

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 25 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25400254

研究課題名(和文)カイラル対称性の部分的回復と原子核中のハドロン

研究課題名(英文)Partial restoration of chiral symmetry and mesons in nuclei

研究代表者

慈道 大介(Jido, Daisuke)

首都大学東京・理工学研究科・准教授

研究者番号：30402811

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、クォーク凝縮の密度依存性を詳細に理論的及び現象論的に決定すること、及び、部分的回復の系統的研究を目的にし、核媒質中の中間子に対するカイラル有効理論を確立することを目指した。そのために、核媒質中のカイラル有効理論を中間子と核子系において構築し、核媒質中でのカイラル凝縮、中間子崩壊定数、波動関数くりこみなどの物理量の見積もりを行った。系統的研究においては、中間子とK中間子の核媒質中の性質を調べた。また、密接に関連する話題として、ハドロン質量スペクトルにおけるダイクォークの役割、ハドロン励起状態の複合性、 $\Lambda(1405)$ の構造についても研究を行った。

研究成果の概要(英文)：The spontaneously broken chiral symmetry in vacuum is considered to be incompletely restored in finite nuclear density systems with moderate reduction of the magnitude of the quark condensate. The investigation of partial restoration of chiral symmetry in nuclear matter faces two directions: to know the density dependence of the chiral condensate more accurately beyond linear density approximation, to know whether other systems than pion also have partial restoration consistently. In this work, we construct a chiral effective theory in nuclear medium for pion and evaluate the density dependence of the chiral condensate, decay constant and wave function renormalization. We also investigate the in-medium properties of the η' and K^* meson for the consistency study. We also study the role of the diquark in hadron spectrum, the compositeness of hadron resonances, the nature of $\Lambda(1405)$.

研究分野：ハドロン物理

 キーワード：理論核物理
 ハドロン物理 カイラル対称性 中間子原子核 中間子 '中間子 K中間子 ハドロ
 ン複合状態

1. 研究開始当初の背景

量子色力学 (QCD) の持つカイラル対称性は、低エネルギーでは物理状態によって自発的に破れており、破れた対称性は高温・高密度の環境下で回復すると考えられている。このような真空の相転移現象の機構や意義を理論的に明らかにすること、また、実験的確認を得ることは、現代ハドロン物理にとって重要な課題である。カイラル対称性は、原子核密度程度でも部分的に回復していると考えられ、原子核そのものを実験場として捉えて、原子核中におけるハドロン性質の変化を観測することで、QCDの相構造に対する知見が得られると期待されている。

2. 研究の目的

核物質中におけるカイラル対称性の部分的回復についての研究の今後の課題は、線形密度近似を超えた議論を行い、クォーク凝縮の密度依存性を理論的に実験的により精密に求め、核密度でのクォーク凝縮の値をより定量的に決定していくこと (部分的回復の精密測定)、及び、 π 中間子-原子核系で示されたカイラル対称性の部分的回復が他の系でも普遍的に起こる現象であることの確認 (部分的回復の系統性) である。本研究では、この二つの方向について、具体的な系を対象に研究を行った。

3. 研究の方法

強い相互作用には二重性があり、ハドロン動力学の基礎理論はクォークで記述されているが、直接観測にかかるのはハドロンだけである。つまり、カイラル対称性の部分的回復のようなQCDに根ざした現象でさえ、核媒質中でのハドロン性質の変化として観測される。また、ハドロンが本質的にクォーク・グルーオンで記述されている以上、クォーク凝縮の変化等のQCDレベルの現象は、必ずハドロン動力学に影響を与え観測される。このように、本研究の目指す物理は、実験 (現象論) と理論の両面から進めていく必要がある。

基礎理論と実験をつなぐためにはいくつかの理論的考察を経る必要がある、基礎理論を実際の系へ応用するトップダウンと、実験事実の現象論的理解から基礎理論へのフィードバックの双方向の研究が必要である。その際に、一番重要となるのが基礎理論と現象論をつなぐ、ハドロンの有効理論である。本研究では、QCDの対称性に基礎をおいた有効理論の構築し、有効理論を用いて定性的な予言を行い、また、実験観測量から有効理論のパラメーターの詳細を決定し、定量的記述を行い、現象の理解を進める方針をとった。

