

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 27 日現在

機関番号：82401

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2013～2014

課題番号：25887014

研究課題名(和文) 極限状態QCDの非摂動的な研究

研究課題名(英文) Nonperturbative study of QCD in extreme conditions

研究代表者

金澤 拓也 (Kanazawa, Takuya)

独立行政法人理化学研究所・階層縦断型基礎物理学研究チーム・研究員

研究者番号：10713224

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では量子色力学(QCD)の極限状況下のダイナミクスを様々な条件下で解析した。まず強磁場および高アイソスピン密度におけるQCDのダイナミクスを汎関数くりこみ群とランダム行列理論を用いて解析し、磁気感受率の温度依存性やディラック固有値の密度依存性の特徴を明らかにした。またクォークがカラーの随伴表現に属する場合に $R^3 \times S^1$ 上のQCD相図を解析し、多様な相転移の存在を明らかにした。格子QCDで負符号問題を解くための有望なアプローチであるLefschetz thimbleの構造をフェルミオン系で初めて体系的に解明した。また5次元の新しい格子ゲージ理論を提案し、その数値シミュレーションも行った。

研究成果の概要(英文)：In this research various aspects of Quantum Chromodynamics (QCD) in extreme conditions were studied. By using the functional renormalization group method and random matrix theory we elucidated miscellaneous properties of QCD in strong magnetic fields and with a large isospin chemical potential. We also studied the phase structure of QCD with quarks in the adjoint representation in $R^3 \times S^1$, tested the Lefschetz-thimble approach to path integrals in fermionic models, and formulated a novel five-dimensional gauge theory on the lattice.

研究分野：数物系科学

キーワード：量子色力学 Lefschetz thimble ランダム行列理論 格子QCD クォーク物質

1. 研究開始当初の背景

近年、加速器による相対論的重イオン衝突実験やスーパーコンピュータを駆使した数値実験により、量子色力学 (QCD) の理解は飛躍的に進んできた。その一方で、これらの実験データを十分に説明する理論・モデルの開発はまだ十分に進んでいなかった。とくに強磁場や高密度の QCD は実験によるアプローチが容易でない一方、マグネターなどの中性子星の構造とダイナミクスを理解する上で鍵となる研究分野であり、理論的解明が待たれていた。

また QCD は強結合ゲージ理論の代表例であり、カイラル対称性の破れや漸近的自由、高温での相転移など、その多くの特徴は標準模型を超える物理の解明においても鍵となることが予想される。その点からも、大量の数値データ・実験データに埋もれている QCD の本質をできるだけ単純化して抽出できるような視座を与える理論的枠組みが望まれていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は極限条件下における QCD の振る舞いを解析的に解明することである。具体的には、(1) 弱結合領域における半古典的計算、(2) 格子 QCD シミュレーション、(3) 汎関数くりこみ群、の3つの手法を組み合わせ、有限温度・有限密度・有限磁場といった条件下における QCD の相構造を総合的に理解するための具体的な方向性を与えることを目指す。

3. 研究の方法

研究手法として、3つのアプローチに分けて進める。まず半古典計算の方法では、時空の一方向をコンパクト化し、 $R^3 \times S^1$ 上での非可換ゲージ理論を考える。このとき S^1 が理論の強結合スケールに比べて十分に小さければ、漸近自由性から、半古典的なゲージ

配位の足しあげに基づく計算が信頼できる。Unsal, Poppitz, Shifman らによってこれまでにクォークが随伴表現に属する QCD (adjoint QCD) を中心に計算方法が開発されてきたが、これを拡張・一般化する。次に格子 QCD シミュレーションでは、時空を格子化してモンテカルロ計算をすることにより、第一原理から QCD の閉じ込め等の強結合ダイナミクスを解析することができる。ただし有限密度 QCD では確率ウェイトが複素数となる負符号問題によりシミュレーションが困難になるため特別な取扱いが必要となる。最後の手法である汎関数くりこみ群は、従来 QCD の有効モデルでよく用いられる平均場近似を超える一つの手法であり、場の揺らぎを非摂動的に足しあげることから二次相転移近傍など揺らぎの強い系の性質を正しく計算することが可能である。これは磁場中の QCD における対称性の自発的破れを解明するために利用できる。以上を組み合わせ、QCD およびより一般の非可換ゲージ理論を解明する計算が可能になると期待できる。

4. 研究成果

(1) コンパクト化された QCD

$R^3 \times S^1$ 上の adjoint QCD を有効モデルと半古典近似によって解析した。その結果、adjoint QCD が S^1 半径とその境界条件に依存した豊かな相構造を持つことを明らかにした。ゲージ対称性が自発的に破れた相ではモノポールが半古典配位として重要であるため、この寄与を計算した結果、理論の質量ギャップが境界条件に非自明に依存することがわかった。また周期境界条件でのカイラル対称性の破れは極めて小さな S^1 でも維持されることがわかった。これらは標準模型を超える物理、とくに余剰次元モデルの今後の構築に示唆を与えている。

