

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K03849

研究課題名（和文）グザイハイペロンを焦点とするストレンジネス核物理

研究課題名（英文）Xi hyperons and strangeness nuclear physics

研究代表者

河野 通郎 (Kohno, Michio)

大阪大学・核物理研究センター・協同研究員

研究者番号：40234710

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,200,000円

研究成果の概要（和文）：ストレンジクォークを含むバリオンであるハイペロンと核子の相互作用の理解は、宇宙の進化過程や中性子星物質中でのハイペロンの役割の理解にとって重要である。ハイパー核実験に加え、原子核上でハイペロンを生成する研究が世界各地で進行している。本課題では、クォークレベルのQCD理論に基づくカイラル有効場理論で構成されるバリオン間相互作用を用いた微視的計算を行い、原子核内の のポテンシャルや生成スペクトルを求めた。さらに、 を含む3体系の束縛状態の可能性を調べ、 や と重陽子の散乱位相差及び重イオン散乱で得られる運動量相関関数を厳密な方法で求めることにより、ストレンジネスが関与する物理の研究を進めた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで、カイラル有効場理論のバリオン間相互作用を用いて核物質計算を行い、核媒質内の と核子の相互作用を構成し原子核内における の束縛状態を予測し、既存の実験データとほぼ対応する結果を得ている。このことは、用いる相互作用が妥当でありこの方向での研究が有意義であることを示す。 については、多くの原子核そして精度の向上した新しい実験データが期待される。その状況に合わせ、微視的検討による相互作用記述の精密化をはかる。ハイペロンの相互作用についても3体力の寄与は重要である。その計算手法として部分波展開式を新たに開発した。この方法を用いた核媒質中での3体力の寄与の解明は、中性子星物質の理解につながる。

研究成果の概要（英文）：The knowledge of the interaction between the hyperon and the nucleon is essential to understand the role of hyperons in neutron star matter and in the matter evolution of our universe. Various experimental facilities are trying to explore properties of hyperons such as and in the nuclear medium by producing them. In this project, I carried out microscopic calculations for potentials in nuclei and formation spectra using baryon-baryon interactions constructed in chiral effective field theory that is based on the fundamental theory of QCD. The NN 3-body bound system and phase shifts of hyperon-deuteron scatterings are calculated in the Faddeev method. In addition, hyperon-deuteron momentum correlation functions are evaluated and compared favorably with current experimental data. These studies elucidate the features of present descriptions of the hyperon-nucleon interactions and help improve them.

研究分野：原子核理論

キーワード：ハイペロン カイラル有効場理論 核物質計算 生成スペクトル バリオン間相互作用 ストレンジネス核物理 Faddeev計算 運動量相関関数

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

私達の日常の世界は、クォークのレベルで存在する6種類のクォークのうち、軽い2つのアップとダウンクォークで構成される陽子と中性子(核子と呼ぶ)が束縛した原子核が基本的な要素である。少し重いストレンジクォークの自由度は実在していないが、宇宙の進化過程などで現れる高エネルギーあるいは高密度下では役割を果たすと考えられる。ストレンジクォークを1つ含む および ハイペロン、そして2つ含む ハイペロンが核子や原子核とどのように相互作用するかを解明することは、クォークが形作るバリオン世界の全体像を理解するための基本的課題である。私は、核子間相互作用に基礎を置いて原子核の構造と反応を微視的に理解する研究を手掛け、対象を核媒質中の および の性質の研究に拡張してきた。その先の課題として ハイペロンの問題に重点を置いて取り組む。核媒質中での と核子の相互作用を考えるには、 や との結合を考慮しなければならず、これまでの研究の蓄積に基づく総合的な扱いが必須である。近年、バリオン間相互作用の理論的記述に進展があり、クォークレベルの標準理論である量子色力学(QCD)に基礎を置くカイラル有効場理論を用いたパラメータ化が進み、核子間相互作用について2核子の散乱実験データを精度良く再現する相互作用記述が得られている。その枠組をハイペロンと核子に適用する研究も進んでいる。私はこれまで、 および と核子の自由空間での相互作用から出発して、それらのハイペロンと核子の核媒質内での相互作用を微視的に導き、実験データとの対応を考える研究を行ってきた。実験的には、世界的に、 を生成して原子核との相互作用を調べる実験が進行中であり、日本でも大強度陽子加速器施設において と原子核の束縛状態や(K-,K+)反応による原子核上での 生成スペクトルを測定する実験が進行し、新しいデータが得られている。そのようなストレンジネスを持つバリオンの関わる実験的および理論的状況の下で、予測性が高いと考えられるバリオン間相互作用構築の枠組みでパラメータ化されるバリオン間相互作用を用いた微視的記述を行い、実験データとの比較によってハイペロンの関わるバリオン間相互作用理解の向上を目指す研究が望まれる。

