

目次

I	研究室別 2018 年度 研究活動報告	2
1	一般物理実験	4
1.1	安東研究室	5
1.1.1	大型重力波望遠鏡 KAGRA	5
1.1.2	周波数依存スクイーズ光の開発	5
1.1.3	宇宙空間レーザー干渉計	6
1.1.4	ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA	6
1.1.5	相対論・量子光学精密実験	8
II	Summary of group activities in 2018	13
1	Ando Group	15

I

研究室別 2018年度 研究活動報告

1 一般物理実験

1.1 安東研究室

本研究室では重力と相対論・量子論に関する実験的研究を進めている。その中でも、重力波望遠鏡の開発と、それによる天文学は一貫して研究室の中心テーマとなっている。2016年2月には米国のLIGOによって、重力波信号の初観測が報告され、「重力波天文学」が幕をあげた。国内でも2010年にスタートした大型低温重力波検出器KAGRAの建設は順調に進んでいる。それに加え、将来計画である宇宙空間重力波アンテナB-DECIGOの実現へ向けた検討や基礎開発も行われている。実験室内の基礎研究としては、独自の方式のねじれ型重力波検出器TOBAの開発、さらには重力波研究で用いられる精密計測技術を用いた基礎物理研究として、オプトメカニクスを用いた巨視的な量子現象の測定実験、片道光速の異方性検証実験などを進めている。

1.1.1 大型重力波望遠鏡 KAGRA

アメリカのAdvanced LIGOとイタリアのAdvanced Virgoによる連星ブラックホール合体や連星中性子星合体からの重力波の初観測により、物理学と天文学は全く新しい時代に突入した。今後はこうしたレーザー干渉計型重力波望遠鏡のさらなる高感度化や、より多くの重力波望遠鏡による同時観測による、さらなる検出数の増加とより精密な到来方向決定、連星パラメータ決定が期待されている。

こうしたさらなる重力波物理学・天文学の発展を目指し、日本では大型低温重力波望遠鏡KAGRA(かぐら)の建設が進められている。KAGRAが稼働すれば、アメリカ、イタリア、日本の三極での三角測量により到来方向決定精度が各段に上がる。また、一般相対性理論が予言するテンソルモードとは異なる偏極モードが初めて分離できるようになり、一般相対性理論に代わる重力理論の検証が可能となることが期待できる。

KAGRAは、約10 Hz付近で問題となる地面振動や重力勾配雑音の影響を低減するために静寂な地下環境に建設されている、世界初のkm級の本格的な重力波望遠鏡である。また、約100 Hzより低周波側で問題となる熱雑音の低減を図るため、km級の重力波望遠鏡としては初めて、鏡を20 Kの極低温に冷やす。こうした地下建設と低温化は将来の重力波望遠鏡の高感度化には必須と考えられており、ヨーロッパの10 kmレーザー干渉計計画Einstein Telescopeも地下建設と低温化を基本としている。KAGRAはサイエンス面に限らず、技術面でもフロンティアを走っていると言える。

これまでと現状

KAGRA計画は2010年にスタートし、トンネルや真空システムなどの基本的な施設は2015年に完成した。その後低温に冷やすサファイア鏡などのインストールを進め、2018年3月には4つのサファイア

鏡のうちの最初の1つが18 Kに到達した。2018年4月末より、低温マイケルソン干渉計の試験運転を行い、低温での干渉計動作確認や鏡の懸架系と制御系の一連の性能評価を行った。その後も引き続き鏡の懸架系や出射光学系などのインストール、入射光学系のアップグレードを進め、2019年3月時点で初期観測運転に必要なコンポーネントのインストールが完了した。現在は干渉計の調整などを進めており、2019年末にはAdvanced LIGOやAdvanced Virgoと共同観測を開始する予定となっている。

当研究室ではKAGRAの根幹部分となる主干渉計の光学系や制御系の設計開発を行っている。本年度は特に、主干渉計の初期アラインメントを完了させ、2本ある3 kmの腕共振器のうち一方の共振器の制御を初実証した。腕共振器の制御には倍波光(波長532 nm)を用いた補助制御を行うが、その制御系が片腕の制御に必要な要求値を満たすことを確認できた。また、干渉計から出射される各種干渉縞信号を取得するための光学系を設計し、インストールと制御システムへの接続を行った。さらに、当研究室ではKAGRAの観測計画の立案とアップグレードのための感度設計と技術的実現可能性の検討も進めている。

観測運転へ向けた干渉計動作

当研究室ではKAGRAの主干渉計部分を担当している。今年度は主に片腕の光共振器の動作の準備と実証を行なった。KAGRAでは、主干渉計を動作状態・観測状態にする(動作点に引き込む)ためにグリーンロックという手法を用いる。グリーンロックとは、主干渉計に用いる波長1064 nmのメインレーザーの倍波であるグリーンレーザーを用いて、決定論的に腕共振器の動作点引き込みを行う手法である。今年度はグリーンロックによる制御系の雑音シミュレーションを行い、主干渉計の動作に十分な性能が出るように制御系の詳細設計を行なった。またその詳細設計にしたがって、必要となる回路系の設計と製作を行なった。その上で、KAGRAの片腕共振器の動作試験を行なった。その結果、グリーンロックの性能が要求値を満たすことを実証するとともに、図1.1.1が示すように、グリーンロックによる腕共振器の動作点引き込みの手順を確立した。さらに、腕共振器を用いて、腕共振器の長さ、フィネス(平均折り返し回数に対応)、光学損失、鏡の曲率といった腕共振器自体の特性を測定し、これらの特性が、観測運転にむけて問題ない性能を満たしていることを示した。

1.1.2 周波数依存スクイーズ光の開発

重力波望遠鏡の将来的な感度は量子雑音という雑音によって制限される。量子雑音を低減する有効な方法として干渉計にスクイーズ光を入射するというものがあるが、通常のスクイーズ光での感度の向上は高周波帯域に限られている。広帯域で量子雑音を低減するためには、高周波で位相方向に、低周波で振

幅方向にスクイーズされた周波数依存したスクイーズ光が必要となる。我々は、国立天文台の重力波望遠鏡 TAMA の 300 m の光共振器を用いて 70 Hz 程度での周波数依存スクイーズ光の実現を目指している。

今年度は、TAMA においてスクイーズ光の開発を進め、TAMA におけるスクイーズ光の観測に初めて成功した。観測されたスクイーズ光は 200 kHz でスクイーズレベルが 3dB 程度であった。

今後は、スクイーズ角の安定化をして、ロスを低減していくことにより、10 Hz 以上で 9 dB のスクイーズ光を目指す。それと並行して、300 m 共振器のデジタルシステムによるロックおよび自動アライメントを進め、スクイーズ光を入射することによって 70 Hz 程度での周波数依存スクイーズ光を実現する。

重力波偏極モードを用いた重力理論検証

一般相対性理論において重力波は偏極モードとして二つのテンソルモードを持つ。しかし、一般の計量重力理論においては六つの偏極モードが許される。重力理論によって許される重力波の偏極モードは異なるため、重力波の偏極モードの分離によって重力理論を検証することができる。原理的には偏極モードの分離には偏極モードの数と同じ数の重力波検出器が必要であるため、重力波検出器ネットワークの拡大によってより多くの偏極モードを含む重力理論の検証が期待される。

本年度はコンパクト連星合体からの重力波の偏極モードの分離可能性やパラメータ間の相関等を、各モードに対する幾何学的な因子を考慮した偏極モデルを用いて系統的に調査した。偏極モードの分離には検出器の台数が、考慮する偏極モードの数以上存在すること、十分な信号雑音比と信号の持続時間が得られていることの二つの条件が必要であることを示した。また、次世代重力波望遠鏡の偏極分離能力を系統的に調べ、将来のコンパクト連星合体からの重力波の長期的な観測によってパルサーの観測からつけられているスカラーモードへの制限と同等の直接検証が可能になることを示した。

1.1.3 宇宙空間レーザー干渉計

宇宙空間レーザー干渉計 DECIGO は基線長 1000 km のファブリペロー型レーザー干渉計を宇宙空間に建設するという野心的な計画である。これは、主に 10 Hz 以上で感度のある地上レーザー干渉計と、0.1 Hz 以下で感度のある LISA のような大型宇宙レーザー干渉計の中間にある周波数帯をターゲットとする検出器である。DECIGO は巨大ブラックホールの合体や、初期宇宙からの重力波などの観測を目指している。

地上試験用プラットフォーム

DECIGO の大きな特徴の一つが、KAGRA などの地上重力波望遠鏡と同様に、重力波と相互作用す

る腕に Fabry-Pérot 共振器を組み込んでいることである。これにより、最高感度を向上させている。一方で、DECIGO のような宇宙重力波望遠鏡では、衛星の振動に起因する雑音を低減するために、テストマス（鏡）と衛星の間の相対位置・姿勢を姿勢を制御するドラッグ・フリー制御が必要となる。DECIGO は、Fabry-Pérot 共振器とドラッグ・フリー制御を両立させる必要のある唯一の重力波望遠鏡である。従って、DECIGO の実現のためには、これらの技術の両立性を実証することが必要である。

本研究室では、この実証のための地上試験用プラットフォームの開発を進めている。このプラットフォームは、大きく分けて、レーザー干渉計と懸架系という 2 つの構成要素からなる。このプラットフォームの懸架系は、衛星を模す光学定盤懸架系とテストマス懸架系の 2 種類からなる。これらの懸架系は、ねじれ振り子などを用いて柔らかく懸架されており、宇宙空間での剛体の自由運動を模倣することができる。2018 年度は主にこれらの懸架系の設計、および構築を進めた。さらに、構築された懸架系を用いて、変位や姿勢の制御試験も行った。今後は、懸架系に加えて、Fabry-Pérot 共振器を含む光学系の構築を進め、ドラッグ・フリー制御を含んだレーザー干渉計の実証を進める。

1.1.4 ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA

Torsion-Bar Antenna (TOBA) とはねじれ振り子の水平回転を利用した新しい重力波検出器である。直交する 2 本の棒状マスが水平懸架され、重力波の潮汐力によってこれらが差動回転するのを干渉計センサによって読み取る。ねじれ振り子は低い共振周波数を持つため、地上でも低周波数帯 (0.1 Hz 前後) の重力波に感度を持つのが特徴である。これにより他の地上レーザー干渉計型重力波検出器では観測が難しい中間質量ブラックホール連星合体の観測が可能になり、銀河中心の超巨大ブラックホールの形成過程に知見を与えることなどが期待できる。重力波観測以外にも地球活動による重力場変動を計測することで将来の地上重力波望遠鏡の低周波感度向上に貢献したり、地震の早期アラートに応用するなどの研究も進められている。

現在は長さ 35 cm の棒状マスを用いた小型プロトタイプ (Phase-III TOBA) の開発が進められており、将来的な大型化 (10 m) に備えた雑音低減実証や、地球重力場変動の観測、地震速報の実現などを目標としている。設計感度は、0.1 Hz で $10^{-15} / \sqrt{\text{Hz}}$ となっている。この感度を実現すべく次から述べるような要素開発が進行中である。

感度向上

TOBA の主要な雑音の一つが地面振動雑音である。地面振動雑音は、地面の回転振動がねじれ振り子を揺らす回転地面振動と、地面の並進振動が振り子の何らかの非対称性を介してねじれ方向の信号にカッ

ブルするカップリング雑音に大別される。先行研究によって、特にカップリング雑音が支配的であることが明らかになっており、Phase-III TOBA の目標感度実現のためにはこれを低減する必要がある。

カップリング雑音は、系の非対称性に起因するカップリング係数と並進地面振動の積で与えられる。前年度まではカップリング係数を下げる手法の原理実証を行ってきたが、本年度は並進地面振動を低減する防振系の開発を行った。

地面振動の防振には一般に受動防振が用いられているが、TOBA の観測帯域である 0.1 Hz 付近を受動防振するのは一般には容易ではない。そこで我々はフィードバック制御を用いた能動防振系を開発し、並進地面振動の能動防振を試みた。本年度は、アクチュエーターをよりレンジの大きなものを用いることで観測帯域の拡大を目指した。その結果、制御帯域の下限を 0.2 Hz まで拡大することに成功した。

現在の性能は、主にフレームの機械共振と傾斜カップリングによって制限されている。今後は、フレームの補強を行うことで共振周波数を高くし、制御帯域の上限を拡大していく。さらにテーブルの傾き変動を読み取るセンサーを設置して傾斜方向の制御も行うことで、傾斜カップリングの問題を解決していく予定である。

低温系の開発

目標感度達成において最も障害となる雑音の一つが懸架ワイヤの熱的な揺らぎ（サスペンション熱雑音）である。熱揺動の大きさはワイヤの温度とエネルギー散逸量の積の平方根に比例するため、雑音低減のためには (1) 低温化、(2) 低散逸ワイヤの開発が必要である。Phase-III TOBA では懸架ワイヤの温度を 4 K まで冷却し、エネルギー散逸を $Q = 10^8$ (Q 値は散逸の逆数を表す無次元量) まで下げることが要求される。

本年度は冷却方法や構成要素などをまとめて低温系の設計を完了し、さらにそれをもとに調達・組み立てを行ったねじれ振り子の統合冷却試験を行い冷却試験を行った。その結果、8.5 K までの冷却に成功した。大型のねじれ振り子を極低温まで冷却した例としては世界で初めてである。ただし温度が 4 K まで到達していないことや冷却時間が想定より長かったなどの問題が発生したため、現在はその改善へ向けて外部からの熱輻射流入の低減やヒートリンクの熱接触の改善などを進めている。

Fiber Q measurement

Q factors of up to of 1.3×10^5 was measured on a variety of sapphire fibres for a torsion pendulum setup. These are currently the highest measured Q factors for sapphire fibres (not bulk measurements) at room temperature to the best of my knowledge, and surface loss was identified as the most likely limiting factor, in line with previous literature on

the subject. Clamp loss and thermoelastic loss were also studied and found to be unlikely the limiting factors in the measured values. Also to be noted is that these values are an order of magnitude higher than metal fibres. [23, 66, 44, 41]

A new experimental setup is also being designed, revolving around cryogenic cooling. This is expected to provide higher Q, and is also conducted because TOBA is planned to run at cryogenic temperatures. Other avenues of increasing Q are also being investigated, with surface loss mitigation a priority. [49]

改良型 WFS

phase-III TOBA が高周波帯で原理的な雑音である散射雑音で制限されるように、試験マスの差動回転を読み取るセンサとしては 5×10^{-16} rad/ $\sqrt{\text{Hz}}$ の感度が要求されている。これを満たすものとしてマイケルソン干渉計の他に 2 つの改良型 Wave Front Sensor(WFS) が考案されており、一本のレーザーで角度が読み取れることから、試験マスの並進運動からのカップリングを低減することが容易であると見られている。

レーザーの基本モードである TEM₀₀ モードを鏡に入射すると、鏡が傾いた時 TEM₁₀ モードの光が反射時に生成される。この TEM₁₀ モード光と TEM₀₀ モード光を同時に光共振器内に共振させるように工夫することで角度センサとしての感度向上が期待できる。このような改良型 WFS として、我々は試験マスに取り付けられた鏡の他に二枚の曲率付き鏡を用いて折り返しのある光共振器を構成する方式と、3 枚の鏡を用いた結合光共振器を用いた方式の 2 つの方式を提案している。一つ目の改良型 WFS では、TEM₀₀ が共振している状態から一つの鏡を角度方向に加振し、ある共振器長の時に TEM₁₀ 光が増幅されることを実験により示すことができた [65]。また、二つ目の改良型 WFS [47] のセットアップ作成と原理実証実験を進めた。

1.1.5 相対論・量子光学精密実験

オプトメカニクス研究

安東研究室では、重力波検出器の感度向上に向けた雑音低減、および巨視的量子力学の検証を目的として、レーザー光の量子輻射圧揺らぎを観測することを目指している。我々は、mg スケールの棒状の鏡をねじれ振り子として利用し、両端で光共振器を構築してそれぞれの共振器長変動の差をとり、回転モードを測定するというセットアップを新たに考案した。このねじれ振り子光共振器という新手法を用いて、輻射圧揺らぎの観測を試みた。

今年度は、共振器内パワーの増大や雑音低減に取り組んだ。共振器内パワーは 10 W 程度まで増大させることに成功し、防振装置を改良することで地面振動雑音を大幅に低減した。結果として、量子輻射圧揺らぎ

と測定された雑音スペクトルの信号雑音比 0.14 ± 0.03 を達成した (図 1.1.2). この値は 100 Hz 付近での測定, mg-g スケールの振動子での測定という両側面において世界最高の結果である. さらに雑音源の特定を進め, それらの結果を学会での発表 [39, 71, 57] や博士論文 [10] としてまとめた.

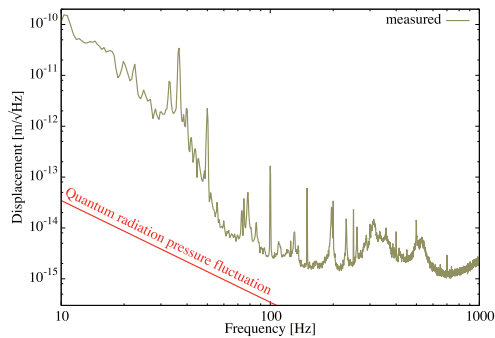


図 1.1.1: 測定された変位雑音と量子輻射圧揺らぎ

光学浮上鏡の開発

熱浴から十分に孤立した巨視的な振動子の実現を目指し, 振り子とは別の手法として, 鏡を光輻射圧で浮上させる方法の開発を行っている. 基底状態への到達を目指すにあたって, 振り子の場合には鏡の懸架に伴う熱雑音が問題となりうるということが分かっている. そこで, この熱雑音を導入しない鏡の支持方法として, 光輻射圧で鏡を浮上させる方法を考案した. 光学浮上鏡を実現できれば, 熱雑音以外の雑音を十分に低減することで基底状態への到達が見込まれる.

現在は, ねじれ振り子と Fabry-Perot 共振器を組み合わせた従来のセットアップを用いて, 光学浮上の安定性検証を目指した研究を進めている. 従来の構成を改良し, 上下 2 つの光共振器からの透過光を分離可能にした. その上で, ねじれ振り子の位置制御と Fabry-Perot 共振器を共振状態に制御することに成功し, 実際に光輻射圧による復元力の測定を行った. 結果として, Fabry-Perot 共振器の光強度を 2 倍以上に向上させると, 有意な大きさを復元力を観測できることを確認した. 今後は, ねじれ振り子の改良と Fabry-Perot 共振器を成す鏡の特性改善を行ったうえで, サンドウィッチ構成の安定性検証を行う予定である.

光速の等方性検証

Lorentz 不変性は宇宙の基本的な対称性として現代物理学の様々な理論で採用されている. しかし, 量子重力理論の研究や宇宙マイクロ波背景放射の観測から, あるエネルギースケールでは Lorentz 不変性

が破れている可能性や特殊な座標系の存在が示唆されている. したがって, Lorentz 不変性をより高い精度で検証することが重要である.

我々は, Lorentz 不変性を検証するために片道光速の等方性検証を行っている. 片道光速に異方性があると光速の行きと帰りに差が生じる. 光路の一部に媒質を入れて屈折率を変えた非対称光リング共振器を用いると, 共振器内を両周りに回る光の共振周波数の差として片道光速の等方性を検証することができる. この共振周波数の差をダブルパスという光学系構成により測定し, 光学系全体を回転させて変調をかけることで信号の取得を行う.

我々はこれまでに 1 年間に渡る異方性探査を行い, 片道光速の異方性で世界最高精度となる 10^{-15} レベルの上限値をつけた. しかし, 回転に伴う振動が感度を制限する要因となっていたため, 今年度までに回転機構と光学系の改良を行った.

回転軸の変動に伴い光学系に導入されるひずみの影響を低減するための高剛性大型回転台の導入や電源供給部の改良等を進めた. 一方で, 回転台による振動雑音を衛星内または衛星自身を回転させることで回避するための超小型衛星を用いた等方性検証ミッション提案を行った.

光共振器を用いたアクション探査

アクションは量子色力学の強い CP 問題を解決するために導入された擬スカラー粒子であるが, 近年ではひも理論など高次元理論からもアクションに似た様々な粒子が予言されている. また, アクションは典型的には eV 以下の小さな質量を持ち, 物質とわずかに相互作用をする点から, 暗黒物質の候補としても注目を集めている. この物質とのわずかな相互作用を利用したアクション探査が現在世界中で行われている.

我々はこれまで実験が行われてきた領域よりも低質量のアクションに着目し, 光共振器を用いてアクション暗黒物質を探索する手法の検討を進めた. アクションと光子の相互作用があると, 左円偏光と右円偏光に速度差が生じるため, その速度差を光共振器の共振周波数差として測定するのである. この手法を用いると, 従来必要であった強磁場がなくなるため, コスト面や振動面で有利になると考えられる.

我々は 2 つの手法を提案した. 1 つ目の手法は, ボウタイ型の光リング共振器を用いる手法である. 同じ光リング共振器に右円偏光で光を共振させた場合と左円偏光で光を共振させた場合の共振周波数差をダブルパス構成でヌル測定する構成である. この構成を用いると, 100 W のレーザー光と周回長 10 m, フィネス 10^6 の光リング共振器でこれまでの上限値を大幅に更新できることがわかった [9, 53]. 特に, 10^{-15} eV 以下のアクションに対し, $g_{a\gamma} < 3 \times 10^{-16}$ GeV $^{-1}$ という, 先行研究の上限値を数桁更新する感度を実現することができる.

2 つ目の手法は, 線形の Fabry-Pérot 共振器を用いる手法である. 入射する直線偏光とは直交する偏光

の光量を測定する光学系を組むことでアクシオン探索をすることができる。我々は、例えばレーザー干渉計型重力波望遠鏡 Advanced LIGO に用いられている Fabry-Pérot 共振器も利用することで、 10^{-13} eV 程度のアクシオンに対し、 $g_{a\gamma} < 8 \times 10^{-13} \text{ GeV}^{-1}$ という感度を実現することができることを示した (arXiv:1903.02017)。この感度は重力波検出器としての感度を損なうことなく実現することができ、重力波探索とアクシオン探索を同時に行える画期的な手法である。

<報文>

(原著論文)

- [1] KAGRA collaboration, KAGRA: 2.5 Generation Interferometric Gravitational Wave Detector, *Nature Astronomy* **3**, 35 (2019).
 - [2] Nobuyuki Matsumoto, Seth B. Cataño-Lopez, Masakazu Sugawara, Seiya Suzuki, Naofumi Abe, Kentaro Komori, Yuta Michimura, Yoichi Aso, Keiichi Edamatsu, Demonstration of Displacement Sensing of a mg-Scale Pendulum for mm- and mg-Scale Gravity Measurements, *Phys. Rev. Lett.* **122**, 071101 (2019).
 - [3] KAGRA Collaboration, Vibration isolation system with a compact damping system for power recycling mirrors of KAGRA, Accepted in *Classical and Quantum Gravity* (2019).
 - [4] T. Shimoda, Naoki Aritomi, Ayaka Shoda, Yuta Michimura and Masaki Ando, Seismic cross-coupling noise in torsion pendulums, *Phys. Rev. D* **97**, 104003 (2018).
 - [5] KAGRA Collaboration, LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration, Prospects for Observing and Localizing Gravitational-Wave Transients with Advanced LIGO, Advanced Virgo and KAGRA, *Living Reviews in Relativity* **21**, 3 (2018).
 - [6] Kentaro Komori, Yutaro Enomoto, Hiroki Takeda, Yuta Michimura, Kentaro Somiya, Masaki Ando, Stefan W. Ballmer, Direct approach for the fluctuation-dissipation theorem under nonequilibrium steady-state conditions, *Phys. Rev. D* **97**, 102001 (2018).
 - [7] Yuta Michimura, Kentaro Komori, Atsushi Nishizawa, Hiroki Takeda, Koji Nagano, Yutaro Enomoto, Kazuhiro Hayama, Kentaro Somiya, Masaki Ando, Particle swarm optimization of the sensitivity of a cryogenic gravitational wave detector, *Phys. Rev. D* **97**, 122003 (2018).
 - [8] Hiroki Takeda, Atsushi Nishizawa, Yuta Michimura, Koji Nagano, Kentaro Komori, Masaki Ando, Kazuhiro Hayama, Polarization test of gravitational waves from compact binary coalescences, *Phys. Rev. D* **98**, 022008 (2018).
 - [9] Ippei Obata, Tomohiro Fujita, Yuta Michimura, Optical Ring Cavity Search for Axion Dark Matter, *Phys. Rev. Lett.* **121**, 161301 (2018).
- (学位論文)
- [10] 小森健太郎: Optomechanical Torsion Pendulum for Measurement of Quantum Radiation Pressure Fluctuation, 博士論文 (2019 年 3 月).
 - [11] 川崎拓也: 巨視的量子系の実現に向けた鏡の光学浮上方法の研究, 修士論文 (2019 年 3 月).
 - [12] 高野哲: ねじれ型重力波望遠鏡 TOBA のための能動防振系の開発, 修士論文 (2019 年 3 月).
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [13] Takuya Kawasaki: Optical Levitation to Realise a Macroscopic Quantum System, The 1st QFilter Workshop (Mar 2019, Paris, France).
 - [14] Yuta Michimura: Brief Overview of QFilter Project, The 1st QFilter Workshop (Mar 2019, Paris, France).
 - [15] Yuta Michimura: Optical Levitation of a Mirror for Realizing Macroscopic Entanglement, The 1st QFilter Workshop (Mar 2019, Paris, France).
 - [16] Satoru Takano, *et al.*: Newtonian Noise Measurement by Torsion Bar Antenna, The 1st Kagra-Virgo-3G Detectors Workshop (Feb. 2019, Perugia, Italy).
 - [17] Yuta Michimura, *et al.*: Summary of Past Discussions on KAGRA Upgrade, 21st KAGRA Face-to-Face Meeting (Dec 2018, Tokyo, Japan).
 - [18] Yuta Michimura, *et al.*: Final Draft of bKAGRA Phase 1 Paper, 21st KAGRA Face-to-Face Meeting (Dec 2018, Tokyo, Japan).
 - [19] Tomofumi Shimoda, *et al.*: R&D of Newtonian noise measurement, KAGRA satellite meeting (Dec. 2018, Mitaka).
 - [20] Hiroki Takeda, *et al.*: Probing nontensorial polarization of inspiral gravitational waves with the third-generation detectors, JGRG28 (Nov. 2018, Rikkyo University).
 - [21] Y. Enomoto for MIF subgroup: MIF status, 17th KAGRA face-to-face meeting (Aug. 2018, University of Toyama).
 - [22] Yuta Michimura, *et al.*: bKAGRA Phase 1 Paper Status, 20th KAGRA Face-to-Face Meeting (Aug 2018, Toyama, Japan).
 - [23] Ching Pin, Ooi: Mechanical loss of crystal fibres for torsion pendulum experiments, RESCEU Summer School (July 28,, Hakodate).
 - [24] Hiroki Takeda, *et al.*: Polarization test of gravitational waves from compact binary coalescences, The 15th MG Meeting (Jul. 2018, University of Rome La Sapienza).

- [25] Koji Nagano, *et al.*: Constructing Test Bench for Integration Tests of Components Developed for DECIGO and B-DECIGO, The 15th MG Meeting, Rome, Italy, July, 2018.
- [26] Yuta Michimura, *et al.*: Prospects for improving the sensitivity of KAGRA gravitational wave detector, The 15th MG Meeting Meeting (Jul 2018, Rome, Italy).
- [27] Koji Nagano on behalf of the KAGRA Collaboration: Environmental monitors and injection test in bKAGRA phase1, The 4th KAGRA International Workshop (Seoul, Korea, June, 2018).
- [28] Yuta Michimura: Optimization of the KAGRA sensitivity, The 4th KAGRA International Workshop (Jun 2018, Seoul, South Korea).
- [29] Hiroki Takeda, *et al.*: Parameter estimation with inspiral waveforms of compact binary coalescences including nontensorial gravitational waves polarizations, 19th KAGRA Face-to-Face meeting (May, 2018, Osaka City University).
- [30] Satoru Takano, *et al.*: TOBA: Torsion Bar Antenna, The Current Status and Future Plans, 19th KAGRA Face-to-Face Meeting (May 2018, Osaka).
- [31] Koji Nagano on behalf of KAGRA Detchar subgroup: Results of the PEM injection during bKAGRA phase 1, 19th KAGRA Face-to-Face meeting (Osaka, Japan, May, 2018).
- [32] Masaki Ando: KAGRA Roadmap and Configuration, 19th KAGRA Face-to-Face Collaboration Meeting (May 20th, 2018, Osaka, Japan).
- 招待講演
- [33] Yuta Michimura on behalf of the KAGRA Collaboration: Status of KAGRA: Recent progress towards O3 and future plans, Conference on Multimessenger Astronomy in the Era of LIGO-India (Jan 2019, Khandala, India).
- [34] Masaki Ando: Recent results of gravitational wave, Higgs Couplings 2018 (Nov. 28, 2018, KFC Hall and Rooms, Ryogoku, Tokyo).
- [35] Masaki Ando: DECIGO : Gravitational-Wave Observation from Space, The 15th MG Meeting (July 1-7, 2018, University of Rome, Italy).
- [36] Masaki Ando, *et al.*: TOBA: Torsion-Bar Gravitational-Wave Antenna, The 15th MG Meeting (July 1-7, 2018, University of Rome, Italy).
- [37] Tomofumi Shimoda, *et al.*: Status of Torsion-bar Antenna Development, GWADW 2018 (May 2018, Alaska).
- [38] Y. Enomoto and K. Izumi for the KAGRA Collaboration: KAGRA: Status and Near Term Plans, GWADW 2018 (May 2018, Alyeska Resort, USA).
- [39] K. Komori, *et al.*: Towards observation of quantum radiation pressure fluctuation acting on a torsion pendulum, GWADW 2018 (May 2018, Alaska).
- [40] Yuta Michimura: Sensitivity Optimization of Cryogenic Gravitational Wave Detectors, GWADW 2018 (May 2018, Alaska, USA).
- ポスター発表
- [41] Ching Pin, Ooi, *et al.*: Mechanical Loss of Crystal Fibres for Torsional Pendulum Experiments, KAGRA Aug 2018 Face-to-Face meeting (2018年8月26日, University of Toyama).
- [42] Takuya Kawasaki, *et al.*: Optical Levitation of a Mirror, The 19th KAGRA Face-to-Face meeting (Osaka, Japan, May, 2018).
- [43] Koji Nagano on behalf of KAGRA Detchar subgroup, Environmental monitors in bKAGRA phase1, The 19th KAGRA Face-to-Face meeting (Osaka, Japan, May, 2018).
- [44] Ching Pin, Ooi, *et al.*: Mechanical Loss of Crystal Fibres for Torsional Pendulum Experiments, The 19th KAGRA Face-to-Face meeting (Osaka, Japan, May, 2018).
- (国内会議)
- 一般講演
- [45] 武田 紘樹, 他: 超小型衛星を用いた光速等方性検証ミッションの提案, 超小型衛星利用シンポジウム (2019年3月18日, 東京大学).
- [46] 高野哲, 他: ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA (Phase-III) の開発 (13): 能動防振系の開発, 日本物理学会 第 74 回年次大会 (2019年3月, 九州大学, 福岡).
- [47] 宮崎祐樹, 他: ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA (Phase-III) の開発 (14), 日本物理学会 第 74 回年次大会 (同上).
- [48] 下田智文, 他: ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA (Phase-III) の開発 (15): 低温ねじれ振り子の開発, 日本物理学会 第 74 回年次大会 (同上).
- [49] Ching Pin, Ooi, 他: Development of Phase-III TOBA (Torsion Bar Antenna) for Gravitational Wave Observation (16): Reducing Suspension Losses via Crystal Fibres, 日本物理学会 第 74 回年次大会 (同上).
- [50] 安東正樹: スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (100): B-DECIGO の概要, 日本物理学会 第 74 回年次大会 (同上).
- [51] 長野晃士, 他: スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (105): 干渉計統合試験用プラットフォーム, 日本物理学会 第 74 回年次大会 (同上).
- [52] 榎本雄太郎, 他: 大型低温重力波望遠鏡 KAGRA の主干渉計制御, 日本物理学会 第 74 回年次大会 (同上).
- [53] 道村唯太, 他: 光共振器を用いたアクション暗黒物質の探索, 日本物理学会 第 74 回年次大会 (同上).
- [54] 川崎拓也, 他: 光輻射圧による鏡の光学浮上技術の開発 (9) 日本物理学会 第 74 回年次大会 (同上).

- [55] 喜多直紀, 他: 光輻射圧による鏡の光学浮上技術の開発 (10) 日本物理学会 第 74 回年次大会 (同上).
- [56] 武田紘樹, 他: 第三世代重力波望遠鏡によるコンパクト連星合体からの重力波偏極モード検証, 日本物理学会 第 74 回年次大会 (同上).
- [57] 小森健太郎, 他: ねじれ振り子を用いた量子輻射圧揺らぎ観測, 日本物理学会 第 74 回年次大会 (同上).
- [58] 有富尚紀, 他: 重力波望遠鏡の感度向上のための周波数依存スクイズ光の開発, 日本物理学会 第 74 回年次大会 (同上).
- [59] 安東正樹: 宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO, 2018 年度第 2 回 CRC 将来計画タウンミーティング (2018 年 11 月 18 日, 東京大学柏キャンパス, 千葉).
- [60] 安東正樹: 宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO の概要 2018 年 DECIGO ワークショップ (2018 年 11 月 1 日, 名古屋大学 東山キャンパス, 愛知).
- [61] 長野晃士, 下田智文, 道村唯太, 安東正樹: 干渉計統合試験用プラットフォームの開発, 2018 年 DECIGO ワークショップ (2018 年 11 月 1 日, 名古屋大学 東山キャンパス, 愛知).
- [62] 安東正樹: 宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO, 2018 年度第 1 回 CRC 将来計画タウンミーティング (2018 年 10 月 20 日, 東京大学柏キャンパス, 千葉).
- [63] 武田紘樹, 他: コンパクト連星合体からの重力波偏極モード検証, 日本物理学会 2018 年秋季大会 (2018 年 9 月, 信州大学).
- [64] 高野哲, 他: ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA (Phase-III) の開発 (11): 防振系開発, 日本物理学会 2018 年秋季大会 (同上).
- [65] 下田智文, 他: ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA (Phase-III) の開発 (12): 光学系開発, 日本物理学会 2018 年秋季大会 (同上).
- [66] Ching Pin, Ooi, 他: Mechanical loss of crystal fibres for torsion pendulum experiments, 日本物理学会 2018 年秋季大会 (同上).
- [67] 長野晃士, 他: スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (99): 統合試験用プラットフォームの開発, 日本物理学会 2018 年秋季大会 (同上).
- [68] 榎本雄太郎, 他: 大型低温重力波望遠鏡 KAGRA の干渉計の動作点への引き込み法の開発, 日本物理学会 2018 年秋季大会 (同上).
- [69] 喜多直紀, 他: 光輻射圧による鏡の光学浮上技術の開発 (7), 日本物理学会 2018 年秋季大会 (同上).
- [70] 川崎拓也, 他: 光輻射圧による鏡の光学浮上技術の開発 (8), 日本物理学会 2018 年秋季大会 (同上).
- [71] 小森健太郎, 他: 量子輻射圧揺らぎ観測に向けたねじれ振り子光共振器の変位雑音評価, 日本物理学会 2018 年秋季大会 (同上).
- [72] 道村唯太: レーザー干渉計による精密距離計測, 第三回若手による重力・宇宙論研究会 (2019 年 2 月, 京都大学).
- [73] 道村唯太: 重力波観測の現状と展望, 第三回若手による重力・宇宙論研究会 (2019 年 2 月, 京都大学).
- [74] 安東正樹: 宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO, 日本学会会議 天文学・宇宙物理分科会 マスタープラン 2020 第 2 回シンポジウム (2019 年 1 月 18 日, 国立天文台, 三鷹).
- [75] 安東正樹: 量子光学における熱雑音と重力波検出の展望, 日本レーザー学会学術講演会 第 39 回年次大会 (2019 年 1 月 12 日, 東海大学 高輪キャンパス, 東京).
- [76] 安東正樹, 綿田辰吾, 亀仲樹, 道村唯太: 高感度重力勾配センサによる地震早期アラート手法の確立, 光・量子飛躍フラッグシッププログラム 量子計測・センシング キックオフ会議 (2018 年 12 月 17 日, 東工大 蔵前会館, 東京).
- [77] 安東正樹: 宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO, 第 1 回大型計画に関する公開シンポジウム (2018 年 9 月 13 日, 東京大学, 東京).
- [78] 安東正樹: 重力波観測分野の将来計画, 2030 年代の光学赤外線天文学を考える (2018 年 9 月 11 日, 国立天文台, 東京).
- (セミナー・アウトリーチ講演)
- [79] 安東正樹: 重力波で探る宇宙, 日本物理学会 市民科学講演会 (2019 年 3 月 16 日, 九州大学, 福岡).
- [80] 安東正樹: 重力波で探る宇宙, NHK 文化センター講演会 (2019 年 2 月 23 日, 町田, 神奈川).
- [81] 安東正樹: 重力波とブラックホール, 川口市立科学館 プラネタリウム (2019 年 2 月 17 日, 川口市立科学館, 埼玉).
- [82] 安東正樹: 時空のさざ波 ~ 重力波で探る宇宙, 第 26 回 自然科学研究機構シンポジウム (2018 年 12 月 8 日, 東京国際交流館, 東京).
- [83] 安東正樹: 「重力波」観測の衝撃, NHK 文化センター 横浜ランドマーク教室 (2018 年 11 月 11 日, 文化センター横浜, 神奈川).
- [84] 安東正樹: アインシュタインの最後の宿題 重力波で探る宇宙: 山形県高等学校教育研究会 (2018 年 10 月 24 日, 河北町総合交流センター, 山形).
- [85] 安東正樹: 重力波で探る宇宙, 第 7 回 福島医師会 市民文化講演会 (2018 年 10 月 6 日, 福島市保健福祉センター, 福島).
- [86] 道村唯太: 重力波で宇宙と社会に耳をすます, 教養総合リレー講座「理系的地球の歩き方」(2018 年 10 月, 麻布高等学校).
- [87] 道村唯太: 重力波を用いた新しい宇宙観測, グローバルウィーク (2018 年 10 月, 順天高等学校).

招待講演

- [72] 道村唯太: レーザー干渉計による精密距離計測, 第三回若手による重力・宇宙論研究会 (2019 年 2 月, 京都大学).

II

Summary of group activities in 2018

1 Ando Group

Research Subjects: Experimental Relativity, Gravitational Wave, Laser Interferometer

Member: Masaki Ando and Yuta Michimura

Gravitational waves has a potential to open a new window onto the Universe and brings us a new type of information about catastrophic events such as supernovae or coalescing binary neutron stars or binary black holes; these information can not be obtained by other means such as optics, radio-waves or X-ray. Worldwide efforts are being continued in order to construct and improve detectors.

In Japan, we are constructing a large-scale cryogenic gravitational-wave antenna, named KAGRA, at Kamioka underground site. This underground telescope is expected to catch gravitational waves from the coalescence of neutron-star binaries at the distance of 200 Mpc. A space laser interferometer, DECIGO, was proposed through the study of the gravitational wave sources with cosmological origin. DECIGO could detect primordial gravitational waves from the early Universe at the inflation era.

The current research topics in our group are followings:

- KAGRA gravitational wave detector
- Space laser interferometer, DECIGO
- Development of TOBA (Torsion Bar Antenna)
- High-precision experiments on relativity and opto-mechanics
 - Opto-mechanics experiments with triangular cavity
 - Optical levitation experiments
 - Experimental study of space isotropy

Reference

- [1] KAGRA collaboration, KAGRA: 2.5 Generation Interferometric Gravitational Wave Detector, *Nature Astronomy* **3**, 35 (2019).
- [2] Nobuyuki Matsumoto, Seth B. Cataño-Lopez, Masakazu Sugawara, Seiya Suzuki, Naofumi Abe, Kentaro Komori, Yuta Michimura, Yoichi Aso, Keiichi Edamatsu, Demonstration of Displacement Sensing of a mg-Scale Pendulum for mm- and mg-Scale Gravity Measurements, *Phys. Rev. Lett.* **122**, 071101 (2019).
- [3] KAGRA Collaboration, Vibration isolation system with a compact damping system for power recycling mirrors of KAGRA, Accepted in *Classical and Quantum Gravity* (2019).
- [4] T. Shimoda, Naoki Aritomi, Ayaka Shoda, Yuta Michimura and Masaki Ando, Seismic cross-coupling noise in torsion pendulums, *Phys. Rev. D* **97**, 104003 (2018).
- [5] KAGRA Collaboration, LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration, Prospects for Observing and Localizing Gravitational-Wave Transients with Advanced LIGO, Advanced Virgo and KAGRA, *Living Reviews in Relativity* **21**, 3 (2018).
- [6] Kentaro Komori, Yutaro Enomoto, Hiroki Takeda, Yuta Michimura, Kentaro Somiya, Masaki Ando, Stefan W. Ballmer, Direct approach for the fluctuation-dissipation theorem under nonequilibrium steady-state conditions, *Phys. Rev. D* **97**, 102001 (2018).
- [7] Yuta Michimura, Kentaro Komori, Atsushi Nishizawa, Hiroki Takeda, Koji Nagano, Yutaro Enomoto, Kazuhiro Hayama, Kentaro Somiya, Masaki Ando, Particle swarm optimization of the sensitivity of a cryogenic gravitational wave detector, *Phys. Rev. D* **97**, 122003 (2018).
- [8] Hiroki Takeda, Atsushi Nishizawa, Yuta Michimura, Koji Nagano, Kentaro Komori, Masaki Ando, Kazuhiro Hayama, Polarization test of gravitational waves from compact binary coalescences, *Phys. Rev. D* **98**, 022008 (2018).
- [9] Ippei Obata, Tomohiro Fujita, Yuta Michimura, Optical Ring Cavity Search for Axion Dark Matter, *Phys. Rev. Lett.* **121**, 161301 (2018).