

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 16 日現在

機関番号：16401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2015

課題番号：23740194

研究課題名(和文) センターボーテックス描像による強相関クォークグルーオンプラズマの研究

研究課題名(英文) Study of strongly-correlated quark-gluon plasma via center vortex mechanism

研究代表者

齋藤 卓也 (Saito, Takuya)

高知大学・自然科学系・助教

研究者番号：50448023

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：「センターボーテックス機構」を通じてグルーオンプラズマにおける磁場自由度の役割を、格子SU(2)計算により研究した。実際に、赤外領域の磁場グルーオンは電場グルーオンに比べて、強いボーテックス相関が観られた。これは、磁場自由度が閉じ込め相においても非摂動的物体であることを示している。さらに、状態方程式や粘性に関する相関関数も算出し、ボーテックス自由度に大きく依存していることを発見した。

研究成果の概要(英文)：We study the role of magnetic degree of freedom in the gluon plasma after the phase transition via center vortex mechanism by using the SU(2) lattice simulations. In the infrared region the magnetic gluon propagator is strongly affected by removal of the center vortices; this means that thermal magnetic gluons are still nonperturbative objects in the deconfinement phase. The equation of state is also investigated by the lattice configuration under this procedure and the free energy become so large. In addition, the thermal correlator function of transport coefficient to shear viscosity is found to be dependent on center vortices.

研究分野：格子QCD

キーワード：クォークグルーオンプラズマ 格子量子色力学 クォーク閉じ込め 磁場遮蔽

1. 研究開始当初の背景

2004年に相対論的重イオン衝突実験(RHIC)により、新しい物質形態であるクォークグルーオンプラズマ(QGP)が地球上で生み出された。これは、量子色力学誕生の70年代以降理論的に盛んに議論されてきたことであり物理学的に大きな進展となった。しかしながら、作成されたQGPは従来の予想とは違い摂動理論が十分に機能しない、強い相関性を持つ低粘性の物質であると考えたと実験結果や現象論的解析の辻褄が合うことが判明した。さらに格子理論による第一原理計算によりハドロンからQGPへの相転移後の物質は低粘性であることが数値的に示された。

後の、2010年からのLHCにおける実験においても、さらに高温でのQGP物質が確認された。ここにおいて、ジェット抑制や重クォークメソンの生成抑制などが、さらに議論されることとなっている。しかし、なぜ生成されたQGP物質が強い相関性をもつのかを、ゲージ理論の立場から正確に理解することはできていない。

QGPの物理を非可換ゲージ理論の立場から解明することは、熱的クォークとグルーオンの多粒子状態の振舞を理解するという物性論的な側面のみならず、量子色力学(QCD:クォークとグルーオンの力学)が持つ「閉じ込め現象」や「カイラルの自発的破れ」といった非摂動論的理解を促すものであると期待される。これまでは、このようなQCDの持つ特異な現象を議論する際には、相転移温度以下のゼロ温度ハドロン相における実験情報のみであったが、一連の研究によりQGP現象を考慮することにもより研究がより進展することになる。

2. 研究の目的

QGPの持つ強相関性の由来を、量子色力学(QCD)の非摂動論的側面を記述する位相欠陥である『センターポータックス』から理解することが本研究の目的である。センターポータックス(色渦糸)写像法を駆使した数値シミュレーションにより実際に格子上に、ポータックスを出現させて、さまざまな物理量との相関を調査する。実際非可換ゲージ理論の位相欠陥であるポータックスは、クォーク閉じ込めのメカニズムやカイラル対称性の自発的破れと密接な関係があることが、すでに示されている。このことから、センターポータックスが存在することによりこれらのQCD特有の非摂動論的効果が引き起こされたと考えることができる。数値計算上の技術的にも様々な物理量のポータックス依存性を比較的簡単に行うことができるという特徴がある。

実際にQGP物質の性質を調査するために、状態方程式や色遮蔽効果などといった代表

的なプラズマ相における物理的現象がどのようにゲージ理論の位相欠陥であるポータックスに依存するかを数値的に明らかにする。これにより、QGP相においてもなお依然として摂動論では扱えない非摂動論的モードが判明することになる。

QGP相においては、電場グルーオンは通常の色遮蔽効果を引き起こし閉じ込め力を消失させ、有限の質量を持つ湯川型のクォークポテンシャルを作り出す。一方で、磁場グルーオンは、空間方向に閉じ込め状態を保存させる。この磁場自由度の特殊性が、QGPの強相関の原因であると仮定して研究を勧めた。ポータックスと電場磁場グルーオン伝搬関数、状態方程式、輸送係数等との関係を非摂動論的に明らかにすることが本研究の具体的な目的である。

