

平成 21 年 6 月 2 日現在

研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2007 -2008  
 課題番号：19540269  
 研究課題名（和文） 超高エネルギー原子核衝突の非平衡時空発展の理論的研究  
 研究課題名（英文） Theoretical study of the non-equilibrium space-time evolution of ultrarelativistic nucleus-nucleus collisions  
 研究代表者  
 氏名（アルファベット） 松井 哲男（Tetsuo Matsui）  
 所属機関・所属部局名・職名 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：

超相対論的原子核衝突で生成されるクォーク・グルーオンプラズマの非平衡時空発展の理論的記述に関する研究を行い、プラズマ生成過程におけるカラーゲージ場の古典論的・量子論的不安定性の記述、非平衡緩和過程の量子論的記述、カイラル相転移の量子場に基づく運動論的記述、終状態凍結過程での平均場の HBT 画像を歪める効果等で成果を得た。

## 交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2008 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

## 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：クォーク・グルーオンプラズマ

## 1. 研究開始当初の背景

2000年にブルックヘブン国立研究所で完成したRelativistic Heavy-Ion Collider (RHIC) を用いた原子核衝突実験が始まって既に6年が経過していた。RHICは金の原子核を核子当たり最大100GeVのエネルギーまで加速できるように設計された世界最高エネルギーの衝突型重イオン加速器で、この間、4つの実験グル

ープが独立の測定器を用いた実験を行い、多くのデータが取られ、その分析が行われてきた。

この実験の主な目的は、原子核衝突によって通常の核物質の密度の数十倍の高密度状態をつくり、原子核を構成する核子やハドロンの中に閉じ込められているクォークやグルーオンの自由度が顕在化した物質相、所謂「クォーク・グルーオンプラズマ」を生成し

その性質を調べることにあった。格子ゲージ理論の数値シミュレーションの結果によれば、平衡状態において温度が約150 MeV ( $1.5 \times 10^{12}$  K) のところで状態方程式の急激な変化がみられ、高温相のエネルギー密度はクォークやグルーオンの理想気体のそれに近い値をとる。このことから、RHICの実験でクォーク・グルーオンプラズマ相が実現されることが期待されている。ただ、実際に原子核衝突実験でクォーク・グルーオンプラズマができてもしそれは持続的な平衡状態になく、急激な膨張と冷却によって短時間で通常のハドロンの集団に崩壊するため、プラズマ生成の特徴的シグナルを観測量に見つけることが理論的にも実験的にも、依然、最も重要な課題となっている。

これまでに解析のされた実験データは主に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ー分布、横方向運動量分布、粒子生成比、粒子相関、揺らぎ、等）であるが、その分析結果からいくつかの原子核衝突に特徴的な効果が見つかっている。その一つは、非中心衝突でのビーム方向に垂直な面で180度の対称性をもった異方的なハドロンの集団流の観測である。このような効果は、以前CERNのSPSを用いて行われた実験でもその兆候があらわれていたが、RHICの実験でそれがはっきり観測された。この効果は、衝突後に生成された高密度物質が局所平衡に達し、初期条件を反映した流体的膨張をしたことを示唆している。この描像を支持するもう一つ見つけた効果は、5GeV/c以上の高い横方向運動量をもったハドロンの収量の減少である。このようなハドロンは、大角度散乱で作られた高い横方向運動量をもったパ

ートン（クォークやグルーオン）が先端粒子となってハドロジェット化する際につくられると考えられているが、パートンが高密度物質中を通過する際にエネルギーを失ったと考えられる。ジェットの吸収の効果は、SPSでは見られなかった新しい効果である。いずれも、原子核衝突によって強く相互作用する高密度物質ができたことを意味している。そのような高密度物質はクォーク・グルーオンプラズマとなっている可能性が高いが、それを結論するには、レプトンなどの観測量から、プラズマ遮蔽などのプラズマ特有の効果の発現の有無を更に確認する必要がある。最近発表された実験結果では、SPSと同程度のJ/psiの生成抑圧が報告されている。

ハドロンの観測量には予期されていなかった異常な現象もいくつか見つかっている。その一つは、横方向運動量が3~5GeVのところではバリオンとメソンの生成比が増大し1よりも大きくなるという現象である。通常のハドロンの衝突では、この比はたかだか0.1程度で、それはハドロンの生成が主に大角度散乱に取って生じたパートンのジェット化によると考えれば定性的に説明がつく。それよりも10倍以上この比が増加していることは、ハドロンの生成過程が原子核衝突とハドロン衝突とで定性的に異なることを示唆している。この現象を説明するのに流体模型やクォーク再結合模型をつかったアイデアが出されているが、この効果がクォーク・グルーオンプラズマの生成とそのハドロンのプロセスからどのように説明されるかは非常に興味ある問題である。もう一つまだ説明がつかない効果として、ハンブリーブラウン・ツイス効果（HBT効果）と呼ばれる同種粒子の波動関数の量子論的干渉効果を使って得られたハドロンの放出源の形状とサイズの問題がある。以前行われたSPSの実

