

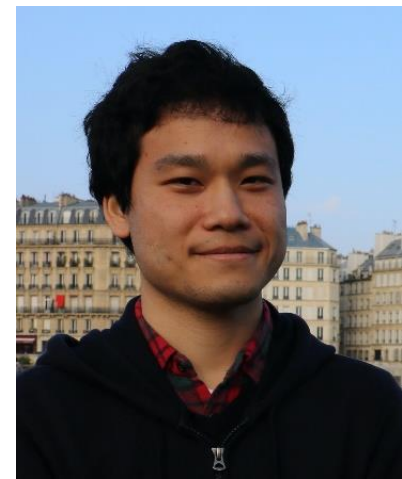
光リング共振器を用いた アクシオンダークマター探索実験

DANCE

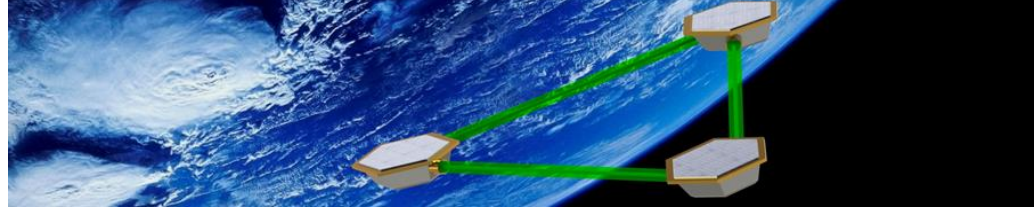
道村唯太

東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻

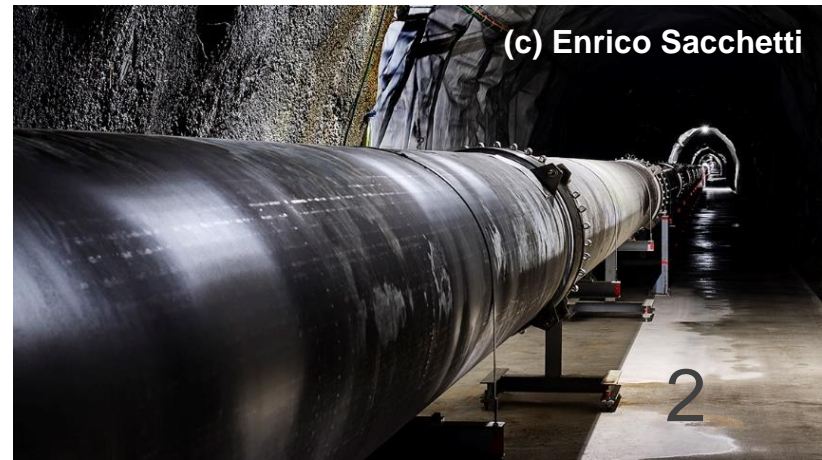
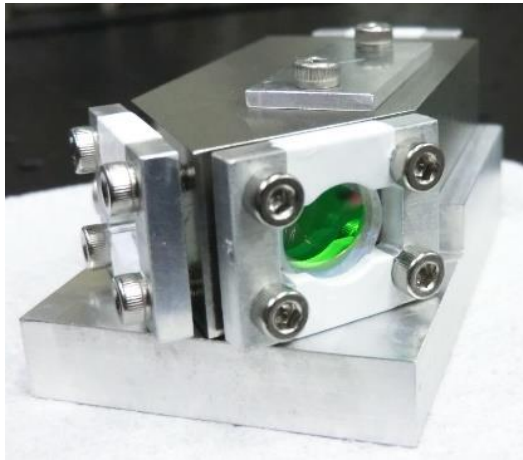
michimura@phys.s.u-tokyo.ac.jp



自己紹介



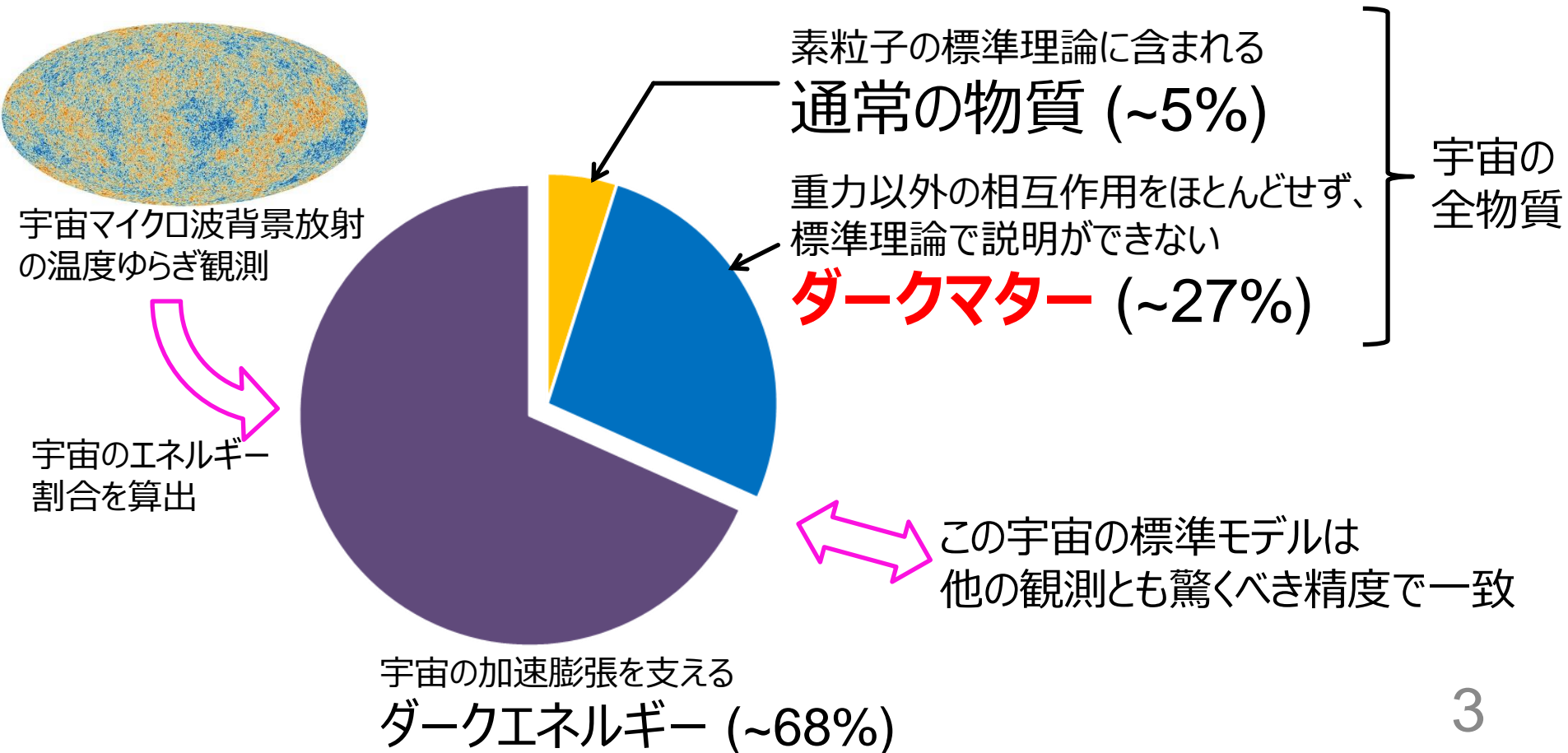
- 道村唯太 (みちむら ゆうた)
東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻 助教
- 1987年生まれ 神奈川県横浜市出身
- 重力波実験: KAGRA DECIGOとSILVIA
- レーザー干渉計を用いた新物理の探索
 - ローレンツ不変性の破れ
 - ミリグラム領域での重力・量子力学検証
 - **ダークマター探索** など



KAGRA

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

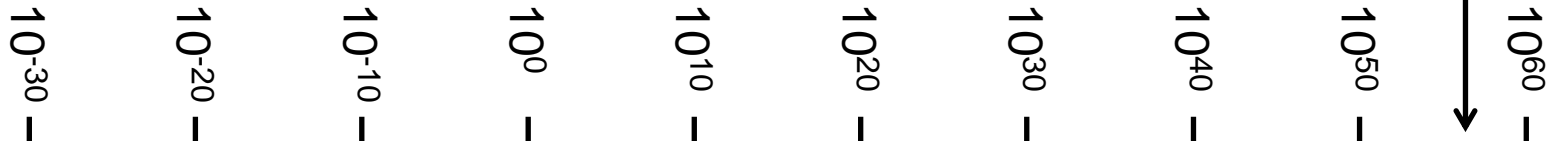


これまでのダークマター探索

- 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

超軽量粒子

軽い粒子

WIMP

重い粒子

複合物質・原始ブラックホールなど

重カマイクロレンズやCMB観測から排除

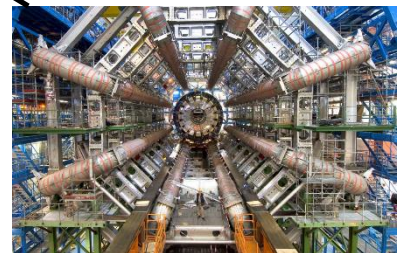


2.4 Hz ~ 2.4 kHz
($1e-14 \sim 1e-11$ eV)

レーザー干渉計
による探索が近年注目されている



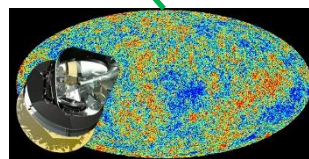
XENON1Tなど
地下実験



LHC
巨大ハドロン加速器



すばる望遠鏡など



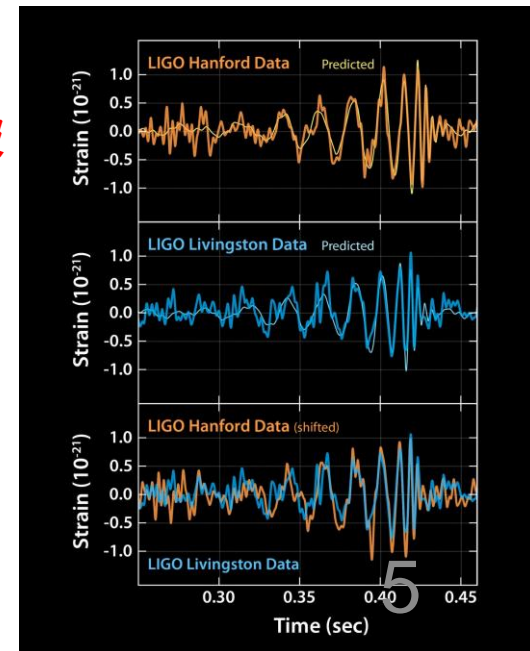
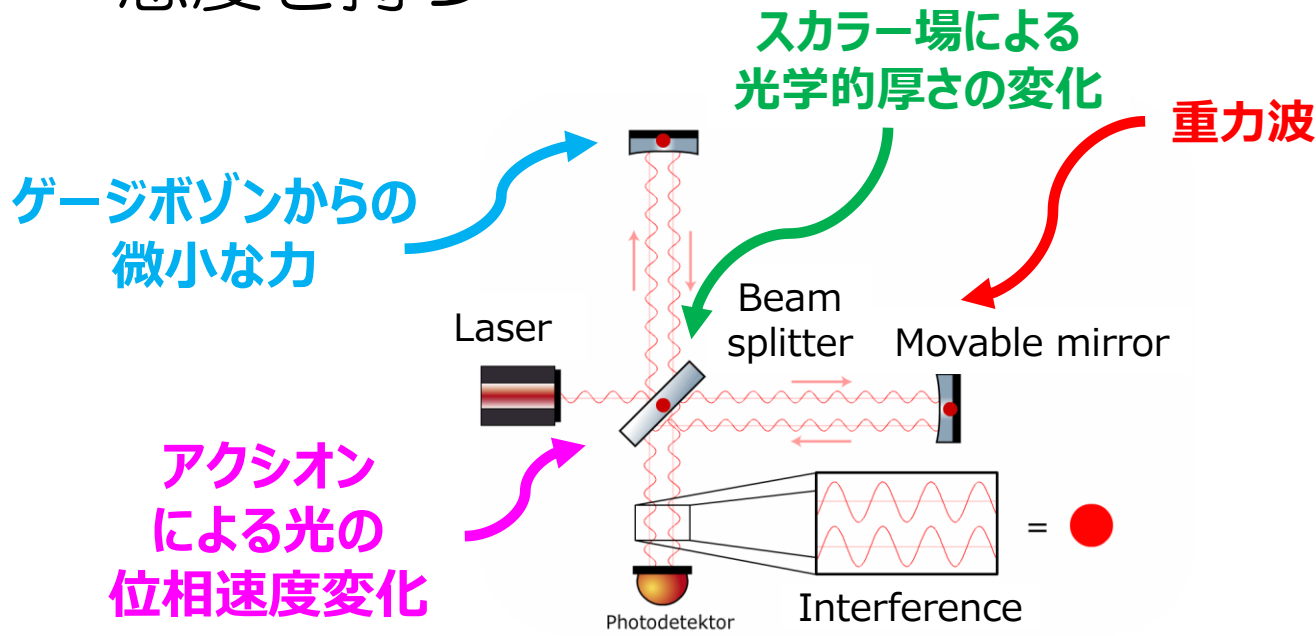
宇宙マイクロ波背景放射観測

超軽量ダークマター

- 超軽量ボゾン場(<~1 eV)が特に宇宙論から高い注目
- 古典的な波としてふるまう

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

- レーザー干渉計はこのような周期的な変化に高い感度を持つ



近年のレーザー干渉計の提案/探索

• $U(1)_B$ or $U(1)_{B-L}$ ゲージボゾン(ベクトル場)

- P. W. Graham+, [PRD 93, 075029 \(2016\)](#)
- A. Pierce+, [PRL 121, 061102 \(2018\)](#)
- H-K Guo+, [Commun. Phys. 2, 155 \(2019\)](#) LIGOの実データ解析
- Y. Michimura, T. Fujita, S. Morisaki, H. Nakatsuka, I. Obata, [PRD 102, 102001 \(2020\)](#)
- D. Carmey+, [New J. Phys. 23, 023041 \(2021\)](#)
- J. Manley+, [PRL 126, 061301 \(2021\)](#)
- S. Morisaki, T. Fujita, Y. Michimura, H. Nakatsuka, I. Obata, [PRD 103, L051702 \(2021\)](#)
- LIGO-Virgo-KAGRA Collaboration, [arXiv:2105.13085](#) LIGO/Virgoの実データ解析

• スカラー場

- Y. V. Stadnik & V. V. Flambaum, [PRL 114, 161301 \(2015\)](#)
- Y. V. Stadnik & V. V. Flambaum, [PRA 93, 063630 \(2016\)](#)
- A. A. Geraci+, [PRL 123, 031304 \(2019\)](#)
- H. Grote & Y. V. Stadnik, [PRR 1, 033187 \(2019\)](#)
- S. Morisaki & T. Suyama, [PRD 100, 123512 \(2019\)](#)
- C. Kennedy+, [PRL 125, 201302 \(2020\)](#)
- E. Savalle+, [PRL 126, 051301 \(2021\)](#)
- S. M. Vermeulen+, [arXiv:2103.03783](#) GEO600の実データ解析

近年盛んに実験提案
ゲージボゾン、スカラー場に関しては
重力波望遠鏡の実データを用いた
探索も既になされている

• アクシオン、Axion-like particles (ALPs)

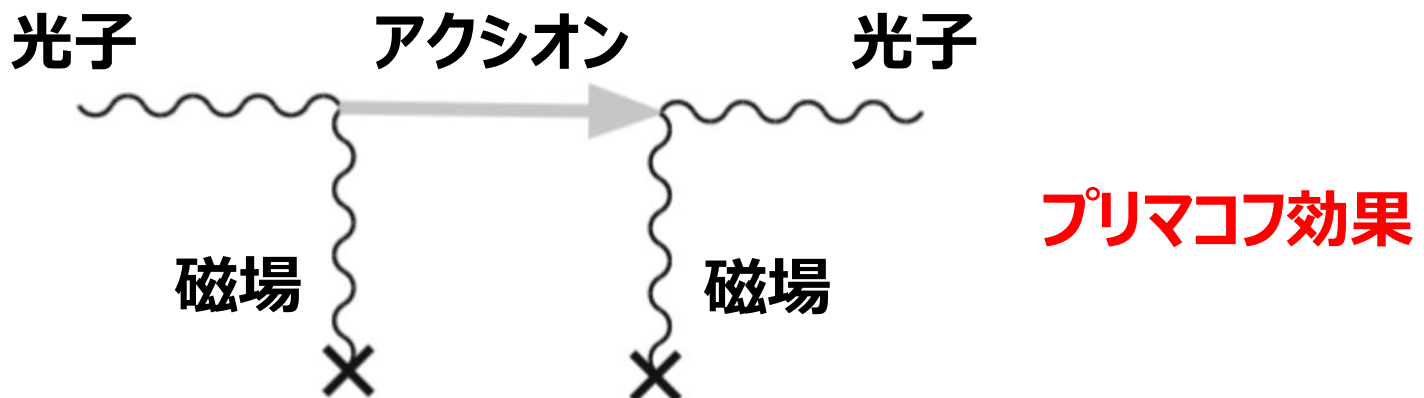
- W. DeRocco & A. Hook, [PRD 98, 035021 \(2018\)](#)
- I. Obata, T. Fujita, Y. Michimura, [PRL 121, 161301 \(2018\)](#) ← 今回のお話
- H. Liu+, [PRD 100, 023548 \(2019\)](#)
- K. Nagano, T. Fujita, Y. Michimura, I. Obata, [PRL 123, 111301 \(2019\)](#)
- D. Martynov & H. Miao, [PRD 101, 095034 \(2020\)](#)
- K. Nagano, H. Nakatsuka, S. Morisaki, T. Fujita, Y. Michimura, I. Obata, [PRD 104, 062008 \(2021\)](#)

Not exhaustive.

The ones which require magnetic fields are not listed.

アクシオン

- 量子色力学の強いCP問題を解決するために導入された擬スカラー粒子 (QCD axion)
- 超ひも理論なども様々なaxion-like particles (ALPs) を予言し、**ダークマター**の有力な候補
XENON1Tの2020年6月の発表もアクシオン検出の可能性を示唆
- 光子とのわずかな相互作用を利用する手法が主流
- 特に、強磁場を使って**光子とアクシオンを変換**させる実験が盛んに行われている

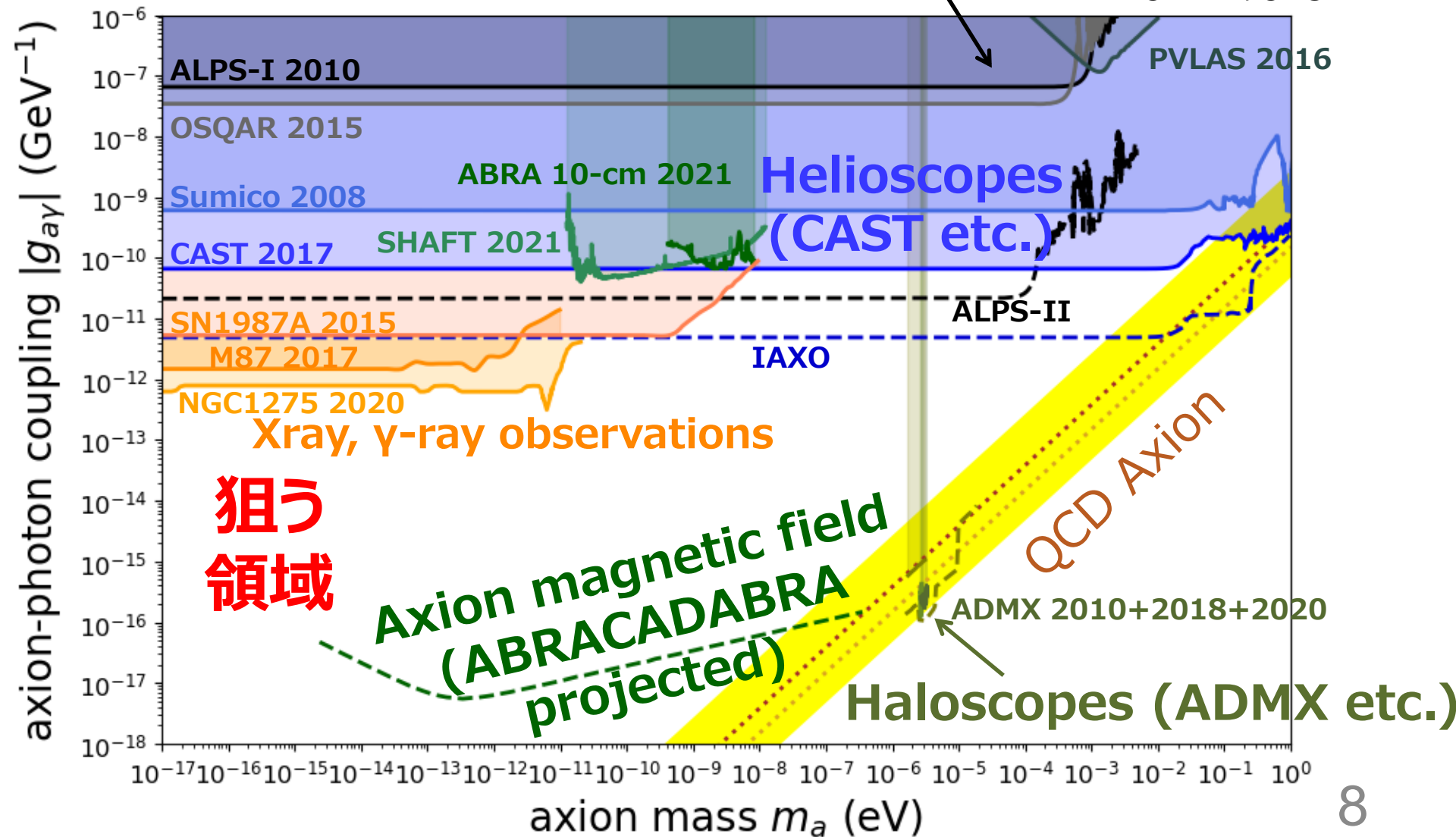


現在の上限値(の一部)

Light Shining through Wall (ALPS etc.)



CERNのCAST



アクシオンと光子の相互作用

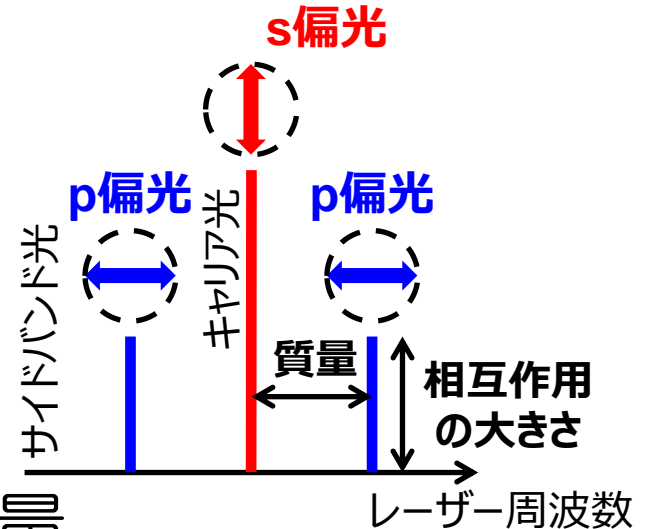
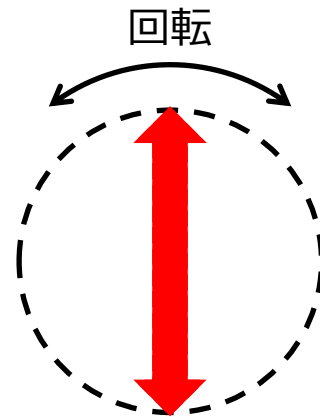
- 相互作用により右円偏光と左円偏光に位相速度差

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

相互作用係数 $g_{a\gamma}$ 、光の波数 k 、アクシオン場の振幅 a_0 、
 アクシオン質量 m_a 、
 アクシオン質量に対応した周波数 ω_a

- 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オンの質量、振幅から相互作用の大きさがわかる

- 磁場は不要

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

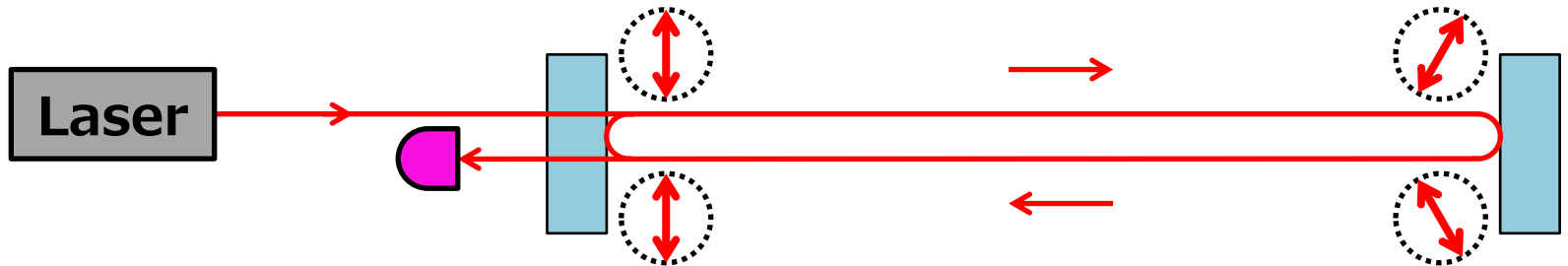


光共振器を用いた信号増幅

- 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

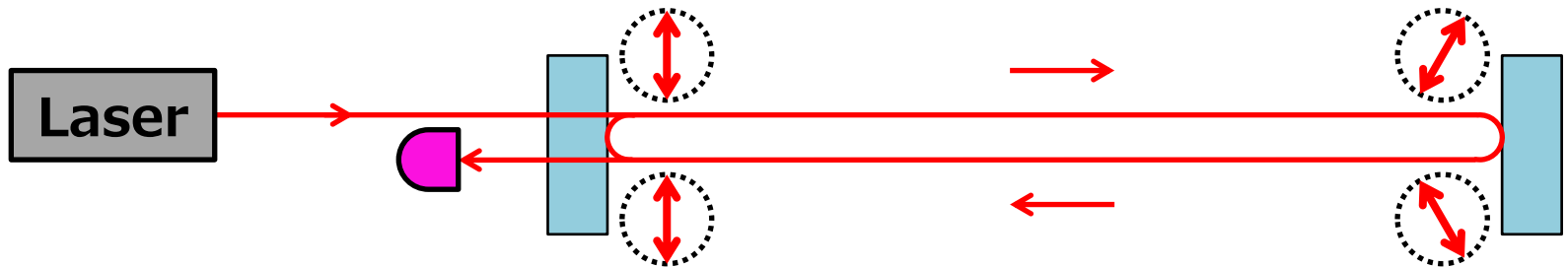


光共振器を用いた信号増幅

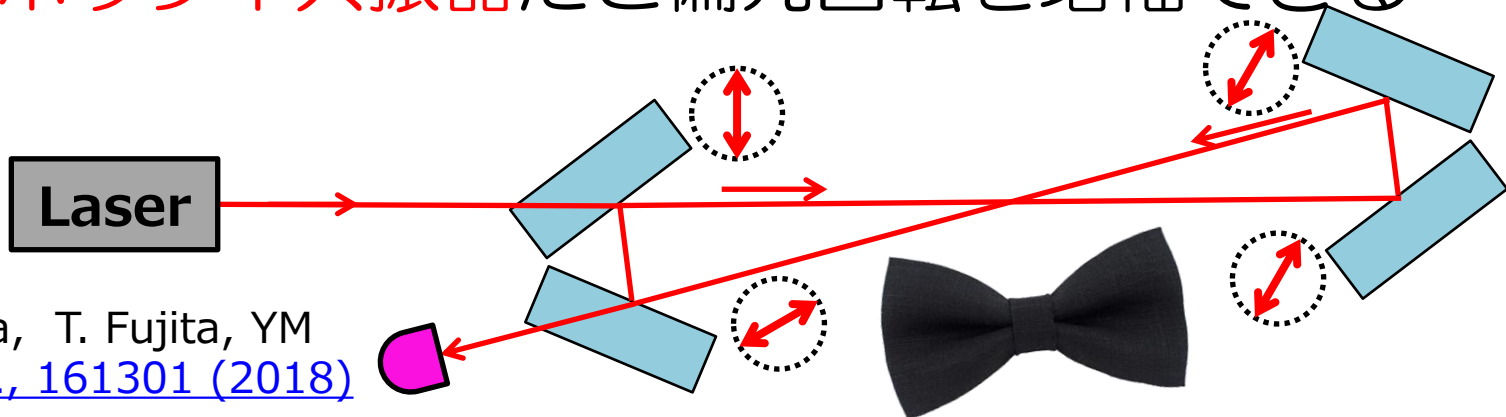
- 短い距離では偏光の回転角が小さい



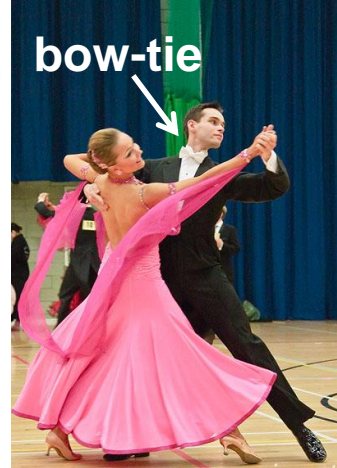
- 光共振器で距離を増幅することはできるが、鏡の反射で偏光が**反転**してしまう



