

# 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)



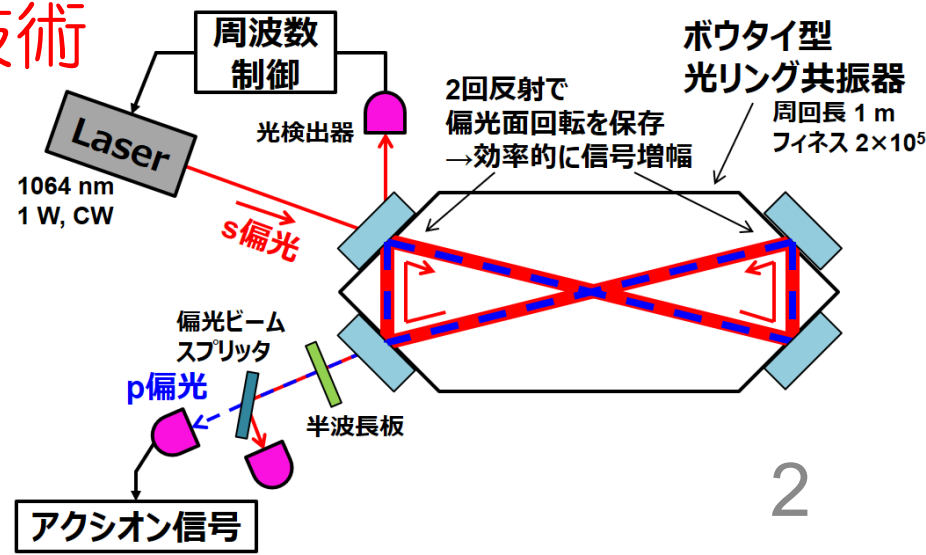
# さきがけ研究の概要

- 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**

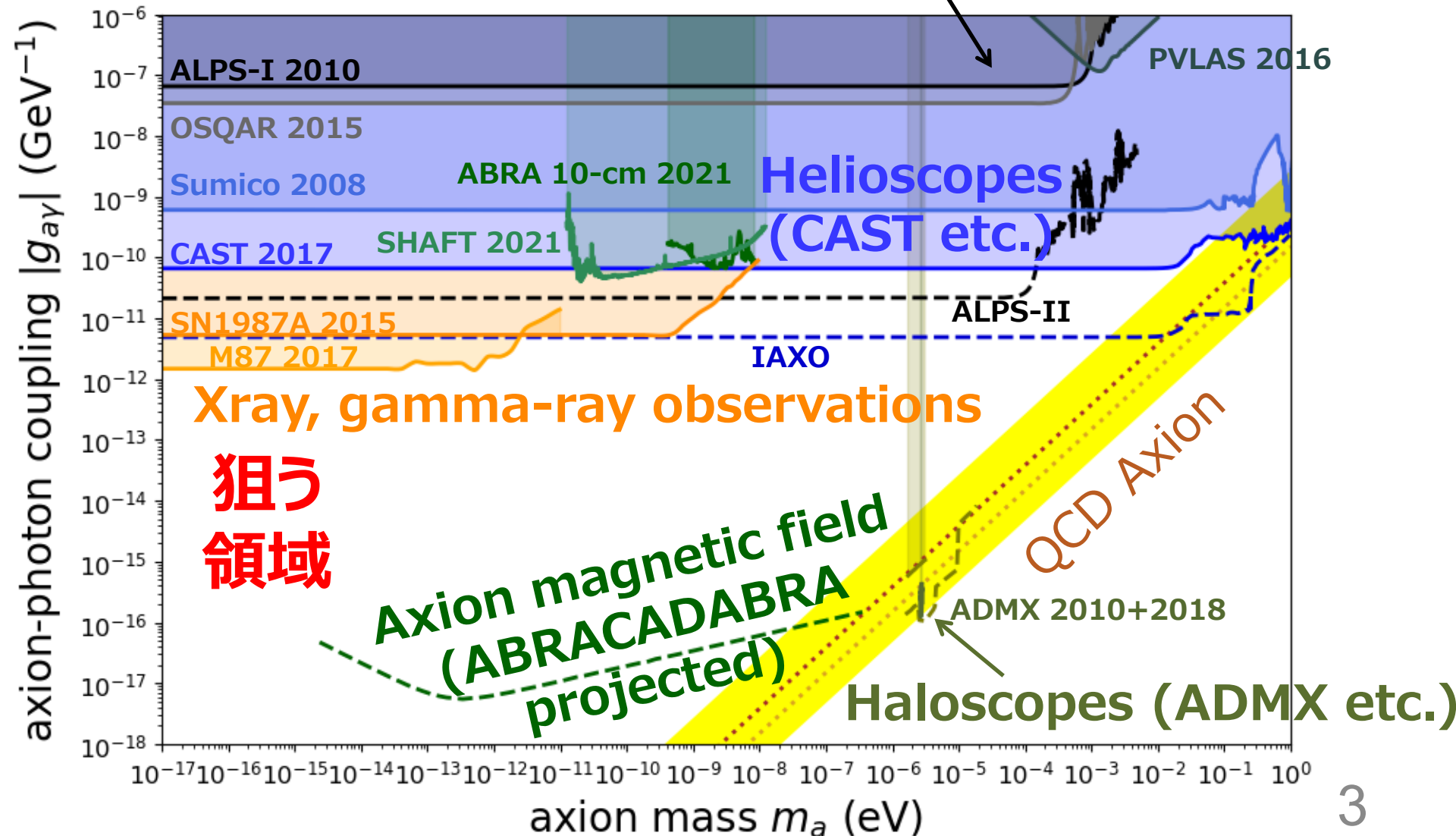
- 超精密偏光計測
- 超低振動光共振器

- 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

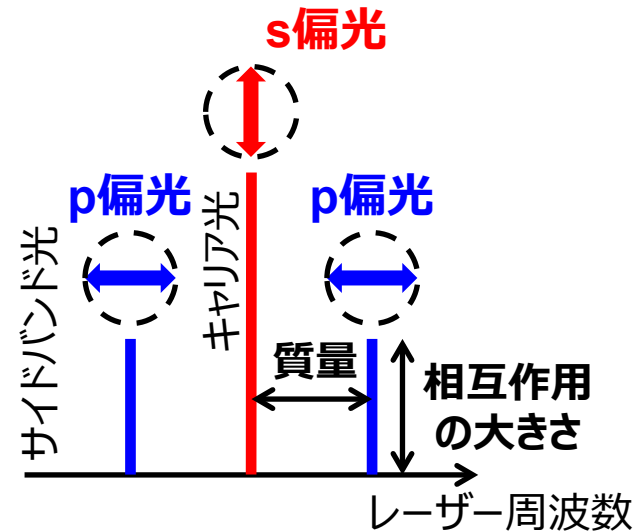
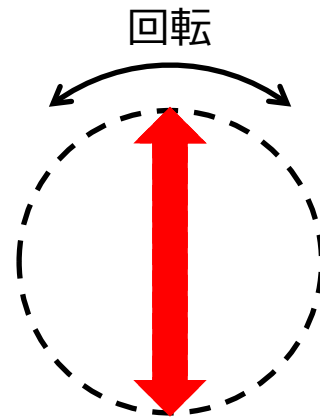
光の波数  
 アクション場  
 の振幅

