

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*, Hyung-Jin Kim**, Thomas Blum***, 出淵 卓**

所属 : *理研BNL研究センター・マインツ大学, **ブルックヘブン国立研究所,***コネチカット大学

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

本研究は素粒子理論における標準模型をもとにした精密な理論計算から、精密な実験値と比較することで新しい物理現象の徴候を掴むことを目的とする。ここで注目する物理量は陽子崩壊に関する行列要素である。これらの物理量は強度フロンティア物理で取り上げられる代表的な物理量であるが、実験的に有意義な値として測定されていない。標準模型の枠内では、理論的に否定される根拠はないにも拘らずこれら物理量が測定されていない理由として、何らかの背後の新しい物理的機構が関わっている可能性が高い。

標準模型を超えた新しい物理機構は幾つか提案されており、これらのモデルは陽子崩壊確率の実験的バンドから未知の理論パラメータの存在領域を予想している。これらの理論パラメータの領域には幾つかの理論的不定性が指摘され、その一つにはQCDからの非摂動的効果がある。陽子崩壊確率の低エネルギーにおける非摂動効果を厳密に取り入れるためには、中性子や陽子を構成するクォーク・グルーオンの力学的振る舞いを考慮した理論計算を実施する必要があるが、現在知られている新しい物理モデル計算ではその非摂動的効果は完全に無視した荒い近似であるために、理論パラメータの不定性は依然として大きい。

そこで本研究では格子QCDを用いた第一原理計算からこれらの不定性を排除した厳密値を求めていくことを目的とする。本研究の成果によって標準模型の枠内で完全な理論計算の値が判明するだけでなく、新しい物理モデルの探索としても有意義である。

2. 具体的な利用内容、計算方法

今年度の計算実行では、AMA (all mode averaging) と呼ぶ新しいアルゴリズムを用いて高統計の陽子崩壊確率の格子QCD計算を試みた。AMAアルゴリズムではディラック演算子の固有モード及びCG法における収束条件を変えることによって、同じ統計精度を得

るために必要となるクォーク伝搬関数の計算時間を劇的に減少させることが可能となる。実際の測定結果から全体の計算時間として10倍ほどの計算効率を実現できている。

陽子崩壊行列の具体的な計算方法は従来の手法に習って行う。格子上における陽子崩壊行列要素ではバリオン数を破る演算子を導入して陽子から擬スカラーへの崩壊形状因子を計算する[Aoki2007,Aoki2013]。ここでは有効モデルを用いることなく直接的に各行列要素の成分を求めることで系統誤差を排除した結果を得ることができる。

上記の計算にはカイラル対称性を保った十分保ったままのかたちで格子上フェルミオンを扱うことができるドメインウォールフェルミオン(DWF)を用いる。このフェルミオン形式では、5次元方向を新しい自由度として導入してその境界で4次元のカイラルフェルミオンが実現される。ただし有限の5次元方向の大きさではカイラル対称性は依然破られているが、十分大きな5次元サイズを用意することによって、その破れの誤差を無視できるほどに抑えることが可能である。このDWFの性質は計算時間が余分に必要となるが、得られる計算結果に予め格子化に伴う系統誤差を除いている分、各解析段階の精度を保つことができる。

格子パラメータとして、 $24^3 \times 64$ 格子サイズで $a^{-1}=1.73 \text{ GeV}$ の $2+1$ フレーバーの動的DWFを含んだゲージ配位上で計算を行った。クォーク質量は $m=0.005, 0.01, 0.02$ を用いた。パイオン質量に換算すると $300-600 \text{ MeV}$ に対応している。5次元方向の大きさは $L_s=16$ としており、カイラル対称性の破れの効果は無視できるほど小さい。固有値計算にはランチョスアルゴリズムにチェビシェフ多項式を用いた加速化を行って効率化を図る。Even-odd 前処理を加えたディラック演算子における固有値と固有モードの計算を $m=0.005$ について400個、 $m=0.01$ について180個の低固有モードを求めた。固有モードはCG法における前処理として deflation と呼ばれるアルゴリズムに用いら

れると共に、AMA法においても統計誤差の減少に重要な役割を果たす。統計数は $m=0.005$ では 91、 $m=0.01$ では 55、 $m=0.02$ では 39 である。この計算では新たに運動量を増やした点のデータも加える。また、陽子演算子の t 方向の位置と π 中間子演算子の t 方向の位置との距離(ここでは t_{sep} と定義する)を 2 通り試すことで、シグナルに含まれる励起状態からの寄与がどの程度かを確認した。用いた演算子間の距離は格子間隔を単位として 22 と 18 である。物理スケールに換算すると 2.5 fm 及び 2.0 fm に対応する。

