

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月7日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H03669

研究課題名(和文) 格子QCDで探るアクシオン宇宙

研究課題名(英文) Axion cosmology on the lattice QCD

研究代表者

北野 龍一郎 (Kitano, Ryuichiro)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授

研究者番号：50543451

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,040,000円

研究成果の概要(和文)：場の量子論において、素粒子は真空からの励起状態として記述されると同時に、その真空を決めるのも素粒子を構成する場の力学である。ゲージ理論はゲージ変換で移り変わるものを同じとみなして理論を定義するが、そのゲージ変換が時空に絡みつくトポロジカルな場の配位が真空の構成に重要な役割を果たす。本研究では、ゲージ理論のトポロジカルな性質の解明のために、格子ゲージ理論のシミュレーションを行い、宇宙が高温となったときの様子や、真空中でのクォークの役割などに関して新しい結果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

アクシオンは、我々の素粒子の作り出す真空を変化させる仮想粒子で、宇宙の暗黒物質の候補である。暗黒物質となるには、宇宙の歴史において、アクシオンの質量がどのように変化してきたかを知る必要があった。そこで、本研究では格子QCDのシミュレーションの新技术を開発し、これまで計算可能でなかった高温領域でのアクシオン質量計算に成功した。その他、トラス上のゲージ理論やクォーク質量の定義に関して新しい結果が得られた。これにより、我々の「真空」の理解は大きく進んだと言える。また、我々の宇宙がどのように成り立っているのかという根本的問題にも重要な知見が得られた。

研究成果の概要(英文)：In quantum field theory, particles are defined as excitations from the vacuum, but at the same time, the vacuum structure is determined by fields to describe particles. In gauge theory like QCD, the field configurations are defined as equivalent when they are related by a gauge transformation. The gauge transformation can actually "wind up" the space-time, that makes the vacuum to involve topologically non-trivial configurations. Such configurations are indeed important to understand the structure of the vacuum. In this research project, in order to understand the topological aspect of the gauge theories, various kinds of studies are performed. In particular, by using the simulations of the lattice gauge theories, new results are obtained in the high temperature physics and also the role played by quarks in the vacuum.

研究分野：素粒子論

キーワード：素粒子論

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

LHC 実験でヒッグス粒子が発見され、また、新粒子探索が進み、標準模型の有効範囲が非常にミクロなスケールまで成り立っていることが徐々にわかってきていた。そのような状況のなか暗黒物質の候補として真空を変化させる軽い粒子であるアクシオンの可能性が脚光を浴びてきていた。アクシオンが暗黒物質となるには、宇宙初期に温度が高温から低温に変化するなか、その変化を受けてアクシオン質量が増大し、次第にアクシオンが凝縮していくという生成機構が適度に働く必要があるが、その理論的計算は準古典近似によるものしかなく、アクシオンの凝縮が始まる温度領域で信用できるものであるか明白でなかった。そこで、格子ゲージ理論による非摂動的な計算を始めたところ、世界中で同様な計算のプロジェクトが立ち上がり国際競走となった。

2. 研究の目的

素粒子物理における量子色力学(強い相互作用の理論)が荷電共役-空間反転(CP)対称性を不自然なまでによく保つ問題「強い CP 問題」は、仮想粒子アクシオンを導入するか、もしくは質量を持たないクォークが存在すれば解決される。いずれの解も確立すれば「強い CP 問題」に留まらない、宇宙の全体像の構築に大きな影響を与える。当研究では、これまで深く議論されてこなかった、1)アクシオン質量の温度依存性の第一原理計算、2)アップクォークは本当に質量を持つのか? の2つ課題をテーマとして設け、主に格子ゲージ理論に基づく数値的な手法で課題の解決を計る。既に小規模な格子上で新たな手法を独自に開発/提案しているが、更なる改良/開発によりこれを格段に発展させ、大規模計算へ拡張し最終的な解決への道筋を付けることを目標とする。

