

課題名 (タイトル) :

## 格子理論を用いた素粒子現象論の研究

利用者氏名 : 新谷栄悟

所属 : 和光研究所 仁科加速器研究センター 理研BNL研究センター理論研究グループ

## 1. 本課題の研究の背景、目的、関係するプロジェクトとの関係

本研究課題では、格子QCDを用いた非摂動計算によって従来の摂動論では解明できなかった強い相互採用(主に核力相互作用)がダイナミクスを決定する系について理論的解析を行うことを目的とする。核力相互作用はQCDによって記述可能であることが高エネルギー実験と摂動論的QCDの予想との一致から裏付けられていたが、低エネルギーにおけるハドロンの振舞もQCDに従うことは格子QCDを用いたスペクトラムなどの計算によるところが大きい。一方、昨今の実験技術の向上によって、従来の物理量が高精度で測定されており、標準理論では説明できない理論と実験とのギャップが実験誤差を超えて見え始めている。また、LHC実験などの超高エネルギー実験によって標準理論には含まれていない新しい現象を模索する取り組みも行われている。これらの実験で観測された結果が標準模型から量的にどれだけズレが生じているかを説明するには、理論結果に含まれている系統誤差を極力排除する必要がある。本研究において、理論の系統誤差の大部分を占めるQCD効果を計算機を用いた第一原理計算によって厳密に求めることで、新しい物理現象の兆候を探っていく。

## 2. 具体的な利用内容、計算方法

格子QCDでは経路積分を数学的に厳密な形で求めるために計算機を用いた数値積分を行う。重み付きランダムサンプリングを生成して統計平均することで確率解釈として物理量の具体的な数値を決定することができる。したがって、統計量がこの計算においては非常に重要である。統計が多ければそれだけ真の値に近づくからである。しかしながら、現実的には有限の機械性能であるため、限られた資源でいかにして効率的に厳密解に近い値を求めるかに労力が注がれる。格子QCDでは、現実の4次元時空間を有限サイズのボックスに切り分けて、その中で粒子場の運動方程式を解いていく。また、隣り合った粒子間の運動も格子間だ

けに限られた不連続にならざるをえない。そのため、現実の連続理論と比べて、有限サイズ効果および格子間隔による系統誤差が新しく生じてしまう。しかしながら、計算機性能の向上とアルゴリズムの改良によって、実験誤差もしくはそれ以下まで抑えることができた最近の研究成果が上がっている。本研究でもアルゴリズムの独自の改良によってさらなる性能向上を目指すことで、理論的不定性が依然大きいU(1)問題に関連した $\eta$ メソンのスペクトラムや強いCP問題に関連した中性子電気双極子モーメントの研究へ繋げていく。

格子上で扱うことができるフェルミオン形式としてカイラル対称性を極力抑えて現実物理を再現しようと試みている。そこで、本課題ではドメインウォールフェルミオンを用いたアルゴリズム改良を試みた。ドメインウォールフェルミオンは4次元のほかに仮想的に5次元方向の自由度を導入することで、カイラル対称性の破れを5次元自由度の大きさに関連させることができる。このフェルミオン形式では従来のものと比べて計算コストがその5次元倍だけ増えるため、アルゴリズム改良は必須である。とくに、フェルミオン運動方程式を解くため多くの逆行列をもとめる必要があり、この部分が最大のネックとなっている。本研究で注目したのは、逆行列を求める共役勾配アルゴリズムに別求めておいた固有ベクトルを使って、ゼロモード付近の固有モードを排除することである。この操作によって逆行列の収束の目安となる条件数を直接減らすことになる。固有値を求めるためのアルゴリズムによるオーバーラップを減らすために、固有値アルゴリズムをチューニングして、全体としてどれだけゲインが得られるかを調べた。

## 3. 結果

まず、共役勾配アルゴリズムが固有モードの排除によってどれだけ計算時間が減少するかを調べた。図1を見るとわかるように、排除する固有モードが多ければその分だけ収束回数が減少していることがわかる。

ここでは格子サイズとして  $24^3 \times 64$  の  $2+1$  フレーバーのドメインウォールフェルミオンがダイナミカルに含まれているゲージ配位上で行った。この結果から 150 個程度の固有値をゲージ配位ごとに 1 回だけ求めておき、共役勾配アルゴリズムを実行するたびに再利用すれば、結果として、ナイーブに行ったときと比較して 4 倍程度のゲインが得られることになる。このときの固有値を求めるオーバーラップはおおよそ 1 回のクォーク伝搬関数を求める程度であった。つまり、ハドロン伝搬関数を多数求める必要のある物理量に対してこの方法は有効であることが分かる。

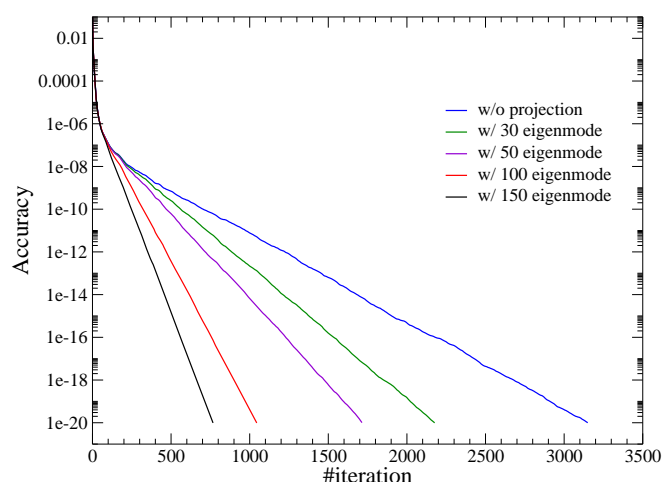


図 1 共役勾配アルゴリズムの収束数（横軸）と精度（縦軸）を表す。

#### 4. まとめ

本研究では格子 QCD を用いた素粒子現象論へのアプローチをより精度よく行うために、格子 QCD において用いられる共役勾配アルゴリズムの改良を試みた。固有モードを取り除くことによって、共役勾配アルゴリズムの収束は 4 倍ほど改善されることが分かった。

#### 5. 今後の計画・展望

この結果をもとに、固有モードを先に計算しておいて後に読みだして計算すれば結果的に 4 倍の統計精度を同じ計算時間で得られることになる。このことから、まず、固有モードを用意されているゲージ配位上ですべて計算させて、ディスクに保存しておけば統計が必要になってあとから追加で計算したいときでも再利用することができる。今後はこの固有モードを用いた改良アルゴリズムを使って統計精度が重要な物理量に応用することを考えている。

#### 6. RICC の継続利用を希望の場合は、これまで利用した状況（どの程度研究が進んだか、研究においてどこまで計算出来て、何が出来ていないか）や、

継続して利用する際に行う具体的な内容

これまでの計算時間によって、計算プログラムのチェックをすることができた。また、固有値を計算するアルゴリズムのチューニングも同時に行うことができた。来年度の計算時間を用いて、このアルゴリズムを実際の格子 QCD の計算に用いて、U (1) 問題や強い CP 問題に対応する物理量の計算に移っていく計画である。

#### 7. 一般利用で演算時間を使い切れなかった理由

今年度の前半では主にプログラムのチェックに費やしたために、後半のみ主に使用していた。RICC の簡易利用の優先度からジョブが走るタイミングが遅いために演算時間を使いきれなかった。

#### 8. 利用研究成果がなかった理由

計算プログラムとパラメータのチューニングの準備に時間を要したため、今年度中に結果には至らなかった。来年度の継続申請の期間において実際の計算に移行する予定である。