

平成21年 4月30日現在

研究種目：若手研究(B)
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19740136
 研究課題名（和文） QCD相転移機構・QGP状態の多角的な研究
 —RHIC・LHC物理解
 研究課題名（英文） Study of QCD phase transition and QGP state -RHIC and LHC physics

研究代表者
 野中 千穂 (Chiho Nonaka)
 名古屋大学・大学院理学研究科・助教
 研究者番号：10432238

研究成果の概要：重イオン衝突物理の実験理解を視野に入れながら、第一原理である量子色力学と現象論をもとに、量子色力学相転移と相転移に伴う新しい物質相（クォーク・グルーオンプラズマ相）の状態を明らかにすることを目標にした。ここではジェット（高横運動量を持つ粒子）と重イオン衝突後に生じた高温・高密度の媒質との相互作用、クォーク・グルーオン・プラズマ相生成の指標となる物理量についての成果を得た。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,000,000	0	2,000,000
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
総計	3,300,000	390,000	3,690,000

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：核物理

1. 研究開始当初の背景

クォーク・グルーオンプラズマ (QGP) 相、ハドロン相の相転移機構と QGP 状態の理解は素粒子・原子核理論における重要な課題である。QGP 状態はクォークとグルーオンの力学を記述する理論、量子色力学 (QCD) の漸近的自由性によって予想された新しい物質相である。漸近的自由性の発見は 2004 年のノーベル物理学賞の受賞対象となった。実験では 2000 年よりブルックヘブン国立研究所で衝突型重イオン加速器 Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) が稼動し、数多くの実験結果が得られている。理論では、研究代表

者たちによる相対論的流体模型、ハドロン化のメカニズムを記述するリコンビネーション模型の研究から RHIC の実験結果は強相関 QGP 状態を生成していることを強く示唆していることが定着した。これは従来の自由ガス QGP 状態を覆すまったく新しい QGP 像である。さらに近い将来ヨーロッパ原子核研究機構 (CERN) の大型ハドロン加速器 (LHC) で鉛による重イオン衝突実験が始まる。これは現在稼動している RHIC の 20 倍以上もエネルギーが高い。この中で実験結果を理解し、第一原理である QCD と実験結果を結びつけることのできる信頼のおける現象論が期待されてい

る。

一方、第一原理である QCD からの研究は現象論の理論基盤を与える。カラー超伝導相などの QGP 相以外の相の存在の可能性も示され、数年前に比べ格段に豊かな QCD 相転移機構の描像が定着しつつある。しかしながら低温度・高密度領域についてはまだ確定していないことも多く、新たな研究フロンティアである。クォークとグルーオンの閉じ込め・非閉じ込め相転移機構に加え、QCD カイラル相転移機構にも注目する。通常のハドロン相ではカイラル対称性が破れ、その結果豊かなハドロン構造が存在している。カイラル相転移機構、有限温度・密度でのハドロンの性質を視野に入れ、格子 QCD 計算により研究代表者たちはスカラー中間子の性質を調べた。特にシグマ中間子の存在の確立、その構造の研究に貢献した。

QGP 状態は宇宙誕生 100 万分の 1 秒後に存在したと考えられるため、本研究は宇宙論、特に宇宙創生と進化の理解へも大きなインパクトを与える。

2. 研究の目的

(1) 統一されたモデルの構築 (相対論的流体モデルの拡張)、(2) 実験結果の定量的解析、(3) QGP 状態の確定・QGP 物性を知ることのできる物理量の提案 (4) QCD 相転移機構の現象論と QCD 基礎論からの研究を軸に進めていく。LHC の重イオン衝突実験の結果が出始め、本格的な実験解析が始まるまでの現象論と QCD 基礎論からの物理提言を目的にする。

3. 研究の方法

(1). 統一されたモデルの構築 (相対論的流体モデルの拡張)、(2). 実験結果の定量的解析、(3). QGP 状態の確定・QGP 物性を知ることのできる物理量の提案、(4). QCD 相転移機構の現象論と QCD 基礎論からの研究

