

# アクション暗黒物質探索のための 光リング共振器の製作と制御

---

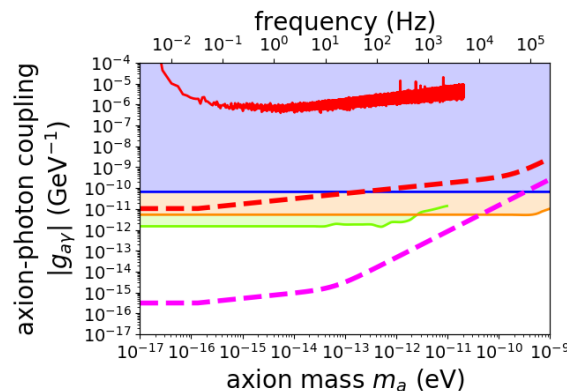
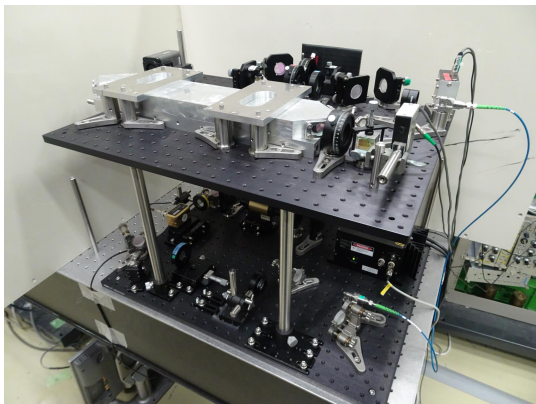
大島由佳, 渡邊泰平, 道村唯太, 長野晃士<sup>A</sup>,  
小幡一平<sup>B,C</sup>, 藤田智弘<sup>D</sup>, 安東正樹

東大理, JAXA宇宙研<sup>A</sup>, MPA<sup>B</sup>, 京大理<sup>C</sup>, 東大宇宙線研<sup>D</sup>



# 概要

- 光リング共振器を用いてアクシオン暗黒物質を探索する実験を行っている  
**DANCE: Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment**
- アクシオンにより生じる直線偏光の回転を測定する
- プロトタイプ共振器 DANCE Act-1 を製作し性能を評価した
- 2020年8月 初のデータを取得し感度を求めた



# 目次

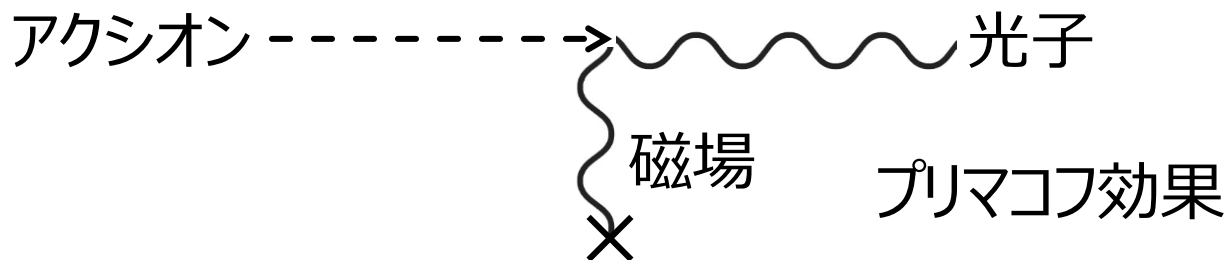
---

- 背景
  - アクション
  - 先行研究
- 方法
  - DANCEの原理
  - DANCEの構成
- 結果
  - 共振器の性能評価
  - 周波数制御の安定性
  - データ取得と感度
- 考察・今後の展望

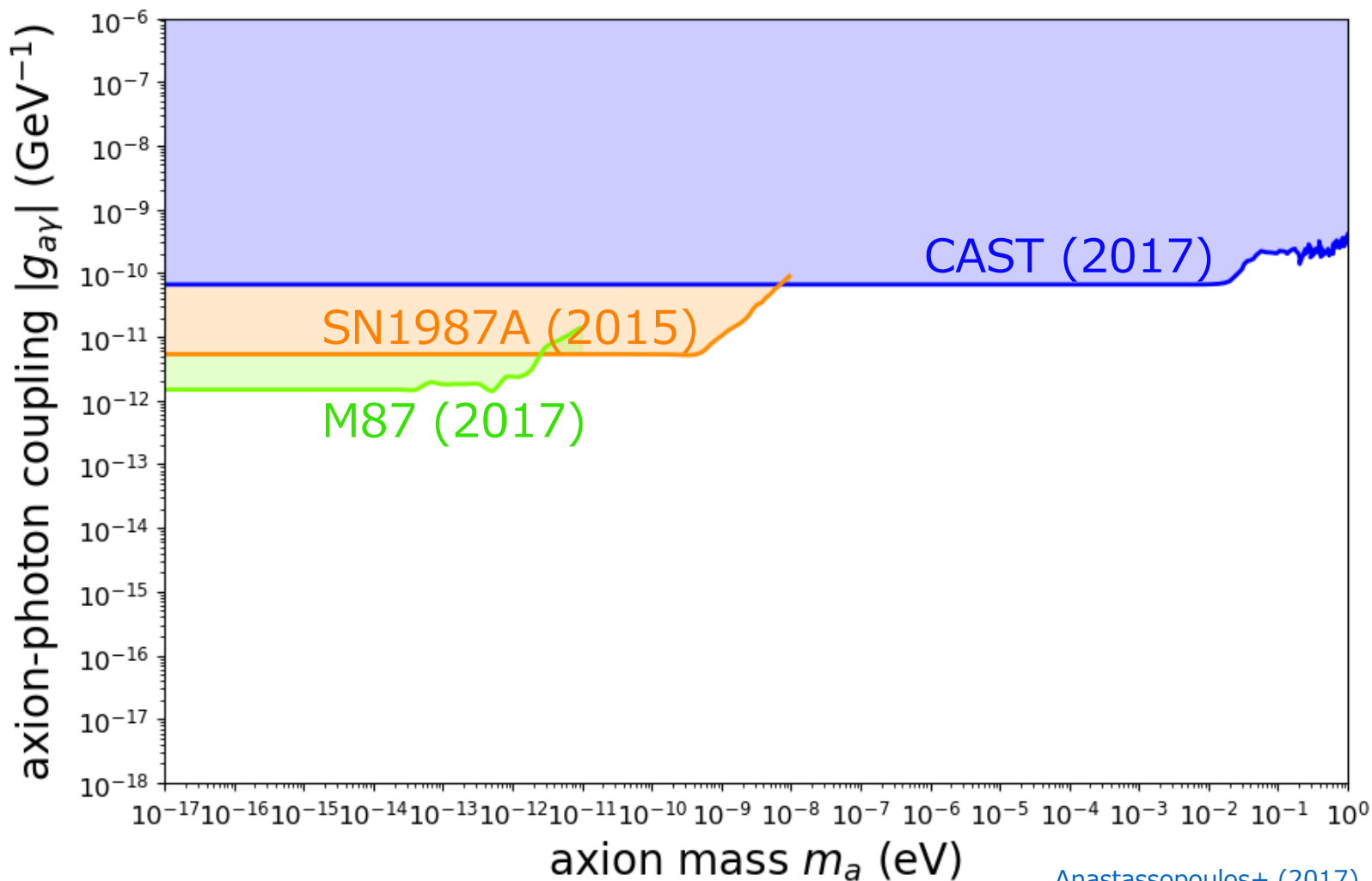
# アクシオン

---

- 量子色力学における強いCP問題の解決策として提唱された仮説上の粒子
- 超弦理論から多くの Axion-like particles (ALPs) が预言されている
  - 暗黒物質の有力候補
- アクシオン-光子相互作用を探索する方法が盛んに行われている
  - 特に磁場を用いる方法が多い



# 先行研究による上限値



[Anastassopoulos+ \(2017\)](#)  
[Payez+ \(2015\)](#)  
[Marsh+ \(2017\)](#)

# 目次

---

- 背景
  - アクション
  - 先行研究
- 方法
  - DANCEの原理
  - DANCEの構成
- 結果
  - 共振器の性能評価
  - 周波数制御の安定性
  - データ取得と感度
- 考察・今後の展望

