

研究終了報告書

「超精密偏光計測が可能にする新しいダークマター探索」

研究期間: 2020 年 11 月～2024 年 3 月

研究者: 道村唯太

1. 研究のねらい

本研究の目的は、一世紀近くの間物理学・天文学の最重要課題となっているダークマターの正体に迫ることである。これまで実験的な直接探索があまり行われてこなかった超軽量ダークマターに着目し、レーザー干渉計の偏光計測という新発想の手法でアクシオンと呼ばれる未発見粒子を探索する。これにより、光科学技術の新利用を切り拓くとともに、ダークマター探索の新局面を開拓することが本研究のねらいである。

2. 研究成果

(1) 概要

ボウタイ型の光リング共振器を利用したアクシオンダークマター探索を行い、アクシオン-光子結合定数に対する上限値の設定に成功した。世界最高精度には到達できなかったものの、磁場を使わない実験的探索としては世界初のものである。また、s 偏光と p 偏光を同時共振させることにより広帯域な高感度化を図る手法として、補助共振器を利用する手法や波長可変レーザーを利用する手法を提案するとともに、初実証に成功した。さらに、超軽量ダークマターの確率的なふるまいを考慮に入れたデータ解析手法を新たに開発した。

(2) 詳細

研究背景及び目的

ダークマターは 1930 年代にその存在を指摘され、現在では様々な宇宙観測によって、宇宙の全物質の約 80% はダークマターであることがわかっている。しかし、長年の大規模な観測や実験にもかかわらず、その正体については全くわかっていない。ダークマターの候補としては、超軽量粒子から原始ブラックホールまで、90 桁近くに及ぶ質量範囲の多様な候補が考えられている。この中でも特に有望視されてきたのは、通常の物質とわずかに相互作用する WIMP と呼ばれる重い粒子である。素粒子物理学からも存在が強く示唆されていたため、巨大ハドロン加速器 LHC や大規模な地下実験で巨額の予算と歳月をかけて探索されたが、検出の兆候は得られていない。近い将来、こうした手法は高感度化に限界を迎えると考えられており、現状打開のためにはより多様なダークマター候補を新しい発想で探索することが重要であると指摘されている。

そこで本研究では、近年高い注目を集めている超軽量ダークマターに着目し、レーザー干渉計技術を駆使した新発想の探索を行う。特に、アクシオンと呼ばれる未発見粒子に着目し、アクシオンと光子の相互作用で生まれる光の偏光面回転をボウタイ型の光リング共振器を利用して計測する。これにより、 10^{-12} eV 程度以下の低質量領域において、世界最高精度でアクシオンダークマター探索を行うことが目標であった。

研究計画

アクシオンと光子が相互作用すると、左円偏光と右円偏光の位相速度の差がアクシオンの質量 m_a に応じて周波数 $f = 2.4 \text{ Hz} \times (m_a/10^{-24} \text{ eV})$ で変化する。直線偏光はその偏光面が周波数 f で回転することになり、直交する偏光成分のサイドバンドが生じることになる。本実験では図 1 のように、光リング共振器を用いて偏光面回転を増幅して検出することでアクシオン探索を行う。光リング共振器を細長いボウタイ共振器にし、両端で 2 回反射させることで偏光面の反転を防ぎ、効率的な増幅を可能とする。レーザー光源(波長 1064 nm, 1 W)からの光を s 偏光として光リング共振器(周回長 1 m、フィネス 2×10^5)に入射する。その反射光を用いて、レーザー周波数を制御し、光共振器に共振させる。透過光の偏光を半波長板によりわずかに回転させ、アクシオンによって生じた p 偏光と s 偏光のビート信号を検出することで、アクシオン信号を得る。

光のショットノイズで決まる目標雑音レベルが達成されたら、3 ヶ月に渡る観測運転を行う。得られたデータを各周波数で復調することで各質量のアクシオン探索を行うことができ、復調振幅の大きさからアクシオン-光子相互作用係数 $g_{a\gamma}$ を測定することができる。導かれた相互作用係数が統計的不確かさや系統的な不確かさより有意にゼロからずれていた場合、アクシオンダークマターの発見となる。ずれていなかった場合は相互作用係数への上限值となる。3 ヶ月の観測により、 10^{-15} eV 程度以下の質量領域でアクシオン-光子相互作用係数に対し $3 \times 10^{-13} \text{ GeV}^{-1}$ という世界最高感度を得ることが可能となる。

