I

研究室別 2019年度 研究活動報告

1　分野 A

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，それによる宇宙の観測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」が幕をあけた．国内でも 2010 年にスタートした大型低温重力波検出器 KAGRA の観測が開始されつつある．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

2015 年にアメリカの 2 台の重力波望遠鏡 Advanced LIGO により連星ブラックホール合体からの重力波が初観測された．2017 年にはイタリアの Advanced Virgo を加えた 3 台での観測運転により，連星中性子星合体からの重力波が初観測され，複数台の望遠鏡での同時観測が可能にする到来方向の精密な決定と，電磁波やニュートリノなどと組み合わせたマルチメッセンジャー観測が実現された．2019 年 4 月から開始された観測運転 (O3) では，ほぼ 1 週間に 1 個のペースで重力波イベントが見つかっている．

こうした観測ネットワークの拡大によるさらなる重力波物理学・天文学の発展を目指し，日本では大型低温重力波望遠鏡 KAGRA(かぐら) の建設が岐阜県神岡で進められている．KAGRA により，到来方向決定精度の向上，偏極モードの分離を利用した重力理論の検証などが期待できる．KAGRA は地下建設と鏡の低温化という次世代重力波望遠鏡に必須と考えられている技術を取り入れたレーザー干渉計であり，技術的にも先進的な望遠鏡ともなっている．

KAGRA の現状

KAGRA 計画は 2010 年にスタートした．2019 年 4 月には初期観測運転に必要な機器のインストールが完了し，8 月には 3 km に及ぶ 2 本の光共振器を用いたファブリ・ペロー・マイケルソン干渉計 (FPMI) の動作に成功している．2020 年 2 月にはパワーリサイクリングの導入にも成功し，PRFPMI と呼ばれる構成が完成した．10 月には LIGO，Virgo，KAGRA の間で共同観測協定の調印が行われ，O3 観測で三者のデータを共同で解析するための条件などが決められた．

一方で，低温化した際にサファイア鏡に氷結が起こってしまう問題やサファイア鏡の非一様性と複屈折の影響が想定よりも大きいという問題も判明した．8 月の FPMI の初動作から 2020 年 3 月の時点まで，干渉計の調整により 3 桁以上の感度改善を行い，現時点で連星中性子星に対する観測可能距離は最大で 1 Mpc 程度となっており，2020 年 2 月より観測運転を開始した．今後もさらなる微調整で感度向上を目指すとともに，2021 年頃に開始する O4 観測に向け，サファイア鏡の改良や複屈折の影響を減らす光学素子の導入などを進める．

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，観測ロードマップの作成などを行っている．本年度は特に，干渉計の動作点引き込みに必要となる補助制御システムを完成させ [3]，FPMI の初動作を実現させた．また，干渉計の感度を制限する雑音の同定を進め，感度向上に貢献するとともに，上記の氷結と非一様性が干渉計に与える影響を評価した [13]．装置開発としては他に，光学定盤のカバーの設計と導入，変調光学系の評価 [12] を行った．現状のサファイア鏡を用いた場合の感度計算を進め，O3 観測やその後の観測をどう行っていくかの観測計画の立案を行った．

観測運転へ向けた干渉計動作

この 1 年の KAGRA の開発の最重要課題は，全てのサブシステムを統合して主干渉計を動作させ，重力波が観測可能な状態を達成することであった．主干渉計の動作点への引き込みでは一般に，グリーンロックと呼ばれるグリーンレーザーを用いた補助制御システムが中心的役割を果たす．本年度は，前年度までの評価で得られた知見をもとにシステムに改良を加え，グリーンレーザーを伝送する光ファイバーの振動によって印加される位相雑音をキャンセルする光学系を新たに導入した．その結果，グリーンロックシステムの雑音をより低減することに成功した．この改良されたシステムを KAGRA の両腕に導入することで，FPMI の動作や PRFPMI の動作に成功した．

この研究で開発されたグリーンロックシステムは次世代のより大きな重力波望遠鏡への応用が容易である．本研究室では次世代望遠鏡の動作点引き込みを世界に先駆けて研究・検討し，必要な開発項目や新規手法を提言・提案した [19]．

