

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月 7日現在

機関番号：17102

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2011～2012

課題番号：23840030

研究課題名（和文） 次世代中性子電気双極子能率探索実験のための新型中性子反射鏡の開発研究

研究課題名（英文） Development of neutron mirror for next-generation neutron electric dipole moment search

研究代表者

吉岡 瑞樹 (YOSHIOKA TAMAKI)

九州大学・大学院理学研究院・助教

研究者番号：20401317

研究成果の概要（和文）：

当初の目標通り、研究期間内に高い核力ポテンシャル、低い表面粗さを持つ重水素化炭素薄膜の製膜技術を確立することができた。重水素化炭素薄膜は中性子電気双極子能率測定実験のための超冷中性子輸送導管に適していることが分かった。

研究成果の概要（英文）：

We have successfully established the film-forming method of the deuterated Diamond-Like Carbon (DLC) which has a high nuclear potential and low surface roughness. We found that the deuterated DLC is suitable for next-generation search for neutron electric dipole moment.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2011年度 | 1,400,000 | 420,000 | 1,820,000 |
| 2012年度 | 1,400,000 | 420,000 | 1,820,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 2,800,000 | 840,000 | 3,640,000 |

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：素粒子物理実験、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：超冷中性子、電気双極子能率

1. 研究開始当初の背景

コンデンサーでの分極のように中性子スピンの方向に電氣的偏りを持つか、この中性子の電気双極子能率 (Electric Dipole Moment：以下、EDM) は、世界の素粒子物理研究者の長年にわたる悲願のひとつである。原子炉や加速器を用いた中性子発生施設において EDM の値を測定するための研究が世界各地で進められてきた。現在までの最高感度を持つ測定は ILL 研究所(仏)の原子炉か

らの超冷中性子(Ultra Cold Neutron：以下、UCN)を用いた実験で、EDM の上限値として $3 \times 10^{-26} \text{e} \cdot \text{cm}$ の値が得られている。(UCN はエネルギーがおおよそ 250neV 以下の極低エネルギー中性子のことであり、物質の核力ポテンシャル以下のエネルギーの場合、物質表面で全反射をおこすという特徴を持つ。) この感度はすでに極めて大きな意味を持ち、素粒子の標準理論を超える新しい理論を構築する際、この EDM の上限値は最も強い制限のひとつとなっている。大統一理論及び重力

の統一を目指す新しい物理の最有力候補である超対称性理論では $10^{27}\sim 10^{28} \text{ e}\cdot\text{cm}$ の EDM を予言しており、現在の実験感度はすでにこの領域に迫ってきているため、この感度の向上は極めて重要となっている。一方、標準理論では $10^{31}\sim 10^{32} \text{ e}\cdot\text{cm}$ である。

申請者が所属する日本中性子光学グループは、これまでの限界を打ち破る、「新しい手法による世界最高密度の UCN 源」を用いた次世代の EDM 測定実験計画を立案し、茨城県東海村の J-PARC 加速器において新規実験提案をしていた。本計画の特色は、

1. J-PARC LINAC からのパルス陽子ビームを用いた瞬間的には世界最高強度のパルス UCN 源。
 2. パルス特性を活かし、中性子飛行時間に同期した中性子の加減速器(リバンチャー)により世界最高密度化する革新的な輸送光学系。
 3. EDM 測定系において、超高感度原子磁束系の使用及び UCN 蓄積容器最適化による系統誤差の大幅な低減。
- の 3 点である。

2. 研究の目的

上述の 2 のリバンチャーは本実験計画の要であり、以下にその原理を述べる。UCN は発生源から EDM 測定系まで導管によって輸送される。この際、エネルギー(速度)広がりでの空間的に拡散し、結果として密度低下につながる。中性子は磁気モーメントを持っているため磁場を用いた加減速が可能であり、UCN 導管軸方向の速度について飛行時間に同期した加減速を行うことにより、EDM 測定系にて空間的に再集束させることができる。UCN は EDM 測定系に達するまでに導管表面で数百回反射する。そのため、反射 1 回当たりの損失は十分低い必要がある。多くの物質では UCN のエネルギー領域では速度に反比例して中性子吸収断面積が大きくなり、また、反射壁面に混入し易い水素原子は大きな中性子吸収断面積を持つ。非弾性散乱により UCN がエネルギーを得て、導管表面の核力のポテンシャルを超えてしまうような過程も存在する。このため、核力のポテンシャルは可能な限り高いことが望まれるが、水素原子の混入はこれを下げる方向に働く。また、リバンチャーでは導管軸方向の速度成分を加減速するため、非鏡面反射により軸方向の速度が変化しないことが要求される。以上をまとめると、UCN 輸送導管の表面は次のような要請を満たす必要がある。

- a. 中性子吸収断面積が小さいこと。

- b. 表面に存在する水素原子の量は可能な限り小さいこと。

- c. 壁面の核力のポテンシャルは可能な限り高いこと。

- d. 非鏡面反射が少ないこと。

上記要請を全て満たす可能性がある有力候補として、Chemical Vapor Deposition(以下、CVD)法にて成膜した Diamond Like Carbon(以下、DLC)が挙げられる。DLC はグラファイトとダイヤモンドの中間構造を持つ非晶質である。炭素自身は要件(a)、(c)を満たすが、CVD 法にて DLC を成膜する場合、通常原料として炭化水素を用いるため要件(b)、(c)を満たさない。重水素化した炭化水素を原料として用いることにより要件(b)、(c)を満たす可能性がある。また、CVD 法では基板表面構造の転写生が高く、制御された基板表面を用意することで要件(d)も実現できる可能性がある。本研究では、CVD 法による重水素化 DLC 薄膜の製膜技術を確立し、中性子反射特性が上記要請を満たしていることを明らかにする。

3. 研究の方法

高エネルギー加速器研究機構(以下、KEK)に新規導入されたナノテック社製の CVD 法 DLC 成膜装置を用いて、重水素化 DLC の成膜技術を確認する。材料の炭化水素は当該科研究費にて購入した重水素化ベンゼンを用いた。実際の成膜作業は KEK の専属技師が行い、バイアス電圧等成膜パラメータの指示を緊密に行うとともに、適宜現地に思う気実際の成膜作業に当たった。中性子反射性能の評価は J-PARC の物質生命科学研究施設にある専用反射率計の冷中性子ビームを用いて行う。成膜パラメータの違いによる反射性能を系統立てて研究する。元素比率組成の測定は茨城大学のタンデトロロン加速器を用いて RBS/ERDA 法にて行った。また、理化学研究所の X 線反射率計を用いて膜密度の測定を行った。これらの結果を組み合わせ核力ポテンシャルの予想値が計算でき、J-PARC 中性子反射率計により実測した核力ポテンシャルとの比較を行った。

4. 研究成果

研究期間内に重水素化 DLC 薄膜を製膜パラメータを変えて複数作製し、中性子反射鏡としての特性を以下の方法により系統的に調査

した。

1. RBS/ERDA 法による元素比率組成の測定。測定は茨城大学のタンデントロン加速器を用いて行った。
2. X 線反射率による密度及び膜厚の測定。測定は理化学研究所の Smartlab 装置を用いて行った。
3. 中性子反射率法による核力ポテンシャルの測定。測定は京都大学原子炉実験所および茨城県東海村の J-PARC 物質生命科学実験施設にて行った。
4. 原子間力顕微鏡による表面粗さの測定。測定は理化学研究所の AFM を用いて行った。比較のため、同様の測定を軽水素 DLC 薄膜についても行った。

以上の測定結果より、

- a. 重水素化 DLC の核力ポテンシャルは軽水素 DLC のそれに比して当初の予測通り高いことを確認した。ポテンシャルの値として従来中性子反射鏡として用いられているニッケルミラーと同等の値を得ることができた。
- b. 1 および 2 の結果による核力のポテンシャルの推定値と 3 の結果を比較し、線形性が良いことを確認した。
- c. バイアス電圧がおよそ 0.5kV の時に膜密度が最大となることを確認した。
- d. 4 の測定により、表面粗さはシリコン基板と同程度であることが分かり、非鏡面反射確立はニッケルミラーと比すと一桁以上か以前していることが示された。

以上まとめると、当初の目標通り、高い核力のポテンシャル及び低い表面粗さを持つ重水素化 DLC の成膜技術を確認することができた。重水素 DLC は中性子 EDM 測定実験のための UCN 輸送導管に適していることが分かり、その成膜技術を確認することができた。

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)

[学会発表] (計 8 件)

1. 片山領、三島賢二、山下了、櫻井大、北口雅暁、吉岡瑞樹、関善親
「中性子電気双極子モーメント測定の為のストレージセル最適化の研究」
日本物理学会第 68 回年次大会 2013 年 3 月 28 日 広島大学

2. 吉岡瑞樹
「BL05 非偏極ビームラインのまとめと今後」
中性子物理研究会 2012 年 11 月 21 日 名古屋大学
3. 櫻井大、吉岡瑞樹
「Study of correlation between non-specular reflection and roughness」
中性子物理研究会 2012 年 11 月 20 日 名古屋大学
4. 櫻井大、清水裕彦、猪野隆、吉岡瑞樹、北口雅暁、三島賢二、覚正信徳
「ダイヤモンドライクカーボン薄膜による中性子ミラーの開発」
日本物理学会 2012 年秋季大会 2012 年 9 月 12 日 京都産業大学
5. 関善親、北口雅暁、吉岡瑞樹、清水裕彦、山田悟史 and NOP collaboration
「超冷中性子ミラー基板の表面ラフネスの評価」
2012 年 9 月 12 日 京都産業大学
6. 北口雅暁、吉岡瑞樹、三島賢二、有本靖、竹谷薫、猪野隆、武藤豪、清水裕彦、岩下芳久、今城想平、神谷好郎、山下了、旭耕一郎、吉見彰洋、嶋達志 and NOP collaboration
「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」
日本物理学会第 67 回年次大会 2012 年 3 月 24 日 関西学院大学
7. 吉岡瑞樹
「重水素 Diamond-Like Carbon の中性子反射率測定」中性子制御デバイスとその応用 IV(招待講演)
2012 年 2 月 23 日 京都大学原子炉実験所
8. 吉岡瑞樹、清水裕彦、猪野隆、武藤豪、三島賢二、有本靖、竹谷薫、岩瀬広、荻津透、木村誠宏、駒宮幸男、山下了、神谷好郎、岩下芳久、日野正裕、北口雅暁、今城想平、藤岡宏之、嶋達志、宇津呂雄彦、酒井健二、旭耕一郎、吉見彰洋、鬼柳善明、船橋春彦
「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 2011 年秋季大会 2011 年 9 月 16 日 弘前大学

[その他]

ホームページ等

<http://nop.kek.jp/Zope2/Home/hgdjyv/dlc-diamond-like-carbon>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉岡 瑞樹 (YOSHIOKA TAMAKI)

九州大学・大学院理学研究院・助教

研究者番号：20401317

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし