

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和2年4月24日現在

機関番号：12601  
研究種目：特別推進研究  
研究期間：2014～2019  
課題番号：26000005  
研究課題名（和文） 極低温干渉計で挑む重力波の初観測  
研究課題名（英文） Detection of gravitational waves with a cryogenic interferometer  
研究代表者  
梶田 隆章 (KAJITA TAKAAKI)  
東京大学・宇宙線研究所・教授  
研究者番号：40185773  
交付決定額（研究期間全体）（直接経費）：452,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では重力波の観測と重力波天文学の創成を目指し、別予算で整備がすすめられた大型低温重力波望遠鏡 KAGRA の研究基盤をベースに、熱雑音を最小化する低温懸架システムの開発、極低温鏡急速冷却方法の開発、グリーンレーザーを用いた干渉計の迅速かつ安定な動作状態獲得、新たな信号読み出し法を可能にし、干渉光に含まれる余計なノイズを削減する出力モードクリーナーの開発などを行った。また、レーザー強度雑音の低減、さらに最終的には自動で観測モードまで進む高度なデジタル制御システムの開発を行った。これらの開発された技術を全て KAGRA に組み込み、重力波観測運転を 2020 年 2 月に開始した。

## 研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発した多くの新アイデアや装置を導入し 2019 年に KAGRA を完成させ、2020 年 2 月には観測運転を開始した。国際協力という観点では、今後、欧米の重力波望遠鏡 LIGO および Virgo との国際共同体制の下で観測を開始することで合意している。このことは、本研究の成果をベースにアジア・オセアニア地域の観測拠点が稼働し始めたことを意味し、本研究の学術的意義は極めて大きい。今後は、感度を向上させつつ観測を実行し、重力波天文学を進展させていく。それと共に重力波の観測データを通して天体物理学・宇宙論・原子核物理など基礎物理学の発展にも貢献し、さらには量子光学技術等への発展へも寄与することを目指していく。

本研究は、基礎科学研究の重要性について多くの国民に知ってもらう絶好の科学プロジェクトであり社会的意義も極めて大きい。そのため、本研究および基礎科学研究への社会的理解を得るための様々な活動を行ってきた。これらの活動としては、様々な機会をとらえてマスメディアへの情報発信、動画配信等を含むインターネットによる広報、地元住民や学生を対象とするイベント、全国各地での講演会等に積極的に取り組んできた。さらに、地元行政と連携した取り組みにも力を入れており、これらの努力が本研究を行う拠点として地元公民館の無償譲渡などの形で還元されている。

研究成果の概要（英文）：In order to observe gravitational waves and to promote gravitational wave astronomy, we have improved KAGRA, which is a large-scale gravitational wave telescope that was constructed by separate budgets, by developing a low-temperature suspension system to minimize the thermal noise, a method to cooldown the mirrors rapidly, a system to achieve a quick and stable lock acquisition of the interferometer using a green laser system, and an output mode cleaner to enable a new signal readout method eliminating noises. Also, we reduced the laser intensity noises, and developed an advanced digital control system that automatically progresses to the observation mode. These newly developed technologies have been installed into KAGRA. We started the operation of KAGRA to observe gravitational waves in February 2020.

研究分野：数物系科学、物理学、天文学

キーワード：重力波 一般相対性理論 中性子星連星 ブラックホール レーザー干渉計

## 1. 研究開始当初の背景

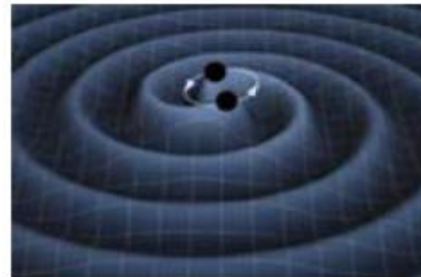
重力波は本研究開始時には未発見であったが、重力波観測の科学的意義は非常に大きいと誰もが認めていた。当時、海外では既存の検出器の改良という形で重力波の観測を目指す研究計画がアメリカ (LIGO) とヨーロッパ (Virgo) において進行しており、本計画と競合していた。従って、重力波の世界初観測に向けた競争は非常に激しいものであった。

一方、頻繁に重力波イベントの観測が可能になった際には、日米欧で協力して、国際ネットワークを構成し、共同で重力波の観測とデータ解析を行うべきとの国際的理解があった。こうすることで、重力波の到来方向など波源の情報を正確に得ることができ、重力波天文学の開拓に大きく寄与できるからである。観測の際に、地球上で大きく離れた場所に位置する KAGRA をもちいた本研究の存在が重力波の到来方向の決定などに極めて大きい意味を持つ。例えば KAGRA の参加により到来方向 (立体角) の決定精度は典型的に数倍から 10 倍以上改善される。日米欧の 3 極の一翼を担う本計画が予定通りに進まなければ、世界の研究を KAGRA が停滞させることになるため、本研究を計画通りに進めることが国際的に強く求められていた。

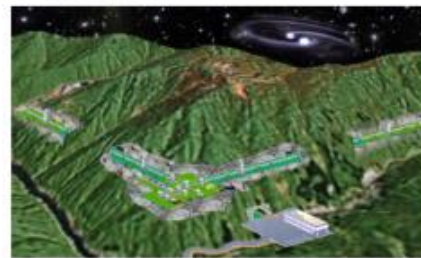
## 2. 研究の目的

アインシュタインの一般相対性理論によると、重力は時空の歪みとしてあらわされる。巨大な質量の星が激しく運動すると、時空の歪みも時間的に変化し、その影響は重力波となって光速で全方向に広がっていく。宇宙には、膨大なエネルギーを放出する中性子星連星やブラックホール連星の合体 (右図参照)、また超新星爆発など、時空の歪みを引き起こして重力波を発生させる現象が存在する。このような天体現象からの重力波を検出し、重力波の観測を通して新たな天文学を創成することが目的である。

本研究は、別経費で建設された重力波望遠鏡 KAGRA (右図参照) の基盤設備等の研究基盤をベースに、新たなアイデアに基づいて熱雑音を最小化する低温懸架システムの開発、極低温鏡急速冷却方法の開発、グリーンレーザーを用いた干渉計の迅速かつ安定な動作状態獲得、新たな信号読み出し法を可能にし、干渉光に含まれる余計なノイズを削減する出力モードクリーナー等を開発し、それを KAGRA に設置して、最終的には標準量子限界を打破する世界に類の無い超高感度の干渉計を実現することを目指した。これにより本研究期間内に中性子星連星合体からの重力波の検出が確実にできる感度で 1 年以上に亘り観測を行い重力波の初検出を成し遂げ、重力波天文学の創成を目指すことにした。



中性子星やブラックホール連星からの重力波放射のイメージ



KAGRAの想像図

## 3. 研究の方法

極めて小さい重力波信号を年間 10 例程度の頻度で観測するには、空間の歪み ( $\Delta L/L$ ) を 10 のマイナス 22 乗から 23 乗の精度で測定できる極限的な感度と長期間に亘る高い安定性を同時に達成する必要がある。これは並大抵の技術では困難である。特に、鏡の熱雑音と量子雑音に関しては、それらを抑えるための極めて高度な技術が必要とされる。そこで本研究では、以下のような独創的な手法の開発を行い、確実に重力波が観測できる感度での観測開始を目指した。

- ① 低温懸架システム：鏡とその懸架系を 20K の極低温に冷却することにより、鏡の熱雑音の究極的低減を行い、超高感度を実現する。これは世界の重力波検出器の中で、KAGRA だけが採用している独創的な手法である。その原理は実証されているが、実際に超高感度を実現するには低温懸架システム全体の開発が不可欠であり、これを行う。
- ② 極低温鏡急速冷却：低温鏡を用いると感度が向上する一方で、長い冷却時間が運転上問題となる。冷却時間短縮のため鏡以外の低温部分に放射率の高い特殊なコーティングを施すなどの工夫を行う。
- ③ 新手法による干渉計の迅速かつ安定な動作状態獲得：本研究で用いられる干渉計は極めて高度なものである。そのため干渉計は複雑になり、設計感度は高くなったが、設計通りの動作状態に速やかに引き込み安定化させるには新たな技術が必要である。そこで本研究では新たな動作点引き込み手法を導入することを提案した。また、高い安定度と感度を維持するために干渉計出力に現れる余計な光を除去する出力モードクリーナーを導入する。
- ④ 標準量子限界の突破：地面振動と熱雑音の影響が無視できるレベルになると、高周波数帯域 ( $>100\text{Hz}$ ) では光子の量子的な位相揺らぎに起因するショットノイズが、低周波数帯域 ( $<100\text{Hz}$ ) では光子の量子的な振幅揺らぎに起因する輻射圧雑音が感度を制限する。その

ため通常の位置計測では、ショットノイズと輻射圧雑音を合わせた量子雑音は、ある感度限界(標準量子限界)を超えることができない。本研究では、量子非破壊計測を導入することにより、標準量子限界を超えた感度を実現し、世界最高感度の重力波望遠鏡を実現する。

以上の開発研究を行い、KAGRA に導入し、干渉計を完成させる。その後、干渉計の試運転を開始し、様々なノイズを除去して感度を徐々に高め、その後定常的な重力波観測に移行し、重力波の観測を目指すとした。

#### 4. 研究成果

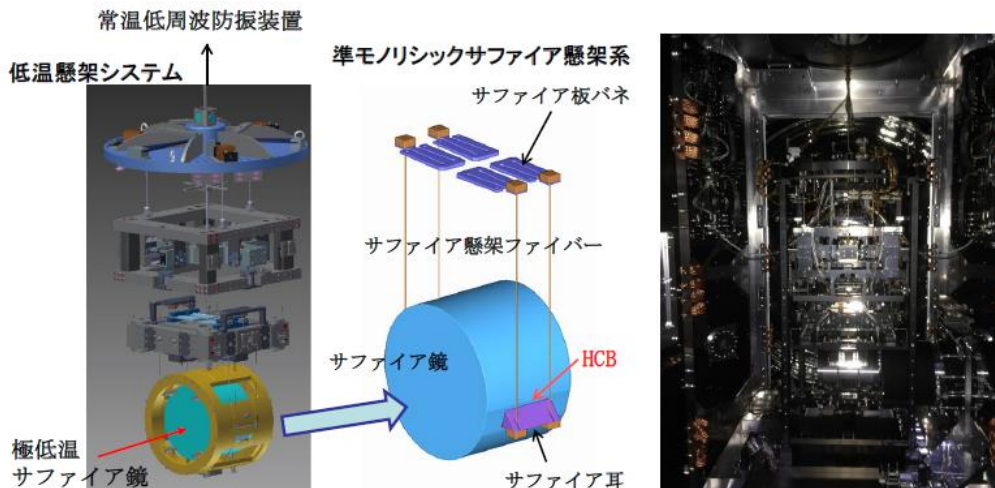
本研究では上記の当初記載した開発研究に加え、レーザー強度雑音の低減、さらに自動で観測モードまで進む高度なデジタル制御システムの開発を行った。開発されたこれらの技術を全て KAGRA に組み込み、重力波観測運転を 2020 年 2 月に開始した。以下ではそれらについて詳しく記述する。