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



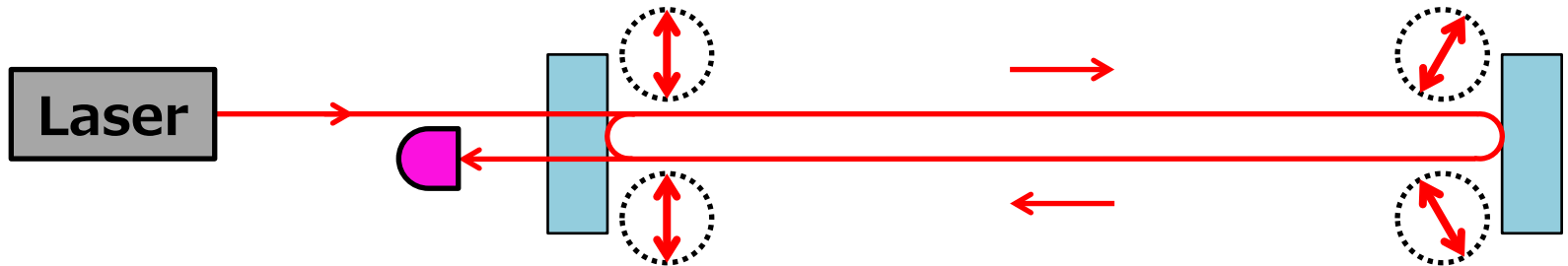
- 回転の周期からアクションの質量  
 振幅から相互作用の大きさ がわかる

# 光共振器を用いた信号増幅

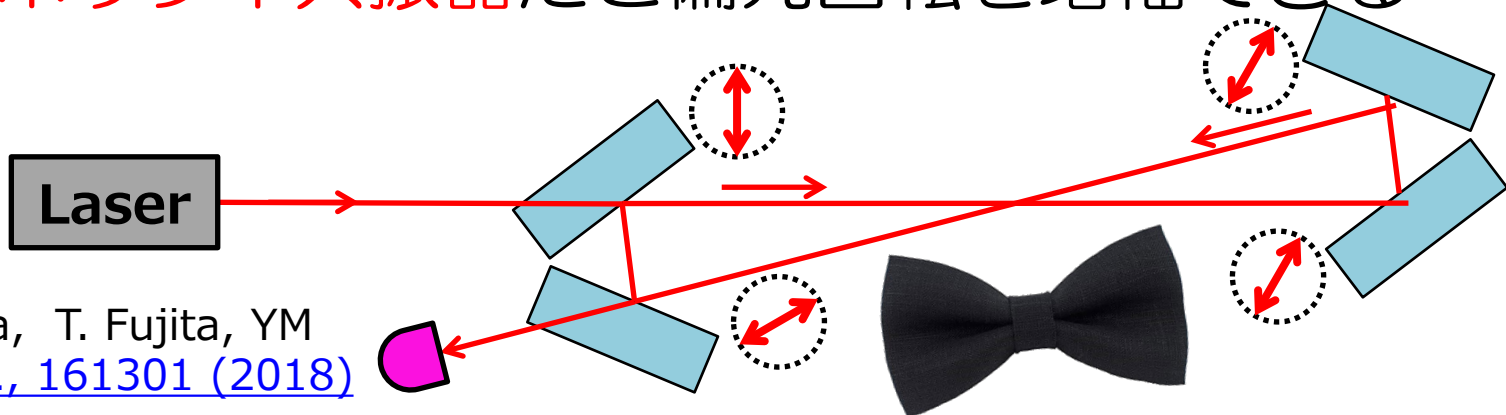
- 短い距離では偏光の回転角が小さい



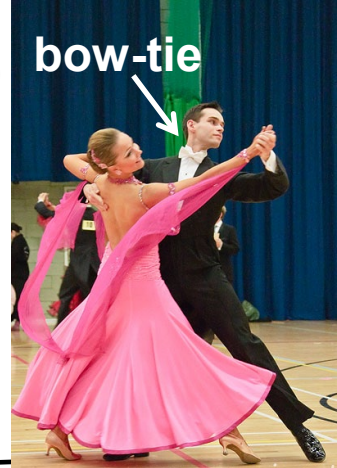
- 光共振器で距離を増幅することはできるが、鏡の反射で偏光が**反転**してしまう



- **ボウタイ共振器**だと偏光回転を増幅できる

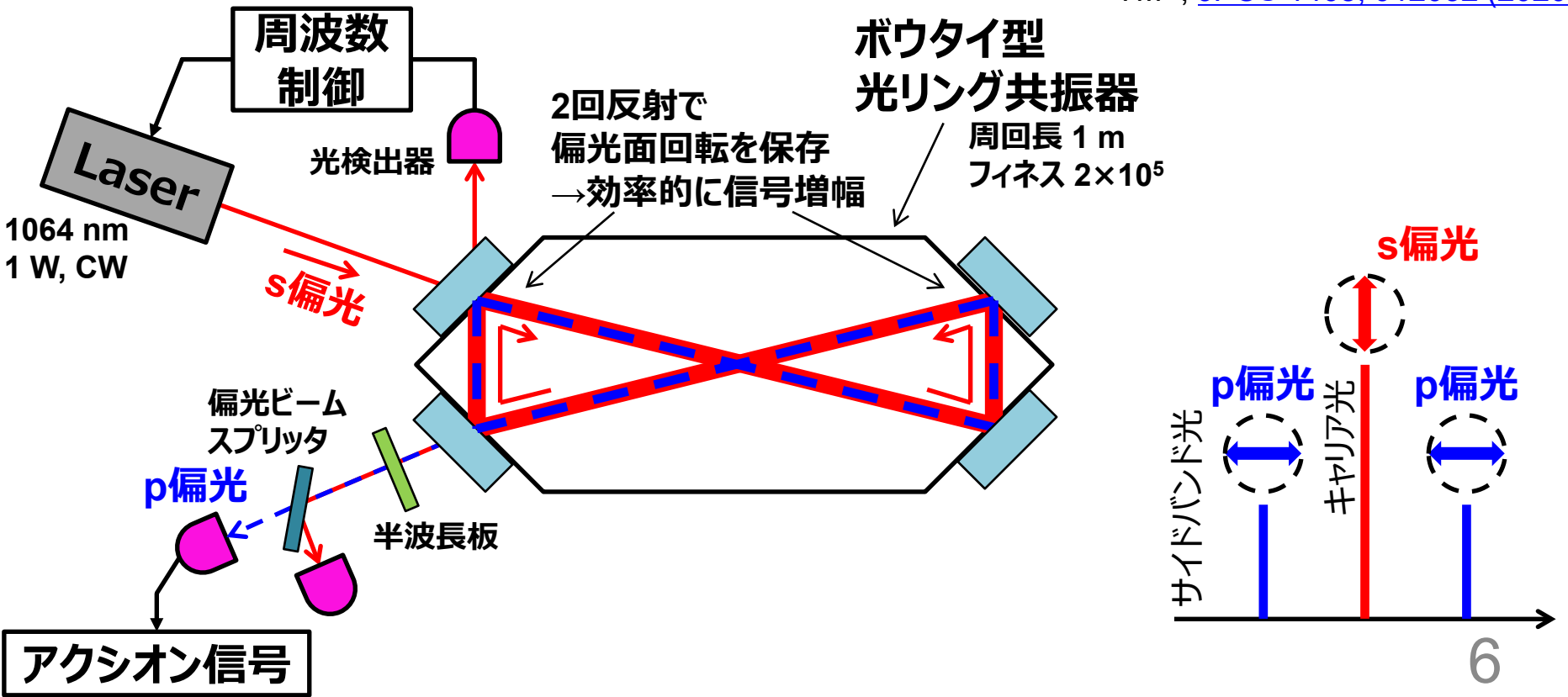


# DANCEのセットアップ



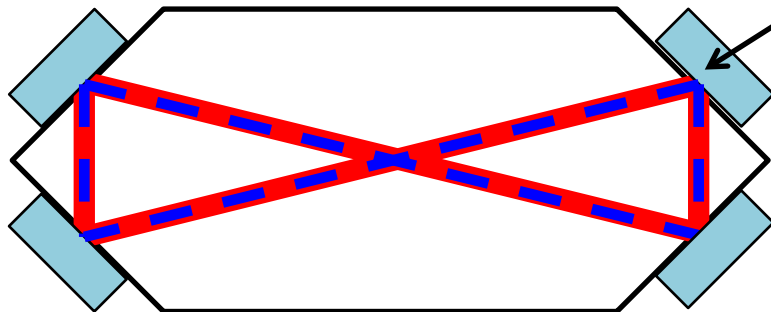
- Dark matter Axion search  
with riNg Cavity Experiment
- さきがけで世界最高精度での探索を目指す

YM+, [JPCS 1468, 012032 \(2020\)](https://doi.org/10.1063/1.5138103)



# 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  
解析結果 Y. Oshima+, [PRD 108, 072005 \(2023\)](#)  
解析手法 H. Nakatsuka+, *PRD accepted*
- 2021年11月 補助共振器による**同時共振実現**成功  
→ 2023年3月にこれまでの最高感度達成
- **波長可変レーザー**を利用した同時共振手法の開発  
**同時共振が可能な波長を同定**



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](#)

H. Fujimoto+, [arXiv:2105.08347](#)

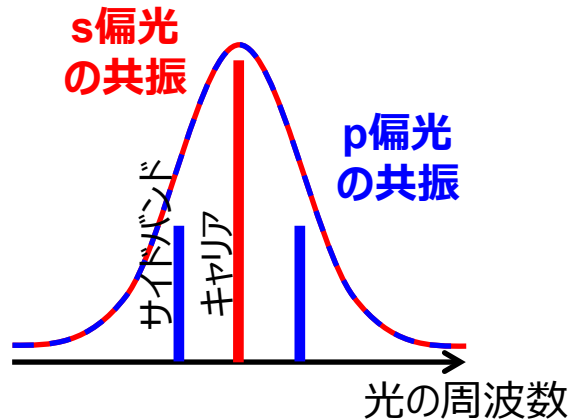
Y. Oshima+, [JPCS 2156, 012042 \(2021\)](#)

