

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2007～2010

課題番号：19540265

研究課題名(和文) 格子 QCD によるストレンジネスを含むハドロン構造の研究

研究課題名(英文) Lattice study of hadron structure and strangeness contribution

研究代表者

佐々木 勝一 (SASAKI SHOICHI)

東京大学・大学院理学系研究科・助教

研究者番号：60332590

研究成果の概要(和文)：近年コンピュータの急速な発展と、新しい計算アルゴリズムの開拓などに伴い、格子 QCD による数値解析の精密化が飛躍的に進んでいる。現在、世界中の格子 QCD 研究グループにおいてストレンジクォークを含めた現実の世界により近い、3種類の動的クォークの自由度を厳密に取り扱った2+1フレーバー格子 QCD 数値計算がスタンダードとなった。本研究においては、すでに公開されているこれらの2+1 フレーバー QCD ゲージ配位を利用して、模型に依らない強い相互作用の第一原理計算として核子の構造研究やフレーバーSU(3)の破れに関連したストレンジネスを含むハドロンの研究を行った。

研究成果の概要(英文)：The latest lattice QCD calculations are progressing with steadily increasing accuracy due to the rapid development of the computer and the numerical algorithm. Fully dynamical QCD simulations with two degenerate light (up and down) and heavier (strange) flavors of quarks have been mostly devoted to studies of the hadron structure by the worldwide lattice QCD community during the past several years. In this study, we take advantage of 2+1 flavor dynamical QCD gauge configurations, which are publicly available to lattice QCD community through ILDG (International Lattice Data Grid) and then study the nucleon structure and also hadron properties from the viewpoint of the SU(3) flavor symmetry breaking by first-principles calculation in a model-independent way.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：ハドロン物理

科研費の分科・細目：原子核(理論)

キーワード：量子色力学、格子ゲージ理論、ハドロン物理

1. 研究開始当初の背景

研究責任者は2004年10月から2006年9月まで、東京大学より理研BNL研究センター(RBRC)へフェロー研究員として出向してRBRCの格子プロジェクトチームに参加し

た。その当時RBRCが導入した、新しい格子QCD数値計算専用の超並列スーパーコンピュータQCDOC(peakスピード12TFlops相当)を用いて、ドメインウォールフェルミオン(DWF)の格子フェルミオン定式化による、

ストレンジクォークを含めた現実の世界により近い3種類の動的クォークの自由度を厳密に取り扱った2+1フレーバー格子QCD数値計算の日米英3カ国の国際共同研究に参画してきた。この国際共同研究プロジェクトにより、格子間隔0.13 fm(格子間隔の逆数が1.7 GeV程度)で物理的格子サイズが3 fm程度になるQCDゲージ配位の生成および蓄積がなされ、格子QCD研究者への一般公開も行われてきた。

2. 研究の目的

2+1 フレーバー格子 QCD 数値解析により、アップ・ダウンクォークよりやや重いストレンジクォークの自由度の存在に着目した、フレーバーSU(3)対称性の破れに関連したハドロン構造の研究を行う。また、アップ・ダウンクォークの質量は π 中間子質量に換算して330 MeVに相当する、これまで行なわれてきたどの核子構造の研究よりもカイラル極限に近い格子 QCD 数値解析を目指した。そちらの数値解析により、核子の諸性質とカイラル対称性との関連を明らかにすることも本研究課題における重要な目的となる。

3. 研究の方法

格子 QCD 数値解析で最も時間の要する QCD ゲージ配位の準備をすることはせず、すでにRBRCによって公開済みのDWFによる2+1フレーバー格子QCDゲージ配位を利用して研究課題を遂行していく。格子QCD数値計算遂行のための計算リソースに関しては高エネルギー加速研究機構(KEK)の大型シミュレーション研究公募を通じて、KEK所有のIBM Bluegene/L(RBRC所有のRBRCはこのマシンのプロトタイプ機)を利用する。又は、筑波大学計算科学研究センターにおける公募型共同利用を活用して研究を遂行する。

4. 研究成果

これまでに2+1フレーバー格子QCD数値解析により、以下のような研究内容に関して成果が得られた。

(1) CKM 行列要素のユニタリティの検証：

カビボ-小林-益川(CKM)行列要素の第一行目(Vud, Vus, Vub)のユニタリティ条件の判定にはVusを精度よく決定する必要がある。本研究では、Vusの決定に必要なK中間子の弱い相互作用による崩壊の形状因子 $f_+(q^2)$ を格子QCD数値解析による数値計算で決定し、さらにその結果と崩壊率に対する最新の実験結果を合わせて、Vusをこれまでになく高い精度で決定することに成功した。CKM行列のユニタリティ条件からのズレが約0.1%以下であることも示した。その結果、素粒子標準模型を超えるシナリオに対する一定の制

