

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：15201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2017

課題番号：25400259

研究課題名(和文) 準位統計の手法による格子QCD+QEDの低エネルギー定数の決定

研究課題名(英文) Determination of Low-Energy Constants of Lattice QCD+QED by Level-Statistical Method

研究代表者

望月 真祐 (M. Nishigaki, Shinsuke)

島根大学・総合理工学研究科・准教授

研究者番号：00362913

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：格子上の2色QCD+QEDの閉じ込め相のパラメータ領域 ($SU(2)$ ゲージ結合定数： $\beta=0\sim 2.1$, $U(1)$ ゲージ結合定数： $e=0.0002\sim 28$, AB磁束： $\phi=0.01\sim 6$) についてシミュレーション(各パラメータ設定について1～4万配位を生成)の実行とディラック演算子の対角化を行った。このデータから導出された個別準位統計分布がchGSE-chGUE遷移ランダム行列から得た解析式によってフィットできることを見出した。この手法により極めて広いパラメータ領域において、有効理論に含まれる2つの低エネルギー定数(カイラル凝縮および崩壊定数 F)を其々 10^{-10} の高精度で決定した。

研究成果の概要(英文)：We have performed exhaustive numerical simulations (gauge field generation and diagonalization of Dirac operators) of two-color QCD+QED on a lattice, for a parameter space in the confining phase of the theory:

$SU(2)$ gauge coupling $\beta=0\sim 2.1$, $U(1)$ gauge coupling $e=0.0002\sim 0.0028$, AB flux $\phi=0.01\sim 0.06$. Statistical distributions of individual Dirac levels obtained from these simulations are then shown to be perfectly fitted with the analytic formula derived from the crossover random matrix ensembles interpolating chGSE and chGUE. This fitting enabled us to determine the two low-energy constants (chiral condensate Σ and pseudo-scalar decay constant F) with the precisions of 10^{-10} and 10^{-10} respectively, for the whole parameter space mentioned above. This achievement might find applications in a version of the technicolor model based on the $SU(2)$ gauge theory, namely for the determination of phenomenological parameters of the proposed composite Higgs particle.

研究分野：場の量子論, 格子ゲージ理論, ランダム行列理論

キーワード：格子ゲージ理論 QCD 準位統計 ランダム行列理論 カイラル対称性 有限密度 有限温度 アンダーソン局在

1. 研究開始当初の背景

(1)素粒子の標準模型の一部である、クォーク間に働く強い相互作用を記述する SU(3)ゲージ理論は量子色力学(QCD)と称される。QCDは非摂動的な量子効果によって、クォークの閉じ込め及びカイラル対称性の自発的破れという古典論とは著しく異なる性質を持つがゆえに、観測される核力やハドロンの性質を整合的に説明することに成功している。また近年、RHIC 加速器が作り出した極高温環境において QCD の非閉じ込め相(QGP 相)が実現したことが明らかになり、宇宙初期におけるハドロンの生成過程の解明に大きな寄与を与えた。これら自然現象の理解が進展した反面、QCD は強結合で非線形性の強い理論であるため、上記の QCD の真空の諸性質を第一原理から理論的に導出することは困難であり、格子化による計算機シミュレーションがその唯一の系統的アプローチを与える。計算機の高速度とアルゴリズムの改良により、格子ゲージ理論の第一原理計算は、実験で測定されたハドロン質量や崩壊定数の再現など理論的な検証の段階を終え、現象を予言する応用の段階に入りつつある。

(2)この分野において代表者は、格子ゲージ理論を量子カオス系として捉える研究に従事し、これに特化したランダム行列理論(RMT)およびカイラル摂動論を用いる計算手法を開発した。これら一連の研究において導出されたディラック準位統計への定量的予言は、後に JLQCD 等の大規模数値実験によって精密に検証されている。また代表者は、乱雑系の局在転移点での準位統計を現象論的な変形 RMT によって記述する研究に従事し、アンダーソン強束縛ハミルトニアン の臨界準位統計を精密に再現することに成功している。

