

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01092

研究課題名（和文）中性子干渉計を用いた暗黒宇宙の多角的研究

研究課題名（英文）Multiple approach for dark energy with neutron interferometer

研究代表者

北口 雅暁（Kitaguchi, Masaaki）

名古屋大学・素粒子宇宙起源研究所・准教授

研究者番号：90397571

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,200,000円

研究成果の概要（和文）：宇宙の加速膨張の力の源「ダークエネルギー」を研究するために、低エネルギー中性子波長の干渉現象を用いて未知の相互作用を探索したい。中性子多層膜反射鏡を用いた冷中性子干渉計を開発し、大強度パルス中性子ビームに導入した。飛行時間法によって波長に対する干渉縞を取得することができる。短時間測定を繰り返すことによって系統的な不確かさを抑制できる。実証実験を行い論文・プレスリリースとして公表した。原子核の中性子散乱長の精密測定を開始し、従来型の干渉計と同等以上の測定精度を達成した。暗黒エネルギー探索のための装置を開発し、準備実験を行なった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

中性子干渉計を高度化した。原子核の中性子散乱長を高精度にかつ効率よく測定できることを実証した。今後様々な原子核について網羅的に測定する計画である。原子核の散乱長は物質研究を含め中性子を用いる実験の基礎であり、そのデータセットの高度化は重要である。中性子干渉計構築には光学素子を10ナノメートルのオーダーで配置しなければならない。本研究では精密光学素子と超精密加工によってこれを達成した。この手法は様々な中性子実験装置の高度化に貢献する。

研究成果の概要（英文）：A cold neutron interferometer with multilayer mirrors has been developed. Interference fringes according to wavelength can be observed by the time-of-flight method for pulsed neutrons. The systematic uncertainty can be suppressed by repeated short-time measurements. The results were published as a journal paper and press releases. Precise measurements of neutron scattering length of various nuclei were started and achieved accuracy equivalent or better than that of conventional interferometers. An apparatus for dark energy search was developed and was used for preparatory experiments.

研究分野：素粒子原子核物理学実験

キーワード：中性子 干渉計 暗黒エネルギー 原子核

1. 研究開始当初の背景

我々の宇宙はビッグバンによって始まったと考えられているが、その後の宇宙の膨張速度が加速していることが様々な観測から明らかになってきた。「暗黒エネルギー」と呼ばれる力の源が必要だと考えられているが、その正体は明らかになっていない。もしも暗黒エネルギーが存在すれば、質量を持つ物体間の未知の相互作用として現れると期待される。一方、物体の間、特に宇宙の進化にとって重要であろう素粒子同士の間働く相互作用に対して我々は現在のところ「素粒子標準模型」で理解しているが、重力相互作用は他の3つの力に比べ極端に弱く、統一的に扱われていない。これを解決しようとする「新しい物理」では多くの場合、新しい相互作用の存在、あるいは時空構造の修正に伴う相互作用の形状の変更が予想される。このように、宇宙論・素粒子物理の両方から「物体間の未知の相互作用」が要請され、現状では兆候すら見つかっていない。小規模精密実験による網羅的な探索が道を開く可能性があり、世界的な競争になっている。

宇宙の加速膨張を解き明かす鍵になる「暗黒エネルギー」の研究は、2つの物体間に働く相互作用に未知の成分が存在するか否か、を探索することになる。このような未知相互作用の探索に用いる試験粒子としては、質量が大きく電磁気力など他の相互作用の影響が小さい中性子が利用できる。低エネルギー中性子は物質波として振る舞い、その波長は原子核のサイズよりも十分に長いいため、相互作用は平均ポテンシャルとして作用する。このポテンシャルによって中性子波動の位相が変化し、中性子干渉計はこの位相変化を精密に測定できる。従来中性子干渉計は、シリコン単結晶の格子による回折を利用していたため、扱える波長と全体の大きさに限界があった。

中性子多層膜ミラーは中性子に対するポテンシャルの異なる2種類の金属を交互に積層したもので、その膜厚を制御することでBragg反射する波長を自由に調節できる。また、単結晶が特定の波長しか反射できないのに対して、多層膜はその厚さを徐々に変化させることで幅広い波長帯域を反射する鏡を作ることができる。我々はこれまでに、多層膜ミラーを高精度に配置し中性子ビームを分割・重ね合わせるデバイス「ビームスプリッティングエタロン(BSE)」を開発していた。さらにBSEを2つ組み合わせることで「多層膜冷中性子干渉計」を実証した。(図1)

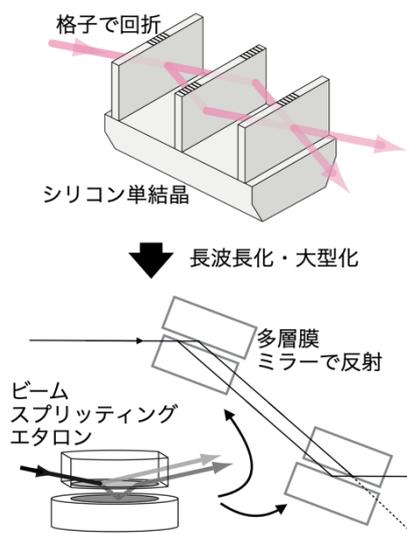


図1：従来型中性子干渉計(上)とBSEを用いた冷中性子干渉計

2. 研究の目的

この研究では、「暗黒エネルギー」の正体に実験的に迫るために、測定装置としての中性子干渉計の開発と実用化を目指す。具体的には、以下のような開発・研究を行うことを目的とした。

1. 多層膜冷中性子干渉計を開発・実用化する。
2. 核力相互作用を精密測定し、暗黒エネルギーを探索する。
3. 地球重力による量子力学的干渉を精密測定し、暗黒エネルギーを探索する。
4. 短距離相互作用探索実験を行い、暗黒エネルギーを探索する。

3. 研究の方法

ビームスプリッティングエタロン(BSE)に製膜する多層膜ミラーの設計によってその利用波長を選択することができる。ミラーが反射できる波長帯域を拡大し、J-PARC中性子のスペクトルのピークにあわせることで実験の統計精度を20倍に向上させる。

パルス中性子の飛行時間法を用いた測定では、短時間の繰り返し測定で装置の振動や温度変化などによる位相ドリフトを追跡することができる。この測定・解析手法を確立し、高剛性ジグの使用や恒温室の設置などとあわせて、系統的不確かさを抑制し、詳細に評価する。

2経路の一方に測定対象物を挿入し、精密位置合わせを可能にする試料挿入ステージを開発する。これを用いて各種原子核の中性子散乱長の測定精度を向上させ、未知相互作用を探索する。重力相互作用など未知の短距離相互作用探索に用いる装置を開発し、試験する。

4. 研究成果

BSE 2つを用いた多層膜中性子干渉計を J-PARC パルス中性子ビームライン BL05 (NOP) に導入した。アクティブ除振台、恒温槽を設置し、干渉縞を安定して得ることができるようになった(図1)。コントラストは最大60%を超えた(図2)。パルス中性子の飛行時間法を用いた解析によって、短時間繰り返し測定ができるようになった。干渉計の2経路は空間的におよそ $300\ \mu\text{m}$ 離れているが、その一方にのみ測定試料を挿入し、ビームに対して精密位置決めできる、試料挿入装置を開発・導入した。実際に幾つかの元素(原子核)について試料を用意し、中性子散乱長を測定した(図3)。測定された中性子散乱長は文献値と一致しており(表1)、測定装置・解析手法の正当性を実証した。

これらの成果は論文として公表した。また参加した大学・研究施設において共同プレスリリースを行なった。

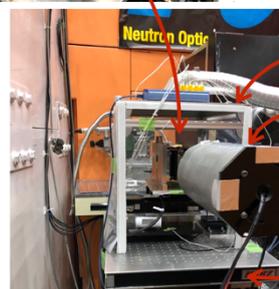
(T. Fujiie, et al., Phys. Rev. Lett. 132, 023402 (2024))

ダークエネルギー探索に向けての開発を行なった。干渉計の経路に圧力の異なるガスを導入し、位相変化を探索することで、ダークエネルギーのモデルを探索・検証することができる。BSE による干渉計は経路の分離が小さいが、真空を含め、ガス領域を干渉計経路に挿入できる容器を設計・製作した。干渉計セットアップに導入し得ることを確認しており、今後各種ガス試料の散乱長測定から開始し、ダークエネルギー探索実験に進める。

広い波長帯域に対応した BSE を試作した。波長幅は従来の5倍程度まで拡大した。干渉計に必要な、反射中性子波動の位相の制御が今後の課題である。



干渉計の
セットアップ



恒温フード
2次元検出器
除震台

図1: J-PARC BL05 に設置した干渉計の全体像。

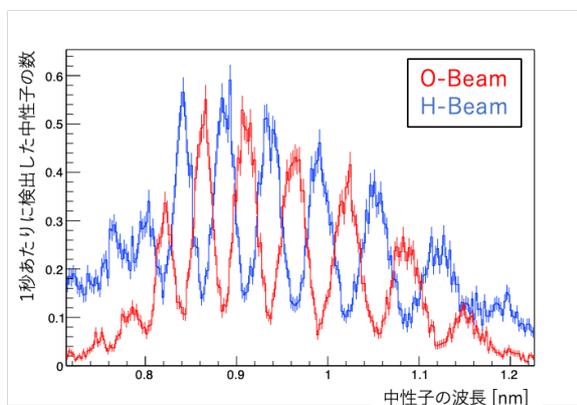


図2: パルス中性子の飛行時間法を用いて得た干渉縞。中心波長は 0.9 nm。

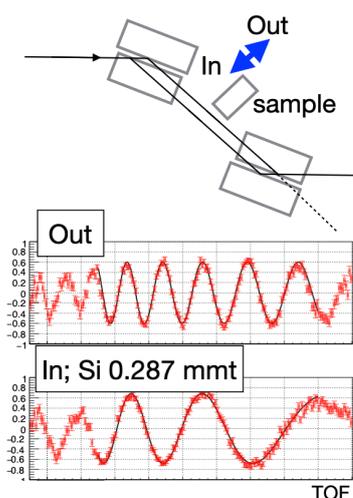


図3: 試料を出し入れし干渉縞の変化を見る。

表1: 幾つかの元素について測定した中性子散乱長と文献値との比較。

| sample | b_c (fm) | b_c/b_c^{ref} |
|-----------------|--------------------|------------------------|
| Si ^a | 4.060 ± 0.027 | 0.978 ± 0.007 |
| Ti | -3.477 ± 0.062 | 1.011 ± 0.018 |
| Al | -3.386 ± 0.064 | 0.985 ± 0.019 |
| | 3.408 ± 0.050 | 0.988 ± 0.015 |
| | 3.423 ± 0.027 | 0.992 ± 0.008 |
| V | 3.466 ± 0.020 | 1.005 ± 0.006 |
| | -0.522 ± 0.004 | 1.364 ± 0.010 |
| | -0.520 ± 0.004 | 1.361 ± 0.011 |
| V Averaged | -0.521 ± 0.003 | 1.363 ± 0.008 |

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 Fujiie Takuhiro, Hino Masahiro, Hosobata Takuya, Ichikawa Go, Kitaguchi Masaaki, Mishima Kenji, Seki Yoshichika, Shimizu Hirohiko M., Yamagata Yutaka | 4. 巻 132 |
| 2. 論文標題 Development of Neutron Interferometer Using Multilayer Mirrors and Measurements of Neutron-Nuclear Scattering Length with Pulsed Neutron Source | 5. 発行年 2024年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review Letters | 6. 最初と最後の頁 23402 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.132.023402 | 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 - |

| | |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名 Iwaguchi Shoki, Nishizawa Atsushi, Chen Yanbei, Kawasaki Yuki, Ishikawa Tomohiro, Kitaguchi Masaaki, Yamagata Yutaka, Wu Bin, Shimizu Ryuma, Uemura Kurumi, Tsuji Kenji, Shimizu Hirohiko, Michimura Yuta, Kawamura Seiji | 4. 巻 458 |
| 2. 論文標題 Displacement-noise-free interferometric gravitational-wave detector using unidirectional neutrons with four speeds | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Physics Letters A | 6. 最初と最後の頁 128581 ~ 128581 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.physleta.2022.128581 | 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9件（うち招待講演 0件/うち国際学会 5件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 藤家拓大 |
| 2. 発表標題 多層膜パルス中性子干渉計の高感度化に向けた開発状況について |
| 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 Takuhiro Fujiie |
| 2. 発表標題 Measurement of Nuclear Scattering Length using Pulsed Neutron Interferometry with Multilayer Mirror |
| 3. 学会等名 The International Conference on Neutron Scattering 2022（国際学会） |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Takuhiro Fujiie |
| 2. 発表標題 Neutron Pendelloesung interferometry to search for exotic interactions |
| 3. 学会等名 Physics of fundamental Symmetries and Interactions - PSI2022 (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名 藤家拓大 |
| 2. 発表標題 多層膜パルス中性子干渉計を用いた核散乱長測定 |
| 3. 学会等名 日本中性子科学会年会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Takuhiro Fujiie |
| 2. 発表標題 Development of Pulsed Neutron Interferometry using Multilayer Mirror at BL05 |
| 3. 学会等名 FPUA2021 (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Takuhiro FUJIE |
| 2. 発表標題 Improving Neutron Pendelloesung Interferometry for the Fifth Force Constraints with Germanium |
| 3. 学会等名 APS 2021 Fall Meeting of the Division of Nuclear Physics (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|-----------------------------|
| 1. 発表者名 南部太郎 |
| 2. 発表標題 広帯域多層膜冷中性子干渉計の開発 |
| 3. 学会等名 日本中性子科学会 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|-----------------------------|
| 1. 発表者名 南部太郎 |
| 2. 発表標題 広帯域多層膜冷中性子干渉計の現状 |
| 3. 学会等名 日本物理学会 |
| 4. 発表年 2024年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Masaaki Kitaguchi |
| 2. 発表標題 Advanced Neutron Optics for Neutron Sources |
| 3. 学会等名 MIRAI 2.0 R&I Week 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 |
|-------------------|--|--|----|
| 研究 分 担 者 | 細畠 拓也 (Hosobata Takuya) (00733411) | 国立研究開発法人理化学研究所・光子工学研究センター・ 上級研究員 (82401) | |

6. 研究組織（つづき）

| | 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 |
|-------|--|---|----|
| 研究分担者 | 日野 正裕 (Hino Masahiro) (70314292) | 京都大学・複合原子力科学研究所・教授 (14301) | |

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 |
|---------|---------|
| | |