

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24年 5月 29日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009 ～ 2011

課題番号：21740182

研究課題名（和文） マクロとミクロに探る有限温度 QCD の物性論

研究課題名（英文） Condensed matter physics of QCD at nonzero temperature

研究代表者

北澤 正清 (KITAZAWA MASAKIYO)

大阪大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号：10452418

研究成果の概要（和文）：

格子 QCD を用いた数値シミュレーションにより、非閉じ込め相におけるクォークの準粒子的な性質を明らかにすることで高温物質のミクロな性質を探った。また、流体模型に現れる輸送係数の解析にもシミュレーションを応用することでこの模型に対する一定の情報を得ることができた他、相対論的重イオン衝突実験で得られる高温物質のゆらぎの物理量から相転移の情報を抜き出すための理論的、および現象論的な研究を行うなど、数値解析および実験で高温物質のマクロな性質を探るための研究成果も挙げる事ができた。

研究成果の概要（英文）：

We investigated spectral properties of quarks in the deconfined phase using lattice QCD Monte Carlo simulations, and revealed some interesting results on their quasi-particle nature. The numerical method was also applied to the measurements of transport coefficients. We also performed theoretical and phenomenological studies on the analysis of QCD phase diagram using fluctuation observables obtained in relativistic heavy ion collision experiments.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

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：クォーク、QGP、格子 QCD

1. 研究開始当初の背景

超高温もしくは超高密度の物質中では、量子色力学(QCD)の基本自由度であるクォークとグルオンが閉じ込めから解放された状態である、クォーク・グルオン・プラズマ

(QGP)相が実現する。2001年からアメリカのRHICで行われた相対論的重イオン衝突実験でQGP状態の実現が確認され、QCD相転移の臨界温度 T_c 付近におけるQGP相が完全流体的な振る舞いを示す強結合系であること等、この物質に対する興味深い

実験結果が続々と得られていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、相対論的重イオン衝突実験で得られた実験データ、および格子 QCD 数値シミュレーションで得られる解析結果を用いて QGP 状態の物性的性質を明らかにすることであった。この際特に、相構造や熱力学量など系のマクロな量と、系を構成する素励起の準粒子的性質などのミクロな量の双方に着目し、両者を相補的に用いながら総合的に研究を推し進めることを心がけた。

3. 研究の方法

(1) 格子 QCD 数値シミュレーションにより非閉じ込め相におけるクォークの伝搬関数を測定し、この結果から QGP 状態においてクォークが持つ準粒子的性質を探る研究を行った。特に、解析をクォーク質量や運動量など連続パラメータの有限領域に対して行い、それらを摂動論で得られる結果と比較することにより、単なる解析にとどまらず非摂動的な温度領域におけるクォークの性質を多角的に明らかにすることを試みた。

(2) 相対論的重イオン衝突実験で得られる実験データの中で、イベントバイイベント解析で得られるバリオン数ゆらぎに着目し、有限温度・密度における QCD 相図の情報をバリオン数ゆらぎを用いて解析するための理論的、および現象論的な研究を行った。この研究では、QCD 相図上におけるバリオン数ゆらぎの理論的な解析を行い、モデルに依存しない一般的な性質を明らかにするとともに、それらを実際の実験で観測しようとした場合に起こりうる技術的な問題に関する提言も行うことにより、実験と理論の協力によってこの分野を進めることを意識した研究を行ったことが特徴として挙げられる。

4. 研究成果

(1) 有限温度格子 QCD 数値シミュレーションを用いて幾つかの温度に対してクォークの虚時間相関関数を運動量、質量などの連続パラメータの関数として解析した。解析にお

いては、ゲージはランダウゲージに固定し、ウィルソンクォークを用いた。次に、これらの解析によって得られた結果を実時間に解析接続することによりスペクトル関数を推定する作業を行った。この推定においては、スペクトル関数に対してポール近似を行ったが、この近似が格子上で得られた相関関数を極めてよく再現することが確かめられた。これらの研究により、非摂動領域におけるクォークの準粒子描像に関する以下のような性質を初めて第一原理的に示すことができた。

①クォーク場の励起は、臨界温度付近の強結合領域においても、超高温の摂動論が有効な温度領域に類似した準粒子的な振る舞いをするのが強く示唆されたほか、摂動論的状态と類似した熱質量を持った状態としてふるまうという結果が得られた。これらの結果は、最近 RHIC で観測されたクォーク数スケールリングにおいて、実験で作られた QGP 状態中にクォークの準粒子が存在することが示唆されたことと整合するため、現象論的な見地からもたいへん興味深い結果であるといえる。

②シミュレーションを行ったクエンチ近似の範囲内ではあるが、臨界温度近傍の強結合領域におけるクォークの熱質量が、温度のおよそ 0.8 倍程度であるという定量的な結果が得られた。また、熱質量と温度の比は温度の減少と共に緩やかに増加するという結果が得られた。この結果は、熱質量の値がゲージ結合定数に比例するという摂動論の予言とコンシステントである。

③軽いクォークの励起スペクトルは、摂動論的状态と同様にノーマルとプラズミノと呼ばれる二つのブランチを持つことが分かった。また、それぞれのブランチの有限運動量における分散関係を解析したところ、図 1 のような振る舞いをするのが分かった。この図において、ノーマルモードは通常の粒子的に振る舞うのに対し、プラズミノモードは有限運動量で極小値を持つという結果が得られた。プラズミノモードのこの性質は摂動論の範囲ではよく知られており、その現象論的な帰結も以前からよく議論されている。このような性質が臨界温度付近の非摂動領域においても存在するということが今回の解析により初めて明らかにされたことにより、今後この極小値の存在を現象論的な見地から追及する研究が発展することが期待される。

