

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05106

研究課題名(和文) スピン偏極を取り入れた非束縛核分光法の開発

研究課題名(英文) Development of experimental techniques for spectroscopy of unbound nuclear states with spin polarization

研究代表者

寺西 高 (TERANISHI, Takashi)

九州大学・理学研究院・准教授

研究者番号：10323495

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：原子核物理において有用な実験手法である陽子共鳴弾性散乱の手法は近年の低エネルギーRIビーム(不安定核2次ビーム)の発達により不安定核にまで適用されるようになった。我々は、従来のRIビーム実験での陽子標的を偏極陽子標的に置き換えた「逆運動学偏極陽子共鳴散乱法」の実現を目指している。新手法の最初の適用対象として炭素9の陽子共鳴散乱が考えられる。本研究では、将来のスピン偏極陽子共鳴散乱実験に向けて、反跳陽子検出器と低エネルギー炭素9二次ビームの開発を行った。また、炭素9の非偏極陽子共鳴散乱のテスト測定を行った。

研究成果の概要(英文)：Proton resonant scattering is one of useful experimental tools in nuclear physics. Recent development of low-energy RI beams (secondary beams of unstable nuclei) allows us to study proton resonant scattering on unstable nuclei. We are aiming at developing a new technique of "spin polarized proton resonant scattering in inverse kinematics" by replacing a conventional proton target for RI beams with a spin-polarized proton target. One of the first possible applications of the new technique is for proton resonant scattering on carbon-9. In this study, we developed recoil proton detectors and a low-energy carbon-9 beam toward the future spin-polarized resonant scattering experiment. We also performed a test measurement of unpolarized proton resonant scattering on carbon-9.

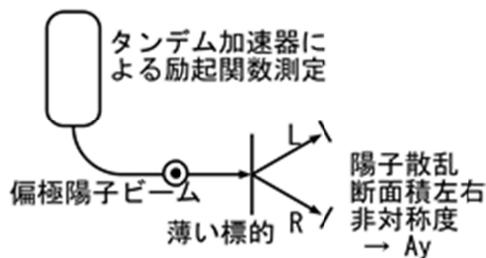
研究分野：原子核物理(実験)

キーワード：共鳴散乱 RIビーム スピン偏極 偏極陽子標的 不安定核 共鳴状態

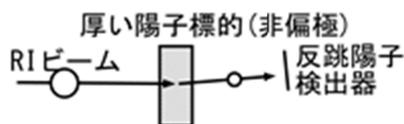
1. 研究開始当初の背景

原子核物理において、束縛状態の核準位だけでなく、陽子・中性子放出に関する非束縛状態(共鳴状態)も重要な研究対象である。特に中性子または陽子ドリップライン近傍の不安定核には、低励起エネルギー領域に中性子/陽子の一粒子的な共鳴状態が現れ、それらの性質は、不安定核の構造、反応、崩壊を理解する上で欠かせない情報となる。さまざまな共鳴状態測定法のうち、ここでは陽子共鳴弾性散乱(A+p → B(共鳴) → A+p)に注目して、その技術的発展を概観する(図1)。

a) 過去の共鳴散乱における偏極分解能測定法



b) 近年のRIビーム実験「逆運動学厚い標的法」



c) 近い将来「逆運動学偏極陽子共鳴散乱法」

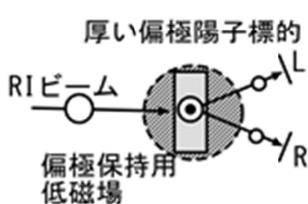


図1. 実験手法の進展

過去においては陽子ビームを標的にあて、弾性散乱の微分断面積をエネルギーの関数として測定し、励起関数を得る方法が一般的であった。励起関数の中に共鳴による干渉パターンが現れ、それを解析することにより共鳴状態の情報が引き出せる。さらに偏極陽子ビームを用いると、微分断面積の左右非対称度から偏極分解能 (A_y) が得られ、共鳴に寄与する一粒子的軌道の全角運動量など、より詳細な核分光が可能となることが知られている(図1a)。一方、近年、核子あたり10 MeV以下の低エネルギーRIビーム(不安定核2次ビーム)が実用化され、不安定核の陽子共鳴弾性散乱が可能になった。低エネルギー核反応を用いてRIビームを生成するイン・フライト型施設や標的中に停止状態で生成された不安定核を核子あたり数 MeV以上にまで再加速するISOL施設が発達してきており、多く

の成果が得られている。申請者らは低エネルギーRIビームの開発に携わるとともに、それを用いた共鳴弾性散乱の実験手法「逆運動学厚い標的法」(図1b)を開発し、実際に $^{11}\text{C}+p$ 、 $^{13}\text{N}+p$ 等のいくつかの共鳴に対し、エネルギー、幅、スピン・パリティを新たに決定することに成功した。その後、不安定核構造や宇宙核物理の観点からさまざまな陽子共鳴、共鳴についての共鳴散乱実験が行われて現在にいたっている。今後期待されるのは、不安定核の共鳴散乱測定にスピン偏極情報を加えることである。そのためには標的中の陽子をスピン偏極させる必要がある(図1c)。

最近、理化学研究所および九州大学のグループにより低エネルギーRIビーム実験のための偏極陽子標的の開発が進められている。この偏極陽子標的は水素を含む芳香族分子(p-Terphenyl, $\text{C}_{18}\text{H}_{14}$)結晶をベースとしたもので、従来と比べて一桁以上低い磁場(0.1 T)において、常温で10-20%程度のスピン偏極度が生成可能であるという特長を持つ。従来の高磁場(2.5T)を用いる偏極標的では、磁場による偏向のため低エネルギー反応粒子の測定が困難であったが、本偏極標的の登場により陽子共鳴散乱におけるスピン偏極物理量測定が可能になると我々は考えた。モンテカルロ・シミュレーションによると、現実的なスピン偏極度($\sim 10\%$)・ビーム強度($10^4/\text{s}$)・マシンタイム(~ 3 days)で十分実験が可能であると考えている。本偏極標的は現状ではすぐに実験に使用できるレベルまでには開発が進んでいないが、近い将来実現されると期待されている。世界的にみても他の施設では同種の標的開発はまだなされておらず、もし実現すれば他の追従を許さない一連の実験が可能となる。

最近、理化学研究所および九州大学のグループにより低エネルギーRIビーム実験のための偏極陽子標的の開発が進められている。この偏極陽子標的は水素を含む芳香族分子(p-Terphenyl, $\text{C}_{18}\text{H}_{14}$)結晶をベースとしたもので、従来と比べて一桁以上低い磁場(0.1 T)において、常温で10-20%程度のスピン偏極度が生成可能であるという特長を持つ。従来の高磁場(2.5T)を用いる偏極標的では、磁場による偏向のため低エネルギー反応粒子の測定が困難であったが、本偏極標的の登場により陽子共鳴散乱におけるスピン偏極物理量測定が可能になると我々は考えた。モンテカルロ・シミュレーションによると、現実的なスピン偏極度($\sim 10\%$)・ビーム強度($10^4/\text{s}$)・マシンタイム(~ 3 days)で十分実験が可能であると考えている。本偏極標的は現状ではすぐに実験に使用できるレベルまでには開発が進んでいないが、近い将来実現されると期待されている。世界的にみても他の施設では同種の標的開発はまだなされておらず、もし実現すれば他の追従を許さない一連の実験が可能となる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、従来の「逆運動学厚い標的法」の陽子標的を偏極陽子標的に置き換えた「逆運動学偏極陽子共鳴散乱法」の実現に向けて、偏極陽子共鳴散乱に適した検出器系の開発を行うことと、将来の測定対象である $^9\text{C}+p$ 共鳴に関して非偏極標的を用いたテスト実験を行うことである。そのため具体的には以下に述べる4つの項目に取り組んだ。

偏極陽子共鳴散乱の実験セットアップでは、散乱による反跳陽子の左右非対称度を測定するため、大立体角の反跳陽子検出器系が必要となる。この実験セットアップに適した反跳陽子検出器の候補として、E-E型Si半導体検出器テレスコープの開発(項目1)、および半導体光増倍器(SiPM)を用いたCsI(Tl)シンチレーション検出器の開発(項目2)を行った。

逆運動学偏極陽子共鳴散乱法の最初の適用対象として $^9\text{C}+p$ (^{10}N)共鳴散乱を考えている。未知の非束縛核 $^{10}\text{N}(=^9\text{C}+p)$ は、そのミラー核 $^{10}\text{Li}(=^9\text{Li}+n)$ と共に中性子ハロー核 ^{11}Li の三体系モデル($^9\text{Li}+2n$)を理解する上で重要

であるが、共鳴の幅が広く同定が困難であるため A_y の測定が非常に重要である。本研究ではそのために必要な、核子あたり 5 MeV 程度の低エネルギー ^{12}C ビームの開発(項目 3)、および非偏極標的を用いた $^{12}\text{C}+p$ 励起関数のテスト測定(項目 4)を行った。

3. 研究の方法

(1) E-E 型 Si 半導体検出器テレスコープの開発

将来の不安定核と偏極陽子の共鳴散乱測定で使用するための E-E 型 Si 半導体検出器テレスコープの開発を九州大学タンデム加速器施設において行った。テレスコープは E 層、E 層の 2 枚構成になっており、有感面積は $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}^2$ 、E 層の厚さは 50 ミクロン程度、E 層の厚さは 1.5 mm 程度である。陽子の散乱角度を決定できるようにするため、E 層は 2 次元の位置決定が可能な両面ストリップ型となっている。構築したテレスコープを用いて、タンデム加速器による核子あたり 2.33 MeV の ^{12}C ビームを非偏極陽子(ポリエチレン)標的に照射し $^{12}\text{C}+p$ 逆運動学共鳴散乱を測定し、検出器系の性能確認および解析手法の検証を行った。

(2) CsI(Tl) と SiPM を用いた反跳陽子検出器の開発

不安定核と陽子の逆運動学共鳴散乱における反跳陽子検出器のもう一つの候補として、CsI(Tl) と SiPM を用いたシンチレーション検出器のテストを行った。CsI(Tl) シンチレーターは Si 半導体検出器に比べ安価で、発光時間分布において早い成分と遅い成分の光量比が粒子種によって異なるということを利用して、単体で粒子識別を行うことができる。また、近年利用可能になった SiPM は従来のフォトダイオードに比べ、出力信号が大きく電氣的ノイズによる分解能の悪化がほとんどないという利点がある。本研究では、有感面積が $5.5 \times 5.5\text{ mm}^2$ という小面積のプロトタイプ検出器(図 2)を製作し、タンデム加速器による 3~12 MeV の陽子および重陽子の弱いビームを検出器に照射し、性能評価を行った。

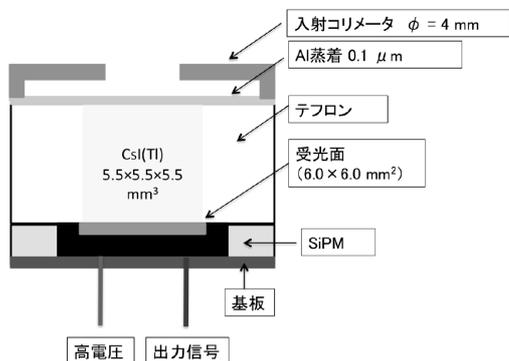


図 2. CsI(Tl) と SiPM による反跳陽子検出器のプロトタイプ

(3) 低エネルギー ^{12}C ビームの開発

将来の偏極陽子標的を用いた $^{12}\text{C}+p$ (^{10}N) 共鳴散乱を想定し、理化学研究所の RIPS ビームラインにおいて、低エネルギー ^{12}C ビームの開発を行った。核子あたり 70 MeV、強度 400 pA の ^{12}C 一次ビームを厚さ 0.74 g/cm^2 の ^9Be 標的に照射し、入射核破砕反応により ^{12}C 二次ビームを生成し、RIPS ビームラインの電磁石系により分離した。 ^{12}C ビームのエネルギーはエネルギー減衰板により核子あたり 4.2 MeV にまで落とした。エネルギー減衰させる際に、多重散乱効果により、ビームの一部がビームライン中で失われてしまうという問題がある。本研究では、エネルギー減衰板の材質を従来の Al から原子番号の小さい原子(C および H)を含むポリエチレンに変え、ビームの損失を抑えるという工夫を行った。

(4) 非偏極陽子標的を用いた $^{12}\text{C}+p$ 励起関数のテスト測定

本研究で開発した核子あたり 4.2 MeV の ^{12}C ビームを用いて、非偏極陽子標的(厚さ 15 mg/cm^2 のポリエチレン)に照射し、「逆運動学厚い標的法」を適用して、 $^{12}\text{C}+p$ 共鳴散乱の励起関数のテスト測定を行った。標的から放出される反跳陽子を実験室系散乱角度 16 度および 22.5 度においた 2 つの E-E 型 Si 半導体検出器テレスコープにより検出した。

4. 研究成果

(1) E-E 型 Si 半導体検出器テレスコープの開発

今回開発した E-E 型 Si 半導体検出器を用いて九州大学タンデム加速器施設において安定核 ^{12}C の逆運動学陽子共鳴散乱の測定を行った。励起関数の測定結果(図 3)において、既知の 3 つの $^{12}\text{C}+p$ (^{13}N) 共鳴状態をはっきりと識別することができ、検出器の基本性能の確認と解析手法の実証をすることができた。今回の測定ではエネルギーがよくわかっており、かつ、エネルギーおよび角度広がり十分小さい ^{12}C ビームを用いた。これにより、検出器のエネルギー分解能、角度分解能、および標的中の粒子のエネルギー損失等の効果が、励起関数のエネルギー分解能にどのように寄与するかということに関し有用なデータが取得できた。解析の結果、今回の測定条件では実験室系散乱角度 10, 20, 30 度において、それぞれ 25, 30, 50 keV (FWHM) の

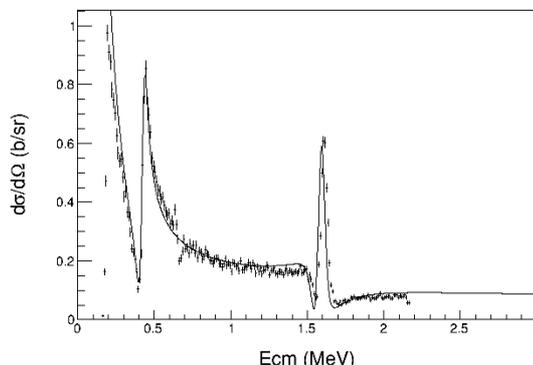


図 3. 実験室系散乱角度 10 度における $^{12}\text{C}+p$ 励起関数

重心エネルギー分解能が達成されていることが確認できた。これらの値は今回想定している $^{12}\text{C}+\text{p}$ 共鳴散乱に対して要求される分解能 100 keV (FWHM)より十分良い。

励起関数の解析の際に必要な、標的中の粒子のエネルギー阻止能は、一般的に用いられている SRIM のような計算コードにより見積もることができる。しかし、計算コードの誤差が ^{12}C のような重イオンに対しては今回のような低エネルギー領域では 10%程度もあるといわれている。その場合、エネルギー阻止能の計算誤差が共鳴エネルギーの決定における大きな系統誤差の要因になる。今回、 ^{12}C ビームが標的を透過する状況でエネルギー損失を実測したところ、SRIM による計算値から 8%程度ずれていることが実際に確認できた。RI ビームを使用する実験においても、実験中にビームの標的中でのエネルギー損失を実測することが重要であるといえる。

(2) CsI(Tl) と SiPM を用いた反跳陽子検出器の開発

今回開発した CsI(Tl)と SiPM を用いた反跳陽子検出器のプロトタイプを九州大学タンデム加速器のビームによりテストした結果を図 4 に示す。

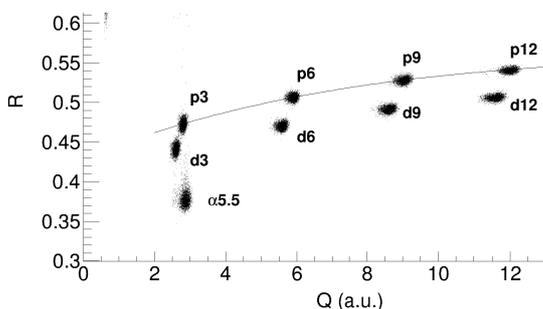


図 4. SiPM を用いた CsI(Tl)シンチレーターによる粒子識別プロットの結果。ラベル p3, p6, p9, p12, d3, d6, d9, d12 は陽子 3, 6, 9, 12 MeV、重陽子 3, 6, 9, 12 MeV をそれぞれ表す。

検出器の光強度信号波形を信号立ち上がり後 0~8 μ 秒まで積分した値 Q は粒子のエネルギーにほぼ比例する。また、信号波形を信号立ち上がり後 0.8~8 μ 秒まで積分した Q_2 は遅い発光成分の量と考えることができる。図 4 では横軸を Q 、縦軸を比 $R = Q_2/Q$ にして作成したプロットである。図中の実線上に陽子 3, 6, 9, 12 MeV に対応したイベントの島が現れている。この実線から少し離れた場所に重陽子 3, 6, 9, 12 MeV の島が現れている。このプロットから、少なくともエネルギー 3 MeV 以上では陽子と重陽子の識別能力が十分であることがわかった。これは想定している $^{12}\text{C}+\text{p}$ 共鳴散乱の重心エネルギーでは約 1 MeV 以上に対応している。予想される共鳴エネルギーは 1 MeV 以上であるので粒子識

別能力は問題ないといえる。

エネルギー分解能は陽子 12 MeV に対し 280 keV (FWHM)、陽子 3 MeV に対し 150 keV (FWHM)であった。これは一般的な Si 半導体検出器よりも悪い分解能であるが、想定している $^{12}\text{C}+\text{p}$ 共鳴散乱の励起関数の重心エネルギー分解能に換算すると、いずれも 100 keV 以下になるので、実験要求を満たしており問題ないことがわかった。

(3) 低エネルギー ^{12}C ビームの開発

理化学研究所 RIPS ビームラインにおける ^{12}C ビーム生成テストの結果を表 1 に、得られたビームスポットを図 5 に示す。エネルギーの実測値は核子あたり 4.3 MeV であり、目標としていた核子あたり 5 MeV 近傍のエネルギーが実現できた。エネルギーの微調整はエネルギー減衰板の厚さを微調整することにより可能である。 ^{12}C ビーム強度は 2.4×10^4 個/s でビーム最終焦点面 (実験標的の位置)でのビームスポットの幅は水平方向に 55 mm (FWHM) 垂直方向に 28 mm (FWHM) であった。将来用いる偏極陽子標的の大きさ (直径 20 mm 程度)に入るビーム量を見積もると 6×10^3 個/s 程度にまで減少してしまうが、それでも検出器の立体角を増強するなどすれば、偏極陽子共鳴散乱の測定は十分可能であることがわかった。なお、純度 (総ビーム強度に対する ^{12}C ビーム強度の割合)は 15%であったが、イベントごとにビーム核種の識別が可能であるので、共鳴散乱の測定には問題とはならない。

表 1. ^{12}C ビーム生成テストの結果

| | |
|--------|-----------------------|
| エネルギー | 核子あたり 4.3 MeV |
| エネルギー幅 | 核子あたり 2 MeV (FWHM) |
| 強度 | 2.4×10^4 個/s |
| 水平方向の幅 | 55 mm (FWHM) |
| 垂直方向の幅 | 28 mm (FWHM) |
| 純度 | 15% |

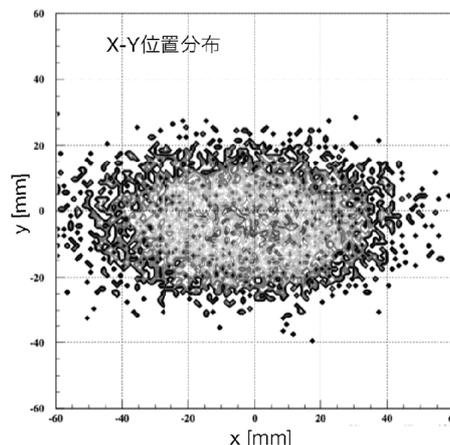


図 5. ビームライン最終焦点面における ^{12}C ビームスポット

(4) $^{12}\text{C}+p$ 共鳴散乱のテスト測定

今回生成した ^{12}C ビームと非偏極陽子標的(ポリエチレン)を使用して測定した $^{12}\text{C}+p$ 共鳴散乱の励起関数の暫定結果を図 6 に示す。R-matrix 計算による暫定的な解析では、重心エネルギー 2.5~3.0 MeV の領域に s 波共鳴が 2 つ、5 MeV 付近に p 波共鳴を 2 つ仮定すると実験で得られた励起関数をおおまかに再現できることが分かった。これらの共鳴状態の存在は殻模型からある程度予想されていたものであるが、今回ほどの統計的に良い品質をもつ実験データは過去になく、今回の結果は共鳴状態の存在をこれまでよりはっきりと示唆するものとなった。

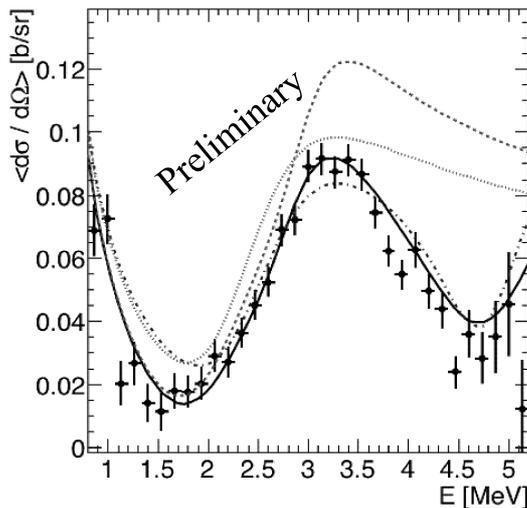
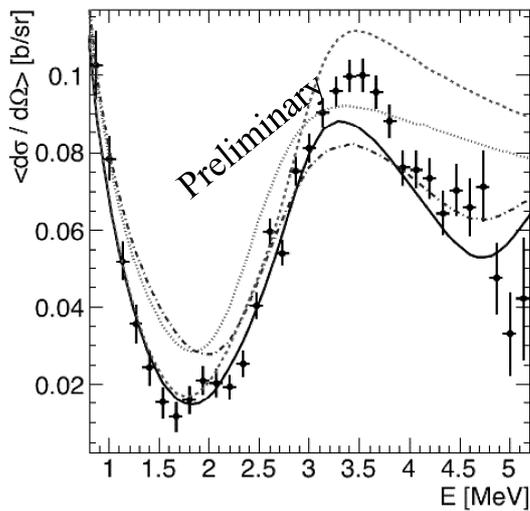


図 6. 実験室系散乱角度 16 度(上)および 22.5 度(下)における $^{12}\text{C}+p$ 励起関数の暫定結果。

(5) 研究成果のまとめと展望

逆運動学偏極陽子共鳴散乱法のための偏極陽子標的の開発が理化学研究所および九州大学のグループにより進められている。本研究では偏極陽子標的を用いる将来の実験と

して $^{12}\text{C}+p$ 共鳴散乱の測定を想定し、反跳陽子用の E-E 型 Si 半導体検出器を開発し、実験に十分使用可能であることを確認した。また、より安価な反跳陽子検出器として SiPM を用いた CsI(Tl)シンチレーターの開発も行った。現状の有感面積が小型のものに関しては十分なエネルギー分解能と粒子識別能力があることが確認でき、今後の大面積型検出器の開発・テストに有用な知見が得られた。

低エネルギー ^{12}C ビームの開発に成功し、偏極陽子共鳴散乱実験に十分使用可能であることを確認した。さらに得られた ^{12}C ビームと非偏極陽子標的を用いた $^{12}\text{C}+p$ 励起関数のテスト測定を行い、未知の ^{10}N 共鳴状態の存在をこれまでよりはっきりと示唆する結果が得られた。将来、偏極陽子標的を用いた実験を行うと、より明確な ^{10}N 共鳴状態の分離同定が実現すると期待される。

本研究全体を通して、逆運動学偏極陽子共鳴散乱法の実験に必要な検出器、解析法、測定対象である共鳴状態に関して有用な結果が得られ、新手法の実現に向かい大きく進んだといえる。

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)

[学会発表](計 10 件)

(1) 岡祥平、寺西高、上野熊紀、入部弘太郎、吉田郭治、坂井秀光、豊原一輝、「逆運動学陽子共鳴散乱実験のための検出器系の開発」、第 123 回日本物理学会九州支部例会、2017 年 12 月 9 日、鹿児島大学

(2) 上野熊紀、寺西高、岡祥平、入部弘太郎、吉田郭治、坂井秀光、豊原一輝、「MPPC を用いた CsI(Tl) シンチレーション検出器の開発」、第 123 回日本物理学会九州支部例会、2017 年 12 月 9 日、鹿児島大学

(3) 福多貴大、寺西高、秋山陽平、栄大輔、上野熊紀、岡祥平、入部弘太郎、吉田郭治、綿部愛、「RI ビーム実験のための反跳粒子 E-E 検出器の開発」、第 122 回日本物理学会九州支部例会、2016 年 12 月 10 日、福岡大学

(4) 秋山陽平、寺西高、栄大輔、福多貴大、上野熊紀、岡祥平、入部弘太郎、吉田郭治、綿部愛、「RI ビーム実験のための陽子シンチレーション検出器の開発」、第 122 回日本物理学会九州支部例会、2016 年 12 月 10 日、福岡大学

(5) Evgeniy Milman, Takashi Teranishi, Satoshi Sakaguchi, Sergey Chebotaryov, Tomohiro Uesaka, Kenichiro Tateishi, Yuichi Ichikawa, Masaki Sasano, Wooyoung Kim, Reii Kaku, Yasuaki Norimatsu, Youhei Akiyama, Takahiro Fukuta, Daisuke Sakae,

Nobuaki Imai, Hidetoshi Yamaguchi, Seiya Hayakawa, Daid Miles Kahl, Yuji Sakaguchi, Keijiro Abe, Noritaka Kitamura, Tomoaki Kaneko, Kotaro Yamada, Sanghoon Hwang, Dahee Kim, Alfredo Galindo-Uribarri, Elisa Romero-Romero, Didier Beaumel, "Search for low-lying resonances in ^{10}N structure via $^{\circ}\text{C} + \text{p}$ resonant scattering", 日本物理学会 2016 年秋季大会、2016 年 9 月 23 日、宮崎大学木花キャンパス

(6) 寺西高、野呂哲夫、森田浩介、若狭智嗣、藤田訓裕、坂口聡志、「九州大学タンデム加速器実験室の廃止」、日本原子力学会 2016 年秋の大会、2016 年 9 月 7 日、久留米シティプラザ

(7) T. Teranishi, "Resonant scattering experiments at CRIB and RIPS", International Symposium on Modern Technique and its Outlook in Heavy Ion Science (MOTO16), June 26, 2016, Rikkyo University.

(8) Evgeniy Milman, Takashi Teranishi, Satoshi Sakaguchi, Sergey Chebotaryov, Tomohiro Uesaka, Kenichiro Tateishi, Yuichi Ichikawa, Masaki Sasano, Wooyoung Kim, Reii Kaku, Yasuaki Norimatsu, Youhei Akiyama, Takahiro Fukuta, Daisuke Sakae, Nobuaki Imai, Hidetoshi Yamaguchi, Seiya Hayakawa, Daid Miles Kahl, Yuji Sakaguchi, Keijiro Abe, Noritaka Kitamura, Tomoaki Kaneko, Kotaro Yamada, Sanghoon Hwang, Dahee Kim, Alfredo Galindo-Uribarri, Elisa Romero-Romero, Didier Beaumel, "Search for ^{10}N resonances with $^{\circ}\text{C} + \text{p}$ resonant scattering", 日本物理学会第 71 回年次大会、2016 年 3 月 20 日、東北学院大学泉キャンパス

(9) 栄大輔、Evgeniy Milman、寺西高、坂口聡志、郭儷怡、則松恭彰、秋山陽平、福多貴大、Sergey Chebotaryov、Wooyoung Kim、上坂友洋、市川雄一、笹野匡紀、立石健一郎、今井伸明、山口英斉、早川勢也、Daid Miles Kahl、坂口裕司、安部敬治郎、北村徳隆、金子智昭、山田紘太郎、Sanghoon Hwang、Dahee Kim、Alfredo Galindo-Uribarri、Elisa Romero-Romero、Didier Beaumel、「陽子共鳴散乱実験のための低エネルギー $^{\circ}\text{C}$ ビームの開発」、第 121 回日本物理学会九州支部例会、2015 年 12 月 5 日、九州工業大学戸畑キャンパス

(10) 寺西高、野呂哲夫、森田浩介、若狭智嗣、藤田訓裕、坂口聡志、「九州大学タンデム加速器実験施設現状報告：廃止と移転」、第 28 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会、2015 年 07 月 03 日、東北大学工学

部

6. 研究組織

(1) 研究代表者

寺西 高 (TERANISHI, Takashi)
九州大学・大学院理学研究院・准教授
研究者番号：10323495

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

坂口聡志 (SAKAGUCHI, Satoshi)
九州大学・大学院理学研究院・准教授
研究者番号：70569566

(4) 研究協力者