最終的に本研究は、非可換ゲージ理論の持つ非摂動論的特徴を、QGP相転移前後の現象と通じて統一的理解を与える。クォークやグルーオンの閉じ込め現象は相転移後の高温におけるプラズマ相においても摂動理論からは導きだされないゲージ理論の本質が理解されるものと期待される。QCD理論の新たな理解に繋がる。

3. 研究の方法

SU(2)ゲージ理論を格子上に再定義した経路積分のモンテカルロシミュレーションにより必要となる演算子を計算し研究を遂行する。とくに、本研究では、センターポータックス遮蔽法により数値的に格子上にポータックスを導出し(もともとの格子ゲージにははっきりとその姿が見えない)、新しく作られたゲージ配位により目的となる相関関数や演算子を計算する。さらに、特定したポータックスを数値的に削除する方法を導入し、修正されたゲージ配位により、同じ物理量を計算する。この一連の操作により、ポータックスとの相関が強い演算子、もしくはより詳しく特定の自由度が判明する。これにより、非摂動論的に重要な部分が導出される。閉じ込め相の時は、線形上昇クォークポテンシャルの消失やカイラル対称性の自発的破れの回復と関連している。この手順を非閉じ込め相にあるQGPの物理に適用し、摂動では記述できない非摂動論的モードの導出を試みる。それが、強相関プラズマを考えるうえでの重要な因子となる。

図1は、センター射影操作により格子上に同定したポータックス描像を示している。左の図はポータックスが存在している状態で、右の図はポータックスが削除された状態を示している。各点はモノポールを表している。ポータックスが無くなることで、格子上の相互作用が不活性化する様子を示している。これにより「非摂動論モードのオンとオフ」が行える。

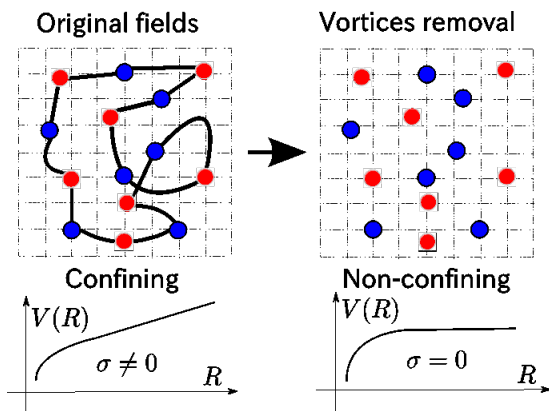
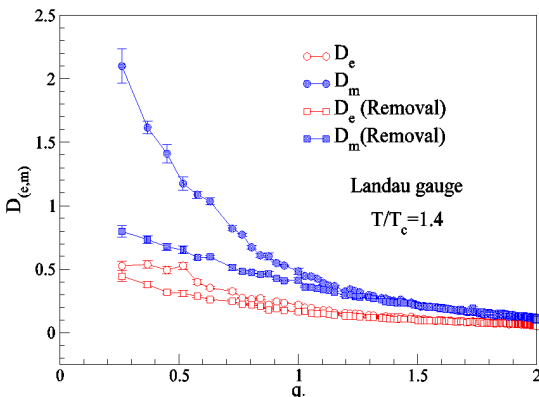


図1：ポータークス（色渦糸）の導出と削除の概念を示した図。モノポール間の渦糸が消滅すると非閉じ込め理論になるようす。（本科研費申請時書類にも記載）

4. 研究成果

4.1 磁場グルーオン伝搬関数の特異性

ここでは、クォークグルーオンプラズマの構成要素は、閉じ込めから解放されたグルーオンである。その中でグルーオンは電場と磁場とに分けられて、特に有限温度においては異なる役割を演じる。零温度のときはローレンツ対称性（もしくは $O(4)$ 対称性）により、両自由度に本質的な違いはないと考えられる。これまでの有限温度格子計算によると電場グルーオンはデバイ遮蔽効果を受けて質量を持つ。そして、クォーク間力は湯川型のポテンシャルで表現され線形上昇する閉じ込めポテンシャルでは無くなる。一方で、磁場グルーオンから作られる空間方向のみのクォークポテンシャルは非閉じ込め相においても閉じ込め力を示すという数値結果が得られている。また、このときの線形弦張力は、温度に依存し、結合定数の二乗という形でスケールするであろうことが摂動理論から示されている。このように磁場自由度は非摂動的であり電場（時間）成分とは本質的に異なることが示されている。



