

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、樊星、稲田聡明^A、山崎高幸^A、難波俊雄^A、浅井祥仁
大間知潤子、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



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

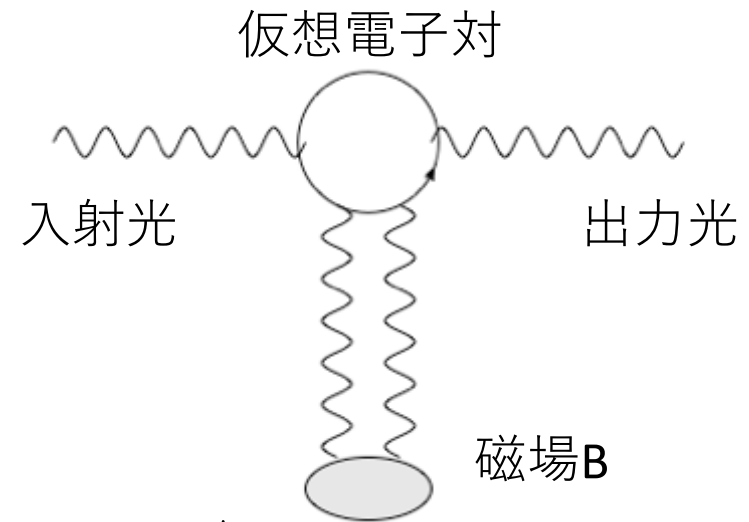


APSA
Advanced Photon Science Alliance

日本物理学会2017年秋季大会
@宇都宮大学 2017/9/15

真空複屈折とは

- 場の量子論では、真空を飛ぶ光は仮想電子対などに絶えず対生成・対消滅している
- そこに磁場を印加すると仮想電子対を通じて真空が分極し、光は磁場に並行・垂直な屈折率に差 $\Delta n = n_{\parallel} - n_{\perp}$ を感じる。この現象を真空複屈折という。



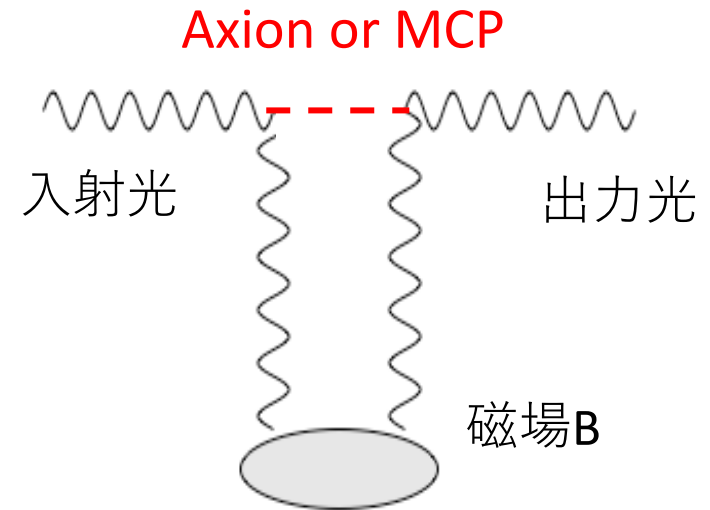
$$\begin{aligned}\Delta n &= n_{\parallel} - n_{\perp} \\ &= k_{CM} B^2\end{aligned}$$

(QED理論値 $k_{CM}=4.0 \times 10^{-24}[\text{T}^{-2}]$)

- 光と光の相互作用は古典的にはありえないプロセス。
QEDの精密検証が可能。

真空複屈折とは

- 場の量子論では、真空を飛ぶ光は仮想電子対などに絶えず対生成・対消滅している
- そこに磁場を印加すると仮想電子対を通じて真空が分極し、光は磁場に並行・垂直な屈折率に差 $\Delta n = n_{\parallel} - n_{\perp}$ を感じる。この現象を真空複屈折という。



$$\Delta n = k_{CM} B^2$$

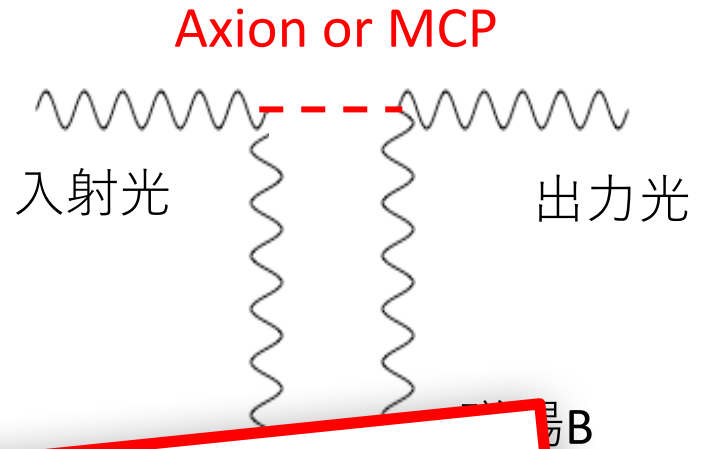
(QED理論値 $k_{CM} = 4.0 \times 10^{-24} [\text{T}^{-2}]$)

- またAxion, Millicharged Particleのような未知粒子が存在すると、 Δn が大きく変わる→未知粒子探索にもつながる

真空複屈折とは

- 場の量子論では、真空を飛ぶ光は仮想電子対などに絶えず対生成・対消滅している

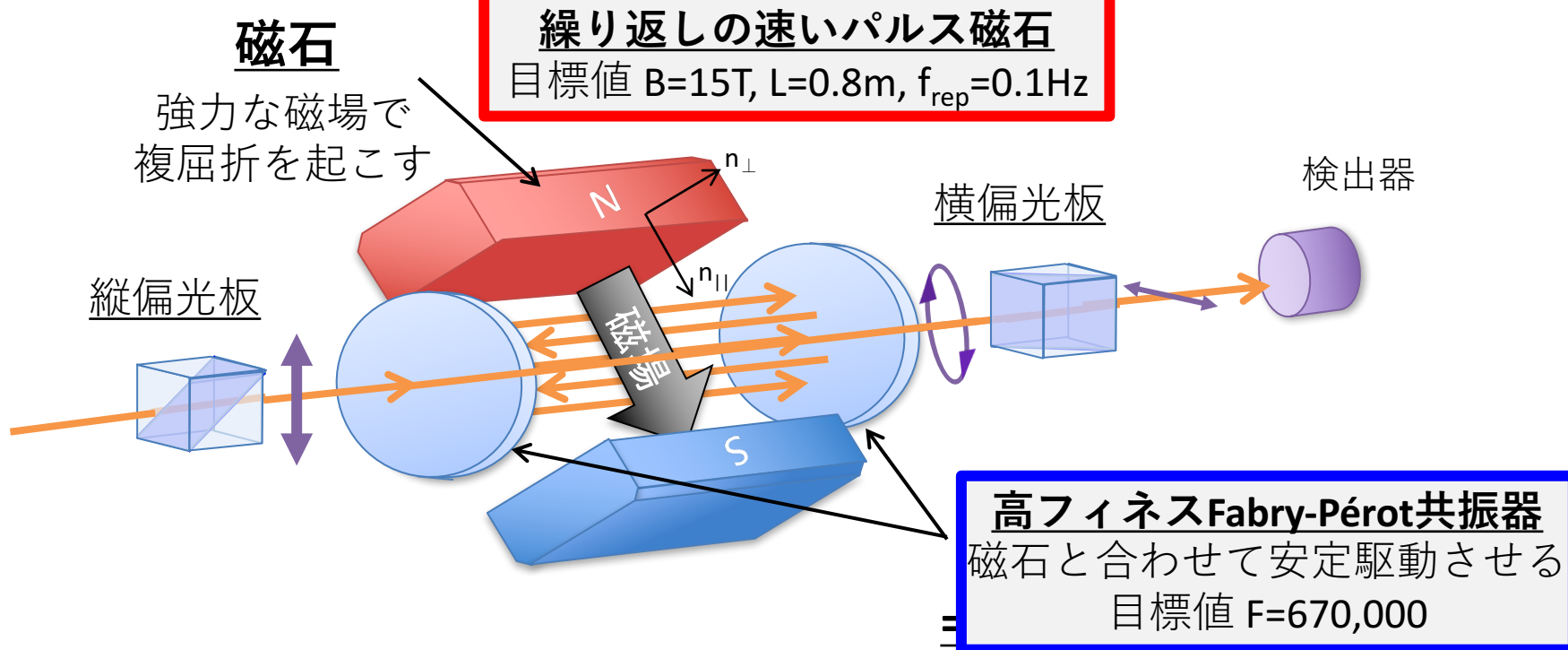
- そこに磁場を印加すると仮想電子対を通じて真空が分極し、光は磁場に並行・垂直な方向



