

I

研究室別 2016年度 研究活動報告

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。トンネルの掘削、全長6kmにおよぶ真空パイプの建造、低温ミラーを収納するクライオスタットの製作が完了し、2014年度からは本格的なインストールが開始されている。また、2016年にはiKAGRAと呼ばれる比較的単純な干渉計構成で、システム全体を用いた試験運転も行われ、2018年頃からの本格的な重力波観測開始への期待が高まっている。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。独自の方式のねじれ型重力波検出器TOBAに関しては、プロトタイプ機の開発が進められ、それを用いた観測運転と重力波信号探索も行われた。それらと並行して、われわれは重力波研究で必要とされる技術を用いた関連研究も進めている。片道光速の異性検出や微小距離における重力法則の検証は基礎物理として重要である。また、量子光学の手法を用いた光学実験は重力波検出器の高感度化を実現する可能性を秘めている。

1.1.1 大型重力波検出器 KAGRA

大型低温重力波望遠鏡KAGRA(かぐら)は岐阜県神岡の地下に建設が進められている、一辺3kmのレーザー干渉計型重力波望遠鏡である。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となっている。また、km級の重力波望遠鏡としては初めて、鏡を低温に冷やすことで熱雑音の低減を目指している。

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。2018年には低温運転を行う予定であり、現在はこれに向けたインストール作業や調整作業が進められている。

2016年2月にアメリカのLIGOグループにより重力波の初観測が発表されたが、重力波源の位置特定には複数台による観測が必須である。そのため、KAGRAが重力波の国際観測ネットワークに一刻も早く参加することが期待されている。当研究室ではKAGRAの根幹部分となる、主干渉計光学系や制御系の設計開発を行っている。また、冷凍機からの振動を抑えつつ鏡を冷やすために重要な役割を担う低温懸架系の開発に携わっている。

iKAGRA 試験運転

KAGRAは2016年3月から4月に渡ってInitial KAGRA (iKAGRA) と呼ばれるフェーズでの試験運転を行った。iKAGRAは常温懸架鏡を用いた一辺3kmのマイケルソン干渉計となっており、簡易な干渉計構成であるため重力波の検出は難しい。全長6kmに及ぶ真空槽・真空ダクトのレイアウト確認や計算機やそのネットワーク系の動作確認、データ取得系の動作確認、観測ソフト体制の確認を目的とした試験運転である。当研究室は、このiKAGRA主干渉計の制御で用いる電気回路や配線の初期アライメント、干渉計の制御と重力波信号の較正などにおいて、主要な役割を担った。また、3月の試験運転と4月の試験運転の間の10日ほどのコミッショニング期間に雑音の低減と干渉計動作の安定化を行った。

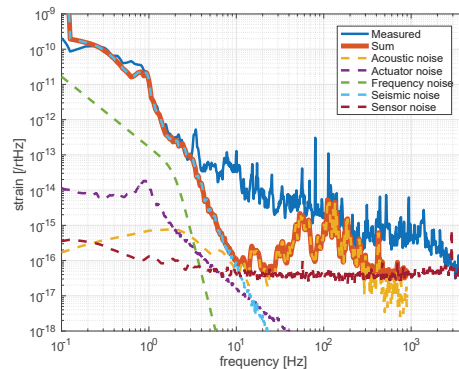


図 1.1.1: iKAGRA の感度曲線と各種雑音の寄与

3月の試験運転では干渉鏡のDC信号を用いた制御であったが、4月の試験運転では変調復調法を用いた制御を実現した。また、鏡の懸架系のセンサ・アクチュエータの再調整を行うことなどにより、制御帯域を8Hzから94Hzまで向上させた。さらに、インプットモードクリーナーにデザイナー・アライメントと呼ばれる手法で鏡の姿勢制御を導入した。これらにより感度を1桁程度改善すると共に、干渉計動作の安定化ができた。稼働率は3月期の85.2%から4月期は90.4%に向上し、最長ロックも3.6時間から21.3時間へと大幅に向上させた。

図 1.1.1 は4月期の典型的な感度スペクトルである。各種雑音の評価により、4Hz以下は地面振動雑音、3kHz以上はアナログ・デジタル変換の量子化雑音に制限されていることがわかった。また、試験運転後にクリーンブースのファンを停止させると感度が向上したことから、中間周波数帯では音響雑音などが感度を制限していることがわかった。図 1.1.1 にプロットされている音響雑音は特に、ビームスプリッター真空槽から混入した音響雑音を評価したものである。音響雑音がほとんどの帯域で感度を制限しているのは、iKAGRA 試験運転では真空槽の真空引きをしていなかったからである。今後の運転ではより本格的な鏡の懸架系を使い、真空引きを行うことで飛躍的な感度向上が期待できる。

主干渉計制御設計

iKAGRA の試験運転後は、Baseline KAGRA (bK-AGRA) と呼ばれる低温での運転を行うフェーズに移行する。当研究室では bKAGRA に向けた入射光学系や主干渉計の制御設計も進めている。

2016 年度は、2018 年 3 月の低温運転に向けた鏡とビームの初期アラインメント計画を立て、干渉計制御のシミュレーションを行った。また、インプットモードクリーナーの制御や腕共振器の 2 倍波光を用いた補助的制御で用いる変調周波数を決定した。さらに、干渉計制御に用いる鏡のアクチュエータについても、設計を進めた。特に低温懸架系が導入される低温真空槽内での磁場測定結果を用いて、多段懸架系の各段での磁場雑音やアクチュエータレンジを評価した。

KAGRA 坑内での作業としては、インプットモードクリーナーの変調復調法を用いた鏡の姿勢制御系の導入を行った。また、インプットモードクリーナーと主干渉計の間の光学系の再調整と、ビームプロファイルの測定を行った。その結果、設計と無矛盾な結果が得られた。今後より精密な測定を行い、2017 年度後半からビームの初期アラインメント作業を開始する予定である。

低温懸架装置

日本の重力波検出器 KAGRA の大きな特徴は米国の aLIGO や欧州の Advanced VIRGO とは異なり地下に建設することと鏡を極低温 (20 K) まで冷却することが挙げられる。安東研ではこのうち低温化した懸架装置 (低温懸架系) を構築するための研究・開発を行っている。

今年度は KAGRA の鏡を懸架する準備として Hydro-Catalysis bonding (HCB) と呼ばれる接合手法の手順の検討を行った。KAGRA の鏡には懸架線を引っ掛けるための構造 (耳) が HCB によって鏡に取り付けられる。HCB の利点は接合強度が非常に強く低温でも使用可能であることや接合層を薄くすることが可能なため接合による機械的散逸が小さくできる点があげられるが、一方で一度取り付けた後に取り外しができないため、接合のやり直しがきかず一度で成功させる必要がある。そのため、接合時には接合のための治具と鏡の保護機能の両方を併せ持った箱 (HCB box) を使用する。HCB box は鏡の位置を機械加工精度で決定し、耳を取り付ける目標位置に 0.1 mm 程度の高い精度で接合することが可能である。

また、アルミ製のダミー鏡を使用した接合実験を多数繰り返し、HCB box のパフォーマンスの試験を行い、デザイン値から 0.1 mm の精度で耳を取り付けることが可能であることを確認した。

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 NGO (LISA の後継計画) 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_{UV} 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。2015 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。

光学系の検討・開発

これまでの TOBA では試験マスの変位センサとしてファイバー干渉計を用いていたが、ファイバー干渉計を用いたことによる位相雑音によって感度が制限されていた。そこで我々は空間光を用いた光学系、特にモノリシック光学系を用いた変位センサの開発を進めている。

今年度は、アルミニウムの光学系土台上で紫外線硬化樹脂を用いたモノリシックパワーリサイクリングマイケルソン干渉計を構築し、干渉計の動作、および先行研究を超える変位感度を達成した。

今後は、モノリシック光学系を組み上げるための治具などの改良、光学系土台を熱膨張率の小さい合成石英のものに変更、強度雑音や周波数雑音などの雑音を低減することによって、要求値到達を目指す。

アクチュエータの検討・開発

これまでの TOBA では試験マスの制御にコイルマグネットアクチュエータを用いていたが、アクチュエータ磁石と環境磁場とのカップリング雑音が問題になっていた。そこで我々は磁石を用いず、かつ駆動力の大きい、コイルコイルアクチュエータという新型のアクチュエータの開発を進めている。

今年度はコイルコイルアクチュエータによってねじれ振り子を制御した上で、ヘルムホルツコイルによって一様な磁場をねじれ振り子に取り付けられたコイルにかけることで、コイルコイルアクチュエータの磁場カップリングを測定し、コイルコイルアクチュエータにおける磁場雑音のダウンコンバージョンを初めて実証した。

以上の実験ではコイルコイルアクチュエータを 1 kHz の電流で駆動していたが、さらなる磁場雑音の低減のために、さらに高周波の 100 kHz で駆動する実験も並行して行った。しかし、回路の問題で 100 kHz での制御には成功しておらず、高周波用の回路に改良する必要があることが分かった。

今後はコイルコイルアクチュエータの原理的な雑音である熱雑音の評価を進め、TOBA のアクチュエータとして十分な性能があることを確認する。

地面振動雑音低減手法の検討・開発

TOBA の主要な雑音の一つが地面振動雑音である。地面の回転が伝達され振り子が回転する回転地面振動雑音と、地面の並進が何らかの非対称性を介して振り子の回転信号に伝達される並進地面振動カップリング雑音、に大きく分けることが出来る。特に後者のカップリング雑音が支配的となることが前年度の計算により明らかになっており、雑音低減のためには非対称性の適切な低減手法を懸架系に組み込む必要がある。今年度は具体的な低減手法の考案を行い、やや簡易なセットアップを用いて低減実証実験を行った。

TOBA では懸架した試験マスの両端を鏡面として干渉計を構成し、干渉信号によって両端の差動 (= 回転) を読み取る構成となっている。このような構成でのカップリングの経路には、(1) 重心位置や質量分布のズレによるマスの傾き、(2) 試験マス上の干渉計用の鏡面の傾き、(3) 干渉計のビームスポットの高さズレ、などがある [24][46]。(1) の経路に関して、現在開発を進めている Phase-III TOBA ではマスの傾きを 2.5 nrad の精度で調整する必要があり、これを実現するため懸架系に質量分布調整機構と傾き微調整用のアクチュエータを導入した。(2) の低減のためには試験マス両端の鏡面が約 1 μ rad の精度で平行である必要がある、このため側面を一体研磨・コーティングした試験マスを製作した。(3) に関してはビームスポットの傾きを約 1 μ rad の精度で調整する必要があり、ピコモーターによるビームスポット調整機構を導入した。

これらの要素を組み込んだ懸架系を構成してカップリング伝達関数の計測・低減実験を行った。計測結

果は (1) (3) から計算される伝達関数と概ね一致しており、上記の経路でカップリングが説明できることが確認された。また、質量分布調整とアクチュエータによってマスの傾きを調整することでカップリングが低減できることもそれぞれ実証された。調整量から計算されるカップリングの変化量も計測結果と一致しており、低減手法に関しても理論通りであることが確認された [10][36]。これらによって雑音低減の流れが実証されたため、今後は調整精度を上げることでさらなる低減を進めていく予定である。

1.1.4 相対論・量子光学精密実験

三角光共振器を用いたオプトメカニクス研究

熱浴から十分に孤立した質量の大きな振動子は、質量依存性のある未知の量子デコヒーレンス (重力デコヒーレンス) の検証や、空間の最小単位の高精度な検証など、様々な基礎物理に実験的な知見を与える可能性を秘めている。これらの検証のため、我々は重力波検出器で用いられているような細線で懸架された鏡に着目し、レーザー光を利用して mg 程度の懸架鏡の機械振動モードを基底状態まで冷却することを目指している。

まず、懸架鏡の振り子モードを基底状態まで冷却する手法の原理検証を行った。共振周波数の低い懸架鏡においては、基底状態まで冷却するにはフィードバック冷却が必要となるが、mg スケールの鏡にアクチュエータを取り付けることは困難である。そこで、三角光共振器を構成する別の大きな鏡にアクチュエータを取り付け、この大きな鏡と mg 鏡を光ばねで束縛することで、光ばねを介し遠隔的に mg 鏡を冷却する手法を用いた。これにより、振り子モードの実効温度を 15 ± 3 mK まで冷却することに成功した。また、基底状態まで冷却された場合にその基底状態を保つ周期数を実測し、懸架鏡の共振周波数 2.14 Hz を光ばねで 1.06 kHz まで上昇させた効果で、周期数を 10^{-11} 程度から 10^{-7} 程度と 4 桁改善することにも成功した [4]。

続いて、懸架鏡の振り子モードよりもねじれモードの方が、その共振周波数の低さゆえに熱雑音が小さく、基底状態冷却に有利であることを見出した。様々な共振周波数をもつねじれ振り子の Q 値を実測し、その Q 値が一定であることから、高周波で熱雑音が小さくなる structure damping model に従っていることを確認した。そして、基底状態冷却の必要条件であるレーザー光の量子輻射圧揺らぎ観測に向けて、ねじれ振り子の両端で三角共振器を構築するセットアップを考案し、様々な雑音の見積もりを行った。ねじれモードを読み出すため両腕で光共振器を組みその差動信号を得るが、この構成はレーザー光の古典的な雑音が同相雑音除去される点でも優れている。結果として、すでに達成されているパラメータを用いて、1 桁以上の広い周波数帯で量子輻射圧揺らぎが支配的になるような設計に成功した [43]。

一方で、同相雑音除去の効果で要求値が緩和されるとはいえ、レーザー光の周波数および強度の安定

化は必要である。そこで周波数安定化のための参照共振器や強度安定化用のフォトディテクターを乗せたプラットフォームを組み上げ、真空装置内で懸架し、周波数雑音、古典強度雑音の評価を行った。結果として、それぞれ要求値を満たす安定度を実現した[33]。今後は、ねじれ振り子共振器の組み立てに取り組み、両腕の共振器ロック、量子輻射圧揺らぎ観測に挑戦する予定である。

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た。そこでそのような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ことが考えられる。光学浮上鏡が実現されれば、その他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ている。この光学浮上が可能となるためには、浮上した鏡が安定となる必要がある。安定な構成として、私たちは鏡の上下から光を当てるサンドイッチ構成を提案し、その実現に向けてこれまでに1.6mgの浮上鏡の製作とねじれ振り子を用いた基礎実験を行ってきた。浮上鏡はmg程度以下かつ曲率つきという条件があり、このような鏡の製作は容易ではない。そこでねじれ振り子の端に鏡をつけることで微小な力を感じる系を作り、この鏡を用いてファブリ・ペロー共振器を作ることで光学浮上に向けた技術開発を行ってきた。また基礎実験を超えて実際にねじれ振り子を用いてサンドイッチ構成の安定性の検証を行うべく、装置を設計し直して組み上げた。その上で装置の特性評価を行い、要求値を満たす仕様であることを確認した。本年度はサンドイッチ構成の安定性検証のためにねじれ振り子の制御と共振周波数の測定のための改良を行った。今後はこの装置を用いてサンドイッチ構成の検証を行い、光学浮上鏡の実現を目指していく。

光リング共振器を用いた光速の異方性検証

アインシュタインの特殊相対性理論によるとローレンツ不変性は宇宙の基本的な対称性である。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ローレンツ不変性が破れている可能性が示唆されている。したがってローレンツ不変性を高い精度で検証することが重要である。

ローレンツ不変性の検証実験の中で、古くから行われているものに光速の異方性探査実験がある。特に、マイケルソン-モーレー型の干渉計を用いた実験は数多く行われており、直交する方向で往復する光速の差を測定することができる。ところが、このタイプの実験では光速の行きと帰りの差、つまり片道光速の異方性を測定することはできない。そこで我々

