

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 10 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：2009～2013

課題番号：21111003

研究課題名(和文)初期宇宙探査のための超高感度アレイデバイスの研究開発

研究課題名(英文)Development of high-sensitivity array devices for exploring the early universe

研究代表者

大谷 知行(Otani, Chiko)

独立行政法人理化学研究所・光量子工学研究領域・チームリーダー

研究者番号：50281663

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 415,000,000円、(間接経費) 124,500,000円

研究成果の概要(和文)：CMB、CIRB観測用1,000画素クラス超伝導アレイ検出器開発を目指し、STJ検出器開発から開始したが、並行してMKIDs検出器を国内で初めて開発し、より良い感度とアレイ読み出しに成功した。そこでMKIDs検出器開発を進め、600素子アレイ(歩留まり95%)、720素子Siレンズ、無反射コート、4000ch信号読み出しシステムを新規開発した。そして、電気的な雑音等価電力 $6e-18$ W/ Hz、偏光に対する実測の雑音等価温度 $190 \mu\text{K} \cdot \text{sec}$ (世界最高値)を達成した。また、CIRB用512素子アレイ、汎用FPGAを用いた読み出しシステム、GroundBIRD実験の開発を進めた。

研究成果の概要(英文)：In the development of $\sim 1,000$ -ch detectors for CMB and CIRB observations, we had started from the development of STJ detectors. However, the better performance had been obtained by the MKIDs detectors, and then we have shifted our the development to the MKIDs detectors for the better sensitivity and the larger array format. Up to now, we have achieved the 600-pixel detector array with the 95% fabrication yield, 720-pixel Si lens array, AR coating, and 4,000 ch readout system. In addition, we have also achieved the electrical noise equivalent power (NEP) of $6e-18$ W/ $\sqrt{\text{Hz}}$ as well as the optical noise equivalent temperature of $190 \mu\text{K} \sqrt{\text{sec}}$ which is the world record for the polarization experiment. Moreover, we have fabricated the 512-pixel device for CIRB observations, and we have developed the readout system with the commercial FPGA board and the prototype system for the GroundBIRD experiment.

研究分野：数物系科学、工学

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理、電気電子工学、電子デバイス・電子機器

キーワード：宇宙マイクロ波背景放射(CMB) 宇宙赤外線背景放射(CIRB) 超伝導検出器 マイクロ波力学インダクタンス検出器(MKIDs) Cooper対解離

1. 研究開始当初の背景

本計画研究の目的は、「宇宙創成の物理」の解明に不可欠なCMB偏光Bモード観測およびCIRB観測用の1,000画素クラス超伝導アレイ検出器の開発である。CMB観測の最大の鍵は検出器の規模と感度であり原理的な限界は光子ノイズで決まる(雑音等価電力NEP=2×10⁻¹⁸ W/√Hzに相当)。光子ノイズリミットの計測を行うには検出器にNEP<10⁻¹⁸ W/√Hzという高い感度が求められる。しかし、世界的に主流の超伝導転移端センサ(TES)を用いたボロメータの感度はNEP=2×10⁻¹⁷ W/√Hz(@0.3K)にとどまっており、理論限界もNEP>2×10⁻¹⁸ W/√Hz(@0.1K)と不十分である。加えて、TESは常伝導・超伝導転移の急峻な抵抗変化を利用するため、動作温度が下がるとデバイス材料も変わり、要求性能達成には長期の開発が必要となる。

2. 研究の目的

そこで、本計画研究では、超伝導体内のCooper対解離を用いた量子検出型検出器を軸として、以下の4項目を実施し、他国の追従を許さない超高感度・高精度のCMBおよびCIRB観測用デバイスの実現を目指すとともに、将来の衛星実験に向けたシステム開発も計画研究A01と連携して進めることとした。

- (1) CMB観測用の1,000画素クラスの検出デバイスの開発
- (2) CIRB観測用の1,000画素クラスの検出デバイスの開発
- (3) 多素子信号読み出しのための交流読み出し技術の開発
- (4) 衛星搭載実験のためのプロトタイプ試験システムの開発

3. 研究の方法

CMBやCIRB観測用の超高感度アレイ検出器の開発では、入射波による超伝導体中のCooper対解離を用いた量子型検出器として、当初は超伝導トンネル接合素子(STJ)検出器の研究を進め、薄膜マッチング型、分布線路型と呼ばれる新たなSTJ検出器を開発することとした。一方、同じくCooper対解離を用いる検出器で、膜構造がより簡素で、多数素子の信号読み出しが圧倒的に容易なマイクロ波力学インダクタンス検出器(MKIDs)も並行して研究開発を進めた。MKIDsは、それまで国内に実績が全くなく、本計画研究での推進によって初めて研究開発が始められた。その結果、STJ検出器と同等以上の感度とアレイ読み出しに成功したことから、当初計画を発展させる形で研究開発の中心をMKIDs検出器に据えることとした。また、並行して、A01と連携して冷凍機・光学系を含む地上観測システムGroundBIRDの開発を進めた。

4. 研究成果

上記の研究開発推進の結果、理研、国立天文台、高エネ研、岡山大の4機関の連携のもと、以下のような成果を得た。まず、検出デバイスについては、電気的雑音等価パワーNEP=6×10⁻¹⁸ W/√Hz(国内最高値)、CMB用600素子アレイ、CIRB用512素子アレイ、4,000ch信号読み出しシステムを実現した。また、A01と連携して冷凍機・光学系を含む地上観測システムGroundBIRDの開発を進め、技術的なブレークスルーとなる回転冷却系(特許申請済)を開発して、パルス管冷凍機とHe減圧冷凍ステージを組み込んだ望遠鏡プロトタイプシステムの設計・製作を進めた。また、集光用720素子Siレンズアレイ、無反射コーティング、多層熱シールドなど光学系に関する新規技術を開発し、システム化技術開発も推進した。また、光学系のビーム形状や偏光感度を実験室で実測できる評価システムも新たに開発し、偏光感度では光学的雑音等価温度(optical NET)で世界最高値となる190 μK√secを達成した。また、読み出しシステム開発において、汎用のFPGAボードを用いたシステムも開発し、KEKのOpenItというフレームワークを通じて公開し、MKIDs技術の利用を他分野へ広げるための体制作りも進めた。以下、それぞれの項目について述べる。

(1) CMB用デバイス開発

(a) STJ検出器開発

STJ検出器は、入射放射によるCooper対解離で発生した余剰電子により発生するトンネル電流を読み出す。このSTJ検出器として、薄膜マッチング型検出器、および、分布線路型検出器を新たに考案し、原理実証実験に成功した。分布線路型STJでは、Nb超伝導体中の準粒子の平均自由行程(~10 μm)に対して十分長い分布線路長の素子でギャップ周波数における感度上昇が確認された。また、Al層の厚みでギャップ周波数を制御できることが明らかになり、同じタイプの検出器でCMB観測にもCIRB観測にも対応可能であることがわかった。

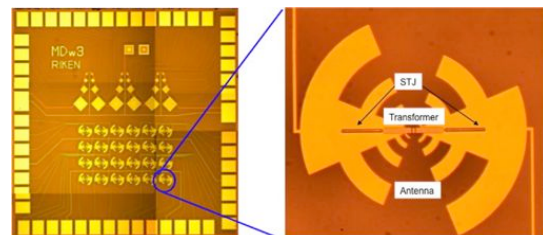


図1. 作製した分布線路型STJ検出器

(b) MKIDs検出器開発

分子線エピタキシー法(MBE)を用いた高

品質 Al 超伝導体をもちいたアンテナ結合型 MKIDs カメラを開発した (図 2)。このカメラを 0.1K に冷却して、608 素子中 584 素子で信号を観測し、歩留り 95% を達成した (図 3)。また、0.2 K 以下の温度で雑音等家電力 $NEP=6 \times 10^{-18} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$ を達成した (図 4)。

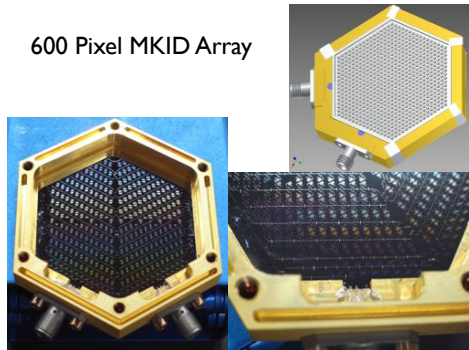


図 2. 600 画素の 220 GHz MKID カメラ

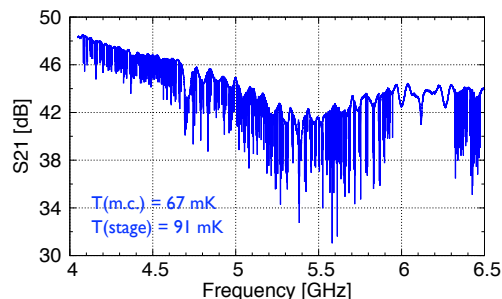


図 3. 600 画素の共振信号

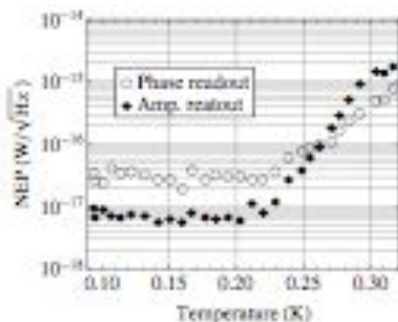


図 4. Al-MKIDs の NEP 測定結果

これと並行して、窒化チタン (TiN) を用いた MKIDs 開発も進めた。TiN は MKID の素材として優れた超伝導材料であり、以下のような特長を有する。1. 物理的に堅牢で冷却に伴う熱ストレスに強い、2. MKID で共振 Q 値が 10^7 を越える、3. MKIDs の Responsivity が Al に比べて 100 倍程度高い、4. 窒素ガスの混入比を変えることで転移温度を制御でき実験に合わせた最適化が可能。まず、反応性スパッタの成膜パラメータ制御で 0.4K~4.5K の転移温度を持つ TiN 膜の作製に成功したが、窒素ガス流量やスパッタ電圧などによる制御では、膜の位置により超伝導転移温度にばらつきがでるといった問題がわかった。そこで、安定成膜が可能な Ti と TiN を交互

に 10 数層積層することで、位置依存性が小さく Tc 制御が容易な成膜に成功した。この Ti を低 Tc の TiN に置き換えることで制御性の高い TiN 膜が実現可能との見通しを得た。また、検出感度の改善に向けて MBE 装置による単結晶化を試みた。その結果、酸素の混入を低減し、さらに基板加熱と高速基板回転を導入することで高品位の (200) 配向の TiN を安定的に成膜する条件を得た。

(2) CIRB 用デバイス開発

NbTiN-MKID, Nb-MKID を製作し、両者ともに共振器の Q 値が 10^6 と非常に高い値を得た。また、その温度依存性を測定して理論値との一致を確認した。また、超伝導転移温度は約 5.8K の TiN 膜を用いて 512 画素の TiN-MKIDs (周波数帯域 0.5THz 以上) を作製した (図 5)。

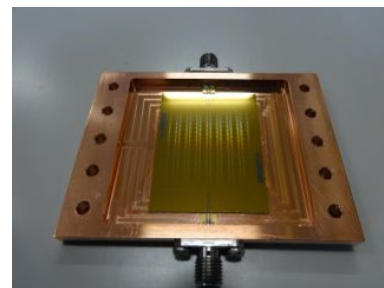


図 5. 512 画素の TiN-MKIDs アレイ

(3) 信号読み出しシステム開発

帯域 270 MHz, 最大チャンネル数 4,000 の複素 FFT 回路を開発し、MKID100 画素カメラの読みだしを実証した (図 6)。また、1 画素を読みだした時のノイズと 100 画素を同時に読み出したときのノイズレベルが等しいことを確認した。

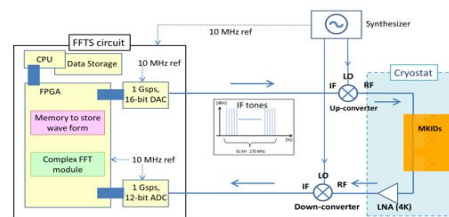


図 6. 複素 FFT を用いた MKID 信号読み出し回路のブロック図

加えて、読み出し技術の汎用化を目指して、市販 FPGA ボードと ADC/DAC を含む読み出しシステムを開発し、32 ch 同時ホモダイン読み出しに成功した (図 7)。FPGA パワースペクトルを測定したところ、MKID を測定するのに十分なノイズレベルであることが分かった (図 8)。このシステム化技術は、KEK のオープンコンソーシアム OpenIt を通じて公開されており、MKIDs を他の用途に用いる際にも同様に利用が可能であり、本技術の利用拡大に貢献すると期待される。

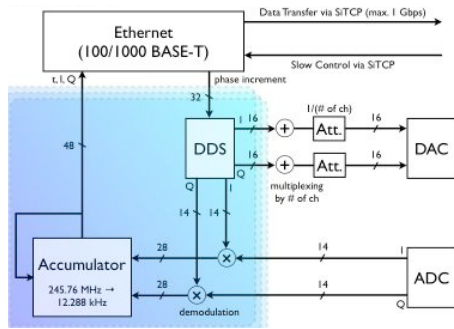


図 7. 32ch ホモダイン同時読み出しによる測定系のノイズレベル。

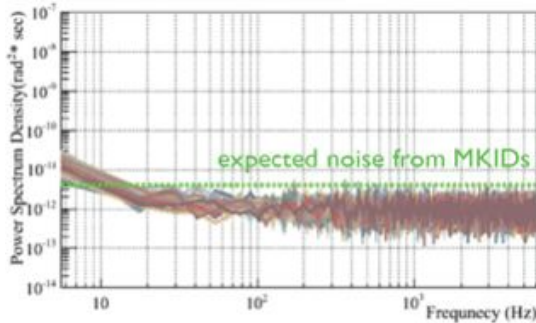


図 8. 32ch ホモダイン同時読み出しによる測定系のノイズレベル。

(4) 試験観測システム開発

(a) 冷凍機開発

CMB 観測の地上評価を目的として、冷凍機の開発を実現した。特に、単なる検出システムの評価ではなく、科学的成果が得られる実験の実現につながる実験系の構築を目的として、天空領域を回転スキャンして観測を行える GroundBIRD 実験の実現のために、高速回転ステージとパルス管冷凍機ユニットを統合した試験観測装置を構築した。特に、機械式冷凍機を用いて回転スキャン観測を行うためのガス導入型回転継手、及び、従来の観測で懸案となっていた熱フィルタ（ともに特許申請中）を新たに開発し、He3/He4 減圧型冷却系（通称、He10）を搭載して冷却試験を行い、望遠鏡架台を回転させた状態で最低到達温度 0.23 K を達成した。また、連続運転を想定してリチャージ操作の試験を行い成功した（図 9）。さらに、これを元に MKIDs 検出器を搭載した GroundBIRD プロトタイプ実験系を構築して試験を行った（図 10）。

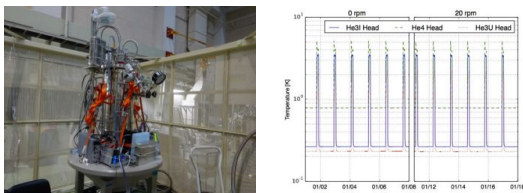


図 9. (左) プロトタイプ冷凍機システム。
(右) 連続運転時の温度試験の結果（左が無回転時 (0rpm)、右が高速回転時 (20 rpm)）。

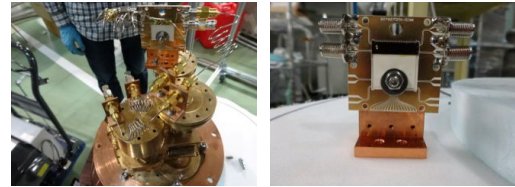


図 10. GroundBIRD プロトタイプの実験の様子（左：検出器搭載ステージ、右：光学系）

(b) 光学系開発

ミリ波 MKIDs カメラを効率よく望遠鏡と結合するために、Si レンズアレイを切削加工で製作した（図 11 左）。これを MKIDs と組み合わせてカメラとして構成し、温度 0.3K に冷却してビームパターンを測定した。その結果、シミュレーションと一致する結果が得られた（図 12）。

また、シリコンの反射防止として、2 種の低温用エポキシ材を混ぜ合わせ、その比率で誘電率を制御し、厚みは切削加工した反射防止膜を開発した（図 11 右）。また、サブ波長構造を利用したアルミナ反射防止膜開発も行った。



図 11. Si レンズアレイと反射防止膜

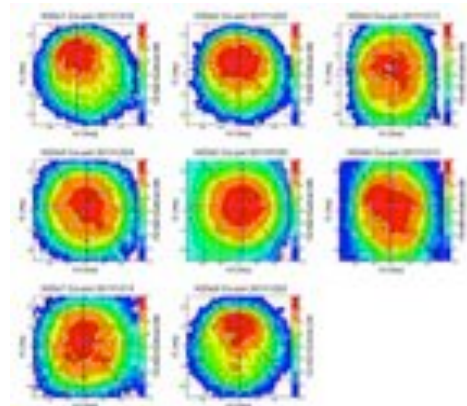


図 12. 220GHz MKIDs のビームパターン

(c) CMB 偏光観測シミュレータの開発

CMB 偏光観測では、CMB 成分に比べて遥かに微弱な偏光成分を検知するため、観測の系統誤差低減が重要である。そこで、CMB 偏光観測シミュレータを開発し、超伝導検出器を搭載して評価実験を行った（図 13）。その結果、実測の光学的雑音等価温度 (NET) が $190 \mu\text{K}\sqrt{\text{sec}}$ に達し、BICEP2 実験で用いら

れた TES 検出器をしのぎ世界最高値が得られ、シミュレータの正常動作と MKIDs 検出器の高い感度の両方が確認された。

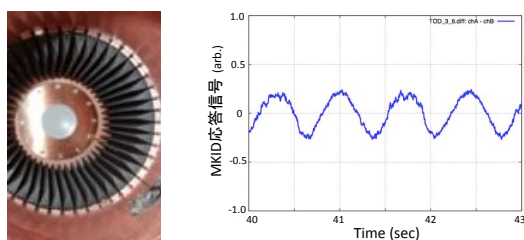


図 13. (左) CMB 偏光観測シミュレータ内の黒体光源、(右) モジュレーション信号。

(5) 波及効果、その他

本学術領域で蓄えられた技術を、基板からのフォノンの検出器として応用した高感度 X 線カメラの開発が開始されている。放射光施設での物性実験への応用が考えられる。また、4K 以下の極低温で高検出効率を持つ可視光・紫外線検出器としても応用可能なため、液体ヘリウムを用いた暗黒物質探索用の検出器としての利用が提案されている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 26 件)(査読あり 18 件)

- ① K. Karatsu, M. Naruse, T. Nitta, M. Sekine, S. Sekiguchi, Y. Sekimoto, T. Noguchi, Y. Uzawa, H. Matsuo, H. Kiuchi, “Measurement of MKID Performance with High-Speed and Wide-Band Readout System,” *J. Low Temp. Phys.*, Published online: 14 Feb. 2014. DOI: 10.1007/s10909-014-1115-7 (査読あり)
- ② M. Naruse, Y. Sekimoto, T. Noguchi, A. Miyachi, K. Karatsu, T. Nitta, M. Sekine, Y. Uzawa, T. Taino, H. Myoren, “Optical Efficiencies of Lens-Antenna Coupled Kinetic Inductance Detectors,” *IEEE Trans. THz Sci. Tech.*, **3**, pp. 180-186 (2013). DOI: 10.1117/12.926743 (査読あり)
- ③ T. Nitta, M. Naruse, Y. Sekimoto, K. Mitsui, N. Okada, K. Karatsu, M. Sekine, H. Matsuo, T. Noguchi, Y. Uzawa, M. Seta, N. Nakai, “Beam Pattern Measurements of Millimeter-Wave Kinetic Inductance Detector Camera With Direct Machined Silicon Lens Array,” *IEEE Trans. THz. Sci. Tech.*, **3**, pp. 56-62 (2013). DOI: 10.1109/TTHZ.2012.2235123 (査読あり)
- ④ S. Oguri, J. Choi, O. Tajima, M. Hazumi, E. Won, M. Yoshida, M. Kawai, “GroundBIRD experiment—detecting CMB polarization power in a large angular scale from the ground,” *J. Low Temp. Phys.*, Published Online, 28 Feb., pp. 1-7 (2014). DOI:10.1007/s10909-014-1138-0 (査読あり)

- ⑤ K. Takahashi, S. Mima, S. Oguri, C. Otani, O. Tajima, H. Watanabe, M. Yoshida, “Calibration system with modulated polarization source for superconducting detectors at 0.1 K,” *J. Low Temp. Phys.*, published online, 23 Feb., pp. 1-7 (2014). DOI:10.1007/s10909-013-1054-8 (査読あり)

〔学会発表〕(計 92 件)(招待講演 24 件)

- ① C. Otani, “Multi-pixel superconducting direct detectors for astrophysical observations,” GDR-I Workshop 2013, Montpellier, France, 2013.12.10. (招待講演)
- ② O. Tajima, “GroundBIRD Experiment,” International Conference on Cosmic Microwave Background (CMB 2013), Okinawa, Japan, 2013.6.13. (招待講演)
- ③ Y. Sekimoto, “Development of Millimeter-wave MKID camera for LiteBIRD and Antarctica Dome Fuji Telescope,” ASIAA seminar, Taipei, Taiwan, 2013.5.15. (招待講演)
- ④ C. Otani, “Development of TiN MKIDs for CMB observations,” The 13th Workshop on Submillimeter Receiver Technologies in East Asia, Nanjing, China, 11-12 Jan., 2013. (招待講演)
- ⑤ C. Otani, “Development of quantum superconducting detectors in RIKEN,” in ‘The 1st International Workshop on Superconducting Sensors and Detectors (IWSSD 2012),’ Daejeon, South Korea, Dec. 12-15, 2012. (招待講演)

〔図書〕(計 1 件)

- ① 大谷知行, “1.2.1 テラヘルツ波検出器,” 平成22年度光技術動向調査報告書, pp. 2-8 (2011).

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 2 件)

名称：電波測定装置
 発明者：田島 治, 小栗秀悟
 権利者：同上
 種類：特許
 番号：特願 2013-116571
 出願年月日：2013 年 6 月 3 日
 国内外の別：国内

名称：連続回転系で極低温を実現する装置
 発明者：田島 治
 権利者：同上
 種類：特許
 番号：特願 2013-027675
 出願年月日：2013 年 2 月 15 日
 国内外の別：国内および国外(米国)

○取得状況（計1件）

名称：超伝導膜表面抵抗推測方法、超伝導膜表面インピーダンス推測方法、超伝導薄膜共振回路Q値推測方法、超伝導膜表面抵抗推測装置、及び、超伝導検出器製造方法

発明者：成瀬 雅人、野口卓、関本裕太郎

権利者：自然科学研究機構

種類：特許

番号：特開 2011-060793

出願年月日：2009年9月5日

公開年月日：2011年3月24日

国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ

<http://cbr.kek.jp/a02-gaiyo.html>

ニューズレター「ゆらぎ」2012年秋号

http://cbr.kek.jp/newsletter/2012_newsletter_autumn.pdf

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大谷 知行 (OTANI, Chiko) (H21-25)

独立行政法人理化学研究所・光量子工学研究領域・チームリーダー

研究者番号：50281663

(2) 研究分担者

関本 裕太郎 (SEKIMOTO, Yutaro) (H21-25)

国立天文台・先端技術研究所・准教授

研究者番号：70262152

石野 宏和 (ISHINO, Hirokazu) (H21-25)

岡山大学大学院・自然科学研究科・准教授

研究者番号：90323782

田島 治 (TAJIMA, Osamu) (H24-25)

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：80391704

岡村 崇弘 (OKAMURA, Takahiro) (H22-24)

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・助教、准教授

研究者番号：90415042

樋口 岳雄 (HIGUCHI, Takeo) (H21-23)

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・助教

研究者番号：40353370

都丸 隆行 (TOMARU, Takayuki) (H22)

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：80391712

(3) 連携研究者

美馬 覚 (MIMA, Satoru) (H24-25)

独立行政法人理化学研究所・光量子工学研究領域・テクニカルスタッフ、特別研究員

有吉誠一郎 (ARIYOSHI, Seiichiro) (H21-23)

独立行政法人理化学研究所・基幹研究所・研究員

研究者番号：20391849

DAYAMANTHI, Thushara (H25)

独立行政法人理化学研究所・光量子工学研究領域・基礎科学特別研究員

野口 卓 (NOGUCHI, Takashi) (H21-25)

自然科学研究機構・国立天文台・教授、センター長

研究者番号：90237826

鶴沢 佳徳 (NOGUCHI, Takashi) (H21-25)

自然科学研究機構・国立天文台・准教授

研究者番号：00359093

唐津 謙一 (KARATSU, Kenichi) (H21-25)

自然科学研究機構・国立天文台・研究員

研究者番号：80624783

吉田 光宏 (YOSHIDA, Mitsuhiro) (H21-25)

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：60391710

小栗 秀悟 (YOSHIDA, Mitsuhiro) (H21-25)

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・研究員

服部 香里 (HATTORI, Kaori) (H22-23)

岡山大学・自然科学研究科・特任助教

岐部 佳朗 (KIBE, Yoshiro) (H24-25)

岡山大学・自然科学研究科・特任助教

(4) 研究協力者

古川 昇 (FURUKAWA, Noboru) (H23-25)

独立行政法人理化学研究所・光量子工学研究領域・テクニカルスタッフ

成瀬 雅人 (NARUSE, Masato) (H24-25)

埼玉大学・工学研究科・助教

研究者番号：10638175