

*Observing  
VAcuum  
with  
Laser*

# OVAL実験： パルス磁石と高フィネス共振 器を用いた真空複屈折の探索

上岡修星、稲田聡明<sup>A</sup>、難波俊雄<sup>A</sup>、浅井祥仁、  
吉岡孝高<sup>B</sup>、五神真、  
松尾晶<sup>C</sup>、金道浩一<sup>C</sup>、野尻浩之<sup>D</sup>

東大理、東大素セ<sup>A</sup>、東大工<sup>B</sup>、東大物性研<sup>C</sup>、東北大金研<sup>D</sup>

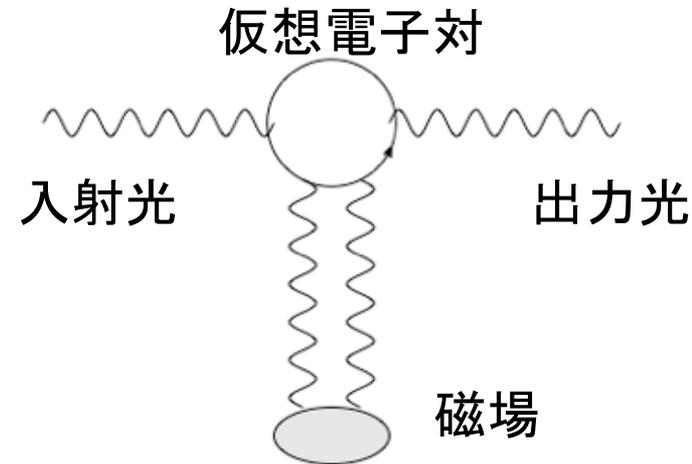


# 真空複屈折とは

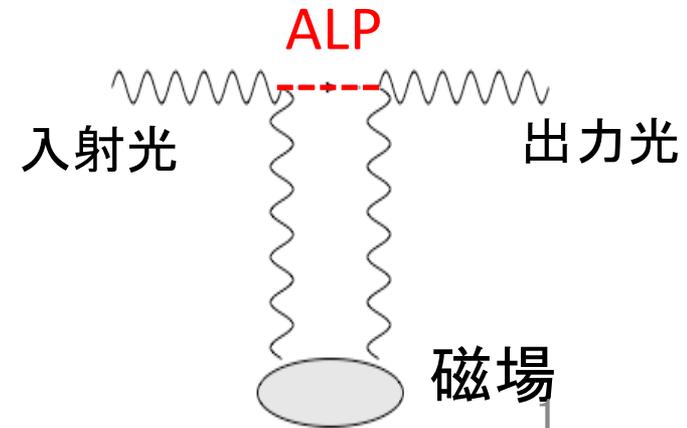
- 標準模型や多くのnew physicsは真空中の電磁場の相互作用を予言
- 磁場と光の相互作用で屈折率に異方性→真空複屈折
- $\Delta n = n_{\parallel} - n_{\perp} = k_{\text{CM}} \times B^2$   
(QED理論値  $k_{\text{CM}} = 4.0 \times 10^{-24} [\text{T}^{-2}]$ )
- 未知粒子も寄与: 0.1eVのALPsに対して地上実験で最も感度が良い
- 世界中で実験が行われ、伊のgroupがQEDまで後20倍まで達したが、未発見

