

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 8 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400259

研究課題名(和文)カイラル対称性を持つ格子QCDによるフレーバー物理の研究

研究課題名(英文)Flavor physics in lattice QCD with exact chiral symmetry

研究代表者

金児 隆志 (Kaneko, Takashi)

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・研究機関講師

研究者番号：20342602

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：素粒子物理の最重要課題は、現在の標準理論では記述できない新物理を探索し、新しい基礎理論を構築することである。クォークのフレーバーが変わる素粒子反応、即ちフレーバー物理は、新物理について多くの知見をもたらすと期待されている。本研究では、国内外で行われている精密実験と協力して新物理を探索することを目指し、フレーバー物理の理論研究、特にセミレプトニック崩壊を記述する形状因子を計算した。この物理量は解析的に計算することが難しい。そこで、時空格子上に定式化された格子量子色力学の数値シミュレーションによって、K、D、B中間子の形状因子を計算した。特に、対称性を正しく保つことにより、高精度計算を実現した。

研究成果の概要(英文)：One of the most important subjects in elementary particle physics is to search for new physics, which can not be described by the Standard Model, and to construct a new fundamental theory. Flavor physics, namely particle processes associating quark flavor changing, is expected to provide wealth of knowledge about new physics. In this research, we calculate form factors of semileptonic decays in order to improve the accuracy of theoretical prediction on these decays and to promote the search of new physics together with world-wide experimental efforts. It is however difficult to calculate the form factors by conventional analytical methods. We therefore perform numerical simulations of Quantum Chromo-Dynamics on space-time lattices to calculate the form factors of K, D and B mesons. The most salient feature of our research is to achieve a high accuracy by preserving important symmetries of QCD.

研究分野：素粒子論

キーワード：量子色力学 格子ゲージ理論 数値シミュレーション フレーバー物理 新しい物理

1. 研究開始当初の背景

素粒子物理の現在の基礎理論、即ち「標準理論」は、多くの物理現象を説明することに成功しているが、暗黒物質の正体を説明できないなど、多くの欠陥も持つ。素粒子物理の最重要課題の一つは、標準理論では記述できない物理的メカニズム、即ち「新しい物理」を探索し、新しい基礎理論を構築することである。これまでの精力的な理論・実験研究にかかわらず、新物理のパラメタはおろか、そのメカニズムさえ明らかになっていない。クォークのフレーバーが変わるような素粒子・ハドロン反応は、フレーバー物理と呼ばれ、新物理について多くの知見をもたらすと期待されている。このため、我が国は精密測定実験” SuperKEKB/Belle II”を主導しており、また、海外でも相補的な大型実験が進められている。新しい物理を発見するためには、精密な実験測定と理論計算を比較検証し、標準理論の綻びを見つける必要がある。しかし、フレーバー物理における強い相互作用の寄与を記述するハドロン行列要素を解析的に計算することは難しい。強い相互作用を記述する量子色力学(QCD)を時空格子上に定式化し、数値シミュレーションによって計算することが唯一の方法である。しかし、これまでの多くの計算は、場の理論の基本要請である局所性や、フレーバー物理などの低エネルギー物理を特徴づけるカイラル対称性を頭わに破る定式化が用いられていた。

2. 研究の目的

本研究では、精密測定実験と協力して新しい物理を探索するために、フレーバー物理の理論計算精度を向上させることを目指す。具体的には、豊富なモードがあり、新物理への制限・証拠が見つけやすいと期待される K, D 中間子のセミレプトニック崩壊に着目し、強い相互作用の効果を記述する形状因子を計算する。この物理量は、従来の摂動論で計算することが困難であるため、QCD を格子上に定式化した格子 QCD の数値シミュレーションによって計算する。従来の格子作用は、局所性やカイラル対称性を破るため、評価の難しい、或いは、大きい系統誤差を生じさせる。本研究では、系統誤差を制御して高精度で計算を行うために、局所であり、かつ、カイラル対称性を保つ定式化を開発して、形状因子の計算を行う。

3. 研究の方法

重い D, B 中間子に比べ、K 中間子のシミュレーションは比較的容易に行える。そこで、まず、K 中間子の形状因子を計算する。実験精度が高いため、形状因子の計算も高精度が要求される。そこで、現実世界の値、即ち物理点よりも重いアップ・ダウンクォーク質量でシミュレーションを行うことにより、計算コストを抑えて、高統計のシミュレーションを行う。シミュレーション結果を物理点へと外

挿する必要があるが、QCD の有効理論であるカイラル摂動論を用いることにより不定性を制御して、このカイラル外挿を行う。

次に、重い中間子の形状因子を計算する。離散化誤差を抑えるためには、細かい格子、即ち、高い格子切断を持つ格子を用いる必要がある。しかし、格子切断を上げると、シミュレーションコストは格段に跳ね上がる。そこで、カイラル対称性を保ちつつ、かつ、シミュレーションが高速な定式化を開発する。

この定式化を用いて、4.5GeV までの格子切断を用いてシミュレーションを行う。格子切断がチャームクォーク質量より十分大きい場合、チャームクォーク直上でシミュレーションを行うことができる。これにより、離散化誤差を抑え、高精度で D 中間子形状因子を計算できる。

4. 研究成果

K 中間子の研究では、カイラル摂動論を用いてカイラル外挿を制御することが重要となる。そこで、同じく、クォーク質量依存性がカイラル摂動論で記述されると期待される電磁形状因子の計算を行った。相関関数を格子上の位置について平均することによって高精度で計算し、カイラル摂動論の予言式と比較検証を行った。その結果、シミュレーション結果のクォーク質量依存性、運動量遷移依存性は、カイラル摂動論の next-to-next-to-leading order (NNLO) の予言式と良く整合することを見た。シミュレーション結果をカイラル摂動論の予言式でフィットすることにより、カイラル摂動論の不定パラメタ(低エネルギー定数)を決定し、また、現実世界での荷電半径を予言できる。前者に関しては、現象論的に良く決まっていなかった NNLO の低エネルギー定数の一部を決定することができた。これは、後述する K 中間子セミレプトニック形状因子の解析で非常に有用なインプットとなった。また、 π 中間子、荷電・中性 K 中間子の荷電半径を QCD から予言し、実験値と一致することを見た。K 中間子の荷電半径を計算し、実験と一致することを確認したのは、筆者の知る限り、本研究が初めてである。

次に、上記の研究手法を応用して、K 中間子セミレプトニック崩壊の形状因子の計算を行った。関連するベクトル、スカラー形状因子のカイラル摂動論による表式は、多くの低エネルギー定数を含む。しかし、ベクトル形状因子の表式を精査することにより、この表式に現れる低エネルギー定数の殆どは、上述の電磁形状因子の計算から決められることがわかった。さらに、スカラー形状因子に関しても、Callan-Treiman 定理に基づいた補正を加えることにより、カイラル摂動論の表式に現れる低エネルギー定数を大きく削減できることがわかった。結果として、不定パラメタの数を 9 から 2 に削減でき、カイラル

外挿の不定性を制御することができた。これにより、現象論的に重要な、ゼロ運動量遷移でのベクトル形状因子 $f_+(0)$ を 1% 以下精度で計算し、従って、関連する小林益川行列要素 $|V_{us}|$ も 1% 以下の精度で決定することができた。

我々の結果は、核子 β 崩壊から決めた $|V_{ud}|$ の結果と併せると、標準理論から期待される小林・益川行列のユニタリ性が 0.1% の精度で満たされていることを示唆する。特定の新物理模型に依存しない、一般的な有効理論に基づいた解析を行うと、この結果は、K 中間子セミレプトニック崩壊に効く新物理のエネルギースケールは 11TeV 以上であることを示唆する。

このような $f_+(0)$ の高精度決定は、世界中の幾つかのグループが行っている。しかし、要求精度 (1% 以下) が高いため、本研究による独立計算は、格子 QCD による予言を確立する上で有益である。また、本研究では、ゼロ運動量遷移での形状因子の値だけでなく、その運動量遷移依存性も詳しく調べている。将来、この依存性は、 $f_+(0)$ とは独立な新物理への制限を与えうると期待される。

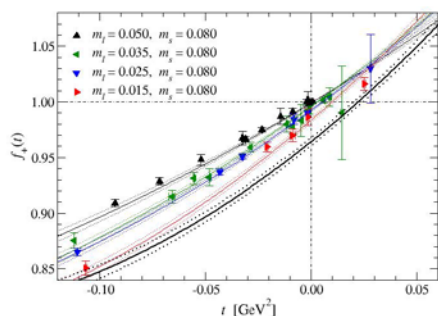


図 1 K 中間子セミレプトニック崩壊の形状因子のカイラル外挿。ベクトル形状因子 $f_+(t)$ を運動量遷移 t の関数としてプロットしている。異なる π 中間子質量でのシミュレーション結果を異なるシンボルでプロットしている。

次に、重いハドロンの研究に向けて、カイラル対称性を保ち、かつ、高速な定式化の開発を行った。K 中間子の研究では、Neuberger と Narayanan によって提案されたオーバーラップ型作用を用いたが、この作用はカイラル対称性を破る従来の作用に比べ、約 100 倍の計算コストを必要とする。しかし、カイラル対称性を保つ作用は一意ではなく、 $1+\text{sgn}[D]$ の形の Dirac 演算子で与えられる。ただし、ここで、 D はある性質を満たす大型行列で、カーネル演算子と呼ばれる。そこでカーネル演算子とその符号関数近似 $\text{sgn}[D]$ を変えて、計算コストの系統的な比較研究を行った。その結果、オーバーラップ作用と比べて、約 20 倍高速な定式化を開発した。対称性を破る従来の定式化と比較すると約 5

倍遅い。しかし、物理量計算の不定性を抑制し、かつ、応用範囲も広いことから、将来の格子 QCD 研究において有用な定式化を開発できたといつて良い。

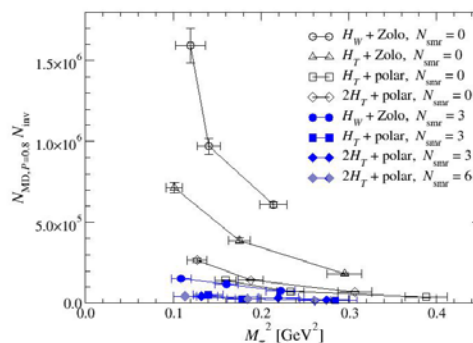


図 2 カイラル対称性を保つ定式化の比較研究。カーネル演算子と符号関数近似を変えた作用の計算コストを、 π 中間子質量の 2 乗に対してプロットしている。オーバーラップ作用 (白抜きの丸) に比べ、約 20 倍高速な定式化 (青色のダイヤモンド) を開発した。

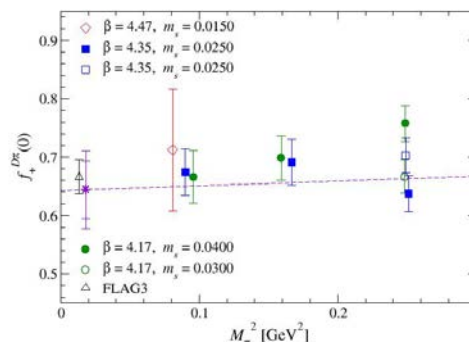


図 3 $D \rightarrow \pi l \nu$ 崩壊の形状因子のカイラル外挿。小林益川行列要素 $|V_{cd}|$ の決定に重要なゼロ運動量遷移での値を π 中間子質量の 2 乗に対してプロットしている。また、異なる格子間隔での結果を異なるシンボルでプロットしている。

この定式化はカイラル対称性を保つことから、格子間隔の奇数次 $O(a^{2n+1})$ の離散化誤差を禁止する。さらに計算コストが小さいことから、約 4.5GeV までの格子切断でシミュレーションを行える。このため、チャームクオーク直上でシミュレーションを行い、D 中間子の物理を精密に計算することができる。そこで、小林益川行列要素の決定において重要な $D \rightarrow \pi l \nu$ 、 $K l \nu$ セミレプトニック崩壊の形状因子を計算した。上述の期待通り、離散化誤差が非常に抑制されていることを確認した。また、アップ・ダウンクオークの質量に対する依存性も小さく、カイラル外挿の不定性も制御できる。さらに、Bourrely によって提案された現象論的模型によらない手法で運動量遷移依存性を記述することによ

り、種々の不定性を抑えて形状因子を決定することができた。K中間の研究に比べて、D中間子セミレプトニック崩壊の研究は、世界的にみても数少ない。本研究による独立計算は、形状因子の理論予言を確立し、 $|V_{cd}|$ 、 $|V_{cs}|$ を高精度で決定するために有益である。

形状因子の精密計算は、フレーバー物理における新物理の探索において重要であるが、近年、国内で殆ど研究が行われていない。本研究では、理論的にクリーンな定式化を用い、さらに高速化することにより、世界の他グループの研究に比肩する精度の精密計算を行った。また、D中間子の物理における離散化誤差が小さいことから、チャームクォークより重いクォーク質量にも応用可能である。我が国が主導する SuperKEKB / Belle II 実験と協力して、B中間子の物理を精密に研究することが、将来の重要な研究テーマとなる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計5件)

- ① T. Kaneko, X-R. Lyu, A. Oyanguren, “ $|V_{ud}|$, $|V_{us}|$, $|V_{cd}|$, $|V_{cs}|$ and charm (semi)leptonic decays: WG1 summary from CKM2016”, Proceedings of Science, 査読有, CKM2016, 2017, 14(13 ページ)
<https://pos.sissa.it/>
- ② T. Kaneko, B. Fahy, H. Fukaya, S. Hashimoto, “D meson semileptonic decays in lattice QCD with Moebius domain-wall quarks”, Proceedings of Science, 査読有, LATTICE 2016, 2017, 297(7 ページ)
<https://pos.sissa.it/>
- ③ T. Kaneko, S. Aoki, G. Cossu, X. Feng, H. Fukaya, S. Hashimoto, J. Noaki, T. Onogi, “Chiral behavior of light meson form factors in 2+1 flavor QCD with exact chiral symmetry”, Proceedings of Science, 査読有, LATTICE 2015, 2016, 325(7 ページ)
<https://pos.sissa.it/>
- ④ S. Aoki, G. Cossu, X. Feng, S. Hashimoto, T. Kaneko, J. Noaki, T. Onogi, “Light meson electromagnetic form factors from three-flavor lattice QCD with exact chiral symmetry”, Physical Review D, 査読有, 93, 2016, 034504(30 ページ)
DOI: 10.1103/PhysRevD.93.034504
- ⑤ X. Feng, S. Aoki, S. Hashimoto, T. Kaneko, “Timelike pion form factor in lattice QCD”, Physical Review D, 査読有, 91, 2015, 054504(16 ページ)

DOI: 10.1103/PhysRevD.91.054504

[学会発表] (計11件)

- ① 金児隆志, “高詳細格子上の QCD シミュレーションによる D 中間子セミレプトニック崩壊の研究”, 日本物理学会第 72 回年次大会, 2017 年 3 月 19 日, 大阪大学 (大阪府・豊中市)
- ② 金児隆志, “格子 QCD シミュレーションと新物理探索”, 素粒子・原子核・宇宙「京からポスト京に向けて」シンポジウム, 2017 年 2 月 16 日, 筑波大学東京キャンパス (東京都・文京区)
- ③ Takashi Kaneko, “WG1 Summary”, 9th International Workshop on the CKM Unitarity Triangle (CKM2016), 2016 年 12 月 2 日, ムンバイ (インド)
- ④ Takashi Kaneko, “D meson semileptonic decays in lattice QCD with Moebius domain-wall quarks”, The 34th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2016), 2016 年 7 月 29 日, サウサンプトン (イギリス)
- ⑤ 金児隆志, “高詳細格子 QCD シミュレーションによる D 中間子崩壊定数の計算”, 日本物理学会第 71 回年次大会, 2016 年 3 月 22 日, 東北学院大学 (宮城県・仙台市)
- ⑥ 金児隆志, “格子 QCD で迫るフレーバー物理”, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015 年 9 月 27 日, 大阪市立大学 (大阪府・大阪市)
- ⑦ Takashi Kaneko, “Chiral behavior of light meson form factors in 2+1 flavor QCD with exact chiral symmetry”, The 33rd International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2015), 2015 年 7 月 14 日, 神戸コンベンションセンター (兵庫県・神戸市)
- ⑧ 金児隆志, “厳密なカイラル対称性をもつ格子 QCD による K 中間子セミレプトニック崩壊の研究”, 日本物理学会第 70 回年次大会, 2015 年 3 月 24 日, 早稲田大学 (東京都・新宿区)
- ⑨ 金児隆志, “K13 decays for search of new physics”, CCS-BNL Workshop on Lattice Gauge Theories 2015, 2015 年 3 月 13 日, 筑波大学 (茨城県・つくば市)
- ⑩ 金児隆志, “素粒子標準理論を超える新物理の解明に向けて”, HPCI 戦略プログラム分野 5 全体シンポジウム, 2015 年 3 月 12 日, 紀尾井フォーラム (東京都・千代田区)
- ⑪ 金児隆志, “2 ループカイラル摂動論に基づいた中間子形状因子の解析”, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 2014 年 9 月 18 日, 佐賀大学 (佐賀県・佐賀市)

〔図書〕（計 0件）

〔産業財産権〕

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

金児 隆志 (KANEKO, Takashi)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子
核研究所・理論センター・研究機関講師

研究者番号：20342602