

2023年5月21日

さきがけ「革新光」

2023年度第1回領域会議 @ アスティ45、札幌

# 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)



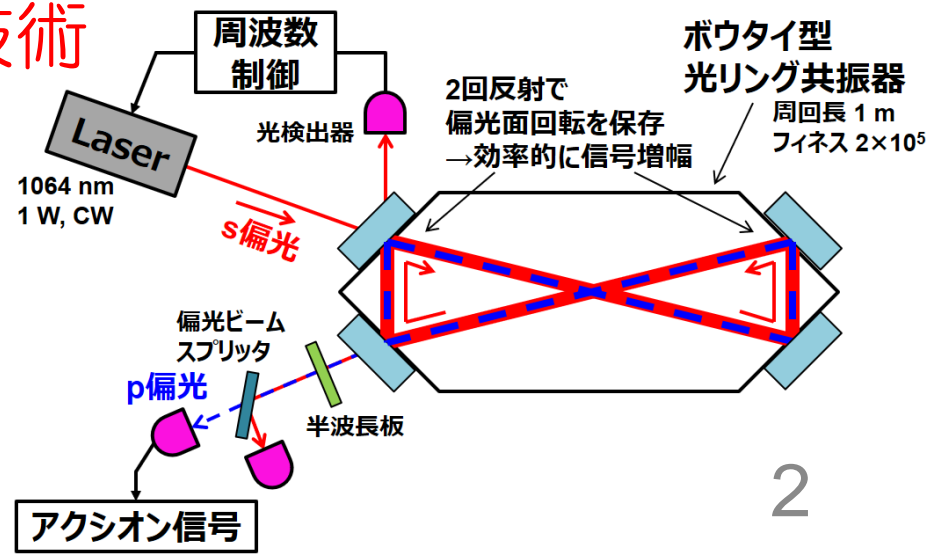
# さきがけ研究の概要

- 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

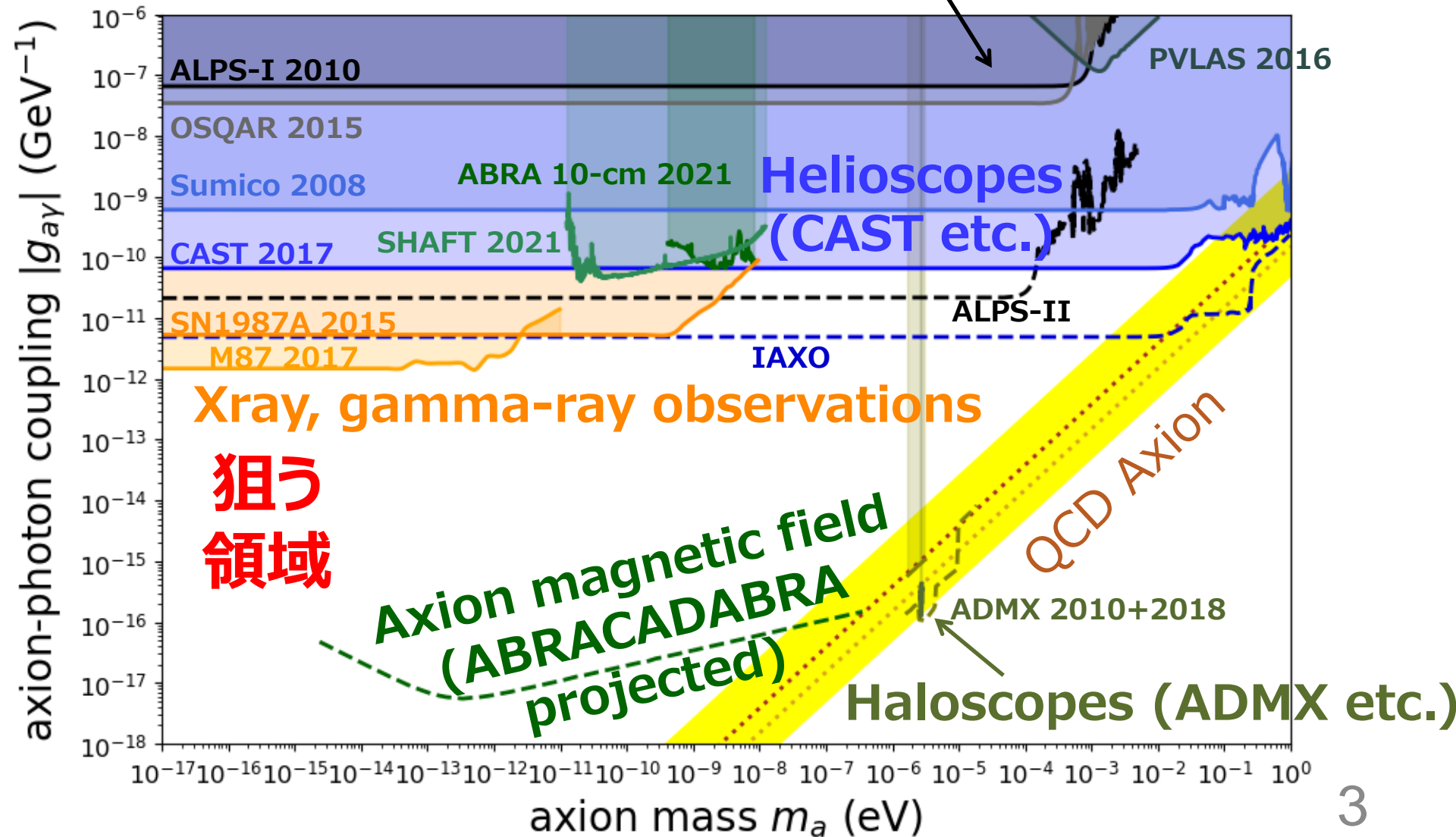
- 超精密偏光計測
- 超低振動光共振器

- 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

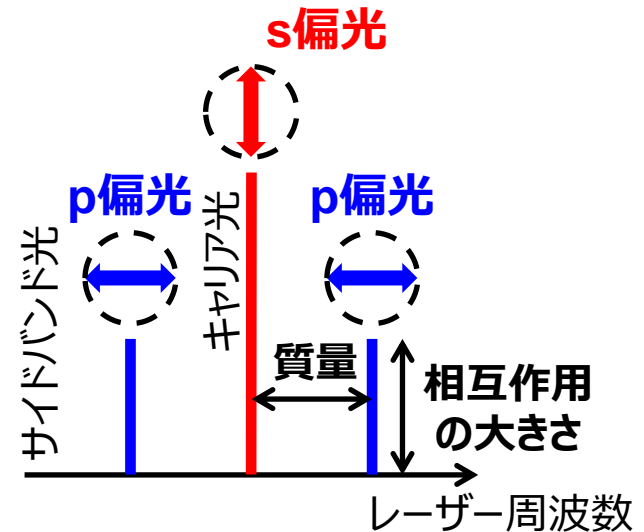
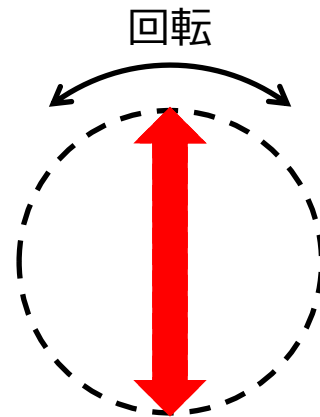
光の波数  
 アクション場  
 の振幅

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



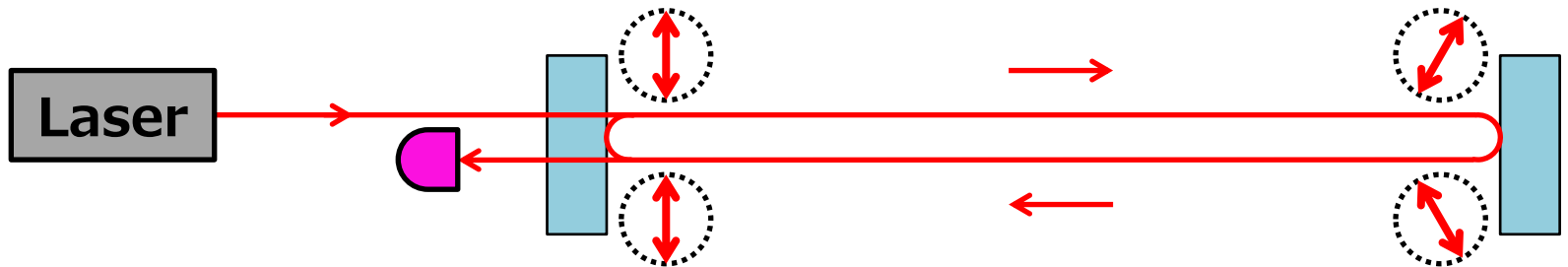
- 回転の周期からアクションの質量  
 振幅から相互作用の大きさ がわかる

# 光共振器を用いた信号増幅

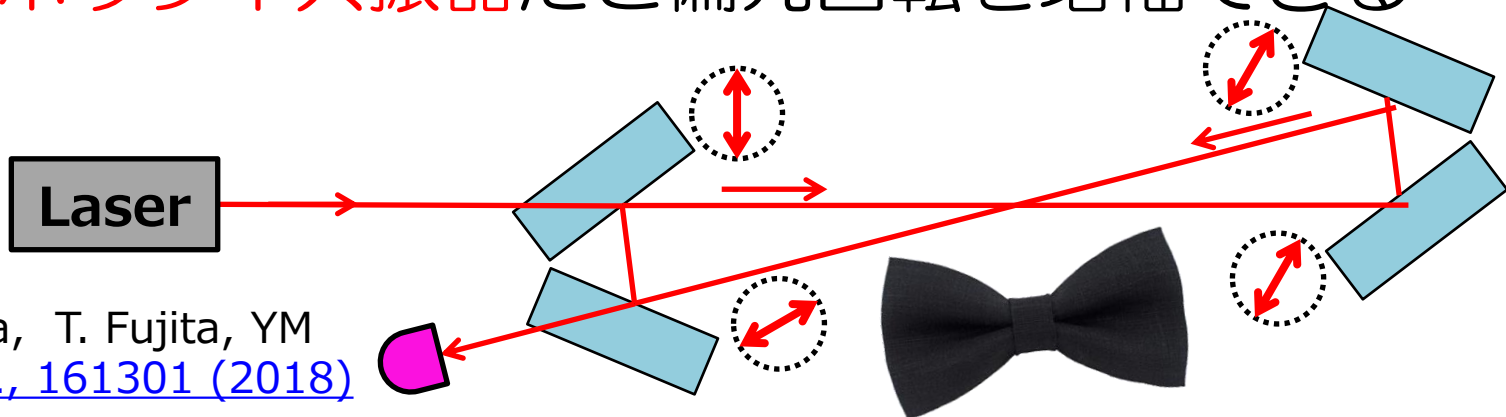
- 短い距離では偏光の回転角が小さい



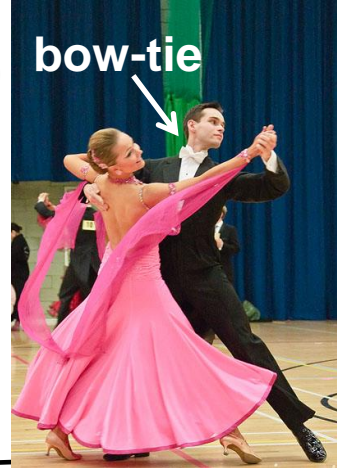
- 光共振器で距離を増幅することはできるが、鏡の反射で偏光が**反転**してしまう