部分的回復の定量的精密化にあたっては、核媒質中のカイラル有効理論 (カイラル摂動論) の整備を行った。このような理論的枠組みから、クォーク凝縮の密度依存性、核媒質中での π 中間子の性質を理論的に決定することを行った。さらに、 π 中間子原子や散乱データより求められた現象論的な π 中間子—原

子核の相互作用を比べることで、理論だけでは足りない情報を補完し、より精密な議論を理論・現象論両面から進めた。

η' 中間子の研究においても、対称性を満足する有効理論を構築し、まずは、部分的回復の影響がどのように中間子の性質に表れるかを調べた。その後、より議論を精密化するために、 η' 中間子の生成反応等を計算し実験データを比較することで、パラメーターに制限を加えていく。部分的回復の系統的理解のために、 K 中間子、 η 中間子なども対象に多角的に議論を進めた。

4. 研究成果

本研究では、主に以下の研究成果を得た。

(1) 核媒質中での π 中間子の性質とカイラル対称性の部分的回復

π 中間子はカイラル対称性の自発的破れに伴う南部ゴールドストーンボソンであるので、部分的回復の影響が顕著に現れる。本研究では、核媒質中の π 中間子に対する有効理論を構築した。このモデルでは、物理量を核密度 (核子フェルミ運動量) の展開として表現し、真空中の πN 相互作用をインプットにすることで、有限密度の物理量を予言する。密度の2次以上の効果を取り入れるためには、核子相関を考慮する必要があることが分かった。この有効理論を用いて、 π 中間子の崩壊定数、質量、波動関数くりこみの計算を行った。また、この手法を用いて、有限密度中の $\pi 0 \rightarrow \gamma\gamma$ 崩壊の見積もりを行い、核媒質中の π 中間子に対する波動関数くりこみが重要な寄与を与えることが分かった。

(2) 核媒質中の η' 中間子の質量とカイラル対称性の部分的回復

擬スカラー中間子である η' メズンは、 π 中間子等の他の擬スカラー中間子より重い質量を持つ。これは、 π 、 K 、 η がカイラル対称性の自発的破れに伴う南部・ゴールドストーンボソンであるのに対して、 η' に対応する flavor singlet の軸性変換は、クォークループによる量子効果のため顕著に破れていて、 η' は南部・ゴールドストーンボソンにはならず、 π 中間子等とは質量生成機構が異なる。本研究では、 η' 中間子の質量に対する軸性 $U(1)$ 量子異常の効果には、カイラル対称性が破れている必要があることを示し、核媒質中でのカイラル対称性の部分的回復に基づいて、 η' 中間子の質量が大きく減少することが期待されることを示した。さらに、 η' 中間子の質量生成機構をさらに理解するためには、 η' 中間子と原子核の束縛系が実験的情報を得るのに適していることを指摘した。 η' 中間子に対する核媒質効果は、核媒質中で質量が大きく減少する一方で、 η' 中間子の核媒質への吸収幅はあまり大きくならないことがわかり、このような状況では、 η' 中間子が原子核と束縛状態を作る可能性が大きく、さらに東

縛すれば幅は狭いことが期待できる。このことは、実験的に η' 中間子原子核束縛状態を観測し、そこから媒質効果を現象論的に引き出すのに有利である。

(3) η' 中間子と核子の相互作用と $\eta'N$ の 2 体束縛状態

η' メソンは軸性量子異常のために南部・ゴールドストーンボソンになれず重い質量を獲得していると理解されている。軸性異常の効果は、カイラル対称性の自発的破れを伴ってはじめて、 η' 質量に寄与することがわかった。核媒質中でのカイラル対称性の部分的回復を表現するために線形 σ 模型を用いて、 η' と核子の相互作用を計算した。結果、 η' と核子の間には、2 体の束縛状態が存在するほど強い引力があることが分かり、本模型においては、7 MeV の束縛エネルギーで 10 MeV 程度の崩壊幅を得た。その後、 ηN や πN のチャンネル結合を考えると幅が広がる可能性があることも分かった。 η' と核子の引力は、核力の機構と類似している。 η' の質量獲得機構がカイラル対称性の自発的破れに起因していることから、 σ 場との強い結合があり、核子も同様に σ 場との強い結合があるので、 η' と核子の間には、強い σ 交換による引力が予想される。この力により η' と核子は 2 体の束縛状態が作られる。