2. 研究の目的

ハイペロンと核子の相互作用の理論的記述には、実験的情報が少なく不定性がある。世界各地でハイペロン生成実験が計画され実行されている状況下で、実験データに対応する理論的検討を行い相互作用理解の向上を図ることは、ストレンジネス核物理の進展のために重要な課題である。 ハイペロンについても原子核に束縛される状態が発見され始めている。また、(K-,K+)実験により原子核上で を生成する実験では、正エネルギー状態の -原子核間のポテンシャルエネルギーについての情報が得られる。 と核子の2体相互作用から出発して微視的に と原子核の相互作用を導き、実験データと対比させることにより出発点の相互作用記述にフィードバックを行うという研究は、ストレンジネス核物理に広範囲の影響を与える研究課題である。

と核子が2体の束縛状態を作らないことはほぼ確実であるが、 NN の3体系として束縛状態が存在するかどうかは不確定である。3体系の厳密な量子多体計算を行い、 と核子の相互作用の性質に基づいてその束縛・非束縛を予測する研究を行うことは、相互作用の性質を調べる上で重要である。

バリオン間相互作用においては2体力を考えるだけでは不十分で、必然的に現れる3体力を考慮しなければならない。私自身カイラル有効場理論が与える3体力の記述に基づいて、通常の原子核においてその基本的性質である飽和性を説明する因子として3体核力が重要な役割を果たすことを定量的に明らかにし

てきた。2体力の理解の精密化に加え、ハイペロンと核子についても3体力の寄与を明らかにすることは、重い原子核や中性子星物質中でのハイペロンの役割の理解にとって基本的課題である。カイラル有効場理論の枠組みでは、3体力のパラメータは2体力に現れるパラメータの他に、少数系の実験データと比較することにより決定しなければならないものが存在する。その決定には、3体系の厳密な量子理論であるFaddeev方程式の枠組みでの計算を遂行することが必要である。

3．研究の方法

バリオンの2体相互作用は短距離部分したがって高運動量部分に強い斥力を持つため、低エネルギー空間で原子核を記述する場合、摂動的に適用することができず、2体相関を適切に考慮しなければならない。伝統的な方法は、核媒質内での2体相関を記述するG行列方程式を解いて得られるG行列を有効相互作用として低エネルギー空間に適用する処方である。近年、高エネルギー空間での相関をユニタリ変換によって低エネルギー空間にくりこむという方法も開発されているが、前者の方法の内容がよく理解されるようになったという側面を持つ。私は、前者の方法で核子の核媒質内相互作用の問題を手掛け、3体力の寄与の役割を含め原子核の基本的性質である飽和性の理解を進展させてきた。ハイペロンと核子の核媒質内相互作用の場合にもその枠組みを適用する。具体的には、仮想的な無限系である核物質でG行列方程式を解いて求めた相互作用を、局所密度近似を用いて有限核に適用し、ハイペロンの一粒子状態や散乱状態を考察する。ハイペロンと核子の2体相互作用に基礎を置く微視的な方法である。

近年、バリオン間相互作用の理論的記述に進展があり、クォークレベルの標準理論であるQCDに基礎を置くカイラル有効場理論を用いたパラメータ化が進み、核子間相互作用について2核子の散乱実験データを精度良く再現する相互作用記述が得られている。その枠組をハイペロンと核子に適用する研究も進んでいる。この研究課題では、その予測性が高いと考えられるバリオン間相互作用を用い相互作用の妥当性を検証し、バリオン間相互作用理解をさらに進展させる研究を行う。

