

令和 6 年 5 月 29 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H00680

研究課題名（和文）第三世代重力波望遠鏡の迅速な光学的性能回復による観測不能時間の改善

研究課題名（英文）Duty cycle enhancement of observation using rapid recovery technique for cryogenic mirror performance in the 3rd generation gravitational wave detectors

研究代表者

三代木 伸二（Miyoki, Shinji）

東京大学・宇宙線研究所・教授

研究者番号：20302680

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 35,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、予測できない重力波を待ち受ける望遠鏡として、その検出の大きな機会損失を発生させ、かつ、LIGO、Virgo、KAGRAの同時観測で求められる三台稼働状況も損なわれることで、重力波源の位置決定精度の劣化につながる問題を解決するために、低温鏡を用いたKAGRAの重力波望遠鏡の観測不能時間を短縮する試みとして、まずは、昇温過程を経ず、波長3マイクロメートルの赤外超短パルスレーザーの集中的照射による水分子の瞬間光刺激脱離を目指す一方、バックアップとして、昇温過程を短縮化するために、炭酸ガスレーザーにより基材を直接昇温させる方法を施行することで、鏡の低損失特性を維持していくこと目指した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

KAGRAにとどまらず、ヨーロッパやアメリカの次期重力波望遠鏡計画であるEinstein Telescope 計画やCosmic Explorer 計画、及び、その前段階のVoyager計画においても想定されている、低温鏡を用いた重力波望遠鏡計画にかならず付随する、低温鏡へのガス分子吸着とそれによる、鏡の低損失特性の劣化という共通の問題に対する解決策の一端を示すことができ、これらの次期計画の実現性を担保する貢献ができた。

研究成果の概要（英文）：A gravitational wave telescope with a cryogenic mirror such as KAGRA requires periodic recovery work of the mirror's low-loss characteristics. However, as a telescope that awaits unpredictable gravitational waves, this work causes a significant opportunity loss in the detection of gravitational waves and also a degradation in the accuracy of the determination of the position of the gravitational wave sources because the LIGO, Virgo, and KAGRA simultaneous observations will be also lost. To solve this problem, first, we aim to achieve instantaneous photo-stimulated desorption of water molecules by concentrated irradiation of ultrashort infrared laser pulses with a wavelength of 3 micrometers without a heating process, and as a backup, we will shorten the heating process by directly heating the substrate material with a CO2 gas laser. The goal was to maintain the mirror's low-loss characteristics.

