九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

Determination of the phase diagram of Quantum Chromodynamics from the regions with no sign problem

境, 祐二
九州大学大学院理学府

https://doi.org/10.15017/21708

出版情報：九州大学, 2011, 博士（理学）, 課程博士
バージョン：
権利関係：

Determination of the phase diagram of Quantum Chromodynamics from the regions with no sign problem
（符号問題のない領域からの量子色力学相図の決定）

境　　祐　二

論文内容の要旨

物質の最小単位はクォークと呼ばれる粒子であり、量子色力学(Quantum Chromodynamics: QCD)によって記述される。QCD の重要な特徴として、カイラル対称性の破れとクォークの閉じ込めがある。カイラル対称性の破れにより物質は質量を獲得し、閉じ込められたクォークは多彩なハドロンを構成する。この 2 つの機構は高温・高密度において変化する。高温においてクォークはハドロンから解放され、カイラル対称性は回復する。また、高密度ではカラー超伝導という新しい状態が出現すると示唆されている。このような状況は宇宙初期や中性子星内部で実現していると考えられ、宇宙初期の物質形成や中性子星の物理を理解する上でも重要である。また、超弦理論におけるゲージ・重力対応の対象になる現象として注目されている。QCD 相図の研究は、原子核物理、宇宙天体物理、素粒子物理、物性物理といった様々な分野で注目されている重要な課題である。近年、重イオン衝突実験によりこれらの状態を再現する試みも行われており、実験・理論両方面から注目されている研究である。

第一原理計算である格子 QCD は符号問題があるため、実数化学ポテンシャル(μ)領域では数値計算を行えない。そのため、有限密度においてカイラル対称性の破れやクォークの閉じ込めといった QCD の特徴がどのように影響を受けるのかは、定性的議論に留まっている。

本研究の目的は QCD 相図の定量的解明である。虚数 μ、アイソスピン μ 領域では、符号問題がなく格子 QCD 計算が可能である。QCD 分配関数は μ^2 の解析関数である。虚数 μ 領域における格子 QCD の結果を再現する分配関数が有効模型によって決まれば、μ^2 について解析接続することで実数 μ 領域の分配関数が得られる。他の物理量は分配関数から求められる。つまり、虚数 μ 領域を解析することで、実数 μ 領域における重要な物理情報が得られる。

中性子星など高密度天体内部においてアイソスピン μ は有限である。アイソスピン μ の影響で QCD の特徴がどう変化するかを調べることは、高密度天体の物理にとって重要である。更に、アイソスピン μ 領域は、μ が実数でも虚数でも格子 QCD 計算を実行できる。つまり、アイソスピン μ 領域で、虚数 μ から実数 μ への解析接続の妥当性を確かめることができる。

本論文では、虚数 μ やアイソスピン μ における格子 QCD の結果を定量的に再現する有効模型を構築する。構築した模型を用いて実数 μ 領域における相図を解析する。

特に以下の 4 点を示した。

1. 虚数 μ 領域における QCD は、μ に対して特異な周期性を持つ。この周期性は QCD が拡張された Z_3 対称性を持つためであることを示した。Polyakov-Nambu-Jona-Lasinio (PNJL) 模型はこの拡張された Z_3 対称性を持っており、虚数 μ の QCD を定性的に再現することを示した。
2. 虚数 μ の格子 QCD を定量的に再現するように PNJL 模型を拡張した。格子 QCD では、カイラル相転移と閉じ込め相転移との間の相関が強く、両者はほぼ同時に起きる。しかし、従来の PNJL 模型は、この同時性を再現できない。この問題を解決するため、相関の強い PNJL 模型 (Entanglement-PNJL: EPNJL)を構築した。構築した EPNJL 模型は虚数 μ の格子 QCD の結果を定量的に再現する。
3. EPNJL 模型がアイソスピン μ の格子 QCD の結果を再現することを示した。この際、虚数 μ の格子 QCD から決めたパラメータを変えずに、アイソスピン μ における格子 QCD を定量的に再現することを示し、EPNJL 模型の妥当性を確かめた。
4. EPNJL 模型を用いて、実数 μ における QCD 相図を予言した。

現在のところ、EPNJL 模型は虚数 μ、アイソスピン μ 領域の格子 QCD 結果を定量的に再現する唯一の模型であり、最も信頼できる模型である。今後、QCD 相図の研究において広く使われることが期待される。特に、この模型を用いて中性子星や宇宙初期の状態を定量的に解明することができる。今まで定性的にしか議論できなかった QCD 相図の研究を定量的議論にまで発展させることができる。