以上を実現するため、偏光依存性の小さい高反射コーティングの開発、複屈折の非一様性が小さい精密偏光計測系の開発、相対変動の小さいモノリシック光学系の開発、環境雑音の低減と除去、の主に 4 つの研究項目を進めるのが当初の研究計画であった。

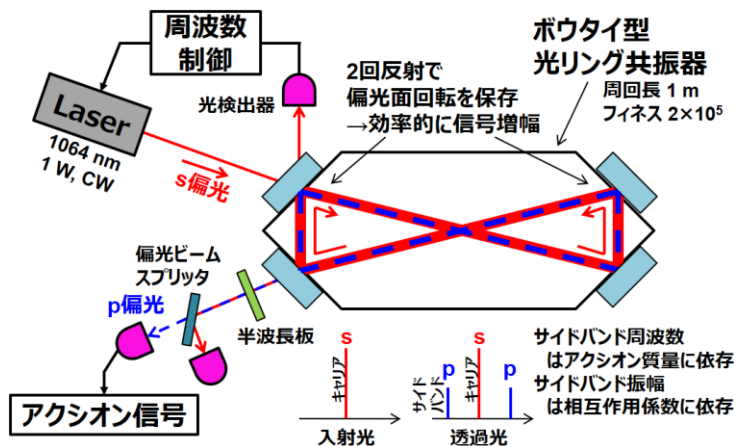


図 1: 実験セットアップの模式図。

研究実施体制

研究期間開始当初に所属していた東京大学大学院理学系研究科物理学専攻の安東研究室の実験室において装置開発を進めた。安東研究室の学生 2 名が主体的に実験を進め、2022 年度からは学生が 1 名加わった。学生の大島由佳氏には 2021 年 4 月まで単純労働者金を支払い、初のアクシオン探索とその解析を進めてもらった。学生の藤本拓希氏には、補助

共振器を用いた s 偏光と p 偏光の同時共振実現のための実験を進めてもらった。藤本氏はこの研究を報告した日本物理学会 2023 年春季大会において、学生優秀発表賞を受賞した。2022 年度より加わった学生の瀧寺陽太氏には、波長可変レーザーを用いた同時共振実現のための実験を進めてもらった。

また、東京大学宇宙線研究所、東京大学大学院理学系研究科附属ビッグバン宇宙国際センター、早稲田大学などの理論研究者らとともに、アクシオン場の確率的なふるまいを考慮に入れたデータ解析手法の新規開発を行った。

研究の進捗と成果

本研究期間の開始前から製作していたプロトタイプ装置を様々に改良し、2021 年 5 月に 12 日間に及ぶ初の観測運転を行った [Y. Oshima+, J. Phys. Conf. Ser. 2156, 012042 (2021)]。装置の改良では、鏡の交換による光共振器のフィネスの向上、入射光強度の向上、カバーの導入による光共振器制御の安定度の向上、鏡の固定ジグの改良による振動雑音の低減などを行った [Y. Oshima+, arXiv:2105.06252]。また、光リング共振器の透過光信号取得ポートに半波長板を導入し、s 偏光からわずかに p 偏光を作り出すことで、アクシオンによって生じる p 偏光をホモダイン測定する偏光測定光学系を開発した。偏光の分離には消光比の高いグランレーザープリズムを用いた。これらにより、感度を 1 桁程度向上することができた。さらに、長期観測に向けて、デジタルシグナルプロセッサを利用した光共振器の自動制御システムの導入を行った [H. Fujimoto+, arXiv:2105.08347]。

初の観測データからアクシオン信号を探索する解析を行った結果、有意なアクシオン信号は見つからず、アクシオン-光子結合定数に上限値をつけることに成功した [Y. Oshima+, Phys. Rev. D 108, 072005 (2023)]。得られた上限値は先行研究に比べ 7 桁以上悪いものであったが、磁場を利用しないアクシオンの実験的探索としては世界初のものであった(図 3)。

データ解析では、12 日間のデータのうち、最も安定だった最初の 24 時間分のデータを用いた。アクシオン信号がほぼ単一周波数に出ることに着目し、パワースペクトルを用いた解析を行った。アクシオン信号の周波数はアクシオンの質量によって決まるが、ダークマターには速度分布があるため、わずかな周波数シフトが存在する。この周波数シフトの範囲は中心周波数に対して 10^{-6} 程度であるため、まずはこの周波数区間で検出された信号と、推定した装置の雑音レベルの比を積分し、信号雑音比を計算した。次に、雑音がガウシアン雑音であると仮定し、信号雑音比の閾値を設定し、閾値を超えたものを信号候補とした。初期の解析では 551 個の候補が見つかったが、2 つの 24 時間データの両方に出て、かつ信号の線幅がダークマターモデルが予測する 10^{-6} 程度と一致する候補は 7 個のみであった。これら 7 個の信号は周波数制御の信号にも見つかったため、共振器長変動に起因するものと判断でき、全ての候補を veto することに成功した。ダークマター探索では疑似信号の除去が大きな課題であるが、周波数領域での解析を行い、ダークマター信号の特徴を利用した効率的な veto 手法を確立できたのも大きな成果である。また、光リング共振器を利用した手法が、疑似信号を発生させにくい手法であることも確認できた。

上限値の計算においては、超軽量ダークマターの確率的なふるまいを考慮に入れる必要が

ある。超軽量ダークマターは非常に軽いため、宇宙観測から得られたダークマター密度を説明するためには、粒子の数密度は非常に高い必要がある。さまざまな位相と速度を持った波が重なってダークマターの間を作っていることになるため、その重なり具合により、場の振幅や位相が確率的に変動する。ダークマターのド・ブROI波長程度の領域では場の振幅や位相が一定であると考えられるため、その領域をダークマターが通過する時間がコヒーレント時間となる。測定時間がコヒーレント時間より十分長い場合は場の平均振幅を使って信号の大きさを計算し、上限値を計算すれば良いが、コヒーレント時間と同等かそれより短い場合は、たまたま場の振幅が小さかった可能性を考え、上限値を緩く設定する必要がある。また、コヒーレント時間の間は連続波とみなせるため、測定時間 T に対して信号雑音比は $T^{1/2}$ で向上するが、測定時間が長くなるとコヒーレントではなくなるため、 $T^{1/4}$ でしか向上しなくなる。軽いダークマターを探索する本研究では、コヒーレント時間が長く、測定時間と同等以上になるが、こうした質量領域でのダークマター信号のふるまいを考慮に入れたデータ解析手法は確立されていなかった。そこで、宇宙論や重力波データ解析の専門家らと新しくデータ解析手法を開発した [H. Nakatsuka+, Phys. Rev. D 108, 092010 (2023)]。

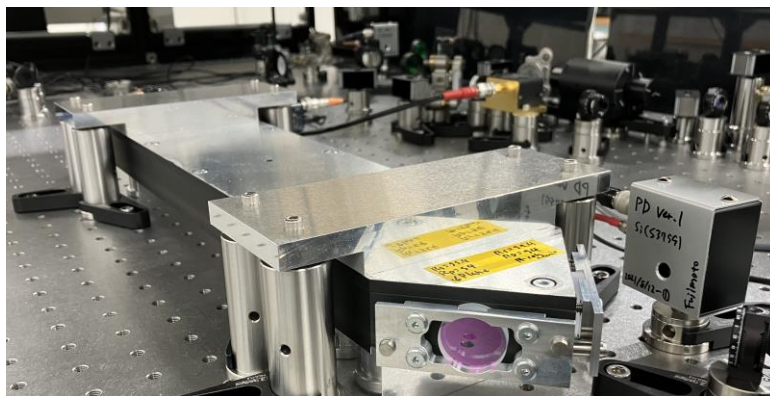


図 2: 本研究で製作した光リング共振器。

この初の観測運転時には、光リング共振器に s 偏光と p 偏光が同時共振しないという課題があった。広帯域な高感度実現のためには、アキシオンによって生じる p 偏光サイドバンドも光リング共振器に共振させ、増幅する必要がある。しかし、光リング共振器を構成する鏡への光の入射角 45 度に近く、反射時に s 偏光と p 偏光で反射位相差が生まれてしまい、共振周波数差が生じてしまう。当初は、こうした反射位相差の小さい高反射コーティングの開発を進める計画であったが、世界中の全ての重力波望遠鏡の鏡へコーティングを施しているフランスの LMA(先端材料研究所)やその他メーカーと検討や試作を進めた結果、コーティング成膜時の誤差があるため、十分小さな反射位相差を得ることはできないことが判明した。

そこで、当初の研究計画にはなかった、補助共振器を利用した同時共振の実現に向けた開発を進めた [H. Fujimoto+, J. Phys. Conf. Ser. 2182, 012042 (2021)]。主となるボウタイ型の光リング共振器に三角形の補助共振器を結合させ、その補助共振器の共振状態を制御することにより、 s 偏光と p 偏光の間の位相差を制御するというアイデアである。2021 年 11 月には同時

共振の初実証に成功し、光学系の改良や制御系の改良を進めた。特に、補助共振器での鏡の裏面反射やモードミスマッチに由来する光学的なロスが課題となった。補助共振器やメインの共振器での p 偏光のフィネスをあえて下げることにより、補助共振器での光学的ロスの増幅を避けるとともに、インピーダンスマッチを改善してアクシオン信号の透過率を向上させる工夫などを行った。また、補助共振器を追加したことにより、 s 偏光と p 偏光で光路が変わってしまうため、周波数雑音や振動雑音に対する同相雑音除去比が悪化してしまうという課題があった。補助共振器にとりつけたピエゾ鏡の改良による制御帯域の拡大や、光強度モニタや周波数モニタを利用した雑音の差し引きなどを進めた。これらの工夫により、2021 年 5 月の初観測時に比べ、約 2 桁の感度向上に成功した(図 3)。

本研究課題の目標に対する達成度

図 3 に示す通り、現在得られている最高感度は、当初目標としていた感度と比べると約 5 桁以上悪い。当初目標としていた、両偏光に対するフィネス 2×10^5 に比べると、現在のフィネスは s 偏光に対して 549(3)、 p 偏光に対して 37(2)となっている。また、当初目標の入射光強度は 1 W であったが、現状ではひとまず 20 mW 程度で実験を行っている。ショットノイズ限界に到達次第、入射光強度を増やす予定である。現状の雑音レベルは振動雑音によって制限されており、高感度化には振動雑音の低減と、フィネス向上が必要となる。

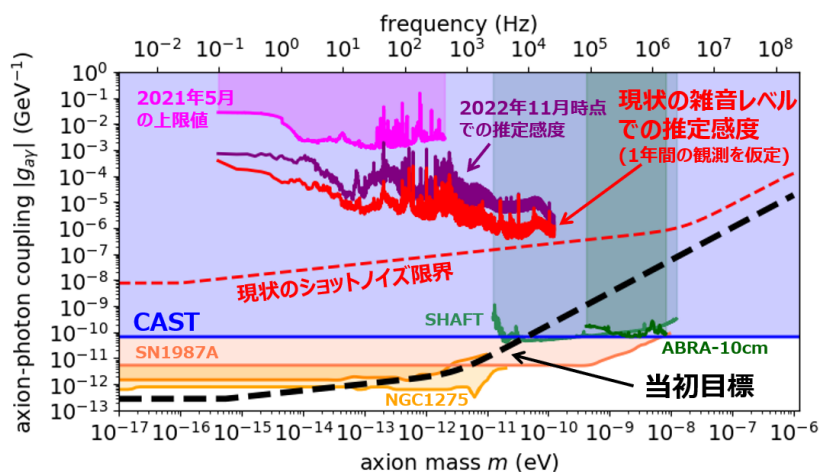


図 3: 本研究で得られたアクシオン-光子結合定数への上限值(ピンク線)、現状の雑音レベルでの推定感度(赤線)と当初目標であった到達感度(黒破線)。

当初計画では想定されていなかった展開やそれによる成果

補助共振器を利用した s 偏光と p 偏光の同時共振の実証は、当初計画にはなかった成果である。一方で、光学的ロスにより両偏光ともに高フィネスを実現することが難しいことや、 s 偏光と p 偏光で別光路になってしまうために同相雑音除去比が悪化してしまい、振動雑音の低減が難しいことがわかった。

そこで、さらに新しい展開として、波長可変レーザーを利用した同時共振の実現を新提案し、その実現に向けた開発を進めた。光学メーカーとの鏡の高反射コーティングの開発の中で、成

