

- 星野百合香, 湯本潤司, 五神真: LiteBIRD に向けた 200mm 径モスアイ多層半波長板の光学評価と TES の非線形効果への影響, 日本物理学会 2021 年秋季大会 (2021/9/15)
- [19] 村田樹, 辻直希, 大谷航 A, 吉岡孝高 B, 森田悠介, 五神真: UV レーザーを用いた SiPM の飽和現象の研究, 日本物理学会 2021 年秋季大会 (2021/9/16)
- [20] 石田明, 橋立佳央理, 難波俊雄, 浅井祥仁, 五神真, 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 2021 年秋季大会 (2021/9/17)
- [21] 石田明, 橋立佳央理, 難波俊雄, 浅井祥仁, 五神真, 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高密度ポジトロニウム生成材料の開発, 日本物理学会 2021 年秋季大会 (2021/9/21)
- [22] 山田涼平, 小松原航, 櫻井治之, 小西邦昭, 三尾典克, 湯本潤司, 五神真: フェムト秒レーザー加工における空気中での非線形伝搬モデルの構築, 日本物理学会第 77 回年次大会 (2022/3/15)
- [23] 村田樹, 辻直希, 大谷航, 吉岡孝高, 森田悠介, 五神真: UV 光を用いた SiPM の飽和現象の研究, 日本物理学会第 77 回年次大会 (2022/3/15)
- [24] 小松原航, 小西邦昭, 湯本潤司, 五神真: 空気から生じる 3 倍波発生におけるクリティカルパワー, 日本物理学会第 77 回年次大会 (2022/3/16)
- [25] 黒田聖也, 鈴木秀勝, 津森貴大, 森田悠介, 五神真: 2 次元半導体光強励起状態に対する光電子分光の理論, 日本物理学会第 77 回年次大会 (2022/3/16)
- [26] 高久諒太, Qi Wen, Scott Cray, Mark Devlin, Simon Dicker, Shaul Hanany, 長谷部孝, 飯田輝人, 片山伸彦, 小西邦昭, 五神真, 松村知岳, 三尾典克, 櫻井治之, 桜井雄基, 山田涼平, 湯本潤司: 超短パルスレーザーによるモスアイ反射防止構造加工を施した大型アルミナ IR フィルターの開発, 日本物理学会第 77 回年次大会 (2022/3/16)
- [27] 石田明, 難波俊雄, 浅井祥仁, 五神真, 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 77 回年次大会 (2022/3/16)
- [28] 田島陽平, 山田恭平, 小林拓豊, 石田明, 難波俊雄, 浅井祥仁, 五神真, 蔡恩美, 周健治, 吉岡孝高: ポジトロニウムのレーザー冷却に向けた深紫外チャープパルス光源の開発, 日本物理学会第 77 回年次大会 (2022/3/17)
- [29] 小林拓豊, 田島陽平, 魚住亮介, 蔡恩美, 石田明, 難波俊雄, 浅井祥仁, 五神真, 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, 周健治, 吉岡孝高: ポジトロニウムのレー

ザー冷却実証に向けたドップラー分光法の開拓, 日本物理学会第 77 回年次大会 (2022/3/17)

## 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。2020 年 3 月に終了した O3 と呼ばれる最新の長期共同観測運転以降、LIGO, Virgo, KAGRA の各検出器は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 12 月中旬に O4 観測運転を共に開始する予定であり、これまで以上に密接な連携を取っている。KAGRA は O4 の初めには連星中性子星の観測可能レンジとして 1 Mpc 以上の感度で運転を行い、O4 の終わりまでに感度を向上させるための作業を行う予定である。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、一般相対性理論が予言するテンソルモードとは異なる偏極モードが初めて明確に分離できるようになり、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。2020 年 4 月には 1 Mpc の感度を実現し、ドイツの GEO との共同観測運転を実施した。観測運転の休止以降、O4 観測に向けて鏡の懸架系や干渉計の調整を行っている。当研究室では KAGRA の根幹部分となる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、サファイア鏡の複屈折が干渉計に与える影響についてのシミュレーションを進めた。また、O3 運転時の感度評価をもとに、O4 での到達可能感度の見積もりや感度向上計画の立案を行った。他に、複屈折に対応するため、干渉計出射光を検出する光学定盤の再設計や、より高品質な鏡への交換などを行った。

### Birefringence calibration of KAGRA sapphire mirrors

Among various techniques to reduce noises, lowering the temperature of mirror-suspension system is a way to reduce thermal noise. KAGRA is the first long-baseline detector that uses cryogenic techniques. The sapphire was chosen as the material of KAGRA's high-quality test masses mainly for its high thermal conductivity and good optical properties. However, as sapphire is birefringent, the effect of birefringence is currently an important factor that determines whether the high-precision detector can achieve its design sensitivity or not. Hence, study of the birefringence of sapphire mirrors and proper mitigation strategies are highly demanded.

This year we studied the method of calibrating birefringence properties of sapphire mirrors using transmission wavefront error (TWE) measurements. The birefringence map was constructed using TWE maps measured with lineally polarized beam of different angles. According to the birefringence map, we successfully estimated the energy coupling from s-polarization to p-polarization and compared it with KAGRA measurements. We also developed a model that can describe light couplings between two orthogonal polarizations when they pass through a birefringence medium. The simulated beam shape matched well with experimental measurements.

### 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、ミッション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 は複数の宇宙機で構成され、その間の長さを精測定・制御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。本年度は特に、ダウンセクション審査に向け、ミッション構成の具体化とコスト評価等の検討を進めた。

#### DECIGO/SILVIA のための地上実証実験

当研究室では、DECIGO/SILVIA で用いられる双方向ファブリ・ペロー共振器の制御手法を確立するために、地上での検証実験を行っている。本年度は特に角度方向の制御に着目し、wavefront sensor 法、beam pointing control 法によるセンサーとアクチュエータの組合せの違いによる、メリット、デメリットを検討した。また現在は、地上のテラブルトップスケールで、角度ずれに対するエラー信号の取得、及び共振器を共振点に制御することを目的とした、原理実証実験のセットアップを構築中である。

### 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 の棒状の試験マスを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  $0.1 \text{ Hz}$  で  $10^{-15}/\sqrt{\text{Hz}}$  と  
なっている。Phase-III TOBA は熱雑音の低減のため  
に試験マスを  $4 \text{ K}$  にまで冷却する。試験マスの冷  
却には既に成功しており、現在はさらなる高感度化  
に向けた要素開発を行っている。

### 低温モノリシック光学系の開発

目標感度を妨げる雑音の1つに、読み取り光学系  
の変動に起因する雑音がある。この雑音の低減のため、  
Phase-III TOBA では基材に光学素子を直接接  
着するモノリシック光学系を用いて試験マスの変位  
を測定する。Phase-III TOBA の試験マス及び読み  
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で構築する予  
定の読み取り光学系を光学上盤上で構築して雑音評  
価を行い [81]、またモノリシック光学系のアセン  
ブリ装置の開発を行った [70]。今後は、開発した装置  
を用いて装置モノリシック光学系の構築を行う予定  
である。

### Fiber Q measurement

Research was focused on characterising and low-  
ering the suspension noise for torsion pendulums,  
focusing on two main key technologies: cryogenic  
temperatures, and crystalline fibres. This is in or-  
der to ensure that the noise floor of TOBA is low  
enough for its intended sensitivity. The key mea-  
surement metric is the Q factor, which we measure  
via the ringdown method with a torsion pendulum  
setup.

We have succeeded in achieving stable operation  
of our cryogenic systems, in combination with the  
torsion pendulum setup using sapphire fibres. Con-  
sistent measurements throughout the entire cooling  
and heating cycle, from room temperature down to  
a chamber temperature of  $4\text{K}$  were measured, al-  
lowing for the characterization of the Q factor of  
the setup with respect to temperature. We have  
also characterised two clamp systems, with one that  
was created only in 2021, and are currently adjust-  
ing them to achieve higher Q [80, 69, 47].

### 改良型角度センサ

TOBA の回転を高精度に読み取る角度センサとし  
て、wavefront sensor の後ろに鏡をもう1枚置いて  
補助共振器を構成する改良型角度センサを考案した。  
補助共振器による位相補償によって角度信号を増幅  
できることに加えて、ビームジッター雑音が小さい  
という利点がある。

本年度は、改良型角度センサのシミュレーション  
と原理実証実験を行った。シミュレーションにより、  
改良型角度センサの信号強度と線形レンジが主共振  
器のフィネスおよび補助共振器の動作点に依存する  
ことを初めて示した。また、原理実証実験では、主  
共振器・補助共振器ともに PDH 法で制御し、改良  
型角度センサを動作させて、角度信号増幅とビーム  
ジッターへの応答を観測することに成功した。

### 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、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査が集中していたが、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査すること  
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  
干渉計を用いた探査実験を進めている。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  
アクシオンを探査する手法を提案し、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、アクシオン探査を行う新手法も提案  
し、本年度は KAGRA に必要な偏光光学系を導入し  
た。2022 年 12 月中旬に開始予定の O4 観測では重  
力波観測データに加え、アクシオン探査データが取  
得できる見込みである。さらに、KAGRA の鏡に周  
期的な力を加えるゲージボゾン探査も進めており、  
KAGRA の 2020 年の観測データを用いた解析を進  
めている。本年度はダークマター信号の統計性を考  
慮に入れた上限値の算出方法を開発し、上限値の設  
定に成功した。

### 光リング共振器によるアクシオン探査 DANCE

DANCE(Dark matter Axion search with riNg Cav-  
ity 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、  
 $10^{-10} \text{ eV}$  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実験である。

本年度は昨年に製作したプロトタイプ機を用いて  
12 日間のデータ取得を行い、較正・擬似信号の除去  
などのデータ解析を行った。また、補助共振器を開  
発することで s 偏光と p 偏光の同時共振を実現し感  
度を向上させ、質量帯域  $m_a = 10^{-14} \sim 10^{-10} \text{ eV}$ 、結  
合定数  $g_{a\gamma} > 10^{-5} \text{ GeV}^{-1}$  のアクシオン暗黒物質に  
感度があることを示した。2022 年度は、現在の感度  
を制限している共振器長変動雑音を制御系の改善に

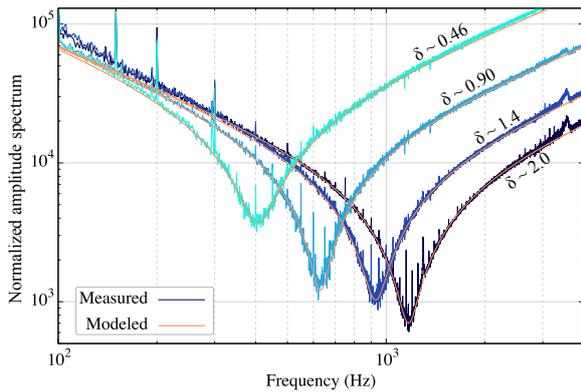


図 6.5.13: 古典雑音による量子雑音低減のデモンストラーション. 共振器の離調  $\delta$  に伴いディップ状に雑音が打ち消しあい, 変位測定感度が向上している.

よって低減し, 観測およびデータ解析によってアクション暗黒物質探索を行うことを目指す.

### 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線形光共振器を組み, 共振器の幾何学的構成から微小鏡をトラップする手法を開発し, 実現した [9, 28]. このセットアップでは, 低雑音な線形共振器でありながら, 量子輻射圧揺らぎを増幅するため共振器内パワーを増大させても, 共振器を安定的に共振させることが可能となる. 今年度, 実現した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注入してデモンストラーションする実験を行い, 図 6.5.13 が示すように測定の反作用雑音の回避を実証することに成功した [2, 28]. その後, 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に線形共振器組む新たな実験セットアップを計画し, mg スケールのねじれ振り子の開発をおこなった. 今後は, 実際にねじれ振り子の両端に線形共振器を構築し, 量子輻射圧揺らぎの観測を目指す.

#### <受賞>

- [1] 有富尚紀: 第 16 回 (2022 年) 日本物理学会若手奨励賞, 宇宙線・宇宙物理領域 (2021 年 11 月).

#### <報文>

(原著論文)

- [2] Yuta Michimura et al.: Ultralight dark matter searches with KAGRA gravitational wave telescope, J. of Phys.: Conf. Ser. 2156, 012071 (2022).

- [3] Koji Nagano, et al.: Axion dark matter search using arm cavity transmitted beams of gravitational wave detectors, Phys. Rev. D 104, 062008 (2021).
- [4] Yuka Oshima et al.: First observation and analysis of DANCE: Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment, J. of Phys.: Conf. Ser. 2156, 012042 (2021).
- [5] Hiroki Fujimoto, et al.: Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment DANCE: Design and development of auxiliary cavity for simultaneous resonance of linear polarizations, J. of Phys.: Conf. Ser. 2156, 012182 (2021).
- [6] Kentaro Komori, et al.: Improving force sensitivity by amplitude measurement of light reflected from a detuned optomechanical cavity, Phys. Rev. A 104, 031501 (2021).
- [7] Takuya Kawasaki, et al.: Angular trapping of a linear-cavity mirror with an optical torsional spring, arXiv:2110.13507 (2021).
- [8] Rika Yamada et al.: Reduction of quantum noise using the quantum locking with an optical spring for gravitational wave detectors, Phys. Lett. A 402, 127365 (2021).
- [9] Kiwamu Izumi et al.: The current status of contribution activities in Japan for LISA, PTEP 2021, 05A106 (2021).
- [10] Seiji Kawamura et al.: Current status of space gravitational wave antenna DECIGO and B-DECIGO, PTEP 2021, 05A105 (2021).
- [11] T. Akutsu et al.: Overview of KAGRA: KAGRA science, PTEP 2021, 05A103 (2021).
- [12] T. Akutsu et al.: Overview of KAGRA: Calibration, detector characterization, physical environmental monitors, and the geophysics interferometer, PTEP 2021, 05A102 (2021).
- [13] T. Akutsu et al.: Overview of KAGRA: Detector design and construction history, PTEP 2021, 05A101 (2021).
- [14] T. Akutsu et al.: Radiative Cooling of the Thermally Isolated System in KAGRA Gravitational Wave Telescope, J. of Phys.: Conf. Ser. 1857, 012002 (2021).
- [15] R. Abbott et al.: Search for continuous gravitational waves from 20 accreting millisecond x-ray pulsars in O3 LIGO data, Phys. Rev. D 105, 022002 (2022).
- [16] R. Abbott et al.: Constraints on dark photon dark matter using data from LIGO's and Virgo's third observing run, Phys. Rev. D 105, 063030 (2022).
- [17] R. Abbott et al.: Search for intermediate-mass black hole binaries in the third observing run of Advanced LIGO and Advanced Virgo, A & A 659, A84 (2022).

- [18] R. Abbott et al.: All-sky search for long-duration gravitational-wave bursts in the third Advanced LIGO and Advanced Virgo run, *Phys. Rev. D* 104, 102001 (2021).
- [19] R. Abbott et al.: All-sky search for short gravitational-wave bursts in the third Advanced LIGO and Advanced Virgo run, *Phys. Rev. D* 104, 122004 (2021).
- [20] R. Abbott et al.: All-sky search for continuous gravitational waves from isolated neutron stars in the early O3 LIGO data, *Phys. Rev. D* 104, 082004 (2021).
- [21] R. Abbott et al.: Observation of Gravitational Waves from Two Neutron Star-Black Hole Coalescences, *The ApJ Lett.* 915, L5 (2021).
- [22] R. Abbott et al.: Searches for Continuous Gravitational Waves from Young Supernova Remnants in the Early Third Observing Run of Advanced LIGO and Virgo, *ApJ* 921, 80 (2021).
- [23] R. Abbott et al.: Constraints from LIGO O3 Data on Gravitational-wave Emission Due to R-modes in the Glitching Pulsar PSR J0537-6910, *ApJ* 922, 71 (2021).
- [24] R. Abbott et al.: Search for anisotropic gravitational-wave backgrounds using data from Advanced LIGO and Advanced Virgo's first three observing runs, *Phys. Rev. D* 104, 022005 (2021).
- [25] R. Abbott et al.: Constraints on Cosmic Strings Using Data from the Third Advanced LIGO-Virgo Observing Run, *Phys. Rev. Lett.* 126, 241102 (2021).
- [26] R. Abbott et al.: Upper limits on the isotropic gravitational-wave background from Advanced LIGO and Advanced Virgo's third observing run, *Phys. Rev. D* 104, 022004 (2021).
- [27] R. Abbott et al.: Diving below the Spin-down Limit: Constraints on Gravitational Waves from the Energetic Young Pulsar PSR J0537-6910, *ApJ* 913, L27 (2021).
- (学位論文)
- [28] 川崎拓也: Milligram-Scale Optomechanical Systems for Macroscopic Quantum Experiments, 博士論文 (2022年3月).
- [29] 大島由佳: 重力波望遠鏡 TOBA のための結合光共振器を用いた角度信号増幅の実証, 修士論文 (2022年3月).
- [30] 藤本拓希: 光リング共振器を用いた超軽量アクション暗黒物質探索, 修士論文 (2022年3月).
- (著書)
- [31] Masaki Ando, Chapter editor: Handbook of Gravitational Wave Astronomy, Ed. by Cosimo Bambi, and Stavros Katsanevas (Springer, 2021).
- (会議集録)
- [32] Satoru Takano: Cryogenic Monolithic Interferometer for Sensing Gravity Gradient, Proc. 4th IFQMS, SE-03- $\delta$  1-01 (2021).
- [33] Ching Pin Ooi: Suspension noise measurements of cryogenic torsion pendulums with crystalline fibrifibres, Proc. 4th IFQMS, SE-03- $\delta$  1-02 (2021).
- [34] Yuka Oshima: Angular Sensor with a Coupled Cavity for Gravity Gradient Sensing, Proc. 4th IFQMS, SE-03- $\delta$  1-03 (2021).
- [35] 安東正樹: 重力波望遠鏡 B-DECIGO, 第65回宇宙科学技術連合講演会 1K05 (2021年11月9日).
- <学術講演>
- (国際会議)
- 招待講演
- [36] Masaki Ando: Gravitational Astrophysics with KAGRA and Beyond, YKIS2022a Symposium (Feb. 16th, 2022, Online).
- [37] Masaki Ando: TOBA: Ground-Based Mid-Frequency Gravitational-Wave Antenna, 16th Marcel Grossmann Meeting (July 7, 2021, Online).
- [38] Masaki Ando: Space GW Antennae: DECIGO/B-DECIGO, GWADW2021 (May 17th, 2021, Online).
- [39] Masaki Ando: Summary of Low-Frequency Workshop, GWADW2021 (May 21st, 2021, Online).
- [40] Satoru Takano, Ching Pin Ooi, Yuka Oshima, Yuta Michimura, Masaki Ando: The Current Status of TOBA, GWADW2021 (May 21st, 2021, Online).
- 一般講演
- [41] Masaki Ando: Future Strategy Committee, 28th KAGRA Face-to-Face Collaboration Meeting (Dec. 20th, 2021).
- [42] Haoyu Wang et al.: Updates of birefringence characterization of ITMs and simulation progress, Same as above.
- [43] Haoyu Wang et al.: Updates of birefringence characterization of ITMs and simulation progress, Same as above.
- [44] Masaki Ando: Development of Human Resources for Future Projects, Same as above.
- [45] Satoru Takano: Cryogenic Monolithic Interferometer for Sensing Gravity Gradient, 4th IFQMS (Dec. 2021, online)
- [46] Yuka Oshima: Angular Sensor with a Coupled Cavity for Gravity Gradient Sensing, Same as above.
- [47] Ching Pin Ooi: Suspension Noise measurements of Cryogenic Torsion Pendulums with Crystalline Fibres, Same as above.
- [48] Masaki Ando: R&Ds for Future Upgrade and Post-O5 Planning, LVK Meeting (Sept. 9th, 2021).

- [49] Yuta Michimura et al.: Vector and Axion Dark Matter Searches with KAGRA, Same as above.
- [50] Yuta Michimura et al.: Ultralight dark matter searches with KAGRA gravitational wave telescope, 17th TAUP (Sep. 2021, Online)
- [51] Yuka Oshima: First observation and analysis of DANCE: Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment, Same as above.
- [52] Hiroki Fujimoto, Yuka Oshima, Masaki Ando, Tomohiro Fujita, Jun'ya Kume, Yuta Michimura, Soichiro Morisaki, Koji Nagano, Hiromasa Nakatsuka, Atsushi Nishizawa, Ipppei Obata: DANCE: Searching for Axion-like particle dark matter with optical bow-tie ring cavity, The Workshop on Very Light Dark Matter 2021 (September 2021, online).
- [53] Masaki Ando: Future Strategy Committee, 27th KAGRA Face-to-Face Collaboration Meeting (Aug. 29th, 2021).
- [54] Haoyu Wang et al.: Study of birefringence effects with realistic mirror maps, Same as above.
- [55] Yuta Michimura et al.: Searching for ultralight vector dark matter with the cryogenic gravitational wave telescope KAGRA, 16th MG Meeting (2021年7月, Online).
- [56] Yuta Michimura et al.: Searching for Signals from Ultralight Vector Dark Matter with KAGRA, 8th KIW (2021年7月, Online).
- [57] Yuka Oshima: First test operation of DANCE: Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment, 16th Patras Workshop on Axions, WIMPs and WISPs (June 2021, online).
- [58] Yuta Michimura: Updates on the Optical Levitation Experiment, The 3rd QFilter Workshop (2021年6月, Online).
- ポスター発表
- [59] Hiroki Fujimoto: Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment DANCE: Design and development of auxiliary cavity for simultaneous resonance of linear polarizations, 17th TAUP (Sep. 2021, online).
- [60] Yuka Oshima: Design of Coupled Wave Front Sensor for TOrsion-Bar Antenna, GWADW2021 (May 21st, 2021, Online).
- (国内会議)
- 招待講演
- [61] 道村唯太: 重力波検出器によるダークマター探索, 第1回「素粒子と重力波」研究会 (2022年2月, オンライン)
- [62] 安東 正樹: 重力波宇宙物理学の今とこれから, 新潟大学 談話会 (2021年11月29日, 新潟大学, リモート).
- [63] 安東 正樹: 宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO, 2021年 第2回 CRC タウンミーティング (2021年9月7日, リモート開催).
- [64] 安東 正樹: 宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO, 2021年 第1回 CRC タウンミーティング (2021年8月10日, リモート開催).
- [65] 安東 正樹: 宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO, 大型中型計画シンポジウム (2021年8月5日, リモート開催).
- 一般講演
- [66] 安東 正樹: スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (139): B-DECIGO の概要, 日本物理学会 第77回 年次大会 (2022年3月17日, オンライン).
- [67] 小野将矢: スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (145): 宇宙重力波望遠鏡のための双方向 Fabry-Perot 共振器の制御, 同上.
- [68] 大島由佳: ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA の開発 (31): 高感度 wavefront sensor の原理実証, 同上.
- [69] Ching Pin; Ooi: Development of Phase-III TOBA for Gravitational Wave Observation (32): Q Value Measurements of Crystalline Fibre Suspensions of Cryogenic Torsion Pendulums, 同上.
- [70] 高野 哲: ねじれ振り子型重力波望遠鏡 TOBA の開発 (33): 低温モノリシック光学系の構築, 同上.
- [71] 藤本拓希: 光リング共振器を用いたアクション暗黒物質の探索実験 DANCE (7), 同上.
- [72] 大島由佳: 高校生向け天文学実習「銀河学校 2021」オンライン実施報告, 日本天文学会 2022年春季年会 (2022年3月, オンライン).
- [73] 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, Q-LEAP 第7回領域会議 (2022年1月14日, オンライン).
- [74] 道村唯太: B-DECIGO 技術サーベイ, 第20回 DECIGO ワークショップ (2021年12月, オンライン).
- [75] 小野将矢: 双方向 FP 共振器の制御, 同上.
- [76] 安東 正樹: 宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO の実現に向けて, 同上.
- [77] 安東 正樹: 重力波望遠鏡 B-DECIGO, 第65回 宇宙科学技術連合講演会 (2021年11月9日, オンライン).
- [78] 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」2021年度第2回領域会議 (2021年10月, オンライン).
- [79] 大島由佳: ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA(Phase-III) の開発 (28): 高感度 wavefront sensor の原理実証, 日本物理学会 2021年秋季大会 (2021年9月, オンライン).
- [80] Ching Pin; Ooi: Development of Phase-III TOBA for Gravitational Wave Observation (29): Torsional Q Value Cryogenic Testing of Crystalline Suspension Fibres, 同上.
- [81] 高野 哲, Ooi Ching Pin, 大島 由佳, 道村 唯太, 安東 正樹: ねじれ振り子型重力波望遠鏡 TOBA の開発 (30): 差動ファブリペロー干渉計の性能評価, 同上.
- [82] 安東 正樹: スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (133): B-DECIGO の概要, 同上.

- [83] 小野将矢: 宇宙重力波望遠鏡のための双方向 Fabry-Perot 共振器の制御, 同上.
- [84] 道村唯太, 他: 大型低温重力波望遠鏡 KAGRA を用いた超軽量ゲージボゾンダークマター探索, 同上.
- [85] 藤本拓希: 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 (6) : s 偏光/p 偏光の同時共振に向けた補助共振器の開発, 同上.
- [86] 川崎拓也: 量子輻射圧ゆらぎ観測に向けたねじれ振子型線形光共振器, 同上.
- [87] 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」2021 年度第 1 回領域会議 (2021 年 6 月, オンライン).
- [88] 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, Q-LEAP 第 6 回領域会議 (2021 年 6 月 3 日, オンライン).
- ポスター発表
- [89] 安東正樹: 宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO, 第 22 回宇宙科学シンポジウム (2022 年 1 月 6-7 日, オンライン).
- (セミナー・アウトリーチ講演)
- [90] Yuta Michimura: DANCE: Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment, ASU Cosmology Seminar (2022 年 3 月, オンライン).
- [91] Yuta Michimura: DANCE: Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment, CENPA Seminar (2021 年 11 月, オンライン).
- [92] 道村唯太: 光リング共振器を用いたアクシオンダークマター探索実験 DANCE, 日本物理学会北陸支部特別講演会 (2021 年 11 月, オンライン).
- [93] Yuta Michimura: Vector dark matter search with KAGRA, SYRTE-UTokyo DM Seminar (2021 年 7 月, online).
- [94] Yuta Michimura: Introduction to MIF (Main Interferometer) and IOO (Input and Output Optics) Groups etc., KAGRA Subsystem Session in 2021 (2021 年 5 月, online).
- [95] Yuka Oshima: The current sensitivity of DANCE Act-1, Paris-Tokyo Dark Matter Seminar (April 2021, online).
- [96] Hiroki Fujimoto: Control scheme and future prospects of DANCE Act-1, Paris-Tokyo Dark Matter Seminar (April 2021, online).
- [97] 道村唯太: 重力波天文学・物理学の現状と未来, 学習院大学 松本研究室セミナー (2021 年 4 月, オンライン).

## 6.6 馬場研究室

宇宙は一見冷たく静かな世界に見えるが、実際は高エネルギー現象に満ち満ちた世界であり、これらの理解なくして宇宙の理解には至らない。本研究室

では、宇宙の高エネルギー現象を研究対象としている。手法としては、高エネルギー現象が発する X 線やガンマ線を人工衛星や地上の検出器で観測することで、実験的に解明しようとしている。また、2022 年度打ち上げ予定の XRISM 衛星など、将来の高エネルギー天文衛星実現に向けて開発を続けている。

### 6.6.1 宇宙物理現象観測に関する研究

#### 超新星残骸

超新星残骸は星が生きているうちに核融合で生成した重元素を宇宙に供給する。その衝撃波では効率よく宇宙線が加速されている。いわば超新星残骸は宇宙の多様性を生み出している。また超新星残骸の衝撃波は密度が約  $1\text{H cm}^{-3}$  と非常に小さいことから衝突ではない機構で加熱している「無衝突衝撃波」である。無衝突衝撃波は宇宙のあらゆるスケールに存在する普遍的現象だが、その生成機構はよくわかっていない。今年度は (1) 若い超新星残骸での衝撃波環境の解明、(2) 無衝突衝撃波の加熱機構の解明の二つの観点で研究を進めた。

(1) に関しては、西暦 1572 年に爆発したティコの新星と西暦 1604 年に爆発したケプラーの新星の残骸を利用した。これらは Type Ia 型と呼ばれる超新星の残骸で、特に前者は周辺環境がクリアな状況で爆発したと考えられてきた。我々は超新星残骸を細かく分解し、ドップラー偏移を含めた複数温度の熱的プラズマモデルでスペクトルを解釈、その膨張を 3 次元的に記述した。その結果、衝撃波直下では球対称膨張では説明できない非常に速度幅が小さい領域があることが判明した。これは、衝撃波が周辺の比較的密度の高い星周物質に衝突した結果であると考えている。ティコの新星は二つの白色矮星が合体して爆発する double degenerate 型であると考えられておりその場合は星周物質は存在しないと考えられてきたのが、本研究により否定され、白色矮星に伴星から物質が降り積もって爆発する single degenerate 型である可能性が示唆されたのは大変興味深い。我々はケプラーの新星の残骸でも非等方に分布する星周物質を発見しており [4]、Ia 型超新星残骸であっても星周物質の存在が重要であることを示した。これらの結果は春日知明の博士論文としてまとめられている [18]。

また、(2) として、超新星残骸 SN1006 北西部衝撃波を Chandra で詳細に解析し、 $\sim 0.2\text{ pc}$  スケールでの温度変化を調べた (図 6.6.14 参照)。その結果、衝撃波直下から下流 (内側) に行くに従いプラズマ温度が上昇する様子を初めてとらえた [47, 48]。温度上昇の速度はクーロン散乱によるエネルギー輸送と無矛盾で、無衝突衝撃波のエネルギー輸送機構を解明したと考えてよい。