

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：32670

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14722

研究課題名（和文）高温高密度クォーク物質における光子生成の統合的研究

研究課題名（英文）Integrated study of photon production in hot and dense quark matter

研究代表者

門内 晶彦（MONNAI, Akihiko）

日本女子大学・理学部・講師

研究者番号：20709357

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,600,000円

研究成果の概要（和文）：超高エネルギーにおける原子核衝突ではクォークグルーオンプラズマとよばれる数兆度の高温物質が生成される反応が起きる。このとき生成される光子について、その運動量分布を理解するための理論的な枠組みを構築した。高温物質から放出される光子に加えて、媒質が生成される途中段階から放出される非平衡光子の影響を取り入れた上で、相対論的流体モデルに基づく数値シミュレーションを行った。その結果、非平衡光子の影響が重要となることを示した。また高温高密度におけるクォーク物質の状態方程式の構築を行うなど、素粒子物性に対する定量的な理解を得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では相対論的流体モデルに基づく原子核衝突における光子生成の理論計算において、これまで考慮されてこなかった非平衡光子の影響を取り入れることで、理論モデルの定量性を高めることができた。また、原子核衝突で生成される高温高密度クォーク物質に関する幅広い知見を得ることができた。これらの成果は素粒子物理と非平衡統計物理の融合分野としての原子核物理の発展に対して大きく貢献するものである。

研究成果の概要（英文）：High-energy nuclear collisions produce a high-temperature matter of several trillion degrees called quark-gluon plasma. The investigator has developed a theoretical framework to understand the momentum distribution of the photons created in such collisions. Numerical simulations are performed based on relativistic hydrodynamic model by considering pre-equilibrium photons emitted before the formation of the quark matter in addition to thermal and prompt photons. It has been found that the effects of pre-equilibrium photons can be important. The investigator has also constructed the equation of state at high temperatures and densities to elucidate the properties of the quark matter.

研究分野：原子核理論

キーワード：原子核理論 クォークグルーオンプラズマ 光子

1. 研究開始当初の背景

クォークやグルーオンなどの素粒子は量子色力学(QCD)に従い、強い相互作用により常温常圧下では陽子や中性子といったハドロン内部に閉じ込められている。一方で、約2兆度以上の超高温では閉じ込めから解放されクォークグルーオンプラズマ(QGP)と呼ばれる素粒子の多体系へと擬相転移することが知られている。QGPは相対論的重イオン衝突型加速器(RHIC)や大型ハドロン衝突型加速器(LHC)といった高エネルギー原子核衝突による生成が可能であり、その重要な成果の一つがQGPにおける流体性の発見である。相対論的な流体モデルはこれまで原子核衝突における実験データの定量解析において重要な役割を果たしている。

高エネルギー原子核衝突においては、光子やレプトンといった電弱相互作用を行うが強い相互作用を行わない素粒子が生成される。これらはQCD物質と局所熱平衡になく媒質を透過するため、熱化したハドロンと異なり生成された時空発展の各点における原子核衝突の情報をそのまま持つ。一方で、光子の粒子分布は理論的に未だ完全には理解されていない。観測される光子のうちハドロン崩壊の寄与を除いたものを直接光子と呼ぶが、流体モデルに基づいた理論計算では直接光子の収量が実験データより有意に少ない。また楕円フローや三角フローとよばれる二次や三次の方位角異方性も過小評価されることが知られ「光子パズル」と呼ばれている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、原子核衝突で観測された光子の定量的理解のための理論を構築すること、およびそれを通じQCD物性を理解することである。旧来のモデルでは直接光子の理論計算において、衝突時に生成される即時光子とQCD媒質由来の熱光子の寄与のみ考慮される。重イオン衝突は、衝突前におけるグルーオン飽和状態であるカラーグラス凝縮、衝突後かつ局所平衡前のグラズマ描像、局所平衡化した流体時空発展、冷却後に生成されたハドロン粒子の輸送過程の各段階から理解される。そのため完全な描像の構築にはグラズマ由来の光子やハドロン気体の散乱光子を含め全ての段階からの光子放出を考慮する必要がある。

また既存の光子収量計算についても改良を行う。即時光子は、陽子-陽子衝突を基準としているが重イオン衝突と同様に他の光子が生成されている可能性があるため補正が必要である。熱光子に関しても、最新の流体力学の知見を基に特に有限密度の生成過程を見直す必要がある。

3. 研究の方法

即時光子と熱光子のみでなく各段階の光子源を考慮したモデルを構築する。そのため相対論的流体描像に基づく原子核衝突モデルに、熱平衡化前のグラズマにおける光子生成の効果を導入する。QCD物質の熱平衡化プロセスは非自明な点が多いが、非熱的固定点を経由するモデルなど幾つか有力な候補が提唱されている。これを基としてクォークとグルーオンの非平衡分布関数から光子生成率を計算しその寄与を取り入れる。また系の温度が十分下がった後にはハドロン気体となるが、低温であるものの膨張により系の体積は大きいため散乱による光子生成が無視できないため定量評価を目指す。また陽子-陽子衝突におけるグラズマからの光子生成の寄与を取り入れ即時光子の評価の見直しを行う。

また実験データとの比較を通じて、QCD媒質の時空発展に関する知見と共に熱平衡化過程の知見を得る。カラーグラス凝縮による描像では、グルーオンは衝突軸に垂直な平面方向に対して典型的な運動量 Q_s を持っており、グラズマにおけるクォーク分布にもこれが反映されているとされる。従って対応する運動量領域に特徴的な光子生成が起こると考えられる。計算結果と実験データを比較しカラーグラス凝縮やグラズマのパラメータに制限が与えられるか検討する。また現在RHICではビームエネルギー走査(BES)によるQCD相図高密度領域の探索が進んでいるため、直接光子生成モデルにバリオン密度を導入し、有限密度における電磁プローブを理解する。

4. 研究成果

(1) グラズマからの非平衡光子の評価

乱流熱化機構では原子核衝突初期にはパートン分布関数が時間発展に対して自己相似形となるとされる。相対論的流体力学モデルを用いて、グラウバーモデルを基に乱流熱化機構の最終段階におけるエネルギー密度分布が流体モデルの正しい初期条件を与えるよう規格化し、衝突軸方向の典型的な運動量と Q_s をパラメータとした上で、グラズマからの非平衡光子の横運動量分布を数値的に評価した。その結果、非平衡光子が Q_s 付近において熱光子や即時光子と同程度の寄与を持ちうるということがわかった。これは直接光子を用いたQGPの温度推定にも有意な影響を与える可能性がある。一方で非平衡光子は方位角異方性を持たないと考えられるため、楕円フローは Q_s 付近で減少する。また陽子-陽子衝突におけるグラズマからの光子生成を考慮して即時光子の推

定に改良を加え、衝突する陽子中のグルーオン飽和運動量付近では運動量分布が減少し、楕円フローが増えうることを示した。

(2) QCD 媒質による屈折効果

QCD 媒質は光子やレプトンに対して透明であるが、非自明な屈折率を持ちうる。媒質が光学レンズとして機能すれば媒質の形状がそのまま運動量分布に反映されるため、Hard thermal loop 法に基づくいくつかの屈折率のモデルに対して、即時光子が受ける影響を数値シミュレーションによって評価した。その結果、QGP のプラズマ周波数よりも大きな運動量において、効果は小さいものの光子の楕円フローを増大させる作用があることがわかった。また QGP の典型的な温度である約 2 兆度付近における屈折率の大きさが楕円フローに対して最も影響をもつことがわかった。屈折率が虚数のときは吸光が起こるため、直接光子の横運動量分布における低運動量領域の測定を通じてプラズマ周波数に対して制限を与えられる可能性を示した。

(3) 有限密度における QCD 状態方程式

QCD 物質において考えられる 3 つの保存量である正味バリオン、電荷、ストレンジネスに対応する化学ポテンシャル (μ_B, μ_Q, μ_S) が有限の場合における状態方程式を構築し、相対論的重イオン衝突における流体モデルへと応用した。テイラー展開法による最新の格子 QCD およびハドロン共鳴ガスモデルの計算結果を基に、熱力学的に正しい状態方程式を構築した。その上で実際に得られた状態方程式を用いて相対論的流体モデルの下に数値シミュレーションを行い、有限密度重イオン衝突実験のデータと比較した結果、生成される粒子と反粒子における収量比の記述が大きく改善されることを示した。これは実験において $T-\mu_B$ 平面ではなく $T-\mu_B-\mu_Q-\mu_S$ 空間を探索していることの重要性を指摘するものであり、今後原子核衝突反応から流体解析において臨界点などの非自明な相構造を探る際の基準として用いることが可能な成果である。得られた研究成果については、ウェブサイト <https://sites.google.com/view/qcdneos/> 上で一般公開している。

(4) 有限密度における熱光子生成率

熱光子生成率は有限密度下では化学ポテンシャルによる補正を受ける。原子核衝突における保存量には正味バリオン、電荷、ストレンジネスの 3 つがあることを踏まえ、これらに対応する化学ポテンシャルがある場合における QGP の熱光子生成率を数値的に計算した。原子核衝突において正味バリオンのみではなく、全ての保存量を考えることが重要であることを示した。

(5) 相対論的散逸流体力学における局所静止系

BES 実験においては QCD 相図における有限バリオン密度領域の探索が行われているが、原子核衝突におけるクォーク物質の記述の礎となる相対論的流体力学には、粘性散逸過程が存在する場合に流速をエネルギー流の向きにとるか (ランダウ系)、保存荷電流の向きにとるか (エッカルト系) という局所静止系問題が存在する。まず線形応答を超えた二次の相対論的散逸流体力学において安定性と因果律が保たれる条件を、解析計算によって 2 つの系でそれぞれ導出しこれらが同値と示唆されることを示した。その上で流体モデルを用いた数値計算によって SPS 実験に対応する 17.3 GeV の場合の原子核衝突のシミュレーションを行い、粘性散逸補正を正しく扱うことによって、実際の観測量である荷電粒子や正味バリオンのラピディティ分布において局所静止系の選択による差が非常に小さいことを示した。

(6) ハドロン生成における過度の影響

2 つの原子核が衝突する際には、その中心間距離に応じて生成された媒質に過度が生じるとされ、実際に近年 RHIC において 粒子の大局的スピン偏極が観測されたことにより注目を集めている。本研究ではハドロンのもつ化学ポテンシャルとスピンによって粒子生成率自体に差が出る可能性を指摘し、実際に Quark coalescence モデルと統計モデルの 2 種類の方法を用いてハドロン収量の過度依存性を計算した。その結果、原子核衝突において到達しうる過度において、粒子種によっては収量に数%の差が出る可能性があることを導いた。

(7) ツァリス統計力学による状態方程式

陽子-陽子衝突をはじめとした原子核衝突における横運動量分布は、熱分布を拡張したツァリス分布を用いることでより広い運動量領域を説明できることが知られている。本研究では、ハドロン共鳴ガスモデルとパートンガスモデルをもとにツァリス統計に従う QCD 状態方程式を構築した。この中で、熱力学的条件からツァリス分布を特徴づけるパラメータ q に対して制限が加わること示した。またこれを相対論的流体モデルに組み込んで適切な拡張を行うことにより、原子核衝突のシミュレーションを行った。その結果、 $q = 1.07$ の場合に横運動量分布において 7-8 GeV 程度までの広い運動量領域の記述が可能となった。一方で楕円フローはそれよりも狭い適用可能範囲を示しており、強結合極限からのずれの影響が重要となることが示唆された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 12件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Akihiko Monnai	4. 巻 380
2. 論文標題 Hydrodynamic analyses of nuclear collisions in Landau and Eckart frames	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	6. 最初と最後の頁 258:1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.380.0258	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 Akihiko Monnai	4. 巻 37(11n12)
2. 論文標題 Direct photons in hydrodynamic modeling of relativistic nuclear collisions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Modern Physics A	6. 最初と最後の頁 2230006:1-26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0217751X2230006X	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 K. Kyan, A. Monnai	4. 巻 2205.01742
2. 論文標題 QCD equation of state with Tsallis statistics for heavy-ion collisions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 arXiv	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.48550/arXiv.2205.01742	査読の有無 無
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 Akihiko Monnai	4. 巻 47
2. 論文標題 Prompt, pre-equilibrium, and thermal photons in relativistic nuclear collisions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics	6. 最初と最後の頁 075105:1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6471/ab8d8c	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 Hidetoshi Taya, Aaron Park, Sungtae Cho, Philipp Gubler, Koichi Hattori, Juhee Hong, Xu-Guang Huang, Su Houng Lee, Akihiko Monnai, Akira Ohnishi, Makoto Oka, and Di-Lun Yang (ExHIC-P Collaboration)	4. 巻 102
2. 論文標題 Signatures of the vortical quark-gluon plasma in hadron yields	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review C Rapid Communications	6. 最初と最後の頁 021901:1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.102.021901	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 門内晶彦	4. 巻 75(9)
2. 論文標題 強い相互作用の状態方程式 原子核衝突の視点から	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本物理学会誌	6. 最初と最後の頁 565-569
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11316/butsuri.75.9_565	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 Akihiko Monnai, Bjoern Schenke and Chun Shen	4. 巻 1005
2. 論文標題 QCD equation of state at finite densities for nuclear collisions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nuclear Physics A	6. 最初と最後の頁 121868:1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nuclphysa.2020.121868	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 Akihiko Monnai, Bjoern Schenke and Chun Shen	4. 巻 36(07)
2. 論文標題 QCD equation of state at finite chemical potentials for relativistic nuclear collisions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Modern Physics A	6. 最初と最後の頁 2130007:1-32
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0217751X21300076	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 Akihiko Monnai	4. 巻 345
2. 論文標題 Possible non-prompt photons in pp collisions and their effects in AA analyses	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	6. 最初と最後の頁 173:1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.345.0173	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 Akihiko Monnai	4. 巻 100
2. 論文標題 Landau and Eckart frames for relativistic fluids in nuclear collisions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 014901:1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.100.014901	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 Akihiko Monnai, Bjoern Schenke, Chun Shen	4. 巻 100
2. 論文標題 Equation of state at finite densities for QCD matter in nuclear collisions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 024907:1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.100.024907	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 Akihiko Monnai	4. 巻 995
2. 論文標題 Medium-induced optical effects for prompt photons	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nuclear Physics A	6. 最初と最後の頁 121679:1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nuclphysa.2019.121679	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 門内晶彦	4. 巻 64(2)
2. 論文標題 原子核衝突で作られる有限密度QCD物質の状態方程式	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 原子核研究	6. 最初と最後の頁 27-37
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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11件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Akihiko Monnai
2. 発表標題 Hydrodynamic analyses of nuclear collisions in Landau and Eckart frames
3. 学会等名 Particles and Nuclei International Conference 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 門内晶彦
2. 発表標題 クォークグルーオンプラズマ流体におけるエネルギーおよびバリオン密度への散逸補正
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 門内晶彦
2. 発表標題 原子核衝突で作られる有限密度QCD物質の状態方程式
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 門内晶彦
2. 発表標題 クォーク物質における相対論的流体モデル
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Akihiko Monnai
2. 発表標題 Photon emission in initial and hydrodynamic stages of nuclear collisions
3. 学会等名 Initial Stages 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 門内晶彦
2. 発表標題 ジオメトリ・グラウパー模型
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 門内晶彦
2. 発表標題 ランダウおよびエッカルト系における重イオン衝突の流体解析
3. 学会等名 基研研究会「熱場の量子論とその応用」2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 門内晶彦
2. 発表標題 高エネルギー原子核衝突における粘性流体力学
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 門内晶彦
2. 発表標題 クォーク物質における非平衡過程の光子生成
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 Akihiko Monnai
2. 発表標題 QCD properties at finite densities in nuclear collisions
3. 学会等名 Quark Matter 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 門内晶彦
2. 発表標題 原子核衝突で作られる有限密度QCD物質の状態方程式
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会 (2020年) (招待講演)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Website of Akihiko Monnai
<https://sites.google.com/site/akihikomonnai/home>
QCD equation of state
<https://sites.google.com/view/qcdneos/>
素粒子原子核研究所 - 素核研
<https://www2.kek.jp/ipns/ja/post/2020/03/20200331/>

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			
中国	Fudan University			
米国	Brookhaven National Laboratory	Wayne State University		
韓国	Yonsei University	Kangwon National University		