(4) γd 反応における $\eta'N$ 2 体束縛状態の観測可能性について

重水素標的における η' や η の光生成反応を考えることで、 $\eta'N$ 束縛状態のシグナルを観測する可能性を検討した。その目的のために、 $\eta'N$ 相互作用を線形 σ 模型から取り、 $\gamma p \rightarrow \eta p$ と $\gamma p \rightarrow \eta' p$ の散乱振幅は測られている散乱断面積を再現するように決めた。陽子が超前方に射出される $\gamma d \rightarrow \eta np$ 及び $\gamma d \rightarrow \eta' np$ 反応の散乱断面積の計算を行った。結果として、 $\eta'N$ の束縛状態が存在すれば、そのシグナルは上記反応の $\eta'N$ しきい値の下にピークとして現れることを確認した。また、しきい値より上のエネルギーでは、同規模の quasi free η' 生成が起こることが分かった。さらに、束縛状態の有無が $\eta'N$ 不変質量分布のしきい値近傍の構造に顕著に表れることが分かった。

(5) カイラル摂動論を用いた核媒質における K^+ の波動関数くりこみ

π 中間子に関して見えた事が他の中間子ではどのように見えるかという系統性の観点から、その他の中間子として南部・ゴールドストーンボソンの 1 つである K^+ 中間子と原子核の弾性散乱においてカイラル対称性の部分的回復の影響がどのように現れるかを調べた。 K^+ と原子核の弾性散乱を考えた時、核媒質中における K^+ の平均自由行程は原子核の典型的な大きさと同程度なので K^+ と核子ひとつひとつとが散乱すると考えられる。

しかし、 $12C$ 標的と重陽子 d 標的の核子 1 つ当りの散乱断面積比が 1 より大きくなる事が実験的に知られていて、線形密度近似が破綻しており真空中の K^+N 相互作用よりも原子核中における K^+N 相互作用は大きくなっている。この事を真空構造の相転移の観点から理解するためにカイラル対称性の部分的回復と密接な関係がある波動関数くりこみの計算を行った。まず、真空中における K^+N 弾性散乱をカイラル摂動論の NLO まで計算し、 K^+N 弾性散乱データを良く再現する散乱振幅を得た。そして、真空中の K^+N 散乱振幅を用いて、フェルミ運動を取り入れた核媒質中の K^+ 自己エネルギーを計算し、 K^+ 自己エネルギーから波動関数くりこみを計算した。その結果、核媒質中の K^+N 相互作用が真空中と比べて 5~8% 斥力的に増大する事が明らかになった。この結果は、波動関数くりこみが核媒質中における K^+N 相互作用の斥力的な増大の一部を説明できる事を意味しており、核媒質中の K^+N 相互作用がカイラル対称性の部分的回復の観点から理解できる可能性を示唆している。

(6) クォーク・ダイクォーク模型による重いバリオン

ハドロンが、クォーク・グルーオンのどのような有効自由度によって記述されるかは、ハドロンの内部構造やその励起スペクトルを理解する上で重要である。クォーク二つからなるダイクォーク相関は、スカラーアイソスカラーで反カラーを持つ組に強い引力があると期待され、ダイクォークはハドロン中の有効自由度の候補として長年期待されている。近年、重いハドロンの生成実験が盛んに行われ、数多くの良質なデータが得られつつある。重いクォークを一つ持ったバリオン系では、軽いクォーク二つがダイクォークとして振る舞う可能性があるため、その内部構造に注目が集まっている。本研究では、重いクォークを一つ持つ Λ_c と Λ_b について、クォークとダイクォークの 2 体の束縛状態と仮定して、クォークとダイクォーク間の相互作用について研究を行った。クォークとダイクォークのカラー構造は、クォークと反クォークと同じことであることから、charmonium や D 中間子系の励起スペクトルを再現する閉じ込めポテンシャルを用いて、バリオン系の励起エネルギーの計算を行った。閉じ込めを起こすカラー電磁ポテンシャルは、カラーに依存しフレーバーに依存しないと考えられることから、メソン系を再現するポテンシャルでバリオン系も再現できると期待していたが、結果は、閉じ込めポテンシャルの張力はメソン系に比べて半分でない、バリオン系の励起スペクトルが再現できないことが分かった。単純な模型での考察ではあるが、クォークポテンシャル模型を取る限り、考えにくい結果であるため、今後、その理由を解明していく必要がある。