- **ボウタイ共振器**だと偏光回転を増幅できる

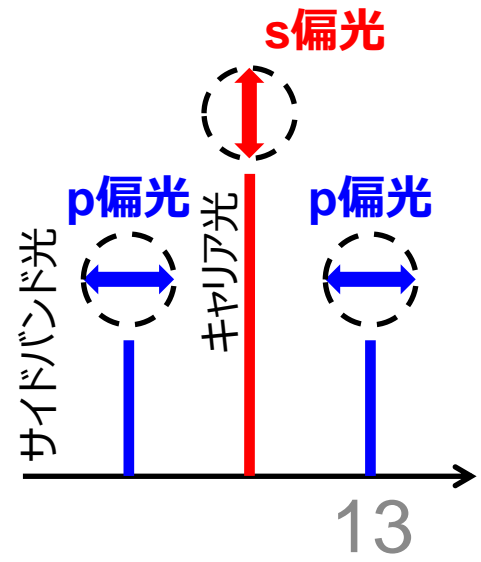
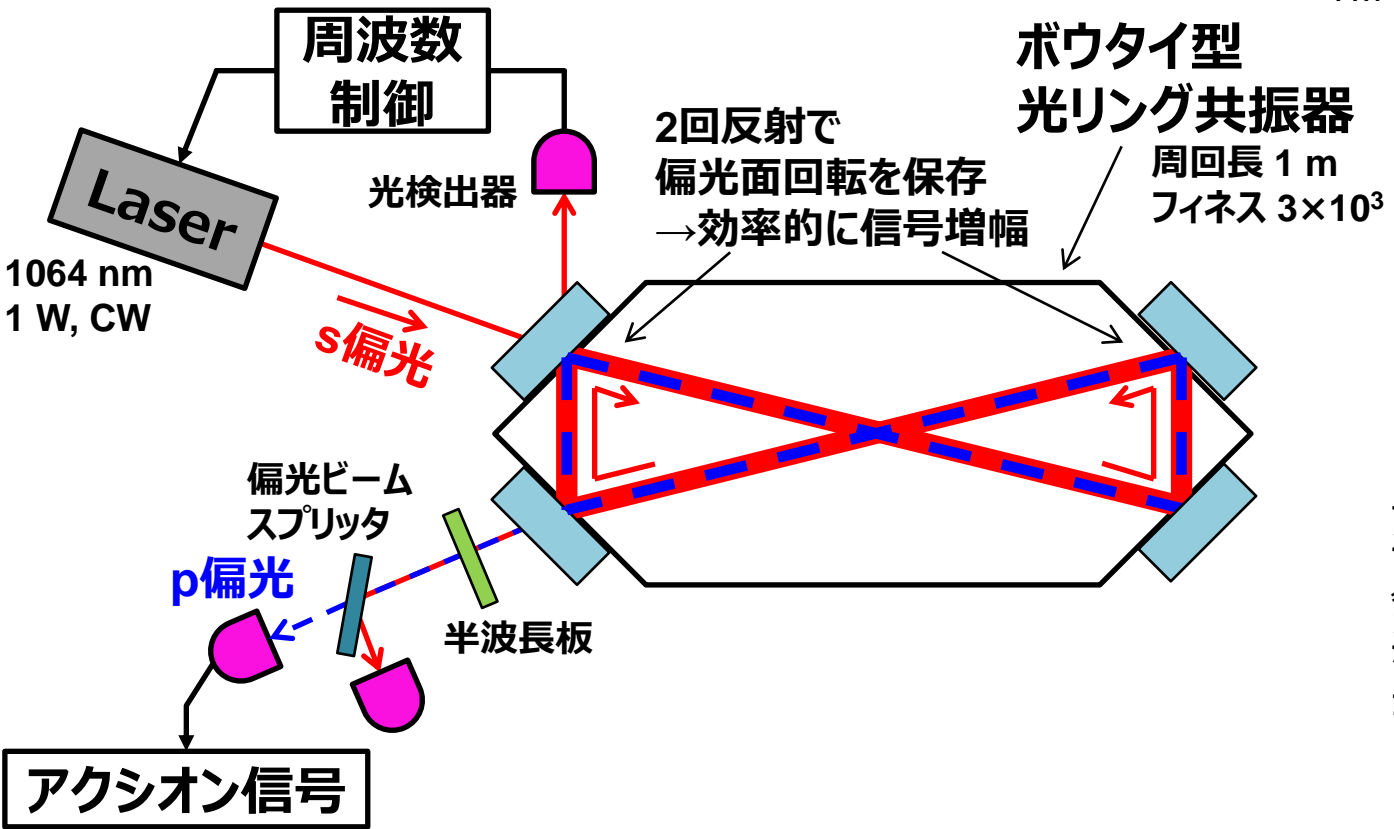


DANCEのセットアップ



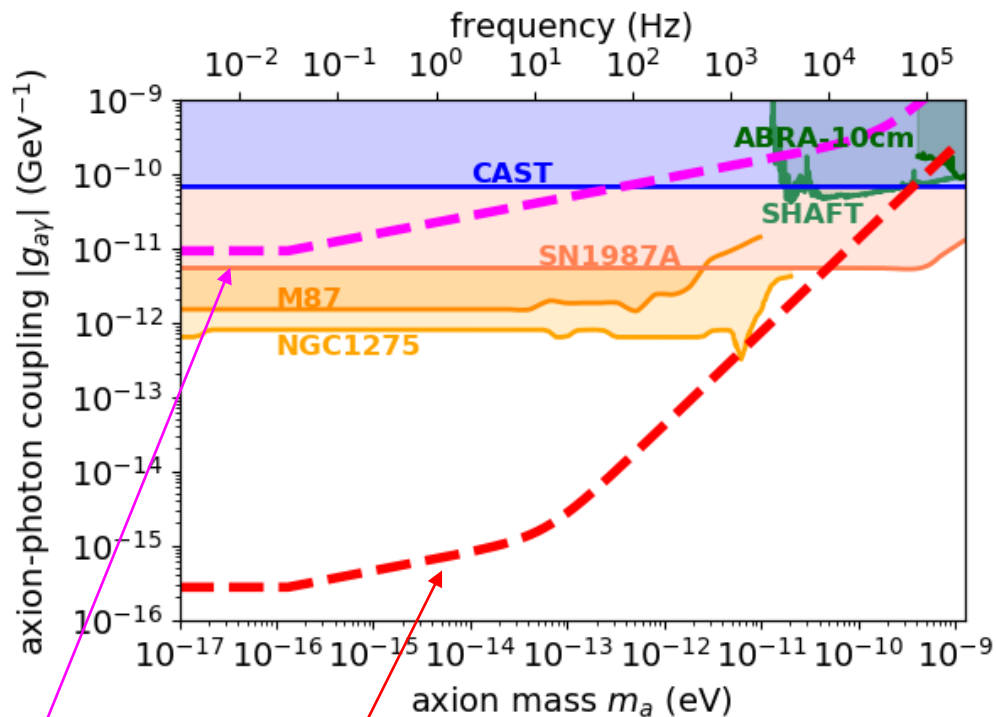
- Dark matter Axion search
with riNg Cavity Experiment
- 世界最高精度での探索を目指す

YM+, [JPCS 1468, 012032 \(2020\)](https://doi.org/10.1063/1.5138000)



DANCEとDANCE Act-1

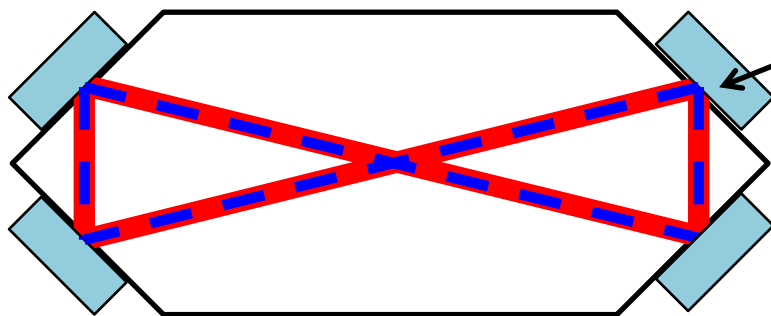
- 現在の世界最高レベルの技術、1年の観測で
CASTを数桁超える
ことが可能
- 控えめなパラメータ
でもCASTと同程度
※ショットノイズ限界の
感度を仮定



| | DANCE Act-1目標 | DANCE |
|--------------------|-----------------|-----------------|
| 共振器の周回長 | 1 m | 10 m |
| 入射光強度 | 1 W | 100 W |
| フィネス (光が何周回するかの指標) | 3×10^3 | 1×10^6 |

DANCE Act-1の現状

- 2019年に開始
- 何度か光学系の組み直し、長期運転のためのデジタル制御系の構築等を経て、2021年5月に初の長期観測運転(12日間)を実施
 - s偏光とp偏光が同時共振しない問題
偏光間の鏡での反射位相差が原因
- 補助共振器を用いた同時共振の実現方法を考案し、2021年11月に同時共振を初実現



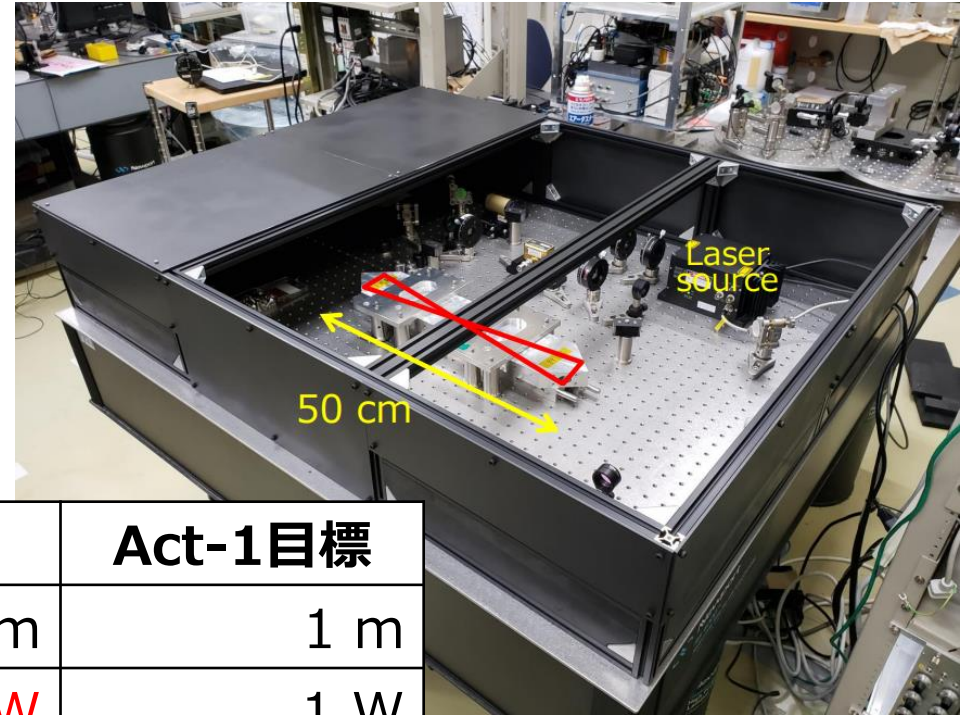
有限の入射角での反射時に
s偏光とp偏光で位相差が生じる
→ 共振周波数差が生じる

Y. Oshima+, [arXiv:2105.06252](https://arxiv.org/abs/2105.06252)
H. Fujimoto+, [arXiv:2105.08347](https://arxiv.org/abs/2105.08347)
Y. Oshima+, [arXiv:2110.10607](https://arxiv.org/abs/2110.10607)
H. Fujimoto+, [arXiv:2110.12023](https://arxiv.org/abs/2110.12023)

2021年5月の観測運転

- Act-1目標と同スケール
- 5月8-30日の**12日間**の試験運転を実施

Y. Oshima+, [arXiv:2110.10607](https://arxiv.org/abs/2110.10607)



| | 2021年5月 | Act-1目標 |
|----------------|--|-----------------|
| 共振器の周回長 | 1 m | 1 m |
| 入射光強度 | 242(12) mW (光源は0.5 W) | 1 W |
| フィネス (キャリア) | $2.85(5) \times 10^3$ s偏光 | 3×10^3 |
| フィネス (サイドバンド) | 195(3) p偏光 | 3×10^3 |
| s偏光とp偏光の共振周波数差 | 2.52(2) MHz | 0 Hz |

