

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2022

課題番号：17K14277

研究課題名（和文）拡張されたガウス展開法に基づく非等方量子多体系の統一的解明

研究課題名（英文）Unified understanding of anisotropic quantum many-body systems from extended Gaussian expansion methods

研究代表者

鈴木 溪 (Suzuki, Kei)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 先端基礎研究センター・研究職

研究者番号：40759768

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：核子や中間子などのハドロンは通常、球形の波動関数として存在するが、系が極端に非等方な環境（例えば電磁場中など）にあるとき、非等方な形状となることが予想される。ハドロンを変質させるほどの強い電磁場は身近には存在しないが、粒子加速器を用いて行われる相対論的重イオン衝突実験や、強磁場中性子星（マグネター）においては極めて強い電磁場が生じる可能性がある。本研究では、そのような非等方環境下のハドロンの性質を解明するための理論や数値計算手法を考案し、新奇な物理現象の予言を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の主な研究対象はハドロン系やクォーク系（ディラック粒子系）であるが、研究成果として予言・解明された物理現象の数々は原子系・核子少数系・固体物性系などのその他の量子系へと拡張できる普遍的な概念であり、非等方環境における量子少数系・多体系の一般的な理解を深化させることにつながるという意味でも意義のある成果である。

研究成果の概要（英文）：Hadrons, such as nucleons and mesons, usually exist as spherical wave functions. When the system is in an extremely anisotropic environment (e.g., in an electromagnetic field), they are expected to have an anisotropic shape. Although electromagnetic fields strong enough to deform hadrons do not exist in our immediate environment, they are expected to occur realistically in relativistic heavy-ion collisions using particle accelerators and in magnetars. In this study, we developed theory and numerical method to elucidate the properties of hadrons under such an anisotropic environment and predicted novel physical phenomena.

研究分野：理論物理学

キーワード：量子色力学 ハドロン 少数多体系 強磁場 相対論的重イオン衝突 カシミール効果 ディラック半金属 格子場の理論

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、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

量子色力学(quantum chromodynamics, QCD)は、クォークやグルーオン、さらには、それらの複合粒子としての「ハドロン」(核子やパイ中間子など)の運動を記述するための基礎理論である。ハドロンは通常、球形の波動関数として存在する。これは、系の球対称性を反映しているためであるが、系が極端な「非等方環境」にある場合、非等方な形状となることが予想される。例えば、ハドロンを変形させるほどの強い磁場は日常には存在しないが、RHIC や LHC などの粒子加速器を用いて行われる相対論的重イオン衝突実験や、強磁場中性子星(マグネター)においては、極めて強い磁場が生じる可能性がある。そのような強磁場環境に焦点を当てた研究分野は、QCD に基づく非等方なダイナミクスの検証、あるいは非等方環境下の量子多体系に対する普遍的な理解を深化させるという意味でも重要である。

さらに、(球対称性のない)非等方な形状の波動関数を精密に求める数値解法の開発は、同時に推進されるべき課題の一つである。例えば、3体・4体などの量子少数系の波動関数を精密に数値解析するための「ガウス関数基底展開法(ガウス展開法)」は、原子・分子・原子核物理学において大きな成功を収めてきた強力な手法だが、電磁場などの外場が存在すると波動関数の球対称性が破れるため、従来のガウス展開法の拡張を行う必要があり、研究代表者らによる拡張手法(円柱座標ガウス展開法)の開発などが推進されてきた。

## 2. 研究の目的

理論物理学において、球対称な(等方的な)3次元空間を仮定したうえで理論や数値計算手法を構成する試みは多いが、特別な物理系に興味がある場合や技術的な都合などにより「等方性」が満たされない状況はしばしば生じる。本研究では、通常は等方的に扱われる系に対して、電磁場や空間的な境界条件を課すことにより、系が「非等方」となることによって新たに創発する物理現象の探索や、それを解析するための新たな理論手法の開発を目的とする。

## 3. 研究の方法

本研究の大きな目的は、非等方な環境下における量子少数系・多体系の統一的解明であるが、主にハドロン系で創発する新奇な物理現象の探索を行う。具体的には、電磁場が存在する環境や(球対称性のない)有限体積系におけるハドロンに着目する。主な理論手法として、従来のガウス展開法の拡張を行い、電磁場の存在によって形状が歪められたハドロンの構造を調べること、非等方ハドロン物理における新奇な現象の予言・解明を行う。さらに、理論的に解明した物理現象を応用し、RHIC や LHC などで行われる相対論的重イオン衝突実験や将来的な格子シミュレーションに対する示唆を与える。

## 4. 研究成果

### (1)磁場中のハドロンに関する理論研究

(1)-

有限軌道角運動量を持つ2体系に対する「円柱座標ガウス展開法」の開発を行い、特に、磁場中のP波チャーモニウムの性質に焦点を当てて詳細な解析を行った。結果として、磁場中の質量スペクトルと波動関数の変形現象の精密計算に成功した。特に、波動関数の変形には、強磁場中の量子力学において知られているスピン角運動量および軌道角運動量の第三成分の分岐現象(いわゆる、パッシュェン・バック効果)が反映されている。この現象が起こる磁場の大きさは、系のスピン軌道相互作用(LS結合)との相対的なスケールによって決まるため、系の条件次第では極めて弱い磁場においても劇的な変形が生じうる。このため、相対論的重イオン衝突実験において瞬間的に生成する磁場に対する有意な観測量としての期待も高まったため、P波チャーモニウムの輻射崩壊における空間異方性の議論も行った。このような「ハドロニック・パッシュェン・バック効果」は、チャーモニウムに限らず有限の軌道角運動量を持つあらゆるハドロンにおいて生じる現象であり、模型や手法を問わず議論できる研究対象という意味で、理論・実験両分野において大いに発展が見込める成果である。これらの成果は速報論文として出版された[S. Iwasaki, M. Oka, K. Suzuki, and T. Yoshida, Phys. Lett. B **790**, 71 (2019)]。

(1)-

上記(1)-で予言した「ハドロニック・パッシュェン・バック効果」に続いて、この効果に起因する特徴的なクォーコニウム崩壊過程について詳細な考察を行った。具体的には、QCDの有効場理論の一つであるポテンシャル非相対論的QCD(pNRQCD)に基づくP波クォーコニウムの輻射崩壊の定式化を考案することで、崩壊モード(E1崩壊やM1崩壊)の分岐比や崩壊の空間異方性に

いての解析的な公式を導出し、相対論的重イオン衝突実験における観測可能性の考察を行った。これらの成果は原著論文として出版された[S. Iwasaki and K. Suzuki, Phys. Rev. D **98**, 054017 (2018)]。

(1)-

上記(1)-、(1)- においては静磁場を扱ったが、相対論的重イオン衝突実験で実際に生じる電磁場は衝突時に急激に増大しその後減衰していくため、そのような電磁場の時間発展を考慮したうえでハドロン系の性質を調べることは重要である。本研究では、時間発展する磁場中の S 波チャーモニウムに対する時間依存シュレディンガー方程式を数値的に解くことにより、チャーモニウム状態がどのように変化していくかシミュレーションを行った。この計算には、チャーモニウムのランダウ準位に起因する効果と磁気モーメントに起因する効果が含まれており、両方の効果がチャーモニウムの性質に有意な影響を及ぼす。結果として、磁場の時間発展に伴い、チャーモニウムの基底状態が異なるスピン固有状態と混合していく過程や、異なる主量子数の固有状態へと励起していく過程を定量的に示した。このような過程は、実験において基底状態の最終的な収量が（他状態への遷移を通して）抑制されることを意味している。そのような「残存確率」の提案は、実験で得られる収量と理論値を比較する際に役立つことが期待される。これらの成果は速報論文として出版された[S. Iwasaki, D. Jido, M. Oka, and K. Suzuki, Phys. Lett. B **820**, 136498 (2021)]。

(1)-

磁場中のクォークコニウムについての先行研究を包括的にまとめたレビュー論文(招待論文)を執筆し、学術雑誌から出版された[S. Iwasaki, M. Oka, and K. Suzuki, Eur. Phys. J. A **57**, 222 (2021)]。