3. 結果

図 1 に AMA 法を用いた高統計のシグナルをプロットした。格子計算で得られた 3 点関数と 2 点関数の割り算から、各行列要素に含まれる規格化因子を取り除くことで、時間依存性が見えない領域、つまり時間依存性をプロットした時、プラトー領域がシグナルと見なすことができる。この図から、異なる t_{sep} における行列要素のシグナルが統計誤差内でオーバーラップしている領域が励起状態の寄与が無視できる範囲と考えられる。図 1 にプロットしたシンボルの振舞をみると、 $t=13$ から 17 の領域が $t_{\text{sep}}=18$ と 22 の結果が一致しており、プラトー領域に達している。このことからフィット範囲として $t=13-17$ を採用する。 $t_{\text{sep}}=18$ ではシグナルとノイズ比(SN比)がよいため、今後の解析では $t_{\text{sep}}=18$ を用いることにする。特に運動量が大きい領域ほど、統計誤差の減少が顕著になっていることがわかる。これは π 中間子のエネルギーが大きいほど相関関数の SN 比が大幅に改善されるためと考えられる。

図 2 にシグナルとして得られた各チャンネルの行列要素の値を、遷移運動量ごとにプロットした。比較のため、以前に同様のゲージ配位上で得られた結果 [Aoki2013] もプロットした。この比較から統計精度がおおよそ 2 倍から 5 倍に改善している。さらに運動量として $q^2=0.6 \text{ GeV}^2$ の結果も高精度で求めることができる。これらの点を用いれば運動量依存性をフィットして求める際に、フィット点が増えるためにその関数形の信頼性を高めることができる。

図 3 に各クォーク質量における結果をプロットしている。異なるクォーク質量であっても q^2 依存性は大きくないことがわかる。 q^2 依存性は線形的に変化している。これは、物理点への外挿の際にフィット関数の選

び方として、 q^2 及び m に関して線形関数を仮定してカイ 2 乗フィットを実行した結果が誤差バンドとして表している。このときの χ^2/dof は 2 以下となっていることから、線形関数を用いたフィットはデータの再現性がよいと考えられる。

図 5 に外挿した陽子崩壊行列要素の格子計算をまとめた。以前の結果 [Aoki2013] と比較すると統計誤差が 4 分の 1 程度まで減少しており、統計誤差はすべてのチャンネルにおいて 10% 以下に抑えられている。これは AMA 法を用いたことによる大幅な計算効率の向上によるところが大きい。

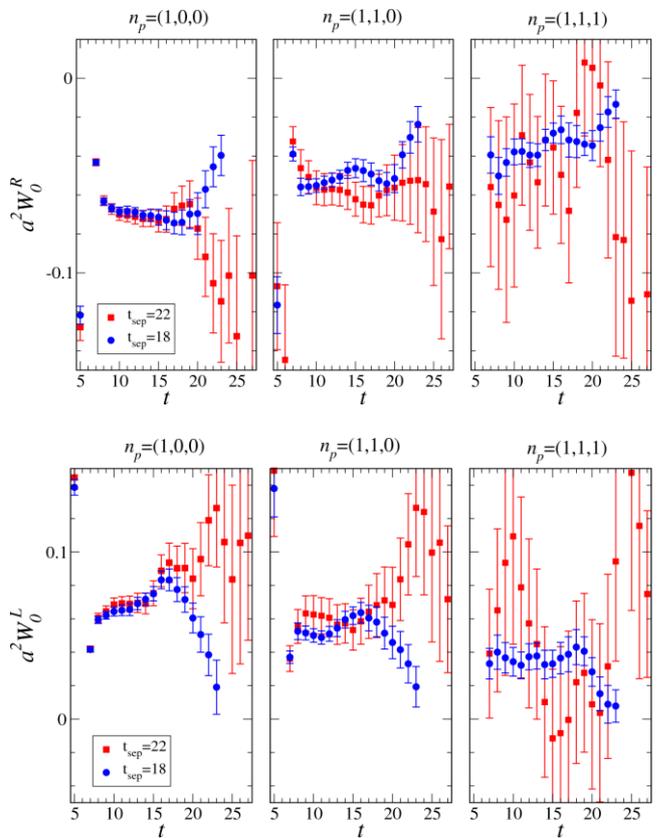


図 1: 陽子崩壊行列要素のうち陽子から π への遷移振幅に対応する形状因子の時間依存性。上図は右巻き、下図は左巻きのカイラリティをもつモードの結果を表す。青塗り丸シンボルは t_{sep} が 18、赤塗り四角シンボルは t_{sep} が 22 の結果である。左図から右図へ運動量を大きくしていった結果を表す。

