

Title	Non-perturbative aspects of quantum chromodynamics for quarks, diquarks, and baryons(Abstract_要旨)
Author(s)	Nawa, Kanabu
Citation	Kyoto University (京都大学)
Issue Date	2007-03-23
URL	http://hdl.handle.net/2433/136762
Right	
Type	Thesis or Dissertation
Textversion	none

氏 名	な わ かな ぶ
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学位記番号	理 博 第 3124 号
学位授与の日付	平成 19 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・宇宙物理学専攻
学位論文題目	Non-perturbative aspects of quantum chromodynamics for quarks, diquarks, and baryons (クォーク・ダイクォーク・バリオンにおける非摂動量子色力学の諸相)
論文調査委員	(主査) 助教授 菅沼秀夫 教授 中村卓史 教授 畑浩之

論 文 内 容 の 要 旨

強い相互作用の基礎理論である量子色力学(QCD)の物理においては、非可換ゲージ理論に特徴的な漸近的自由性の為、エネルギー階級に依存して相互作用の強さが大きく変化し、それに伴って、非常に多彩な様相を示す。特に、低エネルギー領域でのQCD系は、クォークとグルーオンの非常に強結合な系となり、その結果、カラーの閉じ込め、カイラル対称性の自発的破れ、非自明なトポロジーの顕在化など、真空自身の構造が、摂動的な場合と比べ劇的に変化する。

論文では、このQCDの非摂動領域を主たる対象にして、「高密度系の有効模型を用いたダイクォーク凝縮の研究」及び「超弦理論を用いたQCDの非摂動的解析によるバリオンの研究」という2つのテーマの研究を行なっている。

論文の前半部分では、高密度でのQCDの非閉じ込め相において、2つのクォーク対が、強い相関の下で空間的に局在し、ボゾン的な「ダイクォーク」が形成され、それがボーズ・アインシュタイン凝縮(BEC)を起こす可能性についての研究を行なっている。特に、QCDの強結合領域においては、かつて電子系で試みられた「準化学平衡理論」が適用できることに着目し、クォークとダイクォークの準化学平衡系におけるダイクォーク・ボーズ凝縮の諸性質に対する、相対論的な枠組の下での分析を行なった。

論文では、まず、フェルミオン多体系が複数の引力チャネルを持ち、分子形成・解離過程が複数存在する場合、最も質量の軽い、つまり最も引力の強い最安定なボゾンしか系全体の基底状態には凝縮しないという、凝縮状態の单一性に関する定理を示し、これを「One-BEC定理」と名付けた。次いで、QCDの中間密度領域で、強い引力チャネルを与え得る2フレーバーのカラー超伝導のダイクォーク分子のみを取り扱い、そのBEC転移の性質を調べた。

また、論文では、相対論的な系の場合、反粒子を伴う対生成の自由度が現れる為、高温領域でも量子統計性が支配的になることを示し、高温領域での量子統計的重要性を指摘した。更に、ダイクォーク・ボーズ凝縮状態への転移温度に対する、ダイクォーク間の残留相互作用の効果を、化学ポテンシャル繰り込みという手法で評価し、ダイクォーク間の斥力相互作用によって、QCDの中間密度領域でBECの転移温度が、50%程度も小さくなり得ること等を明らかにした。

論文の後半部分では、QCDの閉じ込め相において、3つのクォークが、強い相関の下で束縛されている核子などのバリオンに対して、超弦理論の枠組みで導かれる「ホログラフィック QCD」を用いて非摂動的な解析を行なっている。これは、近年、ウィッテンらと酒井・杉本が開発した、QCDに対する新たな解析方法であり、超弦理論に現れるDプレーンを、10次元空間に適切に配置することによって、4次元のQCD等の非可換ゲージ理論を構成し、次いで、ゲージ／重力対応に基づいて、QCDの赤外有効理論を導出する方法である。この方法は、中間子に対しては、多大な成功を収めたが、この枠組みでは、バリオンに対しては、非局所的なソリトンとして現れる為に、これまで定量的な解析は為されていなかった。

