

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*、Thomas Blum**、Hyung-Jin Kim***、出淵卓*

所属 :

*和光研究所 仁科加速器研究センター 素粒子物性研究部門 理研 BNL 研究センター 理論研究グループ

コネチカット大学、*ブルックヘブン国立研究所

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中性子電気双極子モーメント (EDM) と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ものであるが、現在のところ有意義な値として測定されたことはない。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、これらのモデルは中性子 EDM と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。中性子 EDM と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取り除い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中性子 EDM と陽

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。

中性子 EDM 及び陽子崩壊行列の具体的な計算方法は従来手法に習って行う。中性子 EDM では核子間に電磁カレントを含んだ行列要素を計算して形状因子を計算する。EDM を求めるために θ 項を含んだ作用をモンテカルロ計算に導入して、CP 変換に対して逆符号を示す形状因子が EDM に対応する。ゼロ運動量極限をとることで格子 QCD を用いた EDM として決定される [Shintani2005]。一方、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]。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

$=0.005, 0.01$ を用いた。パイオン質量に換算すると $300 - 400 \text{ Mev}$ 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。

参考文献：

[Shintani2005] E. Shintani, et al., Phys. Rev. D72, 014504 (2005).

[Aoki2007] Y. Aoki, C. Dawson, J. Noaki and A. Soni, Phys. Rev. D75, 014507 (2007).

3. 結果

まず、AMAアルゴリズムが形状因子の計算においても効果的に働いているかを確認するため、従来知られているソース点をシフトした結果を平均する手法、およびLMA手法を用いてアイソベクター型の形状因子の各運動量においてプロットした結果が図1である。×印が従来の方法で統計数はAMAより2倍ほど多いにも拘らず、統計精度としてAMAが最も良い。計算コストとしても全体的にAMAが優っている。この結果からAMA法によって計算効率が5倍程度向上したことがわかる。すなわち、統計精度として同じ計算時間によって同程度の統計数を得ることがAMA法によって実現されることが分かった。

図2には、EDM形状因子を抜き出すときに必要となる核子伝搬関数のCP対称性を破る項の有効質量をプロットしてある。ソース点はガウス型の smearing を用いている。このプロットはCP対称性を破る係数の前にかかる指数関数部分がどの程度の精度で求まるかを確かめており、AMA法によって非常に良い精度でプラトー領域がわかる。また指数関数因子の値も核子質量と同程度の値が求まっている。このことから、AMA法によってCP対称性を破る項についても効率よく働いていることが分かった。図2にはクォーク質量ごとに有効質量をプロットしているが、どの質量についても同

程度の精度が達成できている。

図3にこれまで得られたEDM形状因子の結果を表す。核子演算子は $t=0$ と $t=12$ にセットして電磁カレントがその間を移動できるようにしてある。図3を見ると明らかに $4 \leq t \leq 8$ の間にプラトー領域が分かる。この間を定数関数によってフィットすれば一つの運動量におけるEDM形状因子の値を得ることができる。

図4にこれまで得られた中性子及び陽子EDMの π 中間子質量依存性をプロットした。また、比較のためこれまで発表されている格子QCDの結果も載せてある。これまでの結果と比べて統計精度が未だに大きく出ているが、 π 中間子質量として最も軽い点について 1σ を超えた結果が得られている。陽子EDMは統計誤差が大きいため有意な結果は得られていない。

陽子崩壊過程については、現在モンテカルロ計算を進めている段階である。AMAアルゴリズムを用いた $m=0.005$ における統計精度の大幅な向上が期待される。また、運動量領域を広げた新しい形状因子の計算も進めている。