## (2) 有限体積系のハドロンに関する理論研究

(2)-

「有限体積効果」自体は、格子場の理論の数値シミュレーションにおいて必然的に生じる誤差評価や、現実的な実験系において避けられない「有限サイズ」の補正、真空のゼロ点エネルギーの変化などに関連しており、技術的な問題としてだけではなく純粋な物理現象としても注目されるべき興味深い話題である。特に、QCD 真空におけるカシミール効果(QCD カシミール効果)は、QCD の非摂動効果を通じて、ハドロンに関する物理量に影響を及ぼすことが期待される。本研究では、周期的・反周期的境界条件が課された箱型や平行板型の有限体積系における核子の性質について解析を行った。特に、カイラル対称性の自発的破れ・回復と関係する非摂動的なカシミール効果が核子に及ぼす影響を議論するため、Walecka 模型やパリティ二重項模型を用いた解析を行い、核子やその負パリティ励起状態  $N(1535)$  の質量の体積依存性を予言した。これらの予言は将来的な格子 QCD シミュレーションにおいて検証されることが期待される。これらの成果は原著論文として出版された[T. Ishikawa, K. Nakayama, and K. Suzuki, Phys. Rev. D **99**, 054010 (2019)]。

(2)-

軽いクォークとチャーモニウムクォークを1つずつ含む D 中間子は、カイラル対称性の自発的破れ・回復に対するシンプルで敏感なプローブとなることが期待されるため、本研究では D 中間子に注目して、QCD カシミール効果がどのような影響を及ぼすか解析を行った。具体的には、クォーク自由度に対する線形シグマ模型(クォーク・メソン模型)を用いて周期的・反周期的境界条件の課された有限体積におけるカイラル凝縮の変化を求め、これをパラメータとして含むヘビメソンのカイラル有効模型を用いて D 中間子に対する質量変化を予言した。さらに、有限温度と有限体積の競合効果やストレンジクォーク凝縮における特徴的な性質を発見した。これらの成果は原著論文として出版された[T. Ishikawa, K. Nakayama, D. Suenaga, and K. Suzuki, Phys. Rev. D **100**, 034016 (2019)]。

## (3) 格子上のカシミール効果に関する理論研究

(3)-

通常のカシミール効果は、微小な間隔で置かれた 2 枚の金属板の存在によって真空のゼロ点エネルギーが変化することに伴って生じる引力や負エネルギーなどの物理現象の総称である。本来のカシミール効果は光子場に対して予言された物理現象であるが、スカラー場やフェルミオン場などの他の量子場においても生じることが期待される。特に、QCD 真空におけるカシミール効果にとって、格子 QCD シミュレーションを用いた数値的な検証は重要な課題であるが、格子上の量子場は格子空間上で定義されるため、連続時空上の量子場とは異なる性質を示す。本研究では、ディラック粒子的な性質を持つ格子上のフェルミオン場に対するカシミール効果の定義を初めて提案し、その詳細な性質を予言した。特に、格子 QCD の分野において理論的・実用的によく理解されている格子フェルミオンの例として、ナイーブフェルミオン、ウィルソンフェルミオン、(ドメインウォールフェルミオン定式化に基づく)オーバーラップフェルミオンにおけるカシミール効果の性質(カシミールエネルギーの符号やその強さ、境界条件依存性など)を調べ

た。これらの予言は将来的な格子シミュレーションが行われた際の結果の解釈に役立つだけでなく、固体物性系で観測されることが期待される。1+1次元系における主な成果は速報論文として出版された[T. Ishikawa, K. Nakayama, and K. Suzuki, Phys. Lett. B **809**, 135713 (2020)]。さらに、2+1次元、3+1次元へ拡張した結果や、トポロジカル絶縁体表面やディラック半金属中で実現する(近似的な)ディラック電子系への応用を議論した内容は原著論文として出版された[T. Ishikawa, K. Nakayama, and K. Suzuki, Phys. Rev. Research **3**, 023201 (2021)]。

