

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540295

研究課題名(和文)数値シミュレーションによる高温高密度QCDの相構造の研究

研究課題名(英文)Study of QCD phase structure at high temperature and density by numerical simulations

研究代表者

江尻 信司(Ejiri, Shinji)

新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号：10401176

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：数値シミュレーションにより、高温高密度での量子色力学(QCD)の相構造を研究した。温度と化学ポテンシャルだけではなくクォーク質量も変数として加え、確率分布関数を計算して相転移の性質を調べる方法を提案した。まず、クォークが重い領域で相構造を調べ、一次相転移とクロスオーバーの領域を分ける臨界面を任意の密度で具体的に決定し、その方法の有用性を示した。続いて、現実のクォーク質量での研究を目指した動的クォークが2種類の計算を行い、現象論的に予想されるような低密度でのクロスオーバーが高密度で一次相転移に変わる兆候を確認した。さらに、低密領域でのカイラル相転移のスケーリング則などの研究を行った。

研究成果の概要(英文)：We studied quantum chromodynamics (QCD) at high temperature and density by numerical simulations. Treating the quark masses as parameters of the system as well as the temperature and chemical potential, we proposed a method to investigate the nature of phase transitions by calculating probability distribution functions. First, we tested usability of the method studying the heavy quark region at finite density and actually found the critical surface which separates the crossover and first order transition regions in the heavy quark region. Second, we performed simulations with 2-flavor dynamical quarks. The results suggest that the crossover transition at low density will change first order at high density, which have been predicted by phenomenological studies. Furthermore, we did various studies related to the QCD phase transition such as the scaling behavior of the chiral phase transition at low density.

研究分野：物理学

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：素粒子論 計算物理

1. 研究開始当初の背景

宇宙誕生直後の温度が1兆 ぐらいのときに、クォーク・グルーオン・プラズマ状態からハドロン状態に変わる「強い相互作用」の相転移があったと考えられている。そのような状態の変化を実験室で実現するために、現在、欧州原子核研究機構のLHCやブルックヘブン国立研究所のRHICで大規模な重イオン衝突実験が行われている。

その実験を支援することも含め、宇宙の進化を理解するため、現在、その相転移の理論的な研究が非常に重要となっている。「強い相互作用」の基礎理論は量子色力学(QCD)であることが確立して、その最も有力な研究方法はスーパーコンピューターによる大規模数値シミュレーションである。しかし、密度の効果を取り入れようとすると、その数値的な研究が困難になることが知られていて、その解決策を探ることが急務となっている。

2. 研究の目的

高温高密度でのQCDの相転移が一次相転移か二次相転移かクロスオーバーかといった相転移の性質について議論する。その相転移の次数はクォークの質量によって変化するので、クォーク質量も変数として加え、温度、密度、質量の関数として相転移がどのように変化するかを調べることが本研究の目的である。それを行うためには、有限密度で現れる「符号問題」や「オーバーラップ問題」の解決が不可欠で、その回避方法を同時に議論する。

3. 研究の方法

有限密度QCDの研究における最大の問題は、配位生成の重みが複素数になってしまっていて、モンテカルロシミュレーションが直接には行えないことである。それを回避するために、シミュレーションができるパラメータで配位生成を行い、期待値の計算の段階で正しい重みに補正するという、「再重み付け法」を用いて計算を行う。特に本研究では、適当な物理量で状態をラベルして、その状態がどれだけの確率で発生するかを表す関数である「確率分布関数」に着目して、重みの補正を行う。一次相転移があれば、同時に2つの状態が等確率で現れるため、その確率分布関数の形を調べることによって、一次相転移が起こったかどうかを判定することができる。

再重み付け法でシミュレーションパラメータを変化させたときに、その確率分布関数がどう変化するかを式で書き下し、いろいろなパラメータで生成したデータを組み合わせることにより、広い変数域で確率分布関数を計算する。それがオーバーラップ問題の回避法になり、さらに、有限密度での符号問題は、その問題を級数展開の収束性の問題にすり替えるような方法で回避する。

4. 研究成果

(1) その方法が機能するかどうかを、計算が簡単なすべてのクォーク質量が重い場合でテストし、その方法で相転移の性質が調べられることを確認した。QCD相転移のオーダーパラメータ、ポリヤコフープなどの関数とした確率分布関数を相転移点直上でプロットして、質量の逆数をゼロから変化させた。質量が大きいつきにピークが複数あった分布関数が徐々に1つに変化した。これは一次相転移からクロスオーバーになったことを意味している。さらに、有限密度での相転移の性質が変わるパラメータ空間内の臨界面を求めた。論文は

(2) 実際のクォーク2種類は非常に軽いいため、(1)で議論したクォークが重い領域の臨界面は現実世界とは無縁である。質量のパラメータ空間内の現実の質量点付近にも同様な臨界面があることが予想されていて、有限密度でその臨界面を探ることが実験・理論の両側面から関心がもたれている。各密度で、現実の質量点とその臨界面に対して一次相転移側にあるかどうかを特定することによって、現実世界のQCD相転移の性質が分かる。本研究ではその臨界面の発見に向けた研究を行った。有限密度ではシミュレーションの重みが複素数になるので、その複素位相を除いて配位生成を行い、あとで複素位相部分の補正を行った。その補正のとき、符号問題が現れるが、位相因子の期待値をキュムラント展開し、その収束性を確認しながら、最初の項で近似することによってその問題を回避した。まだ格子点の数が少ない計算であるが、確率分布関数の形を調べることにより、低密度でクロスオーバーであった相転移が、高密度で一次相転移に変わる兆候を見つかることができた。今後、その相転移の変化を系統的に調べることにより、高密度QCDの相構造の詳細な研究に進んでいきたいと考えている。準備的な結果は論文 である。

(3) 現実世界は非常に軽いクォーク2種類と中間的な質量のクォーク1種類、それ以外は重いという系であるが、それを少し変更して、軽いクォーク2と少し重いクォークが多数ある系を研究した。その系では、一次相転移が現れる臨界点を、有限密度の場合も含めて、容易に調べられることが分かった。その重いクォークの種類が多くなるほど、有限密度では化学ポテンシャルが大きくなるほど、一次相転移の領域が広がることが分かった。その研究から出発してその重いクォークの数を減らし、現実世界に近付けるというアプローチがあることを提案した。

さらに、その系は電弱相互作用の複合ヒッグス模型の一例と同等で、その相転移を調べることによって、電弱相転移でバリオン数の非対称性を作ることが可能かどうかの議論に重要な情報を与えられることが分かった。

論文は である。

(4) その他、WHOT-QCD Collaboration という研究グループで、ウィルソン・フェルミオンを用いたQCDの熱力学の研究を行い、いくつかの成果が得られている。高温の媒質中で重いクォーク間のポテンシャルエネルギーを測定することによるグルーオンの遮蔽質量の計算(論文)、チャーモニウムの質量スペクトル関数(論文)、ゼロ密度2+1フレーバーQCD(アップ、ダウン、ストレンジクォークの動的効果を考慮した系。)の状態方程式(論文)、低密度領域でのフレーバー数2の相転移のユニバーサリティー・クラスの研究(論文)などである。論文はこれまでのWHOT-QCD Collaborationの研究のまとめで、論文は相転移の性質を調べるためのLee-Yang zeroの解析について書いた論文である。

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18件)

“Histograms in heavy-quark QCD at finite temperature and density”, H. Saito, S. Ejiri, S. Aoki, K. Kanaya, Y. Nakagawa, H. Ohno, K. Okuno, T. Umeda (WHOT-QCD Collaboration), Physical Review D 89 巻 (2014), 034507 (1-18), arXiv:1309.2445, 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevD.89.034507

“Nature of finite temperature and density phase transitions in many-flavor QCD”, Shinji Ejiri, Norikazu Yamada, Proceedings of Science (Lattice 2013) 146 (1-7), arXiv:1312.0102, 査読有
http://pos.sissa.it/archive/conferences/187/146/LATTICE%202013_146.pdf

“Singularities around the QCD critical point in the complex chemical potential plane”, Shinji Ejiri, Yasuhiko Shinno, Hiroshi Yoneyama, Proceedings of Science (Lattice 2013) 210 (1-7), arXiv:1311.6073, 査読有
http://pos.sissa.it/archive/conferences/187/210/LATTICE%202013_210.pdf

