

令和元年5月29日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K17624

研究課題名（和文）格子QCD計算による極限状態QCDの研究

研究課題名（英文）Lattice QCD calculation for extreme QCD

研究代表者

山本 新 (Yamamoto, Arata)

東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・助教

研究者番号：60615318

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,000,000円

研究成果の概要（和文）：高温、高密度、高強度場といった極限状態の量子色力学（QCD）の性質を明らかにするため、第一原理計算である格子QCDの数値シミュレーションをスーパーコンピュータ上で実行し、様々な物理現象の数値解析を遂行しました。特に、格子QCDにおける新たな計算手法を考案し、ベリー位相や非可換渦といった、従来の格子QCDでは解析できなかった物理現象を初めて解析しました。研究期間全体を通じて、雑誌論文15本が出版され、学会発表9件を行いました。

研究成果の学術的意義や社会的意義

この宇宙には、私たちの身の回りの環境とは大きく異なる極限的な環境が存在します。例えば、宇宙に浮かぶ星々の中には、中性子星と呼ばれる超高密度の天体が存在します。また、宇宙が創成して初期の頃は、宇宙の温度は超高温であり、その中には高強度の電磁場が存在したと考えられています。宇宙の中だけではなく、地上で行われている素粒子・原子核実験でも同様の高温、高密度、高強度場が実現されています。本課題では、こうした極限環境における様々な物理現象の性質を第一原理計算によって明らかにしました。

研究成果の概要（英文）：In order to investigate quantum chromodynamics (QCD) in extreme environments, such as high temperatures, high densities, and intense fields, I performed the lattice QCD simulations of various phenomena on supercomputers. Lattice QCD is the first-principle calculation in QCD. I proposed new computation schemes in lattice QCD, and tried the first application to QCD phenomena, the Berry phase, the non-Abelian vortex, and so on. In this project, I presented fifteen journal papers and nine conference presentations.

研究分野：物理学

キーワード：原子核理論

1. 研究開始当初の背景

量子色力学(QCD)の性質は、周りの環境に応じて大きく変化します。特に、高温、高密度、高強度場などの極限的な状況下では、通常の見られない特異な現象が現れます。これらの「極限状態 QCD」の性質は、近年行われている相対論的重イオン衝突実験、初期宇宙や高密度天体の性質を理解する上で不可欠です。しかし、その実験・観測的検証は、複雑なデータを介して行う必要があるため容易ではありません。このため、不定性がなく信頼できる予言をすることが、理論サイドには求められています。解析計算の困難な QCD の研究では、スーパーコンピュータを用いた「格子 QCD」の数値シミュレーションが必要不可欠です。格子 QCD は基礎理論に基づく第一原理計算であり、直接検証の困難な極限状態 QCD に対して厳密な予言を与えられると期待されています。

2. 研究の目的

格子 QCD の数値シミュレーションに基づき、極限状態 QCD における量子現象を解明することが本研究課題の目的です。特に、従来の格子 QCD では解析できなかった対象に着目し、新たな計算手法を提案し確立することを目指します。

3. 研究の方法

本課題では様々なサブテーマに取り組みましたが、以下では内 2 件に関して簡潔にまとめます。

(1) 格子 QCD によるベリー位相の数値解析

ベリー位相は、様々な量子系におけるトポロジカル現象を記述する普遍的概念です。ハドロン物理学においても、強磁場下で引き起こされるカイラル磁気効果と深い関係があります。ベリー位相に関する理論研究では、多くの場合、相互作用の影響は無視されています。本研究では、格子 QCD によってベリー位相を計算する手法を考案し、ベリー位相に対する相互作用の影響を数値解析しました。

(2) 格子ゲージ理論による非可換渦の数値解析

高密度のハドロン物質中では、電子の超伝導の類推として、クォークのカラー超伝導と呼ばれる現象が予想されています。超伝導体に磁場を印可すると量子渦が生成されますが、カラー超伝導体の場合には、非可換な内部自由度のために、非可換渦と呼ばれる量子渦が生成されません。本研究では、格子ゲージ理論を用いた数値シミュレーションを実行し、カラー超伝導体中の非可換渦の性質を数値解析しました。

4. 研究成果

(1) 格子 QCD によるベリー位相の数値解析

格子 QCD 計算によって、図 1 に示すベリー位相が得られました。運動量空間での特異的なピークがカイラル磁気効果に寄与します。得られたベリー位相は、実際には QCD の強い相互作用によって大きな量子揺らぎを持つことが明らかになりました。この結果から、強結合の量子系ではベリー位相に対する相互作用の影響を無視できないことが示唆されます。また、この計算手法を物性系の量子モンテカルロ計算に応用しました。2 次元トポロジカル絶縁体と 3 次元ワイル半金属の数値解析を行い、電子間のクーロン相互作用がこれらの物質に与える影響を明らかにしました。また、考案した計算手法がハドロン物理学だけでなく物性物理学におけるトポロジカル量子現象に対しても有用であることを示しました。これらの結果は、学術誌 Physical Review Letters、Nuclear Physics B、Physical Review B に計 3 本の論文として出版されています。

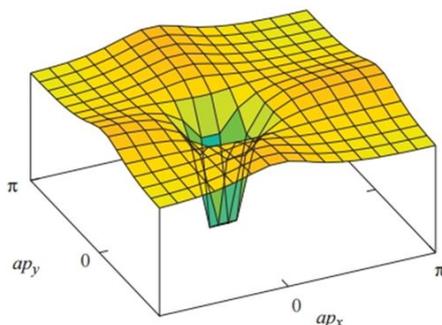


図 1 ベリー位相の運動量空間分布

(2)格子ゲージ理論による非可換渦の数値解析

数値シミュレーションによって、図2に示すような渦密度の空間分布が得られました。渦密度の全空間積分は渦の持つトポロジカル数に対応し、図2の場合のトポロジカル数は1/3です。分数のトポロジカル数は非可換渦の特徴であり、この渦が非可換渦である証拠と言えます。また、複数の非可換渦が存在する場合の計算から、渦と渦の間には斥力が存在することを明らかにしました。これらの結果は、格子ゲージ理論によって初めて得られた非可換渦の計算結果であり、実験的な検証が困難であるカラー超伝導の性質を明らかにしたという点で有意義なものです。本研究結果は、学術誌 Progress of Theoretical and Experimental Physics に出版されています。

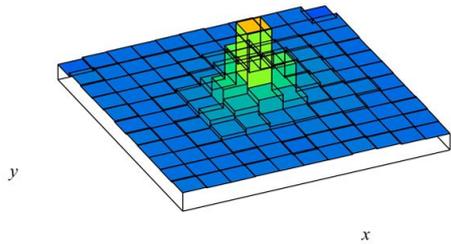


図2 渦密度の空間分布

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 15 件)

- K. Hattori, A. Yamamoto, Meson deformation by magnetic fields in lattice QCD, PTEP 2019 (2019) 掲載決定済, 査読有
DOI: 10.1093/ptep/ptz023
- A. Yamamoto, Non-Abelian vortex in lattice gauge theory, PTEP 2018 (2018) 103B03, 査読有
DOI: 10.1093/ptep/pty106
- S. Pu, A. Yamamoto, Abelian and non-Abelian Berry curvatures in lattice QCD, Nucl. Phys. B 933 (2018) 53, 査読有
DOI: 10.1016/j.nuclphysb.2018.06.005
- A. Yamamoto, 1D anyons in relativistic field theory, PTEP 2018 (2018) 043B03, 査読有
DOI: 10.1093/ptep/pty030
- A. Yamamoto, T. Hayata, Lattice simulation with the Majorana positivity, EPJ Web Conf. 175 (2018) 11003, 査読有
DOI: 10.1051/epjconf/201817511003
- T. Hayata, A. Yamamoto, Quantum Monte Carlo simulation of a two-dimensional Majorana lattice model, Phys. Rev. B 96 (2017) 035129, 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevB.96.035129
- T. Hayata, A. Yamamoto, Classification of sign-problem-free relativistic fermions on the basis of the Majorana positivity, PTEP 2017 (2017) 043B08, 査読有
DOI: 10.1093/ptep/ptx040
- A. Yamamoto, Lattice QCD simulation of the Berry curvature, PoS LATTICE2016 (2016) 311, 査読有
DOI: 10.22323/1.256.0311
- A. Yamamoto, T. Kimura, Quantum Monte Carlo simulation of topological phase transitions, Phys. Rev. B 94 (2016) 245112, 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevB.94.245112
- A. Yamamoto, Berry phase in lattice QCD, Phys. Rev. Lett. 117 (2016) 052001, 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevLett.117.052001
- S. Benic, A. Yamamoto, Quantum Monte Carlo simulation with a black hole, Phys. Rev. D 93 (2016) 094505, 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevD.93.094505
- T. Kanazawa, A. Yamamoto, Lifshitz-type SU(N) lattice gauge theory in five dimensions, PoS LATTICE2015 (2016) 051, 査読有
DOI: 10.22323/1.251.0051
- T. Kanazawa, A. Yamamoto, Nonrelativistic Banks-Casher relation and random matrix theory for multicomponent fermionic superfluids, Phys. Rev. D 93 (2016) 016010, 査

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

読有

DOI: 10.1103/PhysRevD.93.016010

A. Yamamoto, T. Hayata, Complex Langevin simulation in condensed matter physics, PoS LATTICE2015 (2016) 041, 査読有

DOI: 10.22323/1.251.0041

K. Mameda, A. Yamamoto, Magnetism and rotation in relativistic field theory, PTEP 2016 (2016) 093B05, 査読有

DOI: 10.1093/ptep/ptw128

[学会発表](計9件)

山本 新, Non-Abelian vortex in lattice gauge theory, Workshop on Recent Developments in Chiral Matter and Topology, 2018

山本 新, Computation of the Berry curvature in lattice QCD, The XXVIIth International Conference on Ultra-relativistic Nucleus-Nucleus Collisions, 2018

山本 新, Lattice simulation with the Majorana positivity, Toward real-time simulations of quantum field theories and solutions to the sign problem, 2017

山本 新, Lattice simulation with the Majorana positivity, The XXXV International Symposium on Lattice Field Theory, 2017

山本 新, Quantum Monte Carlo simulation of the Berry curvature, Topological Materials Science: Intensive-Interactive Meeting 2016, 2016

山本 新, Lattice QCD simulation of the Berry curvature, The XXXIV International Symposium on Lattice Field Theory, 2016

山本 新, Lattice QCD with External Fields, 「離散的手法による場と時空のダイナミクス」研究会 2016, 2016

山本 新, 格子 QCD と非相対論系への応用, 研究会「第一回 量子スピン液体研究の新展開」, 2016

山本 新, Complex Langevin simulation in condensed matter physics, The XXXIII International Symposium on Lattice Field Theory, 2015

6 . 研究組織

記載事項なし。

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。