

平成 22 年 3 月 31 日現在

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2007 ～ 2009

課題番号：19740121

研究課題名（和文）格子 QCD による中性子電気双極子モーメントの研究

研究課題名（英文）Study of neutron electric dipole moment from lattice QCD

研究代表者

新谷 栄悟（SHINTANI, EIGO）

大阪大学・理学研究科・特任研究員

研究者番号：70447225

研究成果の概要（和文）：

格子 QCD を用いて中性子の電気双極子モーメントを非摂動的に計算した。モンテカルロ計算により摂動論が応用できないハドロンの寄与を取り入れ、第一原理計算することで厳密な値を求めることができた。動的クォークを含んだゲージ配位が持つ CP 対称性の破れの効果を QCD 作用に考慮することで、中性子が持つ電気双極子モーメントの値やクォーク質量依存性を初めて具体的に示すことができた。

研究成果の概要（英文）：

We have non-perturbatively computed the neutron electric dipole moment (EDM) from lattice QCD. In the first principle of QCD, we obtain the precise estimate of neutron EDM, which includes the hadronic contribution. On the gauge configuration including dynamical quark effect and CP violation in QCD action, we first show the lattice result of neutron EDM and analysis of quark mass dependence.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,200,000	0	1,200,000
2008 年度	500,000	150,000	650,000
2009 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,200,000	300,000	2,500,000

研究分野：素粒子論

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：格子 QCD、素粒子論、CP 対称性の破れ、数値計算

1. 研究開始当初の背景

中性子電気双極子モーメントは、QCD の作用に含まれると考えられる CP 対称性を破る θ 項の存在を実験的に確かめることが比較的容易な物理量である。この値がゼロで

ないと理論的には自然に予想できるが、実際は非常にゼロに近い値をとると考えられている。この不自然な結果を説明することは「強い CP 問題」として知られている。この問題の解決を与えうる有力なモデルとしてアクシオンモデルが 30 年前から提唱され

ているが、このモデルが予言するアクション自体の存在が実験的にほぼ否定されている。そのため、依然他のモデルの可能性も残されている。例えば、CP対称性が自発的に破れるモデルでは、パラメータ θ が量子補正として現れるため、 θ の取りえる範囲がこのモデルでは重要となる。

パラメータ θ の値の決定には摂動論が破たんするQCDの低エネルギー領域を考慮する必要がある。QCDでは漸近自由性のために、現実の低エネルギーでは結合定数が摂動論の収束半径を超えるからである。したがって、これまではモデルをベースに求めざるを得なかった。しかし、モデルの種類によって値が大きく変わるため、厳密な評価とはいえない。そこで、本研究では格子QCDを用いた厳密な理論計算を行い、 θ の値を直接導くことを考えるに至った。 θ 値は、また標準模型を超えた物理、例えば超対称性モデルにおいても、モデルが予想する新しい粒子のCP対称性の破れに対して制限を与えているので、この研究は高エネルギー物理モデルに対しても重要な情報を与えうる。

2. 研究の目的

中性子電気双極子モーメント (NEDM) をQCDの第一原理のもとで厳密に評価して、 θ パラメータの存在範囲の決定に繋げていくことを目的とする。格子QCDを用いれば、核子自体の構造を詳細に扱うことができる。さらに、QCD真空が持つ非自明な位相も正確に取り組むことが可能であることが、最近の研究からも裏付けられている。そこで、NEDMはこの両方の性質を正確に取り扱うことが必要であることから、格子QCDを用いた非摂動計算により理論的に厳密な値を求めることが期待される。また、格子QCDの方法論的議論においても、QCD真空のトポロジカルな情報が低エネルギーの物理にどのように影響があり得るのか調べる上でも興味深い。また、この研究を通して得られる方法論が別の θ によるCP対称性が破れた物理に対して応用可能である。

