

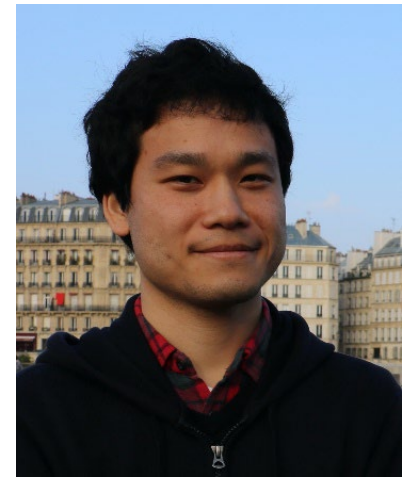
# 超精密偏光計測が可能にする 新しいダークマター探索

道村唯太

カリフォルニア工科大学 LIGO研究所  
[yuta@caltech.edu](mailto: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](mailto:michimura@phys.s.u-tokyo.ac.jp)

(※2022年4月に異動しました)



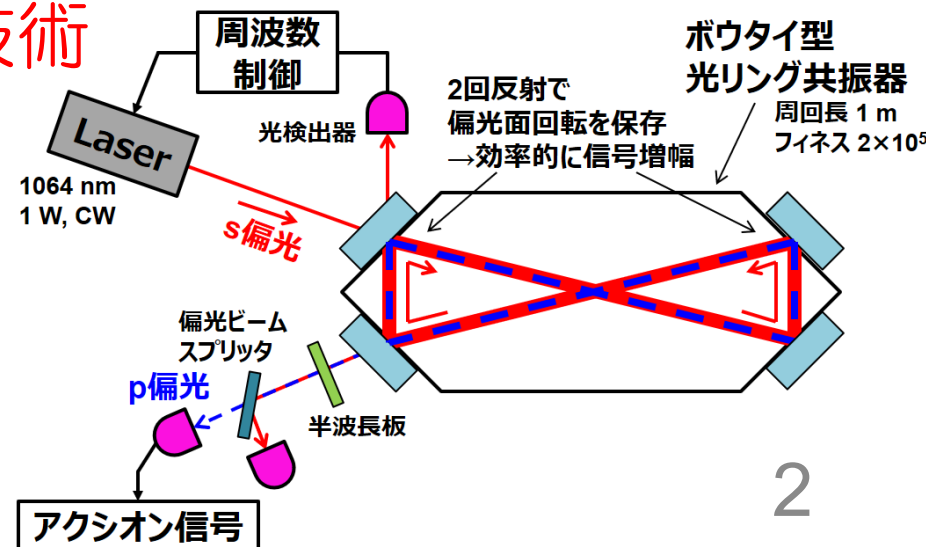
# さきがけ研究の概要

- レーザー干渉計の偏光計測により、  
超軽量ダークマターを初探索
  - ダークマター有力候補であるアクシオンに着目
  - 独自の新手法 [PRL 121, 161301 \(2018\)](#)  
強磁場不要  
ボウタイ共振器で偏光信号を効率的に増幅
  - 達成目標: 世界最高精度での探索

