

修士論文概要 (2020年度)

大阪大学大学院 理学研究科 物理学専攻 原子核理論研究室

非局所的相互作用フェルミオン系における磁気触媒作用

肥後本 拓也

概要

1次元クーロンポテンシャルの下で、電子の最低束縛エネルギーは負の無限大になるという特異性が知られている。この特異性の発見により、低次元物性の分野で注目を集め量子細線等の1次元系の研究が多く行われた。その中でも、1次元励起子（電子と正孔の間のクーロン相互作用による束縛状態）の結合エネルギーの極端な増大等の可能性が指摘されている。

この状況が原子核分野で実現するならば、クォーク対が強く束縛しカイラル対称性の破れの指標であるカイラル凝縮の極端な増大が確認できるのではないかと考えた。1次元系は非常に強い磁場を加えることによって擬似的に実現されるので、カイラル凝縮の磁場依存性の強磁場極限に注目する。また、クォークと反クォークの間に働く引力は短距離領域でクーロンの振る舞う。NJL(Nambu Jona-Lasinio)モデルや格子QCD(量子色力学)で計算した先行研究によると、カイラル凝縮は磁場の増加とともに強められる(磁気触媒作用)ことが分かっている。しかし、NJLモデルはQCDの低エネルギー有効モデルであるため、短距離領域は考慮されておらず、格子QCDには短距離領域に加え、長距離領域の効果も入っている。したがって、クォーク間相互作用が短距離領域でクーロンの振る舞いであることがどのように磁気触媒作用に影響を及ぼすかを調べるため、本研究では短距離領域のみに注目した解析を行った。

本研究では、クォーク間相互作用の短距離領域でのクーロンの非局所性の効果が特異的なものであれば、長距離領域での振る舞いに関係なくカイラル凝縮に強く反映されると予想し、tree-levelのgluon交換の相互作用によるgap方程式を解析した。その結果、短距離領域でのクーロンの相互作用による、カイラル凝縮が異常に増大するような特異性は確認されなかったが、NJLモデルと比較して磁場依存性の乗数が大きいことが分かった。

場の理論におけるソリトンの量子振動と エネルギー運動量テンソル

伊藤 広晃

概要

場の理論にはソリトンと呼ばれるエネルギー密度が局在した安定解が存在する。ソリトンは場の方程式の古典解であるが、量子効果とその構造に与える影響の議論が古くからなされてきた。QCD では静的なクォーク反クォーク対の間にフラックスチューブが作られることが知られており、これは一種のソリトンと解釈される。フラックスチューブの量子振動によって、古典的なカラー電場の分布が広がることが指摘されている。フラックスチューブの力学構造の理解はカラー閉じ込め機構の解明に欠かせない。

本研究では $2+1$ 次元系に現れるソリトンであるドメインウォールの量子効果がエネルギー運動量テンソル (EMT) 分布に与える影響を調べる。近年格子ゲージ理論による数値解析における新しい EMT 測定手法が開発され、クォーク反クォーク系の EMT 分布の測定が行われた。今後この手法を用いた様々な系の EMT 分布の数値測定が実現し、ゲージ理論に現れるソリトン構造の EMT を用いた研究が発展することが期待される。

本研究では、ソリトンの量子効果が EMT 分布に与える補正を調べるために、 $1+1$ 次元と $2+1$ 次元の実スカラー ϕ^4 理論に現れるドメインウォールの解析を行う。 $2+1$ 次元の場合は、全エネルギーを有限にするために、系に固定境界条件を課す。この系の EMT 分布を古典的なソリトン解周りのガウス近似の範囲で量子効果を取り込んで解析した。

格子ゲージ理論における クーロンゲージ固定アルゴリズムについて

大島 涼介

概要

場の量子論に現れる物理量の発散を抑える手段の中でも、格子正則化は非摂動領域に適用できる点や、ゲージ対称性を保つ点から非常に強力な手法として知られている。これらの性質から、格子正則化は強い相互作用を記述する量子色力学 (QCD) でよく用いられ、格子上で QCD を定式化した理論は格子 QCD と呼ばれる。格子 QCD では計算機上で具体的な数値解析ができるため、数多くの研究が格子 QCD による数値解析を用いて行われている。

格子 QCD による数値解析を行う際に、ゲージに依存する量の解析や、スメアリング等の操作を行う場合には、クーロンゲージ等へのゲージ固定が必要となることがある。格子上でゲージ固定を行う場合、アルゴリズムとしては目的のゲージ条件を満たすまで繰り返し配位を更新する反復法が用いられる。しかし、現行のゲージ固定アルゴリズムでは、同じ空間体積を扱う場合でもアルゴリズムの計算時間がゲージ配位に依存してしばしば極端に遅くなることが知られており、これが格子 QCD 数値解析におけるゲージ固定の計算コストを増大させる要因となっている。

本研究では、このクーロンゲージ固定アルゴリズムの収束速度が悪化する原因の特定に取り組んだ。格子 QCD は $SU(3)$ ゲージ理論によって記述されるが、本研究ではより基礎的な $U(1)$ 、 $SU(2)$ ゲージ理論でのクーロンゲージ固定アルゴリズムに注目した。計算手法として各格子点ごとに更新を行う Los Alamos 法・過緩和法を用い、空間 1~3 次元でそれぞれ解析を行った。これらの場合に対し、シミュレーション及び線形解析の結果を比較することにより、 $U(1)$ ゲージ理論では位相欠陥と呼ばれる局所的な構造が収束速度の悪化やアルゴリズムが停滞する原因になっていること、 $SU(2)$ ゲージ理論ではゲージ場の非可換性が収束速度の悪化に関係していることを突き止めた。

カラー超伝導の臨界温度周辺におけるソフトモード とレプトン対生成率の解析

西村 透

概要

QCD 相図上の低温・高密度領域にはカラー超伝導 (CSC) が存在することが理論的に知られているが、これまでこの相の存在を確証づける実験結果は存在しない。しかし近年、米国 RHIC で BES-II における重イオン衝突実験が進行しており、この実験によって高密度物質の研究が飛躍的に発展することが期待される。更に、ドイツでは FAIR が建設中であり、日本では J-PARC-HI が計画中であるなど高密度物質を目指す重イオン衝突実験は今後更なる発展が期待される。このため、これらの実験で CSC を観測するための観測量を調べることは興味深い課題である。

しかしながら、重イオン衝突実験では CSC が実現したとしても一瞬であり、CSC 相を直接観測することは困難である可能性が高い。そこで本研究では CSC の中でも比較的 low density で実現すると考えられている 2SC 相に焦点を当て、その転移温度付近でのダイクォークペア場の揺らぎに起因するレプトン対生成率を計算する。先行研究により、この揺らぎに対応するソフトモードが相転移温度よりも高温かつ、相転移付近の温度で増大することが示されている。相転移付近ではこのソフトモードの寄与により、低エネルギー領域のレプトン対生成率に大きな影響を与える事が期待できる。

本研究では、2SC の相転移に伴うソフトモードが関与するレプトン対生成過程を見るために、2 フレーバー NJL 模型を用いて、Aslamazov-Larkin 項・Maki-Thompson 項という光子自己エネルギーの計算を行う。これら 2 種類の項を考慮することにより、Ward 恒等式が満たされることを示す。これらの計算で得られる光子自己エネルギーを用いて単位不変質量あたりのレプトン対生成率を計算し、ソフトモードが低エネルギー領域のレプトン対生成量に与える影響について論じる。