①国内外の共同研究者と直接議論することができる機会作りに努める。共同研究を深めるための小規模な議論中心の研究会を開催する。QGP 状態・QCD 相転移機構の研究は世界的な規模で遂行され、新しい実験結果が目を見張るスピードで提出されている。それに伴い大規模な国際会議が日本を始め世界各地で数多く開催されている。このような国際会議にも積極的に参加する。それは新しい実験結果収集、実験研究者との情報交換のみに留まらず、申請者自身の研究成果を基にした現象論からの実験への物理提言の場になる。

【平成 19 年度】1. 統一されたモデルの構築 (相対論的流体モデルの拡張) と 4. QCD 相転移機構の現象論と QCD 基礎論からの研究を中心に進める。RHIC・LHC のような高エネルギー衝突実験になると、衝突後に数多くの粒

子が発生する。その状況を的確に記述し、定量的かつ現実的な数値計算を行っていくためには大規模な数値計算が必要である。

と熱平衡状態の物理に対応する相対論的モデル (低横運動量領域) を融合する。デューク大学の Bass 教授の持つ PCM との融合を進めている。4. (a) ベクター中間子・スカラー中間子の媒質中の振舞の詳細な解析: ベクター中間子の有限密度中の質量変化を詳細に調べる。

【平成 20 年度】2. 実験結果の定量的解析、3. QGP 状態の確定・QGP 物性を知ることのできる物理量の提案、4. QCD 相転移機構の現象論と QCD 基礎論からの研究を中心に進める。前年度の成果の確認、共同研究活性化のために議論中心の研究会を開催する。さらに前年度で完成させた統合されたモデルを用い、QGP 状態をよく反映している物理量を探り、QGP 存在確定を目指す。

4. 研究成果

(1) **【QCD 相図をあきらかにできる物理量の提案】** QCD 臨界点 (QCD 相境界上の 1 次相転移の終点) の発見が QCD 相転移現象の一つとして注目されている。しかしながら、現在のところ格子 QCD や有効理論といった理論のみでは QCD 臨界点の相図上の位置やその存在すら最終的な結論を得ることが難しい。そのため、重イオン衝突実験とその実験解釈のための現象論に注目が集まっている。ここで申請者たちは QCD 臨界点の特徴をうまく取り入れた状態方程式を構築した。その状態方程式には QCD 臨界点へ等エントロピー線が引き寄せられるという興味深い特徴がある。この特徴に注目し、QCD 臨界点発見の指標となる物理量として反陽子と陽子の比の横速度に対する振舞いを提唱した (図 1)。現在多くの実験家たちに QCD 臨界点発見のわかりやすく有望な測定量として注目されている。この結果はより現実的なモデル (3D Hydro + UrQMD Model) による定量的な研究の礎となった。

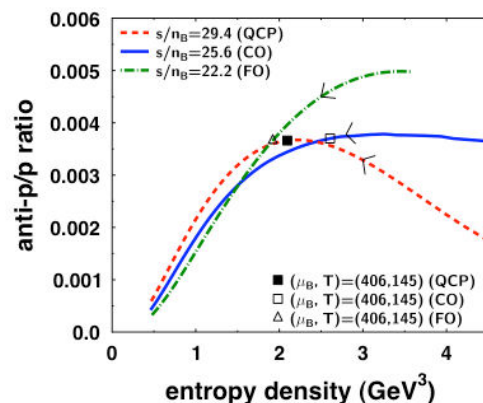


図 1: 反陽子と陽子の比のエントロピー密度

に対する振舞い。QCP: QCD 臨界点を考慮。CO: クロスオーバー相転移 (QCD 臨界点なし) FO: 1 次相転移 (QCD 臨界点なし) 反陽子と陽子の比は QCD 臨界点が存在するときのみ、エントロピー密度が小さくなるにつれて増加している (各線上の矢印方向にみて、横軸のエントロピー密度が 4 から 2 GeV³ (■) までの点線の振舞い)。

