

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 4 日現在

機関番号：82401

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2011～2015

課題番号：23108005

研究課題名（和文）物質創成の原理を極める超冷却と尖鋭化

研究課題名（英文）Extreme cooling and sharpening of the muon beam towards physics frontier beyond the standard model

研究代表者

岩崎 雅彦（IWASAKI, MASAHIKO）

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

研究者番号：60183745

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 267,000,000円

研究成果の概要（和文）：非常に低速のミュオニウムを効率的に真空中に作り出せると、イオン化してビームとして用いることで、生命・物質科学から素粒子物理学までの広い学術領域で従来不可能であった研究が可能となる。この際、低速であればあるほど大きく可能性が広がる。これまで真空中にミュオニウムを放出できる物質としては、2000Kほどの高温のタングステンしか知られていなかった。本研究によって、シリカエアロゲルにレーザーで細穴を設けることで、室温（速度分散1/3）のミュオニウムを作り出せる物質の創生に成功し、細穴のないエアロゲルに比べて10倍効率上がることが確認できた。これによって、ミュオンを使った研究の可能性が大きく広がった。

研究成果の概要（英文）：Ultra-slow muon can be utilized as a good probe, which would open up new research fields over the wide research field from life and materials science to particle physics. Its potential enhances when the muons' speed become slower. Hot tungsten (2000K) has been the only known material, which generates slow-muon into vacuum. By the present research, we succeeded to synthesize new muonium generator, a laser ablated aerogel, which generate muonium 10 times more efficient than that of flat aerogel. By this new muonium generator, one can expand the research field substantially.

研究分野：原子核素粒子物理学

キーワード：ミュオニウム 超低速ミュオンビーム 標準理論検証

1. 研究開始当初の背景

研究開始当初、米国ブルックヘブン国立研究所(BNL)でのミュオン異常磁気能率(g-2)測定実験 E821 で標準理論との有意な差が報告され、標準理論を超えた物理の発見・確立が期待され、極めて高い注目を集めており、どのように研究を進展させるか多面的に検討がされていた。その一つは、BNLの基幹実験装置をフェルミ研究所に移して実験を開始する計画である。他方、超冷却と先鋭化によって本新学術領域で実現する超低速ミュオンを用いると、空間的に広がらないミュオンビームが得られる。この手法を用いれば、閉じ込めに必要となる電場が不要になり、劇的な系統誤差の改善が期待できる。そこで、本新学術領域を発展させてJ-PARCにおいてもg-2 研究実現を目指すことになった。これにより、ミュオンg-2 の高精度測定を理想的な形で実現し、標準理論を超えた物理の確立を目指すことになった。

2. 研究の目的

本研究計画の目的は、世界最強レーザー技術と最先端のバンチング技術を駆使して「超低速ミュオン顕微鏡」の基礎技術を支えると同時に、ミュオン顕微鏡の性能を更に高度化するための超冷却と先鋭化技術に立脚して、ミュオン異常磁気能率(g-2)測定を実現することを目指す。研究代表者が国際協力の下に参画した米国BNL 研究所でのg-2 測定実験 E821 は、宇宙創成を含む物理原理の根源的な理解に関わる標準理論に基づく理論値と大きく食い違い、高い注目を浴びている。

本研究計画で実現する「超冷却と先鋭化技術」によって、ビーム軸に垂直な方向への角度分散が極めて小さく、時間分解能を格段に向上させた超冷却ビームを実現し、これをミュオン源にした新しいg-2 研究方法では、従来必須であった「魔法運動量 ~ 3.1 GeV/c」に縛られずに、理想的な実験条件でg-2 値の測定が実現できる。

本研究班(A04)では、パルス当たり100 μ Jの大強度ライマン レーザーを基幹設備として開発し、最高のミュオニウム共鳴イオン化効率を達成する。このレーザーをA01 班が開発するミュオニウム発生機器に組み込むことで、世界最高強度の超低速ミュオンビームを発生させ、本新学術領域の目指す物性研究を支える。

さらに、高収量低温ミュオニウム生成標的の開発、周波数掃引型レーザーやRF位相回転によるミュオンビームの短バンチ化、光ポンピング法による偏極回復などの要素技術開発により極めて小さなエミッタンスの高偏極ミュオン源を実現するとともに、ミュオン再加速により、g-2 測定のための超低エミッタンスミュオンビームの原理実

証研究を行う。ミュオンビーム性能を先鋭化させる本技術開発研究は、本領域全体にフィードバックされ、多様な研究成果をあげる基盤を提供する。

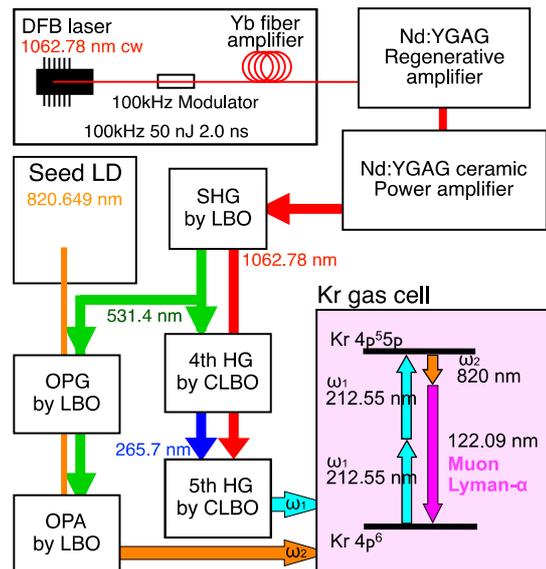
3. 研究の方法

(1)ミュオニウム発生源の低温化：

本研究ではミュオン異常磁気能率(g-2)測定を目指したビームの超冷却と先鋭化の一つの柱として、常温標的による真空中ミュオニウム放出の効率化を目指す。従来の高温標的(200Kのタングステン標的)と比べて、取り出したビームの低エミッタンス化、レーザーイオン化効率の増加、高温を必要としないための標的周辺装置の簡素化と鏡を利用したレーザー光の折り返しによるミュオニウムのイオン化の高効率化、などが期待できる。常温でミュオニウムを放出する標的としてはシリカパウダーが知られているが、パウダーであるための取り扱いの難しさがあり、我々はシリカパウダーと同様の内部構造を持つ板状のシリカエアロゲルに着目した。常温標的では放出されたミュオニウムの速度が遅いため、これを標的に残った大多数のミュオンからの信号と区別して放出率を評価するためには、位置分解能が良く、かつ粒子パイルアップの少ない検出法が必要となる。このため、まずはミュオンを標的に一個ずつ入射して測定ができる TRIUMF 研究所のミュオンビームを用いた標的評価実験を行う。

(2)大強度ライマン レーザーの開発

真空中に熱エネルギーで放出されるミュオニウムを高効率で共鳴イオン化し大強度超低速ミュオンを得るためには、大強度ライマン レーザーが必要とされる。



ライマン レーザーシステムの概念図

ミュオニウム共鳴線は波長122.09 nmの真空紫外光であり、Krの4s⁶(基底準位)と

$4p^5-5p[1/2, 0]$ のエネルギー差を利用した 2 光子共鳴 4 波混合法を利用して発生させる。これに必要な励起光源、212.556 nm (λ_1) および 820.649 nm (λ_2) の高出力・高安定コヒーレント光源の実現のために、図のように全固体レーザーおよびファイバーレーザーの最新技術を導入・融合させ、高出力で安定化システムを実現する。

212.556 nm 光源は、分布帰還型半導体レーザー、ファイバー増幅器によって構成された発振器系、再生増幅器、中間増幅器、最終増幅器によって構成された全固体増幅器系、および非線形周波数変換器系を融合させることによって完成する。中間増幅器までの系において、波長 1062.78 nm、パルス幅 2 ns、出力エネルギー 80 mJ を発生させ、この波長を非線形周波数変換器系において、第 2、第 4、第 5 高調波と変換し、212.556 nm を得る。

820.649 nm 光源は、230 GHz のスペクトル線幅を実現するための広帯域スペクトル半導体レーザー、光パラメトリック発振器、および光パラメトリック増幅器によって構成する。

これら 2 つの波長のビームを Kr/Ar ガスセルに入射し、2 光子共鳴 4 波混合法によるミュオニウムライマン 共鳴線の発生を行う。

(3) 超冷ミュオンビームの開発

本研究で製作したレーザーを A01 班が確立した技術を元に U-line で準備する高温タングステン標的と組み合わせて物性研究用の大強度超低速ミュオンビーム供給を行う。これと並行して、A04 班ではその先の g-2 研究を目指し、超冷化に重点を置いた開発を行う。超冷却ビームの開発には、ミュオニウム発生源の低温化により、エミッタンスを更に向上させ、高精度同軸型ビーム収束のみの初期加速光学によるビームの小径化、エネルギーに時間変調を掛けたレーザーと位相回転を組み合わせてサブ μm のビーム収束を実現し、RF による位相回転によるパンチングでビームの短パンチ化を目指す。

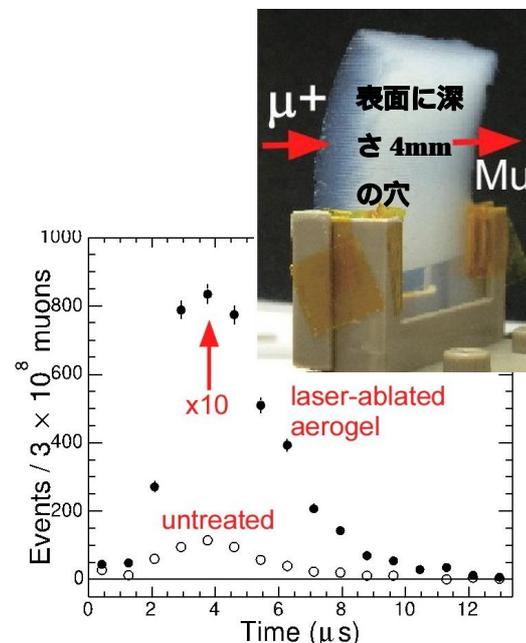
エアロゲル標的を元としたビーム開発には高温タングステンとは別途の取り扱い難しさが予測できる。このためには高温タングステン標的を用いて超高真空環境下で表面物性研究を目指す U-line とは別途の設備であることが望ましい。このために専用のミュオンビームポートとレーザー設備が整っている理研 RAL ミュオン施設ポート 3 をエアロゲル標的ベースの試験場所として考える。

4. 研究成果

(1) 低温ミュオニウム生成標的の開発 (河村・三部・岩崎)

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、ドリフトチャンパ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 $\sim 300\mu\text{m}$ 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/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、さらなる最適化試験を進める。



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

(2) 新規レーザーシステム開発(斎藤、和田)

「ライマン レーザーシステム」では、ミュオニウム解離用 122nm・100 $\mu\text{J}/\text{pulse}$ 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 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。レーザーシステムを J-PARC U-line に持ち込み、大強度ライマン 光発生を行った。

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。メインアンプ用の最後の大口径 Nd:YAG 結晶 (直径 12mm 長さ 80mm) の完成

が遅れているために 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 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、ミュオニウムのイオン化においてライマン 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、メインア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 レーザーを諮問委員会の助言に従い導入した。

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。さらにビーム輸送システム、レーザー強度などの最適化により、PSI を上回る世界最高強度を達成し、物性研究への供用を行う予定である。

最大の課題は、メインアンプ最終段の大口径 Nd:YAG 結晶成長条件の最適化である。セラミック結晶は、高温高圧焼成後に中心部の透明度を高めるためのアニールを行っているが、この際に Nd が熱で結晶から逃げる性質を持ち、逆に外縁部が白濁するという困難を抱えている。この困難を克服するため、メーカーとも緊密に連携を取り、改善を重ねている。これと並行して、今後も引き続き、理研 RAL で新ミュオニウム生成標的の性能評価試験に必要なレーザー開発を行う。

(3) 超冷ミュオンビームの開発(岩崎、岡田、三部)

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ャンバーを完成した。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 27 年 9 月、12 月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。

課題の 1 つであった短パルス化は、ミュオン g-2/EDM 実験の後段加速として RFQ を採用することにより、短パルス化の要請が大きく緩和されたことを受け、他の課題を優先して進めることとした。一方、RFQ 加速試験のために、強度は低いもののレーザーを必要としない直接減速法による低速ミュオン源の製作を別途すすめた。2016 年 2 月末に J-PARC D-line で直接減速法によるビーム試験を行い、強度は低いながら低速ミュオンが得られていることを確認した。

(4) ミュオニウム再偏極(中嶋)

新規レーザーの仕様を元にナノ秒パルスによる再偏極化の理論研究を行い、新規常温ミュオニウム生成標的と組み合わせれば再偏極化が十分実現可能であるとの評価を得た。これを元に、試験装置の概念設計を進めた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 14 件)

(1) N. Saito, Y. Oishi, K. Miyazaki, K. Okamura, J. Nakamura, O. A. Louchev, M. Iwasaki, S. Wada, High-Efficiency Generation of Pulsed Lyman- Radiation by Resonant Laser Wave Mixing in Low Pressure Kr-Ar Mixture, 査読有、巻24、2016、7566-7573 doi: 10.1364/OE.24.007566

(2) 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, P. Strasser, M. Tabata, D. Tomono, K. Ueno, E. Won and J-PARC muon g-2/EDM collaboration, Studies on Muonium Production from Silica Aerogel with Substructure for the Muon g-2/EDM Experiment, JPS Conf. Proc., 査読有、8巻、2015、025016-1-6

(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巻、2015、1237-1244 DOI: 10.1364/JOSAB.32.001237

(4) 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, Prog. Theor. Exp. Phys., 査読有、2014、091C01
DOI: 10.1093/ptep/ptu116

(5) Y. Oishi, K. Okamura, K. Miyazaki, N. Saito, M. Iwasaki, and S. Wada, All-Solid-State Laser Amplifiers for Intense Lyman- α Generation, JPS Conf. Proc., 査読有、2巻、2014、010105-1-5

(6) K. Okamura, N. Saito, K. Miyazaki, Y. Oishi, O.A. Louchev, M. Iwasaki, and S. Wada, Temporally Resolved Spectral Structure of 821nm Broad-Area Laser Diode Seeder for Muonium Lyman-alpha Generation, JPS Conf. Proc., 査読有、2巻、2014、010106-1-4

(7) T. Mibe for the TRIUMF S1249 collaboration, Measurement of muonium emission from silica aerogel, JPS Conf. Proc., 査読有、2巻、2014、010107-1-4

(8) K. Miyazaki, N. Saito, K. Okamura, Y. Oishi, O.A. Louchev, M. Iwasaki, and S. Wada, Tunable 820.65 nm light source by injection-seeded optical parametric oscillator and amplifier for Muonium Lyman-alpha Generation, JPS Conf. Proc., 査読有、2巻、2014、010402-1-4

(9) S. Kanda, H. Fujimori, Y. Fukao, Y. Ikeda, 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 Conf. Proc., 査読有、2巻、2014、010404-1-7

(10) 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, and S. Yoshida, Measurement

of muonium emission from silica aerogel, Prog. Theor. Exp. Phys., 査読有、2013、103C01
DOI: 10.1093/ptep/ptt080

(11) 三部勉、石田勝彦、佐々木憲一、ミュオン g-2/EDM 実験、高エネルギーニュース、査読無、31巻、2012、209-218

(12) 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巻、2012、17566
DOI: 10.1103/PhysRevA.88.013409

(13) 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巻、2012、2420-2424

(14) 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巻、2011、003842-1-9
DOI: 10.1103/PhysRevA.84.033842

〔学会発表〕(計3件)

(1) T. Mibe, New measurement of muon g-2/EDM with ultra-cold muon beam, Interplay between LHC and Flavor Physics, 2016年3月14日~2016年3月15日、名古屋市、名古屋大学
国際会議、招待講演

(2) N. Saito, High-efficient generation of coherent Lyman- α radiation in resonant wave mixing, International USMM & CMSI Workshop: Frontiers of Materials and Correlated Electron Science - from Bulk to Thin Films and Interface, 2016年1月5日~2016年1月9日、東京、東京大学本郷キャンパス

(3) 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), 2015年9月7日~2015年9月11日、Faro, Portugal
国際会議、招待講演

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕
出願状況（計0件）

取得状況（計0件）

〔その他〕

プレスリリース（2014年9月18日）：「室温
ミュオニウムの大量生成に成功 - ミュオン
異常磁気能率・電気双極子能率の超精密測定
による「標準理論の綻び」検証に近づく - 」
<http://www.kek.jp/ja/NewsRoom/Release/20140918140000/>

受賞：高エネルギー加速器科学研究奨励会
平成27年度西川賞「超冷ミュオンビーム
実現の為にミュオニウム標の開発」三部
勉、石田勝彦

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岩崎 雅彦 (IWASAKI, Masahiko)
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
研究者番号：60183745

(2) 研究分担者

中嶋 隆 (NAKAJIMA, Takashi)
京都大学・エネルギー理工学研究所・
准教授
研究者番号：50281639

(3) 研究分担者

河村 成肇 (KAWAMURA, Naritoshi)
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
研究者番号：60311338

(4) 研究分担者

三部 勉 (MIBE, Tsutomu)
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
研究者番号：80536938

(5) 研究分担者

和田 智之 (WADA, Satoshi)
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
研究者番号：90261164

(6) 研究分担者

斎藤 徳人 (SAITO, Norihito)
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
研究者番号：90333327

(7) 連携研究者

齊藤 直人 (SAITO, Naohito)
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
研究者番号：20321763

(8) 連携研究者

横山幸司 (YOKOYAMA, Koji)
Queen Mary University of London・Physics
Department・Post-doctoral Research
Assistant
研究者番号：30569033

(9) 連携研究者

松崎禎市郎 (MATSUZAKI, Teiichiro)
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
研究者番号：10134842

(10) 連携研究者

友野 大 (TOMONO, Dai)
大阪大学・核物理研究センター・教務補佐
員
研究者番号：40415245

(11) 連携研究者

岡田 信二 (OKADA, Shinji)
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
研究者番号：70391901

(12) 連携研究者

大石 裕 (OISHI, Yu)
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
研究者番号：60569804