ハイペロンについて NNの3体系が束縛されるかどうかは、相互作用の詳細に関わる重要な問題である。実験的には確定していないこの問題に対し、Faddeev形式による精密計算を行って、カイラル有効場理論の相互作用で3体系としての束縛状態が可能かどうかを調べる。3体系では2体力の他に3体力が存在する。核子の多体系では3体力が重要な役割を果たすことが明らかになっていて、核子についてもその寄与を明らかにすることは、重い原子核や中性子星物質中での核子の性質の理解にとって重要である。3体力の具体的計算には部分波に展開する必要があり、その処方を開発し実際計算を行う。

4．研究成果

核子間にはたらく核力の理論的記述の研究には長い歴史があるが、現在ではカイラル有効場理論の枠組みで構築される相互作用が、核力に基づいて第1原理的に原子核の構造と反応過程を理解する研究において標準的に用いられている。ハイペロンと核子の相互作用についても、カイラル有効場理論によるパラメータ化が行われ、ハイペロンを含むバリオン間相互作用の包括的理解に向けての研究が進められている。私は、その相互作用記述に基づいてハイペロンと核子の核媒質内有効相互作用の研究を行って、ハイペロンの研究に続き、本研究ではストレンジクォークを2つ含むハイペロンに重点を置いた。これまで、カイラル有効場理論のバリオン間相互作用を用いて核物質計算を行い、得られた核媒質内のN間の有効相互作用を用いて原子核内におけるN核子のポテンシャルエネルギーを求めて束縛状

態を予測し、既存の実験データとほぼ対応する結果を得た。このことは、用いる相互作用が妥当でありこの方向での研究を続けることが有意義であることを示すものであった。引き続きより重い原子核におけるの束縛状態や(K-,K+)生成スペクトル計算を行い、その研究成果を発表した。現状では、が原子核に束縛される状態の実験データは少なく、また不定性が大きい。今後のより多くの原子核そして精度の向上した新しい実験データが期待される。そのデータの向上に合わせ、スピン・アイソスピン依存性の微視的検討を含む相互作用記述の精密化をはかることができる。また、現在のハドロン物理研究で重要な課題になっている3体力の寄与を具体的に検討するために部分波展開の新しい計算手法を開発した。これまでに行った3体力を有効2体力化することに加え、新たに導出することのできた部分波展開式の適用により、核媒質中でハイペロンが関わる3体力効果を明らかにし、中性子星物質の理解につながる研究を行うための準備ができた。

バリオン間相互作用を明らかにするには、直接的な散乱実験と厳密計算が可能な少数系のデータが基本的である。と2核子が束縛するかどうかについてはこれまで、実験的には検出されていないが、理論的に検討するのは重要である。3体系の厳密な枠組であるFaddeev計算を行い、カイラル有効場理論の相互作用では束縛しないという予測を行った。その延長上に、ハイペロンと重陽子の散乱過程をFaddeev方程式で厳密に扱う課題に着手した。直接的な実験は当面望めないが、近年進展している重イオン散乱実験で測定される運動量相関関数がハイペロンと核子間あるいはハイペロンと重陽子間の相互作用について情報を与えることが注目されている。Faddeev計算によれば、近似を導入することなく、ハイペロンと核子の相互作用に基づいてハイペロンと重陽子の相対波動関数を求め、それを用いて対応する運動量相関関数を計算可能であり、およびハイペロンについて重陽子との散乱位相差そして運動量相関関数を求める数値計算プログラムを作成した。については報告されている実験データと比較を行い、カイラル有効場理論の相互作用で求めた結果と対応することを明らかにした。また、これまでの解析で採用されている運動量相関関数の近似表式の妥当性を検証することができた。

