

J-PARCにおけるミュオン $g-2$ /EDM測定実験
光コムレーザーを用いたアライメントモニターの開発

2017/02/22

東京大学 安田浩昌

23rd ICEPP Symposium

■ INTRODUCTION

J-PARC E34 実験

- ミューオンの異常磁気モーメント及び電気双極子モーメントの精密測定実験 -

■ Laser Alignment System

光コムパルスレーザーを使ったレーザーアライメントシステムの原理

■ Demonstration

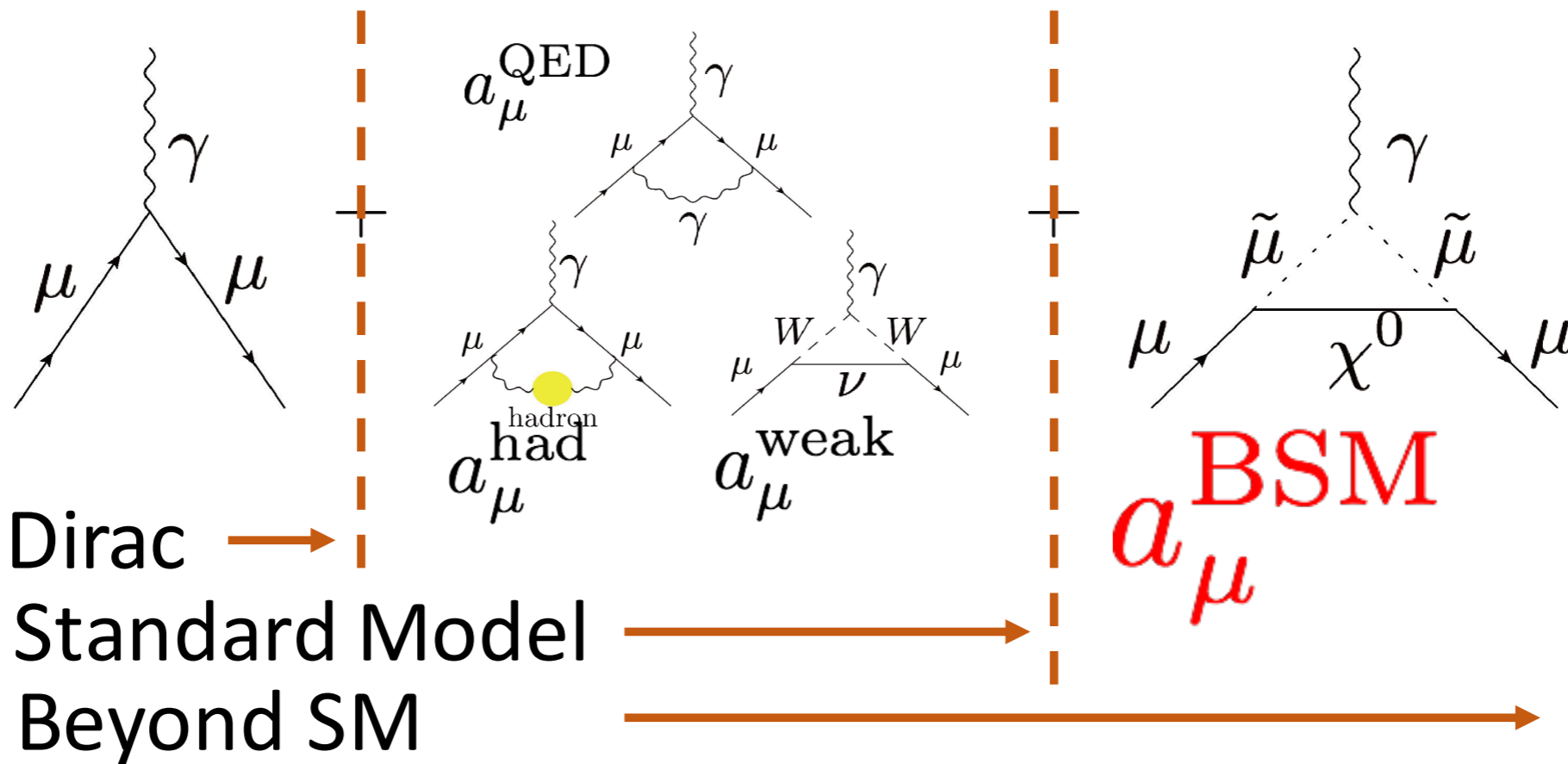
光コムパルスレーザー干渉計の作成とテスト

■ Summary

現状のまとめと今後の展望

異常磁気モーメント g 因子 $g = 2(1 + a_\mu)$

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



- 異常磁気モーメントの値 a_μ は理論モデルを用意することで計算できる。
- 標準模型による計算値と測定値の間に乖離があれば、それは標準模型を超えた物理があることを示唆している。

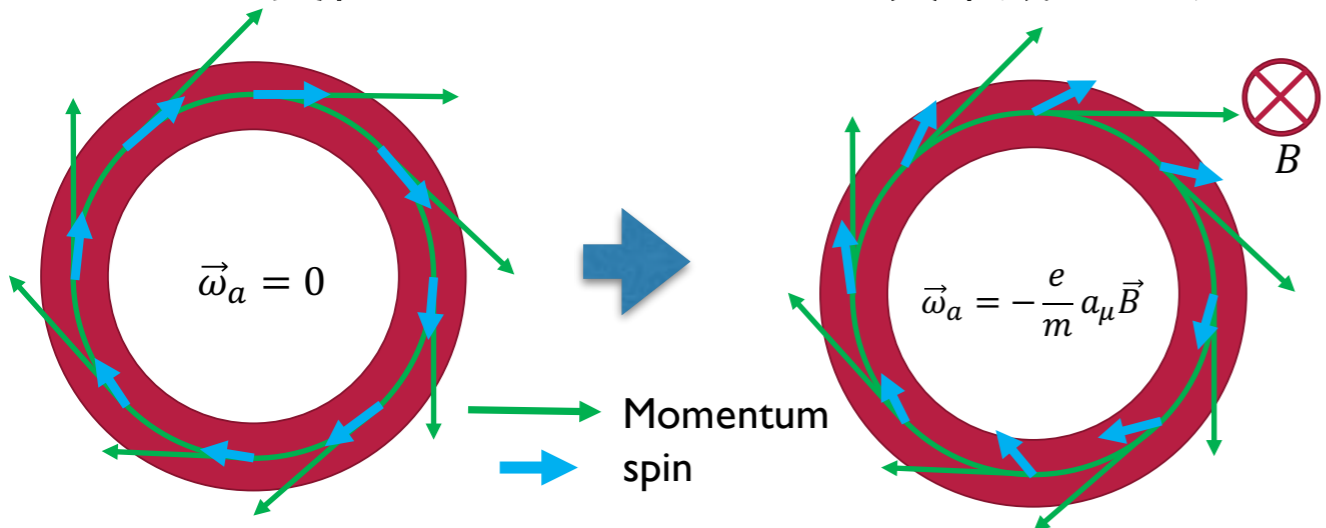
$$\mathcal{H} = -\vec{\mu} \cdot \vec{B} - \vec{d} \cdot \vec{E}$$

$$\vec{\mu} = g \left(\frac{q}{2m} \right) \vec{s} \quad \vec{d} = \eta \left(\frac{q}{2mc} \right) \vec{s}$$

C even / P even / T even P odd / T odd

- 電気双極子モーメントは時間変換に対して奇対称である。
- CPT定理を仮定するならば、EDMはCP対称性も奇対称であることが言える。
- ミューオンのEDMは荷電レプトンフレーバーのCP対称性の破れの探索に有用。
- CP対称性の破れが存在すれば、宇宙のバリオン数非保存などの問題の手がかりとなる。

■ 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 → スピンの異常歳差運動

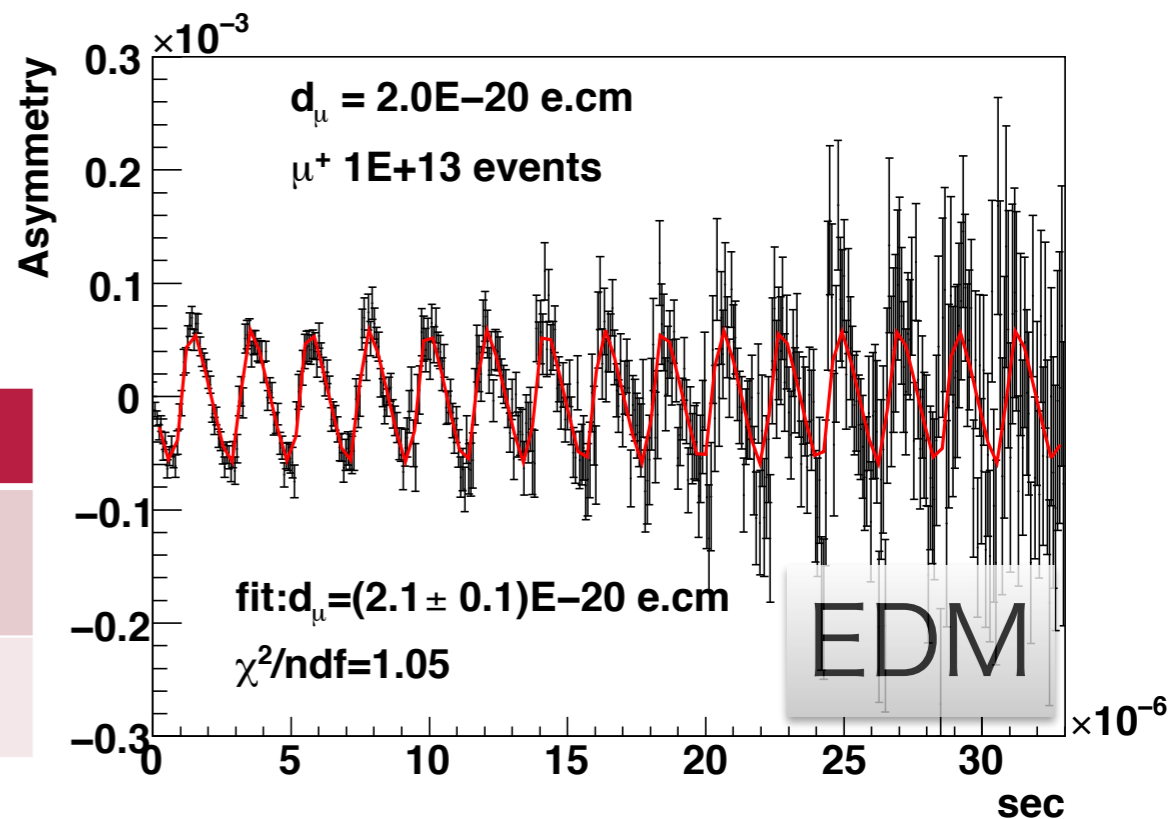
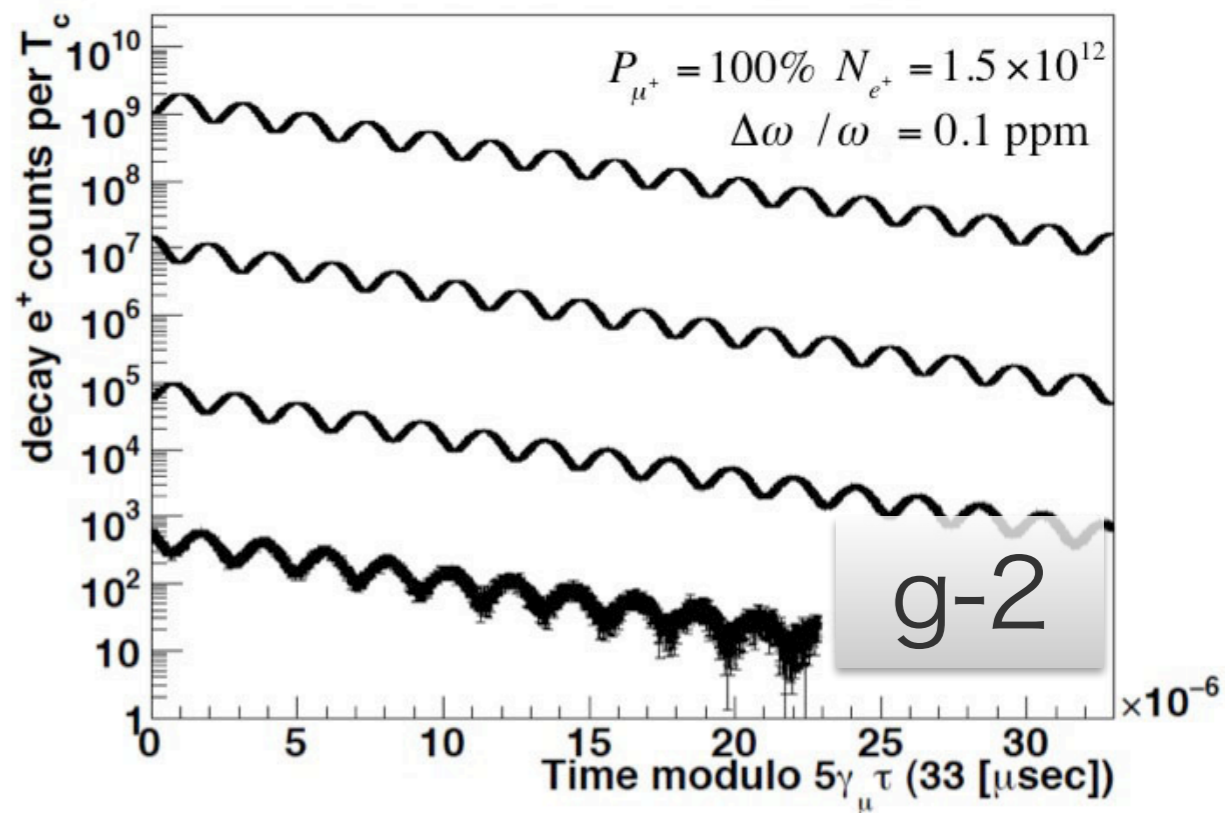


