

令和 2 年 6 月 12 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K17698

研究課題名(和文)核子多体系におけるカイラル有効場理論3核子力の役割の究明

研究課題名(英文) Investigation of roles of chiral three-nucleon-force in nuclear many-body systems

研究代表者

蓑茂 工将 (Minomo, Kosho)

大阪大学・核物理研究センター・協同研究員

研究者番号：50725059

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：核力は、自然界の基本的な力の一つであり、核子どうしを結び付け原子核を存在させる重要な役割を果たす。2核子間にはたらく2核子力に加え、3核子が揃って初めて生じる3核子力も欠かせない存在である。本研究では、これら2核子力と3核子力を統一的に扱って核子多体系の反応を微視的に記述する理論を構築した。その理論を用いてさまざまな反応観測量を解析することで、3核子力の性質を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

多体力まで統一的に扱うカイラル有効場理論の現実的核力に立脚した微視的核反応論の構築は、核物理と素粒子・ハドロン物理を結びつける極めて本質的な研究である。本研究は3核子力効果の解明において重要な役割を担う。3核子力は有限の核子多体系において重要であるだけでなく、超新星爆発や連星中性子星の合体過程などの天体現象にも密接に関連するため、この研究成果は宇宙物理分野にも波及し得る。

研究成果の概要(英文)：Nuclear forces are one of the essential interactions in nature and they play an important role for being a nucleus by binding nucleons. In addition to two-nucleon forces between two nucleons, three-nucleon forces, which interact among three nucleons, are also essential. In this study, two- and three-nucleon forces are treated consistently and a microscopic framework for many-body nuclear reactions have been established. I have analyzed various reaction observables with the theoretical framework and obtained properties of the three-nucleon-force via nuclear reactions.

研究分野：理論核物理

キーワード：3核子力 微視的核反応論

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

3核子力は2核子力の積み重ねでは表現できない全く別の自由度であり、3核子力の役割の究明は核物理最大の課題の一つである。ここ十数年で現実的核力の研究が目覚ましく進展し、量子色力学(QCD)の低エネルギー有効理論であるカイラル有効場理論に基づく現実的核力が構築されている。これにより、2核子力と3核子力をひとつの理論で統一的に扱うことが可能になった。現在、このカイラル有効場理論に基づく現実的核力を用いて、非常に軽い核や核物質中での3核子力の役割が精力的に調べられている。3核子力は、素粒子・ハドロン・中性子星の物理にも関連する、分野を終えるキーワードと言える。そのような状況にありながら、有限核子多体系におけるカイラル有効場理論3核子力の効果は未解明であり、そもそも3核子力効果を検証する枠組みが確立されていないという問題を抱えていた。また、そのような現実的核力に立脚した微視的反応論は未だ完成していない状況にあった。これに鑑み、これまで多種多様な核反応の解析を行ってきた経験から、個々の反応の特性を活かすことで3核子力のさまざまな性質を観測することを試みた。

2. 研究の目的

I. カイラル有効場理論の現実的核力に基づく微視的核反応論の構築

2核子力および3核子力を用いて新しい有効核力を構築し、これと反応論を組み合わせ、カイラル有効場理論の現実的核力に立脚した微視的核反応論を完成させる。

II. 核子多体系における3核子力の役割の究明

完成した微視的核反応論を用いて、2倍の標準核密度以下の密度におけるカイラル有効場理論3核子力の密度依存性、スピン依存性、アイソスピン依存性を確定する。

3. 研究の方法

I. カイラル有効場理論の現実的核力に基づく微視的核反応論の構築

まずは Brueckner 理論に基づき、カイラル有効場理論の現実的核力(2核子力+3核子力)を用いて、新しい有効核力を計算した。有効核力は運動量表示の非局所なポテンシャルとして求められ、本研究ではこれを近似なしに取り扱った。運動量表示の有効核力は2核子散乱の散乱振幅そのものであり、観測量とほぼ直接に結びつく量である。この方法では局所ポテンシャルを介さないため本来の有効核力の情報を損なわず反応計算を行える利点がある。この新しい有効核力と反応論を組み合わせ、反応解析の枠組みを整えた。

II. 核子多体系における3核子力の役割の究明

完成した微視的核反応論を用いて、弾性散乱、ロックアウト反応などの反応観測量を解析し、2倍の標準核密度以下の密度におけるカイラル有効場理論3核子力の密度依存性、スピン依存性、アイソスピン依存性を調べた。核子ロックアウト反応は、入射核子が標的核内の核子を弾き

飛ばし、2つの核が放出される反応である。この反応は、入射核子と弾き飛ばされる核内核子間の有効核力によってほとんど決まっている。まず核子ノックアウト反応を中心に解析し、標準核密度以下の密度における3核子力効果を分析した。3核子力の効果は密度が高い状態で顕著であるが、密度の飽和性のため原子核単体では高密度に達しない。核-核散乱では入射核と標的核の核密度が重なり、高い核密度を実現できると考えられる。核-核散乱の解析から、標準核密度を超えた密度における3核子力効果の性質を調べた。

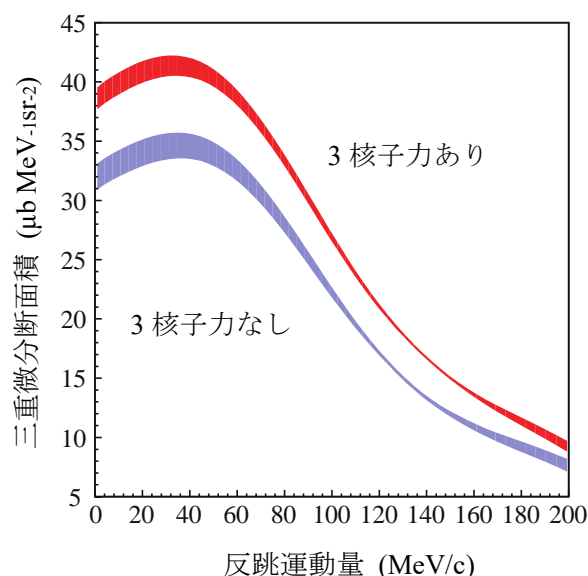
4. 研究成果

1) 微視的光学ポテンシャルの有用性

既存の有効核力を用いて核子-核弾性散乱の角分布と前反応断面積を網羅的に解析し、有効核力に基づく微視的光学ポテンシャルの適用範囲を明らかにした。

2) 核子ノックアウト反応の解析による3核子力効果の探査

カイラル有効場理論の2核子力、3核子力を用いて有効核力を構築し、これと歪曲波インパルス近似計算を組み合わせ、核子ノックアウト反応を精密に解析できる枠組みを構築した。これを用いて ^{40}Ca を標的とする陽子ノックアウト反応計算に着手し、既存の3重微分断面積の実験値を再現することで、信頼できる理論であることを確かめた。この理論を用いて陽子ノックアウト反応の系統的計算を行い、3核子力効果が強く影響する入射エネルギーや運動学的条件を探った。



^{40}Ca に深く束縛された陽子のノックアウト

図1. ^{40}Ca 標的の陽子ノックアウト反応断面積

反応は、密度が比較的高い ^{40}Ca の内側で反応が強く起こるため、3核子力効果が強く影響することがわかった。これを利用し、図1のようにノックアウト反応の3重微分断面積に3核子力効果が明確に現れることを示した。こうして、陽子ノックアウト反応の断面積において3核子力効果を検証できる可能性を示した。ただし、陽子ノックアウト反応の偏極分解能に対しては、3核子力効果は本質的な影響を及ぼさなかった。

3) 核-核弾性散乱の解析による3核子力効果の探査

核-核散乱では入射核・標的核冷気の効果が大きいため、チャネル結合効果を取り入れた解析を行うことが極めて重要である。有効核力を用いた微視的チャネル結合計算によってその効果を適切に取り入れ、核-核弾性散乱の角分布と全反応断面積を解析し、高い密度における3核子力効果を定量的に分析した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 5件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Satoshi Adachi, Takahiro Kawabata, Kosho Minomo	4. 巻 2038
2. 論文標題 Systematic analysis of inelastic alpha scattering off self-conjugate $A=4N$ nuclei	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 AIP Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 020031-1,8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5078850	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 -
1. 著者名 Minomo Kosho, Kohno Michio, Yoshida Kazuki, Ogata Kazuyuki	4. 巻 96
2. 論文標題 Probing three-nucleon-force effects via $(p,2p)$ reactions	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.96.024609	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 Adachi S., Kawabata T., Minomo K., et al.	4. 巻 97
2. 論文標題 Systematic analysis of inelastic scattering off self-conjugate $A=4n$ nuclei	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review C	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/PhysRevC.97.014601	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 Kazuki Yoshida, Kosho Minomo, and Kazuyuki Ogata	4. 巻 94
2. 論文標題 Investigating clustering on the surface of ^{120}Sn via the (p,p) reaction, and the validity of the factorization approximation	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 044604-1,8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.94.044604	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 Yuen Sim Neoh, Kazuki Yoshida, Kosho Minomo, and Kazuyuki Ogata	4. 巻 94
2. 論文標題 Microscopic effective reaction theory for deuteron-induced reactions	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 044619-1,6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.94.044619	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 Kosho Minomo, Kouhei Washiyama, and Kazuyuki Ogata	4. 巻 54
2. 論文標題 Deuteron-nucleus total reaction cross sections up to 1 GeV	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Nuclear Science and Technology	6. 最初と最後の頁 127,131
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/00223131.2016.1213672	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15件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 K. Minomo, M. Kohno, K. Yoshida, and K. Ogata
2. 発表標題 Probing three-nucleon-force effects via knockout reaction
3. 学会等名 Direct Reactions with Exotic Beams 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Minomo
2. 発表標題 Microscopic optical potential from g-matrix folding model and its limitation
3. 学会等名 FRIB Theory Alliance Workshop (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Minomo, M. Kohno, K. Yoshida, and K. Ogata
2. 発表標題 Probing three-nucleon-force effects via knockout reaction
3. 学会等名 APS-JPS Joint Meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 袁茂工将、河野通郎、吉田数貴、緒方一介、豊川将一、松本琢磨、八尋正信
2. 発表標題 有効相互作用に基づく微視的核反応論の現状と今後の課題
3. 学会等名 研究会「原子核多体問題の進展と展望」
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 袁茂工将、河野通郎、吉田数貴、緒方一介
2. 発表標題 ノックアウト反応のスピン観測量で探る3核子力効果
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 袁茂工将、緒方一介
2. 発表標題 微視的反応解析による ^{12}C の単極遷移強度の抽出
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 Kosho Minomo
2. 発表標題 Reexamination of microscopic nucleon-nucleus potentials based on multiple scattering theory
3. 学会等名 RIKEN workshop "Current status of the microscopic description of nucleon-nucleus scattering" (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 袁茂工将
2. 発表標題 九大での微視的反應論研究
3. 学会等名 研究会「これまでの原子核物理学の潮流と今後の展望」
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kosho Minomo, Michio Kohno, Kazuki Yoshida, Kazuyuki Ogata
2. 発表標題 Probing three-nucleon-force effects via knockout reactions
3. 学会等名 10th international conference on Direct Reactions with Exotic Beams (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Minomo, M. Kohno, K. Yoshida, K. Ogata, and M. Toyokawa
2. 発表標題 A new probe into three-nucleon-force effects on reaction observables
3. 学会等名 Direct Reactions with Exotic Beams 2016 (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 K. Minomo, M. Kohno, K. Yoshida, K. Ogata, and M. Toyokawa
2. 発表標題 A new probe into three-nucleon-force effects on many-body reactions
3. 学会等名 Three-nucleon force & its related topics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Y. S. Neoh, K. Minomo, K. Yoshida, and K. Ogata
2. 発表標題 Microscopic Effective Reaction Theory for Deuteron-induced Reactions
3. 学会等名 日本物理学会2016年秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 K. Minomo, M. Kohno, K. Yoshida, K. Ogata, M. Toyokawa, and M. Yahiro
2. 発表標題 Microscopic Reaction Theory for Many-body Nuclear Reactions
3. 学会等名 First Tsukuba-CCS-RIKEN joint workshop on microscopic theories of nuclear structure and dynamics (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 蓑茂 工将, 河野 通郎, 吉田 数貴, 緒方 一介
2. 発表標題 ノックアウト反応の精密解析で探るカイラル有効場理論3核子力効果
3. 学会等名 日本物理学会第72回年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 袁茂 工将, 河野 通郎, 吉田 数貴, 緒方 一介, 豊川 将一, 松本 琢磨, 八尋 正信
2. 発表標題 核力に立脚した多体系の反応の微視的記述
3. 学会等名 基研研究会「核力に基づく核構造、核反応物理の展開」
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

大阪大学 核物理研究センター 理論グループ http://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/Divisions/np2/index.html
--

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