

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K13804

研究課題名(和文) 結晶回折を用いた中性子電気双極子能率の探索

研究課題名(英文) Search for neutron electric dipole moment with crystal diffraction

研究代表者

北口 雅暁 (Kitaguchi, Masaaki)

名古屋大学・現象解析研究センター・准教授

研究者番号：90397571

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：中性子電気双極子能率(EDM)の探索は、素粒子標準模型を超える物理の検証に重要な役割を果たす。結晶内に存在する電場と熱中性子ビームを用いたEDM探索は超冷中性子を蓄積する方法と同程度の感度を持ち、異なる系統誤差を持つ検証実験として重要である。本研究ではこの探索実験の理論的基礎である、動力学的回折を実験的に検証した。J-PARC大強度中性子源を用いてパルス中性子としては初めて明瞭なペンデル干渉を観測することに成功した。EDM測定に必要な結晶内部の電場の測定のために偏極中性子実験セットアップを構築した。非中心対称性結晶であるSiO<sub>2</sub>やBGO結晶を用いて電場測定実験を開始した。

研究成果の概要(英文)：Neutron electric dipole moment (EDM) is an important probe to search for new physics beyond standard model. Search for EDM with crystal diffraction is advantageous according to the extremely strong effective electric field inside the crystal. We observed Pendellosung interference fringes using pulsed cold neutrons in J-PARC for the first time. This means the establishment of the fundamental technique to search for the neutron EDM with crystal diffraction. We are continuing the development of the experimental setup with polarized neutron beamline to measure the internal electric field of the crystals. The measurement of the electric field in non-centrosymmetric crystal has been started.

研究分野：素粒子物理学実験

キーワード：素粒子物理学実験 中性子電気双極子能率 CP対称性の破れ 結晶内電場

### 1. 研究開始当初の背景

中性子が特定の方向に電気的な偏りを持つという「電気双極子能率 (EDM)」の存在は時間反転対称性を破るが、未だその検出には成功していない。中性子 EDM の探索は素粒子標準模型を越える新しい物理の検証に重要な役割を果たす。新物理が含む新粒子群の持つ相対位相によってはその質量領域として超大型加速器実験を超える数 TeV 領域にまで感度がある。現在までの最高感度を持つ測定はフランス ILL 研究所の原子炉から得られる中性子を用いた実験で、上限値  $3 \times 10^{-26} \text{e} \cdot \text{cm}$  を得ている。新物理の最有力候補である超対称性理論や複数のヒッグス場を持つ物理理論では、中性子 EDM の大きさを  $10^{-25} \sim 10^{-28} \text{e} \cdot \text{cm}$  に予言しており、あと 1 桁から 2 桁の感度向上で測定にかかる可能性がある。現在の上限值は、運動エネルギーが極めて小さい (200neV 以下) 超冷中性子 (UCN) を容器蓄積し、そこに印加した電場によるスピン歳差回転の変化を測定している。この方法では、中性子の蓄積容器との相互作用、電場・磁場のゆがみによる中性子スピン回転の乱れなどの系統誤差の評価が非常に難しい。そのため異なる系統誤差を持つ別の手法での EDM 探索実験が求められていた。

### 2. 研究の目的

EDM 測定のもう一つの方法として結晶内電場を用いた方法がある。非中心対称性の結晶の中には内部電場として、人工に印加しうる電圧よりも極めて大きな電場を持つものがある。この単結晶で回折する熱中性子のスピン歳差回転によって EDM を探索することができる。結晶を通過する時間は UCN が蓄積される時間に比べると 5 桁小さいが、その統計は 2 桁以上大きい。結果的に EDM 測定感度は UCN 蓄積法と同程度になりうる。単結晶の種類やその大きさによっては、UCN を用いた方法を凌駕する可能性を秘めている。候補となりうる結晶として SiO<sub>2</sub> や BGO などが提案されているが、その多くは調べられていない。また例えば結晶の不完全性や磁場環境などによる EDM 探索への系統誤差への影響を詳細に調べる事が必要になる。本研究の目的は、より強電場を持つ結晶の選定やその測定へ与える系統誤差を評価し、EDM 探索の基礎を構築することである。

### 3. 研究の方法

EDM 探索に適した結晶、つまり内部電場が大きい結晶を探索する。まず候補となる単結晶の回折のピーク幅の測定などから完全性を検証する。完全結晶を波動が伝播するとき起こる動力的回折の効果を観測することで、EDM 探索の基礎を固める。

単結晶に偏極中性子ビームを透過させるとそのブロッホ波の重ね合わせによって干渉縞が観測される (ペンデル干渉) が、内部電場の影響で入射中性子のスピンの向きによって位相がシフトする。この現象を用いて内部電場の大きさを導出する事ができる。

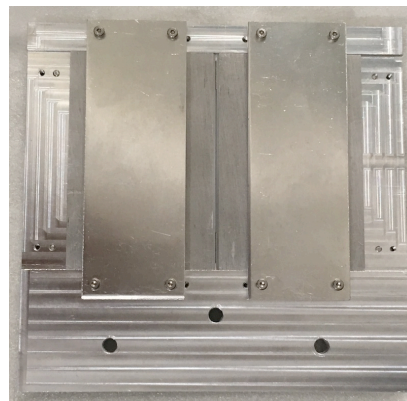
最終的には、電場の大きい単結晶を用いて EDM 探索を行う。EDM が存在する場合、中性子のスピンの向きが入射時の軸と直交する向きの成分を持つようになる。これを感度よく探索するためには 3 次元的にスピンを制御・解析する必要があり、そのための開発を行う。

### 4. 研究成果

結晶内電場測定手法の基礎である、ペンデル干渉を測定する手法を確立した。ペンデル干渉は単結晶の動力的回折の結果、試料の厚さに応じて波動の透過強度が振動する現象で、その周期は原子核の散乱断面積や結晶構造を反映している。動力的回折現象が明瞭に現れるためには結晶の完全性や表面処理、入射ビームの高い可干渉性が必要となる。またペンデル干渉縞の周期は入射波の波長に依存する。パルス中性子ビームの場合は波長の異なる中性子が時間差をもって試料・検出器に到達するため、時分割してデータを取得すれば複数の波長の効果を同時に測定することが可能となる。EDM 測定の際にも EDM を波長ごとに同時探索することで各種系統誤差を除去できる可能性を示している。

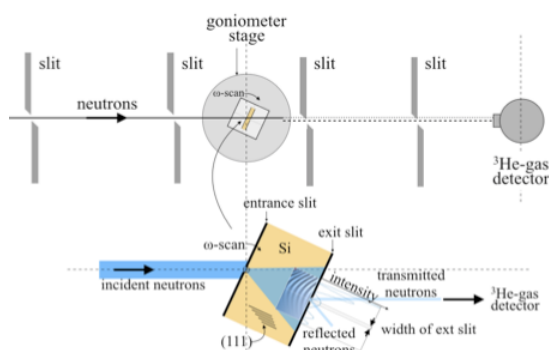
本研究ではまず、完全な単結晶が得やすいシリコンを用い、その動力的回折を観測する条件を詳しく調べた。X線ロッキングカーブによる評価で、エッチングによる表面処理が有効であることがわかった。

次に試料にビームを導くスリットの設置精度について、数値シミュレーションを作成しその許容誤差を評価した。それにもとづいて実際に試料設置ジグを作成した (図 1)。



(図 1) 作成したペンデル干渉縞観測用資料ジグ

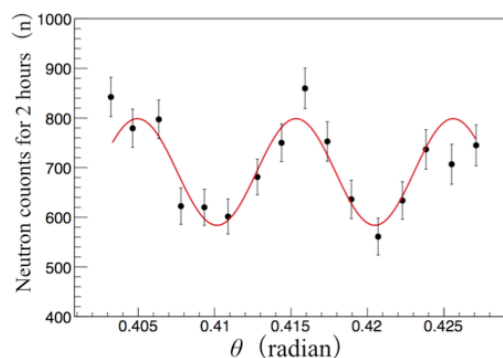
J-PARC 大強度パルス中性子源のビームライン 17 に実験セットアップを構築しペンデル縞観測を試みた (図 2)。J-PARC はパルス中性子ビームを供給する。特定の入射角でビームを入射するので、結晶の格子定数に対応した波長の中性子が時間順に計測され、いわゆる回折ピークを作る。1つの結晶面に対応する回折ピークの強度が、動力学的回折の影響で増減し、ペンデル干渉縞として現れる。測定の結果、コントラスト約 20% 明瞭なペンデル縞を観測することに成功した。ペンデル干渉縞の周期は結晶の構造因子、つまり物質の散乱断面積と結晶構造に依存する。観測された干渉縞から求めたシリコンの散乱断面積は文献値と高い精度で一致した。これはパルス中性子ビームを用いた初めてのペンデル縞の測定であり、時分割測定を組み合わせた解析手法を確立することに成功した。



(図 2) ペンデル干渉測定のために J-PARC に構築したビームライン。図中左からパルス中性子が入射し、各種スリットを通して試料に照射される。下図は資料内での中性子波動の広がりをも模式的に表したもので、実験では動力学的回折の結果入射ビームと平行に取り出される中性子を、2m 下流の検出器で検出する。

さらに EDM 測定に必要な結晶内部の電場の測定にむけて、偏極中性子ビームを用いた実験セットアップを構築した。今回のビームラインでは入射ビームの偏極はビーム進行方向であるが、結晶内電場を測定するためには、ビームに垂直な偏極を作成する必要がある。また、最終目標である EDM 測定の際には試料周りの磁場を可能な限り抑える必要があるため、弱磁場にてスピン方向を断熱的に変化させるビームラインを構築した。実際の測定から、中性子ビームの偏極率は 95% 以上を保っていると確認された。

非中心対称性結晶である  $\text{SiO}_2$  や BGO 結晶について、表面処理や X 線ロックアップによる評価を行った。次にシリコンの場合と同様に試料ジグを作成し、J-PARC にてペンデル干渉縞の測定を開始した。これまでのところペンデル縞のコントラストは小さく、有意な結果を得るには至っていないが、詳細な解析



(図 3) パルス中性子を用いた実験としては初めて観測したペンデル干渉縞

やセットアップの最適化を行なっている。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

① Masaaki Kitaguchi, Search for unknown interaction with neutrons, Proceedings of Science, PoS (KMI2017) 8. 査読有  
<https://pos.sissa.it/294/>

[学会発表] (計 14 件)

① 伊藤茂康, Measurement of Pendellösung interference fringes using the pulsed neutron beam to search, FPUA2018, (2018).

② 中路雅也, 中性子 EDM 探索のための動力学的回折効果の検証, 日本物理学会第 73 回年次大会 (2018).

③ 内田裕也, 結晶回折を用いた中性子 EDM 測定のための結晶内電場の測定に向けて, 日本物理学会第 73 回年次大会 (2018).

④ 伊藤茂康, Measurement of the internal electric field of  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  crystal to research for neutron EDM, International Conference on Neutron Optics (2017).

⑤ 北口雅暁, J-PARC での中性子基礎物理の現状, 日本中性子科学学会年会 (2017).

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

<http://phi.phys.nagoya-u.ac.jp>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

北口雅暁 (KITAGUCHI, Masaaki)

名古屋大学・現象解析研究センター・准教授

研究者番号：90397571

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：

### (4) 研究協力者

伊藤茂康 (ITO, Shigeyasu)

中路雅也 (NAKAJI, Masaya)

内田裕也 (UCHIDA, Yuya)