膜の誤差から、偏光間の反射位相差を狙った波長でゼロにすることが難しいことがわかったが、レーザー波長を調整すれば、それが可能となる。外部共振器型半導体レーザーを製作し、波長を変えながらボウタイ型光リング共振器で用いる鏡の反射位相差を測定したところ、1067 nm 付近で反射位相差がゼロになることがわかった。光源の波長範囲の中に同時共振可能な波長があることがわかり、同時共振の実現が可能であることがわかった。振動雑音の低減とフィネスの向上により、大幅な感度向上が図れると期待している。

また派生的な展開として、レーザー干渉計型重力波検出器の基線長の長い光共振器の透過光を利用することで、アクション探索を行う新手法を提案した [K. Nagano+, Phys. Rev. D 104, 062008 (2021)]。本研究ではボウタイ型光リング共振器の透過光を利用するため、低周波数帯で広帯域な探索が可能となるが、重力波検出器では線形光共振器を利用するため、光共振器の往復で偏光面が反転してしまい、特定の周波数帯にしか感度を持たない。アクションの振動周期の奇数倍が光の往復時間と一致する場合に高感度となる。透過光の偏光測定光学系としては、本研究で開発した、半波長板とグランレーザープリズムを用いたホモダイン測定を利用することが可能であり、この提案に至った。

さらに、鏡の複屈折変動がアクション探索にとっての雑音になることから派生して、重力波検出器において、鏡の複屈折変動が重力波検出にとっての雑音になるメカニズムを明らかにし、その影響を定量的に見積もった [Y. Michimura+, Phys. Rev. D 109, 022009 (2024); Editor's Suggestion]。将来の重力波検出器では、熱雑音の低減のために結晶性の鏡を利用することが検討されている。これまでは結晶の複屈折の大きさに着目した研究しか行われてこなかったが、その時間変動も十分小さく抑える必要があることを初めて指摘し、将来の重力波検出器計画実現のための要求値をまとめた。本研究でのアクション探索のための雑音解析や測定が、重力波検出器開発にも貢献したと言える。

3. 今後の展開

今後は波長可変レーザーを用いた装置開発を中心に進めていく予定である。研究期間内には、波長可変レーザーを利用した同時共振の実現と、それによる観測データの初取得を見込んでいく。その後は光アンプの導入による高強度化や、真空槽への導入、防振装置の導入などを進め、さらなる高感度化を図る。同時共振による広帯域な探索と、あえて s 偏光と p 偏光の共振周波数差を調整することで狭帯域な探索を組み合わせることで、低質量帯だけでなく、高質量帯でも世界最高感度をねらうことができる。本研究では周回長 1 m の光リング共振器を用いたが、周回長 10 m 級の大型化も可能であり、将来性のある装置であると考えている。

また、カリフォルニア工科大学の Zurek 教授らと、フォノンを利用した高感度化の議論を進めている。本研究で用いている光リング共振器では低周波数帯だけでなく、アクションの振動周期の整数倍が光の往復時間と一致した場合にも高感度となるが、光共振器内にフォノンを励起すると、キャリア周波数からシフトした光を作ることができ、高感度となる周波数をシフトすることが可能となる。フォノンの周波数を変化させることで、高周波数帯で様々な周波数での高感度探索が可能となる。フォノンの振幅を上げることが重要となるため、用いる材質の検討や雑音計算などを進めている。

さらに、カリフォルニア工科大学の 40 m 干渉計を利用したアクション探索の実証実験を進める。

40 m 干渉計は LIGO のプロトタイプ機であり、これを用いて実証することにより、LIGO 本体に偏光測定光学系を導入する可能性を高めることができると考えている。現在、40 m 干渉計では、2025 年から開始される LIGO のアップグレードで導入予定のバランス型ホモダイン測定の実証実験を行っている。本研究により、このセットアップはアクシオン探索にとっても好都合なことがわかり、現在、アクシオン探索のための偏光測定光学系の導入を進めている。LIGO は重力波探索に特化しているため、光学系の制約から、アクシオン探索と重力波探索を同時に行えるようにするには多数の光学系の新規導入が必要となるが、一時的にアクシオン探索モードにするだけであれば、半波長板の導入だけで可能となる。LIGO や次世代の大型計画の有効活用につながると考えている。

