

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

2018/02/19

東京大学 安田浩昌

24th ICEPP symposium
@ 長野県 白馬村 岳美山莊

目次

■ ミューオン双極子モーメントの物理

■ J-PARC muon g-2/EDM 実験

■ 検出器アライメントモニターの動機と原理

■ 繰り返し周波数の校正測定実験 と 長さ測定の精度評価

■ 結果 と 今後の展望

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

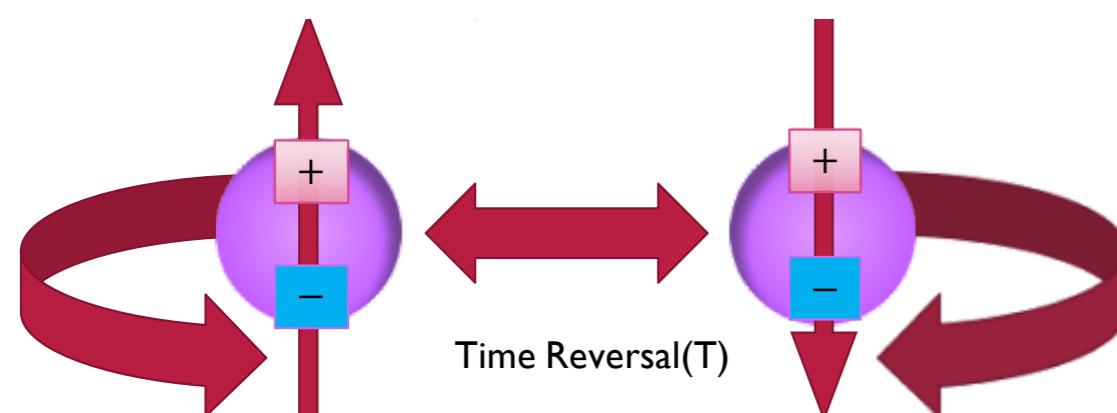
■ ミューオンの異常磁気モーメント($g-2$) [$g = 2(1+a_\mu)$]

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

The diagram illustrates the contributions to the muon's magnetic dipole moment. The total value is zero, composed of contributions from Quantum Electrodynamics (QED), hadronic interactions, the weak interaction (involving W and neutrino exchange), and Beyond the Standard Model (BSM) phenomena involving a scalar particle χ^0 .

■ 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)



■ EDMの発見
 $(\because \text{CPT定理})$
 \rightarrow CPを破るBSM現象の発見
 \rightarrow 物質優勢宇宙問題解決の手がかり

J-PARC muon g-2/EDM 実験 5

■ 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

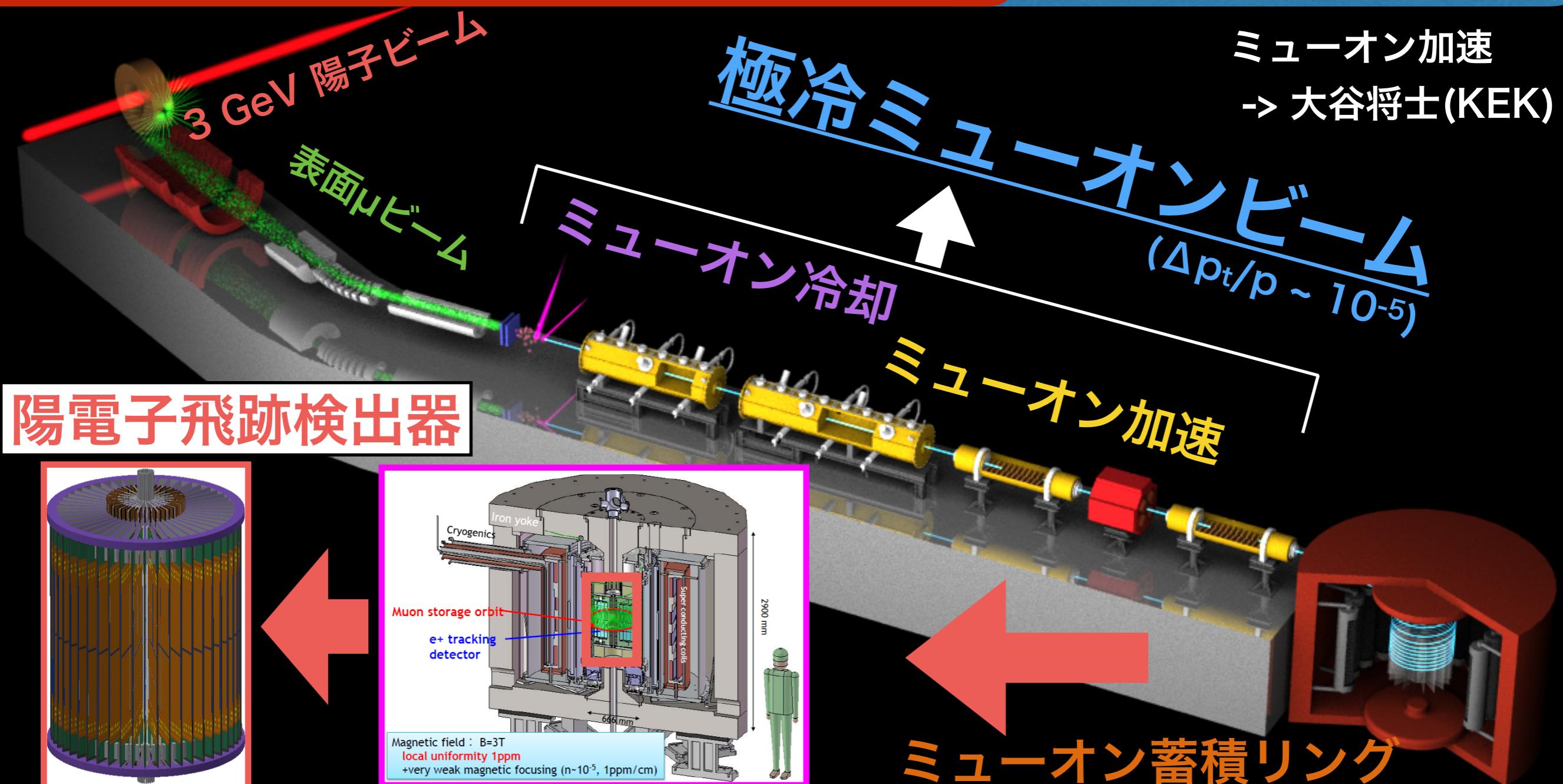
GOAL @ J-PARC E34

異常磁気モーメント(g-2) : 精度 0.1 ppm

Physics

→ SMの検証(3.4 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



J-PARC muon g-2/EDM 実験 6

■ 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

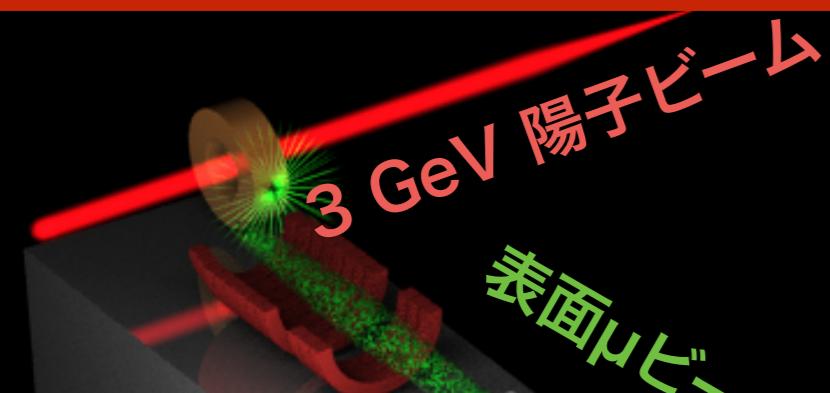
GOAL @ J-PARC E34

異常磁気モーメント(g-2) : 精度 0.1 ppm

Physics

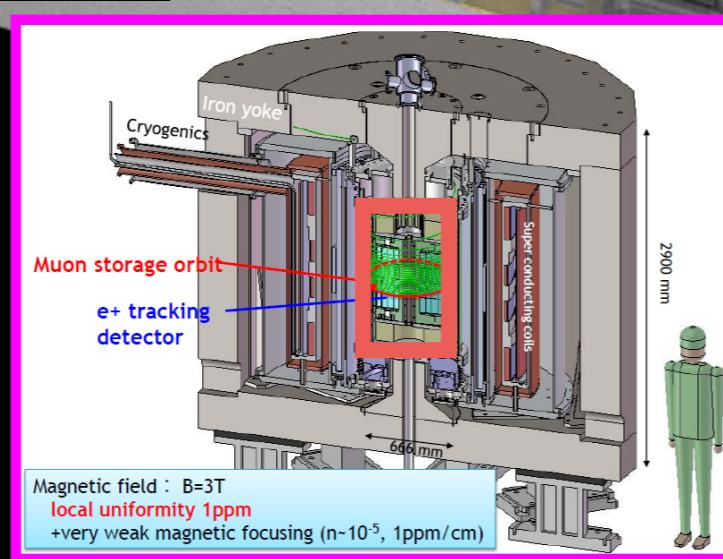
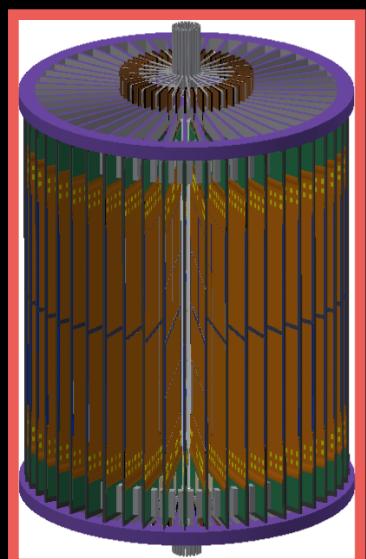
→ SMの検証(3.4 σ @BNL)

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



本研究：陽電子飛跡検出器の
検出器アライメントモニターの開発

陽電子飛跡検出器



極冷ミューオンビーム
($\Delta p_t/p \sim 10^{-5}$)

ミューオン加速
→ 大谷将士(KEK)

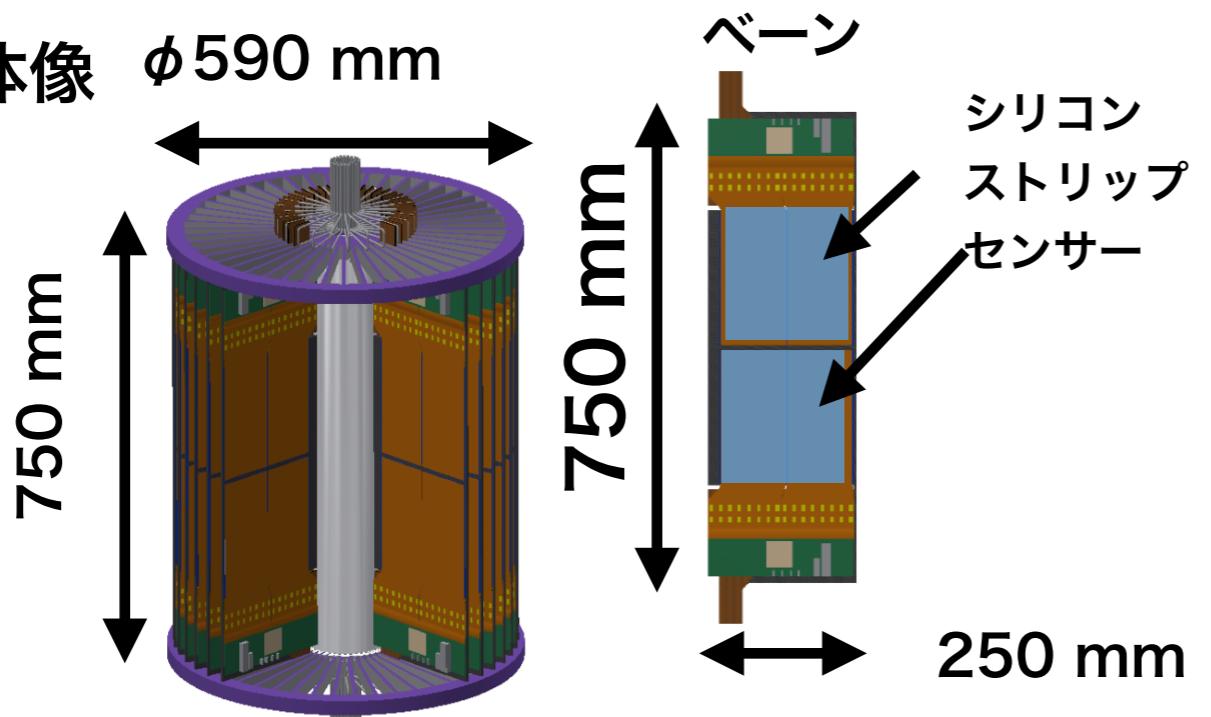


陽電子飛跡検出器とEDM系統誤差

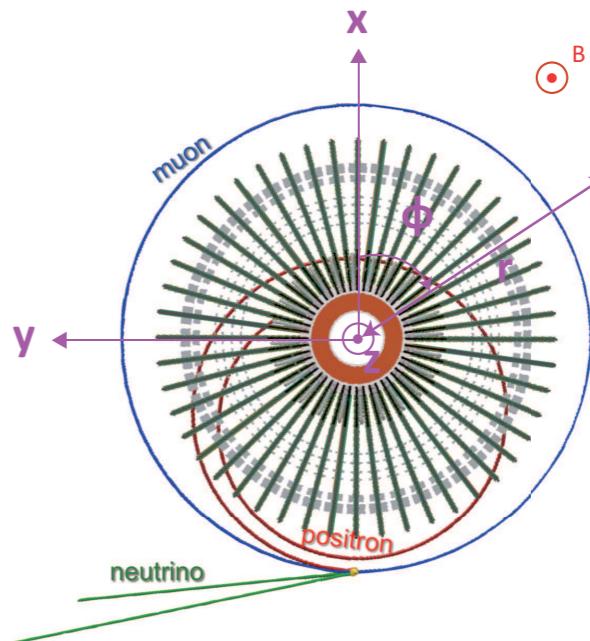
7

- 大強度パルスビーム(~1.4 MHz)に対応した高速応答性, 高計数率での安定性
- ミューオン崩壊によって得られる陽電子の飛跡を検出してスピン運動を観測

検出器の全体像 $\phi 590 \text{ mm}$



トラッキングのイメージ

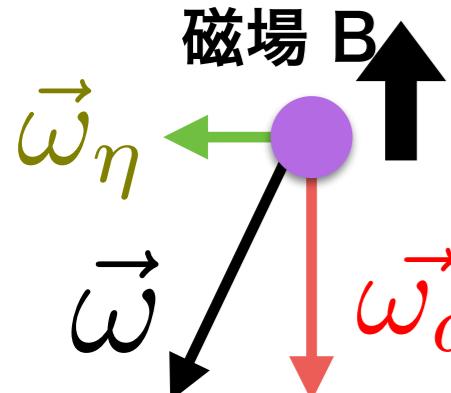


本研究の動機

EDMによるスピン

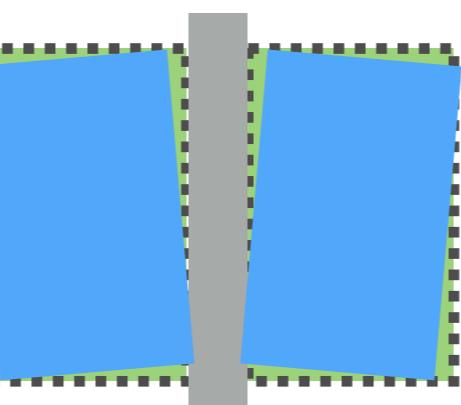
回転平面の傾き

区別できない



for $10^{-21} \text{ e} \cdot \text{cm}$
10 μrad 以内

検出器の回転



EDM測定の系統誤差の見積もり

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

検出器アライメントモニター

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

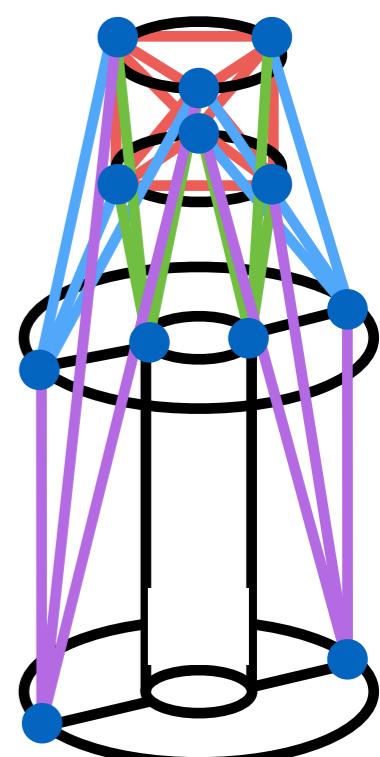
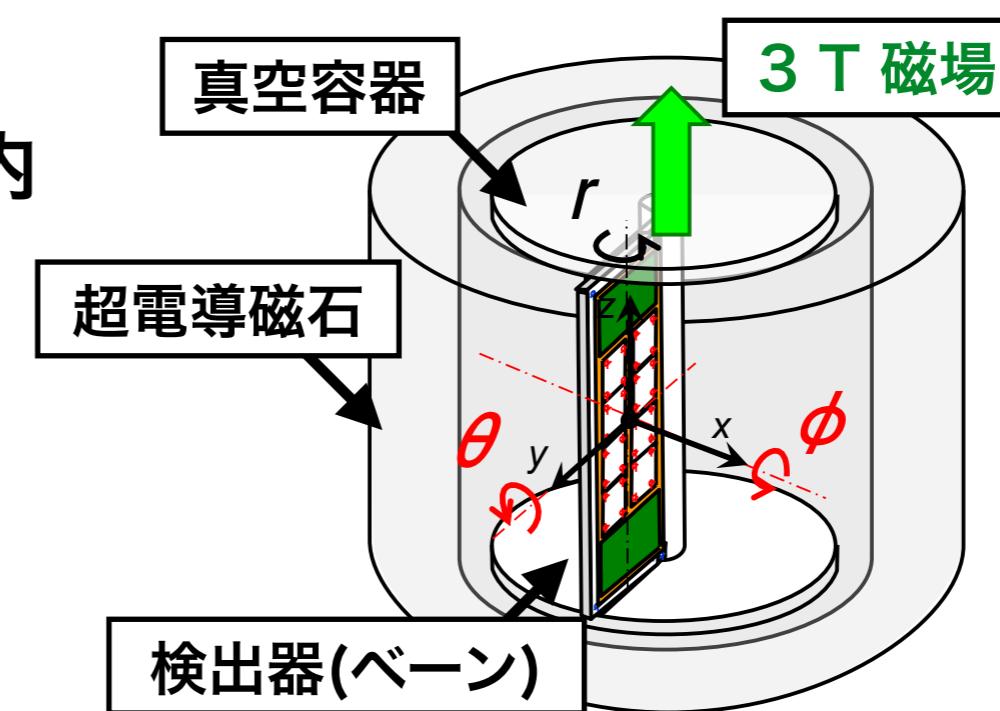
- 長さ測定の精度が $1 \mu\text{m}$ 以内

■設置環境

- 高磁場(3 T)

- 長期間の利用(~1年)

- 狭い設置スペース



光周波数コムレーザー + 光路差掃引式干渉計

光周波数コムレーザー

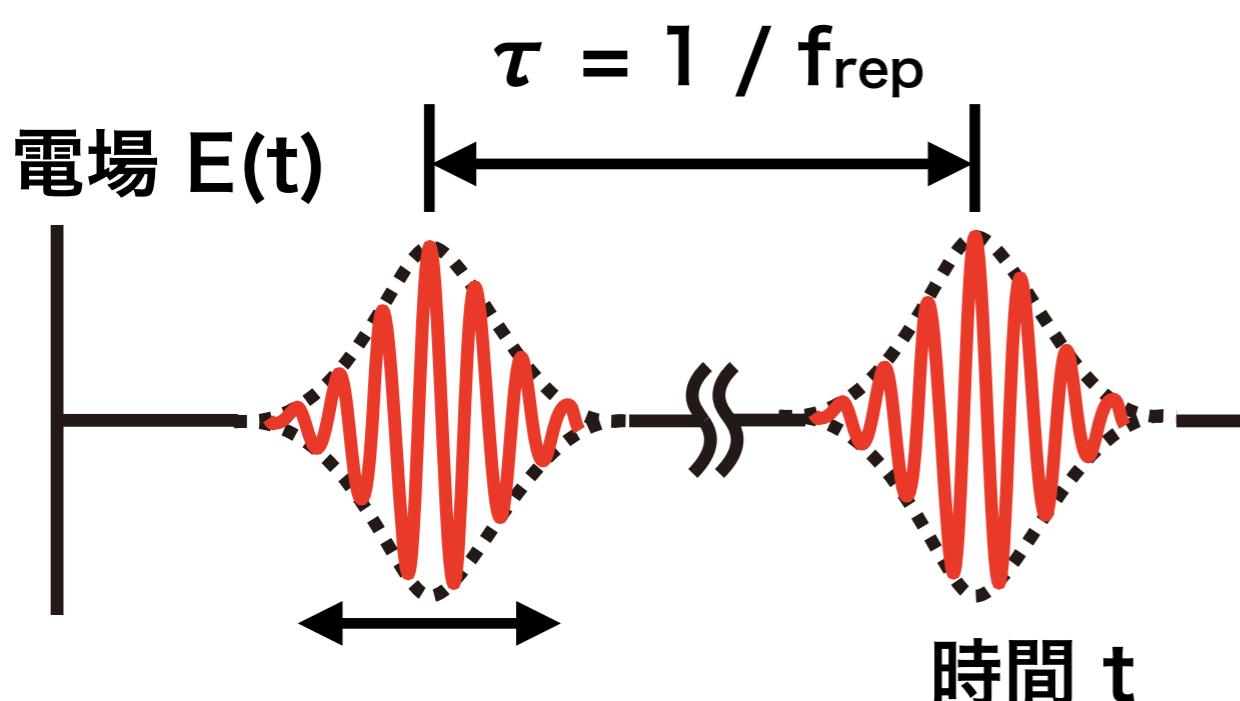
■ 光周波数コムレーザー（光コム）の特徴

- パルス幅がフェムト秒のパルスレーザー

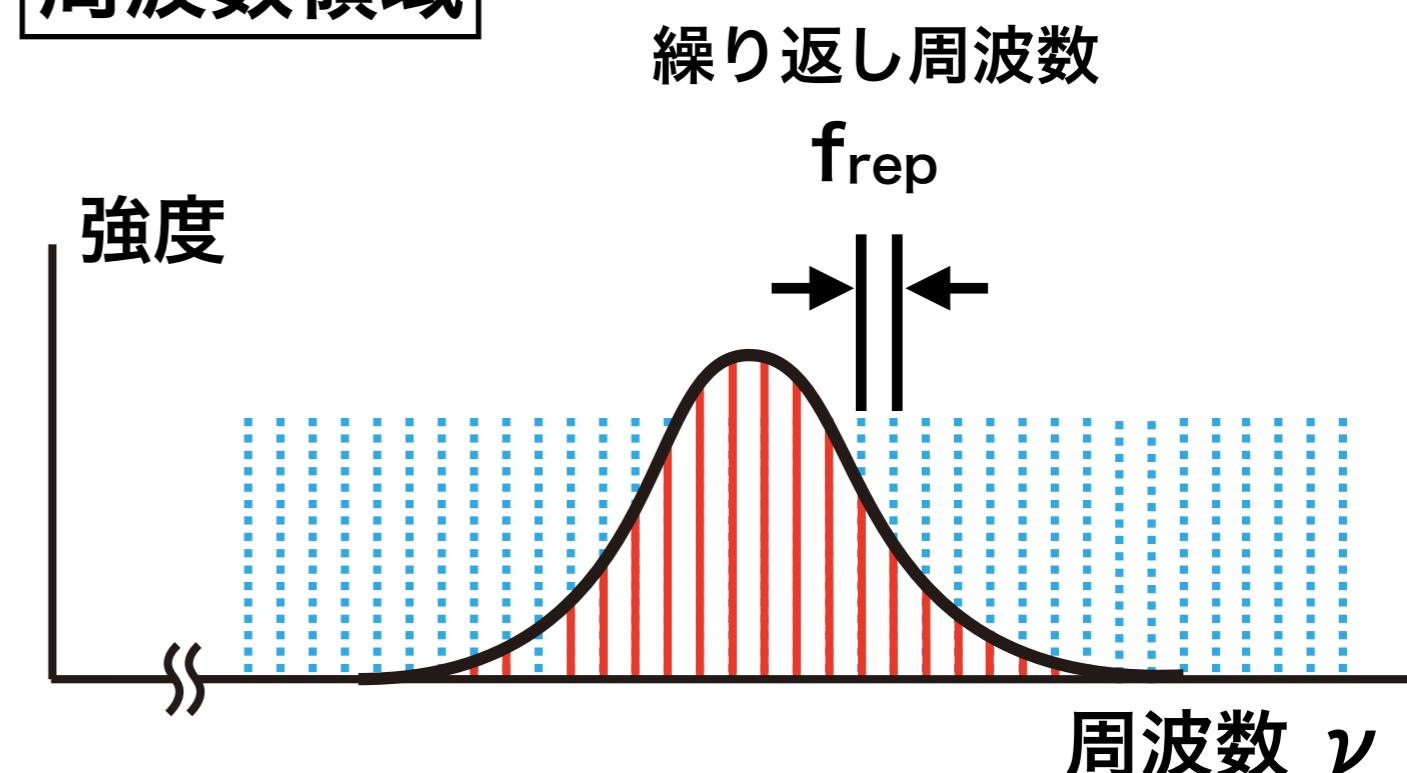
- 櫛(comb)状の周波数構造

- 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

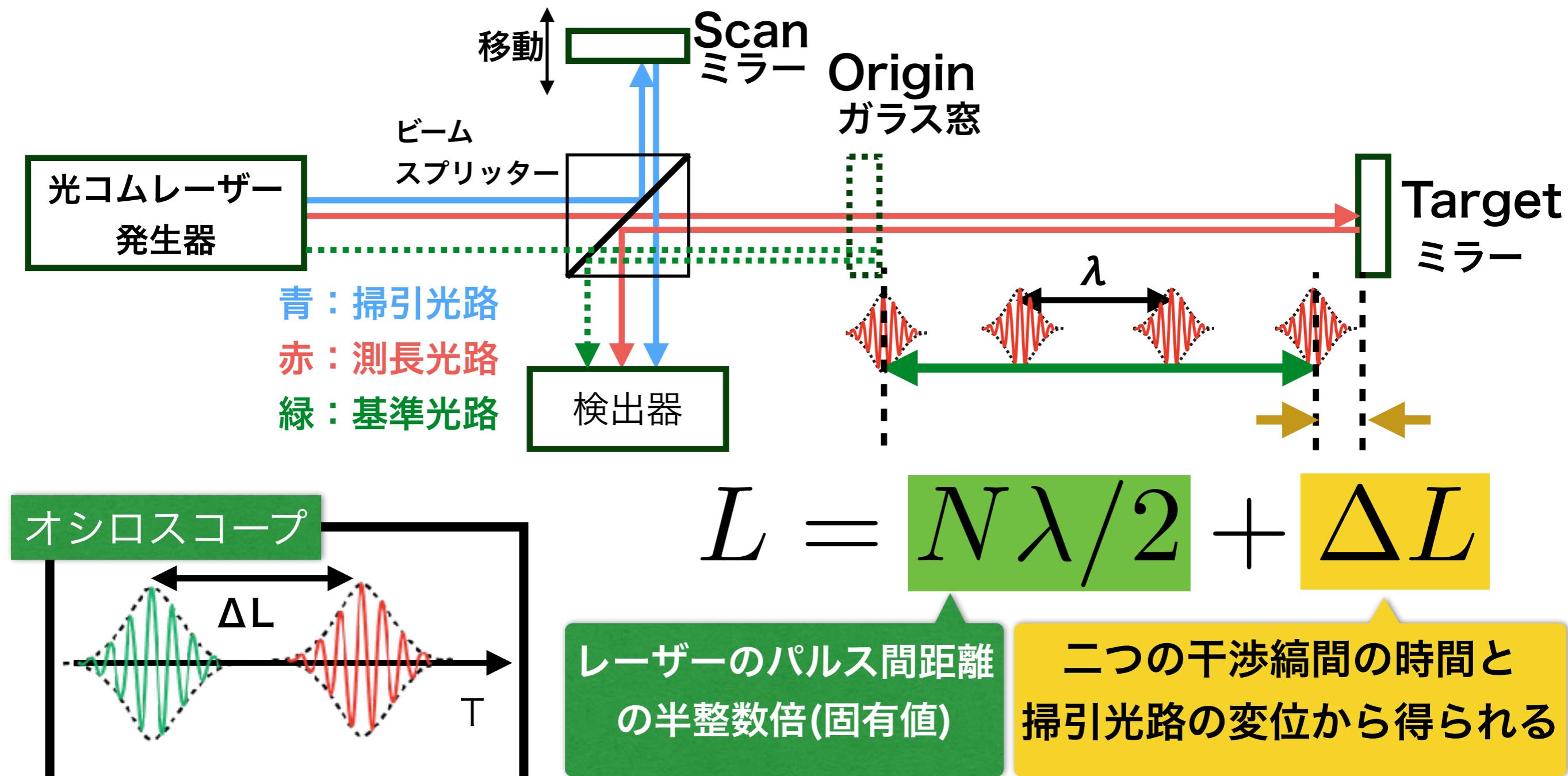


周波数領域



■ 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 , λ : パルス間距離)

測定長さL

■ 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_{air} : 空気中の屈折率,
 f_{rep} : 繰り返し周波数, ΔL : 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.

本研究の流れ

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_{eta} の校正
 - 透過前の繰り返し周波数 f_{rep} の測定
 - 2つの干渉縞間の距離 ΔL の測定
 - 長さ基準 L_{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_{air} の測定
- 測定長さLの精度を評価

本研究の流れ

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

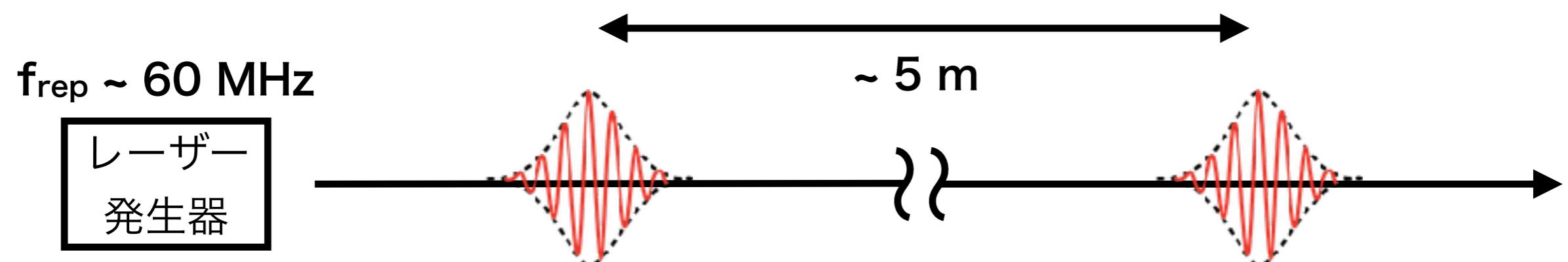
- 測長可能な光周波数コムレーザー干渉計を作成 JPS2017春
- ファイバーエタロン透過後の繰り返し周波数 f_{eta} の校正
 - 透過前の繰り返し周波数 f_{rep} の測定 JPS2017秋
 - 2つの干渉縞間の距離 ΔL の測定 JPS2017春
 - 長さ基準 L_{GB} の測定 JPS2017秋
 - セットアップ再現性の不確かさ
 - 空気の屈折率 n_{air} の測定 JPS2017秋
- 測定長さLの精度を評価

ファイバーエタロンの役割

■ 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

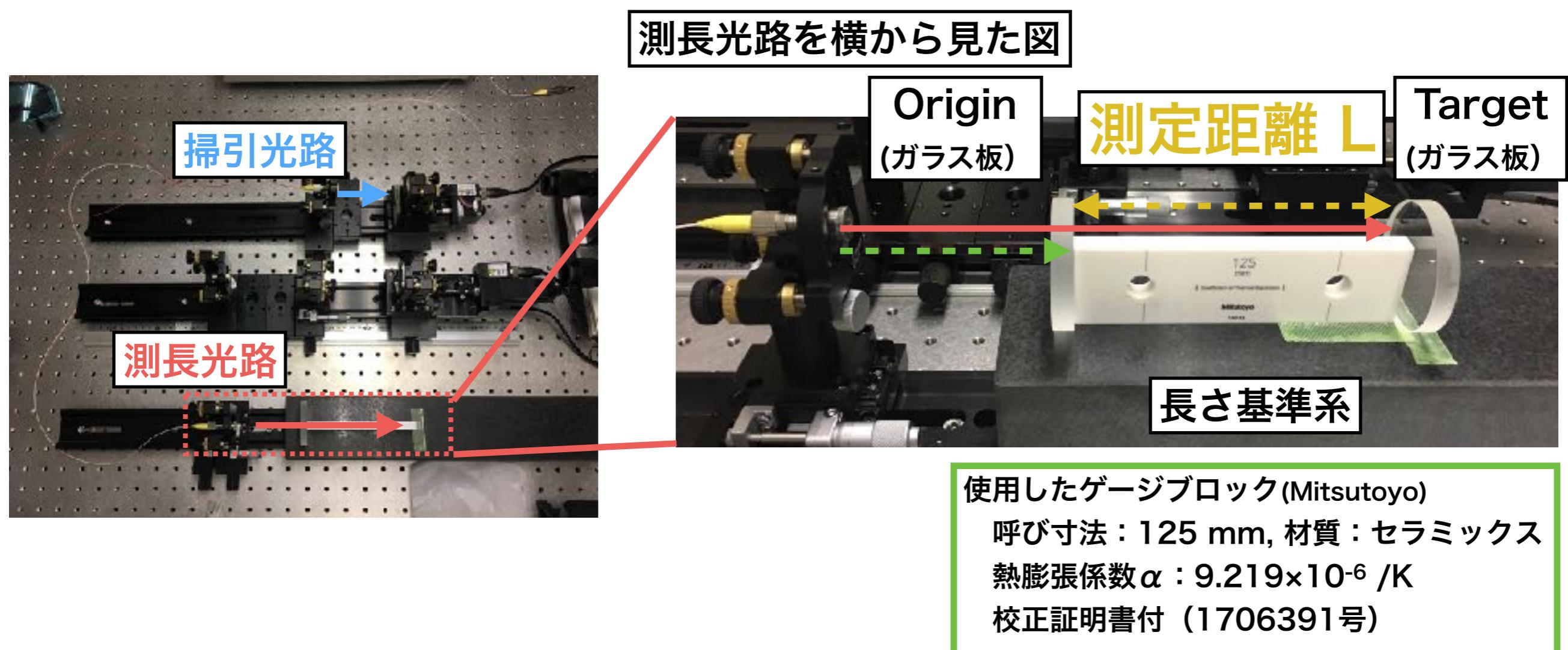


-> しかし、エタロンの透過特性が未知なため、校正する必要がある

ゲージブロックを使った校正測定 15

■ ゲージブロック

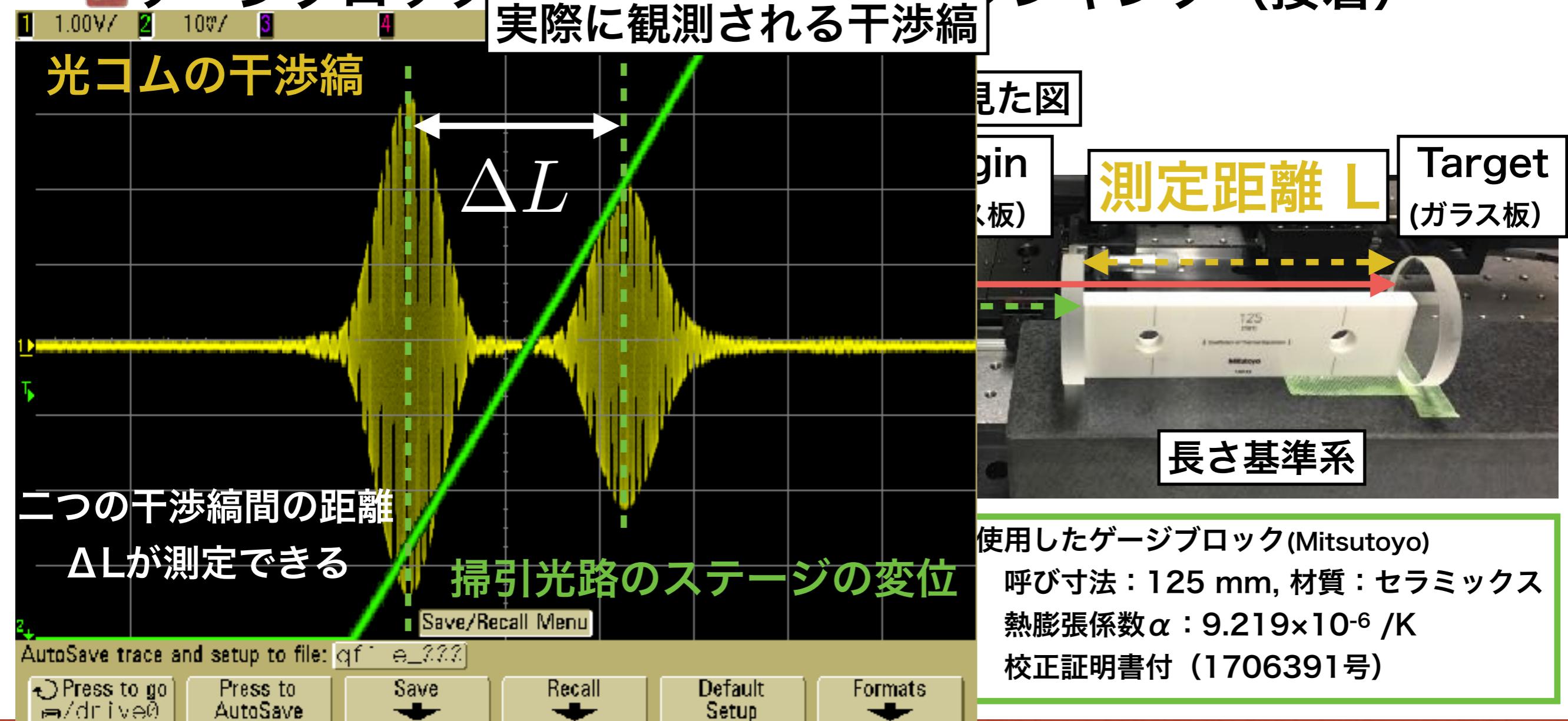
- 特徴：寸法が正確、耐久性がある、測定面が密着する
- ゲージブロックは **0.03 μm** の不確かさで校正されている。
- ゲージブロックの両端にガラス板をリング（接着）



ゲージブロックを使った校正測定 16

■ 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 $0.03 \mu\text{m}$ 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）



