

OVAl実験 ー真空の複屈折を測るー

東大ICEPP 難波俊雄

新学術領域研究("ヒッグス粒子発見後の素粒子物理学の
新展開～LHCによる真空と時空構造の解明～")
公募研究の助成を受けています

今日の話に関係する人たち



東大理、
ICEPP

上岡修星、成田佳奈香、稲田聡
明、浅井祥仁



東大理、
東大工 (APSA)

吉岡孝高、五神真
レーザーの専門家



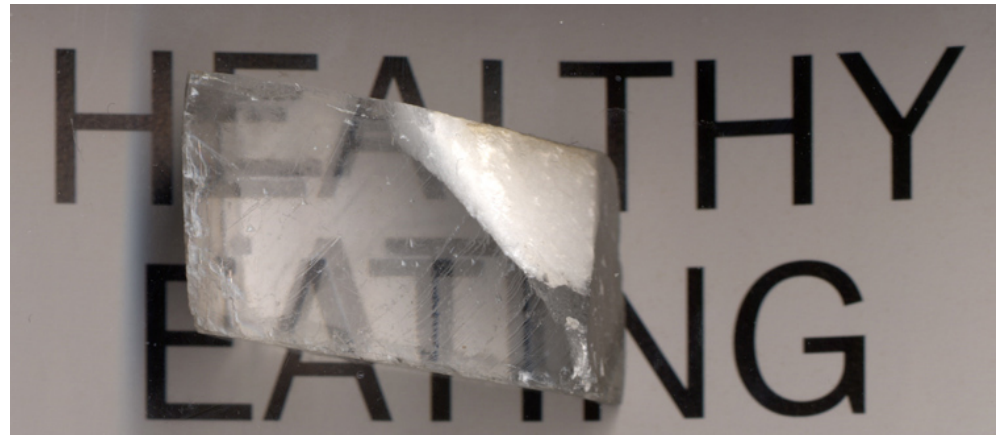
東大物性研、
東北大金研

松尾晶、金道浩一、野尻浩之
磁石の専門家

複屈折 (Birefringence)

- 光の偏光方向によって、屈折率に異方性を持つこと
- 結晶軸に平行な成分と垂直な成分との違い
(偏光方向に応じて電子のまとわりつき方が違う)

$$\Delta n = n_{\parallel} - n_{\perp}$$



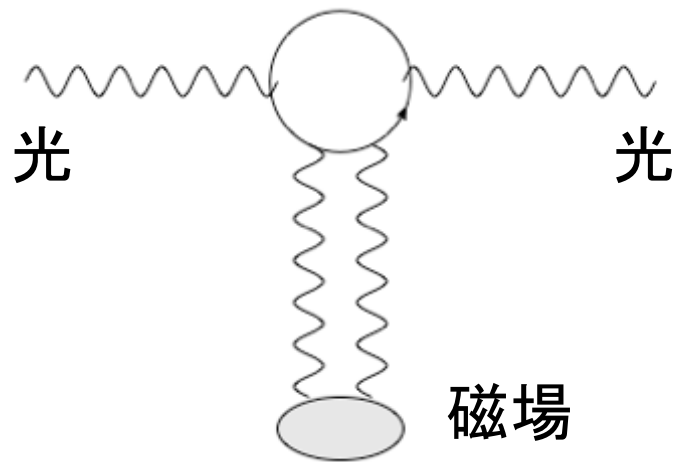
方解石(炭酸カルシウム)の複屈折 (Wikipedia)

真空の複屈折 (Vacuum Birefringence)

- 真空も強磁場によって仮想粒子を引きずり出せば、複屈折性を持つ
- 仮想粒子のまわりつき方が方向によって違う

QEDの真空起源
(仮想電子対)

仮想電子対

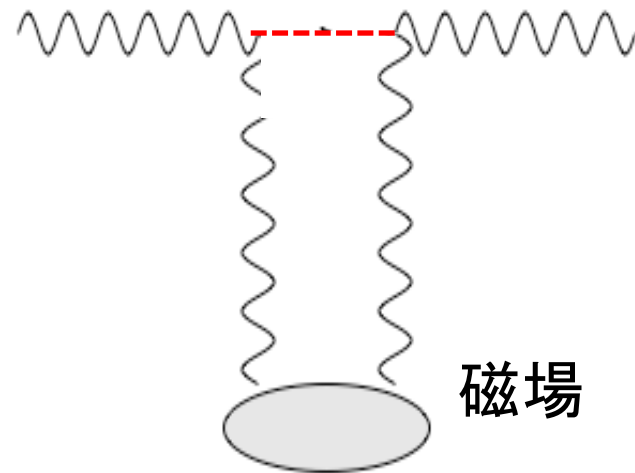


$$\Delta n = 4.0 \times 10^{-24} \times (B[\text{T}])^2$$

$= k_{\text{QED}}$

未発見粒子起源
(例えばAxion Like Particles)

ALP

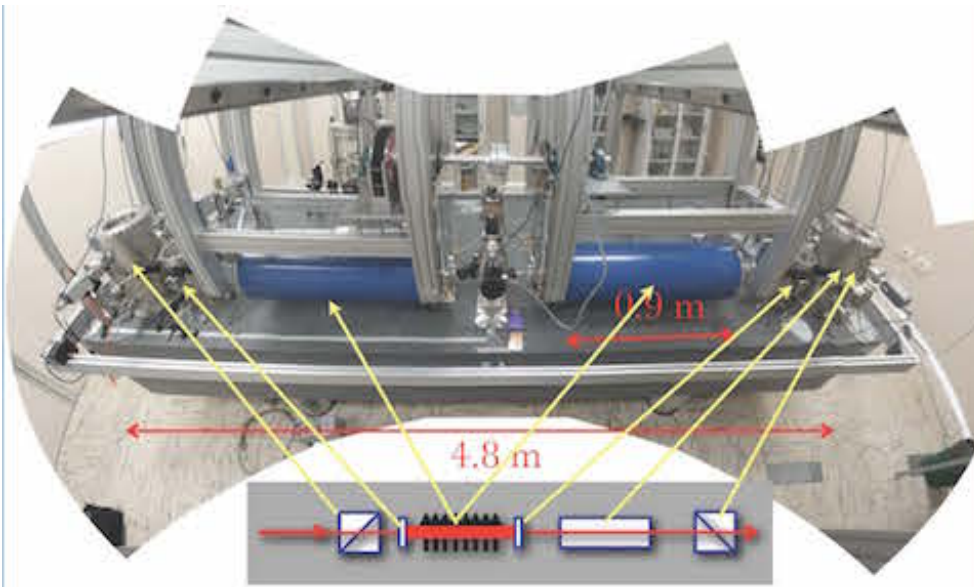


$$\Delta n = \frac{g^2 B^2}{m^2} \left(1 - \frac{\sin 2x}{2x} \right); \quad x = \frac{L m^2}{4\omega}$$

$(\sim g^2 B^2 L)$

先行実験（イタリアのPVLASグループ）

- 1990 年代前半からの老舗
- 3T の永久磁石と3m のファブリペロー共振器の組み合わせ（磁石を回転）
- 現状、世界最高感度: QEDの複屈折まであと20倍の感度



<http://pvlas.ts.infn.it>

先行実験 (イタリアのPVLASグループ)

- 1990 年代前半からの老舗
- 3T の永久磁石と3m のファブリペロー共振器の組み合わせ (磁石を回転)
- 現状、世界最高感度: QEDの複屈折まであと20倍の感度
- かつて、「ALPを発見」

PRL 96, 110406 (2006)

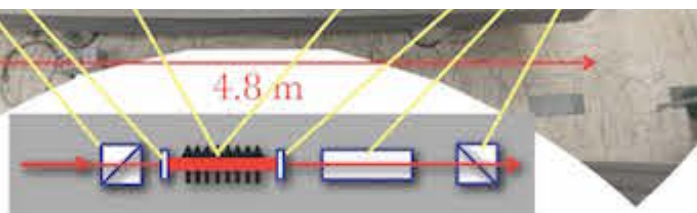
PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
24 MARCH 2006

Experimental Observation of Optical Rotation Generated in Vacuum by a Magnetic Field

E. Zavattini,¹ G. Zavattini,² G. Ruoso,³ E. Polacco,⁴ E. Milotti,⁵ M. Karuza,¹ U. Gastaldi,³ G. Di Domenico,²
F. Della Valle,¹ R. Cimino,⁶ S. Carusotto,⁴ G. Cantatore,^{1,*} and M. Bregant¹

(PVLAS Collaboration)



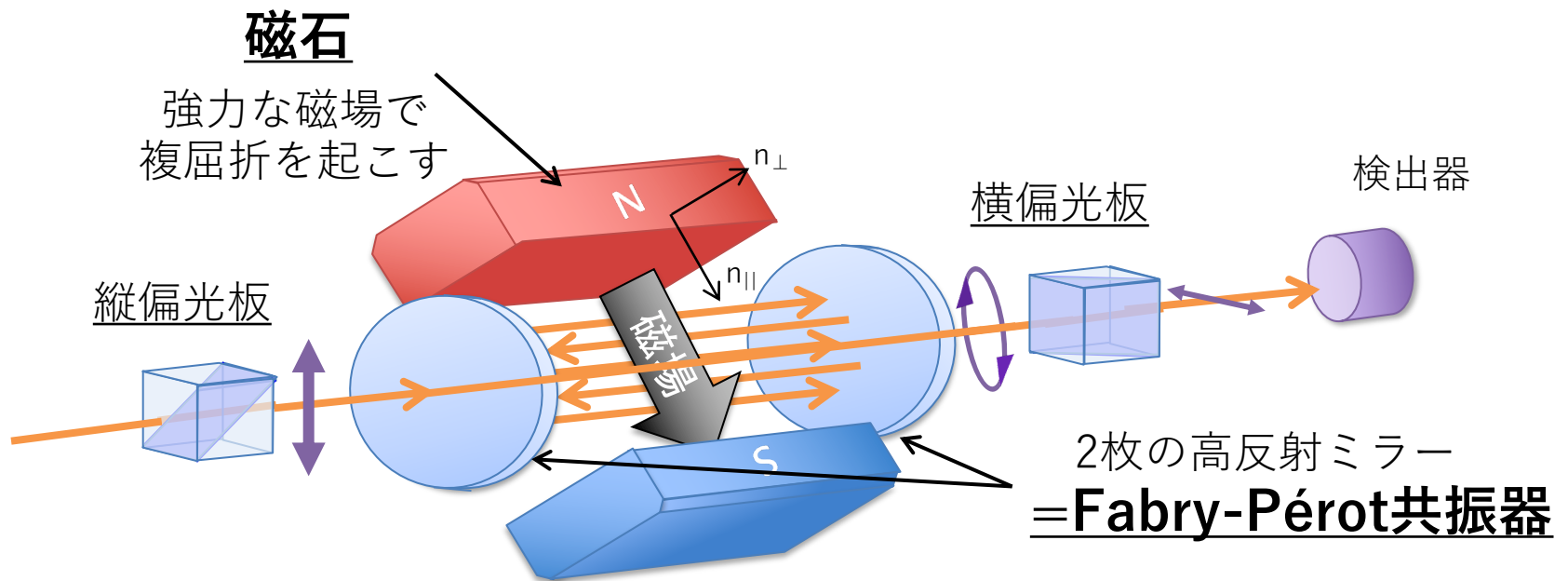
for possible (m_b, M_b) pairs. The allowed segment is contained in the intervals $2 \times 10^5 \text{ GeV} \leq M_b \leq 6 \times 10^5 \text{ GeV}$ and $1 \text{ meV} \leq m_b \leq 1.5 \text{ meV}$.

自分たちの追試で否定

<http://pvlas.ts.infn.it>

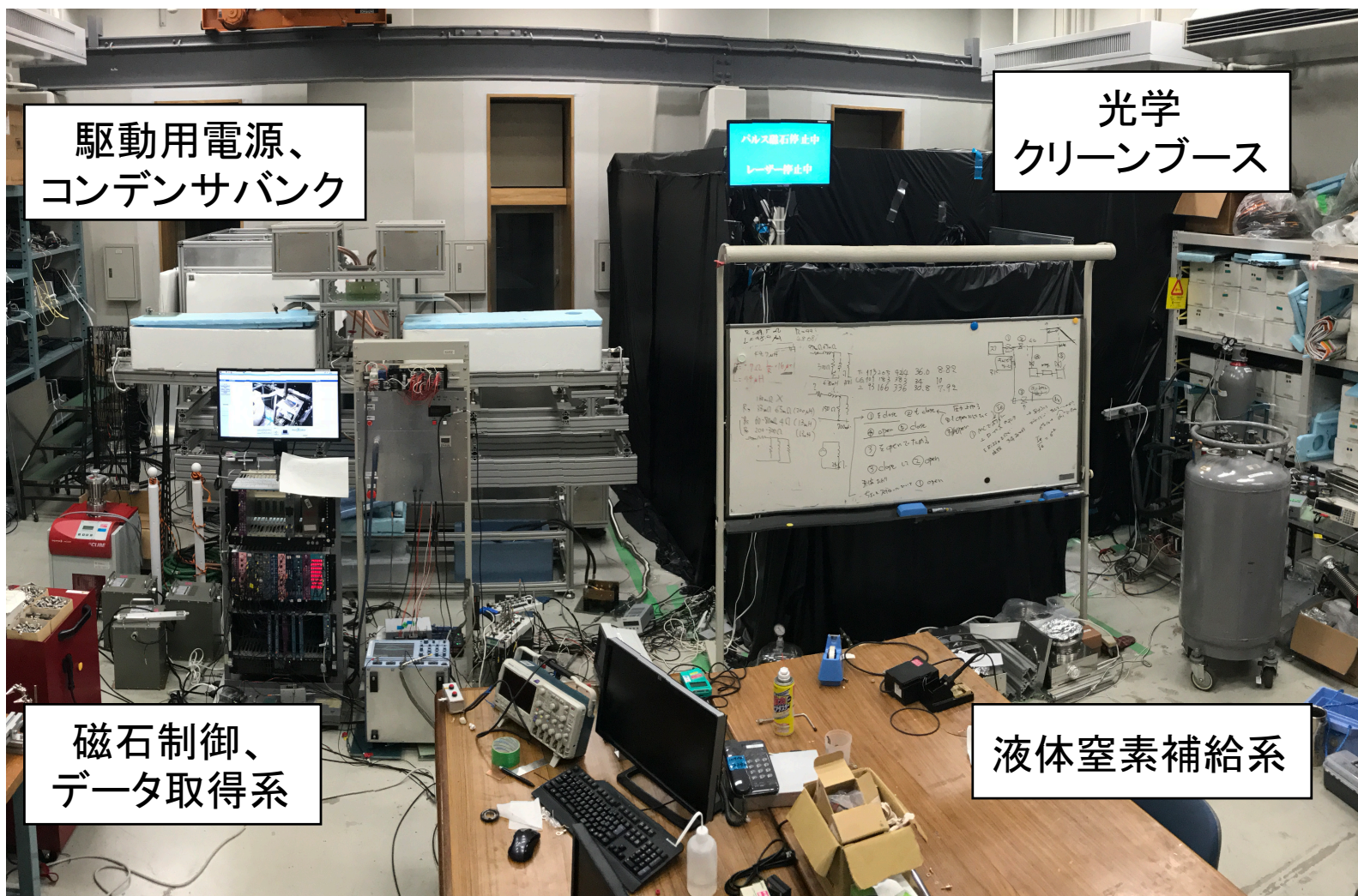
OVAL実験 (Observing VAcuum with Laser)

- 磁石と高フィネス共振器の組み合わせ



特徴: 9Tのパルス磁石(~ms)を0.05Hzの高繰り返しで励磁し、
磁場に依存した成分を取り出す

実験装置@理1号館B203号室



パルス磁石

断面1mm×3mmの銅線を15ターン巻
($\sim 10\text{m}\Omega$ 、 $\sim 40\mu\text{H}$)

光の通る管($\Phi 5.35$)

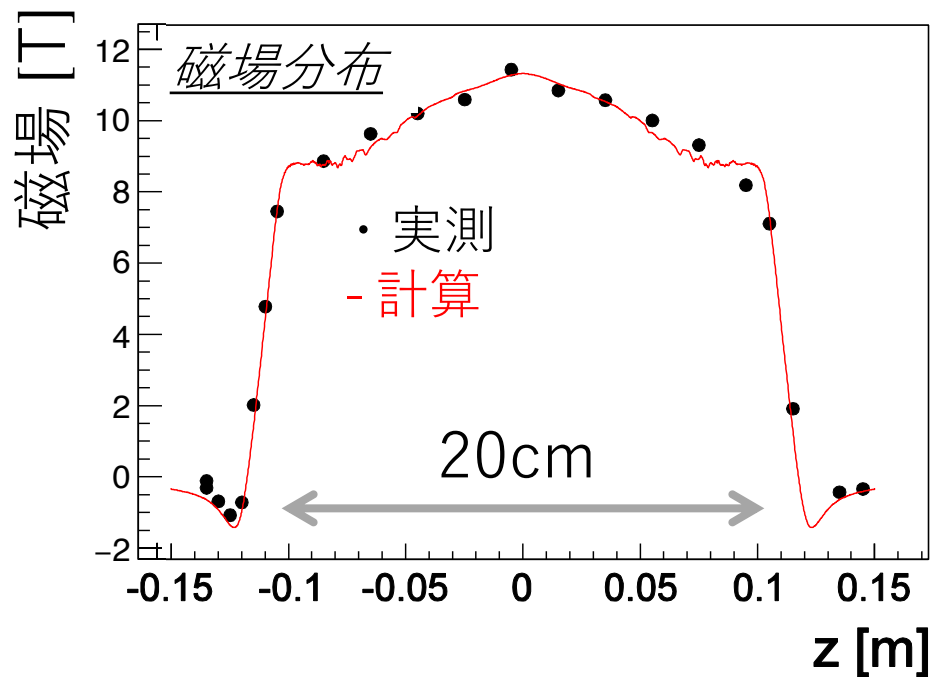
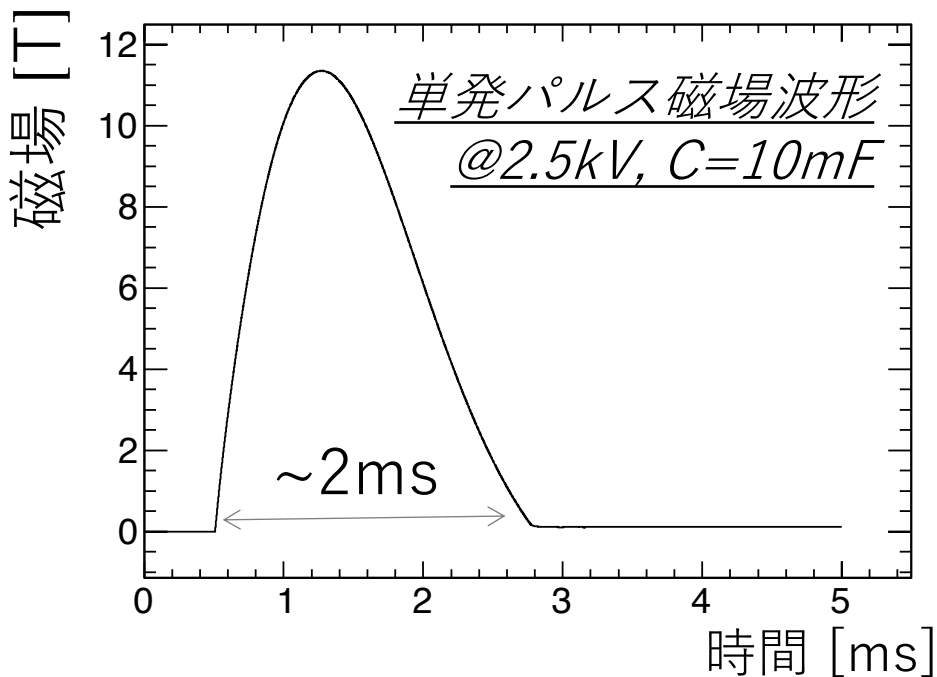
磁場領域 20cm

電流

磁場の向き

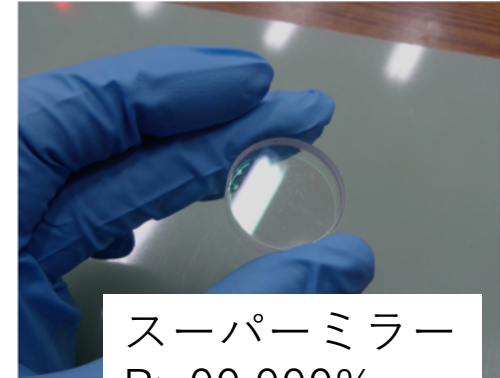
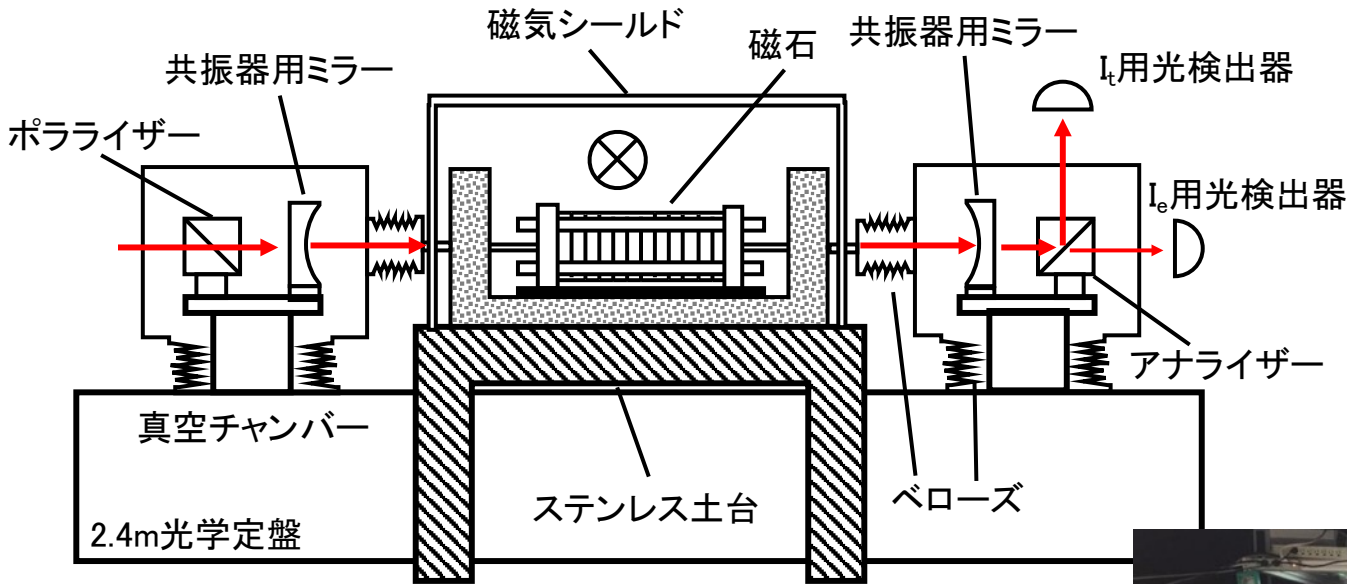
非磁性ステンレス
による補強

液体窒素で冷却して駆動



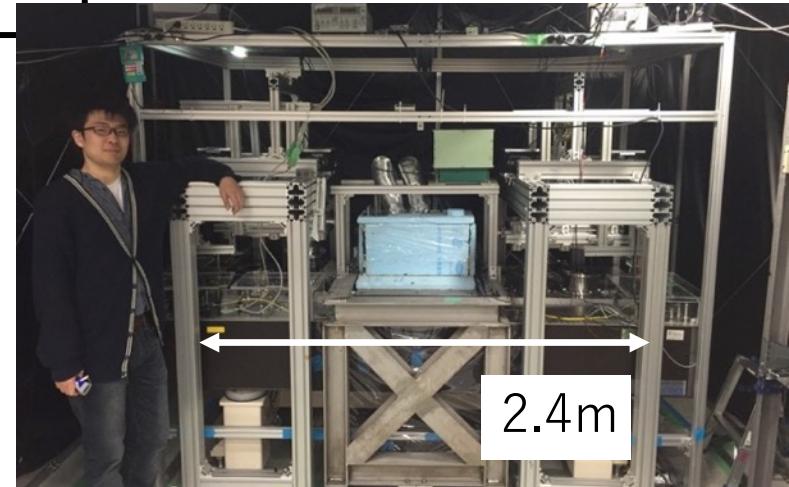
- 0.05Hzくらいのパルス繰り返しレート (充電時間で律速)
- 正負両パルスの繰り返し (充電を効率化)
- コンデンサ (250mF × 12個 = 3mF、4.5kV耐圧、Full充電で30kJ)

光学クリーンブース内



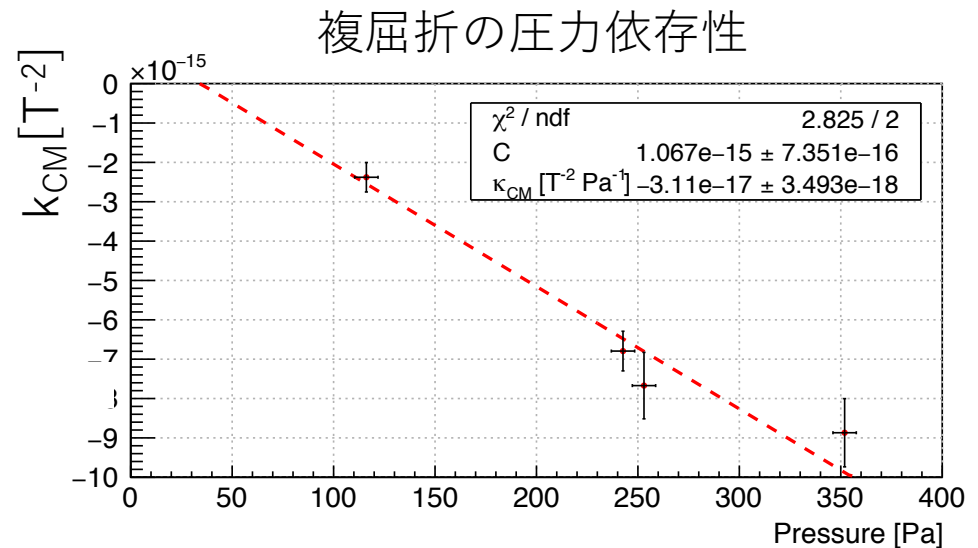
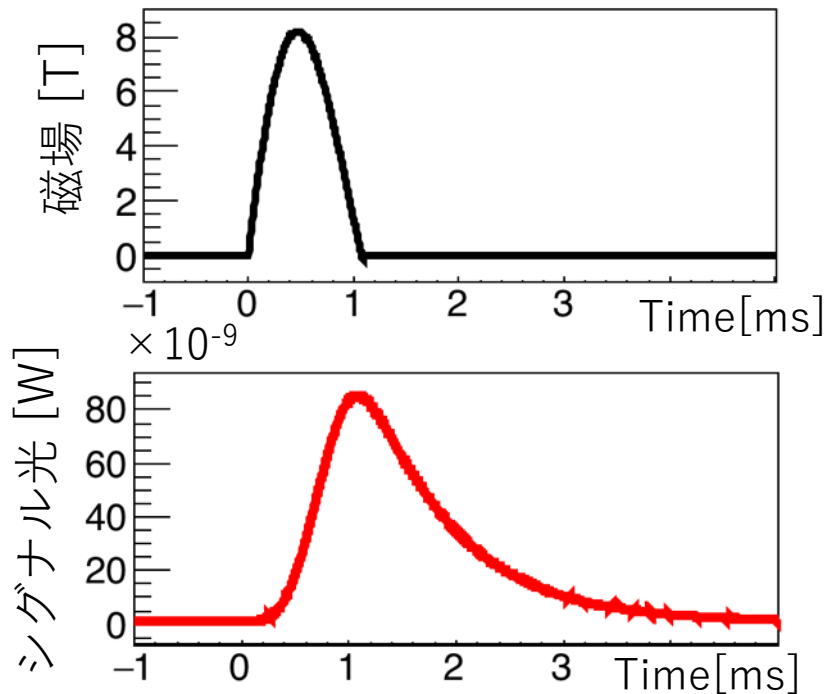
スーパーミラー
 $R > 99.999\%$

- Nd:YAG レーザー (1064nm)
- 2.4mの光学定盤で実験1.4m, フィネス 30万以上の共振器
- 共振のFWHM 3pm: レーザー周波数を feedback制御



シグナル測定 (薄い窒素ガスを用いて)

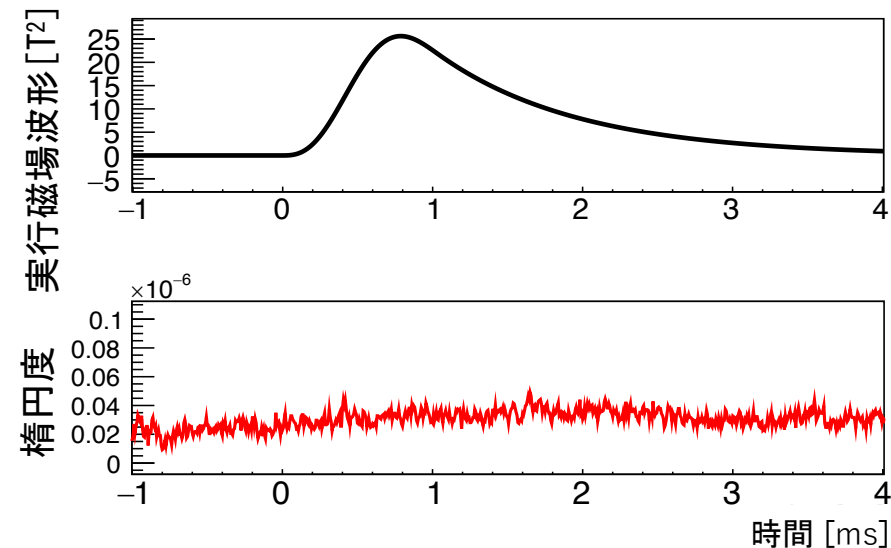
- ガスに磁場を印加しても複屈折が生じる (Cotton-Mouton 効果)
- 装置の校正、動作確認として測定



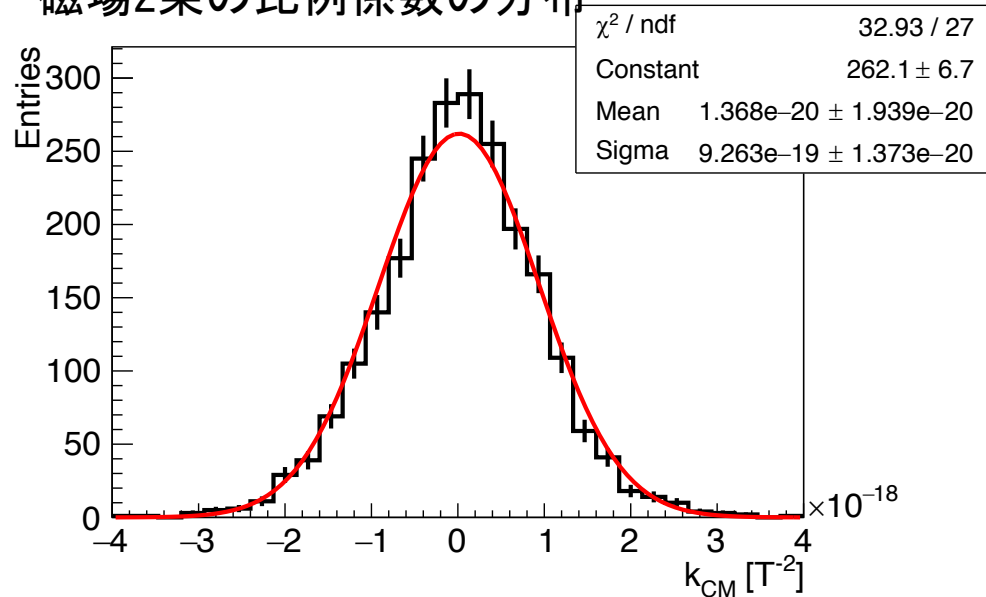
妥当な値が得られた

真空複屈折測定 (2017年11月)

- 同様のセットアップで、磁石内を真空に引いた状態で磁場を印加、偏光の変化を測定した
- 正負双方の磁場を計6000発印加
- 波形fitの結果分布から、 $k_{\text{QED}} < 6.5 \times 10^{-20} [\text{T}^{-2}]$ @95% C.L.
(まだQEDの計算値までは~4桁)



磁場2乗の比例係数の分布

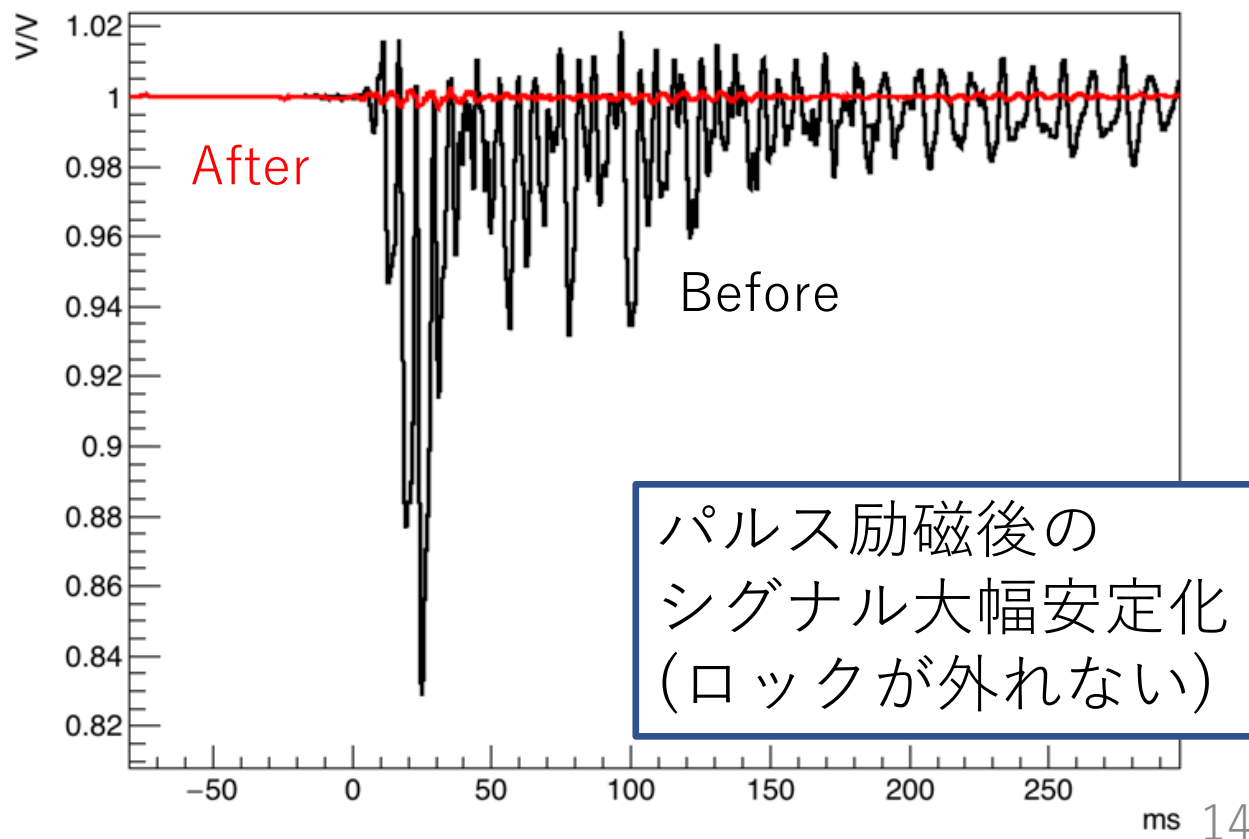


ということで、地道にひたすら高感度化

- パルス磁場印加時のノイズ除去
- レーザーの安定化
- 磁石の磁場強度、長さ増強
- 長期測定可能なシステム（オペレーションコストの削減）

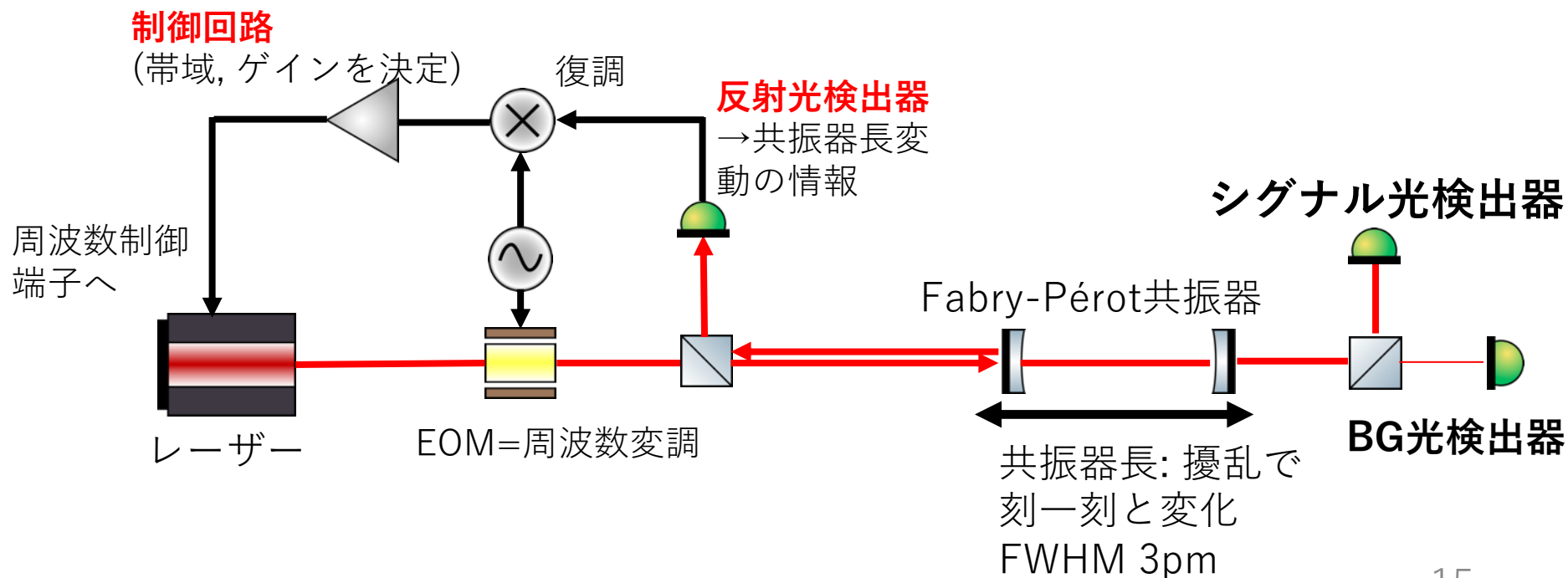
磁石起源のノイズ除去

- パルス磁石と高フィネス共振器の相性は最悪
 - 振動による共振器ノイズ
 - 磁場による計測、制御系へのノイズ
- 磁気シールド、マウント方法の改善



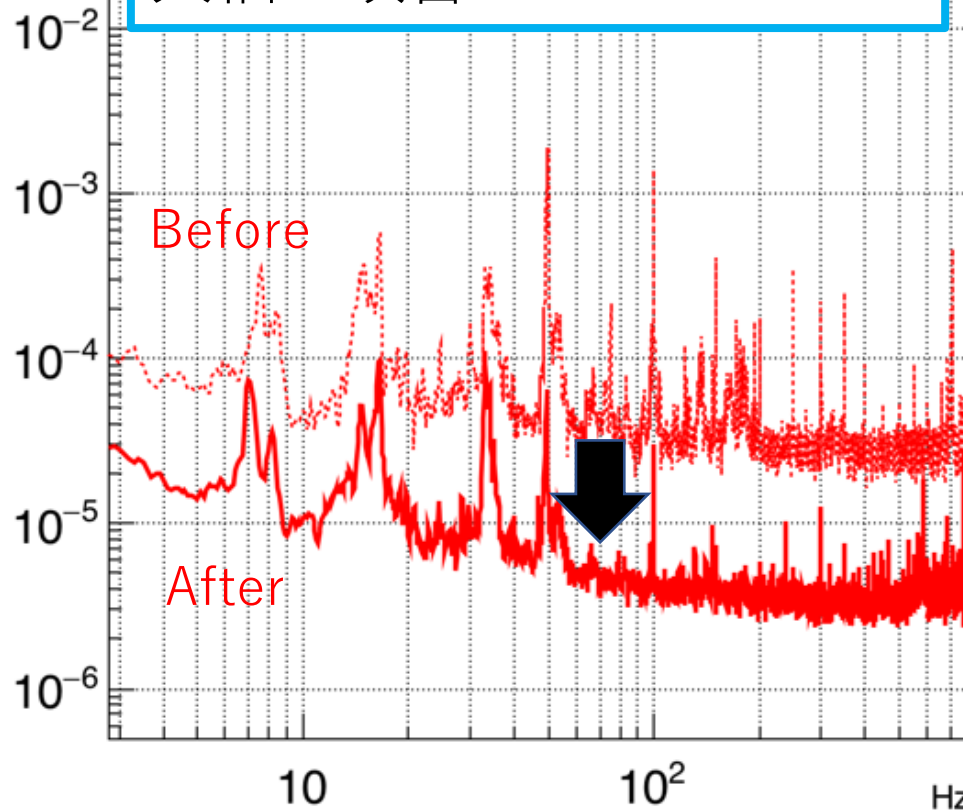
レーザーの安定化 (=共振器内の強度の安定化)

- 共振器 (フィネス $\sim 400,000$)に入れるレーザーは、PDH法と呼ばれる手法でフィードバック制御する
- 検出雑音削減/制御回路ノイズおとし/制御帯域、ゲインの改善により、共振器内のレーザーパワー安定化



レーザーの安定化 (=共振器内の強度の安定化)

