

【課程博士用】

## 学 位 審 査 報 告 書

（ふりがな） 氏 名	みなみ ゆうき 南 佑樹
学位（専攻分野）	博 士 （ 理 学 ）
学 位 記 番 号	理 博 第 号
学位授与の日付	平成 24 年 月 日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研 究 科 ・ 専 攻	理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻
（学位論文題目）	Critical dynamics near QCD critical point （量子色力学臨界点における臨界動力学）
論 文 調 査 委 員	（主査） 菅沼 秀夫 准教授 大西 明 教授 青山 秀明 教授

理 学 研 究 科

( 続紙 1 )

京都大学	博士 ( 理 学 )	氏名	南 佑樹
論文題目	Critical dynamics near QCD critical point. (量子色力学臨界点における臨界動力学)		
(論文内容の要旨)			
<p>高温・高密度の状況下では、ハドロン相からクォーク・グルーオン・プラズマ相への相転移が起こり、クォークは閉じ込めから解放され、カイラル対称性は回復した状況になると期待されている。また、有限温度・有限密度の量子色力学の相図においては、臨界点の存在が理論的に期待されている。論文では、動的くりこみ群理論に基づいて量子色力学の臨界点における輸送係数の特異性と動的臨界指数の研究を行った。</p> <p>まず、1章では導入として有限温度・有限密度での量子色力学、および、そこで現れ得る臨界点の諸性質に関する理論や実験の先行研究等の一般的な背景や、本研究の動機などを紹介している。</p> <p>次に、2章では臨界動力学の一般的な理論についてレビューしている。具体的にはまず、臨界動力学の基礎方程式であるランジュバン方程式の統計力学的な基礎について紹介している。その後、ランジュバン方程式に基づいて、典型的な動的臨界現象、輸送係数の臨界発散と臨界減速が一般にどのように生じるのかについて説明している。更に、流体領域や臨界領域の概念を説明し、動的くりこみ群がどのような理論であるかも紹介している。また、量子色力学での臨界点における臨界動力学に関する先行研究についても触れ、そこでの物理的に有意なモードが流体モードであることを紹介している。</p> <p>3章では、相対論的流体力学により流体モードの時間相関の計算を行っている。これにより、臨界点付近での流体モードの傾向をまず調べている。この計算の結果、熱拡散モードが最も重要なモードであることを示している。一方、音響モードは臨界点付近で抑制され、2次的なモードであることも明らかにした。</p> <p>更に、この計算を通して、相対論的流体方程式の性質についても研究している。具体的には、因果律を破ると考えられているランダウ方程式が、少なくとも線形流体では、問題が無いことを示した。また、因果律の問題を正式に改善したとされるイスラエル・スチュワート方程式が、長波長領域では、ランダウ方程式と同じ結果を与えることも示した。</p> <p>4章では、動的くりこみ群理論により臨界動力学の研究を行っている。具体的にはまず、3章で得られた傾向をもとに、流体モードの非線形相互作用を記述するランジュバン方程式を構成している。その後、得られた方程式にくりこみ群を適用し、輸送係数の特異性を調べ、動的臨界指数の計算を行っている。その結果、まず、体積粘性率と熱伝導率が強い発散をすることを示した。これらの輸送係数は、通常の重イオン衝突実験の研究では無視されるが、臨界点付近では逆に非常に重要になることを明らかにした。次いで、3つの主要な流体モードとして、熱拡散、粘性、音響モードのそれぞれに対して動的臨界指数を計算し、熱拡散では約3、粘性では約2、音響モードでは約-0.8になることを示した。</p> <p>最後の5章では、この論文での研究結果がまとめられている。また、結果のフレーム依存性や今後の展望などについても議論している。</p>			

(続紙 2 )

(論文審査の結果の要旨)

強い相互作用の基礎理論である量子色力学は、その低エネルギー領域での強結合性に起因して、極めて解析が困難な課題であり、その解明は、現代物理学、特に素粒子・原子核物理学に残された最重要課題の1つになっている。とりわけ、有限温度・有限密度系での量子色力学の解明は、クォーク・ハドロン物理学における興味深い研究課題であり、高エネルギー重イオン衝突によるクォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) 相の生成実験やビッグバン直後の初期宇宙の物理などと密接に関連する。ここで、有限温度でゼロ密度の量子色力学系については、格子量子色力学という第一原理計算を用いて、信頼できるレベルで定量的に解明されているが、有限密度においては、サイン問題と呼ばれる数値計算上の困難のため、未解明な部分が多く残されている。

申請論文では、有限温度・有限密度での量子色力学において理論的に存在が予測されている臨界点を研究対象としている。そこでは系がマクロには流体力学的に良く記述されることに着目し、臨界点での諸性質や物理的に主要なモードを、相対論的流体力学の枠組みにおいて解明し、更に、動的くりこみ群理論等を用いて解析している。

オリジナルな研究成果としては、まず、相対論的流体力学により流体モードの時間相関の計算を行い、臨界点付近での流体モードの傾向を調べ、熱拡散モードが最も重要なモードであること、音響モードは臨界点付近では抑制され2次的なモードであること等を明らかにしている。

申請論文では、更に、流体モードの非線形相互作用を記述するランジュバン方程式を構成し、その方程式にくりこみ群を適用し、輸送係数の特異性と動的臨界指数を調べるなど、動的くりこみ群理論を用いた臨界動力学の研究を行った。そして、体積粘性率と熱伝導率に強い発散が現れることを示している。なお、これらの輸送係数は、通常の重イオン衝突実験の研究では無視されるが、臨界点付近では逆に非常に重要になることを明らかにした点は重要である。また、3つの主要な流体モードとして、熱拡散、粘性、音響モードのそれぞれに対して動的臨界指数を計算している。

これらの研究成果は、1兆度以上の高温、あるいは高密度で実現される QGP 実験の理論的基盤と密接に関連している。申請論文は、相対論的流体力学を用いて、量子色力学の臨界点のソフトモードである流体揺らぎの臨界領域での振舞いを理論的に分析したが、これは、QGP という高度に複雑な強相関係に対する動的なレベルでの一般性の高い理論研究である。ここで、QGP 流体を構成する粒子は相関長程度の範囲では、まとめて集团的に運動をするが、臨界点においては、この相関長が発散し音波の波長より長くなるので、音波のような振動モードは抑制される。そういった臨界点での一般的な性質に着目した点が優れている。

この様に、申請論文では、クォーク・ハドロン物理の重要な課題の1つを、独自性の高い方法で分析しておりその寄与は大きい。よって、博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成24年1月17日に論文内容とそれに関連した口頭試問を行った。その結果合格と認めた。