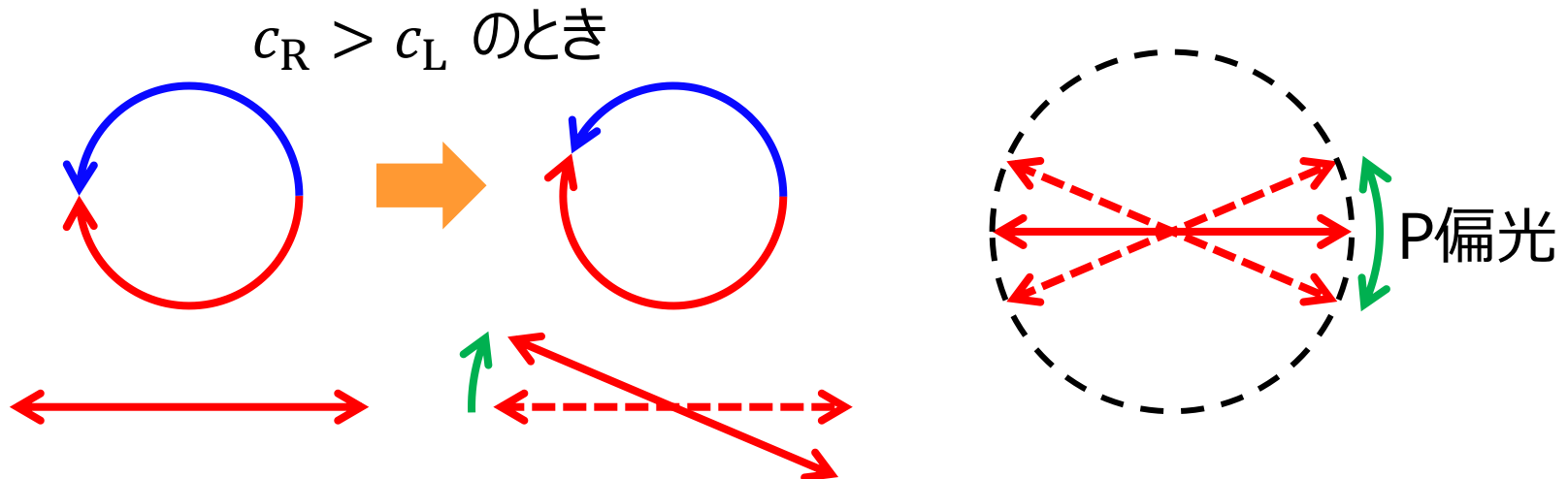
# アクシオンによる直線偏光の回転

- アクシオン-光子相互作用により  
左円偏光と右円偏光に速度差が生じる

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

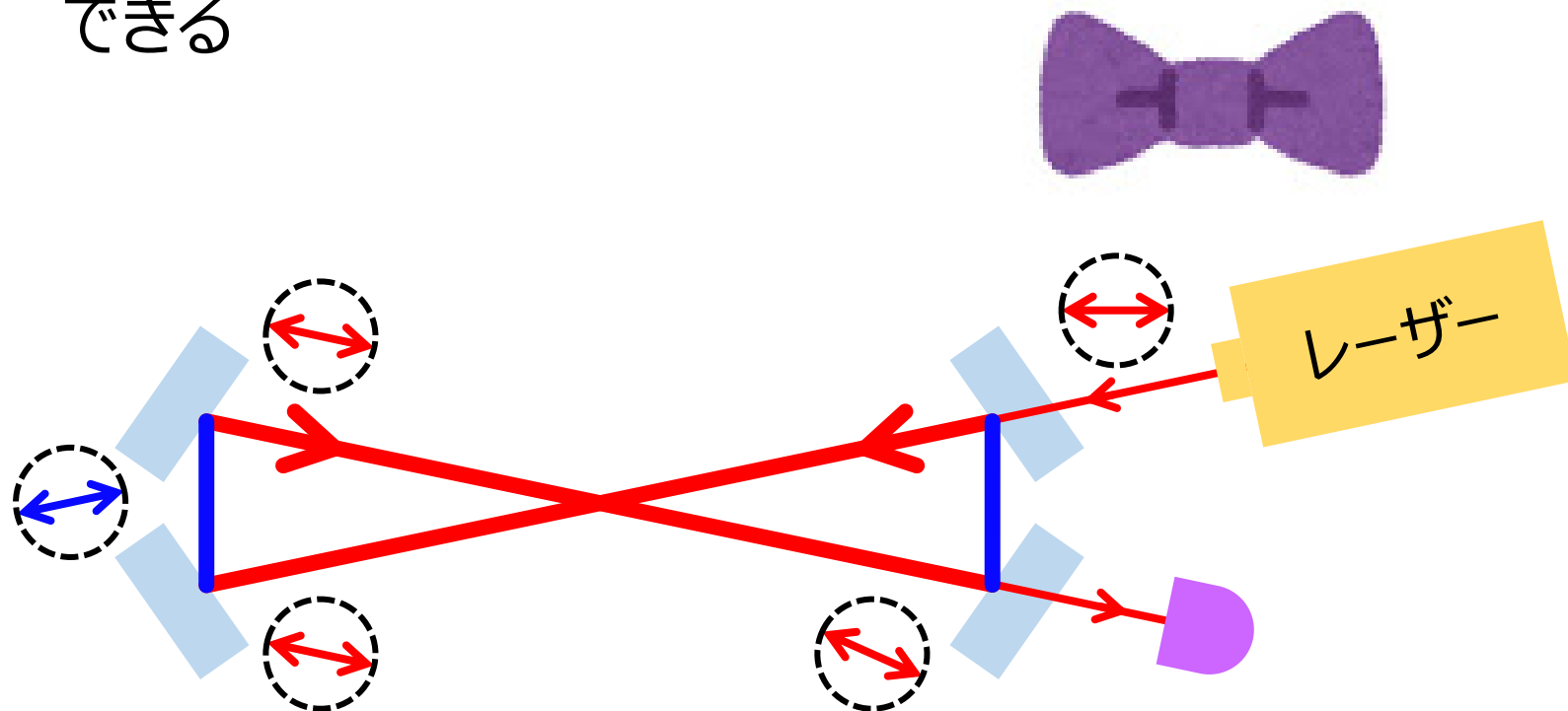
相互作用係数      アクシオン場      アクシオン質量

- 円偏光間の速度差は直線偏光の回転を生む



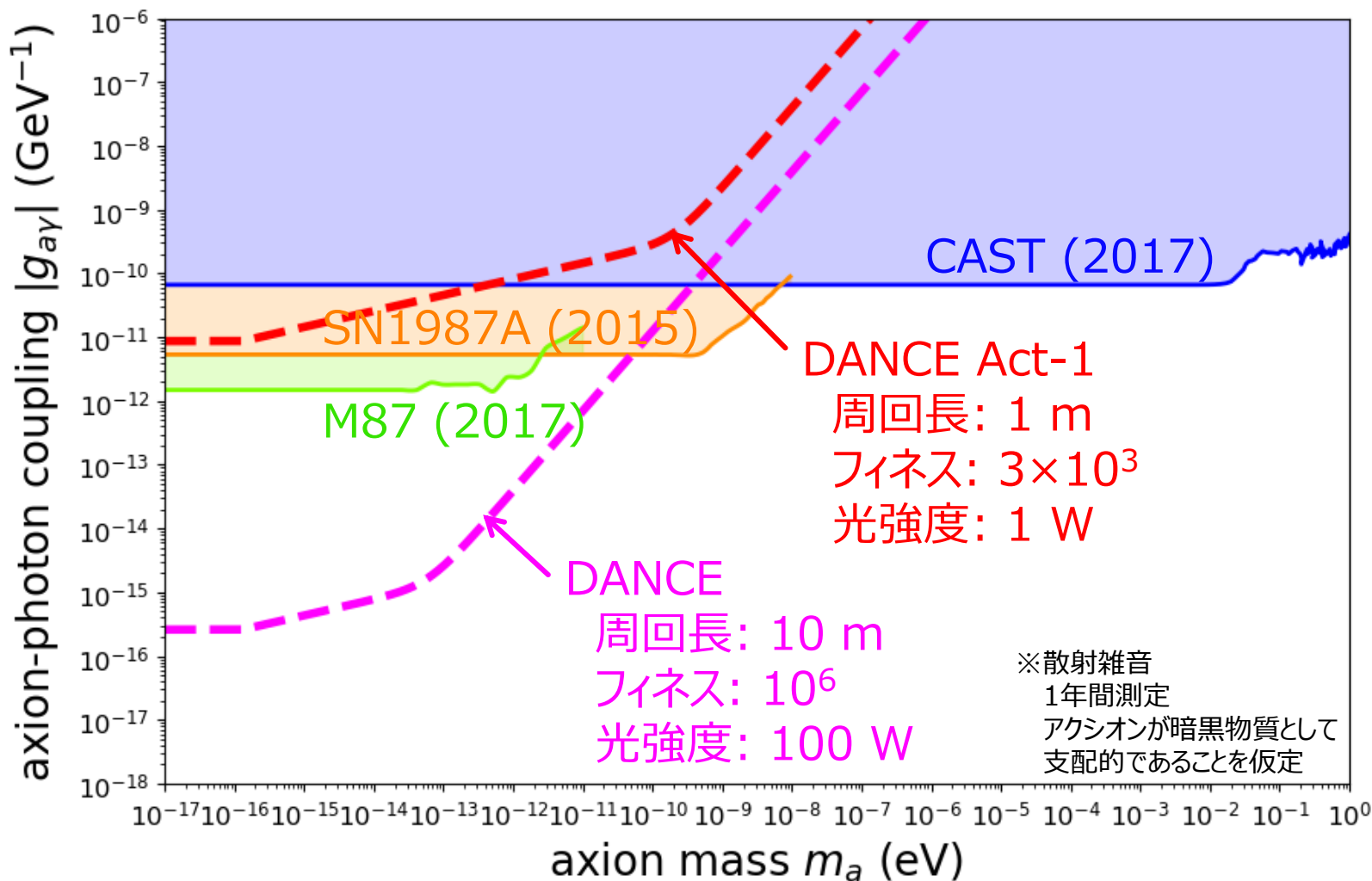
# ボウタイ型共振器

- 光リング共振器にP偏光を入射し透過光の回転を測定する
- 共振器をボウタイ型にすることで偏光の回転を保持できる

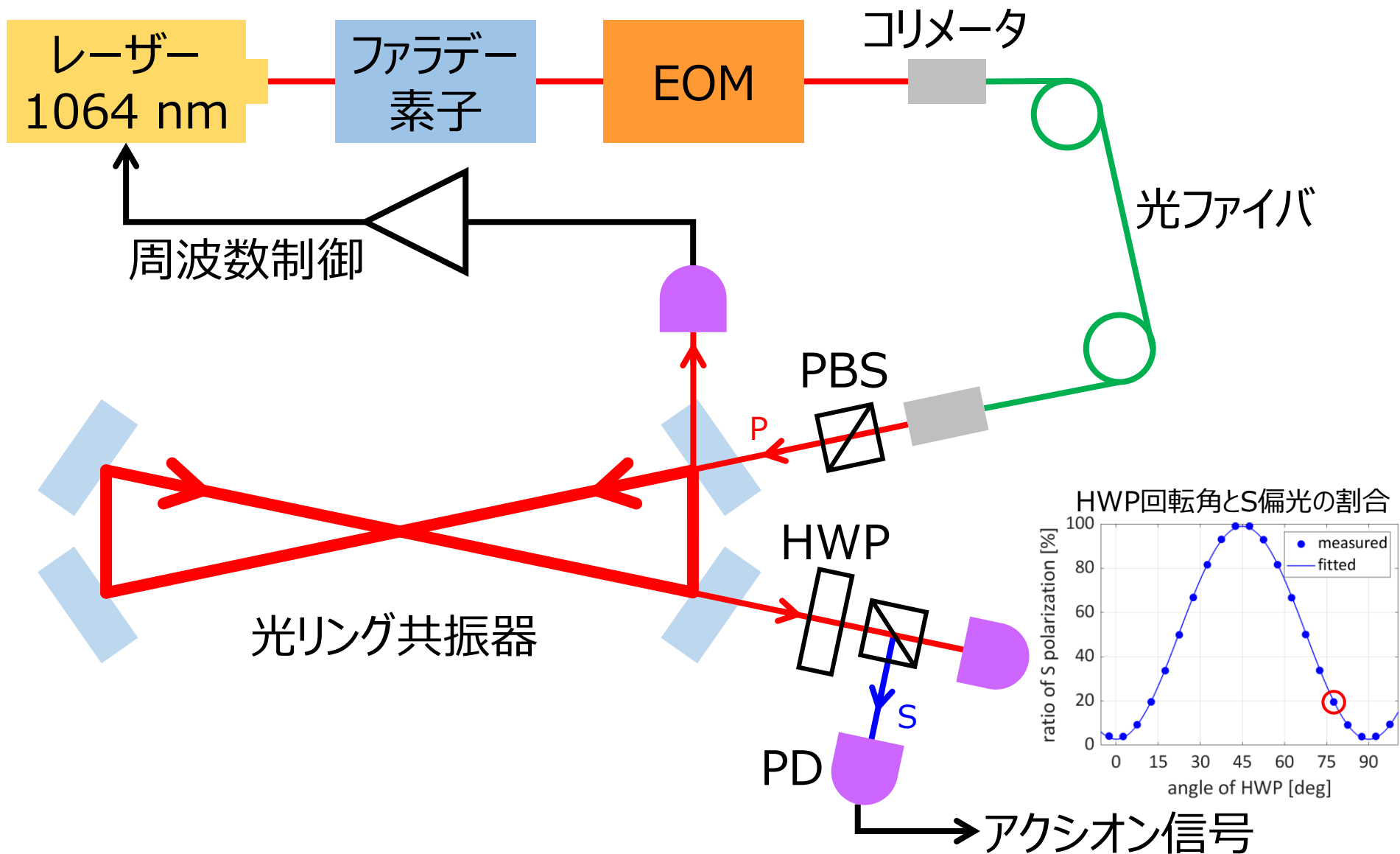




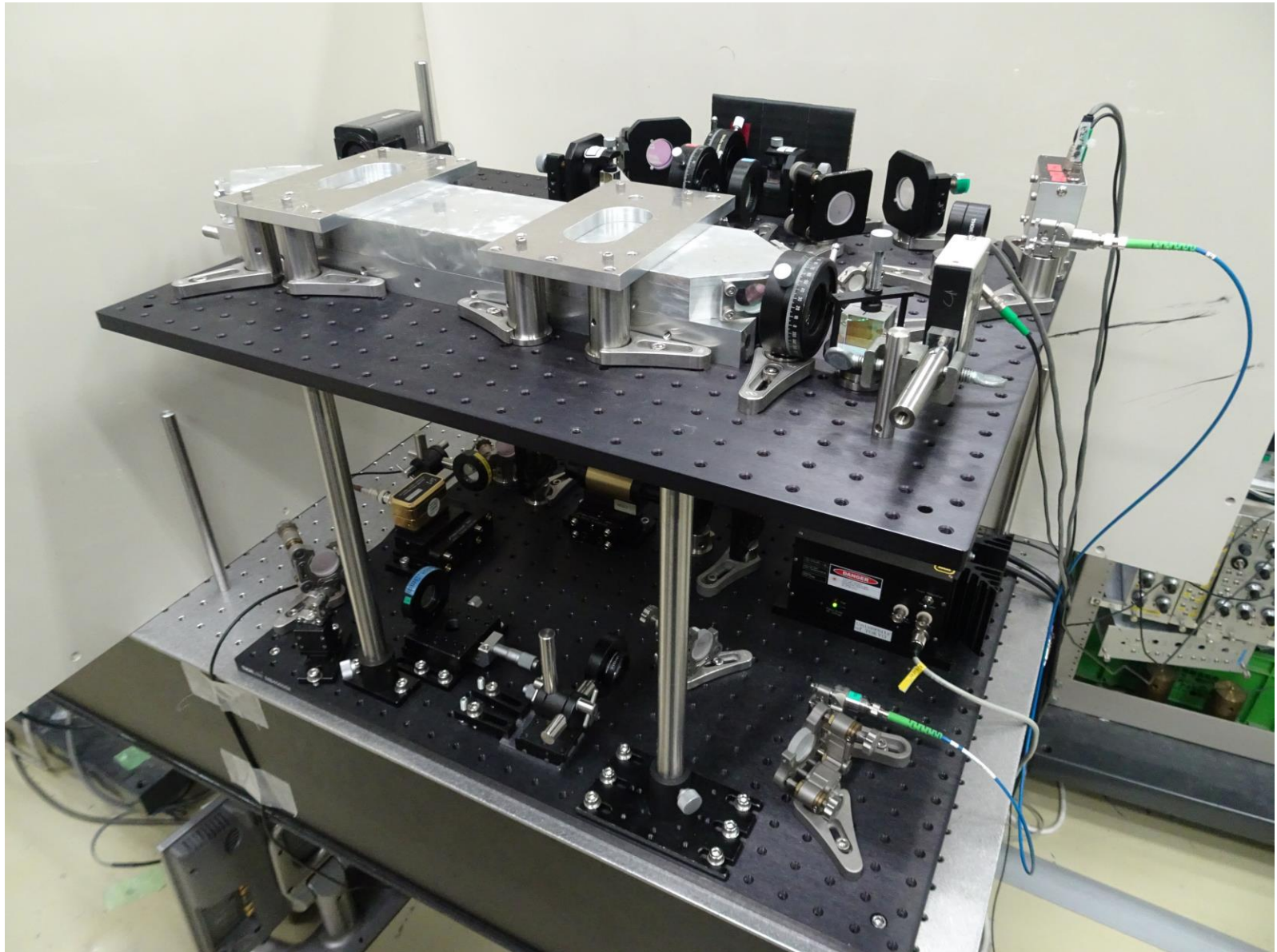
# DANCEの感度



# DANCEの構成

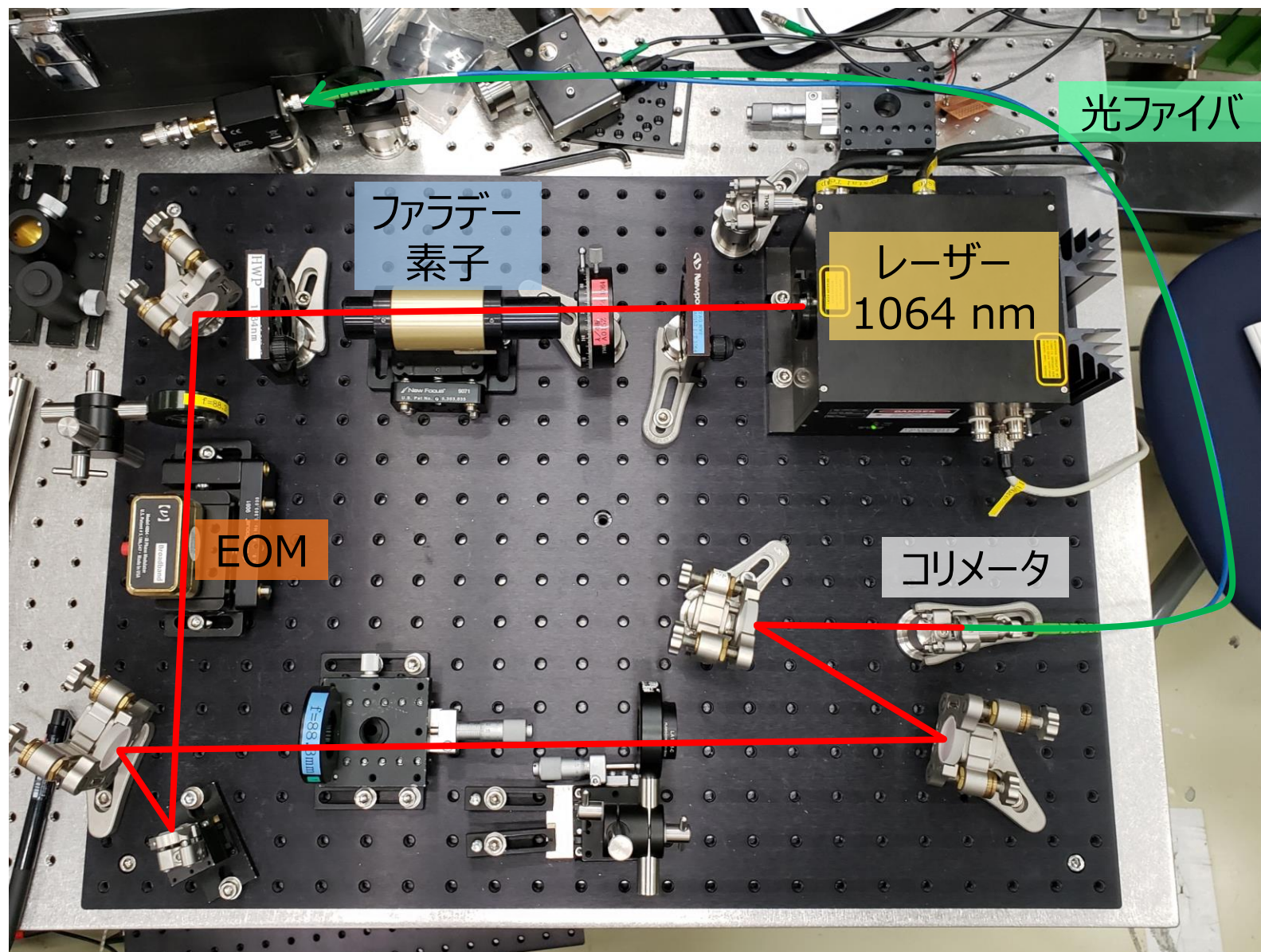


# 実験装置 (全体)



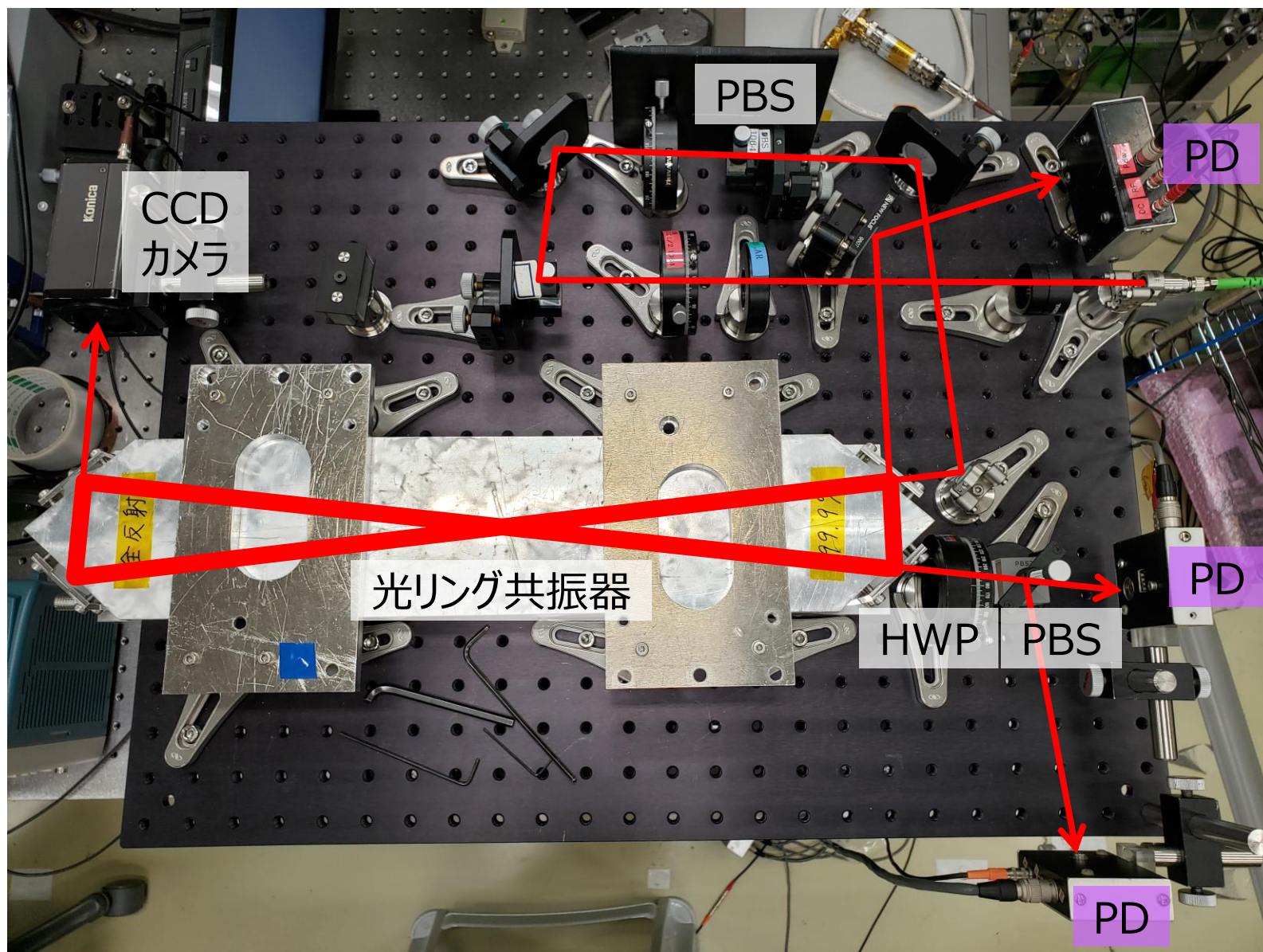


# 実験装置 (1階)





# 実験装置 (2階)



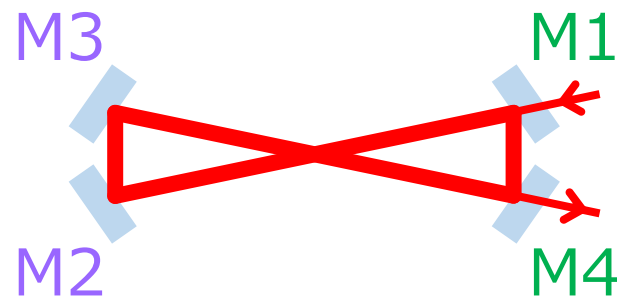
# 目次

---

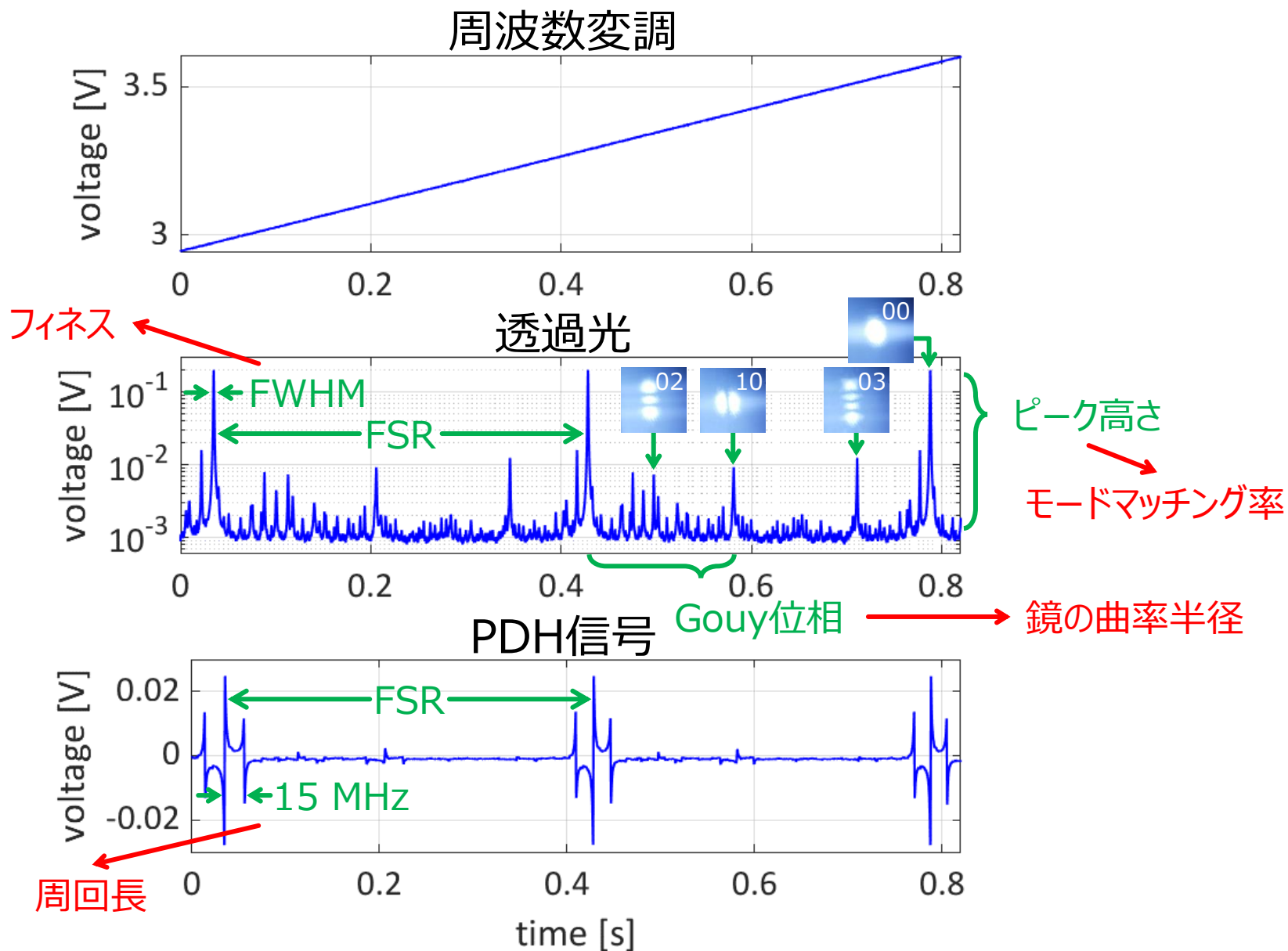
- 背景
  - アクション
  - 先行研究
- 方法
  - DANCEの原理
  - DANCEの構成
- 結果
  - 共振器の性能評価
  - 周波数制御の安定性
  - データ取得と感度
- 考察・今後の展望

# 共振器の設計値

	設計値
鏡の強度反射率	M1, M4: 99.9 % M2, M3: 100 %
フィネス	3140
周回長	99.4 cm
鏡の曲率半径	すべて 100 cm
モードマッチング率	99.9987 %
入射光強度	~1 W



# キャビティスキャン



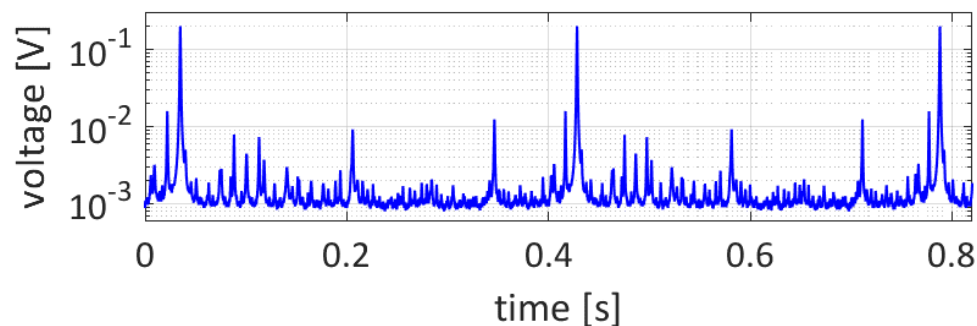
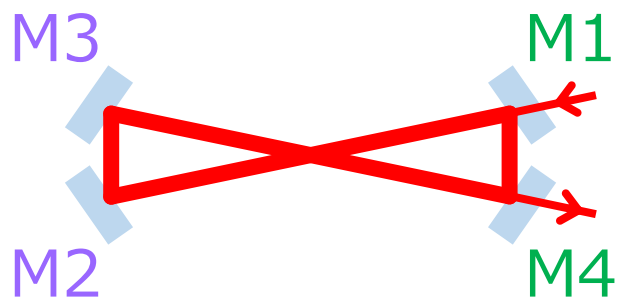


# 共振器の性能評価

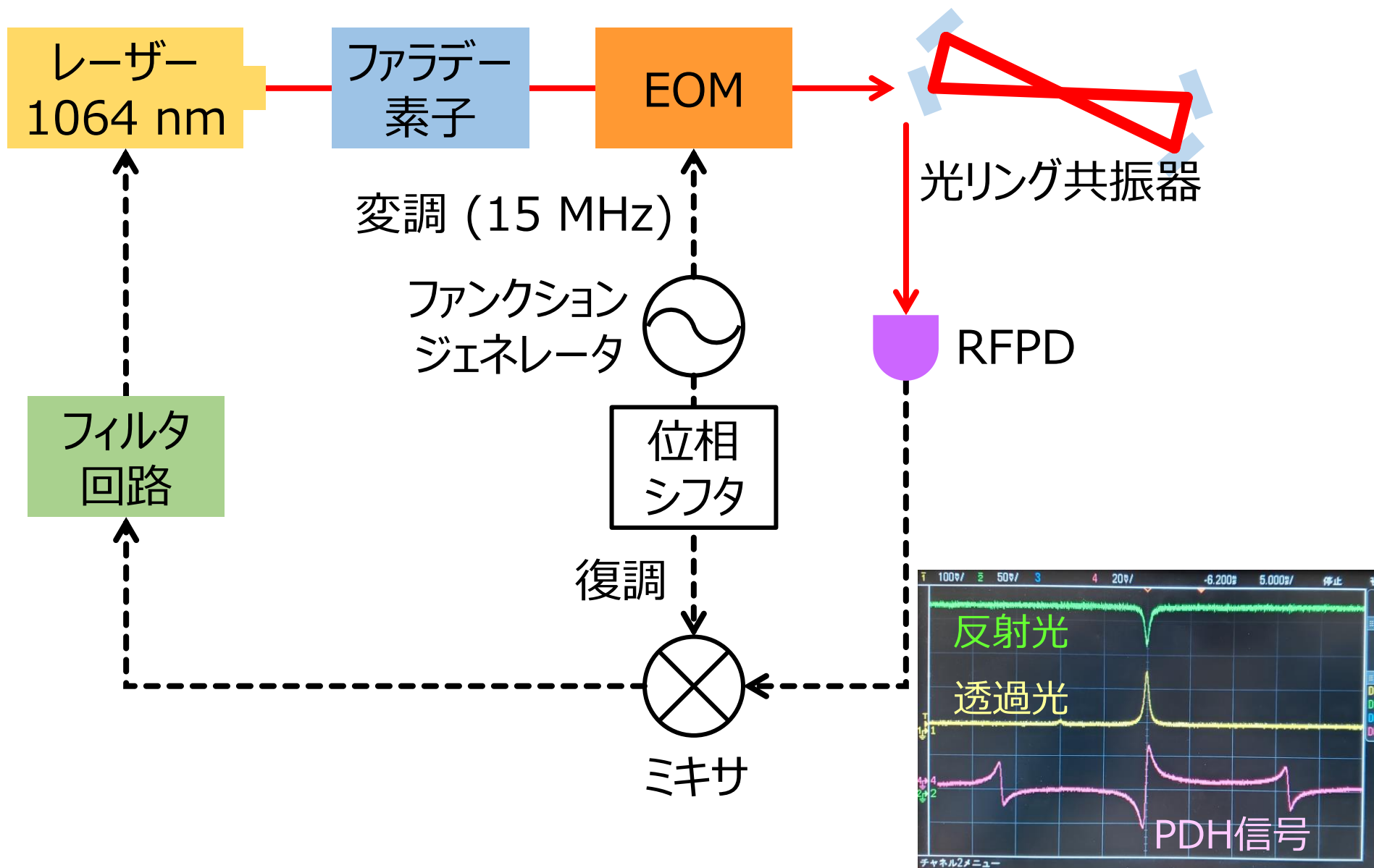
	設計値	測定値 (P偏光)
鏡の強度反射率	M1, M4: 99.9 % M2, M3: 100 %	M1, M4: 99.9 % M2, M3: 99.95 %
フィネス	3140	525 ± 19 (S偏光: 527 ± 29)
周回長	99.4 cm	102 ± 4 cm
鏡の曲率半径	すべて 100 cm	95.6 ± 3.7 cm
モードマッチング率	99.9987 %	83.03 ± 0.09 %
入射光強度	~1 W	~10 mW

→ フィネス  
2100

→ 光のロス  
0.91 %

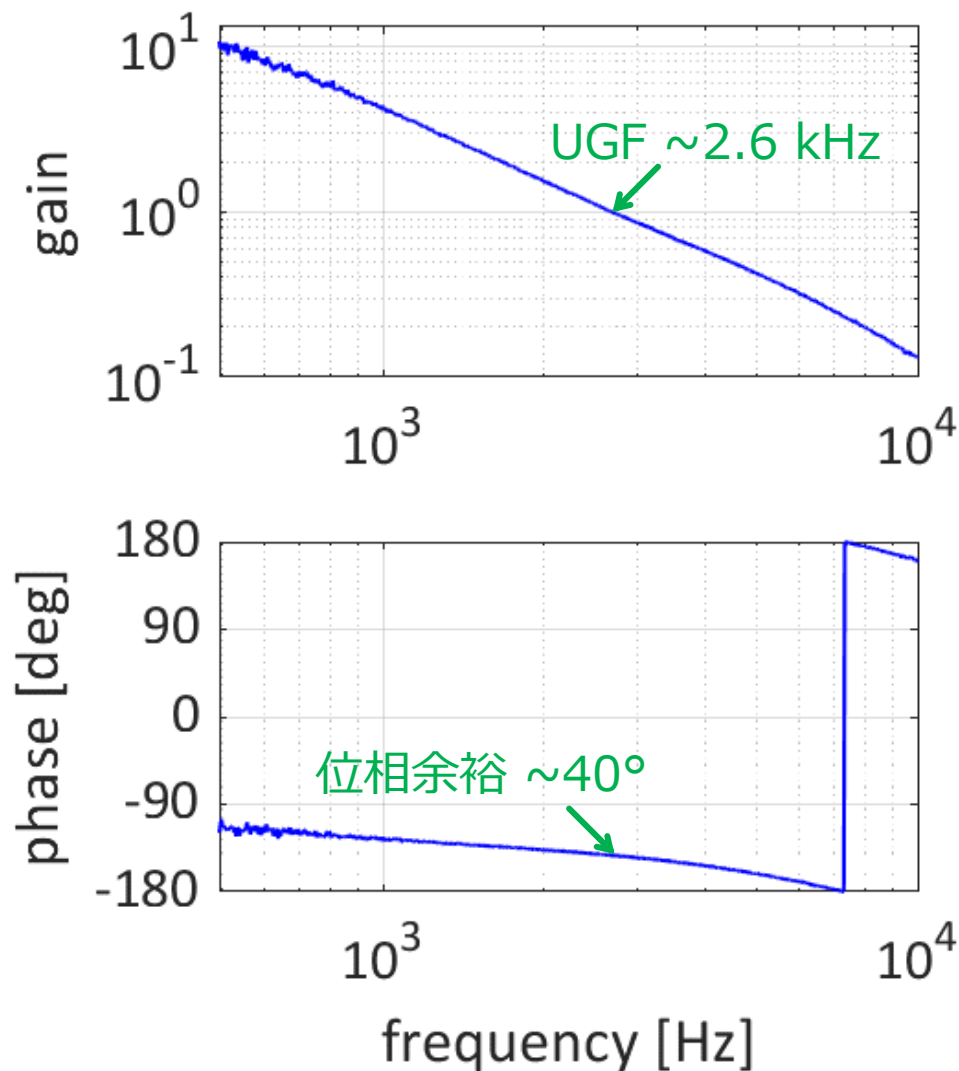


# PDH法による周波数制御

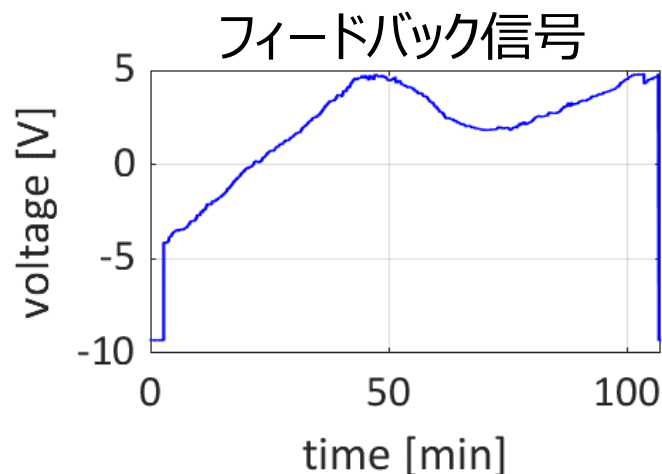
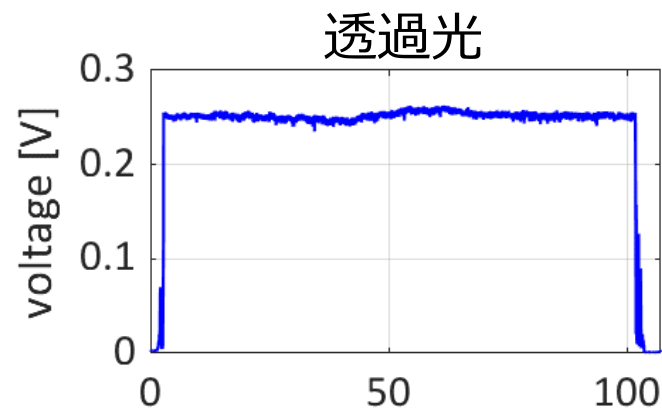


# フィードバック制御の安定性

## オープンループ伝達関数



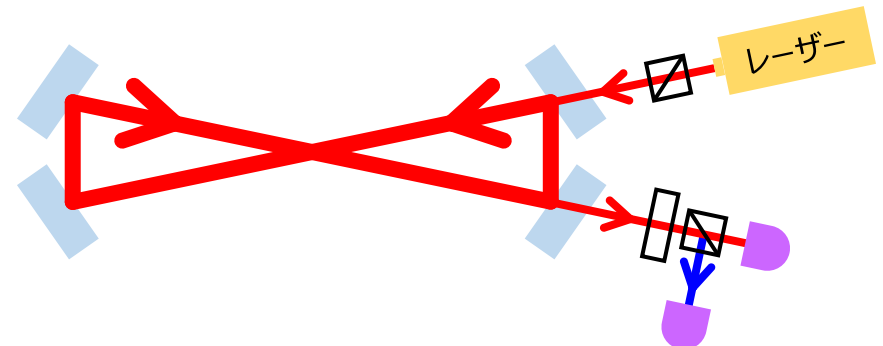
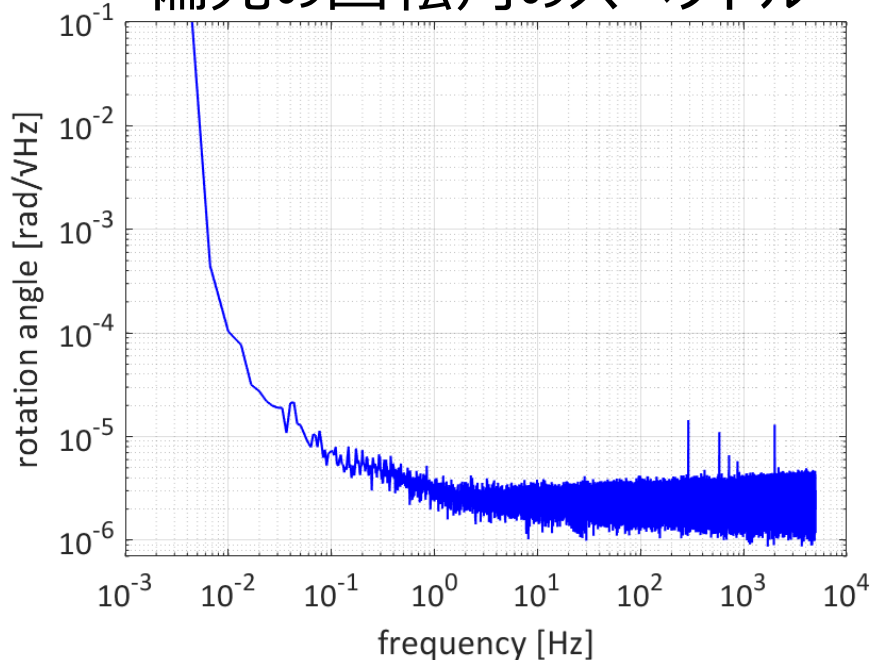
静かな実験室で  
約1時間制御が続いた



