

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 20 日現在

機関番号：32508

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25400247

研究課題名(和文)物質の極限状態の理論的研究

研究課題名(英文)Theoretical studies of extreme states of matter

研究代表者

松井 哲男(Matsui, Tetsuo)

放送大学・教養学部・教授

研究者番号：00252528

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：極限状態におけるハドロン相からクォーク相への転化の理論的記述を、カイラル対称性を内包した、クォーク閉じ込めの有効模型(PNJL模型)を用いて行った。高エネルギー原子核衝突で実現されるようなバリオン密度が小さい状況では、低温相はカイラル対称性の自発的破れにより発生する質量の小さい中間子やK中間子のボソンの熱励起によって満たされ、温度が上がると非閉じ込め転移によりクォークのフェルミオンの熱励起に変わることを示した。この時、中間子やK中間子はクォークとその反粒子からなる集団運動として記述され、励起自由度のボソンからフェルミオンへの変化がどのように起こるかをエントロピーの変化に注目して記述した。

研究成果の概要(英文)：Transition from low temperature hadron phase to high temperature quark phase was studied theoretically in terms of an effective theory (PNJL model) incorporating chiral symmetry and quark confinement. In the baryon free regime as realized in high energy nuclear collisions, the low temperature phase is filled with thermal bosonic excitations of low mass pions and kaons, which turns into the high temperature phase filled with quark and anti-quark excitations in gluon thermal excitations. In this description, pions and kaons are described as collective excitations consisting of quark and antiquark. We studied how the degrees of thermal excitations change by varying temperature from boson-type to fermion-type excitations focusing on the entropy contents of the system.

研究分野：理論核物理

キーワード：高温ハドロン/クォーク物質 クォーク閉じ込めの有効理論 高エネルギー重イオン衝突 クォーク・グルーオンプラズマ

1. 研究開始当初の背景

高温極限状態のハドロン物質におけるクォーク・グルーオン相への転移の問題は、1980年代から理論的研究が行われてきたが、最近では米国ブルックヘブン国立研究所の RHIC や、ジュネーブ郊外の欧州原子核研究機構 (CERN) の LHC などを使った高エネルギー原子核衝突の実験が始まっており、その実験結果による理論の予言の検証に期待が寄せられている。

強い相互作用の基礎理論としては量子色力学 (QCD) が確立しているが、この理論の高温のハドロン物質の熱力学的性質には強結合領域での解法が必要であり、これまでは格子ゲージ理論の数値計算によって調べられてきた。この計算は着実に進歩しているが、計算結果の物理的解釈には、まだ有効模型を用いた分析から学ぶところがあるように思われる。

また、実際の原子核衝突のような複雑な非平衡時間発展から得られた非常に実験結果の理論的な解釈を行うには、簡単な物理描像に基づく現象論的な模型による考察が有用である。有効模型を使った反応過程の記述は、実験結果を理解する上で重要な役割を果たしている。

研究代表者の松井は、先行する課題研究で、原子核衝突の非平衡過程の記述を行うための場の量子論による基礎研究を東京大学大学院総合文化研究科の学生と一緒にやった。これまでの研究では、カイラル対称性の自発的破れに焦点を当てて、それを記述するハド

ロンの有効理論を用いて研究を行った。またハドロンの凍結過程の半古典的記述を使って観測された HBT 関連の異常の解釈を行った。分担研究者の藤井は、初期過程の研究を摂動的 QCD の枠組みで記述することに強い関心を持って研究を行ってきた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、2010年に欧州原子核研究機構(CERN)で始まった LHC を使った実験結果に「クォーク・グルーオンプラズマ」の生成とその時空発展における新しい物理のシグナルがどのように現れているか解明することであり、それに必要な基礎研究を行った。

研究代表者(松井)の研究では、これまでの研究で用いた有効模型に取り入れてこなかったクォーク閉じ込めの効果を、新しい有効理論 (PNJL 模型) を用いて取り入れ、熱励起の自由度がクォーク・グルーオンからハドロン (メソン) に連続的に変化する様子を記述する。

分担研究者(藤井)は原子核反応の初期過程を、グルーオンの非線形効果と重いクォークに着目して、実験結果と比較できる理論的予言を行うことを研究目的として分担者となった。

3. 研究の方法

研究代表者の研究では、クォーク閉じ込めの有効理論である PNJL 模型を用いて、まず、

低温相でカイラル対称性が自発的に破れた場合、その南部・ゴールドストーン粒子であるパイ中間子がクォークとその反粒子の集団運動として熱励起に現れることを示す必要がある。このために経路積分法を用いて圧力の計算を行った。またこの計算にストレンジネスを入れる拡張をやはり同じ方法で行った。この場合、アノマリーの効果としてトフト・小林・益川の3体相互作用を導入して計算を行った。さらに、温度変化による励起自由度の変化を系のエントロピーの変化に注目して分析を行った。

分担研究者の研究では、高エネルギー原子核衝突の初期過程を、グルーオン非弾性散乱の確率過程として、その分布の初期分布からの変化を運動論的方程式を用いて記述した。

4. 研究成果

これまで行われたクォークのNJL有効模型を用いた計算では、低温相でまだクォークの熱励起の圧力への寄与が残っていたため、状態方程式は物理的解釈ができなかったが、我々の計算は、クォークの熱励起が3つの色で相殺し合うため、より現実的な状態方程式が得られた。しかし、この相殺は完全ではなく、一見して3つのカラーの打ち消しあった励起が熱励起として残る。この励起モードはクォーク3つからなるバリオン励起ではないかという解釈が出されていたが、我々の分析によって、これはまだバリオンの励起ではなく、非物理的な自由度であることが示された。

