

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 21 日現在

機関番号：37301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K03836

研究課題名(和文)「強い場の物理」から紐解くクォーク・グルーオンプラズマ生成機構

研究課題名(英文) QGP production mechanism from the viewpoint of strong field physics

研究代表者

板倉 数記 (Itakura, Kazunori)

長崎総合科学大学・共通教育部門・教授

研究者番号：30415046

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：高エネルギー原子核衝突では、陽子や中性子の下部構造であるクォークとグルーオンの熱平衡状態である「クォークグルーオンプラズマQGP」が生成するが、衝突後にどのような物理過程を経てQGPに至るのかは全く分かっていない。衝突直前の状態はグルーオンが高密度に凝縮した「カラーガラス凝縮CGC」と呼ばれる状態だということが理論的にもわかっているため、問題はCGCからQGPへの転換の起こる物理機構の同定にある。CGCの特徴をとらえた枠組みで運動学的アプローチから理解しようとするのが主流ではあるが、本研究では「強い場」がもたらす新規現象に注目して、それが早期熱化機構に寄与する可能性を検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

QGP生成過程という現象は、強結合量子多体系の時間発展を理解する必要があり、理論物理学にとって最も難しい「強結合」「多体」「時間発展」の3つが関係する重要な問題である。一見複雑にみえるこの現象を、実は「強い場の物理」の観点から読み解けば、最終的な結論は得られてはいないものの、比較的容易に理解できる可能性がある。また、強い場の物理自体は、高強度レーザーにおける粒子対生成などの新規現象や、中性子星やマグネターなどの超強磁場中での物理とも関係し、学術的に意義の高いテーマである。

研究成果の概要(英文)：High-energy nucleus-nucleus collisions create "Quark Gluon Plasma (QGP)", which is a thermal state made of quarks and gluons. However, the underlying mechanism how the QGP is formed is not well understood. Since the state before the collisions is known to be a dense gluonic state called the Color Glass Condensate (CGC), the issue is to identify the physical mechanism of the transition from CGC to QGP. While somewhat standard scenario is based on a kinetic theory, I examined in this research project the possibility of new mechanism related to strong color electromagnetic fields, which is the characteristic property of the state just after the collision.

研究分野：高エネルギーハドロン理論

キーワード：高エネルギー原子核衝突 クォークグルーオンプラズマ 強い場の物理

## 1. 研究開始当初の背景

高エネルギー重イオン衝突では、光速近くに加速された2つの重い原子核(重イオン)を衝突させることで、陽子や中性子の下部構造であるクォークやグルーオンが閉じ込めから解放された「クォークグルーオンプラズマ(QGP)」と呼ばれる熱平衡状態を生成し、その性質を探ることを目的としている。2000年から米国BNL研究所のRHICで、2010年からはスイスCERN研究所のLHCでも始まった実験により、QGP生成という目的は既に達成されている。しかし、現在に至るまで理解されていない重要な問題が、「QGPの形成過程」の解明である。QGPは局所平衡状態であるために、原子核が衝突したのちにクォークやグルーオンが相互作用することによって有限の時間を経て形成される。QGPが一旦形成されてしまえば、その状態は熱平衡を特徴づけるマクロな変数のみで記述することができるため、その時間発展には相対論的流体力学が有効である。流体計算と実験結果との比較によって、その輸送的側面も含めて詳細に理解されている。一方で、衝突直前の光速近くで走る原子核の状態は、グルーオンが多数生成して高密度になった「カラーガラス凝縮(CGC)」という状態であるということも理解が進んでいる。実際、重イオン衝突実験の様々なデータにCGCの片鱗が確認されており、CGCは高エネルギー重イオン衝突の初期条件として広く受け入れられている。CGCは「弱結合の古典的に扱える系」であるが、実験的に生成されたQGPは「強結合の量子多体系」である。この変化は1fm程度のごく短い時間(衝突する原子核の大きさはせいぜい10fm程度)で起こることが実験結果との整合性を吟味した流体計算から示唆され、そのような短時間での熱化がどのように起こるのかが分かっていない。流体計算にとっても、計算を始める時刻という重要な情報が不明でパラメータとして扱われているという状況である。

## 2. 研究の目的

QGPが形成される時間を正確に予言することは、生成後の時間発展を理解するうえでも非常に重要な問題である。相対論的流体力学による数値計算にはいくつものパラメータがあり、それらは互いに相関がある。そのため、最適解が物理的に意味のあるものかどうかの確証はなかなか得られない。そこで、本研究では「QGP形成過程」の理解へ向けて、CGCからQGPへの過渡的な状態にどのような物理が起こるのかを同定することを目的とする。また、このような考察を進めることによって、最終的に得られる物理量にCGCの情報がどのように反映するのか、逆にCGC起源の寄与がどれくらいあるのかが明らかになる。

## 3. 研究の方法

衝突直前の状態は高密度のグルーオンからなるCGCであり、その特徴を反映して、衝突直後には非常に強いグルーオン場(カラー電磁場)がビーム軸方向に出現する(その状態をグラズマと呼ぶ)。また、非中心衝突の場合には原子核が持つ大きな電荷のために瞬間的に非常に強力な磁場も発生する。したがって、これらの強い場に起因する現象を見ることができれば、QGP形成「前」の情報を得ることができる。そこで、強い場のもたらず現象に注目する。

また、QGPが形成されるまでに強い場から放出された(光子やレプトン対などの)「電磁的情報」はQGPの影響を受けずに外部に逃げていくため、透過的プローブと言われる。したがって、実験的にQGP形成以前の透過的プローブの寄与を正確に見積もることで、QGP形成までの状態を知ることができる。そこで、QGPが形成された「後」の寄与を正確に見積もって、実験から引くことで、QGP形成以前の寄与を浮き彫りにすることが可能になると考える。

## 4. 研究成果

QGPが形成されてから放出される光子に関しては既に多くの研究がされているが、QGP相やハドロン相からの寄与のみでは実験結果が説明できないという困難があった(正確には、収量と方位角依存性を同時に説明することができないという困難。「光子パズル」と言われる)。おそらく、QGP形成前の寄与も考慮する必要があると推察されるが、その寄与を直接計算するのではなく、QGP形成後でまだ考慮されていない物理過程があるので、それを取り入れることで実験結果を説明できるかを調べた。具体的には、QGPがハドロンになる際に、プラズマ物理で知られている「輻射再結合」と同様の過程によって光子を放出する可能性を考慮した。ハドロン化のモデルにはクォークや反クォークが結合してハドロンになるというRecombination modelと呼ばれるものがあり、それが実際に有効である運動学的領域が存在する(RHICやLHCなら、生成ハドロンの横運動量が1~3GeV程度)。そこで、この領域に絞って、ハドロンが形成されるのに伴って光子が放出されるというモデルを作成した。メソンであれば、「クォーク+反クォークメソン+光子」という過程である。我々はこれをradiative hadronization(輻射ハドロン化)と名付けた。このモデルは、Recombination modelではエネルギー運動量保存が満たされないという欠点を修正するものとしても意義がある。詳細な検討の結果、実際にRHICやLHCの光子の収量や方位角異方性を同時に説明することができるという一定の成功を収めた。この研究に

よって、まだ説明つかない寄与が QGP 形成前に放出された光子である可能性が高く、今後の研究につながるものである。

強力な磁場中を光子が通り抜ける際に受ける「真空複屈折 (vacuum birefringence)」という現象が、重イオン衝突時に生成する超強力な磁場でも見られると期待される。それが起これば、磁場の向きや強さとの相関を持つ光子の偏極やレプトン対の異方性に反映する。磁場は衝突直後 QGP が生成する「以前」が最も強く、従って複屈折も最も強く現れるが、その磁場は QGP が生成したあとでも持続する可能性がある。その場合、磁場のみによる複屈折に加え、媒質の影響も存在する可能性がある。そのような動機のもとで、磁場中での複屈折が有限温度・有限密度の効果によってどのように変わるのかについて詳細な検討を行った。その結果、媒質効果は光子の dispersion に非自明な影響を与え、媒質がないときとは異なる複屈折が見られることが分かった。この計算における媒質は電子と陽電子から構成されているため、その結果を直ちに重イオン衝突の場合 (クォークと反クォークからなる媒質) に適用することはできないが、マグネター周辺の磁気圏に電子・陽電子のプラズマがある中を光子が通過するときは、媒質効果を取り入れる必要があることを意味する。

そのほか、重イオン衝突直後に存在するカラー電磁場からのクォーク対とグルーオン対の生成や、強い磁場中でのカイラル対称性の破れの変化 (magnetic catalysis) などについての考察も引き続き進めた。これらの長年にわたる強い物理に関する成果を、長い総合報告にまとめることができた (2023 年 6 月に Progress in Particle and Nuclear Physics に出版)。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Fujii Hirotsugu, Itakura Kazunori, Miyachi Katsunori, Nonaka Chiho	4. 巻 106
2. 論文標題 Radiative hadronization: Photon emission at hadronization from quark-gluon plasma	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 1~21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.106.034906	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 Hattori Koichi, Itakura Kazunori	4. 巻 446
2. 論文標題 In-medium polarization tensor in strong magnetic fields (I): Magneto-birefringence at finite temperature and density	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Annals of Physics	6. 最初と最後の頁 169114.1~31
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.aop.2022.169114	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 Hattori Koichi, Itakura Kazunori	4. 巻 446
2. 論文標題 In-medium polarization tensor in strong magnetic fields (II): Axial Ward identity at finite temperature and density	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Annals of Physics	6. 最初と最後の頁 169115.1~21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.aop.2022.169115	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 Fujii Hirotsugu, Itakura Kazunori, Miyachi Katsunori, Nonaka Chiho	4. 巻 16
2. 論文標題 Photon Production in High-energy Heavy-ion Collisions: Thermal Photons and Radiative Recombination	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Acta Physica Polonica B Proceedings Supplement	6. 最初と最後の頁 1~6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5506/APhysPoIBSupp.16.1-A130	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 Hattori Koichi, Itakura Kazunori, Ozaki Sho	4. 巻 -
2. 論文標題 Strong-Field Physics in QED and QCD: From Fundamentals to Applications	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Progress in Particle and Nuclear Physics	6. 最初と最後の頁 -
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4件(うち招待講演 0件/うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Hirotsugu Fujii, Kazunori Itakura, Katsunori Miyachi, Chiho Nonaka
2. 発表標題 Effect of radiative hadronization on thermal photons
3. 学会等名 The 8th Asian Triangle Heavy-Ion Conference (ATHIC2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 板倉数記 野中千穂 藤井宏次 宮地克典
2. 発表標題 流体発展からの熱輻射に対するハドロン再結合光子の寄与
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 板倉数記
2. 発表標題 グラズマダイナミクスにおける非線形量子効果の影響(II) 膨張系
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 Hirotsugu Fujii, Kazunori Itakura, Katsunori Miyachi, Chiho Nonaka
2. 発表標題 Photon Production in High-energy Heavy-ion Collisions: Thermal Photons and Radiative Recombination
3. 学会等名 the XXIXth International Conference on Ultra-relativistic Nucleus-Nucleus Collisions (Quark Matter 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022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