我々はOVAL実験と称して真空複屈折探索実験を行っている

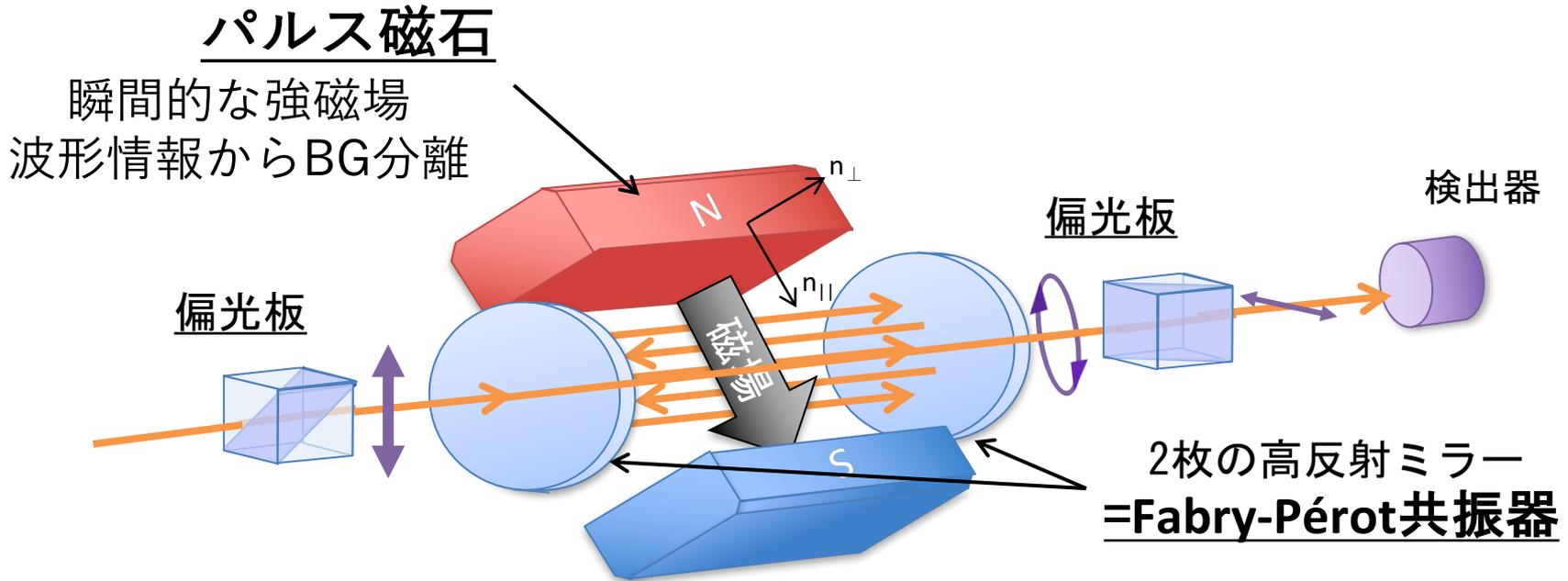
QEDの生む光と磁場の相互作用



ALPsによる光と磁場の相互作用



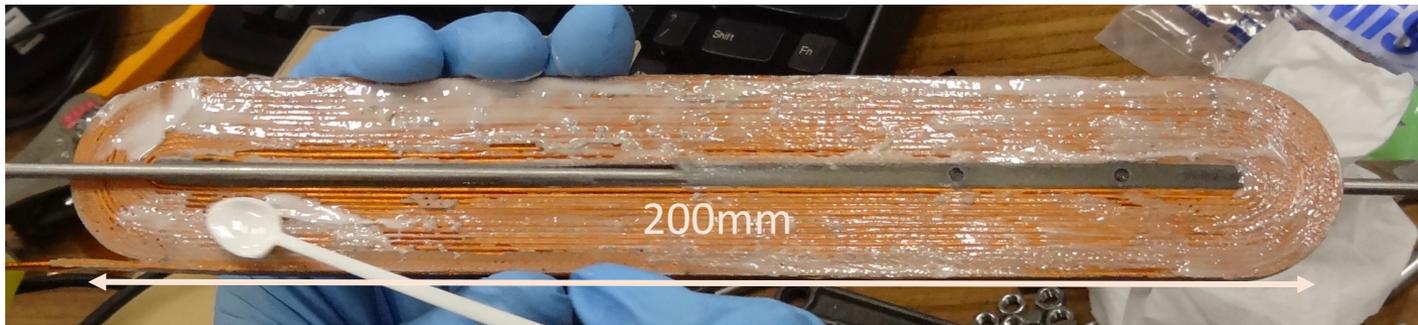
# 探索手法



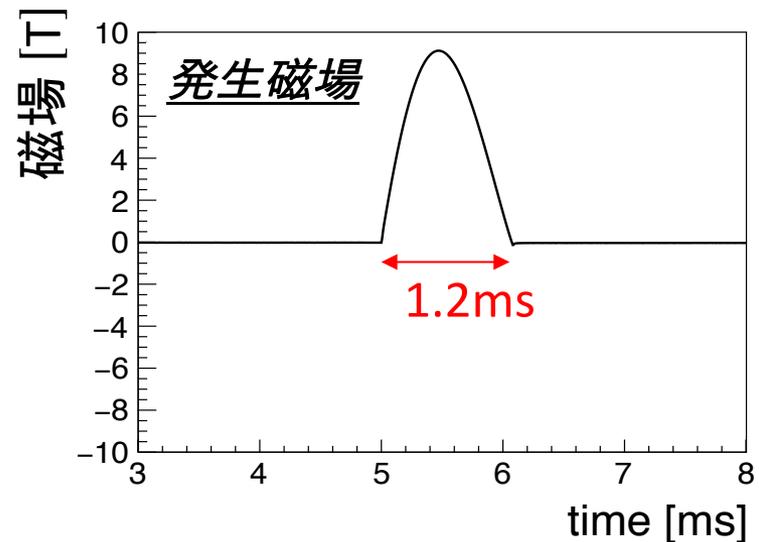
