

# 高時間分解能縦方向ビームプロファイルモニターを用いた RFQによる加速ミューオンのバンチ構造測定

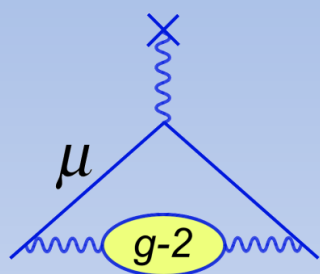
**須江祐貴**<sup>A</sup>, 飯嶋徹<sup>A, B</sup>, 飯沼裕美<sup>C</sup>, 石田勝彦<sup>D</sup>, 居波賢二<sup>A</sup>, 牛澤昂大<sup>E</sup>, 大谷将士<sup>F</sup>,  
河村成肇<sup>F</sup>, 北村遼<sup>G</sup>, 近藤恭弘<sup>G</sup>, 齊藤直人<sup>F</sup>, 下村浩一郎<sup>F</sup>, 竹内佑甫<sup>H</sup>, 中沢雄河<sup>C</sup>,  
長谷川和男<sup>G</sup>, ニツ川健太<sup>F</sup>, 三宅康博<sup>F</sup>, 三部勉<sup>F</sup>, 森下卓俊<sup>G</sup>, 安田浩昌<sup>I</sup>,  
山崎高幸<sup>F</sup>, 四塚麻衣<sup>A</sup>

**名大理**<sup>A</sup>, 名大KMIB<sup>B</sup>, 茨大理工<sup>C</sup>, 理研<sup>D</sup>, 総研大<sup>E</sup>, 高工研<sup>F</sup>, JAEA<sup>G</sup>, 京大理<sup>H</sup>, 東大理<sup>I</sup>

# ミュオン双極子モーメントの精密測定

## 異常磁気モーメント $g-2$

実験結果と標準理論からの予測値の間には  $3.7\sigma$  のずれが見えている



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

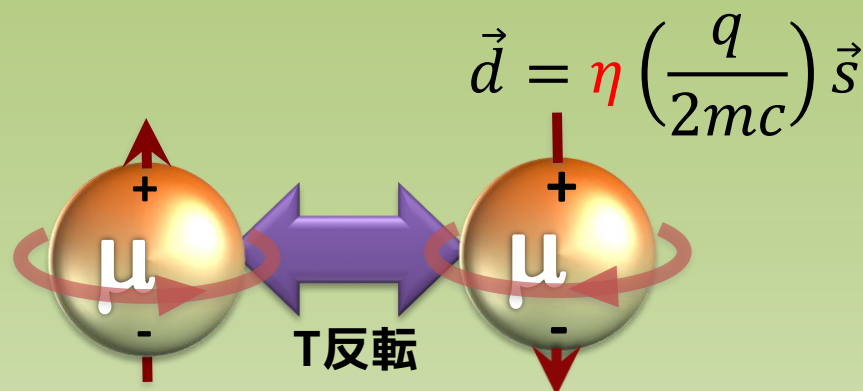
$$\alpha_{\mu} = \alpha_{\mu}^{\text{QED}} + \alpha_{\mu}^{\text{EW}} + \alpha_{\mu}^{\text{QCD}} + \alpha_{\mu}^{\text{BSM?}}$$

540 ppb

現在の測定精度・感度

## 電気双極子モーメント EDM

0でないEDMの測定は時間反転対称性の破れの直接観測につながる



$< 1.8 \times 10^{-19} \text{ e} \cdot \text{cm}$

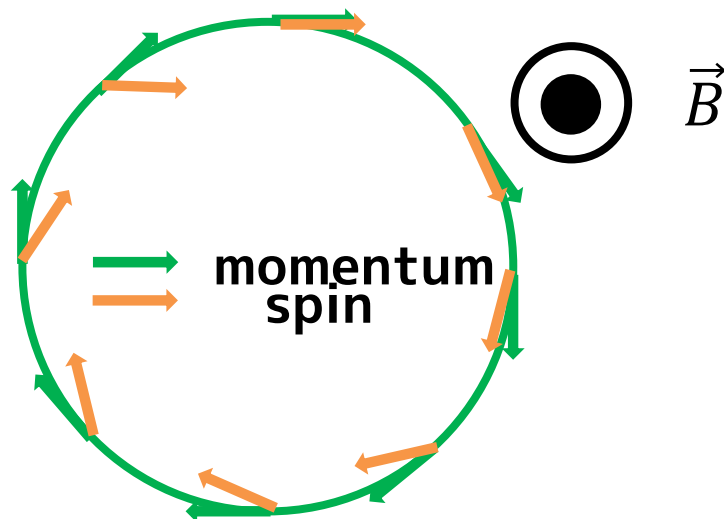
460  $\Rightarrow$  100 ppb

J-PARC muon  $g-2$ /EDM 実験

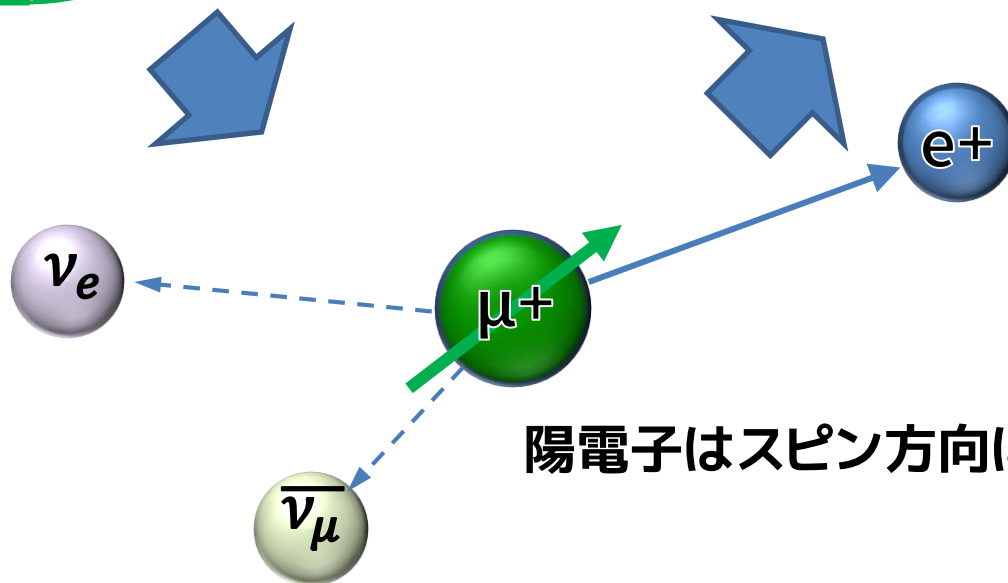
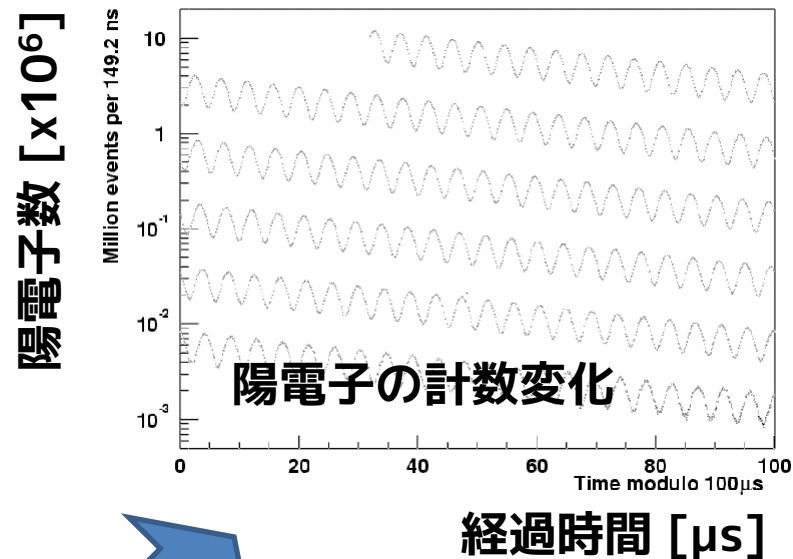
$1 \times 10^{-21} \text{ e} \cdot \text{cm}$

