

令和元年6月24日現在

機関番号：17601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K17655

研究課題名(和文) 発熱型反応を用いた三中性子共鳴状態探索による新しい三体力効果の研究

研究課題名(英文) Study of the three-nucleon force effects from the search of three-neutron resonant state by using exothermal reactions

研究代表者

前田 幸重 (Maeada, Yukie)

宮崎大学・工学部・准教授

研究者番号：50452743

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)：原子核研究の基本となる核力には、二核子間力以外に三体力と呼ばれる多体相互作用が存在する。特に三中性子間に働く三体力成分は、不安定核における新しい魔法数の出現や、中性子星の状態方程式を記述する上で必要不可欠であることがわかってきた。この新しい三体力の効果を実験的に明らかにするという最終目的に向けて、本研究では、重陽子標的の開発、三中性子の同時測定を行う中性子検出器の実験シミュレーション、及び関連する実験である陽子-重陽子分解反応の中間エネルギー領域におけるデータ解析を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

最近、テトラ中性子共鳴状態存在を示唆する実験結果が発表され、本研究の最終目的である三中性子共鳴状態の探索は、世界中で注目されている研究テーマである。三中性子共鳴状態の探索実験は、三中性子間に働く核力の三体力成分を直接的に測定するものであり、原子・原子核・宇宙という広い分野に大きなインパクトを与えるからである。また、本研究の遂行にあたって開発した標的や検出器は、今後様々な原子核実験で利用される可能性の高いものである。

研究成果の概要(英文)：Nuclear force is the building block of the study of nuclei and it is known to have component of many-body interactions. Especially the three-nucleon force (3NF) effects between three neutrons, which have isospin $T=3/2$, are recognized to play an important role in the studies of the new magic numbers of nuclei, and the EOS (Equation Of States) of neutron stars. To reach the final goal to reveal the new 3NF effects experimentally, we developed deuteron targets, and performed simulations of three neutron detections, which would be essential to perform new experiment to search three neutron resonant state. And we also analyzed proton-deuteron breakup reactions at intermediate energies.

研究分野：実験原子核物理学

キーワード：核力 三体力 中性子 重水素標的

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

原子核は有限個のフェルミオンから成り、強い相互作用に支配された有限量子多体系である。原子核を核力レベルから理解することは物理学における大きな目標の1つと言える。そして長年の研究の結果、二核子間に作用する核力に関しては、全ての核子-核子散乱の実験データを非常に良く再現できる現象論的核力を既に得ることができている。

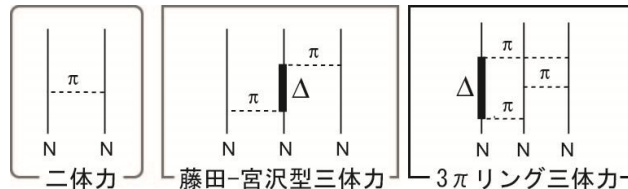


図 1. 二体力 (左)、藤田 - 宮沢型三体力 (中)、3 リング交換型三体力 (右) のファインマンダイアグラム。

一方、三核子以上の系では二核子間核力だけでなく多体間力が存在することは、湯川博士の中間子論以降より長年提唱されてきたが、近年になって実験的にも三体力の効果が示されてきた。三体力には、二つの中間子を交換する際に中間状態として核子がデルタ粒子に励起される状態 (藤田 - 宮沢型三体力・図 1) が最も大きく寄与する。このような 2 交換型三体力を導入することで、現実的核力のみでは説明できなかった三核子系の束縛状態が良く再現されることが、最近の実験・理論双方の発展により示された。

近年の三体力に関する研究を振り返ると、その精力的な研究は主に核子 - 重陽子弾性散乱を用いて行われてきた。中間エネルギー領域 (65MeV 以上) の微分散乱断面積の実験結果は、2

交換型三体力を用いた理論計算により非常に良く再現され、三体力が原子核を理解する上で必要な要素である事が実証された。しかし、さらに高いエネルギー領域のデータや、テンソル偏極分解能を始めとする多くのスピン観測量データは、2 交換型三体力を導入した理論計算で再現することができず、三体力について我々は未だ十分な理解を得ていないと言える。

しかし、現実的核力を用いた第一原理的な原子核構造の研究や、中性子星等の高密度核物質の状態方程式 (EOS) の研究において、三体力の重要性は益々高まり注目を浴びている。特に、核物質、宇宙核物理だけでなく、少数核子反応、核子構造といった原子核研究の様々な分野でアイソスピン $T = 3/2$ 三体力の重要性が高まっている。

2. 研究の目的

前述の通り、近年注目されている中性子 (星) 核物質や中性子過剰核のような系では、三体力のアイソスピン $T=3/2$ が重要な役割を果たすと予想されているが、三核子系で束縛状態を持つのは ${}^3\text{H}$ 及び ${}^3\text{He}$ 原子核のみで、いずれも $T=1/2$ である。また現在まで本研究代表者をはじめとする研究者らが行ってきた三核子系散乱実験は、ほとんどが核子 - 重陽子散乱における測定であり、重陽子が $T=0$ であるため、これらの研究でアプローチできる三体力はやはりアイソスピン $1/2$ 成分に制限されてきた。純粋な三核子 $T = 3/2$ 系の研究は、三陽子 ($3p$) 又は三中性子 ($3n$) の共鳴状態において実現できるが、これらの実験データは非常に乏しい (図 2)。実験的に比較的容易な

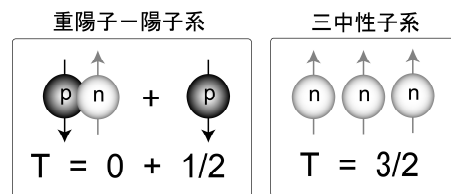


図 2. 従来の三体力実験で用いられた三核子系 (右) はアイソスピン $1/2$ 系に限られたが、本研究ではアイソスピン $3/2$ の三核子系に直接アプローチする。

$3p$ 共鳴状態の探索実験は既に行われているが、クーロン斥力のために強度が $E_x \sim 10$ MeV 近辺に分散しており、顕著な共鳴ピークの観測は難しい。他方、 $3n$ 共鳴状態はクーロン力による不定性の無い研究ができる理想的なプローブであるが、 $3n$ 状態生成反応及び中性子検出の実験的困難さ故、その共鳴状態は未だ明確に確認されていない。そこで本研究では、理化学研究所 RIBF 施設で得られる大強度の不安定核ビームを用いた発熱型荷電交換反応による三中性子共鳴状態の探索実験を行うことで、アイソスピン $3/2$ 三体力の直接的な実験研究を行うことを目指した。

3. 研究の方法

当初は放射性同位体であるトリチウム (${}^3\text{H}$) 標的を開発、制作して実験を行う計画であった。しかし、施設の安全管理の観点から、開発及び使用許可申請に想定よりも時間がかかることが判明し、使用する標的の変更、及びそれに伴う実験計画の変更が必要となった。また、研究期間途中でテトラ中性子 ($4n$) 共鳴状態の存在可能性を示唆する新しい実験結果 (K. Kisamori et al., PRL) が発表され、 $4n$ 共鳴状態に関する理論研究が飛躍的に進んだ。それに伴い、本研究で探索を目指していた $3n$ 共鳴状態に関する新しい理論研究結果が複数グループから発表された。本研究開始以前の理論研究では、 $3n$ 共鳴状態のエネルギー状態は $E_x \sim 10\text{MeV}$ 、 $E \sim 8\text{MeV}$ 程度と予想されていたが、新しい理論研究結果では、低エネルギー状態に幅の狭いピークが見られることが示唆された。それに合わせて、 $3n$ 共鳴状態から崩壊した 3 つの中性子を同時計測するため

の中性子検出器に求められる性能が大きく変更された。以上の状況を踏まえ、本研究では大きく以下の3つを進めた。

(1)重陽子標的として使用する重水素化ポリエチレン(CD₂)標的の開発および作成：粉末でしか販売されていないCD₂を大面積で且つ厚さの均質性の高いシート状に成形する手法を開発した。

(2)中性子検出器 NEBULA による3中性子同時検出のシミュレーション：3n 共鳴状態から崩壊した三中性子を高エネルギー分解能で検出するための実験条件を最適化するため、GEANT4によるシミュレーションを行った。

(3)陽子-重陽子分解反応のデータ解析および(p,d)移行反応の測定と解析：3n 共鳴状態探索実験と相補的に三体力に関する実験的な知見を与えると考えられる、中間エネルギー状態における偏極陽子-重陽子分解反応のデータ解析を行い、理論研究者との議論を進めた。また、少数核子系反応計算との比較のために、中重核を標的とした(p,d)移行反応実験を大阪大学核物理研究センター(RCNP)で実施し、データ解析を行った。

4. 研究成果

(1)二次ビームとして生成される不安定核ビームは空間的な広がりを持っているため、ビームを照射する CD₂ 標的は面積が大きく且つビーム照射領域内での厚さの一様性が良いシートであることが求められた。本研究では、2種類のステンレス製治具と2種類の加熱方法及び加圧方法を組み合わせることで、12cm²以上の十分に大きい面積を持つ、厚さ50~1000μmのシートの作成に成功した。本研究で開発した CD₂ 標的は、三体力研究のための実験以外でも、宇宙核物理実験や、核変換による高レベル放射性廃棄物低減プログラムなど、様々な加速器実験で利用された。さらに、制作結果およびこの標的を用いて行った実験について、日本物理学会等で成果報告を行った。

(2) RIBF 施設の基幹検出器の1つである中性子検出器 NEBULA は多中性子同時検出可能な検出器である。しかし、本研究で実施を目指していた少数核子系反応は、通常不安定核実験と比較して中性子起源のバックグラウンドの寄与が大きく、新たに荷電粒子 VETO 検出器を導入する必要があると考えられた。そこで GEANT 4 によるシミュレーションを行い、VETO 検出器のデザインの最適化、検出器全体の検出効率、検出した三中性子の相対エネルギーの分解能のシミュレーションを行った。その結果、実験可能な VETO 検出器のデザイン及び実験条件を見出すことが出来た。但しエネルギー分解能に関しては、新たな中性子検出器を増強して分解能の恒常を図ったほうが良いことも示された。

(3)RCNP で取得した 170, 250MeV における陽子-重陽子分解反応の再解析を行った。4n 共鳴状態を示唆する実験結果を受け、核子-重陽子系反応の理論計算も新たに進展を見せ、再解析した実験結果と新たな理論結果との比較を行い、現在の三体力モデルの問題点に関する議論を進めた。また、将来的に 3n 共鳴状態探索実験データと理論計算の比較から三体力効果の議論をする際には、少数核子系反応の理論モデルの正しさが問題になると考えられている。そこで、鉄およびニッケル標的を用いた(p,d)核子移行反応実験を遂行し、理論計算との比較を行った。これらの実験および議論から得られた知見について、国内外の学会や国際会議で発表した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 10 件)

S. Takeuchi, Y. Maeda, et al., "Coulomb breakup reactions of 93,94Zr in inverse kinematics", 査読有, Progress of Theoretical and Experimental Physics, vol. 2019, DOI: 10.1093/ptep/pty138 (2019).

S. Kawase, Y. Maeda, et al., "Study of proton- and deuteron-induced spallation reactions on the long-lived fission product 93Zr at 105 MeV/nucleon in inverse kinematics", 査読有, Progress of Theoretical and Experimental Physics, vol. 2017, DOI: 10.1093/ptep/ptx110 (2017).

H. Wang, Y. Maeda, et al., "Spallation reaction study for the long-lived fission product 107Pd", 査読有, Progress of Theoretical and Experimental Physics, vol. 2017, DOI: 10.1093/ptep/ptw187 (2017).

K. Sekiguchi, Y. Maeda, et al., "Deuteron Analyzing Powers for dp Elastic Scattering at Intermediate Energies and Three-Nucleon Forces", 査読有, Few-Body Systems, vol. 58, DOI: 10.1007/s00601-017-1213-6 (2017).

W. Ong, Y. Maeda, et al., "Low-lying level structure of Cu 56 and its implications for the rp process", 査読有, Physical Review C, vol. 95, DOI: 10.1103/PhysRevC.95.055806 (2017).

K. Sekiguchi, Y. Maeda, et al., "Complete set of deuteron analyzing powers from d - p elastic scattering at 190 MeV/nucleon", 査読有, Physical Review C, vol. 96, DOI: 10.1103/PhysRevC.96.064001 (2017).

K. Kisamori, Y. Maeda, et al., "Candidate Resonant Tetraneutron State Populated by the 4He(8He, 8Be) Reaction", 査読有, Physical Review Letters, vol.116, DOI:

10.1103/PhysRevLett.116.052501 (2016).

H. Wang, Y. Maeda, et al., "Spallation reaction study for fission products in nuclear waste: Cross section measurements for ^{137}Cs and ^{90}Sr on proton and deuteron", 査読有, Physics Letters B, vol. 754, 104-108 (2016).

Y. Matsuda, Y. Maeda, et al., "Solid hydrogen target for missing mass spectroscopy in inverse kinematics", 査読有, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, vol. 305, 897-901 (2015).

A.K. Kurilkin, Y. Maeda, et al., "Vector analyzing power A_y and tensor analyzing powers A_{yy} , A_{xx} , and A_{xz} in the reaction $d+d \rightarrow 3\text{He}+p$ at the energy of 200MeV", 査読有, Physics of Atomic Nuclei, vol. 78, 918-928 (2015).

〔学会発表〕(計 7 件)

Y. Maeda, "Study of the three nucleon force and few-body reactions" The 10th China-Japan Joint Nuclear Physics Symposium (CJNP2018)

Y. Maeda, "Analysis of pd scattering measurements at intermediate energies and three nucleon force effects" Fifth joint meeting of the nuclear physics divisions of APS and JPS (HAW2018)

Y. Maeda, "Experimental analysis of few-body physics" International conference on Few-body physics (FB22)(2018)

谷上幸星、後藤 真太郎、前田 幸重、他、" ^{56}Fe , ^{93}Nb 標的による 53.3MeV 陽子ビームの弾性散乱と(p,d)反応の微分散乱断面積測定"、日本物理学会 2016 年年次大会

Y. Maeda, et al., "Effects of three-nucleon force and the experimental study via the few-nucleon systems" The 9th Japan-China Joint Nuclear Physics Symposium (JCNP2015)

川上 駿介、前田 幸重、他、" ^{90}Sr とその近傍核種における荷電交換反応測定"、日本物理学会 2015 年秋季大会

Y. Maeda, et al., "Study of 3NF effects at the intermediate energies by pd breakup measurement" The 21st International Conference on Few-Body Problems in Physics (FB21)(2015)

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 件)

取得状況(計 件)

〔その他〕

ホームページ等

<https://www.cc.miyazaki-u.ac.jp/yukie/>

6 . 研究組織

(1)研究分担者

(2)研究協力者

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。