

格子 QCD による K 中間子崩壊振幅の研究

Calculation of K meson decay amplitude from lattice QCD

石塚 成人

筑波大学 計算科学研究センター

1. 研究目的

格子 QCD の最近の進歩は目覚ましいものがある。しかし、一方で昔からの未解決問題で、かつ標準模型の検証において極めて重要な問題が残されている。K 中間子崩壊での CP 非保存パラメータの理論からの予測である。この問題では、K 中間子が二つの π 中間子に崩壊する過程の崩壊振幅の計算が必要である。崩壊過程には、終状態のアイソスピンが $I=0$ と $I=2$ の二つの場合があり、それぞれの崩壊振幅を A_0 と A_2 と呼ぶ。これら両方の振幅の計算が必要であるが、 A_0 の計算が極端に難しく、問題が未解決のまま残っているのである。

上記の背景のもと、本プロジェクトの目的は、格子 QCD による数値計算により、CP 非保存パラメータを求め、素粒子標準模型における CP 非保存現象の理解を確立することである。本プロジェクトは、2015 年度からはじまった継続プロジェクトである。2018 年度には、目標統計数に達し最終的な値を求めた。CP 非保存パラメータの我々の結果は以下である： $\text{Re}(\epsilon'/\epsilon) = (1.9 \pm 5.7) \times 10^{-3}$ (実験値： $(1.66 \pm 0.23) \times 10^{-3}$)。我々の結果は実験値と矛盾しない。しかし、大きい統計誤差をもっており、有限の答えが得られていない。標準模型の検証のためには、統計誤差を小さくする必要がある。2020 年度本研究では、統計誤差を抑える新しい計算方法の開発を行う。具体的には、Laplace Heaviside smearing (LapH) 法を、K 中間子崩壊での外線のハドロン演算子に使うことを考え、試験計算を行った。この方法は、ハドロン散乱の研究では広く用いられているが、崩壊振幅のような弱行列要素の計算にはこれまで使われていなかった。

2. 研究成果の内容

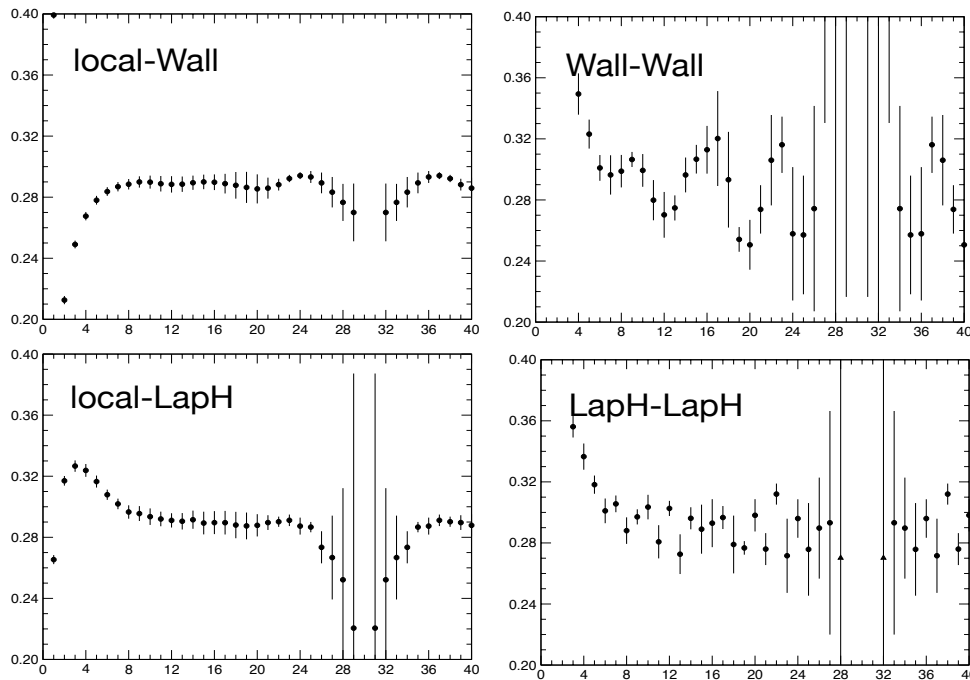
LapH 法の K 中間子崩壊における有効性を調べるために、二体 π 中間子系における行列要素 $\langle 0 | \pi \pi | \pi \pi \rangle$ を $I=2$ の場合について計算し、往來の方法と比較した。崩壊振幅の統計ゆらぎの大部分はこの部分から発生していると考えられる。計算は 2018 年度行った崩壊振幅の計算でのパラメータのもとで行った。具体的には、格子間隔 0.09fm、格子サイズ 4.6fm、 π 中間子質 250MeV、K 中間子質量 560MeV である。統計数は 40 とした。二体 π 中間子の状態は崩壊振幅の計算に合わせ $\pi(p) \pi(0)$ ($p=2\pi/L$) とした。

LapH 法を外線の二体 π 中間子に以下のように用いる。はじめに時刻 t でのゲージ場を含んだ共役 Laplacian を考え、これの固有ベクトル $V(x, t; p)$ を計算する。ここで、 x : 空間座標、 t : 時刻、 p : 固有ベクトルのラベルである。固有ベクトルは固有値の小さい順に計算する。本研究では 320 個の固有ベクトルを用いた。これを用いてクォーク場 q を、空間座標 x についてスメアリングし、新たなクォーク場 Q を作り、それを使って π 中間子の演算子 π を作る：

$$Q(t; p) = \sum_x V(x, t; p) q(x, t), \quad \pi(t) = \sum_{p=1}^N \bar{Q}(t; p) \gamma_5 Q(t, p)$$

計算コストは、これまで採用してきた Wall source の 4 倍である。従って、統計誤差が 1/2 以下になった場合、LapH が有効性であることになる。

下図は、二体 π 中間子の有効質量の計算結果である。有効質量 $m(t)$ は、時間相関関数 $G(t)$ から $m(t) = \log(G(t)/G(t+1))$ で定義される量であり、 t が大きいところで一定値をとり、その値がその系のエネルギーの値に相当する。



4つの図のレジェンドA-Bは、演算子Aを時間tに配置し、演算子Bを時間t=0に配置した場合の相関関数を意味する。演算子は以下の3つを用いる。

- local: もととのクォーク場 :q で作った演算子、
- Wall: wall source、
- LapH: LapH スメアリングで作った演算子。

これらの3つの演算子を使って、図の4つの時間相関関数を計算した。行列要素 $\langle 0 | \pi \pi | \pi \pi \rangle$ は以下のように計算できる。有効質量が一定値をとっている時刻領域から、振幅Aを時間相関関数G(t)から $G(t) = A \exp(-mt)$ の形でフィットして求める。4つの相関関数の4つの振幅Aが得られるが、Wall sourceの場合、 $\langle 0 | \pi \pi | \pi \pi \rangle = A(\text{local-Wall})/A(\text{Wall-Wall})^{1/2}$ から行列要素が計算できる。同様にLapHの場合は、 $\langle 0 | \pi \pi | \pi \pi \rangle = A(\text{local-LapH})/A(\text{LapH-LapH})^{1/2}$ である。我々の得た行列要素の結果は以下である。

$$\text{Wall} : (6.935 \pm 0.067) \times 10^4, \quad \text{LapH} : (6.936 \pm 0.051) \times 10^4$$

これから、LapHを用いた場合の方が、統計誤差が小さいことが分かる。しかし、その効果は統計誤差を1/1.3倍小さくする効果でしかない。LapHでの計算コストが4倍であることを考えると、これはLapHは有効ではないことを意味する。K中間子崩壊振幅の統計ゆらぎの大部分はこの部分から発生するので、崩壊振幅の計算に対しても有効ではないと考えられる。

今回の計算により、散乱状態の研究に広く用いられているLapHが、崩壊振幅の計算には有効ではないことが判明した。従って、異なる新しい計算方法を考える必要がある。これから崩壊振幅のみならず、他の弱行列要素の計算についても同様であると推察される。

3. 学際共同利用が果たした役割と意義

格子QCDによる第一原理計算に基づく大規模計算は、素粒子標準模型におけるCP非保存現象の研究の上で非常に重要である。学際共同利用は、このような大規模計算を必要とする研究者にとって、研究を推進する上で貴重なプログラムである。

4. 今後の展望

今回の計算では、LapH が、崩壊振幅の計算には有効ではないことが判明した。そのため今後の計算では、これまで用いてきた Wall source 法を用いて、統計数を増やすことで統計誤差を小さくする方向で研究を行う。そのためのゲージ配位が大量に必要となる。配位生成は 2020 年 10 月より開始し、プロジェクト終了時に目的の 1/8 の配位が生成できた。

5. 成果発表

- (1) 学術論文 なし
- (2) 学会発表 なし
- (3) その他 なし

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	○	240,000	

※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。