(2) 【相対論的流体模型】

①衝突後に生じた高温・高密度物質とジェット (高横運動量粒子) の相互作用に注目し、一連の研究を行った。RHIC 実験が稼働してすぐに、パイ中間子の原子核増大因子が高横運動量領域で抑制されることが発見され、この実験事実を説明したのが、パートンの媒質中におけるエネルギー損失であった。これは相対論的流体模型とリコンビネーション模型の成功とともに、RHIC で強結合 QGP 状態が生成したことを強く示唆するものである。しかし強結合系におけるジェットエネルギー機構にはいくつか提案されており、そのどれが RHIC 実験において現実的であるのか結論づけられていなかった。そこで、同じ媒質 (相対論的流体模型) を用い、現在提案されている代表的な 3 つのジェットエネルギー損失機構 (BDMP5-Z/ASW, HT, AMY) の比較を行った。いずれのジェットエネルギー損失機構でもパイ中間子の原子核増大因子の横運動量依存性を説明することが可能であった。さらなる違いを確認するには、原子核増大因子の方位角依存性、衝突係数依存性といった、より詳細な解析、実験結果比較が必要であることがわかった。さらに大きな驚きであったのは、それら 3 つの模型で、パートンの媒質中でのエネルギー損失の指標となる輸送係数 (\hat{q}) の値に大きな差があることがわかった。これは現在最近の実験結果で話題となっているが、まだ定量的な解析がされていない、より複雑なジェットと媒質の相互作用 (リッジ構造、マッハコーン、3 粒子相関など) の研究へと発展している。

②ハドロン化を記述するリコンビネーション模型を相対論的流体模型に取り入れ、相対論的流体模型をより現実的にし、またより高い横運動量への適用を可能にした。

(3) 【QCD 基礎論からの研究】

①有限密度 QCD: SU(2) カラーのもとでのハドロンスペクトル、特に先行研究で興味深い振る舞いをしたベクター中間に注目し、最大エントロピー法を使って詳細な測定を行っている。

②非等方格子を用い、大きな格子サイズ (32x32x32xNt) 上で有限運動量を考慮に入れたチャーモニウムのスペクトルを現在測

定中である。

(4) 【研究会、会議などの開催】

①2009 年 3 月 2 日から 4 日に名古屋大学で「ミニワークショップ” photons and leptons in hot/dense QCD” を開催した (主となる補助は名古屋大学グローバル COE プログラム「宇宙基礎原理の探求」より。) このミニワークショップは米国・ミシガン州立大学の Scott Pratt 教授、カナダ・マクギル大学の Sangyong Jeon 准教授をはじめとして、国内の若手研究者を中心に開催された。特に粘性効果に注目が集まり、Pratt 氏、Jeon 氏と実りある議論ができた。それは現在新しい研究へと発展している。

②大阪大学 (浅川教授) 広島大学 (志垣准教授) と共に年数回程度の定例ミーティングを開催した。ここでは毎回一つのテーマをとり上げ、それについて理論、実験からの講演を設定し、じっくり議論するという形式をとった。これによってそのときどきで注目を集めた事柄について理論と実験の両面から吟味を行った。これは最新の理論、実験をより深く検討できる貴重な機会となった。それと同時に多数参加した各大学の学生が世界最先端の研究の触れる良い機会にもなり、研究への強い動機づけを与えることができたと考えられる。

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 5 件)

①Steffen A. Bass, Charles Gale, Abhijit Majumder, Chiho Nonaka, Guang-You Qin, Thorsten Renk, and Jörg Ruppert, Systematic comparison of jet energy-loss schemes in a realistic hydrodynamic medium, Physical Review C, 79, 024901:1-14, 2009 年 2 月、査読有

②M. Asakawa, S.A. Bass, Berndt Muller, C. Nonaka, Transverse Velocity Dependence of the Proton-Antiproton Ratio as a Signature of the QCD Critical Point, Physical Review Letters, 101, 122303:1-4, 2008 年 9 月、査読有

③Hiroaki Wada, Teiji Kunihiro, Shin Muroya, Atsushi Nakamura, Chiho Nonaka, Motoo Sekiguchi, Lattice Study of Low-lying Nonet Scalar Mesons in Quenched Approximation, Physics Letters B, 652, 250-254, 2008 年 9 月、査読有

