

令和 6 年 6 月 4 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K13940

研究課題名（和文）中性子電気双極子モーメント測定実験に向けた中性子ガイド管の表面粗さ測定手法の開発

研究課題名（英文）Development of a method evaluating the surface roughness of neutron guides for a measurement of the permanent electric dipole moment of the neutron

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） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：中性子の電気双極子モーメント測定実験などの基礎物理実験に使用される超冷中性子（UCN）を輸送するガイド管の開発に対して、ガイド管実機のUCN輸送効率およびその内面の表面粗さを評価する新しい手法を開発した。また周期が数十ナノメートル程度の比較的大きな表面粗さに対するUCNの反射が可視光線の拡散反射モデルを用いて記述できることを実験とシミュレーションを比較して確かめた。さらに反射モデルをより詳細に検証するために、表面に数～数十ナノメートルサイズの凹凸を持たせた平板サンプルに発散角を制限したUCNビームを照射し、反射UCNの拡散を2次元検出器で確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

粗い表面に対する量子力学的な中性子反射モデルの適用範囲はこれまで数ナノメートルサイズの凹凸に制限されており、研磨された金属表面のような比較的大きな粗さを取り扱えるものが存在しなかった。この研究では中性子と光とのアナロジーに基づいて、古典的な光学からアプローチすることで中性子光学が取り扱える表面粗さの範囲を拡大することができた。中性子輸送ガイド管は超冷中性子だけでなく低速中性子を利用する実験全般で用いられている。我々が検証した反射モデルを用いることでそれらの中性子輸送の理解がより正確になり、より輸送効率の高いガイド管の作成が実現すると思われる。

研究成果の概要（英文）：We have studied the development of guide tubes for transporting ultracold neutrons (UCN) used in fundamental physics experiments such as neutron electric dipole moment measurements. Then, we have succeeded in developing a new method to evaluate the UCN transport efficiency and surface roughness of the inner surface of the guide tube. We have also demonstrated that the reflection of UCN on a relatively large surface roughness with a period of several tens of nanometers can be described using a diffuse reflection model of visible light by comparing experiments and simulations. In order to verify the reflection model in more detail, we performed experiments in which flat samples with surface irregularities of a few to several tens of nanometers were irradiated with a UCN beam with limited divergence, and we have successfully observed the diffusion of reflected UCN using a two-dimensional detector.

研究分野：原子核物理実験

キーワード：超冷中性子 中性子光学 中性子ガイド管 反射モデル 表面粗さ 装置開発 シミュレーション BRD  
F

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

測定精度を従来実験から 1 桁以上向上させた領域での中性子電気双極子モーメント (nEDM) 探索にむけて、世界各地で超冷中性子 (UCN) を用いた nEDM 実験のための研究開発が進められている。nEDM に現在の素粒子標準模型の予測値よりも十分大きな有限値が観測されれば新しい物理理論の存在が間接的に示され、さらにこれは CP 対称性の破れの新しいソースとなりビッグバン宇宙論における物質-反物質非対称性の補強に貢献する。カナダ TRIUMF では国際共同実験 TUCAN [1]の開始に向けた準備が進められており、筆者はこの国際コラボレーションに所属して UCN の輸送に用いる金属ガイド管の開発を行っている。UCN は非常に速度が遅く入射角によらずに物質表面で全反射するため鏡面度の高い管を用いて希薄な気体のように光学的に輸送できるが、ガイド管壁面の研磨加工精度などに起因したナノメートルサイズの表面粗さのために反射 1 回あたり 3~5%の確率で乱反射し、管内に滞留する。UCN は反射のたびに原子核による吸収や非弾性散乱によってガイド管内から失われるため [2]、滞留による反射回数の増加は損失確率の増加につながる。したがって輸送中の UCN 損失を低く抑え込み統計量を向上させるためには UCN が乱反射を起こさない滑らかなガイド管が必要である。

### 2. 研究の目的

本研究の 1 つめの目的はガイド管実機の表面粗さを非破壊的に評価する手法の確立である。現状よりも輸送効率の高いガイド管を目指すには、まず現状のガイド管内面の表面粗さとガイド管中の UCN の拡散の様子を知る必要がある。さらにガイド管実機の性能をインストール前に詳細に把握できれば実験解析において非常に有利である。しかしながら従来手法では表面粗さを評価するにはガイド管表面を顕微鏡で観測する必要があり、そのためにガイド管を小さく切断せねばならず、再利用可能な形で実機の表面粗さを評価することができなかった。また非破壊の性能検査としてガス状の UCN の透過率を測定する実験が広く用いられていたが、乱反射に起因した UCN 拡散の方向分布などの特徴を評価する実験はほとんど行われていなかった。そこでガイド管を通過した UCN から表面粗さの大きさと UCN 拡散の特徴を読み取る検査手法を開発することにした。

本研究の 2 つめの目的はより広範囲の表面粗さに適用できる UCN 反射モデルを作成することである。UCN 実験は装置設計や実験結果の評価において粒子輸送シミュレーションを大きく活用しており、よりよい装置開発や系統誤差低減のためには装置中の UCN の挙動を正確に記述するモデルが必要である。しかしながら表面粗さに対する UCN の拡散反射モデルについては、UCN の物理でしばしば用いられる量子力学に基づいたモデル [3, 4] は UCN の物質波長 (約 60 nm) に対して比較的大きい約 10 nm 以上の粗さ振幅に対しては適用できない。TUCAN 実験で開発している金属ガイド管はちょうどこの程度の表面粗さを持っており、ガイド管内の表面粗さが UCN 輸送に及ぼす影響や nEDM 実験の系統誤差の見積もりを立てるには、大きな表面粗さに使用できる中性子の拡散反射モデルを既存の反射モデルから探索または新たに作成する必要があった。

### 3. 研究の方法

研究の方法は以下の 2 つである。

(1) ガイド管実機の性能評価手法の開発およびガイド管に合致した拡散反射モデルの探索についての研究：

J-PARC 物質・生命科学実験施設 (MLF) BL05 (NOP) にインストールされている UCN 源「中性子ドップラーシフター [5]」から供されるパルス UCN を、図 1 に示すようにポリエチレンコリメーターを用いて直径 50 mm、発散角  $\pm 6^\circ$  以下のビーム状にコリメートしたのち、内径 95.5 mm、長さ 1 m のガイド管実機に入射させた。ガイド管は無電解ニッケル-リン (NiP) めっきされたアルミ管である。ガイド管は斜めに角度のついたフランジを用いて UCN 入射方向に対して水平方向に  $0^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$  だけ傾けた。鏡面反射のみを仮定した場合、UCN はガイド管の傾き角度に応じて異なる特定の回数だけ反射する。ここに表面粗さによる拡散反射の効果を加えると、ガイド管の傾き角度が増えるにつれ、表面粗さに対して特徴的な UCN 透過率の減少と飛行時間 (TOF) 分布 (=速度分布) の変形が生じる。この結果を表面粗さモデルを組み込んだ粒子輸送シミュレーションと比較し、傾き角度増加に応じた透過率の減衰傾向と TOF 分布の変形の両方を満たすような表面粗さモデルを探索した。検証する表面粗さモデルの選定とその表面粗さパラメーター値については、最初のチャレンジということもあり、今回の研究ではガイド管と同工程で作成されたサンプルに対して行った原子間力顕微鏡 (AFM) 測定の解析結果に基づいて決定した。

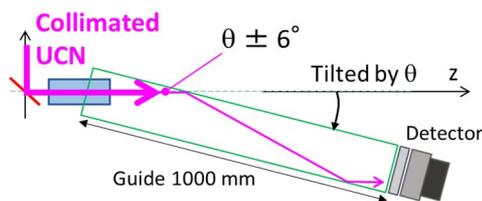


図 1: UCN 透過実験セットアップの模式図。

(2) 反射モデルのより詳細な検証のための研究：

上記 (1) のガイド管実験のセットアップを一部流用し、図 2 に示すようにポリエチレンコリメーターで入射面上の発散角を  $\pm 5^\circ$  以下に制限した断面積  $11\text{ mm (W)} \times 45\text{ mm (H)}$  のビームを、入射角  $45^\circ$  で平板サンプルに照射する実験セットアップを構築した。平板サンプルは表面凹凸の平均値が数～数十ナノメートルサイズの範囲で粗さの異なるものを多数準備した。反射 UCN の測定には 2 次元 UCN 検出器 CASCADE-U [6] を用い、1 回反射での表面粗さによる UCN の拡散反射の方向分布を実測した。

今後、平板サンプルの顕微鏡観測結果に基づいて構築予定の反射モデルを組み込んだ UCN 反射シミュレーションと、CASCADE-U の測定結果とを比較することで、(1) で決定した反射モデルの妥当性のより詳細な検証や、量子力学的な反射モデルと古典的な反射モデルとの複合方法などを探っていく。

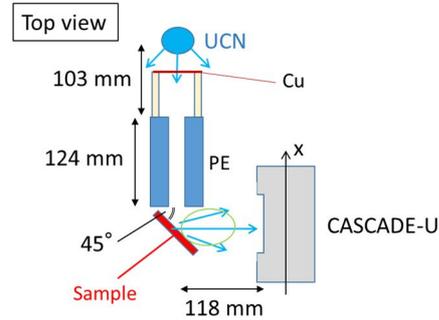


図 2: UCN 反射実験の模式図。

#### 4. 研究成果

(1) NiP ガイド管を用いた UCN 透過実験の解析において、既存の UCN 輸送計算で使用される Lambert の余弦則 (表面上の単位面積の輝度がどの方向から見ても一定となるような現象論的モデル) と、法線ベクトルの分散による幾何光学に基づいた非鏡面散乱モデルである microfacet BRDF model とを組み合わせ、UCN の波長よりも長い周期の表面うねりによる散乱を BRDF モデルで記述し、波長よりも小さい構造からの UCN 散乱をフリーパラメーターとして Lambert 則で記述するモデルを作成した。モデルのパラメーターには AFM で撮影された画像を Fourier 解析し、フィルタリングすること抽出した長周期の粗さを使用した。そして図 3 および図 4 のピンク色のデータで与えるように、UCN 輸送量と TOF パルス形状の変形の両方を Lambert 則単独のモデルよりもよく説明することに成功した。シミュレーションによる最小二乗フィットから得られた Lambert 則の寄与率は 3.9% であり、TRIUMF で行なわれた別の手法による先行実験の結果である 3～5% の寄与率 [7] と一致した。この研究をまとめた論文を Physical Review C に投稿し、掲載された [8]。

この研究において我々は、UCN の波長よりも長い周期の表面粗さからの中性子散乱が可視光線の散乱モデルで記述できるという、中性子光学における一種の処方箋を見つけることができた。また、この成功によりガイド管の表面粗さの非破壊検査について一定の道筋を付けることができた。しかしながら現状では反射モデルの決定に顕微鏡測定を要しており完全な非破壊検査とは言い難いため、今後はより厳密に反射モデルを検証して知見を増やし、顕微鏡測定を要しない完全な非破壊検査を目指す。

(2) 平板サンプルに対する UCN 反射実験において、図 5 に示すように ZYGO による測定で表面粗さ平均が  $1.4\text{ nm}$  のサンプルと表面粗さ平均が  $9.7\text{ nm}$  以上のサンプルとを明瞭に見分けることができた。今後は同じロットで作成された予備の平板サンプルをより高分解能の AFM で測定して確認し、その表面粗さデータから反射モデルを推定してシミュレーション解析を行い、できるだけフリーパラメーターを含まない反射モデルの実現を目指す。

#### < 参考文献 >

- [1] S. Sidhu *et al.*, EPJ Web Conf. **282**, 01015 (2023).
- [2] W. Schreyer *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A **1049**, 168106 (2023).
- [3] A. Steyerl, Z. Physik **254**, 169 (1972).
- [4] R. Pynn, Phys. Rev. B **45**, 602 (1992).
- [5] S. Imajo *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. **2016**, 013C02 (2016).
- [6] CASCADE Detector Technologies, <https://n-cdt.com/wp-content/uploads/2019/09/CASCADE-U.pdf>, Accessed 31 May 2024.
- [7] S. Ahmed *et al.*, Phys. Rev. C **99**, 025503 (2019).
- [8] S. Imajo *et al.*, Phys. Rev. C **108**, 034605 (2023).

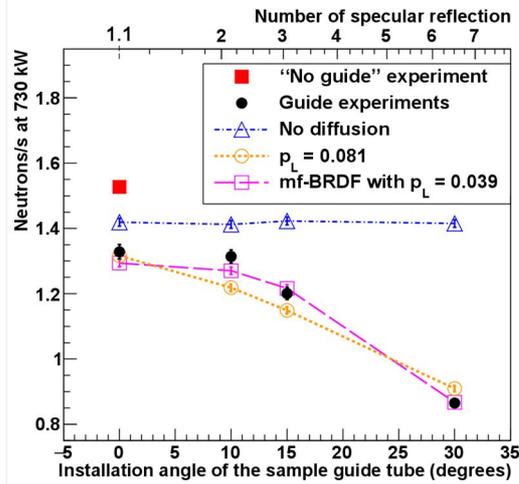


図 3. ガイド管の取り付け角度に対して測定された UCN 輸送効率、およびシミュレーションで計算された輸送効率 [8]。マーカーはそれぞれ以下を示す。赤四角: ガイドを用いない UCN 測定 (入射中性子測定) 黒点: ガイド管の実測の輸送効率、青三角: 非鏡面散乱のない場合の輸送シミュレーション、黄丸: 寄与 0.081 の Lambert 則を用いた輸送シミュレーション、ピンク四角: 寄与 0.039 の Lambert 則と microfacet BRDF model とを組み合わせた輸送シミュレーション。

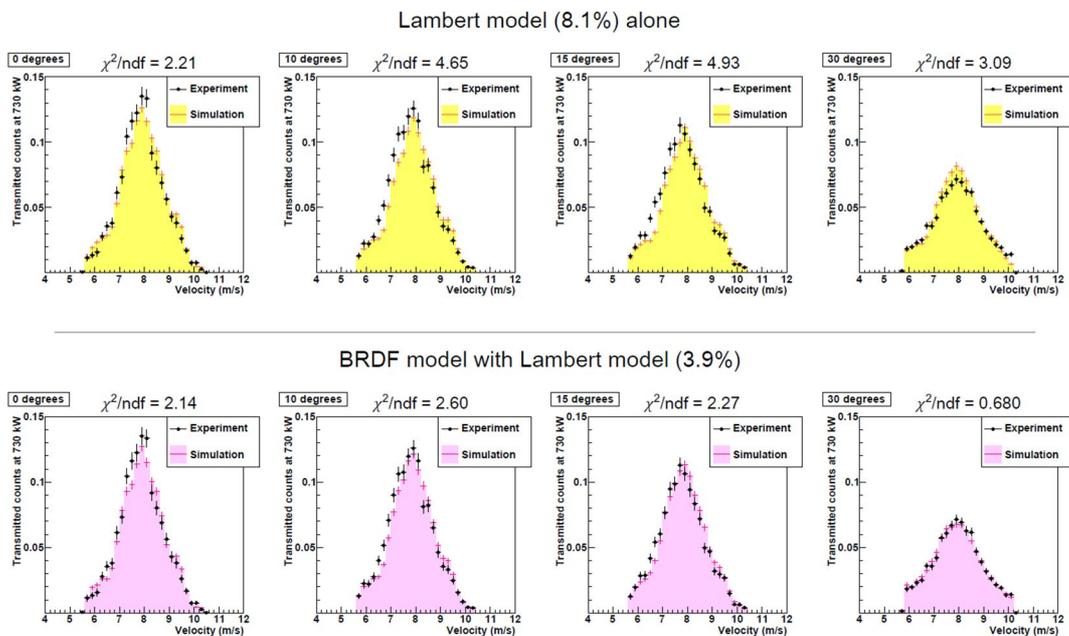


図 4. 実験とシミュレーションでの透過 UCN の速度分布の比較 [8]。それぞれは TOF データを光軸に沿った輸送距離を用いて速度に変換したものである。図の上半分は寄与 0.081 の Lambert 則のみを用いたシミュレーション (黄色) との比較、図の下半分は寄与 0.039 の Lambert 則と microfacet BRDF model とを組み合わせた輸送シミュレーション (ピンク) との比較である。それぞれの積分値は図 2 の同名のデータ点と同じものである。2 つのデータプロットの一致度の指標としてカイ二乗値を計算し、各小図の上部に記載している。

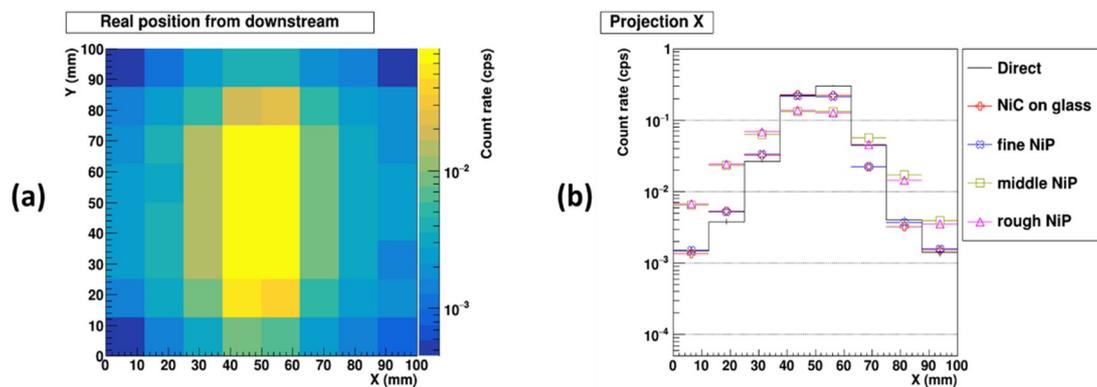


図 5. (a) 平均表面粗さ 1.4 nm の NiP 板に反射した UCN の 2 次元分布。 (b) (a) と同様の 2 次元分布を x 軸に射影した結果の比較。 図中のラベルは以下を示す。 Direct: 入射ビーム, NiC on glass: フロートガラスにスパッタしたニッケル-炭素膜, fine NiP: 平均表面粗さ 1.4 nm の NiP 板, middle NiP: 平均表面粗さ 9.7 nm の NiP 板, rough NiP: 平均表面粗さ 21 nm の NiP 板

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 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Imajo S., Akatsuka H., Hatanaka K., Higuchi T., Ichikawa G., Kawasaki S., Kitaguchi M., Mammei R., Matsumiya R., Mishima K., Picker R., Schreyer W., Shimizu H. M.	4. 巻 108
2. 論文標題 Diffuse scattering model of ultracold neutrons on wavy surfaces	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review C	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） 10.1103/PhysRevC.108.034605	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 該当する

〔学会発表〕 計3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, TUCAN collaboration
2. 発表標題 TUCAN 実験のための中性子ガイド管の J-PARC/MLF BL05 でのパルス UCN を用いた透過率評価
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 今城 想平, TUCAN collaboration
2. 発表標題 TRIUMF での中性子 EDM 実験に用いられる中性子ガイド管の J-PARC/MLF BL05 での性能測定とその解析
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Imajo, TUCAN collaboration
2. 発表標題 Development of a UCN guide and other handling devices at J-PARC with pulsed UCNs
3. 学会等名 6th International Workshop on Neutron Delivery Systems (NDS 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023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
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------