

1 研究組織

- 研究代表者 青木慎也 (筑波大学数理物質科学研究科・教授)
共同研究者 蔵増嘉伸 (筑波大学数理物質科学研究科・講師),
新谷栄悟 (筑波大学数理物質科学研究科・博士研究員、現 KEK・研究員 (科学研究)),
菊川芳夫 (東京大学総合文化研究科・助教授)

2 実施報告の詳細

昨年度は主に以下の計算に SR11000 および Blue Gene を使用した。

- SR11000, 1 ノード・4 ノード
定電場法を用いた中性子電気双極子モーメントのフル QCD 計算
- Blue Gene, 128 ノード・512 ノード
クローバーフェルミオンを用いた NEDM 形状因子の計算

各項目の詳細な結果は以下の通りである。

2.1 定電場法を用いた中性子電気双極子モーメントのフル QCD 計算

2.1.1 方法と内容

θ 項の入った作用の下、格子上に実数成分を持つ定電場を外場として導入することで、核子スピ
ン間にエネルギー差を抜き出し、古典的定義から NEDM を計算する。具体的には、 θ 項をウェ
イトとして掛け合わせた後統計平均し、異なるスピン成分を持つ核子伝搬関数の比を構成する。その
比の指数関数部分の θ 及び電場の 1 次に比例した項を抜き出すことによって NEDM を直接的に計
算することができる。ただし、ウェイトとして $U(1)$ の位相を加える必要があるため、一般にシグ
ナルの精度は悪くなる。そのため、可能な限り統計精度をあげるため、異なった地点のソースポ
イントでの結果を平均する、また、前方・後方伝搬関数が統計的に同じシグナルを得ることができ
るように、電場の導入点とソースポイント間の距離を全時間方向の半分にとるなどして効果的に統計
が上げられるように工夫を重ねた。クエンチ近似での結果を元に統計的なノイズを除去するための核
子伝搬関数の比の組み方や電場・ θ の大きさなどを設定し、フレーバー数 2 の動的クォークを含む
ゲージ配位上でクォーク質量依存性やトポロジカル感受率との関連を調べた。

2.1.2 結果

用いたゲージ配位は CP-PACS collaboration が公開した 2 フレーバーの動的クローバーフェル
ミオンを含んだゲージ配位で、そのなかで最も格子サイズが大きく格子間隔が細かい、 $24^3 \times 48$,
 $\beta = 2.1$, を選んだ。この判断は、トポロジカル感受率の分布が期待されるガウス分布に近くクォ
ーク質量に対する抑制が辛うじて見えていたことを考慮した。この配位はクォーク質量として 4 点用

