

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008 年 ～ 2010 年

課題番号：20540265

研究課題名(和文)

カイラル有効理論に基づく量子色力学相転移点近傍のダイナミクスの解明

研究課題名(英文)

Study of Dynamical Properties around the QCD Critical Points based on Chiral Effective Theory

研究代表者

國廣 悌二 (KUNIHIRO TEIJI)

京都大学・理学研究科・教授

研究者番号：20153314

研究成果の概要(和文)：

量子色力学(QCD)の有効模型を用いて、電荷中性条件下のクォーク物質は臨界点が複数存在する複雑な相構造を持ち得ることを明らかにした。臨界点付近においては、エネルギー揺らぎが支配的になることを示し、その実験的検証方法を提案した。散逸系に対する相対論的流体方程式を「くりこみ群法」により系統的に導出した。QCD 物質の「早期熱化」は古典ヤン・ミルズ場のカオス的な振る舞いに帰着され得ることを示した。また、相対論的場の理論による輸送係数の新しい計算方法を開発した。高温ではクォークのスペクトルに超低エネルギーの集団的励起分枝が存在することを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：

We have shown on the basis of the chiral effective theory that the QCD matter can have a multiple-critical points structure under charge neutrality. The soft dynamics around the typical QCD critical point has been shown to be dominated by the energy fluctuations. A generic class of hydrodynamic equations for a viscous fluid has been derived by applying the so called renormalization-group method. We have shown that the mysterious early thermalization of the QCD matter suggested by RHIC experiments can be attributed to the chaotic behavior of the nonlinear dynamics of the classical Yang-Mills field. A novel diagrammatical method for computing the transport coefficients in the relativistic quantum field theory has been developed. We have established that the quark spectral function gets to develop an ultrasoft mode at high temperature generically.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2009 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：物理学

科研費の分科・細目：原子核・素粒子・宇宙

キーワード：原子核理論

1. 研究開始当初の背景

有限温度・密度での量子色力学(QCD)の相構造を明らかにすることは初期宇宙の物質の状態や中性子星やクォーク星の内部構造を明らかにする上で基本的な重要性を持っている。そこでは、QCD の示すであろう基本的な二種の相転移、非閉じ込め相転移とカイラル相転移、の検証が中心的な課題となる。QCD の相図はある制限されたモデルの範囲で臨界点が一つだけあるだろうと予想されていた。さらに、臨界点近傍での支配的なダイナミクスは何か、カイラルなシグマモードかあるいは密度揺らぎかどうか、についてさえ混乱状態であった。さらに、クォークスペクトルの超低エネルギーでの励起形態についてはほとんど未解明であった。

米国ブルックヘブン国立研究所(BNL)のRHIC(Relativistic Heavy-Ion Collider)による新しい実験結果やその後の新たな理論研究の成果をもとに、QCD 相転移後の物質の物性とそのダイナミクスへの影響について理論的に興味深い問題を提起している。RHIC の原子核衝突実験およびその後の流体モデルを用いた解析は、生成された高温状態の物質がほとんど理想流体として振る舞うことを示唆している。理想流体は平均自由行程が短い極限にあたりと考えられるので、上記のことは生成された QCD 物質が非常に強く結合した物質であることを意味している。

実は、このような強い相関の存在は相転移の臨界点近傍ではむしろ自然なことであり、臨界温度 T_c より高温の QGP 相においてハドロンの励起の存在の可能性さえあるという重大な提起は、申請者らがつとに指摘していたことである。

一方、実験解析の示唆する粘性/エントロピー比の小ささは逆に強相関の輸送係数や散逸を含む相対論的流体方程式への興味を大きく増大させている。

ここ数年、申請者らはこのような臨界点近傍のハドロンの励起の存在の可能性(カイラル相転移のソフトモードが系の基本構成要素であるクォークの準粒子描像自体を変更する可能性を探る研究を集中的に行ってきた。

摂動的QCD計算が妥当な超高温(TeV以上)においては、熱的に励起したグルーオンとの結合のため通常のクォークモードの他に新たなクォーク的集団モード「プラズミーノ」が現れることが硬熱ループ(Hard-thermal loop; HTL)近似により確立している。なお、これはクォークスペクトル関数に2個のピークが現れることを意味する。