(2) 磁場中の QCD

強い外部磁場を加えたとき、クォークの運動

が一次元方向に有効的にトラップされるため次元縮小が起こり、カイラル対称性の破れは強められるというのが通説であったが、格子 QCD のデータでは逆の傾向が見えており、この食い違いはこれまで理解されていなかった。そこで QCD と同じ大域的対称性をもつ有効モデルに汎関数くりこみ群を適用してカイラル相転移を調べた。その結果、磁場中のパイオンの異方的な揺らぎを取り入れても相転移温度の磁場依存性が大きく変更されることは無いことがわかった。またこれを拡張して、2+1 フレーバーでパイオンと K メソンの揺らぎまで取り入れた解析的計算を汎関数くりこみ群によって初めて実行し、磁気感受率の温度依存性を計算して格子 QCD とよく一致する結果を得た。

(3) 格子 QCD

これまで漸近的自由なゲージ理論が定義できるのは 4 次元以下とされていたが、Anselmi や Horava によりローレンツ対称性を破れば高次元へも拡張できることが摂動論で提案されていた。そこで本研究では 5 次元における非等方的な非可換ゲージ理論を格子上に離散化する方法を提案し、それを実際にシミュレートして、滑らかな連続極限の存在を強く示唆する結果を得た。これはゲージ場の kinetic term のべき指数に異方性を持つゲージ理論を格子上でシミュレートした最初の例である。

(4) Lefschetz thimble

複素なウェイトを持つ理論は従来のモンテカルロ法によってシミュレートすることが困難だった。これを解決する一つの方法として、場を複素化して Lefschetz thimble と呼ばれる曲がった多様体上で経路積分を実行する手法がある。これまでいくつかのボゾン系でテストされていたが、本研究ではフェルミオン系においてどのように thimble の構造が変更されるかを数種類のモデルで包括的に調べ、カイラル対称性の破れと thimble の

関係を初めて明らかにした。

(5) ランダム行列理論と QCD

高密度 QCD におけるディラック演算子のスペクトルは対称性の自発的破れによって規定された普遍的な振る舞いを示し、これはカイラル・ランダム行列理論によって明示的に計算することができる。本研究ではこれを高アイソスピン密度の QCD へ拡張し、新たなランダム行列との対応を示した。さらに u クォークと d クォークの化学ポテンシャルが非対称な場合にもある種の演算子のスペクトルに普遍性が見られることを指摘した。有限アイソスピン密度の QCD は負符号問題がないことから、これらの理論的予言は将来の格子 QCD 計算でチェックできることが期待される。

5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

[1] Takuya Kanazawa and Arata Yamamoto, “Asymptotically free lattice gauge theory in five dimensions”, Physical Review D, 査読あり, 91 (2015) 074508.
DOI: 10.1103/PhysRevD.91.074508

[2] Takuya Kanazawa and Yuya Tanizaki, “Structure of Lefschetz thimbles in simple fermionic systems”, Journal of High Energy Physics, 査読あり, 03 (2015) 044.
DOI: 10.1007/JHEP03(2015)044

[3] Kazuhiko Kamikado and Takuya Kanazawa, “Magnetic susceptibility of a strongly interacting thermal medium with 2+1 quark flavors”, Journal of High Energy Physics, 査読あり, 01 (2015) 129.

DOI: 10.1007/JHEP01(2015)129

[4] Takuya Kanazawa and Tilo Wettig, “Stressed Cooper pairing in QCD at high isospin density: effective Lagrangian and random matrix theory”, Journal of High Energy Physics, 査読あり, 10 (2014) 055.
DOI: 10.1007/JHEP10(2014)055

[5] Tatsuhiro Misumi and Takuya Kanazawa, “Adjoint QCD on $R^3 \times S^1$ with twisted fermionic boundary conditions”, Journal of High Energy Physics, 査読あり, 06 (2014) 181.
DOI: 10.1007/JHEP06(2014)181

[学会発表](計 5 件)

[1] 金澤拓也, “格子上の Lifshitz 型ゲージ理論の研究”, 日本物理学会 第 70 回年次大会, 2015 年 3 月 24 日, 早稲田大学 早稲田キャンパス (東京都新宿区).

[2] Takuya Kanazawa, “Matrix model for high-density QCD with mismatched chemical potentials”, High Energy Strong Interactions: A School for Young Asian Scientists, 2014 年 9 月 26 日, Central China Normal University, Wuhan, China.

[3] 金澤拓也, “Magnetic profiles of a relativistic Bose-Fermi mixture”, 第 6 回 JICFuS(計算基礎科学連携拠点)セミナー, 2014 年 9 月 16 日, 大阪大学 豊中キャンパス (大阪府豊中市).

[4] 金澤拓也, “Exotic QCD on compactified spacetime”, 基研研究会 素粒子物理学の進展 2014, 2014 年 7 月 31 日, 京都大学基礎物理学研究所(京都府京都市).

[5] Takuya Kanazawa, “Matrix model for high-density QCD with mismatched chemical potentials”, Workshop on QCD under

extreme conditions (XQCD2014), 2014 年 6 月 21 日, State University of New York, Stony Brook, USA.

6 . 研究組織

(1)研究代表者

金澤 拓也 (KANAZAWA, Takuya)

独立行政法人理化学研究所・階層縦断型基礎物理学研究チーム・研究員

研究者番号 : 1 0 7 1 3 2 2 4