

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 15 日現在

機関番号：17601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2015

課題番号：24740168

研究課題名(和文) 三中性子共鳴状態を用いたアイソスピン三重項型三体力の研究

研究課題名(英文) Study of the effects of the isospin 3/2 three-nucleon force by searching a resonant state of tri-neutron

研究代表者

前田 幸重 (Maeda, 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) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：原子核の研究において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が、今までのほとんどの実験的研究では、その対象がアイソスピン $T=1/2$ の三体力成分に限定されてきた。本研究では、不安定核ビームを用いる事で中性子3個の共鳴状態を生成し、 $T=3/2$ の三体力成分の詳細を直接的に明らかにする事を目指した。そのために、重陽子標的の開発及び製作、そして3つの中性子を同時検出するための大型中性子検出器の開発シミュレーションを行った。また同時に、安定核ビームを用いた陽子-重陽子散乱実験の解析を進め、中高エネルギー領域における三核子連続状態の詳細研究を進めた。

研究成果の概要(英文)：In the wide area of the study of nuclear physics, the nuclear forces play a fundamental role. The nuclear forces have only two-body but also many-body interacting components. In this research, we aimed to study directly the effects of the isospin $T=3/2$ three-nucleon force from the tri-neutron resonant state. For this purpose, we developed the deuterium targets, performed the test of the beam line detectors for the high intensity RI beam, and simulated the simultaneous three-neutron detection by using large acceptance neutron detector NEBULA. Addition to that, we studied the continuum states of the three-nucleon systems at the intermediate states from the analysis of the proton and deuteron scattering reactions.

研究分野：実験原子核

キーワード：原子核 中性子 三体力

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。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子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は主に核子-重陽子弾性散乱を用いて行われて来た。中間エネルギー領域(65MeV以上)の微分散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。しかしエネルギーが250MeVになると、三体力を含む理論計算でも実験値を過小評価する事が明らかになった。この実験と理論の不一致を説明するには、従来の2交換型三体力に加えて、中間子交換型、3リング交換型(イリノイ三体力)等の新しい三体力の導入が必要であると考えられている。

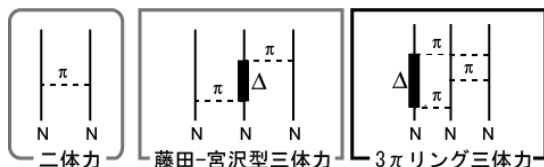


図1: 二体力(左) 藤田-宮沢型三体力(中) 3リング交換型三体力(右)のファインマンダイアグラム。

2. 研究の目的

最近、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。Pieperらによる現実的核力及び三体力を用いた軽核(A=12)の計算によると、基底状態及び励起状態のエネルギーレベルを再現するためには2交換型三体力の導入だけでは不十分であり、3リング交換型三体力(図1)が引力的に働くことが示唆されている。この三体力は強いスピン・アイソスピン依存性を持つポテンシャルで、アイソスピンT=3/2の状態に対して強い効果を持つ。現在、不安定核ビームを用いた研究は理化学研究

所のRIBFを始めとする新しい施設の建設と相まって世界的に急速な発展を遂げており、研究者による関心も高い。不安定核のように陽子と中性子数のバランスが極端な原子核においては、安定核における研究以上に、アイソスピン3/2の三体力効果が大きい。さらに、中性子(星)核物質のような系では、正に三体力のアイソスピン3/2成分のみが効果を持つ。

そこで本研究では、不安定核ビームを用いた全く新しい手法による少数核子系実験を行うことで、アイソスピン3/2三体力の詳細に迫る事を目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、理化学研究所RIBF施設で得られる大強度不安定核ビームを用いて三中性子(3n)共鳴状態の探索を行い、アイソスピン三重項(T=3/2)三体力の詳細に関する直接的な検証を行う事を目指した。この目的を達するため、以下の評価・開発・解析を行った。

- (1) 終状態の三中性子を中性子検出器で検出し、3n共鳴状態の不変質量(invariant mass)スペクトルを測定するため、中性子検出器NEBULAによる三中性子同時計測のシミュレーションを東工大の近藤氏らの協力の元に行った。また、高強度ビーム条件下で実験を遂行するためのVETO検出器やビームライン検出器の評価を行った。
- (2) 重水素標的として、重水素化ポリエチレン、固体重水素の開発・製作を東北大学の松田氏らとの共同研究として行った。また、主として東大CNSの大田氏らが開発を進めてきた重水素アクティブ標的の開発実験に参加し、アクティブ標的内で反跳粒子を検出して欠損質量(missing mass)スペクトルも測定することで測定精度を上げる実験を検討した。
- (3) アイソスピン3/2三体力の研究を進める上で、アイソスピン1/2三体力の知見が十分に得られていることは不可欠である。よって、T=1/2三体力の研究において未解決の問題となっている、高エネルギー領域の陽子-重陽子散乱の実験・解析及び議論を東北大学の関口氏らと進めた。

4. 研究成果

- (1) 検出器シミュレーション複数中性子の同時検出においては、1つの中性子由来のイベントを多数の中性子検出イベントと誤認識するクロストークが生じるため、これを排除するクロストークカット解析が重要となる。そこで、GEANT4ベースの三中性子同時検出シミュレーションを行い、検出効率を悪化させずに不変質量スペクトルのS/N比を改善する新たなクロストークカット解析方法を見出した。また同時に、偽イベントを

判別するための VETO 検出器の導入が大強度ビーム下での実験で重要であることを示した。これらの結果は学会等で発表した。

(2) 重水素標的の開発

ESPR1 グループが開発した固体水素標的システムを改良し、固体重水素標的の製作に成功した。しかし本研究に必要な厚さ(40mm)の製作には至らなかったため、液体標的を使用することになった。そのため、標的厚較正用に使用する大サイズの重水素化ポリエチレン標的の製作開発を行った。また、東大 CNS グループが開発してきた重水素アクティブ標的への不安定核ビーム照射実験を行い、反跳重陽子のトラッキングに成功した。

(3) 陽子-重陽子散乱の解析

RIBF において偏極重陽子ビームを用いた陽子-重陽子弾性散乱の偏極分解能測定を行い、Faddeev 理論計算との比較を行った。また、陽子-重陽子分解反応のエネルギー依存性に関する解析を進め、三核子系連続状態の理論的取扱いに関して理論研究者らと議論を行い、国際会議にて成果発表を行った。

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 8 件)

Y. Matsuda, M. Tsumura, H. Sakaguchi, S. Terashima, Y. Maeda, et. al., “Solid hydrogen target for missing mass spectroscopy in inverse kinematics”, 査読有り、Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 305, 897-901, 2015 年

10.1007/s10967-014-3903-6

Sekiguchi, K., Okamura, H., Wada, Y., Miyazaki, J., Taguchi, T., Gebauer, U., Dozono, M., Kawase, S., Kubota, Y., Lee, C.S., Maeda, Y., Mashiko, T., Miki, K., Sakaguchi, S., Sakai, H., Sakamoto, N., Sasano, M., Shimizu, Y., Takahashi, K., Tang, R., Uesaka, T., Wakasa, T., Yako, K., “Complete set of deuteron analyzing powers for dp elastic scattering at intermediate energies”, 査読有り、Physics of Particles and Nuclei, 45, 190-192, 2014 年

Sekiguchi, K., Okamura, H., Wada, Y., Miyazaki, J., Taguchi, T., Gebauer, U., Dozono, M., Kawase, S., Kubota, Y., Lee, C.S., Maeda, Y., Mashiko, T., Miki, K., Sakaguchi, S., Sakai, H., Sakamoto, N., Sasano,

M., Shimizu, Y., Takahashi, K., Tang, R., Uesaka, T., Wakasa, T., Yako, K., “Complete Set of Deuteron Analyzing Powers for dp Elastic Scattering at Intermediate Energies and Three Nucleon Forces”, 査読有り、Few-Body Systems, 55, 717-719, 2014 年

10.1007/s00601-014-0867-6

Maeda, Y., Saito, T., Miyasako, H., Uesaka, T., Ota, S., Kawase, S., Kikuchi, T., Tokieda, H., Kawabata, T., Yako, K., Wakasa, T., Sakaguchi, S., Chen, R., Sakaguchi, H., Shima, T., Suzuki, T., Tamii, A., “Measurement of the $2\text{H}(p, n)$ Breakup Reaction at 170 MeV and the Three-Nucleon Force Effects”, 査読有り、Few-Body Systems, 55, 729-732, 2014 年

10.1007/s00601-014-0868-5

Sekiguchi, K., Okamura, H., Wada, Y., Miyazaki, J., Taguchi, T., Gebauer, U., Dozono, M., Kawase, S., Kubota, Y., Lee, C.S., Maeda, Y., Mashiko, T., Miki, K., Sakaguchi, S., Sakai, H., Sakamoto, N., Sasano, M., Shimizu, Y., Takahashi, K., Tang, R., Uesaka, T., Wakasa, T., Yako, K., “Complete set of deuteron analyzing powers for dp elastic scattering at intermediate energies and three nucleon forces”, 査読有り、EPJ Web of Conferences, 66, 03076, 2014 年

<http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/20146603076>

Sekiguchi, K. and Wada, Y. and Miyazaki, J. and Witala, H. and Dozono, M. and Gebauer, U. and Golak, J. and Kamada, H. and Kawase, S. and Kubota, Y. and Lee, C. S. and Maeda, Y. and Mashiko, T. and Miki, K. and Nogga, A. and Okamura, H. and Saito, T. and Sakai, H. and Sakaguchi, S. and Sakamoto, N. and Sasano, M. and Shimizu, Y. and Skibinski, R. and Suzuki, H. and Taguchi, T. and Takahashi, K. and Tang, T. L. and Uesaka, T. and Wakasa, T. and Yako, K., “Complete set of deuteron analyzing powers for dp elastic scattering at 250-294 MeV/nucleon and the three-nucleon force”, 査読有り、Physical Review C, 89, 64007, 2014 年

<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.89.064007>

Maeda Y., Saito T., Miyasako H., Uesaka T., Ota S., Kawase S.,

Kikuchi T., Tokieda H., Kawabata T., Yako K., Wakasa T., Sakaguchi S., Chen R., Sakaguchi H., Shima T., Suzuki T., Tamii A., “ Study of the Three-Nucleon Force Effects in the $2\text{H}(p, n)$ Breakup Reaction at 170 MeV ”、査読有り、Few-Body Systems、53、1311-1314、2013年

10.1007/s00601-012-0587-8

Maeda Y., Saito T., Miyasako H., Uesaka T., Ota S., Kawase S., Kikuchi T., Tokieda H., Kawabata T., Yako K., Wakasa T., Sakaguchi S., Chen R., Sakaguchi H., Shima T., Suzuki T., Tamii A., “ Measurements of the Cross Sections and A_y for $\text{D}(p, n)$ Inclusive Breakup Reaction at 170 MeV ”、査読有り、Few-Body Systems、54、291-294、2013年

10.1007/s00601-012-0378-8

〔学会発表〕(計 15 件)

Y. Maeda, “ Effects of three-nucleon force and the experimental study via the few-nucleon systems ”、The 9th Japan-China Joint Nuclear Physics Symposium、2015年11月10日、大阪大学(大阪府茨木市)

川上駿介, 前田幸重, 大津秀暁, 櫻井博義, 王赫 他 22 名(2 番) “ ^{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、2015年9月28日、大阪市立大学(大阪府大阪市)

Y. Maeda, T. Saito, 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年5月18日~22日、シカゴ(米国)

木佐森慶一, 前田幸重 他 49 名、“ 発熱型二重荷電交換反応 $4\text{He}(8\text{He}, 8\text{Be})4n$ による 4 中性子系の研究 ”、日本物理学会 2015 春季大会、2015年3月21日~24日、早稲田大学(東京都新宿区)

五反田修平, 前田幸重, 金谷佳尚, 中村隆司, 近藤洋介、“ NEBULA による不変質量測定におけるエネルギー分解能等のシミュレーション ”、第 121 回日本物理学会九州支部例会、2014 年 12 月 6 日、崇城大学(熊本県熊本市)

金谷佳尚, 前田幸重, 五反田修平, 中村隆司, 近藤洋介、“ NEBULA を用いた多中性子検出におけるクロストークカット及び検出効率のシミュレーション ”、第 121 回日本物理学会九州支部例会、2014 年 12 月 6 日、崇城大学(熊本県熊本市)

Y. Wada, Y. Maeda, et. al., “ Study of 3NF effects via few-nucleon scattering ”、The 4th Joint Meeting of the APS and the JPS、2014 年 10 月 7 日~11 日、ハワイ島(米国)

Y. Maeda, T. Saito, et. al., “ Three-nucleon force study by the pd breakup measurements at the intermediate energy region ”、The 4th Joint Meeting of the APS and the JPS、2014 年 10 月 7 日~11 日、ハワイ島(米国)

Y. Maeda, T. Uesaka, et. al., “ Study of isospin 3/2 three-nucleon force in the three-neutron state ”、SAMURAI International Workshop 2014、2014 年 9 月 8 日、東北大学(宮城県仙台市)

宮裕之, 前田幸重 他 46 名、“ 発熱型荷電交換反応 ($8\text{He}, 8\text{Li}$) を用いた 4He 核のスピン・アイソスピン応答の研究 ”、日本物理学会 2014 秋期大会、2014 年 9 月 20 日~23 日、高知大学(高知県高知市)

木佐森慶一, 前田幸重 他 46 名、“ 二重荷電交換反応をもちいた 4 中性子系質量欠損核分光実験 ”、日本物理学会 2014 秋期大会、2014 年 9 月 20 日~23 日、高知大学(高知県高知市)

大田晋輔, 前田幸重 他 24 名、“ 重水素ガスアクティブ標的を用いた錫領域不安定核における巨大単極共鳴の測定計画 ”、日本物理学会 2014 春季大会、2014 年 3 月 27 日~30 日、東海大学(神奈川県平塚市)

K. Sekiguchi, Y. Maeda, et. al., “ Complete Set of Deuteron Analyzing Powers for dp Elastic Scattering at Intermediate Energies and Three Nucleon Forces ”、The 22nd European Conference on Few-Body Problems in Physics、2013 年 9 月 9 日~13 日、クラクフ(ポーランド)

Maeda Y., Saito T., Miyasako H., Uesaka T., Ota S., Kawase S., Kikuchi T., Tokieda H., Kawabata T., Yako K., Wakasa T., Sakaguchi S., Chen R., Sakaguchi H., Shima T., Suzuki T., Tamii A., “ Measurement of the $2\text{H}(p, n)$ breakup reaction at 170 MeV and the three-nucleon force effects ”、The 22nd European Conference on Few-Body Problems in Physics、2013 年 9 月 9 日~13 日、クラクフ(ポーランド)

前田幸重、“ 3n experiment ”、国際研究会「New aspects of Few Nucleon Interactions」、2012 年 7 月 21 日、岩松旅館(宮城県仙台市)

〔その他〕
ホームページ等
<http://www.cc.miyazaki-u.ac.jp/yukie/>

6．研究組織

(1)研究代表者

前田 幸重 (MAEDA, Yukie)
宮崎大学・工学部・准教授
研究者番号：50452743