

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008 ～ 2010

課題番号：20340051

研究課題名（和文）世界最高密度の新型超冷中性子源を用いた超対称性理論の研究

研究課題名（英文）Research of the World-Highest Density Source of the Ultra-Cold Neutron for Study of Supersymmetry

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・准教授

研究者番号：60272465

研究成果の概要（和文）：

当初の目標を超え、パルス型加速器と中性子の同期収束を組み合わせた新しい原理を用いた世界最高密度の超冷中性子生成のための装置の提案を行い、J-PARC の直線加速器部分への配置と実際の実験提案に至ったことが最大の成果である。さらに技術開発のための超冷中性子のタービン型生成装置を J-PARC に開発、実用に供することにも成功した。実験実現のための主要課題を抽出し研究開発の流れを作ることができた。

研究成果の概要（英文）：

An innovative new type of method is designed through this research program to produce world-highest density ultra-cold neutron (UCN), combining pulsed-beam from an accelerator and time-dependent control of the neutron velocity. We have proposed a new experiment using this scheme with J-PARC accelerator LINAC. In order to start R&D for the realization of the scheme, a turbine-type UCN generator is developed. We have formed a new group of researchers to collaborate to realize the experiment.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
2009 年度	7,800,000	2,340,000	10,140,000
2010 年度	2,000,000	600,000	2,600,000
年度			
年度			
総計	14,000,000	4,200,000	18,200,000

研究分野：

科研費の分科・細目：素粒子物理実験

キーワード：素粒子実験 加速器 量子ビーム 中性子 シミュレーション 精密測定 J-PARC

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 国際的に超冷中性子を用いた中性子の電気双極子能率の測定が提案されてきた。

(2) これまでの原子炉での実験を 1～2 桁程度凌駕する感度を持つことができれば超対称性理論のもたらす効果が観測される可能性が高まっている。

(3) 阪大 RCNP では He-II を用いた高密度

UCN 生成実験が行われてきた。カナダの TRIUMF へ導入する計画が進行中であった。

(4) 東海村に J-PARC が完成し、供用が開始されていた。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、加速器駆動型の中性子生成に新しい手法を導入することにより「世界最高密度の超冷中性子」生成の基盤技術を築き、

超対称性理論の研究を格段に推し進めるための世界に先駆けた中性子の電気双極子率 (EDM) の測定実験を提案することである。具体的には

(1) 世界最高強度、最高密度の超冷中性子をもたらす炉と輸送系の提案をまとめることを最大の目標とする。

(2) そのための基本的な技術、シミュレーション等を確立し、課題と解決法を提示すること、である。

### 3. 研究の方法

(1) 初年度には阪大 RCNP の UCN 源の研究に参加し、He-II を用いたシステムの効果と課題を検討。

(2) 次年度からは J-PARC で最大効率で UCN を生成する方法を研究。

(3) 中性子を用いた基礎物理実験の研究者グループを作り、J-PARC での UCN を用いた新規実験を研究開始。

(4) J-PARC の BL05 ビームラインに UCN ラインを作り基礎 R&D を開始。

(5) 実験提案にまとめるための研究打ち合わせ・研究会の開催、物理学会シンポジウムの開催等を進めた。

### 4. 研究成果

はじめに主な成果を挙げる。

(1) 初年度には阪大 RCNP の UCN 源の研究に参加し、それまでできなかったシミュレーションの導入に成功。

(2) 中性子を用いた基礎物理研究の国内研究者を一同に集めた連携組織の確立

(3) J-PARC での UCN 源案を KEK 等の研究者と作成、LINAC の下流での実実験プランを提示。

(4) J-PARC のパルスビームの特徴を生かした新しい同期型 UCN 収束法 (UCN-Rebuncher) を導入した UCN 実験計画を J-PARC に共同で提案することに成功。

(5) BL05 ビームラインの UCN の生成が成功。

(6) 実験の主要課題を抽出、主要 3 項目の R&D 計画をまとめ、J-PARC に提案するとともに、これを推敲する新規基盤研究の開始に至っている。

具体的には下記の通りである。

(1) 平成 20 年度の研究において、RCNP の UCN 源に関するシミュレーションを PSI 研究所で開発された GEANT4 ベースの

手法を改良することにより発生源内および輸送中における中性子捕獲反応、光学的反射、散乱の影響まで取り入れてできるようになった。

(2) 中性子輸送光学に関しては、J-PARC の MLF のグループの知見を取り入れ、設計検討を開始した。中性子検出器に関しては、TPC をベースにした中性子検出器の検討を開始、データ収集方向に関しても波形を取りこんだ DAQ を完成させた。ラムゼー共鳴を用いた EDM 測定装置の設計に関しては、プロトタイプ共鳴装置を構築し、データを収集するに至った。

(3) 外部磁場遮蔽用のシールドを実製作し、磁場分布の精密測定を行ない、当初予想していた磁場分布の解析に問題があることを見つけた。これらは H21~22 年度の本格設計検討に大きく寄与した。

(4) 目的を遂行するに当たって、広くこの分野の研究者の知見を集積するために自らが共同世話人となって中性子による基礎科学を目指す全国的な研究会を新しく立ち上げることができたことも大きな成果と言える。分野を横断した研究コミュニティの創成を行い、KEK、JAEA や阪大・京大・東工大などの多くの研究者のアイデアを集約することに成功した。

(5) 平成 21 年度の研究において、J-PARC における実験の第一次の提案を公表するに至った。これは当初の予定を越える大きな進展である。阪大 RCNP での知見および J-PARC の MLF での低速中性子の実験手法を用い、まず基礎設計に着手し「Summary of the J-PARC UCN Taskforce」(arXiv:0907.0515) として公表した。これは実験全体の提案の第一段階であり、UCN 源自体は He-II を用いたものにとどまっている。新アイデアによる新しい UCN 源の提案は下に記す。

(6) 次に、数値シミュレーションによる UCN 生成炉・輸送系・実験感度の系統誤差の検討を進めるとともに、UCN 測定器の研究のためにタービンによる UCN 発生装置の試作機を作成し、実際の UCN の発生を確認することに成功した。

(7) 特に重要な発展としてパルス運転であることを最大限に利用した中性子収集のための特殊な輸送系の手法が発案された。この新しい手法を用いると建設中の東海村の JPARC を用いればこれまでの感度を 2 桁以上向上させることが可能であることが期待される。新しい実験の全体構成と要素技術の開発の基礎となっている研究を進めた。東京大学および KEK、京大、東工大、理研等、全国

に跨る研究グループを共同で形成した。この新しい原理を用いた中性子の輸送・貯蔵を含めた UCN 生成・輸送・測定装置の概念設計提案を共同してまとめた。

(8) 概念設計提案書を平成 21 年 12 月に完成させ、「Measurement of Neutron Electric Dipole Moment」(中性子基礎物理実験グループ (NOP) J-PARC・PAC-P33) として審査が開始された。研究内容および基本手法に関する高い評価を得ており、詳細提案に向けた課題の抽出に至った。

(9) 新しい実験の全体構成と要素技術の開発の基礎となっている研究を進めた。系統誤差の評価方法、実験精度の研究、加速器駆動型の UCN 発生装置、測定器構成をまとめ、最も本質的な 3 つの課題と最終的な測定感度の関係を明らかにしている。

(10) パルス型加速器であることを最大限用いた UCN の密度集積用の装置 (Rebuncher) とともに、実験を成立させるための 3 つの課題 (輸送・圧縮・磁場計測) の研究手法を明確にすることができた。

以上の成果は、国際会議および国内での研究会議にて提案実験の全容を公開し、新しい手法に高い評価を得ている。Rebuncher の基盤となる構造体の準備、中性子反射測定による輸送の研究、系統誤差を減らすための磁気測定手法の提案、それらをまとめた実験に向けた R&D 計画の具体化を行い、新規研究の方向を決定することに成功した。当初の予想を超え、パルス型加速器である利点を最大限に用いた更に密度の高い UCN 源の提案を行うことができ、実現へ向けた具体的な要素技術開発の方向も定まったことは大変意義深い。

## 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 3 件)

1. T. Yoshioka, K. Mishima, T. Ino, K. Taketani, S. Muto, T. Morishima, H. M. Shimizu, T. Oku, J. Suzuki, T. Shinohara, K. Sakai, H. Sato, K. Hirota, Y. Otake, M. Kitaguchi, M. Hino, Y. Seki, Y. Iwashita, M. Yamada, M. Ichikawa, T. Sugimoto, S. Kawasaki, S. Komamiya, H. Otono, Y. Kamiya, S. Yamashita, P. Geltenbort

“Polarization of Very Cold Neutron using a Permanent Magnet Quadrupole”  
Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A634, 17-20 (2011) 査読有

2. K. Taketani, T. Ebisawa, M. Hino, K. Hirota,

T. Ino, M. Kitaguchi, K. Mishima, S. Muto, H. Oide, T. Oku, H. Otono, K. Sakai, T. Shimizu, H. M. Shimizu, S. Yamashita, T. Yoshioka

“A High S/N Ratio Spin Flip Chopper System for a Pulsed Neutron Source”  
Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A (in press) (2011) 査読有

3. J-PARC UCN Taskforce, T. Aso, et al

清水裕彦、山下了、他 “Summary of the J-PARC UCN Taskforce” E-Print ArXiv0907.0515 (2009)

[学会発表] (計 11 件)

1. 吉岡瑞樹、他 「J-PARC における中性子電気双極子能率測定実験計画」日本物理学会 2010 年秋季大会 2010 年 9 月 13 日九州工業大学戸畑キャンパス

2. 有本靖、吉岡瑞樹、三島賢二、竹谷薫、猪野隆、武藤豪、清水裕彦、北口雅暁、岩下芳久、今城想平、神谷好朗、山下了、旭耕一郎、吉見彰洋、嶋達志、NOP Collaboration  
「パルス超冷中性子用リバンチャー勾配電磁石」日本物理学会 2011 年 3 月 28 日新潟県新潟市

3. 北口雅暁、他、「中性子電気双極子モーメント測定実験のための高密度超冷中性子輸送法の開発」日本物理学会 2011 年 3 月 28 日新潟県新潟市

4. 吉岡瑞樹、三島賢二、竹谷薫、有本靖、猪野隆、武藤豪、清水裕彦、松村宏、豊田晃弘、音野瑛俊、生出秀行、片山領、山下了、角野浩史、酒井健二、嶋達志、日野正裕、北口雅暁、広田克也 and the NOP Collaboration  
「J-PARC における中性子電気双極子能率測定実験計画 II」  
日本物理学会 2011 年年次大会 2011 年 3 月 28 日新潟大学五十嵐キャンパス

5. T. Yoshioka et al. ” A novel technique to increase the UCN density for J-PARC UCN source” UCN2010, International Workshop on UCN and Fundamental Neutron Physics 2010. Apr. 9 大阪大学・核物理センター

6. 松宮亮平、山下了、他 「Geant4 による UCN 源のエネルギー分布とラムゼーセル内の挙動のシミュレーション」日本物理学会第 65 回年次大会 2010 年 3 月 23 日 岡山大学

7. 松多健策、山下了、他 「UCN によるラム

ゼー共鳴の観測」日本物理学会第 65 回年次大会 2010 年 3 月 23 日 岡山大学

8. 今城想平、他、NOP-Collaboration  
「J-PARC における超冷中性子生成のためのドブラーシフターの開発」日本物理学会第 65 回年次大会 2010 年 3 月 22 日 岡山大学

9. 山下了 (招待講演)  
中性子基礎物理シンポジウム 「国内外の低速中性子を用いた基礎物理の過去・現状・将来計画」日本物理学会 2009 年秋季大会 2009 年 9 月 12 日甲南大学

10. 松多健策, 山下了, 他「ラムゼー共鳴のための UCN 偏極実験」日本物理学会 2008 年 9 月 22 日 山形大学

11. 松宮亮平, 山下了, 他「He-II UCN 源のエネルギー分布の測定」日本物理学会 2008 年 9 月 22 日 山形大学

[その他]

ホームページ等

[http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/yamashita/?page=neutron\\_edm](http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/yamashita/?page=neutron_edm)

## 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・准教授  
研究者番号：60272465

### (2) 研究分担者 なし

### (3) 連携研究者

北口 雅暁 (KITAGUCHI MASAOKI)  
京都大学・原子炉実験所・助教  
研究者番号：90397571

清水 裕彦 (SHIMIZU HIROHIKO)  
高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・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・助教  
研究者番号：10222035

岩下 芳久 (IWASHITA YOSHIHISA)  
京都大学・化学研究所・准教授  
研究者番号：00144387

吉岡 瑞樹 (YOSHIOKA TAMAKI)  
九州大学・大学院理学研究科・助教  
研究者番号：20401317

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