

## 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 6日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21540257

研究課題名（和文）クォーク・グルーオンプラズマの時空発展とシグナル

研究課題名（英文）Space-time evolution of the Quark-Gluon Plasma and its signal

研究代表者

松井哲男（Tetsuo Matsui）

東京大学・大学院総合文化研究科・教授

研究者番号：00252528

研究成果の概要（和文）：

超高エネルギーの原子核衝突におけるクォーク・グルーオンプラズマの時空発展と生成のシグナルを、 $\pi$ 中間子 HBT 2 粒子干渉法における終状態相互作用の平均場による効果と、クォークonium生成の初期過程について分析した。また付随した研究として、ランダム行列模型を用いた有限密度領域の QCD 相図の研究、PNJL 模型によってクォーク・ハドロン相転移の記述をおこなった。

研究成果の概要（英文）：

We studied the space-time evolution of the quark-gluon plasma and related signals in ultra-relativistic nucleus-nucleus collisions, focusing on the role of the mesonic mean field in the HBT interferometry of pions and on the early processes of quarkonium formations. Related works have been done also on the QCD phase with the random matrix model and the quark-hadron transition in the PNJL model.

交付決定額

（金額単位：円）

|         | 直接経費      | 間接経費      | 合計        |
|---------|-----------|-----------|-----------|
| 2009 年度 | 1,800,000 | 540,000   | 2,340,000 |
| 2010 年度 | 900,000   | 270,000   | 1,170,000 |
| 2011 年度 | 900,000   | 270,000   | 1,170,000 |
| 年度      |           |           |           |
| 年度      |           |           |           |
| 総計      | 3,600,000 | 1,080,000 | 4,680,000 |

研究分野：数物経過学

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：クォーク・グルーオンプラズマ

## 1. 研究開始当初の背景

この研究計画が始まった時点では、2000年から始まった米国のブルックヘブン国立研究所の相対論的重イオンコライダー

（RHIC）を使った実験は、既に8年を迎え、2010年からは更に1桁高いエネルギーでの原子核衝突実験が CERN の LHC で始まる前夜であった。

RHIC や LHC での原子核衝突実験の基本的な狙いは、高エネルギーで原子核を衝突させる事により瞬間的に超高温・高密度の状態をつくり、そのような極限状態での物質の性質を解明する事にある。素粒子の標準模型によれば、原子核を構成する核子や中間子は、クォークとよばれる更に基本的な素粒子からできた複合系であり、クォークの相互作用は量子電気力学 (QED) を拡張した非可換ゲージ理論、量子色力学 (QCD) によって記述される。QCD の基本自由度であるクォークやグルーオン (色ゲージ場) はハドロンの中に閉じ込められていて通常の核現象では直接関与しないが、QCD の「漸近的自由」という性質から、高温・高密度の極限状態では、これらの自由度が顕在化した物質状態、所謂「クォーク・グルーオンプラズマ」が生成されると考えられている。クォーク・グルーオンプラズマは嘗て初期宇宙全体を充満していた原始物質で、それを再生しその未知の性質を解明することは、「物質の起源」を理解する上で大きな意義がある。また、クォーク・グルーオンプラズマから通常のハドロンへの転化の実証的研究は、「クォークの閉じ込め」や「カイラル対称性の自発的破れ」の機構など、QCD のまだよく理解されていない部分に新たな知見をもたらすことが期待される。

RHIC の実験でこれまで主に解析された実験データは、収量の多いハドロンに関係した観測量 (多重度とそのラピディティ分布、横方向の運動量分布、粒子の生成比、粒子相関、揺らぎ、等) で、その分析結果から、以前の (低エネルギーの) SPS 実験ではみられなかった新しい特徴が見つかっている。その一つは、強い異方性をもったハドロンの集団的流れが観測されたことで、これは生成された物質が急速に局所平衡に達し、流体的振る舞いをしている事を示唆しており、実際、流体

模型の数値シミュレーションでよく再現できることが示されている。もう一つの重要な発見は、「ハドロンジェット」の抑圧で、これは親のクォークやグルーオンが物質中でエネルギーを失ったためと考えられる。これは、どちらも強く相互作用する物質が生成されることを意味している。

