

平成 22 年 06 月 27 日現在

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2006～2009

課題番号：18540294

研究課題名 (和文) 強結合・非平衡系としての QCD 物質の研究

研究課題名 (英文) QCD-Matter as a strongly interacting non-equilibrium system

研究代表者

室谷 心 (MUROYA SHIN)

松本大学・総合経営学部・教授

研究者番号：70239557

研究成果の概要 (和文)：

RHIC や LHC のデータ解析の基礎となる相対論的流体モデルの輸送パラメーターを、微視的な計算から求める処方箋を定式化し、ハドロンガスについてテスト計算を行った。さらに格子 QCD を用いて緩和現象を議論するために、実時間有限温度格子場シミュレーション技法を提案した。ストレンジネス自由度の影響を明らかにするために、 κ 粒子の質量の解析と K- π 散乱長の解析を、格子 QCD の数値シミュレーションで行った。

研究成果の概要 (英文)：

We have formulated microscopic formulae for the additional coefficients in Israel-Stewart relativistic causal hydrodynamics. In order to discuss the relaxation-dissipation phenomena based on a lattice field theory, we propose a stochastic quantization method of a lattice field theory with Niemi-Semenov-Umezawa type complex time contour. The importance of the s-quark in the QCD matter is also investigated through the analyses of κ meson and K- π scattering length based on a lattice QCD.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,300		1,300
2007年度	700	210	910
2008年度	700	210	910
2009年度	700	210	910
年度			
総計	3,400	630	4,030

研究分野：数物系科学

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：QGP・相対論的粘性流体・緩和現象・格子ゲージ理論・非平衡系

1. 研究開始当初の背景

超高エネルギー重イオン反応によって超

高温の状態を生成し、核子や中間子などのハドロンを構成している、より基本的な粒子であるクォークとグルーオンのプラズマ状態

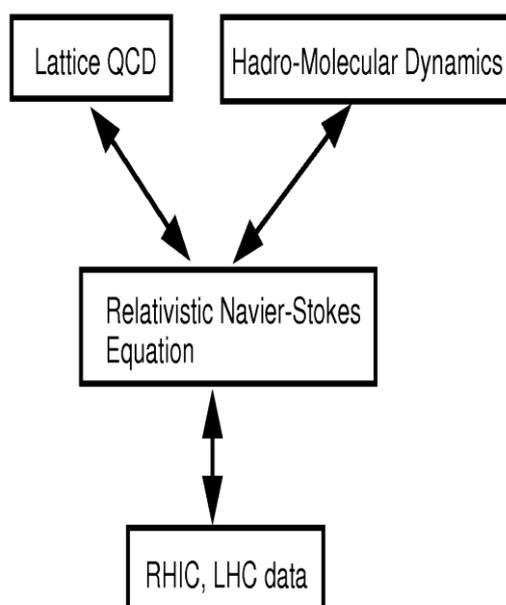
(QGP)を実現しようという試みは、米国ブルックヘブン国立研究所の加速器RHICによる2000年以降の実験によってほぼ達成されたと考えられていた。しかしながら、RHICデータに対する完全流体モデルの予想以上の成功は、従来考えられていたような単純な非閉じ込めQGP描像から予想されていたものとは違い、構成要素同士がQCDによって非常に強く相互作用しあっている強結合プラズマ状態の実現を示唆していた。

さらに、2007年にはよりエネルギーの高いLHCでの実験も始まり、2008年以降にはたくさんの新しいデータが報告・公開されるであろうことが期待されていた。

2. 研究の目的

本研究の最終的な目的は、RHICデータの解析が示唆する強結合QCD物質の物性論的な性質を明らかにすることであった。そのため、QCD物質の緩和現象を解析するための微視的な手法の確立と、巨視的な輸送理論の整備。そして、巨視的現象論の実験データへの適用の3つの段階を行うことを目指した。

3. 研究の方法



本研究の戦略は簡単には上図のように与えられ、相対論的な流体モデルを媒介として、基礎理論であるQCDやハドロンの微視的モデルと実験データを結び付けようというものである。一度流体モデルを設定すると、非平衡な時間発展は流体方程式で記述され、粒子分布や粒子流異方性など実験測定量を比較的簡単に求めることができる。