験ではこの同種粒子相関の運動量依存性はハドロンの放出源の時空的形状にたいする直感的なイメージから定性的に説明される効果が観測されたが、RHICの実験から得られた結果は流体的膨張から予想されるものといっている。これは今のところ説明困難な謎である。これらのハドロンの観測量にみられる「異常」はいずれも、原子核衝突の終段階、つまりクォーク-グルーオンプラズマのハドロ化と凍結の過程の理解に重要な情報を提供していると考えられる。

## 2. 研究の目的

この研究の基本的な目的は、高エネルギー重イオン衝突実験で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」の非平衡時空発展を理論的に記述し、実験で観測される物理量にその生成のシグナルがどのように現われるかを解明することであった。

## 3. 研究の方法

### 1) クォーク-グルーオンプラズマ生成過程におけるパートン相互作用とその非線形効果 :

高エネルギーでの原子核衝突の初期過程は原子核を構成するパートン(クォーク、グルーオン)の散乱過程として記述できるが、そのパートンの分布は高いエネルギーで密度が高くなるにつれて非線形効果が重要となることが最近の実験や理論的研究からもわかってきた。その効果をとりいれて、反応の初期過程で特に重いクォークの生成がどのように原子核のサイズやエネルギーに依存するかを調べる。また、重いクォークと反粒子の対生成の後に、他のパートンとの始状

態相互作用によってチャーモニウムの吸収がどの程度起こるかを評価する。この研究は、クォーク・グルーオンプラズマ生成のシグナルとしてのチャーモニウム生成の生成抑圧(J/psi suppression)の定量的評価に特に重要である。

### 2) クォーク・グルーオンプラズマのハドロ化過程におけるダイクォーク相関とバリオン生成 :

高密度でプラズマ状態にあるクォークやグルーオンが膨張によってハドロ化する過程は、ハドロンの衝突や電子陽電子衝突によって生ずる高エネルギーパートンのハドロ化の過程(ジェット)とは違い、既に存在するパートンの多体的な相関が重要になる事が予想される。カラーが反三重項に組むクォーク対(ダイクォーク)相関は、低温クォーク物質におけるカラー超伝導やエキゾチックな多クォーク状態を説明するモデルでも注目されているが、そのような相関がハドロ化の際にバリオン(ダイクォーク・クォーク対)とメソン(クォーク・反クォーク対)の生成比にどのような影響を与えるか評価する。

### 3) カイラル相転移とハドロンの膨張・凍結 :

QCDはクォーク・グルーオンプラズマがハドロ化する過程でカイラル相転移とよばれる内部対称性の自発的破れが起こる事を予言している。衝突直後に生成される高密度状態のクォーク・グルーオン物質は流体的振る舞いを示す事がRHICの実験結果から示唆されているが、そのような強く相互作用する物質はハドロ化しやがて自由粒子の集団となって飛散する。この過程は局所平衡の破れに

よって粒子の運動量分布が凍結する非平衡過程であり、流体近似では記述できない。この過程をカイラル有効理論から導いたボルツマン・ブラソフ方程式によって記述する。とくに急激な「カイラル相転移」の際に放出される内部エネルギーが平均場をとおした粒子加速が実験的に見つかったハドロンの強い異方流にどの程度寄与するかを検討する。

#### 4) ハドロンの終状態相互作用と HBT 同種粒子相関 :

終状態の量子発展において平均場によって1粒子波動関数が歪曲することが予想されるが、それが同種粒子相関をどのように変えるか調べる。HBT 同種粒子相関における終状態相互作用のこれまでの研究では、流体模型などによって得られたハドロンの放出面の時空構造は考慮されてきたが、2粒子波動関数の干渉への終状態相互作用、特に平均場のもたらす効果はまだあまり研究されていない。2粒子振幅の位相が1体平均場によってどのように変更を受けるかがこの研究の新しい着眼点であった。

#### 4. 研究成果

2年間の短い期間の研究計画であり、エフォートを集中する事になったが、課題に依っては新たな進展があり、次の研究の発展につながった成果も上げられたのではないかと考える。以下、進展のあった課題別に研究成果を述べる。

##### 1) クォーク・グルーオンプラズマ生成過程におけるパートン相互作用とその非線形効果 :

この問題については、分担研究者の藤井が、板倉 (KEK) や福嶋 (京大基研)

らとの共同研究で、カラーガラス凝縮模型をつかってカラーゲージ場の不安定性の問題と、それによって生成される初期状態のエネルギー密度等の評価を行った。また、研究代表者の松井の学生で、西山 (現在 D3) は Kadanoff-Baym 形式を用いた初期非平衡過程での局所平衡への時間発展の研究、丹治 (現在 D2) は強い電場の中で荷電粒子対生成 (Schwinger Mechanism) における生成粒子の運動量分布とその時間発展に関する研究を行った。

##### 2) クォーク・グルーオンプラズマのハドロニ化過程におけるダイクォーク相関とバリオン生成 :

この問題では、この間、特に進展は得られなかったが、依然重要な研究課題として取り組む。

##### 3) カイラル相転移とハドロンの膨張と凍結 :

高温プラズマの生成で一旦局所的に回復したカイラル対称性が再び自発的に破れ、真空のカイラル凝縮体が再成されていく非平衡過程を、QCD の有効理論によって記述し、ハドロンガスの運動量分布が凍結するまでの非平衡過程を記述する運動論を定式化する研究を行った。松井は学生 (松尾) との共同研究で、凝縮体の従う非線形クライン・ゴールドン方程式に「熱的」に励起した中間子が従うブラソフ方程式が連立した運動論的方程式を導き、それによって熱平衡近傍での南部・ゴールドストーンモードや集団運動モードの分散関係を導出した。松尾はこの研究によって平成20年3月に学位を取得した。

##### 4) ハドロンの終状態相互作用と HBT 同種粒子相関 :

反応で大量に生成される粒子のなかの2同種粒子の運動量相関から、HBT 強度干渉計の原理を用いて得られる、粒子源の時空構造

が流体模型などで理論的に計算される形状と一致しないという、「HBT パズル」の問題では、松井は服部(現在 D3)と共に、粒子間の終状態相互作用が2粒子の運動量相関をどのように歪めるか、半古典近似で評価し、平均場による1粒子振幅の位相変化によって、粒子発生源の見かけの分布が歪むという興味ある結果を得た。この研究は HBT 干渉計の基本原理に関わる問題で、密度行列の方法を用いても定式化を行った。

#### 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)

H. Fujii, K. Fukushima, Y. Hidaka, "Initial Energy Density and Gluon Distribution from the Glasma in Heavy-ion Collisions", Phys. Rev. C79, 024909, 2009.  
(査読付)

K. Hattori, T. Matsui, "Distortion of HBT images by mean field potential", Prog. Theor. Phys. Suppl. 174, 164-167, 2008.

T. Matsui, M. Matsuo, "Quantized meson field in and out of equilibrium", Nucl. Phys. A809, 211-245, 2008. (査読付)

H. Fujii, K. Itakura, "Expanding Color Flux Tubes and Instabilities", Nucl. Phys. A809, 88-109, 2008. (査読付)

G. Baym, J. P. Baizot, F. Gelis, T. Matsui, "Landau-Pomeranchuk-Migdal effect in a quark-gluon plasma and the Boltzmann equation", Phys. Lett. B644, 48-53, 2007 (査読付)

H. Fujii, "Heavy Flavor Production from the Color Glass Condensate in Proton-Nucleus Collisions", Prog. Theor. Phys. Suppl. 168, 364-371, 2007.

[学会発表](計7件)

服部恒一, 松井哲男, "Distortion of the HBT images by mean field potential", 日本物理学会 2009年春期大会、2009年3月2日、立教大学、東京

H. Fujii, "Nuclear Effects on the charm production in the CGC framework", Oct. 13, 2008. The 2nd Asian Triangle Heavy Ion Conference (ATHIC2008), Tsukuba, Oct. 13-15, 2008.

K. Hattori, T. Matsui, "Distortion of the HBT Images by the mean field potential", Mar. 4, 2008, "New Frontiers in QCD 2008", Kyoto.

松尾衛, 松井哲男, 「有限温度におけるカイラル凝縮体と中間子励起の分散関係」、日本物理学会 2008年春季大会、2008年3月26日、近畿大学、大阪

服部恒一, 松井哲男, 佐野隆司, 「HBT干渉法における平均場の効果」日本物理学会 2008年春季大会、2008年3月25日、近畿大学、大阪

H. Fujii, F. Gelis, R. Venugopalan, Heavy quarks from the Color Glass Condensate in pA collisions Jun. 4, 2007 (Tokyo int'l forum) Int'l Nuclear Physics Conf. 2007, Jun. 3-8, 2007, Tokyo

服部恒一, 松井哲男, 「HBT干渉法における平均場の効果の準古典理論2」日本物理学会 2007年秋季大会、2007年9月24日、北海道大学、札幌

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