2年の延長の結果、5年の期間で行った研究の成果を以下に記述する。

(1) -原子核ポテンシャル

ドイツのグループがパラメータ化した、カイラル有効場理論によるバリオン間相互作用を用いて、核子の仮想的な無限系(核物質という)でと核子の2体相関を記述するG行列方程式を解いて、核媒質内のと核子の有効相互作用を求めた。実際の有限核でののポテンシャルエネルギーは、核物質のポテンシャルを局所密度近似により対応させた。計算は、 ^{12}C で行い、のポテンシャルエネルギーは浅いが引力的であり、いくつかの束縛状態が存在することを予測した。実験的には、高エネルギー研究機構で行われたエマルジョン実験で束縛状態が見つまっているが、ほぼ対応する結果である。このことは、採用した2体のN相互作用が適切であることを示唆する。同じ枠組みでの計算を、重い原子核に適用し、の一粒状態を予測するとともに、負の電荷をもつが電磁力により原子核に束縛される原子状態のエネルギーがと原子核のバリオンレベルの相互作用の影響で変化する大きさを理論的に評価した。対応する実験が ^{56}Fe を対象として進められていて将来比較可能である。

(2) 生成スペクトル

原子核上の(K-,K+)反応で生成される粒子のスペクトルは、と標的原子核のポテンシャルエネルギー

の影響を受け、正エネルギー状態の σ と原子核の相互作用を反映する。日本の高エネルギー研究機構で実験が計画されている (K-,K+) 反応による原子核内の σ 生成実験データを対象として、これまで開発してきた σ が生成される素過程のエネルギーと角度依存性を考慮することができる半古典歪曲波法を用いて σ 生成スペクトル計算を行った。実験の現状は予備的なものであり、詳細な比較を行って上記(1)の方法で求めたポテンシャルのエネルギー依存性の当否を解析するのは最終的な実験結果を待たなければならないが、スペクトルの形状についてほぼ対応する結果が得られている。

(3) NN3体系のFaddeev計算

と2核子という3体系が束縛状態として存在するかどうかという問題は、Faddeev 方程式を解くことにより厳密な量子多体計算が可能であり、相互作用の性質を直接的に調べることができる課題である。実験的に束縛状態が存在するかどうかは知られていない状況で、理論的な予測を行うことの意義は大きいですが、これまでカイラル有効相互作用を用いた研究はなされていなかった。これまで NN3体系を手掛けてきた研究者の協力を得て、NNの束縛状態に関して Faddeev 方程式を解く計算を行い、カイラル相互作用を用いた場合は束縛しないという結果を得た。

(4) 3体力の部分波展開を行う新しい計算法の導出

3体系以上の系では、2体力に加え3体力の寄与を考慮しなければならない、その項がどの程度の大きさであるかを明らかにしなければならない。カイラル有効場理論は、3体力の表式を系統的に導くことができる枠組みであるが、実際計算を行うには3つのバリオンで積分しなければならない、角度についての多重積分が複雑になる。この問題に対し、従来の方法とは異なる系統的かつ簡明な計算方法を導いた。この方法自身は、NN系に限らず一般的なものである。実際の計算としては、実験データが存在する NN3体系にまず適用し、具体的にカイラル有効相互作用の3体力の寄与を評価する計算を実行するところまで研究を進展させることができた。