論文では、世界に先駆けて、ホログラフィック QCDの枠組みに基づいて、カイラル・ソリトンとして現れるバリオンに対する解(ヘッジホッグ解)を求め、それに対する定量的な分析を行なった。実際に、バリオンを、パイ中間子とロー中間子によって構成される非局所的なソリトンとして定量的に記述し、核子などのバリオンの中心領域では、ロー中間子がアク

ティブに相互作用しているという新しいバリオン描像を得た。この研究に付随する成果として、カラーの閉じ込めとカイラル対称性の自発的破れとが、この枠組みでは直接対応する事、及び、パイ中間子と質量の大きい（軸性）ベクトル中間子とは、余剰次元において重なりが小さい為、結合が小さくなる事等も指摘した。

論文審査の結果の要旨

量子色力学（QCD）に基づく強い相互作用の解明は、現代物理学に残された最重要課題の1つであるが、その非摂動的性質故に、数学的に極めて困難な課題でもあり、その数学的・物理学的解明には多大な努力が払われてきた。近年の高エネルギー重イオン衝突を用いたクォーク・グルーオン・プラズマ（QGP）生成実験の展開等により、QCDの非摂動的性質に加えて、高温・高密度といった新しい極限状況下でのQCDの物理が、理論と実験の両面で注目を集めている。この様な流れの中で、最近、高温・高密度QCDにおいて「強結合QGP」「カラー超伝導」「ダイクォーク凝縮」等の、新しい多彩な相構造の存在が明らかになってきており、QCD系は、新しいタイプの物性系としても興味深い研究対象になりつつある。

申請論文においては、QCDの非摂動的性質に着目し、2つの研究を行なっている。論文の前半部では、高密度下での非閉じ込め相において、QCDの非摂動性に起因する「クォーク多体系におけるボーズ凝縮現象」を研究し、後半部では、超弦理論でのゲージ／重力対応（gauge/gravity correspondence）に基づいて非摂動的QCDを定式化した「ホログラフィックQCD」を解析し、ソリトンとして現れるバリオンに対する研究を行なっている。

有限密度QCDの非閉じ込め相においては、クォーク密度に応じて、相互作用の強さが大きく変化する為に、高密度の弱結合領域では、金属超伝導のBCS状態に対応するようなクォーク（フェルミオン）自由度の「カラー超伝導」状態が現れる一方で、比較的低密度の強結合領域では、ダイクォーク（ボゾン）自由度が発達した系である「ダイクォークのボーズ・アイシュタイン凝縮（BEC）」の実現可能性が示唆されている。

論文では、かつて電子系を対象に考案された「準化学平衡理論」を、通常の物性系とは異なる「相対論的な枠組み」の下に定式化し、これを用いて高密度QCD系でのダイクォークBEC相の諸性質に対する重要な一般的及び定量的解明を行なっている。例えば、フェルミオン多体系が複数の引力チャネルを持ち、分子形成・解離過程が複数存在する場合、最も質量の軽いボゾンしか系全体の基底状態には凝縮しないという、凝縮状態の単一性に関する「One-BEC定理」を見出している。これは、一般性の高い定理であり、「クォーク多体系におけるBCS-BECクロスオーバー」の研究を行なう上で有益な指針を与えるものである。また、相対論的な系の場合は、反粒子を伴う対生成の自由度が現れる為、高温領域でも量子統計性が支配的になることを示し、高温領域での量子統計的重要性を指摘するなど、「相対論的な物性系」の物理系としての面白さもアピールしている。

論文の後半部分では、超弦理論の枠組みで導かれる「ホログラフィックQCD」を用いて、核子などのバリオンに対する研究を行なっている。この方法は、近年開発された、QCDに対する非摂動的解析法であり、中間子に対しては、多大な成功を収めたが、バリオンに対する定量的な研究は、これ迄に為されていなかった。

申請論文では、世界に先駆けて、ホログラフィックQCDの枠組みにおいて、非局所的なカイラル・ソリトンとして現れるバリオンに対する解を求め、定量的な分析を行ない、新しいバリオン描像を得るなどの成果を挙げている。

この様に、申請論文では、素粒子物理から物性物理までの幅広い視点に立って、クォーク・ハドロンの物理に関する最新の重要な課題を、最先端の方法で分析し、複数の重要な研究成果を挙げており、その寄与は大きい。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。また、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。