

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フェルミオンでの格子QCD計算)			
論文調査委員	主 査	九州大学 教 授	八尋 正信	
	副 査	九州大学 教 授	鈴木 博	
	副 査	九州大学 准教授	清水 良文	

論 文 審 査 の 結 果 の 要 旨

物質の最小単位の一つにクォークがある。このクォークの間にはグルーオンを媒介粒子とする力(強い相互作用)がはたらいており、その力は量子色力学(QCD)によって記述される。QCD は漸近自由性、クォークの閉じ込め、カイラル対称性の自発的破れなどの特異な性質をもっている。現在の宇宙に対応する低温度 (T)・低クォーク密度 (低クォーク数化学ポテンシャル: μ) では、クォークはハドロン内に閉じ込められており、軽いハドロンの多くはカイラル対称性の自発的破れによって大きな質量を獲得している。一方、宇宙初期に対応する高温・低 μ 領域では、漸近自由性から摂動論を用いることができるため、クォークは閉じ込めから解放され、クォーク・グルーオン・プラズマ状態になっていることが分かっている。更に、高 μ/T 領域では、カラー超伝導等の興味深い状態が予想されており、中性星内で実在する可能性がある。このように、クォークやグルーオンは T や μ によって、様々な相に変化する。この相変化を $\mu-T$ 平面上に表現したものを QCD 相図と言う。QCD 相図の解明は、QCD の非摂動性を理解することに他ならず、ハドロン物理学の最も重要な課題になっている。

非摂動性の強い QCD を解く方法として、格子 QCD がある。この理論では時空は格子化され、その格子上にクォーク場やグルーオン場を置き、多重積分を数値的に実行することによって、QCD は解かれる。格子 QCD は QCD を研究するための第一原理計算であり、最も強力な方法である。実際、有限 T ・ゼロ μ 領域では、多くの成果を上げてきた。しかし、格子 QCD は、有限 μ 領域では“符号問題”という深刻な数値計算上の問題をもっている。このため、この符号問題を避ける方法が幾つか提案されてきた。その方法の一つが、“純虚数 μ 法”である。この方法では、物理量は符号問題のない純虚数 μ/T 領域で格子 QCD 計算を実行することによって算出され、その量は解析関数を仮定することによって実数 μ/T 領域へと外挿される。符号問題がない領域で、格子 QCD 計算が実行されるため、他の符号問題回避法に比べて数値誤差が小さいという利点が期待される。

本論文では、この純虚数 μ 法を用いて、クォークの性質を知る上で重要な指標である「クォーク間ポテンシャルの距離依存性」と「クォーク数密度」を純虚数 μ/T 領域と実数 μ/T 領域の

両領域で求め、 $(\mu/T)^2 < 1$ 領域における格子 QCD 解析を基に、以下の結果を導き出した。これらの結果は、QCD 相図全領域の解明へ向けて、重要な成果となっている。

(1) カラーチャンネル毎に、クォーク間ポテンシャルの距離依存性を求めた。クォーク間ポテンシャルの μ 依存性は、純虚数 μ/T 領域に比べて、実数 μ/T 領域では弱いことを示した。

(2) クォーク間ポテンシャルの到達距離の逆数であるカラーデバイ遮蔽質量の μ 依存性を求めた。Hard-thermal-loop 摂動論の予言より強い μ 依存性を、カラーデバイ遮蔽質量を持つことを示した。

(3) クォーク数密度の μ/T 依存性を純虚数 μ/T 領域と実数 μ/T 領域の両領域で求め、他の符号問題回避法で得られた実数 μ/T 領域でのクォーク数密度と矛盾しないことを示した。これによって、純虚数 μ 法（特に、外挿に使われた解析関数）の信頼性を示した。加えて、純虚数 μ 法の結果がより小さな数値誤差をもつことを示し、純虚数 μ 法の利点を明確にした。

(4) 純虚数 μ/T 領域におけるクォーク数密度から、ゼロ密度における核子や Δ 粒子の質量の T 依存性を、ハドロン共鳴ガスモデルを用いて、引き出した。バリオン質量の T 依存性は、格子 QCD 計算から直接求めるのが難しい量である。このため、この新しい抽出法は、注目に値する。

以上の結果は、ハドロン物理学の分野において価値ある業績と認められる。よって、本研究者は博士（理学）の学位を受ける資格があるものと認める。