

I

研究室別 2013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る。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。地上浮上型重力波検出器TOBAについてはセンサーの技術開発が進んだ。同時に、われわれは重力波研究以外にも、それらが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。

1.1.1 大型低温重力波望遠鏡 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。

KAGRA 主干渉計の全体設計

大型レーザー干渉計の設計に於いては、その原理的感度を高めるだけでなく、十分にSN比の高い制御信号が得られるか、各光学素子パラメーターの許容誤差が現実的な値であるか、誤差によって生じる高次光モードの影響が十分小さく抑えられるか、等複数の観点から設計の最適化を行う必要がある。KAGRA主干渉計設計チームのチーフである麻生を中心に、安東研ではこれらの検討を進めてきた。その結果、KAGRA主干渉計の主要パラメータを決定し、また大型干渉計の設計を系統的に行う手法をまとめた論文として出版した[3]。

光学系のアライメント制御

レーザー干渉計を高感度な重力波検出器として用いるには、干渉計を構成する鏡の位置と姿勢を高精度に制御する必要がある。KAGRAでは従来型の干渉計に比べて5枚鏡を増やし、RSEと呼ばれる構成を採用することで感度を向上させているが、一方で、制御すべき自由度が大幅に増加する。これにより各自由度の変位信号の分離・対角化が格段に困難になる。また、高出力レーザーを入射光として用いるため、干渉計の片腕のFabry-Perot共振器内を往復するレーザーパワーは400kWにも及ぶ。そのため、共振器を構成する鏡の傾きに対してレーザー輻射圧トルクがそれを拡大させる方向に働き、角度不安定性が自発的に生じてしまうという問題がある。

我々はアライメント制御系をシミュレートするためのソフトを開発し、これを用いてKAGRAの干渉計パラメータの決定や姿勢制御系の設計を行ってきた。今年度は鏡の姿勢制御に用いるwave-front sensor(WFS)法の原理的な雑音であるショットノイズに着目し、その要求値の計算を行った。また、干渉計シミュレーションにより、重力波に対する感度を悪化させない姿勢信号の取得方法や分離方法を検討した。これにより、ほぼ要求値を満たす方法を見出すことができたが、15Hz以下の帯域では、干渉計の重力波に対する感度を悪化させてしまうことがわかった。15Hz以下の低周波帯域では地面振動による雑音によってそもそも干渉計の重力波に対する感度は低いいため、連星中性子星合体の観測可能距離(inspiral range)に対する影響は小さい。

さらに、原理的な雑音以外の雑音も干渉計シミュレーションに加え、より実際の雑音評価を行うことも進めている。特に、基線長3kmのメインの光共振器の透過光を用いて、その共振器を構成する鏡の姿勢制御を行うと、透過光を受ける光検出器の振動が、干渉計の重力波に対する感度に大きく影響を与えてしまうことがわかった。この振動は主に地面振動から来るものであるため、光検出器を懸架するなどして防振を行うか、光検出器の振動に感度のない光学系配置を考えなくてはならず、現在検討を進めている。

光学系のパラメータ設計

光学系のパラメータ設計の際に考慮すべき問題として「パラメトリック不安定性」という問題がある。安東研究室ではこの不安定性の起こる条件の適用範囲を先行研究から拡張し、任意の光学系について適用可能で、かつ不安定性が発生した後の振る舞いについて取り扱うことができるものにした。また、この結果を実際に KAGRA に対して適用し、その光学設計におけるパラメトリック不安定性のリスクを評価した今年度は以上の結果を投稿論文としてまとめ、公表する予定である。

非平衡系熱雑音の研究

微小な変位信号を取り扱う実験においては、熱雑音が測定の精度を制限することが多い。特に干渉計型重力波検出器においては、鏡およびその懸架系の熱雑音が測定帯域において主要な雑音源となっているため、KAGRA では鏡を冷却することによって熱雑音を抑え込むことを試みる。しかし、冷却後の温度勾配のついた系での熱雑音の振る舞いは、その系が非平衡系であるために取り扱いが単純ではない。安東研究室ではこうした非平衡系、その中でも非平衡定常系における熱雑音のモデリングに取り組み、KAGRA の懸架系に対してこれを適用し熱雑音の評価を行った。今年度は以上の結果を投稿論文としてまとめ、公表する予定である。

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、そのデータ解析を行っている。また、DECIGO Pathfinder (DPF) と呼ばれる DECIGO の技術実証衛星の開発にも参加しており、主に干渉計モジュールの構造設計を行っている。

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。そこで現在、最終的な大型 TOBA と既存のプロトタイプの間をつなぐ段階として、Phase-II TOBA の開発を進めている(図 1.1.2)。

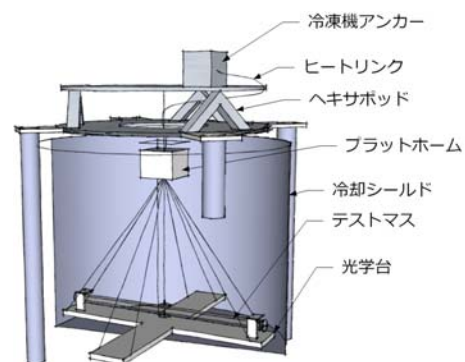


図 1.1.2: Phase-II TOBA の概念図

この装置では大きく、2 本のテストマスによる同相雑音除去及び自由度分離による感度向上の検証、低温共振器でも使用する Hexapod 型能動防振装置の導入による地面振動雑音除去、低温システムの導入による熱雑音の低減の 3 点を柱として開発を進める。

また、重力波観測においてもテストマスの水平方向の回転だけでなく、垂直方向の回転もモニターする事で、双方向からやってくる重力波を同時に観測する新たな解析手法も採用する。この手法によって 3 つの独立な重力波信号が 1 つの実験装置から取り出すことができるため、TOBA1 台でも重力波の波源方向などといったパラメータが精度よく決定できる事も明らかにした。

現在までに、これらの技術が実現できるような振り子の設計・製作、Hexapod 型能動防振装置の開発、低温システムの初期評価までが終了しており、今後はこれらのパーツを組み合わせ、総合的な評価を行っていく予定である。

光ファイバーセンサの開発

Phase-II TOBA ではテストマスの回転変位が 1 Hz で 10^{-15} rad/ $\sqrt{\text{Hz}}$ となるように設計されており、セ

ンサーにはマイケルソン干渉計を用いる予定である。このとき、テストマス 2 本の回転運動と並進運動を同時に読み取る必要があるため、多数のマイケルソン干渉計が必要となる。しかし、空間にレーザー光を通した場合ミラーなどの光学部品が真空槽内で密集するために、すべてを配置することが困難になると考えられる。そこで光ファイバーを用いてマイケルソン干渉計を構成することにより、余分な光学部品を排除してコンパクト化し、問題の解決を目指している。現在までに、試験的に 1 辺 30 cm のブレッドボード上に干渉計を組み上げ、1 Hz で 10^{-11} m/ $\sqrt{\text{Hz}}$ の感度が達成されている。今後は雑音源を特定し、その除去を目指していく。[30]

電磁誘導型アクチュエーターの開発

現在 PhaseII TOBA の開発が進行中である。プロトタイプ TOBA において、低周波帯で感度を制限していた雑音として環境磁場による雑音が挙げられ、その由来は、アクチュエーターとして用いていたコイルマグネットアクチュエーターの、テストマスに貼り付けていた磁石が環境磁場の影響を受けるためだということが分かっている。そこで、特に低周波帯での感度向上のために新型のアクチュエーターが必要となり、我々はテストマス側にもコイルを用いるコイルコイルアクチュエーターの開発を行った。まずは変位を読み取るセンサーとしてフォトセンサーを用いてテストマスをロックし、openloop 伝達関数やアクチュエーターのゲインを測定した。現段階で、コイルコイルアクチュエーター用いてテストマスの制御が可能であることを実証し、アクチュエーターの出す力が、同じ面積の標準的な静電型アクチュエーターより格段に大きいだけでなく、コイルマグネットアクチュエーターと比較しても同等かそれ以上であることが分かった。今後はマイケルソンファイバー干渉計を用いてテストマスを制御し、アクチュエーター自身の雑音を評価していきたいと考えている [31]。

直交位相法 TOBA の開発

以前開発された TOBA では棒状のテストマスを超伝導ピン止め効果によって浮上させ、回転をコイル-マグネットアクチュエータで制御しその回転の読み取るセンサーとしてマイケルソン干渉計を用いていた。この TOBA では磁石をテストマスに取り付けており約 0.1 Hz 以下において磁場雑音によって重力波に対する感度が制限されていた。そのため我々は新しくセンサとして直交位相干渉計を用いた TOBA を開発した。直交位相干渉計を用いることによってテストマスを制御する必要がなくなり、さらにテストマスをワイヤーで懸架しているため磁場雑音が原理的になくなっている。新しい TOBA の重力波に対する感度は 0.01Hz において 2×10^7 [1/Hz^{1/2}] となっており、この周波数において超伝導磁気浮上を用いた TOBA と比べ雑音レベルが 1/35 程度に低減された。今後は雑音を低減させより良い感度の実現を目指す。

1.1.4 低温光共振器を用いた超高安定化レーザー光源

レーザー周波数の安定化は、重力波検出器のみならず、光格子時計や超高精度分光等の精密計測において重要な役割を果たす。一般に周波数安定化には高安定な光共振器を用意し、レーザーをその共振点にロックすることで達成される。しかし、この共振器の長さ安定度は、構成分子の熱的振動によって生じる熱雑音によって制限される。そこで当研究室では、低温において高い機械的 Q 値を持つ単結晶シリコン製の光共振器を用いて、熱雑音を低減した超高安定化レーザーの開発を行なっている。この研究は、工学部香取研究室と共同で進めており、完成した際には、香取研の光格子時計用プローブレーザーとして活用する予定である。本研究の目指す 10^{-17} レベルの安定度を持つプローブレーザーを使えば、100 秒程度の短期積分で 10^{-18} の安定度に到達可能な超高性能光周波数標準を実現可能である。

低温光共振器の評価実験

低温光共振器ではスペーサーや鏡、コーティングの熱雑音を低減させるために極低温まで共振器を冷却する。また、地面振動の防振による弾性変形の抑制や温度安定化による熱膨張の低減も必要となる。

2013 年度は光共振器の冷却試験および低温で光共振器へのレーザーの安定化を行った。冷却試験では光共振器の温度を 4.05 K まで冷やすことができ、極低温でのオペレーションが可能であることを確認した。また、光共振器にレーザーをロックして周波数安定化を行い、in loop 評価で 10^{-18} を下回る結果を得た。さらに今年度は開発したレーザーの応用を見据えて、光の伝送によって導入される周波数雑音の評価を行い 10^{-17} レベルの安定度で光を伝送する光学系を構築した。

今後は、ヘキサポッドステージを用いた能動防振装置のインストールや out of loop でのレーザーの周波数安定度の評価を行っていく。

光共振器の防振

目的の周波数安定度を獲得する為には、地面や冷凍機による振動によって共振器長が弾性変形するのを防がなければならない。この為に必要となるのが防振台である。そこで我々は、ヘキサポッドと呼ばれる 6 本脚の台を使用する。6 本の脚にはそれぞれピエゾ素子が組み込まれており、小型の速度計でモニターした振動をピエゾ素子にフィードバックして脚の長さを調節する事で、台上部の振動を能動的に抑える。

これまでに装置開発、及び並進 3 軸の同時制御に成功しており、直径約 40cm 以内、高さ約 20cm と非常に小型でありながら 1~10Hz という低周波数帯において約 1/10 の防振比を持つ防振台を完成させた。

これは現在低温共振器の防振台としてインストールされており、今後は防振によるレーザー周波数安定度の向上が期待される。

1.1.5 相対論・量子光学精密実験

三角光共振器を用いた異方性検出実験

量子重力理論の研究や宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の観測から、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 不変性の破れは特殊相対論の否定する光速の異方性に通じ、我々の宇宙観を左右する極めて重要な問題であるため、世界中で光速の異方性探査が行われている。しかし、これまでの多くの実験は Michelson-Morley の実験と同じように往復光速の異方性探査となっており、片道光速の異方性への上限値は往復光速に比べて 4 桁大きいものとなっていた。そこで、我々は片道光速の異方性に着目し、研究を行なっている。片道光速の異方性とは、一方向に進む光の速さの、行き帰りの差である。

これまで異方性探査実験では、光共振器の鏡像反転対称性のため、往復光速の異方性しか測定することはできなかった。そこで、光リング共振器の光路の一部に媒質を入れて屈折率を変え、非対称性を持たせることで片道光速の異方性を測定可能にした。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することを考案した。ダブルパス構成では一度光共振器に共振した光を逆回りに再入射する。これにより測定が高精度な null 測定となる。また、両回りの共振周波数は共振器の水平や温度の変動に伴って同相で変化するため、共振周波数の差を測定する本手法は高い同相雑音除去により環境変動に極めて強い。これまでの光共振器を用いた異方性探査実験では高レベル防振装置や高真空環境が必須であったが、本実験ではその必要がない。

今年度は昨年度の 8 月に開始した長期測定を 9 月まで続け、合計 393 日分、約 170 万回転分の異方性信号データを得た。この 1 年以上に渡るデータの解析を行ったところ、有意な異方性は見つからず、片道光速の異方性へ 10^{-15} のオーダーの上限値をつけた。これはこれまで他の実験で得られていたものを 1 桁以上更新するものであり、我々の知る限り世界で最も厳しい上限値である。また、拡張標準理論の枠組みで解析を行い、光子の高次の Lorentz 不変性の破れパラメータに世界初の上限値をつけた。高次の破れとは電磁場のラグランジアンに光子の運動量依存性がある項を加える事で表現される破れのことである。運動量依存性の次数が上がると、光速の異方性を球面調和関数で展開した場合、高次の成分が出てくることになる。これまでは異方性の双極子成分に対応する単純な片道光速の異方性しか測定されてこなかったが、今回我々は六重極成分に着目し、解析を行った。

量子論的輻射圧の測定

近年、光の圧力 (量子輻射圧揺らぎ) と巨視的機械振動子が結合した光共振器 (機械光学系) における巨視的量子現象に関心が集まっており様々な理論予測が発表されている。例えば振動子間の巨視的エンタングル状態の生成など、機械光学系は巨視的量子現象を観測する新たな実験系となる可能性を秘めている。

しかし、巨視的な系における輻射圧揺らぎの観測は未だなされていなかった。その原因の一つとして、光軸変動と輻射圧力が結合し共振器が不安定となる (Siddles-Sigg 不安定性と呼ばれる) ために、光共振器に十分な光量を溜められない問題が存在する。そこで我々は、Siddles-Sigg 不安定性を解消する実験構成として三角共振器を利用した自発的に安定な装置を開発し、輻射圧揺らぎの影響を評価することに成功した。

光学浮上鏡を用いた巨視的量子実験

超高精密測定においては測定に擾乱が問題となる。例えば、重力波検出器のような機械光学系では懸架した鏡にレーザー光を当てることで位置を測定するが、光子数の揺らぎによって鏡に揺らいだ運動量が与えられてしまうことに起因する雑音が存在する。この量子輻射圧雑音は、光子の位相揺らぎによって生じる散射雑音と相関を持たせることで打ち消すことができ、標準量子限界を超えた鏡の位置測定 (量子非破壊計測) ができることになる。そのため盛んに研究が行われているが、プランク質量を超えるような巨視的な領域では量子輻射圧雑音に到達した例がこれまで存在しなかった。今年度の本研究室の実験により、これが達成されたが、量子非破壊計測を行うためには直近にある熱雑音をさらに低減する必要がある。

熱雑音にはさまざまな種類が存在するが、KAGRA のような重力波検出器やこれまでの実験で最も問題となっているのは鏡を懸架する際に生じる散逸に伴うサスペンション熱雑音である。これをなくするためには重力に逆らって鏡を浮上させる必要があり、その一つの方法が光の輻射圧のみによって鏡を支える光学浮上である。磁気浮上などの方法には熱雑音となる散逸が存在するが、光学浮上では光子の有効温度が環境に比べて十分高いため、熱雑音となる散逸が存在しない。

今年度はこの光学浮上の安定性について検討を行った。その結果、鏡の曲率が鉛直下方向に凸でないとき安定な光学浮上が実現できないことがわかった。また、3 本の Fabry-Perot 共振器による光輻射圧を用いて支えるという、既に提案がされている三脚構造の方式より簡便な構成で安定な浮上が可能であることがわかった。その構成は Fabry-Perot 共振器を浮上鏡の上下に 1 本ずつ作る方式であり、我々が新しく発見した構成である。また、初期アラインメントへの要求値の計算や、1.6 mg の鏡や実験に用いる真空設備の準備を進めている。

<受賞>

- [1] 松本 伸之, 2013 年度 理学系研究科 研究奨励賞 (博士課程).

<報文>

(原著論文)

- [2] 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)
- [3] Y. Aso, Y. Michimura, et al.: Interferometer Design of the KAGRA Gravitational Wave Detector, *Phys. Rev. D* 88, 043007 (2013)
- [4] Yuta Michimura, Nobuyuki Matsumoto, Noriaki Ohmae, Wataru Kokuyama, Yoichi Aso, Masaki Ando, Kimio Tsubono: New Limit on Lorentz Violation Using a Double-Pass Optical Ring Cavity, *Phys. Rev. Lett.* 110, 200401 (2013)
- [5] Yuta Michimura, Matthew Mewes, Nobuyuki Matsumoto, Yoichi Aso, Masaki Ando: Optical cavity limits on higher order Lorentz violation, *Phys. Rev. D* 88, 111101(R) (2013)
- [6] J. Harms, BJJ. Slagmolen, RX. Adhikari, MC. Miller, M. Evans, YB. Chen, H. Muller, M. Ando: Low-frequency terrestrial gravitational-wave detectors, *Phys. Rev. D* 88, 122003 (2013)
- [7] Masaki Ando: DECIGO Pathfinder Int. J. Modern. Phys. D 22, 1341002 (2013)

(会議抄録)

- [8] Yuta Michimura, Nobuyuki Matsumoto, Noriaki Ohmae, Wataru Kokuyama, Yoichi Aso, Masaki Ando, Kimio Tsubono: Testing Lorentz Invariance with a Double-Pass Optical Ring Cavity, *Proceedings of the Sixth Meeting on CPT and Lorentz Symmetry*, edited by V. A. Kostelecký, pp.216-219 (World Scientific, Singapore, 2014)

(学位論文)

- [9] 松本 伸之: Direct Measurement of Quantum Back-Action in a Macroscopic System, 博士論文, 2013 年 3 月.

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [10] Yuta Michimura, KAGRA Collaboration: WFS Shot Noise Requirement, 8th KAGRA Face to Face Meeting (Aug 2013, Toyama)
- [11] Yuta Michimura, KAGRA Collaboration: Alignment Sensing and Control for KAGRA Interferometer, 2013 International School on Numerical Relativity and Gravitational Waves (Aug 2013, Toyama)

- [12] A. Shoda, M. Ando, K. Ishidoshiro, K. Okada, Y. Aso, K. Tsubono: A New Setup for Torsion-bar Antenna, Amaldi10/GR20 (Warsaw University, July 2013)
- [13] Yuta Michimura, Nobuyuki Matsumoto, Noriaki Ohmae, Wataru Kokuyama, Yoichi Aso, Masaki Ando, Kimio Tsubono: New Limit on Lorentz Violation Using a Double-Pass Optical Ring Cavity, Sixth Meeting on CPT and Lorentz Symmetry (June 2013, Indiana University)
- [14] Yuta Michimura, KAGRA Collaboration: Alignment Sensing and Control for KAGRA, ELiTES Bilateral Italy-Japan Workshop (Apr 2013, Tokyo)

招待講演

- [15] N. Matsumoto: Direct measurement of quantum back-action in a macroscopic system, IWQD2014, (March 2014, NII, Japan)
- [16] Masaki Ando: Observation of Gravitational Waves, Multi-Messengers from Core-Collapse Supernovae (December 2nd, 2013, Fukuoka Univ.)
- [17] Masaki Ando: Gravitational-Wave Telescopes, 6th OECD Meeting of the Astroparticle Physics International Forum (Oct. 29, 2013 Toyama)
- [18] Masaki Ando: KAGRA, Large-scale Cryogenic Gravitational-Wave Telescope, Workshop on Scientific Project Management (Oct. 16, 2013, Fuku- racia Tokyo Station, Tokyo)
- [19] A. Shoda: Torsion-bar Antenna and Its Collaboration with Interferometers, 2013 International School on Numerical Relativity and Gravitational Waves, (August 2013, Pohang, Korea)
- [20] Masaki Ando: KAGRA and Gravitational-Wave Experiments, APPC12, The 12th Asia Pacific Physics Conference (July 17, 2013, Makuhari Messe, Chiba, Japan)
- [21] Masaki Ando: Recent News from KAGRA, PAC34, The 34th Program Advisory Committee Meeting (June 4th 2013, Hanford, USA)
- [22] A. Shoda: Torsion-bar Antenna and Its Collaboration with Interferometers, Italy-Japan Workshop (Tokyo, Japan, April 2013)

(国内会議)

一般講演

- [23] 安東正樹, 他: 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 第 69 回年次大会 (2014 年 3 月 27 日, 東海大学, 神奈川)
- [24] 麻生洋一, 他: 重力波検出器 KAGRA の主干渉計開発 III, 日本物理学会 第 69 回年次大会 (2014 年 3 月 27 日, 東海大学, 神奈川)
- [25] 松本伸之, 道村唯太, 麻生洋一, 安東正樹: 輻射圧雑音の直接測定, 日本物理学会 第 69 回年次大会 (2014 年 3 月 27 日, 東海大学, 神奈川)

- [26] 道村唯太, 松本伸之, 麻生洋一, 安東正樹: 鏡の光学浮上, 日本物理学会 第 69 回年次大会 (2014 年 3 月 27 日, 東海大学, 神奈川)
- [27] 正田亜八香, 手嶋航大, 桑原祐也, 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, 日本物理学会 第 69 回年次大会 (2014 年 3 月 27 日, 東海大学, 神奈川)
- [28] 柴田和憲, 乙村浩太郎, 出野雄也, 徳田順生, 麻生洋一, 宗宮健太郎, 安東正樹: 非平衡定常状態における熱雑音, 日本物理学会 第 69 回年次大会 (2014 年 3 月 27 日, 東海大学, 神奈川)
- [29] 牛場崇文, 麻生洋一, 大前宣昭, 正田亜八香: 低温シリコン光共振器を用いた狭線幅光源の開発 II, 日本物理学会 第 69 回年次大会 (2014 年 3 月 27 日, 東海大学, 神奈川)
- [30] 桑原祐也, 小森健太郎, 正田亜八香, 麻生洋一, 安東正樹: ねじれ振り子型重力波検出器 (TOBA) に向けたファイバー干渉計の開発, 日本物理学会 第 69 回年次大会 (2014 年 3 月 27 日, 東海大学, 神奈川)
- [31] 小森健太郎, 桑原祐也, 正田亜八香, 麻生洋一, 安東正樹: ねじれ振り子型重力波検出器 (TOBA) のためのアクチュエーターの開発, 日本物理学会 第 69 回年次大会 (2014 年 3 月 27 日, 東海大学, 神奈川)
- [32] 安東正樹: 小型重力波観測衛星 DECIGO パスファインダーイプシロン搭載宇宙科学ミッション・シンポジウム (2014 年 1 月 24 日, 東京大学)
- [33] 安東正樹: DECIGO Pathfinder, 宇宙科学シンポジウム (2014 年 1 月 8 日, 宇宙科学研究所, 相模原)
- [34] 安東正樹: DECIGO/DPF の概要, 第 12 回 DECIGO ワークショップ (2013 年 10 月 27 日, 東京大学)
- [35] 安東正樹, 他: スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (44): DECIGO/DPF の概要日本物理学会 2013 年秋季大会 (2013 年 9 月 23 日, 高知大学)
- [36] 正田亜八香, 安東正樹, 石徹城晃司, 岡田健志, 麻生洋一, 坪野公夫: 「次世代ねじれ振り子型重力波検出器 (Phase-II TOBA) の基本概念設計」, 日本物理学会 2013 年秋季大会 (2013 年 9 月 23 日, 高知大学)
- [37] 道村唯太, 松本伸之, 大前宣昭, 麻生洋一, 穀山渉, 安東正樹, 坪野公夫: 光リング共振器を用いた光子のローレンツ不変性検証, 日本物理学会 2013 年秋季大会 (2013 年 9 月 23 日, 高知大学)
- [38] 柴田和憲, 麻生洋一, 山元一広, 安藤正樹: 任意の光学系におけるパラメトリック不安定の評価, 日本物理学会 2013 年秋季大会 (2013 年 9 月 23 日, 高知大学)
- [39] 牛場崇文, 麻生洋一, 大前宣昭, 正田亜八香, 坪野公夫: 低温シリコン光共振器を用いた狭線幅光源の開発, 日本物理学会 2013 年秋季大会 (2013 年 9 月 23 日, 高知大学)
- [40] 松本伸之, 道村唯太, 麻生洋一, 坪野公夫: 三角共振器を用いた量子輻射圧揺らぎ観測実験 II, 日本物理学会 2013 年秋季大会 (2013 年 9 月, 徳島大学)
- [41] 阿久津 智忠, 安東正樹: スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (23), 日本天文学会 2013 年 秋季年会 (2013 年 9 月 10 日, 東北大学)
- 招待講演
- [42] 安東正樹: 重力波の観測, 日本天文学会 年会 企画セッション 「r プロセスと重力波天文学」 (2014 年 3 月 19 日, 国際基督教大学)
- [43] 安東正樹: DECIGO Pathfinder, CRC 将来計画タウンミーティング (2014 年 3 月 14 日, 東京大学 宇宙線研究所)
- [44] 麻生洋一: 重力波で拓く新しい天文学・KAGRA の技術と建設の現状, CRC 将来計画タウンミーティング (2014 年 3 月 14 日, 東京大学 宇宙線研究所)
- (セミナー)
- [45] Yuta Michimura, Nobuyuki Matsumoto, Noriaki Ohmae, Wataru Kokuyama, Yoichi Aso, Masaki Ando, and Kimio Tsubono: Testing Lorentz Invariance with an Optical Ring Cavity, LHO Journal Club (Mar 2014, Richland, WA)
- [46] Masaki Ando: Current status of KAGRA, RESCEU 交流会 (Jan. 8th, 2014, RESCEU)
- [47] 安東 正樹: 重力波検出に挑む KAGRA, 朝日カルチャーセンター講演 (2013 年 11 月 16 日, ルミネ横浜, 横浜)
- [48] 安東 正樹: 重力波望遠鏡「かぐら」で切りひらく新しい天文学, 駿台天文講座 (2013 年 10 月 19 日, 駿台学園, 東京)
- [49] 安東 正樹: 重力波望遠鏡「かぐら」で探る宇宙, ビッグバン宇宙国際研究センター 講演会, Open Campus 2013 (2013 年 8 月 8 日, 東京大学)
- [50] 安東 正樹: 重力波望遠鏡 KAGRA が切り拓く天文学, 富山大学 談話会 (2013 年 7 月 31 日, 富山大学)
- [51] 安東 正樹: 低周波数重力波の探査, 第 13 回 RESCEU サマースクール 「宇宙における時空・物質・構造の進化」 (2013 年 7 月 26 日, 蔵王, 山形)
- [52] 安東 正樹: 重力と重力波で探る宇宙, 2013 年度 ビッグバン宇宙国際研究センター 研究者交流会 (2013 年 6 月 26 日, 東京大学)
- [53] 安東 正樹: 重力波望遠鏡で観測する新しい宇宙の姿, 平成 25 年度 物理学教室ガイダンス・オープンラボ (2013 年 6 月 7 日, 小柴ホール, 東京大学)
- [54] 安東 正樹: 重力波で解き明かす宇宙の謎, 平成 25 年度 物理学科進学ガイダンス講演会 「物理学の新たな地平」 (2013 年 5 月 27 日, 東京大学駒場キャンパス)
- [55] 安東 正樹: 重力波望遠鏡 KAGRA でみる新しい宇宙の姿, 東京大学 物理学教室談話会 (2013 年 5 月 31 日, 東京大学)
- [56] 安東 正樹: 重力波望遠鏡 KAGRA が拓く宇宙の地平線, 2013 年 総研大特別公開講演 (2013 年 5 月 25 日, 国立天文台, 三鷹)

II

Summary of group activities in 2013

1 Ando Group

Research Subjects: Experimental Relativity, Gravitational Wave, Laser Interferometer

Member: Masaki Ando and Yoich Aso

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] 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)
- [2] Y. Aso, Y. Michimura, et al.: Interferometer Design of the KAGRA Gravitational Wave Detector, *Phys. Rev. D* 88, 043007 (2013)
- [3] Yuta Michimura, Nobuyuki Matsumoto, Noriaki Ohmae, Wataru Kokuyama, Yoichi Aso, Masaki Ando, Kimio Tsubono: New Limit on Lorentz Violation Using a Double-Pass Optical Ring Cavity, *Phys. Rev. Lett.* 110, 200401 (2013)
- [4] Yuta Michimura, Matthew Mewes, Nobuyuki Matsumoto, Yoichi Aso, Masaki Ando: Optical cavity limits on higher order Lorentz violation, *Phys. Rev. D* 88, 111101(R) (2013)
- [5] J. Harms, BJJ. Slagmolen, RX. Adhikari, MC. Miller, M. Evans, YB. Chen, H. Muller, M. Ando: Low-frequency terrestrial gravitational-wave detectors, *Phys. Rev. D* 88, 122003 (2013)
- [6] Masaki Ando: DECIGO Pathfinder Int. *J. Modern. Phys. D* 22, 1341002 (2013)