検出器内の相対強度雑音が大幅に改善



ーは、PDH法と呼

帯域、ゲインの改善

シグナル光検出器

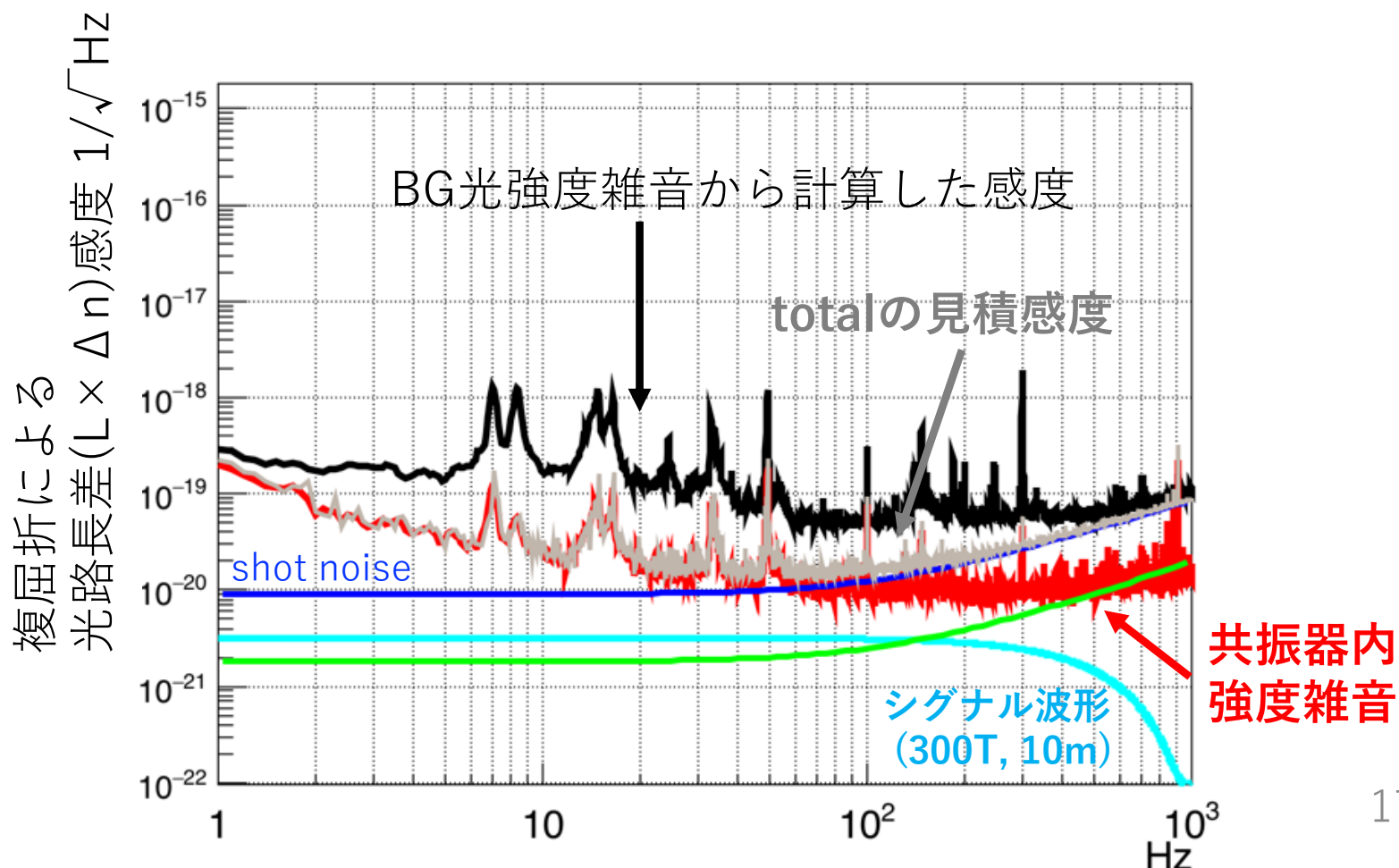
Pérot共振器

共振器長: 擾乱で
一瞬と変化
HM 3pm

BG光検出器

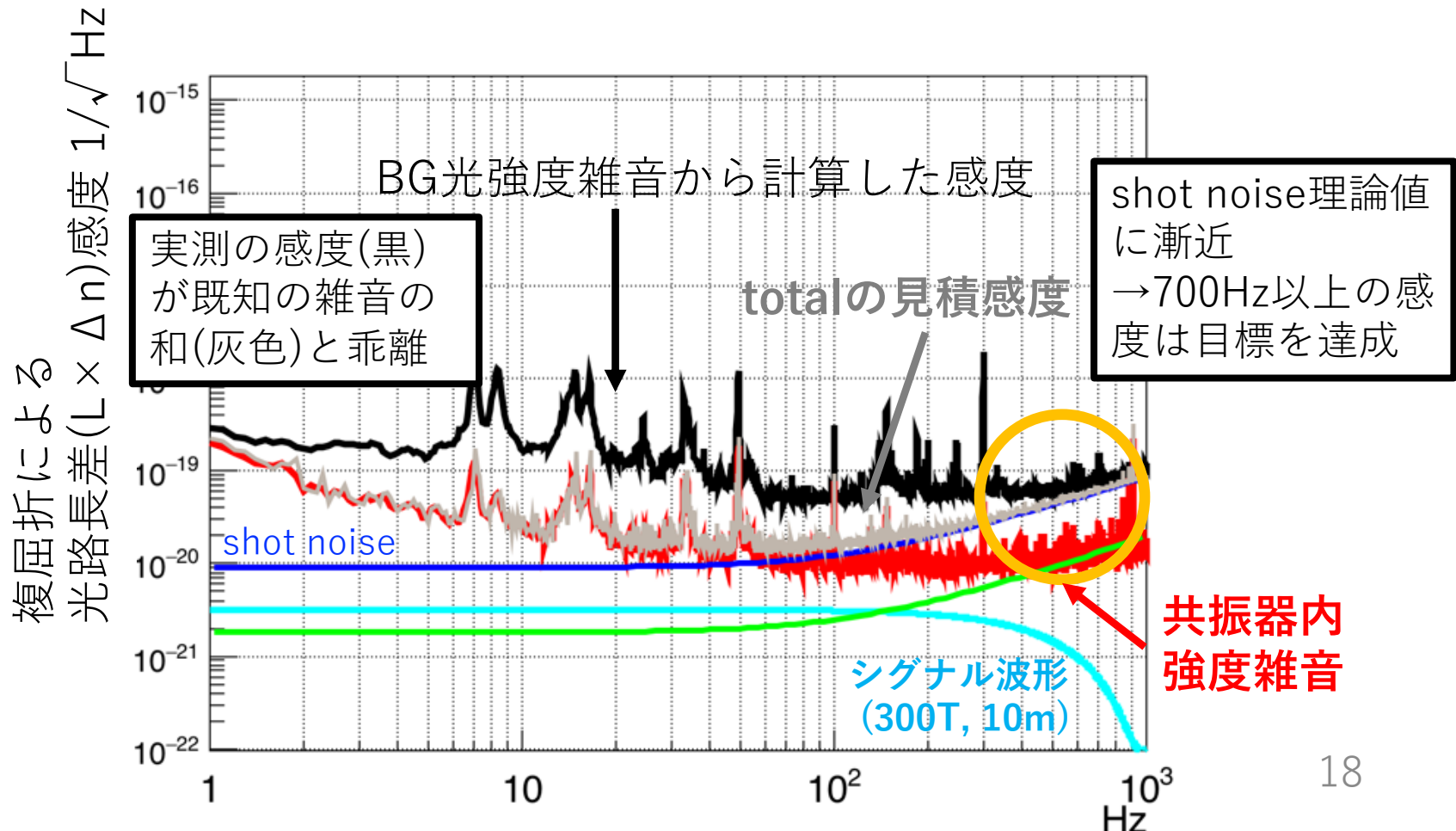
安定化後の感度評価

- 次にBG光の強度雑音を測定し、複屈折感度を実測(黒線)
- **感度は4倍向上**



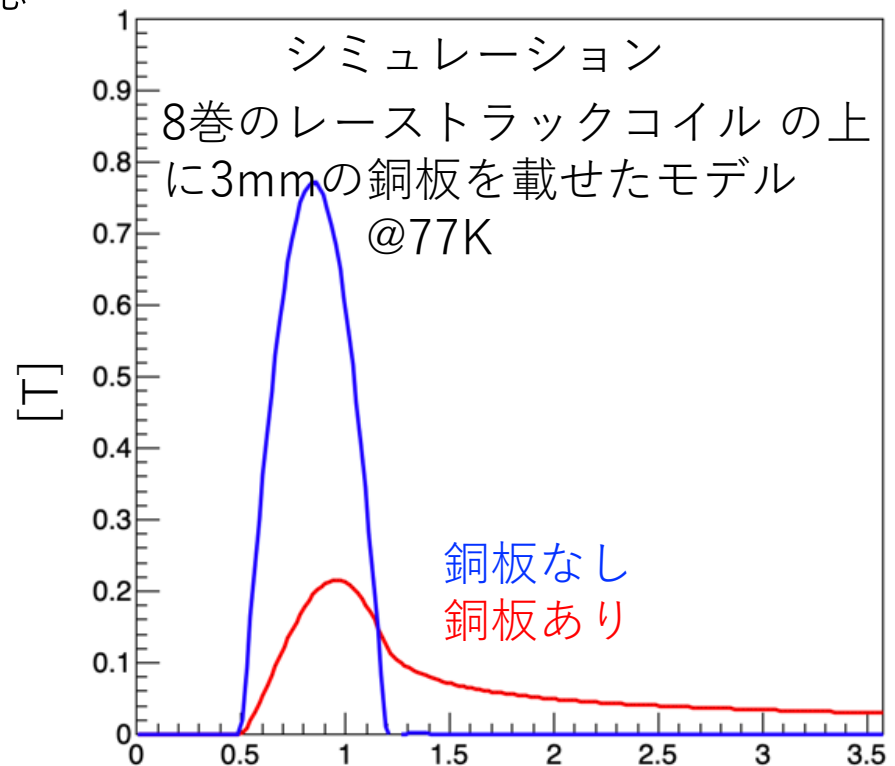
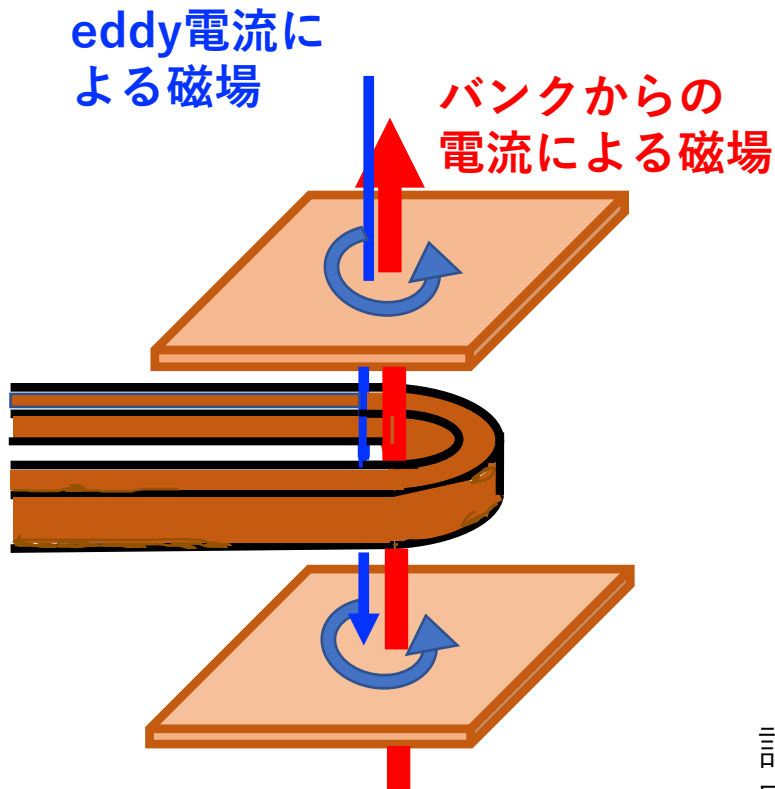
安定化後の感度評価

- 次にBG光の強度雑音を測定し、複屈折感度を実測(黒線)
- 感度は4倍向上** ⇨ まだ完全に理解できてないノイズ源



磁石の強化 (現在開発中)

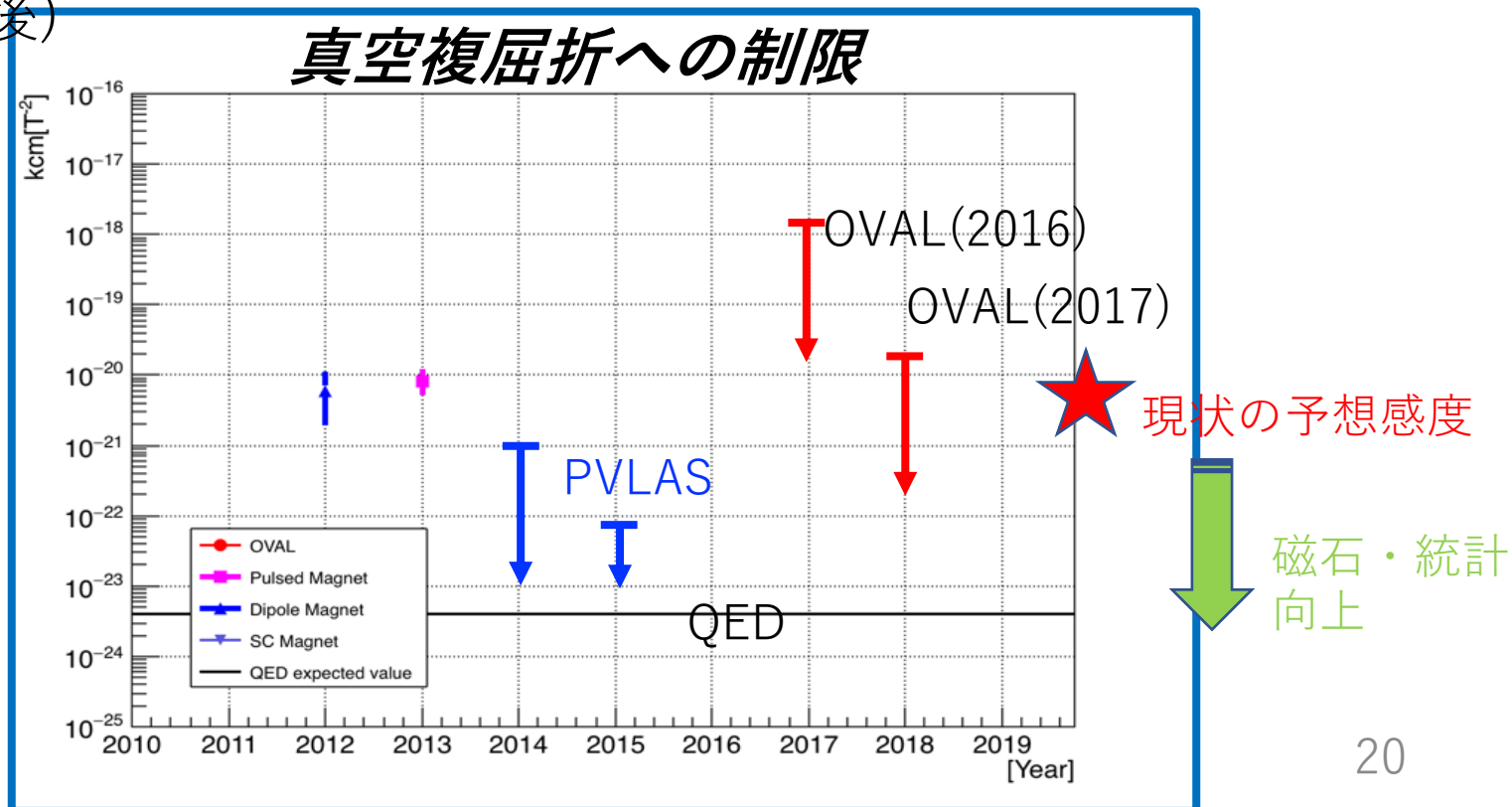
- 磁場強度2倍(16T)、磁場長2倍(40cm)を目標
- 今までは磁気応力($\sim 100\text{MPa}$)による端部破壊が問題だった
- 端部に銅板(Eddy current canceler)を取り付けることで、磁気応力が打ち消せることを確認



試作機でもワークすることを確認
実機製作中

現状のまとめと今後

- レーザー関係のノイズがだいぶ改善されたので、データ取得中 (~1week)
 - おおむね、昔のPVLAS(偽アクシオン)くらいの感度
 - BMV(パルス磁石を使った別グループ)を上回るくらいの感度
- 今後、「磁石の増強」「真空度の向上」のアップグレードをおこない、PVLASを上回る感度での真空の複屈折測定をおこなう (~1年後)



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の構造である。
- 真空複屈折の初観測に向けて、9T、0.05Hzの高速繰り返しパルス磁石と、共振器長さ1.4m、フィネス400,000のFabry-Pérot共振器を組み合わせたセットアップを開発
- 2017年11月の測定で、QEDまで4桁の感度。その後、主にレーザー系の安定化を強化して現在測定中
- パルス磁石と統計量の向上で、QEDの预言する真空複屈折観測へ