この物質は「強結合クォーク・グルーオンプラズマ」ではないかと考えられているが、その名の通り「プラズマ」としての性質をもっているかどうかを判定するには、「プラズマ」としての性質をより良く反映する観測量をみる必要がある。最近の実験の解析からはこの問題に手がかりを与える注目すべきいくつかの結果が得られてきている。その一つは、 $J/\psi$  と呼ばれる重いチャームクォークとその反粒子からできた結合状態の生成の抑圧が観測された事である。この現象は、クォーク・グルーオンプラズマの遮蔽効果の現れのシグナルとして本研究代表者と H. Satz 氏が 1986 年に予言していた現象であるが、CERN の陽子シンクロトロン (SPS) による実験で既に観測されて注目されていた。RHIC の実験でも最近の解析で同様な効果の存在が確認された。実験でわかった  $J/\psi$  の生成率の抑圧のパターンの詳細 (多重度や衝突係数との相関、ラピディティ・横運動量依存性等) がプラズマ生成の効果として説明 RHIC の実験からは、生成された物質が流体的に膨張している形跡や、 $J/\psi$  粒子の生成抑圧、ジェットの強い吸収等が観測され、これらはクォーク・グルーオンプラズマ生成の兆候と考えられていたが、「HBT パズル」のように流体模型では説明出来ない効果も観測され、 $J/\psi$  粒子のエネルギー依存性など、観測結果からクォーク・グルーオンプラズマ生成を結論づけるためには、更に理論的に立ち入った研究が求められていた。

## 2. 研究の目的

本研究の主な目的は、これらの問題に焦点をあてて、これまで行ってきたクォーク・グルーオンプラズマの時空発展の理論的記述にかんする研究をさらに発展させ、RHICの実験においてクォーク・グルーオンプラズマが生成できたことを更に理論的に基礎づけることであった。

## 3. 研究の方法

「HBT パズル」の問題は、最近導入された新しいデータ解析の方法によって再検討が行われているが、終状態相互作用によって同種粒子相関がどのような変更をうけるかは、実験結果の解釈のために依然重要な問題である。この問題を密度行列を用いて量子論的粒子相関の記述を行い、凍結過程でのハドロン間の終状態相互作用が平均場を通してHBT干渉効果で問題となる2同種粒子相関にどのように効くか準古典近似で計算する。

クォーク・グルーオンプラズマのハドロン化の過程やその後の凍結過程の記述において、カイラル対称性の自発的破れの効果がどのように効いてくるかという問題は、重要な研究課題である。代表者は最近の研究で、カイラル相転移を平均場近似で記述する方法を、膨張によって粒子数とその運動量分布が凍結する非平衡過程まで記述出来るように拡張する量子運動論を作ったが、実際この運動論で現実的な膨張の効果を考慮して時間発展を記述し、実験結果が説明出来るかどうかは今後に残された重要な課題である。特に、カイラル相転移に伴って放出される自由エネルギーが観測されているハド

ロンの集団流の効果をどの程度説明出来るかは、非常に興味ある問題である。そのため、これまでの研究で導出したランダウ・ブラソフ型の量子運動論方程式の1次元膨張解を構成する。

RHICの実験で観測された  $J/\psi$  抑圧のパターンをプラズマ生成によって説明できるかどうか詳しく検討するためには、 $J/\psi$  生成過程の理解が重要である。この点に関してはまだ良く理解されておらず、フェルミ国立研究所の Tevatron を使った 2 TeV での陽子陽子衝突による  $J/\psi$  生成の実験データが存在するが、その理論的理解はまだ十分でなかった。特に単なる現象的モデルによる解析では、重イオン衝突におけるクォーク・グルーオンプラズマのプロブとして使うことはできず、生成過程の微視的な理解を目指す必要がある。この研究では、比較的大きい横運動量をもった  $J/\psi$  粒子の生成に効くと思われる、 $gg \rightarrow J/\psi + g$  の素過程をカラー一重項モデルで記述する。特に  $J/\psi$  の内部波動関数の情報が生成過程にどのように現れるかをみる。

また、RHICの実験で見つかったバリオンの異常生成を説明するのに、「クォーク再結合モデル」のようにいきなり3つのクォークが結合するのではなく、バリオン生成の過程でクォークの対相関がどのように効くかという事も興味ある問題である。クォーク対（ダイクォーク）はもう一つのクォークとの結合によって容易にバリオンをつくることができるからである。クォーク対相関は、低温のクォーク物質中でのカラー超伝導の発現の問題とも絡んで興味を持たれており、核物質中での

クォーク閉じ込めの機構とも関係する重要な問題である。

これらの研究は、量子多体系の問題としては、レーザーによって捕獲された極低温の原子気体におけるボース凝縮やBCS状態の研究と、物理的概念や理論的手法で共通した点が多い。本研究では、このような量子多体系に共通した問題を、分野間の研究交流を行いつつ、広く統一的な視点から理解する努力をしていく。