(3)-

これまでのカシミール効果の研究では、エネルギーが運動量について線形に増加するような「相対論的な」量子場(電磁場など)に関しては理論的・実験的に一定の理解が得られている。一方で、分散関係が二次となるような「非相対論的な」量子場において、カシミール効果が存在するの否かはそれほど自明でない。本研究では、上記(3)-で考案した定義を応用し、様々な分散関係を持つ格子上の量子場に起因するカシミール効果が存在(または消失)する条件について、理論的な考察を行った。特に、運動量について偶数次の分散関係を持つような量子場を調べたところ、二つの境界間の距離が長距離のときカシミール効果が消失するが、短距離のときのみ特異的な「名残」が残る例(remnant Casimir effect)を発見した。さらに、この効果の実現する具体例として、半導体であるヒ化ガリウム(GaAs)から成る1次元物質中のフォノン場に起因するカシミール効果を簡単な模型を用いて定量的に示した。これらの成果は速報論文として出版された[K. Nakayama and K. Suzuki, Phys. Rev. Research (Letter) (2023)]。

(3)-

電磁場に起因するカシミール効果は理論的・実験的によく検証されてきたが、スカラー場由来のカシミール効果に相当する現象を実験的に検証できるか否かは重要な課題のひとつである。反強磁性体中のマグノン線形分散を持つスカラー場として記述されるため、スカラー場由来のカシミール効果を検証するための良い舞台となることが期待される。本研究では、上記(3)-で考案した定義を応用し、反強磁性体である酸化クロム(III)(Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)とフェリ磁性体であるイットリウム鉄ガーネット(Y<sub>3</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub>)の薄膜内部のマグノン場から生じるカシミール効果を定量的に予言した。さらに、フェリ磁性体薄膜におけるカシミール効果が磁化の膜厚依存性として観測可能であることを提案した。これらの成果は速報論文として出版された[K. Nakata and K. Suzuki, Phys. Rev. Lett. **130**, 096702 (2023)]。

(3)-

スカラー場と同様に、フェルミオン場についてもカシミール効果に相当する現象が生じることが理論的には予想される。しかし、素粒子である電子やクォークは有限の質量を持ち、有質量場のカシミール効果は(ゼロ質量場と比べて)抑制されることから、実験的に観測することはほぼ困難である。一方で、ディラック/ワイル半金属中で準粒子として実現するディラック/ワイル電子はギャップの無い分散関係を持つため、フェルミオン場のカシミール効果の観測に対して有利となる可能性がある。本研究では、上記(3)-で考案した定義を応用し、ディラック/ワイル半金属薄膜内部のフェルミオン場から生じるカシミール効果の解析を行った。特に、運動量空間におけるディラック/ワイル点がゼロでない運動量に存在するとき、カシミールエネルギーが膜厚に依存して振動するという新現象を発見した。さらに、既にディラック半金属であることが知られているヒ化カドミウム(Cd<sub>3</sub>As<sub>2</sub>)やピスマス化合物(Na<sub>3</sub>Bi)の有効模型を用いた定量的な解析や、電子系に外部磁場をかけることで生じるランダウ量子化による影響の評価なども行った。これらの成果は速報論文として出版された[K. Nakayama and K. Suzuki, Phys. Lett. B (2023)]。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計30件（うち査読付論文 29件 / うち国際共著 11件 / うちオープンアクセス 27件）

1. 著者名 Katsumasa Nakayama, Kei Suzuki	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Dirac/Weyl-node-induced oscillating Casimir effect	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 -
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 Katsumasa Nakayama, Kei Suzuki	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Remnants of the nonrelativistic Casimir effect on the lattice	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 -
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 Katsumasa Nakayama, Kei Suzuki	4. 巻 430
2. 論文標題 Casimir effect for fermions on the lattice	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	6. 最初と最後の頁 379 ~ 379
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.430.0379	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 Koichi Hattori, Daiki Suenaga, Kei Suzuki, Shigehiro Yasui	4. 巻 276
2. 論文標題 Phase diagram of the QCD Kondo effect and inactivation of the magnetic catalysis	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 01015 ~ 01015
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/202327601015	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 Yonghee Kim, Makoto Oka, Daiki Suenaga, Kei Suzuki	4. 巻 107
2. 論文標題 Strong decays of singly heavy baryons from a chiral effective theory of diquarks	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 074015 ~ 074015
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.107.074015	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 Kouki Nakata, Kei Suzuki	4. 巻 130
2. 論文標題 Magnonic Casimir Effect in Ferrimagnets	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 096702 ~ 096702
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.130.096702	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 Sachio Iwasaki, Daisuke Jido, Makoto Oka, Kei Suzuki	4. 巻 820
2. 論文標題 Survival probabilities of charmonia as a clue to measure transient magnetic fields	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 136498 ~ 136498
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2021.136498	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 Sachio Iwasaki, Makoto Oka, Kei Suzuki	4. 巻 57
2. 論文標題 A review of quarkonia under strong magnetic fields	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The European Physical Journal A	6. 最初と最後の頁 222 ~ 222
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epja/s10050-021-00533-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yonghee Kim, Yan-Rui Liu, Makoto Oka, Kei Suzuki	4. 巻 104
2. 論文標題 Heavy baryon spectrum with chiral multiplets of scalar and vector diquarks	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 054012 ~ 054012
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.104.054012	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 Tsutomu Ishikawa, Katsumasa Nakayama, Kei Suzuki	4. 巻 104
2. 論文標題 Kondo effect with Wilson fermions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 094515 ~ 094515
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.104.094515	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 Daiki Suenaga, Yasufumi Araki, Kei Suzuki, Shigehiro Yasui	4. 巻 105
2. 論文標題 Heavy-quark spin polarization induced by the Kondo effect in a magnetic field	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 074028 ~ 074028
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.105.074028	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 Yonghee Kim, Makoto Oka, Kei Suzuki	4. 巻 105
2. 論文標題 Doubly heavy tetraquarks in a chiral-diquark picture	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 074021 ~ 074021
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.105.074021	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 Yonghee Kim, Emiko Hiyama, Makoto Oka, Kei Suzuki	4. 巻 102
2. 論文標題 Spectrum of singly heavy baryons from a chiral effective theory of diquarks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 014004 ~ 014004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.014004	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 Tsutomu Ishikawa, Katsumasa Nakayama, Kei Suzuki	4. 巻 809
2. 論文標題 Casimir effect for lattice fermions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 135713 ~ 135713
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2020.135713	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 Yasufumi Araki, Daiki Suenaga, Kei Suzuki, Shigehiro Yasui	4. 巻 3
2. 論文標題 Two relativistic Kondo effects: Classification with particle and antiparticle impurities	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 013233 ~ 013233
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.3.013233	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 Yohei Kawakami, Masayasu Harada, Makoto Oka, Kei Suzuki	4. 巻 102
