

平成 21 年 5 月 26 日現在

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19740134
 研究課題名（和文）京速計算機に向けた場の量子論のための計算手法とデバイスの開発
 研究課題名（英文）Research and development for algorithms devices of quantum field theories towards the next generation super computer

研究代表者
 出渕 卓（IZUBUCHI TAKU）
 金沢大学・自然科学研究科・研究協力員
 研究者番号：60324068

研究成果の概要：場の量子論の大規模数値計算の新しい計算手法の研究開発を行った。まず、真空角度が入った量子色力学（QCD）配位生成の新しい手法を開発し、実際にトポロジー電荷が零からずれた真空の生成に成功した。また、周期的境界条件を課した時空上で、端に非物理的な逆電場の出ない様で十分弱い電場をシミュレーションする方法を研究し、その二つの手法を元に Strong CP 問題を解明するべく、核子の電気双極子モーメントの計算を行った。この他、場の理論の計算手法の開発としてクォーク・反クォークの生成消滅が2回以上起きている量子振幅（非結合ループ）に係わる計算として、 η' 中間子の質量計算を行った。通常行われている、2つのクォークループ間の相関関数を測る方法の他に、QCD 配位生成段階でループの片方をモンテカルロの生成確率に押し込めてしまう新たな計算手法を試し、両者で互いに無矛盾な結果を出すことを確かめ、 η' 中間子をはじめその他の中間子の質量を求めた。これらの基本となる動的アップ、ダウン、ストレンジクォークの効果を入れたドメインオール QCD のシミュレーションを行い、素粒子標準モデルのパラメータを精度よく決定した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,100,000	0	2,100,000
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	360,000	3,660,000

研究分野：数物系科学

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：格子場の理論、素粒子物理、大規模シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

陽子、中性子や中間子などのハドロン粒子はクォーク粒子とその間の相互作用を司るグルーオンによって構成されており、量子色力学(QCD: Quantum Chromo Dynamics)と呼ばれる量子的場の理論によって記述される。この

力学は非常に強く複雑な相互作用をもつため、通常の摂動論では捉えきれない非摂動論的な振る舞いが重要となる。

近年、理論、計算アルゴリズム、計算機の急速な進展に伴いこの自然界の真の第一原理のひとつである QCD を一切の近似を廃し

て摂動論に頼らずに計算するシミュレーション 格子 QCD が発達してきた。近年の格子 QCD シミュレーションにおいて特筆すべき点として、

- 質量が非常に軽い場合に成立するクォークの右手成分と左手成分の独立性に対応する、カイラル対称性を保った格子クォークのシミュレーションができるようになった。これにより有限サイズの格子間隔であってもカイラル変換に付随するトポロジーを研究することが可能となり、カイラル対称性の露わな破れから来る離散誤差を小さくでき、またクォーク反クォークなどからなる物理的に興味深い演算子（中間子の崩壊双一次演算子、中間子一反中間子間の混合を表す 4 体演算子、統一理論によける陽子の崩壊を表す 3 体演算子など）を格子上で計算する場合の演算子間の非物理的な（カイラリティの異なる演算子間の）混合を抑止することができる。また QCD の非摂動的現象の顕著なものとして「カイラル対称性の自発的破れ」があるが、このメカニズムを正しく数値計算で扱うためには、用いる格子理論にカイラル対称性がある必要である。
- 動的クォークの効果、つまりグルーオンに対するクォーク粒子からのバックリアクション（真空偏極）の効果を取り入れることが可能となった。これにより、シミュレーションを行う理論の量子確率が保存され（ユニタリー）、動的クォークを無視したことから来る系統誤差（クエンチ誤差）をなくすことができる。という 2 点があげられる。これらの進展より、格子 QCD シミュレーションは自然界の根本原理である素粒子理論 QCD の真の第一原理計算の有力な候補となっており、事実、加速器やその他の素粒子原子核実験と素粒子現象の理論に関する欠かすことの出来ない計算手法として認識されていることが研究背景である。

2. 研究の目的

強い相互作用の真空角度問題 (Strong CP Problem)

素粒子物理学における長年の問題として強い相互作用における荷電・パリティ変換の破れの問題と呼ばれる問題 (Strong CP Problem) がある。QCD の基礎方程式（あるいはラグランジアン）に理論的には許されるはずである（繰り込み可能な）次元 4 のトポロジー電荷に比例する形で書ける真空角度 θ の相互作用 (θ 項) が自然な強さ ($\theta \sim 1$) であったとすると、中性子や陽子などの電気

双極子モーメントが現在実験で観測されているより約 10 桁も大きくなるはずであるというモデル計算に基づく、QCD の θ 項の「不自然な」弱さについての問題である。この問題の解決の糸口にすべく、電気双極子モーメントを非摂動的に第一原理計算から求める。

標準模型の精密検証

自然界の「電磁気力」、「弱い力」、「強い力」をまとめた基本理論に素粒子「標準模型」がある。ごく一部の例外をのぞき、これまで実験で発見されている物理現象はすべて「標準模型」の予言と合致しているが、「世代数の問題」「質量階層問題」上で述べた「真空角度問題」など「標準模型」では理論的に説明しきれない謎があり、自然を記述する究極の理論ではないだろうという予測がある。標準模型を第一原理から系統誤差をできる限り廃して精度よく計算し、素粒子の精密実験と対峙させることによって、素粒子標準模型の綻びがないか、さらには標準模型を超えた新しい物理の発見を目指す。

η' 中間子

η' 中間子は QCD のカイラル対称性の量子異常という非常に興味深い性質の表れであり、その質量が何故重いのか (Strong U(1) Problem) を第一原理から理解することは非常に重要である。また η' をはじめとするフレーバー変換に対して不変な中間子 (フレーバー一重項中間子) はその物理的な重要性にもかかわらず格子 QCD で計算することは難しく現在に至っても満足できる計算結果がない。この困難はクォークの非連結ループの効率の良い統計サンプリングが鍵となる。本研究ではこの非連結クォークループをカイラル対称性を保ったドメインウォールクォークを用いて研究開発し、フレーバー単重項中間子を含む中間子の質量を計算する。

3. 研究の方法

強い相互作用の真空角度問題 のために、真空角度 θ を配位生成の段階から取り入れる。つまりトポロジーの偏り (CP の破れ) を取り入れた QCD 真空生成を行う。その QCD 真空の上で、次の 3 点の測定を行う

- 複数の θ の値で真空を作成し、トポロジー分布がどのように偏るかを調べる。これは格子上の θ の値と連続理論のそれとの間の関係、つまりトポロジー電荷を

表す演算子の繰り込み（演算子マッチング）を調べることになる。また、インスタントン模型をはじめとする模型との比較も可能となる。

- CPを破った中性子や陽子（核子）の形状因子 F_3 を核子の伝搬関数に電磁電流演算子を挟んだ3点関数を図ることにより計算する。
- 一様で弱い電場を格子全体に印加し、スピンによる核子エネルギーの変化を見ることによって、電気双極子モーメントを調べる。

素粒子標準模型の精密検証のためにカイラル対称性を良い精度で保った格子フェルミオンであるドメインウォールフェルミオンを格子 QCD のシミュレーションに用い、アップ、ダウン、ストレンジの動的クォーク効果を取り入れたシミュレーションを行う。生成した QCD 真空の統計サンプル (QCD 配位) 上を用い、ハドロンの質量の格子 QCD 計算と実験値との比較により、標準模型の基本定数である、3 種類のクォークの質量を高い精度で決定する。また、クォーク間の混合を記述するキャビボ-小林-益川理論の混合行列を決定するのに欠かすことの出来ない、中間子の崩壊定数、K 中間子のレプトン対を含む三体崩壊の形状因子、K 中間子とその反粒子の間での遷移行列要素などを信頼できる精度で決定する。また、生成した貴重な QCD 配位はインターネットを通じて世界中の研究者に公開する。

η' 中間子の研究においてもドメインウォールクォークを用い、離散誤差を抑える。統計ノイズが大きい非連結クォークループのへの対策として

- 中間子の波動関数をなるべく基底状態のものに近付けたものにする (スメアリング)
- 質量を計算する際に、第一励起状態までを取り入れた解析をすることによって統計ノイズの小さい場所 (伝搬距離が小さい場所) を用いることができるようにする。

を行う。またこのほかに、QCD 配位生成の段階からある特定の時空点のみに中間子の源を置いた配位生成を行い、この配位上で (2 点に比べて統計ノイズが小さいであろう) 一点関数を測ることによって中間子の伝搬関数を決定する試みも行う。

4. 研究成果

強い相互作用の真空角度問題

格子クォークとしてクローバーフェルミオンを用い、純虚数に解析接続した真空角度 $\theta = 0.2, 0.4$ の QCD 真空を 7,000 トラジェク

トリ作成した。格子間隔は 約 0.1fm である。トポロジー電荷の分布は予想とおり θ の値に応じて非ゼロの値を中心に分布した。CP を破る核子の形状因子 F_3 についても θ に代替比例して陽子、中性子共値を持つことがわかった。用いたクローバーフェルミオンは離散誤差としてカイラル対称性を破る効果を持っており、その破れの効果が計算結果にどのように影響するかという系統誤差をおさえることが今後の課題である。

素粒子標準模型の精密検証

ドメインウォールをアップ、ダウン、ストレンジの3種類のクォークとして用い、それらの動的な効果を完全に取り入れた QCD 真空を作成した。格子間隔は 約 0.12 fm クォーク質量は 物理的なストレンジクォークの約 1/5 (約 20 MeV) まで軽い範囲をカバーしている。

作成した、QCD 真空上で Ω バリオン、 π 、K 中間子を測ることにより、素粒子標準模型にとって重要なパラメータであるクォーク質量を決定した。また、 π 、K 中間子のレプトン2体崩壊 (K_{l2}) 及び $\pi \rightarrow K l \nu$ のセミレプトニック3体崩壊 (K_{l3}) のハドロンの行列要素を高い精度で決定した。K 中間子と反中間子の混合にかかわる行列要素 (B_K) を決定し、これについてはドメインウォールクォークのカイラル対称性のおかげで現在のところ最も信頼のおける結果を出している。 K_{l2} 、 K_{l3} 、 B_K の計算結果と実験結果を突き合わせて、小林-益川理論のクォーク混合行列に制限を与えることができる。

これらの基本的な QCD の性質の測定の他に、電磁相互作用 (QED) を取り入れたシミュレーションも行い、荷電ハドロンと中性ハドロンの差異 (アイソスピンの破れ) についての計算も行い、アップクォークとダウンクォークの質量比や陽子と中性子の質量差などを研究した。

η' 中間子

アップ、ダウンクォークとしてドメインウォールクォークを用いた $N_f=2$ の QCD 真空を用いて、フレーバ表現のトリプレットとシングレットに属する全ての中間子の伝搬関数を計算した。中間子の波動関数として基底状態、励起状態への結合が互いに異なるものを複数用意し、その伝搬関数 (行列) を対角化することによって、 $N_f=2$ の範囲で η' 、 ω 、 π^* など今までの計算では得られなかったエネルギー固有値を求めた。さらにストレンジクォークの動的効果を取り入れた計算を行い、また連続極限を取ることがこれからの課題である。

実験的な試みとして、 η' のソースを QCD 真

空の作成の段階から取り入れ、その上で η' の 1 点関数の時間依存性を調べることによってエネルギー固有値を求める新しい方法を試した結果、通常の 2 点関数と一致する結果を得た。統計エラーは通常の方法に比べて特に減ることがなかったが新しい計算方法の正しさを確かめることが出来た。

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 15 件)

1. C. Sturm, Y. Aoki, N.H. Christ, T. Izubuchi, C.T.C. Sachrajda, A. Soni, "Renormalization of quark bilinear operators in a MOM-scheme with a non-exceptional subtraction point", arXiv:0901.2599[hep-ph], 掲載予定, 査読有
2. Ran Zhou, Thomas Blum, Takumi Doi, Masashi Hayakawa, Taku Izubuchi, Norikazu Yamada, "Isospin symmetry breaking effects in the pion and nucleon masses", PoS LAT2008, (7 pages) 掲載予定, 査読無
3. R. Horsley, T. Izubuchi, Y. Nakamura, D. Pleiter, P.E.L. Rakow, G. Schierholz, J. Zanotti, "The electric dipole moment of the nucleon from simulations at imaginary vacuum angle theta", arXiv:0808.1428[hep-lat], 2008 査読無
4. C. Allton, D.J. Antonio, Y. Aoki, T. Blum, P.A. Boyle, N.H. Christ, S.D. Cohen, M.A. Clark, C. Dawson, M.A. Donnellan, J.M. Flynn, A. Hart, T. Izubuchi, A. Juttner, C. Jung, A.D. Kennedy, R.D. Kenway, M. Li, S. Li, M.F. Lin, R.D. Mawhinney, C.M. Maynard, S. Ohta, B.J. Pendleton, C.T. Sachrajda, S. Sasaki, E.E. Scholz, A. Soni, R.J. Tweedie, J. Wennekers, T. Yamazaki, J.M. Zanotti, "Physical Results from 2+1 Flavor Domain Wall QCD and SU(2) Chiral Perturbation Theory", Phys.Rev.D78 (2008) 114509 (60 pages), 査読有
5. Koichi Hashimoto and Taku Izubuchi, "Yeta' meson from two flavor dynamical domain wall fermions", Prog.Theor.Phys.119 (2008) 599-641 (42 pages). 査読無

6. Y.Aoki, P.A.Boyle, N.H.Christ, C.Dawson, M.A.Donnellan, T.Izubuchi, A.Juttner, S.Li, R.D.Mawhinney, J.Noaki, C.T.Sachrajda, A.Soni, R.J.Tweedie, A.Yamaguchi, "Non-perturbative renormalization of quark bilinear operators and B_K using domain wall fermions", Phys.Rev.D78 (2008) 054510 (28 pages), 査読有

7. D.J. Antonio, P.A. Boyle, R.J. Tweedie, J.M. Zanotti, C. Dawson, T. Izubuchi, A. Juttner, C.T. Sachrajda, S. Sasaki, A. Soni, "K to pi semileptonic form factor with 2+1 flavor domain wall fermions on the lattice" PoS KAON:010,2008, 査読無

8. 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", Phys.Rev.D76 (2007) 114508 (38 pages), 査読有

9. D.J.Antonio, P.A.Boyle, T.Blum, N.H.Christ, S.D.Cohen, C.Dawson, T.Izubuchi, R.D.Kenway, C.Jung, S.Li, M.F.Lin, R.D.Mawhinney, J.Noaki, S.Ohta, B.J.Pendleton, E.E.Scholz, A.Soni, R.J.Tweedie, A.Yamaguchi, "Neutral kaon mixing from 2+1 flavor Domain Wall QCD", Phys. Rev. Lett. 100 (2008) 032001 (4 pages), 査読有

10. C.Allton, D.J.Antonio, T.Blum, K.C.Bowler, P.A.Boyle, N.H.Christ, S.D.Cohen, M.A.Clark, C.Dawson, A.Hart, K.Hashimoto, T.Izubuchi, A.Juttner, C.Jung, A.D.Kennedy, R.D.Kenway, M.Li, S.Li, M.F.Lin, R.D.Mawhinney, C.M.Maynard, J.Noaki, S.Ohta, B.J.Pendleton, S.Sasaki, E.E.Scholz, A.Soni, R.J.Tweedie, A.Yamaguchi, T.Yamazaki, "2+1 flavor domain wall QCD on a (2 fm) 3 lattice: light meson spectroscopy with $L_s = 16$ ", Phys.Rev.D76 (2007) 014504 (18 pages), 査読有

11. Oleg Loktik, Taku Izubuchi, "Perturbative renormalization for static and domain-wall bilinears and

four-fermion operators with improved gauge actions", Phys.Rev. D75 (2007) 034504 (11 pages), 査読有

12. D.J.Antonio, T.Blum, K.C.Bowler, P.A.Boyle, N.H.Christ, S.D.Cohen, M.A.Clark, C.Dawson, A.Hart, K.Hashimoto, T.Izubuchi, B.Joo, C.Jung, A.D.Kennedy, R.D.Kenway, S.Li, H.W.Lin, M.F.Lin, R.D.Mawhinney, C.M.Maynard, J.Noaki, S.Ohta, S.Sasaki, A.Soni, R.J.Tweedie, A.Yamaguchi, "First results from 2+1-Flavor Domain Wall QCD: Mass Spectrum, Topology Change and Chiral Symmetry with $L_s=8$ ", Phys.Rev.D75 (2007) 114501 (27 pages), 査読有

13. C. Albertus, Y. Aoki, P.A. Boyle, N.H. Christ, L. Del Debbio, T.T. Dumitrescu, J.M. Flynn, T. Izubuchi, O. Laktik, C.T. Sachrajda, A. Soni, J. Wennekers, "B - anti-B mixing with domain wall fermions in the static approximation", PoS LAT2007:376,2007 (7 pages), 査読無

14. T.Izubuchi, S.Aoki, K.Hashimoto, Y.Nakamura, T.Sekido and G.Schierholz, "Dynamical QCD simulation with θ terms", PoS (LATTICE 2007) 106 (8 pages) (8 pages), 査読無

15. Norman H.Christ, Thomas T.Dumitrescu, Taku Izubuchi, Oleg Laktik, "The Static Approximation to B Meson Mixing using Light Domain-Wall Fermions: Perturbative Renormalization and Ground State Degeneracies", PoS (LATTICE 2007) 351 (7 pages), 査読無

[学会発表] (計 8 件)

1. Taku Izubuchi "Results of Lattice Studies by the RBRC-UKQCD Collaboration" Rencontres de Moriond QCD and High Energy Interactions 2009年3月20日 La Thuile, Italy

2. Taku Izubuchi "The RBC/UKQCD light

quark physics program: Meson result and future plans"

Perspectives on Light Quark Simulations through Machine, Algorithm and ILDG 2009年3月10日 筑波大学 計算科学研究センター

3. Taku Izubuchi "CKM and Lattice QCD" RIKEN-BNL Research Center Symposium 2008年12月10日 Upton, NY, USA

4. 出淵卓 「計算基礎科学における人材育成の現状と課題」次世代スーパーコンピューティング・シンポジウム2008 2008年9月17日 東京 MY PLAZA ホール

5. 出淵卓, 「格子計算の新しい可能性」, シンポジウム 未来の素粒子・原子核シミュレーション, 2007年12月20日, 筑波エポカル国際会議場

6. Taku Izubuchi, "Lattice QCD simulations with theta terms", RBRC Scientific Review, 2007年11月5日, 理研BNL研究センター

7. Taku Izubuchi "Lattice QCD simulations with theta terms: Neutron EDM and eta'" Workshop "Towards the precise prediction of CP violation", 2007年10月24日, 京都大学基礎物理学研究所

8. Taku Izubuchi, "Dynamical QCD with theta terms", XXV International symposium on Lattice Field Theory, 2007年8月1日, レーゲンスブルグ大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

出淵 卓 (IZUBUCHI TAKU)

金沢大学・自然科学研究科・研究協力員
研究者番号: 60324068