

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 4 月 16 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540307

研究課題名(和文) 第一原理計算による有限温度量子色力学物性と相対論的流体力学

研究課題名(英文) Properties of finite temperature quantum chromodynamics matter by first principle calculation and relativistic hydrodynamics

研究代表者

浅川 正之 (Asakawa, Masayuki)

大阪大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：50283453

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円、(間接経費) 1,140,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙初期に存在したと考えられるクォークグルーオンプラズマの性質を、強い力の基礎理論である量子色力学の第一原理計算である格子ゲージ計算により研究した。

また、実験的にクォークグルーオンプラズマを作る手段である高エネルギー原子核衝突において、どのような系が作られたかを調べる手段の一つである保存量である電荷の2次および高次揺らぎについて、そのような衝突におけるその時間発展および有限体積効果について研究した。

研究成果の概要(英文)：I studied properties of the quark-gluon plasma, which is thought to have existed in the early universe, by lattice gauge calculation, which is a first principle calculation of quantum chromodynamics, the fundamental theory of the strong force.

The experimental method to create the quark-gluon plasma is high energy heavy ion collisions. The measurement of the second and higher order fluctuations of the electric charge, which is a conserved quantity, is one of diagnostic tools to understand what kind of system was created in those collisions. I studied the time evolution of the second and higher order fluctuations of the electric charge and the finite volume effect on them.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：量子色力学 高エネルギー原子核衝突 理論核物理 素粒子論 クォークグルーオンプラズマ 相対論的流体力学 保存量揺らぎ

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) が、高エネルギー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継続的に提供してきており、2010 年度からは CERN の Large Hadron Collider (LHC) においても高エネルギー原子核衝突が開始され、ちょうど様々なデータの提供が始まってきていた時期であった。また、RHIC においては QCD の相構造を探るため、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。それまでに得られた様々な測定値から RHIC および LHC 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。しかしながら、RHIC では様々な予期されていなかった現象も観測され、クォークグルーオンプラズマや高エネルギー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広く議論されてきていた。このような状況において、次に行うべきステップは、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と、生成された系の時間発展と観測量との関係のより基本的な立場による研究と考へた。

RHIC において発見された予期されていなかった現象のうち重要なものとしては、例えば、予想外に早い熱平衡化と、生成された物質が熱平衡化した後の振る舞いが粘性をもたない完全流体のそれに非常に近いことがあった。また、RHIC における低エネルギーでの衝突では、陽子数の揺らぎの測定が重要であると考えられていた。この背景のもと、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中での輸送係数などの物性の理解、および高エネルギー原子核衝突で作られた系の時間発展、とくに揺らぎの時間発展に焦点を絞って研究を行うことを立案した。

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) 非閉じ込め相 (クォークグルーオンプラズマ) における応力の緩和時間。通常用いられる粘性を含んだ相対論的流体力学は因果律を破ることが知られている。これを改善するために、Israel-Stewart 形式などのセカンドオーダーの相対論的流体力学を使うことが必要とされていた。この形式では、しかしながら、粘性に加えて応力の緩和時間などの新しい輸送係数を導入することが必要である。この応力の緩和時間を第一原理的に評価する。

(2) RHIC で行われる低エネルギー衝突など

では、臨界点の存在を確かめる方法として、正味の陽子数の揺らぎを観測することが計画されており、また行われた。しかし、陽子数は通常の化学凍結が起きた後のハドロン相でも、陽子とその周りにふんだんに存在するパイ中間子との相互作用でデルタ粒子が作られそれが崩壊することにより、頻繁に変化する。このことは以前の議論では見過ごされていた。この不定性を除去するため、観測される正味の陽子数の揺らぎ (保存量ではない) と正味のバリオン数の揺らぎ (保存量であり、臨界点の存在などの情報を含みうる) の関係を明らかにする。

