

令和 2 年 6 月 11 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H03988

研究課題名(和文) 複素ランジュバン法による有限密度QCDの第一原理計算

研究課題名(英文) First-principle calculations in finite density QCD by the complex Langevin method

研究代表者

西村 淳(Nishimura, Jun)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授

研究者番号：90273218

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：有限密度下における量子色力学の性質を第一原理計算により明らかにすることは、符号問題のため極めて困難である。我々は最近進展が自覚しい複素ランジュバン法を用いて、この難問に挑戦した。特に $L=16$, $T=32$ という格子を用いた低温領域の計算では、化学ポテンシャルがある値より大きい領域において、クォーク数密度が一定値をとるといふ振る舞いが確認できた。又 $L=24$, $T=12$ という格子を用いた有限温度領域の計算では、化学ポテンシャルを変えながら、有限温度で起こるクォーク・グルーオン・プラズマ相への転移を確認しようとしたが、閉じ込め相に入る直前で複素ランジュバン法が破綻することが結論づけられた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これらの計算は、これまでのQCDの第一原理計算では決して調べられなかったパラメタ領域でなされたものである。特に低温での結果は、ゼロ運動量のクォークが凝縮し始め、フェルミ面が形成され始めていることを明確に示している。今後、格子サイズを大きくすることにより、カラー超伝導などの現象を解明できる可能性を示唆する点において重要である。また高温での結果は、方法論が破綻するか否かで相転移がおこる相境界を決定できる可能性を示唆するとともに、非閉じ込め相で詳細な計算ができることを示している。このように、QCDのカラー超伝導相やクォーク・グルーオン・プラズマ相の性質を研究する礎が構築できた点に大きな意義がある。

研究成果の概要(英文)：It is extremely difficult to clarify the properties of QCD at finite density by first-principle calculations because of the sign problem. We made an attempt to overcome this problem by using the complex Langevin method, in which there has been remarkable progress recently. In particular, by calculations in the low temperature regime using a $L=16$, $T=32$ lattice, it was confirmed that the quark number density has a plateau behavior when the chemical potential is larger than some critical value. Also by calculations in the high temperature regime using a $L=24$ and $T=12$ lattice, we have tried to observe the transition to the quark-gluon-plasma phase at finite temperature, but it was concluded that the complex Langevin method breaks down just before one enters the confined phase.

研究分野：素粒子物理学

キーワード：格子ゲージ理論 量子色力学 有限密度系 符号問題 複素ランジュバン法

1. 研究開始当初の背景

素粒子の強い相互作用は量子色力学 (QCD) によって記述されるが、その相互作用の強さゆえ、解析は困難であり、多くの謎が残されている。理論のもっとも基本的な性質である、有限温度、有限密度における真空の構造、つまり相図もいまだ完全に理解されておらず、低温・高密度領域でおこる現象や相転移の次数、臨界点の位置などが活発な議論の対象となっている。これらの解明は、ビックバン宇宙論や重イオン衝突実験、中性子星・ブラックホールの物理的理解には不可欠な要素である。

一方、有限密度 QCD において格子ゲージ理論に基づく第一原理計算を遂行することは、極めて困難であることが知られている。これは QCD におけるフェルミオン行列式が、有限密度にするやいなや複素数値になることに起因する。これにより、経路積分の被積分関数が複素数になってしまい、モンテカルロ法における確率としての取り扱いができなくなる、といういわゆる「符号問題」が起こる。ここ 20 年以上にわたり、虚化学ポテンシャル法、テイラー展開法、因子化法など、様々なアイデアに基づいて研究がなされてきたが、成果は低密度領域に限られており、QCD の相図に関する理解はほとんど進展していないのが現状である。

本研究で用いる複素ランジュバン法は、力学変数を複素化したランジュバン方程式を解くことにより、符号問題が起こるような系での計算を可能にする画期的な方法である。特に 2013 年 Sixty が、「ゲージ・クーリング」と呼ばれる新しいテクニックを用いて、高温領域における有限密度計算に成功して以来、素粒子原子核分野で大きな注目を集めていた。

2. 研究の目的

QCD の第一原理計算を有限密度において遂行することは、宇宙の成り立ちを理解する上で重要であるが、符号問題のため極めて困難であることが知られている。これに対して複素ランジュバン法は、そのような状況での計算を可能にする画期的な方法である。我々は、低温相でクォークの質量が小さい場合に起こる問題を克服する新しいテクニックを考案し、単純化した模型の場合に正しい結果が得られることを確認した。

