

Lattice QCD with two-flavor Wilson fermions for static-quark free energies and quark number densities at finite chemical potential

高橋, 純一

<https://doi.org/10.15017/1654645>

出版情報 : 九州大学, 2015, 博士 (理学), 課程博士
バージョン :
権利関係 : 全文ファイル公表済

氏名：高橋 純一

論文名：Lattice QCD with two-flavor Wilson fermions for static-quark free energies and quark number densities at finite chemical potential

(有限化学ポテンシャル領域における静的クォークの自由エネルギーとクォーク数密度に対する2フレーバーウィルソンフェルミオンでの格子QCD計算)

区分：甲

論文内容の要旨

量子色力学(QCD)はクォークやグルーオンの間に働く強い相互作用を記述する理論である。QCD は漸近自由性を持つ代表的な理論である。それ故、有限温度 (T) や有限クォーク数化学ポテンシャル (μ) において QCD は幾つかの違った相を持つと考えられている。実際、低い T かつ小さな μ の領域において、系はハドロン相である。この相ではクォークはハドロン内部に閉じ込められており、カイラル対称性の自発的破れが起こっている。高い T の領域においては漸近自由性から、系はクォーク-グルーオンプラズマ相であると期待される。この相ではカイラル対称性は回復し、クォークはハドロン内部の閉じ込めから解放される。低い T かつ大きな μ の領域において、系はカラー超電導相にあると考えられている。この相では二つのクォーク間の相互作用が引力的に働き、二つのクォークがクーパー対を成していると考えられている。 $T-\mu$ 平面での相構造を解明することはハドロン物理やそれと関係した分野において最も重要な問題の一つである。

有限 μ 領域の QCD にはたくさんの魅力的な主題がある。例えば、QCD 相図に対するビームエネルギー探査実験、核物質の性質やコンパクト星の内核構造の解明などである。格子 QCD(LQCD)は QCD の第一原理計算であるため、QCD を研究するための最も強力な手法である。しかし LQCD は有限 μ 領域において数値計算上の問題である「符号問題」を有している。これまでこの符号問題を避けようと幾つかの方法が提案されてきたが、未だに完璧なものはない。

本論文では、LQCD を虚数 μ 領域で用いることにより、静的クォークの自由エネルギーとクォーク数密度を有限 T かつ有限 μ の領域で調べた。虚数 μ 領域では LQCD に符号問題はなく計算可能である。そこでの計算結果を実数 μ 領域に外挿した。これは QCD 相図を解明するという最終目標に向けた大切な第一歩である。LQCD の作用はクローバー改良型の2フレーバーウィルソンフェルミオン作用、及び繰り込み群改良型の岩崎ゲージ作用である。また LQCD シミュレーションは虚数 μ ($\equiv i\mu$) 領域において実行されている。虚数 μ における LQCD の結果に対し幾つかの関数形を想定することで、物理量を実数 μ 領域に外挿している。

本論文では初めに、様々なカラーチャンネルにおける静的クォークの自由エネルギーの μ 依存性を調べた。静的クォークの自由エネルギーを $i\mu/T$ の4次まで展開し、4次の係数の影響について調べた。次に、有限 μ の領域におけるカラー遮蔽効果について調べた。静的クォークの自由エネルギーの結果からカラーデバイ遮蔽質量を引き出した。虚数 μ 、実数 μ の両領域においてカラーデバイ遮蔽質量は、摂動計算と比較されている。次に、クォーク数密度の μ 依存性を調べた。虚数 μ 領域で得られたクォーク数密度は、閉じ込め領域においてフーリエ級数を、非閉じ

込め領域においては多項式級数を想定して、実数 μ 領域に外挿されている。また、どれほど大きな実数 μ の領域まで外挿できるか、信頼できる外挿域の上限を非閉じ込め領域のそれぞれの T において調べた。最後に、虚数 μ 領域での LQCD 計算で得られたクォーク数密度から、核子や Δ 粒子の質量の T 依存性がハドロン共鳴ガスモデルを用いて引き出せるかどうかを調べた。

今回の虚数 μ から実数 μ へのアプローチによる静的クォークの自由エネルギーとクォーク数密度の μ 依存性の研究は、物理的興味という観点のみならず、異なる手法や異なるクォーク作用による結果との妥当性のチェックをするという観点からも重要なことである。