■ 繰り返し周波数校正における不確かさの要因

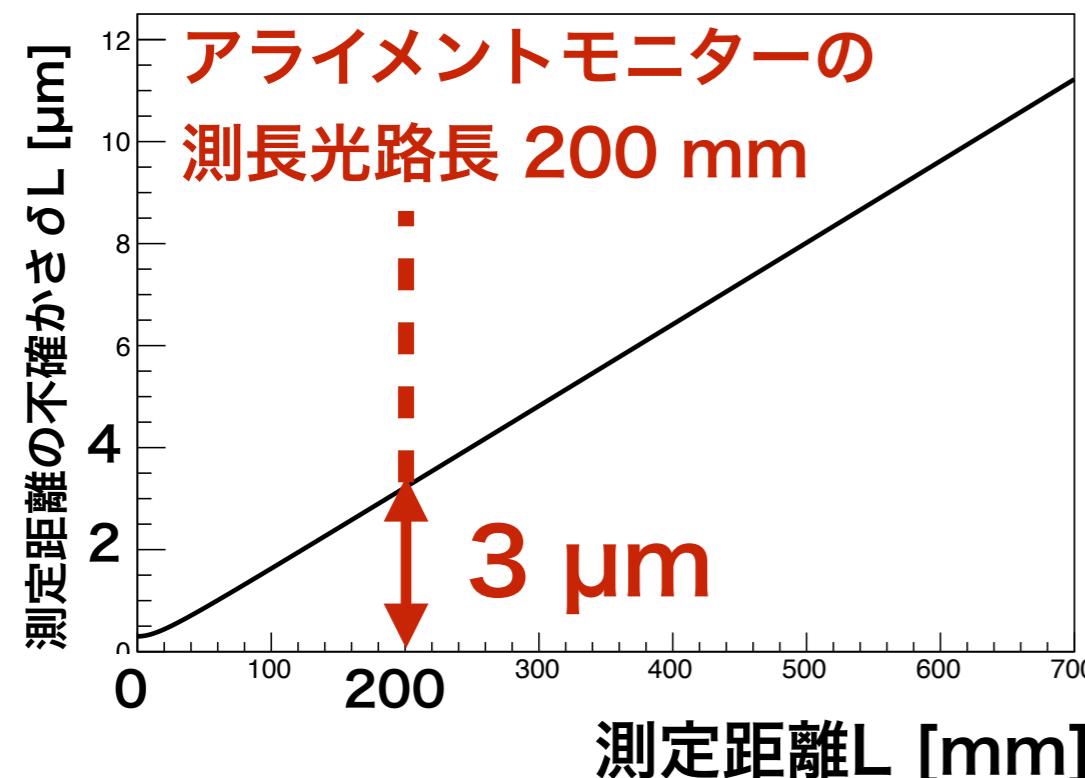
不確かさ要因	各不確かさ	f_{eta} 不確かさ [GHz]	寄与率 [%]
長さ基準系 LGB	寸法差幅	0.03 μm	< 0.2%
	校正不確かさ	0.017 μm	< 0.1%
	熱膨張係数	0.008 μm	1.83×10^{-5} < 0.1% <u>97.2%</u>
	測定温度	0.2 μm	1.1%
	セットアップ再現性	<u>1.9 μm</u>	<u>96.1%</u>
空気の屈折率 n_{air}	0.9×10^{-6}	1.1×10^{-6}	0.4%
干渉縞間の距離 ΔL	0.3 μm	2.9×10^{-6}	2.4%
合計		1.9×10^{-5}	(100%)

■ セットアップ再現性による不確かさが大きく影響

測定長さLの不確かさ

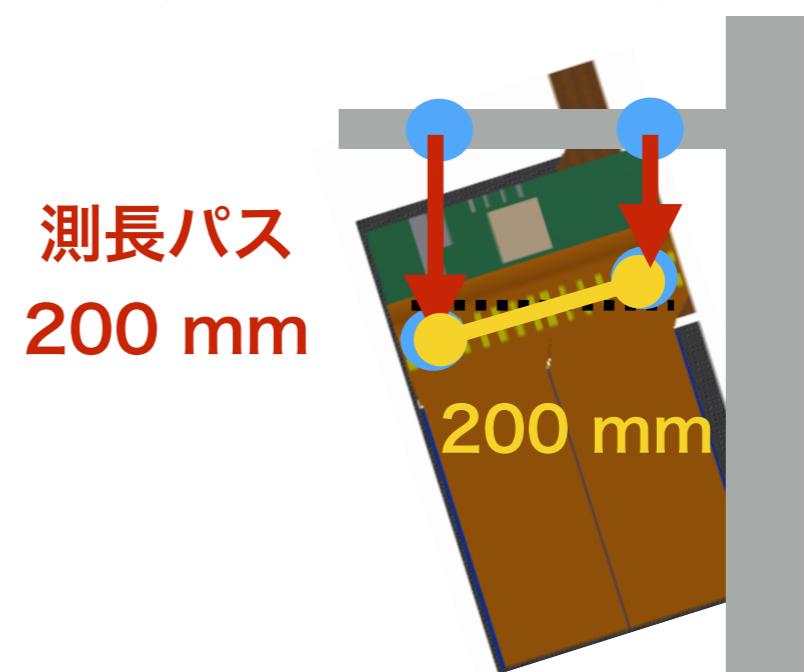
18

■ 測長長さLの不確かさ δL



■ 測長パス(200 mm) の δL

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



■ 長さ精度を角度精度に換算

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

■ Misalignmentによる系統誤差

~ 統計誤差($10^{-21} \text{e} \cdot \text{cm}$)

→ 測定精度向上の必要有

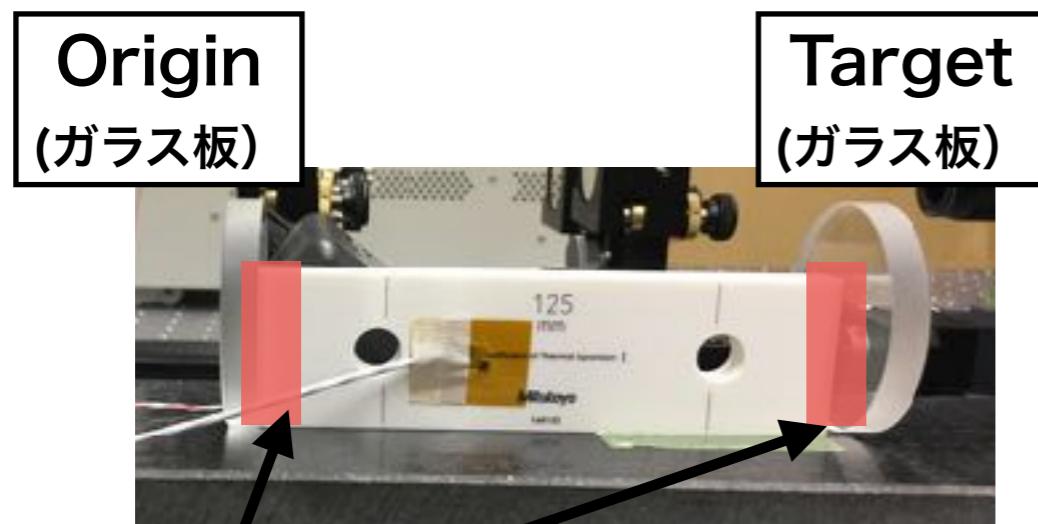
誤差要因	$d_\mu (\times 10^{-21}) [\text{e} \cdot \text{cm}]$
Axial E-field	10^{-3}
Radial B-field	10^{-5}
Misalignment	3
統計誤差	1.4

セットアップ再現性の向上

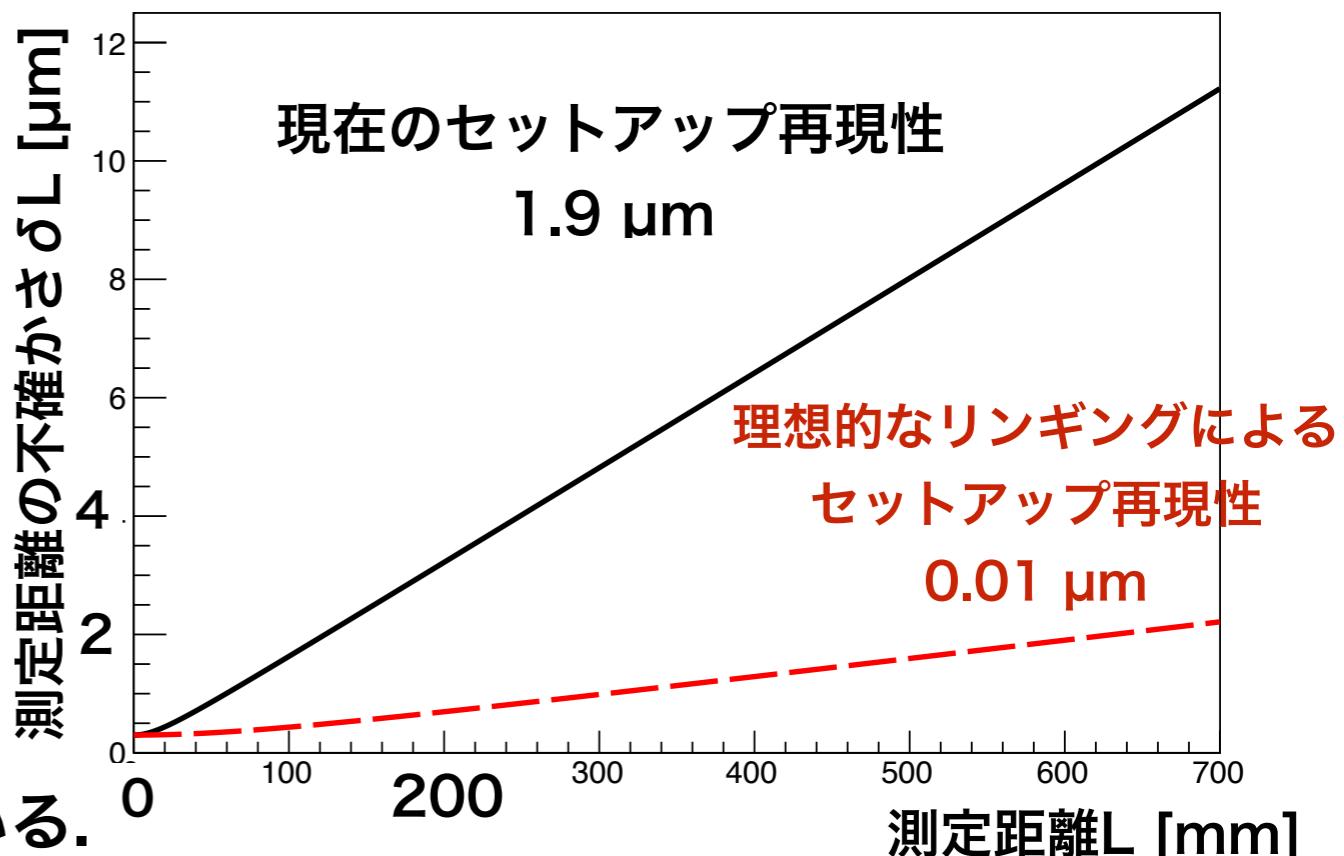
19

■ f_{eta} 校正の不確かさのほとんどがセットアップ再現性

■ セットアップの再現性は、リングング・環境・光軸のアライメントなどに依存している。



リングング（密着）による不確かさは
0.01 μm 程度に抑えられることが知られている。



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

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

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

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。

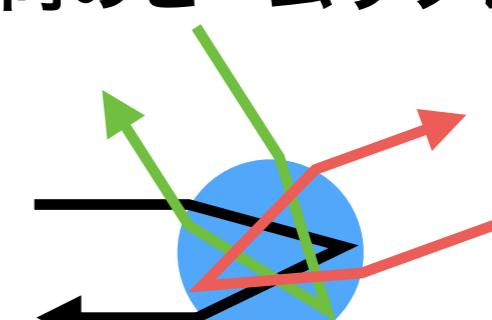
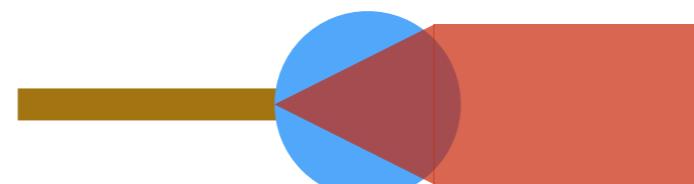
- ゲージブロックを利用してことで f_{eta} を校正した。
- 校正によって期待される絶対距離L 測定の不確かさは,
$$\delta L \text{ (200 mm)} = 3 \mu\text{m}$$
- 期待されるミューオンEDMの系統誤差。
$$\delta d_\mu = 3.0 \times 10^{-21} \text{ e} \cdot \text{cm}$$
- セットアップ再現性を向上することで、長さ測定の精度を向上できる。

■アライメントモニターの開発

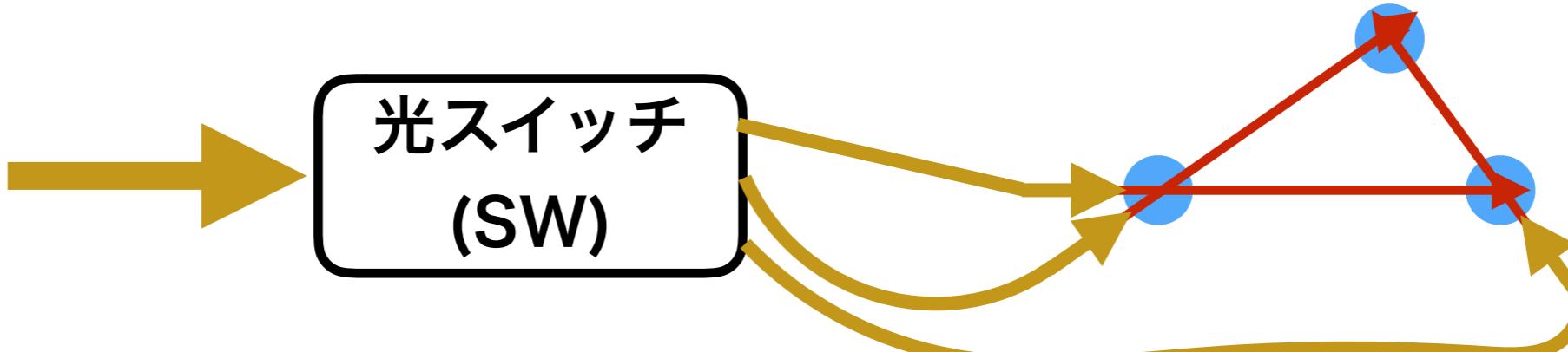
■長さ測定 L の精度評価（本研究）

■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

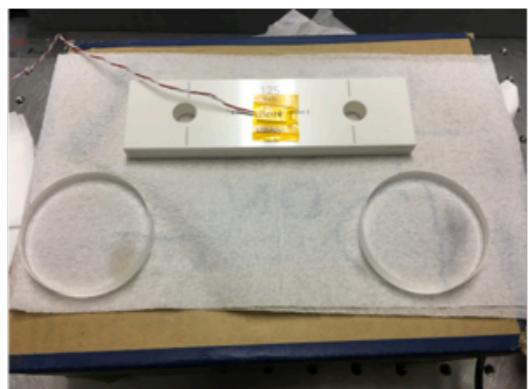
■本実験での稼働

BACK UP

■ 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。

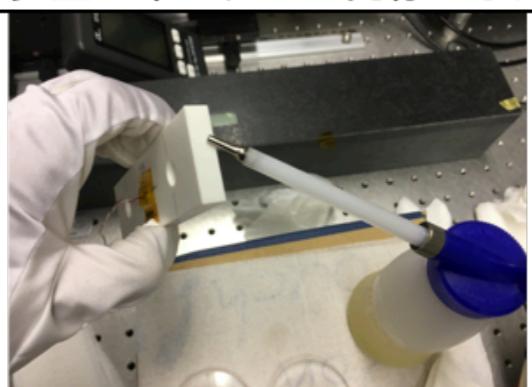
1、GBとガラス板を用意



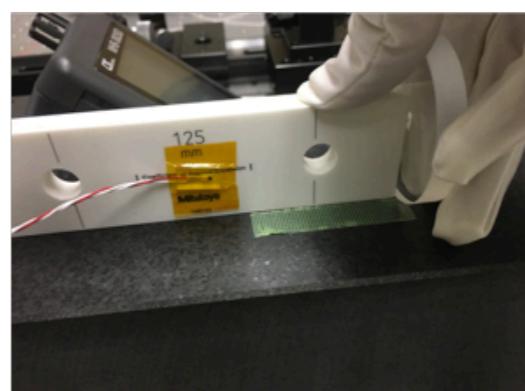
2、エタノールでGB及びガラス板を拭く



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

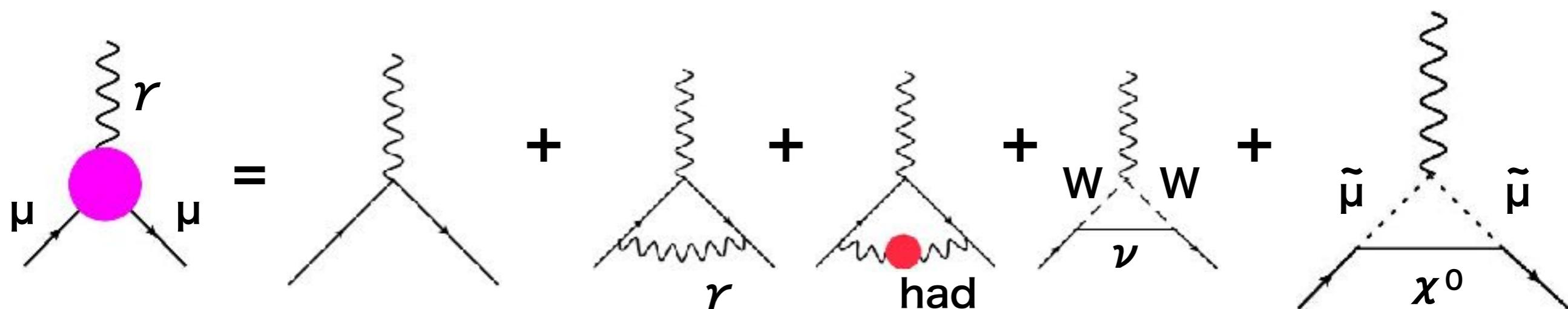


■ 5回測定を行い $1.9 \mu\text{m}$ (RMS) のばらつきがあった。

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

■ 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

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

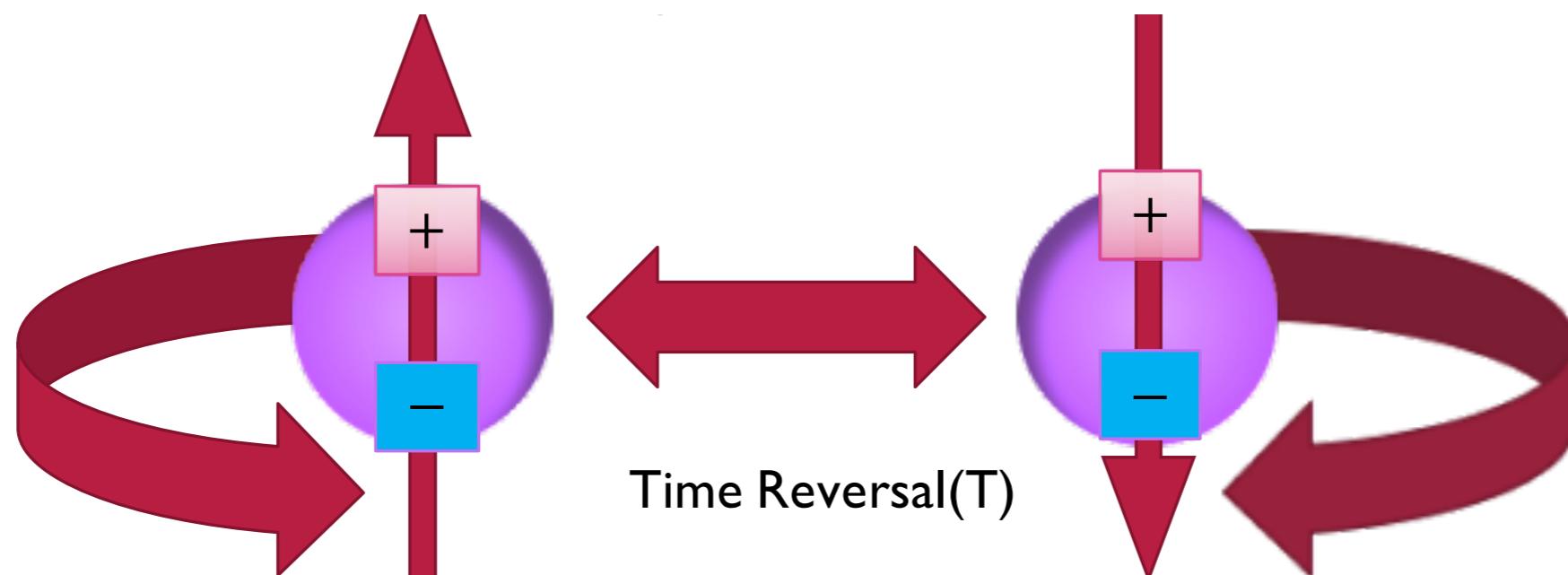
$$\delta a_\mu \sim 100 \times 10^{-11}$$

