

平成 22 年 5 月 28 日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2006～2009

課題番号：18540250

研究課題名（和文）格子上の場の理論による標準理論の研究

研究課題名（英文）Standard model with lattice field theory

研究代表者

藏増 嘉伸（KURAMASHI YOSHINOBU）

筑波大学・大学院数理物質科学研究科・准教授

研究者番号：30280506

研究成果の概要（和文）：格子 QCD を用いたハドロン行列要素の計算を CP 非保存の研究に応用した。重いクォークの物理に対しては、我々筑波大グループによって提唱された重いクォークの相対論的定式化の有効性を数値的に確認し、アップ、ダウン、ストレンジクォークの真空偏極効果を取り入れたより現実的な計算に移行した。中性子電気双極子能率に関しては、定電場法を用いてクエンチ近似とアップ、ダウンの真空偏極効果を取り入れた計算を行い両者を比較した。

研究成果の概要（英文）：Lattice QCD calculation of hadron matrix elements was applied to investigate the CP violation. After demonstrating the effectiveness of our relativistic heavy quark action by a numerical test, we started to calculate physical quantities associated with heavy quarks including the polarization effects of up, down, strange quarks. For the neutron electric dipole moments, we compared the results obtained with the external electric method both in the quenched approximation and the two flavor QCD.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2007年度	900,000	270,000	1,170,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：素粒子理論

科研費の分科・細目：物理学・素粒子

キーワード：格子場の理論、量子色力学(QCD)、CPの破れ、重いクォーク、Strong CP問題

1. 研究開始当初の背景

強い相互作用における最も特徴的な現象はクォーク・グルーオンの閉じ込めである。これは非摂動的な効果であり、定量的評価のためには格子量子色力学(格子 QCD)を用いた非摂動的研究が必要である。1981年に初めて格子 QCD によってハドロン質量が計算されてか

ら今日に至るまで、様々な物理量に対して格子 QCD による計算が試みられ我々の強い相互作用に対する理解は着実に深まってきている。特に近年は様々なハドロン行列要素の計算が試みられ、その計算手法も確立しつつある。そこで格子 QCD を用いたハドロン行列要素の計算によって CP 非保存の研究を行うこ

とを考える。

今日、CP 非保存の現象としてよく知られている事例が2つある。一つは中性 K 中間子崩壊または中性 B 中間子崩壊において観測された CP の破れであり、もう一つは宇宙における baryon asymmetry の問題である。後者の場合は CP の破れが必要条件であることが知られている。また、逆に CP 非保存が原理的に期待されるにもかかわらずその破れの度合いが非常に小さいことが実験的に知られており、その疑問に対する根本的解決がなされていないものとして strong CP 問題がある。これらの場合において、格子 QCD によるハドロン行列要素の理論的決定は重要な役割を果たす。

2. 研究の目的

(1) 最初に CP の破れが観測されたのは 1964 年中性 K 中間子崩壊の実験においてであったが、近年高エネルギー加速器研究機構(高エネ研)における B ファクトリーにおいても同様の CP の破れが B 中間子システムで観測された。高エネ研における高統計の B 中間子崩壊の実験結果は素粒子物理学における 30 年来の問題である CP の破れについて多くの新しい知見をもたらしたが、ここで得られた実験結果から標準理論における Cabibbo-小林-益川行列要素を決定するためには、弱い相互作用の有効ハミルトニアンを K または B 中間子の状態で挟んだ様々なハドロン行列要素を理論的に計算することが必要である。言い換えれば、それらのハドロン行列要素を精確に決定することなしに Cabibbo-小林-益川行列要素を得ることはできない。これらの行列要素を格子 QCD を用いて非摂動的に高精度で計算することが我々の目標である。

