

J-PARCにおけるミューオンg-2/EDM精密測定に向けた 検出器アライメントモニターの開発

2017 / 03 / 18 JPS2017S @ 大阪大学 豊中キャンパス

安田浩昌、久米達哉^A、齊藤直人^A、佐藤優太郎^A、
西村昇一郎、高増潔^B、三部勉^A、Wiroj SUDATHAM^B

for J-PARC muon g-2/EDM Collaboration

東大理、KEK^A、東大工^B

■ J-PARC E34 実験

J-PARCでのミューオンのg-2/EDMの精密測定実験

■ 陽電子飛跡検出器 と

検出器のミスアライメントによるEDM測定の系統誤差

■ 光コムレーザーを用いた測長系の測定原理

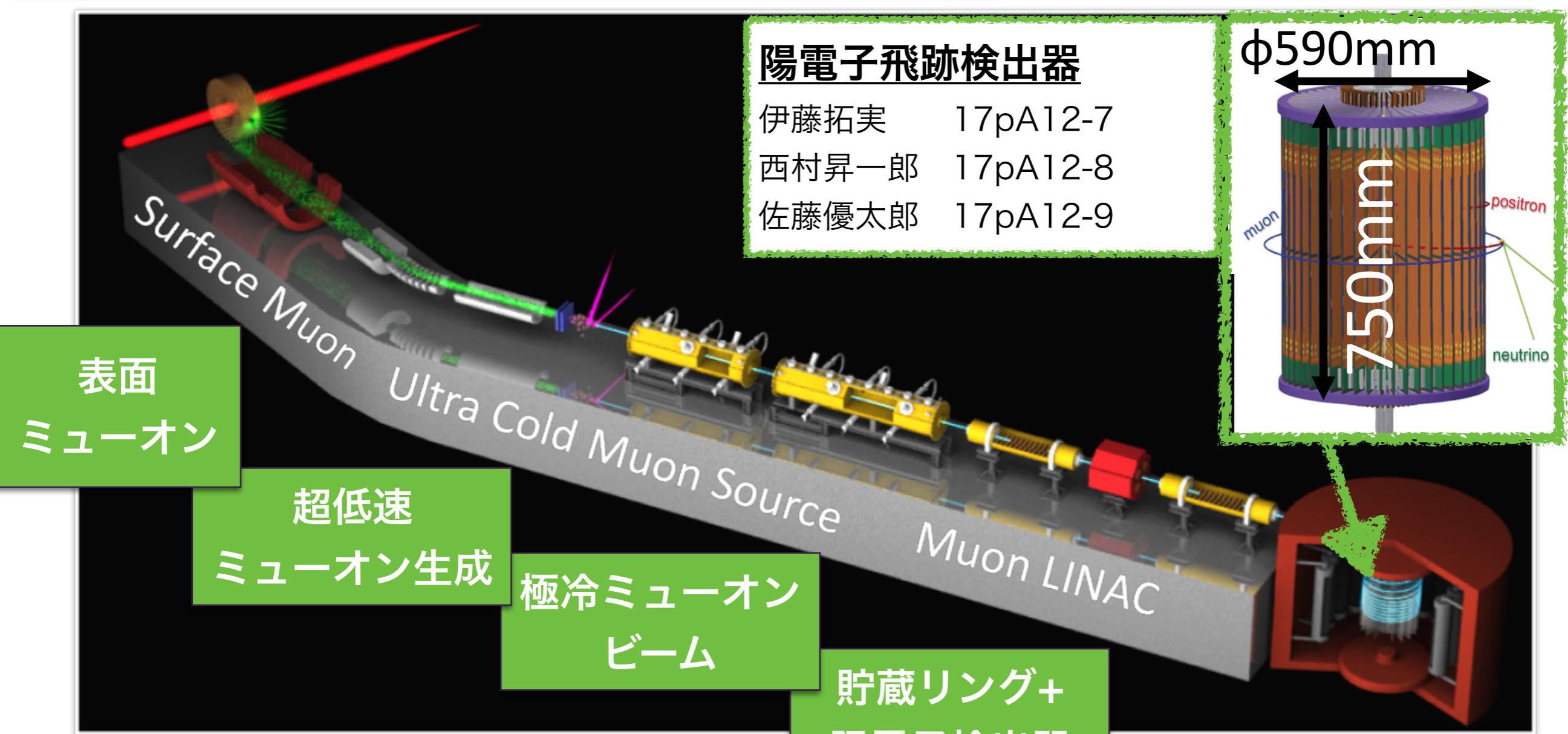
■ 1次元測定系での原理実証に向けた測定と結果

■ まとめと今後の方針

■ 極冷ミューオンビームを用いて電場収束などによる系統誤差を排除

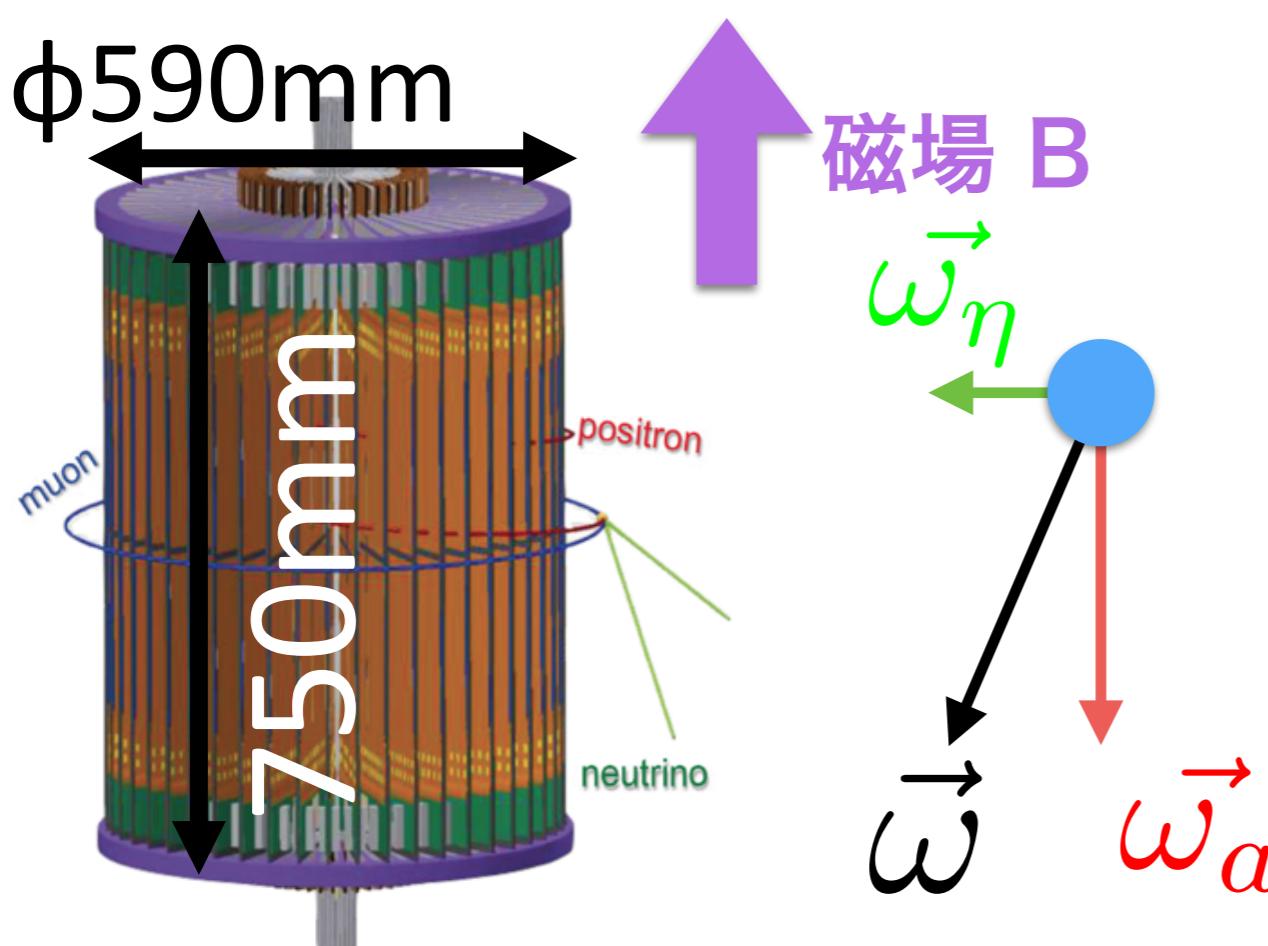
GOAL @ J-PARC E34

異常磁気モーメント(g-2)	: 精度 0.1 ppm	→SMの検証(3.3 σ @BNL)
電気双極子モーメント(EDM)	: 感度 $10^{-21} e \cdot cm$	→CPの破れの探索