20年ほど前から世界中で実験が行われているが未観測。我々 (**OVALL実験**) も2年まえからこの競争に参戦。

未知粒子探索にもつながる

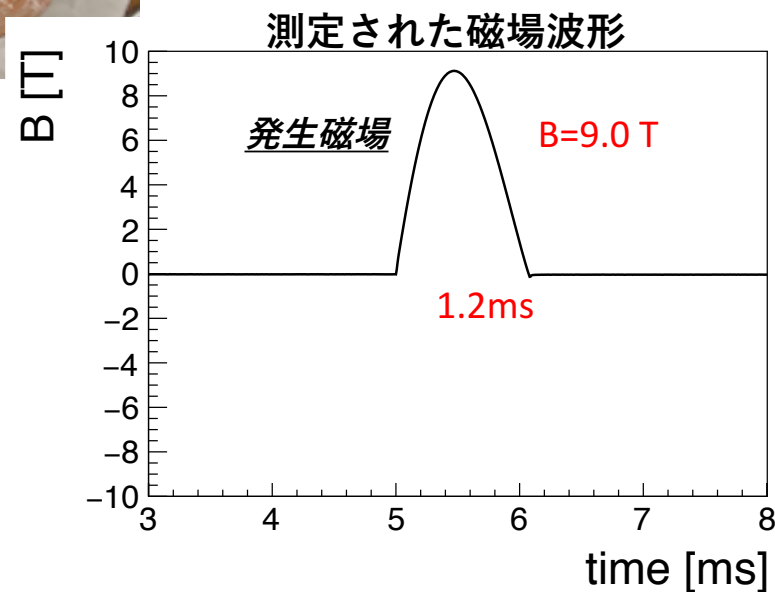
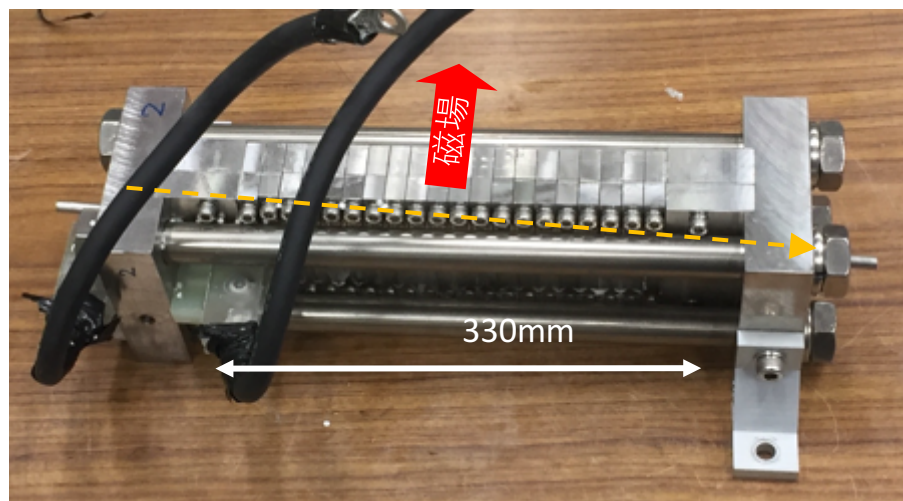
探索手法



- 複屈折は光の偏光を回す。偏光板一枚使い、それを回す。
- 感度 6ヶ月のRunでQED理論値に到達！ 比例
- Fabry 世界初の真空複屈折の観測 $2F/\pi$
- 倍稼げる (F :フィネス = 光の反射回数 $\times \pi/2$)
- また、パルス磁石の速い駆動を達成することで統計量を稼ぐ

パルス磁石

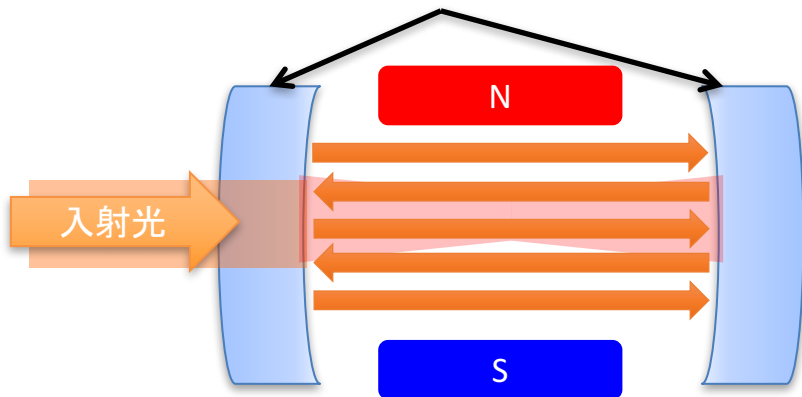
- ❖ コイルは銅線。2.75度の角度で光用の管を通す。磁場領域は20cm
- ❖ 電磁応力は40MPa。ステンレスで外部補強しLqN₂冷却して駆動。
- ❖ 9Tと-4.5Tを交互に印加、繰り返し0.2Hz(従来の磁石の100倍)を達成