(7) ハドロン励起状態の複合性

原子核中での中間子の性質を知る上で重要となるのが、中間子と核子からできるバリオン励起状態の構造である。特に、ハドロン励起状態がハドロンの複合状態としてできているのか、あるいはより微視的なクォーク模型的な状態をして記述されるかは、励起状態の構造を知る上で重要となる。本研究では、ハドロン励起状態の複合性をその波動関数から調べる理論的枠組みを構築して、実験データから複合性を定量的に評価する方法を確立した。粒子状態の複合性は、波動関数の規格化に対する多粒子成分の割合で定義される。本研究では、1粒子状態と2粒子散乱状態を同時に取り扱い、複合性が、励起状態の極の位置、そこで散乱振幅の留数と2体散乱状態の自由なグリーン関数の微分で表されることを示した。同時に、励起状態の素粒子性は、1粒子成分をくりこんだ有効相互作用の微分と励起状態の性質で表される。しかしながら、複合性の定義で最も重要なのは、状態の粒子の数ではなく、励起状態を表現する上で状態を頭わに扱うのか、有効相互作用の中にくりこむかであり、複合性と素粒子性の相対化を行うことができた。このようなスキーム依存性についても適切に議論ができたことが本研究の特徴である。この枠組みの応用として、 $\Lambda(1405)$ やスカラー中間子、ベクター中間子について、チャンネル結合法による洗練された散乱振幅を用いて、複合性・素粒子性を定量的に議論した。その結果、 $\Lambda(1405)$ や $f_0(980)$ は、それぞれ、大部分が反KN、反KKの成分を持つハドロン複合状態である一方で、 $\rho(770)$ や $K^*(982)$ は素粒子性が強いことが分かった。

(8) $\Lambda(1405)$ 共鳴状態の生成機構とその構造

ストレンジクォークを持つ Λ ハイペロンの励起状態として知られている $\Lambda(1405)$ 共鳴状態は、古くより単純なクォーク模型では記述されないエキゾチックハドロンとして知られてきた。本研究では、カイラルユニタリー模型に基づき $\Lambda(1405)$ の光生成反応の理論計算を行った。 $\Lambda(1405)$ の光生成機構は単純ではなく、実験データを再現するためには現象論的なパラメーターの導入が不可欠であることが分かった。 $\Lambda(1405)$ の構造に関して、光生成反応では反KNから作られる $\Lambda(1405)$ の成分が主要な寄与を与えていて、 $\Lambda(1405)$ がハドロン複合状態であることをサポートする結果を得た。また、 $\Lambda(1405)$ を反KNから生成する反応 $K-d \rightarrow n\Sigma n$ の理論計算について、散乱理論に基づき考察を行い、計算に必要な近似の理論的不定性を明らかにし、将来J-PARCで行われる実験に有益な情報を提供した。

(9) BaBarやLHCbのデータによるB中間子崩壊における $D^*s_0(2317)$ 中間子とDK散乱
本研究では、BaBarで測られた $B^+ \rightarrow$ 反

$D_0D_0K^+$, $B_0 \rightarrow D-D_0K^+$ 崩壊過程とLHCbで測定された $B_s \rightarrow \pi^+ +$ 反 D_0K^+ 崩壊におけるDK不変質量分布を用いて、 $D^*s_0(2317)$ の存在とその性質について、研究を行った。B中間子の崩壊過程でのDK不変質量分布には、しきい値近傍にスペクトルの増大が見えており、この増大は、 $I(JP) = 0(0^+)$ の量子数を持つDK束縛状態としての $D^*s_0(2317)$ が存在していることに起因していることを示した。重い中間子を含むカイラル摂動論に基づいた相互作用をユニタリー化した散乱振幅を用い、実験データを再現するようにパラメーターを調節した結果、 $D^*s_0(2317)$ の質量として2315 MeVを得て、ワインバーグの複合性指標として70%を得るに至った。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計11件)

