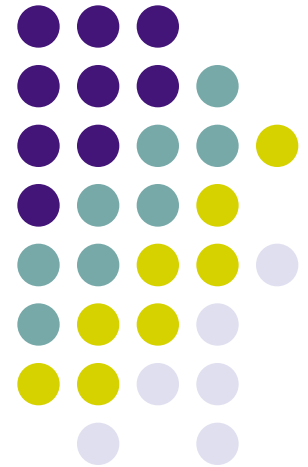


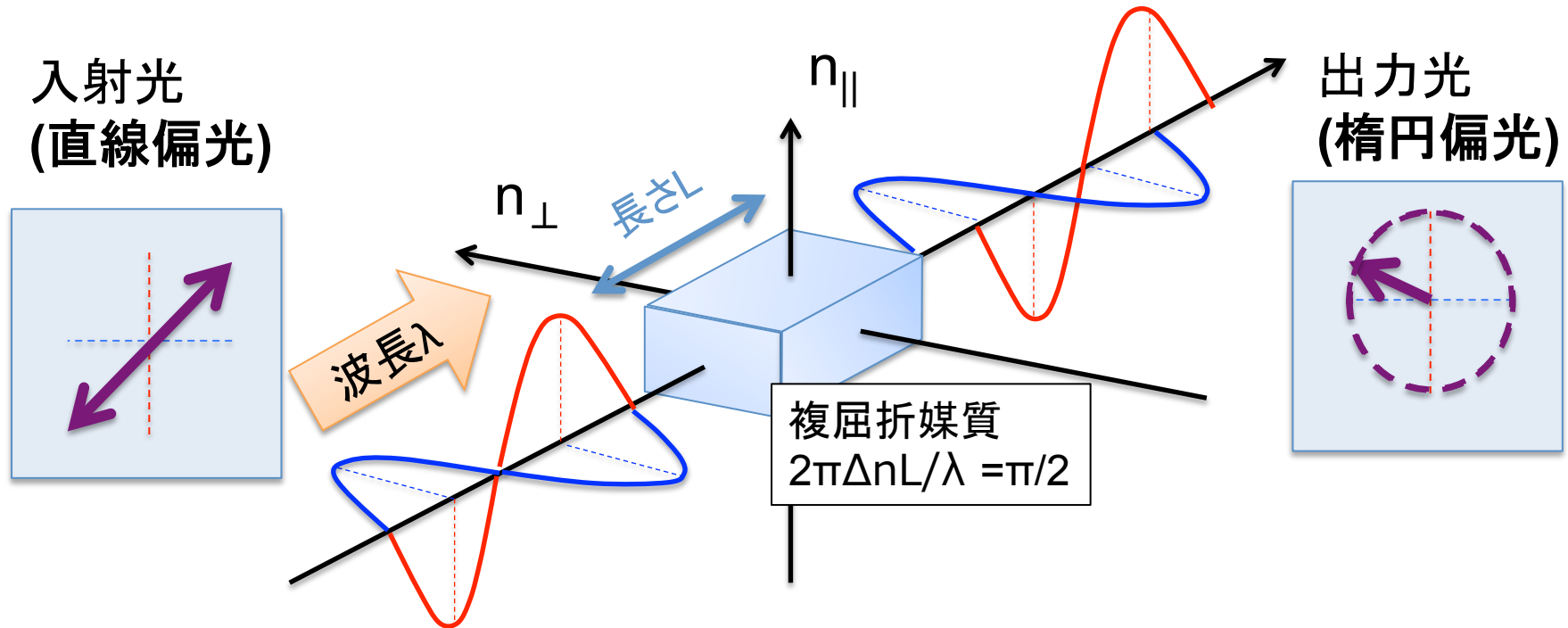
パルス磁石を用いた 真空複屈折の探索

樊星^A, 周健治^A, 稲田聡明^A, 山崎高幸^B,
難波俊雄^B, 浅井祥仁^A, 小林富雄^B,
吉岡孝高^A, 大間知潤子^C, 五神真^{A, C}

東大理^A, 東大素セ^B, 東大工^C



複屈折とは



- 空間に異方性があり屈折率が縦偏光と横偏光とで異なる現象のこと。縦横の屈折率の差 $\Delta n = n_{\parallel} - n_{\perp}$ で定量的に表す
- 波長 λ の光が距離 L 走ると、縦横偏光に位相差 $\delta = 2\pi\Delta nL/\lambda$ が生じ、直線偏光の光が**横偏光成分を獲得する**
 - ex. 位相差 $\pi/2$: 縦偏光 $\rightarrow$ 円偏光

真空の複屈折

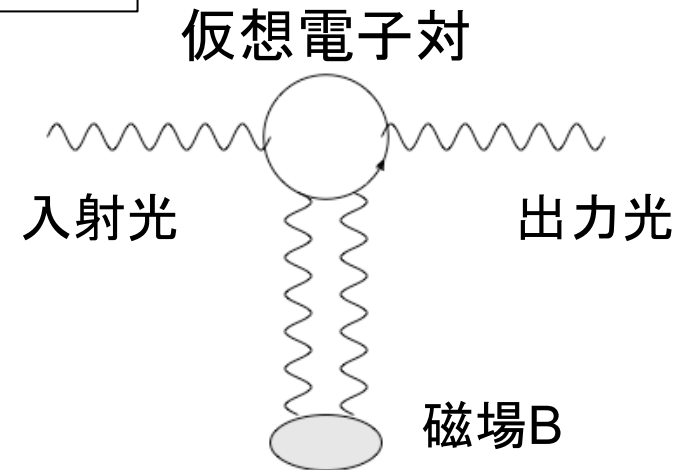


- 光は真空偏極により仮想電子対への生成、消滅を繰り返している。磁場を印加すると、仮想電子対を通じて**磁場に並行・垂直な偏光が異なる屈折率 Δn を感じる**

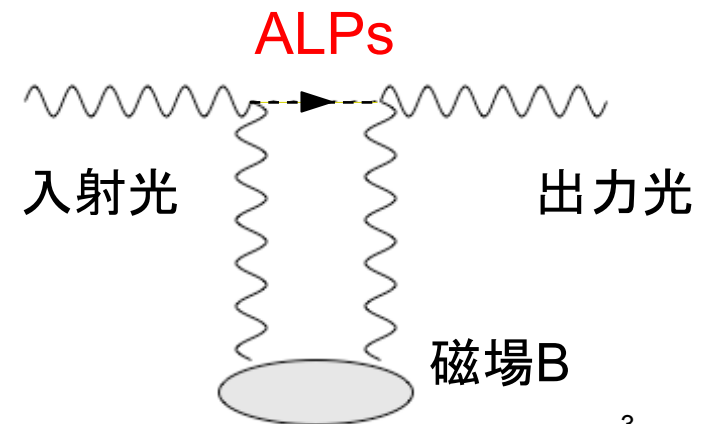
$$\begin{aligned}\Delta n &= n_{//} - n_{\perp} \\ &= k_{CM} B^2 \quad (\text{QED理論値}) \\ &\quad k_{CM} = 4.0 \times 10^{-24} [\text{T}^{-2}]\end{aligned}$$

- 磁場と光の、電磁場同士の非線形効果で**未だ観測されていない**
- Axionなど、光と結合する未知粒子があると複屈折が大きくなるため、**未知粒子探索**にもなる

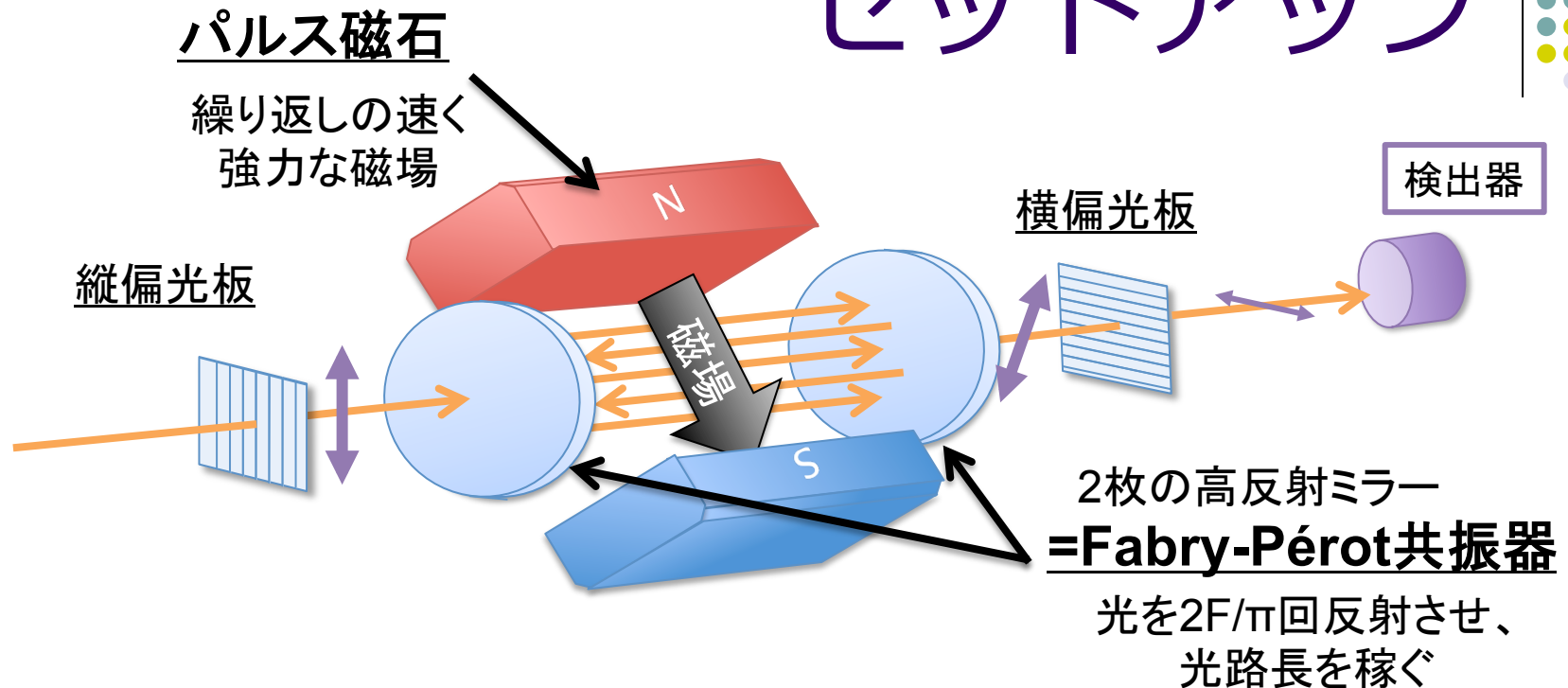
QED予測



ALPsの寄与



セットアップ



- Fabry-Pérot共振器中で磁場を印加することで光路長を稼ぐ。
パルス磁石と同期した横偏光成分が複屈折シグナルとなる
- 出力光の横偏光度 ψ ($=$ 横偏光/縦偏光) は下の式で書かれる

$$\psi = 2k_{CM} B^2 \frac{L}{\lambda} F$$

F : 共振器のフィネス
 $=$ 光の反射回数 $\times \pi/2$

- よって、実験感度は $B^2 L F \sqrt{t}$ (t は測定時間) に比例

我々の作戦



- 強い磁場、速い繰り返し、長い光路長がカギとなる

我々は

- ① 繰り返しの速い強パルス磁石 (21pDF-2, 3) で $B^2\sqrt{t}$ を稼ぎ
- ② 共振長の長い Fabry-Pérot 共振器 (このトーク) で LF を稼ぐ

