

平成22年6月7日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2009

課題番号：19540273

研究課題名（和文） 極限条件のQCDにおける動的臨界現象

研究課題名（英文） Dynamic critical phenomena in QCD in extreme conditions

研究代表者

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

研究成果の概要（和文）：原子核を構成する陽子や中性子の構造と相互作用は、クォークとグルーオンを基本自由度とする量子色力学（QCD）によって記述される。超相対論的な高エネルギー原子核衝突によって、クォーク・グルーオン自由度の顕在化した高温高密度の極限物質を生成し、その物性を探る研究は現在、国際協力研究として進められている。本研究では QCD が支配する極限物質の動的な性質の解明を目指している。まず、3 フレーバーのカイラルランダム行列模型の相構造の研究、そして、QCD 相転移における動的な性質と原子核衝突初期のグルーオン場の時間発展について理論的な研究を行った。

研究成果の概要（英文）： Structures of protons and neutrons, which compose atomic nuclei, and their interactions are described by Quantum ChromoDynamics (QCD), where the elementary degrees of freedom are quarks and gluons. Recently the ultra-relativistic nuclear collider enables us to explore properties of the extremely high-temperature and -density matter of quarks and gluons, as an international experiment collaboration in this field. In our theory research project we aim at investigating aspects of the QCD matter in time-dependent phenomena. First, we show the phase structure of the chiral random matrix model with three quark flavors. Then, we study the dynamic critical properties of the QCD matter and the gluon field evolution in the early stage of nuclear collisions.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2008年度	600,000	180,000	780,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	2,600,000	780,000	3,380,000

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

(1) 有限温度密度条件におけるQCDの相構造

この研究は、2000年に実現した超相対論的原子核衝突実験によって新たな段階に入っている。

る。最高エネルギー原子核衝突事象の実験研究と並んで、物質の相構造を走査することを目的に、衝突エネルギーなどの条件を変えつつ、生成する高励起物質の性質を網羅的に調べる実験が計画・進行している。とりわけ、カイラル対称性の破れに関連して、QCD相図上に存在が期待される臨界点の理論的・実験的同定が、相図上の道標的な重要な意義を持つ。

(2) 衝突事象において過渡的に生成する物質の研究には、非平衡現象の観点が必要である。臨界点の同定に関しても、静的な特異性は有限時間内に生起する事象では丸められてしまうことが十分に想定される。動的現象における特異性の現れ方を十分に理解しておくことが、実験結果の検討の際にも重要である。

(3) 極めて非平衡な衝突初期から集団性を帯びた物質形成にいたる過程の研究は、原子核衝突事象において状態方程式の成立と相図研究の根拠を与える上で重要である。動的臨界現象とは直線的な関係は不明だが、古典グルーオン場の非平衡シミュレーションに固定点が見出され、スケール不変性を示すことが示唆されている点が非常に興味深い。

## 2. 研究の目的

QCDの相図には、カイラル対称性の破れに関する臨界点が存在すると期待される。この点に伴う臨界現象について、模型計算を用いて具体的に示しつつ、普遍性の観点から明らかにする。そして、実験によって観測できるシグナルを提案する。

## 3. 研究の方法

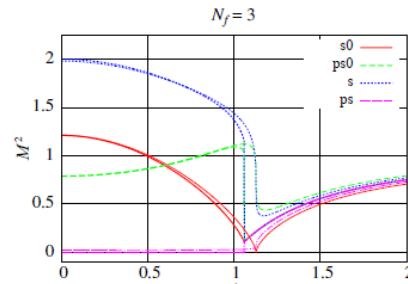
(1) 臨界点近傍の様相は、系の持つ対称性や保存則によって強く規定されていると考えられる。そこで、QCDの特徴を反映する模型を用いて、臨界点近傍の相構造を計算する。特に、クォークフレーバー数3の場合のカイラルランダム行列模型の相構造を明らかにする。

(2) 動的臨界性について、平衡状態からの線形応答として興味のある輸送係数の振舞いと特異性について対称性を共有するQCDの有効模型を用いて計算する。カイラル対称性の秩序変数であるシグマ中間子とエネルギー運動量や密度という保存量揺らぎとの結合に着目する。

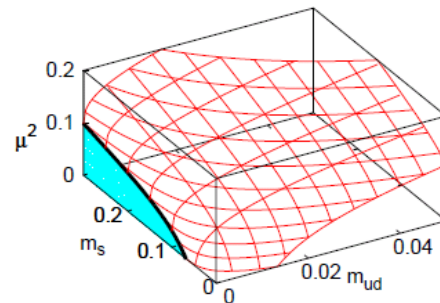
(3) 原子核衝突事象における非平衡現象として最も基本的かつ重要な、初期熱化過程について、グルーオン自由度を古典場として扱った場合のダイナミクスを明らかにする。

