

平成22年 4月 5日現在

研究種目： 基盤研究（C）
 研究期間： 2006 ～ 2009
 課題番号： 18540278
 研究課題名（和文） 相対論的重イオン衝突実験で見られる動的相転移とクォーク・グルオン多体系の物性研究
 研究課題名（英文） The study of the dynamical phase transitions and the quark and /or gluon matter in the relativistic heavy ion collisions
 研究代表者
 津江 保彦（TSUE YASUHIKO）
 高知大学・教育研究部自然科学系・教授
 研究者番号：10253337

研究成果の概要（和文）： 高エネルギー原子核衝突実験で実現されると期待される相転移に関し、パイオン対励起を考慮した有限温度でのカイラル相転移の記述に成功した。また準安定状態として異方カイラル凝縮体の発達が可能であることを明確にした。ハドロン相とカラー超伝導相の相転移についてクォーク・ボン模型でその相構造を明らかにした。さらにクォーク・グルオン多体系の流体的特徴として、量子グルオン流体の粘性係数が小さいことを示した。

研究成果の概要（英文）： In the physics of the relativistic heavy-ion collision experiments, the chiral phase transition is described including the effects of the pion-pair excitation. Also, it is shown that the disoriented chiral condensates can be realized as a quasi-stable state. As for the quark-hadron phase transition, the phase boundary between hadron phase and the color-superconducting phase is shown by using the quark-Bonn model as a function of the ration of quark-pair and the particle-hole type interaction strength. Further, the shear viscosity of the quantum gluon matter is investigated and it is shown that the value of shear viscosity is small.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,100,000	0	1,100,000
2007年度	900,000	270,000	1,170,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
年度			
総計	3,500,000	720,000	4,220,000

研究分野： 数物系科学

科研費の分科・細目： 物理学 ・ 素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード： クォーク・グルオンプラズマ，カイラル対称性，カラー超伝導，相転移，QCD物性，高エネルギー原子核衝突

1. 研究開始当初の背景

- (1) アメリカ合衆国の Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) 実験が佳境に入り、原子核衝突実験のデータが

蓄積され、多くの理論的解析がなされていた。さらにはヨーロッパの Large Hadron Collider (LHC) の稼働を2009年に控え、高エネルギー原子核

衝突でクォーク・グルオンプラズマの生成が期待されること、及び種々の相転移の実現が期待されることが世界中のこの分野の研究者により共有されていた。

- (2) 南部陽一郎氏の 2008 年度のノーベル物理学賞に結実することになる、ハドロンの質量の起源となるカイラル対称性が、高エネルギー原子核衝突実験により回復することが期待されていた。一旦回復したカイラル対称性が再び自発的に破れる際に、準安定状態としての異方カイラル凝縮体(DCC)が動的相転移の過程で生成されるかどうか、理論的に混乱していた。
- (3) クォーク・グルオン多体系はプラズマ的、あるいはガス状だと考えられてきたが、RHIC 実験から液体、しかも完全流体的な振る舞いをする事が示唆され、多くの研究者が驚いた。ハドロンの相からクォーク・グルオン相に相転移しても、強い相関が残っていることが議論され始めていた。
- (4) 理論的に、低温高密度状態では、クォーク・グルオンが自由に動く状態ではなく、クォーク対がある種の超伝導状態(カラー超伝導)にあることが示唆されており、LHC 実験や、中性子星内部などで実現、あるいは前駆状態が観測されるのではないかと期待があった。

以上の様な物理状況にあり、クォーク・グルオン、及びハドロンの相構造・相転移を、多体系物理として微視的に記述することが重要であると考え、研究を開始した。

2. 研究の目的

高エネルギー原子核衝突実験で実現が期待されるハドロンの相、クォーク・グルオン相に関わる相転移、及び相構造、ハドロンの多粒子系及びクォーク・グルオン多粒子系の物性を微視的に理解することを目的とした。申請時に掲げた研究目的は以下のものが含まれる。

- (1) カイラル対称性に関して、DCC 実現の可能性を探るため、カイラル対称性が自発的に破れる際の動的過程を記述し、DCC が実現できるか否かを明らかにする。
- (2) グルオン多体系の物性として、ずれ粘性係数を微視的に求めることにより、グルオン流体が完全流体に近いかどうかを明確にする。
- (3) クォーク・ハドロンの相転移において、カラー超伝導相とハドロ