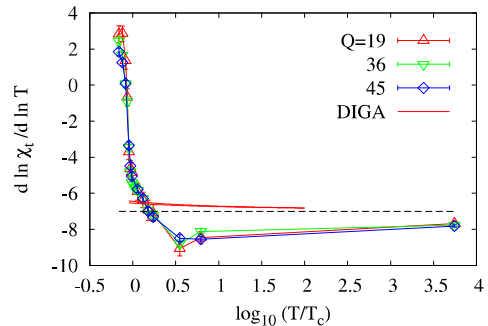
3. 研究の方法

動的クォークを含まないクエンチ近似 QCD の枠内で、新手法の大規模シミュレーションへの拡張を推し進めることから始める。博士研究員1名を雇用し、プログラムの最適化を通じた計算速度の向上を担当する。並行して、クォーク質量問題の最も有効な評価法の選定に努める。動的クォークの効果を含む QCD でアクシオン質量の試験的計算を小規模計算機上で開始し、大規模計算に向けた課題の解決を図る。また、選定した手法で不定性の無いクォーク質量の計算を開始する。両課題の大規模数値計算を KEK のスパコン等で実行し、アクシオン模型へのインパクトやクォーク質量不定性の大きさを評価し、成果を発表する。

4. 研究成果

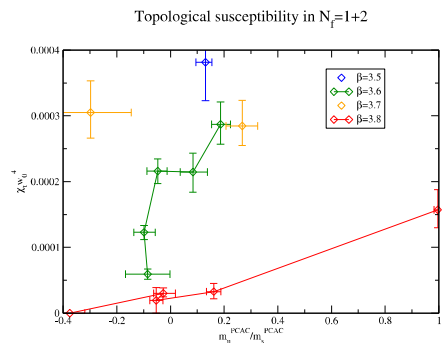
アクシオンの質量

トポロジ感受率の温度依存性は、強い CP 問題の1つの解であるアクシオン模型におけるアクシオン暗黒物質の残存量の決定に必要である。本プロジェクトのグループを始め、これまで多くの計算結果が得られている。我々は、アクシオン質量の温度微分を直接調べる「微分法」を提案し、クエンチ近似ではあるが、従来の方法では到達困難であった超高温領域での温度依存性を決定することができた。結果はおおむね希インスタントンガス近似による半古典的評価が高温で成り立つことを示唆するが、非閉じ込め相転移温度付近でどの程度定量的に成り立っているかは議論の余地がある。



クォークの質量問題

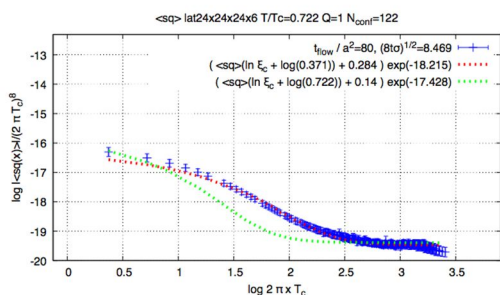
1 + 2 フレーバー QCD の研究については既に幾つかのとクォーク質量で予備的な結果が得られており(右図)、それらは Lattice 国際会議で報告された。計算前の予測に反して PCAC 質量が負の領域でもシミュレーションが可能であることなどが分かってきた。図からは、トポロジ感受率 (χ_t) の PCAC クォーク質量依存性が m_q を変えると大きく変わることが読み取れる。従って、この不規則にも見える依存性を理解するとともに離散化誤差を抑制するために可能な限り大きな m_q でのシミュレーションを行う必要がある。



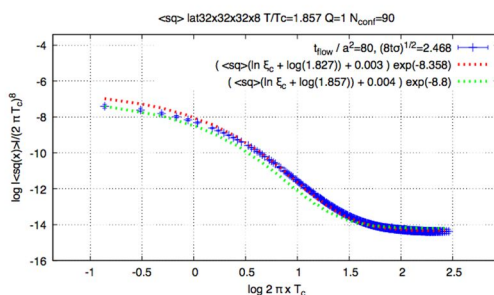
半古典近似と格子計算の定量的比較

半古典的に計算された相関関数のような局所的な物理量がどの程度正しい描像を与えているかについて研究を行った。インスタントン背景下では、 $\langle FF(x)FF(0) \rangle$ といった CP を破る相関関数が値を持つ。相関関数はインスタントン計算によって評価でき、その関数型はインスタントンの典型的な大きさに支配され、また温度に依存する。デバィ遮蔽によって高温ではインスタントン

