

# J-PARC muon g-2/EDM 実験 検出器アライメントモニターの開発

2017/09/14 日本物理学会2017年秋季大会@宇都宮大学峰キャンパス

安田浩昌、伊藤拓実<sup>A</sup>、Wiroj SUDATHAM<sup>B</sup>、川越清以<sup>A</sup>、久米達哉<sup>C</sup>、齊藤直人<sup>D</sup>、  
佐藤優太郎<sup>D</sup>、末原大幹<sup>A</sup>、高増潔<sup>B</sup>、堤裕樹<sup>A</sup>、東城順治<sup>A</sup>、西村昇一郎、三部勉<sup>D</sup>、  
山中隆志<sup>E</sup>、吉岡瑞樹<sup>E</sup>、他 J-PARC muon g-2/EDM Collaboration

東大理、九大理<sup>A</sup>、東大工<sup>B</sup>、KEK機械工セ<sup>C</sup>、KEK素核研<sup>D</sup>、九大RCAPP<sup>E</sup>

# 目次

## ■ Introduction

■ J-PARC E34実験 (ミューオンg-2/EDM測定)

■ 検出器ミスマライメントによるEDM測定の系統誤差

## ■ 光コムパルスレーザーを用いた干渉計の測長原理

## ■ ゲージブロックを使った絶対距離の比較測定に向けたセットアップ

## ■ 干渉計での絶対距離測定の不確かさ要因の考察

## ■ まとめと展望

■ 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

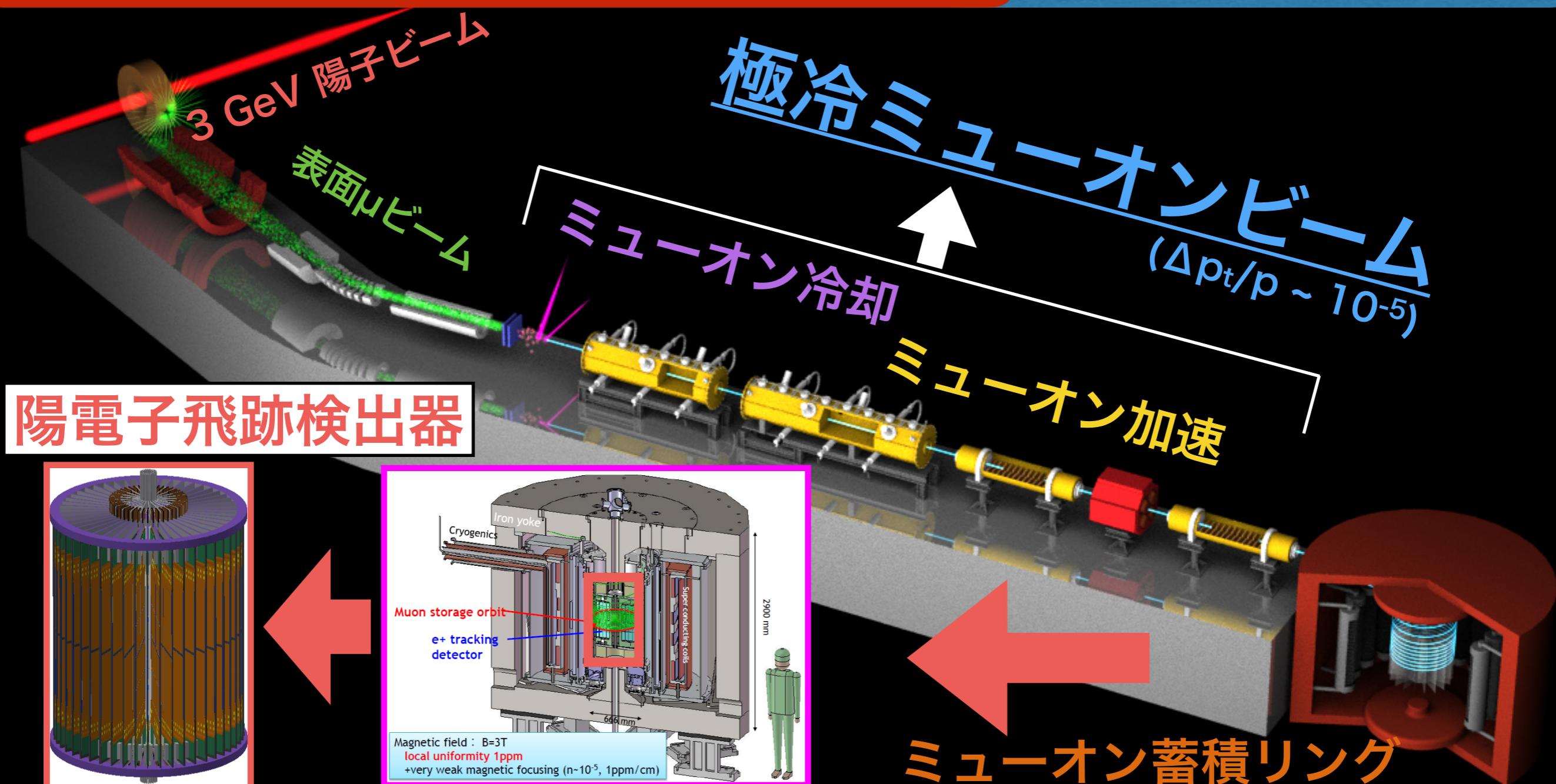
異常磁気モーメント(g-2) : 精度 0.1 ppm

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

## Physics

→ SMの検証( $3.3\sigma$ @BNL)

→ CPの破れの探索



■ **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

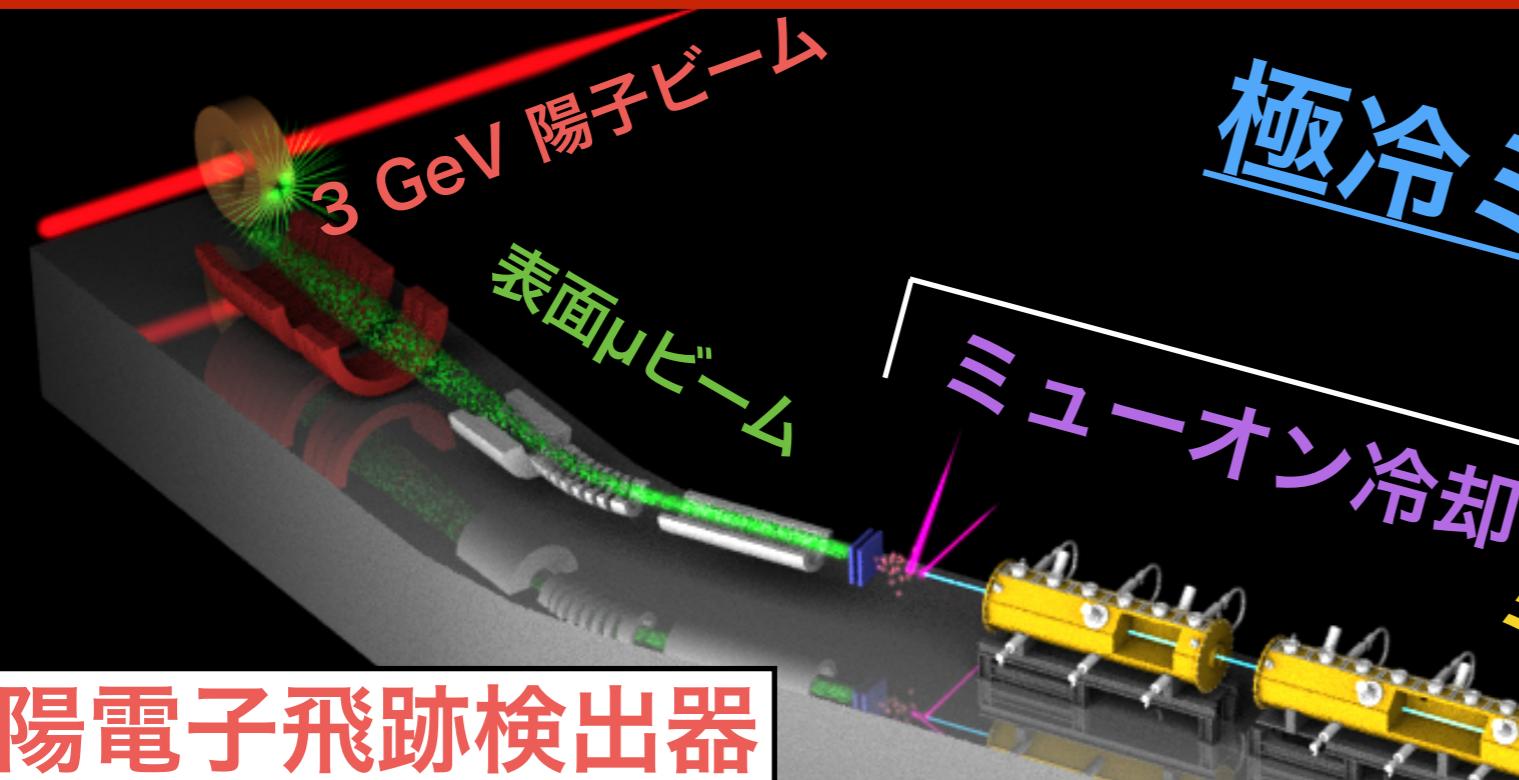
異常磁気モーメント(g-2) : 精度 0.1 ppm

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

## Physics

→ SMの検証( $3.3\sigma$ @BNL)

→ CPの破れの探索



## 陽電子飛跡検出器

12pS35-3 佐藤優太郎 (KEK素核研)

12pS36-6 伊藤拓実 (九大理)

12pS36-7 堤祐樹 (九大理)

12pS36-8 西村昇一郎 (東大理)

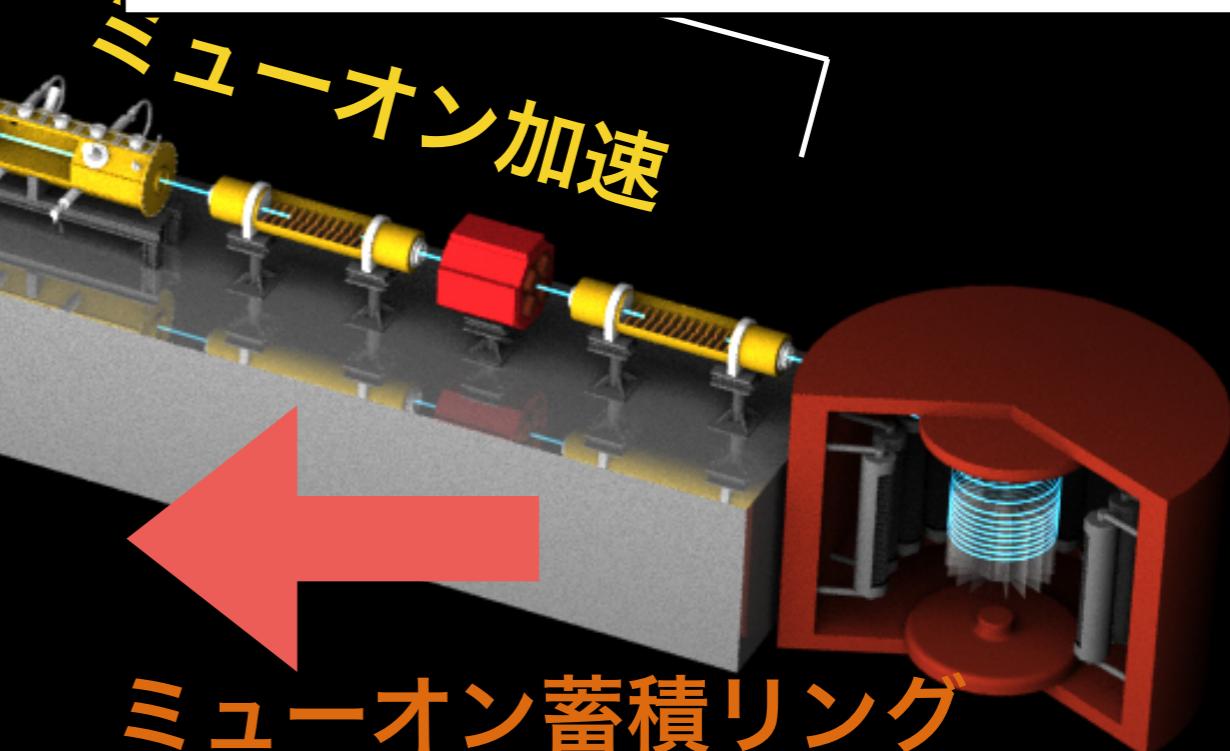
## 超低速ミューオンの生成

13pS36-1 Li Sirui (東大理)

## ミューオン線形加速

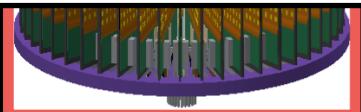
13aT21-4 北村遼 (東大理)

13aT21-5 大谷将士 (KEK)



**ミューオン蓄積リング**

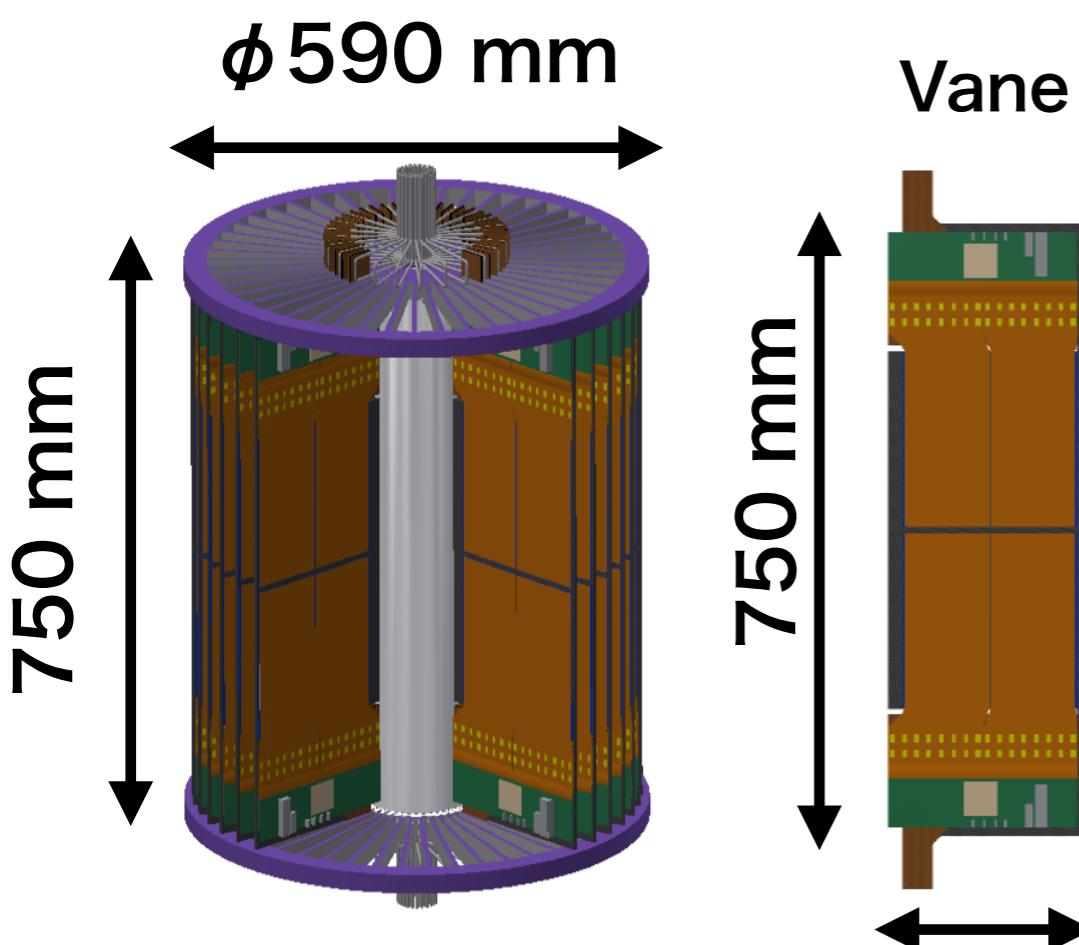
Magnetic field : B=3T  
local uniformity 1ppm  
+very weak magnetic focusing ( $n \sim 10^{-5}$ , 1ppm/cm)



## ■ 検出器のミスアライメント

- ミューオンEDMは陽電子運動量の上下非対称度の振動として観測される。
- 検出器が $10 \mu\text{rad}$ 回転すると目標精度の偽のEDM信号が見える。
- 検出器位置を $1 \mu\text{m}$ 以内の不確かさで決定し、維持する必要がある。
- 長期（1年間）に高精度で測定できるアライメントモニターが必要になる。

陽電子飛跡検出器の全体図

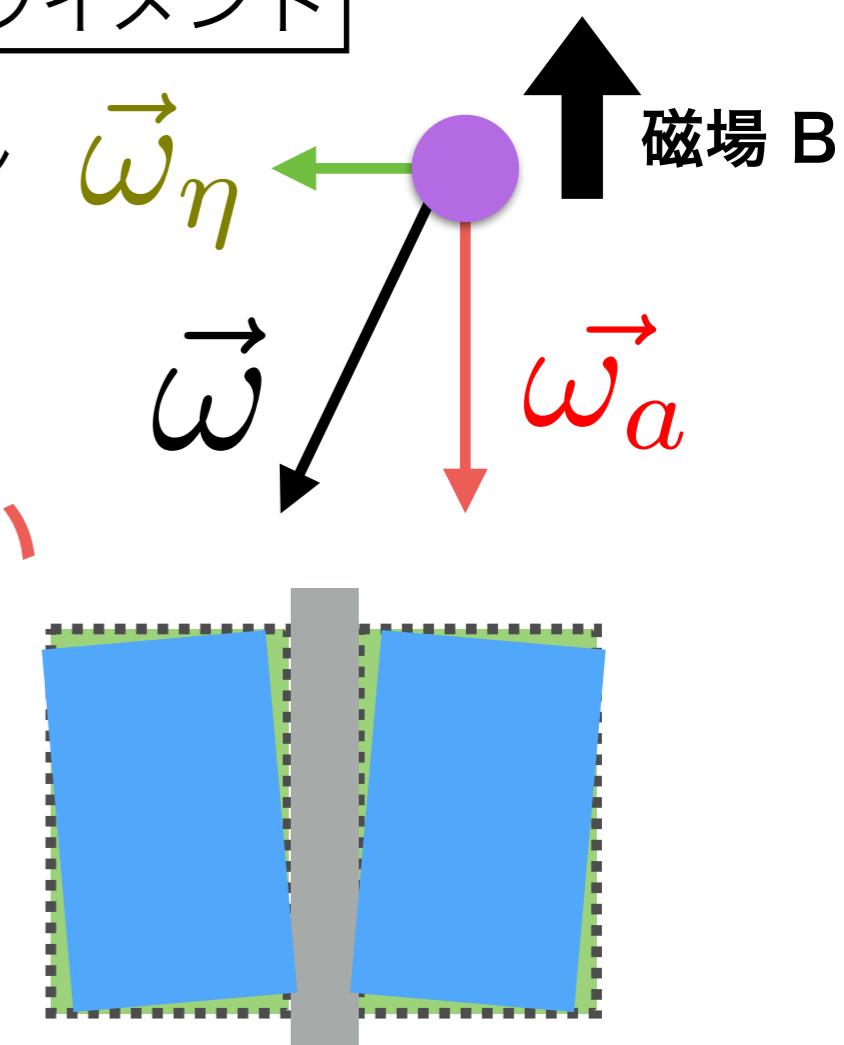


検出器のミスアライメント

EDMによるスピン  
回転平面の傾き

区別できない

検出器の  
 $10 \mu\text{rad}$ 回転



# 光コムレーザー

■ 検出器の設置環境

■ 真空 ( $\sim 1 \text{ Pa}$ )

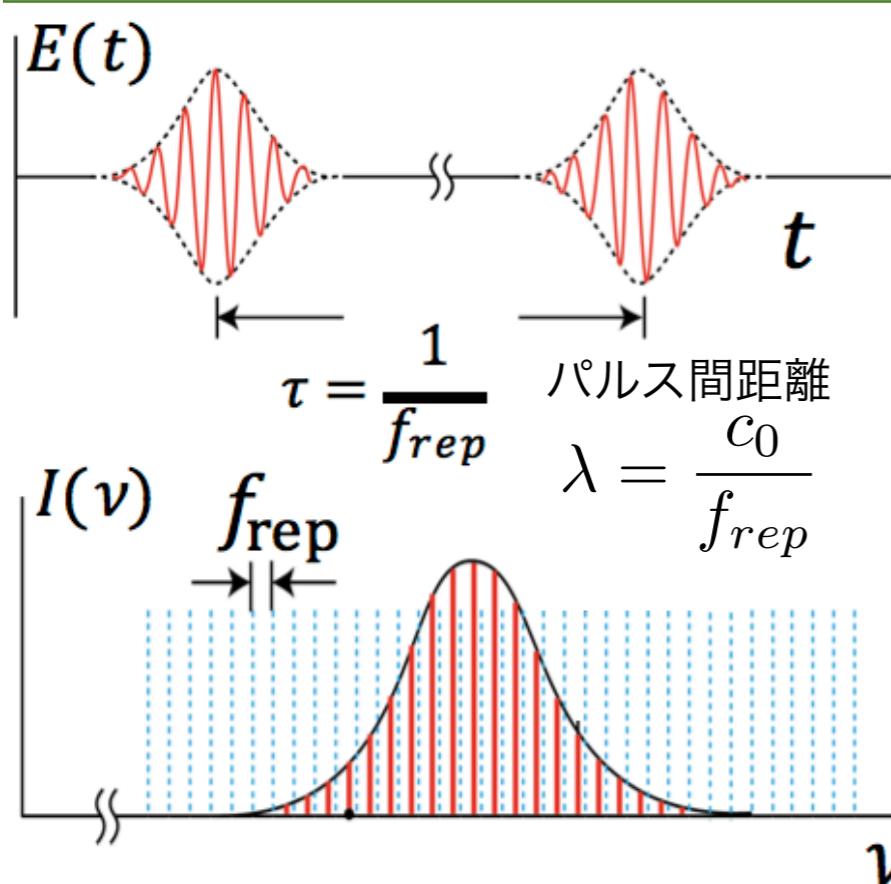
■ 高磁場 (3 T)

■ 狹い設置スペース



ファイバー導入型の干渉計で  
精密機器を検出器外部へ

## Optical Comb Laser



■ 光コムレーザー

■ 櫛(comb)状の周波数構造

■ 時間標準器によってパルス間距離が  
 $10^{-12}/\text{m}$ で安定

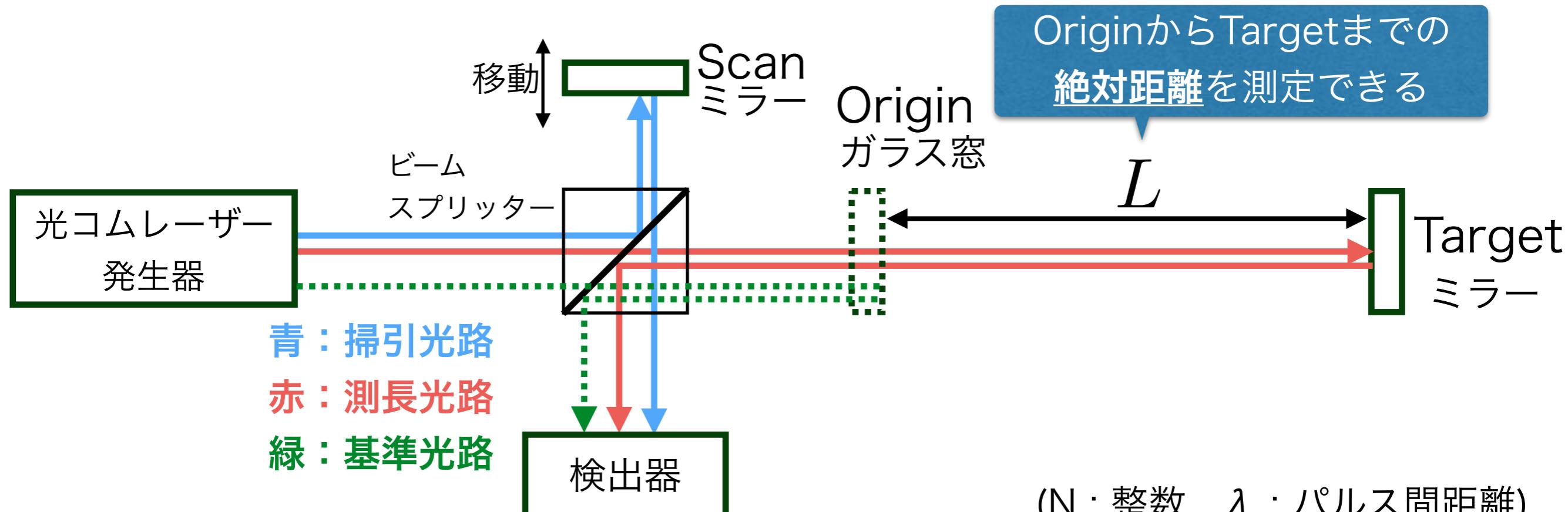
→非常に正確なパルス間隔を実現

長期間にわたる精密な測定が可能

# 測長原理

## 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。

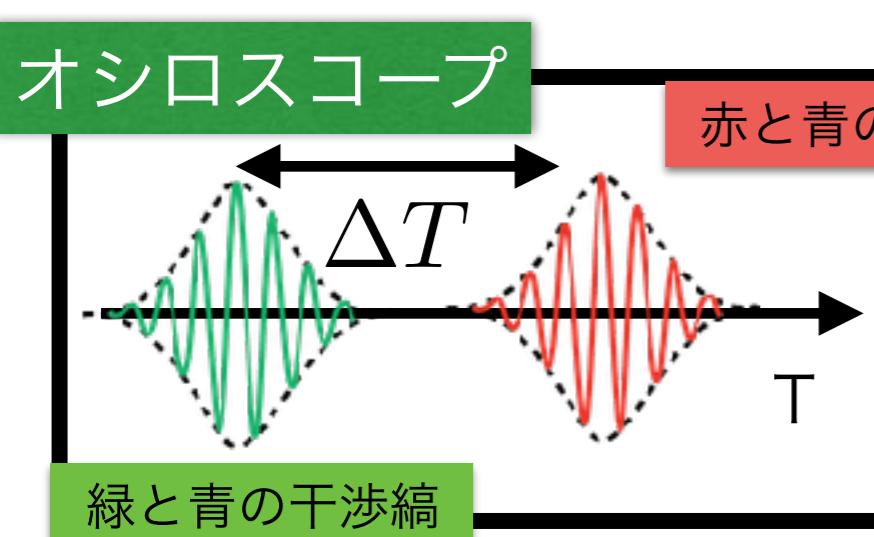


(N : 整数 ,  $\lambda$  : パルス間距離)

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

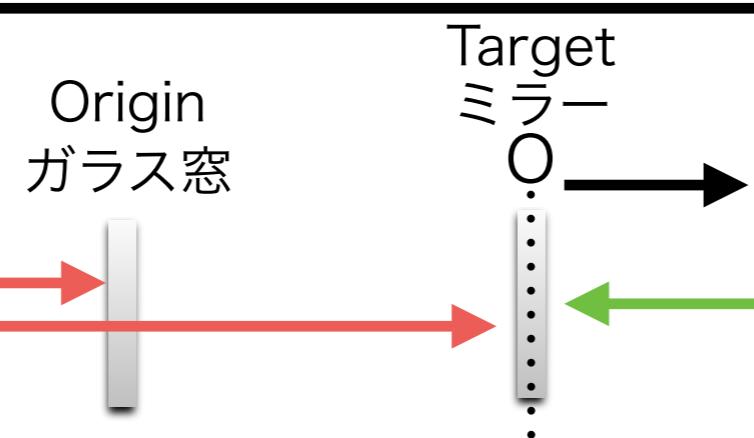
レーザーのパルス間距離  
の半整数倍(固有値)

二つの干渉縞間の時間  $\Delta T$  と  
ステージの速度から求まる



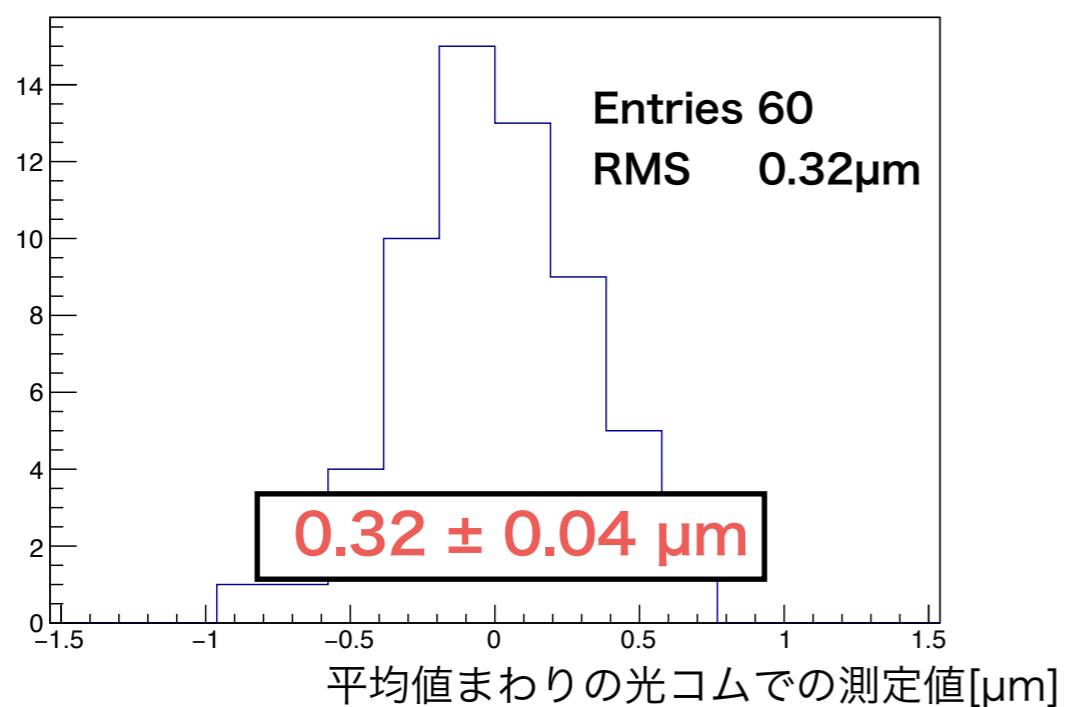
## ■前回 (JPS2017春@大阪) での報告内容

### 相対距離測定

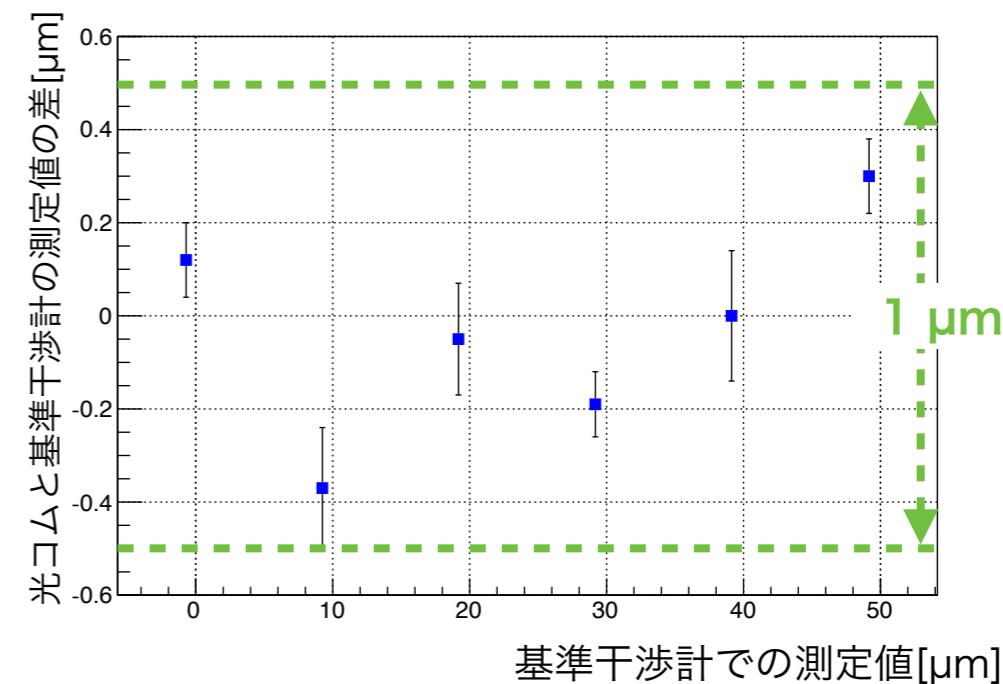


基準干渉計

### 光コムの測定データの不確かさ



### 光コムと基準干渉計で測定した変位の差



■相対距離の比較測定で測定の不確かさが1  $\mu\text{m}$ 以内であることを確認した。

# R&D Status

9

2013年

検出器ミスアライメントによる  
EDM系統誤差のシミュレーション

西村 JPS2013秋

2014年  
～2015年

アライメントモニターの  
コンセプト決定

西村 JPS2015春  
久米 IWAA2016

2016年秋  
～2017年

光コムレーザーを用いた  
1次元測長系での原理実証

安田 JPS2017春  
**本講演**

2017年～

3次元マルチパス測長系での原理実証

アライメントモニター実機試験

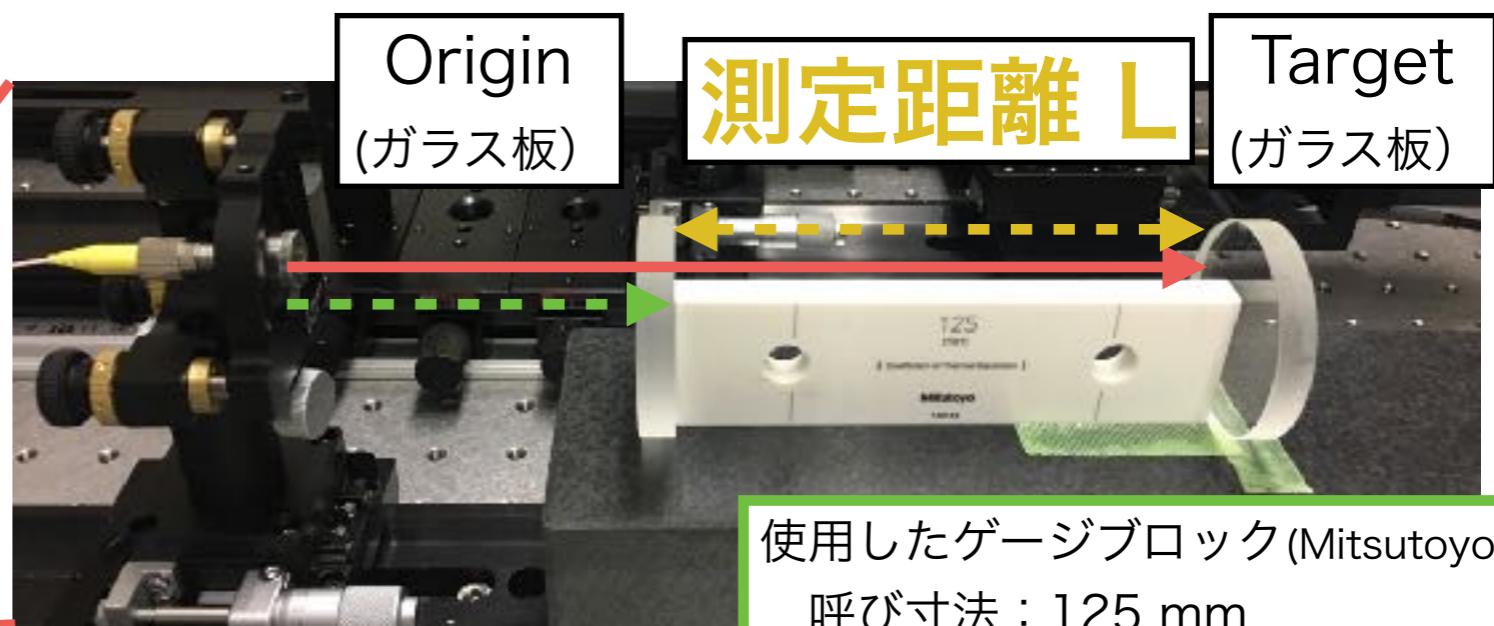
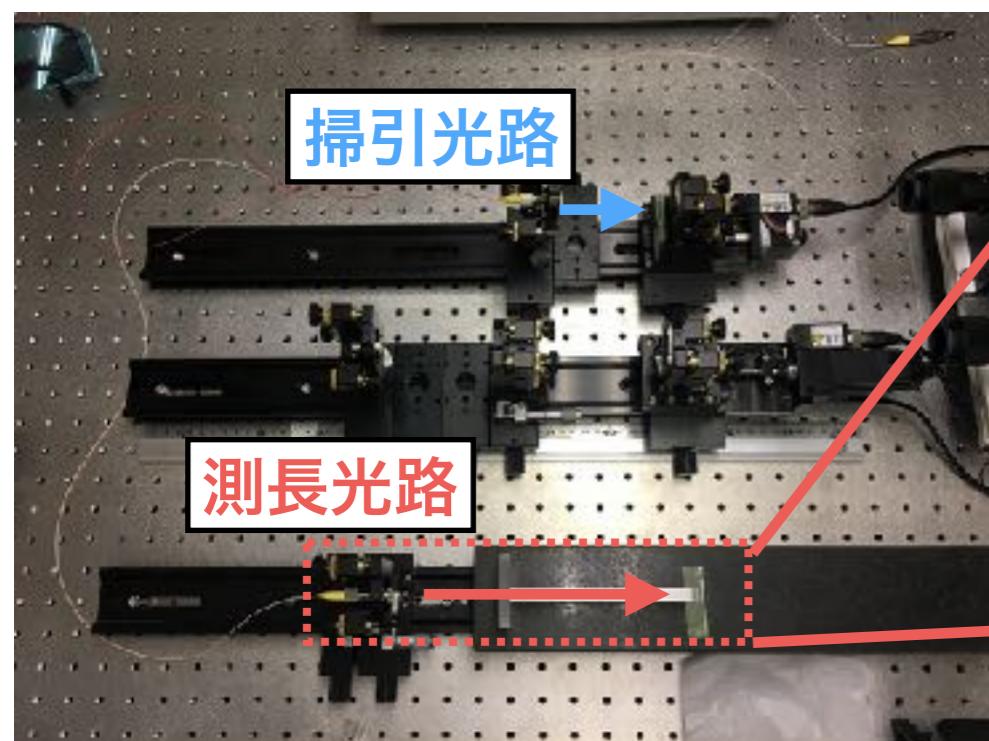
J-PARC E34 本実験

本講演の  
内容

- ゲージブロックを使った干渉計での絶対距離の比較測定に向けた準備。
- 不確かさ要因の見積もり。

# 干渉計の測長精度評価に向けたセットアップ 10

- 目的：光コムレーザー干渉計を用いて基準系（ゲージブロック）の長さを測定し、干渉計の測長不確かさを評価
- 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）

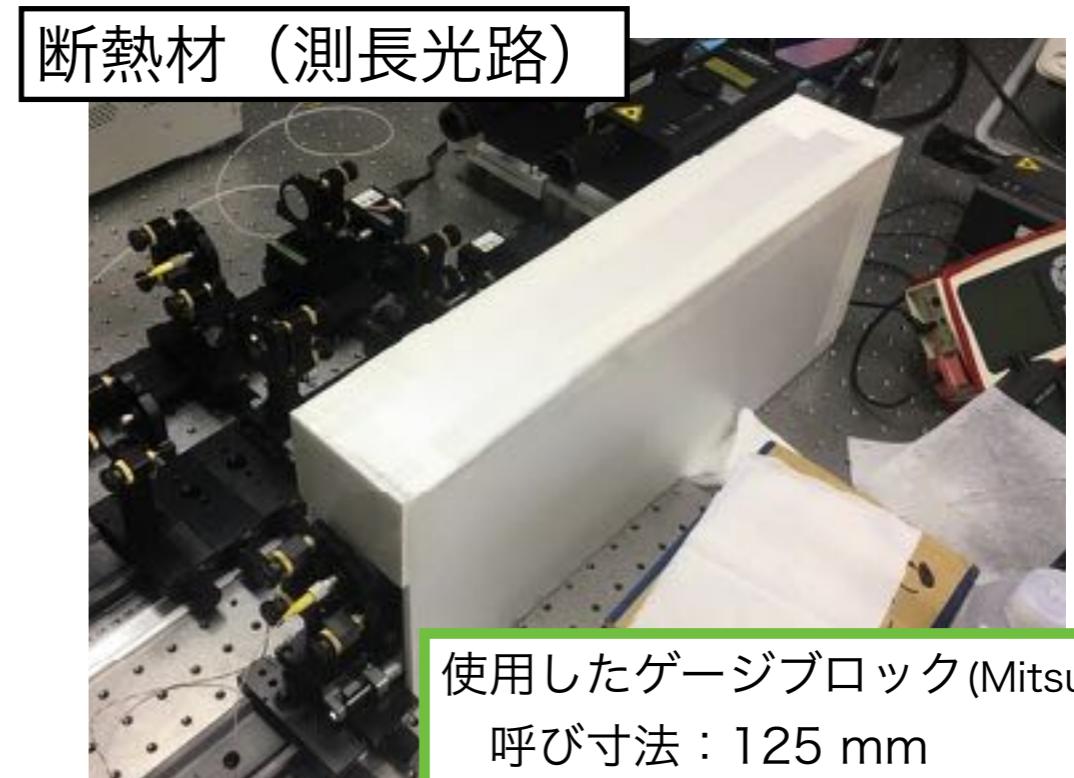
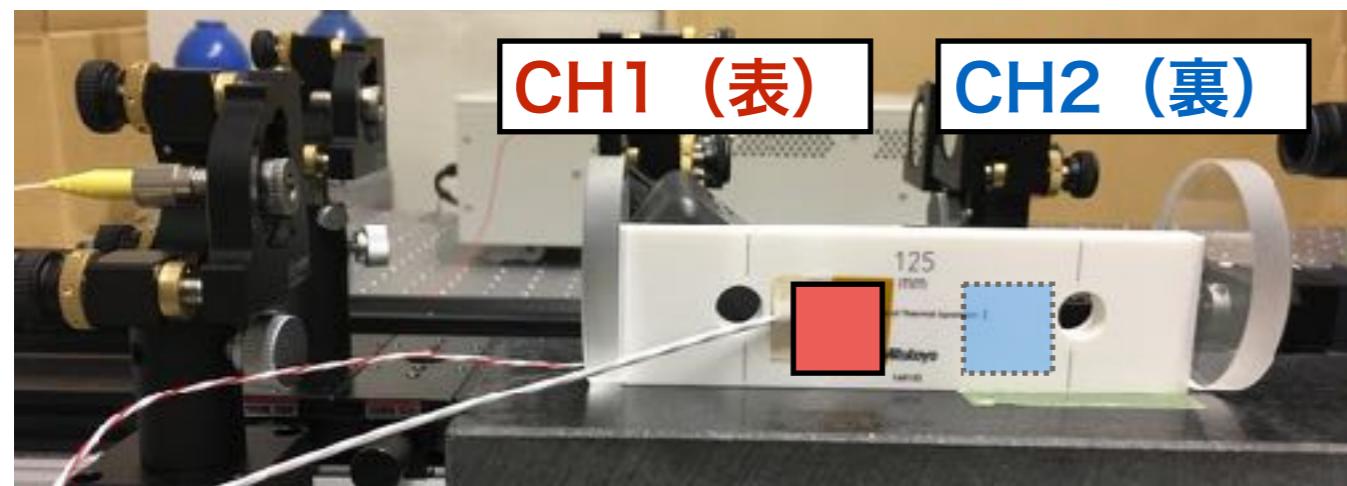


使用したゲージブロック (Mitsutoyo)  
呼び寸法 : 125 mm  
材質 : セラミックス  
熱膨張係数  $\alpha$  :  $9.219 \times 10^{-6} /K$   
校正証明書付 (1706391号)

# ゲージブロックの温度補正

11

- ゲージブロックの不確かさのうち、温度補正に起因するものが最も大きい。
- 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。
- ゲージブロック内の温度を一定にするため断熱材で囲った。
- 測定した結果、温度は  **$21.96 \pm 0.17\text{ }^{\circ}\text{C}$**  であった。



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)

# 長さ基準系の不確かさ

## ■ 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	0.030
校正不確かさ	0.017 μm	0.017
リングング (接着) [1]	0.01 μm	0.010
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>0.18</u>
合成標準不確かさ		<b>0.18</b> (<目標値 1 μm)

[1] Yokichi BITOU, 2005, "Calibration method of gauge block and their uncertainties"

$$\underline{L_{GB} = 125\ 002.37 \pm 0.18 \mu\text{m}}$$

## ■ 目標の不確かさ(1 μm)を満たす長さ基準系を用意できた。

■ 干渉計で測定する絶対距離  $L$

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

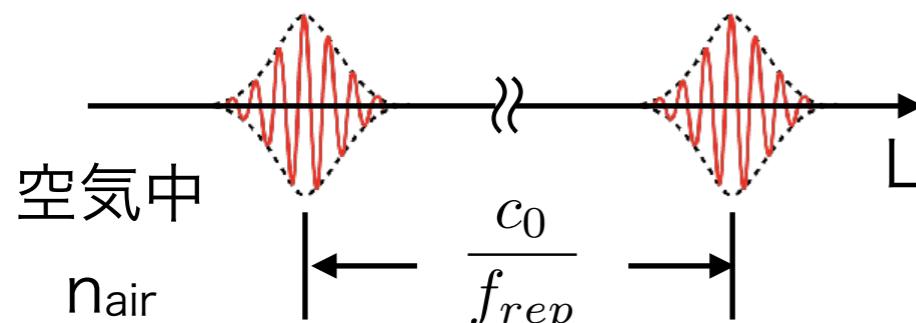
パルス間距離

$$\lambda = \frac{c_0}{n_{air} f_{rep}}$$

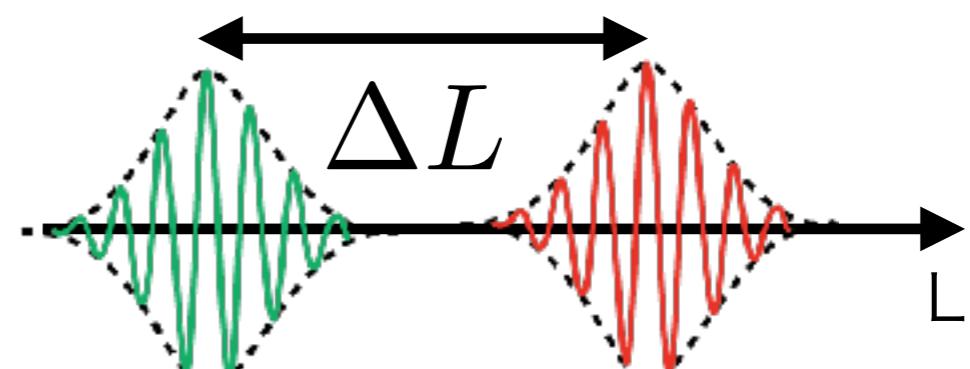
■ ( $N$  : 整数、  $c_0$  : 真空中の光速)

■  $n_{air}$  : 空気の屈折率

■  $f_{rep}$  : 光コムを基準とした  
繰り返し周波数



■  $\Delta L$  : 二つの干渉縞の距離

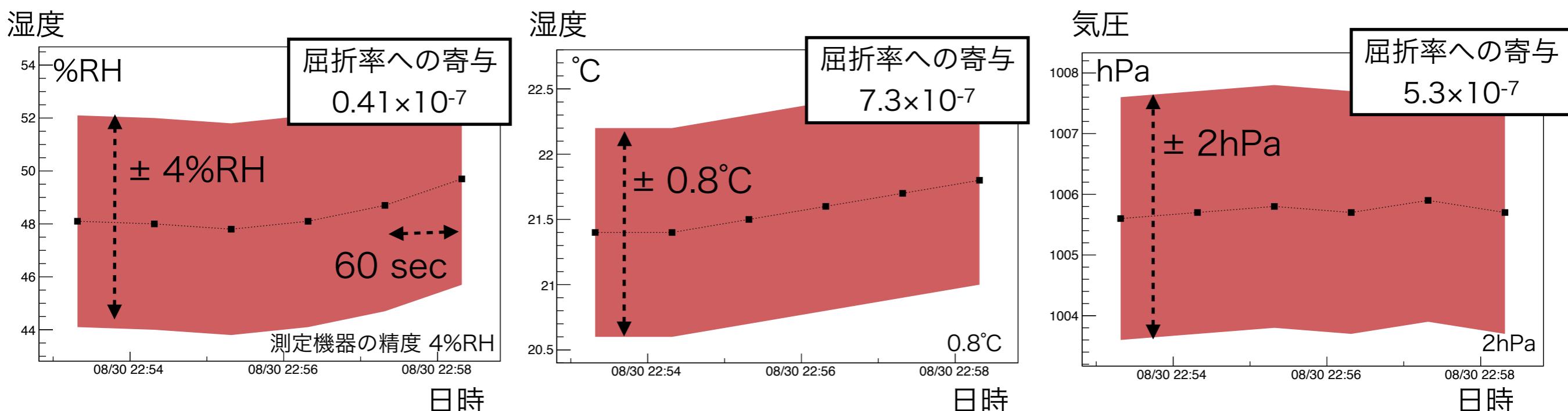


■  $n_{air}$ ,  $f_{rep}$ ,  $\Delta L$  を測定し、絶対距離とその不確かさを導く。

# 空気の屈折率 $n_{air}$ の見積もり

14

- 温度、湿度、気圧をモニターし、Ciddorの方程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)
- 測定機器の不確かさが、空気の屈折率の不確かさに支配的である。



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

相対不確かさ  $0.9 \times 10^{-6}$

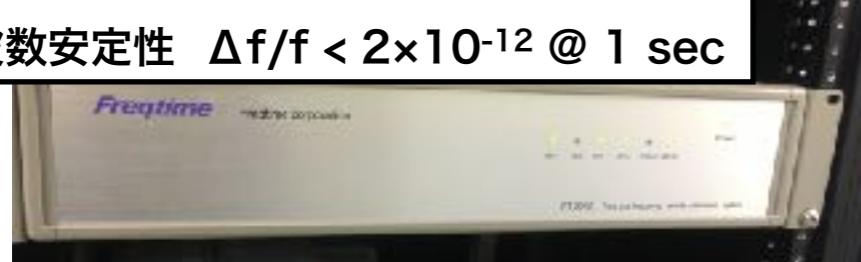
# 光コム繰り返し周波数の測定

15

■遠隔時間標準器と同期することで、高い安定性を得ることができる。

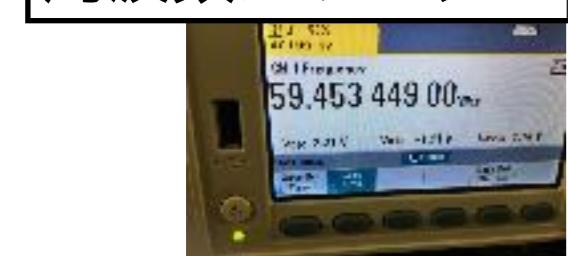
遠隔時間校正標準器

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

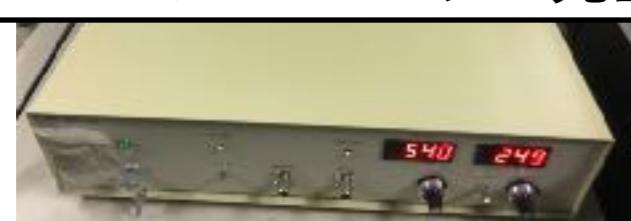
クロックの同期  
Signal Generator



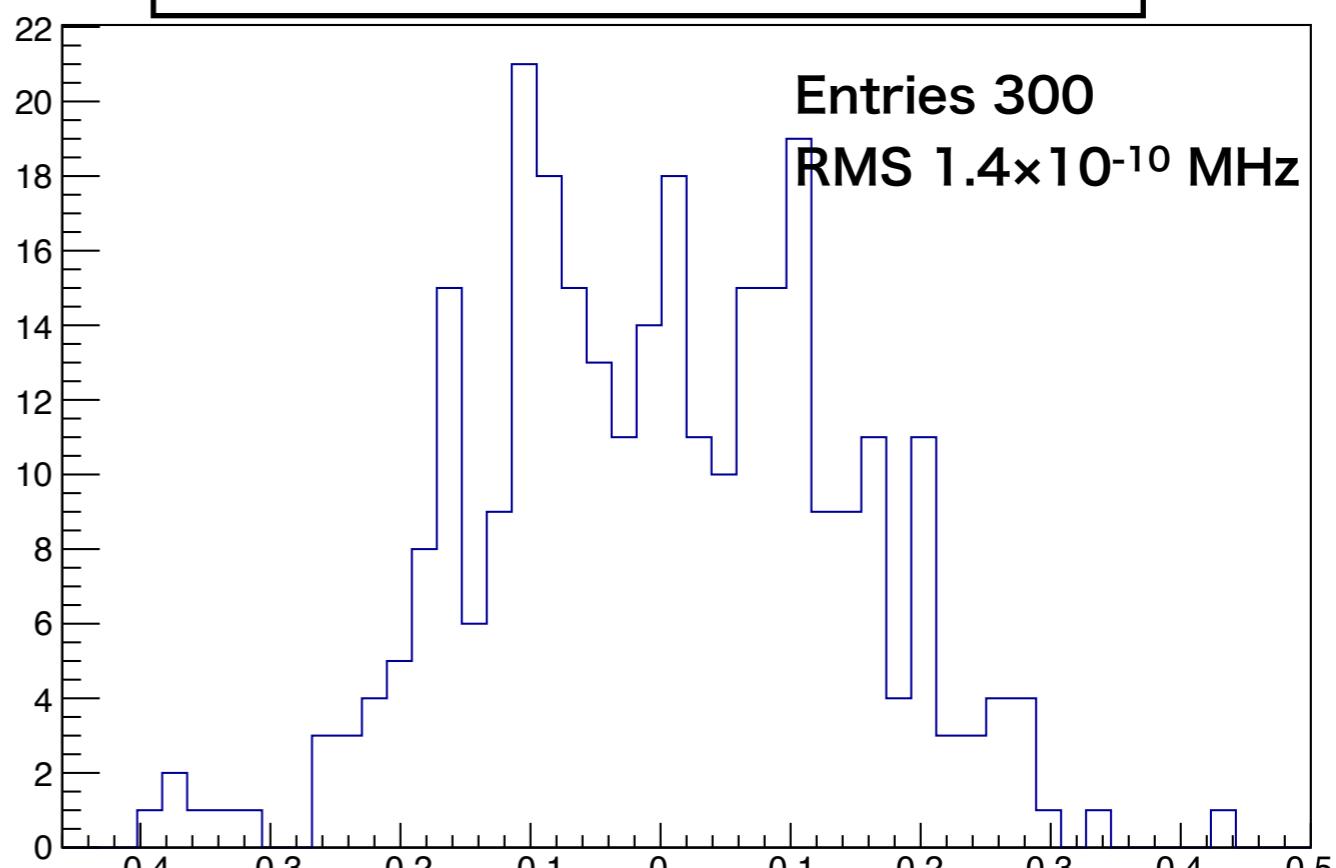
内蔵PDからの信号  
↑

↓ RF 同期信号

光コムパルスレーザー発生器



繰り返し周波数の分布



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

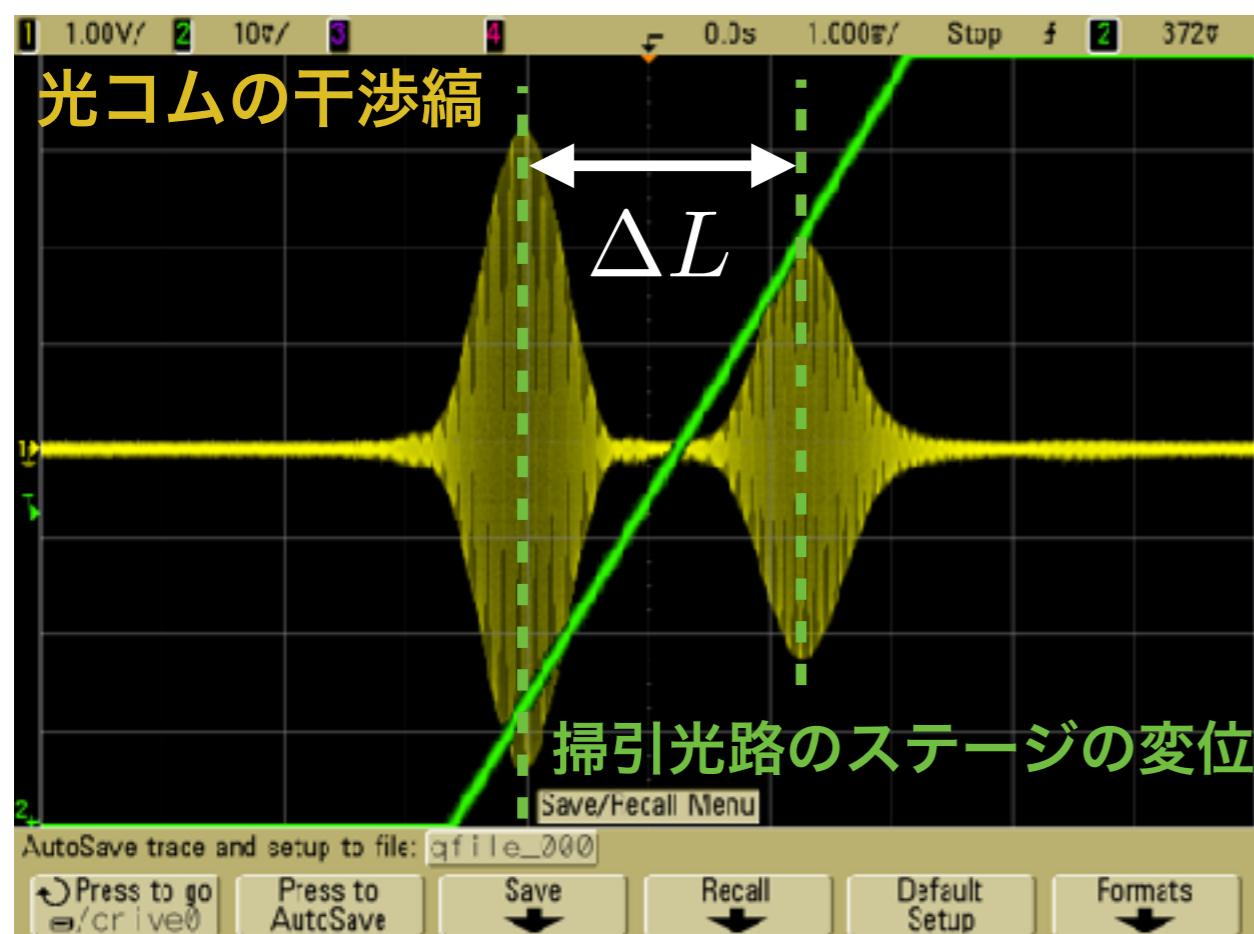
**$3.0 \times 10^{-12}$**

# $\Delta L$ の測定

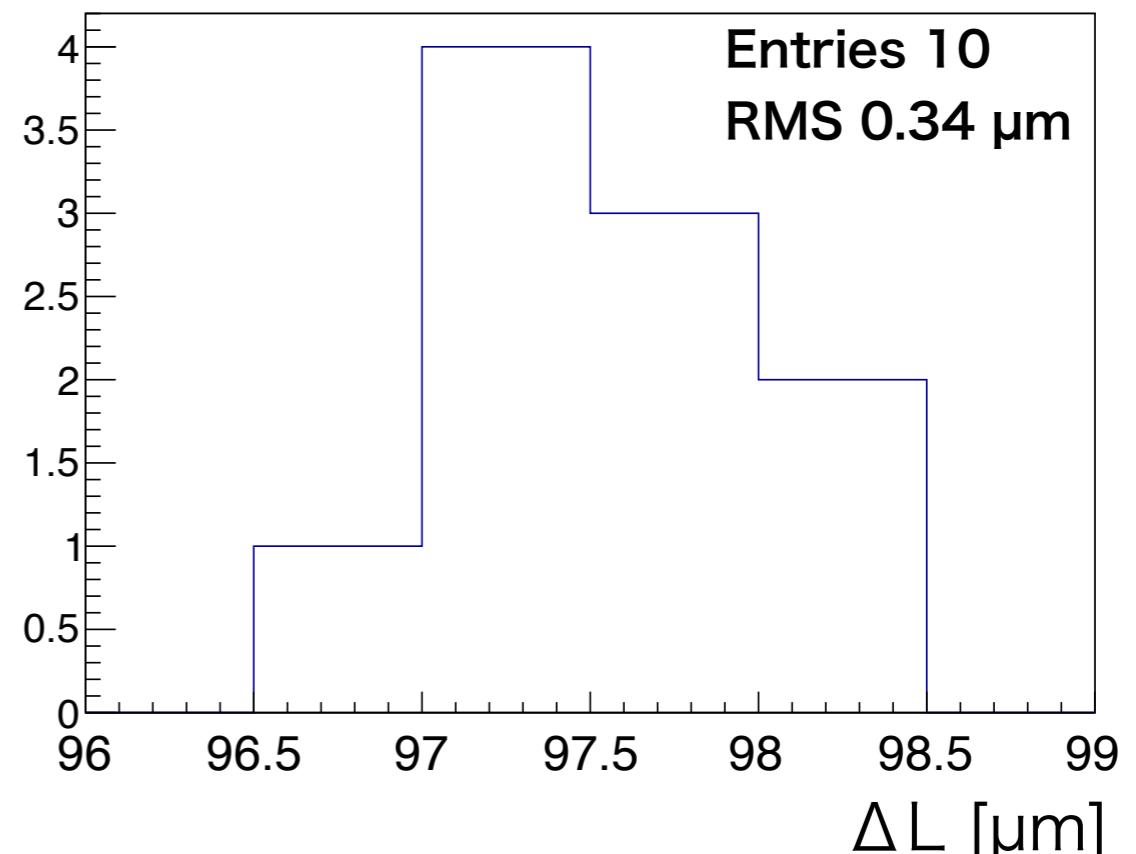
16

- 10回連續測定を行い、手法による不確かさを見積もった。
- 不確かさ(RMS)は前回の報告 (JPS2017春) と同程度であった。

実際に観測している干渉縞



測定した $\Delta L$ の分布



$$\Delta L = 97.54 \pm 0.34 \mu\text{m} (\text{RMS})$$

■これまでの  $n_{air}$ ,  $f_{rep}$ ,  $\Delta L$  の見積もりから、光コムレーザー干渉計による絶対距離測定の不確かさを見積もった。

■不確かさ要因の表(包含係数  $k=1$ , 測長距離を125 mmとした)

不確かさ要因	不確かさ	長さの不確かさ [ $\mu\text{m}$ ]
空気の屈折率	$0.9 \times 10^{-6}$	0.11
繰り返し周波数	$3.0 \times 10^{-12}$	$3.8 \times 10^{-7}$
$\Delta L$ の測定	0.34 $\mu\text{m}$	0.34
合成標準不確かさ		<b>0.36</b>

■干渉計の測長の不確かさを**0.36  $\mu\text{m}$**  (<目標値 1  $\mu\text{m}$ ) と見積もった。

- J-PARC E34 実験 : g-2 精度 0.1 ppm, EDM 感度  $10^{-21}$  e · cm
- 目標EDM感度に必要な検出器のアライメント精度  
要求 : 10  $\mu\text{rad}$  以内の回転 → 1  $\mu\text{m}$  以下の不確かさでのモニター
- ゲージブロックを用いた干渉計の比較測定の準備が完了した。
  - ゲージブロックを用いた長さ基準の不確かさ 0.18  $\mu\text{m}$
  - 干渉計の測定の不確かさ 0.36  $\mu\text{m}$
- 今後は絶対距離の比較測定を行っていく。

# BACK UP

- リンギング（接着）の不確かさ
  - 文献値を参照。経験的な知見から  $\pm 10 \text{ nm}$ として見積もられている。
- 寸法差幅の定義は？
  - バックアップスライドを参照。

# ゲージブロックの寸法差幅に関する資料 21

## ゲージブロック公称値の寸法許容差と寸法許容差幅

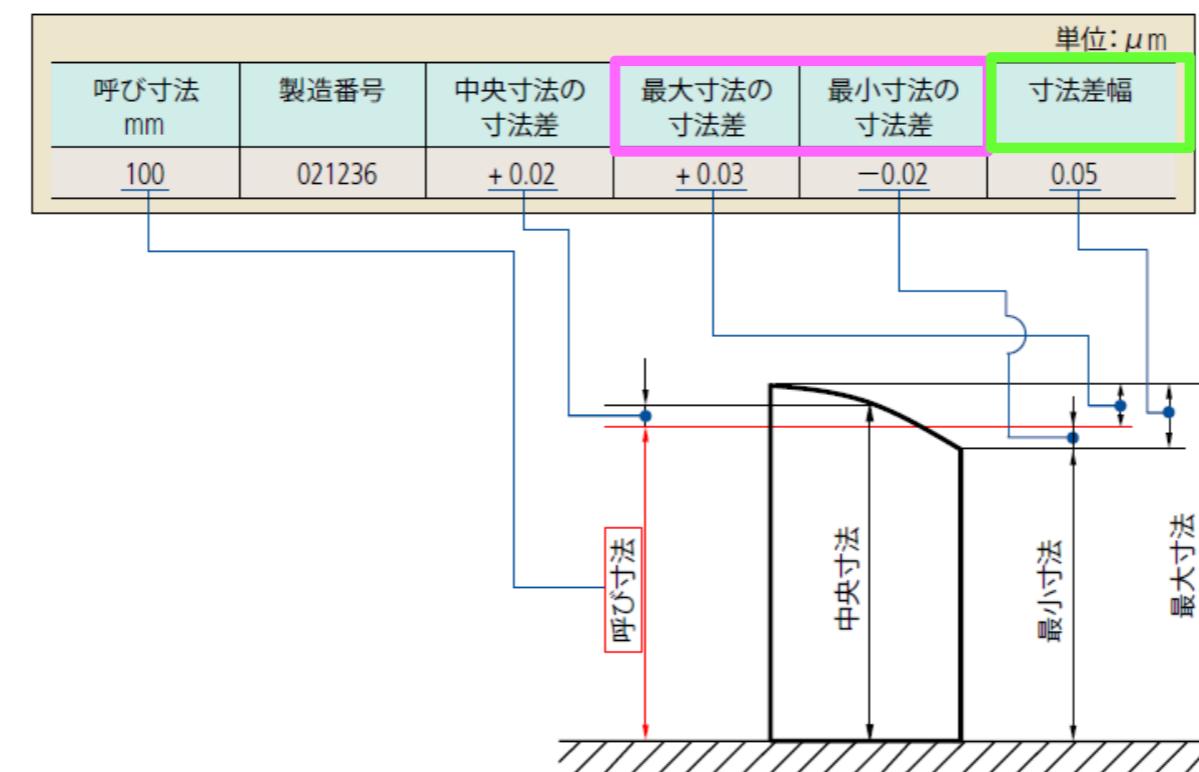
-ミツトヨゲージブロックカタログ、

[https://www.mitutoyo.co.jp/support/service/catalog/08\\_kijyunki/12014.pdf](https://www.mitutoyo.co.jp/support/service/catalog/08_kijyunki/12014.pdf)より

(JIS B 7506適用) 単位:  $\mu\text{m}$

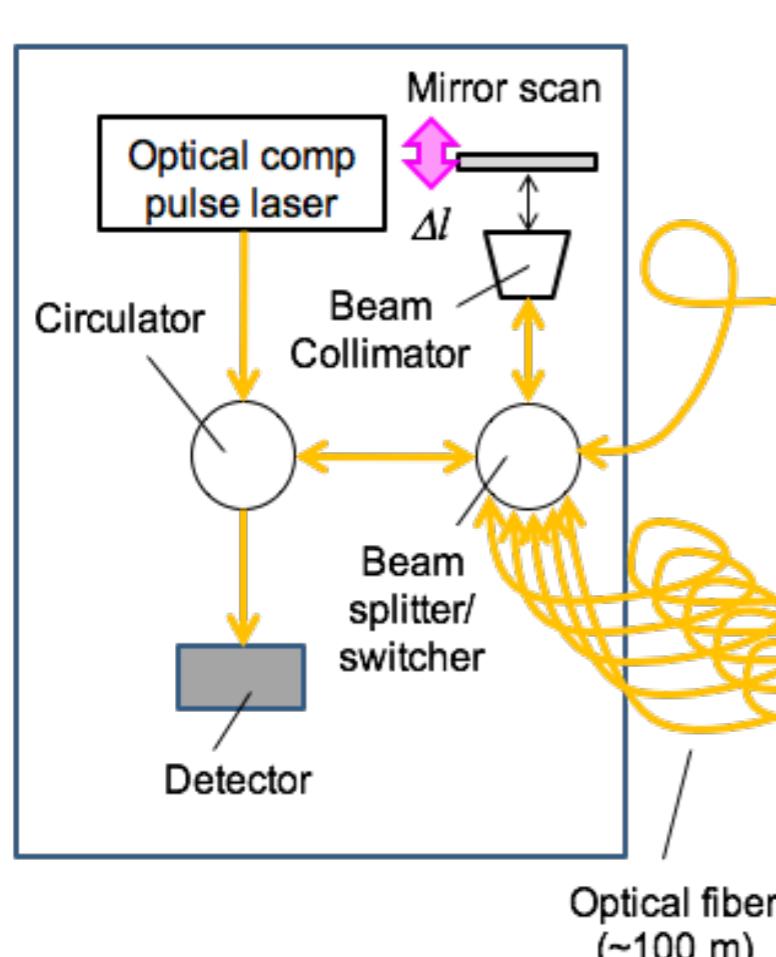
呼び寸法 (mm)		K級		0級		1級		2級	
を超え	以下	寸法許容差	寸法許容差幅	寸法許容差	寸法許容差幅	寸法許容差	寸法許容差幅	寸法許容差	寸法許容差幅
0.5*1	10	0.20	0.05	0.12	0.10	0.20	0.16	0.45	0.30
10	25	0.30	0.05	0.14	0.10	0.30	0.16	0.60	0.30
25	50	0.40	0.06	0.20	0.10	0.40	0.18	0.80	0.30
50	75	0.50	0.06	0.25	0.12	0.50	0.18	1.00	0.35
75	100	0.60	0.07	0.30	0.12	0.60	0.20	1.20	0.35
100	150	0.80	0.08	0.40	0.14	0.80	0.20	1.60	0.40
150	200	1.00	0.09	0.50	0.16	1.00	0.25	2.00	0.40

検査成績書の記載例

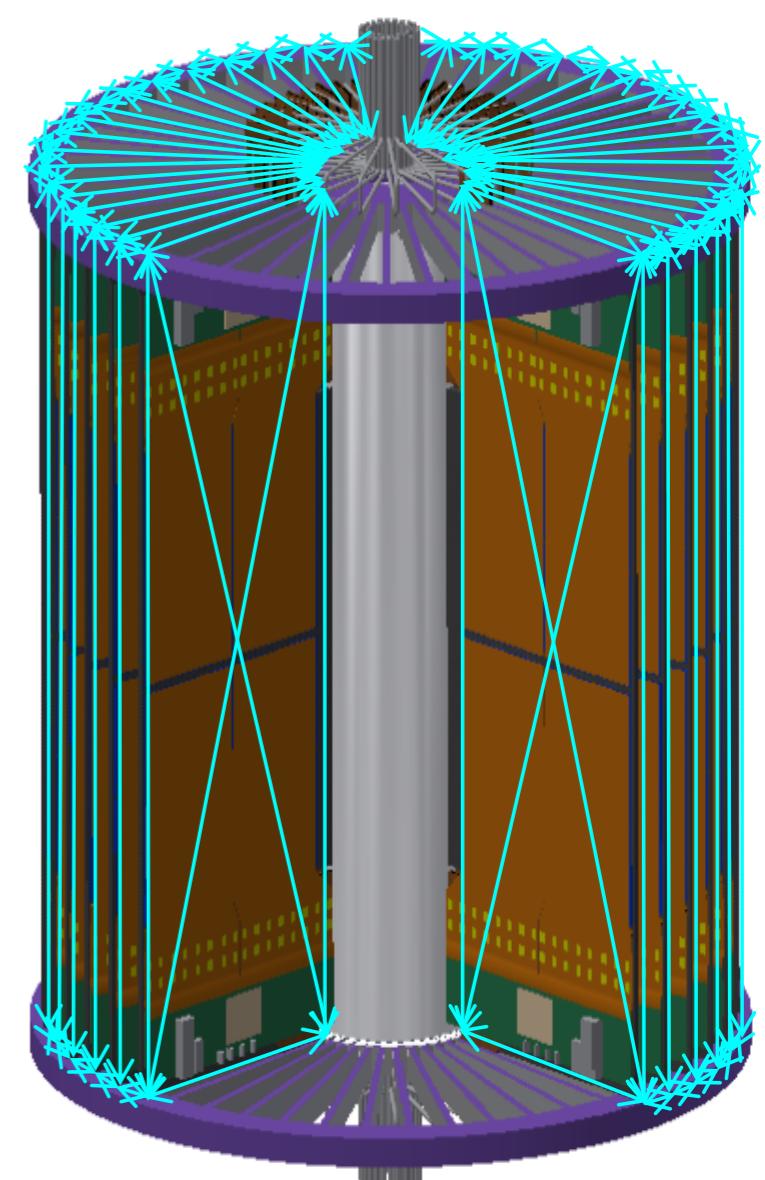
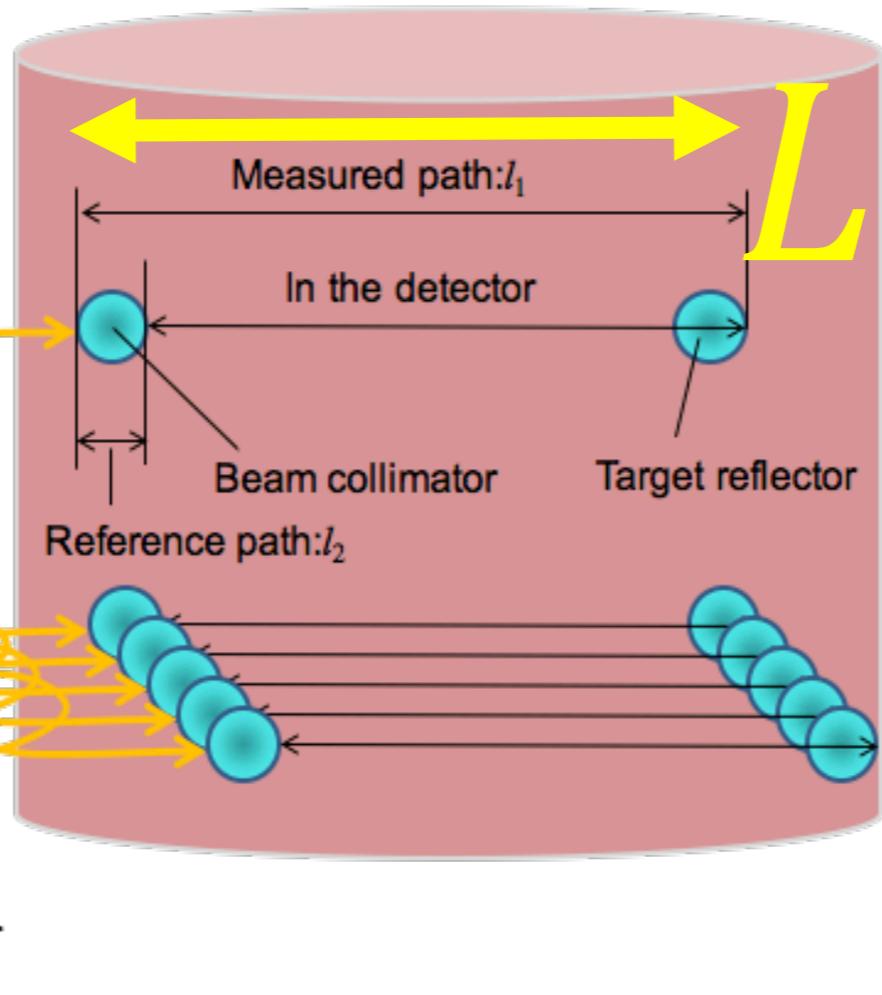


- 光ファイバーを使うことで、検出器内の高磁場からレーザー発生器などを遠ざける。
- 検出器全体を張り巡らせるように光路をとる（最大で約500光路）
- 検出器に設置されたミラーの位置をサブミクロン精度で測定することが目標。

Outside the detector



In the detector

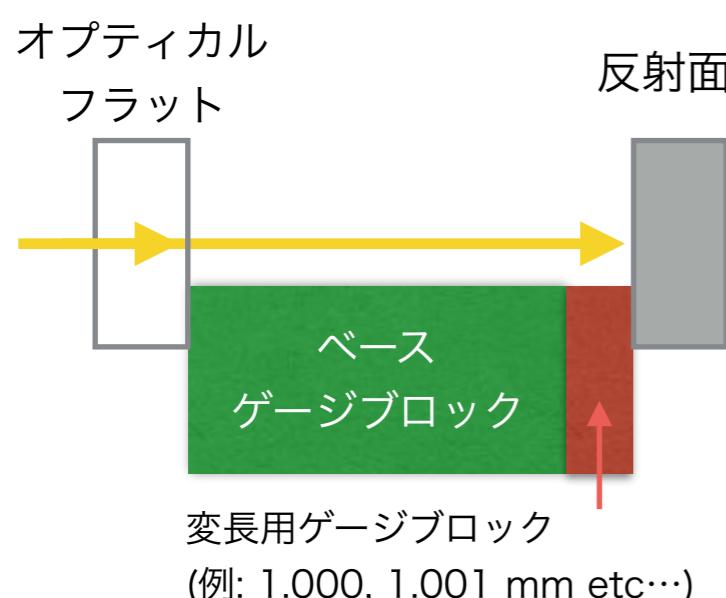


■ J-PARC E34実験に向けて必要な開発要素

■ 今回の講演(JPS2017秋)では、精度の保証に関する項目として、長さ基準系との比較測定を行った。

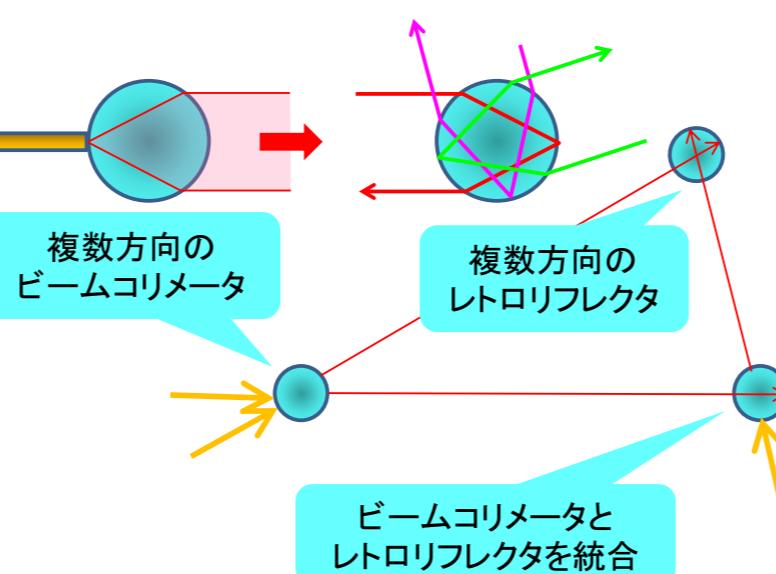
## ■ 精度の保証

校正值付きゲージ  
ブロック



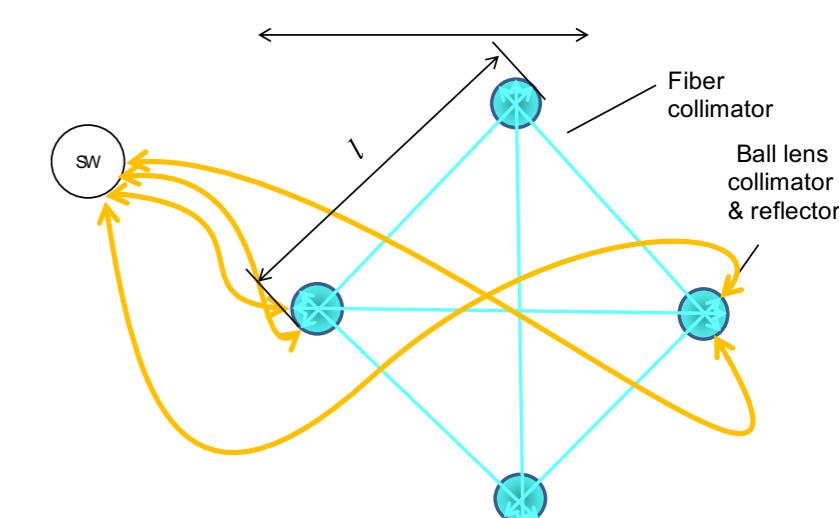
## ■ コンパクト化

ボールレンズ標的



## ■ マルチパス

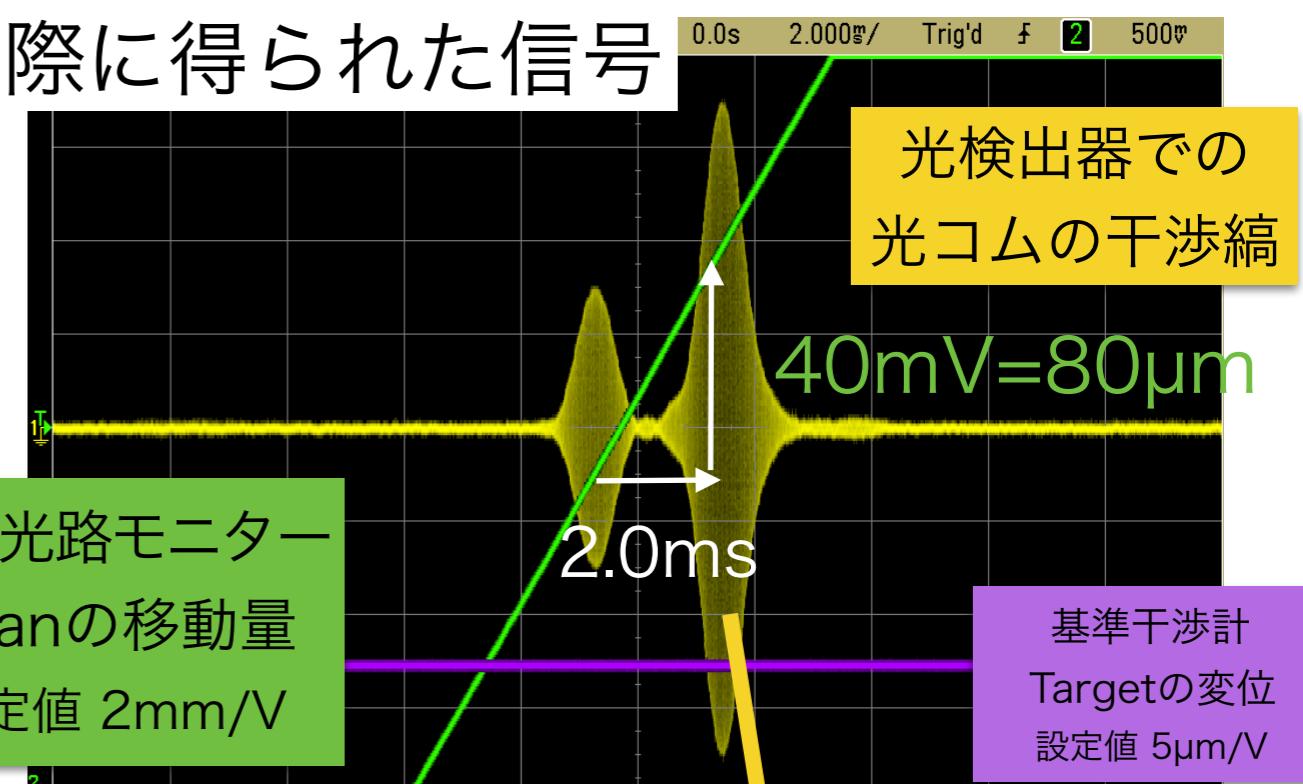
スイッチング  
システム



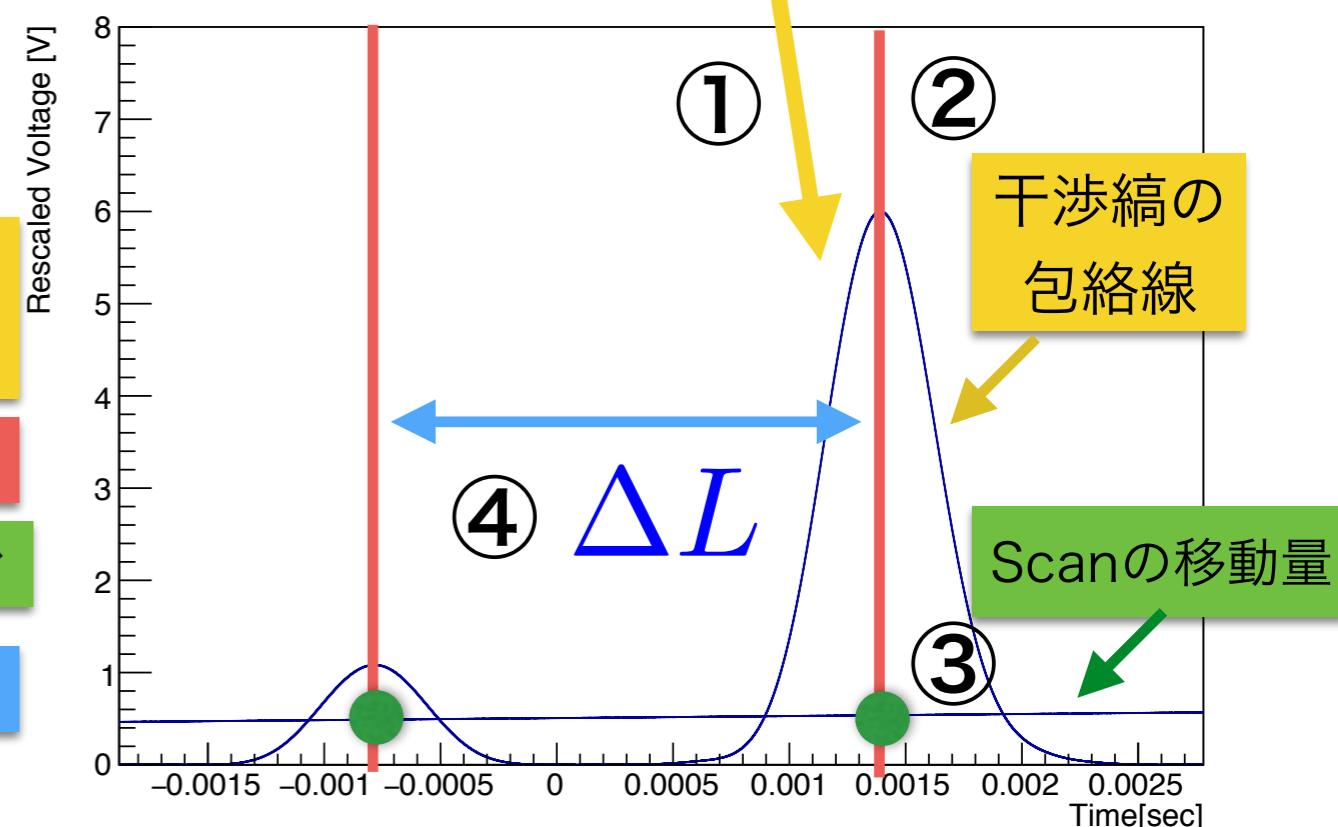
# $\Delta L$ 測定での解析手法

24

実際に得られた信号



ローパス後の信号



■ 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。

■ 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

# 相対距離測定のセットアップ (写真)

25

掃引光路モニター

基準干渉計

Targetミラー

Scanミラー

掃引光路

Origin : ガラス窓

測長距離  $L$

測長光路

光コムレーザーの仕様

型番

PCLS-KE

中心波長

1559.1 nm

発信出力

6.10 mW

スペクトル幅

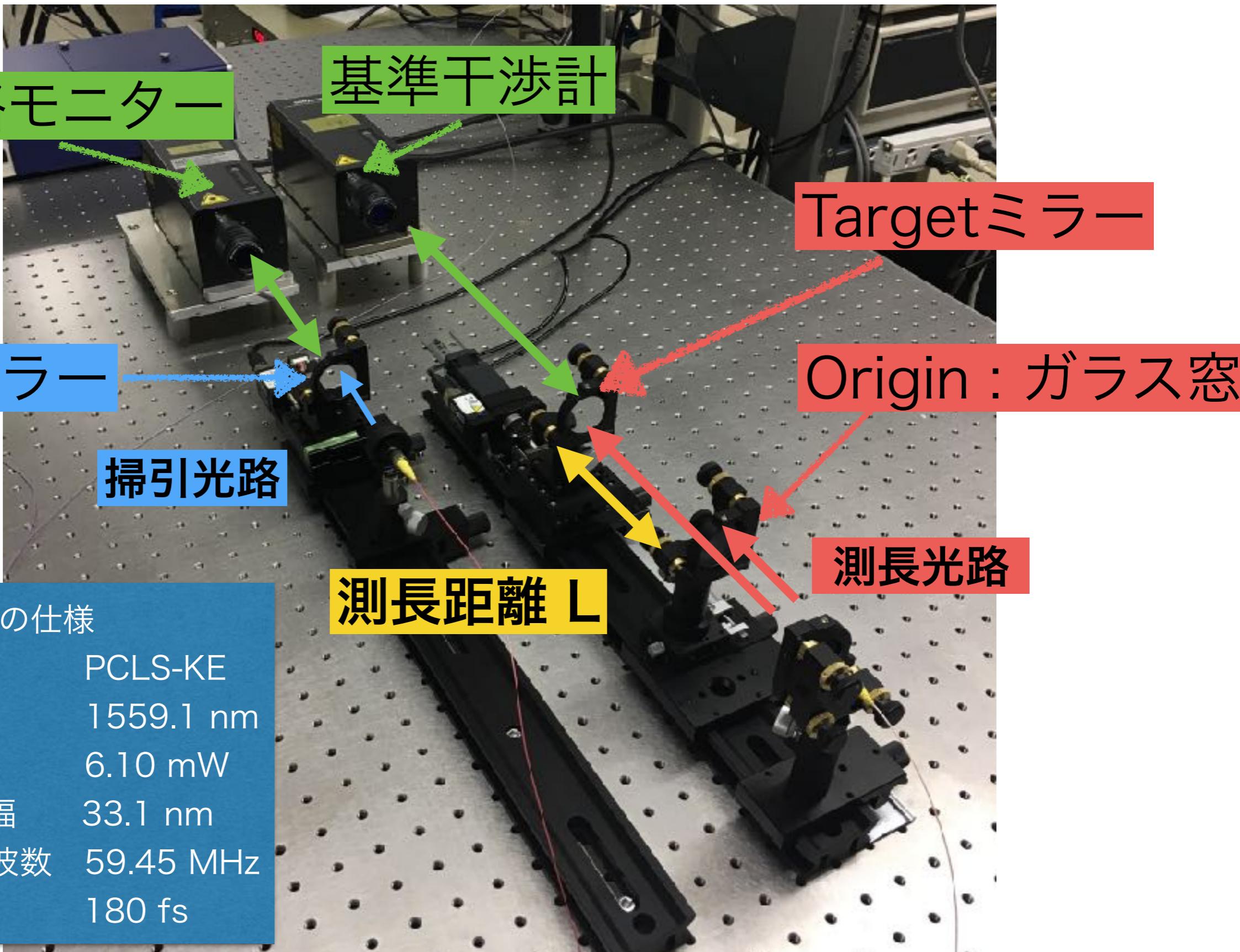
33.1 nm

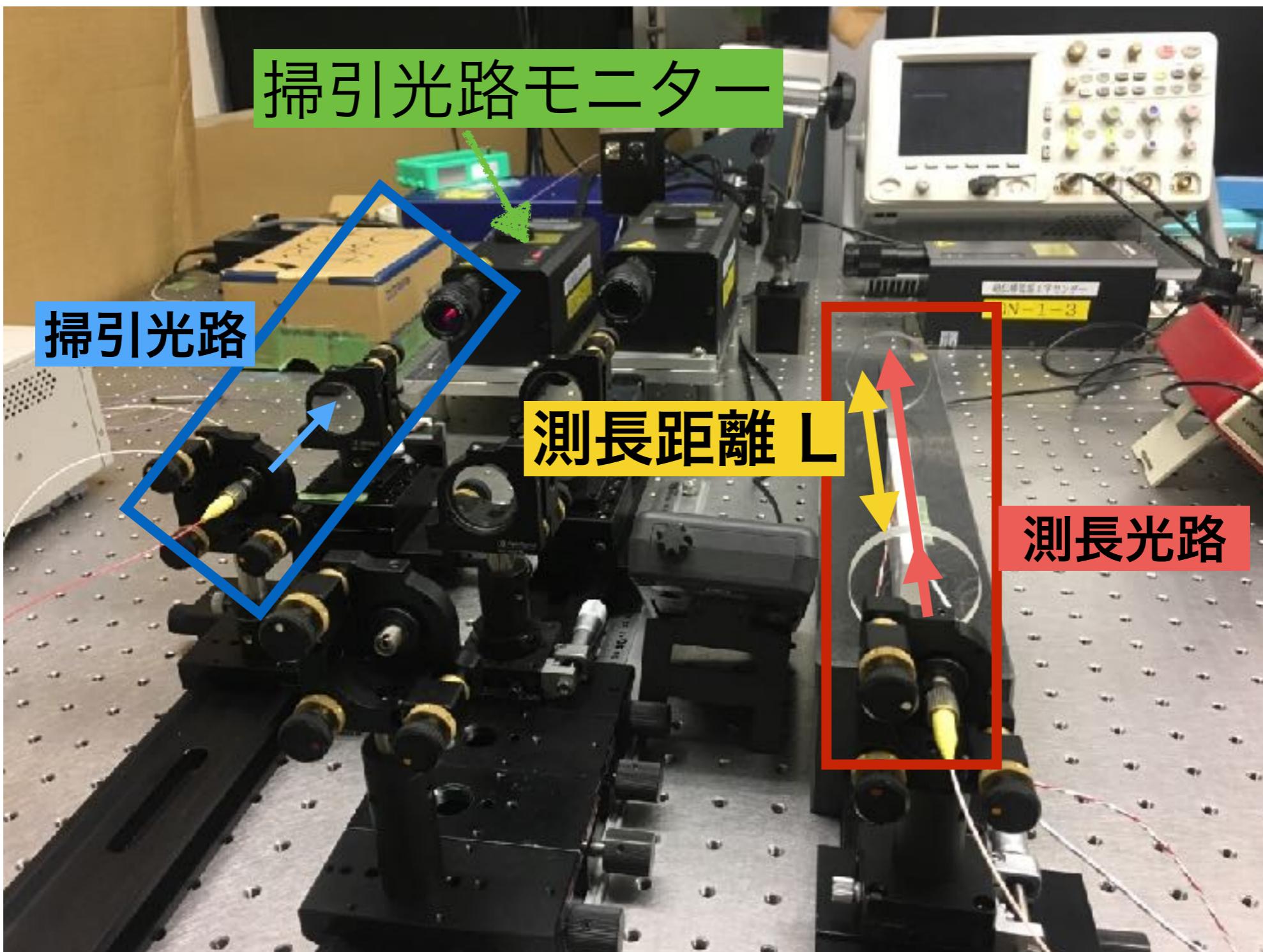
繰り返し周波数

59.45 MHz

パルス幅

180 fs

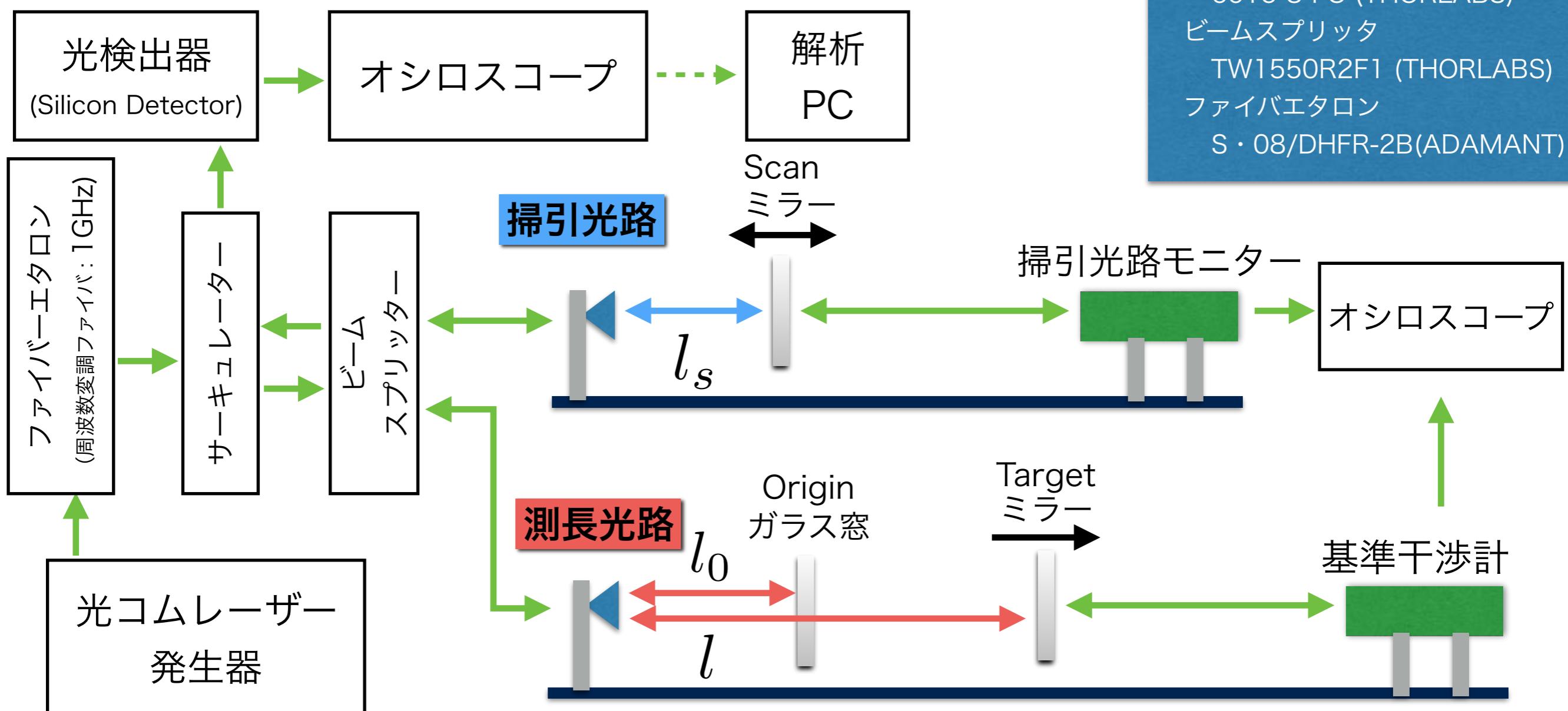




# ファイバ光学系セットアップ

27

- 掃引光路モニターで測定したScanミラーの移動量から光コムでの測長結果を得ている。
  - Targetミラーの変位を基準干渉計と光コムで測定し、その結果を比較する。



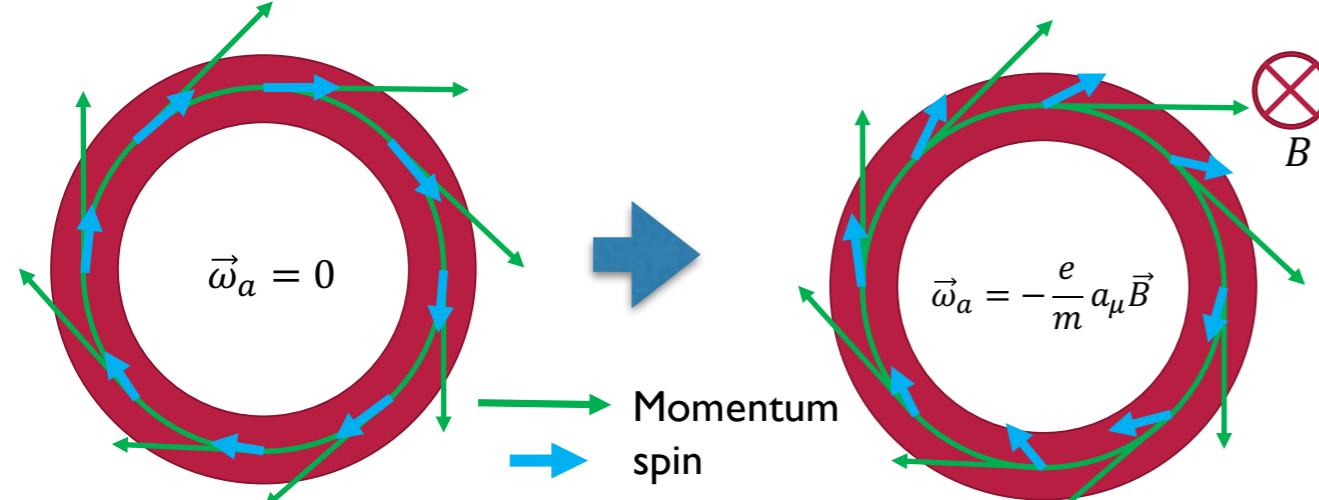
# 使用機器

Laser Measurement System  
LV-9001, LV-9002(ONOSOKKI)  
Silicon Detector  
Model 818-SL (Newport)  
ファイバーサーキュレーター  
6015-3-FC (THORLABS)  
ビームスプリッタ  
TW1550R2F1 (THORLABS)  
ファイバエタロン  
S・08/DHFR-2B(ADAMANT)

# ミューオンg-2/EDM信号

28

- g-2やEDMの存在によって運動方向に対してスピンの向きが変化する → スpinの異常歳差運動



- スpinの方向に崩壊陽電子が放出しやすい性質から、崩壊陽電子を観測することでスpin方向の振動を測定する。

- g-2による項 → 運動平面と水平なスpin方向が振動

- EDMによる項 → 運動平面と垂直なスpin方向が振動

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

BNL (先行研究) / FNAL

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

Magic Momentum  
 $\gamma = 30$  ( $P = 3$  GeV/c)

J-PARC (本実験)

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

$E = 0$  and any  $\gamma$  ( $\gamma=3$ )

