

超冷中性子リバンチャー改良機による UCN 時間収束

TIME FOCUS OF ULTRACOLD NEUTRONS BY IMPROVED ULTRACOLD NEUTRON REBUNCHER

今城想平^{#,A)}, 岩下芳久^{B)}, 三島賢二^{C)}, 北口雅暁^{A)}, 清水裕彦^{A)}, 猪野隆^{C)}, 山下了^{D)}, 広田克也^{A)},
後藤文也^{A)}, 不破康裕^{E)}, 片山領^{B)}

Sohei Imajo^{#,A)}, Yoshihisa Iwashita^{B)}, Kenji Mishima^{C)}, Masaaki Kitaguchi^{A)}, Hirohiko M. Shimizu^{A)}, Takashi Ino^{C)},
Satoru Yamashita^{D)}, Katsuya Hirota^{A)}, Fumiya Goto^{A)}, Yasuhiro Fuwa^{E)}, Ryo Katayama^{B)}

^{A)} Department of Physics, Nagoya University

^{B)} Institute of Chemical Research, Kyoto University

^{C)} High Energy Accelerator Research Organization

^{D)} International Center for Elementary Particle Physics, University of Tokyo

^{E)} Kyoto University Research Reactor Institute

Abstract

We have developed and improved an ultracold neutron (UCN) rebuncher. It can control the kinetic energy of UCN by the combination of an adiabatic fast passage spin flipper and a gradient magnetic field, and focus diffusing pulsed UCNs on a point. We carried out UCN focus experiments by the improved rebuncher at beamline 5 in J-PARC/MLF and have succeeded in focusing pulsed UCNs more sharply than our demonstration experiment.

1. 装置開発背景

中性子などのスピンをもつ粒子に電気双極子能率 (electric dipole moment - EDM) が存在すると、時間反転操作に対してスピンの向きは反転するが EDM はその向きを保つため時間反転対称性が破られる。また素粒子標準模型の CP 対称性の破れが予言する中性子 EDM の大きさ $10^{-30} \sim 10^{-32} \text{ e}\cdot\text{cm}$ よりも大きな EDM が見つかれば素粒子標準模型を超える新しい物理の証拠となる。これらを背景として、現在の中性子 EDM の上限値 $2.9 \times 10^{-26} \text{ e}\cdot\text{cm}$ [1] を超える $10^{-27} \text{ e}\cdot\text{cm}$ 以下の EDM 探索を目指した装置の研究開発が進められている。

中性子 EDM の測定では運動エネルギーがおおよそ 200 neV (\sim 速度 6 m/s) 以下の超冷中性子 (ultracold neutrons - UCN) を用いるものが現在の主流である。実験ではスピン偏極させた UCN を弱い静磁場がかけられた実験容器に貯蔵し、1 MV/m 程度の強電場を印加して電場に対するスピン反転率の変化量を評価する。また電場印加の前後において高周波 (RF) 磁場を印加してスピンを 90° ずつ倒し、ラムゼー共鳴法を用いて変化量を増幅する [2]。

中性子 EDM, d_n と中性子の共鳴周波数 ν との関係は、プランク定数 h , 中性子の磁気モーメント μ_n , 静電場 E , 静磁場 B を用いて以下の式 (1) で表わされる。複号は電場と磁場の平行および反平行の印加を意味する。

$$h\nu_{\pm} = -2\mu_n |B| \pm 2d_n |E| \quad (1)$$

中性子 EDM は式 (1) の複号間の差をとり磁場の影響を除去することで見積もられる。従って、測定精度向上のためには可能な限り様な磁場が必要であり、その実

現のために容器のサイズ拡大には制限がつく。他方、実験の統計精度は測定された全 UCN 数の平方根に反比例するため、体積密度の高い UCN を使用することが求められる。

体積密度の高い UCN の生成手法としては、核破砕中性子源の減速材中に超流動ヘリウム等からなるコンバーターを設置し、コンバーター中での冷中性子とフォノンとの散乱により中性子を UCN へ減速するスーパーサーマル法が開発されている。我々 NOP (Neutron Optics and Physics) グループは J-PARC 線形加速器のビーム (ピークパワー 20 MW) を用いた核破砕中性子源を新設し、世界最高のピーク強度を持つパルス UCN 源のもとで中性子 EDM 探索実験を行うことを提案している (P33) [3]。我々の実験計画ではバックグラウンド遮蔽や磁気シールドのために UCN 源から 10 m 以上離れた地点に実験容器を設置する予定である。一方で、中性子源へ引き出す陽子ビームの繰り返し周期を長くするため UCN は離散的な時間構造を持ち、生成直後においては高い体積密度を持つ UCN パルスが実験容器への輸送中にその速度分布に従って大きく拡散してしまう。この解決策として我々は、UCN の位相空間分布を輸送中に回転させ時間収束によって UCN のピーク強度を回復させる装置「超冷中性子リバンチャー」の開発を行ってきた [4]。

2. 超冷中性子リバンチャー

UCN リバンチャーは中性子の磁気モーメントが磁場中で得る大きさ $\pm 60 \text{ neV/T}$ のポテンシャルエネルギーを利用して中性子の運動エネルギーを制御する中性子加速器である。この装置はゆるやかな勾配磁場を発生させる電磁石と、周波数掃引する高周波磁場 (RF) を発生させる空洞共振器により構成されている。中性子の加

[#] imajo@phi.phys.nagoya-u.ac.jp

速原理は、勾配磁場中で磁場と垂直な方向に RF 磁場を印加することで UCN のスピンを高速断熱通過型 NMR 法 (AFP-NMR 法) [5] によって反転させ、Figure 1 に示されるように磁場通過前後での UCN のポテンシャルエネルギーに収支差を生じさせるというものである [6, 7]。これに加え、RF 周波数を掃引することでスピン反転が生じる共鳴点の位置を連続的に移動させ、共鳴点を通る UCN ごとに適切なエネルギー収支差を生じさせて速度-位置位相空間中での UCN 分布を適切に回転させる。従って、収束効率を高めるためには周波数掃引の時間設計精度とスピン反転率の高さが重要となる。たとえば我々が開発した異方性中間磁極を備えた電磁石 [8, 9] が作る最大磁場 1 T、磁場勾配 3.2 T/m の磁場を用い、5 m/s の UCN を集束ターゲットとした場合、スピン反転率 90 % 以上を達成するためには 0.7 mT 以上の RF 磁場強度が必要となり、また周波数掃引は 180 MHz/s 程度の傾きを持つ直線状の時間変化で行う必要がある。

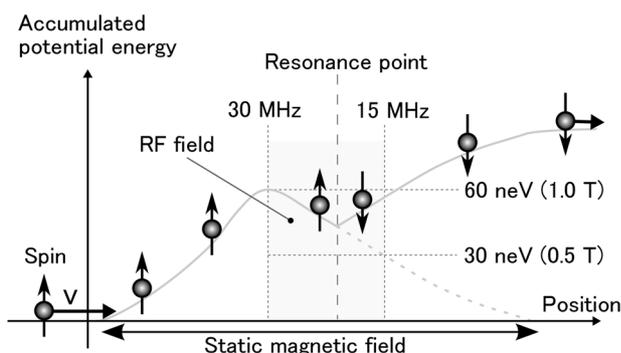


Figure 1: Mechanism of neutron acceleration.

共振空洞内部には Figure 2 に示すように、モーターで制御された可変コンデンサ C_r および銅板で作られた一巻きコイル L からなる LC 共振回路が設置されている。可変コンデンサ C_r はインピーダンス整合用のコンデンサである。各コンデンサは絶縁耐圧向上および静電容量増加を目的としてシリコンオイル KF-96 に漬けられている。周波数掃引は C_r の容量を掃引して空洞内の共振周波数を変化させ、位相同期回路を用いて共振周波数を検知および追跡し、共振周波数に合致する RF 電力を入力することで実現される。我々の最終開発目標は内寸 12 cm × 12 cm のコイルを用いて 6~30 MHz の RF 磁場発振を実現することである。これは中性子の運動エネルギーに換算して 24~120 neV の制御幅となる。

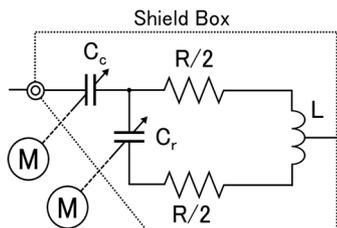


Figure 2: Circuit inside RF cavity.

我々は UCN リバンチャー原理実証機 (1 号機) を用いた原理実証実験に 2011 年にフランスの ILL で成功し

たが、1 号機には以下に挙げる問題が残っていた。

1. 15.3~29.4 MHz の RF 磁場発振が可能だったが、モーターの加速トルク不足により UCN 収束に対して実用可能な範囲は 17.5~28.6 MHz (70~114 neV) だった。
2. 電力反射等の原因により RF 磁場強度が不足しスピン反転率が 50% (RF 磁場強度に換算して 0.56 mT) となった。
3. 半値全幅 13 ms にチョップしたパルス UCN を入射したが周波数掃引の時間設計が適切でなく、200 ms に渡る広い集束ピーク幅となった。

これら 1 号機の問題を解決するために我々は 1 号機のコンデンサおよびモーターを大型化した改良機 (2 号機) を開発した。

3. リバンチャー改良

リバンチャー 2 号機の内部機構は Figure 3 に示されるような構成となっている。各可変コンデンサは 1 号機よりも軽量かつ大容量のアルミ製コンデンサに交換され、Figure 4 に示されるように 115 ms 間に 8~29 MHz の周波数範囲でほぼ直線状の周波数掃引を実現している。これは 32~116 neV の制御幅となる。共振回路への電力供給については、 C_e の容量成分に加え、RF コイル内部から単芯ケーブルをループさせて給電することにより誘導成分を利用し、 C_e の容量を最大値に固定した状態で 10 MHz 以上において電圧定在波比 2.0 以下を達成している。RF コイルは 1 号機同様の内寸 5 cm × 8 cm のコイルを使用している。電力投入については 1 kW の RF アンプを使用した 1 号機に対し、2 号機は 3 kW の RF アンプを使用した。

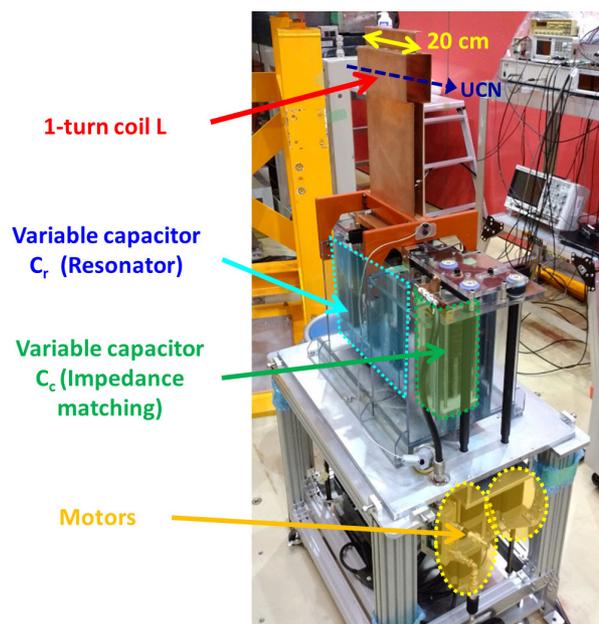


Figure 3: Final version of the second rebuncher.

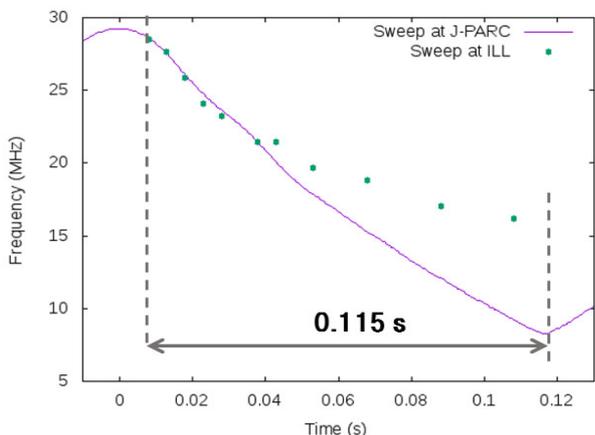


Figure 4: Comparison of frequency sweeps by the first and the second rebuncher, which are dots and a line, respectively.

4. UCN 収束実験

リバンチャー 2 号機を用いた UCN 集束実験は J-PARC/MLF BL05 にて行われた。実験では UCN 源として我々が開発した中性子ドップラーシフター [10] を使用した。ドップラーシフターは後退する中性子鏡に入射ビームを反射させることで中性子を減速させる装置であり、我々のものは生成直後において半値全幅 4.4 ms の時間構造を持つパルス UCN を生成する。実験セットアップは Figure 5 に示すものであり、8.33 Hz で生成される UCN の繰り返し周波数をシャッターを用いて 0.52 Hz にまで間引き、UCN 源から約 2 m 地点に設置されたリバンチャーによって UCN を減速し、UCN 源から約 6 m 下流地点に時間集束させる設計となっている。この図の向きにおいてリバンチャーの静磁場は紙面手前に向けて張られ、RF 磁場は UCN 輸送と同じ方向に振動する。

共振器に投入された電力は約 2 kW であり、1 cm² の 1 巻きコイルプロープによって測定された RF 磁場強度は

0.5~0.7 mT となった。この磁場強度を 5.5 m/s の UCN のスピン反転率に換算した結果は Figure 6 に示されるものとなり、スピン反転率は周波数に応じて 50~100 % に渡ると推測される。RF 磁場強度が安定していない原因は、電圧定在波比の周波数依存性、RF アンプのゲインの周波数依存性、アンプの高調波増幅を抑制するための意図的な入射電力制限など、複合的なものである。

実験では 5.5 m/s 周辺の UCN を減速のターゲットとし、検出器位置において 4.7 m/s の UCN と重なるように時間収束させた。その結果、Figure 7 に示すように TOF スペクトル中においてリバンチャー未使用時に対して 2.3 倍の計数率増加を持つ収束ピークを得ることに成功した。収束ピーク幅は 20 ms であり、使用した UCN のパルス時間幅の違いを考慮しても 1 号機よりも十分に鋭いものとなっている。実験スペクトルと 1 次元輸送による UCN 集束シミュレーションとの比較は Figure 8 に示すようなものとなった。シミュレーションではスピン反転によって 1100 ms 周辺に生じる谷の形状はよく再現できているが、集束ピークが 30 ms 程度左側に生じており、かつピーク高さが 2 倍ほど高くなっている。原因としては周波数スイープを制御するモーター等の動作機構のジッタなどが考えられる。この不明点については現在解析中である。

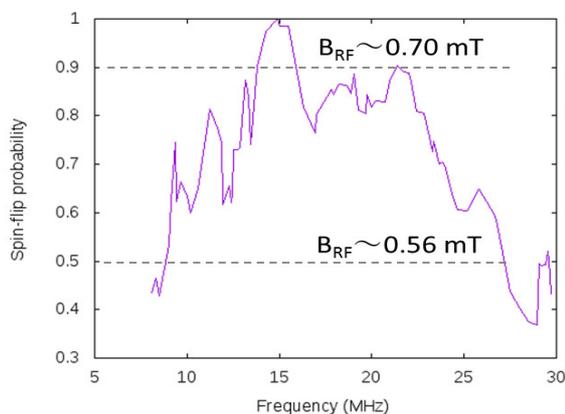


Figure 6: Spin-flip probability of 5.5-m/s UCNs calculated by the RF magnetic field strength.

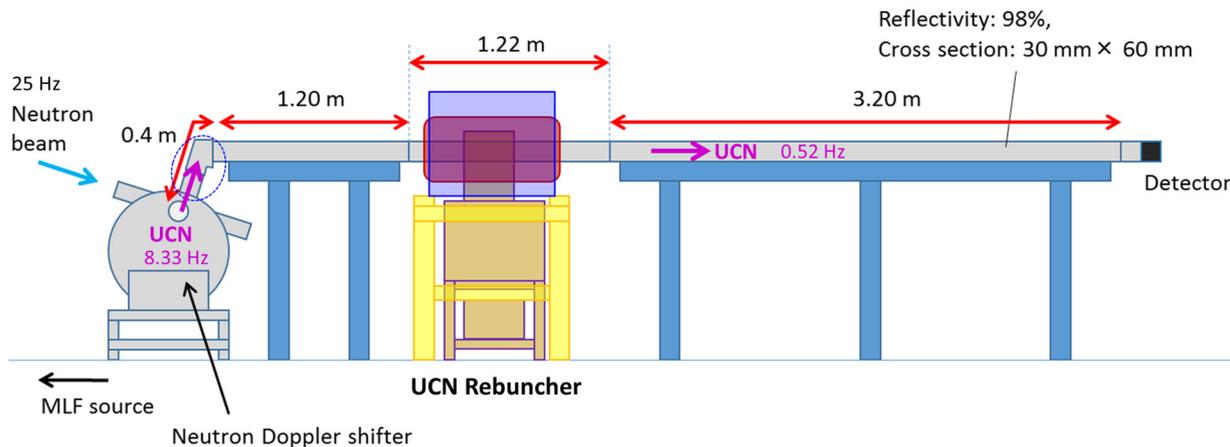


Figure 5: Setting of the UCN focus experiment at beamline 5 in J-PARC/MLF.

した設計変更と装置開発が重要となる。

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was partially supported by Ministry of Education, Science, Sports, and Culture Grants-in-Aid for Scientific Research (A) 23244047 and (A) 26247035, and by the JSPS, Grant No. 23360428, and approved by the Neutron Scattering Program Advisory Committee of IMSS, KEK (Proposal No. 2009S03 and 2014S03).

参考文献

- [1] C. A. Baker *et al.*, Phys. Rev. Lett. **97**, 131801 (2006).
- [2] C. A. Baker *et al.*, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A **736**, 184-203 (2014).
- [3] Proposal to J-PARC; http://j-parc.jp/researcher/Hadron/en/pac_1001/pdf/KEK_J-PARC-PAC2009-11.pdf
- [4] Y. Arimoto *et al.*, Phys. Rev. A **86**, 023843 (2012).
- [5] S. V. Grigoriv *et al.*, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A **384**, 451-456 (1997).
- [6] B. Alfeld, G. Badurek, and H. Rauch, Z. Physik B **41**, 231 (1981).
- [7] H. Weinfurter *et al.*, Z. Physik B **72**, 195 (1988).
- [8] Y. Arimoto *et al.*, Physics Procedia **17**, 20-29 (2011).
- [9] Y. Arimoto *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond **22**, 4500704 (2012).
- [10] S. Imajo *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. **2016**, 013C22 (2016).

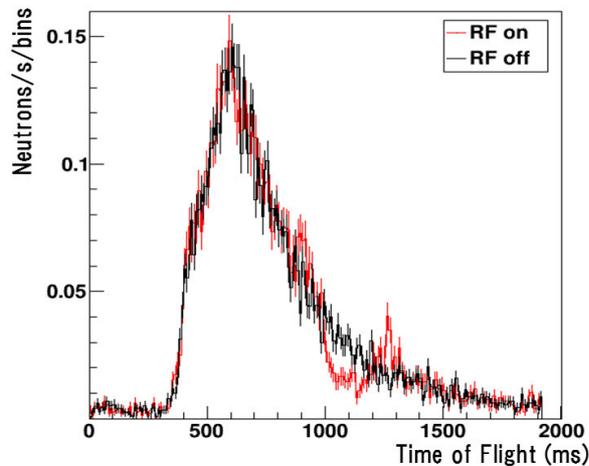


Figure 7: Result of the UCN focus experiment. RF on/off indicates working and stopping of the rebuncher, respectively.

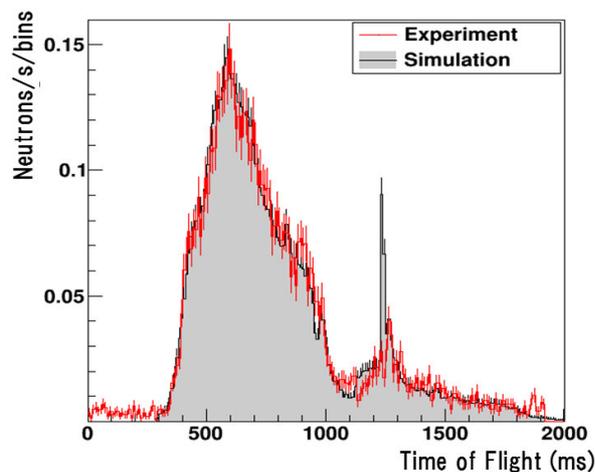


Figure 8: Comparison of the spectra obtained by the UCN focus experiment and calculated by a one-dimensional UCN transport simulation.

5. 今後の展望

我々はリバンチャー1号機の問題点を1号機の各部分の能力をアップグレードする形で改良し、1号機では達成できなかった鋭いUCN集束を実現する2号機を開発した。しかしながら現在のリバンチャーは周波数スイープのために0.1 s間に1000 rpmまで可変コンデンサの回転速度を増加させる設計のため、駆動部品の疲労が非常に大きく数日間の運転にしか耐えないものとなっている。中性子EDM実験は年単位に渡る長期実験となるため、今後の開発は2号機が達成できなかったRFコイルの大型化に加え、より小さな機械的負荷や機械駆動に頼らずに周波数掃引を行えるような、長期運転を目指