

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：12601
研究種目：基盤研究(C) (一般)
研究期間：2012～2015
課題番号：24540255
研究課題名(和文)量子色力学における非平衡場のダイナミクスの研究

研究課題名(英文)Non-equilibrium field dynamics in QCD

研究代表者

藤井 宏次 (FUJII, Hirotugu)

東京大学・総合文化研究科・助教

研究者番号：10313173

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：超相対論的原子核衝突を用いた高エネルギー物質およびQCD相図の研究が進展する状況において、QCD物質の非平衡過程の理解を目指す研究を行った。

陽子-原子核衝突での粒子生成において、原子核内のグルーオン飽和効果の影響を定量的に評価した。時間発展について、グルーオン飽和状態の衝突から局所平衡化にいたる過程をビーム軸方向の膨張を取り入れつつ二粒子既約有効作用を用いて記述する運動方程式を定式化した。また、複素作用を持つ系の統計力学サンプリング手法として、複素ランジュバン方程式の方法とLefschetz thimble上のモンテカルロ法を模型に適用して、両者の利点と問題点を検討した。

研究成果の概要(英文)：With recent developments in study of high-density medium and QCD phase diagram with ultra-relativistic nuclear collisions, we performed theoretical studies towards understanding non-equilibrium aspects of QCD medium.

We evaluate quantitatively the effects of the gluon saturation in the incident nucleus on particle production in proton-nucleus collisions. Regarding time evolution, we formulate the equation of motion in tau-eta coordinates based on 2-particle irreducible effective action framework. As for statistical sampling of the systems with complex actions, we examine the pros and cons of two approaches, the complex Langevin equation and the Lefschetz thimble method, by applying them to simple models.

研究分野：原子核理論

キーワード：量子色力学 超相対論的原子核衝突 有限温度密度 非平衡場の理論 符号問題 ハドロン構造

1. 研究開始当初の背景

(1) 質量数の大きい重い原子核同士を超相対論的なエネルギーに加速し衝突させることによって高エネルギー密度状態を過渡的に生成し、その高密度物質の性質解明を目指す研究が、実験主導で進展している。クォークとグルーオンからなる高密度物質の観測量を、強い相互作用の基本理論である量子色力学(QCD)に基づく解析と比較することによって、非可換ゲージ理論 QCD の理解をさらに深めることが重要である。それは、宇宙初期や中性子星という宇宙物理現象とも関連が深い。

(2) 衝突事象では、極短時間に過渡的に高密度物質が生成されるために、非平衡過程を適切に記述することが不可欠である。一方で、非可換ゲージ理論に基づいて、高エネルギー原子核の衝突直後から局所熱平衡に至る動力学を理解することは依然と不完全なままである。

(3) また、平衡な有限温度密度 QCD の相構造に関しては、統計力学計算に現れる符号問題のために、有限密度基底状態の研究は QCD に対する有効模型計算に依拠した部分が多い。これまでの研究では、一次相転移線とその端点の存在が相図上に示唆されている。臨界性を持つ端点が存在すれば、臨界性に基づいて模型の詳細に抛らない(動的な)性質を検討できる可能性があり、実験探索のためにも重要である。

2. 研究の目的

(1) 高エネルギーに加速された原子核は、ローレンツ時間遅延効果のために、短寿命の量子揺らぎ(主にグルーオン)が飽和した状態になる。原子核衝突での粒子生成について、濃密なグルーオン飽和効果の重要性を QCD に基づいて定量的に明らかにする。

(2) 濃密なグルーオン状態を衝突初期条件として、非平衡量子場の数値シミュレーションコードを開発・実行して、原子核衝突初期の量子場の時間発展を明らかにする。

(3) QCD 相構造の上に期待される臨界端点の動的な性質と、原子核衝突での粒子生成との関係を明らかにする。関連する課題として、第一原理的な相構造の解明を目指した基礎研究を行う。

3. 研究の方法

(1) 濃密なグルーオン系の衝突からの粒子生成を、多重散乱効果を含むパートン(クォーク・グルーオン)散乱行列と、ハドロン(原子核)内の一般化されたグルーオン分布を用いて記述する。グルーオン分布は、観察する時間(エネルギー)スケールに依存し、Bjorken の x によって特徴づけられる。その

依存性は大きな x を持つグルーオンがより小さな x のグルーオンへ分岐あるいは融合する Balitsky - Kovchegov の非線形微積分方程式によって規定され、非線形性を特徴づける運動量スケールが現れる。方程式の初期条件は電子散乱データによって決められたものを用いる。原子核に対しては、質量数によって初期条件を変更して考慮するが、ここに模型的不定性が残る。

