

目 次

I	研究室別 2017 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	宇宙空間レーザー干渉計	6
1.1.3	ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA	6
1.1.4	相対論・量子光学精密実験	7
II	Summary of group activities in 2017	13
1	Ando Group	15

I

研究室別 2017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、宇宙を観測するための全く新しい窓が開かれた。これらレーザー干渉計型重力波望遠鏡のさらなる高感度化や、より多くの望遠鏡数での同時観測により、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可能になる。より精密な到来方向決定は電磁波やニュートリノなどと合わせたマルチメッセンジャーによる天文学を進める上で極めて重要である。また、より精密な連星パラメータ決定により、ブラックホールの起源や中性子星の状態方程式に迫るだけでなく、宇宙論や重力理論への知見が得られると期待されている。

こうしたさらなる重力波物理学・天文学の発展を目指す、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、一般相対論の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るため、スカラー・テンソル理論など一般相対論に代わる重力理論の検証が可能となる。

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。

KAGRA の現状

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。そして2016年の3月から4月にかけて、常温マイケルソン干渉計というシンプルな構成ながら、初めての試験運転を行った。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を行う予定である。さらに2019年には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(図1.1.1)。本年度は特に、3 kmの腕共振器の補助制御に必要となる倍波光(波長532 nm)光学系のインストールとアラインメント、モードクリーナーと呼ばれる共振器の角度揺れの評価を行った。また、磁場雑音や音響雑音などの評価に必要となる環境雑音注入の準備を進めた。さらに本年度は、特に温度勾配がある場合のサスペンション熱雑音に着目し、干渉計感度のより正確な設計を行った。KAGRAの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。



図 1.1.1: KAGRA のコントロールルーム

初期観測へむけた干渉計の開発

当研究室ではKAGRAの主干渉計部分を担当しているが、本年度は具体的には次のようなことを行った。

1つは、低温マイケルソン干渉計の試験運転へむけた干渉計のコミッショニングである。ここでコミッショニングとは、インストールされた光学系やレーザー光を統合し、動作する干渉計を組み上げることである。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う予定であり、この運転の干渉計動作のためのKAGRAサイトでのコミッショニング、すなわち鏡の初期アラインメントを整えメインレーザーを3 kmの腕を往復させること、鏡およびその懸架系の姿勢制御、マイケルソン干渉計の制御信号

の取得および制御に対して、当研究室のメンバーが主要な役割を果たした。

2 つめには、KAGRA の初期観測運転時の感度を最適化する干渉計構成の提案と、そのような干渉計構成における主干渉計制御のシミュレーションである。KAGRA の干渉計のデザインは、最終形が達成されたときの感度が最適になるように決定されているが、初期観測運転時には技術的な雑音や最終形より低い入射レーザーパワーが予想されるため、異なる干渉計構成がより良い感度を与えうる。そこで当研究室では、比較的容易に変更可能なシグナルリサイクリング鏡という重力波信号の抜き出しに関わる鏡の反射率に着目し、その反射率をいくつに設定すれば最適な感度が得られるかを計算した。また、反射率の変更をした場合に主干渉計制御に与える影響についてもシミュレーションを行った。

干渉計感度設計

安東研究室では、KAGRA の詳細な感度設計を行っている。特に本年度は、初の KAGRA の厳密な懸架熱雑音を導出に成功し、干渉計パラメータの確認および最適化を行った。

KAGRA は、世界で唯一の低温重力波望遠鏡である。振り子の上部が冷却され鏡から懸架ファイバーを通して熱が吸収されるため、ファイバーに熱勾配が生じ非平衡状態となっている。通常、熱雑音は平衡状態を仮定して導出され非平衡状態には適応できないため、これまでの推定方法は不完全であった。

そこで私たちは、GSGC 客員准教授として物理学専攻に滞在していた Stefan Ballmer 氏と共同研究を行い、このような温度勾配のある系の厳密な熱雑音の導出に成功した。特にこの理論を KAGRA の懸架系に適用し、厳密な懸架熱雑音を推定した [16]。本研究の論文は PRD 誌に受理されている。