“Scaling properties of the chiral phase transition in the low density region of two-flavor QCD with improved Wilson fermions”, T. Umeda, S. Ejiri, K. Kanaya, Y. Maezawa, Y. Nakagawa, H. Ohno, H. Saito, S. Yoshida (WHOT-QCD Collaboration), Proceedings of Science (Lattice 2013) 450 (1-7), arXiv:1312.5385, 査読有

http://pos.sissa.it/archive/conferences/187/450/LATTICE%202013_450.pdf

“Phase structure of many flavor lattice QCD at finite temperature”, Norikazu Yamada and Shinji Ejiri, Proceedings of KMI-GCOE Workshop on “Strong Coupling Gauge Theories in the LHC Perspective (SCGT 12)”, World Scientific, September 2013, 51-57, arXiv:1304.2091, 査読有

“Phase structure of hot dense QCD by a histogram method”, Shinji Ejiri, European Physical Journal A 49 巻 (2013), 86 (1-16), arXiv:1306.0295, 査読有
DOI: 10.1140/epja/i2013-13086-7

“End Point of a First-Order Phase Transition in Many-Flavor Lattice QCD at Finite Temperature and Density”, Shinji Ejiri and Norikazu Yamada, Physical Review Letters 110 巻 (2013), 172001 (1-5), arXiv:1212.5899, 査読有
DOI:10.1103/PhysRevLett.110.172001

“Thermodynamics in 2+1 flavor QCD with improved Wilson quarks by the fixed scale approach”, T. Umeda, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, K. Kanaya, Y. Maezawa, H. Ohno (WHOT-QCD Collaboration), Proceedings of Science (LATTICE 2012), 074 (1-7), arXiv:1212.1215, 査読有
http://pos.sissa.it/archive/conferences/164/074/Lattice%202012_074.pdf

“Probability distribution functions in the finite density lattice QCD”, S. Ejiri, Y. Nakagawa, S. Aoki, K. Kanaya, H. Saito, T. Hatsuda, H. Ohno, T. Umeda (WHOT-QCD collaboration), Proceedings of Science (LATTICE 2012), 089 (1-7), arXiv:1212.0762, 査読有
http://pos.sissa.it/archive/conferences/164/089/Lattice%202012_089.pdf

“Phase structure of finite density QCD with a histogram method”, Y. Nakagawa, S. Ejiri, S. Aoki, K. Kanaya, H. Saito, H. Ohno, T. Hatsuda, T. Umeda (WHOT-QCD collaboration), Proceedings of Science (LATTICE 2012), 092 (1-7), arXiv:1212.0890, 査読有
http://pos.sissa.it/archive/conferences/164/092/Lattice%202012_092.pdf

“Application of Fixed Scale Approach to Static Quark Free Energies in Quenched and 2+1 Flavor Lattice QCD with Improved Wilson Quark Action”, Y. Maezawa, T. Umeda, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, K.

Kanaya, H. Ohno (WHOT-QCD Collaboration), Progress of Theoretical Physics 128 巻 (2012), 955-970, arXiv:1112.2756, 査読有 DOI: 10.1143/PTP.128.955

“ Ab initio study of the thermodynamics of quantum chromodynamics on the lattice at zero and finite densities ”, Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, and Takashi Umeda for the WHOT-QCD Collaboration, Progress of Theoretical and Experimental Physics 2012 巻 (2012), 01A104 (1-35), arXiv:http:1205.5347, 査読有 DOI: 10.1093/ptep/pts005

“ Numerical study of QCD phase diagram at high temperature and density by a histogram method ”, S. Ejiri, S. Aoki, T. Hatsuda, K. Kanaya, Y. Nakagawa, H. Ohno, H. Saito, T. Umeda (WHOT-QCD Collaboration), Central European Journal of Physics 10 巻 (2012), 1322-1325, arXiv:1203.3793, 査読有 DOI: 10.2478/s11534-012-0054-7

“ Equation of state in 2+1 flavor QCD with improved Wilson quarks by the fixed scale approach ”, T. Umeda, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, K. Kanaya, Y. Maezawa, H. Ohno (WHOT-QCD Collaboration), Physical Review D 85 巻 (2012), 094508 (1-11), arXiv:1202.4719, 査読有 DOI: 10.1103/PhysRevD.85.094508

“ Histogram method in finite density QCD with phase quenched simulations ”, Y. Nakagawa, S. Ejiri, S. Aoki, K. Kanaya, H. Ohno, H. Saito, T. Hatsuda, T. Umeda (WHOT-QCD collaboration), Proceedings of Science (LATTICE 2011), 208 (1-7), arXiv:1111.2116, 査読有 http://pos.sissa.it/archive/conferences/139/208/Lattice%202011_208.pdf

“ Finite density QCD phase transition in the heavy quark region ”, H. Saito, S. Aoki, K. Kanaya, H. Ohno, S. Ejiri, Y. Nakagawa, T. Hatsuda, T. Umeda (WHOT-QCD collaboration), Proceedings of Science (LATTICE 2011), 214 (1-7), arXiv:1202.6113, 査読有 http://pos.sissa.it/archive/conferences/139/214/Lattice%202011_214.pdf

“ Charmonium spectral functions with the variational method in zero and finite temperature lattice QCD ”, H. Ohno, S. Aoki, S. Ejiri, K. Kanaya, Y. Maezawa, H. Saito and T. Umeda (WHOT-QCD Collaboration), Physical Review D 84 巻

(2011), 094504 (1-13), arXiv:1104.3384, 査読有 DOI:10.1103/PhysRevD.84.094504

“ Phase structure of finite temperature QCD in the heavy quark region ”, H. Saito, S. Ejiri, S. Aoki, T. Hatsuda, K. Kanaya, Y. Maezawa, H. Ohno and T. Umeda (WHOT-QCD Collaboration), Physical Review D 84 巻 (2011), 054502 (1-9), arXiv:1106.0974, 査読有 DOI:10.1103/PhysRevD.84.054502

〔学会発表〕(計31件)

江尻信司, “ Nature of phase transitions in finite temperature and density QCD with many-flavors ”, SIGN 2014, International EMMI Workshop on the Sign Problem in QCD and beyond, 2014年2月18-21日, GSI, Darmstadt, ドイツ

江尻信司, “ Numerical simulations to understand QCD phase transition at high temperature and density ”, Workshop on Lattice QCD at finite temperature and density, 2014年1月20-22日, つくば市, 高エネルギー加速器研究機構

江尻信司, 「有限温度・有限密度格子QCD研究の現状と今後の展望」, 新学術領域「素核宇宙融合による計算科学に基づいた重層的物質構造の解明」のまとめと今後を語る研究会, 2013年12月20-21日, 宮城県鳴子温泉

江尻信司, “ Nature of QCD phase transition at finite temperature and density ”, Long-term Workshop on New Frontiers in QCD 2013 (NFQCD2013), 2013年11月25-29日(2nd week), 京都大学基礎物理学研究所

江尻信司, “ QCD phase structure by a histogram method ”, Lattice Field Theory on multi-PFLOPS computers (German - Japanese Seminar 2013), 2013年11月6-8日, Regensburg, ドイツ

江尻信司, 「有限密度格子QCDの数値的研究における技術的な困難とその解決にむけた試み」(企画講演), 日本物理学会 2013年秋季大会, 2013年9月20-23日, 高知大学

江尻信司, 「高温高密度多フレーバーQCDにおける一次相転移の終点」(poster) 基研研究会「熱場の量子論とその応用」, 2013年8月26-28日, 京都大学基礎物理学研究所

江尻信司, “Nature of finite temperature and density phase transitions in many-flavor QCD”, International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2013), 2013年7月29日-8月3日, Mainz, ドイツ

江尻信司, 「End point of a first order phase transition in many-flavor lattice QCD」, 名古屋大学素粒子論セミナー2013年7月19日, 名古屋大学

江尻信司, 「QCDの有限温度相転移、複合ヒッグス模型、電弱相転移」, 第41回北陸信越地区素粒子論グループ研究会, 2013年5月24-26日, 富山県、国立立山青少年自然の家

江尻信司, 「有限温度多フレーバーQCDの相構造の研究」, 日本物理学会、第68回年次大会, 2013年3月26-29日, 広島大学

江尻信司, “Study of finite density lattice QCD by the histogram method”, Symposium on Quarks to Universe in Computational Science (QUCS 2012), 2012年12月13-16日, 奈良県新公会堂、奈良

