

機関番号：14401

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20540268

研究課題名 (和文) クォークグルーオンプラズマ物性の非摂動的研究

研究課題名 (英文) Non-Perturbative Study of Properties of the Quark-Gluon Plasma

研究代表者

浅川 正之 (ASAKAWA MASAYUKI)

大阪大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：50283453

研究成果の概要 (和文)：本研究では、クォークグルーオンプラズマの非摂動性に基づく物性を非摂動的な方法を用いて研究した。具体的には、クォークグルーオンプラズマ中における輸送係数、有限運動量メソンスペクトル関数を格子ゲージ計算を用いて研究し、有限温度・密度における保存電荷の三次のモーメントを数学的方法と有効模型を用いて解析し、さらに高エネルギー原子核衝突における反応平面に関する電荷不均衡をアノマリー理論を用いて評価した。

研究成果の概要 (英文)： In this research, we carried out investigations on non-perturbative properties of the quark-gluon plasma with non-perturbative methods. More concretely, we studied transport coefficients and mesonic spectral functions at finite momenta in the quark-gluon plasma with lattice gauge calculations, third moments of conserved charges at finite temperature and density by combining mathematical methods and analyses with an effective model, and charge separation with respect to the reaction plane in high energy nucleus collisions using anomaly theory.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：原子核理論

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：QCD 相転移、クォークグルーオンプラズマ、高エネルギー原子核衝突、相対論的流体力学、輸送係数、格子ゲージ理論、アノマリー、スペクトル関数

## 1. 研究開始当初の背景

Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) は、相対論的原子核衝突における様々な観測量に関するデータを順調に提供してきた。そして、申請当時までに得られた様々な測定量から、RHIC において、宇宙の初期状態において存在した、クォークとグルーオンがハドロン中にもはや閉じ込められていないクォ

ークグルーオンプラズマ相が生成されたことは、確実になっていた。その過程では申請者もその確立に寄与した、クォークグルーオンプラズマのハドロン化に関するいわゆるリコンビネーション模型が重要な役割を果たした。しかしながら、RHIC では様々の予期されていなかった現象が観測され、クォークグルーオンプラズマや相対論的原子核衝突に関する理解を改めなくてはならない可

能性も同時に広く議論されてきていた。このような状況において、相対論的原子核衝突によって単にクォークグルーオンプラズマが生成されたか否かというような定性的な問いを超えて行うべき次のステップは、そこで生成されたクォークグルーオンプラズマの、より微視的な第一原理に基づいた研究であると考へた。そのような微視的理解は宇宙の初期状態の理解にもつながる。

RHIC において発見された予期されなかった現象のうち重要なものとしては、予想外に早い熱平衡化と生成された物質の熱平衡化した後の極めて粘性（特にずれ粘性）の小さな完全流体に近い振る舞いがある。このうち、本研究ではクォーク・グルーオンが解放された熱平衡状態であるクォークグルーオンプラズマの極めて小さな粘性などの物性に焦点を絞って研究を行うことを計画した。

クォークグルーオンプラズマ中における粒子状態については、クォーク・グルーオンは解放されているが、一方  $J/\psi$  粒子などはゼロ化学ポテンシャルにおいては相転移温度の 1.6 倍程度まで存在していることが申請者らの研究によって明らかにされていた。このことと上記の実験的に観測されている極めて小さな粘性などから、クォークグルーオンプラズマは強結合系であると考えられていたが、その第一原理に基づく非摂動的微視的理解はほとんどなされていない状況だった。

## 2. 研究の目的

以上の背景を踏まえて、本研究では次のようなテーマを目的とした。

(1) 上述のように、RHIC において生成された物質の粘性（特にずれ粘性）は非常に小さいことが判明しているが、第一原理に基づく研究は非常に少なく、また不完全である。また、RHIC や Large Hadron Collider (LHC) において実現されるような相対論的な流れにおいては、相対論的要請を満たす、速度の高階の微分を含む Israel-Stewart 形式などの流体方程式を採用する必要があるが、この理論では通常使われる Navier-Stokes 方程式におけるよりもさらに多くの輸送係数が必要となる。これらの新たに加わる輸送係数に対する第一原理的理解は、量子色力学においては皆無である。そこで、この研究ではこれらの高階微分を含む相対論的な流体力学において現れる輸送係数について第一原理的な理解を得ることを目指した。

