

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 31 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22740161

研究課題名（和文）原子核を舞台にして探るハドロンの性質と量子色力学のカイラル対称性

研究課題名（英文）Hadrons in nuclei and chiral symmetry in quantum chromodynamics

研究代表者

慈道 大介 (JIDO DAISUKE)

京都大学・基礎物理学研究所・助教

研究者番号：30402811

研究成果の概要（和文）：核媒質中でのカイラル対称性の部分的回復の現象論的実証およびハドロンの性質への影響を研究した。部分的回復を研究するためのツールとして、核媒質中のカイラル有効理論を整備し、線形密度近似を超えて、核媒質中のクォーク凝縮と π 中間子の性質を計算した。また、核物質中の η' 中間子質量をカイラル対称性の部分的回復の観点から議論を行い、原子核中で η' 中間子に強い引力が期待されることを示した。

研究成果の概要（英文）：The phenomenon of the spontaneous breakdown of chiral symmetry in the QCD vacuum was studied in the aspect of partial restoration of chiral symmetry in nuclear medium. To study the partial restoration, an in-medium chiral effective theory was developed. The quark condensate and the pion properties in the nuclear medium were calculated beyond the linear density approximation. The η' meson in nuclear medium was discussed in the viewpoint of partial restoration of chiral symmetry. It was shown that the η' meson could have a strong attractive potential in nucleus.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	700,000	210,000	910,000
2011 年度	600,000	180,000	780,000
2012 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	1,900,000	570,000	2,470,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学 素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：原子核（理論）、ハドロンの物理学、カイラル対称性、中間子原子核、 η' 中間子

1. 研究開始当初の背景

現代の原子核・ハドロンの物理学の目標は、強い相互作用をする多体系における諸現象を解明することである。特に、ハドロンの物理学においては、強い相互作用の基礎理論である量子色力学 (QCD) に基づく記述・理解が求められている。とりわけ、基底状態である真空の構造を解明することは、ハドロンの構造・動

力学を理解する上での基礎を与えるだけでなく、有限温度・有限密度下の相構造を探究する上で重要である。

カイラル対称性は量子色力学が持つ近似的な対称性であり、低エネルギーでは物理状態（真空）によって自発的に破れている（南部理論）。このような真空の相転移現象の機構やハドロンの物理学における意義を理論的に

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研究課題である。その方法の一つは、高エネルギー重イオン衝突等により高温状態を作り出すことで破れた対称性を回復させ、相転移現象を直接観測することである。一方で、対称性を完全に回復させるような極限的な状況に至らなくても、相転移現象であるならば、自発的破れの秩序変数の大きさが真空中に比べて小さくなるような、カイラル対称性が部分的に回復した系を用いることで、対称性の回復や破れの機構を十分に研究することができる。実際に、核密度程度の有限密度系では、カイラル対称性が部分的に回復していることが予想され、そのような対称性の部分的回復は、原子核中でのハドロンの性質の変化を通して観測されると期待されている。

このような研究は、重イオン衝突による有限温度の QCD 相構造の研究と相補的であり、中性子内部等の有限密度における物理の基礎的な知見を、原子核を舞台に地上での実験から得られる点が非常にユニークである。

2. 研究の目的

前述のように、有限温度や密度などの環境で、量子色力学の相構造を理解することが求められている。このような状況をふまえて、本研究では、量子色力学のもつカイラル対称性と核媒質中での部分的回復に注目して、研究を行った。研究の主目的は以下の通り：

- 原子核中でのハドロンの性質の変化と QCD におけるカイラル対称性の部分的回復の関係を定量的に明らかにすること
- 核物質中でのカイラル対称性の部分的回復が実際の物理系でどのような役割をしているかを明らかにすること

(1) 原子核内部で、カイラル対称性がどれくらい部分的に回復しているかを定量的に確認することは、現在の原子核物理にとって重要なテーマである。カイラル対称性がどれくらい部分的に回復しているかを調べるためには、核物質中におけるカイラル対称性の秩序変数がどれくらい減少しているかを理論的・実験的に明らかにする必要がある。カイラル対称性は量子色力学における対称性であるので、その秩序変数は、クォーク凝縮のように、クォークやグルーオンの物理量として与えられる。しかしながら、クォークの閉じ込めのため、直接的な観測はハドロンの物理量であって、クォークやグルーオンの物理量を直接的に実験で測ることができない。したがって、カイラル対称性の部分的回復を実験的に明らかにするためには、ハドロン物理量とクォーク物理量との信頼できる理論的関係式や考察が必要となる。そのため