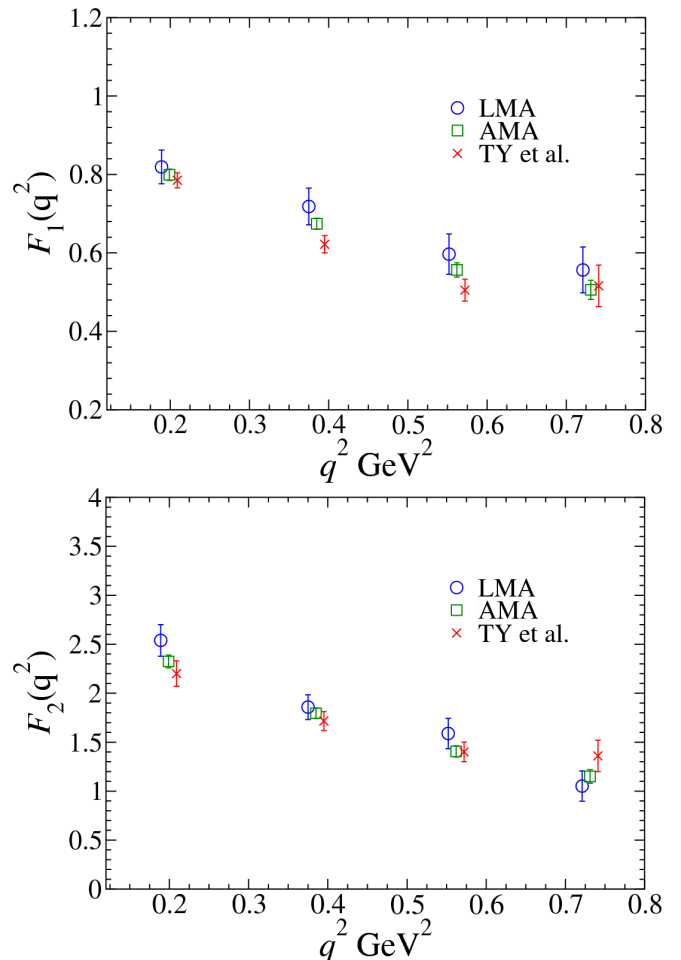


図1：アイソベクター型の核子形状因子、 F_1 (上図)、 F_2 (下図)。

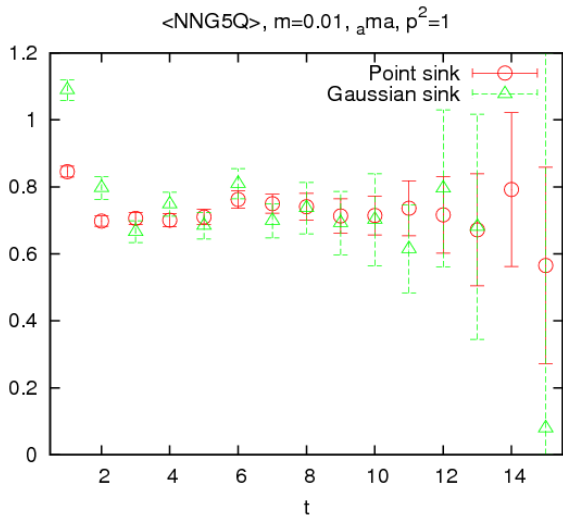
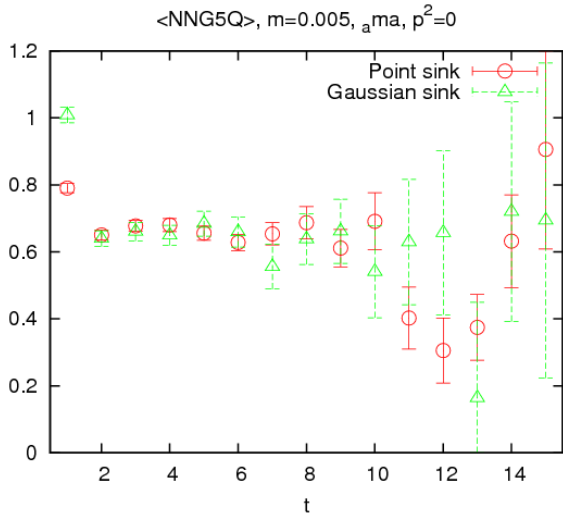