想定している装置

① パルス磁石

$B=30\text{T}$, $L=0.8\text{m}$, 繰り返し 6Hz

② Fabry-Pérot 共振器

$\lambda=1064\text{nm}$, $F=450,000$ 、共振器長 3.2m

感度 $= B^2 L F \sqrt{t}$ で
パルス磁石を用いた
先行実験の2000倍

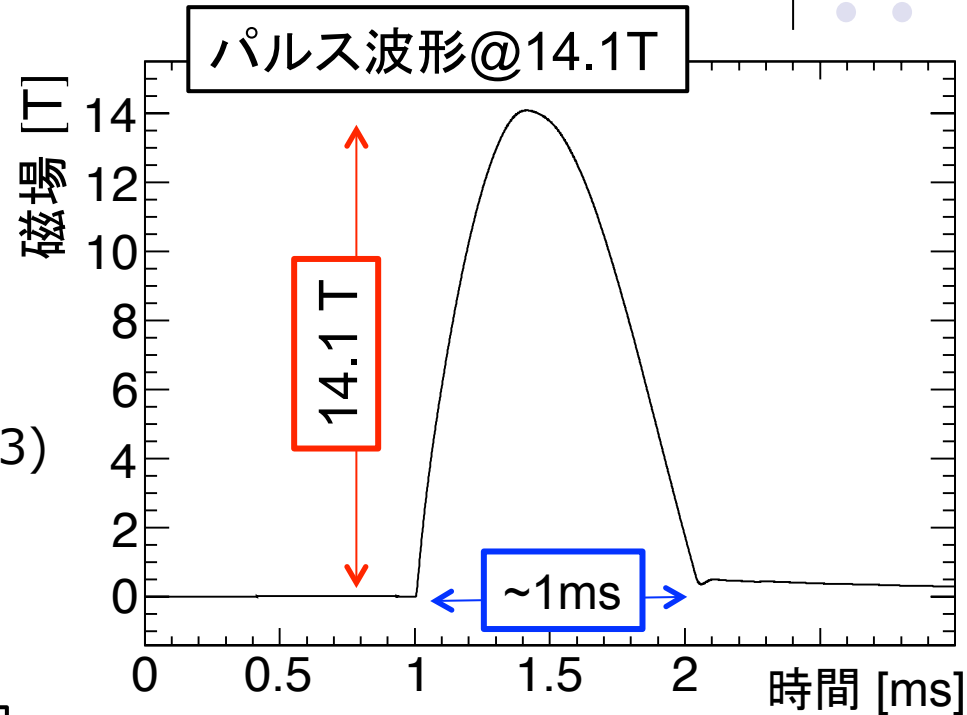


2hのRunでQED理論値に到達！
世界初の真空複屈折の観測

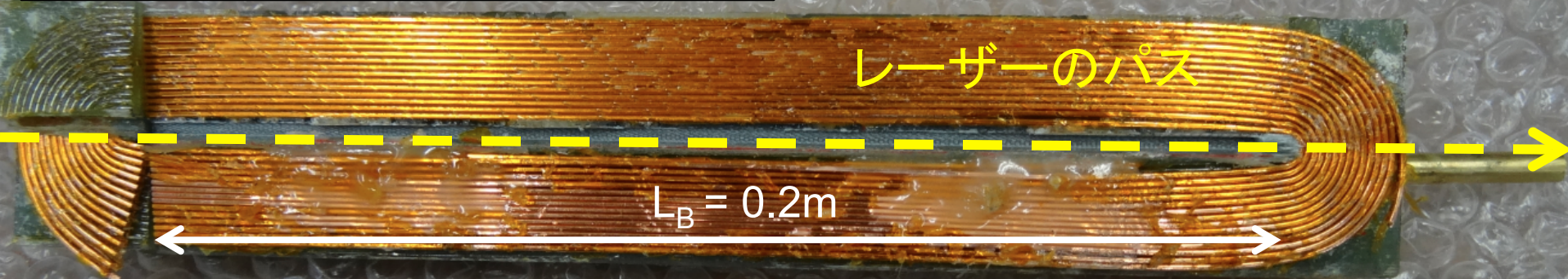
パルス磁石



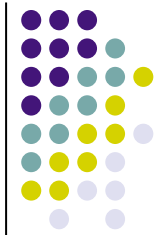
- **30T, 0.2m(×4個), 6Hz**を目標に東大物性研、東北大金研と共同開発。**14T, 0.2mを達成**
- 同時に繰り返しの速い電源も開発中。**3T, 0.4m, 1.3Hzで1万発以上**打っている(21pDF-2, 3)
- また、複数個並べてレーザー光が通ることも確認済



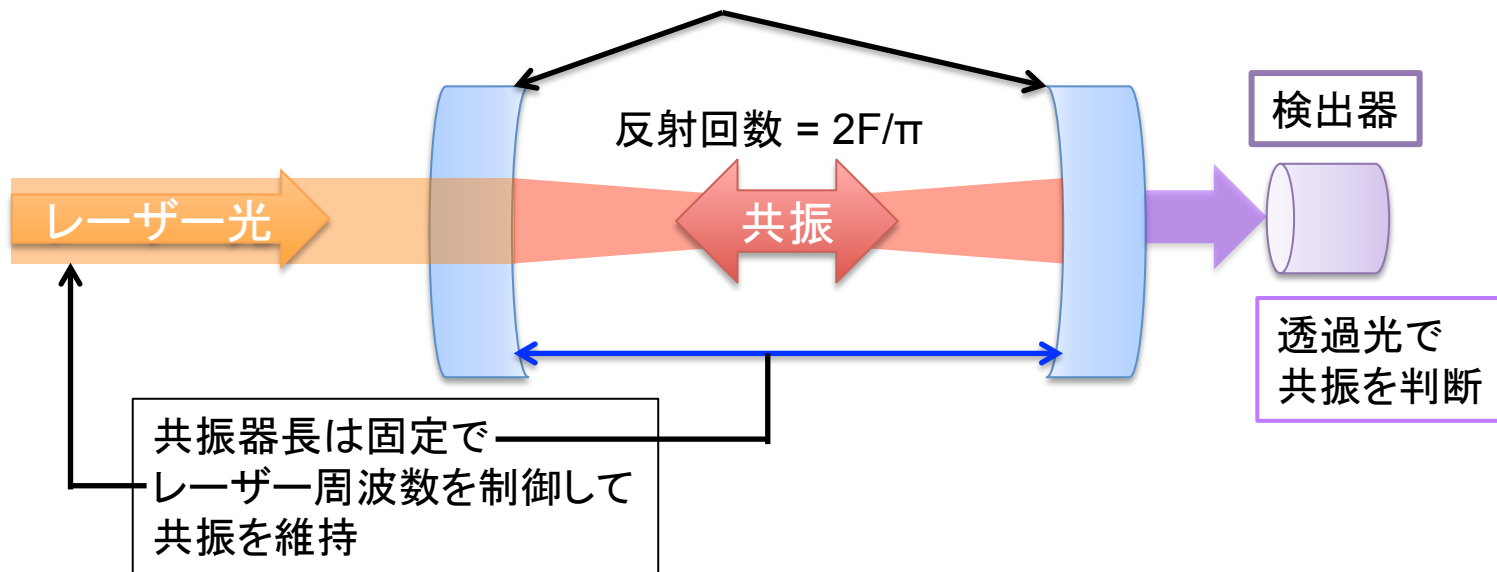
断面1mm×3mmの銅線を20ターン巻く



Fabry-Pérot共振器の製作



反射率 $R \sim 99.999\%$ $\leftrightarrow$ フィネス $F \sim 100,000$



- 複屈折探索では、**高フィネスの共振維持**が大事になる
- 縦/横 偏光板&磁石との融合 等は後からアップグレードするとして、まずは
 - $R \sim 99.999\%$ ミラーで **$F > 100,000$ 、 $L = 1\text{m}$ の共振器**を設計
 - 本番でも使用可能な、**レーザー周波数にフィードバックする共振維持システム**の構築を行った