■ スピンの方向に崩壊陽電子が放出しやすい性質から、崩壊陽電子を観測することでスピン方向の振動を測定する。

■ g-2による項 → 運動平面と水平なスピン方向が振動

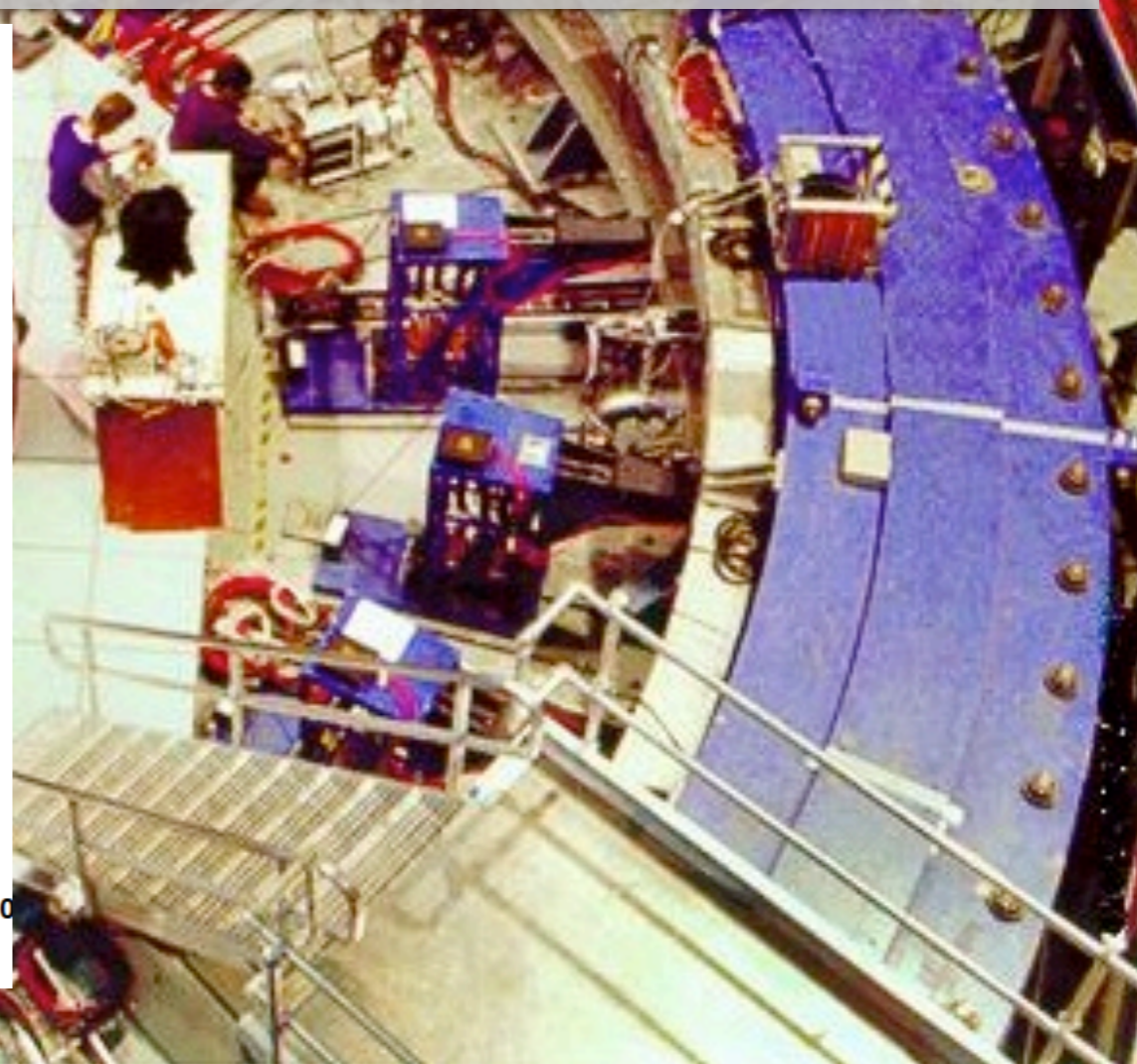
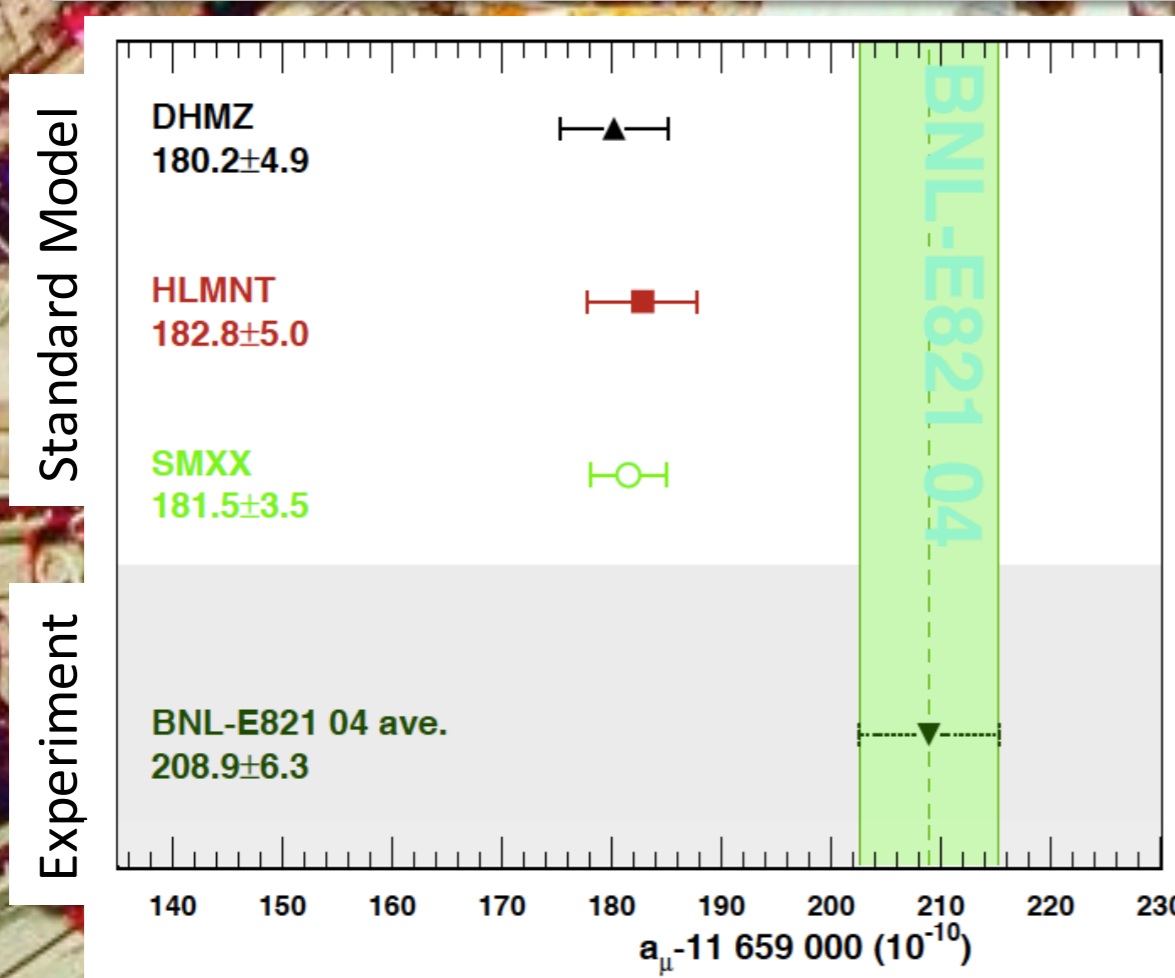
■ EDMによる項 → 運動平面と垂直なスピン方向が振動

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



BNL (先行研究) / FNAL	J-PARC (本実験)
$\vec{\omega} \approx -\frac{e}{m} a_\mu \vec{B}$	$\vec{\omega} = -\frac{e}{m} \left[a_\mu \vec{B} + \frac{\eta}{2} \vec{\beta} \times \vec{B} \right]$
Magic Momentum $\gamma = 30$ ($P = 3 \text{ GeV}/c$)	$E = 0$ and any γ

- ブルックヘブン国立研究所 (BNL) では、
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 **3.3σ** 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測定されており、
 $10^{-19} \text{ e} \cdot \text{cm}$ の制限値を与えている。 [PRD 80, 052008(2009)]



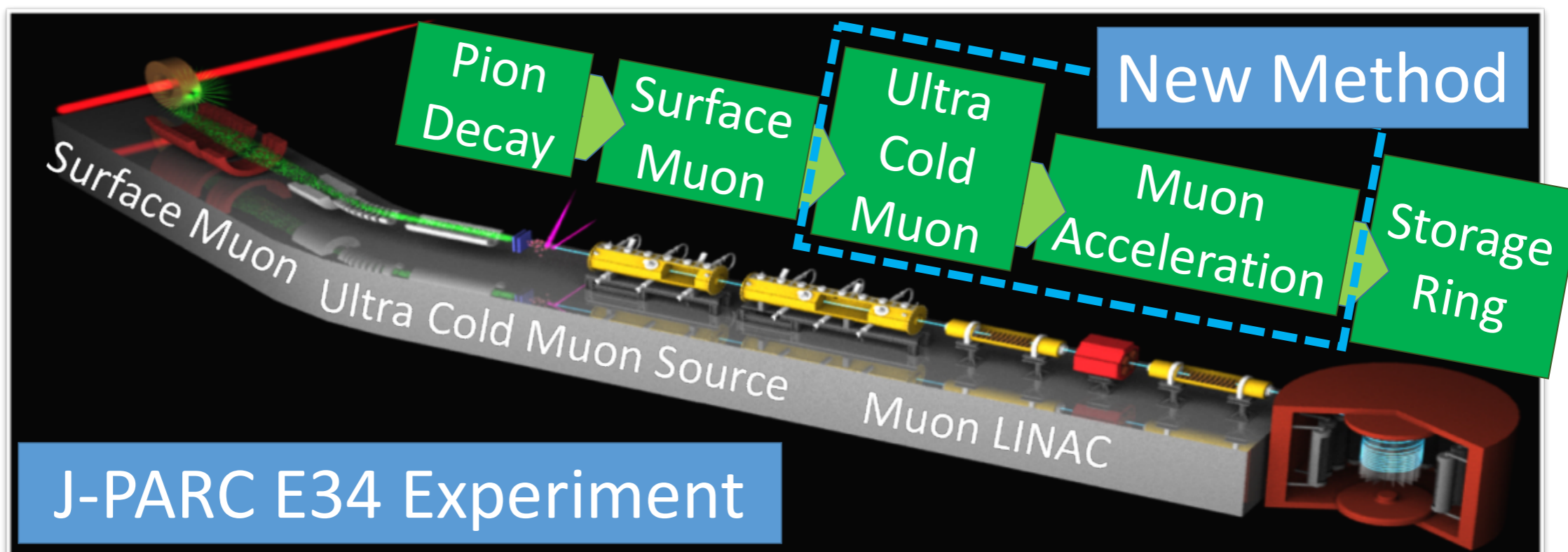
New Experiment at J-PARC

BNL E821

g-2 : Precision 0.54 ppm
EDM : Sensitivity $10^{-19} e \cdot cm$

GOAL @ J-PARC/FNAL

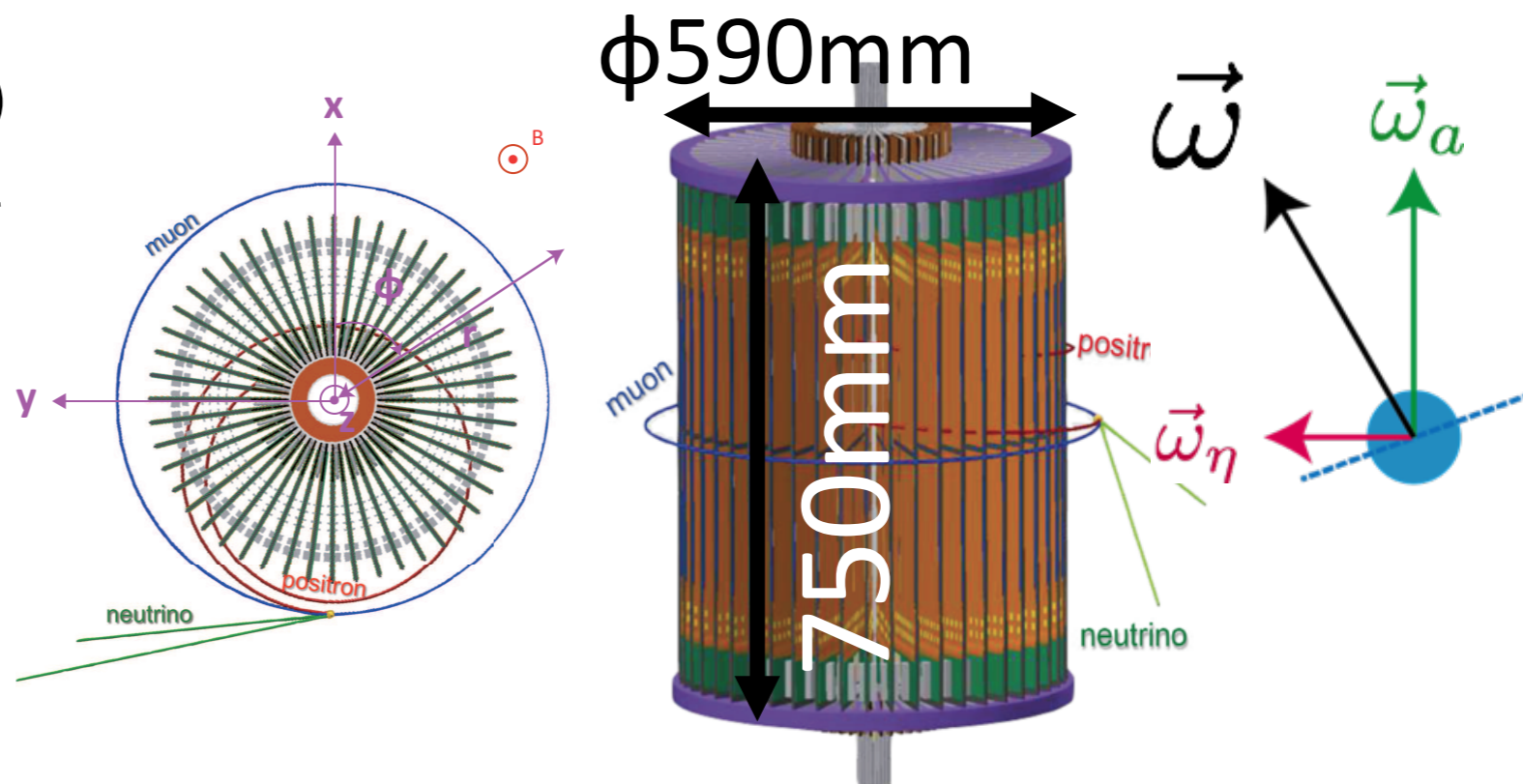
g-2 : Precision 0.1 ppm
EDM : Sensitivity $10^{-21} e \cdot cm$



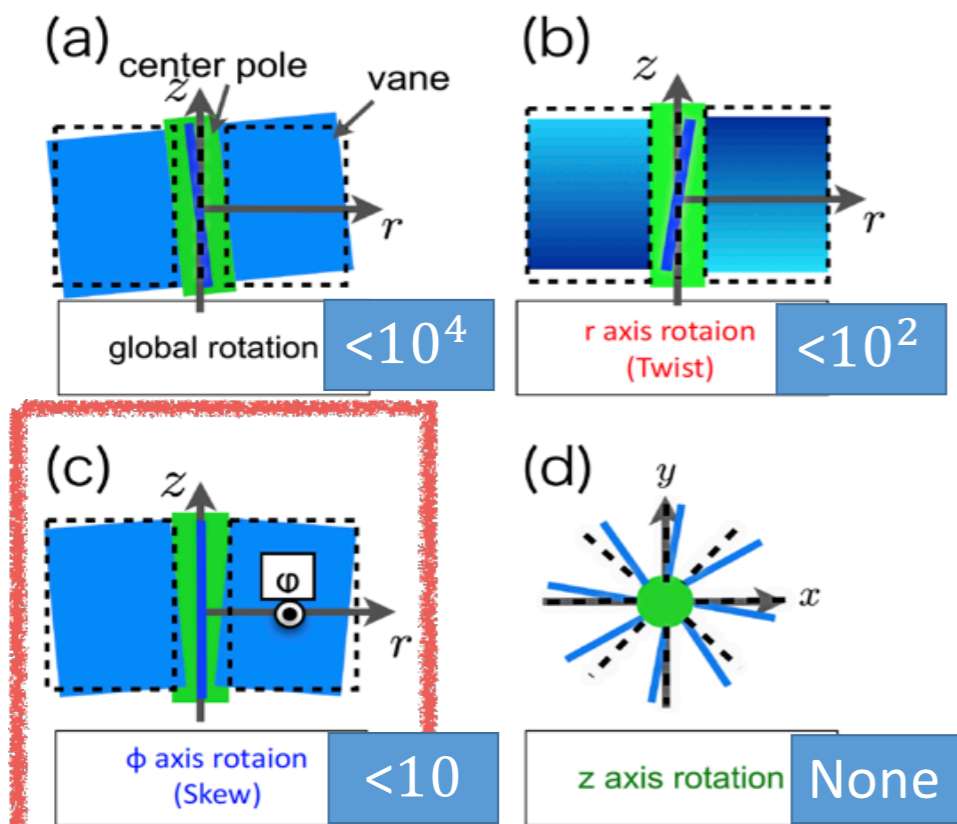
- BNL E821 実験で示唆されている標準模型との違い検証するために、FNALとJ-PARCではより精度の良い実験を行う。
- J-PARC E34 では極冷ミュオンビームとコンパクトな貯蔵磁石を使った新しい測定方法による実験を行う。

陽電子飛跡検出器

- シリコンストリップセンサー(SSSD)
- センサーが上下表裏4枚1組になったベーンを放射状に48枚
- 各ベーンで検出した崩壊陽電子の位置から、崩壊陽電子の飛跡を測定することができる。



要求される検出器の傾き [μrad]



Skew is most sensitive

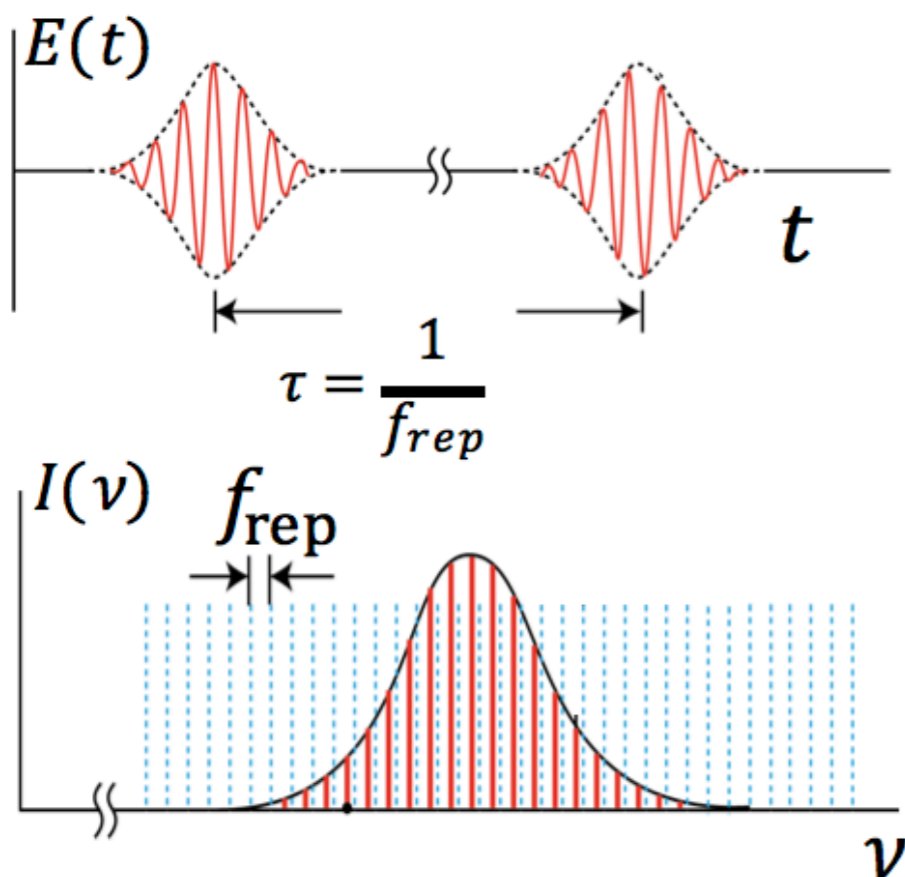
検出器の傾きによるEDMの系統誤差

- 検出器の傾きとEDMによるスピンの回転軸が判別できないことから、**偽のEDM信号**が見えてしまう。
- シミュレーションの結果から我々の目標の $10^{-21} e \cdot cm$ を達成するには検出器が **10 μrad 以内の傾き** であることが要求される。
- 我々はこれを**光コムレーザーを使ったアライメントモニター**を使うことで解決を目指す。

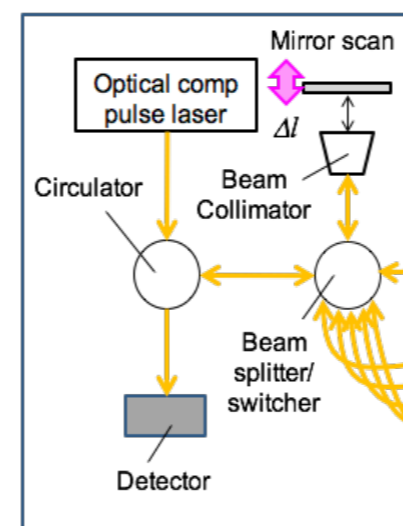
- 光コムパルスレーザー
 - 周波数構造が櫛状(comb)の構造
 - パルスレーザー
 - 干渉条件の時のみ信号が現れる
 - 繰り返し周波数 f_{rep} の安定性
 - パルス間隔が安定し長さを精密に測れる

- 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ことができる。
- 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。

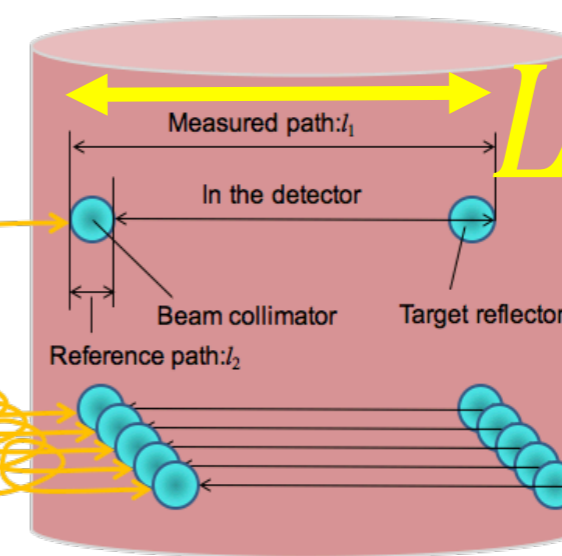
Optical Comb Laser



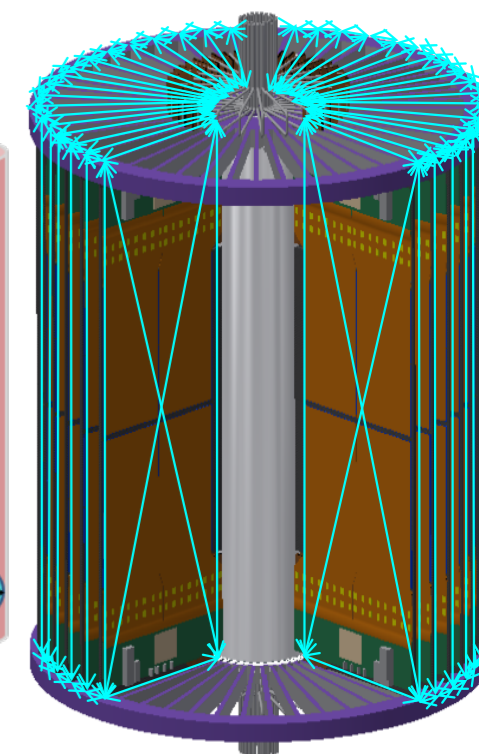
Outside the detector

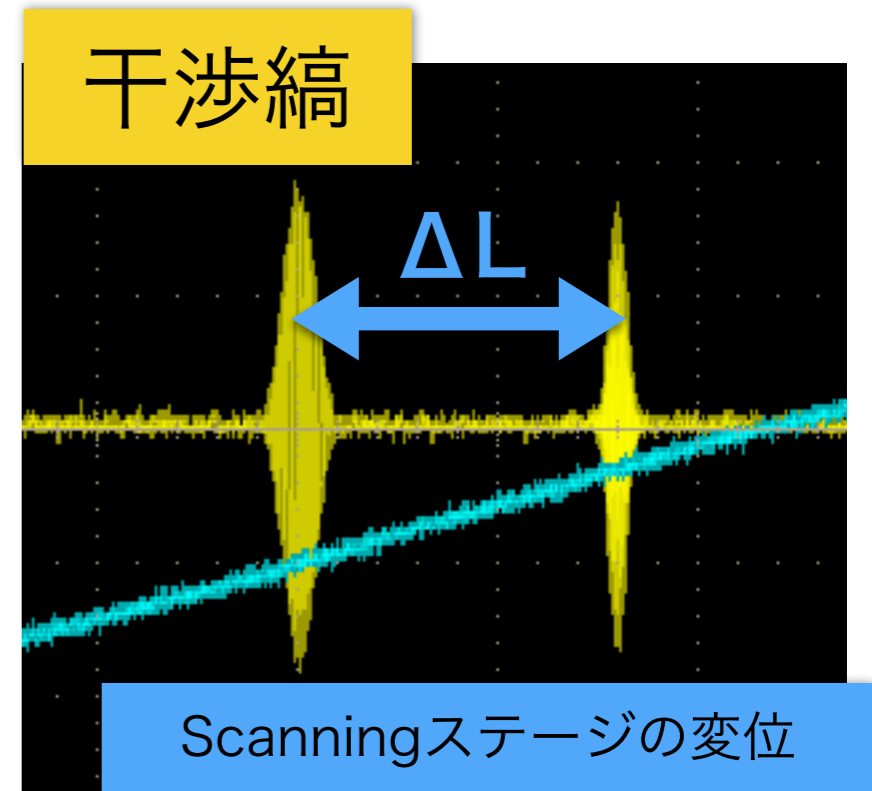
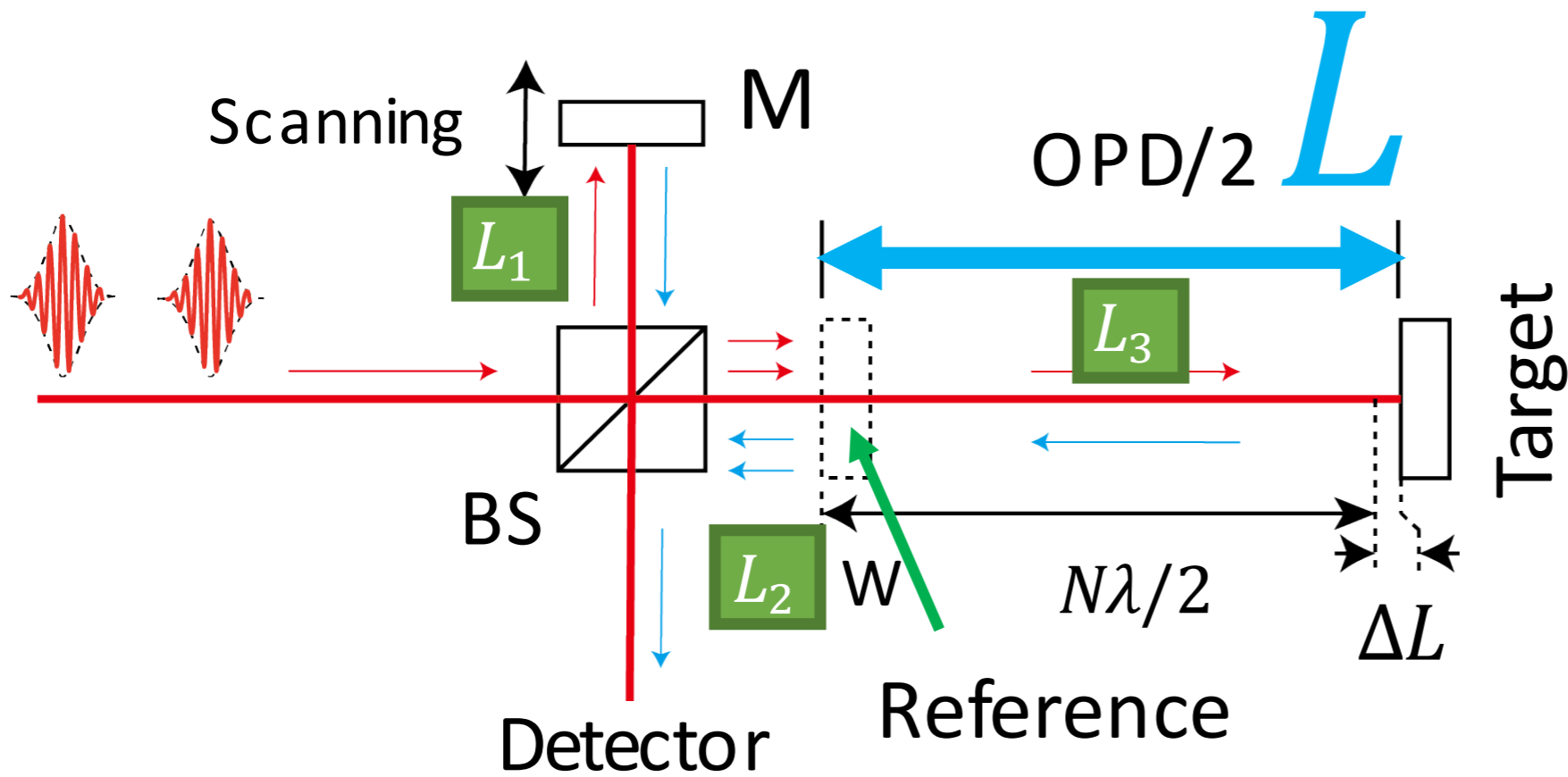


In the detector



Optical fiber (~100 m)





- Michelson-Moller型干渉計にガラス窓(W)を挿れることで光路が三つ得られる。
- Scanningステージを動かして、干渉条件を満たした時に干渉縞が得られる。
- オシロスコープで二つの干渉縞が見れて、同時刻のScanningステージの位置 L_1 から ΔL を測定することができる。