- 発展させる革新的な光技術

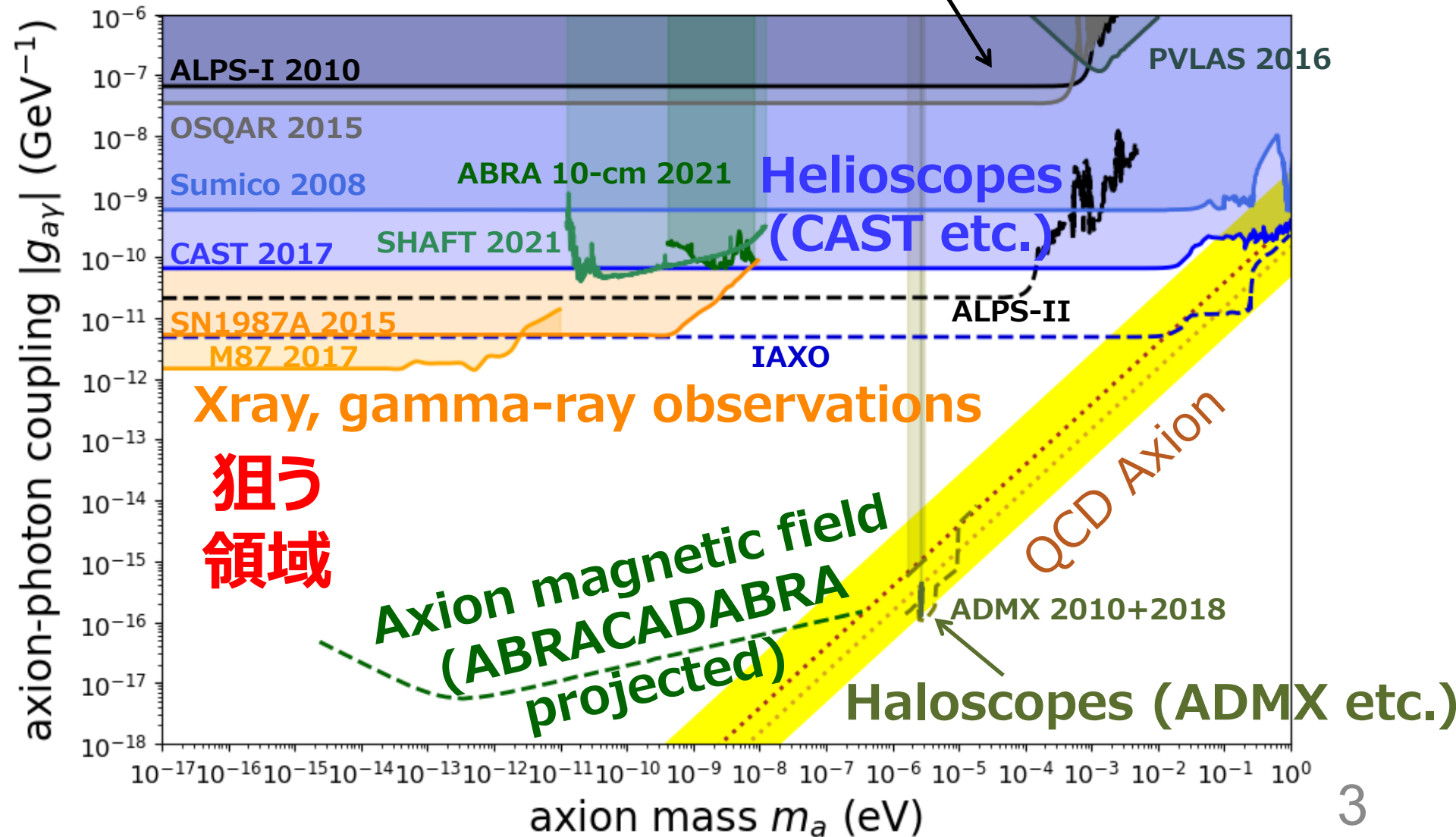
- 超精密偏光計測
- 超低振動光共振器

- ダークマター探索の  
新局面を開拓



# 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

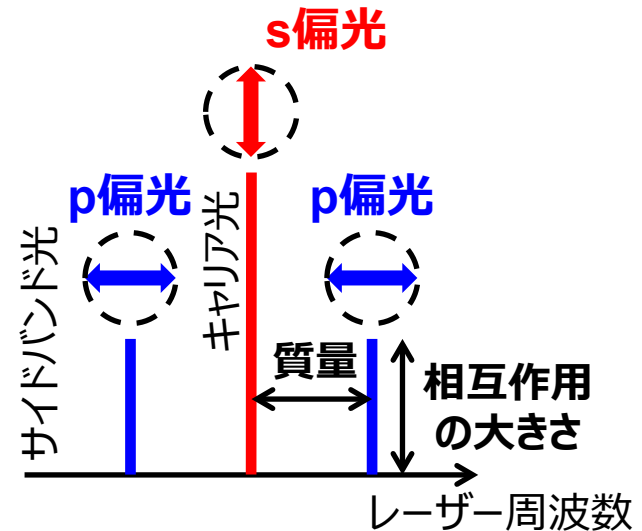
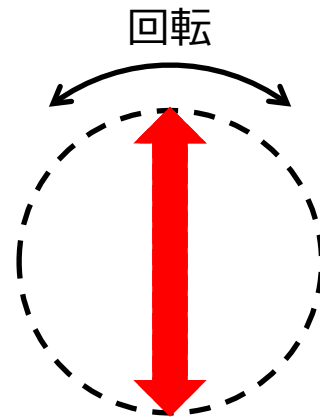
光の振幅  
 アクション場

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



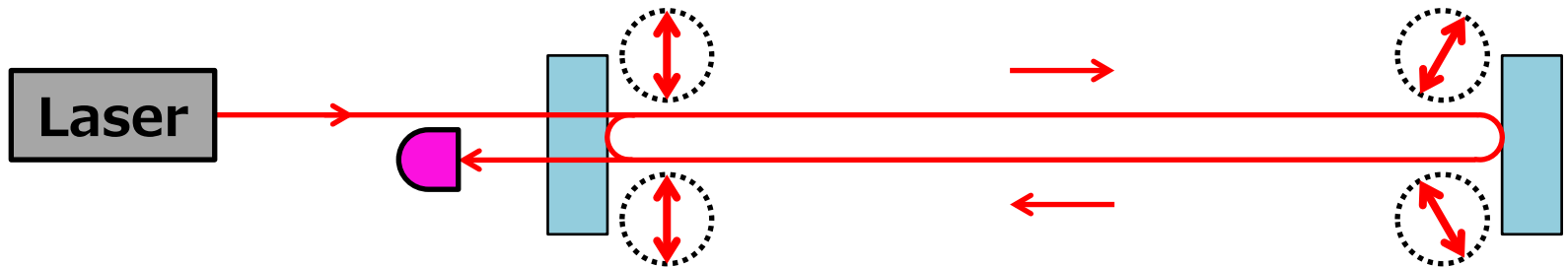
- 回転の周期からアクションの質量  
 振幅から相互作用の大きさ がわかる

# 光共振器を用いた信号増幅

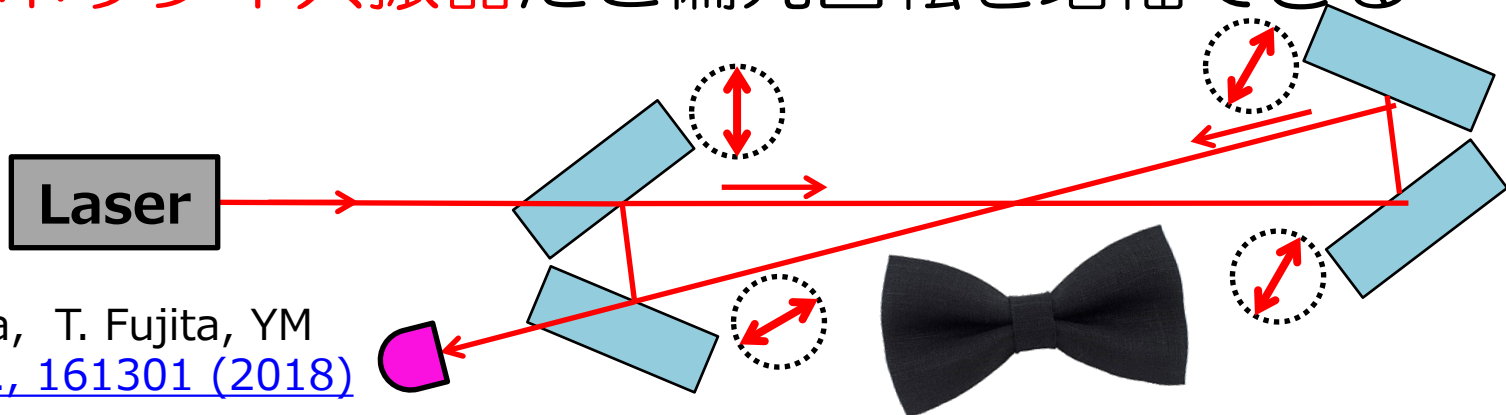
- 短い距離では偏光の回転角が小さい



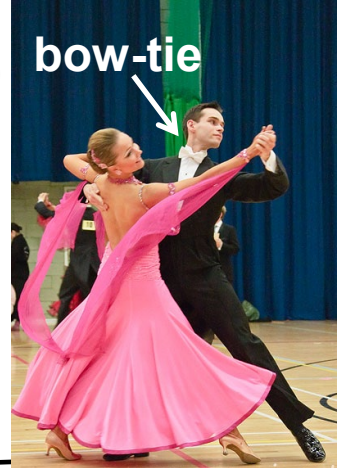
- 光共振器で距離を増幅することはできるが、鏡の反射で偏光が**反転**してしまう



- **ボウタイ共振器**だと偏光回転を増幅できる

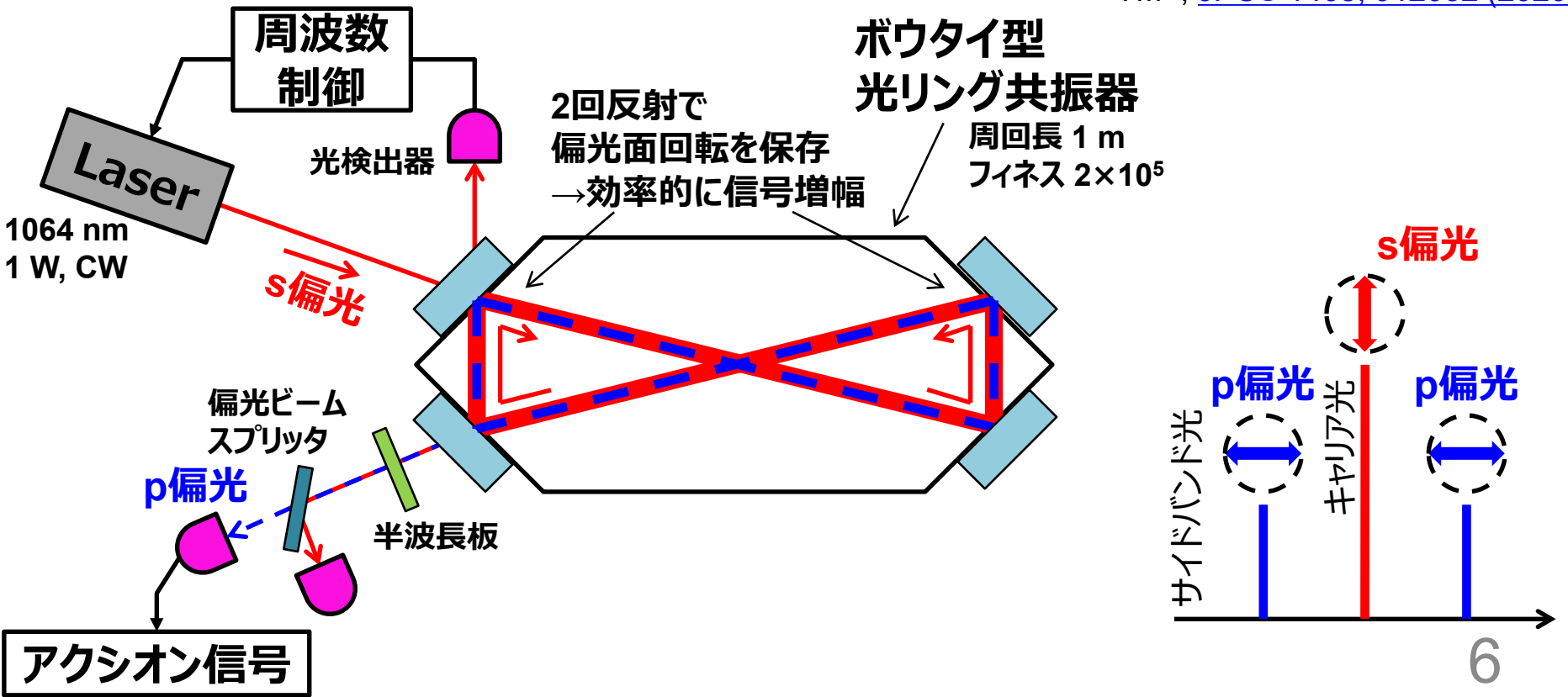


# DANCEのセットアップ



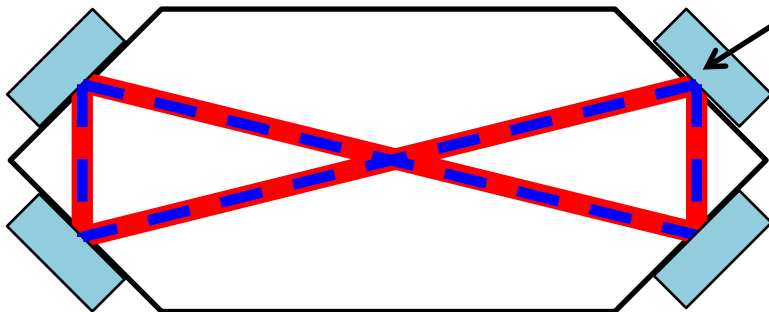
- Dark matter Axion search  
with riNg Cavity Experiment
- さきがけで世界最高精度での探索を目指す

YM+, [JPCS 1468, 012032 \(2020\)](https://doi.org/10.1063/1.5138881)



# これまでの進捗状況

- 2021年5月 **最初の試験運転(12日間)を実施**  
データ解析を実施し、初の上限值  
初のEnd-to-end試験に成功  
p偏光とs偏光が同時共振しない問題が発覚  
→ **信号較正のための測定、全候補のvetoに成功**
- 2021年11月 **同時共振実現に成功**  
補助共振器を導入するアイデア  
約3桁の感度向上に成功  
→ **光学的ロスを低減**



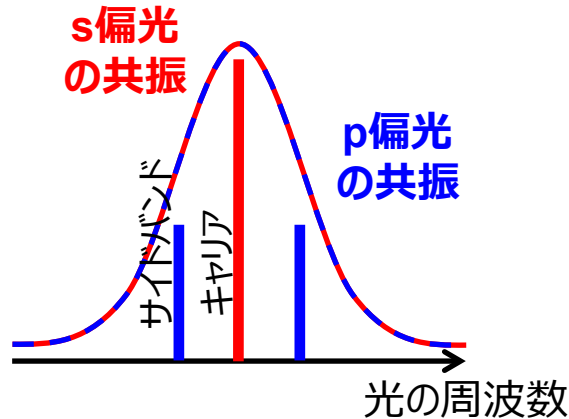
有限の入射角があるため、鏡の反射時に  
s偏光とp偏光に位相差が生じる  
→共振周波数差になる

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)  
H. Fujimoto+, [JPCS 2156, 012182 \(2021\)](https://doi.org/10.1143/JPCS.2156.012182)

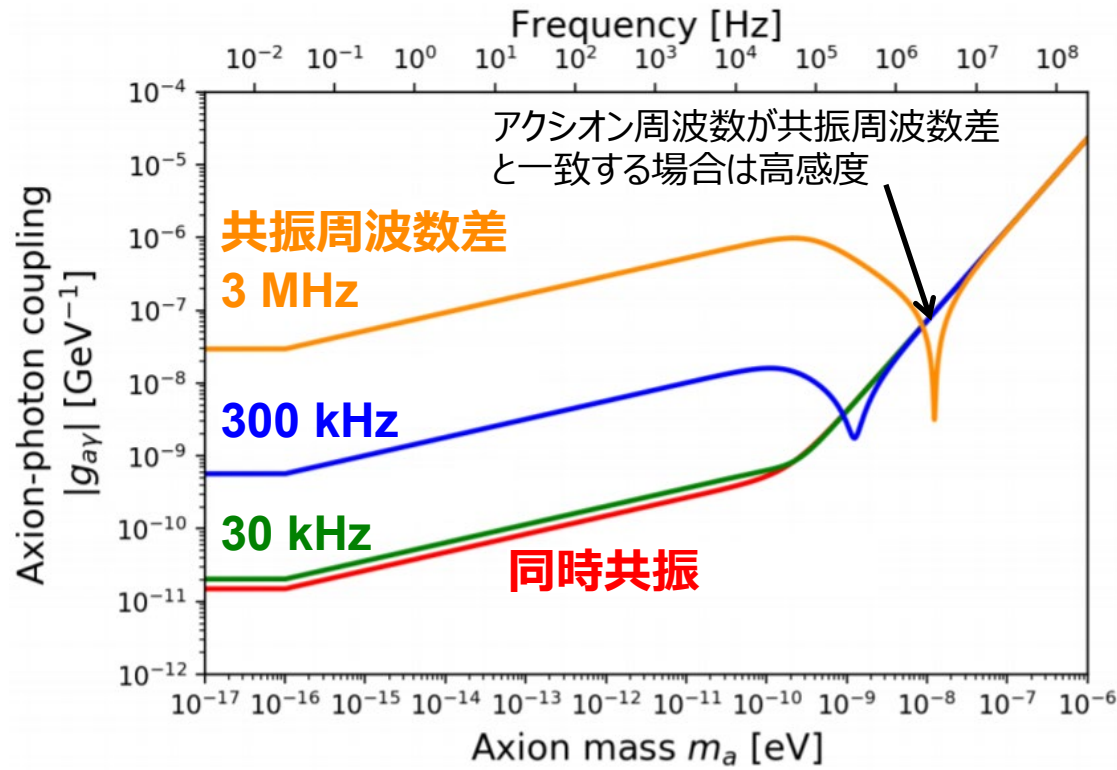
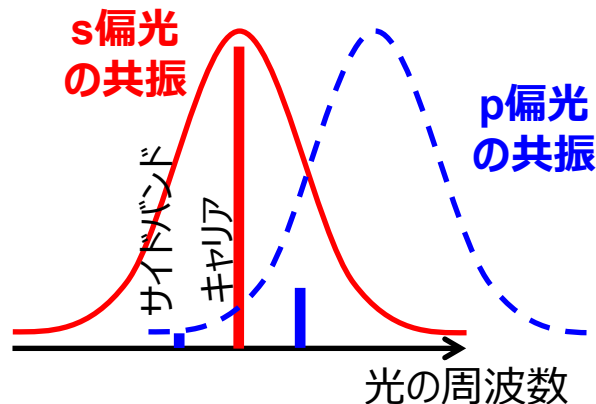
# s偏光とp偏光の同時共振

- 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

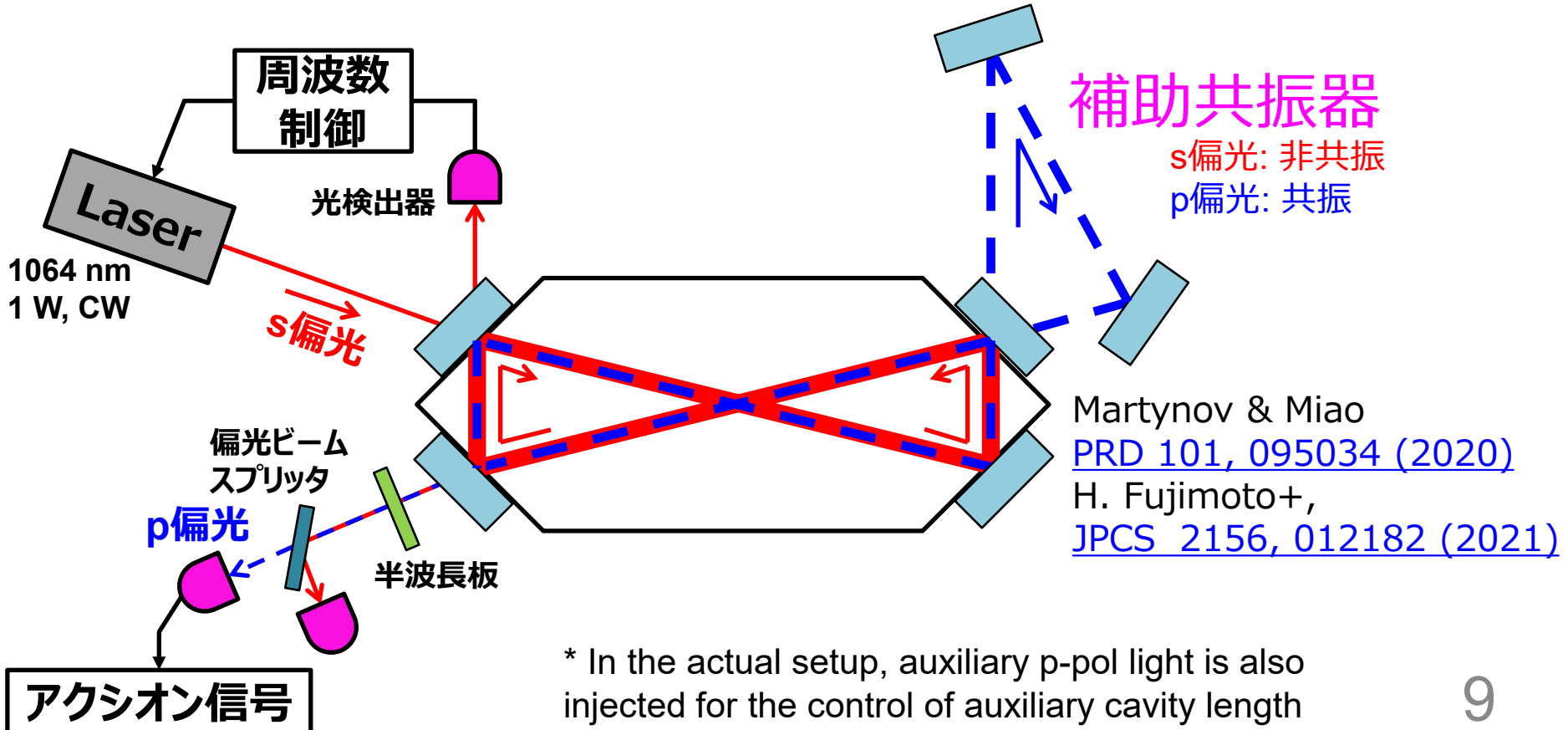


Plot by Y. Oshima & H. Fujimoto



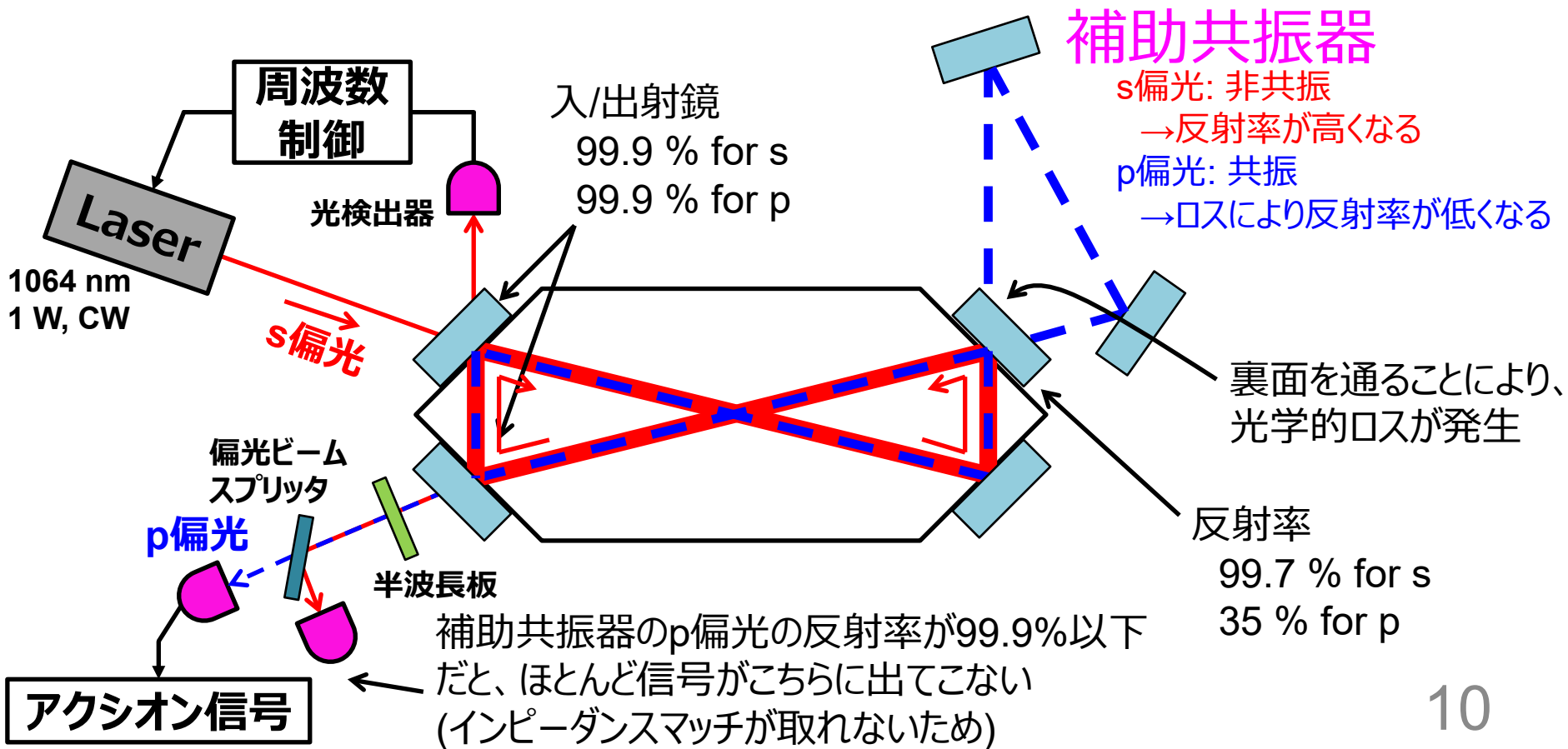
# 補助共振器の導入による解決

- 補助共振器でのs偏光とp偏光の共振状態に差をつけることで、補助共振器反射時に位相差をつける
- この位相差が、メイン共振器での位相差を補償



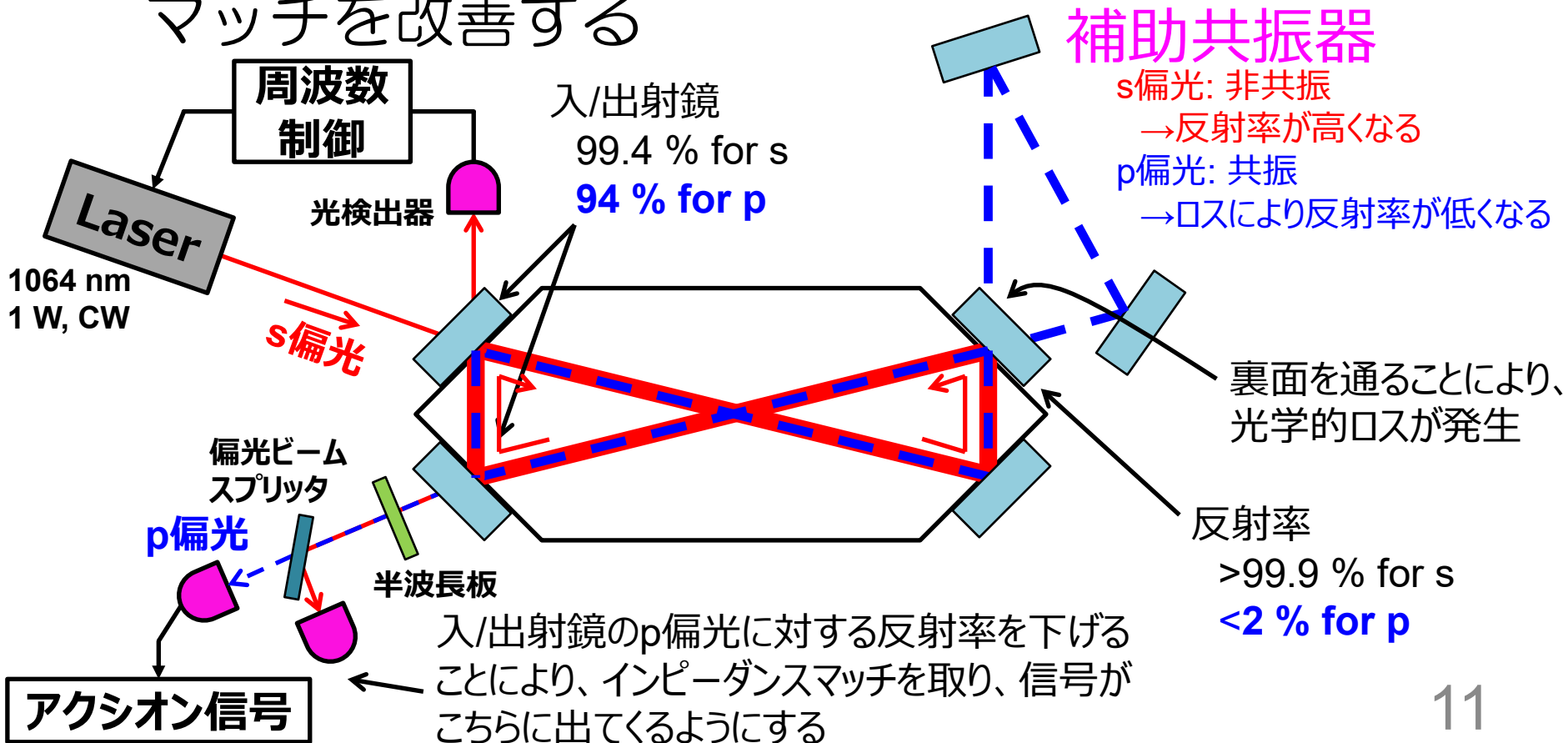
# 補助共振器での光学的ロス

- p偏光が信号取得ポートに出てくる量は補助共振器での光学的ロスやモードミスマッチに依存