- **ボウタイ共振器**だと偏光回転を増幅できる

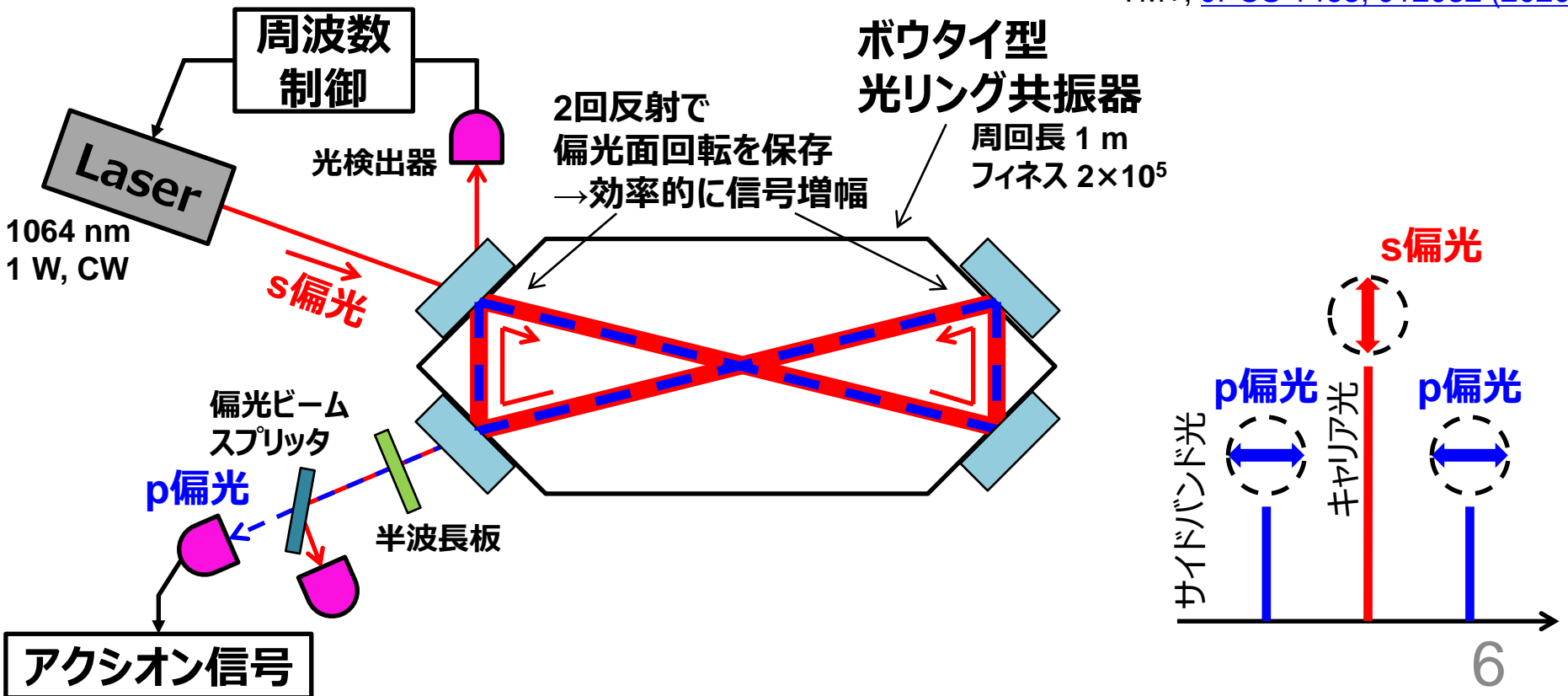


# DANCEのセットアップ



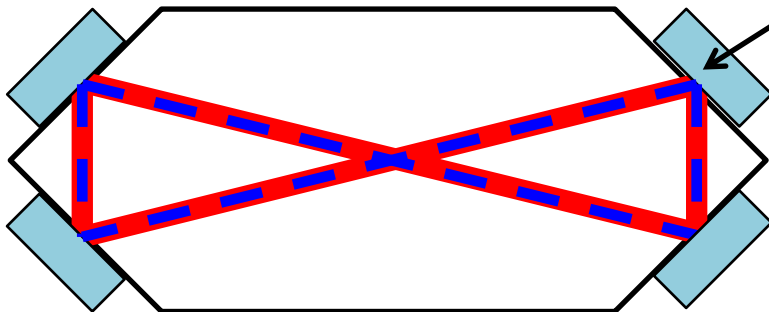
- Dark matter Axion search  
with riNg Cavity Experiment
- さきがけで世界最高精度での探索を目指す

YM+, [JPCS 1468, 012032 \(2020\)](https://doi.org/10.1063/1.513843)



# 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  
p偏光とs偏光が同時共振しない問題が発覚  
信号較正、雑音ピークのvetoなど  
→ **解析結果** Y. Oshima+, [arXiv: 2303.03594](https://arxiv.org/abs/2303.03594)
- 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  
→ **2023年3月にこれまでの最高感度達成**



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)

# データ解析の流れ

E. Savalle+,  
[PRL 126, 051301 \(2021\)](https://arxiv.org/abs/2105.01301)

- 信号は**ほぼ単一周波数**

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

- この周波数範囲内のSNRを積分

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

観測データ  
 推定感度

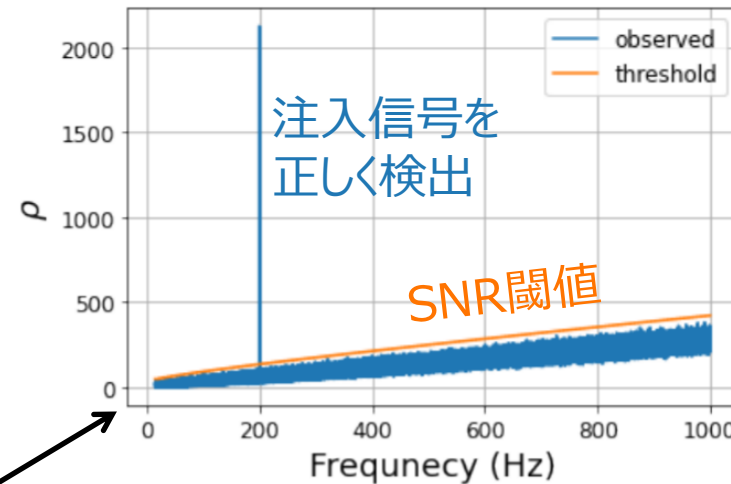
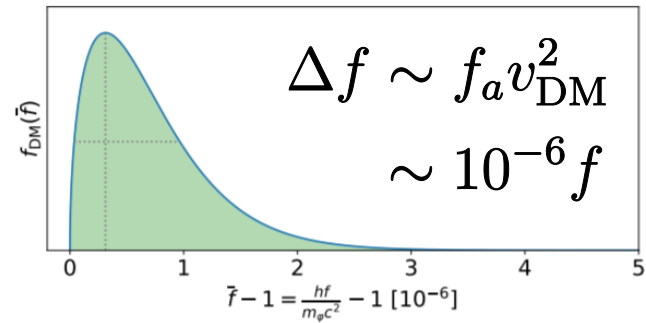
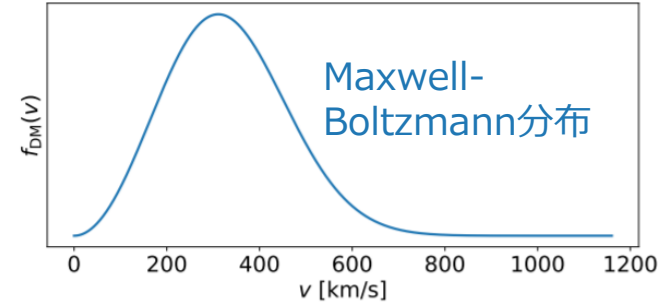
$$m_a \leq 2\pi f_k \leq m_a(1 + \kappa v_{\text{DM}}^2)$$

