

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24740169

研究課題名(和文)非摂動的な手法によるクォーク・グルーオン物質研究

研究課題名(英文)Non-perturbative approach to research on quark gluon matter

研究代表者

福島 健二(Fukushima, Kenji)

東京大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：60456754

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：極限環境下でのクォーク・グルーオン物質の性質を研究し、特に強磁場中、強重力場中のカイラル対称性の破れについて、新しいダイナミクスを発見した。強磁場中では、中性スカラー中間子中のクォーク分極が磁場と結合する可能性を指摘し、スカラー中間子の揺らぎが磁場によって増大することを実証した。また曲がった時空中ではカイラル対称性を破らないフェルミオン質量ギャップを発生させる機構を発見し、これをカイラルギャップ効果と命名した。さらに実時間シミュレーションによって、強電場中の粒子生成を解析し、確率過程量子化法での新しいシミュレーション法を提唱した。

研究成果の概要(英文)：Properties of quark-gluon matter under extreme environments have been studied, especially when magnetic fields and gravity effects are strong. Then, new mechanisms for chiral symmetry breaking have been found. In a strong magnetic field a possibility of neutral scalar mesons coupling to the magnetic field through quark polarization has been pointed out, and a significant enhancement of scalar fluctuations induced by the magnetic field has been demonstrated. In a strongly curved space, it has been found that the curvature gives a fermion mass gap in a way not to break chiral symmetry, which has been named the chiral gap effect. Also, by using the real-time simulation, the particle production problem under a strong electric field has been analyzed, and a new method has been proposed based on the stochastic quantization.

研究分野：クォークハドロン物理学

キーワード：強い相互作用 強電磁場効果 曲がった時空 実時間シミュレーション カイラル対称性の破れ 非摂動的計算 ダイクォーク相関 トポロジ的ゲージ配位

1. 研究開始当初の背景

(1) 相対論的重イオン衝突実験の成功によりクォーク・グルーオン・プラズマの実験的生成が確定的になり、高温極限におけるクォーク・グルーオン物質の研究は飛躍的に進んだ。その一方で、バリオン密度の高い物質の性質については、長らく研究が停滞している。その主たる理由は強い相互作用の第一原理計算である格子 QCD シミュレーションが有限密度環境では機能しないためである。そこで、格子 QCD シミュレーションに代わる非摂動的アプローチの開発が急務の課題であった。

(2) 高温 QCD の理論研究は大きな成功を収めてきたが、実験的により多様な環境を実現できるようになり、高温だけでなく、高バリオン密度、高アイソスピン密度、高強度場(磁場や電場など)、強重力場の影響まで含めた QCD 相図の探索が新たな理論課題として浮上してきた。特に強磁場中のクォーク物質の性質は重イオン衝突実験とも密接な関わりがあるだけでなく格子 QCD シミュレーションからも非自明な結果が報告されており、物理的な解釈を巡って混沌とした状況が続いていた。

(3) QCD 研究の新たな問題として、実時間における量子発展を正しく記述する必要性が認識されてきた。半古典近似の枠内では安定なシミュレーションが可能となりつつあるものの、熱化に至る量子ダイナミクスには不明な点の方が多く、理論形式そのものの整備が必要な状況であった。

2. 研究の目的

(1) 究極的には QCD 相図の全容を明らかにすることを目的とする。従来の研究ではバリオン密度の高い領域で、クォーク物質の存在を仮定してしまうことで、相転移の様相が調べられてきた。しかしこのようなアプローチでは高密度バリオン物質中で起こる新奇現象を見逃してしまうことになる。そこで本研究では、バリオン自由度を正しく扱いつつもクォーク物質へと連続につながるような微視的メカニズムを明らかにすることを目指す。このような動機のもとに、特にクォーク 2 つの強い相関、すなわちダイクォークの自由度を正しく取り入れる処方箋の確立を目標として掲げる。