本研究ではこの研究を QCD の場合に拡張し、臨界点の決定など、QCD の相図に関する新しい知見を得る。また符号問題に対する新しい方法論を確立することにより、素粒子・原子核・物性理論など多岐にわたる応用の可能性を切り開く。

3. 研究の方法

まず方法論の確立のため、Silver Blaze 現象を確認する。ここではゼロ温度において化学ポテンシャル (μ) を変えながら物理量を測定し、 μ 依存性が現れない領域が、物理的に予想されるものと一致することを確認する。この段階で、ゲージ・クーリングなどに関連した最適化を行う。次に有限温度で起こるクォーク・グルーオン・プラズマ相への転移の性質を、化学ポテンシャルを変えながら調べる。

以上の計算を、まずスタッガード・フェルミオンを用いたシミュレーションにより行う。このフェルミオンの定式化は連続極限で 4 フレーバーのクォークに対応するため、現実の QCD の状況とは異なるが、計算コストが低いので、方法論のテストに適している。次の段階では、ウィルソン・フェルミオンを用いることにより、現実に近い 2 フレーバーのセットアップで計算を実行する。

又、最初に行う $L=8$, $T=16$ という格子での計算は PC クラスタを用いて行うが、次のステップでは、格子サイズを 2 倍にした計算を行う。ここでは引き続き、必要とされる計算量は、概ねシステム・サイズに比例して増加することが予想され、これまでの 16 倍の計算量になってしまう。このため、必要となる並列コードを開発し、スーパーコンピュータ「京」や GPU 計算機を用いた大規模並列計算を行う。

4. 研究成果

$L=16$, $T=32$ という格子を用いた低温領域の計算では、化学ポテンシャルがある値より大きい領域において、クォーク数密度が一定値をとるといふ振る舞いが確認できた。又 $L=24$, $T=12$ という格子を用いた有限温度領域の計算では、化学ポテンシャルを変えながら、有限温度で起こるクォーク・グルーオン・プラズマ相への転移を確認しようとしたが、閉じ込め相に入る直前で複素ランジュバン法が破綻することが結論づけられた。

これらの計算は、これまでの QCD の第一原理計算では決して調べられなかったパラメータ領域でなされたものである。特に低温での結果は、ゼロ運動量のクォークが凝縮し始め、フェルミ面が形成され始めていることを明確に示している。今後、格子サイズを大きくすることにより、カラー超伝導などの現象を解明できる可能性を示唆する点において重要である。また高温での結果は、方法論が破綻するか否かで相転移がおこる相境界を決定できる可能性を示唆するとともに、非閉じ込め相で詳細な計算ができることを示している。このように、QCD のカラー超伝導相やクォーク・グルーオン・プラズマ相の性質を研究する礎が構築できた点に大きな意義がある。

さらに、上に述べた複素ランジュバン法を、もう一つの方法であるレフシェッツ・シンプル法と組み合わせた方法を考案し、簡単な模型の場合に用いてみた。これにより、今まで明らかでなかった両者の関係性を深く理解することができ、今後、さらに効率の良い方法を開発するための基礎を築くことができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 K.Nagata, J.Nishimura and S.Shimasaki	4. 巻 1805
2. 論文標題 Testing the criterion for correct convergence in the complex Langevin method	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 JHEP	6. 最初と最後の頁 4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP05(2018)004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 K.Nagata, J.Nishimura and S.Shimasaki	4. 巻 98
2. 論文標題 Complex Langevin calculations in finite density QCD at large μ/T with the deformation technique	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Rev. D	6. 最初と最後の頁 114513
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.98.114513	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Y.Ito, H.Matsufuru, J.Nishimura, S.Shimasaki, A.Tsuchiya and S.Tsutsui	4. 巻 2018
2. 論文標題 Exploring the phase diagram of finite density QCD at low temperature by the complex Langevin method	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	6. 最初と最後の頁 146
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.334.0146	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 S.Tsutsui, Y.Ito, H.Matsufuru, J.Nishimura, S.Shimasaki and A.Tsuchiya	4. 巻 2018
2. 論文標題 Can the complex Langevin method see the deconfinement phase transition in QCD at finite density?	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	6. 最初と最後の頁 144
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.334.0144	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 J.Nishimura and S.Shimasaki	4. 巻 1706
2. 論文標題 Combining the complex Langevin method and the generalized Lefschetz-thimble method	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 JHEP	6. 最初と最後の頁 23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP06(2017)023	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 K.Nagata, J.Nishimura and S.Shimasaki	4. 巻 175
2. 論文標題 Complex Langevin simulation of QCD at finite density and low temperature using the deformation technique	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 EPJ Web Conf.	6. 最初と最後の頁 7017
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/201817507017	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 J.Nishimura and S.Shimasaki	4. 巻 175
2. 論文標題 Unification of the complex Langevin method and the Lefschetz-thimble method	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 EPJ Web Conf.	6. 最初と最後の頁 7018
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/201817507018	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 K.Nagata, J.Nishimura and S.Shimasaki	4. 巻 1607
2. 論文標題 Gauge cooling for the singular-drift problem in the complex Langevin method - a test in Random Matrix Theory for finite density QCD	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 JHEP	6. 最初と最後の頁 73
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP07(2016)073	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 K.Nagata, J.Nishimura and S.Shimasaki,	4. 巻 94, no.11
2. 論文標題 Argument for justification of the complex Langevin method and the condition for correct convergence	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Phys. Rev. D	6. 最初と最後の頁 114515
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.94.114515	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shoichiro Tsutsui, Yuta Ito, Hideo Matsufuru, Jun Nishimura, Shinji Shimasaki, Asato Tsuchiya	4. 巻 26
2. 論文標題 Exploring the finite density QCD based on the complex Langevin method	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 JPS Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 24012
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.26.024012	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計27件 (うち招待講演 9件 / うち国際学会 13件)