低温相ではカイラル対称性の破れによって、

確かに南部・ゴールドストーン粒子としてパイ中間子の熱励起が現れることを解析的に示すことができた。また、これらの中間子の集団運動励起モードが融解して、クォークと反クォークの個別励起モードに変わる過程を、クォーク・反クォーク2体の有効散乱振幅の位相差を計算して詳細に調べた。これもこれまでの研究になかった新しい成果である。

ストレンジネスの自由度を入れる計算では、 s クォークの質量とアノマリーの効果によってメソン励起の縮退が解け、結局、低温相ではパイ中間子と K 中間子の熱励起が起こることが示された。

エントロピーの計算では、温度が上がると熱励起の自由度が中間子励起からクォーク励起に変わることにより、中間子のボース粒子的なエントロピーからクォーク+反クォークのフェルミ粒子的なエントロピーに移る遷移過程を詳細に明らかにした。

また、バリオン生成をクォーク対相関に依るダイクォークとクォークの結合状態として記述する研究を行った。バリオン密度が小さい領域におけるバリオン熱励起の誘拐をブローブ近似で行ったが、バリオン密度が高い領域におけるバリオン相関については今後の重要課題として残された。

初期過程の研究では、重いクォークの初期分布からの変化を、運動論的方程式を用いて計算し、重いクォークの入射エネルギーへの依存性などを多重発生するハドロン（パイ中間

子)と同じ記述で予測しこれまでの理論と実験結果との食い違いの説明を行った。

この研究計画を実施した期間中に、2名の大学院生が関連研究で東京大学から博士号の学位を取得し、1名の院生がやはり東京大学から修士号を取得した。これらのうち2名は在学中に日本学術振興会奨励研究生に採用され、その後同振興会から研究支援を受けている。

この研究計画の終了を1年残して、研究代表者の松井は東京大学を2015年3月をもって早期退職し、放送大学に転任した。そのため、研究計画の遂行に遅れが生じた。この期間は、日本国内で該当分野の大きな国際会議(Quark Matter 2015)が開かれ、研究代表者はバンケット講演をはじめその開催に協力した。また、2016年には、この研究計画の一部支援を受けて欧州原子核機構(CERN)を訪問し、ALICE実験の見学や、理論部との交流を行った。その成果は、これまでの研究成果とともに、放送大学の番組「物理の世界」の作成の中に生かされていることを記す。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計5件)

(1) K. Yamazaki, T. Matsui, G. Baym, “Entropy in the quark-hadron transition”, Nuclear Physics A933 (2015) 245-255 [査読有り]

(2) K. Yamazaki, T. Matsui, “Quark hadron phase transition in a three flavor PNJL model for interacting quarks”, Nuclear Physics A922 (2014) 237-261 [査読有り]

(3) H. Fujii, K. Watanabe, Heavy quark pair production in high energy pA collisions: Open heavy quarks”, Nuclear Physics A920 (2013) 78-93 [査読有り]

(4) H. Fujii, K. Watanabe, “Heavy quark pair production in high energy pA collisions: Quarkonium”, Nuclear Physics A915 (2013) 1-23 [査読有り]

(5) K. Yamazaki, T. Matsui, “Quark hadron phase transition in PNJL model for interacting quarks”, Nuclear Physics A913 (2013) 19-50 [査読有り]

[学会発表] (計3件)

(1) T. Matsui, Entropy in Quark-Hadron Transition, Seminar at CERN Theory Group, June 23, 2016 [ジュネーブ、スイス]

(2) T. Matsui, A Guide to the Early History of the Quark Matter Conferences, Banquet Talk at Quark Matter 2015 (The 25th International Conference on Ultra-relativistic Nucleus-Nucleus Collisions), Oct. 1, 2015. [神戸ファッション・マート、兵庫県神戸市]

- (3) 松井哲男 (発表者)、山崎加奈子、バリオンを取り込んだPNJL 模型によるクォーク・ハドロン相転移の記述、日本物理学会年会、2015 年 3 月 24 日 [早稲田大学、東京都新宿区]

[図書] (計 1 件)

- (1) 岸根順一郎、松井哲男、「物理の世界」(放送大学教育振興会、2017 年 3 月出版) [292 ページ (松井担当執筆箇所 : p.3 - p.11, p.80 - p.161, p.216 - p.280, p.283 - p.284)]

[産業財産権] なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松井 哲男 (Matsui, Tetsuo)
放送大学・教養学部・教授
研究者番号 : 00252528

(2) 研究分担者

藤井 宏次 (Fujii, Hirotsugu)
東京大学・大学院総合文化研究科・助教
研究者番号 : 10313173

(3) 連携研究者 なし

(4) 研究協力者 (大学院生)

渡邊 和弘 (Watanabe, Kazuhiro)
東京大学・大学院総合文化研究科
2014 年 3 月学位取得

山崎 加奈子 (Yamazaki, Kanako)
東京大学・大学院理学系研究科
2015 年 3 月学位取得

田谷 英俊 (Taya, Hidetoshi)
東京大学・大学院理学系研究科
2017 年 3 月学位取得