

B 中間子セミレプトニック崩壊による新物理模型の検証

Test of new physics models through B meson semileptonic decays

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、素粒子標準理論に欠けている物理的メカニズム、即ち、「新物理」の有望なプローブと期待されている。このため、我が国が主導する国際協力実験 SuperKEKB/Belle II は測定精度を格段に向上させようとしている。しかし、その一方で、異なるセミレプトニック崩壊から決定した小林・益川行列要素 $|V_{cb}|$ の値が一致しないという長年の未解決問題がある。 $|V_{cb}|$ は様々な B 中間子崩壊の振幅を記述する基礎パラメタであるため、この問題を解決しなければ、Belle II の精密実験データの解釈は曖昧なものにならざるを得ない。 $|V_{cb}|$ のずれの原因として、 $B \rightarrow D^{(*)} \ell \nu$ 崩壊への強い力の寄与を記述する形状因子の不定性が過小評価されている可能性が、近年の現象論的研究によって指摘されている。

そこで、本研究では、時空格子上に定式化した量子色力学（格子 QCD）の数値シミュレーションを行い、 $B \rightarrow D^{(*)} \ell \nu$ 崩壊の形状因子を第一原理から非摂動的に計算する。これによって $|V_{cb}|$ のずれの問題を理解・解決し、また、形状因子の精密なデータを提供して Belle II と協力したデータ解析を行い、新物理の探索と解明を目指す。

2. 研究成果の内容

本研究では、計算コストを削減し、離散化誤差を抑えるために、現実世界よりも重い π 中間子質量と軽いボトムクォーク質量を用いる。格子カットオフは $a^{-1} = 2.5, 3.6, 4.5$ GeV の 3 点を取り、ボトムクォーク質量は $0.8 a^{-1}$ より小さい複数の値をとる。また、 π 中間子質量は $M_{\pi} = 230, 300, 400, 500$ MeV である。2019 年度は、これらの全てのパラメタでのシミュレーションを完了し、形状因子の結果を連続時空の極限と現実世界のクォーク質量に外挿することを可能にした。

図 1 は $B \rightarrow D^{(*)} \ell \nu$ 崩壊の軸性ベクトル形状因子 h_{A1} の予言を力学変数 w の関数としてプロットしたものである。 w は反跳パラメタと呼ばれ、始状態の B 中間子と終状態の $D^{(*)}$ 中間子の運動量変化、即ち、反跳を表し、 $w=1$ が反跳ゼロの極限に対応する。また、解析は進行中であり、現時点では統計誤差のみ評価している。系統誤差が部分的にキャンセルするように、形状因子は $w=1$ の値で規格化している。 $w \neq 1$ での格子 QCD の先行研究が無い場合、これまでの $|V_{cb}|$ の決定では、形状因子も実験データから決

定していた。その際、形状因子の w 依存性のパラメトリゼーションとして、Caprini, Neubert, Lellouch によって提案された CLN と Boyd, Grinstein, Lebed による BGL が用いられてきた。前者は低次の重クォーク展開の予言を仮定した現象論的模型であり、後者はそれを排した模型非依存のパラメトリゼーションである。図 1 に示したように、これらのパラメトリゼーションを用いた近年の解析結果（赤と黒のバンド）が有意にずれている。

本研究の予言は、CLN を用いた解析結果と良く一致し、BGL を用いた解析の不定性が十分に理解されていないことを示唆する。実際、模型非依存な BGL は多くの不定パラメータで記述され、この点を考慮した再解析 (Gambino et al., '19) の結果は、本研究の予言と一致するようになった。