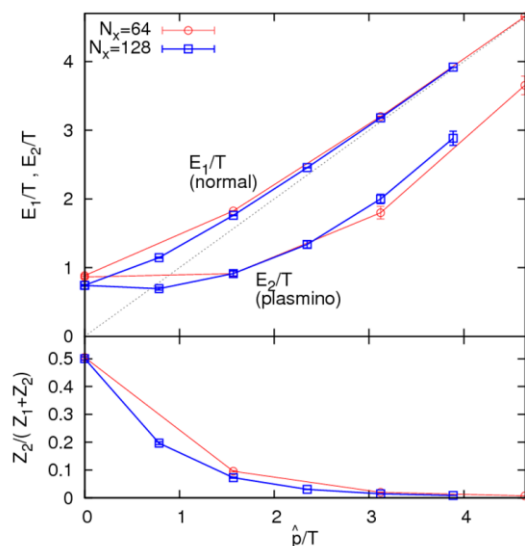


図1 クォークの分散関係

(2) 相対論的重イオン衝突実験でQCD相図を探るための理論的・現象論的な基礎づけに関して、以下の仕事を行った。
 ①QCD相図上におけるバリオン数ゆらぎの振る舞いを理論的に整理することにより、バリオン数の3次のキュムラントが非閉じ込め相転移の相境界で符号を変えることを明らかにした。この議論は、相転移の一般論のみを用いて進められているためこの結果はモデルに依存しない普遍的な性質である。更に、符号の変化は実験的にも明瞭な観測量となるため、この性質が実験で相転移の情報を探る際の明瞭なシグナルとなることを論じた。また、同様に符号を変える物理量を、バリオン数の3次キュムラントの他に6つ提示し、これらを用いて実験的にQCD相図を探るためのシナリオを論じた。それぞれの物理量が符号を変える領域を有効模型で解析した結果を図2に示す。

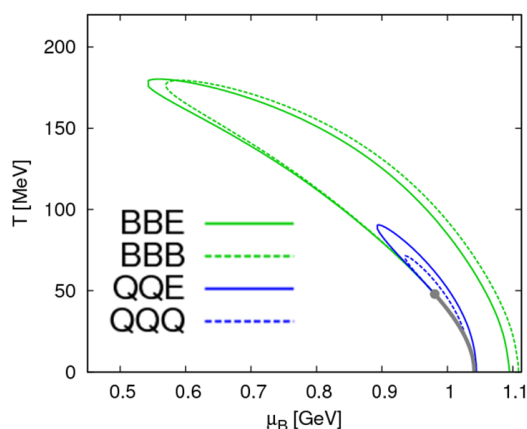


図2 QCD相図上におけるゆらぎの振る舞い

②バリオン数ゆらぎは、QCD相図上で物質の状態に最も敏感に反応してその性質を変える物理量であることが様々な理論研究によって指摘されており、QCD相図を実験的に探るための観測量として、ゆらぎの中でも最もクリアな量であると考えられている。しかし、現在の実験装置の多くは中性バリオンを観測できないので、バリオン数ゆらぎは実験的観測量ではないと考えられており、2011年までは実験的観測量である陽子数ゆらぎをバリオン数ゆらぎと同一視することで実験と理論を比較するという議論が頻繁に行われていた。我々は、重イオン衝突の終状態における粒子間の相関を理論的に整理することで、直接的な観測量ではないバリオン数ゆらぎを実験的な観測量のみを用いて決めることができることを指摘し、この作業を遂行するための一連の関係式を具体的に導出した。また、この関係式を用いることにより、従来行われてきたバリオン数ゆらぎと陽子数ゆらぎを同一視することが著しく危険であることを指摘した。また、2011年にRHICで得られた陽子数ゆらぎに関する実験結果が一見相転移の存在を否定するものであったのに対し、この議論が前述の同一視に由来する誤りであることを指摘した。

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6件)

① Masakiyo Kitazawa, Masayuki Asakawa, “Revealing baryon number fluctuations from proton number fluctuations in relativistic heavy ion collisions”, Physical Review C85 (2012) 021901(5 pages) 査読有

<http://prc.aps.org/abstract/PRC/v85/i2/e021901>

② Masayuki Asakawa, Shinji Ejiri, Masakiyo Kitazawa, “Third Moments of Conserved Charges as Probes of QCD Phase Structure”, Physical Review Letters 103 (2009) 262301 (4 pages) 査読有

<http://prl.aps.org/abstract/PRL/v103/i2/6/e262301>

③ Frithjof Karsch, Masakiyo Kitazawa, “Quark propagator at finite temperature and finite momentum in quenched lattice QCD”, Physical Review D80 (2009) 056001 (18 pages) 査読有

<http://prd.aps.org/abstract/PRD/v80/i5/e056001>

〔学会発表〕（計 10 件）

① Masakiyo Kitazawa, “Third moments of conserved charges in phase diagram of QCD”, at “12th International Conference, Baryons’ 10. The structure of baryons”, 7-11 Dec 2010, RCNP, Osaka University, Osaka, Japan

② Masakiyo Kitazawa, “Spectral properties of quarks above T_c -- thermal mass, dispersion relation, and self-energy --”, at “28th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2010)”, 14-19 Jun 2010, Villasimius, Sardinia, Italy

6. 研究組織

(1) 研究代表者

北澤 正清 (KITAZAWA MASAKIYO)
大阪大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号：10452418

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし