

氏 名	荒井 亮一
博士の専攻分野の名称	博士（理学）
学 位 記 号 番 号	博理工甲第 770 号
学位授与年月日	平成 22 年 3 月 24 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学 位 論 文 題 目	QCD Phase Diagrams with Three-Flavor Random Matrix Model (3 フレーバーランダム行列模型による QCD 相図)
論 文 審 査 委 員	委員長 教 授 吉永 尚孝 委 員 教 授 鈴木 健 委 員 教 授 谷井 義彰 委 員 准 教 授 山口 貴之

論文の内容の要旨

クォークは強い相互作用、すなわち、量子色力学 (QCD) に支配された素粒子である。QCD によると、クォークはグルーオンと呼ばれるボソンの交換で強い相互作用を生じ、カラーの閉じ込めにより、クォークは単独で存在することを許さない、と言われている。3つのクォークから構成された陽子や中性子などはバリオンと呼ばれ、 π 中間子や K 中間子などのメソンはクォークと反クォークの対から成る。バリオンとメソンを総じてハドロンと呼ぶ。ハドロンは、相対論的重イオン衝突型加速器 (RHIC) で研究されており、今後、さらに高エネルギーである CERN の大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) や日本の大強度陽子加速器施設 (J-PARC) などで QCD に関する広域な研究が行われようとしている。

QCD ラグランジアン中のクォーク質量は、標準模型での Higgs 場凝縮の期待値に起因する質量 (カレントクォーク質量) である。カレントクォーク質量の値はエネルギースケールに依存し、エネルギースケールが 2GeV のとき、アップクォーク質量: $m_u = 1.5 \sim 3.3\text{MeV}$, ダウンクォーク質量: $m_d = 3.5 \sim 6.0\text{MeV}$, ストレンジクォーク質量: $m_s = 70 \sim 130\text{MeV}$ である。そこで、クォークの種類を 3 以下に限定すると、カレントクォーク質量は QCD のエネルギースケール ($\Lambda \sim 200\text{MeV}$) に比べ十分小さく無視してもよい。このとき、QCD ラグランジアンは、左手系と右手系のクォークに関係する対称性を保存する。この対称性はカイラル対称性と呼ばれる。カイラル対称性が動力学的に破れることで、クォークは現実的な質量である構成クォーク質量を獲得する、と考えられている。

QCD は、温度やバリオン数密度の大きさによって様々な自発的対称性の破れのパターンを有する。カイラル極限、すなわち、カレントクォーク質量がゼロの場合、最も特徴的なパターンが 3 種類ある。それぞれ、低温低密度で Nambu-Goldstone (NG) 相、高温でクォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) 相、低温高密度でカラー超伝導 (CSC) 相である。NG 相が現在の状態である。QCD には漸近的自由性があり、高エネルギーでは QCD の結合定数が弱まるため、クォークとグルーオンが単独で存在できるような状態、すなわち、QGP 相が高温で現れる。また、低温高密度ではカラーによる超伝導が予想されている。

カイラル対称性の破れと金属の超伝導体への相転移には強い類似性があり、金属超伝導のクーパー対の凝縮が重要であるように、QCD ではクォーク - 反クォークの凝縮が重要な働きをする。この凝縮はカイラル

凝縮と呼ばれる。

低エネルギー領域では、QCD の結合定数は大きいので、場の量子論における常套手段の摂動展開ができないので、解析的に計算することが困難である。そこで、QCD の第一原理として、4次元時空を格子化した格子ゲージ理論のモンテカルロ法を使って数値的にハドロン質量などの物理量を計算している。しかしながら、モンテカルロ法を使用するため、有限密度の場合、負符号問題が発生し、高密度領域の QCD を研究できない。現時点では、Nambu-Jona-Lasinio (NJL) 模型、カイラル摂動論、ランダム行列理論などの有効模型を利用して QCD の高密度領域が研究されている。

有効模型によると、ゼロ温度において、アイソスピン化学ポテンシャル $\mu_I \geq m_\pi/2$ (ここで m_π は π 中間子の質量) で π 中間子凝縮が現れる。また、ストレンジネス化学ポテンシャル $\mu_S \geq m_K$ (ここで m_K は K 中間子の質量) で K 中間子凝縮が現れることが期待されている。このような高密度の実現は中性子星が有力視されている。

本博士論文では、QCD の有効模型の 1 つであるランダム行列理論を用いた。ランダム行列とは行列要素がガウス分布に従ってランダムに選ばれた行列である。ランダム行列理論は 1950 年代に Wigner によって原子核物理学で発展した理論であり、量子論的場の理論においてユークリッド空間での Dirac 演算子のスペクトルを再現できることが示された。

本論文では、有限温度で、バリオン数化学ポテンシャル、アイソスピン化学ポテンシャル、ストレンジネス化学ポテンシャルを有する 3 フレーバーランダム行列模型を構築した。今まであった 2 フレーバーランダム行列模型の 3 フレーバーへの拡張であるため、 π 中間子凝縮だけでなく、 K 中間子についての凝縮も考慮できるようになった。

また、ゼロ温度と有限温度において各々の化学ポテンシャル平面で QCD 相図を数値計算で調べた。その結果、一次相転移線と二次相転移線で分割された相構造を多くもち、それぞれの相は、各フレーバーに対するカイラル凝縮、 π 中間子凝縮、と K 中間子凝縮によって特徴付けることができる、ことがわかった。さらに、3 フレーバーランダム行列模型による QCD 相図のパターンが NJL 模型やカイラル模型による予言と定性的に一致することがわかった。

論文の審査結果の要旨

クォークは強い相互作用、すなわち、量子色力学(QCD)に支配された素粒子である。QCDによると、クォークはグルーオンと呼ばれるボソンの交換で強い相互作用を生じ、カラーの閉じ込めにより、クォークは単独で存在することは許されない、と言われている。3つのクォークから構成された陽子や中性子などはバリオンと呼ばれ、 π 中間子やK中間子などのメソンはクォークと反クォークの対から成る。バリオンとメソンを総じてハドロンと呼ぶ。ハドロンは、相対論的重イオン衝突型加速器(RHIC)等で研究されており、今後、さらに高エネルギーであるCERNの大型ハドロン衝突型加速器(LHC)や日本の大強度陽子加速器施設(J-PARC)などでQCDに関する広域な研究が行われようとしている。

QCD ラグランジアン中のクォーク質量は、標準模型でのHiggs場の真空期待値に起因する質量(カレントクォーク質量)とされている。このカレントクォーク質量の値はエネルギースケールに依存し、エネルギースケールが2GeVのとき、uクォーク質量: $m_u = 1.5 \sim 3.3\text{MeV}$, dクォーク質量: $m_d = 3.5 \sim 6.0\text{MeV}$, sクォーク質量: $m_s = 70 \sim 130\text{MeV}$ である。そこで、クォークの種類を3以下に限定すると、カレントクォーク質量はQCDのエネルギースケール($\Lambda \sim 200\text{MeV}$)に比べて十分小さく、無視してもよい。このとき、QCD ラグランジアンは、左手系と右手系のクォークに関係する対称性を保有する。この対称性はカイラル対称性と呼ばれる。カイラル対称性が力学的に破れることで、クォークは現実的な質量である構成クォーク質量を獲得する、と考えられている。

QCDは、温度やバリオン数密度の大きさによって様々な自発的対称性の破れのパターンを有する。カイラル極限、すなわち、カレントクォーク質量がゼロの場合、最も特徴的なパターンが3種類ある。それぞれ、低温低密度でNambu-Goldstone (NG) 相、高温でクォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) 相、低温高密度でカラー超伝導 (CSC) 相である。NG相が現実の原子核の状態である。QCDには漸近的自由性があり、高エネルギーではQCDの結合定数が弱まるため、クォークとグルーオンが単独で存在できるような状態、すなわち、QGP相が高温で現れる。また、低温高密度ではカラーによる超伝導状態が予想されている。

