

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2006 ～ 2008
 課題番号：18740167
 研究課題名（和文） カイラル対称な格子フェルミオンを用いた素粒子現象論の新局面
 研究課題名（英文） New aspect of particle physics using lattice chiral fermion
 研究代表者
 山田 憲和（YAMADA NORIKAZU）
 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・助教
 研究者番号：50399432

研究成果の概要： 厳密なカイラル対称性を持つフェルミオン形式で記述されるクォーク場の動的効果を取り入れた数値シミュレーションを行い、中性 K 中間子の混合振幅の決定、S-parameter の決定等を行った。これとは別に、QCD のゲージ配位に QED の配位を結合し、従来の格子 QCD では評価できない up と down クォークの質量差をより現実的な 2-フレーバー理論で予言した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,400,000	0	1,400,000
2007年度	1,200,000	0	1,200,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	270,000	3,770,000

研究分野：格子場の理論

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：素粒子論、格子QCD、カイラル対称性、大規模数値シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

格子 QCD が素粒子現象論から期待されていることの一つは、様々な物理量における非摂動効果を第一原理に基づいて正しく取り扱い、制御された系統誤差、統計誤差を伴って物理量を予言することにある。格子 QCD の結果において、「誤差が制御されている」ことは既にあまり大きくなることが分かっている「新しい物理の効果」を探す際に直接影響を与えるため非常に重要である。しかしながら、研究開始当初は、計算機のパワー不足のため、実際のクォーク質量よりも何十倍も重いクォークしか取り扱うことができず、その結果非現実的なシミュレーションしかでき

なかったため、その質量の外挿に伴う系統誤差をどう評価すべきなのか、そもそも信頼できる系統誤差を付けることができるのか、という問題があった。この問題は、格子計算で得られる殆ど全ての物理量にとって共通の問題であった。

2. 研究の目的

目的は、上述の問題を高速な計算機の導入とより効率のよい計算手法の開発を通して解決することである。具体的には、より物理的なクォークに近い質量でシミュレーションを行い、外挿による不定性を減らすこと。外挿の際は、カイラル摂動論が予言する質量依

存性を指導原理として行うが、そもそも格子上のクォーク質量がカイラル摂動論が取り扱える範囲に入っているか否かも検証しておく必要がある。その上で、現象論的に重要ないくつかの物理量の格子計算を行う。

3. 研究の方法

2008年3月よりKEKにおいて稼働を開始したスーパーコンピュータシステムを主な計算資源として用いた。格子QCDの研究において、何よりも重要で最も計算コストがかかる部分はゲージ配位の生成である。全ての物理量はこの配位を基に計算される。現実の質量にできるだけ近い軽いクォークを格子上で実現する以外に上述の問題を解決することはできないが、従来使われてきたWilson fermionの形式ではそれが難しいとされていた。その理由は、この形式がカイラル対称性を持っていないからであり、この対称性を持つオーバーラップフェルミオン形式を導入した。この形式は、厳密なカイラル対称性を持つことに起因して様々な利点がある。例えばオーバーラップディラック演算子の固有値にある意味において理論的に決まる最低値が存在する点が挙げられる。この最低値の存在によりクォークがどんなに軽くてもディラック行列の条件数が爆発的に大きくなることはないためシミュレーションが滞りにくい。一方で、Wilson fermion形式ではこの最低値が存在しないためクォークがある程度軽くなってくると固有値はいくらでも小さくなり得る。その結果ゼロ固有値がある頻度で発生し、シミュレーションはストップしてしまう。このように利点がある一方でオーバーラップ形式は、計算コストが大きいため、何だかの工夫を行う必要がある。その他にもこの形式のクォーク場は連続極限をとる際重要となってくる局所性が保証されていないため、その点も数値的に調べる必要があった。

一度、十分な数のゲージ配位が生成され、場の局所性が数値的に証明されると、次はいくつかの物理量を格子上で計算し、カイラル摂動論の予言との整合性の検証を行った。オーバーラップ形式の導入により軽いクォークを取り扱えるようになったとはいえ、実際の質量よりはまだ重い。このためカイラル摂動論の予言を指導原理としてデータ点をカイラル外挿をする必要があるが、データ点がカイラル摂動論の収束範囲に入っているか否かを見極めておかなければならない。次に現象論的に重要な物理量の計算を行った。本科研費では中性K中間子の混合パラメータ、S-parameter, カイラル凝縮、Nucleon sigma term等の計算をした。

また、Brookhaven研究所にあるスーパーコンピュータQCDOCを用いて、upとdownクォークの質量差の決定を行った。この決定の際、実験のinputとしては π 中間子とK中間子質量を使うが、これらの中間子質量へのu-d質量差の効果は電磁気力が及ぼす効果と同程度であることが分かっているため、QED相互作用も正しく取り込む必要がある。これを実現するため、格子QCDのゲージ配位にQEDの配位を結合したQCD+QEDの配位を作りその上で中間子質量の計算を行った。

4. 研究成果

まず、ゲージ配位の生成にかかる計算コストの削減については、大域的トポロジーを固定することにより実現した。これは、大域的トポロジーが変わる際の特徴的配位が出現しないよう Boltzmann weight に小細工をすることができる。これにより場の理論において重要な clustering property は損なわれるが、その効果は時空の体積に逆比例する形で現れ、原理的には系統的に補正が可能であるため問題にはならない。具体的には、大域的トポロジーが固定されていても、局所的に揺らいでいれば良いわけだが、実際にトポロジカルサセプタビリティを計算し、カイラル摂動論と無矛盾なクォーク質量依存性を示すことでそれを実証した(図1参照)。

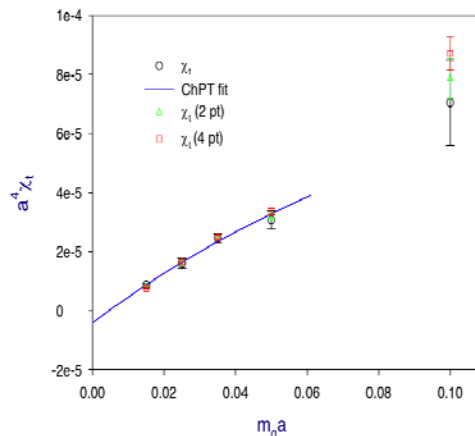


図1 トポロジカルサセプタビリティのクォーク質量依存性。

一方で、カイラル行列模型は、有限体積で且つ固定された大域的トポロジーを持つQCDの系と等価であることが知られているが(いわゆる ϵ -regime QCD)、これを使ってカイラル凝縮の決定を行った。この際、大域的トポロジーの固定はむしろ必須となる(図2参照)。

また実際の物理量の計算へ進む前に、オーバーラップクォークの局所性を数値的に実証した。

次に得られた配位を現象論へ応用した。まず、中性 K 中間子の混合パラメータBK を決定した。その際、BK のクォーク質量依存性とカイラル摂動論が予言する依存性を比較し、 $m_q < 40, 50 \text{ MeV}$ のデータはカイラル摂動論と無矛盾な振る舞いを示すことを指摘した。すなわち、それより重いデータだけを使って外挿しても正しい値は得られないということである(図 3 参照)。