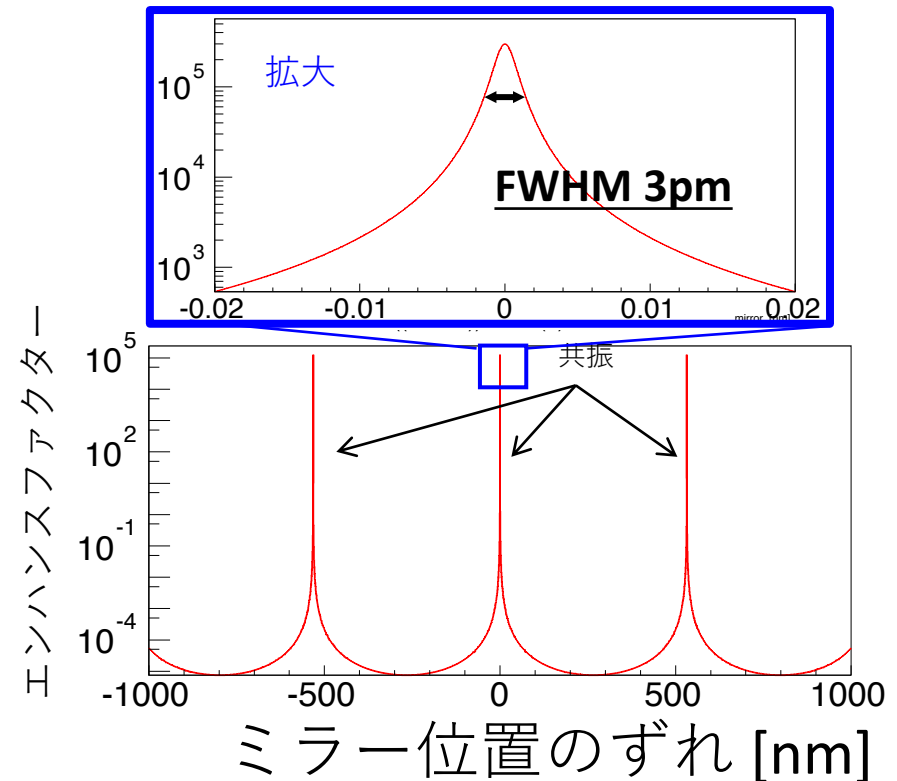
Fabry-Pérot共振器

- 二枚ミラーで光を反射させ、相互作用長をフィネス分稼ぐ
- しかしミラー間距離が共振条件を満たさないと透過光が出ない
一世の中にある最高性能 $R > 99.999\%$ ミラー@1064nmを使用

ミラー反射率 $R > 99.999\%$
フィネス $F > 300,000$



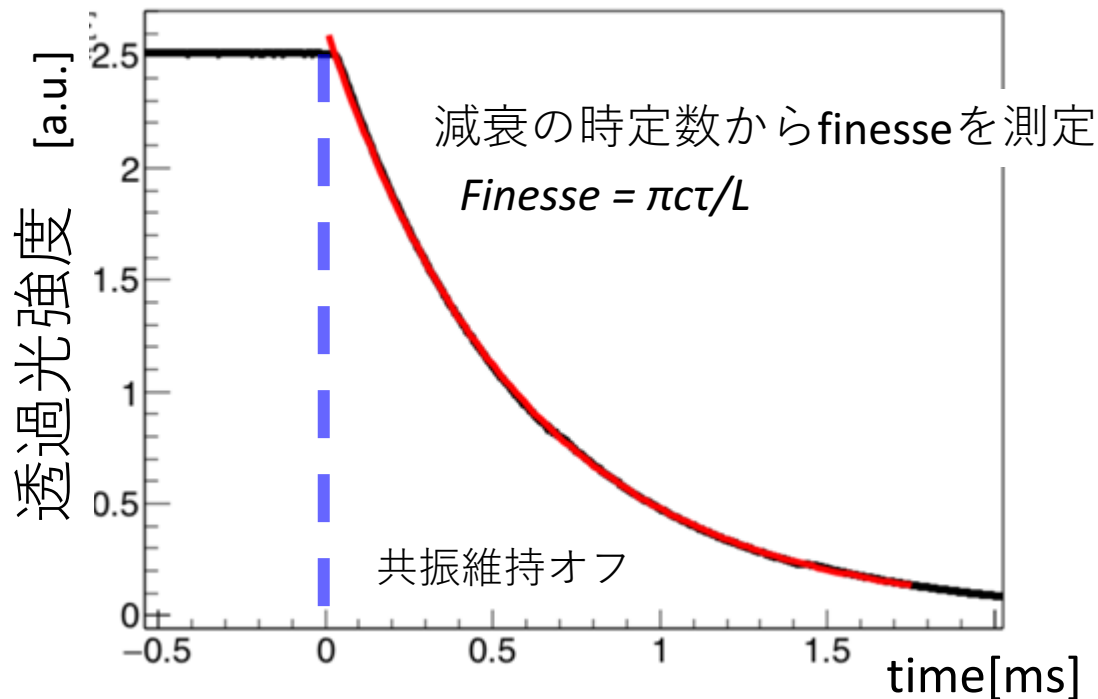
$L = \lambda/2 \times n$ のときのみ増幅



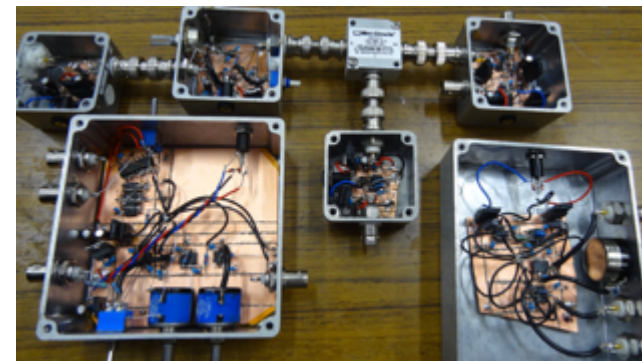
→波長にフィードバックし、精密な共振制御をする

共振器 実機製作

- 実際に高反射率のミラーを用いてfabry-perot共振器を作成した。



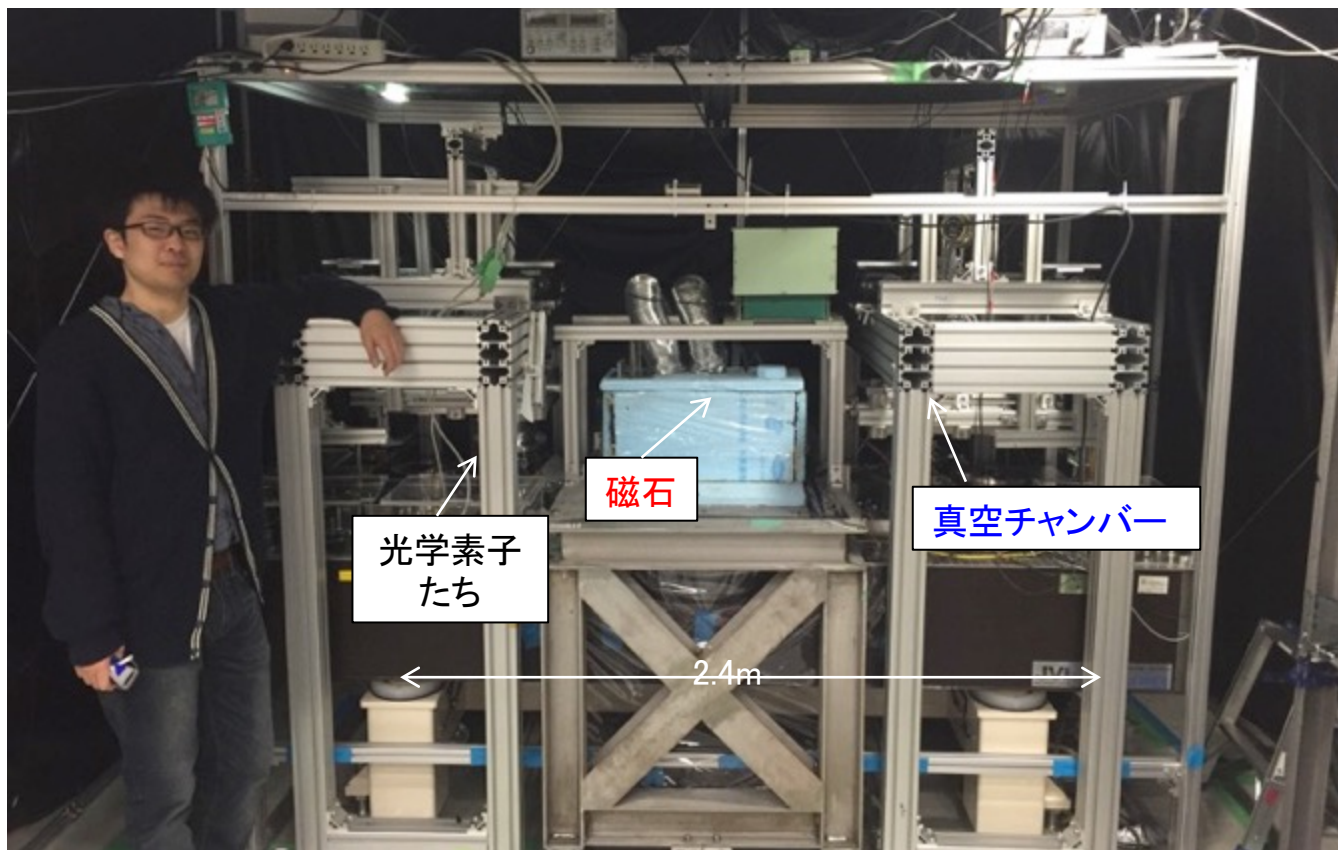
手作りフィードバック回路



自作回路を用いて共振維持。
十分長い時間共振を維持できる

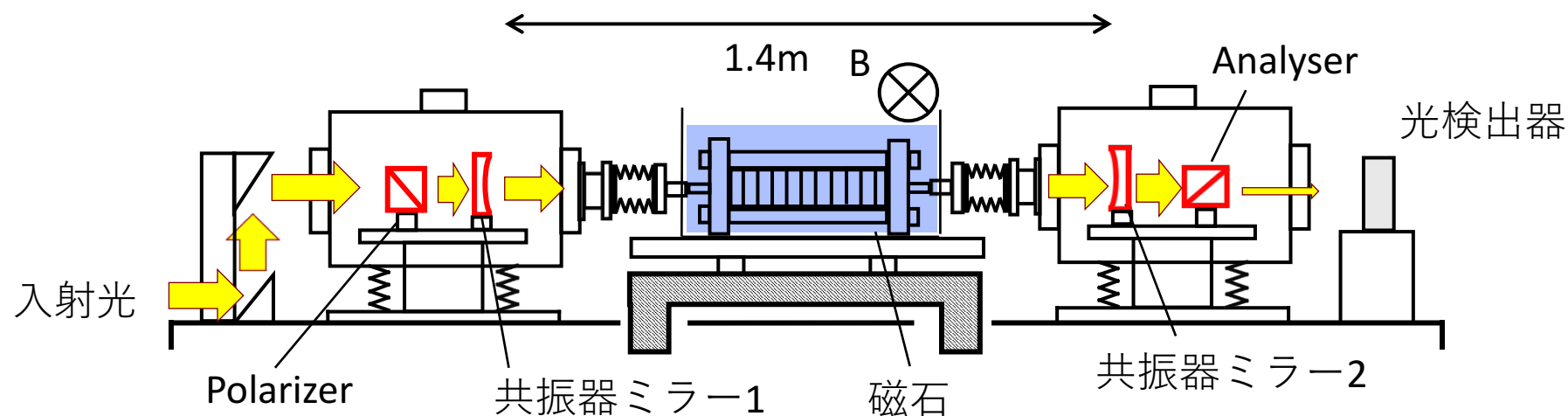
光子寿命からfinesseを測定し、finesseは350,000
ミラーの反射率から期待される値とコンシステント
最大で650,000を達成

実験セツトアップ全体像

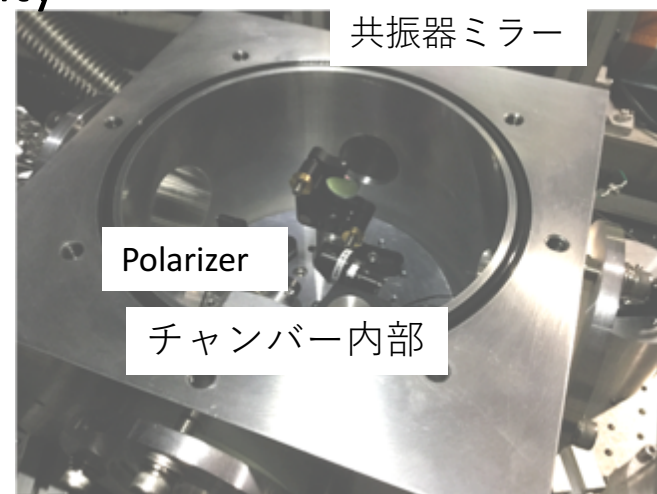


- 2.4m*1.2mの光学定盤に磁石、光共振器が配置される。
- 磁石電源や操作系はクリーンブース外に設置

実験装置全体像 ポンチ絵

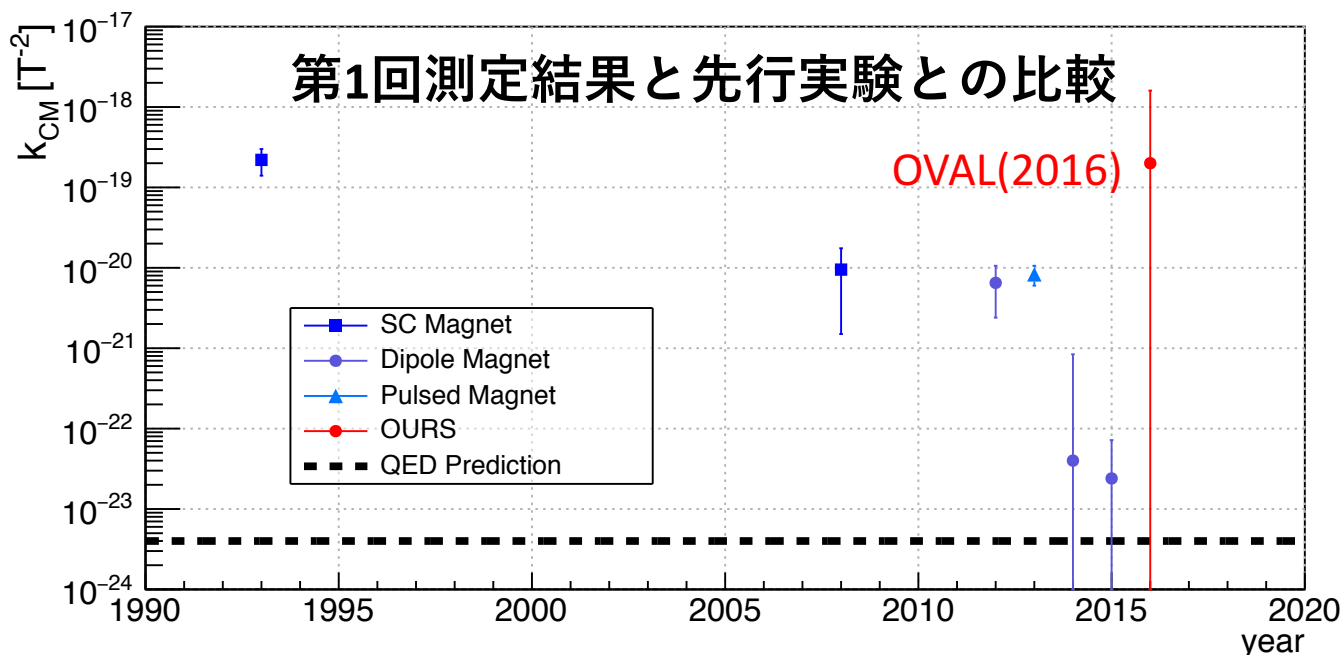


- プロトタイプとして、共振器長 1.4m のcavity中に磁石を1つ設置
- 磁石の前後のチャンバーにミラーと偏光板を配置。Cavityを形成
- **Analysar**後に設置した検出器に届く光から偏光変化量を測定できる。



これまでのOVALの測定結果

昨年12月に第一回測定を行った。15分(磁場100発)の測定で得られた感度は $1.1 \times 10^{-18} [\text{T}^{-2}]$

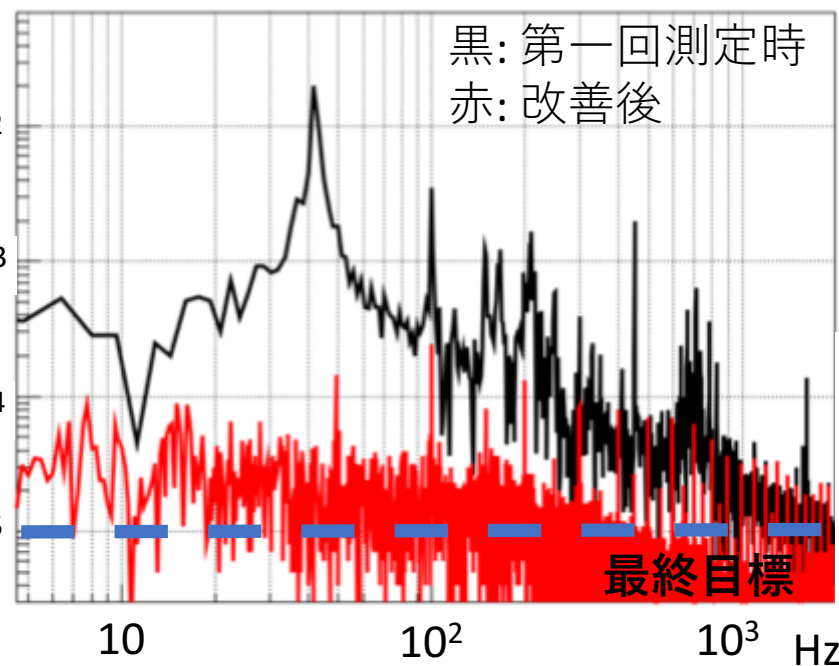


課題は

- ✓ 共振器の透過光が $10\mu\text{W}$ と小さかった→ノイズの影響が大きくなってしまい感度が伸びなかった
- ✓ DAQの不安定性→共振器が磁石の振動を拾う&冷却の影響により共振が不安定or意図せずして共振がはずれてしまい15分(パルス100発)の運転が限界

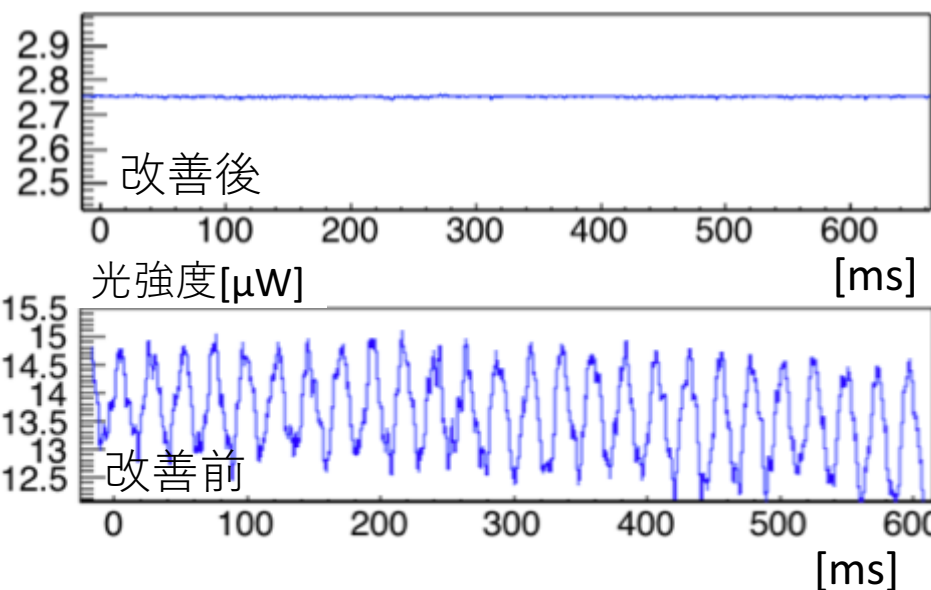
アップグレード1:高強度&安定化

共振器透過光の相対強度揺らぎ [$1/\text{Hz}^{1/2}$]



光強度[mW]

透過光の時間波形

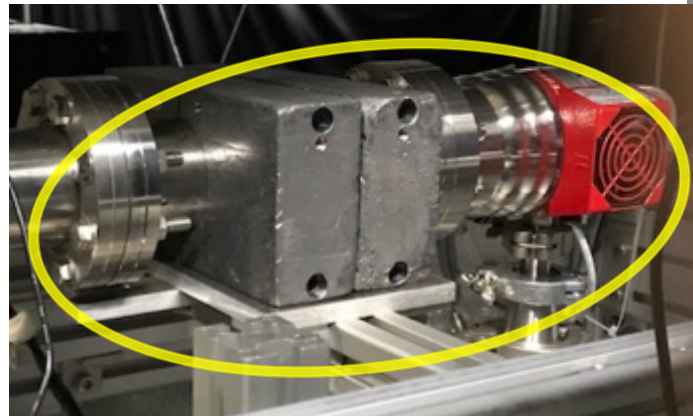


- 共振制御のフィードバックループを見直すことで、昨年より**強度が300倍多い3mW**の透過光強度を確保しつつ相対強度揺らぎを1桁落とすことに成功。
- 今までの周波数制御(帯域100kHz、制御可能幅**100MHz**)に加えレーザー結晶温度でも共振制御(帯域1Hz、**制御幅 10GHz**)。長期的な共振維持性能も向上。

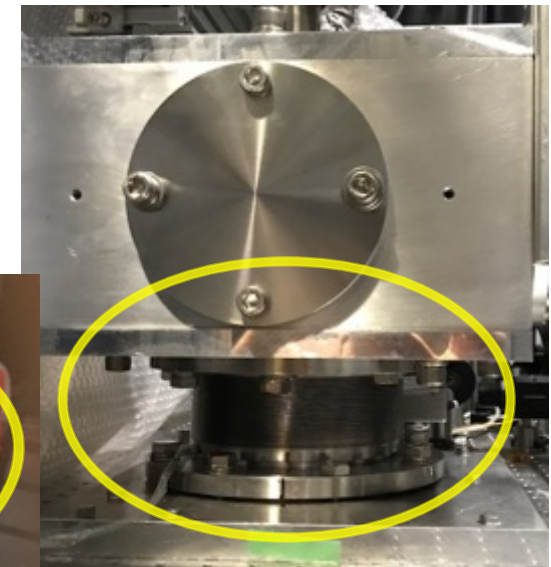
アップグレード2: 擾乱の削減

- 磁場印加時の振動etcは共振を不安定にする。偽シグナルの原因にもなる。
- 磁石、セットアップ全体の振動源、電磁ノイズ源を取り除くことで磁場印加時の擾乱の共振器への影響を大幅に減らすことに成功した。

10kAもの電流が流れるため
反発して振動していた
電流供給ケーブルを
ソリッドで対称性の
良い同軸ロッドに。



ターボポンプも
余計な機械的共振を生んでいた
再配置&鉛で固定

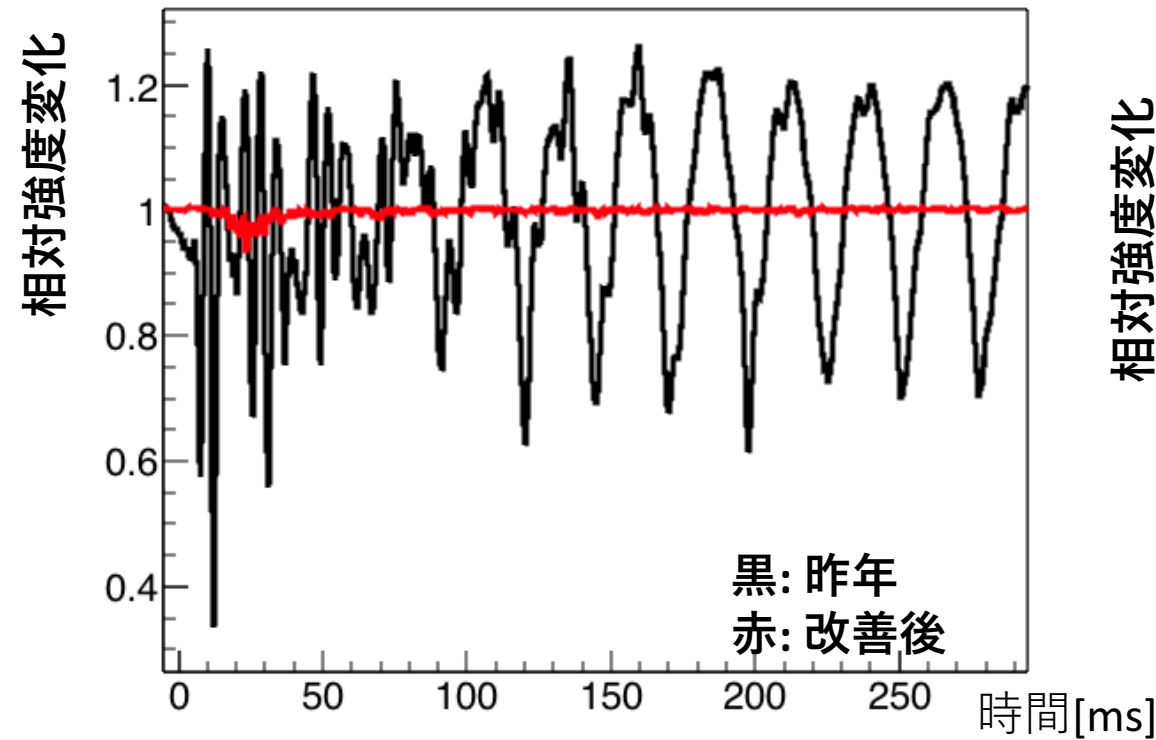


メカニカルな接続を
振動を伝えない
溶接ベローズに統一

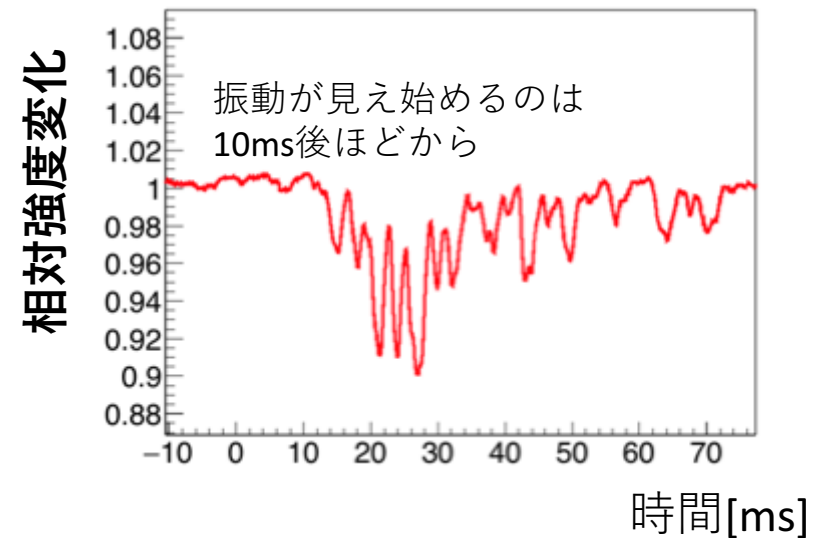
アップグレード2: 擾乱の削減

- 磁場印加時の振動etcは共振を不安定にする。偽シグナルの原因にもなる。
- 磁石、セットアップ全体の振動源、電磁ノイズ源を取り除くことで磁場印加時の擾乱の共振器への影響を大幅に減らすことに成功した。

9T磁場後の擾乱による透過光強度揺らぎ



拡大図



第二回測定

- 改善後の実験系を用いて、8月末に第二回DAQを行った。

測定時のステータス比較

	finesse	光強度	磁場	繰り返し	磁場領域	測定時間	感度
前回	350,000	10 μ W	9T	0.15Hz	0.2m	15min	1.1e-18
今回	350,000	2.5mW	9T	0.15Hz	0.2m	15min	?????

+ 防振、防磁場の強化

確認するのは以下の2点

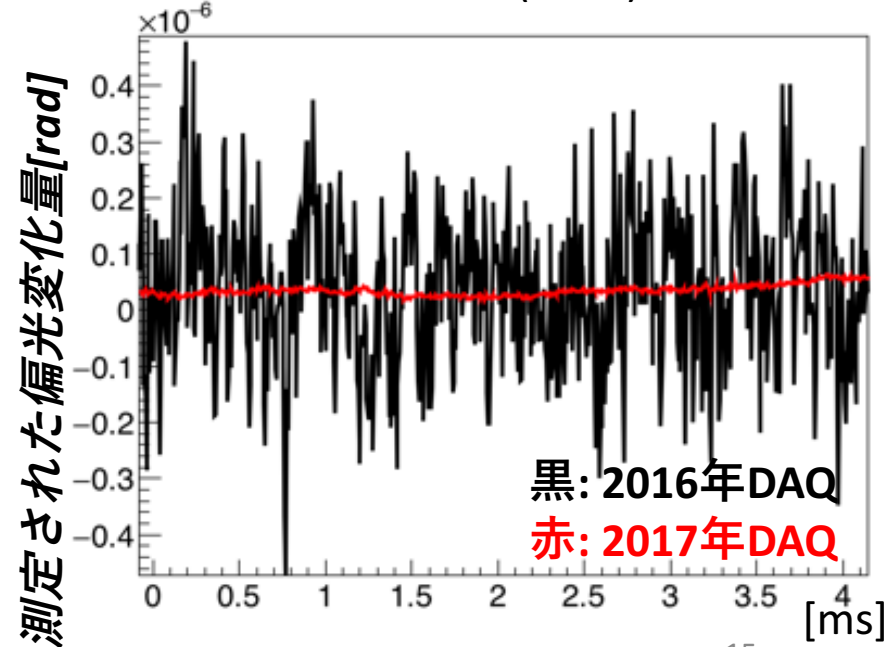
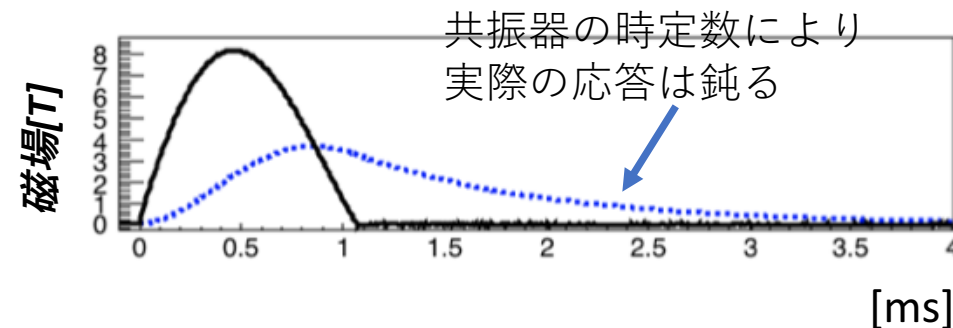
- ✓ 光量が増えたことによる感度向上
- ✓ 共振器の安定化&擾乱除去によるDAQの安定性

測定結果

- 磁石内を真空に引いた状態($\sim 5 \times 10^{-4} \text{Pa}$)で9Tと-4.5Tの磁場を印加し磁場に同期した偏光変化(下図赤線)を測定した。
- 15分にわたって正負双方の磁場を100発ずつ印加。
- DAQの間で共振は一度も落ちず安定したDAQに成功

磁場変化(左)と測定された偏光変化量(右)

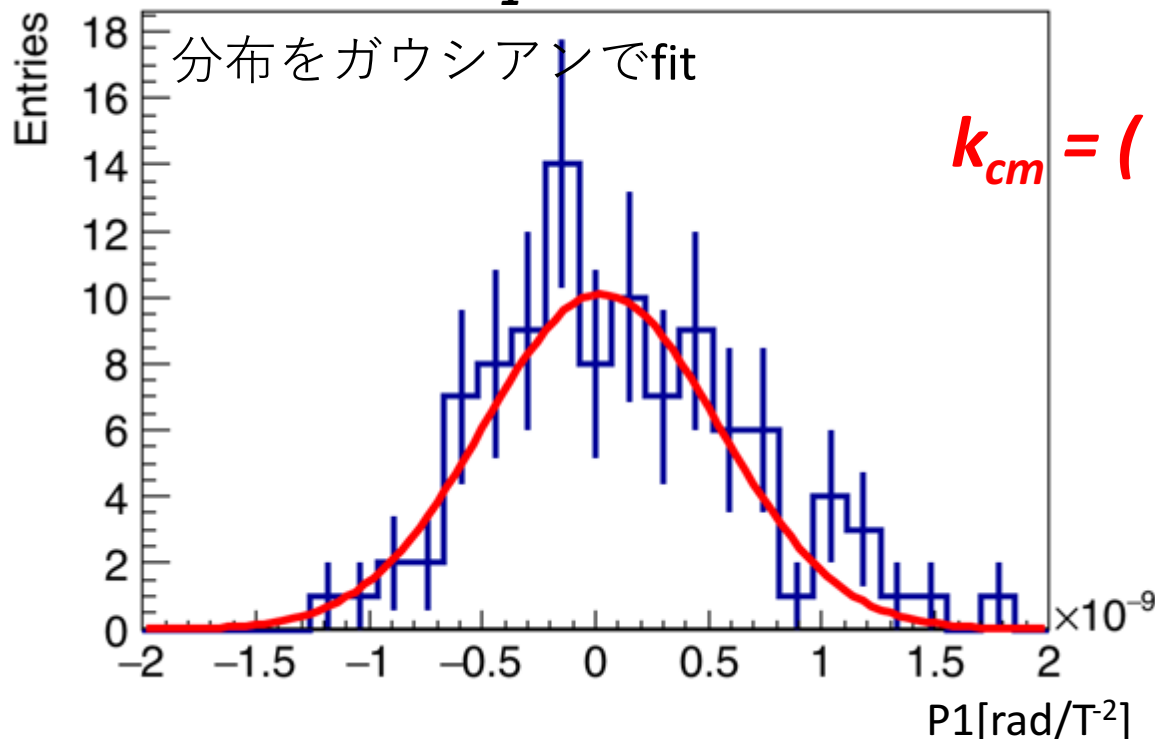
※比較のため昨年度結果(黒線)と重ね書き



得られたデータの解析

- 各パルスごとに偏光変化を $P_0 + P_1 \times B^2$ でfitした。
- 異なる符号の磁場を用いて解析することで磁場に比例するような成分をとりのぞける。
- P_1 の分布から真空複屈折の大きさ k_{CM} を推定する

P_1 の分布



$$k_{cm} = (3.3 \pm 7.5) \times 10^{-20} [\text{T}^2]$$

同じ測定時間で
去年より15倍の感度向上

第二回測定の実況とこれから

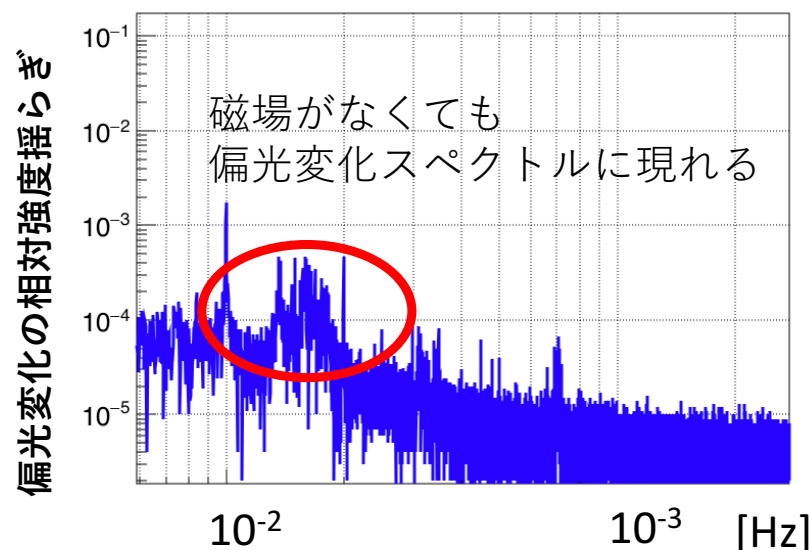
1/2

1. 安定したDAQ

- ✓ 100発打つ間に共振が落ちることはなく、**15分程度のDAQは問題なく実行可能に。**
- ✓ 実際の目標DAQ時間は半年。→次は1日(10,000発)DAQに挑戦!
- ✓ 自動化