(2) 強磁場中のクォーク物質の物性、特にカイラル凝縮(物質の質量の起源となるような QCD 真空の性質)の振る舞いについては、多くの理論的予想がある。ゼロ温度ではカイラル凝縮が磁場とともに大きくなることがよく知られており、これは磁気触媒効果と呼ばれている。一方で、ゼロ温度の凝縮値が大きくなるにもかかわらず、凝縮の融ける温度が磁場とともに低くなることも、格子 QCD シミュレーションで発見されている。通常は

QCD のよい低エネルギー有効理論だと見做されているカイラル有効模型などを使った計算では、このような有限温度の振る舞いを説明することができない。本研究では強磁場中のクォーク物質の振る舞いを手がかりに、従来見過ごされてきた QCD の非摂動的な性質について研究し、有限密度系への応用も視野に入れた議論を展開する。また磁場だけでなく、非自明な計量を導入して曲がった時空におけるクォーク物質についても新たな研究分野を開拓し、先駆的な研究をリードしていく。

(3) 高エネルギー QCD 極限では、コヒーレントなグルーオン場を古典的に取り扱う近似が成立し、このような近似に基づいた理論はカラーグラス凝縮という名のもとに体系化されている。クォーク・グルーオン・プラズマは熱平衡状態にあるため、コヒーレントな場が粒子に崩壊し、相互作用によって熱化してはならない。カラーグラス凝縮を熱化させるシミュレーションについては数多くの先行研究があるものの、時間スケールが非物理的に長くなってしまい、実験と整合のあるシナリオができていない。本研究では QCD による乱流シミュレーションを行うことによって、熱化について現実味のあるシナリオを提唱することを目的とする。

3. 研究の方法

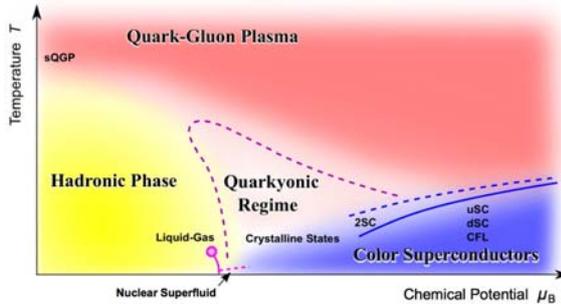
(1) 格子 QCD シミュレーションに相補的な手法として汎関数繰り込み群方程式を用いることによって、低エネルギーの有効自由度を取り出す。特にダイクォークの自由度を、クォークやバリオンの自由度と過不足なく入れるためには、束縛状態の問題を適切に取り扱わなくてはならない。そのための理論の整備を行い、実践的な数値計算を行う。

(2) 強磁場中や強重力場中のカイラル対称性の性質については、やはりカイラル有効理論の範囲内で正しい答えが導かれるはずである。何故ならばもとの理論の大局的な対称性が自発的に破れるときは、低エネルギー領域ではもとの理論と答えが一致する(低エネルギー定理)ためである。従って理論の未知のダイナミクスではなく、既知ではあるが近似の範囲内で取り入れられてない効果を適切に考慮することによって、格子 QCD シミュレーションの結果を説明できるはずである。

(3) 古典統計シミュレーションを数値的に行うとともに、半古典近似の限界を突破するための新しい手法として、確率過程量子化法に着目し、実時間シミュレーションへの応用の実用化を目指す。まずは簡単なスカラー場の理論について、特に低次元では数値的に正確な答えを得ることもできるため、正しい解への収束性の検証も行う。

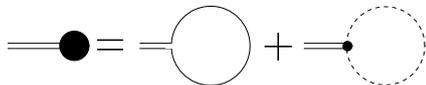
4. 研究成果

(1) QCD 相図について現在までに理解されている結果をまとめた総説を書き、従来とは一線を画する QCD 相図の可能性を提唱した。すなわち従来は高密度側に一次相転移の線を入れた相図が一般的だったが、そうでない可能性に明示的に言及し、低エネルギー重イオン衝突実験が追求すべき物理対象について注意を喚起した。



また一次相転移の存在可能性や、空間的に非一様なカイラル凝縮の発現について、ある程度モデルに依存しない一般的なメカニズムに基づく説明を与えることに成功した。これにより非一様相の現実味が増すとともに、上記の QCD 相図におけるクォークイオン領域では非一様性が成長している可能性を指摘した。