図 2 : 核子伝搬関数の C P を破る項に対応する有効質量プロット。上図は $m=0.005$ 、下図は $m=0.01$ の結果。

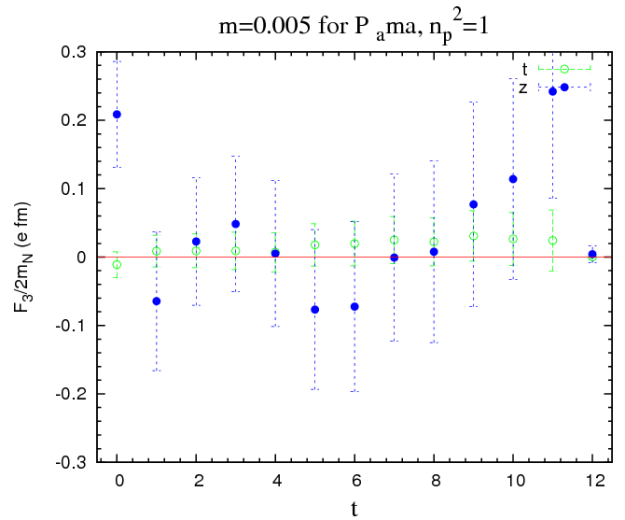
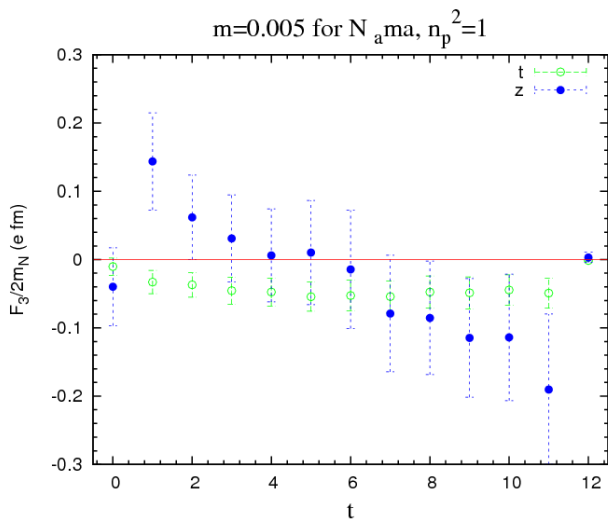


図 3 : E DM 形状因子の時間方向依存性。演算子は $t=0$ と $t=12$ にセットしてある。異なるシンボルはスピンプロジェクション行列の違いを表している。上図は中性子、下図は陽子の E DM 形状因子を示す。この結果は最も運動量が小さい場合である。

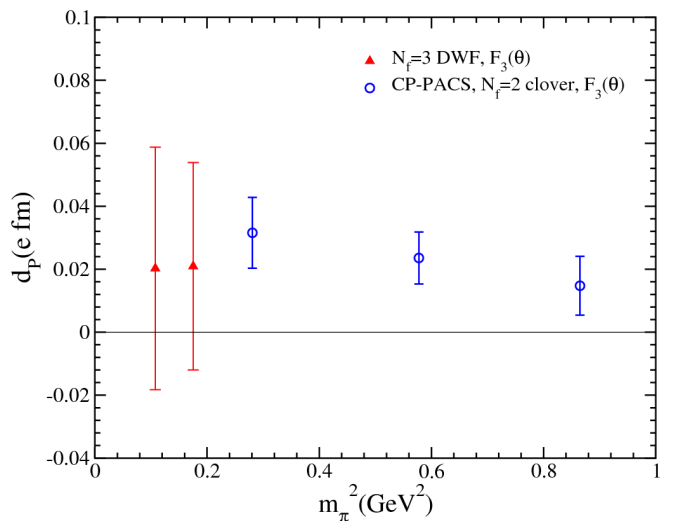
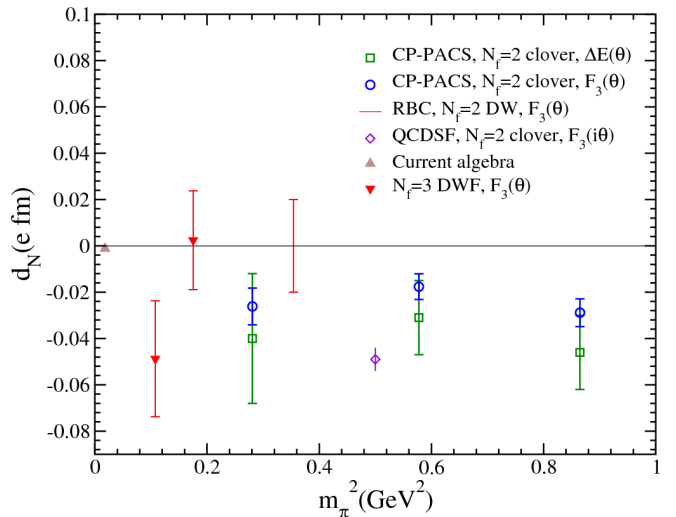