江尻信司, “Numerical study of QCD phase structure at finite temperature and density”, Conference on Computational Physics 2012 (CCP 2012), 2012年10月14-18日, 神戸ポートアイランド

江尻信司, “Critical point in finite density 2-flavor QCD by the histogram method”, Workshop on “QCD Structure I”, 2012年10月7-20日(Part I, 2012年10月8-11日), Central China Normal University, Wuhan, 中国

江尻信司, 「Toward the understanding of QCD phase structure at finite temperature and density」, 大阪大学素粒子論セミナー, 2012年10月2日, 大阪

江尻信司, “Phase structure of lattice QCD at finite density by a histogram method”, International Workshop on the Sign Problem in QCD and Beyond, 2012年9月19-22日, Regensburg, ドイツ

江尻信司, “Study of finite density lattice QCD by a histogram method”, Workshop “New Frontiers in Lattice Gauge Theory”, 2012年8月27日-9月28日(発表日8月30日), The Galileo Galilei Institute, Florence, イタリア

江尻信司, “Probability distribution functions in the finite density lattice QCD”, International Symposium on Lattice

Field Theory (Lattice 2012), 2012年6月24-29日, Cairns, オーストラリア

江尻信司, 「有限温度有限密度格子QCDの数値シミュレーション - 高密度QCDの解明にむけて」, 金沢大富山大合同セミナー, 2012年6月1日, 金沢

江尻信司, 「有限密度格子QCDにおける符号問題の解決に向けた状態密度法による試み」, 第2回HPCI戦略プログラム、分野2×分野5異分野交流研究会 - 量子モンテカルロ計算 -, 2012年5月30日, 東京大学物性研究所

21 江尻信司, “Phase structure of finite density lattice QCD by a histogram method”, YIPQS-HPCI international molecule-type workshop on New-type of Fermions on the Lattice, 2012年2月9-24日, 京都大学基礎物理学研究所

22 江尻信司, 「Finite Density Lattice QCD」, HPCI研究会「計算的手法による素粒子論研究の広がり」, 2011年12月19-21日, つくば市, 高エネルギー加速器研究機構

23 江尻信司, 「高温高密度での格子QCDシミュレーション」, 素核融合による計算基礎物理学の進展, 2011年12月3-5日, 三重県志摩市、合歡の郷

24 江尻信司, “Finite Density Lattice QCD by a Histogram Method”, 2nd Workshop on Quarks and Hadrons under Extreme Conditions - Lattice QCD, Holography, Topology, and Physics at RHIC / LHC, 2011年11月17-18日, 慶応義塾大学(日吉)

25 江尻信司, “Numerical Study of QCD Phase Diagram at High Temperature and Density by a Histogram Method”, 7th International Workshop on Critical Point and Onset of Deconfinement (CPOD 2011), 2011年11月7-11日, Central China Normal University, Wuhan, 中国

26 江尻信司, “Histogram method for the calculation of QCD equation of state at finite density”, Brookhaven National Laboratory, Nuclear Physics & RIKEN Theory Seminar, 2011年10月7日, BNL, アメリカ

27 江尻信司, “Study of QCD Phase Transition at Finite Density by a Histogram Method”, Workshop On “Fluctuations, Correlations and RHIC Low Energy Runs”, 2011年10月3-5日, Brookhaven National Laboratory, アメリカ

28 江尻信司, 「低密度領域における 2 フレーバー有限温度密度格子 QCD の臨界線の研究」, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 2011 年 9 月 16-19 日, 弘前大学

29 江尻信司, 「有限温度密度格子 QCD 計算」, 格子 QCD 将来戦略検討会, 2011 年 7 月 27 日, 東京大学理学部

30 江尻信司, “Study of finite density lattice QCD by a density of state method”, International workshop “Extreme QCD 2011”, 2011 年 7 月 18-20 日, San Carlos, メキシコ

31 江尻信司, “QCD thermodynamics by numerical simulations of Lattice QCD with Wilson-type quarks” (poster), International Conference on Ultra Relativistic Nucleus Nucleus Collisions (Quark Matter 2011), 2011 年 5 月 23-28 日, Annecy, フランス

〔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〕

ホームページ等

<http://muse.sc.niigata-u.ac.jp/~ejiri/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

江尻 信司 (EJIRI SHINJI)

新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号: 10401176

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者