(2) 過去数十年にわたり中性子電気双極子能率(NEDM)測定の実験が行われているが、未だその存在の確証は得られておらず、上限値が与えられているだけである。この小さな NEDM の値は、 θ と呼ばれる強い相互作用の CP の破れの度合いを表すパラメータが非常に小さいことを示唆しており、なぜ小さいのかという問いに対する明確な回答はない。(実は、実験結果から得られる θ の値には Cabibbo-小林-益川行列からの寄与も存在するが、それも含めて θ の値が小さいことは不自然であると考えられている。) ここで、NEDM の実験値から θ の値を定量的に決めようとするれば、電磁カレントを中性子の状態で挟んだハドロン行列要素の形状因子を知らなければならない。今日までこの量は各種のモデルを使って推測されていただけであるが、モデル依存性も大きく信頼できる評価方法とは言い難い。我々の目的はこのハドロン行列要素

を格子 QCD を用いて第一原理から計算することである。それによって、 θ パラメータの値を NEDM の実験結果から精密に決めることが初めて可能となる。

3. 研究の方法

(1) 格子 QCD 計算における代表的な系統誤差としてカットオフ効果がある。これは、格子上で考えている物理系に比べて格子間隔 a が粗いことに起因する。チャーム・ボトムクォークを格子上で扱おうとする場合、最大の問題点は現在の計算機性能では格子 QCD のカットオフ、即ち格子間隔の逆数 ($1/a$) は重いクォークの質量 (m_Q) より小さく取らざる得ないことである。例えば、現在の数値計算においてはボトムクォークの質量はカットオフのおよそ 2-3 倍程度である。数値計算に要する時間は単純に考えて少なくとも $1/(a^4)$ に比例するので近い将来カットオフに対してボトムクォークの質量が無視できるような状況が実現することはありえない。この大きな $m_Q \cdot a$ 比の効果を実験的にコントロールするために幾つかのアイデアが提案されているが、その殆どは非相対論的 QCD のように $m_Q \cdot a \gg 1$ という仮定に基づいている。この場合カットオフの大きさは重いクォークの質量よりも小さくしなければならないので、ハドロン行列要素の連続極限を考えることは原理的に出来ない。このことは、第一原理計算に基づいた計算という格子 QCD の本質的な利点を放棄しており、格子上における重いクォークの定式化として満足できるものではない。近年我々筑波大グループは任意の $m_Q \cdot a$ の値に対して適用できる格子上の重いクォークの相対論的定式化を提唱した。基本的なアイデアとしては重いクォークの作用に $m_Q \cdot a$ に依存するパラメータを導入し、それによって重いクォークの質量に起因するカットオフ効果を取り除くというものである。これによって、重いクォークを含んだ物理量の連続極限を考えることが可能となり、これまで広く行われている非相対論的近似を超えた計算が実現できる。

(2) Strong CP 問題を格子 QCD で取り扱うためにはユークリッド時空上の経路積分による定式化において QCD の作用に CP 不変性を破る項 $i\theta Q$ (Q はトポロジカルチャージ) を取り込む必要があるが、実はこれによって大きな技術上の困難が生じる。そもそも格子 QCD における経路積分が数値計算可能となったのは、その重み因子(統計力学のボルツマン因子に相当)である指数部分が実数であり確率解釈できるからである。ところが、CP 不変性を破る項は純虚数であり、これによって重み因子は振動的な振る舞いを示すようになる。

その場合、もはや確率解釈は不可能となり、実際の数値計算においても異なった位相の間で極めて微妙な打ち消し合いが起こり、最終的に有限の期待値が得られることになる。この計算は技術的に非常に難しく、符号問題と呼ばれている。現在までのところ、任意の θ に対する抜本的解決策はないが、 θ が小さい場合は reweighting 法と呼ばれる方法によって取り扱いが可能である。この方法ではゲージ場の配位を通常の QCD 作用によって生成し、重み因子 $\exp(i\theta Q)$ は期待値計算において取り入れる。この方法が十分良いインポートサンプリングとなるためには θ が小さいことが必要であるが、これまでの実験結果から θ の値は非常に小さいと推定されているので、我々は reweighting 法を活用することが出来る。