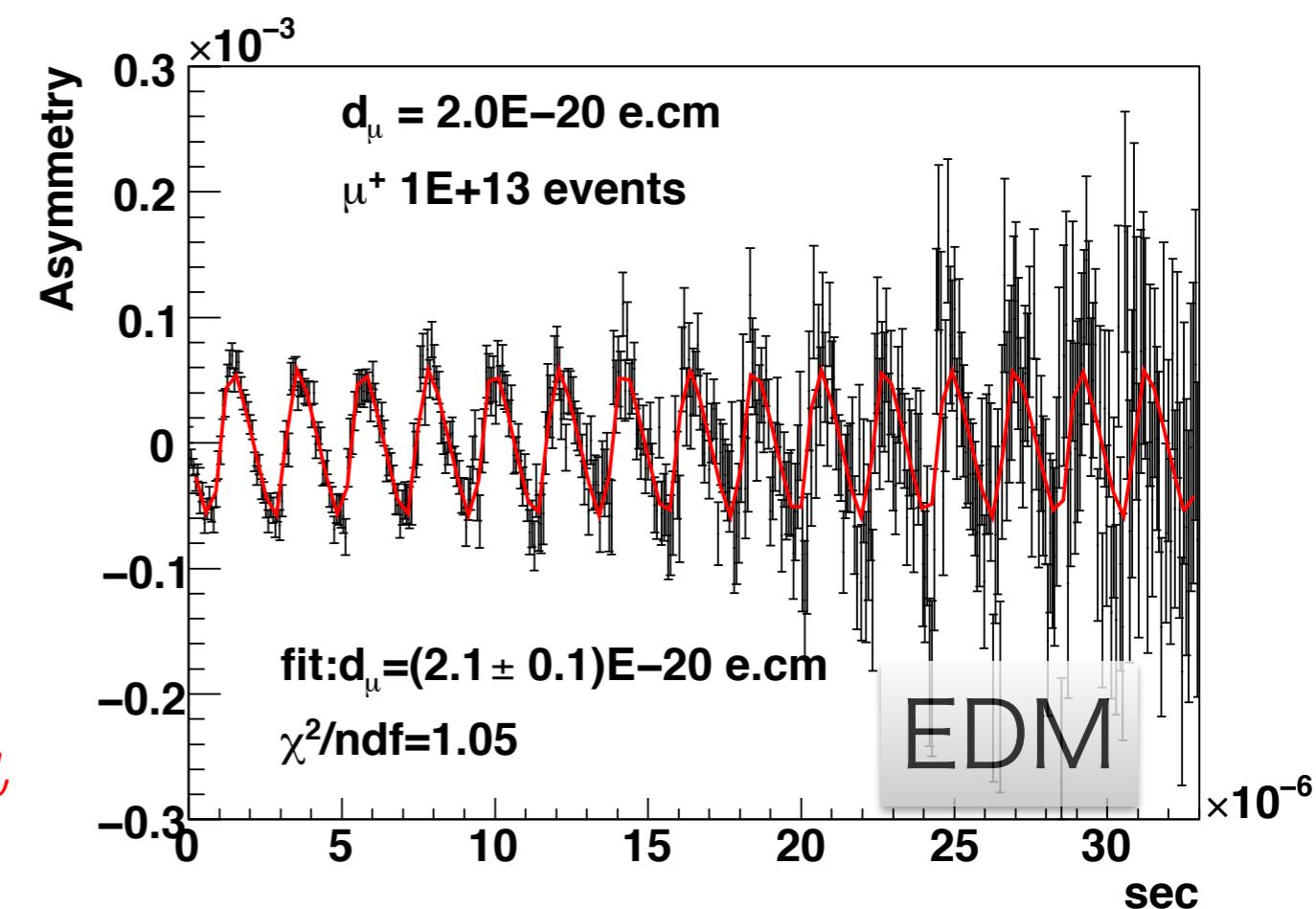


陽電子飛跡検出器と得られるEDM信号

- 陽電子飛跡検出器
- シリコンストリップセンサー
- 放射状にセンサーを配列
- コンパクトな検出器
- ミューオンが崩壊した際に放出される陽電子の飛跡からスピン方向を測定

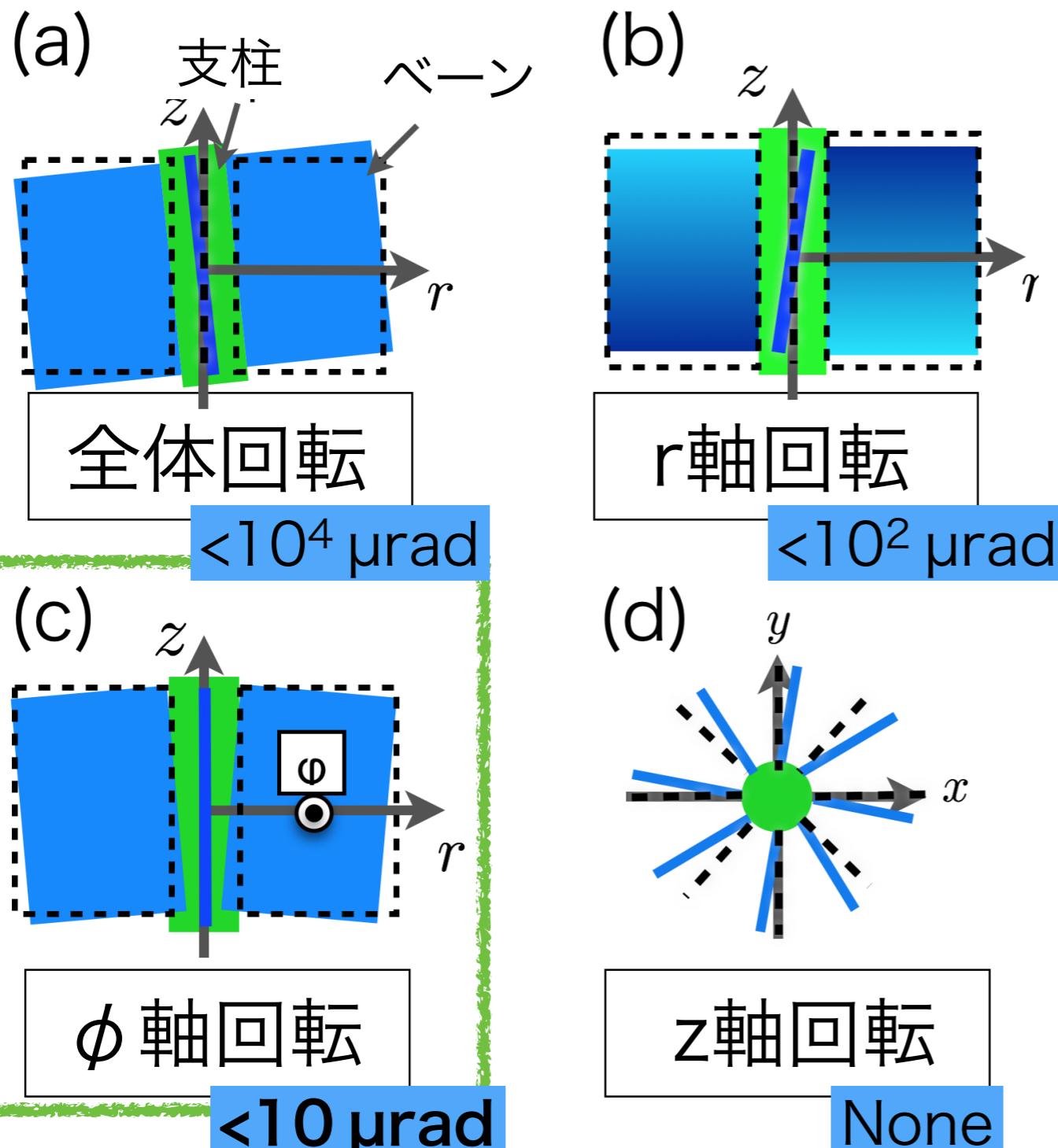


- ミューオンEDM信号
 - スピинの異常歳差運動 **EDM**
- $$\vec{\omega} = -\frac{e}{m} \left[a_\mu \vec{B} - \frac{\eta}{2} \beta \times \vec{B} \right]$$
- 磁場と運動方向に垂直な回転軸.
 - 崩壊陽電子の検出位置の上下の非対称度の振動として見える.



