

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

クォークのフレーバの変化を伴う B 中間子反応は、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。我が国が主導する SuperKEKB/Belle II と欧州の LHCb の国際協力実験により、今後 10 年間で測定精度は格段に向上する。これに見合う理論計算を達成し実験測定と理論予言を精密に比較検証することにより、新物理を探索・解明することができる。しかし、現在の理論精度は、低エネルギー領域における量子色力学 (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、SuperKEKB/Belle II や LHCb 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の源となり、シミュレーションの応用範囲を大きく制限する。

そこで、本研究では、有効作用や演算子を用いず、相対論的 QCD の直接シミュレーションによって B 中間子反応を記述するハドロン行列要素を計算する。このために QCD の低エネルギー物理を特徴づけるカイラル対称性を保ち、高速な定式化を構成した。この定式化の良い性質を活かしてシミュレーションの不定性を制御し、幅広い反応で新物理を探ることを目指す。

2. 研究成果の内容

中性 B 中間子とその反粒子が互いに遷移する B 中間子混合は、標準理論のツリーレベルで禁止されているため、新物理の効果が顕著に現れると期待される。前年度に引き続き、米・英国の RBC/UKQCD グループと協力し、B 中間子混合を記述するハドロン行列要素であるバグパラメタを計算した。

2020 年度は、格子カットオフが 3.6 GeV 以下の格子で、300 MeV 以上の π 中間子質量を用いてシミュレーションを行った。2021 年度は、これを、4.6 GeV のカットオフ、230 MeV の π 中間子質量へと拡張した。これまでに我々 JLQCD と RBC/UKQCD グループ

プが計算したバグパラメタの結果を図 1 にプロットした。JLQCD はより高いカット

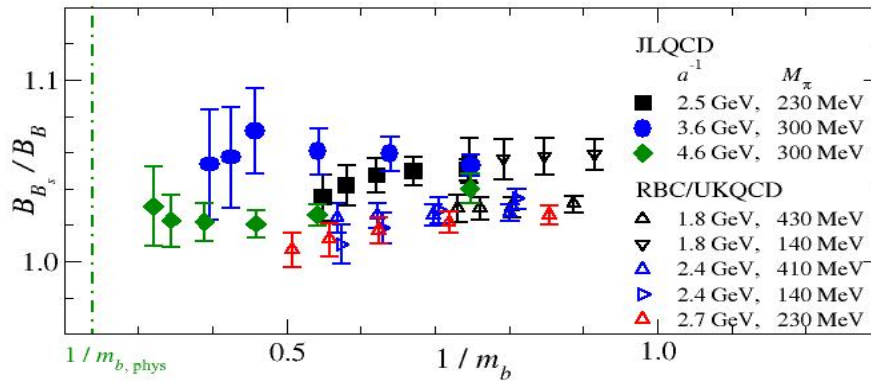


図 1 B 中間子と B_s 中間子のバグパラメタの比

我々 JLQCD グループの結果を塗りつぶしたシンボルで、UKQCD グループの結果を白抜きのシンボルでプロットした。異なる形のシンボルは、格子カットオフ(a^{-1})や π 中間子質量 M_π が異なるシミュレーションの結果をプロットしている。横軸はシミュレーションに用いたボトムクォークの逆数で、現実世界での値を左端の点破線で示している。

オフでシミュレーションを行っているため、 $O(am_b)$ の離散化誤差を小さく抑えることができる。このため、図で明らかなように、より大きく現実世界に近いボトムクォーク質量を用いることができています。一方、RBC/UKQCD はカットオフを小さく制限することにより、計算コストを抑えて現実世界付近の π 中間子質量を用いている。このため、二つのグループの国際協力により、格子間隔、 π 中間子質量、ボトムクォーク質量についての外挿の制御が容易になる。

3. 学際共同利用が果たした役割と意義

B 中間子混合の研究では、高統計精度を達成するために、混合を記述する相関関数を時間座標と時間距離を変えて数多く計算する必要がある。さらに、離散化誤差を抑制するために、解像度の大きい格子 $64^3 \times 128$ を採用しているために膨大な計算量を必要とする。高性能な Oakforest-PACS 計算機の大規模ジョブ(典型的には 512 ノードを使用した)により、この計算を速やかに実行することができた。

4. 今後の展望

シミュレーションパラメタでの結果を連続時空、現実世界のクォーク質量へと外挿してバグパラメタの値を決定する。実験結果との比較により小林・益川行列要素 $|V_{td}|$ 、 $|V_{ts}|$ を決定して、ユニタリ性などの標準理論の性質の絞りを探る。また、標準理論を超えた新物理模型で現れるバグパラメタも計算しているため、ユニタリ性の検証などから新物理模型のパラメタを制限することができる。

5. 成果発表

(1) 学術論文

- “ $B \rightarrow D^{(*)} \ell \nu$ semileptonic decays in lattice QCD with domain-wall heavy quarks”, T. Kaneko, Y. Aoki, B. Colquhoun, M. Faur, H. Fukaya, S. Hashimoto, J. Koponen, E. Kou, Proceedings of Science, Lattice 2021, 561 (査読有).
- “BSM B - B bar mixing on JLQCD and RBC/UKQCD $N_f=2+1$ DWF ensembles”, P. Boyle, F. Erben, A. Juttner, T. Kaneko, M. Marshall, A. Portelli, O. Witzel, L. Del Debbio, J.T. Tsang, Proceedings of Science, Lattice 2021, 224 (査読有).

(2) 学会発表

- “Heavy-Heavy and heavy-light form factors from lattice QCD”, T. Kaneko, The 19th Conference on Flavor Physics and CP Violation, Shanghai, China and on-line, June 8-11, 2021 (招待講演).
- “ $B \rightarrow D^{(*)} \ell \nu$ semileptonic decays in lattice QCD with domain-wall heavy quarks”, T. Kaneko, Y. Aoki, B. Colquhoun, M. Faur, H. Fukaya, S. Hashimoto, J. Koponen, E. Kou, The 38th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2021), on-line, July 26-30, 2021.
- “BSM B - B bar mixing on JLQCD and RBC/UKQCD $N_f=2+1$ DWF ensembles”, P. Boyle, F. Erben, A. Juttner, T. Kaneko, M. Marshall, A. Portelli, O. Witzel, L. Del Debbio, J.T. Tsang, The 38th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2021), on-line, July 26-30, 2021.
- 「新物理探索に向けた 格子 QCD シミュレーションの 精密化と最近の進展」、金児隆志、日本物理学会 2021 年秋季大会、on-line、2021 年 9 月 14-17 日 (招待講演).
- “ $B \rightarrow D^{(*)} \ell \nu$ semileptonic decay form factors in LQCD”, T. Kaneko, The 11th International Workshop on the CKM Unitarity Triangle (CKM 2021), on-line, November 22-26, 2021 (招待講演).
- 「 $B \rightarrow D^{*} \ell \nu$ 崩壊による $|V_{cb}|$ の決定」、金児隆志、青木保道、B. Colquhoun、深谷英則、橋本省二、J. Koponen、日本物理学会第 77 回年次大会、神戸大学 (on-line)、2021 年 3 月 15-19 日.

(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	○	695,950	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。			