(5) 低エネルギーのハイペロンと重陽子の散乱のFaddeev方程式による記述と運動量相関関数

ハイペロンを含む3体系の束縛状態の Faddeev 計算に続き、ハイペロンと2核子の束縛系である重陽子の散乱を Faddeev 方程式で記述する研究を進めた。直接的にその散乱データを得る実験は当面は望めないが、別の方法として、重イオン散乱で生じるハイペロンと重陽子のペアを捕らえ、その運動量相関を測定することによってそれらの間の相互作用の情報を引き出すという研究が進み注目されている。理論的には量子系の問題として Faddeev 方程式で記述する課題である。と重陽子の実験データが近い将来得られるという状況の下で、束縛状態の計算の延長としてこの問題を手掛けた。核子と重陽子の散乱についてはこれまで計算がなされているが、質量の異なるハイペロンの場合は方程式が複雑になり、これまでは計算されなかったことがない課題であったが、本研究課題の期間中に、散乱の位相差を求め、同時に得られる相対波動関数から運動量相関を計算するプログラムを完成させた。計算は、 Λ -重陽子と Σ -重陽子についてカイラル有効場理論の相互作用を用いて行った。実験的には、 Λ と重陽子の運動量相関関数が予備的ではあるが初めて報告されていて、計算結果とよく対応している。このことはやはり、用いた相互作用が妥当であり実験データの蓄積があれば、より精密なものに改良すればよいことを意味する。実験的な Λ と重陽子の運動量相関関数も近い将来利用できるはずである。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 M. Kohno, K. Kamada, and K. Miyagawa	4. 巻 109
2. 論文標題 Contributions of 2 exchange, 1 exchange, and contact three-body forces in NNLO chiral effective field theory to 3 H	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 024003:1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.109.024003	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 H. Kamada, M. Kohno, and K. Miyagawa	4. 巻 108
2. 論文標題 Faddeev calculation of 3 H incorporating the 2-exchange NN interaction	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 024004:1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.108.024004	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 M. Kohno, H. Kamada, and K. Miyagawa	4. 巻 106
2. 論文標題 Partial-wave expansion of NN three-baryon interactions in chiral effective field theory	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 054004:1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.106.054004	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 K. Miyagawa and M. Kohno	4. 巻 62
2. 論文標題 A Realistic Approach to the NN Bound-State Problem Based on Faddeev Equation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Few-Body Systems	6. 最初と最後の頁 65:1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00601-021-01650-z	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 M. Kohno and K. Miyagawa	4. 巻 2021
2. 論文標題 hypernuclear states predicted by next-to-leading-order chiral baryon-baryon interactions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 103D04:1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptab115	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 M. Kohno	4. 巻 101
2. 論文標題 Comparison between optical-model potentials in G-matrix folding method and improved local-density approximation method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 024611:1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.102.024611	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 M. Kohno	4. 巻 100
2. 論文標題 Xi hyperons in the nuclear medium described by chiral NLO interactions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 024313:1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.100.024313	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 -

〔学会発表〕 計13件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 河野通郎
2. 発表標題 -deuteron散乱のFaddeev計算で見る N相互作用ポテンシャルの性質
3. 学会等名 日本物理学会2024春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 河野通郎、鎌田裕之
2. 発表標題 Faddeev方式による低エネルギー d -deuteron 散乱の記述
3. 学会等名 日本物理学会2024春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 河野通郎、鎌田裕之、宮川和也
2. 発表標題 カイラル有効場理論 NN 3 体力のhypertriton束縛エネルギーへの寄与
3. 学会等名 日本物理学会2024春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 鎌田裕之、河野通郎、宮川和也
2. 発表標題 カイラル有効場理論の 2 交換 3 体力を含むhypertritonのFaddeev計算
3. 学会等名 日本物理学会2023春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 河野通郎、鎌田裕之、宮川和也
2. 発表標題 3 体力のJacobi座標部分波展開式と NNへの適用例
3. 学会等名 日本物理学会2022秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 河野通郎
2. 発表標題 カイラル NLO ポテンシャルが予測する ^{56}Fe の準位シフト
3. 学会等名 日本物理学会2021秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 河野通郎
2. 発表標題 ストレンジネス核物理とカイラル有効場理論
3. 学会等名 Physics at J-PARC HIHR/K1.1 beam lines
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Kohno
2. 発表標題 Effect of three-baryon force for hyperons in neutron star matter
3. 学会等名 2nd J-PARC HEF-ex workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Miyagawa and M. Kohno
2. 発表標題 A realistic approach to the XiNN bound-state problem based on Faddeev equation
3. 学会等名 The 8th Asia-Pacific conference on Few-Body problems in Physics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 河野通郎、宮川和也
2. 発表標題 NN3 体力と NN3 体系
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 宮川和也、河野通郎
2. 発表標題 XiN-LambdaLambda相互作用とXiNN準束縛状態の解析
3. 学会等名 日本物理学会2019年度年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 河野通郎
2. 発表標題 カイラルNLOポテンシャルが記述する核媒質中のXiハイペロン
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 M. Kohno
2. 発表標題 X hyperons in the nuclear medium described by the chiral NLO interactions
3. 学会等名 THEIA-STRONG2020 Workshop 2019 in Speyer, germany (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019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
--	---------------------------	-----------------------	----

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