2. 論文標題 Suppression of decay widths in singly heavy baryons induced by the UA(1) anomaly	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 114004 ~ 114004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.114004	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 Yasufumi Araki, Daiki Suenaga, Kei Suzuki, Shigehiro Yasui	4. 巻 3
2. 論文標題 Spin-orbital magnetic response of relativistic fermions with band hybridization	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 023098 ~ 023098
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.3.023098	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 Tsutomu Ishikawa, Katsumasa Nakayama, Kei Suzuki	4. 巻 3
2. 論文標題 Lattice-fermionic Casimir effect and topological insulators	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 023201 ~ 023201
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.3.023201	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 Daiki Suenaga, Yasufumi Araki, Kei Suzuki, Shigehiro Yasui	4. 巻 103
2. 論文標題 Chiral separation effect catalyzed by heavy impurities	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 054041 ~ 054041
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.103.054041	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 Tsutomu Ishikawa, Katsumasa Nakayama, Daiki Suenaga, Kei Suzuki	4. 巻 100
2. 論文標題 D mesons as a probe of Casimir effect for chiral symmetry breaking	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 34016
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.034016	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 Sachio Iwasaki, Makoto Oka, Kei Suzuki, Tetsuya Yoshida	4. 巻 2130
2. 論文標題 Hadronic Paschen-Back effect in charmonium	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 AIP Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 050001 ~ 050001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5118418	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 Sachio Iwasaki, Makoto Oka, Kei Suzuki, Tetsuya Yoshida	4. 巻 49
2. 論文標題 Hadronic Paschen-Back effect in P-wave charmonia under strong magnetic fields	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Modern Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 1960002 ~ 1960002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S2010194519600024	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 Daiki Suenaga, Kei Suzuki, Shigehiro Yasui	4. 巻 2
2. 論文標題 QCD Kondo excitons	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 023066 ~ 023066
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.023066	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 Masayasu Harada, Yan-Rui Liu, Makoto Oka, Kei Suzuki	4. 巻 101
2. 論文標題 Chiral effective theory of diquarks and the UA(1) anomaly	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 054038 ~ 054038
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.101.054038	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 Daiki Suenaga, Kei Suzuki, Yasufumi Araki, Shigehiro Yasui	4. 巻 2
2. 論文標題 Kondo effect driven by chirality imbalance	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 023312 ~ 023312
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.023312	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 Sachio Iwasaki, Makoto Oka, Kei Suzuki, Tetsuya Yoshida	4. 巻 790
2. 論文標題 Hadronic Paschen-Back effect	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 71 ~ 76
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2018.10.024	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 Sachio Iwasaki, Kei Suzuki	4. 巻 98
2. 論文標題 Quarkonium radiative decays from the hadronic Paschen-Back effect	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 054017 ~ 054017
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.98.054017	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 Tutomu Ishikawa, Katsumasa Nakayama, Kei Suzuki	4. 巻 99
2. 論文標題 Casimir effect for nucleon parity doublets	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 054010 ~ 054010
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.99.054010	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 Kei Suzuki, Shigehiro Yasui, and Kazunori Itakura	4. 巻 96
2. 論文標題 Interplay between chiral symmetry breaking and the QCD Kondo effect	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 114007 ~ 114007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.96.114007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 岩崎幸生、岡真、鈴木溪、吉田哲也	4. 巻 62(suppl.1)
2. 論文標題 チャーモニウムにおけるハドロニック・パッシェン・バック効果	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 原子核研究	6. 最初と最後の頁 50 ~ 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 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計33件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 11件)

