

超精密偏光計測が可能にする 新しいダークマター探索

道村唯太

カリフォルニア工科大学 LIGO研究所

yuta@caltech.edu

東京大学 ビッグバン宇宙国際研究センター

michimura@phys.s.u-tokyo.ac.jp

(※2022年4月に異動しました)

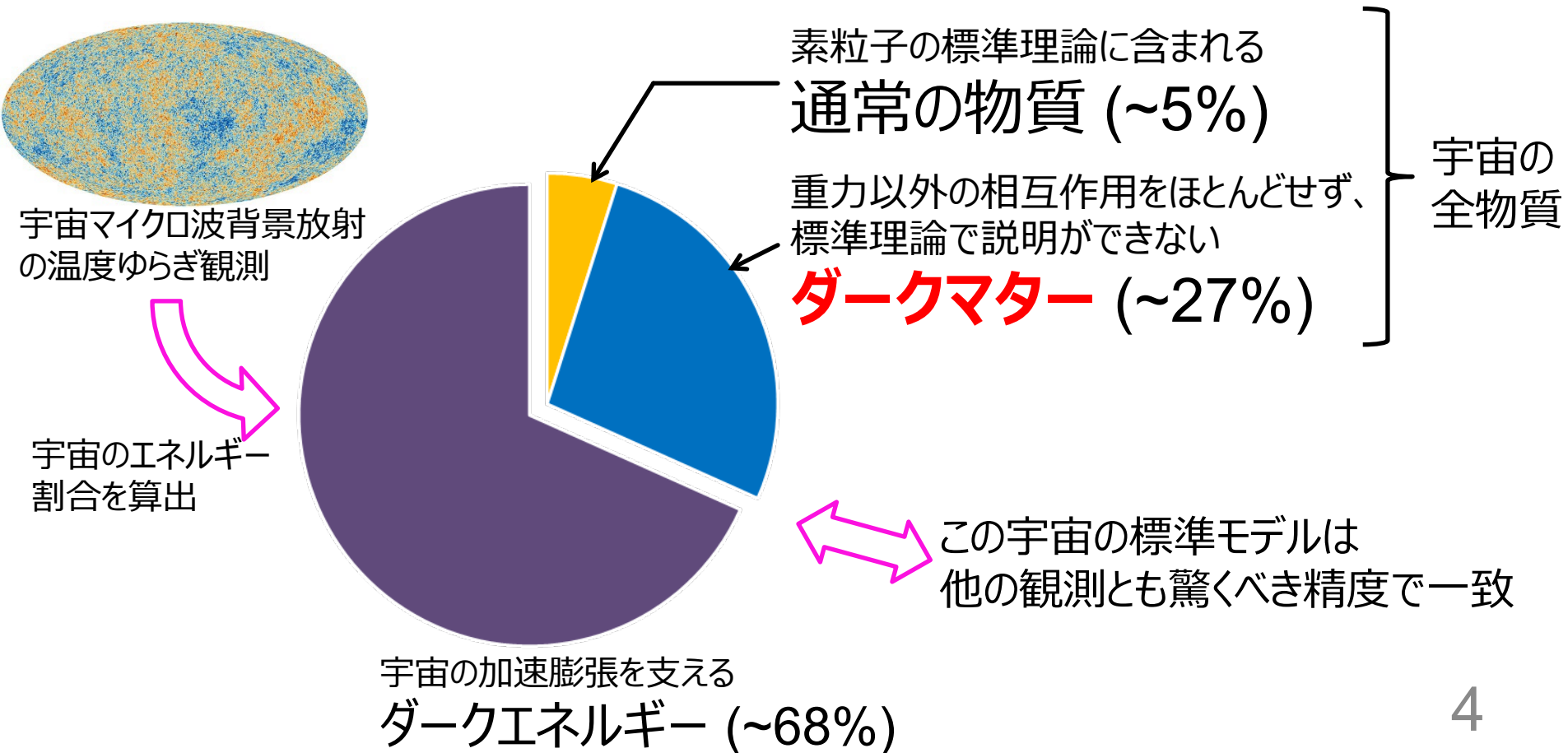
さきがけ研究の成果まとめ

- 当初目標の「世界最高精度」は達成できず
- 光リング共振器による世界初のアクシオンダークマター探索を実施
 - 磁場を用いない初の実験的探索
 - データ解析手法の新規開発

Y. Oshima+, [PRD 108, 072005 \(2023\)](#)
H. Nakatsuka+, [PRD 108, 092010 \(2023\)](#)
- s偏光とp偏光の同時共振により広帯域な高感度化を図る2つの手法を実証
 - 補助共振器
 - 波長可変レーザー
- 本実験の原理実証と高感度化に向けた基礎開発ができた

背景: ダークマターの謎

- 1930年代に銀河の回転速度の観測から存在指摘
- 現代では全物質の約80%を占めることが明らかに
- 依然として正体は不明



背景: ダークマター探索

- 長年の間**WIMP**に探索が集中するも**未発見**
 近い将来、太陽・大気ニュートリノのバックグラウンドで検出限界に
- より網羅的な、**新発想の探索**が求められている

ダークマターの質量 (GeV)

太陽質量
($1.1e57$ GeV)



波長が矮小銀河のサイズを超えるので排除



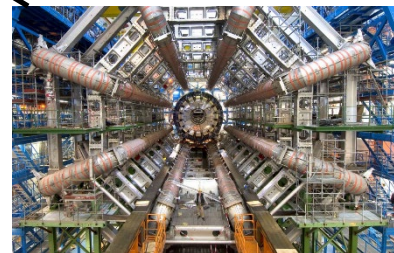
重力マイクロレンズやCMB観測から排除



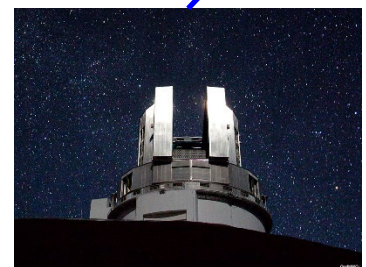
本研究でレーザー干渉計による初探索



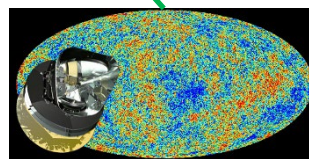
XENON1Tなど地下実験



LHC 巨大ハドロン加速器



すばる望遠鏡など



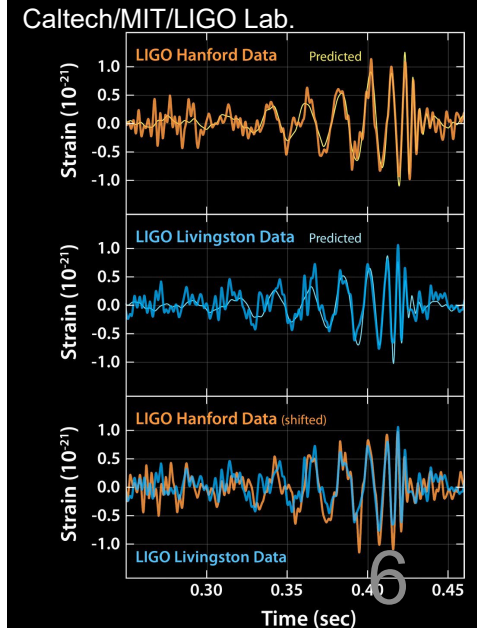
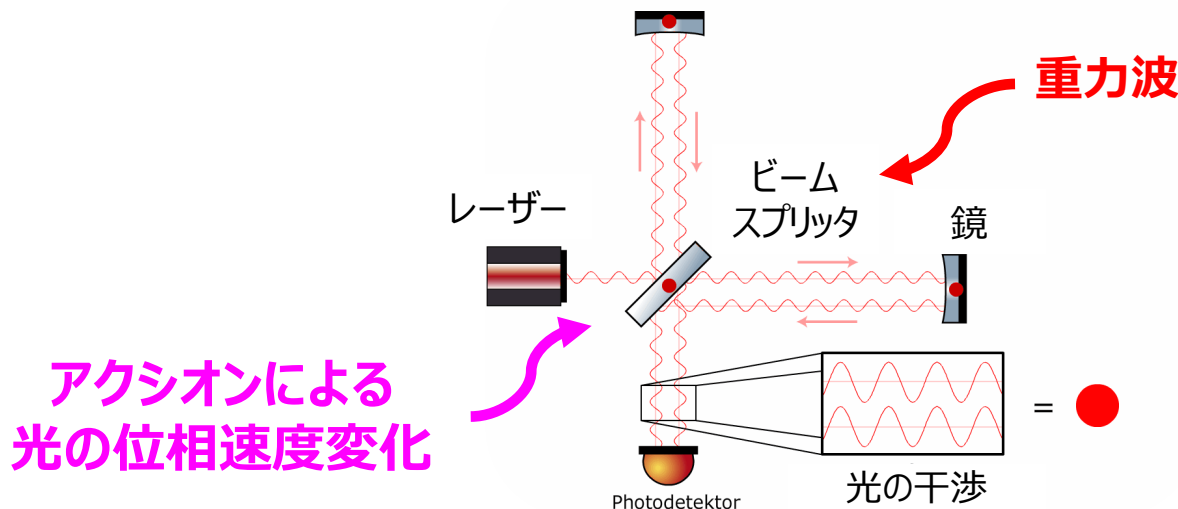
宇宙マイクロ波背景放射観測

レーザー干渉計による探索

- 超軽量ダークマターは宇宙論から高い注目
- 古典的な波としてふるまう

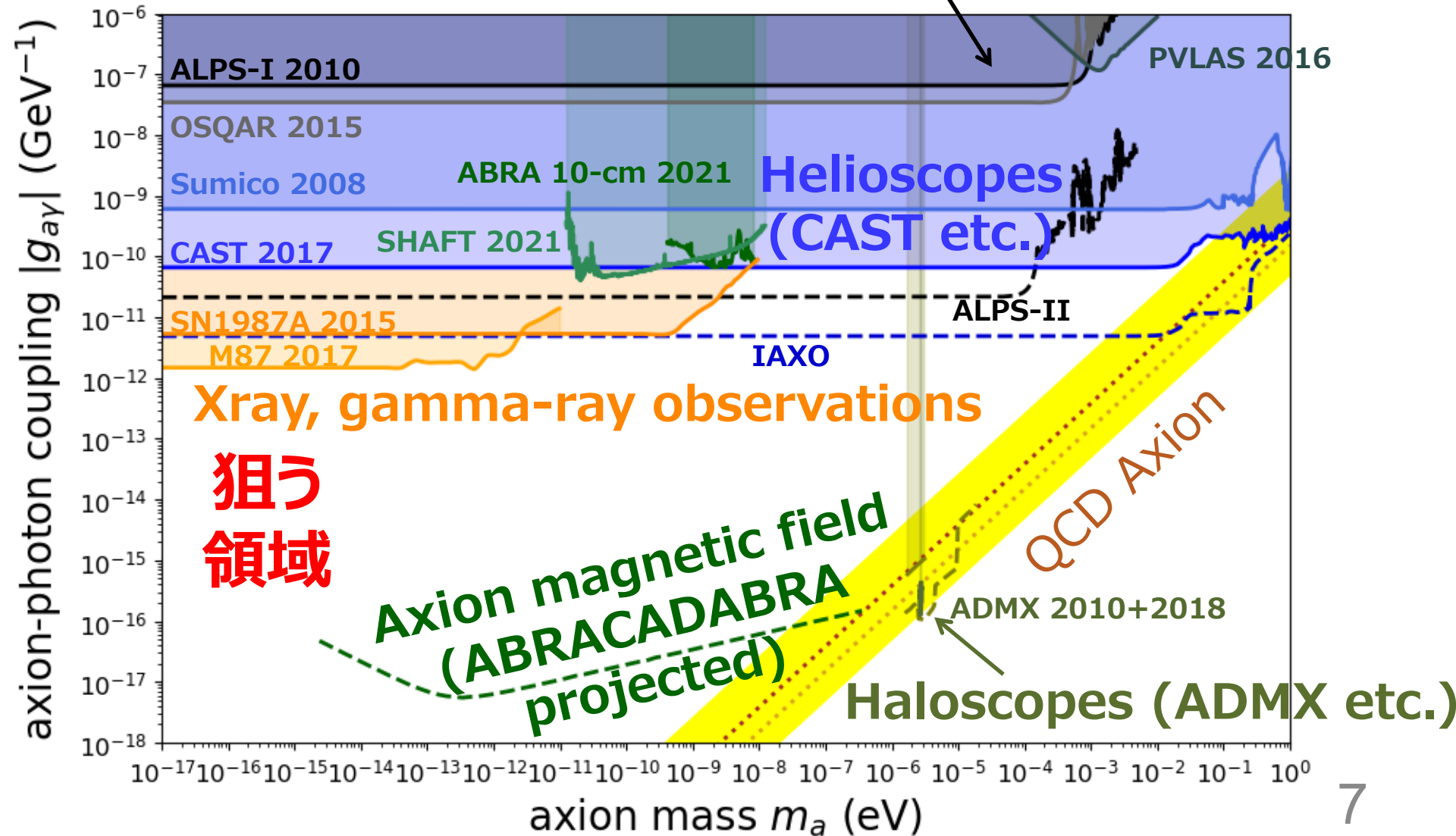
$$f = 242 \text{ Hz} \left(\frac{m_{\text{DM}}}{10^{-12} \text{ eV}} \right)$$

- レーザー干渉計は
周期的な変化に高い感度を持つ
- 特に未発見粒子のアクシオンに注目



アクシオン探索の現在の上限値

Light Shining through Wall (ALPS etc.)



