

令和 5 年 6 月 10 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18H03710

研究課題名(和文) B中間子セミレプトニック崩壊におけるクォーク・ハドロン双対性

研究課題名(英文) Quark-hadron duality in B meson semileptonic decays

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) 33,700,000円

研究成果の概要(和文)：B中間子のセミレプトニック崩壊において、終状態のハドロンの基底状態だけでなく励起状態も含めた包括的崩壊率を、クォーク・ハドロン双対性の仮定によることなく格子量子色力学(格子QCD)の第一原理計算を用いて計算する新しい手法を開発した。格子上で計算されたハドロン相関関数における演算子間のユークリッド時間間隔に対する依存性の情報を使って、包括的崩壊率の評価に必要な終状態のエネルギーに関する積分を近似的に求める。テスト的な計算を行ったうえで対応する摂動的計算と結果を比較し、よく一致することを確認した。積分で導入した近似の妥当性を検証するためのより詳細な解析を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子色力学の関わる物理過程を理論的に計算する際には、クォークを基礎的自由度としてあつかう摂動法がしばしば用いられる。実際にあらわれる過程はクォークの束縛状態としてのハドロンであり、摂動法による計算が正当化できるかどうかは自明ではない。実際、このことは「クォーク・ハドロン双対性」の仮定として扱われる。本研究ではこの仮定によることなく、量子色力学の第一原理計算を通じて包括的測定に対応する崩壊率を計算することを可能にした。

研究成果の概要(英文)：We developed a new technique to calculate inclusive decay rate of semi-leptonic B meson decays using the first-principles lattice Quantum Chromodynamics (lattice QCD) computation without relying on the assumption of quark-hadron duality. That include not only the ground state of final state hadrons but all the states including the excited states. It evaluate the energy integral over the hadronic final states appearing in the inclusive decays using hadronic correlation function calculated on the lattice. We performed test calculation and compared the results with corresponding perturbative calculation to confirm that they agree. We also carried out more detailed studies to validate the approximation of the energy integral.

研究分野：素粒子理論

キーワード：B中間子崩壊 クォーク・ハドロン双対性 格子QCD

1. 研究開始当初の背景

B 中間子崩壊の実験では、終状態 (崩壊先の粒子) を指定して測定する場合と、終状態を指定せずにしてすべてを足した崩壊率を測定する場合がある。クォークのレベルでの崩壊過程は同じだが、途中でおこる強い力による複雑な相互作用のおかげで、現実の崩壊率を理論的に計算することは非常に難しい問題になる。従来、終状態を指定した「排他的測定」に対応する計算は、格子量子色力学 (格子 QCD) の数値シミュレーションによる非摂動的計算が可能になっていたが、終状態を指定しない「包括的測定」では格子 QCD 計算を行う手法が確立しておらず、摂動的計算に頼るほかなかった。摂動的計算が現実の測定を記述できるかどうかは、「クォーク・ハドロン双対性」という仮定にもとづいたもので、理論的な基盤がはっきりしていなかった。

2. 研究の目的

B 中間子崩壊の包括的測定に対応する崩壊率を、クォーク・ハドロン双対性の仮定を置くことなく、格子 QCD を用いた第一原理計算を用いて直接計算することが最終的な目的である。そのための理論的定式化は確立していないため、手法の開発が最初の課題となる。

3. 研究の方法

B 中間子の包括的崩壊に対応する量子的振幅を格子 QCD を用いて計算するが、ユークリッド空間で定式化された格子 QCD では、実験に対応する力学的条件 (粒子のエネルギーと運動量) を満たすことができない。当初は、非物理的セットアップで計算した振幅を、物理的セットアップでの振幅と (複素関数としての) 解析接続と関係付ける手法を想定して研究を進めていたが、その過程で、研究を進めるうちにより直接的に実験との対応をつけられる手法を理論的に導くことができたため、途中で方針を変えてこの新しい方法の技術開発を進めることとした。

新しい手法では、格子上でのハドロン相関関数の時間発展の情報 (右図におけるカレント $J(t)$ の時間座標 t) を使って、物理的な振幅のエネルギーに関する重みつき積分を実行する。重み関数が十分になめらかなときには、チェブシェフ多項式による近似を使って格子計算で得られた相関関数で積分を精密に再構成できる。こうして得られたある種のスペクトル関数は、さまざまな終状態ハドロンの寄与を自然に含んでおり、かつ格子 QCD 計算で非摂動的に計算することが可能になる。

$$\langle B | J_{\mu}(t) \quad J_{\nu}^{\dagger}(0) | B \rangle$$

終状態の和をとってインクルーシブ崩壊率を求める手法のイメージ。2つの B 中間子状態 (このプロジェクトでは D 中間子) の間に 2つの弱い相互作用のカレントを挿入する

4. 研究成果

B 中間子のセミレプトニック崩壊において、包括的崩壊の崩壊率をクォーク・ハドロン双対性の仮定を置くことなく格子 QCD の数値シミュレーションを使って直接計算する手法を開発した。終状態のエネルギーに関する積分を、格子 QCD におけるハドロン相関関数を使って近似する。近似の精度は数学的に厳密な方法で制御することができ、系統的に改善できる手法になっている。この手法を用いた最初のテスト的計算を実行し、手法の概要とともに論文発表した。テスト的計算では、現実よりも小さい質量をもつボトムクォークでのシミュレーションを行った。終状態のハドロンがもつ運動量が大きくならないようにし、離散化による誤差を抑えるためである。対応するパラメーターでの摂動法による計算も同時に行い、結果が一致することを確認した [1]。

この新手法の核になるのは上記の近似だが、その妥当性を他の方法との比較などを通じて検証を進め、論文にまとめた [2]。

参考文献

[1] P. Gambino, S. Hashimoto, "Inclusive semileptonic decays from lattice QCD," Physical Review Letters 125 (2020) 3, 032001; arXiv:2005.13730.

[2] P. Gambino, S. Hashimoto, S. Machler, M. Panero, F. Sanfilippo, A. Smecca, N. Tantalo, “Lattice QCD study of inclusive semileptonic decays of heavy hadrons,” JHEP 07(2022) 083; arXiv:2203.11752.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Paolo Gambino, Shoji Hashimoto	4. 巻 125
2. 論文標題 Inclusive Semileptonic Decays from Lattice QCD	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 32001
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.125.032001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Gabriela Bailas, Shoji Hashimoto, Tsutomu Ishikawa	4. 巻 2020
2. 論文標題 Reconstruction of smeared spectral functions from Euclidean correlation functions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 043B07
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/ptep/ptaa044	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Hidenori Fukaya, Shoji Hashimoto, Takashi Kaneko, Hiroshi Ohki	4. 巻 102
2. 論文標題 Towards fully nonperturbative computations of inelastic IN scattering cross sections from lattice QCD	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 114516
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.102.114516	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Gabriela Bailas, Shoji Hashimoto, Tsutomu Ishikawa	4. 巻 2020
2. 論文標題 Reconstruction of smeared spectral functions from Euclidean correlation functions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 043B07
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/ptep/ptaa044	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 C. Rohrhofer, Y. Aoki, L. Ya. Glozman, S. Hashimoto	4. 巻 802
2. 論文標題 Chiral-spin symmetry of the meson spectral function above T_c	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 135245
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2020.135245	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 C. Rohrhofer, Y. Aoki, G. Cossu, H. Fukaya, C. Gatttringer, L. Ya. Glozman, S. Hashimoto, C.B. Lang, and S. Prelovsek	4. 巻 100
2. 論文標題 Symmetries of spatial meson correlators in high temperature QCD	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 14502
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.014502	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 S. Hashimoto, B. Colquhoun, T. Izubuchi, T. Kaneko, H. Ohki	4. 巻 175
2. 論文標題 Inclusive B decay calculations with analytic continuation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 European Physical Journal, web of conferences	6. 最初と最後の頁 13006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/201817513006	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Gambino, P., Hashimoto, S., Machler, S. et al.	4. 巻 2022
2. 論文標題 attice QCD study of inclusive semileptonic decays of heavy mesons	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 J. High Energ. Phys.	6. 最初と最後の頁 83
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP07(2022)083	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Brian Colquhoun, Shoji Hashimoto, Takashi Kaneko, and Jonna Koponen	4. 巻 106
2. 論文標題 Form factors of $B \rightarrow \ell \ell$ and a determination of $ V_{ub} $ with Mobius domain-wall fermions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 54502
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.106.054502	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計4件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 S. Hashimoto
2. 発表標題 Inclusive B decay structure functions and their decomposition into final states
3. 学会等名 Advances in Lattice Gauge Theory (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Hashimoto
2. 発表標題 Inclusive decay structure functions for $B \rightarrow X c l \nu$
3. 学会等名 Interntatical Symposium for Lattice Field Theory (Lattice 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Hashimoto
2. 発表標題 Hints and challenges in heavy quark physics
3. 学会等名 Interntatical Symposium for Lattice Field Theory (Lattice 2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 橋本省二
2. 発表標題 インクルーシブ崩壊構造関数からのB->D** Inモードへの制限
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	大木 洋 (Ohki Hiroshi) (50596939)	奈良女子大学・自然科学系・助教 (14602)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計1件

国際研究集会 6th KEK Flavor Factory Workshop (KEK-FF 2019)	開催年 2019年～2019年
---	--------------------

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------