要求される検出器の傾き

4パターンでシミュレーション



■ EDMによるスピンドル軸の傾きと検出器の傾きを判別できない

■ 要求アライメント精度
(for EDM $10^{-21} \text{e} \cdot \text{cm}$)
 ϕ 軸回転 $10 \mu\text{rad}$ 以内

(西村JPS2013A)

■ EDMの精密測定には
検出器のアライメントが重要

■ 検出器の設置環境

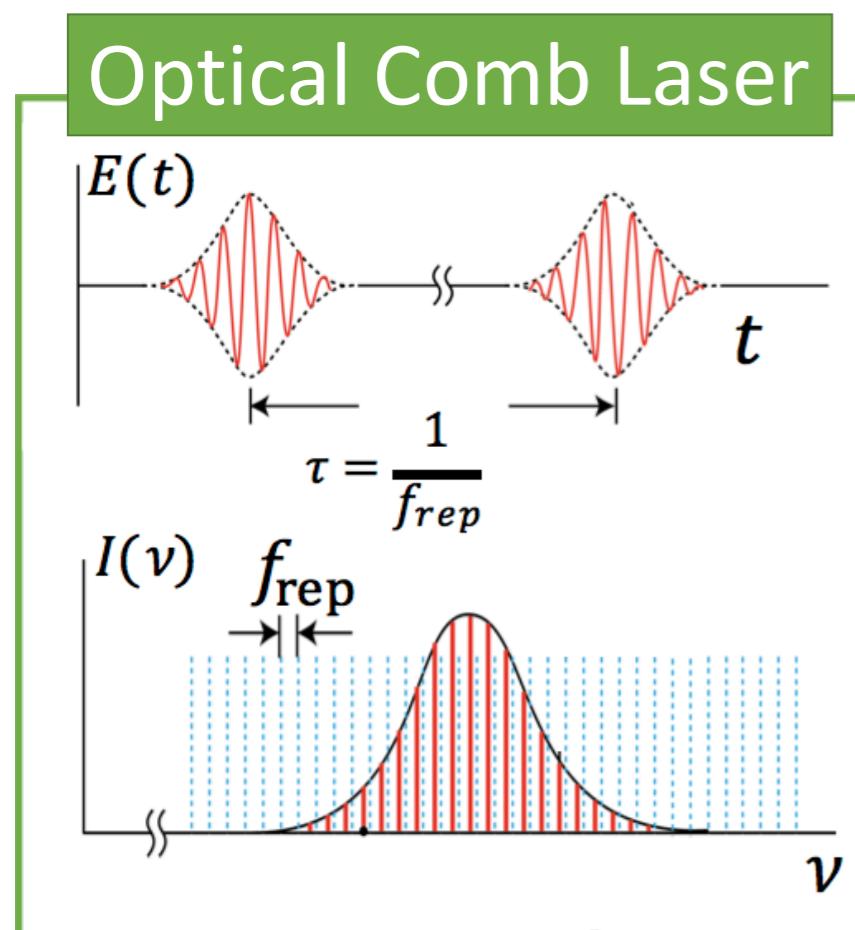
- 真空 ($\sim 10^4 \text{ Pa}$)
- 高磁場 (3T)
- 放射線環境下
- コンパクトな検出器
- 要求精度 $1 \mu\text{m}$ 以内

}

ファイバー導入型の干渉計で
精密機器を検出器外部へ

光コムレーザーを用いた干渉計を使用

(西村JPS2015S)



■ 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隔が $10^{-19}/\text{m}$ で安定
→ 非常に正確なパルス間隔を実現