H. Fujimoto+, [JPCS 2156, 012182 \(2021\)](#)

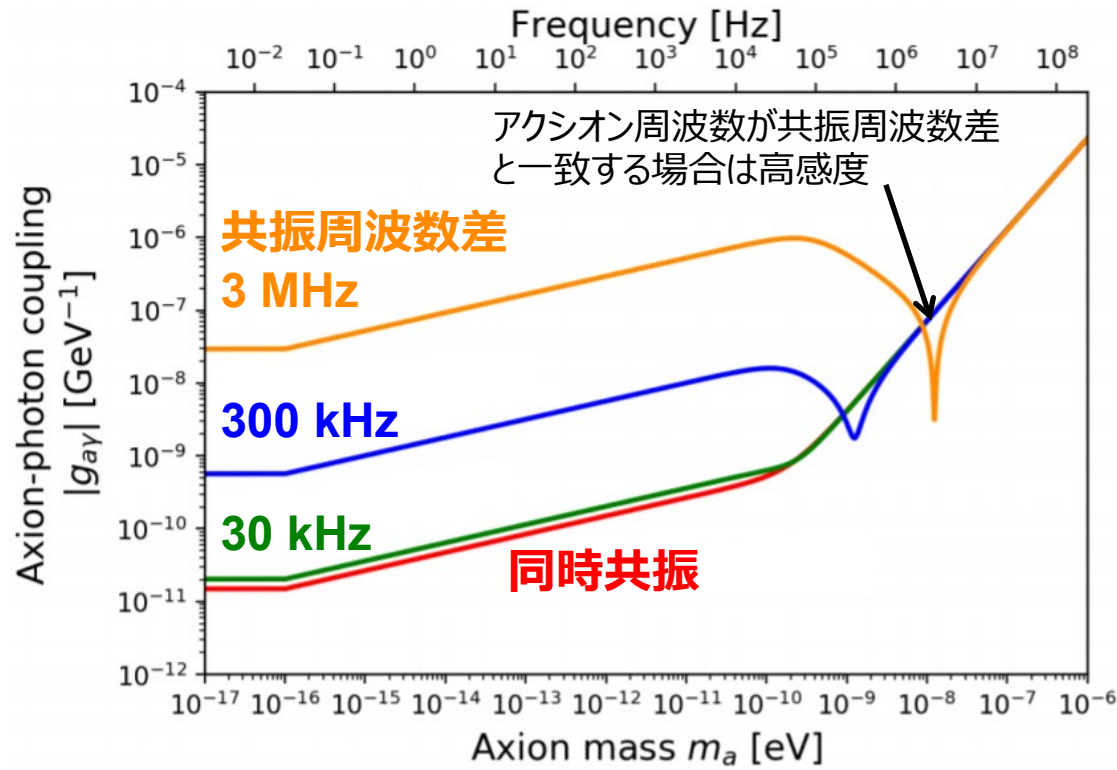
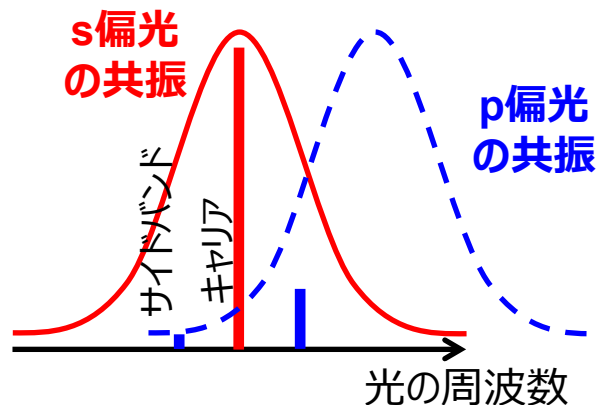
# s偏光とp偏光の同時共振

- 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

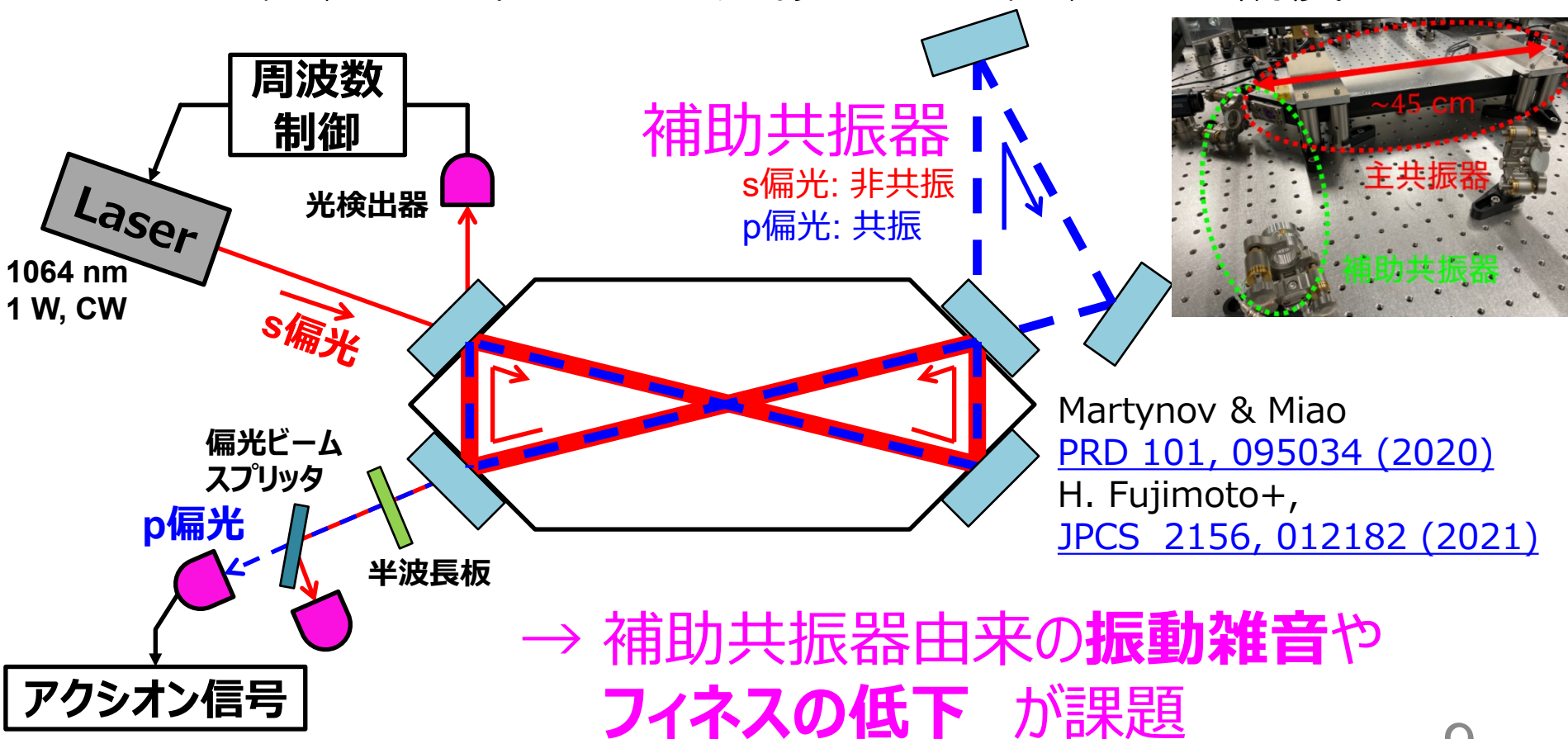


Plot by Y. Oshima & H. Fujimoto



# 補助共振器を利用した同時共振

- 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



# 波長可変レーザーの利用

- 鏡の反射位相の偏光間の差には波長依存性がある
- レーザー波長によっては同時共振が可能

- 外部共振器型半導体レーザー(ECDL)を開発

波長: 1045-1068 nm

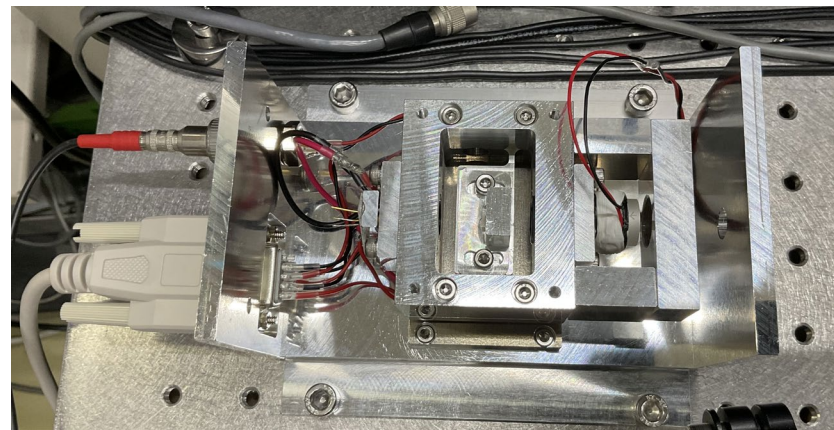
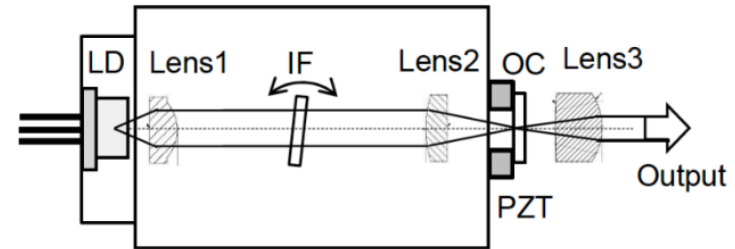
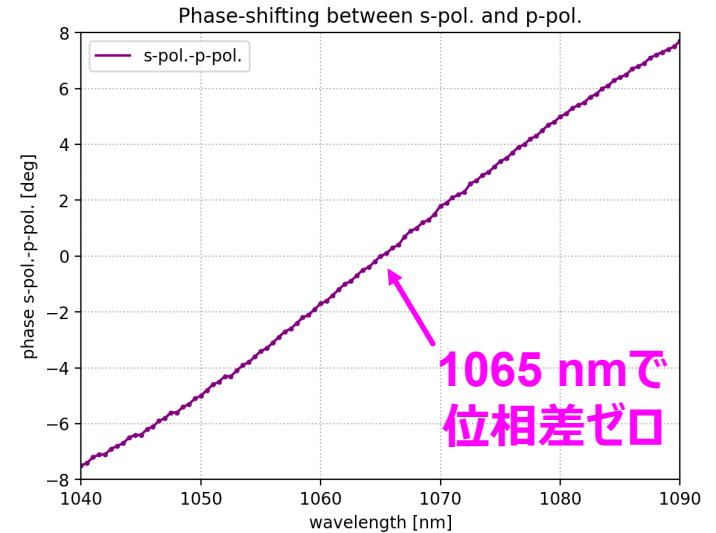
線幅: 200 kHz

出力: 50 mW

(電気通信大学

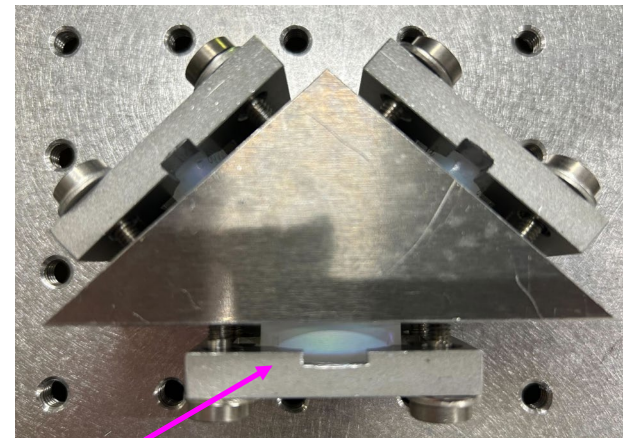
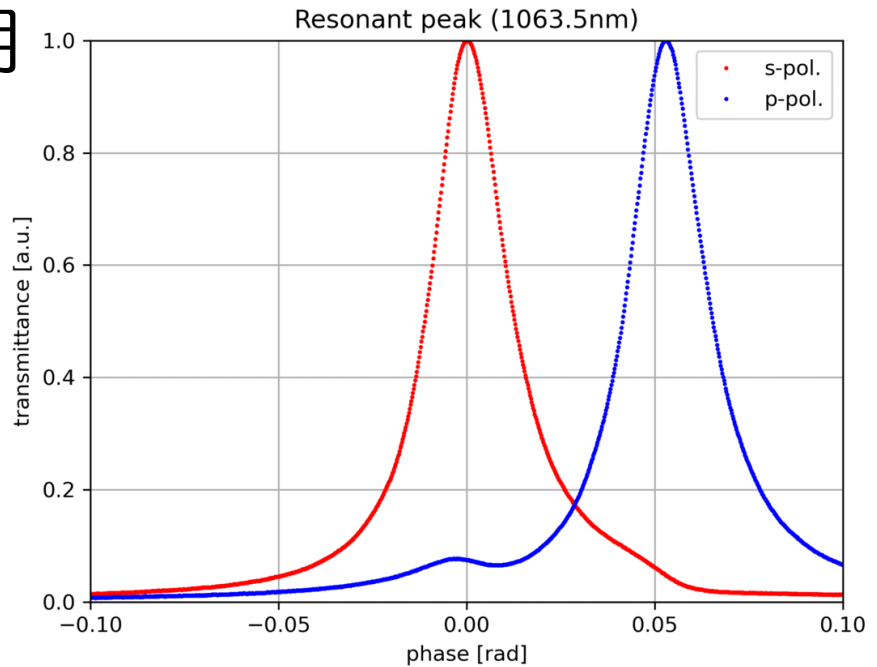
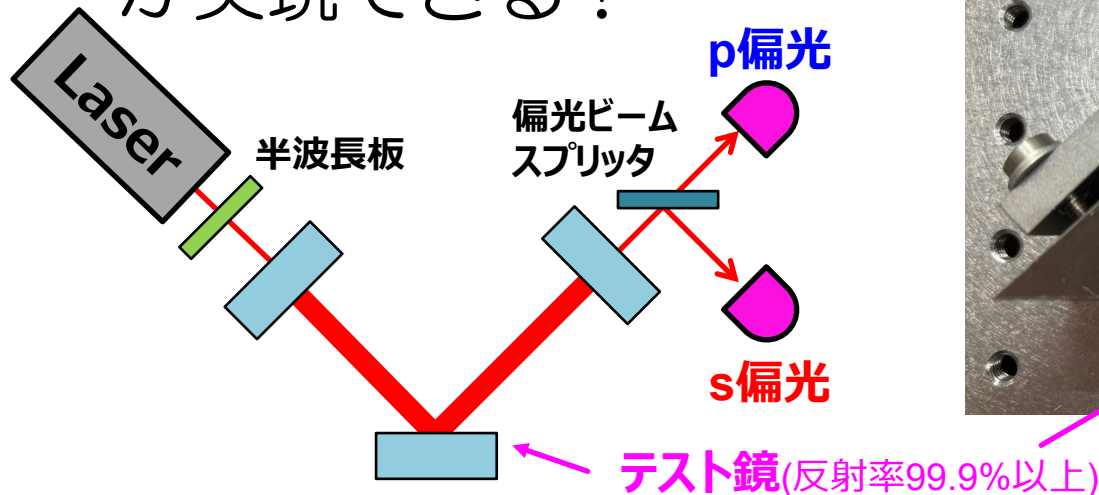
中川賢一先生

のご協力)



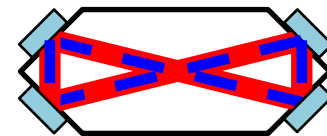
# 反射位相差の波長依存性測定

- V字型の光共振器を利用
- 1067 nm付近で  
反射位相差がゼロに  
なることを確認  
(設計では1065 nm)
- この鏡とECDLで  
高フィネスの同時共振  
が実現できる！