一方、流体モデルの特徴である熱力学的な性質や、輸送係数、緩和時間、相関距離など

は格子QCDや微視的なHadro-Molecular Dynamicsから計算されるべき量であり、これらの量を微視的モデルから評価することにより、実験を再現するような流体のパラメータを正当化したり、流体モデル自体の適用可能条件を吟味することができる。

このように、現象論である流体モデルを媒介することによって、微視的な力学と実験データとを関係付けることが本研究の最終目標である。

4. 研究成果

現在得られている実験データへの巨視的現象論の適用として、RHIC重イオン実験で報告されている粒子相関の実験データとCERN重イオン実験の粒子相関の実験データとを、統一的な立場から議論した。2体相関に関しては従来から精力的に議論されてきたが、ここでは特に π 粒子の3体相関に注目して、2体相関と3体相関とを統一的に議論することによって、粒子生成源の混濁性と生成粒子数に正の相関が見出せることを議論した。粒子相関は多重発生の粒子源についての重要な情報を与えることが知られているが、実際の実験データには粒子生成後の崩壊や散乱の影響が混じってしまい、生成源の情報を生成後の粒子の相互作用の影響から分離して取り出すことは簡単ではない。我々は、統計モデルを用いたハドロンガスモデルのシミュレーションを利用して生成源に起因する相関を評価し、とくに生成源の混濁性について核子あたり1.7 GeVのCERNでの原子核衝突実験から、核子あたり200 GeVのRHICのデータまでを統一的に解析した。

また、RHICおよびCERN-SPSでの重イオン衝突の結果について、散乱領域のサイズの評価に使われるHBT効果に対する流体的の膨張と混濁性の影響を系統的に調べ、HBT効果から得られる見かけの系の広がりや、さらにそれを使って評価されるエネルギー密度などの密度量に対する影響を議論した。

巨視的な輸送理論の整備として、相対論的な流体方程式の輸送係数の計算法を整備し、予備的な解析を行った。

現在RHICのデータ解析で使われている流体モデルは多くの場合は完全流体モデルであるが、緩和現象を考慮に入れた場合には粘性を無視できるとは限らず、より一般的なナビエ・ストークス方程式の利用が考えられる。しかしながら、従来よく用いられてきたランダウ・リフシッツ型の相対論的なナビエ・ストークス方程式は拡散型であり、相対論的な因果律と矛盾するという問題が指摘されている。ここではとくに、イスラエルとスチュ

アートにより拡張された,”緩和を考慮に
入れた“流体方程式を採用し,この方程式に現
れる新しい輸送係数を微視的に評価する処
方箋の確立を目指した.この緩和を考慮した
相対論的流体方程式(イスラエル・スチュ
アート方程式)は因果律を満足する双曲型の方
程式として注目されている.イスラエル・ス
チュアート方程式には,通常のナビエ・スト
ークス方程式に含まれる輸送係数に加えて,
5個の新たな輸送係数が含まれている.本研
究では,局所平衡分布関数に基づく定式化に
従って,新たな5個の輸送係数に対する久保
公式を導出した.さらに,この公式を使って
ハドロンガスの系について輸送係数の温
度・重粒子数密度依存性を微視的に計算した.

高温高密度ハドロン状態の熱力学的性質
の微視的な導出に当たっては,基礎理論である
QCD理論に直接基づく満足できる処方箋は
ない.我々は,モンテカルロ型衝突事象生成
コード URASiMA(Ultra-Relativistic A-A
collision simulator based on Multiple
Scattering Algorithm)を用いてハドロンの
分子動力学的な計算 Hadro-Molecular
Dynamics をおこなって統計力学的な解析を
行っている.我々の Hadro-Molecular
Dynamics の処方箋全体の理論整備を行った
結果はシミュレーションの国際学会で報告
した.

ハドロン状態に関しては,我々は URASiMA
を用いたハドロンの分子動力学的な計算
(Hadro-Molecular Dynamics)によって十分
に信頼の置ける数値シミュレーションができ
ると考えているが, QGP 状態に関しては,
有効な微視的な統計力学は存在しない,格
子 QCD に基づく数値シミュレーションは,
平行系の性質に関しては十分に確立しており,
様々な解析が行われ重要な結果が得られて
はいるが,非平衡系の物理量に関しては純ゲ
ージ状態(クォークの影響を無視したグル
オンだけの状態)の高温領域における粘
性係数の計算がようやく端緒についた段階
である.

