

令和 6 年 5 月 24 日現在

機関番号：13101

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2022～2023

課題番号：22K20369

研究課題名（和文）スピン・軸性電荷を含む相対論的流体力学の構築とそのQCDプラズマへの応用

研究課題名（英文）Construction of relativistic hydrodynamics involving spin and axial charge and its application to QCD plasmas

研究代表者

本郷 優（Hongo, Masaru）

新潟大学・自然科学系・助教

研究者番号：10779656

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,100,000円

研究成果の概要（和文）：連続対称性が明示的に破れた場合、対応するネーター電荷はもはや保存されなくなる。このような状況をハドロン物理学において考慮し、ハドロン多体系において見られる緩和ダイナミクスの理論的定式化と評価を研究した。特に、相対論的重イオン衝突実験においてラムダ粒子のスピン偏極が観測されていることに着目し、バリオン（核子およびラムダバリオン）のスピン緩和に焦点を当てた研究を行った。その結果、熱的なパイ中間子気体中におけるバリオンのスピンドイナミクスを記述する運動方程式を導出し、パイ中間子との散乱過程に関する情報に基づいて、核子およびラムダバリオンのスピン緩和率を具体的に評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

相対論的重イオン衝突実験はほぼ光速まで加速された原子核を衝突させることで1超度を越える極限状況の物質を生成し、その性質を調べることを目的としている。近年、生成されたラムダ粒子のスピン偏極が測定されたことで、実験で生成された超高温の物質が非常に大きな角速度を持っていることが示唆されている。しかしながら、生成された物質中におけるスピンのダイナミクスを記述する理論的方法はこれまで明らかになっていなかった。本研究ではこの点を解決し、生成された物質中におけるバリオン（核子・ラムダ粒子）のスピンが緩和ダイナミクスを示すことを理論的に明らかにした。

研究成果の概要（英文）：When continuous symmetry of a physical system is explicitly broken, the corresponding charge is no longer conserved. Considering such a situation in hadron physics, we have studied theoretical formulation and evaluation of the relaxation dynamics associated with many-body hadronic systems. In particular, we focused on the spin relaxation of baryons (nucleons and Lambda baryon), inspired by the observation of spin polarization of the Lambda baryon in relativistic heavy-ion collision experiments. As a result, we derived the effective kinetic equation describing the spin dynamics of baryons in a thermal pion gas and specifically evaluated the spin relaxation rates of nucleons and lambda baryons relying on information of their scattering processes with pions.

研究分野：ハドロン物理学

キーワード：スピン緩和 近似的対称性

1. 研究開始当初の背景

高エネルギー重イオン衝突実験の目標は、QCDにより記述される素粒子多体系のQGPを実験室で再現し、その物性を調べることである。その代表的な成果の1つが「QGPは粘性が極めて小さい相対論的流体としてふるまう」とわかったことである。さらに近年では、原子核の中心軸がずれた非中心衝突で極めて強い磁場や回転角速度が実現される(図1)という指摘に基づき、これらにより誘起されるカイラル輸送現象、ならびにスピン偏極のダイナミクスに興味が集まっている。実際、米国ブルックヘブン国立研究所のRHICにおける実験で、ハドロンのスピン偏極の実験データが得られ、生成されたQGPは 10^{20} s^{-1} もの角速度を持つことが示唆された[STAR Collaboration, Nature (2017)]。しかし、その他の関連する観測量では、結果の解釈にまだ不定性が残っている。一方、カイラル輸送現象(とくにカイラル磁気効果)に関しては、精力的な探索が行われているが、いまだにその実験的な確証は得られていない。

カイラル輸送現象ならびにスピン偏極のダイナミクスについて、「小さな粘性」のように確固たる結論が得られていない主たる理由は、これらの現象に付随した物理量が保存量ではなく、その緩和ダイナミクスの理論的定式化が確立していない点にある。実際、カイラル輸送現象はQCDのもつ近似的なカイラル対称性に付随したものであり、スピン角運動量も相対論的な場の理論では保存しない(保存するのは軌道角運動量も合わせた全角運動量)。したがって、これらの保存量ではない物理量の緩和ダイナミクスを記述する理論的定式化ならびにその緩和率の評価が、QGP物性の理論的研究の最重要課題の1つと考えられる。

2. 研究の目的

本研究はQCDの近似的カイラル対称性に付随する軸性電荷、ならびにクォーク自由度がもつスピン偏極のマクロな緩和ダイナミクスを記述する理論の構築を目的とし、具体的には次の2つの研究課題を扱った：