- ほとんどの信号が補助共振器で失われてしまう



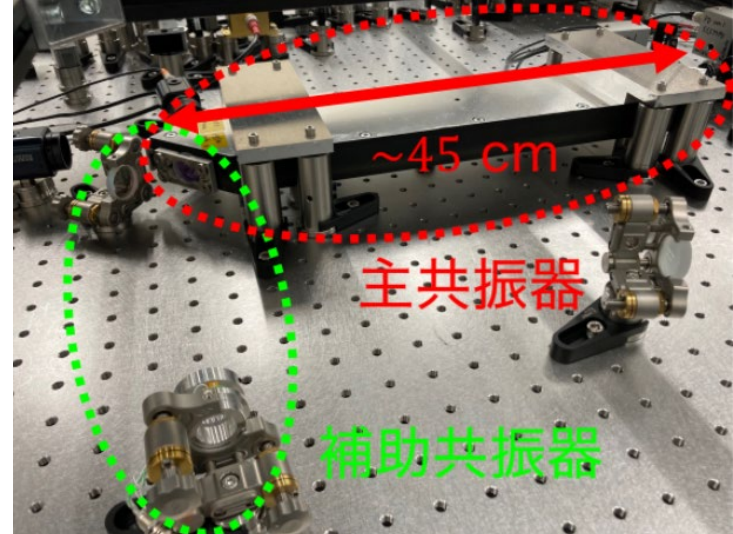
# 鏡の交換で信号のロス回避

- 補助共振器のp偏光のフィネスを下げ、補助共振器での光学的ロスが増幅されないようにする
- 入/出射鏡のp偏光の反射率を下げ、インピーダンスマッチを改善する



# 現状のパラメータ

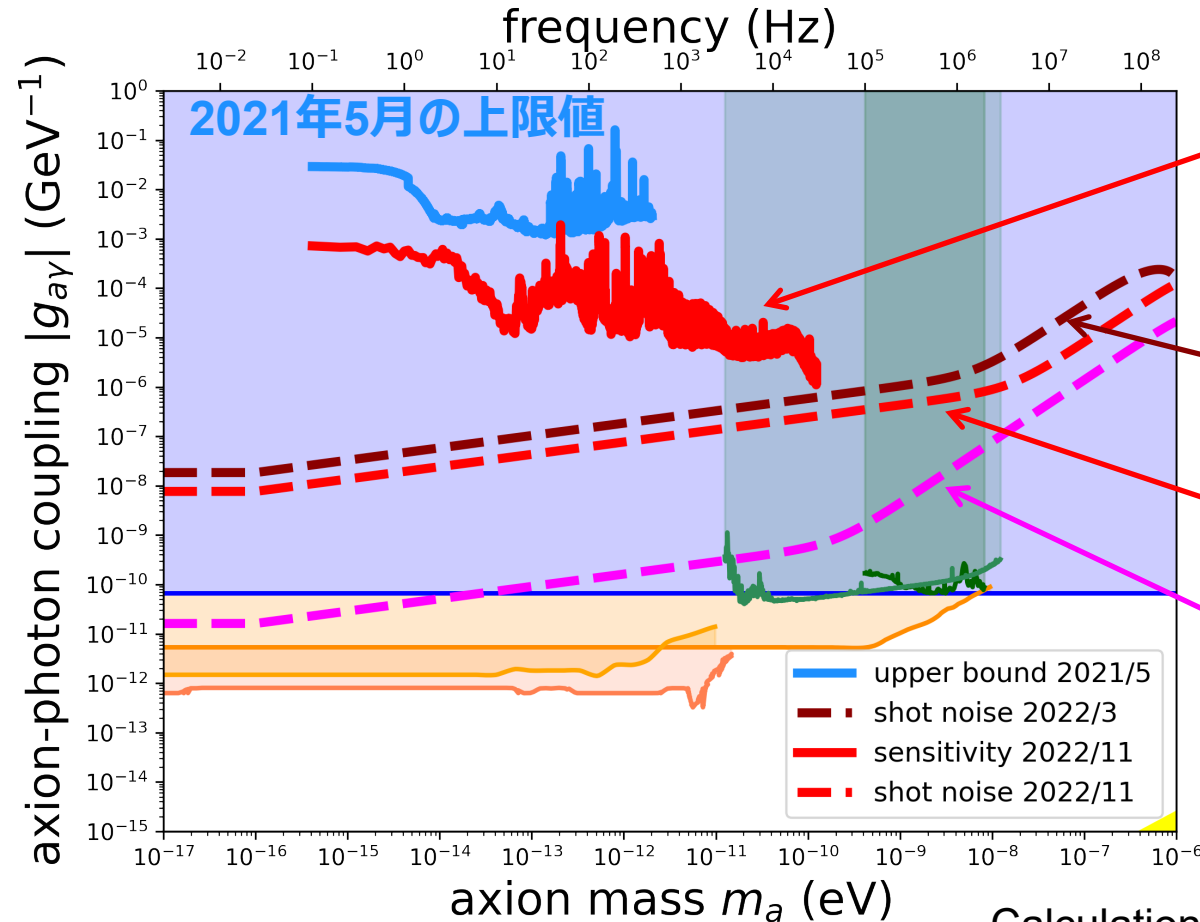
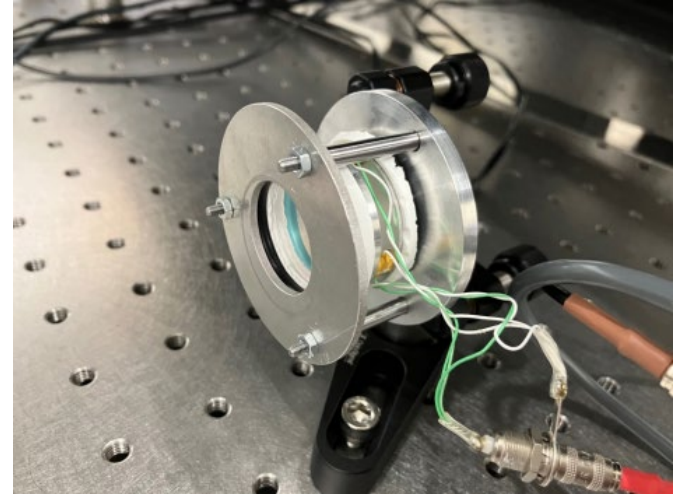
- 補助共振器のロスを6.5%から4.6%に下げ、**信号透過率を5倍改善**
- ただしフィネスは低減(上げることも可能)



