

機関番号：11301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2008～2010

課題番号：20684010

研究課題名(和文) 重陽子・陽子分解反応測定による核子間三体力モデルの精緻化

研究課題名(英文) Measurement of Deuteron-Proton Breakup Reactions and Model Dependence of Three Nucleon Forces

研究代表者

関口 仁子 (SEKIGUCHI KIMIKO)

東北大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：70373321

研究成果の概要(和文)：

近年、原子核では核子間三体力が重要な役割を果たす事が指摘されている。本研究では三体力効果が現れると予想される重陽子・陽子分解反応の特定の幾何学的配置と弾性散乱の測定を実施した。実験値と厳密理論計算との比較から、分解反応では三体力ばかりでなく相対論効果が顕著である事がわかった。弾性散乱では相対論効果は小さく、低運動量領域は主に藤田・宮沢型三体力で説明できた。しかしながら、高い運動量領域では実験値を説明できない事があきらかになった。

研究成果の概要(英文)：

Three nucleon forces (3NFs) are taken as key elements for fully understanding nuclear phenomena. In order to study dynamical aspects of 3NFs precise measurements for particular kinematical configurations for deuteron-proton breakup reactions as well as elastic scattering have been performed. Obtained data are compared with rigorous numerical Faddeev calculations. Relativistic effects as well as those of 3NFs are clearly shown in the breakup reactions. In elastic scattering relativistic effects are very small. As for low momentum transfer region the data are described by taking into account the Fujita-Miyazawa type 3NFs, however, no theoretical calculations explain the data in higher momentum region.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	7,900,000	2,370,000	10,270,000
2009年度	5,200,000	1,560,000	6,760,000
2010年度	2,000,000	600,000	2,600,000
年度			
年度			
総計	15,100,000	4,530,000	19,630,000

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(実験)

## 1. 研究開始当初の背景

原子核の中ではフェルミオンである核子(陽子と中性子)が狭い領域に密集している。そこでは、主に二つの核子の間を中間子が交換する事で説明される核力が働いている。これは、湯川秀樹が提唱した中間子論であり、

二体力である。しかしながら原子核では、核子が三つ同時に作用する事によって生じる力の存在も想定されている。これは二体力では説明できない三体力(核子間三体力)と呼ばれる力である。三体力は二体力に比べて非常に小さいことから、今までその効果を探し

出すことは難しいとされてきた。

1990年代、核力研究は一つの転機を迎える。二体力の完成である。ここでの完成とは、二体力が入射核子の運動エネルギー350MeVまでの約4,000に及ぶ核子-核子散乱の実験データを $\chi^2 \sim 1$ という精度で記述するまでに至ったということの意味である。これにコンピュータの飛躍的な高速化に伴い、三核子系散乱、原子核の結合エネルギー、核物質の状態方程式などにおいて二体力を用いた厳密理論計算が発表されるようになった。この結果、原子核の様々な性質が二体力のみでは実験値を説明出来ない事が示され、三体力研究の重要性が指摘されるようになった。

三核子系散乱では、研究代表者の関口等が理化学研究所(理研)で行った中間エネルギー(入射粒子のエネルギーが核子あたり100MeV付近)の重陽子と陽子の弾性散乱の微分断面積の高精度測定から、断面積が最小となる付近に見られる、二体力のみの計算と実験値との約30%の違いは、Tucson—Melbourne(TM)型、Urbana型の二つの三体力によって説明される事を示した。二つの三体力は共に、三核子の間を $\pi$ 中間子が交換する間に中間の核子が核子の励起状態であるデルタ励起を引き起こす、藤田・宮沢型と呼ばれる三体力を主要成分としている。この結果より、理論的に予言されていた三体力の大きさがほぼ正しいことが明らかになり、重陽子・陽子散乱において三体力の定量的な議論が可能な事

が初めて示された。またスピン観測の結果では、現在の三体力モデルでは、実験値が説明されない事も明らかになった(Phys. Rev. C. 65, 034003-01-016(2002), Phys. Rev. C. 70, 014001-01-17 (2004), Phys. Rev. Lett. 95, 162301-01-04 (2005) に発表。)

上記で述べたように、三体力は原子核の様々な性質でその重要性が指摘されている。例えば、

- 1) 核物質においては、高密度の領域で三体力が非常に重要であると示唆されている。
- 2) 比較的軽い原子核では、結合エネルギーの約10—25%が三体力によるものであり、ヘリウム原子核などでは中性子数が過剰になるほど三体力の寄与が大きくなると指摘されている。1) や 2) などの記述も、現在は藤田・宮沢型三体力を用いて理論的な予測が行われているが、1) の高密度状態などでは、より核子と核子が近づいた場合に起きる短距離型の三体力が重要になると予測されている。また 2) では、中性子数と陽子数の差に依存する三体力やスピン量子数依存型の三体力が重要であるとの報告もなされており、三体力の精緻化が必要になってきた。三核子系散乱の最大の特徴は、三体力の運動量依存性、また三体力のスピン量子数依存性の研究が

可能な事である。三体力に関してより詳細な情報を得るには、重陽子・陽子分解反応の測定が有効である。重陽子・陽子の分解反応は散乱の終状態として様々な幾何学条件があるので、特定の幾何学的配置を選ぶことにより、より特徴的な三体力の散乱振幅の検証を行うことができると考えられる。

この様な経緯から、我々は重陽子・陽子分解反応の測定を計画するに至った。

## 2. 研究の目的

三核子系散乱である重陽子・陽子分解反応の特定の散乱条件に注目し、現在提唱されている三体力モデルの検証をし、精緻化を目指す。また、この目的の達成には欠かせない、同反応における相対論的な効果について定量的な評価を行う。

## 3. 研究の方法

(1) 理研RIBFにおける偏極重陽子ビームラインの建設と重陽子・陽子弾性散乱の測定：

理研RIビームファクトリ(RIBF)において200~300 MeV/N 偏極重陽子ビームを用いた重陽子-陽子散乱実験を展開する事を目的として、重陽子ビーム加速に必要なビームライン、偏極度計BigDpolの建設を行った。建設した装置を用いて、重陽子—陽子弾性散乱の重陽子の全ての偏極分解能の測定を行う。

(2) 重陽子・陽子分解反応のFinal State Interaction 近傍における偏極移行量測定：

(1)の研究と併行して135 MeV/N における重陽子—陽子分解反応の測定を理研加速器施設で進める。三体力のモデルの優劣をつける事を目的として、まずモデル依存性が顕著な幾何学的配置を探索した。その結果、重陽子—陽子分解反応散乱の中でも、終状態の陽子と中性子の運動量が同じとなるFinal State Interaction 近傍の幾何学的配置の偏極移行量 $K_{yy'}$ に、Tucson-Melbourne型三体力とUrbana型の三体力にモデル依存性が見られるという理論の示唆が得られた事から、同観測を中心に測定を行い、Faddeev理論計算との比較を行う。

(3) 陽子・重陽子分解反応の準弾性散乱近傍の微分断面積の測定：

相対論効果に最も敏感な測定を行う事を目的として、三体力効果が小さく、かつ相対論効果が見られると予測される幾何学的配置を探索する。理論計算から陽子—重陽子分解反応の準弾性散乱近傍の微分断面積に、三体力効果が少なく相対論効果のみが大きく寄与する事が示唆された事から、同観測の測定を大阪大学核物理研究センターのリングサイクロトロン施設において実施する。

## 4. 研究成果

(1) RIBFに偏極重陽子兼軽イオン加速専用の

ビームライン及び、ビームライン偏極度計の建設を行い、RIBFにおいて偏極重陽子ビームの加速を初めて行った。この成功を受け、新たに建設したビームライン偏極度計 Big Dpol を用いて 250 MeV/N の重陽子—陽子弾性散乱の全ての偏極分解能 ( $iT_{11}$ ,  $T_{20}$ ,  $T_{21}$ ,  $T_{22}$ ) を重心系角度  $\theta_{c.m.} = 40^\circ \sim 160^\circ$  と広い角度範囲に渡って測定する事に成功した。本結果は入射エネルギー 200~300 MeV/核子付近において初めて高精度に得られた重陽子のすべての偏極分解能である。得られた実験結果を三核子系厳密理論計算 Faddeev 計算と比較を行ったところ、120 度同弾性散乱は、以上の後方角度では藤田・宮型三体力を導入しても実験と理論に大きな不一致(微分断面積では約 50%)が見つかるという、100 MeV/N 付近の弾性散乱とは全く異なる状況がある事がわかった(図 1 参照)。

この結果は、三核子系散乱における高運動量領域の記述は、現在の三体力を含む核力では説明出来ない事を意味する。高運動量領域の核力は、対称核物質の記述や、中性子星の質量の記述に重要な役割を果たすと予測されている事から、本測定で得られた実験結果を理解すべく、カイラル有効場核力などの理論の構築、また相対論効果を考慮した理論計算が行われつつある。現在、相対論効果は、重陽子—陽子弾性散乱では無視できる程に小さい事が発表されている。また、我々は 200~300 MeV/N 付近のエネルギー依存性の測定が重要と考え、250 MeV/N の測定に引き続き 300 MeV/N の重陽子—陽子弾性散乱の偏極分解能測定を実施した。

(2) 重陽子—陽子分解反応の重陽子から陽子への偏極移行量  $K_{yy}^{y'}$  を散乱陽子の測定角度  $(\theta_1, \theta_2) = (30^\circ, 31^\circ)$  となる幾何学的配置を中心に測定した。実験結果と理論計算を比較したところ、二体の核力のみでは、明らかに実験値を再現せず、また Urbana 型の三体力を考慮した計算の方が実験値と良い一致が得られるという結果が得られた (図 2 左。Physical Review C79, 054008 (2009) に発表)。その後、相対論効果と三体力を考慮した理論解析が進み、測定した幾何学的配置では、相対論効果が大きく現れる事が示唆された (図 2 右。H. Witala et al., Physical Review C83, 0440011 (2011))。本測定により三体力のモデル依存性の優劣をつける事は出来なかったが、陽子—重陽子分解反応では、三体力効果を定量的に議論する為には相対論効果も考慮する事が必要であることが示された。

(3) 準弾性散乱の測定については、現在解析を進めているところである。

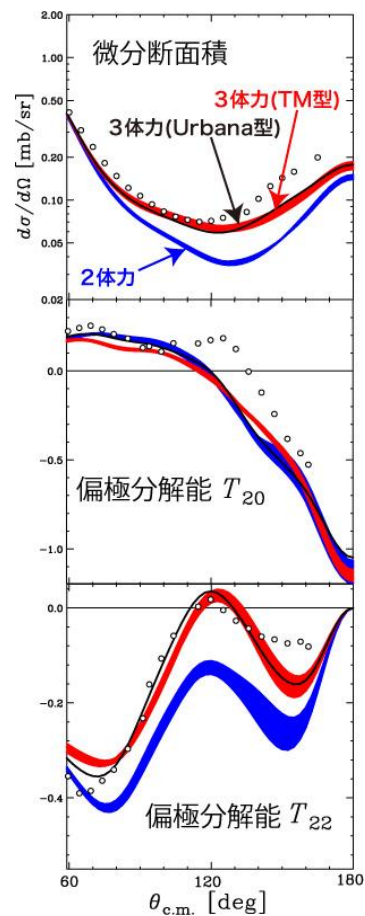


図 1 : 入射エネルギー核子当たり 250 MeV における重陽子—陽子弾性散乱。青い線束は二体力のみの計算(現実的な二体の核力ポテンシャル: CDBonn、ArgonneV18、Nijmegen I、Nijmegen II を使用)。赤い線束はと上記の二体の核力ポテンシャルに TM 型の三体力を考慮したもの。黒い実線は ArgonneV18 に Urbana 型の三体力を考慮した計算。

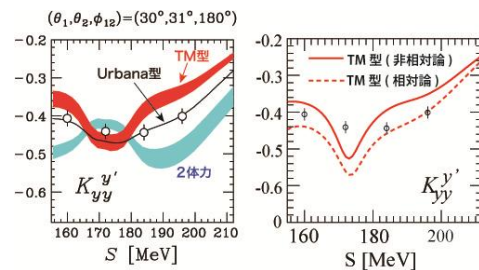


図 2 : 重陽子—陽子分解反応 Final State Interaction 近傍の偏極移行量  $K_{yy}^{y'}$ 。

## 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7件)

- ① 関口仁子、Experimental Approach to Three Nucleon Forces in Few Nucleon Systems、Few Body Systems、査読有、2012、DOI 10.1007/s00601-012-0362-x
- ② I. Ciepal、St.Kistryn、関口仁子、(他37名、32番目)、Vector analyzing powers of deuteron-proton elastic scattering and breakup at 130 MeV、Physical Review C 誌、査読有、Vol. 85、2012、pp. 017001-01—017001-04 (2012) DOI:10.1103/PhysRevC.85.017001
- ③ 関口仁子、岡村弘之(他10名、1番目)、Three nucleon force effects in intermediate-energy deuteron analyzing powers for dp elastic scattering、Physical Review C 誌、査読有、Vol. 83、2011、pp. 061001-01—pp. 061001-05 DOI:10.1103/PhysRevC.83.061001
- ④ 関口仁子(他12名、1番目)、Complete Set of Deuteron Analyzing Powers for  $dp$  Elastic Scattering at 250 MeV/nucleon and Three Nucleon Forces、European Physical Journal Web of Conference、査読有、Vol. 3、2010、pp. 05024-01—pp. 05024-03 DOI:10.1051/epjconf/20100305024
- ⑤ H. Mardanpour、関口仁子(他22名、20番目)、Spin-isospin selectivity in three nucleon forces、Physics Letters B 誌、査読有、Vol. 687、2010、pp. 149—pp. 153 <http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2010.03.021>
- ⑥ 関口仁子(他11名、1番目)、Three-Nucleon Force Effects in the  $1H(d, pp)n$  Reaction at 135 MeV/nucleon、Physical Review C 誌、査読有、Vol. 79、2009、pp. 054008-01—pp. 054008-15 DOI:10.1103/PhysRevC.79.054008
- ⑦ 渡邊裕、関口仁子、鈴木宏、熊谷桂子、真家武士、山田一成、加瀬昌之、福西暢尚、Construction of the IRC-bypass beam transport line、Riken Accelerator Progress Report、査読有、Vol. 42、2009、pp. 111—pp. 112

[学会発表] (計9件)

- ① 関口仁子、Complete set of deuteron analyzing powers for Deuteron-Proton Elastic Scattering at Intermediate Energies、the 20th International Conference on Spin Physics (SPIN2012)、2012年9月17日、ドゥブナ、ロシア

- ② 和田泰敬、関口仁子、(他20名、2番目) Measurement of all deuteron analyzing powers for  $d-p$  elastic scattering at 294 MeV/nucleon、the 20th IUPAP International Conference on Few Body Problems in Physics、2012年8月23日、福岡
- ③ 関口仁子、Experimental Approach to Three Nucleon Forces via Few Nucleon Systems、the 20th IUPAP International Conference on Few Body Problems in Physics、2012年8月23日、福岡
- ④ 関口仁子、Experimental Approach to Three Nucleon Forces in Few Nucleon Systems、The Fifth Asia-Pacific International Conference on Few-Body Problems in Physics、2011年8月26日、ソウル、大韓民国
- ⑤ 関口仁子、Study of Three Nucleon Forces in Three Nucleon Scattering at RIBF、University of Aizu-JUSTIPEN-EFES symposium Cutting-Edge Physics of Unstable Nuclei、2010年11月12日、会津
- ⑥ 関口仁子、岡村弘之、(他11名、1番目)、250 MeV/nucleon 偏極重陽子—陽子弾性散乱と三核子力、日本物理学会、2010年3月21日、岡山
- ⑦ 関口仁子、Study of 3N Scattering at RIKEN、International Symposium on New Facet of Spin-Isospin Responses、2010年2月18日、東京
- ⑧ 関口仁子、Few Nucleon Scattering and Three Nucleon Force、Third Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and JPS、2009年10月13日、ハワイ島、米国
- ⑨ 関口仁子、(他12名、1番目)、Complete Set of Deuteron Analyzing Powers for dp Elastic Scattering at 250 MeV/nucleon and Three Nucleon Forces、The 19th International IUPAP Conference on Few-Body Problems in Physics、2009年9月3日、ボン、ドイツ

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

関口 仁子 (SEKIGUCHI KIMIKO)

東北大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：70373321