

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：14401

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2019～2023

課題番号：19K23442

研究課題名（和文）素粒子標準模型を超える新物理探索実験のための動的磁場補償システムの開発

研究課題名（英文）Development of an active magnetic field compensation system for experimental searches of physics beyond the Standard Model

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） 2,200,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、TUCAN国際共同研究が計画している中性子EDM実験のための動的磁場補償システムを開発した。目標とする中性子EDM測定のために、磁気シールド外側でのサイクル当たり磁場変動を約100 nT以内に収める必要がある。まず実験装置を設置する実験施設で磁場測定を行い、その結果から主な補償の対象を天井クレーン由来の磁場変動に定め、日中のEDM測定可能時間帯を拡大することを目指した。次に、一辺約5.5mの正方形コイルによるクレーン磁場補償試験を行い、クレーン由来の磁場変動を約6分の1に抑制できることを示した。これを踏まえ磁気シールドを取り囲む長方形型コイルの設計とプロトタイプ製作を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究を通して、TRIUMFの中性子EDM実験のための動的磁場補償システムを開発した。製作前に行った試験によれば、これによって、実験施設内の主な磁場変動要因となる天井クレーン由来の磁場変動を約6分の1に抑制し、EDM測定が可能な時間帯を大幅に拡大することができる。本研究で得られた知見は、精密な磁場制御が要求される他の加速器施設での実験にも役立てることができる。

研究成果の概要（英文）：In this project, a dynamic magnetic-field compensation system for a neutron EDM experiment has been developed, as a part of the international TUCAN collaboration. First, magnetic field monitoring was performed at the TRIUMF Meson Hall, where the EDM experiment is going to be built. Based on this, we set the main target of the dynamic magnetic field compensation to be magnetic field variations produced by motions of the bridge crane of the facility and aimed to prolong the uptime of the EDM measurement during the daytime by compensating them. Next, using a 5.5 m x 5.5 m square coil, we performed a compensation test of crane-induced magnetic field variations, and demonstrated the compensation with a shielding factor of 6. Based on this, we designed rectangular coils surrounding the TUCAN magnetic shield, and built a prototype coil to test the parts and the construction procedures.

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 CP対称性の破れ 時間反転対称性 基本的対称性 磁場安定化 超冷中性子
中性子

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

非零の中性子の電気双極子モーメント(Electric Dipole Moment, EDM) 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) 対称性を仮定すると、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、実験に使用できる超冷中性子(Ultracold Neutrons, UCN)の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)国際研究は、TRIUMF で開発中の世界最高強度の UCN 源によって、過去の測定精度を一桁上回る 10^{-27} ecm の精度での中性子 EDM 測定を目指している。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。そのためには、高い磁場の安定性が要求され、目標とする測定精度で EDM を測定するためには、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。安定な磁場を作り出すために、約 10^5 の遮蔽係数をもつ外寸 $3.5 \times 3.5 \times 3.5$ m³ の大型の磁気シールドを開発しているが、それに加え、磁気シールド外側での磁場変動を約 100 nT/サイクル(1 サイクル 100-180 s)に抑える動的磁場補償システムが必要となる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、TRIUMF での中性子 EDM 実験のために必要となる動的磁場補償手法を開発することである。目標とする磁場安定性は磁気シールド外側において数 100 nT/サイクルである。これに 10^5 の遮蔽係数をもつ磁気シールドを組み合わせると、中性子 EDM 測定に必要な磁場安定度が達成できる。

3. 研究の方法

本研究を行うにあたり、まず、EDM 実験装置が設定される TRIUMF の Meson Hall における典型的な磁場変動を観測するために、2019 年 11-12 月の 1 ヶ月間にかけて、当該施設内で固定された磁束計による測定を行った。これにより数日に 1 回から 1 日に数回程度の頻度の日中の施設天井クレーン動作により、100 s 平均 Allan 偏差にして数 100 nT 程度の変動が存在する以外は、概ね 100 s 平均 Allan 偏差 100 nT 以内の変動に収まっていることがわかった。そこで、クレーンによる変動を主な補償の対象とし、鉛直方向の成分を主に作り出す補償システムを設計した。

4. 研究成果

図 1 と図 2 に、2019 年に行った Meson Hall での磁場モニタリングの結果を示す。図 1 左には、測定期間を通しての磁場の変動を各成分に対して示しており、図 1 右には 1 時間ごとにデータを区切り、それぞれの区間での 100 s 平均時間での Allan 偏差を計算したものを示す。ここで、x,y が水平成分、z が鉛直成分である。時折、Allan 偏差が数 100 nT のデータ点がある以外は、全体的には、Allan 偏差 100 nT 以内に収まっていることがわかる。磁場変動が大きいデータ点は、図 1 左でスパイク状に磁場が変化しているが、これは天井クレーンの動作からくるものと考えられる。図 2 左では、図 1 右と同じ 100 s 平均 Allan 偏差を各日の時刻ごとに表示している。午前 7 時から午後 7 時を日中、午後 7 時から午前 7 時を夜間として、それぞれオレンジと紫の窓を表示しているが、夜間よりも日中のほうが磁場不安定度が高く、また磁場が不安定なデータ点では、鉛直成分変動が水平成分変動に対してより大きい。図 2 中央と右では、日中と夜間に分けて 100 s 平均 Allan 偏差をヒストグラムに示す。図中の折れ線は、横軸 0 からの積算分布で軸は右側に表示している。これにより、水平成分の磁場変動は日中の場合は、90%のデータ点が < 50 nT に分布しており、夜間の場合は、90%のデータ点が < 6 nT に分布している。一方、鉛直成分の場合は、90%分布の閾値が、日中 130 nT、夜間 2 nT である。これにより、夜間は、EDM 測定に問題のない外部磁場安定性であり、主にクレーン動作由来と考えられる、日中の施設内での活動による鉛直成分が主の磁場変動を数分の 1 に抑えてやれば、日中も EDM 測定が可能であることがわかる。

2022 年 10 月、磁気シールド建設開始前に、正方形型のコイルによってクレーンの変動を補償する試験を行った。図 3 に実験セットアップを示す。FG1 から FG6 の 6 個のフラックスゲート磁束計を磁気シールド設置予定領域に 3 次元的に配置した。それを囲むように一辺約 5.5m の正方形コイルを設置した。天井クレーンのブリッジを動かす、それによって生じる主に鉛直 (図 3