アクシオンによる光の偏光回転

- 相互作用により右円偏光と左円偏光に**速度差**

$$c_{L/R} = c_0 \sqrt{1 \pm \frac{g_{a\gamma} a_0 m_a}{k} \sin(\omega_a t + \delta_\tau)}$$

相互作用係数

光の波数

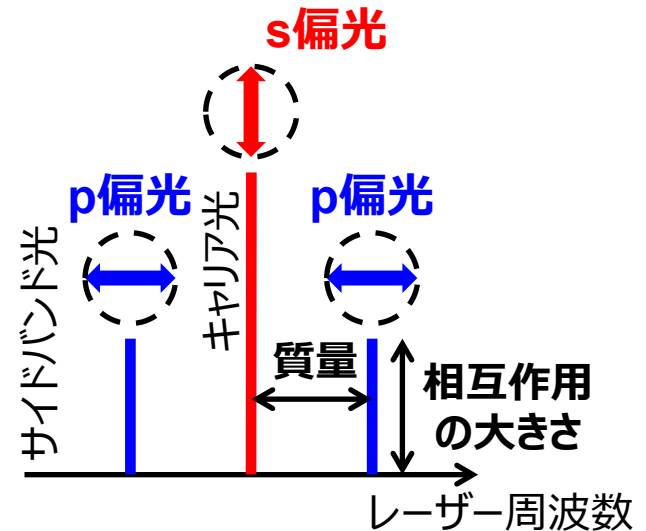
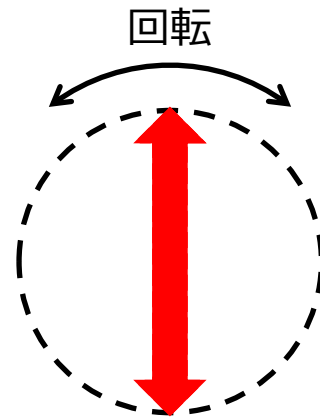
光の波数
 アクション場
 の振幅

アクション
 質量

アクション質量に
 対応した周波数

- 直線偏光の偏光面が**周期的に回転**

s偏光の場合、
 p偏光成分が
 生じる



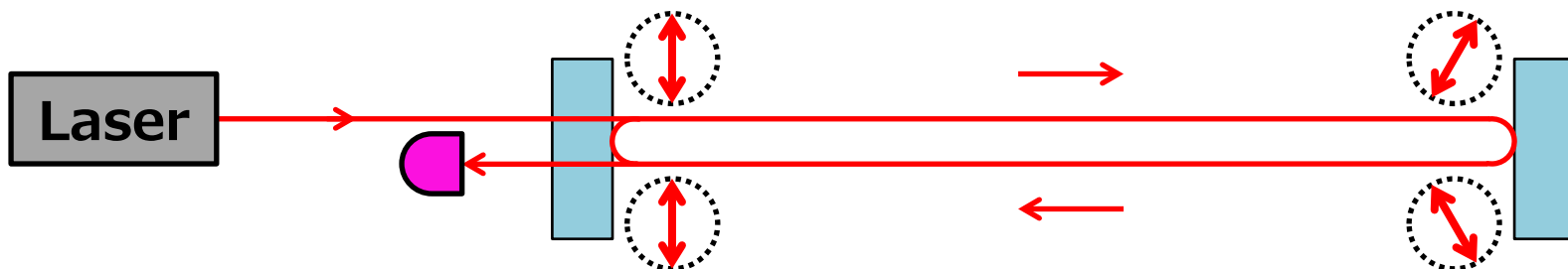
- 回転の周期からアクションの質量
 振幅から相互作用の大きさ がわかる

光共振器を用いた信号増幅

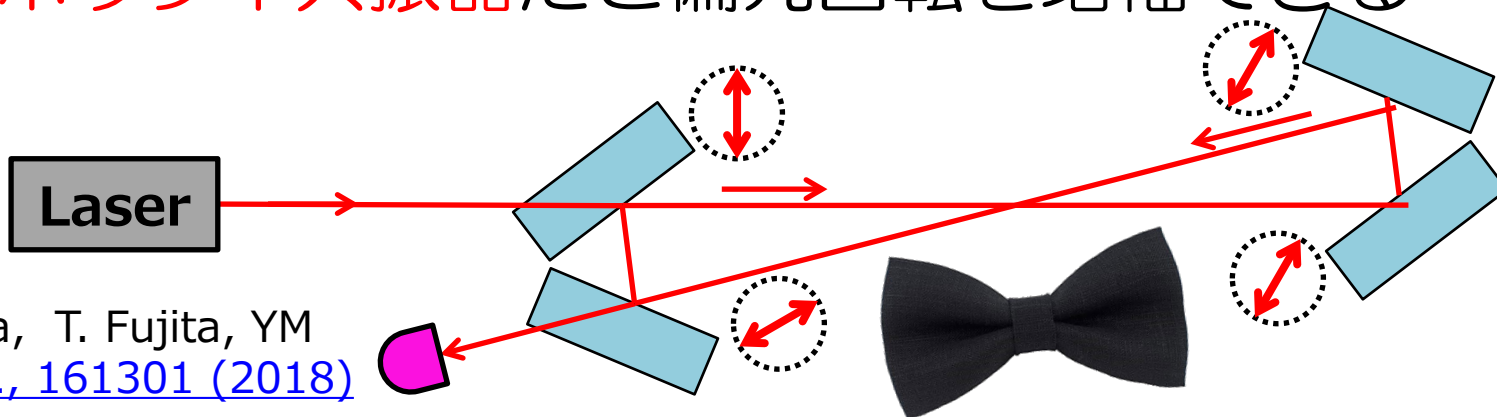
- 短い距離では偏光の回転角が小さい



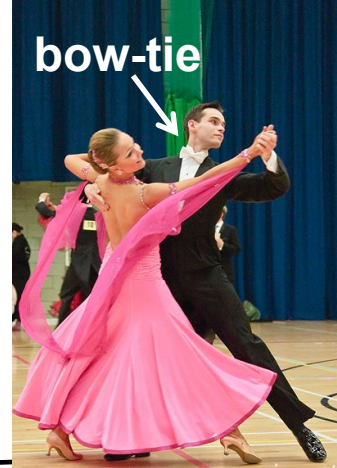
- 光共振器で距離を増幅することはできるが、鏡の反射で偏光が**反転**してしまう



- **ボウタイ共振器**だと偏光回転を増幅できる

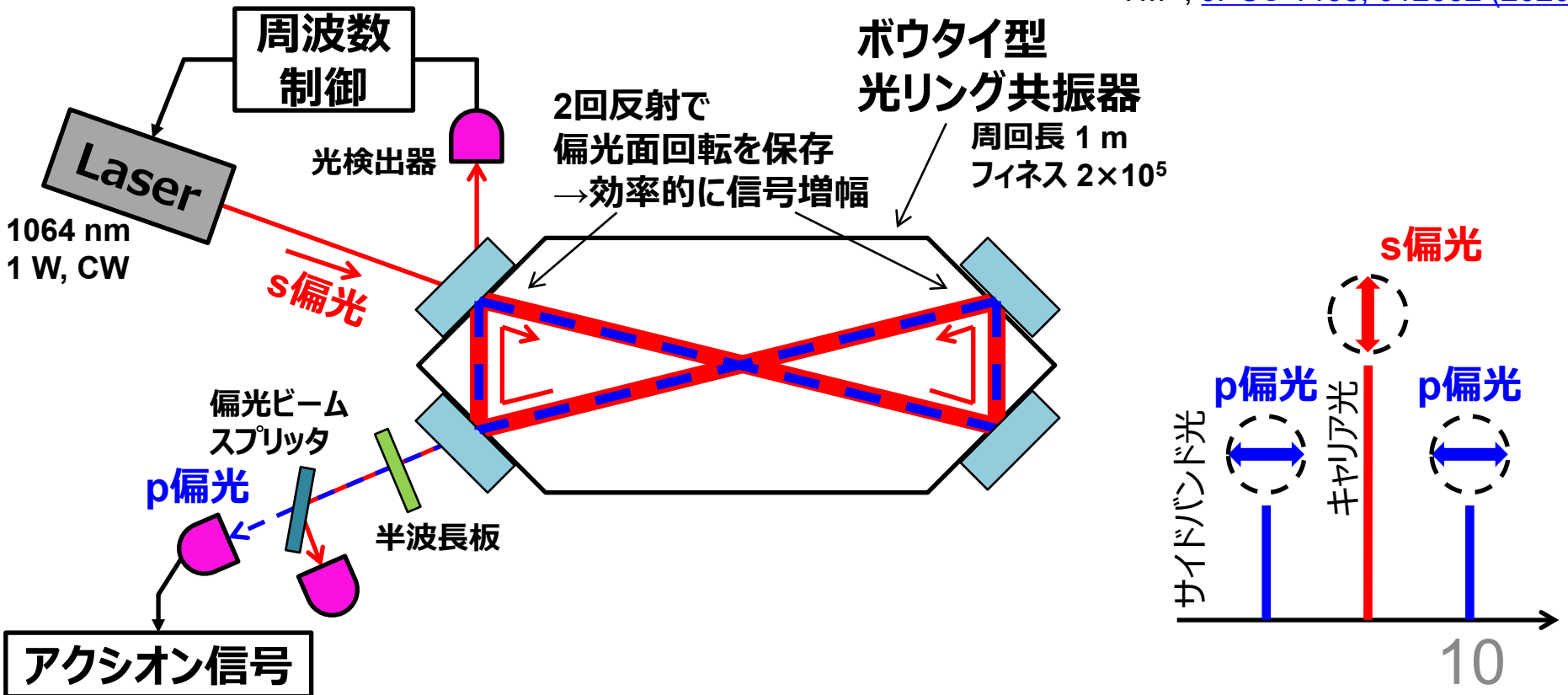


DANCEのセットアップ



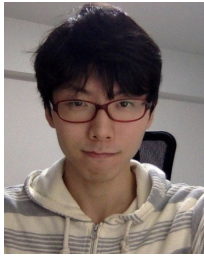
- Dark matter Axion search
with riNg Cavity Experiment
- さきがけで世界最高精度での探索を目指す

YM+, [JPCS 1468, 012032 \(2020\)](https://doi.org/10.1063/1.513848)

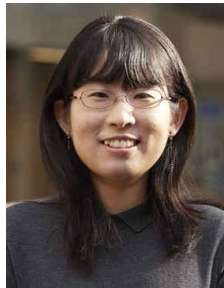
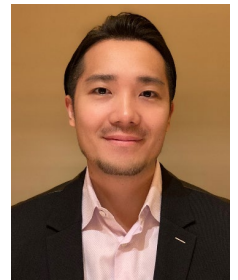


研究実施体制

- 実験装置は東京大学本郷キャンパス地下で開発
- 理論計算・データ解析に東京大学ビッグバンセンター、宇宙線研究所、早稲田大学などが参画



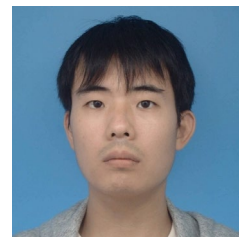
Caltech



JAXA

WIAS

KAVLI
IPMU

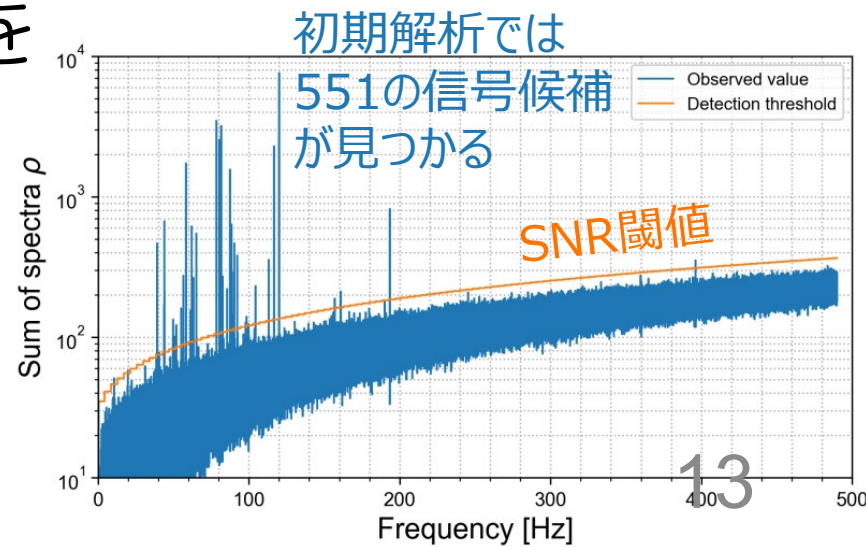
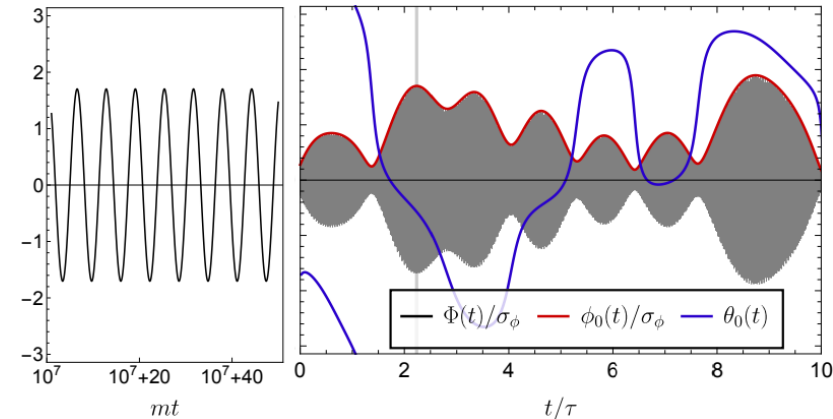


研究の進捗と成果

- 2020年11月 さきがけ開始 (初号機の改良開始)
- 2021年5月に初の観測運転を実施
 - 装置開発: Y. Oshima+, [arXiv:2105.06252](https://arxiv.org/abs/2105.06252)
H. Fujimoto+, [arXiv:2105.08347](https://arxiv.org/abs/2105.08347)
Y. Oshima+, [JPCS 2156, 012042 \(2021\)](https://doi.org/10.1143/JPCS.2156.012042)
 - 解析手法の開発: H. Nakatsuka+, [PRD 108, 092010 \(2023\)](https://doi.org/10.1103/PRD.108.092010)
 - 解析結果: Y. Oshima+, [PRD 108, 072005 \(2023\)](https://doi.org/10.1103/PRD.108.072005)
- 2021年11月に補助共振器による同時共振に成功
 - H. Fujimoto+, [JPCS 2156, 012182 \(2021\)](https://doi.org/10.1143/JPCS.2156.012182)
藤本拓希、東京大学修士論文 (2022)
- 2023年9月に波長可変レーザーによって同時共振が可能なレーザー波長を確認
 - 瀧寺陽太、東京大学修士論文 (2024)

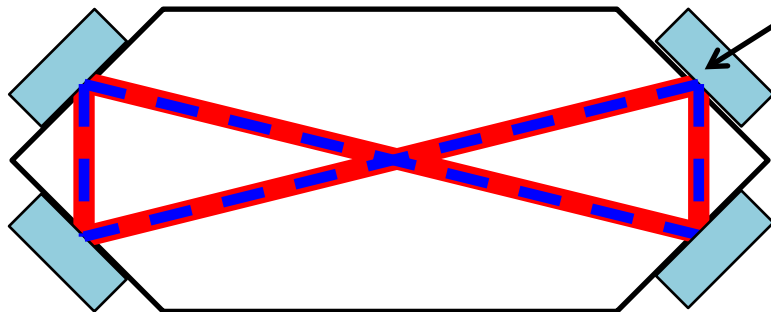
データ解析手法の新規開発

- 時系列データから超軽量ダークマター信号を探索する解析手法が確立されていなかった
- 特に、観測時間がコヒーレンス時間と同程度以下になる低質量領域ではたまたま信号が小さくて検出されない可能性がある
- こうした確率的ふるまいを考慮に入れた上限値計算手法を確立
- また、veto手法も確立し、全擬似信号の除去に成功



想定外と新たな展開

- 当初計画では、まずは偏光依存性の小さい光学素子の開発を光学メーカー等と進める予定であった
- 偏光間の反射位相差が想定より大きいこと、小さくすることが難しいことが判明
- 光学系の工夫で同時共振を実現する開発
 - 補助共振器
 - 波長可変レーザー

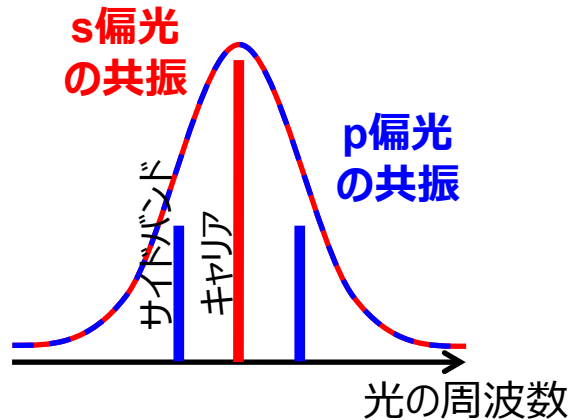


有限の入射角があるため、鏡の反射時に
s偏光とp偏光に位相差が生じる
→共振周波数差になる

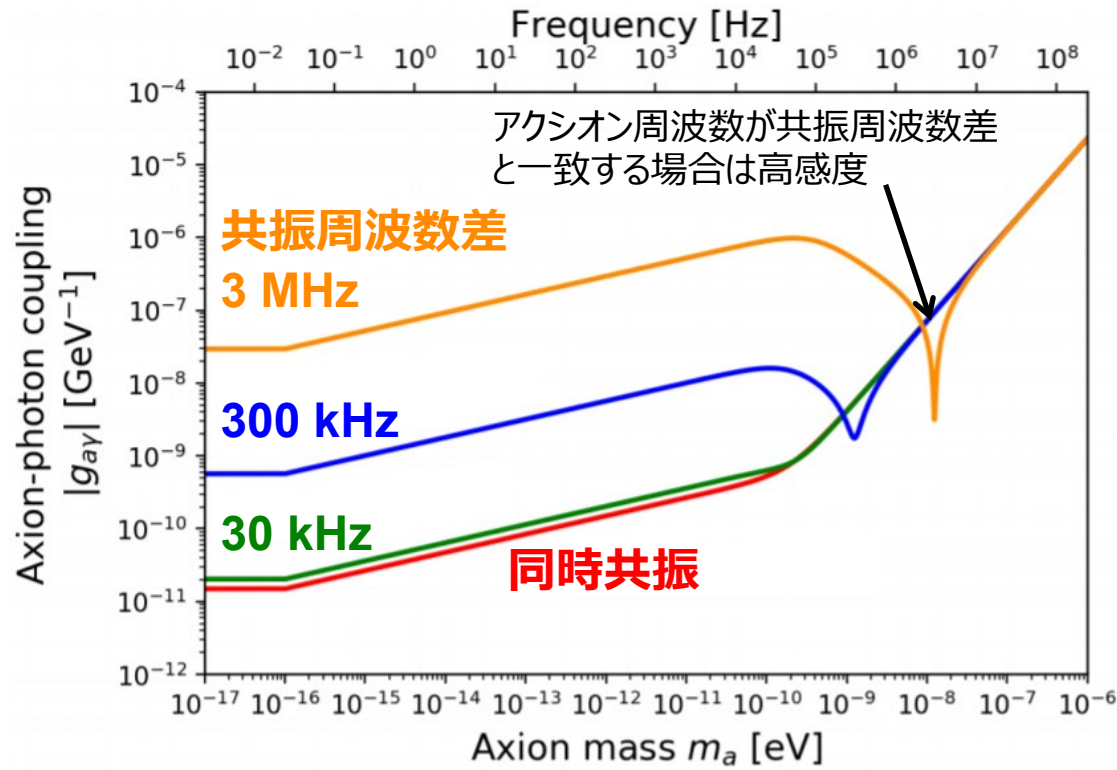
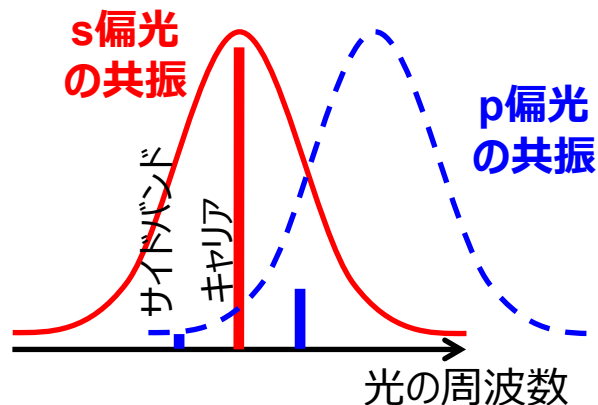
s偏光とp偏光の同時共振

- キャリアの偏光と、アクシオンにより生じるサイドバンドの偏光を同時に増幅する必要がある

同時共振する場合



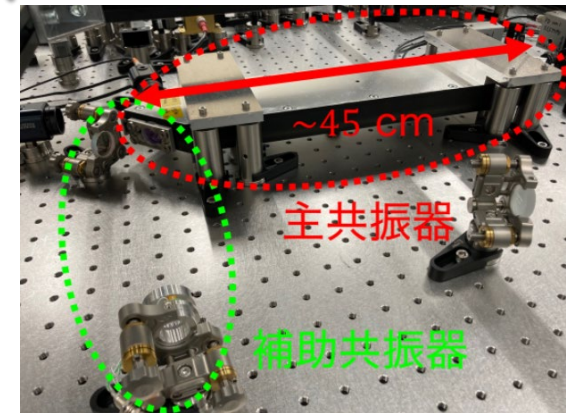
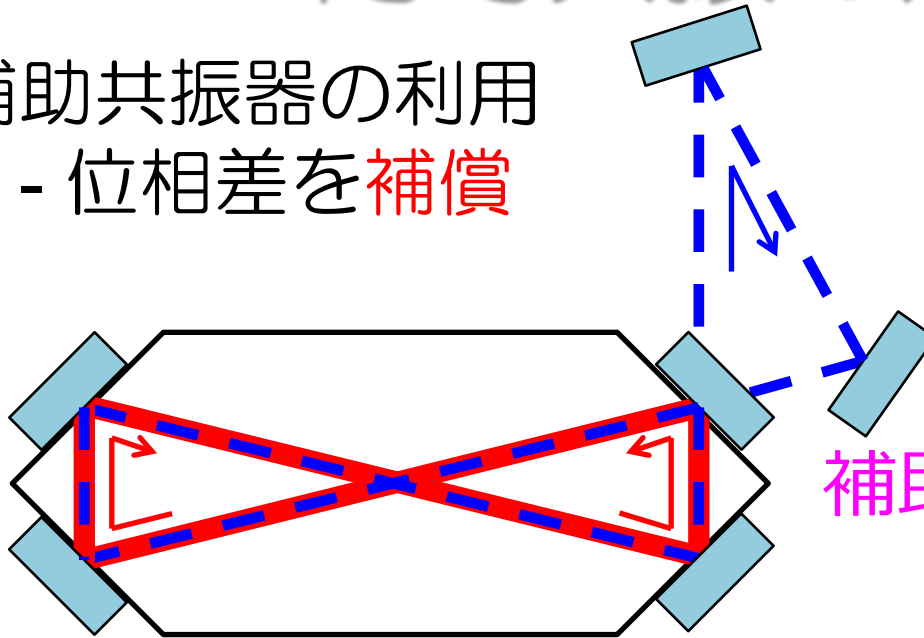
同時共振しない場合



Plot by Y. Oshima & H. Fujimoto

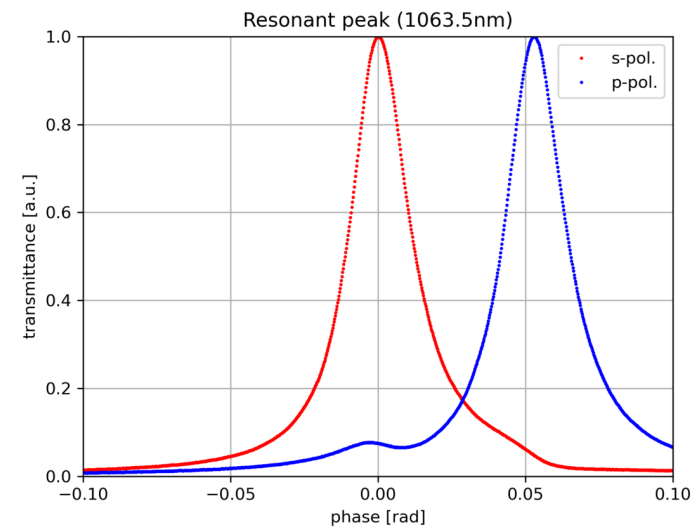
同時共振の方法

- 補助共振器の利用
 - 位相差を補償



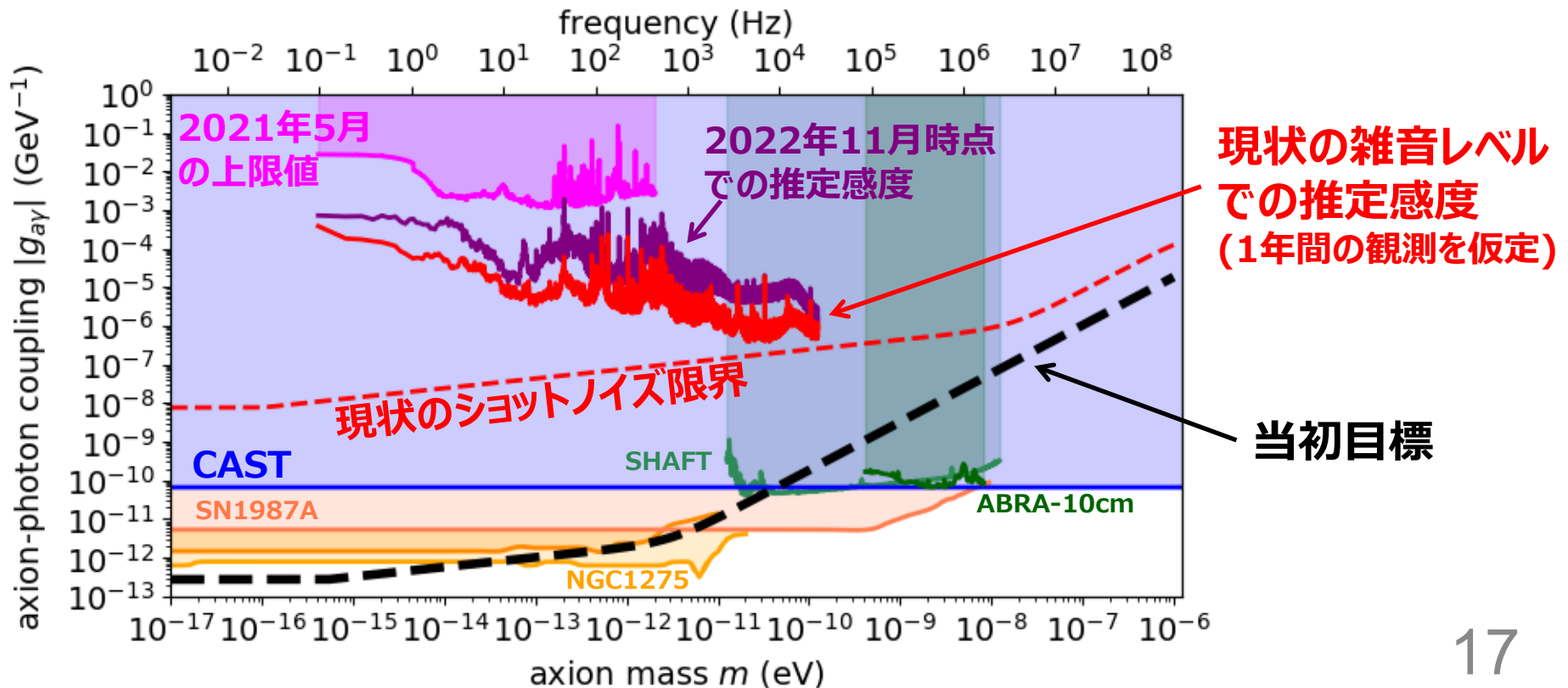
補助共振器

- 波長可変レーザーの利用
 - 位相差の波長依存性を利用
 - 高フィネス化と振動雑音低減に期待



当初目標に対する達成感度

- 感度は着実に上げられたものの、当初目標に比べ約5桁以上悪い
- 補助共振器手法では高フィネス化と振動雑音低減が難しく、波長可変レーザーの開発に移行



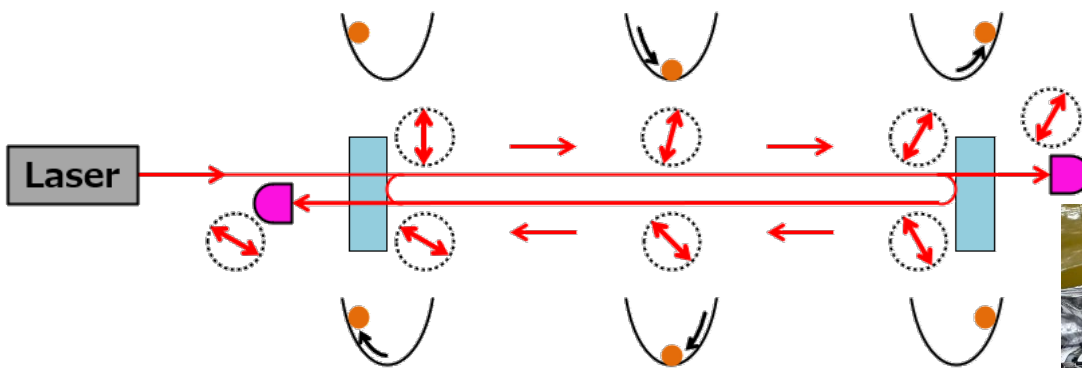
当初目標に対する達成パラメータ

- 同時共振と高フィネスの両立が課題
- 波長可変レーザーで**目標達成が可能な見込み**

	2021年5月	現状 (2023年3月)	さきがけ目標
共振器の周回長	1 m	1 m (+0.5 m 補助共振器)	1 m
入射光強度	242(12) mW (光源: 0.5 W)	21.4(9) mW (光源: 2 W)	1 W
フィネス (キャリア)	$2.85(5) \times 10^3$ s偏光	549(3) s偏光、制御時	2×10^5
フィネス (サイドバンド)	195(3) p偏光	36.8(2) p偏光、制御時	2×10^5
s偏光とp偏光の 共振周波数差	2.52(2) MHz	制御で~0 Hz (もともとは ~92 MHz)	0 Hz

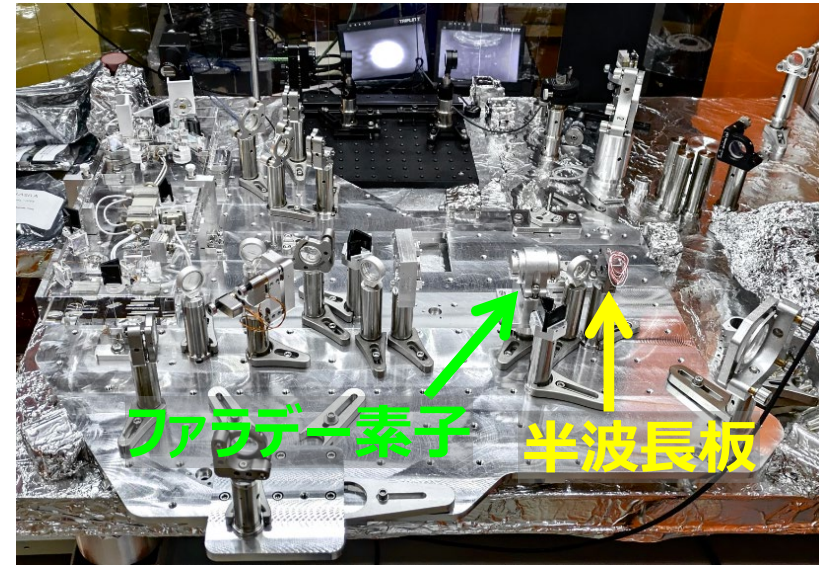
その他の新たな展開 1

- 重力波検出器の腕共振器透過光を用いる提案



K. Nagano+,
[PRD 104, 062008 \(2021\)](#)

- Caltech 40 m 干渉計を利用した探索の実証
 - 重力波との共存
 - 真空槽内での動作/校正

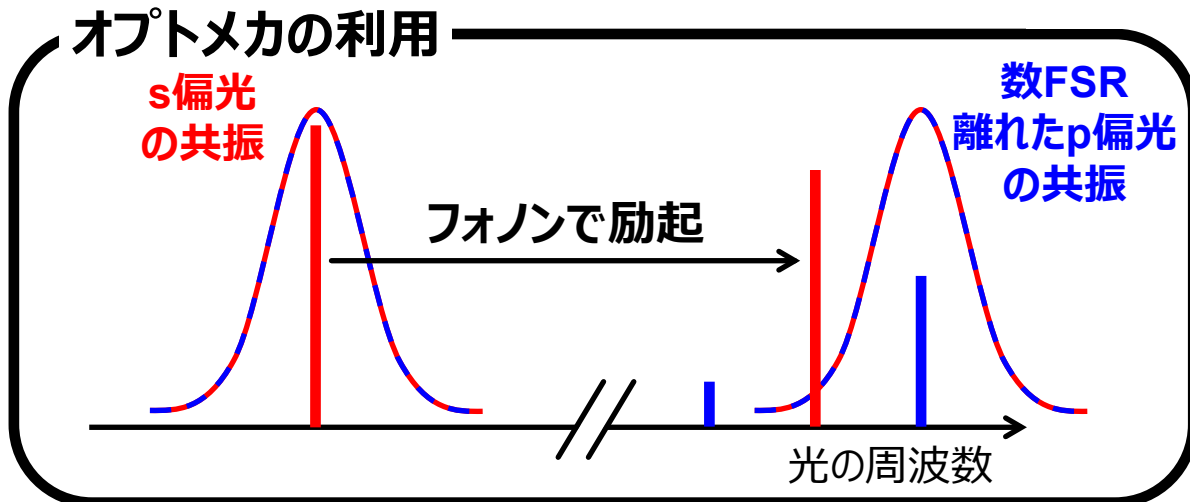
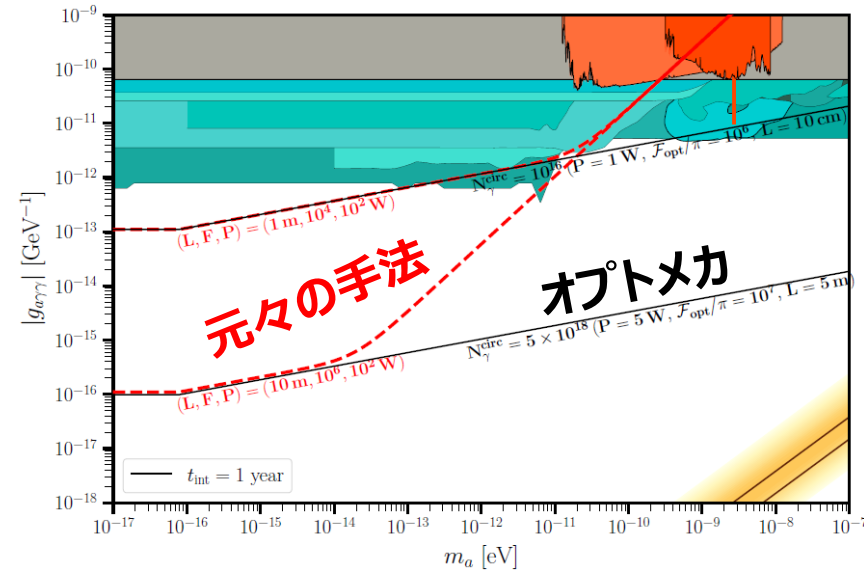
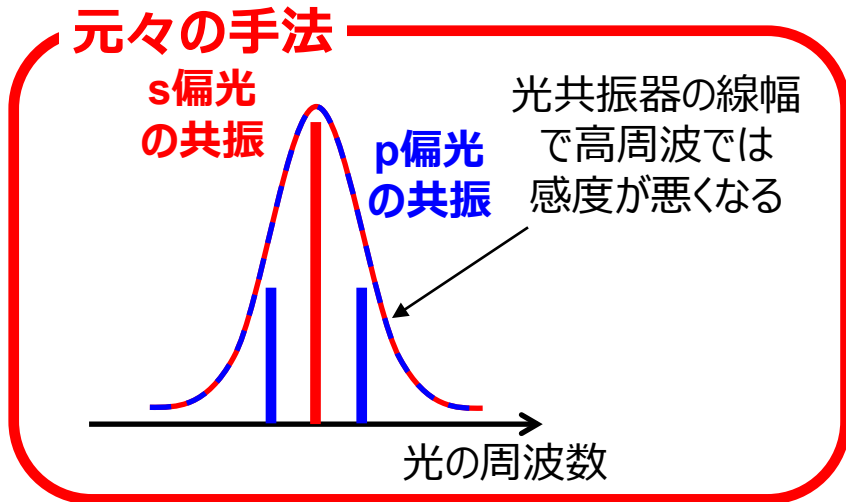


- 重力波検出器における鏡の複屈折雑音の評価
 - アクシオンへの雑音評価からの派生

Y. Michimura+, [arXiv:2308.00150](#)
(to appear in PRD)

その他の新たな展開 2

- オプトメカを利用することで高周波の感度向上
 C. Murgui, Y. Wang, K. M. Zurek, [arXiv:2211.08432](https://arxiv.org/abs/2211.08432)



Caltech
Yale

科学技術や社会への波及効果

- 新たな光技術の開拓

- 光共振器を用いた**複屈折**の高感度測定手法
- **高出力光の偏光**測定手法 ($\sim 10^{-7}$ rad/rtHz @ 1 kHz)
- 重力波検出器や光周波数標準分野で問題になりうる鏡の**複屈折変動の評価**や**低減**に利用可能

J. Yu+, [PRX 13, 041002 \(2023\)](#)

← JILAグループによる未知の複屈折雑音の発見論文

- ダークマター探索の**新局面の開拓**

- 合計6件の招待講演やセミナー
- 「高エネルギーニュース 第41巻3号」
- 「Newton 2022年11月号」「岩波 科学 2023年10月号」
- バーミンガム大学も2023年7月に探索結果公開

J. Heinze+, [arXiv:2307.01365](#)

今後の展望

- 波長可変レーザーを用いた手法を中心に開発
 - さきがけ期間内に初の観測データ取得予定
 - 広帯域・狭帯域探索の切り替えも初実証
 - 高出力化、真空槽への導入、防振装置導入など
- 10m級の大型化も比較的容易(1桁の感度向上)
- LIGO-Virgo-KAGRAを用いたアクション探索
 - Caltech 40m干渉計での実証
- スカラー場、ベクトル場のダークマター探索
 - 固定光共振器と懸架鏡の光共振器の周波数比較

まとめ

- 光リング共振器による**世界初のアクシオンダークマター探索**を実施
 - **磁場を用いない初の実験的探索**
 - **データ解析手法の新規開発**
Y. Oshima+, [PRD 108, 072005 \(2023\)](#)
H. Nakatsuka+, [PRD 108, 092010 \(2023\)](#)
- s偏光とp偏光の同時共振により**広帯域な高感度化**を図る2つの手法を**実証**
 - 補助共振器、波長可変レーザー
- 本実験の**原理実証**と**高感度化**に向けた**基礎開発**ができた
- 重力波検出器やオプトメカといった**新たな展開**も