

# 中性子電気双極子能率測定のための、パルス超冷中性子高密度輸送方法の開発

Development of transport system of pulsed ultra-cold neutrons for nEDM measurement

代表研究者 京都大学 北口雅暁      Kyoto University Masaaki KITAGUCHI

共同研究者 九州大学 吉岡瑞樹      Kyusyu University Tamaki YOSHIOKA

Measurement of neutron electric dipole moment (EDM) will be a powerful technique to search for the new physics beyond the Standard Model of particle physics to reveal the origin of matter in the universe.

The present upper bound of the neutron EDM is the order of  $10^{-26}$  e cm, which is limited by the precision of the measurement of spin precession frequency under magnetic and electric field. The density was lost with the spatial spreading in transport optics between the neutron source and the EDM apparatus before. Here we developed neutron accelerator to control neutron velocity for space-time focusing at the experimental position. The accelerator consists of the static magnet with isotropic inter-pole for gradient field and RF coil with variable capacitors to control the amount of change of velocity. The acceleration and focusing of pulsed beam were demonstrated by using ultra-cold neutrons at High Flux Reactor in Institut Laue-Langevin.

## はじめに

現代物理学は、現在の物質優勢の宇宙はいかにして形成・進化してきたか、自然の基本的な相互作用とはどのようなものか、という問いに答えようと発展してきた。20 世紀物理学の一つの完成形「素粒子標準理論」は Weinberg-Salam 理論と量子色力学の組み合わせによって様々な素粒子反応を説明することに成功した。しかし現在において「標準理論」は、基本的な 4 つの相互作用のエネルギーが大きく異なり統一されていないこと、基本的対称性の破れの起源を説明しないこと、といった点で満足いく理論ではないと考えられるようになった。「素粒子標準理論を超える物理とは何か？」は 21 世紀物理学の最も重要な課題の一つである。

「標準理論を超える物理」を実験的に検証する方法として ILC などの高エネルギー実験とともに超精密測定によるものがある。相互作用の高次ループのしみ出しを調べることは現在の加速器実験ではすぐには到

達できない高エネルギー実験に対応し、「標準理論を超える物理」の早期発見あるいは強い制限を与えることができるかと期待されている。その中でも中性子の電気双極子能率の測定はクォークの電気双極子能率と直接結びつきクリアな実験が行えること、現在の測定精度  $10^{-26} e \text{ cm}$  が、「標準理論を超える物理」として有力視されている超対称性理論の予言する値まであと一步のところまで迫っていることなどから、非常に有望なものの一つである。

電気双極子能率の測定には極めて運動エネルギーの低い中性子、超冷中性子を用いる。超冷中性子は物質の核力ポテンシャルによって容器内に貯蔵することができ、微小な相互作用を長時間蓄積して拡大することができる。スピンをそろえた中性子を容器に貯蔵し、電場磁場との応答を見る。測定領域の電場磁場の一様性やその測定精度などの系統誤差を低減するために、測定容器の体積を小さくすることが重要である。統計精度を保ったまま体積を 1/100 にするために、中性子密度を 100 倍に増加させたい。大強度加速器などによって高密度で発生させた超冷中性子も、単純に空間的に拡散させるだけの従来の輸送方法では測定容器に導くまでに希薄になってしまう。発生位置での高い密度を保って中性子を輸送することが、測定容器内の超冷中性子の密度向上、つまり電気双極子能率の測定精度の向上にとって、極めて重要である。

## 研究目的

J-PARC から得られる陽子ビームはパルスあたりの強度が強く、それによって発生する中性子パルスも瞬間的に非常に高い密度になりうる。しかし単純に空間的に拡散させるだけの従来の輸送方法では測定容器に導くまでに希薄になってしまう。測定容器で発生位置での密度を再現するような効率のよい輸送法を開発することが、本研究の目的である。

中性子パルスの時間集束を利用してこれを実現させる。パルス中性子では速度分布を持った中性子が同時に発生し、ある位置には速度に応じて異なる時刻に到着する。蓄積容器までの輸送途中に中性子を加減速させる素子を置く。減速には磁場中でのスピン反転を用いる。この際スピン2状態間のポテンシャル差に相当する運動エネルギーが交換される。磁場を適切に変調させ加減速量を時刻(=中性子の初速)に応じて変化させれば蓄積位置への到着時刻をそろえることができる。これにより拡散による密度の低下を防ぎ、また集束した中性子が到達する時間のみ容器の扉を開けることでこぼれ出る中性子を減らすことができる。(Figure 1)

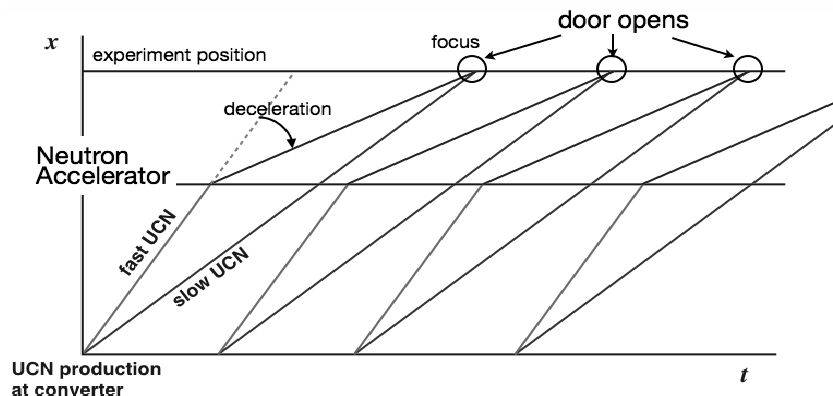


Figure 1. Ultra-cold neutron transport system. When fast neutrons are magnetically decelerated and/or slow neutrons are accelerated properly in the middle of the transport, these neutrons can reach the experimental area at the same time. The density can be kept from the source to the arrival position by focusing.

## 研究結果と考察

### I. 超冷中性子ガイド管の開発

中性子を期待通り集束させるためには、加減速器による制御以外では輸送方向速度の変化を起こさないことが必要である。中性子はガイド管と呼ばれる管の内面を多数回反射しながら発生位置から測定位置まで輸送されるが、その反射に際して進行方向が変わらないことがこれに対応する。ガイド管内面に凹凸があると入射角と反射角が等しくない非鏡面反射が起こり、進行方向速度を乱す。

表面粗さを 1nm 以下に磨いたガラス基板に中性子への反射能力の高い Ni をコーティングし、形状誤差 1mrad 以下で全長 5.6m のガイド管に組み立てた。後述するフランスでの実験によって、パルス超冷中性子を輸送しその時間構造が崩れないことを確認した。一方、ガイド管 1m あたりの輸送効率は 0.82 と高くなかった。平板ガラスを組み立てた際の四隅に中性子が落ち込んでしまうことや、Ni コーティングの荒れなどが原因として考えられる。円筒状のガイド管の採用やコーティングの最適化が今後の課題として理解された。

### II. 異方性中間磁極によって均一な勾配磁場を発生させる電磁石の開発

中性子の加減速には、Adiabatic Fast Passage と呼ばれるスピン反転を用いる。勾配磁場を中性子が通過する際、その磁場と共鳴条件を満たす周波数の振動磁場とエネルギーを交換する。この際、断熱条件を満たす滑らかな勾配磁場が必要である。

異方性中間磁極を組み込むことによって、中性子通過位置で一様な勾配磁場を発生させる電磁石を開発した (Figure 2 Left)。最大磁場強度は 1T、スピン反転領域の磁場勾配は 400Gauss/cm、ビーム断面の強度の一様性は 4% 以下、である。これと次に述べる高周波振動磁場との組み合わせは断熱条件を満たし、中性子時間集束のための加減速器として用いることができる。

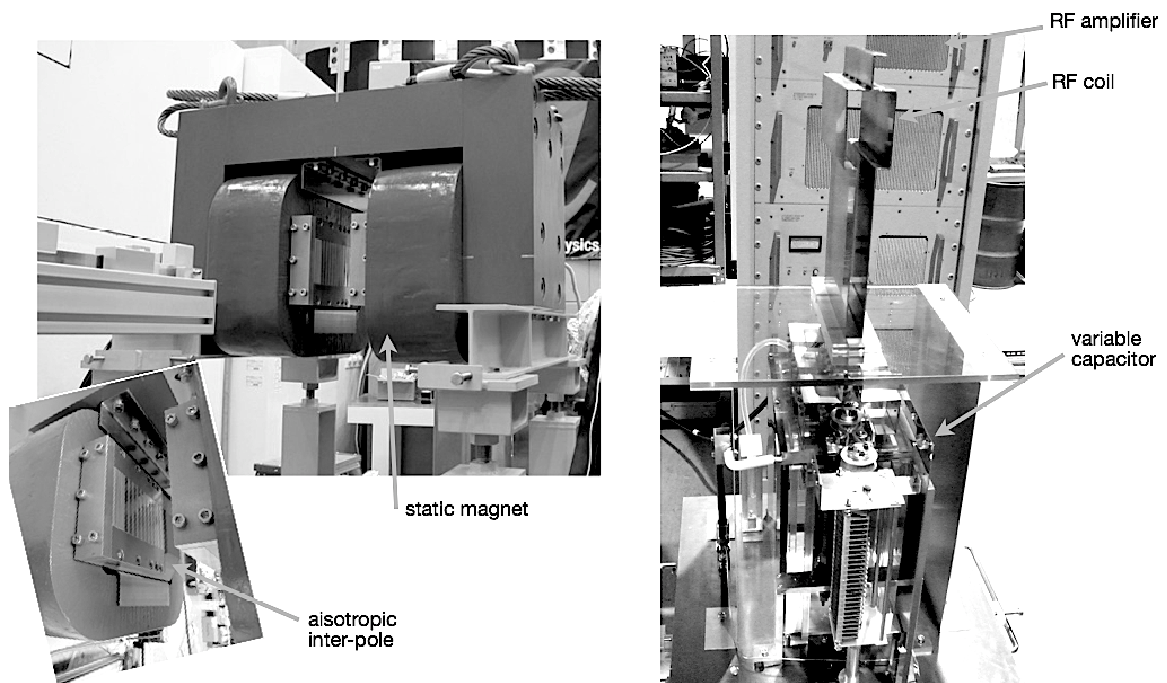


Figure 2. Neutron Accelerator. (Left) Magnet for gradient field with anisotropic inter-poles. (Right) RF coil and resonance circuit system. The combination of the magnet and RF system functions as a spin flipper for neutron accelerator.

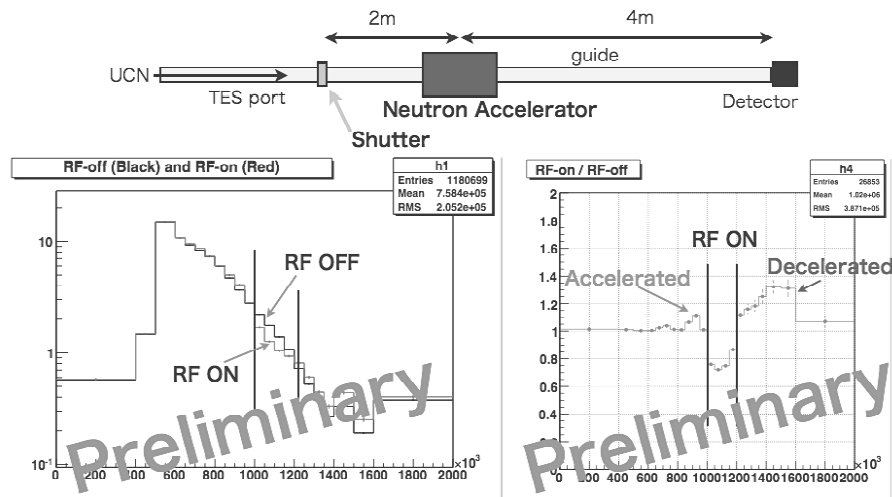


Figure 3. (Top) Experimental setup. (Left) Time-of-Flight spectra of pulsed ultra-cold neutrons with and without RF. (Right) Ratio of the two spectra. Acceleration and deceleration of the neutrons was observed respectively.

### III. 時間的に周波数変調可能な高周波振動磁場コイルの開発

中性子の時間集束には、加減速器に早く到着した中性子は大きく減速し、遅く到着した中性子は小さく減速する、という動作が必要である。Adiabatic Fast Passage で交換されるエネルギーは振動磁場の周波数に比例するので、中性子パルスの到着時刻に応じて適切な周波数に変調できる振動磁場コイルが必要である。可変コンデンサを時間的に駆動し、30MHz から 17MHz にわたって RF 回路の共振条件を保ってコイルに電力を供給できるシステムを開発した。(Figure 2 Right)

### IV. パルス超冷中性子の加減速、時間集束の実証

II の電磁石と III の振動磁場コイルを組み合わせた Adiabatic Fast Passage スピン反転素子を用いて、中性子加減速実験を行った。フランスラウエ・ランジュバン研究所の高出力原子炉から得られる連続超冷中性子ビームを中性子シャッターにより整形してパルス超冷中性子を模擬した。I で述べたガイド管を用いて超冷中性子を輸送する。その途中に中性子加減速素子を挿入し、加減速動作ありとなしとで飛行時間スペクトルを比較した。その結果、振動磁場を入力した時間に加減速装置を通過した中性子に対応する検出時刻の計数は減少し、かわりにその前後に計数が増加することが確認できた。これは中性子がスピンの応じて加速または減速され、検出時刻が早まるまたは遅れることに対応する。振動磁場の入力時刻や時間幅、磁場強度を変化させるとそれに応じて検出器での飛行時間スペクトルも期待通り応答した。加減速装置を中性子パルスが通過する時間内で振動磁場の周波数を変調し減速量を時刻に応じて変化させると、飛行時間スペクトルの特定の時刻の計数が増加した。これは検出器位置でパルス中性子が集束したことを示している。

一方、スピン反転率は 0.5 程度と高くなかった。このため加減速される中性子の量は半分程度になり集束の効果が小さくなった。これは振動磁場の強度が不足していることを示している。現在より電力の大きな RF 増幅器を用いたシステムを準備している。

## まとめ

「標準理論を超える物理」を実験的に検証する方法として中性子の電気双極子能率の測定は非常に有望なものの一つである。超冷中性子蓄積による測定では、電場磁場の一様性からくる系統誤差を低減させるために、蓄積容器内の中性子密度の向上が重要である。J-PARC など大強度パルス陽子ビームを用いて瞬間的に発生させた高密度超冷中性子を効率よく実験領域に輸送するために、中性子加減速素子を開発し、実際に超冷中性子を用いた実験によって加減速、集束を確認した。一方で超冷中性子の輸送に用いるガイド管の輸送効率の向上、加減速器としてのスピン反転素子の反転率の向上が課題であることがわかった。また利用する中性子を増やすには振動磁場の周波数帯を広げる事が必要で、振動磁場コイルの共振回路の開発が必要である。

これらを達成すると超冷中性子密度を1桁から2桁増加させ、中性子電気双極子モーメントの測定感度を1桁向上する事が可能になる。現在我々は、J-PARC の線形加速器から得られるパルス陽子ビームを用いてパルス超冷中性子を発生させ、今回開発した中性子加減速器によって密度を保ったまま輸送し、高精度の電気双極子能率測定を行う実験を J-PARC に提案している。発生ターゲットや電気双極子能率測定装置も含めて、研究開発を進めていく計画である。

## 研究発表

### 口頭発表

1. 北口雅暁「超冷中性子を用いた基礎物理と J-PARC での展開」  
日本中性子科学会年会、2010 年 12 月、仙台市
2. 北口雅暁「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 II」  
日本物理学会秋季大会 2011 年 9 月、弘前市
3. 吉岡瑞樹「J-PARC における中性子電気双極子能率測定実験計画 III」  
日本物理学会秋季大会 2011 年 9 月、弘前市
4. M. Kitaguchi: "Development of UCN Transport System for EDM experiment at Pulsed Source"  
1st of Asia-Oceania Conference on Neutron Scattering, November 2011, Tsukuba

### 誌上発表

Y. Arimoto, P. Gertenbolt, S. Imajo, Y. Iwashita, M. Kitaguchi, Y. Seki, H. M. Shimizu, and T. Yoshioka, "Neutron Accelerator", Submitted.