

令和 5 年 4 月 14 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2022

課題番号：18K03646

研究課題名(和文) 高温高密度QCDにおける最重要課題に対する相関・揺らぎを用いたアプローチ

研究課題名(英文) Approach toward the most important problems in high temperature QCD with correlations and fluctuations

研究代表者

浅川 正之 (Asakawa, Masayuki)

大阪大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：50283453

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：強い相互作用の基礎理論である量子色力学の高温相であるクォークグルーオンプラズマ中において、重クォーク対である $J/\psi$  粒子や  $\Upsilon$  粒子は、通常はポテンシャルがデバイ遮蔽されることによって溶解すると考えられている。この研究では、重クォーク系をクォークグルーオンプラズマ中における量子開放系と捉え、初めてカラー自由度も考慮してその時間発展を考察し、それらがデバイ遮蔽でなく量子デコヒーレンスにより溶解することを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

強い相互作用の基礎理論である量子色力学においては、現実のこの世界のような低温相においてはクォークやグルーオンという基本粒子はハドロン中に閉じ込められている。しかし、約2兆K以上の高温ではクォークグルーオンプラズマというクォークやグルーオンがもはや閉じ込められていない相に転移することが知られている。この状態は宇宙開闢からおよそ10のマイナス5乗秒程度の時間まで存在していた。この研究ではこの状態における重い中間子の振る舞いを研究した。これは、宇宙開闢時に存在していたこの相を量子力学的に理解することに繋がる。

研究成果の概要(英文)： The fundamental theory of the strong interaction is called quantum chromodynamics and its high temperature phase is called quark-gluon plasma. Heavy mesons such as  $J/\psi$  and  $\Upsilon$ , which are composed of a heavy quark and a heavy antiquark, are usually considered to melt in the quark-gluon plasma because the potential between them is Debye screened. In this study, we treated a heavy meson as a quantum open system in the quark-gluon plasma and we studied its quantum evolution with color degrees of freedom taken into account. We found that they decay not by Debye screening but by quantum decoherence.

研究分野：高エネルギー原子核理論

キーワード：量子色力学 ecoherence クォークグルーオンプラズマ 量子開放系 Lindblad方程式 重クォーク系 量子相関 d 保存量揺らぎ

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

研究当初は高エネルギー原子核衝突におけるクォークグルーオンプラズマの生成と QCD 相図上に存在すると考えられている臨界点の影響による、相関と揺らぎについての理解はそれぞれ次のような状況であった。

まず、相関については、 $J/\psi$  や  $\chi$  といった重クォーク対によって構成されたメソンのクォークグルーオンプラズマ中での振る舞いについて、クォークのカラーや環境からのノイズのカラーを無視した  $U(1)$  近似によるものしかなかった。また、散逸の効果も取り入れられておらず、系の時間発展を考察する際にオーバーヒーティングの問題があった。

臨界点の影響による臨界揺らぎの観測に対する影響は、ハドロン相における拡散の影響は考えられていたが、何が観測されているかについて曖昧な理解が流布している状況であった。そのため、例えば臨界点付近で存在すると考えられているバリオン数の負の 4 次のキュムラントが実験でそのまま観測され、それが臨界点の存在の証拠となると考えられているという状況であった。

## 2. 研究の目的

以上の状況のもとで、まず  $J/\psi$  や  $\chi$  といった重クォーク対によって構成されたメソンのクォークグルーオンプラズマ中での振る舞いについては、クォークのカラー、環境からのノイズがカラーを持っているということを取り入れ、その影響を調べることを目的であった。さらに、クォーク・反クォーク対の相対運動の熱化についても調べることを目的とした。また、基礎方程式で無視されていた散逸を表す項を取り入れて考察を行うことも目標とした。

また、臨界点の影響による臨界揺らぎについては、観測されている揺らぎが何に対応するか論理的に明確にして、理論で計算されていることと実験的に観測されている量との関係を理論家と実験家の双方に理解・合意させることも目的であった。

## 3. 研究の方法

$J/\psi$  や  $\chi$  といった重クォーク対によって構成されたメソンのクォークグルーオンプラズマ中での振る舞いについては、系を重クォーク対という注目している系と外界に分け、外界の部分の状態についてはトレースアウトし、注目している系を量子開放系として扱った。ここまでは通常の Lindblad 方程式による定式化でも同様であるが、この研究では通常の Lindblad 方程式をクォークのカラー、環境からのノイズのカラーを取り入れた Lindblad 方程式に拡張し、さらに散逸項も取り入れ、それに基づいてクォーク・反クォークのカラー 1 重項と 8 重項それぞれの状態の時間発展を記述した。

臨界揺らぎと観測量との関係については、高エネルギーではあるが比較的低エネルギーが低い原子核衝突の空間的幾何学的時間発展と二次相転移点近傍における臨界減速、保存量揺らぎの特性についての一般論を組み合わせて議論を行った。

## 4. 研究成果

カラーを取り入れる際に現実の QCD に対応する  $SU(3)$  だけでなく、 $SU(2)$  の場合も考察した。その結果、 $SU(2)$  の場合には  $SU(3)$  の場合に存在しないある対称性が存在し、時間発展に影響を及ぼすことが判明した。また、カラー  $SU(3)$  の場合、8 重項状態を取り入れることにより、 $J/\psi$  や  $\chi$  といったメソン数の減少は加速されることがわかった。これは Debye 遮蔽による減少よりも速く、重クォーク対によって構成されたメソンはクォークグルーオンプラズマ中では Debye 遮蔽によって溶解するという通常の描像は正しくないことが分かった。散逸項を導入すると、重クォーク対の熱化が生じ、長時間時間発展させると各レベルの存在比はほぼボルツマン分布に従うことが数値計算によって示された。よって、散逸項を含めない場合に存在したオーバーヒーティングの問題は解消された。

臨界揺らぎと観測量との関係について、次の 3 点をそれぞれ明確にした。第一としては、現在の実験的理論的解析においては、高エネルギー原子核衝突において保存量揺らぎが化学凍結時にその変化が停止すると仮定されているが、これは定義から考えて運動学的凍結に置き換えるべきであるということ。第二には、通常の議論では保存量(例えばバリオン数)揺らぎの(高次)キュムラントと秩序変数場の相関距離の関係について、平衡状態におけるものが使用されているが、一般には保存量揺らぎダイナミクスは保存量でない秩序変数場のダイナミクスよりは遅

く、高エネルギー原子核衝突のようなダイナミカルな状況においては、このことは正当化できないということ。最後の論点としては、通常、ある運動量空間の領域内で観測されている量が、位置空間で計算されている量と直接比較されている、すなわち、暗黙の裡に運動量空間における分布と位置空間における分布が同一であるという Bjorken 的描像が仮定されているということである。これは、臨界点探索実験のように高エネルギーではあるが比較的エネルギーの低い原子核衝突において生成される系は、Bjorken 的描像が正当化される衝突軸方向の Lorentz 推進に関して位置空間・運動量空間で平坦な幾何学的な形状はもたないので、このような議論は低エネルギー原子核衝突では正当化されないということである。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 5件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Akamatsu Yukinao, Asakawa Masayuki, Kajimoto Shiori	4. 巻 105
2. 論文標題 Dynamics of in-medium quarkonia in SU(3) and SU(2) gauge theories	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 054036 (1-18)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.105.054036	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 R. Yanagihara, M. Kitazawa, M. Asakawa, and T. Hatsuda	4. 巻 102
2. 論文標題 Distribution of energy-momentum tensor around a static quark in the deconfined phase of SU(3) Yang-Mills theory	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 114522(1-12)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.114522	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 T. Miura, Y. Akamatsu, M. Asakawa, and A. Rothkopf	4. 巻 101
2. 論文標題 Quantum Brownian motion of a heavy quark pair in the quark-gluon plasma	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 034011(1-15)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.101.034011	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 M. Asakawa, M. Kitazawa, and B. Mueller	4. 巻 101
2. 論文標題 Issues with the search for critical point in QCD with relativistic heavy ion collisions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 034913(1-3)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.101.034913	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Y. Akamatsu, S. Kajimoto, M. Asakawa, and A. Rothkopf	4. 巻 1807
2. 論文標題 Quantum dissipation of a heavy quark from a nonlinear stochastic Schroedinger equation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 JHEP	6. 最初と最後の頁 029(1-18)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP07(2018)029	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Y. Akamatsu, M. Asakawa, T. Hirano, M. Kitazawa, K. Morita, K. Murase, Y. Nara, C. Nonaka, and A. Ohnishi	4. 巻 98
2. 論文標題 Dynamically integrated transport approach for heavy-ion collisions at high baryon density	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 024909(1-9)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.98.024909	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 R. Yanagihara, T. Iritani, M. Kitazawa, M. Asakawa, and T. Hatsuda	4. 巻 B789
2. 論文標題 Distribution of stress tensor around static quark--anti-quark from Yang-Mills gradient flow	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics Letters	6. 最初と最後の頁 210-214
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2018.09.067	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 S. Kajimoto, Y. Akamatsu, M. Asakawa, and A. Rothkopf	4. 巻 A982
2. 論文標題 Quantum dynamical dissociation of quarkonia by wave function decoherence in quark-gluon plasma	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Physics	6. 最初と最後の頁 711-714
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nuclphysa.2018.12.005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Miura Takahiro, Akamatsu Yukinao, Asakawa Masayuki, Kaida Yukana	4. 巻 106
2. 論文標題 Simulation of Lindblad equations for quarkonium in the quark-gluon plasma	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 074001(1-12)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.106.074001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 M. Asakawa
2. 発表標題 Past, present, and future of the QGP physics
3. 学会等名 Fifth Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the American Physical Society and the Physical Society of Japan (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Asakawa
2. 発表標題 Fluctuation observables around the critical point
3. 学会等名 The 7th Asian Triangle Heavy-Ion Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
米国	デューク大学	ブルックヘブン国立研究所		
中国	北京大学			
ノルウェー	スタバングル大学			