限を与えたることとなった。

(2) 核子弱崩壊遷移要素の研究：

核子の構造に関する格子QCD計算は近年着実に精度が上がりつつあるが、もっぱら核子の電磁形状因子や深非弾性散乱における核子構造関数に重きを置いている。本研究においては弱い相互作用の軸性ベクトルカレントに伴う形状因子に焦点を当てた。軸性ベクトルカレントに伴う核子行列要素は、軸性ベクトルタイプの形状因子と擬スカラータイプの形状因子の2つの形状因子によって特徴づけられる。前者の零運動量極限は中性子ベータ崩壊定数に対応し、後者の擬スカラー定数に対応する。

① 中性子ベータ崩壊定数の研究：

中性子ベータ崩壊定数は、理論的にも非常に基礎的な物理量であるにもかかわらず、格子QCD数値計算によって長年実験値を再現することができなかったが、本研究における2+1フレーバー格子QCD数値計算によって実験値を数%の誤差の範囲内で再現することに成功した。

② 核子擬スカラー定数の研究：

擬スカラータイプの形状因子の零運動量近傍の値は、核子ミュオン吸収の実験で測られる核子擬スカラー電荷として知られるもので、その値については、仏国サクレ研究所で行われた実験(OMC)と加連邦トライアンフ研究所で行われた実験(RMC)での食い違いが長年の問題になっている。前者のOMCは後者のRMCの実験に比べ、実験の過程で2つの陽子とミュオンとの分子状態が作られやすく、そのことによる系統誤差が大きい事が指摘されているが、RMCの実験値はカイラル摂動論などを使った理論的予想からは大きくはずれていた。

この理論を含む食い違いの問題に、強い相互作用の第一原理計算である格子QCDを用いて研究を行った。格子QCD数値解析により、小さな運動量における擬スカラータイプの形状因子の振る舞いは、理論的に予想とされてきたパイオン極近似をよく見ていることを確認し、最終的に核子ミュオン吸収の核子擬スカラー電荷としてカイラル摂動論による予言値に近い値を得た。本研究の計算値は、最近スイスのPSIで行われた、MuCap collaborationによる新しいOMCの実験値をよく再現し、これまで信じられてきたRMCの実験値の信憑性を問う結果となった。

(3) 核子の大きさについての研究

核子の大きさの定義は色々あるが、最も理論的にも実験的にも、これまでよく研究されてきたものとして、形状因子の低エネルギー極限における運動量移行依存性から定義される平均自乗半径がある。格子 QCD 数値計算においてもベクトル、軸性ベクトルの両チャンネルに關与する計 4 つの異なる形状因子を計算でき、それぞれの低エネルギー極限における形状因子の運動量移行依存性からそれぞれの意味での平均自乗半径を測定することができ、このことを使って核子の大きさについての情報が引き出せる。

ここでの研究においては、ストレンジクォーク質量を現実の値に固定した下で、アップ・ダウンクォークの質量が π 中間子の質量 330 MeV, 390 MeV, 520 MeV, 620 MeV に相当する 4 つの異なるアップ・ダウンクォークの質量における格子 QCD 数値計算を行った。電荷平均自乗半径を含むいずれのチャンネルにおける平均自乗半径も、そのクォーク質量依存性は非常に弱く、単純なカイラル極限への外挿ではそれぞれの実験値を 3 分 2 程度しか再現できないことを指摘した。この数値計算の結果と実験値との食い違いの背後には、カイラル摂動論で電荷平均自乗半径などにおける、 π 中間子による量子効果を計算する際に必然的に現れるカイラル極限での強い赤外発散との関連が強く示唆される。

(4) 核子構造関数に関する研究

厳密に軸性ベクトル対称性を取り扱うことのできるドメインウォールフェルミオンを用いた格子 QCD 第一原理計算により、核子の構造関数の低次のモーメントに関して研究を行った。

有限体積効果に充分留意して、二つの異なる物理サイズ(一辺が 2 fm と 3 fm に相当する大きさ)の計算結果が統計誤差の範囲で差異がないことを確認した。物理量の繰り込みに際しては、格子上での繰り込み定数に関して RI/MOM スキームによる非摂動論的な繰り込みを行い、これまで大きな不定性となっていた 1-loop 計算の摂動計算による繰り込み定数の決定方法に由来する系統誤差を最大限縮小することに成功した。これら全ての試みによって、これまでで最も精度の高い理論計算を成し遂げた。そのことによって、これまでの研究で示唆されてきた、実験値との大きな差が(実験値よりも 5 割ほど大きな値が格子 QCD 計算によって計算されてきた)クォークの質量を物理点に近づけるに従って縮小傾向にあることを確認し、QCD の赤外有効理論であるカイラル摂動論における 1-loop 計算の予言と矛盾しない事を確認した。

(5) ハイペロン β 崩壊に関する研究

ハイペロン β 崩壊は現象論的に「CKM 行列のユニタリティの問題」や「陽子スピン問題」と関連して重要であるにも関わらず、ハイペロン β 崩壊におけるフレーバー SU(3) の破れの構造が理論的不定性なく理解されているとは言い難い。本研究では CKM 行列要素のユニタリティの検証にも関連して、ハイペロン β 崩壊のベクトルカレントの形状因子、Dirac 形状因子 $f_1(q^2)$ におけるフレーバー SU(3) の破れの効果に焦点を絞って研究を行った。

π 中間子質量に換算して 330 MeV 相当に対応するアップ・ダウンクォークのシミュレーションにおいても、これまでのクエンチ近似格子 QCD 計算と同様に、フレーバー SU(3) 対称性の破れの増大によってベクトル結合 $f_1(0)$ の大きさが対称性が厳密に成り立つ場合に比べ相対的に減少していることが明らかとなった。この傾向は重いバリオンを含んだ拡張された SU(3) カイラル摂動論やラージ Nc 極限による解析とは逆の傾向を示している。現実的な格子 QCD 計算による「模型に依らない理論的評価」は、SU(3) カイラル摂動論やラージ Nc 極限による解析の正当性に疑問を呈することとなった。

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 7 件)

- ① S. Sasaki, and T. Yamazaki, *Physical Review D* **78**, 014510 (2008), 査読有り
- ② P.A. Boyle, A. Jüttner, R.D. Kenway, C.T. Sachrajda, S. Sasaki, A. Soni, R.J. Tweedie, J.M. Zanotti, *Physical Review Letter* **100**, 141601 (2008), 査読有り
- ③ T. Yamazaki, Y. Aoki, T. Blum, H.-W. Lin, M.-F. Lin, S. Ohta, S. Sasaki, R.J. Tweedie, J.M. Zanotti, *Physical Review Letter* **100**, 171602 (2008), 査読有り
- ④ H.-W. Lin, T. Blum, S. Ohta, S. Sasaki, T. Yamazaki, *Physical Review D* **78**, 014505 (2008), 査読有り
- ⑤ T. Yamazaki, Y. Aoki, T. Blum, H.-W. Lin, S. Ohta, S. Sasaki, R.J. Tweedie, J.M. Zanotti, *Physical Review D* **79**,

114505 (2009), 査読有り

- ⑥ S. Sasaki, and T. Yamazaki, Physical Review **D 79**, 074508 (2009), 査読有り
- ⑦ Y. Aoki, T. Blum, H.-W. Lin, S. Ohta, S. Sasaki, R.J. Tweedie, T. Yamazaki, J.M. Zanotti, Physical Review **D 82**, 014501 (2010). 査読あり

[学会発表] 計6件)

- ① 佐々木勝一, 日本物理学会大第63回年会、平成20年3月24日、近畿大学
- ② 佐々木勝一、日本物理学会2008年秋季大会、平成20年9月20日、山形大学
- ③ 佐々木勝一、第3回日米物理学会合同核物理分科会、平成21年10月17日、米国ハワイ州、ハワイ島
- ④ 佐々木勝一、核子構造軌道角運動量(OAM)研究会、平成22年2月12日、埼玉県和光市、理化学研究所
- ⑤ 佐々木勝一、次世代格子ゲージシミュレーション研究会、平成22年9月24日、埼玉県和光市、理化学研究所
- ⑥ 佐々木勝一、国際会議 BARYONS' 2010、平成22年12月7日、大阪府、大阪大学吹田キャンパス

[その他]

該当なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐々木勝一 (SASAKI SHOICHI)
東京大学・大学院理学系研究科・助教
研究者番号：60332590

(2) 研究分担者

該当者なし

(3) 連携研究者

該当者なし