



## 1. 研究開始当初の背景

クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) とは、日常世界では核子や中間子の中に閉じ込められているクォークやグルーオンが、超高温の環境下で解放されているプラズマ状態のことである。QGP 中で働く力は真空中とは全く異なり、遮蔽や散逸など様々な熱的效果を受ける。重クォークの束縛状態は、これらの力を受けて運動する不純物粒子であり、かつ量子論的な記述を必要とする。研究開始当時にはこれら全てを満たす計算は存在しなかった。

## 2. 研究の目的

重クォークの束縛状態の量子論的な非平衡ダイナミクスを記述するマスター方程式を導き、数値計算を行う。それにより、相対論的重イオン衝突における  $J/\psi$  粒子や  $Y$  粒子の収量と、QGP 中で働く力の基本的性質 (遮蔽長や拡散係数) を明らかにするための理論的な手法を整備する。

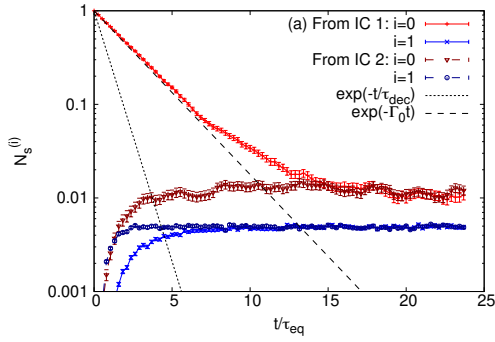
## 3. 研究の方法

量子開放系の理論に基づき、重クォーク系の従う Lindblad 方程式を導き、数値計算を行った。Lindblad 方程式を摂動的に導く際には regime を定める必要があるが、重クォーク束縛状態の場合には、高温領域は量子 Brown 運動の regime に属する。一方で低温領域は一見すると量子光学の regime に属するが、実はそうではなく、Markov 近似の範囲に属しないと予想される。Lindblad 方程式を量子 Brown 運動の regime で導出する際には、熱平衡に緩和するための微分展開の次数について検討する必要がある。数値計算をする際には、Quantum State Diffusion 法により確率的に波動関数を生成し、密度行列を混合状態として構成した。

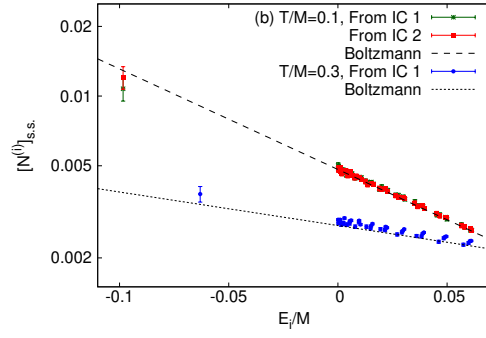
## 4. 研究成果

本研究で得られた主な成果は、熱平衡化と双極子近似の妥当性についてである [1]。

熱平衡化を達成するには微分展開の 0 次だけでなく 1 次まで残す必要があることを解析的・数値的に確認した。図 1 は異なる初期条件から始めたときに、2 つの束縛状態の占有確率の時間発展である。これにより長時間では定常状態に到達することを確認した。図 2 は定常状態において各エネルギー状態の占有確率をボルツマン分布と比較した。これにより、定常状態はほぼボルツマン分布であることを確認した。

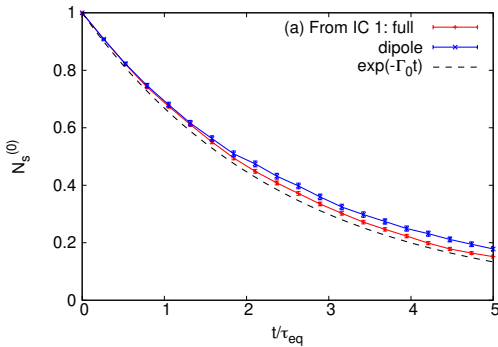


(図 1 : 占有確率の時間発展)

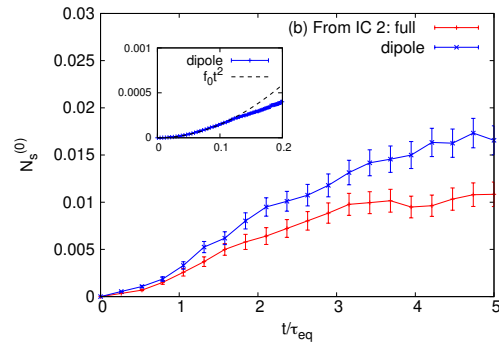


(図 2 : 定常状態の占有確率)

相対論的重イオン衝突実験では重クォーク束縛状態に対して双極子近似を用いた Lindblad 方程式のシミュレーションが盛んになってきた。一方で、熱平衡化過程において、重クォーク束縛状態の波動関数はより広がった状態にも励起されることから、双極子近似の妥当性を議論する必要がある。双極子近似は有限空間では境界条件と整合しないことから、熱平衡化は達成されないことが分かった。一方で、相対論的重イオン衝突は有限時間の事象なので、熱平衡化に至る前の時間で双極子近似が妥当であれば十分である。図 3 と図 4 はそれぞれカラー 1 重項状態と 8 重項状態を初期条件とした場合に、双極子近似の妥当性をテストした結果である。その結果、有限時間であれば双極子近似が有効であることを確認した。特に 8 重項から始めた場合には双極子近似が有効である時間は短い。相対論的重イオン衝突では 8 重項として QGP 中の運動を開始するものも多いので、双極子近似のシミュレーションを行う際の適用範囲の目安を与える重要な結果である。



(図 3 : カラー 1 重項の初期条件)



(図 4 : カラー 8 重項の初期条件)

[1] Takahiro Miura, Yukinao Akamatsu, Masayuki Asakawa, Yukana Kaida,  
 “Simulation of Lindblad equations for quarkonium in the quark-gluon plasma”  
 Phys. Rev. D106 (2022) 074001.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件 / うち国際共著 7件 / うちオープンアクセス 4件）

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 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 -
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 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 Akamatsu Y.	4. 巻 123
2. 論文標題 Quarkonium in quark-gluon plasma: Open quantum system approaches re-examined	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Progress in Particle and Nuclear Physics	6. 最初と最後の頁 103932 ~ 103932
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.pnnp.2021.103932	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 Akamatsu Yukinao, Miura Takahiro	4. 巻 258
2. 論文標題 Nonequilibrium evolution of quarkonium in medium	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 01006 ~ 01006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/202225801006	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 Alund Oskar, Akamatsu Yukinao, Lauren Fredrik, Miura Takahiro, Nordstrom Jan, Rothkopf Alexander	4. 巻 425
2. 論文標題 Trace preserving quantum dynamics using a novel reparametrization-neutral summation-by-parts difference operator	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Computational Physics	6. 最初と最後の頁 109917 ~ 109917
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcp.2020.109917	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 Akamatsu Yukinao	4. 巻 1005
2. 論文標題 Approach to thermalization and hydrodynamics	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nuclear Physics A	6. 最初と最後の頁 122000 ~ 122000
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nuclphysa.2020.122000	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 Miura Takahiro, Akamatsu Yukinao, Asakawa Masayuki, Rothkopf Alexander	4. 巻 32
2. 論文標題 Time Evolution of a Quarkonium towards the Thermal Equilibrium in the Quark-gluon Plasma	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings JPS Conf.Proc. 32 (2020) 010084	6. 最初と最後の頁 010084 1-3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.32.010084	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, Rothkopf Alexander	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 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 Akamatsu Yukinao, Teaney Derek, Yan Fanglida, Yin Yi	4. 巻 100
2. 論文標題 Transits of the QCD critical point	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 1 - 23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.100.044901	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 Akamatsu Yukinao, Asakawa Masayuki, Kajimoto Shiori, Rothkopf Alexander	4. 巻 2018
2. 論文標題 Quantum dissipation of a heavy quark from a nonlinear stochastic Schrödinger equation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 0-18
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 Kajimoto Shiori, Akamatsu Yukinao, Asakawa Masayuki, Rothkopf Alexander	4. 巻 982
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 A	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 Akamatsu Yukinao, Teaney Derek, Yan Fanglida, Yin Yi	4. 巻 982
2. 論文標題 Scaling Properties of Out-of-equilibrium Hydrodynamic Fluctuations near the QCD Critical Point	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Physics A	6. 最初と最後の頁 875 ~ 878
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nuclphysa.2018.10.031	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

[学会発表] 計24件(うち招待講演 12件/うち国際学会 15件)

1. 発表者名 Yukinao Akamatsu, Takahiro Miura
2. 発表標題 Nonequilibrium evolution of quarkonium in medium
3. 学会等名 A Virtual Tribute to Quark Confinement and the Hadron Spectrum 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yukinao Akamatsu
2. 発表標題 Dynamics of quarkonium as an open quantum system
3. 学会等名 The 8th Asian Triangle Heavy-Ion Conference (ATHIC 2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yukinao Akamatsu
2. 発表標題 Quarkonium and Open Quantum Systems
3. 学会等名 The Quantumness of Hard Probes (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yukinao Akamatsu
2. 発表標題 Quarkonium as an open quantum system in the quark-gluon plasma
3. 学会等名 REIMEI Workshop on "Open Quantum Mechanics in Nuclear, Hadron and Condensed- Matter Systems" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 開田 有奏、赤松 幸尚、浅川 正之
2. 発表標題 Color dipole 近似を使ったクォーク・グルーオン・プラズマ中でのクォーコニウムの時間発展の計算
3. 学会等名 日本物理学会 第 77 回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 赤松 幸尚
2. 発表標題 相対論的重イオン衝突におけるクォーコニウムのデコヒーレンスと量子散逸
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 赤松 幸尚
2. 発表標題 相対論的重イオン衝突におけるクォーコニウムのデコヒーレンスと量子散逸
3. 学会等名 KEK 素核宇・物性 連携研究会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三浦 崇寛、赤松 幸尚
2. 発表標題 カラー 1 重項・8 重項遷移を取り入れた重いクォーコニウムの量子散逸過程
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 Yukinao Akamatsu
2. 発表標題 What can quarkonium tell us about the QGP?
3. 学会等名 Quo vadis QCD theory: heavy-ion collision perspectives and beyond (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yukinao Akamatsu
2. 発表標題 Approach to thermalization and hydrodynamics
3. 学会等名 The 28th International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions (Quark Matter 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 赤松 幸尚
2. 発表標題 Quarkonium as an open quantum system in the QGP
3. 学会等名 第36回Heavy-Ion Cafe (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 赤松 幸尚
2. 発表標題 クォーコニウム
3. 学会等名 チュートリアル研究会「高エネルギー重イオン衝突の物理：基礎・最先端・課題・展望」(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takahiro Miura, Yukinao Akamatsu, Masayuki Asakawa, Alexander Rothkopf
2. 発表標題 Quantum dissipation of quarkonium in quark-gluon plasma: Lindblad equation approach
3. 学会等名 The 17th International Conference on QCD in Extreme Conditions (XQCD 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shiori Kajimoto, Yukinao Akamatsu, Masayuki Asakawa, Alexander Rothkopf
2. 発表標題 Quarkonium dynamics with colorful stochastic potential
3. 学会等名 The 28th International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions (Quark Matter 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takahiro Miura, Yukinao Akamatsu, Masayuki Asakawa, Alexander Rothkopf
2. 発表標題 Quantum dissipation in the quarkonium evolution by Lindblad master equation
3. 学会等名 The 28th International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions (Quark Matter 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 梶本 詩織, 赤松 幸尚, 浅川 正之, Alexander Rothkopf
2. 発表標題 SU(3)カラー自由度を取り入れたクォークoniumの時間発展
3. 学会等名 日本物理学会 2019 年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 梶本 詩織, 赤松 幸尚, 浅川 正之, Alexander Rothkopf
2. 発表標題 SU(3)確率ポテンシャル中でのクォークoniumカラー八重項状態のふるまい
3. 学会等名 日本物理学会 第 75 回年次大会(2020年)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yukinao Akamatsu
2. 発表標題 Quantum aspects of heavy quark theory
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

1. 発表者名 Yukinao Akamatsu
2. 発表標題 Quantum Aspects of Quarkonium Dynamics
3. 学会等名 Nagoya Mini-Workshop “Phenomenology and experiments at RHIC and the LHC” (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yukinao Akamatsu
2. 発表標題 Open Quantum Systems for Quarkonia in QGP
3. 学会等名 INT Program INT-18-1b: Multi-Scale Problems Using Effective Field Theories (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yukinao Akamatsu
2. 発表標題 Quantum Dissipation of Heavy Quarks in the Quark-Gluon Plasma
3. 学会等名 New Frontiers in QCD 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 赤松 幸尚, Derek Teaney, Fanglida Yan, Yi Yin
2. 発表標題 重イオン衝突における QCD 臨界点探索に対する Kibble-Zurek scaling 解析
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shiori Kajimoto, Yukinao Akamatsu, Masayuki Asakawa, Alexander Rothkopf
2. 発表標題 Quantum dynamical dissociation of quarkonia by wave function decoherence in quark-gluon plasma
3. 学会等名 The 27th International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions: Quark Matter 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shiori Kajimoto, Yukinao Akamatsu, Masayuki Asakawa, Alexander Rothkopf
2. 発表標題 "Classicalization" of quarkonia in the quark-gluon plasma
3. 学会等名 The 27th International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions: Quark Matter 2018 (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			
ノルウェー	University of Stavanger			
米国	Stony Brook University			