データ解析手法

E. Savalle+,
[PRL 126, 051301 \(2021\)](#)

- 信号は**ほぼ単一周波数**

$$\omega_i = m_A \left(1 + \frac{v_i^2}{2} \right)$$

- この周波数範囲でのスペクトルからSNRを計算

$$\rho = \sum \frac{4|\tilde{d}(f_k)|^2}{T_{\text{obs}} S_n(f_k)}$$

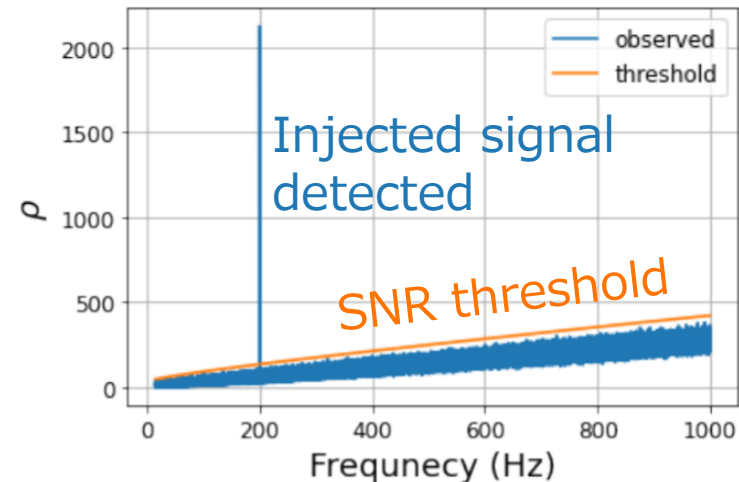
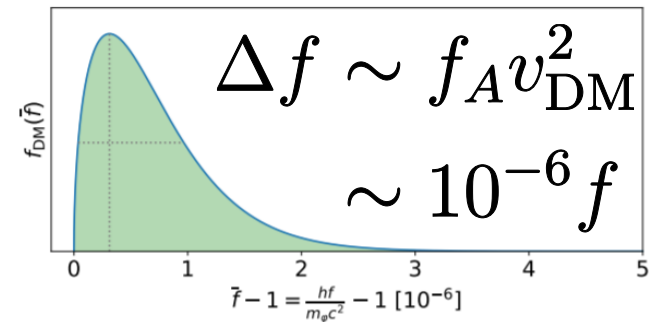
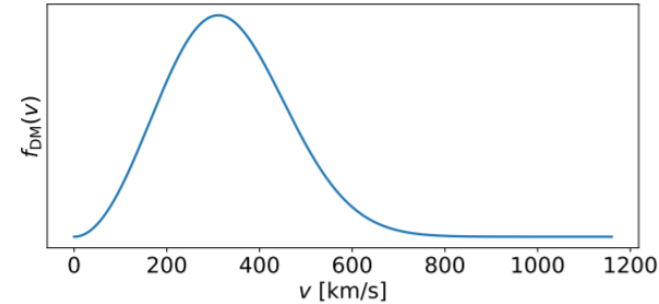
Data

PSD

Obs. time

$$m_A \leq 2\pi f_k \leq m_A(1 + \kappa v_{\text{DM}}^2)$$

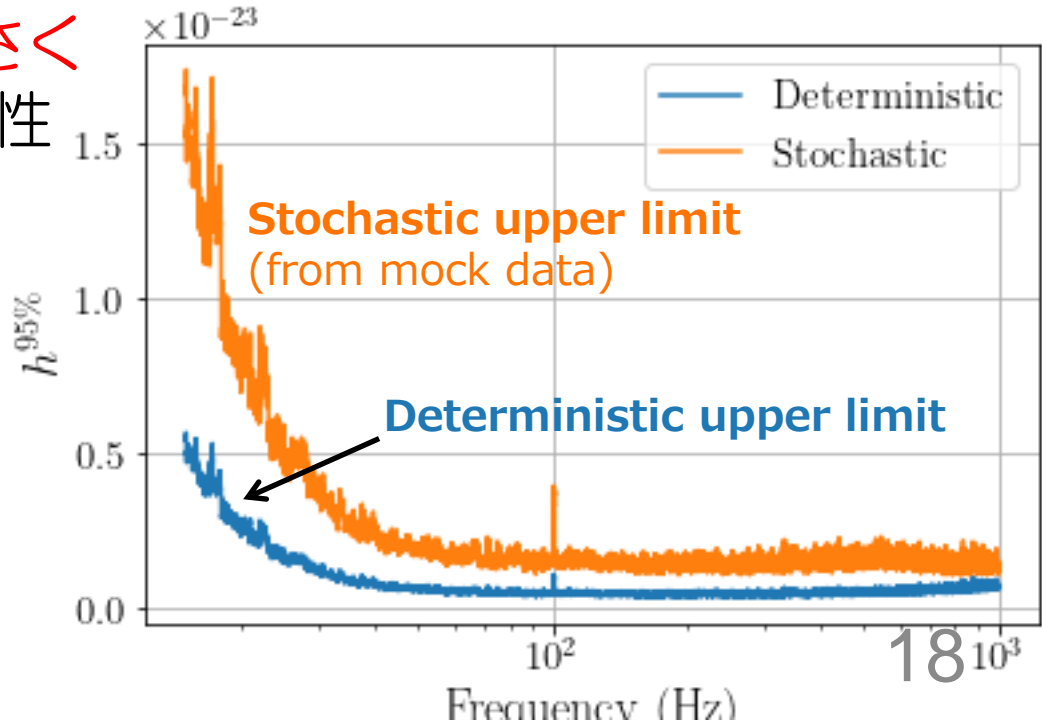
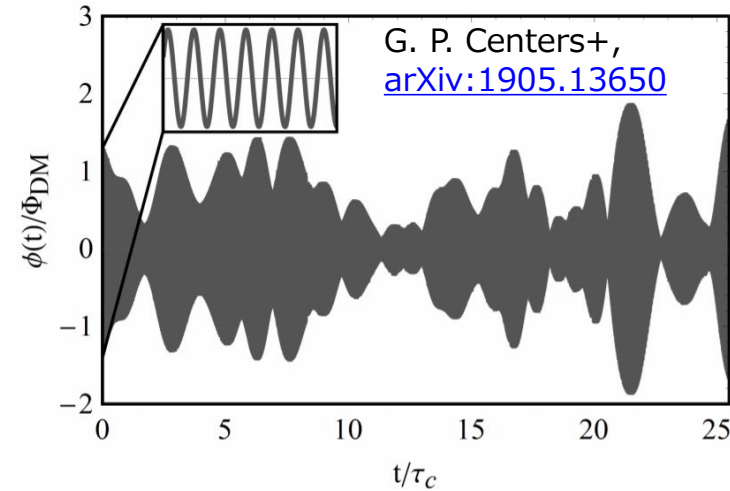
- ρ が χ^2 分布に従うと仮定してSNR閾値を設定 (つまり、ガウス雑音を仮定)
- ρ から**95%上限値**を計算
- モックデータ**で解析パイプラインを確認



DM信号の統計的ふるまい

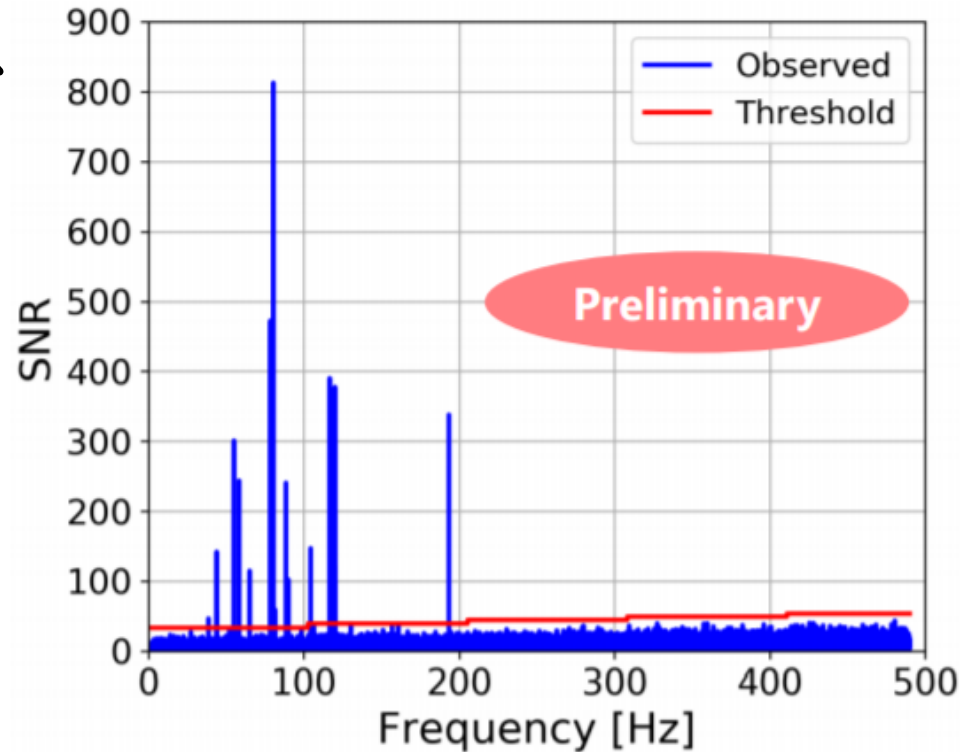
- DM信号は様々な運動量、位相を持つ波の重ね合わせ
- 振幅や位相が変動する
タイムスケール
$$\tau = 2\pi / (m_A v_{DM}^2)$$
- 低周波数(低質量)帯ではDM信号がたまたま小さく検出できなかった可能性も考慮する必要がある
- 統計的ふるまいを考慮に入れた上限値計算手法を開発

H. Nakatsuka+, *in preparation*



観測データの解析結果

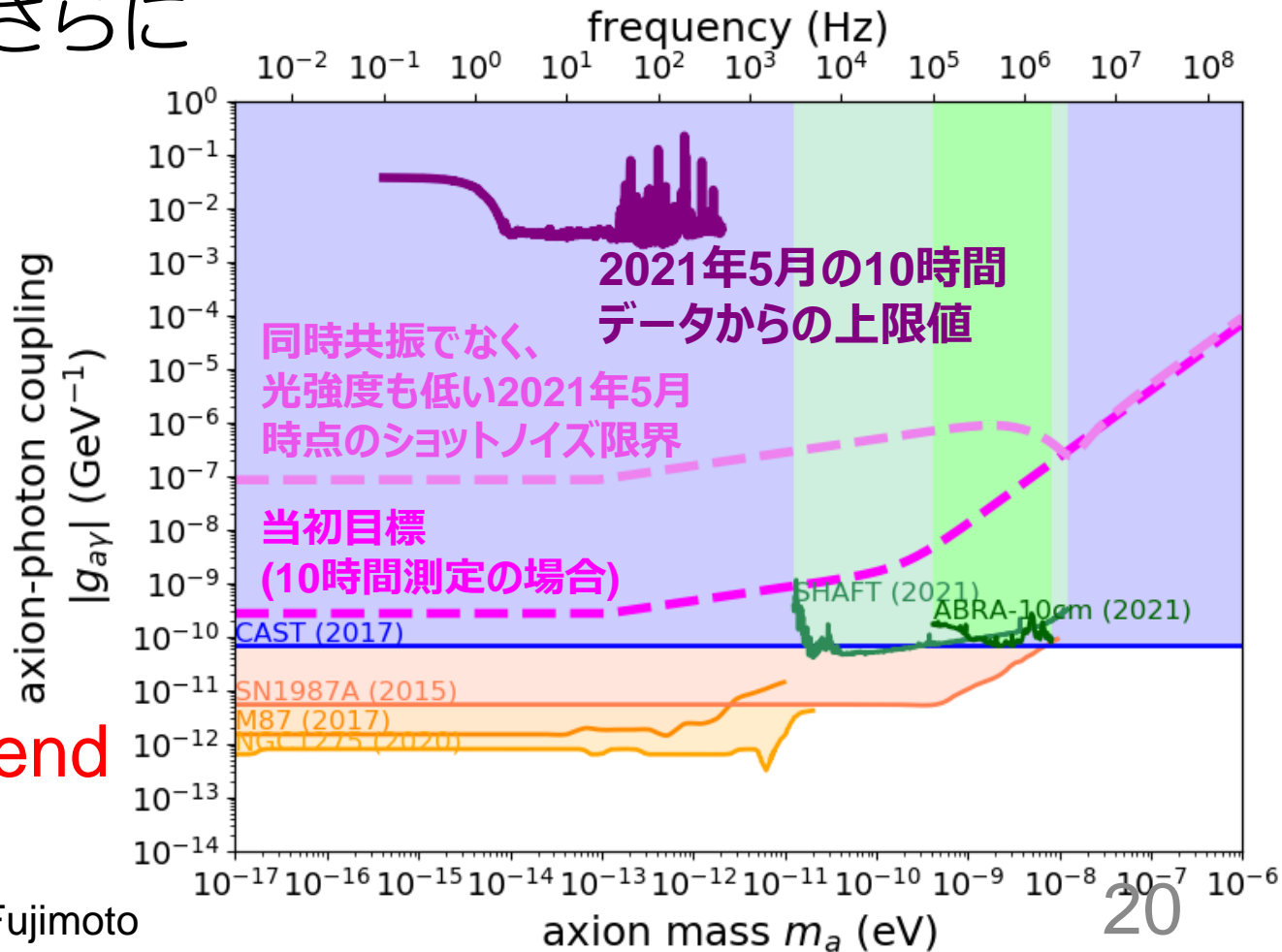
- 12日間のデータのうち、**10時間分のデータ**を解析
 - 82個の信号候補
 - Veto解析
 - Q-factor veto
(DM信号は 10^6 程度のはず)
 - Consistency veto
(別の10時間セグメントと周波数が一致するか)
- 現状、**8個の信号候補**(調査中)
すべて40 Hzの高調波なので
おそらく何らかの機械的な共振



Analysis by Y. Oshima
Pipeline developed by
J. Kume, S. Morisaki *et al.*

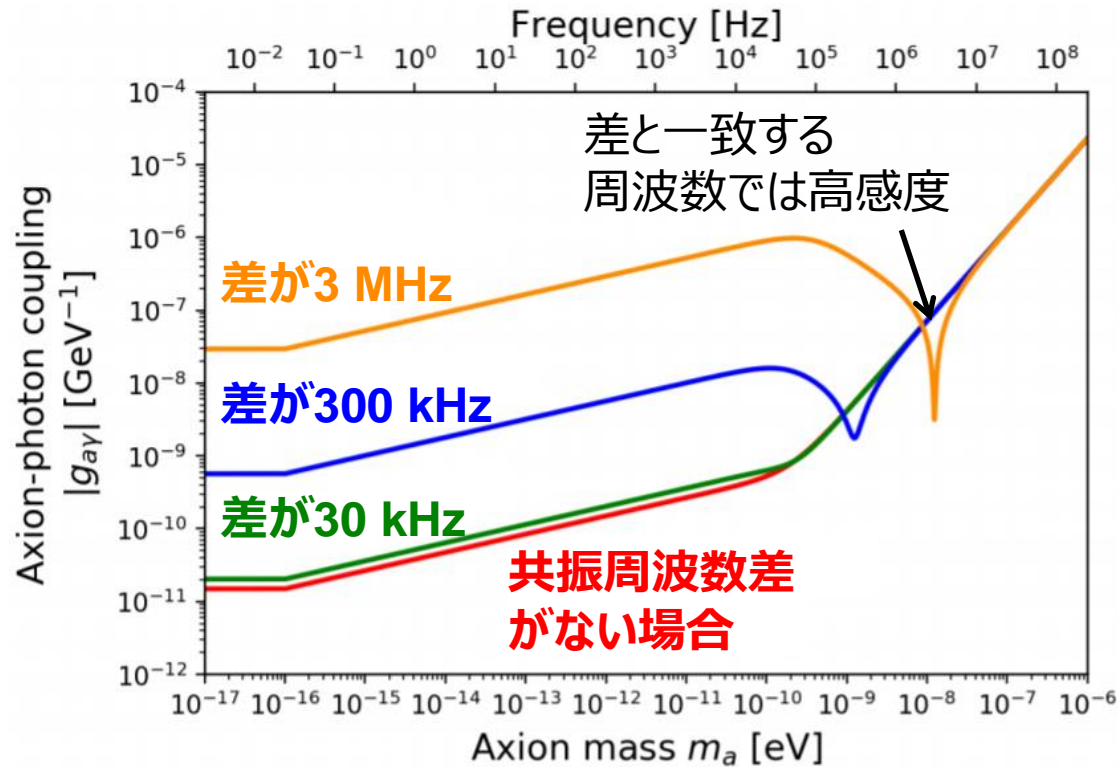
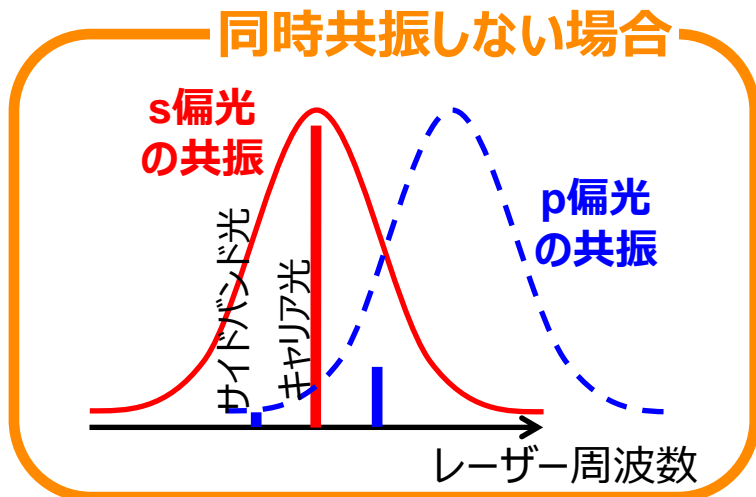
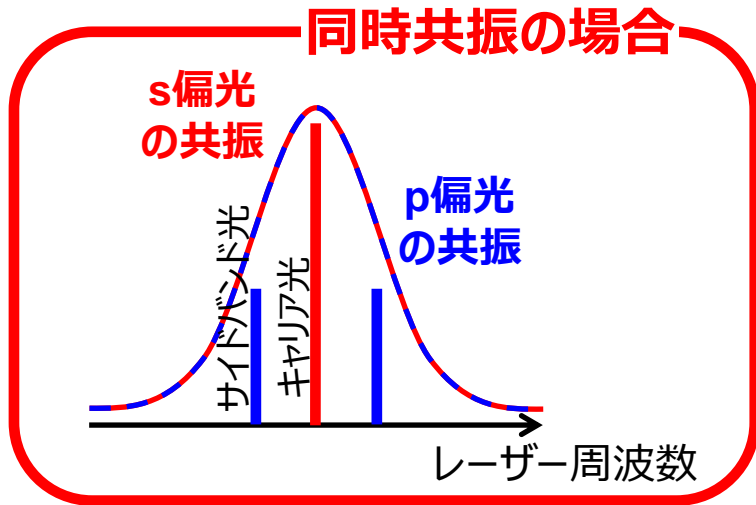
得られた上限値

- s偏光とp偏光が同時共振しないせいでショットノイズ限界は当初目標より約3桁悪い
- それよりもさらに数桁悪い
- 強度雑音、振動雑音の原因か？
- いずれにしても初の上限値初のend-to-endテスト



なぜ両偏光の同時共振が重要か

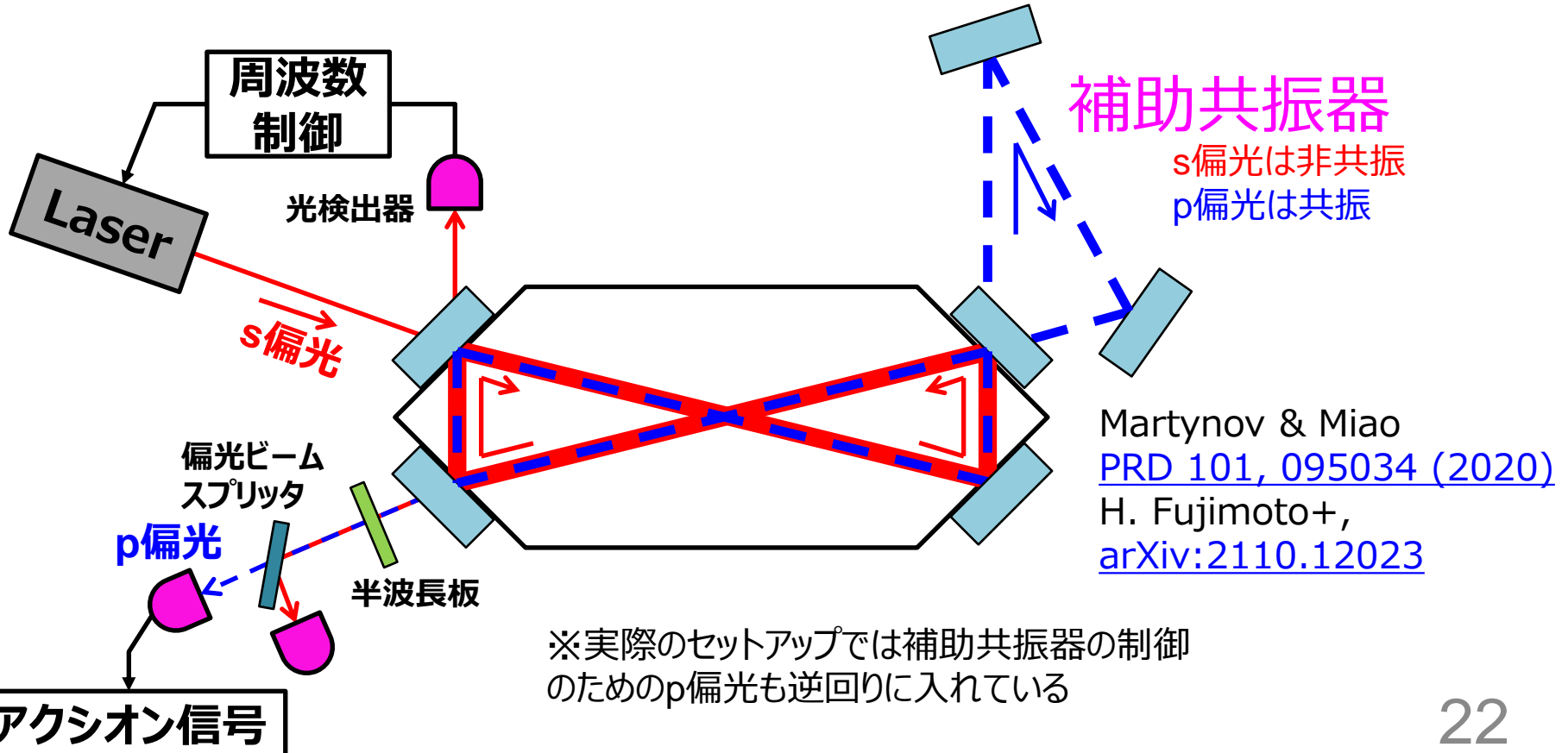
- 高感度実現のためには光共振器でキャリア偏光と信号サイドバンド偏光を**ともに増幅する必要**



Plot by Y. Oshima & H. Fujimoto

補助共振器を用いた同時共振

- s偏光とp偏光の補助共振器での共振状態に差をつけることで、反射位相に差をつける
- これによりメイン共振器での位相差を補正



最新のセットアップ

- 新しい実験室を整備
- 2Wレーザー光源を新調
(これまでは0.5W光源)
- 補助共振器を導入



補助共振器

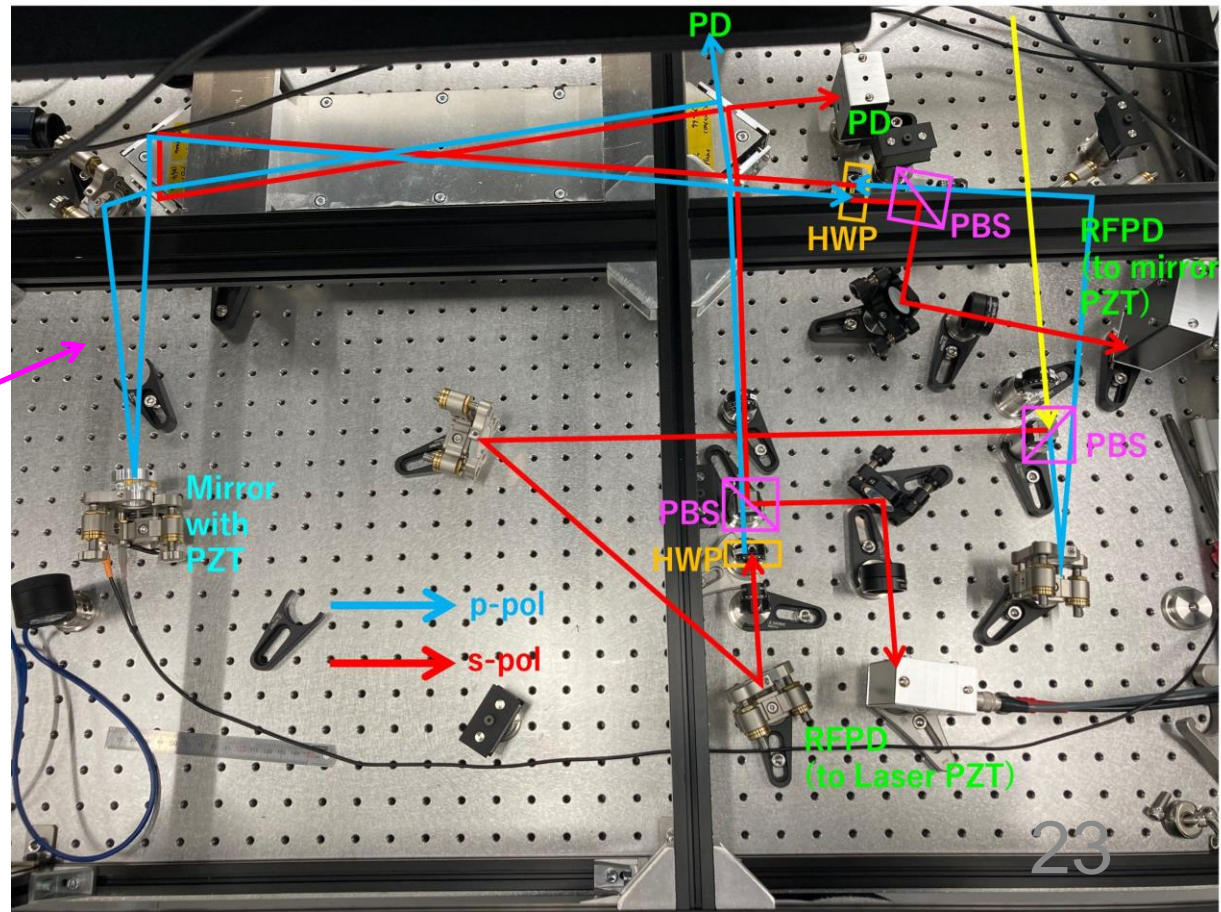
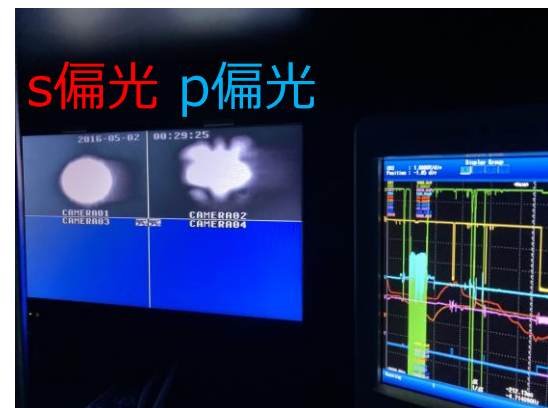


Photo by H. Fujimoto

2021年11月に同時共振を初実現

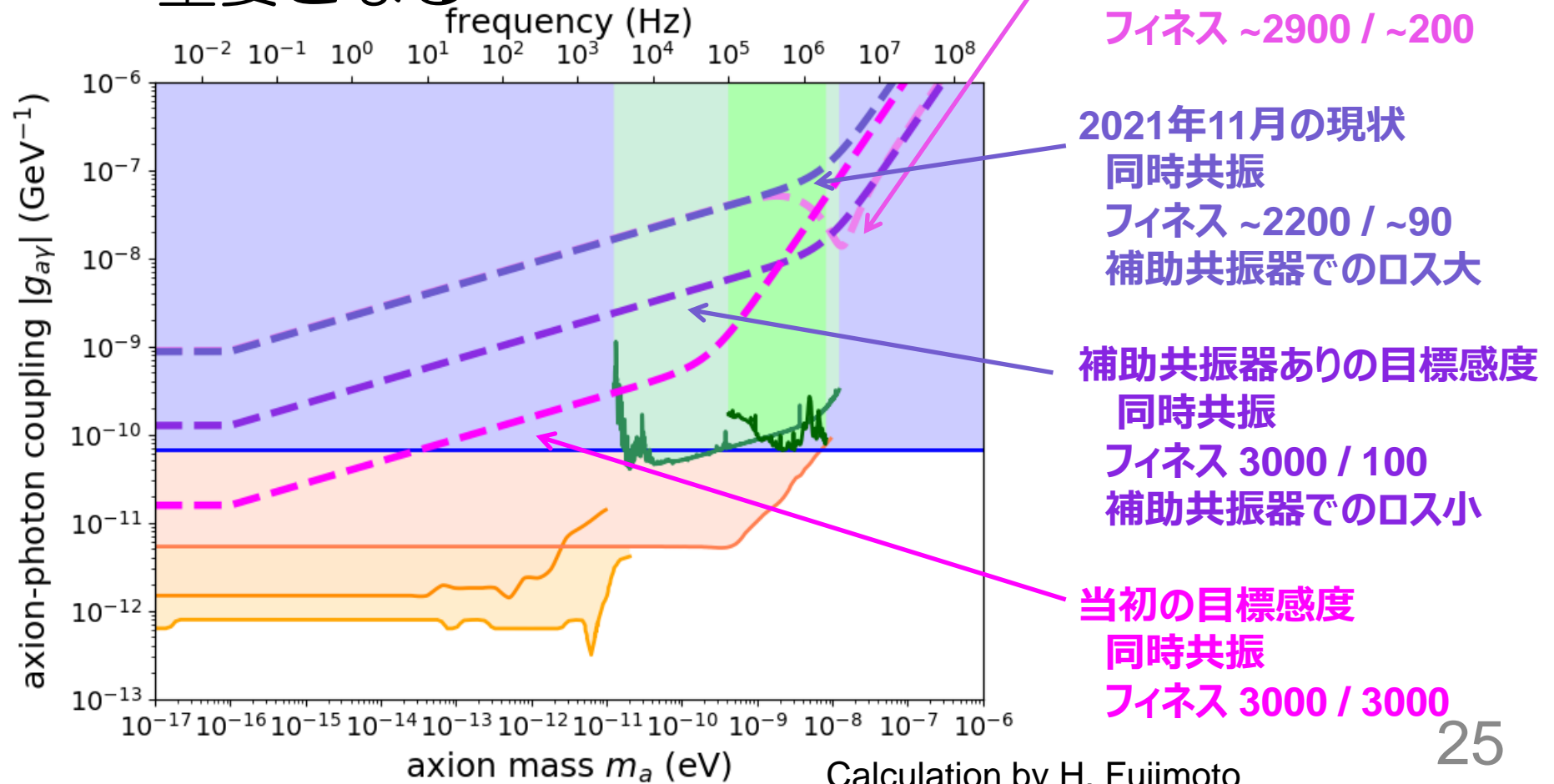
- いまいちな鏡だが、同時共振のための制御が可能なることを**実証**
- 反射率などがより最適化された鏡を発注予定



| | 2021年5月 | 現状(2021年11月) | Act-1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 (光源は0.5 W) | ~40 mW (光源は2 W) | 1 W |
| フィネス (キャリア) | $2.85(5) \times 10^3$ s偏光 | $\sim 2.2 \times 10^3$ s偏光、制御時 | 3×10^3 |
| フィネス (サイドバンド) | 195(3) p偏光 | ~90 p偏光、制御時 | 3×10^3 |
| 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 |