中性子電気双極子能率の具体的な計算方法としては定電場を用いる方法を試みる。CP が保存されないような系(QCD の作用に CP 不変性を破る項 $i\theta Q$ が加わった場合)において一様電場が存在すると、上向きスピンの中性子と下向きスピンの中性子の間にはエネルギー差が生じる。これを格子上で再現することによって電気双極子能率を求める。この計算方法の主な利点は、(i) 中性子の 2 点グリーン関数を計算するだけなので比較的小規模の計算コストで可能なこと、(ii) 定電場の値を自由に変えることが出来るので電場に対する中性子の応答性を解析しやすいこと、が挙げられる。先ずクエンチ近似の範囲内でこの計算方法のテストを行った後、3 フレーバー (アップ、ダウン、ストレンジ) の真空偏極効果を取り入れた計算を目指す。

4. 研究成果

(1) 重いクォークの物理に関しては、先ず我々筑波大グループにより提案された相対論的定式化の有効性を確認するために数値計算によるテストを行った。具体的には、クエンチ近似の範囲内でチャームクォークを含む Heavy-Heavy、Heavy-Light メソン系に対して時間-空間回転対称性の回復度合いを調べ、良好な結果を得た(論文として発表済み)。その後、アップ、ダウン、ストレンジクォークの真空偏極効果を取り入れたより現実的な計算に移行した。特に着目した物理量はチャームクォークを含む Heavy-Light メソン系のスペクトラムと崩壊定数である。最終目標は物理的質量を持つアップ、ダウン、ストレンジクォークの真空偏極効果を取り入れた計算であるが、現在は物理的クォーク質量近傍での計算を系統的に実行し、軽いアップ、ダウンクォークの真空偏極効果を詳細に調べている段階である。

(2) 中性子電気双極子能率の計算に関しては、先ずクエンチ近似の範囲内で定電場法の可能性をテストし、その後 2 フレーバー (アップ、ダウン) のクォークの真空偏極効果を取り入れた計算を行なった。結果に関しては、明確な両者の差異は確認できなかったが、これは 2 フレーバーのクォークの質量が重すぎたためだろうと考えている。これらの結果は既に論文として発表済みである。我々の最終目標は 3 フレーバー (アップ、ダウン、ストレンジ) のクォークの真空偏極効果を取り入れた中性子電気双極子能率の計算であり、現在もそれを目指した研究を継続中である。

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 4 件)

- ① E. Shintani, S. Aoki and Y. Kuramashi, “Full QCD calculation of neutron electric dipole moment with the external electric field method”, Physical Review D78 (2008) 014503. 査読有
- ② E. Shintani, S. Aoki, N. Ishizuka, K. Kanaya, Y. Kikukawa, Y. Kuramashi, M. Okawa, A. Ukawa and T. Yoshie, “Neutron electric dipole moment with external electric field method in lattice QCD”, Physical Review D75 (2007) 034507. 査読有
- ③ Y. Kayaba, S. Aoki, M. Fukugita, Y. Iwasaki, K. Kanaya, Y. Kuramashi, M. Okawa, A. Ukawa and T. Yoshie, “First nonperturbative test of a relativistic heavy quark action in quenched lattice QCD”, Journal of High Energy Physics 02 (2007) 019. 査読有
- ④ E. Shintani, S. Aoki, N. Ishizuka, K. Kanaya, Y. Kuramashi, M. Okawa, A. Ukawa and T. Yoshie, “Calculation of neutron EDM in quenched and full QCD”, Proceedings of Science LAT2006 (2006) 123. 査読無

[学会発表] (計 2 件)

- ① Yoshinobu Kuramashi, “Lattice QCD calculation of neutron electric dipole moment”, INT Workshop on Electric Dipole Moments and CP Violation, Seattle, USA, March 19–23, 2007. 国際会議招待講演
- ② Yoshinobu Kuramashi,

“Lattice QCD calculation of neutron
electric dipole moment” ,
The IVth International Conference on
Quarks and Nuclear Physics,
Madrid, Spain, June 5-10, 2006.
国際会議招待講演

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藏増 嘉伸 (KURAMASHI YOSHINOBU)
筑波大学・大学院数理物質科学研究科・
准教授
研究者番号 : 30280506