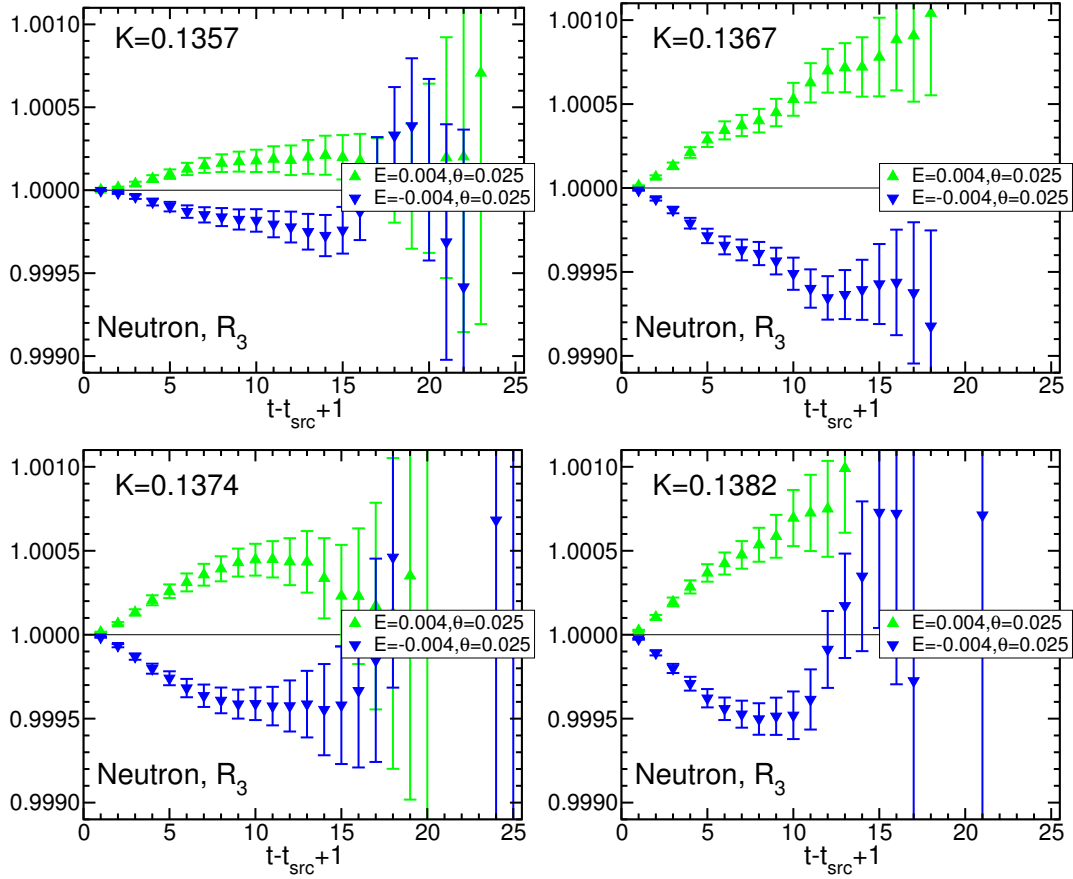


図 1: 各クォーク質量における異スピン核子伝搬関数の比。異なるシンボルは、異なる電場の符号の場井伊を表す。

意されているので、全ての点に関し NEDM の計算を行い、クォーク質量に対する減少が統計精度内で確認できるか調べた。

まず、図 1 に、4 つのクォーク質量での異なるスピン成分間の核子伝搬関数の比の各時間ごとの値をプロットしてある。異なるシンボルの振舞が 1 を軸として対称的に分かれて広がっている。その広がり方も時間に対して線形に近い形である。この結果は、伝搬関数の比の指数関数部分の展開として電場に比例した成分を担っていることを表しており、期待された結果である。また、すべての質量に対して誤差を越えてシグナルが表れていることがわかる。シグナル領域を明らかにするために、図 2 にその有効質量プロットを載せてある。見て分かるように、ソースポイントからおよそ 10 程度離れた点までに有意な結果を得ることができた。この結果は、NEDM のフル QCD 計算において、初めて有限値を得られることを示している。異なった電場の符号を持つ伝搬関数の比同士を割り算することでさらに電場の 2 次以降を取り除いた形を使い、全ての質量について指数関数でフィットを行った結果を図 3 の左図に示してある。すべてのクォーク質量について 1 σ 以内で有限な値をとることができた。同じ図に比較の為以前求めたクエンチ近似の結果もプロットしてあるが、残念なことに質量依存性に明らかな違いを見てとることはできない。また、値自体はモデル計算の結果と比較しておよそ 1 桁だけ大きい。したがって现阶段の結果からだと θ の制限はかなりきついものとなっている。ただし、統計誤差は依然大きい。

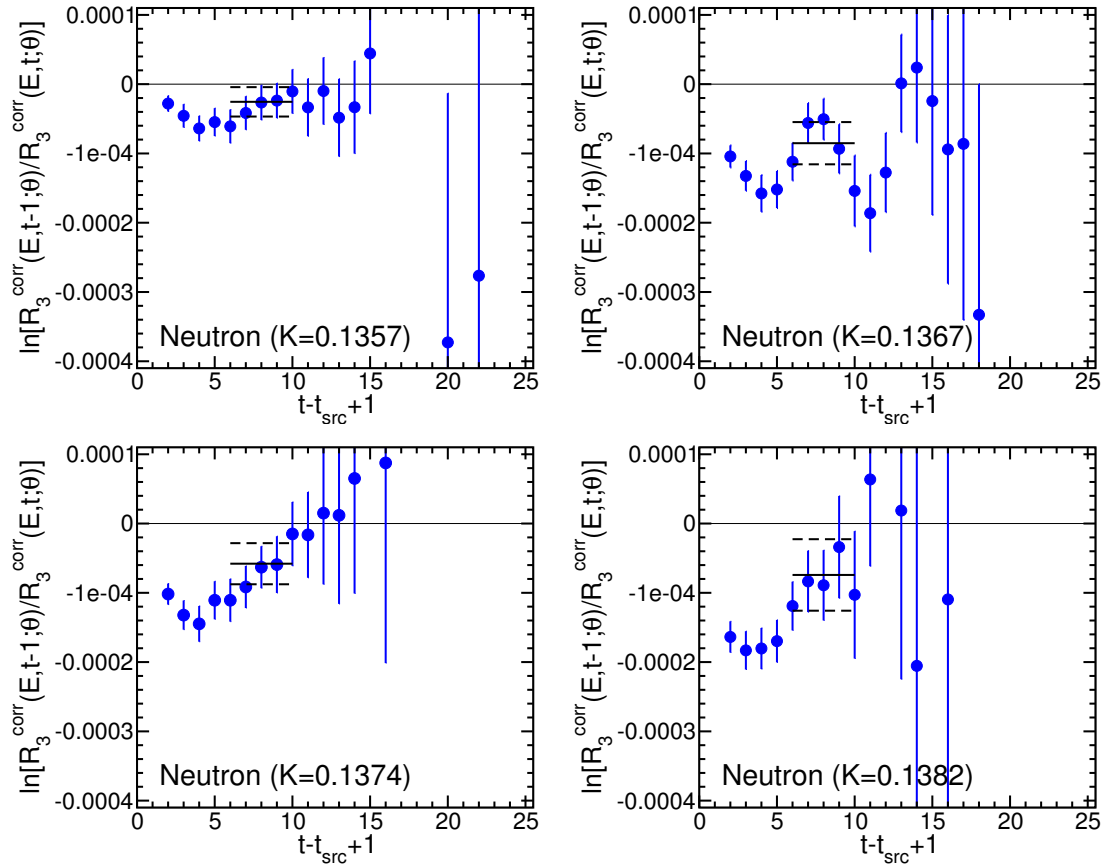


図 2: 各クォーク質量における、図 1 の有効質量プロット。ただし、異なった符号の電場間で割り算を行い電場に関する 2 次以上の項を落としてしている。直線はフィットした結果、破線はその誤差を表している。

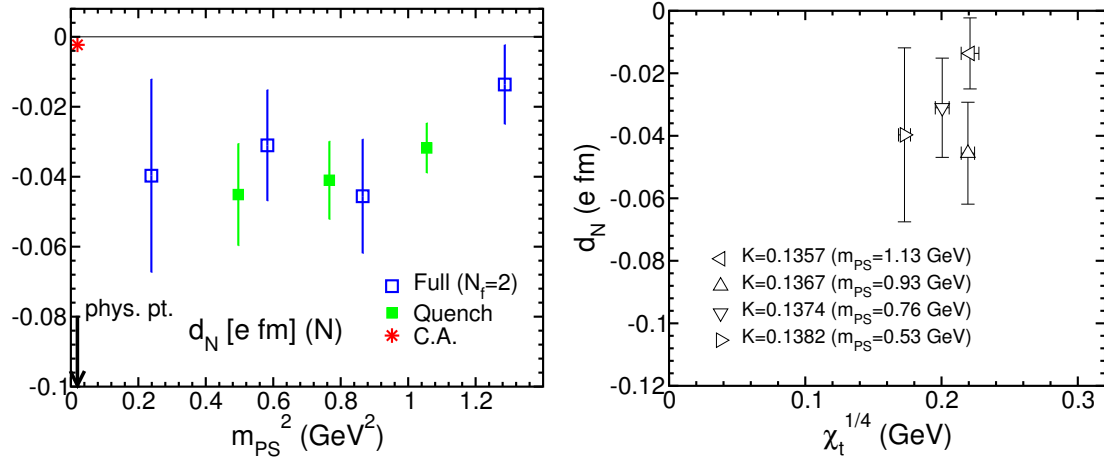


図 3: (左図) NEDM の π 中間子質量² 依存性。ここで得られたフル QCD の結果と以前得られたクエンチ近似の結果を比較の為載せてある。星印はカレント代数から求められた代表的なモデル計算の結果を示している。(右図) 横軸にトポロジカル感受率、縦軸に NEDM をとった図。

これらの問題の要因として、sea クォーク質量が大き過ぎるために、あるべき振る舞いを示していない可能性がある。それは図 3 の右図に示したトポロジカル感受率との関係から見てとれる。図を見ると、全てのクォーク質量の結果がトポロジカル感受率が大きい点に集中している。このことから、ゲージ配位がもつトポロジカル感受率が大きすぎるため、NEDM の質量依存性もうまく見えていないのではと考えられる。

2.2 クローバーフェルミオンを用いた NEDM 形状因子の計算

2.2.1 方法と内容

前セクションでは、有限な NEDM 値はフル QCD のゲージ配位上であっても測定可能であることを示したが、値そのものは統計誤差が大きく、質量依存性もクエンチ近似と大差ない結果であった。そこで、少しでも誤差を減らすことのできる可能性を探るため、NEDM 形状因子の計算をクローバーフェルミオンを使って行い、定電場法との比較を行った。同時に、お互いの方論の非自明なチェックとして同じゲージ配位上で計算を行うことを試みた。ここではまずクエンチ近似の下で計算を行った。

さらに、3点関数の構成過程で必要となる非接続ダイアグラム部分の計算も行った。この部分は SU(3) 極限では電荷の和をとることでゼロにすることができるが、現実世界ではストレンジクォーク質量はアップ・ダウンクォークと比べて格段に重いため、この極限はあまり正しくない。そこで、実際問題としてどの程度の寄与を非接続ダイアグラムが担うのかを確認するために、ノイズ法とよばれる近似法により、このダイアグラムを計算し、いままで主要な寄与を果たすと考えられている接続ダイアグラムとの比較を行った。

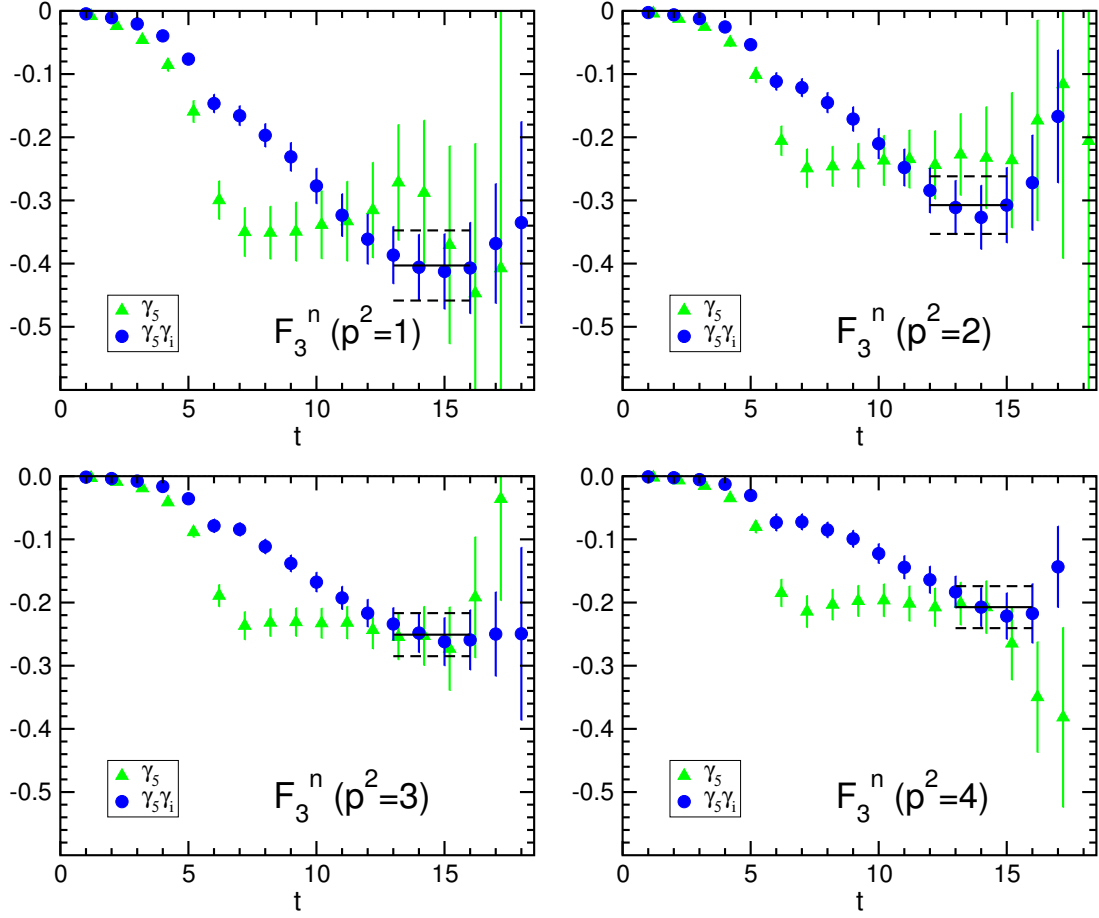


図 4: 各運動量における NEDM 形状因子の時間依存性。異なったシンボルは違うスピノール成分から求めた結果をプロットしてある。実線はフィットの結果、破線はフィットの誤差を表す。

2.2.2 結果

ゲージ配位は以前定電場法で用いた、 $24^3 \times 32$, 岩崎ゲージ作用 $\beta = 2.6$ を用いた。フェルミオンの質量パラメータは、最も軽かった $K = 0.1340$ とした。3 点関数の計算は、電磁カレントの挿入時間 $t_{EM} = 6$ に固定して sink の核子を動かすことで漸近状態に達した際のプラトーを測定する。

図 4 にはチェックの為、2 つの独立したスピノール成分から抜き出した同じ NEDM 形状因子の時間ごとの推移を表す。4 点すべての運動量について時間 $t = 13$ 付近から 2 つともコンシステントなプラトーを持っていることが分かり、クローバーフェルミオンを用いても NEDM 形状因子のシグナルが鮮明にとれることを示している。おおよそ $t = 13 \sim 16$ の範囲に 2 つのプラトーが一致していることから、この範囲をフィット範囲として、丸いシンボルに対し定数フィットを行い、NEDM 形状因子の運動量依存性を調べた結果が図 5 に載せてある。クエンチ近似における NEDM 形状因子の運動量依存性の定式は自明では無いが、結果は少なくとも leading order では線形な振る舞いを見せているため、各ジャックナイフサンプルを線形フィットしてそのゼロ運動量における外挿値を求めた結果、以下の NEDM 値が得られた。

$$\lim_{q^2 \rightarrow 0} \frac{F_3(q^2)}{2m_N} = -0.0268(35)(e \cdot \text{fm}) \quad (1)$$

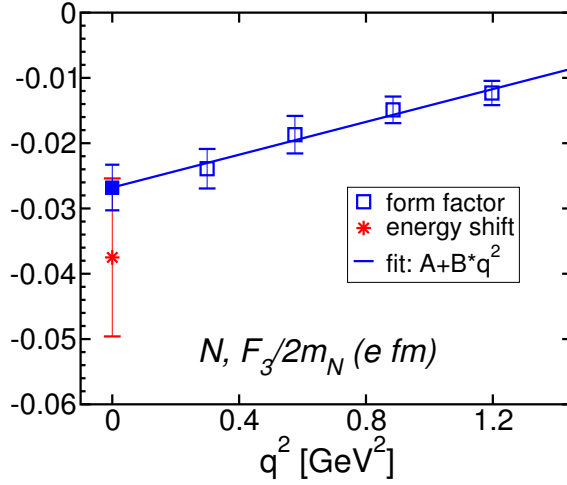


図 5: NEDM 形状因子の運動量依存性。実線は各 JK サンプルを線形フィットした結果を表す。星印は同じゲージ配位上で定電場法を使って求めた結果である。

定電場法で求めた NEDM 値は $-0.0391(125)$ e·fm であったことから、誤差の範囲内で良く一致しており、2つの方法論が数値的にコンシステントな結果を出すことが分かる。また、統計誤差自体も大幅（およそ 60% 程）に改善している。理由は明らかではないが、定電場法における周期境界条件の破れに起因するノイズが若干残っているため、シグナルの悪化に繋がっていた可能性がある。

ただし、この結果は接続ダイアグラムのみ計算であり、NEDM 形状因子の非接続ダイアグラムからの寄与を加える必要がある。非接続ダイアグラムの計算には時空間方向を成分に持った行列のトレース計算が必要になってくるため、なんらかの近似的な操作が必要となる。そこで、ここでは従来よく使われる $U(1)$ ノイズ法とよばれる方法を採用することにした。ノイズの個数は 60 に設定した。また、ストレンジクォーク質量は $K = 0.1320$ として計算を行った。この値はアップ・ダウンクォークとの質量比では 3 倍程度である。

図 6 に（接続ダイアグラム+非接続ダイアグラム）の最も運動量が小さい場合の結果をのせてある。フィットした結果は

$$\frac{F_3(q^2)}{2m_N} = -0.0230(69) \text{ e} \cdot \text{fm} \quad (2)$$

であった。接続ダイアグラムのみの場合 ($-0.0239(30)$ e·fm) と比較すると、値自体はさほどの変化はない。ただ、ノイズ法を使ったことによる誤差が含まれるため、統計誤差は若干大きくなっている。この結果は非接続ダイアグラムの寄与は小さいことを示唆している。ただし、現実のストレンジクォークとアップ・ダウンクォークの質量比は 30 倍程度あると考えられているので、ストレンジクォーク質量をいくつか振ってその依存性を測る必要がある。それらの系統的研究は、来年度以降に行う予定である。

ここで得られた結果は、フル QCD へ応用した際に、定電場法と比べてさらに統計誤差を減らす可能性を示唆している。以上の結果をもとに、フレーバー数 2 のフル QCD に適応しカイラル外挿による物理的な NEDM の値を求めることが期待される。

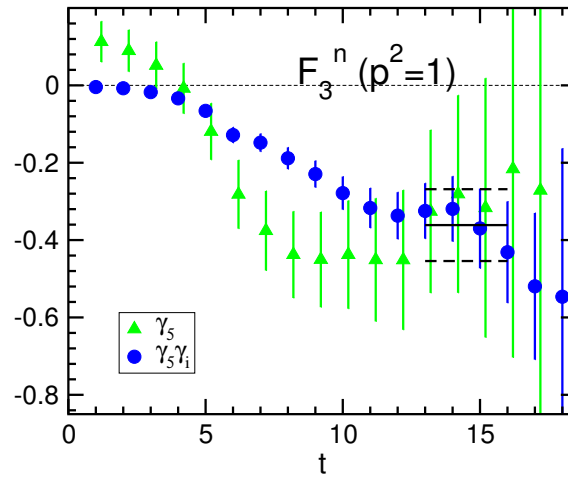


図 6: $p^2 = 1$ の場合の非接続ダイアグラムの寄与を含めた NEDM 形状因子の時間推移。シンボルの違いはスピノール成分の違いを表す。実線はフィット結果、破線はその誤差を表す。

3 論文発表、及び口頭発表

- 国際会議のプロシーディング論文
 - [1] E. Shintani, S. Aoki, N. Ishizuka, K. Kanaya, Y. Kikukawa, Y. Kuramashi, M. Okawa, A. Ukawa, T. Yoshie, “Calculation of neutron EDM in quenched and full QCD”, PoS LAT2006, 123 (2006).
- 口頭発表
 - [1] E. Shintani, S. Aoki, N. Ishizuka, K. Kanaya, Y. Kikukawa, Y. Kuramashi, M. Okawa, A. Ukawa, T. Yoshie, “Calculation of neutron EDM in quenched and full QCD”, 24th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2006), Tucson, Arizona, 23-28 Jul 2006.
 - [2] E. Shintani, S. Aoki, Y. Kuramashi, “Full QCD calculation of neutron electric dipole moment”, The Joint Meeting of Pacific Region Particle Physics Communities, Hawaii, Oct 2006.
 - [3] E. Shintani, S. Aoki, Y. Kuramashi, “Lattice approaches to the neutron electric dipole moment with dynamical clover fermion”, 日本物理学会 2007 年春季大会、2007 年 3 月.