には、量子色力学との関連が明確であって核媒質中でのハドロンを記述する理論的枠組を構築することが必要である。

このようにして、原子核中のハドロンの性質の理論的研究と実験的観測を有機的に融合させることで、ハドロン観測量と QCD の性質であるクォーク凝縮の変化を結び付け、カイラル対称性の部分的回復を定量的に明らかにできる。

(2) カイラル対称性の部分的回復の役割の系統性を明らかにするためには、原子核中の π 中間子の性質のみならず、さまざまな中間子の性質を系統的に調べる必要がある。本研究では、原子核中の π 中間子、 η' 中間子の性質を調べた。また、実験的な観測可能性を視野に入れ、原子核中に中間子を生成する機構を具体的に検討し、生成反応断面積を系統的・理論的に計算を行った。

3. 研究の方法

中間子・原子核系の実験で観測された物理量から QCD のカイラル対称性の知見を得るには、いくつかの理論的考察を経る必要があることがわかっている。また、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。

- 実験データ (反応断面積)
有効理論や現象論的考察に基づいて、生成反応を定量的に評価
- 中間子・原子核系の構造
(束縛状態のエネルギーと幅)
束縛状態からハドロン性質変化を理解
- 原子核中でのハドロンの性質
局所密度近似や多体論的取り扱い
- 核物質中でのハドロンの性質 (有効質量、崩壊幅、波動関数くりこみ等)
ハドロン有効モデルや低エネルギー定理
- 量子色力学におけるカイラル対称性

(1) 原子核中でのカイラル対称性の部分的回復の検証は、 π 中間子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ゾンであることに注目して、まず、原子核中での π 中間子の性質を明らかにする。そのために、核物質中における π 中間子と核子を含むカイラル有効理論の構築を行う。この有効理論を用いて、クォーク凝縮と核物質中の π 中間子の性質を関係づける。また、この理論を用いて、観測可能な π 中間子の性質について計算を行い、カイラル対称性の部分的回復の帰結として、どのような物理量があるかを検討する。

(2) η' 中間子は $U_A(1)$ 量子異常によって質

量が重くなっているため、 π や η と異なる質量生成機構を持っている。このことを、線形 σ 模型などの有効模型を使って調べ、核媒質中での η' の質量変化を評価することで、定量的に検討をする。 η' 中間子が原子核中で束縛状態を作ることが期待されるので、 η' 中間子原子核の生成反応を具体的に考え、生成断面積を計算する。このような方法により、 η' 中間子質量における $U_A(1)$ 量子異常の役割を明らかにし、質量への核媒質効果を知ることで、カイラル対称性の部分的回復によって $U_A(1)$ 量子異常の効果がどのように変わるかを調べる。

4. 研究成果

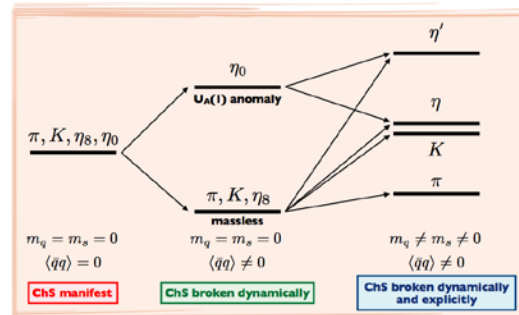
(1) 原子核中のカイラル対称性の部分的回復をより定量的に評価するために、媒質中のカイラル摂動論を構築した。この方法では、基本的なパラメータを真空中での π 中間子と核子の力学から実験的に決めることで、有限密度中でのクォーク凝縮の値を予想することができる。まず、この方法が、クォーク凝縮の密度依存性に対して、よく知られた線形密度近似の結果を再現することを示した。線形密度を超えて現れる寄与は、核媒質中での核子間の多体効果と π 中間子によるループ補正によって決まることがわかった。

密度の 2 次を超えない寄与においては、ループ補正による発散は真空中の πN 散乱の実験データをインプットとすることで、発散するダイアグラムからの寄与を繰り込むことができる。したがって、密度の 2 次を超えない次数では、 πN 散乱の実験データによりクォーク凝縮の値と密度依存性を予言することが分かった。このように πN の情報をインプットとして用いたとしても、密度 2 次以上の寄与を計算すると、さらにいくつかのダイアグラムが発散することが分かった。この発散が生じる理由は、密度 2 次以上の寄与を計算するには、真空中の πN 相互作用の情報だけでは十分でなく、真空中の 2 核子相関の情報を与える必要があることを意味している。つまり、密度 2 次の項では、2 核子相関の力学によって決まる物理量をインプットとして用いる必要があることがわかった。したがって、 NN の 2 体相互作用を、カイラル有効理論を用いて定式化し、その結果を取り入れることで、密度が 2 次までの寄与を計算することができる。具体的な計算は、今後の課題である。

このように、カイラル摂動論で核媒質中のクォーク凝縮の値を評価する際には、核子と π 中間子の基本的な相互作用を知ることと共に、どのようにして核物質を構成するかが重要である。つまり、クォーク凝縮の値の詳細

な決定には核物質を適切に構成することが重要であることがわかった。核物質の構成は、従来の原子核物理によって議論されている。したがって、既存の核物理によって培われた計算手法によりクォーク凝縮の計算が可能であることを意味する。そのような原子核物理で培われた現象論的な方法が、カイラル有効理論でどのように表現されるかを精査することで、より現実的な値をすることができる。さらに、カイラル対称性の部分的回復のような量子色力学に基づいた現象との整合性や相互関係を明らかにすることで、従来の現象論的方法の現代的な基礎付けを与えることができる。これら課題については、今後、さらに検討をしていく予定である。また、理論的な観点から、現実的な核物質を構成せずにカイラル摂動論に厳密に従った場合に、クォーク凝縮がどのような密度依存性を示すかについても興味深い。

(2) η' 中間子原子核と核媒質中の $U_A(1)$ 量子異常に関する研究については、本研究において、 $U_A(1)$ 量子異常によって η' 中間子質量が重くなる際に、カイラル対称性の破れを伴う必要があることがわかり、核媒質中では η' 質量が小さくなることが期待できることがわかった。これは、フレーバー 3 のカイラル対称性(カイラル $SU(3)$ 対称性)においては、 η' 中間子が π や η と同じ規約表現に属する事実に起因する。つまり、系がカイラル対称性を持っている場合(顕わな破れも自発的破れもない場合)は、 η' は π や η と縮退する必要があるのである(図参照)。



η' と η の質量差は、 $U_A(1)$ 量子異常を契機にして、カイラル対称性の自発的破れによって引き起こされている。したがって、カイラル対称性が部分的に回復する核媒質中においては、 η と η' の質量差が減少し、 η 中間子が南部・ゴールドストーンボゾンの一つでその質量が部分的回復とともにあまり変化しないことを考えると、 η' の質量は減少することが予想される。

核密度程度でカイラル対称性が 30% 程度回復するとし、 η と η' の質量差がクォーク凝縮に比例しているとすると、核媒質中で 100MeV 程度の η' 質量の減少が見込まれる。この規模の質量減少は核物理の範囲を超え、

ハドロン物理のサイズと言えよう。このような核媒質中の質量の減少は、ポテンシャル描像に立てば、引力のスカラーポテンシャルに対応する。原子核中の η' に対して、このような引力の光学ポテンシャルが存在すると、その強さは η' が原子核内部で束縛状態を持つに十分な大きさである。また、この引力は $U_A(1)$ 量子異常に起因する質量減少から生じているので、フレーバー-1 重項のチャンネルに選択的に働く。したがって、 $\eta'N$ の 2 体系で見た場合、引力は弾性的なチャンネルのみに働き、非弾性的なチャンネルにはほとんど効かないので、 η' の原子核への吸収は小さいと予想できる。この理論は、現象論的に知られている η' 中間子の原子核中での吸収幅が小さいことも説明する。

このような計算は、線形 σ 模型を用いて具体的に計算を行った。線形 σ 模型にはカイラル対称性の部分的回復が内包されている。この模型を用いて、計算を行った結果、 η' 質量の減少は、核密度で約 90MeV あり、 $\eta'N$ の 2 体系の束縛状態 (結合エネルギー 6MeV) の存在可能性も示した。さらに、 $\eta'N$ 2 体系の散乱長や有効距離の値も計算を行った。線形 σ 模型の描像では、 η' 質量の一部が σ 凝縮から生じており、 $\eta'N$ の強い引力は σ 中間子の交換によって与えられる。これは、核子質量が σ 凝縮より生じ、NN の引力が σ 交換によることと同じ機構となっている。NN の 2 体系で束縛状態の重陽子が存在することを考えれば、 $\eta'N$ の束縛状態も存在する可能性は大いにある。

η' 中間子の原子核中の束縛状態の観測可能性の議論も行った。 η' 中間子原子核の生成反応を具体的に考え、生成断面積を計算することによって、実験で観測される質量スペクトルを評価した。実験研究者との議論が活発となり、 η' 中間子原子核の観測実験を計画するに至った。今後、 η' 中間子と核子の少数束縛系の可能性や η' 中間子と核子との相互作用 (散乱長、有効距離等) の検討といった課題を提供した。

これらの研究成果、国際学術雑誌に掲載されているだけでなく、ポーランドのクラクフで行われた国際研究集会「Meson2012」やバルセロナで行われた国際会議「HYP2012」などで成果報告を行い、また、ドイツの GSI (重イオン研究所) やミュンヘン工科大学でのセミナー講演などで、国際的にも広く公表を行った。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 20 件) 以下全て査読有

- ① " η' meson under partial restoration of chiral symmetry in nuclear medium", Daisuke Jido, Shuntaro Sakai, Hideko Nagahiro, Satoru Hirenzaki, Natsumi Ikeno, Nucl. Phys. A. (2013), DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2012.12.097.
- ② "Formation of η' (958)-mesic nuclei by (p,d) reaction", H. Nagahiro, D. Jido, H. Fujioka, K. Itahashi, S. Hirenzaki, Phys. Rev. C 87, 045201 (2013), DOI: 10.1103/PhysRevC.87.045201.
- ③ "Feasibility Study of Observing η' Mesic Nuclei with (p,d) Reaction", Kenta Itahashi, Hiroyuki Fujioka 他 15 名 (Daisuke Jido 7 番目), Prog. Theor. Phys. 128, 601-613 (2012), DOI: 10.1143/PTP.128.601.
- ④ "Nuclear bound state of η' (958) and partial restoration of chiral symmetry in the η' mass", Daisuke Jido, Hideko Nagahiro, Satoru Hirenzaki, Phys. Rev. C 85, 032201(R) (2012), DOI: 10.1103/PhysRevC.85.032201.
- ⑤ "Precision Spectroscopy of Deeply Bound Pionic Atoms and Partial Restoration of Chiral Symmetry in Medium", Natsumi Ikeno, Rie Kimura 他 6 名 (Daisuke Jido 5 番目), Prog. Theo. Phys. 126, 483-509 (2011), DOI: 10.1143/PTP.126.483.
- ⑥ "Nature of the σ meson as revealed by its softening process", Tetsuo Hyodo, Daisuke Jido, Teiji Kunihiro, Nucl. Phys. A848, 341-365 (2010), DOI:10.1016/j.nuclphysa.2010.09.016
- ⑦ "Pseudoscalar mesons in nuclei and partial restoration of chiral symmetry" Daisuke Jido, Prog. Theor. Phys. Suppl. 186, 294-299 (2010), DOI: 10.1143/PTPS.186.294.

[学会発表] (計 13 件)

- ① D. Jido, " η' meson under partial restoration of chiral symmetry in nuclear medium", XI International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics (HYP2012), October 1, 2012, Science Museum of Barcelona, Barcelona, Spain
- ② D. Jido, "A possible story of η' meson in medium" (Invited talk), Eta-prime in-medium workshop, February 6, 2012, University of Giessen, Giessen, Germany.
- ③ D. Jido, "Hadron Physics at J-PARC -exotic hadrons and hadrons in nuclei-" (Invited talk) Korea-Japan

workshop on nuclear and hadron physics at J-PARC, September 22, 2011, Seoul National University, Seoul, Korea.

- ④ D. Jido, "Pseudoscalar mesons in nuclei and partial restoration of chiral symmetry" (Invited talk), XIV International Conference on Hadron Spectroscopy (Hadron2011), June 16, 2011, Künstlerhaus, Munich, Germany.
- ⑤ D. Jido, "Chiral symmetry for hadrons in nuclei" (Invited talk), International Workshop on Chiral Symmetry in Hadrons and Nuclei (Chiral 10), 21 June, 2010, Instituto de Fisica Corpuscular, Valencia, Spain.
- ⑥ 慈道 大介, " $\Lambda(1405)$ in coupled channels chiral dynamic" (招待講演), 理研仁科センターワークショップ「Strangeness in Nuclei」 2010.6.12、理化学研究所 仁科センター、和光市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

慈道 大介 (JIDO DAISUKE)
京都大学・基礎物理学研究所・助教
研究者番号：30402811

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

郷田 創一郎 (GODA SOICHIRO)
京都大学・理学研究科・大学院生
酒井 俊太郎 (SAKAI SHUNTARO)
京都大学・理学研究科・大学院生