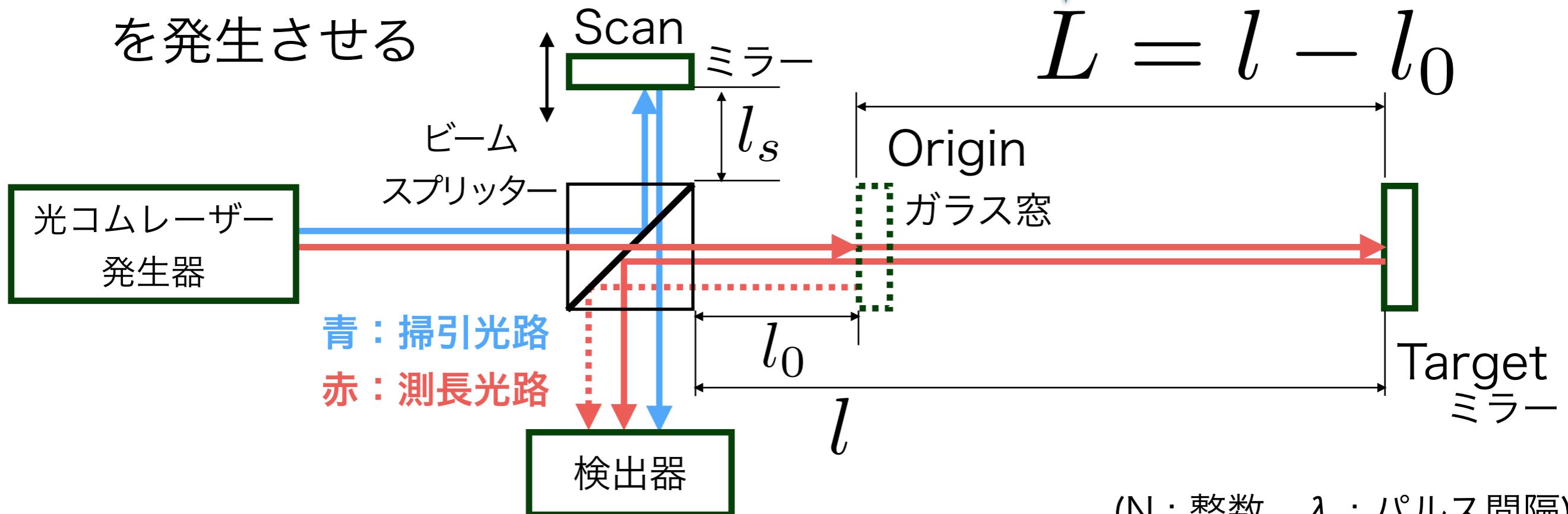
精密な測定が可能

光コムレーザー干渉計を用いた測長原理

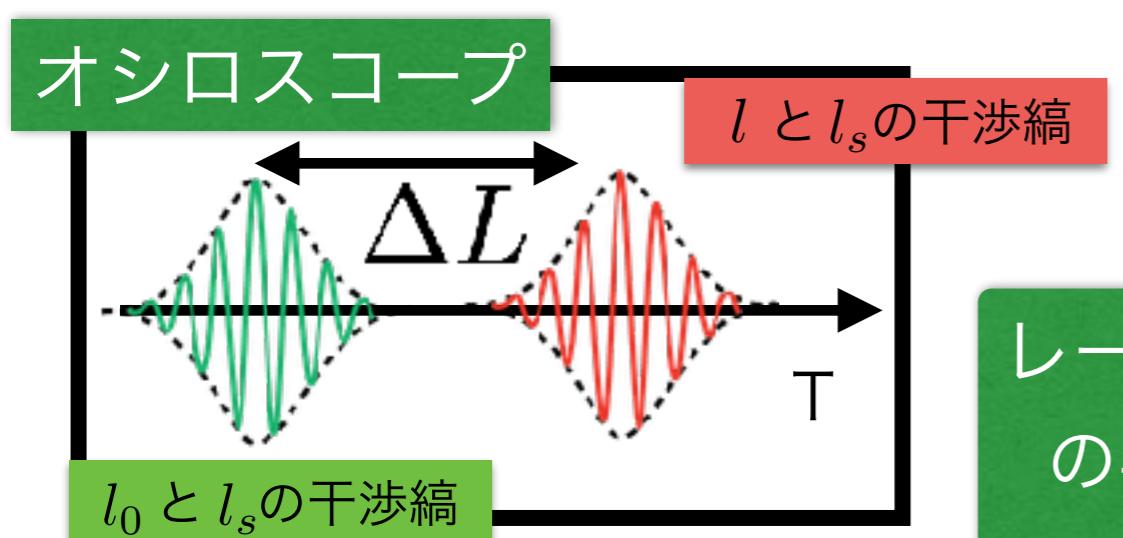
光路長掃引式干渉計

光路長(l_s)を変化させることで干渉縞を発生させる

OriginからTargetまでの
絶対距離を測定できる



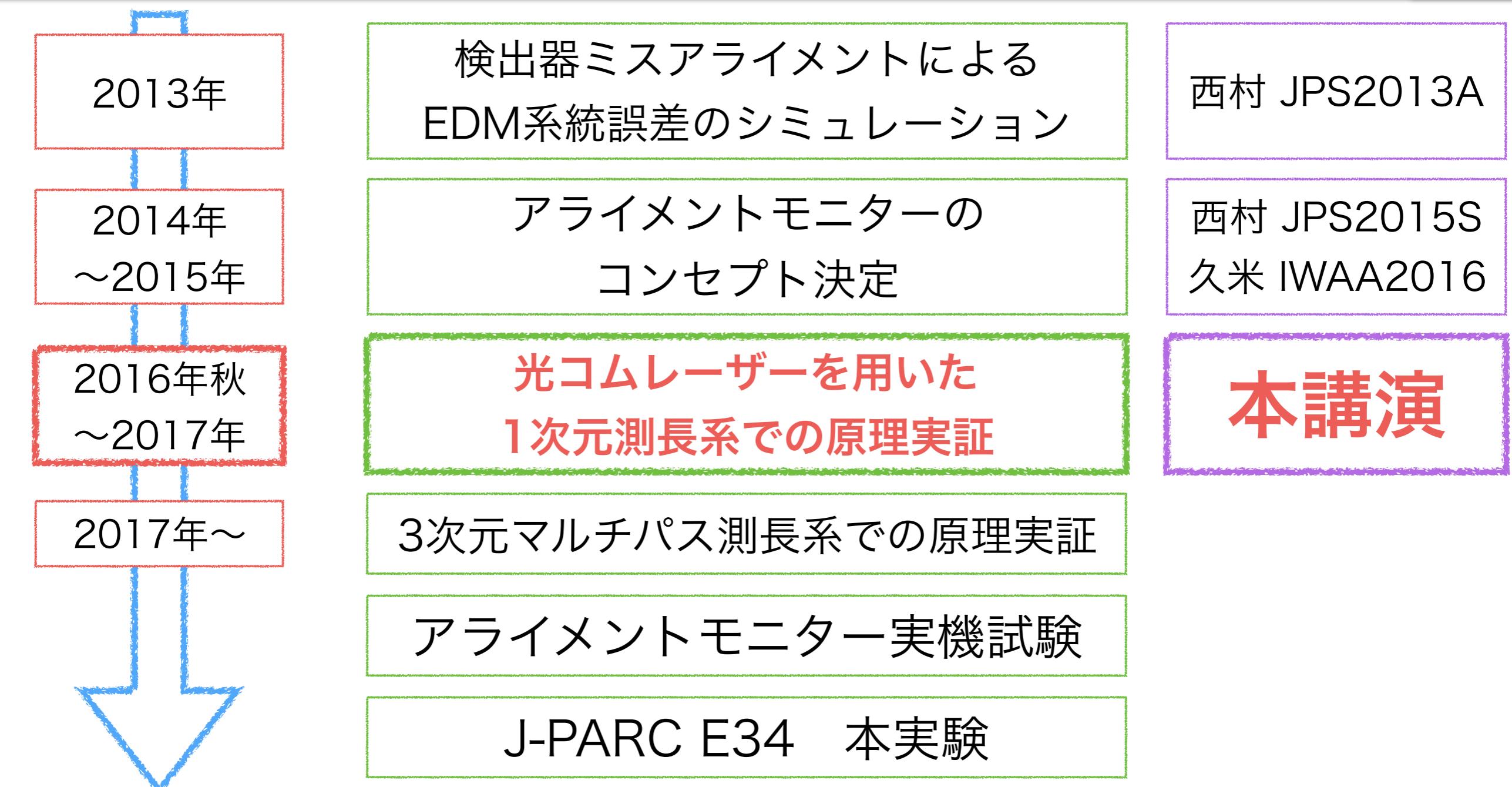
(N : 整数 , λ : パルス間隔)



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

レーザーのパルス間隔
の半整数倍(固有値)

得られる二つの干渉縞間の
距離を測定することで求まる

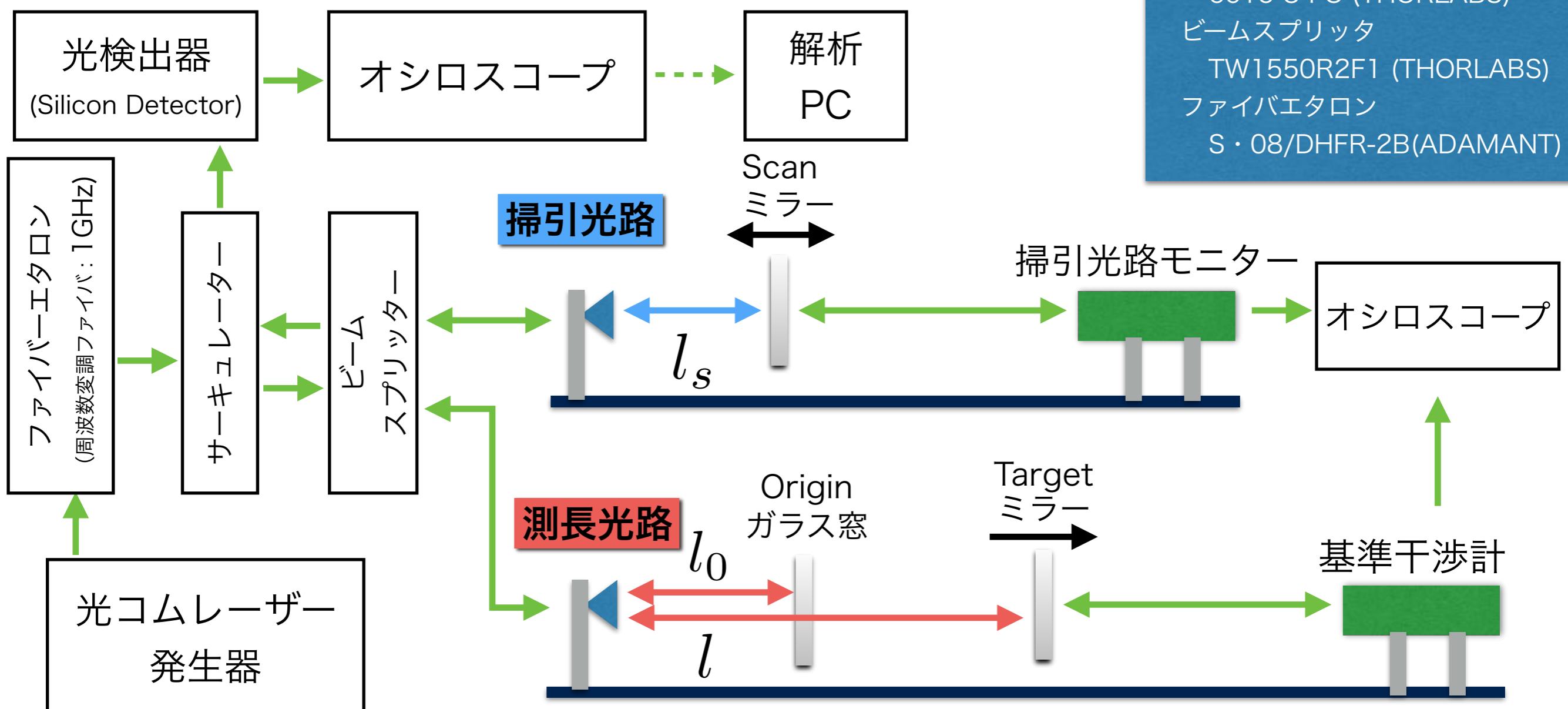


本講演の 内容

- 光コムレーザを使った1次元測長系の作成。
 - 基準干渉計(ONOSOKKI製)による測長結果と比較して、光コムレーザー測長の原理実証の現状。

実験セットアップ

- 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)

