

I

研究室別 2014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に関する実験的研究を進めている。その中でも、重力波検出は一貫して研究室の中心テーマとなっている。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前年度までにほぼ完了し、2014年度からは本格的なインストールが開始されており、KAGRA の 2017 年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。また、宇宙空間重力波アンテナ DECIGO 計画の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査も行われた。それらと並行して、われわれは重力波研究が必要とされる技術を用いた関連研究を進めている。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。

1.1.1 大型重力波検出器 KAGRA

KAGRA (かぐら) は岐阜県神岡の地下サイトに一辺 3km の L 字型巨大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 (図 1.1.1)。2010 年 10 月よりプロジェクトがスタートし、2011 年 1 月 28 日には、それまで LCGT と呼ばれていたプロジェクト名に KAGRA という愛称がつけられた。現在、装置の建設は順調に進んでおり、2015 年には常温での運転が、2017 年からは低温での重力波観測が可能になる予定である。これによって世界初の重力波検出をめざしている。当研究室では、主干渉計光学系の設計などの主要部分の役割を担っており、それに関連した研究開発が進められている。



図 1.1.1: 大型低温重力波望遠鏡 KAGRA の概念図。

主干渉計制御系の設計開発

レーザー干渉計型重力波検出器では、干渉計を構成する鏡を懸架し、重力波によって伸び縮みする鏡間の距離をレーザー光を用いて測定することで重力波の検出を行う。この時、距離変動に対する感度を最もいい状態に保つため、検出された距離変動をキャンセルするように鏡の位置を制御することにより、その制御力から重力波の振幅を割り出すというを行う。また、鏡の姿勢を高精度に制御しないと、干渉計内に十分なレーザー光を往復させることができない。そのためレーザー干渉計型重力波検出器では、干渉計制御が重要となる。

今年度は、鏡の制御を行うためのアクチュエータの設計や、鏡の姿勢をモニターするための光てこと呼ばれるセンサーの設計と評価、制御系に用いるデジタルシステムと電気回路類の設計、発注、評価などを行った。また、こうしたアクチュエータやセンサー、制御系からの雑音を評価するためのシミュレーションツールの開発を行った。KAGRA では、鏡の制御のためのアクチュエータにはコイル-マグネットアクチュエータを用いる。鏡に磁石をつけ、そばにおいたコイルに流れる電流を調整することで鏡を動かすのである。このとき用いる磁石の強さは、外部磁場の影響が無視できる程度に小さくなければならない。また、コイルの巻き数が多すぎたり、コイルに流れる電流が大きすぎたりすると、雑音電流により鏡を揺らしてしまうことになって雑音となる。一方、アクチュエータ効率が十分でないと、地面振動などによる鏡の揺れを十分に抑えることができない。これらの要求を満たすような磁石、コイル、電圧電流変換回路の設計を行った。

また、光てこの雑音や長期安定度の評価を国立天文台の TAMA 実験施設で行ったり、デジタルシステムの整備を KAGRA の建設が進められている岐阜県の神岡町で行った。さらに、干渉計制御に用いる光検出器や光検出器からの信号を復調するための復調器、制御フィルタ回路、デジタルシステムとアナログ回路のインターフェース回路などの製作を進めた。これら回路を繋ぐケーブルの選定や配線図の作成、ケーブルラックの検討なども行った。

入射光学系の設計開発

KAGRA では現在、主干渉計へのレーザー光入射光学系の開発が急ピッチで進められている。入射光学系は主に、周波数や強度が安定化されたレーザー光源、主干渉計の信号取得のための変調光学系、そして基本モード以外の空間モードを除去する入射モードクリーナーから構成されている。レーザー光源の周波数安定化には周波数参照共振器と入射モードクリーナーが用いられる。また、ビームジッターを低減し、RF 強度雑音を低減するプリモードクリーナーも入射光学系の構成物の一つである。こうした構成物の一つ一つを、主干渉計の目標感度が達成させられるような仕様で制作しなければならない。

今年度はこれらの設計と開発を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。入射モー

ドクリナーは懸架された 3 枚の鏡から構成されているが、この鏡の懸架系の設計と開発は、国立天文台重力波推進室や新潟大学のグループと共に進めた。また、多重の制御ループが組み込まれる周波数安定化をモデリングするツールの開発を行った。

強度安定化と変調光学系に関しては、KAGRA の初期段階では単純化したものを用いる。しかし、最終段階では複雑なシステムとなるため、富山大学や新潟大学のグループと共同で検討を進めている。

1.1.2 宇宙空間レーザー干渉計

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_{μν} 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。

2014 年度は、DECIGO の前段階となる Pre-DECIGO の検討を進めた。中性子星連星、中間質量ブラックホールの合体といった観測で得られる科学的成果の検討、また、その観測を行うためのミッション検討を進めた。

1.1.3 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。

Phase-II TOBA の開発

現在までに最初のプロトタイプによって原理検証・観測が行われてきたが、今後は感度向上の為、更なる技術検証が求められている。そこで次世代の TOBA として、テストマスの懸架システムや多方向同時観測などといった新たな技術を実証する Phase-II TOBA の開発を行った (図 1.1.2)。

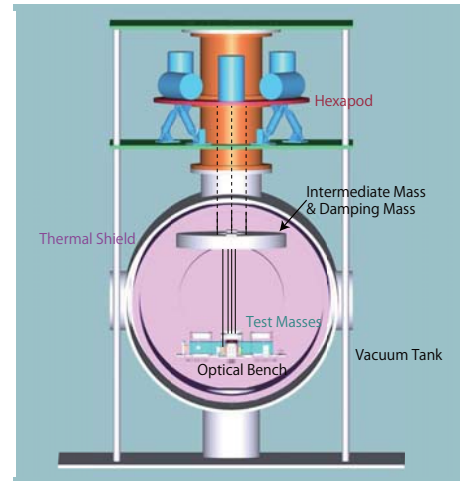


図 1.1.2: Phase-II TOBA の概念図

テストマスの懸架システムの開発では、能動防振系と受動防振系を組み合わせた防振系を組み込む事により、並進方向の地面振動からのカップリング雑音を評価・低減した。また、多方向同時観測では、水平方向だけではなく垂直方向の回転も同時にモニターする新手法を提案・導入する事により、1 台から 3 つの独立な重力波信号を同時に取得する事に成功した (図 1.1.2)。この多方向同時観測により、重力波の検出頻度が約 1.7 倍に向上する他、波源方向などといった重力波信号のパラメータをより少ない検出器で決定する事ができるようになる。これはより少ない検出器でも低周波重力波天文学を展開する可能性を広げるものである [4]。

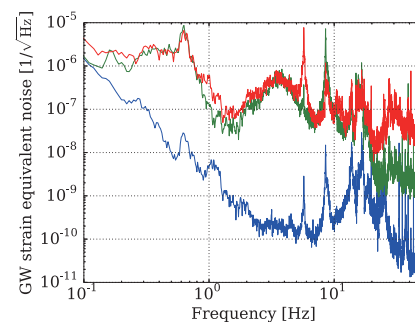


図 1.1.3: Phase-II TOBA で得られた感度。青線が水平方向の回転から得られた感度、赤・緑線がそれぞれ垂直方向の回転から得られた感度である。水平回転では、防振システムの導入により 10 ~ 100 Hz で約 100 倍の感度が向上した。

1.1.4 中間質量ブラックホール連星の探査

開発した Phase-II TOBA を用いて中間質量ブラックホール連星の探査を行った。中間質量ブラックホール連星は、超巨大質量ブラックホールや銀河の形成過程を明らかにするうえで重要な重力波源として注目されている。

衝突以前の中間連星ブラックホール連星からの重力波は、これまで $100 M_{\odot}$ 以下の質量を持つものに対してしか探査されていなかったが、本研究では TOBA が干渉計型重力波検出器よりも低い周波数帯に感度を持つ特色を活かし、matched filtering と呼ばれる手法を用いて $200 M_{\odot}$ の質量を持つ中間質量ブラックホール連星からの重力波を初めて探査した。

本研究では Phase-II TOBA を用いて 24 時間連続運転を行い、この観測中に重力波信号は検出されなかった。また、この観測中に 1.2×10^{-4} pc 以内では中間質量ブラックホール連星合体はおこらなかったという観測的制限値を世界で初めて設定した。

背景重力波探査

重力波のターゲットの一つに背景重力波があり、大きく分けて宇宙論的な重力波と分解不可能な点重力波源の和の 2 種類が考えられる。背景重力波からはインフレーションや相転移に関する情報を得ることができ、それはほぼ重力波によってしか得ることができないものである。これまでに背景重力波のエネルギー密度 Ω_{gw} に対する上限値は、100 Hz 以上の高周波数帯で干渉計型や共振型の重力波検出器によって、1 mHz – 1 Hz の低周波数帯で TOBA や地球の地面振動によって、さらに低周波の 1 mHz 以下でドップラートラッキングやパルスタイミング、CMB などによって設定されてきた。しかし 1 – 100 Hz 帯では、特に干渉計型重力波検出器が地面振動の影響を大きく受けるために背景重力波探査はなされて来なかった。

今回は開発した TOBA を用いて 2014 年 12 月に 24 時間の観測運転を行い、そのデータから背景重力波に対して最も感度のよい周波数帯であった 1 – 3 Hz において背景重力波探査を行った。1 台の検出器からのデータのみを用いた探査のため、相関解析を行って重力波信号のみを抽出することはできず、仮にデータが全て重力波由来であっても成立する等号を含んだ上限値を設定した。その結果、1 – 3 Hz 背景重力波のエネルギー密度に対して、頻度論的な上限値として $\Omega_{\text{gw}} \leq 10^{18}$ 、ベイジ的な上限値として $\Omega_{\text{gw}} \leq 10^{20}$ の値を得た。今後の TOBA アップグレードによる感度向上、複数台の検出器を用いることによる相関解析により、背景重力波に対してさらに厳しい上限値が得られるものと期待されている。

1.1.5 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の開発で培ったノウハウを活用し、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 秒のアラン分散で 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。

光共振器の防振

目標の安定度を達成するためには地面振動や冷凍機由来の振動による共振器の弾性変形を防ぐ必要がある。そのために我々はヘキサポッドステージと呼ばれる 6 本脚の除振台を製作した。ヘキサポッドの 6 本の脚には PZT が組み込まれており、速度センサーによって読み取ったヘキサポッドステージの振動をフィードバックすることにより能動的に振動を抑制する。

これまでに、並進 3 自由度の同時防振に成功しており、最もよい周波数帯においては 10 倍以上の防振比を得ることに成功している。

温度安定化

目標の安定度達成のためには光共振器の温度変動による共振器長変動を抑制する必要がある。冷凍機で冷却した光共振器は外気温の日周変動や季節変動によって大きく変動するがこれらは非常に長い時間スケールでの変動であるため、温度を能動的に安定化することによって抑制することができる。

冷凍機のコールドヘッドは温度安定化を行わない場合には 12 mK/day 程度の温度ドリフトが見られたが、温度安定化を施すことによって 0.1 mK/day 以下までドリフトを抑えることに成功している。

1.1.6 相対論・量子光学精密実験

巨視系における量子輻射圧変動の測定

これまで重たい物体の重ね合わせ状態が観測されていないのはなぜか。単なる技術的な問題に過ぎないのか、あるいは量子性を示さない根源的な機構が存在するのか。この問いに答えるべく、我々は重たい物体の重ね合わせ状態を生成しその持続時間を測定することを目標とした研究を行っている。

持続時間検証のために用意する重ね合わせ状態は、光子と懸架鏡のエンタングルメント状態である。まず、振り子モードが基底状態まで冷却された懸架鏡

を用意する。その懸架鏡から構成されるマイケルソン干渉計に単一光子を入射することで、光子の有無と、懸架鏡の基底/励起状態のエンタングルメント状態が生成される。

第一目標として懸架鏡の基底状態冷却を目指す、そのためには懸架鏡をレーザー光強度の量子的な揺らぎから生ずる反作用（量子輻射圧揺らぎ）で支配的に駆動しなければならない。特に、原理的な古典雑音である振り子の熱雑音よりも量子輻射圧揺らぎの方が強く働く懸架鏡の開発に取り組んだ。

鍵となったのは、熱雑音低減のための外部環境からの孤立と、量子輻射圧揺らぎ増大のためのレーザー光と懸架鏡の強力な結合を両立である。非常に細くエネルギー散逸の小さな $3\ \mu\text{m}$ のタングステンワイヤーで、 $5\ \text{mg}$ の鏡を懸架した。さらに、この懸架鏡を一端として構成される光共振器を三角形とすることで回転方向に自律的な安定な共振器を構築、高い共振器内パワーを実現した。入射レーザー光量を大きくしていくにつれて懸架鏡に加わる輻射圧が理論通り増大していく様子を測定し、量子輻射圧揺らぎと振り子内部の散逸に由来する熱雑音の信号雑音比が 1.4 ± 0.2 と推定された。

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は Lorentz 不変性が宇宙の基本的な対称性であることを明らかにした。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な研究から、わずかに Lorentz 不変性が破れている可能性が示唆されている。特に光子の Lorentz 不変性の破れは光速の異方性に通じ、Michelson-Morley の時代から数々の異方性探査が行われてきた。我々は光速の行きと帰りの差、つまり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。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 測定を行った。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 10^{-15} レベルの上限値をつけてきた。これは光子の Lorentz 不変性の破れのうち、奇パリティ成分としては世界最高精度での上限値となっている。

今年度はさらなる高い精度での検証を目指した、装置改良の検討を進めた。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、振動感度の低いモノリシック光学系を用いることや、より振動の少ないモーターを用いた安定な連続回転を行うことを検討している。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。連続回転を行うことで回転反転時の測定時間のロスが無くなるとともに、複数回の回転に渡るデータを解析に用いることで、雑音レベルを下げるができることと考えている。

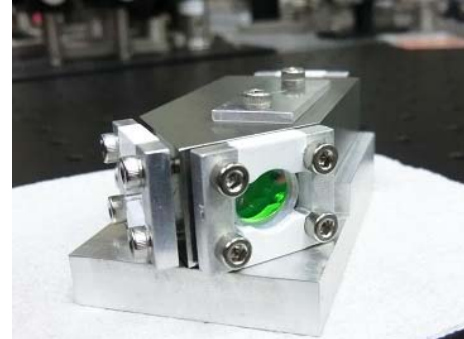


図 1.1.4: シリコンの入った非対称光リング共振器

光学浮上鏡を用いた量子測定

懸架した鏡のような機械系の振動状態をレーザー光を用いて測定したり、制御したりする機械光学系の研究が現在盛んに行われている。特に、プランク質量を超える巨視的な物体の基底状態を実現することや、ハイゼンベルグの不確定性関係で決まる標準量子限界を超える位置測定を行うことは、巨視的な量子力学の検証に繋がるため、注目を浴びている。

しかし、巨視的な物体において量子力学的な測定を行うことは極めて難しい。それは標準量子限界に比べ、熱雑音が大きいためである。物体を支持するために懸架のような機械的な手法を用いると、機械的な散逸に伴って熱的揺動力が物体に加わってしまい、熱雑音となる。

我々は機械的な手法を用いずに物体を支持する、光学浮上の検討を行っている。光学浮上とは光の輻射圧のみによって鏡を支える方法である。光子の有効温度は環境に比べて十分高いため、この支持方法では熱雑音となる散逸が存在しないことになる。今年度は $1.6\ \text{mg}$ の浮上鏡の製作と装置設計を進めるとともに、ねじれ振り子を用いた基礎実験を行った。

十分な浮上力を得るためには浮上鏡は mg 程度以下の軽さでなければならないが、この製作は困難を極める。そのため、ねじれ振り子の端に鏡をつけることで、有効質量を軽くし、この鏡を用いて Fabry-Perot 共振器を作ることによって光学浮上に向けた技術開発を行っている。今年度はこの Fabry-Perot 共振器の制御には成功したが、制御が安定ではなく、ねじれ振り子の運動状態を十分に変化させることができなかった。アクチュエータの改良やねじれ振り子の改良が必要ながわかった。

< 報文 >

(原著論文)

- [1] K. Eda, A. Shoda, Y. Itoh, M. Ando: Improving parameter estimation accuracy with torsion-bar Antennas, *Phys. Rev. D*, 90, 064039 (2014).
- [2] M. Adier, F. Aguilar, T. Akutsu, M.A. Arain, M. Ando *et al.*: Progress and challenges in advanced ground-based gravitational-wave detectors *General Relativity and Gravitation*, 46, 1749 (2014).
- [3] K. Nakamura, M. Ando: Torsion-bar antenna in the proper reference frame with rotation, *Phys. Rev. D*, 89, 064008 (2014).
- [4] A. Shoda, M. Ando, K. Ishidoshiro, K. Okada, W. Kokuyama, Y. Aso, K. Tsubono: Search for a stochastic gravitational-wave background using a pair of torsion-bar antennas, *Phys. Rev. D*, 89, 027101 (2014).
- [5] Nobuyuki Matsumoto, Yuta Michimura, Yoichi Aso, Kimio Tsubono: Optically trapped mirror for reaching the standard quantum limit, *Opt. Express* 22, 12915 (2014).

(学位論文)

- [6] 正田亜八香: Development of a High-Angular-Resolution Antenna for Low-Frequency Gravitational-Wave Observation, 博士論文, 2015年3月.

< 学術講演 >

(国際会議)

一般講演

- [7] A. Shoda: TOBA experience and future plans, 2015, E-GRAAL kickoff meeting (March 2015, Paris, France).
- [8] Yuta Michimura, KAGRA Collaboration: New iKAGRA Configuration, 11th KAGRA Face to Face Meeting (Feb 2015, Tokyo).

招待講演

- [9] Nobuyuki Matsumoto: Development of the 5-mg suspended mirror driven by measurement-induced back-action, Workshop on Hierarchy of Quantum Mechanics (Feb. 25, 2015, Okazaki Conference Center, Aichi).
- [10] Nobuyuki Matsumoto, Kentaro Komori: Development of 5-mg suspended mirror driven by measurement-induced back-action, Workshop on Hierarchy of Quantum Mechanics (February 23rd, 2015, Institute for Molecular Science, Aichi).
- [11] Masaki Ando: Recent News from KAGRA, PAC37, The 37th Program Advisory Committee Meeting (January 28th, 2015, Hanford, USA).
- [12] Masaki Ando: DECIGO: Space Gravitational-wave Antenna, RESCEU APCosPA Summer School on Cosmology and Particle Astrophysics (August 3rd, 2014, Matsumoto).

- [13] A. Shoda: Torsion-bar Antenna for low-frequency gravitational wave detection, GWADW (May 2014, Takayama, Japan).
- [14] Masaki Ando: DECIGO and DECIGO Pathfinder, 10th International LISA Symposium (May 19th, 2014, Florida, USA).

(国内会議)

一般講演

- [15] 安東 正樹, DECIGO WG: スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (59): DECIGO/DPF の概要, 日本物理学会 第 70 回年次大会 (2015 年 3 月 23 日, 早稲田大学).
- [16] 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 の主干渉計制御設計, 日本物理学会 第 70 回年次大会 (2015 年 3 月 23 日, 早稲田大学).
- [17] 正田亜八香, 桑原祐也, 枝和成, 麻生洋一, 道村唯太, 安東正樹: 次世代ねじれ振り子型重力波検出器 (Phase-II TOBA) の開発 (4), 日本物理学会 2015 年春季大会 (2015 年 3 月 早稲田大学).
- [18] 牛場崇文, 大前宣昭, 正田亜八香, 麻生洋一: 低温シリコン光共振器を用いた狭線幅光源の開発 IV, 日本物理学会 第 70 回年次大会 (2015 年 3 月 23 日, 早稲田大学).
- [19] 桑原祐也, 正田亜八香, 枝和成, 道村唯太, 安東正樹: 次世代ねじれ振り子型重力波検出器 (Phase-II TOBA) を用いた背景重力波探査, 日本物理学会 第 70 回年次大会 (2015 年 3 月 23 日, 早稲田大学).
- [20] 小森健太郎, 松本伸之: 重力デコヒーレンス検証に向けた量子輻射圧揺らぎで駆動される巨視的振り子の開発, 日本物理学会 第 70 回年次大会 (2015 年 3 月 21 日, 早稲田大学).
- [21] 安東 正樹: DECIGO / DPF, CRC 将来計画タウンミーティング (2015 年 1 月 24 日, 東京大学宇宙線研究所).
- [22] 安東 正樹: DECIGO のロードマップ, DECIGO ワークショップ (2014 年 10 月 25 日, 京都大学).
- [23] 安東 正樹: スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (55): DECIGO/DPF の概要, 日本物理学会 2014 年秋季大会 (2014 年 9 月 19 日, 佐賀大学).
- [24] 桑原祐也, 正田亜八香, 枝和成, 小森健太郎, 麻生洋一, 安東正樹: 次世代ねじれ振り子型重力波検出器 (Phase-II TOBA) の開発 (2), 日本物理学会 2014 年秋季大会 (2014 年 9 月 21 日, 佐賀大学).
- [25] 道村唯太, Matthew Mewes, 松本伸之, 麻生洋一, 安東正樹: 光リング共振器による高次ローレンツ不変性検証, 日本物理学会 2014 年秋季大会 (2014 年 9 月, 佐賀大学).
- [26] 正田亜八香, 桑原祐也, 枝和成, 小森健太郎, 麻生洋一, 安東正樹: 次世代ねじれ振り子型重力波検出器 (Phase-II TOBA) の開発 (3), 日本物理学会 2014 年秋季大会 (2014 年 9 月, 佐賀大学).

- [27] 牛場崇文, 大前宣昭, 正田亜八香, 麻生洋一: 低温シリコン光共振器を用いた狭線幅光源の開発 III, 日本物理学会 2014 年秋季大会 (2014 年 9 月, 佐賀大学).
- [28] 安東 正樹: DECIGO/DPF CRC タウンミーティング (2014 年 7 月 12 日, 名古屋大学).

招待講演

- [29] 安東 正樹: 大型低温重力波望遠鏡 KAGRA とレーザー干渉計技術, 第 62 回 応用物理学会 春季学術講演会 (2015 年 3 月 12 日, 東海大学).
- [30] 安東 正樹: 重力波の観測, コンパクト連星合体からの重力波・電磁波放射とその周辺領域 (2015 年 2 月 14 日, 京都大学).
- [31] 安東 正樹: アインシュタインの宿題と重力波で探る宇宙, 一般相対性理論白寿記念シンポジウム (2014 年 9 月 27 日, 慶応大学).
- [32] 安東 正樹: レーザー干渉計による原始重力波観測原始重力波シンポジウム 日本物理学会 2014 年秋季大会 (2014 年 9 月 19 日, 佐賀大学).
- [33] 安東 正樹: 重力波でさぐる宇宙, 第 3 回 自然科学研究機構 機構長プレス懇談会 (2014 年 4 月 11 日, 虎ノ門 SQUARE, 東京).

(セミナー)

- [34] Masaki Ando: Recent Situations of DECIGO and DECIGO Pathfinder, NAOJ GW Seminar (July 10th, 2014, NAOJ, Mitaka).
- [35] 安東 正樹: 重力波望遠鏡でさぐる宇宙の姿, 平成 26 年度 物理学教室ガイダンス・オープンラボ (2013 年 5 月 30 日, 東京大学).

II

Summary of group activities in 2013

1 Ando Group

Research Subjects: Experimental Relativity, Gravitational Wave, Laser Interferometer

Member: Masaki Ando and Yuta Michimura

The detection of gravitational waves is expected 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; 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 detectors with sufficient sensitivity to catch possible gravitational waves.

In 2010, a new science project, KAGRA (former LCGT) was approved and funded by the Leading-edge Research Infrastructure Program of the Japanese government. 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.

We summarize the subjects being studied in our group.

- Construction of the KAGRA gravitational wave detector
 - Optical design of the interferometer
 - Alignment control
 - Parametric instability
- Space laser interferometer, DECIGO
- Development of TOBA (Torsion Bar Antenna)
 - A new type sensor for TOBA
 - Design of next generation TOBA
- Development of the ultra stable laser source
 - Optical system
 - Vibration isolation of cavity
 - Cryogenics for cavity
- High sensitive laser interferometer using non-classical light
- Study of space isotropy

Reference

- [1] K. Eda, A. Shoda, Y. Itoh, M. Ando: Improving parameter estimation accuracy with torsion-bar antennas, *Phys. Rev. D*, 90, 064039 (2014).
- [2] M. Adier, F. Aguilar, T. Akutsu, M.A. Arain, M. Ando *et al.*: Progress and challenges in advanced ground-based gravitational-wave detectors *General Relativity and Gravitation*, 46, 1749 (2014).
- [3] K. Nakamura, M. Ando: Torsion-bar antenna in the proper reference frame with rotation, *Phys. Rev. D*, 89, 064008 (2014).
- [4] A. Shoda, M. Ando, K. Ishidoshiro, K. Okada, W. Kokuyama, Y. Aso, K. Tsubono: Search for a stochastic gravitational-wave background using a pair of torsion-bar antennas, *Phys. Rev. D*, 89, 027101 (2014).