1. 発表者名 J.Nishimura
2. 発表標題 Complex Langevin simulation of finite density QCD
3. 学会等名 New Frontiers in QCD ---Confinement, Phase Transition, Hadrons, and Hadron Interactions (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年~2019年

1. 発表者名 西村 淳
2. 発表標題 複素ランジュバン法による符号問題の解決とその適用範囲について
3. 学会等名 熱場の量子論とその応用 (招待講演)
4. 発表年 2018年~2019年

1. 発表者名 Y.Ito, H.Matsufuru, J.Nishimura, S.Shimasaki, A.Tsuchiya and S.Tsutsui
2. 発表標題 Exploring the phase diagram of finite density QCD at low temperature by the complex Langevin method
3. 学会等名 LATTICE2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 S.Tsutsui, Y.Ito, H.Matsufuru, J.Nishimura, S.Shimasaki and A.Tsuchiya
2. 発表標題 Can the complex Langevin method see the deconfinement phase transition in QCD at finite density?
3. 学会等名 LATTICE2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 伊藤祐太, 松古栄夫, 西村淳, 島崎信二, 土屋麻人, 筒井翔一郎
2. 発表標題 複素ランジュバン法に基づく有限密度QCD低温領域における相転移の研究
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 筒井翔一郎, 伊藤祐太, 松古栄夫, 西村淳, 島崎信二, 土屋麻人
2. 発表標題 有限密度4フレーバーQCDの非閉じ込め相転移近傍における複素ランジュバン法の適用可能性について
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 K.Nagata, J.Nishimura and S.Shimasaki
2. 発表標題 Complex Langevin simulation of QCD at finite density and low temperature using the deformation technique
3. 学会等名 LATTICE2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年～2018年

1. 発表者名 J.Nishimura and S.Shimasaki
2. 発表標題 Unification of the complex Langevin method and the Lefschetz-thimble method
3. 学会等名 LATTICE2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年～2018年

1. 発表者名 島崎信二, 伊藤祐太, 松古栄夫, 森竹貴人, 西村淳, 土屋麻人, 筒井翔一郎
2. 発表標題 複素ランジュバン法を用いたQCDの低温高密度領域の大規模計算
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年～2018年

1. 発表者名 筒井翔一郎, 伊藤祐太, 松古栄夫, 森竹貴人, 西村淳, 島崎信二, 土屋麻人
2. 発表標題 複素ランジュバン法によるQCD臨界終点の探索
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年～2018年

1. 発表者名 島崎信二, 伊藤祐太, 松古栄夫, 森竹貴人, 西村淳, 土屋麻人, 筒井翔一朗
2. 発表標題 複素ランジュバン法によるQCD相図の低温高密度領域の探索
3. 学会等名 日本物理学会 第73回年次大会
4. 発表年 2018年~2019年

1. 発表者名 筒井翔一朗, 伊藤祐太, 松古栄夫, 森竹貴人, 西村淳, 島崎信二, 土屋麻人
2. 発表標題 複素ランジュバン法による4フレーバーQCD相図の有限密度領域の探索
3. 学会等名 日本物理学会 第73回年次大会
4. 発表年 2018年~2019年

1. 発表者名 J.Nishimura
2. 発表標題 New developments in finite density QCD calculations by the complex Langevin method
3. 学会等名 Discrete Approaches to the Dynamics of Fields and Space-Time (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年~2018年

1. 発表者名 J.Nishimura
2. 発表標題 Complex Langevin analysis of finite density QCD and nonperturbative superstring theory
3. 学会等名 the 2nd East Asia Joint Workshop on Fields and Strings (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年~2018年

1. 発表者名 K.Nagata, H.Matsufuru, J.Nishimura and S.Shimasaki
2. 発表標題 Gauge cooling for the singular-drift problem in the complex Langevin method --- an application to finite density QCD
3. 学会等名 LATTICE2016 (国際学会)
4. 発表年 2016年～2017年

1. 発表者名 S.Shimasaki, K.Nagata and J.Nishimura
2. 発表標題 On the condition for correct convergence in the complex Langevin method
3. 学会等名 LATTICE2016 (国際学会)
4. 発表年 2016年～2017年

1. 発表者名 西村 淳
2. 発表標題 複素ランジュバン法による符号問題の解決に向けた新たな進展
3. 学会等名 日本物理学会 2016年秋季大会 (招待講演)
4. 発表年 2016年～2017年

1. 発表者名 永田桂太郎, 西村淳, 島崎信二
2. 発表標題 拡張されたゲージクーリング法を用いた低温有限密度QCDの複素ランジュバンシミュレーション
3. 学会等名 日本物理学会 2016年秋季大会
4. 発表年 2016年～2017年

1. 発表者名 島崎信二, 永田桂太郎, 西村淳, 松古栄夫
2. 発表標題 複素ランジュバン法の収束性問題に対する新たな理解とその応用
3. 学会等名 日本物理学会 2016年秋季大会
4. 発表年 2016年～2017年

1. 発表者名 永田桂太郎, 西村淳, 島崎信二
2. 発表標題 複素ランジュバン法を用いた低温有限密度QCDの解析
3. 学会等名 日本物理学会 第72回年次大会(2017年)
4. 発表年 2016年～2017年

1. 発表者名 西村 淳
2. 発表標題 符号問題はどこまで解けるか ~複素ランジュバン法からの新たな視点~
3. 学会等名 KEK連携コロキウム・研究会エディション 「量子多体系の素核・物性クロスオーバー」(招待講演)
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 J. Nishimura
2. 発表標題 Current status and perspectives of complex Langevin calculations in finite density QCD
3. 学会等名 The 17th International Conference on QCD in Extreme Conditions (XQCD 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 J. Nishimura
2. 発表標題 Perspectives of complex Langevin calculations in finite density QCD
3. 学会等名 RMT in Sub Atomic Physics and Beyond (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 西村 淳
2. 発表標題 複素ランジュバン法の様々な応用の可能性
3. 学会等名 離散的手法による場と時空のダイナミクス (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 Shoichiro Tsutsui, Yuta Ito, Hideo Matsufuru, Jun Nishimura, Shinji Shimasaki, Asato Tsuchiya
2. 発表標題 Exploring the QCD phase diagram at finite density by the complex Langevin method on a $16^3 \times 32$ lattice
3. 学会等名 LATTICE2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 横田猛, 浅野侑磨, 伊藤祐太, 松古栄夫, 滑川裕介, 西村淳, 土屋麻人, 筒井翔一郎
2. 発表標題 複素ランジュバン法によるカラー超伝導相の第一原理解析
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 筒井翔一郎, 伊藤祐太, 松古栄夫, 西村淳, 島崎信二, 土屋麻人
2. 発表標題 有限密度QCDの複素ランジュバン解析における特異ドリフト問題とディラック演算子の固有値分布
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年～2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>西村 淳のホームページ http://research.kek.jp/people/jnishi/ KEK理論センタープロジェクト「第一原理計算で切り拓く素粒子物理のフロンティア」のホームページ http://research.kek.jp/people/jnishi/project/project_j.html</p>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	松古 栄夫 (Matsufuru Hideo) (10373185)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・計算科学センター・助教 (82118)	
研究協力者	島崎 信二 (Shimasaki Shinji)		
研究協力者	永田 桂太郎 (Nagata Keitaro)		