

## 超冷中性子リバンチャーの現状

### PRESENT STATUS OF ULTRACOLD NEUTRON REBUNCHER

今城想平<sup>#,A)</sup>, 岩下芳久<sup>B)</sup>, 三島賢二<sup>C)</sup>, 北口雅暁<sup>D)</sup>, 清水裕彦<sup>D)</sup>, 猪野隆<sup>C)</sup>, 山下了<sup>E)</sup>

Sohei Imajo<sup>#,A)</sup>, Yoshihisa Iwashita<sup>B)</sup>, Kenji Mishima<sup>C)</sup>, Masaaki Kitaguchi<sup>D)</sup>, Hirohiko M. Shimizu<sup>D)</sup>, Takashi Ino<sup>C)</sup>,  
Satoru Yamashita<sup>E)</sup>

<sup>A)</sup> Department of Physics, Kyoto University

<sup>B)</sup> Institute of Chemical Research, Kyoto University

<sup>C)</sup> High Energy Accelerator Research Organization

<sup>D)</sup> Department of Physics, Nagoya University

<sup>E)</sup> International Center for Elementary Particle Physics, University of Tokyo

#### Abstract

We describe the present status of the second ultracold neutron rebuncher. It could sweep the RF frequencies from 7.0 to 29.4 MHz. VSWR values were lower than 2.0 at the higher frequency than 10 MHz. However, the RF field strength was 1/3 lower than our goal of 1 mT and the high stray field existed. In addition, the phase-lock was lost due to the fall of loop gain. At present, we are trying to solve these problems.

#### 1. 超冷中性子リバンチャー概要

中性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 EDM はその向きを保つのに対しスピンは反転するため時間反転対称性が破られる。また素粒子標準模型が予言する中性子 EDM の大きさ  $10^{-30} \sim 10^{-32} \text{ e}\cdot\text{cm}$  よりも大きな EDM が見つければ素粒子標準模型を超える新しい物理の証拠となるし、見つからなくともその上限値の更新は新しい物理理論に制限を付けることになる。このような理由により、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  $10^{-27} \text{ e}\cdot\text{cm}$  以下の EDM 探索を目指した研究が進められている。

中性子 EDM の測定では運動エネルギーがおおよそ 200 neV 以下の超冷中性子 (ultracold neutrons - UCN) をスピン偏極させて弱い静磁場がかけられた実験容器に貯蔵し、RF 磁場 ( $\pi/2$  パルス)、強電場、RF 磁場の順に印加を行い、ラムゼー共鳴法を用いて電場印加時のスピン反転率の変化量を評価する [2]。中性子 EDM,  $d_n$  はプランク定数  $h$ , 中性子の共鳴周波数  $\nu$ , 中性子の磁気モーメント  $\mu_n$ , 静電場  $E$ , 静磁場  $B$  を用いて以下の式で表わされる。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。電場 1 MV/m を印加して EDM を測定する場合は式 (1) において  $10^{-27} \text{ e}\cdot\text{cm}$  の EDM と 0.3 fT の磁場が同じ周波数変化を生むため、容器内磁場は磁力計を用いて極めて厳密に評価され、系統誤差として除去されなければならない。そのため貯蔵容器は小さいことが望ましい。一方で測定された全 UCN 数を  $N$  とすると統計誤差は  $N^{-1/2}$  に比例して向上

するため、 $10^{-27} \text{ e}\cdot\text{cm}$  の測定には貯蔵 UCN 数を現在の実験の 100 倍に向上させなければならない。それゆえ体積密度の高い UCN を生成し小容器に貯蔵することが求められている。

体積密度の高い UCN の生成は、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のフォノン放出により中性子を UCN へ減速するスーパーサーマル法によって達成される。この手法は大阪大学核物理研究センター (RCNP) やスイスのポール・シェラー研究所 (PSI) 等で研究されており、我々 NOP (Neutron Optics and Physics) グループも 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 EDM 探索実験を行うことを提案している (P33) [3]。この実験計画では UCN 生成の繰り返し周波数は 2 Hz であり、また実験容器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 以上離れた地点に設置されるため、生成直後において高い体積密度を持っていた UCN パルスは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 UCN の拡散方向を輸送中に反転させ UCN のピーク強度を回復させる集束機構として我々は「超冷中性子リバンチャー」の開発を行ってきた [4]。

UCN リバンチャーは中性子の磁気モーメントが磁場中で受ける大きさ  $\pm 60 \text{ neV/T}$  のポテンシャルエネルギーを利用した中性子加速器である。この装置はゆるやかな勾配磁場中に長い RF コイルを設置した共鳴スピンフリップパーであり、共鳴点の近傍において 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ことで UCN を加減速する [6,7]。また RF 周波数を 0.1 s 間に 30 MHz から 10 MHz まで掃引することで共鳴点の位置を移動させ、速度の異なる UCN の到着に

<sup>#</sup> imajo.sohei.74c@st.kyoto-u.ac.jp

合わせてエネルギー収支差を連続的に変化させることで速度-位置空間中での UCN 分布を適切に回転させ、任意地点への時間的な集束を達成する。

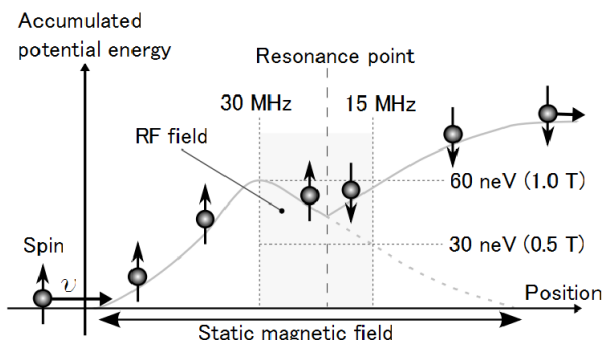


Figure 1: Mechanism of neutron acceleration.

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 3.2 T/m の勾配磁場を用い、5 m/s の UCN を集束ターゲットとした場合、AFP-NMR 法における中性子のスピン反転率は印加した回転磁場の最大強度に対して Figure 2 のような分布を持つ [10]。したがってスピン反転率 90% 以上を達成するには少なくとも 0.35 mT の大きさを持つ回転磁場が必要であり、スピン反転に適する磁場の回転方向が決まっているためこの条件を振動磁場で達成する場合は 0.7 mT 以上の RF 磁場が必要となる。そこで我々は 1 mT 以上の RF 磁場発振を目指して RF 共振器を開発してきた。

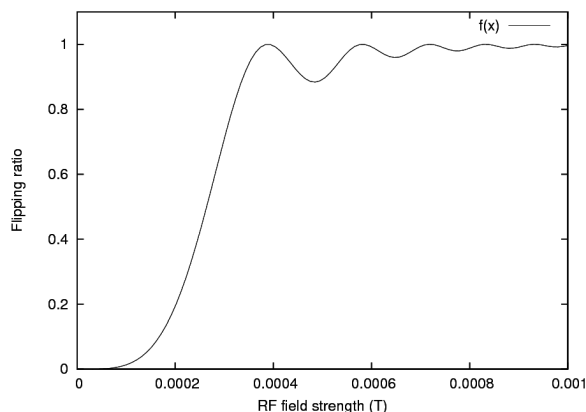


Figure 2: Spin-flip ratio.

RF 共振器は Figure 3 に示すようにモーターで制御される可変コンデンサ  $C_r$  と銅板で作られた一巻きコイル  $L$  からなる LC 共振回路で構成されている。 $C_r$  の容量を調節することで共振周波数を変化させ、それと同時にカップリングコンデンサ  $C_c$  によって共振器のインピーダンス整合を行い、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 電力を印加することで周波数を掃引しつつ高出力の RF 磁場発振を実現する。我々の最終目標は内寸 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 UCN の運動エネルギーに換算して 24~120 neV の加減速に相当する。

我々は UCN リバッチャーの原理実証機 (1 号機) を開発し、2011 年 11 月にフランスの ILL で原理実証実験を成功させた。1 号機は内寸 5 cm × 8 cm のコイルを有し、15.3~29.4 MHz の RF 磁場が発振可能であった。このうちモーター回転の限界から 17.5~28.6 MHz (70~114 neV) の範囲が集束に使用され、5 m/s の UCN を減速し 4 m/s に重ね合わせることで 1.4 倍の集束を達成した [4]。しかし、1 kW の RF アンプを用いて電力投入を行ったが電力反射等により RF 磁場強度が不足しスピン反転率は 50% (磁場に換算して 0.56 mT) となった。また RF 印加タイミングの UCN の到着に対する 10 ms 程度の遅れにより、FWHM 13 ms の UCN パルスを入射したが集束ピーク幅は 200 ms となり鈍い集束となった。これらの問題を解決するために我々は 2 号機を開発してきた。

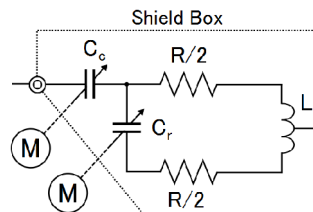


Figure 3: Circuit inside RF cavity.

## 2. リバッチャー2号機の現状

現在の UCN リバッチャー2号機の内部回路は Figure 4 に示されるような構成となっている。2号機は最終目標である大口径のコイルに装置設計を近付けるため内寸 30 cm × 5 cm のコイルを搭載している。また 1号機よりも軽量かつ大容量のアルミ製コンデンサを搭載し、7.0~29.4 MHz の RF 磁場発振を実現している。共振回路への電力供給に  $C_c$  による C マッチに加えて RF コイル中において給電ケーブルをループさせることによる L マッチを用いることで、 $C_c$  を停止した状態であっても 10 MHz 以上において VSWR < 2.0 を達成している。またモーター制御については 10 MHz 以上において理想的な周波数掃引が実現出来ることを確認している。電力投入には 3 kW の RF アンプを使用する予定である。

しかしながら UCN ガイド管中心位置での RF 磁場強度については現在のコイルでは Figure 5 に示されるように電力 3 kW に換算しても目標である 1 mT の 1/3 程度であり、大きく不足している。この図はネットワークアナライザを用いて 10 mW の電力入射に対する RF コイル内からの透過電力を測定し、3 kW 電力投入時の磁場に換算したものである。また、同図に示されるようにガイド管中心から 8 cm 下方では 2 倍の強さの RF 磁場発振が生じていることが確認された。コイルが縦に大型化したことでコイルの中心が UCN ガイド管の中心よりも下方に移動したため磁場が大きく弱まったと推測される。この磁場強度の不足は RF コイル内に絶縁体を挟んで Cu フォイルを貼りつけコイルを多層にすることで解決できると考えられる。

また、現状の RF 磁場には大きな洩れ磁場が生じるという問題がある。Figure 6 に 29.4 MHz における RF コイル中心から 13 cm までの RF 磁場強度分布を示す。

この結果は 0.5 W の電力入射に対する RF コイル内での誘導起電力の振幅を磁場強度に換算したものである。磁場測定はリバンチャーに UCN ガイド管を挿入した際のガイド管中心軸に沿って行われている。ガイド管中心軸がコイル上端に位置するため RF コイルの端へ向かうほど磁場強度が大きくなり、RF コイル端から 3 cm 離れた地点でもコイル中心の 2 倍の磁場が残存している。現在のリバンチャーは UCN スピン反転において純粋な回転磁場ではなく振動磁場を用いているため、静磁場の上り勾配にまで大きな RF 磁場が洩れると登り勾配中でもスピン反転が生じ、意図した集束が行えなくなってしまう。そのため我々の最終目標を実現するには RF コイルを小分けにする、台形状の磁場分布を持つ静磁場を使用する等の対策が必要となる。また、最終目標の実現に向けて現在の大口径コイルの RF 磁場増強を行う一方で、リバンチャーによる鋭い UCN 集束の実証実験の際には 1 号機と同形状の内寸の小さなコイルの使用を検討しなければならない。

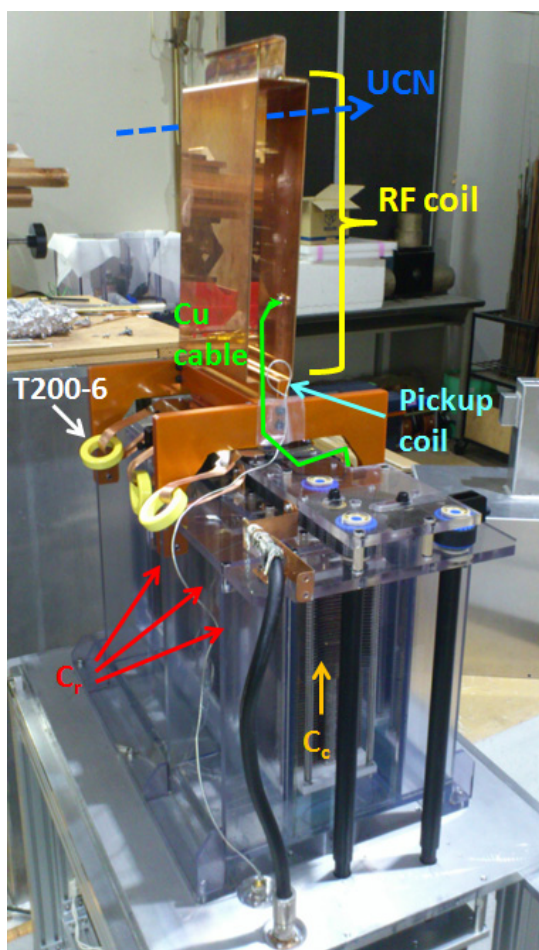


Figure 4: Present second rebuncher.

位相同期回路については、取り扱う周波数幅が 4 倍以上に渡り 1 号機に対して約 2 倍広いため 1 号機に用いた位相シフターが使用できず厳密な位相差調整が現状行えない問題と、周波数掃引途中でループゲインが大幅に低下し位相同期が外れてしまう問題が判明している。現在はループゲイン低下の原因を調査中である。

今後は位相同期回路の問題を解決して 7~30 MHz に渡って位相同期をとれるようにし、その後に RF 磁場増強を行い、本年中の UCN 集束実験を目指す。

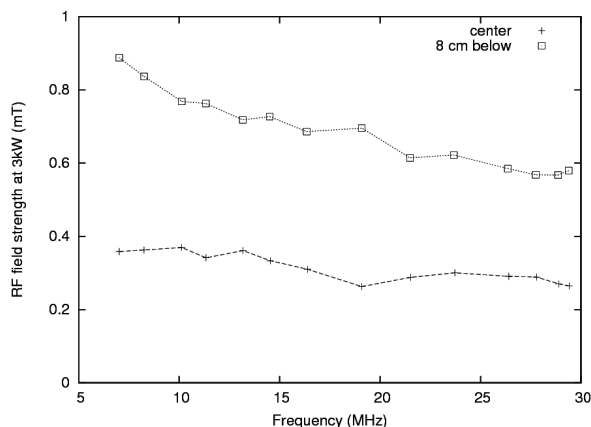


Figure 5: RF field strengths at the center of an UCN guide tube and at 8 cm below the point.

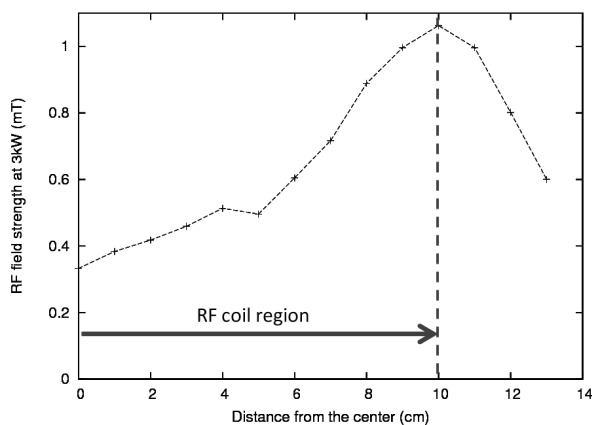


Figure 6: RF field strength along the center of an UCN guide tube.

## 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](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).

**PASJ2016 MOP009**

- [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.*, Physica Procedia 17, 20-29 (2011).
- [9] Y. Arimoto *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond 22, 4500704 (2012).
- [10] R. T. Robiscoe, Am. J. Phys. 39, 146 (1971).