以上の理論に基づく粒子生成を数値評価し、LHC での陽子-原子核衝突実験データとを比較することによって、LHC 実験におけるパートン飽和効果の必要性を検証する。

(2) 非平衡場の方程式として、濃密なグルーオン系を扱うために、古典統計近似を採用し、非可換ゲージ理論について、平均場と揺らぎに関する運動方程式の定式化とシミュレーションコードの開発を行う。グルーオン飽和の初期条件から原子核衝突の時間発展をシミュレーションして、グルーオン飽和と非可換ゲージ理論の非線形性の役割を明らかにする。続いて、適用範囲の広い二粒子既約有効作用から導かれる量子運動方程式を採用して、定式化とシミュレーションを実行する。

(3) QCD 臨界点近傍での運動を、保存量揺らぎのモード結合を考慮した方程式系を用いて解析する。また、有限密度系の第一原理計算を目指して、複素ランジュバン方程式と Lefschetz thimble 上のモンテカルロ計算を、簡単な模型に対して試行・検討する。

4. 研究成果

(1) LHC エネルギーの陽子-原子核衝突において、ハドロン粒子生成をグルーオン飽和効果を考慮した理論に基づいて数値評価して発表した。グルーオン飽和効果は、陽子に比べて原子核で強く現れるので、陽子-陽子衝突に比べて、陽子-原子核衝突での粒子生成が抑制される傾向がある。後に LHC で行われた実験はわれわれの評価と定量的にも矛盾のない結果を報告し、LHC の衝突事象におけるグルーオン飽和効果の重要性を支持する結果となっている。

(2) さらに、陽子-原子核衝突におけるチャームクォークとその束縛状態であるクォークニウム J/ψ 生成の評価を行った。LHC エネルギーでは、飽和運動量スケールが、チャームクォーク質量と同じ程度の大きさになるのでグルーオン飽和効果によってチャームクォーク生成が影響を受ける。一方で、QCD の非摂動効果のスケールに比べてチャームの質量が大きいので、生成過程の摂動的記述が可能になるという点で重要な観測量である。 J/ψ 生成について、グルーオン飽和効果のエネルギー依存性を反映して、RHIC エネルギーで観測されたものよりも強い抑制効果

が LHC では現れるという計算結果を我々は得て、実験実施の前に公表した。後に LHC での実験が行われ、結果は我々の予言値よりも弱い抑制であった。引き続き研究では、我々の採用した原子核内グルーオン飽和を特徴づけるパラメータが、電子散乱の示唆する値よりも強すぎたことが原因と考えられている。その点を変更することによって理論計算結果は実験データに近づくものの、完全な一致は得られず、現時点でも研究が続いている。一方で、チャームクォークを含む D メソンについては、実験と矛盾しない予言結果を得ている。チャーム粒子崩壊起源の電子やミュオンについても、運動量分布や粒子相関を評価し、実験結果と比較することによって、さらに包括的なパートン飽和効果の検証を続けている。

(3) 飽和効果を伴うグルーオン場の衝突以後の時間発展について、古典統計近似に基づく研究はヨーロッパのグループによって精力的に行われた。古典統計近似が成立する領域では、圧力の等方化や局所熱平衡化は困難であると考えられており、粒子間の散乱効果を含む一貫した枠組みでの研究が待たれている。そこで、我々は完全に量子論的な枠組みとして二粒子既約有効作用の方法を採用し、また原子核衝突のビーム方向膨張の効果を検討するための異方的な座標系での運動方程式を書き下した。現在は、異方的座標特有の性質を回避した有効な数値計算アルゴリズムを工夫しつつ計算コードを準備中である。

(4) 初期時間発展に関係する研究として、衝突初期の時間に依存する強いゲージ場からの非摂動的な粒子生成機構 (Schwinger 機構) について、大学院生の田屋と研究を行った。空間一様でパルス的な電場による電子対生成において、パルス継続時間の長短によって、生成率が完全に非摂動的な Schwinger 公式から摂動論的評価へ連続的に移り変わることを解析的に明らかにし、論文に発表した。ビーム方向に膨張する効果の検討や、生成粒子による遮蔽効果を現在検討している。