(2) 第二にはメソンチャンネルの有限運動量におけるスペクトル関数である。媒質中では有限運動量における“質量”はゼロ運動量におけるそれと同じであるとは限らない。ま

た、 $J/\psi$  粒子などベクトルメソンの場合には縦方向成分と横方向成分の二つのスペクトル関数が存在する。有限運動量でこれらの振る舞いに大きな違いがある場合には、高エネルギー原子核衝突の現象論において重大な意味を持つ。しかしながら、この問題に関しては散発的な理論的に不十分な解析は存在したが、それらの理論的に満足のいく第一原理計算は存在しなかった。そのような理由で、一般の有限運動量におけるメソンチャンネルのスペクトル関数を大規模格子を用いて計算することを目的とした。

(3) その他、クォークグルーオンプラズマの非摂動的な理解が必要となる物理量は多彩であるので、特定の手法に捉われずにクォークグルーオンプラズマの非摂動的な性質とその現象論に対する意味について考察をすることを目的とした。

## 3. 研究の方法

研究の目的の (1) (2) (3) に対応させて、研究の方法を述べる。

(1) クォークグルーオンプラズマ中の輸送係数のうち、ずれ応力に対する緩和時間とずれ粘性の比などの物理量に対しては、一般の輸送係数と違い、現実の時空が存在するミンコフスキー空間から格子ゲージ理論が定義されているユークリッド空間への解析接続およびその逆変換の手続きなしに、格子上でその測定ができることが Pratt によって指摘されている。我々はこの方法に従い、更に緩和時間近似と準古典近似を用いることにより、格子上でこの量を測定した。

(2) (1) と同様に格子ゲージ計算を行ったが、その際クォークグルーオンプラズマ中のメソン励起などのように本質的に非摂動的な物理についてはソフトなモードが重要になると考えられるので、十分小さな運動量のモードを取り入れるように、空間方向の長さが十分大きな格子を採用した。その上で格子上で、つまりユークリッド空間で有限運動量における虚時間相関関数を測定し、それから最大エントロピー法を用いてスペクトル関数を導出した。

(3) 当研究期間中に行った研究のうち、クォークグルーオンプラズマ中における保存電荷の高次（特に三次）のモーメントが負になりうることとその意義の理解、および高エネルギー原子核衝突の初期において生成される強い磁場のクォーク物質に対する影響についての研究がこの範疇に属する。前者については、統計力学と物理量の定義に基づいた厳密な定式化と有効模型を用いた具体的な計算とを行い、後者についてはアノマリーの理論と高エネルギー原子核衝突において生成される磁場の大きさの定量的評価とを

組み合わせるにより、反応平面に関する電荷不均衡を準定量的に評価した。

#### 4. 研究成果

研究の目的の(1)(2)(3)に対応させて、研究結果を述べる。

(1) ずれ応力に対する緩和時間とずれ粘性の比を格子上で測定する際には、場の演算子の特異性により同一時空点における場の演算子の積に対応する接触項による寄与が生じることを見出した。我々にとって興味がある比を導くためには、この項の寄与は取り除かなくてはならないが、この項は温度依存性も持つので単純に真空において引き算を行うだけでは不十分であることも見出した。その結果、この接触項の引き算が重要であること、クォークグルーオンプラズマ中での緩和は非常に速く進行するらしいことが判明した。

(2) クエンチ近似を用いて、相転移温度以下の温度から相転移温度の二倍以上の温度まで、チャームクォークの質量に対応するクォーク質量を用いて、多くの温度点で擬スカラーチャンネル、ベクトルチャンネルについて有限運動量における虚時間相関を計算した。そしてそれを用いて、最大エントロピー法を用いて各スペクトル関数を計算した。その結果、相転移温度以上の温度においては有限運動量では $\eta_s$ 、 $J/\psi$ メソンに相当するピークの高さは減少するらしいこと、また、分散関係は真空中におけるものから変化しているらしいこと、さらにベクトルチャンネルにおいては縦方向、横方向のスペクトル関数は明らかに異なるらしいことなどを初めて見出した。

