
超低速ミュオン顕微鏡が拓く物質・生命・素粒子科学のフロンティア

2307

**平成23年度～平成27年度科学研究費助成事業
(科学研究費補助金)(新学術領域研究(研究領域提案型))研究成果報告書**

平成29年6月

領域代表者 鳥養 映子

山梨大学大学院総合研究部教授

<はしがき>

超低速ミュオン顕微鏡 (Ultra Slow Muon Microscope: USMM) は、本研究の共通基盤装置として、茨城県東海村の高強度陽子加速器実験施設 (J-PARC) 物質・生命科学実験施設 (MLF) において開発中の量子ビーム実験装置である。表面から約百ナノメートルの深さまでをナノメートル分解能で探る超低速ミュオンビームと、物質内部をマイクロメートルの分解能で3次元的に探るミュオンマイクロビームから構成されている。

本研究の目的は、超低速ミュオン顕微鏡の開発により物質内部の新しいイメージング法を確立し、多様な物理・化学・生命現象の発現機構を、スピン時空相関という概念を導入して理解する新しい学術領域を開拓することにある。

スピン偏極した正ミュオンは、物質に止まり崩壊する際の陽電子放出の異方性とその時間変化により、電子状態・スピン状態を微視的、かつ、高感度に検出する。超低速ミュオンは、熱エネルギーミュオニウム (正ミュオンと電子からなる水素状原子) のレーザー共鳴イオン化によって得られるエネルギーの揃ったビームである。深さ方向にナノメートルオーダーの局所性と走査性を持つ超低速ミュオンビームにより、界面のスピン伝導や触媒反応、表面・バルク境界のヘテロ電子相関などの機構を微視的に解明する、新たな超低速ミュオン科学領域を拓く。さらにこれを再加速先鋭化することにより高密度ミュオンマイクロビームを創り、極微量試料の観測や、物質深部をマイクロメートルオーダーのビームサイズで三次元マッピングする機能の完成を目指す。ミュオンマイクロビームは、生命科学においても生体の空間イメージングなどの新たな可能性を拓く。加えて、さらなるビームの低温化・尖鋭化により、「標準理論」を越える素粒子/基礎物理のフロンティアを推進する。この2つの新しい量子ビームを用いた顕微法により、大強度陽子加速器施設 (J-PARC) に物質・生命・素粒子基礎物理研究の世界的研究拠点を構築する。

本領域では、研究期間の前半で共通基盤装置の超低速ミュオン顕微鏡を開発し、後半でこれを用いた新たな学術領域の開拓を目指した。後半の3年間は、加速器施設の事故等による再三の長期運転停止のため、超低速ミュオン利用実験の開始には至らなかったが、平成28年2月21日 (ビーム再開の翌日) に、超低速ミュオン発生に成功した。最高のエネルギー分解能 (30eV) が実証され、深さ方向にナノメートルの分解能での連続走査性能が現実のものとなった。実用強度達成に向けたビーム最適化とレーザー増強が進められており、超低速ミュオン発生数 (検出器の効率補正後毎秒約200個) の世界記録を更新中である。単結晶にかわるレーザー媒質として、実用サイズのNd:YAGセラミックスの開発に成功し、長期間安定したライマン α レーザー光を連続発振している。さらに世界に前例のない低エネルギーミュオン加速のために、インダクション加速装置を設計開発し、ミュオン波動性の直接観測とミュオン干渉顕微鏡への道を拓いた。さらなる超冷化のために、レーザーによる高精度微細穴加工を施したシリカエアロゲルを用いて、高い収量を持つ常温ミュオニウム標の開発に成功した。

一方、物質・生命の研究者らは、周辺実験装置開発や、試料作成・評価などの準備と並行

して、ビーム停止期間に国内外の既存のミュオン実験施設や、相補的な研究手段等による予備実験を進め、磁性、超伝導、半導体、電池材料に加えて、触媒化学や生命科学などこれまで未開拓の分野においても、超低速ミュオンによる実験に向けた基礎データを蓄積し、理論と実験の密接な協力による測定原理の理解も進んだ。これらの実績を踏まえて、さまざまな分野において、この夢の量子ビームへの国際的な期待が高まっている。

施設側では、ビーム供給の遅れに配慮して、本研究プロジェクトによるビーム占有期間の2年間延長（平成31年3月まで）の申請を、課題採択委員会及び施設利用委員会で公式に承認した。ミッション達成に向けて、本新学術領域の研究体制を維持して研究活動を進めているところである。

これまでに得られた研究成果をここに報告申し上げる。

研 究 組 織

【計画研究】

領域代表者：鳥養 映子（山梨大学・大学院総合研究部・教授）

【計画研究 X00：総括班】

研究代表者：鳥養 映子（山梨大学・大学院総合研究部・教授）

研究分担者：三宅 康博（大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・教授）

研究分担者：門野 良典（大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・教授）

研究分担者：岩崎 雅彦（国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器科学研究センター・主任研究員）

連携研究者：西田 信彦（公益財団法人豊田理化学研究所・その他部等・フェロー）

連携研究者：秋光 純（岡山大学・特任教授）

連携研究者：杉山 純（豊田中央研究所・分析部・主監）

連携研究者：永嶺 謙忠（9独立行政法人理化学研究所・主任研究員研究室等・客員研究員）

連携研究者：齋藤 直人（大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・J-PARC センター・教授）

【計画研究 A01：超低速ミュオン顕微鏡】

研究代表者：三宅 康博（大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・教授）

研究分担者：PATRICK Strassr（大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・研究機関講師）

研究分担者：石田 勝彦（国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器研究センター・副主任研究員）

研究分担者：髙本 亘（国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門・先端基礎研究センター・研究主幹）

連携研究者：牧村 俊助（大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・技師）

連携研究者：松田 恭幸（東京大学・大学院総合文化研究科・准教授）

連携研究者：久我 隆弘（東京大学・大学院総合文化研究科・教授）

連携研究者：藤森 寛（大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・前任技師）

連携研究者：西山 樟生（大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・その他部局等・名誉教授）

連携研究者：芳賀 芳範（国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門・先端基礎研究センター・研究主幹）

連携研究者：網塚 浩（北海道大学・理学(系)研究科(研究院)・教授）

連携研究者：加藤 礼三（国立研究開発法人理化学研究所・加藤分子物性研究室・主任研究員）

連携研究者：中村 惇平（大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・准技師）

連携研究者：二宮 和彦（大阪大学・大学院理学研究科・助教）

連携研究者：伊藤 孝（国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門・先端基礎研究センター・研究員）

連携研究者：小林 庸男（大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・技師）

連携研究者：池戸 豊（大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・技師）

連携研究者：妹尾 仁嗣（国立研究開発法人理化学研究所・古崎物性理論研究室・専任研究員）

連携研究者：藪内 敦（京都大学・原子炉実験所・助教）

連携研究者：山内 一宏（佐賀大学・工学(系)研究科(研究院)・助教）

連携研究者：足立 泰平（大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・博士研究員）

【計画研究 A02：界面のスピン伝導と反応】

研究代表者：鳥養 映子（山梨大学・大学院総合研究部・教授）

研究分担者：朝倉 清高（北海道大学・触媒科学研究所・教授）

研究分担者：杉山 純（豊田中央研究所・分析部・主監）

研究分担者：菅原 洋子（北里大学・理学部・教授）

研究分担者：下村 浩一郎（大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・准教授）

研究分担者：吉野 淳二（東京工業大学・理工学研究科・教授）

研究分担者：永嶺 謙忠（国立研究開発法人理化学研究所・主任研究員研究室等・客員研究員）

研究分担者：新村 信雄（茨城大学・フロンティア応用原子力科学研究センター・特命研究員）

研究分担者：金 秀光（大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・特別助教）

連携研究者：前川 禎通（国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センター・センター長）

連携研究者：渡辺 政廣（山梨大学・燃料電池ナノ材料研究センター・特命教授）

連携研究者：金谷 利治（大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・教授）

連携研究者：菅野 了次（東京工業大学・総合理工学研究科・教授）

連携研究者：常行 真司（東京大学・理学系研究科・教授）

連携研究者：笠井 秀明（独立行政法人国立高等専門学校機構明石工業高等専門学校・校長）

連携研究者：中西 寛（大阪大学・大学院工学研究科・助教）

連携研究者：池田 正二（東北大学・国際集積エレクトロニクス研究開発センター・教授）

連携研究者：野崎 洋（豊田中央研究所・分析部・主任研究員）

連携研究者：原田 雅史（豊田中央研究所・分析部研究室・主任研究員）

連携研究者：高阪 勇輔（広島大学・理学研究科・特任助教）

連携研究者：川浦 宏之（豊田中央研究所・分析部・主任研究員）

連携研究者：楠木 正巳（山梨大学・総合研究部・教授）

協力研究者：Amba Datt Pant（大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・博士研究員）

【計画研究 A03：表面－バルク境界領域のヘテロ電子相関】

研究代表者：門野 良典（大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・教授）

研究分担者：西田 信彦（公益財団法人豊田理化学研究所・フェロー）

研究分担者：橋詰 富博（東京工業大学・理工学研究科・連携教授）

研究分担者：小池 洋二（東北大学・大学院工学研究科・教授）

研究分担者：井上 克也（広島大学・大学院理学研究科・教授）

研究分担者：小嶋 健児（大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・准教授）

研究分担者：幸田 章宏（大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・研究機関講師）

研究分担者：足立 匡（上智大学・理工学部・准教授）

連携研究者：永長 直人（東京大学・大学院工学系研究科・教授）

連携研究者：内藤 方夫（東京農工大学・工学部・教授）

連携研究者：秋光 純（岡山大学・理学部・特任教授）

連携研究者：藤森 淳（東京大学・大学院理学系研究科・教授）

連携研究者：平田 和人（物質・材料研究機構・環境・エネルギー材料部門・グループリーダー）

連携研究者：竹屋 浩幸（物質・材料研究機構・ナノフロンティア超伝導材料グループ・主席研究員）

連携研究者：大熊 哲（東京工業大学・理工学研究科・教授）

連携研究者：井澤 公一（東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授）

連携研究者：金子 真一（東京工業大学・理学部・助教）

連携研究者：壬生 攻（名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授）

連携研究者：岸根 順一郎（放送大学・教養学部・教授）

連携研究者：山本 秀樹（NTT 物性科学基礎研究所・機能物質科学研究部・部長）

【計画研究 A04：物質創成の原理を極める超冷却と尖鋭化】

研究代表者：岩崎 雅彦（国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器研究センター・主任研究員）

研究分担者：中嶋 隆（京都大学・エネルギー理工学研究所・准教授）

研究分担者：河村 成肇（大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・講師）

研究分担者：三部 勉（大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授）

研究分担者：和田 智之（国立研究開発法人理化学研究所・光量子工学研究領域・グループディレクター）

研究分担者：斎藤 徳人（国立研究開発法人理化学研究所・光量子工学研究領域・上級研究員）

連携研究者：齊藤 直人（大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授）

連携研究者：横山 幸司（Queen Mary University of London・Physics Department・Post-doctoral Research Assistant）

連携研究者：松崎 禎市郎（国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器研究センター・チームリーダー）

連携研究者：友野 大（大阪大学・核物理研究センター・教務補佐員）

連携研究者：岡田 信二（国立研究開発法人理化学研究所・東原子分子物理研究室・協力研究員）

連携研究者：大石 裕（大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・特別准教授）

【公募研究】

研究代表者：林崎 規託（東京工業大学・原子炉工学研究所・准教授）

研究代表者：長友 傑（国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器研究センター・技師）

研究代表者：妹尾 仁嗣（国立研究開発法人理化学研究所・古崎物性理論研究室・専任研究員）

研究代表者：関場 大一郎（筑波大学・数理物質科学研究科・講師）

研究代表者：佐藤 朗（大阪大学・理学研究科・助教）

研究代表者：森 道康（国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センター・研究主幹）

研究代表者：吉田 光宏（大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・准教授）

研究代表者：圓谷 貴夫（国立研究開発法人物質・材料研究機構・若手国際研究センター・ICYS 研究員）

研究代表者：有賀 寛子（海道大学・触媒化学研究所・助教）

研究代表者：福谷 克之（東京大学・生産技術研究所・教授）

研究代表者：高阪 勇輔（広島大学・理学研究科・特任助教）

研究代表者：伊藤 孝（国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センター・研究員）

研究代表者：斎藤 峯雄（金沢大学・数物科学系・教授）

研究代表者：竹中 康司（名古屋大学・工学研究科・教授）

研究代表者：清谷 多美子（昭和薬科大学・薬学部・助教）

研究代表者：大石 一城（一般財団法人総合科学研究機構・東海事業センター・グループリーダー）

研究代表者：梅垣 いづみ（株式会社豊田中央研究所・分析部量子ビーム解析研究室副研究員）

研究代表者：壬生 攻（名古屋工業大学・工学研究科・教授）

研究代表者：岸根 順一郎（放送大学・教養学部・教授）

研究代表者：一杉 太郎（東京工業大学・物質理工学院・教授）

研究代表者：松浦 弘泰（東京大学・理学系研究科・助教）

研究代表者：後藤 貴行（上智大学・理工学部・教授）

研究代表者：大江 純一郎（東邦大学・理学部・准教授）

交付決定額（配分額）

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
平成23年度	274,900,000	82,470,000	357,370,000
平成24年度	234,900,000	70,470,000	305,370,000
平成25年度	246,600,000	73,980,000	320,580,000
平成26年度	243,800,000	73,140,000	316,940,000
平成27年度	152,300,000	45,690,000	197,990,000
総計	1,152,500,000	345,750,000	1,498,250,000

研究発表

（1） 雑誌論文

領域全体の発表論文等総数は365編である。主な論文を計画研究班ごとに挙げる（計画研究の見出しの横に各班の発表論文総数をカッコ書きで示す）。研究代表者には二重下線、研究分担者には一重下線、連携研究者には点線の下線を付し、corresponding author を著者名の左肩に*印で示す。