# 初データ取得

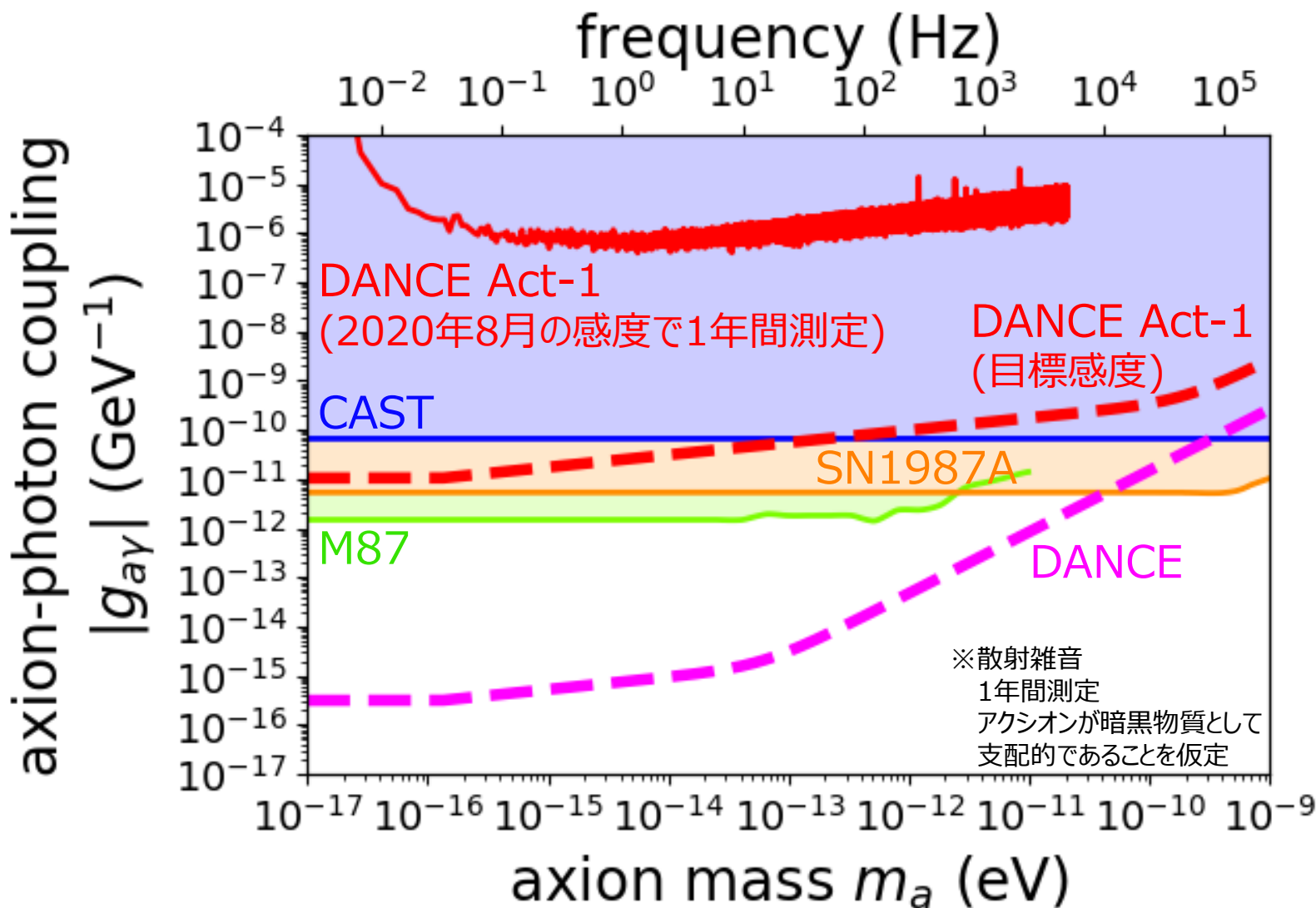
- 2020年8月 初データ取得 (5分間×10回)
- 透過光のP偏光とS偏光の強度  $P_{P,S}(t)$  を測定
- P偏光とS偏光の電場振幅  $E_{P,S}(t) = \sqrt{P_{P,S}(t)}$
- 偏光の回転角  $\phi(t) = \arctan \frac{E_S(t)}{E_P(t)} \approx \frac{E_S(t)}{E_P(t)}$

偏光の回転角のスペクトル



# 現在の感度

- DANCE Act-1 目標感度より5桁悪い



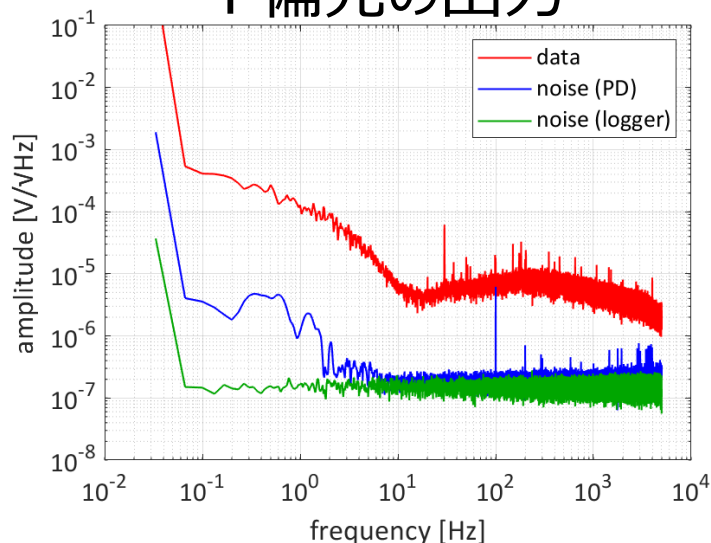
# 目次

---

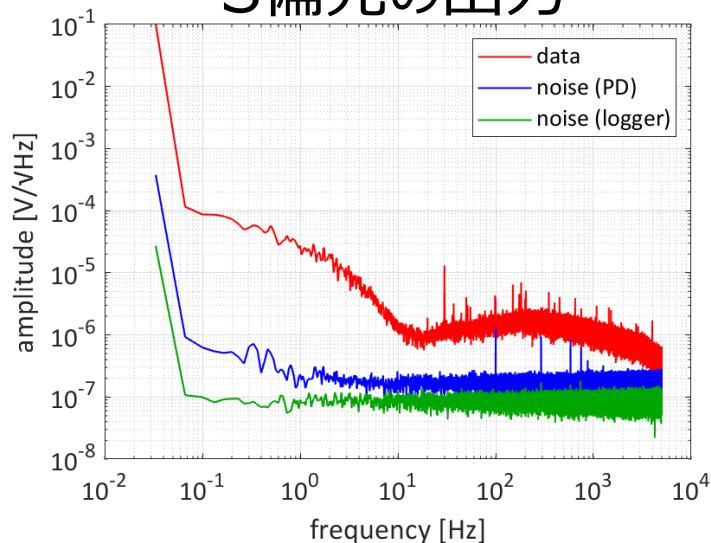
- 背景
  - アクション
  - 先行研究
- 方法
  - DANCEの原理
  - DANCEの構成
- 結果
  - 共振器の性能評価
  - 周波数制御の安定性
  - データ取得と感度
- 考察・今後の展望

# 雑音の考察

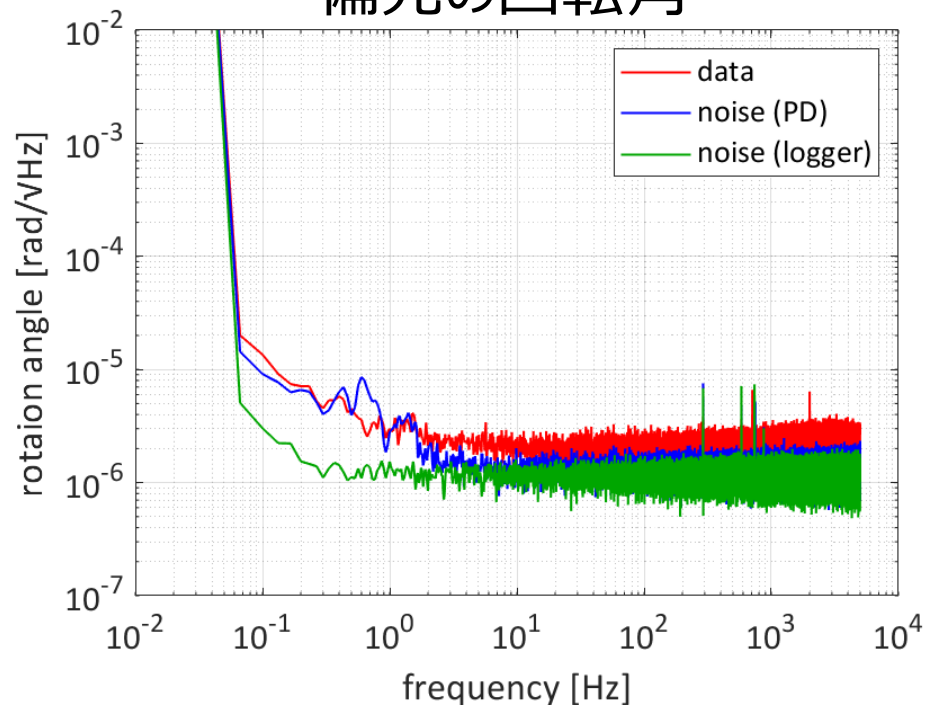
## P偏光の出力



## S偏光の出力



## 偏光の回転角



- 現在の感度は光検出器とデータロガーの雑音で制限されていると考えられる

# 今後の展望

---

- フィネスを向上させる
  - 鏡を変更する
  - アラインメントを見直す
- 入射光強度を上げる
- 長時間の周波数制御を実現する
  - 低周波数成分をよりレンジの大きいアクチュエータで制御する
- 雑音源を突き止め低減する
  - 光検出器のS/N比を上げる
  - データロガーの量子化雑音を低減する



# まとめ

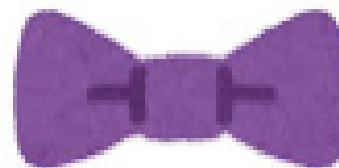
---

- 光リング共振器を用いてアクシオン暗黒物質を探索する実験を行っている (DANCE)
- アクシオンにより生じる直線偏光の回転を測定する
- プロトタイプ共振器 DANCE Act-1 を製作し性能を評価した
  - ・ フィネスが設計値より小さい
- PDH法を用いて周波数制御を行った
  - ・ 安定な制御を実現できた
- 2020年8月 初のデータを取得し感度を求めた
  - ・ 今後改良しより高感度なデータ取得を目指す

