

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：14401
研究種目：若手研究
研究期間：2020～2023
課題番号：20K14487
研究課題名（和文）中性子電気双極子モーメント探索のための加速器施設内の環境磁場補償システムの開発

研究課題名（英文）Development of an ambient magnetic field compensation system in an accelerator facility for the neutron electric dipole moment measurement

研究代表者
樋口 嵩（Higuchi, Takashi）

大阪大学・核物理研究センター・招へい准教授

研究者番号：90843772
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、TUCAN中性子EDM実験のための環境磁場補償システムを開発した。中性子EDM測定に要求される環境実現のため、高性能磁気シールドルーム(MSR)を開発してきたが、装置が設置される施設にはサイクロトロン加速器の漏れ磁場による数100 μT の強い背景磁場が存在し、そのMSRの遮蔽能力への悪影響が懸念された。そこで、この問題の解決のための環境磁場補償システムを開発した。MSR製作前に実験エリアで測定した3次元磁場分布をもとに、環境磁場、MSRと補償コイルを実装したシミュレーションを行い、MSR最外層の面内磁束密度強度を約半分に軽減するコイルを設計し、その試験製作と励磁試験を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で扱ったような磁気シールドルーム(MSR)は、代表的なものではベルリンPTBのBMSR-2など医療イメージングなどの応用のために、世界の数か所で共用施設として利用されているが、本研究のような加速器からの強い漏れ磁場が存在する場所に設置される例は過去にない。その意味で、本研究は、加速器施設内へのMSR導入の一つのモデルケースを提示した。これは将来の幅広い分野へのMSRの応用のために有意義な知見を与えると考えている。

研究成果の概要（英文）：In this project, an environmental magnetic field compensation system was developed for the TUCAN neutron EDM experiment. To achieve the magnetic field environment required for the experiment, a high performance magnetically shielded room (MSR) was developed. However, a background magnetic field of several hundred μT exists at the experiment site due to leakage from the cyclotron accelerator, and there was concern about its negative impact on the MSR shielding performance. In this context, we developed the ambient magnetic field compensation system. First, we obtained a three-dimensional magnetic field distribution from a measurement prior to the construction of the MSR. Based on this data, a simulation was developed that implemented the ambient magnetic field, the MSR, and the compensation coils. The system was designed to reduce the in-plane magnetic flux density in the outermost layer of the MSR by half. A test assembly of the system was completed and a charging test was performed.

研究分野：素粒子物理学

キーワード：電気双極子モーメント 加速器 磁場安定化 時間反転対称性 CP対称性の破れ 超冷中性子 中性子
磁気シールド

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

超冷中性子(Ultracold Neutrons, UCN)とは運動エネルギー約 300 neV 未満の中性子を指す。このような低エネルギーの中性子は、物質容器に蓄積可能という特長を持ち、中性子を用いた素粒子物理学において重要な役割を果たしている。そのひとつが、中性子の電気双極子モーメント(Electric Dipole Moment, EDM) の測定である。

非零の中性子の電気双極子モーメントは時間反転対称性を破る。これは場の量子論の基本的な対称性である CPT (荷電・パリティ・時間) 対称性から、CP (荷電・パリティ) 対称性の破れと等価であるため、CP 対称性の敗れの敏感なプローブであり、その探索は標準模型を超える物理の検証に有効である。現在の中性子 EDM の測定精度は、実験に使用できる UCN 数によって決まる統計精度が支配的である。研究代表者の所属する TUCAN(TRIUMF Ultracold Advanced Neutron)国際共同研究は、加速器ビームによる核破砕中性子発生と超流動ヘリウム中の非弾性散乱による UCN 生成法を組み合わせた世界最高強度の UCN 源を TRIUMF で開発している。中性子 EDM の測定原理は、物質容器中に蓄積された UCN のスピン歳差周波数を異なる電磁場の組み合わせに対して高精度に測定することによる。新 UCN 源によって、過去の実験の約 200 倍の実験容器中の UCN 密度を達成し、EDM 測定精度の一桁更新にあたる 10^{-27} ecm の統計精度での中性子 EDM 測定することを目指している。EDM 測定には高い磁場の安定性が要求され、目標とする精度での測定には、サイクルあたりの磁場変動を約 10 pT に抑える必要がある。このような安定な磁場環境を実現するために、4 層のミュンタルと 1 層の銅からなる約 10^5 の遮蔽係数をもつ外寸 $3.5 \times 3.5 \times 3.5 \text{ m}^3$ の磁気シールドルーム(Magnetically Shielded Room, MSR)を開発してきたが、装置の設計を進める中で、新たな課題が明らかになった。実験装置は、TRIUMF の Meson Hall という加速器施設に位置しているが、サイクロトロン加速器からの漏れ磁場による数 100 μT の背景磁場が存在する。このような強い磁場中に MSR が設置されると、MSR 最外層のミュンタルが飽和してしまう恐れがある。そこで、本研究では、背景静磁場を打ち消し、MSR での環境磁場中での動作を保証する環境磁場補償システムを開発してきた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、強い環境磁場が存在する加速器施設内で中性子 EDM 実験を行うために、MSR の面内磁束密度を打ち消す環境磁場補償システムの開発である。ミュンタルの飽和磁束密度は約 600 mT であるので、MSR 面内全領域において、それよりも十分に小さい磁束密度を達成することを目標とした。

3. 研究の方法

本研究を行うにあたり、まず、TRIUMF の Meson Hall において磁場分布の測定を行い、3 次元磁場分布を取得した。それを有限要素法シミュレーション中で再現し、外部磁場、MSR および補償コイルを実装したシミュレーションによって MSR 最外層に生じる磁束密度を十分に軽減する補償コイルのパラメーターを決定した。MSR の大きな体積領域に補償磁場を生成するためには、約 1000 アンペア・ターンの大きな起磁力が必要になる。そのため、過去に TRIUMF の別の施設での環境磁場補償コイルの製作経験がある技術スタッフに助言を受けながら詳細設計を行った。

また、研究期間中に MSR の一層ごとに建設される各段階で遮蔽係数を測定する性能評価を行うとともに、MSR の消磁用コイルを使って外部磁場の存在による遮蔽係数の変化を測定した。

4. 研究成果

図 1 に TRIUMF Meson Hall での 3 次元磁場測定の結果を示す。図 1(a)に示すように、MSR 設置予定領域を含む大きな体積領域に対し、フラックスゲート磁束計によって磁場分布を取得した[1]。磁場の鉛直成分(B_z)の 3 次元分布を図 1(b)に、それを x =定数で切断した 2 次元分布を図 1(c)に示す。床の近くに局所的に磁場の高い点が存在しており、これは、床の鉄筋が磁化しているためと考えられるが、MSR が設置される $z \geq 1 \text{ m}$ の領域ではおおむねなめらかな磁場分布であることが見て取れる。この分布は、MSR 中心から約 19 m 離れた点を中心とするダイポール磁場でおおむね再現できることが分かった。そこで、ダイポール磁場と MSR、正方形コイル

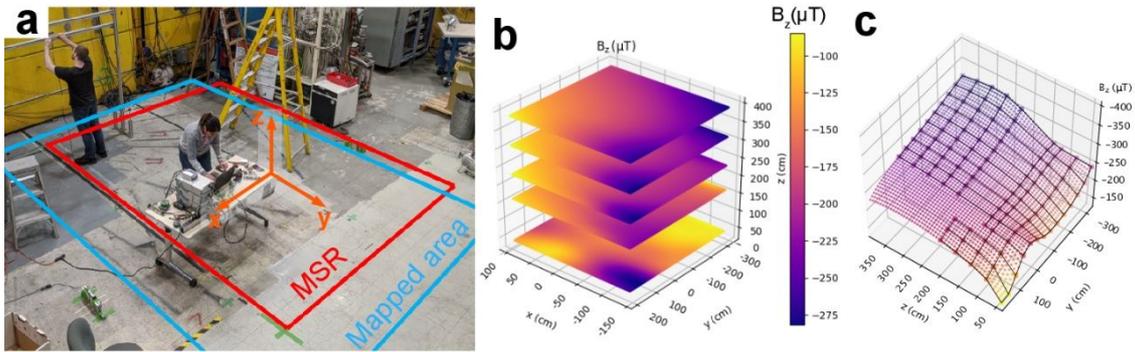


図 1 (a) TRIUMF Meson Hall での磁場分布測定の様子。MSR 設置予定領域を含む約 $2.4 \times 5.2 \times 3.9 \text{ m}^3$ の領域を測定した。(b) 鉛直成分(B_z)についての測定結果磁場の方向は鉛直下向きである。(c) x =定数の平面での鉛直成分磁場の分布。□のマークが測定によって直接得られたデータ点を、○のマークが内挿によって得られたデータ点を示す。文献[1]より。

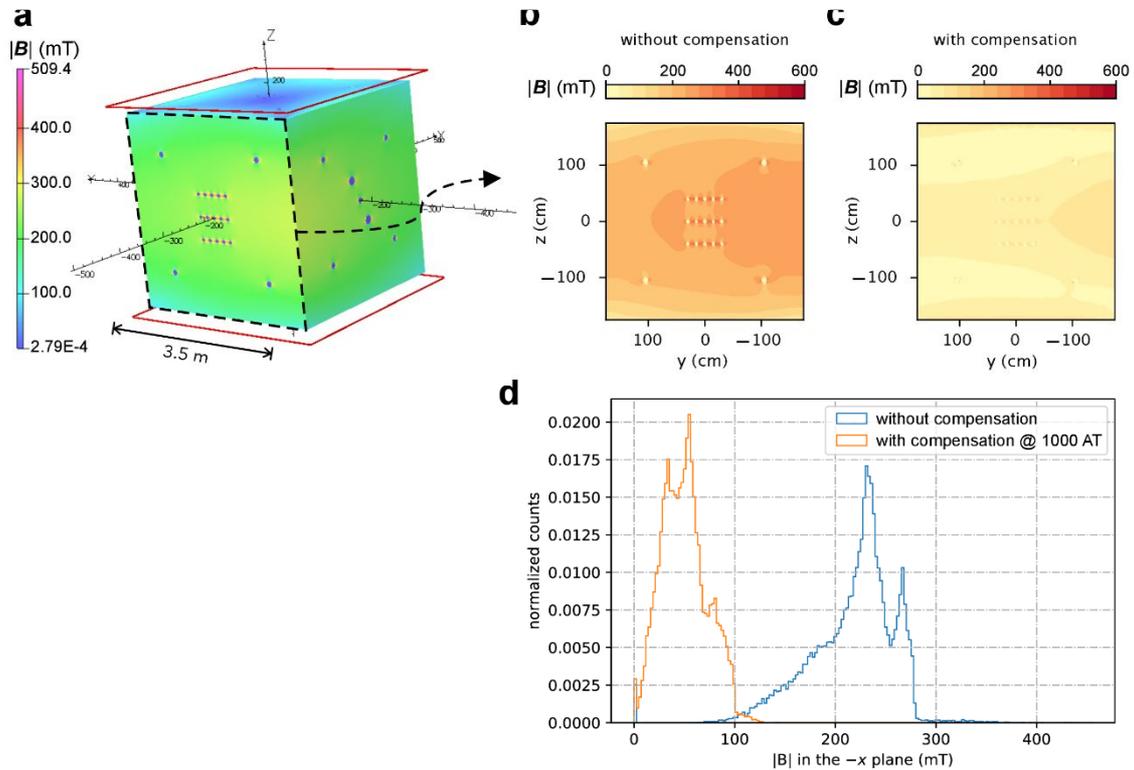


図 2 有限要素法シミュレーションの結果。(a) サイクロトロン加速器からの漏れ磁場を模したダイポール磁場中に置かれた MSR と 3.8 m の間隔で置かれた $4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ の正方形コイルのシミュレーションを行った。カラースケールは、MSR 最外層の面内の磁束密度強度を示している。(b)補償コイルの磁場なしの場合の $-x$ 軸方向の面内の MSR 最外層の磁束密度分布。(c) コイルに 1000 アンペア・ターンの電流を印加した場合の $-x$ 軸方向の面内の MSR 最外層の磁束密度分布。(d) (b),(c)の場合の磁束密度分布をヒストグラムに表したもの。文献[2]より。

を実装した有限要素法シミュレーションを行った。その一例を図 2 に示す。サイクロトロン加速器からの漏れ磁場を模したダイポール磁場中に、図 2(a)に示す MSR のモデルと正方形コイル対が置かれたセットアップにおいて、補償磁場なしの場合(図 2(b))と補償コイルに 1000 アンペア・ターンの電流を印加した場合(図 2(c))での $-x$ 軸方向の面内の磁束密度強度分布を比較した。図 2(d)には、2つの場合の磁束密度強度分布をヒストグラムで比較したものを示す。この結果から、補償磁場がない場合、磁束密度は大部分の領域において約 300 mT 以下になっているが、穴の近くではその約 2 倍まで増加し、飽和磁場に近い約 500 mT の領域もある。ここに、ダイポール磁場と逆向きに補償磁場を加えることで、全体的に磁束密度を約半分に軽減することができる。さらに、補償コイルのパラメータを系統的に調べるシミュレーションを行ったうえで、最終的な設計を決定した。図 3 に、環境磁場コイルを設置するためのプラットフォームの図面を示す。約 1000 アンペア・ターンという大きな起磁力を与えるために、コイルを 4 つの束に分け、それぞ

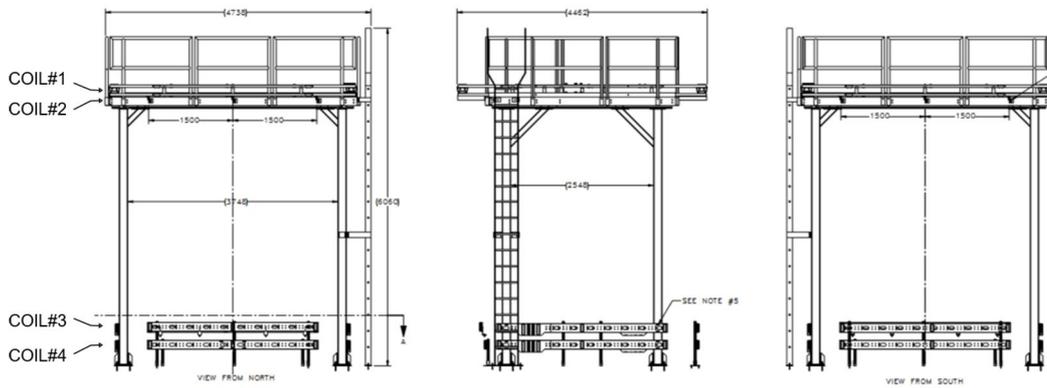


図 3 環境磁場補償コイル用のフレームの最終設計。4 つのケーブルの束がそれぞれ 20 巻きのコイルを構成し、アルミ製のケーブルトレイを使って固定される。

れに 20 ターンの巻き数のコイルを高電流対応ケーブルで構成する。MSR 製作工程の遅れのため、研究期間中に環境磁場補償システムの実機製作にいたらなかったが、図 4 に示すような実機の 1/4 にあたる部分を試験製作し、100 μ T までの励磁試験を行った。

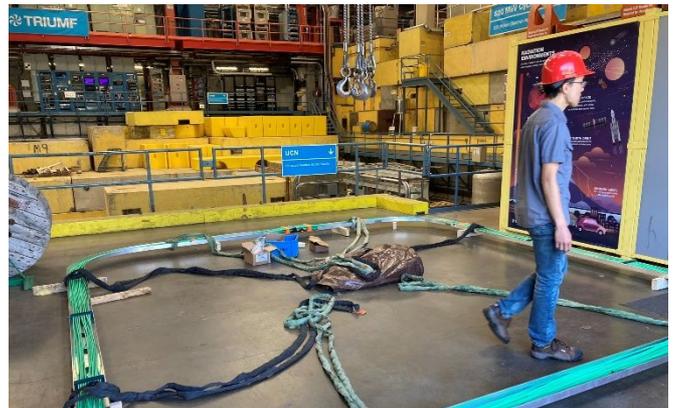


図 4 環境磁場補償コイルの試験製作。実機で使用するのと同じ部品を用いて組立手順の確認とクレーンでのつり上げ試験、および励磁試験を行った。

本研究期間中に MSR の建設過程での性能評価も行った。図 5 左に示す外部磁場印加用コイルを使って、MSR 各層が建設されていくそれぞれの段階において遮蔽係数を測定した。さらに、MSR 消磁用に取り付けられたコイルを使って、サイクロトロン加速器の磁場がない条件で、消磁用コイルが作る外部静磁場の印加による遮蔽性能の変化を測定した。結果、図 5 右に示すように、外部静磁場の印加によって遮蔽係数が有意に変化することが観測された。このことは、サイクロトロン加速器の漏れ磁場が MSR の遮蔽性能を悪化させることと、本研究で設計した環境磁場補償システムがその対策として有効であることを示唆する。

< 引用文献 >

- [1] T. Higuchi on behalf of the TUCAN collaboration, “Prospects for a neutron EDM measurement with an advanced ultracold neutron source at TRIUMF”, EPJ Web of Conferences **262**, 01015 (2022)
- [2] The TUCAN collaboration, “Status Update on the nEDM Experiment at TRIUMF”, TRIUMF (2022)

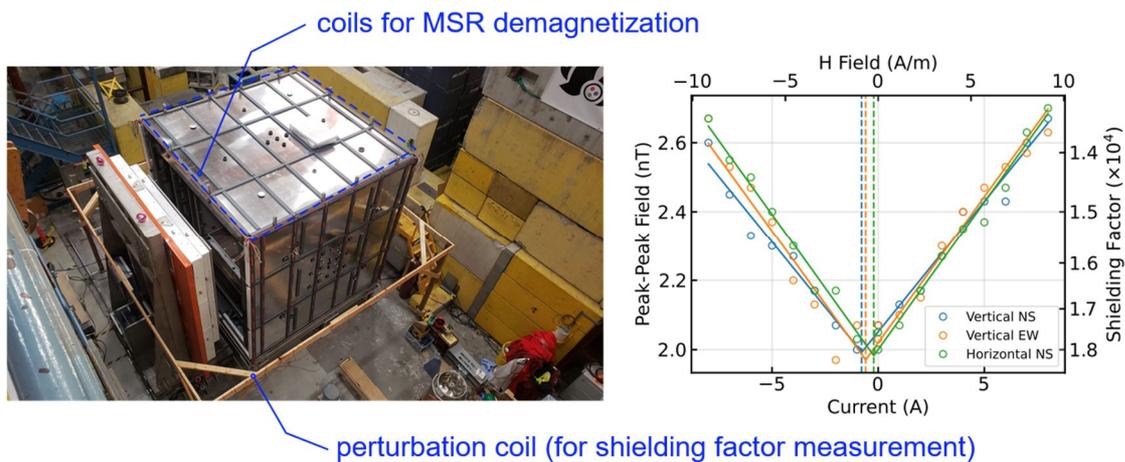


図 5(左) 最外層が取り付けられた MSR。遮蔽係数測定用に設置された一辺約 5.5 m の正方形の外部磁場印加用コイルと、MSR 消磁用に MSR の辺に沿うように取り付けられた消磁用コイルを指示する。(右) 消磁用コイルによって最外層に静磁場を印加した場合の遮蔽係数の変化、縦軸左スケールは、外部磁場印加用コイルで磁場を発生させた際に MSR 中心で測定された磁場であり、それが小さいことが高い遮蔽係数に対応する。この測定はサイクロトロン加速器が停止中に、それによる漏れ磁場がない条件で行われた。わずかに磁場を印加した場合が、遮蔽係数が最も高く、それよりも大きくすることで、遮蔽係数は有意に悪化した。

5. 主な発表論文等

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

| | |
|--|-------------------|
| 1. 著者名 Mark McCrea, TUCAN Collaboration | 4. 巻 PANIC2021 |
| 2. 論文標題 The TUCAN Neutron Electric Dipole Moment Experiment | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Proceedings of Science | 6. 最初と最後の頁 459 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.22323/1.380.0459 | 査読の有無 有 |
| 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 Ryohei Matsumiya et al. | 4. 巻 37 |
| 2. 論文標題 The Precision nEDM Measurement with UltraCold Neutrons at TRIUMF | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings | 6. 最初と最後の頁 20701 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSCP.37.020701 | 査読の有無 有 |
| 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 Higuchi Takashi, on behalf of the TUCAN collaboration | 4. 巻 262 |
| 2. 論文標題 Prospects for a neutron EDM measurement with an advanced ultracold neutron source at TRIUMF | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences | 6. 最初と最後の頁 01015 ~ 01015 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1051/epjconf/202226201015 | 査読の有無 有 |
| 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30件（うち招待講演 4件/うち国際学会 17件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 樋口 嵩 |
| 2. 発表標題 高強度超冷中性子源による中性子EDM探索にむけて |
| 3. 学会等名 RCNP研究会 研究用原子炉を用いた 原子核素粒子物理学 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Wolfgang Schreyer |
| 2. 発表標題 The TRIUMF UltraCold Advanced Neutron source and EDM experiment |
| 3. 学会等名 APS April Meeting 2022 (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Ruediger Picker |
| 2. 発表標題 The cyclotron based high-yield ultracold neutron source and neutron electric dipole moment experiment |
| 3. 学会等名 2022 CAP congress (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Mark McCrea |
| 2. 発表標題 Magnetic Holding Field Requirements for UCN Precession in the TUCAN EDM Experiment |
| 3. 学会等名 2022 CAP congress (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Maedeh Lavvaf |
| 2. 発表標題 Mapping the Magnetically Shielded Room for the Neutron Electric Dipole Moment Experiment at TRIUMF |
| 3. 学会等名 2022 CAP congress (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 赤塚 浩明 |
| 2. 発表標題 高強度超冷中性子源による中性子電気双極子モーメントの探索 |
| 3. 学会等名 RCNP研究会 中性子と原子で探る基礎物理 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Wolfgang Schreyer, Russell Mammei |
| 2. 発表標題 The TRIUMF UltraCold Advanced Neutron source and EDM experiment |
| 3. 学会等名 14th Conference on the Interactions of Particle and Nuclear Physics (CIPNP2022) (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Russell Mammei |
| 2. 発表標題 Magnetics for the TUCAN EDM experiment |
| 3. 学会等名 14th Conference on the Interactions of Particle and Nuclear Physics (CIPNP2022) (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Ruediger Picker |
| 2. 発表標題 Progress towards the TRIUMF ultracold neutron facility and neutron electric dipole moment experiment |
| 3. 学会等名 8th International Symposium on Symmetries in Subatomic Physics (SSP2022) (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Shinsuke Kawasaki |
| 2. 発表標題 Neutron Electric Dipole Measurement by TUCAN |
| 3. 学会等名 J-PARC Workshop "Progress for Fundamental Physics with Neutrons" (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Takashi Higuchi |
| 2. 発表標題 Towards a neutron electric dipole moment measurement with an advanced ultracold neutron source at TRIUMF |
| 3. 学会等名 Physics of Fundamental Symmetries and Interactions (PSI2022) (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Takashi Higuchi |
| 2. 発表標題 Progress towards a neutron electric dipole moment measurement with an advanced ultracold neutron source at TRIUMF |
| 3. 学会等名 AEC Experimental Seminar (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Kicjihi Hatanaka |
| 2. 発表標題 Precision nEDM experiment at TRIUMF |
| 3. 学会等名 The 14th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms (FPUA2022) (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 今城 想平 |
| 2. 発表標題 中性子電気双極子モーメント探索TUCAN実験に向けた装置開発 |
| 3. 学会等名 KEK S型課題 合同研究会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 赤塚 浩明 |
| 2. 発表標題 TUCANプロジェクト 高強度超冷中性子源による中性子電気双極子モーメントの探索 |
| 3. 学会等名 KEK S型課題 合同研究会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Derek Fujimoto |
| 2. 発表標題 An Introduction to the TUCAN EDM Measurement |
| 3. 学会等名 60th Winter Nuclear Particle Physics Conference (WNPPC20) (国際学会) |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Masaaki Kitaguchi |
| 2. 発表標題 Status and Prospects of the TUCAN EDM experiment |
| 3. 学会等名 KMI Workshop Searches of Electric Dipole Moment -- From Theory to Experiments (国際学会) |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名 川崎 真介 |
| 2. 発表標題 TUCANによる中性子電気双極子モーメント探索実験 |
| 3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名 樋口 嵩 |
| 2. 発表標題 中性子EDM測定によるCP対称性の破れの探索 |
| 3. 学会等名 RCNPでの次期計画検討会（招待講演） |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Takashi Higuchi, the TUCAN collaboration |
| 2. 発表標題 Prospects towards a neutron EDM measurement with an advanced ultracold neutron source at TRIUMF |
| 3. 学会等名 International Conference on Exotic Atoms and Related Topics (EXA 2021) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Takashi Higuchi, La collaboration TUCAN |
| 2. 発表標題 Recherche du moment dipolaire électrique du neutron avec une source intense de neutrons ultra-froids |
| 3. 学会等名 Les 6es Rencontres des chercheurs francophones du Kansai (RCFK2021) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 樋口嵩, TUCAN collaboration |
| 2. 発表標題 中性子EDM測定のための加速器施設内の環境磁場補償システムの開発 |
| 3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名 樋口嵩, TUCAN collaboration |
| 2. 発表標題 中性子EDM実験のための磁場関連実験要素の開発 |
| 3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Takashi Higuchi, the TUCAN collaboration |
| 2. 発表標題 Towards a neutron electric dipole moment measurement with an advanced ultracold neutron source at TRIUMF |
| 3. 学会等名 原子衝突学会 第45回年会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Takashi Higuchi, the TUCAN collaboration |
| 2. 発表標題 Prospects towards a neutron EDM measurement with an advanced ultracold neutron source at TRIUMF |
| 3. 学会等名 International Workshop on Searches for a Neutron Electric Dipole Moment (nEDM2021) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 樋口嵩, TUCAN collaboration |
| 2. 発表標題 TRIUMFにおける中性子EDM測定のための磁場関連実験要素の開発状況 |
| 3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 樋口嵩 |
| 2. 発表標題 低エネルギー系精密測定による素粒子標準模型の検証 |
| 3. 学会等名 京都大学複合原子力科学研究所 第58回学術講演会（招待講演） |
| 4. 発表年 2024年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Eric Miller for the TUCAN collaboration |
| 2. 発表標題 Current Status of the TUCAN UCN Source and neutron EDM Measurement |
| 3. 学会等名 6th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan (HAW23)（国際学会） |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Shinsuke Kawasaki for the TUCAN collaboration |
| 2. 発表標題 Progress of a Neutron Electric Dipole Search by the TUCAN collaboration |
| 3. 学会等名 The 15th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms (FPUA2024) |
| 4. 発表年 2024年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 松宮亮平, TUCAN collaboration |
| 2. 発表標題 TUCAN中性子電気双極子モーメント測定実験の最新の開発状況について |
| 3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会 |
| 4. 発表年 2024年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

| |
|--|
| <p>The UCN group https://www.triumf.ca/node/39465 Experimental Subatomic Physics http://nuclear.uwinnipeg.ca/ TRIUMF UCN home https://www.triumf.ca/ucn</p> |
|--|

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 |
|-------|--------------------------------------|---|----|
| 研究協力者 | マーティン ジェフェリー (Martin Jeffery) | ウィニペグ大学・Physics Department・Professor | |
| 研究協力者 | マメイ ラッセル (Mammei Russell) | マニトバ大学・Physics and Astronomy Department・Associate Professor | |
| 研究協力者 | ピッカー ルディガー (Picker Ruediger) | TRIUMF・Physical Sciences Division・Research Scientist | |

6. 研究組織（つづき）

| | 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 |
|-------|-------------------------------------|--|----|
| 研究協力者 | フランケ ベアトリス (Franke Beatrice) | TRIUMF・Physical Sciences Division・Research Scientist | |
| 研究協力者 | フジモト デレック (Fujimoto Derek) | TRIUMF・Physical Sciences Division・Postdoctoral Fellow | |
| 研究協力者 | ミラー エリック (Miller Eric) | ブリティッシュコロンビア大学・Department of Chemistry・Research Associate | |
| 研究協力者 | クラッセン ウォルフガング (Klassen Wolfgang) | ブリティッシュコロンビア大学・Department of Physics and Astronomy・PhD student | |
| 研究協力者 | ラヴァフ マエデ (Lavvaf Maedeh) | マニトバ大学・Physics and Astronomy Department・PhD student | |
| 研究協力者 | マククレア マーク (McCrea Mark) | ウィニペグ大学・Physics Department・Research Associate | |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
| | |