クォーク閉じ込めの原因と考えられるセ
図2：電場（赤）と磁場（青）グルーオンのポータークス依存性の様子。

ンターポータークスと有限温度における磁場自由度との関係を調査することが重要である。ポータークス射影と削除法を駆使して電場と磁場グルーオンの振舞いの違いを運動量空有間で調査した。その結果の一例が図2である。磁場グルーオン（青）と電場グルーオン（赤）の運動量依存性がプロットされている。丸と四角の違いは、ポータークスがあるかないかを表している。運動量が高い摂動領域においては、両者の違いは電場・磁場ともに発見することはできない。摂動理論が有効である小さい結合定数があるような状況においては、非摂動的効果は大変小さく差異はない。一方で、閉じ込めやカイラルの破れがあるハドロンを作るときに重要な低運動量領域においては、両者に著しい違いが見られる。磁場グルーオンがポータークス削除前後に大きく変化をしている。これは、非摂動的に自明ではない動きが磁場方向に存在していることを示している。それに対して電場方向にこのようなことはなく摂動的であることがわかる。

世界で初めて得られた、電場と磁場についての極めて対照的な結果は、QGPの強相関性を示唆するものである。そして、QCDの理解にも必須である。

この成果は主に研究目的(1)に該当する。

4.2 状態方程式の再考

閉じ込め相においてクォークとグルーオンはハドロン内部に閉じ込められているが、相転移後の高温状態においては、閉じ込め力がなくなり、自由に動き回るQGPが生成される。このとき、系を構成する要素が激変するので自由エネルギーなどの熱力学的量も変化する。実際に格子計算で計測してみると、自由エネルギー、エネルギー密度、エントロピーなどが大きく増大するようすがこれまでも、さまざまな格子作用や格子体積のもとで研究がなされてきた。

本研究では、位相欠陥であるセンターポータークスがQGPの状態方程式にどのように影響を与えるかを調査した。ミクロに考えた構成要素であるグルーオンは磁場部分が特異であることが我々の研究により判明しており、マクロで考察した場合の変化を知る。

ブラケットエネルギーをそれぞれの温度で計測した後に、その値を積分することにより状態方程式を導出する。零温度と有限温度でのエネルギー差は図3に示されている。ここでは、ポータークスが存在するこれまでと同様の格子と、それが削除された場合との比較が示されている。ポータークスが削除されたほうの曲線が大きく増大していることがわかる。これは、渦糸がゲージ理論の中にもともと存在しており、その影響で格子に構造が発生しており、そのためにエネルギーが低くなっていたものと解釈される。しかしながら、高温における削除したほうの体積依存

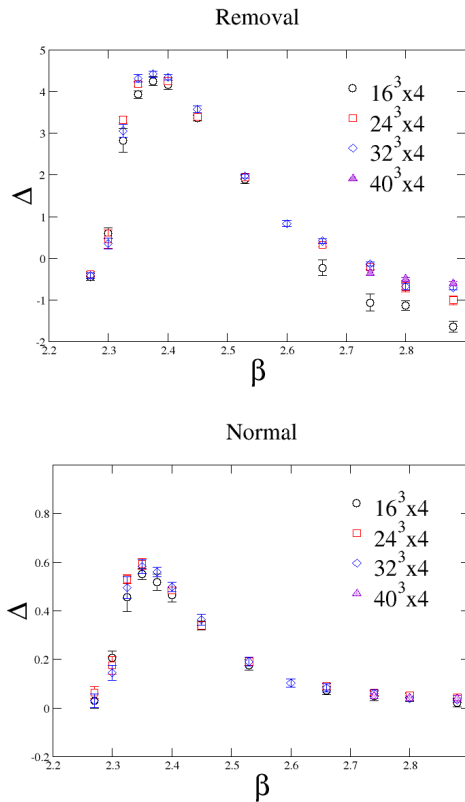


図3: プラケット(グルーオン)エネルギー差の温度依存性。上図は通常の場合、下図はボーテックスを削除した場合。ボーテックスを削除すると山が大きくなるのがわかる。また、高温(右のほう)において、体積依存性が大きく負になっている。

性が大きい。また、値そのものがマイナスになるという特徴がある。

図4では、積分した後の自由エネルギー(この場合は圧力)の振舞いの要するがプロットされている。ボーテックスが削除されたゲージの結果が青で、赤が通常の場合である。ボーテックス自由度を削除したほうが大変大きく増大していることがわかる。また、高温に行くと若干減少傾向になる。この値そのものは、高温極限のステファンボルツマン極限を超えており、ボーテックス自由度の統計性や分配関数の絶対値が違うことを示唆しているものと考えられる。数値計算の格子サイズがまだ限定されており、有限ボリュームの効果を考えることが今後必要である。

この数値実験により想定どおりの結果が出た。つまり、ボーテックス自由度の寄与の大きさが格子計算により示された。QGPにおいては磁場自由度が特殊性を持つことが(4.1)の我々の研究により判明しており、この結果はやはり磁場自由度の非摂動論性が原因とみなされる。しかしながら、その統計性の違いや格子サイズの依存性の確認のため、さらなる研究遂行が必要であり、最終確認が必要である。定量的な理解に向けたより大きな統計数と格子サイズ、またはより細かい温度解像度が必要とされる。

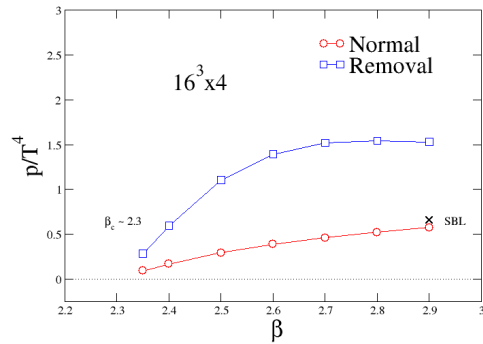


図4: 通常の場合と色渦系を排除した場合での状態方程式の振舞。自由エネルギーは増大しSBリミットを超える。

4.3 低粘性の由来

強く相関する QGP は低粘性を示すことが、実験や理論研究を通じて明らかになってきた。その原因を、同様に、ボーテックス自由度と磁場自由度との観点から研究した。実際に、ボーテックス自由度を排除すると、それまでに計測されていた粘性輸送係数に関する相関関数が平坦になることが示された。これもまた、非摂動論モードと密接に関係するボーテックスと低粘性の関係を示唆する数値結果である。(図4参照)

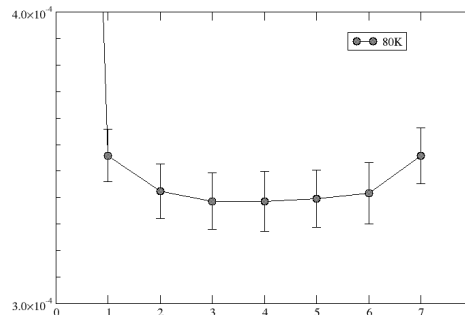
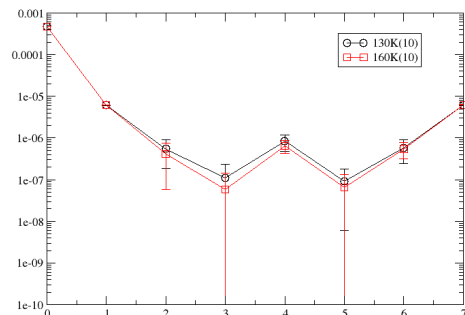


図5: 輸送係数の計算例。下図がボーテックスを削除した場合。著しく平坦になる。

4.4: 本研究のまとめ

本研究では、通じて示唆されることは、相

転移後においても磁場自由度が非摂動論的物体として存在して、空間方向に一種の閉じ込め効果を依然として引き起こしている。これにより、QQP の低粘性や自由エネルギー増大と関係があることが示唆される。しかしながら、計算量が通常の格子計算のそれに比べて百倍から数千倍の統計量が必要である。かつ、強相関中での相関関数の距離依存性が大変不安定なこともあり、最終結果を得るにはさらなる継続研究が必要である。

本研究はQQP 中での磁場自由度の非摂動論性を明確にする世界でも唯一の研究である。現象論的な理解にとどまらず、量子色力学が誕生して40年来になる「閉じ込め問題」の解決に向けた研究となる。

本研究では、申請時に記載されてあった研究目的()から()までを全体的に行った。その結果のいくつかは、論文、国内外の学会で発表され、大変注目されている。今後の研究進展も望まれるものとなっている。

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7件)

“Lattice study of the gluon plasma via center vortex mechanism, Takuya Saito, Proceedings of Science, PoS(Confinement X)337,2013,URL:

http://pos.sissa.it/archive/conferences/171/337/Confinement%20X_337.pdf: 査読あり

〔学会発表〕(計4件)

日本物理学会素粒子領域、理論核物理領域合同シンポジウム「多様なアプローチによる量子色力学の非摂動論的現象の研究」広島大学、2013年3月28日における発表「センターボルテックスによるグルーオンプラズマの格子研究、斎藤卓也；<http://www.pt.div.jps.or.jp/2013qcd/1-Kondo.pdf>。(会議全体の要旨)

<http://www.pt.div.jps.or.jp/2013qcd/3-Saito.pdf>.(自身の発表スライド)

〔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0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

斎藤 卓也 (Saito Takuya)
高知大学・教育研究部
自然科学系学部門・助教
研究者番号 50448023