

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 10 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400272

研究課題名(和文) 高エネルギー原子核衝突において生成される高温QCD物質中の相関・揺らぎ・輸送

研究課題名(英文) Correlation, fluctuation, and transportation in high temperature QCD matter created in high energy nucleus collisions

研究代表者

浅川 正之 (Asakawa, Masayuki)

大阪大学・理学研究科・教授

研究者番号：50283453

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では高エネルギー原子核衝突において生成された系における、相関、揺らぎ、輸送をテーマに研究を行った。強い相互作用の基礎理論は量子色力学によって記述される。高エネルギー原子核衝突において生成される系においては、クォーク、グルーオンが閉じ込めから解放されたクォークグルーオンプラズマが生成される。本研究では特に、クォークグルーオンプラズマ中におけるチャーモニウム相関、高エネルギー原子核衝突の時間発展における保存量揺らぎの輸送について研究を行い、新たな知見を得た。

研究成果の概要(英文)：In this study, we investigated correlation, fluctuation, and transportation in the system created in high energy nucleus collisions. The fundamental theory of the strong interaction is quantum chromodynamics. In high energy nucleus collisions, the quark-gluon plasma, where quarks and gluons are deconfined, is created. In this study, we focused on the charmonium correlation in the quark-gluon plasma and the transportation of fluctuations of conserved charges, and obtains new insights.

研究分野：原子核理論

キーワード：クォークグルーオンプラズマ 高エネルギー原子核衝突 量子色力学 保存量揺らぎ スペクトル関数  
格子ゲージ理論 臨界点 動的臨界現象

## 1. 研究開始当初の背景

研究開始当初は、米国ブルックヘブン国立研究所の Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC)、および、CERN の Large Hadron Collider (LHC) においても高エネルギー原子核衝突実験が行われ、様々なデータが提供され、その結果、それらの衝突において、クォークグルーオンプラズマが生成されたことは確実になったが、その強結合的な性質もまた確実になった時期であった。また、1988年に本研究代表者らによって QCD 相図上において存在が提唱された相転移の臨界点の存在など、QCD の相構造を探るため、RHIC において低エネルギーでの原子核衝突が立案され、実行に移されつつあるという時期であった。また、ドイツの GSI、ロシアの Dubna、日本の J-PARC においても、低エネルギーの原子核衝突実験を行おうという機運が高まっていた時期でもあった。

これらの機運に対応して、本研究ではクォークグルーオンプラズマの非摂動性が物理的量にどのように現れるかを第一原理計算である格子ゲージ計算によるチャーモニウム系(チャーム反チャームクォーク系)の虚時間相関関数を通して研究することを考えた。また、QCD 相図の実験的研究の多くは本研究代表者らによって提唱された保存量揺らぎを通して計画されていたが、ほとんどの理論的計算は高エネルギー原子核衝突における化学凍結までは保存量揺らぎは熱平衡値を取り、その後は変化しないという、保存量揺らぎの特質を無視したものであった。そのような極度に単純化され、現実にそぐわないモデルから脱却するため、局所的に保存される量である保存量揺らぎの特質を考慮し、また、化学凍結後のハドロン相においても揺らぎの輸送は起こることをも考慮した理論体系を打ち立てることを立案した。これら、相関、揺らぎ、輸送が本研究のテーマであった。

## 2. 研究の目的

以上の背景を踏まえて、本研究では主に次のようなテーマを目的とした。

(1) 2003年に研究代表者らによって、クォークグルーオンプラズマ中において、 $J/\psi$  および  $J/\psi'$  粒子というチャーモニウムは閉じ込め非閉じ込め相転移温度以上のクォークグルーオンプラズマ中においても、およそ相転移温度の 1.6 倍程度の温度までは存在し続けることが見いだされた。この研究は媒質の固有系において、ゼロ運動量のチャーモニウムに関するものであった。これを、有限運動量に拡張し、さらにベクトルチャンネルである  $J/\psi$  については、縦波チャンネルおよび横波チャンネルに分離して、それらの存在可能性を調べる。

(2)

高エネルギー原子核衝突において、化学凍結後のハドロン相における保存量揺らぎの輸送について研究し、実験と比較するためにはどのような量と比較したらよいか考察する。

高エネルギー原子核衝突において生成される系は、有限の温度を持っている。そのため、物質の固有系において、各粒子は熱運動を行っている。一方、従来の研究においては、この熱運動の効果を無視して、高エネルギー原子核衝突についての Bjorken 描像において、位置空間におけるラピディティーと運動量空間におけるラピディティーとを同一視して、観測量を計算していた。これは、流体の体積要素については適用できるが、流体を構成している各粒子については、熱運動の存在のため、必ずしも正当化できない。この研究では、この点を改善することを目指した。

