

## 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

B 中間子の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・益川行列要素の決定を与えるとともに、素粒子標準理論を超える「新物理」の有望なプローブと期待されている。我が国が主導する SuperKEKB/Belle II 実験により、その測定精度は今後 10 年間で各段に向上する。理論予言と実験測定の精密な比較検証により新物理のヒントを見つけ出すためには、理論計算精度も各段に向上させる必要がある。現在の理論精度は、量子色力学 (QCD) の非摂動効果を記述するハドロン行列要素の不定性によって制限されている。時空格子上に定式化した格子 QCD のシミュレーション研究の最重要課題の一つは、Belle II に見合う精度でハドロン行列要素を計算することである。

しかし、現在の計算機性能では、ボトムクォーク質量直上でシミュレーションを行えるほど細かい格子を用いることができない。このため先行研究は、QCD の物理を再現するように調節された有効作用と相互作用演算子を用いて行われてきた。この調節は評価や削減の難しい不定性を生み、シミュレーションの応用範囲を大きく制限する。実際、小林・益川行列要素  $|V_{cb}|$  の決定を与え、超対称性に強い感度のある  $B \rightarrow D^* \ell \nu$  崩壊の先行研究では、ハドロン行列要素を記述する形状因子の結果が Belle II の前身である Belle 実験の結果と矛盾することが指摘されている。そこで、本研究では、カイラル対称性を保つ理想的な QCD 作用を全てのクォークに採用し、 $B \rightarrow D^* \ell \nu$  崩壊の形状因子の計算に取り組んだ。

### 2. 研究成果の内容

格子カットオフが  $a^{-1} = 2.5, 3.6, 4.5 \text{ GeV}$  の格子で、230 MeV 以上の  $\pi$  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、最大 3.2 GeV までに制限した。従って、シミュレーション結果を連続時空と現実世界のクォーク質量へと外挿する必要がある。しかし、上述のように選定した領域では、これらの依存性が小さいことを確認し、現実世界への外挿は十分に制御されている

図 1 では、得られた形状因子の結果から運動量遷移や崩壊角度についての微分崩壊率を予言し、Belle 実験の測定結果と比較した。有効理論の作用を用いた先行研究で

は、これらの微分崩壊率が実験結果から大きくずれており、現象論・実験研究者を巻き込んだ論争となっていたが、理想的な定式化を用いた QCD の直接シミュレーションにより、実験とよく整合する結果を得た。

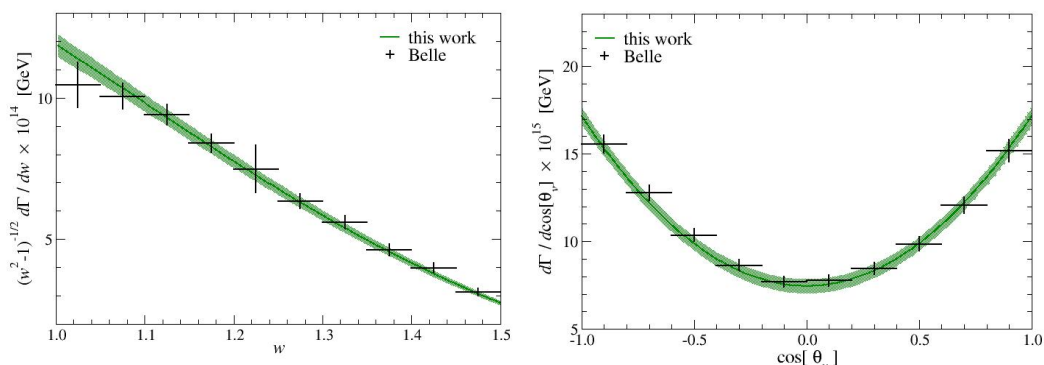


図 1 B $\rightarrow$ D\* $l\nu$  崩壊の微分崩壊率の比較

左図は、運動量遷移を表す反跳パラメタ  $w$  についての微分崩壊率  $d\Gamma/dw$ 、右図は崩壊角度  $\theta_l$  に対する微分崩壊率  $d\Gamma/d\cos[\theta_l]$  をプロットしている。我々の理論予言（緑のバンド）と Belle 実験の測定結果（“+”シンボル）がよく一致している。左図では大きく変化する位相因子  $(w^2-1)^{1/2}$  で割って  $w$  依存性を見やすくしている。

これにより、理論と実験の間の微分崩壊率の比較による  $|V_{cb}|$  の決定が力学変数によって変動しない結果を与えるようになった。

### 3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

B 中間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-O を用いることにより、必要な計算を完了することができた。

### 4. 今後の展望

理論と実験の微分崩壊率の比較により、 $|V_{cb}|$  を決定する。終状態を指定しないインクルーシブ崩壊からの決定と一致しないことが長年の問題となっているが、その一方で、実験データの強い相関からバイアスが生じる可能性も指摘されており、それを考慮して慎重に解析を進める。

また、異なる小林・益川行列要素  $|V_{ub}|$  の決定を与え、Belle II によって実験精度が各段に向上する B $\rightarrow\pi l\nu$  崩壊へと研究を拡張する。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計算する必要があるため、Wisteria-O のような高性能な計算機が益々不可欠となる。

5. 成果発表

(ア) 学術論文

- “Form factors of  $B \rightarrow \pi \ell \nu$  and a determination of  $|V_{ub}|$  with Möbius domain-wall fermions”, B. Colquhoun, S. Hashimoto, T. Kaneko, and J. Koponen, Phys. Rev. D 106 (2022) 054502.

(イ) 学会発表

- “JLQCD form factors for  $B \rightarrow D^{(*)} \ell \nu$ ”, Takashi Kaneko, Challenges in semileptonic B Decays, Apr 19-23, 2022, Barolo, Italy (招待講演).
- “Heavy flavor physics from lattice QCD”, Takashi Kaneko, The 39<sup>th</sup> International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2022), August 8-13, 2022, Universität Bonn, Germany (招待講演).
- “(Semi)leptonic kaon decays and neutral kaon mixing from lattice QCD”, Takashi Kaneko, International Conference on Kaon Physics (KAON 2022), Sep 13-16, 2022, Osaka University, Japan (招待講演).
- “B meson exclusive semileptonic decays from JLQCD”, Takashi Kaneko, Challenges and opportunities in Lattice QCD and related topics, Feb 15-17, RIKEN R-CCS, Japan (招待講演).
- 「標準理論の検証に向けた B 中間子セミレプトニック崩壊の研究」、金児隆志、シンポジウム「富岳で加速する素粒子・原子核・宇宙・惑星」、2022 年 12 月 12-13 日、理化学研究所計算科学研究センター
- 「格子 QCD による  $B \rightarrow \pi \ell \nu$  崩壊の形状因子の計算」、金児隆志、青木保道、深谷英則、橋本省二、金森逸作、P. Mohanta、中村宣文、日本物理学会 2023 年春季大会、2023 年 3 月 22-25 日、オンライン開催.

(ウ) その他

使用計算機	使用計算機に ○	配分リソース※	
		当初配分	追加配分
Cygnus			
Wisteria/BDEC-01	○	780,000	780,000
※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。			