はこの片道光速の異方性に着目し、その探査実験を行っている。

光速の行きと帰りの差は、非対称な光リング共振器を用いて測定することができる。非対称性は光リング共振器の中にシリコンを入れ、光路の一部の屈折率を変えることで導入している。この非対称性により、片道光速の異方性が存在すると、この光リング共振器の時計回りの共振周波数と反時計回りの共振周波数に差が生じる。この差をダブルパスという光学系構成により測定し、異方性のnull測定が可能となる。また、この測定を光リング共振器を回転させながら行うことで、異方性信号の変調を行う。

我々はこれまでに一年間に渡る異方性探査を行い、片道光速の異方性に世界最高精度となる 10^{-15} レベルの上限値をつけた。さらに拡張標準理論と呼ばれる検証理論の枠組みでデータ解析を行い、光子における高次のローレンツ不変性の破れを表すカモフラージュ係数のうち、奇パリティ成分へ世界最高精度の、または世界初の上限値をつけた。

これまでの感度は装置の回転に伴う雑音によって制限されていた。今年度はさらなる高い精度での検証を目指し、以下の二つの装置改良を進めた。まず初めに、これまで電気配線上的問題で右回りと左回りを交互に回転させていたが、より安定的に回転させるために連続回転を実現するための改良を行なった。次に、振動感度の低いセミモノリシック光学系を用いた光リング共振器制御系の開発を行なった。また、装置の回転に伴う雑音源の一つとして環境磁場が問題になることがわかったため、磁場の影響をキャンセルする解析手法を確立した。

今後はこれまで独立に開発してきた回転機構と光学系を組み合わせることで雑音レベルを評価し、感度向上を目指す。

打撃中心を用いた感度向上の実証

ねじれ振り子を用いた精密測定を行う際、装置の非対称性などに起因して並進方向の地面振動から回転方向へのカップリングが生じる。通常はカップリングを抑えることを目指すが、逆にカップリングを利用して並進と回転の運動を打ち消すことで雑音レベルを下げる手法が提唱されている。

物体が並進運動と回転運動の両方をしているとき、並進と回転がちょうど打ち消しあうような点が存在する。これを打撃中心 (Center of percussion, COP) という。COP付近で並進方向の運動を測定すると、地面振動による雑音を大きく抑えることができる。しかし現実的な精度で測定点をCOPに合わせるには、懸架点を重心から大きくずらすなど、大きな非対称性が必要なのがわかっている。

本年度は、準備実験として強い非対称性を持つねじれ振り子を磁気浮上させて水平に制御する実験が進められた。その結果浮上には成功したが、検証実験ができるほどの安定性を確保することはできなかった。今後は制御をより安定化し、実際に検証実験を行うことを目指していく。

<受賞>

- [1] Yuta Michimura: Tests of Lorentz Invariance with an Optical Ring Cavity, Springer Thesis Prize (May 2016).
- [2] 榎本雄太郎: 東京大学 理学部学修奨励賞 (2016 年度).
- <報文>
- (原著論文)
- [3] K. Eda, A. Shoda, Y. Kuwahara et al.: All-sky coherent search for continuous gravitational waves in 6-7 Hz band with a torsion-bar antenna, PTEP 1, 011F01 (2016).
- [4] T. Nakamura, M. Ando, T. Kinugawa, et al.: Pre-DECIGO can get the smoking gun to decide the astrophysical or cosmological origin of GW150914-like binary black holes, PTEP 9, 930 (2016).
- [5] Y. Kuwahara, A. Shoda, K. Eda, et al.: Search for a stochastic gravitational wave background at 1-5 Hz with a torsion-bar antenna, Phys. Rev. D 94, 92003 (2016).
- [6] N. Matsumoto, K. Komori, S. Ito, Y. Michimura, Y. Aso: Direct measurement of optical-trap-induced decoherence, Phys. Rev. A, 94, 033822 (2016).
- (国内雑誌)
- [7] 安東正樹: 重力波望遠鏡を用いた地震速報, 日本物理学会誌 71 636 (2016).
- [8] 安東正樹: ついに初観測! 重力波とはなにか, 本 10 月号 p.38 (講談社, 2016).
- (学位論文)
- [9] 有富尚紀: ねじれ型重力波望遠鏡 TOBA のためのモノリシック干渉計の開発, 修士論文 (2017 年 3 月).
- [10] 下田智文: ねじれ型重力波望遠鏡 TOBA のための地面振動雑音低減法の研究, 修士論文 (2017 年 3 月).
- (著書)
- [11] 安東正樹: 重力波とはなにか, 講談社ブルーバックス (2016).
- [12] 安東正樹: 重力波の初観測と重力波天文学の幕開け, 理科年表 (丸善出版, 2016).
- <学術講演>
- (国際会議)
- 一般講演
- [13] Yuta Michimura: KAGRA MIF Status Report, 16th KAGRA Face to Face Meeting (Mar 2017, Niigata).
- [14] Yuta Michimura: KAGRA+ planning, 16th KAGRA Face to Face Meeting (Mar 2017, Niigata).
- [15] Takafumi Ushiba, Development of cryogenic system in KAGRA, Workshop on Gravitational Wave activities in Taiwan (Jan. 2017, Academia Sinica, Taipei, Taiwan).
- [16] Yuta Michimura for the KAGRA Collaboration: Status of KAGRA, ELiTES 5th general meeting (Feb 2017, Tokyo).
- [17] Takafumi Ushiba, Status on Cryogenic payload of KAGRA, The 5th ELiTES general meeting (Feb. 2017, Toyama Univ., Toyama, Japan).
- [18] Yuta Michimura: KAGRA MIF Status Report, 15th KAGRA Face to Face Meeting (Dec 2016, Tokyo).
- [19] Tomofumi Shimoda, Naoki Aritomi, Masaki Ando: Current Status of TOBA experiment at Univ. of Tokyo, E-GRAAL (Earthquake GRAVity ALerts) 2nd meeting (Oct. 2016, Institut de physique du globe de Paris).
- [20] Yuta Michimura: KAGRA MIF Status Report, 14th KAGRA Face to Face Meeting (Aug 2016, Toyama).
- [21] Yuta Michimura: Summary of iKAGRA Run, 14th KAGRA Face to Face Meeting (Aug 2016, Toyama).
- [22] Takafumi Ushiba, Mechanical loss measurement for KAGRA sapphire suspension system, The 1st international meeting on KAGRA (Jun. 2016, KISTI, Daejeon, Korea).
- [23] N. Aritomi, T. Shimoda, K. Komori, Y. Kuwahara, Y. Michimura, A. Shoda, Y. Aso, R. Takahashi, K. Kazuhiro, M. Ando: Coil-Coil Actuator for reduction of magnetic noise, GWADW2016 (May 24th, 2016, Elba, Italy).
- [24] Tomofumi Shimoda, Naoki Aritomi, Yuya Kuwahara, Yuta Michimura, Ayaka Shoda, Yoichi Aso, Ryutaro Takahashi, Kazuhiro Yamamoto, Masaki Ando: Reduction of Seismic Coupling Noise for TOBA, Gravitational Wave Advanced Detector Workshop (May 24th, 2016, Elba, Italy).
- 招待講演
- [25] Masaki Ando: Observation of Gravitational Waves, Physics in LHC and the Early Universe (Jan. 10th, 2017, The University of Tokyo, Tokyo).
- [26] Masaki Ando: KAGRA : a Cryogenic Interferometric Gravitational-Wave Antenna Gravitational Wave Astronomy with Present and Future Detectors (Aug. 22nd, 2016, Yangpyeong, Korea).
- [27] Yuta Michimura for the KAGRA Collaboration: Recent news and status of the KAGRA gravitational wave telescope, Optical Society of Korea Summer Meeting 2016 (Jul 2016, Busan).
- [28] Masaki Ando: Space Gravitational-Wave Antenna: DECIGO and Pre-DECIGO, GWPAAW2016 (June 15th, 2016, Cape Cod, Massachusetts, USA).
- [29] Masaki Ando: 重力波天文学の幕開けと将来 The First Direct Detection of Gravitational Wave, Space Science Colloquium (April 27th 2016, ISAS-JAXA, Sagami-hara).

- [30] Masaki Ando: KAGRA : a Gravitational-Wave Antenna in Japan, Korean Physical Society Spring Meeting (April 21st 2016, Daejeon Convention Center, Daejeon, Korea).
- (国内会議)
一般講演
- [31] 道村唯太, 麻生洋一, 宗宮健太郎, 宮川治, 苔山圭以子, 廣瀬榮一, 阿久津智忠, 榎本雄太郎, 小森健太郎, 有富尚紀, 下田智文, 新井宏二, 山本博章: 重力波望遠鏡 KAGRA の低温動作に向けた主干涉計開発, 日本物理学会第 72 回年次大会 (2017 年 3 月, 大阪大学).
- [32] 牛場崇文, 宮本昂拓, 山元一広, 上田綾子, 都丸隆行, The KAGRA cryogenic group, KAGRA 低温懸架系のための低温変位センサーの開発, 日本物理学会 2017 年春季大会 (2017 年 3 月, 大阪大学, 大阪).
- [33] 小森健太郎, 松本伸之, Ooi Ching Pin, 道村唯太, 安東正樹: ねじれ振り子での量子輻射圧揺らぎ観測に向けたレーザー光の周波数, 強度安定化, 日本物理学会第 72 回年次大会 (2017 年 3 月 19 日, 大阪大学).
- [34] 和田祥太郎, 道村唯太, 桑原祐也, 牛場崇文, 松本伸之, 安東正樹: ねじれ振り子を用いた光学浮上の安定性検証 (2) 日本物理学会 第 72 回年次大会 (2017 年 3 月, 大阪大学).
- [35] 有富尚紀, Donatella Fiorucci, 下田智文, 桑原祐也, 道村唯太, 正田亜八香, 麻生洋一, 高橋竜太郎, 山元一広, 安東正樹: ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA(Phase-III) の開発 (6) : 変位センサ雑音および磁場雑音の低減, 日本物理学会 第 72 回年次大会 (2017 年 3 月 19 日, 大阪大学).
- [36] 下田智文, 有富尚紀, 桑原祐也, 道村唯太, 正田亜八香, 麻生洋一, 高橋竜太郎, 山元一広, 安東正樹: ”ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA(Phase-III) の開発 (5) : 地面振動カップリング雑音の低減”, 日本物理学会第 72 回年次大会 (2017 年 3 月 19 日, 大阪大学).
- [37] 酒井讓, 武田紘樹, 道村唯太, 安東正樹: Lorentz 不変性検証のための連続回転機構の開発, 日本物理学会第 72 回年次大会 (2017 年 3 月 19 日, 大阪大学).
- [38] 武田紘樹, 酒井讓, 道村唯太, 松本伸之, 安東正樹: Lorentz 不変性検証のための光リング共振器制御系の開発, 日本物理学会第 72 回年次大会 (2017 年 3 月 19 日, 大阪大学).
- [39] 安東 正樹: 宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO 第 17 回宇宙科学シンポジウム (2017 年 1 月 6 日, 宇宙科学研究所, 相模原).
- [40] 安東 正樹: DECIGO/B-DECIGO の概要第 15 回 DECIGO ワークショップ (2016 年 11 月 5 日, 東京大学, 東京).
- [41] 道村唯太: 大型低温重力波望遠鏡 KAGRA プロジェクトの現状, 日本物理学会 2016 年秋季大会 (2016 年 9 月, 宮崎大学).
- [42] 牛場崇文, 田中宏樹, Kieran Craig, 山元一広, Rahul Kumar, 都丸隆行: KAGRA サファイア懸架系の機械的散逸測定, 日本物理学会 2016 年秋季大会 (2016 年 9 月, 宮崎大学, 宮崎).
- [43] 小森健太郎, 松本伸之, 道村唯太, 安東正樹: 量子輻射圧揺らぎ観測に向けた低熱雑音ねじれ振り子の開発, 日本物理学会 2016 年秋季大会 (2016 年 9 月 24 日, 宮崎大学).
- [44] 和田祥太郎, 道村唯太, 桑原祐也, 牛場崇文, 松本伸之, 安東正樹: ねじれ振り子を用いた光学浮上の安定性検証, 日本物理学会 秋季大会 (2016 年 9 月, 宮崎大学).
- [45] 有富尚紀, 下田智文, 桑原祐也, 道村唯太, 正田亜八香, 麻生洋一, 高橋竜太郎, 山元一広, 安東正樹: ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA(Phase-III) の開発 (4) : 変位センサ雑音および磁場雑音の低減, 日本物理学会 2016 年秋季大会 (2016 年 9 月 24 日, 宮崎大学).
- [46] 下田智文, 有富尚紀, 桑原祐也, 道村唯太, 正田亜八香, 麻生洋一, 高橋竜太郎, 山元一広, 安東正樹: ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA(Phase-III) の開発 (3) : 地面振動カップリング雑音の低減, 日本物理学会 2016 年秋季大会 (2016 年 9 月 24 日, 宮崎大学).
- [47] 武田紘樹, 道村唯太, 松本伸之, 安東正樹: 光リング共振器を用いた Lorentz 不変性検証の信号取得無線化による感度向上, 日本物理学会 2016 年秋季大会 (2016 年 9 月 24 日, 宮崎大学).
- 招待講演
- [48] 安東 正樹: 重力波天文学入門, 第 23 回 ICEPP シンポジウム (2017 年 2 月 19-20 日, 岳見山荘, 白馬, 長野).
- (セミナー・アウトリーチ講演)
- [49] 道村唯太: 重力波の初検出とこれから, 日本大学素粒子論研究室セミナー (2016 年 9 月, 日本大学).
- [50] 安東 正樹: 重力波で探るブラックホールと宇宙ーアインシュタインの相対論と新しい天文学ー, 富山県教育フォーラム (2016 年 12 月 10 日, 富山国際会議場, 富山).
- [51] 安東 正樹: 重力波で知る宇宙の不思議, サイエンスアゴラ 2016 「限界に挑戦する光科学」 (2016 年 11 月 06 日, 日本科学未来館, お台場).
- [52] 安東 正樹: 重力波で宇宙を探るーアインシュタインの相対論と新しい天文学ー, 高尾記念市民公開講座 (2016 年 10 月 30 日, ワテラスコモン ホール, 神田淡路町, 東京).
- [53] 道村唯太: 重力波望遠鏡 KAGRA で聞く! ブラックホール誕生の声, 朝日カルチャーセンター新宿教室「ブラックホール研究の最前線」 (2016 年 6 月, 東京).
- [54] 安東 正樹: 重力波でみるブラックホールと宇宙, いわて銀河フェスタ 2016 (2016 年 8 月 20 日, 国立天文台水沢, 岩手).
- [55] 安東 正樹: 重力波とブラックホール, そして宇宙, 2016 年七夕公開講演会 「七夕の夜は宇宙を見上げて」 (2016 年 8 月 7 日, 法政大学 小金井キャンパス).
- [56] 安東 正樹: 重力波でさぐる宇宙, 朝日カルチャーセンター講演 (2016 年 7 月 23 日, ルミネ横浜, 横浜).
- [57] 安東 正樹: 重力波でさぐる宇宙, 第 28 回 東京大学理学部 公開講演会 (2016 年 4 月 24 日, 東京大学 安田講堂).

II

Summary of group activities in 2016

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] K. Eda, A. Shoda, Y. Kuwahara, et al.: All-sky coherent search for continuous gravitational waves in 6-7 Hz band with a torsion-bar antenna, PTEP 1, 011F01 (2016).
- [2] T. Nakamura, M. Ando, T. Kinugawa, et al.: Pre-DECIGO can get the smoking gun to decide the astrophysical or cosmological origin of GW150914-like binary black holes, PTEP 9, 930 (2016).
- [3] Y. Kuwahara, A. Shoda, K. Eda, et al.: Search for a stochastic gravitational wave background at 1-5 Hz with a torsion-bar antenna, Physical Review D 94, 92003 (2016).
- [4] N. Matsumoto, K. Komori, S. Ito, Y. Michimura, Y. Aso: Direct measurement of optical-trap-induced decoherence, Phys. Rev. A, 94, 033822 (2016).