重力波偏極モードを用いた重力理論検証

一般相対性理論において重力波は二つのテンソル偏極モードを自由度として持つ．しかし，重力理論によって許される重力波の偏極モードは異なるため，重

力波の偏極モードの分離によって重力理論を検証することができる．原理的には偏極モードの分離には偏極モードの数と同じ数の重力波検出器が必要であるが，低周波数帯で優れた感度を持つ Einstein Telescope や Cosmic Explorer などの次世代検出器では，地球の自転によって実効的な台数が多くなり，数台でも検出器台数より多くの偏極モードを探査することが可能であると考えられる．本年度は，これらの次世代重力波望遠鏡の偏極分離能力を系統的に調べ，将来のコンパクト連星合体からの重力波の長期的な観測によってパルサーの観測からつけられているスカラーモードへの制限と同等の重力理論検証がより強重力場で可能になることを示した．

1.1.2　周波数依存スクイーズ光の開発

重力波望遠鏡の将来的な感度は量子雑音という雑音によって制限される．広帯域で量子雑音を低減するためには，高周波で位相方向に，低周波で振幅方向にスクイーズされた周波数依存したスクイーズ光が必要となる．我々は，国立天文台の重力波望遠鏡 TAMA の 300 m の光共振器を用いて重力波望遠鏡の観測帯域である 70 Hz 程度での周波数依存スクイーズ光の実現を目指している．

今年度は，スクイーズ光の開発を進め，20 Hz 以上で 6dB 程度のスクイーズ光の生成に成功した．また，生成されたスクイーズ光を 300 m の光共振器に入射することにより，300 m の光共振器を用いた周波数依存スクイーズ光の生成に世界で初めて成功した (図 1.1.1).

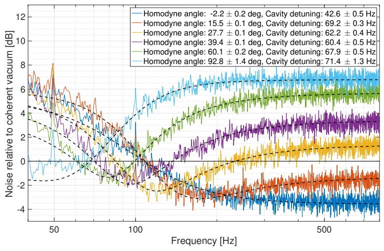

図 1.1.1: 生成された周波数依存スクイーズ光.

1.1.3　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 のレーザー干渉計制御手法の検討

DECIGO では，一つの Fabry–Pérot 共振器に両側からレーザー光を入射させる，双方向 Fabry–Pérot 共振器と呼ばれる干渉計方式を用いて，三角形型の干渉計を構成する予定である．この方式では，複数の Fabry–Pérot 共振器が互いに影響を与え合うため，すべての干渉計の信号を同時に得るための新しい制御手法の検討が必要であった．本年度は，Fabry–Pérot 型宇宙重力波望遠鏡の制御モデルを構築し，DECIGO の目標感度である $10^{-23}\ 1/\sqrt{\mathrm{Hz}}$ というひずみ感度と 1 日以上の安定性を持つ干渉計制御の成立解を確立した．また，双方向差動 Fabry–Pérot 干渉計を定式化するとともに，実際に地上の実験室に 55 cm の基線長を持つセットアップを構築し，その動作を世界で初めて実証した．さらに，共振器の共振点からのずれが，共振器長さを調整することで低減されることを確認した．

1.1.4　ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA

Torsion-Bar Antenna (TOBA) とはねじれ振り子の水平回転を利用した新しい重力波検出器である．地上でも低周波数帯（0.1 Hz 前後）の重力波に感度を持ち，中間質量ブラックホール連星合体の観測が可能になり，銀河中心の超巨大ブラックホールの形成過程に知見を与えることなどが期待できる．重力波観測以外にも地球活動による重力場変動を計測することで将来の地上重力波望遠鏡の低周波感度向上に貢献したり，地震の早期アラートに応用するなどの研究も進められている．

現在は長さ 35 cm の棒状マスを用いた小型プロトタイプ（Phase-III TOBA）の開発が進められており，将来的な大型化（10 m）に備えた雑音低減実証や，地球重力場変動の観測，地震速報の実現などを目指している．設計感度は 0.1 Hz で $10^{-15}\ /\sqrt{\mathrm{Hz}}$ となっている．

ねじれ振り子の低温化

目標感度達成において最も障害となる雑音の一つが懸架ワイヤの熱的な揺らぎであり，雑音を十分に低減するためには (1) 懸架ワイヤの低温化（目標温度：4 K）および (2) 低エネルギー散逸ワイヤの開発（目標 Q 値：10^8）が求められる．本年度は前年度に引き続き低温化の開発を進め，プロトタイプねじれ振り子を 4.8 K まで冷却することに成功した. さらに低温下での振り子回転計測を実現し，その信号をもとに低温ねじれ振り子の雑音調査なども行った．35 cm スケールのねじれ振り子に対して低温化・雑音調査が行われた先行研究はなく，これらは本研究で初めて達成された．雑音調査の結果，低温下では磁場変動に対する応答が増大してしまうことが明らかになったが，これは振り子材質の無酸素銅の電気伝導度が増大し，誘導電流を介した電磁力が大きくなっているためだと解釈されている．

能動防振系の開発

TOBA の主要な雑音の一つが地面振動雑音である．

現在我々は，能動防振により並進地面振動の低減することを目指している．今年度は，防振系が設置されているフレームをより強固なものに変更することで機械共振による制御の安定性を高めることに成功し，並進 3 自由度の同時制御に成功した．また低周波数帯に余分な振動を導入する傾斜変動を読み取る傾斜計の開発を進め，懸架系の構築が完了した．今後は傾斜系を防振系に組み込み，並進・回転 6 自由度の制御を目指す．

改良型角度センサの開発

Phase-III TOBA の目標感度を達成するためには，試験マスの差動回転を読み取る際の角度読み取り雑音を 5×10^{-16} rad/$\sqrt{\mathrm{Hz}}$ より小さくすることが要求される．これを満たす角度センサとして Coupled 共振器を用いた Wave Front Sensor (Coupled WFS) が考案されている [66].

Coupled WFS は，試験マスに取り付けられた鏡と他の二枚の鏡が同じ軸の上に向かい合って並んだ形をしており，二つの光共振器を構成している．後ろの光共振器の長さに応じて TEM_{00} モードと TEM_{10} モードの光の間に異なる位相を与えることができ，Gouy 位相を打ち消して角度信号を増幅する．

本年度は Coupled WFS の原理実証や制御の実現を目的として原理実証を行なった [23]．その結果，試験マスの差動回転に対する角度信号は，WFS に比べて 2.1(5) 倍増幅できることを実証した．また同時に，Coupled WFS の制御が実現可能であることも確認できた．これによって Coupled WFS の定性的な原理実証は完了したと言える．

懸架ファイバでの機械損失の評価

We worked further on experimental research on Q factor measurements of sapphire fibres in torsion. Discovered a link between clamp strength and resonant frequency, providing a deeper understanding of the experimental setup. [69, 51]. Cryogenic measurements are also being prepared, with a new setup being designed for compatibility. Work done in 2018 on Q factor measurements for single strand carbon fibre for an experimental setup was also published [1].

1.1.5 地震の早期アラート

断層破壊に伴う地面の密度変化を重力場の変化として検出することで地震発生の早期検知に用いる研究が近年提案された．特に 0.1 Hz 付近の低周波変動を捉えることで，地震波を用いる現行の速報より素早い検出やマグニチュード推定の精度向上ができる可能性が期待されており，TOBA の観測ターゲットの一つに設定されている．

本年度，TOBA での地震検出に関連して (1) 重力勾配テンソル成分間の差を考慮した信号検出可能性，(2) 複数の TOBA を用いた観測ネットワークによる震源位置推定，について計算を行った．その結果，TOBA で観測可能な水平重力勾配のみでも十分な信号検出が可能であることが分かった．また複数検出器間の信号振幅比をもとに震源位置を推定するシミュレーションを行い，観測ネットワークの適切な構成を議論した．

