

研究責任者名 Name	橋本省二 Shoji Hashimoto	所属機関 Affiliation	高エネルギー加速器研究機構 KEK
受理番号 Proposal No.	大型 12/13-04	研究課題名 Program title	格子ゲージ理論の大規模シミュレーションとその素粒子現象論への応用

研究を終了しましたので、下記の通り報告します。

成果の概要

Abstract

(和文)

scqcd グループは、新スーパーコンピューターシステムを用いた新たな大規模プロジェクトとして、素粒子フレーバー物理で必要になる種々の物理量の精密計算を目標とし、カイラル対称性をよい精度で保つ格子フェルミオンを用いた格子量子色力学の大規模シミュレーションの計画を進めている。高精度格子でのシミュレーションを複数の格子間隔で実行し、連続極限をとる。平成24-25年度は、格子間隔の大きな2点でのシミュレーションの第一段階として3,000HMCトラジェクトリのシミュレーションを数点のクォーク質量で実行し、得られたデータをもとに物理量計算を開始した。カイラル対称性の破れの大きさを調査、クォーク間ポテンシャルやウィルソン流を用いた格子間隔の決定、軽いハドロンの質量計算など、今後行う本格的な解析のための準備を行った。

(英文)

On the new supercomputer system at KEK, the scqcd group (JLQCD collaboration) started a project to perform large scale simulation of lattice Quantum Chromodynamics (LQCD) using lattice fermion formulation that precisely preserves chiral symmetry. Our physics target is a precise calculation of various physical quantities relevant to quark flavor physics, and we plan to generate fine lattices to perform continuum extrapolation. In the term of 2012-2013, we carried out the initially planned 3,000 HMC trajectories on the two smallest lattices in the series at several sea quark masses. We then started physics measurements on these generated gauge configuration data. Among other things, we investigated the residual chiral symmetry breaking with our new fermion formulation, calculated the heavy quark potential and the Wilson flow to determine the lattice spacing, and calculated the light hadron spectrum. These analysis form a basis of our more extensive calculations in the near future.

研究成果を公開しているホームページアドレス

研究成果の 公表	口頭研究発表 件数	査読つきの 学術論文数	プロシーディング 論文数	その他 (投稿中を含む)
	8	2	0	0

成果の公表リスト（それぞれの枠に番号をつけて記入願います。）

口頭研究発表 Presentations at scientific meetings concerning the program		
1. Xu. Feng, Neutral pion decay and the U(1) anomaly, invited planery talk at the 31 st International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE 2013), July 29-August 3, 2013, Mainz, Germany. 2. H. Fukaya, Overlap/domain-wall reweighting, at LATTICE 2013. 3. J. Noaki, Fine lattice simulations with chirally symmetric fermions, at LATTICE 2013. 4. S. Hashimoto, Residual mass in five-dimensional fermion formulations, at LATTICE 2013. 5. G. Cossu, JLQCD Iroiro++ lattice code on BG/Q, at LATTICE 2013. 6. Y.G. Cho, O(a ²)-improved actions for heavy quarks, at LATTICE 2013. 7. T. Kaneko, Large-scale simulations with chiral symmetry, at LATTICE 2013. 8. T. Iritani, Analysis of topological structure of the QCD vacuum with overlap-Dirac operator eigenmode, at LATTICE 2013.		
査読付きの学術論文(雑誌名等には 巻、頁、発表年を記載) (*) 不足する場合には追加願います。		
Refereed Journal Articles (name of journal, volume, page, year)		
1	著者名 Author	G. Cossu, S. Aoki, H. Fukaya, S. Hashimoto, T. Kaneko, H. Matsufuru, J. Noaki
	タイトル title	Finite temperature study of the axial U(1) symmetry on the lattice with overlap fermion formulation
	雑誌名 name of journal	Physical Review D87 (2013) 114514.
	URL	http://prd.aps.org/abstract/PRD/v87/i11/e114514
2	著者名	H. Ohki, K. Takeda, et al.
	タイトル	Nucleon strange quark content from Nf=2+1 lattice QCD with exact chiral symmetry
	雑誌名等	Physical Review D87 (2013) 034509.
	URL	http://prd.aps.org/abstract/PRD/v87/i3/e034509
3	著者名	
	タイトル	
	雑誌名等	
	URL	
プロシーディング論文(雑誌名等には 巻、頁、発表年を記載) (*) 不足する場合には追加願います。		
International Conference Proceedings (name of journal, volume, page, year)		
1.	著者名 Author	
	タイトル title	
	雑誌名等 name of journal	
	URL	
その他 (学位論文、紀要、投稿中の論文を含む) (URL を記載)		
Others (thesis for a degree, bulletin, papers to be published, etc.)		
なし		
特記 (本研究に関係した、新聞記事・著作、受賞など) (過去に遡っても構いません。)		
Special Notes (newspaper article, literary works, awards, etc.)		
なし		

「格子ゲージ理論の大規模シミュレーションとその素粒子現象論への応用」平成24-25年度研究報告書

高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所 橋本省二

平成25年12月26日

1 研究組織

scqcd グループは KEK、大阪大、京大、筑波大を主体とするグループで、「大型シミュレーション研究」の開始当初から、格子 QCD の大規模シミュレーションによる素粒子物理学の非摂動的な研究を推進している。対外的には JLQCD collaboration の名前で研究発表を行っている。メンバーは以下の通りである。

- 研究責任者

- 橋本 省二 (はしもと しょうじ)
高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所 教授

- 研究従事者

- 金見 隆志 (かねこ たかし)
高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所 研究機関講師
- 松古 栄夫 (まつふる ひでお)
高エネルギー加速器研究機構 計算科学センター 助教
- 野秋 淳一 (のあき じゅんいち)
高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所 特任助教
- Guido Cossu
高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所 研究員
- 大野木 哲也 (おおのぎ てつや)
大阪大学 理学研究科 教授
- 深谷 英則 (ふかや ひでのり)
大阪大学 理学研究科 助教
- 青木 慎也 (あおき しんや)
京都大学 基礎物理学研究所 教授
- 谷口 祐介 (たにぐち ゆうすけ)
筑波大学 物理学系 助教

- 趙 栄貴 (ちょう よんぎ) 筑波大学大学院 数理物質科学研究科 D2
- 大木 洋 (おおき ひろし)
名古屋大学 素粒子宇宙起源研究機構 (KMI) 研究員
- Xu Feng
Columbia University, Postdoctoral fellow

2 研究目標

本研究の目標は、SuperKEKB/Belle II 実験に代表されるクォーク・フレーバー物理の実験・解析において必要となるハドロン行列要素を十分な精度で計算し、実験で得られるデータをもとに標準模型を超える物理の探索につなげることである。2012 年から本格運用が始まった KEK の新スーパーコンピュータシステムを用いて、連続極限に近い格子シミュレーションを実行して精密計算を実現する。カイラル外挿や演算子混合による不定性を抑えることができるよう、カイラル対称性をよい精度で保ちながらも高速なシミュレーションが可能になる格子定式化を開発して採用した。シミュレーションにおいては、新たな計算コードを開発し、最適化を順次進める。物理量計算においても大規模格子で効率のよい計算手法開発を進める。

3 平成 24-25 年度の研究報告

本研究は、基本となる定式化の研究から計算コード開発、シミュレーション実行、種々の物理量計算手法の開発・実行、解析などからなる全体としては大規模なプロジェクトである。以下に、平成 24-25 年度の進捗状況と成果について報告する。

- 本グループがこれまでに進めてきた厳密なカイラル対称性をもつ格子 QCD シミュレーションによる経験をもとに、カイラル対称性を非常によい精度で保ちつつシミュレーションを大幅に高速化できる手法の開発を行った上で、実際の HMC シミュレーションによる本格的なテストを実施した。その結果、ドメインウォール・フェルミオンを修正してカイラル対称性の破れを小さくする定式化を用いることで、カイラル対称性の破れを 0.5 MeV 以下に抑えながら、オーバーラップ・フェルミオンよりも 20 倍程度高速なシミュレーションを実現できることを実証した。
- シミュレーション・コードの開発、アルゴリズムの最適化について継続的に研究を行った。このプロジェクトのために新規の C++コードセット Iroiro++を開発中である。Blue Gene/Q 向けの最適化では、IBM が提供する QCD 向けライブラリをシミュレーションの各所で利用すると同時に、スレッド並列化の最適化を進めた。HMC シミュレーションで必要となるほとんどのパーツについてこの作業を完了し、全体での実行効率を 10%程度にまで高めた。特に、フェルミオン行列の逆を計算する部分では、エジンバラ大学の Peter Boyle 氏が開発した BG/Q 向けに最適化されたコード全体を呼び出すような変更を加えている。

- 大規模シミュレーションは、格子切断として 2.4 GeV, 3.0 GeV, 3.6 GeV, 4.8 GeV をもつ格子データを生成する計画である。格子サイズは $32^3 \times 64$ から $64^3 \times 128$ をもつ大規模格子で、物理的体積として 2.5 fm 程度以上を確保する。それぞれで 400–220 MeV の質量をもつパイ中間子に相当するクォーク質量でのシミュレーションを 4~5 点実行し、クォーク質量依存性を明らかにする。平成 24-25 年度においては、格子切断 2.4 GeV, 3.6 GeV の格子シミュレーションを実行し、2.4 GeV については当初の予定分を完了、3.6 GeV も当初の予定の半分以上を完了した。解析の結果、モンテカルロ・シミュレーションが予想していたよりも大きな自己相関を持つことが判明したため、パラメータを一部調整したうえで、統計量を 3–4 倍に増やすこととした。全体にかかる時間の増加にはクォーク質量の点数を削減することで対応する。
- 格子間隔を決定するため、クォーク間ポテンシャルを計算し、 r_0 スケールを求めた。また、ウィルソン流の計算コードを開発したうえで実行し、ウィルソン流によるスケール決定とトポロジー荷電の計算も行った。
- 通常の軽いハドロン質量の計算を行った。上記の統計量の不足の問題はここでも明らかで、通常の方法で得られた結果では統計誤差が大きい。伝搬関数の原点位置について平均をとる手法を用いてこれを大幅に改善することができたが、上記のように全体の統計量が不十分なため、最終的な結果までは得られていない。今後は高度な平均化の手法などを用いて、より精度のよい結果が得られるよう開発を進める。
- 重いクォークのために用いるフェルミオン作用の研究を行った。エネルギー運動量分散関係を非常に精度よく保ち、かつ格子化による誤差を $O(a^2)$ まで取り除いた格子作用を開発し、その非摂動的なテストを開始した。チャーモニウム質量スペクトルなどで格子間隔依存性が小さいことを確認した。
- 今回採用した新しいドメインウォール・フェルミオン定式化を用いた有限温度 QCD シミュレーションのテスト的計算を開始した。カイラル対称性に非常に敏感な軸性 $U(1)$ 対称性の回復を主要なターゲットとした小規模な研究を、定式化のテストも兼ねて行う計画である。

これらの新プロジェクトの準備と同時に、以前のプロジェクトの最終的な物理解析、成果発表も行っている。今期中には、有限温度 QCD シミュレーションによる軸性 $U(1)$ 対称性の回復に関する研究および核子のストレンジクォーク成分の計算に関する研究を発表した。

4 成果報告

論文および口頭発表リストについては別紙を参照。