$$\Lambda_{\text{BSM}} \sim 100 \text{ GeV}$$

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

ミューオンの電気双極子モーメント : d_μ 25

- 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

■ Fabry-Pérot 型ファイバーエタロン

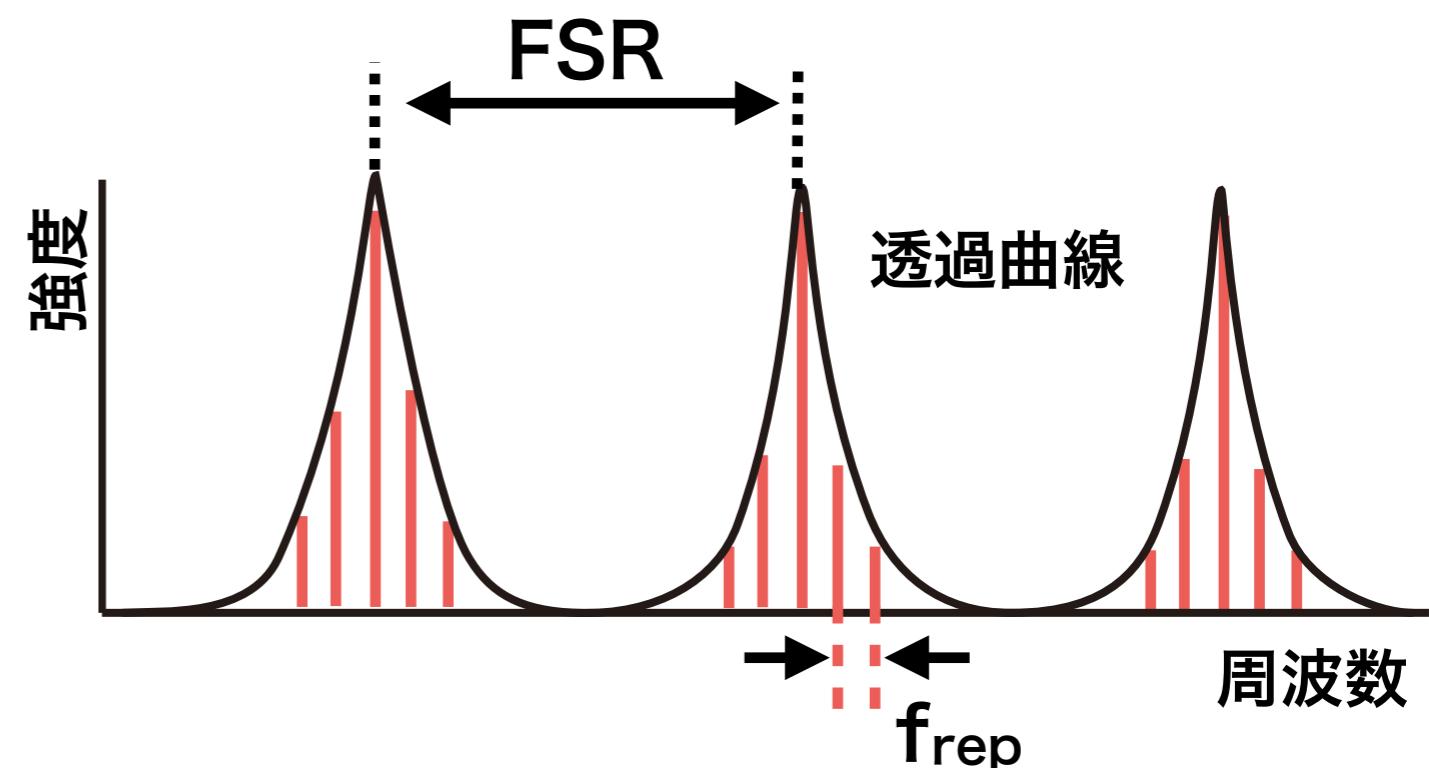
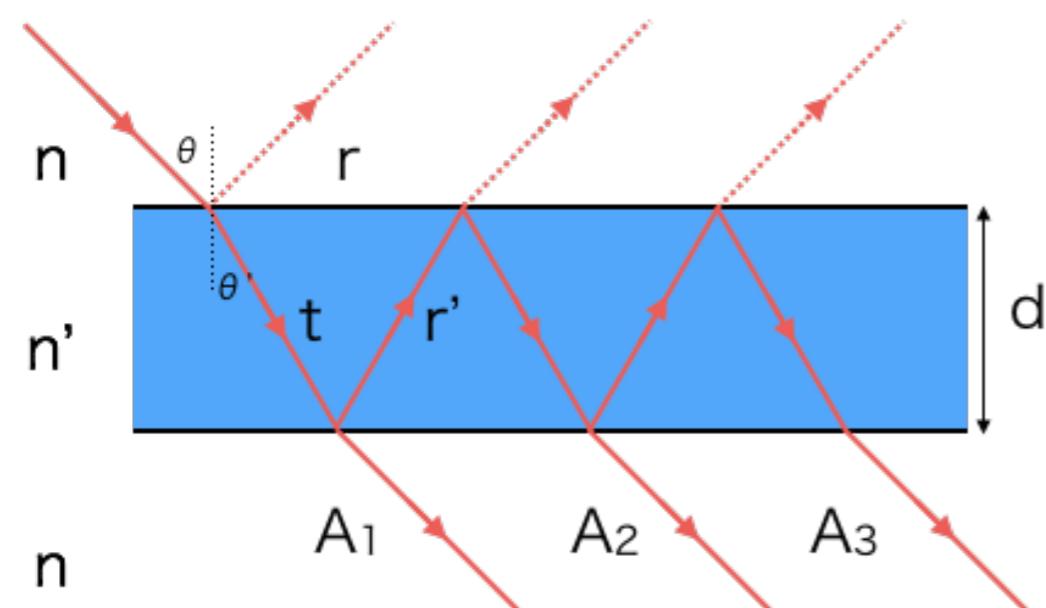
■ 両端に反射コーティングが施された光ファイバー

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

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

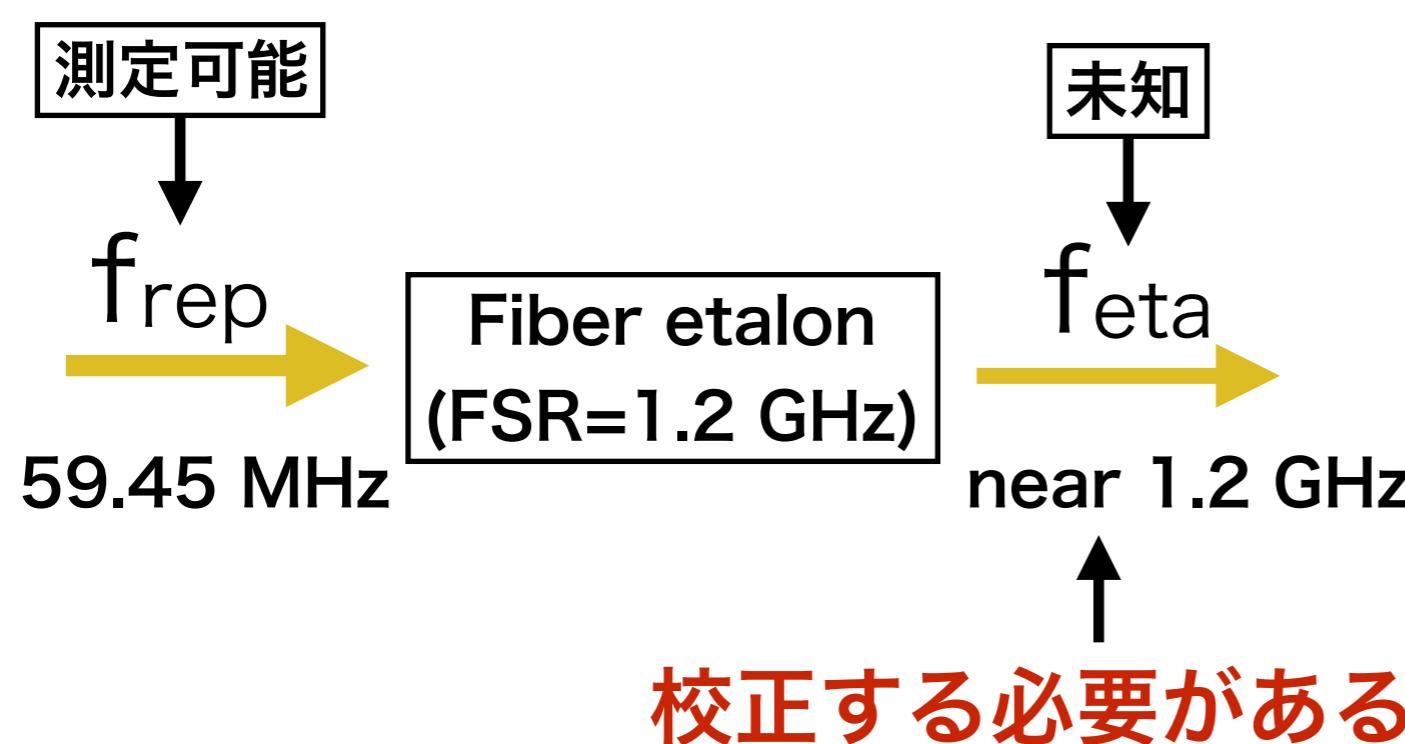
自由スペクトル幅(FSR)

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



■ 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

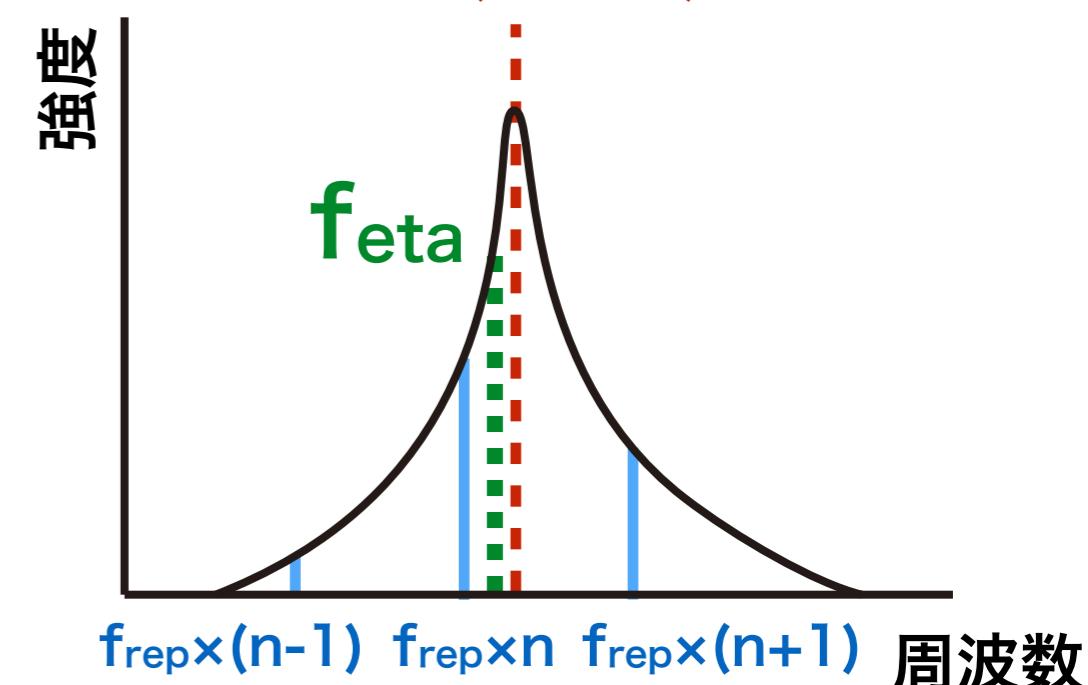
- ファイバーエタロン透過後の繰り返し周波数 f_{eta}
- 高反射率(~99%)を使用 → 透過光の強度が小さい
- 低反射率(85%)を使用 → 透過曲線の幅が広い
- 複数の周波数が影響 → f_{eta} の値を決める必要



透過曲線の幅 F (R : 反射率)

$$F = \frac{4R}{(1 - R)^2}$$

FSR(設計値)



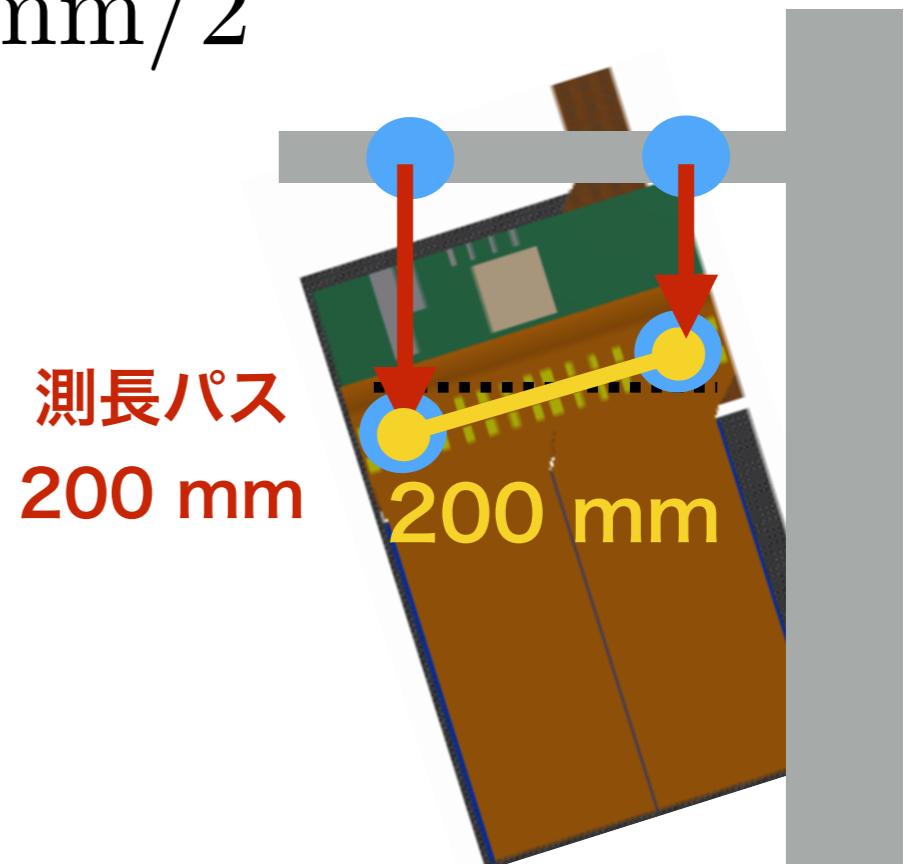
- 得られた δL より、ミューオンEDMへの系統誤差を検討
- 測長パス200 mmの時の測長精度より検出器の傾き誤差