## 3. 研究の方法

研究の目的の(1)(2)に対応させて、研究の方法を述べる。

(1) 本研究では、チャーモニウムの運動量を細かく取るために、空間方向の格子サイズを従来のものより大きく取った。これは、クォークグルーオンプラズマ中のチャーモニウムに対して赤外の物理的效果を十分に取り入れるという意味もある。その上で、格子間隔が十分に小さい非等方格子を使用して、クエンチ近似のもとで、チャーモニウムの  $J/\psi$  および  $J/\psi'$  粒子に対応するチャンネルの虚時間相関関数を各運動量において十分な統計を用いて計算した。その虚時間相関関数を、ベクトルチャンネルに対しては、縦方向と横方向のチャンネルに分離し、各運動量、各チャンネルに対して、最大エントロピー法を用いて、実時間スペクトル関数を求めた。  $J/\psi$  および  $J/\psi'$  粒子に対応するピークに位置や、留数の値についても、最大エントロピーを用いて、誤差付きで評価した。

(2)

通常用いられる、連続変数の分布に対する確率論的方程式は、2次揺らぎ以外は扱うことが出来ない、あるいは、2次より高次の揺らぎに対してはゼロを与えることが知られている。高エネルギー原子核衝突において興味のある高次揺らぎを扱うためには、この条件を何らかの形で破らなくてはならない。そのために、粒子という離散性を陽に考慮に入れた確率マスター方程式を座標のラピディティー空間で解き、保存量の2次、および高次の揺らぎの時間変化とその時間変化の実験的に変化させることのできる、観測を行う運動量ラピディティー幅についての依存性を調べた。

の方法を用いて座標ラピディティー空間において揺らぎの輸送を追跡した後、熱的凍結が起きる不変時間超平面において粒子の熱運動を考慮して、座標ラピディティー空

間から運動量ラピディティ空間に変換をおこなうことにより、熱運動によるにじみ効果がどのように現れるかを調べた。

#### 4. 研究成果

研究の目的の(1)(2) に対応させて、研究の成果を述べる。

(1) 本研究でも、ゼロ運動量において、 $\rho$  および  $J/\psi$  粒子は相転移温度のおよそ 1.6 倍の温度まで存在し続けることが確認された。また、相転移温度以上の温度において、運動量をゼロから 3GeV 程度まで増加させて、各運動量において、極の留数の値を最大エントロピー法によって得られたスペクトル関数を積分することにより求めたところ、 $\rho$  および  $J/\psi$  粒子の縦横成分ともに、ほぼ一定であり、この運動量までではそれらの粒子は、運動量の増加に伴ってクォークグルーオンプラズマ中で溶解が促進されるということではなかった。また、 $\rho$  および  $J/\psi$  粒子のゼロ運動量におけるエネルギーの値(正確な意味では質量ということでは出来ないが、一般に参照される質量)の値は、相転移温度のおよそ 1.6 倍の温度においては、ゼロ温度における値よりも 1GeV 近く増加することが判明した。この結果は通常のポテンシャルモデルでは説明が困難である。一方、有限温度における各粒子状態の分散関係は、真空中と同じローレンツ型であることが示された。このことは、測定を行った運動量においては、媒質効果はゼロ運動量におけるエネルギーの変化にすべて吸収できることを示し、非常に非自明な結果である。

#### (2)

確率マスター方程式を LHC における電磁電荷の 2 次揺らぎを念頭に解き、LHC における ALICE 実験で観測されている、観測する運動量ラピディティ幅を増加させると、D-measure という量がハドロン相における値から減少するという現象は、それまで考えられていた有限サイズ効果によるものではなく、ハドロン相における拡散による電磁電荷という保存量の揺らぎの輸送によるということを明らかにした。さらに、ハドロン相における拡散係数も求めた。

拡散マスター方程式による座標空間における保存量揺らぎの輸送に加えて、位置ラピディティから運動量ラピディティへの変換において粒子の熱運動によるにじみの効果が存在する場合、その効果は見かけの拡散長あるいは拡散係数を増大させる方向に働くことを確かめた。揺らぎの座標空間における輸送とこのにじみ効果により、初期状態における保存量揺らぎは、観測する運動量ラピディティ幅が小さい場合には、観測される保存量揺らぎは初期状態における保存量揺らぎから速やかにハドロン相における値に近づくことになる。そのため、高エネルギー原子核衝突の初期状態や相図上の臨界点を研究する際には、揺らぎの、観測を行う運

動量ラピディティ幅依存性を詳しく調べることが必要である。

#### 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 10 件)

A. Ikeda, M. Asakawa, and M. Kitazawa, In-medium Dispersion Relations of Charmonia Studies by Maximum Entropy Method, Physical Review D 95 (2017) 012504 (1-11), 査読有  
DOI: 10.1103/PhysRevD.95.014504

M. Kitazawa, T. Iritani, M. Asakawa, T. Hatsuda, and H. Suzuki, Equation of State for SU(3) Gauge Theory via the Energy Momentum Tensor under Gradient Flow, Physical Review D 94 (2016) 114512 (1-14), 査読有  
DOI: 10.1103/PhysRevD.94.114512

Y. Ohnishi, M. Kitazawa, and M. Asakawa, Thermal Blurring of Event-by-Event Fluctuations Generated by Rapidity Conversion, Physical Review C 94 (2016) 044905 (1-10), 査読有  
DOI: 10.1103/PhysRevC.94.044905

M. Kitazawa and M. Asakawa, Fluctuations of Conserved Charges in Relativistic Heavy Ion Collisions: An Introduction, Progress in Particle and Nuclear Physics 90 (2016) 299-342, 査読有  
DOI: 10.1016/j.pnpnp.2016.04.002

T.K. Kim, M. Asakawa, and M. Kitazawa, Dilepton Production Spectrum above  $T_c$  with a Lattice Quark Propagator, Physical Review D 92 (2015) 114014 (1-12), 査読有  
DOI: 10.1103/PhysRevD.92.114014

M. Sakaida, M. Asakawa, and M. Kitazawa, Higher Order Fluctuations of Conserved Charges in Heavy Ion Collisions, Journal of Physics: Conference Series, 612 (2015) 012046 (1-4), 査読無

T.K. Kim, M. Asakawa, and M. Kitazawa, Dilepton Production Spectrum above  $T_c$  analyzed with a Lattice Quark Propagator, Proceedings of Science, CPOD2014 (2015) 057 (1-7), 査読有

M. Asakawa, T. Hatsuda, E. Itou, M. Kitazawa, and H. Suzuki, Thermodynamics of SU(3) Gauge Theory from Gradient Flow on the Lattice, Physical Review D 90 (2014)

011501(1-5), 査読有  
DOI: 10.1103/PhysRevD.90.011501

M. Asakawa, S.A. Bass, and B. Muller, Center Domains and Their Phenomenological Consequences in Ultrarelativistic Heavy Ion Collisions, Nuclear Physics A931 (2014) 1120-1124, 査読有  
DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2014.08.005

M. Sakaida, M. Asakawa, and M. Kitazawa, Effects of Global Charge Conservation on Time Evolution of Cumulants of Conserved Charges in Relativistic Heavy Ion Collisions, Physical Review C 90 (2014) 064911(1-9), 査読有  
DOI: 10.1103/PhysRevC.90.064911

〔学会発表〕(計 8 件)

M. Asakawa, Critical Point and Conserved Charge fluctuations in Relativistic Heavy Ion Collision, Exploring the QCD Phase Diagram through Energy Scans, 2016 年 10 月 12 日、Seattle (アメリカ合衆国)

M. Asakawa, Conserved Charge Fluctuations in Relativistic Heavy Ion Collisions, CNT QGP Meet 2015, 2015 年 11 月 19 日、Kolkata(インド)

M. Asakawa, Thermal Blurring Effects on Fluctuations of Conserved Charges in Rapidity Space, XXV International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions (Quark Matter 2015), 2015 年 9 月 28 日、神戸ファッションマート (兵庫県・神戸市)

M. Asakawa, Conserved Charge Fluctuations: Two Myths and Facts, Looking Beyond  $10^{10}$  Mini-Bangs, CGC, Perfect Fluids, and Jet Tomo/Holography, a Symposium on Future RHIC and LHC Physics on the Occasion of Miklos Gyulassy's Second Retirement, 2015 年 9 月 25 日、Wuhan (中華人民共和国)

浅川正之, 巷で誤解されている考え方を直す, チュートリアル研究会「重イオン衝突の物理: 基礎から最先端まで」, 2015 年 3 月 27 日、理化学研究所 (埼玉県・和光市)

浅川正之, 重イオン衝突実験における荷電揺らぎのラピディティ方向へのにじみ効果, 日本物理学会第 70 回年次大会, 2015 年 3 月 23 日、早稲田大学 (東京都・新宿区)

M. Asakawa, Conserved Charge Fluctuations: Myths and Facts, QCD 2015,

2015 年 1 月 29 日、Mumbai (インド)

M. Asakawa, Center Domains and Their Phenomenological Consequences in Ultrarelativistic Heavy Ion Collisions, XXIV International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions (Quark Matter 2014), 2014 年 5 月 20 日、Darmstadt (ドイツ)

〔図書〕(計 0 件)

〔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-nuclth.phys.sci.osaka-u.ac.jp/>

## 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:

### (4) 研究協力者

( )