● A01 班（81編）

- *Go Yoshida, Kazuhiko Ninomiya, Makoto Inagaki, Wataru Higemoto, Naritoshi Kawamura, Koichiro Shimomura, Yasuhiro Miyake, Taichi Miura, Michael Kenya Kubo, Atsushi Shinohara, “Chemical Environmental Effects on Muon Transfer Process in Low Pressure Mixture Gases: H₂+CO and H₂+CO₂”, RADIOISOTOPES, 査読有, 65 (2016) 113-11.
- *K. Ninomiya, M. Inagaki, M. K. Kubo, T. Nagatomo, W. Higemoto, N. Kawamura, P. Strasser, K. Shimomura, Y. Miyake, S. Sakamoto, A. Shinohara, T. Saito, “Negative muon induced elemental analysis by muonic X-ray and prompt gamma-ray measurements”, J. Radioanal. Nucl. Chem., 査読有, 309 (2016) 65-69.
- *H.A. Torii, Y. Higashi, T. Higuchi, Y. Matsuda, T. Mizutani, M. Tajima, K.S. Tanaka, Y. Ueno, Y. Fukao, H. Iinuma Y. Ikedo, R. Kadono, N. Kawamura, A. Koda, K.M. Kojima, T. Mibe, Y. Miyake, K. Nagamine, K. Nishiyama, T. Ogitsu, et. al., “High-Precision Microwave Spectroscopy of Muonium for Determination of Muonic

- Magnetic Moment”, Spin Physics (SPIN2014) International Journal of Modern Physics:Conference Series, 査読有, 40 (2016) 1660076-1-6.
4. *Z. Xu, B. Gu, M. Mori, T. Ziman, and S. Maekawa, "What determines the sign of the spin Hall effects in Cu alloys doped with 5d elements? ", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 査読有, 400 (2016) 184-187.
 5. *T. Tsumuraya, H. Seo, R. Kato, and T. Miyazaki, "First-Principles Study of Hydrogen-Bonded Molecular Conductor κ -H3(Cat-EDT-TTF/ST)2", Physical Review B, 査読有, 92 (2015) 035102/1-9.
 6. *T. Tohyama, K. Tsutsui, M. Mori, S. Sota, and S. Yunoki, "Enhanced Charge Excitations in Electron-Doped Cuprates by Resonant Inelastic X-Ray Scattering", Physical Review B, 査読有, 92 (2015) 014515/1-8.
 7. *Makoto Inagaki, Kazuhiko Ninomiya, Kazuya Fujihara, Go Yoshida, Yoshitaka Kasamatsu, Michael K. Kubo, Wataru Higemoto, Naritoshi Kawamura, Takashi Nagatomo, Yasuhiro Miyake, Taichi Miura, and Atsushi Shinohara, “Muonic Atom Formation by Muon Transfer Process in C6H6 or C6H12 and CCl4 Mixtures” , JPS Conference Proceedings, 査読有, 8 (2015) 033004-1-6.
 8. *Takahito Osawa, Kazuhiro Ninomiya, Go Yoshida, Makoto Inagaki, Kenya M. Kubo, Naritoshi Kawamura, and Yasuhiro Miyake, “Elemental Analysis System with Negative-Muon Beam” , JPS Conference Proceedings, 査読有, 8 (2015) 025003-1-6.
 9. *Kazuhiro Ninomiya, Michael K. Kubo, Patrick Strasser, Takashi Nagatomo, Yoshio Kobayashi, Katsuhiko Ishida, Wataru Higemoto, Naritoshi Kawamura, Koichiro Shimomura, Yasuhiro Miyake, Takao Suzuki, Atsushi Shinohara, and Tsutomu Saito, “Elemental Analysis of Bronze Artifacts by Muonic X-ray Spectroscopy” , JPS Conference Proceedings, 査読有, 8 (2015) 033005-1-6.
 10. *Taihei Adachi, Yutaka Ikedo, Atsushi Yabuuchi, Patrick Strasser, Kenji M. Kojima, Shunsuke Makimura, Jumpei Nakamura, Koichiro Shimomura, Yasuhiro Miyake, Takashi Nagatomo, Wataru Higemoto, Eiko Torikai, “Tuning of the ultra slow muon beamline by utilizing ionized hydrogen” , PoS, 査読有, NuFACT2014 (2015) 097(1-4).
 11. *Masatoshi Arai, Masatoshi Futakawa, Hiroshi Takada, Katsuhiko Haga, Shin-ichiro Meigo, Yasuhiro Miyake, Masahide Harada, Kenji Nakajima, Ryoichi Kajimoto, Mitsutaka Nakamura, Kentaro Suzuya, Kaoru Shibata, Jun-ichi Suzuki, Shinichi Takata, Takeshi Nakatani, Yasuhiro Inamura, Tatsuya Nakamura, Takayuki Oku, Kazuya Aizawa, Kazuhiko Soyama, and Yukinobu Kawakita, “Present Status of the Materials & Life Science Experimental Facility of J-PARC” ,

JPS Conference Proceedings, 査読有, 8 (2015) 036021-1-10.

12. *Motonobu Tampo, Kouji Hamada, Naritoshi Kawamura, Makoto Inagaki, Takashi U. Ito, Kenji M. Kojima, Kenya M. Kubo, Kazuhiko Ninomiya, Patrick Strasser, Go Yoshida, and Yasuhiro Miyake, “The Development of a Non-Destructive Analysis System with Negative Muon Beam for Industrial Devices at J-PARC MUSE ” , JPS Conference Proceedings, 査読有, 8 (2015) 036016-1-6.

13. *R. Kitamura, G. Beer, K. Ishida, M. Iwasaki, S. Kanda, H. Kawai, N. Kawamura, W. Lee, S. Lee, G. M. Marshall, Y. Matsuda, T. Mibe, Y. Miyake, S. Nishimura, Y. Oishi, S. Okada, A. Olin, M. Otani, N. Saito, K. Shimomura, et. al., “Studies on Muonium Production from Silica Aerogel with Substructure for the Muon $g-2$ /EDM Experiment” , JPS Conference Proceedings, 査読有, 8 (2015) 025016-1-6.

14. *Yohei Nakatsugawa, Masaharu Aoki, Doug Bryman, Masanori Ikegami, Yoshiro Irie, Shintaro Ito, Naritoshi Kawamura, Michikazu Kinsho, Hitoshi Kobayashi, Shunsuke Makimura, Hiroshi Matsumoto, Shin-ichiro Meigo, Tsutomu Mibe, Satoshi Mihara, Yasuhiro Miyake, Hiroaki Natori, Hajime Nishiguchi, Toshio Numao, Chihiro Ohmori, Stefan Ritt, et. al., “Silicon Carbide Target for a Muon-Electron Conversion Search at J-PARC MLF” , JPS Conference Proceedings, 査読有, 8 (2015) 025013-1-5.

15. *S. Kanda, M. Aoki, Y. Fukao, Y. Higashi, T. Higuchi, H. Iinuma, Y. Ikedo, K. Ishida, M. Iwasaki, R. Kadono, O. Kamigaito, D. Kawall, N. Kawamura, A. Koda, K. M. Kojima, K. Kubo, Y. Matsuda, T. Mibe, Y. Miyake, T. Mizutani, et. al., “Precision Measurement of Muonium Hyperfine Splitting at J-PARC and Integrated Detector System for High-intensity Pulsed Muon Beam Experiment” , JPS Conference Proceedings 査読有, 8 (2015) 025006-1-6.

16. *Shunsuke Makimura, Naritoshi Kawamura, Satoshi Onizawa, Yukihiro Matsuzawa, Masato Tabe, Yasuo Kobayashi, Ryo Shimizu, Hiroshi Fujimori, Yutaka Ikedo, Ryosuke Kadono, Akihiro Koda, Kenji M. Kojima, Kusuo Nishiyama, Jumpei Nakamura, Koichiro Shimomura, Patrick Strasser, Masaharu Aoki, Yohei Nakatsugawa, and Yasuhiro Miyake, “Present Status of Muon Production Target at J-PARC/MUSE” , JPS Conference Proceedings, 査読有, 8 (2015) 051002-1-8.

17. *三宅康博, “日本のミュオン実験施設 ; J-PARC MUSE” , RADIOISOTOPES, 査読有, 64 (2015) 639-646.

18. *Kazuhiko Ninomiya, Michael K. Kubo, Takashi Nagatomo, Wataru Higemoto, Takashi U. Ito, Naritoshi Kawamura, Patrick Strasser, Koichiro Shimomura, Yasuhiro Miyake, Takao Suzuki, Yoshio Kobayashi, Shinichi Sakamoto, Atsushi

- Shinohara, and Tsutomu Saito, “Nondestructive Elemental Depth- Profiling Analysis by Muonic X-ray Measurement” , Anal. Chem., 査読有, 87 (2015) 4597-4600.
19. *G. Yoshida, K. Ninomiya, T.U. Ito, W. Higemoto, T. Nagatomo, P. Strasser, N. Kawamura, K. Shimomura, Y. Miyake, T. Miura, K. M. Kubo, A. Shinohara, “Muon capture probability of carbon and oxygen for CO, CO₂, and COS under low-pressure gas conditions”, J. Radioanal. Nucl. Chem., 査読有, 303 (2015) 1277-1281.
20. *Shunsuke Makimura, N. Kawamura, S. Onizawa, Y. Matsuzawa, M. Tabe, Y. Kobayashi, R. Shimizu, Y. Taniguchi, H. Fujimori, Y. Ikedo, R. Kadono, A. Koda, K. M. Kojima, K. Nishiyama, J. Nakamura, K. Shimomura, P. Strasser, Y. Nakatsugawa, Y. Miyake, “Development of muon rotating target at J-PARC/MUSE” , J. Radioanal. Nucl. Chem. 査読有, 305 (2015) 811-815.
21. *T. Adachi, Y. Ikedo, K. Nishiyama, A. Yabuuchi, T. Nagatomo, P. Strasser, T. U. Ito, W. Higemoto, K. M. Kojima, S. Makimura, J. Nakamura, K. Shimomura, N. Kawamura, Y. Kobayashi, R. Kadono, Y. Miyake, and E. Torikai, "Tuning of Ultra-Slow Muon Transport System", JPS Conference Proceedings, 査読有, 8 (2015) 036017(1-4).
22. *T. U. Ito, W. Higemoto, K. Ninomiya, M. K. Kubo, N. Kawamura, and K. Shimomura, "Online Monitoring of Negative Muon Beam Profiles at J-PARC MUSE using a Gated Image Intensifier", JPS Conference Proceedings 査読有, 8 (2015) 036014-1-5.
23. * J. Nakamura, Y. Oishi, N. Saito, K. Miyazaki, K. Okamura, W. Higemoto, Y. Ikedo, K. M. Kojima, P. Strasser, T. Nagatomo, S. Makimura, Y. Miyake, N. Kawamura, K. Yokoyama, D. Tomono, K. Shimomura, S. Wada, A. Koda, Y. Kobayashi, H. Fujimori, R. Kadono, and K. Nishiyama, "Optimal crossed overlap of coherent vacuum ultraviolet radiation and thermal muonium emission for μ SR with the Ultra Slow Muon", Journal of Physics: Conference Series, 査読有, 551 (2014) 012066-1-6.
24. *Y. Miyake, K. Shimomura, N. Kawamura, P. Strasser, A. Koda, H. Fujimori, Y. Ikedo, S. Makimura, Y. Kobayashi, J. Nakamura, K. Kojima, T. Adachi, R. Kadono, S. Takeshita, K. Nishiyama, W. Higemoto, T. Ito, K. Nagamine, H. Ohata, Y. Makida, M. Yoshida, T. Okamura, R. Okada and T. Ogitsu, "Current status of the J-PARC muon facility, MUSE", J. Phys.: Conf. Ser., 査読有, 551 (2014) 012061(1-7).
25. *P. Strasser, Y. Ikedo, S. Makimura, J. Nakamura, K. Nishiyama, K. Shimomura, H. Fujimori, T. Adachi, A. Koda, N. Kawamura, Y. Kobayashi, W. Higemoto, T.U. Ito, T. Nagatomo, E. Torikai, R. Kadono and Y. Miyake, "Design and

construction of the ultra-slow muon beamline at J-PARC/MUSE", J. Phys.: Conf. Ser., 査読有, 551 (2014) 012065(1-7).

26. *T. Nagatomo, Y. Ikedo, P. Strasser, S. Makimura, J. Nakamura, K. Nishiyama, K. Shimomura, N. Kawamura, A. Koda, H. Fujimori, Y. Kobayashi, T.U. Ito, W. Higemoto, A.D. Pant, R. Kadono, E. Torikai and Y. Miyake, "Construction of Ultra Slow Muon Beam Line at J-PARC" , JPS Conference Proceedings, 査読有, 2 (2014) 010102-1-5.

27. *Y. Ikedo, Y. Miyake, K. Shimomura, P. Strasser, N. Kawamura, K. Nishiyama, S. Makimura, H. Fujimori, A. Koda, J. Nakamura, T. Nagatomo, Y. Kobayashi, T. Adachi, A.D. Pant, T. Ogitsu, T. Nakamoto, K.i Sasaki, H. Ohhata, R. Okada, A. Yamamoto, Y. Makida, M. Yoshida, T. Okamura, R. Ohkubo, W. Higemoto, T.U. Ito, K. Nakahara, K. Ishida, "U-line at MLF/J-PARC for Ultra Slow Muon Microscopy", JPS Conference Proceedings, 査読有, 2 (2014) 010103-1-4.

28. *T.Sugimoto, M. Mori, T. Tohyama, and S. Maekawa, "Spin-Spin Correlation Enhanced by Impurities in a Frustrated Two-leg Spin Ladder", JPS Conference Proceedings, 査読有, 3 (2014) 014016/1-5.

29. *H. Seo, S. Ishibashi, Y. Otsuka, H. Fukuyama and K. Terakura, "Electronic States of Single-Component Molecular Conductors [M(tmtd)2]", Journal of the Physical Society of Japan, 査読有, 82(5) (2013) 054711-1-11.

30. *W. Higemoto, T. U. Ito, K. Ninomiya, T. Onimaru, K. T. Matsumoto, and T. Takabatake, "Multipole and superconducting state in PrIr2Zn20 probed by muon spin relaxation", Physical Review B, 査読有, 85 (2012) 2351521-4.

● A02 班 (161 編)

1. *T.U. Ito, A. Koda, K. Shimomura, W. Higemoto, T. Matsuzaki, Y. Kobayashi, and H. Kageyama, "Excited configurations of hydrogen in the BaTiO₃-xHx perovskite lattice associated with hydrogen exchange and transport", Phys. Rev. B, 査読有, 95 (2017) 020301-1-5 (R).

2. *K. Takenaka, Y. Okamoto, T. Hinoda, N. Katayama, and Y. Sakai, "Colossal negative thermal expansion in reduced layered ruthenate", Nature Communications, 査読有, 8 (2017) 14102 (7 pages).

3. *J. Sugiyama, H. Nozaki, I. Umegaki, T. Uyama, K. Miwa, J. H. Brewer, S. Kobayashi, C. Michioka, H. Ueda, and K. Yoshimura, "Static magnetic order on the metallic triangular lattice in CrSe₂ detected by μ +SR", Physical Review B, 査読有, 94 (2016) 014408-1-5.

4. M. A. Absor, F. Ishii, H. Kotaka, *M. Saito, "Spin-split bands of metallic

hydrogenated ZnO (10-10) surface: First-principles study", AIP Advances, 査読有, 6 (2016) 025309-1-8.

5. *K. Ohishi, Y. Kousaka, E. Proskurina, T. Ogura, J. Akimitsu, and K. Inoue, "Relation between crystallographic and magnetic chiralities in chiral helimagnet CsCuCl₃", JPS Conference Proceedings, 査読有, 8 (2015) 034006-1-5.

6. M. Kobayashi, *I. Tanaka, T. Kiyotani, and N. Niimura, "Towards direct observation of electron and proton transfers due to enzymatic reaction in trypsin by μ SR", JPS Conference Proceedings, 査読有, 8 (2015) 033006-1-4.

7. *K. Takenaka, K. Kuzuoka, and N. Sugimoto, "Matrix-filler interfaces and physical properties of metal matrix composites with negative thermal expansion manganese nitride", Journal of Applied Physics, 査読有, 118 (2015) 084902-1-7.

8. *S. Ohno, M. Wilde, and K. Fukutani, "Desorption temperature control of palladium-dissolved hydrogen through surface structural manipulation", Journal of Physical Chemistry C, 査読有, 119 (2015) 11732-11738.

9. *T. Yokoyama, M. Mizuguchi, A. Ostermann, K. Kusaka, N. Niimura, T. E. Schrader, I. Tanaka, "Protonation State and Hydration of Bisphosphonate Bound to Farnesyl Pyrophosphate Synthase", J. Med. Chem., 査読有, 58 (2015) 7549-7556.

10. K. Shimomura, *R. Kadono, A. Koda, K. Nishiyama, and M. Mihara, "Electronic structure of Mu-complex donor state in rutile TiO₂", Phys. Rev. B, 査読有 92 (2015) 075203(1-6).

11. A. D. Pant, *Y. Sugawara, I. Yanagihara, G. P. Khanal, I. Shiraki, W. Higemoto, K. Shimomura, K. Ishida, F. L. Pratt, E. Torikai, and K. Nagamine, "Hydration effect on electron transfer in cytochrome c monitored by μ SR", JPS Conference Proceedings 査読有 8 (2015) 033007-1-5.

12. *J. Sugiyama, H. Nozaki, I. Umegaki, M. Harada, Y. Higuchi, K. Miwa, E. J. Ansaldo, J. H. Brewer, M. Imai, C. Michioka, K. Yoshimura, and M. Månsson, "Variation of magnetic ground state of Sr_{1-x}Ca_xCo₂P₂ determined with μ +SR", Physical Review B, 査読有, 91 (2015) 144423-1-5.

13. *K. Nagamine, "Past, Present and Future of Ultra-Slow Muons", JPS Conference Proceedings, 査読有, 2 (2014) 010001-1-8.

14. *S. Kaku, J. Nakamura, K. Yagyu, and J. Yoshino, "Origin of symmetric STM images for the asymmetric atomic configuration on GaAs(001)-c(4x4) α surfaces", Surface Science, 査読有, 625 (2014) 84-89.

15. *Y. Sugawara, A. D. Pant, W. Higemoto, K. Shimomura, E. Torikai and K. Nagamine, "Hydration Effects on Electron Transfer in Biological Systems Studied by μ SR", JPS Conference Proceedings, 査読有, 2 (2014) 010310-1-5.

16. A. D. Pant, K. Nagamine, I. Shiraki, E. Torikai, K. Shimomura, F. L. Pratt, H. Ariga, K. Ishida, and J. S. Schultz, "Muonium response to oxygen content in biological aqueous solutions for cancer research", *J. Phys.: Conf. Ser.*, 査読有, 551 (2014) 012043(1-6).
17. *J. Sugiyama, H. Nozaki, M. Harada, Y. Higuchi, J. H. Brewer, E. J. Ansaldo, G. Kobayashi, and R. Kanno, "Variation of local magnetic environments in olivine-type compounds: $\text{Na}_{0.7}\text{FePO}_4$ and FePO_4 ", *Physical Review B*, 査読有, 90 (2014) 014426-1-10.
18. *H. Nozaki, I. Umegaki, M. Harada, Y. Higuchi, E. J. Ansaldo, J. H. Brewer, M. Månsson, H. Sakurai, and J. Sugiyama, "Internal magnetic field in the zigzag-chain family $(\text{Na,Ca})\text{Cr}_2\text{O}_4$ ", *Journal of Physics: Conference Series*, 査読有, 551 (2014) 012013-1-6.
19. *H. Nozaki, M. Harada, S. Ohta, T. Asaoka, I. Watanabe, V. Pomjakshin, Y. Ikedo, Y. Miyake, N. H. Jaralvo, E. Mamontov, and J. Sugiyama, "Diffusive behavior of Li ions in garnet $\text{Li}_{5+x}\text{La}_3\text{Zr}_x\text{Nb}_{2-x}\text{O}_{12}$ studied by muon-spin relaxation and QENS", *Solid State Ionics*, 査読有 262 (2014) 585-588.
20. H. Ariga, K. Shimomura, K. Ishida, F. Pratt, K. Yoshizawa, W. Higemoto, E. Torikai, and *K. Asakura, "Detection of oxygen vacancy in rutile TiO_2 single crystal by μSR measurement", *JPS Conference Proceedings*, 査読有, 2 (2014) 010307-1-4.
21. *K. Takeyasu, K. Fukada, S. Ogura, M. Matsumoto, and K. Fukutani, "Two charged states of hydrogen on the $\text{SrTiO}_3(001)$ surface", *Journal of Chemical Physics*, 査読有, 140 (2014) 084703-1-6.
22. *Y. Kousaka, T. Koyama, M. Miyagawa, K. Tanaka, J. Akimitsu, and K. Inoue, "Crystal Growth of Chiral Magnetic Material in CsCuCl_3 ", *J. Phys.: Conference Series*, 査読有, 502 (2014) 012019-1.
23. I. Umegaki, H. Nozaki, M. Harada, Y. Higuchi, T. Noritake, M. Matsumoto, S. Towata, E. J. Ansaldo, J. H. Brewer, A. Koda, Y. Miyake, and *J. Sugiyama, "In-situ μSR experiment during hydrogen desorption reaction in MgH_2 ", *Journal of Physics: Conference Series*, 査読有, 551 (2014) 012036-1-6.
24. *T. U. Ito, W. Higemoto, T. D. Matsuda, A. Koda and K. Shimomura, "Shallow donor level associated with hydrogen impurities in undoped BaTiO_3 ", *Appl. Phys. Lett.*, 査読有, 103 (2013) 042905-1-4.
25. K. Yokoyama, K. Nagamine, K. Shimomura, H.W.K. Tom, R. Kawakami, P. Bakule, Y. Matsuda, K. Ishida, K. Ohishi, F.L. Pratt, I. Shiraki, *E. Torikai, "Detection of Conduction Electron Spin Polarization in n-GaAs by Negative

Muonium", Physics Procedia, 査読有, 30 (2012) 231-234.

26. R. Inoue, K. Kawashima, K. Matsui, M. Nakamura, K. Nishida, *T. Kanaya, and N. L. Yamada, "Interfacial properties of polystyrene thin films as revealed by neutron reflectivity", Physical Review E, 査読有, 84 (2011) 031802-1-7.

● A03 班 (81 編)

1. *Yoshinori Okada, Yasunobu Ando, Ryota Shimizu, Emi Minamitani, Susumu Shiraki, Satoshi Watanabe, and Taro Hitosugi, "Scanning tunneling spectroscopy of superconductivity on surfaces of LiTi₂O₄(111) thin films", Nature Communications, 査読有, (2017) in press.

2. *Taira Shibuya, Hiroyasu Matsuura, Masao Ogata, "Magnetic Chirality Induced from Ruderman-Kittel-Kasuya-Yosida Interaction at an Interface of a Ferromagnet/Heavy Metal Heterostructure", Journal of the Physical Society of Japan, 査読有, 85 (2016) 114701-1-4.

3. *T. Adachi, A. Takahashi, K. M. Suzuki, M. A. Baqiya, T. Konno, T. Takamatsu, M. Kato, I. Watanabe, A. Koda, M. Miyazaki, R. Kadono, Y. Koike, "Strong electron correlation behind the superconductivity in Ce-free and Ce-underdoped high-T_c T'-cuprates", Journal of the Physical Society of Japan, 査読有, 85 (2016) 114716(1-6).

4. *M. Horio, T. Adachi, Y. Mori, A. Takahashi, T. Yoshida, H. Suzuki, L. C. C. Ambolode II, K. Okazaki, K. Ono, H. Kumigashira, H. Anzaki, M. Arita, H. Namatame, M. Taniguchi, D. Ootsuki, K. Sawada, M. Takahashi, T. Mizokawa, Y. Koike and A. Fujimori, "Suppression of the antiferromagnetic pseudogap in the electron-doped high-temperature superconductor by protect annealing", Nature Communications, 査読有, 7 (2016) 10567/1-8.

5. Li Li, Sadafumi Nishihara, *Katsuya Inoue, *Mohamedally Kurmoo, "Synthesis, Crystal Structure, and Magnetic Properties of a Chiral Cyanide-Bridged Bimetallic Framework K₃[MnII(L asp)]₆[CrIII(CN)₆]·2H₂O", Inorganic Chemistry, 査読有, 55 (2016) 300-306.

6. *T. Kawase, T. Goto, H. Kuroe, T. Sekine, T. Sasaki, M. Hase, K. Oka, T. Ito, H. Eisaki, "Cu-NMR study on the quasi one dimensional antiferromagnet Cu₃Mo₂O₉", Physics Procedia, 査読有, 75 (2015) 641-646.

7. *Kazuki Matsui, Takayuki Goto, Hirotaka Manaka, and Yoko Miura, "19F-NMR study on the Equilateral Triangular Spin Tube CsCrF₄", Physics Procedia, 査読有, 75 (2015) 726-730.

8. *Yosuke Hosoya, Takayuki Goto, Akira Endo, Takeshi Hashimoto, Takashi Hayashita, Satoshi Iguchi, Takahiko Sasaki, "NMR study on the Ru-dimer system

- with valence fluctuation", *Physics Procedia*, 査読有, 75 (2015) 613-617.
9. *Takayuki Goto, Kazuki Matsui, Tadashi Adachi, Tomi Ohtsuki, Ngoc Han Tu, Yoichi Tanabe, Katsumi Tanigaki, Isao Watanabe, Zaher Salman, Andreas Suter and Thomas Prokscha, "Low-energy μ SR study on the tetradymite topological insulator $\text{Bi}_{1.5}\text{Sb}_{0.5}\text{TeSe}_2$ ", *Physics Procedia*, 査読有, 75 (2015) 100-105.
10. *Jun Sugiyama, Hiroshi Nozaki, Izumi Umegaki, Kazuhiko Mukai, Kazutoshi Miwa, Susumu Shiraki, Taro Hitosugi, Andreas Suter, Thomas Prokscha, Zaher Salman, James S. Lord, and Martin Månsson, "Li-ion diffusion in $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ and LiTi_2O_4 battery materials detected by muon-spin spectroscopy", *Physical Review B*, 査読有, 92 (2015) 014417/1-9.
11. Y. Fujimoto, K. Miyake and H. Matsuura, "Deformation of the Fermi Surface and Anomalous Mass Renormalization by Critical Spin Fluctuations through Asymmetric Spin-Orbit Interaction", *Journal of the Physical Society of Japan*, 査読有, 84 (2015) 043702/1-5 Editor's choice.
12. *K Matsui, T Suzuki, A Oosawa, M Fujisawa, K Yoshizawa, H Tanaka, T Goto, P K Biswas, A Amato, I Watanabe, " μ SR study on quantum spin system NH_4CuCl_3 ", *Journal of Physics: Conference Series*, 査読有, 551 (2014) 012007/1-5.
13. *J. Kishine, I. G. Bostrem, A. S. Ovchinnikov, and Vl. E. Sinitsyn, "Topological magnetization jumps in a confined chiral soliton lattice", *Physical Review B*, 査読有, 89 (2014) 014419/1-6.
14. K. M. Kojima, Y. Krockenberger, I. Yamauchi, M. Miyazaki, M. Hiraishi, A. Koda, *R. Kadono, R. Kumai, H. Yamamoto, "Bulk superconductivity in undoped $\text{T}'\text{-La}_{1.9}\text{Y}_{0.1}\text{CuO}_4$ probed by muon spin rotation", *Physical Review B*, 査読有, 89 (2014) 180508/1-5.
15. S. Yoshizawa, T. Koseki, K. Matsuba, T. Mochiku, K. Hirata and *N. Nishida, "High-Resolution Scanning Tunneling Spectroscopy of Vortex Cores in Inhomogeneous Electronic States of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ ", *Journal of the Physical Society of Japan*, 査読有, 82 (2013) 083706/1-5.
16. *M. Mito, T. Nagano, K. Tsuruta, H. Deguchi, S. Takagi, J. Kishine, Y. Yoshida and K. Inoue, "Multiple spectra of electron spin resonance in chiral molecule-based magnets networked by a single chiral ligand", *Journal of Applied Physics*, 査読有, 114 (2013) 133901/1-5.
17. *S. Nishihara, X. Zhang, K. Kunishio, K. Inoue, XM. Ren, T. Akutagawa, J. Kishine, M. Fujisawa, A. Asakura, S. Okubo, H. Ohta, *T. Nakamura, "The effect of doping a molecular spin ladder with non-magnetic impurities", *Dalton Transactions*,

査読有, 42 (2013) 15263-15266.

18. R. Shimizu, K. Iwaya, T. Ohsawa, S. Shiraki, T. Hasegawa, T. Hashizume, and *T. Hitosugi, "Effect of oxygen deficiency on SrTiO₃(001) surface reconstructions", Applied Physics Letters, 査読有, 100 (2012) 263106/1-4.

19. K. M. Suzuki, *T. Adachi, Y. Tanabe, H. Sato, Y. Koike, Risdiana, Y. Ishii, T. Suzuki, and I. Watanabe, "Distinct Fe-induced magnetic states in the underdoped and overdoped regimes of La_{2-x}Sr_xCu_{1-y}FeyO₄ revealed by muon spin relaxation", Physical Review B, 査読有, 86 (2012) 014522-1-9.

20. *S. Okuma, D. Shimamoto, and N. Kokubo, "Velocity-induced reorientation of fast driven Abrikosov lattice", Physical Review B, 査読有, 85 (2012) 064508/1-5.

21. T. Koyama, S. Yano, *Y. Togawa, Y. Kousaka, S. Mori, K. Inoue, J. Kishine, and J. Akimitsu, "Unconventional Magnetic Domain Structure in the Ferromagnetic Phase of MnP Single Crystals", Journal of the Physical Society of Japan, 査読有, 81 (2012) 043701/1-4.

● A04 班 (42 編)

1. *O. A. Louchev, N. Saito, Y. Oishi, K. Miyazaki, K. Okamura, J. Nakamura, M. Iwasaki, S. Wada, "Photoionization pathways and thresholds in generation of Lyman- α radiation by resonant four-wave mixing in Kr-Ar mixture", AIP Advances, 査読有, 6 (2016) 095018/1-10.

2. *N. Saito, Y. Oishi, K. Miyazaki, K. Okamura, J. Nakamura, O. A. Louchev, M. Iwasaki, S. Wada, "High-Efficiency Generation of Pulsed Lyman- α Radiation by Resonant Laser Wave Mixing in Low Pressure Kr-Ar Mixture", Optics Express 査読有 24 (2016) 7566-7573.

3. *Rakesh Mohan Das, Souvik Chatterjee, Masahiko Iwasaki, and *Takashi Nakajima, "Ionization efficiencies of Doppler-broadened atoms by transform-limited and broadband nanosecond pulses: one-photon resonant two-photon ionization of muoniums", J. Opt. Soc. Am. B, 査読有, 32 (2015) 1237-1244.

4. *Masashi Otani, Yoshinori Fukao, Yoshihisa Iwashita, Ryo Kitamura, Yasuhiro Kondo, Tsutomu Mibe, Naohito Saito, Mitsuhiro Yoshida, "Development of Muon LINAC for the Muon g-2/EDM Experiment at J-PARC", Proceedings of the 6th International Particle Accelerator Conference (IPAC2015), 査読有, JACoW WEPWA023/1-4 (2015-06).

5. *Kotaro Okamura, Norihito Saito, Koji Miyazaki, Yu Oishi, Oleg Louchev, Masahiko Iwasaki and Satoshi Wada, "Temporally Resolved Spectral Structure of

- 821nm Broad-Area Laser Diode Seeder for Muonium Lyman-Alpha Generation” , JPS Conference Proceedings, 査読有, 2 (2014) 010106-1-4.
6. Tsutomu Mibe, and for the TRIUMF S1249 collaboration, “Measurement of Muonium Emission from Silica Aerogel” , JPS Conference Proceedings, 査読有, 2 (2014) 010402-1-4.
7. *Li Deng and Takashi Nakajima, "Detuning-induced stimulated Raman adiabatic passage in atoms with hyperfine structure", Physical Review A, 査読有, 89 (2014) 023406/1-8.
8. *Naritoshi Kawamura, Akihisa Toyoda, Tsutomu Mibe, Naohito Saito, Masaharu Aoki, Koichiro Shimomura, Yasuhiro Miyake, “H Line; A Beamline for Fundamental Physics in J-PARC” , JPS Conference Proceedings, 査読有, 2 (2014) 10112-1-6.
9. *Koji Miyazaki, Norihito Saito, Kotaro Okamura, Yu Oishi, Oleg A. Louchev, Masahiko Iwasaki, Satoshi Wada, "Tunable 820.65nm Light Source by Injection-Seeded Optical Parametric Oscillator and Amplifier for Muonium Lyman-Alpha Generation", JPS Conference Proceedings, 査読有, 2 (2014) 10107-1-4.
10. *Yu Oishi, Kotaro Okamura, Koji Miyazaki, Norihito Saito, Masahiko Iwasaki, Satoshi Wada, "All-Solid-State Laser Amplifiers for Intense Lyman- α Generation", JPS Conference Proceedings, 査読有, 2 (2014) 10105-1-5.
11. *S. Kanda, H. Fujimori, Y. Fukao, Y. Ikedo, K. Ishida, M. Iwasaki, N. Kawamura, K. M. Kojima, M. Lee, S. Makimura, T. Mibe, Y. Miyake, J. Nakamura, Y. Nagashima, T. Nagatomo, K. Nagumo, S. Nishimura, S. Okada, N. Saito, K. Shimomura, T. Suzuki, P. Strasser, K. Ueno, E. Won, “Development of High-Rate Positron Tracker for the Muonium Production Experiment at J-PARC” , JPS Conference Proceedings, 査読有, 2 (2014) 10404-1-7.
12. G. A. Beer, Y. Fujiwara, S. Hirota, K. Ishida, M. Iwasaki, S. Kanda, H. Kawai, N. Kawamura, R. Kitamura, S. Lee, W. Lee, G. M. Marshall, *T.Mibe, Y. Miyake, S. Okada, K. Olchanski, A. Olin, H. Ohnishi, Y. Oishi, M. Otani, N. Saito, K. Shimomura, P. Strasser, M. Tabata, D. Tomono, K. Ueno, E. Won, and K. Yokoyama, "Enhancement of muonium emission rate from silica aerogel with a laser-ablated surface", Progress of Theoretical and Experimental Physics, 査読有, (2014) 091C01/1-7.
13. P. Bakule, G.A. Beer, D. Contreras, M. Esashi, Y. Fujiwara, Y. Fukao, S. Hirota, H. Iinuma, K. Ishida, *M. Iwasaki, T. Kakurai, S. Kanda, H. Kawai, N. Kawamura, G.M. Marshall, H. Masuda, Y. Matsuda, *T. Mibe, Y. Miyake, S. Okada, K.

Olchanski, A. Olin, H. Onishi, N. Saito, K. Shimomura, P. Strasser, M. Tabata, D. Tomono, K. Ueno, K. Yokoyama, S. Yoshida, "Measurement of muonium emission from silica aerogel", Prog. Theor. Exp. Phys., 査読有 (2013) 103C01/1-10.

14. 三部勉、石田勝彦、佐々木憲一, " ミューオン g-2/EDM 実験", 高エネルギーニューース, 査読無, 31 巻, 2012, 209-218

15. L. Deng and *T. Nakajima, "Generation of vacuum-ultraviolet pulses with a Doppler-broadened gas utilizing high atomic coherence", Optics Express, 査読有, 20 (2012) 17566-17580.

16. *T. Nakajima, "Spin polarization of Doppler-broadened atoms by the broadband nanosecond and transform-limited picosecond laser pulses: case study for the muonium", J. Opt. Soc. Am. B, 査読有, 29 (2012) 2420-2424.

17. O. A. Louchev, P. Bakule, N. Saito, S. Wada, K. Yokoyama, K. Ishida, and M. Iwasaki, "Mechanism and computational model for Lyman- α radiation generation by high-intensity-laser four-wave mixing in Kr-Ar gas", Physical Review. A, 査読有, 84 (2011) 033842-1-9.

(2) 学会発表

国内外の学会における領域メンバーによる発表は 424 回、そのうち国際会議・学会での発表は 173 回、招待講演は 35 回であった。領域メンバーが行った国内外での招待講演 88 回について以下にリストアップする。

● A01 班

1. Y.Miyake, "J-PARC Muon Facility, MUSE", OIST Mini Symposium "Radiation sensors and emerging applications in medical imaging, space science and materials science", 沖縄科学技術大学院大学 (沖縄県国頭郡), 2017-1-16~2017-1-18.

2. Y.Miyake, "J-PARC Muon Facility, MUSE", The International Symposium of Quantum Beam Science at Ibaraki University, 茨城大学 (茨城県・水戸市), 2016-11-18~2016-11-20.

3. Y.Miyake, "J-PARC Muon Facility, MUSE", The 6th Yamada workshop on Muonic X and Gamma ray Spectroscopy 2016 (MXG16), 大阪大学 (大阪府・吹田市), 2016-09-26~2016-09-28.

4. M. Mori, A. Spencer-Smith, O.P. Sushkov, S. Maekawa, "Phonon Hall effect in the terbium-gallium-garnet: Skew scattering of phonon", 39th ANNUAL CONDENSED MATTER and MATERIALS MEETING, Wagga Wagga (Australia), 2015-02-03~2015-02-06.

5. W. Higemoto, “Ultra slow muon microscopy in the nanosciences at J-PARC MUSE”, Nanoscience and Quantum Physics “ (nanoPHYS'12), Tokyo, 2012-12-17-2012~12-19.
6. 三宅康博, “超低速ミュオン顕微鏡計画”, 理研極限粒子ビームシンポジウム, 理化学研究所, 2011-06-30.
7. 三宅康博, “J-PARC MUSE へようこそ-世界最強パルスミュオン源による挑戦”, 先端加速器科学技術推進協議会第 20 回技術部会, アルカディア市ヶ谷、東京, 2011-07-19.
8. 三宅康博, “ミュオン科学”, CROSS 産業利用研究会, 豊田中央研究所(愛知県・長久手市), 2011-10-17.

● A02 班

1. 下村浩一郎, “TiO₂(ルチル)中の水素同位体中心の電子構造”, 量子ビームサイエンスフェスタ, つくば国際会議場 (茨城県・つくば市), 2016-03-15~2016-03-16
2. 菅原洋子, “中性子で観る水: 生体高分子と水分子の不思議な関係”, 平成 27 年度第 2 回生物構造学研究会, 研究社英語センター (東京都・新宿区), 2016-03-10~2016-03-10.
3. J. Sugiyama, H. Nozaki, I. Umegaki, K. Mukai, K. Miwa, M. Shiraki, T. Hitosugi, A. Suter, T. Prokscha, Z. Salman, J. S. Lord, M. Månsson, G. D. Morris, A. W., MacFarlane, and R. F. Kiefl, “Li-diffusion in Li₄Ti₅O₁₂ and LiTi₂O₄ films detected with LEM- μ +SR and ⁸Li β -NMR”, International USMM & CMSI Workshop; Frontiers of Materials and Correlated Electron Science - from Bulk to Thin Films and Interfaces, 東京大学本郷キャンパス (東京都・文京区), 2016-01-05~2016-01-09.
4. K. Asakura, “An Interpretation of ps Transient XANES of WO₃ in Photoabsorption and Decay Processes”, New Trends in X-ray Absorption and Photoelectron Spectroscopy and Multiple Scattering Theory, 千葉大学 (千葉県・千葉市), 2015-07-28.
5. Eiko Torikai, “Prospects of laser-driven muon microscopy for bioimaging”, V International Symposium Topical Problems of Biophotonics-2015 (TPB-2015), Nizhny Novgorod, Russia, 2015-07-20~2015-07-24.
6. 朝倉清高, 城戸大貴, 高草木達, 丹羽尉博, 上村洋平, 横山利彦, “可視光応答型水分解 WO₃ 触媒における励起構造の Pump-Probe XAFS 観察”, 2015 年度前期 物性研究所 短期研究会 機能物性融合科学研究会シリーズ(3)「反応と輸送」, 東京大学物性研究所 (千葉県・柏市), 2015-06-25.
7. 朝倉清高, 城戸大貴, 高草木達, 丹羽尉博, 上村洋平, 横山利彦, “可視光応答型水

- 分解 WO₃ 触媒における励起構造の Pump-Probe XAFS 観察”, 2015 年度前期 物性研究所 短期研究会, 東京大学物性研究所 (千葉県・柏市), 2015-06-15~2015-06-16.
8. 鳥養映子, “超低速ミュオン顕微鏡が拓く物質・生命・素粒子科学のフロンティア”, 第 129 回東北大学金属材料研究所講演会, 東北大学金属材料研究所 (宮城県・仙台市), 2015-05-29~2015-05-29.
9. 菅原洋子, “中性子で観る水: 生体高分子と水分子の不思議な関係”, 日本化学会第 95 春季年会, 日本大学船橋キャンパス (千葉県・船橋市), 2015-03-29.
10. 下村浩一郎, “TiO₂(ルチル)中の水素同位体中心の電子構造”, 物構研サイエンスフェスタ 2014/第 6 回 MLF シンポジウム/第 32 回 PF シンポジウム, つくば国際会議場 (茨城県・つくば市), 2015-03-17~2015-03-18.
11. K. Nagamine, “Muon Science from TRIUMF & KEK to the Future”, E.W. Vogt Science Symposium, University of British Columbia, Vancouver, Canada, 2015-02-07.
12. 朝倉清高, “触媒とは何か? ~人類の持続的発展を陰で支えるキーテクノロジー~”, 第 40 回知の拠点セミナー, 京都大学東京オフィス(東京都・千代田区), 2015-01-16.
13. 有賀寛子, “TiO₂ 表面構造と触媒機能”, 物構研サイエンスフェスタ 2013, つくば国際会議場(茨城県), 2014-03-18~2014-03-19.
14. 永嶺謙忠, “素粒子科学の産業利用ラジオグラフィー・元素変換・核融合”, 豊田理化学研究所第 9 回懇話会, 豊田理化学研究所 (愛知県・長久手市), 2014-12-12.
15. 鳥養映子, “超低速ミュオン顕微鏡が拓く物質・生命・素粒子科学のフロンティア”, 第 55 回真空に関する連合発表会, 大阪府立大学 i-site, なんば(大阪府大阪市), 2014-11-18~2014-11-20.
16. 杉山純, “ミュオン素粒子による産業用材料解析”, 第 55 回真空に関する連合講演会, 大阪府立大学 i-site, なんば (大阪府・大阪市), 2014-11-18~2014-11-20.
17. Koichiro Shimomura, “Muonium in J-PARC from fundamental to application”, International Conference on Exotic Atoms and Related Topics EXA2014, Wien, Austria, 2014-09-15~2014-09-19
18. Hiroko Ariga, “Quantum beam approach to Catalyst local structure analysis”, FHI workshop, Schloss Ringberg TegernSee, Ringberg, Germany, 2014-09-15.
19. 永嶺謙忠, “ミュオン核変換による核廃棄物処理”, 日本原子力学会「2014 秋の大会」加速器ビーム部会, 京都大学吉田キャンパス (京都府・京都市), 2014-09-08
20. J. Sugiyama, “固体内イオン拡散の μ SR その場評価”, 日本物理学会, 2014 年秋季大会, 中部大学 (愛知県・春日井市), 2014-09-07~2014-09-14.
21. E. Torikai, Y. Miyake, R. Kadono and M. Iwasaki, “Frontier of materials, Life and Particle Science explored by Ultra Slow Muon Microscope”, J-PARC

- Symposium 2014, つくば国際会議場 (茨城県・つくば市), 2014-07-12~2014-07-15.
22. J. Sugiyama, H. Nozaki, I. Umegaki, M. Harada, Y. Higuchi, E. J. Ansaldò, J. H. Brewer, Y. Miyake, G. Kobayashi, and R. Kannno, “ μ +SR study on olivine-type $\text{Na}_0.7\text{FePO}_4$ ”, 2nd International Symposium on Science at J-PARC, Grindelwald, Switzerland, 2014-07-12~2014-07-14.
23. Y. Sugawara, S. Yamamura, S. Yoneda, K. Osaka, and K. Miura, “Cyclic phase transitions” of nucleoside and nucleotide hydrates”, Joint Congress of ACTS-2014 and CGOM11, 奈良春日野国際フォーラム (奈良県・奈良市), 2014-06-17~2014-06-20.
24. M. Medarde, M. Mena, J. L. Gavilano, E. Pomjakushina, J. Sugiyama, K. Kamazawa, V. Yu. Pomjakushin, D. Sheptyakov, B. Batlogg, H. R. Ott, M. Månsson, and F. Juranyi, “Towards sodium ion batteries: understanding sodium dynamics on a microscopic level”, The European Powder Diffraction Conference (EPDIC14), Aarhus University, Denmark, 2014-06-15~2014-06-18.
25. K. Nagamine, “Ultra-Slow Muon Microscope Project and Application to Advanced Materials Characterization”, BIT’s 3rd Annual World Congress and EXPO of Advanced Materials-2014, Chongqing, China, 2014-06-06~2014-06-09.
26. 杉山純, “ミュオンと中性子による統合解析の試み”, 日本中性子科学会第 13 回年会, 千葉県民プラザ (千葉県), 2013-12-12~2013-12-13.
27. 福谷克之, “Hydrogen ortho-para conversion on solid surfaces”, Novel designed surface and catalysis for greener future: C&FC symposium, イーグレ姫路 (京都府), 2013-11-28~2013-11-29.
28. 福谷克之, “固体における水素の電子状態と運動状態”, 物性研究所短期研究会「エネルギーと新材料の物性・物質科学」, 東京大学物性研究所 (千葉県), 2013-11-11~2013-11-13.
29. 杉山純, “ミュオンで見る固体内イオン拡散”, 第 23 回格子欠陥フォーラム, 淡路夢舞台国際会議場 (兵庫県), 2013-09-23~2013-09-24.
30. 杉山純, “Materials research with neutrons and muons for future automobiles”, Light and Particle Beams in Materials Science 2013 (LPBMS2013), Tsukuba International Congress Center (茨城県), 2013-08-29~2013-08-31.
31. 杉山純, “Muon-spin relaxation study for solid state ionics”, 19th International Conference on Solid State Ionics, Kyoto International Conference Center (京都府), 2013-06-02~2013-06-07.
32. 杉山純, “リチウムイオン電池材料中のリチウム拡散- μ SR による評価-”, 日本物理学会第 67 回年次大会, 関西学院大学, 2012-03-24~2012-03-27.
33. 永嶺謙忠, “素粒子が実現する革新的レントゲン写真”, 科学宅配塾講座, 三鷹ネ

ットワーク大学, 2012-03-22.

34. 鳥養映子, “超低速ミュオン顕微鏡の開発と応用-電子状態の実空間イメージングを目指して-”, SPring-8利用者懇談会「キララル磁性・マルチフェロイクス研究会」, 青山学院大学(青山), 2012-01-27.

35. 杉山純, “超低速ミュオン顕微鏡の産業応用:電池材料等”, 日本物理学会, 2011年
秋季大会, 富山大学, 2011-09-21~2011-09-24.

36. 菅原洋子, “ヌクレオシド・ヌクレオチド水和物結晶の温度湿度誘起相転移を通して眺めた水和水の揺らぎと移動の解析”, 平成23年度生物構造学研究会, テクノ交流館リコッティ(東海村), 2011-12-19.

37. 下村浩一郎, “ミュオンを用いた半導体中水素の研究”, 第21回格子欠陥フォーラム, 立山国際ホテル, 2011-09-19.

38. 永嶺謙忠, “ミュオンが実現する革新的レントゲン写真”, 先端加速器科学技術推進協議会第20回技術部会, アルカディア市ヶ谷(東京), 2011-07-19.

39. 永嶺謙忠, “Particle Beam Radiography from nm-scale to km-scale”, Brand Ritchie Workshop on Particle Penetration Phenomena and Excitations of Solids, くにびきメッセ(島根県・松江市), 2011-05-12.

40. 菅原洋子, “生体分子関連物質結晶内の水和水の揺らぎと凍結”, 菅原洋子, Workshop: CROSSroads of Users and J-PARC, いばらき量子ビーム研究センター(茨城県).

41. 菅原洋子, “量子ビームで水和水の構造、運動、機能を観る”, MLFシンポジウム, つくば国際会議場(茨城県).

42. 有賀寛子, “Surface structures and electronic states of Ni₂P single crystal and their adsorption properties”, 北海道大学アモイ共同シンポジウム, 北海道大学(北海道).

43. 朝倉清高, “In-situ time resolved XAFS studies on catalysts”, 2013 XAFS Workshop in Korea, Chungbuk National University (Chungbuk).

44. 伊藤孝, “ミュオンで探るペロフスカイト型酸化物中の不純物水素の電子状態”, 物構研サイエンスフェスタ2013, つくば国際会議場(茨城県).

45. 福谷克之, “PdおよびAuPd表面における炭化水素の水素化と同位体交換”, 表面科学会シンポジウム「表面化学の新展開」, 札幌.

● A03班

1. 足立匡, “電子ドーピング型T'銅酸化物における新規な電子状態とノンドーピング超伝導”, KEK構造物性研究センター研究プロジェクト「強相関電子系における局所構造変調が誘起する創発現象」キックオフミーティング, KEK(茨城県・つくば市), 2016-3-10..

2. 足立匡, “電子ドーピング型銅酸化物におけるドーピングを要さない新しい超伝導”,

- 千葉大学理学部物理学科セミナー, 千葉大学 (千葉県・千葉市), 2015-12-04.
3. 足立匡, “輸送特性とミュオンスピン緩和から見た電子ドーパ型 T'-214 高温超伝導体における磁性と超伝導”, 東京大学物性研究所短期研究会, 東京大学柏キャンパス (千葉県・柏市), 2015-11-26~2015-11-28.
4. 足立匡, “電子ドーパ型 T' 銅酸化物における輸送特性と μ SR から見た電子状態”, CMRC-plus 研究会「量子ビームによる銅酸化物超伝導体研究の最前線」, KEK (茨城県・つくば市), 2015-11-18.
5. Tomihiro Hashizume, “Electric field enhancement by a metal tip of scanning probe microscope”, The Interdisciplinary Workshop on Quantum Device 2015 (IWQD2015), 国立情報学研究所 (東京都・千代田区), 2015-10-13~2015-10-14.
6. 足立匡, “Novel electronic state in the electron-doped high-Tc T'-superconductors observed by transport properties and muon spin relaxation”, University of Zurich seminar, チューリッヒ (スイス), 2015-09-28
7. 小池洋二, “電子ドーパ型銅酸化物の真の電子状態と高温超伝導”, 関西学院大学理工学セミナー, 関西学院大学神戸三田キャンパス (兵庫県・三田市), 2015-09-09.
8. T. Adachi, A. Takahashi, K. M. Suzuki, M. A. Baqiya, T. Konno, T. Ohgi, T. Takamatsu, T. Kawamata, M. Kato, I. Watanabe, A. Koda, M. Miyazaki, R. Kadono, H. Oguro, S. Awaji and Y. Koike, “Novel electronic state in the electron-doped high-Tc T'-superconductors observed by transport properties and muon spin relaxation”, The 11th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity (M2S 2015), ジュネーブ (スイス), 2015-08-23~2015-08-28.
9. T. Adachi, A. Takahashi, K. M. Suzuki, M. A. Baqiya, T. Konno, T. Ohgi, T. Takamatsu, T. Kawamata, M. Kato, I. Watanabe, A. Koda, M. Miyazaki, R. Kadono, H. Oguro, S. Awaji and Y. Koike, “Novel electronic state in n-type high-Tc cuprate superconductors observed by transport properties and muon spin relaxation”, International Conference on Superstirpes 2015, イスキア (イタリア), 2015-06-13~2015-06-18.
10. Nobuhiko Nishida, “STM/STS Observation of Vortex Motion in Non-equilibrium Superconducting States in Bi2Sr2CaCu2Ox and YNi2B2C”, International Workshop on Vortex Matter in Superconductors, エル・エスコリアル (スペイン), 2015-05-10~2015-05-15.
11. 足立匡, “電子型 T'-214 高温超伝導体における超伝導と短距離秩序の共存”, 日本物理学会 第 70 回年次大会, 早稲田大学 早稲田キャンパス (東京都), 2015-03-21~2015-03-24.
12. 足立匡, “T'型銅酸化物高温超伝導体における磁性と超伝導: ノン Ce ドープ超伝導と新しいバンド描像”, 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻小形研セミナー, 東

京大学 本郷キャンパス (東京都), 2015-01-26.

13. 足立匡, “電子型 T'-214 高温超伝導体における超伝導と短距離秩序の新奇な共存”, Workshop: CROSSroads of Users and J-PARC 第 13 回「強相関電子系の物理」, いばらき量子ビーム研究センター (茨城県東海村), 2014-12-02~2014-12-03.

14. 足立匡, “電子型 T'-214 高温超伝導体における超伝導と短距離磁気秩序の新奇な共存”, CMRC 研究会「超伝導研究の新展開 (鉄系・銅酸化物系+非平衡系)」, KEK つくばキャンパス (茨城県つくば市), 2014-11-18.

15. 足立匡, “Novel coexistence of superconductivity with short-range magnetic order in electron-doped high-Tc T'-cuprates”, 2nd International Conference on Functional Materials Science (ICFMS2014), Lombok (Indonesia), 2014-11-12~2014-11-13

16. 鈴木謙介、足立匡、小池洋二, “Impurity substitution effects on magnetic correlation in $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{Cu}_{1-y}\text{MyO}_4$ (M = Fe, Al)”, International Workshop "Research Frontier of Transition-Metal Compounds Opened by Advanced Spectroscopies", 東北大学 片平キャンパス (宮城県仙台市), 2014-09-30~2014-10-02.

17. 足立匡, “Novel coexistence of superconductivity with short-range magnetic order in high-Tc T'-cuprates observed by muon spin relaxation”, International Conference on Superstirpes 2014, Erice (Italy), 2014-07-26~2014-07-30.

18. Nobuhiko Nishida, “Superconductivity seen from STS Studies of Vortex Core states in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ and $\text{YNi}_2\text{B}_2\text{C}$ ”, 3rd Japan-Israel Binational Workshop on Quantum Phenomena, OIST Okinawa, 2013-03-10~2013-03-13.

19. 秋光純, “カイラル磁性体の研究 ー過去、現在、未来ー”, CROSS roads of Users and J-PARC, いばらき量子ビームセンター (茨城県・東海村), 2012-12-17~2012-12-18

20. 小嶋健児, “表面ーバルク境界領域のヘテロ電子相関”, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 富山大学 (富山), 2011-09-21~2011-09-24.

21. 橋詰富博, 平家誠嗣, 岩楯裕介, 牛山崇幸, 久保田俊介, 井上遥介, 一杉太郎, “半導体、金属、誘電体界面の顕微評価の重要性”, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 富山大学 (富山), 2011-09-21~2011-09-24.

22. 橋詰富博, 平家誠嗣, 岩楯裕介, 牛山崇幸, 久保田俊介, 一杉太郎, “半導体、金属、誘電体界面の顕微評価の重要性”, 日本中間子科学会ワークショップ, 東京工業大学 (東京), 2011-05-29.

23. 秋光純, “中性子・X線・ミュオンを用いた固体物理研究の過去・現在・未来”, 日本中性子科学会 第 12 回年会, 京都大学 吉田キャンパス (京都市), 2011-12-10~2011-12-11.

● A04 班

1. T. Mibe, “New measurement of muon $g-2$ /EDM with ultra-cold muon beam”, Interplay between LHC and Flavor Physics, 名古屋大学 (愛知県), 2016-03-14.
2. T. Mibe, “Measurement of muon $g-2$ and EDM with ultra-cold muon beam at J-PARC”, 12th International Conference on Low Energy Antiproton Physics (LEAP), 金沢歌劇座 (石川県・金沢市), 2016-03-11.
3. T. Mibe, “Measurement of muon $g-2$ and EDM with ultra-cold muon beam at J-PARC”, The 10th Circum-Pan-Pacific Spin Symposium on High Energy Spin Physics, Institute of Physics, Academia Sinica, Taiwan, 2015-10-07.
4. N. Saito, Y. Oishi, K. Miyazaki, K. Okamura, O. A. Louchev, M. Iwasaki, S. Wada, “High-efficient coherent Lyman- α resonance radiation source for ultra slow muon generation”, Advanced Laser Technologies (ALT'15), Faro, Portugal, 2015-09-07.
5. 大石裕, 宮崎洸治, 斎藤徳人, 岡村幸太郎, Oleg A. Louchev, 岩崎雅彦, 和田智之, “超低速ミュオン生成のための高輝度 Lyman- α 光源の開発”, レーザー学会第 35 回 年次大会, 東海大学高輪校舎 (東京都・港区), 2015-01-11~2015-01-12.
6. Katsuhiko Ishida for muon $g-2$ /EDM collaboration, “Status and prospect of $g-2$ experiment at J-PARC”, PHIPSI13, Rome, Italy, 2013-09-09~2013-09-12.

(3) 図書

1. N. Niimura, M. Takimoto-Kamimura, I. Tanaka, John Wiley & Sons, Ltd, Encyclopedia of Analytical Chemistry, 2016,
2. Yoko Sugawara, Eds R. Tamura and M. Miyata, Springer Japan, Advances in Organic Crystal Chemistry, 2015, 706.
3. Eds W. Higemoto and T. Mibe, Organizing Committee of the USM2013, 日本物理学会, Proceedings of the International Symposium on Science Explored by Ultra Slow Muon (USM2013), 2014, 236.

研究成果による産業財産権の出願・取得状況

出願状況 0 件

取得状況 0 件

研究成果

「超低速ミュオン顕微鏡」は、物質の表面近傍から内部にわたる現象の走査的な観測により、表面とバルクの関係性を明らかにし、また界面という境界条件自体が作り出す諸現象の微視的機構を解明するものである。一方、生命科学においても生体の空間イメージングなどの新たな可能性を拓く。加えて、さらなるビームの低温化・尖鋭化により、「標準理論」を越える素粒子/基礎物理のフロンティアを推進する。

図 X00-1 に、超低速ミュオン顕微鏡の特徴的な観測の空間スケールを示す。

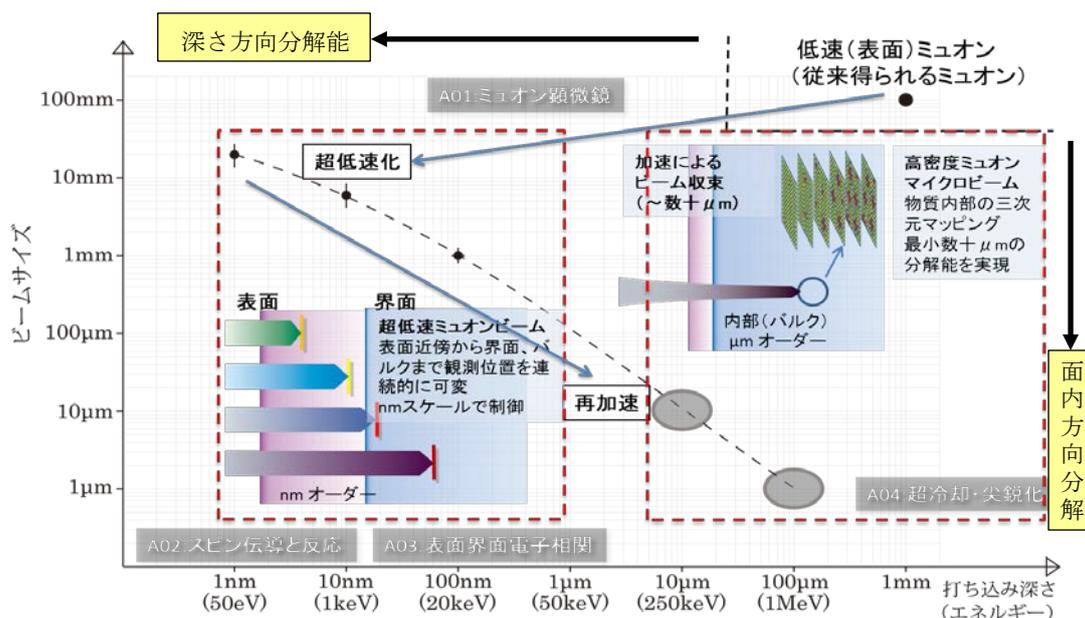


図 X00-1 超低速ミュオン顕微鏡で見える空間スケール。打ち込み深さ（横軸：Au の例）とビームサイズ（縦軸）はミュオンエネルギー（横軸）に依存性する。超低速ミュオンビーム（左側：20eV～30keV）と、高密度ミュオンマイクロビーム（右側：～300keV）。挿入図は、深さ方向（超低速ミュオン）及び三次元（ミュオンマイクロビーム）イメージングの概念。

図 X00-2 に超低速ミュオン発生原理を示す。超低速ミュオンは、加速器から生まれるミュオンのエネルギー広がりを見極め低減しつつ、エネルギーを可変とした夢の量子ビームである。熱エネルギー状態にある真空中のミュオニウム(正ミュオンと電子からなる水素状原子；Mu)からレーザー解離法で得られる。さらにこれを加速・収束させることにより、世界に類のない高密度ミュオンマイクロビームが創り出される。

超低速ミュオン生成は、我が国が誇るパルスミュオン生成技術（高エネルギー加速器研究機構）と、全固体ライマンαレーザーシステム技術（理化学研究所）の2つの基盤技術によって支えられており、これらの技術開発の大部分は、前半に当初目的を達成した。2012年には、従来の80倍となる世界最強パルス表面ミュオン（加速器で生成される低エネルギーミュオン）の発生に成功した。2014年には、世界最強のライマンαレーザー光の発生に成功し、長期間安定したレーザービームを供給している。

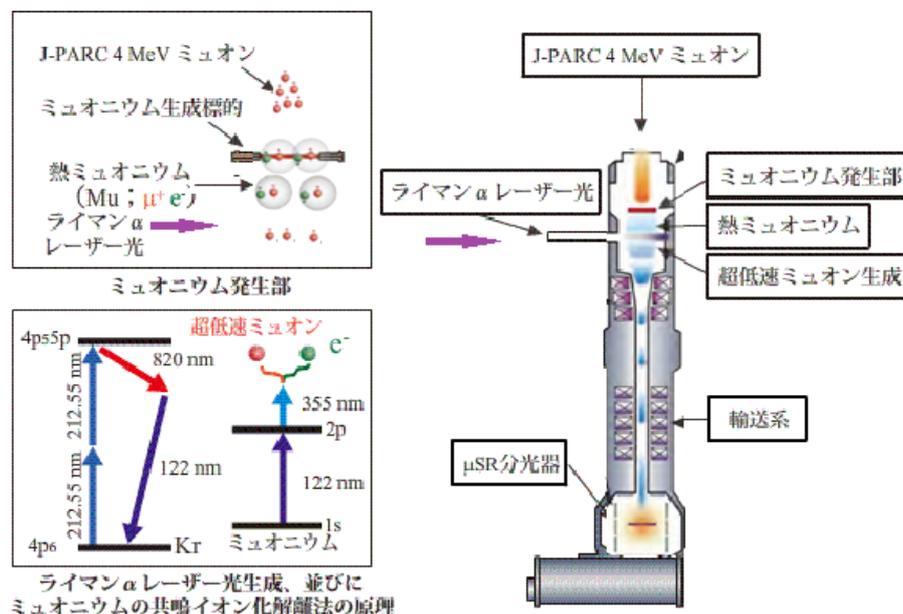


図 X00-2 超低速ミュオン発生原理。右：全体像、左上：熱ミュオニウム生成標的の拡大図、左下：ライマン α レーザー生成とミュオニウムの共鳴イオン化解離のエネルギー準位。

超低速ミュオン顕微鏡設置施設（J-PARC）の事故等により、平成 25 年 5 月から最終年度の 2 月下旬までビームがほぼ止まっていたが、再開翌日（平成 28 年 2 月 21 日）に初の超低速ミュオン発生に成功した。超低速ミュオン分岐（A-leg）とミュオンマイクロビーム分岐（B-leg）へのビームの振り分け、試料空間へのビーム輸送、ミュオン崩壊陽電子寿命、超低速ミュオンズピン回転等の基本性能が確認され、現在、目標とする毎秒 1 万～10 万個の実用強度に向けて増強途上である。エネルギー分解能（エミッタンス）は、PSI（スイス）の低エネルギーミュオンの公称値 400eV より 1 桁以上優れた 30eV が確認され、表面から深さ方向に nm の分解能での連続走査性能実現に大きく前進した。しかし、陽子ビームを共有する中性子源のトラブル回避のため、加速器の低強度（公称値の 1/5）、間欠運転が平成 29 年 6 月まで続いており、機能イメージングの実証にはまだ至っていない。

後半（実験装置本体完成後の 3 年間）は、加速器施設の事故や不具合による再三の長期運転停止が続き、装置へのビーム供給は 90 日間（予定では約 600 日）にとどまった。この間、実験研究者は海外ミュオン実験施設・相補的な研究手段による予備実験や試料準備等を進め、磁性、超伝導、半導体、電池材料に加えて、触媒化学や生命科学などこれまで未開拓の分野においても、超低速ミュオンによる実験に向けた基礎データを蓄積することができた。これらの実績を踏まえて、国際的にもさまざまな分野において、ますますこの夢の量子ビームへの期待が高まっている。

計画研究各班の研究成果の概要

■ A01 班：超低速ミュオン顕微鏡

超低速ミュオン顕微鏡は、図 A01-1 に示すように、(1)熱ミュオニウム発生装置、(2)レーザー輸送系、(3)偏向電磁石、(4)レーザーシステム (A04 班担当)、(5)、(6)超低速ミュオンビーム輸送系、(7)超低速 μ SR 分光器から構成されている (番号は図に対応)。A01 班では、これらを設計・製作し、J-PARC へすべての設置が完了し、タングステン標的に存在する微量リシウムイオンを用いて、ビームラインのコミッシュニングを行ってきた。また、レーザーシステム担当の A04 班と協力し、共鳴イオン化法により超低速ミュオンビームを発生すべく研究を進めてきた。

火事や、2 度に亘る中性子源のトラブルで 1 年程度、ビーム運転がとまっていたが、平成 28 年 2 月のユーザー運転開始直後、超低速ミュオンの発生に成功することができた。当初は、10 分に 1 イベント程度であったが、最適化が進み、毎秒 35 個以上の超低速ミュオンを安定に引き出すことができるようになった (図 A01-2)。この収量は、理研 RAL で達成した瞬間最大強度 20 個/秒を上回る世界最高強度の収量である。レーザーの増幅結晶が準備できれば、1000 倍以上の強度になることが期待される。

超低速ミュオンビームを得るためには、第 1 ステップとして、生成標的から引き出された大強度低速 (表面) ミュオンを、高温に熱したタングステン箱に打ち込む。第 2 ステップでは、熱エネルギーの μ を、タングステン表面から真空中に蒸発させる。第 3 ステップでは、 μ から電子をはぎとるのに、パルス状レーザーを用いた共鳴イオン化 (1s-2p-非束縛状態) 法を用いる。図 A01-3 は、真空中に漂い出てきた μ をイオン化するレーザーのタイミングを変えながら、超低速ミュオンの収率をプロットした実験結果である。タングステン箱からのレーザーが横切る位置までの距離を変えることで、レーザーの遅延時間に対する超低速ミュオン収率の最適値が変

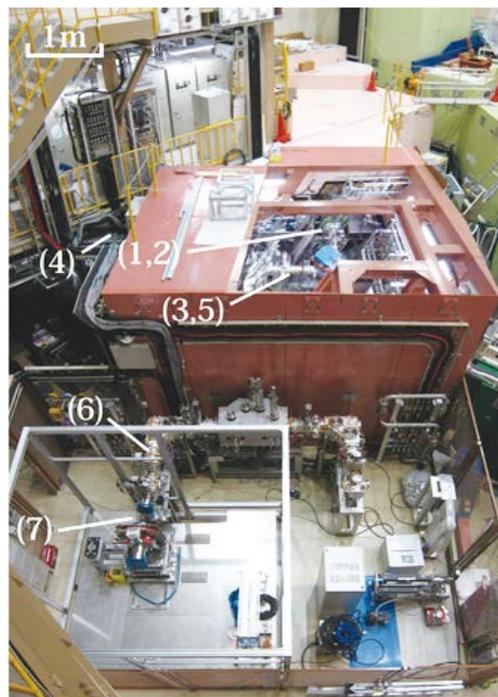


図 A01-1: 超低速ミュオンビームライン

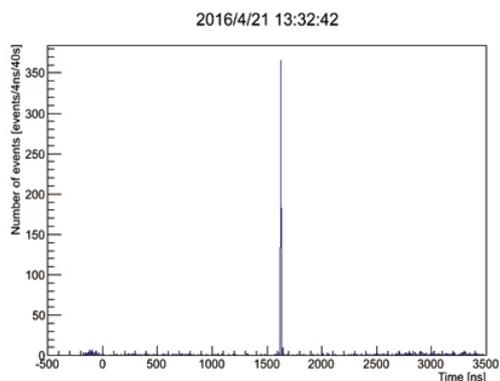


図 A01-2: 2016 年 2 月のビーム復旧直後、超低速ミュオンの発生に成功。

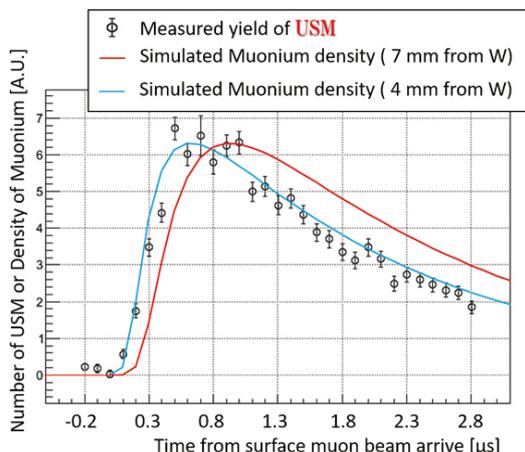


図 A01-3: 真空中に漂い出てきた Mu をイオン化するレーザーのタイミングを変えながら、超低速ミュオンの収率をプロットした実験結果。超低速ミュオン発生には、最適化したタイミングでレーザーが導入される。

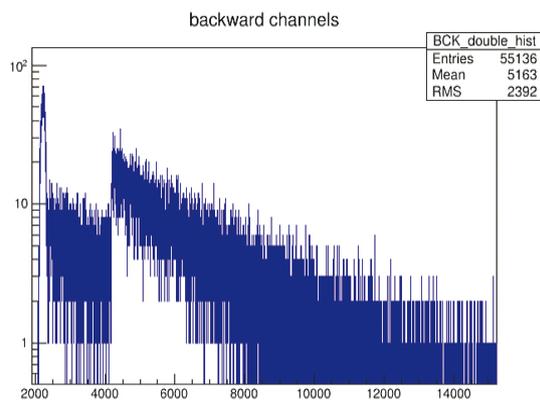


図 A01-4: Kalliope で検出した崩壊陽電子の時間スペクトル。横軸の単位は ns。

わることを見てとれる。

また、A01 班では、超低速ミュオンビームラインの最終端には、U1A エリアに Kalliope 検出器から構成される nm- μ SR スペクトロメータを設置した。Kalliope 検出器は 512ch のプラスチックシンチレータと MPPC で構成され、試料中に止まったミュオンが崩壊して生成する陽電子の崩壊方向を検出することができる。本スペクトロメータを用いて、超低速ミュオンの時間測定を図 A01-4 に示す。統計は少ないが、2.2 マイクロ秒のミュオンの寿命を見て取れる。本スペクトロメータは、TRIUMF の β -NMR の実験装置を参考に、絶縁されたプラットフォームの上に設置されており、プラットフォーム全体を ± 30 kV までバイアスする事が可能な設計がなされている。本システムを用いることにより、実験条件を変更することなく、30 keV に加速された超低速ミュオンを減速し、試料に対する打ち込む深さを調整することができる。但し、高圧に人が直接触れないように、安全上、写真に示すようにメッシュ付きの安全板で囲われている。打ち込み深さをコントロールできるだけでなく、様々な摂動条件が付加し易い実験の応用性を考慮した仕様となっている。図 A01-5 に nm- μ SR スペクトロメータ並びに、U1A、U1B エリアの最近の写真の写真を示す。

A01 班としては、レーザーの増幅結晶が準備できれば、超低速ミュオンの収率を容易に 1000 倍以上の強度とする準備が整った。



図 A01-5: U ラインの最近の様子。U1A エリアに設置された Kalliope 検出器から構成される nm- μ SR スペクトロメータ。

■ A02 班：界面のスピンの伝導と反応

物質と生命の機能の発現には、界面における物質、エネルギー、情報の伝達と反応が本質的に重要である。本研究班は、伝導と反応を伴う諸現象を超低速ミュオン顕微鏡で局所的に観測し、その機構を、相互作用のスピンの選択性という統一的な視点から解明する新しい学術分野の開拓を目指している。既存のミュオン施設を用いた実験と理論で、スピン流とイオン流の測定原理を確立した。さらに、ミュオンの応用が困難だった触媒化学、生命科学の分野において、ミュオンが酸素欠陥や水素の状態、生体物質中の電子伝達に敏感であることを検証し、新しい分野への展開をはかることができた。加えて、物質中で水素の軽い同位体としてふるまうミュオンの挙動を自分自身のスピンの調べることにより、触媒や生命反応に伴う水素の状態や運動を調べる敏感なプローブとなることを示した。これらの研究の多くは、計画研究者、公募研究者が連携して実施した成果である。

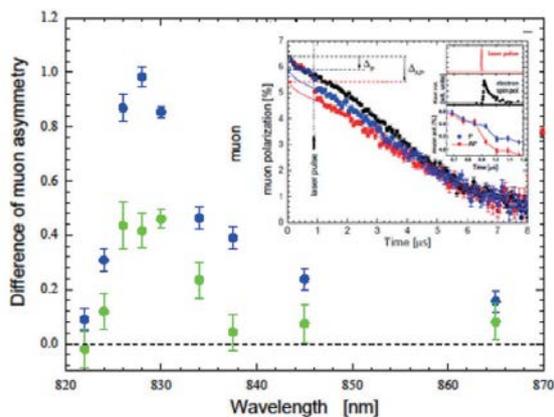


図 A02-1: n-GaAs の円偏光レーザー励起によるスピン流によるミュオンスピン偏極度の波長依存性。緑 σ^+ 円偏光照射と σ^- 円偏光照射における非対称性の差。青:レーザー OFF と ON の差。挿入図は、16K、ゼロ磁場ミュオンスピン偏極の時間発展: 黒はレーザー OFF、青は σ^+ 光、赤 σ^- 光照射。

(1) 界面近傍におけるスピン伝導

半導体中の伝導電子スピン偏極 (CESP) の時間空間的構造・運動は、新しい情報工学を

始めとして、広く大きな発展分野を持つ。ミュオニウムスピン交換反応法を確立し、スピン寿命、スピン拡散長、界面におけるスピン減偏極を解明することを目指した。n 型 GaAs 内にレーザーで CESP を発生し、その挙動を、同時に打ち込んだ偏極正ミュオンによって、時間分解能 ns 以上、空間分解能 μm 以上で非破壊的に観測できること、スピン依存性を示すのは負ミュオニウム（擬負水素イオン）であることを明らかにした（図 A02-1）。この測定法は、スピン注入の方法によらず、スピン軌道相互作用の小さい軽元素半導体中のスピン流測定も可能になる。

スピントロニクス材料の高性能化のため、STM 測定技術を発展させた原子レベルのスピン輸送現象の測定技術（SP-BEEM）の開発を目指すと共に、超低速ミュオン実験のための準備を行った。電子状態も強磁性の発現機構も十分理解できていない GaMnAs に関して、図 A02-1 に示すように、立方晶磁気異方性や異方的磁気抵抗が膜厚に対して特異な振る舞いを示すことを見出すと共に、低温で観測される巨大な熱電能が、いずれも従来モデルでは、説明できないことを示した。ミュオン顕微鏡により得られる局所スピン構造の知見により、この物質のスピン構造、磁性の起源を解明することができれば、スピントロニクス材料としての GaMnAs の高性能化に大きく貢献することが期待される。

（2）触媒化学反応

酸化物の電子物性や触媒物性を決定している表面近傍の酸素欠陥の構造と分布、光触媒活性への寄与の解明を目的として、予備実験ではミュオンによる酸素欠陥の直接観測法の確立を目指した。光触媒である TiO_2 について、酸素欠陥を制御した単結晶の MuSR 実験により、酸素欠陥に図

A02-2 に示す二つの水素（水素分子）が存在する新しい安定構造を見出した。構造について密度汎関数法によりエネルギー的安定性と電子状態を計算したところ、本構造は準安定構造の一つで、また、band gap 内部にエネルギー状態を持つことが明らかとなった。ミュオンを用いた新しい欠陥研究と水素の挙動の研究法として期待される。 TiO_2 のバルクと表面層との関連について今後発

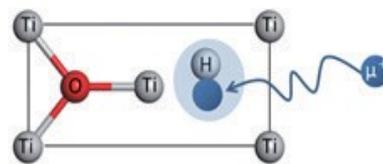


図 A02-2: 欠陥のある TiO_2 での H_2 の状態

展させることが触媒科学の進展に重要である。触媒作用は表面で起こっており、超低速ミュオンを用いることで、表面感性を高めることが強く望まれる。

酸化物に関して、代表的な強誘電体である BaTiO_3 においてミュオニウムが浅いドナーとして振る舞うことを明らかにし、Ba を Sr や Ca で置換した一連のペロブスカイト型チタン酸化物においても浅いミュオニウムを見出し、それらの不対電子が主にチタン由来の軌道に分布していることを明らかにした。

また、アモルファス氷表面における核スピン転換モデルである電場誘起核スピン転換モデルを検証すべく、 μSR 実験を行い、アモルファス氷では、形成される Mu が非常に速い緩和を起こしている可能性を新たに発見した。表面における水素の電子状態を直接観測できる

実験手法は超低速ミュオンにおいてほかにはなく、超低速ミュオンによる研究が不可欠である。

(3) 電気化学を担うイオン伝導の研究

電池の電極と電解質材料について、粉末・ペースト・シート電極・薄膜形状試料中の Li イオン拡散を、表面ミュオン (J-PARC や英国 ISIS)・低速ミュオン (スイス PSI)・ ^8Li による β -NMR 法 (カナダ TRIUMF) を駆使して調べた。全ての結果が良く一致し、 μSR による Li 拡散や Na 拡散の測定範囲を決定した。

積層固体電池の超低速ミュオン顕微鏡による観察で、界面層でのイオン拡散やイオン濃度変化を明らかにし、固体電池の性能を支配すると言われる「界面層」に関する新知見を得ることを目的とし、積層固体電池におけるイオン拡散を調べた。正極材料の μSR 測定結果と電気化学測定結果を比較することにより、電解液中での反応面積と充電深度との関係を世界で初めて明らかにした。

また図 A02-3 に示すように μSR 法と β -NMR 法により固体電解質材料の Li 拡散係数を求め、イオン伝導度と比較してキャリア濃度を見積もり、イオン伝導を支配する要因を明らかにした。Li 以外にも Na の固体内拡散を検出できることを明らかにした。

(4) 生命系の電子伝達

電子伝達は、生命系の光合成や呼吸鎖反応の基本機能となっている。また、理論計算により水和水が電子伝達を媒介するという提案がなされている。ミュオンラベル電子法と、超低速ミュオン顕微鏡の高い空間分解能を活かして、様々な環境下にある生体物質中の電子伝達を明らかにすることを目標としている。呼吸鎖にかかわるシトクロム c について含水量を制御した μSR 測定を行い、図 A02-4 に示すように、含水量の増加が電子の 3 次元拡散を促進すること、ガラス転移温度の上下で電子伝達の振る舞いに差異があることを明らかにし、この方法の有用性を示した。さらに、準位交差共鳴 (LCR) を観測し、照射されたミュオンの一部が、カルボニル基にミュオニウムラジカルを形成し停止することを明らかにした。

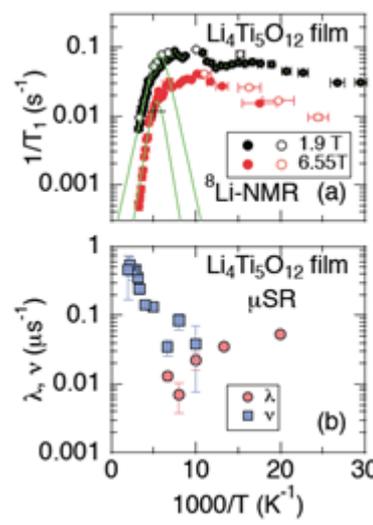


図 A02-3: (a) β -NMR と(b)低速 μSR で求めた $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ 薄膜の spin 格子緩和率と温度の逆数の関係

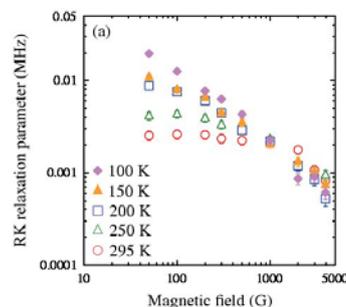


図 A02-4: シトクロム c (湿潤試料)における μSR 実験緩和パラメーター Γ の磁場依存性の温度変化。ガラス転移温度で Γ が磁場に反比例し、分子内 1 次元電子運動が支配的になる事を示している。

また、酵素反応に伴う電子及びプロトン移動が起こる系において、特有の μSR スペクトルの観測に成功し、プロトンによる原子レベルでの酵素反応の可視化に大きく前進した。さらに、ヘモグロビン水溶液中では、ミュオニウム緩和が酸素濃度と共に変化することを実証した。高密度ミュオンマイクロビームと組み合わせることにより、癌細胞中に酸素濃度が減少している低酸素症 (Hypoxia) とよばれる現象に対して、非侵襲で血管等の微小領域を、短時間に酸素濃度を測定する新しい診断法につながる。

従来のミュオン実験では、1回の測定に数 100mg の試料を必要とすることから、生命系については僅かな研究例しかなかった。超低速ミュオン顕微鏡では、mg 以下の量での実験が可能となり、初めて生命系への系統的な研究展開が可能となる。また、深さ方向の分解能は、生体膜厚にほぼ対応していることから、生命系で重要な機能を担っているは膜タンパク質の外側、膜中、内側について深さ方向を走査した測定が可能となる。

さらに、公募研究者による準備研究で、八面体に由来する幾何学的フラストレーションを特徴とする反強磁性体 Mn_3GaN に関して、磁気構造出現に伴い出現する大きな磁気熱量効果を圧力により取り出すことに成功し、これまで見出されている物質中で最大の磁気熱量効果を実現した。また、 GaN 中ミュオニウムにおいて実験的に顕著な異方性が観測されていたが、公募研究者による超微細構造における異方性の理論研究によって、初めてその原因が解明された。

以上の成果により、博士 5 名、修士 13 名が学位を取得した。うち 1 名は、平成 27 年日本度中間子科学会学生奨励賞を受賞した。

■ A03 班：表面ーバルク境界領域のヘテロ電子相関

本研究班においては、表面から 10^2nm の深さまで数 nm の空間分解能でミュオンを注入可能な超低速ミュオン (USM) ビームを用い、なおかつミュオンスピン回転・緩和法が局所磁性の敏感なプローブであることを活かして (USM- μSR)、表面近傍・界面・薄膜において数 nm という特徴的な空間スケールで現れる特異な磁性、超伝導 (異方的超伝導、薄膜渦糸ダイナミクスを含む) の基になる電子状態を明らかにすることを目標にした。またその際、走査トンネル分光法、角度分解光電分光法による表面第 1 層からの情報と超低速ミュオンによる深さ方向の情報を組み合わせ、表面・界面近傍で現れる電子の軌道角運動量の効果と電子相関とがもたらす複合的な磁性、伝導現象の起源に迫ること、さらにはミュオンの持つユニークな揺らぎの時間窓を利用して、表面を「節」として深さ方向に発達する磁束 (渦糸) やカイラルソリトン格子などの磁気構造及びそのダイナミクスを明らかにすることを目指した。しかしながら、諸般の事情により超低速ミュオンビームの開発 (計画研究 A01 班、A04 班) が当初の計画通り進まなかったため、通常ミュオンビームを用いたバルク電子物性の研究、および海外施設 (ポール・シェラー研究所、PSI) の低エネルギーミュオンビームを用いた薄膜の物性研究を行った。