また、これまで用いられてきた KAGRA の感度計算コードを見直し、パラメータの確認などを行った。全ての干渉計パラメータを多くの KAGRA メンバーと共に確認し、より正確な KAGRA の感度を設計することに成功した [17]。さらに、KAGRA のアップグレード計画についても詳細な検討を行った。レーザー光の高パワー化や鏡の巨大化によって KAGRA の感度を上げるべく、その実現可能性や得られる物理について研究を行っている [18]。

1.1.2 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。DECIGO は極めて技術的要求が高い計画であ

るため、数段階の技術実証実験を経てその実現を目指す。本研究室ではこれまでに世界初の宇宙空間重力波検出器である SWIM_{μν} を打ち上げ、そのデータを用いた重力波探索解析を行っている。2017 年度は、DECIGO の前段階となる宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO の検討を進めた。LIGO が観測したような 30 $M_{\odot}$ の質量をもつブラックホールの連星であれば、赤方偏移 30 の遠方まで観測可能であること、長時間の観測によって位置の特定も可能であることなどが示され、その科学的な意義の検討を進めた。また、中性子星連星や中間質量ブラックホールの合体といった観測の可能性で得られる科学的成果の検討や、その観測を行うためのミッション検討も進めた。

1.1.3 ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA

Torsion-bar Antenna (TOBA) とは、ねじれ振り子を用いた新しい重力波検出器である。TOBA は 2 本の棒状のテストマスを持ち、これらが重力波による潮汐力を受けて差動回転するのを読み取ることで、重力波を検出する。TOBA の大きな特徴は、回転方向の共振周波数が小さいことから、地上においても 1 Hz 付近の低周波数帯に良い感度を持つことである。これによって、地上の干渉計型重力波検出器では捉える事が難しい、中間質量ブラックホール連星合体や背景重力波などといった低周波重力波源の探索を行う事を目標とする。

感度向上

現在の TOBA は試験マスの変位センサーとしてマイケルソン干渉計を用いており、それに由来する種々の雑音がある。主要な雑音の一つが地面振動雑音であり、その他にレーザーの強度雑音、周波数雑音、アクチュエータ由来の雑音、環境磁場の変動雑音などがある。

前年度は水平地面振動雑音の低減手法を提案し、それによって実際に雑音を低減することに成功したが、本年度はさらに水平地面振動以外の雑音の低減を行い、前年度を超えた感度を達成することに成功した。

まず、これまで定量的に評価されていなかった雑音の評価を行った。具体的には鉛直地面振動からの寄与、レーザーの偏光揺らぎ、レーザーの周波数雑音、及び環境磁場変動雑音について測定を行った。その結果 [58, 41], 0.01 - 1 Hz の周波数帯でレーザーの偏光揺らぎが、10 - 30 Hz の帯域では鉛直地面振動が現在の感度を制限していることがわかった。また直接感度を制限してはいないが、環境磁場変動雑音も現在の感度の数倍低いレベルに存在していることも分かった。

さらに、レーザーの偏光揺らぎを低減する手法の確立を行った。まず偏光ビームスプリッターでレーザー光の P 偏光のみを取り出し、続いて P 偏光の強度を安定化して干渉計へ入射することにより、偏光揺らぎによる雑音を低減した。その上で、アクチュエータ効率を下げることでアクチュエータ回路由来

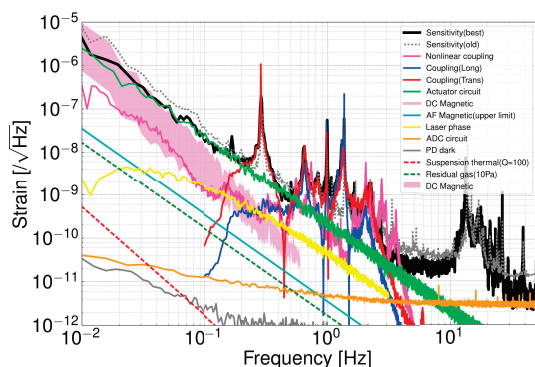


図 1.1.2: 更新された TOBA の感度と主な雑音源

の雑音を低減し、その結果 TOBA の最高感度を更新することができた (図 1.1.2). 今後は、これまでの知見をもとに、後述する低温 TOBA の開発に生かしていく予定である。

低温 TOBA の検討・設計

熱雑音は TOBA の目標感度達成において最も障害となる雑音の一つである。Phase-III TOBA では、ワイヤの温度 4 K, Q 値 10^8 が要求値となっている。前者については懸架系を冷却することで達成できるが、冷却機構による雑音の増加を抑えての低温化は慎重な設計を要する。雑音を小さくするためには懸架ワイヤが細い方がよいが、細いほど熱伝導が小さくなり冷却が難しくなる等の事情による。そこで本年度は、懸架ワイヤを 4 K まで冷却できる懸架系の設計を行った。冷却開始時 (300 K) からしばらくは主にマス表面からの熱輻射によって冷却し、数 10 K まで達した後は懸架ワイヤを通した熱伝導によって冷却される設計である。懸架系の質量、材質、形状などを考慮して冷却時間の計算を行った結果、約 21 日で 4 K まで冷却できる見積もりとなっている。

今後はより具体的な設計と性能試験を行う。冷凍機 (パルスチューブ冷凍機) は既に真空槽にインストールされており、一重の輻射シールド (44 K) も既に導入されている。約 4 年前に冷凍機の動作試験も行われ、スペック通りに冷却できることも確かめられた。現在は 4 年ぶりの再稼働に向けた準備を行っている他、二重輻射シールドおよび懸架系の具体的な設計が行われている。また、低温下でも動くことが期待される光検出器やモーター、可動ステージ、ヒートリンクなど要素部品の候補も既に挙げられており、今後低温での動作試験などを行っていく予定である。

Fiber Q measurement

The first half of the year was spent (research wise) on the characterisation and selection of thin ($\sim 3 \mu\text{m}$ thick) tungsten wires for use in radiation

pressure experiment via measuring the torsion Q factor. A clear choice emerged from the three options tested, and it was found that clamp loss dominated at large amplitudes [53].

The second half was spent designing a system for measuring the torsion Q factor of crystal fibres, for use in precision experiments using torsional pendulums, such as TOBA [14]. 1 mm thick C-axis sapphire fibre was measured to have a Q factor of 1.3×10^5 , which is the first measurement for torsional Q of sapphire fibres in a torsional pendulum setup at room temperature, and is higher than any comparable setup that uses a metal fibre [37].

1.1.4 相対論・量子光学精密実験

ねじれ振り子を用いたオプトメカニクス研究

当研究室では、振り子を用いてレーザー光の量子輻射圧揺らぎを広い周波数帯で測定することを目指している。量子輻射圧揺らぎの観測は、重力波検出器の R&D や、機械振動子の基底状態冷却に対し大きな意義を持つ。しかしながら、これまで振り子を用いて自由質点領域で観測した例はない。そこで我々は、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ることで、量子輻射圧揺らぎを観測することを目指している (図 1.1.3)。

回転モードは、懸架の熱雑音を抑制できるという点で有利である。ねじれ振り子の復元力は非常に小さいため、歪みに伴って発生する熱雑音も小さくなる。また、両腕の変位差を測定することで、並進の振り子モードに効く雑音や、レーザー光の古典的な雑音を同相雑音除去できる点も大きな利点である。

本年度は、まず防振装置や光共振器の構築に取り組み、これが完了した [51, 12]。さらに、棒状鏡の両端で同時に光共振器をロックすることにも成功した。また、測定された棒状鏡の曲がりモードから、適切なキャリブレーション係数やビームスポット位置を求めることにも成功した [35]。今後は、共振器内パワー増大および雑音低減に取り組み、量子輻射圧揺らぎの観測を目指す。

光学浮上鏡の開発: 設計/実験

巨視的な振動子の実現を目指し、懸架に伴う熱雑音を導入しない鏡の支持方法として、鏡を光輻射圧で浮上させる方法の開発を行っている。当研究室では、安定な光学浮上の構成として、鏡の上下から光を当てるサンドウィッチ構成を提案し、その実現に向けた基礎研究を進めている。特に、ねじれ振り子の端に鏡をつけることで微小な力を感じうる系を作り、この鏡を用いて Fabry-Perot 共振器を構成することで浮上安定性の実験的検証を進めている。本年度は、ねじれ振り子と Fabry-Perot 共振器を同時に制御した状態で共振周波数の測定を測定し、安定性

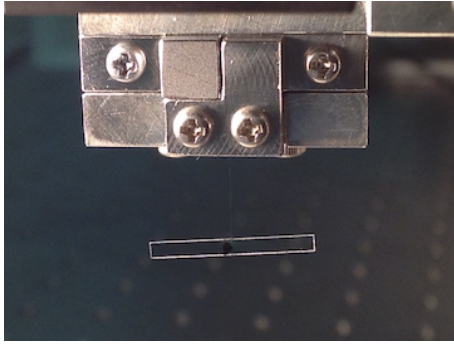


図 1.1.3: ねじれ振り子として用いる棒状鏡

検証ができるよう装置を築いた。その上で現状のセットアップの各パラメータの評価を行い、レーザー強度を 1 W 以上に向上することで安定性の実証が可能であることを示した。今後はレーザーアンプを導入し、この装置を用いてサンドウィッチ構成の安定性検証を行う予定である。

また、実際に微小鏡を浮上させる実験セットアップを構築するための準備も進めてきた。特に本年度は、サンドウィッチ型光学浮上において最も重要な微小鏡を含む 2 つの Fabry-Perot 共振器の設計を進めてきた。まず初めに、微小鏡 (質量 1.6 mg, 厚さ 0.1 mm) の曲率半径の評価を行った。固定された微小鏡を含む Fabry-Perot 共振器を構築して縦モードを評価することで、微小鏡の曲率半径を測定し、現実的な機械精度内で、鏡の曲率中心間距離を調整できることを確認した。次に、サンドウィッチ型光学浮上の 2 組の Fabry-Perot 共振器の内部状態をモニターするために必要な偏光ビームスプリッター (PBS) の光損失の評価を行った。微小鏡を挟んでいる 2 組の Fabry-Perot 共振器の共振モードや共振器内パワーなどの内部状態をモニターするために、それぞれの共振器内に PBS を組み込む設計になっている。この PBS を持つ Fabry-Perot 共振器の損失を実際にセットアップを構築して評価した。その結果、PBS の往復光損失は 250 ppm 以下であると測定され、共振器内の往復光損失が 9000 ppm 以下という要求値を満たすことを確認した。今後は、ねじれ振り子を使った実験により水平方向の安定性が実証され次第、実際の浮上実験用セットアップを構築し、サンドウィッチ型光学浮上の原理実証を行う計画である。

光リング共振器を用いた光速の異方性検証

Einstein の特殊相対性理論によると、Lorentz 不変性は宇宙の基本的な対称性の 1 つである。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 不変性を検証する方法の 1 つと

して、片道光速の異方性探査を行っている。片道光速の異方性とは光速の行きと帰りの差を意味し、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いう形で測定することができる。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、本年度までに回転機構と光学系の改良を行った。この改良によって雑音が低減し、7 日間にわたり異方性を探査したところ、我々がもつ世界最高精度とほぼ同じ精度を達成し、このまま 1 年間測定を行うことで世界最高精度を約 5 倍更新できる見込みがあることがわかった。