4. 自己評価

当初の達成目標であった世界最高感度でのアクシオンダークマター探索はできなかったものの、自らが提案した全く新しい手法での初探索ができ、上限値を設定することができた。磁場を用いない初の実験的探索は注目を受け、招待講演やセミナーの機会を複数いただくとともに、一般向け科学雑誌などでも紹介していただいた。研究を進めた学生も、日本物理学会学生優秀発表賞を受賞することができた。また、s 偏光と p 偏光を同時共振させることにより広帯域な高感度化を図る手法として、補助共振器を利用する手法や波長可変レーザーを利用する手法を提案するとともに、初実証することができ、当初計画では想定されていなかった成果を得ることができた。超軽量ダークマターの確率的なふるまいを考慮に入れたデータ解析手法を開発するなど、理論面でも大きな進展があった。さらに、本研究で開発した光技術を応用し、フォノンを利用した高感度化やレーザー干渉計型重力波望遠鏡を利用したアクシオン探索など、新たな展開を得ることもできた。

以上より、本研究で一定の成果が挙げられたと自負している。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数：9 件

- | |
|---|
| 1. Koji Nagano, Hiromasa Nakatsuka, Soichiro Morisaki, Tomohiro Fujita, Yuta Michimura, Ippei Obata, "Axion dark matter search using arm cavity transmitted beams of gravitational wave detectors," Phys. Rev. D 104, 062008 (2021) |
| 2. Yuka Oshima, Hiroki Fujimoto, Jun'ya Kume, Soichiro Morisaki, Koji Nagano, Tomohiro Fujita, Ippei Obata, Atsushi Nishizawa, Yuta Michimura, Masaki Ando, "First results of axion dark matter search with DANCE," Phys. Rev. D 108, 072005 (2023) |
| 3. Hiromasa Nakatsuka, Soichiro Morisaki, Tomohiro Fujita, Jun'ya Kume, Yuta Michimura, Koji Nagano, Ippei Obata, "Stochastic effects on observation of ultralight bosonic dark matter," Phys. Rev. D 108, 092010 (2023) |

4. Yuta Michimura, Haoyu Wang, Francisco Salces-Carcoba, Christopher Wipf, Aidan Brooks, Koji Arai, Rana X. Adhikari, "Effects of mirror birefringence and its fluctuations to laser interferometric gravitational wave detectors," Phys. Rev. D 109, 022009 (2024)

(2) 特許出願

研究期間全出願件数: 0 件(特許公開前のものも含む)

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

【招待講演】

Yuta Michimura, "Ultralight axion dark matter search with DANCE," International workshop on "Double Beta Decay and Underground Science", Hilton Waikoloa Village, Hawaii, December 2023

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、オンライン、2022年2月

【国際学会】

Yuta Michimura, "Noise from mirror birefringence fluctuations," LIGO-Virgo-KAGRA collaboration meeting September 2023, Toyama International Conference Center, Japan, September 2023

Yuta Michimura, "Ultralight dark matter searches with laser interferometry," 15th Edoardo Amaldi Conference on Gravitational Waves, Online, July 2023

Yuta Michimura, "Vector and Axion Dark Matter Searches with KAGRA," LIGO-Virgo-KAGRA Collaboration Meeting September 2021, Online, September 2021

Yuta Michimura, "Ultralight dark matter searches with KAGRA gravitational wave telescope," 17th International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics, Online, September 2021

Yuta Michimura, "Searching for ultralight vector dark matter with the cryogenic gravitational wave telescope KAGRA," Sixteenth Marcel Grossmann Meeting, Online, July 2021

Yuta Michimura, "Searching for Signals from Ultralight Vector Dark Matter with KAGRA," The 8th KAGRA International Workshop, Online, July 2021

【セミナー等での招待講演】

Yuta Michimura, "Ultralight dark matter searches with laser interferometry," Copernicus Webinar and Colloquium Series, April 2023

Yuta Michimura, "DANCE: Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment," ASU Cosmology Seminar, March 2022

Yuta Michimura, "DANCE: Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment," CENPA Seminar, November 2021

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

【著作物】

道村唯太、「レーザー干渉計で探るダークマターの波」、『科学 2023 年 10 月号』（岩波書店、2023 年 9 月）

道村唯太、「レーザー干渉計で探るダークマター」、『高エネルギーニュース 第 41 巻 3 号』（2022 年 11 月）

道村唯太(監修)、「ダークマター探索に新展開」、『Newton 2022 年 12 月号』（ニュートンプレス、2022 年 10 月）

【報道】

日本経済新聞「宇宙の暗黒物質を探せ 素粒子実験が難航、研究広がる」、2022 年 3 月 19 日