2. 研究の目的

(1)本研究では QCD と QED(電磁相互作用)が共存する格子ゲージ理論において、弱結合から強結合領域に渡って低エネルギー有効作用中の現象論的定数を精密決定することを主たる目標とする。この目的のために、比較的小規模な格子上の数値実験により測定されたディラック固有値を、遷移的カイラル RMT の解析結果にフィットする手法を用いる。

(2)また、この手法に伴う副産物として、有限温度中の同理論の QGP 相において存在する移動度端モードの性質と、その物理的影響を解明することを副次的な目標とする。

3. 研究の方法

(1)中性子星に代表される高密度環境下における QCD のエキゾチックな相の研究は、近年のハドロンの物理の主要な主題となっている。有限密度での符号問題のために数値実験が出来ない問題の解決への道標として、クォークの色自由度を 3 から 2 に落とした SU(2)

ゲージ理論を通じて有限密度理論の性質を理解することが提唱されてきた。これに関して代表者は、SU(2)ディラック準位の境界条件依存性から現象論的定数である中間子の崩壊定数を正確に出す新規な手法を開発した。その手法は、境界条件のツイストに伴う大域的対称性の破れが有効理論に特定の形で現れることから、その効果を遷移的カイラル RMT を用いて厳密に評価し、数値的に測定されたディラック固有値の準位統計とのフィットから崩壊定数を読み取るというものである。本研究ではこの手法を敷衍して、U(1)背景としての境界条件のみならず、U(1)ゲージ理論である QED をプローブとして用い、比較的小規模な格子シミュレーションから統計・系統誤差あわせて 10^{-3} の精度で精密に測定する。

(2)物理点でのクォーク質量を持つ QCD の高温相 ($T > 2T_c$) の数値実験で得られた、スペクトルパルク中のディラック固有値の準位間隔分布を、アンダーソン局在転移を記述する変形 RMT の解析結果によりフィットすることにより、「3+1 次元ゲージ理論の高温環境における非閉じ込め相転移と 3 次元強結合模型におけるアンダーソン局在転移は、同一の物理現象である」という予想を検証する。

4. 研究成果

(1)SU(2)クエンチ理論のシミュレーションにおいて小サイズ ($4^4 \sim 6^4$) の格子を採用することにより、ゲージ理論のパラメータ (SU(2)ゲージ結合定数, U(1)ゲージ結合定数, AB 磁束) を幅広くかつ細かく変化させながら、各点において極めて多数 ($1 \sim 4 \times 10^4$) のディラック固有値のサンプルを生成した。これらの膨大なデータのほぼ全てについて、chGSE-chGUE 遷移 RMT の個別固有値分布をニューストレーム法により評価した解析結果によって極めて良くフィットすることに成功した(図 1)。

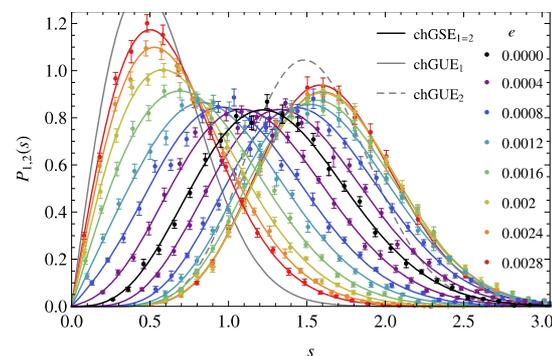


図 1: SU(2) x U(1)理論における個別ディラック準位分布

ゲージ理論における U(1)摂動に対する遷移パラメータの応答係数から、カイラル凝縮および粒子の崩壊定数 F を各点においてそれぞれ 10^{-4} , 10^{-3} という相対誤差で精密決定することができた。SU(2)クエンチ理論におけるこの成功は本研究手法の有効性を示す

ものであり、今後現実的な QCD およびテクニカラー模型への適用が大いに期待される。

(2)ハンガリーINS のグループと共同して、格子の空間サイズを細かく変えながら ($24^3 \sim 56^3 \times 4$), 高温相 ($T=2.6T_c$) かつ物理点での 2+1 フレーバー-QCD のディラック固有値バルクディラック準位を 10^4 サンプル生成した。これらのデータからアンフォールドした準位間隔分布を抽出し、それがサイズに依存しなくなる特定のエネルギーウィンドウ(移動度端)において変形 RMT の解析結果で完全にフィットできることを見出した(図 2)。

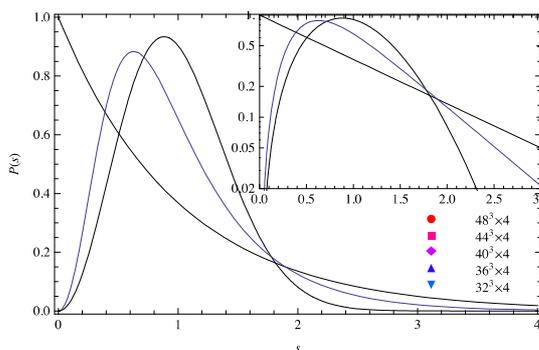


図 2 : QCD の高温相におけるディラック準位間隔分布

このフィットから決定された RMT の変形パラメータは磁場下での 3 次元アンダーソン模型の移動度端のそれと誤差の範囲で一致し、両者が同一の普遍性クラスに属するという予想を肯定的に解決することができた。この結果は、高温 QCD における非閉じ込め相転移はポリアコフループの格子欠陥を乱数として惹き起こされるアンダーソン転移(量子的干渉による固有モードの局在)であることを強く示唆し、宇宙初期などの極限環境におけるゲージ理論への理解に大きく寄与するものである。

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 6 件)

Takuya Yamamoto, Shinsuke M. Nishigaki, Individual eigenvalue distributions of crossover chiral random matrices and low-energy constants of $SU(2) \times U(1)$ lattice gauge theory, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 査読有, Vol.2018, 2018, pp.023B01-1--26, DOI:10.1093/ptep/ptx188

Shinsuke M. Nishigaki, Distribution of the k -th smallest Dirac operator eigenvalue: an update, PoS LATTICE, 査読有, Vol.251, 2015, 057-1--7, DOI:10.22323/1.251.0057

Keitaro Nagata, Kouji Kashiwa, Atsushi

Nakamura, Shinsuke M. Nishigaki, Lee-Yang zero distribution of high temperature QCD and Roberge-Weiss phase transition, Physical Review D, 査読有, Vol.91, 2015, 094507-1--12, DOI:10.1103/PhysRevD.91.094507

Shinsuke M. Nishigaki, Takuya Yamamoto, Individual eigenvalue distributions for chGSE-chGUE crossover and determination of low-energy constants in two-color QCD+QED, PoS LATTICE, 査読有, Vol.214, 2014, 067-1--7, DOI:10.22323/1.214.0067

Shinsuke M. Nishigaki, Fumihiko Sugino, Tracy-Widom distribution as instanton sum of 2D IIA superstrings, Journal of High Energy Physics, 査読有, Vol.09, 104-1--24, 2014, DOI:10.1007/JHEP09(2014)104

Shinsuke M. Nishigaki, Matteo Giordano, Tamas G. Kovacs, Ferenc Pittler, Critical statistics at the mobility edge of QCD Dirac spectra, PoS LATTICE, 査読有, Vol.187, 2013, 018-1--15, DOI:10.22323/1.187.0018

[学会発表](計 15 件)

時本晋吉, 西垣真祐, 2次元 IIA 型超弦理論における多点関数と超対称行列模型との対応, 日本物理学会第 73 回年次大会, 2018 年 3 月 22 日~2018 年 3 月 25 日, 東京理科大学 (千葉県野田市)

Takuya Yamamoto, Shinsuke M. Nishigaki, et. al, Critical statistics at the mobility edge of QCD Dirac spectra at high temperature, Japanese-German Seminar 2016 "Phase structure of lattice field theories", 2016 年 9 月 26~28 日, 新潟大学 (新潟県新潟市)

Shinsuke Nishigaki, Multiple level spacing distributions at the mobility edge of QCD Dirac spectrum, "Discrete Approaches to the Dynamics of Fields and Space-Time" (招待講演), 2017 年 9 月 19~23 日, Asia-Pacific Center for Theoretical Physics, POSTECH (Pohang, Korea)

山本託也, 西垣真祐, 有限温度 QCD Dirac 準位の移動度端における臨界統計, 理研シンポジウム「熱場の量子論とその応用」, 2016 年 8 月 22~24 日, 理化学研究所 (埼玉県和光市)

西垣真祐, 山本託也, T. Kovacs, M.

Giordano, F. Pittler, 有限温度 QCD Dirac 準位の移動度端における臨界統計, 日本物理学会第 71 回年次大会, 2016 年 3 月 19~22 日, 東北学院大学 (宮城県仙台市)

Shinsuke Nishigaki, Spectral crossover and Anderson localization in QCD Dirac spectra, Workshop "Random Matrix Theory, Integrable Systems, and Topology in Physics" (招待講演), 2015 年 11 月 2~6 日, Simons Center for Geometry and Physics, Stony Brook University (New York, USA)

Shinsuke Nishigaki, Tracy-Widom distribution and spontaneous SUSY breaking in a matrix model of 2D IIA superstrings, "Foundations and Applications of Random Matrix Theory" (招待講演), 2015 年 9 月 14 日, Simons Center for Geometry and Physics, Stony Brook University (New York, USA)

Shinsuke M. Nishigaki, Distribution of the kith smallest Dirac operator eigenvalue: an update, LATTICE2015 - the 33rd International Symposium on Lattice Field Theory, 2015 年 7 月 14~18 日, 神戸国際会議センター (兵庫県神戸市)

Shinsuke M. Nishigaki, Individual eigenvalue distributions for chGSE-chGUE crossover and low-energy constants in $SU(2) \times U(1)$ gauge theory, Workshop 'Fluctuation and Correlation in Stochastic Systems' (招待講演), 2014 年 10 月 15 日, 中央大学 (東京都文京区)

Shinsuke M. Nishigaki, Critical statistics at the mobility edge of QCD Dirac spectra in the QGP phase, Workshop 'Fluctuation and Correlation in Stochastic Systems' (招待講演), 2014 年 10 月 15 日, 中央大学 (東京都文京区)

西垣真祐, 杉野文彦, Tracy-Widom distribution as instanton sum of 2D IIA superstrings, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 2014 年 9 月 18~21 日, 佐賀大学 (佐賀県佐賀市)

Shinsuke M. Nishigaki, Individual eigenvalue distributions for chGSE-chGUE crossover and determination of low-energy constants in two-color QCD+QED, LATTICE 2014 - the 32st International Symposium on Lattice Field Theory, 2014 年 6 月 23~28 日, Columbia University (New York, USA)

Shinsuke M. Nishigaki, Individual eigenvalue distributions for chGSE-chGUE crossover and determination of low-energy

constants in two-color QCD+QED, RMT2013: Random Matrix Theory - Fluctuation in Complex Systems (招待講演), 2013 年 10 月 27 日~11 月 1 日, 沖縄科学技術大学院大学 (沖縄県恩納村)

山本託也, 西垣真祐, Individual Dirac eigenvalue distributions for two-color QCD+QED and determination of low-energy constants, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013 年 9 月 20~23 日, 高知大学 (高知県高知市)

Shinsuke M. Nishigaki, Critical statistics at the mobility edge of QCD Dirac spectra, LATTICE 2013 - the 31st International Symposium on Lattice Field Theory (招待・基調講演), 2013 年 7 月 29 日~8 月 3 日, Johannes Gutenberg University (Mainz, Germany)

〔図書〕(計 1 件)

西垣真祐, ランダム行列とゲージ理論 普遍性を通して捉える量子物理 [SGC ライブラリ 127], サイエンス社, 2016 年 9 月 10 日発行, 144 頁, ASIN: B01JMCACEU

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕
ホームページ等

http://www.phys.shimane-u.ac.jp/research/research_mochizuki.html 「遷移ランダム行列によるパイ中間子崩壊定数の決定 ~ゲージ理論と量子カオスのインタープレイ~」

6. 研究組織

(1) 研究代表者

望月 (西垣) 真祐

(NISHIGAKI, Shinsuke M.)

島根大学・総合理工学研究科・准教授

研究者番号: 00362913

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

コバッチ タマシュ (KOVACS, Tamas G.)

山本 託也 (YAMAMOTO, Takuya)