④Guang-You Qin, Jorg Ruppert, Simon Turbide, Charles Gale, Chiho Nonaka, Steffen A. Bass, Radiative jet energy loss in a three-dimensional hydrodynamical

medium and high p_T azimuthal asymmetry of π_0 suppression at mid and forward rapidity in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV, Physical Review C, 76, 064907:1-9, 2007年12月、査読有

⑤A. Majumder, C. Nonaka, S.A. Bass, Jet modification in three dimensional fluid dynamics at next-to-leading twist, Physical Review C, 76, 041902(R):1-5, 2007年10月、査読有

〔学会発表〕(計21件)

①野中千穂、Signals of the QCD Critical Point in Hydrodynamic Evolution, Quark Matter 2009, 2009年3月31日、ノックスビル、米国

②野中千穂、RHIC physics, hydrodynamic simulations with the critical point, Non-equilibrium quantum field theories and dynamic critical phenomena, 2009年3月19日、京都

③野中千穂、The QCD Phase Structure in Heavy Ion Collisions, Nagoya mini-workshop on “Photons and leptons in Hot/Dense QCD”, 2009年3月4日、名古屋

④野中千穂、重イオン衝突実験で探る QCD 相図、九大若手研究会「量子力学の相構造研究の現状と展望」、2008年12月26日、福岡

⑤野中千穂、Radiative jet energy loss in a 3-D hydrodynamical medium, Tamura symposium, 2008年11月20日、テキサス、米国

⑥野中千穂、Hydrodynamic Evolution of Bulk QCD Matter with the QCD Critical Point, RANP2008, 2008年11月6日、リオデジャネイロ、ブラジル

⑦野中千穂、Hydrodynamic Expansion with the QCD Critical Point, 熱場の量子論とその応用, 2008年9月3日、京都

⑧野中千穂、Hydrodynamic Expansion with the QCD Critical Point in Heavy Ion Collisions, The QCD Critical Point, 2008年8月12日、INT, シアトル、米国

⑨野中千穂、生成粒子の集団運動流(フロー)からみる高エネルギー原子核衝突、第3回 Heavy Ion Pub, 2008年6月16日、名古屋

⑩野中千穂、3D Hydro + UrQMD Model with QCD Critical Point, 日本物理学会第63回年次大会, 2008年3月25日、大阪

⑪野中千穂、Dynamics of Bulk QCD Matter in Heavy Ion Collisions, New Frontiers in QCD 2008, 2008年2月20日、京都

⑫野中千穂、流体模型の成功から QCD 相図理解へ、日本物理学会、2008年9月22日、

山形

⑬野中千穂、3D Hydro + UrQMD Model with QCD Critical Point, Quark Matter 2008, 2008年2月8日、ジャイプール、インド

⑭野中千穂、Hard and Soft Probe from 3D Hydro + UrQMD Approach, APCTP workshop, 2007年12月13日、ポハン、韓国

⑮野中千穂、Hydrodynamics in Heavy Ion Collisions, APCTP workshop, 2007年12月11日、ポハン、韓国

⑯野中千穂、Jet Quenching in 3D Hydro + UrQMD Model at RHIC, RCNP 研究会, 2007年10月30日、大阪

⑰野中千穂、Bulk QCD Dynamics in Relativistic Heavy Ion Collisions, 日本物理学会第62回年次大会, 2007年9月24日、北海道

⑱野中千穂、Bulk QCD Dynamics in Relativistic Heavy Ion Collisions, 熱場の量子論とその応用, 2007年9月6日、京都

⑲野中千穂、Latest Results from 3D Hydro plus UrQMD, Workshop on Particle Correlations and Femtoscopy (WCPF2007), 2007年8月1日、サンタローザ、米国

⑳野中千穂、Phenomenological Approach to RHIC and LHC Physics, Quantum Field Theory and Gravity(QFTG'07) 2007年7月3日、トムスク、ロシア

21野中千穂、The QCD critical point and its consequences in heavy ion collisions, Nagoya Mini-Workshop

“Chiral Symmetry in hot and/or dense matter” 2007年6月26日、名古屋

〔その他〕

ホームページ等

<http://hken.phys.nagoya-u.ac.jp/~nonaka/index-j.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

野中 千穂 (Chiho Nonaka)

名古屋大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号：10432238