

平成 30 年 6 月 8 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26247043

研究課題名(和文) 高精細格子計算による標準模型の精密検証

研究課題名(英文) Precision test of the Standard Model by fine lattice calculations

研究代表者

橋本 省二 (Hashimoto, Shoji)

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：90280510

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 30,200,000円

研究成果の概要(和文)：BおよびD中間子崩壊形状因子の精密計算を目的として、カイラル対称性を保つ格子フェルミオン定式化を用いた大規模格子量子色力学シミュレーションを実行した。重いチャームおよびボトムクォークの計算での格子化による誤差を抑えるために、小さな格子間隔(0.044~0.083 fm)を採用し、複数のクォーク質量での格子真空データを生成・蓄積した。これらのデータのもとでチャームクォーク質量の精密決定、短距離相関関数と実験データとの比較、D中間子の崩壊形状因子の計算など、様々な物理量の計算を進めた。

研究成果の概要(英文)：We performed large scale simulation of quantum chromodynamics (QCD) employing a chirally symmetric fermion formulation on the lattice with applications to the calculation of B and D meson decay form factors in mind. In order to control the discretization effects that could be significant for heavy quarks, we take fine lattice spacings between 0.044 fm and 0.083 fm. We generated and accumulated the lattice data describing the vacuum of QCD at various light quark masses. Utilizing these generated data, we calculated various physical quantities including a precise determination of charm quark mass, a comparison of short-distance current correlation functions with experimental data, as well as a calculation of D meson semi-leptonic decay form factors.

研究分野：素粒子物理学

キーワード：格子QCD B中間子 チャームクォーク

1. 研究開始当初の背景

素粒子物理学の研究は、ヒッグス粒子が発見されたことで素粒子標準模型の検証という大きな山を越え、新物理法則の探索に重点が移りつつあった。LHCでの新粒子・新現象発見の報告はなく、新物理のエネルギースケールは当初期待された TeV よりも高いことが想定されるため、低エネルギー領域での精密実験が新物理探索に中心的役割を果たす時代に移ってきた。

これらの精密実験とその理論的解釈における未解決の最重要課題は、ハドロンの不定性である。B 中間子などのハドロンはクォークとグルーオンの量子色力学(QCD)による束縛状態なので、その混合や崩壊の振幅は QCD の影響を強く受け、知りたい新物理の情報は QCD の効果を正しく取り去ったのちに初めて得られる。強い力の基礎理論である QCD は、非摂動領域における理論的計算が非常に困難で、多くの場合、オーダーの評価を超えて定量的予言を与えるには、格子量子色力学(格子 QCD)の数値シミュレーションが唯一の手段となる。格子 QCD 計算の精度が著しく向上しない限り、SuperKEKB 等で得られる実験結果の解釈は非常にあいまいなものにならざるを得ない。

本研究計画は、格子 QCD 計算の精度を格段に向上させることを目指すものであった。格子 QCD 計算は、QCD のラグランジアンから出発して経路積分量子化を定義に忠実に実行することで文字通り QCD の第一原理計算を可能にする。格子化による誤差などの系統誤差も連続極限では消えることが理論的に期待される。膨大な計算機リソースを必要とするが、理論的な進展と同時に計算機技術の進歩の恩恵も受け、基本的なハドロンスペクトルや崩壊定数を実験値の 1~2% の精度で再現するなど、QCD の「忠実なシミュレーション」の実現が視野に入ってきていた。

一方で、崩壊の形状因子などの複雑な物理量、特に B や D 中間子を含む物理量の精密計算を実現するには、以下の二つの重要な課題が残っていた。

- 軽いクォークの質量を自然界の値にとるには、比較的重いところからの外挿を行う必要がある。通常はパイ中間子の質量が 500 MeV から 200 MeV の領域でシミュレーションを行い、物理的な 135 MeV に外挿する。この外挿を 1% の精度で制御するには、カイラル領域(軽いパイ中間子の領域)で予想される非解析的クォーク質量依存性(カイラルログと呼ばれる)を正しく扱う必要がある。ここではカイラル対称性が本質的な役割を果たすので、カイラル対称性をよい精度で保つ計算が重要になる。
- 当時使われていた典型的な格子切断 $1/a$ は、チャームおよびボトムクォーク質

