

機関番号：14301

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20740134

研究課題名 (和文) 高温高密度ハドロン物質の理論研究

研究課題名 (英文) Theoretical Researches on High-temperature and High-density Hadronic Matter

研究代表者

福嶋 健二 (FUKUSHIMA KENJI)

京都大学・基礎物理学研究所・准教授

研究者番号：60456754

研究成果の概要 (和文)：相対論的重イオン衝突実験で生成される「クォーク・グルーオン・プラズマ」へと至る過程で、ハドロン物質からクォーク・グルーオン物質への相転移 (クロスオーバー) がおきる。本研究では、この相転移を記述する微視的なモデルを作り、複数の秩序変数が絡み合う QCD 相転移現象の本質を明らかにした。

研究成果の概要 (英文)：In the process toward a formation of a “quark-gluon plasma” in the relativistic heavy-ion collisions, the system goes through a phase transition (or crossover) from hadronic to quark-gluon matter. In this research a microscopic model has been build to clarify the essential feature of the QCD phase transitions in which multiple order parameters are involved.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	2,700,000	810,000	3,510,000

研究分野：原子核理論

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、カイラル対称性、カラー閉じ込め

## 1. 研究開始当初の背景

1980年代から理論・実験両面で着実な発展を遂げてきた相対論的重イオン衝突実験は、2000年になって Relativistic Heavy-Ion Collider (通称 RHIC) として大きな実を結んだ。ここに至って「クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP)」の生成が実験的にほぼ確定的なものとなり、実験の目的が、QGP 生成から、QGP の性質の精密測定へと転換した。このような状況下で、クォーク・グルーオンの力学の基礎理論である QCD を用いた QGP 生成過程の理論研究や、QCD 相転移の理論研究が必要とされていた。

## 2. 研究の目的

高エネルギー QCD 物質の熱化プロセスを QCD に基づいたアプローチによって研究し相対論的重イオン衝突実験の時空発展の記述を完成させる。そして熱化した高温高密度 QCD 物質の相転移、特に「非閉じ込め相転移」と「カイラル相転移」との相互関係について研究する。

## 3. 研究の方法

高エネルギー QCD に対してはカラーグラス凝縮の理論を用いることができる。それによって相対論的重イオン衝突実験の時空発展を

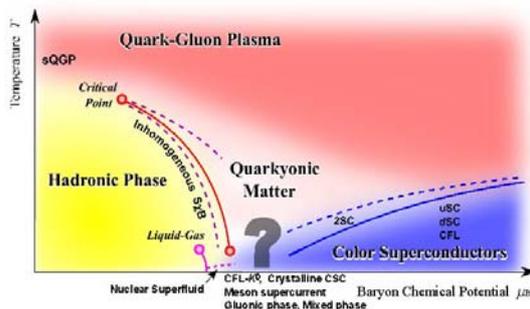
非線型微分方程式を解くことによって決定することができる。初期条件は膨張縦方向に強いカラー電場、カラー磁場を持っていることが知られており、このような初期状態はしばしばグラスマとよばれている。グラスマ状態は強い場を伴うため、非常に面白い物理的内容を含んでいる。さらに熱化した後に生成される高温物質はQCD相転移を起こし、有限温度・有限密度で張られる空間で様々な相境界線を描く。このようなQCD相図を解明することは、QCD物理における重要かつ未解決問題として依然議論が続いている。本研究ではQCDの持つ大域的対称性に根差した有効模型を用いることによって、この難問に具体的な方向性を与える。

#### 4. 研究成果

##### (1) QCD相図の研究

高温高密度QCD物質の相図について、非閉じ込め相転移の境界線と、カイラル相転移の境界線とが、必ずしも一致しない可能性を指摘し、その可能性を尤もらしい有効理論模型を使って検証した。また同じ模型の枠組みで、軸性量子異常の強さと、相図の構造との関係を調べ、QCD臨界点と呼ばれる2次相転移点の位置が量子異常の強さに強く依存することを見出した。この事実は、相対論的重イオン衝突実験が低エネルギー領域まで含めたエネルギースキャンを始め、QCD臨界点探索を大きな目標のひとつに掲げている今日、重要な警鐘としての意味を持っている。

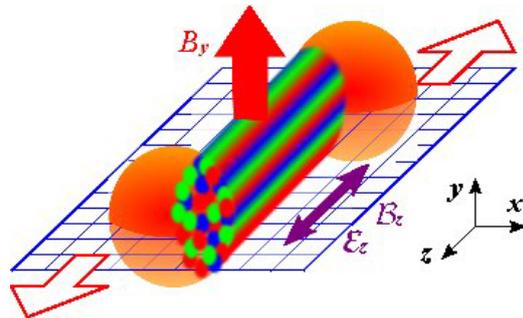
QCD相図研究の現在までの成果を、模式的にまとめたものが以下の図である。完全に定量的な相図を得ることは極めて難しく、満足のいく評価を得ることは、世界中の誰も未だ成功していない。



##### (2) カイラル磁気効果の研究

研究途上で、高温高密度QCD物質が実現しているような環境では非常に強い磁場が発生

していることが明らかになり、相図や相転移に対する磁場の効果についても研究を進めた。その結果、非閉じ込め・カイラル相転移後のQCD物質に磁場が印加されると、QCD物質中のトポロジ的な励起を観測することができることが分かった。場の量子論において量子異常はありふれた現象だが、にも関わらず、トポロジ的な配意が実験的に見付かった事例は（少なくとも素粒子・原子核物理学の範疇では）ないと言っても過言ではない。トポロジ的な励起はグラスマ中にも自然に含まれており、強磁場グラスマ中での粒子生成の問題が、量子異常と密接な関わりを持っている。以下に示すのは、このような状況を模式的にスケッチした図である。



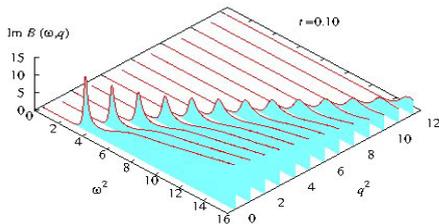
##### (3) 衝突初期状態の時空発展

古典 Yang-Mills 方程式を膨張座標系で解くことによって、相対論的重イオン衝突初期状態のエネルギー密度および生成粒子数を計算した。エネルギー密度は衝突初期には対数的な紫外および赤外発散を持つが、有限の時刻が過ぎると急速に収束して、紫外発散が実質的に消えることを示した。このことを見るために運動方程式の解のうち、紫外発散に強く効いてくる微分項について全オーダーの足し上げを実行し、最終的にベッセル関数で記述される時間発展方程式を得た。また縦方向の揺らぎが指数関数的に時間とともに増大していく不安定性について研究し、早い熱化プロセスとの関係を調べた。

##### (4) 高次元模型アプローチ

強結合QCDを解くことは容易ではないが、高次元模型を使うと、ある種の強結合理論の厳密解を得ることができる。強結合QCDと似た性質を持つようにうまく模型を作ると、QCDの非摂動的な性質について有用な情報が得られる。このようなアプローチ、AdS/QCD模型によって、重いメソンのスペクトル関数を研究した。重いクォーコンウム(同種クォー

ク・反クォークの束縛状態)はゼロ温度では束縛されていても、高温では束縛が解け、スペクトル関数のピークがなだらかになる。この様子を AdS/QCD 模型によって非摂動的に調べた。その結果、格子 QCD 理論を数値シミュレーションして得られるスペクトル関数と定性的にはよく合致する振る舞いを得ることができた。以下のグラフが有限温度のスペクトル関数を、エネルギーと運動量の関数としてプロットした図である。



ここで得られた数値計算結果は、定性的な振る舞いに関しては、最近の格子 QCD 計算の結果とよく合致しており、さらに全く独立に行われた AdS/CFT 計算 (AdS/QCD とは違って共形不変性を破らないので、理論的には厳密に扱えるが、QCD の性質からは遠くなる) とともコンシステントになっている。

