

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

金見隆志

高エネルギー加速器研究機構

1. 研究目的

B 中間子の $B \rightarrow \pi \ell \nu$ セミレプトニック崩壊は、標準理論の基礎パラメタである小林・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標準理論を超えた新しい物理の有望なプローブとなる。この崩壊は分岐比が小さいため、これまでの実験精度は統計数で頭打ちになっていた。しかし、我が国が主導する国際協力実験 SuperKEKB/Belle II (以下、Belle II 実験と呼ぶ) は、その前身の KEKB/Belle II 実験の約 50 倍のデータを蓄積することを目指しており、 $B \rightarrow \pi \ell \nu$ 崩壊の測定精度を格段に向上させる。これに見合う理論計算精度を達成し、Belle II 実験の精密データを最大限に活用して、 $|V_{ub}|$ を決定し、標準理論を検証することは、新物理を解明し、それを内包する新たな基礎理論の構築につながる。

$B \rightarrow \pi \ell \nu$ 崩壊の理論計算精度は、崩壊振幅への量子色力学 (QCD) の非摂動効果を記述する形状因子と呼ばれる物理量の不定性によって制限されている。そこで、本研究では、QCD を時空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形状因子を実験に見合う精度で計算することを目指す。このような研究は世界中で行われてきたが、計算コストを削減するために、場の理論の基本的要請である局所性や、QCD の低エネルギー物理を特徴づけるカイラル対称性を顕に壊してシミュレーションを行っている。これによる不定性を定量的に評価し、削減することは難しく、実際、海外の異なるグループが互いに矛盾する結果を報告し、その原因は明らかになっていない。そこで、本研究では、局所性やカイラル対称性を保つ理論的にクリーンな定式化を用いて系統誤差を制御し、また、高性能な富岳や Wisteria/BDEC-01 を用いて統計誤差を制御する。これによって Belle II 実験に見合う計算精度を達成し、同実験と協力した新物理探索へとつなげていく。

2. 研究成果の内容

令和 6 年度は、格子カットオフが $a^{-1} = 4.5 \text{ GeV}$ の格子で、 300 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、現実世界のボトムクォーク質量への外挿のため、異なる 6 つの質量を用いた。

近年、 B 中間子の相関関数は $B\pi 2$ 粒子状態からの寄与を強く受け、基底状態間の崩

壊 $B \rightarrow \pi l \nu$ の寄与をうまく抽出することができない可能性が示唆された。そこで、まず、シミュレーションで実測した B 中間子と π 中間子の質量を用いて $B\pi$ 状態の寄与を頭に考慮した解析を行い、結果が変わらないことを確認した。これは、非物理的に重い π 中間子を用いているため、 $B\pi$ 状態の寄与が抑制されるためと考えられる。

次いで、 B 中間子の 2 点関数と 3 点関数を時間間隔の関数としてフィットし、形状因子を抽出した。統計精度は、ゼロ反跳付近で 1-2% 程度であり、Belle II に見合う数%以下となっている。また、運動量遷移依存性は、Boyd-Caprini-Lellouch によって提案された現象論的仮定を配した関数形 (BCL 関数形) で良く記述され、現実世界への外挿によって大きな不定性は生じないと期待される。

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。さらに、今年度に注力した $B \rightarrow \pi l \nu$ 崩壊は、運動量遷移を幅広く探るために、計算コストの高い軽いクォークの伝播関数を運動量を変えて繰り返し計算する必要がある。このため、数あるセミレプトニック崩壊のなかでも特に計算コストの高い崩壊である。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

所有しているより粗い格子での計算を完了させ、形状因子を格子間隔とクォーク質量の関数としてフィットし、現実世界へと外挿する。得られた外挿式を用いて運動量遷移の参照値での擬データを生成し、BCL 関数形でフィットする。これによって、形状因子を運動量遷移の関数として予言することが可能になり、微分崩壊率などの観測量を計算し、Belle II 実験の精密データとの比較検証を進める。

5. 成果発表

(1) 学術論文

(2) 学会発表

- ・ "Lattice QCD"、研究会「フレーバーアノマリーの現状と B ファクトリーの未来」、2024 年 8 月 7 日、名古屋大学素粒子宇宙起源研究所
- ・ "CKM 行列要素決定のための格子 QCD 計算の現状"、基研研究会「素粒子物理学の進展 2024」、2024 年 8 月 19 日、京都大学基礎物理学研究所
- ・ "Semileptonic B to D* decays"、国際研究会「3rd Edition of "Lattice meets Continuum"」、2024 年 10 月 2 日、Universität Siegen, Germany

(3) その他

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	○	478,000		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				