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

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

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



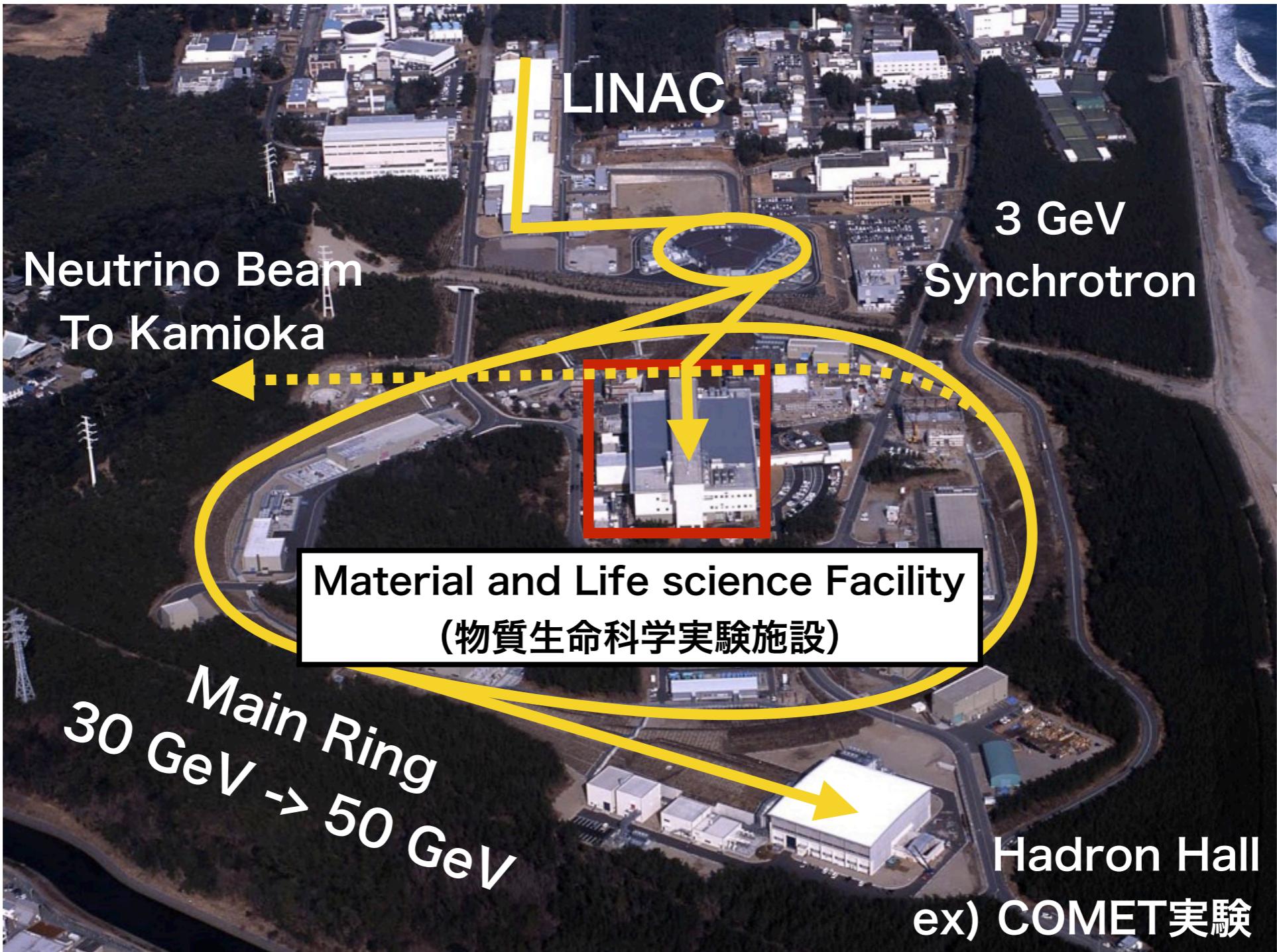
- 統計誤差と同じ大きさの系統誤差 → 測定精度向上の必要有

実験サイト : J-PARC

29

■ 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

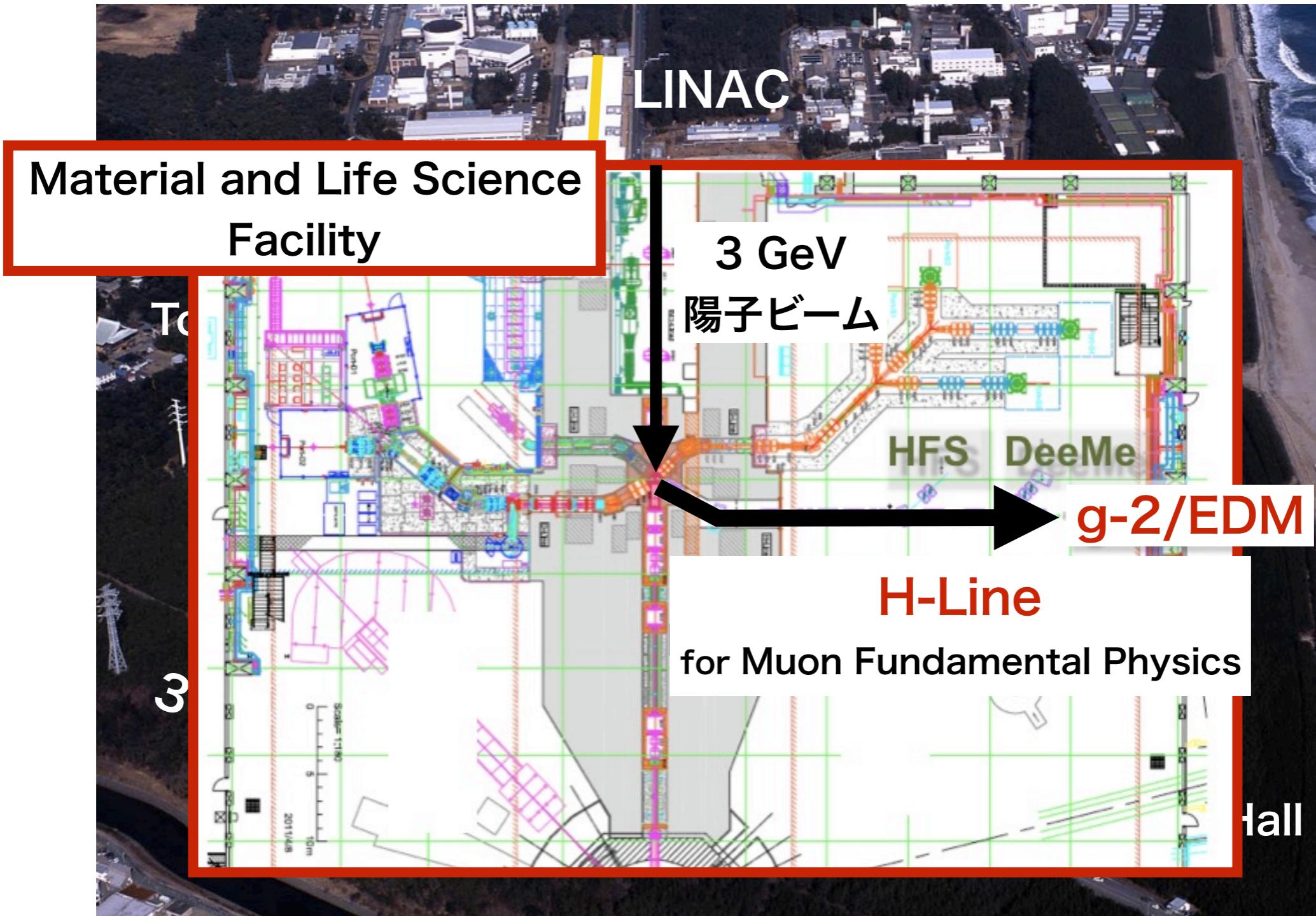


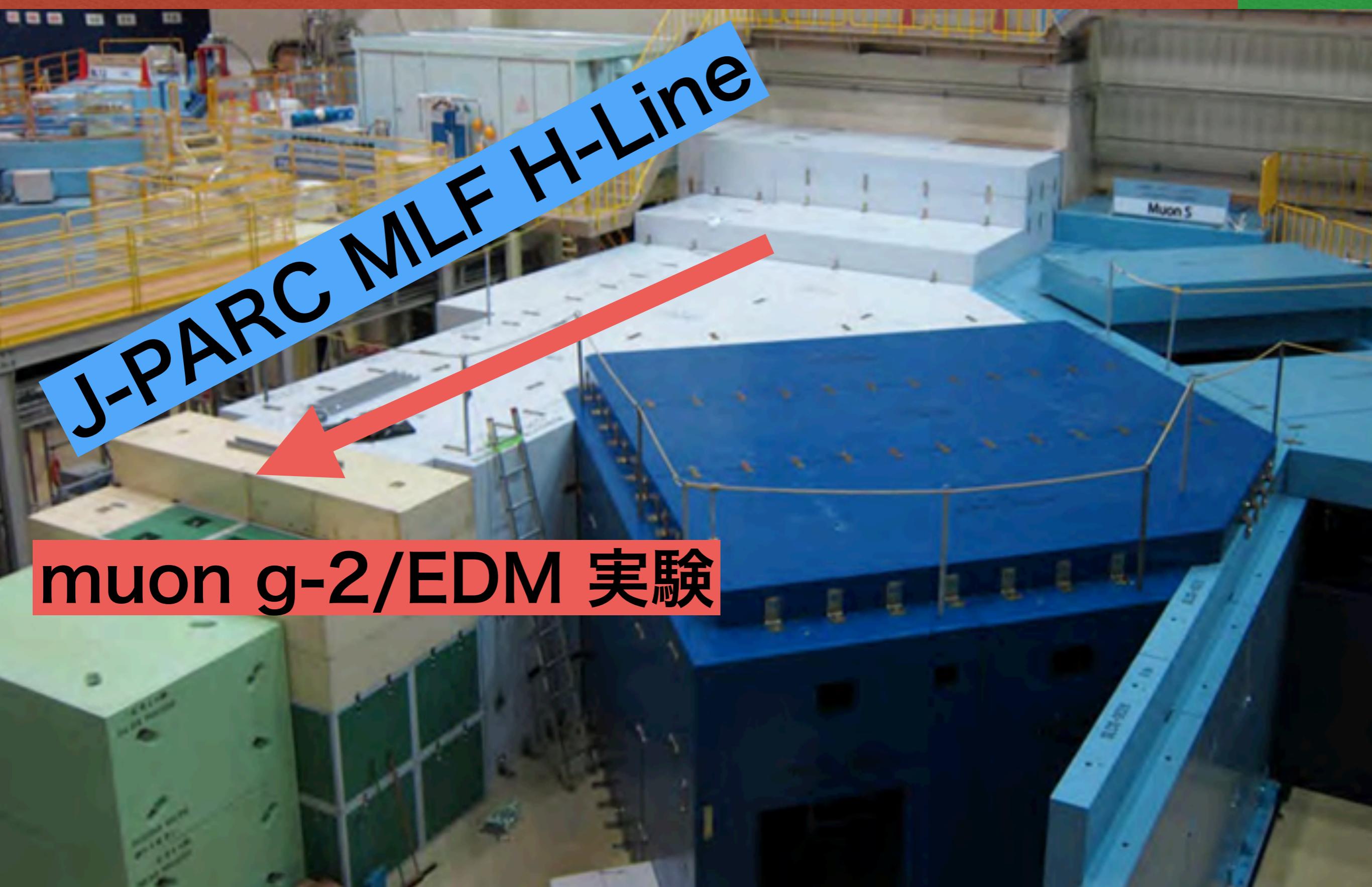
実験サイト：J-PARC

30

■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





■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 ω_a

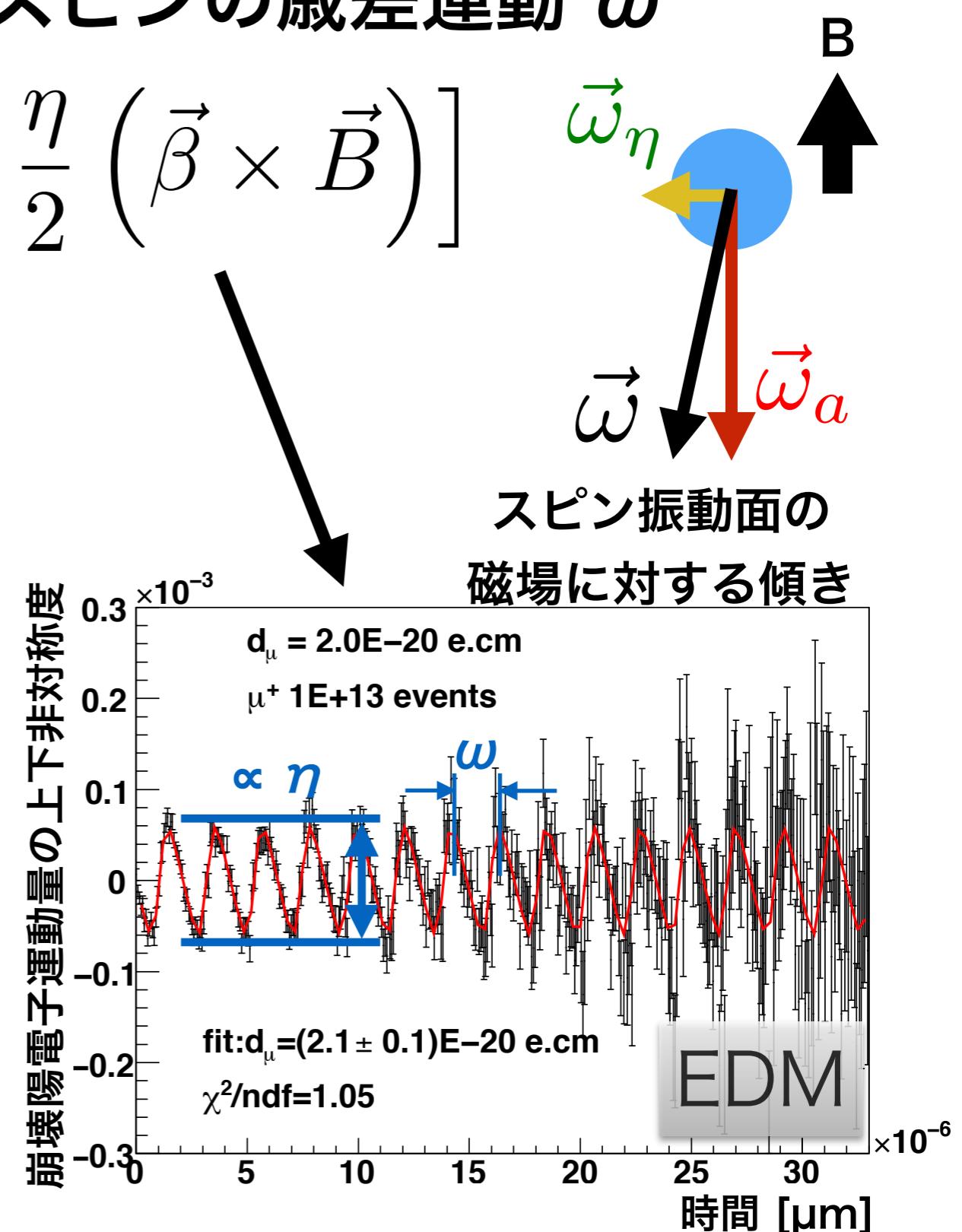
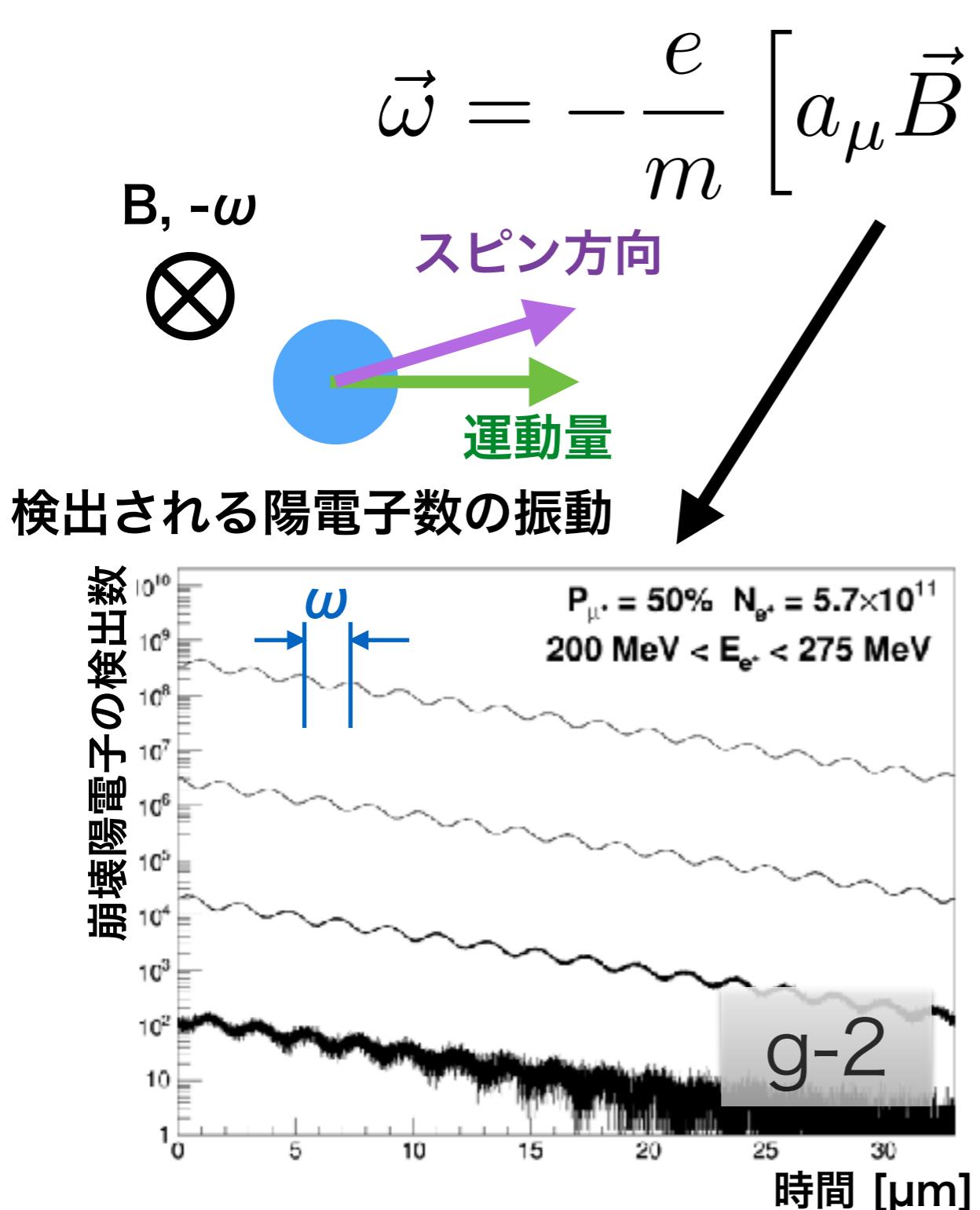
粒子の運動 粒子のスピンの運動

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

■ ω_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の実験で期待される信号 33

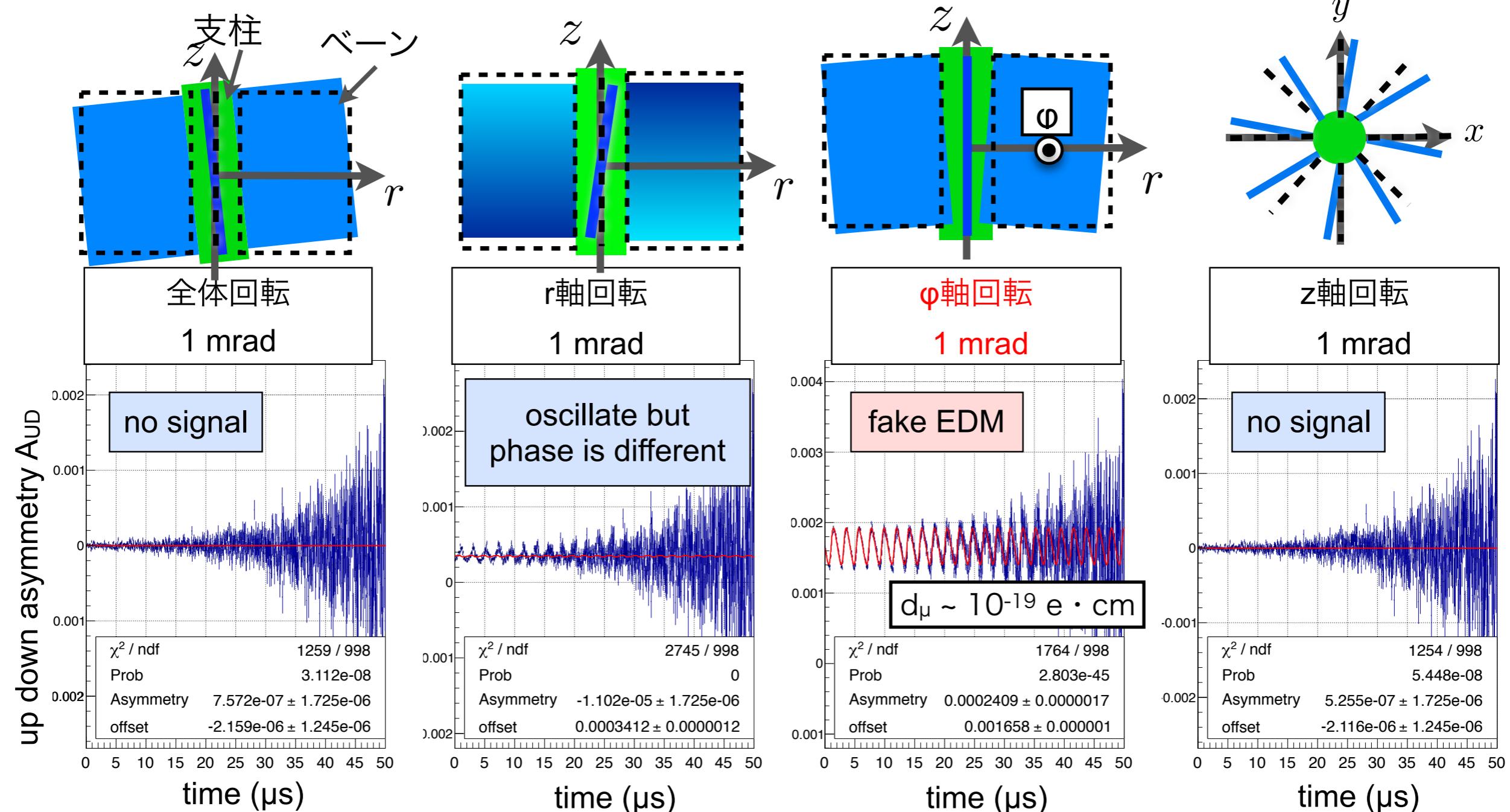
J-PARC E34実験におけるスピンの歳差運動 ω



■ 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 ϕ 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

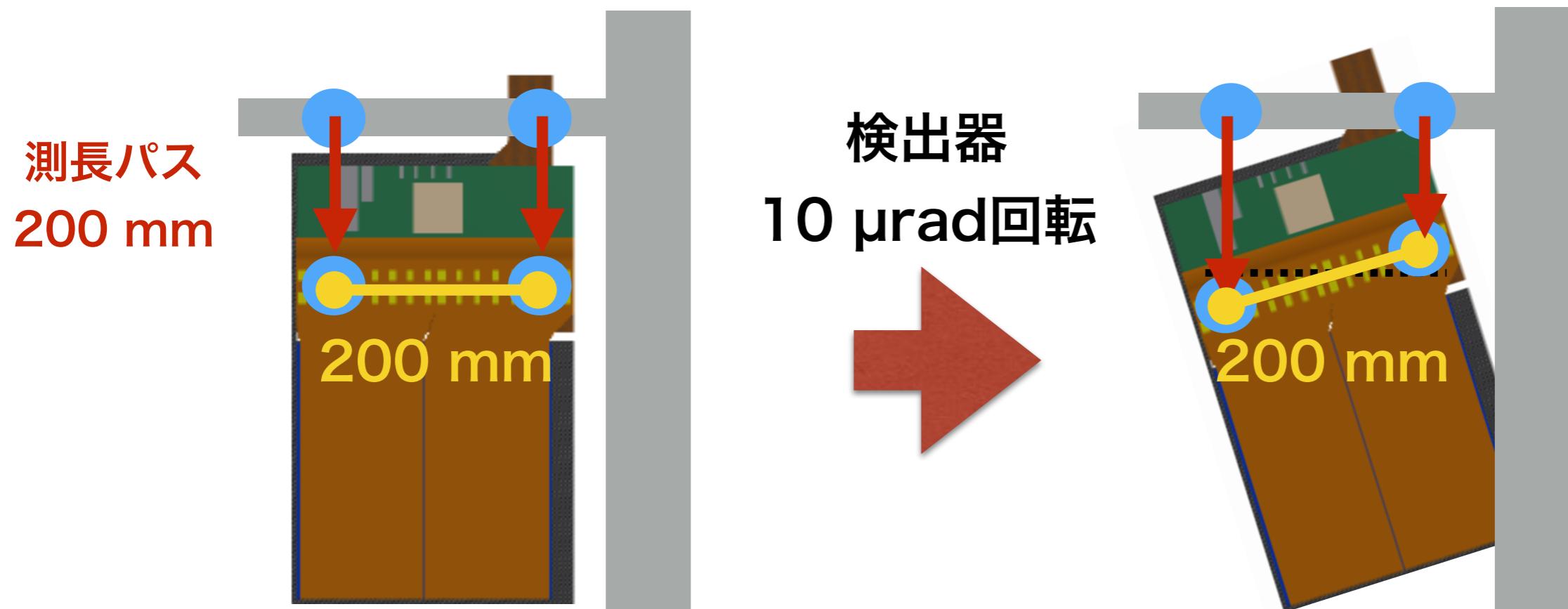
■ 検出器の傾き要求 $10 \mu\text{rad}$

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

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

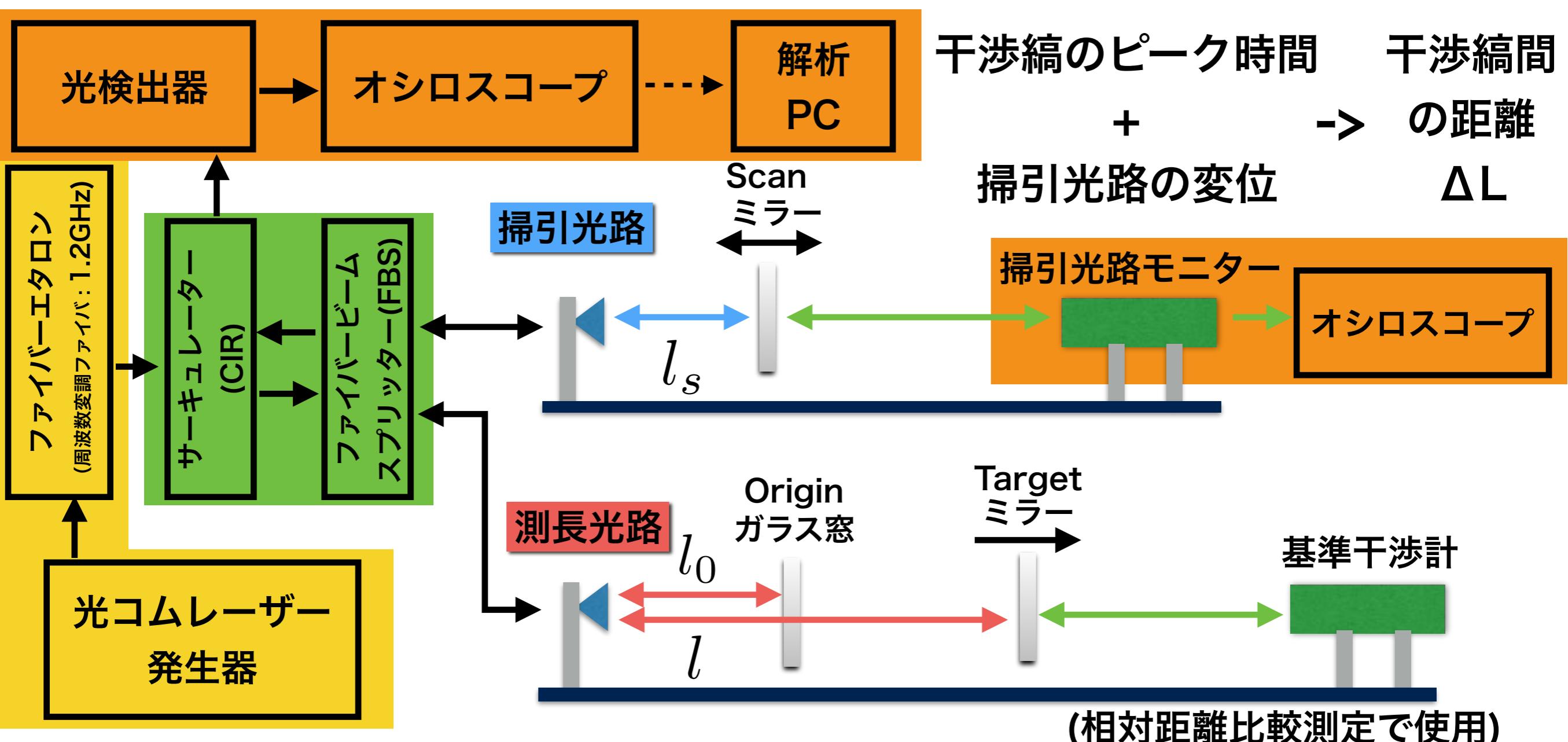
factor 2はベーン中心で傾いていると仮定

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



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



掃引光路自動ステージと掃引光路モニター 37

■ 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。

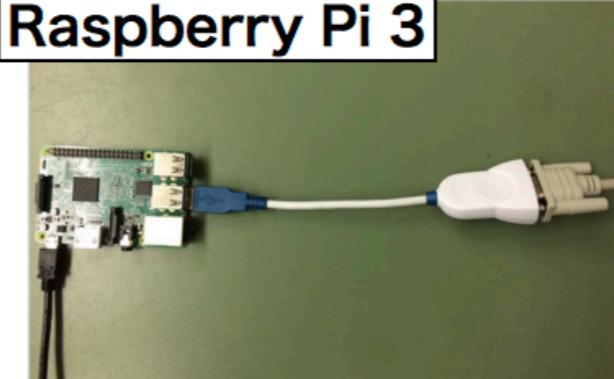
掃引光路自動制御系

制御用PC



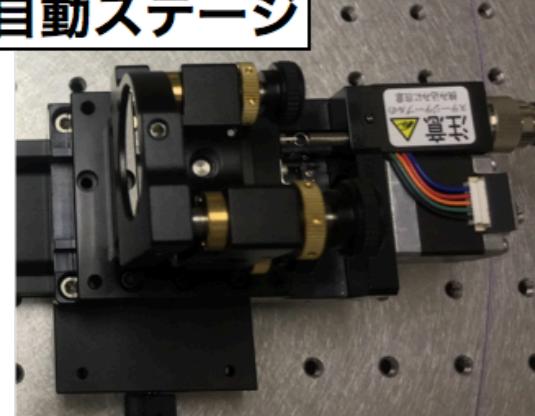
----->
SSH接続

Raspberry Pi 3

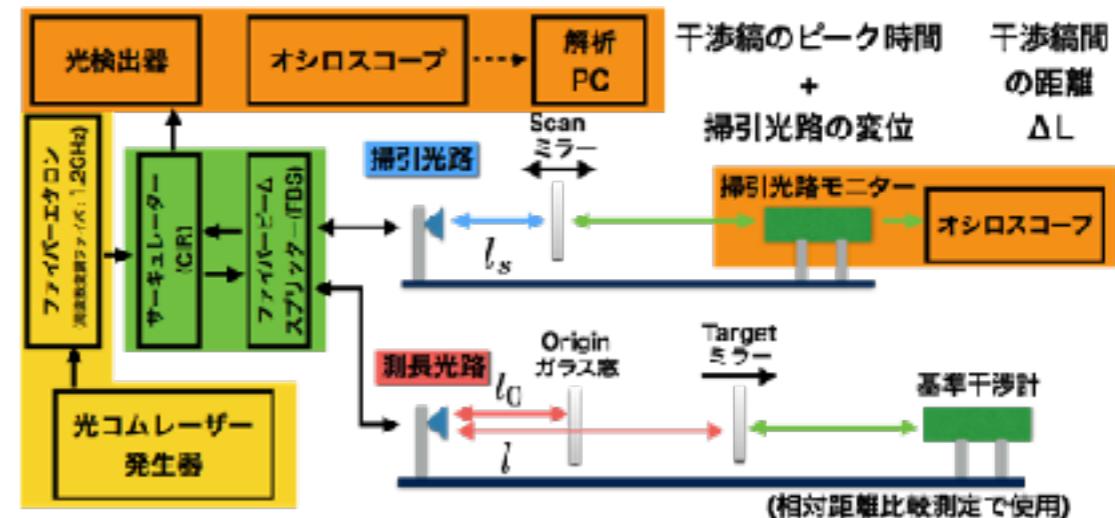
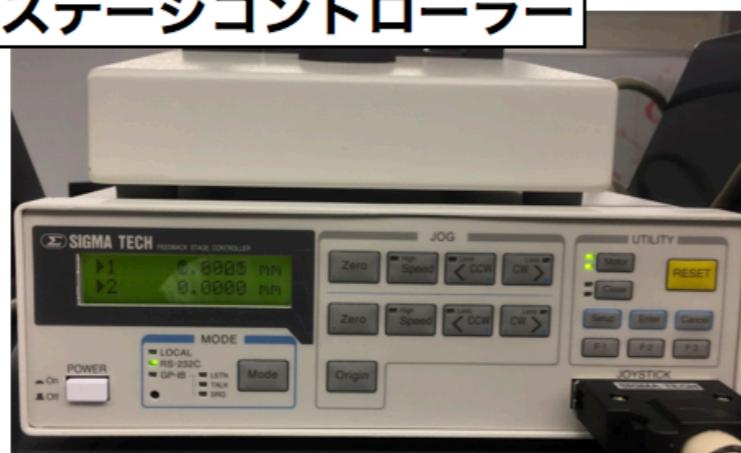


USB-RS232S

掃引光路用
自動ステージ



自動ステージコントローラー

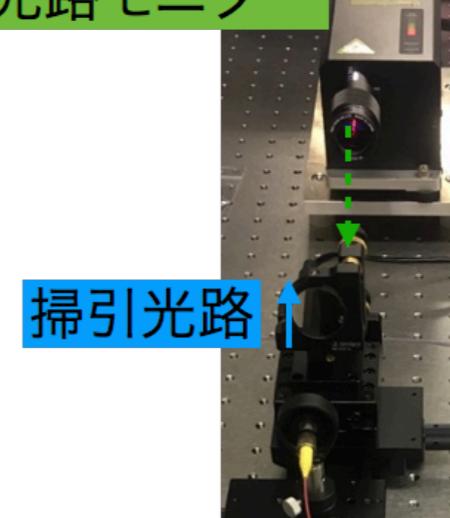


掃引光路モニター

掃引光路モニターユニット
(レーザー変位系)

