

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。現在は Oakforest-PACS を用いて、最後のゲージ配位を生成中である。これら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実験値と良い一致を示す結果が得られている。

本プロジェクトでは 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 から軽原子核の性質及び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。これらの研究は軽原子核の内部構造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

(1) パイ中間子, K 中間子電磁的形状因子

パイ中間子, K 中間子の内部構造に関する電磁的的形状因子を、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。図 1 にパイ中間子形状因子の中間結果を示す。運動量移行が小さい領域では、2 つの格子間隔の結果がよく一致しており、有限格子間隔による系統誤差が小さいと期待できる。また、我々の結果は荷電半径の実験値を用いて予測される形状因子ともよく一致した。

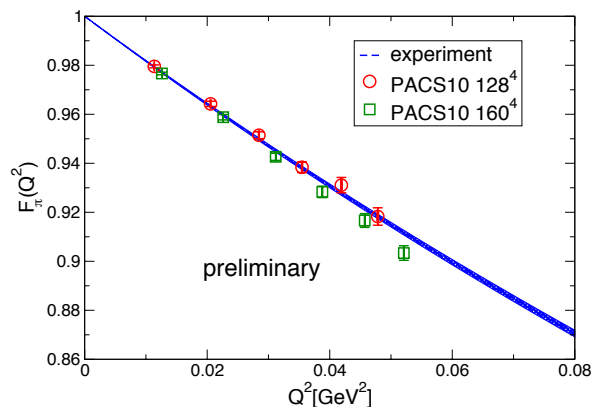


図 1 パイ中間子電磁的の形状因子の結果。赤印と緑印が本研究課題での中間結果。青線は荷電半径の実験値を用いた形状因子。横軸は運動量移行の二乗。

一方、K 中間子形状因子は、各格子間隔で実験値よりも統計精度が良い結果が得られた。この結果から、連続極限での結果も実験値よりも高精度の結果が得られると期待できる。

(2) 軽原子核直接計算

現実よりも重いクォークを用いた軽原子核の試験的計算では、実験値よりも大きな束縛エネルギーが得られていた。この主要な原因は、計算に用いたクォーク質量が大きいためと考えられる。そこで、現実のクォークと同程度の質量を用いた計算から、実験値を再現できるかの検証を目的とした計算を近年継続している。軽原子核計算は、典型的な格子 QCD 計算よりも多くの計算機資源が要求されるうえに、現実のクォーク質量では統計揺らぎが大きくなり、統計誤差を抑えることが非常に難しい。これまでの現実的クォーク質量近傍の計算から、重陽子の束縛エネルギーについて、有限体積効果を含めた実験値を大きな誤差ではあるが再現することができた。しかし、統計誤差を格段に小さくするためには、これまでと同じ計算方法では難しいため、計算コード高速化と計算方法の改良を行った。また、計算方法の改良については、核子励起状態に対する演算子を含めた計算のための演算子選定を行なった。

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 中間子電磁的形因子は、二種類の格子間隔での結果がほぼ揃ったので、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。軽原子核直接計算については、計算方法の改良について継続した研究を行っていく。

5. 成果発表

(1) 学術論文

T. Yamazaki and Y. Namekawa, “Two-pion scattering amplitude from Bethe-Salpeter wave function at the interaction boundary”, Proceedings of Science(LATTICE2019), 032.

(2) 学会発表

(3) その他

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	○	36,000	
Oakforest-PACS	○	1,000,000	
※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。			