[A] 非保存電荷の緩和ダイナミクスを記述する理論的枠組み(流体力学の拡張)を確立する。

[B] 場の量子論の手法を用いて、QGP中の軸性電荷・スピン偏極の緩和率を評価する。

研究課題[A]については、マクロスケールの緩和ダイナミクス(不可逆過程)を記述する非平衡統計力学がその基本的な研究方針を与える。一方で、研究課題[B]では、クォーク・グルーオンなどの微視的な自由度のダイナミクスを記述する場の量子論の計算手法を用いる。非平衡統計力学と場の量子論の両手法を用いることで、保存則が厳密には成立しない場合に、非平衡統計力学に基づいた緩和ダイナミクスの系統的な記述法を明らかにすることが本研究の目的であった。

3. 研究の方法

本研究は、「2. 研究の目的」に記したように、非平衡統計力学と場の量子論の手法を組み合わせることで遂行される。まず、研究課題[A]においては、不可逆過程の熱・統計力学という理論的枠組みが主たる研究手法になる。その結果として、研究課題[A]では熱力学第二法則に整合するような緩和ダイナミクスの方程式、ならびに方程式に現れるパラメータを微視的に計算するための公式を与える。研究課題[B]においては、場の量子論に基づいた計算法がその理論的基盤を与える。具体的には、研究課題[A]で同定した公式を、場の量子論に基づいて計算する。以上のように、マクロスケールでの非保存電荷の緩和ダイナミクスを支配する運動方程式を導出し、導出された方程式に含まれる緩和率を場の量子論に基づいて計算する研究を行った。

4. 研究成果

相対論的重イオン衝突実験において観測されているラムダ粒子のスピン偏極は、生成されたQCD物質が非常に大きな角速度をもっていることを示唆している。この観測結果に動機づけられて、ハドロン相におけるバリオン(核子・ラムダ粒子)の持つスピンの緩和ダイナミクスに集中して研究を行った。そのために、低温領域でハドロン多体系がパイ中間子で構成されるとしてよく近似できることを注目し、パイ中間子気体中のバリオンの緩和ダイナミクスを記述する理論的枠組みを定式化し、その枠組みに基づいてバリオンのスピン緩和ダイナミクスを理論的に記述した。具体的には、パイ中間子気体中のバリオン1粒子に関する縮約密度行列の運動方程式をまず導出した。このとき、得られた縮約密度行列の運動方程式を解くためには、パイ中間子とバリオンの散乱過程に関する情報(特にスピンのフリップするプロセスの散乱振幅)が必要になる。核子・パイ中間子散乱については、実験で得られていた散乱の位相シフトを用いることでモデルに依らない予言を出すことができたが、一方、ラムダ粒子・パイ中間子散乱に関してはそのような精密なデータが存在しない。そこで、ラムダ粒子・パイ中間子散乱についてはハドロンスペクトルの情報あるいは低エネルギーの散乱過程を記述することができるカイラル摂動論による最低次のプロセスにより記述した。以上の方法により、パイ中間子気体で近似される低温相において、核子・ラムダ粒子スピン緩和率を評価することができ、査読付き学術論文として研究結果を出版

した.また,これとは独立した研究として,QCD のカイラル対称性のように近似的対称性に付随した電荷の緩和率を記述する方法についても研究を進めた.その結果として,対称性が自発的に破れた相においても,その緩和ダイナミクスの記述方法が部分的にわかり始めてきている.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Fujii Keisuke, Hongo Masaru, Enss Tilman	4. 巻 129
2. 論文標題 Universal van der Waals Force between Heavy Polarons in Superfluids	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.129.233401	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 Hidaka Yoshimasa, Hongo Masaru, Stephanov Mikhail A., Yee Ho-Ung	4. 巻 109
2. 論文標題 Spin relaxation rate for baryons in a thermal pion gas	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 54909
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevC.109.054909	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

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 2件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 本郷 優
2. 発表標題 Soft Electromagnetic Radiation from the Critical Fluid in the Vicinity of the QCD Critical Point
3. 学会等名 Chirality and Criticality: Novel Phenomena in Heavy-Ion Collisions（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 本郷 優
2. 発表標題 Hydrodynamic approach to spin relaxation in quark-gluon plasma
3. 学会等名 6th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 三浦 大輝
2. 発表標題 Analysis of temperature gradient effects on thermodynamic properties of relativistic scalar field model
3. 学会等名 6th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 本郷 優
2. 発表標題 Universal properties of weakly-bound Borromean nuclei
3. 学会等名 Sado2023: The 6th workshop on many-body correlations in microscopic nuclear model (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>極低温の量子流体中に現れる普遍的な力 - 量子揺らぎが導く原子超流動体中の分子間力 - https://www.niigata-u.ac.jp/news/2022/298122/</p>

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			
ドイツ	ハイデルベルク大学			
米国	イリノイ大学シカゴ校			