それに対し、申請者らの研究は比較的低温度(200MeV程度)でのカイラル相転移の臨界現象としてクォークの準粒子描像の可能な変化を探る始めてのものとなった。その結

果分かったことは、熱的に励起した質量有限のカイラルソフトモードとクォークおよび熱的に励起した反クォークの「孔(ホール)」の共鳴散乱(ランダウ減衰の一種)により、クォークは新奇の集団性を獲得し、その結果クォークスペクトル関数にゼロエネルギー付近に新たなピークが現れ、スペクトル関数は3個のピークを持ち得るということである。このことはクォークの性質がカイラル相転移の臨界点近傍で自由気体描像やHTL近似が描くものから大きくずれるということの意味する。これは、いわゆるQGP相における物性系の強電子相関系に近い物性を示すことを意味し、その物理的描像が大きく変更されることを示唆している。

また、このようにクォーク準粒子が熱的に励起した素励起と結合して強い集団運動性を獲得している場合の各種輸送係数への影響への評価は理論的にもたいへん興味ある課題であり、現象論的にも重要である。主要研究課題の一つとして取り上げる。

さらに、RHICのような重イオン衝突の実験による検証を行うには、流体方程式により具体的にダイナミクスを解いて解析することが不可欠である。そのような解析は散逸などへの影響の評価を通して物質の詳細な物性についての知見を得ることができるであろう。

2. 研究の目的

本申請課題においては、QGP相且つ臨界点近傍におけるクォークの著しい性質の可能な変化が(たとえば、多ピーク構造)どのようにQGPの動的な性質、ダイナミクスに影響をもたらすかを包括的に研究することを主な目的とする。

まず、早期熱化の機構を明らかにしたい。そのために、量子系におけるエントロピー生成の機構についての深い洞察とそれを実現する強力な理論的枠組みが必要である。ここでは、伏見関数を用いて、最小の粗視化を行い、情報の縮減としてのエントロピー生成の記述を目指す。

さらに、重イオン衝突で生成された物質のダイナミクスを記述する基本方程式である散逸を含む場合の相対論的流体方程式を確立することを目指す。そのために、通常の現象論的な方法ではなく、背景のボルツマン方程式からその赤外有効モデルとして流体方程式を導出することを試みる。クォーク準粒子が熱的に励起した素励起と結合して強い集団運動性を獲得している場合の各種輸送係数への影響への評価を行う。

QCD 臨界点においては、気-液相転移と同じ

ダイナミクスが関与すると考えられるので、保存量のダイナミクスを記述する相対論的流体方程式を用いて、密度揺らぎとエネルギー揺らぎを同一の足場で記述しその強度スペクトルを臨界点への近さの関数として求める。

物性理論における輸送係数の計算理論として確立してエリアシュベルグ理論を相対論的な系へ展開する。その場合、虚時間形式で定式化されている元の理論を実時間形式に書き直し、理論の透明性を計る。こうして相対論的場の量子論における新しい輸送係数の計算方法を定式化する。

クォーク物質の当然の条件である電荷中性のもとで、クォーク間の赤外有効相互作用をより現実的なものとしてQCD相構造を明らかにする。臨界点まわりのソフトモードを総合的に考察し、何が支配的なダイナミクスであるかを明らかにし、臨界点検証のための実験への提案を行う。また、臨界点近傍を含む、有限温度でのクォーク物質のダイナミクスを明らかにする。

3. 研究の方法

量子系における情報縮約を実現するため伏見関数を用いて、最小の粗視化を行い、情報の縮減としてのエントロピー生成の記述を目指す。

散逸系の相対論的流体方程式の導出というのは、相対論と熱力学との融合という基本的問題を扱う問題である。相対論的不変性(共変性)は運動学方程式としての相対論的ボルツマン方程式に求め、ダイナミクスの縮約法として確立している「くりこみ群法」を用いてその赤外有効理論として流体方程式を導出することを試みる。

南部—ヨナラシニオ型の有効モデルを拡張し、有限温度での平均場近似を用いて、カイラルおよびカラー超伝導相転移の効果を取り入れて熱力学ポテンシャルを計算する。粒子数やエネルギーなどの保存量を相互的に取り入れた赤外有効モデルとしての流体方程式を用いて、密度ゆらぎおよびそれに結合したエントロピー揺らぎの臨界点近傍でのダイナミクス、特にそのスペクトル関数を求める。さらに、有限温度の場の理論における摂動論を適用して、一般的な枠組みでボソンと結合するクォークのグリーン関数を計算し、その極と強度関数からクォークのスペクトル構造を求める。