図 4 : 中性子 (上図) と陽子 (下図) E DM の π 中間子質量依存性。赤い \blacktriangle 印が今回得られた結果。他のシンボルはこれまで得られた格子 QCD の結果。

4. まとめ

この研究では新しい計算アルゴリズムを用いた中性子及び陽子 EDM の格子 QCD 計算を実施して、初めて現実的な格子サイズ及びストレンジクォークを含んだ動的 DWF ゲージ配位上で有限値を得ることができた。AMA アルゴリズムはこれらの観測量についても十分に効率的に働くことが分かった。

5. 今後の計画・展望

中性子及び陽子 EDM 研究では統計精度をさらに改善していくために、ゲージ配位の数を増やして統計数を上げていく計画である。EDM 計算では位相幾何的電荷の分布が重要になってくるため、多くの配位数を用いたモンテカルロ計算は重要である。

陽子崩壊行列要素では、現在進行中の AMA アルゴリズムを用いた高精度計算を継続していく計画である。軽い質量点 $m=0.005$ 、 $m=0.01$ における誤差を 10% まで抑えた結果を目指していきたい。

6. 利用がなかった場合の理由

年度末までおおよそ 60% まで使用予定である。AMA アルゴリズムのプログラムコード開発などで利用を抑えていた時期を考慮するとおおよそ予定通りである。

平成 24 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】

【国際会議などの予稿集、proceeding】

1. T. Blum, T. Izubuchi and E. Shintani, “Error reduction technique using covariant approximation and application to nucleon form factor”, PoS(Lattice 2012)262
2. Yasumichi Aoki, Eigo Shintani, "Proton decay matrix elements from lattice QCD", International Workshop on Grand Unified Theories (GUT2012), AIP Conf. Proc. 1467, pp. 116-121, Mar 2012. Kyoto, Japan
3. E. Shintani, “Electric Dipole Moment of the Neutron”, PoS(Confinement X)348
4. E. Shintani, T. Blum, T. Izubuchi, “Lattice calculation of neutron and proton EDM in full QCD”, PoS(Confinement X)330

【国際会議、学会などでの口頭発表】

1. “Nucleon EDM in lattice QCD”, CP VIOLATION IN ELEMENTARY PARTICLES AND COMPOSITE SYSTEMS, Thursday 07 Feb, 2013 - Saturday 23 Feb, 2013, India
2. “Electric Dipole Moment of the Neutron”, Quark Confinement and the Hadron Spectrum X, Oct 7-12, 2012
3. “Nucleon EDM from Lattice QCD”, New Horizons for Lattice Computations with Chiral Fermions, 14-16 May 2012, BNL
4. “Neutron EDM from Lattice QCD”, 2012 Project X Physics Study (PXPS12), 14-23 June 2012, Fermi National Accelerator Laboratory