

ボトムクォークの直接計算による新物理探索

Direct bottom quark simulation 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。このため、我が国が主導する SuperKEKB/Belle II や欧州の LHCb などの国際協力実験は測定精度を格段に向上させようとしている。これに見合う理論計算を実現することは喫緊の課題であるが、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が理論精度を制限している。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

前年度までの研究では、我々が構成した定式化を $B \rightarrow D^{(*)} \ell \nu$ 崩壊の研究に応用し、この反応を記述するハドロン行列要素、即ち、形状因子を高精度で計算した。結果の解析を進めており、2021 年度に論文として発表する予定である。

2020 年度は、この定式化を用い、英国の UKQCD グループとの国際協力により、B 中間子混合の研究に着手した。標準理論では摂動低次の寄与が禁止されるため、B 中間子混合は新物理に敏感なプローブであると期待されており、SuperKEKB/Belle II や LHCb 実験の主要な測定反応の一つである。

時空の離散化による誤差を制御するため、 $a^{-1} = 2.5, 3.6, 4.5 \text{ GeV}$ という比較的大きい格子カットオフを用い、ボトムクォークの質量を $0.7 a^{-1}$ より小さい複数の値に制限する。また、計算コストを格段に削減するために、現実世界より重い π 中間子質量 $M_\pi = 230, 300, 400, 500 \text{ MeV}$ を採用する。我々の定式化がカイラル対称性を保つことにより、離散化誤差を抑制し、カイラル摂動論を用いて現実世界の π 中間子質量への外挿を制御できる。さらに、B 中間子混合の研究においてしばしば問題になる非物理的な演算子混合も禁止されるため、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高精度で計算できる。

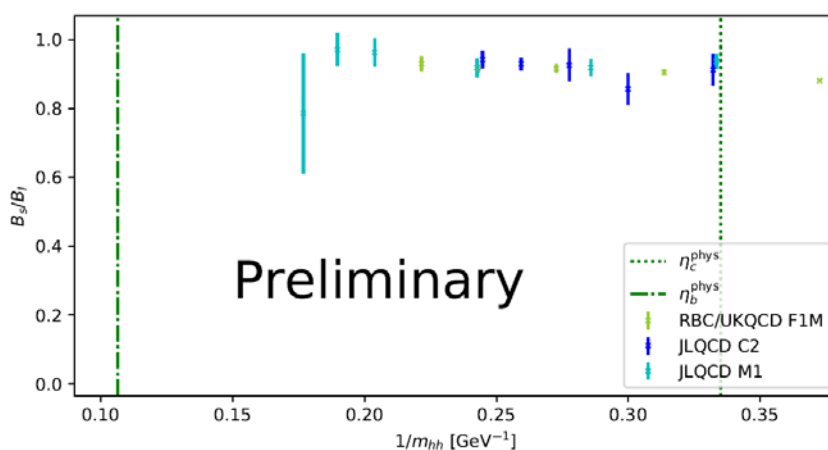


図 1 B 中間子と B_s 中間子のバグパラメタの比を η_b 中間子質量の逆数に対してプロットした図。青緑と青のシンボルは本研究の成果、緑は UKQCD グループによる先行研究の結果をプロットしたもの。また、2本の垂直方向の線は、現実世界での η_b 中間子(左)と η_c 中間子(右)の質量の逆数を表している。

UKQCD とパラメタを分担して計算を進め、 3.6 GeV 以下のカットオフ、 300 MeV 以上の π 中間子質量での計算を完了した。図 1 は、B 中間子と B_s 中間子のバグパラメタの比を、 η_b 中間子の質量の逆数に対してプロットしたものである。今回の結果は UKQCD による先行研究の結果とよく一致するとともに、現実世界での η_b 中間子質量に有意に近い結果を与えている。このため、ボトムクォーク質量についての外挿をより良く制御して、現実世界でのバグパラメタをより高精度で決定できると期待できる。

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

今後は、大きいカットオフ $a^{-1}=4.5\text{GeV}$ 、軽い π 中間子質量 $M_\pi=230\text{MeV}$ へと計算を拡張し、カットオフ、クォーク質量についての外挿を行って、現実世界でのバグパラメタを予言する。相対論的シミュレーションに基づいた研究は数少なく、また、本研究では新物理模型の寄与を記述するバグパラメタも計算しているため、B中間子混合による新物理探索に重要なインプットを提供できると考えている。

5. 成果発表

(1) 学術論文

- ・ “Towards fully nonperturbative computations of inelastic ℓN scattering cross sections from lattice QCD”, H. Fukaya, S. Hashimoto, T. Kaneko and H. Ohki, Phys. Rev. D 102 (2020) 114516.

(2) 学会発表

- ・ “ $B \rightarrow D^{(*)} \ell \nu$ form factors from relativistic lattice QCD”, T. Kaneko, Asia-Pacific Symposium on Lattice Field Theory (APLat 2020), August 4-7, 2020, on-line.
- ・ “ $B_{(s)} - \bar{B}_{(s)}$ bar mixing on domain-wall lattices”, F. Erben, Asia-Pacific Symposium on Lattice Field Theory (APLat 2020), August 4-7, 2020, on-line.
- ・ 「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、日本物理学会 2020 年秋季大会、2020 年 9 月 14-17 日、筑波大学（オンライン開催）
- ・ 「相対論的格子 QCD による 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」、2021 年 1 月 28 日、高エネルギー加速器研究機構（オンライン開催）

(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	○	856,100	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。			