

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K13563

研究課題名(和文)パルス超冷中性子源と周期的開閉弁を用いた超冷中性子貯蔵実験

研究課題名(英文) Ultracold neutron storage experiment with the pulsed ultracold neutron source and a cyclically operating valve

研究代表者

今城 想平 (Imajo, Sohei)

大阪大学・核物理研究センター・特任研究員

研究者番号：10796486

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,800,000円

研究成果の概要(和文)：中性子の電気双極子能率測定実験などの超冷中性子(UCN)貯蔵を要する実験において UCN の実験容器内体積密度を向上させるため、周期的に動作する開閉弁を用いたパルス UCN の貯蔵を目指した。しかしながら事前シミュレーションにおいて UCN 体積密度向上は困難であるという結果が得られたため、実験は行わず原因の分析と開閉弁開発のみ行った。開閉時間幅や開閉周期を任意に制御可能かつ 12 ms で開閉可能な開閉弁を開発し、今後の研究開発に使用可能な耐久性を持つことを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

基礎物理実験や材料開発への将来的な応用を見据えてパルス状に生成されるガス状の低速中性子を容器内により多く貯蔵することを試みた。しかしながら実用になる前提条件が非常に厳しく、一般的には貯蔵するよりもパルスをより切り詰めて利用した方がよいという結果が示唆された。

研究成果の概要(英文)：We attempted to store pulsed ultracold neutrons (UCN) with a cyclically opening valve synchronized with the pulse arrival in order to increase the number density of UCN in the storage experiments such as the searches of the neutron electric dipole moment or the measurements of the neutron lifetime. However, we abandoned the demonstration experiment because of the great negative results of our simulation which predicted the low or non-increase of the density. We examined the cause of the decrease. Besides, we have developed cyclically opening valves for expected experiments. The valve can open or close in at least 12-ms duration and has strong durability enough to use in long-term research and development. The opening duration and period can be controlled arbitrarily.

研究分野：素粒子物理実験

キーワード：超冷中性子 中性子光学 材料工学 装置開発 シミュレーション

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 速度 6.8 m/s 以下の超冷中性子 (ultracold neutron: UCN) を用いたゼロでない電気双極子能率 (electric dipole moment: EDM) の探索や、中性子寿命の高精度測定がフランスの ILL 研究所の UCN 源で行われてきた。ゼロでない EDM は時間反転対称性の破れを意味し、また標準模型の予言値  $10^{-30} \sim 10^{-32} \text{ e} \cdot \text{cm}$  よりも数桁以上大きな中性子 EDM が存在すれば新しい物理理論の存在を間接証明できる。中性子寿命の精度はビッグバン元素合成におけるヘリウム 4 の質量存在比決定において重要である。UCN を用いる測定手法では、いずれの実験もガス状の UCN を実験容器に貯蔵することで行われる。

(2) 原子炉からの低速中性子ビームを後退する中性子鏡に反射させて UCN 化するタービン法を用いた ILL 研究所の UCN 源が実現しうる UCN の実験容器内体積密度は基礎物理実験の要求精度に対してすでに限界に来ている。このため加速器のビームと核破砕反応を用いて得られた中性子を固体重水素や超流動ヘリウム中のフォノンを用いて減速する大強度 UCN 源の建設がスイスの PSI 研究所やカナダの TRIUMF で進められている。

(3) 報告者の属するグループもまた J-PARC での UCN 源建設と EDM 測定を提案している。我々の EDM 実験計画では J-PARC 陽子ビームのピークパワーの高さを利用し、固体重水素コンバーターを用いて 0.5 Hz で高密度 UCN をパルス状に生成する。UCN 集団は速度差のため輸送ガイド管内で拡散し密度低下を引き起こすので、輸送中間地点に UCN リバンチャー [1] と呼称する減速機を配置して UCN の速度を調整し、実験容器入口に時間的に再収束させる。そしてその再収束パルスの到着に同期して容器入口弁を開閉し、図 1 に与えるように容器入口が感じる実効的な UCN 密度を上昇させ、高体積密度の UCN 貯蔵を実現する。

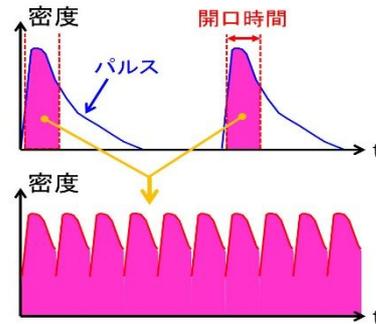


図 1: 開閉弁による UCN 貯蔵原理。

### 2. 研究の目的

パルス UCN 源と周期的開閉弁を用いた UCN 貯蔵はパルス UCN 源が開発された当初から提案されてきた手法であった [2]。しかしながら長いパルス繰り返し周期を持つパルス UCN 源の建設数が少ないため実験例は少数にとどまっている。このようなパルス UCN 源は上述のように貯蔵実験において原理的に不利であるが、周期的開閉弁の搭載によって体積密度低下を挽回できれば瞬間的な強度に優れるパルス UCN 源の活用の幅を広げることができる。UCN 貯蔵は基礎物理実験だけでなく平滑面の表面粗さ測定などの装置開発にも用いられるため、長周期のパルス UCN 源一般に対して貯蔵密度向上を適用できれば非常に望ましい。

本研究の第 1 の目的は我々の提案する大強度パルス UCN 源の実現に先駆けて研究開発用の開閉弁の開発と開閉弁を用いた UCN 貯蔵実験を行い、貯蔵体積密度向上を確認し、パルス UCN 源の有効性を示すことである。また、開発された開閉弁を我々の研究開発用の小規模 UCN 源に適用し、パルス UCN 源の実用例としてその装置開発能力を向上させることを第 2 の目的とする。

### 3. 研究の方法

研究の前提条件を以下に述べる。UCN 源としては我々が開発し、J-PARC 物質・生命科学実験施設 (MLF) の BL05 に敷設した中性子ドップラーシフター [3] を用いる。この UCN 源は ILL 研究所の UCN タービンと同様の手法の UCN 源であるが、中性子鏡を取り付けた 1 本の回転アームのみで UCN を生成するため離散的なパルス UCN を得ることができる。UCN の繰り返し周期は比較的長く 120 ms である。貯蔵容器は我々のグループが UCN 反射率測定のために作成したステンレス製の円筒形容器を用いる。容器の内寸は直径 498 mm、高さ 500 mm であり、内面は電解研磨されている。UCN は断面積 45 mm 角のガイド管で容器へと輸送される。

以上を踏まえ、研究手法の主要点は以下の 3 つとした。

#### (1) 数値シミュレーションの開発

開閉弁の要求精度の決定と最適な運用法の追求、および開閉弁導入時に達成される UCN 体積密度を見積もるためにレイトレーシング法による数値シミュレーションを開発する。計算コードは報告者がドップラーシフター開発の際に独自に作成したものを発展させて使用する。より現実に近い貯蔵条件を予想するために粒子の反射計算には壁面での中性子吸収による UCN 損失や、ランバート反射またはマイクロラフネスモデル [4] に基づいた散漫散乱を導入し、入射光学系の形状や弁での UCN 損失条件も変え、それらが貯蔵に与える影響を確認する。

#### (2) 開閉弁の開発

数値計算で見積もられた要求スペックに基づいて開閉弁を作成する。必要な開閉周期が 8.33

Hz 以下と低く、また貯蔵に最適な開閉タイミングの探索のために弁の開閉タイミングと開閉時間を任意に制御する必要があるため、弁の構造は一般的なディスクチョッパー型の弁ではなく長形状の金属板を駆動機構によって左右にスライドさせる方式とする。我々は UCN リバンチャー開発において同様の機構の UCN チョッパーを開発しており、その装置を発展させる。

### (3) UCN 貯蔵実験

J-PARC/MLFBLO5 の UCN 貯蔵実験系に開閉弁を搭載して UCN 貯蔵実験を行い、シミュレーションで予想された UCN 体積密度向上や弁周辺での UCN 損失の影響を確認する。開閉弁を 1 次バルブとして用いて 200 秒程度 UCN 集積を行ったのちメインバルブを閉じ、100 ~ 300 秒貯蔵ののち容器内部の UCN 計数を測定して、その時間変化の傾向から最大蓄積数を見積もる。

## 4. 研究成果

(1) 開閉弁上でのみ UCN 損失がなく、その他では現実的な UCN 損失がある状況を仮定して貯蔵シミュレーションを行った。開閉弁は入射 UCN のピークフラックス周辺のみ切り取るよう時間幅 50 ms だけ開ける設定とした。この結果、8.33 Hz で動作させたとき 1.5 倍程度の UCN 体積密度増加が見込めるが、半周期である 4.17 Hz 以下に開閉周期を落とすと開閉弁を用いない場合と同等以下の体積密度しか得られないことが判明した。この原因は使用予定の容器が大きすぎて UCN が容器から脱出しづらいこと、および容器中の UCN の寿命である 160 秒が貯蔵に必要な時間に対して短すぎることだと推察される。貯蔵に対する開閉弁の効果は容器外部に大きな UCN 損失源がある状況下で次の UCN パルスの到来まで容器内部の UCN の脱出を妨げ、UCN の貯蔵時間を短縮させることに本質があるため、UCN が脱出しづらく溜まり切るまで時間がかかるような容器ではパルス貯蔵の効果が現れづらい。チョッパーを用いて UCN パルスを間引き、たとえば繰り返しを 1 Hz に低下させるシミュレーション結果では開閉弁の使用の有無で 2 倍以上の体積密度向上を確認できるが、パルスを間引かない場合の密度に対して 1/4 程度にまで密度が低下するためアップグレードという目的には適さない。

開閉弁直前に漏斗状の集光ガイドを導入した場合は、封入圧力がわずかに向上するためパルス貯蔵しない場合では体積密度が 10% 程度向上するが、容器へ導入される UCN 数が減少するため貯蔵時間が増加しパルス貯蔵下では集光ガイドを用いない場合に比べて体積密度が 5% ほど低下する結果となった。

現実の開閉弁周囲に存在する隙間に相当する領域を UCN が完全吸収される領域として開閉弁上に設定したところ、8.33 Hz 運転において体積密度は開閉弁を用いない場合に対して 10% 以上低下した。吸収領域の面積は弁の開口面積に対して 3% 程度である。これにより開閉弁周辺の UCN 損失低減が極めて重要であることがわかった。計算では開閉弁の 2 枚の板が重なってできる隙間での UCN 損失は UCN 吸収領域が直接見込める場合と比べて小さいという結果が得られており、この損失は開口部縁に反射板をうまく配置することで改善可能だと思われる。

以上のように開閉弁を 8.33 Hz で運転し、UCN 損失原因も十分に抑え込んだ場合のみ UCN 体積密度向上が確認できるという結果が得られた。しかしながらこの運用は非常に過酷であり、我々が保有している貯蔵容器では開閉弁搭載による体積密度向上の効果は利点が非常に小さいと判断したため、貯蔵実験は取りやめることとした。合わせて開閉弁を貯蔵実験系に組み込むためのガイド管などの光学装置の作成もまた取りやめることとした。

### (2) 開閉弁の開発

UCN 貯蔵実験は取りやめたが、我々が提案する長周期パルス UCN 源が実現した際や、開発が継続している UCN リバンチャーを用いたパルス UCN 貯蔵実験の際には長期運転に耐え安定動作する開閉弁が研究開発において重要な要素となるため、開閉弁については開発を行うこととした。弁の開口サイズはすでに作成実績のある 30 mm × 60 mm とした。過去に作成した UCN チョッパーは動力源としてロータリーソレノイドを搭載し、2 枚の板をそれぞれソレノイドで逆方向に動作させることで約 7 ms での開閉が可能であったが、開閉速度が制御できず、また板が停止する際に大きな衝撃が発生するという欠点を持っていた。そこで今回作成した開閉弁では動力機構としてパルスモーターを使用し、主軸などの各所にバネを配置して衝撃の緩和を行っている。さらに図 2 左に与えるようにワイヤーを用いて 2 枚の板の動作を連動させることで 1 個の動力源のみで両開きの弁を実現し、約 12 ms での開閉を可能とした。開閉 1 セットの繰り返しは最大で 8.5 Hz での動作が可能である。開口時間をこの周期よりもさらに短くとれるように開閉弁は 2 台作成し、開口タイミングをわずかにずらした設定で重ねて使用できるようにした。

弁の耐久性については、開発当初はワイヤーとして耐荷重 6 kg のステンレスワイヤーを使用していたが、滑車部分での曲げ伸ばしによる金属疲労のため、耐荷重の 1/30 程度の負荷にもかかわらず 4 万回以下の開閉でワイヤーが切断してしまった。この問題点はワイヤーの代わりに耐荷重 33 kg かつ伸び率が非常に小さい超高分子量ポリエチレン繊維の糸を用いることで解決された。50 万回の開閉テスト前後の弁の開閉タイミングをレーザーセンサーで測定し比較した結果は図 2 中央および右に与えたようになり、動作がほぼ変化していないことが確認できた。テスト後の開閉動作がわずかに揺らいでいるのは軸受けの摩耗による摩擦係数の変化やワイヤー

を繋いでいるバネの伸びの増加が原因として推察される。なお、この糸を耐荷重がさらに大きく伸びが小さいケーブル糸に交換すれば耐久性のさらなる向上を見込むことができる。以上のように、開閉タイミングを任意制御可能かつ高耐久の開閉弁の作成に成功した。

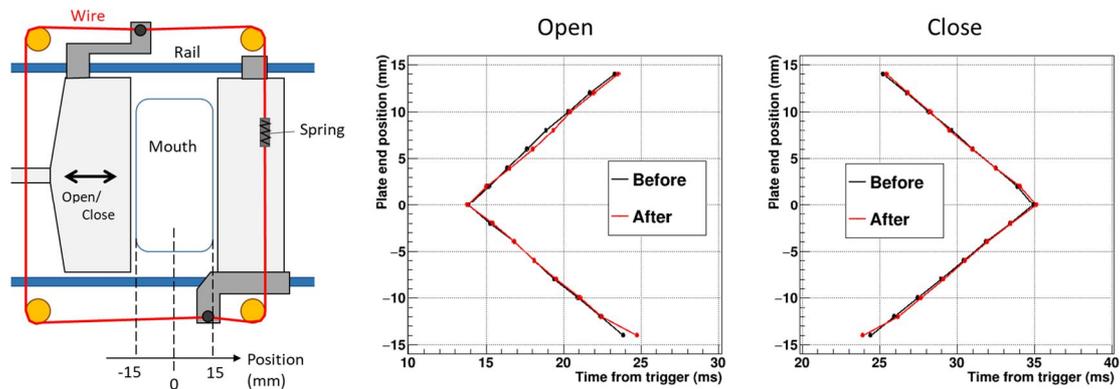


図 2: 開閉弁の構造および制御信号入力からの弁の開閉タイミング。

(3) 散漫散乱を導入した数値シミュレーションを用いてガイド管中での単一速度のパルス UCN 輸送を計算したところ、図 3 に与えるように反射モデルに応じて UCN 飛行時間分布の形状が変化することが確認された。我々のドップラーシフターで生成された UCN は同一速度の集団が物理幅 2 cm 程度となる非常に短いパルス時間構造を持つため速度と飛行時間との対応が非常によい。ゆえに開発された開閉弁を従来の使用法通り UCN チョッパーとして使用すれば同様の測定は容易に可能と思われる。当初想定した貯蔵に対する用途ではないが、高耐久の開閉弁が完成したことで我々の UCN 源の装置開発能力は向上したと推察する。

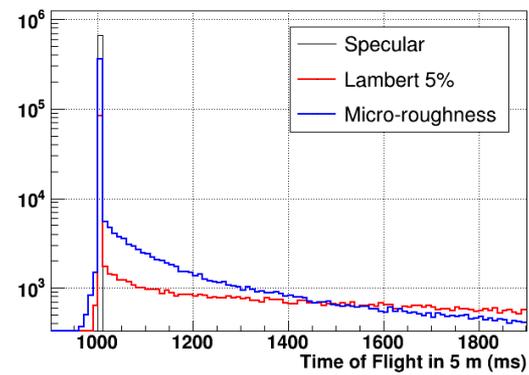


図 3: 長さ 5 m のガイドで UCN 輸送した際の反射モデルに対する飛行時間分布の形状変化。

パルス UCN 源は UCN リバンチャーのような特殊な機構を搭載していたり秒単位の長周期のパルス生成を行う設計になっていない限り、現実に達成可能な範囲では UCN 貯蔵に向いていないというのが最終的な結果である。貯蔵のような UCN 集積とは逆に、パルスをさらに切り詰めて速度の単色性と離散性を強調した方がパルス UCN 源の使用法として有望だと推察される。

#### < 引用文献 >

- [1] Y. Arimoto et al., Phys. Rev. A **86**, 023843 (2012)
- [2] T. W. Dombeck et al., Nucl. Instr. and Meth. **165**, 139-155 (1979).
- [3] S. Imajo et al., Prog. Theor. Exp. Phys. **2016**, 013C22 (2016).
- [4] F. Atchison et al., Eur. Phys. J. A **44**, 23-29 (2010).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 S. Imajo, Y. Iwashita, K. Mishima, M. Kitaguchi, H. M. Shimizu, T. Ino, S. Yamashita, K. Hirota, F. Goto, Y. Fuwa, R. Katayama	4. 巻 -
2. 論文標題 Ultracold Neutron Time Focusing Experiment and Performance Evaluation of an Improved UCN Rebuncher at J-PARC/MLF	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） -	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 今城想平, 岩下芳久, 三島賢二, 北口雅暁, 清水裕彦, 猪野隆, 山下了, 広田克也, 後藤文也, 不破康裕, 片山領
2. 発表標題 超冷中性子リバンチャー2号機の性能評価実験結果
3. 学会等名 日本物理学会 2019 年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Imajo, Y. Iwashita, K. Mishima, M. Kitaguchi, H. M. Shimizu, T. Ino, S. Yamashita, K. Hirota, F. Goto, Y. Fuwa, R. Katayama
2. 発表標題 Ultracold Neutron Time Focusing Experiment and Performance Evaluation of an Improved UCN Rebuncher at J-PARC/MLF
3. 学会等名 The 3rd J-PARC Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----