

- [11] "Modeling of Nonlinear Propagation of Femtosecond Laser Pulse in Air for Laser Ablation", Ryohei Yamada, Wataru Komatsubara, Haruyuki Sakurai, Kuniaki Konishi, Norikatsu Mio, Junji Yumoto, Makoto Kuwata-Gonokami, Conference on Lasers and Electro-Optics 2022 (CLEO 2022) (2022/5/19, Poster)
- [12] "Large diameter millimeter-wave low-pass filter made of alumina with laser ablated anti-reflection coating", Ryota Takaku, Qi Wen, Scott Cray, Mark Devlin, Simon Dicker, Shaul Hanany, Takashi Hasebe, Teruhito Iida, Nobuhiko Katayama, Kuniaki Konishi, Makoto Kuwata-Gonokami, Tomtoake Matsumura, Norikatsu Mio, Haruyuki Sakurai, Yuki Sakurai, Ryohei Yamada, Junji Yumoto 16th International Conference on Laser Ablation (COLA2021/2022) (2022/4/28, Shimane, Oral)
- (国内会議)
- 一般講演
- [13] 「シングルパルスレーザー加工における局所フルエンスと加工深さの直接相関」櫻井 治之、小西 邦昭、田丸 博晴、湯本 潤司、五神 真、第7回フォトニクスワークショップ、1-P-40、2022年11月
- [14] 「レーザー加工穴形状の定量的予測を可能とする空気中でのフェムト秒光パルスの非線形伝搬シミュレーション」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、第7回フォトニクスワークショップ、1-P-28、2022年11月
- [15] 「テラヘルツラディアル偏光パルスを用いたダークプラズモンモード選択励起の数値計算解析」的場 みづほ、小西 邦昭、三尾 典克、湯本 潤司、五神 真、第7回フォトニクスワークショップ、1-P-22、2022年11月
- [16] 「レーザー加工穴径の定量的予測を可能とする空気中でのフェムト秒光パルスの非線形伝搬シミュレーション」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、第83回応用物理学会 秋季学術講演会、2022年9月22日
- [17] 「THz波デバイス用高アスペクト比構造への超臨界流体薄膜堆積法によるCu被覆の検討」黄 昱源、小西 邦昭、出浦 桃子、下山 裕介、湯本 潤司、五神 真、霜垣 幸浩、百瀬 健、第83回応用物理学会 秋季学術講演会、2022年9月22日
- [18] 「サブピコ秒から数ナノ秒時間遅延領域における超短パルスレーザー加工の時間分解複素透過率イメージング」川野 将太郎、戸田 圭一郎、櫻井 治之、小西 邦昭、井手口 拓郎、第83回応用物理学会 秋季学術講演会、2022年9月21日

## 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。

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の各望遠鏡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。2023年5月から約1年半の観測運転O4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1Mpc以上の感度で運転を行い、O4の終わりまでに10Mpc程度まで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。さらに、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。

### 6.5.1 重力波望遠鏡KAGRA

#### 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1Mpcの連星中性子星観測可能レンジを実現し、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が行われている。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、KAGRAの将来計画の検討などを行っている。本年度は特に、重力波信号に混入する他自由度の長さ信号をあらかじめ除去するためのフィードフォワードの設計と実装や、他自由度のフィードバック制御によって混入する雑音を低減するために制御フィルターの改良を行なった。これにより数100kpc程度観測可能レンジが向上し、短時間ではあるものの1Mpcのレンジを達成している。今後は干渉計動作の安定化および自動化に取り組みつつ、さらなる感度向上を目指す。また他にも、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。

### Birefringence calibration of sapphire mirrors

The birefringence effect of KAGRA's sapphire test masses is currently an important factor that influences the interferometer's stable control. This year, we calibrated birefringence properties of sapphire mirrors using transmission wavefront error measurements. We successfully estimated the energy coupling from s-polarization to p-polarization and compared it with on-site measurements. We also designed a tabletop experiment which will demonstrate new real-time alignment control schemes for future KAGRA.

