

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月31日現在

機関番号：82401
 研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2010～2012
 課題番号：22540301
 研究課題名（和文） 素粒子・原子核シミュレーションにおける計算方法のブレイクスルー
 研究課題名（英文） Breakthrough in algorithm of particle and nuclear physics simulation
 研究代表者
 出渕 卓 (IZUBUCHI TAKU)
 独立行政法人理化学研究所・計算物理研究グループ・グループリーダー
 研究者番号：60324068

研究成果の概要（和文）：

大規模格子シミュレーションを通じて素粒子・原子核物理に重要な物理量の精密計算とそのため
 の計算方法・アルゴリズムの研究を通して、今まで不可能だった計算を行えるようにするこ
 とを目標として次の研究を行った。

1. Cabibbo 小林・益川理論による CP を破る $K \rightarrow \pi\pi$ 崩壊 の計算
2. 格子上の量子色力学+量子電磁気の計算、アイソスピンの破れの計算
3. ミューオン異常磁気能率 $(g-2)_\mu$ へのハドロンからの2つの寄与（光・光散乱、真空偏極）
4. B 中間子崩壊、混合の計算
5. 陽子・中性子の永久電気双極子能率、核子の形状因子・構造関数
6. 新しい格子シミュレーションの統計誤差の縮減方法

研究成果の概要（英文）：

Aiming for breakthrough in precise calculation of important physical quantities
 relevant for particle and nuclear physics, the following topics are studied :

1. CP-violating $K \rightarrow \pi\pi$ decay through Cabibbo-Kobayashi-Masukawa theory
2. Lattice QCD+QED simulation, isospin breaking effects
3. Hadronic contributions to the anomalous magnetic moment of muon $(g-2)_\mu$
 (light-by-light and hadronic vacuum polarization contributions)
4. B meson decay and mixings
5. Proton and Neutron's permanent electric dipole moment (EDM) and nucleon's form
 factors and structure functions
6. New error reduction technique for lattice simulation

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	0	0	0
2009年度	0	0	0
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2012年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

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, Cabibbo・小林・益川理論, B 中間子, K 中間子, カイラル対称性

1. 研究開始当初の背景

近年、計算機の進歩、理論的研究、数値手法の研究により、格子ゲージ理論の大規模数値計算を通して、量子色力学で記述される強い相互作用による作られているハドロンの性質や力学的性質が定量的に調べられるようになってきた。

シミュレーションからの計算結果と素粒子・原子核の加速器などによる実験結果を比較する際の誤差のうち系統誤差はドメインウォール格子クォークをはじめとする格子理論の進歩により正確な結果が得られつつあり、現在の精度への挑戦に関しては、量子電磁気学的効果を含むアイソスピン対称性の破れの効果、charm, bottom などの重いクォークの物理などのより高度な系統誤差を取り除くことと、現実的な計算資源の範囲内でいかに統計誤差を小さくしていけるかに焦点があたっている。

2. 研究の目的

大規模格子シミュレーションを通じて素粒子・原子核物理に重要な物理量計算を行う。またそのための計算方法・アルゴリズムの研究を行い今まで不可能だった計算を行えるようにする。

3. 研究の方法

格子量子色力学と電磁気学の混合、海クォークの電荷の影響、ハドロンの崩壊の直接計算などのより高度な計算を実行すると同時に、今までの計算方法を基本的なところから見直すことにより、計算手法の大きな改良を図る。

4. 研究成果

- Cabibbo 小林・益川理論による CP を破る $K \rightarrow \pi\pi$ 崩壊 の計算
- 格子上の量子色力学+量子電磁気の計算、アイソスピンの破れの計算
- ミューオン異常磁気能率 $(g-2)_\mu$ へのハドロンの寄与 (光-光散乱、真空偏極)
- B 中間子崩壊、混合の計算
- 陽子・中性子の永久電気双極子能率、核

子の形状因子・構造関数

- 新しい格子シミュレーションの統計誤差の縮減方法

本研究計画の成果の一つである物理量の全運動量範囲での近似計算と、格子理論の対称性を使うことによって近似計算のバイアスを取り除く新手法 All-Mode Averaging (AMA) により 格子理論での物理量計算の計算コストを、現在までに調べた範囲内で、20-40 倍程度小さくすることが可能になった。AMA は一般の格子計算に適用でき応用範囲が広く、また拡張も容易である。

この AMA を上に述べた様な多くの物理研究に使うことにより、今まで計算が難しかった物理量を精度良く計算出来るようになった。

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 15 件) 全て査読有り

- ① R. Arthur, T. Blum, P. A. Boyle, N. H. Christ, N. Garron, R. J. Hudspith, T. Izubuchi, C. Jung, C. Kelly, A. T. Lytle, R. D. Mawhinney, D. Murphy, S. Ohta, C. T. Sachrajda, A. Soni, J. M. Zanotti (RBC and UKQCD Collaborations), “Domain Wall QCD with Near-Physical Pions”, Phys.Rev. D87 (2013) 094514 (53 pages) .
- ② T. Blum, P.A. Boyle, N.H. Christ, N. Garron, E. Goode, T. Izubuchi, C. Jung, C. Kelly, C. Lehner, M. Lightman, Q. Liu, A.T. Lytle, R.D. Mawhinney, C.T. Sachrajda, A. Soni, C. Sturm (RBC and UKQCD Collaboration), “Lattice determination of the $K \rightarrow (\pi\pi)_{I=2}$ Decay Amplitude A_2 ”, Phys.Rev. D86 (2012) 074513 (26 pages) .
- ③ Yasumichi Aoki, Norman H.Christ, Jonathan M.Flynn, Taku Izubuchi, Christoph Lehner, Min Li, Hao Peng, Amarjit Soni, Ruth S. Van de Water, Oliver Witzel (RBC and UKQCD

- Collaboration), “Nonperturbative tuning of an improved relativistic heavy-quark action with application to bottom spectroscopy”, Phys. Rev. D86 (2012) 116003 (28 pages) .
- ④ Tomomi Ishikawa, Thomas Blum, Masashi Hayakawa, Taku Izubuchi, Chulwoo Jung, Ran Zhou, “Full QED+QCD Low-Energy Constants through Reweighting”, Phys. Rev. Lett. 109 (2012) 072002 (5 pages) .
- ⑤ T. Blum, P. A. Boyle, N. H. Christ, N. Garron, E. Goode, T. Izubuchi, C. Jung, C. Kelly, C. Lehner, M. Lightman, Q. Liu, A. T. Lytle, R. D. Mawhinney, C. T. Sachrajda, A. Soni, C. Sturm (RBC and UKQCD Collaboration), “The $K \rightarrow (\pi \pi)_{I=2}$ Decay Amplitude from Lattice QCD”, Phys. Rev. Lett. 108 (2012) 141601 (5 pages) .
- ⑥ T. Blum, P. A. Boyle, N. H. Christ, N. Garron, E. Goode, T. Izubuchi, C. Lehner, Q. Liu, R. D. Mawhinney, C. T. Sachrajda, A. Soni, C. Sturm, H. Yin, R. Zhou (RBC and UKQCD Collaboration), “K to $\pi \pi$ Decay amplitudes from Lattice QCD”, Phys. Rev. D84 (2011) 114503 (22 pages) .
- ⑦ Y. Namekawa, S. Aoki, K. -I. Ishikawa, N. Ishizuka, T. Izubuchi, K. Kanaya, Y. Kuramashi, M. Okawa, Y. Taniguchi, A. Ukawa, N. Ukita, T. Yoshié (PACS-CS Collaboration), “Charm quark system at the physical point of 2+1 flavor lattice QCD”, Phys. Rev. D84 (2011) 074505 (11 pages) .
- ⑧ Tomomi Ishikawa, Yasumichi Aoki, Jonathan M. Flynn, Taku Izubuchi, Oleg Laktik, “One-loop operator matching in the static heavy and domain-wall light quark system with $O(a)$ improvement”, JHEP 1105 (2011) 040 (77 pages) .
- ⑨ Y. Aoki, R. Arthur, T. Blum, P. A. Boyle, D. Brommel, N. H. Christ, C. Dawson, T. Izubuchi, C. Jung, C. Kelly, R. D. Kenway, M. Lightman, R. D. Mawhinney, Shigemi Ohta, C. T. Sachrajda, E. E. Scholz, A. Soni, C. Sturm, J. Wennekers, R. Zhou (RBC and UKQCD Collaborations), “Continuum Limit of BK from 2+1 Flavor Domain Wall QCD”, Phys. Rev. D84 (2011) 014503 (32 pages) .
- ⑩ Y. Aoki, R. Arthur, T. Blum, P. A. Boyle, D. Brommel, N. H. Christ, C. Dawson, J. M. Flynn, T. Izubuchi, X-Y. Jin, C. Jung, C. Kelly, M. Li, A. Lichtl, M. Lightman, M. F. Lin, R. D. Mawhinney, C. M. Maynard, S. Ohta, B. J. Pendleton, C. T. Sachrajda, E. E. Scholz, A. Soni, J. Wennekers, J. M. Zanotti, R. Zhou (RBC and UKQCD Collaborations), “Continuum Limit Physics from 2+1 Flavor Domain Wall QCD”, Phys. Rev. D 83 (2011) 074508 (65 pages) .
- ⑪ T. Blum, T. Doi, M. Hayakawa, T. Izubuchi, S. Uno, N. Yamada, R. Zhou, “Electromagnetic mass splittings of the low lying hadrons and quark masses from 2+1 flavor lattice QCD+QED”, Phys. Rev. D82 (2010) 094508 (47 pages) .
- ⑫ S. Aoki, K. -I. Ishikawa, N. Ishizuka, T. Izubuchi, K. Kanaya, Y. Kuramashi, K. Murano, Y. Namekawa, M. Okawa, Y. Taniguchi, A. Ukawa, N. Ukita, T. Yoshié (PACS-CS collaboration), “Non-perturbative renormalization of quark mass in $N_f=2+1$ QCD with the Schroedinger functional scheme”, JHEP 1008:101 (2010) (27 pages) .
- ⑬ N. H. Christ, C. Dawson, T. Izubuchi, C. Jung, Q. Liu, R. D. Mawhinney, C. T. Sachrajda, A. Soni, R. Zhou (RBC-UKQCD collaboration), “The eta and eta’ mesons from Lattice QCD”, Phys. Rev. Lett. 105 (2010) 241601 (4 pages) .
- ⑭ C. Albertus, Y. Aoki, P. A. Boyle, N. H. Christ, T. T. Dumitrescu, J. M. Flynn, T. Ishikawa, T. Izubuchi, O. Laktik, C. T. Sachrajda, A. Soni, R. S. Van de Water, J. Wennekers, O. Witzel (RBC-UKQCD collaboration), “Neutral B-meson mixing from unquenched lattice QCD with domain-wall light quarks and static b-quarks”, Phys. Rev. D82 (2010) 014505 (29 pages) .
- ⑮ S. Aoki, K. I. Ishikawa, N. Ishizuka, T. Izubuchi, D. Kadoh, K. Kanaya, Y. Kuramashi, Y. Namekawa, M. Okawa, Y. Taniguchi, A. Ukawa, N. Ukita, T.

Yoshie (PACS-CS collaboration),
“Physical Point Simulation in 2+1
Flavor Lattice QCD”, Phys.Rev.D81
(2010) 074503 (12 pages) .

[学会発表] (計 20 件) 招待講演

- ① Thomas Blum, Taku Izubuchi, Eigo Shintani, “Error reduction technique using covariant approximation and application to nucleon form factor”, PoS(LAT2012) 262, arXiv:1212.5931 (8 pages).
- ② Thmas Blum, Masashi Hayakawa, Taku Izubuchi,
“ Hadronic corrections to the muon anomalous magnetic moment from lattice QCD”
PoS(LAT2012) 022 .
- ③ April 2013, Oak Ridge National Laboratory, TN, Lattice QCD Computational Science Workshop <https://www.olcf.ornl.gov/training-event/lattice-qcd-computational-science-workshop/> “Lattice QCD and the HEP Intensity Frontier”
- ④ February 2013, Fermi National Accelerator Laboratory, IL, Winter Workshop on Electric Dipole Moments (EDMs13), <https://indico.fnal.gov/conferenceDisplay.py?confId=6276> “Lattice-QCD Calculations for EDMs”
- ⑤ October 2012, University of Wuhan, Wuhan, China, RBRC, Wuhan workshop on QCD Structure, <http://conf.ccnu.edu.cn/qcdstructure/> “Lattice QCD+QED and its applications”
- ⑥ October 2012, European Center for Theoretical Studies in Nuclear Physics and Related Areas (ETC*), Trento, Italy,
ECT* workshop EDM Searches at Storage Rings,
<http://www.ectstar.eu/>
“Lattice calculation of the nucleon EDM”
- ⑦ September 2012, Florence, Italy, New Frontiers in Lattice Gauge Theory

Workshop, Galileo Galilei Institute for Theoretical Physics
<http://www.ggi.fi.infn.it//index.php?p=events.inc&id=84>

“ A new class of error reduction techniques and its application” .

- ⑧ August 2012, Seattle INT Summer School on Lattice QCD for Nuclear Physics, Univ. Washington
<http://www.int.washington.edu/PROGRAMS/12-2c/> Invited lectures “Lattice QCD+QED”
- ⑨ August 2012, Jefferson Lab The 7th International Workshop on Chiral Dynamics, Jefferson Lab
<http://www.jlab.org/conferences/CD12/> Plenary talk “Isospin breaking studies from lattice QCD + QED”
- ⑩ June 2012, Adelaide, Australia QCDNA VII, The Seventh International Workshop on Lattice QCD and Numerical Analysis, Univ Adelaide
<http://www.physics.adelaide.edu.au/cssm/workshops/QCDNA7/> “CAA: Covariant Approximation Averaging a class of error reduction techniques”
- ⑪ June 2012, Adelaide, Australia LHP IV, The 4th International Workshop on Lattice Hadron Physics, Univ. Adelaide
<http://www.physics.adelaide.edu.au/cssm/workshops/LHP4/> “Aslash SeqSrc & AMA”
- ⑫ June 2012, Cairns, Australia Lattice 2012, The 30th International Symposium on Lattice Field Theory, <http://www.physics.adelaide.edu.au/cssm/lattice2012/> plenary talk “Lattice QCD + QED from Isospin breaking to $g-2$ light-by-light”
- ⑬ June 2012, FNAL, Project X Physics Study Workshop, “New methods for lattice-QCD calculations of the hadronic light-by-light contribution to $g-2$ ”, <https://indico.fnal.gov/conferenceTimeTable.py?confId=5276>
- ⑭ June 2012, FNAL, Project X Physics Study Workshop,
“ Proton Decay Matrix Elements from Latticee QCD” ,

<https://indico.fnal.gov/conferenceTimeTable.py?confId=5276> T. Izubuchi
E. Shintani Y. Aoki, A. Soni

⑮ May 2011, Wuppertal, Germany,
“Japan-German Symposium on Lattice
Gauge Theory”,
<http://particle.uni-wuppertal.de/symposiumlgt/>
“Lattice QCD+QED”

⑯ April 2011, Nagoya University,
“Seminar at Kobayashi-Maskawa
Institute”,
<http://www.kmi.nagoya-u.ac.jp/jpn/events/seminar.html>
“SM, CKM, and LQCD”

⑰ March 2011, La Thuile, Italy,
“Rencontres de Moriond,
Electro-Weak”, plenary talk
“Recent results of CKM physics, quark
masses from RBC/UKQCD”

⑱ November 2010, Ohio State University,
“High Energy Physics Seminar”,
<http://www.physics.ohio-state.edu/hepastro/>
“Studies of the pseudoscalar mesons
including isospin symmetry breakings
using lattice QCD+QED”

⑲ November 2010, Yale University,
“Seminar at the Particle Theory
Group”,
“Studies of isospin symmetry breakings
using lattice QCD+QED”

⑳ August 2010, CERN, Meyrin,
Switzerland, “Future directions in
lattice gauge theory - LGT10”,
<http://ph-dep-th.web.cern.ch/ph-dep-th/content2/THInstitutes/2010/LGT10/LGT10.html>
“Lattice QCD+QED simulation”

6. 研究組織

(1) 研究代表者

出渕 卓 (IZUBUCHI TAKU)

独立行政法人理化学研究所・計算物理研究グループ・グループリーダー

研究者番号：60324068