

氏 名 富井 正明

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 1857 号

学位授与の日付 平成28年9月28日

学位授与の要件 高エネルギー加速器科学研究科 素粒子原子核専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Short-distance correlation functions and non-perturbative
renormalization of quark currents in lattice QCD

論文審査委員 主 査 教授 熊野 俊三
教授 橋本 省二
教授 北野 龍一郎
准教授 西村 淳
講師 山田 憲和
准教授 清 裕一郎 順天堂大学

論文内容の要旨
Summary of thesis contents

Precise predictions of the Standard Model (SM) are important for the searches of new physics. The precision of the SM predictions needs to be improved for detailed comparisons with the forthcoming updates of experiments. The uncertainty of SM predictions mainly arises from the contribution of Quantum Chromodynamics (QCD), which is the theory of strong interaction of quarks, anti-quarks and gluons. This is because QCD cannot be treated by perturbation theory at low energies and the parameters of QCD such as the strong coupling constant have large uncertainty compared to other SM parameters.

Correlation functions of quark currents provide a rich source of information on the QCD vacuum at various scales ranging from perturbative to non-perturbative regions. At short distances, they become mostly perturbative due to the asymptotic freedom of QCD. Using high order perturbation theory, they can be used to determine the strong coupling constant. At long distances, on the other hand, the correlation functions carry the information about the hadron spectrum and the low-energy QCD constants, which are the parameters in the chiral perturbation theory.

Correlation functions can be calculated from first principles using lattice QCD. In lattice QCD, the spacetime is discretized and compactified with some boundary conditions. Then, the degrees of freedom of the system in lattice QCD become finite and therefore the numerical path integral is feasible using the Monte Carlo method. Taking the infinite volume limit and the continuum limit for the correlation functions on the lattice, one can obtain the correlation function in the continuum.

The comparison of the correlation functions in the continuum theory and on the lattice may determine fundamental quantities of QCD. In fact, lattice QCD is usually applied to calculate hadron masses and decay constants from the correlation functions at long distances. Similarly, the comparison at short distances can in principle provide a determination of the strong coupling constant. The comparison at short distances needs to be performed after eliminating lattice artifacts. The lattice calculation at short distances suffers from unphysical discretization effect, which becomes more significant as the distance becomes small. A careful investigation of the discretization effect is, therefore, necessary for the precise determination of the strong coupling constant.

In this thesis, we analyze short-distance correlation functions both on the lattice and in the continuum, and investigate the region where the lattice results agree with the continuum theory after appropriately removing the lattice artifact. The lattice simulation is carried out on 14 gauge field ensembles generated by the JLQCD collaboration. The ensembles contain 2+1 flavors of sea quarks described by the

(別紙様式 2)
(Separate Form 2)

Mobius domain-wall fermions, which realize precise chiral symmetry on the lattice. The pion masses on these ensembles are in the region 220-500 MeV. The lattice spacings are 0.044 fm, 0.055 fm, and 0.080 fm. We extrapolate lattice results to the physical pion mass and the continuum limit. We subtract the discretization effects within the mean field approximation.

Vector, axial-vector, scalar, pseudoscalar channels of the correlation functions in perturbation theory are available to the four-loop level. Using this well-advanced results, we investigate the convergence property of perturbative expansions. Slight deviation of the correlation functions in QCD at short distances from those in perturbation theory is explained by the Operator Product Expansion (OPE), which accommodates some non-perturbative effects in the correlation functions by expanding a correlation function into a series of composite operators.

We utilize the correspondence of continuum and lattice correlation functions for the renormalization of quark currents. It turns out that although the correlation functions on our lattice ensembles suffer from significant discretization effect in the perturbative region, the analysis including OPE allows us to determine the renormalization constants at slightly longer distances where the discretization effects are well-managed. We obtain the renormalization constants of the vector current and the scalar density with precision of O(1%) or less.

Using the result of the renormalization, we test the consistency between correlation functions on the lattice and experiments. We calculate the vector and axial-vector correlation function from the experimental results of spectral functions obtained through the hadronic tau decays by the ALEPH collaboration. We verify that the experimental correlation functions are in good agreement with our lattice results.

The result of the renormalization is also applied to an analysis of the chiral condensate, which is an order parameter of the spontaneous breaking of chiral symmetry in QCD and plays an important role in the chiral perturbation theory. We extract the chiral condensate from current correlators in the OPE regime using a novel method based on the axial Ward-Takahashi identity. This result agrees with the world average of lattice calculation of 2+1 flavor QCD.

(別紙様式 3)
(Separate Form 3)

博士論文の審査結果の要旨

Summary of the results of the doctoral thesis screening

富井正明氏の学位論文は、量子色力学におけるカレント相関関数にかかわるものである。ベクトル・カレントの相関関数は電子陽電子衝突断面積やタウレプトンのハドロンへの崩壊振幅と関係がつけられる物理量で、量子色力学の直接的な検証にもつながる。格子量子色力学(格子QCD)ではユークリッド空間での相関関数を計算することが可能で、実際、長距離相関関数からはハドロン質量などが抽出される。短距離および中距離の相関関数も原理的には格子QCDで計算可能で、この領域でも実験と理論の整合性検証が可能ではあるが、格子理論の離散化誤差が顕著になるためこれまでの研究では注目されてこなかった。富井氏の学位論文はこの領域に注目して摂動論および実験との整合性について研究したものである。

論文の前半は短距離の相関関数を用いて格子理論のくりこみ定数を決定するための研究である。連続理論での短距離相関関数は摂動論を用いて計算することができるが、摂動展開の収束性が問題になる。富井氏は4次まで知られている既存の計算にもとづいて収束性の検証を行い、結合定数のスケールを適切に選ぶことで精度のよい摂動展開が得られることを示した。格子QCDの側では離散化誤差を削減するいくつかの工夫を行い、格子理論に特有の回転対称性の破れをほとんど取り除いた結果を抽出することに成功した。これらの結果を使い、格子理論のくりこみ定数を1%の精度で決定した。この研究はPhysical Review D誌に受理されており、学位論文でも詳しく記述されている。

論文の後半では、短距離および中距離相関関数を実験データと比較する手法について研究した。タウレプトンの崩壊で得られたスペクトル関数は、解析接続を用いてユークリッド空間の相関関数に読み直すことができる。富井氏は、格子QCD計算で得られた相関関数をクォーク質量および格子間隔に関して外挿することで、 $V+A$ および $V-A$ のそれぞれのチャンネルにおいて実験データとの比較を行った。 $V+A$ チャンネルでは、摂動論からのずれが顕著になる中距離の領域で理論と実験の一致が確認された。 $V-A$ チャンネルは摂動論の寄与が相殺するため短距離ではゼロになるが、非摂動的な寄与が現れる領域で実験とよく一致することが確認されている。一般的に用いられる演算子積展開の手法では収束が悪いため、格子QCDはこの領域で信頼できる計算が可能な唯一の手法だと思われる。この研究結果については投稿論文を準備中である。

これらの結果は量子色力学における新たな研究領域を切り拓くものであり、オリジナルな学術論文としても十分な価値を認められる。博士論文としても必要な水準を満たしているものと判断した。以上のことから、富井正明氏の博士論文審査を合格と判定する。