

*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^A、難波俊雄^A、浅井祥仁、
吉岡孝高^B、五神真、
松尾晶^C、金道浩一^C、野尻浩之^D

東大理、東大素セ^A、東大工^B、東大物性研^C、東北大金研^D

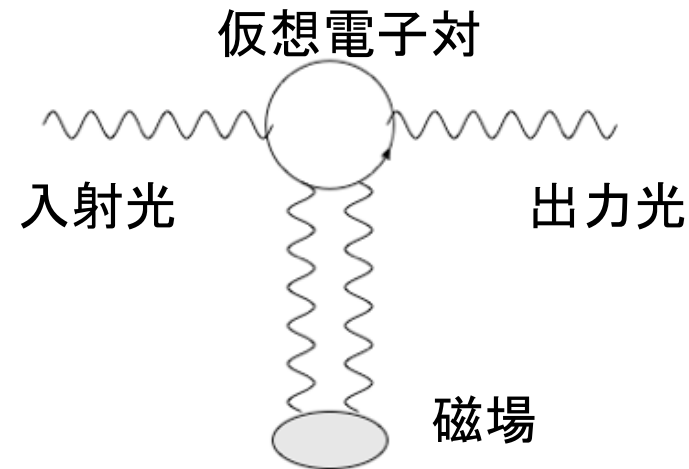


真空複屈折とは

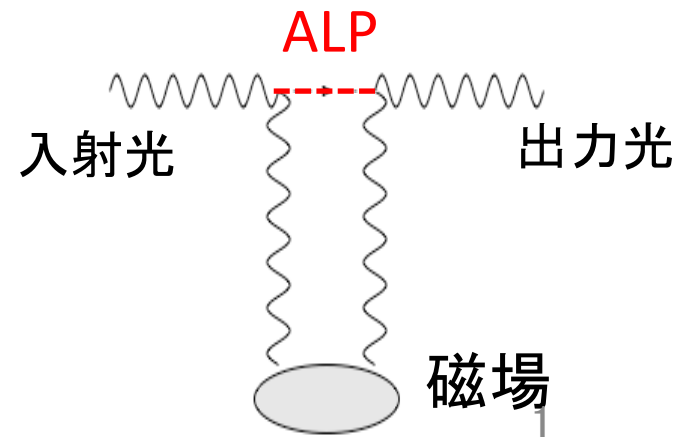
- 標準模型や多くのnew physicsは
真空中の電磁場の相互作用を予言
- 磁場と光の相互作用で屈折率に異
方性→真空複屈折
- $\Delta n = n_{\parallel} - n_{\perp} = k_{\text{CM}} \times B^2$
(QED理論値 $k_{\text{CM}} = 4.0 \times 10^{-24} [\text{T}^{-2}]$)
- 未知粒子も寄与: 0.1eVのALPsに
対して地上実験で最も感度が良い
- 世界中で実験が行われ、伊の
groupがQEDまでfactor 20まで達
したが、未発見

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

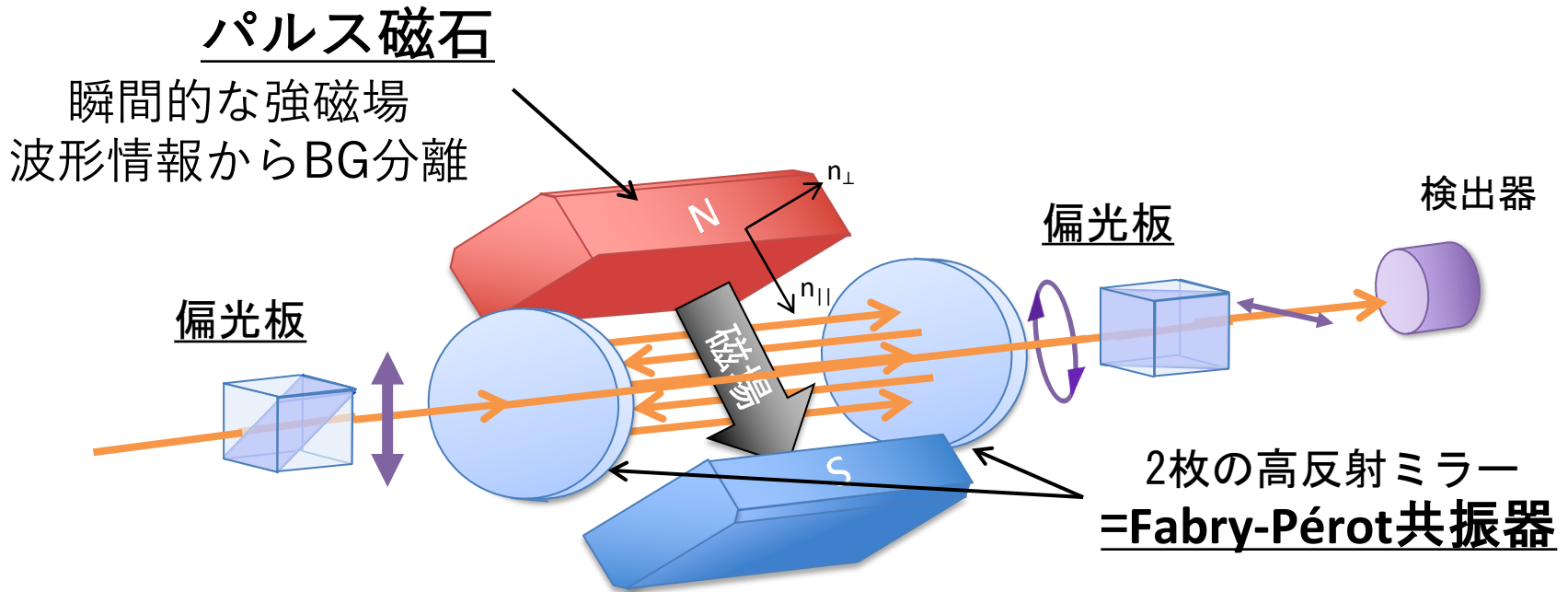
QEDの生む光と磁場の相互作用



ALPsによる光と磁場の相互作用



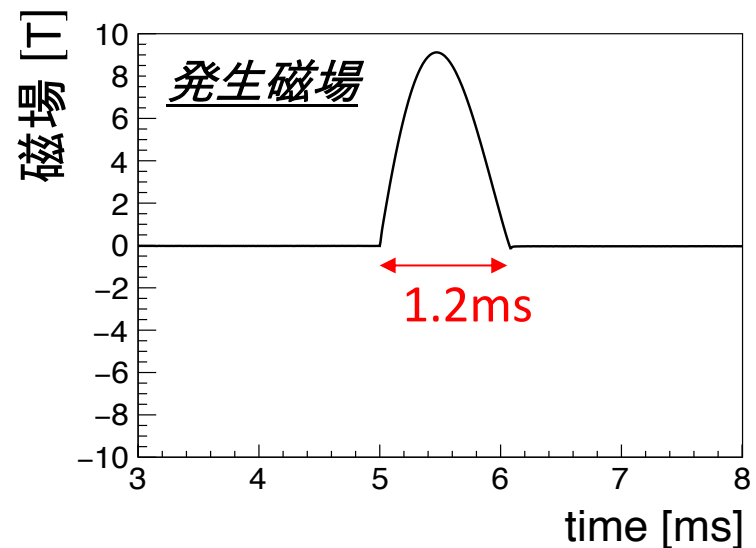
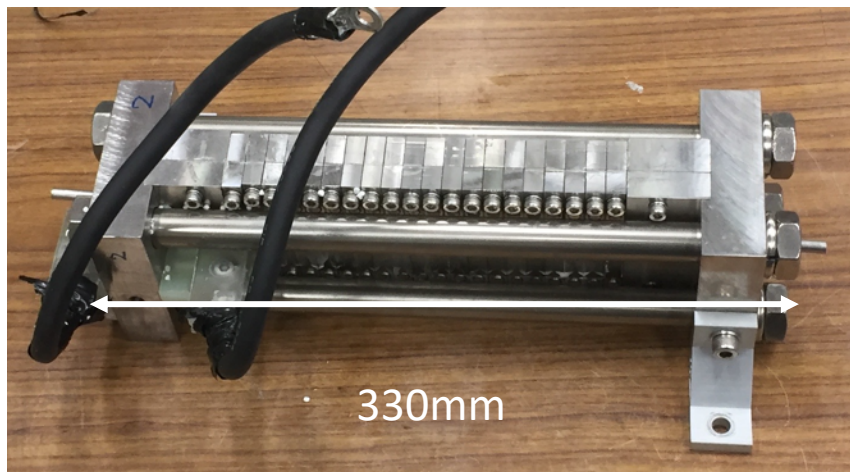
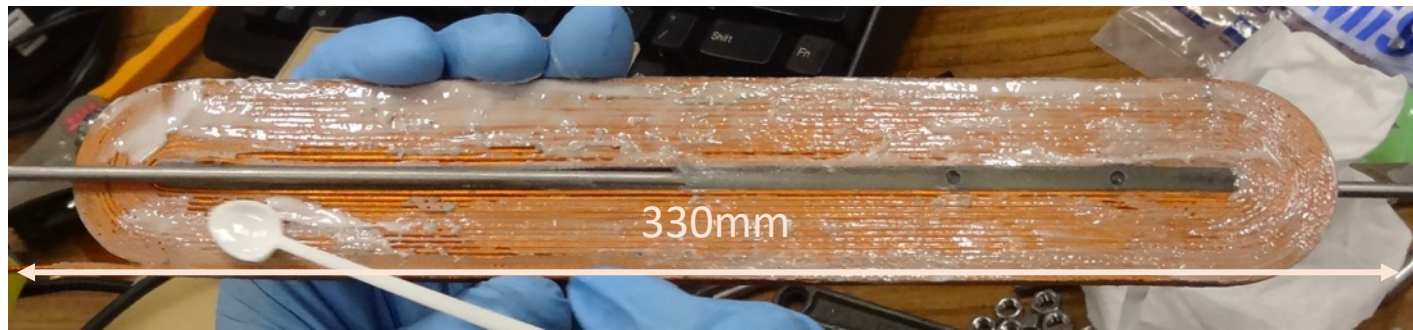
探索手法



- 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BG分離
- Fabry-Pérot共振器を用いることで $2/\pi \times$ フィネス回光が往復
- 感度は **磁場強度² × 磁場長 × フィネス × 測定時間^{1/2}**

Key technology 1: パルス磁石

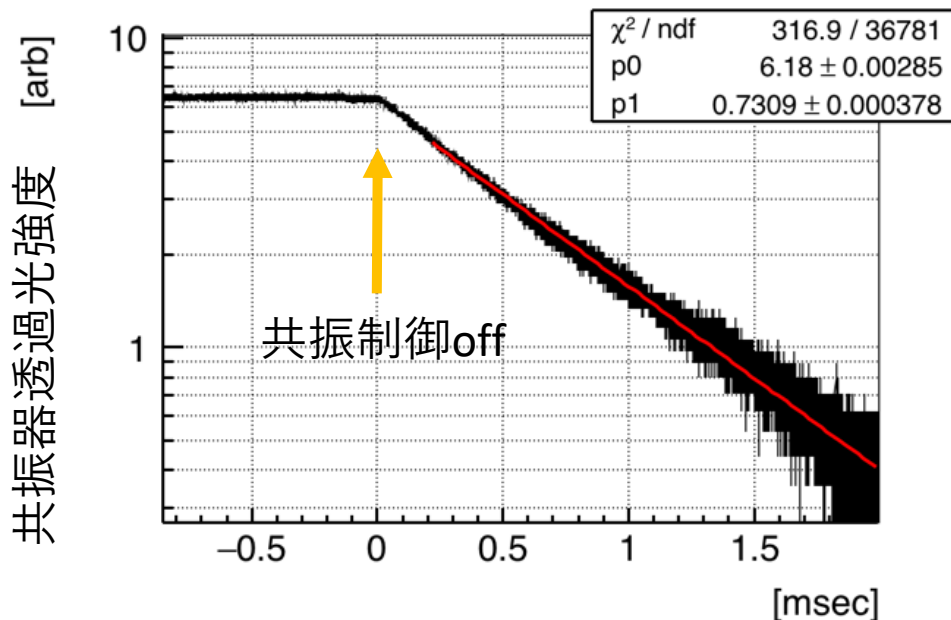
- ✓ 磁場長20cm。パルス幅1msで最大11.4Tまで発生
- ✓ LqN_2 中で運転。17秒毎に8.5Tの磁場を発生可能



Key technology 2: 光共振器

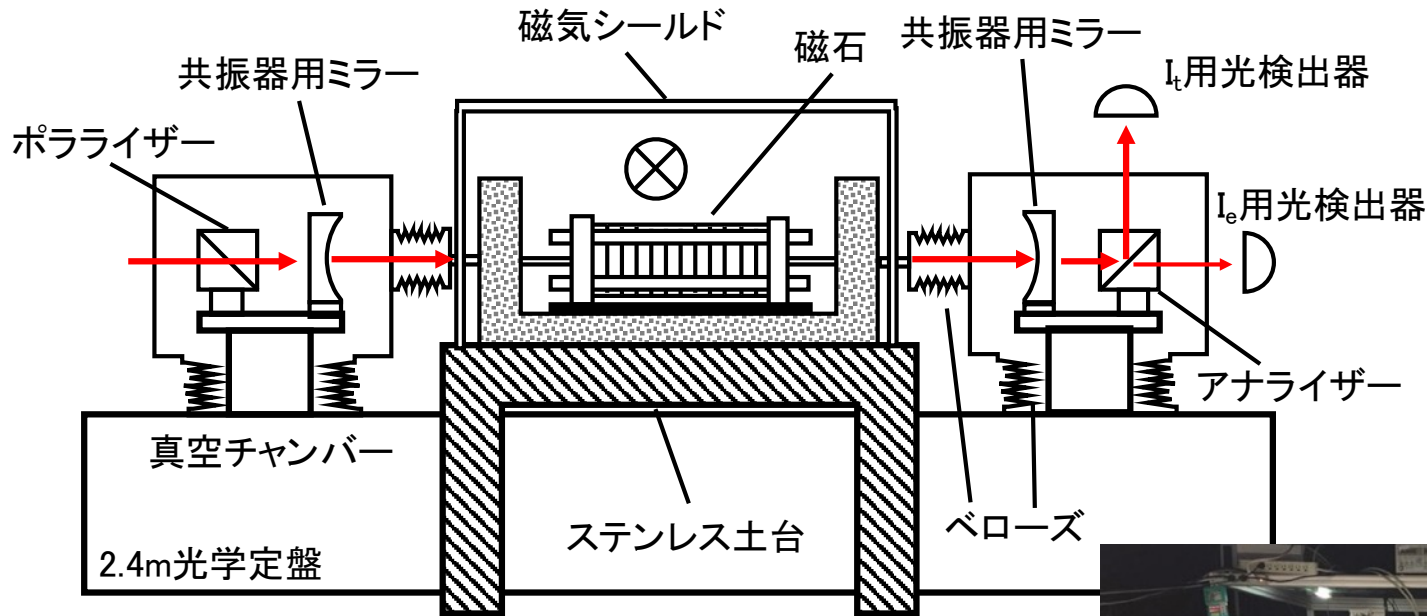
- 1064 μm の光源で長さ1.4mのFabry-Pérot共振器を構築
- 高反射($R > 99.999\%$)ミラーを使用しfinesse 50万程度を確保
- 厳しい共鳴条件($\text{FWHM} = 3\text{pm}$)を満たすようにレーザーの周波数を共振器長変動にfeedback制御

cavityからの透過光の減衰時定数測定

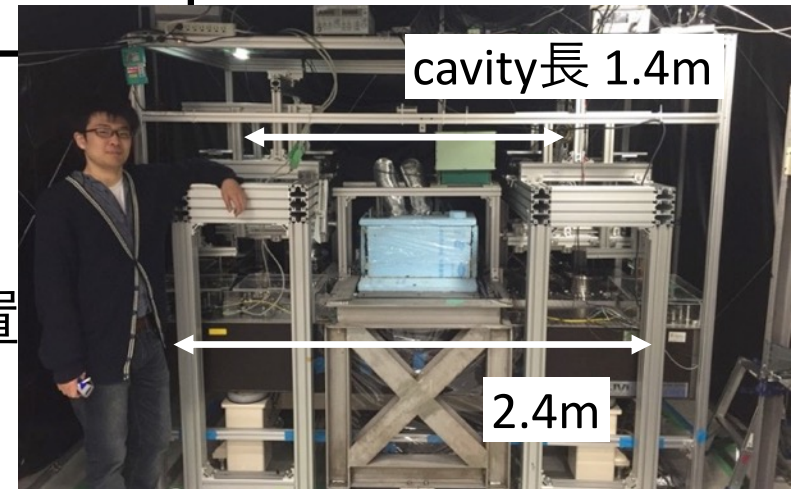


透過光強度の
減衰時定数($\sim 730\mu\text{s}$)から
finesse 490,000

実験セットアップ全体

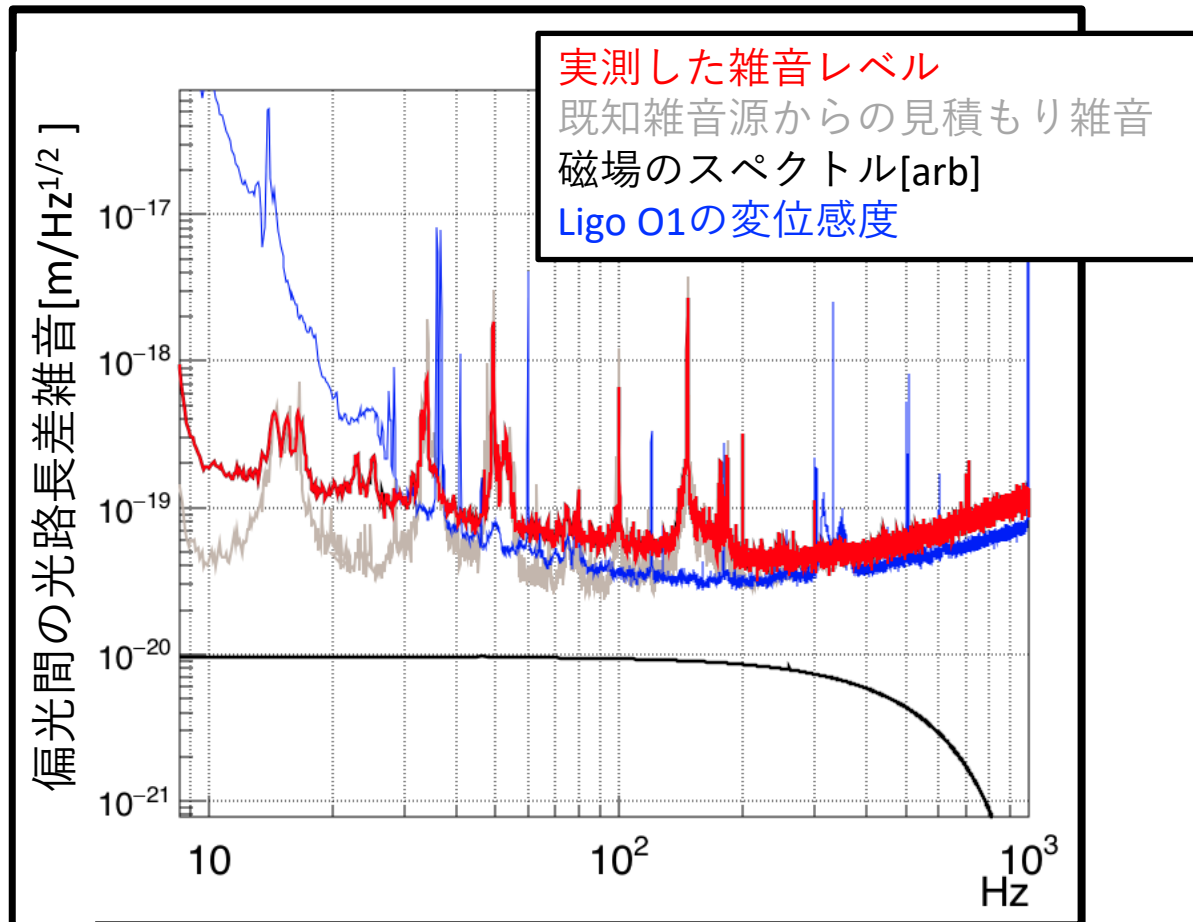


- 2.4mの光学定盤で実験
- 偏光子とミラーは真空中に封入
- 1.4mの共振器の中央に磁石が1個設置
- 磁石からの様々な擾乱への対策が実験の鍵



雑音レベル

- 非磁場印加時の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: パルス当たり $k_{cm} = 4 \times 10^{-19} [T^{-2}]$



- 50Hz~500Hz付近の雑音スペクトルが感度に重要
- 高周波ではほぼ期待通りの雑音レベルに。

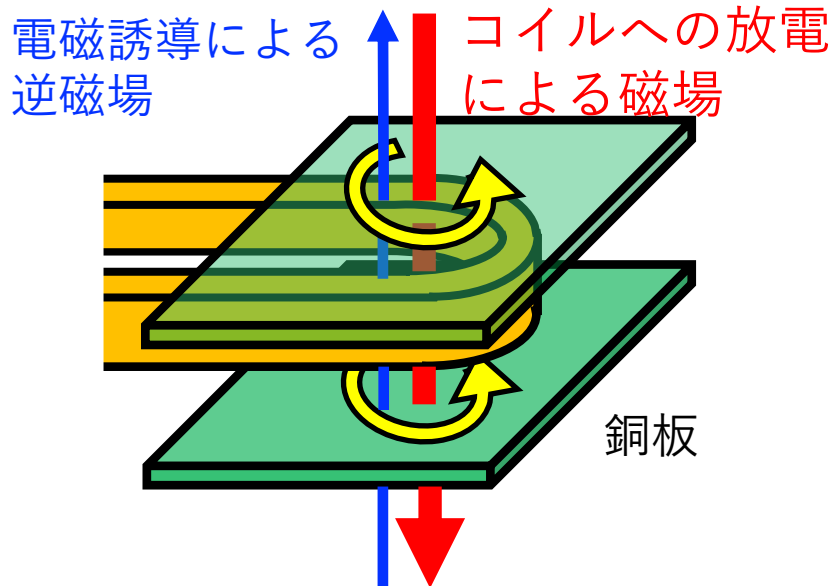
OVAL実験のこれまで/これから

- テスト運転として、1年半前に磁場9T、0.05Hzの繰り返しで1日測定し、QED理論値まで後 5×10^3 倍の感度に到達。
- 感度向上のためにアップグレードが必要
 1. より強力な磁石の開発 → 8倍の感度向上
 2. 安定した長期運転 → 15倍の感度向上
 3. 実験自体の大型化 → 4倍の感度向上
 4. 複屈折雑音の削減

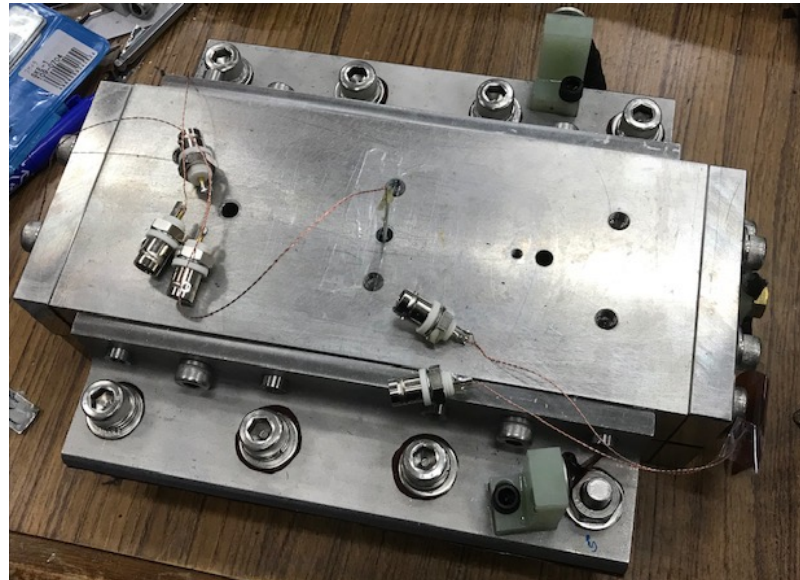
現在ここに取り組み中

新型磁石の開発

- 18T、磁場長0.4 mが目標→**10倍感度向上**
- 今の磁石は12Tで破壊→コイルのコーナ一部で電磁応力が強い+補強が難しいのが原因。
 - コーナ一部を銅で挟み、電磁誘導による逆磁場で磁場を弱めるコイル構造を考案。原理検証用に磁場長15cmのプロトタイプを作成

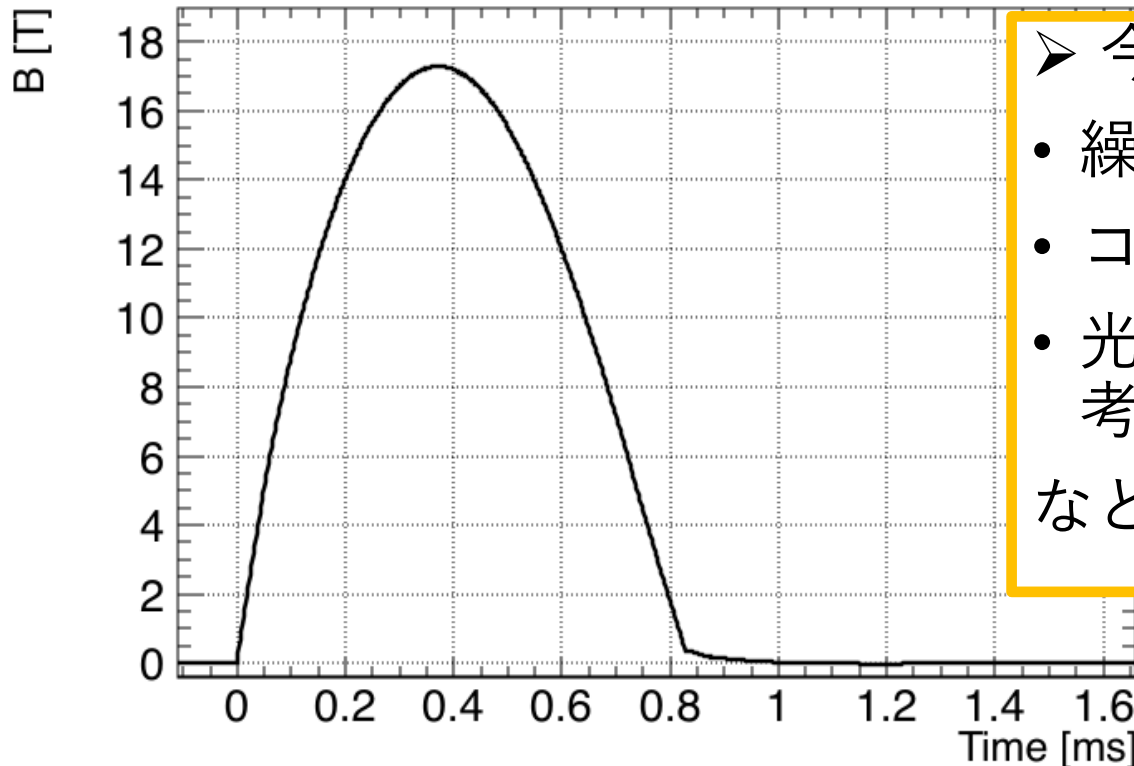


New磁石の外観



新型磁石：性能評価

- コイルの状態をモニターしながら少しずつ印加電圧を上げていく → 非破壊で**単発17Tまで達成**



➤ 今後は

- 繰り返し運転テスト
- コイルの大型化
- 光学系との組み合わせも考慮した補強構造の開発などを行っていく

安定DAQへの挑戦

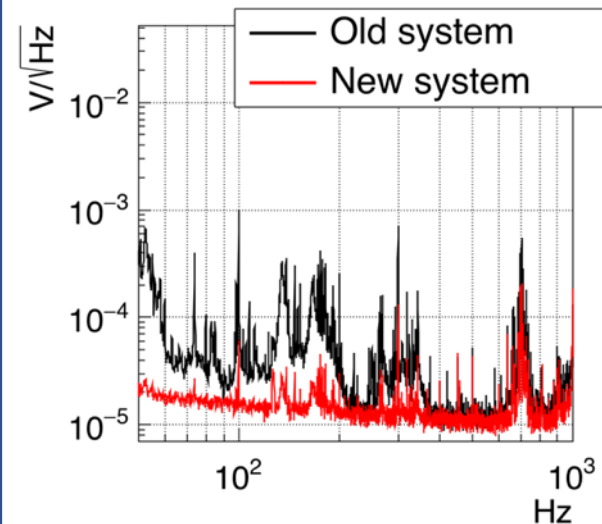
- パルス磁石はそれ自体が擾乱源→これらの理解が実験の鍵
 - 磁場印加に伴う振動や音。冷却に伴うアライメント変化/熱収縮 etc
- まずは現有の磁石で安定DAQを目指す→多くの改善を行った

熱変形を減らし、かつ容器の密封性を高めるため薄いSUS容器を作成し磁石を封入



フィードバック回路も改良。
500Hzから最大40dB抑え込み能力を強化

非磁場印加時の
誤差信号(=安定性)スペクトル



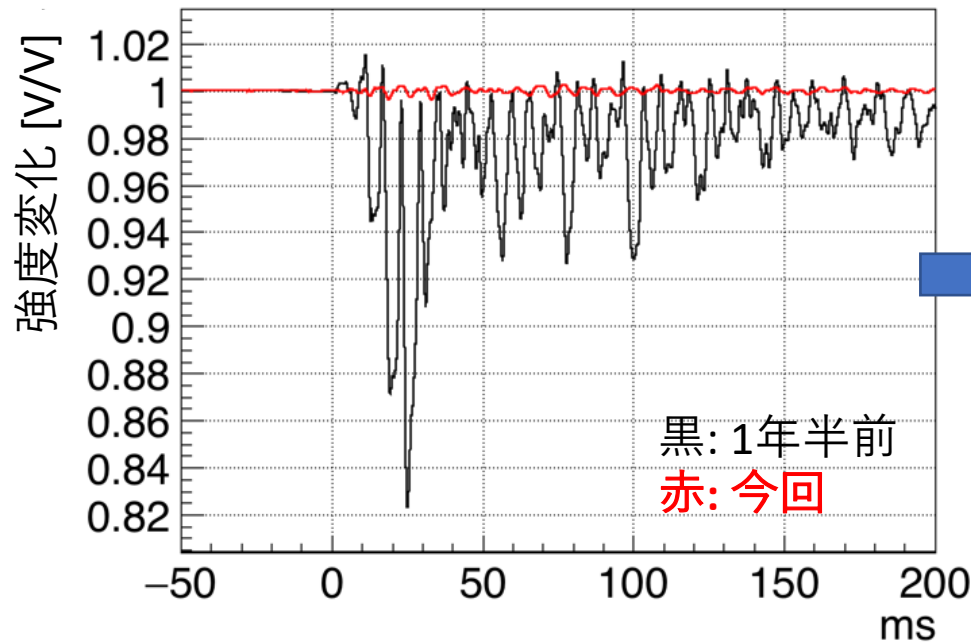
+ 振動や音
対策の見直し

擾乱の影響の評価

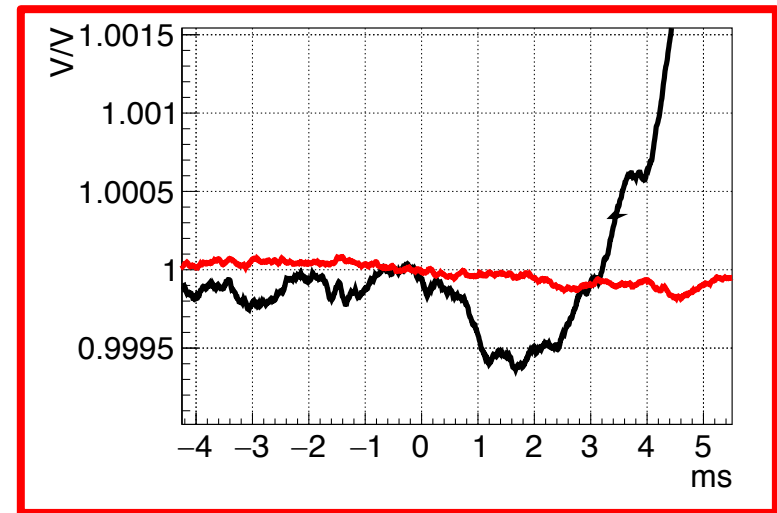
- 前回の運転に比べて大幅に磁場印加後の擾乱を削減することに成功! 数日間にまたがる測定も可能に。

➤より長期に渡ってcleanなデータ測定が可能に

9T磁場印加時($t=0$)の複屈折信号変化割合
(~100発平均)



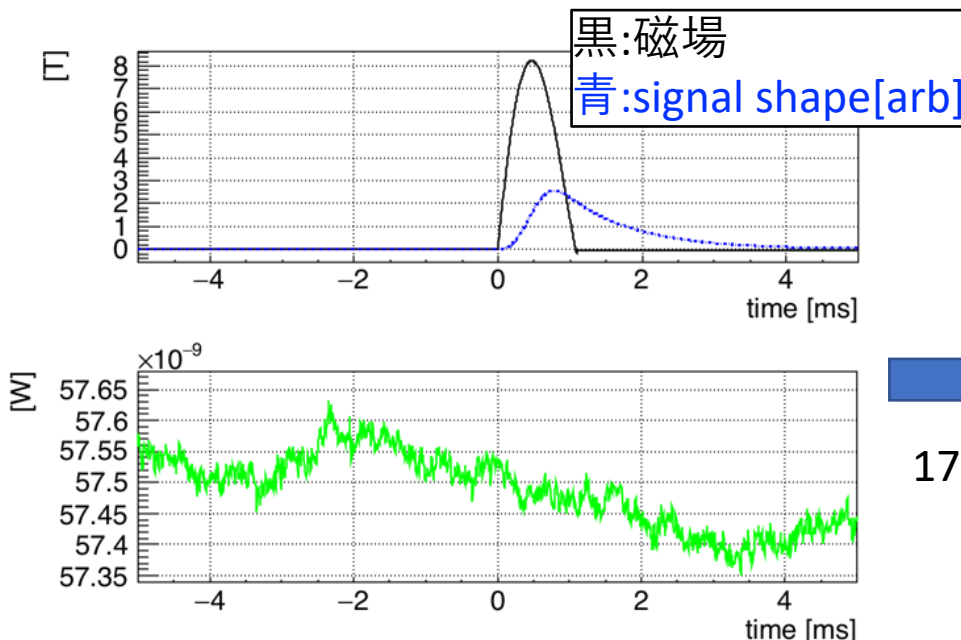
シグナル領域付近拡大($t=0$ で磁場印加)



データ測定 @ 2019夏

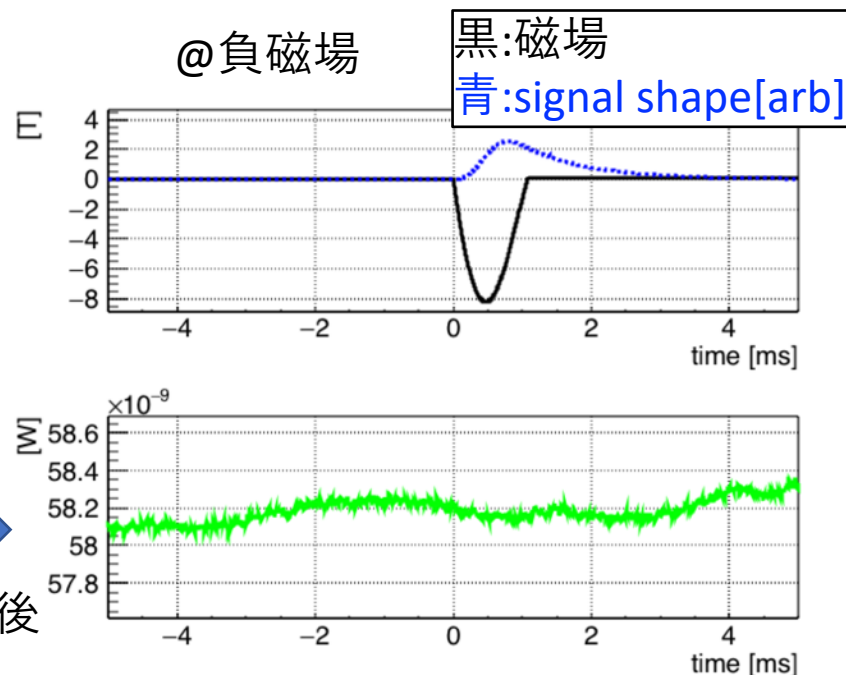
- 今年度前半に現有の磁石でデータ測定を行った。
- 2回の測定で合計4800発のパルスを印加
- 1回のDAQサイクルごとに極性の違う同じ大きさのパルス磁場を交互に印加

磁場波形と異常光強度変化 @ 正磁場



17秒後

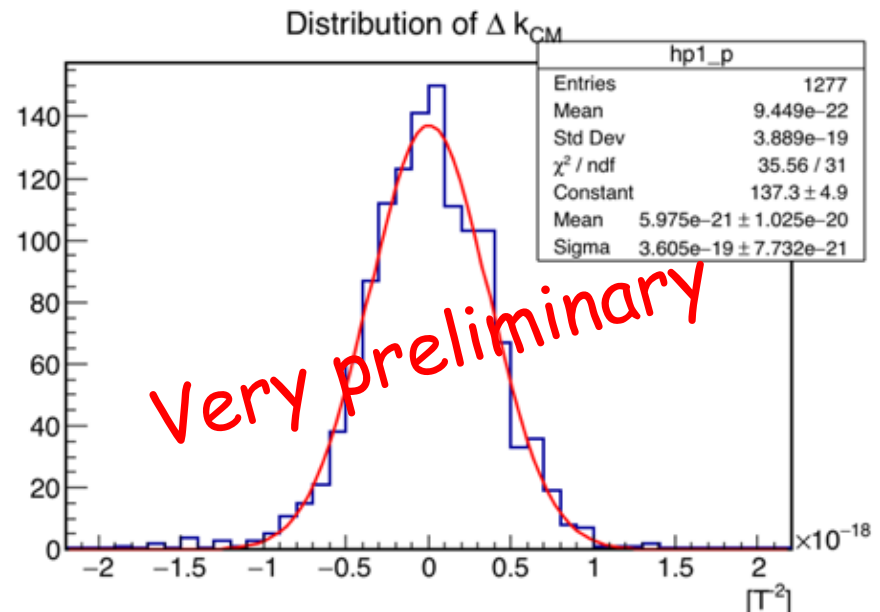
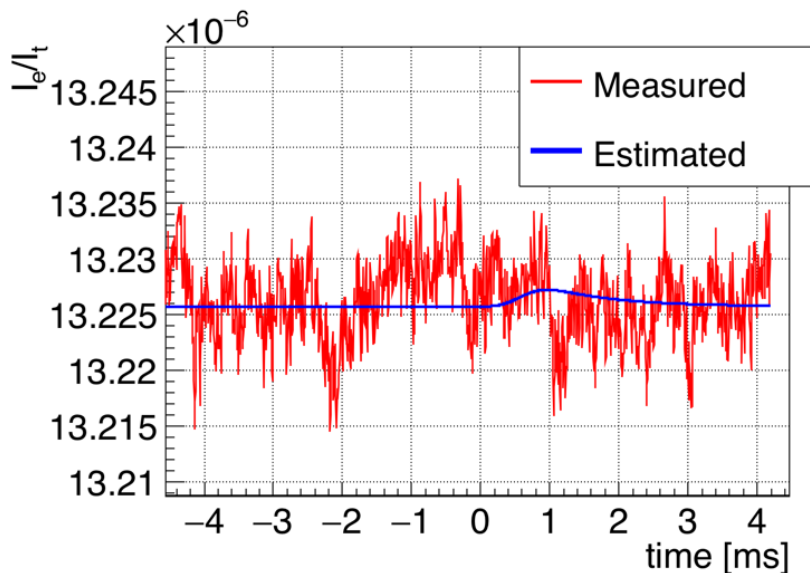
@負磁場



解析手法/結果

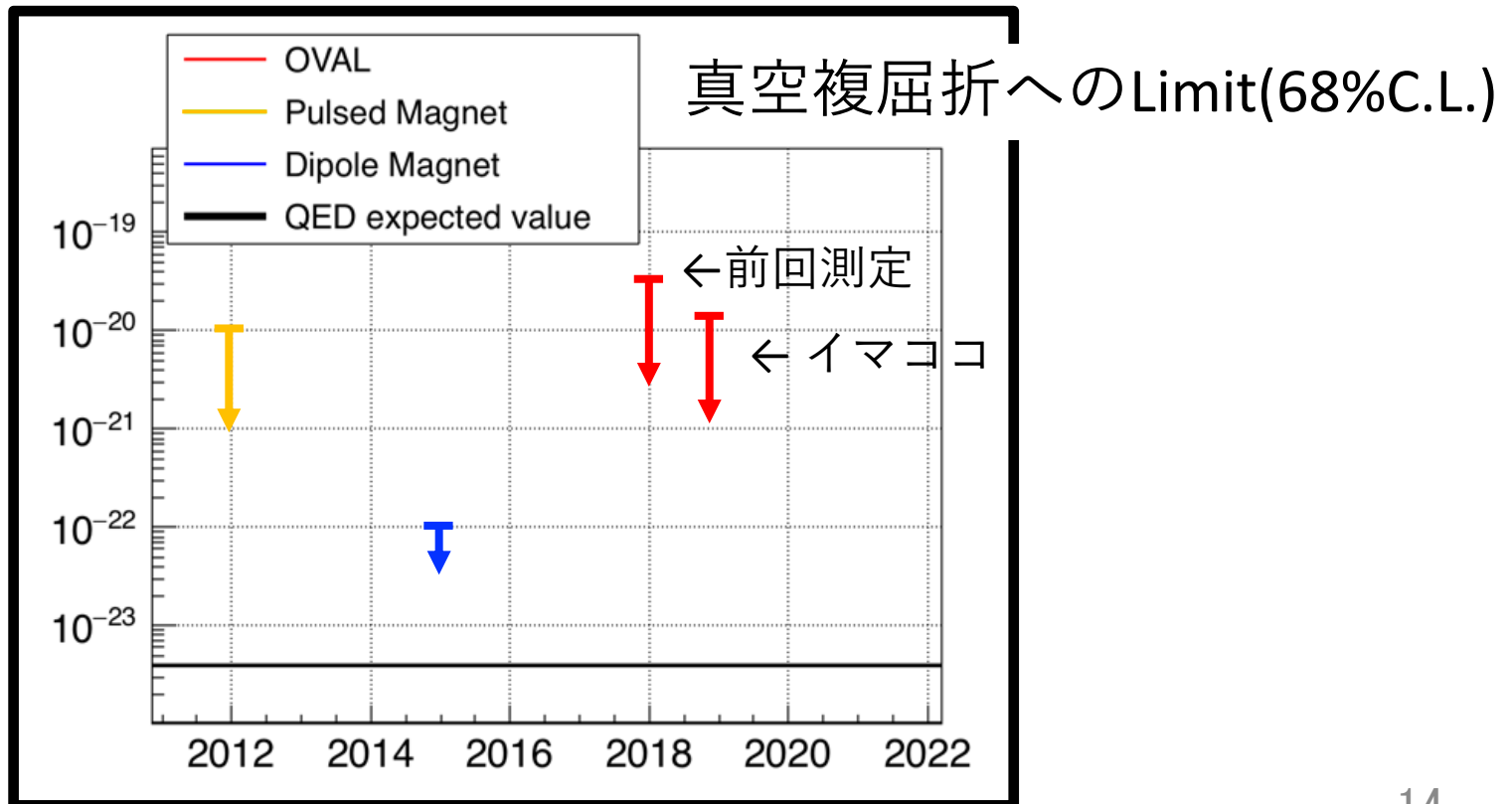
- 1サイクル毎に、正/負磁場のデータを平均して磁場の符号に依存する効果の寄与をキャンセル
 - 平均したデータから磁場²に依存する項の大きさを推定
- run中に測定した全サイクルからの分布から k_{CM} の中心値と誤差を推定

パラメータ推定の例



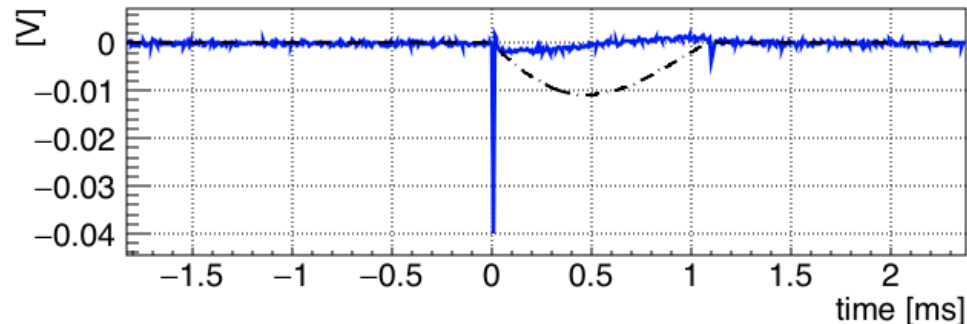
到達した感度

- 今回行った2回の測定でそれぞれ解析を行い、全体として到達した感度は $\Delta k_{\text{CM}} = 8 \times 10^{-21} [\text{T}^2]$
- 旧setupでの測定から3倍の感度向上



結果の考察

- 実測感度は非磁場印加時に見積もった感度より~1.5倍悪い
→まだ磁石起因の雑音が残っている？
- cavityへの擾乱以外のノイズ源候補が発見済み
 - ✓ 磁場と同時にfeedback系に現れる電磁ノイズ？
 - ✓ 磁石が揺れた際にbeam pipe($\phi=5\text{mm}$)に光が遮られ偏光が変化？

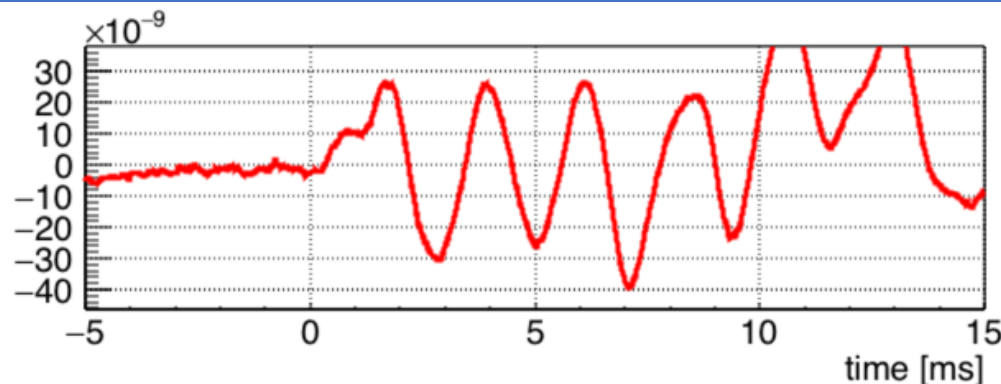


feedback回路に現れる電磁ノイズの例。
大きさにあまり再現性がなく、
これがふらつきを生んでいる可能性

結果の考察

- 実測感度は非磁場印加時に見積もった感度より~1.5倍悪い
→まだ磁石起因の雑音が残っている？
- cavityへの擾乱以外のノイズ源候補が発見済み
 - ✓ 磁場と同時にfeedback系に現れる電磁ノイズ？
 - ✓ 磁石が揺れた際にbeam pipe($\phi=5\text{mm}$)に光が遮られ偏光が変化？

光軸とbeam pipe
をdetuneした際の
偏光変化信号



beam pipeと光軸の位置関係をdetuneし磁場印加すると、磁石が揺れた際に偏光が変化する→ beam pipeで光が遮られると偏光が変わる
pipeと光軸の位置関係の変化が分布を広げている可能性

結果の考察

- 実測感度は非磁場印加時に見積もった感度より~1.5倍悪い
→まだ磁石起因の雑音が残っている？
- cavityへの擾乱以外のノイズ源候補が発見済み
 - ✓ 磁場と同時にfeedback系に現れる電磁ノイズ？
 - ✓ 磁石が揺れた際にbeam pipe($\phi=5\text{mm}$)に光が遮られ偏光が変化？

➤ 前者は遮蔽や回路の取り回しの変更で、後者は磁石の固定方法やbeam pipe径の変更での対処を検討
➤ 対処後再び測定を開始する

これから

- **今の磁石で1week程度の安定運転をestablishする**
 - ✓ 今回から更にfactor3感度が向上し、パルス磁石としては世界最高感度になる見込み。
- **そこで得られた知識をもとに構造を最適化した新型磁石をインストール**
 - ✓ さらに1桁程度感度が向上。世界最高感度と同程度に。
- その後、装置自体の大型化、長期run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
 - ✓ さらに大きなsignalを得るために新型パルス磁石を開
発中。現在試作機で17Tまで非破壊で達成。
 - ✓ 安定したDAQ実現のために磁場を印加しながら磁石
起因の雑音源や実際の感度を評価中。
 - ✓ 擾乱の大幅な削減に至ったが、理想感度よりやや悪
いため引き続き雑音源を調査中
- これらのR&Dを踏まえ、来年度はじめにNew setupを完
成させ世界最高感度を目指す