

氏 名	しみずべ だい 清水 辺 大
学位(専攻分野)	博 士 (人間・環境学)
学位記番号	人 博 第 313 号
学位授与の日付	平成 18 年 3 月 23 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	人間・環境学研究科 人間・環境学専攻
学位論文題目	非摂動繰り込み群による有限温度・密度 QCD の相構造の研究

(主査)
論文調査委員 教授 植松恒夫 教授 際本泰士 教授 富田博之 教授 青山秀明

論 文 内 容 の 要 旨

近年、素粒子物理学および原子核ハドロン物理学において、超高温、超高密度でハドロン物質がどのように振る舞うかに大きな関心が寄せられている。その解析の基礎となるのは素粒子の強い相互作用を記述する量子色力学 (QCD) とよばれるゲージ場の量子論である。有限温度かつ有限密度の QCD ではクォーク・グルーオンのプラズマ状態、カイラル対称性の回復、カラー超伝導などの多彩な相構造が期待され、理論・実験の両面から大いに興味を持って研究が進められている。

本学位申請論文は、非摂動繰り込み群 (ERG) とよばれる手法を用いて、QCD の相構造の解析を行ったものである。有限温度・密度 QCD の相構造の解明には非摂動論的な解析手法が必要であり、これまで主として格子 QCD のモンテカルロ計算や Schwinger-Dyson 方程式等を用いて研究が行われてきた。本学位論文での基礎となる非摂動的手法の ERG は量子補正の足し上げが比較的容易で、また系統的に近似を精密化できるという優れた特徴を有している。

本論文の第 1 章では、本研究の理論的および実験的背景が、近年の QCD による相構造の研究の進展に沿って述べられている。数百 MeV すなわち数兆度もの高温においては、ハドロン物質はハドロンを構成するクォークとグルーオンに乖離したクォーク・グルーオンプラズマ (QGP) という状態へ相転移することが予想される。このような超高温すなわち超高エネルギー状態は、初期宇宙や中性子星の内部に存在し、また重イオンの衝突で実験的に実現されると考えられる。これについては現在、米国ブルックヘブン研究所 (BNL) の相対論的重イオン衝突型加速器 (RHIC) 等で実験が行われ、また将来的には欧州共同原子核研究所 (CERN) の大ハドロン衝突型加速器 (LHC) でも実験的研究が進められる予定である。この章の後半ではウィルソンによる ERG の概念とその定式化について述べられている。すなわち運動量空間に赤外カットオフ Λ を導入し、その値より大きな運動量を持つ場については経路積分を遂行した有効作用を考え、 Λ の微小な変化に対する応答から導かれる微分方程式が ERG 方程式であることの説明がなされている。

第 2 章では有限温度における QCD のカイラル相転移をグルーオンが梯子状に交換される梯子 (Ladder) 近似を用いて議論している。グルーオンの熱的質量の評価には硬熱ループ (Hard Thermal Loop, HTL) 近似とよばれる近似法を用いる。ERG をゲージ理論に応用しようとする、赤外カットオフ項がゲージ不変性を破ってしまう。そこで、本学位論文では、グルーオンの伝播関数に現れるグルーオンの有効質量を HTL 近似で計算し、単体のグルーオン交換の寄与を非局所的な 4 体フェルミ相互作用で置き換え、有限温度・密度で相構造が受ける影響を調べた。有効ポテンシャルに対する ERG 方程式を解く際には多項式近似を適用して、有限の次数 N の項で切断を行う。この近似によって、ERG 方程式は連立常微分方程式に還元される。パイオンの崩壊定数を求めると、 N の増大に伴い速やかに収束することが確かめられた。この収束値が実験値に一致するように QCD のスケールである Λ_{QCD} を決めると 583 MeV という値が得られた。数値解析の結果、熱的な遮蔽効果はカイラル凝縮の生成に著しい影響を及ぼすことが明らかになった。これに基づいて、3 種類 (3 フレーバー) のクォークを考慮して臨界指数と臨界温度を計算した結果、相転移の次数は 2 次または非常に弱い 1 次であり、臨界温度が 124 MeV、臨界指数が 0.48 という結果が得られた。

第3章では、前章の結果を踏まえて、有限温度かつ有限密度での QCD の相構造の解析が遂行される。ここでは温度 T もクォークの化学ポテンシャル μ も Λ_{QCD} の大きさと考えられる。 T も μ も共にゼロの場合では QCD はカラーが閉じ込められた相にあり、かつ左巻きと右巻きのクォーク間の対称性であるカイラル対称性が破れた相にあるが、臨界温度 T_c や臨界化学ポテンシャル μ_c では相転移が起きて別の真空状態へ移行すると考えられる。 T_c が $100 \sim 200 \text{ MeV}$ でカイラル対称性は回復し、また QGP への相転移も期待される。またカラー超伝導状態がクーパー対の形成で出現することが予想される。本論文の数値解析では 2 フレーバーでの QCD の相構造が解析され、カイラル対称性の破れた相 ($D\chi\text{SB}$) と 2 フレーバーのカラー超伝導相 (2SC 相) が調べられた。ここではカイラル凝縮とクーパー対に対しては補助場を導入し、有効ポテンシャルの振る舞いを直接調べることで相構造を判定した。この結果、 T - μ 面での相図を描くと、三重臨界点は $(T, \mu) = (86, 242) \text{ MeV}$ という値が得られ、2SC-QGP 相転移は 2 次または非常に弱い 1 次であることが示された。このような計算を総合して、本論文の近似の範囲内では、カイラル対称性が破れた相とカラー超伝導 (2SC) 相は共存しないという結果が得られた。