は小さくなることが予言される。この描像が格子計算によって得られた配位群に存在するかどうかは、原理的にはインスタントン背景での相関関数の格子計算によって確認することができるが実際には困難である。格子計算には古典解の上に量子ゆらぎが乗るため、雑音が多い。そこで、格子計算で得られた配位から雑音を取り除き、インスタントンを抜き出してから相関関数を計算し、半古典的な予測と定量的な比較を行った。インスタントンの形を変化させない雑音の除去は、長時間の Wilson flow により実現できる。この研究により、格子計算と半古典計算が直接比較可能となった。高温のシミュレーションでは格子計算と半古典計算はよく一致しており、インスタントン描像の正しさが確認された。一方、相転移温度以下では、2つのカーブは一致せず、インスタントン描像は定量的には成り立たないことが示された。インスタントンで解釈しようとする、予測より大きなインスタントンが経路積分に主要な寄与を与えている。この成果は Lattice 国際会議にて報告された。

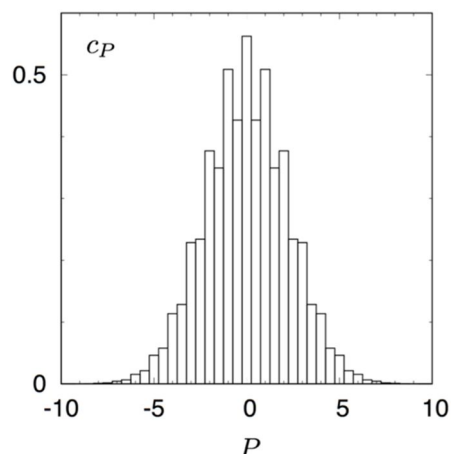


(a) $24^3 \times 6$ with $T/T_c \approx 0.72$



(b) $32^3 \times 8$ with $T/T_c \approx 1.9$

トラス上のゲージ理論とトポロジー
 時空のトポロジーとゲージ群によっては Q が整数でなくなることが知られている。トラス上の $SU(N)/Z_N$ ゲージ理論もその例で、 Q は $1/N$ の整数倍となる。これは、パラメータの周期性が 2 ではなく、 $2/N$ となることを意味する。最近、この事実に関連して、 θ をパラメータとしたゲージ理論の相構造の研究が盛んに行われ、 R^4 上の $SU(N)$ 理論が $\theta = \pi$ において自発的に CP を破るとの主張がなされている。我々は、トラス上の $SU(N)/Z_N$ ゲージ理論の性質と R^4 上の $SU(N)$ 理論との関係を、物理量の体積依存性に注目することにより明白にし、いくつかの仮定のもとで自発的 CP 対称性の破れが起こることを示した。有限体積効果の依存性を決定し、これが上図のようにインスタントン数分布に特徴的な構造を与え、格子計算で確認可能であることを示した。



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 21 件)

“ $\theta = \pi$ in $SU(N)/Z(N)$ gauge theories,” [Ryuichiro Kitano](#), [Takao Suyama](#), [Norikazu Yamada](#). JHEP 1709 (2017) 137.

“Topological susceptibility at high temperature on the lattice,” [J. Frison](#), [R. Kitano](#), [H. Matsufuru](#), [S. Mori](#), [N. Yamada](#). JHEP 1609 (2016) 021.

“Topology in QCD and the axion abundance,” [Ryuichiro Kitano](#), [Norikazu Yamada](#). JHEP 1510 (2015) 136.

〔学会発表〕(計 36 件)

[北野龍一郎](#), Strong CP problem on the lattice, Johns Hopkins Workshop Series on Current Problems in Particle Theory Summer 2017, “Beyond the Standard Model - Exploring the Frontier”, 2017 年 7 月 6 日, Budapest, Hungary

[Julien Frison](#), Topological susceptibility with a single light quark flavour, The 35th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2017), 2017 年 6 月 18-25 日, Granada, Spain

[森紳悟](#), Instanton effects on CP-violating gluonic correlators, The 35th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2017), 2017 年 6 月 18-25 日, Granada, Spain

〔図書〕(計 0 件)
〔産業財産権〕
出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://research.kek.jp/people/kitano/axion/>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：山田憲和

ローマ字氏名：(YAMADA, norikazu)

所属研究機関名：高エネルギー加速器研究機構

部局名：素粒子原子核研究所

職名：研究機関講師

研究者番号(8桁)：50399432

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：Julien Frison

ローマ字氏名：(FRISON, julien)

研究協力者氏名：森紳悟

ローマ字氏名：(MORI, shingo)

研究協力者氏名：松古栄夫

ローマ字氏名：(MATSUFURU, hideo)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。