

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。ハドロン質量は誤差数%で求められており、標準模型の未知定数の一つであるクォーク質量の精密決定が出来るようになってきた。この様に格子 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。計算が難しい理由は、“非連結グラフ”と呼ばれるダイアグラムが存在するからである。このダイアグラムが非常に大きい統計ゆらぎを発生させ、統計誤差を非常に大きくし計算を困難にするのである。

上記の背景のもと、本プロジェクトの目的は、 A_0 と A_2 両方の K 中間子崩壊振幅を、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、平成 23 年度からはじまった継続プロジェクトである。実際の崩壊過程では、K 中間子は有限運動量をもつ π 中間子へ崩壊する。平成 23-26 年度は、ゼロ運動量の π 中間子へ崩壊する非物理の場合について考え、計算の最大の障壁になっている非連結ダイアグラムの計算方法の開発を行った。そして、その場合について崩壊振幅を求めた。平成 27-28 年度は、研究を有限運動量の場合に拡張し、より信頼性の高い崩壊振幅を求める事を考え、この状況下での崩壊振幅の計算方法を開発し、試験計算を行った。平成 29 年度では、試験計算を基に崩壊振幅の本格計算を開始した。平成 30 年度では、計算を更に進め目標統計数に達し、最終的な値を求めた。

2. 研究成果の内容

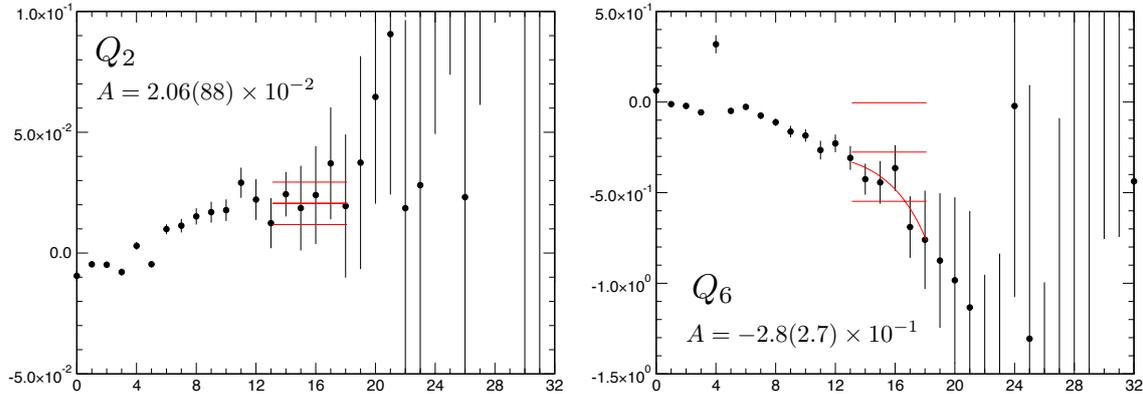
本研究では、これまで行ってきたゼロ運動量の場合の計算を、有限運動量の場合に拡張し、より信頼性の高い崩壊振幅を求める事を考えた。計算は、格子間隔 0.09fm 、格子サイズ 4.6fm 、 π 中間子質 250MeV 、K 中間子質量 560MeV のもとで行う。崩壊振幅は、崩壊過程： $K(p) \rightarrow \pi(p)\pi(0)$ について計算する。ここで $p=2\pi/L$ は考えている格子上で許される最低の運動量である。これは、崩壊過程： $K(0) \rightarrow \pi(p/2)\pi(-p/2)$ を考えることと同じである。

非連結ダイアグラムには、弱演算子のところで、クォークが同じ位置に戻ってくるクォークループが存在する。このクォークループの統計揺らぎが、非連結ダイアグラムの大きい統計揺らぎの原因の一つになっている。クォークループの計算には、ゼロ運動量の場合に有効であった二つの方法：ホッピングパラメータ展開法、不完全収束法を用いて計算した。有限運動量をもった K 中間子と π 中間子には、運動量ウォールソース演算子を用いた。更に統計精度上げる為に、オールモードアベレージ法を用い、全時間平均をとった。

平成 28 年度研究では、これらの計算法を組み見込んだ計算コードを開発し、統計数 $=200$ までの計算を行い、計算効率と崩壊振幅の統計揺らぎの大きさを調べた。平成 29 年度は、試験計算をもとに本格的な計算を実行した。この計算は平成 30 年度も継続して行

われ、目標の統計数である 1000 に達し、**K** 中間子崩壊振幅の最終的な値を求めた。

下図は、アイソスピン $I=0$ の $\pi\pi$ 状態に崩壊する過程の時間相関関数である。左図は演算子 Q_2 、右図は Q_6 の寄与である。横軸は格子間隔を単位とした時間 t を表し、**K** 中間子は $t=27$ 、 π 中間子は $t=4$ に固定されており、弱演算子の時間 t を動かした。 $t=13-18$ 領域の一定値の部分が崩壊振幅を与える。図では定数フィットで求められた振幅 A の値と、フィットの中心値とエラーが赤い線で示されている。



計算された崩壊振幅から、係数間数を掛けて求めた物理的な崩壊振幅は以下である。

$$\begin{aligned} \text{Re } A_0 &= (51.3 \pm 27.5) \times 10^{-8} \text{ GeV} \\ \text{Re } A_2 &= (2.431 \pm 0.019) \times 10^{-8} \text{ GeV} \end{aligned}$$

また、直接的 CP 非保存パラメータの結果は以下である。

$$\text{Re}(\varepsilon' / \varepsilon) = (1.94 \pm 5.72) \times 10^{-3}$$

直接的 CP 非保存パラメータに関しては、実験値 $(1.66 \pm 0.23) \times 10^{-3}$ と矛盾しない結果が得られた。これは、素粒子標準模型が実験を再現したことを意味し、一定の成果を得ることができた。しかし、我々の結果は 300% 以上の大きい統計誤差をふくみ、有限値を求めることができていない。標準模型の精密検証、および素粒子標準模型における CP 非保存現象の理解のためには、更に統計をあげ、有限値を得る必要がある。そのためには、統計誤差を現在の 1/5 以下にする必要があるが、現在用いている計算方法では約 25 倍の統計数が必要である。これを達成するのは非常に難しい。従って、新たな計算方法が必要である。

現在新しい計算法として我々が有力視しているのは、**LapH smearing** 法である。この **smearing** 法は、ハドロン散乱の研究に多く用いられ、これまで求められなかったハドロン散乱の物理量が計算されてきている。**K** 中間子崩壊過程では、終状態はハドロンの散乱状態であり、この **smearing** が有効であるはずである。現在、この方法の有効性を調べるため、プログラム開発と試験計算を行っている。

3. 学際共同利用として実施した意義

直接的 CP 非保存パラメータに関しては、実験値と矛盾しない結果が得られた。これは、素粒子標準模型が実験を再現したことを意味し、一定の成果を得ることができた。**K** 中間子崩壊には、解決できていない重要な問題があり、その問題に多くの計算手法によりアプローチすることは、素粒子物理のみならず、学際的計算科学の発展に貢献できたのではないかと考えている。

4. 今後の展望

直接的 CP 非保存パラメータに関しては、実験値と矛盾しない結果を得た。これは、素粒子標準模型が実験を再現したことを意味し、一定の成果である。しかし、更に標準模型の精密検証、および素粒子標準模型における CP 非保存現象の理解のためには、更に統計をあげ、有限値を得る必要がある。それには、現在の方法より更に統計誤差を小さくできる新しい計算方法が必要である。新しい計算方法として **LapH smearing** 法が考えられる。現在、この新しいアイディのもと、プログラム開発と試験計算を行っている。

5. 成果発表

(1) 学術論文 1

Calculation of $K \rightarrow \pi\pi$ decay amplitudes with an improved Wilson fermion action in a nonzero momentum frame in lattice QCD,

N.Ishizuka, K.-I.Ishikawa, A.Ukawa, T.Yoshie,

Physical Review D 98, 114512 (2018)

(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
COMA	○	57,000	
Oakforest-PACS	○	305,000	

※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。