

論文審査の結果の要旨

氏名 村瀬 功一

本論文は8章および6つの補遺から成る。第1章ではクォークグルーオンプラズマ(QGP)の性質を温度-化学ポテンシャル相図を用いて概観し、初期宇宙やコンパクト天体内部におけるQGPの振る舞いを解説する。近年、RHIC加速器をはじめとする大型施設による高エネルギー原子核衝突実験によって超高温度状態のQGPの振る舞いを探ることができるようになり、相対論的流体およびプラズマの性質を理論的に解明することが重要であるとの動機を与えている。

第2章では高エネルギー原子核衝突実験の詳細を解説する。原子核衝突の後に系が緩和し流体的振る舞いをするようになり、やがてハドロン生成へと至る物理過程を記述する。特に衝突初期の系の発展については、核子配置などに起因する事象毎の揺らぎを考慮し、Glauberモデルなど複数の理論モデルを取り上げて詳細を検討している。最後に、高エネルギー原子核衝突実験により生成されるQGPの発展を追うには散逸過程に加えて熱揺らぎが重要であると提唱し、本研究の目的が提示されている。

第3章では相対論的流体力学について理論をまとめている。理想流体の場合の定式化から始め、散逸過程を含む相対論的流体力学の定式化に関する問題、すなわち因果律や揺らぎの不安定性を議論したのち、散逸流を記述する高次の構成方程式を与える。さらに第4章では相対論的流体に生ずる揺らぎの理論を展開する。ここで、微分形および積分形の構成方程式をそれぞれ検討し、前者では揺らぎ項が白色雑音として表されることから、本研究で行う高精度の数値計算のために適していると結論する。

第5章では、本研究で行う数値計算のための計算方法を詳述する。前章で選択した微分形の構成方程式を離散化し、保存則を満たしながら散逸流場を精度よく発展させるスキームを構築している。補遺Dではここで用いる有限体積法を陽に定式化している。この手法により、因果律を守る相対論的流体方程式と散逸流の構成方程式を同時に解くことが可能となり、本研究が対象とする高エネルギー原子核衝突現象に適用する。

第6章では、流体揺らぎを特徴づける典型的長さスケールを考察し、流体方程式を対応する長さスケールで粗視化して数値計算を行うことを提案する。適切

に粗視化することにより流体的揺らぎを表す項を白色雑音として与えることができ、また、数値計算を行う際の格子サイズについての制限が与えられる。

第 7 章では、原子核衝突の事象毎の揺らぎがある場合とない場合に分けて多数の数値計算を行い、結果を解析する。生成されたハドロンの運動量分布の非等方性をあらかず統計量である楕円フローに着目し、はじめに事象ごとの揺らぎの影響を調べている。次に流体の取り扱いを(1)完全流体、(2)散逸流体、(3)散逸流体に揺らぎ項を考慮したもの、の3つの場合に対して同じ初期条件から計算をすすめ、結果を詳細に比較している。計算はそれぞれ10万事象行い、また1事象につきハドロ生成部も10万回繰り返すことで十分な統計精度を確保している。揺らぎによる局所的な流速の影響により、最終的に生成されるハドロンの運動量分布に違いが現れることを明らかにした。運動量の関数として計算した楕円フローを PHENIX 実験の結果と比較し、輸送係数の不定性とあわせて議論した上で、本研究の理論計算が有効であると結論づけている。

第 8 章では、本研究における主要な結果をまとめ、将来展望を述べている。揺らぎの典型的長さやハドロ生成時における揺らぎの影響など、さらなる理論研究により突き詰めるべき点をまとめ、QGP の状態方程式や輸送係数など、将来の実験により明らかにされるべき事柄を検討する。今後の原子核衝突実験に重要な示唆を与えるものである。

なお、本論文第 4 章、第 5 章、第 7 章は平野哲文氏との共同研究をもとにしている。因果律を満たす相対論的流体力学や有色雑音について平野氏と議論した上で、散逸過程を含む相対論的流体中での揺らぎの重要性に関する着想は論文提出者本人が得た。粗視化を施した揺らぎ項を含む相対論的流体方程式を自ら導き、数値計算コードを開発し、散逸流を含めた時間発展を追う計算をおこなった。運動量分布や楕円フローを計算し、解析は全て論文提出者が行い、結果の考察も自ら与えたもので論文提出者のオリジナルな成果である。

クォークグルーオンプラズマ(QGP)の性質を明らかにすることは超高温状態の物質の振る舞いを理解するための重要課題の一つである。近年の重イオン衝突実験により、高温 QGP の流体的振る舞いが明らかになり、散逸や揺らぎを含めた理論研究の重要性は増している。本研究は、現在稼働中、および将来の高エネルギー原子核衝突実験に重要な示唆を与える成果を生み出した。したがって、博士(理学)の学位を授与できると認める。