一方で、回転と同期する雑音が新たに問題になるということがわかったため、今後はさらなる回転機構の改良により、そのような雑音を低減する必要がある。

モノリシック光学系の開発

一般に光速の異方性探査による Lorentz 不変性の検証実験では、信号に変調を加えるための装置の回転に伴う振動が主要な雑音源となる。そこで Lorentz 不変性の高精度検証のために、光リング共振器を用いた片道光速の異方性に感度を持つ上述の構成で、光学土台と光学素子を接着し一体化することで振動感度を低減できるモノリシック光学系を製作した。モノリシック光学系は通常の光学系と比べてアラインメントの難度が高く工夫を要する。テンプレートと手動ステージを用いた光学土台上部からの光学素子の支持を用いてモノリシック光学系アラインメント手法を開発した。開発したモノリシック光学系アラインメント手法では角度精度で 0.11° のモノリシック光学系アラインメントが可能であり、本実験では十分な精度となっている。

開発したモノリシック光学系アラインメント手法によって製作したモノリシック光学系は入射光学系と共振器部が一体となった世界初のモノリシック光学系である。振動評価と温調を用いた同相雑音除去比の実測によって、製作したモノリシック光学系で Lorentz 不変性の破れの可能性が示唆されている 10^{-17} レベルでの片道光速の異方性探査が可能であることを示した。

一方、現在の光学系は強度雑音で制限されていることがわかっており、実際のモノリシック光学系の振動感度はより低いと考えられる。したがってモノリシック光学系自身の正確な振動評価には強度雑音対策をより徹底する必要がある。

<報文>

(原著論文)

- [1] T. Akutsu, M. Ando, S. Araki, et al. (KAGRA Collaboration), Construction of KAGRA: an under-

ground gravitational-wave observatory, Progress of Theoretical and Experimental Physics 2018, 013F01 (2018).

- [2] Yuta Michimura, Tomofumi Shimoda, Takahiro Miyamoto, et al., Mirror actuation design for the interferometer control of the KAGRA gravitational wave telescope, Classical and Quantum Gravity 34, 225001 (2017).
- [3] Yuta Michimura, Yuya Kuwahara, Takafumi Ushiba, Nobuyuki Matsumoto, Masaki Ando, Optical levitation of a mirror for reaching the standard quantum limit, Optics Express 25, 13799 (2017).
- [4] Ayaka Shoda, Yuya Kuwahara, Masaki Ando, et al., Ground-based low-frequency gravitational-wave detector with multiple outputs Physical Review D 95, 082004 (2017).

(国内雑誌)

- [5] 安東正樹: 重力波望遠鏡の極限光計測技術, フォトニクスニュース 第3巻 第1号 (2017年).

(学位論文)

- [6] 和田祥太郎: 巨視的量子力学の検証に向けた光輻射圧による浮上手法の開発, 修士論文 (2018年3月).
- [7] 武田紘樹: ローレンツ不変性検証のためのモノリシック光学系の開発, 修士論文 (2018年3月).
- [8] 酒井譲: 光リング共振器の連続回転による片道光速の異方性探査, 修士論文 (2018年3月).

(著書)

- [9] ピエール・ビネトリュイ (著), 安東 正樹 (監訳), 岡田 好恵 (翻訳): 重力波で見える宇宙のはじまり, 講談社ブルーバックス (2017).

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [10] Masaki Ando: Status of TOBA torsion bar experiment, Workshop on Future Instruments for Gravity-based Earthquake (Jan 10th, 2018, France).
- [11] Y. Enomoto, et al.: Signal Recycling Mirror Reflectivity, 18th KAGRA face-to-face meeting (Dec. 2017, Tokyo Institute of Technology).
- [12] K. Komori, et al.: Towards observation of quantum radiation pressure fluctuation acting on a torsion pendulum, 18th KAGRA face-to-face meeting (Dec. 2017, Tokyo Institute of Technology).
- [13] Satoru Takano, et al.: The current status of Torsion Bar Antenna (TOBA), 18th KAGRA Face to Face Meeting (Dec 2017, Tokyo Institute of Technology).

- [14] Ching Pin Ooi, et al.: Investigation of mechanical loss in torsion pendulums, 18th KAGRA Face to Face Meeting (Dec 2017, Tokyo Institute of Technology).
- [15] Y. Enomoto, et al.: Expected Sensitivity Growth and Signal Recycling, 17th KAGRA face-to-face meeting (Aug. 2017, University of Toyama).
- [16] K. Komori, et al.: Suspension thermal noise calculations for KAGRA, 17th KAGRA face-to-face meeting (Aug. 2017, University of Toyama).
- [17] K. Komori, et al.: Proposal to update the latest estimated sensitivity of KAGRA, 17th KAGRA face-to-face meeting (Aug. 2017, University of Toyama).
- [18] K. Komori, et al.: Scientific targets of future KAGRA, 17th KAGRA face-to-face meeting (Aug. 2017, University of Toyama).
- [19] Yuta Michimura: Summary of KSC Session, 17th KAGRA Face to Face Meeting (Aug. 2017, University of Toyama).
- [20] Yuta Michimura for the KAGRA Collaboration: The status of KAGRA underground cryogenic gravitational wave telescope, XV International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics, (Jul 2017, Sudbury).
- [21] Yuta Michimura, et al.: Possibility of Upgrading KAGRA, 3rd KAGRA International Workshop (May 2017, Taipei).
- [22] Masaki Ando: Observation Scenario Paper and Roadmap, 3rd KAGRA International Workshop (May 2017, Taipei).
- [23] Tomofumi Shimoda, et al.: Seismic Cross-Coupling Noise in Torsion-Bar Antenna, GWADW2017 (May 9th, 2017, Australia).
- [24] N. Aritomi, et al.: Monolithic Power Recycling Michelson Interferometer for TOBA, GWADW2017 (May 9th, 2017, Australia).
- [25] Yuta Michimura: Optical Cavity Tests of Lorentz Invariance, Light driven Nuclear-Particle physics and Cosmology 2017 (Apr 2017, Yokohama).

招待講演

- [26] Masaki Ando: KAGRA and B-DECIGO, YKIS2018a Symposium (Feb. 19th, 2018, Kyoto University).
- [27] Masaki Ando: Observation of Gravitational Waves, Japan-France Workshop "Neutron Star Mergers and Galactic Chemical Evolution" (Oct. 20th, 2017, NAOJ).
- [28] Yuta Michimura: Laser Interferometry for Gravitational Wave Astronomy, International OSA Network of Students 2017 (Oct 2017, Okinawa).
- [29] Masaki Ando: Science and Design of DECIGO and B-DECIGO, ISGW2017: International Symposium on Gravitational Waves (May 26th, 2017, Beijing, China).

- [30] Masaki Ando: Science and Design of DECIGO and B-DECIGO, The 2nd ASTROD International Workshop (May 22nd, 2017, National Tsing Hua Univ., Taiwan).
- [31] Masaki Ando: Science and Design of DECIGO and B-DECIGO, The 3rd KAGRA International Workshop (May 21st, 2017, Academia Sinica, Taiwan).
- [32] Yuta Michimura, et al.: Possible KAGRA Upgrades, Gravitational Wave Advanced Detector Workshop 2017 (May 2017, Australia).
- [33] Masaki Ando, et al.: Status of TOBA for Low-frequency GW Observations, Gravitational Wave Advanced Detector Workshop 2017 (May 2017, Australia).
- (国内会議)
- 一般講演
- [34] 榎本雄太郎, 他: 大型低温重力波望遠鏡 KAGRA の初期観測へむけた主干涉計制御, 日本物理学会 第 73 回年次大会 (2018 年 3 月, 東京理科大学).
- [35] 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ロック, 日本物理学会 第 73 回年次大会 (同上).
- [36] 道村唯太, 他: 第二世代重力波望遠鏡の高感度化, 日本物理学会 第 73 回年次大会 (同上).
- [37] Ching Pin Ooi, 他: Investigation of mechanical loss in torsion pendulums (2), 日本物理学会 第 73 回年次大会 (同上).
- [38] 酒井譲, 他: 光リング共振器を用いた Lorentz 不変性検証 (3), 日本物理学会 第 73 回年次大会 (同上).
- [39] 武田紘樹, 他: 光リング共振器を用いた Lorentz 不変性検証 (4), 日本物理学会 第 73 回年次大会 (同上).
- [40] 下田智文, 他: ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA(Phase-III) の開発 (10): 改良計画, 日本物理学会 第 73 回年次大会 (同上).
- [41] 高野哲, 他: ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA(Phase-III) の開発 (9): 0.1Hz 付近周波数帯の雑音の低減, 日本物理学会 第 73 回年次大会 (同上).
- [42] 和田祥太郎, 他: 光輻射圧による鏡の光学浮上技術の開発 (4), 日本物理学会 第 73 回年次大会 (同上).
- [43] 川崎拓也, 他: 光輻射圧による鏡の光学浮上技術の開発 (5), 日本物理学会 第 73 回年次大会 (同上).
- [44] 長野晃士, 他: 光輻射圧による鏡の光学浮上技術の開発 (6), 日本物理学会 第 73 回年次大会 (同上).
- [45] 安東正樹: スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (90): DECIGO/B-DECIGO の概要, 日本物理学会 第 73 回年次大会 (同上).
- [46] 安東正樹: 宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO, 第 18 回宇宙科学シンポジウム (2018 年 1 月 9-10 日, 宇宙科学研究所).
- [47] 安東正樹: 宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO, CRC 将来計画タウンミーティング (2017 年 12 月 16 日, 東京大学).
- [48] 安東 正樹: DECIGO/B-DECIGO の概要, 第 16 回 DECIGO ワークショップ (2017 年 11 月 12 日, 京都大学).
- [49] 長野晃士, 他: 光学浮上技術を用いた超精密位置測定装置の開発, 宇宙素粒子若手の会 第 2 回秋の研究会 (2017 年 10 月, 東京大学).
- [50] 榎本雄太郎, 他: 干渉計型重力波検出と光学機械相互作用, 日本物理学会 2017 年秋季大会 (2017 年 9 月, 宇都宮大学).
- [51] 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構築, 日本物理学会 2017 年秋季大会 (同上).
- [52] 道村唯太, 他: 重力波望遠鏡 KAGRA の主干涉計高度化, 日本物理学会 2017 年秋季大会 (同上).
- [53] Ching Pin Ooi, 他: Investigation of mechanical loss in torsion pendulums, 日本物理学会 2017 年秋季大会 (同上).
- [54] 安東正樹: スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (84): DECIGO/B-DECIGO の概要, 日本物理学会 第 72 回年次大会 (同上).
- [55] 酒井譲, 他: 光リング共振器を用いた Lorentz 不変性検証 (1), 日本物理学会 2017 年秋季大会 (同上).
- [56] 武田紘樹, 他: 光リング共振器を用いた Lorentz 不変性検証 (2), 日本物理学会 2017 年秋季大会 (同上).
- [57] 下田智文, 他: ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA(Phase-III) の開発 (7): 低周波雑音の低減, 日本物理学会 2017 年秋季大会 (同上).
- [58] 高野哲, 他: ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA(Phase-III) の開発 (8): 鉛直地面振動からのカップリング雑音の解析, 日本物理学会 2017 年秋季大会 (同上).
- [59] 和田祥太郎, 他: 光輻射圧による鏡の光学浮上技術の開発 (1) 日本物理学会 2017 年秋季大会 (同上).
- [60] 川崎拓也, 他: 光輻射圧による鏡の光学浮上技術の開発 (2) 日本物理学会 2017 年秋季大会 (同上).
- [61] 長野晃士, 他: 光輻射圧による鏡の光学浮上技術の開発 (3) 日本物理学会 2017 年秋季大会 (同上).
- [62] 道村唯太, 他: 鏡の光学浮上による標準量子限界の到達, 日本物理学会 2017 年秋季大会 (2017 年 9 月, 岩手大学).
- 招待講演
- [63] 安東正樹: 重力波観測における光計測技術, 日本物理学会 第 73 回年会 シンポジウム (2018 年 3 月 22 日, 東京理科大学).
- [64] 安東正樹: 重力波天文学の幕開け, 東北大学 談話会 (2018 年 2 月 14 日, 東北大学).
- [65] 安東正樹: 宇宙からの重力波観測, 2030 年代の光赤外分野のスペースミッション (2017 年 12 月 15 日, 日本橋, 東京).
- [66] 安東正樹: 重力波天文学の幕開け, 京都大学 談話会 (2017 年 11 月 22 日, 京都大学).

- [67] 安東正樹: 重力波観測の現状と今後, X 線天体と元素合成を中心とする宇宙核物理研究会 (2017 年 7 月 21 日, 理化学研究所).
- (セミナー・アウトリーチ講演)
- [68] 安東正樹: 重力波で探る宇宙のはじまり (2018 年 1 月 27 日, 朝日カルチャーセンター湘南).
- [69] 安東正樹: 重力波で探る宇宙, 順天高校 グローバルウィーク (2017 年 11 月 8 日, 順天高校).
- [70] 安東正樹: 重力波天文学で探る宇宙 (2017 年 11 月 4 日, 朝日カルチャーセンター横浜).
- [71] 安東正樹: ブラックホール合体の重力波観測 (2017 年 9 月 9 日, 朝日カルチャーセンター新宿).
- [72] 安東正樹: 重力波・ブラックホール・宇宙のはじまり, 東京大学オープンキャンパス 2017 (2017 年 8 月 2, 3 日, 東京大学).
- [73] 安東正樹: 重力波でさぐる宇宙の大爆発, 第 125 回 東京大学 公開講座 (2017 年 6 月 3 日, 東京大学 安田講堂).
- [74] 道村唯太: 重力波観測の現状と展望, 東北大学ニュートリノ科学研究センターセミナー (2017 年 6 月, 東北大学).
- [75] 安東正樹: 重力波天文学の誕生 (2017 年 4 月 22 日, 朝日カルチャーセンター湘南).

II

Summary of group activities in 2017

1 Ando Group

Research Subjects: Experimental Relativity, Gravitational Wave, Laser Interferometer

Member: Masaki Ando and Yuta Michimura

In February 2016, the LIGO gravitational-wave observatory announced detection of a gravitational-wave signal. The new field of gravitational-wave astronomy was opened. Gravitational waves have a potential to open a new window onto the Universe and bring us a new type of information about catastrophic events such as supernovae or coalescing binary neutron stars or binary black holes; this 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 (former LCGT). The detector is now under construction in KAMIOKA. This underground telescope is expected to catch gravitational waves from the coalescence of neutron-star binaries at the distance of 200Mpc. 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
 - Construction and test observation run
 - Optical design of the interferometer
- Space laser interferometer, DECIGO
- Development of TOBA (Torsion Bar Antenna)
 - A new type sensor for TOBA
 - Design and development of the next generation TOBA
- Development of the ultra stable laser source using cryogenic cavity
- High-precision experiments on relativity and opto-mechanics
 - Opto-mechanics experiments with triangular cavity
 - Optical levitation experiments
 - Experimental study of space isotropy

Reference

- [1] T. Akutsu, M. Ando, S. Araki, et al. (KAGRA Collaboration), Construction of KAGRA: an underground gravitational-wave observatory, *Progress of Theoretical and Experimental Physics* 2018, 013F01 (2018).
- [2] Yuta Michimura, Tomofumi Shimoda, Takahiro Miyamoto, et al., Mirror actuation design for the interferometer control of the KAGRA gravitational wave telescope, *Classical and Quantum Gravity* 34, 225001 (2017).
- [3] Yuta Michimura, Yuya Kuwahara, Takafumi Ushiba, Nobuyuki Matsumoto, Masaki Ando, Optical levitation of a mirror for reaching the standard quantum limit, *Optics Express* 25, 13799 (2017).
- [4] Ayaka Shoda, Yuya Kuwahara, Masaki Ando, et al., Ground-based low-frequency gravitational-wave detector with multiple outputs *Physical Review D* 95, 082004 (2017).