$$L_2 = L_1 + N\lambda/2$$

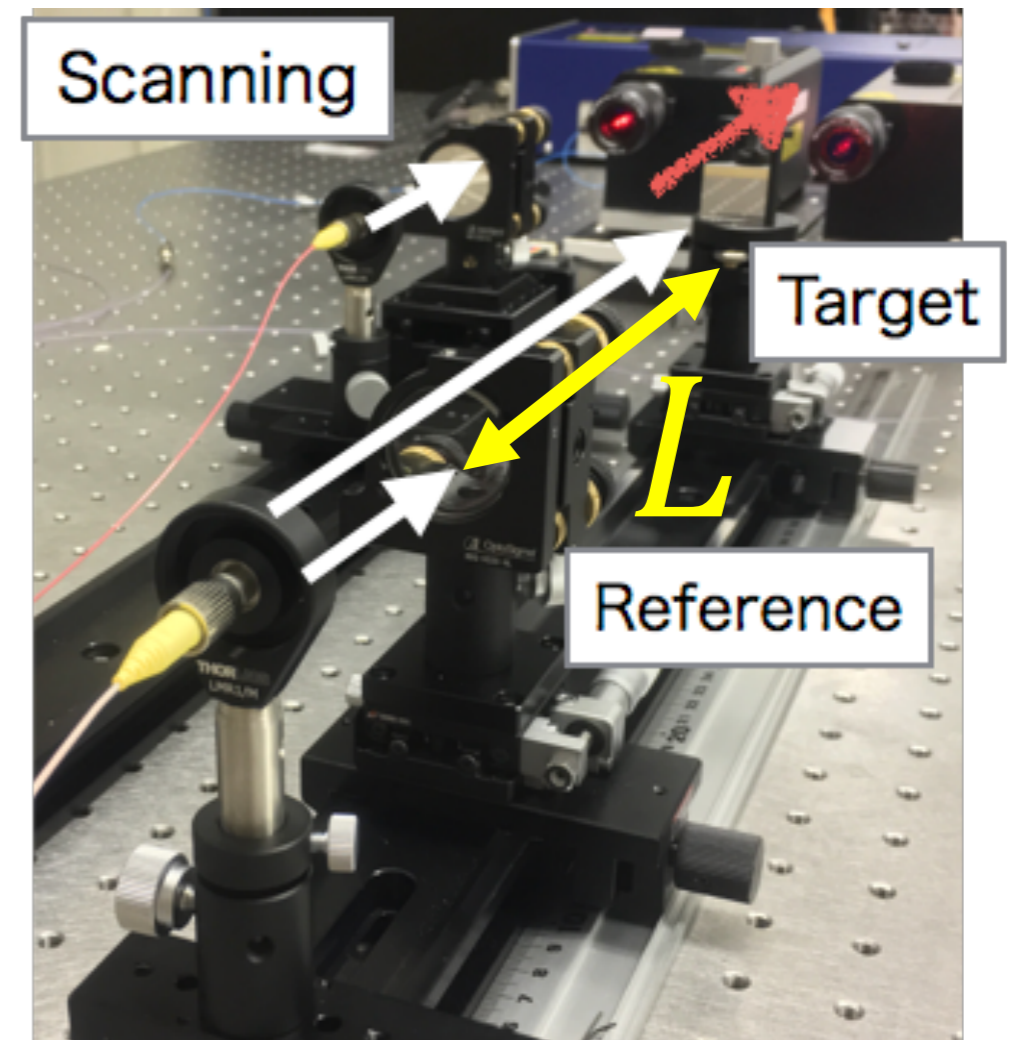
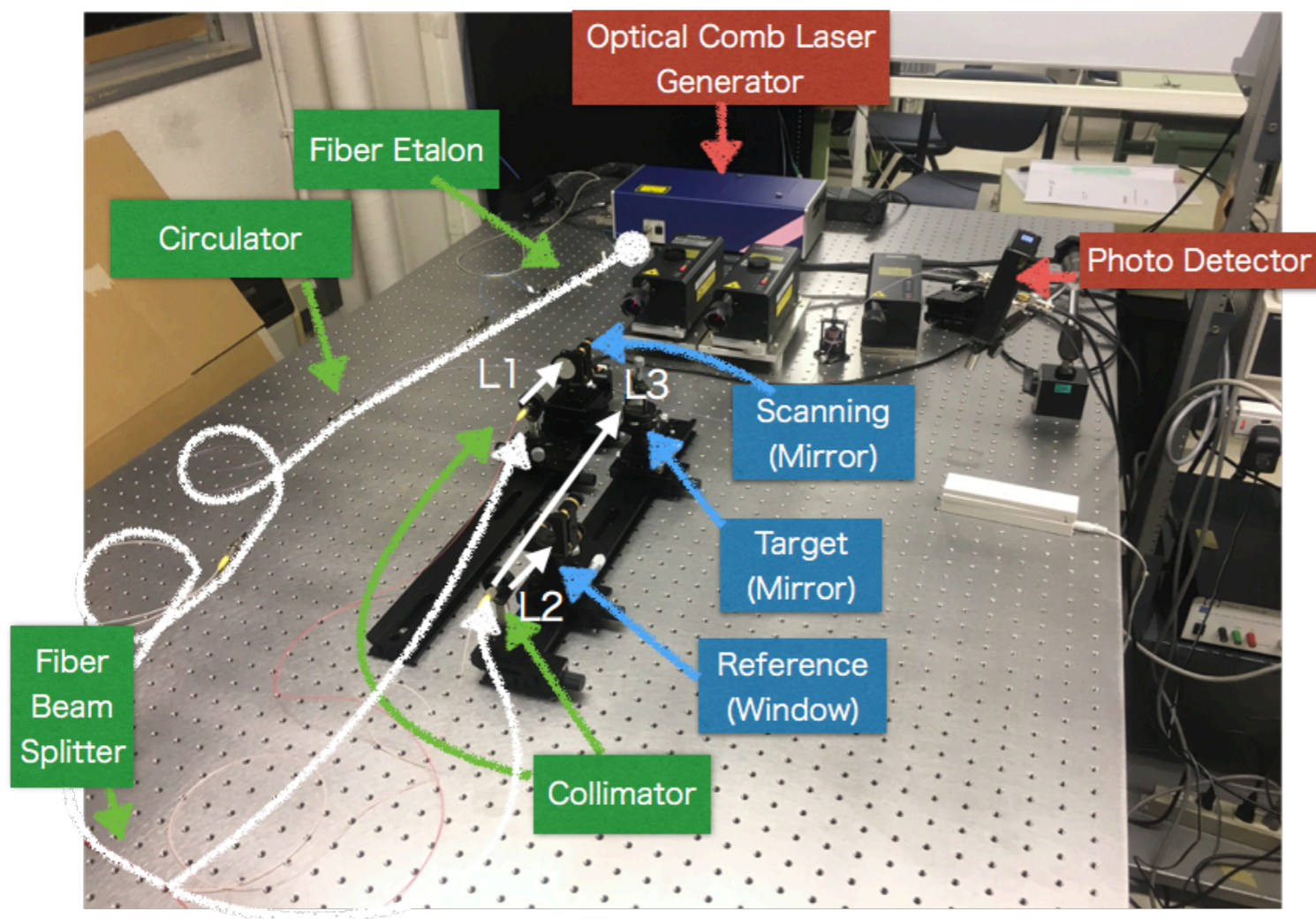
$$L_3 = L'_1 + N'\lambda/2$$

(N, N', M : integer, λ : wavelength)

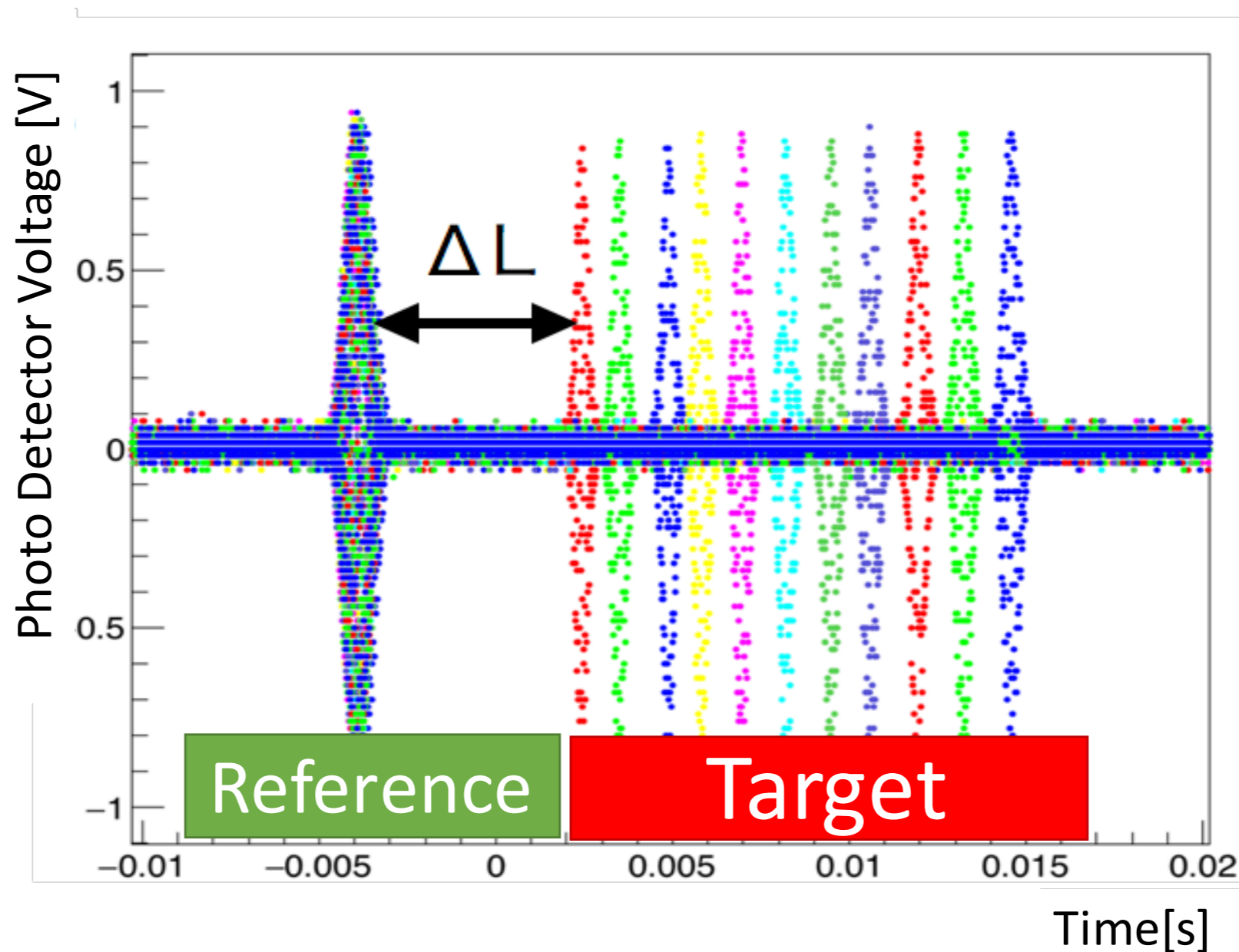
$$L = M\lambda/2 + \Delta L$$

■ 実験方法

- ファイバエタロンを使うことで繰り返し周波数 f_{rep} を 60MHz から 1GHz にする。
- ハーフミラーの役割をサーキュレーターとビームスプリッターで担う。
- 三つの光路が得られ、Scanning ステージを動かし、干渉縞が現れることを確認した。
- Target ステージを $100\mu\text{m}$ ずつ動かし、干渉縞にどのような変化が見られるかを確認した。



- 下図はTargetを100 μm ずつ動かした結果を重ね書きしたものの。
- 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。
- 定量的な評価に向け、干渉縞の安定性、分解能などについて評価している最中。
- 市販のレーザー干渉計と比較した性能評価を行う。



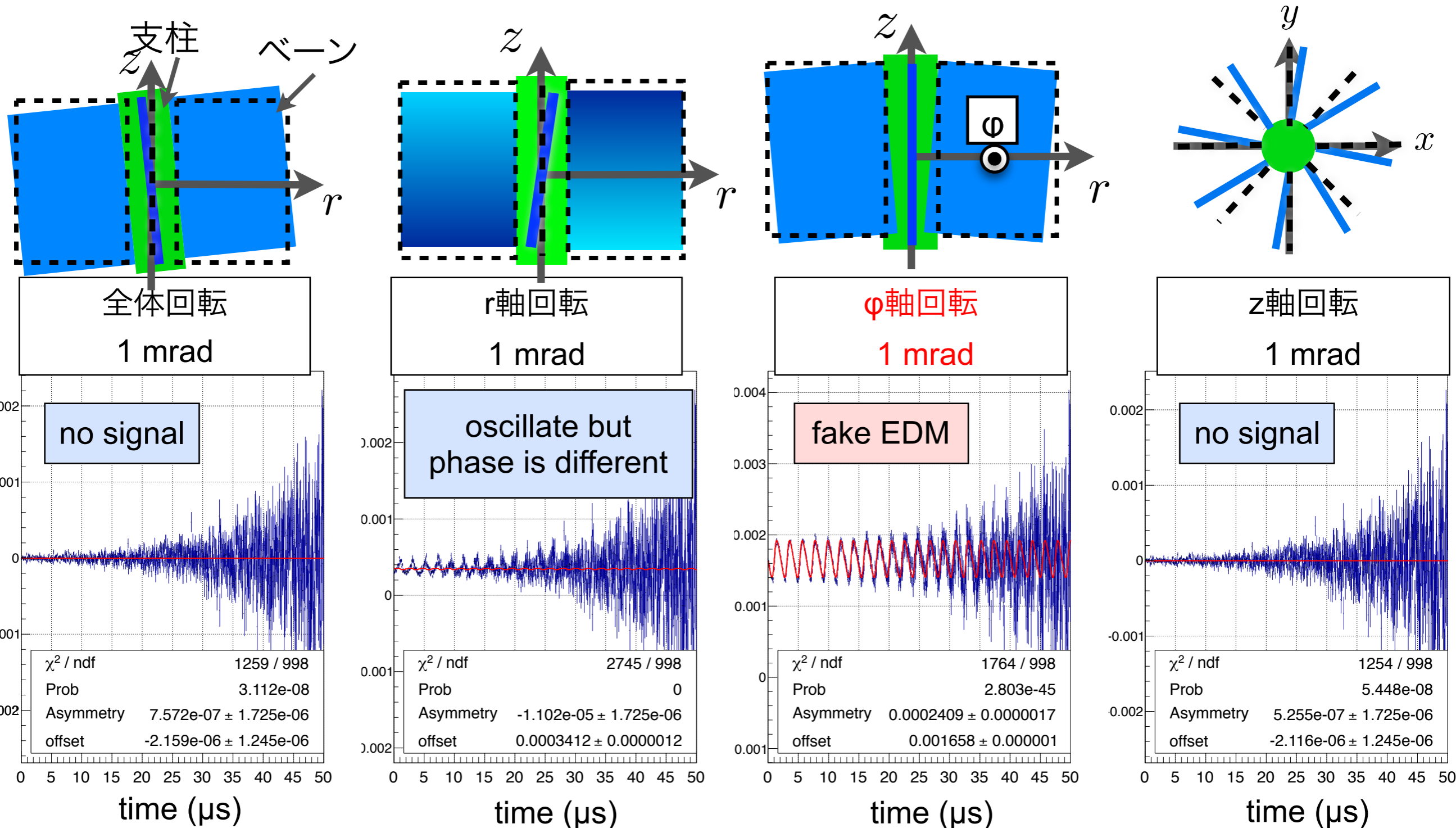
- J-PARCでは**ミュオンの異常磁気モーメント及び電気双極子モーメントの精密測定実験**が行われる予定で、それに向けた研究開発が進んでいる。
- 検出器のアライメントがEDMの系統誤差に効いてくることから、検出器を**10 μ rad以内の傾き**であることをモニターする必要がある。
- 我々はそれを**光コムレーザーを用いたアライメントモニター**を使うことで解決を目指す。
- 作成した干渉計で**干渉縞**を見ることができた。また、**Targetステージの変位との関係性**を見ることができた。
- 作成した干渉計の性能評価に向けて、市販のレーザー干渉計の性能比較を行い目的の精度を満たしているかを確認している。
- ガラスボールレンズをミラーの代わりに使った系への応用や、3次元系測定に向けた原理実証を来年度中に行っていく。

BACK UP

	BNL E821	J-PARC E34
muon momentum	3.09 GeV/c	0.3 GeV/c
storage ring radius	7 m	0.33 m
storage field	1.5 T	3.0 T
focusing field (n-index)	0.14 (electric)	1.5 E-4 (magnetic)
average field uniformity	≈1 ppm	<< 1ppm
(local uniformity)	≈50 ppm	≈1ppm
Injection	inflector + kick	spiral + kick
Injection efficiency	3-5%	80%
muon spin reversal	--	pulse-to-pulse
positron measurement	calorimeters	tracking
positron acceptance*	65%	≈100%
muon polarization	≈100%	≈50%
events to 0.46 ppm	9×10^9	5×10^{11}

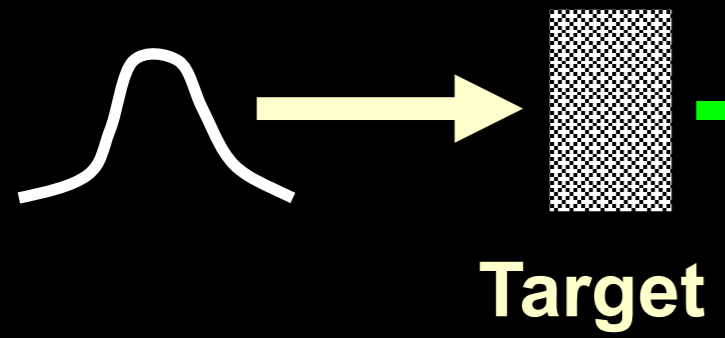
検出器ミスアラインメントと偽EDM信号の関係

- EDM = 0 e · cmで検出器が一律に傾いた場合の上下非対称度をシミュレートした (西村、JPS 2013S)



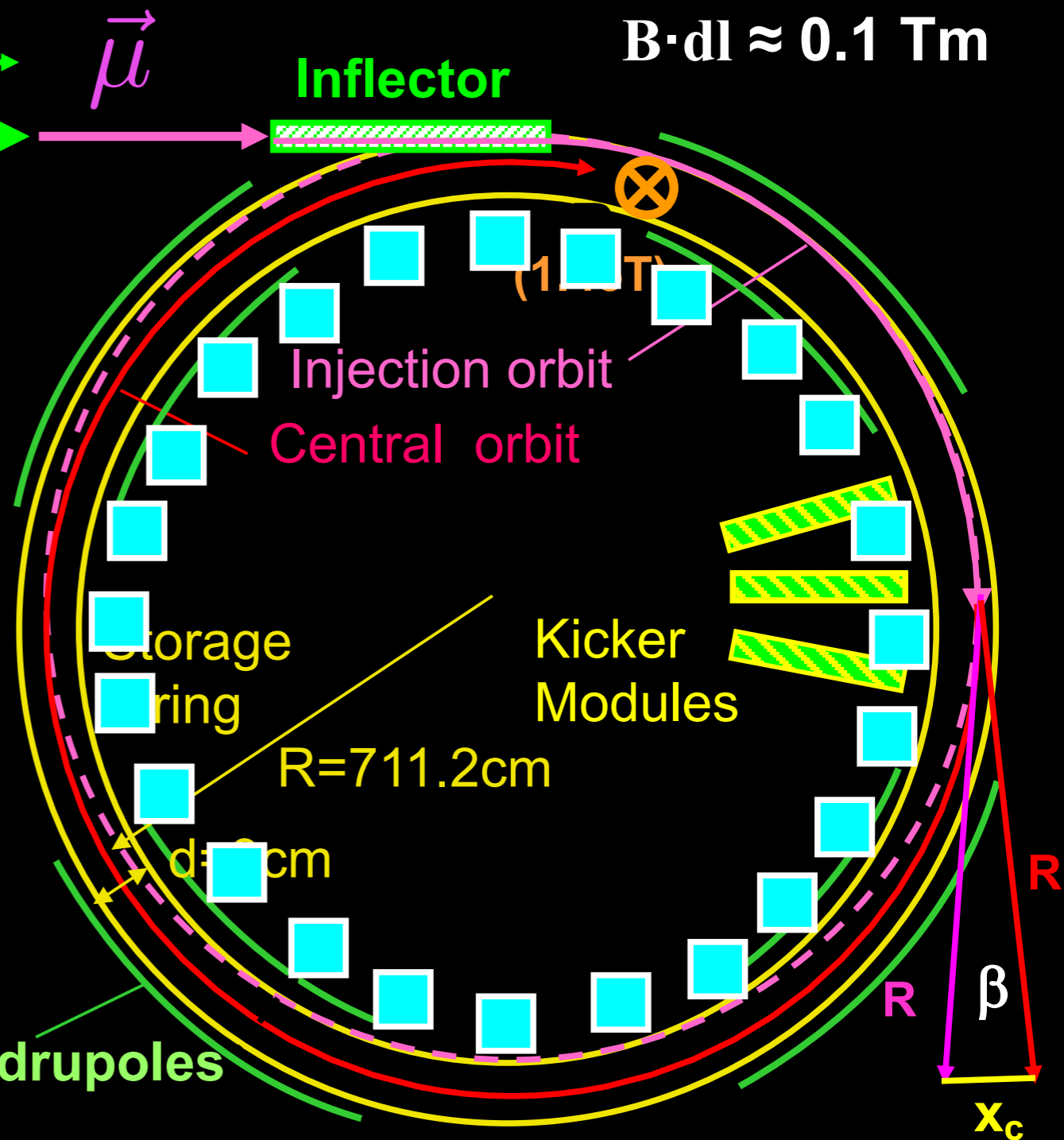
Experimental Technique

narrow bunch of protons



$x_c \approx 77 \text{ mm}$
 $\beta \approx 10 \text{ mrad}$
 $B \cdot dl \approx 0.1 \text{ Tm}$

- Muon polarization
- Muon storage ring
- injection & kicking
- focus with Electric Quadrupoles
- 24 electron calorimeters

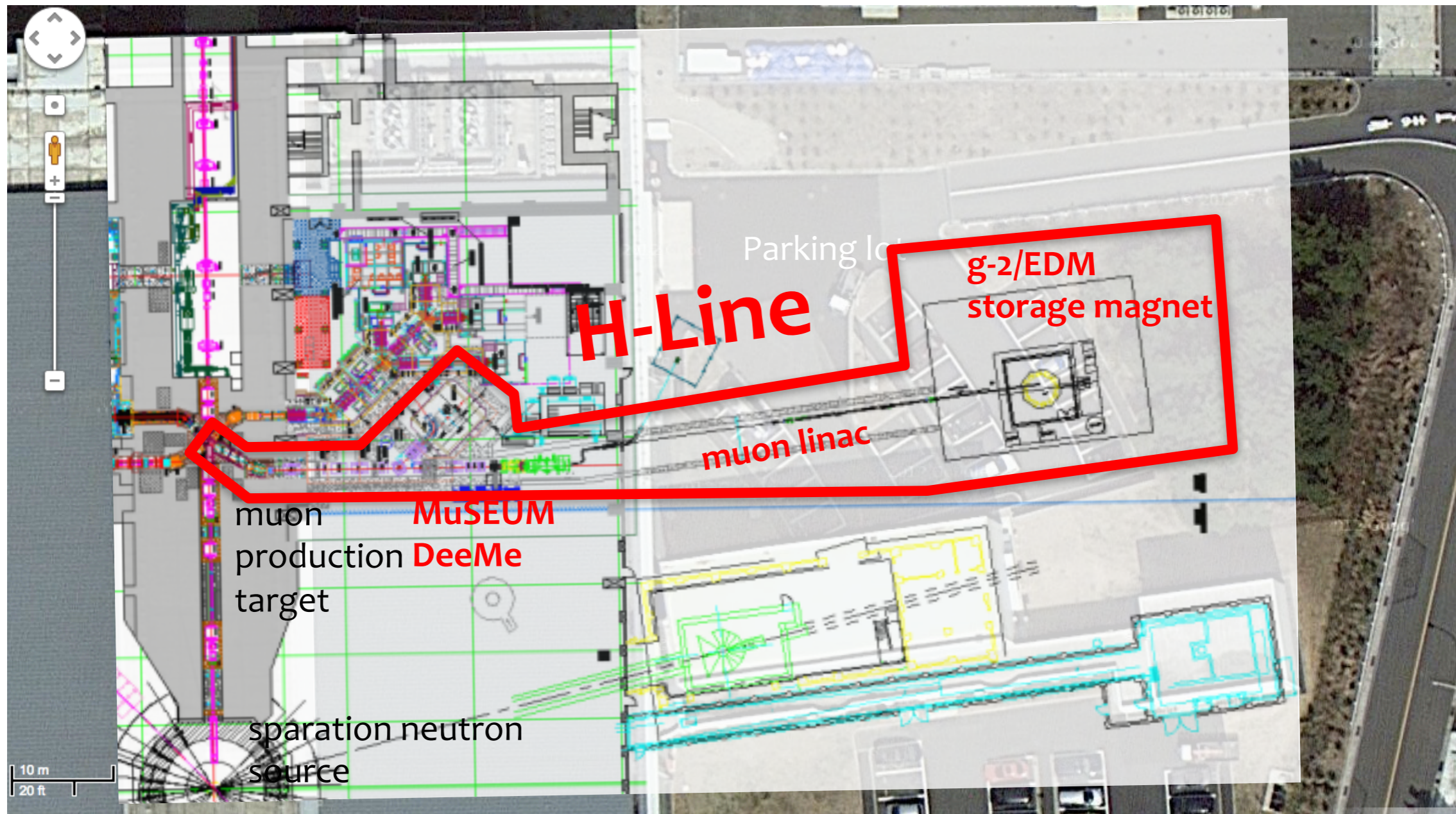


$$\vec{\omega}_a = - \frac{Qe}{m} a_\mu \vec{B}$$

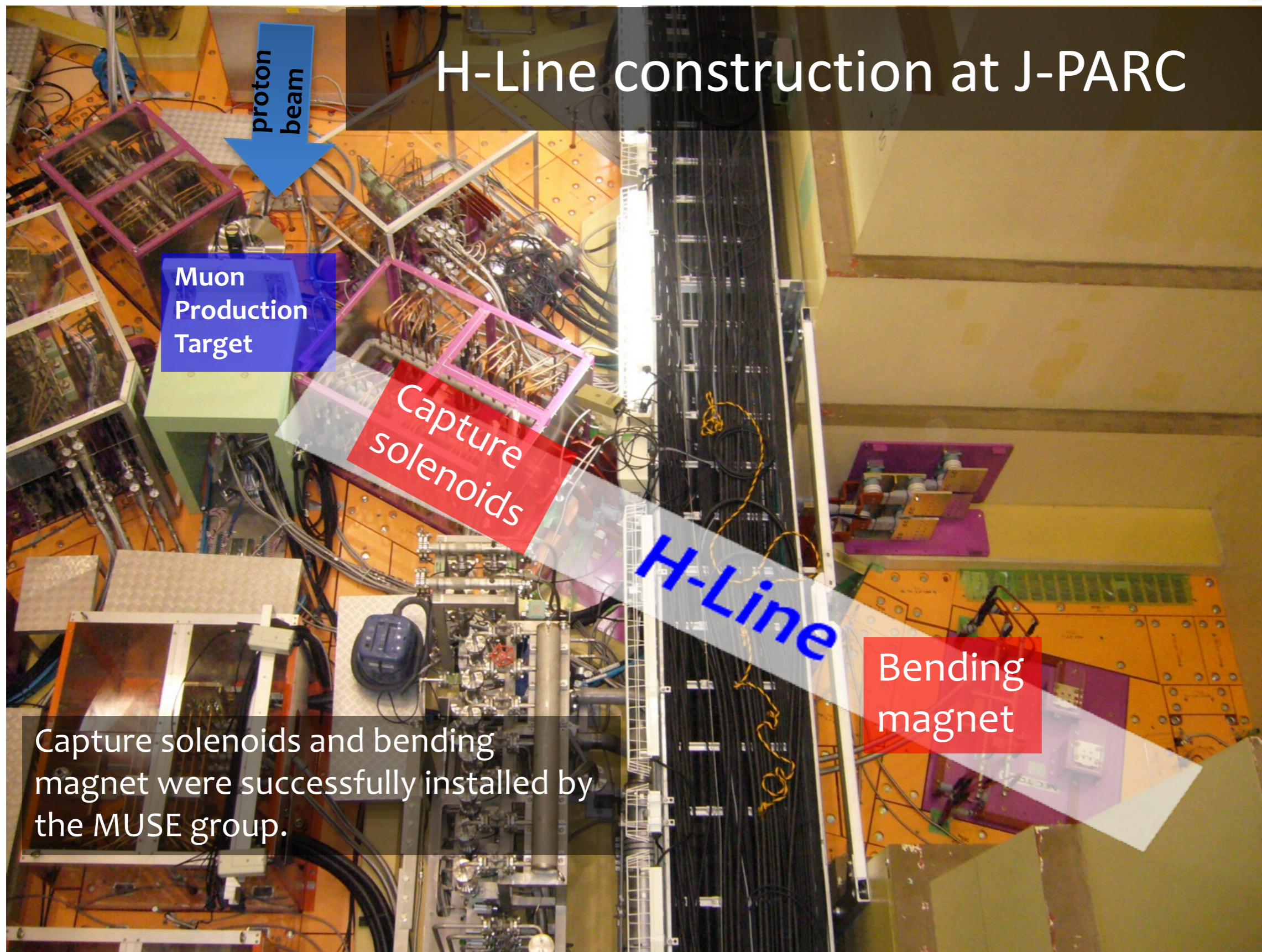
Electric Quadrupoles

Proposed experimental site

Material and Life science Facility in J-PARC



36



H-Line construction at J-PARC

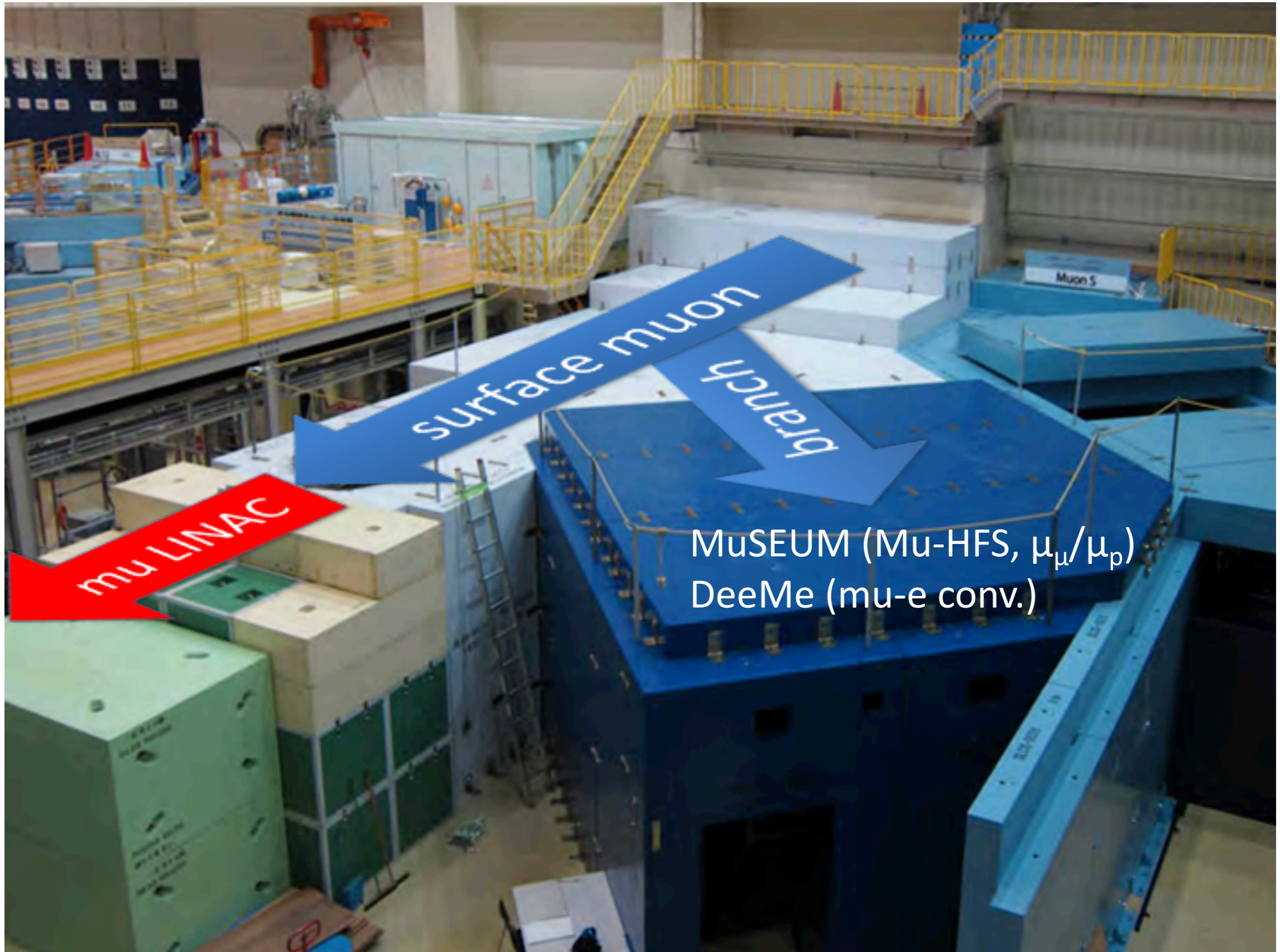
Muon
Production
Target

Capture
solenoids

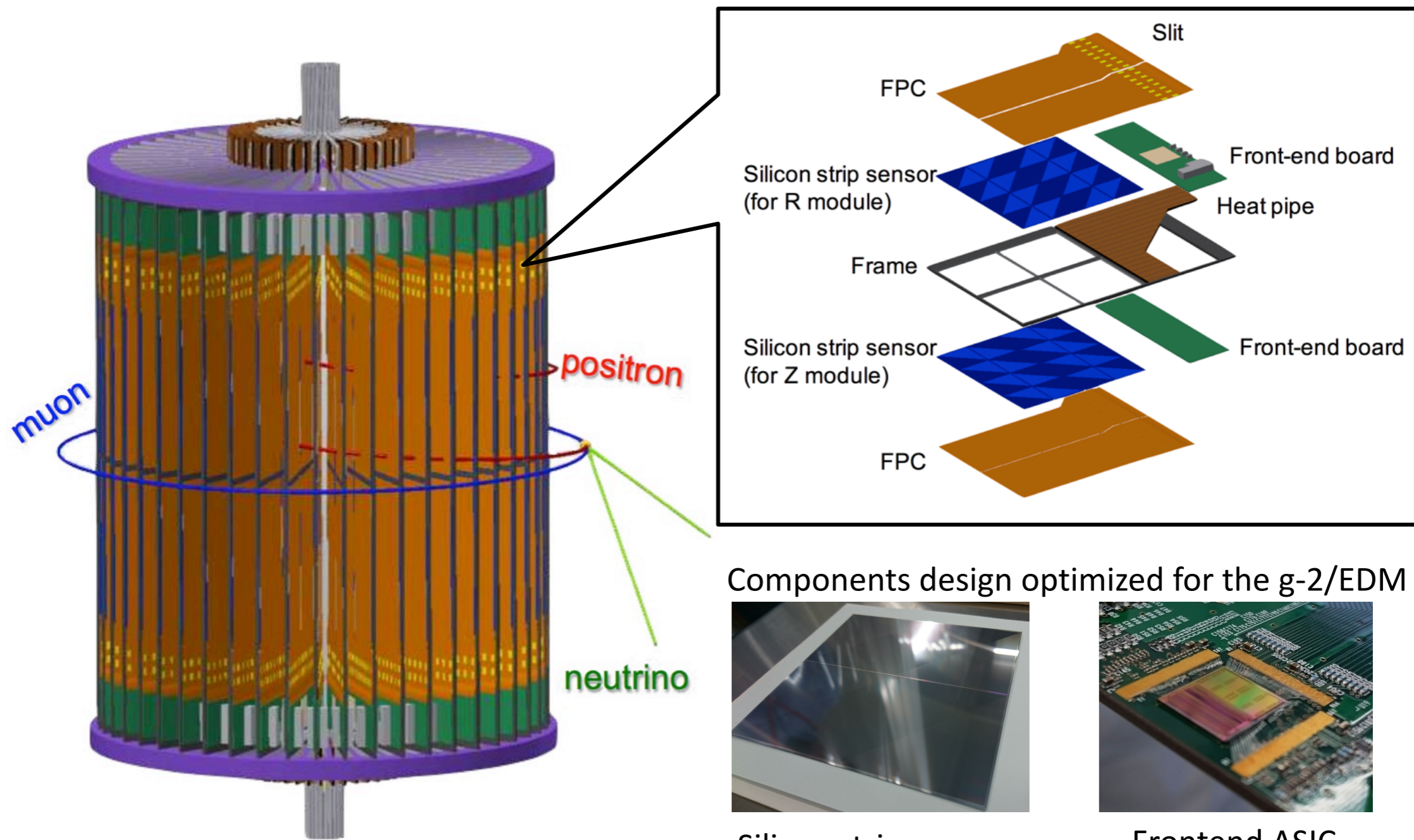
H-Line

Bending
magnet

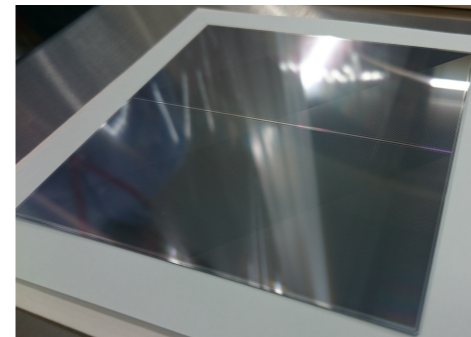
Capture solenoids and bending magnet were successfully installed by the MUSE group.



