

平成 29 年 6 月 27 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2016

課題番号：25800155

研究課題名(和文)低エネルギー不安定核ビーム実験用の薄膜偏極陽子標的の開発

研究課題名(英文)Development of thin polarized proton target for low-energy RI-beam experiments

研究代表者

坂口 聡志(Sakaguchi, Satoshi)

九州大学・理学研究院・助教

研究者番号：70569566

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)：スピン偏極陽子による低エネルギー核反応を用いた不安定核研究を実現するため、高温低磁場で動作する偏極陽子固体標的の開発を行った。真空中で安定なp-タフェニルを材質とした標的を製作し、高温での昇華を用いた薄膜化手法を開発した。標的の性能向上のため、大面積化(直径24mm)を行い、新波長レーザー(556nm)の導入により高偏極度化を実現した。また、炭素9-陽子共鳴弾性散乱のテスト実験を遂行し、低エネルギー炭素9ビームの開発と、窒素10の質量など低位状態の性質を明らかにした。さらに大面積化した偏極陽子固体標的を用いて、中高エネルギーにおけるヘリウム6-陽子弾性散乱のスピン非対称を測定した。

研究成果の概要(英文)：To realize the study of unstable nuclei via low-energy reactions with spin-polarized proton, we developed a spin-polarized solid proton target which can be operated at high temperature and at low magnetic field. p-Terphenyl was used as target material because it is stable in the vacuum. A technique to make the target as thin as 100 um was developed by using slow sublimation of the material at high temperature. As an upgrade of the target, its size was enlarged from 14mm to 24mm in diameter. The target was polarized efficiently using a new laser with a wavelength of 556 nm. A test experiment of ${}^9\text{C}$ -p resonant elastic scattering was carried out, where the property of low-lying states of ${}^{10}\text{N}$ including its mass was unveiled. In addition, spin-asymmetry was measured for the ${}^6\text{He}$ -p elastic scattering at an intermediate energy using the enlarged polarized proton target.

研究分野：数物系科学

キーワード：原子核(実験) 原子核(理論) 不安定核 スピン偏極 弾性散乱 共鳴弾性散乱 偏極分解能

1. 研究開始当初の背景

Mayer と Jensen によって提唱された殻模型は、50 年以上の長きに渡り原子核構造の理解の根幹をなしてきた。一方、近年の不安定核の研究において殻構造の変化を示す実験事実が数多く見出されており、中性子過剰核における殻構造の変容とそのメカニズムを解き明かすことは、現在の原子核物理の最も重要なテーマの一つとなっている。

殻構造を研究するための直接的な手法は、中性子一粒子軌道の情報を得ることである。安定核の一粒子軌道の研究における最も強力な手法の一つが、核子あたり 5~20MeV の低エネルギー領域における偏極重陽子や偏極陽子などのスピン偏極軽イオンによる一核子移行反応であった。これらの反応において、スピン観測量は決定的に重要な役割を果たす。反応の微分断面積は一粒子状態の軌道角運動量を決定する役割を果たすものの、全角運動量に対する感度はない。一方で、微分断面積のスピン非対称 (偏極分解能) は、全角運動量の値に応じて符号の反転という大きな変化を見せる。この現象を用いた全角運動量の決定は一粒子軌道の情報を得るための強力な手法であり、安定核の殻構造に対する理解を大きく前進させてきた。

上記の手法を不安定核研究に適用することで、偏極陽子による核子移行反応や共鳴弾性散乱を用いた殻構造研究が可能となる。スピン非対称の測定から一粒子状態の全角運動量を決定し、不安定核における殻構造の変容の鍵を握るスピン依存相互作用の働きを解明することが強く求められている。

2. 研究の目的

研究代表者のグループでは、芳香族分子の光励起三重項状態における電子偏極を用いた不安定核ビーム実験用の標的を開発してきた。この偏極標的は、核子あたり数十 MeV 以上の比較的高エネルギー領域に使用可能であるが、低エネルギービーム実験に適用するためには、①真空中で昇華しない材料の偏極試験、②物質質量を抑えるための薄膜化、③低エネルギービームの比較的大きなスポットサイズに対応するための大面積化、及び④陽子偏極度向上のための電子偏極機構の解明、などの開発が必要である。本研究では、上記の偏極陽子固体標的の基礎開発、及び物理知見を得るための加速器実験を目的とする。

3. 研究の方法

研究方法は以下の三項目に大別できる。まず、(1)偏極陽子固体標的の大面積化及び薄膜化の基礎開発を行った(2.の①~④)。次に、この標的を用いたビーム実験として、理化学研究所 RI ビームファクトリーにて、(2)薄膜標的を用いた $p+^9\text{C}$ 共鳴散乱実験(テスト実験)、及び(3)大面積標的を用いた $p+^6\text{He}$ 弾性散乱実験(本実験)を遂行した。

4. 研究成果

(1)大面積・薄膜標的の開発

①p-タフェニル結晶の製作と偏極生成
従来の標的材質であるナフタレンは真空中で昇華してしまうため、代わりに p-タフェニルを用いて、これをゾーンメルト法で精製し、ペンタセンをドーピングしてブリッジマン法で結晶成長させた。結晶を直径 14 mm 厚さ 1 mm に整形し、既存の偏極システムを用いてスピン偏極させられることを確認した。

②薄膜化

低エネルギービーム実験においては、従来 1~3mm 程度であった標的を数十~100 ミクロン程度の厚さまで薄くする必要がある。一方、標的は脆い材質であるため、機械的に磨いて目的の厚さまで薄くすることは困難である。そこで、真空中で結晶の片面を熱することで昇華させ、目的の厚さを得る方法を開発した。結晶は真空中では 180°C で昇華し、温度や加熱時間を変えることで厚さを制御できる。一方で 150°C 以下では昇華は観測されず、実際の使用温度である 30°C 程度では真空中でも十分に安定であることが確認された。

また、薄膜標的用のマイクロ波共振器を開発した。従来は反跳陽子の軌道がマイクロ波共振器を貫くため物質質量の小さい共振器を使用する必要があったが、低エネルギービーム実験においては、反跳陽子は比較的前方角度に射出されることが多いため、マイクロ波共振器の厚さに対する制約がない。そこで、図 1 の「3 ループ 2 ギャップ共振器」を真鍮及び銅で製作し、それぞれ Q 値 ($f/\Delta f$) として 500 及び 800 (図 2) を得た。後者を用いることで、32 W 程度のマイクロ波強度で磁場 0.2 T における偏極 (周波数~5 GHz) に十分な定在波強度が得られると見積もられる。

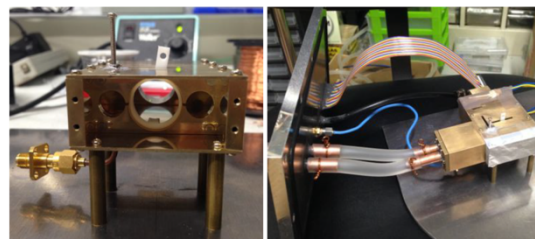


図 1: 3 ループ 2 ギャップ共振器

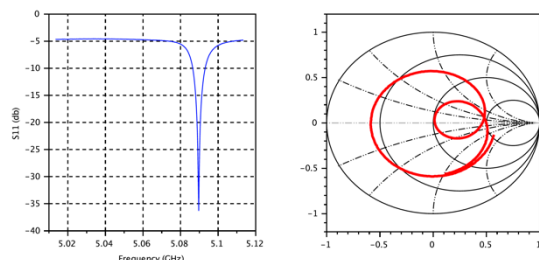


図 2: マイクロ波の共振ピーク

③大面積化

低エネルギー不安定核ビームは、エネルギーを減衰させる過程でエネルギー・位置・角度の広がりが大きくなることが避けられない。

従って、希少な不安定核ビームを有効利用するためには、標的のサイズを大きくすることが極めて重要である。従来の標的は直径 14 mm であったが、これを 24 mm まで大面積化した。これにより、統計量を 4 倍、信号雑音比を 10 倍以上改善できる。標的の原料として直径 29 mm の大口径結晶を製作し、直径 24 mm のディスク上に削り出し加工した（応用光研工業株式会社との共同開発）。

また、大面積結晶をスピン偏極させるために、マイクロ波共振器の拡張を行った。偏極システムの写真を図 3 に示す。共振器を拡張すると、一般に電磁場密度が低下し、さらに放射による損失も大きくなるため、現実的な強度のマイクロ波入射で偏極に十分な強度の定在波が生成できるか試験する必要がある。本研究では共振器の直径を 16 mm から 26 mm に拡張し、2-3GHz 領域に正しく整合が取れることを示した。さらに、共振器に大面積結晶をインストールし、偏極生成率のマイクロ波強度依存性を測定することで偏極試験を行った。図 4 に示す通り、偏極に十分な定在波強度を生成できることを確認した。このシステムは (3) の加速器実験において使用した。



図 3: 大面積標的システム

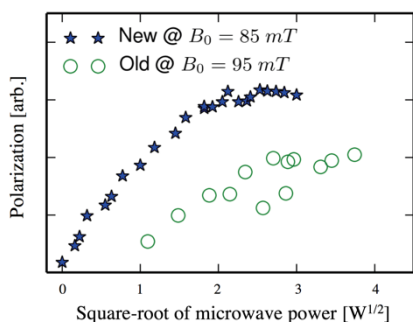


図 4: 偏極生成率のマイクロ波強度依存性

④高偏極化

ビームタイムの限られた加速器実験では高偏極度が重要な要素である。偏極度が 2 倍になれば、ビームタイムは 1/4 の長さに短縮できる。特に低エネルギービーム実験用の p-タフェニルは従来のナフタレンに比べて得られる偏極度が低いことが知られている。従って、高い陽子偏極度を得るために、その元となるペンタセン分子光励起三重項状態の電子偏極度を向上させる必要がある。この目的のため、以下の二点の基礎研究を行った。

④-1: 電子偏極機構の解明

電子偏極は、パルスレーザーの照射により励

起された芳香族分子の三重項状態 ($m_s=+1, 0, -1$) の間に生成される。この中で $m_s=0$ 状態の占有数が最も大きいのに対し、寿命も短いと考えられている。このため、パルスレーザーのパルス幅や繰り返しなどの時間構造には最適な組み合わせがある。そこで、CW レーザーを機械的にパルス化しその時間構造を変えることで、電子偏極度のパルス構造依存性を測定し、ペンタセン分子三重項状態の寿命 (図 5: $\tau_0=22 \mu s, \tau_- = 88 \mu s$) を求めた。結果を投稿論文として発表した (論文②)。寿命からパルスの最適な時間構造が得られる。また、得られた電子偏極を陽子に移行し、さらに陽子から ^{13}C 核に移行することにも成功した。

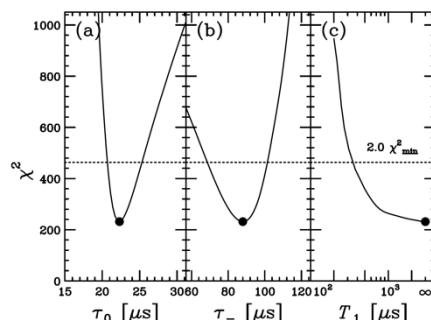


図 5: ペンタセン三重項状態 ($m_s=0, -1$) の寿命及びそれらの状態間のスピン緩和時間の決定

④-2: 新波長レーザーによる偏極効率向上

偏極度を制限している最大の要因は、偏極源であるペンタセン分子を励起するための光強度不足である。従来、励起光源としては波長 514 nm の Ar イオンレーザーが使用されてきたが、これはペンタセン分子@100K の第三吸収ピークに相当し、第一 (600nm) ・第二ピーク (553nm) と比べると数分の一の吸収効率である。当初予定していた第一ピークに対応するレーザーは開発困難であったため、第二ピークに対応する波長 556nm のレーザーを代わりに用いた (理研量子制御技術開発チームと共同開発)。図 6 に、3 種類の波長のレーザーによる単位光量あたりの偏極生成効率 (ビルドアップ率) の比較を示す。新規導入した 556 nm レーザーは、同じ光量で 3.3 倍の偏極生成効率を示すことが分かった。この理由は、一つにはパルス幅が短縮されたため (67 → 2.5 μs)、もう一つは上記の光吸収効率の違い (第 3 → 第 2 吸収ピーク) によるものと考えられる。さらに、556 nm レーザーは 514 nm レーザーの光量 (平均 1.1 W) の 5 倍弱にあたる平均 5 W の光量を出力できるため、偏極生成効率を 16 倍に向上することに成功した。

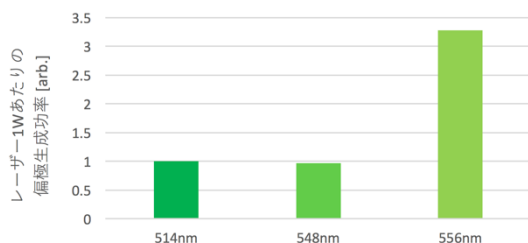


図 6: 異なる光源による偏極生成効率の比較

(2) 薄膜標的を用いた $p+^{12}\text{C}$ 共鳴散乱実験

① 加速器実験の遂行 (テスト実験)

低エネルギー偏極陽子固体標的の原理検証実験として、理化学研究所 RI ビームファクトリーにおける陽子-炭素 9 共鳴弾性散乱の偏極分解能測定実験が課題採択され、テスト実験を遂行した。実験目的は、陽子と炭素 9 の共鳴状態として生成される窒素 10 の核分光である。窒素 10 は陽子ドリップラインの外に位置する非束縛核であり、その質量ですら未知である。実験的情報が欠けている理由としては、共鳴状態のエネルギー幅が極めて広く、共鳴ピークを識別し難いことにあるが、断面積に加えてスピン非対称を測定することで互いに重なり合った状態の分解が可能になると期待される。認められたビームタイムは、低エネルギーの炭素 9 ビームの生成試験、及び窒素 10 分光法の開発のために使用した。また、実験の第一段階として、ポリエチレン標的を用いて微分断面積の試験測定を行った。実験は、2015 年 9 月に理研 RIBF の RIPS ビームラインにおいて遂行した。

② 炭素 9 ビーム生成

炭素 9 を生成するためには安定核の炭素 12 から 3 つの中性を除去する必要があるが、低エネルギーの 1~2 核子移行反応によるビーム生成は不可能である。従って、まず核子あたり数十 MeV の比較的高いエネルギーの核破砕反応を用いて炭素 9 ビームを生成し、5 MeV 程度まで減速させる必要がある。この過程でビームのエネルギー及び角度広がりが生じるため、これを最小化する手法を開発した。着目したのは、ビームを減速するための減衰板の材料として水素など軽い核を用いた方が同じエネルギー損失あたりの角度広がりを抑えられる、という効果である。理研 RIPS においては建設当初から長くアルミニウムによるくさび型減衰板が用いられてきたが、水素を多く含むポリエチレンでこれを置き換えることで、核子あたりのエネルギー 4.2 ± 0.8 MeV (σ)、水平/垂直位置広がり 23/11 mm、強度 25 kpps のビームを生成することに成功した。図 7 に炭素 9 ビームの核子あたりのエネルギー分布を示す。

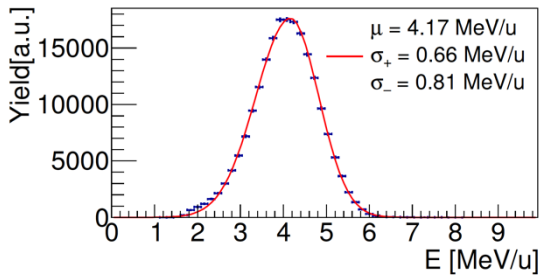


図 7: 炭素 9 ビームのエネルギー分布

③ Preliminary data

得られた励起関数 (断面積のエネルギー依存性) の Preliminary data を図 8 に示す。横軸は重心系における散乱角度である。得られた

微分断面積を再現するように、R 行列理論を用いて窒素 10 の共鳴状態のエネルギー及び幅を求めた。解析においては、理論的に予想される $2^-, 1^-, 2^+, 1^+$ の四つの共鳴状態の存在を仮定した。これにより、基底状態のエネルギー (すなわち質量) を含む窒素 10 の低励起準位構造の一部が解明された。結果は投稿論文として準備している。

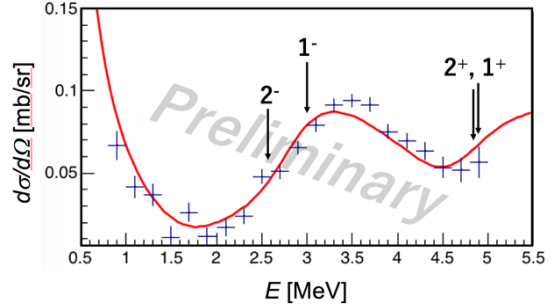


図 8: $p+^{12}\text{C}$ 共鳴弾性散乱の励起関数

(3) 大面積標的を用いた $p+^6\text{He}$ 弾性散乱実験

① 加速器実験の遂行 (本実験)

2016 年 6 月に、理研 RIBF の SAMURAI ビームラインにおいて、研究成果 (1) ③ において大面積化した偏極陽子固体標的を用いて、陽子-ヘリウム 6 弾性散乱の偏極分解能測定を遂行した。実験の目的は、ぼやけた密度分布を持つヘリウム 6 核と陽子の間に働くスピン軌道相互作用に、ヘリウム 6 の特異な表面構造が如何なる影響を与えるのか明らかにすることである。実験は、理研 RIBF の SAMURAI ビームラインにおいて、2016 年 6 月に 6 日間の期間、国内外 14 機関 62 名で遂行した。

実験セットアップを図 9 に示す。ヘリウム 6 ビームは、二次ビーム生成分離装置 BigRIPS のパラメータを注意深く設定し、さらに三重陽子を分離装置内でシールドすることで 90% 以上の高い純度・最大 1 MHz の高レートで生成された。偏極陽子固体標的を SAMURAI 磁気分析器の上流に設置し、ヘリウム 6 ビームを照射した。反跳陽子はビームラインの左右に設置した 2 組の陽子検出器システムで検出した。散乱ヘリウム 6 は、磁気分析器 SAMURAI を用いて運動量を測定した。磁気分析器内部にはヘリウムガスを充填し、物質量を減らすとともに磁気分析器の設計上最大の角度アクセプタンスを確保した。

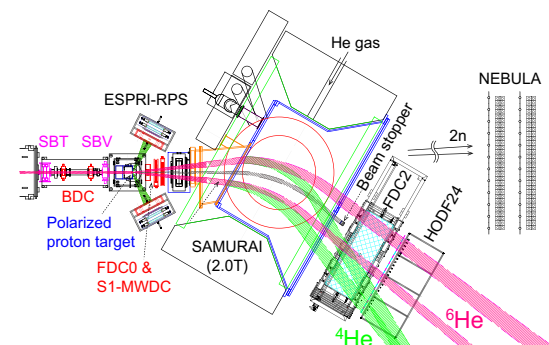


図 9: $p+^6\text{He}$ 弾性散乱実験セットアップ

②偏極標的の適用

実験にあたっては、(1)③で直径 24mm まで大面積化した偏極陽子固体標的を使用した。また、(1)④-2 で開発した新波長 (556nm) レーザからのパルス光を空間伝送し、マイクロ波と共に結晶に照射してスピン偏極を生成した。図 10 に偏極生成曲線・減衰曲線を示す。それぞれの時定数は、 $T_{B.U.}=1.2$ 時間及び $T_{Int.Relax.}=3.4$ 時間である。この値と、レーザー照射による緩和率の予想値 $T_{Las.Relax.}=4$ 時間から見積もられる偏極度は、

$P_e (T_{B.U.}^{-1} - T_{Int.Relax.}^{-1} - T_{Las.Relax.}^{-1}) / T_{B.U.}^{-1} = 30\%$ である。ここで、 P_e は電子偏極度 90% である。ただし、この値はレーザーが照射されている領域での偏極度であるため、全体の偏極度は $p^4\text{He}$ 弾性散乱実験の詳細な解析から評価する必要がある。

実験中に測定した偏極信号の強度の推移を図 11 に示す。偏極開始より 38 時間後から 600kpps、核子あたり 200MeV のヘリウム 6 ビームが照射され、放射損傷による若干の減偏極が見られる。また、67, 133 時間後には見かけ上の左右非対称をキャンセルするための偏極反転が行われた。上下の偏極方向について、同程度の偏極度が得られた。

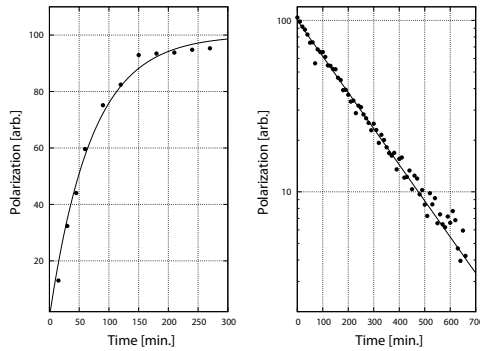


図 10: (左) 偏極生成曲線・(右) 緩和曲線

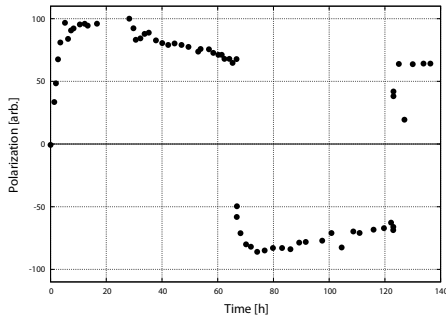


図 11: 実験中の偏極度の推移

③Preliminary data

実験で得られた $p^4\text{He}$, $p^6\text{He}$ 弾性散乱の微分断面積の Preliminary data を図 12 に示す。前者については、得られたデータは既存データとほぼ一致しており、検出器システム及び解析手法に問題ないことが確認された。後者についても、ヘリウム 6 のハロー構造を示す理論計算と概ね一致しており、予定していた統計量のデータが取得できていることを示している。また、スピン非対称の解析も進行中である。 $p^4\text{He}$ 散乱の解析結果から、標的の絶

対偏極度を導出し、 $p^6\text{He}$ 散乱の偏極分解能を決定する。

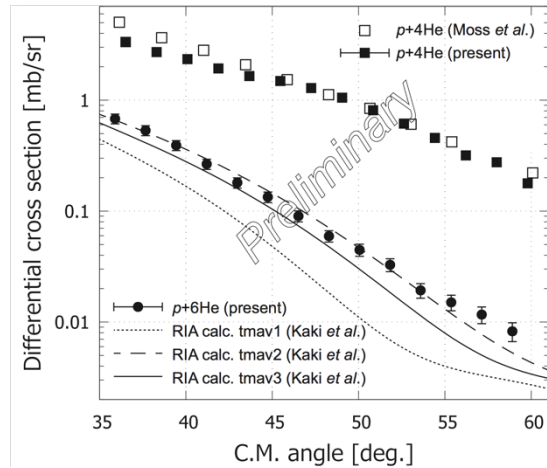


図 12: $p^4\text{He}$, $p^6\text{He}$ 弾性散乱断面積

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 S. Sakaguchi, T. Uesaka, T. Wakui, S. Chebotaryov, T. Kawahara, S. Kawase, E. Milman, T. L. Tang, K. Tateishi and T. Teranishi, “Studies of Unstable Nuclei with Spin-Polarized Proton Target”, International Journal of Modern Physics **40**, 1660071 (2016).

② T. Kawahara, S. Sakaguchi, K. Tateishi, T. L. Tang, and T. Uesaka, “Kinetic parameters of photo-excited triplet state of pentacene determined by dynamic nuclear polarization”, J. Phys. Soc. Jpn. **84**, 044005 (2015).

③ S. Sakaguchi, T. Uesaka, T. Kawahara, T. Ogawa, L. Tang, T. Teranishi, Y. Urata, S. Wada, and T. Wakui, “Proton polarization in photo-excited aromatic molecule at room temperature enhanced by intense optical source and temperature control”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B **317** (2013) 679–684.

④ T. Teranishi, S. Sakaguchi, T. Uesaka, H. Yamaguchi, S. Kubono, T. Hashimoto, S. Hayakawa, Y. Kurihara, D.N. Bihn, D. Kahl, Y. Wakabayashi, L.H. Khiem, P.V. Cuong, S. Watanabe, and A. Goto, “Resonant scattering experiments with radioactive nuclear beams - Recent results and future plans”, AIP Conference Proceedings **1525**, 552 (2013)

[学会発表] (計 14 件)

① S. Chebotaryov, S. Sakaguchi for SAMURAI13 Collaboration, “Elastic scattering of neutron-rich ${}^6\text{He}$ nuclei from polarized protons at 200 A MeV”, 22nd International Spin Symposium, 27 September 2016, University of Illinois.

② S. Sakaguchi for SAMURAI13 Collaboration, “Polarized proton target at SAMURAI: Elastic scattering of ${}^6\text{He}$ from polarized proton”, SAMURAI International Collaboration Workshop 2016, 5 September 2016, Kyushu University

③ S. Sakaguchi, “Recent and future development of polarized proton target”, Nuclear physics with Triplet-DNP technique and its application, Jan. 8, 2016.

④ S. Sakaguchi, “Elastic scattering with spin-polarized proton target”, Physics with Fragment Separators - 25th Anniversary of RIKEN-Projectile Fragment Separator (RIPS25), Shonan Village Center, 5-7 December 2015. (招待講演)

⑤ S. Sakaguchi, “Progress report on polarized target project at SAMURAI: Preparation status for experiment with polarized proton target (SAMURAI13)”, SAMURAI International Collaboration Workshop 2015, RIKEN Nishina Center, 7-8 September 2015.

⑥ S. Sakaguchi, “Solid polarized proton target in low magnetic field and at high temperature”, NOPTREX meeting, Nagoya University, July 27-28, 2015.

⑦ S. Sakaguchi, “Studies of unstable nuclei with spin-polarized proton target”, The 21st International Symposium on Spin Physics (SPIN2014), Beijing, China, October 20-24, 2014. (招待講演)

⑧ S. Sakaguchi, “Solid polarized proton target for radioactive ion beam experiments”, Fourth Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of APS and JPS, Hawaii, USA, October 7-11, 2014.

⑨ S. Sakaguchi, “Spin-asymmetry measurement in proton resonant scattering from unstable nuclei”, Direct Reactions with Exotic Beams (DREB2014), Darmstadt, Germany, 30 June - 4 July, 2014.

10. S. Sakaguchi et al., “Study of radioactive isotopes at low incident energy with solid polarized proton target”, The 2nd Conference on Advances in Radioactive Isotope Science (ARIS2014), University of Tokyo, June 1-6, 2014 (poster presentation).

11. 坂口 聡志, “陽子弾性散乱のアイソスピン空間への拡張で探る中性子スキン厚と状態方程式”, 九大分野横断型研究会 クォーク・原子核・中性子星を概観する, 九州大学, 2014年3月

12. S. Sakaguchi, “Study of Unstable Nuclei with Spin-polarized Protons”, Nuclear Physics Seminar, Institute for Basic Science, Daejeon, Korea, 19 Feb., 2014. (招待講演)

13. S. Sakaguchi, “Study of Unstable Nuclei with Spin-polarized Protons”, Nuclear Physics Seminar, Kyungpook National University, Daegu, Korea, 17 Feb., 2014. (招待講演)

14. S. Sakaguchi, “Preparation status of SAMURAI13 experiment”, SAMURAI International Workshop 2013, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan, 9 Sept., 2013.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

坂口 聡志 (SAKAGUCHI SATOSHI)
九州大学・大学院理学研究院・助教
研究者番号: 70569566

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

()