- [33] 橋立佳央理,石田明,難波俊雄,浅井祥仁,五神真,山田恭平,田島陽平,周健治,蔡恩美,吉岡孝高,大島永康,オロークブライアン,満汐孝治,伊藤賢志,熊谷和博,鈴木良一,藤野茂,兵頭俊夫,望月出海,和田健,甲斐健師:ボース・アインシュタイン凝縮を目指したポジトロニウム冷却 II,日本物理学会 2020 年秋季大会,オンライン開催,(2020/9/16).
- [34] 石田明, 橋立佳央理, 難波俊雄, 浅井祥仁, 五神真, 山田恭平, 田島陽平, 周健 治, 蔡恩美, 吉岡孝高, 大島永康, オロークブライアン, 満汐孝治, 伊藤賢志, 熊谷和博, 鈴木良一, 藤野茂, 兵頭俊夫, 望月出海, 和田健, 甲斐健師: ボース・アインシュタイン凝縮を目指したポジトロニウム冷却 I, 日本物理学会 2020 年秋季大会, オンライン開催, (2020/9/16).
- [35] 石田明, 橋立佳央理, 難波俊雄, 浅井祥仁, 五神真, 山田恭平, 田島陽平, 小林拓豊, 魚住亮介, 周健治, 蔡恩美, 吉岡孝高, 大島永康, オロークブライアン, 満汐孝治, 伊藤賢志, 熊谷和博, 鈴木良一, 藤野茂, 兵頭俊夫, 望月出海, 和田健, 甲斐健師: ボース・アインシュタイン凝縮を目指したポジトロニウム冷却 (1), 京都大学複合原子力科学研究所専門研究会「陽電子科学とその理工学への応用」, オンライン開催, (2020/12/11).
- [36] 周健治, 田島陽平, 小林拓豊, 魚住亮介, 蔡恩美, 吉岡孝高, 橋立佳央理, 石田 明, 難波俊雄, 浅井祥仁, 五神真, 山田恭平, 大島永康, オロークブライアン, 満汐孝治, 伊藤賢志, 熊谷和博, 鈴木良一, 藤野茂, 兵頭俊夫, 望月出海, 和田 健, 甲斐健師: ボース・アインシュタイン凝縮を目指したポジトロニウム冷却(2), 京都大学複合原子力科学研究所専門研究会「陽電子科学とその理工学への応用」, オンライン開催, (2020/12/11).
- [37] 小林拓豊, 田島陽平, 魚住亮介, 蔡恩美, 周健治, 吉岡孝高, 石田明, 橋立佳 央理, 難波俊雄, 浅井祥仁, 五神真, 山田恭平, 大島永康, オロークブライアン, 満汐孝治, 伊藤賢志, 鈴木良一, 兵頭俊夫, 望月出海, 和田健: Ps のレーザー冷却実現に向けた光源開発及び温度測定実験, 低速陽電子実験施設研究会, オンライン開催, (2021/2/9).
- [38] 魚住亮介, 田島陽平, 小林拓豊, 蔡恩美, 周健治, 吉岡孝高, 石田明, 橋立佳央 理, 難波俊雄, 浅井祥仁, 五神真, 山田恭平, 大島永康, オロークブライアン, 満汐孝治, 伊藤賢志, 鈴木良一, 兵頭俊夫, 望月出海, 和田健: Ps のレーザー冷却の実証に向けた温度測定実験, 2020 年度量子ビームサイエンスフェスタ, オンライン開催, (2021/3/10). (ポスター)
- [39] 黒田聖也, 鈴浦秀勝, 津森貴大, 森田悠介, 五神真: 2 次元半導体励起子状態に対する角度分解光電子分光 の理論 II, 第 76 回年次大会 日本物理学会, オンライン開催, (2021/3/12-15)
- [40] 周健治, 田島陽平, 小林拓豊, 魚住亮介, 蔡恩美, 吉岡孝高, 石田明, 橋立佳央 理, 難波俊雄, 浅井祥仁, 五神真, 山田恭平, 大島永康, オロークブライアン, 満汐孝治, 伊藤賢志, 鈴木良一, 兵頭俊夫, 望月出海, 和田健:ポジトロニウムのレーザー冷却実験, 日本物理学会第76回年次大会, オンライン開催, (2021/3/13).
- [41] 高久諒太,松村知岳,櫻井治之,小西邦昭, Shaul Hanany, Qi Wen,桜井雄基,片山伸彦,山崎典子,星 野百合香,湯本潤司,五神真: 超短パルスレーザー加

- 工を用いた CMB 偏光観測のためのアルミナ IR フィルターの広帯域反射防止構造の開発日本物理学会第76 回年次大会オンライン開催, (2021/3/13).
- [42] 小林真隆, 嵐田雄介, 浅川寛太, 金島圭佑, 小西邦昭, 湯本潤司, 五神真, 武田淳, 片山郁文: Ge₂Sb₂Te₅ 薄 膜の LIPSS 形成におけるマルチパルス超高速ダイナ ミクスの観測日本物理学会第 76 回年次大会 オンラ イン開催, (2021/3/14).
- [43] 石田明, 橋立佳央理, 難波俊雄, 浅井祥仁, 五神真, 山田恭平, 田島陽平, 小林 拓豊, 魚住亮介, 周健治, 蔡恩美, 吉岡孝高, 大島永康, オロークブライアン, 満汐孝治, 伊藤賢志, 熊谷和博, 鈴木良一, 藤野茂, 兵頭俊夫, 望月出海, 和田 健, 甲斐健師: ボース・アインシュタイン凝縮を目指したポジトロニウム冷却日本物理学会第76回年次大会, オンライン開催, (2021/3/15).
- [44] 小松原 航, 小西 邦昭, 湯本 潤司, 五神 真: 固体から の高調波発生における回転ドップラーシフトの観測 第 68 回応用物理学会春季学術講演会 (オンライン開 催, 2021/3/18).
- [45] 小松原 航, 小西 邦昭, 湯本 潤司, 五神 真: Tight Focusing Limit における逆回り円偏光二色励起による高調波発生第 68 回応用物理学会春季学術講演会 オンライン開催, (2021/3/18).
- [46] 小松原 航, 小西 邦昭, 湯本 潤司, 五神 真: 空気における3倍波発生メカニズムの解明第68回応用物理学会春季学術講演会オンライン開催, (2021/3/18).
- [47] 山田 涼平, 櫻井 治之, 小西 邦昭, 三尾 典克, 湯本 潤司, 五神 真:空気との非線形相互作用による光パルスの 強度分布変化のレーザー加工への影響第 68 回応用物 理学会春季学術講演会 オンライン開催, (2021/3/18).
- [48] Yuyuan Huang, Kuniaki Konishi, Momoko Deura, Yusuke Shimoyama, Junji Yumoto, Makoto Kuwata-Gonokami, Yukihiro Shimogaki, Takeshi Momose: Propagation loss of metal-coated dielectric parallel-plate waveguide in transverse-electric (TE) mode 第 68 回応用物理学会春季学術講演会 オンライン開催, (2021/3/18).

(セミナー)

[49] 小松原 航: 空気からの高調波発生における伝搬の効果と偏光の選択則光量子科学連携研究機構 (UTripl)セミナー 光量子科学研究センター (PSC) セミナー・フォトンサイエンス研究機構 (IPST) セミナー コヒーレントフォトン技術によるイノベーション拠点 (ICCPT) セミナー 先端レーザーイノベーション拠点 (ALICe) セミナー 最先端融合科学イノベーション教育研究コンソーシアム (CIAiS) セミナー TACMIコンソーシアム オープンセミナー フォトンサイエンス国際卓越大学院プログラム (XPS) セミナー合同セミナー,東京大学 (2021/3/25).

6.5 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

6.5. 安東研究室

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。国内でも大型低温重力波検出器 KAGRA の観測が開始された。それに加え、将来計画である宇宙空間重力波アンテナ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、ダークマター探査実験、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。

6.5.1 大型重力波望遠鏡 KAGRA

2015年の Advanced LIGO による重力波の初観 測以降, 重力波望遠鏡の感度は着実に向上し, 観測 ネットワークも拡大している. 2017年にはイタリア の Advanced Virgo が, そして 2020 年には日本の KAGRA が観測運転を開始した. 2019 年 4 月から 2020年3月まで行われた,O3と呼ばれる最新の長期 共同観測運転の際,KAGRA はドイツの GEO との 共同観測運転 O3GK を行った [20]. LIGO, Virgo, KAGRA は 2020 年 4 月以降は観測を休止し, さらな る高感度化を目指した調整やアップグレードを行っ ている. 2022 年には 4 回目の共同観測運転 O4 を開 始する予定である. アメリカ, イタリア, 日本の三 極での共同観測が実現されれば、到来方向決定精度 が各段に上がる. また, 一般相対性理論に代わる重 力理論の検証が可能となると期待されている. 技術 的には、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、次世代へ向けても 重要な役割を担っている.

KAGRA の現状

KAGRA 計画は 2010 年にスタートした,岐阜県神岡の地下に大型低温重力波望遠鏡を建設する計画である.様々な試験運転を繰り返し,2020 年 2 月より初の観測運転を開始した.4 月には,連星中性子星の観測可能レンジとして最大 1 Mpc 程度の感度を実現した.これは当初の O3 観測時の最低目標感度である 8 Mpc には及ばないものの,GEO との共同観測により様々な知見が得られている.4 月 21 日には観測を終了させ,現在は干渉計の再調整と O3GKデータの共同解析を進めている.

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,O4に向けた感度向上計画の立案や,感度を制限する各種雑音の評価を行った。KAGRAで用いている低温サファイア鏡の非一様性と複屈折が感度や制御に与える影響を干渉計シミュレーションなどを通じて調べた。また,観測運転時には実現できなかったシグナルリサ

イクリング共振器制御の実現に向けた干渉計シミュレーションも進めた。加えて、干渉計の動作安定性向上のための懸架系制御の設計光学定盤のカバーの設計、真空槽内光学系のアップグレードための設計、干渉計補助信号の感度見積もりなどを行った。さらに、KAGRAのアップグレード案を提案する [22] とともに、国立天文台の TAMA 施設を利用した、周波数依存スクイーズド真空場の生成実験も進めた。

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.量子雑音を低減する有効な方法として,フィルター共振器と呼ばれる光共振器を用いて,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望遠鏡TAMAの300mの光共振器を用いて,重力波望遠鏡で必要となる100Hz以下での周波数依存スクイーズ光の実現研究を進めた.その結果,今年度,100Hz以下での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[12]。また,フィルター共振器の制御精度を向上させる新制御手法を考案し[14],その手法を用いて300mのフィルター共振器の制御精度の向上を実証した.

コンパクト連星合体からの重力波偏極モードを用い た重力理論検証

一般相対性理論は弱い重力場での検証を通して、 基本的な重力理論として現在広く受け入れられてい る. しかし一方で、宇宙加速膨張の説明や量子論と 重力理論の統合などを果たすべく,多くの拡張重力 理論が提案されている.そのため,非線形効果のよ り働く強重力場での重力理論検証が必要とされてい る. 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、コンパクト連星合体からの重力波の 偏極モードの探査によって重力理論を強重力場で検 証できる. 我々は本年度, 連星ブラックホール合体 からの重力波である GW170814 や連星中性子星合体 からの重力波である GW170817 の純粋な偏極モード 探査を、軌道傾斜角依存性を考慮して再解析し、テ ンソルモードが支配的であることを示した. また, スカラー・テンソル理論などで予言されているよう なスカラーとテンソルモードの混合偏極モード探査 を 3 台の検出器によって観測された GW170814 と GW170817 に対して実施した. その結果, スカラー モード振幅に強重力場で最も強い一般相対性理論に 無矛盾な制限を与えた.

6.5.2 宇宙空間重力波望遠鏡

宇宙空間でレーザー干渉計を実現することで,長い 基線長による高感度化,地面振動の影響の回避が可能 になり、低い周波数帯での重力波観測が可能になる.

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. 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. この DECIGO の前段階の重力は望遠鏡 B-DECIGO や,技術実証ミッション SILVIA の設計検討を進めている.

宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO

B-DECIGOは、DECIGOの前哨ミッションと位置付けられる一方、連星合体現象に対して宇宙全体を見渡すことができるだけの性能を持つ本格的な重力波望遠鏡である。ET や CE といった次世代地上重力波望遠鏡や、ESAが主導する LISA とは異なる周波数帯と独自の科学的成果が期待されている。本年度は、B-DECIGOで必要となる技術を明確化するとともに、網羅的な技術サーベイを進めた。また衛星メーカーの協力のもと、フォーメートンフライト・ドラッグフリー制御技術の成立性検討を進めた。

超精密フォーメーションフライト実証計画 SILVIA

DECIGO や B-DECIGO の実現には超精密なフォーメーションフライトが必要であり、着実な技術実証が必要となる. 当研究室は JAXA フォーメーションフライトワーキンググループに参画し、公募型小型クラスで実行可能な超精密フォーメーションフライト実証計画 SILVIA (Space Interferometer Laboratory Voyaging towards Innovative Applications)を進めている. 2019 年度公募型小型計画・宇宙科学ミッションコンセプト公募に応募し、2020 年 8 月には次フェーズに進むことが承認された.

SILVIA は正三角形に配置された 3 機の宇宙機で構成され,各辺の長さをファブリ・ペロー共振器で精密に測定することで精密なフォーメーションフライトを実現することを目指す計画である. 共振器を構成する鏡は各宇宙機ないで非接触保持されており,この鏡を基準に宇宙機の位置や姿勢がドラッグフリー制御される. この構成は DECIGO と同等となっており,重力波を捉える感度の達成は困難なものの,重力波望遠鏡としての機能実証も可能な構成となっている. 本年度は特に,共振器を構成するための初期捕捉の検討や,干渉計制御の検討を進めた.

6.5.3 ねじれ型重力波検出器 TOBA

Torsion-Bar Antenna (TOBA) とはねじれ振り子の水平回転を利用した独自の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.また、重力場勾配雑音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 $35~{\rm cm}$ 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 $(10~{\rm m})$ 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 $0.1~{\rm Hz}$ で 10^{-15} / $\sqrt{{\rm Hz}}$ となっている.

低温ねじれ振り子の設計

目標感度達成にむけて最も障害となる雑音の1つが懸架ワイヤーの熱的な揺らぎである. 熱揺動の大きさはワイヤーの温度とワイヤーのエネルギー散逸の大きさの平方根に比例するため、雑音低減のためには(1) 懸架ワイヤーの低温化、(2) 低散逸ワイヤーの開発、が必要である. Phase-III TOBA では懸架ワイヤーの温度を 4K まで冷却し、エネルギー散逸を $Q=10^8$ まで下げることが要求される.

前年度までにねじれ振り子の低温化には成功しており、入射ビームの揺れや、誘導電流を介した磁場雑音の影響といった課題が分かっている。本年度はこれらの問題点を解決する新しいプロトタイプの概念設計を行った。具体的には、(1) 土台に光学素子を直接接着するモノリシック光学系を構築してビームジッターの低減を行う、(2) 試験マスを電気伝導度の小さいシリコンで製作することで誘導電流を低減する、という改良を行う予定である[37,70].

低温モノリシック光学系の開発

Phase-III TOBA において読み取り光学系は低温下にあるため、モノリシック光学系についても低温化で動作するものを開発する必要がある。本年度はモノリシック光学系に用いる光検出器、接着剤、ファイバーコリメーターの低温での動作を試験し、使用可能なものを調査した[57]。今後は、調査した結果をもとにモノリシック光学系の構築を行う予定である。

Fiber Q measurement

In the investigation to achieve high Q for torsion pendulums at cryogenic temperatures, a cryogenic setup was designed, and preliminary Q fibre measurements at cryogenic temperatures were measured. Currently optimising the system, and solving the challenges and complexities that come with the cryogenic system, as well as the problems that come with moving to a new setup [71, 58, 35].

地震の早期アラート

TOBA を用いて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 6.5. 安東研究室

の精度向上ができる可能性が期待されている.本年度,TOBAでの連続観測データを用いて,2011年3月11日に発生した東日本大地震に起因する重力場変動の信号を探査するデータ解析を進めた.有意な信号は見つからなかったが,解析手法を確立するとともに、上限値を与えるという結果を得た.

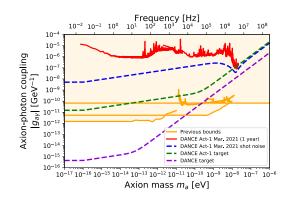
6.5.4 ダークマター探査

数々の宇宙観測によってダークマターの存在は確実視されており、宇宙の構造形成の重要な役割を果たしたことがわかっているが、その正体は全く不明である。これまでは素粒子物理学からの強い示唆から、WIMPと呼ばれる重い粒子に探索が集中していたが、検出の兆候は得られていない。こうした背景から、WIMP以外の候補への関心が高まっており、質量で90桁に及ぶ様々な候補を新しい発想によって探索することの重要性が認識されてきた。

我々は特に超軽量ダークマターに着目し、レーザー 干渉計を用いた探索実験を進めている. 我々は、アク シオンが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こと性質に着目し, テーブルトップサイズの光リング共振器を用いて軽い アクシオンを探索する手法を提案し、DANCE (Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment) 計画を 2018 年度より開始した. また, 重力波望遠鏡 の線形光共振器を用いて直線偏光の偏光面回転を調 べることで,アクシオン探索を行う新手法も提案し. KAGRA への導入に向けた開発を進めている。さら に、ゲージボゾン探索も進めている。ダークマター の存在は標準理論を超えた未知の力の存在を示唆す るが、これを媒介するゲージボゾンがダークマター である可能性が指摘されている. このボゾン場が重 力波望遠鏡を構成する懸架された鏡に力を与えうる ことに注目し、KAGRA を用いた探索を進めている.

光リング共振器によるアクシオン探索 DANCE

DANCE (Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment) は光リング共振器を用いることでアクシオンによる直線偏光の偏光面回転を増幅し、 $10^{-10}\,\mathrm{eV}$ 程度以下のアクシオンを広帯域にわたって探査することを目指したテーブルトップ実験である.本年度は原理検証のためのプロトタイプ実験 DANCE Act-1 の光学系の組み立てを完了し、推定感度を得ることができた (下図). (図 6.5.4). また、デジタル制御を用いた自動ロックシステムと階層制御の開発によって、60 時間以上の共振器制御を実現した.これにより、信号雑音比向上に必要な長期間の観測が可能となった。今後は、1 週間程度の観測とデータ解析、およびさらなる感度向上を目指す.



KAGRA によるゲージボゾン探索

KAGRA はレーザー干渉計型重力波望遠鏡として は世界で唯一の低温干渉計となっており、唯一テス トマスとして石英鏡ではなくサファイア鏡を用いて いる. 干渉計を構成するその他の鏡としては石英鏡 を用いているため、B-L 数の異なる石英鏡とサファ イア鏡で構成された部分の干渉計補助信号を用いる と、高い感度で B-L ゲージボゾンを探索することが 可能となることを示した[17]. また、鏡の材質が同 じ場合であっても、鏡間を光が往復する時間が有限 であることを考慮に入れると,感度が大幅に向上す ることを示し、LIGO による既存の上限値を更新し た [17]. これらのアイディアを利用して, KAGRA の 2020 年の実観測データを用いた解析を進めてい 超軽量ダークマターの信号はコヒーレンス時間 が振動周期の 106 倍程度の連続波信号として観測さ れる. この特徴を利用して検出器由来のラインノイ ズと区別する手法や、2つの観測データの相関を取 る手法などの開発を進めた. また, ゲージボゾン場 の振幅や位相、偏極が確率論的にふらつく効果を統 計的に処理し,観測データから B-L 結合係数への制 限を得る手法の開発を進めた.

6.5.5 相対論・量子光学実験

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。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、共振器の幾何実験を行っている。このセットアップでは、量子輻射圧も、共振器を安定的に共振させることができる。今年度、共振器を安定的に共振させることができる。今年度、この高感度な系を用いて、量子雑音を低減する実験を行い、測定の反作用雑音の回避を実証することに成功した [69, 36]。さらに、量子輻射圧揺らぎの観測のためにさらなる高感度化を進めるべく、微小なね

じれ振り子の両端で線形共振器組む新たな実験セットアップの開発を行なった.また,鏡の機械的支持に伴う熱雑音の排除を目指した,鏡の光学浮上実験も進めている.本年度はミリグラムスケールの曲率付き鏡の実現に向けて,0.1 mm 厚の薄型石英鏡の開発やフォトニック結晶ミラーの開発を進めた.

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に取 り組んでいる。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、光学系 全体を回転させて変調をかけることで信号取得を行 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るため, 本年度も回 転機構の改良を行った.回転に同期した雑音低減の ために導入した上部支持を伴わない回転機構の調整 を進めている.

<受賞>

- [1] 榎本雄太郎: 第 15 回 (2021 年) 日本物理学会若手奨励賞, 宇宙線・宇宙物理領域 (2020 年 11 月).
- [2] 有富尚紀: The 26th KAGRA face-to-face meeting Best Poster Award, KAGRA collaboration (2020 年 12 月).

<報文>

(原著論文)

- [3] Koji Nagano, et al.: Demonstration of a dual-pass differential Fabry-Perot interferometer for future interferometric space gravitational wave antennas, Class. Quantum Grav. 38, 085018 (2021).
- [4] Takafumi Ushiba et al.: Cryogenic suspension design for a kilometer-scale gravitational-wave detector, Class. Quantum Grav. 38, 085013 (2021).
- [5] Soichiro Morisaki, et al.: Improved sensitivity of interferometric gravitational-wave detectors to ultralight vector dark matter from the finite lighttraveling time, Phys. Rev. D 103, L051702 (2021).
- [6] KAGRA Collaboration: Vibration isolation systems for the beam splitter and signal recycling mirrors of the KAGRA gravitational wave detector, Class. Quantum Grav. 38, 065011 (2021).
- [7] Seiji Kawamura et al.: Current status of space gravitational wave antenna DECIGO and B-DECIGO, PTEP, ptab019 (2021).

[8] KAGRA Collaboration: Overview of KAGRA: Calibration, detector characterization, physical environmental monitors, and the geophysics interferometer, PTEP 2021, ptab018 (2021).

- [9] Tomohiro Ishikawa et al.: Improvement of the Target Sensitivity in DECIGO by Optimizing Its Parameters for Quantum Noise Including the Effect of Diffraction Loss, Galaxies 9, 14 (2021).
- [10] Shoki Iwaguchi et al.: Quantum Noise in a Fabry-Perot Interferometer Including the Influence of Diffraction Loss of Light, Galaxies 9, 9 (2021).
- [11] Hiroki Takeda, et al.: Pure polarization test of GW170814 and GW170817 using waveforms consistent with modified theories of gravity, Phys. Rev. D, 103, 064037 (2021).
- [12] Y. Zhao, N. Aritomi et al.: Frequency-Dependent Squeezed Vacuum Source for Broadband Quantum Noise Reduction in Advanced Gravitational-Wave Detectors, Phys. Rev. Lett., 124, 171101 (2020).
- [13] T. Shimoda, et al.: Torsion-Bar Antenna: A ground-based mid-frequency and low-frequency gravitational wave detector, IJMPD 29, 1940003 (2020).
- [14] N. Aritomi et al.: Control of a filter cavity with coherent control sidebands, Phys. Rev. D, 102, 042003 (2020).
- [15] Takuya Kawasaki, et al.: Optical trapping of the transversal motion for an optically levitated mirror, Phys. Rev. A 102, 053520 (2020).
- [16] Tomotada Akutsu et al.: Compact integrated optical sensors and electromagnetic actuators for vibration isolation systems in the gravitational-wave detector KAGRA, RSI 91, 115001 (2020).
- [17] Yuta Michimura, et al.: Ultralight vector dark matter search with auxiliary length channels of gravitational wave detectors, Phys. Rev. D 102, 102001 (2020).
- [18] KAGRA Collaboration, LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration: Prospects for observing and localizing gravitational-wave transients with Advanced LIGO, Advanced Virgo and KAGRA, Living Reviews in Relativity 23, 3 (2020).
- [19] Kiwamu Izumi et al.: The current status of contribution activities in Japan for LISA, PTEP 2020, ptaa124 (2020).
- [20] KAGRA Collaboration: Overview of KAGRA: Detector design and construction history, PTEP, ptaa125 (2020).
- [21] KAGRA Collaboration: Overview of KAGRA: KAGRA science, PTEP, ptaa120 (2020).
- [22] Yuta Michimura et al.: Prospects for improving the sensitivity of the cryogenic gravitational wave detector KAGRA, Phys. Rev. D 102, 022008 (2020).

6. 一般物理実験 6.5. 安東研究室

- [23] Yuta Michimura, Kentaro Komori: Quantum sensing with milligram scale optomechanical systems, The European Physical Journal D 74, 126 (2020).
- [24] Rika Yamada et al.: Optimization of quantum noise by completing the square of multiple interferometer outputs in quantum locking for gravitational wave detectors, Phys. Lett. A 384, 126626 (2020).
- [25] KAGRA Collaboration: Application of independent component analysis to the iKAGRA data, PTEP, 053F01 (2020).

(国内雑誌)

[26] 有冨尚紀: 重力波望遠鏡の量子雑音低減のための周波 数依存スクイーズド真空場, 光アライアンス誌 (2020 年 11 月).

(学位論文)

- [27] 有冨尚紀: Frequency-Dependent Squeezed Vacuum Source with Filter Cavity Control using Coherent Control Sidebands for Gravitational-Wave Detectors, 博士論文 (2021年3月).
- [28] 武田紘樹: Tests of Alternative Theories of Gravity through Gravitational-Wave Polarizations, 博士論文 (2021年3月).
- [29] 千代田大樹: 光学浮上の実現に向けた微小鏡の開発, 修士論文 (2021 年 3 月).

(著書)

- [30] 安東正樹, KAGRA 観測開始, 理科年表 (2021 年 1 月, 丸善出版).
- [31] 安東正樹,白水徹也 (編集幹事),浅田秀樹,石橋明浩,小林努,真貝寿明,早田次郎,谷口敬介 (編):相対論と宇宙の事典 (朝倉書店,2020年6月).

<学術講演>

(国際会議)

一般講演

- [32] Yuta Michimura et al: Levitating Optomechanics: Optical Levitation LVK Meeting (2021年3月, Online).
- [33] Yuta Michimura for the KAGRA Collaboration: Status of KAGRA: Instrument Updates for O4, LVK Meeting (2021年3月, Online).
- [34] Yuta Michimura et al: Laser interferometric searches for ultralight dark matter Transformative Research Area "Dark Matter" Symposium, (2021年2月, Online).
- [35] Ching Pin Ooi, et al.: Towards suspension noise measurements of crystalline fibres at cryogenic temperatures for torsion pendulums, 3rd IFQMS (2020年12月, Online).

[36] Takuya Kawasaki: Quantum radiation pressure fluctuation in a linear optical cavity, 3rd IFQMS (2020年12月, Online).

- [37] Satoru Takano, et al.,: Cryogenic Monolithic Torsion Pendulum Made of Silicon for Gravity Gradient Sensing, 3rd IFQMS (2020年12月, Online).
- [38] Yuka Oshima, et al.: Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment DANCE: Signal calibration and sensitivity evaluation, 7th KIW (Dec. 2020, Online).
- [39] Hiroki Fujimoto, et al.: Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment DANCE: Development of automated cavity locking system, 7th KIW (Dec. 2020, Online).
- [40] N. Aritomi: Frequency-Dependent Squeezing for Gravitational-Wave Detectors, 7th KIW (Dec. 2020, Online).
- [41] Yuta Michimur: Expectations for Sensitivity of KAGRA in O4, 7th KIW (Dec. 2020, Online).
- [42] Hiroki Takeda, et al.: Polarization tests of GW170814 and GW170817 using waveforms consistent with alternative theories of gravity, 7th KIW (Dec. 2020, Online).
- [43] Yuta Michimura for the KAGRA Collaboration: Future Plans for KAGRA Facility, KAGRA-OzGrav Meeting (2020年11月, Online).
- [44] Yuka Oshima, et al.: The current status of DANCE: Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment, Kashiwa Dark Matter Symposium 2020 (Nov. 2020, Online).
- [45] N. Aritomi: Frequency Dependent Squeezing with 300 m filter cavity in TAMA, The 25th KAGRA face-to-face meeting (August 2020, Online).
- [46] Yuta Michimura: Summary of Sensitivity Estimate for O4 in Various Interferometer Configurations, KAGRA 2020 May Telecon (2020年5月, Online).

ポスター発表

- [47] Hiroki Fujimoto, et al.: Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment DANCE: Development of control system for long-term measurement, Rencontres de Moriond on Gravitation (Mar. 2021, Online).
- [48] Yuka Oshima, et al.: Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment DANCE: Current sensitivity, Rencontres de Moriond on Gravitation (Mar. 2021, Online).
- [49] N. Aritomi: Frequency-Dependent Squeezing for Gravitational-Wave Detectors, The 26th KAGRA face-to-face meeting (December 2020, Online).
- [50] Hiroki Takeda, et al.: Tests of alternative theories of gravity through gravitational-wave polarization modes, KAGRA The 26th Face to Face Meeting (December, 2020, Online).

招待講演

- [51] Masaki Ando: Observation of Gravitational-Wave in Space, RESCEU Summer School 2020 (Aug 19, 2020, Online).
- [52] Masaki Ando: Gravitational-wave Observation and KAGRA, ILC Summer Camp 2020 (Sep 24, 2020, Online).

(国内会議)

一般講演

- [53] 大島由佳, 他: 光リング共振器を用いたアクシオン暗 黒物質の探索実験 DANCE (5): 信号の較正と感度の評価, 日本物理学会 第 76 回年次大会 (2021 年 3 月, オンライン).
- [54] 藤本拓希, 他: 光リング共振器を用いたアクシオン暗 黒物質の探索実験 DANCE (4): 長時間測定に向けた 制御法の開発, 同上.
- [55] 有冨尚紀: 重力波望遠鏡のためのフィルターキャビ ティの新しい制御手法, 同上.
- [56] 武田紘樹, 他: インスパイラル重力波のスカラーテンソル混合偏極探査, 同上.
- [57] 高野哲,他: ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA(Phase-III)の開発(26):低温モノリシック 光学系に向けた特性評価,同上.
- [58] Ching Pin Ooi, et al.: Development of Phase-III TOBA (Torsion Bar Antenna) for Gravitational Wave Observation (27): Preliminary Q factor measurements of cryogenic torsion pendulums with crystalline fibres, 同上.
- [59] 安東正樹, 他: スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (126): B-DECIGO の概要, 同上.
- [60] 道村唯太: 超精密偏光計測が可能にする新しいダークマター探索, 第 14 回さきがけ研究者交流会議 (2021年 3 月, オンライン).
- [61] 安東正樹, 他: 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, Q-LEAP 第 5 回領域会議 (2021 年 1 月, オンライン).
- [62] 武田紘樹, 他: Tests of alternative theories of gravity through gravitational-wave polarizations, 第 33 回 理論懇シンポジウム (2020 年 12 月, オンライン).
- [63] 道村唯太: 超精密偏光計測が可能にする新しいダークマター探索, さきがけ「革新光」キックオフ・領域会議 (2020 年 11 月, オンライン).
- [64] 道村唯太, 他: SILVIA による重力波観測の可能性, 第 19 回 DECIGO ワークショップ (2020 年 11 月, オンライン).
- [65] 安東正樹, 他: 重力波望遠鏡 B-DECIGO, 同上.
- [66] 道村唯太, 他: 超精密フォーメーションフライト実証機 SILVIA による重力波観測の可能性, 第 64 回 宇宙科学技術連合講演会 (2020 年 10 月, オンライン).
- [67] 安東正樹, 他: 重力波望遠鏡 B-DECIGO, 同上.

- [68] 有冨尚紀: 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 (4), 日本物理学会 2020 年秋季大会 (2020 年 9 月, オンライン).
- [69] 川崎拓也, 他: 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 II, 同上.
- [70] 高野哲, 他: ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA (Phase-III) の開発 (24): 低温ねじれ振り子の運転 および改良計画, 同上.
- [71] Ching Pin Ooi, et al.: Development of Phase-III TOBA (Torsion Bar Antenna) for Gravitational Wave Observation (25): Achieving Cryogenic Q measurements for crystalline fibres in torsion pendulums, 同上.
- [72] 道村唯太, 他: レーザー干渉計型重力波検出器による 超軽量ダークマター探索, 同上.
- [73] 大島由佳, 他: アクシオン暗黒物質探索のための光リング共振器の製作と制御, 同上.
- [74] 武田紘樹, 他: コンパクト連星合体からの重力波偏極 モード検証, 同上.
- [75] 安東正樹, 他: スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (120): B-DECIGO の概要、同上.
- [76] 安東正樹, 他: 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, Q-LEAP サイトビジット (2020 年9月11日, 東京大学).
- [77] 安東正樹, 他: 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, Q-LEAP 第4回領域会議 (2020 年6月, オンライン).

(セミナー・アウトリーチ講演)

- [78] Yuta Michimura: Laser interferometric searches for ultralight dark matter, SYRTE-UTokyo DM Seminar (2021 年 3 月, オンライン).
- [79] 大島由佳: 天体観測の入り口, 銀河学校 2021 (2021 年 3 月, オンライン).
- [80] 安東正樹: 重力波で探る宇宙の姿, 朝日カルチャーセンター (2021年2月20日, ルミネ横浜, 神奈川).
- [81] Yuta Michimura: Optical levitation of a mirror for probing macroscopic quantum mechanics, OIST Quantum Machines Seminar (2021年1月, オンライン).
- [82] 大島由佳: 天体解説 (オリオン大星雲 M42), 国立天文台 三鷹定例観望会 (2021 年 1 月, オンライン).
- [83] 大島由佳: 実験室から宇宙へ 重力波と暗黒物質をとらえろ!, 東大理学部で考える 女子中高生の未来 2020 (2020 年 11 月, オンライン).
- [84] 安東正樹: 重力波でさぐる宇宙, 順天高校 グローバ ルウィーク (2020 年 11 月 13 日, 順天高校, オンライン).
- [85] 大島由佳: 天体解説 (月, 球状星団 M15 と散開星団 M29), 国立天文台 三鷹定例観望会 (2020 年 9 月, オンライン).
- [86] Yuta Michimura: Search for ultralight dark matter with laser interferometric gravitational wave detectors, 理研 iTHEMS Dark Matter Working Group Seminar (2020 年 7 月, オンライン).