(2) これまでは中性スカラー粒子は磁場中で何も影響を受けないとされてきたが、パイ中間子のようなクォークの複合状態の場合は、磁場によるラーマー半径が束縛状態の波動関数の広がりよりも小さくなれば、クォークの分極を通して磁場と結合するようになるはずである。このようなアイデアのもと、強磁場中における中性パイ中間子の分散関係を計算し、磁場を大きくするとパイ中間子の速度が減少することを発見した。このことにより磁場と垂直方向の運動については、ほぼエネルギー励起なしで伝搬できるようになり実効的に位相空間体積が増大する。すると運動量積分の赤外領域からの寄与が大きくなり、有効ポテンシャルが大きく変更を受ける。



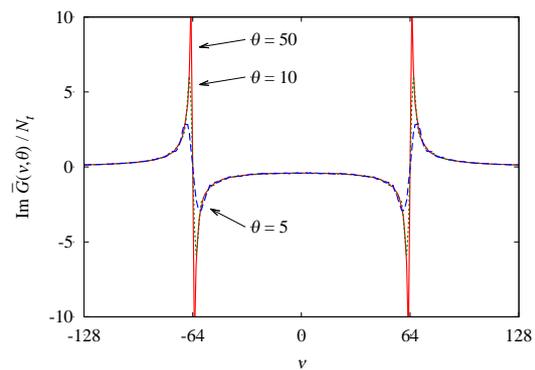
そこでこのような構造を持ったパイ中間子のループ効果も取り入れた有効ポテンシャルの計算を実行した。具体的には上に模式的に示したようなダイアグラムを、磁場中で全てのランダウ準位を取り入れて評価した。その結果、実際に中性スカラー場の揺らぎが増幅されることによって対称性の破れが回復することが見出された。このような全く新しい現象を我々は「Magnetic Inhibition」と命名した。

(3) 曲がった時空中でカイラル対称性の破れ

が変更されることは、(平均場近似の範囲内で) 解けるカイラルモデルの先行研究により、知られていた。すなわち曲率が正の場合、臨界曲率の値が存在し、もしも曲率が臨界値よりも大きい場合、カイラル対称性の自発的な破れが回復する。一方で、もしも曲率が負の場合には、カイラル対称性はさらに大きく破れることになる。従来の研究では複雑な計算の結果として、これらの振る舞いが見られたのだが、直感的で平易な説明は与えられていなかった。本研究では、熱核と呼ばれる関数を系統的に展開していくことによって、曲率について再和をとった伝搬関数を求め、それによって非常に分かり易い説明を与えることに成功した。

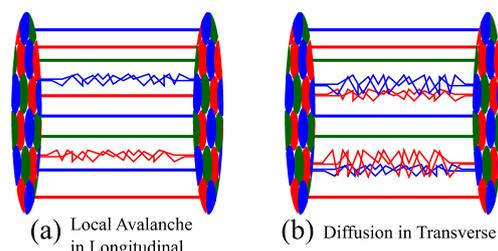
カイラル対称性はフェルミオンの質量と密接な関わりを持っている。通常、ゼロ質量のフェルミオン系が持つカイラル対称性が、カイラル凝縮によって自発的に破れることによって、フェルミオンに質量が発生する。しかし曲がった時空中では、時空構造に起因したフェルミオン質量ギャップが現れる。しかもこの質量ギャップはカイラル対称性を破らない。この一見、矛盾する2つの事実を整合させるポテンシャルの形を書き下してみると、従来の複雑な計算で知られていた事実が自然と導かれるのである。このようなカイラル対称性を破らない質量ギャップ発現機構を「カイラルギャップ効果」と名付けた。

(4) 実時間量子シミュレーションの問題に立ち向かうために確率過程量子化法を用いたシミュレーションを行った。具体的には調和振動子の量子力学系に対して計算を実行し、数値的に安定な結果を出すことに成功した。下図は振動数空間で見た伝搬関数の計算例である。シミュレーションとともに質量の位置に極が現れる様子が分かる。



