては、強い衝撃波や急激な密度変化を伴う極端な条件を扱う必要がある。しかし、従来の特殊相対論的 SPH 法手法には、計算精度や効率的な衝撃波計算法に課題があった。本研究では、畳み込み積分に基づく基礎方程式の再定式化を提案し、数値計算の精度向上と解析能力の強化を目指した。さらに、流束計算にはリーマン問題の厳密解を用いる Godunov 法を採用することで、強い衝撃波を含む領域でも高精度な解析を可能とする手法を構築した。また、体積に基づく場の定義を導入することで、異なるバリオン数を有する SPH 粒子を安定的に扱える枠組みを実現した。これにより、密度が大きく異なるような流体も計算コストを削減して安定的に扱うことが可能となった。これらの改良の有効性は、複数のテスト計算を通じて検証されている。

本研究では特殊相対論的数値計算で現れる「横成分問題」にも取り組んでいる。この問題は、特定の条件下では衝撃波の速度等が解像度によって大きく依存するという問題である。このような問題はリーマン問題といった単純な場合でも生じる。本研究では、開発した手法を用いて解析を行うことで、この問題の原因が膨張波に起因することを特定した。また、膨張波における横成分の加減速を定性的に説明し、必要な解像度を見積もるための手法を提案している。

SPH 法の真空領域を扱えるという特性を活かし、本研究では高温天体から真空中への噴流モデルを解析対象として、非相対論的および相対論的条件下での加速メカニズムを調査した。非相対論的な場合では、流体が真空中へ放出されることで急激に膨張し、理論的な限界値まで加速することが示された。一方で、相対論的な場合は相対論的効果により加速が抑制され、ローレンツ因子が理論的な限界値に到達するまでに時間を要することが明らかとなった。この結果は、活動銀河核ジェットやガンマ線バーストといった相対論的ジェット現象の駆動メカニズムに関する理論モデルに制約を与えるものである。

以上のように本研究で提案した SPH 法は、特殊相対流体力学における真空を含む領域を解析可能であり、相対論的ジェットを含む高エネルギー天文現象全般の解析に応用可能である。