

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26247035

研究課題名(和文)世界最高密度の超冷中性子貯蔵による次世代超対称性理論研究へ向けた基盤研究

研究課題名(英文) Study towards next-generation experiment for Supersymmetry using storage of the ultra-cold-neutron with world highest density

研究代表者

山下 了 (Yamashita, Satoru)

東京大学・素粒子物理国際研究センター・特任教授

研究者番号：60272465

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,100,000円

研究成果の概要(和文)：素粒子物理の大きな課題の一つである中性子の電気双極子能率を測定するため、(A) 系統誤差を制御するための超冷中性子(UCN)の輸送・貯蔵用の界面技術と数値解析の確立と(B)UCNの加減速装置の開発に成功した。特に、1)Geant4のコアの改良と非鏡面反射モデルを導入したUCNの輸送精密解析系、2)多数サンプルで反射ポテンシャル・非鏡面反射成分を実測し重水素化ダイヤモンドコーティングで世界最高レベルの反射ポテンシャルをもつ部材の開発に成功、3)J-PARC初のUCN貯蔵実験と蓄積能率の測定に成功、4)UCNの加減速の効率を上げ既設のドップラシフターからのUCNの加減速をJ-PARC初で成功した。

研究成果の概要(英文)：In order to measure the electric dipole moment of neutrons which is one of the major targets of present elementary particle physics, we have achieved (A) the developments of technology for the optical materials and numerical analysis scheme for the transportation and storage of ultra-cold-neutron (UCN), essential for controlling systematic errors, and (B) succeeded in developing UCN acceleration / deceleration device. In particular, we have succeeded; 1) improvement of core of Geant 4 and introducing non-specular reflection model, 2) measurements of the reflective potential and non-specular reflection component for many samples, and development of superior material with the world's highest level of reflection by deuterated-diamond-coating, 3) measuring J-PARC's first UCN storage experiment and accumulation efficiency, 4) develop a system to accelerate and decelerate UCN and controlling the velocity distribution of UCN from existing Doppler shifter, for the first time at J-PARC.

研究分野：素粒子物理実験

キーワード：CP対称性の破れ 素粒子 超対称性 超冷中性子 量子ビーム 中性子光学 材料工学

1. 研究開始当初の背景

(1) ゼロでない電気双極子モーメント (electric dipole moment: EDM) の存在は時間反転対称性の破れを意味する。標準模型を超える新模型の多くは標準模型より大きな EDM の存在を预言するが、特に、新模型として最も有望視される模型の一つである超対称性模型は中性子 EDM を $10^{-27} \sim 10^{-28}$ e cm と预言する。現在中性子 EDM の測定結果はフランスの原子炉施設で行われた $(0.2 \pm 1.5(\text{stat}) \pm 0.7(\text{syst})) \times 10^{-26}$ e cm [2] であるため、更なる 1-2 桁の改善で到達できる段階まで来ている。

(2) 世界的には原子炉での実験から加速器での陽子ビームを標的に当て生成される中性子を冷やした超低エネルギー中性子を用いる実験がスイスの PSI で進行中でありカナダでも実験が準備されている。共通の課題は中性子の輸送・蓄積に伴う系統誤差を数値的に精密解析すること、輸送・蓄積用の部材の開発、中性子を高密度化する処方、磁場・電場の精密な制御である。

(3) J-PARC は世界でもパルス型加速器としてパルスあたり最高強度の加速器であり、このパルス構造を用いて中性子を輸送・収束・蓄積することで世界最高密度の中性子での研究を行える可能性がある。このため我々はこれまで実験に必要な主要課題を分析し、基盤となる要素の開発準備として統計精度向上のためのパルス UCN 再集束機構の原理実証および系統誤差の原因となる UCN 集団運動の理解を行ってきた。

2. 研究の目的

運動エネルギー 250 neV 以下の超冷中性子 (ultra cold neutron: UCN) は物質表面で全反射される性質を持つため、容器に貯蔵し長時間測定することでより精度のよい EDM 測定が可能である。中性子は磁場中で歳差運動するが、もし中性子 EDM が存在す

れば、電場内でその歳差周期が変化する、UCN を容器に閉じ込め電場を磁場と平行、反平行に印可してその歳差運動の周波数の差をとることで EDM の寄与のみ導出できる。

EDM 測定での系統誤差の観点から測定容器の大きさは一定の制限があり、統計精度向上のためには UCN 密度を上げる必要がある。大強度陽子加速器施設 (J-PARC) で提案している新しい実験では、世界最高の強度を持つ J-PARC のパルスビームを用いて生成した UCN を測定セル手前で再集束させることにより大幅な UCN 密度統の向上改善を達成できる見込みである。

本研究の目的は次世代の中性子 EDM 実験に向けた要素技術開発である。本研究ではこれまでの研究を元に、実施段階で重要となる以下の 4 つに焦点を絞って研究を行った。1) 系統誤差を制御するために、UCN 集団運動の精密な数値解析ができるシステムの開発、2) 中性子の輸送のため後述のリバンチャーの特性を生かし吸収と非鏡面反射が少ない輸送反射材質の開発とその分析手法の確立、3) UCN 蓄積のための部材の開発と蓄積実証実験、4) UCN 収束装置リバンチャーの効率向上と実証試験。

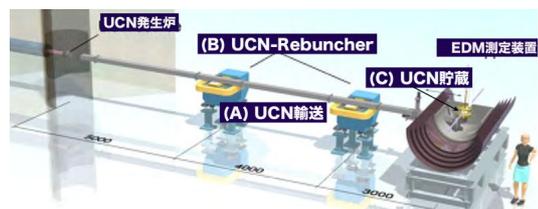


図 1: J-PARC 中性子 EDM 測定装置概念図

本研究では上記の 4 つの主要開発を元に、系統誤差の評価および抑制手法を確立し、測定精度の評価を行うことを最終目的とした。

3. 研究の方法

(1) **数値シミュレーションの開発**: UCN を用いた EDM の測定において世界の課題の一つであった数値シミュレーション手法の

確立をまず行う。中性子の輸送部分では非鏡面反射成分の数値モデルとしてマイクロラフネスモデルを元にその拡張と実測を行い、数値解析ができるようにする。磁場と電場により UCN が歳差する際の集団運動及びスピンの分散を三次元及び時間を追って解析できるようにするため、従来の Geant4 の持つ問題点を見出し、その改良を行う。

(2) UCN **鏡面反射界面の開発** : UCN 再集束の実現のためには、12 m 程の距離を輸送する必要があり、その際、UCN の乱反射成分が鏡面反射成分の 10^{-4} でなければならない。実用的な反射ポテンシャルを持ち、且つ乱反射の少ない平滑な界面をもつ物質の研究開発を行う。反射ポテンシャルの高いニッケルモリブデン、ダイヤモンドライクカーボン皮膜を中心に工程と材質の異なるサンプルを製造し、その UCN への反射ポテンシャルと非鏡面反射成分の測定手法を構築し部材の開発を行う。

(3) UCN **蓄積と EDM 実験への影響の研究** : 中性子 EDM 実験では長時間のスピンの歳差運動を観測するために、UCN を 20 リットル程度の貯蔵容器内で 100 秒程蓄積する。蓄積された UCN が全体として直進、回転といったような集団運動をしている場合 EDM に似た影響を及ぼすことが知られており、このような集団運動は極力抑制する必要がある。UCN の蓄積部材の開発においては、実際に J-PARC で蓄積実験を行い、蓄積容器内に蓄積用部材の候補サンプルを設置して UCN の減衰を実測することで部材の性能を評価しサンプルの選別を行う。(1) で開発する中性子 EDM 実験用のシミュレーションコードで、乱反射が実験に与える影響を評価する。

(4) UCN **リバンチャーの性能向上** : 中性子は磁気双極子を持ち、1T の磁場より ± 60 neV のポテンシャルを受ける。対して UCN の運動エネルギーは 250 neV 以下であるため、強い勾配磁場中で UCN をスピン反転さ

せることで有意に運動エネルギー、つまり進行方向の速度を変調させることが可能になる。この速度変調をコントロールすることで、UCN を任意の位置で再集束させることが可能になる。勾配磁場電磁石と周波数可変高周波磁場発生装置を組み合わせることで実際にパルス UCN を用いて集束の実証実験を行う。時間的に変化する磁場の生成のためのバリコンなどの改良を行い、周波数特性を向上させる。J-PARC での実際の UCN 収束実験を行い性能を実証する。このためこれまでの研究で開発・設置したドブラーシフターにより UCN を生成して用いる。

4. 研究成果

(1) 数値計算における大きな成果は以下の2つである。まず、Geant4 のカーネル部分に内包されていた問題点を神戸大学の蔵重教授と協力して解決することに成功し、磁場内部でのスピン歳差を相対論的に正確に扱えるようにした。さらに中性子光学の数値解析においては、マイクロラフネスモデル[3]を基盤にして非鏡面反射の数値的な分析が行えるようになった。これにより、実際の実験環境での J-PARC における中性子 EDM 測定実験全体のシステムの詳細なシミュレーションでの評価が行える環境を構築することに成功した。さらに後述する部材の開発などの成果を取り入れ、全体セットアップでの系統誤差の評価が行えるようになった。具体的には、PHITS と改造した Geant4 シミュレーションを用いて、J-PARC LINAC の陽子ビームを用いて固体重水素コンバータから産出される超冷中性子の特性、リバンチャーを用いた収束、輸送中の非鏡面反射の影響、シャッターの開閉による逆流の防止をトータルでシミュレーションできる環境を整え、統計精度と系統誤差の評価を行い、3年間の本実験の実施によりこ

れまでに比べ1桁以上の測定精度の向上を達成できることを確認できた。

(2) 超低エネルギー中性子を輸送するためのガイド管の材質・加工方法の研究を下記の通り行った。2015年度にはフィルタードアーキオンプレーティングによるダイヤモンドライクカーボンコーティングを試行した。本成膜法は膜中に中性子反射率を劣化させる水素が含有されないという利点を持つ。そのフェルミポテンシャルを J-PARC 物質生命科学実験施設の BL16 における中性子反射率測定により評価した結果、 $264 \text{ neV} \pm 14 \text{ neV}$ という PSI のレーザーアブレーションによる方法に並ぶ世界最高レベルの反射ポテンシャルを持つことが確認できた。また、本試料の表面粗さを原子間力顕微鏡を用いて評価した結果、 0.4 nm RMS と極めて滑らかな表面が実現できていることを確認した。これにより、本成膜法で作製した反射材が中性子ミラーとして使用できることが証明できた。2016年度には、二元蒸着によるモリブデン重量比15%のニッケルモリブデンコーティングと重水素ベンゼンを原料に用いたプラズマイオン注入法による重水素ダイヤモンドライクカーボンコーティングを試行した。両成膜法は大面積コーティングが可能という利点を持ち、特に、プラズマイオン注入法は三次元立体コーティングの可能性があるため超冷中性子の貯蔵容器の側面材への応用が期待できる。J-PARC 物質生命科学実験施設 BL16 における中性子反射率測定により両試験材のポテンシャルの評価を行った。本測定によりニッケルモリブデンのポテンシャルとして $227 \text{ neV} \pm 13 \text{ neV}$ という評価値が得られており、PSI において作製された試験材のポテンシャルである 217 neV と実験精度の範囲内で一致するという結果を得た。一方で、プラズマイオン注入法により作製

したダイヤモンドライクカーボンに関しては、 $193 \text{ neV} \pm 9 \text{ neV}$ というポテンシャルが得られており、超冷中性子貯蔵容器の側面材として利用されている重水素化ポリスチレンの 160 neV を上回る結果を得た。RBS/ERDA 測定の解析によりプラズマイオン注入法で作製した DLC/SUS304 の試験材の中に $250 \sim 270 \text{ neV}$ という高いフェルミポテンシャルを達成できているサンプルも製造できた。ただし、実際の中性子反射率測定の結果はそれよりもかなり低い値になっていた。プラズマイオン注入法によりダイヤモンドライクカーボン膜と基板との間に生じたミキシングレイヤーのせいで、RBS/ERDA の予言と実際の反射率の間に大きな乖離が生じたことが原因と推察される。

(3) 超冷中性子を 522 L500 の SUS316 製鏡面ボトルに貯蔵して反射率の性能試験を行える環境を構築して、実際に貯蔵試験による反射性能の評価を行うことに成功した。2015年度にはシステムの構築を完了して、1回の貯蔵で90個以上の超冷中性子を160s以上貯蔵できることを確認した。2016年度には、本貯蔵容器の上部にニッケルモリブデンコーティングとダイヤモンドライクカーボンをコーティングした試験材を設置して、試験材の反射性能に応じて変化した超冷中性子数の時間変化を捉える実験を実施し、両試験材とも1衝突あたり $3e-4$ の UCN 喪失確率が存在するという結果を得た。

(4) 2016年度に J-PARC の物質生命科学実験施設の BL05 に設置したドップラーシフターを用いて生成した超冷中性子をガイド管に導き磁場との相互作用により収束させる実験を J-PARC で行うことに初めて成功した。本実験では、リバンチャーの装置に供給するパワーや磁場特性を改良してより高いスピン反転率を実現できるようにし

てパルスの加減速を効率的に行うことができる環境が整えられており、実際に過去にILLで行われた原理実証試験[1]よりはるかに強い収束を達成できることを確認できている(図2)。

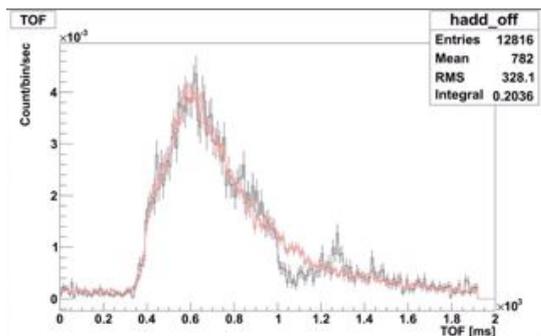


図2: UCNリバンチャーにより中性子の加減速で収束をする以前の速度分布(赤)と収束後の速度分布(黒)。初期設定通りの収束に成功した。

<引用文献>

- [1] Y. Arimoto et al., Phys. Rev. A 86, (2012) 023843
- [2] C. A. Baker et al., Phys. Rev. Lett. 97, (2006) 131801
- [3] S. Sinha, E. Sirota, S. Garoff, and H. Stanley, Phys. Rev. B 38 (1988) 2297.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計10件)うち査読有論文8

M. Kitaguchi, et. al., "Concentration of the velocity distribution of pulsed neutron beams", Prog Theor Exp Phys 2017 (2017) (4): 043D01, 査読有,
DOI: [10.1093/ptep/ptx029](https://doi.org/10.1093/ptep/ptx029)

S.Imajo,K.Mishima,M.Kitaguchi, Y.Iwashita, N.L.Yamada,M.Hino, T.Oda, T.Ino, H.M.Shimizu, S.Yamashita, R.Katayama "Pulsed ultra-cold neutron production using a Doppler shifter at J-PARC", PTEP 2016 (2016) no.1, 013C02 (2016-01-01), 査読有,
DOI: [10.1093/ptep/ptv177](https://doi.org/10.1093/ptep/ptv177)

R.Katayama, K.Mishima, M.Kitaguchi, M.Kurata, D.Sakurai, Y.Seki, S.Yamashita, T.Yoshioka. "Simulation Study for Systematic Uncertainty Suppression in nEDM Experiment Assuming Various Surfaces Roughness" JPS Conf.Proc. 8 (2015) 026004
査読有, DOI: [10.7566/JSPSC.8.026004](https://doi.org/10.7566/JSPSC.8.026004)

〔学会発表〕(計20件)うち招待講演4件

今城想平, 岩下芳久, 北口雅暁, 山下了, 他 "J-PARC MLFにおけるドップラシフターによる超冷中性子ビーム生成とその解析", 日本物理学会第72回年次大会(招待講演), 2017年3月18日, 大阪大学(大阪府豊中市)

M. Kitaguchi, "Neutron Physics in Japan", 2015年10月14日, HINT2015, 招待講演, J-PARC, Tokai, Ibaraki, Japan

S. Imajo, Y. Iwashita, M. Kitaguchi, S.Yamashita, et al, "Development of Slow Neutron Accelerator for Rebunching Pulsed Neutron" LINAC2014, 2014年8月31日 Geneve, Switzerland

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

取得年月日:

国内外の別:

[その他]

ホームページ

東京大学・山下研究室: 超冷中性子の電気双極子
モーメント測定に向けた研究:

http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/yamashita/?page=neutron_edm

中性子光学・基礎物理(NOP)

<http://nop.kek.jp/index-j.html>

名古屋大学 Phi-lab 時間反転対称性・CP 対称性の破れ

<http://phi.phys.nagoya-u.ac.jp/research/nopt.html>

公開シミュレーションプログラム

<https://github.com/rkatayama/JparcSymposium2014>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山下 了 (YAMASHITA, Satoru)

東京大学・素粒子物理国際研究センター・特任教授

研究者番号: 60272465

(2) 研究分担者

北口 雅暁 (KITAGUCHI, Masaaki)

名古屋大学・現象解析研究センター・准教授
研究者番号: 90397571

岩下 芳久 (IWASHITA, Yoshihisa)

京都大学・化学研究所・准教授

研究者番号: 00144387

関場 大一郎

(SEKIBA, Daiichirou)

筑波大学・数理物質系・講師

研究者番号: 20396807

(3) 連携研究者

清水 裕彦 (SHIMIZU, Hirohiko)

名古屋大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号: 50249900

嶋 達志 (SHIMA, Tatsushi)

大阪大学・核物理研究センター・准教授

研究者番号: 10222035

猪野 隆 (INO, Takashi)

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: 10301722

三島 賢二 (MISHIMA, Kenji)

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: 20392136

(4) 研究協力者

今城 想平 (IMAJO, Sohei)

京都大学・大学院理学研究科・研究員

片山 領 (KATAYAMA, Ryo)

東京大学・大学院理学系研究科・大学院生