

令和 3 年 6 月 24 日現在

機関番号：14602

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K14309

研究課題名(和文)物質優勢宇宙の起源解明に向けた素粒子原子核の非摂動的計算

研究課題名(英文) Non-perturbative calculations of the hadronic structure functions for understanding of the universe's matter dominance

研究代表者

大木 洋(Ohki, Hiroshi)

奈良女子大学・自然科学系・助教

研究者番号：50596939

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：物質優勢宇宙の起源の解明のため、CP対称性の破れを引き起こす物理量の一つである核子の電磁双極子能率(EDM)に対して、格子量子色力学(QCD)による第一原理計算を行なった。特に外部電場を用いた新たな核子EDMの計算手法の研究とその数値計算による実証を行なった。この方法は運動量の外挿による系統誤差がなく、またゲージ場の揺らぎによる誤差が小さくなることが期待され、グルーオン演算子を含む様々な物理量に応用出来る可能性がある。またインクルーシブ過程を用いた小林益川行列要素の精密計算を行い、またその手法を核子相関関数に拡張し、核子崩壊における新たなインクルーシブ過程の非摂動計算手法の研究を行なった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自然界の基本的な対称性であるCP対称性とその破れの起源の探求は、自然界の基本的な物理法則の探求や宇宙の成り立ちに迫る自然科学における根源的な課題と関連する。電気双極子能率はCP対称性の破れを引き起こす代表的な物理現象であるが、従来の研究成果では誤差が大きく、素粒子標準模型やそれを超えた新物理の検証には不十分であり、本研究のように大型計算機を用いた格子理論に基づく第一原理計算による新たな知見が自然界の極微の世界の解明や宇宙の起源に迫る上で重要である。また高エネルギー物理学や宇宙観測など、日本が主導する国際的実験プロジェクトに対する理論的基礎の構築にも貢献する事が出来ると考えられる。

研究成果の概要(英文)：The electric dipole moment (EDM) is a key quantity to probe the universe's matter dominance and to test the physics beyond the standard model in particle physics. We develop a new method to compute the nucleon EDM in the presence of the background electric field on a lattice. This method does not require the zero-momentum extrapolation and can suppress the gauge fluctuations, so that it can be applicable to measure other quantities that include gauge fields. We also study a general dispersion relation of the spectral functions on a lattice, by which we performed a precise measurement of a Kobayashi-Maskawa matrix element  $|V_{us}|$  in combining with an inclusive tau decay experimental data and the lattice hadronic vacuum polarization functions. We then extend the method to the nucleon correlation functions that can be used to study nucleon inclusive decay processes such as a nucleon-neutrino scattering on a lattice.

研究分野：素粒子論

キーワード：格子QCD 数値シミュレーション 素粒子標準模型 宇宙論 CP対称性

## 1. 研究開始当初の背景

物質優勢宇宙(物質-反物質非対称性)やヒッグス粒子、暗黒物質の謎の解明は素粒子標準模型を超えた物理の探索、宇宙論における重要な課題である。物質優勢宇宙の謎に関しては、素粒子物理における CP 対称性の破れ(Sakharov の 3 条件の一つ)の解明が大きな鍵になると考えられているが、素粒子標準模型では CP 対称性の破れの効果は小さく、現在の宇宙の物質-反物質非対称性を説明する事が出来ない。そのため、未知の大きな CP 対称性の破れが存在していると考えられており、その現象を発見し理解することが、物質優勢宇宙の謎の解明に大きな進展をもたらすと期待される。特に電気双極子モーメント(EDM)は CP 対称性の破れを示す代表的な物理現象の一つであり、国内外で次世代の EDM の測定実験の準備が進められている。これら現在計画されている実験では観測精度の大幅な向上が見込まれ、今後数年以内に EDM が観測される可能性が高まっている(引用文献[1])。実験精度の向上に応じた EDM の理論予測を行うため量子色力学(QCD)の第一原理計算が重要である。