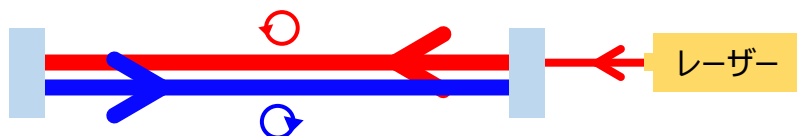
# 予備スライド

# ボウタイ型共振器とダブルパス構成

- ボウタイ型光リング共振器



線形型では光速差の影響がキャンセル

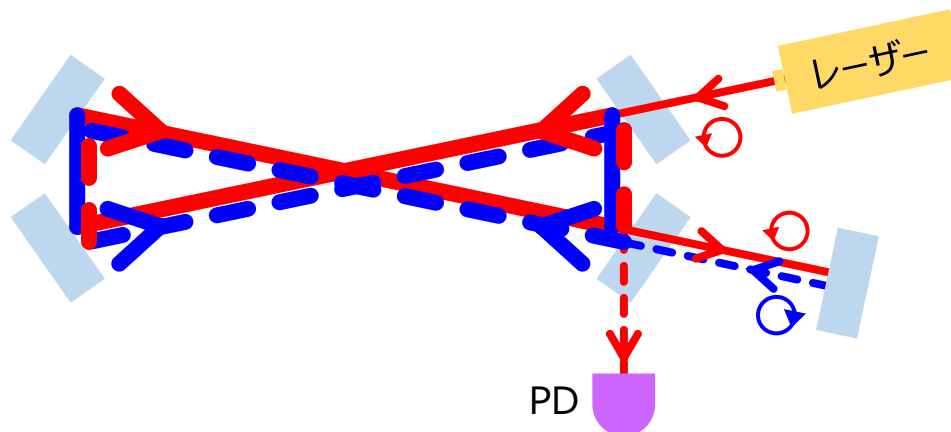


ボウタイ型なら左円偏光が支配的に共振する

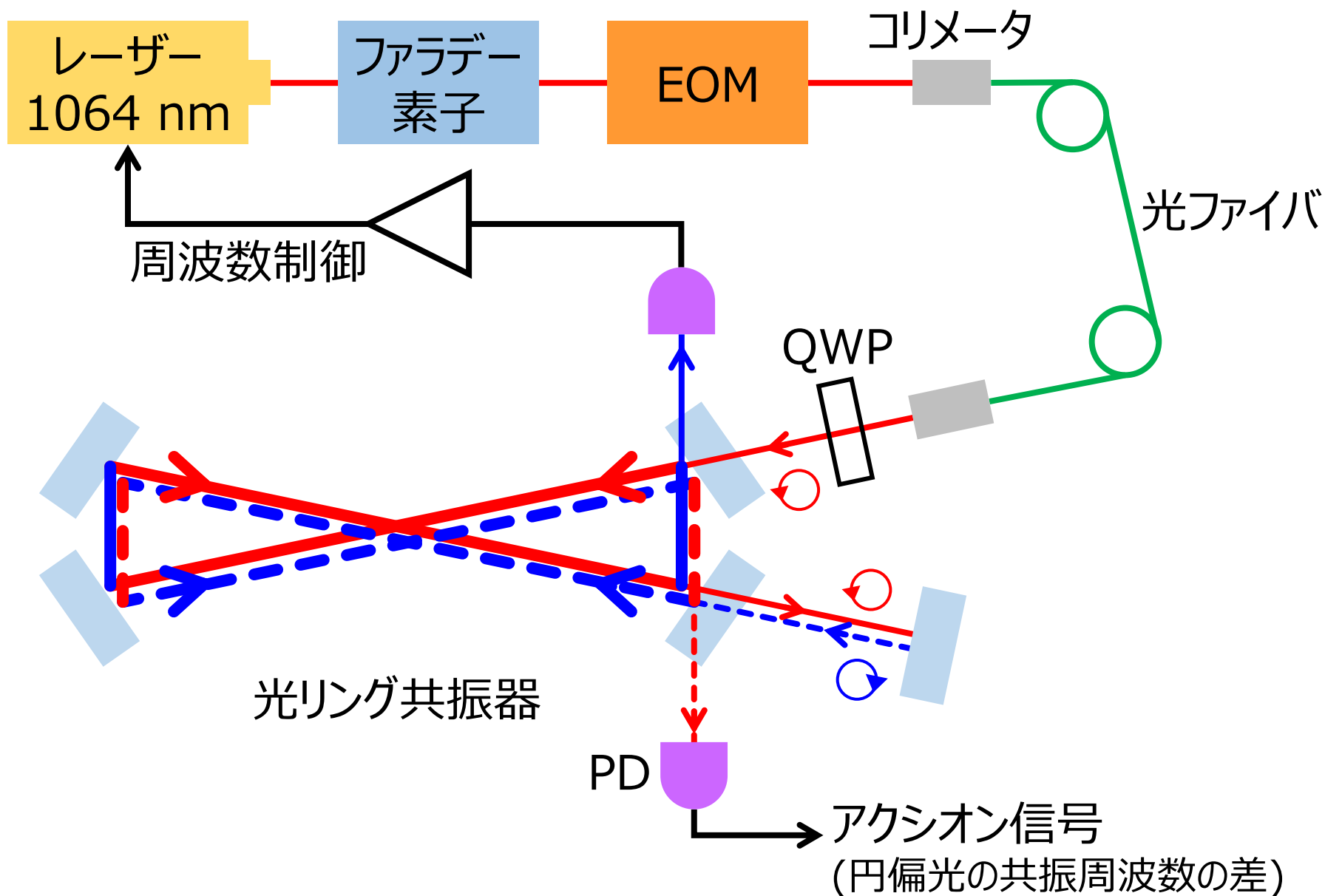


- ダブルパス構成

透過光を鏡で打ち返し共振周波数差をヌル測定



# 実験装置の構成 (円偏光ダブルパス)

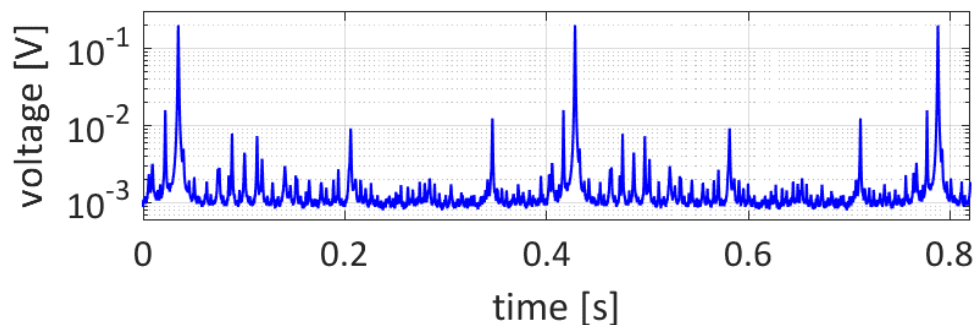
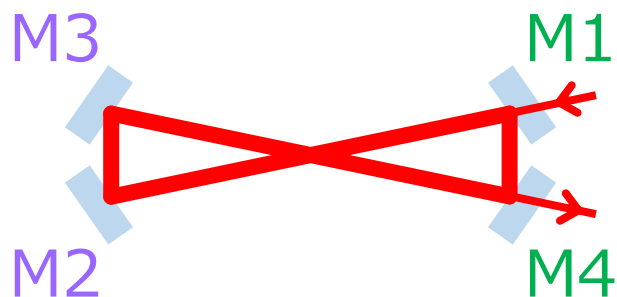


# 共振器の性能評価

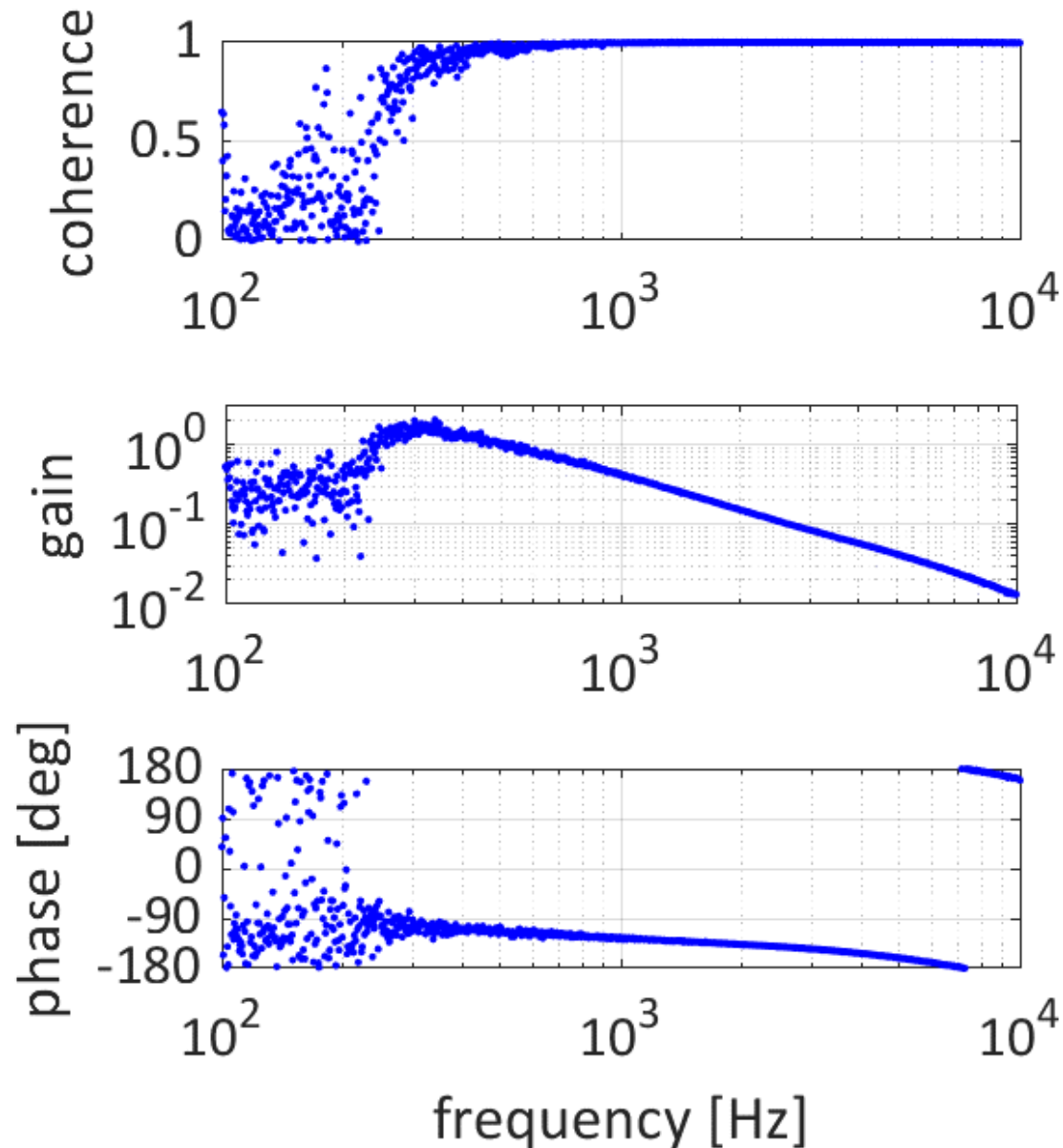
	設計値	測定値 (P偏光)
鏡の強度反射率	M1, M4: 99.9 % M2, M3: 100 %	M1, M4: 99.9 % M2, M3: 99.95 %
フィネス	3140	$525 \pm 19$ (S偏光: $527 \pm 29$ )
周回長	99.4 cm	$102 \pm 4$ cm
鏡の曲率半径	すべて 100 cm	$95.6 \pm 3.7$ cm
入射角	$42^\circ$	$40.9 \pm 2.4^\circ$
モードマッチング率	99.9987 %	$83.03 \pm 0.09$ %
入射光強度	$\sim 1$ W	$\sim 10$ mW