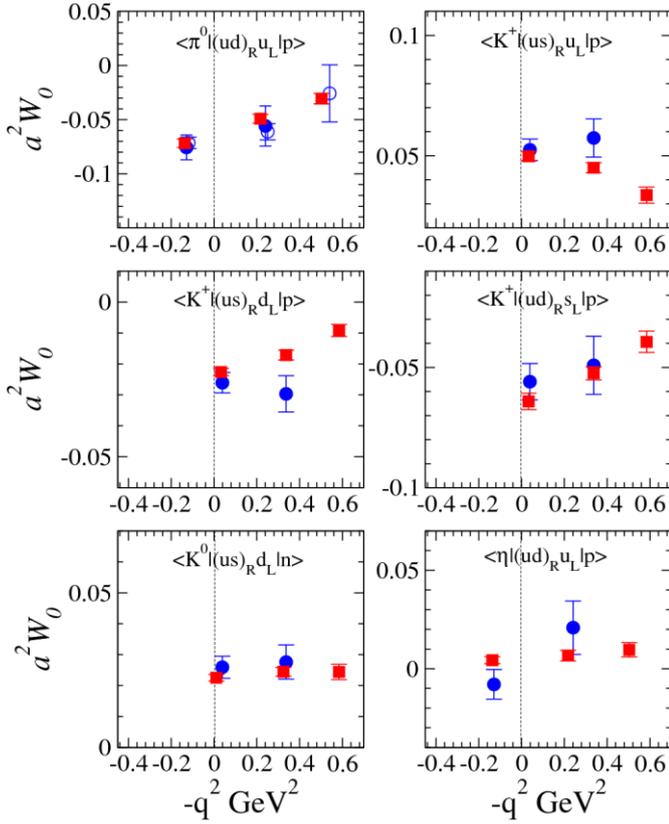


図 2: 各チャンネルへの陽子崩壊行列要素における遷移運動量 (q^2) 依存性。この結果は $m=0.005$ である。青塗り丸シンボルは以前の結果、白抜き丸シンボルは $t_{\text{sep}}=22$ 、赤塗り四角は $t_{\text{sep}}=18$ の AMA 法を用いた結果を表す。