Fabry-Pérot共振器

(1) 全体図



レーザー入射部分

$\lambda=1064\text{nm}$ レーザー
東大工 三尾研より

反射光 PD

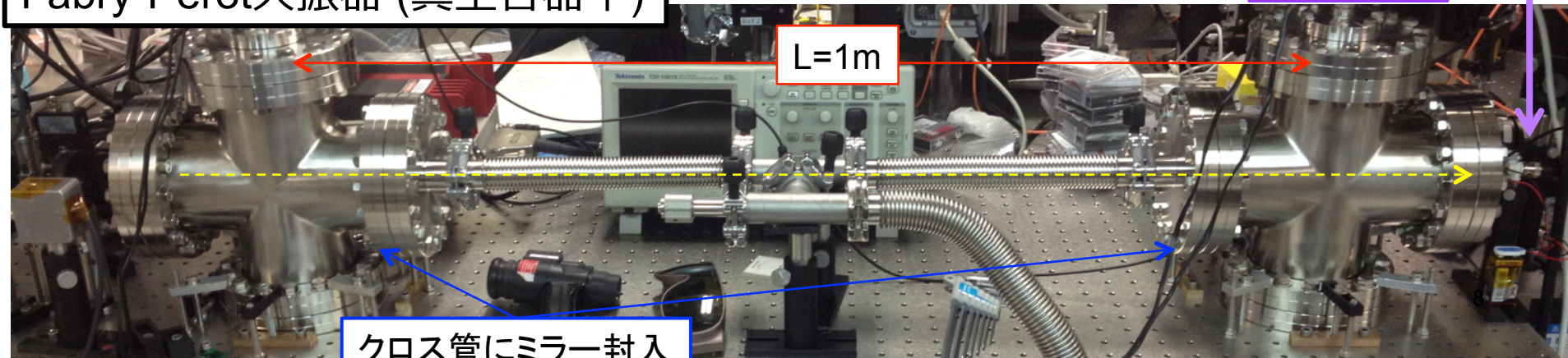
- 2枚のミラーは外乱を避けるため、真空容器中に封入
 - レーザーに電圧を印加して周波数を変えられる
- 印加電圧を調整し共振コントロール

Fabry-Pérot共振器 (真空容器中)

透過光 PD

$L=1\text{m}$

クロス管にミラー封入



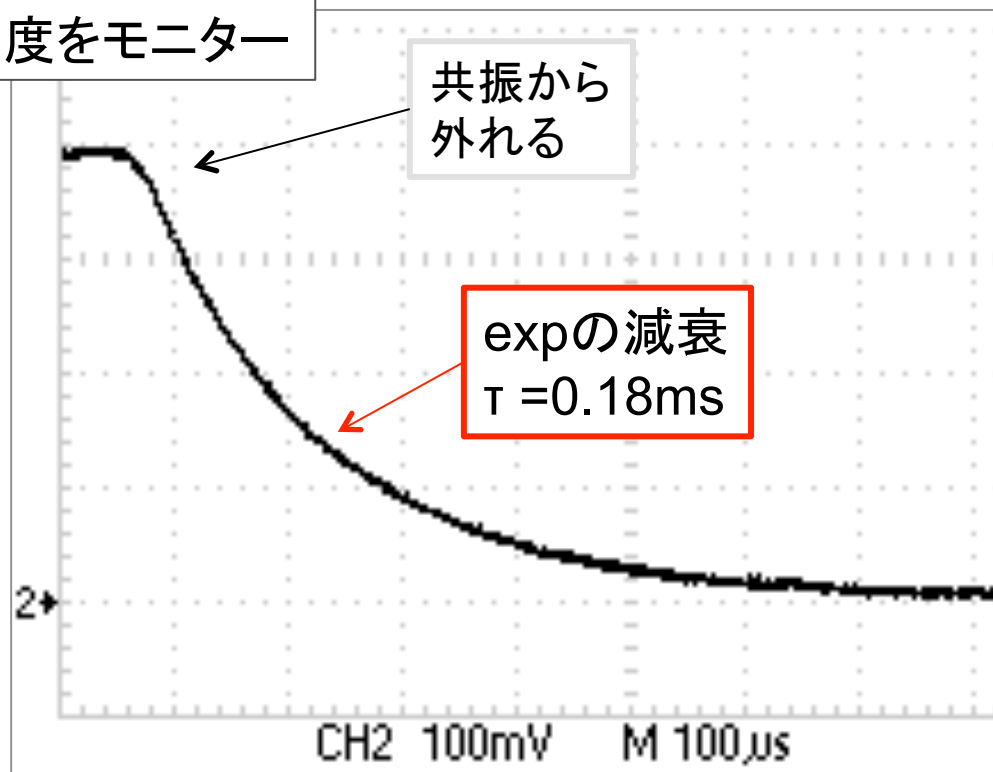
Fabry-Pérot共振器

(2) フィネスの測定



- 共振から外れるとき、透過光は $P(t) \propto \exp(-t/\tau)$ で減衰していく、
 $\tau = FL/\pi c$ その時定数からフィネスを測定した

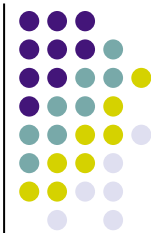
透過光強度をモニター



- $\tau = 0.18\text{ms}$ より、 **$F = 180,000$ を達成**
 - 理論値は $F = 300,000$ 。アラインメント改善中

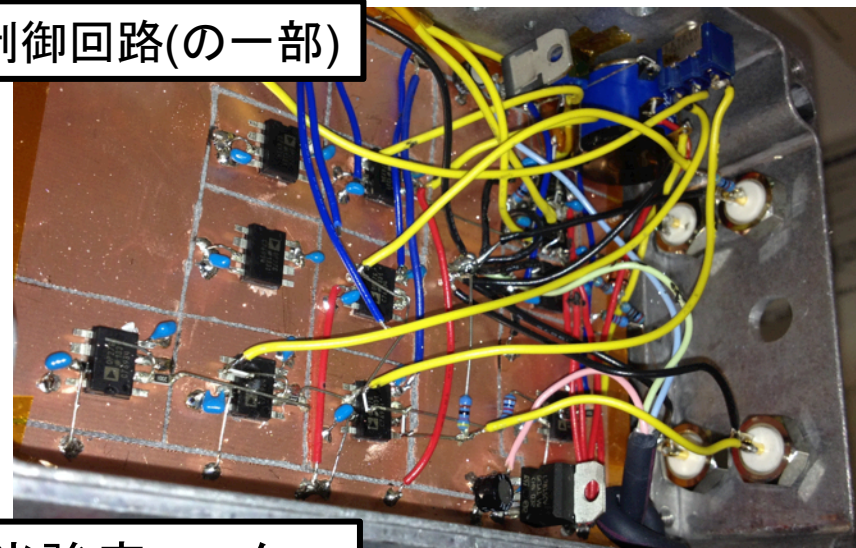
Fabry-Pérot共振器

(3) 共振の維持



- 高フィネスのFabry-Pérot共振器は非常に共振が鋭く、制御が必須。共振からのずれを抽出しレーザー周波数にフィードバックする回路を自作した

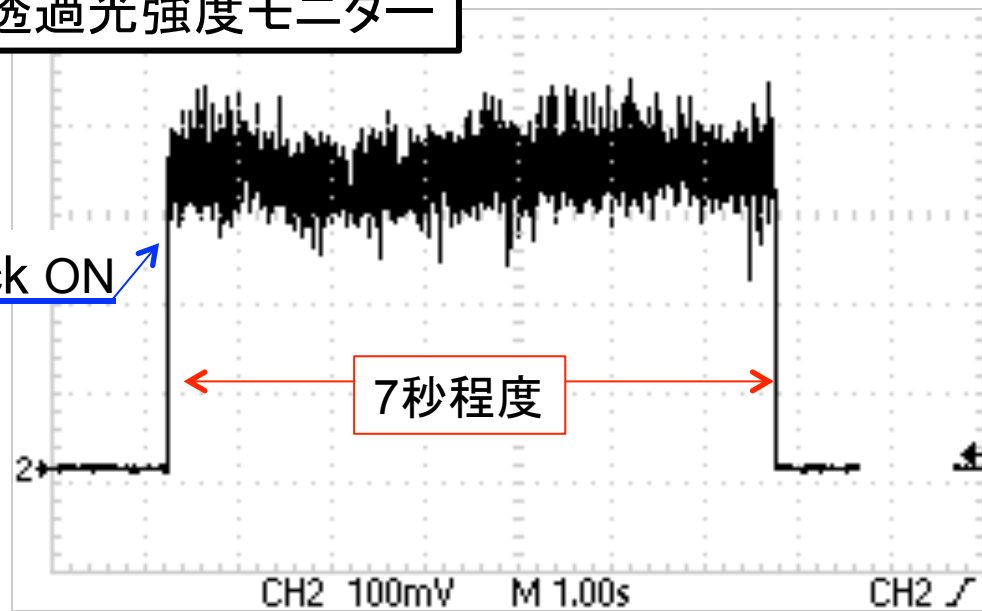
制御回路(の一部)



透過光強度モニター

- 現在共振は10秒弱。アライメント不足でリミット
- 磁石と組み合わせた際も、同様の制御システムで制御できる。

Lock ON

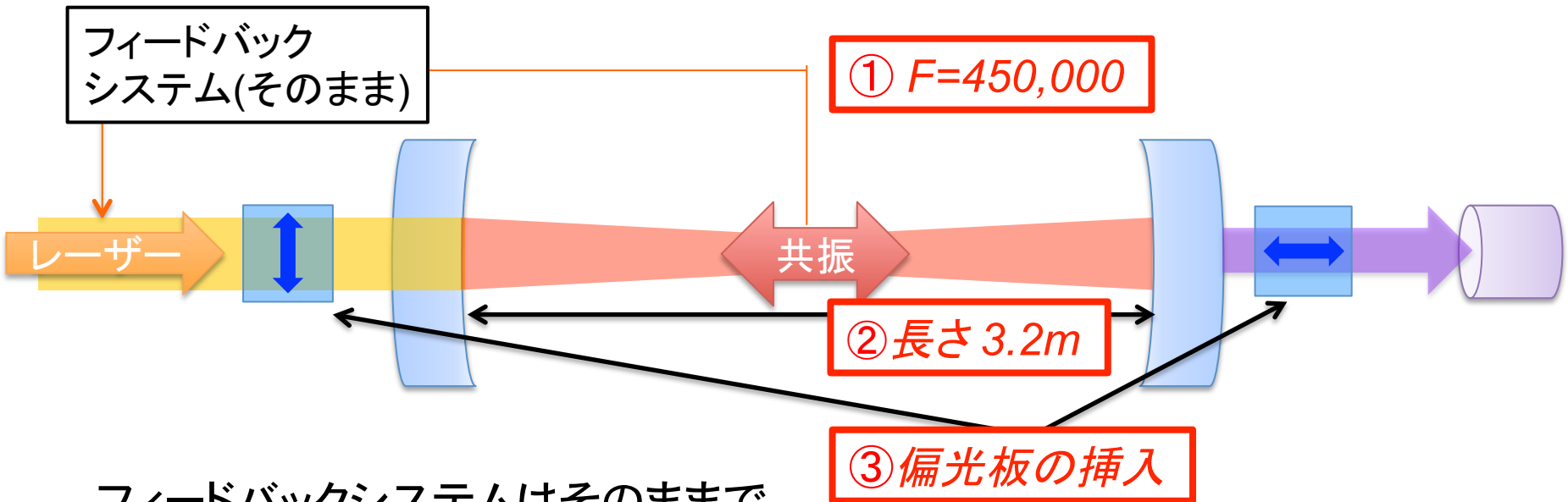


Fabry-Pérot共振器

(4) これから



Fabry-Pérot共振器: これから



フィードバックシステムはそのまま

- ① $F=450,000$ まで上げる
- ② 磁石と組み合わせるため、共振器長を3.2mに
- ③ 偏光を揃えるため、縦/横 偏光板を挿入する

➡ その後、磁石と組み合わせる



まとめ

- 真空の複屈折は電磁場の非線形効果で、アクシオンを代表とする未知粒子にも感度を持つが未観測である。
- 我々は、①30T, 0.2m×4, 6Hzのパルス磁石と②L=3.2m, F=450,000のFabry-Pérot共振器を用いることで、世界最高感度での探索を行う。
- すでに、
 - ①磁石は14T, 0.2m、電源も3T, 0.4m, 1.3Hzを達成
 - ②Fabry-Pérot共振器もL=1m, F=180,000を達成現在、磁石&光学のアップグレードを行っている

2015年内に磁石と共振器を
組み合わせた実験を行う