3. 研究の方法

格子QCDを用いて中性子電気双極子モーメント (NEDM) を抜き出すために2つの方法を考案した。

一つは核子-核子状態に電磁相互作用を含んだときに現れる行列要素から形状因子を抜き出す方法である。CP対称性が破れた真空上で核子状態を定義して、 θ パラメータで展開したとき、形状因子として θ の1次項と

してNEDM形状因子が定義される。その低エネルギー極限としてNEDMとみなすことができる。そのため、まずは有限の運動量空間から出発して、NEDM形状因子を核子-核子の3点関数から抜き出した後、ゼロ運動量への外挿操作を行うことで、ある質量におけるNEDMを求めることができる。そのあと、物理的な π 中間子質量領域に外挿することで、実験で得られたNEDMの(上限値)と比較して、 θ の値を決める。

二つ目は、NEDMの定義に則って、外電場として定電場を格子上のvalenceクォークに含ませることによって、エネルギー差としてNEDMを抜き出す方法である。これは、直接的にNEDMを定義できるため、1番目の方法と比べてゼロ運動量への外挿誤差を考慮する必要はない。しかし、ユークリッド時空上で定電場を入れるために、時間成分の周期境界条件を破ることになり、その影響が物理量に反映される可能性はある。

以上の方法では、物理的クォーク質量への外挿という操作が必要となるため、外挿関数の選び方による系統誤差の評価が必要となる。この誤差を極力抑えるためには質量がなるべく軽い点において計算を行う必要がある。また、このことはゲージ配位が持つトポロジーの分布を正しく反映するためにも重要である。

4. 研究成果

まず、2つの方法論の妥当性を確認するためにCP-PACSグループが公開しているフレーバー数2のゲージ配位を用いて、一致した結果を得ることができるかを確かめた。図1に2つの方法の比較をプロットした。NEDM形状因子を用いた方法では、小さい運動量から順に3点とり、線形関数で外挿を行った。外電場を用いた方法では、電場を小さくとり、ソース点を8点取って平均することで統計を上げて、異なるスピン核子間のエネルギー差を求めた結果を載せてある。そのそれぞれの π 中間子質量において誤差内で一致した結果を得ることができた。図からわかるように、定電場を用いた方法では、誤差が大きくなっている。これは、周期境界条件の破れから発生する、余分な格子誤差の影響を被ってしまい、結果としてシグナルが非常に悪くなってしまった。それに比べて、形状因子を用いた方法では、周期境界条件を保持したまま格子計算を行うことが可能であるために、統計誤差は小さく抑えることができた。また、十分な大きさの格子サイズを用いればゼロ運動量への外挿誤差も大きくないことが分かった。この結果をもとに、現実的なストレンジクォークを動的に含んだゲ-