## 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 21 件)

1. Kenji Fukushima, Tetsuo Hatsuda, “The phase diagram of dense QCD,” Reports on Progress in Physics, 査読有, 74, 014001 (2011).
2. Kenji Fukushima, “Phase diagram of hot and dense QCD constrained by the Statistical Model,” Physics Letters, 査読有, B695, 387-391 (2011).
3. Kenji Fukushima, Dmitri E. Kharzeev, Harmen J. Warringa, “Electric-current susceptibility and the Chiral Magnetic Effect,” Nuclear Physics, 査読有, A836, 311-336 (2010).
4. Kenji Fukushima, Dmitri E. Kharzeev, Harmen J. Warringa, “Real-time dynamics of the Chiral Magnetic Effect,” Physical Review Letters, 査読有, 104, 212001 (2010).
5. Kenji Fukushima, Marco Ruggieri, “Chiral magnetic effect in the PNJL model,” Physical Review, 査読有, D81, 114031 (2010).
6. Kenji Fukushima, Marco Ruggieri, “Dielectric correction to the Chiral Magnetic Effect,” Physical Review, 査読有, D82, 054001 (2010).
7. Hirotsugu Fujii, Kenji Fukushima, Yoshimasa Hidaka, “Initial energy density and gluon distribution from the Glasma in heavy-ion collisions,” Physical Review, 査読有, C79, 024909 (2009).
8. Kenji Fukushima, “Isentropic thermodynamics in the PNJL model,” Physical Review, 査読有, D79, 074015 (2009).
9. Jiunn-Wei Chen, Kenji Fukushima, Hiroaki Kohyama, Kazuaki Ohnishi, Udit Raha, “U(1)<sub>A</sub> anomaly in hot and dense QCD and the critical surface,” Physical Review, 査読有, D80, 054012 (2009).
10. Hiroaki Abuki, Kenji Fukushima, “Gauge dynamics in the PNJL model: Color neutrality and Casimir scaling,” Physics Letters, 査読有, B676, 57-62 (2009).
11. Mitsutoshi Fujita, Kenji Fukushima, Tatsuhiro Misumi, Masaki Murata, “Finite-temperature spectral function of the vector mesons in an AdS/QCD model,” Physical Review, 査読有, D80, 035001 (2009).
12. Kenji Fukushima, Francois Gelis, Tuomas Lappi, “Multiparticle correlations in the Schwinger mechanism,” Nuclear Physics, 査読有, A831, 184-214 (2009).
13. Tomas Brauner, Kenji Fukushima, Yoshimasa Hidaka, “Two-color quark matter: U(1)<sub>A</sub> restoration, superfluidity, and quarkyonic phase,” Physical Review, 査読有, D80, 074035 (2009).
14. Kenji Fukushima, “Characteristics of the eigenvalue distribution of the Dirac operator in dense two-color QCD,” Journal

of High Energy Physics, 査読有, 0807, 083 (2008).

15. Kenji Fukushima, Yoshimasa Hidaka, “Two gluon production and longitudinal correlations in the Color Glass Condensate,” Nuclear Physics, 査読有, A813, 171-197 (2008).

16. Kenji Fukushima, Dmitri E. Kharzeev, Harmen J. Warringa, “Chiral magnetic effect,” Physical Review, 査読有, D78, 074033 (2008).

17. Kenji Fukushima, “Critical surface in hot and dense QCD with the vector interaction,” Physical Review, 査読有, D78, 114019 (2008).

[学会発表] (計 27 件)

1. Kenji Fukushima, “Chiral Magnetic Effect and the QCD Phase Transitions,” at Quark Confinement and the Hadron Spectrum IX, August 30, 2010, Universidad Complutense Madrid, Spain

2. Kenji Fukushima, “Phases of QCD - Baryon Rich State of Matter,” at International Nuclear Physics Conference (INPC) 2010, July 5, 2010, University of British Columbia (UBC), Canada

3. Kenji Fukushima, “Phase Diagram of Hot and Dense QCD Matter Constrained by the Statistical Model,” at Extreme QCD, June 23, 2010, Physikzentrum, Bad Honnef, Germany

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

福嶋健二 (FUKUSHIMA KENJI)  
京都大学・基礎物理学研究所・准教授  
研究者番号：60456754

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：