Plot by  
H. Takidera

# 手法の比較



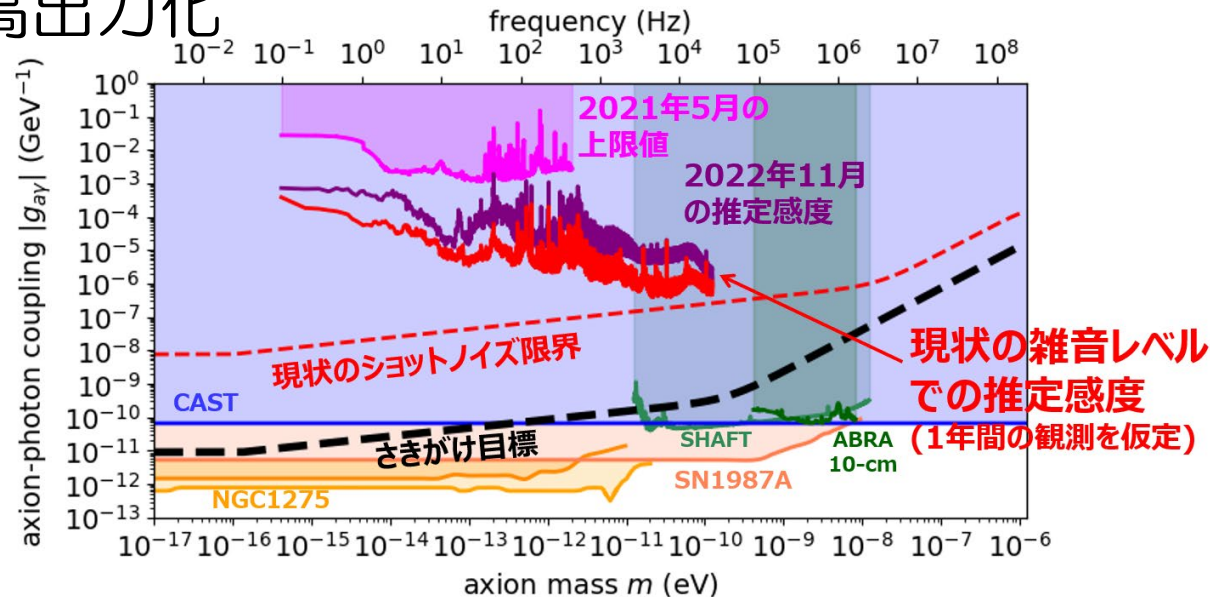
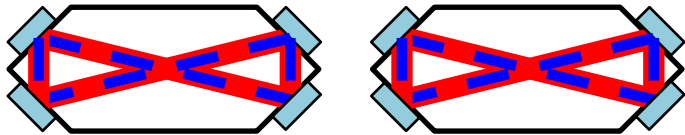
|                | 補助共振器  | 波長可変レーザー          | 入射角の調整  |
|----------------|--|-------------------|---|
| 提案             | Birmingham<br><a href="#">PRD 101, 095034 (2020)</a> | 我々                | MIT<br><a href="#">PRD 100, 023548 (2019)</a> |
| 実証             | 済み(我々)   | 開発中               | 未定  |
| 高フィネス化         | 限界あり   | 可能                | 可能  |
| 高出力化           | 容易   | 広帯域アンプが<br>必要な可能性 | 容易  |
| 共振器長制御         | 複雑   | 容易                | 容易  |
| 位相差調整によるスweep° | 容易   | 共振器の再ロック<br>必要そう  | 機械的に角度<br>を変える必要                              |
| コーティングの<br>依存性 | あまりなし  | 出来次第              | 出来次第  |
| 振動雑音           | sとpで別光路  | sもpも同光路           | 同光路(だがマウン<br>ト難しい)                            |

# 今後の予定

- **波長可変レーザー**を利用した同時共振の実現と観測運転

- フィネス  $10^4$  程度 (s&p偏光)
- 制御帯域拡大と周波数雑音の低減
- 振動雑音などの低減
- レーザー光の高出力化

- **2つ目の装置**を製作し、**相関解析**

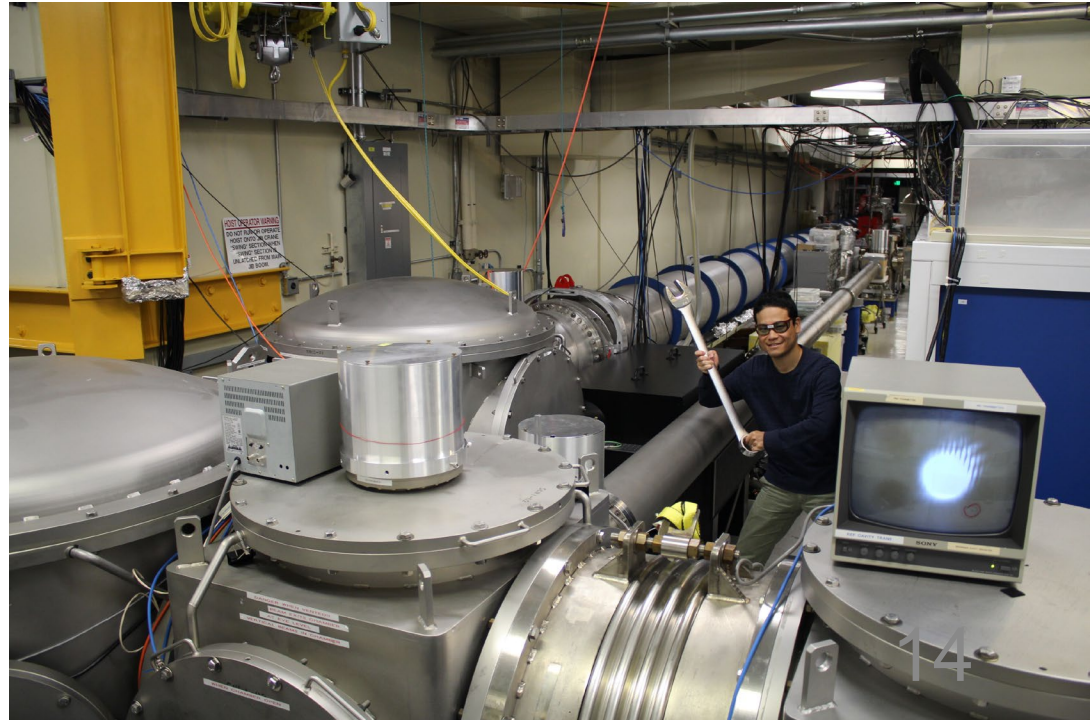


- (カリフォルニア工科大学でも予算が使えるようになりました。ありがとうございました！)

# 40 m干渉計によるアクシオン探索

- カリフォルニア工科大学にはLIGOの試験をする  
40 mのプロトタイプ干渉計がある
- これに偏光測定光学系を導入し、**アクシオン探索**  
も可能にする計画を進めている
- 重力波検出器を利用したアクシオン探索の試験
  - 重力波測定との  
**共存**の実現性
  - **校正手法**