(3) 正味のバリオン数や電磁電荷などの保存量の揺らぎは、それを担う粒子の拡散によってのみ変化し得る。クォークグルーオンプラズマや臨界点の情報を含む化学凍結時におけるそれらの値と実際に観測されるそれらの値の関係を、粒子の拡散を考慮することにより求める。

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) 本研究ではクォークのフレーバー数ゼロの場合を考察した。まず、格子ゲージ計算により、有限温度 (非閉じ込め相) ゼロ化学ポテンシャルにおけるエネルギー運動量テンソルの相関をユークリッド空間において求める。エネルギー運動量テンソルは次元の高い演算子であり、その同時空点における積は非常に特異性が高いので、それを解析的に分離する必要がある。そのためには演算子積展開を用いる。また、また、このエネルギー運動量テンソルの相関はミンコフスキー空間で考察することにより、応力テンソルの緩和時間と対応する粘性の比と関連付けることができる。本研究では、これらの理論構成を行い、最終的に典型的に、各格子サイズ各温度において、それぞれ百万個程度のゲージ配位を生成して、ずれ応力の緩和時間とずれ粘性の比を求めた。

(2) ハドロン相において、主にパイ中間子との反応による (反) 核子の自由行程時間はハドロン相の継続時間よりも十分短い。そのため、ハドロン相から粒子が放出される運動凍結時には核子は最初の陽子であったか中性子であったかという記憶を失い、アイソスピン空間でランダム化される。このことを用いて、始状態の正味のバリオン数の 2 次、3 次、4 次の揺らぎを終状態の様々な陽子の情報を用いて表す。

(3) 通常用いられる、連続変数の分布を考へ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ことが知られている。ここで興味のある高次揺らぎを扱うためには、この定理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、粒子の離散性をあらわに考慮に入れた確率マスター方程式をラ

ピディティ空間で解き、保存量の2次、および高次の揺らぎの時間変化とその実験的に変化させることのできる観測するラピディティ幅についての依存性を調べる。

4. 研究成果

研究の目的の(1)(2)(3)に対応させて、研究の成果を述べる。

(1) 非閉じ込め相におけるずれ応力の緩和時間とずれ粘性の比を求め、さらにエントロピー密度の測定と組み合わせることにより、この相におけるずれ方向の典型的情報伝達速度を求めた。その結果、この値は非閉じ込め相転移温度のおよそ1.5倍から3倍程度の温度ではほぼ一定であり、光速よりも小さいので、Israel-Stewart形式のセカンドオーダーの相対論的流体力学において因果律はこのモードに関しては保たれることがわかった。

(2) 高エネルギー原子核衝突の終状態で観測される陽子数の様々な相関と、化学凍結時における正味のバリオン数の2、3、4次揺らぎを関連付ける公式を導出した。さらに、衝突する原子核がアイソスピン対称でないことによる影響についても調べ、それによる補正は十分小さいことを導いた。

(3) 確率マスター方程式を解くことにより、化学凍結時には保存量揺らぎはラピディティ幅によらずクォークグルーオンプラズマにおける揺らぎであったものが、ラピディティ幅の小さいところからハドロン相における値に徐々に近づいていくことを導くことができた。これは、LHCのALICE実験における電磁電荷の揺らぎに関する実験における結果ともよく整合する。

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)

Y. Kohno, M. Asakawa, and M. Kitazawa, Shear Viscosity to Relaxation Time Ratio in SU(3) Lattice Gauge Theory, Physical Review D, 89 (2014) 054508(1-8), 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevD.89.054508

M. Kitazawa, M. Asakawa, and H. Ono, Non-Equilibrium Time Evolution of Higher Order Cumulants of Conserved Charges and Event-by-Event Analysis, Physics Letters, B728 (2014) 386-392, 査読有
DOI: 10.1016/j.physletb.2013.12.008

M. Asakawa, QCD Critical Point, Baryon Number Fluctuations, and Final State Interactions, Journal of Physics:

Conference Series, 422 (2013) 012025(1-4), 査読有
DOI: 10.1088/1742-6596/422/1/012025

M. Asakawa, S. A. Bass, and B. Müller, Center Domains and Their Phenomenological Consequences, Physical Review Letters, 110 (2013) 202301(1-4), 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.202301

H. Ono, M. Asakawa, and M. Kitazawa, On the Effect of Secondary Protons on Baryon and Proton Number Cumulants in Event-by-event Analysis, Physical Review C, 87 (2013) 041901R(1-4), 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevC.87.041901

M. Kitazawa and M. Asakawa, Relation between Baryon Number Fluctuations and Experimentally Observed Proton Number Fluctuations in Relativistic Heavy Ion Collisions, Physical Review C, 86 (2012) 024904(1-13), 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevC.86.024904

C. Nonaka and M. Asakawa, Modeling a Realistic Dynamical Model for High Energy Heavy Ion Collisions, Progress of Theoretical and Experimental Physics, (2012) 01A208(1-31), 査読有
DOI: 10.1093/ptep/pts014

濱垣秀樹, 浅川正之, RHICにおける強く相互作用するクォークグルーオンプラズマ, 日本物理学会誌解説, 日本物理学会, 67 (2012) 616-624, 査読有

M. Kitazawa and M. Asakawa, Revealing Baryon Number Fluctuations from Proton Number Fluctuations in Relativistic Heavy Ion Collisions, Physical Review C, 85 (2012) 042503(R)(1-5), 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevC.85.021901

C. Nonaka, M. Asakawa, M. Kitazawa, and Y. Kohno, Charmonium Spectral Functions at Finite Momenta in the Gluon Plasma from Lattice QCD, Journal of Physics G, 38 (2011) 124109(1-5), 査読有
DOI: 10.1088/0954-3899/38/12/124109

[学会発表](計 10 件)

M. Asakawa, Center Domains and Their Phenomenological Consequences, New Frontiers in QCD, 2013年12月05日、

京都大学基礎物理学研究所（京都府）

浅川正之、高エネルギー重イオン衝突現象論：現象と物理を結ぶ架け橋、日本物理学会 2013 年秋季大会、2013 年 9 月 21 日、高知大学（高知県）

M. Asakawa、Nuclear Theory in Japan、PHENIX Workshop on Physics Prospects with Detector and Accelerator Upgrades、2013 年 8 月 2 日、理化学研究所（埼玉県）

M. Asakawa、QCD Critical Point, Conserved and Nonconserved Charge Fluctuations, and Final State Interactions、2012 年 11 月 16 日、Pusan（大韓民国）

M. Asakawa、Center Domains and Their Phenomenological Consequences、Nagoya Mini-Workshop 2012 “ Phenomenology and Experiments at RHIC and LHC ”、2012 年 9 月 26 日、名古屋大学（愛知県）

M. Asakawa、QCD Critical Point, Charge Fluctuations, and Final State Interactions、Heavy Ion Collisions in the LHC Era、2012 年 7 月 17 日、Quy Nhon（ベトナム）

M. Asakawa、Baryon Number Cumulants and Proton Number Cumulants in Relativistic Heavy Ion Collisions、7th International Workshop on Critical Point and Onset of Deconfinement、2011 年 11 月 11 日、Wuhan（中華人民共和国）

M. Asakawa、Cumulants of Conserved Charges and QCD Phase Structure、Workshop on Fluctuations, Correlations, and RHIC Low Energy Runs、2011 年 10 月 3 日、Brookhaven National Laboratory（アメリカ合衆国）

M. Asakawa、Heavy Mesonic Spectral Functions at Finite Temperature and Finite Momentum、Emmi Workshop “ Quarkonia in Deconfined Matter ”、2011 年 9 月 30 日、Acitrezza（イタリア）

浅川正之、QGP の素顔とは --- 現在までの理解、日本物理学会 2011 年秋季大会、2011 年 9 月 18 日、弘前大学（青森県）

〔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：5 0 2 8 3 4 5 3

(2) 研究分担者
()

研究者番号：

(3) 連携研究者
()

研究者番号：