量の間にあつた。通常の格子定式化を単純に重いクォークに適用すると大きな系統誤差の要因となるため、特別な取り扱いが必要となる。重いクォークの有効理論を用いる手法が一般的だが、その際に必要とされる理論のマッチング計算の精度が摂動展開によって制限されるという問題がある。一方、チャームクォークについては、格子作用を最大限改良しつつ、できるだけ高い格子切断を用いる手法が有望である。

2. 研究の目的

本研究で精密計算を目指す物理量は、B, D, K 中間子の崩壊定数、バグパラメタ、セミレプトニック崩壊形状因子など多岐にわたるが、もっとも重要かつ困難な課題として $B \rightarrow \pi l \nu$ 崩壊形状因子の、5%以内の精度での計算を目標とする。この崩壊モードは小林益川行列要素 $|V_{ub}|$ を決定する主要なモードの一つだが、その値がインクルーシブ崩壊を用いた評価と大きく(40%程度、 3σ)ずれており、小林益川理論の整合性を確認する上で問題になっていた。格子計算においては、b クォーク質量は上記の重いクォーク定式化でも直接は届かない領域にあり、(クォーク質量無限大の)有効理論と組み合わせる必要があるため、精密計算は D 中間子に比べて一段難しい。本研究では、理論的に確かな手法を使って正面からこの目標にせまるが、計画中の手法を組み合わせることで 10%の精度は確保できると見込まれ、さらに統計精度を改善する手法を開発することで 5%以内を目指す。また、他の多くの物理量に対しては、誤差を 1~5%程度に抑えた計算は十分に可能である。SuperKEKB で得られるより精密なデータと、同程度に精密な格子計算を組み合わせ、信頼できる計算にもとづいて、新物理探索を限界まで推し進める。

3. 研究の方法

上記の目標を達成するため、格子理論の定式化を完成し、高精細格子での大規模シミュレーションを実行して基礎データを生成することが優先課題であった。そのため、本研究計画では新しい格子定式化を開発し採用することとした。

軽いクォークの定式化に求められることは、カイラル外挿における不定性を精密に制御できるようカイラル対称性を十分な精度で保持すること、同時に高速なシミュレーションが可能であることである。研究代表者らは、オーバーラップ・フェルミオン定式化を用いた研究を進めてきた。この定式化の利点は格子上で厳密なカイラル対称性を保持することにあるが、同時に計算コストが非常に大きいという欠点をもつ。オーバーラップ・フェルミオンの演算は、通常の

ウィルソン・フェルミオンの演算子をもとにした複雑な複合演算子の計算を必要とし、大幅なコスト増の要因になる。一方、元の理論的定式化に立ち戻ると、同じ演算子を5次元型演算子の形に帰着できることがわかる。これはドメインウォール・フェルミオンとして知られているものだが、その形は一通りではなく、無数の可能性があることがわかる。これら多くの可能性のうち、近似の精度と計算コストの両面で最適なものを探る研究を行った結果、小さなカイラル対称性の破れ(0.5 MeV 以下)を許せば、オーバーラップ・フェルミオン定式化に比べて20倍程度高速にシミュレーションを実行できる定式化を開発した。

重いクォークについても同様の定式化を採用することで、格子化の誤差を小さく保ちつつ低コストで比較的重いクォークの領域までシミュレーションを推し進めることができる。あとは重いクォークの有効理論にもとづいてクォーク質量の外挿を行うことでbクォークのシミュレーションを実現する。

4. 研究成果

上記の新しいフェルミオン定式化を用いた2 + 1フレーバーQCDの大規模シミュレーションを行った。格子体積として $32^3 \times 64$, $48^3 \times 96$, $64^3 \times 128$ の大体積格子を採用し、物理的格子間隔0.083, 0.055, 0.044 fmの高精細格子データを生成した。クォークの質量は、パイ中間子の質量に換算して230 MeVから500 MeVをカバーして、合わせて15通りの格子真空のデータを生成・蓄積した。このデータは汎用的なもので、将来、さまざまな格子計算に利用することができる。

これらの格子データのもとで、まずは基礎となるパラメタを決定するために、ウィルソン流の手法を用いた格子間隔の決定、短距離相関関数を用いた繰り込み定数の決定に関わる研究を行い、後者については論文で発表した。

この研究から派生して、短距離相関関数を直接実験と比較する研究を行った。ベクトルおよび軸性ベクトルのチャンネルでの相関関数は電子陽電子散乱のデータとの比較が可能である。格子間隔による誤差を取り除いたあとでは格子計算と実験値がよい一致を示すことがしめされた。