最終の第4章では、本論文の内容の総括と今後の研究の展望が述べられている。特に、実験における取り組みとの関係でどのような物理量に注目するか、また有限温度・有限密度の QCD を扱う「熱場の量子論」自身の理論的發展に関する今後の課題に言及している。

論文審査の結果の要旨

核子やメソンなどのハドロンはクォークやグルーオンから構成され、その基本的相互作用は $\text{SU}(3)$ カラー対称性をゲージ化した量子色力学 (QCD) で記述される。最近、このハドロンが超高温、超高密度でどのように振る舞うかに大きな注目が集まっている。これは宇宙初期や中性子星内部の問題等にこの振る舞いが深く関わっているからである。すなわち有限温度・密度の QCD ではクォーク・グルーオンのプラズマ状態、カイラル対称性の回復、カラー超伝導といった相構造が予想され、近年その理論的研究が進展し、また実験面でも BNL の RHIC での重イオン衝突等で研究が進み、さらに将来の CERN の LHC の加速器実験でも研究が計画されている。

本学位申請論文は、非摂動繰り込み群 (ERG) とよばれる手法を用いて、QCD の相構造の解析を遂行したものである。有限温度・密度 QCD の相構造の解明には非摂動論的な解析手法が必要であり、従来主としてこの分野で用いられてきた理論的手法は格子 QCD のモンテカルロ計算や Schwinger-Dyson 方程式等である。有限密度系では、温度を T 、化学ポテンシャルを μ と表すと、格子 QCD では、フェルミオンの行列式が複素数になるため、現時点では T/μ が非常に小さい領域しか扱えないという問題があり、また Schwinger-Dyson 方程式では主として有効ポテンシャルの停留点を問題とするため、大域的なポテンシャルの最小値を見出すのには向いていないという欠点がある。本学位論文での基礎となる非摂動的手法の ERG は他の手法と比較した場合、量子補正の足し上げにおいてその種類を比較的容易に制御可能であり、さらに近似計算を系統的に精密化できるという優れた特徴を有している。

本論文で申請者は、まずはじめに、ERG の定式化について論じ、運動量空間で導入されたカットオフ Λ より大きな運動量を持つ場については経路積分を遂行した有効作用の Λ の微小な変化に対する応答から導かれる微分方程式が ERG 方程式であることを示した。次に、本学位申請者は、有限温度で化学ポテンシャルがゼロの状態における QCD のカイラル相転移をグルーオンが梯子状に飛ぶ梯子 (Ladder) 近似を用いて解析している。グルーオンの熱的質量の計算には熱場の量子論でしばしば用いられる硬熱ループ (HTL) 近似を適用する。しかし、ERG をゲージ理論に応用しようとする、赤外カットオフ項がゲージ不変性を破るという問題がある。そこで本論文では、単体のグルーオン交換の寄与を非局所的な 4 体フェルミ相互作用で置き換えることで、グルーオンの自由度を考慮し、さらにグルーオンの熱的質量を HTL 近似で計算し、有限温度・密度で相構造が受ける影響を調べた。この場合ゲージボゾンにカットオフ項を導入しないことで、計算の効率は大幅に向上した。有効ポテンシャルに対する ERG 方程式を解く際には、複合演算子についての多項式近似を適用して、有限の次数 N で切断を行う。この近似によって、ERG 方程式は連立常微分方程式に還元される。これによりパイオンの崩壊定数を求めると、 N の増大に伴ってその値が速やかに収束することが確かめられた。次に、申請者は QCD のスケールである Λ_{QCD} をこの収束値が実験値に一致するように決定し、3 フレーバーで数値解析を行った結果、カイラル相転移の次数は 2 次

または非常に弱い1次であることを示し、またその臨界温度を臨界指数を求めることに成功した。ただし、臨界温度は熱的質量の近似法に大きく依存することが明らかになった。

本学位申請論文はさらに、カイラル凝縮とカラー超伝導に対するクーバー対にそれぞれ補助場を導入し、ERG方程式の振る舞いを直接調べることで、 μ がゼロでない場合のQCDの相構造を解析した。 T も μ もゼロの場合では、QCDはカラーが閉じ込められ、カイラル対称性が破れた相にあるが、臨界温度 T_c や臨界化学ポテンシャル μ_c では相転移が起きて別の真空状態へ移行すると考えられる。本学位論文の数値計算では2フレーバーでのQCDの相構造が解析され、カイラル対称性の破れた相(D χ SB)と2フレーバー・カラー超伝導相(2SC相)が調べられた。この結果、 T - μ 面での相図を描くことにより、三重臨界点の値を得ることに成功した。また、2SC-QGP相転移は2次または非常に弱い1次であり、さらにこの近似の範囲では、カイラル対称性が破れた相とカラー超伝導(2SC)相は共存しないことを本申請論文は明らかにした。

以上のように、申請者は非摂動繰り込み群(ERG)とよばれる理論的手法を用いて、ハドロンの高温・高密度状態を記述する有限温度・有限密度でのQCDを有効ポテンシャルの振る舞いを調べることで、カイラル凝縮、QGP相転移、カラー超伝導を解析し、これらの相構造についての新たな知見を得た。したがって、本研究は、場の量子論に基づき自然界の基礎的構造を探究する人間・環境学専攻自然・人間共生基礎論講座の量子自然構造論での研究目的に合致したものとして高く評価できる。

よって

本論文は博士(人間・環境学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成18年1月20日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。