計画研究からの主な成果としては、まず銅酸化物研究において、バルク結晶よりも薄膜において酸素の化学量論的な不定性を制御できる可能性が高いことに着目し、電子ドープ系銅酸化物 T' 相 La214 系の母物質の薄膜で、頂点酸素の原子レベルでの制御によりキャリアドーピングなしで現れるとされる超伝導について、低エネルギーミュオンビームを用いた μ SR (深さ分解能 ~ 20 nm) 測定を厚さ ~ 300 nm の T' 相 $(\text{La}, \text{Y})_2\text{CuO}_4$ 試料 (Y は La と同じ +3 価で非ドープ) について行った結果、母物質薄膜で現れる超伝導が本質的でバルクな性質であることを示す証拠 (図 A03-1) を得るとともに、薄膜表面付近に超伝導とは異なる電子状態が現れる証拠をも得た。この結果から、今後 USM- μ SR のより高い深さ分解能を用いることで、表面近傍についてさらなる電子状態の解明が期待される。また、これに触発されてバルク試料合成も見直された結果、プロテクトアニール法による T' 相 La214 系単結晶においても非ドープ超伝導を示唆する研究結果が得られ (収録論文 III-2)、光電子分光による電子状態研究も進展するなど (収録論文 III-3)、T' 相の研究に大きなインパクトを与えている。

一方、第 2 種超伝導体の表面近傍における磁束格子のダイナミクスの研究では、 μ SR と相補的な時空スケールを持つ走査トンネル分光 (STS) により磁束格子の測定を高速で行えるような新手法を開発することが目標の一つであったが、本研究により今までの 1000 倍の速さの渦糸運動の STS 測定が可能となり、これによって磁束格子における刃状転位の振る舞いを明らかにした。今後 STS と USM- μ SR の相補利用による広い時空でのダイナミクス解明が期待される。

表面・界面に現れる磁性の研究では、USM- μ SR を用いた深さ方向空間分解によるスピン相関の研究を目標としていたが、 $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$ 等の界面を含む遷移金属酸化物複合構造の製膜手法の開発、および走査トンネル顕微鏡 (STM) 測定などによる表面の評価が行われ、これまで知られていなかった表面の原子構造や電子状態を明らかにし (図 A03-2)、USM- μ SR による表面-バルク境界領域の研究に向けて試料サイズ、製膜条件等の最適化が進展した。

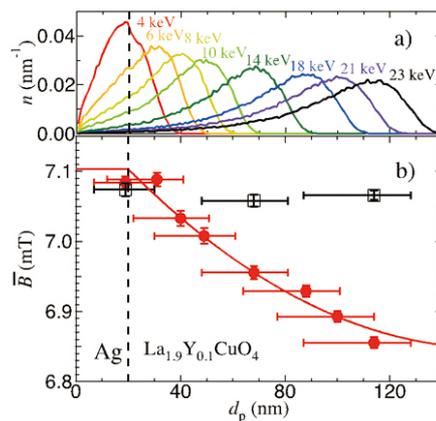


図 A03-1: (下部臨界磁場より低い磁場中に置かれた T'- $\text{La}_{1.9}\text{Y}_{0.1}\text{CuO}_4$ 薄膜で、観測されたマイスナー効果。(a) 各入射エネルギーにおける低エネルギーミュオンの注入深さ分布、及び (b) 測定された局所磁場の深さ依存性。

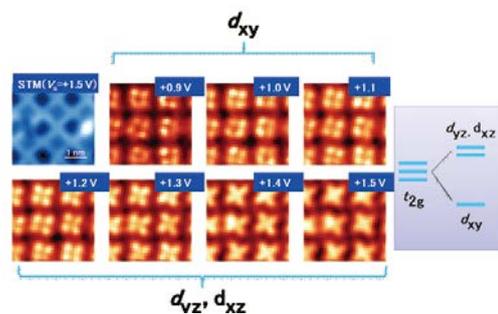


図 A03-2: SrTiO_3 (001) ($\sqrt{13} \times \sqrt{13}$) 表面の STM 像 (試料バイアス +1.5 V)、および、微分コンダクタンスマッピング (dI/dV , 試料バイアス +0.9 ~ +1.5 V)。

さらに、キラル(カイラル)磁性体研究では、カイラルスピントリトン格子の実現と USM- μ SR によるそのダイナミクス解明を目標としていたが、本研究で育成に成功したカイラル磁性体 $\text{CrNb}_3\text{S}_6(\text{Cr}_{1/3}\text{NbS}_2)$ の単結晶について、ローレンツ電子顕微鏡を用いた実空間および電子線回折実験を行うことにより、らせん軸に垂直方向への磁場印加によるカイラルスピントリトン格子発生の観測に成功するとともに、ソリトン格子の間隔の磁場依存性を理論的に明らかにした。さらに、 CsCuCl_3 の新規不斉合成手法の開発により cm オーダーの単結晶試料を得ることを可能にし、得られた単結晶試料についてのミュオン測定、偏極中性子回折測定から、右手系(空間群 P6122)の結晶は右巻のらせん磁気構造、左手系(空間群 P6522)の結晶は左巻のらせん磁気構造であることを実証した。今後 USM- μ SR 測定を行うことで、当該物質中でのソリトンダイナミクス解明が期待される。

公募研究では、密封放射線源およびシンクロトロン放射線源を用いたメスバウアー分光法により磁性積層膜の界面磁性や深さに依存した磁性の研究、トポロジカル絶縁体表面におけるスピントキシチアの低エネルギーミュオンによる研究、スピン軌道相互作用と多体効果についての理論的研究、さらには磁気超格子中におけるトポロジカル表面スピン波の理論的研究などで成果が得られた。

■ A04 班

本研究班においては室温のミュオニウム源を開発するとともに、パルス当たり 100 μ J の大強度ライマン α レーザーを基幹設備として開発し、世界最高強度の超低速ミュオンビームを発生させ、開発する技術に立脚して、ミュオン異常磁気能率 ($g-2$) 測定実現を目指す。

(1) ミュオニウム発生源の低温化

TRIUMF のミュオンビームを用いて、シリカエアロゲルからのミュオニウム放出個数の入射ミュオン数に対する割合を、ドリフトチャンバーなどの測定器技術を駆使して、精度よく決定した。当初の測定では放出個数は期待に届かなかったが、拡散モデルを仮定した放出シミュレーションを進展させ、表面積を増加させることが重要との指針を得た。シリカエアロゲル表面に近赤外超短パルスレーザーの多光子吸収アブレーション加工によって高アスペクト比(穴径 \sim 300 μ m 深さ 4mm) の高精細穴構造を作り、表面方向に向けた多数のマイクロチャンネルを設け、2013 年 11 月に TRIUMF においてミュオニウムの放出率を再測定したところ、図 A04-1 のように従来の構造のない

(“untreated”) シリカエアロゲル標的と比べて 10 倍のミュオニウム収量を実現するという成果を得た。この結果は KEK/理研

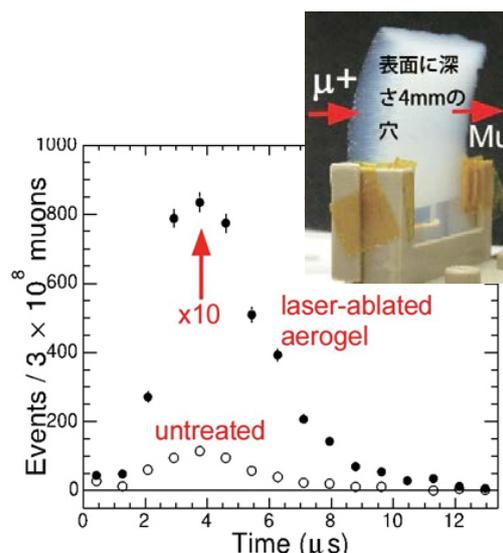


図 A04-1: 表面穴加工エアロゲル標的の写真と真空中ミュオニウム収量測定

/J-PARC/TRIUMF よりプレスリリースを行い、また西川賞を受賞することとなった。

J-PARC でも 2014 年 6 月に同じ標的を用いてミュオニウム測定に成功した。更に、カナダの研究者と共にミュオニウム発生シミュレーション、エアロゲル表面構造の詳細観察、表面加工の最適化を進めており、今後より一層の最適化に資する試験を進める。

(2) 新規レーザーシステム開発

「ライマン α レーザーシステム」では、ミュオニウム解離用 122nm・100 μ J/pulse 級の高安定・高出力パルスレーザーシステム開発を進め、ライマン α 光を発生させる Kr/Ar ガスセルへの入力として 5 倍波で最適となる波長 1062.78 nm において高い利得を持つセラミック光学結晶 Nd:YAG の開発に成功した。また、この光学結晶を基盤としたレーザーシステムを J-PARC U-line に持ち込み、ライマン α 光発生を行った。図 A04-2 に中間アンプまで新たな Nd:YAG を使ったレーザーシステムからのライマン α 光発生の様子を示す。

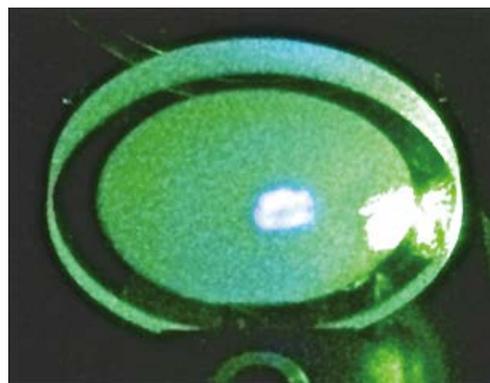


図 A04-2: 発生したライマン α 光

当初の計画では、全増幅段においてこの新たに開発した光学結晶を基盤とする計画であったが、残念ながら、最終段パワーアンプ用の大口径 Nd:YAG 結晶(直径 12mm 長さ 80mm)の均質性と透明性が想定通りには上がらず、後段のレーザーシステム開発を含めた全体システムの完成が遅れ、レーザーと加速器とを組み合わせた研究開発に支障をきたす恐れが出てきた。

このため 2015 年 2 月のレーザー国際諮問委員会で詳細な外部評価意見をいただき、いくつかの改善を行った。1062.78nm 光の目標強度はまだ得られていないが、Kr/Ar ガス中での 4 波混合の相互作用長を長く取る集光光学系を適用することにより、ライマン α 光への変換効率が理研 RAL のレーザーシステムの最大値と比べて 2 桁向上し、絶対強度でも約 10 倍のパルスエネルギーが長時間にわたって大きな揺らぎ無く得られた。また、諮問委員会の助言に従い、ミュオニウムのイオン化においてライマン α 光 (1s-2p 遷移光) と同時に必要な 355 nm 光(2p-非束縛励起光)は、現状では足りない強度を補うため、最終段パ

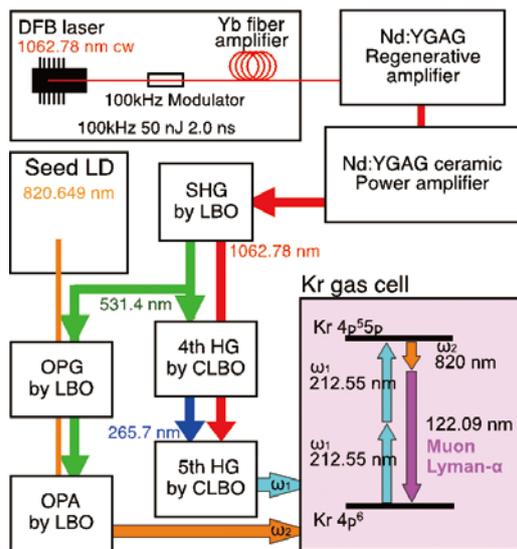


図 A04-3: ライマン α レーザーシステムの概念

ワーンプが完成するまでの間、別途フラッシュランプ励起 Nd:YAG レーザーを導入した。J-PARC のビームが復活した 2016 年 2 月には、A01 班が準備した高温タングステン標的から発生したミュオニウムに照射し、超低速ミュオンの観測に成功し、その後のレーザーおよびミュオンビーム調整の結果、4 月にはパルスミュオン方式では RAL を上回る 45 個/秒を得ることに成功した。

最大の課題は、最終段パワーンプの大口径 Nd:YAG 結晶成長条件の最適化である。セラミック結晶は、完成までにおおまかに成形、乾燥、焼結、そしてアニールと多くの工程を経るが、乾燥に時間をかけると成形体内部に層分離が生じて均質性が低下する。またアニール工程ではその温度と時間のわずかなバランスを欠くと、部分的に Ga 元素が抜けるなどの欠陥が生じて白濁が生じる。これまでにメーカーと緊密に連絡を取り、様々な視点から問題点の抽出を図ってきた。これらの知見を活かして、メーカーと引き続き改善を重ねている。

(3) 超冷ミュオンビームの開発

g-2 実験に向けた「超冷ミュオンビーム」生成に向けては、シリカエアロゲルを源とした超低速ミュオン生成を実証するための評価チェンバーを完成した。新たに導入した 3 軸磁場コイルでは地磁気および漏れ磁場をキャンセルし、さらには意図的にミュオン回転を起こさせるために 5 G までの磁場がかけられる。理研 RAL ミュオン施設で 2015 年と 2016 年に行われたビーム試験では 2.2 G の横磁場下の標的中ミュオニウムのスピン回転が観測された。これを利用すると、磁場ベクトルとレーザー照射タイミングの組み合わせにより、超低速ミュオンのスピン方向を自由に制御でき、偏極に係る効果だけを抜き出すことにより、 μ SR および g-2 実験における系統誤差を大幅に減らすことが期待できる。

RAL の既存レーザーを大幅に改良し、常温標的を基にした超低速ミュオンビームの実証および性能測定を行うべく進めていたが、同時に推進している J-PARC MLF 実験室 U ラインの超低速ミュオンビームライン開発がいまだ進行中であることから、理研 RAL 支所での標的試験に必要なレーザーの本格的運転に至っていない。科研費自体は終了するが、予算を別途確保し、さらに研究を進める。