

課題名 (タイトル) :

## 物理点上での中性 B 中間子混合と崩壊定数の計算

利用者氏名 : ○石川 智己, 青木 保通, 出渕 卓

所属 : 理研 BNL 研究センター 計算物理研究グループ

## 1. 本課題の研究の背景、目的、関係するプロジェクトとの関係

CP(粒子-反粒子の対称性)の破れ、は小林-益川理論を要素となす素粒子標準模型の特筆すべき性質で、特にその帰結である重い中性 B 中間子とその反粒子へ転換する頻度は KEK B ファクトリー他の加速器実験で 1%未満という高精度で求められている。この実験結果と理論計算とを組み合わせる標準模型の基本パラメタである小林-益川行列要素を求めることができる。そのために必要な中性 B 中間子混合行列要素と崩壊定数は摂動計算では得ることの出来ない非摂動的な量であり、現在のところ格子 QCD による数値計算が唯一の方法である。本研究ではこの格子 QCD を用いた混合行列要素と崩壊定数の高精度計算を行う。それにより、B 中間子をプローブとした標準模型の精密検証を目指す。

## 2. 具体的な利用内容、計算方法

上述の物理量の高精度計算には QCD の複雑なダイナミクスをもれなく取り込むことが可能な格子 QCD による第一原理数値計算が必要になる。さらに標準模型の特性から特に連続理論の QCD の持つカイラル対称性をよく保つ格子理論を使う必要がある。その要請を満たすべく、ドメインウォールフェルミオンを軽いクォークに用いる。重いクォークを格子上で直接的に取り扱うのは現在の計算機性能では不可能であるので、b クォークは格子上の重クォーク有効理論を用いる。QCD 真空配位は RBC/UKQCD コラボレーションが生成したものを用い、必要な 2 点、3 点グリーン関数の計算を RICC 上でを行い、行列要素を計算する。格子 QCD の計算結果から格子間隔ゼロの極限を得るために必要な 2 つの格子間隔で計算を完了させ、中性 B 中間子混合行列要素と崩壊定数の連続極限での精密値を求める。

本課題では特に物理的パイ中間子質量点での  $B_d$  中間子に対する物理量計算に特化する。物理的パイ中間子質量点でのシミュレーションは有限体積効果がシビアであり、大きな体積を必要とする。例えば従来我々が行ってきた格子では格子間隔が 0.1fm の場合、 $24^3 \times 64$  のサイズで良かったものが物理的パイ中間子質量点では  $48^3 \times 96$  のようなサイズが必要となる。加えて  $B_d$  中間子は down クォークを含んでいるために非常に軽いクォーク質量でディラック行列の逆を計算する必要があり、共役勾配法の収束は非常に遅い。収束改善の一つの方法は低モード固有ベクトルを使った deflation 法であるが、これが効果的に働くためには固有ベクトルが 2000 本程度必要である。我々は計算にドメインウォールフェルミオンを用いている上に上述のように格子サイズは巨大であるので計算に非常に大きな物理メモリ空間を要する。計算量は非常に大きく富士通 FX100 を擁する理研 ACCC の HOKUSAI-GreatWave 上で計算を行う。

## 3. 結果

後述するが、計算コード開発における問題から本年度は HOKUSAI-GreatWave を利用しなかった。ここでは理研 ACCC の別システムである RICC で得られた  $B_s$  中間子に関する量について報告を行い、本課題の本来の目標であった  $B_d$  中間子の計算に対する知見を述べたい。

図 1 は  $B_s$  中間子崩壊定数のカイラル・連続極限外挿を示している。縦軸が崩壊定数の値、横軸が up と down クォークの値である。24c, 48c は粗い格子、32c が細かい格子で、それぞれの格子間隔で up と down クォークの値をいくつか変えて計算している。”cont”が連続極限を取ったものである。HYP1 と HYP2 は重クォーク作用中のゲージ・リンク変数の smearing の種類を表していて両者は連