### 長基線信号増幅共振器

近年のLIGO-Virgo-KAGRAコラボレーションによる重力波観測を経て、連星ブラックホール・中性子星に関する数多くの知見が得られた。一方で観測された重力波の周波数は10 Hzから1 kHz程度と限定的であるため、今後はより広い周波数帯での重力波観測が求められる。特に、数kHz帯の重力波は連星中性子星合体時に放出されるため、その観測は中性子星の状態方程式決定に重要である。数kHzに特化した重力波望遠鏡が計画されており、そこで用いられるのが長基線信号増幅共振器と呼ばれる技術である。当研究室ではこの技術がテーブルトップスケールでさえ未実証であることに着目し、その原理実証を目指している。本年度は光学系や干渉計の構築が完了し、様々な干渉計自由度の同時制御に取り組んだ。

### 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の前段階の重力波望遠鏡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。また、DECIGOの感度を制限する量子雑音の低減手法の検討に関する共同研究も進めた。本年度は特に、量子ロッキングと呼ばれる量子雑音低減手法において最

適な信号処理を実現するフィルターの原理実証を行った。

### 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。SILVIAは複数の宇宙機で構成され、その間の長さを精密測定・制御することでサブ $\mu\text{m}$ 級の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。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。本年度は、さらなるミッション構成の具体化とコスト評価等の検討を進め、2022年11月に行われたプリプロジェクト候補移行審査を通過した。また、国立天文台とも共同でSILVIA光学系の詳細設計にも取り組んでいる。

### DECIGO/SILVIAのための地上実証実験

当研究室では、DECIGO、B-DECIGOのレーザー干渉計を構成する双方向Fabry-Perot光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、地上検証用の実験セットアップを完成させた。また、wavefront sensor法、beam pointing control法によって双方向Fabry-Perot共振器の角度制御の全12自由度の制御に成功した。現在は、制御の最適化や残留変動の評価を行っている。

### 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。Phase-IIIにおける目標感度は、0.1 Hzにおいてひずみ換算で $10^{-15}/\sqrt{\text{Hz}}$ となっている。

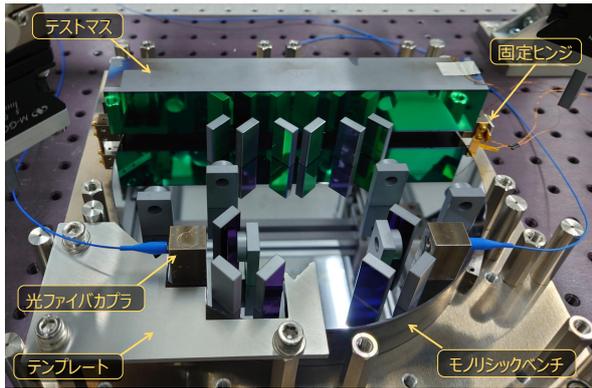


図 6.5.17: シリコン製モノリシック光学系.

Phase-III TOBA の特徴の 1 つは、雑音の低減のために試験マスを 4 K にまで冷却することである。これまでに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て次に述べる低温下での要素開発や光学系の改良などを行っている。

#### 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のセンサー部分について、光学上盤上に通常の光学系を組み、特性評価を行った [66]、またモノリシック光学系の光学設計を行い、光学系の構築を始めた。今年度は特に干渉計の入射部分についてアセンブリを行った (図 6.5.17) [56]。今後は、モノリシック光学系のアセンブリを進め、低温下での測定を行う予定である。

#### 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、共振器制御の安定化のため、テストマスを懸架するセットアップへの変更を行った。

#### Fiber Q measurement

Research was focused on characterising and lowering the suspension noise for torsion pendulums,

focusing on two main key technologies: cryogenic temperatures, and crystalline fibres. This is in order to ensure that the noise floor of TOBA is low enough for its intended sensitivity. The key measurement metric is the Q factor, which we measure via the ringdown method with a torsion pendulum setup.

We have succeeded in achieving  $Q = 2.2 \times 10^5$  at cryogenic temperatures for a torsion pendulum with a 1 mm sapphire fibre, which is a record for this setup. This was achieved by changing the length of the fibre for the torsion pendulum. This suggests that the limiting noise source for the current setup is coupling between the torsion modes and the other resonant modes, and further characterisation is underway to quantify and reduce this coupling.

#### Tilt meter

To achieve the desired sensitivity of TOBA, the Active Vibration Isolation Table (AVIT) must effectively suppress ground vibrations. However, the tilt-horizontal coupling of seismometers on AVIT can affect its performance. To mitigate this, a highly sensitive tilt meter that is not influenced by translation is required. We have developed a beam balance type tilt meter as a proof of concept, with a 20 cm long beam balance and a resonance frequency of approximately 0.8 Hz. An optical level is used for readout, and feedback control is implemented to maintain the operating point. We have measured several tilts using this tilt meter and are currently investigating its noise sources and improving the design.

#### 6.5.4 アクシオンダークマター探索

数々の宇宙観測によって宇宙に存在する物質の 8 割以上がダークマターという未知の物質で占められていることが明らかになっている。ダークマターは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おり、その存在は確実視されているが、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のダークマター候補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分類されるアクシオンに着目し、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偏光面を周期的に変化させる性質に着目し、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)

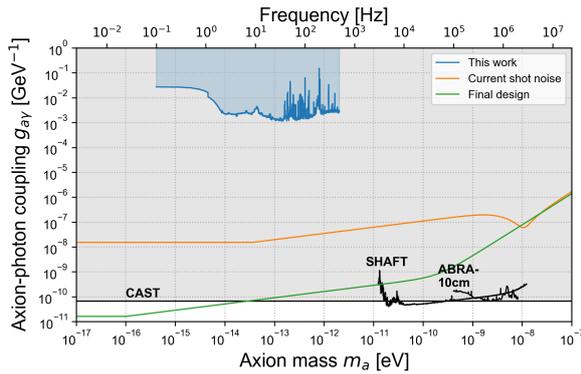


図 6.5.18: 光リング共振器を用いたアクシオン-光子結合定数の上限値。

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ている。KAGRA に必要な偏光光学系の導入は完了しており、2023 年 5 月に開始予定の O4 観測では重力波観測データに加え、アクシオン探索データが取得できる見込みである。

## DANCE

DANCE 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、 $10^{-10}$  eV 程度以下の軽量アクシオンを広帯域にわたって探索することを目指した実験である。本年度は 2021 年 5 月にプロトタイプを用いて取得した 12 日間のデータの解析を完了し、光リング共振器を用いた初のアクシオン-光子結合定数の上限値を設けた (図 6.5.18)。また、s/p 偏光が共振器に同時に共振しないと感度が大幅に低下してしまうという問題が明らかになっており、現在は同時共振のための機構を備えた装置の開発も進められている。昨年度には補助共振器を利用した同時共振の実現に成功しており、本年度は光学素子の改良とオフライン解析によって約一桁の雑音低減に成功した。また、波長可変レーザーを用いて s/p 偏光の反射位相差をキャンセルすることにより同時共振を実現する手法も提案されている。本年度は V 字型の光共振器を作成し、ミラー 1 枚あたりの s/p 偏光間の反射位相差測定を行った。今後は、s/p 偏光間の反射位相差の時系列データを取得し、制御量についての調査を行った後、波長可変レーザーを用いた同時共振の実現を目指す。

### 6.5.5 相対論・量子光学実験

#### オプトメカニクス研究

重力波望遠鏡における最も原理的な雑音として、レーザー光の量子雑音が挙げられる。また巨視的な

機械振動子を用いて量子雑音に制限された変位感度を観測することで、巨視的重ね合わせ状態を実現することが可能となる。当研究室では、その最初のステップとして 10 mg 程度のねじれ振子を用いて量子輻射圧雑音を観測することを目指している。ねじれ振子は両端に曲率のついた鏡を固定したダンベル型である。本年度は、鏡を固定するためのダンベル型のスペーサの制作を企業と共同で進め、設計通りのものが完成した。来年度は、鏡を固定して光共振器を構築し、量子輻射圧雑音観測を行う予定である。また、レーザー光によって共振器内の光学結晶が熱膨張する光熱効果をモデル化し、実験的に実証する共同研究も行った。

#### B-L 相互作用探索

超軽量ダークマターの候補の一つとして、標準理論に含まれていないゲージ対称性である  $U(1)_{B-L}$  ゲージボソンが提案されている。このモデルでは、レプトン数とバリオン数の差である B-L に比例する力が存在するため、異なる原子で構成された機械振動子が異なる力を受ける。当研究室では、このような異なる機械振動子の変位差を光共振器で測定し、ダークマターを探索することを目指している。本年度は、探索可能なパラメータ範囲の設計、入射光学系の構築、機械振動子を防振するための懸架系の準備を行った。

#### <受賞>

- [1] 高野哲: 2022 年秋季大会 日本物理学会 学生優秀発表賞, 日本物理学会 (2022 年 10 月)
- [2] Yuka Oshima: 2nd International Symposium on Trans-Scale Quantum Science Poster Award (November 2022).