光学系のセットアップー写真

10

掃引光路モニター

基準干渉計

Scanミラー

掃引光路

Targetミラー

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

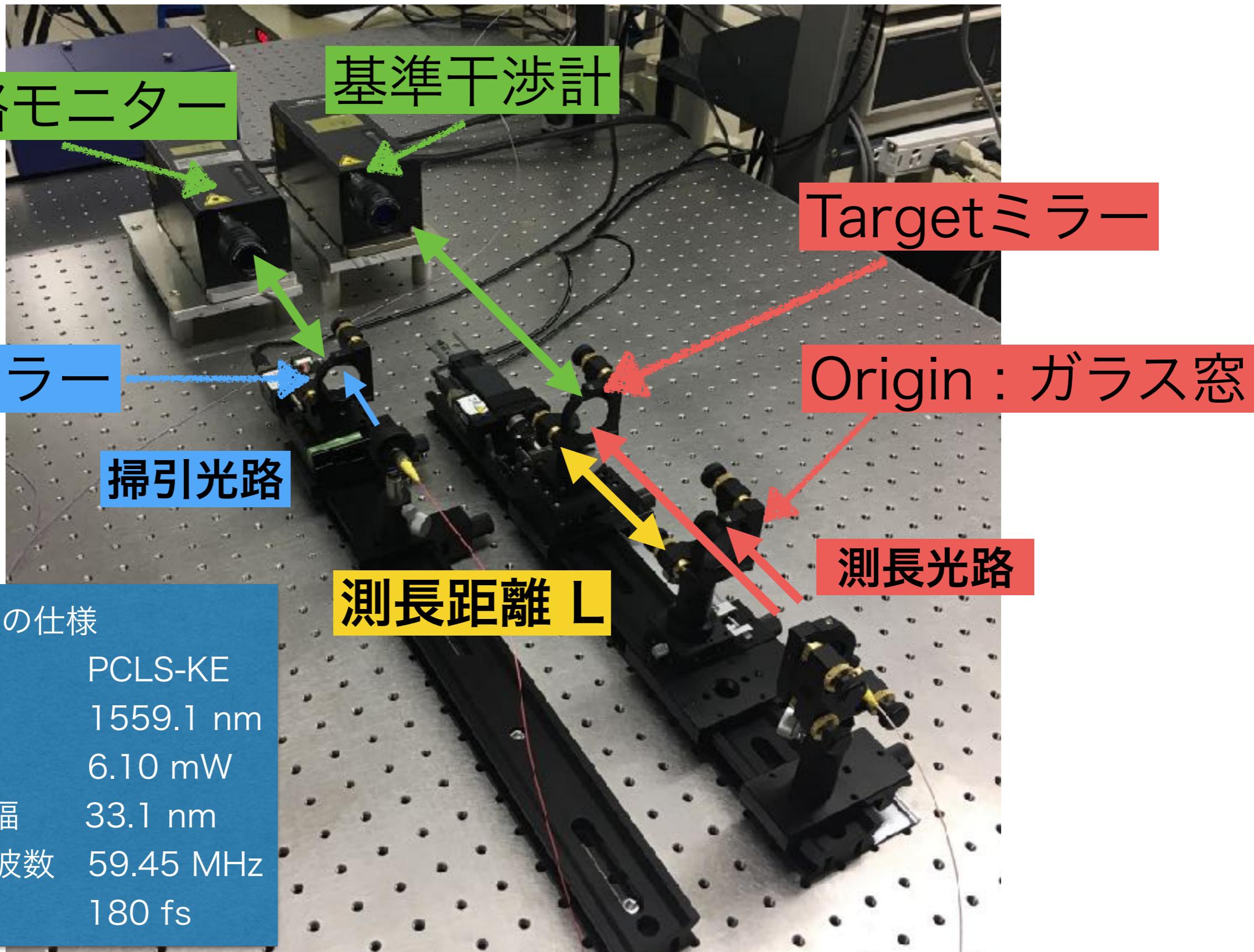
33.1 nm

繰り返し周波数

59.45 MHz

パルス幅

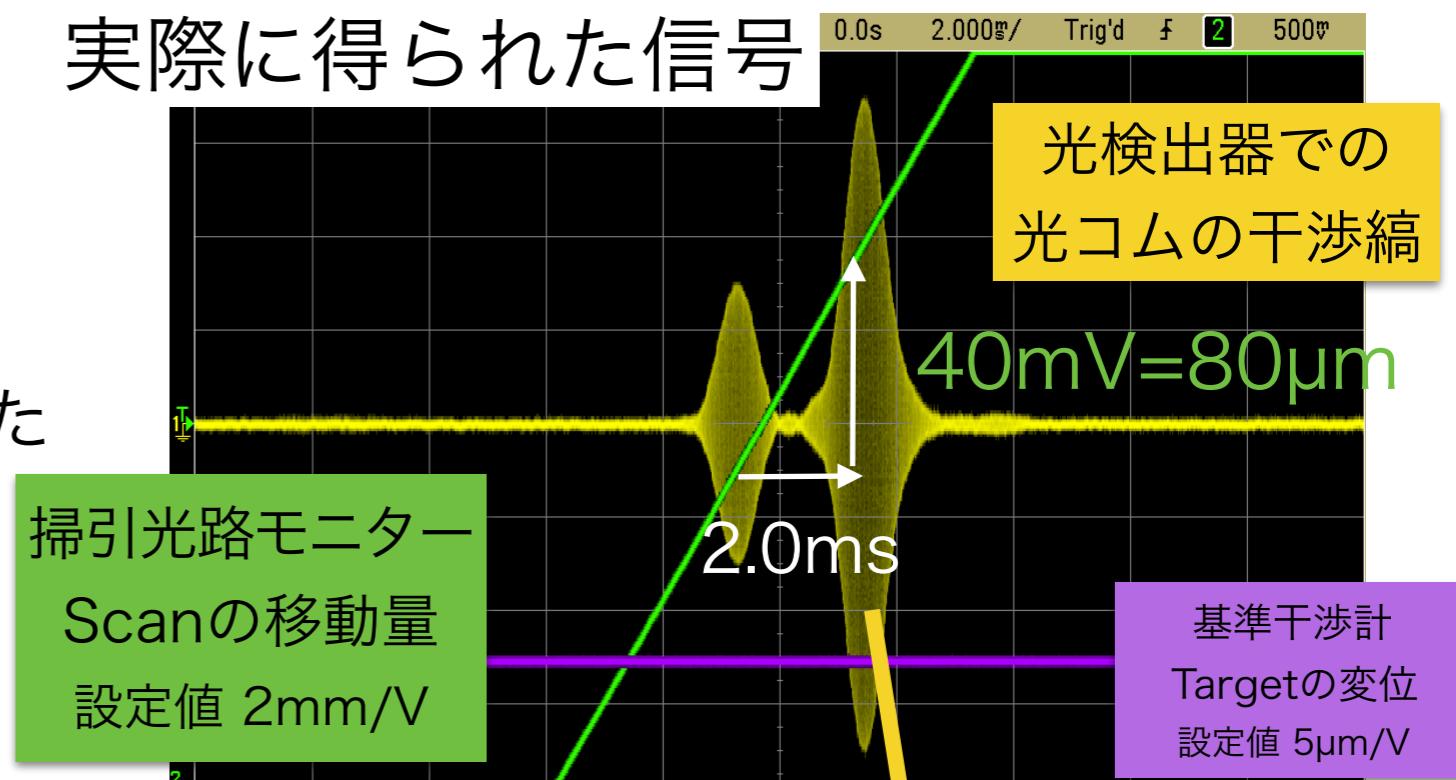
180 fs



干渉縞の信号と解析手法

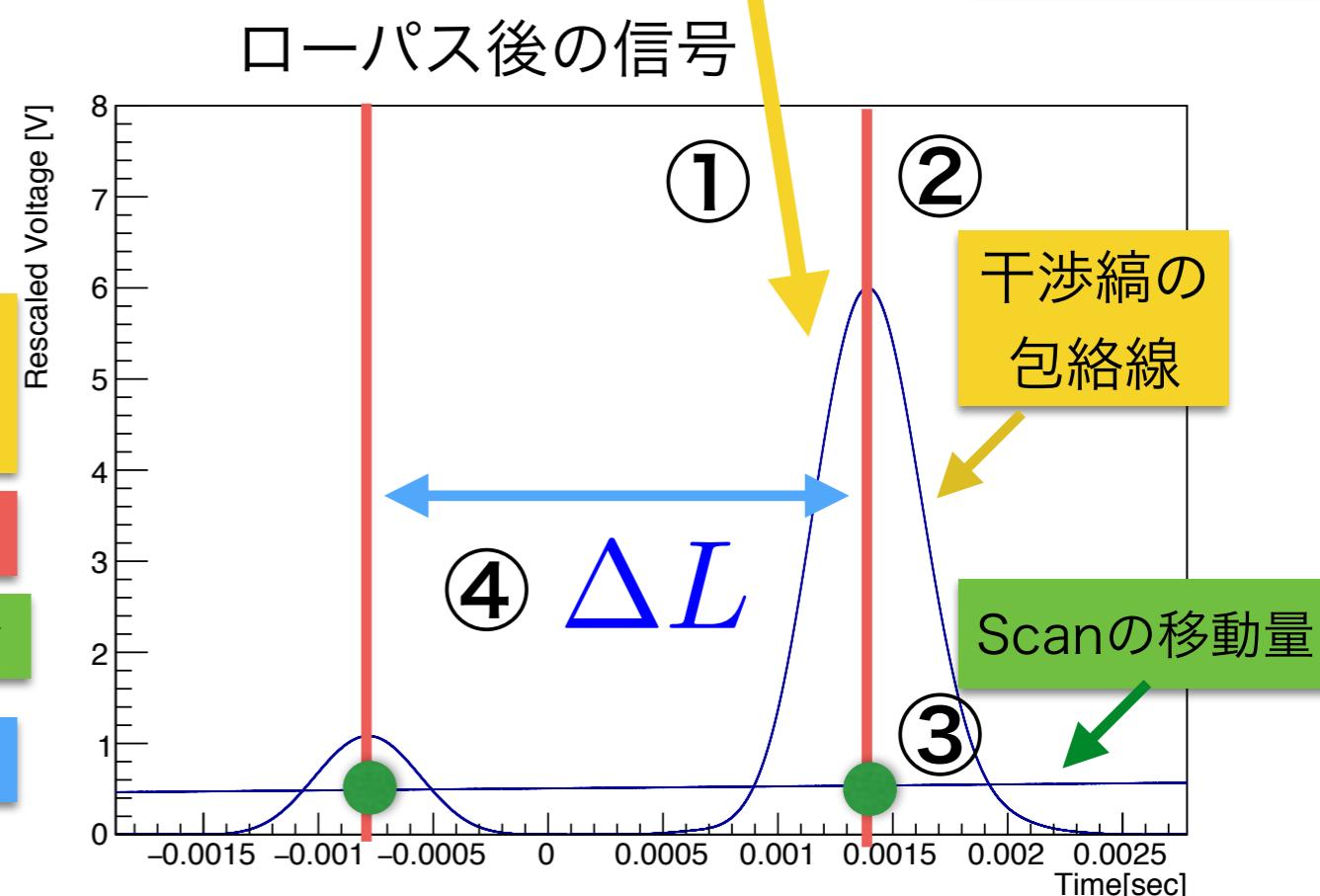
- オシロスコープで得られる信号
- 掃引光路モニターと基準干渉計で測定した長さは、設定値に対応した電圧値として得られる。

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 ΔL を求めた

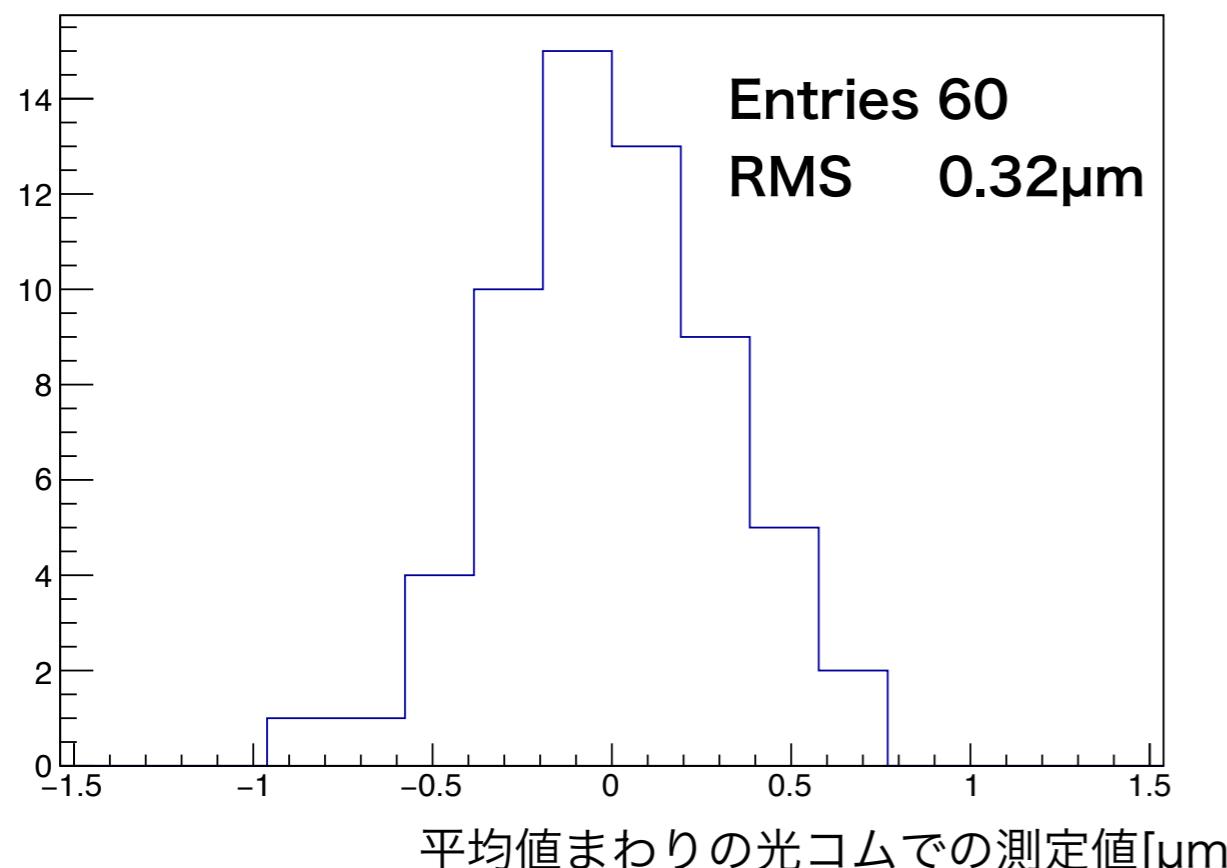


変位測定の結果

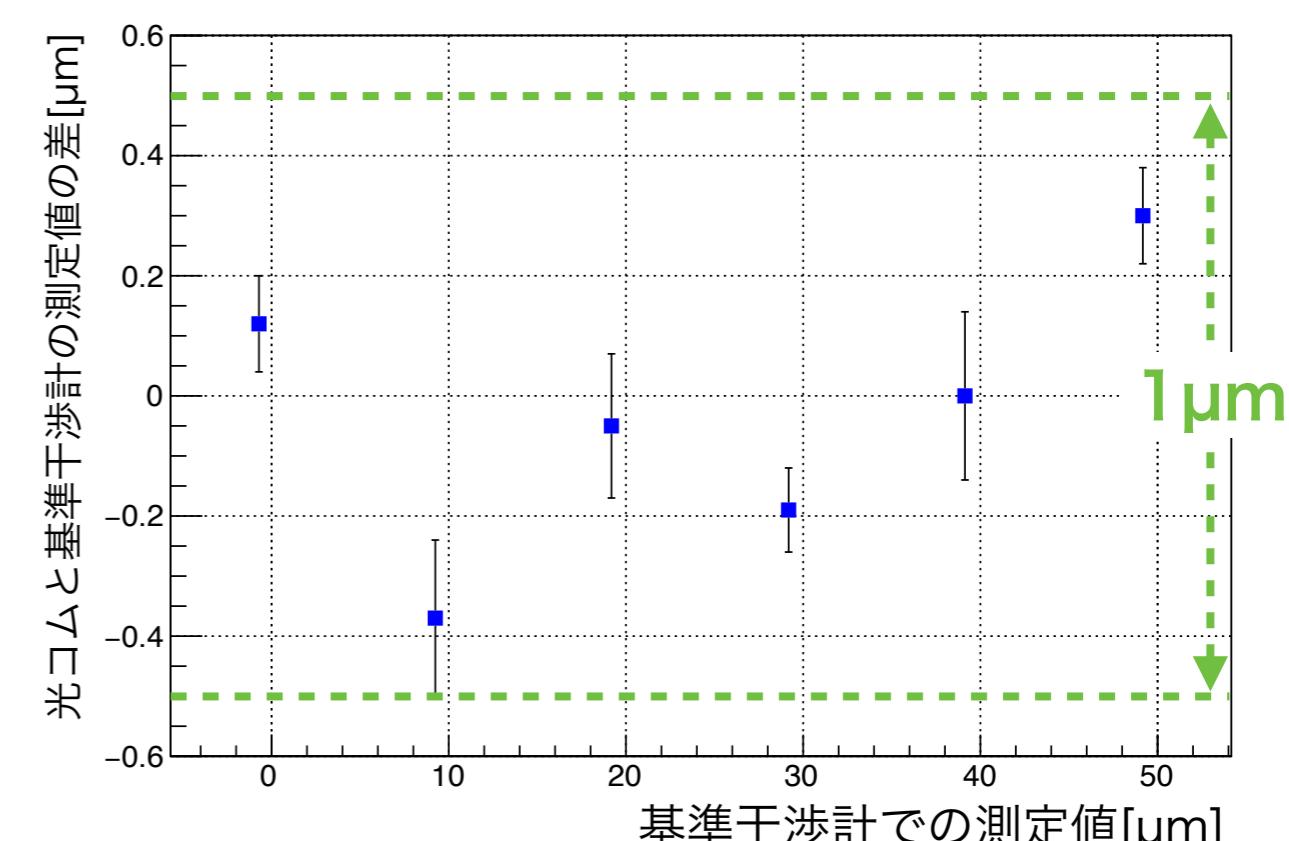
■ 変位測定

- Targetミラーを $10\mu\text{m}$ ずつ変位させ、計 $50\mu\text{m}$ 動かした。
- 各点で10回ずつ連續測定を行った

■ 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
- 統計誤差で説明できないバラつきが存在している。

今後の方針 — 系統誤差の見積もりに向けて

■ 系統誤差となる要因

■ 光学系

光コム干渉計の光軸、基準干渉計の光軸、ステージ移動軸の不一致



■ 光コムと干渉計の光軸合わせを行い、光軸の不一致による誤差を最小限に抑える

■ 環境要因

温度、湿度、気圧

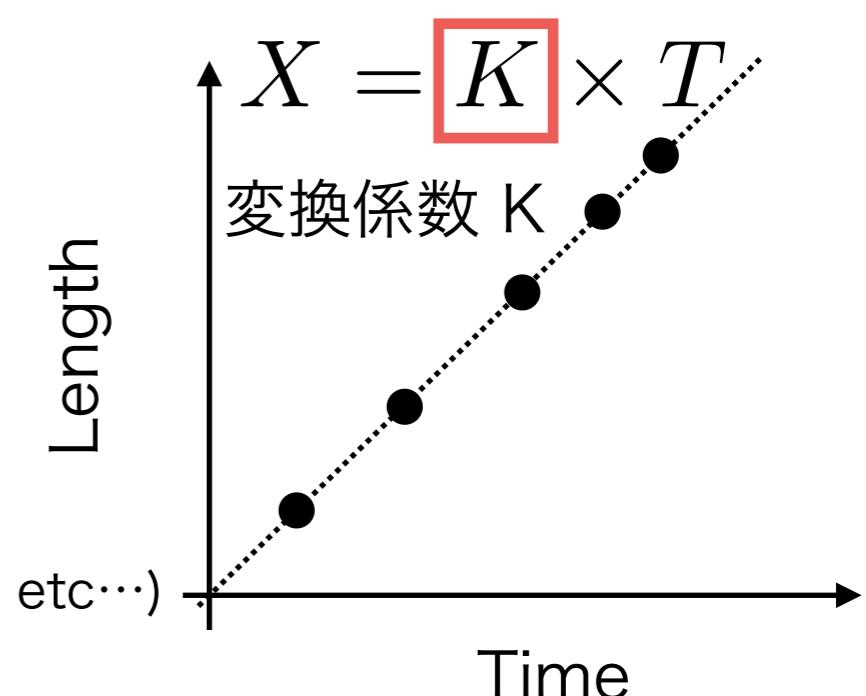
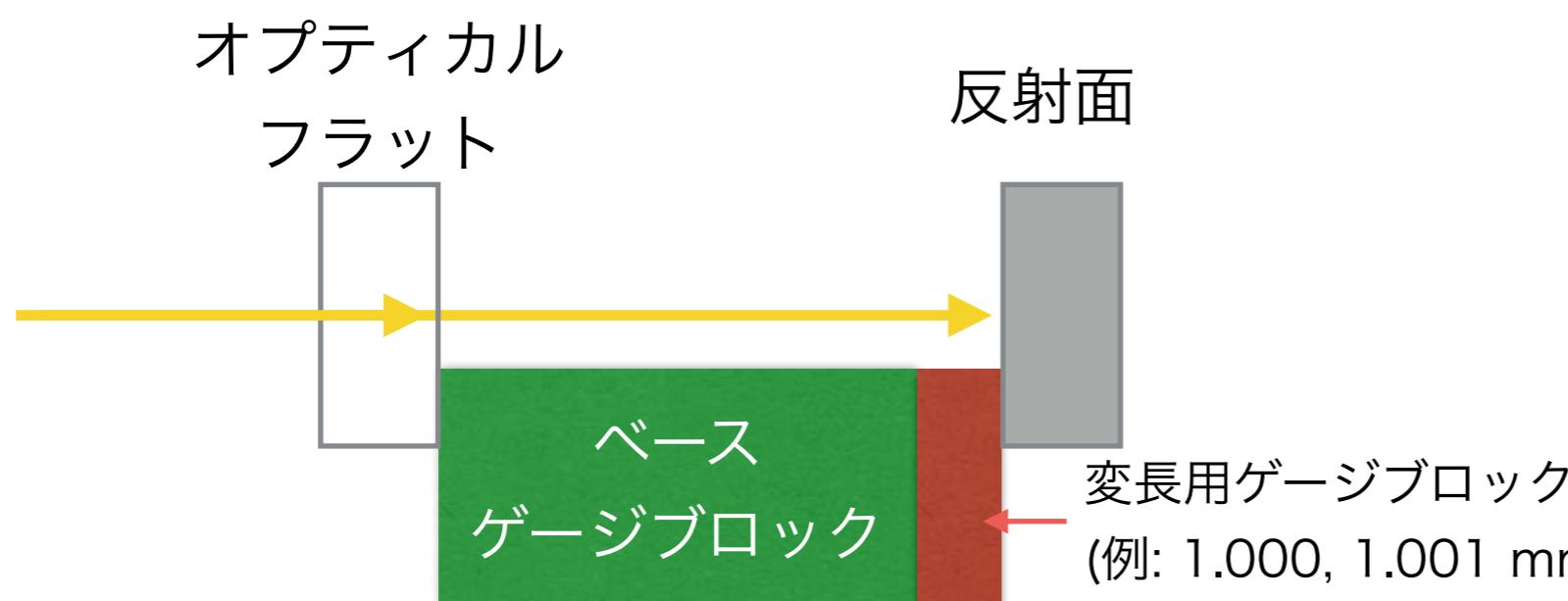


■ 光学系の各点の温度等のモニター

■ 掃引光路モニター・基準干渉計 較正值がズれている可能性



■ 校正值を持った基準系
(ゲージブロック)を使った較正



まとめ

- J-PARC E34 実験 : g-2 精度 0.1 ppm, EDM 感度 $10^{-21} \text{ e} \cdot \text{cm}$
- 目標EDM感度に必要な検出器のアライメント精度
要求 : 10 μrad 以内の回転 → 1 μm 以下の精度でのモニター
- 光コムレーザーを使った干渉計を作成し、干渉縞から1次元の変位を測定する方法を確立した。
- 1 回測定での精度は **0.32 μm** であり、最大50 μm まで変位させたとき、基準干渉計による測定値と **$\pm 0.21 \mu\text{m}$ (RMS)** で一致した。
- 今後は系統誤差の各要因について検討をしていく。
- 3次元マルチパスへ拡張し、最終的なシステム全体として目標の1 μm 以下の精度が得られるかを評価・検討していく。

BACK UP

■ Targetミラーの傾きによる影響

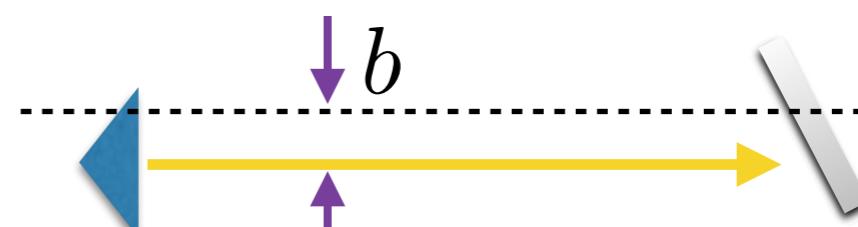


$$\Delta l = r \cos \theta \sim r\theta^2$$

ミラーの傾き
 $\theta \ll 1$
 $r = 500\text{mm}$
 $\Delta l = 5\mu\text{m}$

→ $\theta \sim 1\text{mrad}$

■ 光軸とTargetの中心軸の違いによる影響



$$\Delta l = b \sin \theta \sim b\theta$$

→ $\theta \sim 500\mu\text{rad}$

ミラーの傾き
 $\theta \ll 1$
 $b = 1\text{mm}$
 $\Delta l = 5\mu\text{m}$

■ 想定される鏡の傾きが $100\mu\text{rad}$ であることから、想定されているよりもわずかに大きい影響がある。

今後の方針 — 系統誤差の見積もりに向けて

■ 時間を距離に変換する不確かさ

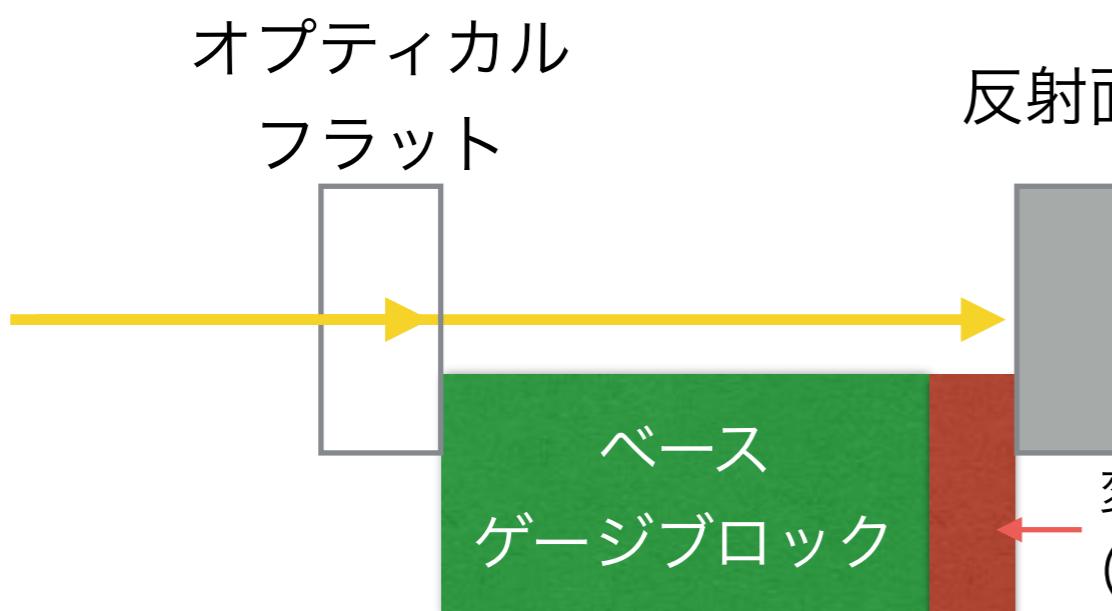


■ ピーク位置によってONOSOKKIでのScanステージの測定値に違いがある可能性

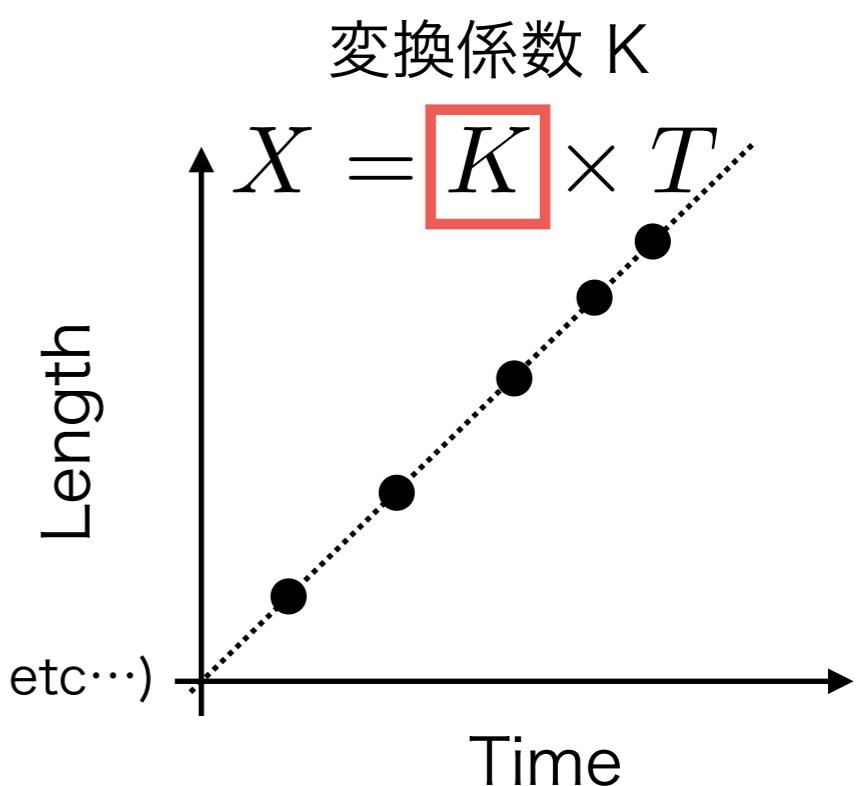
■ ゲージブロックを使った較正方法

■ 精度の既知なゲージブロックを使い、時間と距離の変換係数 K を導出する

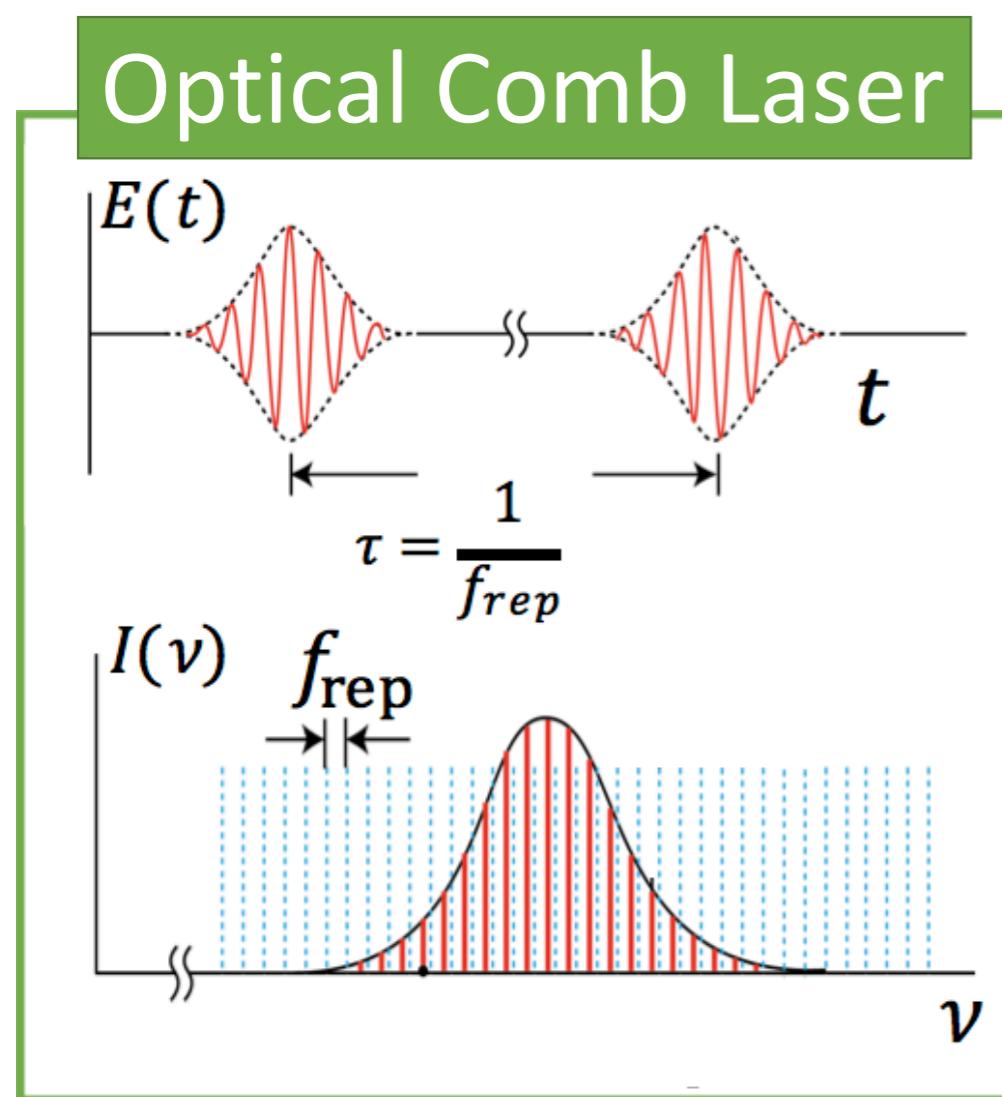
■ 未知の系統誤差について検証する。



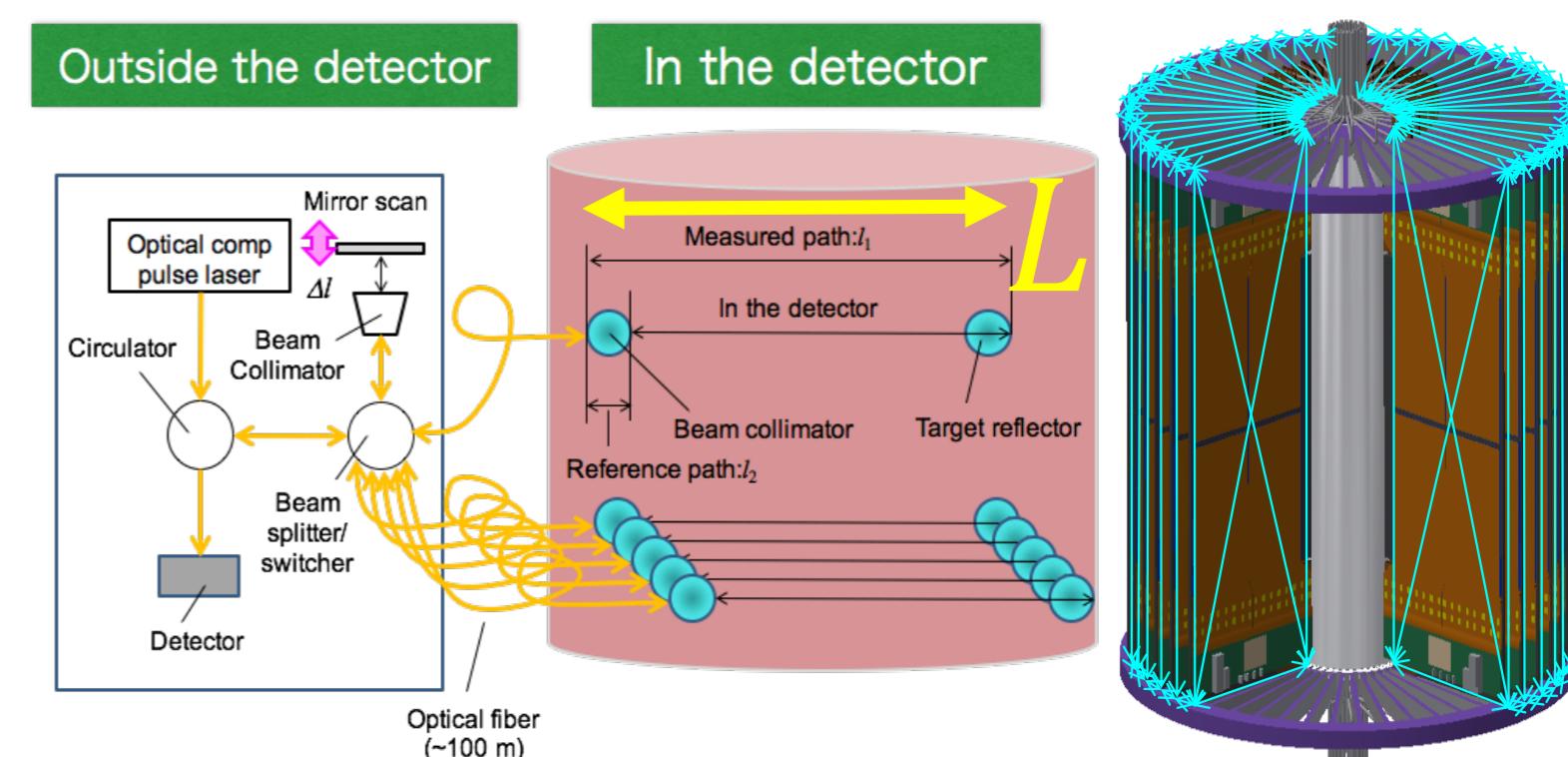
変長用ゲージブロック
(例: 1.000, 1.001 mm etc…)



- 光コムパルスレーザー
- 周波数構造が櫛状(comb)の構造
- パルスレーザー
→干渉条件の時のみ信号が現れる
- 繰り返し周波数 f_{rep} の安定性
→パルス間隔が安定し長さを精密に測れる



- 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。



Magnitude of the 1st transform