	2021年5月	現状 (2022年11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	$2 \times 10^5$
フィネス (サイドバンド)	195(3) p偏光	36.8(2) p偏光、制御時	$2 \times 10^5$
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 12

# 現状の感度

- ショットノイズ限界を**2.4倍改善**
- 補助共振器の振動雑音低減のため  
ピエゾミラーを改良中



現状の雑音レベルで  
1年間観測した場合の  
推定感度

改善前のショットノイズ限界

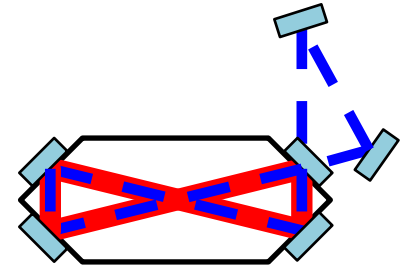
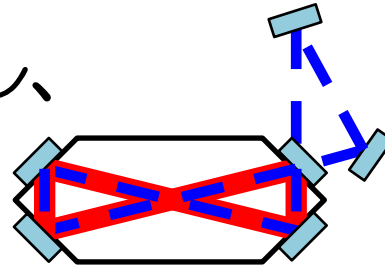
現状のショットノイズ限界

フィネス  $3 \times 10^3$  の場合  
のショットノイズ限界

# 今後の予定

- さまざまな**雑音低減**に取り組む
  - レーザー光の強度安定化
  - 迷光の低減(補助共振器制御用の光の周波数シフト、入射のp偏光除去など)
  - 共振器長制御の最適化(補助共振器PZTミラーの改善など)
  - 環境雑音のモニタと除去 などなど...

- **2つ目の装置**を製作し、  
相関解析



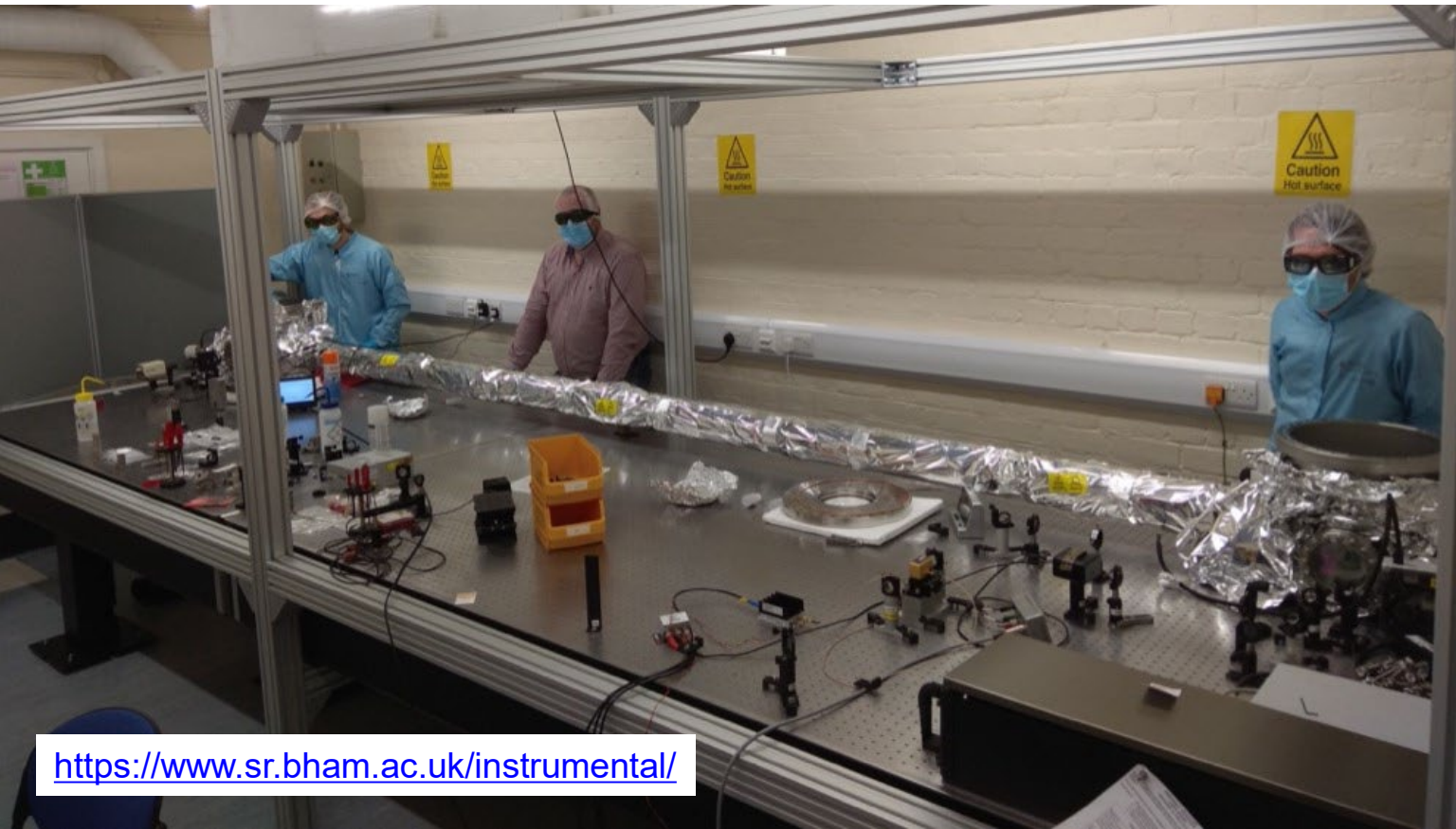
- **波長可変レーザー**を利用した同時共振の実現
- (カリフォルニア工科大学に異動したことにより、  
いまだに研究中断中... まずは研究の早期再開を  
目指す)



# ライバル現る

- 英国のバーミンガム大学が今秋から実験を開始
- 真空中、周回長10 m (我々は1 m)、  
490 kHz (2 neVのアクシオン質量に対応)の共振周波数差

Joscha Heinze, [KASHIWA DARK MATTER SYMPOSIUM 2022](https://www.kashiwa-dark-matter-symposium2022.com/)