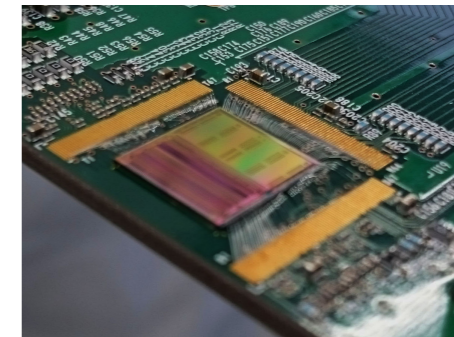
Positron tracking detector



Components design optimized for the g-2/EDM



Silicon strip sensor



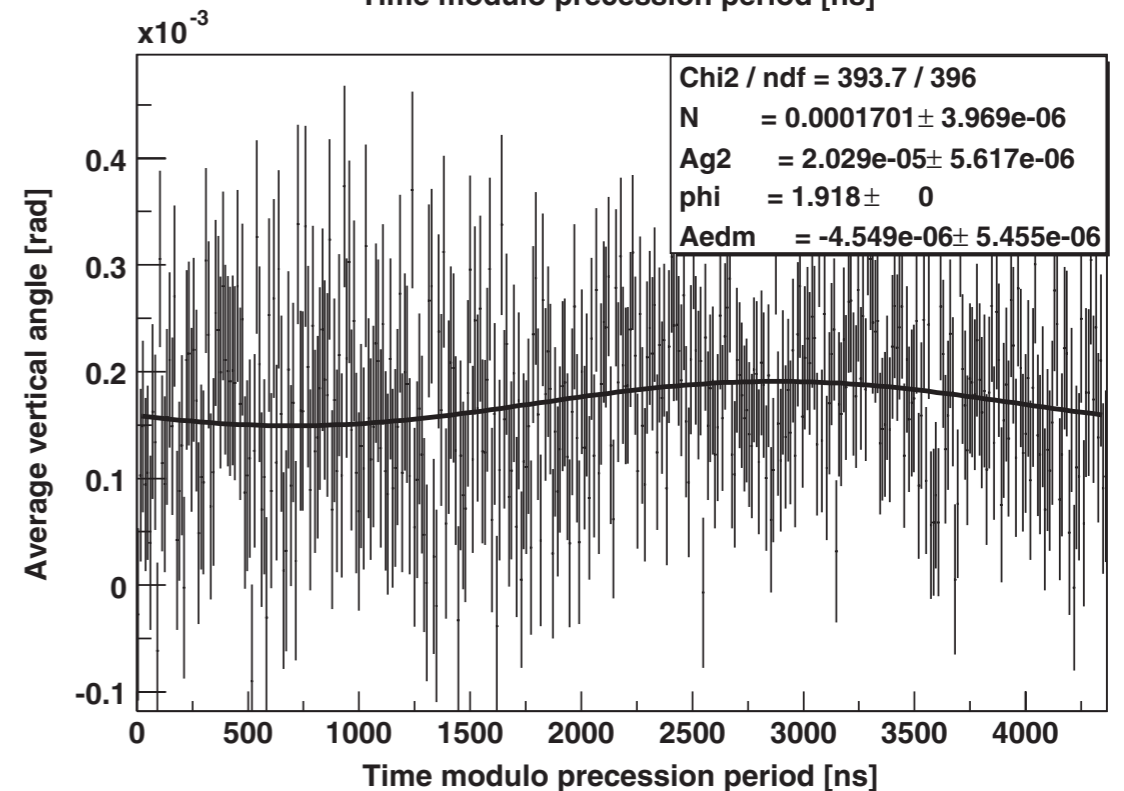
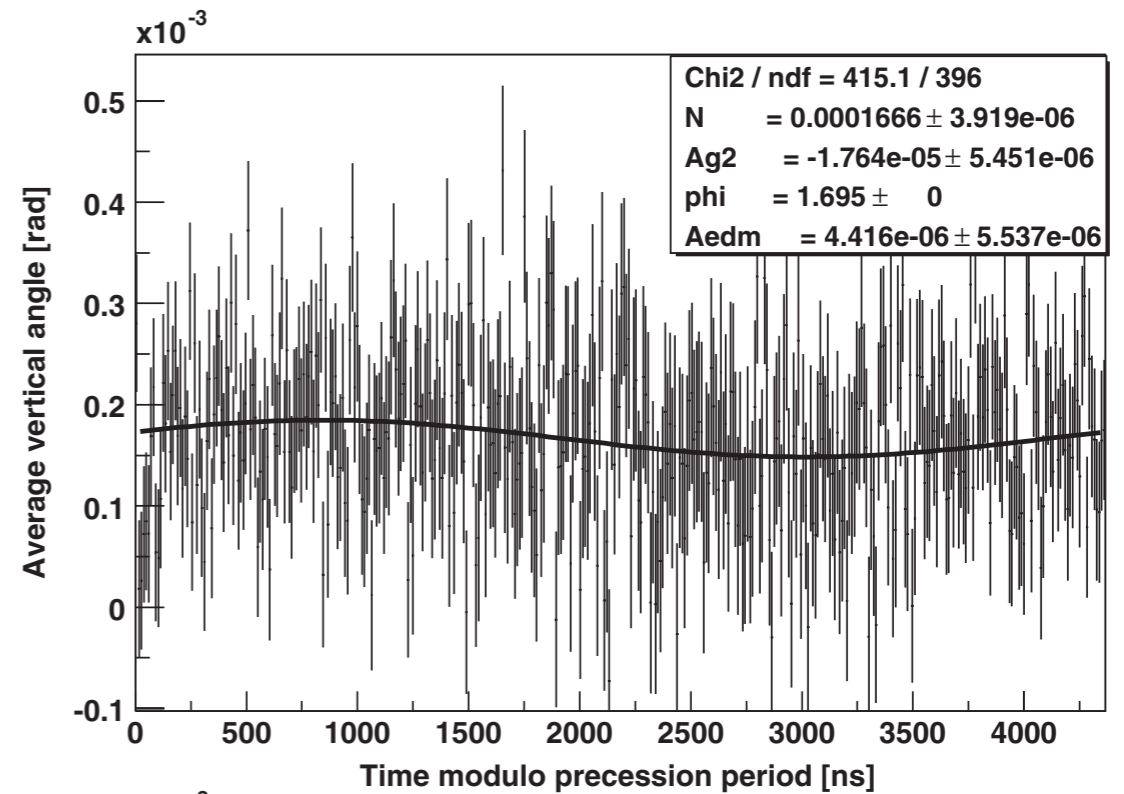
Frontend ASIC

Partial funding available to complete ~1/3 of the system

45

$$\theta(t) = M + A_{\mu} \cos(\omega t + \Phi) + A_{\text{EDM}} \sin(\omega t + \Phi),$$

$$|d_{\mu^+}| < 3.2 \times 10^{-19} \text{ (e cm) (95\% C.L.)}.$$



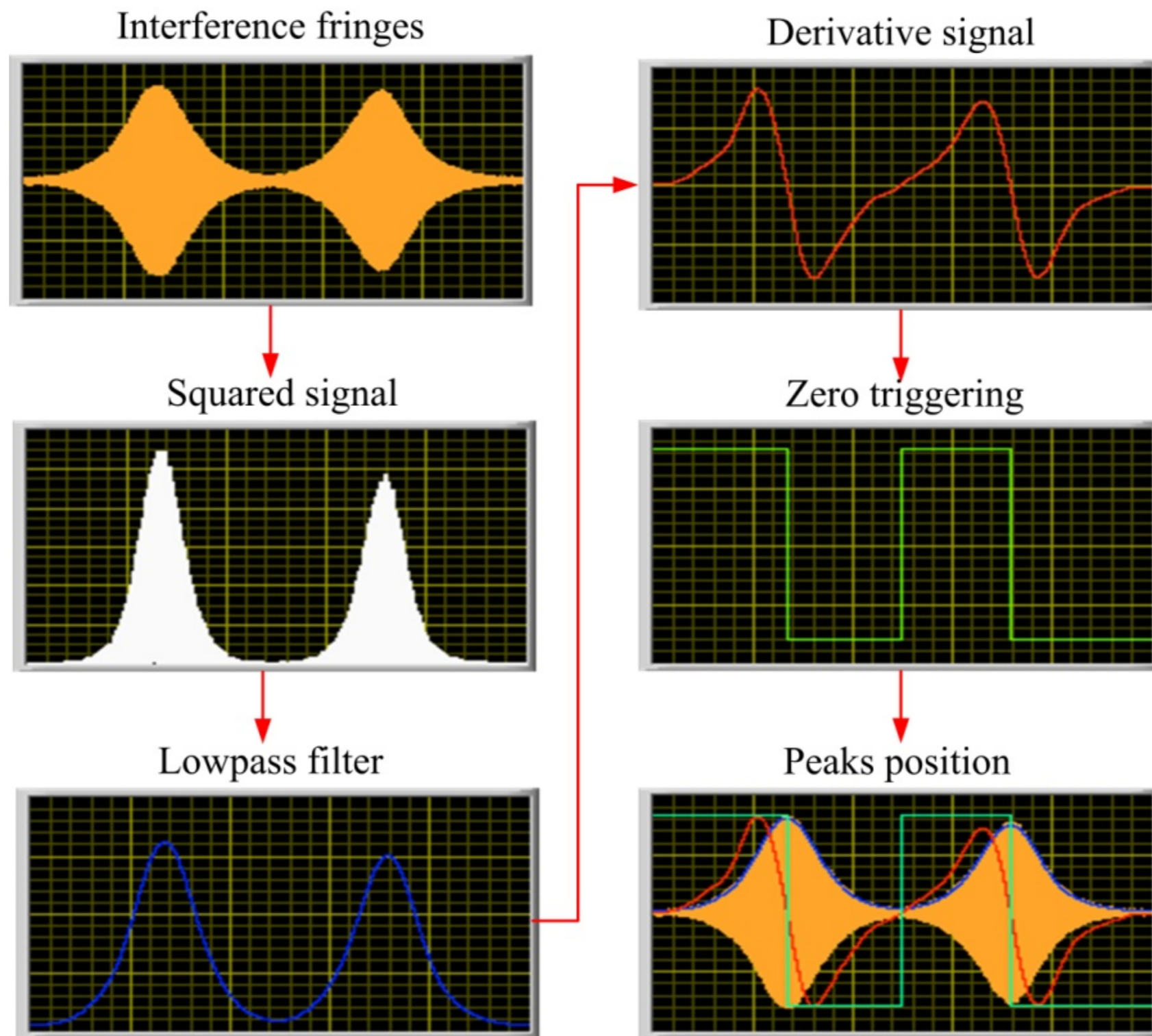


TABLE II. Table of systematic errors from the traceback analysis.

Systematic error	Vertical oscillation amplitude (μ rad lab)	Precession plane tilt (mrad)	False EDM generated 10^{-19} (e cm)
Radial field	0.13	0.04	0.045
Acceptance coupling	0.3	0.09	0.1
Horizontal CBO	0.3	0.09	0.1
No. oscillation phase fit	0.01	0.003	0.0034
Precession period	0.01	0.003	0.0034
Totals	0.44	0.13	0.14