1. 発表者名 服部恒一、末永大輝、鈴木溪、安井繁宏
2. 発表標題 強磁場中のQCD近藤効果はカイラル凝縮と共栄できるか?
3. 学会等名 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金龍熙、岡真、末永大輝、鈴木溪
2. 発表標題 ダイクォークの相互作用に基づくヘビーバリオンの崩壊反応
3. 学会等名 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Katsumasa Nakayama, Kei Suzuki
2. 発表標題 Casimir effect for fermions on the lattice
3. 学会等名 The 39th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中山勝政、石川力、鈴木溪
2. 発表標題 格子上的カシミア効果とトポロジカル絶縁体
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金龍熙、岡真、鈴木溪
2. 発表標題 ダイクオーク模型による $ST_{\{QQ\}}$ テトラクオークの構造
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金龍熙、岡真、鈴木溪
2. 発表標題 ダイクオーク模型による $ST_{\{QQ\}}$ テトラクオークの構造2
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Katsumasa Nakayama, Tsutomu Ishikawa, Kei Suzuki
2. 発表標題 Casimir energy for the domain-wall fermion
3. 学会等名 Asia-Pacific Symposium for Lattice Field Theory (APLAT 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石川力、中山勝政、鈴木溪
2. 発表標題 格子フェルミオンにおけるカシミール効果：ナイーブ、ウィルソン、ドメインウォール
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 末永大輝、鈴木溪、荒木康史、安井繁宏
2. 発表標題 カイラリティ不均一物質中における近藤効果
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 末永大輝、荒木康史、鈴木溪、安井繁宏
2. 発表標題 磁場中の近藤効果に起因したヘビークォークスピン分極
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川上洋平、原田正康、岡眞、鈴木溪
2. 発表標題 UA(1)アノマリーによるsingly heavy baryonsの崩壊幅の抑制
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 金龍熙、肥山詠美子、岡眞、鈴木溪、Yan-Rui Liu
2. 発表標題 ベクトルダイクォークのカイラル有効理論によるヘビーバリオンのスペクトル
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岩崎幸生、鈴木溪、岡眞
2. 発表標題 非定常磁場中におけるチャーモニウムの混合比
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 荒木康史、末永大輝、鈴木溪、安井繁宏
2. 発表標題 非相対論的フェルミオンとディラックフェルミオンが結合した系の帯磁率
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石川力、中山勝政、鈴木溪
2. 発表標題 ウィルソン・フェルミオンにおける近藤効果
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金龍熙、肥山詠美子、岡真、鈴木溪、Yan-Rui Liu
2. 発表標題 ダイクォークのカイラル有効理論とバリオンのスペクトル
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kei Suzuki
2. 発表標題 A new phase and exciton modes in QCD Kondo effect
3. 学会等名 Quarks and Compact Stars (QCS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木溪、石川力、中山勝政、末永大輝
2. 発表標題 D中間子におけるCasimir効果とカイラル対称性の自発的破れ
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 石川力、中山勝政、鈴木溪
2. 発表標題 有限体積における核子に対するパリティ二重項模型の相構造
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 岩崎幸生
2. 発表標題 円筒型ガウス展開法を基にした時間依存磁場中のチャーモニウムの解析
3. 学会等名 ELPH 研究会「ハドロン構造における多粒子相関」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木溪
2. 発表標題 QCD Casimir効果を用いて探るハドロンのカイラルパートナー構造
3. 学会等名 ELPH 研究会「ハドロン構造における多粒子相関」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sachio Iwasaki
2. 発表標題 Mixing ratios of quarkonia in time-evolving magnetic fields with CGEM
3. 学会等名 REIMEI Workshop on "Universal Features of Quantum Flows with Spin, Orbital and Tensor Correlations" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Sachio Iwasaki
2. 発表標題 Hadronic Paschen-Back Effect on charmonia
3. 学会等名 REIMEI Workshop on "Universal Features of Quantum Flows with Spin, Orbital and Tensor Correlations" (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木溪、末永大輝、安井繁宏
2. 発表標題 QCD近藤効果におけるヘッジホッグ凝縮の起源
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Sachio Iwasaki
2. 発表標題 Hadronic Paschen-Back effect in charmonium
3. 学会等名 The 13th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics (HYP2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Sachio Iwasaki, Makoto Oka, Kei Suzuki, Tetsuya Yoshida
2. 発表標題 Hadronic Paschen-Back effect in P-wave charmonia under strong magnetic fields
3. 学会等名 5th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Sachio Iwasaki
2. 発表標題 Hadronic Paschen-Back effect in P-wave charmonia under strong magnetic fields
3. 学会等名 New aspects of the Hadron and Astro/Nuclear Physics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岩崎幸生、鈴木溪
2. 発表標題 強磁場中におけるクォークonium輻射崩壊の異方性
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kei Suzuki
2. 発表標題 Quarkonium radiative decays from the Hadronic Paschen-Back effect
3. 学会等名 QWG 2019 - The 13th International Workshop on Heavy Quarkonium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sachio Iwasaki, Makoto Oka, Kei Suzuki, and Tetsuya Yoshida
2. 発表標題 Hadronic Paschen-Back Effect in Charmonium
3. 学会等名 The 7th Asia-Pacific Conference on Few-Body Problems in Physics (APFB 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 岩崎幸生、岡眞、鈴木溪、吉田哲也
2. 発表標題 チャーモニウムにおけるハドロニック・パッセン・バック効果
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 Kei Suzuki
2. 発表標題 Recent studies of D meson mass increase in nuclear matter
3. 学会等名 Tokyo Tech - Uppsala University - Joint Symposium (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 岩崎幸生、岡眞、鈴木溪、吉田哲也
2. 発表標題 強磁場のプローブとしてのP波チャーモニウム
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔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
研究協力者	岩崎 幸生  (Iwasaki Sachio)		

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
---------	---------