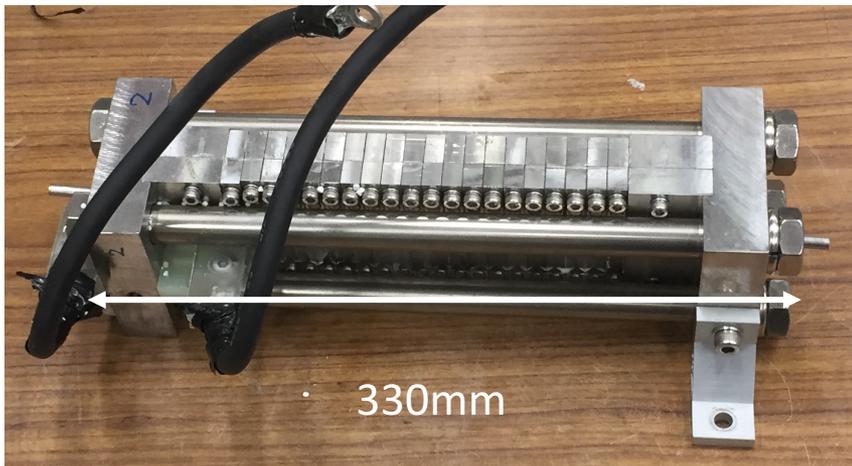
- 真空複屈折で生じる偏光変化を偏光子を用いて測定
- パルス磁石を採用: 強磁場 & 波形情報からsignalとBGを分離
- Fabry-Pérot共振器でフィネス倍 相互作用領域をエンハンス
- 感度は**磁場強度<sup>2</sup> × 磁場長 × フィネス × 測定時間<sup>1/2</sup>**

# Key technology 1: パルス磁石

- ✓ 磁場長20cm、パルス幅1.2ms。最大磁場11.4T
- ✓  $LqN_2$ で冷却しながら繰り返し0.06Hz、8.4Tで運転



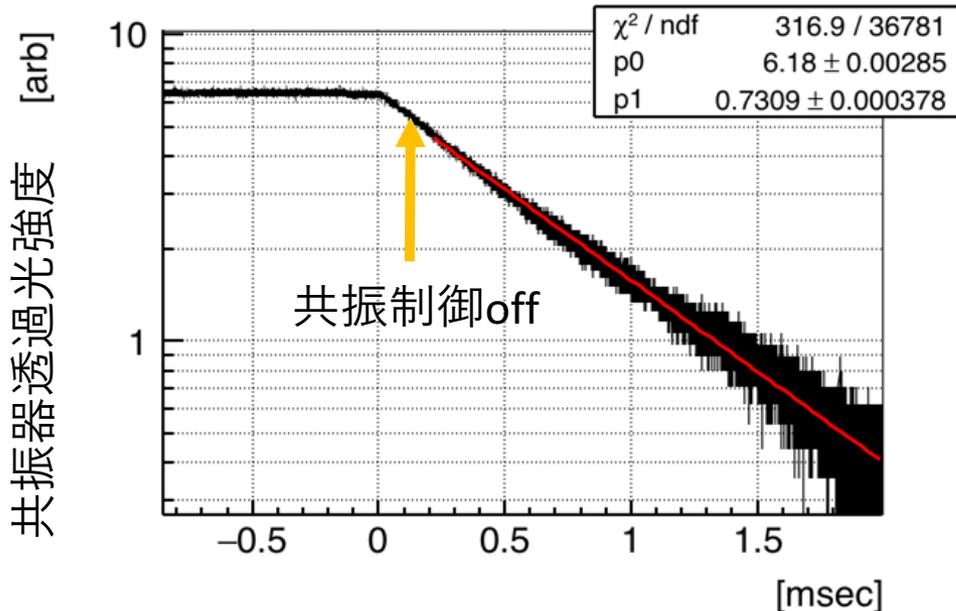
beam pipe  
 $\phi$  5.3mm



# Key technology 2: 光共振器

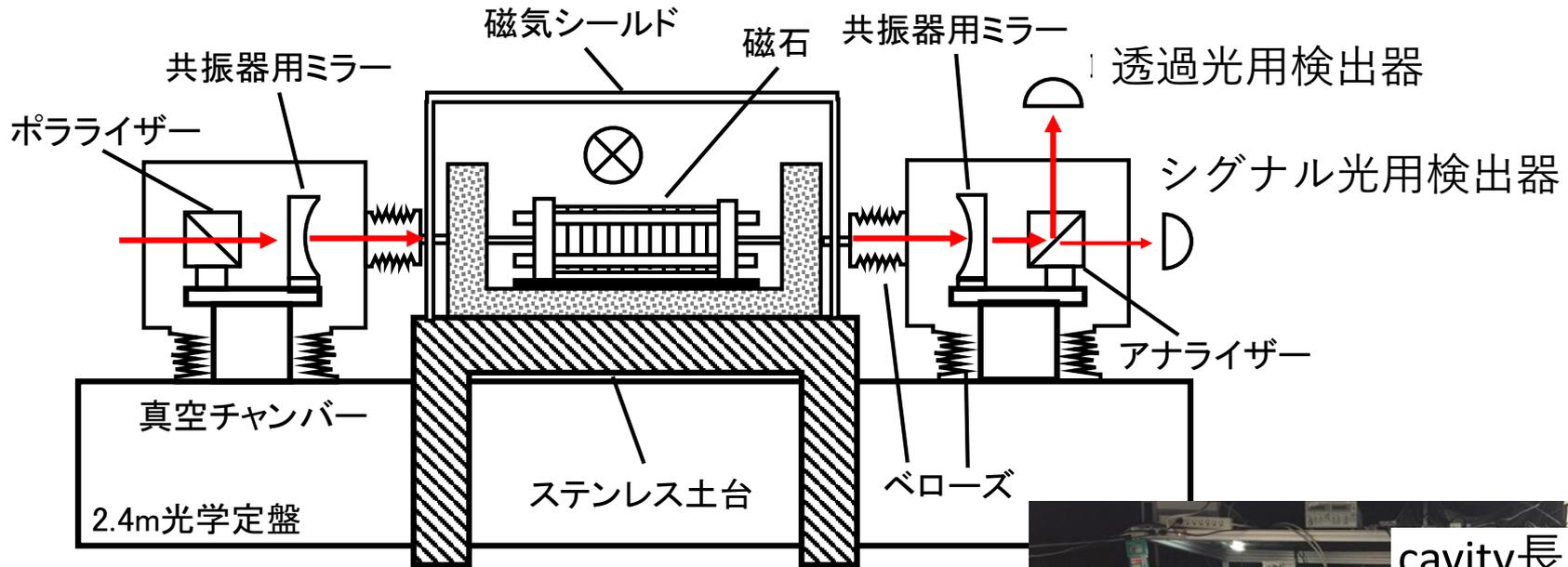
- 1064 $\mu\text{m}$ の光源で長さ1.4mのFabry-Pérot共振器を構築
- 高反射( $R > 99.999\%$ )ミラーを使用 $\rightarrow$  finesse 50万
- レーザーの周波数を共振器長変動にfeedbackすることで共振を制御