## 4. 研究成果

(1) カイラルランダム行列模型によるQCD相構造の研究； QCDに対する模型としてランダム行列模型の相構造を扱った先行研究が存在していた。しかし、QCDに特有な軸性U(1)量子異常効果を適切に取り込んだものではなかったため、本研究では佐野崇(大学院生)と大谷宗久(杏林大)と協力して、量子異常効果を含むランダム行列模型の構築に取り組み、それに成功した。行列の縦横の大きさをインスタントン数に関連すると解釈すれば、われわれはインスタントン数分布について二項分布を考えることによって軸性U(1)対象性を破る有効作用を導出したことになる。この模型を用いて、u, d, sクォークフレーバーが存在する場合に有限温度と密度を変数にした相構造を明らかにした。その結果、この模型では、ゼロ密度でクロスオーバーを示すカイラル相転移が密度を上げるに従い、一次相転移に移行する臨界点を持つことを示した。



フレーバー数3の場合の中間子質量と換算温度  $t$  との関係 (太線; クォーク質量0, 細線; クォーク質量  $m_c$ )。クォーク数密度はゼロ。軸性U(1)量子異常の効果で擬スカラー (ps0) が  $t=0$  で大きな質量を獲得している。  $t \rightarrow 1$  で  $m=0$  の場合は一次相転移による飛びを示し、  $m_c$  の場合は二次相転移を示している。

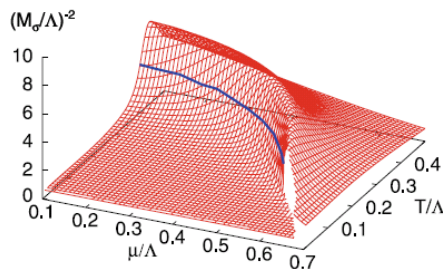


u, d と s クォークの質量と相転移次数との関係。クォーク化学ポテンシャル  $\mu=0$  の場合、  $m_{ud}=m_s=0$  では一次相転移、クォーク質量が大きくなると、臨界線を挟んでクロスオーバーに移行する。化学ポテンシャルを大きくすると一次相転移の領域が広がる。この結果は他の模型計算と整合する。

(2) QCD 臨界点における動的臨界現象；有限

温度や有限密度での基底状態上の励起モードである中間子やバリオンの性質が真空のものから変質すると考えられる。従って、QCD物質の相転移ではハドロンの変質が研究対象として特に注目されてきたが、(1)に挙げた一次相転移線の終端点として存在する臨界点では、ハドロン粒子の励起モードよりもむしろ流体力学モードが絡んだ臨界性が本質であることを、われわれは強調している。流体力学モードの存在は保存則に関連しており、有限密度媒質に特有の運動様式である。

温度－化学ポテンシャル平面上でのシグマ中間子質量の逆数を図に示した（模型計算）。



シグマ中間子はカイラル対称性の秩序変数の揺らぎであり、カイラル二次相転移点上では質量ゼロになる。しかし、臨界終端点では、カイラル対称性はクォーク質量によって破れている帰結として、シグマ質量は有限に留まる。一次相転移への移行して密度ギャップが開く点であるから、むしろ保存量密度の揺らぎである流体力学モードが、この臨界点の臨界性に本質てきなのである。この点の特徴として、クォーク数の拡散係数などに特異性が表れる。この点について、日本物理学会での招待講演などで解説した。

流体力学モードが絡むモード結合理論やくりこみ理論を、QCDの有効模型に直接適用した場合、カイラル対称性とエネルギー運動量、クォーク数保存が関係する新しい動的臨界性を提供することが期待されるので、輸送係数などの特異性を明らかにするべく研究を進めている途上にある。

(3) 衝突初期のグルーオン場配位の不安定性； 衝突初期の極めて非平衡な配位から局所平衡状態に至る過程は事象全体を理解する上で重要な位置を占め、衝突事象に対する流体力学シミュレーションの成功を根拠に、早期に達成されるものと見られている。しかしながら、その物理的機構は全く未解明のままである。衝突初期は衝突によって原子核から開放されたグルーオンが濃密に分布する状態と考えられている（くわしくは高エネルギーハドロン反応での「カラーグラス凝縮」について参照されたい）。これをヒントに先行研究では、古典グルーオン場のシミュレ