→ フィネス  
2100

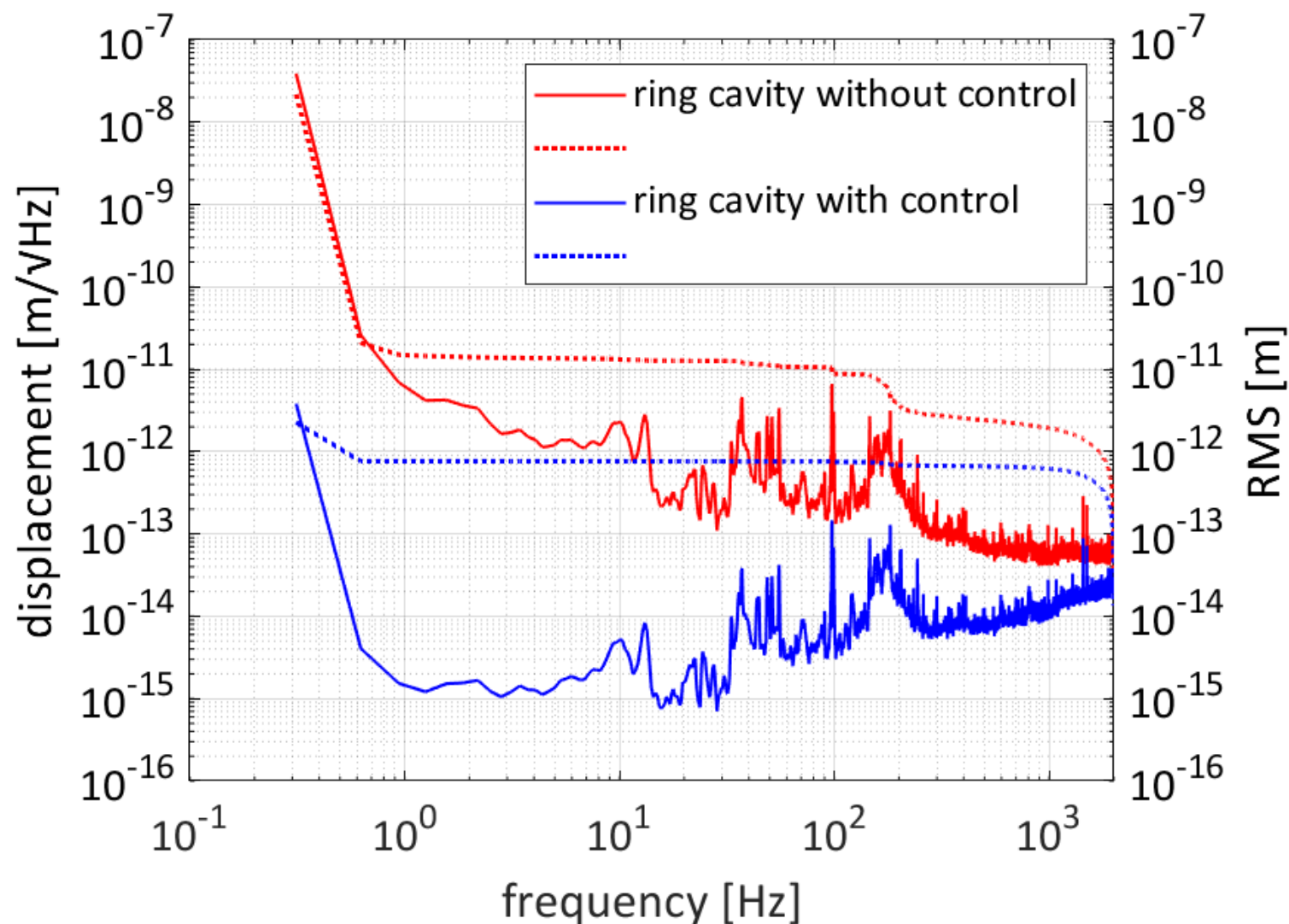
→ 光のロス  
0.91 %



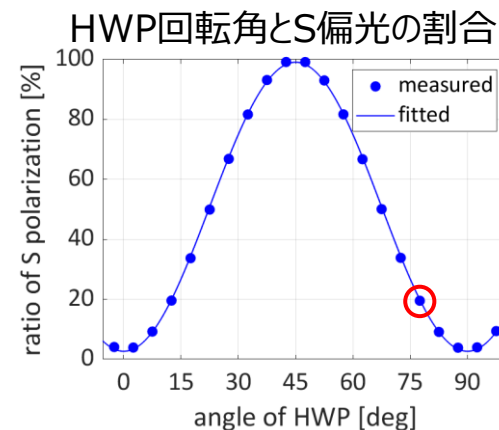
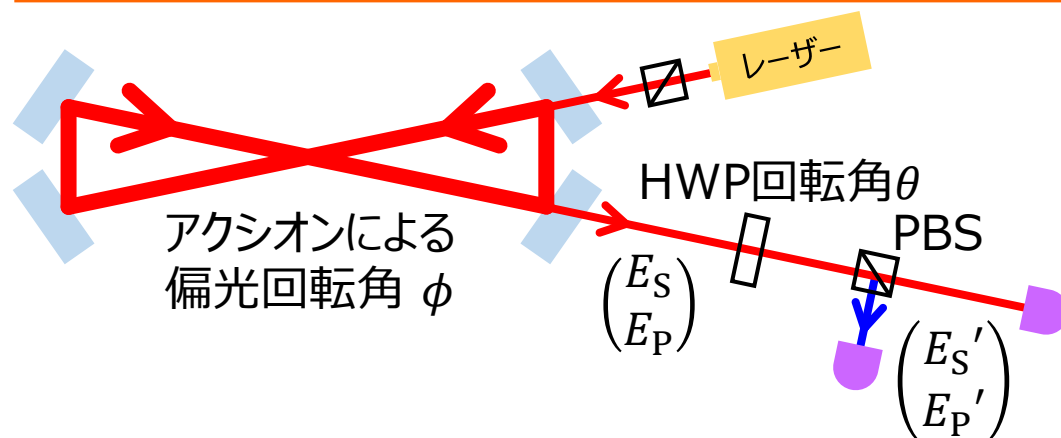
# オープンループ伝達関数 生データ



# 外乱のスペクトル



# データ解析



$$\begin{pmatrix} E_S \\ E_P \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_0 \sin \phi(t) \\ E_0 \cos \phi(t) \end{pmatrix}, \text{HWP} \begin{pmatrix} \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ -\sin 2\theta & \cos 2\theta \end{pmatrix}$$

$$\rightarrow \begin{pmatrix} E'_S \\ E'_P \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_0 \sin (2\theta + \phi(t)) \\ E_0 \cos (2\theta + \phi(t)) \end{pmatrix}$$

$\theta = 0$  では  $\phi$  の符号がわからない  
 今回の場合  $0 < 2\theta + \phi(t) < \pi/2$

$$\arctan \frac{E'_S}{E'_P} = 2\theta + \phi(t)$$

$2\theta$  は一定なのでスペクトルには寄与しない



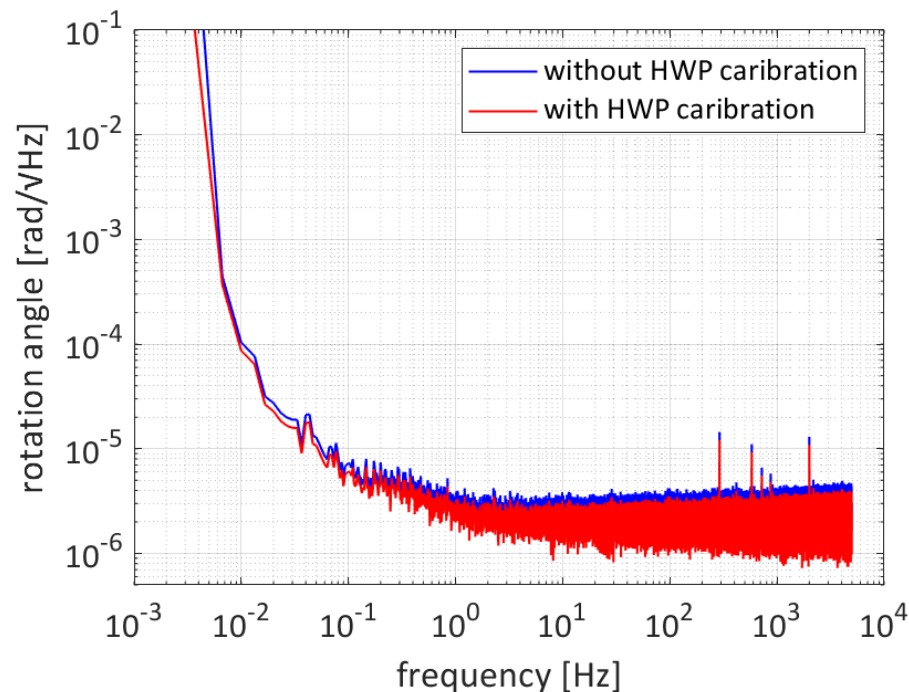
# データ解析

## より一般的なHWPの較正

$\phi(t) \ll 1$  を用いて

$$\begin{pmatrix} E_S' \\ E_P' \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} E_0 (\sin 2\theta + \phi(t) \cos 2\theta) \\ E_0 (\cos 2\theta - \phi(t) \sin 2\theta) \end{pmatrix}$$

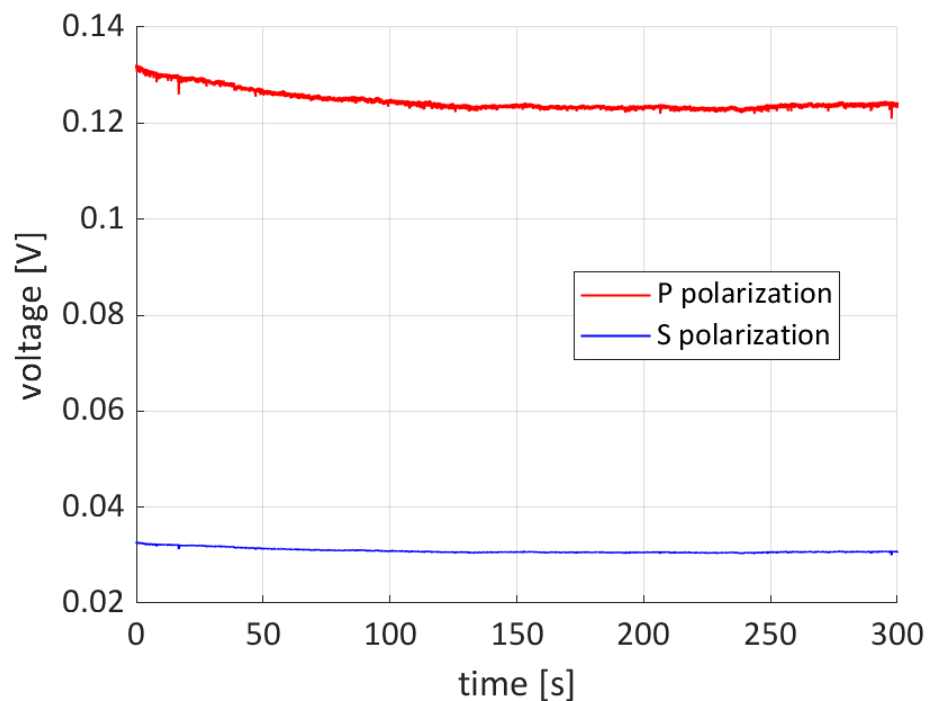
$$\frac{P_S'}{P_{\text{total}}'} = \frac{E_S'^2}{E_S'^2 + E_P'^2} \approx \sin^2 2\theta + \phi(t) \sin 4\theta$$



