

令和 2 年 6 月 30 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2019

課題番号：15K05064

研究課題名(和文)ドメインウォール法格子量子色力学による核子構造

研究課題名(英文)Nucleon structure in domain-wall-fermion lattice QCD

研究代表者

太田 滋生(Ohta, Shigemi)

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・准教授

研究者番号：50183025

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：2+1フレイヴァードメインウォール法格子量子色力学で格子切断運動量を約1.38GeV/c、中間子の質量を約249および172MeVに設定した二つと、格子切断運動量を約1.73GeV/c、中間子の質量をほぼ現実の値の約139MeVに設定した一つのアンサンブルを使った核子構造の計算が大きく進捗した。前二アンサンブルでの核子質量とアイソベクトル極性・軸性両荷電とテンソル・スカラー両結合の計算を完了し報文を出版した。もうひとつのアンサンブルでもこれらの物理量の計算が進捗し、特に核子励起状態の影響を世界で初めて極性荷電で確認した。また軸性荷電の計算値が実験値よりやや小さいこともほぼ確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

核子は我々人類やその生存環境を形作る様々な元素の基本構成要素で、その質量やアイソベクトル極性・軸性荷電はその存在量や構成比を決定する物理量なので、これらについての理論的理解を深めることは我々の存在の宇宙論的進化の歴史を理解し、将来を予測するのに役立つ。またアイソベクトルテンソル・スカラー両結合の値は素粒子の標準模型を超える新物理学の探索に役立つ。

研究成果の概要(英文)：Nucleon structure calculations using three 2+1-flavor domain-wall fermion lattice QCD ensembles with a lattice cutoff momentum of about 1.38GeV/c and pion mass of about 249 and 172 MeV and another cutoff momentum of about 1.73GeV/c and pion mass of almost physical 139MeV were advanced. In the former two ensembles the calculations of nucleon mass, isovector vector and axialvector charges, and isovector tensor and scalar couplings were completed and a full paper reporting these were published. Calculations of the same observables in the last ensemble progressed: for the first time in the world an influence from nucleon excited state was confirmed in the isovector vector charge. Also the calculated value of the isovector axialvector charge slightly undershoots the experimental value.

研究分野：素粒子物理学

キーワード：場の量子論 格子上の場の量子論 ハドロン物理学 素粒子現象論 数値物理学 スーパーコンピュータ

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

1. 研究開始当初の背景

格子量子色力学（格子QCD）はハドロン物理学の低いエネルギー領域での第一原理理論計算を厳密に行える唯一の枠組みだが、特に重要なカイラル対称性とフレーヴァー対称性を同時に保つことは長らく難題であった。その重要なカイラル対称性とフレーヴァー対称性を同時に保つ格子QCD計算が、私とその1997年の創立に参加し今も指導的立場にある理化学研究所・ブルックヘイヴン国立研究所・コロンビア大学（RBC）格子QCD共同研究によって実用化されたドメインウォールフェルミオン（Domain Wall Fermion、DWF）法によってついに可能になった。またアップ、ダウン、ストレンジの軽い三つのクォークフレーヴァーの質量を現実の軽い値に設定することも難題であったが、これもRBC共同研究によって開発された専用の並列数値計算ハードウェア・ソフトウェアによって実用化し、本研究開始ときに $\pi \cdot K$ 両中間子の質量をほぼ現実の値に設定する数値計算が可能になったところだった。

2. 研究の目的

ハドロン物理学において重要なカイラル対称性とフレーヴァー対称性を同時に保つ第一原理格子QCD数値計算を核子の構造の理論に適用すること。

3. 研究の方法

ハドロン物理学において重要なカイラル対称性とフレーヴァー対称性を同時に保つ第一原理格子QCD数値計算はドメインウォールフェルミオン（Domain Wall Fermion、DWF）法によって行われるが、これをアップ、ダウン、ストレンジの軽い三つのクォークフレーヴァーの質量を現実の軽い値に設定して行うには当時も今も日本国内には存在しない高性能な並列数値計算ハードウェア・ソフトウェアが必要なので、それが可能な合衆国の計算機を使い数値計算を実行する。

4. 研究成果

2+1フレーヴァードメインウォール法格子量子色力学で格子切断運動量を約1.38GeV/c、 π 中間子の質量を約249および172MeVに設定した二つと、格子切断運動量を約1.73GeV/c、 π 中間子の質量をほぼ現実の値の約139MeVに設定した一つのアンサンブルを使った核子構造の計算が大きく進捗した。

格子切断を約1.38GeV/c、パイ中間子質量を約250MeVおよび170MeVに設定したふたつのアンサンブルについては核子のアイソベクトル極性流荷電 g_V 、同軸性流荷電 g_A 、同テンソル結合 g_T 、同スカラー結合 g_S の計算を完了し報文を出版した。極性流荷電 g_V については計算統計誤差の範囲で正常であることを確認した。軸性流荷電 g_A では計算値が実験値とくらべて10%程度過小であることを確認し、その原因についての分析も報告した。テンソル結合 g_T についてはより重いパイ中間子質量ではみられた質量依存性が消えることを確認した。スカラー結合 g_S にも質量依存性がないことを確認した。

格子切断を約1.73GeV/c、パイ中間子質量をほぼ現実の値の約139MeVに設定したアンサンブルでも同じく核子のアイソベクトル極性流荷電 g_V 、同軸性流荷電 g_A 、同スカラー結合 g_S 、同テンソル結合 g_T の計算を継続した。アイソベクトル極性流荷電 g_V では2018年度に世界で初めて検出した核子励起状態の混合に由来すると考えられる異常値の分析を深めた。アイソベクトル軸性流荷電 g_A では計算値が実験値とくらべて5%程度過小になる状況の分析を深めた。これらについて中国・武漢市で開催された格子上の場の理論国際会議で報告した。

またスーパーコンピューター上での格子上の場の理論数値計算の歴史と現状について中国・山東省済南市の中国国家超級計算中心で開催されたSupercomputing Workshop国際会議で招待講演した。この済南市の中国国家超級計算中心での共同研究を検討することにした。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 7件 / うちオープンアクセス 11件）

1. 著者名 Ohta Shigemi	4. 巻 175
2. 論文標題 Nucleon structure from 2+1-flavor domain-wall QCD	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 06012 ~ 06012
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/201817506012	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Ohta Shigemi	4. 巻 Lattice2018
2. 論文標題 Nucleon axial charge in dmain-wall QCD with physical mass	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	6. 最初と最後の頁 128
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://pos.sissa.it/334/128	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Shigemi Ohta	4. 巻 175
2. 論文標題 Nucleon structure from 2+1-flavor domain-wall QCD	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 6012
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1051/epjconf/201817506012	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Michael Abramczyk, Meifeng Lin, Andrew Lytle, Shigemi Ohta	4. 巻 LATTICE2016
2. 論文標題 Nucleon structure from 2+1-flavor dynamical DWF ensembles	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	6. 最初と最後の頁 150
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Shigemi Ohta	4. 巻 LATTICE2015
2. 論文標題 Some nucleon isovector observables from 2+1-flavor domain-wall QCD at physical mass	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	6. 最初と最後の頁 124
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Tom Blum, Peter Boyle, Norman Christ, Julius Frison, Nicolas Garron, Robert Hudspith, Taku Izubuchi, Tadeus Janowski, Chulwoo Jung, Andreas Juettner, Chris Kelly, Richard Kenway, Christoph Lehner, Maria Marinkovic, Robert Mawhinney, Greg McGlynn, David Murphy, Shigemi Ohta, Antonin Portelli, Chris Sacraida	4. 巻 93
2. 論文標題 Domain wall QCD with physical quark masses	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 74505
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.93.074505	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 S. Syritsyn, T. Blum, M. Engelhardt, J. Green, T. Izubuchi, C. Jung, S. Krieg, M. Lin, S. Meinel, J. Negele, S. Ohta, A. Pochinsky and E. Shintani	4. 巻 LATTICE2014
2. 論文標題 Initial nucleon structure results with chiral quarks at the physical point	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	6. 最初と最後の頁 134
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 S. Ohta	4. 巻 LATTICE2014
2. 論文標題 Systematics analyses on nucleon isovector observables in 2+1-flavor dynamical domain-wall lattice QCD near physical mass	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	6. 最初と最後の頁 149
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 P.A. Boyle, N.H. Christ, N. Garron, C. Jung, A. Juttner, C. Kelly, R.D. Mawhinney, G. McGlynn, D.J. Murphy, S. Ohta, A. Portelli, C.T. Sachrajda	4. 巻 93
2. 論文標題 Low energy constants of SU(2) partially quenched chiral perturbation theory from Nf f =2+1 domain wall QCD	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 54502
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.93.054502	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 M. Abramczyk, T. Blum, T. Izubuchi, C> Jung, M. Lin, A. Lytle, S. Ohta, E. Shintani	4. 巻 101
2. 論文標題 Nucleon mass and isovector couplings in 2+1-flavor dynamical domain-wall lattice QCD near physical mass	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 34510
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.101.034510	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Ohta Shigemi	4. 巻 Lattice2019
2. 論文標題 Nucleon isovector charges from physical mass domain-wall QCD	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	6. 最初と最後の頁 51
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 太田滋生
2. 発表標題 Nucleon structure from domain-wall lattice QCD at physical mass
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 太田滋生
2. 発表標題 Nucleon structure from domain-wall lattice QCD at physical mass
3. 学会等名 日本物理学会2019年春季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shigemi Ohta
2. 発表標題 Nucleon structure from 2+1-flavor domain-wall lattice QCD
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Shigemi Ohta
2. 発表標題 Nucleon structure from 2+1-flavor domain-wall QCD
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shigemi Ohta
2. 発表標題 Nucleon isovector axialvector charge from 2+1-flavor dynamical domain-wall lattice QCD at physical mass
3. 学会等名 日本物理学会2020年春季年会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<https://quark.phy.bnl.gov/~ohta/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----