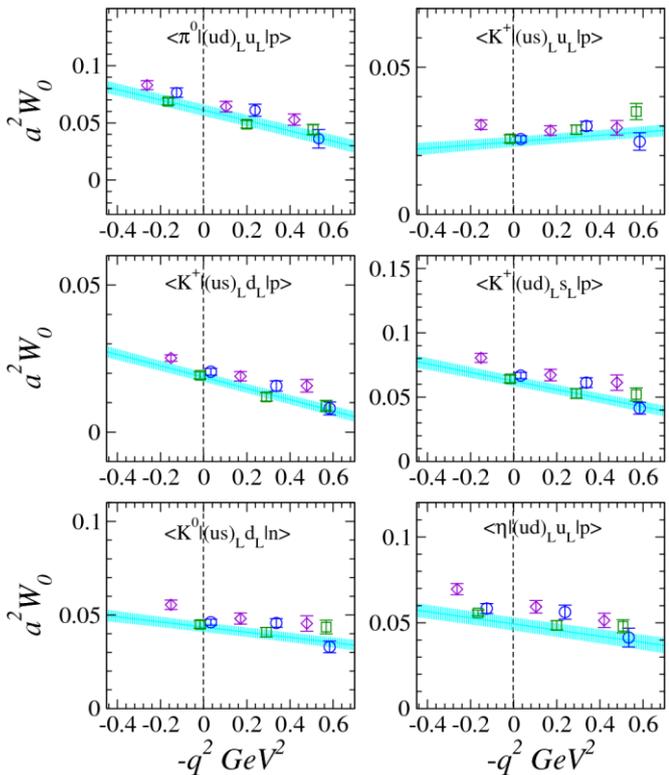


図 3: 各チャンネルへの陽子崩壊行列要素の q^2 依存性と物理点への外挿。異なるシンボルはクォー

ク質量の違いを表している。色塗りのバンドは物理点へフィット外挿した結果を表す。

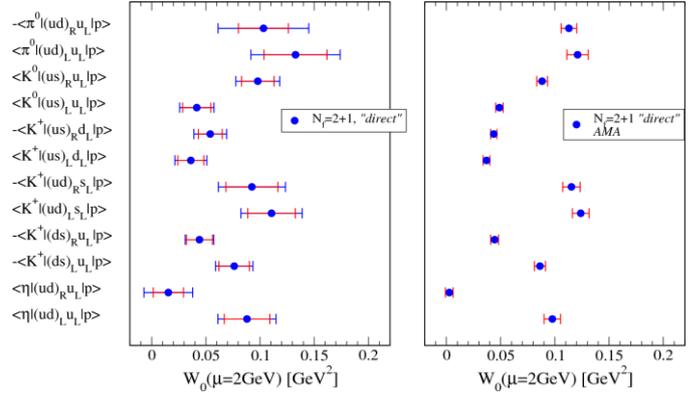


図 4: 物理点における陽子崩壊行列要素の格子計算の結果。左図は以前に得られた同様の結果。右図は AMA 法を用いた高精度計算。赤い誤差棒は統計誤差を表し、青い誤差棒は系統誤差を含めた全体の不定性を表す。

4. まとめ

本研究では陽子崩壊行列要素の各チャンネルにおける形状因子を統計精度 10% 以下まで抑えた計算を実行した。AMA 法を用いた大幅な計算効率の向上を図り、さらに励起状態の寄与を無視できてかつ SN 比を大幅に改善したセットアップのもとで格子計算を実行することで、以前の結果と比較して統計精度を 4 倍以上向上させることに成功した。この結果は、陽子崩壊振幅を幾つかの大統一理論から予言する際に重要なインプットとなる。

5. 今後の計画・展望

今後の計画として、カイラル外挿による系統誤差を注意深く評価するために $m=0.03$ の結果を求めて、より信頼性の高い結果を求めていきたい。この結果 $m=0.005, 0.01, 0.02, 0.03$ の 4 点を用いたカイラル外挿によって、クォーク質量に対して線形関数をフィット関数として仮定した際の系統誤差の評価を、フィット範囲を変化させることで求める。フィット関数に含まれている $0(m^2)$ や $0(mq^2)$ の大きさが系統誤差として考えられるため、これらの項を含んだカイ 2 乗フィットを実行して、その結果と線形フィットの差からその誤差評価を行う計画である。さらに、有限サイズ効果やさらに小さいクォーク質量における値を求めるために、より大きいサイズを持つゲージ配位上でも、同様の計算を実行し

ていく計画である。

6. 利用がなかった場合の理由

現時点では申請した計算時間の 70%以上を使用した。
計算実行は計画通りに進行した。

参考文献 : [Aoki2007] Y. Aoki, C. Dawson, J. Noaki
and A. Soni, Phys. Rev. D75, 014507 (2007).
[Aoki2013] Y. Aoki, E. Shintani, A. Soni, Phys. Rev.
D89, 014505(2014).

平成 25 年度 RICC 利用研究成果リスト

【論文、学会報告・雑誌などの論文発表】

1. Yasumichi Aoki, Amarjit Aoni, Eigo Shintani, “Proton decay matrix elements on the lattice”, Phys. Rev. D89, 014505(2014).
2. T. Blum, T. Izubuchi, E. Shintani, “A new class of variance reduction techniques using lattice symmetries”, Phys. Rev. D88, 094503 (2013).

【国際会議などの予稿集、proceeding】

1. Eigo Shintani, Hyun-jin Kim, Thomas Blum, Taku Izubuchi, “Vacuum polarization function in $N_f=2+1$ domain-wall fermion”, PoS(LATTICE 2013)487.
2. Eigo Shintani, Thomas Blum, Taku Izubuchi, Amarjit Soni, “Neutron and proton EDM with $N_f=2+1$ domain-wall fermion”, PoS(LATTICE 2013)298.

【国際会議、学会などでの口頭発表】

1. “Lattice calculation of proton decay matrix element”, Lattice meet experiment 2013 Beyond the Standard Model, Dec 5-6 2013 at BNL.
2. “Neutron and proton EDMs from the Lattice”, MITP Workshop on Low-Energy Precision Physics, Monday, 23 September 2013 to Friday, 11 October 2013 at MITP - Mainz.
3. “Neutron and proton EDM with $N_f=2+1$ domain-wall fermion”, Lattice 2013, the 31st International Symposium on Lattice Field Theory, Sunday 28th of July to Saturday the 3rd of August 2013.
4. “Vacuum polarization function in $N_f=2+1$ domain-wall fermion”, Lattice 2013, the 31st International Symposium on Lattice Field Theory, Sunday 28th of July to Saturday the 3rd of August 2013.
5. “Proton decay matrix element in lattice QCD”, 2013 International Workshop on Baryon and Lepton Number Violation (BLV2013), April 8-11, 2013, MPIK Heidelberg, Germany

【その他】