cavityからの透過光の減衰時定数測定

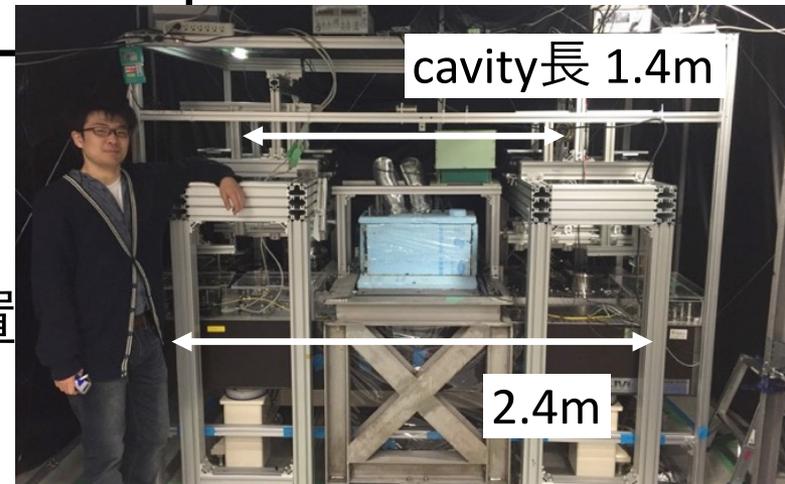


透過光強度の  
減衰時定数( $\sim 730\mu\text{s}$ )から  
finesse 490,000

# 実験セットアップ全体

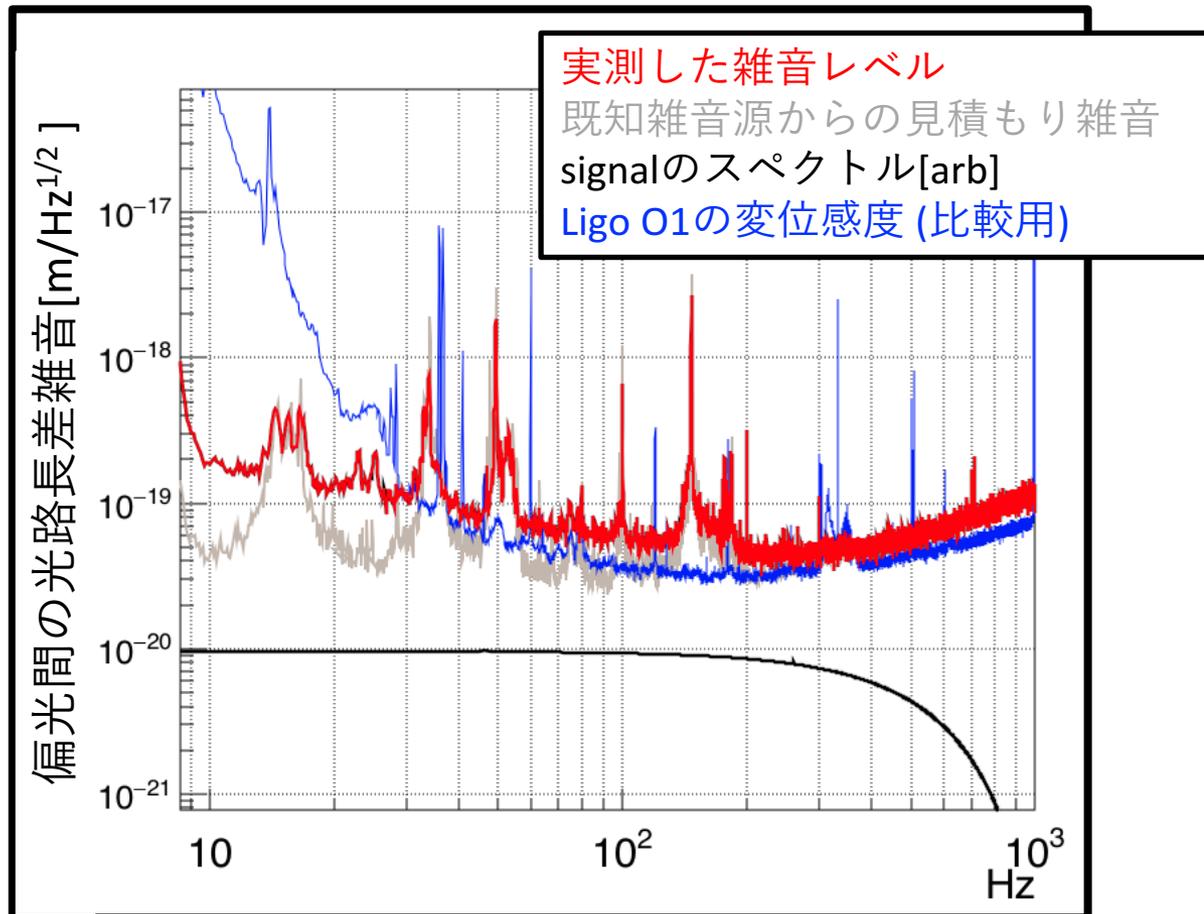


- 2.4mの光学定盤で実験
- 偏光子とミラーは真空中に封入
- 1.4mの共振器の中央に磁石が1個設置
- 磁石からの擾乱への対策が実験の鍵



# 雑音レベル

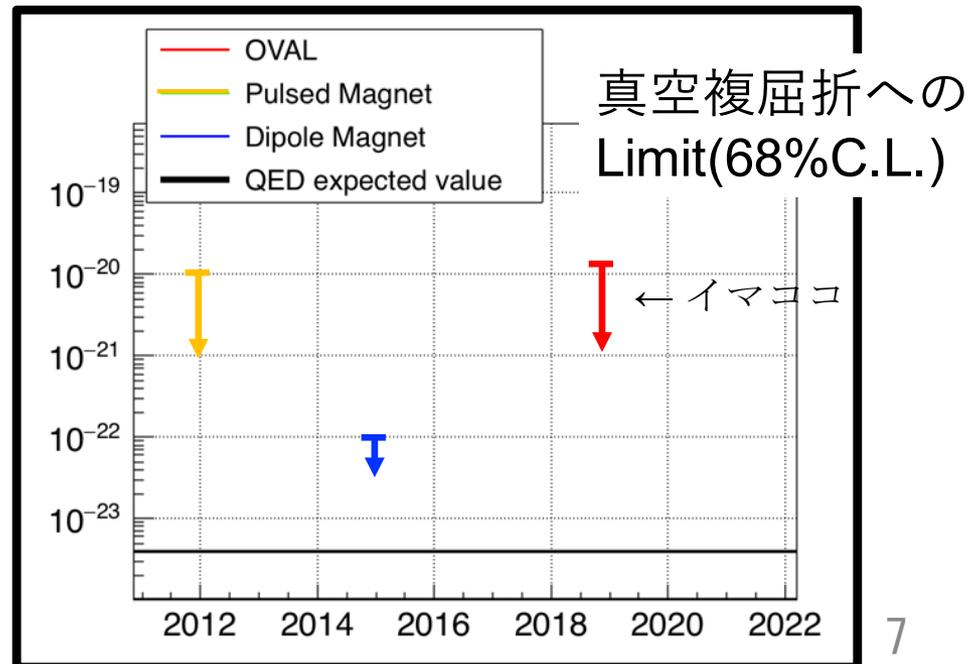
- 非磁場印加時のBG複屈折信号から雑音レベルを評価
- 現有の磁石での期待感度:  $\Delta k_{cm} = 3 \times 10^{-19}$  [T<sup>2</sup>/pulse]



- 50Hz~500Hz付近にsignalが現れる→この帯域のnoiseが重要
- 高周波ではほぼ期待通りの雑音レベルに。

# OVAL実験のこれまで/現在

- 2019年夏にDAQ: 8.4Tの磁場 × 5000発 (total DAQ time ~ 1day)
- 得られた感度は  $\Delta k_{CM} \sim 8 \times 10^{-21} [T^{-2}]$
- ✓ 次のstepとして以下の2点で~30倍の感度向上を目指す
  1. 1weekの安定中期DAQの確立 → 感度 6倍
  2. 新型磁石の導入 → 感度 6倍



# 感度向上作戦: 安定DAQの確立

- 夏の測定時の感度は見積もりに比べて2倍悪い

→ 感度を悪化させる候補を探し出し対策を行っている

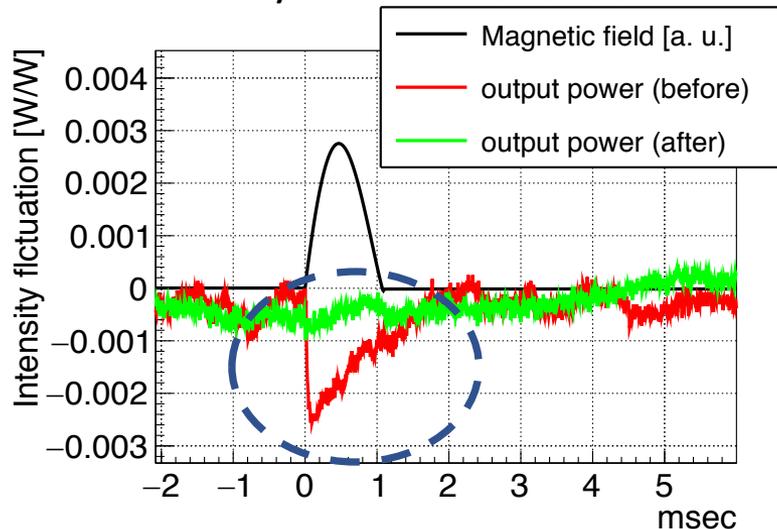
- 磁場の立ち上がりに伴って発生する電磁ノイズ

- 磁石からの振動&音による共振の不安定化

- アライメント変動

現在、再測定の準備中

Cavity透過光強度雑音



磁場印加時の電磁ノイズで  
cavityのパワーが変動(赤)  
→GND、ケーブルの取り回  
しの変更で対策(黄緑)

# 感度向上作戦: 安定DAQの確立

- 夏の測定時の感度は見積もりに比べて2倍悪い

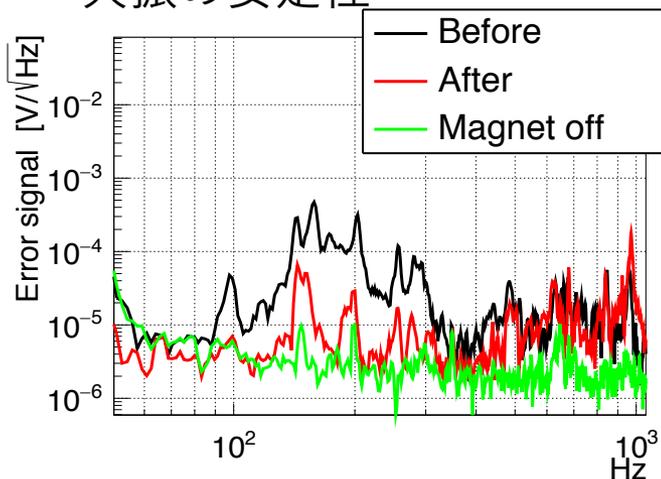
→ 感度を悪化させる候補を探し出し対策を行っている

- 磁場の立ち上がりに伴って発生する電磁ノイズ
- 磁石からの振動&音による共振の不安定化

- アライメント変動

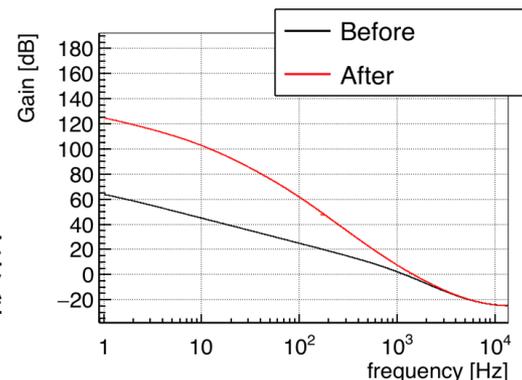
現在、再測定の前準備中

磁場印加時の誤差信号  
～共振の安定性



signalが現れる500Hz以下の制御を大幅に強化 + lock processを自動化しDAQに対応  
➤ まだpeakは残るものの大幅に安定に

サーボ回路の  
設計ゲイン



# 感度向上作戦: 安定DAQの確立

- 夏の測定時の感度は見積もりに比べて2倍悪い

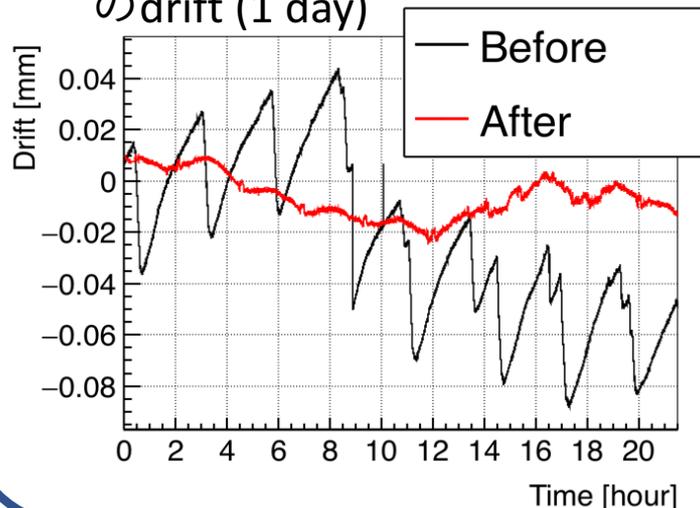
→ 感度を悪化させる候補を探し出し対策を行っている

- 磁場の立ち上がりに伴って発生する電磁ノイズ
- 磁石からの振動&音による共振の不安定化

- アライメント変動

現在、再測定の前準備中

cavity透過光のbeam pointing  
のdrift (1 day)



磁石に対する光軸の位置のdriftは100 $\mu$ m以下に抑えたい→磁場に同期してnoiseが生じることがわかっている (beam pipeによる散乱?)

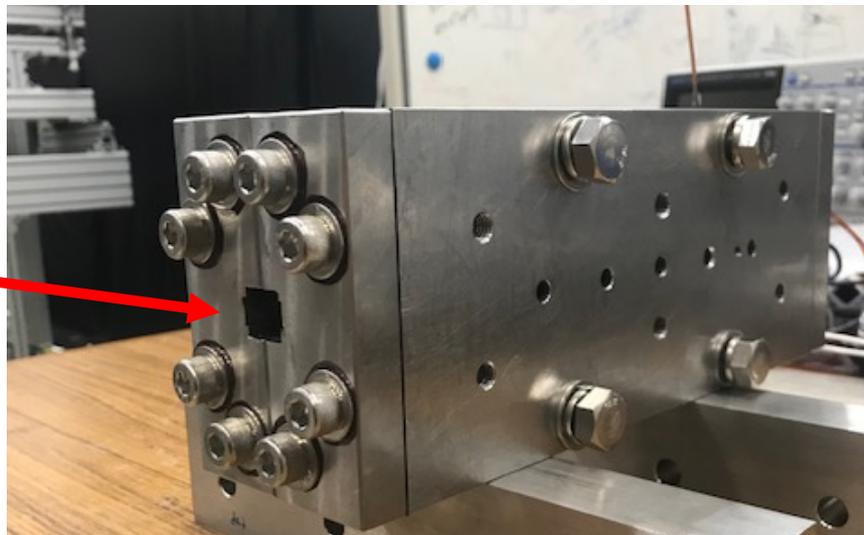
温度変化への対策etcによってcavity透過光のpointingで評価した長期driftが  
**130 $\mu$ m/day**→**30 $\mu$ m/day**にまで減少

noiseが生じるメカニズムも並行して調査中

# 感度向上作戦: 新型磁石作成

- 運転磁場 14Tを目標に新型磁石の開発中
  - 磁場長とパルス幅据え置きでも**3倍感度向上**
- 小型の試作機で17T発生させても非破壊であることを確認済み=機械的強度はOK
- 現在、install用に現在の磁石と同サイズのものを作成中

## 作成中のinstall用新磁石



ここに  
beam pipeが通る

今春中にinstall予定

# これから

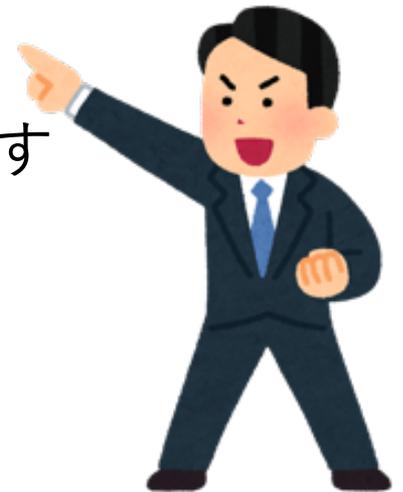
## ➤ 改造後のsetupで再測定 + 新型磁石をインストール

- 新型磁石 × 2個 + 1weekの測定で見積もり感度としては world recordと同程度に達する

## ➤ さらになるstepとして

- 実験の大型化
- 数ヶ月のlong run
- 複屈折雑音源の理解

などにより世界初の真空複屈折観測を目指す



# まとめ

- 真空複屈折はQEDや標準理論を超えた物理で予測される真空中の電磁場の相互作用である。
- パルス磁石とFabry-Pérot共振器を組み合わせたセットアップを開発し、感度向上にむけたアップグレード中
  - 見積もり感度と実測の感度の乖離を理解&改善
  - $B^2$ が3倍の新型磁石の組み立て
- 現行のset upで再測定を終えた後、新磁石をinstallし測定を行う予定
- 最終的には実験の大型化によりQEDの予言する真空複屈折の世界初観測を目指す