

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 3 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23244047

研究課題名(和文)世界最高密度の極低エネルギー中性子貯蔵による次世代・超対称性理論研究の基盤構築

研究課題名(英文) Development for a Next-Generation Experiment to Study Super Symmetry using Accumulation of the Highest Density Ultra-Cold-Neutron

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,800,000円

研究成果の概要(和文)：自然の基本法則の理解を目指し、極低エネルギーの状態で生成・輸送・蓄積した中性子を超精密測定することで、クォークの持つ電気双極子能率の発見を目指す実験の基盤を構築できた。以下の3つの大きな成果があがった。1)中性子の輸送・蓄積のための素材の開発において、中性子を反射する能力の高い「重水素化したダイヤモンド・ライク・カーボン」の実用化を進めた。2)中性子の磁気能率と変動磁場の相互作用により中性子の加減速を行う「リバンチャー」の開発に世界で初めて成功した。3)超低エネルギー中性子の磁場および物質表面との反応を研究するためのGeant4を基盤としたシミュレーションソフトの開発に成功しコードを公開した。

研究成果の概要(英文)：We have achieved major steps to realize the next generation particle physics experiment using an ultra-cold-neutron (UCN), neutrons having very low kinetic energy, in order to study fundamental law of Nature. Following three achievements are highlighted. 1) Developments of materials "UCN reflectors" for the transportation and accumulation of UCN: Especially, a diamond-like-carbon with deuterium satisfies the requirements of the next generation experiment. 2) Development of world brand new device "UCN rebuncher" which controls neutron velocity using the interaction between magnetic field and magnetic moment: We have succeeded to develop the system and verify its performance. 3) Development of Geant4-base simulation software to cope with neutron interactions with a magnetic field and that with surface of materials: The code simulates the transportation and accumulation of UCN with an accuracy of one order higher, which is necessary to design the system of the next generation experiment.

研究分野：素粒子物理実験

キーワード：素粒子物理 宇宙物理 中性子 材料 量子ビーム 加速器 原子核物理

1. 研究開始当初の背景

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 の存在を予言するが、特に、新模型として最も有望視される模型である超対称性模型は中性子 EDM を $10^{-27} \sim 10^{-28} \text{ e cm}$ と予言する。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 $(0.2 \pm 1.5(\text{stat}) \pm 0.7(\text{syst})) \times 10^{-26} \text{ e cm}$ [1] 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. 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。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 集団運動の理解を目標とする。

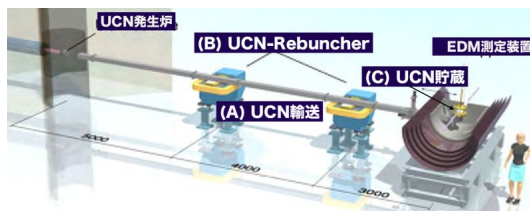


図 1: J-PARC 中性子 EDM 測定装置概念図

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) で提案され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。本研究のもうひとつの目的は系統誤差の評価および抑制手法の研究である。系統誤差の大きさの測定セル内壁の特性に強く依存しており、その評価を行う。

3. 研究の方法

(1) 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。

(2) UCN 再集束機構の開発: 中性子は磁気双極子を持ち、1T の磁場より $\pm 60 \text{ neV}$ 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本機構を実現し、実際にパルス UCN を用いて集束の実証実験を行う。

(3) 界面粗さと UCN 反射の関係、および中性子 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。粗さの異なる界

面での乱反射成分を中性子反射率計により評価し、粗さが乱反射に与える影響を調べる。また、中性子 EDM 実験用のシミュレーションコードを開発し、乱反射が実験に与える影響を評価する。

4. 研究成果

(1) 重水素化 Diamond-like Carbon を用いた中性子ミラーの開発：UCN 全反射界面として重水素化 Diamond-like Carbon(DLC)に注目し、その研究開発を行った。DLC は一般に平面度が高く、またグラファイトに比べ密度が高く中性子に対する反射ポテンシャルが高いという性質を持つ。ただし、化学合成した DLC には散乱断面積が大きくポテンシャルが負である水素が 30%程度含有しており、中性子ミラーとしては不適當であった。そこで DLC 内の水素を重水素化し、実用的な中性子ミラーとして利用するための研究開発を行った。研究開発を行うに当たり高エネルギー加速器研究機構の DLC 成膜装置を用いた。成膜条件を変えながら作成した重水素化 DLC の反射ポテンシャルおよび乱反射を J-PARC 中性子反射率計(SOFIA)で評価した。反射ポテンシャルを最適化した結果、243neV と実用的な中性子ミラーである NiC と同等のポテンシャルを持つミラーの作成に成功した(図 2)[2]。また粗さ平均は AFM の測定から 0.3 nm と非常に小さく中性子反射率系で評価した乱反射確率は 1.3×10^{-3} と見積もられた[3]。この値から実機で想定される 100 回の反射に対して 88%以上の輸送効率が期待され、実用に耐えうるものである。

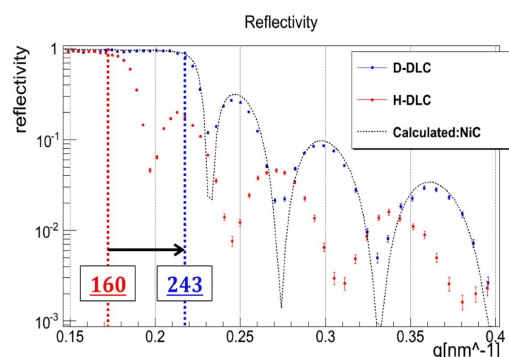


図 2: DLC(赤)および重水素化 DLC(青)の反射ポテンシャルの測定値[2]。重水素化により 160 neV の反射ポテンシャルを 243neV に増加した。

(2) UCN 再集束機構の開発と実証試験：

UCN 再集束機構は、UCN を速度に応じて加減速し蓄積容器位置での到着時刻を揃える。静磁場と共鳴条件を満たす高周波磁場を中性子が通過すると、中性子はスピン反転し静磁場に比例したエネルギーを交換し加減速する。勾配磁場として世界で初めて異方性中間磁極を採用し、最大磁場 1T、磁場勾配 0.35T/m を実現した。3MHz~30MHz の高周波磁場をパルス中性子に同期して挿引するために、100 倍のダイナミックレンジを持つ静電容量 C の同期変調を開発した。フランス ILL 研究所の研究用原子炉 HFR の UCN 源をチョッパーでパルス化することで模擬的なパルス UCN を作成し UCN 再集束の実証実験を行った。実験結果を図 3 に示す。スピン反転した中性子が元来到達する予定時刻の強度が減少、減速の結果、より遅い時刻に集束しており、数値シミュレーションともよく一致している。UCN 再集束機構を世界で初めて実証した[4] [5]。

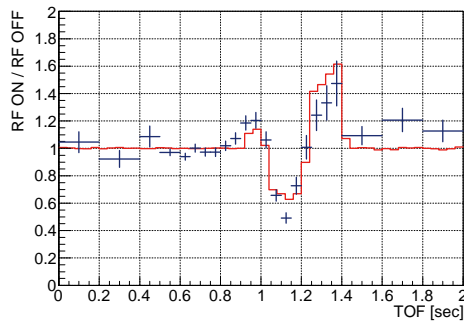
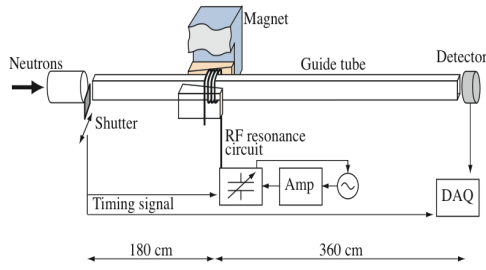


図 3: UCN 再集束実験のセットアップ(上)と TOF スペクトル(下)。青が実測、赤がシミュレーションである。パルス UCN が 1.3 秒付近に再集束している。

(3)界面粗さと UCN 反射の関係、および中性子 EDM 実験への影響の研究：中性子 EDM は電場と磁場を印可した容器に蓄積した UCN のスピン歳差運動から測定する。UCN が電場中を運動する際、相対論的效果により磁場が加わったものと同じ影響を受ける。UCN が乱雑に運動している場合この効果は相殺するが、UCN が全体として運動する成分を持っている場合、中性子 EDM と同じ偽信号として観測されてしまう。このような集団的運動の効果は実験の系統誤差になるため、容器内部での運動およびスピン歳差を正確に理解する必要がある。そこで素粒子物理分野で実績のあるシミュレーションコード Geant4 を使い、スピン歳差運動を中性子 EDM に換算し 5×10^{-30} e-cm の精度で計算できるコードを開発した[6]。このコードにより、中性子の初期条件と界面での反射が理解できれば UCN のスピン歳差運動が計算できるようになった。コードはその有用性を鑑み web 上に公開した[7]。中性子の物質界面での

反射/乱反射について、その現象を良く理解するため、粗さを 0.3 nm~10 nm までコントロールした複数の界面サンプルを用意し、その乱反射成分を中性子反射率計(SOFIA)により評価した。結果、Sinha ら [8]の理論が乱反射をよく再現することが分かった。今後この理論をシミュレーションに実装することで、高い精度での系統誤差の評価を実現する予定である。

< 引用文献 >

- [1] C. A. Baker et al., Phys. Rev. Lett. 97, 131801 (2006)
- [2] D. Sakurai et al., Journal of Physics: Conference Series 528 (2014) 012010
- [3] Y. Seki et al., “Experimental Study on Neutron Diffuse Reflection due to Surface Roughness for nEDM Measurement”, Poster presentation, 2nd International Symposium on Science at J-PARC, 2014. Jul. 15th, Tsukuba, Japan
- [4] Y. Arimoto et al., IEEE Transactions On Applied Superconductivity, Vol. 22 (2012) 4500704
- [5] Y. Arimoto et al., Phys. Rev. A 86, 023843 (2012)
- [6] R. Katayama et al., “Simulation study for systematic uncertainty suppression in nEDM experiment assuming various surfaces roughness”, Poster presentation, 2nd International Symposium on Science at J-PARC, 2014. Jul. 15th, Tsukuba, Japan
- [7] <https://github.com/rkatayama/JparcSymposium2014>
- [8] 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 11 件)

Dai Sakurai, Junsei Chiba, Takashi Ino,

Nobunori Kakusho, Naokatsu Kaneko, Ryo Katayama, Masaaki Kitaguchi, Kenji Mishima, Suguru Muto, Kazuhide Ozeki, Yoshichika Seki, Hirohiko M. Shimizu, Satoru Yamashita, Tamaki Yoshioka, Daiki Nishimura

“Development of a new neutron mirror made of deuterated Diamond-like carbon”
Journal of Physics: Conference Series 528 (2014) 012010, 査読有,
DOI: 10.1088/1742-6596/528/1/012010

Yasushi Arimoto, Haruhiko Funahashi, Nao Higashi, Masahiro Hino, Katsuya Hirota, Shohei Imajo, Takashi Ino, Yoshihisa Iwashita, Ryo Katayama, Masaaki Kitaguchi, Kenji Mishima, Suguru Muto, Hideyuki Oide, Hidetoshi Otono, Yoshichika Seki, Tatsushi Shima, Hirohiko M. Shimizu, Kaoru Taketani, Takahiro Yamada, Satoru Yamashita, and Tamaki Yoshioka,

“Present status of neutron fundamental physics at J-PARC”
Prog. Theor. Exp. Phys. 2012, 02B007,
査読有, DOI:10.1093/ptep/pts075

Yasushi Arimoto, Peter Gertenbort, Sohei Imajo, Yoshihisa Iwashita, Masaaki Kitaguchi, Yoshichika Seki, Hirohiko M. Shimizu, and Tamaki Yoshioka

“Demonstration of focusing by a neutron accelerator”
PHYSICAL REVIEW A 86, 023843 (2012)
査読有, DOI: 10.1103/PhysRevA.86.023843

〔学会発表〕(計 30 件)

S. Imajo, “Development of Neutron Doppler Shifter and UCN Accelerator”,

J-PARC2014, 2014年7月14日, つくば国際会議場 (茨城県つくば市)

K. Mishima, "Production of Ultra Cold Neutrons by a Doppler Shifter with Pulsed Neutrons at J-PARC"
NOPD2013, 2013年07月05日, Munich, Germany

D. Sakurai, "Development of a new neutron mirror made of deuterated Diamond-like carbon",
NOPD2013, 2013年07月04日, Munich, Germany

M. Kitaguchi, "Accelerator/Decelerator of Slow Neutrons", LINAC12 (招待講演), 2012年09月10日, Tel Aviv, Israel

〔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

<http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/yamashita/>

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・准教授

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

(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 素粒子宇宙物理学専攻 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

岩下 芳久 (IWASHITA, Yoshihisa)

京都大学 化学研究所 准教授

研究者番号：00144387

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

(4) 研究協力者

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