#### <報文>

##### (原著論文)

- [3] T. Ishikawa, *et al.*: First-step experiment for sensitivity improvement of DECIGO: Sensitivity optimization for simulated quantum noise by completing the square, *Phys. Rev. D* 107, 022007 (2023).
- [4] M. Croquette, *et al.*: Recent advances toward mesoscopic quantum optomechanics, *AVS Quantum Sci.* 5, 014403 (2023).
- [5] T. Kawasaki, *et al.*: Angular trapping of a linear-cavity mirror with an optical torsional spring, *Phys. Rev. A* 106, 013514 (2022).
- [6] T. Shimoda, *et al.*: Coherent angular signs amplification using an optical cavity *Appl. Opt.* 61, 3901-3911 (2022).
- [7] S. Otabe, *et al.*: Photothermal effect in macroscopic optomechanical systems with an intracavity nonlinear optical crystal, *Opt. Express* 30, 42579-42593 (2022).
- [8] Yuta Michimura, *et al.*: Ultralight dark matter searches with KAGRA gravitational wave telescope, *J. of Phys.: Conf. Ser.* 2156, 012071 (2022).

- [9] Yuka Oshima, *et al.*: First Results of Axion Dark Matter Search with DANCE, arXiv:2303.03594 (2023).
- [10] Yuka Oshima, *et al.*: Wavefront Sensing with a Coupled Cavity for Torsion-Bar Antenna, arXiv:2207.13847 (2022).
- [11] R. Abbott, *et al.*: Population of Merging Compact Binaries Inferred Using Gravitational Waves through GWTC-3, Phys. Rev. X 13, 011048 (2023).
- [12] R. Abbott, *et al.*: First joint observation by the underground gravitational-wave detector KAGRA with GEO 600, PTEP 2022, 063F01 (2022).
- [13] H. Abe, *et al.*: Performance of the KAGRA detector during the first joint observation with GEO600 (O3GK), PTEP ptac093 (2022).
- [14] H. Abe, *et al.*: The Current Status and Future Prospects of KAGRA, the Large-Scale Cryogenic Gravitational Wave Telescope Built in the Kamioka Underground, Galaxies 10, 63 (2022).
- [15] R. Abbott, *et al.*: Search for Subsolar-Mass Binaries in the First Half of Advanced LIGO's and Advanced Virgo's Third Observing Run, Phys. Rev. Lett. 129, 061104 (2022).
- [16] R. Abbott, *et al.*: All-sky, all-frequency directional search for persistent gravitational waves from Advanced LIGO's and Advanced Virgo's first three observing runs, Phys. Rev. D 105, 122001 (2022).
- [17] R. Abbott, *et al.*: Search for Gravitational Waves Associated with Gamma-Ray Bursts Detected by Fermi and Swift during the LIGO-Virgo Run O3b, ApJ 928, 186 (2022).
- [18] R. Abbott, *et al.*: Searches for Gravitational Waves from Known Pulsars at Two Harmonics in the Second and Third LIGO-Virgo Observing Runs, ApJ 935, 1 (2022).
- [19] R. Abbott, *et al.*: All-sky search for gravitational wave emission from scalar boson clouds around spinning black holes in LIGO O3 data, Phys. Rev. D 105, 102001 (2022).
- [20] R. Abbott, *et al.*: Narrowband Searches for Continuous and Long-duration Transient Gravitational Waves from Known Pulsars in the LIGO-Virgo Third Observing Run, ApJ 932, 133 (2022).
- [21] R. Abbott, *et al.*: All-sky search for continuous gravitational waves from isolated neutron stars using Advanced LIGO and Advanced Virgo O3 data, Phys. Rev. D 106, 102008 (2022).
- [22] R. Abbott, *et al.*: Search for gravitational waves from Scorpius X-1 with a hidden Markov model in O3 LIGO data, Phys. Rev. D 106, 062002 (2022).
- [23] R. Abbott, *et al.*: Search for continuous gravitational wave emission from the Milky Way center in O3 LIGO-Virgo data, Phys. Rev. D 106, 042003 (2022).
- [24] R. Abbott, *et al.*: Model-based Cross-correlation Search for Gravitational Waves from the Low-mass X-Ray Binary Scorpius X-1 in LIGO O3 Data, ApJL 941, L30 (2022).
- (国内雑誌)
- [25] 安東正樹: 重力波望遠鏡のための光・量子技術, 光学, 51, 7 (2022年7月).
- (学位論文)
- [26] 小野将矢: 宇宙重力波望遠鏡に向けたレーザー干渉計の角度制御, 修士論文 (2023年3月).
- <学術講演>
- (国際会議)
- 招待講演
- [27] Masaki Ando: KAGRA: Large Cryogenic Gravitational Wave Telescope, International Conference on the Physics of Two Infinities (March 30th, 2023, Kyoto, Japan).
- [28] Hiroki Fujimoto, *et al.*: Recent Upgrades of Optical System and Data Analysis in DANCE, Workshop on Very Light Dark Matter 2023 (Mar. 2023, Chino, Japan).
- [29] Yuka Oshima, *et al.*: First Results of DANCE from Long-Term Observation, Workshop on Very Light Dark Matter 2023 (Mar. 2023, Chino, Japan).
- [30] Masaki Ando: DECIGO: a space gravitational-wave antenna, KIW9: KAGRA International Workshop (June 6, 2022, Online).
- 一般講演
- [31] Yuka Oshima, *et al.*: First Results of Axion Dark Matter Search with DANCE, FY2022 "What is dark matter? - Comprehensive study of the huge discovery space in dark matter" (Mar. 2023, Kavli IPMU and online).
- [32] Hiroki Fujimoto, *et al.*: Axion dark matter search with optical ring cavity, FoPM International Symposium (Feb. 2023, University of Tokyo).
- [33] Hiroki Fujimoto, *et al.*: Latest Status and Sensitivity of DANCE: Dark matter Axion search with riNg Cavity experiment, KASHIWA DARK MATTER SYMPOSIUM 2022 (Dec. 2022, University of Tokyo and online).
- [34] Ching Pin; Ooi, *et al.*: Development of a cryogenic suspension system for TORSION-Bar Antennae (TOBA), The 5th International Forum on Quantum Metrology and Sensing (November 29th, 2022, online).
- [35] Yuka Oshima, *et al.*: Torsion-Bar Antenna for Early Earthquake Alert, The 5th International Forum on Quantum Metrology and Sensing (November 29th, 2022, online).

