

| | |
|----------|---|
| 氏 名 | すが ぬま ひで お 菅 沼 秀 夫 |
| 学位(専攻分野) | 博 士 (理 学) |
| 学位記番号 | 理 博 第 1360 号 |
| 学位授与の日付 | 平 成 4 年 3 月 23 日 |
| 学位授与の要件 | 学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当 |
| 研究科・専攻 | 理 学 研 究 科 物 理 学 第 二 専 攻 |
| 学位論文題目 | Color 電磁場中の chiral 対称性と quark-antiquark 対生成 |

論文調査委員 (主 査)
 教 授 玉 垣 良 三 教 授 益 川 敏 英 教 授 政 池 明

論 文 内 容 の 要 旨

強い相互作用をする系は、その基礎法則である量子色力学 (QCD) がもたらすカラーの閉じ込めとカイラル対称性という特徴をもつ。低エネルギー領域では閉じ込めは貫徹しカイラス対称性は自発的に破れているが、高温や高密度の状況では閉じ込めはなくなりカイラル対称性は回復することが知られている。カイラル対称性の発現様式は、このようなエネルギー密度という環境の変化のみでなく、強い電磁場や強いカラー電磁場によっても、変化を受ける。申請論文は、ハドロンの内部や高エネルギー原子核衝突で生じるカラー電磁場中でのカイラル対称性の発現様式とクオーク・反クオーク ($q-\bar{q}$) 対生成の問題を有効模型を用いて理論的に考察した研究である。

申請論文では、QCD の有効模型としては、クオークの閉じ込めはひとまず前提にして、カイラル対称性をよく記述する Nambu-Jona-Lasinio 模型を採用する。申請者は、この模型ではグルオンが与える高次の効果は模型のクオーク間の 4 体フェルミ相互作用の中に取り入れられているとし、カラー電磁場はクオークに対して外場として作用するという視点をとる。この模型の Lagrangian より、補助場の方法を用いて、スカラー場 σ ギスカラー場 $\vec{\pi}$ についての有効 Lagrangian を構成する。ここに相互作用によってもたらされる有効クオーク質量 (dynamical quark mass) が現れ、カラー電場などの環境によって変化する量となる。共变的に一樣なカラー電磁場の場合には、通常の電磁場の場合と同様に有効ポテンシャルが定式化出来ることが示され、カラー電場、磁場が非摂動的に作用する形で入った表式が与えられる。この有効ポテンシャルの実部に極値条件を課すことにより、dynamical quark 場に対する Dyson 方程式を導く。実部の最小値よりエネルギー的に安定な真空のエネルギー密度と対応する秩序パラメーター ($\vec{\pi}=0$ での σ の値乃至有効クオーク質量に関係する) が得られる。有効ポテンシャルの虚部から Schwinger 機構による $q-\bar{q}$ 対生成率の表式が導かれる。

導いた理論式を用いた計算により、カラー電磁場の効果について、申請者は以下のような定性的特徴を明らかにした。

- (1) カラー電場の効果によって、有効クォーク質量は減少し、カイラル対称性は回復する。
- (2) カラー磁場の効果は、対称性の破れを拡大するが、その効果は電場に比べて極めて小さい。
- (3) カイラル相転移の起こる臨界カラー電場の強さは約 4 GeV/fm である。
- (4) $q-\bar{q}$ 対生成率は、臨界カラー電場付近で、有効クォーク質量の減少により著しく増大する。
- (5) 以上の u, d クォーク場合に比べて、質量の大きい s クォークの場合には、カラー電場に対する有効クォーク質量の変化、 $q-\bar{q}$ 対生成率共に変化は緩やかである。

ハドロン内部のカラー電場の強さは、color-flux-tube 描像で Regge 軌跡の勾配から、半経験的に得られる。その値は約 $5-6 \text{ GeV/fm}$ であり、上記の臨界カラー電場より大きい。従って、ハドロンの flux-tube の内部では、強いカラー電場のために、カイラル対称性は回復しているとの結論を申請者は導いている。

論文の最後に、申請者はこの知見を高エネルギー重イオン衝突の初期段階に適用している。衝突直後の重イオン間では、多数重なりあった flux tube 中の強いカラー電場のために、カイラル対称性は回復していると考えられ、従ってクォーク・グルオンのプラズマ生成の議論において重要となる $q-\bar{q}$ 対生成の計算等には、current quark を用いる方が適切であるとの指摘を行っている。

参考論文 3 編のうち 2 編は申請論文の先駆となった研究であり、他の 1 編は強い電磁場中での対称性の振舞いとカピボ角についての研究で、本論文の理論的枠組みの基礎に関係する内容になっている。

論文審査の結果の要旨

強い相互作用をする物理系即ちハドロンの世界を理解するには、低エネルギー領域でカラーの閉じ込めとカイラル対称性の自発的破れという特徴をもつ量子色力学 (QCD) の真空が、クォークの存在によって生じるカラー電磁場のもとでどのような変化を受けるかを明らかにする必要がある。よく用いられる有効モデルでは、この点について適当に仮定を置いているのが、現状である。例えば、QCD の特徴をかなり良く採り入れているハドロン構造に対するカイラルバック模型では、カイラル場がクォークの存在するバック内部に入り込んでいない描像をとることが多い。他方、構成子クォーク模型のように、クォークの周辺でもカイラル対称性が破れていて、クォークとカイラル場とが相互作用するという描像も可能である。

申請論文は、上記のような問題意識を背景にして、カラー電磁場のもとでのカイラル対称性の発現様式とこれと関連してクォーク-反クォーク ($q-\bar{q}$) 対生成の様相を QCD の有効モデルを用いて研究したものである。申請者はこのための有効モデルとして Nambu-Jona-Lasinio 模型を選んだ。この模型はカイラル対称性に関する QCD の定性的な側面を良く記述する。また、これを用いた有限温度でのカイラル相転移の研究は最近の格子 QCD simulation の結果とよく対応する結果を与える。これからみて、カイラル対称性の問題を研究する上で、申請者の模型の選択は適切であった。導かれた有効ポテンシャルの実部は与えられたカラー場に応じて実現する秩序パラメーターと真空のエネルギー密度を与え、その虚部は Schwinger 機構による $q-\bar{q}$ 対生成に対する真空の不安定性を与えるという理論構成は、カイラル対称性の変化と $q-\bar{q}$ 対生成を同時に整合的に議論することを可能にした意味で、優れた定式化と言える。

計算結果に即して言えば、カイラル対称性の回復にはカラー電場が本質的役割を果たし、その臨界カラ

一電場の強さからハドロン内部でのカイラル対称性は回復しているとの結論は、ハドロンに対するカイラルバックの描像を支持し、また最近の格子 QCD simulation の結果とも整合する意味で、重要な知見である。また、質量の大きい s クォークでは、カイラル対称性の回復は遅く、 $q-\bar{q}$ 対生成率も緩やかであるという結果は、核物理におけるストレンジネス自由度の問題を考えるとときの指針となるもので興味深い。

以上、申請論文はカラー電磁場中でのカイラル対称性の回復とクォーク反クォーク対生成の機構に統一的理解を与えた意味で、クォーク・ハドロン多体論の分野の進歩に寄与するところが大きい。

よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。

なお、主論文及び参考論文に報告されている研究業績をを中心とし、これに関連した研究分野について試問した結果、合格と認めた。