

新物理探索に向けた B 中間子の物理の格子 QCD 研究

B meson physics from lattice QCD for search of new physics

金児隆志

高エネルギー加速器研究機構

1. 研究目的

ボトムクォークを含む重いハドロンの多彩な崩壊モードは、標準理論の基礎パラメータの決定だけでなく、素粒子標準理論を超える「新物理」の有望なプローブを与える。特に、ボトムクォークと軽いクォークからなる B 中間子の $B \rightarrow \pi \ell \nu$ 崩壊は、小林・益川行列要素 $|V_{ub}|$ の決定に用いられるとともに、レプトン ℓ のフレーバーについての普遍性が超対称性モデルなどの新物理の探索を可能にする。このため、我が国の SuperKEKB/Belle II 実験は、この崩壊の測定精度を格段に向上させようとしている。これに見合う理論予言精度を実現するためには、QCD の非摂動効果を記述し、理論計算の最大誤差を与える形状因子を格子 QCD シミュレーションによって高精度で計算する必要がある。しかし、 π 中間子を頭を含むことから、軽いクォークの質量に対する依存性は非解析的となり、現在の計算機性能でシミュレーションできるクォーク質量から現実世界への外挿、即ち、「カイラル外挿」を制御することが難しい。

そこで、本研究では、軽いクォークをストレンジクォークに置き換えた $B_s \rightarrow K \ell \nu$ 崩壊に着目する。 $B \rightarrow \pi \ell \nu$ 崩壊と同様に、 $|V_{ub}|$ の決定と超対称性モデルなどの新物理探索が可能である。また、Peter Lepage らの議論により統計精度が大きく改善されることが期待され、さらに、 π 中間子を頭に含まないことからカイラル外挿の制御も容易になる。欧州 CERN の LHCb 実験によって測定精度が格段に向上する予定であり、同実験と協力した $|V_{ub}|$ の決定と新物理探索に向け、この崩壊の形状因子を Wisteria/BDEC-01 を用いた大規模シミュレーションによって計算する。

2. 研究成果の内容

令和 5 年度は、格子カットオフが $a^{-1} = 2.5 \text{ GeV}$ の格子で、 500 MeV の π 中間子質量を用いてシミュレーションを行った。離散化誤差を抑えるため、ボトムクォークはカットオフの 0.7 倍以下に制限した。

本研究では、 B_s や K 中間子を始状態や終状態を含む相関関数を格子 QCD の数値シミュレーションによって計算し、その適切な比をとる。これによって、中間子の伝播による指数関数的減衰因子などの不要な寄与をキャンセルさせ、形状因子を高精度で抽出する。図 1 は、運動量遷移がゼロの場合のスカラー形状因子の 2 乗を与える比を、 $B_{(s)}$ 中間子の生成演算子と相互作用演算子の間の時間距離に対してプロットしたもので

ある。シミュレーションパラメタと統計数は同じであるが、上述の期待通り、 $B_s \rightarrow K\ell\nu$ 崩壊の形状因子は $B \rightarrow \pi\ell\nu$ 崩壊と比べて約 1/2 の統計誤差で決定できることを確認した。

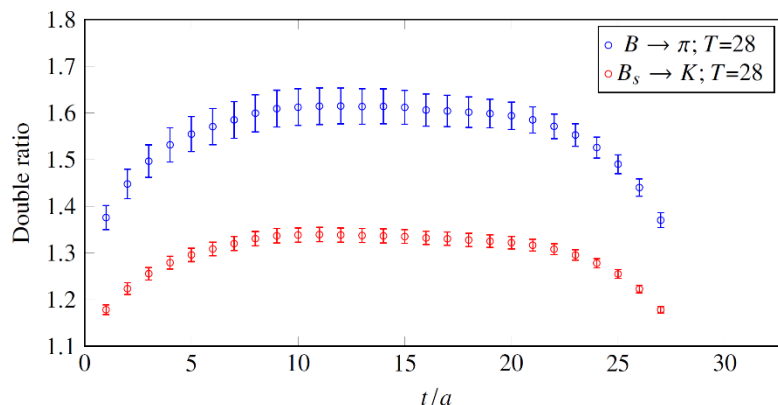


図 1 スカラー形状因子の 2 乗を与える相関関数の比を、 $B_s \rightarrow K\ell\nu$ 崩壊 (赤丸) と $B \rightarrow \pi\ell\nu$ 崩壊 (青丸) で比較したもの。横軸は、 $B_{(s)}$ 中間子の生成演算子と相互演算子の時間距離 t/a を表す。いずれのデータも、相関関数の全時間距離が $T=28$ の場合のデータである。

また、重いハドロンの研究では、しばしば、励起状態の寄与による系統誤差が問題となる。図 1 では、時間距離 t/a の中間領域で相関関数の比の値がほぼ一定となっている。これは、励起状態の寄与が十分に削減できていることを示している。

3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

セミレプトニック崩壊の研究では、形状因子を運動量遷移の関数として決定するために、始・終状態の運動量配位を様々に変えて計算を行う。このため、運動量を変える必要のないレプトニック崩壊や混合の研究と比べて各段に多い演算量を必要とする。高性能な Wisteria/BDEC-01 を用いることにより、必要な計算を実行することができた。

4. 今後の展望

クォークの質量や相関関数の時間距離などを選定し、 $B_s \rightarrow K\ell\nu$ 崩壊の形状因子を格子 QCD のシミュレーションによって計算し、十分な高精度で計算できることを確認した。本研究をより小さい格子間隔や π 中間子質量への拡張して現実世界の形状因子を計算し、LHCb 実験と協力して $|V_{ub}|$ の決定や新物理探索を進めていく。

さらに、本研究で得られた知見、特に、相関関数の時間距離などのパラメタの選定に基づいて $B \rightarrow \pi\ell\nu$ 崩壊のシミュレーションを行い、我が国の SuperKEKB/Belle II 実験に見合う理論計算精度を達成することが大きな目標となる。

5. 成果発表

(1) 学術論文

- "B→D*ℓν semileptonic form factors from lattice QCD with Möbius domain-wall quarks", Y.Aoki, B.Colquhoun, H.Fukaya, S.Hashimoto, T.Kaneko, R.Kellermann, J.Koponen, E. Kou, Phys. Rev. D 109 (2024) 074503, 10.1103/PhysRevD.109.074503 (Editor's Suggestion に選出) .
- "Bs→Kℓν form factors from lattice QCD with domain-wall heavy quarks", P. Mohanta, T. Kaneko, S. Hashimoto, Proceedings of Science, Lattice 2023 (2024) 267, 10.22323/1.453.0267.

(2) 学会発表

- "Flavor Physics From Lattice QCD", Takashi Kaneko, Korean Physical Society and Physical Society of Japan Joint Symposium, 2023/04/20, Daejeon Conventional Center, Korea.
- "Bs→Kℓν form factors from lattice QCD with domain-wall heavy quarks", Protick Mohanta, 2023/07/31-08/04, Fermi National Accelerator Laboratory, US.
- "B meson semileptonic decays from lattice QCD", Takashi Kaneko, 34th IUPAP Conference on Computational Physics (CCP2023), 2023/08/04-08, Kobe International Conference Center, Japan.
- "Status and progress of lattice QCD", Takashi Kaneko, 12th International Workshop on the CKM Unitarity Triangle (CKM2023), 2023/09/18-22, Hospedería San Martín Pinario, Santiago de Compostela, Spain.
- 「素粒子標準理論の精密検証に向けた B 中間子崩壊の格子 QCD シミュレーション」、金児隆志、第 10 回「富岳」を中核とする HPCI システム利用研究課題 成果報告会、2023/10/25-26 (優秀成果賞に選出) .
- "Flavor Physics From Lattice QCD", Takashi Kaneko, KEK Theory Meeting on Particle Physics Phenomenology (KEK--PH2023), 2023/11/07-10, KEK Tsukuba, Japan.

(3) その他

筑波大学計算科学研究センター 2023 年度学際共同プログラム利用報告書

使用計算機	使用計算機に ○	配分リソース※		
		当初配分	移行*	追加配分
Cygnus				
Pegasus				
Wisteria/BDEC-01	○	524,000		0
※配分リソースについてはノード時間積をご記入ください。 *バジェット移行を行った場合、「+2000」「-1000」のように記入				