観測時間

- $\rho$  が  $\chi^2$  分布に従うと仮定 (ガウシアンノイズを仮定) し、SNRの閾値を決定

- $\rho$  から**95%上限値**  $g_{a\gamma}^{95\%}$  を算出

$$\int_{\rho_{\text{obs}}}^{\infty} p(\rho | g_{a\gamma}^{95\%}) d\rho = 0.95$$



モックデータでもパイプラインの動作を確認



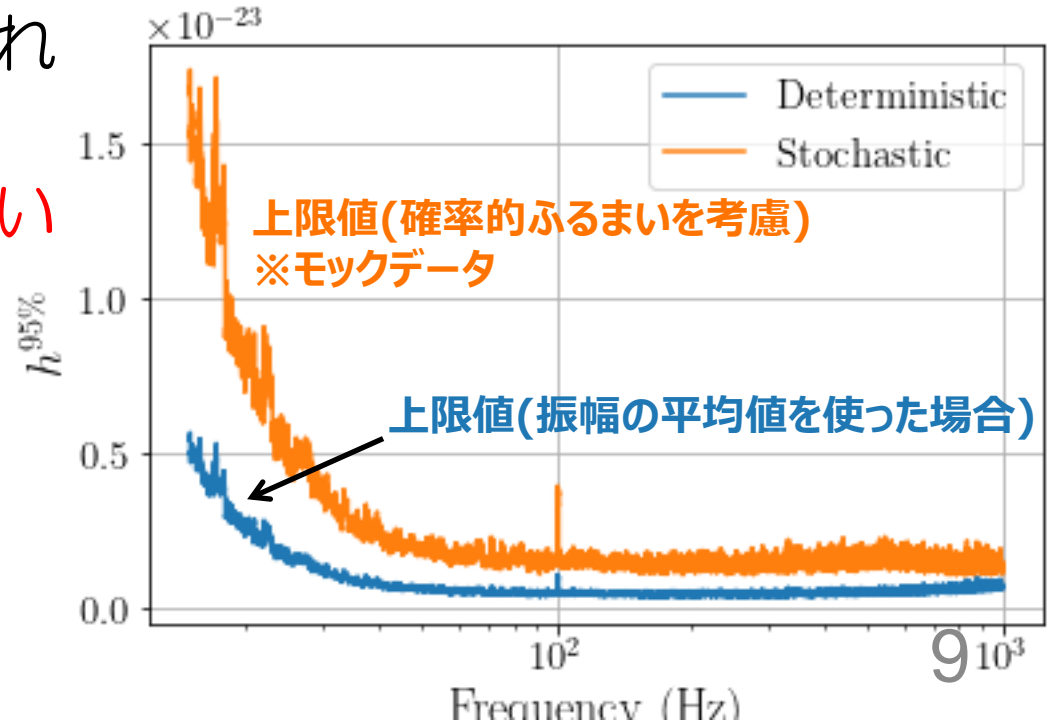
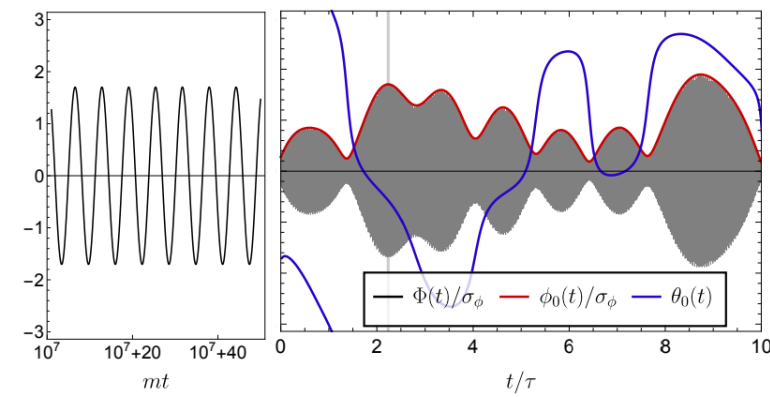
# ダークマター信号の確率的ふるまい

- 信号は様々な運動量や位相を持つたくさんの波の重ね合わせ
- コヒーレンスタイム程度で振幅が揺らぐ

$$\tau = 2\pi / (m_a v_{DM}^2)$$

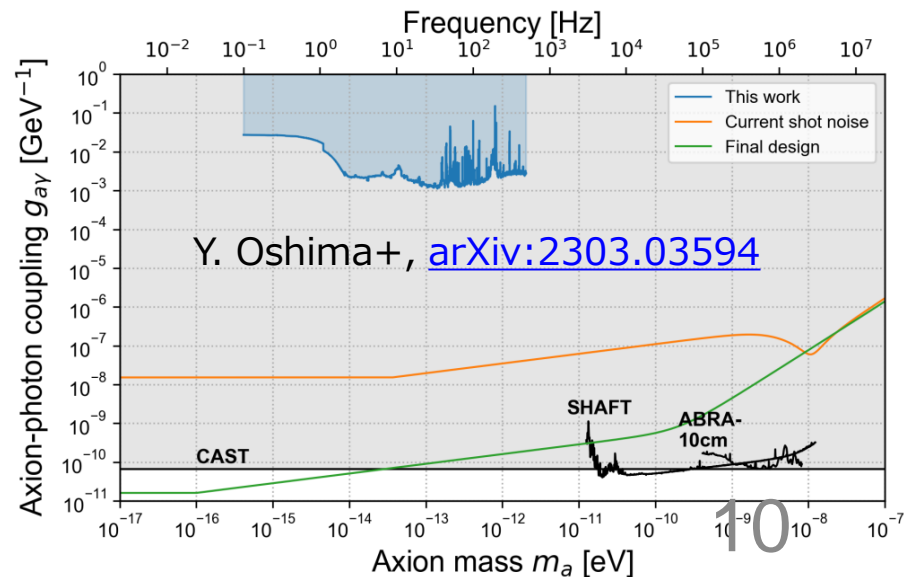
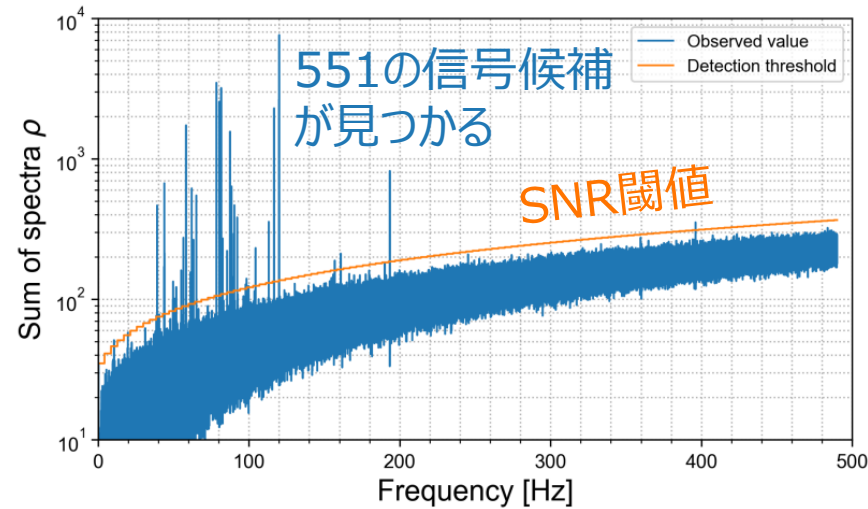
- 低質量帯では、たまたま振幅が小さくて検出されない可能性がある
- こうした確率的ふるまいを考慮に入れた上限値計算手法を確立

H. Nakatsuka+,  
[arXiv:2205.02960](https://arxiv.org/abs/2205.02960)



# 最初のデータ解析結果

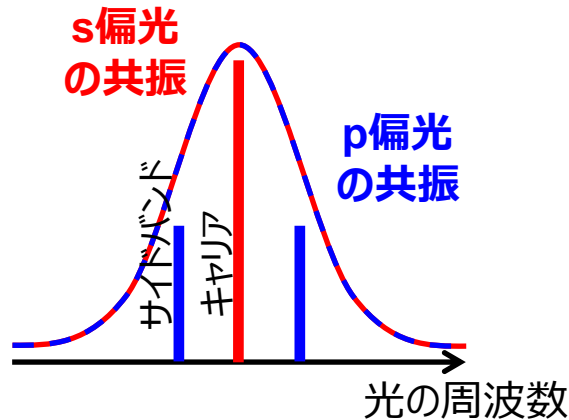
- 12日間の運転のうちの、最初の**24時間データ**を使用
- 551の信号候補が見つかる
- Veto解析
  - 2つのデータ区間を利用  
(ダークマターなら別の24時間データでも周波数は同じはず)
  - Q値を利用  
(ダークマターなら $Q \sim 10^6$ のはず)
  - 7つの候補が残ったが、  
全て周波数制御の信号にも見つかかり、veto  
(すべて $\sim 40$  Hzの高調波)
- **全ての信号候補のvetoに成功し、上限値を設定**
- 磁場を利用しない光学実験としては世界初



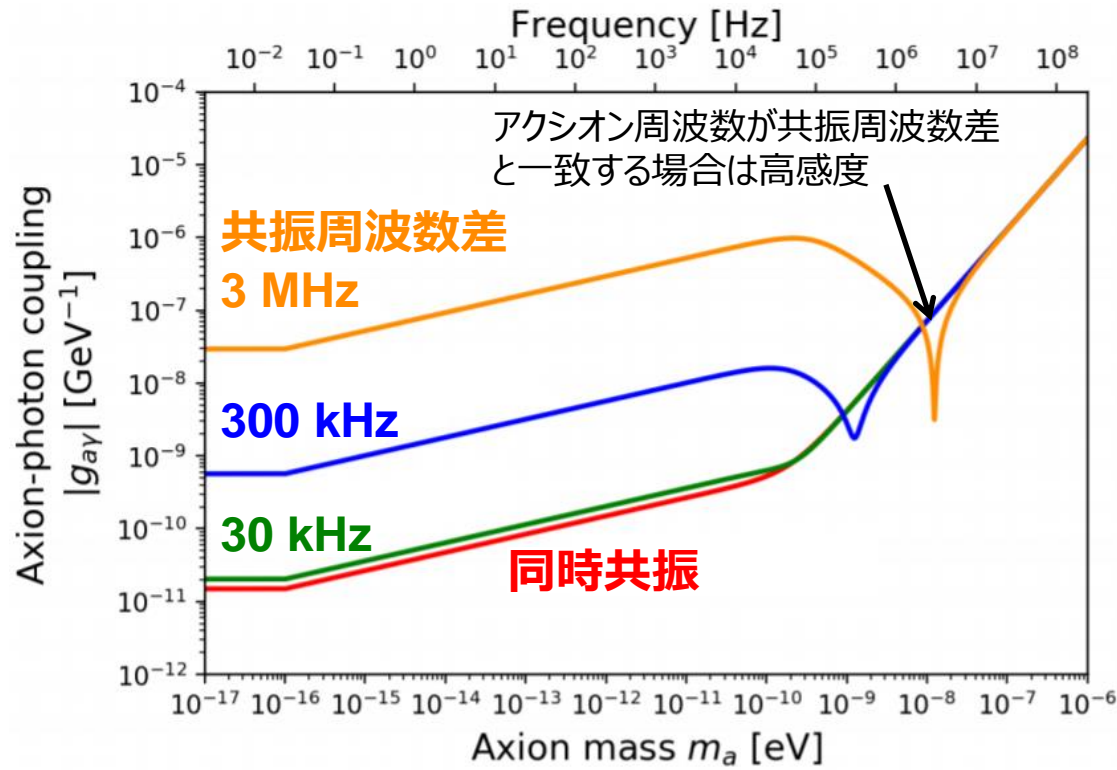
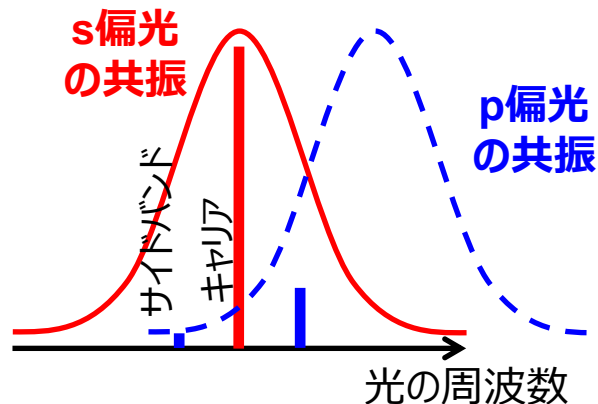
# s偏光とp偏光の同時共振