4. 研究成果

米国BNLのRHICで発見された「早期熱化」の与える一つの機構を「伏見関数」を用いた定式化により初めて提案し、その展開を行った。その結果、古典ヤンミルズ場の非線形性によるカオス的な振る舞いがエントロピー生成に大きく寄与することが見いだされた。

基礎が未確立の散逸を含む相対論的流体方程式を「くりこみ群法」により系統的に導出した。特に、所謂二次の散逸を含む相対論的流体方程式を導出した。力学系の強力な縮約法を用いたほとんど仮定無しでの微視的な導出のため、これまでの「導出」で曖昧に設定されていた「接続条件」が必ずしも正しくないことが判明した。すなわち、Eckartに由来しIsrael-Stewartらも採用している局所静止系の定義が下部のボルツマン方程式と整合的でないことが明らかにされた。

さらに、エリアシュベルグ理論を発展させて、相対論的場の量子論における新しい輸送係数の計算方法が展開された。

我々が指摘してきたように、量子色力学(QCD)相図における「新しい臨界点」が低温度・高密度領域に存在する可能性が明らかにされた。そこでは、ベクトル相互作用や現実的に要請される荷電中性条件により引き起こされるカイラル相転移とカラー超伝導の共存/競合が重要な役割を果たしている。さらに、電荷中性およびベータ平衡条件の下で、ダイクォーク結合を持つQCDの軸性異常項およびベクトル相互作用の効果をもつ2+1フレーバーNJLモデルにおいても新たな臨界点の存在を含むQCD相構造の複雑の様相が明らかにされた。電荷中性条件下でフェルミ面のミスマッチのために相の境界は非常に揺らぎが大きくなり、平均場近似では普遍的にいくつもの臨界点が現れ得ることが示された。また、軸性異常項とベクター相互作用は同じ役割をし、非対称クォーク物質での色磁気不安定性の問題が完全に回避され得ることも明らかになった。このような低温度領域での「新しい臨界点」の存在可能性は、高密度QCDの理解の上でのアカデミックな興味にとどまらず、コンパクト星の内部状態の物理への大きなインパクトを与えるものである。

密度ゆらぎによる光散乱理論を相対論的系に拡張し、熱力学量および輸送係数の臨界点での振る舞いが密度揺らぎのスペクトル関数にどう影響するかを散逸流体方程式の初期値問題を解くことにより考察した。QCD臨界点ではフレームによらずレーリーピークのみが残ることが判明した。文献で提案されている散逸系流体方程式の特性も明らかにされた。さらに、臨界点で密度揺らぎが縮減する理由を臨界点における相関距離の増大を基づいて明らかにするとともに、高エネルギー重イオン衝突でQCD臨界点の存在と位置を検証する有力な方法として、重イオンの入射エネルギーの減少とともにマッハコーンが消失していくことを観測することを提案した。

臨界点近傍のハドロンの集団励起（相転移のソフトモード）が系を構成するクォークの準粒子描像自体を変更する可能性がより明らかになった。質量を持つベクトル型のボソン励起がクォークスペクトルに与える影響を全温度領域に渡った解析した結果、ボソンの質量程度の温度では、ゲージに依らず、クォークスペクトルは原点付近のものを含めて3ピークを持つことが明らかになった。さらに、ボソンがスカラー型の場合、超高温においてもこの3ピーク構造が維持されることを系統的な摂動論において示すことに成功した。これは、高温領域におけるクォークスペクトルについて全く新たな知見を与えるものであり、クォーク・グルーオンプラズマの物理や宇宙初期のフェルミオンのスペクトル研究について重要な基礎を与えるものである。

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 8 件）

- (1) Y. Hidaka and T. Kunihiro,
‘Renormalized Kinetic Theory as derived from quantum field theory; A novel diagrammatic method for computing transport coefficients’
Phys. Rev. D83 (2011), 076004
(18 pages)
- (2) D. Satow, Y. Hidaka and T. Kunihiro,
‘Spectral Function of Fermion Coupled with Massive Vector Boson at Finite Temperature in Gauge Invariant Formalism’
Phys. Rev. D 83, (2011), 045017 (21 pages)
- (3) T. Kunihiro, B. Muller, A. Ohnishi and A. Schafer, T.T. Takahashi and A. Yamamoto,
‘Chaotic behavior of classical Yang-Mills dynamics’
Phys. Rev. D82 (2010), 114015 (9pages)
- (4) K. Tsumura and T. Kunihiro,
‘Second-order Relativistic Hydrodynamic Equations for Viscous Systems: How does the dissipation affects the internal energy?’
Phys. Lett. B690 (2010), 255-260
- (5) Y. Minami and T. Kunihiro,
‘Dynamical Density Fluctuations around QCD Critical Point Based on Dissipative Relativistic Fluid Dynamics

-Possible fate of Mach cone at the critical point-

Prog. Theor. Phys. 122 (2009), 891-910

(6) T. Kunihiro, B. Muller, A. Ohnishi and A. Schafer,

‘Toward a Theory of Entropy Production in the little and Big Bang’

Prog. Theor. Phys. 121 (2009), 555-575

(7) Z. Zhang and Teij Kunihiro,

‘Vector interaction, charge neutrality and multiple chiral critical point structures’

Phys. Rev. D80 (2009), 01405 (14 pages)

(8) Z. Zhang, K. Fukushima and T. Kunihiro,
‘Number of the QCD critical points with neutral color superconductivity’

Phys. Rev. D79 (2009), 014004 (13 pages)

[学会発表]（計 9 件）

(1) 佐藤大輔、日高義将、国広悌二、
「改善された摂動論によるフェルミオンのソフトモードの解析」、日本物理学会 2010 年秋季大会、2010 年、9 月 11 日 -14 日、九州工業大学

(2) T. Kunihiro,

‘Density fluctuations around the QCD critical point: role of the vector Interaction’, ECT*--EMMI International Workshop on Chiral Symmetry and Confinement in Cold, Dense Quark Matter July 19 - 23, 2010, ECT*, 2010/07/21, ECT*, Trento, Italy

(3) 佐藤大輔、日高義将、国広悌二,

「質量を持つベクトル粒子と結合したフェルミオンの有限温度におけるスペクトル関数-3ピーク構造のゲージ非依存性」日本物理学会第 65 回年次大会、2010/03/20、岡山大学

(4) D. Sato, Y. Hidaka and T. Kunihiro,

‘Spectral function of a fermion coupled with a massive vector particle at finite temperature--- analysis on gauge dependence in the Stueckelberg formalism’

3rd Joint Meeting of the Nuclear Physics Division of the Physical Society of Japan and the American Physical Society, 2009/10/15, Waikoloa, Hawaii, USA

(5) Y. Minami and T. Kunihiro,

‘Attenuation of Dynamical Density Fluctuation around QCD Critical Point and

Its Phenomenological Implications’
3rd Joint Meeting of the Nuclear Physics
Division of the Physical Society of Japan
and the American Physical Society,
2009/10/15, Waikoloa, Hawaii, USA

(6) Teiji Kunihiro,

‘Toward Identifying the QCD Critical
Point: Attenuation of the sound mode
around the critical point’

5th International Workshop on Critical
Point and Onset of Deconfinement (CPOD),
BNL, 2009/06/09, USA

(7) T. Kunihiro, Y. Minami and

K. Tsumura,

‘Critical Opalescence around the QCD
Critical Point and Second-order
Relativistic Hydrodynamic Equations
Compatible with Boltzmann Equation’
International Conference

‘Quark Matter 2009, 2009/03/31,
Knoxville, USA

(8) 南佑樹、国広悌二、津村享佑

「相対論的散逸流体方程式による「臨界たんぱく光」、

日本物理学会第 64 回年次大会、2009/3/28、
立教大学

(9) 国広悌二,

「クォーク・グルーオンプラズマ相の素励
起と輸送」、

日本物理学会 2008 年秋季大会、2008 年 9 月
22 日、山形大学

[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

国広 悌二 (KUNIHIRO TEIJI)

京都大学・理学研究科・教授

研究者番号 : 20153314

(2) 研究分担者

()

研究者番号 :

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :