

# 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、稻田聰明<sup>A</sup>、難波俊雄<sup>A</sup>、浅井祥仁

大間知潤子、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>



東京大学  
素粒子物理国際研究センター  
International Center for Elementary Particle Physics  
The University of Tokyo



**APSA**  
Advanced Photon Science Alliance

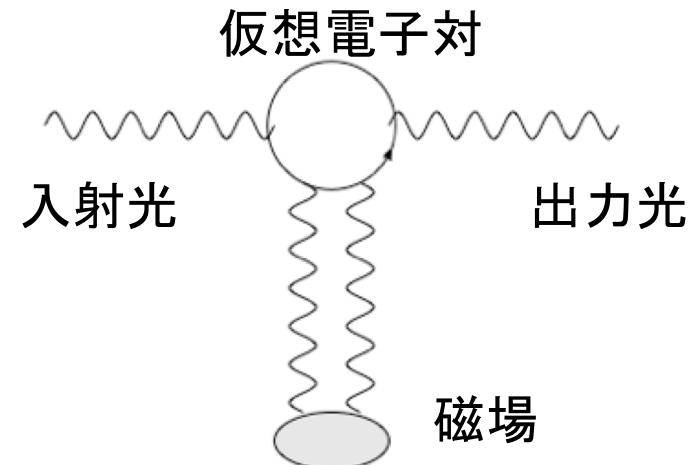
日本物理学会第73回年次大会  
@東京理科大学 2019/3/25

# 真空複屈折とは

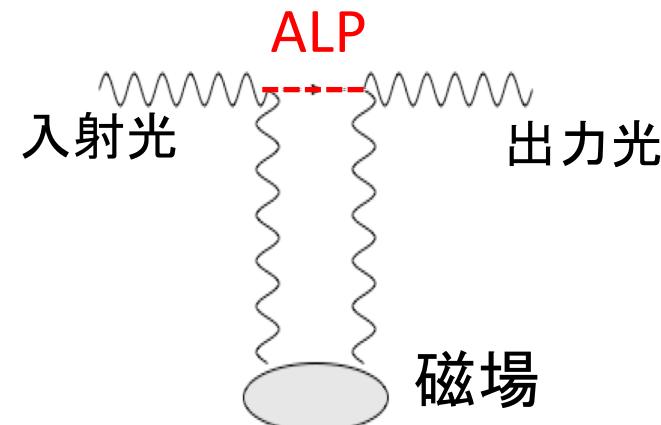
- 標準模型やそれを超えた物理の多くは**真空中の電磁場同士の相互作用**を予測。
- 中でも磁場と光の相互作用により**真空の屈折率に異方性が生じる現象**を**真空複屈折**と呼ぶ。
- $\Delta n = n_{||} - n_{\perp} = k_{CM} \times B^2$   
(QED理論値  $k_{CM} = 4.0 \times 10^{-24} [T^2]$ )
- 真空複屈折の探索は質量0.1eV程度のALPsやMCPに対して地上実験で最も感度が良い実験手法。

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

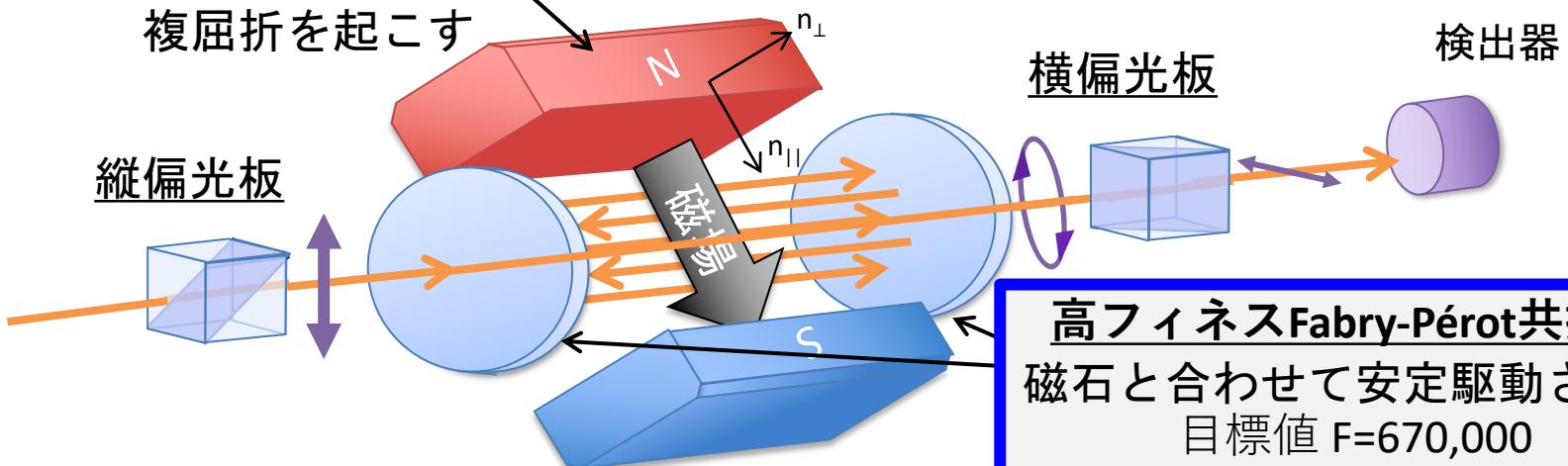


# 探索手法

繰り返しの速いパルス磁石

目標値  $B=15\text{T}$ ,  $L=0.8\text{m}$ ,  $f_{\text{rep}}=0.1\text{Hz}$

複屈折を起こす



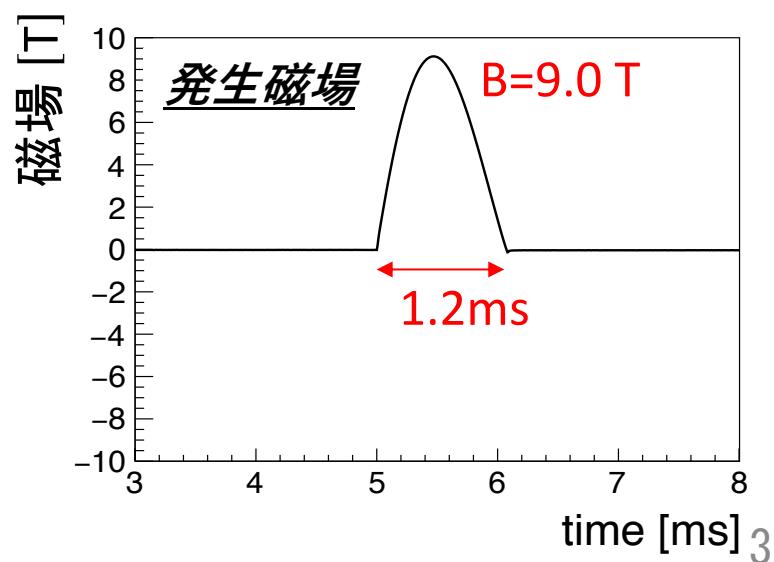
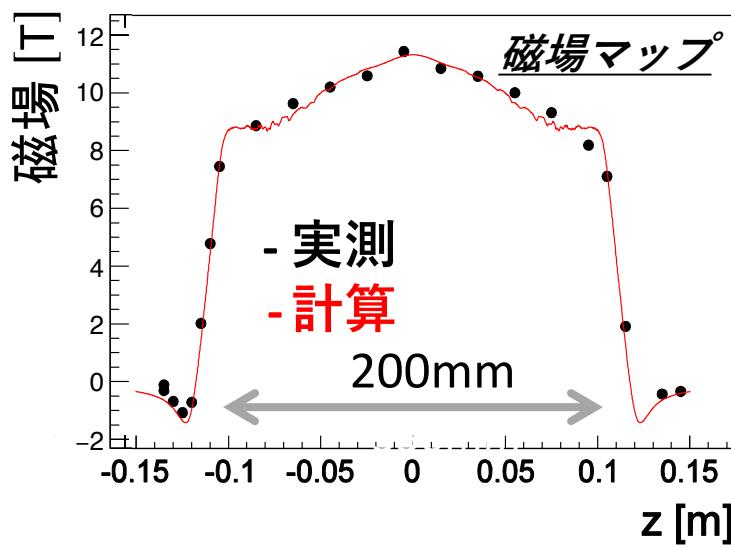
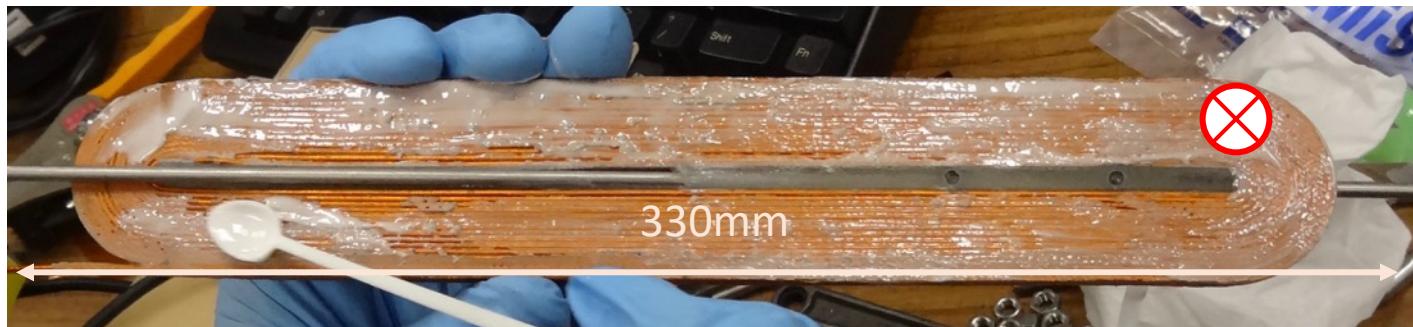
高精度Fabry-Pérot共振器

磁石と合わせて安定駆動させる  
目標値  $F=670,000$

- 屈折率の異方性は入射光の偏光を変える。
- 真空複屈折で生じる偏光変化を偏光子を用いて測定
- Fabry-Pérot 6ヶ月のRunでQED理論値に到達！  
世界初の真空複屈折の観測
- 感度は

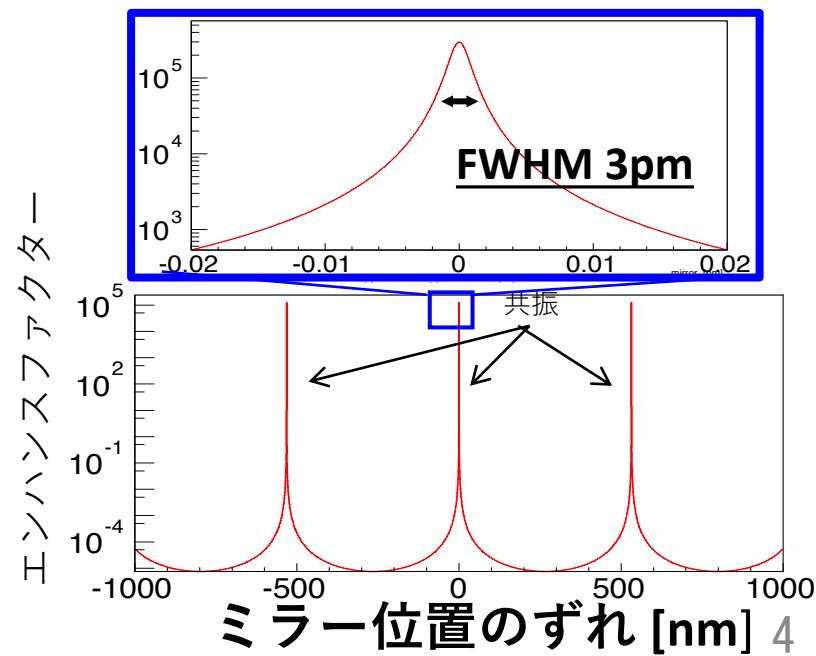
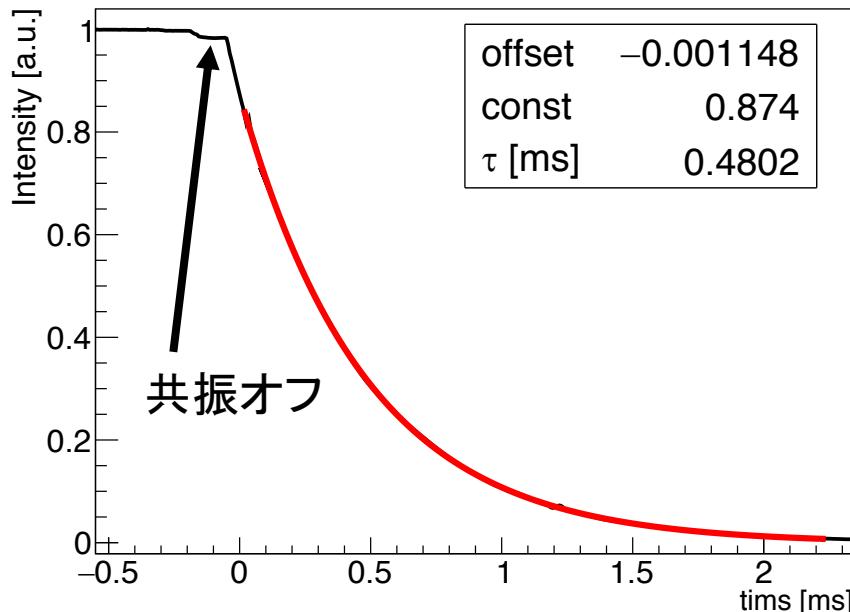
# ① パルス磁石

- ✓ 高い周波数成分を持ち、強磁場を発生できるパルス磁石を採用
- ✓ 20cmにわたってパルス幅1msで単発最大11.4Tまで発生
- ✓  $\text{LqN}_2$ 中で運転。繰り返し0.1Hzで9T, -4.5Tの磁場を交互に印加

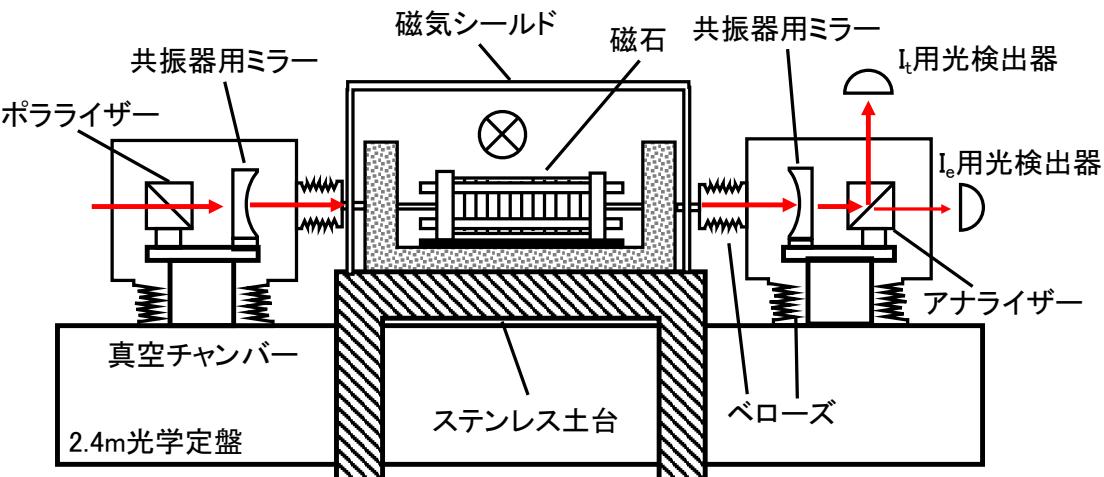


## ② Fabry-Pérot共振器

- 高いフィネスが達成されている $\lambda=1064\text{nm}$ で光学系を作成
- 透過光強度の減衰時定数 $\tau=FL/\pi C$ からフィネスを測定  
→ $F=340,000$ 。ミラーの反射率とコンシスティント
- ミラーの位置精度の要求は $3\text{pm}$ →磁場印加に同期した擾乱を生むパルス磁石との組み合わせが実験の鍵。

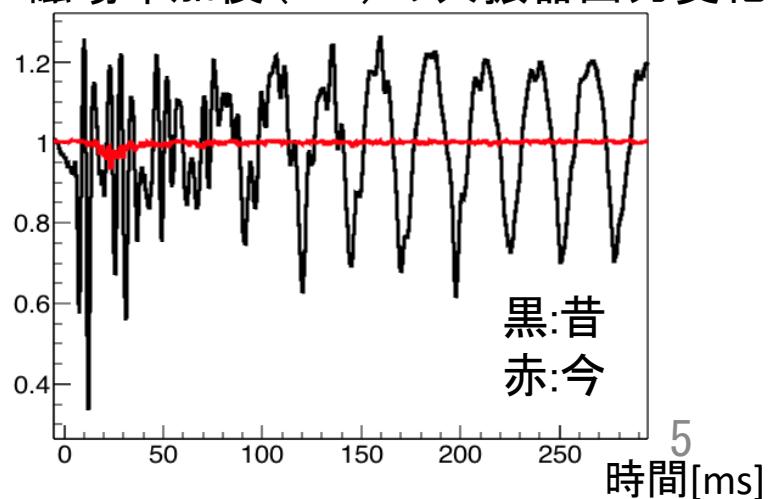


# 実験セットアップ



- パルス磁石1個の前後にミラーを設置し共振器( $L=1.4\text{m}$ )を作成
- 偏光子, ミラー, 磁石管内部は真空中で運転。磁気シールドで防磁場
- 磁石起因の巨大な擾乱に耐えられる擾乱耐性を獲得済み

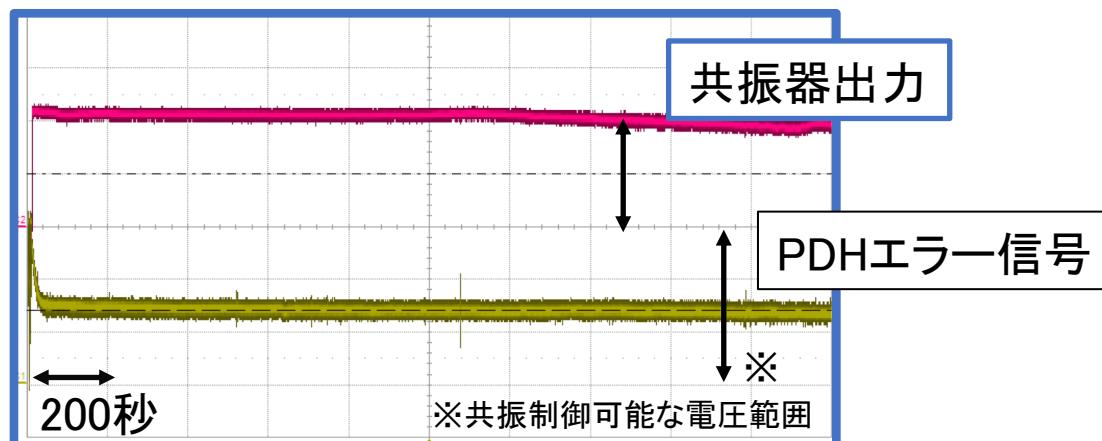
磁場印加後( $t=0$ )の共振器出力変化



# 課題：長時間運転に向けた改善

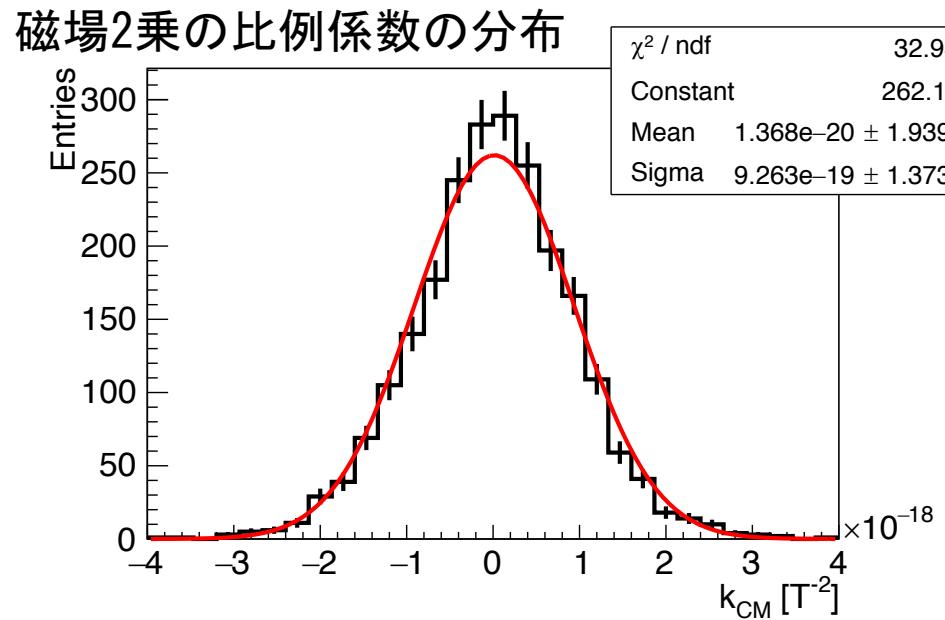
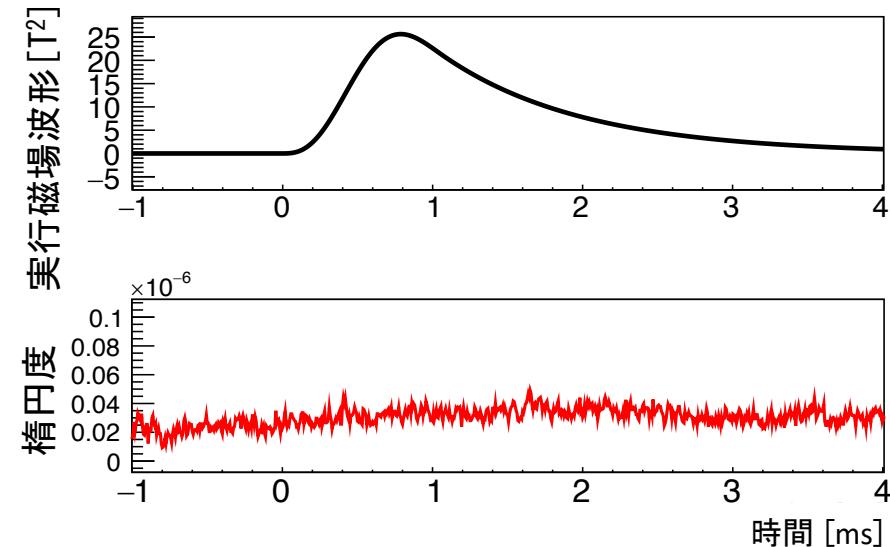
- ・ 実効30分の短い駆動時間が課題→1日の駆動を目標に
  - ✓ 共振周波数の長期変動に伴う短い共振持続時間  
→ 变動をレーザーの結晶温度に feedback。PDHエラー信号のドリフトをキャンセルし共振持続時間が10分から2時間以上に
  - ✓ 大電圧(~3kV)起因のサーボノイズによる充電時の制御異常  
→ 充電操作を全て低圧側で行う回路構成に
  - ✓ LqN<sub>2</sub>供給や共振状態の確認に伴う定期的な磁石駆動の中止  
→ 自動化、遠隔操作可能にし磁石駆動と並列できるように。

共振制御中のPDHエラーシグナルのドリフト



# データ取得・解析

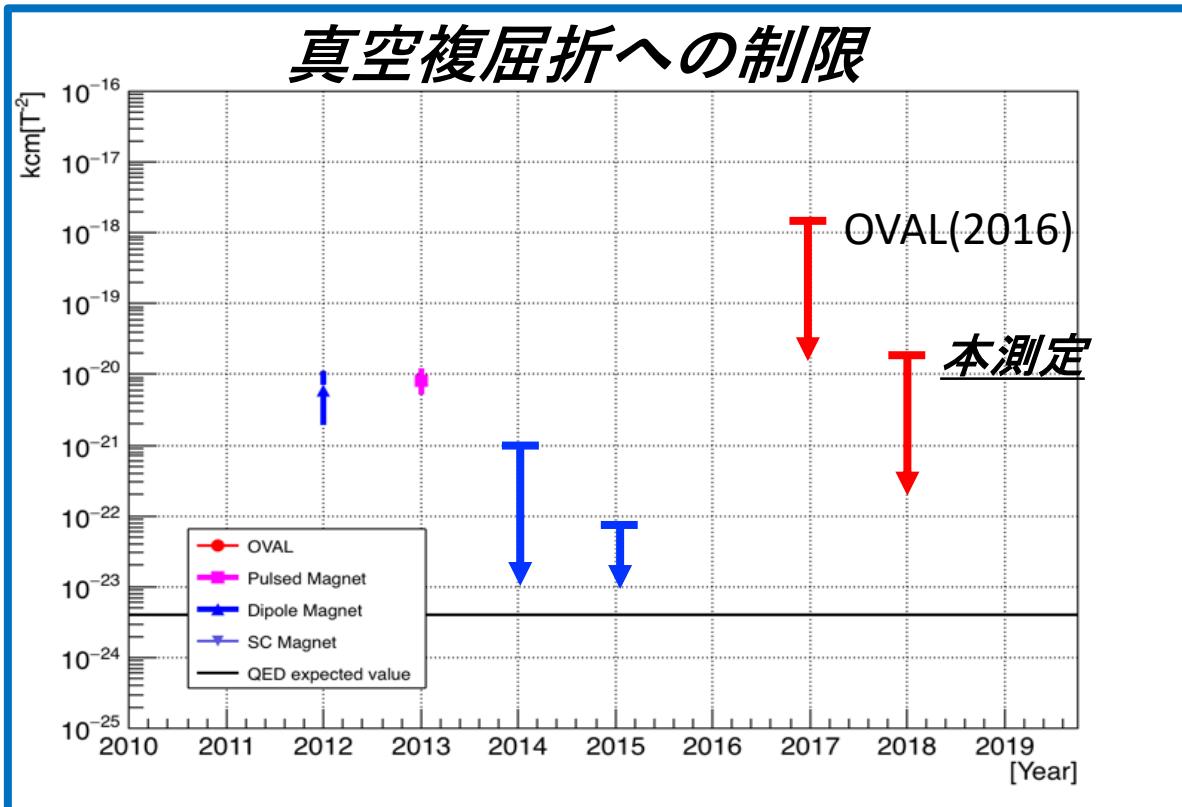
- 昨年11月に1日に渡るデータ取得に挑戦
- 世界最高の合計6000発の磁場の印加に成功。
- 記録した光検出器出力から楕円度を計算。光子寿命を考慮した磁場<sup>2</sup>波形でパルスごとにfittingして解析
- fit結果の分布からrun全体での $k_{cm}$ とその誤差を推定



得られた結果は  $k_{CM} < 6.5 \times 10^{-20} [T^{-2}]$  @95% C.L.

# 結果の比較

- 本測定の結果を1年前のrunや先行実験と比較

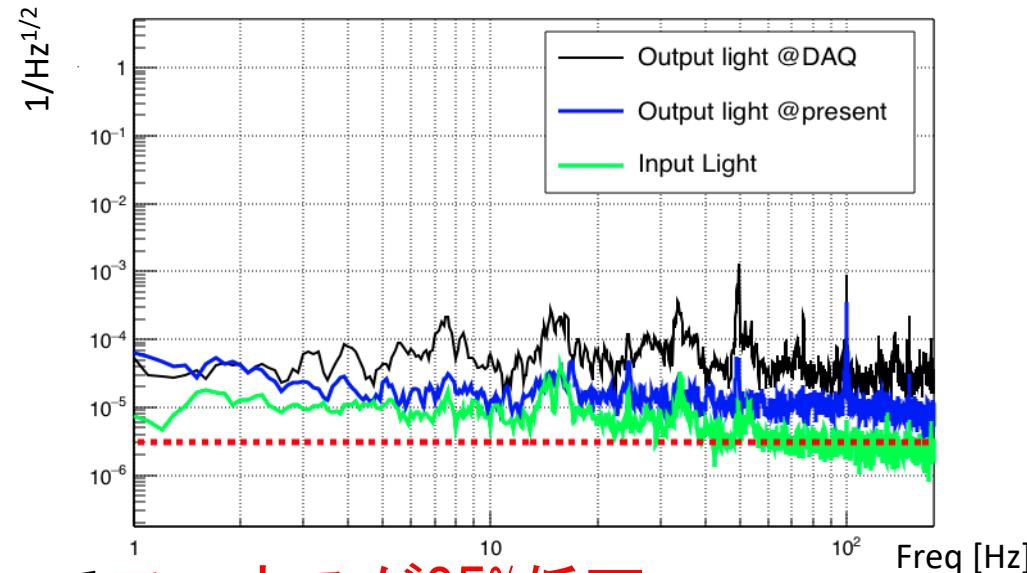


- 1年前の測定に比べて感度が約2桁向上
- QEDの予言する真空複屈折の観測まであと3.5桁

# 結果の考察・課題

- 結果は感度限界と4倍ズレ→強度雑音が要求値から乖離
  - アライメントやフィードバックの調整で改善可能。入射光自体が目標雑音より悪いためAOMを用いた強度安定化を導入中

共振器のカットオフ周波数以下の強度揺らぎ



- 1日に渡ってフィネスが25%低下
  - 磁石駆動に伴うミラーの煽りや光軸のアライメントの長期変化の影響と思われる→電動のミラーマウントによる自動アライメント機構の導入を検討中

# 今後の感度向上策

今回のDAQ結果から今後の感度向上策を見積もる

	今回	目標	ゲイン	アップグレードの計画
磁場	9[T]	15[T]	3	銀銅線を用いた新規磁石作成
磁場領域長	0.2[m]	0.8[m]	4	共振器長3.2mに拡大 磁場長を0.8mに
パルス幅	1.2[ms]	4.8[ms]	2	電源ユニットの改造
強度揺らぎ	$3 \times 10^{-5} [1/\sqrt{\text{Hz}}]$ @100Hz	$3 \times 10^{-6} [1/\sqrt{\text{Hz}}]$ @100Hz	4	入射光の強度安定化から
透過光強度	2.5mW	10mW	2	入射光の増強
Finesse	350,000	650,000	2	達成済み
統計	1日	200日	14	自動アライメント機構の導入

- ✓ 200日統計を貯めることで、感度が5000倍向上しQEDの予測する真空複屈折を観測可能に。<sup>10</sup>

# 今後の感度向上策

今回のDAQ結果から今後の感度向上策を見積もる

	今回	目標	ゲイン	アップグレードの計画
磁場	9[T]	15[T]	3	銀銅線を用いた新規磁石作成
磁場領域長	0.2[m]	0.8[m]	4	共振器長3.2mに拡大 磁場長を0.8mに
パルス幅	1.2[ms]	4.8[ms]	2	電源ユニットの改造
強度揺らぎ	$3 \times 10^{-5} [1/\sqrt{\text{Hz}}]$ @100Hz	$3 \times 10^{-6} [1/\sqrt{\text{Hz}}]$ @100Hz	4	入射光の強度安定化から
透過光強度	2.5mW	10mW	2	入射光の増強
Finesse	350,000	650,000	2	
統計	1口			

- ✓ 次のステップとして15T級の磁石と目標雑音レベルを満たす共振器の開発を行う。  
向上させることで、感度が5000倍  
QEDの予測する真空複屈折を観測可能に。11

# まとめ

- ・ 真空複屈折は量子電磁気学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。
- ・ 真空複屈折の初観測に向けて、9T、0.1Hzの高速繰り返しパルス磁石と、共振器長さ1.4m、フィネス300,000のFabry-Pérot共振器を組み合わせたセットアップを開発
- ・ パルス磁石を用いた測定では世界最多となる6000発の磁場を発生させて真空複屈折を探索し、QED理論値まで、あと3.5桁の感度を達成した。
- ・ パルス磁石、共振器のアップグレードにより200日のデータ測定で真空複屈折の観測が見込めることがわかった。