QGP 状態の緩和現象を格子ゲージ理論に基
づくシミュレーションによって解析するた
めには,実時間の入った有限温度系のシミュ
レーション技法の確立が理想的である.我々
はナイエミ・セメノフ・梅沢流に時間を複
素経路に拡張した系に対して,確率過程量子
化法を適用して量子化を行うことによって,
ユークリッド時間領域のある格子場の量子
論のシミュレーションを行う方法を提案し
ている.まずは簡単のためにスカラー場を用
いて予備的な計算をおこなった.その結果
緩和現象らしき徴候が得られた.

s-クォークの QCD 相互作用への寄与を明ら

かにするために,ストレンジネをもったス
カラー九重項粒子 κ の性質や, $K-\pi$ 散
乱の散乱長を格子ゲージ理論の数値シミュ
レーションで調べた.その結果,単純なク
ォーク反クォーク描像では 1 GeV を切る
ような軽い κ は得難いことがわかった.こ
れは我々が先に行った,同じスカラー九重
項に属する σ 粒子についての格子 QCD
のダイナミカルシミュレーションで得ら
れた結果とは異なった結論である.同じス
カラー九重項であっても, κ はストレン
ジネス電荷を持つために,非接続ダイア
グラムが存在せず,このことが,軽い質
量を持つ σ 粒子との本質的な違いとな
ることが明らかとなった.

また, $K-\pi$ 散乱の散乱長を格子ゲージ理
論の数値シミュレーションで調べた結果,
 $K-\pi$ 散乱では, $I=3/2$ チャンネル, $I=1/2$
チャンネルいずれもカイラル極限の過程
で引力から斥力への変化が見られ,カイラ
ル極限では,どちらも斥力になるという結
果が得られた.我々の結果は従来無視され
てきた非接続グラフの影響もきちんと考
慮し, $I=3/2$ チャンネル, $I=1/2$ チ
ャンネルの両方を格子ゲージ理論でシミュ
レートして計算した初めての結果である.

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 18 件)

- ① Kenji Morita, Shin Muroya and Hiroki Nakamura, Multiplicity dependence of partially coherent pion production in relativistic heavy ion collisions. Progress of Theoretical Physics 116, (329-347) (2006). 査読有
- ② Kenji Morita, Shin Muroya, Hiroki Nakamura, Source chaoticity in relativistic heavy ion collisions at SPS and RHIC, Braz. J. Phys. 37, (705-707) (2007). 査読有
- ③ Shin Muroya, Transport coefficients of Relativistic Causal Hydrodynamics for Hadrons, High Energy Physics and Nuclear Physics, 31, (1162-1164) (2007). 査読有
- ④ Kenji Morita, Shin Muroya and Hiroki Nakamura, COHERENCE OF PION SOURCES FROM MULTI-PION INTERFEROMETRY IN RELATIVISTIC HEAVY ION COLLISIONS AT SPS AND RHIC, International Journal of Modern Physics E16, (1826-1831) (2007). 査読有
- ⑤ T. Kunihiro, S. Muroya, A. Nakamura, C. Nonaka, M. Sekiguchi and H. Wada, Mass spectroscopy of scalar and axial vector mesons in lattice QCD, Acta

