

格子 QCD を用いた現実的クォーク質量近傍でのハドロン物理量測定

Calculation of physical quantities of hadrons near physical quark masses from lattice QCD

山崎 剛

筑波大学数理物質系

1. 研究目的

筑波大学の格子 QCD グループ (PACS Collaboration) では、現実的なクォーク質量かつ、一辺が 10fm を超える大体積の計算から、格子 QCD に含まれる主要な系統誤差を全て除いた物理量を求める、PACS10 プロジェクトを実行している。最終的には異なる格子間隔 3 点でのゲージ配位「PACS10 配位」を生成する計画であり、現在までに最も格子間隔の小さいゲージ配位以外は生成が終了している。これら既存のゲージ配位を用いて、格子 QCD の大きな目的の一つである実験値の再現へ向けた研究が進められ、これまでに基本的な物理量であるハドロン質量や崩壊定数について高精度の結果が得られている。

本プロジェクトではこの PACS10 配位を用いて、強い相互作用の第一原理計算である格子 QCD からハドロンの内部構造を解明することを目的とした研究を行った。この研究は軽原子核の内部構造の研究へ向けた基礎研究という位置付けでもある。

2. 研究成果の内容

昨年度までの計算では、パイ中間子、K 中間子の内部構造に関する電磁氣的形状因子を、2 種類の格子間隔の PACS10 配位、(格子サイズ,格子間隔)=(128⁴,0.085 fm), (160⁴,0.065 fm)を用いて計算した。これにより得られた荷電半径は、有限格子間隔による系統誤差が小さく、実験値ともよく一致した。しかし、この結果は電磁氣的形状因子の運動量移行 q^2 依存性に特定の関数を仮定した解析によって得られていた。荷電半径の精密決定のためには、この仮定による系統誤差を取り除くことが望まれる。

令和 3 年度は、特定の関数を仮定しない荷電半径の計算方法について研究を進めた。荷電半径は電磁氣的形状因子の $q^2=0$ での傾きにより定義されているため、電磁氣的形状因子の微分が計算できれば、荷電半径を直接求めることができる。一般的な格子 QCD 計算では、運動量が体積の逆数に比例して離散化されているため、連続的に運動量移行を動かすことができず、微分を差分により評価したとしても大きな系統誤差が含まれてしまう。

本研究では、2020 年に提案された電磁氣的形状因子の微分を直接計算する方法を基

にして、その方法の試験的計算を比較的重いパイ中間子質量 0.51 GeV を用いて行った。この試験計算により、2020 年に提案された方法では有限体積効果が含まれてしまう場合があり、荷電半径の値が過小評価される可能性があることがわかった。そこで、この有限体積効果を抑える方法の改良案について研究した。

図 1 に示したのが改良前(紫色)と、改良後(黄色)の解析結果の比較である。改良前の結果でも、参照値としたモデルを仮定した解析結果(横実線)に近い値が得られているが、統計誤差を超えて過小評価になっている。一方、改良後の結果は改良前と比べ大きな値になり、参照値と一致する結果となった。これ以外にも、類似の微分を直接計算する方法を考案し、全てで良く一致する結果が得られた(図 2)。

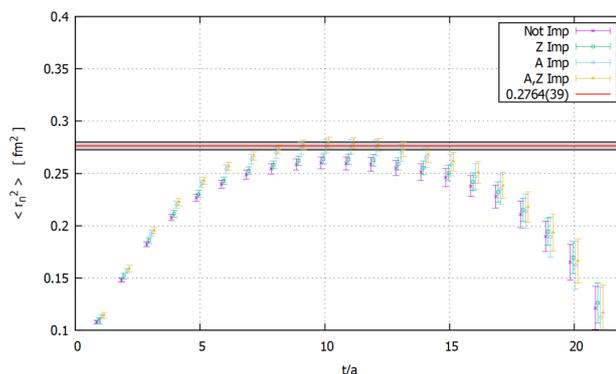


図 1 パイ中間子荷電半径の結果。紫色が改良前の結果。黄色が全ての改良を加えた結果。横線はモデルを仮定した参照値。

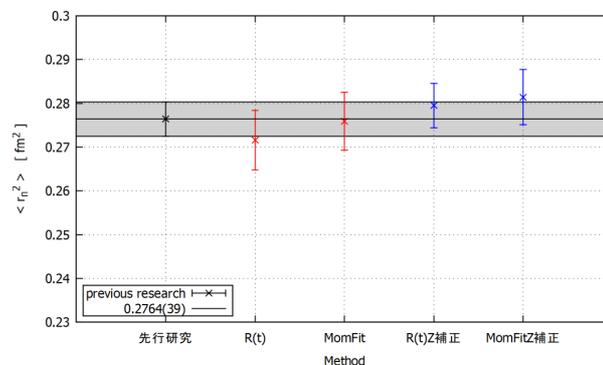


図 2 パイ中間子荷電半径解析結果の比較。赤青印は改良を加えた方法による結果。灰色帯はモデルを仮定した参照値。

3. 学際共同利用が果たした役割と意義

本プロジェクトで実施した大規模

格子 QCD シミュレーションには、膨大な大型並列計算機資源が不可欠であり、学際共同利用で配分されたリソースにより実施することが可能になった。

4. 今後の展望

パイ中間子、K 中間子電磁的形状因子は、PACS10 配位による 2 種類の格子間隔での結果が揃ったので、格子間隔起因の系統誤差を含め種々の系統誤差評価を実行したのち、研究成果を論文としてまとめる。直接微分計算方法については、異なるパラメータでの計算を追加した後、研究成果を学術論文としてまとめる。また、直接微分法を用いた PACS10 配位での計算を実行し、従来の方で得られた荷電半径の結果との比較から、モデルを仮定したことによる系統誤差の大きさを調査する。

5. 成果発表

- (1) 学術論文
- (2) 学会発表

(3) その他

修士論文：佐藤航平、筑波大学、修士(理学)、「格子 QCD による形状因子の計算法に関する基礎研究と π 中間子荷電半径の計算」

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	○	15,000	
Oakforest-PACS	○	255,000	76,500
※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。			