

博士論文の要旨及び審査結果の要旨

氏名 石見 涼
 学位 博士 (理学)
 学位記番号 新大院博 (理) 第 419 号
 学位授与の日付 平成 29 年 3 月 23 日
 学位授与の要件 学位規則第 4 条第 1 項該当
 博士論文名 格子 QCD を用いた有限温度カイラル相転移

論文審査委員 主査 准教授・浅賀 岳彦
 副査 教授・小池 裕司
 副査 教授・大原 謙一
 副査 准教授・江尻 信司
 副査 准教授・中野 博章

博士論文の要旨

物質の質量の 99% を与える量子色力学 (QCD) のカイラル対称性の破れは、宇宙誕生直後の非常に高温の状態では回復していたと考えられている。そのカイラル対称性の破れの相転移を第一原理である QCD から理解することは、宇宙の進化の歴史を研究する上で重要である。

本学位論文では、質量の起源として本質的な、2 種類の動的クォーク (アップクォークとダウンクォーク) を考慮した 2 フレーバー QCD のカイラル対称性の破れを、格子ゲージ理論の大規模数値シミュレーションを行うことにより研究した。特に、「質量ゼロ極限での 2 フレーバー QCD の有限温度カイラル相転移が一次相転移か二次相転移か」という問題について、2 つのアプローチで研究した。その問題は、20 年以上の間、様々な方法で研究が続けられているが、未だに決定的な結論には至っていない問題である。

一つ目のアプローチは、軽いクォーク 2 フレーバーと重いクォークが多フレーバーある系を議論することで、質量ゼロの 2 フレーバー QCD の相転移を調べる方法である。クォークの質量が軽くなるにつれて QCD の数値シミュレーションは計算時間がかかるため、難しくなる。このアプローチでは、クォーク質量を軽くしてゼロ極限を調べる代わりに、2 フレーバーに別の動的クォークを加え、その 2 フレーバーの質量と余計な多フレーバーの質量のパラメータ空間で、クロスオーバーから一次相転移に変化する質量 (臨界質量) を計算する。さらに、クロスオーバーの領域と一次相転移の領域の境界を 2 フレーバーの質量がゼロになる方向へ外挿することによって、重いクォークの質量無限大極限の点、つまり、質量ゼロの 2 フレーバー QCD の点が一次相転移の領域にあるかどうかを調べる。フレーバー数を増やすと一次相転移の領域が広がり、臨界質量は決めやすくなるため、このようなアプローチが有効になると考えられる。系統的な数値シミュレーションを行った結果、2 フレーバー QCD に一次相転移の領域が現れる兆候はなく、得られた結果は質量ゼロの 2 フレーバー QCD の相転移は二次相転移であることを支持するものであった。

もう一つの方法は、カイラル相転移の秩序変数「カイラル凝縮」を相転移点近傍で測定し、スケーリング則を他の模型と比較する方法である。二次相転移であれば、2フレーバーQCDのカイラル相転移は3次元O(4)スピン模型と同じユニバーサルティークラスにあることが期待される。スピン系の外部磁場項がQCDの質量項に相当し、スピン系の温度はQCDの温度と化学ポテンシャルの2つの変数に相当する。有限温度格子QCDのシミュレーションで得られた秩序変数の結果を用い、スケーリングプロットを描き、スピン模型の秩序変数である自発磁化のスケーリング関数とよく一致していることを示した。有限温度ゼロ密度だけでなく、低密度領域でのカイラル凝縮の変化も調べることにより、スケーリング関数の中でQCDの温度と化学ポテンシャルがどのように混ざり、スピン系の換算温度に対応するのかを調べることができた。それは、(温度-化学ポテンシャル)相図における臨界線の場所を低密度領域で調べたことに相当する。

有限温度QCDのスケーリング則が、O(4)スピン模型のものとよく一致していることは先行研究でも示されていることであるが、本研究では、有限密度にスケーリング則の研究を拡張することにより、(温度-化学ポテンシャル)面の臨界線の密度ゼロでの曲率を測定することができた。その臨界温度の密度依存性は、QCD物質の研究における重要な情報の一つである。

審査結果の要旨

フレーバー数2のQCDのカイラル相転移が一次相転移か二次相転移かという問題は、長い間議論されてきた未解決問題である。本論文では、大規模数値シミュレーションによる2つの方法でその問題に取り組んだ。

1つ目のフレーバー数を増やすアプローチは、軽い2フレーバーと余計な多フレーバーの質量パラメータ空間での相図の情報から2フレーバーQCDの質量ゼロ極限の性質を読み取るという、今までにない斬新な方法である。本学位論文の研究では、一次相転移であることを完全には否定できてはいないが、二次相転移であることを強く示唆する結果が得られた。その研究成果は、投稿論文としてすでにPhysical Review Dに掲載され、高く評価される。

2つ目のアプローチは、従来からの用いられている方法で、相転移点付近で秩序変数のスケーリング則を、同じユニバーサルティークラスにあると期待される模型と比較する方法である。2フレーバーQCDの秩序変数のスケーリング関数が、3次元O(4)スピン模型のスケーリング関数とよく一致し、カイラル相転移が二次転移であると示唆されることは、先行研究でも示されていることであるが、そのスケーリング則の解析を有限密度領域まで拡張したことが、この研究の新しい点である。その有限密度の解析では、スケーリング関数の中に相転移温度の化学ポテンシャルについての密度ゼロでの2階微分に相当するパラメータがあり(1階微分は対称性からゼロ)、そのパラメータを数値シミュレーションで決定することに成功した。現時点で空間を格子に切った格子間隔が粗く、得られた数値自体はまだ信頼できるものではないかもしれない。しかし、その臨界温度の密度依存性は、QCD物質の研究における重要な情報の一つで、いろいろなグループが競って計算を試みている課題である。このスケーリング関数から臨界温度の2階微分を読み取る方法が有用であることを示したこの研究は、有限密度QCDにおける重要な進展であると考えられる。

よって、本論文は博士(理学)の博士論文として十分であると認定した。