ジ配位を用いた形状因子から NEDM を求めて θ パラメータの範囲を格子 QCD の立場から決定できる。

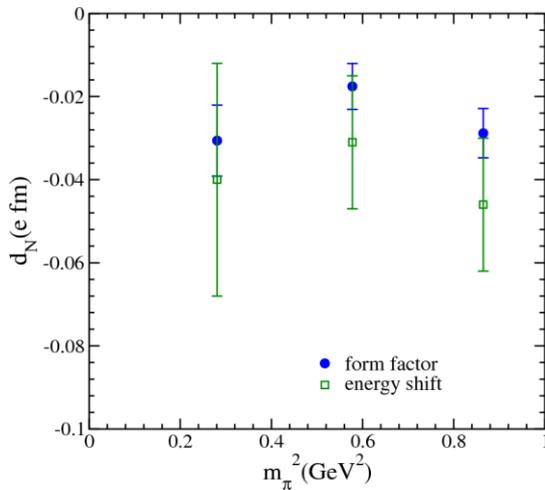


図 1 : 定電場と形状因子を用いた時の NEDM の比較。横軸は格子上の π 中間子の質量を表す。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① J. Noaki, T. W. Chiu, H. Fukaya, S. Hashimoto, H. Matsufuru, T. Onogi, E. Shintani, N. Yamada, “Non-perturbative renormalization of bilinear operators with dynamical overlap fermions”, Physical Review D 81, 034502 (2010)、査読有
- ② Eigo Shintani, Sinya Aoki, Yoshinobu Kuramashi, “Full QCD calculation of neutron electric dipole moment with the external electric field method”, Physical Review D 78, 014503 (2009)、査読有
- ③ S. Aoki, T. W. Chiu, H. Fukaya, S. Hashimoto, T. H. Hsieh, T. Kaneko, H. Matsufuru, J. Noaki, T. Onogi, E. Shintani, N. Yamada, “Pion form factors from two-flavor lattice QCD with exact chiral symmetry”, Physical Review D 80, 034508 (2009)、査読有
- ④ E. Shintani, S. Aoki, T. W. Chiu, S. Hashimoto, T. H. Hsieh, T. Kaneko, H.

Matsufuru, J. Noaki, T. Onogi, N. Yamada, “Lattice study of the vacuum polarization function and determination of the strong coupling constant”, Physical Review D 79, 074510 (2009)、査読有

- ⑤ E. Shintani, S. Aoki, H. Fukaya, S. Hashimoto, T. Kaneko, H. Matsufuru, T. Onogi, N. Yamada, “S-parameter and pseudo-Nambu-Goldstone boson mass from lattice QCD”, Physical Review Letter 101, 242001 (2008)、査読有
 - ⑥ H. Ohki, H. Fukaya, S. Hashimoto, T. Kaneko, H. Matsufuru, J. Noaki, T. Onogi, E. Shintani, N. Yamada, “Nucleon sigma term and strange quark content from lattice QCD with exact chiral symmetry”, Physical Review D 78, 054502 (2008)、査読有
- [学会発表] (計 9 件)
- ① 新谷栄悟、格子理論を用いたグラフエン系物性特性の研究、日本物理学会第 65 回年次大会、2010 年 3 月 20 日、岡山大学
 - ② Eigo Shintani, “ π^0 to two-photon decay in lattice QCD”, The Joint Meeting of the nuclear physics divisions of the APS and the JPS, Oct 13-17 2009, Waikoloa, Hawaii
 - ③ 新谷栄悟、格子 QCD を用いた中性パイ中間子の 2 光子崩壊過程、日本物理学会秋季大会、2009 年 9 月 12 日、甲南大学
 - ④ Eigo Shintani, “ π^0 to two-photon decay in lattice QCD”, 27th International Symposium on Lattice Field Theory, July 26-31 2009, Peking University, Beijing, China
 - ⑤ 新谷栄悟、ストレンジクォークを含む動的オーバーラップを用いた強い結合定数の計算、日本物理学会 64 回次大会、立教大学、2009 年 3 月 27 日
 - ⑥ 新谷栄悟、Coupling constant from VV and AA vacuum polarization in lattice

QCD、日本物理学会、2008年9月20日、山形大学

- ⑦ Eigo Shintani, “Strong coupling constant and four-quark condensates from vacuum polarization functions with dynamical overlap fermions”, 26th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2008), Williamsburg, Virginia, 14-20 Jul 2008.
- ⑧ 新谷栄悟、 “Pion mass difference from vacuum polarization in lattice QCD”, 日本物理学会第62回年次大会、2007年9月21日、北海道大学
- ⑨ Eigo Shintani, “Pion mass difference from vacuum polarization”, 25th International Symposium on Lattice Field: Lattice 2007, Regensburg, Germany, Jul 30 - Aug 4, 2007.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

新谷栄悟 (SHINTANI, EIGO)
大阪大学・理学研究科・特任研究員
研究者番号：70447225

(2) 研究分担者 ()

研究者番号：

(3) 連携研究者 ()

研究者番号：