

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月31日現在

機関番号：82401

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2011～2012

課題番号：23840053

研究課題名（和文） パリティ移行核反応による核内パイ中間子相関の研究

 研究課題名（英文） Study of pionic correlation effects in nuclei
via the parity-transfer reaction

研究代表者

堂園 昌伯 (DOZONO MASANORI)

独立行政法人理化学研究所・上坂スピンのアイソスピン研究室・特別研究員

研究者番号：60616259

研究成果の概要（和文）：本研究では、原子核内のパイ中間子相関の影響を反映していると期待される 0^- 状態の強度分布を調べるために、 0^- 状態に対する新たな核反応プローブ「パリティ移行核 (^{16}O , ^{16}F) 反応」を提案した。本研究成果は以下の3点である。第1に、パリティ移行核反応の有効性を確認するために、250A MeV の $^{12}\text{C} (^{16}\text{O}, ^{16}\text{F})$ 反応を測定する実験を計画した。第2に、(^{16}O , ^{16}F) 反応測定に特化した陽子用検出器の開発を行った。第3に、250A MeV の (^{16}O , ^{16}F) 反応について歪曲波ボルン近似計算による理論的解析を行った結果、その角度分布を定量的に理解するには歪曲の効果が必要であることが分かった。

研究成果の概要（英文）：We proposed a new probe, a parity-transfer (^{16}O , ^{16}F) reaction for the study of 0^- states, whose distributions are expected to reflect pion-like correlations in nuclei. The accomplishments of this research are; firstly, we planned the $^{12}\text{C} (^{16}\text{O}, ^{16}\text{F})$ experiment at 250A MeV in order to confirm the effectiveness of the parity-transfer reaction. Second, we developed a new proton detector system for the (^{16}O , ^{16}F) experiment. Thirdly, we analyzed the parity-transfer (^{16}O , ^{16}F) reaction at 250A MeV using the distorted wave Born approximation and found that the distortion effect is important to understand its angular distribution quantitatively.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2011年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2012年度	1,300,000	390,000	1,690,000
総計	2,800,000	840,000	3,640,000

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：パイ中間子、テンソル力、スピン双極子遷移

1. 研究開始当初の背景

湯川博士の予言でよく知られるパイ中間子は原子核の結合に重要な役割を果たし、また、その原子核内での振舞(パイ中間子相関)

は原子核の構造に決定的な影響を及ぼす。近年、急速に研究が推し進められている不安定核の構造にも、パイ中間子に起因するテンソル相関が関わっていることが指摘されてお

り、不安定核まで含めた核構造の統一的な理解にパイ中間子相関は本質的な役割を果たす。

こうした状況のなか、パイ中間子と同じ量子数を持つアイソベクトル型0状態の強度分布が、パイ中間子相関の影響を確定できるとして、理論的に大きな着目を集めている。しかし、現状での0状態の実験的情報は非常に限られており、広い核図表を見渡しても同定された状態は僅かしかない。この主な理由として、0状態を探り当てる適切なプローブの欠如が挙げられる。一般に0状態は強度が弱いので、他のスピン・パリティ状態が大きな物理的バックグラウンドになり、簡単に埋もれてしまう。0状態のみを選択的に励起する新たな核反応プローブの開発なくしてはこの閉塞的な状況は打開できない。

2. 研究の目的

これまで適切な実験手法欠如のために研究が進められてこなかった状況を打開するため、新手法「パリティ移行核反応(^{16}O , ^{16}F)」を提案する。既知の0状態を持つ ^{12}C 原子核にてパリティ移行核反応測定を行うことで、パリティ移行核反応の有効性を確認し、0状態に対する有効な核反応プローブを確立する。また、より大きな励起エネルギーの0状態を調べることで、原子核内のパイ中間子相関に関する定量的な知見を得る。

3. 研究の方法

本研究で提案するパリティ移行核反応について説明する。パリティ移行核反応は、プローブの原子核がパリティのみを移行する反応($0^+ \rightarrow 0^-$)である。表1に、これまでの反応[(p, n), (d, ^3He)等]およびパリティ移行核反応で励起されるスピン・パリティ状態を、軌道角運動量遷移 ΔL ごとに示す。 ΔL は、断面積の角度分布を測定することで決定することができる。これまでの反応では、同じ

	$\Delta L=0$	$\Delta L=1$	$\Delta L=2$...
従来の反応 [(p, n), (d, ^3He)等]	$0^+, 1^+$	$0^-, 1^-, 2^-$	$1^+, 2^+, 3^+$...
パリティ 移行核反応 (^{16}O , ^{16}F)	0^-	1^+	2^-	...

表 1: 従来の反応およびパリティ移行核反応で励起されるスピン・パリティ状態。

$\Delta L=1$ で $1^-, 2^-$ 状態が混ざるため、0状態をク

リアに観測することはできなかった。これに対し、パリティ移行核反応は $\Delta L=0$ で0状態のみを選択的に励起するため、断面積の角度分布により0状態を精度よく抽出することができる。また、従来の反応に比べて、励起されるスピン・パリティ状態が限られるため、物理的バックグラウンドの少ないクリーンな測定が実現できる。つまり、パリティ移行核反応を用いることで、0状態を高純度かつ高精度で測定することが可能なのである。

本研究では、パリティ移行核反応として、(^{16}O , ^{16}F)反応を用いる。 ^{16}F は基底状態に $J^\pi=0^-$ を持つ唯一の原子核であり、本研究に用いるプローブとして最適である。また(^{16}O , ^{16}F)反応は、パイ中間子が関与するアイソベクトル型遷移のみを励起する荷電交換反応であるため、本研究においてバックグラウンドとなりうるアイソスカラー成分の寄与は皆無である。

実験は理化学研究所のRI Beam Factoryにて行う。ビームは ^{16}O ビームであり、入射エネルギー約250A MeVを選択することで、歪曲波の影響を最小にし、反応機構を単純にする。

標的核は ^{12}C 原子核である。 ^{12}C には既知の0状態があり、これを観測することで、パリティ移行核反応の有効性を確認し、0状態に対する新たな核反応プローブとして確立する。また、より大きな励起エネルギーの0状態を調べることで、原子核内のパイ中間子相関に関する知見を得る。

反応により放出される ^{16}F は非束縛粒子で、陽子と ^{15}O 粒子に崩壊するため、この2つの粒子を同時検出する必要がある。これらの粒子はSHARAQスペクトロメータにて磁気分析し、運動量ベクトルが決定される。双磁石中での陽子と ^{15}O の軌道半径は、1:1.88(磁気剛性の比)と大きく異なるため、適切な場所に配置された2つの検出器系によって各粒子を測定する。具体的には、 ^{15}O をSHARAQの最終焦点面検出器にて、陽子をD1磁石後の陽子用検出器にて測定する。得られた各粒子の運動量ベクトルから不変質量法を用いて相対エネルギーを決定し、 ^{16}F の基底状態を同定することで目的の反応チャンネルを選別する。また、2つの粒子の情報から ^{16}F の運動量ベクトルを決定し、残留核 ^{12}B の励起エネルギースペクトルを得る。

4. 研究成果

(1) 陽子用検出器の設計・製作

^{16}F の基底状態を第一励起状態($E_x=0.19$ MeV)と分離して観測するためには、不変質量分解能として半値幅で150keV以下が必要である。これを実現するためにも、新たに陽子用検出器の設計・製作を行った。

SHARAQスペクトロメータのイオン光学に

についてシミュレーションを行い、イオン光学パラメータをパリティ移行核反応(^{16}O , ^{16}F)用に最適化したうえで、陽子用検出器の仕様を決定した。測定装置は2台の多線式ドリフトチェンバー(MWDC)から構成され、20 cm 離して D1 磁石下流の低運動量側に配置する。各 MWDC の有効面積は 480 mm(W) x 240 mm(H) である。セルサイズは、12 mm x 10 mm である。面構成は、 $X-X'$ $-Y-Y'$ の 4 面であり、 X' (Y') は X (Y) 面に対し、半セル分だけワイヤの位置をずらした配置となっている。1 台あたりの検出位置分解能は半値幅 300 μm である。これにより、本研究に必要な不変質量分解能 150 keV を達成することが可能である。

検出器の仕様決定後、MWDC 二台のうち、1 台を試作機として製作し、2012 年 6 月に 250 MeV の陽子ビームを照射することで、検出器の性能テストを行った。この結果、位置分解能: 270 μm 、検出効率: $\sim 100\%$ 、と目的の性能を達成した。これにより、本研究に必要な不変質量分解能 150 keV を達成できると期待される。設計・製作した検出器を既存の SHARAQ スペクトロメータに組み込むことによりパリティ移行核反応実験を行う準備が整ったといえる。

(2) 実験計画の検討、課題申請

^{12}C 原子核においてパリティ移行核反応(^{16}O , ^{16}F)測定を行う実験を計画した。実験の全体計画を詳細に検討し、理化学研究所 RI Beam Factory へ実験プロポーザルを提案したところ、優先度 A で採択された。残念ながら、加速器の運転日程の都合などから、研究期間までにパリティ移行核反応の本実験を行うことはできなかったが、2013 年度の冬には実験を行う予定である。今後、 ^{12}C 原子核における 0 状態強度分布を実験的に明らかにすることで、原子核内のパイ中間子相関に関する定量的な知見を得る。

(3) パリティ移行核反応の反応機構に関する理論的解析

パリティ移行核反応を核分光研究手法として確立するためには、その反応機構が重要となる。そこで、理論研究者(理化学研究所、市村宗武氏)と協力して歪曲波ボルン近似(DWBA)計算による理論的解析を行い、反応機構(主に歪曲波の効果)が断面積に与える影響について調べた。その結果、中間エネルギー重イオン反応においては光学ポテンシャルの虚部による吸収の効果が本質的であり、パリティ移行核反応においても吸収の効果を定量的に扱うことが重要であるとの結果を得た。

(4) 0 状態におけるパイ中間子相関の影響の

研究

上記の研究を進める一方で、原子核の 0 状態におけるパイ中間子相関による影響を調べるために、理論研究者(理化学研究所、市村宗武氏)と協力して、乱雑位相近似(RPA)計算による計算コードの開発と理論的解析を行った。その結果、0 状態の強度分布は、他のスピン・パリティ状態よりもパイ中間子相関に敏感であり、その分布を実験的に抽出できれば、パイ中間子相関の強さを確定できる、よい指標となることが分かった。

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 4 件)

- ① M. Dozono, T. Uesaka, M. Sasano, S. Shimoura, S. Michimasa, S. Ota, H. Matsubara, Y. Sasamoto, S. Noji, H. Tokieda, H. Miya, S. Kawase, R. Tang, Y. Kikuchi, K. Kisamori, M. Takaki, Y. Kubota, C. S. Lee, T. Fujii, R. Yokoyama, H. Sakai, T. Kubo, K. Yoshida, Y. Yanagisawa, N. Fukuda, H. Takeda, D. Kameda, N. Inabe, K. Yako, T. Wakasa, K. Fujita, S. Sakaguchi, H. Sagawa, M. Yamagami, and M. Ichimura, "The parity-transfer reaction (^{16}O , ^{16}F) for studies of pionic 0⁻ mode", RIKEN Accelerator Progress Report 45, 10 (2012). [査読有]
- ② T. Wakasa, M. Okamoto, M. Dozono, K. Hatanaka, M. Ichimura, S. Kuroita, Y. Maeda, H. Miyasako, T. Noro, T. Saito, Y. Sakemi, T. Yabe, and K. Yako, "Complete sets of polarization transfer observables for the $^{208}\text{Pb}(p, n)$ reaction at 296 MeV and Gamow-Teller and spin-dipole strengths for ^{208}Pb ", Physical Review C 85, 064606 (2012). [査読有]
- ③ 堂園昌伯、上坂友洋、市村宗武、"On the angular distribution of intermediate-energy heavy-ion reactions based on a simple model", 素粒子論研究 119(4B), E49 (2012). [査読無]
- ④ T. Wakasa, M. Okamoto, M. Takaki, M. Dozono, K. Hatanaka, M. Ichimura, T. Noro, H. Okamura, and Y. Sakemi,

“Complete set of polarization transfer observables for the $^{16}\text{O}(p,n)^{16}\text{F}$ reaction at 296 MeV and 0 degrees”, Physical Review C 84, 014614 (2011). [査読有]

[学会発表] (計 4 件)

- ① M. Dozono, T. Wakasa, T. Noro, K. Sagara, Y. Yamada, S. Kuroita, T. Imamura, H. Shimoda, Y. Sueta, K. Hatanaka, H. Okamura, A. Tamii, H. Matsubara, and Y. Sakemi, “Study of spin-dipole strengths in ^{12}N via complete polarization transfer measurements”, The 4th international conference on “Collective Motion in Nuclei under Extreme Conditions” (COMEX4), Kanagawa, Japan (October 23, 2012).
- ② 堂園昌伯、“(p, n) 反応の全偏極移行量測定から探る核内中間子相関の研究”、日本物理学会 2012 年秋季大会、京都、2012 年 9 月 12 日
- ③ M. Dozono, T. Uesaka, M. Sasano, S. Shimoura, S. Michimasa, S. Ota, H. Matsubara, Y. Sasamoto, S. Noji, H. Tokieda, H. Miya, S. Kawase, R. Tang, Y. Kikuchi, K. Kisamori, M. Takaki, Y. Kubota, C. S. Lee, T. Fujii, R. Yokoyama, H. Sakai, T. Kubo, K. Yoshida, Y. Yanagisawa, N. Fukuda, H. Takeda, D. Kameda, N. Inabe, K. Yako, T. Wakasa, K. Fujita, S. Sakaguchi, H. Sagawa, M. Yamagami, and M. Ichimura, “The parity-transfer reaction ($^{16}\text{O}, ^{16}\text{F}$) for studies of pionic 0^- mode”, International symposium on frontiers in nuclear physics, Beijing, China (November 3, 2011).
- ④ 堂園昌伯、上坂友洋、市村宗武、“On the angular distribution of intermediate-energy heavy-ion reactions on a simple model”, 基研研究会「微視的核反応理論による物理」、京都、2011 年 8 月 1 日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

堂園 昌伯 (DOZONO MASANORI)

独立行政法人理化学研究所・上坂スピン・ア

イソスピン研究室・特別研究員

研究者番号：60616259