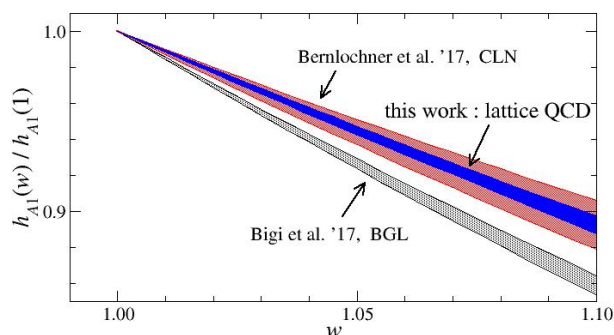


図 1 形状因子 h_{A1} を反跳パラメタ w の関数としてプロットした図。本研究の予言を青のバンドでプロットした。一方、赤と黒のバンドは CLN と BGL のパラメトリゼーションを仮定した実験データの解析の結果を表している。

3. 学際共同利用が果たした役割と意義

2017 年当時は、BGL を用いて決定した $|V_{cb}|$ が他の崩壊からの結果と一致し、また、模型非依存の解析は信頼できるという期待から、 $|V_{cb}|$ のずれの問題は解決したと主張されていた。本研究は、これに対する反証を与え、 $|V_{cb}|$ の不定性の正しい理解とずれの解決に向けて貢献したと考えている。

また、2018 年度の報告書に示したように、CLN の基本仮定である低次の重クォーク展開では記述できない形状因子も存在する。従って、 $|V_{cb}|$ のずれを理解、解決する上で、学際共同利用による形状因子の第一原理計算は本質的に重要である。

4. 今後の展望

今後は、現実世界への外挿式を変えた系統的な解析を行って系統誤差を評価し、 $B \rightarrow D^{(*)} \ell \nu$ 崩壊を記述する全ての形状因子を予言する。実験と協力した解析を行って $|V_{cb}|$ のずれの解決と新物理の探索を推し進める。そのために、Belle 実験の解析チームとの協力体制も整えている。

その後の課題として、 $B \rightarrow \pi \ell \nu$ 崩壊を記述する形状因子の高精度計算がある。この崩壊から決定できる小林・益川行列要素 $|V_{ub}|$ にもずれの問題があり、また、この崩壊の測定精度は Belle II 実験によって格段に向上するため、新物理のプロブとしても期待されている。

5. 成果発表

(1) 学術論文

“ $B \rightarrow D^{(*)} \ell \nu$ form factors from lattice QCD with relativistic heavy quarks”, T. Kaneko, Y. Aoki, G. Bailas, B. Colquhoun, H. Fukaya, S. Hashimoto, J. Koponen (JLQCD Collaboration), Proceedings of Science, LATTICE2019, 139, 2020.

(2) 学会発表

“ $B \rightarrow D^{(*)} \ell \nu$ decays at non-zero recoils”, 金児隆志, 研究会 “Frontiers in Lattice QCD and related topics”, 2019 年 4 月 15 日-26 日, 京都大学基礎物理学研究所.

“Flavor physics and theoretical challenges for precision”, 金児隆志, 洪江美, 2019 Joint Workshop of FKPL and TYL/FJPPL, 2019 年 5 月 8 日-10 日, 濟州島、韓国.

“ $B \rightarrow D^{(*)} \ell \nu$ form factors from lattice QCD with relativistic heavy quarks”, The 37th Annual International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE 2019), 2019 年 6 月 16 日-22 日, 武漢、中国.

“ $B \rightarrow D^{(*)} \ell \nu$ form factors from relativistic lattice QCD”, 金児隆志, 研究会 “2019 X Lattice Intensity Frontier”, 2019 年 9 月 23 日-25 日, ブルックヘブン国立研究所.

“格子 QCD シミュレーションと SuperKEKB/Belle II”, 研究会 「シミュレーションによる宇宙の基本法則と進化の解明に向けて」, 金児隆志, 2019 年 12 月 16 日-19 日, 京都大学基礎物理学研究所.

“相対論的格子 QCD シミュレーションによる $B \rightarrow D^{(*)} \ell \nu$ 崩壊の研究”, 金児隆志, 青木保道, Gabriela Bailas, Brian Colquhoun, 深谷英則, 橋本省二, Jonna. Koponen, 日本物理学会第 75 回年次大会, 2020 年 3 月 16 日-19 日, 名古屋大学.

(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	追加配分
Cygnus			
Oakforest-PACS	○	829440	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。			