

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010 ~ 2012

課題番号：22740156

研究課題名（和文）

QCD相図の包括的な研究—基礎論と現象論から探る重イオン衝突の物理

研究課題名（英文）

Study of the QCD phase diagram - Understanding of high-energy heavy ion collisions based on the first principle calculation and phenomenology

研究代表者

野中 千穂 (NONAKA CHIHO)

名古屋大学・理学研究科・准教授

研究者番号：10432238

研究成果の概要（和文）：

重イオン衝突実験理解を視野に入れながら、量子色力学 (QCD) 相転移、そしてクォーク・グルーオン プラズマ (QGP) 状態を明らかにすることを目標に研究を遂行した。2000年から稼働している Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC, 米国 BNL 研究所) では我々による相対論的流体模型と、リコンビネーション模型の実験理解の成功により RHIC で強結合 QGP (sQGP) 状態生成という大きな成果へ至った。さらに LHC の重イオン衝突実験結果も報告され始めた。ここでは最も現実的な現象論的模型である相対論的流体模型の拡張を RHIC、LHC 物理解明を遂行した。特に (3+1) 次元の相対論的流体模型と終状態相互作用を取り入れた模型 (Hydro+UrQMD model) に粘性流体を組み入れた。この粘性を考慮にいたした相対論的流体模型は、数値計算安定性のために必要な人口粘性が小さく、粘性やゆらぎに対し既存の相対論的流体模型にくらべ、優位性があることを示すことができた。これは高エネルギー衝突実験衝突実験解析を通じ、QGP の輸送係数を議論する上で重要な性質である。しかし今までその重要性についてきちんと議論がされてこなかった。また多次元化も容易であり、すでに3次元のプログラムを完成させている。この相対論的粘性流体の数値計算と数値粘性の評価方法について論文にまとめた。さらに終状態相互作用についても準備が着々と進んでいる。いよいよ具体的な実験解析が可能になった。すでにゆらぎがある場合の初期条件についての解析について結果を出すことに成功した。

研究成果の概要（英文）：

Our main purpose is to investigate the dynamics of the QCD phase transition and detailed property of Quark-gluon plasma (QGP) from the point of view of analyses of high-energy heavy ion collisions. At the Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) which started its operation in 2000, the production of the strongly interacting QGP (sQGP) was achieved. The production of the sQGP at RHIC was established by understanding of experimental data based on relativistic hydrodynamics and the recombination model. Furthermore, at Large Hadron Collider (LHC) the operation of heavy ion collisions started in 2010. To get insight of QGP property from understanding of high-energy heavy ion collisions at RHIC and LHC, we carried out phenomenological studies. First we include the viscosity effect of QGP into the hydro + UrQMD model which can describe not only the hydrodynamic expansion of hot and dense matter that is created after collisions but also final state interactions among hadrons. Here we developed a new algorithm that is based on the Godunov method for solving the relativistic viscous hydrodynamic equation. Our numerical method has the following important properties; (i) small numerical dissipation which is important for analyses of physical viscosity in experimental data. (ii) shock-wave capturing scheme for dealing with event-by-event initial fluctuations. We show that our numerical scheme has advantages over than other algorithms (SHASTA, KT and NT) in having small

numerical dissipation. We evaluate the numerical dissipation that contains our algorithm. Now we extend the this algorithm to 3-dimensional calculation and start a realistic calculation for RHIC and LHC using our new hydrodynamic code.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

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：高エネルギー原子核衝突、クォークグルーオンプラズマ

1. 研究開始当初の背景

通常ではクォークやグルーオンはハドロンの中に閉じ込められており、系はハドロンで記述される。高温・高密度下になると、今度はクォークやグルーオンが系の自由度となる。これは QCD の漸近的自由性（2004年ノーベル物理学賞）から予想された新しいピッチ相であり、クォーク・グルーオンプラズマ (QGP) と呼ばれる。この QGP の検証のために 1980年代より一連の重イオン衝突実験が行われてきた。特に 2000年より米国・ブルックヘブン国立研究所で稼働した初めての衝突型加速器 Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) では大きな成果と進展があった。その一つが Strongly coupled (interacting) QGP (sQGP) 生成の成功である。この新しい知見を得るに至った背景には理論の実験結果理解の成功が大きい。カラーガラス凝縮、ジェットのエネルギー損失、相対論的流体模型、リコンビネーション模型が RHIC で sQGP 生成成功の結論に至った主となる理論根拠であった。重イオン衝突実験は世界規模で遂行されている。RHIC だけでなく、エネルギーフロンティアとして稼働直前の CERN の Large Hadron Collider (LHC)、エネルギースキャンとして RHIC, GSI の FAIR などが計画されている。このような多くの実験結果に対し、理論的裏付け、また普遍的で意味ある物理を見出すために実験をリードできる理論が今求められている。そのためには次の 2つが必要である。一つは実験結果と直接比較しうる現象論である。もう一つは QCD に基づく、基礎論である。RHIC で生成された強結合系である sQGP の理解には単純な摂動論が使用できないという困難さが伴う。そのため、このような系で強力な数値実験手段、格子ゲージ理論が有力である。また最近では AdS/CFT 対応による解析も注目を集めている。

2. 研究の目的

世界規模で遂行あるいは予定されている豊富な重イオン衝突実験結果理解を念頭におき、基礎論（格子ゲージ理論）と現象論（相対論的流体模型を軸にした模型）といった 2つのアプローチで、QCD 相図と QGP 物性を明らかにすることを目標にする。すでに持つ研究成果を使用、あるいは発展させ、現在稼働中の RHIC での実験結果理解の未解決の問題、さらにこれから稼働する LHC などの実験結果理解に取り組む。様々な実験結果からその背後にある普遍的な物理を解明し、新しい知見を得るのみならず、理論から実験への物理提言をも目指す。

3. 研究の方法

重イオン衝突実験からは様々な実験結果が報告されている。それらは大きくわけて、粒子生成に関係するもの、フローなどの系のダイナミクスに関するもの、ジェット、それから電磁プローブに分類される。これら別々に広告されている実験結果を有機的に捉え、背後にある普遍的な物理を取り出していく。そのためにこれら実験結果を重イオン衝突後に起こると考えられている過程、あるいは横運動量領域で分類し、構築しなおすと理解しやすい。重イオン衝突実験では i) 初期状態 (熱平衡に関して) ii) 系の発展 (相対論的流体模型で記述) iii) ハドロン化 (QGP 状態からハドロンへの相転移) iv) フリーズアウト (ハドロン間の相互作用) の過程が起こっていると考えられている。つまり、それぞれの過程に応じた理論を作り上げるのみならず、それらを組み合わせて考えていく必要がある。このため相対論的流体模型を基調にした模型作りが必要になってくる。また横運動量領域では i) 低横運動量 (相対論的流体模型) ii) 中横運動量 (リコンビネーション模型) iii) 高横運動

量（摂動 QCD）のように主となる物理がいれかわる。以上の実験の現状を踏まえ、重イオン衝突実験結果理解から QCD 相図、QGP 物性の物理解明を目指す。そのために基礎論と現象論を駆使し、以下のようなアプローチをしていく。

現象論では i) 実験理解 (RHIC, LHC など。) ii) 模型構築 (相対論的流体模型を拡張)、iii) 有効な観測量の提案、iv) 理論提言を柱に効率よく進めていく。

基礎論では現象論の理論基礎を主たる目標にする。具体的には i) 現象論のインプット、ii) ジェットのエネルギー損失、iii) 有限温度・密度下のハドロンの性質、iv) ハドロン構造・生成過程である。

4. 研究成果

現象論では相対論的流体模型の拡張において大きな成功をおさめることができた。RHIC での相対論的流体模型の成功がきっかけになり衝突後の高温・高密度状態を記述することができる模型として相対論的流体模型に多くの注目が集まった。2010年秋には LHC での重イオン衝突実験も稼働し多くの実験結果が報告され、豊富な実験成果のもとに QGP 物性研究が可能になった。そこで最近になり重要性を認識されたのが、QGP 相の粘性効果と衝突直後の初期ゆらぎの存在である。実験の統計や精度が格段に向上したことから高次方位角異方性といった実験結果が RHIC と LHC の双方で報告され始めた。これはイベントごとに存在する初期ゆらぎに起因すると考えられている。この実験結果を理解するのに必要なのが粘性を考慮にいれた相対論的流体模型である。粘性を考慮にいれた相対論的流体模型の構築には様々な困難があった。その一つは粘性を考慮にいれた相対論的流体方程式である。単純に一次のオーダーで粘性を入れてしまうと、方程式が因果律を破り不安定になってしまう。二次のオーダーでは方程式は安定になるが、候補がいくつも提案されている。それらのどの方程式が高エネルギー重イオン衝突実験を記述するのにふさわしいのかまだ結論が出ていない。さらに数値計算自体にも困難が存在する。例えば粘性を考慮に入れた相対論的流体方程式として現象論的に導きだされた Israel-Stewart 方程式は、緩和時間の導入によって方程式が安定化している。通常緩和時間に対する時間スケールは流体の時間スケールに比べ小さいので、数値計算に非常にコストがかかってしまう。こういった困難がある。またここで注目している高次方位角異方性を議論するには流体の初期条件にゆらぎといった構造を含める必要がある。そのためそのような小さな構造をきちんと追うことのできる精度のよい数値アルゴリズムが要

求される。これまで高エネルギー原子核衝突実験解析で使用されてきた相対論的流体模型ではアルゴリズムについての吟味がなされてこなかった。非常に統計が高く精度のよい実験を解析するには精度のより相対論的流体模型が求められている。そのため我々はまず QGP 方程式を扱うのにふさわしい粘性を考慮にいれた相対論的流体方程式のアルゴリズムを開発した。ここで重要な性質は衝撃波を取り扱うことが可能であることと、数値粘性が少ないアルゴリズム、あるいは数値粘性の大きさを良く把握したアルゴリズムを使用することである。我々はそれら2つの観点から考慮したアルゴリズムを開発した。我々のアルゴリズムは理想流体部分と粘性を考慮いれた部分の2つで構成されている。特に理想流体部分について QGP 方程式にも適応できる Godunov 法に基づいたリーマンソルバーを（リーマン解に基づくアルゴリズム）を開発した。この新しく開発したアルゴリズムと既存のプログラムの結果を比較したのが図1である。

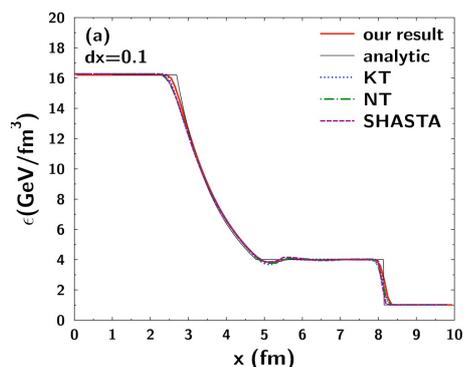


図1：ある時間ステップ後のエネルギー密度の分布の様子。

図1は左側に高エネルギー密度部分、右側に低エネルギー密度部分を用意し、ある時間ステップ後のエネルギー密度分布の様子を示す。細い線が解析解である。実線が我々の開発したアルゴリズムを示し、その他の線が他のアルゴリズムを示す。KT、NT、SHASTA は高エネルギー重イオン衝突実験の解析に良く使用されている。解析解からのずれが数値粘性を示す。数値粘性は数値計算の安定化のために入れる必要があるものではあるが、多く入れすぎると解がなまってしまい、解析解とのずれとして現れる。ここで我々の結果が最も解析解に近いことが示された。ここで重要なのは数値計算に当たり同じ時間ステップと同じ大きさの空間サイズを取ることである。もちろん十分に細かい時間ステップや空間サイズの計算では解析解に近づく。ここで重要なのは高エネルギー重イオン衝突の解析で現実的な時間ステップと空間サイズ

を取ることである。ここで取った $dx=0.1\text{fm}$ というのは現在の計算機の性能から言って取りうる最小の空間サイズと言って良い。ここで数値粘性において改良が見られたことは、高エネルギー重イオン衝突実験の実験解析に重要であることがわかる。

さらに我々はアルゴリズムに存在する数値粘性の評価方法を提示した。数値粘性の評価は先に示した衝撃波がある場合でなく音波などなめらかな解が存在するところで評価する必要がある。図2は粘性に対するL1

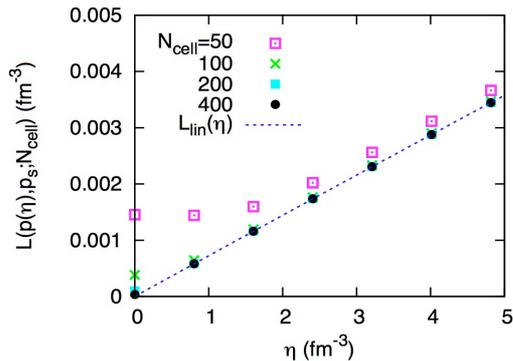


図2:L1ノルムの粘性 η に対する振舞。

ノルムの振舞を示している。ここでわかるようにグリッド数が少ない方が数値粘性の存在により点線からのずれが大きく出ていることがわかる。これにより見たい物理のスケール、粘性の大きさにより十分に小さな空間サイズをとらなければ、実際の粘性は数値粘性に埋もれてしまい、正しく評価できないことがわかる。我々のアルゴリズムでは0.2 fmより小さくとれば高次方位角異方性の解析に十分であることがわかった。現在この結果をもとに高エネルギー重イオン衝突実験の解析を進行中である。

第一原理における解析ではエキゾチックハドロンに注目した。特にスカラー中間子に注目した解析を行った。スカラー中間子は単純なクォーク模型では記述できない今興味を持たれている粒子の一つである。我々は特に4体クォークといったエキゾチックハドロンとしてスカラー中間子が存在するかどうかについて調べた。ここでの計算では4体としてのスカラー中間子を見出すことはできなかった。それは我々の計算がクエンチ計算であり、スカラー中間子の評価では重要な非連結グラフを無視したということにも起因する。そのため現在フェルミオンの効果、非連結グラフを取入れた計算を続行中である。さらに有限温度での計算も行い量子色力学相図の理解をハドロンの構造、性質から解析していく予定である。

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9件)

- ① M.Wakayama and C. Nonaka, “Analysis of the scalar mesons on the Lattice”, PoS (Proceedings of Science), Lattice 2012, 査読なし, 276巻, 2012, 1-7
- ② C.Nonaka and M.Asakawa, “Modeling a Realistic Dynamical Model for High Energy Heavy Ion Collisions”, 査読有り, 01A208巻, 2012, 1-31
- ③ R.J.Fries and C.Nonaka, “Evaluating Results from the Relativistic Heavy Ion Collider with Perturbative QCD and Hydrodynamics”, Progress in Particle and Nuclear Physics, 査読有り, Progress of Particle and Nuclear Physics 66巻, 2011年, 607-660
- ④ M.Harada, C.Nonaka and T.Yamaoka, “Masses of vector bosons in two-color dense QCD based on the hidden local symmetry.”, Physical Review D, 査読有り, 81巻, 2010年, 096003

[学会発表] (計16件)

- ① “Study of higher harmonics based on (3+1)-d relativistic viscous hydrodynamics”, The 4th Asian Triangle Heavy Ion Conference, 野中千穂 (ATHIC2012), 2012年11月, Pusan, Korea
- ② 「高エネルギー原子核衝突実験の最新結果 -国際会議QM2012から」、熱場の量子論とその応用、2012年8月、京都大学基礎物理学研究所、野中千穂
- ③ “Study of higher harmonics based on (3+1)-d relativistic viscous hydrodynamics”, Quark Matter 2012, 2012年8月, Washington D.C., USA, 野中千穂
- ④ 「相対論的粘性流体による生成粒子高次方位角異方性の研究」、日本物理学会第68回年次大会、2013年3月、広島大学、野中千穂
- ⑤ “Charmonium spectral functions in quark-gluon plasma from lattice QCD with large spatial volume”, Quark Matter 2011, 2011年5月, Annecy, フランス, 野中千穂
- ⑥ “The QCD Phase Diagram in Relativistic Heavy Ion Collisions”, KMI Inauguration Conference, 2011年10月, 名古屋大学、野中千穂
- ⑦ “Fragmentation and Recombination for Exotics in Heavy Ion Collisions”, ExHIC10, 2010年5月, 京都大学基礎物理学研究所(京都)、野中千穂
- ⑧ “The QCD Phase Diagram in Heavy Ion Collisions”, From Strong Field to Colorful Matter, 2010年10月, アシュビル (米国)、野中千穂
- ⑨ 「高エネルギー重イオン衝突の物理—RHIC か

ら LHC へ」、新潟冬の研究会 2011、2011 年 1 月 6 日、湯沢東映ホテル（新潟）、野中千穂

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

なし

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

野中 千穂 (NONAKA CHIHO)

名古屋大学・理学研究科・准教授

研究者番号：10432238

(2) 研究分担者なし

(3) 連携研究者なし