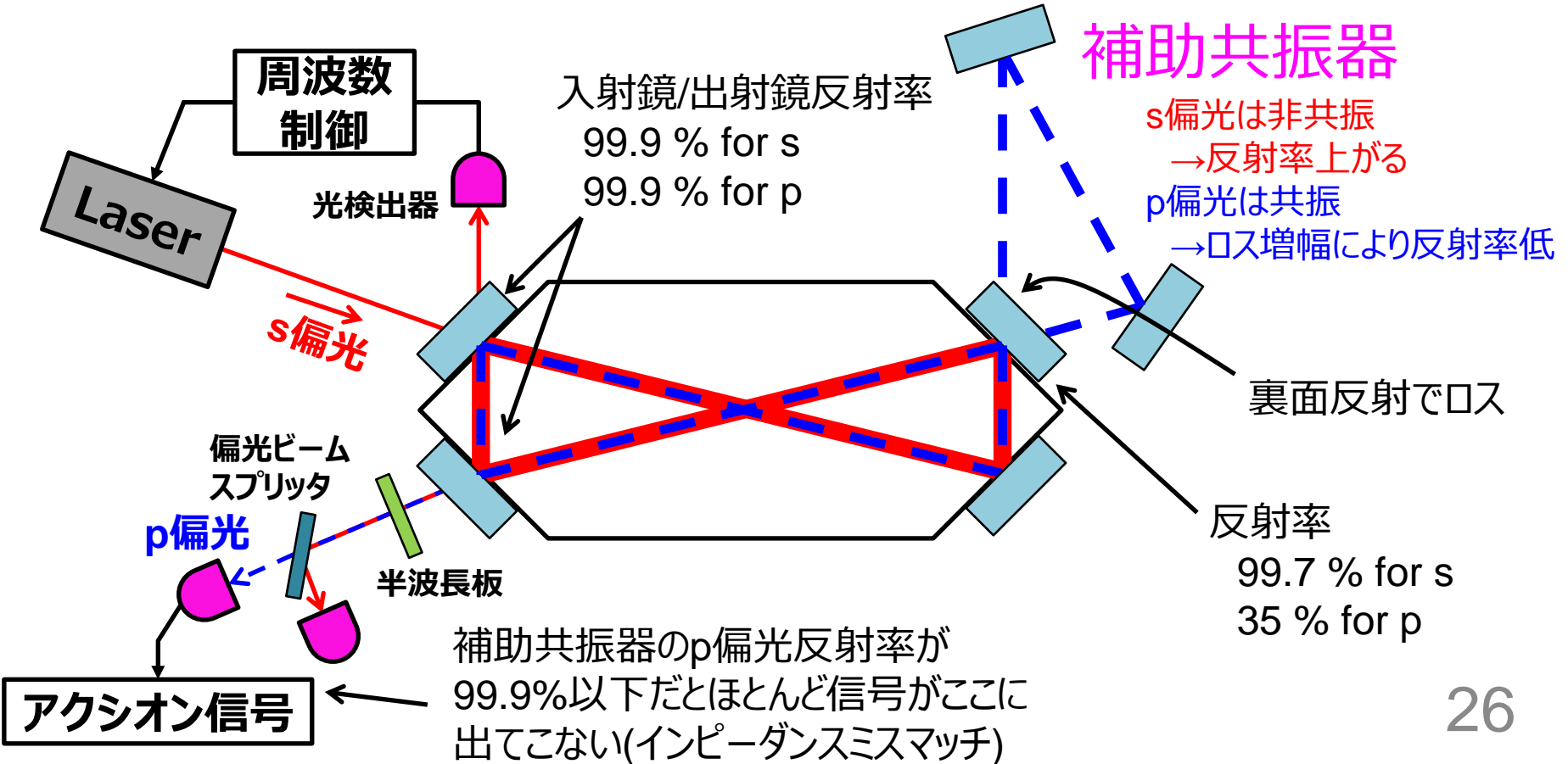
補助共振器ありでの感度

- 同時共振により**広帯域での高感度化**が可能
- ただし補助共振器での**ロス**が重要となる



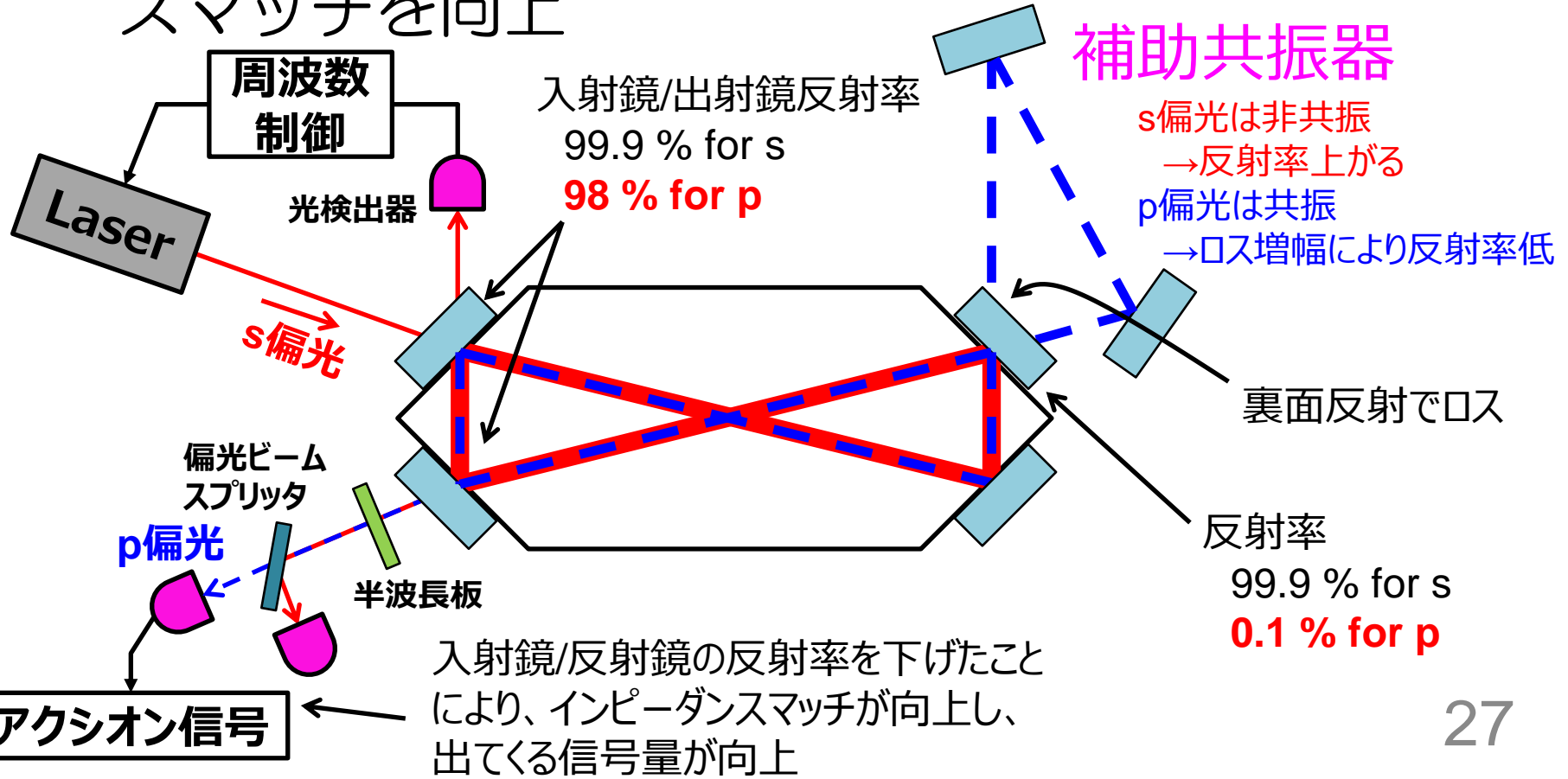
補助共振器での信号ロス

- p偏光は補助共振器に共振するため、裏面反射やモードマッチによるロスに敏感
- この光学的ロスにより信号を大幅にロス



補助共振器での信号ロス回避

- 補助共振器のp偏光のフィネスを下げ、裏面反射でのロスが増幅されないようにする
- 入射鏡/出射鏡のp偏光反射率を下げ、インピーダンスマッチを向上



今後の予定

- 反射率などがより最適化された鏡で補助共振器による同時共振を実現
- ショットノイズ限界感度に到達するため、強度雑音や振動雑音など各種雑音の低減
 - レーザー強度安定化、共振器制御最適化
 - 地震計など各種センサの導入
- 2台作って相関解析

- おまけ
 - 波長可変レーザーを用いて同時共振の実現？

東京大学 物理学専攻

大島由佳

藤本拓希

Haoyu Wang

道村唯太

安東正樹

東京大学 ビッグバン宇宙国際研究センター

糸潤哉

西澤篤志

東京大学宇宙線研究所

中塚洋佑

早稲田大学 高等研究所

藤田智弘

JAXA 宇宙科学研究所

長野晃士

マックスプランク天体物理学研究所

小幡一平

ウィスコンシン大学ミルウォーキー校

森崎宗一郎

… and more to come!

チーム

KAGRAデータを使ったベクトルダークマター探索、アクション探索計画も同じチームで進めています！


科研費
KAKENHI

ダークマターの正体は何か？

広大なディスカバリースペースの網羅的研究

What is dark matter? - Comprehensive study of the huge discovery space in dark matter

文部科学省
科学研究費助成事業
学術変革領域研究
(2020-2024)

 科学技術振興機構

 PRESTO

まとめ

- レーザー干渉計を用いると超軽量ダークマターの新しい探索が可能
- 光リング共振器を用いて光の偏光回転を見るDANCEではCASTを超える感度でのアクシオン探索が磁場を用いずに可能
- プロトタイプ実験DANCE Act-1を進めている
- 2021年5月に12日間の試験運転を実施
- データ解析パイプラインを開発し、実データ解析をすることで初の上限值をつけた
- s偏光とp偏光の同時共振の実現などにより、さらなる感度向上を計画中