カイラル対称性の破れと金属の超伝導体への相転移には強い類似性があり、金属超伝導のクーパー対の凝縮が重要であるように、QCDではクォーク-反クォークの凝縮が重要な働きをする。この凝縮はカイラル凝縮と呼ばれる。

低エネルギー領域では、QCDの結合定数は大きいため、場の量子論における常套手段の摂動展開ができないので、解析的に計算することが困難である。そこで、QCDの第一原理として、4次元時空を格子化した格子ゲージ理論のモンテカルロ法を使って数値的にハドロン質量などの物理量を計算している。しかしながら、モンテカルロ法を使用するため、有限密度の場合、負符号問題が発生し、高密度領域のQCDを研究できない。現時点では、Nambu-Jona-Lasinio (NJL) 模型、カイラル摂動論、ランダム行列理論などの有効模型を利用してQCDの高密度領域が研究されている。

有効模型によると、ゼロ温度において、アイソスピン化学ポテンシャル μ_I が $\mu_I \geq m_\pi / 2$ (ここで m_π は π 中間子の質量) で π 中間子凝縮が現れる。また、ストレンジネス化学ポテンシャル μ_S が $\mu_S \geq m_K$ (ここで m_K は K 中間子の質量) で K 中間子凝縮が現れることが予想されている。このような高密度状態の実現は中性子星が有力視されている。

本博士論文では、QCDの有効模型の1つであるランダム行列理論を用いた。ランダム行列とは行列要素がガウス分布に従ってランダムに選ばれた行列である。ランダム行列理論は1950年代にWignerによって原子核物理学で発展した理論であり、量子論的場の理論においてユークリッド空間でのDirac演算子のスペクトルを再現できることが示された。

本論文では、有限温度で、バリオン数化学ポテンシャル μ_B 、アイソスピン化学ポテンシャル μ_I 、ストレンジネス化学ポテンシャル μ_S を有する 3 フレーバーランダム行列模型を構築した。今まであった 2 フレーバーランダム行列模型の 3 フレーバーへの拡張であるため、 π 中間子凝縮だけでなく、K 中間子についての凝縮も考慮できるようになった。

カイラル凝縮のみが現れる簡単な系において、解析的にクォーク質量と温度依存の臨界化学ポテンシャルを得た。ゼロ温度においては、 π^\pm 、 K^\pm 、 K^0 のうち 1 つだけが凝縮する場合の臨界化学ポテンシャルを求め、 $\mu_B = \mu_S = 0$ のときの π 中間子質量、 $\mu_B = \mu_I = 0$ のときの K 中間子質量を得た。

また、ゼロ温度と有限温度において各々の化学ポテンシャル平面で QCD 相図を数値計算で調べた。その結果、一次相転移線と二次相転移線で分割された相構造を多くもち、それぞれの相は、各フレーバーに対するカイラル凝縮、 π 中間子凝縮および K 中間子凝縮によって特徴付けることができる、ことがわかった。さらに、3 フレーバーランダム行列模型による QCD 相図のパターンが NJL 模型やカイラル摂動論による予言と定性的に一致することがわかった。

μ_I の効果により、 $\mu_I = 0$ で縮退していた u と d クォークの一次相転移線がお互い反対方向に移動し、さらに、s クォークの一次相転移線はより高密度側にシフトすることがわかった。ただし、これらの効果に臨界エンドポイントは影響しない。

本研究は、格子ゲージ理論では原理的に計算することのできない有限密度・有限温度での QCD 相図をランダム行列理論を使って解析的および数値的に求めることに成功し、その寄与するところは大きい。これらの研究結果の一部は、論文 2 編が査読制のある国際誌に報告されている。よって当論文審査委員会は、本論文が博士（理学）の学位に値するものとして、「合格」と判定した。