(3) まず、保存電荷の三次のモーメントがハドロン・クォーク相間のクロスオーバー相転移の高温高密度側ではモデルによらず必ず負の値を持つ領域が存在することを、厳密に証明した。その上で、バリオン数、電荷、エネルギーなどの保存量に対して具体的な有効模型を用いて温度・化学ポテンシャル平面上でそれらの三次のモーメントが負になる領域を求め、それらの位置や広さは保存量によって大きくことなることを示した。さらに、このことから、ある一定の原子核の衝突の条件において三次のモーメントをさまざまな保存量に対して測定してその符号を求めることにより、その揺らぎが生成された温度・化学ポテンシャル平面上での場所に対する知見を得ることができる可能性を指摘した。また、高エネルギー原子核衝突におけるパリティや荷電共役変換不変性の破れの可能性と関連して関心を持たれている、反応平面に関する電荷不均衡を、衝突の前後に生成される磁場の時間変化の定量的評価、アノマ

リー関係式から定まる磁場とクォーク・反クォーク間の相互作用、およびクォーク・ハドロン間の双対性とに基づいて、準定量的に求めた。その結果、期待される電荷不均衡はSTAR 実験において観測されている値とは桁違いに小さく、STAR 実験において観測されている現象は何か別の起源を持つはずであることを議論した。

#### 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 13 件)

- ① M. Asakawa, S.A. Bass, and B. Müller, Anomalous Transport Processes in Turbulent non-Abelian Plasmas, Nuclear Physics A854 (2011) 76-80, 査読有
- ② C. Nonaka, M. Asakawa, T. Hoshino, M. Kitazawa, and Y. Kohno, Charmonium Spectral Functions in Quark-Gluon Plasma from Lattice QCD with Large Spatial Volume, PoS(LAT2010) (2010) 207 (1-7), 査読無
- ③ Y. Kohno, M. Asakawa, M. Kitazawa, and C. Nonaka, Lattice Study of Transport Coefficients in Second Order Dissipative Hydrodynamics, PoS(LAT2010) (2010) 194(1-7), 査読無
- ④ M. Asakawa, A. Majumder, and B. Müller, Electric Charge Separation in Strong Transient Magnetic Fields, Physical Review C 81 (2010) 064912(1-18), 査読有
- ⑤ Y. Kohno, M. Asakawa, M. Kitazawa, and C. Nonaka, Evaluation of Israel-Stewart Parameters in Lattice Gauge Theory, PoS(LAT2009) (2009) 196(1-8), 査読無
- ⑥ M. Kitazawa, M. Asakawa, and S. Ejiri, Third Moments of Conserved Charges in QCD Phase Diagram, PoS(LAT2009) (2009) 174(1-7), 査読無
- ⑦ M. Asakawa, Novel Ways to Look for the Critical Point and New Phases in RHI Collisions, PoS(CPOD2009) 2009 015(1-10), 査読有

⑧ M. Asakawa, QCD Critical Point and Experimental Observables, Journal of Physics G 36 (2009) 064042(1-7), 査読有

⑨ C. Nonaka, M. Asakawa, S. A. Bass, and B. Müller, Signals of the QCD Critical Point in Hydrodynamic Evolutions, Nuclear Physics A830 (2009) 291c-294c, 査読有

⑩ M. Asakawa, S. Ejiri, and M. Kitazawa, Third Moments of Conserved Charges as Probes of QCD Phase Structure, Physical Review Letters 103 (2009) 262301(1-4), 査読有

⑪ M. Kitazawa, M. Asakawa, B. Müller, and C. Nonaka, Measurement of Shear Viscosity in Lattice Gauge Theory without Kubo Formula, PoS(LAT2008) (2008) 183(1-7), 査読無

⑫ C. Nonaka, M. Asakawa, and S. A. Bass, The 3D hydro + UrQMD Model with the QCD Critical Point, Journal of Physics G 35 (2008) 104099(1-4), 査読有

⑬ M. Asakawa, S. A. Bass, B. Müller, and C. Nonaka, Transverse Velocity Dependence of the Proton-Antiproton Ratio as a Signature of the QCD Critical Point, Physical Review Letters 101 (2008) 122302(1-4), 査読有

[学会発表] (計 15 件)

① M. Asakawa, QCD Critical End Point: How it started, How it grew, and Where it goes, International Symposium “New Faces of Atomic Nuclei”, 2010 年 11 月 15 日, 沖縄科学技術研究基盤整備機構 (沖縄県)

② M. Asakawa, Charge Fluctuations: Possible Phase Indicators, From Strong Fields to Colorful Matter, 2010 年 10 月 27 日, Asheville Renaissance Hotel (アメリカ合衆国)

③ M. Asakawa, Charmonia at Finite Temperature and Momentum, The First Heavy Ion Collisions at the LHC, 2010 年 9 月 6 日, CERN (スイス)

④ M. Asakawa, Charmonia at Finite T and Finite P, Quantifying the Properties of Hot QCD Matter, 2010 年 7 月 7 日, University of Washington (アメリカ合衆国)

⑤ M. Asakawa, New Ways to Look for the Critical End Point and Phase Transition, NICA Roundtable Workshop IV: Physics at NICA, 2009 年 9 月 9 日, JINR Dubna (ロシア)

⑥ M. Asakawa, Novel Ways to Look for the Critical Point and New Phases in RHI Collisions, 5th International Workshop on Critical Point and Onset of Deconfinement, 2009 年 6 月 9 日, Brookhaven National Laboratory (アメリカ合衆国)

⑦ M. Asakawa, Quark-(anti)quark Correlations above the Confinement-Deconfinement Phase Transition, Nagoya Mini-Workshop “Photons and Leptons in Hot/Dense QCD”, 2009 年 3 月 3 日, 名古屋大学 (愛知県)

⑧ M. Asakawa, Lattice QCD --- RHIC and LHC, Tamura Symposium, 2008 年 11 月 21 日, The University of Texas at Austin (アメリカ合衆国)

⑨ M. Asakawa, QCD Critical Point and Experimental Observables, International Conference on Strangeness in Quark Matter 2008, 2008 年 10 月 10 日, Tsinghua University (中華人民共和国)

⑩ M. Asakawa, Fluctuation Probes and the Critical End Point, Initial Conditions in Heavy-Ion Collisions, 2008 年 9 月 15 日, International Center, Goa (インド)

⑪ M. Asakawa, QCD Critical Point and its Effect on Physical Observables, The QCD Critical Point, 2008 年 8 月 6 日, University of Washington (アメリカ合衆国)

⑫ M. Asakawa, Baryonic Spectral Functions above the Deconfinement Phase Transition, XQCD 2008, 2008 年 7 月 23 日, North Carolina State University (アメリカ合衆国)

⑬ M. Asakawa, Baryonic Spectral Functions above the Deconfinement Phase Transition, Lattice 2008, 2008 年 7 月 18 日, The College of William and Mary (アメリカ合衆国)

⑭ M. Asakawa, Baryonic Spectral Functions of One, Two, and Three Quark Operators in the Quark-Gluon Plasma, Understanding QGP through Spectral Functions and Euclidean Correlators,

2008 年 4 月 23 日, Brookhaven National Laboratory (アメリカ合衆国)

⑮ M. Asakawa, QCD Critical Point and its Effects on Physical Observables --- Schematic Consideration, Hydrodynamics in Heavy Ion Collisions and QCD Equation of State, 2008 年 4 月 21 日, Brookhaven National Laboratory (アメリカ合衆国)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

浅川 正之 (ASAKAWA MASAYUKI)  
大阪大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号 : 50283453

(2) 研究分担者

( )

研究者番号 :

(3) 連携研究者

( )

研究者番号 :