

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

現在、格子 QCD では、計算機の計算能力および計算アルゴリズムの進歩により、現実のクォーク質量でのシミュレーションが可能となっている。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 $\Delta I=1/2$ 則の解明と、CP 非保存パラメータの理論からの予測である。これらの問題の解決には、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。先の問題の場合、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、先の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、 A_0 と A_2 の両方の崩壊振幅を、格子 QCD により数値計算し、未解決問題である $\Delta I=1/2$ 則の研究、および 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。2019 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

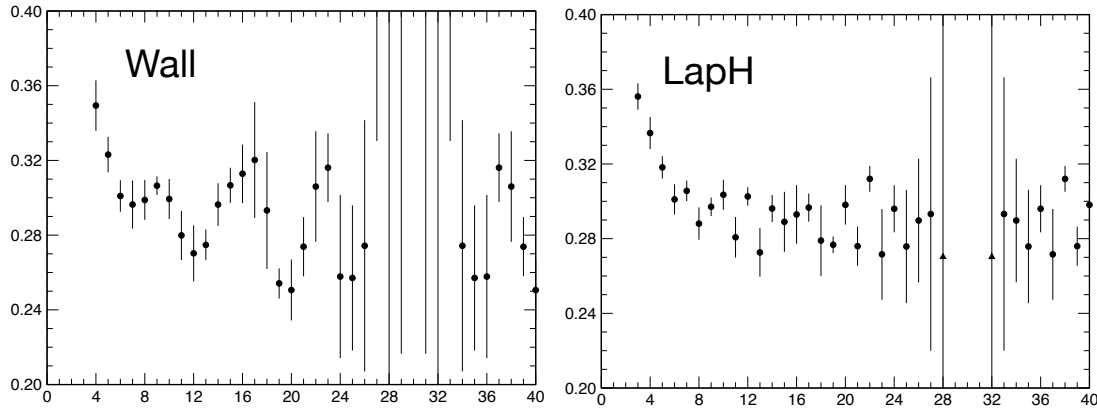
LapH 法の K 中間子崩壊における有効性を調べるために、二体 π 中間子系における行列要素 $\langle 0 | \pi \pi | \pi \pi \rangle$ を $I=2$ の場合について計算し、往來の方法と比較した。崩壊振幅の統計ゆらぎの大部分はこの部分から発生していると考えられる。計算は 2018 年度行った崩壊振幅の計算でのパラメータのもとで行った。具体的には、格子間隔 0.09fm、格子サイズ 4.6fm、 π 中間子質 250MeV、K 中間子質量 560MeV である。統計数は 40 とした。二体 π 中間子の状態は崩壊振幅の計算に合わせ $\pi(p)\pi(0)$ ($p=2\pi/L$) 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 $V(a, x, t; p)$ を計算する。ここで、 a : カラー、 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。これから以下の量を計算し、これをスメアリング関数として、 π 中間子の中のクォーク場を、カラー a と空間座標 x についてスメアリングする。

$$W(a, x, t; s, r) = \sum_{q=1}^{N_l} V(a, x, t; s + q \cdot N_l) E(s; r)$$

ここで $E(s; r)$ は各 s での乱数で、そのランクが r であることを意味する。本研究では、 $N_l=16$ 、 $s=[1, 20]$ 、 $r=[1, 2]$ とした。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を意味する。

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。左図はこれまで用いてきた Wall source の結果であり、右図は今回採用した LapH の結果である。図から分かるように、LapH の方が統計ゆらぎが少ないことが分かる。



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、行列要素 $\langle 0 | \pi \pi | \pi \pi \rangle = \sqrt{A}$ を求めた。以下がその結果である。

$$\begin{aligned} \text{Wall} & : (6.935 \pm 0.067) \times 10^4 \\ \text{LapH} & : (6.936 \pm 0.051) \times 10^4 \end{aligned}$$

これから、LapH 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同様に有効ではないと考えられる。従って、異なる新しい計算方法を考える必要がある。

3. 学際共同利用が果たした役割と意義

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。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。これは、これからの物理的に重要な量を格子 QCD 計算するさいに、大きな情報を与えると思われる。

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。新しい計算法として、LapH と他のスメアリングを組み合わせた演算子を使うことが考えられる。いくつかの候補があるが、そのひとつがクォークの伝搬関数を重いモードと軽いモードにわける方法がある。計算法を組み合わせる最良の方法を探ることが次の課題である。

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	○	225,000	
※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。			