

修士論文概要 (2018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

カイラリティを変化させる散乱の 寄与を取り入れたカイラル運動論の構築

大塚高弘

概要

質量 0 のフェルミオンに対してはカイラル対称性が成立し、カイラリティを保存量として持つことが Noether の定理によって示される。しかし、相対論的な量子論においてカイラル対称性は破れており、したがってカイラリティは保存量とならない。このような古典的な対称性の量子的破れはカイラルアノマリーとして知られている。カイラルアノマリーはマクロな輸送現象においても現れており、そのようなカイラルアノマリーに起因する輸送現象はカイラル輸送現象と呼ばれている。

カイラル輸送現象は従来の古典的な輸送理論では説明できない現象であり、磁場と平行に流れる電流を発生させるカイラル磁気効果や、流体中で渦度に沿った電流を発生させるカイラル渦効果などが挙げられる。カイラル輸送現象はさまざまな系で発生すると考えられており、重イオン衝突実験によって生成されるクォーク・グルーオン・プラズマ状態においてもその観測が期待されている。しかし、現段階では実験的観測が成功しているとは言いがたく、今後より高精度を目指して精力的に実験が行われる予定である。そのため、理論側からもカイラル輸送現象を引き起こす種であるカイラリティの時間発展を理解することは非常に重要である。

そこで、本研究ではフェルミオンの散乱がカイラリティに与える影響を議論する。特に、フェルミオンの質量が 0 の極限においても、カイラリティを変化させるフェルミオン・ゲージボソン間の散乱に着目した。そのような散乱がカイラリティの時間発展に与える影響を解析するため、衝突項を取り入れた Boltzmann 方程式を構成した。一方で、この散乱がカイラルアノマリーとして理解可能かどうかを議論したところ、得られた Boltzmann 方程式とカイラルアノマリーの関係式と整合しないことが判った。そのため、カイラリティを変化させる散乱の起源を探るため散乱過程をさらに詳細に解析した。

改良したクエンチ QCD による 重クォーク QCD の臨界点の精密解析

清原淳史

概要

クォークやグルーオンの運動は量子色力学 (QCD) によって記述される。QCD の特徴として有限温度有・限密度において相構を持つことがあげられる。しかし、QCD では結合定数が低エネルギーで大きくなるため、摂動展開を用いて相転移現象を扱うことが難しい。そこで摂動展開を用いず、第一原理的な計算を可能にしたのが格子 QCD である。QCD における相転移現象に対して、有限温度の格子 QCD を用いた研究は盛んに行われている。

有限温度 QCD の相転移の次数はフレーバー数およびクォークの質量に依存することが知られている。相転移の次数はクォークの質量が非常に重い領域では一次相転移だが、質量が軽くなるにつれてクロスオーバーへ変化する。これまでに、クォークの質量を無限大とするクエンチ QCD によって重クォーク領域の相構が調べられてきた。これらの先行研究では、物理量のヒストグラムが転移点上において一次相転移ではピークが複数ある一方で、クロスオーバーではピークは 1 しかないという性質を利用した臨界点の探索が行われた。また、多重再重み付け法とホッピングパラメータ展開を用いて、クエンチの配位から臨界点付近の物理量のヒストグラムを構築して解析が行われたが、オーバーラップ問題と呼ばれる統計的な問題により精密な解析が困難であった。

本研究では臨界点付近の配位を直接得るために、クエンチ近似された作用にポリヤコフループを加えた作用に基づくモンテカルロシミュレーションを行った。この改良により、従来とほぼ同等の計算コストで臨界点の精密な測定が可能となった。また、本研究ではピンダーキウムラントを用いた解析で臨界点の測定も行った。ヒストグラム法による臨界点の測定結果とピンダーキウムラントによる測定結果は、有限体積効果のために大きく異なる結果となった。この不一致について、有限サイズスケーリング解析に基づいて議論する。

QCD 相図上の 1 次相転移探索へ向けた 高次ゆらぎの時間発展の研究

野中奏志

概要

陽子や中性子といったハドロンは、内部構としてクォークの自由度を持っている。極めて高温・高密度の状態ではそのクォークは閉じ込めから開放され、QCD 物質はクォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) という状態に相転移することが知られている。この例のように QCD は有限温度・有限密度の領域で多彩な相構を持っており、それらをまとめたものを QCD 相図と呼ぶ。QCD 相図において、ハドロン相と QGP 相の間には 1 次相転移線が、その終点には臨界点が存在することが理論的に示唆されている。このような 1 次相転移や臨界点の探索は理論・実験の両アプローチで盛んに行われており、その温度・密度を具体的に決定することは最も興味深い研究課題の 1 つとなっている。

特に実験的な手段として近年世界各地で盛んに行われているのが重イオン衝突実験である。重イオン衝突実験では、衝突終状態におけるイベント毎の保存電荷数ゆらぎを観測量として用いることができる。保存電荷数ゆらぎは、臨界点付近でカイラル凝縮のゆらぎと結合してソフトモードになることや、それが初期の媒質の情報を反映しやすい物理量であることなどの利点がある。特に非ガウス性を特徴づける高次ゆらぎは、臨界点に敏感であること、臨界点付近で符号変化を起こすことなどの理由から近年注目を集めている観測量である。

本研究では、QCD 相図上の 1 次相転移に注目し、重イオン衝突実験で生成された物質が 1 次相転移線を通過することを想定し、衝突後から 1 次相転移線を通過し観測に至るまでの非平衡的な時間発展を確率微分方程式を用いて記述した。1 次相転移通過する際に期待される表面の形成やドメインの出現といった現象のダイナミクスを見るとともに、それらが 1 次相転移のシグナルとして観測量にどのように反映されるかを議論する。

機械学習を用いた SU(3) Yang-Mills 理論における トポロジカル電荷の推定

松本拓也

概要

非可換ゲージ理論におけるトポロジカル電荷とはゲージ場の配位ひとつひとつが持っているトポロジカル不変な量であり整数値 $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ をとる。トポロジカル電荷は本来、連続理論において定義されるものであるが格子上でも計算することができる。SU(3) Yang-Mills 理論におけるトポロジカル電荷を格子上で定義するひとつの方法は、トポロジカル電荷を離散化して計算する方法である。しかしその計算結果は格子化による紫外ノイズの影響により、整数値から離れた値になってしまう。その紫外ノイズを抑制するために、従来の研究では勾配流法やスメアリング法などの手法を用いてゲージ配位をアップデートし、場の平滑化を行ってきた。場の平滑化によるアップデートを繰り返すことにより格子上で計算されたトポロジカル電荷は徐々にある整数値に近づいていくが、アップデートには多くの時間がかかってしまう。

本研究では、ゲージ配位のトポロジカル電荷を機械学習の技術を用いて推定する。具体的には、十分勾配流をかけた時のトポロジカル電荷を正解データとし、4次元時空上で定義されるトポロジカル電荷密度及びそれを勾配流で発展させたものをそれぞれ4次元画像として学習するようなネットワークモデルを構成した。しかし、その学習結果はトポロジカル電荷密度を単に空間積分した時の精度と変わらないものとなった。そこで、トポロジカル電荷密度を一部の次元について積分することで低次元化し、更には異なる勾配流の flow 時間における配位をひとつの画像として重ねあわせて入力するなどの工夫をした。その結果トポロジカル電荷の推定において、従来の方法と比べ遥かに少ない計算コストと 95 % 程度の極めて高い精度での推定を両立することに成功した。