全て査読付き論文である。

- ① Shuntaro Sakai, Daisuke Jido, Investigation of η' N system using linear sigma model, Prog. Theor. Exp. Phys. 2017, 013D01 (2017), DOI:10.1093/ptep/ptw191.
- ② Daisuke Jido, Minori Sakashita, Quark confinement potential examined by excitation energy of the Λ_c and Λ_b baryons in a quark-diquark model, Prog. Theor. Exp. Phys. 2016, 083D02 (2016), DOI: 10.1093/ptep/ptw113.
- ③ Takayasu Sekihara, Shuntaro Sakai, Daisuke Jido, Theoretical study of photoproduction of η' N bound state on deuteron target with forward proton emission, Phys. Rev. C94 025203 (2016), DOI: 10.1103/PhysRevC.94.025203.
- ④ Hungchong Kim, K.S. Kim, Myung Ki Cheoun, Daisuke Jido, Makoto Oka, Testing the tetraquark structure for the X resonances in low-lying region, Eur. Phys. J. A52, 184 (2016), DOI: 10.1140/epja/i2016-16184-0.
- ⑤ M. Albaladejo, J. Nieves, E. Oset, D. Jido, $D^*s_0(2317)$ and DK scattering in B decays from BaBar and LHCb data, Eur. Phys. J. C76, 300 (2016), DOI: 10.1140/epjc/s10052-016-4144-3.
- ⑥ Takayasu Sekihara, Tetsuo Hyodo, Daisuke Jido, Comprehensive analysis of the wave function of a hadronic resonance and its compositeness, Prog. Theor. Exp. Phys. 2015, 063D045 (2015), DOI: 10.1093/ptep/ptv081.
- ⑦ S.X. Nakamura and D. Jido, $\Lambda(1405)$ photoproduction based on chiral unitary model, Prog. Theor. Exp. Phys. 2014 (2014) 023D01.

- DOI: 10.1093/ptep/ptt121
- ⑧ Soichiro Goda and Daisuke Jido, Pion properties at finite nuclear density based on in-medium chiral perturbation theory, Prog. Theor. Exp. Phys. 2014 (2014) 033D03.
DOI: 10.1093/ptep/ptu023
- ⑨ S. Goda and D. Jido, Chiral condensate at finite density using chiral ward identity, Phys. Rev. C88 (2013) 065204.
DOI: 10.1103/PhysRevC.88.065204
- ⑩ Shuntaro Sakai and Daisuke Jido, In medium η' mass and η' N interaction based on chiral effective theory, Phys. Rev. C88 (2013) 064906.
DOI: 10.1103/PhysRevC.88.064906
- ⑪ Daisuke Jido, Eulugio Oset, and Takayasu Sekihara, the $K-d \rightarrow \pi\Sigma n$ reaction revisited, Eur. J. Phys. A49 (2013) 95.
DOI: 10.1140/epja/i2013-13095-6

[学会発表] (計7件)

- ① 慈道大介: Mesons in nuclei and partial restoration of chiral symmetry, 滞在型研究会@JPARC「原子核媒質中のハドロン研究 III」2015.10.17-20、高エネルギー加速器研究機構 東海1号館 (茨城県・東海村)
- ② 慈道大介: 原子核を舞台に探る量子色力学のカイラル対称性、日本物理学会年会 第71回年次大会 2016年3月19日~3月22日 東北学院大学 泉キャンパス (宮城県・仙台市)
- ③ D. Jido: Hadrons in nuclei and partial restoration of chiral symmetry, Workshop on "Hadrons in Nuclear medium II", October 24-28, 2014, 高エネルギー加速器研究機構 東海1号館 (茨城県・東海村)
- ④ D. Jido: η' -nucleon interaction in chiral dynamics and η' -nucleus bound systems, International Conference on Exotic Atoms and Related Topics - EXA2014, September 15-19, 2014, Austrian Academy of Sciences, Wien, Austria.
- ⑤ D. Jido: Hadronic few-body systems in chiral dynamics, HaPhy-CLAS Workshop on Hadron Physics, August 28-29, 2014, Kyungpook National University, Deagu, Korea.
- ⑥ 慈道大介: 光生成反応によるハドロン分光、ELPH 研究会「GeV 領域光子で探るメソン生成反応の物理」2014年2月20-21日、東北大学農学部 (宮城県・仙台市)
- ⑦ 慈道大介: 核媒質中におけるカイラル対称性の部分的回復と中間子の性質、研

究会「原子核媒質中のハドロン研究=魅力と課題=」2013年8月5-6日、高エネルギー加速器研究機構 東海1号館 (茨城県・東海村)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

慈道 大介 (JIDO, Daisuke)

首都大学東京・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：3002811

(2) 研究協力者

郷田 創一郎 (GODA, Soichiro)

酒井 俊太郎 (SAKAI, Shuntaro)

青木 健児 (Aoki, Kenji)

坂下 みのり (Sakashita, Minori)