ン相の相転移、またはカラー超伝導相とカイラル対称相との共存・競合について明らかにする。以上の事柄を主要な研究目的とした。

3. 研究の方法

- (1) 動的カイラル相転移を考察し、DCC 生成の可能性を探るためには、カイラル凝縮体の時間発展を、平均場の周りの量子ゆらぎまで含んで記述することが必要となる。DCC はカイラル相転移後の準安定状態で実現される可能性があるため期待されたので、自発的にカイラル対称性が破れた後の世界、すなわち、パイオン、シグマメソンを基本に記述すれば良い。これらはボソンであるので、補助金交付者が開発し発展させてきた理論的手法、「スクイーズ状態を用いた時間依存変分法」を適用した。この手法では平均場の周りの量子揺らぎだけでなく、異なるモード間相関も取り入れることができることが大きな特徴である。
- (2) 線形シグマ模型でカイラル相転移を考察するために「スクイーズ状態を用いた時間依存変分法」を適用する際、パイオン対励起、パイオン・シグマメソン励起を考慮する方法を考案し、Goldstone の定理を満足した上で時間依存変分法を定式化し、上記のメソン対励起がカイラル相転移に及ぼす影響を考察することとした。
- (3) グルオン多体系の物性を調べる際には、基礎理論である QCD に直接依拠しながら、グルオンは(1)の記載同様にボソンであることから、非可換ゲージ理論である QCD のグルオン場に対してもスクイーズ状態を用いた時間依存変分法を構成した。この手法をグルオン多体系に適用することにより、時間発展が記述できるようになる。さらに、久保の線形応答理論を援用して、グルオン多体系のずれ粘性係数を評価することとした。
- (4) クォーク・ハドロンの相転移に関しては、クォーク間に対相関が存在するクォーク・ボンモデルを用いることにした。このモデルはクォーク対相関しか持たないが、クォーク 3 体から核子を構成できることが知られていた。しかしながら、クォーク対相関により、容易にカラー不安定性を起し、カラー超伝導状態になり得る。そこで、このモデルを拡張して、クォークカラー超伝導相と核子多体相の相構造を調べることとした。
- (5) カラー超伝導相をいったん除外し

て、クォーク・ハドロン相転移を考察する方法として、南部・Jona-Lasinio (NJL)モデルを拡張したモデルを用いた。すなわち、核物質の飽和性を再現するには、もともとのNJLモデルの相互作用では不十分で、カイラル対称性を保ったまま8点相互作用を導入する必要があり、モデルをこのように拡張して、有限密度でのクォーク・ハドロン相転移を考察することとした。

4. 研究成果

- (1) スクイーズ状態を用いた時間依存変分法という理論的手法を、線形シグマモデルに適用することにより、カイラル対称性が自発的に破れる際の動的カイラル相転移を記述することに成功した。これにより、平均場としてのカイラル凝縮体の周りの量子効果とモード間相関の双方の効果を取り込むことが可能となり、両者の効果により、準安定状態としての異方カイラル凝縮体(DCC)が生成可能であることを示した。この研究までは、古典的にはDCCの生成は可能であるが、量子効果がこの生成可能性を失わせてしまうという議論が盛んであったが、実際にDCCは生成可能であることを示したことは大きな成果である。今後は、高エネルギー原子核衝突実験で、どのようなシグナルを測定できればDCCが生成したと判定できるのかというシグナル問題を解決していくことが必要である。
- (2) 線形シグマ模型に対するスクイーズ状態を用いた時間依存変分法に、パイオン対励起、パイオン・シグマメソン励起を取り込む方法を定式化し、これらの効果がカイラル相転移に及ぼす影響を考察した。メソン対励起を取り込むことで、Goldstoneの定理を満足したままで変分法を構成することが可能であることを示し、これを有限温度系に拡張することで、有限温度のカイラル相転移の相転移の次数を検討し、2次相転移となることを示した。
- (3) 高エネルギー重イオン衝突実験での大きな成果の一つは、クォーク・グルオン多粒子系は従来考えられていたようなガス状ではなく、強く相関した完全流体的な振る舞いを示すことが示唆されたことである。そこで、グルオン多体系に絞って、グルオン多体系が示す物性の一つとしてずれ粘性係数を、できるだけ基礎理論に基づいた手法により評価した。その結果、量子グルオン場のみを扱った段階では