- [36] Masaki Ando: Future Strategy Committee, KAGRA F2F (Nov 30th, 2022, Online).
- [37] Yuka Oshima, *et al.*: Angular Measurement with a Coupled Cavity for Torsion-Bar Antenna, KAGRA Future Working Group 2nd open meeting (November 2022, University of Tokyo and online).
- [38] Masaki Ando, *et al.*: FWG Open Meeting, KAGRA Future Working Group 2nd open meeting (November 2022, University of Tokyo and online).
- [39] Haoyu Wang, *et al.*: Mirror birefringence in KAGRA, LIGO-Virgo-KAGRA Collaboration Meeting (September 2022, Cardiff and online).
- [40] Haoyu Wang, *et al.*: Current status of birefringence characterization and simulation of KAGRA ITMs, The 29th KAGRA Face-to-Face meeting (August 2022, University of Tokyo and online).
- [41] Yuka Oshima, *et al.*: Wavefront Sensing with a Coupled Cavity for Torsion-Bar Antenna, GRAvitational-wave Science & technology Symposium 2022 (June 2022, Padova, Italy).
- [42] Masaki Ando: Gravitational Waves: VIRGO-KAGRA and Future R&Ds, ILANCE Meeting (June 8, 2022, ICRR Kashiwa, Chiba).
- [43] Masaya Ono, Control of Dual-Pass Fabry-Perot cavity for space gravitational antennas:DECIGO and B-DECIGO The 9th KAGRA International Workshop (June 2022, online).
- [44] Haoyu Wang, *et al.*: Birefringence characterization of KAGRA ITMs and simulation with Finesse, GWADW2022 (May 2022, online).
- [45] Hiroki Fujimoto, *et al.*: Recent Upgrades and Future Prospects of DANCE, FY2022 "What is dark matter? - Comprehensive study of the huge discovery space in dark matter" (Mar. 2023, Kavli IPMU and online).
- ポスター発表
- [46] Yuka Oshima, *et al.*: Torsion-Bar Antenna for Low-Frequency Gravity Gradient Observation, 2nd International Symposium on Trans-Scale Quantum Science (November 2022, University of Tokyo).
- [47] Masaya Ono, *et al.*: Control of Dual-Pass Fabry-Perot Cavity for space gravitational wave antennas: DECIGO and B-DECIGO, Gravitational Wave Advanced Detector Workshop 2022 (May 2022, online).
- [48] Yuka Oshima, *et al.*: Angular Signal Amplification with a Coupled Cavity for Torsion-Bar Antenna, Gravitational Wave Advanced Detector Workshop 2022 (May 2022, online).
- [49] Satoru Takano, *et al.*: The Current Status of Torsion-Bar Antenna (TOBA) Experiment, Gravitational Wave Advanced Detector Workshop 2022 (May 2022, online).
- [50] Masaki Ando: Space GW Antennae: DECIGO/B-DECIGO, Gravitational Wave Advanced Detector Workshop 2022 (May 2022, online).
- (国内会議)
- 招待講演
- [51] 安東 正樹: 重力波観測による時空の探査, KMI 分野横断セミナー 時空の漸近構造, 赤外発散, 重力波 (2022年12月18日, 名古屋大学).
- 一般講演
- [52] 小森健太郎, 他: 高周波重力波望遠鏡のための長基線信号増幅共振器の実証, 日本物理学会 2023年春季大会 (2023年3月, オンライン).
- [53] 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 (9): コミッショニングおよび最新の感度, 同上.
- [54] 瀧寺陽太, 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 (10): ミラー1枚あたりのs/p偏光の反射位相差測定, 同上.
- [55] 大島由佳, 他: ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA (Phase-III) の開発 (37): ねじれ振り子と読み取り光学系の開発, 同上.
- [56] 高野哲, 他: ねじれ振り子型重力波望遠鏡 TOBA (Phase-III) の開発 (38): 低温モノリシック干渉計の開発と観測, 同上.
- [57] Mengdi Cao, *et al.*: Development of Phase-III TOBA for Gravitational Wave Observation (39): Development of Tiltmeter 同上.
- [58] Ching Pin; Oo, *et al.*: Development of Phase-III TOBA for Gravitational Wave Observation (40): Current Status on the Measurement of Q Value for Torsion Pendulums using Sapphire Fibres at Cryogenic Temperatures, 同上.
- [59] 安東 正樹: スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (157): B-DECIGO の概要, 同上.
- [60] 小野將矢, 他: スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (160): 双方向 Fabry-Perot 共振器のアライメント制御, 同上.
- [61] 小野將矢: 双方向 FP 共振器の角度方向制御, 第21回 DECIGO ワークショップ (2022年12月, オンライン).
- [62] 安東 正樹: 宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO の実現に向けて同上.
- [63] 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8回領域会議 (2022年12月14日, 東京工業大).
- [64] 安東 正樹: 重力波望遠鏡 B-DECIGO, 第66回 宇宙科学技術連合講演会 (2022年11月1日, 熊本城ホール, 熊本).
- [65] 大島由佳, 他: ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA (Phase-III) の開発 (34), 日本物理学会 2022年秋季大会 (2022年9月, 岡山理科大学).