2. 光強度増加による感度向上

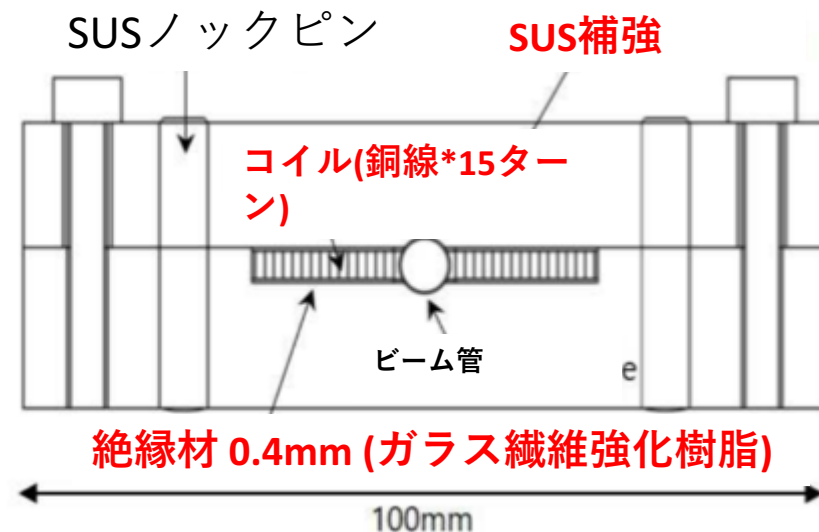
- ✓ 同じ測定時間でも感度は**15倍向上**
- ✓ シグナル光に見られる低周波の強度揺らぎが感度をLimit
(振動? 回路起因?)
- ✓ ノイズ源の特定、改善が課題



これから 2/2 磁石開発

- **目標磁場は15T**⇒現在は9T
→ 線材の強度でlimitされている。
- 3倍引っ張り強度が強い銅銀線入手済み。
→ これを用いて**15T磁石を作る**
- ネックは銅銀線の熱伝導率の悪さ
- 冷却効率を上げるために熱伝導のよい絶縁材の開発とSUS補強構造の見直しを進めている
- 最終的に繰り返し**0.1Hzを目指す。**

材質	引っ張り強度 [MPa]	熱伝導率@77K
銅	400	0.2[μΩ/m]
銀銅	1300	0.8[μΩ/m]

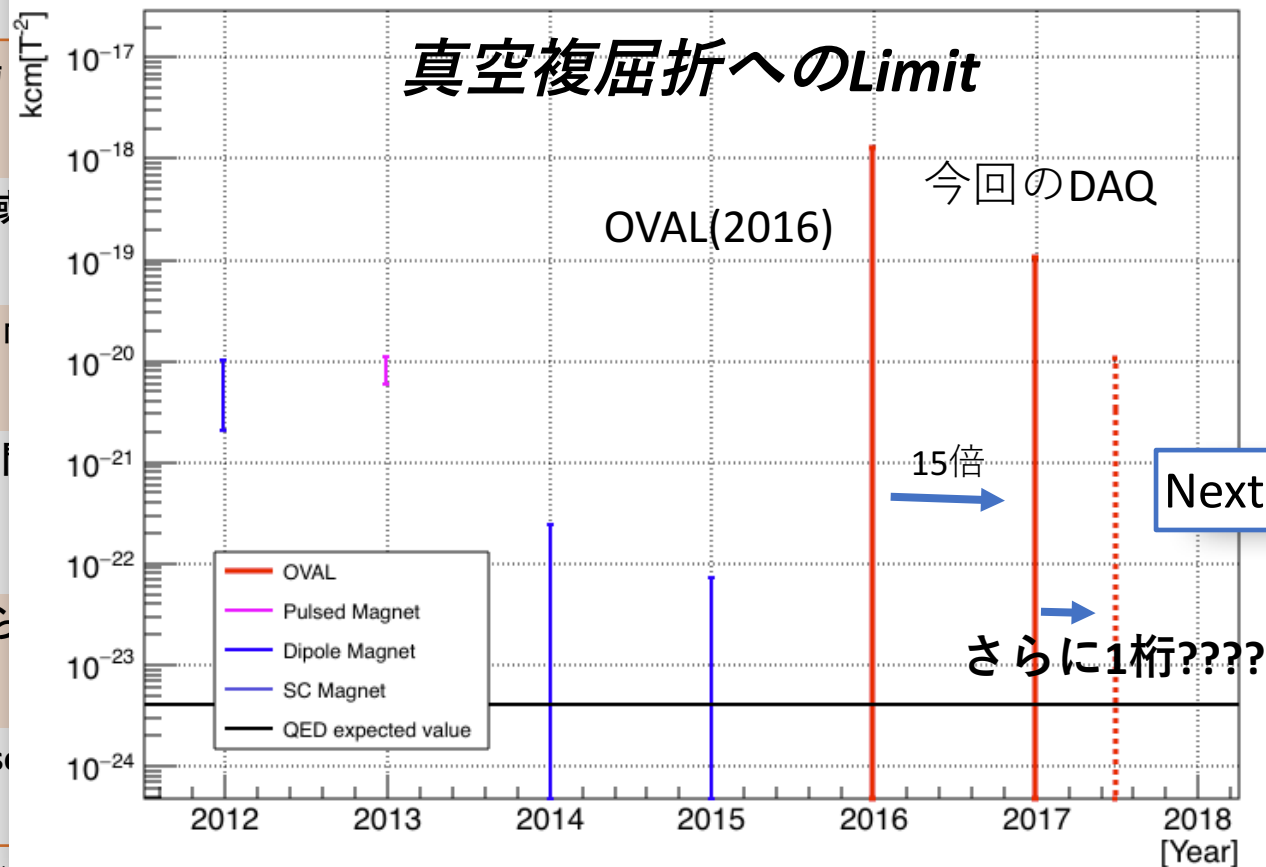


今後の感度向上プランまとめ

	今回	目標	感度への ゲイン	アップグレードの計画/状況
磁場	9[T]	15[T]	3	銀銅線を入手 熱伝導の良い絶縁材の開発中
磁場領域長	0.2[m]	0.8[m]	4	4mの定盤の入手を計画中 共振器長3.2m、磁石4つを目指す
パルス幅	1.2[ms]	4.8[ms]	2	電源ユニットの改造により実現可能
DAQ時間	15分	180[days]	140	年度内に1万発(1日)のDAQに挑戦 感度10倍?? 次なる課題を見つける
強度揺らぎ	$1 \times 10^{-4} [1/\sqrt{\text{Hz}}]$ @100Hz	$1 \times 10^{-5} [1/\sqrt{\text{Hz}}]$ @100Hz	3.5	振動源、ノイズ源の理解から
Finesse	350,000	650,000	2	反射率の良いミラーを正しく組み合 わせることで達成済み

→ 感度へのゲインは合計で 2×10^4
 QEDの予言する真空複屈折を観測できる
 次のステップは長時間のDAQ。統計量をためる

今後の感度向上プランまとめ



QEDの予言する真空複屈折を観測できる
次のステップは長時間のDAQ。統計量をためる

計画/状況

開発中

中
を目指す

より実現可能

に挑戦

解から

正しく組み合

まとめ

- 真空複屈折はQEDの予言する電磁場の非線形効果であり、Axionなどの未知粒子にも感度を持つが観測されていない。
- OVAL実験は、①高フィネスの光共振器と②高速繰り返しパルス磁石を用いて真空複屈折の世界初観測を目指している。
- 昨年行った第1回測定の実験から①より高いパワー②安定したオペレーションの成功を目標に第二回DAQを行った
- 感度は15倍向上して、 $7e-20[T^2]$ 。低周波の強度揺らぎが感度を制限しており、これの解決が今後の課題
- 磁石開発も並行して進め、半年DAQでの観測を目指す