

Demonstration of Accelerator for Ultracold Neutrons

Yasushi Arimoto^{A)}, Peter Gertenbort^{B)}, Sohei Imajo^{#,C)}, Yoshihisa Iwashita^{D)}, Masaaki Kitaguchi^{E)},
Yoshichika Seki^{F)}, Hirohiko M. Shimizu^{G)}, Tamaki Yoshioka^{H)}

^{A)} High Energy Accelerator Organization, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801, Japan.

^{B)} Institut Laue-Langevin, BP 156, F-38042, Grenoble Cedex 9, France.

^{C)} Department of Physics, Kyoto University, Kitashirakawa, Kyoto, 606-8502, Japan.

^{D)} Institute of Chemical Research, Kyoto University, Uji, Kyoto, 611-0011, Japan.

^{E)} Research Reactor Institute, Kyoto University, Kumatori, Osaka, 590-0494, Japan.

^{F)} RIKEN, Wako, Saitama, 351-0198, Japan.

^{G)} Department of Physics, Nagoya University, Chikusa, Nagoya, 464-8602, Japan.

^{H)} Department of Physics, Kyushu University, Hakozaki, Fukuoka, 812-8581, Japan.

Abstract

We are developing an ultracold neutrons accelerator for measurement of the parametric electric dipole moment of neutrons in J-PARC. We performed a test experiments in Institut Laue-Langevin and succeeded in accelerating and decelerating very slow neutrons.

超冷中性子加速器の実証

1. 超冷中性子加速器概要

素粒子標準理論を超える物理を探索する手段の一つに中性子の電気双極子モーメントの測定がある。標準理論が予言する電気双極子モーメントの大きさは $10^{-30} \sim 10^{-32} \text{ e} \cdot \text{cm}$ であるが新しい物理には大きな値を予言するものがある。たとえば超対称性理論では $10^{-27} \sim 10^{-28} \text{ e} \cdot \text{cm}$ に値を持つと予言している。電気双極子モーメントの大きな有限値を測定できれば新しい物理の存在を強く示唆する。

現在中性子電気双極子モーメントの測定は、中性子に加わる電磁場の相対論的効果を抑えるとともに中性子に電磁場を長時間印加するために運動エネルギーが 250 neV 以下の極めてエネルギーの低い超冷中性子 (UltraCold Neutrons - UCN) を用いる手法が一般的である。UCN はそのエネルギーの低さゆえに原子の数百倍の大きさの波長を持ち原子核の疑フェルミポテンシャルを面平均して感じるため、ニッケルのような大きなポテンシャルを持つ物質で作られた平面上で全反射を生じ、容器に閉じ込めることができる。実験では UCN を容器中に封入し、電磁場に対する中性子の応答を測定する。

UCN の電気双極子モーメントの測定では容器中に電場と磁場を平行および反平行に均一にかけ、それぞれ中性子スピン歳差運動のわずかな違いを比較するため、実験容器は小さいことが望ましい。その制限のもとで UCN の統計数を向上させるためにはできるだけ大きな UCN 密度のもとで実験容器に UCN を封入する必要がある。現在の電気双極子モーメントの上限値はフランスの ILL で得られたもので、 $2.9 \times 10^{-26} \text{ e} \cdot \text{cm}$ (90% C.L.) である。この実験では回転するタービンの羽根に原子炉から導いた低速中性子を反射させドップラー効果によって UCN を生成する手法が用いられており、実験容器中の UCN 密

度は $1 \sim 2 \text{ UCN/cm}^3$ ほど^[1]であった。UCN は通常は一度生成されると気体と同じように拡散するため、そのまま輸送する場合、発生位置での密度を向上させなければならない。現在、PSI や TRIUMF などでは加速器を用いた核破砕中性子源の中性子を超流動ヘリウムや固体重水素中のフォノンとの非弾性散乱で一気に UCN にまで冷却し、高密度の UCN を生成する計画が進められている。PSI は 1000 UCN/cm^3 以上の粒子密度の UCN を生成し、 $10^{-27} \sim 10^{-28} \text{ e} \cdot \text{cm}$ の電気双極子モーメントの測定を目指そうとしている^[1]。

我々 NOP (Neutron Optics and Physics) グループも J-PARC 内に 3000 UCN/cm^3 以上の UCN を生成する専用の UCN 源を建設し、電気双極子モーメントの測定実験を行うことを提案した。^[2]

我々の実験計画の特色は J-PARC の大強度陽子パルスを利用してパルス状の UCN を発生させ、UCN を拡散するに任せることなく輸送中間地点で加速もしくは減速させ、UCN の進行方向の拡散を逆転させて実験容器の入口地点で生成直後の UCN バンチ構造を回復させ、実験容器中において高い UCN 密度を実現することである。具体的には UCN の再バンチ化のタイミングと容器の蓋の開閉間隔を同期させ、容器の開口時間あたりの実効的な封入圧力を大きくすることで実験容器中の UCN 密度の向上を達成する。これを目指して現在開発しているのが、我々が UCN リバンチャーと呼んでいる中性子加速器である。

中性子加速器の加速の原理は中性子の磁気モーメントと磁場勾配との相互作用を利用したものである。磁気モーメント μ を持つ中性子は磁場 \mathbf{B} 中で $-\mu \cdot \mathbf{B}$ で表されるポテンシャルエネルギーを持つ。これは磁場 1 T あたりおよそ 60 neV の大きさに相当する。しかし図 1 に示すように磁場中にスピントリッパーを設置して磁気ポテンシャル中の適切な位置に中性

子が来たときに中性子のスピンを反転させてやれば、磁場を通過する前後での中性子のエネルギー収支を制御することができ、最大で 1 T あたり 120 neV の運動エネルギーの変化を与えることができる。UCN の運動は 100 neV のエネルギースケールであるため、有限の速度変化を起こさせることができる。スピンフリップには共鳴スピンフリップを用いた。中性子の磁気モーメントを μ_n 、z 方向の静磁場の強さを B_z 、プランク定数を h とすると、スピン反転を生じさせる共鳴振動数 ω_s は以下のように書ける。

$$|\mu_n| B_z \frac{2\pi}{h} = \frac{\omega_s}{2}$$

すなわち、共鳴振動数 ω_s を変化させるとスピン反転に適した B_z が変化することになり、静磁場中でスピン反転が生じる位置が移動する。パルス中性子では静磁場中の特定位置への到達時刻が速度によってほぼ一意に決まるため、タイミングよく連続的に共鳴周波数を変化させてやれば UCN の速度成分ごとに適切な加減速を与えることができ、理想的には図 2 に示すように実験容器の位置で UCN の到達タイミングを同時に揃えることができる。

中性子のスピンの絶対値が 1/2 であるので、実際には入射した中性子のうちの半数に対してしか狙った速度操作ができないが、それでも操作できる速度幅が十分に広ければ半数の損失を補えるだけの密度の向上を見込むことが可能となる。

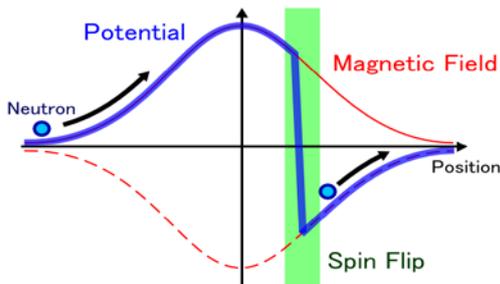


図 1: 磁場勾配中で中性子が感じる磁気ポテンシャル

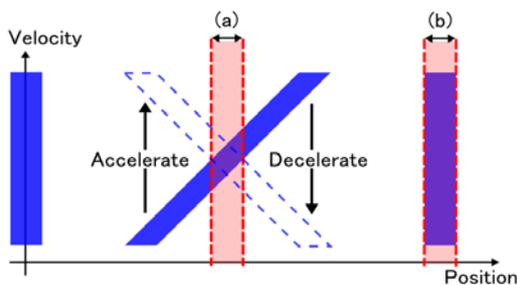


図 2: 位相空間中での UCN リバッチの概念図。(a)はスピンフリップが生じる位置であり、(b)は実験容器が存在する位置である。

RF 磁場は図 3 に示すようなコイル L と可変コンデンサ C_r で構成される LC 共振回路に共鳴条件に応じた周波数の高周波電力を投入することで発振させている。可変コンデンサ C_c は外部とのインピーダンスマッチング用に備え付けられており、これら 2 つのコンデンサをそれぞれ独立のモーターを用いて制御することで RF 発振に適した共鳴条件を変化させる。回路図中のシールドボックス内の装置の写真を図 4 に示す。

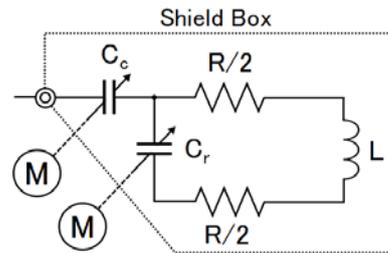


図 3: RF コイルの回路図

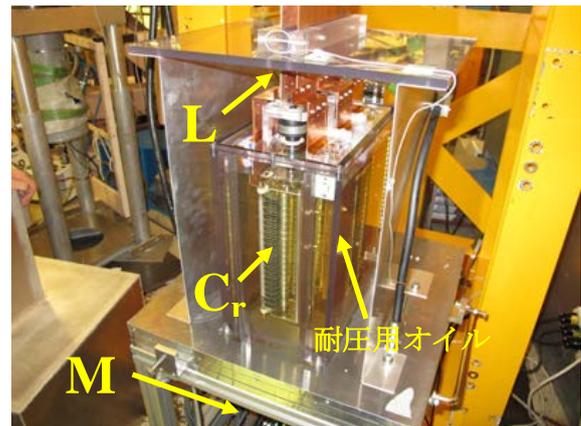


図 4: シールドボックス内部

2. 中性子加速器の原理実証実験

本装置の原理実証実験は 2011 年 9 月～10 月にかけて ILL の UCN TEST ポートで行った。セッティングの概念図を図 5 に、写真を図 6 に示す。

ILL は原子炉であるため UCN は連続的に生成される。一方、本装置はパルス状に発生した UCN に使用することが想定されているため、ガイド管最上流部に中性子吸収材としてガドリニウムを塗布したシャッターを設置し、2 s ごとに 20 ms の間だけシャッターを開いて入力 UCN をパルス化し、実験に使用した。

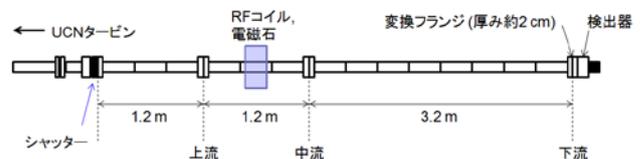


図 5: ILL 実験におけるセッティング

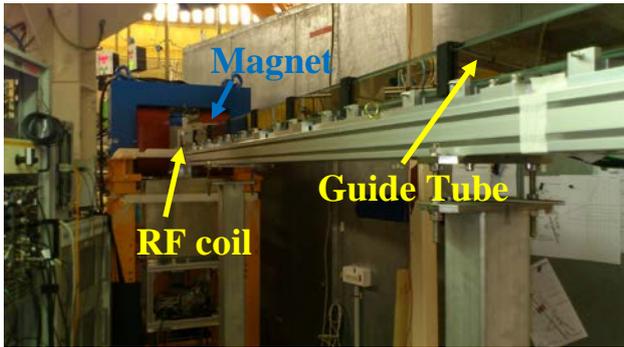


図 6 セッティングの様子

この実験で使用した電磁石の作る磁場強度は 1T であり、UCN 進行軸(z 軸)に対する鉛直方向の磁場強度分布は図 7 のような非対称な形状になっている。静磁場は異方性中間磁極を用いて一様な磁場勾配を実現している。この図中の、強度が直線的になだらかに減少する赤線の領域を使用して UCN の加減速を行う。

この磁場のもとで本装置は 17MHz~30MHz の RF パルスを発振し、70neV~120neV の範囲で UCN のエネルギー変化を制御できる。

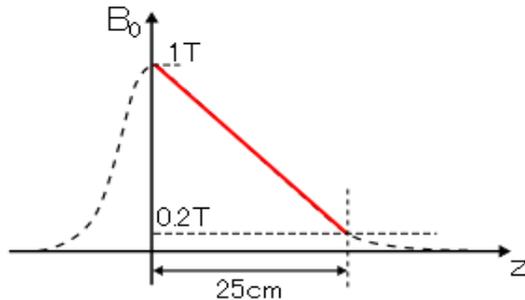


図 7: UCN の進行方向に対する磁場の強度分布^[3]

図 8 に共振周波数を 28.83MHz に固定した条件下で共振器に 1kW のパワーを入力した際の UCN の飛行時間(TOF)スペクトルの変化を示す。2つのヒストグラムはそれぞれのピークの高さが一致するように規格化されている。RF が OFF の場合(黒線)と ON の場合(赤線)とで TOF に明らかな変化が生じており、UCN のうちの一部は加速され、残りは逆の作用を受けて減速されたことがわかる。図 9 は RF ON/OFF のスペクトルの比である。加速・減速されたピークが明瞭に観察された。

この測定に加えて我々は RF 周波数を遷移させて一定の速度範囲の UCN をカバーするリバンチの測定実験も行ったが、そちらのデータに関しては現在解析中である。静磁場中でスピンを単純に反転させて中性子を加減速する実験には前例が存在するが^{[4][5]}、到来する中性子に応じて共鳴周波数を変化させての加減速は我々の実験が世界初の試みとなる。

3. まとめと考察

RF と静磁場を用いた中性子の加減速に成功し、

UCN リバンチの原理実証に成功した。図 9 に示されるように半数の UCN は加速も減速もされていない。これはスピンフリップの反転率が低いためであり、その向上など、問題解決に努める必要がある。

我々は次のステップとして、本装置を改良し J-PARC 物質生命科学実験施設(MLF) 内の中性子光学基礎物理ビームライン BL05 に敷設した UCN テストポートにおいて再度実験を行う予定である。

それらの結果をもとに、本実験用の大型の UCN 加速器の製作に取り掛かる計画である。

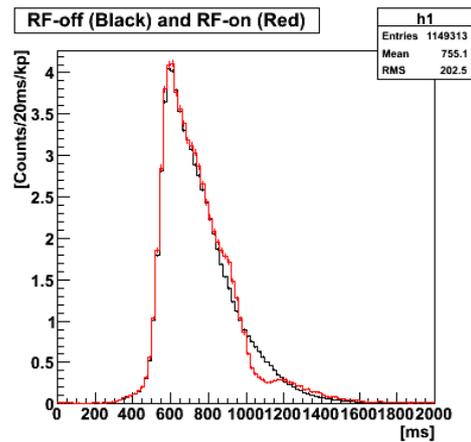


図 8: RF の ON/OFF に応じた UCN の TOF の形状変化

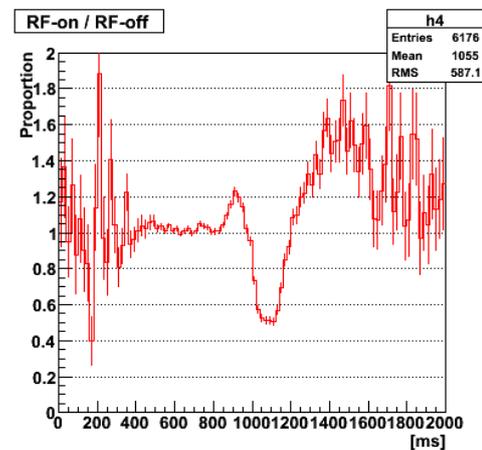


図 9: RF が OFF の時の TOF に対する ON の時の TOF の変化比率

参考文献

- [1] <http://www.triumf.ca/sites/default/files/SEEC-UCN.pdf>
- [2] http://j-parc.jp/jhf-np/pac_1001/pdf/KEK_J-PARC-PAC2009-11.pdf
- [3] Y. Arimoto, et. al., Physica Procedia 17, 20-29(2011).
- [4] B. Alfeld, G. Badurek, and H. Rauch, Z. Physik B41, 231(1981).
- [5] H. Weinfurter, et. al., Z.Physik B72, 195(1988).