あるが、量子グルオン場のずれ粘性係数への寄与はQCDの結合定数の最低次では零になることを示した。ずれ粘性係数が零であることはグルオン流体が完全流体であるということである。しかしながら、結合定数の高次効果の寄与は未評価であること、平均場の効果を見逃したことがあり、完全な解決には至っていない。今後は、特に古典的なグルオン場としての平均場の、ずれ粘性係数への寄与を評価することが必要であり、さらにずれ粘性係数以外の輸送係数をも評価していくことが課題と展望である。

- (4) クォーク間に対相関を持つクォーク・ボンモデルにより、カラー超伝導相とハドロン相の相構造・相転移の様相を調べた。クォーク・ボンモデルは $su(4)$ の対称性を持つことを指摘し、これをカラー $su(3)$ 対称性のみを持つように、粒子・空孔相関を導入し、モデルを拡張した。このモデルはボソン表現を用いることにより、正確に解けてしまうことを示し、厳密解を用いて、クォーク対相関の強さと粒子・空孔対相関の強さの比の関数として、このモデルでの相構造を示した。これにより、核子多体相とクォークのカラー超伝導相間の相変化、相構造を明らかにすることが可能となった。
- (5) 南部・Jona-Lasinio(NJL)モデルに、カイラル対称性を保持したまま8点相互作用を加えた、拡張されたNJLモデルを構成し、有限密度での核物質相とクォーク相の相転移を考察した。8点相互作用を導入することにより、核物質相では飽和性を再現できるモデルとなる。ここではクォーク物質にも同様な8点相互作用を取り入れた。この8点相互作用はカイラル対称性の回復点には影響を与えるが、クォーク・ハドロン相転移点には影響が現れないことを示した。両物質相の圧力を比較することで、相転移を記述し、有限密度でのクォーク・ハドロン相転移は1次相転移となることを示した。ここではカラー超伝導相は考慮していないので、クォーク対凝縮もモデルに取り入れ、カラー超伝導相との相変化をも考察することが今後の展望である。

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 18 件)

- ① Yasuhiko TSUE, Tong-Gyu LEE, Hiroshi

- ISHII, Time-Dependent Variational Approach to the Non-Abelian Pure Gauge Theory, Progress of Theoretical Physics 誌, 査読有, Vol.122, No.5, 2009, pp.1169-1188.
- ② Yasuhiko TSUE, C. PROVIDENCIA, J. da PROVIDENCIA, Masatoshi YAMAMURA, Many-Quark Model with $su(4)$ Algebraic Structure, Progress of Theoretical Physics 誌, 査読有, Vol.121, No.6, 2009, pp.1237-1287.
- ③ Yasuhiko TSUE, Kazuki MATSUDA, Variational Approach to the Chiral Phase Transition in the Linear Sigma Model, Progress of Theoretical Physics 誌, 査読有, Vol.121, No.3, 2009, pp.577-591.
- ④ Yasuhiko TSUE, C. PROVIDENCIA, J. da PROVIDENCIA, Masatoshi YAMAMURA, Semi-Classical Approach to the Two-Level Pairing Model - Various Aspects of Phase Change -, Progress of Theoretical Physics 誌, 査読有, Vol.117, No.3, 2007, pp.431-449.
- ⑤ N. Ikezi, M. Asakawa, Y. TSUE, Effects of mode-mode and isospin-isospin correlations on domain formation of disoriented chiral condensates, Physical Review 誌, 査読有, C73, 2006, pp.045212 1-10.

〔学会発表〕(計 6 件)

- ① 津江保彦, Time-Dependent Variational Approach to the Non-Abelian Pure Gauge Theory, 第 3 回日米合同物理学会, 2009 年 10 月 15 日, Hilton Waikoloa Village, Hawaii, USA
- ② 津江保彦, 変分法による線形シグマ模型での有限温度カイラル相転移, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 2008 年 9 月 20 日, 山形大学
- ③ 津江保彦, グルオン場に対する変分法と、グルオン物質への適用, 日本物理学会第 63 回年次大会, 2008 年 3 月 26 日, 近畿大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

津江 保彦 (TSUE YASUHIKO)
高知大学・教育研究部自然科学系・教授
研究者番号: 10253337

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし