

日本物理学会 第74回年次大会

J-PARC E34 実験

ミュオン線型加速器における高時間分解能 縦方向ビームモニターの性能評価

四塚麻衣(B4)^A、飯嶋徹^{A,B}、飯沼裕美^C、居波賢二^A、大谷将士^D、河村成肇^E、
北村遼^H、近藤恭弘^H、齊藤直人^I、下村浩一郎^E、須江祐貴^A、中沢雄河^C、
長谷川和男^H、ニツ川健太^D、三部勉^F、三宅康博^E、森下卓俊^H、安田浩昌^G、
山崎高幸^E、他J-PARC ミュオン g-2/EDM コラボレーション

名大理^A、名大KMI^B、茨城大^C、KEK加速器^D、KEK物構研^E、KEK素核研^F、
東大理^G、JAEA^H、J-PARCセンター^I

ミューオンと新物理

異常磁気能率($g-2$)

$$g = 2(1 + a_\mu)$$

標準理論からの予測値と
実験による測定値に

3 σ 以上の乖離

→**新物理の寄与**の可能性

電気双極子能率(EDM)

新物理の寄与により

測定精度内で有限の値の観測
が行える可能性が有る

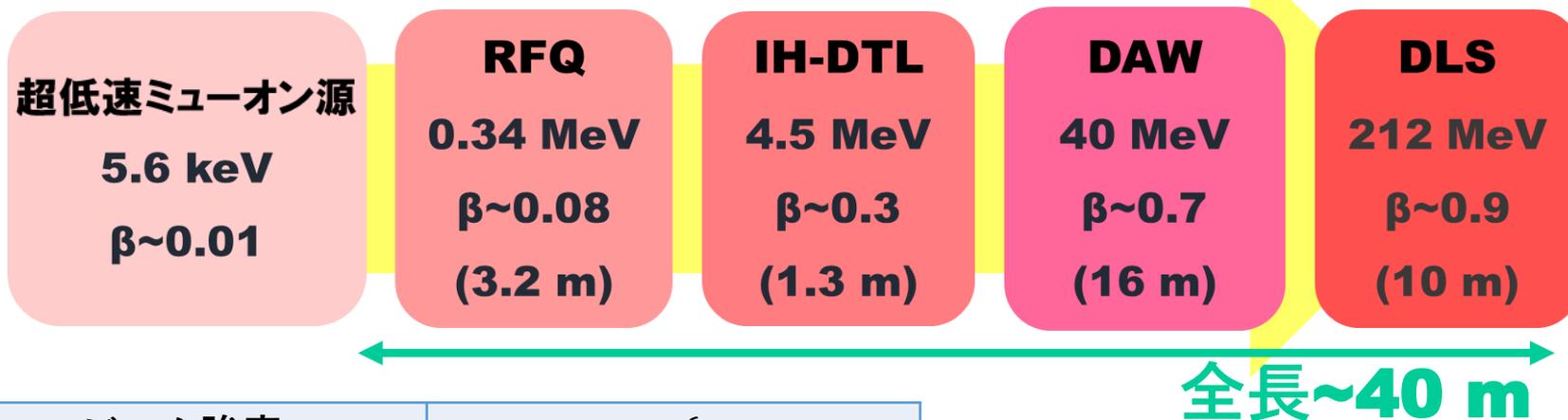
→**時間反転対称性の破れ**、
即ち**レプトンにおける**
CP対称性の破れの観測

	先行研究	J-PARC
$g-2$	540 ppb	460 ppb
EDM	0.1×10^{-19} e·cm	1×10^{-21} e·cm

J-PARC muon $g-2$ /EDM実験

系統誤差削減のため**低エミッタンスビーム**を使用
ミュオンを**静止**→**再加速**により生成

速度に応じた**複数段階の線形加速器**を使用



ビーム強度	1×10^6 /sec
周期	25 Hz
規格化横エミッタンス	1.5π mm·mrad
運動量幅	0.1%

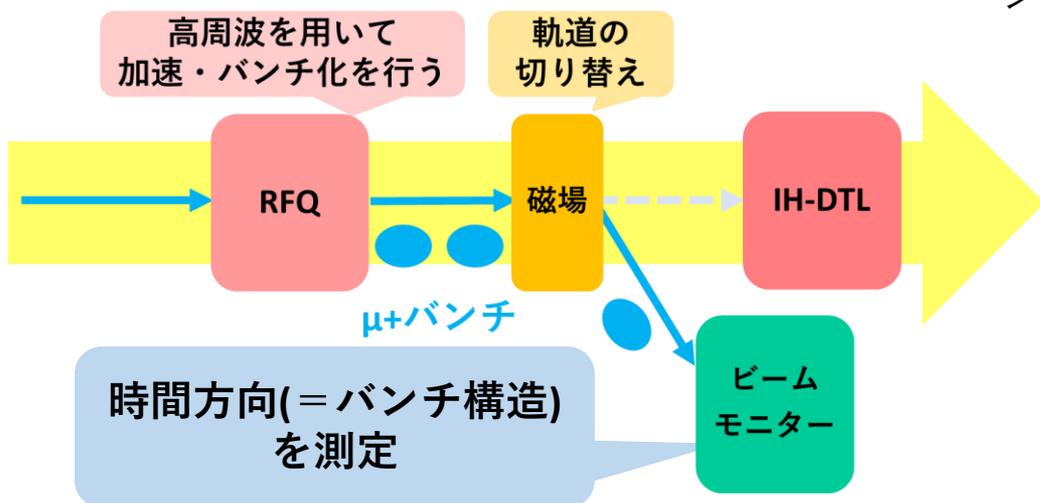
* Technical Design Report
の要約論文がPTEPで受理
(arXiv:1901.03047)

設計されたビームの実現→**ビームマッチング**が重要

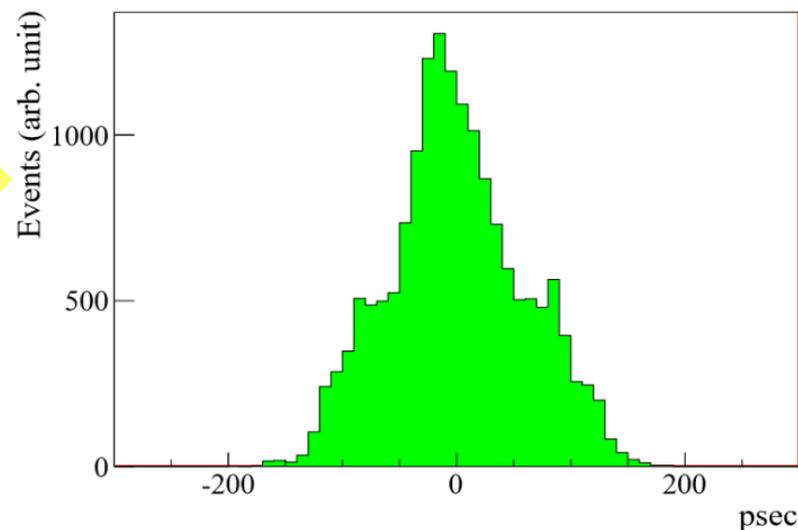
ビームマッチング

▶時間方向の測定の必要性

- ・ ミューオンビームは**時間方向にバンチ化**されている
- ・ **高周波加速**のため時間方向における**加速範囲が限られる**
→**実際のバンチ構造測定に基づくビームの調整が必要**



シミュレーションによるRFQ出口の分布



時間方向(=バンチ構造)測定を行う **ビームモニターの開発**

時間方向測定の実験モニター

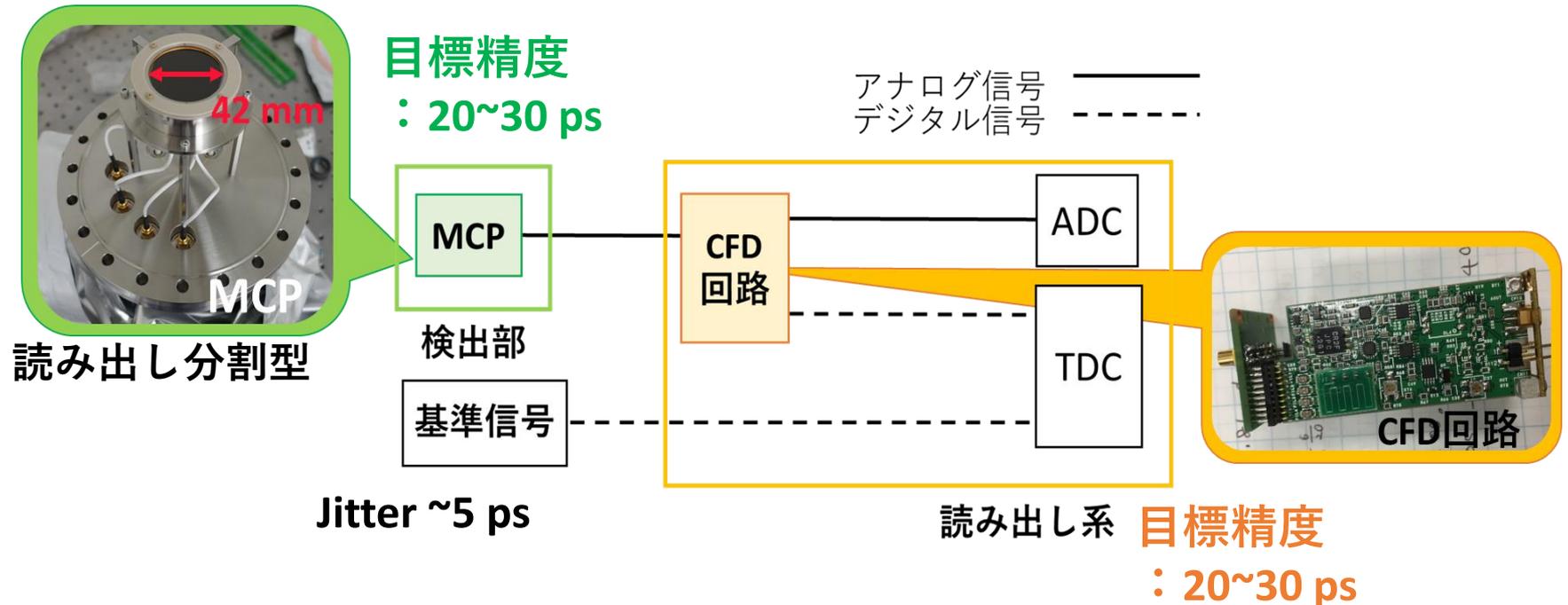
▶ ビームモニターへの要求

① 高時間分解能

時間分解能 **30~40 ps** : 加速位相324MHzの1%の精度

② ミューオン1つに対して高い感度を持つ

ビーム強度の低い実証段階での使用を可能とするため

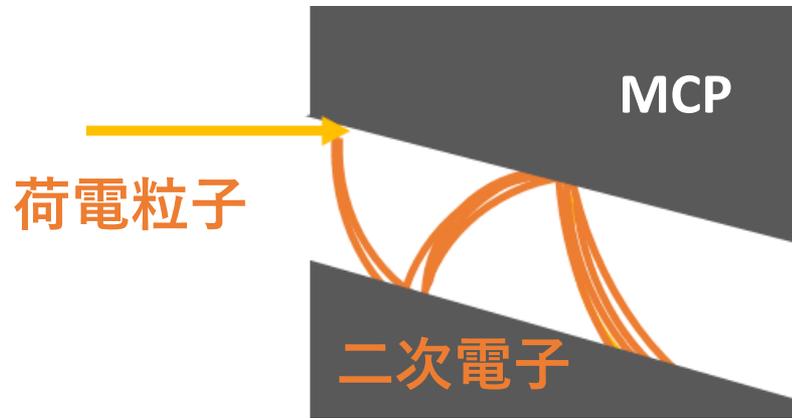


粒子検出部

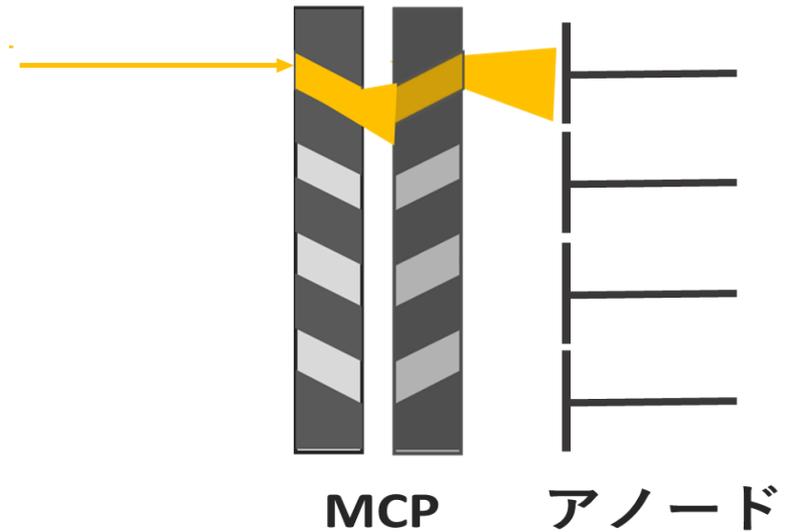
▶ マイクロチャンネルプレート (MCP)

二次電子増幅により荷電粒子を検出する

内部での二次電子増幅



MCPによる粒子検出



- ・ ミューオンひとつに対して高い感度を持つ
- ・ 高い時間応答性を持つ

☆ 信号読み出しを4か所設ける

→ 入射位置依存による時間分解能の悪化を抑制

読み出し系

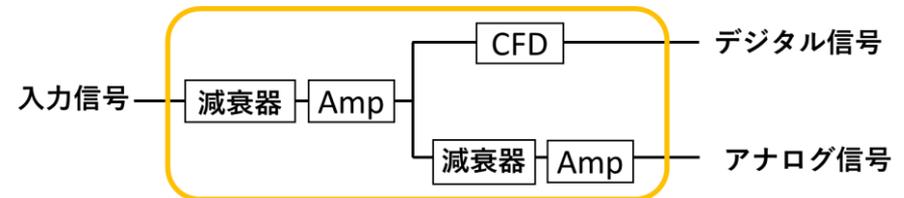
➤ Constant Fraction Discriminator(CFD)回路

- 信号を内部で2つに分け交点でタイミングを決定

→電圧に依存せずに信号を出力

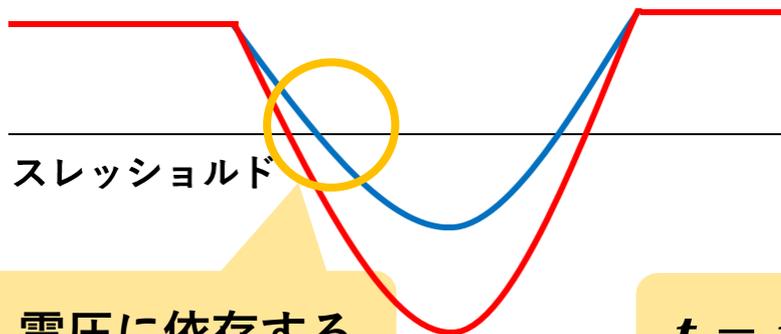
- 増幅させたアナログ信号とデジタル信号を出力

読み出し回路



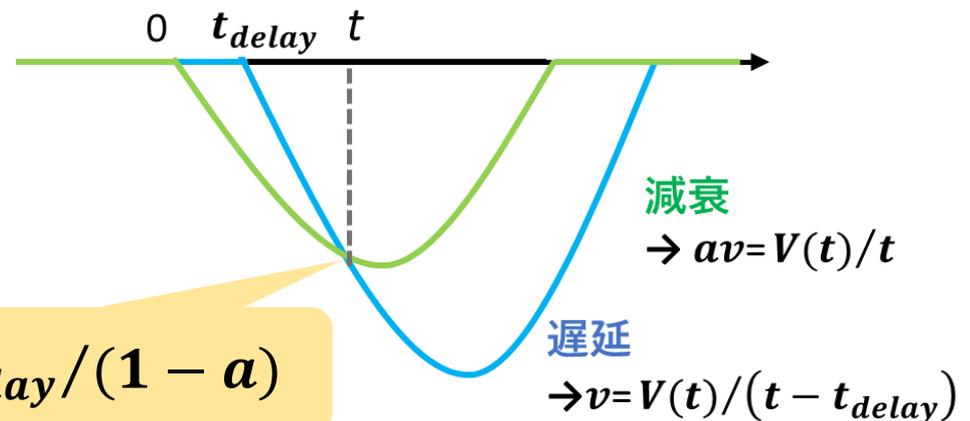
Belle II TOP読み出しのプロトタイプとして開発($\sigma \sim 5$ ps)

電圧と信号検出
: Time Walk



電圧に依存する

電圧に依存しない信号出力



$$t = t_{delay} / (1 - a)$$

ビームモニター開発①

読み出し系
の性能評価



テストベンチの構築

①初期評価

②改良後の評価

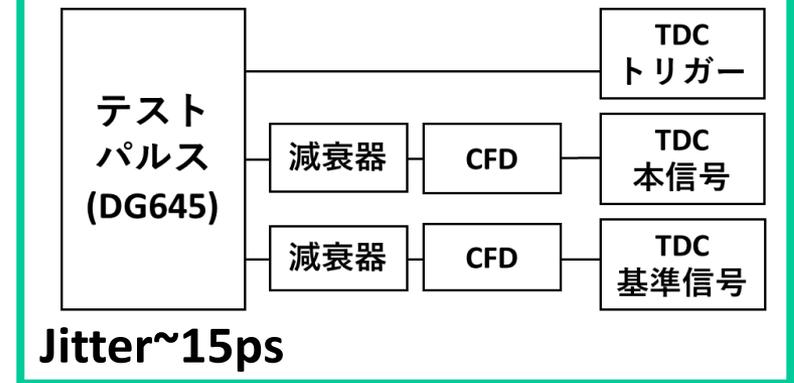


ビームモニター

の性能評価

遅延調整が可能な信号源を用いて、様々な入力信号時間差における読み出し系の性能評価を行う

性能評価の測定系



TDC CAEN V1290を使用

読み出し系の時間分解能

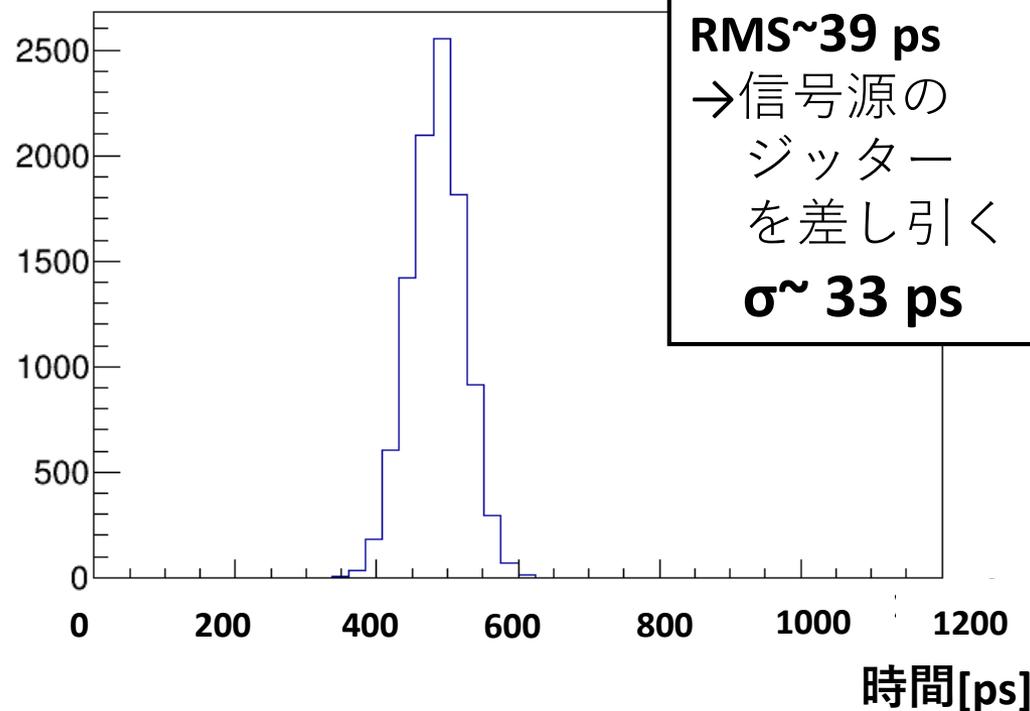
本信号と基準信号の
測定値の差を取り
時間情報を取得



RMSをもとに
時間分解能を評価
(TDC CAEN V1290
仕様書では $\sigma \sim 35$ ps以下)

信号数

時間分解能の評価



入力信号差0~3000 nsでの評価結果は $\sigma = 30 \sim 35$ ps

$\sigma = 20 \sim 30$ ps達成のために改善が必要

→TDCのキャリブレーションによって向上が見込まれる

ビームモニター開発②

読み出し系
の性能評価



テストベンチの構築
①初期評価
②改良後の評価



ビームモニター
の性能評価

MCPを含むビームモニター全体を評価するために、ミューオン以外の荷電粒子を用いたテストベンチの構築を行う

要求事項

- ・ 実験室内で測定が可能な大きさである
- ・ 十分な収量が得られる
- ・ 照射位置のコントロールが可能である

テストベンチの構築①初期評価

- ・ **荷電粒子** → 結晶表面にピコパルスレーザーを照射し光電効果により得られる**光電子**を使用
- ・ **位置調整** → 2次元的に**可動であるステージ**を使用

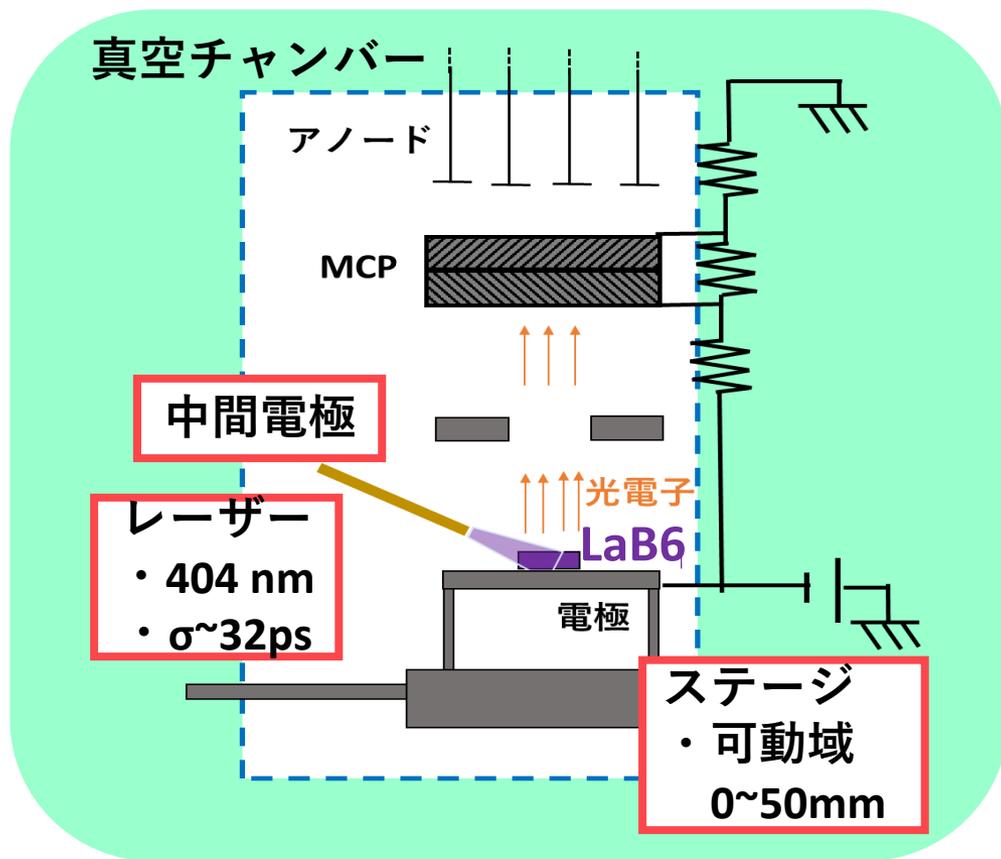
①初期評価

内部電場の一様性のため
中間電極を挿入する

→ **時間分解能** ~ 204 ps

**バンチ幅実証試験での
要求精度を満たす**

(詳細は **15pG107-9 (須江)**)

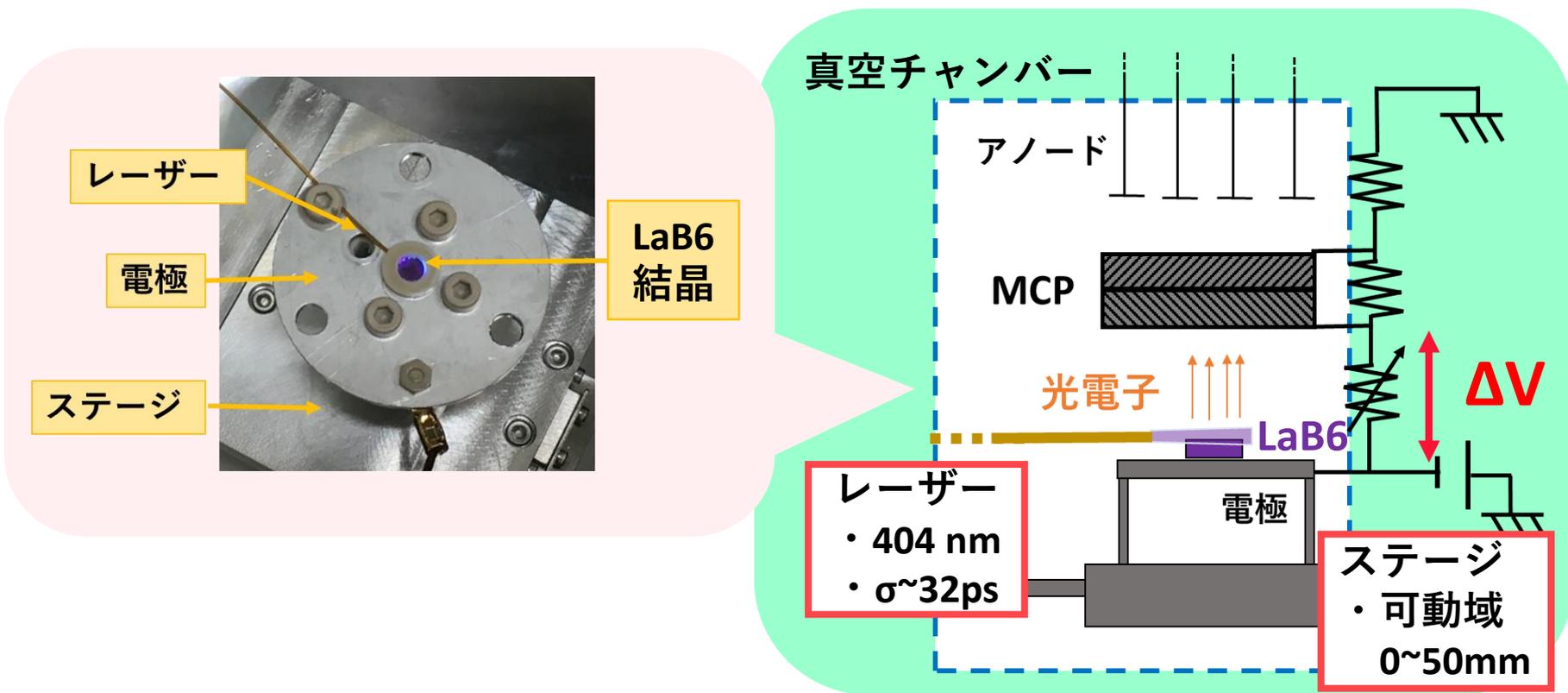


テストベンチの構築②改良後の評価

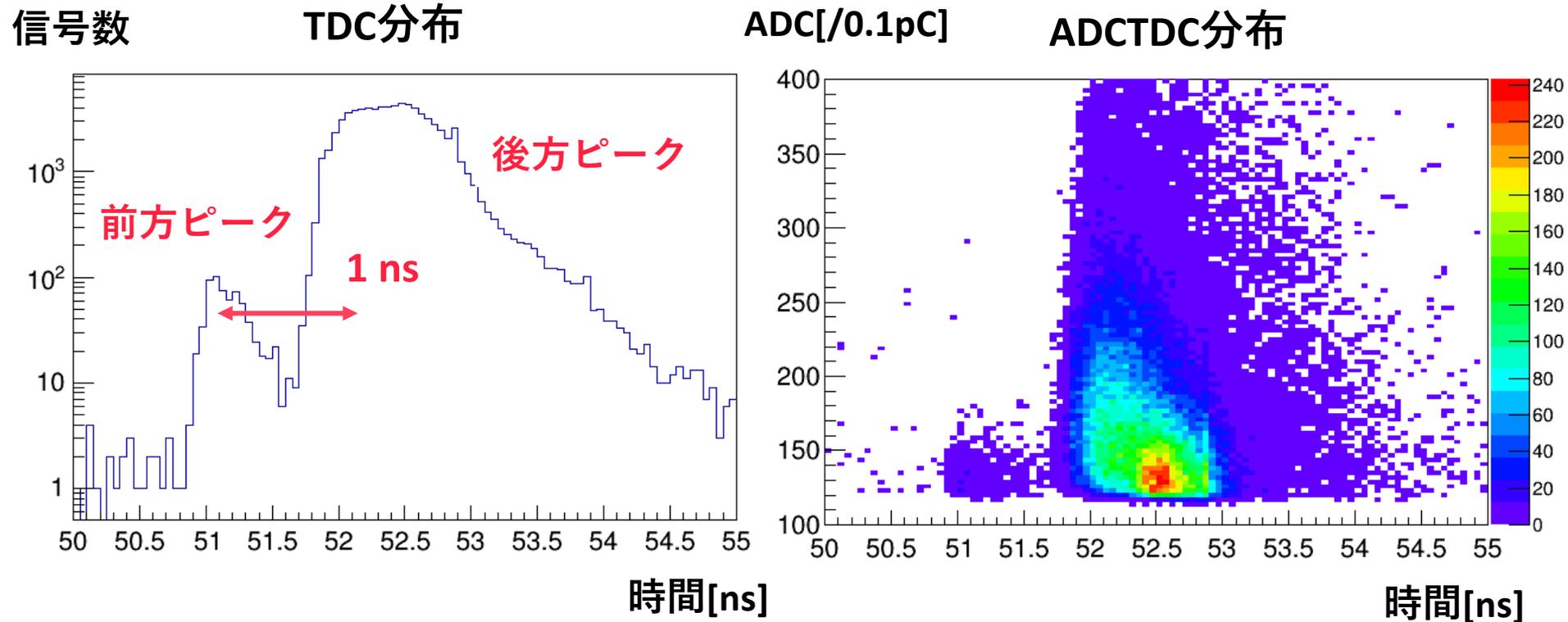
②改良後の評価

収量の増加と時間分解能の向上が必要

→中間電極を取り外し光電面とMCPの距離を近づける



テストベンチによる測定



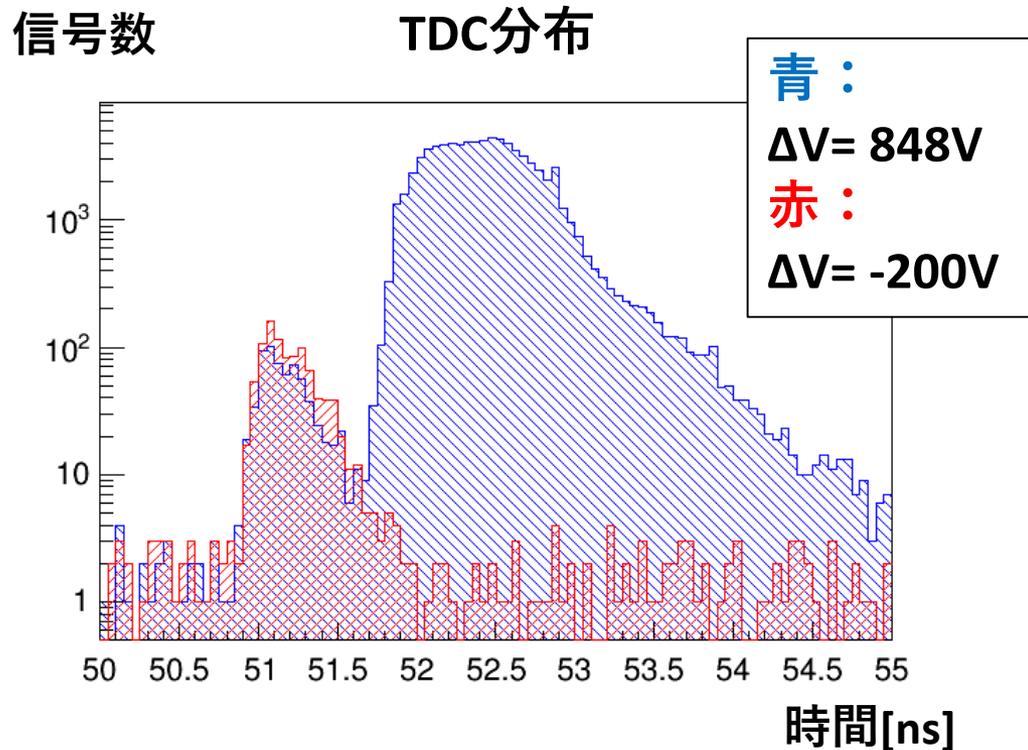
レーザーに同期かつ時間分解能400 ps以下の信号を測定できていることを確認

→2つのピークの発生過程同定のために異なるセットアップで測定を行った

測定1:光電面とMCP表面間の電位差(ΔV)を変化

➤結晶由来の光電子によるピークの特定

→減速される向きに ΔV を設定



- ・前方ピークは存在
→電場の影響を受けない
- ・後方ピークが消失
→電場の影響を受ける

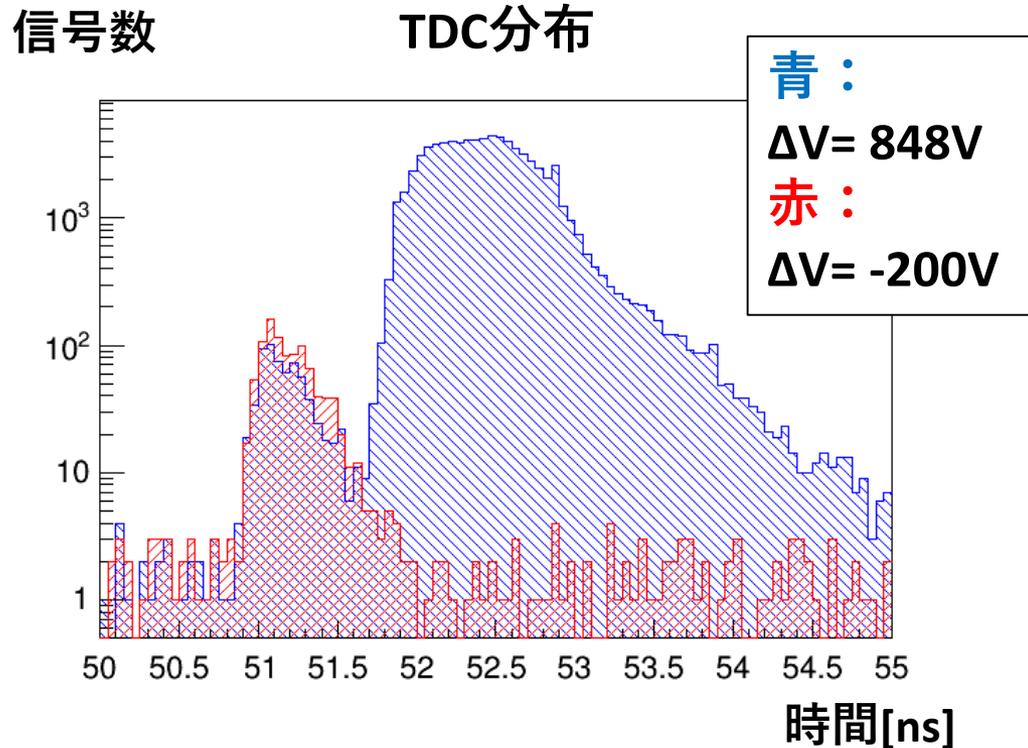
後方ピーク：RMS \sim 360 ps

→元々設計していた結晶由来の光電子と結論した

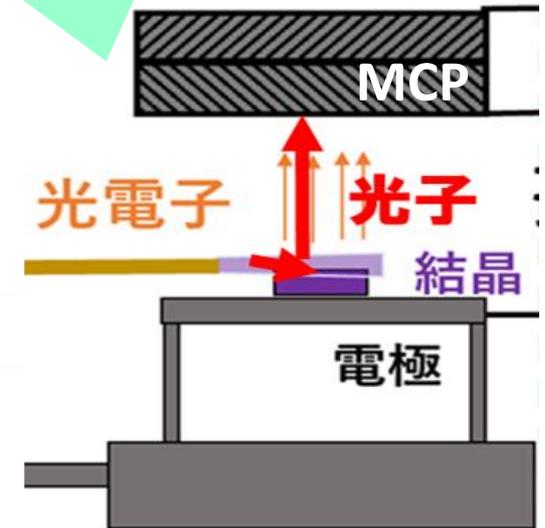
測定1:光電面とMCP表面間の電位差(ΔV)を変化

➤結晶由来の光電子によるピークの特定

→減速される向きに ΔV を設定



結晶表面での反射
→MCP表面で光電子発生
が考えられる



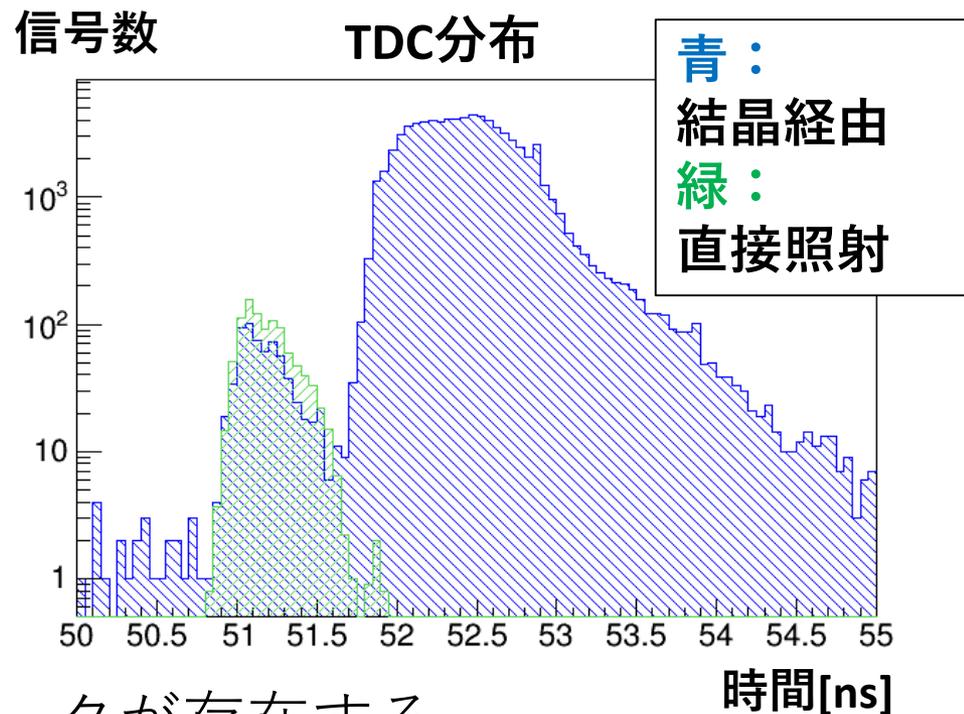
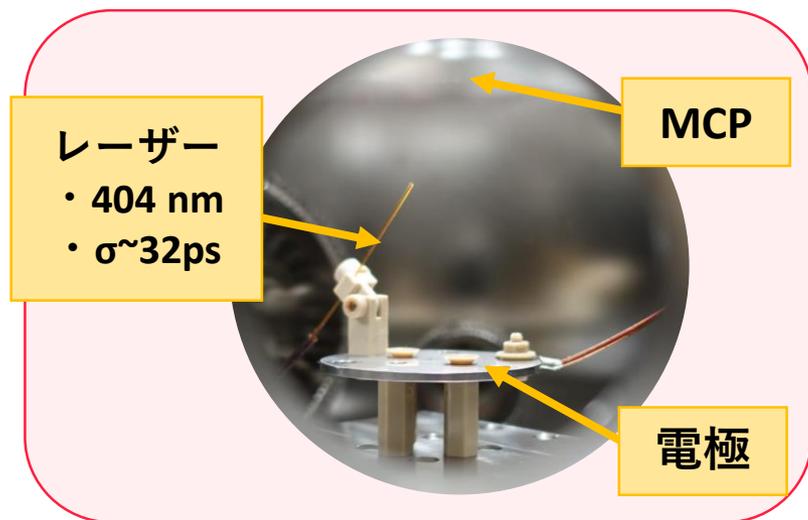
前方ピークの候補

- ①ノイズ→クロストーク、レーザー確認済み
- ②MCP表面由来の光電子→レーザー直接照射測定を行う

測定2:レーザー直接照射測定

➤MCP表面由来の光電子によるピークの検証

→結晶を取り除きレーザーをMCPに直接照射



レーザーを直接照射してもピークが存在する

前方ピーク : RMS \sim 154 ps

→ MCP表面由来の光電子と結論した

結論と展望

➤ 結論

J-PARC muon $g-2$ /EDM実験のために**時間方向のビームモニターの開発**を行っている

☑読み出し系の**時間分解能は35 ps以下**であることを確認できた

☑性能評価に必要なテストベンチを立ち上げている

- 初期性能評価結果では**時間分解能は204 ps**であり、**バンチ幅実証試験への要求を達成した**
- 収量の増加と時間分解能向上のために行ったテストベンチの改良後も**レーザーに同期した信号を検出**できた
- 2つのピークの発生過程の同定を測定を通して行っており、**異なる発生過程による光電子**であると結論した

➤ 展望

MCPを含むビームモニター全体の時間分解能の評価に向けて、

□**前方ピークと後方ピークのRMS値の違いの理解**を行う

□可動ステージを用いた**時間分解能の照射位置依存性を理解する**

Backup

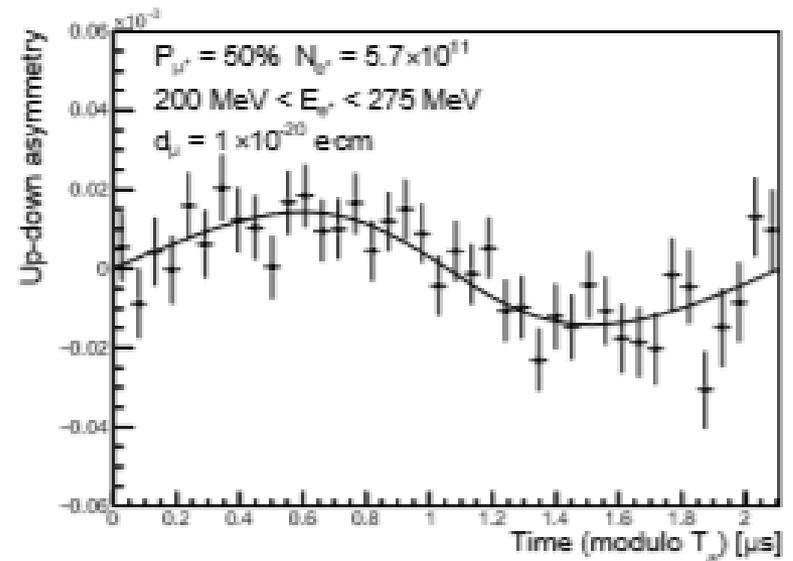
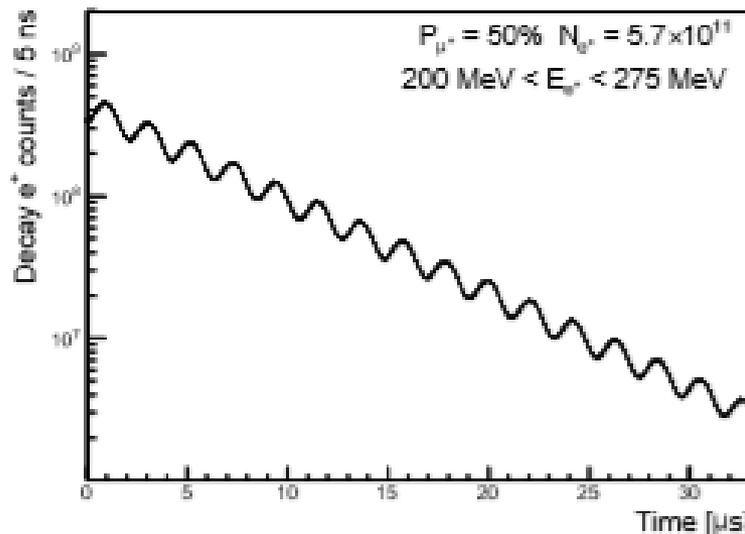
精密測定

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

➤ **g-2** : 第2項の消去 → $\vec{\omega}_a$ と \vec{B} を精密測定

- BNL E821実験 : マジック運動量 $p=3.094 \text{ GeV}/c$ を使用
- J-PARC E34実験 : $\vec{E} = \mathbf{0}$ とする

➤ **EDM** : スピンの回転軸の磁場に対する傾きを感度よく測定

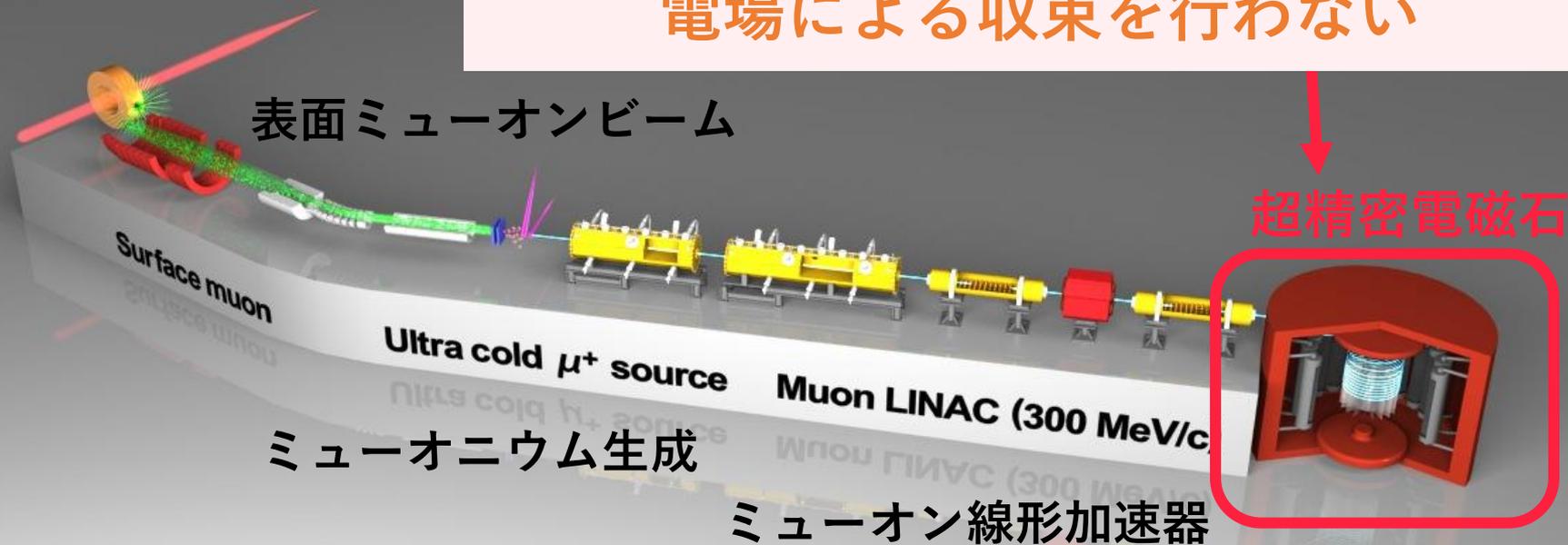


E34実験におけるシミュレーション

J-PARC E34実験

ミューオンを磁場中に蓄積し円運動
 →崩壊陽電子より**スピンの歳差運動**を測定
 系統誤差削減のため蓄積リングにおいて
電場による収束を行わない

3 GeV 陽子ビーム



先行研究

E34

$g-2$

540ppb

460→100ppb

EDM

$0.2 \times 10^{-19} [e \cdot cm]$

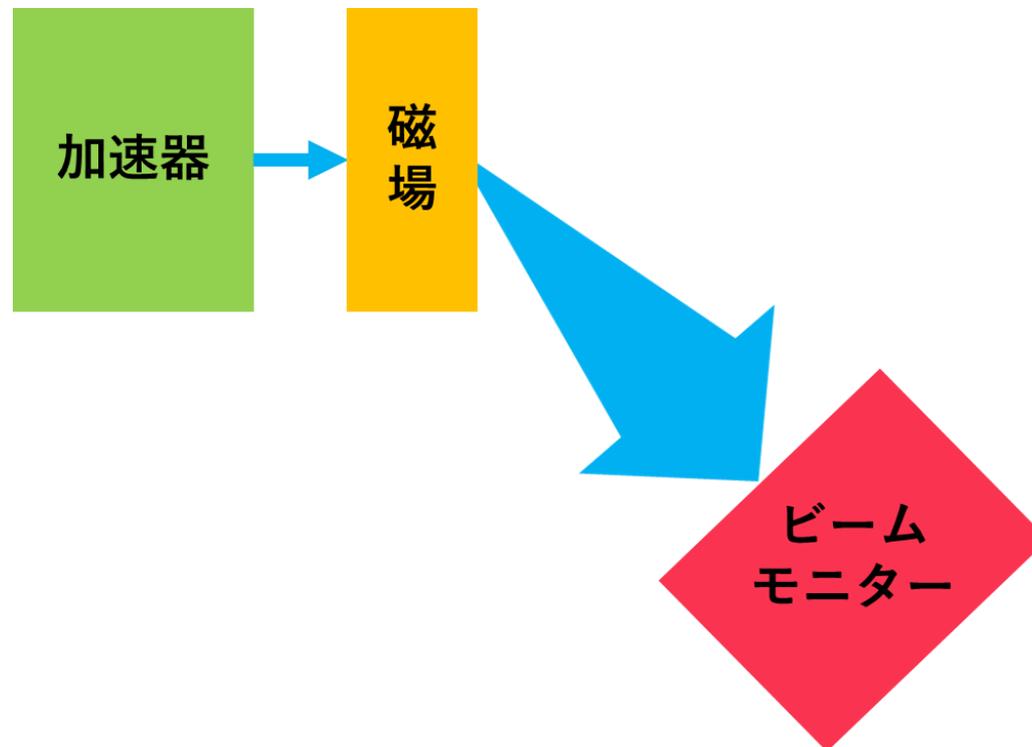
$1 \times 10^{-21} [e \cdot cm]$

運動量分散による広がり

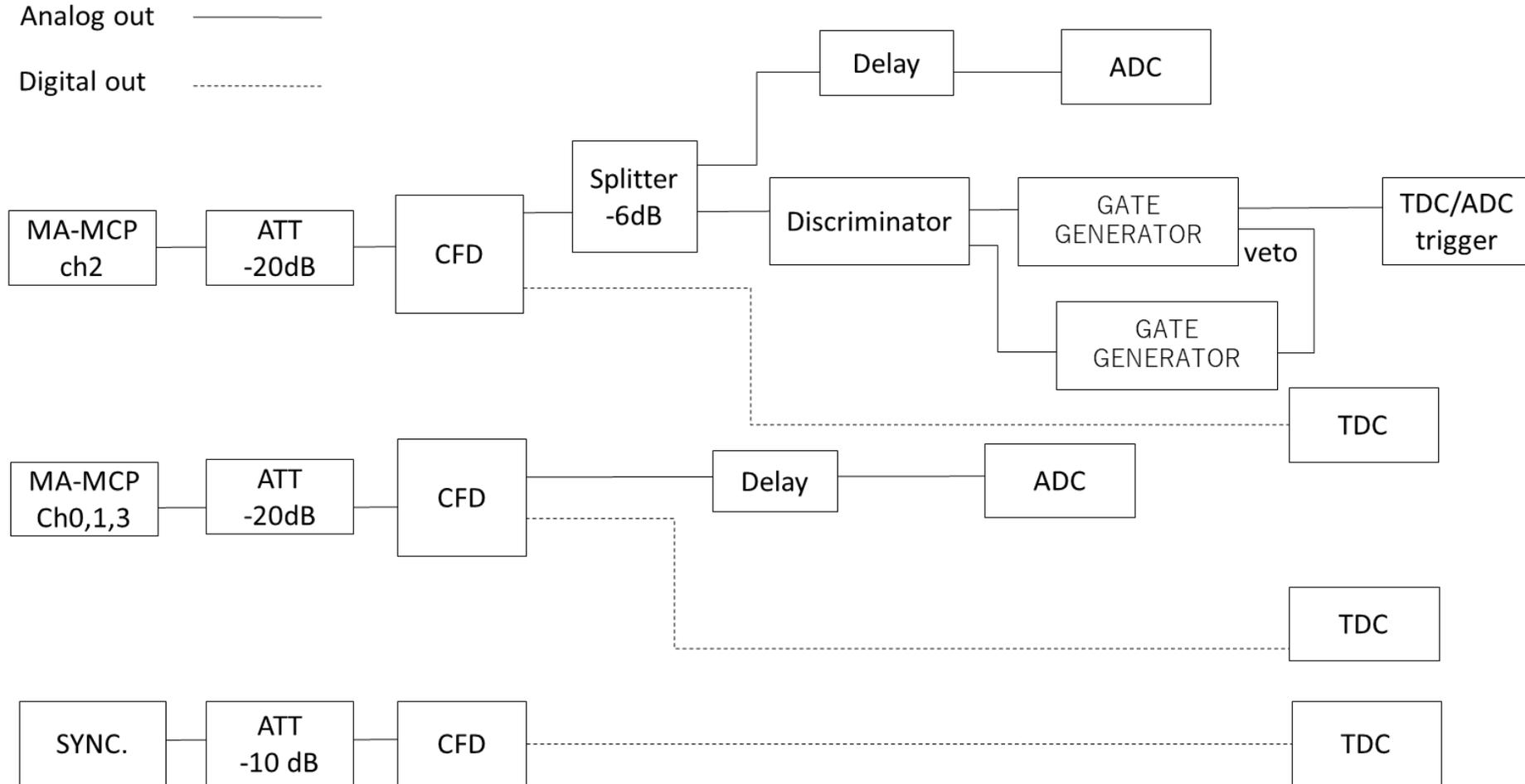
偏向電磁石によって軌道を曲げる際、
曲率半径は運動量の大きさに比例

→ **運動量の違い**により

ビームモニターへの**到達位置と時間にばらつきが生じる**



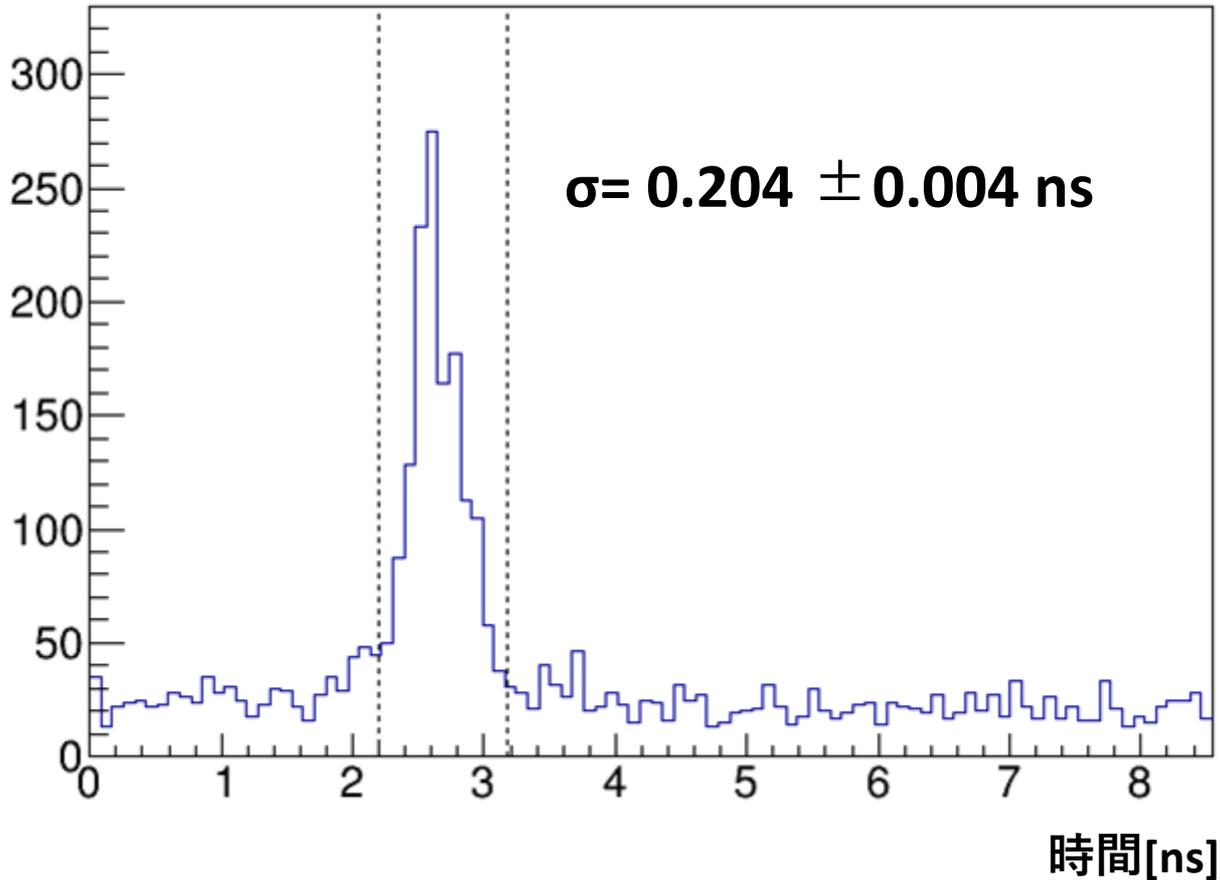
測定系：ビームモニターの時間分解能の評価



MCP ch2によるセルフトリガー

初期性能評価

信号数

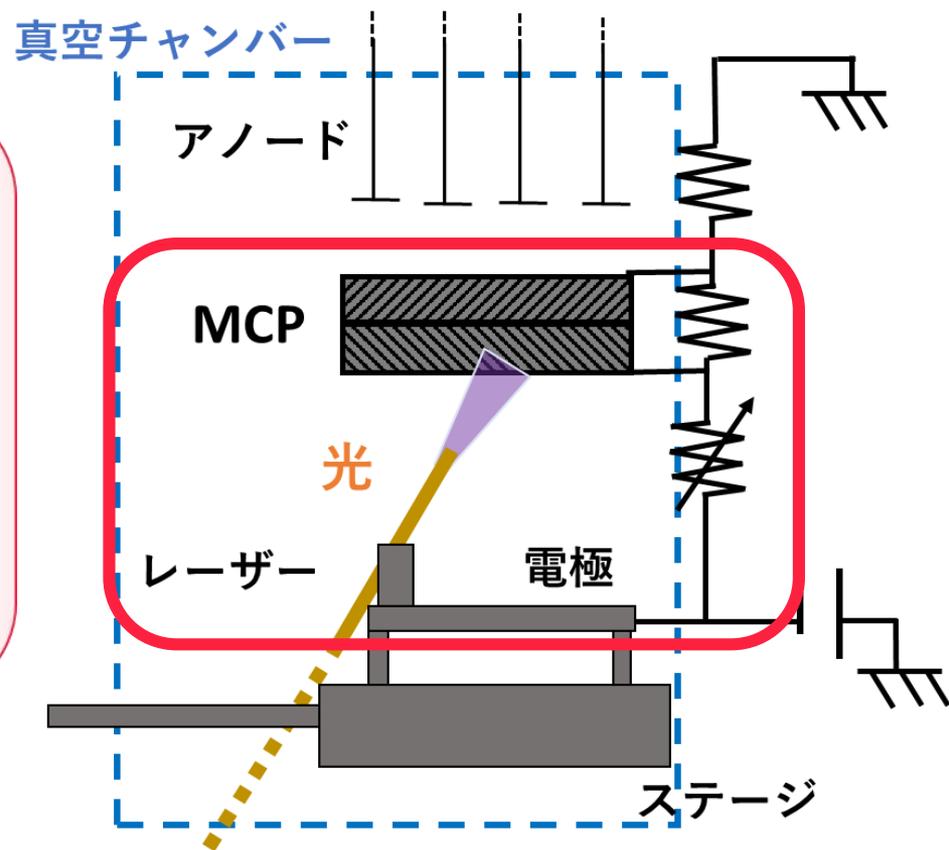
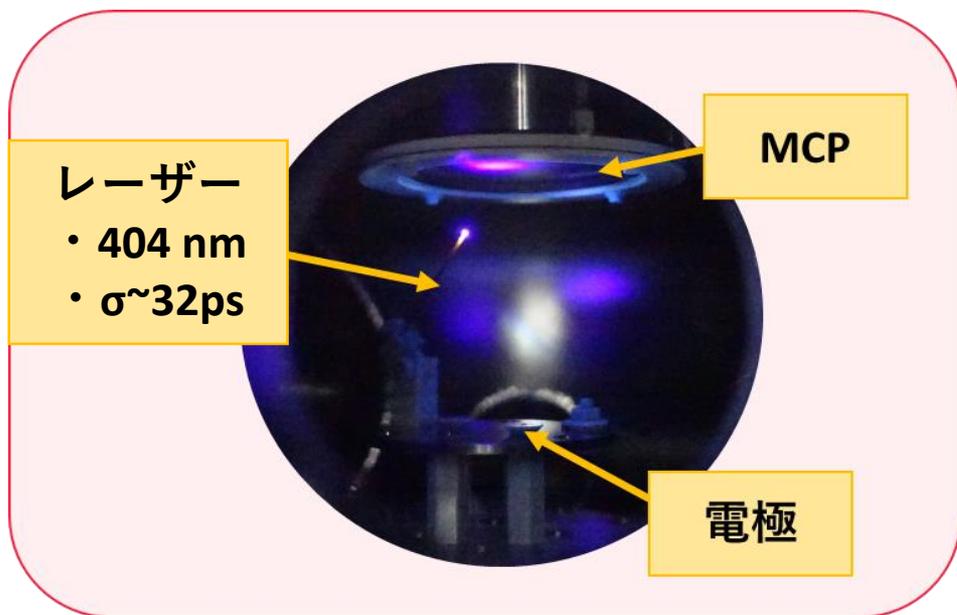


信号レート : 0.4 Hz

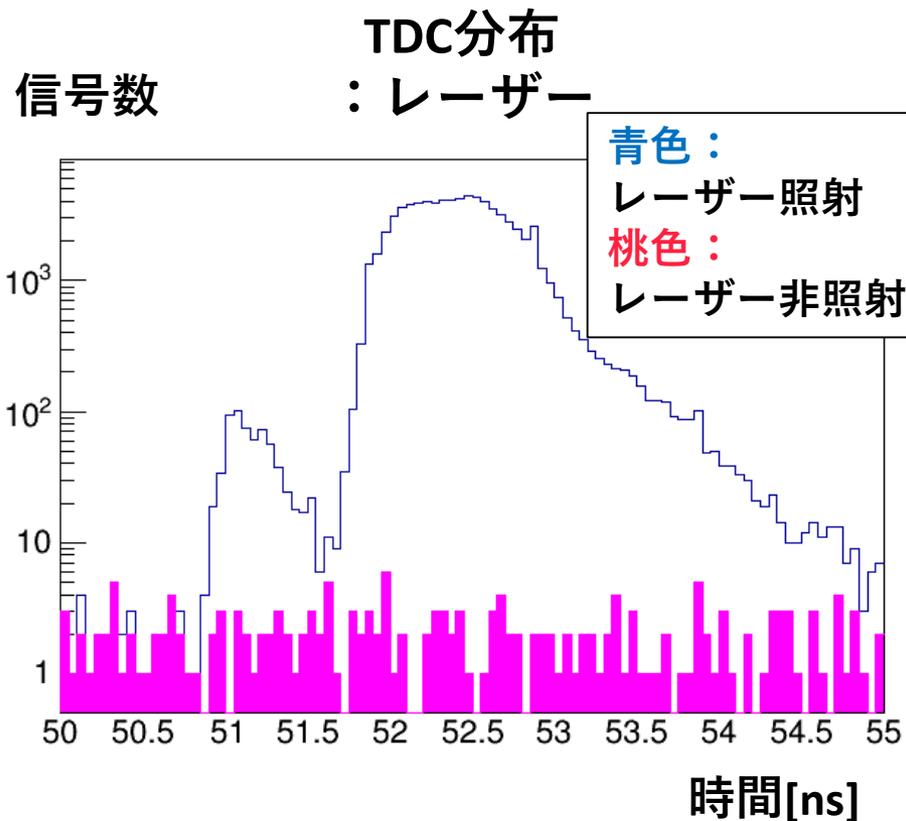
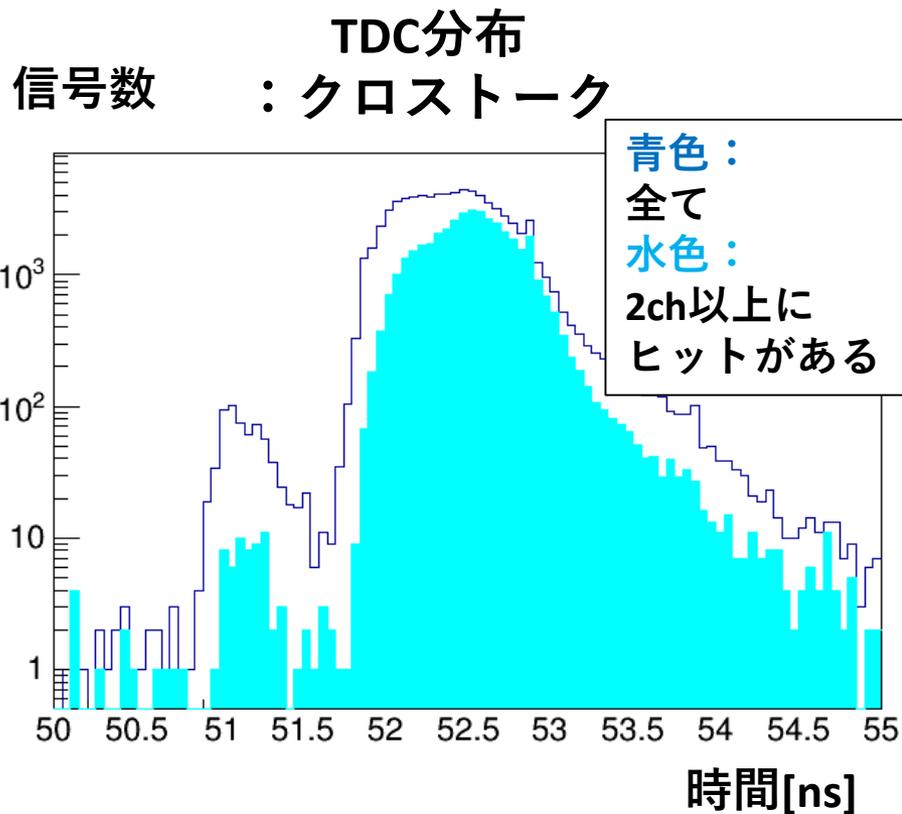
立下りにテールがみられる → 理解と分離が時間分解能向上につながる

テストベンチ③

レーザー直接照射



ノイズの確認



信号数

全て : 160460 count

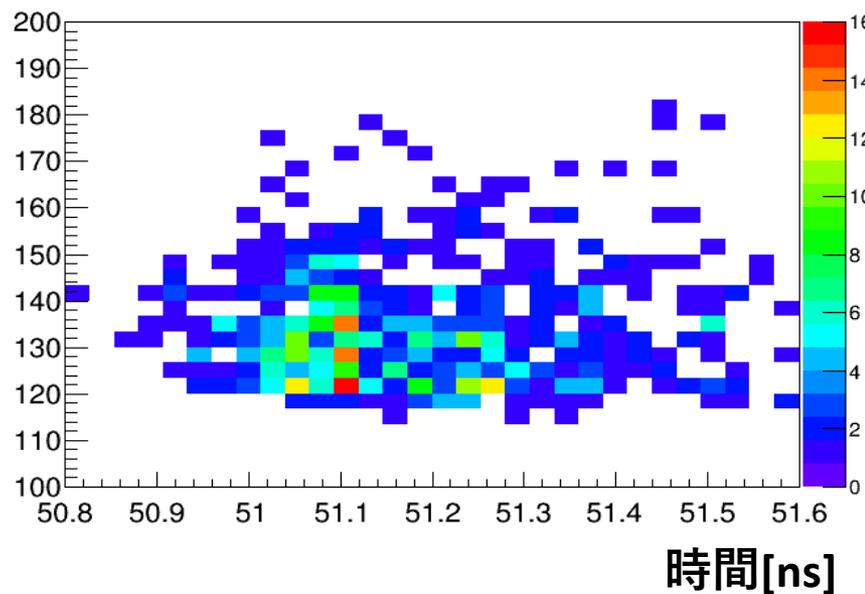
クロストーク : 85064 count レーザーノイズ : 3432 count

ADCTDC比較

結晶經由

ADC[/0.1pC]

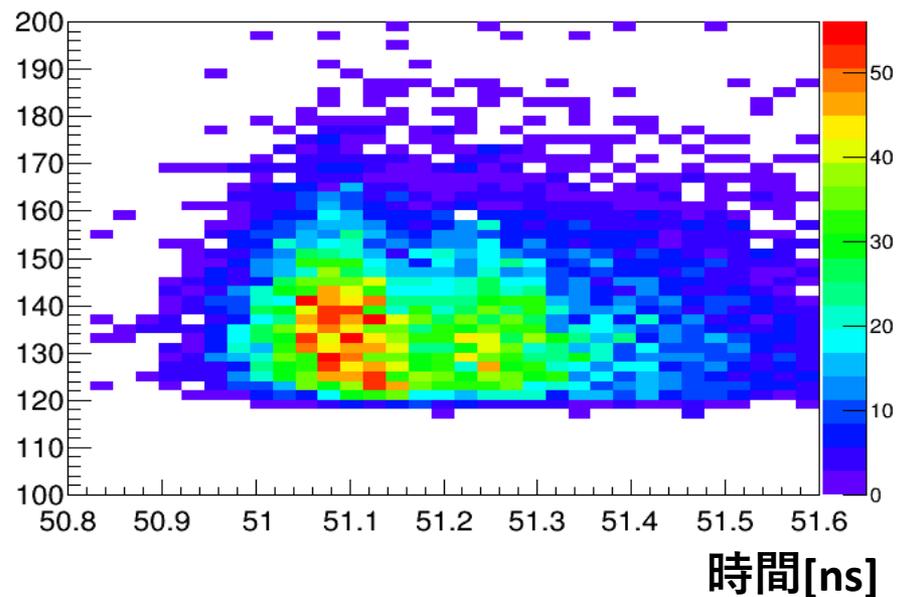
ADCTDC分布



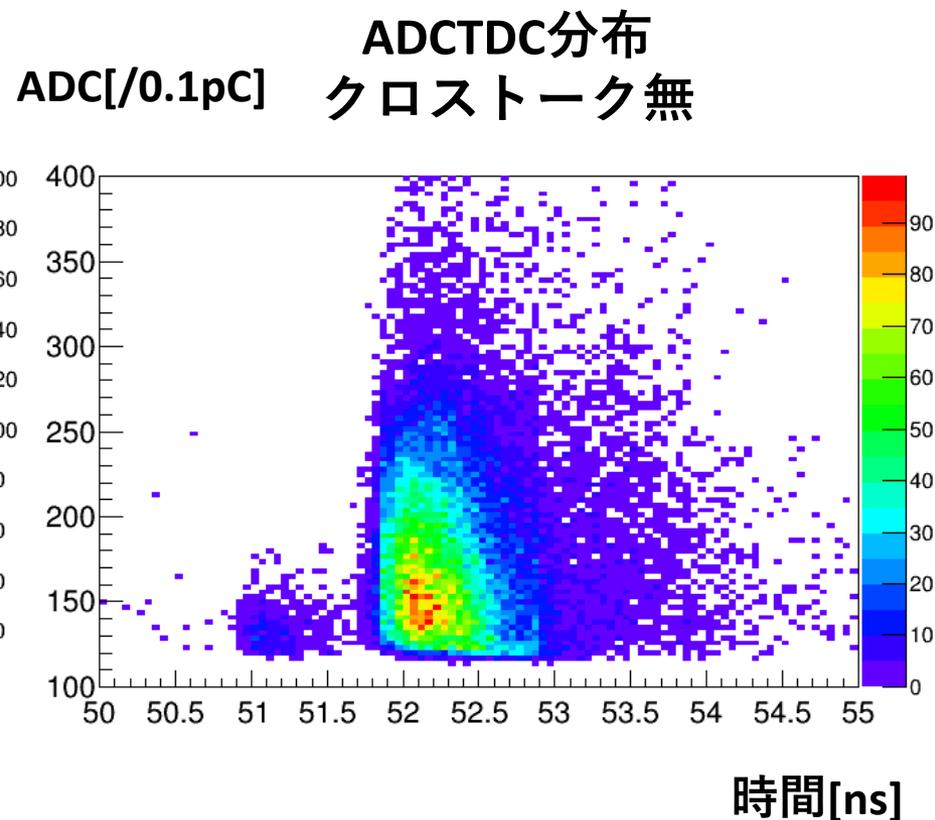
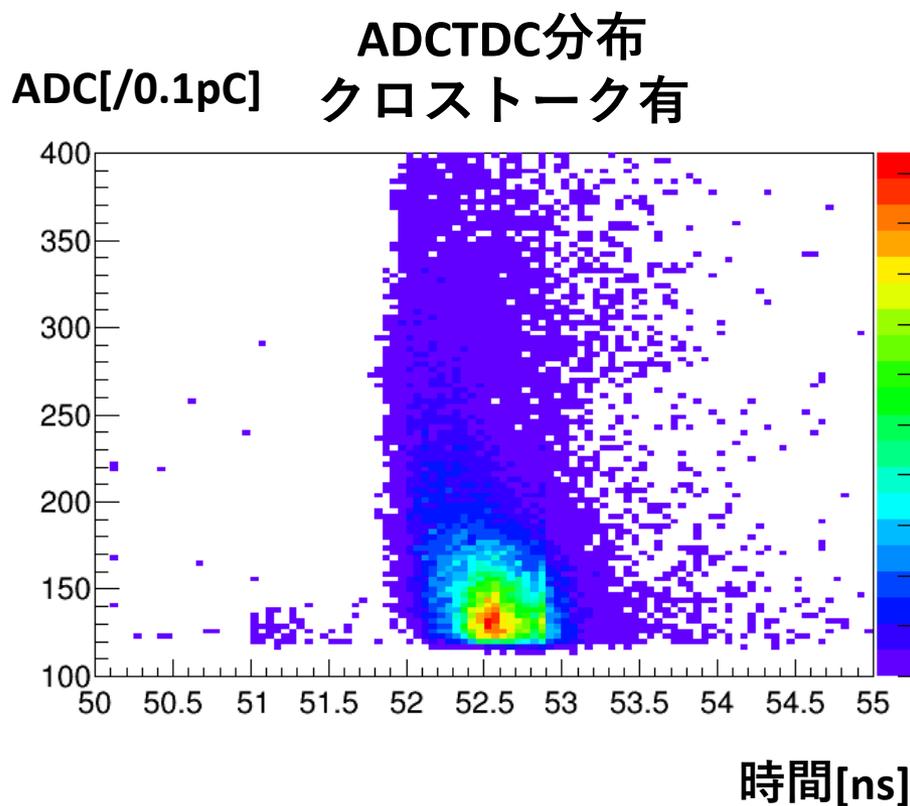
レーザー直接照射

ADC[/0.1pC]

ADCTDC分布



クロストーク



- 電荷量：クロストーク無 > クロストーク有
- 時間差～320 ps
- 比：有/無 = 1.1

電位差と飛行時間の変化の評価

等加速度運動を考えると、

$$t = \sqrt{\frac{2d}{a}} \quad a = \frac{qV}{m_e d}$$

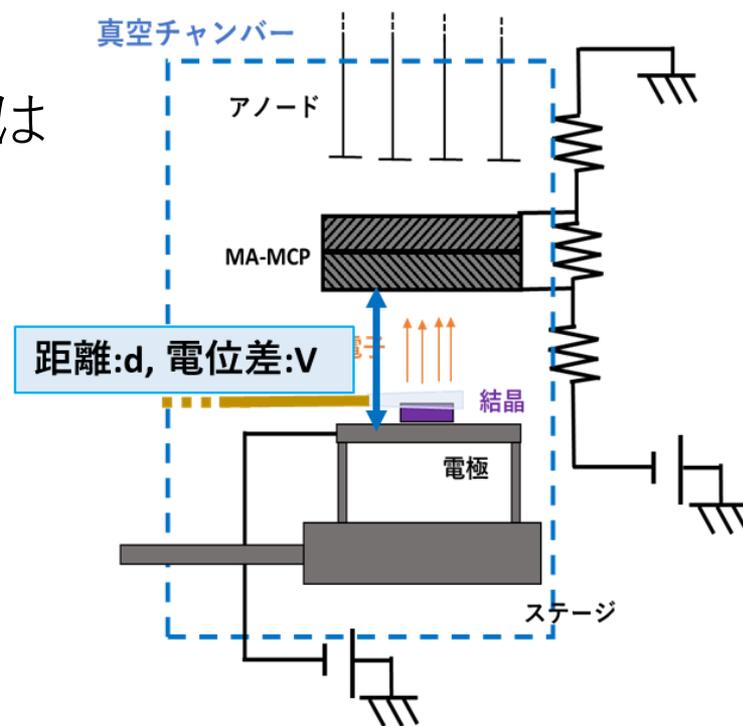
ここで、 d :光電子源とMCP表面間の距離 q :電子の電荷 m_e :電子の質量
 V :光電子源とMCP表面間の電位差

電位差の変化による飛行時間の変化は

$$\Delta t = \sqrt{2m_e d^2} \left(\frac{1}{\sqrt{qV}} - \frac{1}{\sqrt{qV'}} \right)$$

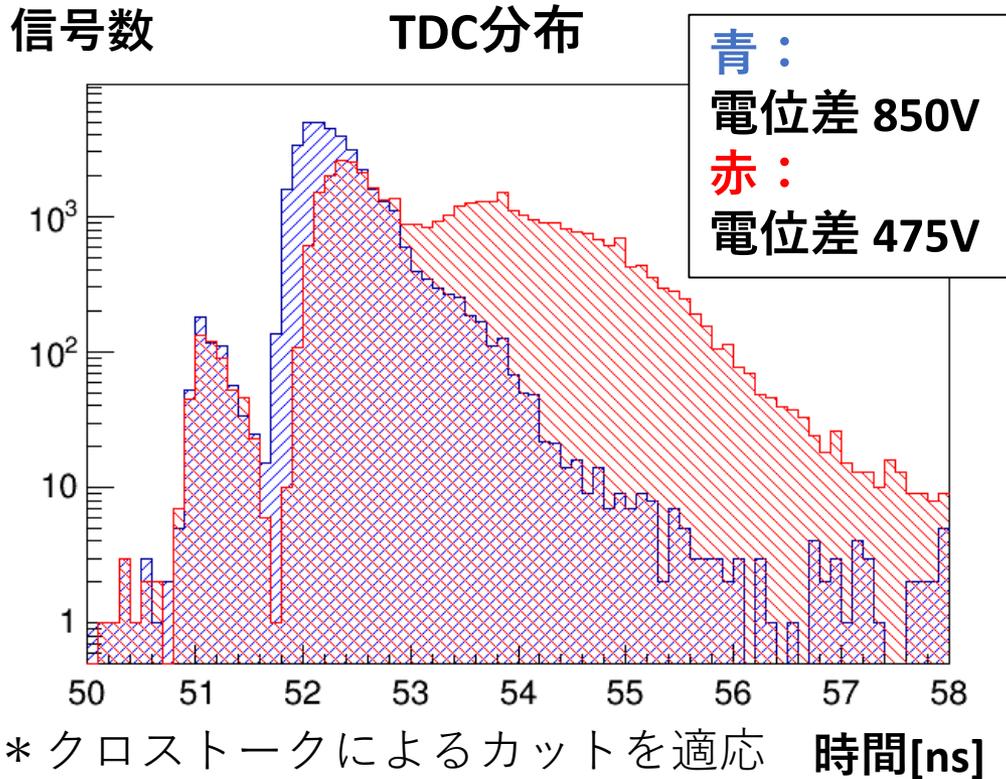
従って、 $V-V'=375$ V, $d=10$ mm
の場合の到達時間差は

$\Delta t = 390$ ps と予測できる



電位差を変えた測定

光電子を加速する向きで ΔV を変化



電位差とピーク位置

電位差[V]	前方[ns]	後方[ns]
475	51.19	52.54
850	51.17	52.2

電位差と時間差

ΔV の差[V]	到達時間差: 期待値[ps]	到達時間差: 測定値[ps]
375	390	340

- 電位差による到達時間差と測定値の差が概ね一致
- $\Delta V = 475V$ の時にピークが増えたことは考察中