1.1.6 相対論 · 量子光学精密実験

オプトメカニクス研究

安東研究室では，重力波検出器の感度向上に向けた雑音低減，および巨視的量子力学の検証を目的として，レーザー光の量子輻射圧揺らぎを観測することを目指している．今年度我々は，mg スケールの曲率つき微小鏡を用いて光共振器を組み，共振器の幾何学的構成から微小鏡をトラップする実験セットアップを新たに構築した．本年度は，安定度を評価する実験を行い，共振器内パワーを増大させるほど，微小鏡に強い復元力が働くことを実際に観測した [61]．同時に，この高感度な系を用いて，量子雑音を低減する手法を古典雑音を用いてデモンストレーションする実験を行い，測定の反作用雑音の回避を示唆する結果を得た [54]．今後は，量子輻射圧ゆらぎ観測に向け，雑音源の特定を進め，現在得られている感度 [61] の向上を目指す．

光学浮上法の安定性検証

巨視的な量子系を観測するためには，対象質量スケールにおいて，レーザー光の量子ゆらぎによって決まる測定限界 (標準量子限界) に到達する必要がある．そのための最大の障害となり得る鏡の懸架に伴う熱雑音を克服するため，私たちは，鏡を光輻射圧で浮上させる光学浮上の開発を行っている．光学浮上法の実現には，浮上した鏡が安定であることが必要であり，鏡の上下から光を当てることで安定浮上を可能とするサンドウィッチ構成を提案した．

本年度は，サンドウィッチ構成の安定性検証を目指し，二段ねじれ振り子の導入と光学系の改良を行った．その上で，ねじれ振り子と Fabry-Perot 共振器の同時制御に成功し，共振状態における光輻射圧による復元力の測定を行なった．結果として，復元力と Fabry-Perot 共振器の光強度の関係が理論と矛盾しないことを確認した．今後は，復元力と Fabry-Perot 共振器の曲率中心間距離の関係を評価した上で，実際に鏡を浮上させるセットアップ構築を行う予定である．

光速の等方性検証

Lorentz 不変性は宇宙の基本的な対称性として現代物理学の多くの理論で採用されている．しかし，量子重力理論の理論的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や特殊な座標系の存在が示唆されている．そのため，Lorentz 不変性をより高い精度で検証することが重要とされる

我々は，Lorentz 不変性を検証するために片道光速の等方性検証を行っている．光路の一部に媒質を入れて屈折率を変え，非対称化した光リング共振器を用いると，共振器内を両周りの光の共振周波数の差として片道光速の等方性を検証することができる．

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} の上限値をつけた．しかし，回転に伴う振動雑音が感度を制限する要因となっていたため，今年度までに回転機構の改良を行った．本年度は，回転に同期した雑音低減のために上部支持を伴わない回転機構を導入し連続回転を実現した．細かい回転軸調整なしで，2×10^{-15} の回転時感度を得ることに成功した．

光共振器を用いたアクシオン暗黒物質探査

数々の宇宙観測によって，宇宙の全物質の約 5/6 は暗黒物質であることが判明しているが，その正体は全くわかっていない．我々は，特にアクシオンと呼ばれる粒子に注目し，レーザー干渉計とのわずかな相互作用を利用した探査を進めている．我々は，アクシオンがその質量に応じた周期で光の左円偏光と右円偏光の位相速度を周期的に変化させる性質に着目し，光リング共振器を用いてこの位相速度差を測定する手法を提案し、10^{-10} eV 程度以下の軽いアクシオンを探査する DANCE (Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment) 計画を 2018 年度よりスタートさせた [2].

本年度は最初のプロトタイプとなる, 周回長 1 m のボウタイ型共振器の製作と性能評価, 入射光学系と検出光学系の構築を行った．フィネスを測定したところ，設計値である 3×10^3 に対し，測定値は 5.2×10^2 程度に留まったものの，その他の性能については想定通りの結果が得られた．今後は共振器用の鏡の交換と感度向上を行い，2020 年度中の初期観測開始を目指す．

また，本年度は線形のファブリ・ペロー共振器を用いて直線偏光の偏光面回転を調べることで，アクシオン探査を行う新手法を提案した [5]．この手法では，光の往復時間がアクシオンの振動周期の奇数倍と一致する場合にのみ高い感度を持つ．この手法では重力波望遠鏡の 3-4 km に及ぶ巨大な共振器を用いることで, 高い感度を得ることができるため, テーブルトップサイズの光リング共振器で広帯域に感度を持たせる DANCE とは相補的な手法となっている．

＜受賞＞

[1] Yutaro Enomoto: 24th KAGRA Meeting Poster Award, KAGRA Scientific Congress (Dec 2019).

[2] 有冨尚紀: 2019 年秋季大会 日本物理学会学生優秀発表賞, 日本物理学会 (2019 年 10 月).

[3] 宮崎祐樹: 2019 年秋季大会 日本物理学会学生優秀発表賞, 日本物理学会 (2019 年 10 月).

[4] 有冨尚紀: The 23rd KAGRA meeting Best Poster Award, KAGRA collaboration (2019 年 8 月).

[5] 榎本雄太郎: 第 74 回年次大会 (2019 年) 日本物理学会学生優秀発表賞, 日本物理学会 (2019 年 5 月).

＜報文＞

(原著論文)

[6] K. Komori et al.: Attonewton-meter torque sensing with a macroscopic optomechanical torsion pendulum, Phys. Rev. A 101, 011802(R) (2020).

[7] Y. Michimura et al.: DANCE: Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment, Journal of Physics: Conference Series 1468, 012032 (2020).

[8] KAGRA Collab.: An arm length stabilization system for KAGRA and future gravitational-wave detectors, Class. Quantum Grav. 37, 035004 (2020).

[9] H. Takeda et al.: Prospects for gravitational-wave polarization tests from compact binary mergers with future ground-based detectors, Phys. Rev. D 100, 042001 (2019).

[10] K. Nagano et al.: Axion Dark Matter Search with Interferometric Gravitational Wave Detectors, Phys. Rev. Lett. 123, 111301 (2019).

[11] KAGRA Collab.: KAGRA: 2.5 generation interferometric gravitational wave detector, Nature Astronomy 3, 35-40 (2019).

[12] M. Kimura et al.: Earthquake-induced prompt gravity signals identified in dense array data in Japan, Earth, Planets and Space 71, 27 (2019).

[13] T. Shimoda, and M. Ando: Nonlinear vibration transfer in torsion pendulums, Class. Quantum Grav. 36 12 (2019).

[14] KAGRA Collab.: Vibration isolation system with a compact damping system for power recycling mirrors of KAGRA, Class. Quantum Grav. 36, 095015 (2019).

[15] S. Kawamura et al.: Space gravitational-wave antennas DECIGO and B-DECIGO, Int. J. Mod. Phy. D 28, 1845001 (2019).

[16] KAGRA Collab.: First cryogenic test operation of underground km-scale gravitational-wave observatory KAGRA, Classical and Quantum Gravity 36, 165008 (2019).

[17] K. Yamamoto et al.: Design and experimental demonstration of a laser modulation system for future gravitational-wave detectors, Classical and Quantum Gravity 36, 205009 (2019).

[18] K. Somiya et al.,: Influence of non-uniformity in sapphire substrates for a gravitational wave telescope, Phys. Rev. D 100, 082005 (2019).

(学位論文)

[19] 榎本雄太郎: Interferometer Locking Scheme for Advanced Gravitational-Wave Detectors and Beyond, 博士論文 (2020 年 3 月).

[20] 下田智文: Cryogenic Torsion Pendulum for Observing Low-frequency Gravity Gradient Fluctuation, 博士論文 (2020 年 3 月).

[21] 長野晃士: Control scheme for a Fabry–Pérot type interferometric space gravitational wave antenna, 博士論文 (2020 年 3 月).

[22] 喜多直紀: 巨視的量子系の観測に向けた光学浮上法の安定性検証, 修士論文 (2020 年 3 月).

[23] 宮崎祐樹: ねじれ型重力波検出器 TOBA のための高感度角度センサの開発, 修士論文 (2020 年 3 月).

(著書)

[24] 道村唯太: 低温レーザー干渉計で地下から重力波をとらえる, 大槻義彦, 他 編,『物理科学, この 1 年 2020』(丸善出版, 2020 年 1 月).

[25] M. Ando: Advanced Interferometric Gravitational-wave Detectors: Ed: David Reitze, et al., World Scientific Pub. Co. Inc. (2019).

＜学術講演＞

(国際会議)

一般講演

[26] N. Aritomi, *et al.*: Frequency Dependent Squeezing with 300 m filter cavity for Gravitational Wave Detectors, The 2nd QFilter WS (Feb. 2020, Kyoto).

[27] Y. Michimura: Recent news from the optical levitation experiment, The 2nd QFilter WS (Feb. 2020, Kyoto).

[28] Y. Enomoto: Interferometer Locking Scheme for Advanced Gravitational-Wave Detectors and Beyond, 24th KAGRA Meeting (Dec. 2019, Tokyo).

[29] M. Ando: Space-borne Gravitational-Wave Antenna: B-DECIGO, GWPAW 2019 (Oct. 14th, 2019, Univ. of Tokyo, Tokyo).

[30] Y. Michimura: DANCE: Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment, 16th TAUP (Sep. 2019, Toyama).

[31] Y. Michimura for the KAGRA Collab.: Prospects for upgrading the KAGRA gravitational wave telescope, 13th Edoardo Amaldi Conference (Ju.l 2019, Valencia, Spain).

[32] Y. Michimura: Resubmission of bKAGRA Phase 1 Paper, 22nd KAGRA Meeting (Apr. 2019, Kashiwa).

[33] N. Kita: Optical Levitation of a Mirror, 22nd KAGRA Meeting (Apr. 2019, Kashiwa).

ポスター発表

[34] Y. Enomoto: Interferometer Locking Scheme for Advanced Gravitational-Wave Detectors and Beyond, 24th KAGRA Meeting (Dec. 2019, Tokyo).

[35] Y. Michimura: Improving the sensitivity of KAGRA gravitational wave detector, GWPAW 2019 (Oct. 2019, Tokyo, Japan).

[36] N. Aritomi, *et al.*: Control of a Filter Cavity with Coherent Control Sidebands, The 23rd KAGRA Meeting (August 2019, Toyama).

[37] H. Takeda: Prospects for gravitational-wave polarization test from compact binary coalescences with next-generation detectors, 22nd GR 13th Edoardo Amaldi Conference (July, 2019, Valencia, Spain).

[38] N. Aritomi, *et al.*: Control of a Filter Cavity with Coherent Control Sidebands, GWADW 2019 (May, 2019, Isola d'Elba, Italy).

[39] Y. Michimura: How to be a superhero in interferometric gravitational wave detection, 22nd KAGRA Meeting (Apr 2019, Kashiwa).

[40] S. Takano, et al.,: Active Vibration Isolation by Hexapod For TOrsion-Bar Antenna, 22nd KAGRA Meeting (Apr. 2019, Kashiwa).

招待講演

[41] Y. Michimura: Laser Interferometric Search for Non-Standard Physics, The First School on Quantum Sensors for Fundamental Physics (Jan. 2020, Durham, UK).

[42] Y. Michimura for the KAGRA Collab.: Present status and future prospects of KAGRA gravitational wave telescope, Multi-dimensional Modeling and Multi-Messenger observation from Core-Collapse Supernovae (Oct. 2019, Fukuoka).

[43] M. Ando: Gravity-Gradient-Based Early Earthquake Alert, UK-Japan WS (Sep. 10th, 2019, Tokyo).

[44] Y. Michimura: Laser Interferometry for Gravitational Wave Observations, TianQin Summer School on Gravitational Waves 2019 (July 16, 2019, Sun Yat-sen University, China).

[45] M. Ando: Science and Technology of B-DECIGO and DECIGO, TianQin Summer School on Gravitational Waves 2019 (July 16, 2019, Sun Yat-sen University, China).

[46] M. Ando: Gravitational-wave observation - Recent results and prospects -, OMEG15 (July. 4th, 2019, YITP, Kyoto).

[47] M. Ando: B-DECIGO and DECIGO, The 6th KAGRA International Workshop (June 23rd, 2019, WIPM, Wuhan, China).

[48] Y. Enomoto for the KAGRA Collaboration: Topics on Commissioning of KAGRA, GWADW 2019 (May 2019, Isola d'Elba, Italy).

[49] S. Takano et al.,: Development of Cryogenic Torsion-Bar Gravitational Wave Detector, GWADW 2019 (May 2019, Isola d'Elba, Italy).

(国内会議)

一般講演

[50] 有冨尚紀, 他: 重力波望遠鏡の感度向上のための周波数依存スクイーズ光の開発 (3), 日本物理学会 第 75 回年次大会 (2020 年 3 月, 名古屋大学, 名古屋).

[51] Ching Pin Ooi: Development of Phase-III TOBA (TOrsion Bar Antenna) for Gravitational Wave Observation (22): Towards Cryogenic Cooling of Crystal Fibres for Suspension, 同上.

[52] 安東正樹: スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (111)：B-DECIGO の概要, 同上.

[53] 長野晃士: スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (117)：双方向 Fabry-Perot 干渉計の実証, 同上.

[54] 川崎拓也: 光共振器における古典強度雑音を用いた反作用雑音低減の実証, 同上.

[55] 喜多直紀: 光輻射圧による鏡の光学浮上法の安定性検証, 同上.

[56] 有冨尚紀, 他: 重力波望遠鏡の感度向上のための周波数依存スクイーズ光の開発, 第 39 回 天文学に関する技術シンポジウム (2020 年 1 月 15 日, 国立天文台).

[57] 安東正樹: 高感度重力勾配センサによる地震早期アラート手法の確立, 光・量子飛躍フラッグシッププログラム 第 3 回領域会議 (2019 年 11 月 14 日, 東京工業大学, 東京).

[58] 安東正樹: B-DECIGO, 第 18 回 DECIGO ワークショップ (2019 年 11 月 10 日, 京都大学).

[59] 長野晃士: 双方向 Fabry-Perot 干渉計の開発, 同上.

[60] 道村唯太: 小型宇宙重力波望遠鏡の提案, 同上.

[61] 川崎拓也: 線形光共振器による量子輻射圧ゆらぎの観測実験, 日本物理学会 2019 年秋季大会 (2019 年 9 月, 山形大学, 山形).

[62] 喜多直紀: 光輻射圧による鏡の光学浮上技術の開発 (11), 同上.

[63] 安東正樹: スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (106)：B-DECIGO の概要, 同上.

[64] 武田紘樹: 光リング共振器を用いた Lorentz 不変性検証 (5), 同上.

[65] 長野晃士: スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (109): 双方向 Fabry-Perot 干渉計の開発, 同上.

[66] 宮崎祐樹: ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA(Phase-III) の開発 (18), 同上.

[67] 高野哲, 他: ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA(Phase-III) の開発 (17)：傾斜計の開発, 同上.

[68] 下田智文: ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA(Phase-III) の開発 (19)：続・低温ねじれ振り子の開発, 同上.

[69] Ching Pin;Ooi：Development of Phase-III TOBA (Torsion Bar Antenna) for Gravitational Wave Observation (20): Towards cryogenic measurements of suspension mechanical loss for torsion pendulums with crystalline fibres, 同上.

[70] 道村唯太: km 級宇宙レーザー干渉計による重力波望遠鏡の可能性, 同上.

[71] 榎本雄太郎, KAGRA Collaboration: 大型低温重力波検出器 KAGRA の主干渉計制御 II, 同上.

[72] 有冨尚紀, 他: 重力波望遠鏡の感度向上のための周波数依存スクイーズ光の開発 (2), 同上.

[73] 道村唯太: レーザー干渉計によるアクシオン暗黒物質の探索, ダークマターの懇談会 2019 (2019 年 7 月, 早稲田大学).

[74] 安東正樹: 高感度重力勾配センサによる地震早期アラート手法の確立, 光・量子飛躍フラッグシッププログラム 第 2 回領域会議 (2019 年 5 月 13 日, 科学技術振興機構・東京本部, 東京).

ポスター発表

[75] 安東正樹, DECIGO グループ: 宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO 第 18 回 宇宙科学シンポジウム (2020 年 1 月 8-9 日, 宇宙科学研究所, 相模原, 神奈川).

招待講演

[76] 道村唯太: レーザー干渉計による重力波観測の現状と将来展望, 第 32 回 理論懇シンポジウム (2019 年 12 月, 国立天文台).

[77] 道村唯太: 重力波観測と量子技術, 応用物理学会・量子エレクトロニクス研究会 (2019 年 11 月, 東京大学山中寮).

[78] 安東 正樹: 宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO, 第 63 回 宇宙科学技術連合講演会 (2019 年 11 月 6 日, アスティとくしま, 徳島).

(セミナー・アウトリーチ講演)

[79] Y. Michimura: Optical levitation of a mirror for probing macroscopic quantum mechanics, ナノサイエンスセミナー (2019 年 12 月, 東京大学生産技術研究所).

[80] 道村唯太: レーザー干渉計型重力波検出器と巨視的量子力学, 宇宙論研究室セミナー (2019 年 10 月, 神戸大学).

[81] 安東 正樹: 重力波で宇宙を聴く, 2019 年度 科学セミナー, 宇宙を観る，聴く，計算する (2019 年 8 月 25 日, 早稲田大学, 東京).

[82] 道村唯太: レーザー干渉計による基礎物理実験, 寄田研究室セミナー (2019 年 8 月, 早稲田大学).

[83] Y. Michimura: Current status and future prospects of KAGRA gravitational wave telescope, ICRR Seminar (Jun 2019, ICRR).

[84] Y. Michimura: km-scale Space Gravitational Wave Detector, Formation Flying Meetup (May 2019, JAXA).

[85] Y. Enomoto: Current status of Large-Scale Cryogenic Gravitational-Wave Telescope KAGRA, ISAS Astrophysics Colloquium (May 2019, ISAS).

II

Summary of group activities in 2019

1 Ando Group

Research Subjects: Experimental Relativity, Gravitational Wave, Laser Interferometer

Member: Masaki Ando and Yuta Michimura

Gravitational waves has a potential 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 or binary black holes; 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 and improve detectors.

In Japan, we are constructing a large-scale cryogenic gravitational-wave antenna, named KAGRA, at Kamioka underground site. This underground telescope is expected to catch gravitational waves from the coalescence of neutron-star binaries at the distance of 200 Mpc. 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
- Space laser interferometer, DECIGO
- Development of TOBA (Torsion Bar Antenna)
- 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. Komori et al.: Attonewton-meter torque sensing with a macroscopic optomechanical torsion pendulum, Phys. Rev. A 101, 011802(R) (2020).

[2] Y. Michimura et al.: DANCE: Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment, Journal of Physics: Conference Series 1468, 012032 (2020).

[3] KAGRA Collaboration: An arm length stabilization system for KAGRA and future gravitational-wave detectors, Classical and Quantum Gravity 37, 035004 (2020).

[4] H. Takeda et al.: Prospects for gravitational-wave polarization tests from compact binary mergers with future ground-based detectors, Phys. Rev. D 100, 042001 (2019).

[5] K. Nagano et al.: Axion Dark Matter Search with Interferometric Gravitational Wave Detectors, Phys. Rev. Lett. 123, 111301 (2019).

[6] KAGRA Collaboration: KAGRA: 2.5 generation interferometric gravitational wave detector, Nature Astronomy 3, 35-40 (2019).

[7] M. Kimura et al.: Earthquake-induced prompt gravity signals identified in dense array data in Japan, Earth, Planets and Space 71, 27 (2019).

[8] T. Shimoda, and M. Ando: Nonlinear vibration transfer in torsion pendulums, Class. Quantum Grav. 36 12 (2019).

[9] KAGRA Collaboration: Vibration isolation system with a compact damping system for power recycling mirrors of KAGRA, Class. Quantum Grav. 36, 095015 (2019).

[10] S. Kawamura et al.: Space gravitational-wave antennas DECIGO and B-DECIGO, Int. J. Mod. Phy. D 28, 1845001 (2019).

[11] KAGRA Collaboration: First cryogenic test operation of underground km-scale gravitational-wave observatory KAGRA, Classical and Quantum Gravity 36, 165008 (2019).

[12] K. Yamamoto et al.: Design and experimental demonstration of a laser modulation system for future gravitational-wave detectors, Classical and Quantum Gravity 36, 205009 (2019).

[13] K. Somiya, E. Hirose, and Y. Michimura: Influence of non-uniformity in sapphire substrates for a gravitational wave telescope, Phys. Rev. D 100, 082005 (2019).