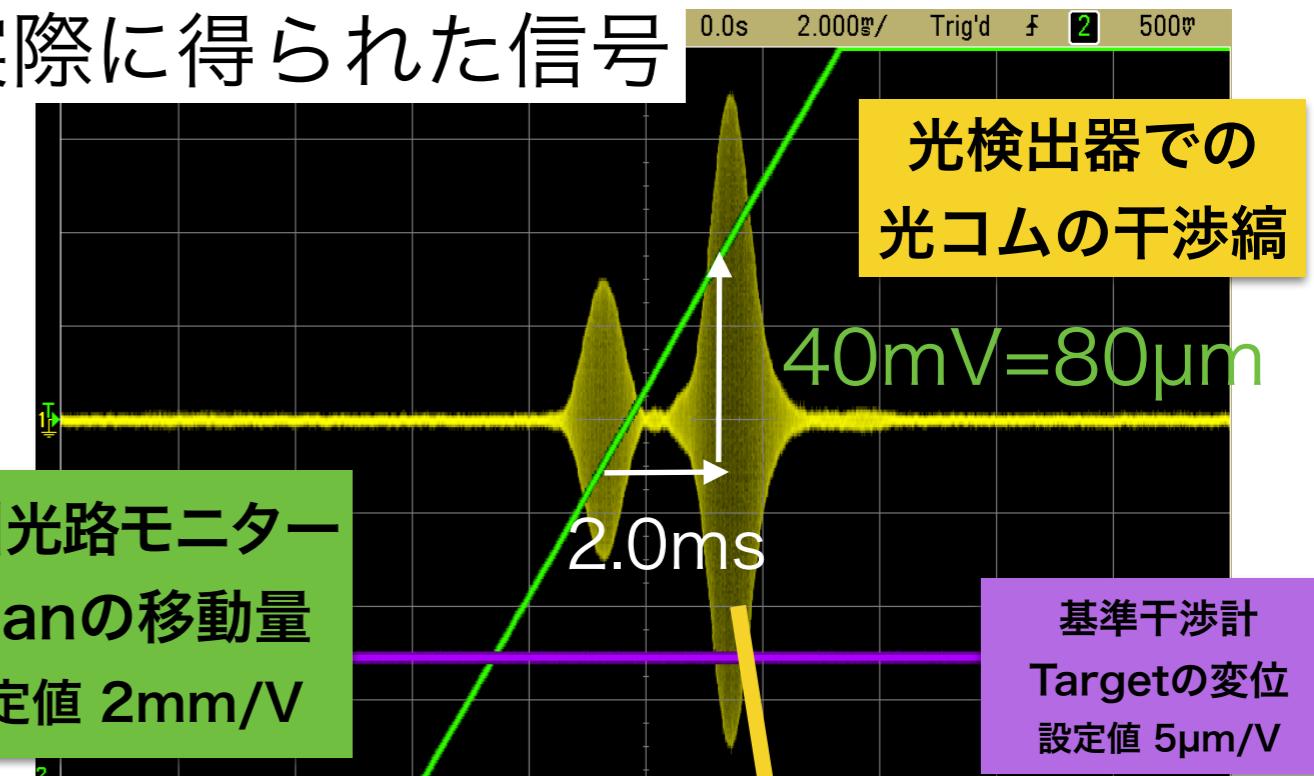


掃引光路モニター



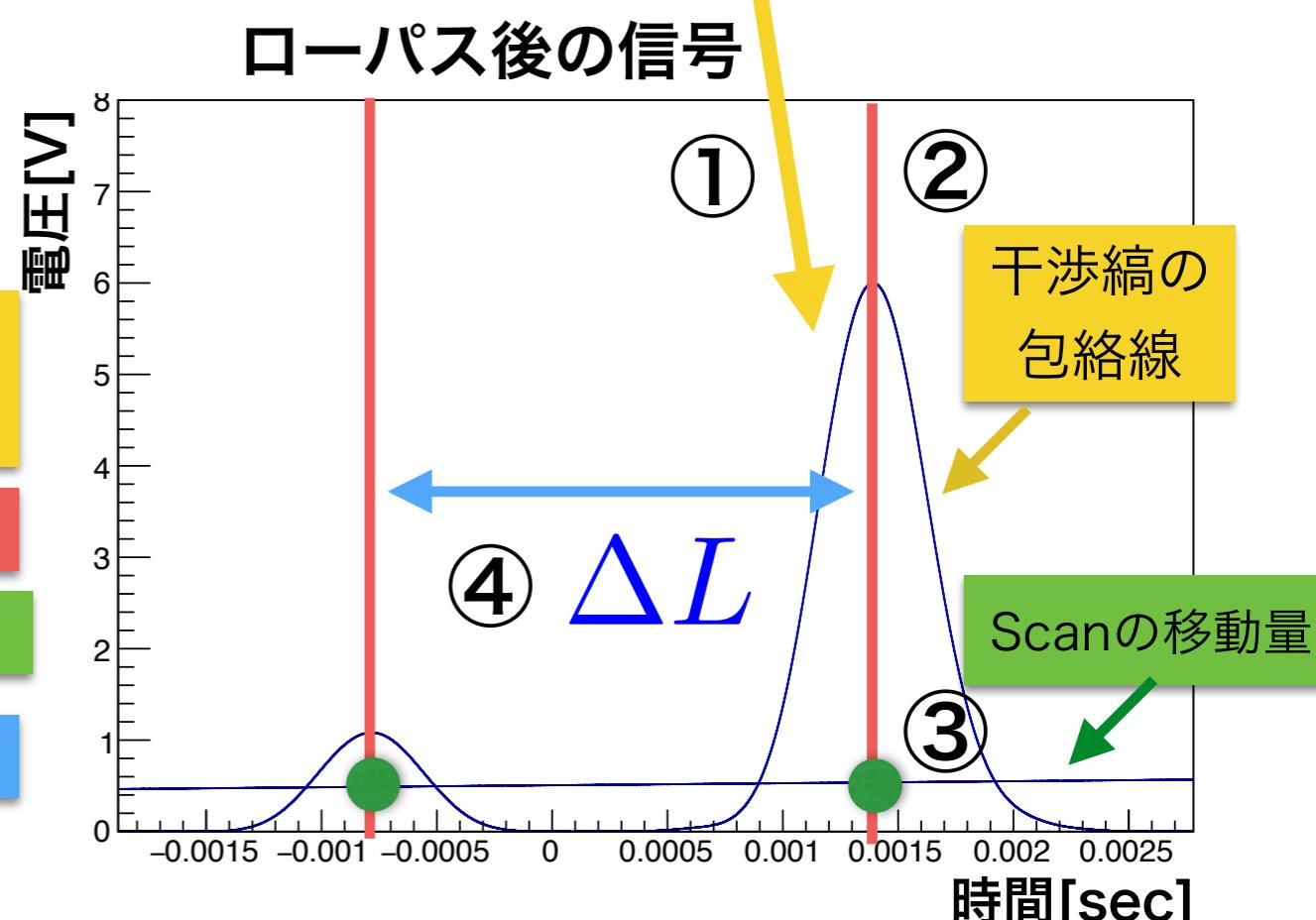
掃引光路

実際に得られた信号



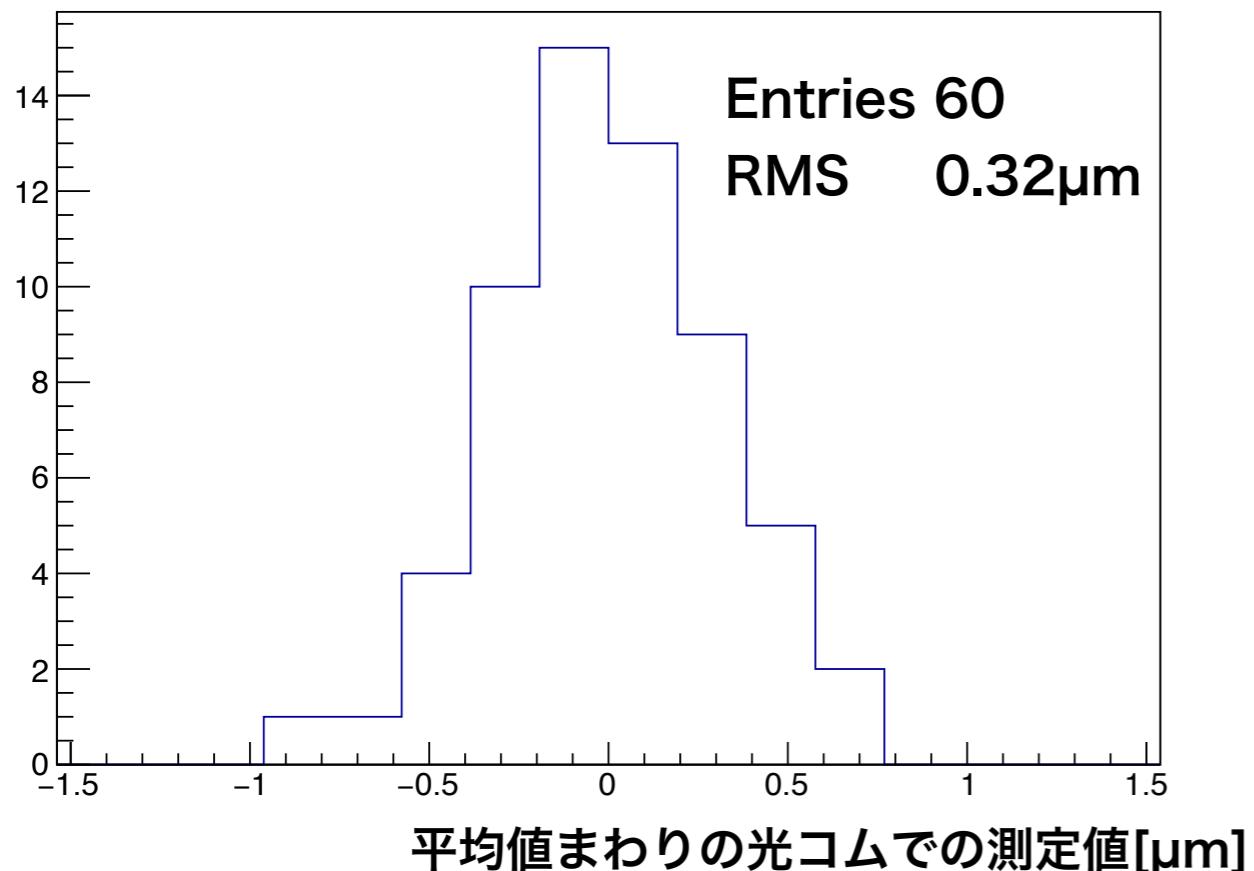
解析手法

- 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

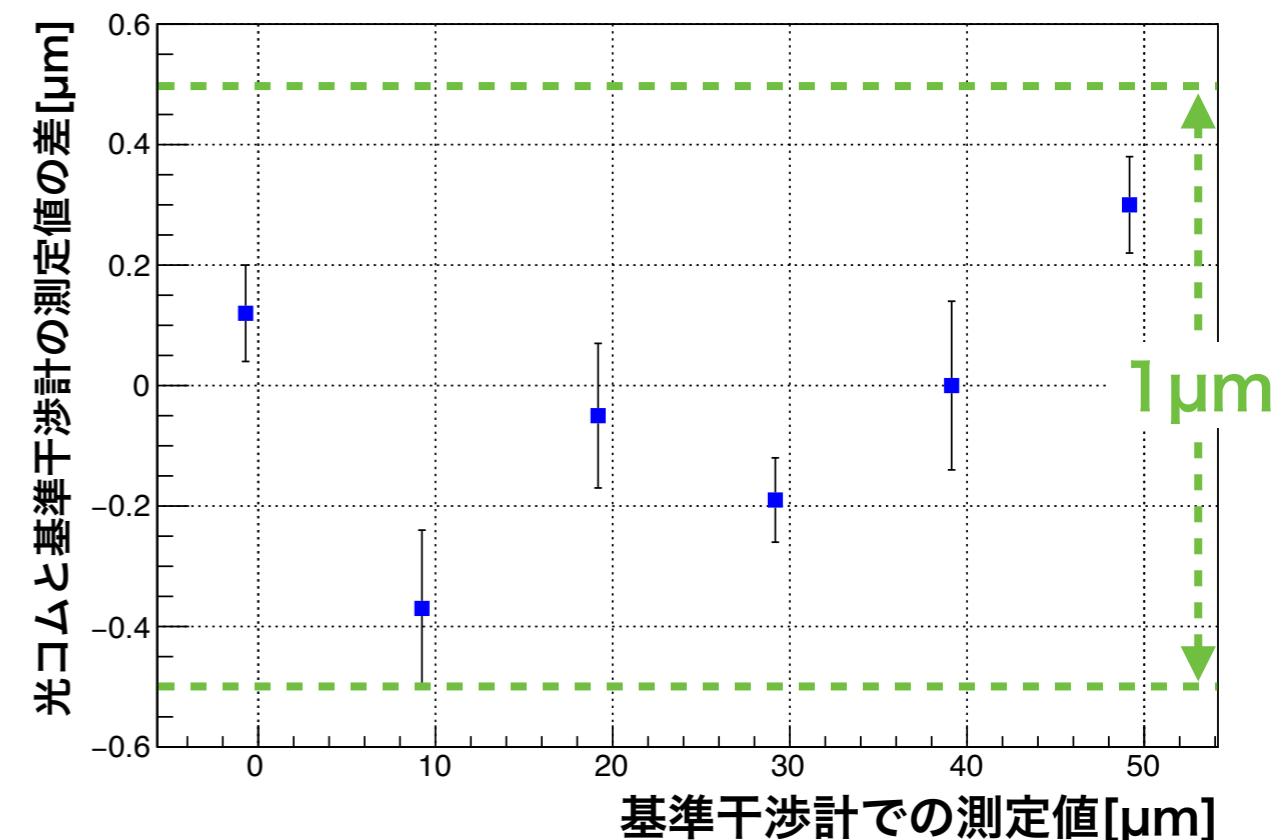


■ 相対距離比較測定で得られたデータを解析した結果

■ 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 $0.21 \pm 0.9 \mu\text{m}$

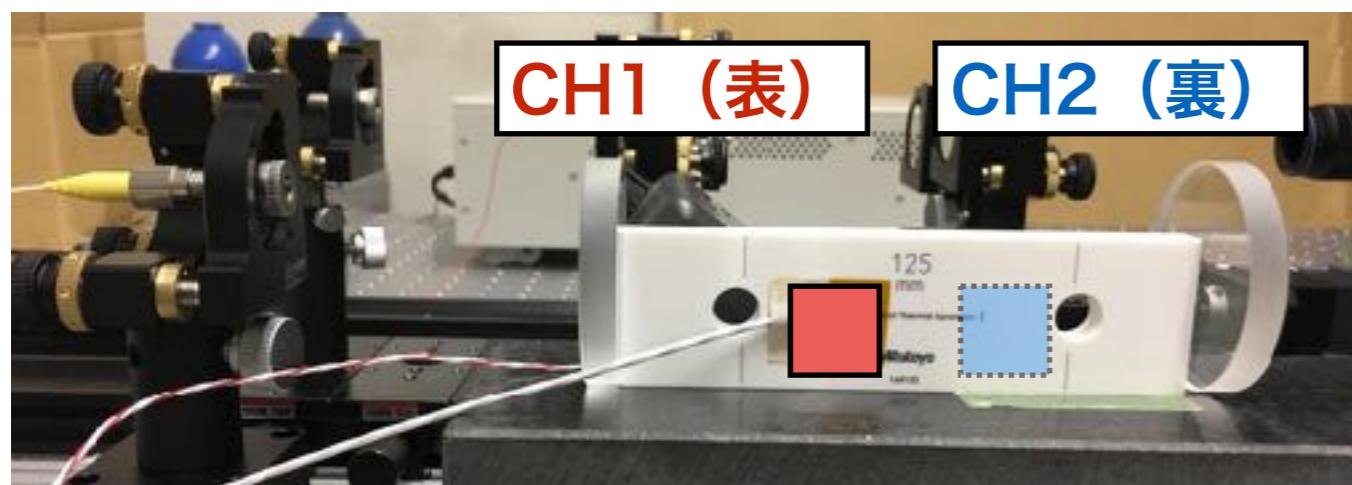
■ 50 μm の可動域に対して、目標の精度を達している

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

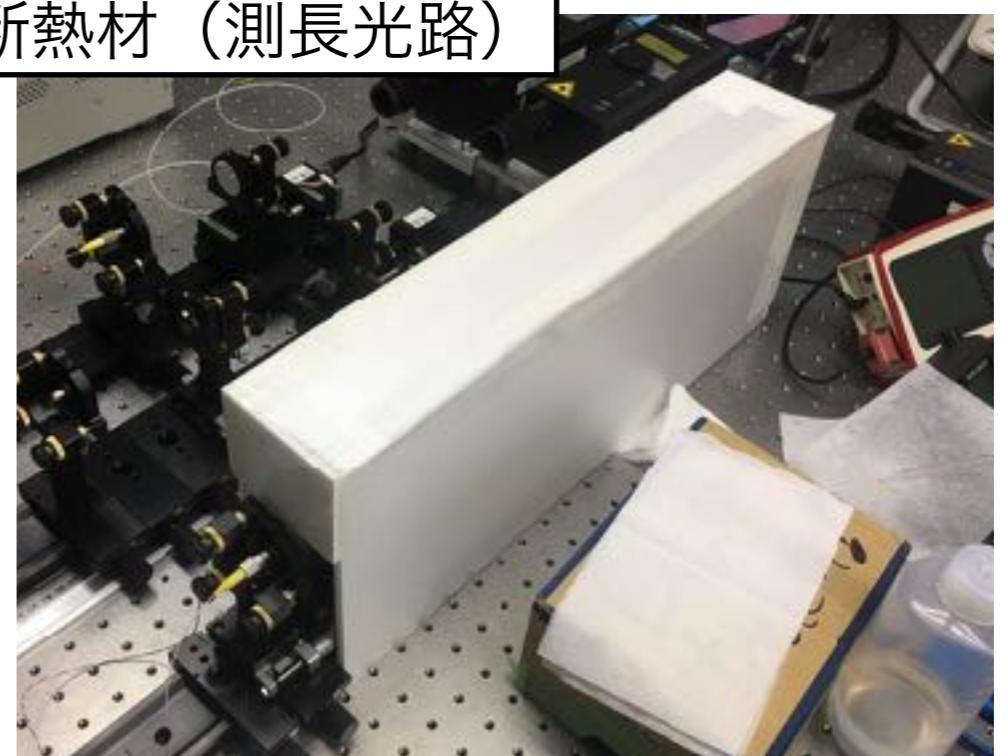
ゲージブロックの温度補正

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。

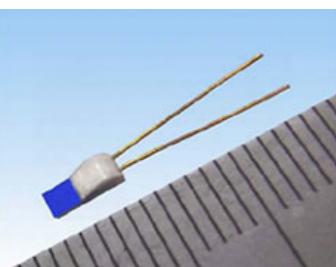


断熱材（測長光路）



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 α : $9.219 \times 10^{-6} / \text{K}$
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(α)	$0.018 \times 10^{-6} / \text{K}$	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		0.2 (<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。

繰り返し周波数 f_{rep} の不確かさ

42

■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。

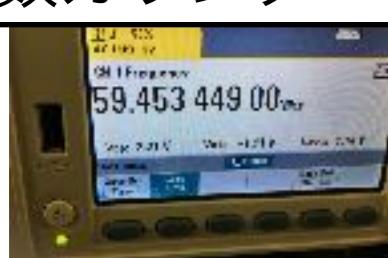
遠隔時間校正標準器

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



クロックの同期

Signal Generator



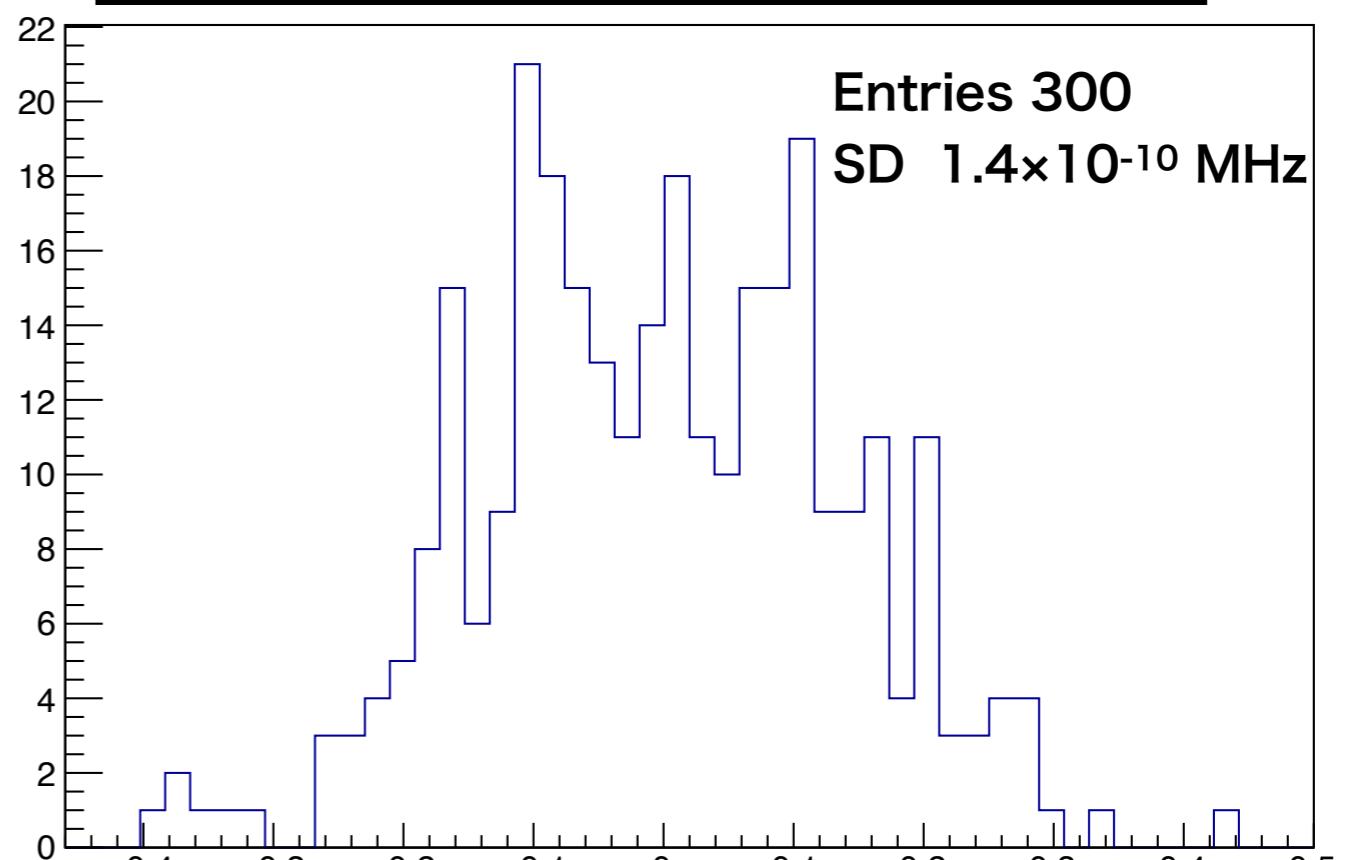
内蔵PDからの信号

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

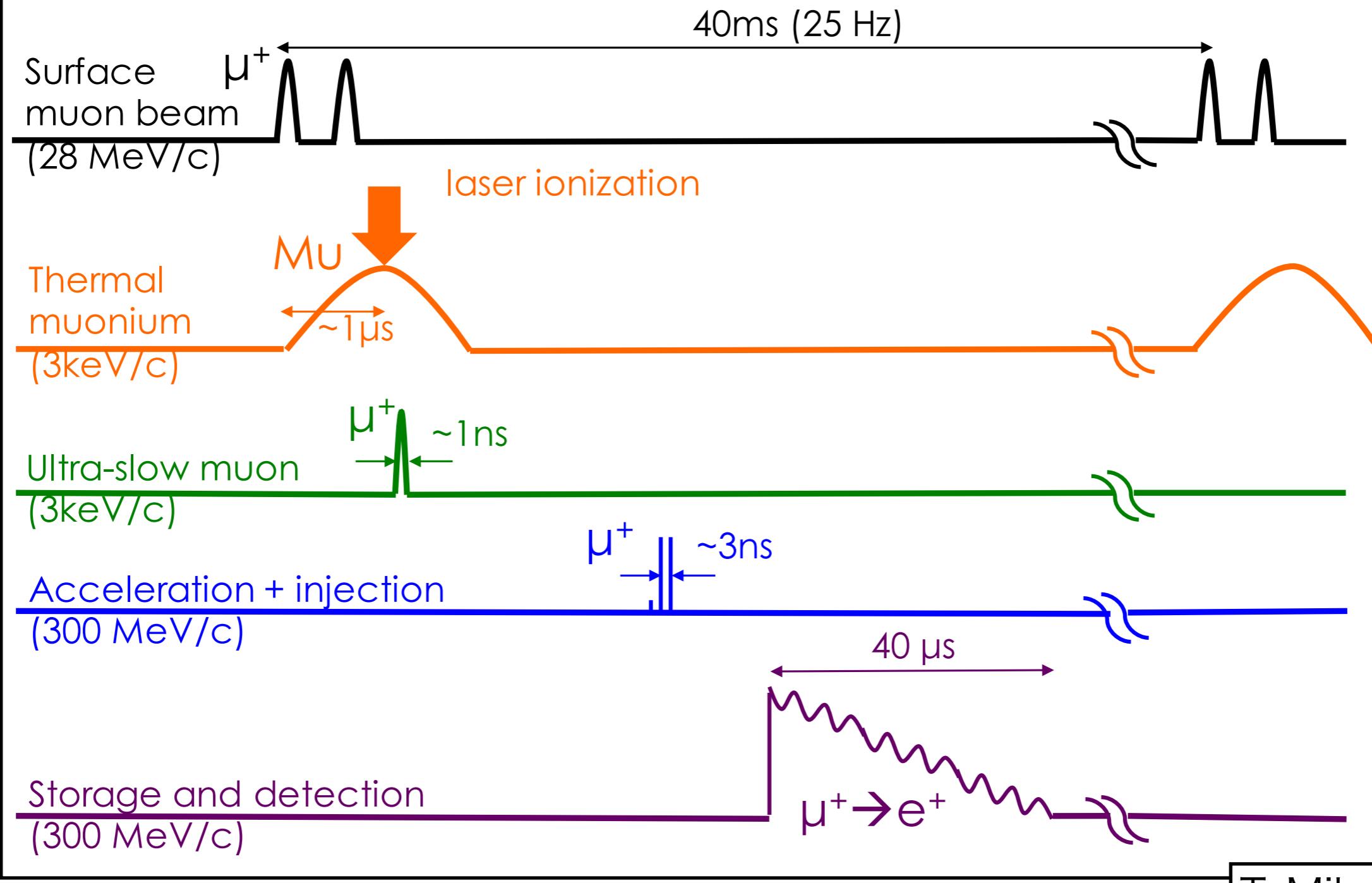


繰り返し周波数の中心値まわりの分布 [MHz]