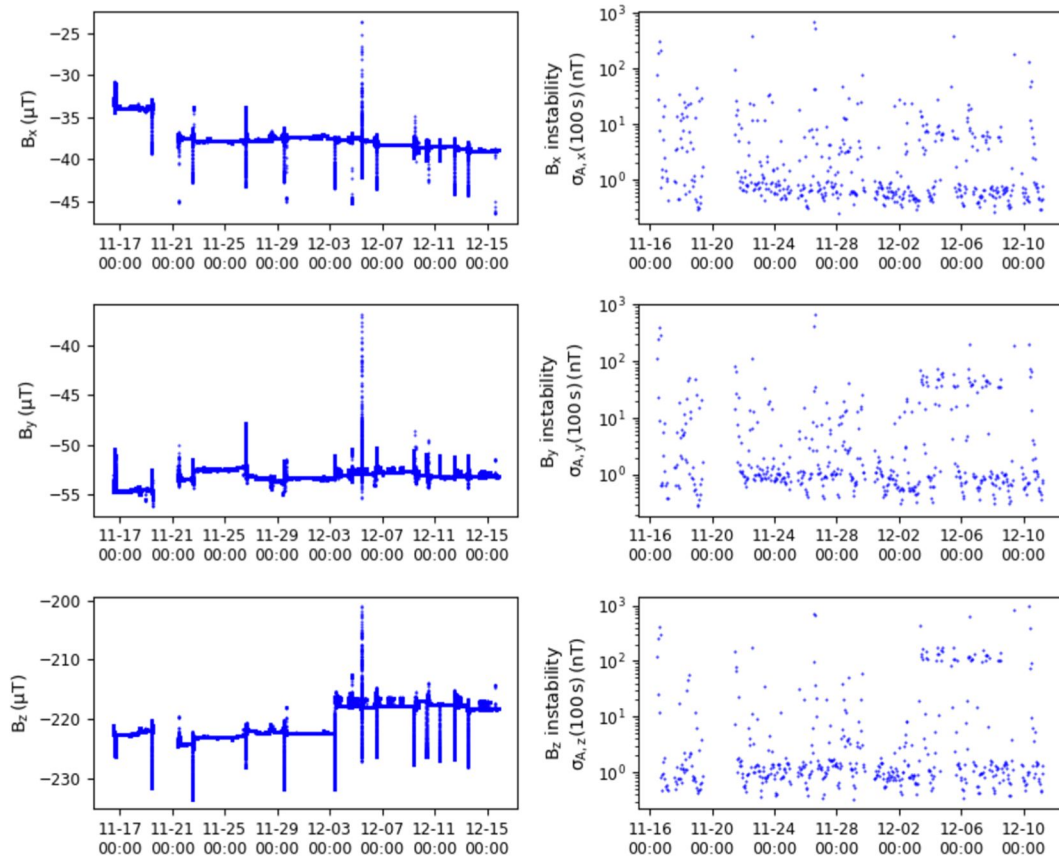


図 1 2019 年 11 月から 12 月に行った TRIUMF Meson Hall での外部磁場モニタリング測定の結果[1]。(左) 測定全期間の磁場の変動を各成分(x,y,z)ごとに表示。(右) データを 1 時間ごとの区間に区切り、それぞれの区間において計算した 100 s 平均の Allan 偏差。

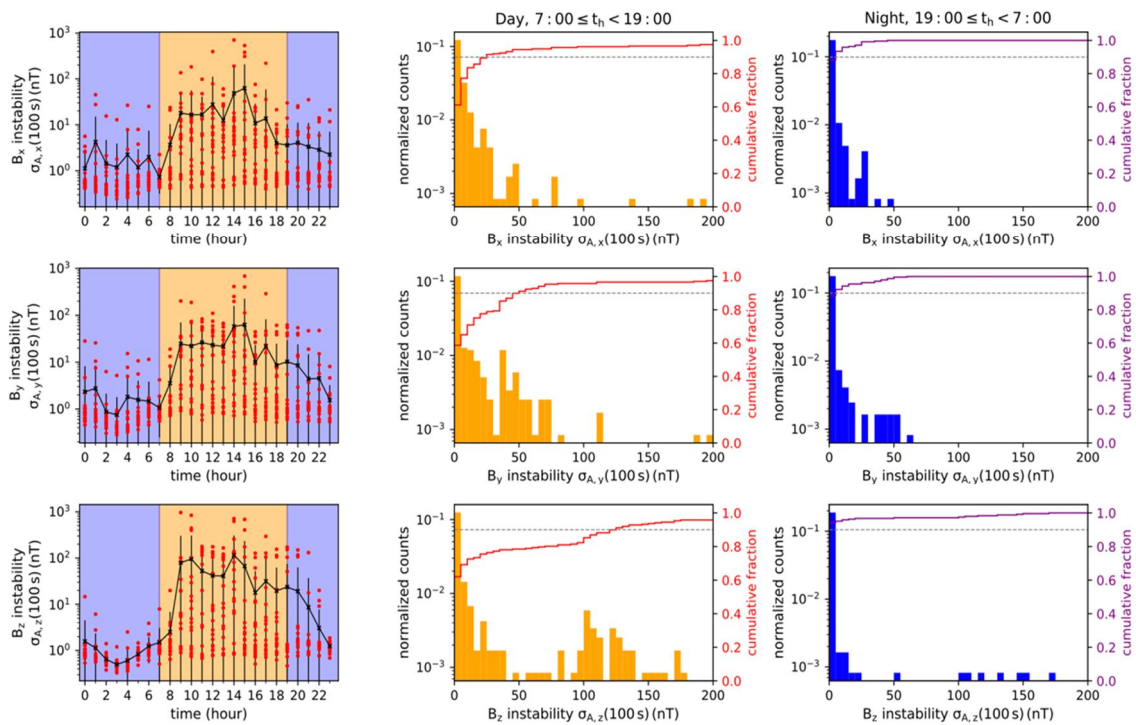


図 2 図 1 の磁場モニタリングデータにより詳細な解析[1]。(左) 1 時間ごとの各磁場成分の 100 s 平均 Allan 偏差を時刻ごとに表示。(中央) 午前 7 時から午後 7 時までのデータについての各成分の 100 s 平均 Allan 偏差の分布。赤の折れ線は積算分布で右側に軸を表示。(右) 午後 7 時から午前 7 時までのデータについての各成分の 100 s 平均 Allan 偏差の分布。紫の折れ線は積算分布で右側に軸を表示。

中 z 方向) 成分の磁場の変動を中央の磁束計 FG2 の測定結果に基づくフィードバック制御によって打ち消した。結果を図 4 に示す。図 4 上には、フィードバック制御を行う前のクレーン動作による磁場の変動が示されている。図 4 下には、PID 制御のパラメーターを最適化した後のフィードバック制御時の磁場変動を示す。クレーン動作によって生成される鉛直成分の磁場変動が元の約 $9.5 \mu\text{T}$ から約 $1.5 \mu\text{T}$ にまで小さくなったことがわかる。中心のセンサーで評価した遮蔽係数は 6.5、磁気シールドの底面部分に相当する FG6 で評価した遮蔽係数は 2.7 であった。この

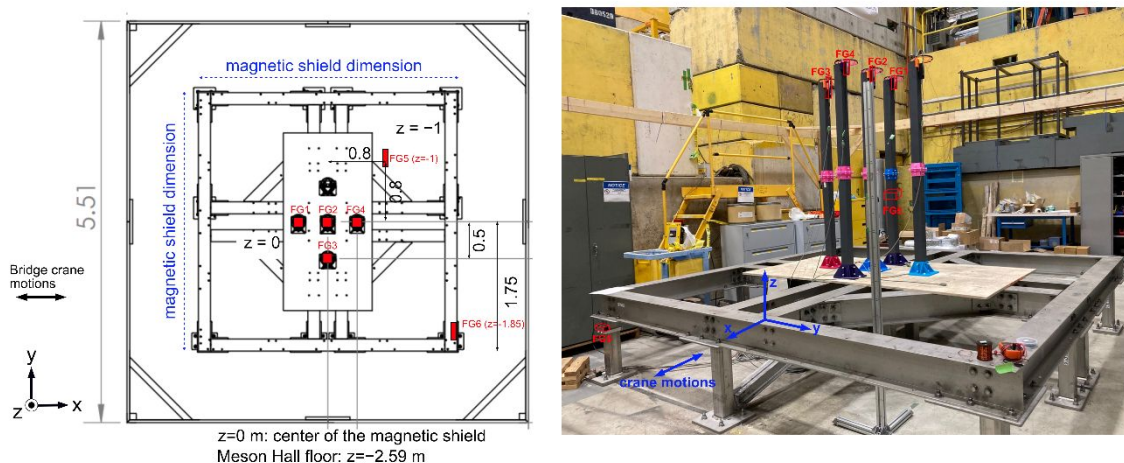


図 3 一辺約 5.5 m の正方形コイルによって行ったクレーン磁場補償試験のセットアップ。磁気シールド設置予定領域に配置された計 6 個の 3 軸フラックスゲート磁束計を使って天井クレーンのブリッジ動作によって発生する磁場の変化を測定した。ブリッジは図中 x 方向に移動し、主に z 方向の磁場を作り出す。磁束計の測定結果に基づいてコイルの印加電流量をフィードバック制御することでクレーンによって生じる磁場を打ち消した。

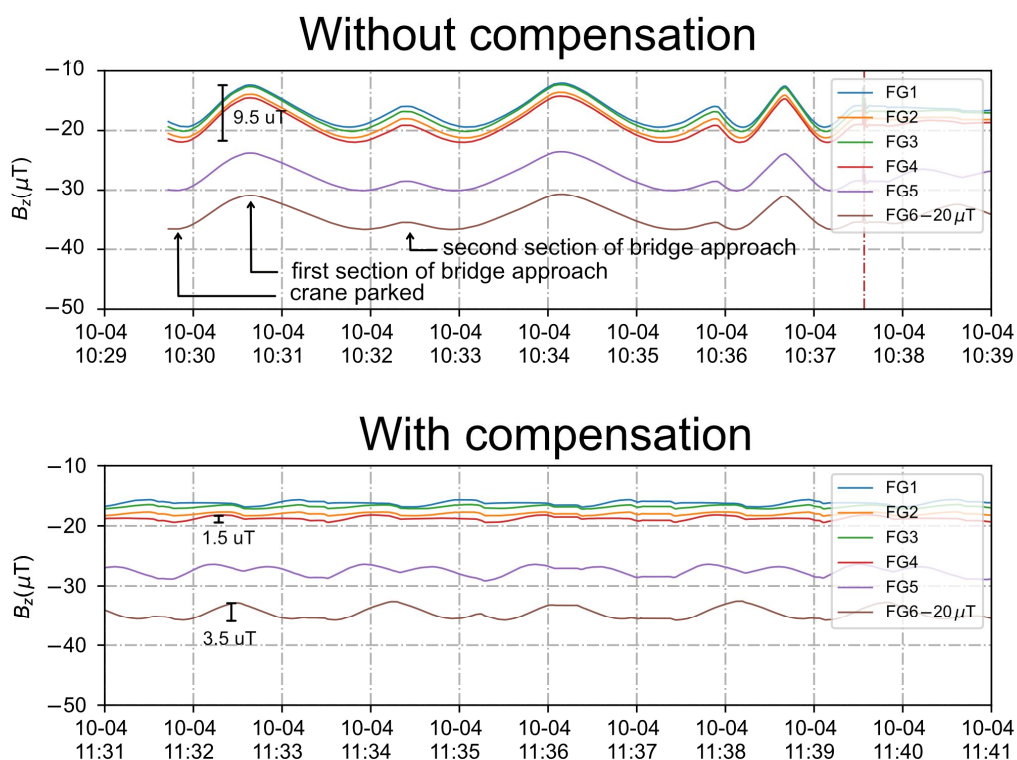


図 4 クレーンに磁場補償試験の結果。鉛直(z) 成分について示す。(上) フィードバック制御 OFF の場合のクレーン動作による磁場変動。(下) PID 制御のパラメーター最適化後のフィードバック ON の場合のクレーン動作中の磁場変動。当初約 $9.5 \mu\text{T}$ あった振幅が約 $1.5 \mu\text{T}$ にまで小さくなった。

ように、シンプルな形状のコイルでも磁場変動を数分の 1 に抑制するには十分であることを示した。前述の施設内磁場変動のモニタリングの結果と合わせると、この性能の補償コイルがあれば、日中の EDM 測定可能な時間帯を大幅に拡大することができることが期待される。

この結果をもとに磁気シールドの周りに設置される長方形型の補償コイルを設計した。磁気シールドの製作工程の遅れのため、研究期間内に実機完成には至らなかったが、2023 年 8 月には、プロトタイプを製作することで、実機と同じ組立および配線方法を試験したうえで、100 μT までの励磁試験を行った。

< 引用文献 >

[1] TUCAN collaboration, “Conceptual Design Report for the Neutron Electric Dipole Moment Spectrometer at TRIUMF”, TRIUMF (2020)

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 Takashi Higuchi, 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41件（うち招待講演 4件/うち国際学会 26件）

1. 発表者名 Derek Fujimoto
2. 発表標題 Progress and Goals of the TRIUMF nEDM Measurement
3. 学会等名 New physics searches at the precision frontier (INT-23-1b) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 樋口 高
2. 発表標題 TRIUMFの超冷中性子源と中性子電気双極子モーメント測定装置の開発”
3. 学会等名 日本中性子科学会第23回年会（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 川崎真介
2. 発表標題 UCANによる中性子電気双極子モーメント探索 II
3. 学会等名 日本物理学会第78回年次大会（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shinsuke Kawasaki
2. 発表標題 Fundamental Physics with Slow Neutrons
3. 学会等名 KEK IPNS workshop Fundamental Neutron Physics（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takashi Higuchi
2. 発表標題 New Physics Search in TUCAN
3. 学会等名 KEK IPNS workshop Fundamental Neutron Physics（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Derek Fujimoto
2. 発表標題 Overview and Status of the TUCAN EDM Experiment
3. 学会等名 The 5th Workshop on Searches for a Neutron Electric Dipole Moment (nEDM2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Maedeh Lavvaf
2. 発表標題 Magnetically Shielded Room for the Neutron Electric Dipole Moment Experiment at TRIUMF
3. 学会等名 The 5th Workshop on Searches for a Neutron Electric Dipole Moment (nEDM2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Eric Miller
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 川崎真介
2. 発表標題 原子炉で行う中性子電気双極子モーメントの探索
3. 学会等名 第3回研究用原子炉を用いた原子核素粒子物理(FPUR-III)
4. 発表年 2024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 Shinsuke Kawasaki
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) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 松宮亮平
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

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 Kichiji Hatanaka
2. 発表標題 Precision nEDM measurement 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 UCAN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 Takashi Higuchi
2. 発表標題 Production of ultra-cold neutrons at TRIUMF and prospects for a neutron EDM measurement
3. 学会等名 The 12th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms (FPUA2020) (国際学会)
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 TUCAN実験 中性子EDM測定のための磁場環境の開発
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

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

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	フジモト デレック (Fujimoto Derek)	TRIUMF・PHYSICAL SCIENCES DIVISION・Postdoctoral fellow	
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	ラバフ マエデ (Lavvaf Maedeh)	マニトバ大学・Physics Department・PhD student	
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	

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	ピッカー ルディガー (Picker Ruediger)	TRIUMF・Physical Sciences Division・Research Scientist	
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	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	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