

I

# 研究室別 2015年度 研究活動報告

## 0.1 安東研究室

本研究室では重力と相対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、2015年度末には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Pre-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。低温(4K)シリコン光共振器を用いた超高安定レーザー光源の開発は世界的にもユニークな研究である。片道光速の異方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。

### 0.1.1 大型重力波望遠鏡 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一辺3kmのL字型レーザー干渉計を建設し、宇宙からの重力波を検出しようとするプロジェクトである。神岡鉱山地下の静寂な環境の中に建設することで地面振動による雑音を軽減し、鏡を20Kの低温に冷やすことで熱雑音の低減を図る計画となっている。2010年10月にプロジェクトがスタートし、2016年3月に常温かつ簡易な構成での試験運転が開始された。2018年には低温での運転を行う予定である。

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。

#### iKAGRA 試験運転

KAGRAは2016年3月に試験運転を開始したが、このフェーズをiKAGRAと呼ぶ。iKAGRAは常温懸架鏡を用いた一辺3kmのMichelson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(図

0.1.1)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、観測シ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取りまとめ、3km光を往復させるための鏡の初期アラインメント、干渉計の制御と重力波信号の較正、雑音源の特定などにおいて、主要な役割を担った。また、当研究室所属の全スタッフ、全学生が観測シフトに参加した。



図 0.1.1: KAGRA の X 腕 3 km 真空ダクト

iKAGRA 主干渉計に入射するレーザーの空間モードの整形や周波数安定化のために用いられるプリモードクリーナー、インプットモードクリーナーの開発も、東京大学宇宙線研究所の重力波グループなどと共に進めた。特に、計算機を用いたプリモードクリーナーの自動制御システムや、インプットモードクリーナーの自動制御システムの開発や性能評価を行った。インプットモードクリーナーに関しては、変調サイドバンドと呼ばれる光を使うことにより、その周回長を6桁の精度で測定し、設計値から1.5cmのずれがあることを確認した。また、インプットモードクリーナーが設計値通りの500程度のフィネスを持つことを確認し、十分なクリーン環境下でインストールが行われたことを確認した。

iKAGRA 主干渉計の動作確認も順調であり、制御系やデータ取得系が期待通りに動いており、90%近い高い稼働率を誇っている。感度は重力波によるひずみ換算で $3 \times 10^{-15} / \sqrt{\text{Hz}} @ 100\text{Hz}$ と、原理的な雑音に比べて3桁程度悪くなっており、試験運転と平行して、現在雑音源特定のための測定や計算が行われている。iKAGRAの試験運転は2016年4月末まで続けられる予定である。

#### 主干渉計制御設計

iKAGRAの試験運転後は、bKAGRA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。

主干渉計に入射するレーザー光には高い強度安定度と周波数安定度が要求される。そこで、今年度はレーザー光の強度安定化や周波数安定化のための光

学系配置と制御システムの設計をほぼ固めた。特に、周波数安定化は複数の光共振器を用いた多段安定化が必要となるため、制御システムをモデル化し、雑音や制御帯域の検討を行った。今後は実際にこの設計での入射光学系統合テストが宇宙線研究所で行われ、性能評価が行われる予定である。

また、主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。レーザー干渉計を高感度な重力波検出器として用いるためには鏡の位置と姿勢を高精度に制御しなければならないが、この制御にはコイル-マグネットアクチュエータが用いられる。鏡に磁石を貼り付け、近くにおいたコイルに電流を流すことで鏡を駆動する。この磁石のサイズが大きいほど、大きな駆動力が得られるが、環境磁場の変動によって鏡の位置が揺らいでしまい、雑音となる。この磁場雑音と駆動レンジの検討を行い、全ての常温鏡に対して、磁石サイズの決定を行った。低温鏡については低温懸架系の設計とともに、現在計算を進めている。

### 0.1.2 宇宙重力波望遠鏡

DECIGO は基線長 1000km 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<sub>μν</sub> を打ち上げ、そのデータを用いた重力波探査解析を行っている。

2015 年度は、DECIGO の前段階となる宇宙重力波望遠鏡 Pre-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。

### 0.1.3 ねじれ型重力波検出器 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査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。

今年度はモノリシック光学系の設計、試験マスや光学素子、光学系土台の設計、発注を行った。

今後はモノリシック光学系を組み上げ、その変位読み取り雑音を評価し、TOBA の変位センサとして十分な性能があることを確認する。

#### 防振・懸架装置の検討・開発

検出器の感度を制限する主要な雑音源の一つが地面振動による試験マスの回転である。回転方向の地面振動が伝達され回転するものと、並進方向の地面振動がねじれ振り子の非対称性などを通して回転にカップルするものがあり、いずれも目標感度を達成できるレベルまで抑える必要がある。

本年度は、回転地面振動雑音を低減するための設計や、並進地面振動からのカップリング経路の系統的研究およびその低減実証のための実験が進められた。回転地面振動雑音に関しては、既存の構成に中段マスを 1 つ追加し 3 段ねじれ振り子とすることで受動防振を強化する設計を行った。また中段マスを防振効率のよい形状にすることで、さらなる防振性能の向上もはかっている。並進地面振動からのカップリングに関しては、カップリングが導入される経路の洗い出しにより、マイケルソン干渉計を用いる単純なねじれ振り子の場合には少なくとも 5 つの経路が存在することが明らかになった。そこから各経路について目標感度を達成するための低減方法が考えられ、ねじれ振り子の非対称性に対する要求値も導かれた。現在はそのうちの 1 つの経路について低減の実証実験が進められている。

#### 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 TOBA に用いられる試験マスと同じサイズの試験マスをコイルコイルアクチュエータによって制御することに成功し、その感度評価を行った。

今後はコイルコイルアクチュエータの磁場雑音や熱雑音といった雑音の評価を進め、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。

## データ解析研究

TOBAの観測データを用いた重力波探査として、これまでは数10mHzから数Hz帯における背景重力波探査や特定の質量(200  $M_{\odot}$ -200  $M_{\odot}$ )を持つ中間質量ブラックホール連星からの重力波探査、特定のパルサー(PSR J2144-3933)からの連続波探査などが行われてきた。今年度はPhase-II TOBAの2014年12月の観測データを用いて、6-7 Hz帯における全天連続波探査、100  $M_{\odot}$ から500  $M_{\odot}$ の広い質量範囲での中間質量ブラックホール連星からの重力波探査を行うことで、TOBAにおける解析パイプラインの開発を進めた。

全天連続波探査については、 $F$ -statisticと呼ばれる統計を用いて、6-7 Hz帯において上限値をつけた。この周波数帯での最も厳しい上限値は6.84 Hzにおける重力波によるひずみに対する上限値で、95%信頼区間で $3.6 \times 10^{-12}$ であった。この上限値は天文学的に面白い領域には達していないが、TOBAのアップグレードによって $\sim 10^{-19}/\sqrt{\text{Hz}} @ 0.1 \text{ Hz}$ の感度が達成されれば、重力波の検出や連星中性子星の楕円度への上限値の設定ができると期待されている。

また、中間質量ブラックホール連星からの重力波探査では1つのブラックホールの質量を100  $M_{\odot}$ から500  $M_{\odot}$ の範囲で刻み、2つのブラックホールの質量が同じとして162個のテンプレート波形を作り、マッチドフィルターを用いて探査を行った。現時点では重力波の候補は見つかっていないが、2つのブラックホールの質量が異なる場合のテンプレート波形を作成し、より広い質量範囲での探査を行う予定である。Phase-II TOBAのこの質量範囲でのブラックホール連星に対する検出可能距離は0.1 pc程度であり、重力波が見つかることはまずないが、イベントレートなどに上限値がつけられると考えられる。

## 0.1.4 低温光共振器を用いた超高安定化レーザー光源

安東研究室では次世代の周波数標準として期待される光格子時計の性能を向上させるための周波数安定化光源の開発を行っている。本研究では低温重力波検出器KAGRAの開発で培った技術を活用して、単結晶シリコンで製作した光共振器を低温に冷却することによって、従来の周波数安定化の妨げとなっていた熱雑音を低減し、1秒のアラン標準偏差で $10^{-17}$ という非常に高い周波数安定度を実現する。これにより、光格子時計は100-1000秒という非常に短時間の積算時間で $10^{-18}$ の安定度が実現可能になる。

今年度は昨年度に構築を終えた周波数安定化セットアップを用いて10 Kまで冷却したシリコン光共振器にレーザーの周波数を安定化し、開発したレー

ザーの周波数安定度を測定した。得られた周波数安定度は0.8秒のアラン標準偏差で $7.03_{-0.34}^{+0.38} \times 10^{-15}$ の安定度で、この結果は1秒近傍の時間スケールにおいて、極低温の光共振器にレーザー周波数を安定化した先行研究の結果を上回る周波数安定度となっている。

しかしながら、現在達成されている $7.03_{-0.34}^{+0.38} \times 10^{-15}$ という周波数安定度は目標としていた $10^{-17}$ に到達していない。したがって、今後の安定度向上のためには現状の安定度を制限している雑音源を特定する必要がある。そこで、周波数雑音源となり得る雑音を定量的に評価することにより現在の安定度を制限している雑音源の特定を行った。

その結果、1 Hz以上の高周波数帯では共振器に加わる振動の影響が大きく、1 Hz以下の低周波数帯では共振器の温度変動の影響が大きかった。また、今回調査したその他の雑音については目標を達成するのに十分なレベルまで雑音が小さいことも確認できた。これにより、振動の低減・温度安定度の向上を行うことで目標が達成可能であることがわかった。

## 0.1.5 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巨視的な、特に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懸架鏡の振り子モードを基底状態まで冷却することを目指している。

基底状態冷却のために、まずレーザー光の量子的な揺らぎ(量子輻射圧揺らぎ)によって励起される振り子運動が熱雑音よりも大きくなるような懸架鏡の開発に取り組んだ。5 mg鏡を一端とした三角光共振器を構成し回転方向を光ねじればねで束縛することで、これまで問題となっていた共振器内光量と懸架線から導入される振り子の熱雑音のトレードオフを解消した。量子輻射圧揺らぎの直接測定には至らなかったものの、振り子運動の大きさの入射レーザー光量依存性を測定することに成功し、量子輻射圧揺らぎと振り子の熱雑音の信号雑音比は $1.4 \pm 0.2$ と推定される[5]。

続いて、懸架鏡の振り子モードを基底状態まで冷却する冷却主婦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、小さな5 mg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5 mg鏡を光ばねで束縛することで、光ばねを介し遠隔的に5 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  $15 \pm 3$  mK まで冷却することに成功した [45, 27].

さらに、例えば基底状態まで冷却されたとしても、基底状態を 1 周期以上保てなければその振動子を基礎物理の検証に用いることはできない。基底状態を何周期保つことができるのかを実測することには大きな意義があるが、いまだ測定例はない。そこで我々は、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の測定に取り組んだ。実測に成功し、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 [27].

現在、実効温度や基底状態を保つ周期数を制限しているのはレーザー光の周波数雑音であることが分かっている。今後は周波数安定化をはじめ、真空度の向上、懸架線の改良 [46] など古典的な雑音を抑える工夫を施し、基底状態到達、基底状態を保つ周期数 1 以上を目指す。

### 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、前節で用いられた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。光学浮上鏡が実現できれば、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 1.6 mg 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うる系を作り、この鏡を用いて Fabry-Perot 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。本年度は、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 [11, 28]。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等方性検証

アインシュタインの特殊相対性理論の登場から、Lorentz 不変性は宇宙の基本的な対称性であると考えられてきた。しかし、重力と他の相互作用を統一的に理解しようとする理論的研究から、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。そのため、よりよい精度での Lorentz 不変性の破れ探査が世界中で行われている。

Lorentz 不変性の検証実験の中で、古くから行われている種類に光速の異方性探査実験がある。特に、直交する方向で往復する光速の差を測る、Michelson-Morley 型の実験が数多く行われてきた。しかし、このタイプの実験では光速の行き帰りの差、つまり片道光速の異方性を測定することができない。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 1 年間に渡る異方性探査を行い、そのデータ解析を行うことで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。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 Lorentz 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。

今年度はさらなる高い精度での検証を目指した装置改良を進めた。これまでの感度は装置の回転に伴う振動によって制限されていたため、振動感度の低いセミモノリシック光学系 (図 0.1.2) を製作した。また、これまでは信号取得や電源供給のためのワイヤがねじれてしまうことを防ぐため、回転と逆回転を交互に繰り返していたが、今後は連続回転を行うことで周波数分解能を上げて雑音レベルを下げることを考えている。そのため連続回転しながら電源を供給するためのスリップリングを導入するとともに、回転する装置からデータを無線で取得するためのシステムを開発した。

新しい装置での雑音レベルは今のところ、前のものよりも高くなってしまっている。散乱光雑音ではないかと考えているが、現在その原因究明中である。また、スリップリング経由での電源供給由来と思われる、回転に同期した雑音が見つかった。これは Lorentz 不変性の破れ信号と区別がつかないため、対策が必要である。今後は電源供給の見直しなどを進めていく。

### <受賞>

- [1] 道村唯太: 第 10 回日本物理学会若手奨励賞 (宇宙線・宇宙物理領域), 日本物理学会, 2015 年 10 月 16 日.
- [2] Nobuyuki Matsumoto: Classical Pendulum Feels Quantum Back-Action, Springer Theses Prize (2015).
- [3] 佐藤遼太郎: 東京大学 理学部学修奨励賞 (2015 年度). (原著論文)



図 0.1.2: セミモノリシック光学系

- [4] Kazunari Eda, Ayaka Shoda, Yuya Kuwahara, Yousuke Itoh and Masaki Ando: All-sky coherent search for continuous gravitational waves in 6-7 Hz band with a torsion-bar antenna, Prog. Theor. Exp. Phys. (2016) 011F01.
- [5] N. Matsumoto, K. Komori, Y. Michimura, G. Hayase, Y. Aso, K. Tsubono: 5-mg suspended mirror driven by measurement-induced backaction, Phys. Rev. A, 92, 033825 (2015).
- [6] K. Okutomi, T. Akutsu, M. Ando, et al.: Residual Gas Noise in the Test-mass Module for DECIGO Pathfinder Journal of Physics Conference Series 610 (2015) 012040.

(国内雑誌)

- [7] S. ドワイヤー, 安東正樹 (訳): 量子雑音のスケーリング, パリティ (丸善出版) 2015 年 8 月号.

(学位論文)

- [8] 牛場崇文: Laser Frequency Stabilization with a Cryogenic Optical Cavity, 博士論文 (2016 年 3 月).
- [9] 道村唯太: Tests of Lorentz Invariance with an Optical Ring Cavity, 博士論文 (2015 年 6 月).
- [10] 小森健太郎: 巨視的振動子の遠隔光冷却, 修士論文 (2016 年 3 月).
- [11] 桑原祐也: 巨視的量子現象の観測に向けた光輻射圧による鏡の支持方法の開発, 修士論文 (2016 年 3 月).

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [12] Naoki Aritomi: Monolithic Optics and Coil-Coil Actuator, Low Frequency Gravitational Wave Antenna Workshop (March 3rd, 2016, Canberra, Australia).

- [13] T. Shimoda, M. Ando: Design of New TOBA - Vibration Isolation Systems, Low Frequency Gravitational Wave Antenna Workshop (March 3rd, 2016, Canberra, Australia).
- [14] M. Ando: Torsion Bar Antenna Experiments, Low-Frequency Gravitational Wave Antenna Workshop (March 2nd 2016, ANU, Canberra, Australia).
- [15] M.Ando: bKAGRA Schedule, KAGRA Face-to-Face Meeting (Feb. 22, 2016, Kashiwa, Tokyo).
- [16] Yuta Michimura, KAGRA Collaboration: Initial Alignment Procedure for iKAGRA, 13th KAGRA Face to Face Meeting (Feb 2016, Kashiwa).
- [17] M.Ando: Possibility of contribution to ESA L3 from Japan, ESA L3 GOAT#5 (September 17th, 2015, Noordijk, NL).
- [18] M.Ando: Preliminary bKAGRA Plan, KAGRA Face-to-Face Collaboration Meeting (August 29th, 2015, Toyama).
- [19] Yuta Michimura, KAGRA Collaboration: KAGRA MIF Status Report, 12th KAGRA Face to Face Meeting (Aug 2015, Toyama).
- [20] Tomofumi Shimoda: Shift Work Report, 12th KAGRA Face to Face Meeting (Aug 2015, Toyama).
- [21] Yuta Michimura, Jake Guscott, Matthew Mewes, Nobuyuki Matsumoto, Noriaki Ohmae, Wataru Kokuyama, Yoichi Aso, Masaki Ando: Higher Order Test of Lorentz Invariance with an Optical Ring Cavity, Fourteenth Marcel Grossmann Meeting (July 2015, Rome).
- [22] Y. Kuwahara, A. Shoda, K. Eda, and M. Ando: Search for stochastic gravitational wave background at 1-3 Hz with Torsion-bar Antenna, GWPAW2015 (June 17-20, 2015, Osaka, Japan).
- [23] Yuta Michimura, KAGRA Collaboration: KAGRA Lock Acquisition Overview, GWADW 2015 (May 2015, Alaska).

招待講演

- [24] M.Ando: The GW Research in Japan - Current Status of KAGRA -, ELiTES 4th General Meeting (December 3rd 2015, Delegation of the European Union to Japan, Tokyo).
- [25] M.Ando: Space Gravitational-Wave Antenna: DECIGO and Pre-DECIGO, GWPAW2015 (June 19th, 2015, INTEX-Osaka, Osaka).
- [26] M. Ando, A.Shoda, K. Yamamoto, Y. Aso, R. Takahashi: Lessons learned and the next steps of Torsion-Bar Antenna experiments, GWADW2015 (May 19th, 2015, Alaska, USA).

(国内会議)

一般講演

- [27] 小森健太郎, 松本伸之, 道村唯太, 安東正樹: 光学トラップによる懸架鏡の遠隔冷却および熱的デコヒーレンスの低減, 日本物理学会第 71 回年次大会 (2016 年 3 月 21 日, 東北学院大学).

- [28] 桑原祐也, 道村唯太, 牛場崇文, 安東正樹: 光輻射圧による鏡支持方法の開発, 日本物理学会第 71 回年次大会 (2016 年 3 月 21 日, 東北学院大学).
- [29] 道村唯太, 麻生洋一, 宗宮健太郎, 宮川治, 中野雅之, 苔山圭以子, 廣瀬榮一, 山元一広, 辰巳大輔, 阿久津智忠, 安東正樹, 齊藤高大, 加川智大, 我妻一博, 和泉究, 新井宏二, 山本博章: 重力波望遠鏡 KAGRA における主干涉計制御, 日本物理学会第 71 回年次大会 (2016 年 3 月, 東北学院大学).
- [30] 牛場崇文, 大前宣昭, 香取秀俊: 低温シリコン光共振器を用いたレーザー周波数安定化, 日本物理学会 第 71 回年次大会 (2016 年 3 月, 東北学院大学).
- [31] 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 の開発 (1), 日本物理学会 第 71 回年次大会 (2016 年 3 月, 東北学院大学).
- [32] 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 の開発 (2), 日本物理学会 第 71 回年次大会 (2016 年 3 月 21 日, 東北学院大学).
- [33] 安東正樹, 他: スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (68): DECIGO 計画の概要, 日本物理学会 第 71 回年次大会 (2016 年 3 月 21 日, 東北学院大学, 仙台).
- [34] 安東正樹: 宇宙重力波望遠鏡 Pre-DECIGO, JGWC 総会 (2016 年 3 月 10 日, 大阪市立大学).
- [35] 安東 正樹: 宇宙重力波望遠鏡 Pre-DECIGO, CRC 将来計画タウンミーティング (2016 年 2 月 11 日, 東京大学 宇宙線研究所).
- [36] 安東 正樹: 宇宙重力波望遠鏡 DECIGO と Pre-DECIGO, 第 16 回 宇宙科学シンポジウム (2016 年 1 月 7 日, 宇宙科学研究所).
- [37] 安東 正樹: 宇宙重力波望遠鏡 DECIGO / Pre-DECIGO, CRC 将来計画タウンミーティング (2015 年 12 月 21 日, 東京大学柏キャンパス).
- [38] 安東 正樹: DECIGO 戦略と取りまく状況, DECIGO Workshop (2015 年 10 月 18 日, 京都大学).
- [39] 有富尚紀: Pre-DECIGO の加速度雑音の評価 (1), DECIGO ワークショップ (2015 年 10 月 18 日, 京都大学).
- [40] 下田智文, 有富尚紀, 奥富弘基: PreDECIGO システム検討 PreDECIGO の加速度雑音の評価 (2), DECIGO ワークショップ (2015 年 10 月, 京都大学).
- [41] 安東 正樹: DECIGO 戦略と取りまく状況, DECIGO ワークショップ (2015 年 10 月 18 日, 京都大学).
- [42] 牛場崇文, 大前宣昭, 香取秀俊: 高安定光共振器開発に向けた低温環境下での温度安定化, 日本物理学会 2015 年秋季大会 (2015 年 9 月, 大阪市立大学, 大阪).
- [43] 道村唯太, 麻生洋一, 宗宮健太郎, 宮川治, 中野雅之, 山元一広, 辰巳大輔, 阿久津智忠, 安東正樹, 齊藤高大, 加川智大, 我妻一博, 和泉究, 新井宏二, 山本博章, KAGRA Collaboration: 重力波望遠鏡 KAGRA の主干涉計制御設計 II, 日本物理学会 2015 年秋季大会 (2015 年 9 月, 大阪市立大学).
- [44] 安東 正樹, 他: スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (64): DECIGO 計画の概要, 日本物理学会 2015 年秋季大会 (2015 年 9 月 28 日, 大阪市立大学).
- [45] 小森健太郎, 松本伸之, 道村唯太, 安東正樹: 光ばねを用いた懸架鏡の遠隔冷却, 日本物理学会 2015 年秋季大会 (2015 年 9 月 28 日, 大阪市立大学).
- [46] 桑原祐也, 松本伸之, 牛場崇文, 井上翼, 菊田基志, 小森健太郎, 道村唯太, 安東正樹: カーボンナノチューブ線を用いた低損失振り子の開発, 日本物理学会 2015 年秋季大会 (2015 年 9 月 28 日, 大阪市立大学).

## 招待講演

- [47] 道村唯太: 光リング共振器を用いたローレンツ不変性の検証, 日本物理学会第 71 回年次大会 (2016 年 3 月, 東北学院大学).
- [48] 安東正樹: 重力波が切り拓く新たな天文学, NHK 視点・論点 (2016 年 2 月 22 日).
- [49] 安東 正樹: 重力波で見る宇宙 - 重力波の観測 -, 東京大学 駒場祭公開講座 (2015 年 11 月 21 日, 東京大学 駒場キャンパス).
- [50] 安東 正樹: アインシュタインの宿題 — 重力波 —, 一般相対性理論誕生 100 年記念市民講演会 (2015 年 10 月 03 日, 弘前大学).
- [51] 安東 正樹: アインシュタインの相対論と重力波天文学, 高校生のための夏休み講座 2015 (2015 年 8 月 18 日, 東京大学).
- [52] 安東 正樹: 重力波望遠鏡でさぐる宇宙の姿, 物理学教室オープンラボ (2015 年 5 月 29 日, 小柴ホール, 東京大学).
- (セミナー)
- [53] M. Ando: KAGRA and Pre-DECIGO, ANU CGP Group Seminar (March 1st 2016, Australian National University, Canberra).
- [54] Yuta Michimura: Testing Lorentz Invariance with an Optical Ring Cavity, Department of Physics Lunch Talk (Nov 2015, Tokyo).

## II

# Summary of group activities in 2015



# 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] Kazunari Eda, Ayaka Shoda, Yuya Kuwahara, Yousuke Itoh and Masaki Ando: All-sky coherent search for continuous gravitational waves in 6-7 Hz band with a torsion-bar antenna, *Prog. Theor. Exp. Phys.* (2016) 011F01.
- [2] N. Matsumoto, K. Komori, Y. Michimura, G. Hayase, Y. Aso, K. Tsubono: 5-mg suspended mirror driven by measurement-induced backaction, *Phys. Rev. A*, 92, 033825 (2015).
- [3] K. Okutomi, T. Akutsu, M. Ando, et al.: Residual Gas Noise in the Test-mass Module for DECIGO Pathfinder *Journal of Physics Conference Series* 610 (2015) 012040.