**LIGO**  
**Caltech**

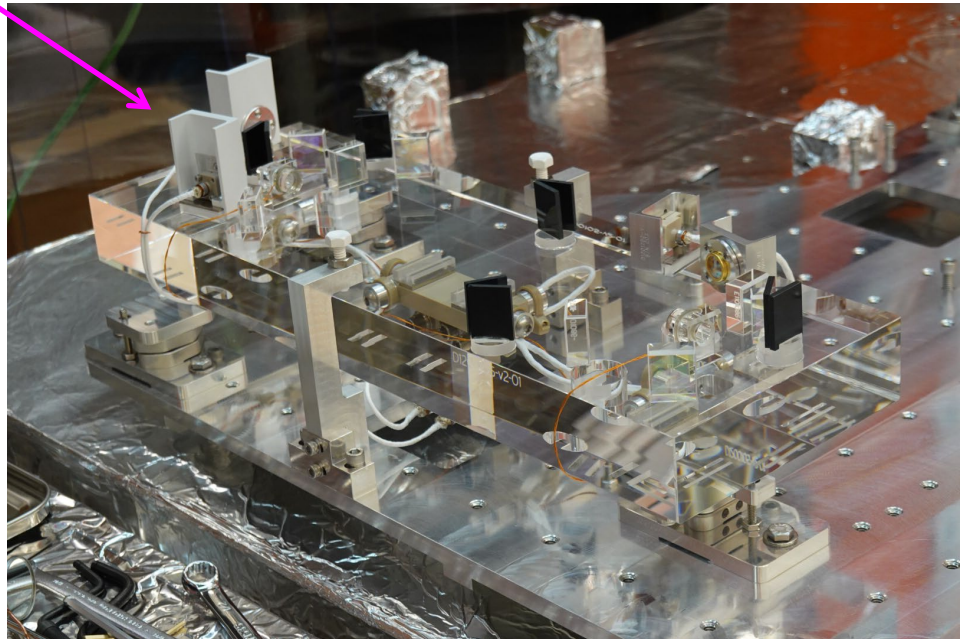
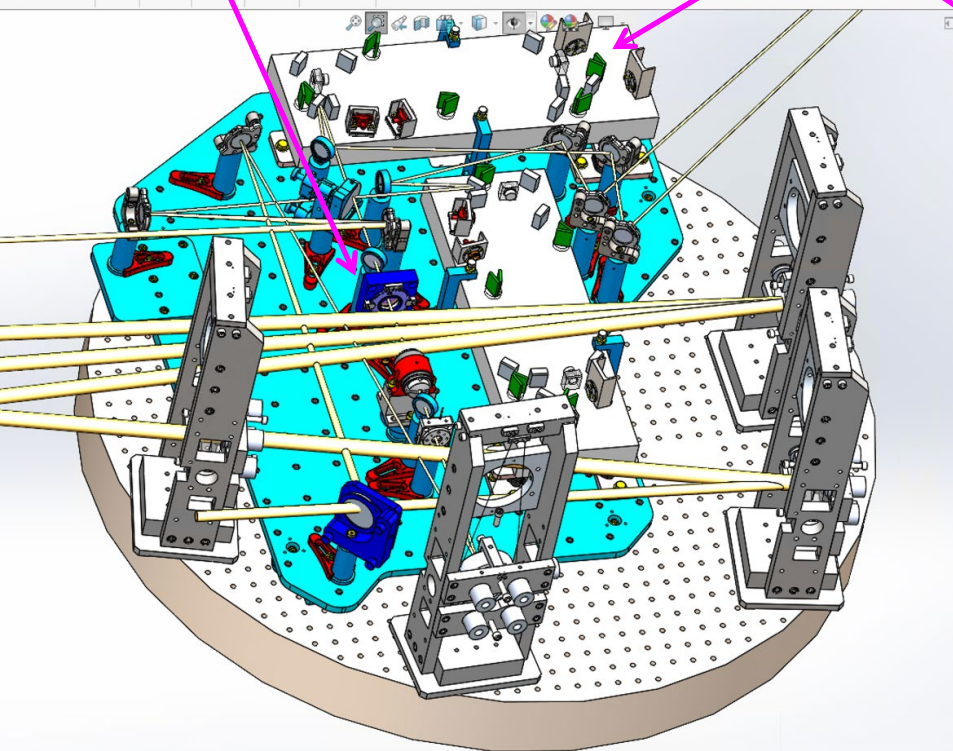


# 40 m干渉計によるアクシオン探索

- 今月大気導入し、**偏光光学系**(とバランス型ホモダイク検出のための光学系)を真空槽内にインストールする作業を進めている

半波長板

アウトプット・モード・クリーナー(光検出器に入る高次モード等を除去)



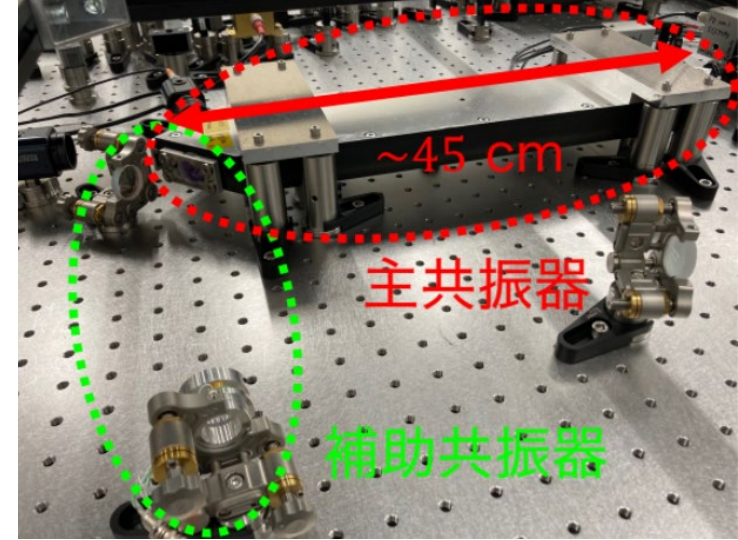
# まとめ

- 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、初の上限值設定に成功
  - Y. Oshima+, [PRD 108, 072005 \(2023\)](#)
  - 解析手法も開発 H. Nakatsuka+, *PRD accepted*
- p偏光とs偏光の同時共振しない問題
  - 補助共振器を利用する手法は実証済み  
高フィネス化と振動雑音低減に限界？
  - 波長可変レーザーを利用する手法を開発中  
高フィネスな同時共振が実現できる見込み



# 補足資料

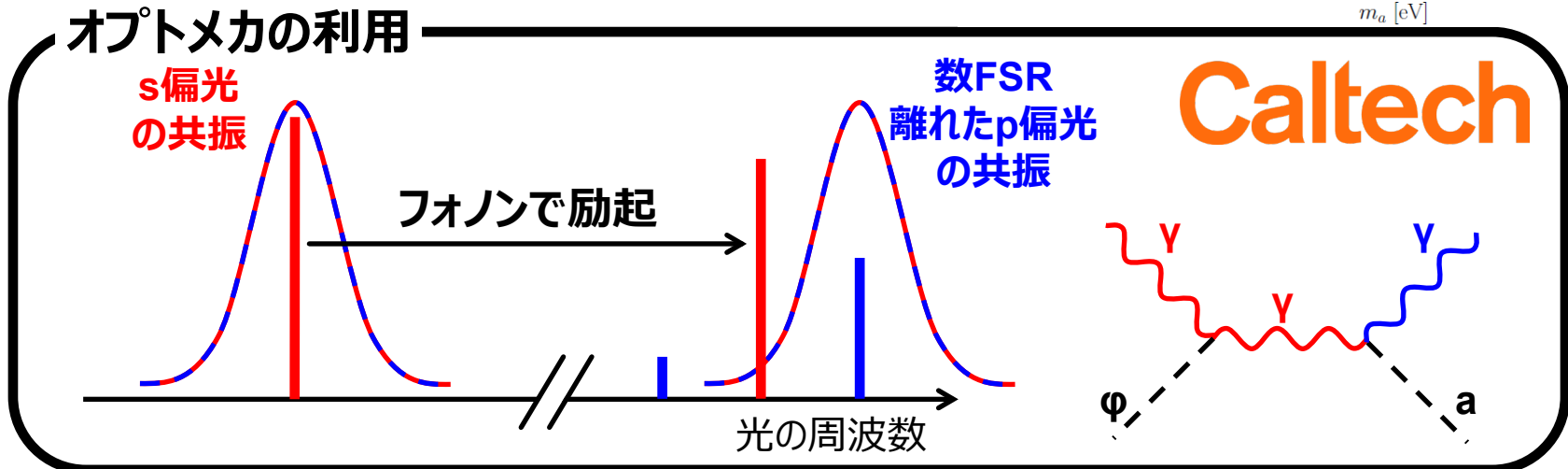
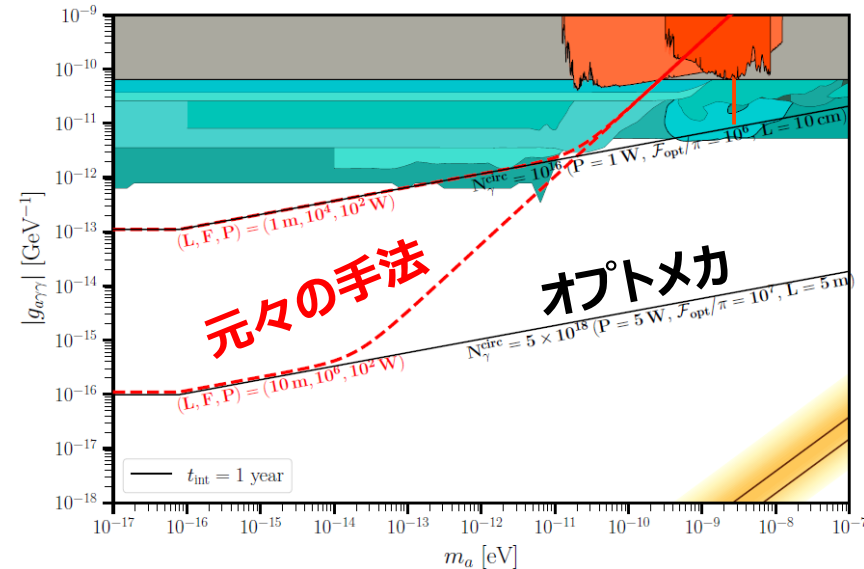
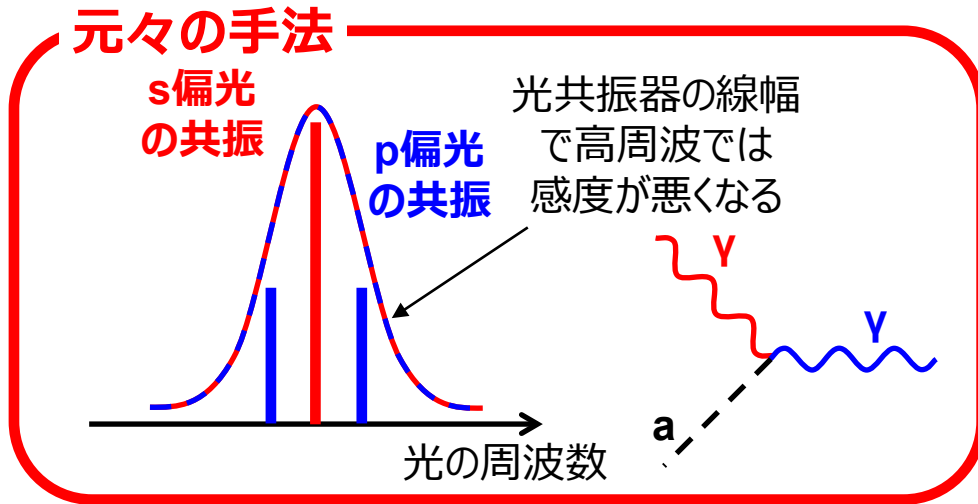
# 補助共振器の パラメータ