(5) QCD 臨界点では、臨界性に伴う長距離揺らぎが成長することが期待される。臨界揺らぎの時間発展の理解を目指した予備的計算の研究が近年米国グループによって発表された。しかしながら、それらの研究においては、臨界性揺らぎに結合する保存量 (バリオン数、エネルギー密度) の揺らぎの重要性が依然と欠落している。我々は、保存則と両立する臨界揺らぎの運動方程式を書き下し、その観測量に対する帰結について、大阪大学のグループと研究協力を始めたところである。

(6) 有限バリオン密度系について、化学ポ

テンシャルを用いて表して経路積分形式に移ると QCD 作用が複素数になるという、符号問題が長く知られている。近年、符号問題に対する方策として力学系の自由度を複素化する方法が注目されている。我々は、複素ランジュバン方程式を用いた統計サンプリングの方法と、複素配位空間内の最急降下部分空間 (Lefschetz thimble) でのモンテカルロの方法という二つの方法を、QCD に似た符号問題を持つ簡単な模型に適用して検討した。複素ランジュバン方程式は確率分布を用いないので、複素作用に対してもシミュレーションを問題なく実行することができる。QCD の有効模型として、カイラルランダム行列模型とその簡略版に対してシミュレーションを行い、結果が正しい答えを出さないことを確認した。1 変数の簡略版の場合には、ある種の複素位相をあらたに加えることによって、正しい答えを凡そ再現することを確認した。以上の成果は、2013 年の日本物理学会で発表した。理論的な基礎づけの理解は不完全である。

(7) 積分空間を Lefschetz thimble に変形する方法では、thimble 上では作用の位相が一定であるという大きな利点がある。但し、座標変換に伴うヤコビアンが複素数になるため、この「残された符号問題」の難しさを評価する必要がある。我々は、複素 ϕ^4 模型について thimble 上でのモンテカルロ計算を実行し、ヤコビアンの複素位相を評価した結果、残る符号問題は小さく、複素位相を観測量に含めるという形で物理量を正確に評価できることを確認した。さらに、フェルミオンの模型として 1 次元の Thirring 模型を取り上げて、模型の thimble 構造を調べた。その結果、ディラック演算子のゼロ点が thimble の端点となり、基底状態のクロスオーバー領域では、複数の thimbles が積分に寄与すること、そして、その thimble 同士の相対位相による相殺効果が、化学ポテンシャルに対する観測量の急激な依存性を再現するために極めて重要であることが判明した。この観察が、 $3+1$ 次元の一般的なフェルミオン系についても普遍的に成立する問題なのか、について検討を続けている。また、元の符号問題に対する問題の困難さの度合いと回避する方策について検討を続けている。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 10 件)

- ① [H. Fujii](#), K. Watanabe, *Leptons from heavy-quark semileptonic decay in pA collisions within the CGC framework*, Nucl. Phys. A, 査読有, Vol.951, 2016, pp.45-59, DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2016.03.045
- ② [H. Fujii](#), S. Kamata, Y. Kikukawa, *Application of the Lefschetz thimble formulation to the (0+1) dim. Thirring model*

- at finite density, PoS LATTICE2015, 査読無, 2015, 190 (7 pages)
- ③ H. Fujii, S. Kamata, Y. Kikukawa, *Lefschetz thimble structure in one-dimensional lattice Thirring model at finite density*, JHEP, 査読有, Vol.11, 2015, 078, DOI: 10.1007/JHEP11(2015)078
- ④ H. Fujii, S. Kamata, Y. Kikukawa, *Monte Carlo study of Lefschetz thimble structure in one-dimensional Thirring model at finite density*, JHEP, 査読有, Vol.12, 2015, 125, DOI: 10.1007/JHEP12(2015)125
- ⑤ Y. Saito, H. Fujii, K. Itakura, O. Morimatsu, *Microscopic identification of dissipative modes in relativistic field theories*, PTEP, 査読有, no.5 2015, 053A02, DOI: 10.1093/ptep/ptv065
- ⑥ H. Taya, H. Fujii, K. Itakura, *Finite pulse effects on $e+e^-$ pair creation from strong electric fields*, Phys. Rev. D, 査読有, 2014, Vol.90, no.1, 014039, DOI: 10.1103/PhysRevD.90.014039
- ⑦ H. Fujii, K. Watanabe, *Heavy quark pair production in high energy pA collisions: Open heavy flavors*, Nucl. Phys. A, 査読有, Vol. 920, 2013, pp. 78-93, DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2013.10.006
- ⑧ H. Fujii, K. Watanabe, *Heavy quark pair production in high energy pA collisions: Quarkonium*, Nucl. Phys. A, 査読有, Vol. 915, 2013, pp.1-23, DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2013.06.011
- ⑨ J. Albacete, A. Dumitru, H. Fujii, Y. Nara, *CGC predictions for p+Pb collisions at the LHC*, Nucl. Phys. A, 査読有, Vol. 897, 2013, pp.1-27, DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2012.09.012
- ⑩ H. Fujii, D. Honda, M. Kato, Y. Kikukawa, S. Komatsu, T. Sano, *Hybrid Monte Carlo on Lefschetz thimbles – A study of the residual sign problem*, JHEP, 査読有, Vol. 10, 2013, 147, DOI: 10.1007/JHEP10(2013)147
- [学会発表] (計 15 件)
- ① 藤井宏次, 鎌田翔, 菊川芳夫, *Thimble analysis of 1D Thirring model at finite density*, 日本物理学会 71 回年次大会, 東北学院大学 (泉キャンパス) (宮城県, 仙台市), 2016 年 3 月 22 日
- ② 藤井宏次, *符号問題に対する試み: 複素ランジュバン法と Lefschetz thimble*, 日本物理学会 70 回年次大会 (企画公演), 早稲田大学 (東京都, 新宿区), 2015 年 3 月 24 日
- ③ H. Fujii, *Complex Langevin and Thimbles in Chiral Random Matrix Model*, HHIQCD workshop, 基礎物理学研究所, 京都大学 (京都府, 京都市), 9 Mar., 2015
- ④ H. Fujii, *Multiplicities and inclusive hadrons in saturation approach*", Workshop on Future Circulating Collider, CERN, Geneva (Switzerland), 22 Sept., 2014
- ⑤ H. Fujii, *Heavy Quarks from CGC in pA collisions*, New Frontiers in QCD 2013, 基礎物理学研究所, 京都大学 (京都府, 京都市), Dec. 2-6, 2013 (invited).
- ⑥ 齊藤陽平, 森松治, 板倉数記, 藤井宏次, *相対論的場の理論における散逸モードの微視的同定*, 日本物理学会秋季大会, 高知大学(高知県, 高知市), 2013 年 9 月 23 日
- ⑦ 奈良寧, A. Dumitru, 藤井宏次, *カラーグラス凝縮にもとづく高エネルギー原子核衝突直後のグルーオン生成*, 日本物理学会秋季大会, 高知大学 (高知県, 高知市), 2013 年 9 月 23 日
- ⑧ 渡邊和宏, 藤井宏次, *カラーグラス凝縮に基づく pA 衝突におけるクォークニウム生成*, 日本物理学会秋季大会, 高知大学(高知県, 高知市), 2013 年 9 月 21 日
- ⑨ H. Fujii, *CGC approach in p+A collisions*, PHENIX Workshop on Physics Prospects with Detector and Accelerator Upgrades, 理研 (埼玉県, 和光市), Jul.29 – Aug.2, 2013
- ⑩ H. Fujii, *Gluon saturation and heavy flavors in p+A collisions at the LHC*, workshop on high energy, high density and hot QCD, ECT*, Trento (Italy), 17-21, June, 2013
- ⑪ 渡邊和宏, 藤井宏次, *“カラーグラス凝縮に基づく pA 衝突における重クォーク対相関”*, 日本物理学会 68 回年次大会, 広島大学 (広島県, 東広島市), 2013 年 3 月 29 日
- ⑫ 佐野崇, 藤井宏次, 菊川芳夫, *複素ランジュバン法適用条件のランダム行列模型による解析 (27aHA9)*, 日本物理学会 68 回年次大会, 広島大学 (広島県, 東広島市) 2013 年 3 月 27 日
- ⑬ H. Fujii, *Chiral random matrix model and sign problem*, Yonsei U. Workshop, Seoul (South Korea), Feb. 2013
- ⑭ H. Fujii, *CGC approach in p+A collisions at the LHC*, ISMD2012, 16-21 Sep., 2012, Jan Kochanowski Univ., Kielce (Poland), (Acta Phys. Polon. Supp., 2013, Vol.6, pp.567-572, DIO: 10.5506/APhysPolBSupp.6.567)
- ⑮ H. Fujii, *Forward particle production in proton-nucleus collisions at the LHC*, Int'l conf on Heavy Ion Collisions in the LHC era, 15-21 Jul, 2012, Qui Nhon (Vietnam) (J. Phys. Conf. Ser., Vol. 422, 2013, 012027 (4pages), DOI: 10.1088/1742-6596/422/1/012027)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤井 宏次 (FUJII, Hirotugu)

東京大学・大学院総合文化研究科・助教

研究者番号：10313173