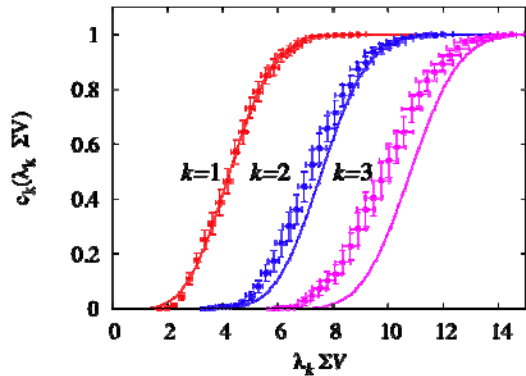


図 2 ディラック演算子の k 番目に低い固有値の accumulated ヒストグラムとカイラルランダム行列の予言との比較。

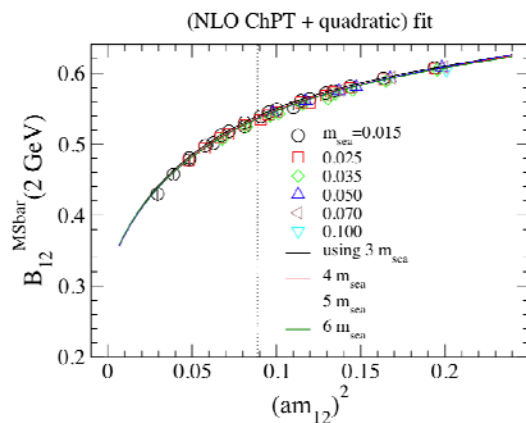


図 3 B-parameter の中間子質量依存性。

次の応用として、2-flavor QCD の S-parameter の計算と、擬南部-Goldstone 中間子の質量の計算を行った。これら 2 つの物理量は、Vector カレントの 2 点相関関数と Axial-vector カレントの 2 点相関関数の差から決定される。これら 2 つの相関関数の各々の大きさに対しその差は非常に小さいため、「差」における系統誤差が高精度で制御されていないと正しい結果を得ることはできない。例えば Wilson fermion 形式でこの量を計算すると、この形式にはカイラル対称性が無いことからその「差」を見ても explicit

breaking が支配的であり、そこから物理的な寄与を抜き出すことはできない。従ってオーバーラップ形式で計算することが本質的である。これら 2 つの物理量は、新しい物理の候補であるテクニカラー模型を様々な実験結果により検証する際、極めて重要な役割を果たすが、非摂動効果のため正確に計算することは困難であった。諸々の系統誤差に注意しつつこれらの量を計算したところ、2 つの物理量の実験値を再現した(図 4 参照)。このことから、格子ゲージ理論の応用範囲をヒッグスの物理へも広げる活気的な仕事になった。特に、これから始まる LHC 実験で探るヒッグス機構と電弱相転移の解明に非常に有用な成果である。

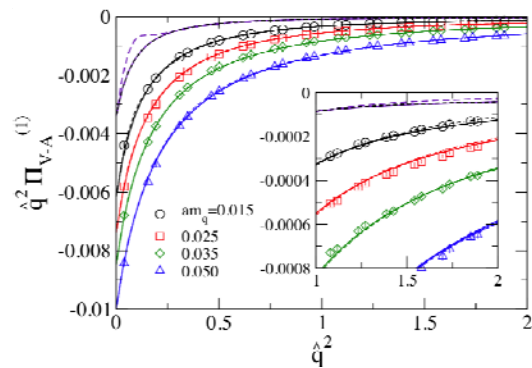


図 4 真空偏極関数の運動量依存性。

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 10 件)
- ① E. Shintani, S. Aoki, H. Fukaya, S. Hashimoto, T. Kaneko, H. Matsufuru, T. Onogi, N. Yamada, for JLQCD Collaboration, “S-parameter and pseudo Nambu Goldstone boson mass from lattice QCD”, Physical Review Letter, 101, 202004, 2008, 査読有
 - ② S. Aoki, H. Fukaya, S. Hashimoto, J. Noaki, T. Kaneko, H. Matsufuru, T. Onogi, N. Yamada, “BK with two flavors of dynamical overlap fermions”, Physical Review, D77, 094503, 2008, 査読有
 - ③ Thomas Blum, Takumi Doi, Masashi Hayakawa, Taku Izubuchi, Norikazu Yamada, “Determination of light quark masses from the electromagnetic splitting of pseudoscalar meson masses computed with two flavors of domain wall fermions”, Physical Review,

D76, 114508, 2007, 査読有

〔学会発表〕（計 8 件）

- ①. 山田 憲和, “シュレディンガー汎関数を用いた 10 フレーバー QCD における結合定数のスケール依存性の計算”, 日本物理学会、2009/3/27, 立教大学
- ②. “Pseudo-NG boson mass and S-parameter from lattice QCD”, 日本物理学会, 2008/3/24, 近畿大学
- ③. “Lattice calculation of vacuum polarization”, Workshop “Towards the precise prediction of CP violation”, 2007/10/22, 京都大学基礎物理学研究所
- ④. “BK with dynamical overlap fermions”, 日本物理学会、2007/9/21、北海道大学
- ⑤. 同、International Conference “Lattice 2007”, 2007/8/2、レーゲンスブルグ大学(ドイツ)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山田 憲和 (YAMADA NORIKAZU)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・助教

研究者番号：50399432