

# J-PARCにおけるミューオンg-2/EDM実験 の為の高精度アライメントモニターの開発

2018/01/22 修士論文審査会

東大理 齊藤研究室

修士2年 安田浩昌

# 発表の流れ

## ■序論

- ミューオン双極子モーメントの物理
- 先行実験：BNL-E821 実験
- J-PARC E34 実験

## ■検出器アライメントモニターの開発（本研究）

## ■議論

- ミューオンEDM測定の系統誤差への影響
- 測定精度向上に向けた改善策

## ■結論

# 発表の流れ

## ■序論

- ミューオン双極子モーメントの物理
- 先行実験：BNL-E821 実験
- J-PARC E34 実験

## ■検出器アライメントモニターの開発（本研究）

## ■議論

- ミューオンEDM測定の系統誤差への影響
- 測定精度向上に向けた改善策

## ■結論

磁気

電気

$$\mathcal{H} = -\vec{\mu} \cdot \vec{B} - \vec{d} \cdot \vec{E}$$

異常磁気モーメントの  
理論値(SM)と実験値の乖離



電気双極子モーメント  
の発見



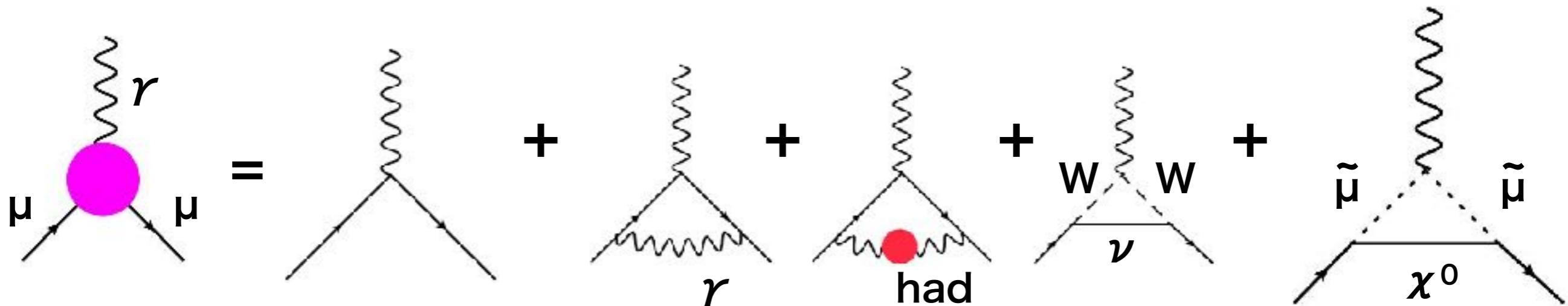
新物理(BSM)の存在

# ミューオンの異常磁気モーメント : $a_\mu$ 5

## ■ ミューオンの異常磁気モーメント(g-2)

■ g因子の2からのズレ  $g = 2(1 + a_\mu)$

$$a_\mu = 0 + a_{\mu \text{QED}} + a_{\mu \text{had}} + a_{\mu \text{weak}} + a_{\mu \text{BSM}}$$



BSM粒子による異常磁気モーメント

新実験の測定精度とBSM粒子のスケール

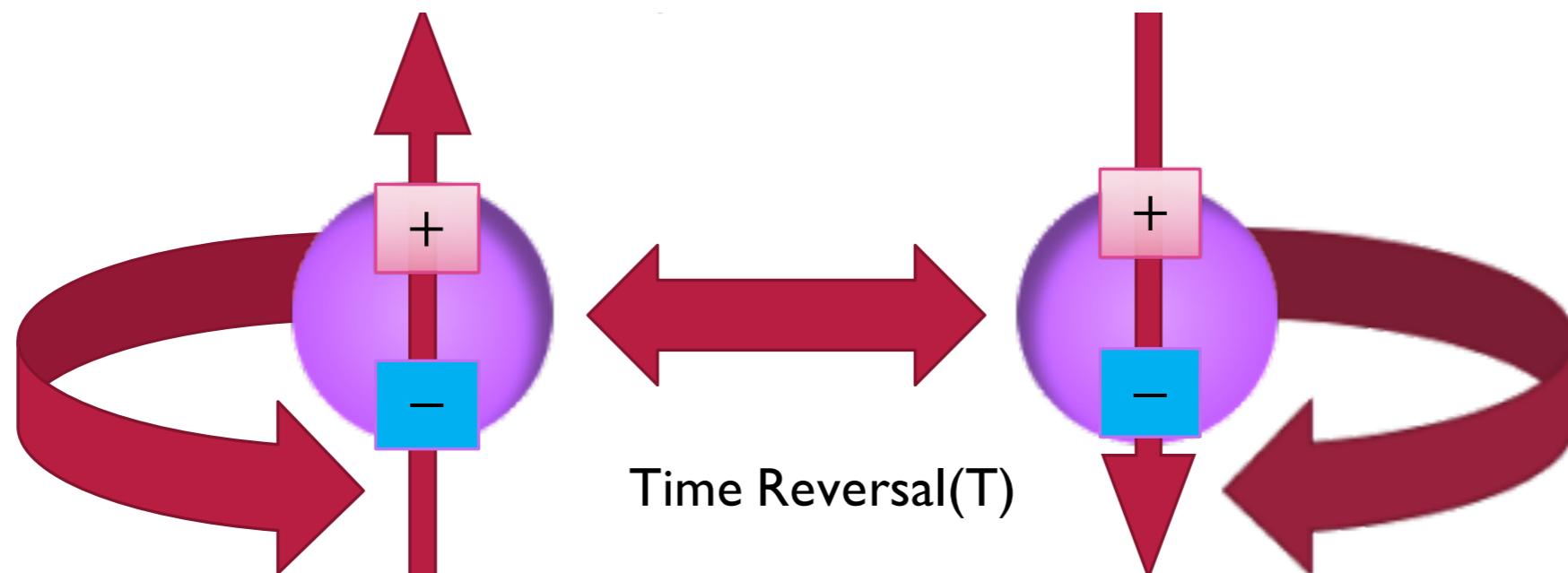
$$a_\mu^{\text{BSM}} \sim \frac{m_\mu^2}{\Lambda_{\text{BSM}}^2}$$

$$\delta a_\mu \sim 100 \times 10^{-11}$$
$$\Lambda_{\text{BSM}} \sim 100 \text{ GeV}$$

■ 理論値(標準模型)と実験値の乖離  $\rightarrow$  新粒子の存在を示唆

## ■ 電気双極子モーメント(EDM)

■ T対称性を破る物理量  $\rightarrow$  CP対称性を破る物理量 ( $\because$ CPT定理)



標準模型によるミューオンEDM

$$d_\mu^{\text{SM}} \sim 10^{-38} [\text{e} \cdot \text{cm}]$$

新実験の目標感度

$$\delta d_\mu^{\text{exp}} \sim 10^{-21} [\text{e} \cdot \text{cm}]$$

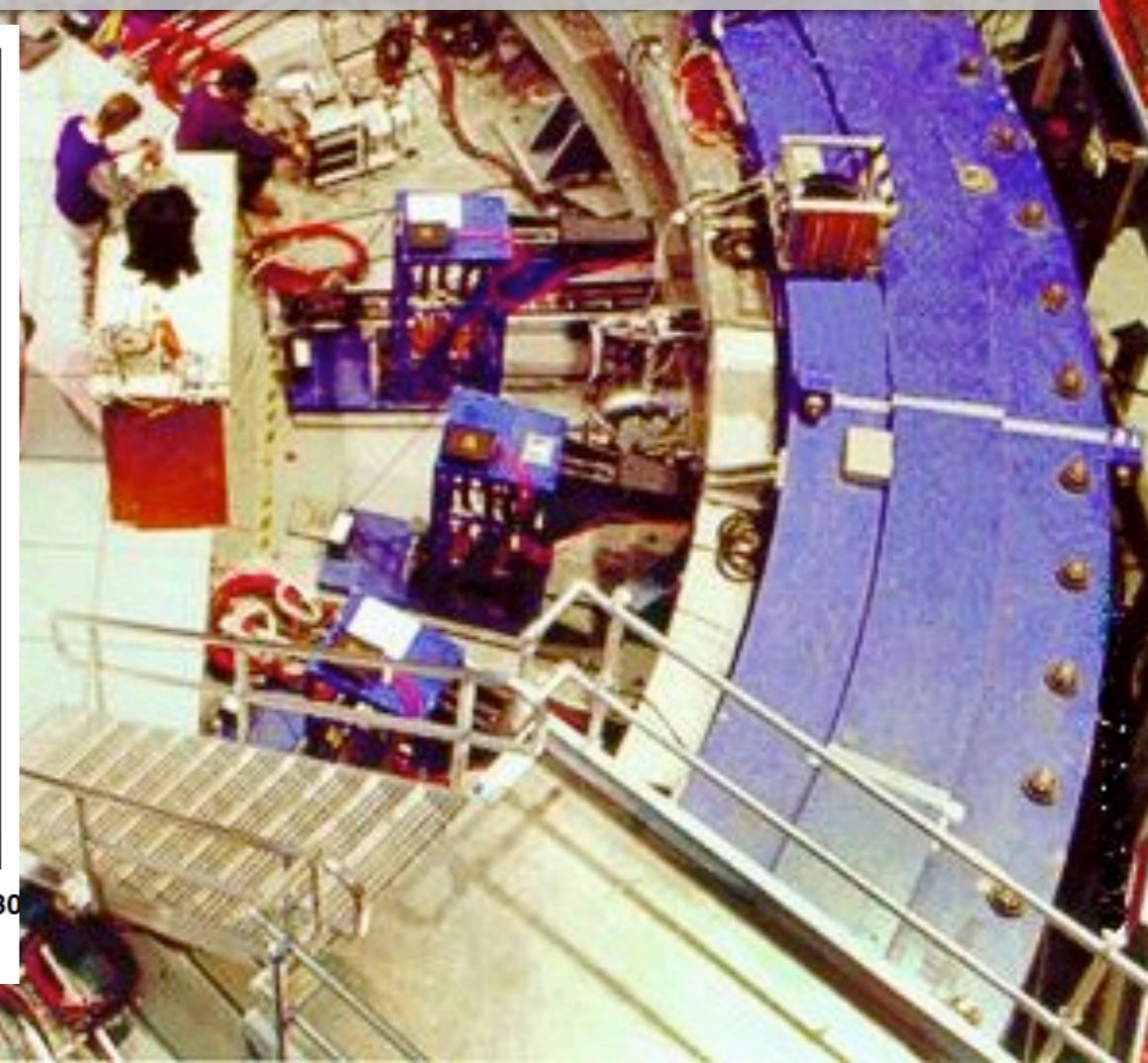
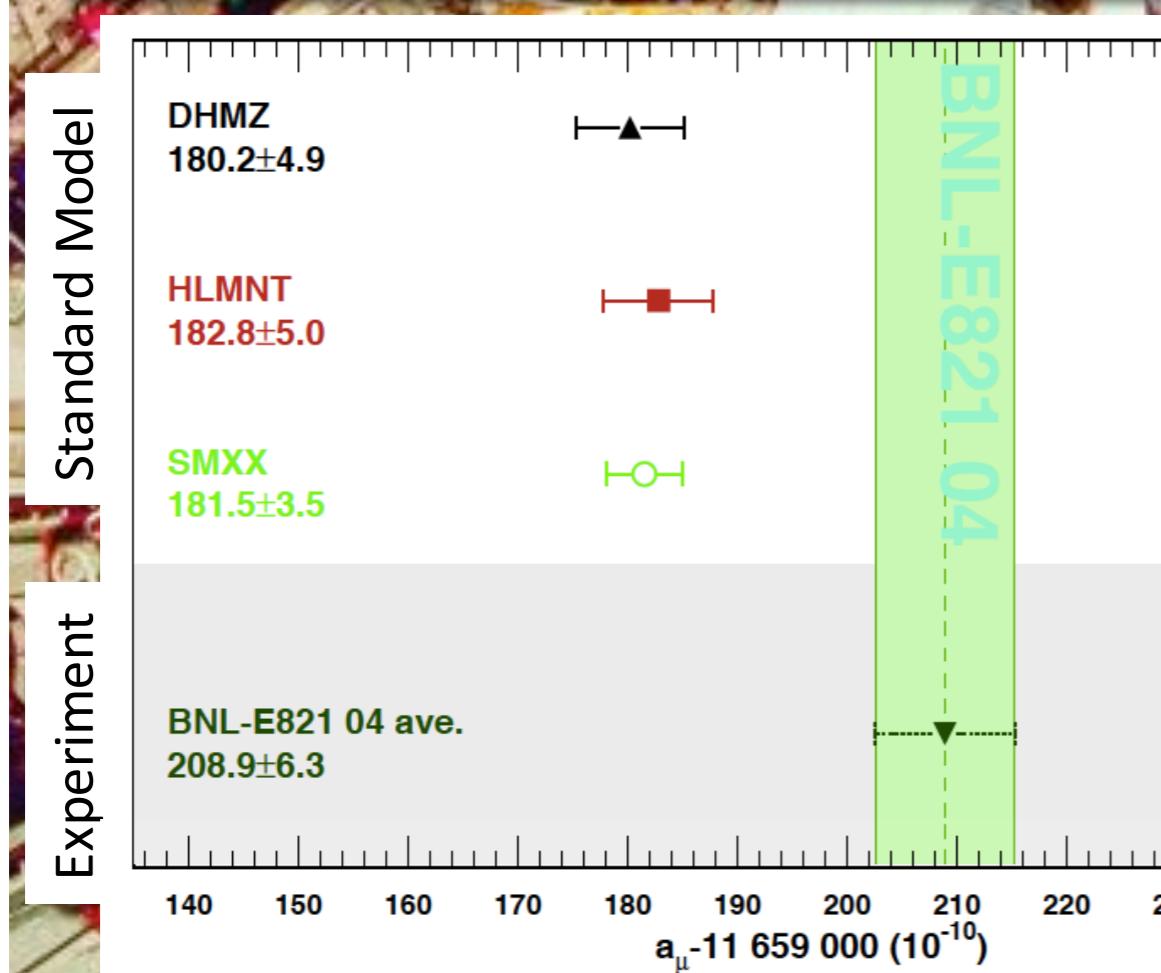
■ EDMの発見  $\rightarrow$  CPを破るBSM現象の発見

■ 物質優勢宇宙問題解決の手がかりに

# 先行研究：BNL-E821 実験

7

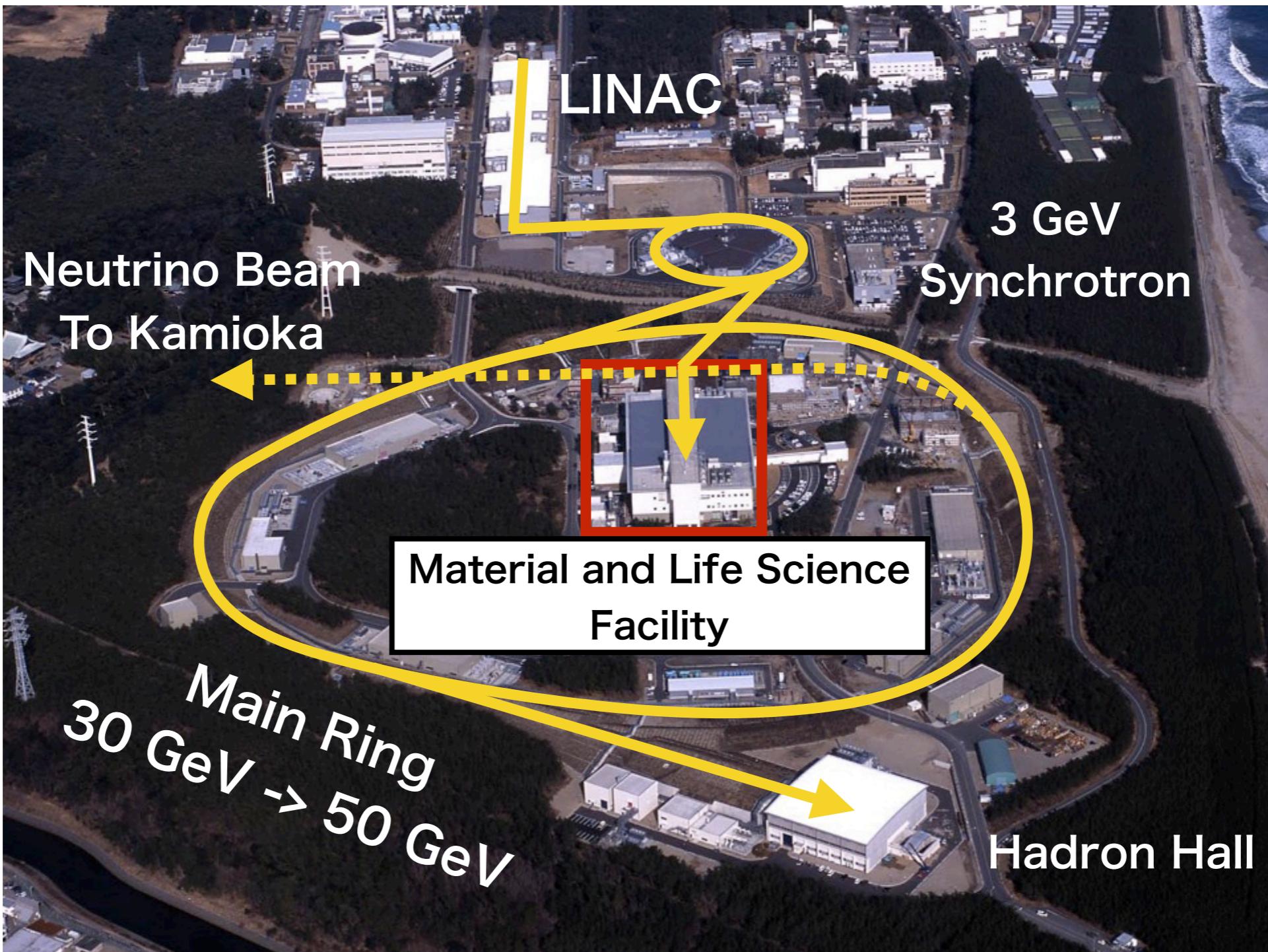
- ブルックヘブン国立研究所 (BNL) では1999年～2001年にかけて 0.46 ppmでミューオンの異常磁気モーメントの測定が行われた。
- 最終結果はミューオンの異常磁気モーメントの測定値が標準模型による理論値と3.4σのズレがあることがわかった。[ PRD 73, 072003(2006) ]
- ミューオンの電気双極子モーメントについても探索されており、 $1.8 \times 10^{-19} \text{ e} \cdot \text{cm}$ (95% C.L.)の上限値を与えていた。[ PRD 80, 052008(2009) ]



# 実験サイト：J-PARC

■大強度陽子加速器施設 (茨城県東海村)

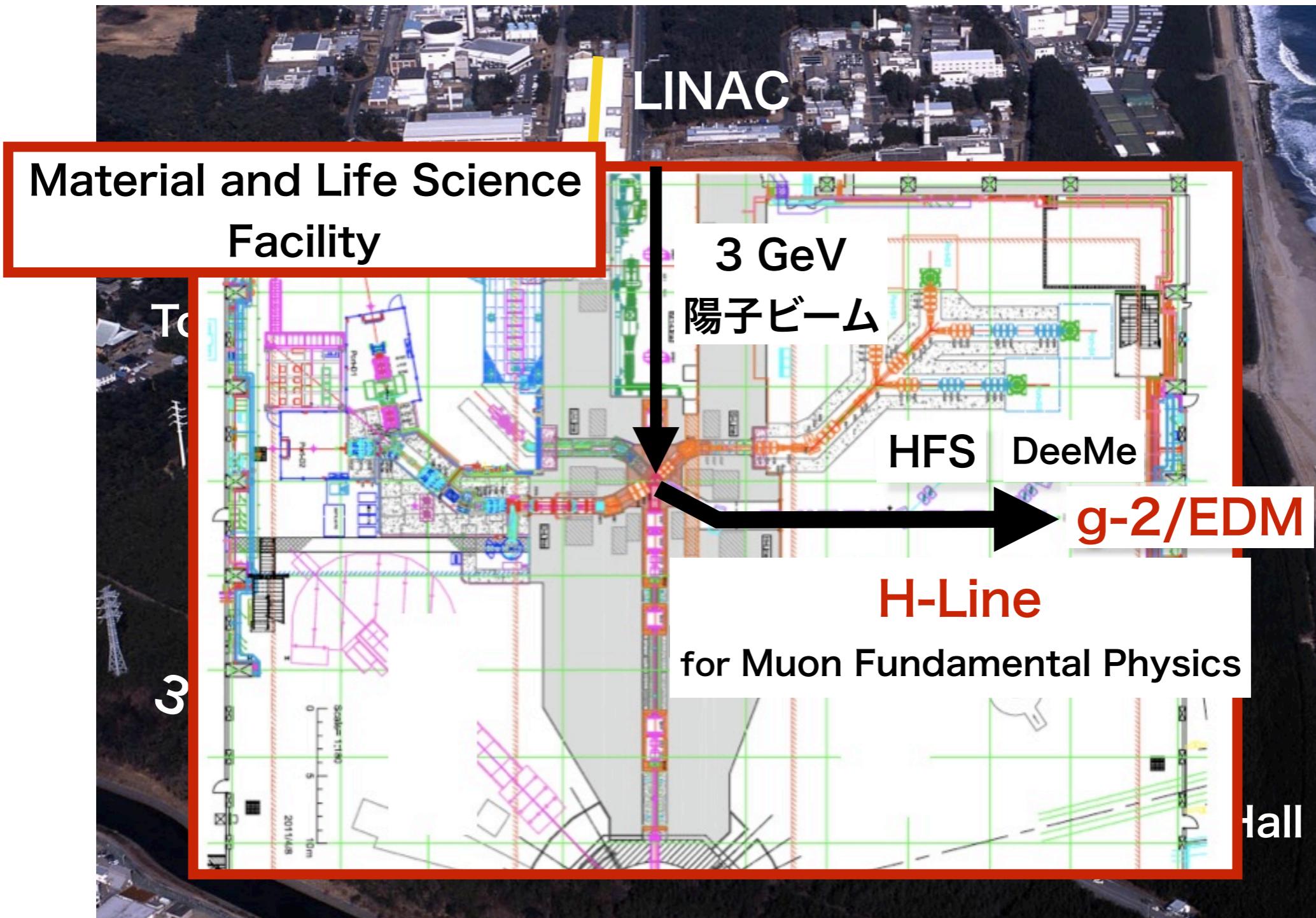
■MLF(物質生命科学実験施設) ミューオンビームライン H-Line



# 実験サイト：J-PARC

■大強度陽子加速器施設 (茨城県東海村)

■MLF(物質生命科学実験施設) ミューオンビームライン H-Line



# J-PARC E34実験

■ 極冷ミューオンビームを用いて先行実験の主要な系統誤差を排除

## GOAL @ J-PARC E34

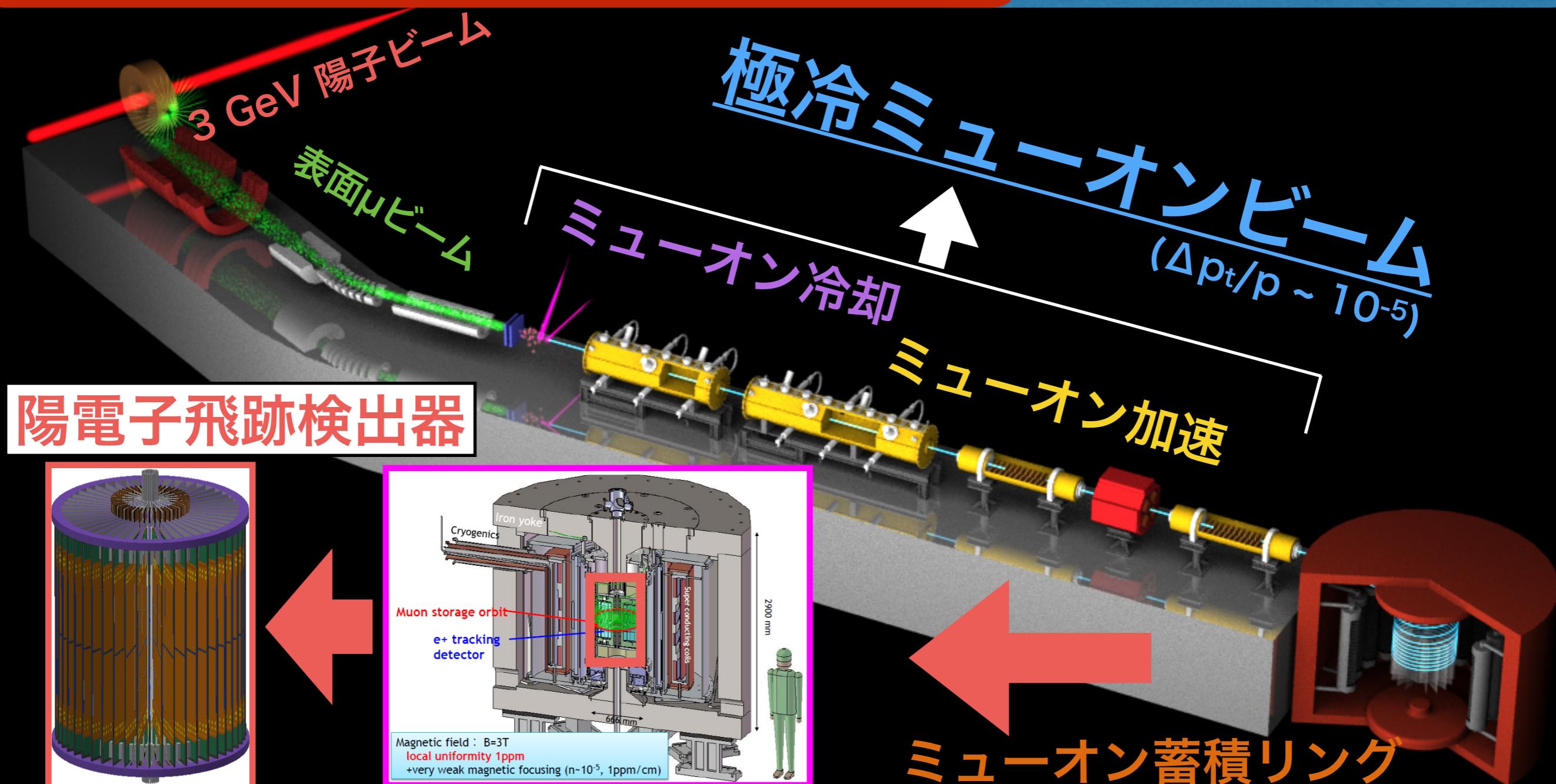
異常磁気モーメント( $g-2$ ) : 精度 0.1 ppm

電気双極子モーメント(EDM) : 感度  $10^{-21} e \cdot cm$

## Physics

→ SMの検証( $3.4\sigma$ @BNL)

→ CPの破れの探索

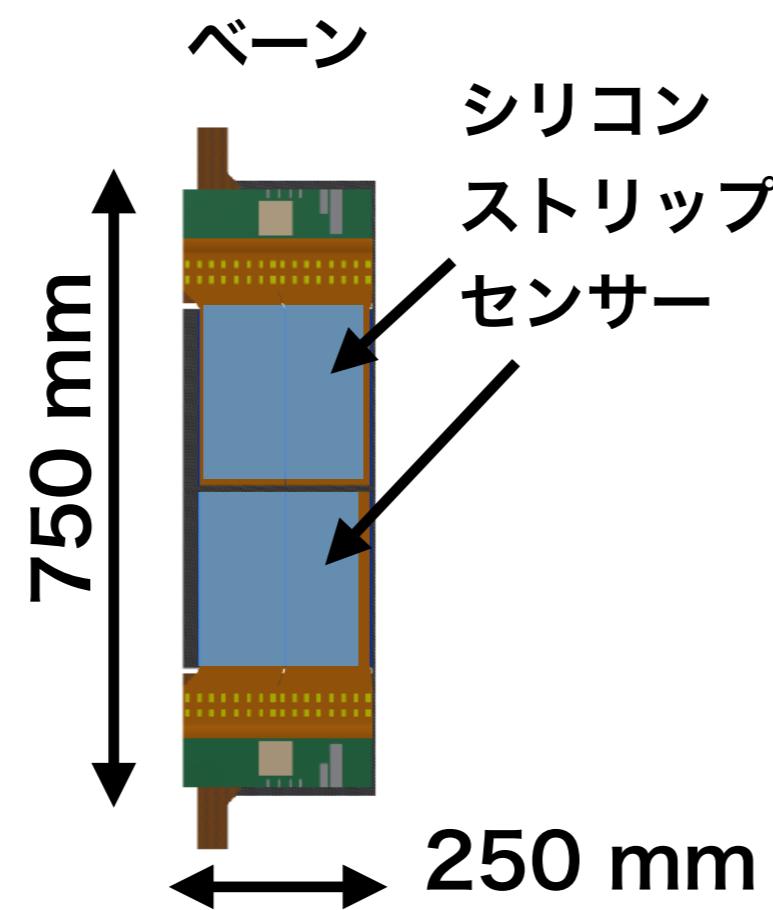
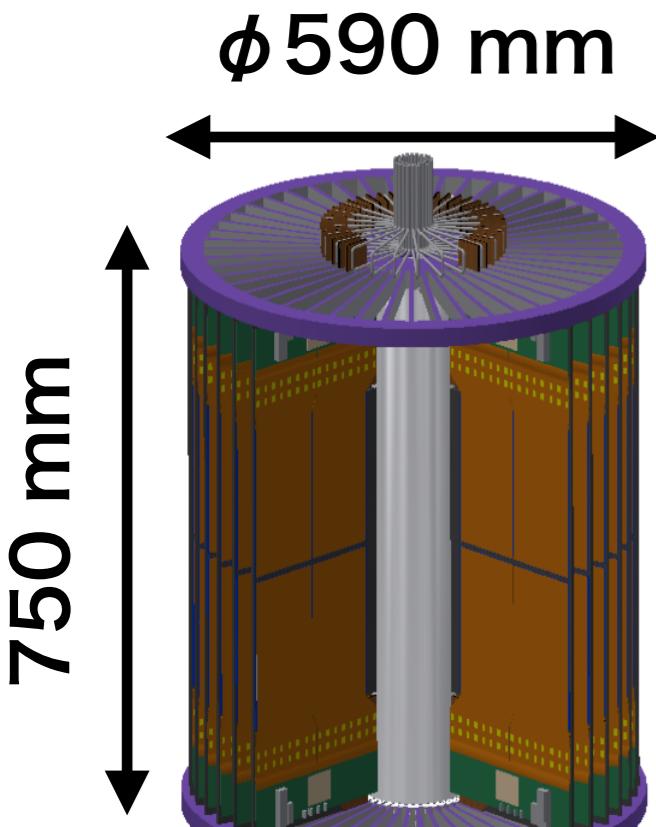


# 陽電子飛跡検出器

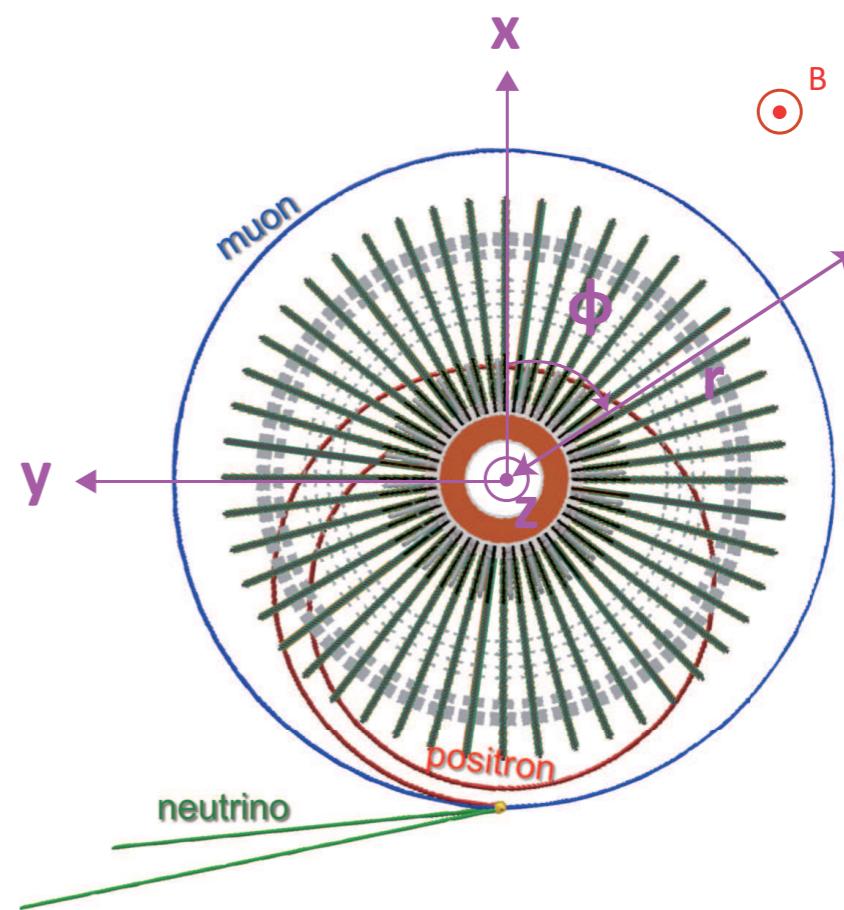
11

- 大強度パルスビーム( $\sim 1.4 \text{ MHz}$ )に対応した高速応答性, 高計数率での安定性
- シリコンストリップセンサーを使用
- 48枚の板(ベーン)を放射状に配列した飛跡検出器
- サイクロトロン運動しているミューオンの崩壊によって放出される陽電子の飛跡からミューオン спин方向を測定

検出器の全体像



トラッキングのイメージ



## ■スピンの異常歳差運動

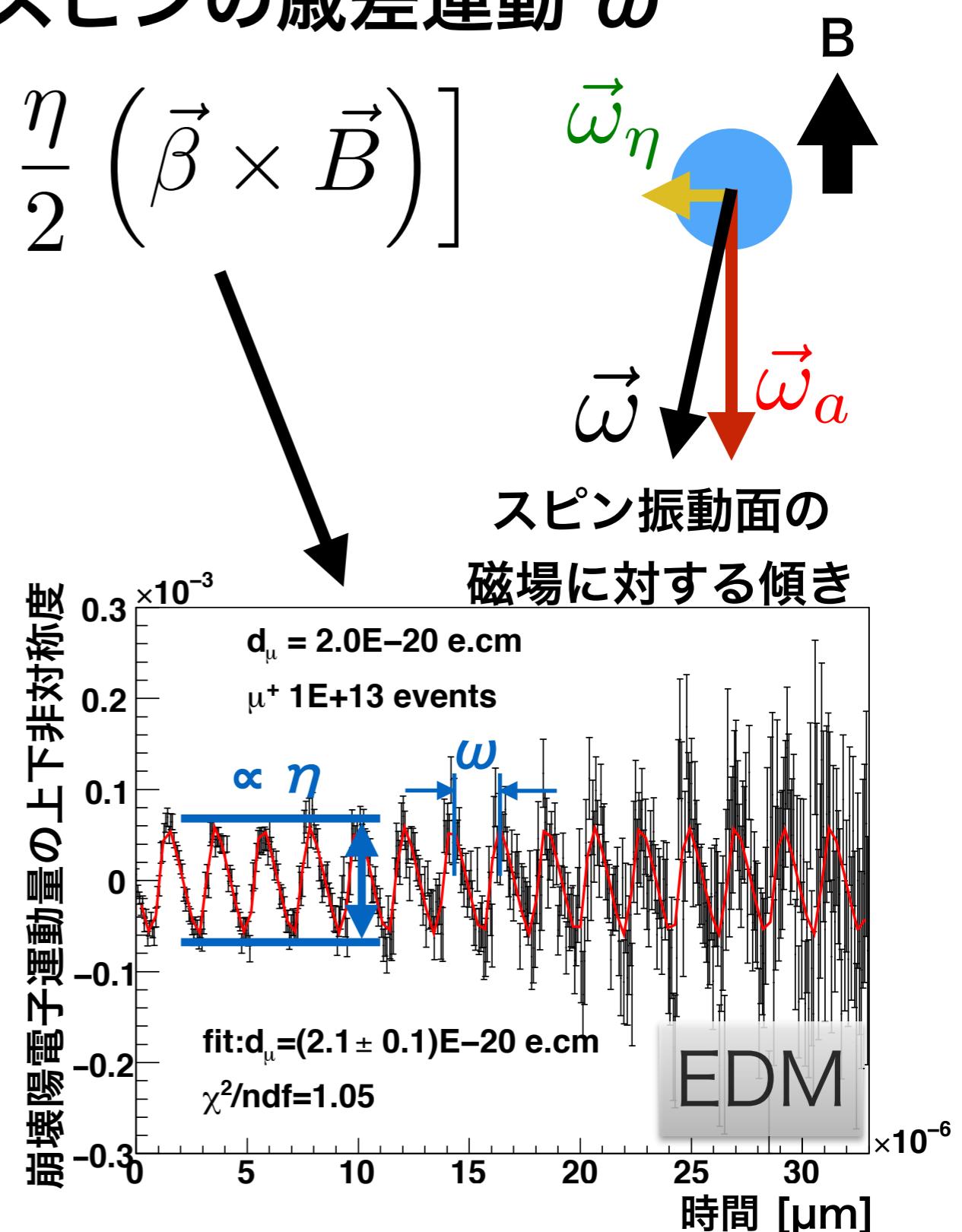
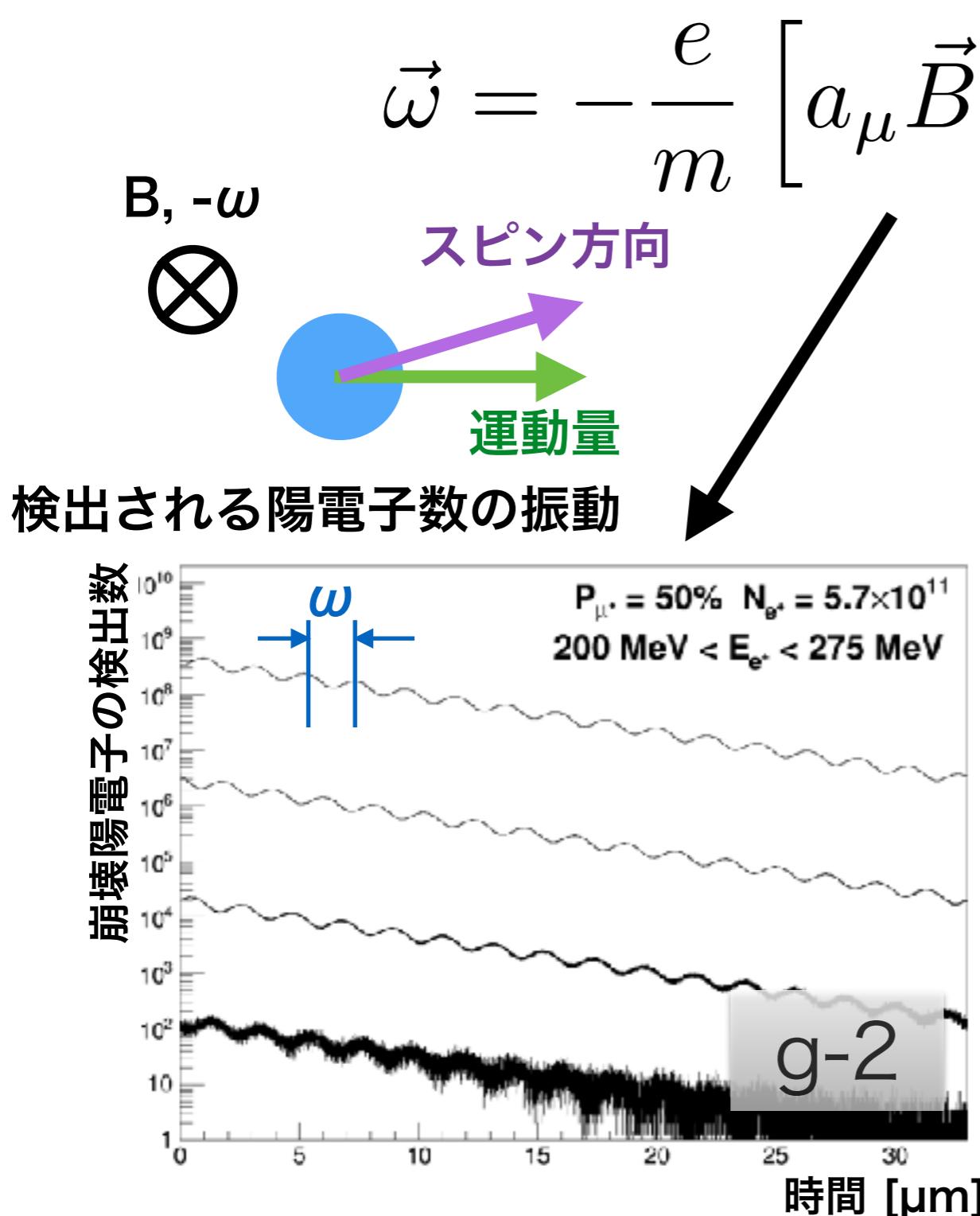
■ $g-2 \neq 0 \rightarrow$  運動量方向に対するスピン方向の振動  $\omega_a$

粒子の運動                  粒子のスピンの運動

$$\omega_a = \left( \frac{eB}{m_\mu \gamma} \right) - \left( \frac{eB}{m_\mu \gamma} + \frac{e}{m_\mu} a_\mu B \right) = -\frac{e}{m_\mu} a_\mu B$$

■  $\omega_a$  を精密測定することがミューオンg-2の精密測定になる.

## J-PARC E34実験におけるスピンの歳差運動 $\omega$



# EDM測定の系統誤差要因

## J-PARC E34 実験の特徴

### ビーム広がりが小さい

-> 弱い収束磁場

-> 電磁場による系統誤差への影響が少ない

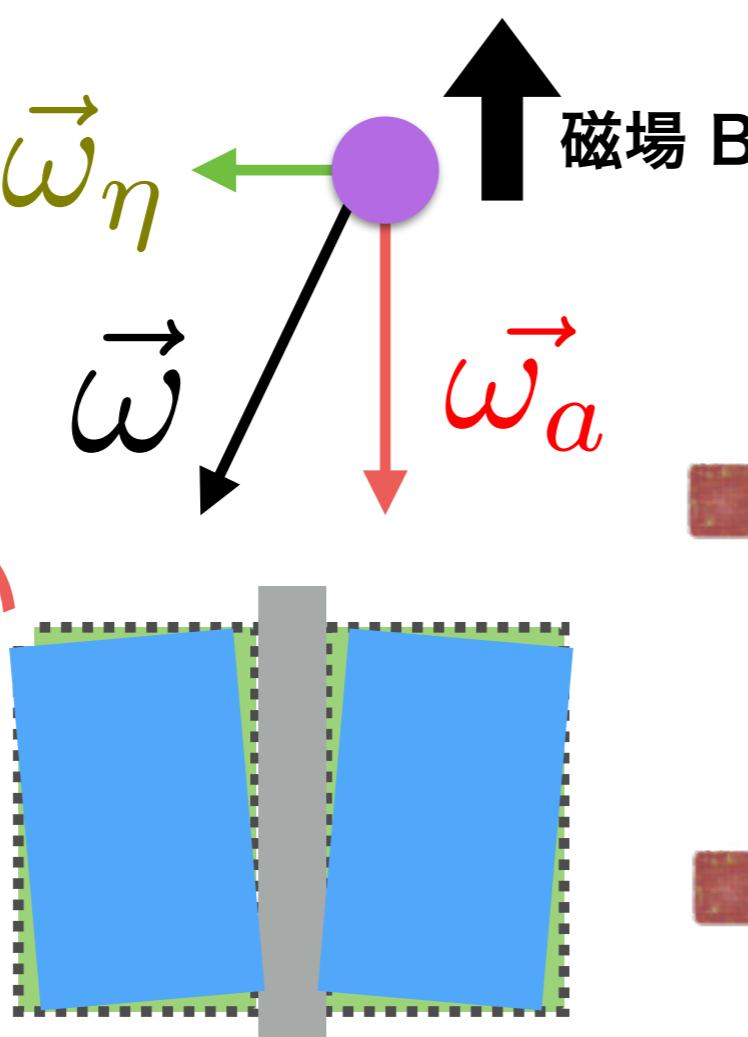
### 本研究の動機

EDMによるスピン回転平面の傾き

区別できない



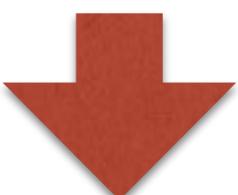
検出器の回転



## EDM測定の系統誤差の見積もり

誤差要因	$d_\mu (\times 10^{-21}) [e \cdot cm]$
Axial E-field	$10^{-3}$
Radial B-field	$10^{-5}$
Detector misalignment	(本研究の目的)
統計誤差	1.4

### EDM測定の系統誤差を理解する

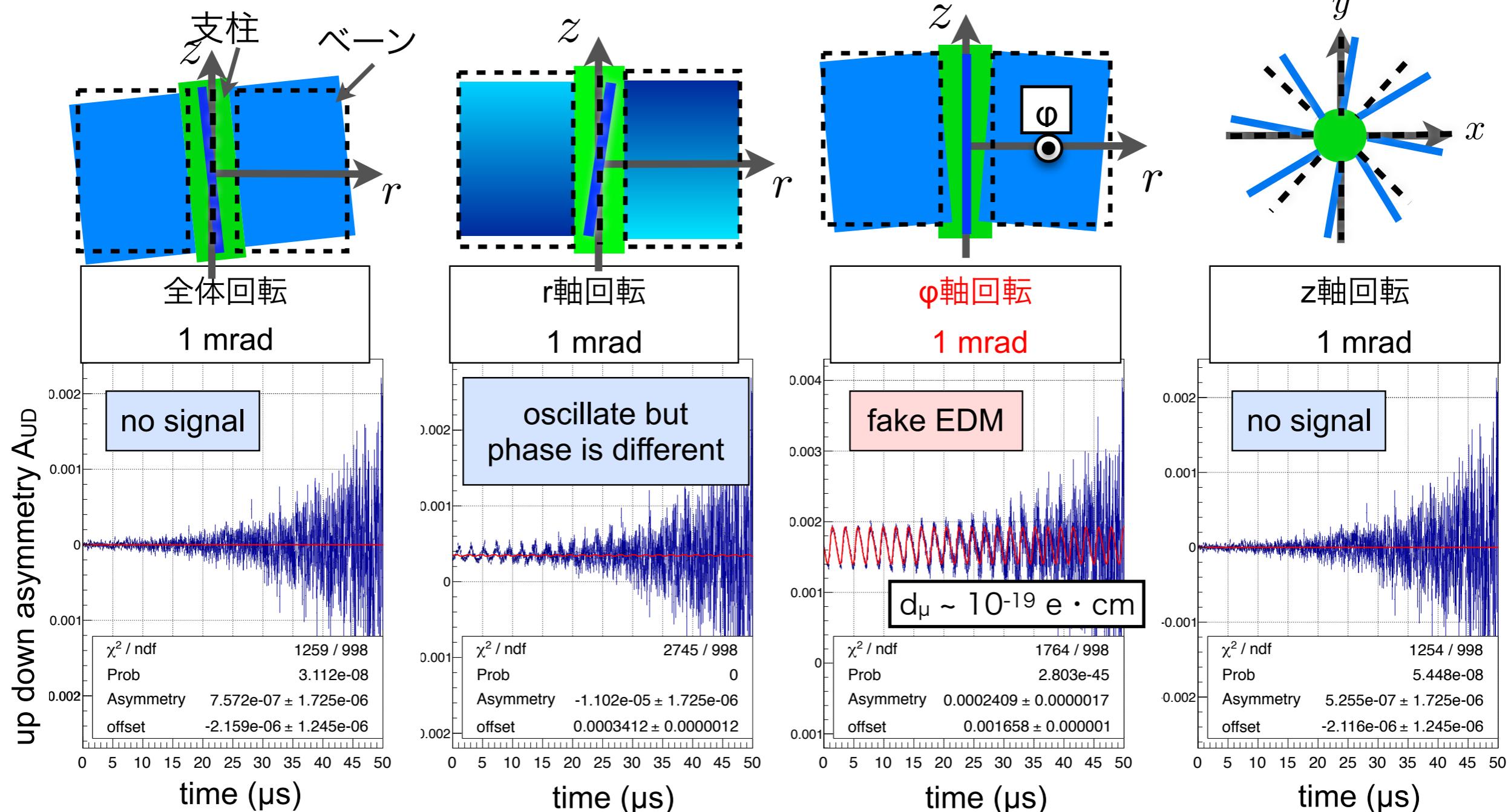


### 検出器の傾きを知る必要がある

## ■ 検出器の傾きによるEDM信号のシミュレーション

## ■ 目標EDM感度 $10^{-21} [\text{e} \cdot \text{cm}]$ に必要な傾きは $\phi$ 軸 $10 \mu\text{rad}$ 以内

Ref. 西村昇一郎, 東京大学大学院理学系研究科修士論文 (2014)



## ■ 検出器位置の要求精度の見積もり

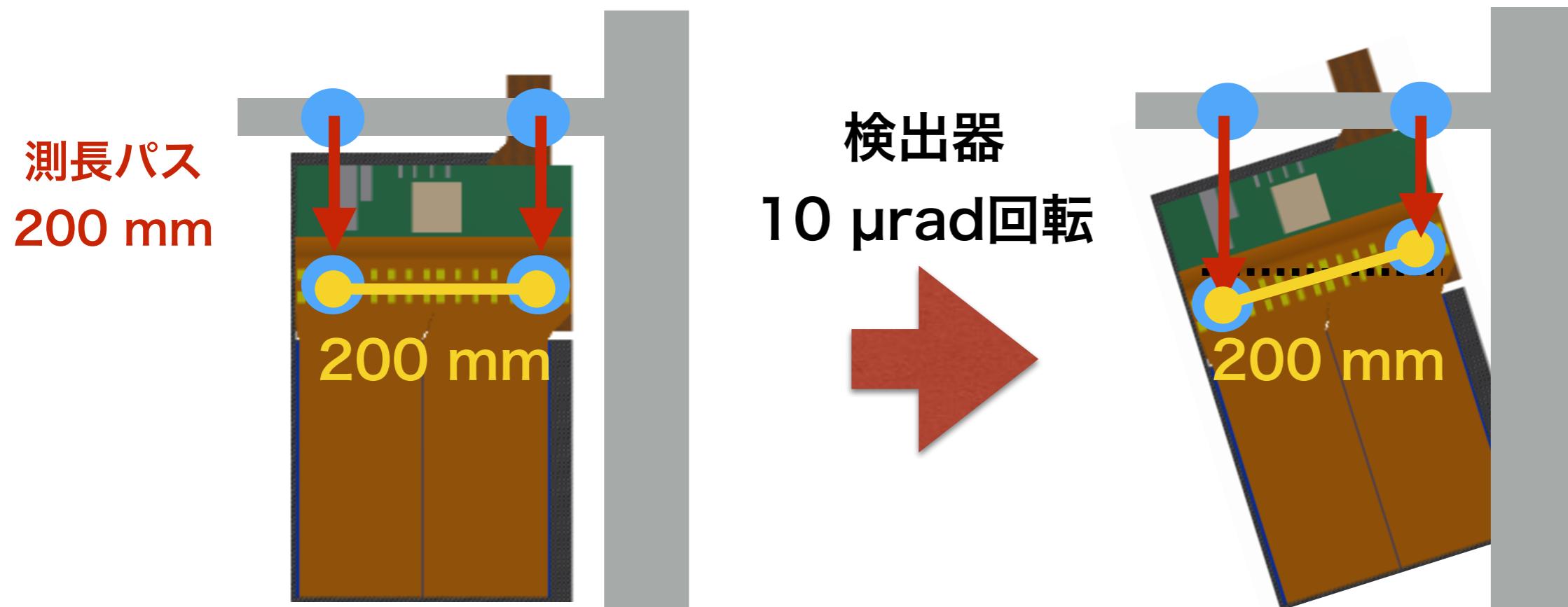
■ 検出器の傾き要求  $10 \mu\text{rad}$

■  $200 \text{ mm}$ の検出器幅に対する検出器位置のズレは $1 \mu\text{m}$

$$10 \mu\text{rad} \times 200 \text{ mm}/2 = 1 \mu\text{m}$$

factor 2はベーン中心で傾いていると仮定

## ■ $200 \text{ mm}$ 測長パスに対して $1 \mu\text{m}$ の測定精度が必要



# 発表の流れ

## ■序論

- ミューオン双極子モーメントの物理
- 先行実験：BNL-E821 実験
- J-PARC E34 実験

## ■検出器アライメントモニターの開発（本研究）

## ■議論

- ミューオンEDM測定の系統誤差への影響
- 測定精度向上に向けた改善策

## ■結論

## 本研究の動機

検出器のミスアライメントを精密にモニターすることで  
ミューオン電気双極子モーメントの系統誤差を抑制する。



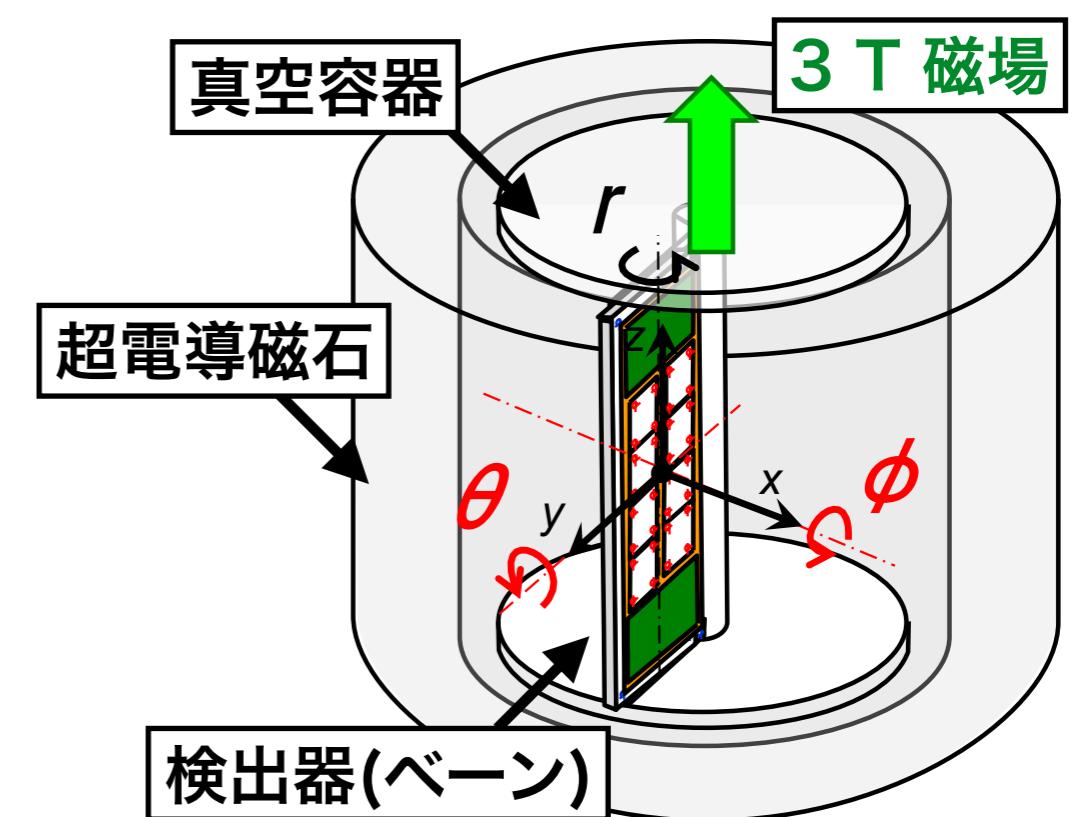
## 検出器アライメントモニターの開発

### ■ 要求仕様

- 長さ測定の精度が  $1 \mu\text{m}$  以内

### ■ 設置環境

- 高磁場(3 T)
- 長期間の利用(~1年)
- 狹い設置スペース
- 低真空( ~ 0.1 気圧)



# アライメントモニターの概要

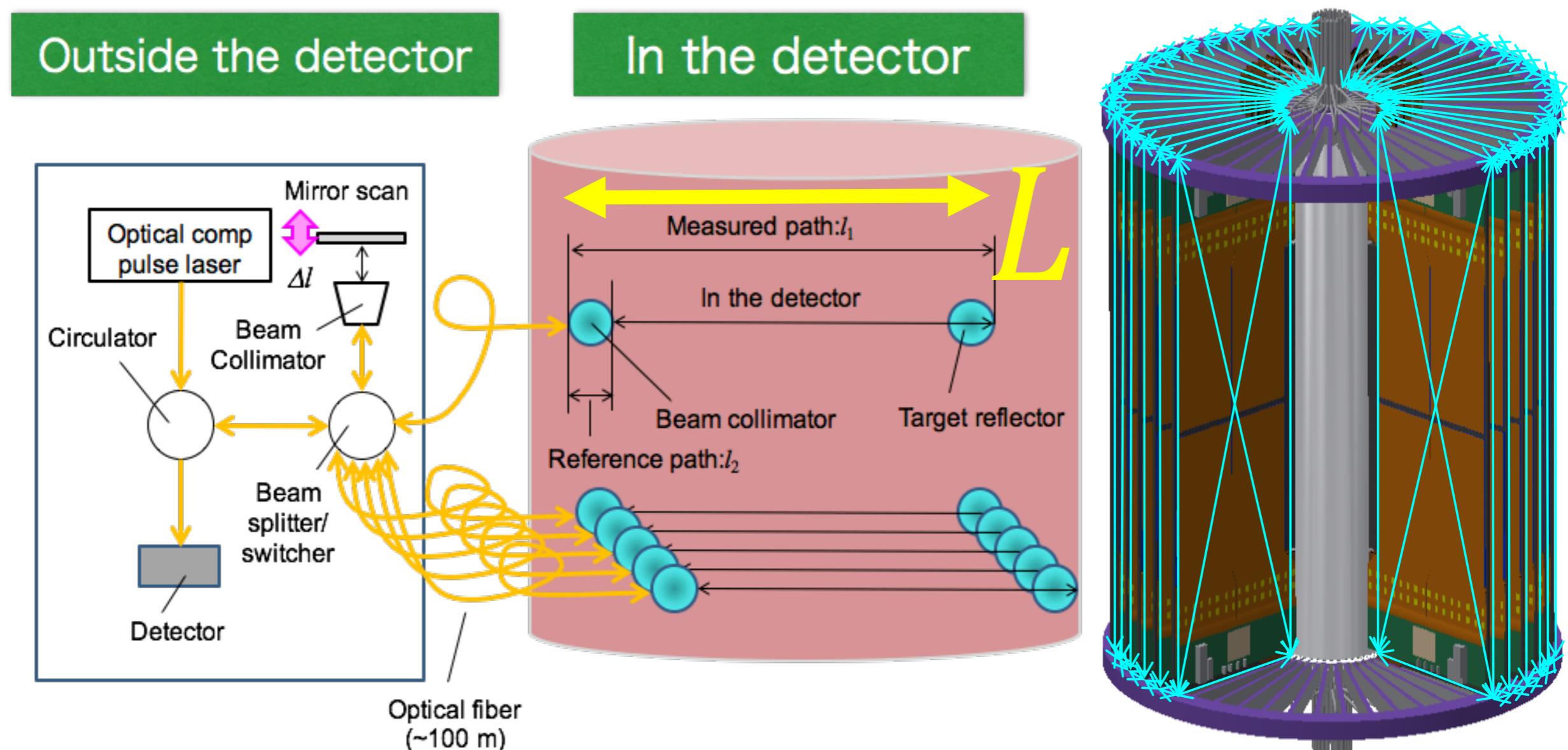
19

■光検出器・レーザー発生器を検出器外に設置

-> 光ファイバー導入型の干渉計を利用

■原理：光周波数コムレーザー + 光路長掃引

Ref. Wiroj Sudatham, 東京大学大学院工学系研究科博士論文 (2016)



# 光周波数コムレーザーの特徴

20

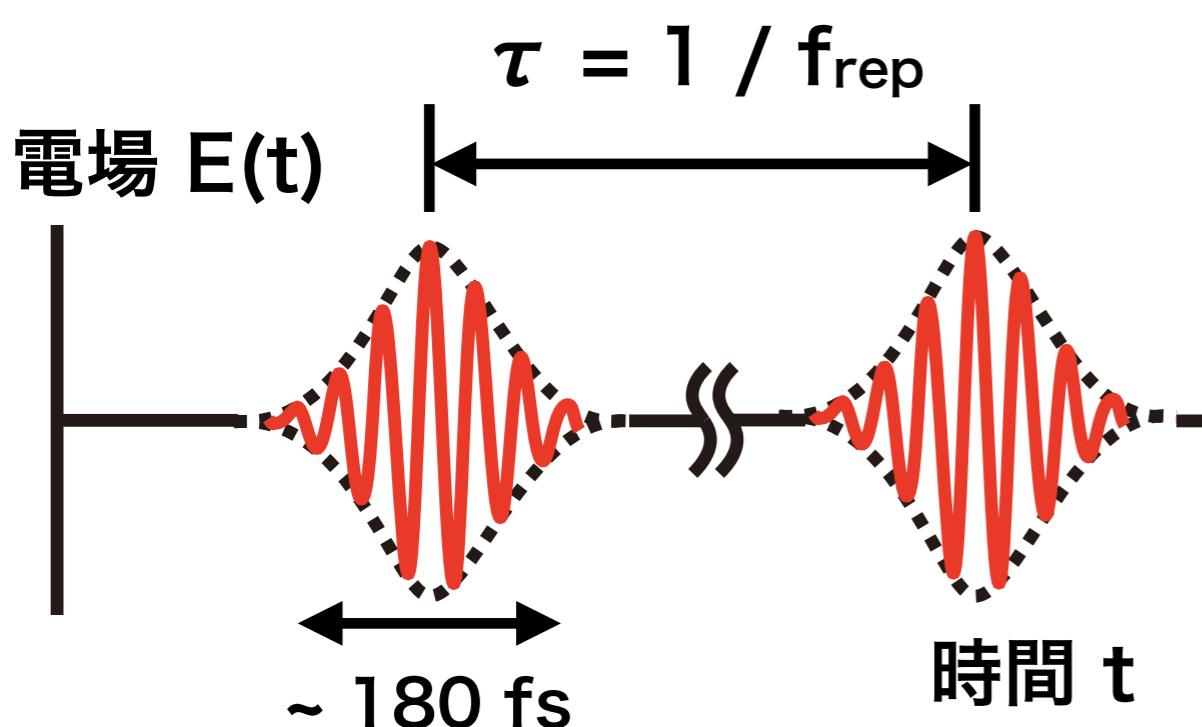
## ■ 光周波数コムレーザー（光コム）の特徴

- パルス幅がフェムト秒のパルスレーザー

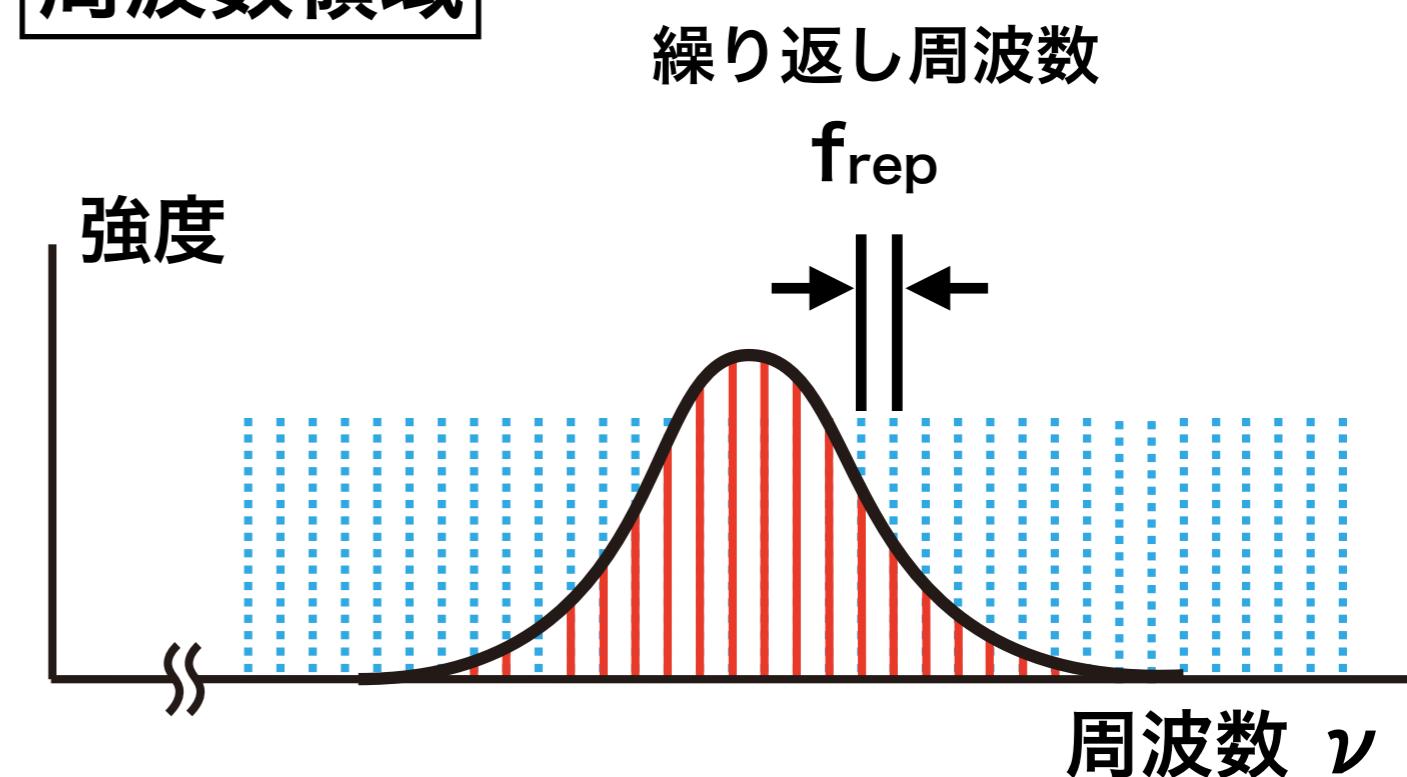
- 櫛(comb)状の周波数構造

- 外部基準周波数と同期することで安定した繰り返し周波数 $f_{rep}$ を得られることに着目 ( $\delta f_{rep}/f_{rep} \sim 10^{-19}$ )

時間領域



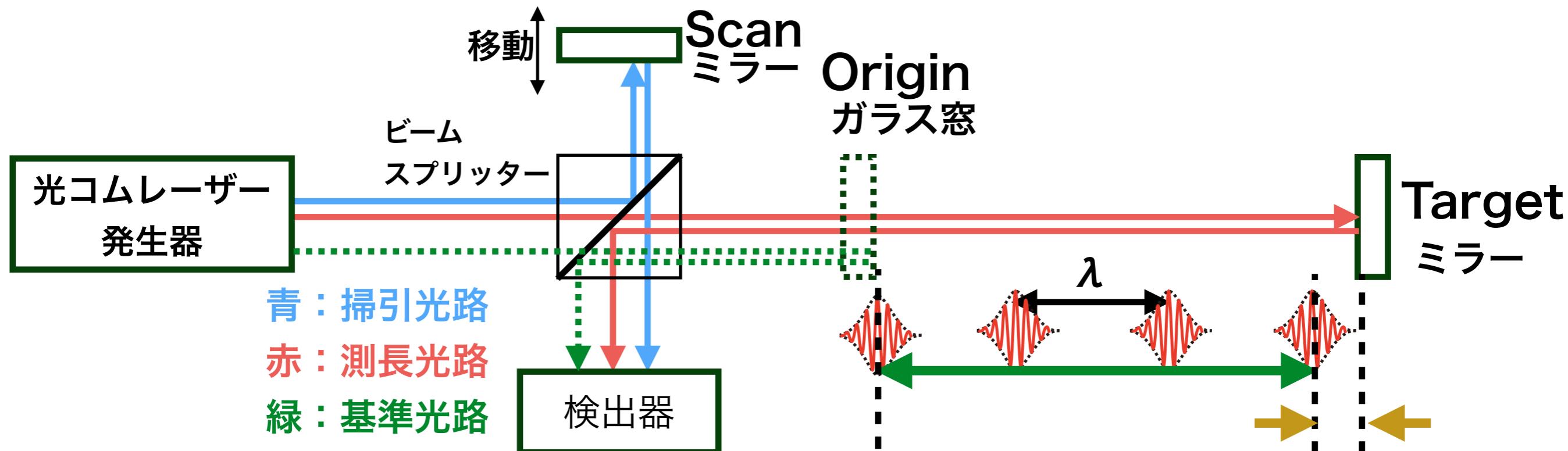
周波数領域



繰り返し周波数

## ■光路長掃引式干渉計

■光路長を変化させることで干渉縞を発生させる。



$$L = N\lambda/2 + \Delta L$$

レーザーのパルス間距離  
の半整数倍(固有値)

二つの干渉縞間の時間と  
掃引光路の変位から得られる

(N : 整数 ,  $\lambda$  : パルス間距離)

# 本研究の目的

## ■ 本干渉計で測定できる長さ L

$$L = \frac{Nc}{2n_{\text{air}} f_{\text{rep}}} + \Delta L$$

N : 整数, c : 光速,  $n_{\text{air}}$  : 空気中の屈折率,  
 $f_{\text{rep}}$  : 繰り返し周波数,  $\Delta L$  : 二つの干渉縞間の距離

## 本研究の目的

測長可能な光周波数コムレーザー干渉計を作成し,  
測定長さ L の精度を評価する.

# 本研究内容

## 本研究の目的

測長可能な光周波数コムレーザー干渉計を作成し、測定長さLの精度を評価する。

## 本研究の内容

- 測長可能な光周波数コムレーザー干渉計を作成
- ファイバーエタロン透過後の繰り返し周波数 $f_{\text{eta}}$ の校正
  - 透過前の繰り返し周波数 $f_{\text{rep}}$ の測定
  - 2つの干渉縞間の距離 $\Delta L$ の測定
  - 長さ基準 $L_{\text{GB}}$ の測定
  - セットアップ再現性の不確かさ
  - 空気の屈折率 $n_{\text{air}}$ の測定
- 測定長さLの精度を評価

# 本研究内容

## 本研究の目的

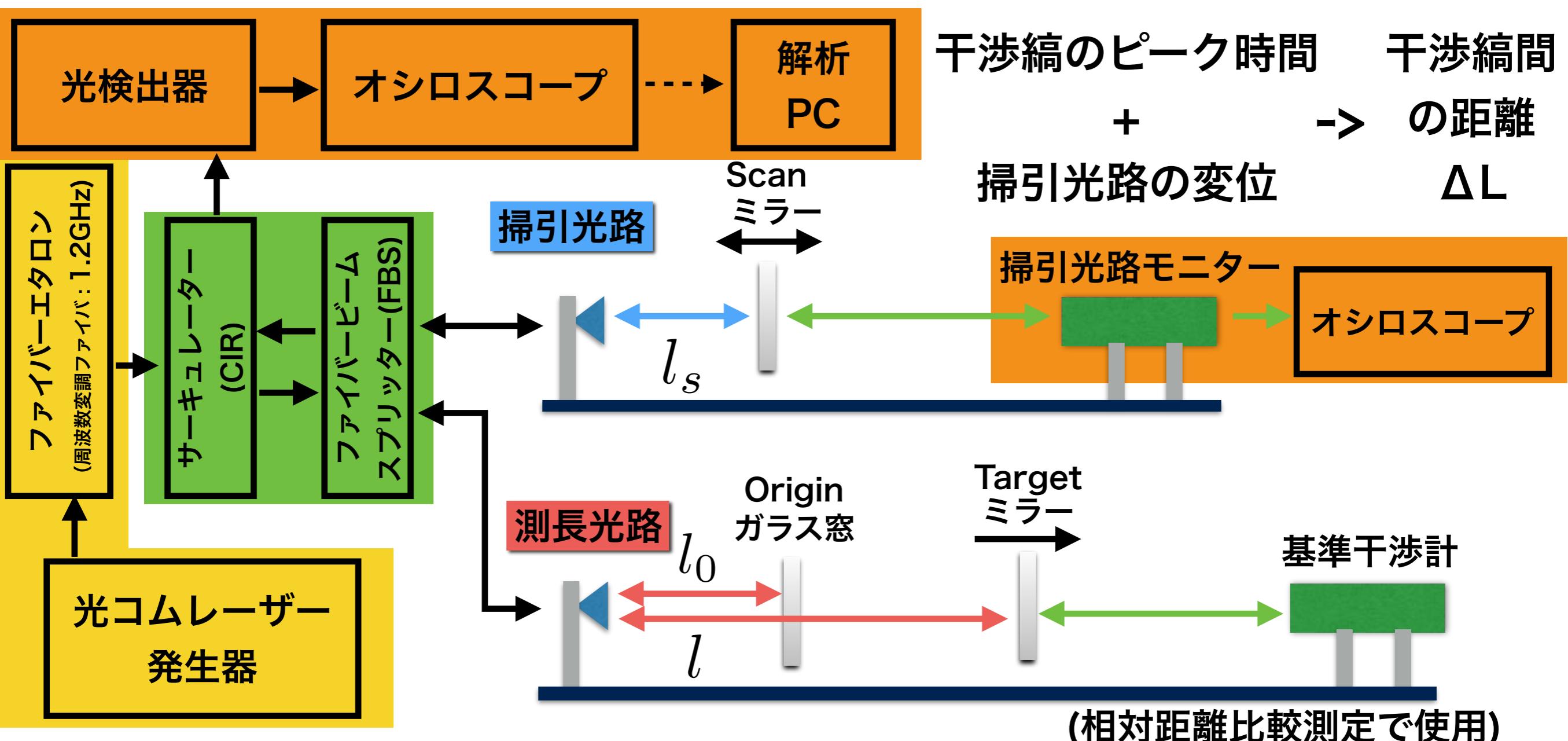
測長可能な光周波数コムレーザー干渉計を作成し、測定長さLの精度を評価する。

## 本研究の内容

- 測長可能な光周波数コムレーザー干渉計を作成
- ファイバーエタロン透過後の繰り返し周波数 $f_{\text{eta}}$ の校正
  - 透過前の繰り返し周波数 $f_{\text{rep}}$ の測定
  - 2つの干渉縞間の距離 $\Delta L$ の測定
  - 長さ基準 $L_{\text{GB}}$ の測定
  - セットアップ再現性の不確かさ
  - 空気の屈折率 $n_{\text{air}}$ の測定
- 測定長さLの精度を評価

# セットアップ

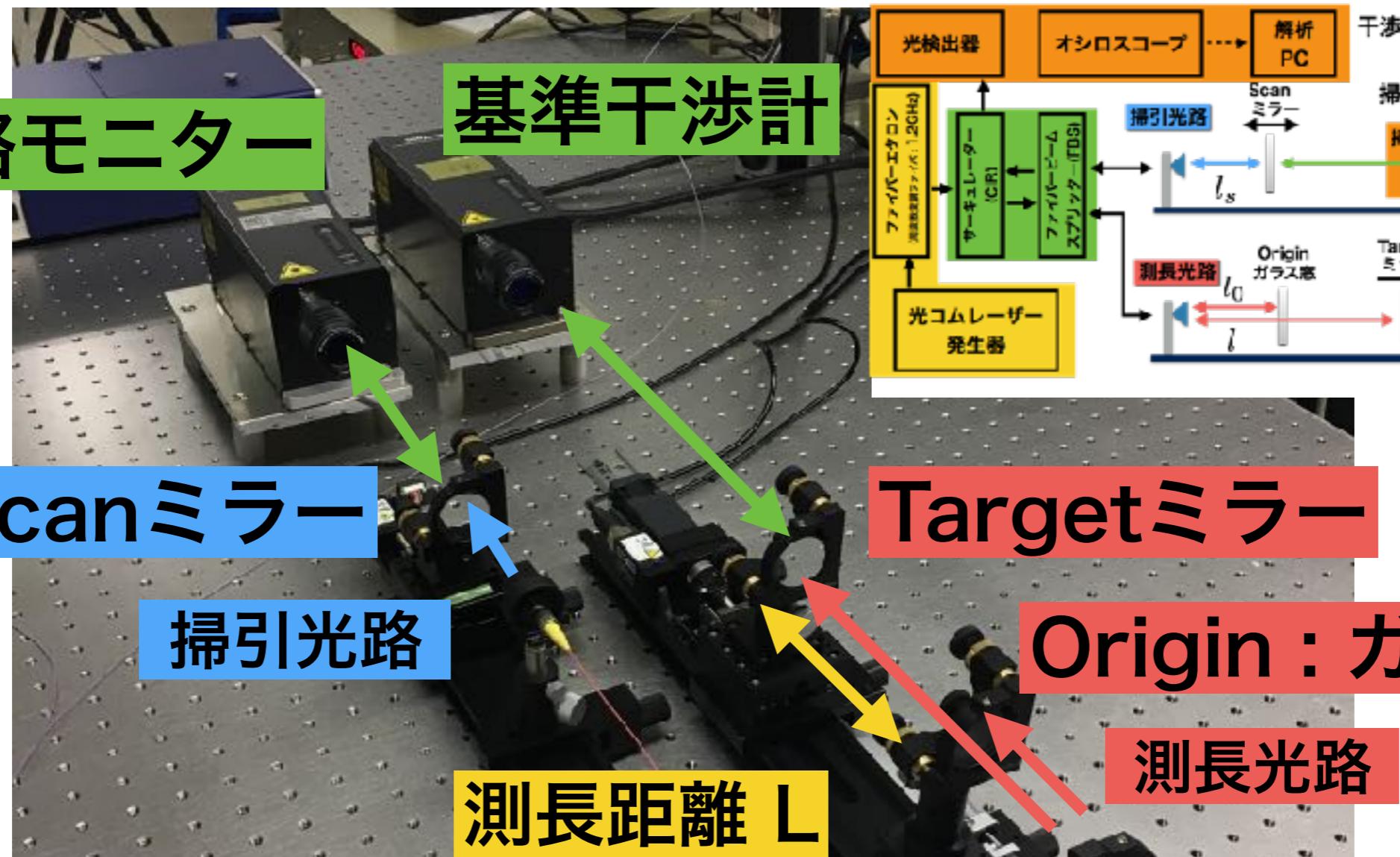
- ファイバーエタロンによってパルス間隔を圧縮
- CIRとFBSがビームスプリッターの役割
- 掃引光路モニターでScanミラーの変位をモニター



# セットアップの写真

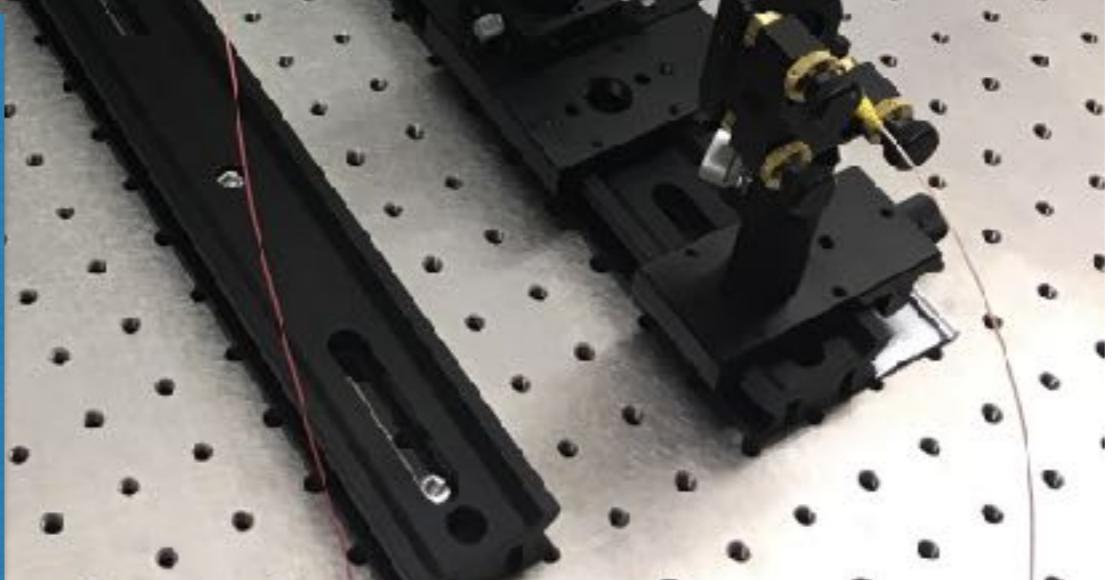
26

掃引光路モニター



光コムレーザーの仕様

中心波長	1559.1 nm
発信出力	6.10 mW
繰り返し周波数	59.45 MHz
パルス幅	180 fs



# 掃引光路用自動ステージと掃引光路モニター 27

■ 掃引光路モニターと掃引光路自動制御計

■ 市販レーザー変位計と自動ステージを利用し、掃引光路の走査と変位測定を行う。

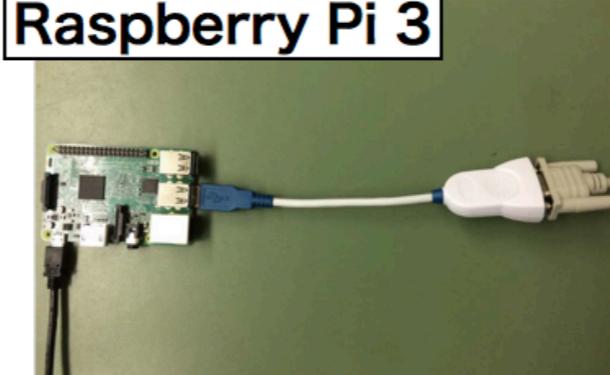
掃引光路自動制御系

制御用PC



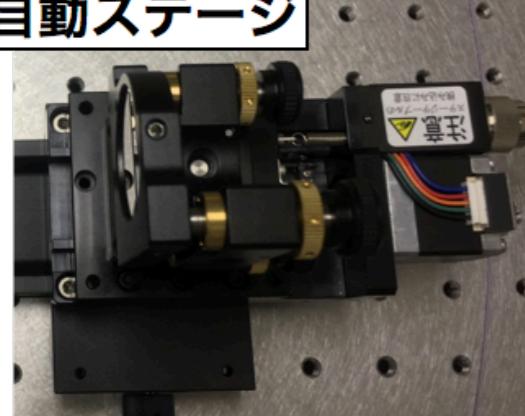
----->  
SSH接続

Raspberry Pi 3

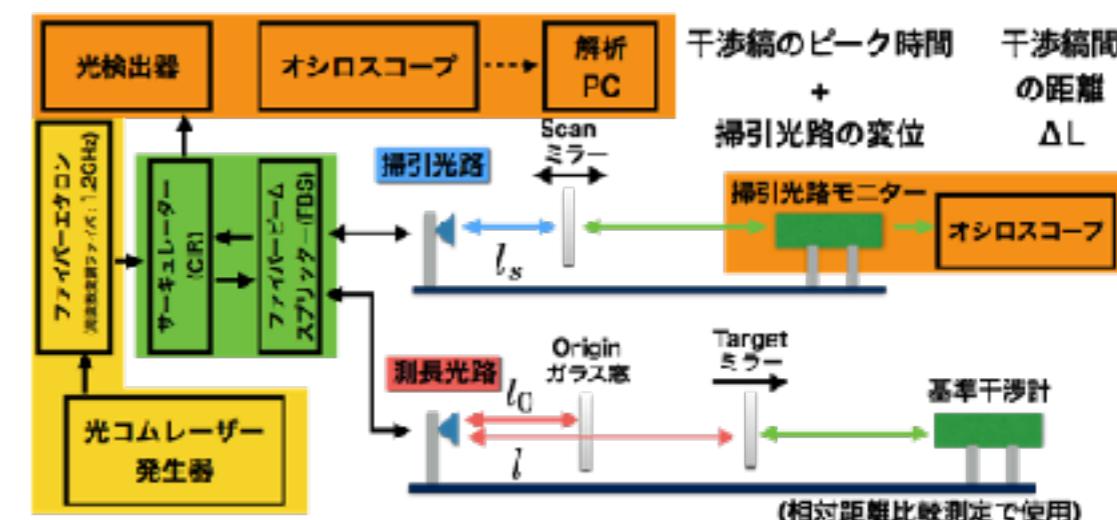
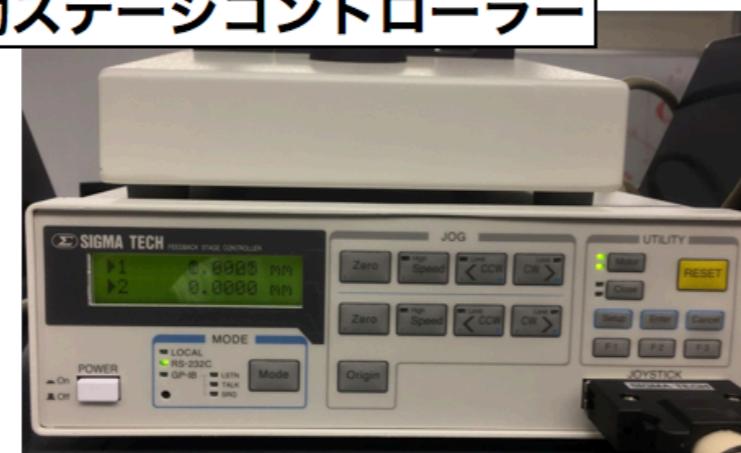


USB-RS232S

掃引光路用  
自動ステージ

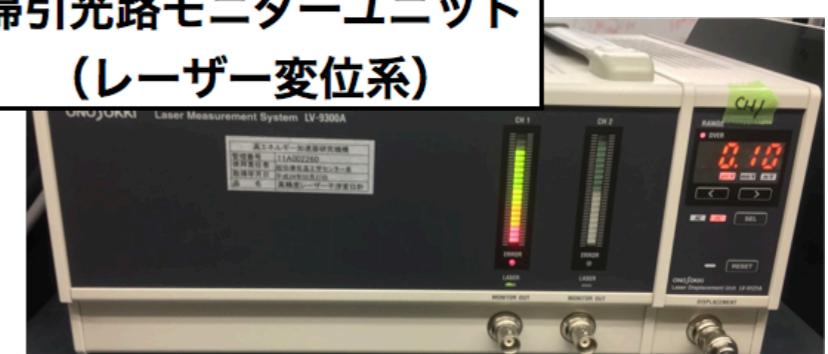


自動ステージコントローラー

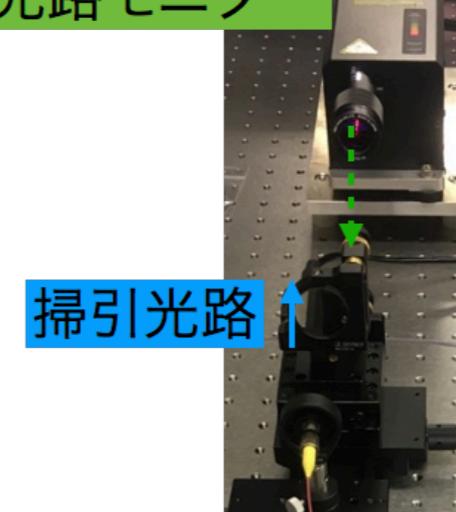


掃引光路モニター

掃引光路モニターユニット  
(レーザー変位系)

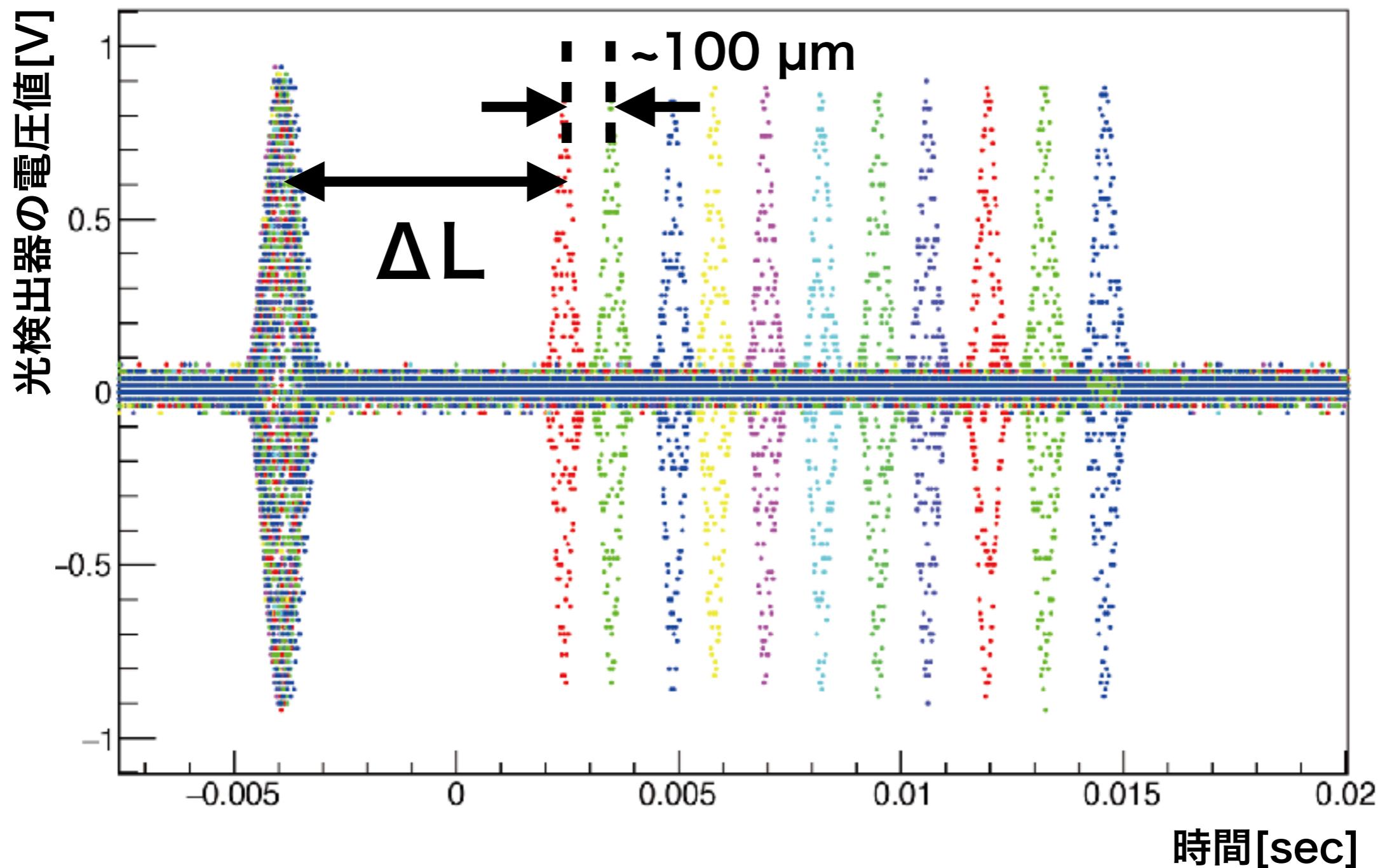


掃引光路モニター



掃引光路

- 下図はTargetを $100\mu\text{m}$ ずつ動かした結果を重ね書きしたもの。
- ReferenceからのTargetの距離がほぼ等間隔で長くなっているように見える。



# 本研究内容

## 本研究の目的

測長可能な光周波数コムレーザー干渉計を作成し、測定長さLの精度を評価する。

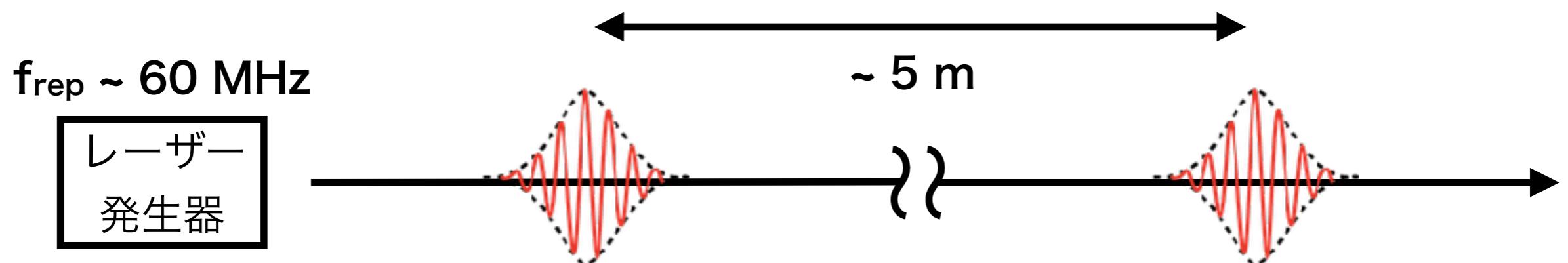
## 本研究の内容

- 測長可能な光周波数コムレーザー干渉計を作成
- ファイバーエタロン透過後の繰り返し周波数 $f_{\text{eta}}$ の校正
  - 透過前の繰り返し周波数 $f_{\text{rep}}$ の測定
  - 2つの干渉縞間の距離 $\Delta L$ の測定
  - 長さ基準 $L_{\text{GB}}$ の測定
  - セットアップ再現性の不確かさ
  - 空気の屈折率 $n_{\text{air}}$ の測定
- 測定長さLの精度を評価

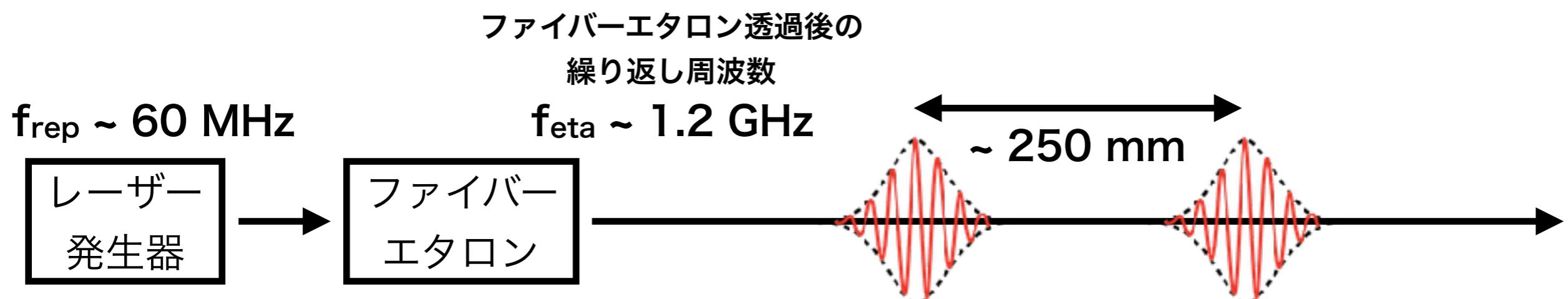
## ■ ファイバーエタロンの役割

高精度化のためにパルス間隔を圧縮し、掃引光路を短くする

## ■ そのままでパルスの間隔が広く掃引光路が長くなる



## ■ ファイバーエタロンを通すことで掃引光路を短くできる



## ■ Fabry-Pérot 型ファイバーエタロン

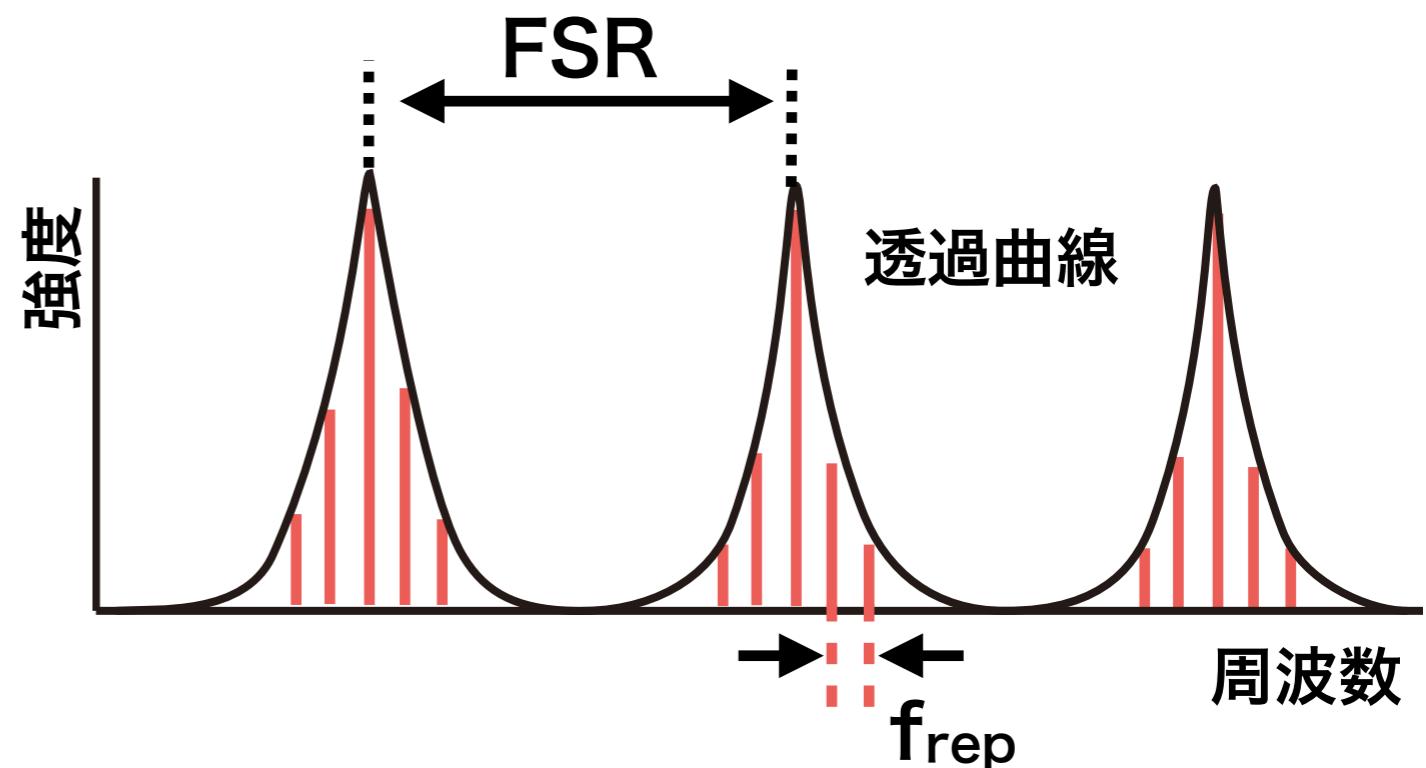
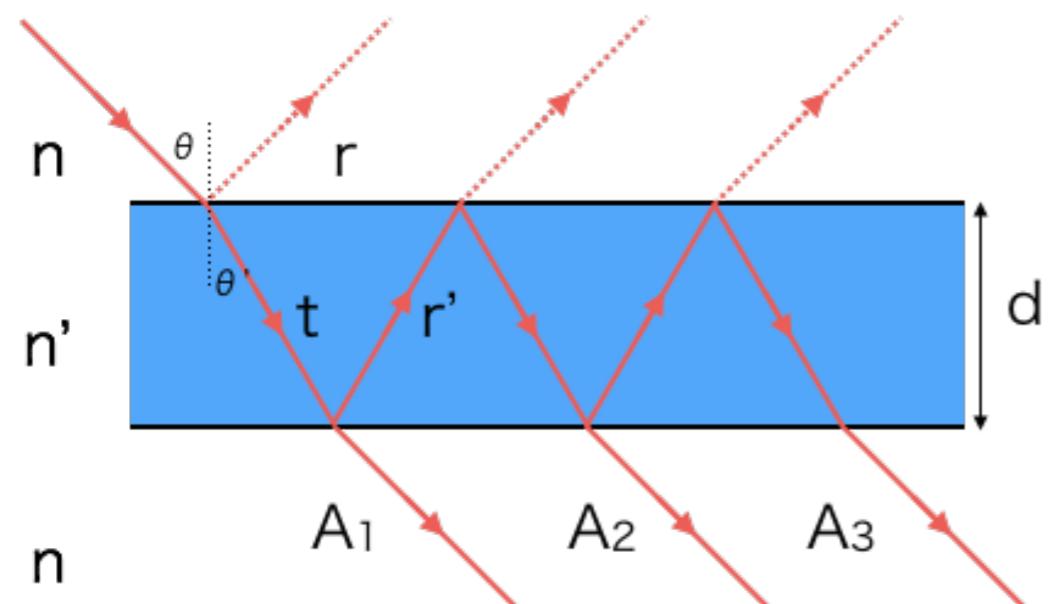
### ■ 両端に反射コーティングが施された光ファイバー

入射光  $I_0$  と透過光  $I_t$  の強度比 (  $R$ :反射率,  $\delta$ :位相差 )

$$\frac{I_t}{I_0} = \frac{1}{1 + F \sin^2(\delta/2)} \quad (F = \frac{4R}{(1 - R)^2})$$

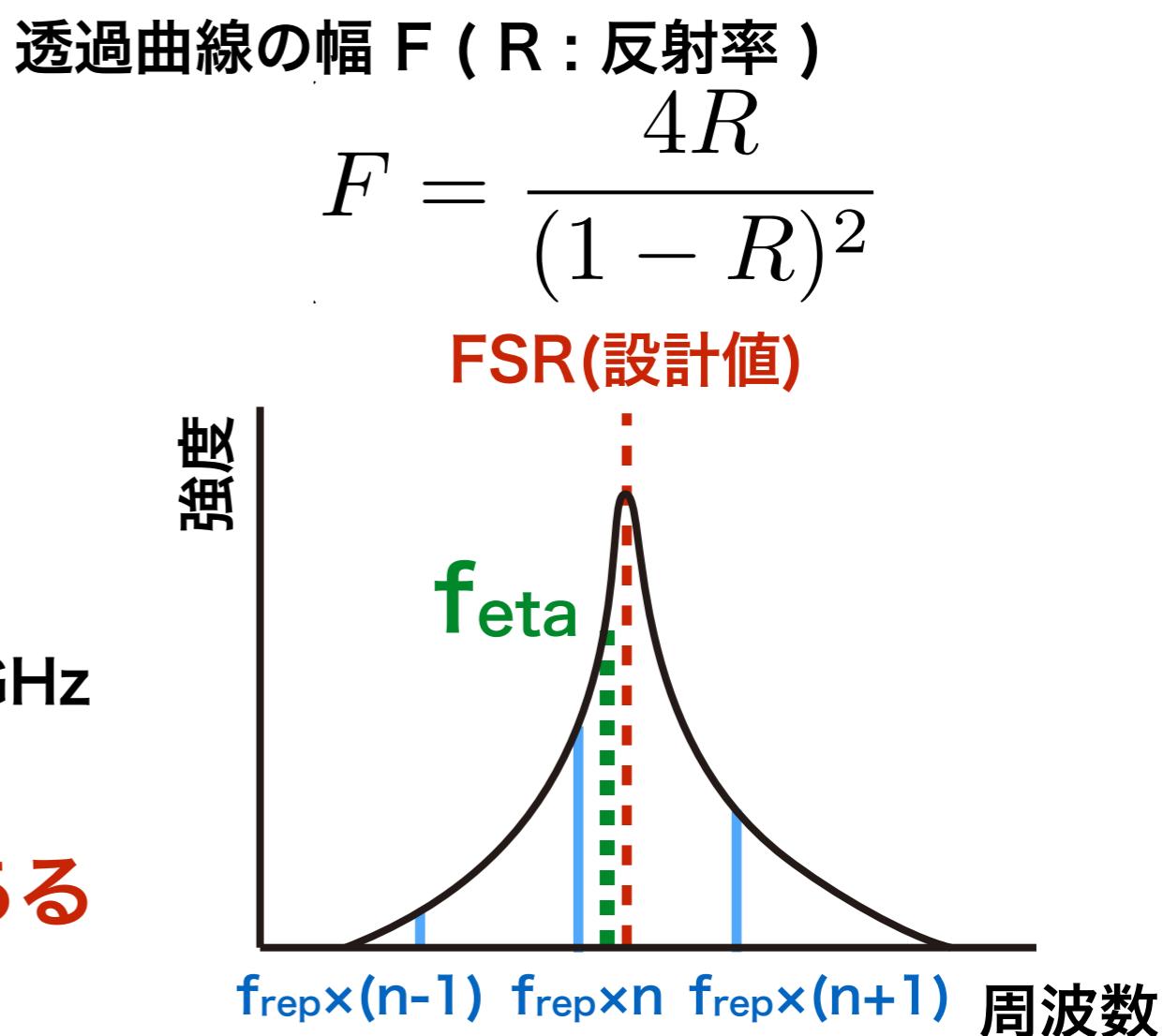
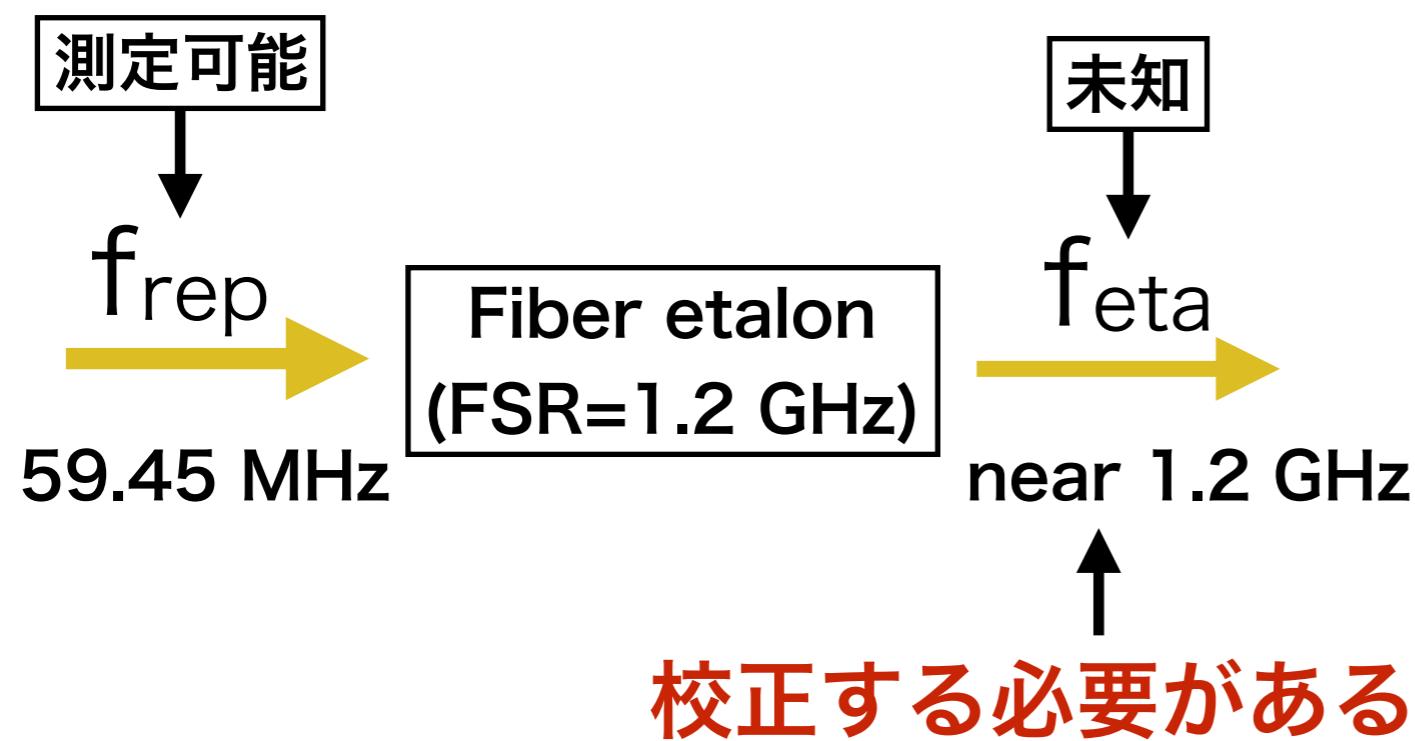
自由スペクトル幅(FSR)

$$FSR = \frac{c}{2nd}$$



■ ファイバーエタロンを使うことで  $f_{rep}$  を高周波FSRにできる

- ファイバーエタロン透過後の繰り返し周波数  $f_{\text{eta}}$
- 高反射率(~99%)を使用 → 透過光の強度が小さい
- 低反射率(85%)を使用 → 透過曲線の幅が広い
- 複数の周波数が影響 →  $f_{\text{eta}}$ の値を決める必要



 絶対距離Lとエタロン後の繰り返し周波数f<sub>eta</sub>の関係

$$L = \frac{c}{2n_{\text{air}} f_{\text{eta}}} + \Delta L \quad \longleftrightarrow \quad f_{\text{eta}} = \frac{c}{2n_{\text{air}}(L_{\text{GB}} - \Delta L)}$$

## 本研究の内容

- ファイバーエタロン透過後の繰り返し周波数f<sub>eta</sub>の校正
  - 2つの干渉縞間の距離ΔLの測定
  - 長さ基準L<sub>GB</sub>の測定
  - セットアップ再現性の不確かさ
  - 空気の屈折率n<sub>air</sub>の測定
  - 透過前の繰り返し周波数f<sub>rep</sub>の測定

## ■ 絶対距離Lとエタロン後の繰り返し周波数f<sub>eta</sub>の関係

$$L = \frac{c}{2n_{\text{air}} f_{\text{eta}}} + \Delta L \quad \longleftrightarrow \quad f_{\text{eta}} = \frac{c}{2n_{\text{air}}(L_{\text{GB}} - \Delta L)}$$

### 本研究の内容

- ファイバーエタロン透過後の繰り返し周波数f<sub>eta</sub>の校正
- 2つの干渉縞間の距離ΔLの測定
- 長さ基準L<sub>GB</sub>の測定
- セットアップ再現性の不確かさ
- 空気の屈折率n<sub>air</sub>の測定
- 透過前の繰り返し周波数f<sub>rep</sub>の測定

## ■ 相対距離比較測定

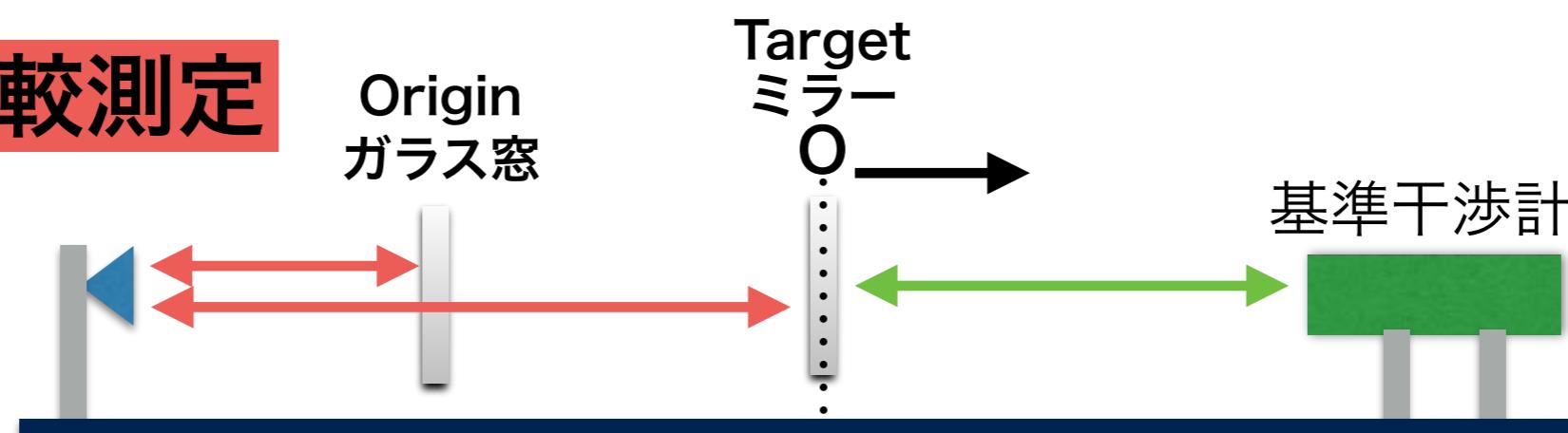
### ■ 目的

- 二つの干渉縞間の距離 $\Delta L$ の測定安定性を評価

### ■ 方法

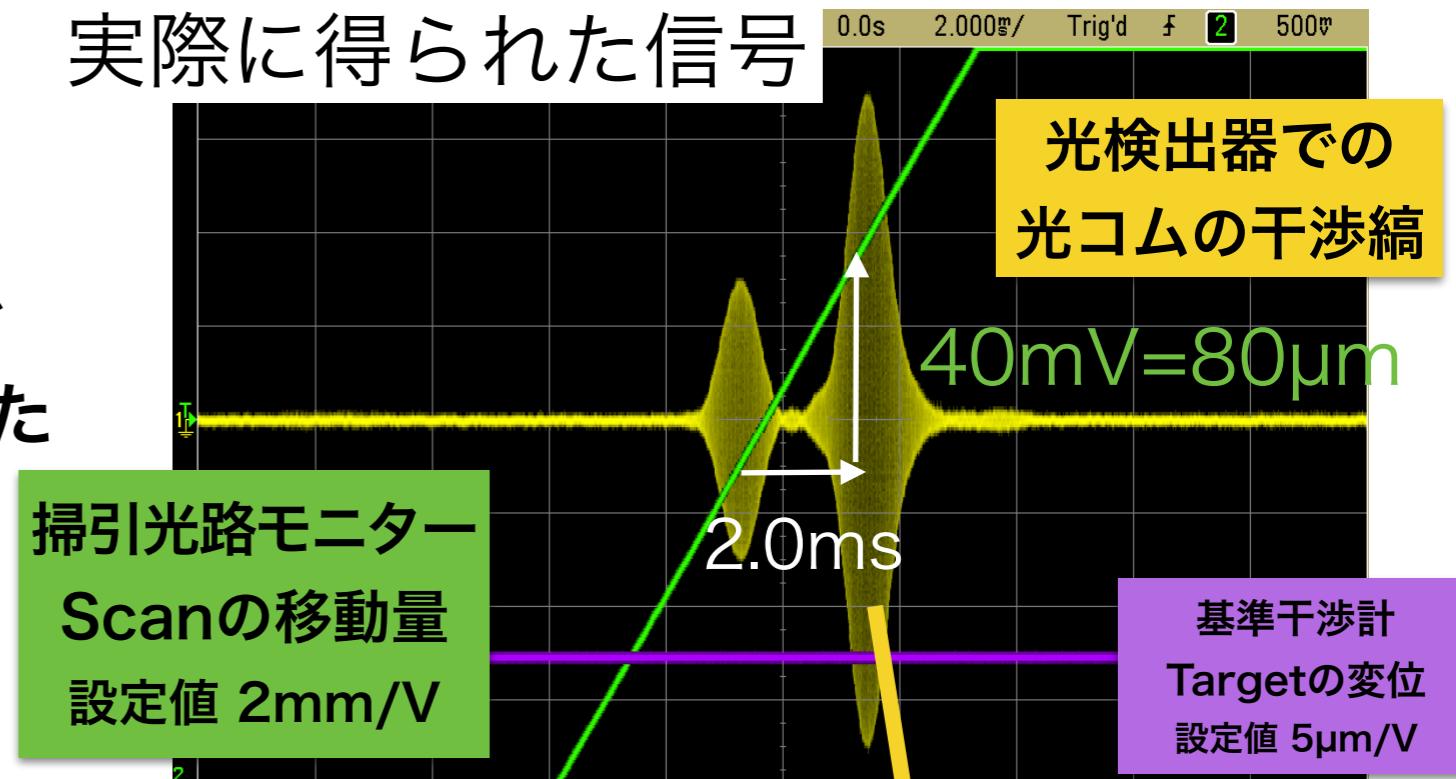
- 市販レーザーと光コムレーザーでTargetミラーの変位をモニターする。
- Targetミラーを $10 \mu\text{m}$ ずつ変位させて、計 $50 \mu\text{m}$ 動かした。
- 各測定点で10回ずつ測定を行った。

## 相対距離比較測定



- オシロスコープで得られる信号
- 掃引光路モニターと基準干渉計で測定した長さは、設定値に対応した電圧値として得られる。

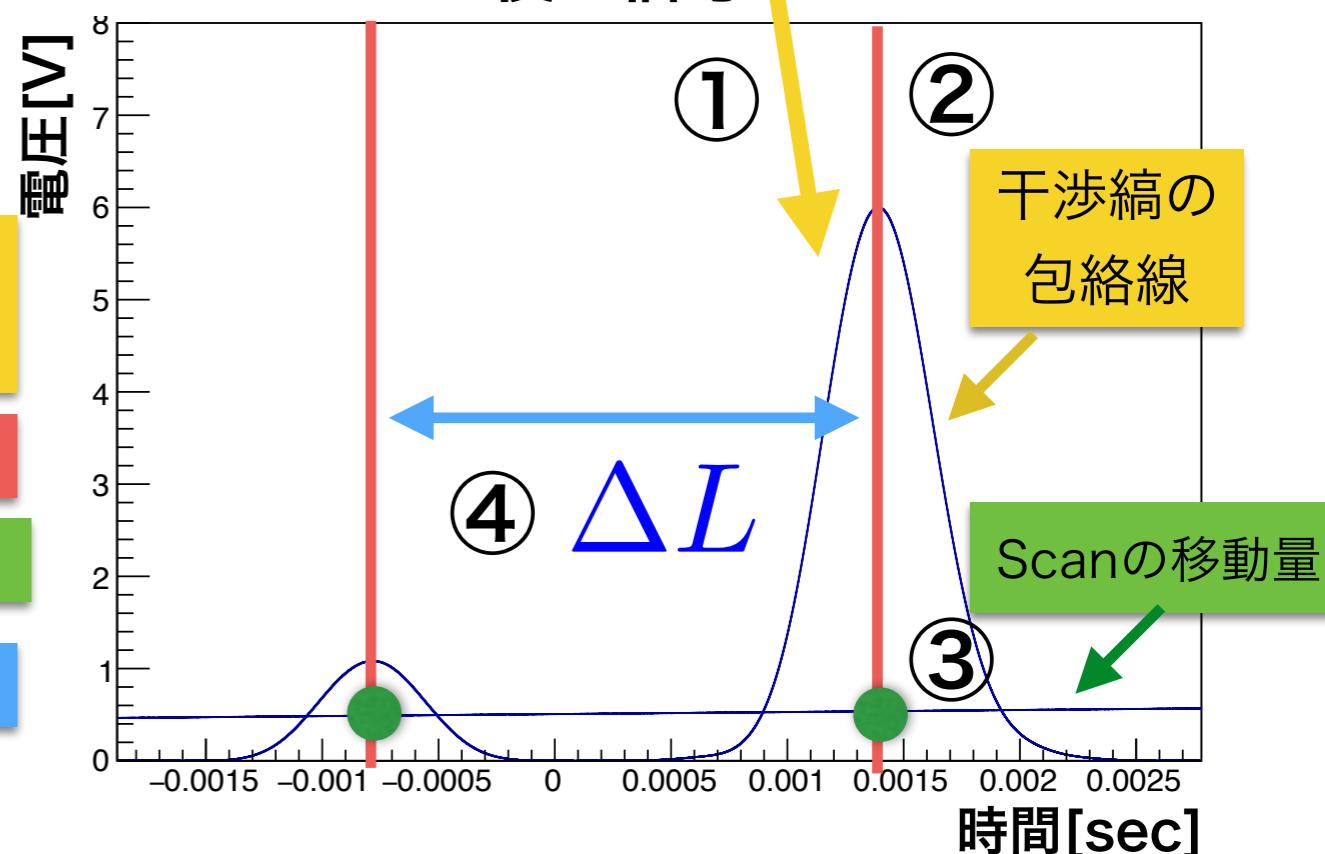
## 実際に得られた信号



## 解析手法

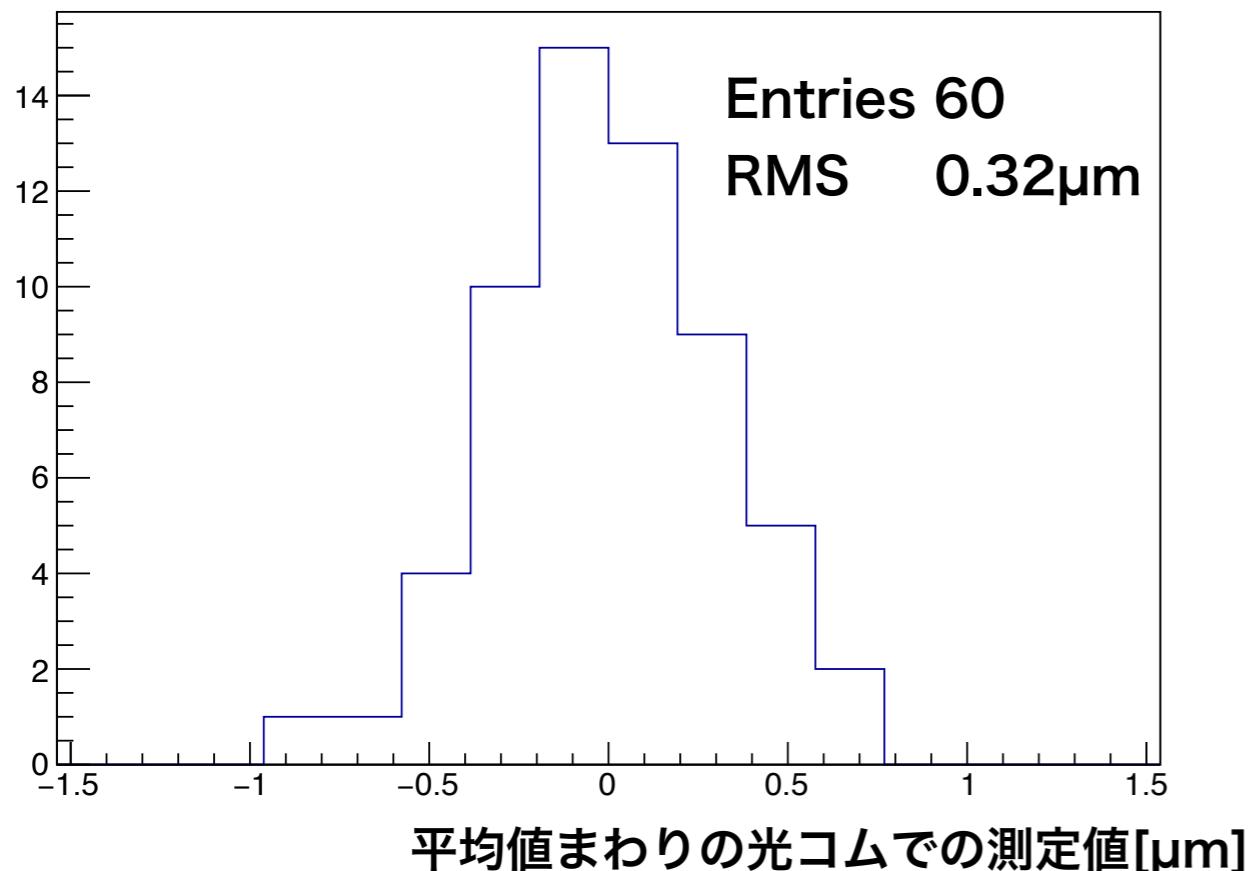
- ①干渉縞にFFTを行い、ローパスをかけることで包絡線を取り出す
- ②微分値が正から負になるピーク時間を求める
- ③ピークと同時刻のScanミラーの移動量を読む
- ④Scanミラーの移動量の差を $\Delta L$ を求めた

## ローパス後の信号

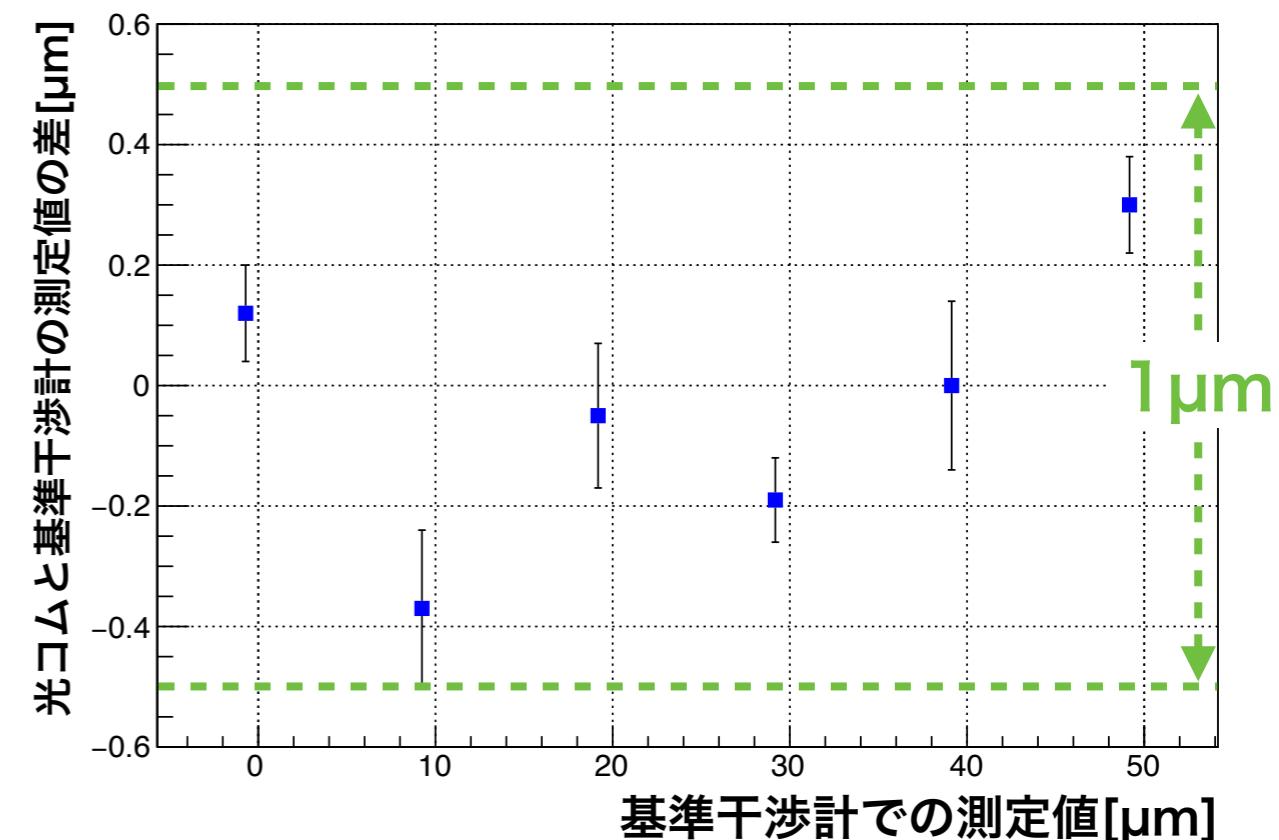


## ■ 相対距離比較測定で得られたデータを解析した結果

### ■ 光コムの測定データのバラつき



### ■ 光コムと基準干渉計で測定した変位の差



■ 標準偏差は  $0.32 \pm 0.04\mu\text{m}$

■ 1回当たりの測定(統計)精度は要求を満たしている。

■ 各測定点の間のRMSは  $0.21 \pm 0.9\mu\text{m}$

■ 50 $\mu\text{m}$ の可動域に対して、目標の精度を達している

■ 2つの干渉縞間の距離 $\Delta L$ の不確かさは  $\sigma \Delta L = 0.3\mu\text{m}$

## ■ 絶対距離Lとエタロン後の繰り返し周波数f<sub>eta</sub>の関係

$$L = \frac{c}{2n_{\text{air}} f_{\text{eta}}} + \Delta L \quad \longleftrightarrow \quad f_{\text{eta}} = \frac{c}{2n_{\text{air}}(L_{\text{GB}} - \Delta L)}$$

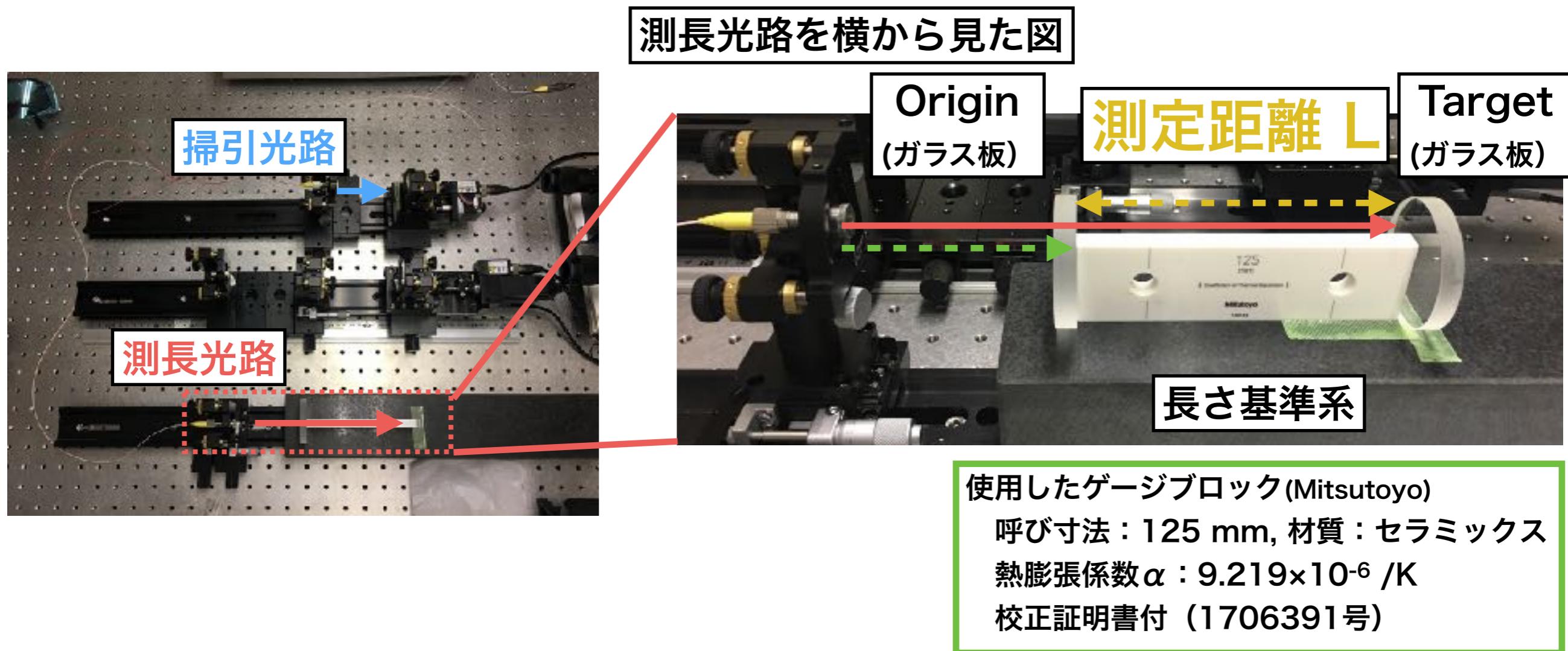
### 本研究の内容

- ファイバーエタロン透過後の繰り返し周波数f<sub>eta</sub>の校正
- 2つの干渉縞間の距離ΔLの測定
- 長さ基準L<sub>GB</sub>の測定
- セットアップ再現性の不確かさ
- 空気の屈折率n<sub>air</sub>の測定
- 透過前の繰り返し周波数f<sub>rep</sub>の測定

# ゲージブロックを利用したf<sub>eta</sub>校正 39

## ■ ゲージブロック

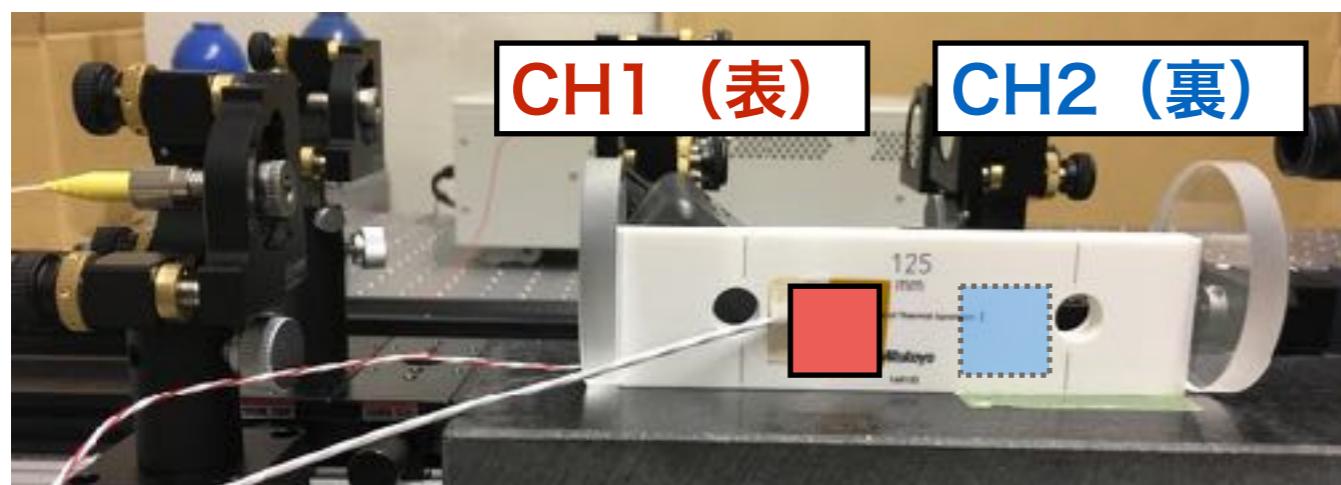
- 特徴：寸法が正確、耐久性がある、測定面が密着する
- ゲージブロックは0.03 μmの不確かさで校正されている。
- ゲージブロックの両端にガラス板をリング（接着）



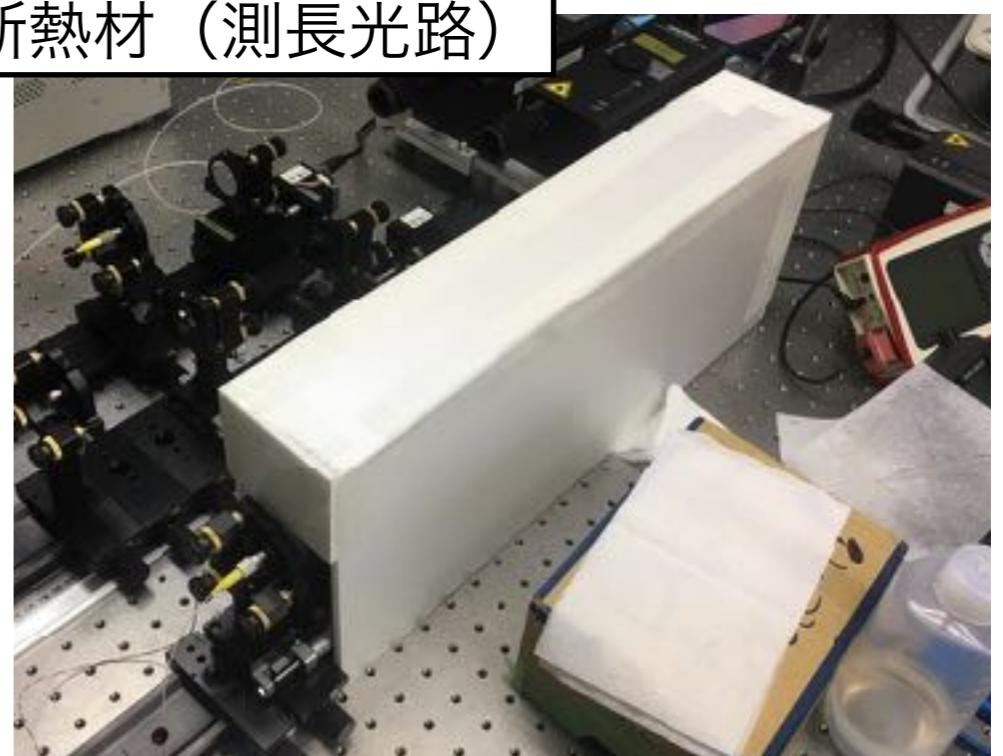
# ゲージブロックの温度補正

40

- ゲージブロックは温度補正をして扱うものである。
- 今回使用するゲージブロックは $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$ で $1\text{ }\mu\text{m}$ 程度膨張するもの。
- 温度勾配も考慮するために2つの白金測温抵抗体を使用。
- 測定した結果、温度は  $21.96 \pm 0.17\text{ }^{\circ}\text{C}$  であった。

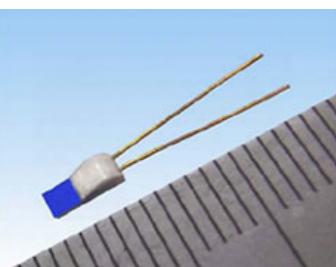


断熱材（測長光路）



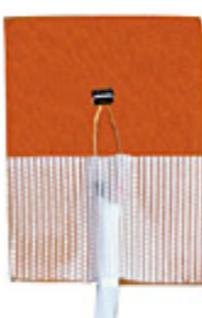
CH1

白金測温抵抗体  
林電工製  
RZM(TF)-1TF(001)+2TF(02)-A  
JIS-A級相当



CH2

白金測温抵抗体  
オメガエンジニアリング  
SA1-RTD-120  
JIS-A級相当



使用したゲージブロック(Mitsutoyo)

呼び寸法：125 mm , 材質：セラミックス  
熱膨張係数 $\alpha$  :  $9.219 \times 10^{-6} / \text{K}$   
校正証明書付 (1706391号)

# ゲージブロック長さの不確かさ

41

## ■ ゲージブロックの長さ

呼び寸法

中央寸法差

温度補正

$$L_{GB} = 125 \text{ mm} + 0.11 \mu\text{m} + 2.26 \mu\text{m} (@ 21.96 ^\circ\text{C})$$

## ■ 不確かさ要因の表(包含係数 k=1)

不確かさ要因	不確かさ	長さの不確かさ [μm]
寸法差幅	0.03 μm	0.03
校正不確かさ	0.017 μm	0.017
熱膨張係数の不確かさ( $\alpha$ )	$0.018 \times 10^{-6} / \text{K}$	0.008
測定温度の不確かさ(T)	0.17 K	<u>0.2</u>
合成標準不確かさ		<b>0.2</b> (<目標値 1 μm)

$$\underline{L_{GB} = 125\ 002.4 \pm 0.2 \mu\text{m}}$$

## ■ 目標の不確かさ(1 μm)を満たす長さ基準を用意できた。

## ■ 絶対距離Lとエタロン後の繰り返し周波数f<sub>eta</sub>の関係

$$L = \frac{c}{2n_{\text{air}} f_{\text{eta}}} + \Delta L \quad \longleftrightarrow \quad f_{\text{eta}} = \frac{c}{2n_{\text{air}}(L_{\text{GB}} - \Delta L)}$$

### 本研究の内容

- ファイバーエタロン透過後の繰り返し周波数f<sub>eta</sub>の校正
  - 2つの干渉縞間の距離ΔLの測定
  - 長さ基準L<sub>GB</sub>の測定
- セットアップ再現性の不確かさ
- 空気の屈折率n<sub>air</sub>の測定
- 透過前の繰り返し周波数f<sub>rep</sub>の測定

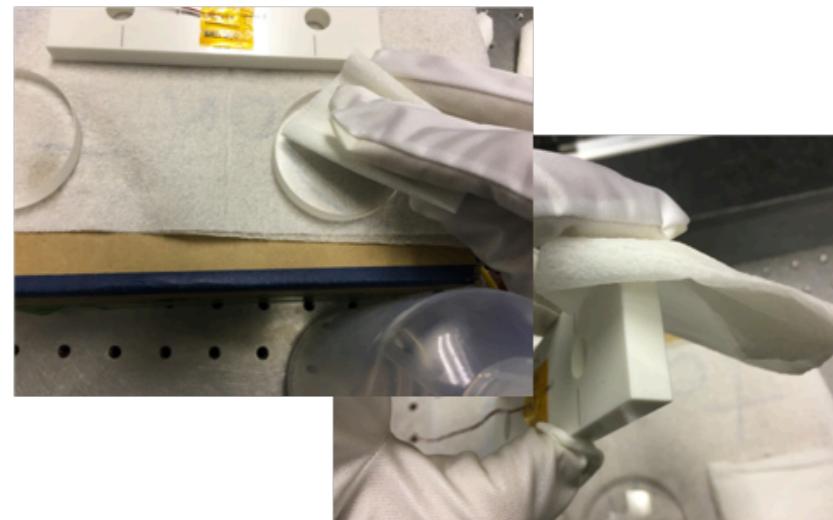
## ■ ゲージブロックのセットアップ再現性試験

■ 再現性を高めるため、以下の手順で組み立てた。

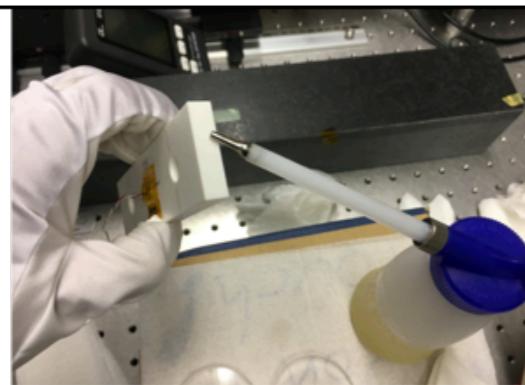
1、GBとガラス板を用意



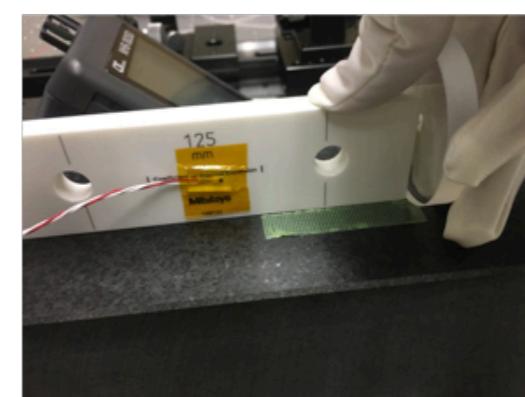
2、エタノールでGB及びガラス板を拭く



3、必要に応じて、GBに機械油を少量塗布し、2と同様の手法で拭く



4、GBとガラス板をリング（接着）する



■ 5回測定を行い  $1.9 \mu\text{m}$  (RMS) のばらつきがあった。

■ 長さ基準系の不確かさは  $\delta L_{\text{GB}} = 1.9 \mu\text{m}$

## ■ 絶対距離Lとエタロン後の繰り返し周波数f<sub>eta</sub>の関係

$$L = \frac{c}{2n_{\text{air}} f_{\text{eta}}} + \Delta L \quad \longleftrightarrow \quad f_{\text{eta}} = \frac{c}{2n_{\text{air}}(L_{\text{GB}} - \Delta L)}$$

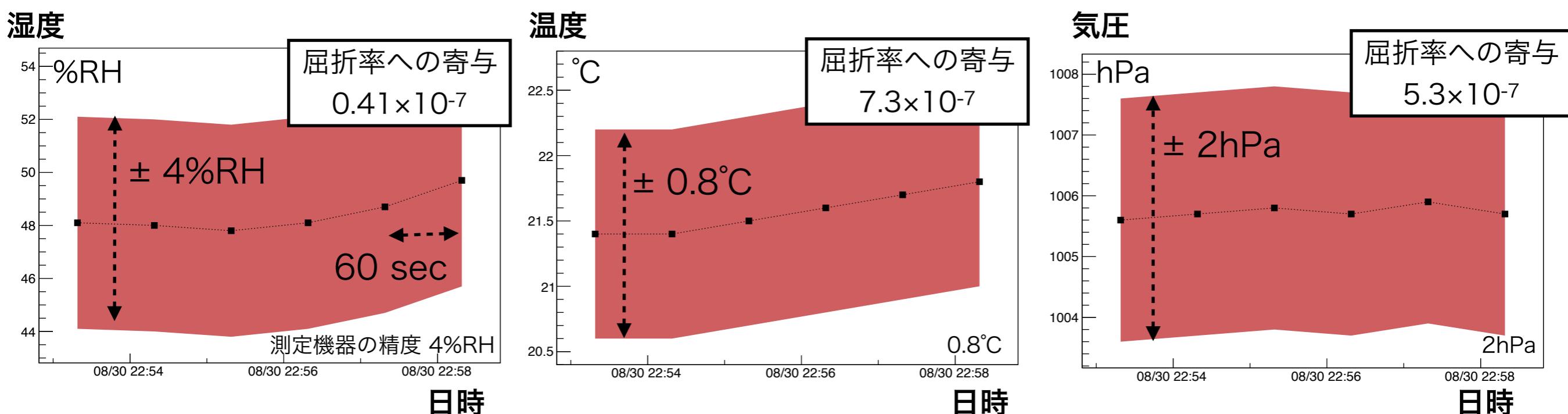
### 本研究の内容

- ファイバーエタロン透過後の繰り返し周波数f<sub>eta</sub>の校正
  - 2つの干渉縞間の距離ΔLの測定
  - 長さ基準L<sub>GB</sub>の測定
  - セットアップ再現性の不確かさ
  - 空気の屈折率n<sub>air</sub>の測定
  - 透過前の繰り返し周波数f<sub>rep</sub>の測定

# 空気中の屈折率 $n_{air}$ の不確かさ

45

- 温度、湿度、気圧をモニターし、Ciddorの式から空気中の屈折率を求めた。(CO<sub>2</sub>は 450 ppm (標準大気) と仮定)
- 温度・湿度・気圧計の不確かさが空気の屈折率の不確かさを占めている。



$$n_{air} - 1 = (264.7 \pm 0.9) \times 10^{-6}$$

$$\text{相対不確かさ } \sigma n_{air}/n_{air} = 0.9 \times 10^{-6}$$

## ■ 絶対距離Lとエタロン後の繰り返し周波数f<sub>eta</sub>の関係

$$L = \frac{c}{2n_{\text{air}} f_{\text{eta}}} + \Delta L \quad \longleftrightarrow \quad f_{\text{eta}} = \frac{c}{2n_{\text{air}}(L_{\text{GB}} - \Delta L)}$$

### 本研究の内容

- ファイバーエタロン透過後の繰り返し周波数f<sub>eta</sub>の校正
  - 2つの干渉縞間の距離ΔLの測定
  - 長さ基準L<sub>GB</sub>の測定
  - セットアップ再現性の不確かさ
  - 空気の屈折率n<sub>air</sub>の測定
  - 透過前の繰り返し周波数f<sub>rep</sub>の測定

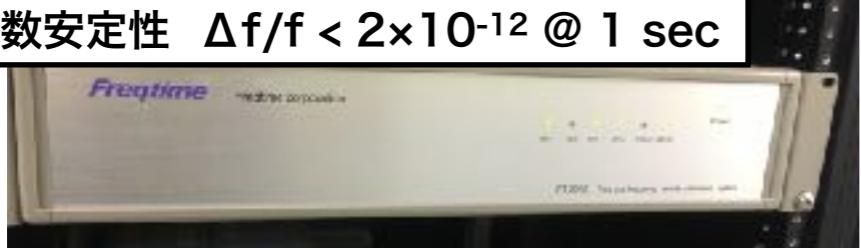
# 繰り返し周波数 $f_{rep}$ の不確かさ

47

■遠隔時間校正標準器と同期することで、安定した $f_{rep}$ を得ることができる。

遠隔時間校正標準器

周波数安定性  $\Delta f/f < 2 \times 10^{-12} @ 1 \text{ sec}$



クロックの同期  
周波数カウンター

周波数カウンター



クロックの同期

Signal Generator

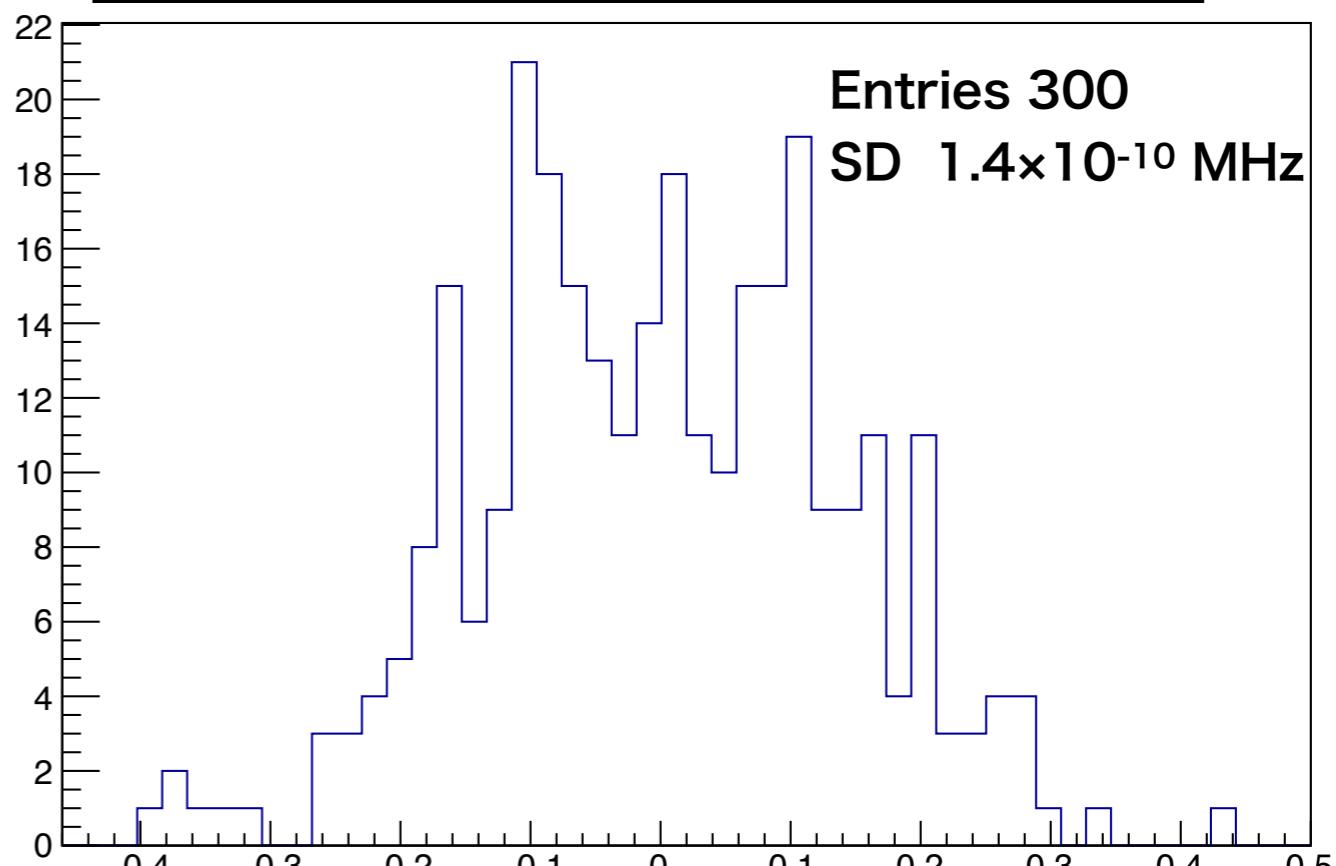


内蔵PDからの信号  
RF 同期信号

光コムパルスレーザー発生器



同期した繰り返し周波数 $f_{rep}$ の分布



繰り返し周波数の中心値まわりの分布 [MHz]

光コムの繰り返し周波数 **59.452 439 999 98(14) [MHz]**

相対不確かさ  $3.0 \times 10^{-12}$   $\rightarrow f_{eta}$ 校正に影響しない

■ 絶対距離L とエタロン後の繰り返し周波数f<sub>eta</sub> の関係

$$L = \frac{c}{2n_{\text{air}} f_{\text{eta}}} + \Delta L \quad \longleftrightarrow \quad f_{\text{eta}} = \frac{c}{2n_{\text{air}}(L_{\text{GB}} - \Delta L)}$$

■ f<sub>eta</sub> の不確かさ  $\delta f_{\text{eta}}$ 

$$\delta f_{\text{eta}} = f_{\text{eta}} \times \sqrt{\left(\frac{\delta n_{\text{air}}}{n_{\text{air}}}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{\delta L_{\text{GB}}^2 + \delta \Delta L^2}}{L_{\text{GB}} - \Delta L}\right)^2}$$

これまでの測定結果

$$\delta n_{\text{air}}/n_{\text{air}} = 0.9 \times 10^{-6} \quad L_{\text{GB}} = 125\ 002.4 \pm 1.9 \mu\text{m} \quad \Delta L = 97.5 \pm 0.3 \mu\text{m}$$

■ 本測定で得られた f<sub>eta</sub> の校正值

$$f_{\text{eta}} = 1.199765 \pm 1.9 \times 10^{-5} \text{ GHz}$$

$$\text{相対不確かさ} \quad \delta f_{\text{eta}}/f_{\text{eta}} = 1.6 \times 10^{-5}$$

## ■ $f_{\text{eta}}$ 校正における不確かさ $\delta f_{\text{eta}}$ の不確かさ要因

不確かさ要因	各不確かさ	$f_{\text{eta}}$ 不確かさ [GHz]	寄与率 [%]
長さ基準系 $L_{\text{GB}}$	寸法差幅	0.03 $\mu\text{m}$	< 0.2
	校正不確かさ	0.017 $\mu\text{m}$	< 0.1
	熱膨張係数	0.008 $\mu\text{m}$	$1.83 \times 10^{-5}$
	測定温度	0.2 $\mu\text{m}$	1.1%
	セットアップ再現性	<u>1.9 <math>\mu\text{m}</math></u>	<u>96.1%</u>
空気の屈折率 $n_{\text{air}}$	$0.9 \times 10^{-6}$	$1.1 \times 10^{-6}$	0.4%
干渉縞間の距離 $\Delta L$	0.3 $\mu\text{m}$	$2.9 \times 10^{-6}$	2.4%
合計		$1.9 \times 10^{-5}$	(100%)

## ■ セットアップ再現性による不確かさが大きく影響

## 本研究の目的

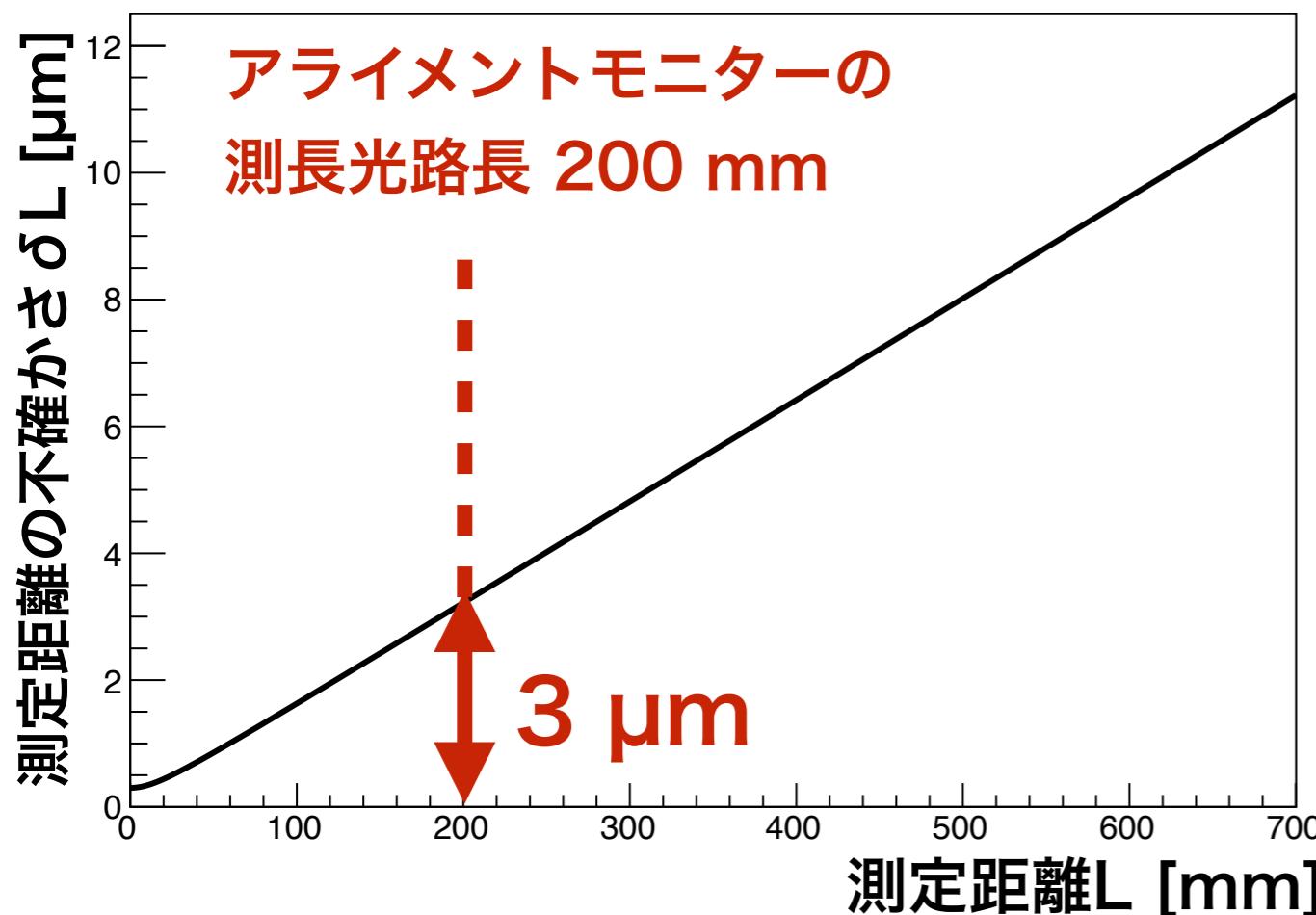
測長可能な光周波数コムレーザー干渉計を作成し、  
測定長さLの精度を評価する。

## 本研究の内容

- 測長可能な光周波数コムレーザー干渉計を作成
- ファイバーエタロン透過後の繰り返し周波数 $f_{\text{eta}}$ の校正
  - 透過前の繰り返し周波数 $f_{\text{rep}}$ の測定
  - 2つの干渉縞間の距離 $\Delta L$ の測定
  - 長さ基準 $L_{\text{GB}}$ の測定
  - セットアップ再現性の不確かさ
  - 空気の屈折率 $n_{\text{air}}$ の測定
- 測定長さLの精度を評価

■ 絶対距離L測定の不確かさ  $\delta L$  (  $L_0$  : パルス間隔 )

$$\delta L^2 = L_0^2 \times \sqrt{\left(\frac{\delta n_{\text{air}}}{n_{\text{air}}}\right)^2 + \left(\frac{\delta f_{\text{eta}}}{f_{\text{eta}}}\right)^2} + \delta \Delta L^2$$



- 校正測定の結果より,
- $$\delta n_{\text{air}}/n_{\text{air}} = 0.9 \times 10^{-6}$$
- $$\delta f_{\text{eta}}/f_{\text{eta}} = 1.6 \times 10^{-5}$$
- $$\delta \Delta L = 0.3 \mu\text{m}$$
- 200 mmでの不確かさ  $\delta L$
- $$\delta L(@200 \text{ mm}) = 3 \mu\text{m}$$

## ■序論

- ミューオン双極子モーメントの物理
- 先行実験：BNL-E821 実験
- J-PARC E34 実験

## ■検出器アライメントモニターの開発（本研究）

## ■議論

- ミューオンEDM測定の系統誤差への影響
- 測定精度向上に向けた改善策

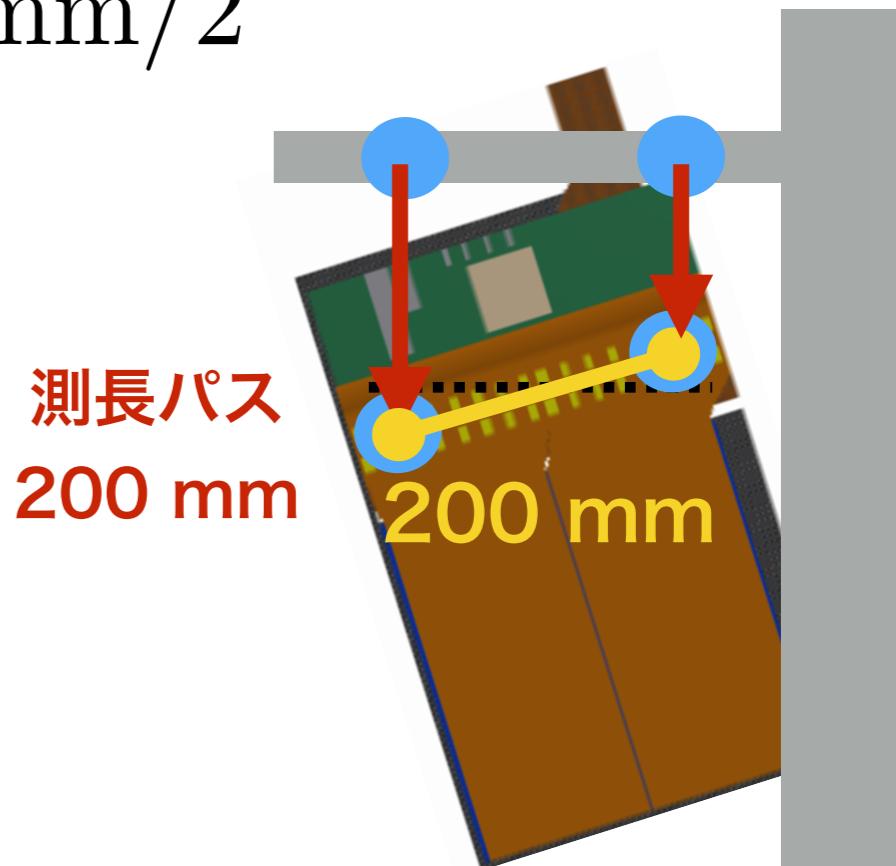
## ■結論

- 得られた  $\delta L$  より、ミューオンEDMへの系統誤差を検討
- 測長パス 200 mm の時の測長精度より検出器の傾き誤差

$$\delta L(@200 \text{ mm}) = 3 \mu\text{m}$$

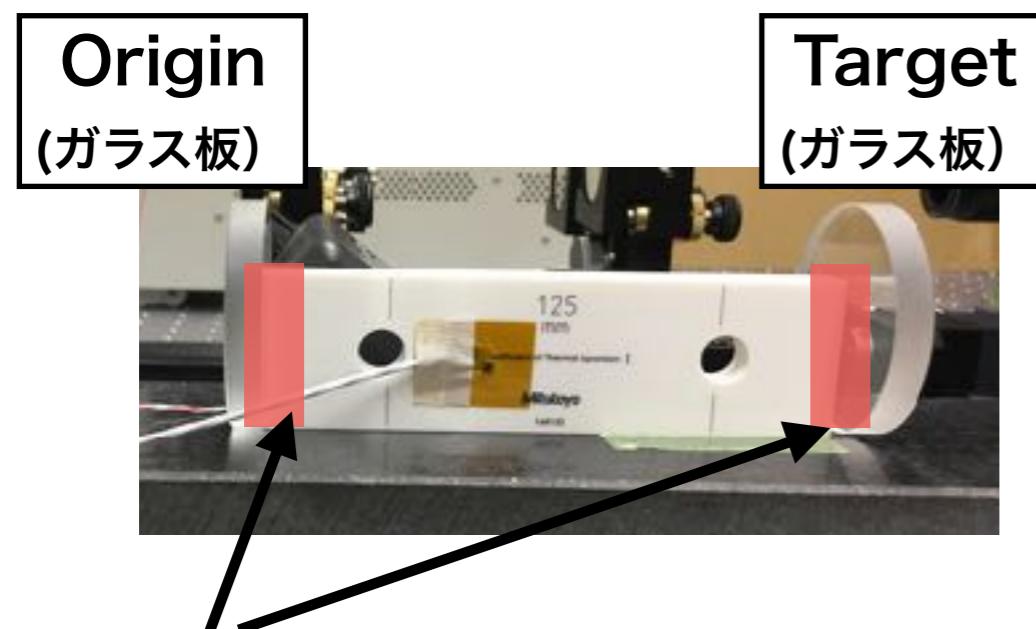
$$\frac{3 \mu\text{m}}{200 \text{ mm}/2} = 30 \mu\text{rad}$$

誤差要因	$d_\mu (\times 10^{-21}) [\text{e} \cdot \text{cm}]$
Axial E-field	$10^{-3}$
Radial B-field	$10^{-5}$
Detector misalignment	<u>3</u>
-----	
統計誤差	1.4



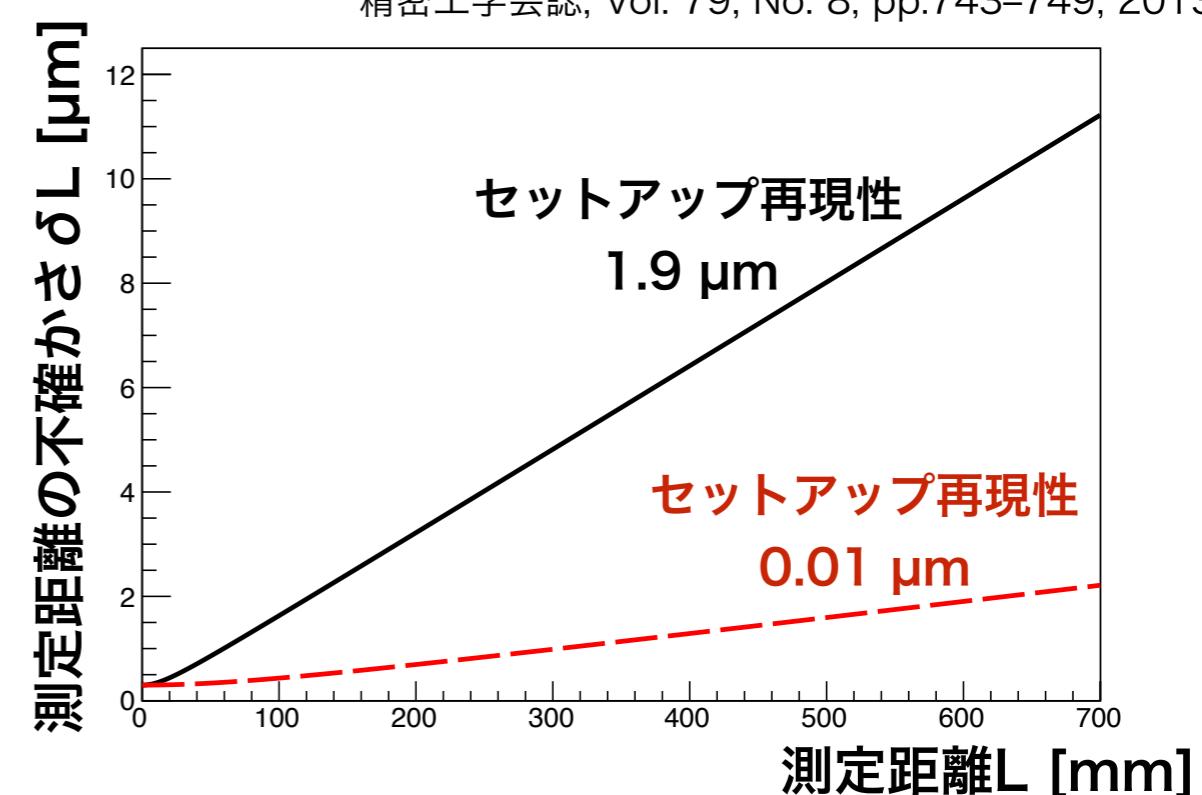
- 統計誤差と同じ大きさの系統誤差 → 測定精度向上の必要有

- $f_{\text{eta}}$ 校正の不確かさのほとんどがセットアップ再現性
- セットアップ再現性を向上することで測長精度向上
  - ゲージブロックのリンク（密着）による不確かさは密着の方法や表面の状態に依存する。一般的には最小で $0.01 \mu\text{m}$ まで抑制できる。



ガラス板とゲージブロックを密着(リンク)  
密着の正確さや表面の状態で不確かさが変わる

Ref. 小須田哲雄. ブロックゲージの基礎と応用.  
精密工学会誌, Vol. 79, No. 8, pp.743–749, 2013



## セットアップ再現性改善によって得られる系統誤差

$$\frac{0.7 \mu\text{m}}{200 \text{ mm}/2} = 7 \mu\text{rad}$$

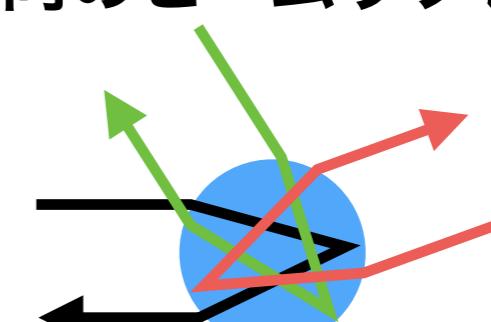
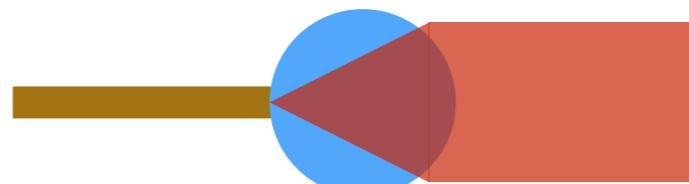
$$\delta d_\mu = 0.7 \times 10^{-21} \text{ e} \cdot \text{cm}$$

## ■アライメントモニターの開発

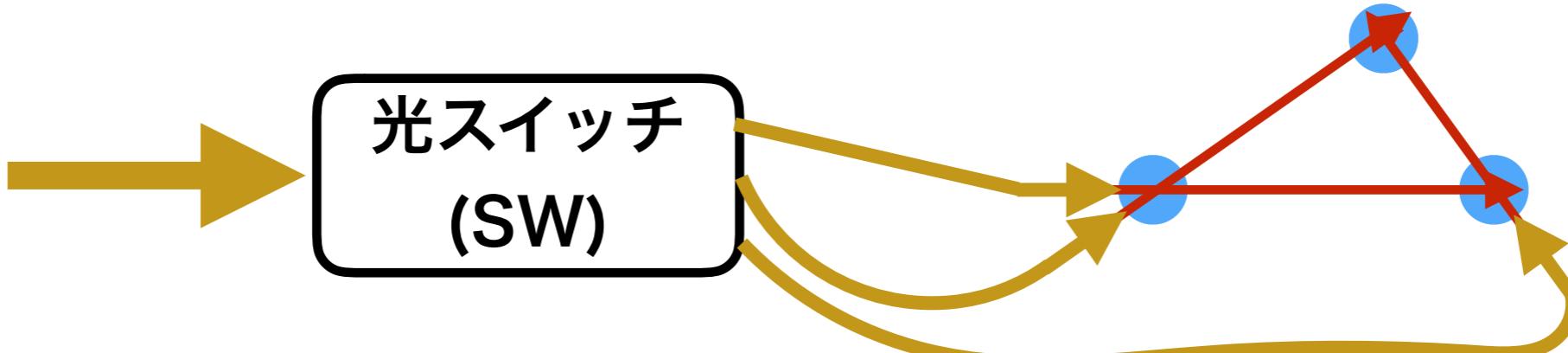
### ■長さ測定 L の精度評価（本研究）

### ■コンパクト化に向けたガラスボールレンズ干渉計の開発

複数方向のビームコリメータ 複数方向のビームリフレクター



### ■3次元測定に向けたスイッチングシステムの開発



## ■検出器ベースへの実装と試験

## ■本実験での稼働

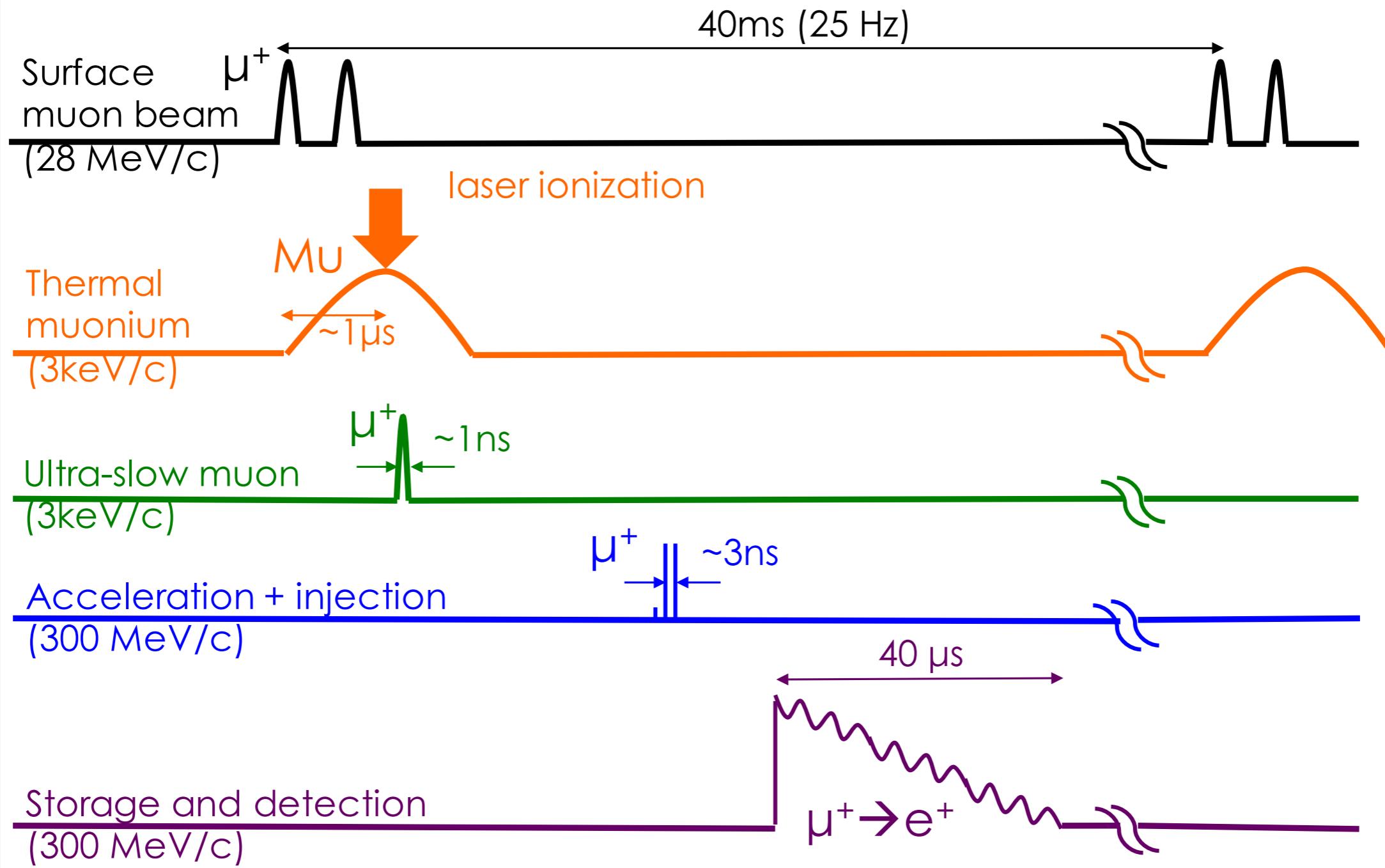
## 本研究の目的

測長可能な光周波数コムレーザー干渉計を作成し,  
測定長さLの精度を評価する.

- 測長可能な光周波数コムレーザー干渉計を作成し, 干渉縞を観測した.
- 市販レーザー変位計との比較測定を行い測定安定性は,  
$$0.32 \pm 0.04 \mu\text{m} \text{ (RMS)}$$
- ゲージブロックを利用してことで $f_{eta}$ を校正した
- 校正によって期待される絶対距離L 測定の不確かさは,  
$$\delta L \text{ (200 mm)} = 3 \mu\text{m}$$
- 期待されるミューオンEDMの系統誤差.  
$$\delta d_\mu = 3.0 \times 10^{-21} \text{ e} \cdot \text{cm}$$
- セットアップ再現性を向上することで, 長さ測定の精度を向上できる.

# BACK UP

## Experimental sequence



T. Mibe

■ g-2/EDMによるスピンの歳差運動

$$\vec{\omega} = -\frac{e}{m} \left[ a_\mu \vec{B} - \left( a_\mu - \frac{1}{\gamma^2 - 1} \right) \frac{\vec{\beta} \times \vec{E}}{c} + \frac{\eta}{2} \left( \vec{\beta} \times \vec{B} + \frac{\vec{E}}{c} \right) \right]$$

■ BNL-E821 / FNAL-E989実験

■ 魔法運動量と電場収束

$$\text{魔法運動量} \quad a_\mu - \frac{1}{\gamma^2 - 1} = 0$$

$$\vec{\omega} = -\frac{e}{m} a_\mu \vec{B}$$

■ J-PARC E34 実験

■ 極冷ビームと弱収束磁場

$$\vec{\omega} = -\frac{e}{m} \left[ a_\mu \vec{B} + \frac{\eta}{2} (\vec{\beta} \times \vec{B}) \right]$$

■ J-PARC/FNAL : g-2 0.14 ppm , EDM  $10^{-21}$  e · cm

## ■ モード同期法

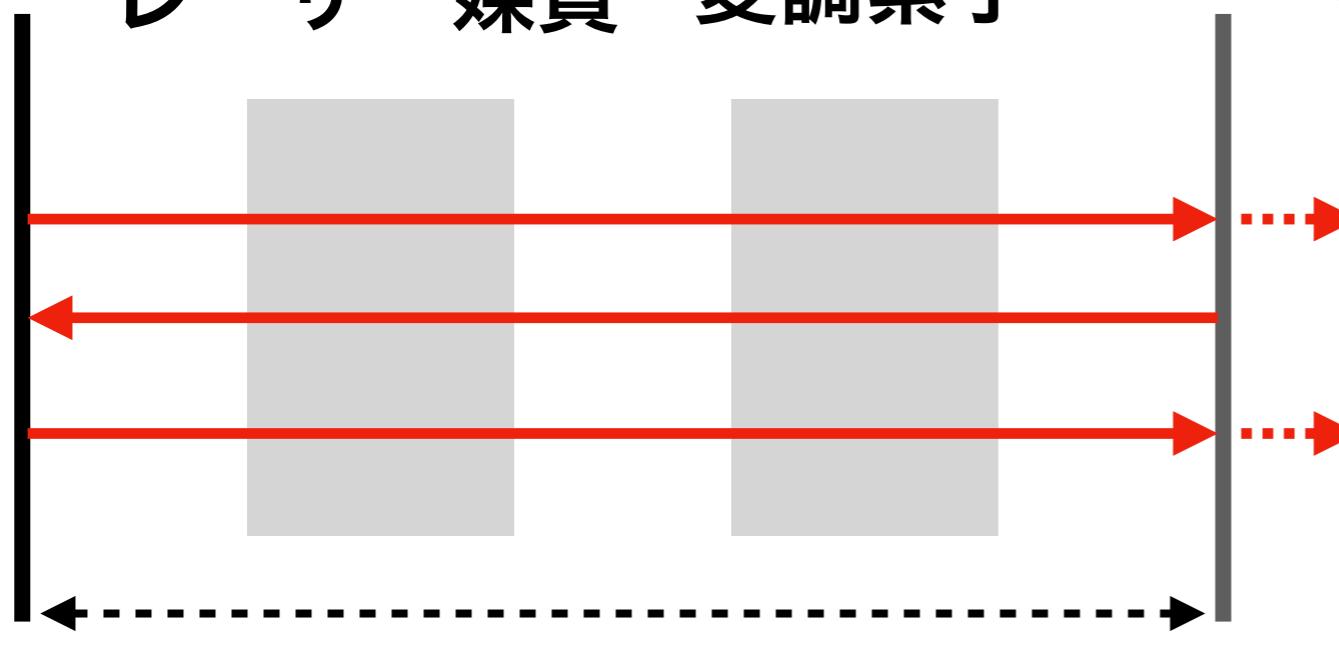
### ■ 広いスペクトル幅を持つレーザー媒質と共振器を利用

$$I = \frac{E_1^2}{2} + \frac{E_2^2}{2} + \frac{E_1 E_2}{2} \int_0^{\tau_D} dt \cos[(\omega_1 - \omega_2)t + \phi_1(t) - \phi_2(t)]$$

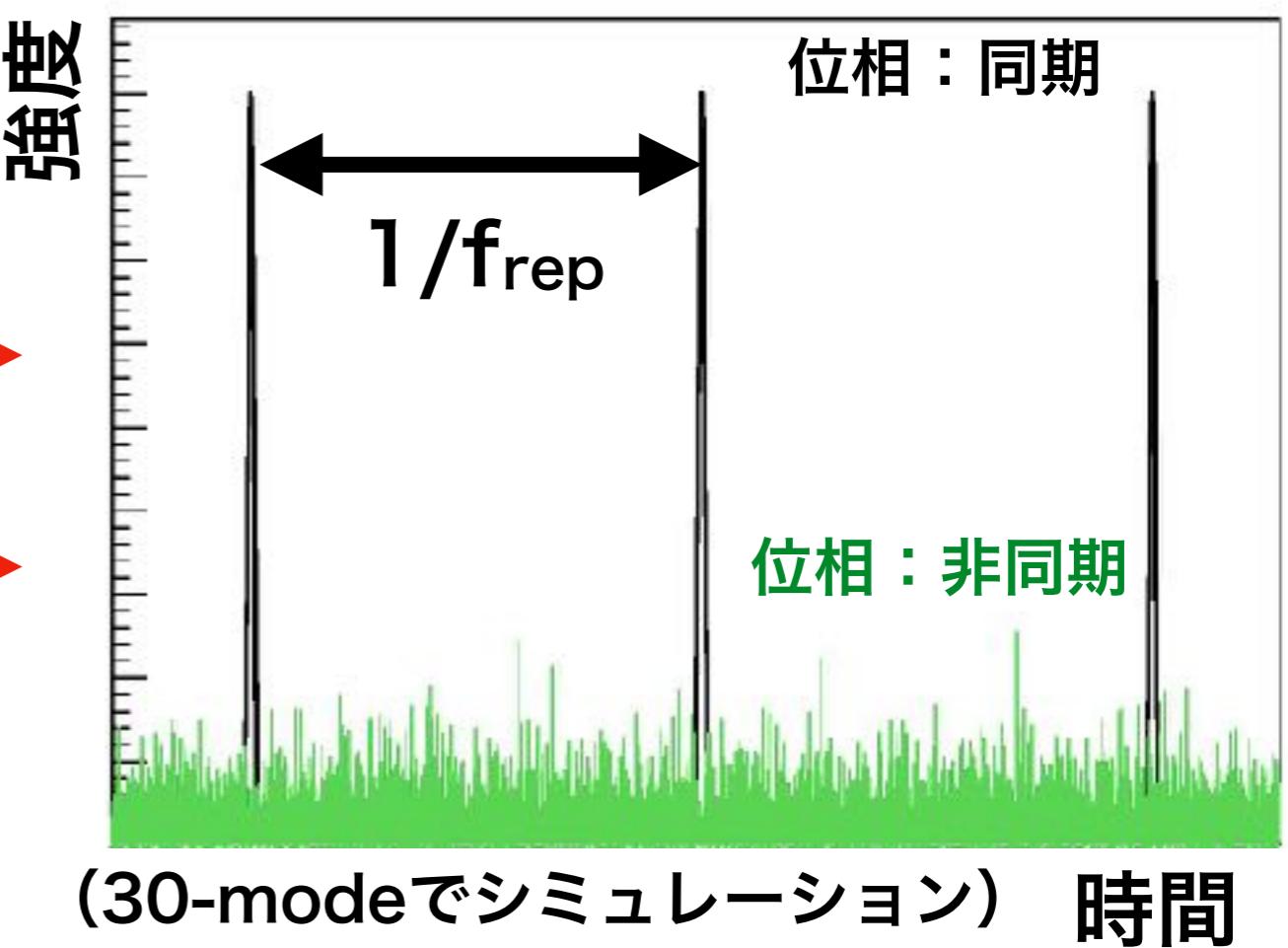
(2-modeの場合)

位相を同期することで  
強いパルス光が得られる

レーザー媒質 変調素子



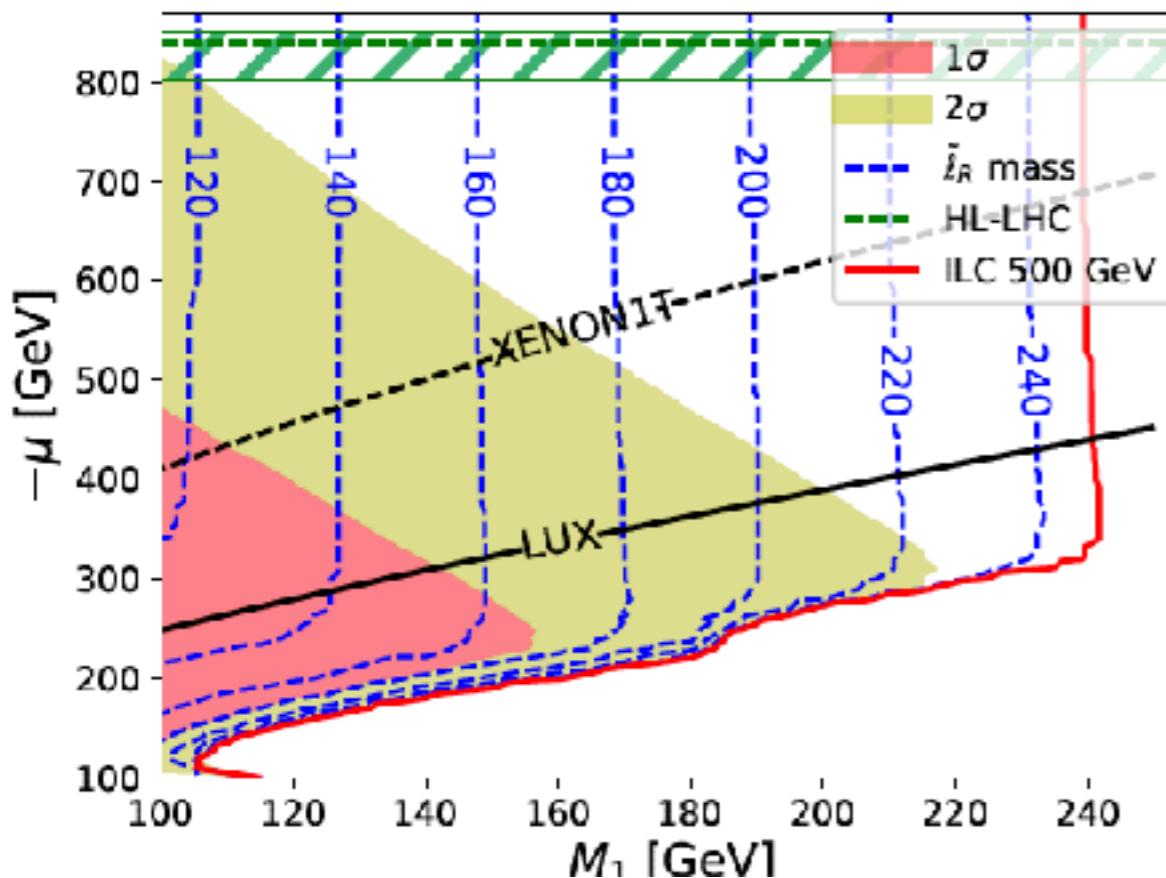
共振器長  $L$



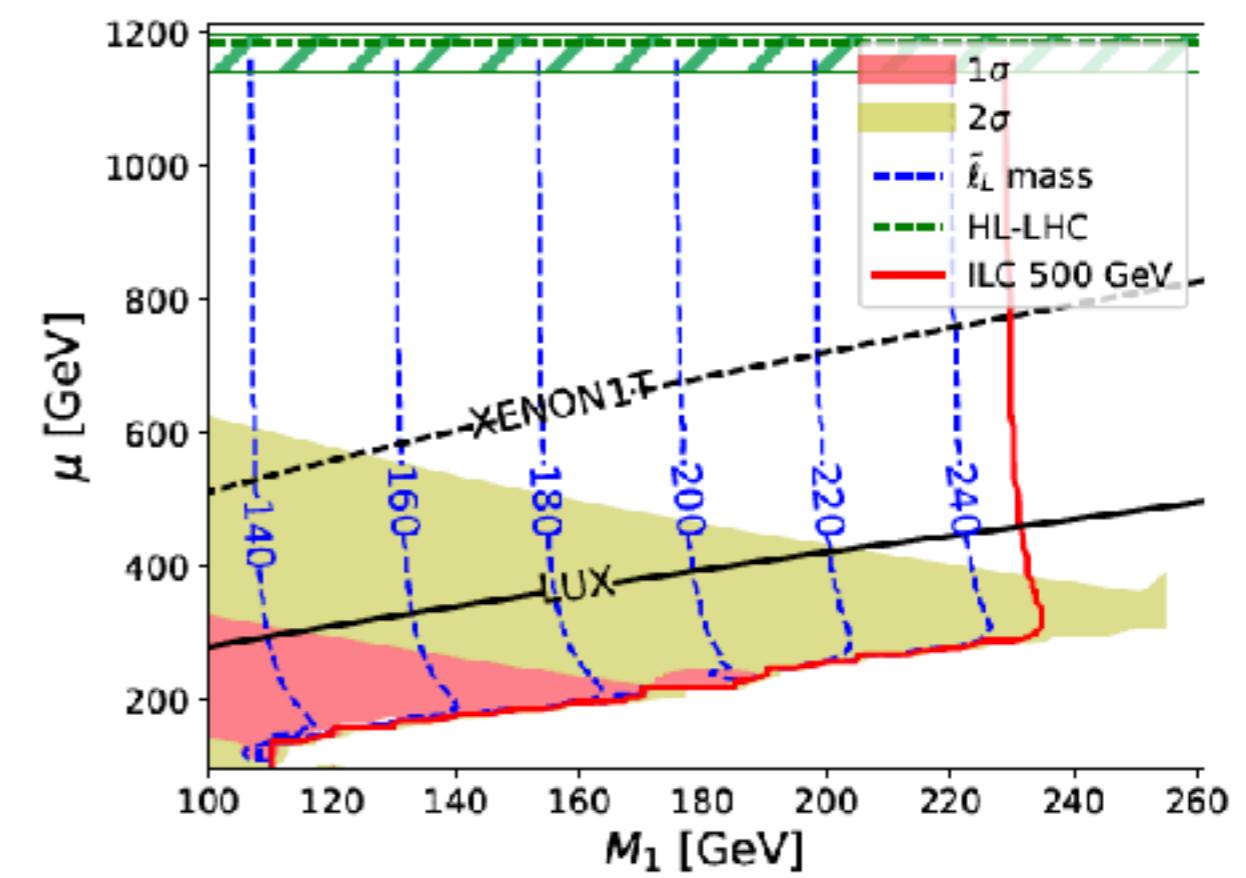
## Bino-Higgsino-slepton model ( $\tan\beta = 40$ )

JHEP06(2017)031, Motoi Endo, Koichi Hamaguchi, Sho Iwamotoe and Keisuke Yanagid

right-handed slepton



left-handed slepton



## ■ 電子の電気双極子モーメント $d_e(\text{SM})$ , $d_e(\text{exp})$

$$d_e(\text{SM}) \sim 10^{-38} \text{ e} \cdot \text{cm}$$

$$d_e(\text{exp}) < 0.87 \times 10^{-28} \text{ e} \cdot \text{cm}, \text{CL} = 90\%$$

## ■ 電子EDMの上限から期待されるミューオンのEDM

$$d_\mu(\text{exp}) < (m_\mu/m_e) d_e \sim 10^{-26}$$

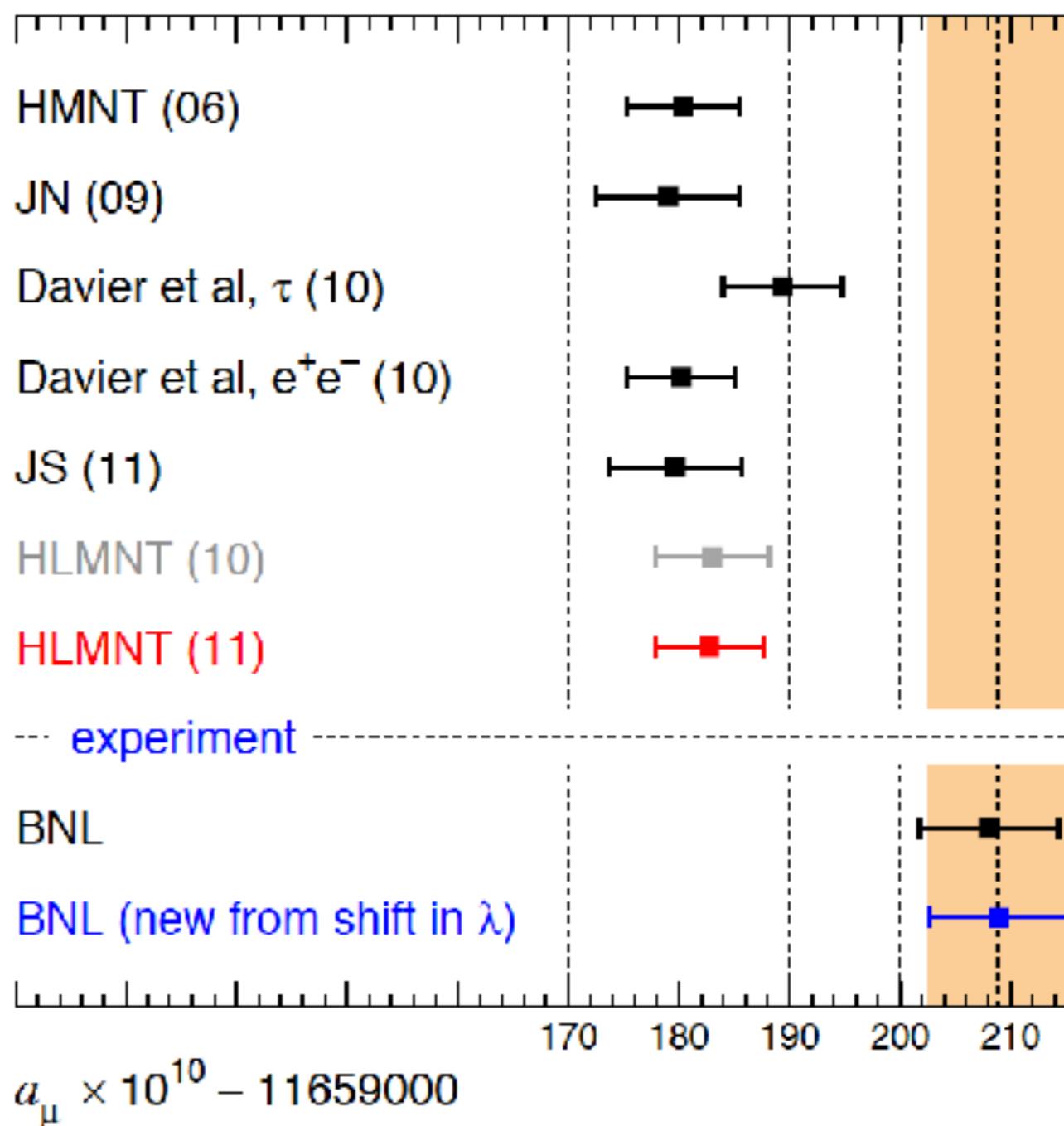
$$d_\mu(\text{exp}) < (m_\mu/m_e)^2 d_e \sim 10^{-24}$$

$$d_\mu(\text{exp}) < (m_\mu/m_e)^3 d_e \sim 10^{-22}$$

## ■ 質量比の3乗でスケールされるならば発見できる可能性有

# $a_\mu$ の標準模型による理論値

63



Hagiwara, Liao, Martin, Nomura, Teubner,  
arXiv: 1105.3149.

## ■ ミューオンの崩壊：弱い相互作用による三体崩壊

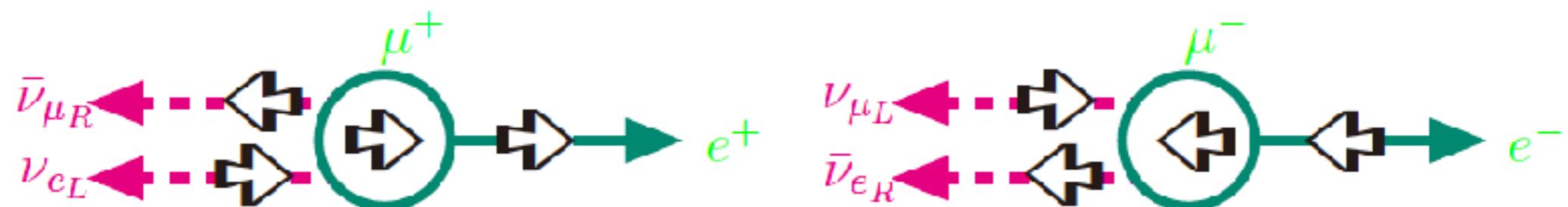


## ■ この崩壊による確率は、

$$T_{\text{out}} < e^-, \bar{\nu}_e \nu_\mu | \mu^- >_{\text{in}} = \frac{G_\mu}{\sqrt{2}} (\bar{u}_e \gamma^\alpha (1 - \gamma_5) v_{\nu_e}) (\bar{u}_{\nu_\mu} \gamma_\alpha (1 - \gamma_5) u_\mu)$$

■ 電子の放出方向がスピンの向き/逆向きに偏る

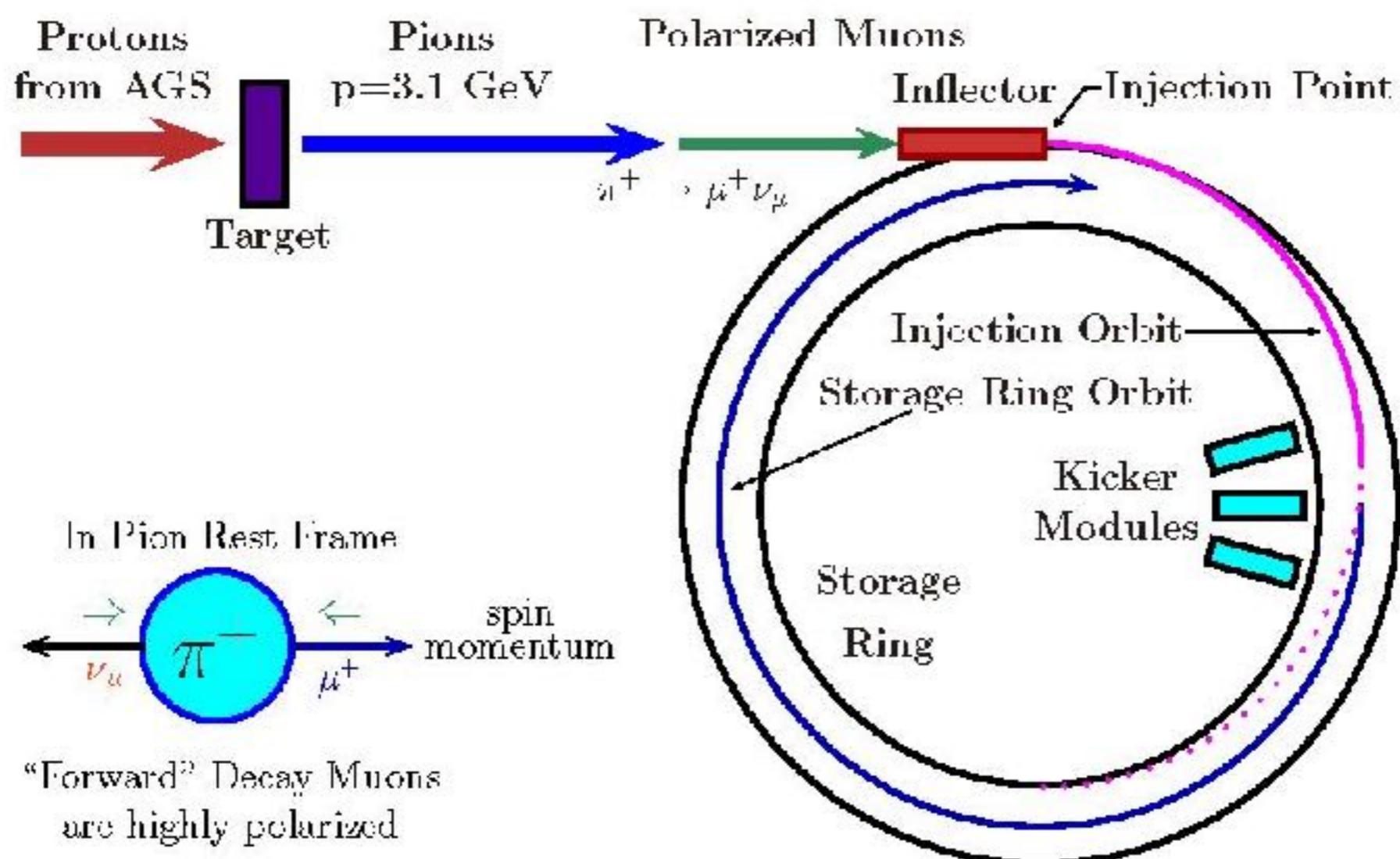
■ これは空間対称性(P対称性)を破る現象



## ■ BNL-E821実験の特徴

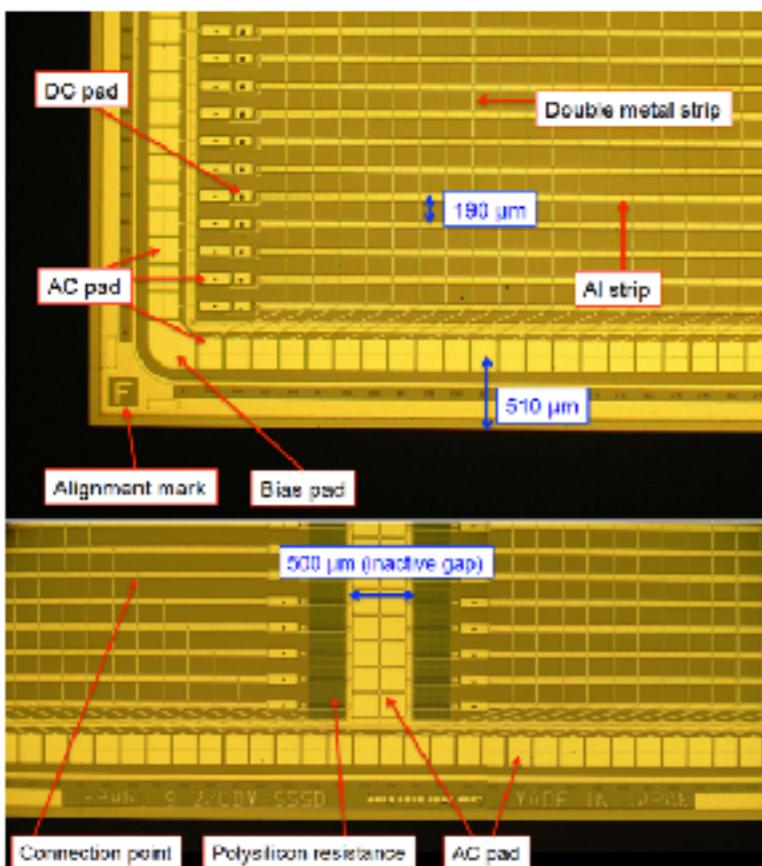
■ 広がったミューオンビーム -> 電場収束

■ 電場収束によるスピンの振動 -> 魔法運動量で打ち消し



# 陽電子飛跡検出器の仕様

66



Block	Parameter	Value
Analog	conversion gain dynamic range pulse width peaking time time walk noise number of channel	90 mV/fC 4 MIP 80 ns 25 ns <5 ns < 1600 e <sup>-</sup> 128
Digital	reference clock sampling period event buffer length serial outputs rate	200 MHz 5 ns 8k (40.96 μs) 100 Mbps
Mechanical	chip size thickness pad pitch	<9 mm × 5 mm ~300 μm 60 μm
Electrical	supply voltages power consumption	±0.9 V, 2.4 V, GND <5 mW/ch

Table 10.5: Specifications of the Slit128A

E34実験ではビーム由来の系統誤差はない。

系統誤差要因	R99 [ppm]	R00 [ppm]	R01 [ppm]
Pileup	0.13	0.13	0.08
AGS beam background	0.10	0.01	< 0.1 *
Lost Muons	0.10	0.10	0.09
Timing Shifts	0.10	0.02	< 0.1 *
E-field nad pitch	0.08	0.03	< 0.1 *
Fitting / Binning	0.07	0.06	< 0.1 *
Coherent Betatron Oscillation	0.05	0.21	0.07
Gain Changes	0.02	0.13	0.12
Total ( $\omega_a$ )	0.3	0.31	0.21

## ■ 物質優勢宇宙を満たすには(Saharov 1964)

- 1. 高温高密度下の宇宙初期に物質数を破る相互作用
- 2. CP対称性の破れ
- 3. 非平衡状態

## ■ レプトン数と物質数の関係

- 反レプトン数  $\rightarrow$  物質数 (Fukugita,T.Y. (1986))

## ■ 初期宇宙が反レプトン優勢宇宙ならば,

現在の物質優勢宇宙を説明できる。

## ■ レプトン数を破るような現象

- レプトン  $\rightarrow$  反レプトン : CP対称性を破る現象

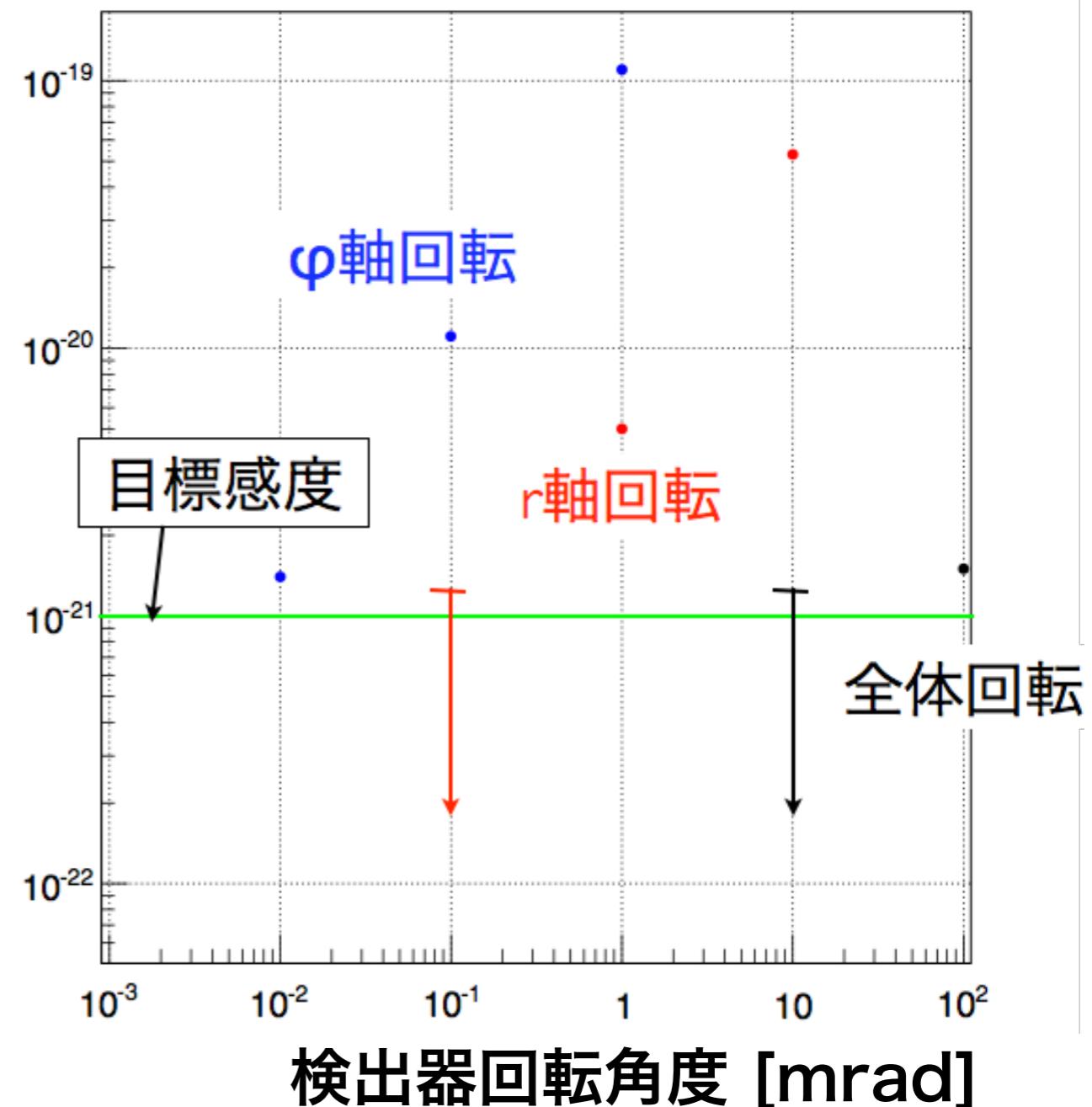
■ 4つのパターンの傾き方にて、検出器角度を変えてEDM信号の大きさをシミュレーションした。

■ 最も影響するのは、EDMによるスピン回転面の傾きと同じ $\phi$ 軸回転である。

■ 目標感度  $10^{-21} \text{ e} \cdot \text{cm}$  よりも低い偽EDM信号にするには  $10 \mu\text{rad}$  よりも小さい傾きの必要がある。

傾き方	傾けた角度	$A_{\text{EDM}}$	相当する EDM の大きさ $d_\mu$
検出器全体回転	100 mrad	$(3.2 \pm 1.7) \times 10^{-6}$	$1.5 \times 10^{-21} \text{ e cm}$
	10 mrad	$(1.0 \pm 1.7) \times 10^{-6}$	$< 1.3 \times 10^{-21} \text{ e cm (90\% C.L.)}$
	1 mrad	$(0.7 \pm 1.7) \times 10^{-6}$	$< 1.3 \times 10^{-21} \text{ e cm (90\% C.L.)}$
$r$ 軸回転	1 mrad	$(-1.1 \pm 0.2) \times 10^{-5}$	$5.0 \times 10^{-21} \text{ e cm}$
	0.1 mrad	$(-0.6 \pm 1.7) \times 10^{-6}$	$< 1.3 \times 10^{-21} \text{ e cm (90\% C.L.)}$
	0.01 mrad	$(0.4 \pm 1.7) \times 10^{-6}$	$< 1.3 \times 10^{-21} \text{ e cm (90\% C.L.)}$
	0.001 mrad	$(0.5 \pm 1.7) \times 10^{-6}$	$< 1.3 \times 10^{-21} \text{ e cm (90\% C.L.)}$
$\phi$ 軸回転	1 mrad	$(2.41 \pm 0.02) \times 10^{-4}$	$1.10 \times 10^{-19} \text{ e cm}$
	0.1 mrad	$(2.46 \pm 0.17) \times 10^{-5}$	$1.1 \times 10^{-20} \text{ e cm}$
	0.01 mrad	$(3.0 \pm 1.7) \times 10^{-6}$	$1.4 \times 10^{-21} \text{ e cm}$
	0.001 mrad	$(0.7 \pm 1.7) \times 10^{-6}$	$< 1.3 \times 10^{-21} \text{ e cm (90\% C.L.)}$
$z$ 軸回転	100 mrad	$(0.05 \pm 1.7) \times 10^{-6}$	$< 1.3 \times 10^{-21} \text{ e cm (90\% C.L.)}$
	10 mrad	$(0.5 \pm 1.7) \times 10^{-6}$	$< 1.3 \times 10^{-21} \text{ e cm (90\% C.L.)}$
	1 mrad	$(0.5 \pm 1.7) \times 10^{-6}$	$< 1.3 \times 10^{-21} \text{ e cm (90\% C.L.)}$

偽EDM信号の大きさ [ $\text{e} \cdot \text{cm}$ ]



ref. 西村昇一郎, 修士論文, 東大理

- EDM信号は上方向と下方向に放出される陽電子数の非対称度 $A_{UD}$ として得られる。

$$A_{UD} = \frac{N_{\text{up}} - N_{\text{down}}}{N_{\text{up}} + N_{\text{down}}}$$

- 非対称度の振動はg-2の信号と同じ周波数であるが、位相は $\pi/2$ ずれたものとして得られる。

$$A_{UD} = \frac{A_{\text{EDM}} \sin(\omega t + \phi)}{1 + A \cos(\omega t + \phi)}$$

- EDM測定の統計誤差  $1.3 \times 10^{-21} \text{ e} \cdot \text{cm}$  に対応する  $A_{\text{EDM}}$  の大きさは  $A_{\text{EDM}} \sim 1.6 \times 10^{-6}$

## ■ 必要なパスの数（見積もり）

### ■ 対向する1組2枚のベーン

- ベーン上の6点

- 6つの参照点

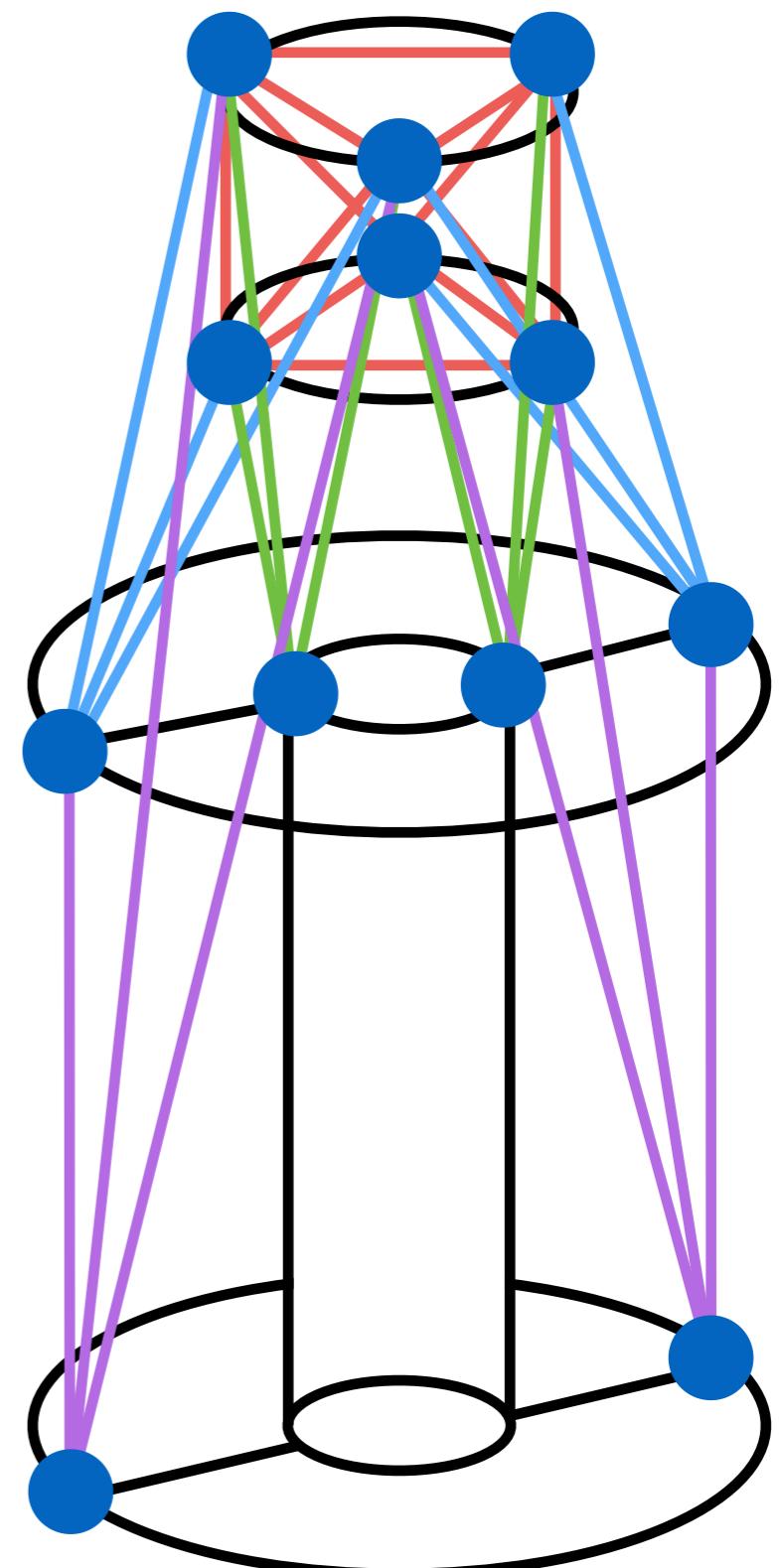
→ 12点, 30パス

### ■ 対向する24組48枚のパス

- ベーン上の6点 × 24

- 6つの参照点

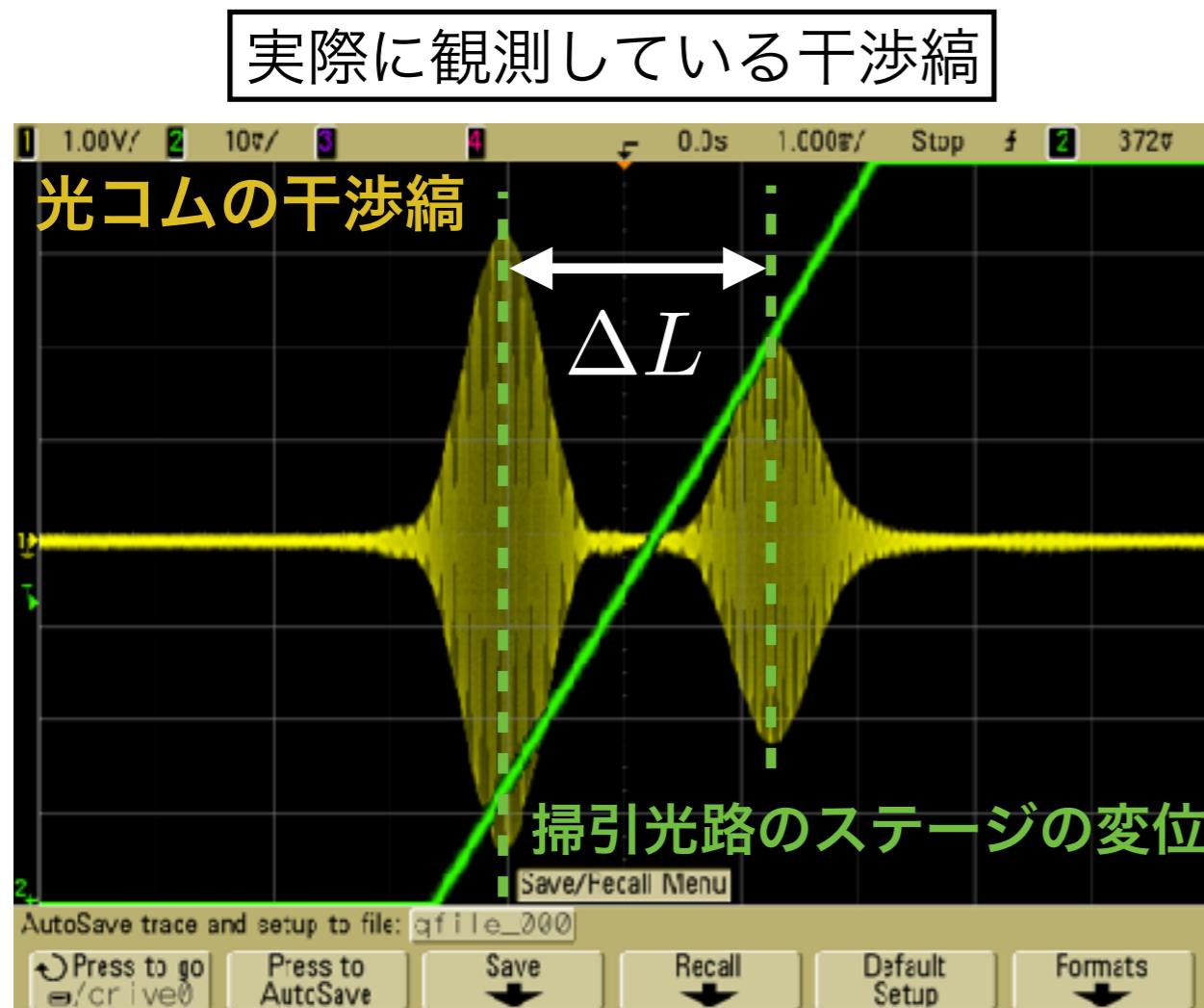
→ 150点, 444パス



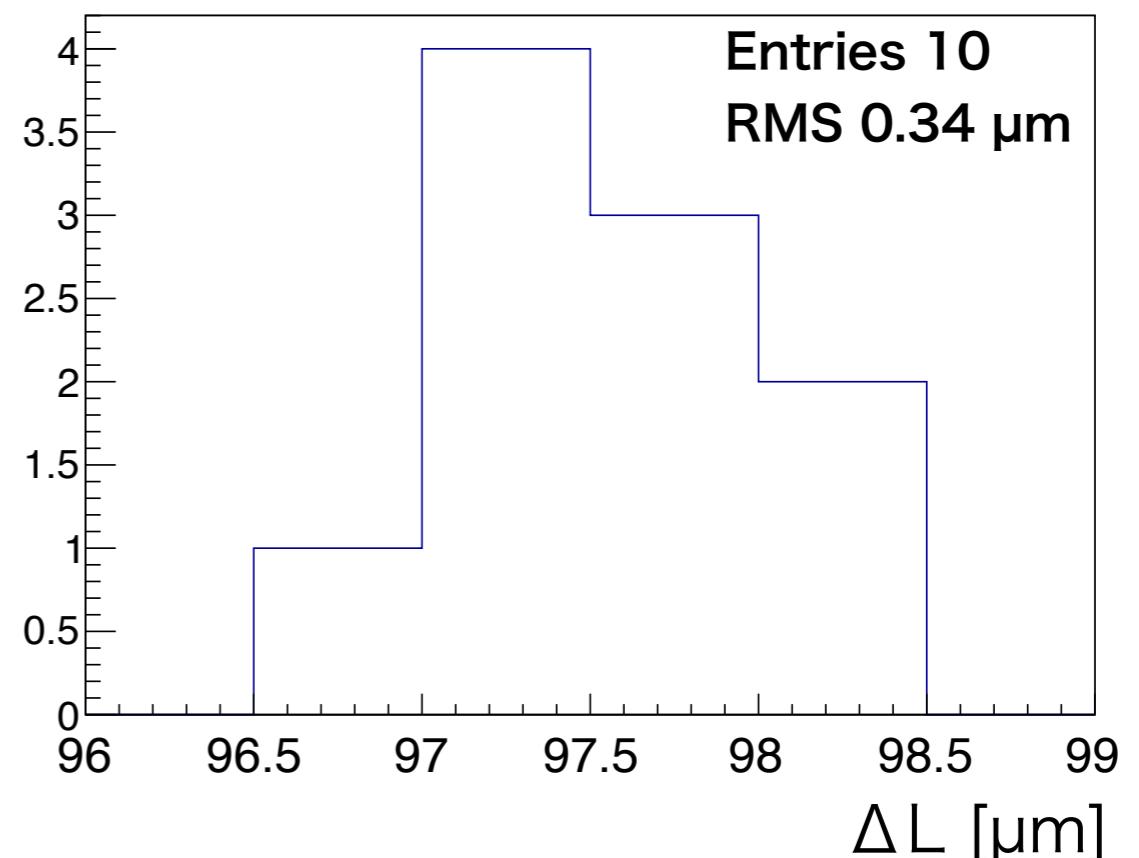
# 干渉縞間の距離 $\Delta L$ の測定

72

- 10回の繰り返し測定を行い、手法による不確かさを見積もった。
- 相対距離比較測定の時と同程度の不確かさが得られた。



測定した $\Delta L$ の分布



$$\Delta L = 97.5 \pm 0.3 \mu\text{m} (\text{RMS})$$