#### 4. 研究成果

##### 1) HBTの平均場の効果 (服部、松井)

Hanbury-Brown-Twissの2同種粒子干渉法を応用した $2\pi$ 中間子の運動量相関に $\pi$ 中間子とその発生源であるハドロン物質との終状態相互作用を平均場の効果として準古典的に取り入れる計算を行った。その結果通常用いられている方法で得られる $\pi$ 中間子発生源の形状が、平均場の効果で歪むことが示された。この研究の動機付けとなった「HBTパズル」がこの効果に依って説明できるかどうかは、膨張の効果等、まだ取り入れられていない効果を考慮する必要がある。この研究によって服部は2010年3月に理学系研究科より理学博士の学位を取得した。

##### 2) 膨張するハドロン物質でのカイラル相転移の記述 (大西、松井)

カイラル相転移を記述する松井・松尾の量子運動論を使って膨張するハドロン物質の記述を試みた。1次元ローレンツ不変な膨張解の構成するため、この方程式の2時間形式への拡張を行い、その数値解を構成した。この研究によって大西は2009年3月に理学修士の学位を取得し、その成果は2009年10月にハワイで開かれた日米合同物理学会等で

大西によって報告された。

##### 3) $J/\psi$ 粒子生成のカラー1重項模型による記述 (渡邊、松井)

重イオン衝突で見つかった $J/\psi$ 粒子の生成抑圧のパターンを理解するための準備研究として、 $J/\psi$ 粒子の生成機構の研究をカラー1重項模型を用いて行った。QCDの最低次のボックスダイアグラムに $J/\psi$ の束縛波動関数を用いて横方向運動量やスピン偏極などに波動関数の影響がどのように現れるか調べた。渡邊はこの研究で2011年3月に学術修士の学位を取得し、その研究の成果を2回学会報告した。

##### 4) カラー凝縮体模型による粒子生成の記述 (藤井、渡邊)

前述の研究の発展として、藤井(分担研究者)と渡邊は陽子原子核衝突における $J/\psi$ 粒子生成の初期過程にQCDのグルーオン非線形相互作用がどのように効くか、カラーグラス凝縮体模型を使って計算した。この模型はグルーオン分布関数の横運動量分布を変化させ、それがグルーオン融合反応で生成される $J/\psi$ 粒子の横運動量分布にも反映することが示された。この研究の成果は渡邊によって学会発表され、最近論文として投稿された。

##### 5) PNJL模型によるクォーク・ハドロン相転移の記述 (山崎、松井)

クォーク・グルーオンプラズマの時間発展の記述にはカイラル相転移だけでなくクォーク閉じ込めを取り込む必要があるが、この方向での研究の発展に大きな成果が得られた。カイラル対称性の自発的破れを記述する有効理論である南部・ジュナラシーニョ模型に閉じ込めの効果を取り込んだPNJL模型を用いて、クォーク・グルーオンプラズマからハドロンガスへの自由度の変換を連続的に

記述する方法を経路積分法を用いて構成した。この研究成果をもとに、山崎は2012年3月に理学修士を取得し、その成果を学会や国際研究集会（エリーチェ）で発表し、最近 Nuclear Physics A 誌に発表した。

#### 6) ランダム行列模型による QCD 相図の記述 (佐野、藤井)

ランダム行列模型は QCD 相図の有限温度・有限密度の領域を広く記述する有効理論としてこれまで研究されてきたが、ライラル相転移を記述する際に障害になっていた不安定性の問題解決する統計的方法を佐野、藤井の共同研究で開発した。この研究は、その後、3フレーバーへの拡張や、カラー超伝導状態を記述するなどの拡張を行い、それらの研究成果によって佐野は2012年3月に理学博士の学位を取得した。この研究の成果は Physical Review D 誌に発表された。

#### 7) その他の関連する成果

その他、この研究計画に関連して、研究府代表者の松井の指導のもとで、2名の学生、西山陽大と丹治直人が、クォーク・グルーオンプラズマ生成の非平衡過程に関する研究で、それぞれ2010年3月と2011年3月に学術学位と理学博士の学位を取得したことを付記する。

#### 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6件)

1) K. Hattori and T. Matsui, "Distortion of HBT images by meson clouds", Prog. Theor. Phys.122 (2009) 1301L.(査読付)

2) 松井哲男, 「多重発生から原子核衝突へ：流体模型の歴史」, 原子核研究 54 Suppl.3

(2010) 3.

3) H. Fujii and T. Sano, "A chiral random matrix model with 2+1 flavors at finite temperature and density", Phys. Rev. D81 (2010), 037502.(査読付)

4) H. Fujii and T. Sano, "Random matrix model at nonzero chemical potentials with anomaly effects", Phys. Rev. D83 (2011), 014005.(査読付)

5) T. Matsui, "Deciphering the Measured Ratios of Iodine-131 to Cesium-137 at the Fukushima Reactors", Prog. Theor. Phys. 126 (2011) 1167L (査読付)

6) H. Fujii, K. Itakura, Y. Kitadono, Y. Nara "Forward particle productions at RHIC and the LHC from CGC within local rcBK evolution", Journal of Physics G 38 (2011), 124125. (Proceeding of Quar Matter 2011)

[学会発表] (計15件)

1) 服部恒一、松井哲男、"Distortion of the HBT images by meson clouds", 第3回日米物理学会合同核物理分科会、Hilton Waikoloa Village、2009年10月16日

2) 大西由晃、松井哲男、"Freeze-out dynamics of expanding quantum meson cloud", 第3回日米物理学会合同核物理分科会、Hilton Waikoloa Village、2009年10月16日

3) 藤井宏次、佐野崇、"2+1 flavor QCD phase structure at finite temperature and density in chiral random matrix

models' (DB7), 第3回日米物理学会合同核物理分科会、Hilton Waikoloa Village、2009年10月15日

4) 服部恒一、松井哲男、"Distortion of the HBT image in semi-classical theory", 日本物理学会 2009 年次大会、立教大学、3 月

5) 大西由晃、松井哲男、「相互作用する量子メソン気体のフリーズアウト過程における膨張」, 日本物理学会 2010 年次大会、岡山大学、2010 年 3 月

6) 佐野崇、藤井宏次、「ランダム行列模型による有限温度密度 QCD 相構造の解析」日本物理学会 2010 年次大会、岡山大学、2010 年 3 月 21 日

7) 服部恒一、松井哲男、「Effects of the mean field interaction in the freeze-out stage」, 日本物理学会 2010 年秋期大会、九州工業大学、2010 年 9 月

8) 松井哲男、「LHC 原子核衝突実験への期待：歴史を振り返って」日本物理学会 2011 年秋季大会招待講演、弘前大学、2011 年 9 月 16 日

9) 渡邊和宏、松井哲男、「 $e^-e^+$ 衝突での true-muonium 生成プロセスにおける束縛状態の記述」, 日本物理学会 2011 年秋季大会、弘前大学、2011 年 9 月 16 日

10) 佐野崇、藤井宏次、「ランダム行列模型による複素ランジュバン法の検討」(18aSF-12) 日本物理学会 2011 年秋季大会、弘前大、2011 年 9 月

11) 渡邊和宏、松井哲男、「グルーオン及び光子衝突による真空中での高横運動量  $J/\psi$  生

成」, 日本物理学会 2012 年次大会、関西学院大学、2012 年 3 月 24 日

12) 山崎加奈子、松井哲男、「メソン励起を取り込んだ PNJL 模型による状態方程式の計算」日本物理学会 2012 年次大会、関西学院大学、2012 年 3 月 25 日

13) 渡邊和宏、藤井宏次、「pA 衝突での重いクオーク対生成: rcBK 方程式が記述するパートン飽和効果」, 日本物理学会 2012 年秋季大会

14) K. Yamazaki and T. Matsui, "Equation of state of a meson gas from the PNJL model for interacting quarks", Erice Int. School of Nucl. Physics, 34th Course "Probing the Extremes of Matter with Heavy Ions", 2012 年 9 月 17 日

15) K. Watanabe and H. Fujii, "Quark pair productions in pA collisions from CGC with running coupling BK evolution", Pusan, Korea, ATHIC 2012 年 11 月 15 日

[図書] (計 1 件)

1) 松井哲男 (共著)、「高校生のための東大授業ライブ 純情編」(東大出版会、2010 年)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松井哲男 (MATSUI TETSUO)

東京大学・大学院総合文化研究科・教授  
研究者番号: 00252528

(2) 研究分担者

藤井宏次 (FUJII HIROTSUGU)

東京大学・大学院総合文化研究科・助教  
研究者番号: 10313173

(3) 連携研究者

なし