

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

素粒子標準模型には昔からの未解決問題で、かつ素粒子標準理論の検証において極めて重要な問題が残されている。それは、中性 K 中間子系の直接的 CP 非保存パラメータの理論からの予測である。この問題の研究には K 中間子の崩壊振幅を精度良く求める必要がある。本プロジェクトの最終目標は、K 中間子崩壊振幅を格子 QCD により第一原理から計算し、CP 非保存パラメータを標準模型から求め、それを実験値と比較することにより、標準模型における CP 非保存を深く理解することである。

本プロジェクトは、2015 年度からはじまられ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。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、計算は実際のクォーク質量より重い場合で行われたものであり、次のステップとして、現実の質量での計算が求められる。2021 年度プロジェクトでは、現実クォーク質量での K 中間子崩壊の計算に向けての準備研究を行う。

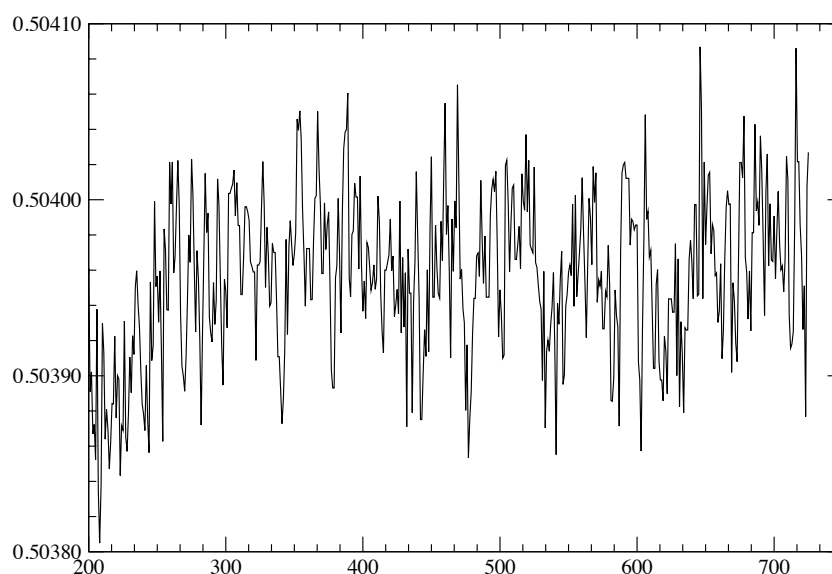
2. 研究成果の内容

本プロジェクトでは、現実クォーク質量での K 中間子崩壊を考えた。格子 QCD のパラメータは以下である：格子サイズ $48^3 \times 96$ 、格子間隔 0.09 fm、物理体積 $4.0^3 \times 8.0 (fm^4)$ 、 π 中間子質量 140 MeV、K 中間子質量 490 MeV。

往來の崩壊振幅の研究では、格子上のフェルミオンとして、カイラル対称性を保つ定式化である「ドメインウォール・フェルミオン」が用いられたが、本プロジェクトでは、「ウイルソン・フェルミオン」を用いた。一般には、ウイルソン・フェルミオンを用いた場合、カイラル対称性の破れにより、非物理的な演算子への混合が起こり、物理量を求めるのが困難になる。しかし、K 中間子崩壊の場合には、この様な演算子混合が起きず、計算上の困難はないことを、我々の先行研究によって確立された。必要な計算時間は、ウイルソン・フェルミオンの場合の方が圧倒的に少ない。従って、限られた計算時間内で統計数を大きくし、統計誤差を小さくできる可能性がある。

崩壊振幅の計算では高統計の計算を必要とする。そのため今回の課題では、研究の第一段階として、崩壊振幅の計算に必要なゲージ配位を効率よく生成するプログラムの開発と、そのプログラムを用いたゲージ配位生成を行った。この配位を使った崩壊振幅の計算は、次期以降の課題で行うこととした。配位生成プログラムでは、クォーク質量が軽い場合にも動作する最新のアルゴリズムである領域分割 HMC 法を使った。

下図は、今回行った配位生成の履歴である。縦軸は格子間隔の 4 乗をかけ無次元化したゲージ作用の値、横軸はシミュレーションのモレキュラーダイナミック時間 (MD time) である。



配位生成におけるゲージ作用の値の変化。
横軸はモレキュラーダイナミクス時間 (MD time)。

初めの MD time < 300 の部分は系全体がまだ平衡状態に達していないため、作用が小さい値をとっている。それ以降は中心値の周りに熱揺らぎをしており、平衡状態に達していることがわかる。ゲージ配位は MD time=10 毎にセーブし、崩壊振幅の計算に使われる。従って、今回の計算では 40 個のゲージ配位が生成された。崩壊振幅の計算にはおおよそ 100 個の配位が必要であると考えられるので、まだ配位数が十分ではない。今後のプロジェクトにおいて、必要な配位を生成し、崩壊振幅の計算を行う予定である。

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

今回の課題では崩壊振幅の計算の第一段階として、崩壊振幅の計算に必要なゲージ配位を効率よく生成するプログラムの開発と、そのプログラムを用いたゲージ配位生成を行った。プログラム開発は成功し、期待通りの計算効率を得ることができた。今回生成された配位を用いて、次期以降の課題において崩壊振幅の計算を行う予定である。

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	○	206,550	
※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。			