重いクォークのかかわる物理量としては、チャーモニウム相関関数の短距離での値を通じてチャーム・クォーク質量を決定する研究を行い、論文で発表した。高精細格子のおかげで重いクォークかつ短距離の相関関数でも格子化による誤差を十分に制御することができ、最終的に摂動の誤差を含めても1%の精度での決定が可能となった。

これらの成果をもとに、D中間子およびB中間子の崩壊定数およびセミレプトニック崩壊形状因子の計算を行った。D中間子に関

しては格子化による誤差の影響は無視できるほど小さいことが確認され、精密な計算が可能になることがわかった。この研究については論文を準備中である。

最終的にB中間子の形状因子を得るため、D中間子からB中間子へのクォーク質量に関する外挿についても研究した。重いクォークの有効理論にもとづいて外挿する際に問題になる $1/M$ 補正の大きさは十分に制御可能であることがわかり、現在は最終解析を進めている段階にある。

当初は想定していなかった進展として、B中間子のインクルーシブ崩壊の構造関数を計算する手法を開発したことがあげられる。終状態を指定しない計算は従来の格子QCD計算では不可能だったが、崩壊振幅の解析性を利用して計算することが可能であることがわかった。様々な過程に関して適用可能な手法であり、今後の発展が期待される。

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17件)

1. S. Aoki, G. Cossu, X. Feng, H. Fukaya, S. Hashimoto, T. Kaneko, J. Noaki, T. Onogi, “Chiral behavior of $K \rightarrow \pi l \nu$ decay form factors in lattice QCD with exact chiral symmetry,” *Phys. Rev. D* **96**, 034501 (2017). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.96.034501>
2. M. Tomii, G. Cossu, B. Fahy, H. Fukaya, S. Hashimoto, T. Kaneko, J. Noaki, “Lattice calculation of coordinate-space vector and axial-vector current correlators in QCD,” *Phys. Rev. D* **96**, 054511 (2017). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.96.054511>
3. S. Hashimoto, “Inclusive semi-leptonic B meson decay structure functions from lattice QCD,” *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2017** 053B03 (2017). DOI: [10.1093/ptep/ptx052](https://doi.org/10.1093/ptep/ptx052)
4. K. Nakayama, S. Hashimoto, “Short-distance charmonium correlator on the lattice with Mobius domain-wall fermion and a determination of charm quark mass,” *Phys. Rev. D* **94**, 054507 (2016). DOI: [10.1103/PhysRevD.94.054507](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.94.054507)
5. M. Tomii, G. Cossu, B. Fahy, H. Fukaya, S. Hashimoto, T. Kaneko, J. Noaki, “Renormalization of domain-wall bilinear operators with

- short-distance current correlators,”
Phys. Rev. D94, 054504.
DOI:https://doi.org/10.1103/PhysRev
D.94.054504
6. 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,” Phys. Rev. D93, 034504 (2016). DOI:https://doi.org/10.1103/PhysRevD.93.034504
 7. Y.G. Cho, S. Hashimoto, A. Juttner, T. Kaneko, M. Marinkovic, J. Noaki, J.T. Tsang, “Improved lattice fermion action for heavy quarks,” JHEP 1505 (2015) 072. DOI: 10.1007/JHEP05(2015)072
 8. X. Feng, S. Aoki, S. Hashimoto, T. Kaneko, “Time-like pion form factor in lattice QCD,” Phys. Rev. D91, 054504 (2015). DOI: 10.1103/PhysRevD.91.054504

〔学会発表〕(計33件)

1. S. Hashimoto, “Inclusive B decay calculations with analytic continuation,” 35th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2017), Jun 2017, Granada, Spain.
2. S. Hashimoto, “Determination of chiral condensate from low-lying eigenmodes of Mobius domain-wall Dirac operator,” 34th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2016), Jul 2016, Southampton, UK.
3. S. Hashimoto, “Stochastic calculation of the QCD Dirac operator spectrum with Mobius domain-wall fermion,” 33rd International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2015), Jul 2015, Kobe, Japan.

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

橋本 省二 (HASHIMOTO, Shoji)

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：90280510

(2) 研究分担者

深谷 英則 (FUKAYA, Hidenori)

大阪大学・理学研究科・助教

研究者番号：70435676

(3) 連携研究者

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・研究機関講師

研究者番号：20342602

(4) 研究協力者

()