

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料  
〔令和4（2022）年度 中間評価用〕

令和4年3月31日現在

研究期間：2020年度～2024年度  
課題番号：20H05636  
研究課題名：三核子系散乱による核子間三体力の完成

研究代表者氏名（ローマ字）：関口仁子（SEKIGUCHI Kimiko）  
所属研究機関・部局・職：東北大学大学院・理学研究科・准教授  
研究者番号：7037332

研究の概要：

原子核・核物質の精緻な理解には核子間三体力を含む核力の完成が必須である。入射核子エネルギー100MeV 付近の重陽子・陽子弾性散乱では、微分断面積が最小となる散乱角度に三体力効果が現れる。本研究では重陽子・陽子弾性散乱のスピンの相関係数測定によって実験が供与する三体力の情報を完全なものとし、カイラル有効場理論に基づく記述精度の高い核子間三体力を含む核力の構築を目指す。

研究分野：原子核物理

キーワード：三体力、偏極重陽子、偏極陽子、少数系、カイラル有効場核力

1. 研究開始当初の背景

現在、原子核物理学では三体力を含めた核力による原子核・核物質の記述が進みつつある。核子間に働く核力は、これまで二つの核子（陽子、中性子の総称）の間で働く二体力として理解され、約4000におよぶ核子・核子散乱データと重陽子の性質を  $\chi^2 \sim 1/\text{datum}$  という精度で記述する二核子間ポテンシャルが構築されてきた。近年、この核力を用いて核子多体系である原子核を統一的に理解しようという研究が国内外で精力的に進められている。その様な中、二体力だけでは原子核の記述はできず、三つの核子間で生じる核子間三体力（以下、三体力）を考慮する必要がある事が、三核子系散乱、原子核の束縛エネルギー、中性子過剰核の存在限界、中性子星の最大質量（現在の観測では太陽質量の約2倍）の理解等で明らかになってきた。三体力を含めて原子核を記述する必要がある事が確実となった現在、三体力の動的性質（運動量依存、スピン依存、荷電スピン依存）を明らかにする事は、原子核の本質的な理解に到達するための重要課題の一つとなっている。

2. 研究の目的

三核子系散乱は、実験値と三核子系厳密理論計算（Faddeev 計算）との比較から三体力の動的性質を直接的に議論できる最適なプローブである。これまでに代表者等は中間エネルギー（入射エネルギーが核子あたり70-300MeV）重陽子・陽子弾性散乱において、微分断面積、および偏極分解能の高精度実験と三核子系の厳密理論計算との比較から三体力効果の明確な証拠を示しつつ、既存の三体力モデルの問題点を詳らかにしてきた。本研究では、中間エネルギー（入射エネルギーが核子あたり70-300MeV）重陽子・陽子弾性散乱の微分断面積が最小となる散乱角度付近は三体力の情報を持つ“golden window”と捉え、実験と理論の両輪で三体力をも含む圧倒的な記述精度を持つ核力を完成させる事を目的としている。実験研究においては、偏極重陽子ビームと偏極陽子標的によるスピンの相関係数高精度測定を実現し、最も確実に実験から供与できる三体力の情報を完全なものとする。理論研究においては、カイラル有効場核力( $\chi$  EFT)に基づく三体力の構築を行い、重陽子・陽子弾性散乱の実験値から低エネルギー定数(LEC)の決定を行う。実験と理論研究の両輪により、三体力を含む核子間核力の完成を目指す。

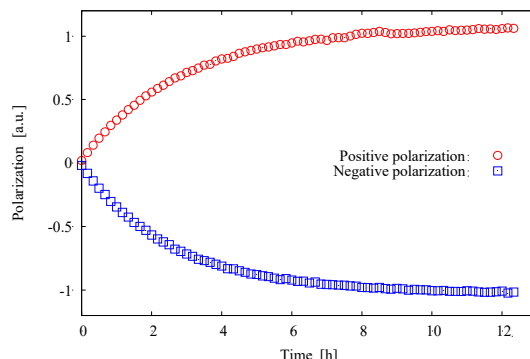
3. 研究の方法

本研究では、最も確実に三体力の情報が得られる中間エネルギー重陽子・陽子弾性散乱を三体力決定のプローブとして用いる。実験研究では、測定の難易度の高さ故に系統的な測定がなされなかったスピンの相関係数の高精度測定を実現する。併行して  $\chi$  EFT 核力三体力(5次摂動項)の構築と同核力を用いた三核子系理論計算の開発を進める。実験値と理論計算の直接比較から、カイラル有効場核力三体力の低エネルギー定数を決定する。スピンの相関係数は、偏極重陽子ビームを偏極陽子標的に照射し、散乱の非対称度を測定することで得られる観測量である。本研究では、偏極陽子の偏極方法として RI ビーム等での実績をもつ芳香族分子 (p-Terphenyl,  $C_{18}H_{14}$ ) 結晶をベースとする動的偏極核方法(Triplet-DNP)を採用し、同標的の構築を進める。また、本研究では i) 広い重心系角度にわたる角度分布測定が必須、ii) 偏極微分断面積の

方位角分布測定が必須、という要請から、大立体角型の検出器の建設を行う。実験は、高品質な偏極重陽子ビームが得られる理化学研究所 RIBF で実施する。

#### 4. これまでの成果

Triplet-DNP 法を用いた偏極陽子標的に関しては、広角度範囲測定に則した電磁石、マイクロ波共振器、標的冷却用チェンバーおよびナフタレン単結晶の製作、更にパルス NMR による偏極度測定システムの整備を行った。電磁石については、偏極効率を上げるため当初設計予定であった 0.2T から 0.35T に変更した。これまでに重陽子一次ビーム用の単結晶標的 ( $\phi$  10mm, 2mm 厚) の生成と整形に成功している。ビームオフライン測定においては建設した標的システムは全て正常に稼働し、Triplet-DNP による偏極信号を NMR によって観測することに成功した。さらに DNP 条件の最適化を行い正負偏極共に約 30-40% の高偏極度を達成している [右図]。同標的を用い、東北大 CYRIC において 1M counts/sec の陽子ビーム照射実験を遂行した。



図(b) 正負偏極における偏極発展の様子。

この際、0.3%/hour の減偏極効果がある事を確認している。

なお、標的建設と併行して広角度範囲検出器の製作、およびデータ収集系の構築を進めている。

理論研究については、二核子系を精度よく記述するまでに至っている N4LO カイラル有効場二体核力に N2LO 三体核力を組み合わせ、(1) 重陽子・陽子弾性散乱の微分断面積が最小値となる角度付近に有意な三体力効果が現れる事を確認した。その結果 (2) 同散乱系の精緻な記述には  $\chi$  EFT 核力の第 5 次までの摂動展開が必要な事、(3)  $\chi$  EFT 三体力の短距離部を反映する LEC の決定にはスピン相関係数が必要である事 (過去に測定された微分断面積と偏極分解能のみでは不十分である) が明らかになった。

#### 5. 今後の計画

理研 RIBF においてスピン相関係数、特に理研 RIBF で課題採択された  $C_{x,x}$ ,  $C_{y,y}$ ,  $C_{yy,y}$  を中心に測定を実施する。同測定に向け、(1) 偏極固体標的の高度化、(2) 検出器、データ収集系の整備を進める。特に(1)では、東北大 CYRIC におけるビーム照射試験で確認された減偏極効果を軽減するため、常温で安定な芳香族分子である p-ターフェニルの導入を進める。(2)で整備した検出器系のシステムを用い、陽子-陽子弾性散乱を用いて標的偏極度の絶対値較正を行う。

重陽子・陽子実験値をインプットとするカイラル有効場の N4LO の三体力の構築を進め、三体力を含む記述精度の極めて高い核子間核力の確立を目指す。

#### 6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

1. K. Sekiguchi, “Review of the experimental activity at RIKEN to explore the three-nucleon interactions”, 査読有, Proceedings of Science, the 10<sup>th</sup> International Workshop on Chiral Dynamics, 掲載決定
2. 齋藤由子, 修士論文「Evaluation of the polarized proton target for polarized deuteron- polarized proton」, 東北大, 2021 年度 (指導教員: 関口仁子)
3. 足立智輝, 修士論文「高速データ収集システムのリアルタイム・モニタの実装と偏極ナフタレン標的の陽子偏極度較正」, 九州大学, 2021 年度 (指導教員: 若狭智嗣)
4. 齋藤由子, Incentive Prize, International School for Strangeness Nuclear Physics, Dec. 2021, RCNP, Osaka Univ., Osaka, JAPAN (指導教員: 関口仁子)
5. K. Sekiguchi, “Current Status and Future Prospects of Study of Three-Nucleon Forces”, 2<sup>nd</sup> International Workshop on the Extension Project for J-PARC Hadron Experimental Facility, 2022.2, online, JAPAN, 招待講演
6. K. Sekiguchi, “Exploring Three-Nucleon Forces – Achievements of Few-Nucleon Systems –”, Symposium of JPS Nuclear Physics and Physical Review C – the 50<sup>th</sup> Anniversary of Physical Review C -, 2020.9, online, JAPAN, 招待講演

#### 7. ホームページ等

1. 研究室ホームページ: <http://lambda.phys.tohoku.ac.jp/nuclphys2/>
2. 日経サイエンス 2022 年 2 月号「挑む」 [https://www.nikkei-science.com/202202\\_010.html](https://www.nikkei-science.com/202202_010.html)
3. 日本経済新聞 2021 年 8 月 30 日 <https://www.nikkei.com/article/DGXZQOCD199YCOZ10C21A800000/>