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

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

Experimental sequence



■ 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

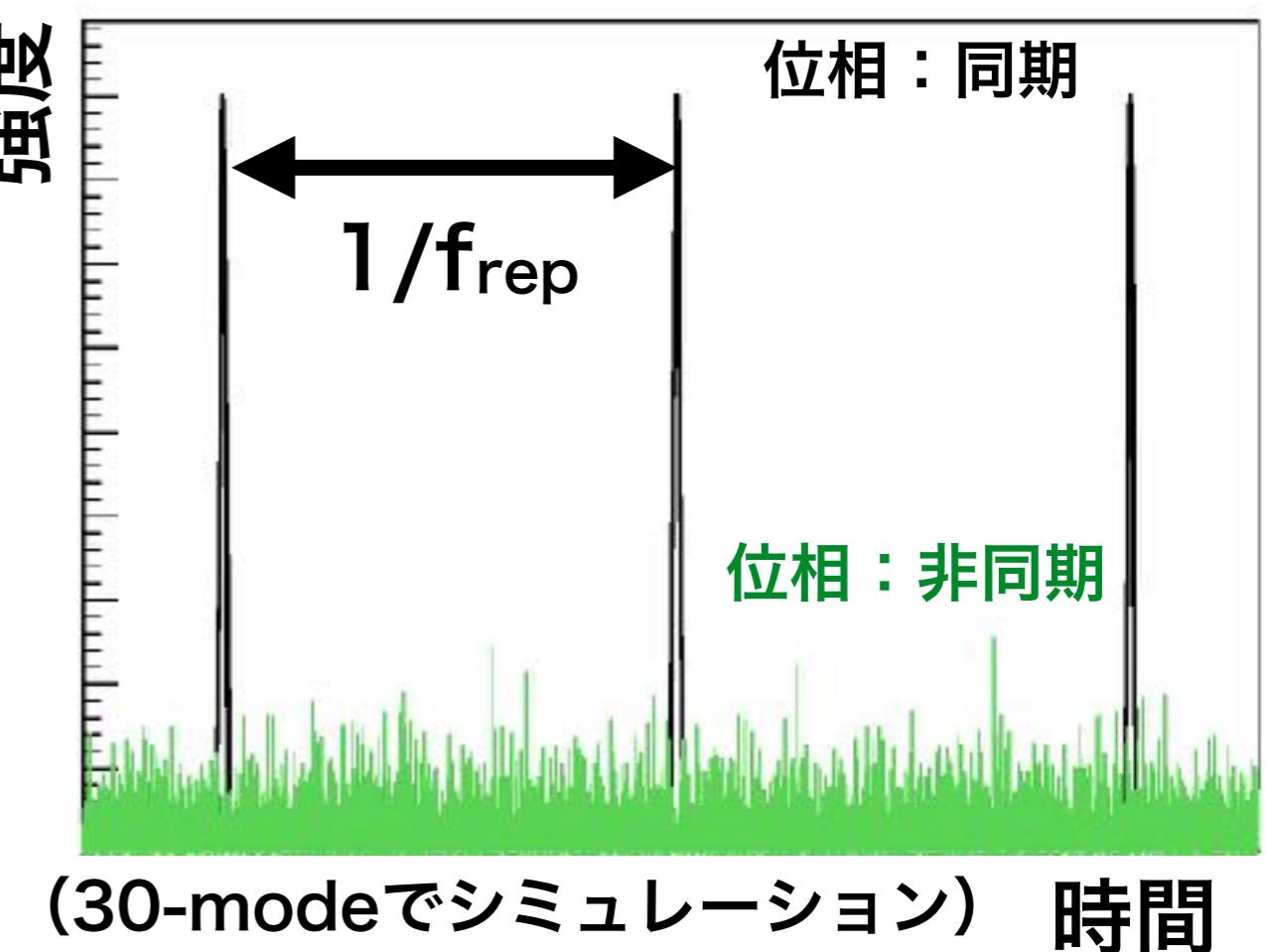
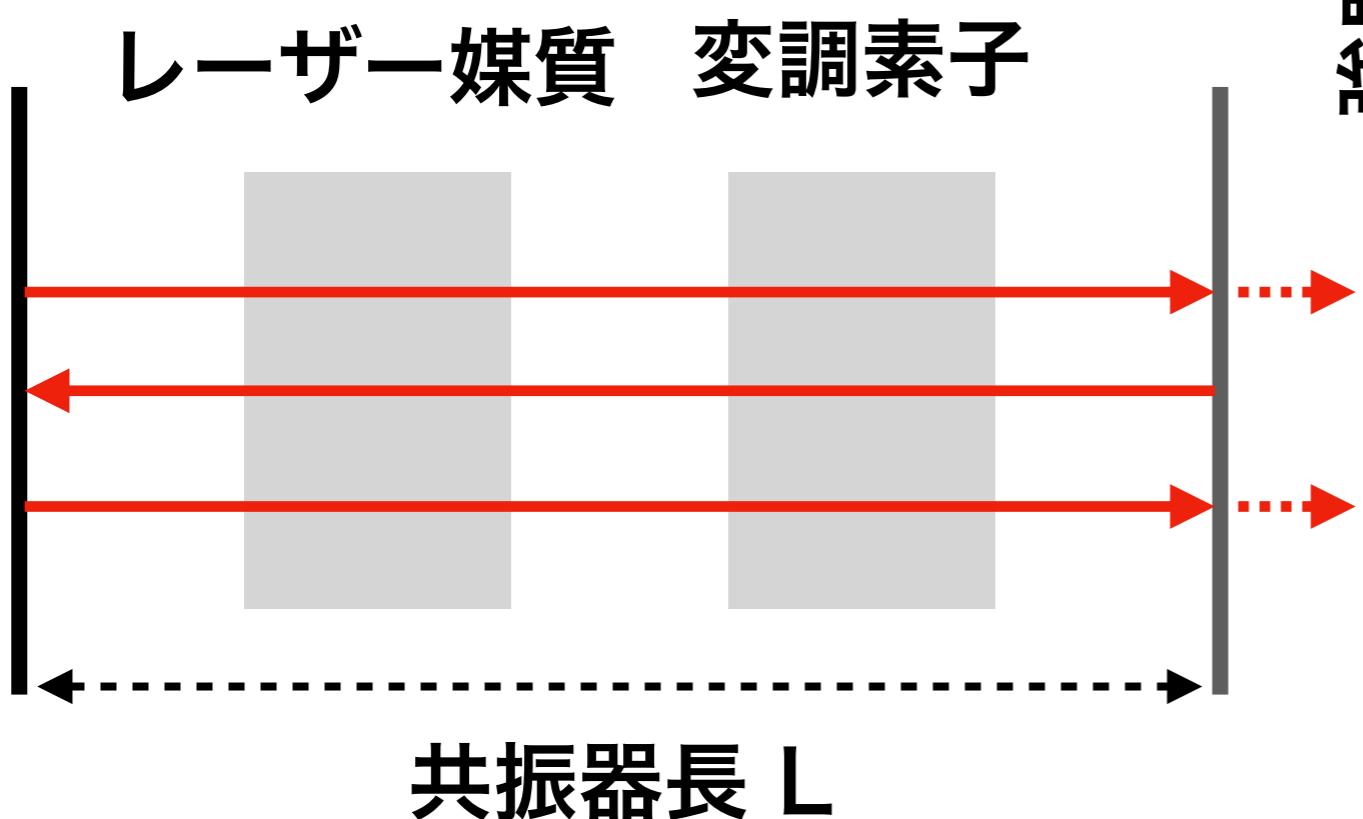
■ モード同期法

■ 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



■ 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

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

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

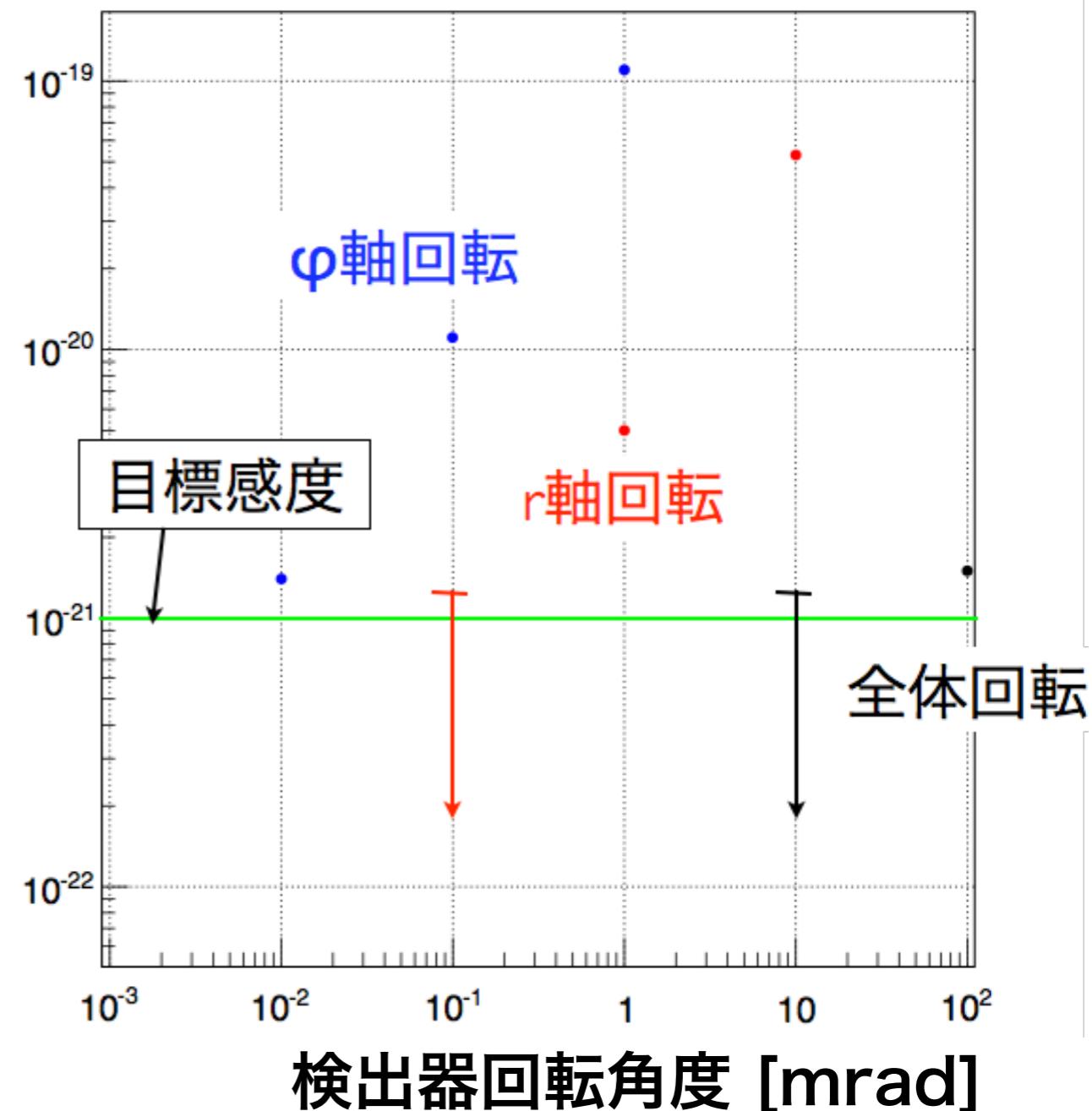
$$d_\mu(\text{exp}) < (m_\mu/m_e)^3 d_e \sim 10^{-22}$$

■ 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

- 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 ϕ 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_{EDM}	相当する EDM の大きさ d_μ
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	$(0.5 \pm 1.7) \times 10^{-6}$	$< 1.3 \times 10^{-21} \text{ e cm (90\% C.L.)}$
ϕ 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_{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

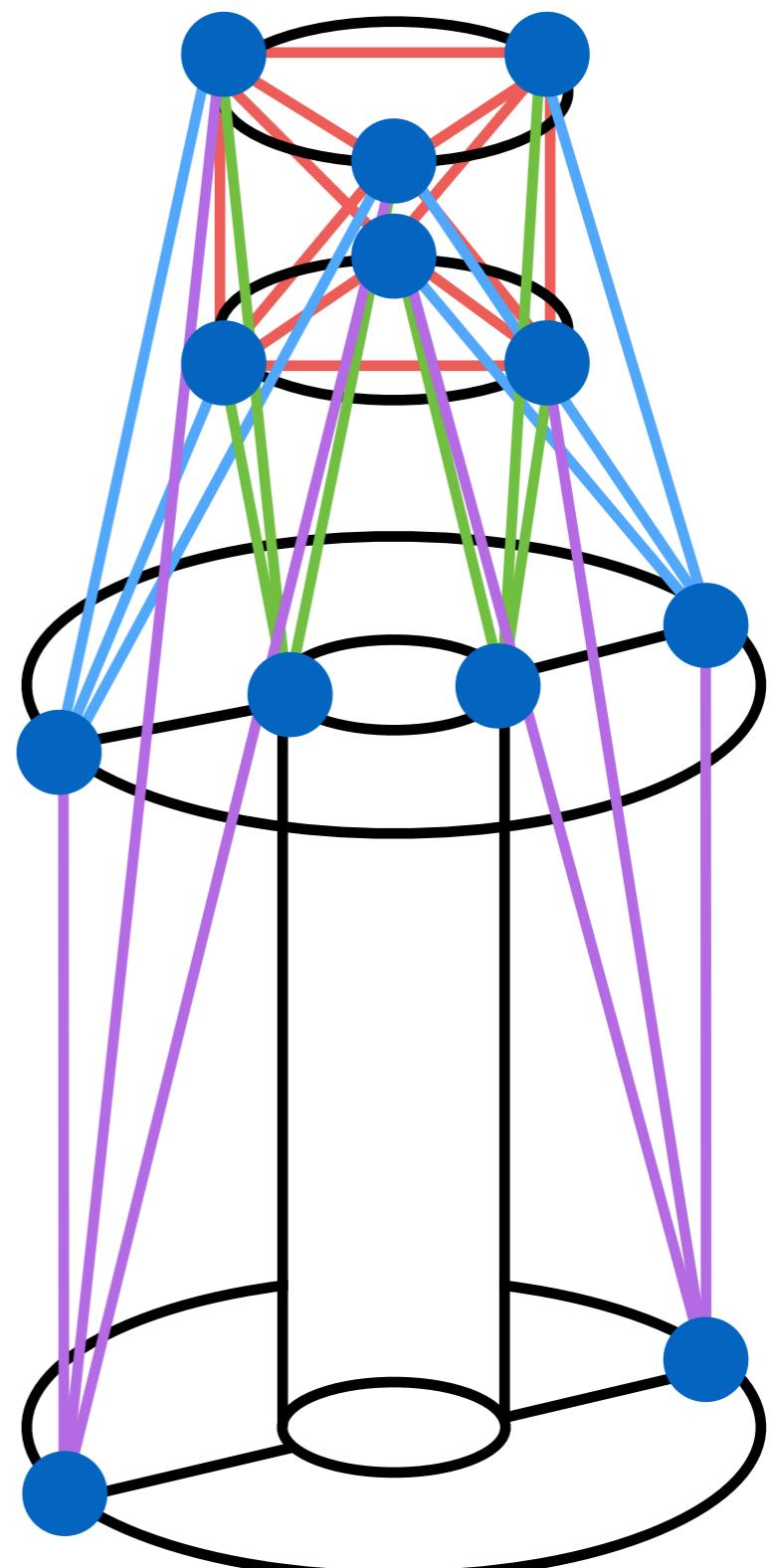
→ 12点, 30パス

■ 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

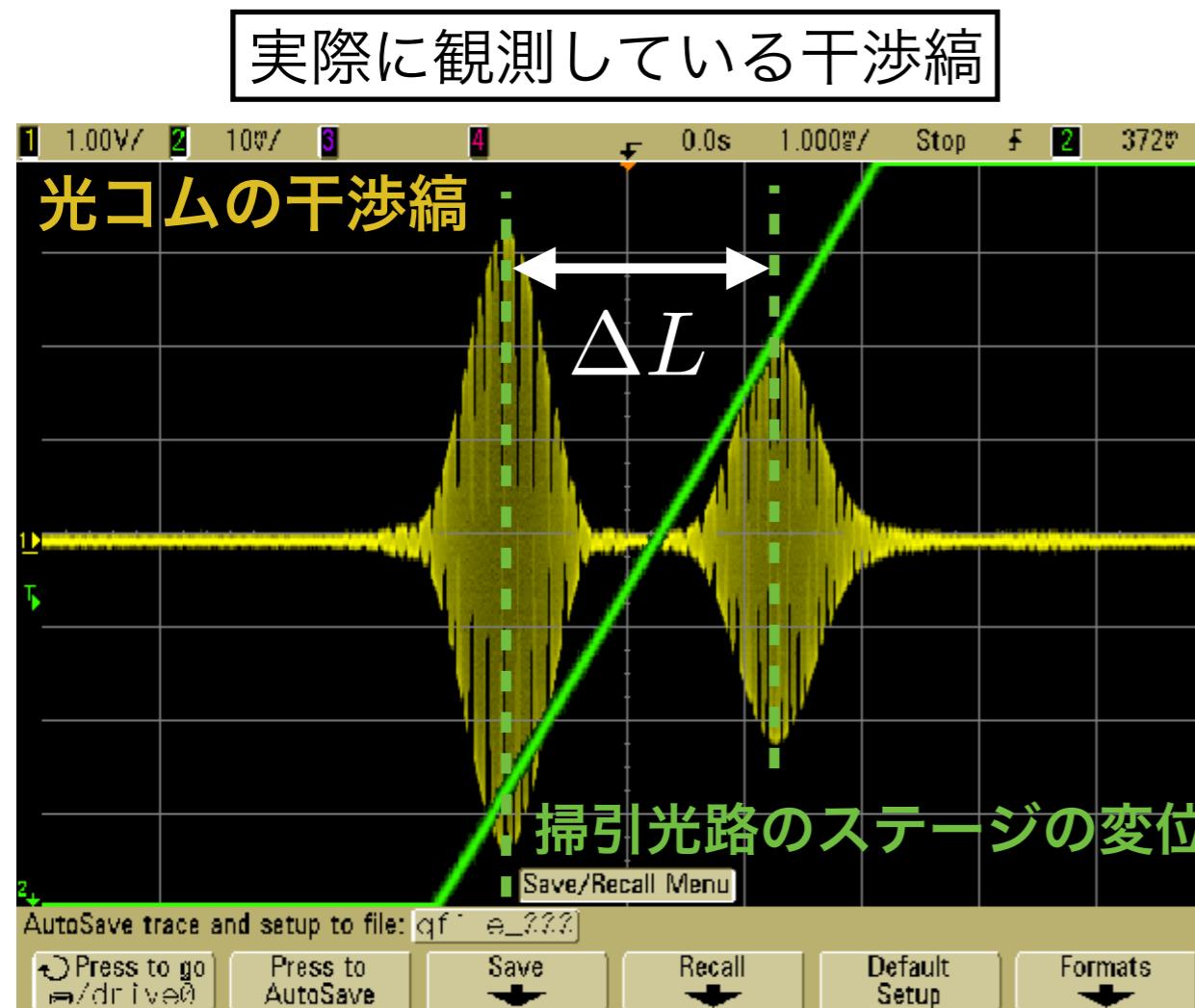
→ 150点, 444パス



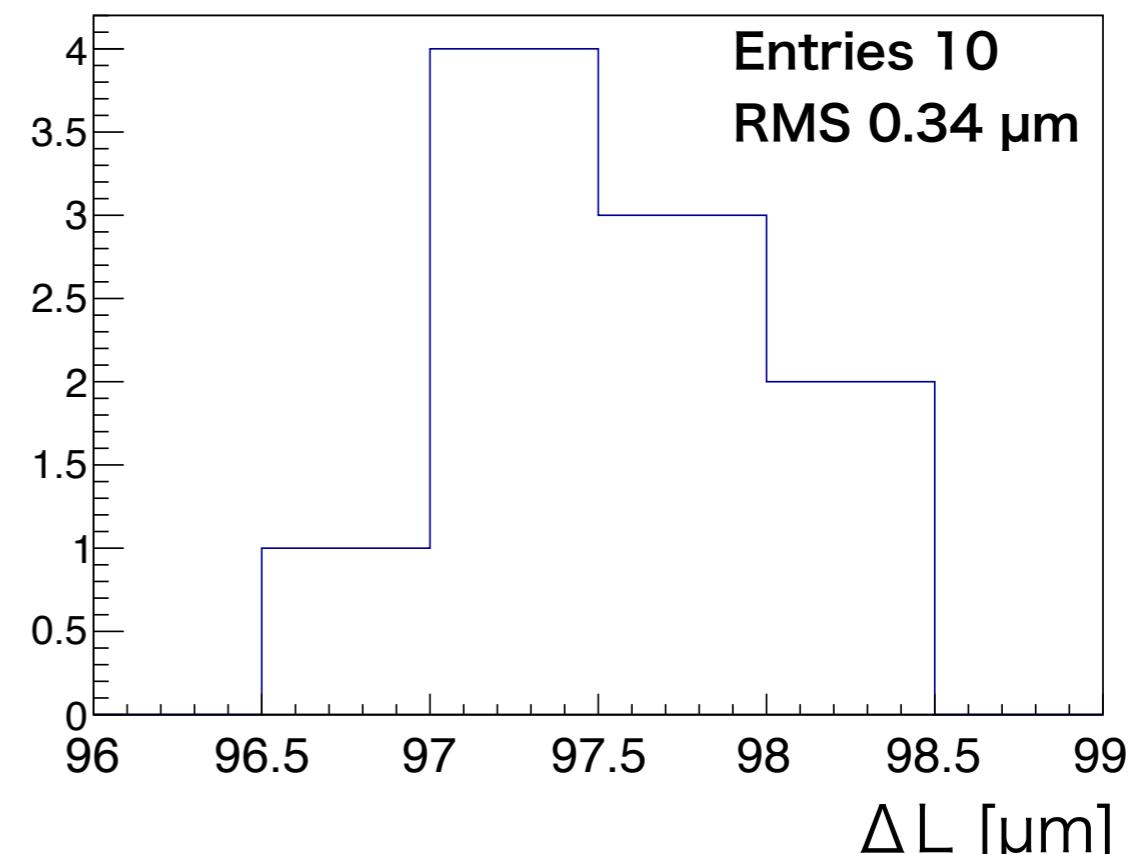
干渉縞間の距離 ΔL の測定

50

- 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 ΔL の分布



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