

令和 6 年 5 月 31 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K21875

研究課題名（和文）原始重力波の検出を地上で可能にする変位雑音フリー中性子・原子干渉計の開発

研究課題名（英文）Development of displacement-noise-free neutron/atom interferometer for detecting primordial gravitational waves on earth

研究代表者

川村 静児（Kawamura, Seiji）

名古屋大学・理学研究科・教授

研究者番号：40301725

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、原始重力波の地上での検出を目指して、変位雑音フリー中性子干渉計を開発し、その原理を検証することであった。

理論面においては、2つのマッハツェンダー干渉計に中性子を両側から入射する方式、1つの干渉計に2速度の中性子を両側から入射する方式、1つの干渉計に4速度の中性子を片側から入射する方式、さらにサニャック干渉計を利用した方式を考案し、それぞれについて詳細な検討を行った。

実験面においては、シグザグタイプのアルミ板の角度をピエゾ素子で振動させるアクチュエーターを設計・製作し、それをを用いて、J-PARCにおいて変位雑音フリー中性子干渉計の原理を実験的に実証できたと考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

2015年の重力波の初検出により重力波天文学が創成し、その後も検出が続いている。今後は、重力波天文学をさらに発展させ、最終的には宇宙誕生直後のインフレーションから発生したと予想される原始重力波を検出し、宇宙誕生の謎を解き明かすことが期待されている。そのような状況の中、我々が開発した変位雑音フリー中性子干渉計は、従来の地上の重力波検出器の感度を低周波帯で飛躍的に改善する可能性を持つ全く新しい検出方式である。本研究により、その具体的な干渉計構成が明らかにされ、その原理が実験的に検証されたことにより、変位雑音フリー中性子干渉計の実現への着実な一歩を踏み出すことができた。

研究成果の概要（英文）：The aim of this study was to develop a displacement-noise-free neutron interferometer and validate its principles, targeting the detection of primordial gravitational waves on the ground.

On the theoretical front, we devised methods including introducing neutrons from both sides into two Mach-Zehnder interferometers, introducing neutrons of two velocities from both sides into one interferometer, introducing neutrons of four velocities from one side into one interferometer, and utilizing a Sagnac interferometer, and conducted detailed examinations for each.

On the experimental front, we designed and fabricated an actuator that vibrates the angle of a zigzag-type aluminum plate using piezoelectric transducers, and successfully experimentally demonstrated the principle of the displacement-noise-free neutron interferometer at J-PARC.

研究分野：重力波物理学

キーワード：重力波 変位雑音フリー干渉計 中性子干渉計 マッハツェンダー干渉計 J-PARC

1. 研究開始当初の背景

2015年にアメリカのLIGOにより重力波が初検出されて以来、ブラックホール連星や中性子星連星の合体などからの重力波が頻りに検出され、重力波天文学が創成した。重力波天文学は今後も、検出器の感度向上とともに、より一層発展していくことが期待されている。そして、特に重要なのは低周波帯(0.1~10 Hz)における感度の向上である。なぜならば、一般に、より重い重力波源は、より低い周波数に、より大きい重力波を出す、つまり低周波帯では期待できる重力波信号が大きいからである。特に、宇宙誕生直後に起きたと考えられているインフレーションの期間に生成された原始重力波も、低周波帯において、より大きいと考えられており、低周波帯の感度を向上させることにより、将来的には原始重力波を検出し、宇宙誕生の謎を解き明かすことも期待されている。

しかしながら、低周波帯の感度を飛躍的に向上させることは、地上の検出器においては非常に難しい。それは、地上においては、地球が丸いため、アーム長を数十km以上に伸ばすことが無理である、地上においては、鏡を懸架する必要があるため、低周波帯で支配的な地面振動雑音や懸架の熱雑音を抑えるのが極めて困難である、という2つの理由があるためである。そこで、日本の将来計画として、宇宙重力波望遠鏡DECIGO(2023年度まで本研究の代表者である川村がDECIGOの代表)により、アーム長を伸ばし、地面振動などを取り除き、原始重力波を検出するという計画が推進されている。しかし、その実現には長い時間がかかり、また必要な経費も極めて大きい。そこで、2004年に川村とYanbei Chen氏(カリフォルニア工科大学)によって考案されたのが、変位雑音フリーレーザー干渉計である。

変位雑音フリーレーザー干渉計は、鏡の変位雑音を完全に除去するという夢のような手法である。この原理は、重力波が光の伝播中に作用するのに対して、鏡の動きは、光が鏡によって反射されたときにのみ発生するという違いを利用して、複数の干渉計を含む検出系において、複数の出力信号の適切なコンビネーションを取り、重力波信号を残しつつ、鏡の変位を完全にキャンセルするというものである。しかしながら、この手法においては、アーム長3kmの干渉計に対して、変位雑音キャンセルの有効周波数は100kHzとなり、鏡の変位雑音が問題となる肝心の周波数帯である0.1~10Hzでは効果がないという問題があった。

そこで、我々が新たに考え出したのが、変位雑音キャンセル技術と中性子干渉計とを組み合わせることである。光子のかわりに、速度の遅い中性子を用いれば、中性子が干渉計内を伝播する時間を0.1~10秒にでき、有効周波数を0.1~10Hzにすることが可能であるという道理である。そこで、本研究ではこの、変位雑音フリー中性子干渉計についてその実現可能性を、理論・実験両面から検討しようと考えた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、『変位雑音フリー中性子干渉計』についてその実現可能性を、理論・実験両面から検討することである。理論面では、具体的にどのような干渉計の構成にすれば変位雑音フリー中性子干渉計が実現できるかを検討し、その詳細な特性について理論的な解析を行い、周波数応答や実現可能な感度を計算し、また、留意すべき問題点を洗い出すことである。実験面では、原理検証実験のための装置を設計・製作し、日本原子力研究開発機構J-PARCで中性子干渉の実験を行っているグループと協力して実験を行い、変位雑音フリー中性子干渉計の原理が正しいことを実験的に実証することである。

3. 研究の方法

(1) 理論

まず、変位雑音フリー中性子干渉計の構成を検討する上で基本となる構成として、図1に示すような変位雑音フリーレーザー干渉計を考えた。この構成は変位雑音フリーレーザー干渉計の中でも最もシンプルなものであり、これを基本構成とすることにより、光を中性子に置き換えて検討する際に、複雑な問題を回避することができる。本研究では、この干渉計において光を中性子に置き換えたものを基本として、そこから派生する形でいくつかの変位雑音フリー中性子干渉計の構成を新たに考案した。その際、光の速度は一定であるが、中性子の場合は複数の速度を持たせることが可能であるという特徴を最大限利用して、干渉計の構成の最適化を行った。また、それぞれの干渉計において、現在の重力波検出器と同等なサイズの中性子干渉計を仮定し、重力波に対する応答関数を計算し、重力波に対する到達可能な感度も計算した。

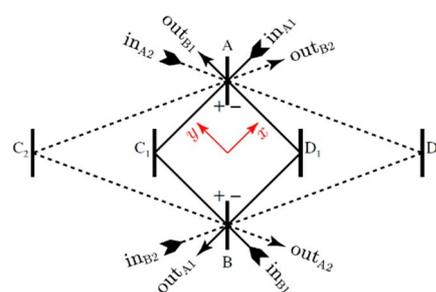


図1 .最もシンプルな変位雑音フリーレーザー干渉計。(Yanbei Chen, et al., Phys. Rev. Lett. 97 (2006) 151103)

(2) 実験

実験においては、J-PARC において中性子干渉計グループが行っている既存の実験設備（図2参照）とその装置（図3参照）を利用して原理検証実験を行うことにした。

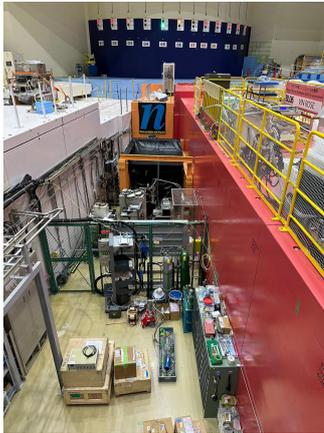


図2 .J-PARC の中性子干渉計の実験設備。

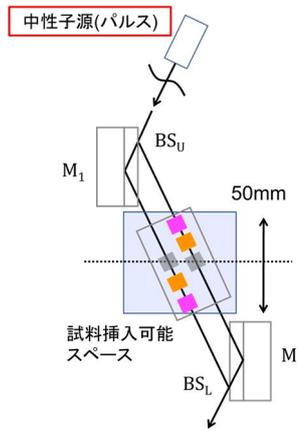


図3 .J-PARC における実際の実験装置の構成。

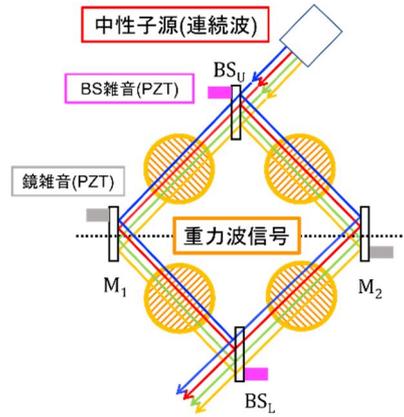


図4 .理想的な原理検証実験の構成。

原理検証実験としては、図4で示されるような構成が理想であるが、既存の装置（図3参照）は、マッハツェンダー干渉計がひしゃげた非対称な形、中性子源が連続波ではなくパルス、マッハツェンダー干渉計の資料挿入スペースが非常に短い、鏡やビームスプリッターを直接振動させることができない、などの点で異なり、それに対応して実験計画を工夫して策定した。また、鏡の変位信号や重力波の模擬信号を生成するため、ジグザグタイプのアルミ板の角度をピエゾ素子で振動させるアクチュエータを設計・製作し（図5参照）それを中性子の経路に挿入し光路長を変調した。なお、実験においては、鏡ではなく、より本質的なビームスプリッターの変位雑音フリーの特性を確認することにした。

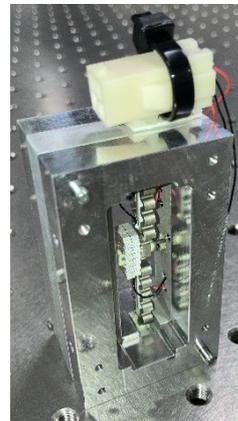


図5 .ジグザグタイプのアルミ板とピエゾ素子からなるアクチュエータ。

4 . 研究成果

(1) 理論

まず、我々は図1に示した変位雑音フリーレーザー干渉計において、単に光を単一速度の中性子に置き換えた変位雑音フリー中性子干渉計について詳細な検討を行った。これは、図6に示すように、ビームスプリッターを共有した大小2つのマッハツェンダー干渉計の上部と下部から単一速度の中性子を入射し、4つの干渉計出力信号の適切なコンビネーションを取るものである。その結果、この干渉計が、重力波信号を残したままで変位雑音フリーの特性を持つことが分かった。また、この変位雑音中性子干渉計応答関数を計算したところ、中性子の速度と干渉計のサイズを実現可能な範囲で適切に選ぶことにより、最も応答の高い周波数帯を0.1~1 Hz にもっていくことが可能であることを示した（図7参照）。また、達成可能な感度としては、0.1~1 Hz で宇宙重力波望遠鏡 LISA や第3世代地上検出器である Einstein Telescope (ET) や Cosmic Explorer (CE) よりもよい感度が実現でき、宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO/DECIGO の前哨科学衛星) にもあと1桁半と迫ることが分かった（図8参照）。

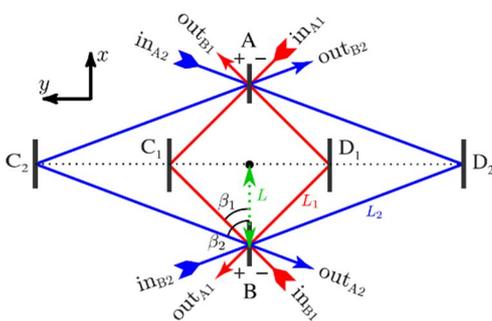


図6 . 変位雑音フリー中性子干渉計の構成。(Atsushi Nishizawa, et al., Phys. Rev. D, 105 (2022) 124017)

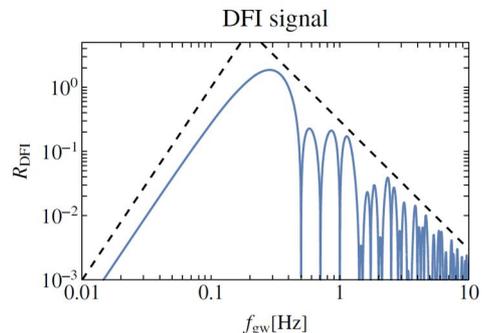


図7 . 変位雑音フリー中性子干渉計の応答関数。(Atsushi Nishizawa, et al., Phys. Rev. D, 105 (2022) 124017)

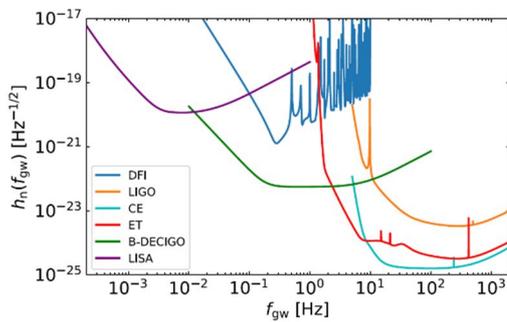


図8 . 変位雑音フリー中性子干渉計の到達可能感度。LIGO, CE, ET, B-DECIGO, LISA の感度も併せて記載している。(Atsushi Nishizawa, et al., Phys. Rev. D, 105 (2022) 124017)

次に我々は、中性子が光と違って異なる速度を持たせることが可能であることに着目し、大小2つのマッハツェンダー干渉計を1つのマッハツェンダー干渉計に単純化し、その上部と下部から異なる2速度の中性子を入射する方式の検討を行った(図9参照)。その結果、この構成においても、4つの干渉計出力信号を適切に組み合わせることにより、重力波信号維持・変位雑音フリーの特性を持つことを示した。また、適切なパラメータを採用することにより応答関数のピークも0.1~1 Hzにできることも確認した(図10参照)。

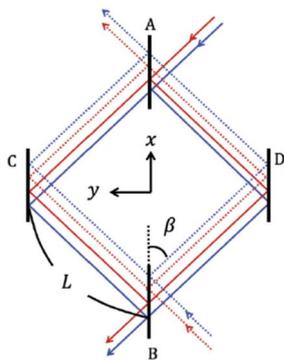


図9 .単一マッハツェンダーに2速度の中性子を両側から入射するタイプの変位雑音フリー中性子干渉計。(Shoki Iwaguchi, et al., Phys. Lett. A, 441 (2022) 128150)

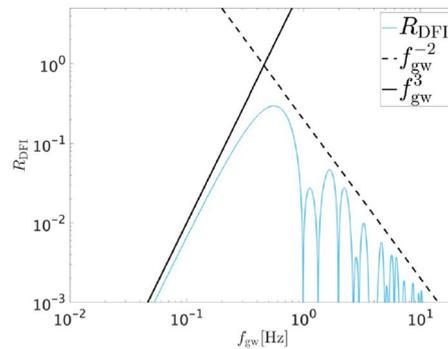


図10 .単一マッハツェンダー2速度両側入射型変位雑音フリー中性子干渉計の応答関数。(Shoki Iwaguchi, et al., Phys. Lett. A, 441 (2022) 128150)

また、我々は、速度を変えることができるという中性子の特性をさらにもう一段進んで利用し、干渉計の構成をより一層簡略化した。具体的には単一のマッハツェンダー干渉計の片側から4つの異なる速度を持つ中性子を入射し(図11参照)、その4つの干渉計出力信号の適切なコンビネーションを取る方式である。これに関しても、重力波維持・変位雑音フリーの特性を持ち、応答関数のピークも0.1~1 Hzにできることも確認した(図12参照)。

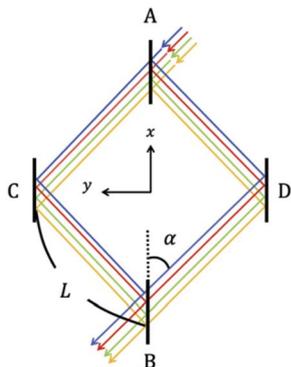


図11 .単一マッハツェンダーに4速度の中性子を片側から入射するタイプの変位雑音フリー中性子干渉計。(Shoki Iwaguchi, et al., Phys. Lett. A, 458 (2022) 128581)

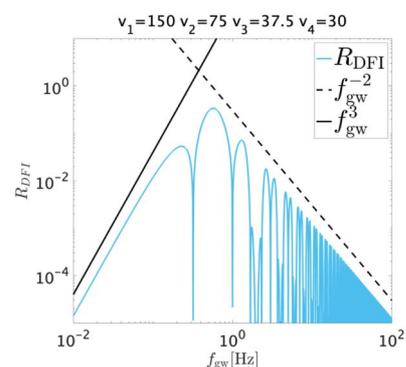


図12 .単一マッハツェンダー4速度片側入射型変位雑音フリー中性子干渉計の応答関数。(Shoki Iwaguchi, et al., Phys. Lett. A, 458 (2022) 128581)

さらに、我々は、マッハツェンダー干渉計の代わりにサニャック干渉計を用いて感度が改善するかを確認した。サニャック干渉計は、図 1 3 に示すようにマッハツェンダー干渉計の下部のビームスプリッターを鏡で置き換えたものである。このサニャック干渉計の上部から 4 速度の中性子を入力し、それらに対応する 4 つの干渉計出力信号の適切なコンピネーションをとるのである。解析の結果、サニャック干渉計を用いても、重力波維持・変位雑音フリーの特性を持ち、応答関数のピークも 0.1~1 Hz にできることも確認した。また、その感度はマッハツェンダー干渉計の感度より最高感度がファクター約 1.5 改善することが分かった (図 1 4 参照)。

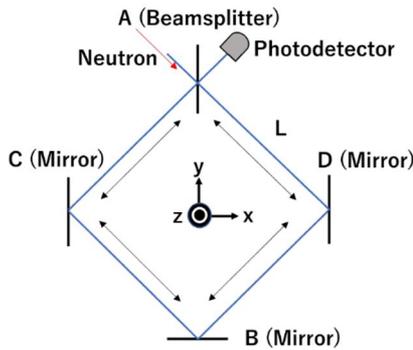


図 1 3 . 単一マッハツェンダーに 4 速度の中性子を片側から入射するタイプの変位雑音フリー中性子干渉計。(Yuki Kawasaki, et al., Class. Quantum Grav., 41 (2024) 117002)

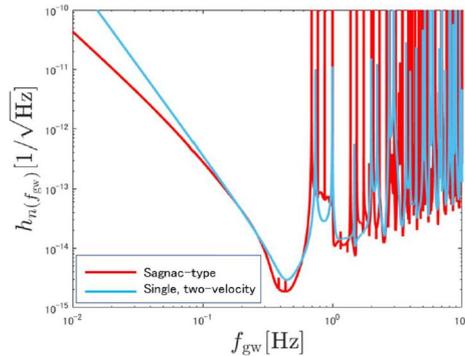


図 1 4 . 単一マッハツェンダー 4 速度片側入射型変位雑音フリー中性子干渉計の応答関数。(Yuki Kawasaki, et al., Class. Quantum Grav., 41 (2024) 117002)

(2) 実験

アルミ板アクチュエータのピエゾ素子に、100Hz, 150Hz, 250Hz, 300Hz の 50Vpp の電圧をかけ、それらの信号の初期位相を 45° ごとにずらして干渉計の出力信号を計測した。また、干渉計の 2 つの光路長の差は温度変化等の影響で、時間とともにわずかに変化していくので、それを知るため、各計測の前にアクチュエータに電圧をかけない状態でも干渉計の出力信号を計測した。例として、初期位相 0° で 300Hz の電圧をかける直前とかけた場合の干渉計信号をそれぞれ図 1 5 と図 1 6 に示す。

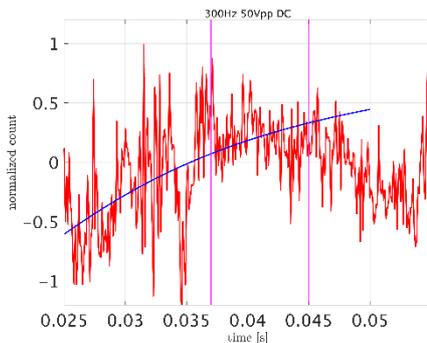


図 1 5 . 初期位相 0° で 300Hz の電圧をかける直前の干渉計信号。

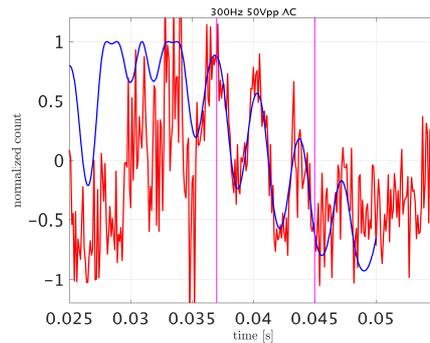


図 1 6 . 初期位相 0° で 300Hz の電圧をかけた場合の干渉計信号。

これらの周波数 4 種類、初期位相 8 種類、電圧あり・なしの 2 種類、合わせて 6 4 種類の干渉計信号を取得し、それらを組み合わせて、変位雑音フリー信号を合成した。そして、印加する変調信号の初期位相ごとに、変位雑音フリー信号を作成したところ、ビームスプリッターの変位雑音フリー信号が重力波模擬信号のみがある場合の信号と一致し、一方、ビームスプリッターの変位雑音のみがある場合の変位雑音フリー信号は完全に消えることが示された。

以上の結果により、変位雑音フリー中性子干渉計の原理が実験的に実証されたと考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Shoki Iwaguchi, Atsushi Nishizawa, Yanbei Chen, Yuki Kawasaki, Masaaki Kitaguchi, Taigen Morimoto, Tomohiro Ishikawa, Bin Wu, Izumi Watanabe, Ryuma Shimizu, Hirohiko Shimizu, Yuta Michimura, Seiji Kawamura	4. 巻 441
2. 論文標題 Displacement-noise-free neutron interferometer for gravitational wave detection using a single Mach-Zehnder configuration	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Phys. Lett. A	6. 最初と最後の頁 128150
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physleta.2022.128150	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

1. 著者名 Atsushi Nishizawa, Shoki Iwaguchi, Yanbei Chen, Taigen Morimoto, Tomohiro Ishikawa, Bin Wu, Izumi Watanabe, Yuki Kawasaki, Ryuma Shimizu, Hirohiko Shimizu, Masaaki Kitaguchi, Yuta Michimura, and Seiji Kawamura	4. 巻 105
2. 論文標題 Neutron displacement noise-free interferometer for gravitational-wave detection	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Phys. Rev. D	6. 最初と最後の頁 124017
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.105.124017	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

1. 著者名 Shoki Iwaguchi, Atsushi Nishizawa, Yanbei Chen, Yuki Kawasaki, Tomohiro Ishikawa, Masaaki Kitaguchi, Yutaka Yamagata, Bin Wu, Ryuma Shimizu, Kurumi Umemura, Kenji Tsuji, Hirohiko Shimizu, Yuta Michimura, Seiji Kawamura	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 2022年
3. 雑誌名 Phys. Lett. A	6. 最初と最後の頁 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 該当する

1. 著者名 Yuki Kawasaki, Shoki Iwaguchi, Tomohiro Ishikawa, Atsushi Nishizawa, Masaaki Kitaguchi, Yutaka Yamagata, Yanbei Chen, Bin Wu, Ryuma Shimizu, Kurumi Umemura, Kenji Tsuji, Hirohiko Shimizu, Yuta Michimura, Kazuhiro Kobayashi, Takafumi Onishi and Seiji Kawamura	4. 巻 41
2. 論文標題 Sagnac-type neutron displacement-noise-free interferometric gravitational-wave detector	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Class. and Quantum Gravity	6. 最初と最後の頁 117002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6382/ad42fa	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9件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Shoki Iwaguchi, Atsushi Nishizawa, Yanbei Chen, Yuki Kawasaki, Masaaki Kitaguchi, Taigen Morimoto, Tomohiro Ishikawa, Bin Wu, Izumi Watanabe, Ryuma Shimizu, Yuta Michimura, Yutaka Yamagata, Seiji Kawamura
2. 発表標題 Displacement-noise-free interferometer for gravitational wave detection at low frequencies
3. 学会等名 Gravitational Wave Advanced Detector Workshop (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川崎祐輝, 岩口翔輝, 石川智浩, 西澤篤志, Yanbei Chen, 北口雅暁, 山形豊, Wu Bin, 清水龍真, 梅村来未, 辻健志, 清水裕彦, 道村唯太, 川村静児
2. 発表標題 重力波検出のための変位雑音フリー中性子干渉計の開発 (6)
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岩口翔輝, 川崎祐輝, 石川智浩, 北口雅暁, 山形豊, 西澤篤志, Yanbei Chen, Wu Bin, 清水龍真, 梅村来未, 辻健志, 清水裕彦, 道村唯太, 川村静児
2. 発表標題 重力波検出のための変位雑音フリー中性子干渉計の開発 (7)
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岩口翔輝, 川崎祐輝, 石川智浩, 西澤篤志, 山形豊, 北口雅暁, 小林和宏, 大西崇文, Yanbei Chen, Wu Bin, 清水龍真, 梅村来未, 辻健志, 清水裕彦, 道村唯太, 川村静児
2. 発表標題 重力波検出のための変位雑音フリー中性子干渉計の開発(8)
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岩口翔輝, 森本泰玄, 石川智浩, Wu Bin, 渡辺泉実, 川崎祐輝, 清水龍真, 西澤篤志, 清水裕彦, 北口雅暁, 道村唯太, 川村静児
2. 発表標題 重力波検出のための変位雑音フリー中性子干渉計の開発(4)
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩口翔輝, 西澤篤志, 川崎祐輝, Yanbei Chen, 北口雅暁, 森本泰玄, 石川智浩, Wu Bin, 渡辺泉実, 清水龍真, 清水裕彦, 道村唯太, 川村静児
2. 発表標題 重力波検出のための変位雑音フリー中性子干渉計の開発(5)
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 内藤丈雄, 森本泰玄, 西澤篤志, 清水裕彦, 北口雅暁, 山田梨加, 渡辺泉実, 黒柳幸子, 石川智浩, 岩口翔輝, 川村静児
2. 発表標題 重力波検出のための変位雑音フリー中性子干渉計の開発(2)
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 森本泰玄, 内藤丈雄, 西澤篤志, 清水裕彦, 北口雅暁, 山田梨加, 渡辺泉実, 黒柳幸子, 石川智浩, 岩口翔輝, 川村静児
2. 発表標題 重力波検出のための変位雑音フリー中性子干渉計の開発(3)
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 内藤丈雄, 西澤篤志, 清水裕彦, 北口雅暁, 黒柳幸子, 山田梨加, 森本泰玄, 渡辺泉実, 川村静児
2. 発表標題 重力波検出のための変位雑音フリー中性子干渉計の開発(1)
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020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
---------	---------