研究分野：重力波物理学

キーワード：重力波 低温吸着 光学損失 光刺激脱離 昇温脱離

1. 研究開始当初の背景

2015年9月14日に、史上初めて、アメリカの重力波望遠鏡(Advanced-LIGO)が連星ブラックホールの合体からの重力波を検出した。これは1915年にアインシュタインの一般相対性理論で予測された重力波を直接的に検証した偉業であるとともに、ブラックホール、及び連星ブラックホールがこの宇宙に存在することの直接的証明でもある。さらにその後も4つの連星ブラックホール合体からの重力波の検出により、非常に強い重力場における一般相対性理論の正しさが強く示唆され、また、そのブラックホール連星の起源に関する宇宙論的考察も活発化し、重力波による全く新しい天文学が幕を切って落とされた。さらに、その後、GW170817という連星中性子星合体からの重力波の検出にも成功し、重力波の進行速度がほぼ光速であるとの予想への極めて強い制限、中性子星の状態方程式の傾向、イベントレート予測の補強、独立な手法によるHubble-Lemaître定数への制限という全く新しい知見が得られただけでなく、電磁波観測母体による重力波発生天体の特定にも成功し、宇宙における重元素合成過程の解明に繋がる重要な知見の獲得にも成功した。これにより、重力波観測とその他分野への広がり、そして統計的に優位な結論を得るためのさらに多くの重力波の検出と、将来の精密波形観測への期待はゆるぎないものとなっている。但し、この重力波の直接検出は、 10^{-22} [rms]の重力波感度を目指した第二世代の重力波望遠鏡を完成させる途上でなされたため、今後10年程度の見通しとしては、Advanced-LIGOやAdvanced-VIRGOでは、この目標感度を目指すさらなる開発と調整が行われ、KAGRAも同等の感度を目指した建設と改良を行うことで、断続的に三拠点による重力波同時観測の実現を目標にしており、より具体的には、2019年中の03という同時観測を行い、その後も、04、05という同時観測が予定され、観測シナリオとして合意が得られている。また、この益々高まる宇宙物理・天文学分野からのより多くかつ精度の高い重力波観測への期待を背景に、第二世代重力波望遠鏡より10倍程度感度を改善し、1000倍程度の観測事象と波形の精密観測を目指した第三世代重力波望遠鏡(ヨーロッパのEinstein Telescope(ET)計画、アメリカのCosmic Explorer(CE)計画など)の基本設計に関する考察も既に行われており、かつそれは、LIGO、VIRGO、KAGRAをはじめとする世界の重力波望遠鏡計画に携わる研究者の代表を集めたDawn会議(すでに4度開催され本申請者がKAGRA代表の一人として2度出席)において、国際的な一体的な組織の元、効率よく協力しながら行おうという議論も既に行われている。しかし、その第三世代重力波望遠鏡の感度達成には、主に三つの雑音(低周波:地面振動と重力雑音、中周波:熱雑音、高周波:散乱雑音)の除去が必要であるが、そのうちの一つが鏡やそれを懸架する線状素材の熱雑音である。その為、その基本設計には、鏡の基材を従来の熔融石英からサファイアやシリコンに、そして、その鏡に施されるレーザー光用の薄膜コーティングに関しては、従来のTa₂O₅/SiO₂から結晶化AlGaAsへ、という40年余にわたって培われた既存の技術の放棄とテクニカルジャンプが提案されているが、それだけでは目標への到達は困難である。そのため、これらに追加して必須と考えられている手段が鏡の低温化である。これらの将来像の内、すでに、サファイア基材の鏡の利用と鏡の低温化で世界をリードしているのが、申請者の東大宇宙線研と研究分担者の高エネルギー加速器研究機構が中心となって開発してきた低温レーザー干渉計システムであり、特にET計画とは、密接な研究協力体制のもと、第三世代重力波望遠鏡における低温鏡技術の開発を行っている。

2. 研究の目的

その低温鏡の導入において問題となっているのが、鏡自身が約20K程度であることによる、残留ガス、主に水分子の表面吸着とその積層による超低損失鏡の反射率の劣化がもたらす重力波望遠鏡の感度低下である。その回復には、①鏡自身を真空中で水分子が脱離する温度付近まで全体を自然・加熱昇温し再冷却する、②水分子が吸収特性を持つ遠赤外線連続波ハイパワーレーザーを真空タンク外部より鏡表面に照射することにより鏡表面を直接昇温し吸着分子を脱離させ、ヒートスイッチなどの直接的な低温体と鏡の再接触により再冷却の高速化を図る、が主に考えられてきた。①では、KAGRAの場合、昇温と再冷却で約2か月かかるため、その期間は観測不能となる。②においても、氷が真空中で昇華脱離する130K以上までの昇温が必要なため、再冷却も含めて2~3日の観測不能期間が生じると考えられる。この継続的観測不能期間は、いつ発生するかわからない重力波イベントを待ち受ける望遠鏡としては大きな機会損失であることはもちろんのこと、重力波発生源の位置決定精度の向上のため、LIGO、Virgo、KAGRAの同時観測で求められる三台稼働状況を損ない、電磁波観測母体への位置情報精度の劣化につながる。本研究では、この観測不能時間を根本的に短縮するために、昇温過程を経ず、波長3マイクロメートルの赤外超短パルスレーザーの1ヶ月程度の間隔を置いての集中的照射による水分子の瞬間光刺激脱離、一方、真空紫外線の照射による水分子の脱離の促進、及び、副次的効果としての表面汚染物質の分解をうながすことで、鏡の低損失特性を維持していくことを目標としている。

3. 研究の方法

(研究体制概略) 本研究では、重力波望遠鏡に必須の高品質鏡の開発と評価、レーザー干渉計制御、低温工学と真空工学の研究者、そして、論文[1]を創出した大学院生が協力しながら、超短パルスレーザー、及び、真空紫外光線の照射による低温鏡吸着残留ガスの除去手法の研究開発を行う。

(研究手法) 本研究に先立ち、冷却鏡の表面に吸着する残留ガス(主に水分子)の詳細な吸着過程を調査する実験を、重力波望遠鏡 KAGRA のクライオスタット実機を利用し行った。結果、真空度が 6×10^{-7} [Pa] と目標真空度 6 倍悪い真空度において、水分子の積層が、あたかも誘電膜のように機能し、その水分子膜と既存の Ta₂O₅/SiO₂ 膜との光干渉効果により、鏡の反射率が変化、つまり、光共振器のフィネスの変化 (Fig. 2) となって現れていることが判明し、さらに、その振動中心値が吸着分子の損失により低下している様子が確認された。本結果は、我々の開発した光計測系が、ナノメートルからマイクロメートルレベルの吸着積層変化を検出できることを立証するものである。この計測系を用いることにより、逆に、パルスレーザーの照射、及び、真空紫外光の照射による低温鏡の反射率の変化をモニターすることができ、かつ、そのような高エネルギー光照射による既存誘電多層膜への影響も同時に調査することが可能となる。本吸着膜厚計測系の実験概要図を Fig. 3 に記す。クライオスタット真空槽内の二重の熱輻射シールドの中に、計測対象となる、低温化される鏡二枚で構成される光 FP 共振器が設置されている。鏡の反射率を、99.993%程度(フィネスで 45000 程度)という超高反射・低損失鏡にすることで、わずかな光損失を敏感にそのフィネス(光滞在時間)の変化として捉えることができる。光共振器は、外乱防止と適度な光滞在時間(30 マイクロ秒程度)の確保から長さ 30cm のステンレスのスペーサーの両端に押し付け固定されている。さらに、一枚の鏡は、クライオスタットに開いた穴とその先に装着されている長さ 12m の断熱輻射シールドの方端常温開口部が見通せる位置に設置され、かつ、その共振器ステンレス筐体にも適切な側面開口部を設けることで (Fig. 4)、その常温開口部の残留ガス分子が、低温鏡に到達し得る構造となっている(ただし、本研究では、このダクトは不要)。この低温 FP 共振器へのレーザー入射光学系はクライオスタットの直近の安定な定盤の上に展開する。モニターレーザー光線波長は、重力波望遠鏡で使用されるのと同じ 1064nm を選択している。光共振器の共振制御には、一般的な Pound-Drever-Hall 方を用いる。レーザーから出た光は、イソレーターを通過後、音響光学素子(AOM)により、直進 0 次光と回折 1 次光に分けられる。1 次光が光 FP 共振器に導入され、かつ AOM による 1 次光の On/Off により光 FP 共振器内の光量減衰過程を計測し (Fig. 5)、鏡の反射率推定を行う。クライオスタット内部へのレーザー光線の導入のために、真空槽、二重の熱輻射シールドには、直線状に並ぶ光学窓がそれぞれに装着されており、その部位は冷却されているので、そこからの熱輻射や残留ガスの侵入は防ぐようになっている。共振器の共振状態のモニターのために、共振器透過光をクライオスタット内部で一度反射し、外に導き光量や横モードを判定する CCD カメラ系を含む出射光学系もクライオスタット直近の定盤上に用意されている。先行研究により、既に、この KAGRA とほぼ同じ構造と入射光学系を持つテストベンチ計測系が構築されており、本実験は、まずはこのテストベンチを用いて本申請研究を行う。

但し、本申請研究では、Fig. 6 の既存テストベンチ設備に関し、以下の改良を行う。まず、さらに微小な積層変化をとらえる必要性から、共振器に利用する鏡の反射率を 99.997~99.999% 反射率を持つ鏡を用意する。結果得られるフィネスは、10 万~30 万と高くすることができ、既存より 1/3 の積層分解能獲得できる。そのような鏡の候補としては、CMS 社の結晶化 GaAs/AlGaAs を薄膜とした鏡が存在する。ただし、既存の冷凍機の振動とそのクライオスタットへの伝導により、現状のフィネスの高い光共振器の共振制御が困難であることが判明しており、その解決のため、低振動型の冷凍機の導入、あるいは、冷凍機の振動がクライオスタットに伝わらない免振伝導装置の導入を行う。また、現クライオスタットは、コンダクタンスの問題から、本実験に必要な真空度である 10^{-7} [Pa] が得られないため、コンダクタンスの改造および、排気系の増強と同時に免振構造の導入を行う。

