

課題名 (タイトル) :

中性 B 中間子混合と崩壊定数の高精度計算

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。

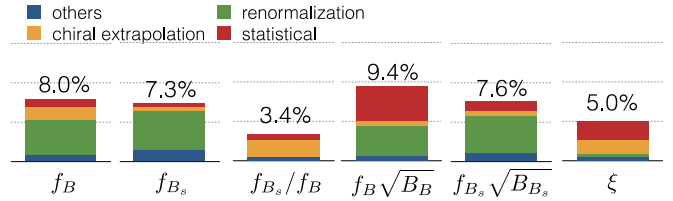


図 1 物理量に対する誤差の内訳

3. 結果

本年度は過去に行った計算が論文雑誌に掲載された。計算は 2 つの格子間隔で行い、カイラル外挿・連続極限を全て押さえたものであるが不十分な点も浮き彫りとなっている。図 1 にこの結果に対する誤差の内訳を示す。 f_B は B 中間子崩壊定数、 χ は SU(3) breaking ratio、 B_B は bag パラメタである。現在のところ主要な誤差は統計誤差、摂動的繰り込み不定性、カイラル外挿不定性である。以上の結果を踏まえ近年は全モード平均 (AMA) と呼ばれるディラック行列の逆行列の近似計算を利用した統計改善手法を用いている。加えて今年度は物理パイ中間子質量点でのシミュレーションとして B_s 中間子に関する量の計算を行った。

図 2 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 スケーリングを、右側は a スケー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 スケーリングでの連続極限で HYP1 と HYP2 のデータが一致

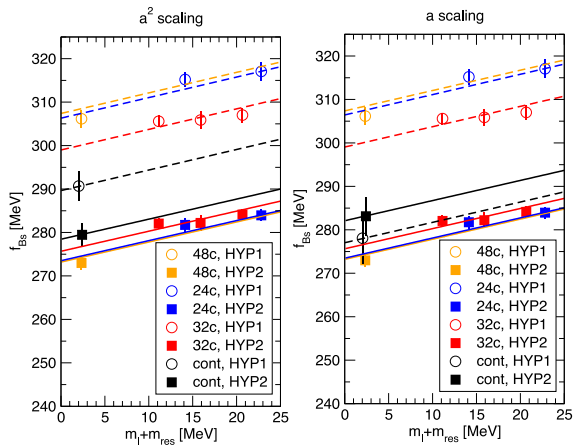


図 2 f_{B_s} のカイラル・連続極限外挿

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、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 スケーリングと a スケー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。

B_s 量に対する旧計算からの改善は、

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

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

である。ここでは統計誤差のみ示している。カイラル・連続極限外挿後の統計誤差は旧結果の半分程度に縮まっているが、さらに重要な点は高統計により、より信頼できる解析が行えるようになったことである。

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。

5. 今後の計画・展望

ξ 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: RBC/UKQCD コラボレーションが生成した物理パイ中間子質量点での動的ドメインウォール・フェルミオンのゲージ配位により計算を行う。格子サイズ $48^3 \times 96$ と $96^3 \times 128$ であり、格子サイズはこれまでの 2 倍である。本年度は B_s 量の計算を $48^3 \times 96$ の配位上で計算したが、 B_d 量に対しては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、十分計算が可能になっている。
- (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。

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., 33rd 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., 33rd International Symposium on Lattice Field Theory - LATTICE 2015, Kobe International Conference Center, Kobe, July 14 - 18, 2015.