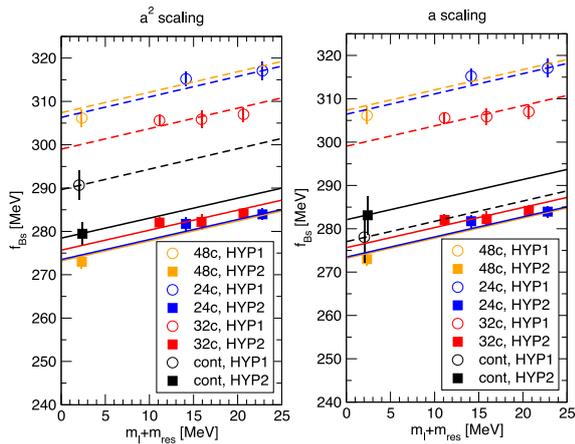


図 1  $f_{B_s}$  のカイラル・連続極限外挿

連続極限で一致すべきものである。図の左側は連続極限を取る時に $a^2$ スケールリングを、右側は $a$ スケールリングを仮定したものである。この計算では全てのデータ点は 1-ループ摂動論で $O(a)$ 補正を行っているので摂動の近似が良ければ $a^2$ スケールリングでの連続極限で HYP1 と HYP2 のデータが一致するはずである。ところが図 2 の左側を見るとそうはなっていない。しかし右側の $a$ スケールリングでは HYP1 と HYP2 で無矛盾な連続極限が得られている。これは何を意味しているかということ、1-ループ摂動論 $O(a)$ 補正が不十分だということである。これは以前の計算では明らかではなかった点で、今回非常に統計が上がったために見えてきた事実である。またさらに注意深く見ると、 $a^2$ スケールリングと $a$ スケールリングでの連続極限で HYP2 ではそれ程差が無いのに比べて HYP1 は大きく動いている。これは、HYP2 に限っては 1-ループ摂動論で $O(a)$ 補正はほぼ十分であることを意味する。以前の計算では HYP1 と HYP2 で共に $a^2$ スケールリングを仮定して combined フィットによりカイラル・連続極限外挿の値を得ていたが、現段階の高精度計算では HYP1 のデータは捨てて HYP2 だけで評価するのが良いことを示している。同様のことは $B_d$ 中間子に対する量にも予想される。

$B_s$ 量に対する旧来の計算からの統計的改善は、

$$f_{B_s} = 256.5(4.8) \rightarrow 279.5(2.6)[\text{MeV}]$$

$$f_{B_s} \hat{B}_{B_s}^{1/2} = 290(9) \rightarrow 317.1(4.5)[\text{MeV}]$$

のように顕著に見て取れる。更にカイラル外挿不定性は $B_s$ 中間子よりも $B_d$ 中間子で顕著であり、目

標である物理的パイ中間子質量点での計算が実行できれば大幅な統計的・系統的改善が $B_d$ 量に対しても見込まれる。

#### 4. まとめ

過去行ったの中性 B 中間子混合の重クォーク展開第零近似のシミュレーションの最終的な誤差は統計誤差・カイラル外挿不定性・摂動論的繰り込み不定性が大きな部分を占める。これを踏まえて本年度では AMA 手法を用いて統計改善、並びに物理的パイ中間子質量点での計算を行い、 $B_s$ 量を評価した。この計算により統計誤差は格段に減り、より信頼できる解析が可能になることを見た。同様なことは $B_d$ 量に対しても期待される。

#### 5. 今後の計画・展望

$\xi$  や B 中間子崩壊定数の比は、B 中間子中の軽いクォーク要素を d、s と取った場合の QCD 行列要素の比として定義される。比を取る事により様々な系統誤差ならびに統計誤差が相殺されることが精密な結果を導き、従って、小林-益川行列要素の精密決定に役立てる事が出来る。一方、比を取る前の QCD 行列要素は、小林-益川行列要素の違う側面からの精密決定、惹いては、標準模型の精密検証に重要であるが、統計誤差、系統誤差(特に重クォーク質量の逆数の一次と、繰り込みの誤差)ともに大きくなる。しかしながら、統計誤差、あるいは、繰り込みの誤差を十分抑える事が出来れば、他のアプローチ(charm クォーク質量付近での有効理論によらない直接計算など)との組み合わせで、精密結果を導く際のアンカーポイントという重要な役割を担う事ができる。来年度は引き続きこの AMA を用いた計算の最終結果を引き出すが、同時に以下の事項も挑戦する必要がある。