|                    | 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<br>(+0.5 m 補助共振器)       | 1 m             |
| 入射光強度              | 242(12) mW<br>(光源: 0.5 W)    | 21.4(9) mW<br>(光源: 2 W)     | 1 W             |
| フィネス<br>(キャリア)     | $2.85(5) \times 10^3$<br>s偏光 | 549(3)<br>s偏光、制御時           | $2 \times 10^5$ |
| フィネス<br>(サイドバンド)   | 195(3)<br>p偏光                | 36.8(2)<br>p偏光、制御時          | $2 \times 10^5$ |
| s偏光とp偏光の<br>共振周波数差 | 2.52(2) MHz                  | 制御で~0 Hz<br>(もともとは ~92 MHz) | 0 Hz<br>18      |

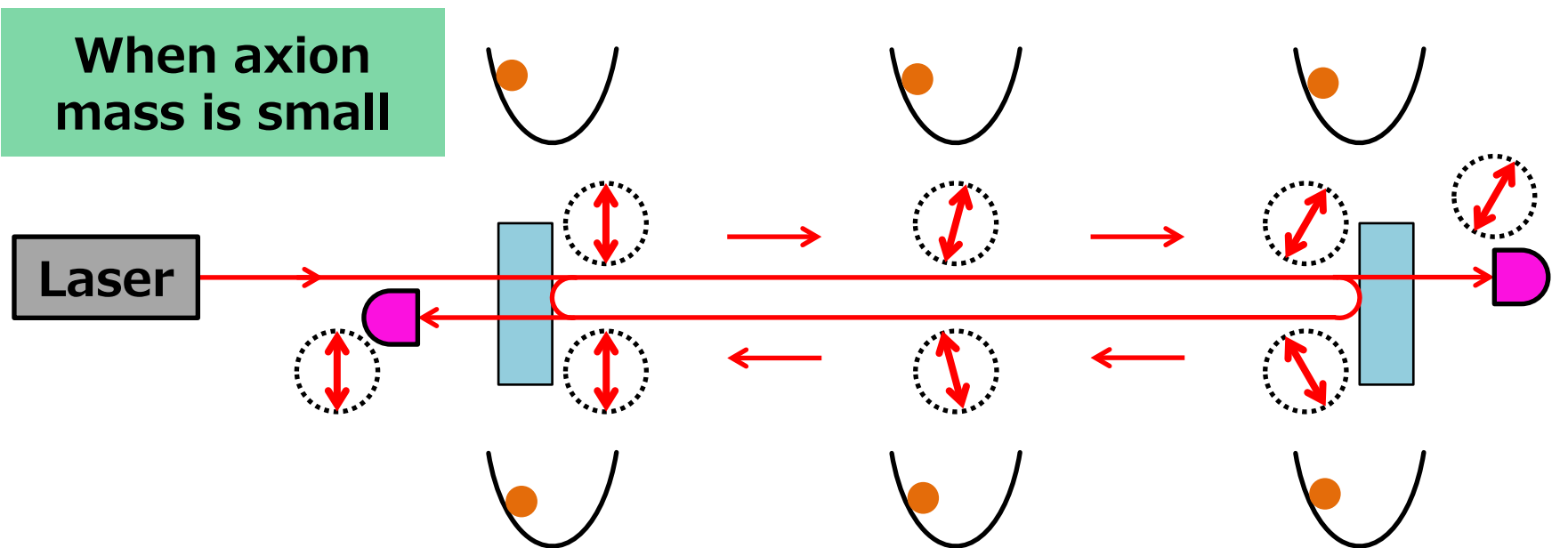
# 極秘プロジェクト

- **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)



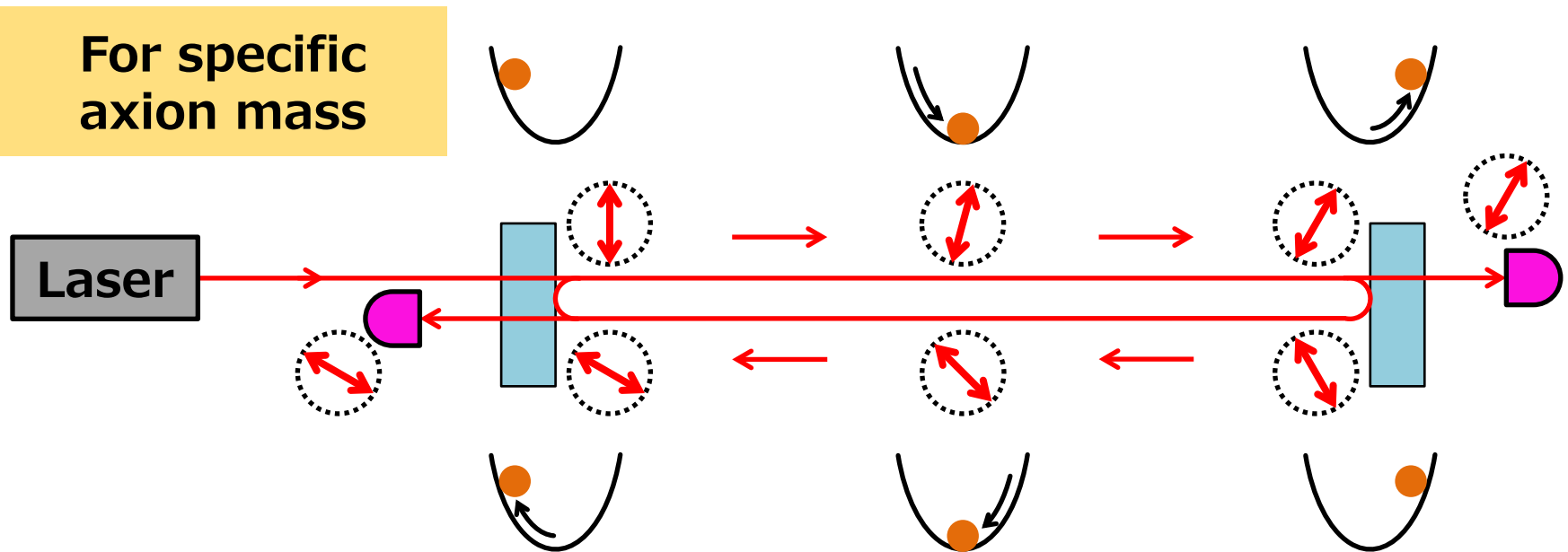
# 線形光共振器による探索

- 鏡での反射により偏光が反転してしまうため、アキシオンの振動周期が光の往復時間より長い場合は反射光での探索は困難
- 長基線長であれば透過光での探索は可能



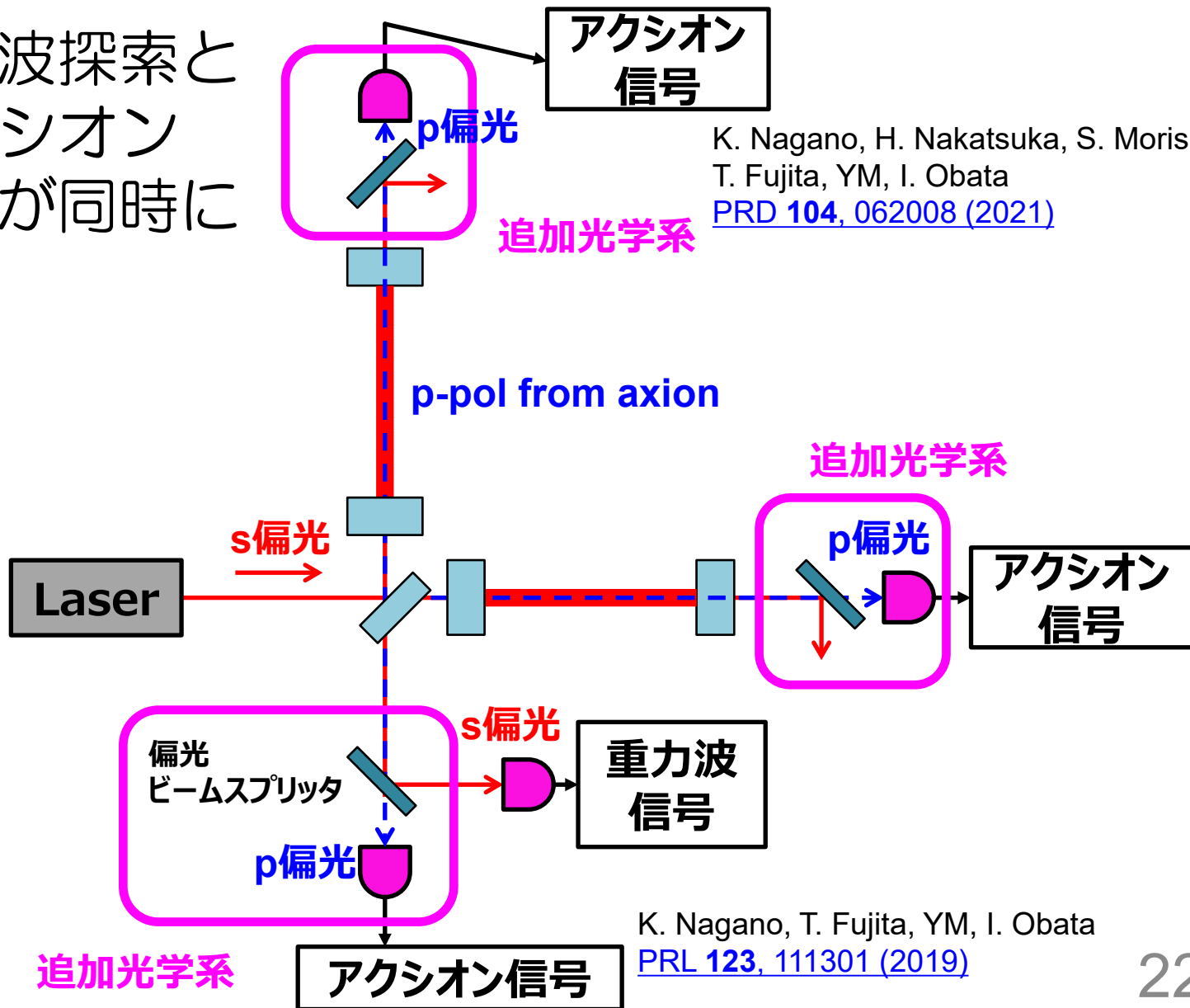
# 線形光共振器による探索

- 光の往復時間がアキシオン振動周期の奇数倍のときは、鏡による偏光の反転を利用し、反射光での信号増幅が可能



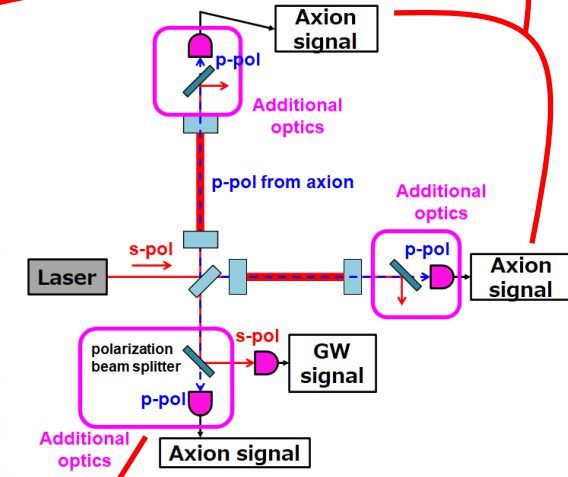
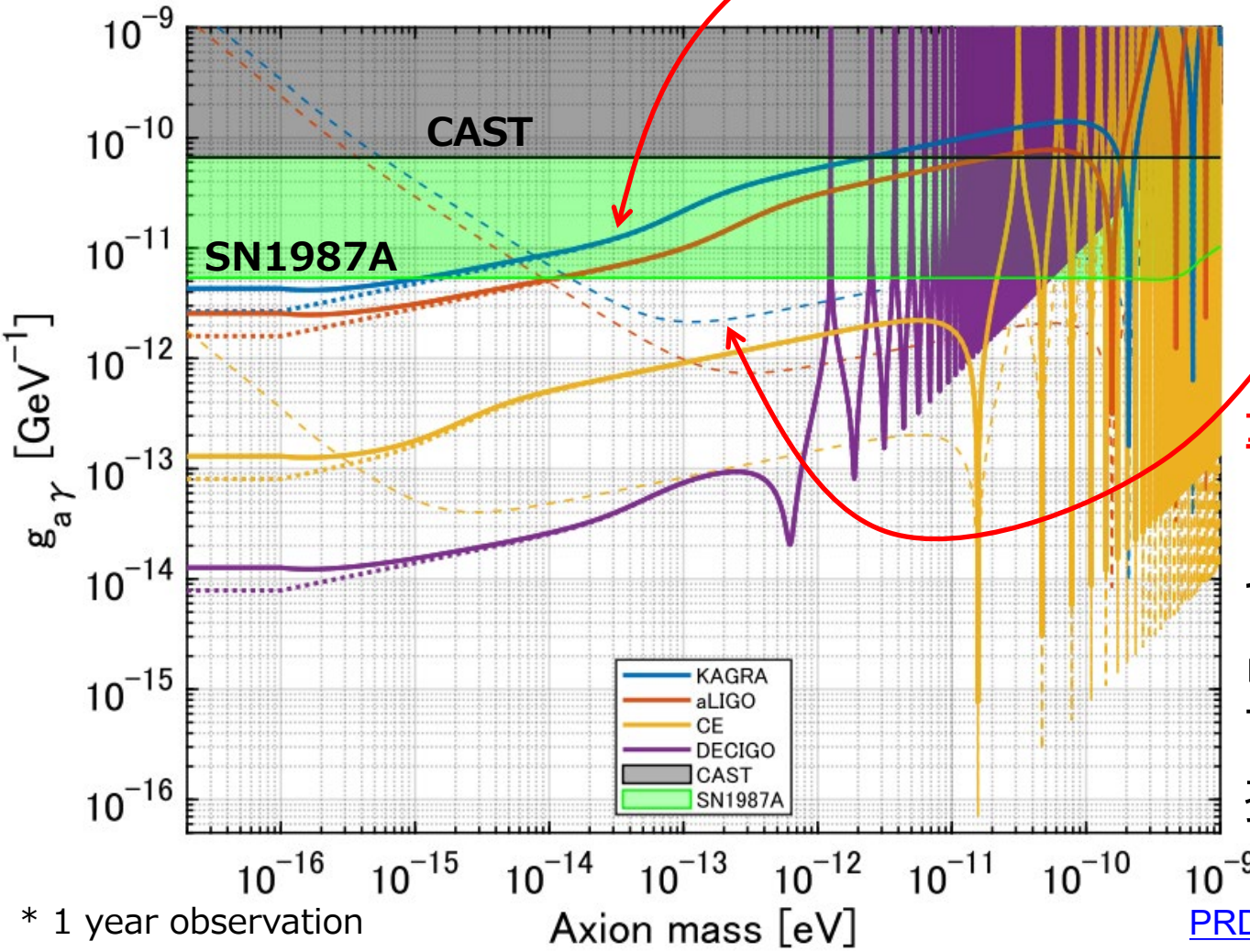
# 重力波検出器でアクシオン探索

- 重力波探索とアクシオン探索が同時に可能



# LIGOやKAGRAのアクシオン感度

腕共振器の  
透過光ポート



重力波検出ポート

それぞれの干渉計  
出力ポートを利用  
することで相補的な  
探索が可能

\* 1 year observation