- 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



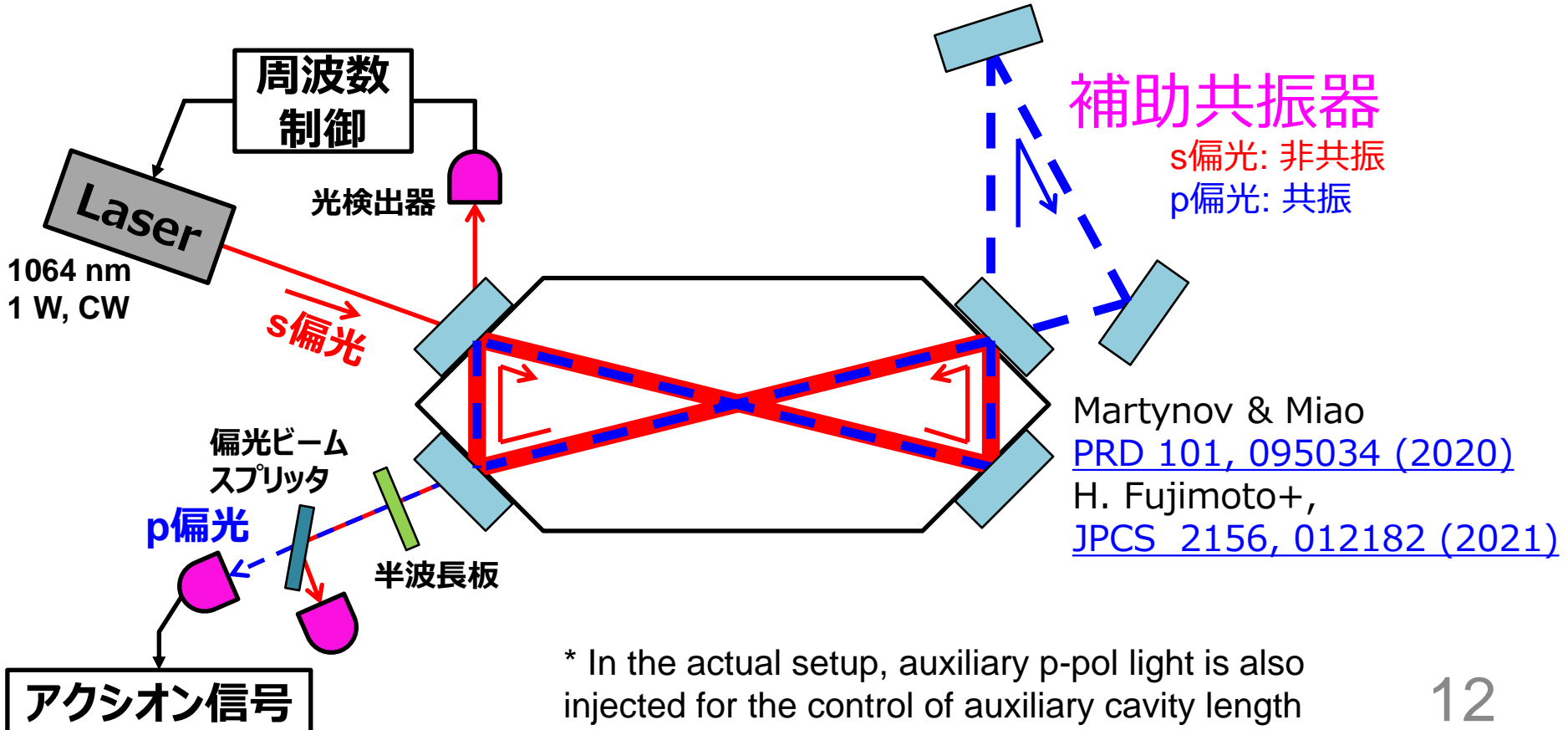
## 同時共振しない場合



Plot by Y. Oshima & H. Fujimoto

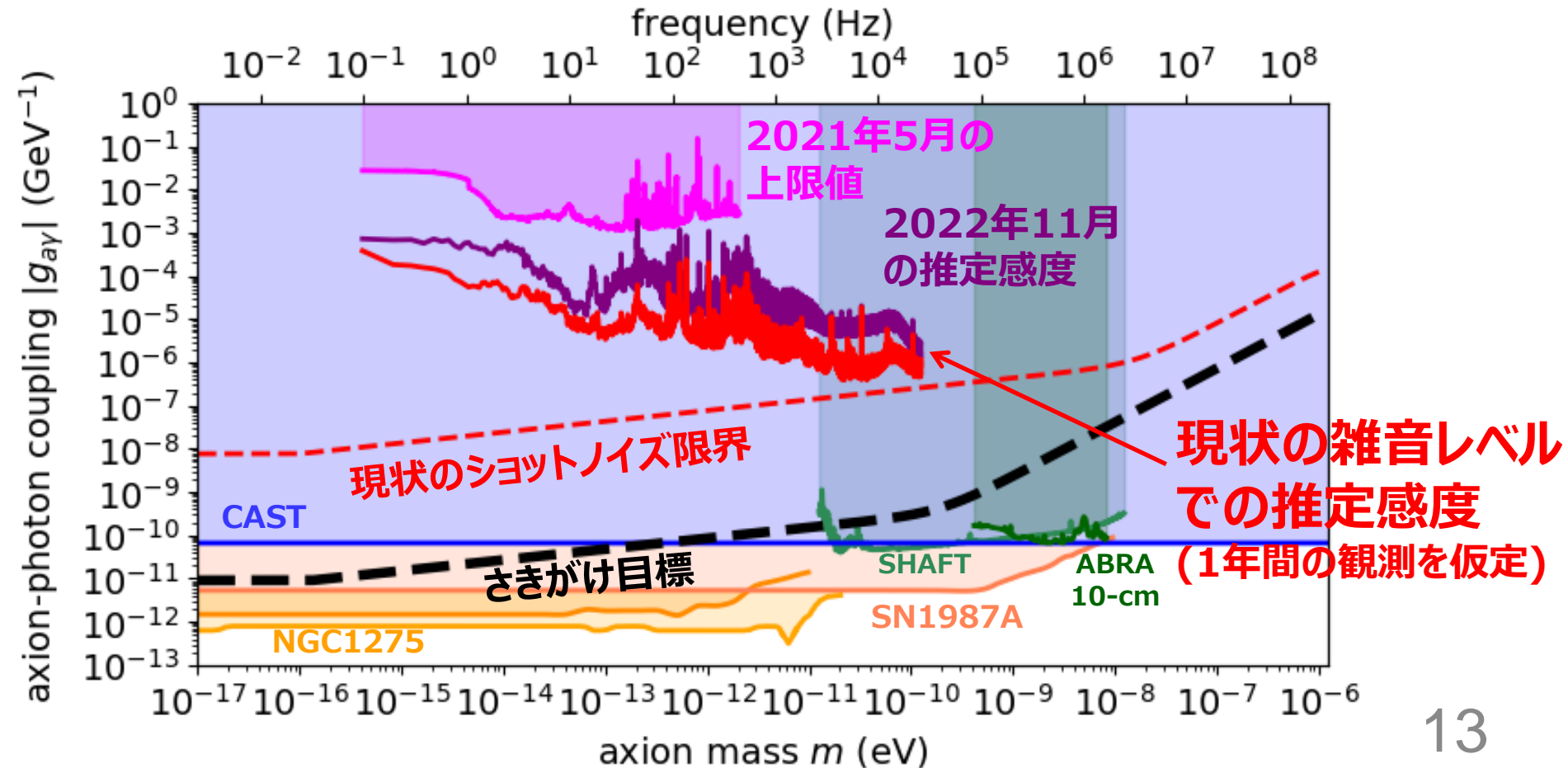
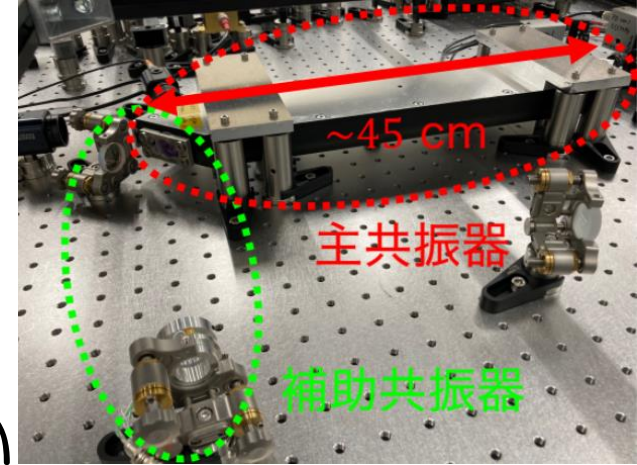
# 補助共振器の導入による解決

- 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



# 現状の推定感度

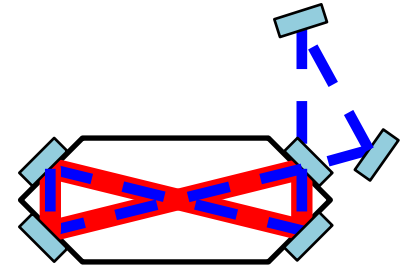
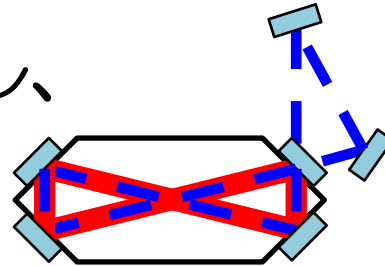
- 同時共振の実現、振動雑音の差し引きなどにより**感度向上**
- 補助共振器由来の振動雑音が大きい



# 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

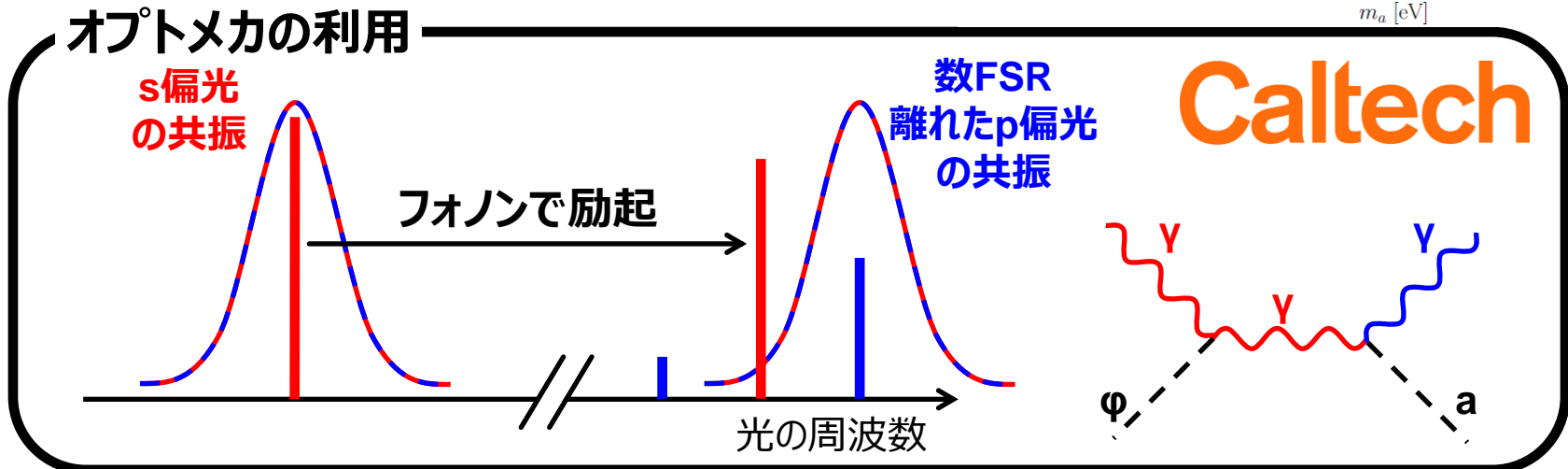
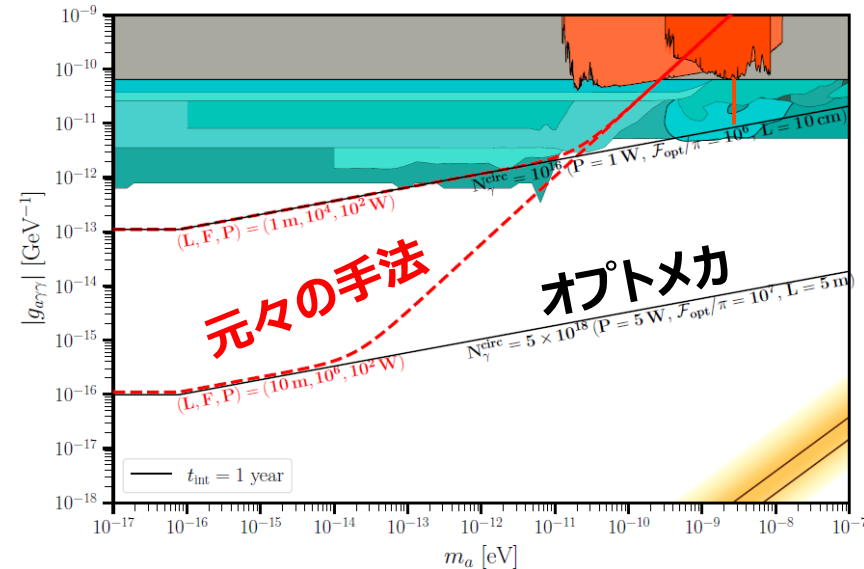
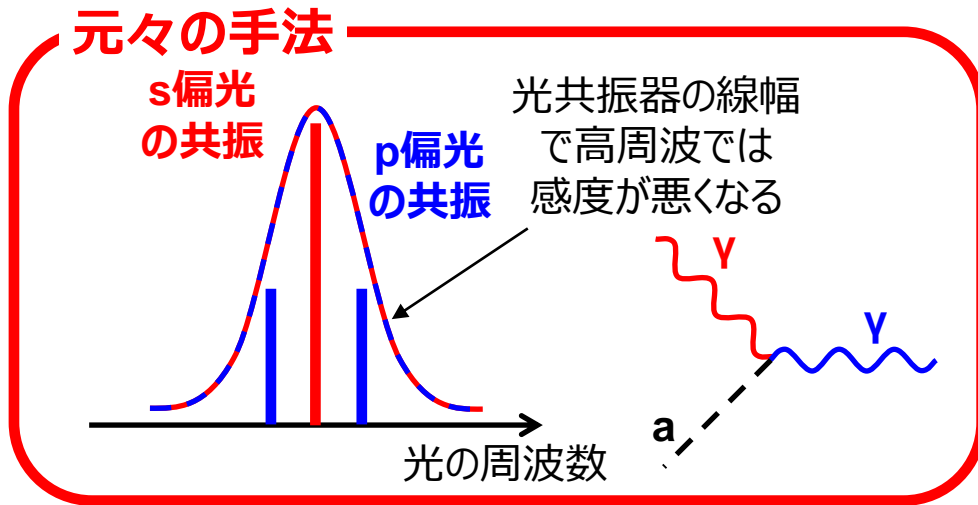


- **波長可変レーザー**を利用した同時共振の実現  
光源の製作中、2023年度中に実現目標

- (カリフォルニア工科大学に異動後1年を経て、ついに契約完了、送金済み。確認中！)

# 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)



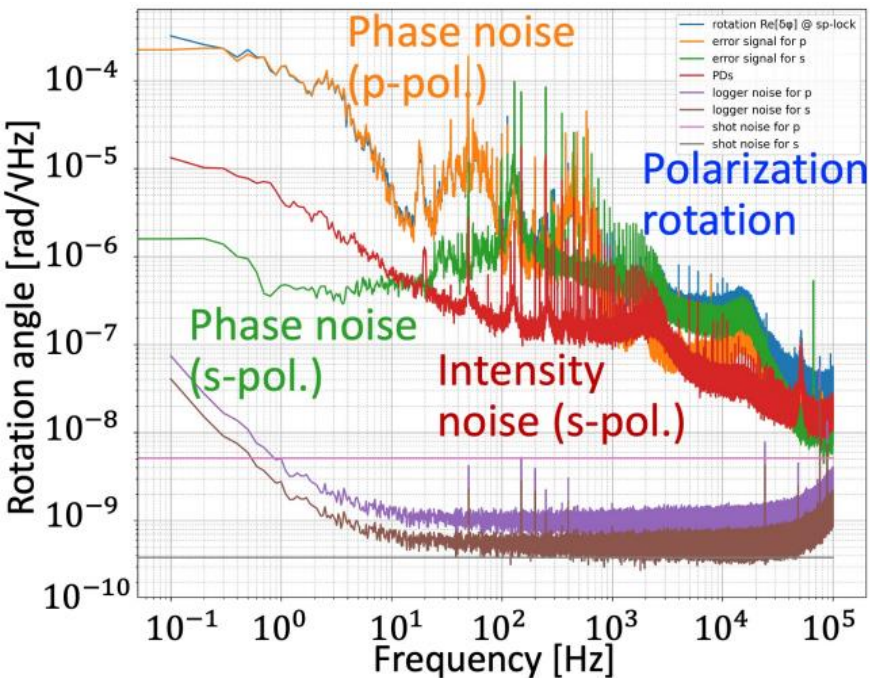
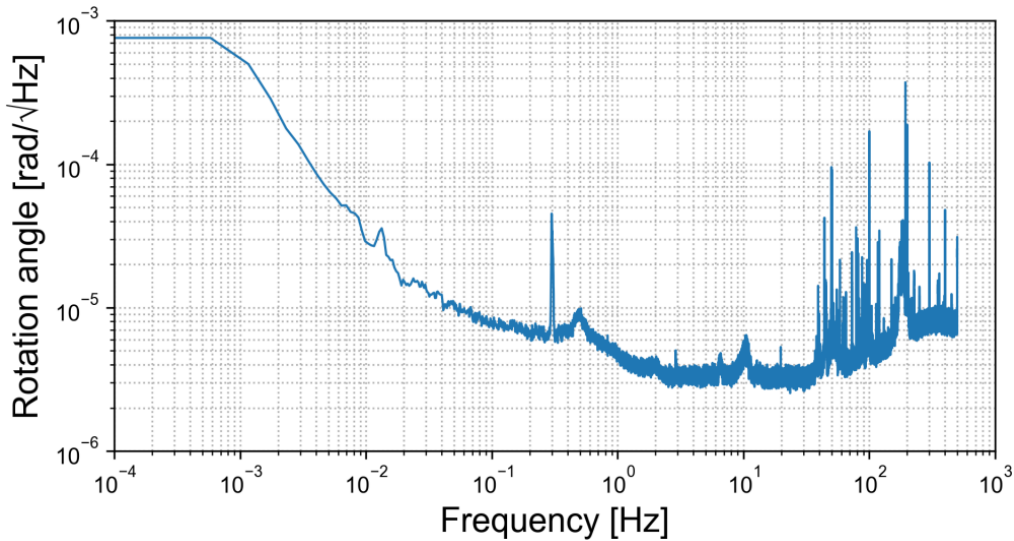
# まとめ

- 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+, [arXiv: 2303.03594](https://arxiv.org/abs/2303.03594)
- 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
- 波長可変レーザーを利用した手法も実験開始

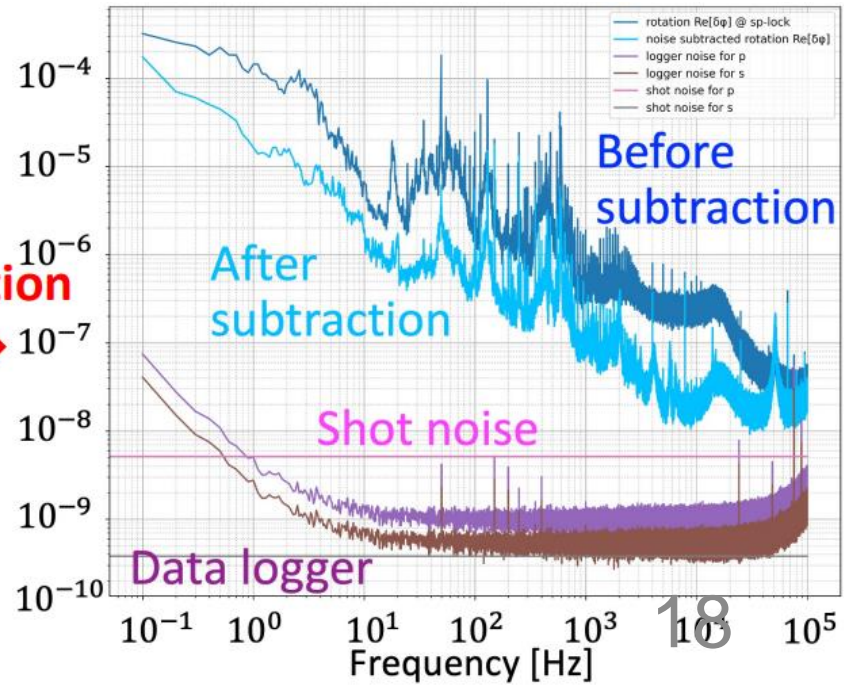


# 補足資料

# 偏光回轉角



Offline  
noise  
subtraction  
➔



# Veto解析

Frequency	SNR (data)	SNR (threshold)
81.6711 Hz	3197	109
81.6713 Hz	122	109
119.983 Hz	2070	136
120.001 Hz	2621	136
120.113 Hz	1120	136
120.118 Hz	7632	136
396.141 Hz	353	310