- Phys. Polon. B38, (491-496) (2007). 査読有
- ⑥ Hiroaki Wada, Teiji Kunihiro, Shin Muroya, Atsushi Nakamura, Chiho Nonaka, Motoo Sekiguchi, Lattice Study of Low-lying Nonet Scalar Mesons in Quenched Approximation, Physics Letters B652, (250-254) (2007). 査読有
- ⑦ J. Nagata, A. Nakamura, and S. Muroya, Lattice study of pi K scattering length, Nuclear Phys. A790 (414-417) (2007). 査読有
- ⑧ Shin Muroya, Relaxation Time of a Hadron Gas and Relativistic Causal Hydrodynamics, Nagoya Mini-Workshop "Strongly Coupled Quark-Gluon Plasma: SPS, RHIC and LHC", held at Nagoya Univ. 17 Feb. 2007.
- ⑨ T. Kunihiro, S. Muroya, A. Nakamura, C. Nonaka, M. Sekiguchi, H. Wada, The Low-lying Scalar Mesons and Related Topics, Nucl. Phys. Proc. Suppl. 186:294-297, (2009).
- ⑩ S. Muroya, M. Mizutani, and A. Nakamura, Stochastic quantization of a finite temperature lattice field theory in the real time formula, In the proceedings of the XXVI International Symposium on Lattice Field Theory, PoS(LATTICE 2008) 2009. 査読有
- ⑪ J. Nagata, S. Muroya and A. Nakamura, Lattice study of $K\pi$ scattering in $I=3/2$ and $1/2$ channels, Phys. Rev. C80, 045203 (2009). 査読有
- ⑫ Shin Muroya, A Hadro-Molecular Dynamic Calculation, ID050, in the Proceedings of Asia Simulation Conference 2009 (JSST 2009) held at Ritsumeikan Univ. Shiga, Japan Oct 7 - 9, 2009. 査読有
- ⑬ 室谷 心, 「相対論的流体方程式の輸送係数について」素粒子論研究 114(C117-C119) (2006)
- ⑭ 水谷雅志, 室谷 心, 中村 純, 「実時間有限温度格子場の量子論の数値シミュレーション」素粒子論研究 116(C117-C119) (2008)
- ⑮ 室谷 心, 「QGP の流体力学的記述: 流体モデル入門」原子核研究 2007 年特別号
- ⑯ 水谷雅志, 室谷 心, 中村 純, 「格子場の量子論の実時間有限温度数値シミュレーション II」, 素粒子論研究 116 C117-C119 (2008).
- ⑰ 室谷 心, 「クォーク・グルーオンの世界の可視化」第 27 回日本シミュレーション学会大会論文集(345-348) (2008)

⑱ 室谷心, 「高エネルギー素粒子反応の世界の可視化」第 28 回日本シミュレーション学会大会論文集(203-207) (2009) [学会発表] (計 8 件)

- ① 室谷心, 「いっしょに箱に入れて散乱をみる --- 格子シミュレーションによる散乱長の研究 ---」 (2007 年 8 月 3 日) 平成 19 年度スーパーコンピュータシンポジウム(大阪大学サイバーメディアセンター)
- ② 室谷心, 「因果的な相対論的流体方程式の係数と緩和時間について」 (2007 年 3 月) 日本物理学会 2007 年春の分科会 (首都大学東京)
- ③ 室谷心, 「相対論的流体方程式の係数と緩和現象について II」, (2007 年 9 月 24 日), 日本物理学会第 62 回年次大会, (北海道大学札幌キャンパス)
- ④ 室谷心, 水谷雅志, 中村純, 「格子場の量子論の実時間有限温度数値シミュレーション」, (2008 年 3 月 22 日) 日本物理学会第 63 回年次大会, (近畿大学本部キャンパス)
- ⑤ 室谷心, 永田純一, 中村純 「格子 QCD 理論による π -K 散乱の散乱長 II」 (2008 年 9 月 21 日) 日本物理学会 2008 年秋の分科会 (山形大学小白川キャンパス)
- ⑥ 中村純, 室谷心, 水谷雅志, 「格子場の量子論の実時間有限温度数値シミュレーション II」 (2008 年 9 月 20 日) 日本物理学会 2008 年秋の分科会 (山形大学小白川キャンパス)
- ⑦ 国広梯二, 関口宗男, 中村純, 野中千穂, 室谷心, 和田浩明, 「ILDG 配位を用いたスカラー中間子の研究」 (2009 年 3 月 27 日) 日本物理学会第 64 回年次大会 (立教学院池袋キャンパス)
- ⑧ 水谷雅志, 室谷心, 中村純, 「格子場の量子論の実時間有限温度数値シミュレーション III」 2009 年 3 月 28 日) 日本物理学会第 64 回年次大会 (立教学院池袋キャンパス)

[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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

室谷 心 (MUROYA SHIN)

松本大学・総合経営学部・教授

研究者番号: 70239557

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし