

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K05380

研究課題名(和文) 室温超偏極陽子を用いた新しい不安定核分光法の開発

研究課題名(英文) Development of new spectroscopy method for unstable nuclei using hyper-polarized protons at room temperature

研究代表者

坂口 聡志 (Sakaguchi, Satoshi)

九州大学・理学研究院・准教授

研究者番号：70569566

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：低エネルギー不安定核ビームを用いた直接反応核分光手法の実現のため、室温で動作する偏極陽子固体標的を開発した。C型電磁石、レーザー、マイクロ波、NMRなどのサブシステムを新たに立ち上げ、九州大学加速器・ビーム応用科学センターにおいて標的システムを構築した。また、理化学研究所において陽子-ヘリウム6弾性散乱の測定を行い、相対論的インパルス近似を用いた理論解析を通じてヘリウム6のコア領域の陽子及び中性子密度分布を導出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、自然界に300種類ほど存在する安定な原子核の構造研究に重要な役割を果たしてきたスピン偏極プロトンによる直接反応研究の手法を、数千種類あるとされる不安定な原子核の研究に適用するために、新たなスピン偏極技術による標的の開発を進めたものである。これにより、原子核が安定線から離れるにつれてどのように殻構造が変容するか、直接的に調べることが可能となり、核図表の広範な領域で普遍的に成り立つ原子核構造の描像の成立に寄与するものである。

研究成果の概要(英文)：A solid polarized proton target working at a room temperature was developed to realize the nuclear spectroscopy with direct reactions utilizing low-energy radioactive-ion beams. The target system was constructed at Kyushu University Center for Accelerator and Beam Applied Science. The system consists of a C-type electromagnet, a laser subsystem, a microwave circuit and an NMR subsystem. In addition, the elastic scattering of protons from ${}^6\text{He}$ was measured at RIKEN. The proton and neutron density distributions in the core region was extracted via the theoretical analysis using the relativistic impulse approximation.

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 共鳴散乱 偏極分解能

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

現在の原子核物理の最も重要なテーマの一つは、不安定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である。そのための有力な手法は、直接反応により一粒子軌道の情報を得る「直接反応核分光法」である。安定核に対しては、20 MeV/A 程度の入射エネルギーにおける偏極陽子・重陽子などの軽イオンビームによる一核子移行反应用いた研究が進められてきたが、不安定核には未適用である。また、これらの方法と並んで共鳴弾性散乱による手法も有望であるが、安定線から非常に遠い核における共鳴状態は、幅が広く互いに重なり合っており、非偏極データのみでは共鳴パラメータを決め難く、ブレイクスルーが求められる状況にあった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、低エネルギー核反応に適用可能な偏極陽子固体標的を開発することである。手法としては、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る。特に、物質量を制限する必要のある低エネルギー実験への適用のため、室温で高い偏極度を得ることが不可欠である。このため、新規レーザーを用いた偏極手法の改良により、偏極成功率の増大も試みる。

3. 研究の方法

(1) 室温偏極陽子固体標的の開発

スピン偏極軸の定義のための電磁石、電子偏極を生成するためのパルスレーザー照射系、電子偏極を陽子偏極に移行するためのマイクロ波システム、陽子偏極の測定のための NMR システムなどのサブシステムを組み合わせた室温偏極陽子固体標的を開発する。試料にはペンタセン分子をドーブした p-タフェニル結晶を用いる。また、偏極成功率のレーザー波長依存性を測定し、室温における高偏極度化のための基礎研究を行う。

(2) 陽子⁶He 弾性散乱の測定およびヘリウム 6 の物質分布の導出

理化学研究所 RIBF にて供給される大強度ヘリウム 6 ビームを偏極陽子固体標的陽子に照射し、陽子弾性散乱を高い運動量移行領域(すなわち散乱角度の後方領域)まで測定する。ヘリウム 6 の持つ陽子密度分布及び中性子密度分布を導出し、特にそのコア領域の構造を議論する。

4. 研究成果

(1) 室温偏極陽子固体標的の開発

以下のサブシステムからなる室温偏極陽子固体標的を、九州大学伊都キャンパスの加速器・ビーム応用科学センターの放射線管理区域内にて開発、構築した。

電磁石

高エネルギー加速器研究機構より、最大磁場 0.5 T を発生させることのできる C 型電磁石(タカノ技研、磁極間隔 80 mm、磁極直径 200 mm)を九州大学に移設し、通電・通水し、励磁試験を行なった。また、磁場分布の一様性の測定を行ない、偏極標的の可偏極部分の全領域に渡って十分な磁場強度の一様性が保たれていることを確認した。

レーザーシステム

高エネルギー加速器研究機構より、532 nm の波長の光を発生させることのできるレーザー(Coherent 社 Verdi-5W)を移設し、動作を確認した(図 1 左)。レーザーの立ち上げ、光学系の構築、オプティカルチョッパーを用いたパルス化、遮光環境の構築、標的領域への照射試験を行ない、レーザー系の構築を完了した。

また、上記のレーザーとは別に、理化学研究所において、新波長レーザーの導入による偏極生成効率の増大に関する基礎研究を遂行した。従来の 514 nm や 532 nm の波長レーザーに比べてペンタセン分子が吸収しやすい波長(556 nm)を持ち、大きなパルス強度(1 mJ)・平均光量(3 W)を有する新レーザーを導入した。これにより、514 nm の場合と比較して、同じ平均光量あたりで 3.3 倍、最大光量で 8.9 倍の偏極生成効率の増大に成功した。

マイクロ波システム

マイクロ波の発振器、および回路診断装置を兼ねるネットワークアナライザー(HP 社 8719D)を整備し、マイクロ波アンプ(L3 Narda ATM, S1517D)、PIN スイッチ、サーキュレータ等と組み合わせマイクロ波回路を構築し、回路全体の整合を調整した。

NMR システム

東京大学 CNS より RF アンプなどの関連装置を移設し、偏極標的システムに組み込んだ。組み込みの際には、ファンクションジェネレータを 2 台同期させ、移設した RF アンプに対するトリガー信号及びゲート信号回路を構築した。また、複数の可変コンデンサを用いたチューナー回路、及び NMR コイルを製作した。コイルホルダーの製作には 3D プリンターを活用した。デュプレクサーを導入して NMR 回路を組み、8.4 MHz の RF 波に対する回路の整合を取った。硫酸銅を混入させた水試料に 0.2 T の静磁場を印加し、減衰時間 200 マイクロ秒程度の陽子スピンの信号を観測することに成功した(図 1 右)。

図1中央に、九州大学にて構築した室温偏極陽子固体標的の外観を示す。本システムは、九大加速器・ビーム応用科学センターのタンデム加速器からのビームにより実証試験を行なった後、理化学研究所 RIPS ビームラインにおける陽子共鳴散乱実験に適用する。



図1 室温偏極陽子固体標的@九州大学。左：レーザー、中央：全システム、右：陽子 NMR 信号

(2)陽子- ^6He 弾性散乱の測定およびヘリウム6の物質分布の導出

理化学研究所 RI ビームファクトリーにおいて、本課題で開発中の偏極陽子固体標的を用いた加速器実験を遂行した。目的は、陽子-ヘリウム6間のスピン軌道相互作用を明らかにすることである。実験は SAMURAI ビームラインにおいて、14 機関、62 名のコラボレーションで遂行した。図2に実験セットアップを示す。図の左方向から偏極陽子固体標的にヘリウム6ビームを照射し、散乱されたヘリウム6粒子を磁気スペクトロメータ SAMURAI で分析し、同時に左右に反跳された陽子を反跳陽子検出器 ESPRI-RPS で検出し、これらの同時計数から弾性散乱事象を選択し、微分散乱断面積及び偏極分解能を得た。図3に本実験で用いた偏極陽子固体標的の写真を示す。

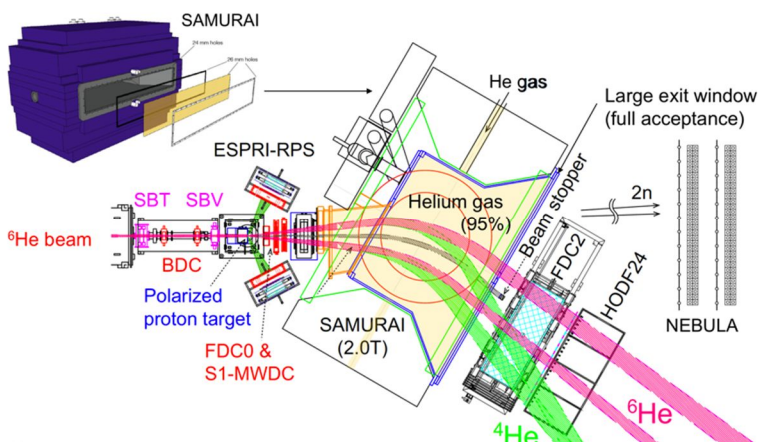


図2 p - ^6He 弾性散乱測定@200MeVの実験セットアップ

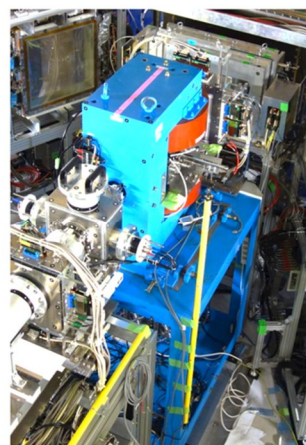


図3 偏極陽子固体標的

得られたデータ(図4)は、既存のデータと比べて非常に高い運動量移行領域($1.7\text{--}2.7\text{ fm}^{-1}$)をカバーしており、原理的に原子核内部の密度分布を反映していると推察できる。相対論的インパルス近似を用いた理論解析を通じてヘリウム6核の内部に存在するコアの分布に関する情報を得ることに成功した。得られたコアの分布は、レーザー核分光による荷電分布半径の測定と誤差の範囲内で一致し、核の中心付近での中性子分布が陽子分布と似た形状、すなわちヘリウム4的なコアであることが示された(図5(c))。結果を投稿論文として発表した[1]。

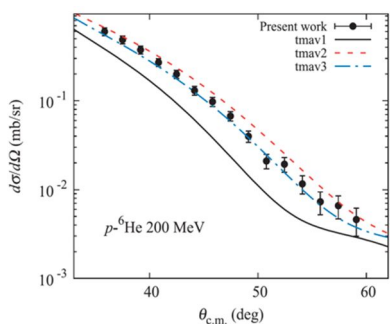


図4 p - ^6He 微分散乱断面積

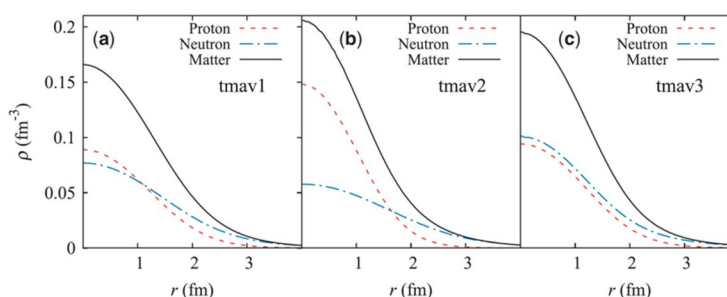


図5 ^6He の陽子・中性子・核子の密度分布

<引用文献>

[1] S. Chebotaryov, S. Sakaguchi, et al., Prog. Theor. and Exp. Phys. 5, 053D01(2018).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件(うち査読付論文 9件/うち国際共著 10件/うちオープンアクセス 3件)

1. 著者名 S. Chebotaryov, S. Sakaguchi (62人中2番目), et al.	4. 巻 5
2. 論文標題 Proton elastic scattering at 200 A MeV and high momentum transfers of 1.7-2.7 fm ⁻¹ as a probe of the nuclear matter density of 6He	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 053D01
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1093/ptep/pty048	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 J. Yasuda, M. Sasano, S. Sakaguchi (60人中39番目), et al.	4. 巻 121
2. 論文標題 Extraction of the Landau-Migdal Parameter from the Gamow-Teller Giant Resonance in 132 Sn	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Lett.	6. 最初と最後の頁 132501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.121.132501	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 T. Wakasa, S. Sakaguchi (7人中7番目), et al.	4. 巻 8
2. 論文標題 Neutron production cross sections for (d,n) reactions at 55 MeV	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Prog. Theor. Exp. Phys.	6. 最初と最後の頁 083D01
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1093/ptep/ptx099	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 T. Wakasa, S. Sakaguchi (20人中16番目), et al.	4. 巻 96
2. 論文標題 Cross sections and analyzing powers for (p,np) reactions of 2H, 6Li, and 12C and 296 MeV	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Phys. Rev. C	6. 最初と最後の頁 14604
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevC.96.014604	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 S. Noji, S. Sakaguchi (30人中22番目), et al.	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Excitation of the Isovector Spin Monopole Resonance via the Exothermic $90\text{Zr}(12\text{N}, 12\text{C})$ Reaction at 175 MeV/u	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Lett.	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 K. Sekiguchi, S. Sakaguchi (31人中19番目), et al.	4. 巻 96
2. 論文標題 Complete set of deuteron analyzing powers from dp elastic scattering at 190 MeV/nucleon	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Phys. Rev. C	6. 最初と最後の頁 64001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevC.96.064001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 S. Adachi, S. Sakaguchi (39人中28番目), et al.	4. 巻 97
2. 論文標題 Systematic analysis of inelastic alpha scattering off self-conjugate $A=4n$ nuclei	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Phys. Rev. C	6. 最初と最後の頁 14601
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevC.97.014601	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 S. Kawase, S. Sakaguchi (51人中32番目), et al.	4. 巻 97
2. 論文標題 Exclusive quasi-free proton knockout from oxygen isotopes at intermediate energies	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Prog. Theor. Exp. Phys.	6. 最初と最後の頁 14601
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1093/ptep/pty011	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 J. Yasuda, M. Sasano, R.G.T. Zegers, S. Sakaguchi et al.	4. 巻 376
2. 論文標題 Inverse kinematics (p,n) reactions studies using the WINDS slow neutron detector and the SAMURAI spectrometer	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B	6. 最初と最後の頁 393-396
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nimb.2016.02.007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 S. Chebotaryov, S. Sakaguchi et al.	4. 巻 49
2. 論文標題 Dependence of spin-polarized proton target performance on microwave resonator thickness parameter and operation temperature	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 RIKEN Accel. Prog. Rep.	6. 最初と最後の頁 174
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 E. Milman, T. Teranishi, S. Sakaguchi et al.	4. 巻 49
2. 論文標題 Production of low-energy 4.17 MeV/nucleon ⁹ C beam with polyethylene degrader at RIPS	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 RIKEN Accel. Prog. Rep.	6. 最初と最後の頁 160
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 V. Panin, S. Chebotaryov, S. Sakaguchi et al.	4. 巻 49
2. 論文標題 Development of the He-filling system for the SAMURAI spectrometer	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 RIKEN Accel. Prog. Rep.	6. 最初と最後の頁 168
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 S. Sakaguchi
2. 発表標題 Elastic scattering of 6He from polarized proton at 200 A MeV
3. 学会等名 10th International Conference on Direct Reactions with Exotic Beams (DREB2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Sakaguchi
2. 発表標題 Proton elastic scattering from 6He at 200 A MeV measured with polarized proton target for RI-beam experiments
3. 学会等名 The IX International Symposium on EXotic Nuclei (EXON-2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Sakaguchi
2. 発表標題 Elastic scattering of polarized protons from 6He at 200 A MeV
3. 学会等名 13th International Conference on Nucleus-Nucleus Collisions (NN2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Sakaguchi
2. 発表標題 Elastic scattering of polarized proton from 6He
3. 学会等名 SAMURAI International Collaboration Workshop 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Sakaguchi for SAMURAI13 Collaboration
2. 発表標題 Polarized proton target at SAMURAI: Elastic scattering of ^6He from polarized proton
3. 学会等名 SAMURAI International Collaboration Workshop 2016 (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 S. Chebotaryov, S. Sakaguchi for SAMURAI13 Collaboration
2. 発表標題 Status of data analysis from experiment on p- ^6He elastic scattering at 200 MeV/nucleon
3. 学会等名 日本物理学会 第72回年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Chebotaryov, S. Sakaguchi for SAMURAI13 Collaboration
2. 発表標題 Experiment on elastic scattering of polarized protons from neutron-rich ^6He isotopes at 200 MeV/nucleon
3. 学会等名 日本物理学会 2016年秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 E. Milman, T. Teranishi, S. Sakaguchi for RRC27 Collaboration
2. 発表標題 Search for low-lying resonances in ^{10}N structure via $^9\text{C} + \text{p}$ resonant scattering
3. 学会等名 日本物理学会 2016年秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 S. Chebotaryov, S. Sakaguchi for SAMURAI13 Collaboration
2. 発表標題 Elastic scattering of neutron-rich 6He nuclei from polarized protons at 200 A MeV
3. 学会等名 22nd International Spin Symposium (国際学会)
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	寺西 高 (Teranishi Takashi) (10323495)	九州大学・理学研究院・准教授 (17102)	