

# 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、

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



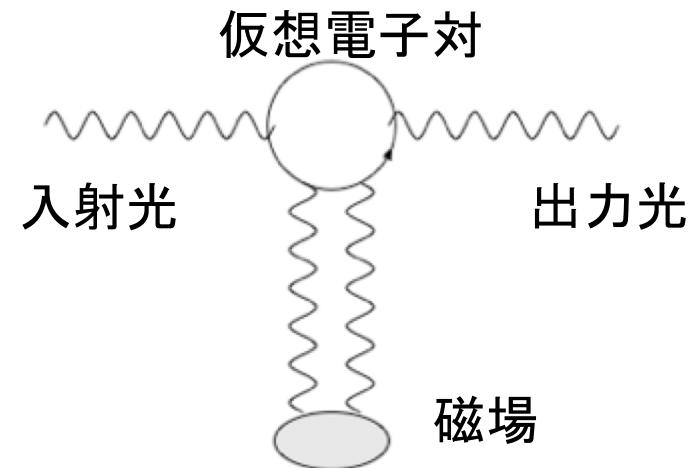
**APSA**  
Advanced Photon Science Alliance

# 真空複屈折とは

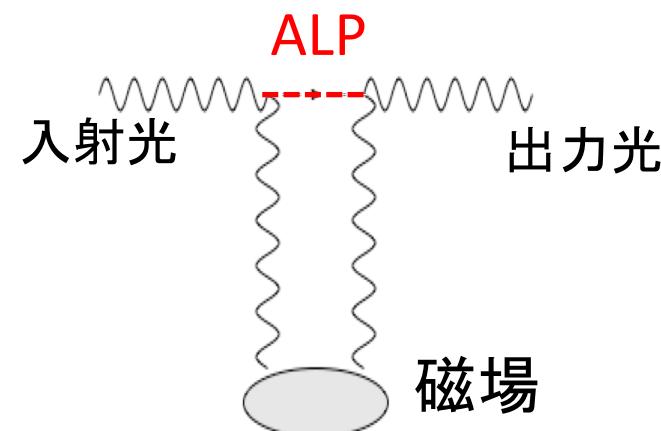
- 標準模型やそれを超えた物理の多くは**真空中の電磁場同士の相互作用**を予言
- 磁場と光の相互作用で**屈折率に異方性が生じる現象が真空複屈折**
- $\Delta n = n_{||} - n_{\perp} = k_{CM} \times B^2$   
(QED理論値  $k_{CM}=4.0 \times 10^{-24} [T^{-2}]$ )
- 未知粒子も異方性に寄与→質量0.1eVのALPsを地上実験で最も感度よく探索できる

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

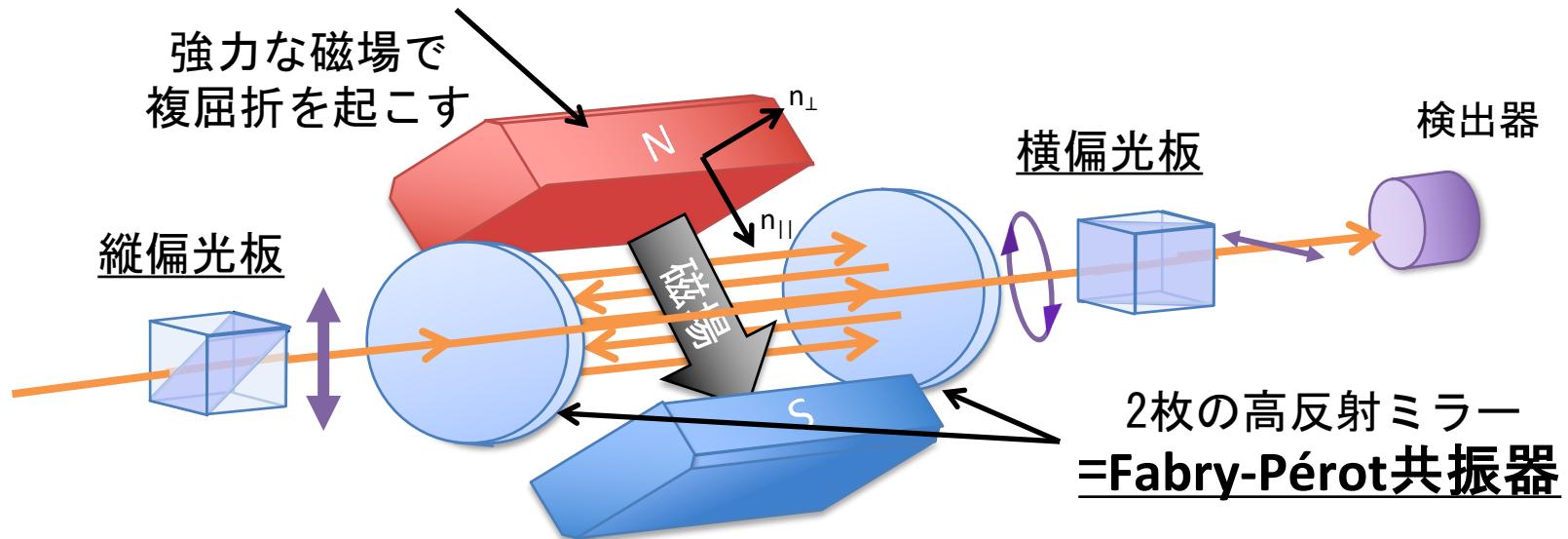


## ALPsによる光と磁場の相互作用



# 探索手法

## 磁石

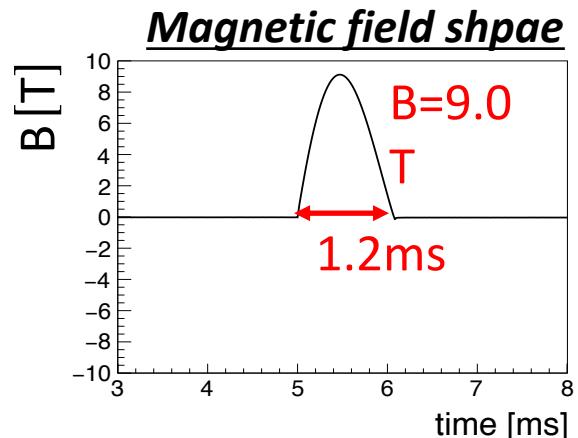
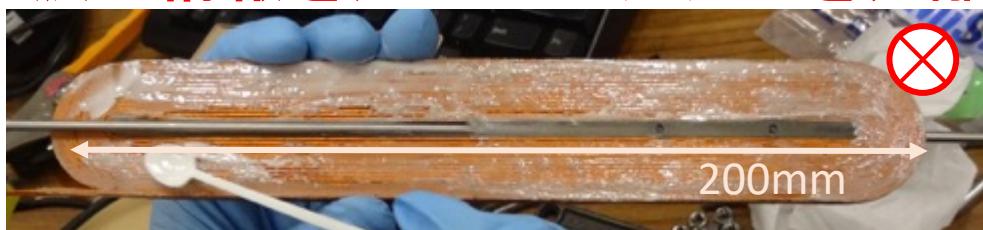


- 屈折率の異方性は入射光の偏光を変える。
- 真空複屈折で生じる偏光変化を偏光子を用いて測定
- Fabry-Pérot共振器を用いてることで $2 \times \text{フィネス}/\pi$ 回光が往復
- 感度は**磁場強度 $^2 \times$ 磁場長 $\times$ フィネス} \times \text{測定時間}^{1/2}**

# 鍵となる技術：共振器と磁石

## パルス磁石

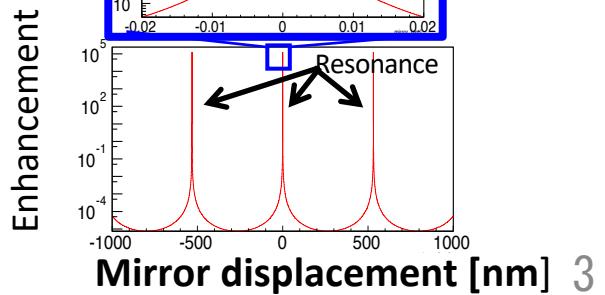
- 9T 繰り返し:0.05Hz 磁場領域:20cm
- 波形情報を用いてシグナルを分離



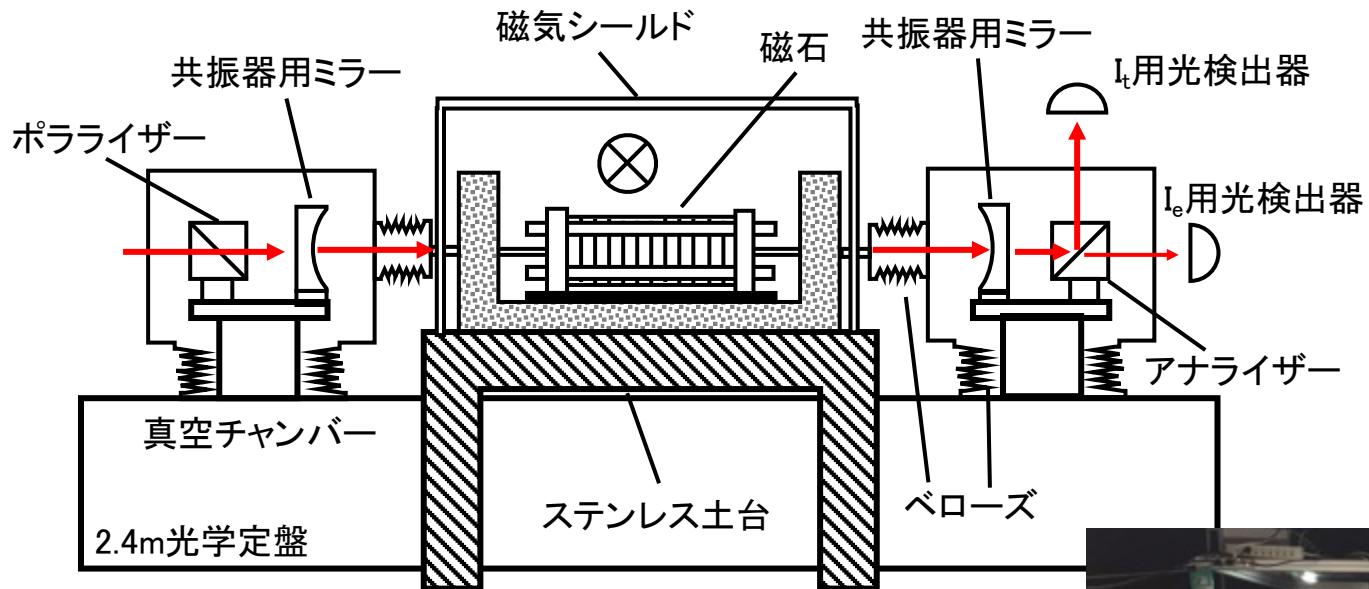
## Fabry-Pérot cavity

- 長さ1.4mの共振器
- 反射率99.999%のミラー→ フィネス 350,000を達成
- 非常に厳しい共振条件  
→レーザー周波数を feedback制御

## FWHM 3pm....



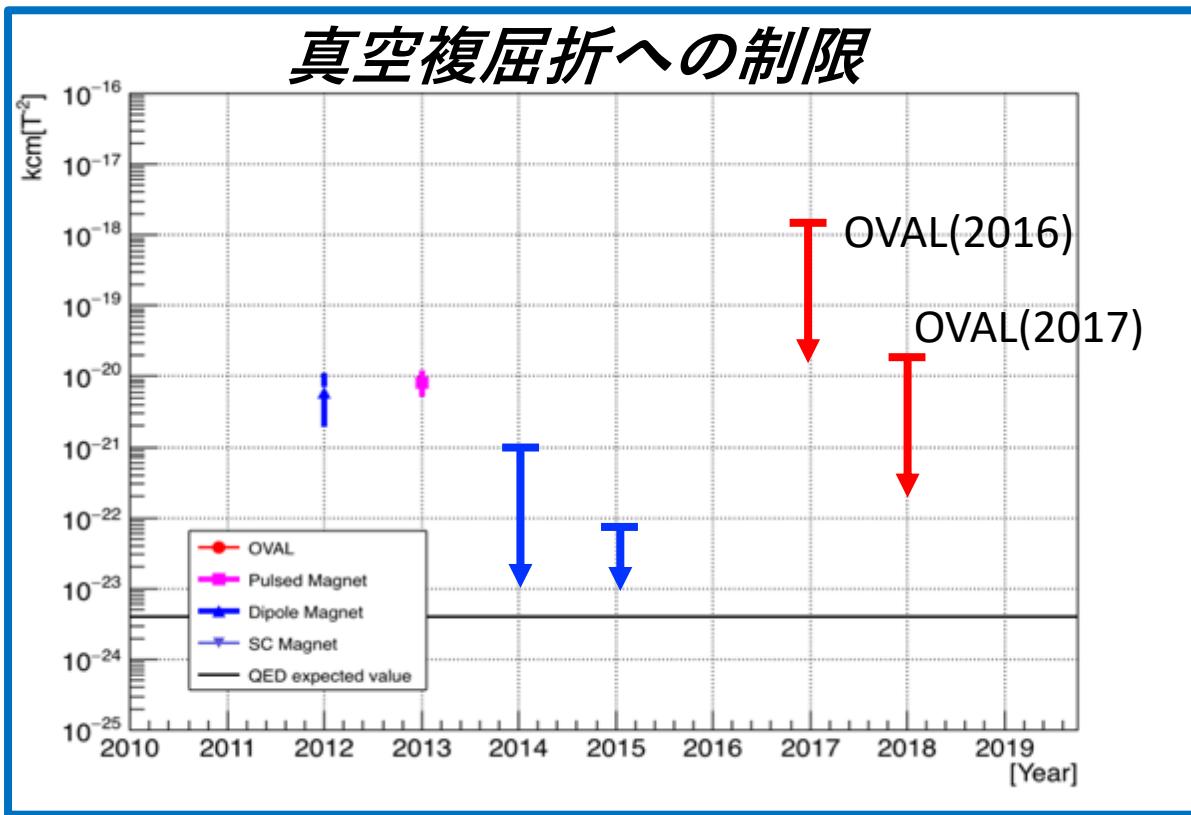
# 実験セットアップ



- 2.4mの光学定盤で実験
- 磁石起因の磁場&振動への対策
- 磁石を駆動しても共振は安定



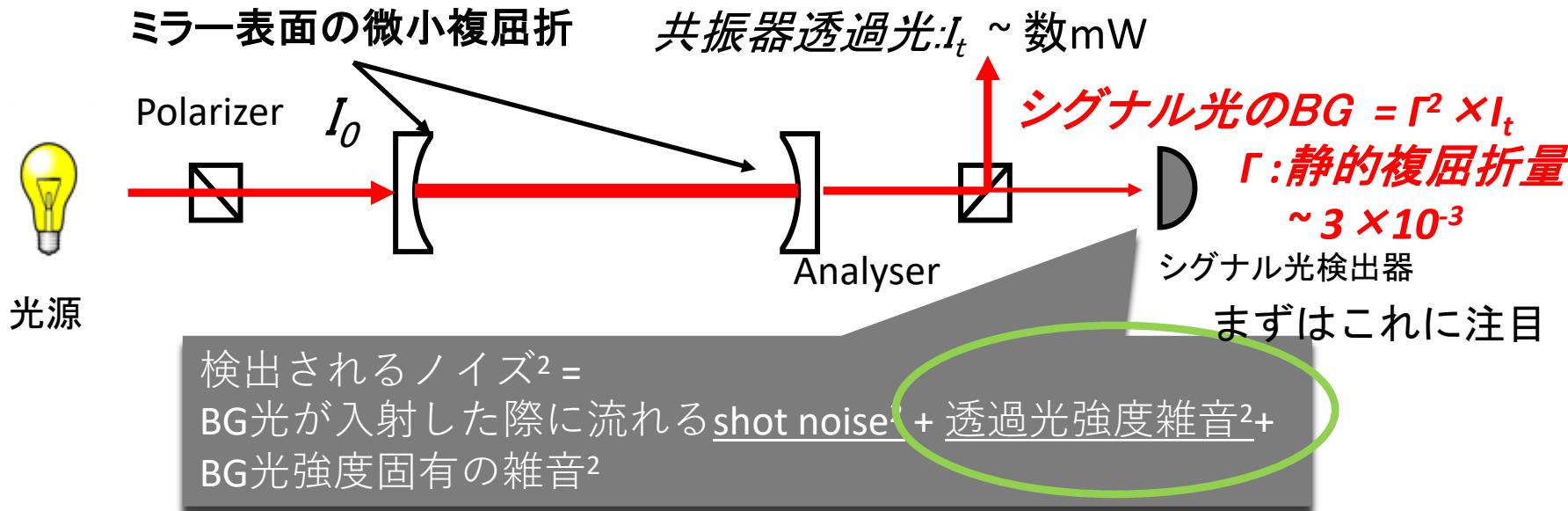
# OVAL実験のこれまで



- 2017末に年に1日間テスト運転
- 当初の目標であった磁石と共振器の同時駆動には成功しているもののQEDの検証までは**3.5桁の感度向上**が必要

# 感度向上に向けて：ノイズ源

- ミラーの静的複屈折性で共振器透過光の10ppm程度は常に偏光板を通過→避けられないBG
- このBG光を通じて様々なノイズが現れる

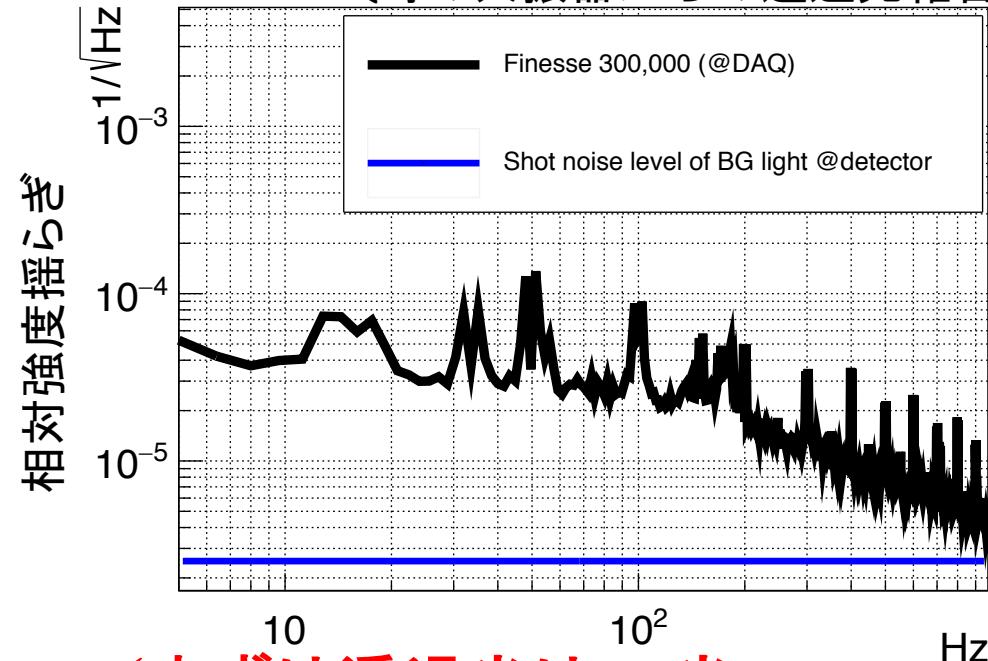


- ノイズ限界はショットノイズで決まる→その他のノイズをショットノイズ以下まで落としたときにS/N最大

# 強度雑音削減による感度向上

- DAQ時は、透過光雑音がBG光の支配的なノイズ源
- 最終目標のshot noiseと1桁乖離。

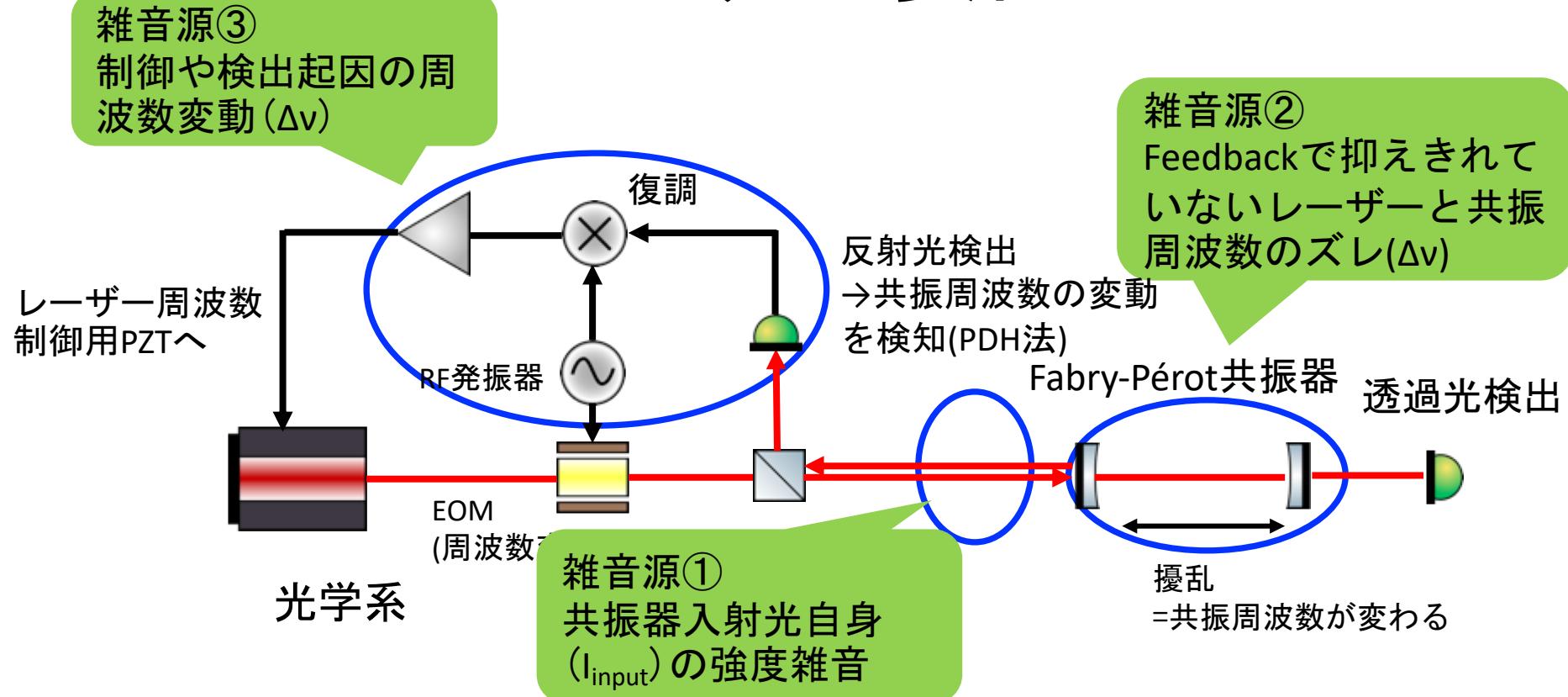
DAQ時の共振器からの透過光雑音



※最終設計値の透過光強度 $10\text{mW}$ 、 $\Gamma^2 = 10^{-5}$ を仮定してshot noiseを計算

- ✓まずは透過光はBG光 shot noise レベルまで安定させたい
- ✓シグナルは数msのパルス→数10~数100Hzのノイズが重要

# 強度雑音を limitする要因



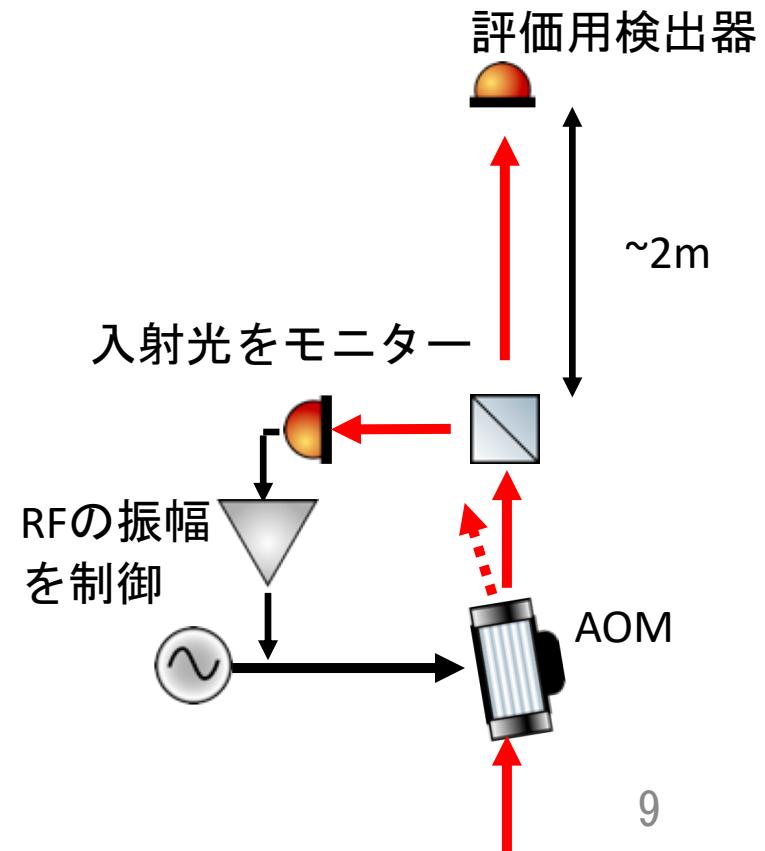
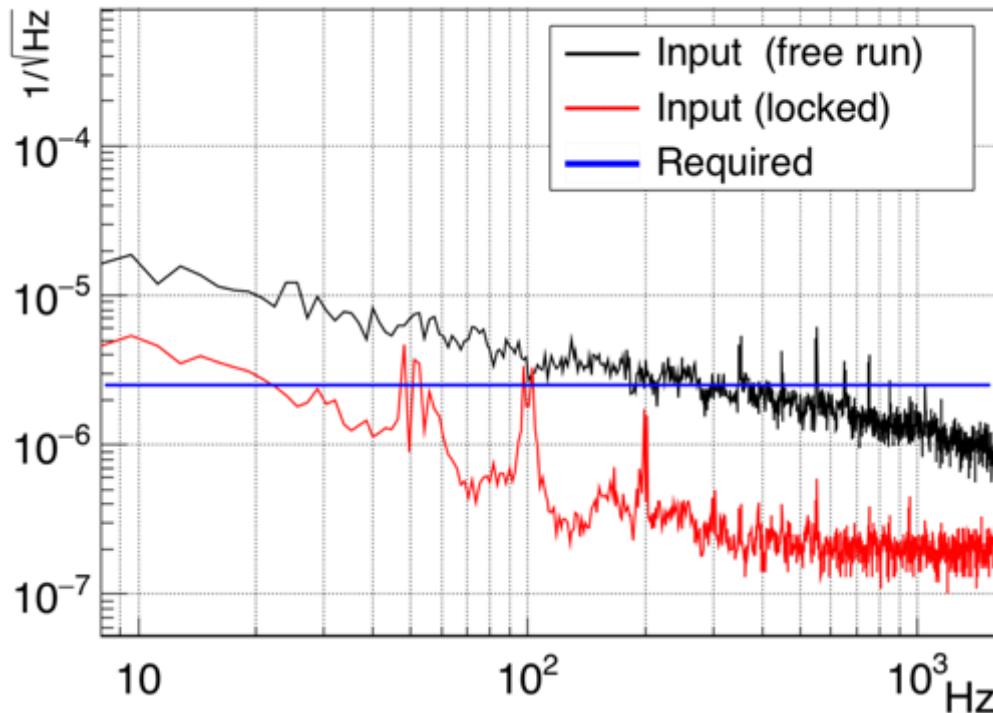
- 共振器透過光は単純には  $\propto \frac{I_{input}}{1 + \frac{4F^2}{\pi^2} \sin^2(\pi \times \frac{\Delta\nu}{v_{FSR}})}$

ただし  $v_{FSR} = \frac{c}{2L_{cav}}$   $\Delta\nu$  が共振周波数と光源周波数のズレ

# 光学系改善①: 入射光安定化

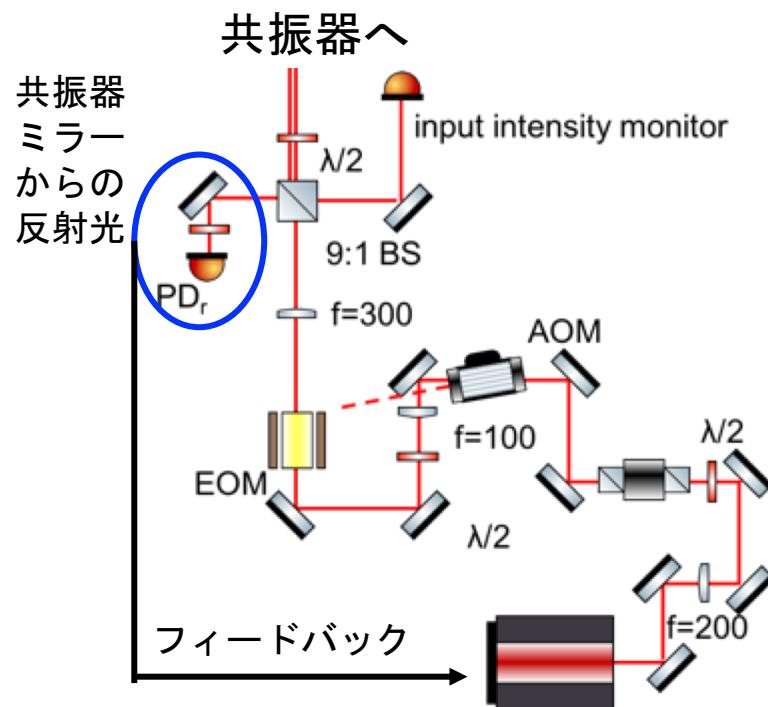
- 光源の強度雑音が要求値を満たしていない → AOM導入してフィードバック制御
- 共振器なしでシグナル光検出位置で入射光雑音を評価。  
~20Hz以上で要求をクリア

入射光の相対強度揺らぎ

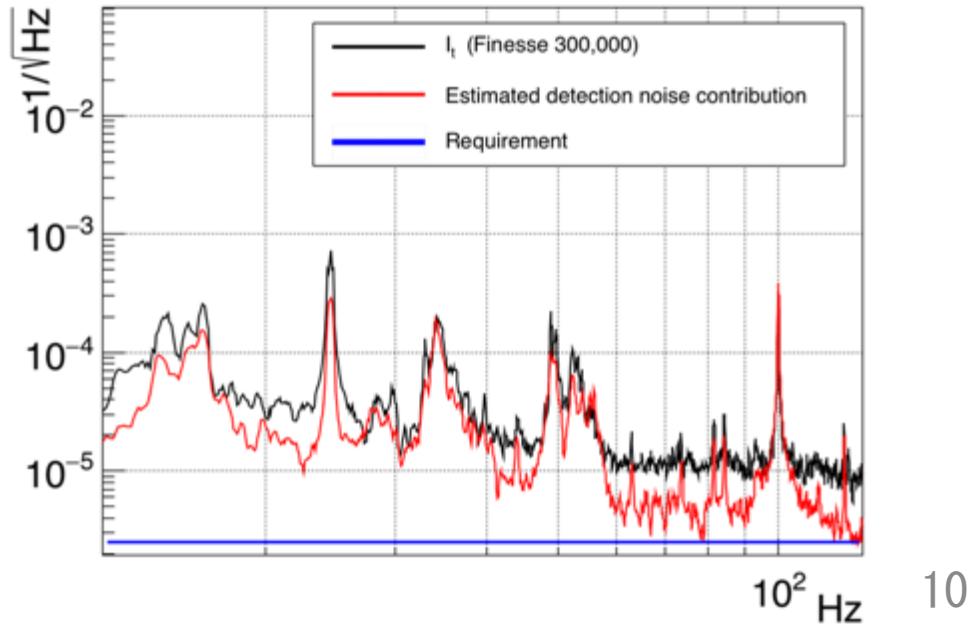


## 光学系改善②: 検出雑音減らし

- 誤差信号に雑音が含まれるとその雑音で周波数雑音が limit → 透過光雑音も limit
- 現状、大きな検出雑音があり伝達関数から透過光雑音への寄与を見積もると ~100Hz 以下でその影響が大きい。

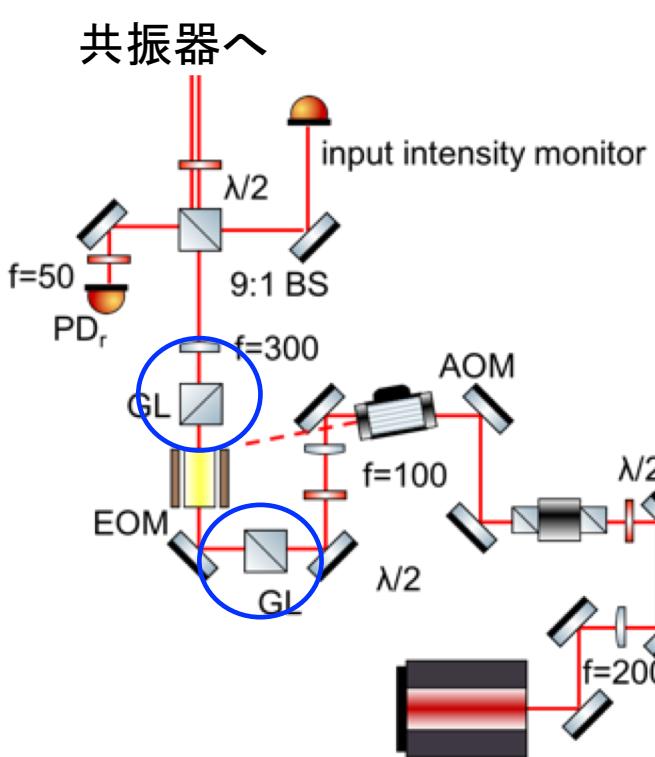


共振器透過光強度と  
検出雑音の寄与(見積もり)の比較

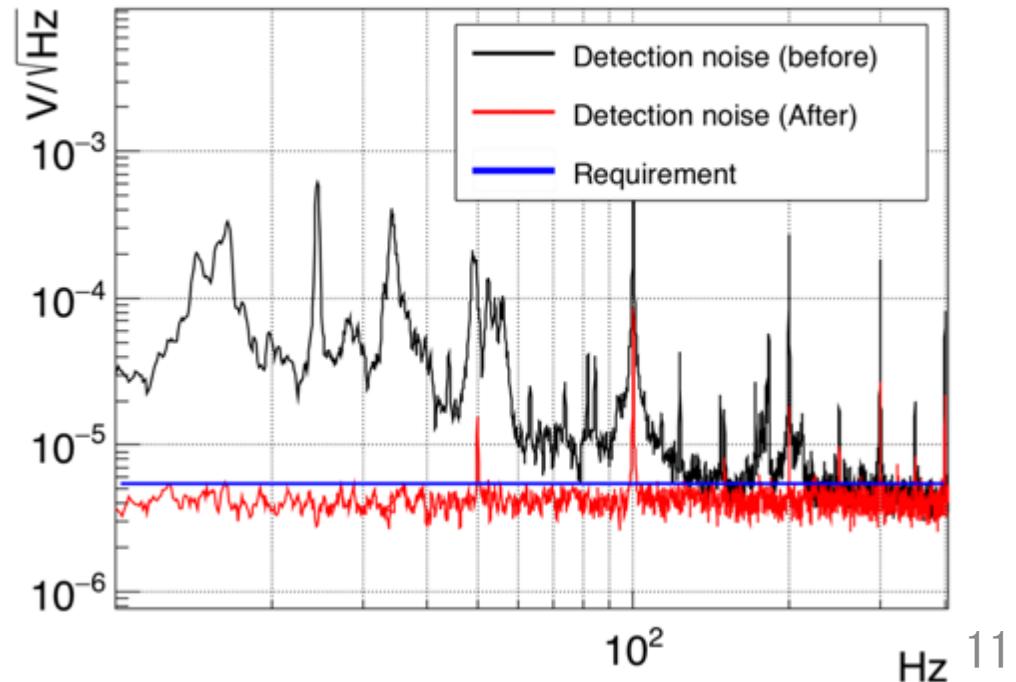


## 光学系改善②: 検出雑音減らし

- ・雑音の原因是EOM前後での偏光のふらつきや振動が原因の可能性が高い
- ・入射光学系に偏光板を追加する等の対策を行った
- ・以前見られた構造を十分小さくすることに成功



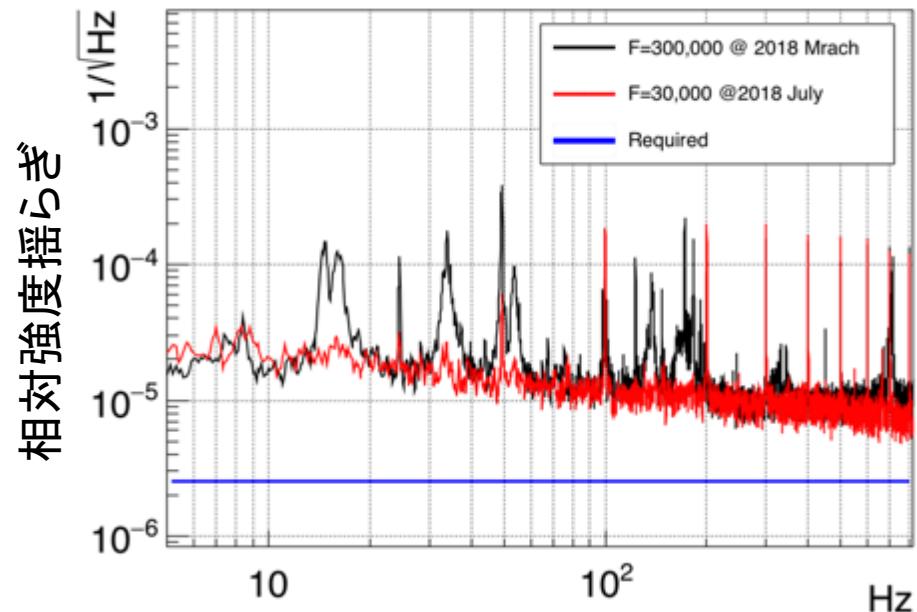
光学系の改善前後での検出雑音



# 雑音のフィネス依存性

- 1桁フィネスの小さいフィネス3万の共振器を作つて雑音のフィネス依存性を調査→擾乱の寄与が考察できる

フィネス30万(昨年3月時データ)と



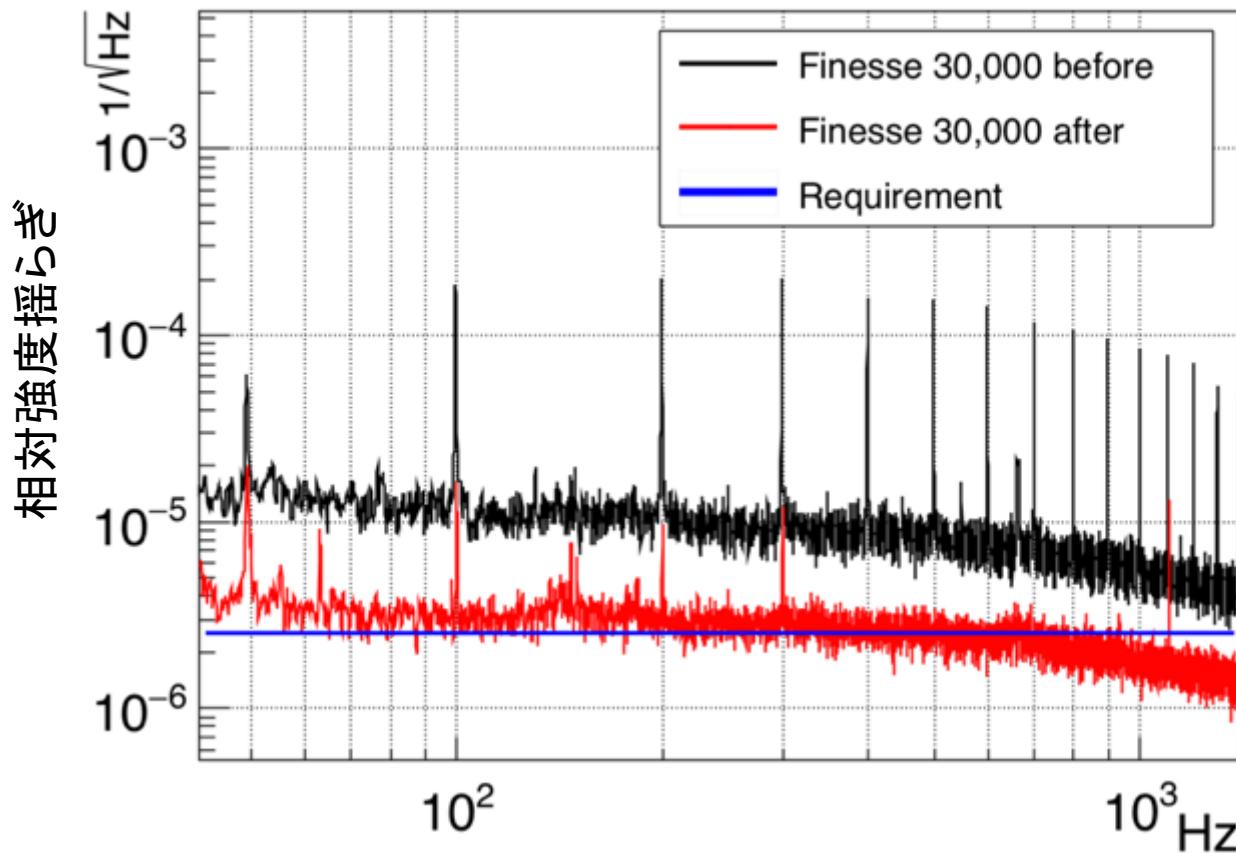
フロアがフィネスによらない  
&100Hz毎に鋭いノイズ  
→制御の雑音(回路etc)が強度  
雑音をlimitしている可能性???

※異なるフィネスを比較するため光子寿命で補正済み

✓まずは擾乱の影響の小さい共振器で目標値達成を目指す

# 現在達成した強度安定性

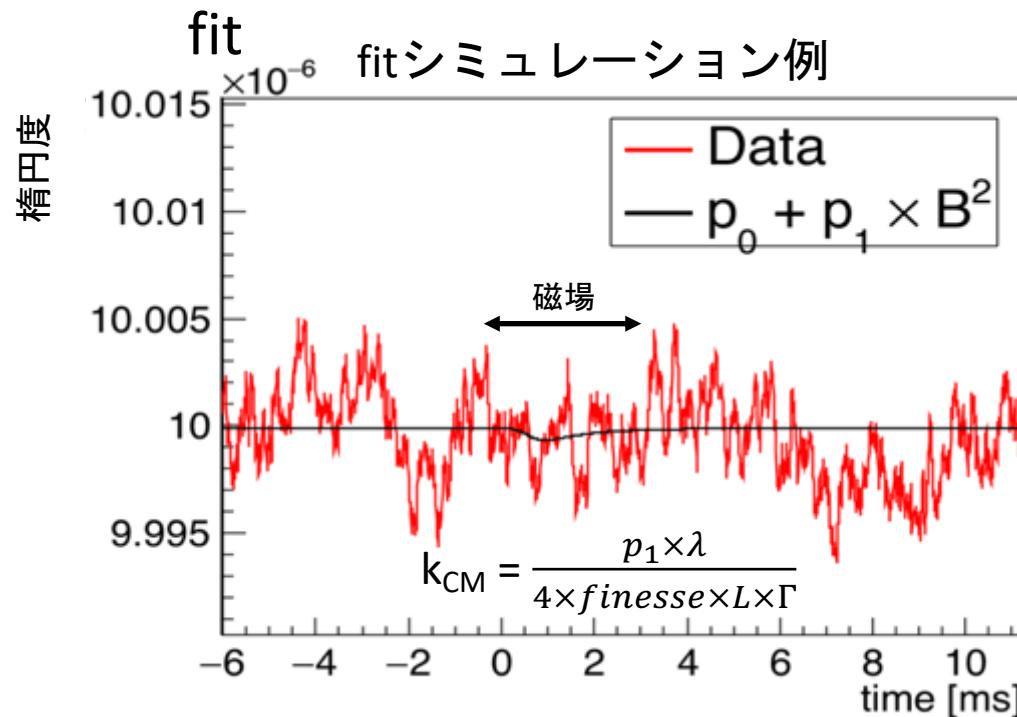
共振器透過光相対強度揺らぎ



- 回路や制御帯域を変えるとノイズが減少することを確認
- ~50Hz以上で概ね目標値程度まで安定化

# 感度への寄与の見積もり

- 透過光を用いて光子寿命やshot noiseを考慮したフィネス30万の予想BG光波形を作成→楕円度を $p_0 + B^2 \times p_1$ で

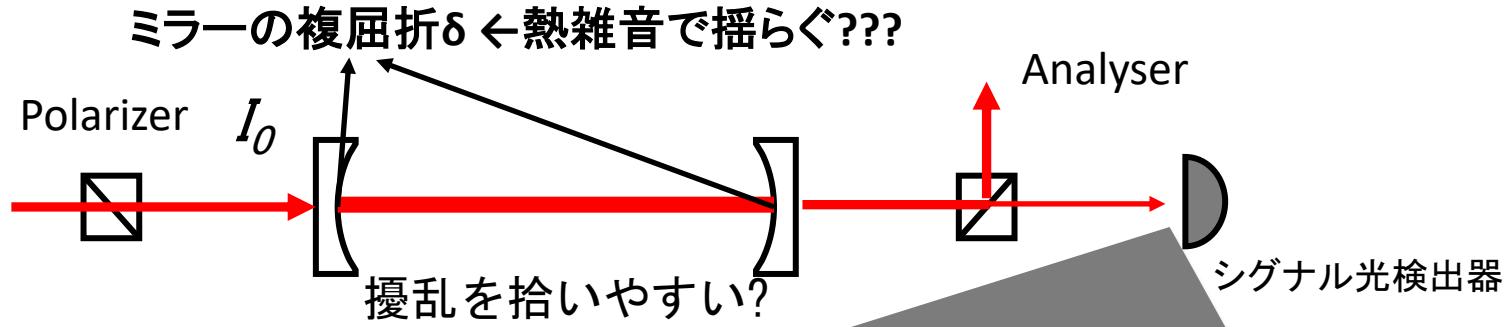


- ✓ 得られた誤差は  
パルス1発あたり  
 $\Delta k_{CM} = 1.0 \times 10^{-19} [T^{-2}]$
- ✓ Shot noise限界は  
 $\Delta k_{CM} = 7.5 \times 10^{-20} [T^{-2}]$

強度雑音はshot noiseと同程度→強度雑音の寄与を1桁削減可能  
→次のステップはフィネス30万実機作成+BG光固有の雑音study

# これから：共振器

- ① finesse 300,000 cavityの安定化に着手
- ② BG光固有の雑音調査: PVLAS実験の直面している課題  
→shot noiseより大きなノイズが見える?
  - ✓ ミラー複屈折の熱雑音→ $1/f$ ノイズ
  - ✓ BG光は共振周波数からずれており擾乱の影響大などの可能性。しかし十分な理解は行われていない
  - 現状の強度安定性なら十分見えるはず。フィネスの1桁違う2種の共振器を使用してスペクトルや大きさ、原因を理解。



$$\text{ノイズ}^2 = \text{shotnoise}^2 + \text{大きな擾乱の寄与?}^2 + \text{ミラー複屈折雑音?}^2$$

# これから：全体

- 透過光以外の感度向上策→**磁石の強化と長期安定運転の確立**で2.5桁程度感度向上ができる

	現状	目標	ゲイン	アップグレードの計画
磁場	9[T]	15[T]	3	銅銀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
Finesse	350,000	650,000	2	達成済み
統計	1日	200日	14	磁石の冷却対策 自動アライメント?

- 合計**3.5桁感度**が向上する
- 年度内に磁石の開発を開始→世界初の真空複屈折観測へ

# 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。
- 9T、0.1Hzのパルス磁石とフィネス30万のFabry-Pérot共振器を組み合わせたセットアップを開発
- テスト測定を終え、感度を向上させるための第一段として共振器透過光の安定化に着手
- 入射光安定化、検出雑音除去、フィードバック回路を改善することでフィネス3万のcavityで概ね目標値通りまでの安定化に達成
- 今後はフィネス30万の共振器に移行しBG光の雑音源の調査を行う。同時に磁石のアップグレードも開始する。