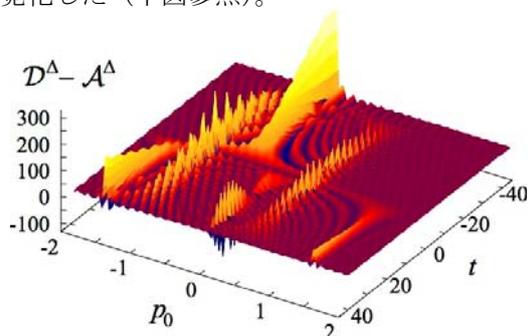
さらに入念な数値的な解析を進めたところ、相互作用の影響によって、非物理的な解へと収束する問題が、ほぼ普遍的に不可避であるという衝撃的な事実を発見した。このような問題を解決する1つの方法として、位相空間に制限を与える近似計算法を提唱し、実際に正しい解に極めて近い値を得ることに成功した。

(5) 重イオン衝突実験における熱化シナリオとして、乱流的な振る舞いが衝突軸とは垂直平面上で起きていることを主張し、古典統計シミュレーションによって数値的に実証した。



シミュレーションの結果を模式的にまとめたものが上図である。2つの楕円状の物体はローレンツ収縮した原子核を表し、それらの間にグルーオンによるカラー場が発生している。カラーグラス凝縮の理論によれば、衝突初期に生じたカラー場は衝突軸に対して一様に延びており、これはブースト不変と呼ばれている。まず衝突後、すぐに縦方向に不安定性が発生し、波数の小さいモードが波数の大きいモードへと雪崩のように広がっていく。このような雪崩現象は横平面では局所的に起こる。そこで次に、局所的に発生した雪崩が横平面で拡散していくことによって、あらゆるモードへとエネルギーが急速に分配される。

(6) 強電場中で、真空から粒子、反粒子がこぼれ落ちてくる現象は、シュウィンガー機構と呼ばれている。シュウィンガー機構については様々な先行研究があるが、本研究では粒子数演算子の期待値という非常に分かり易い表式を出発点として、それを場の演算子で書き直すことによって、非常に一般的で分かり易い公式を得ることに成功した。このような表式は今後、数値計算に有用である。またさらに直感的に分かり易くするために、非平衡系の時間に依存するスペクトル関数を導入し、スペクトル関数のピークの時間変化から反粒子が粒子へと遷移していく様子を視覚化した(下図参照)。



5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計14件)

① Antonino Flachi and Kenji Fukushima,

Chiral mass-gap in curved space, Phys. Rev. Lett. 113, 91102 (2014)、査読有

② Kenji Fukushima and Pablo Morales, Spatial modulation and topological current in holographic QCD matter, Phys. Rev. Lett.111, 51601 (2013)、査読有

③ Kenji Fukushima and Yoshimasa Hidaka, Magnetic catalysis vs magnetic inhibition, Phys. Rev. Lett.110, 031601 (2013)、査読有

[学会発表] (計30件)

① Kenji Fukushima, “Chiral Gap Effect in Curved Space”, Confinement and Hadron Spectrum 2014, St.Petersburg, Russia、2014年9月8日発表(招待講演)

② Kenji Fukushima, “Baryonic matter and beyond”, Quark Matter 2014, Darmstadt, Germany、2014年5月24日発表(招待講演)

③ 福嶋健二「ダイクオーク関連の物理」日本物理学会、高知大学、2013年9月13日発表(招待講演)

④ Kenji Fukushima, “Extreme QCD matter – Fate of chiral symmetry in strong magnetic fields”, International Conference on Strong and Electroweak Matter 2012, Swansea, UK、2012年7月10日発表(招待講演)

⑤ Kenji Fukushima, “Local P and CP Violation in the Strong Interaction”, Flavor Physics and CP Violation 2012, Hefei, China、2012年5月22日発表(招待講演)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福嶋 健二 (FUKUSHIMA, Kenji)

東京大学・大学院理学系研究科・准教授

研究者番号：60456754

(2) 研究協力者

Jan M. Pawłowski