また上記の通り、標準模型(小林・益川理論)における EDM の寄与は極めて小さいため、仮に EDM が近い将来発見されれば、それは標準模型を超えた物理が存在する事を意味する。従って、CP 対称性の破れの研究は、宇宙の起源以外にも、現代素粒子物理が抱える様々な問題(暗黒物質の存在、クォークレプトンのフレーバー構造の謎、ヒッグス粒子の正体等)とも密接に関連する。特に、フレーバー物理における標準模型を超えた物理の検証という観点では、クォークセクターにおけるキャビボ小林益川(CKM)行列要素の精密測定や CKM 行列のユニタリー性の検証が重要である。例えばインクルーシブ及びエクスクルーシブ崩壊過程を用いた CKM 行列要素の決定には大きなブレが存在する事が分かっており、これは標準模型を超えた新物理の存在を予見させるものであるが、ハドロン行列要素計算における QCD の不定性が大きな障害になっており、標準模型を超えた物理に関して確定した結論は未だ得られておらず、QCD の第一原理計算に基づいた精密なハドロン不定性の理解が重要である事が分かる。レプトンセクターにおいても、ニュートリノ振動現象はフレーバー物理を解明する上で重要な研究対象の一つであり、ニュートリノの質量、混合角の精密測定が重要である。ここでも核子散乱の理論計算におけるハドロンの不定性が無視できないため、その解析には核子構造因子やインクルーシブ崩壊過程も含めた非弾性散乱過程の QCD の第一原理計算に基づく研究が重要である。

格子ゲージ理論は場の量子論の非摂動的定式化であり、QCD の定量的理解には欠かせない手法として確立しているが、CP を破る物理量に関しては、計算の複雑性や大きな誤差が問題となっており、満足な精度が得られていない。それに加えて系統誤差を小さくするためには、現実的クォーク質量における大きな 4 次元時空体積での QCD 真空配位を用いたモンテカルロシミュレーションを行わなければならないため、より大きな計算コストを必要とする。限られた統計数で有意なシグナルを獲得するために、より効果的な誤差縮減法の研究や演算子の改良が要求される。またユークリッド時空で定義される格子計算では、上述のハドロンのインクルーシブ過程を含めた非弾性散乱過程を系統的に取り扱うことは難しく、計算技術の進展とそれに応じた新たな解析方法の研究など理論的進展が必要である。

## 2. 研究の目的

QCD の第一原理計算法の一つである格子場の量子論を用いて、上記素粒子物理や宇宙の起源の謎解明に重要な様々な物理量の計算を行うことで、物質優勢宇宙誕生のシナリオの検証や素粒子標準模型を超えた物理の探索が目的である。

(1) 核子 EDM に関する我々の先行研究において、従来の格子 QCD の形状因子を用いた計算において、CP 対称性の破れを表す CP-odd な演算子を含む場合の EDM 形状因子の表式に余分な混合項が存在する事を見出し、その余分な混合項を厳密に取り除く新しい公式を提唱した。我々は chromo-EDM 演算子と呼ばれる素粒子標準模型を超えた物理から誘導される CP 対称性を破る演算子に対して、形状因子法と外部電場中のエネルギー変位法を直接比較する事でその新しい公式の整合性を数値的にも確認した(引用文献[2])。エネルギー変位法とは、核子スピンと電場の大きさに比例した核子エネルギーの一次の変化から EDM の大きさを読み取る方法であり、形状因子の表式に依存しない方法である。その結果、混合項の除去により核子 EDM の大きさが従来の評価値に比べて非常に小さくなる可能性がある事が分かった。これは他のモデル計算の結果と整合する結果ではあるが、シグナルの減衰によって格子計算における相対誤差が大きくなってしまったため、定量的な EDM の理論予測を行うためには、より一層の誤差縮減が求められる事も意味する。本研究成果は格子 QCD による EDM 研究の分野に大きなインパクトを与えた。このような先行研究の結果を踏まえ本研究では、現在までで最も精力的に研究されている核

子 EDM の一つである QCD の  $\theta$  項と呼ばれるゲージ場のトポロジカルな揺らぎに起因する CP 対称性の破れに対して、我々が提唱する表式に基づいた格子計算を行い、従来の結果とどのような違いが生じるかを調べる必要がある。更に、上述の形状因子法やエネルギー変位法など複数の手法を試みることで、計算精度の向上を目指す。特に外部電場を用いるエネルギー変位法は、先行研究ではあまり着目されていなかったが、電磁カレントを挿入する必要がないため、計算量や系統誤差が小さくなる等、幾つかの利点があり、今後外部電場を用いた格子 QCD の研究が大きく進展する可能性もある。そのため、外部電場を用いた新たな解析手法の確立に向けた理論的研究を必要に応じて行う事も本研究課題の目的の一つである。

(2) 格子 QCD を用いた素粒子標準模型の検証に向けた研究として、ハドロンインクルーシブ過程の系統的な解析手法の研究を行い、その数値計算への応用を通して、フレーバー物理の理解に繋がる研究を行う。具体的には、インクルーシブ過程とエクスクルーシブ過程で結果にズレが存在している CKM 行列要素の一つ  $|V_{us}|$  における格子 QCD の計算結果を用いた新たなインクルーシブ決定法の研究である。従来のインクルーシブ過程の理論計算では、演算子積展開と摂動展開を用いた理論計算と実験結果の比較から物理量の決定を行っているが、摂動計算による近似計算の代わりに格子 QCD の非摂動結果を応用することで、新たな知見が得られる可能性がある。

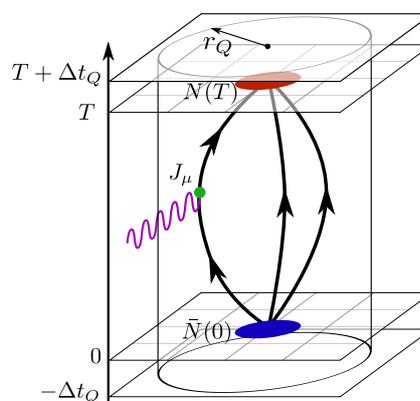
### 3. 研究の方法

本研究における格子 QCD の非摂動計算では、理研 Brookhaven 国立研究所やアメリカ Columbia 大学などの研究者等からなる格子 QCD の国際的研究グループである RBC コラボレーションが生成した QCD 真空のゲージ配位を用いて計算を行う。核子 EDM の計算では、演算子の改良について研究するため、トポロジカル電荷を時空点に依存するトポロジカル電荷密度演算子の積分として捉え直すことで時空間での揺らぎを系統的に理解し系統誤差を制御する事を目指す。エネルギー変位法については、QCD 真空のゲージ配位に対し、各リンク変数を時空点に依存した複素位相を掛けることで外部電場中の QCD 真空をシミュレーションする事が可能であり、既存の QCD 真空のゲージ配位をそのまま用いることが出来るため、比較的少ない計算量で行うことが出来る。その外部電場中の QCD 真空でのトポロジカル電荷を含めた核子相関関数の計算から核子エネルギーの計算を行い、核子 EDM を得る。比較的小さい体積  $16^3 \times 32$  と  $24^3 \times 64$  の格子体積の QCD 真空を用いて外部電場中の核子 EDM 計算の計算を行い、既存の方法との比較や新たな手法の確立を目指す。

また CKM 行列要素  $|V_{us}|$  の精密決定に関する計算では、最大  $64^3 \times 128$  の大きな時空体積でのハドロン真空分極関数のデータと  $\tau$  レプトンのセミレプトニック崩壊の実験データを組み合わせた全く新しいインクルーシブ決定を試みる。その他、上記の手法を応用した核子ニュートリノ散乱における格子解析手法の理論的考察や、素粒子現象論的研究も並行して行う。

### 4. 研究成果

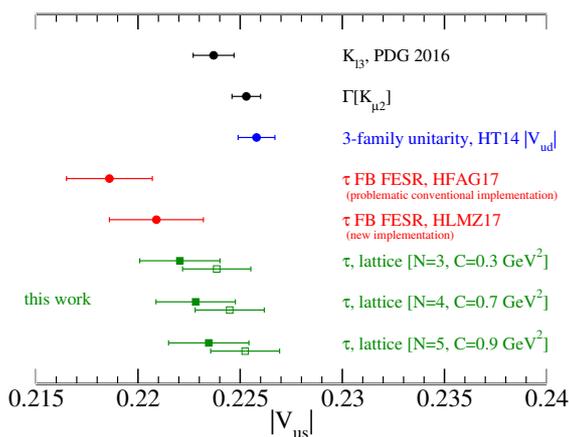
(1)  $\theta$  項による核子 EDM の研究においては、トポロジカル電荷密度演算子による大きなゲージ揺らぎを抑制する必要がある、ここではクラスター分解原理を応用した誤差改善法を試みる。これは核子から十分離れた点における演算子の寄与は指数関数的に減少すると期待されるため、トポロジカル電荷密度の積分範囲を小さい体積に制限する事で、ゲージ場の揺らぎを削減しようとするものである。本研究ではその一つの方法として、右図のようにトポロジカル電荷密度演算子を核子近傍のシリンダー状の時空間に制限した場合を考える。これにより遠方の揺らぎを抑えたシグナルが得られ、その積分範囲を変化させることで系統的に誤差の解析が出来ると期待される。実際の数値計算の結果、比較的大きなクォーク質量 ( $m_\pi \sim 340 \text{ MeV}$ ) における計算では、十分大きな空間領域に積分範囲を拡大すれば結果が収束する様子が確認出来たが、現実的クォーク質量 ( $m_\pi \sim 140 \text{ MeV}$ ) では  $r_Q, \Delta t_Q \rightarrow \infty$  外挿の収束性が悪い事が分かり、トポロジカル電荷密度演算子の積分範囲を制限したことによる不定性は無視出来ない事が分かった(引用文献[3])。



しかしながら、このトポロジカル電荷密度演算子の方法を一様外部電場中の核子相関関数に適用することでエネルギー変位法における全く新しい核子 EDM の計算手法を確立出来る可能

性があることが分かってきた。具体的には、一様外部電場中にトポロジカル電荷密度演算子の核子行列要素から核子の一次のエネルギー変位を引き出せる可能性があり、その場合核子から十分離れた遠方のゲージ場からの寄与を無視出来るため、将来的に形状因子法に代わる新たな計算手法となり得る可能性があることを示した。既に幾つかのクォーク質量での背景電場中のゲージ配位の生成による行列要素の計算から EDM を計算し、従来の形状因子法による EDM の結果が整合する事も確認した(引用文献[4])。今後は現実的なクォーク質量、大きな格子体積での数値計算を行う必要があり、継続して研究を進めていく予定である。また、この揺らぎの減少に関する性質は  $\theta$  項以外の演算子に対しても同様に成り立つことが期待されるため、他のグルーオン演算子を含む様々な物理量に応用出来る可能性がある。

(2)本研究課題におけるもう一つの重要な研究成果に、フレーバー物理の研究、特にインクルーシブ過程における格子 QCD の非摂動計算手法の応用がある。具体的には格子 QCD 計算で得られるハドロンの真空分極関数を用いて標準模型パラメータの一つである CKM 行列要素  $|V_{us}|$  の精密決定を試みたものである。 $|V_{us}|$  は  $\tau$  粒子のインクルーシブ崩壊モード、または K 中間子のエクスクルーシブ崩壊モードの実験データを用いて決定されているが、両者の結果には  $3\sigma$  程度のズレが存在しており、それは  $|V_{us}|$  パズルと呼ばれる素粒子のフレーバー物理における謎として知られている。通常インクルーシブ崩壊モードの計算では、QCD の演算子積展開(OPE)やその摂動計算を用いた理論計算が用いられるため、OPE の展開の高次の不定性や QCD の非摂動効果が十分に考慮されておらず、その計算結果には問題がある事が先行研究において指摘されていた(引用文献[5])。一方、本研究では、一般化された分散関係式と格子 QCD で得られるハドロンの真空分極関数を組み合わせる事で、インクルーシブ崩壊における全散乱断面積の実験データに対して、格子 QCD の非摂動計算結果を用いて系統的に解析出来る事を示した。この研究では、格子 QCD の国際共同研究グループ RBC+UKQCD コラボレーションが格子体積  $48^3 \times 96$  と  $64^3 \times 128$  で 2+1 フレーバーの動的ドメインウォールフェルミオン作用を用いて生成した格子 QCD 真空のゲージ配位を用いて計算を行った。下図は、本研究(引用文献[6])で得られた  $|V_{us}|$  の値と様々な先行研究との比較である。従来の OPE を用いたインクルーシブ計算結果(HFAG17)とエクスクルーシブ計算結果(K13 や  $\Gamma[K_{\mu 2}]$ )の結果に大きなズレがあるのが分かる。本研究の格子 QCD の非摂動計算を用いたインクルーシブ計算で得られた値(this work)は従来のインクルーシブ計算で得られた結果よりも大きく、CKM ユニタリティーの制限から決められる値やエクスクルーシブ計算結果とも整合する値となっている。またこの方法では、真空分極関数に対する OPE とその摂動計算における不定性が一般化された分散関係式を通して系統的に制御出来るため、将来的には従来の摂動計算よりも高精度で決定できる可能性があり、格子 QCD の非摂動計算が  $|V_{us}|$  パズルの問題に新たな知見をもたらすものと期待される。



このように、近年の計算機の進展と格子理論の進展により、従来格子計算が困難であった物理量に対しても、今後比較的小さい誤差で計算が行える可能性が出てきている。従って、今後もインクルーシブ過程における格子 QCD の応用に関しては並行して研究を進めていく予定である。例として本研究と関連して行われた核子ニュートリノの非弾性散乱過程に関する研究では、上述の CP-odd 演算子の計算で培われた核子とカレントを含めた 4 点相関関数の計算手法を時空間に依存する一般的なカレント演算子に拡張する事で得られる表式を提唱したものであり、この手法を通じて核子のインクルーシブ崩壊過程に関する物理量の定量的な計算を行う事が可能になると期待される。しかしながら実際の格子 QCD におけるシミュレーションはまだ出来ておらず、現在現実的な QCD 真空のゲージ配位を用いた上記ニュートリノ核子散乱におけるハドロンの寄与や核子 EDM の非摂動的研究の準備を進めている。

また素粒子標準模型を超えた物理や宇宙進化のシナリオに関する非摂動効果が重要な現象論的研究として、複合ヒッグス模型における宇宙進化の相転移で引き起こされる重力波シグナルの研究を行った。複合ヒッグス模型は標準模型を超えた物理の有力な候補の一つであり、そのダイナミクスには非摂動効果が重要な役割を果たす。初期宇宙重力波は今後観測が期待される物理現象の一つであり宇宙進化に関する重大な手掛かりを得る事が出来ると考えられるため、本研究の主要課題である EDM と同様に今後も進展が期待される分野である。複合ヒッグス模型の低エネルギー有効理論から導かれる初期宇宙の重力波シグナルについて、半古典的近似を用いた解析を行い、将来計画で観測が期待される程度の特徴的な重力波シグナルが得られること

を示し、学術論文として発表を行った(引用文献[7])。非摂動計算を用いた真空の相転移現象の理解とその重力波シグナルのより精密な予言が今後の課題である。その他、超弦理論の低エネルギー有効理論から導かれるフレーバー構造とモジュラー群との関連についての研究も行い、学術論文として発表した(引用文献[8])。

<引用文献>

- [1] P. G. Harris, The Neutron EDM Experiment, [arXiv:0709.3100[hep-ex]]
- [2] M. Abramczyk, S. Aoki, T. Blum, T. Izubuchi, H. Ohki and S. Syritsyn, ``Lattice calculation of electric dipole moments and form factors of the nucleon,’’ Phys. Rev. D **96**, no.1, 014501 (2017), doi:10.1103/PhysRevD.96.014501 [arXiv:1701.07792 [hep-lat]].
- [3] S. Syritsyn, T. Izubuchi and H. Ohki, ``Calculation of Nucleon Electric Dipole Moments Induced by Quark Chromo-Electric Dipole Moments and the QCD  $\theta$ -term,’’ PoS **Confinement2018**, 194 (2019) doi:10.22323/1.336.0194 [arXiv:1901.05455 [hep-lat]].
- [4] T. Izubuchi, H. Ohki and S. Syritsyn, ``Computing Nucleon Electric Dipole Moment from lattice QCD,’’ PoS **LATTICE2019**, 290 (2020) doi:10.22323/1.363.0290 [arXiv:2004.10449 [hep-lat]].
- [5] R. J. Hudspith, R. Lewis, K. Maltman and J. Zanotti, ``A resolution of the inclusive flavor-breaking  $\tau \rightarrow V_{us}$  puzzle,’’ Phys. Lett. B **781**, 206–212 (2018), doi:10.1016/j.physletb.2018.03.074 [arXiv:1702.01767 [hep-ph]].
- [6] Peter Boyle, Renwick James Hudspith, Taku Izubuchi, Andreas Juttner, Christoph Lehner, Randy Lewis, Kim Maltman, Hiroshi Ohki, Antonin Portelli, and Matthew Spraggs [RBC and UKQCD], ``Novel  $|V_{us}|$  Determination Using Inclusive Strange  $\tau$  Decay and Lattice Hadronic Vacuum Polarization Functions,’’ Phys. Rev. Lett. **121**, no.20, 202003 (2018), doi:10.1103/PhysRevLett.121.202003 [arXiv:1803.07228 [hep-lat]].
- [7] K. Miura, H. Ohki, S. Otani and K. Yamawaki, ``Gravitational Waves from Walking Technicolor,’’ JHEP **10**, 194 (2019) doi:10.1007/JHEP10(2019)194 [arXiv:1811.05670 [hep-ph]].
- [8] H. Ohki, S. Uemura and R. Watanabe, ``Modular flavor symmetry on a magnetized torus,’’ Phys. Rev. D **102**, no.8, 085008 (2020) doi:10.1103/PhysRevD.102.085008 [arXiv:2003.04174 [hep-th]].

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 7件/うちオープンアクセス 9件）

1. 著者名 H. Fukaya, S. Hashimoto, T. Kaneko and H. Ohki	4. 巻 102, no.11, 114516
2. 論文標題 Towards fully nonperturbative computations of inelastic IN scattering cross sections from lattice QCD	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Phys. Rev. D	6. 最初と最後の頁 1-23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.114516	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 H. Ohki, S. Uemura and R. Watanabe	4. 巻 102, 085008
2. 論文標題 Modular flavor symmetry on a magnetized torus	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Phys. Rev. D	6. 最初と最後の頁 1-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.085008	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 S. Syritsyn, T. Izubuchi and H. Ohki	4. 巻 194
2. 論文標題 Calculation of Nucleon Electric Dipole Moments Induced by Quark Chromo-Electric Dipole Moments and the QCD $\theta$ -term	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 PoS Confinement2018, 194	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.336.0194	査読の有無 無
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 Kohtaroh Miura, Hiroshi Ohki, Saeko Otani, and Koichi Yamawaki	4. 巻 194
2. 論文標題 Gravitational Waves from Walking Technicolor	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-35
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP10(2019)194	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. Izubuchi, H. Ohki	4. 巻 336, 194
2. 論文標題 Calculation of Nucleon Electric Dipole Moments Induced by Quark Chromo-Electric Dipole Moments and the QCD $\gamma$ -term	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of Science, 336	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.336.0194	査読の有無 無
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 N. Yamanaka, S. Hashimoto, T. Kaneko, and H. Ohki	4. 巻 98
2. 論文標題 Nucleon charges with dynamical overlap fermions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Rev. D	6. 最初と最後の頁 1-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.98.054516	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 K. Maltman, P.A. Boyle, R.J. Hudspith, T. Izubuchi, A. Juttner, C. Lehner, R. Lewis, H. Ohki, A. Portelli, M. Spraggs, J.M. Zanotti	4. 巻 1
2. 論文標題 Current Status of inclusive hadronic tau determinations of $ V_{us} $	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 SciPost Physics Proceedings	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.21468/SciPostPhysProc.1.006	査読の有無 無
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 Peter Boyle, Renwick James Hudspith, Taku Izubuchi, Andreas Juttner, Christoph Lehner, Randy Lewis, Kim Maltman, Hiroshi Ohki, Antonin Portelli, and Matthew Spraggs	4. 巻 121
2. 論文標題 Novel $ V_{us} $ Determination Using Inclusive Strange Decay and Lattice HVPs	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys.Rev.Lett.	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.121.202003	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 Michael Abramczyk, Sinya Aoki, Tom Blum, Taku Izubuchi, Hiroshi Ohki, Sergey Syritsyn	4. 巻 175, 06027
2. 論文標題 Computing nucleon EDM on a lattice	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 EPJ Web Conf.	6. 最初と最後の頁 1, 8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/201817506027	査読の有無 無
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

〔学会発表〕 計9件 (うち招待講演 9件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Hiroshi Ohki
2. 発表標題 Computing Nucleon Electric Dipole Moments in Lattice QCD
3. 学会等名 International Molecule-type Workshop Frontiers in Lattice QCD and related topics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroshi Ohki
2. 発表標題 Computing Nucleon Electric Dipole Moments from Lattice QCD
3. 学会等名 The 37th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroshi Ohki
2. 発表標題 Calculation of Electric Dipole Moments of the Nucleon
3. 学会等名 2019 Lattice X Intensity Frontier Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroshi Ohki
2. 発表標題 Recent Progress on Lattice QCD with inclusive analysis
3. 学会等名 Non-Abelian discrete flavor symmetry and related topics workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroshi Ohki
2. 発表標題 Gravitational Waves from Walking Technicolor
3. 学会等名 The 24th Regular Meeting of the New Higgs Working Group (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroshi Ohki
2. 発表標題 Nucleon Electric Dipole Moments from Lattice QCD
3. 学会等名 基研研究会 素粒子物理の進展 2018 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大木洋
2. 発表標題 Nucleon Electric dipole moments from lattice QCD
3. 学会等名 The 7th KIAS Workshop on Particle Physics and Cosmology and The 2nd KEK-NCTS-KIAS Workshop on Particle Physics Phenomenology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大木洋
2. 発表標題 Nucleon Electric Dipole Moments from Lattice QCD
3. 学会等名 10th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms (FPUA) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大木洋
2. 発表標題 格子QCDによる核子構造の研究と標準模型を越えた物理
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会企画講演 (招待講演)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 大木洋	4. 発行年 2020年
2. 出版社 丸善出版	5. 総ページ数 4
3. 書名 物理科学、この1年 2020	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関