- [66] 高野哲, 他: ねじれ振り子型重力波望遠鏡 TOBA (Phase-III) の開発 (35): 低温モノリシック干渉計の開発同上.
- [67] Ching Pin; Ooi, *et al.*: Development of Phase-III TOBA for Gravitational Wave Observation (36): Development and characterisation of cryogenic suspension system, 同上.
- [68] 小野將矢, 他: DECIGO, B-DECIGO のための双方向 Fabry-Perot 共振器の制御, 同上.
- [69] 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 (8): 長時間測定に向けた制御法の開発, 同上.

ポスター発表

- [70] 安東 正樹: 宇宙重力波望遠鏡 B-DECIGO, 第 23 回宇宙科学シンポジウム (2023 年 1 月 5-6 日, オンライン).

(セミナー・アウトリーチ講演)

- [71] 小森健太郎: 宇宙にこだまする残響を聴く〜重力波観測の現在と未来〜, 第 35 回 東京大学 理学部 公開講演会 (2023 年 3 月, 小柴ホール).
- [72] 藤本拓希: Axion dark matter search with laser interferometry, 重力波交流会 (2023 年 1 月).
- [73] 大島由佳: 重力波望遠鏡でダークマターを探す, 第 73 回 東京大学 駒場祭 10 分で伝えます! 東大研究最前線 (2022 年 11 月).
- [74] Kentaro Komori: Precise measurement by laser interferometer: from macroscopic optomechanics to gravitational wave observation, QUP Project Q (B) 7th meeting (Sep. 21st, 2022, online).
- [75] Kentaro Komori: Revival of 20-m interferometer or TAMA 300 as GW detectors, 2nd GWSP Future Strategy Meeting (Aug. 4th, 2022, NAOJ).
- [76] 安東 正樹: 宇宙物理学の挑戦, 令和 4 (2022) 年度 物理学科 進学ガイダンス (2022 年 5 月 18 日, 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、2023 年度打ち上げ予定の XRISM 衛星や GRAMS 計画など、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。本年は特に中性子星や超新星残骸、中性子星-中性子星合体の観測的研究と、XRISM 衛星・GRAMS 計画・cipher 計画の開発研究を行った。

### 6.6.1 宇宙物理現象観測に関する研究

#### 中性子星

中性子星はブラックホールを除いて宇宙空間でも最も密度の高い天体であり、強重力、高密度、強磁場下での特異な物理現象を実現する宇宙で唯一の実験室である。伴星からの物質が降着する中性子星 (降着駆動型中性子星) は、最も明るい宇宙 X 線源の一つであり、中性子星磁場などの幾何構造を知る上でも重要である。しかし降着駆動型中性子星からの X 線放射は、中性子星自身と  $10^{12}$  G にものぼる超強磁場による磁気圧・降着物質・伴星が公転する複雑な幾何構造をもつ系であるため、スペクトルは激しく時間変動する。これを解くことで降着駆動型中性子星の幾何構造を理解することが重要となっている。

我々は、明るい降着駆動型中性子星 Cen X-3 の公転周期 2 周期分を覆う長時間観測を NuSTAR に提案、採択された。このデータから中性子星の自転周期と連星系の公転周期を分離し、中性子星への降着流は一定であり、スペクトル変動は伴星の星風による X 線の吸収と散乱に起因することを示唆した [14]。同様の解析を別の降着駆動型中性子星 Her X-1 についても行っている。また、中性子星の自転に伴う位相変化を 3 次元放射モデルと比較し、いずれの天体でも (1) 降着柱は半径より高さが大きい形状をしている、(2) 放射は降着柱上面からの放射 ("pencil beam") はほとんどなく降着柱側面からの放射 ("fan beam") が主である、(3) fan beam が直接観測者に届く成分と中性子星表面で反射した成分がある、という特徴を持つことを示した [20]。これらは降着駆動型中性子星の幾何構造に共通する特徴である可能性があり、サンプルを増やしたさらなる解析が期待される。また、IXPE をはじめとする X 線偏光観測による情報と併せることで、降着駆動型中性子星の幾何構造にさらなる制限をつけられると考えている。

また、我々は energetic なパルサー星雲の広帯域 X 線系統解析を NuSTAR データを用いて初めて行った。その結果、4 天体中 3 天体で X 線スペクトルに有意な折れ曲がりを見つけた [6]。この折れ曲がりには放射の空間構造を考えない場合には再現できず、起源の解明が必要である。また折れ曲がりの形状が中心パルサーの進化に伴って進化する兆候も見つけた。パルサー星雲が銀河宇宙線電子成分の主な起源と考えられており、今後理論面でもこのスペクトル形状を再現し宇宙線電子成分の加速に関する知見を広げていきたい。

#### 超新星残骸

超新星残骸は星が死ぬ際の大爆発であり、そのエネルギーは  $10^{51}$  erg にものぼる。爆発時には星が核融合で作っていた重元素をばらまき、また衝撃波で宇宙線を加速する。いわば超新星残骸は宇宙の多様性の源である。

超新星残骸衝撃波は、銀河宇宙線加速源の最も有力な候補であるものの、衝撃波からのエネルギー注