ションが行われた。そこでは時間発展に非熱的な固定点が発見され、臨界点や乱流に似たスケール不変性を示すことが示唆されている。本研究では古典グルーオン場が早期の熱化や乱流の成因の候補として、初期グルーオン場配位の不安定性を板倉数記（KEK）、岩崎愛一（二松学舎大）と協力して研究した。グルーオンが非アーベルゲージ場であることを反映して、衝突直後の原子核同士の間には衝突軸方向に平行なカラー電場とカラー磁場が生じる。このグルーオン配位の下では、カラー価を持つグルーオン揺らぎはランダウ準位を形成するが、ベクトル粒子であることを反映してタキオンの不安定モードが現れることに着目した。この不安定モードの性質を線形近似の下で解析的に調べた結果、シミュレーションの特徴を再現することが分かった。研究当初の背景には含まれなかった問題であるが、非アーベルゲージ場のダイナミクスの結果、スケール不変な固定点が出現する点は非常に興味深い。研究結果を踏まえて、初期不安定性と動的臨界性の観点からシミュレーションを実行し再検討することを、現在計画している。

## 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 藤井宏次, 佐野崇, Chiral random matrix model with 2+1 flavors at finite temperature and density, Phys. Rev. D, 査読有, 81 巻, 2010, 037502
- ② 佐野崇, 藤井宏次, 大谷宗久,  $U_A(1)$  breaking and phase transition in chiral random matrix model, Phys. Rev. D, 査読有, 80 巻, 2009, 034007
- ③ 藤井宏次, 板倉数記, 岩崎愛一, Instabilities in non-expanding glasma, Nucl. Phys. A, 査読有, 828 巻, 2009, 178–190
- ④ 藤井宏次, Sigma mesonic mode near the QCD critical point, Euro. Phys. J. C, 査読有, 62 巻, 2009, 69–73
- ⑤ 藤井宏次, 福嶋健二, 日高義将, Initial energy density and gluon distribution from the glasma in heavy-ion collisions, Phys. Rev. C, 査読有, 79 巻, 2009, 024909
- ⑥ 藤井宏次, 板倉数記, Expanding color flux tubes and instabilities, Nucl. Phys. A, 査読有, 809 巻, 2008, 88–109

〔学会発表〕（計13件）

- ① 齊藤陽平, 板倉数記, 藤井宏次, 森松治,

- 2PIくりこみ群を用いた静的臨界指数, 日本物理学会 (岡山大学), 2010年3月20日
- ② 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 (岡山大学), 2010年3月20日
- ③ 藤井宏次, 板倉数記, 岩崎愛一, Instabilities of initial gauge field configurations in heavy ion collisions, 第三回日米合同原子核物理学会 (ハワイ), 2009年10月16日
- ④ 佐野崇, 藤井宏次, 大谷宗久, 2+1 flavor QCD phase structure at finite temperature and density in chiral random matrix models, 第三回日米合同原子核物理学会 (ハワイ), 2009年10月15日
- ⑤ 藤井宏次, Landscape near the QCD critical point, 国際会議 Extreme QCD 2009 (Sejong大, ソウル), 2009年8月5日
- ⑥ 佐野崇, 藤井宏次, 大谷宗久, chiral phase transition in a random matrix model with three flavors, 第27回格子場の理論に関する国際会議 (北京大), 2009年7月26-31日, PoS(LAT2009), 査読有, 2010, 222
- ⑦ 佐野崇, 藤井宏次, Phase diagram of a chiral random matrix model with 2+1 flavors, 第27回格子場の理論に関する国際会議 (北京大), 2009年7月26-31日, PoS(LAT2009), 査読有, 2010, 189
- ⑧ 佐野崇, 藤井宏次, 大谷宗久, カイラルランダム行列模型のNf依存性と有限温度相転移, 日本物理学会 (立教大), 2009年3月30日
- ⑨ 藤井宏次, QCD臨界点, 日本物理学会シンポジウム講演 (山形大), 2008年9月22日
- ⑩ 藤井宏次, Spectral functions near the QCD critical point in chiral effective models, 国際ワークショップ The QCD critical point (ワシントン大, シアトル), 2008年8月13日
- ⑪ 藤井宏次, 丹治直人, Soft mode of the QCD critical point, 第20回超相対論的原子核原子核衝突に関する国際会議 (ジャイプール), 2008年2月5日, J. Phys. G, 査読有, 35巻, 2008, 104060 (4pages)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称:  
 発明者:  
 権利者:  
 種類:  
 番号:  
 出願年月日:

国内外の別:

○取得状況 (計◇件)

名称:  
 発明者:  
 権利者:  
 種類:  
 番号:  
 取得年月日:  
 国内外の別:

[その他]  
 ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

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

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号:

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号: