

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：2021～2023

課題番号：21K18626

研究課題名（和文）周期的無重力レーザー干渉計型重力波検出器の開発

研究課題名（英文）Development of a periodically-free-falling laser interferometric gravitational-wave detector

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、干渉計の鏡を周期的に自由落下させ、低周波帯において感度を飛躍的に高める、いわゆるジャグリング干渉計型重力波検出器を開発することである。

理論面においては、ジャグリング干渉計の使用により、中間質量ブラックホール連星の準固有振動状態からの重力波検出など、サイエンスにおいて大きな進展が期待できることを導いた。

実験面においては、リニアステージを用いて鏡投げ上げ機構を製作し、鏡が実際に無重力状態になることを確認した。また、鏡の角度変化を抑え込み、干渉計のコントラストを維持できる状態まであと一桁と迫ることができた。

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、我々が開発したジャグリング干渉計は、従来の地上重力波検出器の低周波帯における感度を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、期待される感度と科学的成果が明らかになり、最も重要な特性が実験的に確認されたことで、ジャグリング干渉計の実現に向けた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 objective of this research is to develop a juggled interferometer-type gravitational wave detector that significantly enhances sensitivity at low frequencies by periodically allowing the mirrors of the interferometer to undergo free fall.

On the theoretical side, the use of a juggled interferometer is expected to lead to significant scientific advancements, such as the detection of gravitational waves from the quasi-normal modes of intermediate-mass black hole binaries.

On the experimental side, we constructed a mirror launching mechanism using a linear stage and confirmed that the mirrors indeed enter a state of free fall. Additionally, we managed to suppress changes in the mirror's angle, bringing us within an order of magnitude of maintaining the interferometer's contrast.

研究分野：重力波物理学

キーワード：重力波 レーザー干渉計 周期的無重力 一般相対性理論 ブラックホール ジャグリング干渉計 ジグリング干渉計

## 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、その実現には長い年月がかかり、また必要な経費も極めて大きい。そこで、2008年に川村によって考案され、2014年に我々のグループによりその特性が発表された(D Friedrich, et al, CQG 31 (2014) 245006)のがジャグリング干渉計である。

ジャグリング干渉計とは、干渉計の鏡を周期的に自由落下させ、地面振動雑音と懸架の熱雑音を取り除き、1~10 Hzの低周波帯における感度を飛躍的に高めるといふ世界に類を見ない独創的な手法である(図1参照)。2014年の研究では、“detrend”と呼ばれるデータ解析手法(毎回の自由落下運動において位置・速度の平均値を計算し、データから差し引く)を考案し、また簡易な理論的検討と、簡易な自由落下振動システムを用いた予備実験が行われただけであった。そこで、本研究では、ジャグリング干渉計について、その実現可能性を、理論・実験両面から本格的な検討を行うことを考えた。

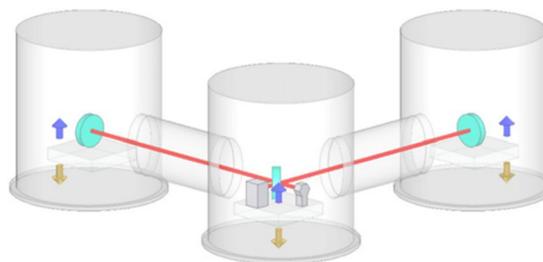


図1 周期的無重力干渉計型重力波検出器の概念図。(D Friedrich, et al., Class. Quantum Grav., 31 (2014) 245006)

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、ジャグリング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、ジャグリング干渉計の信号取得方法、データ解析方法、雑音、達成可能感度、そして、得られるサイエンスなどについて詳細な検討を行い、その有効性を評価する。また、実験面では、本格的なジャグリング干渉計のプロトタイプを設計・製作し、実際に鏡を無重力状態にし、干渉させることができることを確認し、ジャグリング干渉計を実現していく上で様々な問題点を洗い出すことである。

## 3. 研究の方法

### (1) 理論

まず、検出器自体の動作に関して理論的な検討を行った。特に投げ上げ周期によって決まるジャグリング周波数より低い周波数において、detrendにより感度がどのようになるかの検討を行った。そして、その結果に基づき、重力波検出器としての達成可能な感度曲線を求めた。また、ジャグリング干渉計に特有な信号取得方法についても検討し、簡易でありながら質の高い信号取得方法を考案した。

次に、達成可能な感度に基づき、得られるサイエンスを検討した。具体的には、大質量のブラックホール連星の合体後の準固有振動からの重力波、プランク・ディッケ理論の検証、原始ブラックホールの探索についての詳細な検討を行った。