# まとめ

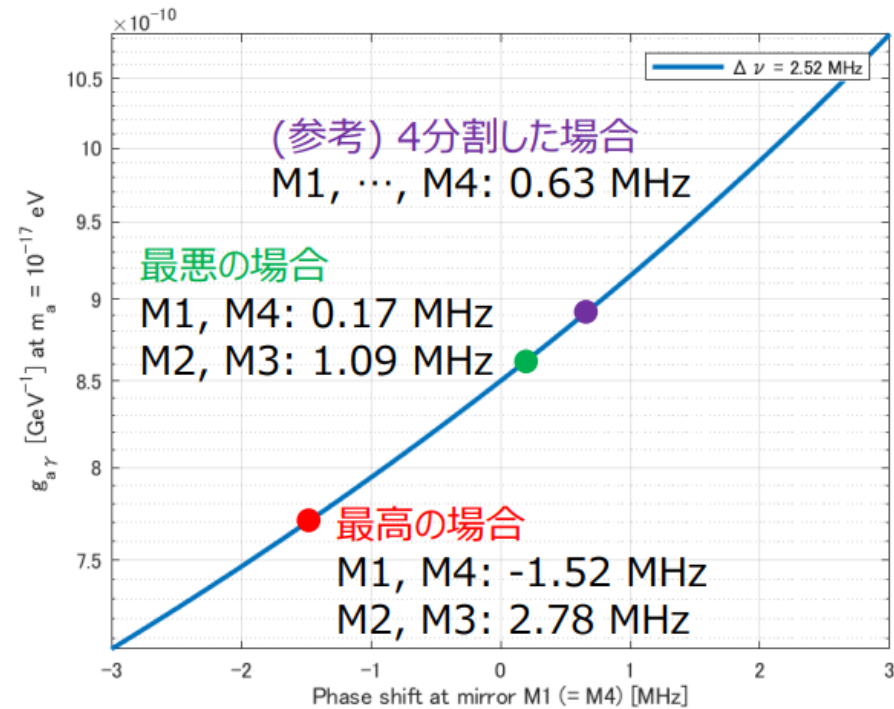
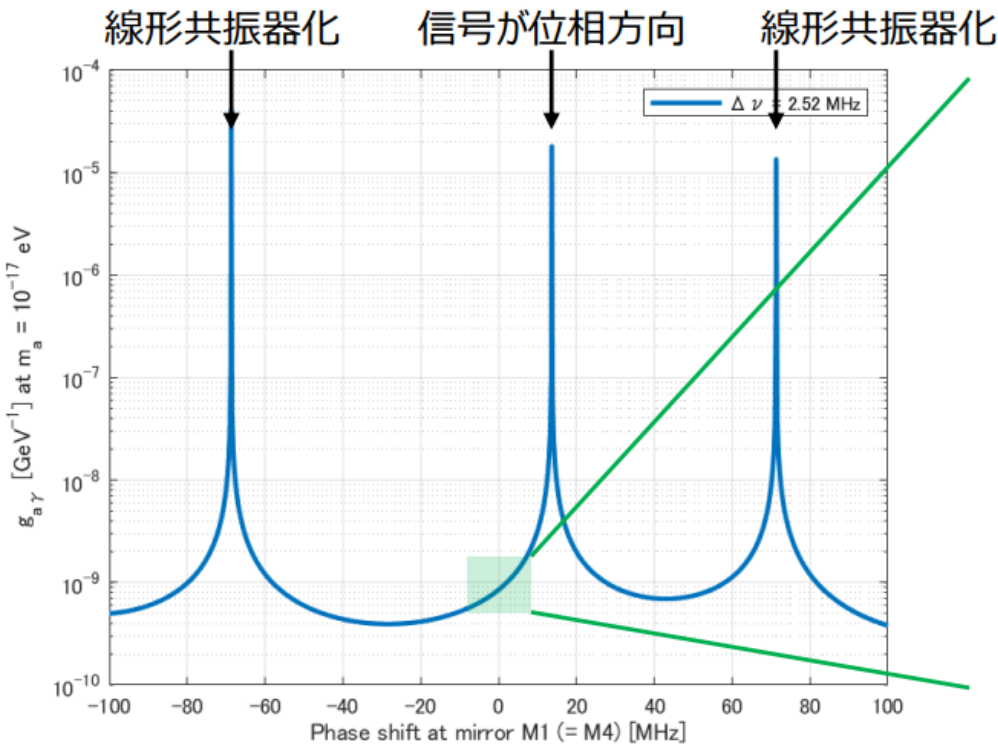
- レーザー干渉計により、全く新しいダークマター探索が可能になる
- 光リング共振器を用いて光の偏光回転を探索することにより、アクシオンダークマターを探索
- 2021年5月に初の試験運転を実施し、データ解析を含めた初のEnd-to-end試験に成功
- 信号の較正、全信号候補のvetoにも成功
- p偏光とs偏光が同時共振しない問題は補助共振器により解決
- 信号のロス低減や、雑音低減に取り組んでいる



補足資料

# 信号校正のための追加測定

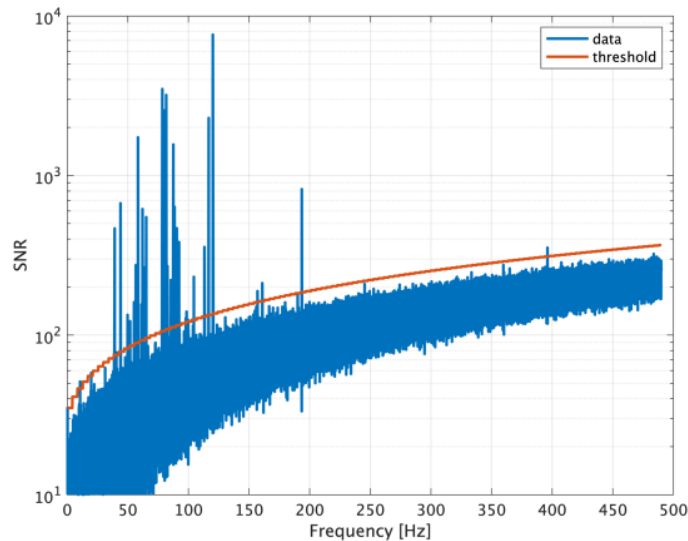
- 各鏡で生じる位相差によって校正係数が異なる



Plots by Y. Oshima

# 信号のVeto

- 約40 Hzの倍波でしきい値を超えるアクション信号候補



周波数 [Hz]	SNR	SNR閾値
81.6711	3197	109
81.6713	122	109
119.983	2070	136
120.001	2621	136
120.113	1120	136
120.118	7632	136
396.141	353	310

- 地震計信号、PDH信号にも同じ周波数にピークがあり、アクション由来ではないと言える

