

論文審査の結果の要旨

氏名 門内晶彦

本論文では、高エネルギー原子核反応で生成されるクォーク・グルーオン・プラズマに関する理論的研究について論じている。近年、クォーク・グルーオン・プラズマがあたかも粘性がゼロの理想流体のような性質を持つことが示されて注目されてきた。それに関して、相対論的な散逸流体理論を構築し、クォーク・グルーオン・プラズマのマクロな時空発展の記述を行い、その過程で粘性や散逸についての理解を得ることを目的としている。

本論文は6章からなる。第1、2章でクォーク・グルーオン・プラズマなどに関するイントロダクションとレビューが示された後で、第3章では相対論的な散逸流体方程式の導出が述べられている。そこでは、単成分で弾性散乱を素過程として出発する従来の理論とは異なり、粒子の生成消滅反応も含まれた場合を想定して、クォークやパイオンなど多成分から成り、バリオン数や電荷など複数の保存荷電がある場合の散逸流体方程式が導かれている。粘性として考えられているのは、変形に対する応答としてのずれ粘性、及び、膨張や収縮に対する応答としての体積粘性である。また、散逸として考えられているのは、熱勾配や加速に対する応答であるエネルギー散逸や、化学ポテンシャル勾配に対する応答である荷電散逸である。これらが、体積粘性応力やずれ粘性応力テンソル、エネルギー散逸流、荷電散逸流などの形で方程式に現れる。モーメント方程式を導入して、粘性散逸量で表される歪みテンソルを用いながら、エントロピー増大則から方程式が求められた。すなわち、非平衡分布関数の歪みテンソルを上述の粘性散逸量の線形結合で表わされている。そこでは、2次の項までを対等に揃える方針が立てられ、体積粘性応力、エネルギー散逸流、荷電散逸流、ずれ粘性応力テンソルに対する表式が示されている。

第4章では、カラーガラス凝縮が起きていると仮定して、その後の時空発展をネットバリオンがない設定（近似）のもとで議論している。その際に、高エネルギー重イオン反応で衝突する2つの原子核がぶつかり合う方向を z 軸として、 xy 平面の膨張を考えない仮定、すなわち、 $(1+1)$ 次元による近似を採っている。また、本章では、体積粘性とずれ粘性だけを考慮するものとする。状

態方程式は格子 QCD から求め、輸送係数は AdS/CFT や適当な現象論的な議論などから事前に得ておき、この計算の結果でのフィットは行わない。数値計算の結果、エントロピー生成やその流れのラピディティ分布への流体的な発展が議論された。ブルックヘブン国立研究所の RHIC による実験データに当てはめた場合、対流的な効果の方が粘性より大きいことが示された。一方、原子核反応のエネルギーがより高いセルンの LHC からの実験データでは粘性によるエントロピー生成効果が大きくなることが示唆された。また、z 軸方向の一様流からのずれも示された。

第 5 章では、有限なネットバリオン数の場合について、ずれ粘性、体積粘性、バリオン散逸を含めた計算を行った。計算に必要な状態方程式は格子 QCD に基づき、2 次のバリオン揺らぎまで含めている。輸送係数は、AdS/CFT 対応や適当な現象論的な考察から決めている。初期状態はカラーグラス状態である。計算の結果得られたネットバリオン数のラピディティに対する分布は、流体時空発展によって前方に移動することが示された。また、粘性や散逸過程は流体効果を抑える方向に働くことが示された。ネットバリオン分布は流体発展によって外に広がり、初期の高温物質生成時により多くのエネルギーが転換されていることも示唆された。

第 6 章では、全体のまとめが述べられている。すなわち、相対論的散逸流体力学を多成分・複数保存荷電のある系に対して定式化と、それに基づいた解析を行い、例えば、対流と粘性の関係が RHIC と LHC で変わることが示唆された。又、有限なバリオン密度（ネットバリオン数）における散逸流体計算を実行した。今後は空間 3 次元での計算などへの発展が考えられている。

以上は、散逸流体計算の枠組みを含めて初めて得られた結果であり、申請者の独創的な研究の成果であると認められる。特に、相対論的な流体モデルの構築の意義は大きい。実験との比較による検証は、データがまだ十分ではないので限定的であるものの、矛盾するデータはない。実験による検証を含む理論としての確立は今後に待たないといけないものの、これまでの計算は、根拠のあるパラメータによっており、結果にも十分な意義が認められる。

なお、本論文第 3、4 章は、平野哲文氏との共同研究となっているが、論文提出者が主体となって研究を進めたもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（理学）を授与できると認める。