このように、現システムの改良を行ったうえで、外部からの、パルスレーザーの導入を行う。候補としては、波長 2.95 マイクロメートルのナノ秒パルスを 16mJ のエネルギーで発生させられる OPTEK 社 RADIANT2731 などがある。パルスレーザーの導入は、出射側の光学系にダイクロイック鏡を挿入し、波長 1 マイクロメートルは透過し、波長 3 マイクロメートルは反射させることで出射光学系から導入する。FP 共振器を構成する低温鏡面において、その照射領域を調節するためのビーム径調整光学系も用意する。また、被対象低温鏡からの脱離物が相対する低温鏡に飛散しないようにするために、FP 共振軸に一時的に遮蔽物を挿入する磁石コイル駆動系による機構を導入する。一方、真空紫外光の導入は、クライオスタット真空槽の別窓から導入し、側面が開いた光共振器の常温領域に配向している側とは逆側から照射する構造とする。候補としては、東京インストルメント社・高輝度真空紫外光源・ELux121 などがある。これらの光線照射による脱離による反射率の改善の傍証として、所有している質量分析器により、放出ガス成分の把握も行う予定である。負荷エネルギー、照射時間、照射密度に関し、最適な条件を見出す試行錯誤を行った後、良好な結果が得られたのちは、KAGRA 重力波望遠鏡のサイトに照射系のみ持ち込み、新たな入射光学系を構築し、KAGRA の低温鏡においてその性能実証を行いたい。

4. 研究成果

2019 度は、現在 KAGRA 重力波望遠鏡で用いられている低温鏡の構成にならない、サファイア鏡基材の上にコーティングされた Ta₂O₅/SiO₂ 誘電多層膜で構成される高性能鏡に吸着した水分子の低温における脱離エネルギーを計測するための実験系の構築を行った。低温系の生成装置として、すでに所有のクライオスタット装置を利用した。現在、一重の熱輻射シールドしかないため、効率の良い迅速な冷却と、サンプル基材のより低温状態の創出のため、サンプル基材周りにも熱輻射シールドを設け、二重シールドとすることで、冷却速度とより低温状態が実現できる改善をした。具体的には、2 段式の GM 型冷凍機を用意し、その 1 段目の 40K 部分を外側シールド、その 2 段目の 4K 部分を内部熱シールドに接続されたクライオスタット真空槽を構成した。結果、真空度は、 10^{-4} Pa 程度が実現でき、外側シールドは、80K 程度に、内部シールドは 10K 程度に冷却できることを確認した。サンプル鏡として、直径 1 インチ、厚み 5mm 程度の単結晶サファイア基材を用意した。その冷却と昇温の制御のため、鏡は、同径で長さ 5cm 程度の銅製の筒の円面一端に熱伝導を十分とれるようグリスを介し全面貼り付け、かつ、この鏡のついた銅体は、低熱アンカーからの熱伝導を阻害させるため、ステンレスの細い棒のみで支持されるように構築した。この銅体、つまりサンプルの冷却は、その一端が低温熱アンカーに固定された、99.9999%の純度のアルミ細線の束でできた屈曲可能で熱伝導率の高い熱リンクを機械的に接触または分離させる熱スイッチ機構で行った。さらに、この実験装置の構成に必要な、波長 3 μ m のレーザー光源を調達し、それを運用するための窒素供給系も構築した。

2020 年度は、コロナ禍による、厳しい外出および移動の制限、それから世界的に派生した、生産活動と物流の混乱により、令和 2 年 11 月までに、レーザーシステムの構築、真空システムの構築を行い、令和 3 年 3 月までに、鏡表面汚染再現装置の構築、一定の研究成果とりまとめを行う予定までには到達できなかったが、その中においても下記の活動を行った。引き続き、サファイア鏡基材の上にコーティングされた Ta₂O₅/SiO₂ 誘電多層膜で構成される高性能鏡に吸着した水分子の低温における脱離エネルギーを計測するための実験系の構築を行った。特に真空タンク外光学系の構築を行った。光路中の水分による吸収の影響を極力低減するために、光学系のコンパクト化を図った。さらに、乾燥窒素の消費を低減し、実験室への放出による窒素中毒への懸念を根絶するため、空間閉回路を作成したが、光学部品そのものから放出される微小な水分が残存し、さらなる対策が必要となった。前年度二重シールド化したことで、冷却速度とより低温環境を改善した装置の熱負荷試験を行い、本実験に必要な冷却負荷性能を持つことが確認された。同時に真空リーク試験も行い、 10^{-8} Pa \cdot sec レベルでリークがないことも確認され、本実験の試験環境要求を満たすことも確認した。さらに、水分子そのものではなく、水分子が付着したサファイア鏡基材の昇温に焦点を置いた水分子脱離化実験に必要なレーザー光学系とそれを KAGRA 重力波望遠鏡に設置する場合の具体的配置案の検討を開始した。

2021 年度も、コロナのさらなる感染拡大により継続された、外出および移動の制限、それから世界的に派生した、生産活動と物流の混乱により、真空装置の改良設計を行い、令和 4 年 3 月までに、真空装置の改良部分の発注、真空装置の改良部分の構築を行う予定までには到達できなかったが、その中においても下記の活動を行った。引き続き、サファイア鏡基材の上にコーティングされた Ta₂O₅/SiO₂ 誘電多層膜で構成される高性能鏡に吸着した水分子の低温における脱離エネルギーを計測するための実験系の構築を行った。特に本年度は、真空タンク内光学系の構築を行った。さらに、前年度懸案となった、乾燥窒素の消費を低減し、実験室への放出による窒素中毒への懸念を根絶するための空間閉回路を作成したが、光学部品そのものから放出される微小な水分が残存する問題に対しベイクング等の手法で改善を行った。前年度までに構築した真空系に対し、さらに、外部光軸常板上光学系も真空内に内包し、極力窒素ガス中を通過しない校正とすべく、真空系の改良設計を行った。さらに、水分子そのものではなく、水分子が付着したサファイア鏡基材の昇温に焦点を置いた水分子脱離化実験に必要なレーザーとそのレーザー光学系を新たに構築した。

2022 年度から 2023 年度にかけては、引き続き、サファイア鏡基材の上にコーティングされた Ta₂O₅/SiO₂ 誘電多層膜で構成される高性能鏡に吸着した水分子の低温における脱離エネルギーを計測するための実験系の構築と改造を行った。前年度までに構築した水分子への直接的な吸収を引き起こす波長 3 μ m 光学系に加え、鏡基材への直接的熱吸収による基材自身の急速昇温を目指した波長 1.5 μ m 光学系の光学系を、前者と併用できる形で構築した。今までは、鏡へ入射した重力波望遠鏡で使用される波長 1064nm のレーザー光線を、3 μ m 光学系からのレーザー光線と同じ位置に入射することで、鏡の表面の水分子の脱離状態を 1064nm レーザー光線の透過光量の増加をもってモニターしていたが、それに加え、真空装置内の水分子の脱離状況をモニターするための質量分析器を設置し、水分子の脱離の状況をガス量の視点からもモニターできるように改善し、透過率の改善と脱離分子量の関係を見いだせるようにした。さらに、重力波望遠鏡では、

鏡基材は、振り子状に懸架され、熱伝導体による熱伝導に関しては孤立している系になっているため、それを再現するように、サファイアファイバーを使って懸架し、現実に近い設定を施した。また 1.5 μm 系のレーザーによる基材の直接昇温に関し、入射レーザーパワーと基材の昇温状況の関係が見いだせるよう、温度モニター系の構築も行った。さらに、漂着物があると、1064nm レーザー照射に対し、前方散乱も観察されることが予想されるため、その前方散乱をモニターするための真空内用の光検出器の設置も行った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計23件（うち査読付論文 22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 Akutsu T, et al.	4. 巻 2021
2. 論文標題 Overview of KAGRA: Calibration, detector characterization, physical environmental monitors, and the geophysics interferometer	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptab018	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 Abbott R, et al.	4. 巻 913
2. 論文標題 Diving below the Spin-down Limit: Constraints on Gravitational Waves from the Energetic Young Pulsar PSR J0537-6910	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L27 ~ L27
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/abffcd	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 Abbott R, et al.	4. 巻 915
2. 論文標題 Observation of Gravitational Waves from Two Neutron Star Black Hole Coalescences	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L5 ~ L5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ac082e	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 Abbott R, et al.	4. 巻 126
2. 論文標題 Constraints on Cosmic Strings Using Data from the Third Advanced LIGO-Virgo Observing Run	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 241102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.126.241102	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 Abbott R, et al.	4. 巻 104
2. 論文標題 Search for anisotropic gravitational-wave backgrounds using data from Advanced LIGO and Advanced Virgo's first three observing runs	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 22004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.104.022005	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 Abbott R, et al.	4. 巻 104
2. 論文標題 Upper limits on the isotropic gravitational-wave background from Advanced LIGO and Advanced Virgo's third observing run	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 22004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.104.022004	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 Abbott R, et al.	4. 巻 104
2. 論文標題 All-sky search for continuous gravitational waves from isolated neutron stars in the early O3 LIGO data	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 82004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.104.082004	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 Abbott R, et al.	4. 巻 104
2. 論文標題 All-sky search for long-duration gravitational-wave bursts in the third Advanced LIGO and Advanced Virgo run	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 102001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.104.102001	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 Abbott R, et al.	4. 巻 921
2. 論文標題 Searches for Continuous Gravitational Waves from Young Supernova Remnants in the Early Third Observing Run of Advanced LIGO and Virgo	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 80 ~ 80
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac17ea	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 Abbott R, et al.	4. 巻 921
2. 論文標題 Searches for Continuous Gravitational Waves from Young Supernova Remnants in the Early Third Observing Run of Advanced LIGO and Virgo	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 80 ~ 80
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac17ea	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 Abbott R, et al.	4. 巻 922
2. 論文標題 Constraints from LIGO O3 Data on Gravitational-wave Emission Due to R-modes in the Glitching Pulsar PSR J0537?6910	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 71 ~ 71
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac0d52	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 Abbott R, et al.	4. 巻 104
2. 論文標題 All-sky search for short gravitational-wave bursts in the third Advanced LIGO and Advanced Virgo run	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 122004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.104.122004	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 Abbott R, et al.	4. 巻 105
2. 論文標題 Search for continuous gravitational waves from 20 accreting millisecond x-ray pulsars in O3 LIGO data	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 22002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.105.022002	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 Abbott R, et al.	4. 巻 659
2. 論文標題 Search for intermediate-mass black hole binaries in the third observing run of Advanced LIGO and Advanced Virgo	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A84 ~ A84
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202141452	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 Abbott R, et al.	4. 巻 105
2. 論文標題 Constraints on dark photon dark matter using data from LIGO 's and Virgo 's third observing run	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 6-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.105.063030	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 Ushiba Takafumi, et al.	4. 巻 38
2. 論文標題 Cryogenic suspension design for a kilometer-scale gravitational-wave detector	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Classical and Quantum Gravity	6. 最初と最後の頁 085013 ~ 085013
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6382/abe9f3	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 Abbott B. P., et al.	4. 巻 23
2. 論文標題 Prospects for observing and localizing gravitational-wave transients with Advanced LIGO, Advanced Virgo and KAGRA	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Living Reviews in Relativity	6. 最初と最後の頁 3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s41114-020-00026-9	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 Akutsu T, et al.	4. 巻 2021
2. 論文標題 Overview of KAGRA: KAGRA science	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 05A103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptaa120	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 Akutsu T, et al.	4. 巻 2021
2. 論文標題 Overview of KAGRA: Detector design and construction history	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 05A101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptaa125	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 Akiyama Y, Miyoki S, et al	4. 巻 36
2. 論文標題 Vibration isolation system with a compact damping system for power recycling mirrors of KAGRA	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Classical and Quantum Gravity	6. 最初と最後の頁 095015 ~ 095015
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6382/ab0fcb	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 T Akutsu, S Miyoki et al	4. 巻 36
2. 論文標題 First cryogenic test operation of underground km-scale gravitational-wave observatory KAGRA	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Classical and Quantum Gravity	6. 最初と最後の頁 165008 ~ 165008
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6382/ab28a9	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 T Akutsu, S Miyoki et al	4. 巻 1342
2. 論文標題 The status of KAGRA underground cryogenic gravitational wave telescope	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012014 ~ 012014
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1342/1/012014	査読の有無 無
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 T Akutsu, S Miyoki et al	4. 巻 37
2. 論文標題 An arm length stabilization system for KAGRA and future gravitational-wave detectors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Classical and Quantum Gravity	6. 最初と最後の頁 035004 ~ 035004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6382/ab5c95	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19件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 13件)

1. 発表者名 Hisaaki Shinkai, on behalf of KAGRA collaboration
2. 発表標題 Gravitational Wave Physics & Astronomy, Status of KAGRA
3. 学会等名 Cosmology from Home (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takafumi Ushiba, on behalf of KAGRA collaboration
2. 発表標題 Current status of KAGRA
3. 学会等名 Amaldi14 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takahiro Sawada for the KAGRA Collaboration
2. 発表標題 Current status of KAGRA
3. 学会等名 Probe into core-collapse SuperNovae via Gravitational-Wave and neutrino signals (SNeGWv2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masaki Ando, on behalf of the KAGRA collaboration
2. 発表標題 Gravitational Astrophysics with KAGRA and Beyond
3. 学会等名 Yukawa International Seminar 2022a (YKIS2022a) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazuhiro Yamamoto, on behalf of KAGRA collaboration
2. 発表標題 KAGRA +, Next step for KAGRA
3. 学会等名 GWADW202 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 澤田崇広, KAGRA collaboration
2. 発表標題 大型低温重力波望遠鏡KAGRAの現状
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山本尚弘, KAGRA collaboration
2. 発表標題 大型低温重力波望遠鏡KAGRAの現状
3. 学会等名 日本物理学会 2021年春季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Dan Chen, KAGRA Collaboration
2. 発表標題 Status of KAGRA calibration toward O4
3. 学会等名 7th KAGRA International Workshop (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Miyoki Shinji on behalf of KAGRA collaboration
2. 発表標題 Current status of KAGRA
3. 学会等名 SPIE - The international Society for Optics and Photonics(SPIE2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中野雅之, KAGRA Collaboration
2. 発表標題 KAGRAの現状
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 横澤孝章, KAGRA collaboration
2. 発表標題 重力波検出器KAGRAの現状
3. 学会等名 日本物理学会2021年春季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takaaki Kajita, Shinji Miyoki, KAGRA collaboration
2. 発表標題 KAGRA and Gravitational Wave Astronomy
3. 学会等名 The 6th KAGRA International Workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shinji Miyoki, KAGRA collaboration
2. 発表標題 Experiences with the underground facility for KAGRA Site
3. 学会等名 The 6th KAGRA International Workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 Shinji Miyoki, KAGRA collaboration
2 . 発表標題 Status of KAGRA
3 . 学会等名 ,Gravitational Wave Physics and Astronomy Workshop (GWPAW2019) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Yuta Michimura, Shinji Miyoki, KAGRA collaboration
2 . 発表標題 Improving the sensitivity of KAGRA gravitational wave detector
3 . 学会等名 Gravitational Wave Physics and Astronomy Workshop (GWPAW2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Hisaaki Shinkai, Shinji Miyoki on behalf of KAGRA collaboration
2 . 発表標題 Latest Status Of KAGRA
3 . 学会等名 13th Edoardo Amaldi Conference on Gravitational Waves (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Kunihiko Hasegawa, Tomotada Akutsu, Nobuhiro Kimura, Yoshio Saito, Takaharu Shishido, Toshikazu Suzuki, Takayuki Tomaru, Ayako Ueda and Shinji Miyoki, KAGRA collaboration
2 . 発表標題 Molecular Adsorbed Layer Formation On Cooled Mirrors And Its Impacts On Cryogenic Gravitational Wave Telescopes
3 . 学会等名 13th Edoardo Amaldi Conference on Gravitational Waves (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 三代木伸二, KAGRA Collaboration
2. 発表標題 大型低温重力波望遠鏡KAGRAの現状
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中野雅之, 三代木伸二, KAGRA Collaboration,
2. 発表標題 大型低温重力波望遠鏡KAGRAの現状
3. 学会等名 日本物理学会2020年春季大会
4. 発表年 2019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	都丸 隆行 (TOMARU Takayuki) (80391712)	国立天文台・重力波プロジェクト・教授 (62616)	

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
---------	---------