(1)  $B_d$ 量に対する物理パイ中間子質量点でのシミュレーション: 先に述べたが格子サイズは巨大であり、更に物理パイ中間子質量点での down クォークの伝搬関数を解く必要がありより莫大な計算コストを要求する。しかしドメインウォール・フェルミオンのディラック行列の解法アルゴリズムの改良が大きく

進んでおり、十分計算は可能である。

- (2) 非摂動的演算子繰り込み： 現行の計算では演算子繰り込みとして 1 ループ摂動論を用いている。SU(3) breaking ratio 等の比の量に関してはその不定性はゼロ或は微小であるが、比を取る前の量はその不定性が 6% にものぼる。この不定性を削減するには非摂動的繰り込みが必要である。現在、座標空間上の非摂動繰り込み手法を使った試みを行っており、崩壊定数に対する繰り込みは近々実現出来る見込みである。

以上の計算により、中性 B 中間子混合の物理における不定性を排除、小林-益川行列要素の更なる精密検証を目指す。

## 6. 利用がなかった場合の理由

本年度は HOKUSAI-GreatWave システムの利用申請をしたものの利用しなかった。理由は計算コード開発上の問題によるものである。

- i) 従来の RICC 上で使用していた計算コードは Intel CPU ベースであり、しかも SIMD は 128bit 長で最適化していた。FX100 は SPARC CPU であり異なるアーキテクチャである。加えて SIMD 幅は 2 倍の 256bit となっており、簡単なコードの書き換えでは期待したパフォーマンスが得られなかった。
- ii) 我々のグループで開発中の [Grid C++ QCD ライブラリ](#) を FX100 上に転用できると思われていたが、このライブラリに不可欠な c++11 が HOKUSAI-GreatWave では未対応であることが判明した。

以上がシステムを利用できなかった理由であるが、仮にコードを用意できたとしても FX100 上では期待通りのパフォーマンスを得られない可能性もある。FX100 の搭載メモリは 1 ノード当たり 32GB であるがこれは現在の標準からすると必ずしも十分とは言えない大きさである。我々が計算に採用しているドメイン-ウォールフェルミオンは他のフェルミオンに比べて非常に多くのメモリを要求し、更に deflation 法を用いる戦略では固有ベクトルを格納するためのメモリも莫大である。よって計算量に比して非常に多くのノ

ドを使用せざるを得ない。加えてアーキテクチャが FX10 から FX100 にアップグレードされた際に計算と通信のバランスは悪化しており、高パフォーマンスが得られない可能性が懸念される。

平成 27 年度 利用研究成果リスト

**【論文、学会報告・雑誌などの論文発表】**

“Neutral B meson mixings and B meson decay constants with static heavy and domain-wall light quarks”,  
Y. Aoki, T. Ishikawa, T. Izubuchi, C. Lehner and A. Soni,  
Phys. Rev. D91 (2015) 11, 114505 [arXiv:1406.6192 [hep-lat]].

**【国際会議などの予稿集、proceeding】**

“Non-perturbative renormalization of the static quark theory in a large volume,”  
P. Korcyl, C. Lehner and T. Ishikawa,  
PoS LATTICE2015 (2015) 254 [arXiv:1512.00069 [hep-lat]].  
(理研の計算資源は利用していないが本研究課題に関連した計算)

**【国際会議、学会などでの口頭発表】**

“Neutral B meson mixings and B meson decay constants in the infinite b quark mass limit with domain-wall light quarks”, Tomomi Ishikawa et.al., 33nd International Symposium on Lattice Field Theory - LATTICE 2015, Kobe International Conference Center, Kobe, July 14 - 18, 2015.

“Non-perturbative renormalization of the static quark theory in a large volume”, Piotr Korcyl et.al., 33nd International Symposium on Lattice Field Theory - LATTICE 2015, Kobe International Conference Center, Kobe, July 14 - 18, 2015.