##### 【低温懸架システムの開発】

干渉計型重力波検出器で最も感度の良い 100Hz 帯の感度を改善する極低温鏡懸架システムは、世界で KAGRA だけが搭載する最先端技術である。鏡を冷却して熱雑音を下げることが物理的にはシンプルであるが、低機械的ロスを維持しながら鏡の懸架・防振システムを構築しなければならない。本研究ではこのような技術的難問を解決するため、まず、機械的損失の小さなサファイア鏡を全て同じサファイア部品で懸架するという「準モノリシックサファイア懸架」を実現した。具体的には、まずサファイア鏡の側面を高精度にカット・研磨し、プリズム型のサファイア耳を Hydroxide Catalysis Bonding (HCB) という結晶接合で取り付けた。HCB はシリカ鏡部品の接合にしばしば使われているが、低温のサファイアでも強固な接合が実現出来る事を我々の研究で証明し、実用化した。熱雑音に寄与する機械的損失は、4K の極低温で  $3 \times 10^{-4}$  である事を実測値として得た。これによる熱雑音への寄与は十分に小さい事を確認した。

このような準モノリシックサファイア懸架を最下段とした 4 段の低温振り子型防振装置を開発し、その上部に配置した常温の超低周波防振装置から懸架した。低温振り子には本研究で新たに開発した 99.9999% の超高純度アルミニウム細線を束ねた極めて熱伝導率が大きく (約 20000W/m/K @10K)、柔らかいヒートリンクを取り付け、振動を導入しないようにしながら、全て 20K 以下まで冷却することに成功した。更に試験の結果からヒートリンクによる振動の流入が 20Hz 付近で設計値より大きい事がわかり、ヒートリンク自身を途中で防振するような「ヒートリンク防振装置」を新たに開発、導入した。これにより 20Hz で振動流入が  $10^{-4}$  に低減された。

これら全ての制御システムを用い、世界で初めて本格的な極低温鏡懸架システムを極低温動作させ、重力波用レーザー干渉計の制御に成功した。本研究による開発の成功は、KAGRA における最も重要な技術的達成事項であるが、それだけでなく第 3 世代重力波望遠鏡の技術実証としても極めて重要であり、ヨーロッパの Einstein Telescope 計画を始め、本研究で開発した極低温鏡懸架システムの導入の検討が始まっている。



極低温鏡懸架システム概念図 (左、中央) および写真(冷却速度の改善のため黒化処理済み)

##### 【冷却速度の改善】

本研究の特徴の一つは、主鏡の熱雑音を冷却によって低減する点にあるが、鏡とそれをコントロールするための低温懸架システムは超高真空中に置かれるため、冷却手段は輻射の利用と熱伝導の利用に限られる。通常の固体物質は室温(≒300K)付近で 1 モル当り 3R の比熱を持ち(R



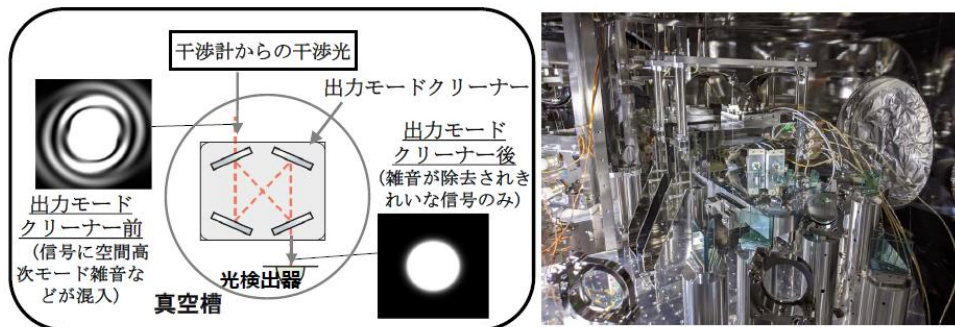
は気体定数)、低温域で比熱は温度とともに減少する。冷却のために取り除くべき内部エネルギーのほとんどは常温付近にあるので、冷却時間の短縮のためには、常温の冷却開始から低温域に移行するまで、被冷却体と寒冷源との間の熱流を大きく取ることが求められる。

本研究では、輻射の利用によってこの問題に対処した。低温懸架システムを構成する部品の表面に Solblack(旭プレジジョン商品名)による黒化処理を施し、低温懸架システムを囲むクライオシールドの内面に DLC(Diamond-Like-Carbon)による黒化処理を行った(前項の写真)。低温域の温度の目安として 100K を取ると、鏡は 20 日で 100K に達し、そこからは高純度アルミ撚細線のヒートリンクによる伝導で冷却され、目標の 20K に達するまでに 27 日と、冷却時間を当初の想定約半分にすることに成功し、観測時間を確保するうえで重要な技術的成果となった。本技術の成果も、欧米の将来計画でも導入される見込みである。

### 【出力モードクリーナーの開発】

出力モードクリーナーは、4 枚の鏡で構成される光共振器であり、主干渉計内で発生する搬送波の高次モード光や制御用の側帯波といった不要な光を除去しつつ、重力波信号と参照光を透過させるという役割を担っている(下図参照)。4 枚の鏡は低熱膨張合金で製造された特注のマウントに搭載され、アルミ定盤上にねじ止めされている。同じ定盤上には、重力波信号取得のための光検波器やモードクリーナーの姿勢制御のための分割光検波器も搭載されている。アルミ定盤は 4 本のワイヤーで防振懸架され、装置全体はスタック防振台に搭載されている。

出力モードクリーナーの導入により、それまで一時的に用いていた変調復調法による信号取得よりも出力の高い光を光検波器に照射

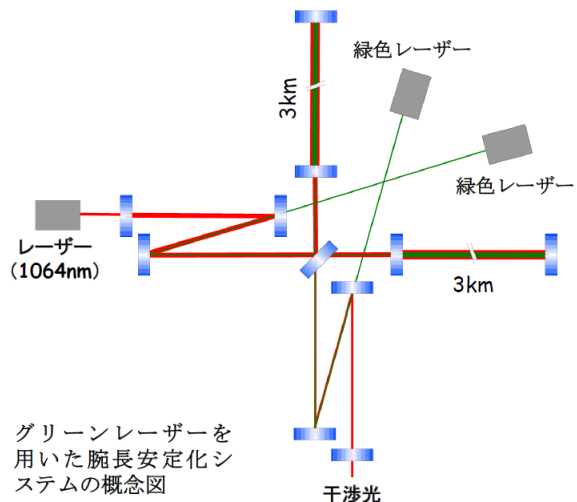


出力モードクリーナーの概念図と働き(左)とその写真(右)

できるようになったため、高周波の感度が 10 倍ほど改善した。2020 年春の段階では、まだ技術的な雑音が支配的で、KAGRA の感度は標準量子限界に到達してはいないが、出力モードクリーナーを導入したことにより、その実現が可能となったと言える。

### 【グリーンレーザーを用いた腕長安定化システム】

KAGRA の光学検出システムは、5 つの強結合干渉計で構成されており、すべての干渉計を動作位置に持ってくる。この目的のために、2 台のファブリーペロー干渉計のそれぞれを他の 3 台の干渉計とは独立して安定化させる。そのために、2 台の補助グリーンレーザーを導入した。すなわち、グリーンレーザーで 3 km 両アームのファブリーペロー干渉計をロックし、引き続き主レーザーでロックし、その後他の部分をロックする仕組みである(右図参照)。このシステムは予定通りの性能を発揮し、本研究で別途開発した高度なデジタル制御システムと併せて KAGRA を迅速かつ安定に運転するうえで不可欠なシステムとなった。現在干渉計をロックして観測状態に持ち込むのにかかる時間はおおむね 5 分と迅速な運転開始を実現した。



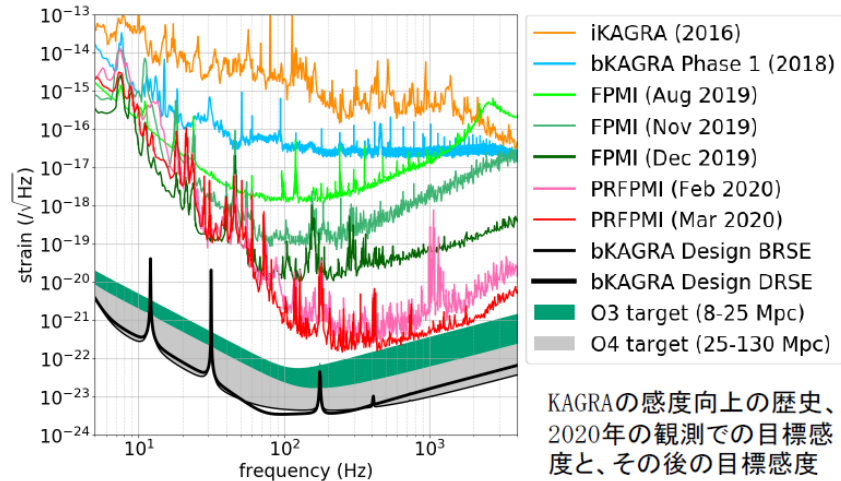
グリーンレーザーを用いた腕長安定化システムの概念図

### 【レーザー強度雑音の低減化】

重力波を観測するためには、レーザー強度雑音の低減が重要である。レーザー強度雑音は出力信号を直接変動させるため、重力波の信号のノイズとなる。また、高出力レーザーの場合、輻射圧による鏡の揺れが強度雑音で大きくなり、重力波信号と区別がつかない雑音となる。そこで、強度安定化システムを開発した。このシステムは、主レーザー出力の出口付近に配置した光強度変調素子として音響光学変調器(AOM)を用いたフィードバックに基づくものである。30Hz から 1kHz の周波数範囲では目標値である  $10^{-7} 1/\sqrt{\text{Hz}}$  以下と 3 桁程度の低減に成功した。

## 【重力波観測】

本研究で開発された技術を全て組み込み、我々は2020年2月25日にKAGRAの観測運転を開始した。右図にKAGRAを運転した際の感度曲線の改善状況を示す。2018年に初めて低温鏡をもちいた干渉計を運転したとき（水色の線）と比べ（あるいは2019年夏に初めて3kmの腕をロックしてファブリーペロー干渉計として運



転したとき（黄緑色）と比べ、2020年3月時点（赤色）で300Hzでは約5桁（4桁）感度が改善している。また昨年12月（濃緑）から今年2月（ピンク）の間の感度向上の主な理由の一つは出力モードクリーナー動作による。緑色の帯が今期の目標感度であり、数百Hz以上ではほぼ目標を達成した。しかし、それ以下の低周波帯ではまだ理解されていないノイズが残り、極低温鏡の特性を生かして100Hz付近で標準量子限界を超える感度を達成するのは今後の課題である。なお、2019年9月にTAUP（宇宙粒子と地下での物理に関する国際会議）を富山市で開催し、本研究の成果を広く国際コミュニティに報告した。また、2020年4月現在、観測運転で取得されたデータの重力波探索解析が進められている。

それと共に、国際協力という観点からは、2019年10月4日にはLIGO, Virgo, KAGRAの国際観測ネットワーク構築に関する協定に調印し、今後は国際共同体制で観測を進めることになった。KAGRAが参加すれば、重力波源の方向特定精度が格段に良くなるなど多くのメリットがあり、マルチメッセンジャー天文学に大きな貢献ができることになる。さらに、アジア圏における国際観測拠点として今後重力波天文学の発展に貢献していくことになる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 59 件）

- ① T. Akutsu et al. (KAGRA Collaboration), Application of the independent component analysis to the iKAGRA data, Progress of Theoretical and Experimental Physics (PTEP)、査読あり、Volume 2020, 053F01 (19 pages)、10.1093/ptep/ptaa056
- ② T. Akutsu et al. (KAGRA Collaboration), An arm length stabilization system for KAGRA and future gravitational-wave detectors, Classical and Quantum Gravity, 37 (2020) 035004 (19pp)、査読あり、10.1088/1361-6382/ab5c95
- ③ T. Akutsu et al. (KAGRA Collaboration), The status of KAGRA underground cryogenic gravitational wave, Journal of Physics: Conference Series XV International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics 24-28 June 2017, Sudbury, ON, Canada, 1342 (2020) 012014、査読あり、10.1088/1742-6596/1342/1/012014
- ④ T. Akutsu et al. (KAGRA Collaboration), First cryogenic test operation of underground km-scale gravitational-wave observatory KAGRA, Classical and Quantum Gravity, 36 (2019) 165008 (22pp)、査読あり、10.1088/1361-6382/ab28a9
- ⑤ Y. Akiyama et al. (KAGRA Collaboration), Vibration isolation system with a compact damping system for power recycling mirrors of KAGRA, Classical and Quantum Gravity 36 (2019) 095015 (16pp)、査読あり、10.1088/1361-6382/ab0fcb
- ⑥ Kunihiro Hasegawa, Tomotada Akutsu, Nobuhiro Kimura, Yoshio Saito, Toshikazu Suzuki, Takayuki Tomaru, Ayako Ueda, and Shinji Miyoki, Molecular adsorbed layer formation on cooled mirrors and its impacts on cryogenic gravitational wave telescopes, Physical Review D, 99, 022003 (2019)、査読あり、10.1103/PhysRevD.99.022003
- ⑦ Takaaki Kajita, Status of KAGRA and its science goals, Proceedings of the Fifteenth Marcel Grossmann Meeting, 査読なし、5 ページ、2020、<http://www.icra.it/mg/mg15/proceedings.htm>

※KAGRA Collaboration は共著者 252 名を含む総称で、梶田 隆章、川村 静児、内山 隆、黒田 和明、大橋 正健、三代木 伸二、都丸 隆行、鈴木 敏一、FLAMINIO, Raffaele、安東 正樹、宗宮 健太郎、麻生 洋一、森脇 喜紀を含む

〔学会発表〕(計 343 件)

- ① 中野雅之、大型低温重力波望遠鏡 KAGRA の現状、日本物理学会第 2020 年春季大会、2020.3
- ② Takaaki Kajita、Status and future of KAGRA、Gravitational Wave Physics and Astronomy Workshop (GWPAW2019, Tokyo, Japan)、2019.10
- ③ Takaaki Kajita、Status of KAGRA and its science goals、Yamada Conference LXXI: Gamma-ray Bursts in the Gravitational Wave Era 2019 (Yokohama, Japan)、2019.10
- ④ Shinji Miyoki、KAGRA Present Status、Gravitational Wave Physics and Astronomy Workshop (GWPAW2019, Tokyo, Japan)、2019.10
- ⑤ Takayuki Tomaru、Cooling System of KAGRA、Gravitational wave science and technology symposium 2019 (GRASS209, Padova, Italy)、2019.10
- ⑥ 三代木 伸二、大型低温重力波望遠鏡 KAGRA の現状、日本物理学会第 2019 年秋季大会、2019.9
- ⑦ Masatake Ohashi、Overview of KAGRA、Toyama International Conference Center, (TAUP2019, Toyama, Japan)、2019.9
- ⑧ Takayuki Tomaru、Cryogenic Mirror System in KAGRA、13th Amaldi Conference on Gravitational Wave (Valencia, Spain)、2019.7
- ⑨ Takaaki Kajita、KAGRA and Gravitational Wave Astronomy、6th KAGRA International Workshop (Wuhan, China)、2019.6
- ⑩ Takayuki Tomaru、Status Report of KAGRA Cryogenics、6th KAGRA International Workshop (Wuhan, China)2019.6
- ⑪ Takayuki Tomaru、Large-Scale Cryogenic Gravitational wave Telescope: KAGRA、24th Science in Japan Forum (Washington DC, US)、2019.6
- ⑫ 梶田 隆章、真空技術と表面科学がささえる KAGRA と重力波天文学、表面真空学会、2019.5
- ⑬ Takayuki Tomaru、Vacuum Fluctuation at Nanoscale and Gravitation conference, Sardinia, Italy、2019.4

〔図書〕(計 5 件)

- ① 安東正樹他編 (梶田 隆章、黒田 和明、宗宮 健太郎含)、朝倉書店、相対論と宇宙の事典 2020.6、432 ページ、ISBN978-4-254-13128-4

〔産業財産権〕

○取得状況 (計 1 件)

名称：極低温冷凍機システム

発明者：都丸 隆行

権利者：大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構、大学共同利用機関法人自然科学研究機構

種類：特許

番号：特開 2015-197244 (P2015-197244A)

取得年：平成 27 年 11 月 9 日

国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ

<http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/gr/GWPOHP/index.html>

<http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/gr/SPR/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：内山 隆

ローマ字氏名：(UCHIYAMA, Takashi)

所属研究機関名：東京大学

部局名：宇宙線研究所

職名：准教授

研究者番号 (8 桁)：60361656

【別紙に続く】

【別紙】研究組織続き

(2) 研究分担者

研究分担者氏名：大橋 正健

ローマ字氏名：(OHASHI, Masatake)

所属研究機関名：東京大学

部局名：宇宙線研究所

職名：教授

研究者番号 (8桁)：80213833

(3) 研究分担者

研究分担者氏名：川村 静児

ローマ字氏名：(KAWAMURA, Seiji)

所属研究機関名：東京大学

部局名：宇宙線研究所

職名：教授

研究者番号 (8桁)：40301725

(4) 研究分担者

研究分担者氏名：黒田 和明

ローマ字氏名：(KURODA, Kazuaki)

所属研究機関名：東京大学

部局名：宇宙線研究所

職名：名誉教授

研究者番号 (8桁)：00242165

(5) 研究分担者

研究分担者氏名：三代木 伸二

ローマ字氏名：(MIYOKI, Shinji)

所属研究機関名：東京大学

部局名：宇宙線研究所

職名：准教授

研究者番号 (8桁)：20302680

(6) 研究分担者

研究分担者氏名：安東 正樹

ローマ字氏名：(ANDO, Masaki)

所属研究機関名：東京大学

部局名：理学系研究科

職名：准教授

研究者番号 (8桁)：90313197

(7) 研究分担者

研究分担者氏名：宗宮 健太郎

ローマ字氏名：(SOMIYA, Kentaro)

所属研究機関名：東京工業大学

部局名：理学院物理学系

職名：准教授

研究者番号（8桁）：10582603

(8) 研究分担者

研究分担者氏名：森脇 喜紀

ローマ字氏名：(MORIWAKI, Yoshiki)

所属研究機関名：富山大学

部局名：学術研究部理学系

職名：教授

研究者番号（8桁）：90270470

(9) 研究分担者

研究分担者氏名：麻生 洋一

ローマ字氏名：(ASO, Yoichi)

所属研究機関名：国立天文台

部局名：重力波プロジェクト

職名：准教授

研究者番号（8桁）：10568174

(10) 研究分担者

研究分担者氏名：都丸 隆行

ローマ字氏名：(TOMARU, Takayuki)

所属研究機関名：国立天文台

部局名：重力波プロジェクト

職名：教授

研究者番号（8桁）：80391712

(11) 研究分担者

研究分担者氏名：フラミニオ ラファエレ

ローマ字氏名：(FLAMINIO, Raffaele)

所属研究機関名：国立天文台

部局名：重力波プロジェクト

職名：特任教授

研究者番号（8桁）：10723108

(12) 研究分担者

研究分担者氏名：鈴木 敏一

ローマ字氏名：(SUZUKI, Toshikazu)

所属研究機関名：大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構

職名：ダイヤモンドフェロー

研究者番号（8桁）：20162977