### (2) 実験

まず、ジャグリング干渉計のプロトタイプを設計・製作した。図2に示すように、真空容器をリニアステージの可動部に設置する。真空容器の中に2枚の鏡とビームスプリッターからなるマイケルソン干渉計を組む。隣接する光学定盤の上に設置されたレーザー光源から、光ファイバーを通してレーザー光を真空容器の中のマイケルソン干渉計に入射する。鏡やビームスプリッターは3面が接する形で台座に着座させる。この状態で、リニアステージを上下に振動させ、上面で鏡やビームスプリッターが台座から浮き上がり無重力状態になるようにする。その状態

で干渉計の信号を測定することを目指す。

この実験の遂行のため、以下のような詳細な準備を行った。まず、鏡やビームスプリッターが自由落下中に角度がどの程度変化するかを測定し、マイケルソン干渉計の2つの光がきちんと干渉し90%のコントラストが実現できるかどうかの測定を行い、不十分であればさまざまな手法で改善を行う。次に、リニアーステージの動作中に光ファイバーからの出射ビームの角度揺れが十分に小さいかどうかの測定を行い、不十分であればさまざまな手法で改善を行う。

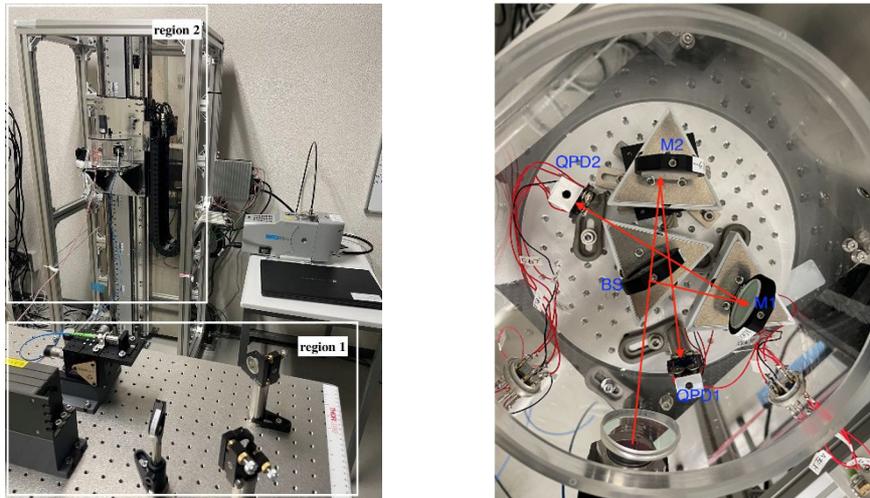


図2 . ジャグリング干渉計のプロトタイプ。左：リニアーステージとレーザー光源。右：真空容器内のマイケルソン干渉計。

#### 4 . 研究成果

##### (1) 理論

まず、データ取得の理論的研究について述べる。ジャグリング干渉計においては、通常の重力波検出器と違ってフリンジを制御するのは簡単ではない。その理由は、鏡が無重力状態になっている間に制御を完成させなくてはならないからである。そこで我々は、フリンジ制御をせずに、安定な信号・雑音比を確保する手法を考案した。

図3に示すように、マイケルソン干渉計のシンメトリックポートとアンチシンメトリックポートにおいて、それぞれ光検出器で直接取得した信号と位相変調復調法により取得した信号の2つを取得する。これらを適切に組み合わせることにより、フリンジによらない光路長差信号を取得できる。そして、その信号の、重力波に対する信号雑音比は、通常の干渉計においてダークフリンジに制御した場合と比べて僅か2倍劣るだけであることを解析的に示し、この手法の有効性を示した。

また、detrend という信号処理により、鏡の投げ上げの時間に対応する、ジャグリング周波数より低い周波数で、重力波信号が小さくなってしまう効果について、詳細な検討を行った。その結果、確かに信号は小さくなるが、ジャグリング干渉計に存在する雑音(例えば重力場雑音)も小さくなり、信号雑音比は維持されることが分かった。したがって、図4に示すように、ジャグリング干渉計を使用すると、地面振動雑音と懸架の熱雑音を除去でき、2 Hz以下の低周波帯で飛躍的な感度改善が達成できることを示した。

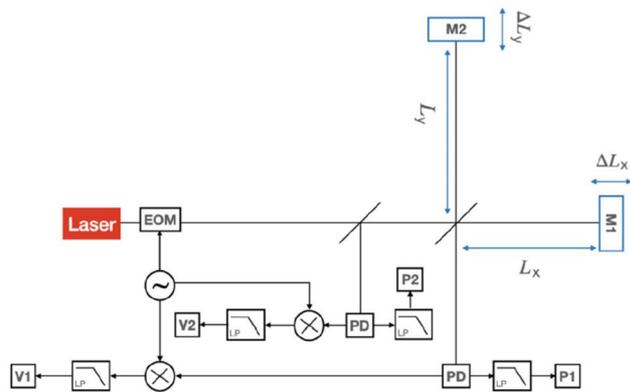


図3 . ジャグリング干渉計の信号取得方法。(Bin Wu, et al., Phys. Rev. D, 106 (2022) 042007)

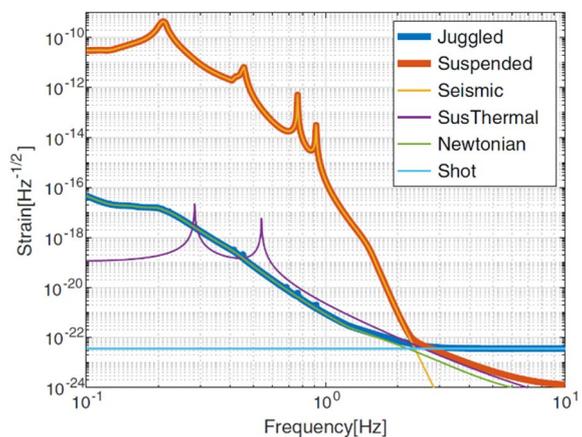


図4 . ジャグリング干渉計と懸架鏡を用いた通常の地上検出器の達成可能感度の比較。(Bin Wu, et al., Phys. Rev. D, 106 (2022) 042007)

次に、この感度が達成された場合に、どのようなサイエンスが可能になるかを調べた。まず、大質量のブラックホール連星の合体後の準固有振動からの重力波についてである。図5に、地球から6 Gpc離れた $1.5 \times 10^4 M_{\odot}$ のブラックホールの準固有振動からの重力波信号の強さと、ジャグリング干渉計及び懸架鏡型干渉計の感度を示す。これによると、0.5 Hz~1.7 Hzにおいては、懸架鏡型干渉計では重力波の観測ができないのに対して、ジャグリング干渉計では非常によい信号雑音比( $\sim 200$ )で観測可能であることが分かる。これにより、強重力場中での重力理論の検証が、よりよい精度で実現可能となる。次に、フランス・ディッケ理論の検証についてである。図6に、地球から78 Mpc離れた中性子星と $10 M_{\odot}$ および $1,000 M_{\odot}$ のブラックホールからなる連星の公転運動からの重力波信号の強さと、ジャグリング干渉計及び懸架鏡型干渉計の感度を示す。これによると、それぞれの質量のブラックホールに対して、0.8 Hz~1.9 Hzおよび0.6 Hz~1.8 Hzにおいては、懸架鏡型干渉計では重力波の観測ができないのに対して、ジャグリング干渉計では非常によい信号雑音比( $\sim 10$ )で観測可能であることが分かる。これにより、フランス・ディッケ理論のパラメーターである、 $\omega_{BD}$ に対して、Cassini衛星によって与えられた上限値を上回る精度が得られることが期待できることが分かった。最後に、原始ブラックホールの探索についてである。図7に、原始ブラックホールがダークマターの正体であると仮定した時に、その原始ブラックホールを生み出す、初期宇宙における密度揺らぎから発生する重力波信号の強さと、ジャグリング干渉計及び懸架鏡型干渉計の感度を示す。これによると、0.9 Hz~1.3 Hzにおいては、懸架鏡型干渉計では重力波の観測ができないのに対して、ジャグリング干渉計では観測可能であることが分かる。これにより、原始ブラックホールの探索に関する重要な知見が得られることが期待できる。以上のように、ジャグリング干渉計を用いることにより、重力波天文学が大きく発展することを定量的に明らかにした。

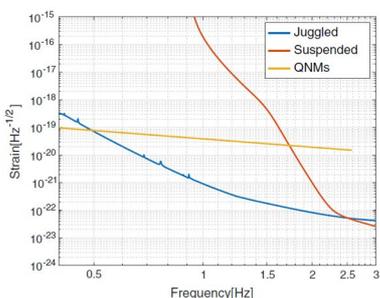


図5 . ブラックホールの準固有振動からの重力波。(Bin Wu, et al., Phys. Rev. D, 106 (2022) 042007)

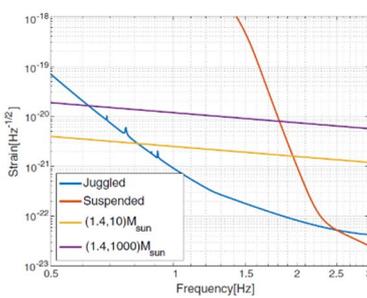


図6 . 中性子星・ブラックホール連星からの重力波。(Bin Wu, et al., Phys. Rev. D, 106 (2022) 042007)

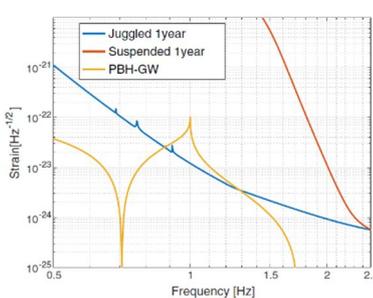


図7 . 原始ブラックホール関連の重力波。(Bin Wu, et al., Phys. Rev. D, 106 (2022) 042007)

## (2) 実験

まず、1枚の鏡を台座に載せ、真空容器を真空( $\sim 200$  Pa)に引き、リニアーステージによる投げ上げを行った。図8に示すように、リニアーステージを上下に振動させ、真空容器の高さが中間点に達した時に、リニアーステージの動きを急減速させる。すると、鏡が投げ上げされ、無重力(自由落下)状態になる想定である。この動作を実際に行ったところ、鏡が確かに台座から完全に浮き上がり、無重力状態になることを確認した。しかし、鏡の姿勢は、自由落下している間に、目視でも確認できるほど変化し、リニアーステージの動きをどのように設定しても、その問題を解決できなかった。そこで、図9に示すように、リニアーステージの動きを、投げ上げ方式ではなく、上部で一旦停止した後に下方に動かす方式に変えた。リニアーステージを鏡の自由落下の加速度より素早く下方に動かすことにより、相対的に鏡を台座から浮き上がらせるのである。この方式により、自由落下中の鏡の姿勢は目視では変化が分からないほどに安定した。図10に2枚の鏡・台座システムの自由落下中での姿勢を表す写真を示す。2枚の鏡が台座から均

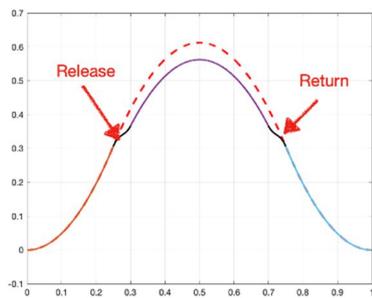


図8 . リニアーステージの投げ上げ動作とそれに伴う鏡の動き。

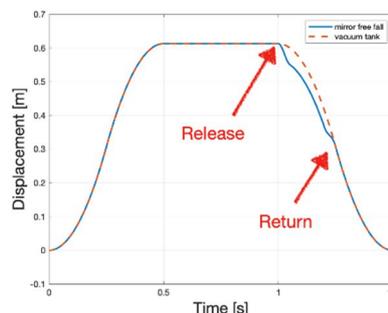


図9 . リニアーステージの上部で一旦停止のあとの下方動作とそれに伴う鏡の動き。

等に浮き上がっている様子が分かる。この間の鏡の角度変化をレーザービームと4分割フォトダイオードを用いて精密に測定したところ、角度変化が小さい時は $1 \times 10^{-3}$  rad (ただし、悪い時は $8 \times 10^{-3}$  rad)であった。干渉計のコントラストを90%に維持するための要求値は $1 \times 10^{-4}$  radであるため、角度変化が小さい時に限って言えば、要求値まであと1桁と迫る安定度が実現できていることになる。

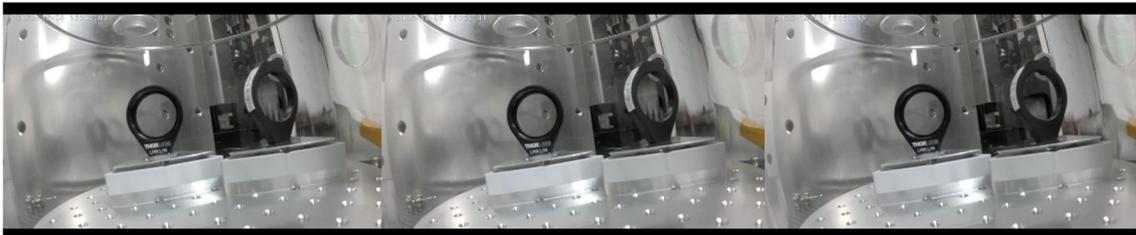


図10．リニアーステージの上部で一旦停止したあと下方動作した時の、自由落下中の鏡の姿勢。

なお、この問題を解決するため、現在、鏡のリリースをピエゾ素子を使ってより精密に行う方式を開発中である。

上記の実験を行っている間に、判明したもう一つの問題点はリニアーステージの動きに伴うレーザービームの揺らぎである。光ファイバーの出射端は真空容器の設置されているブレッドボードに設置されているが、リニアーステージの動きにより出射端が機械的に振動し、そこから出たレーザービームの方向が揺らいでしまうのである。これも、出射ビームの位置を4分割フォトダイオードを用いて精密に測定したところ $2.5 \times 10^{-3}$  radであった。これに関しては、出射端をよりしっかりと固定するなどの対策を施し $8.6 \times 10^{-4}$  radに改善された。

なお、この問題をより改善するため、現在、反射鏡を能動的に制御して、レーザービームの揺れを抑え込む方式を開発中である。

### (3) 本研究から派生した新方式

本研究を行っている中で、鏡の投げ上げ周期を非常に短くすることにより、自由落下中での鏡の角度変化の問題やレーザービームのトラッキングに伴う振動の問題を除去できるのではないかという考えを思いついた。そして、鏡の投げ上げ周期に対応するジャグリング周波数より下の周波数においても、信号雑音比が変化しないことから、原理的な問題はないように思えた。また、ジャグリング周波数を100 Hzもの高い周波数にすることで、リニアーステージそのものも必要なくなり、ピエゾ素子を用いた投げ上げシステムで十分である。本方式を、ジグリング干渉計と名付けその検討も行ってきた。これまでのところ、detrendのデータ処理による非線形な操作に伴い、ジャグリング周波数付近の雑音が、低周波帯に周波数のマイナス2乗の依存性をもって降り注ぐという効果が存在することが分かった。

なお、この問題を回避するため、現在、さまざまなデータ解析の手法を検討中である。

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 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Bin Wu, Tomohiro Ishikawa, Shoki Iwaguchi, Ryuma Shimizu, Izumi Watanabe, Yuki Kawasaki, Yuta Michimura, Shuichiro Yokoyama, and Seiji Kawamura	4. 巻 106
2. 論文標題 Conceptual design and science cases of a juggled 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 42007
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.106.042007	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7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Bin Wu, T. Ishikawa, S. Iwaguchi, R. Shimizu, Y. Kawasaki, Y. Michimura, S. Yokoyama, R. Nishimura, S. Kawamura
2. 発表標題 Juggled interferometer for gravitational wave detection
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 梅村来未, Wu Bin, 清水龍真, 石川智浩, 岩口翔輝, 川崎祐輝, 辻健志, 西村良太, 道村唯太, 横山修一郎, 川村静児
2. 発表標題 重力波検出のためのジャグリング干渉計の開発(3)
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 WU Bin, 清水龍真, 梅村来未, 石川智浩, 岩口翔輝, 川崎祐輝, 辻健志, 西村良太, 道村唯太, 横山修一郎, 川村静児
2. 発表標題 Juggled interferometer for gravitational wave detection (4)
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Wu Bin, 清水龍真, 梅村来未, 石川智浩, 岩口翔輝, 川崎祐輝, 辻健志, 西村良太, 道村唯太, 横山修一郎, 川村静児
2. 発表標題 Juggled interferometer for gravitational wave detection (5)
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, Wu Bin, 清水龍真, 梅村来未, 石川智浩, 川崎祐輝, 辻健志, 西村良太, 道村唯太, 横山修一郎, 川村静児
2. 発表標題 重力波検出のためのジャグリング干渉計の開発(6)
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Bin Wu, Tomohiro Ishikawa, Shoki Iwaguchi, Izumi Watanabe, Yuki Kawasaki, Ryuma Shimizu, Yuta Michimura, Shuichiro Yokoyama, Seiji Kawamura
2. 発表標題 Juggled interferometer for gravitational wave detection (1)
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Bin Wu, Tomohiro Ishikawa, Shoki Iwaguchi, Izumi Watanabe, Yuki Kawasaki, Ryuma Shimizu, Yuta Michimura, Shuichiro Yokoyama, Seiji Kawamura
2. 発表標題 Juggled interferometer for gravitational wave detection (2)
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2022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
---------	---------