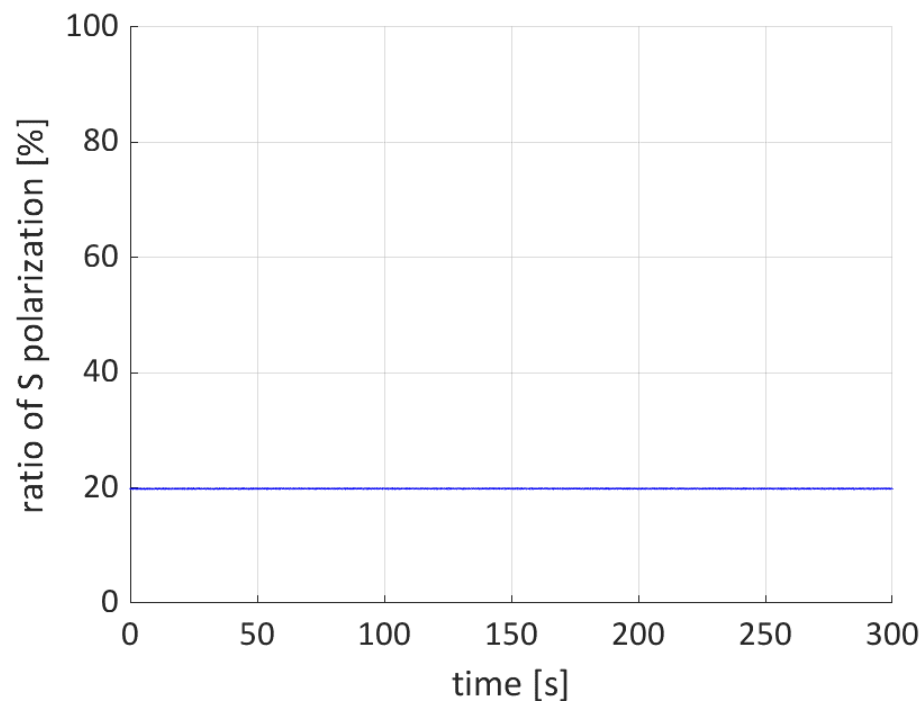
2つの解析方法でスペクトルは  
ほぼ一致する

# 時系列データ

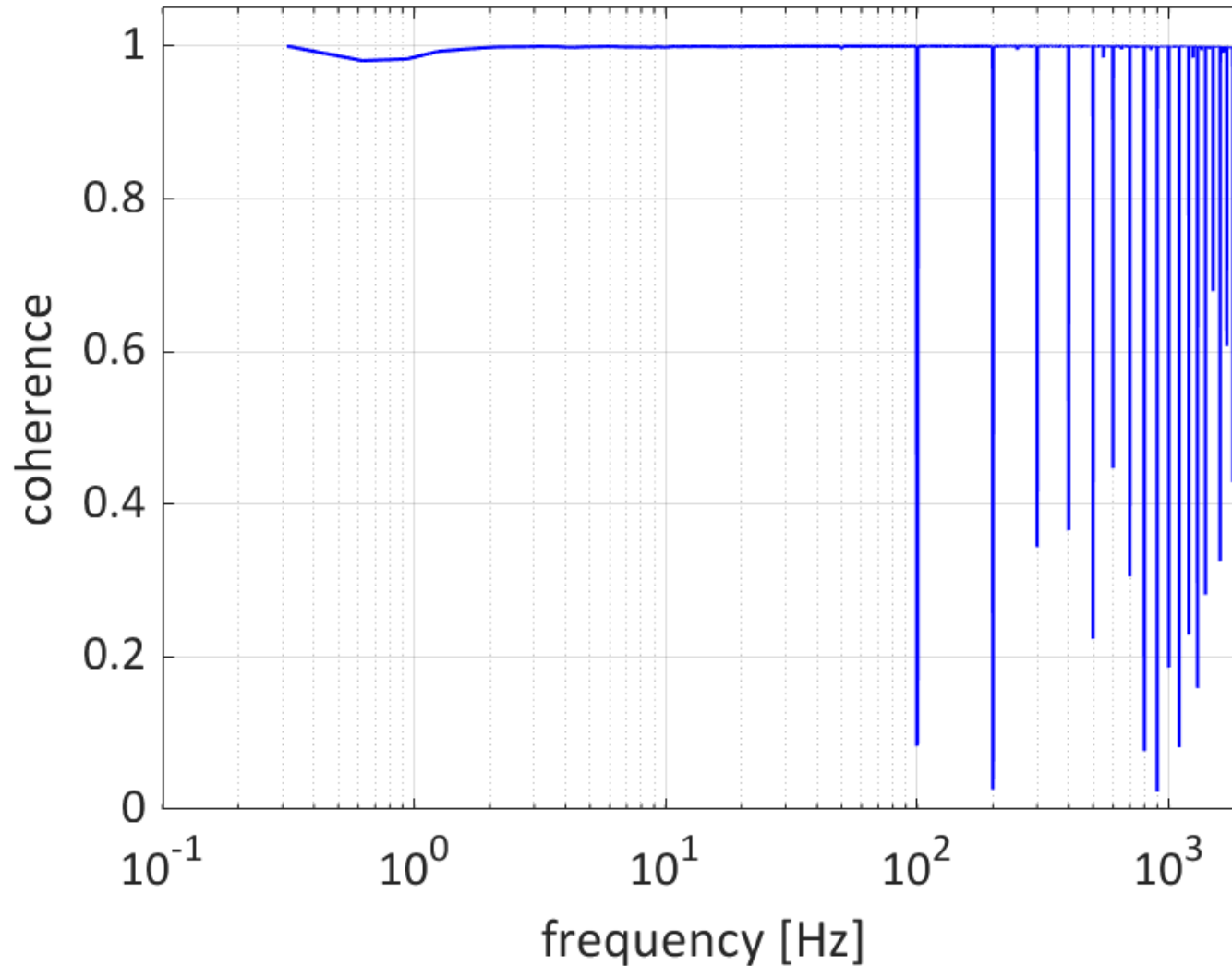
## P偏光とS偏光の透過光強度



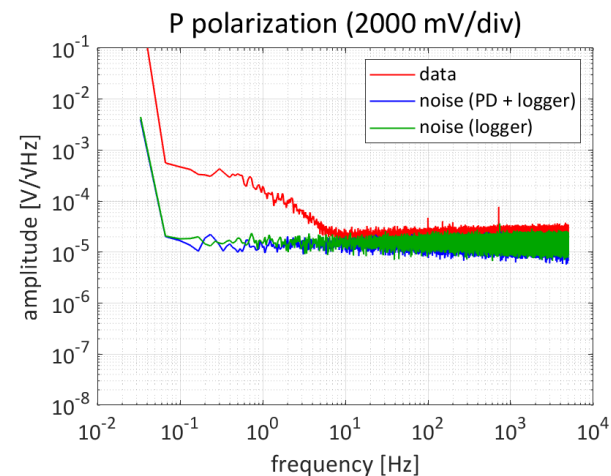
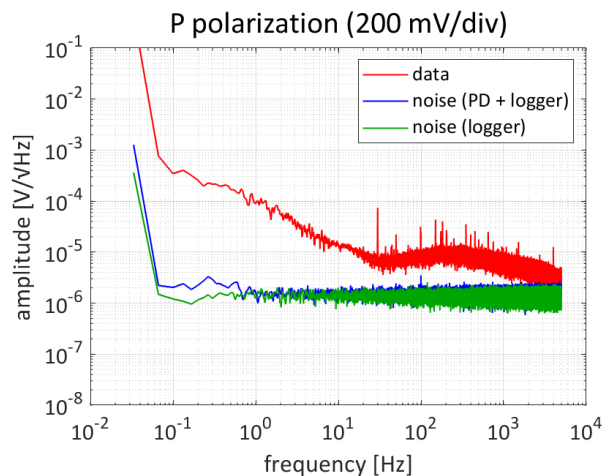
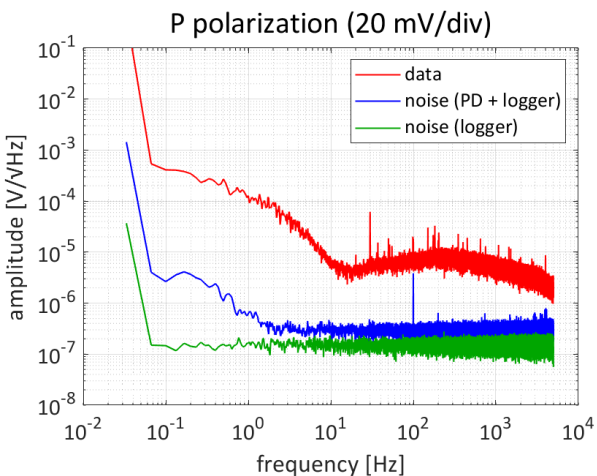
## 透過光中のS偏光の割合



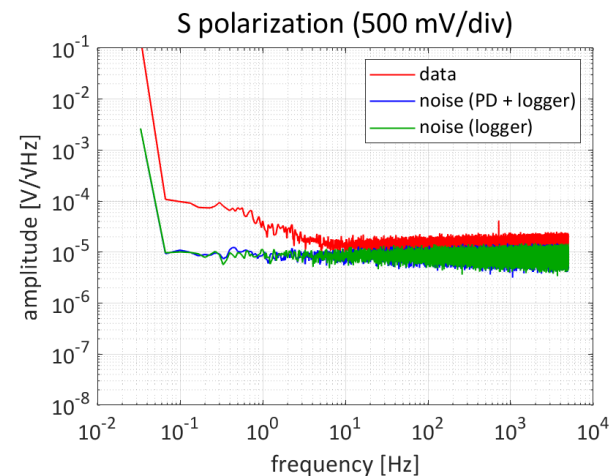
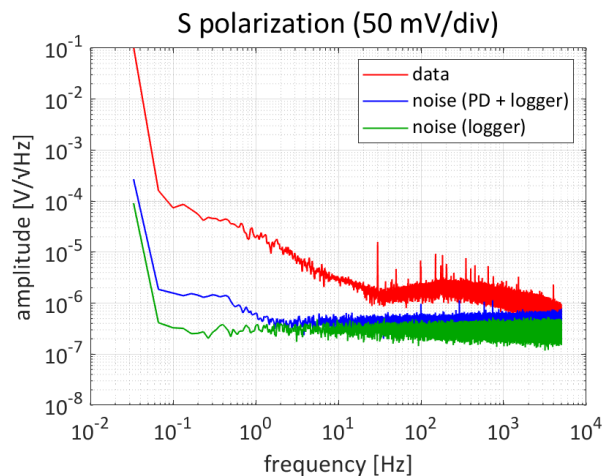
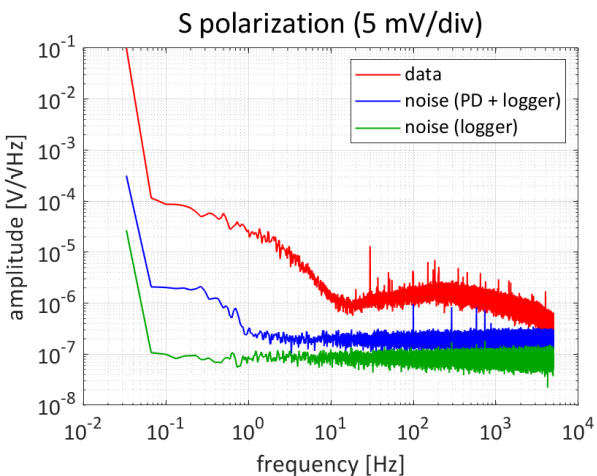
# 偏光間のコヒーレンス



# ノイズバジェット

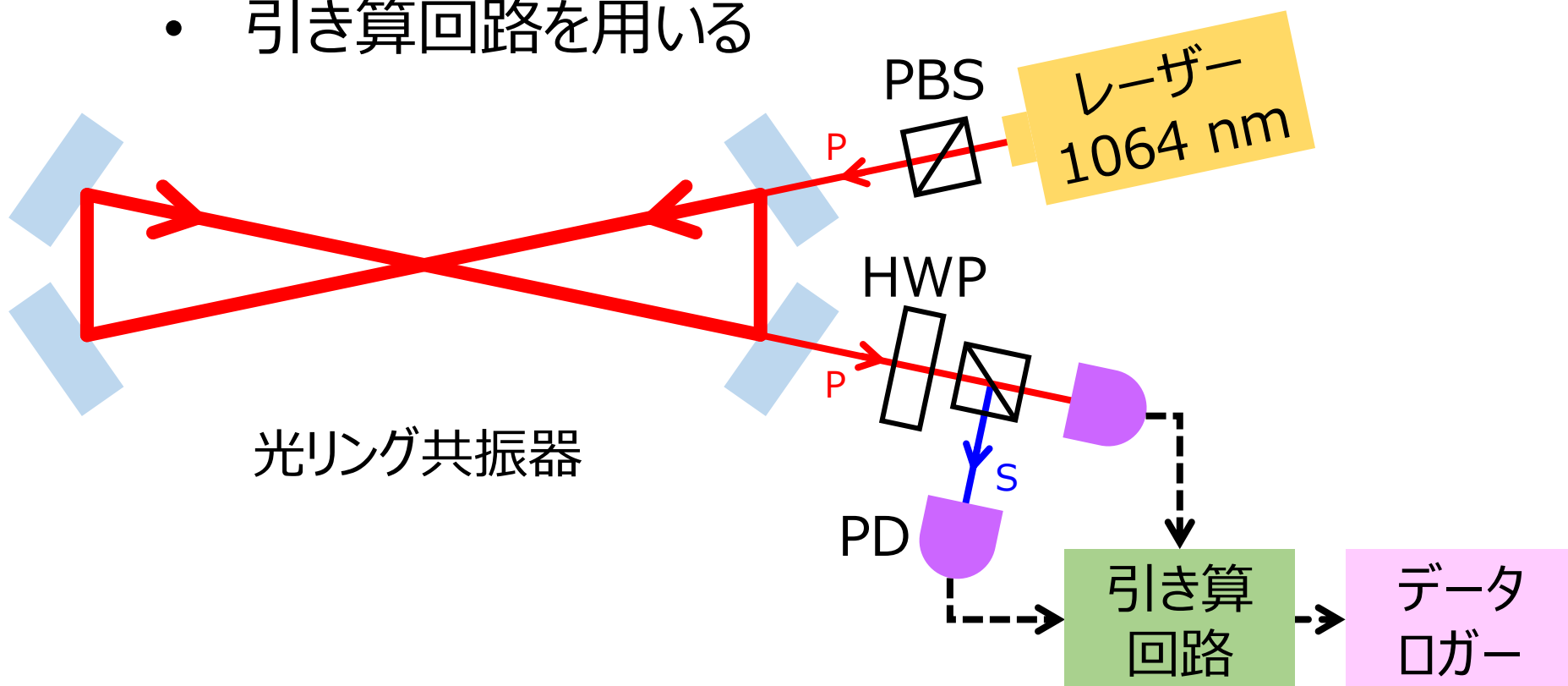


小 ← データロガーのレンジ → 大

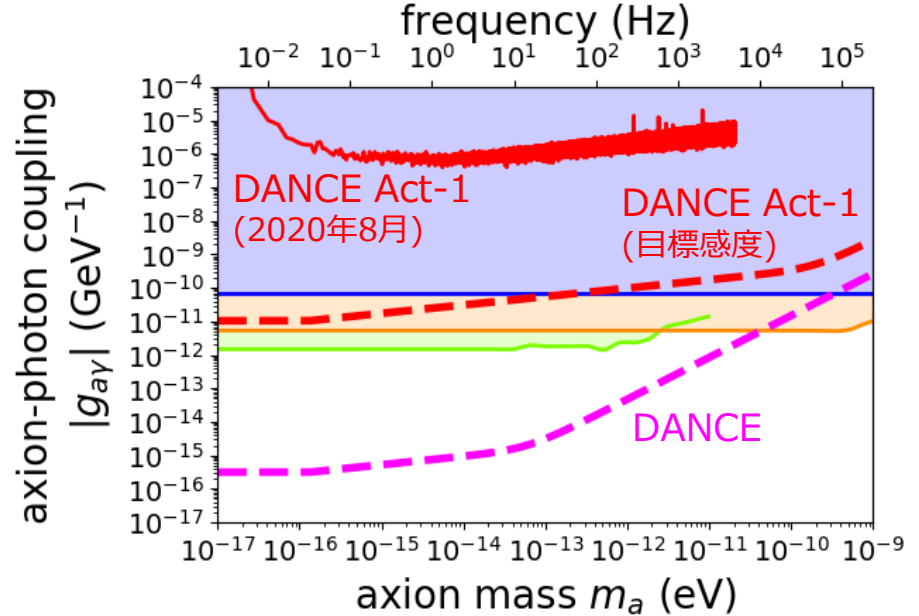
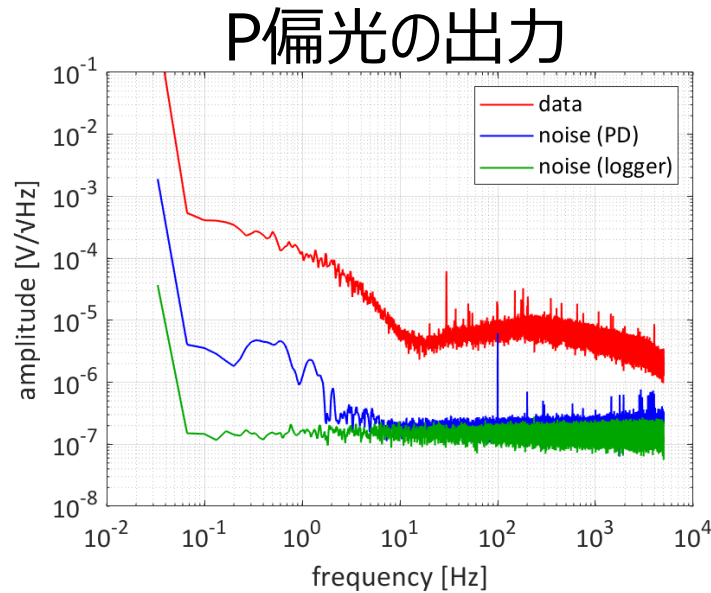


# 雑音の低減方法

- 光検出器のS/N比を上げる
  - ・ レーザー光の強度を上げる
  - ・ 光検出器のゲインを上げる
- データロガーの量子化雑音を低減する
  - ・ 引き算回路を用いる



# 感度向上の概算



- 現在のショットノイズ  $\sim 10^{-8} \text{ V}/\sqrt{\text{Hz}}$  (雑音 +1桁)  
→ 感度曲線で  $\sim 10^{-7} \text{ GeV}^{-1}$
- フィネス (500  $\rightarrow$  3000) +1桁
- 入射光強度 (10 mW  $\rightarrow$  1 W) +1桁
- 透過率 (1 %  $\rightarrow$  100 %) +1桁