# J-PARCで精密測定実験を目指す

ミュオンビームを磁場中で回転



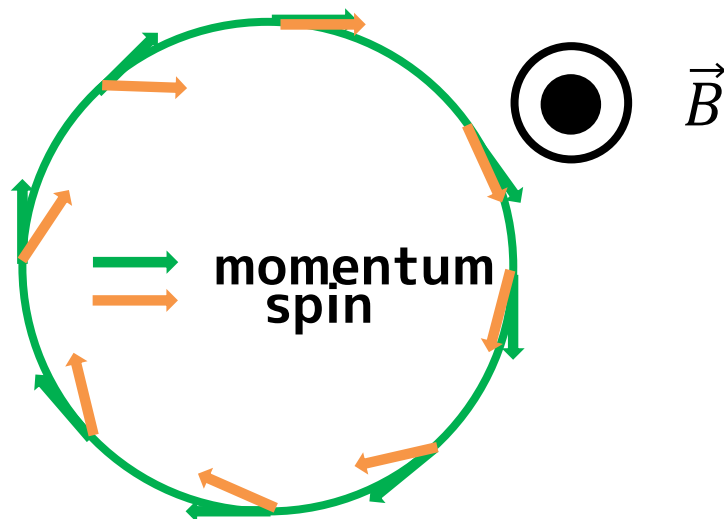
崩壊陽電子からスピンの歳差運動を測定



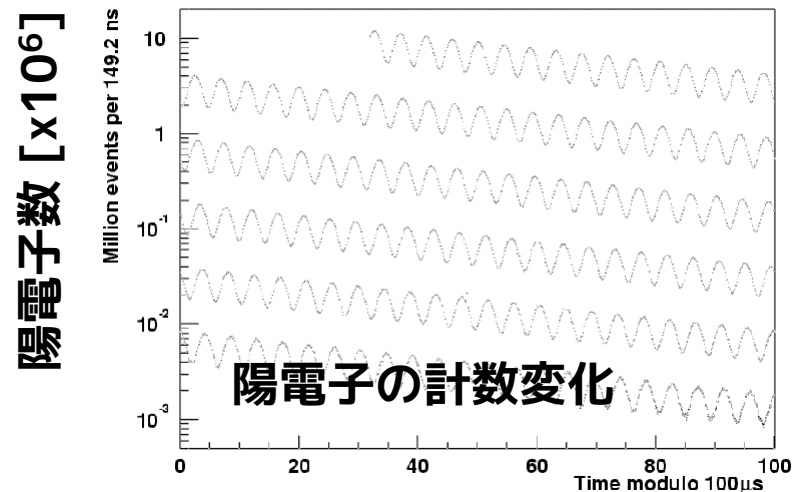
陽電子はスピン方向に放出されやすい

# J-PARCで精密測定実験を目指す

ミュオンビームを磁場中で回転



崩壊陽電子からスピンの歳差運動を測定



先行実験における主要な系統誤差 [ppm]

0 0.03 0.06 0.09 0.12 0.15

ミュオンビームの  
エミッタンスに由来する



ゲイン変化



パイルアップ

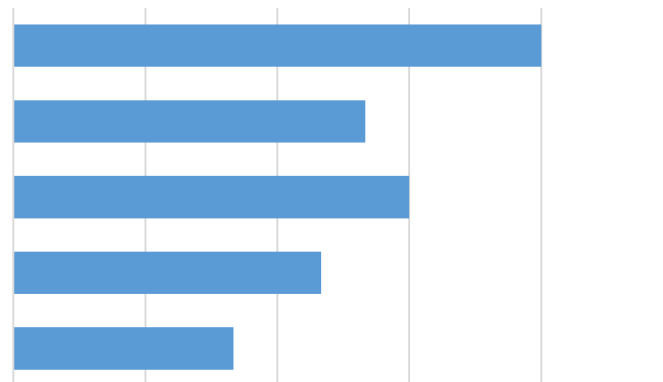


ミュオン散失



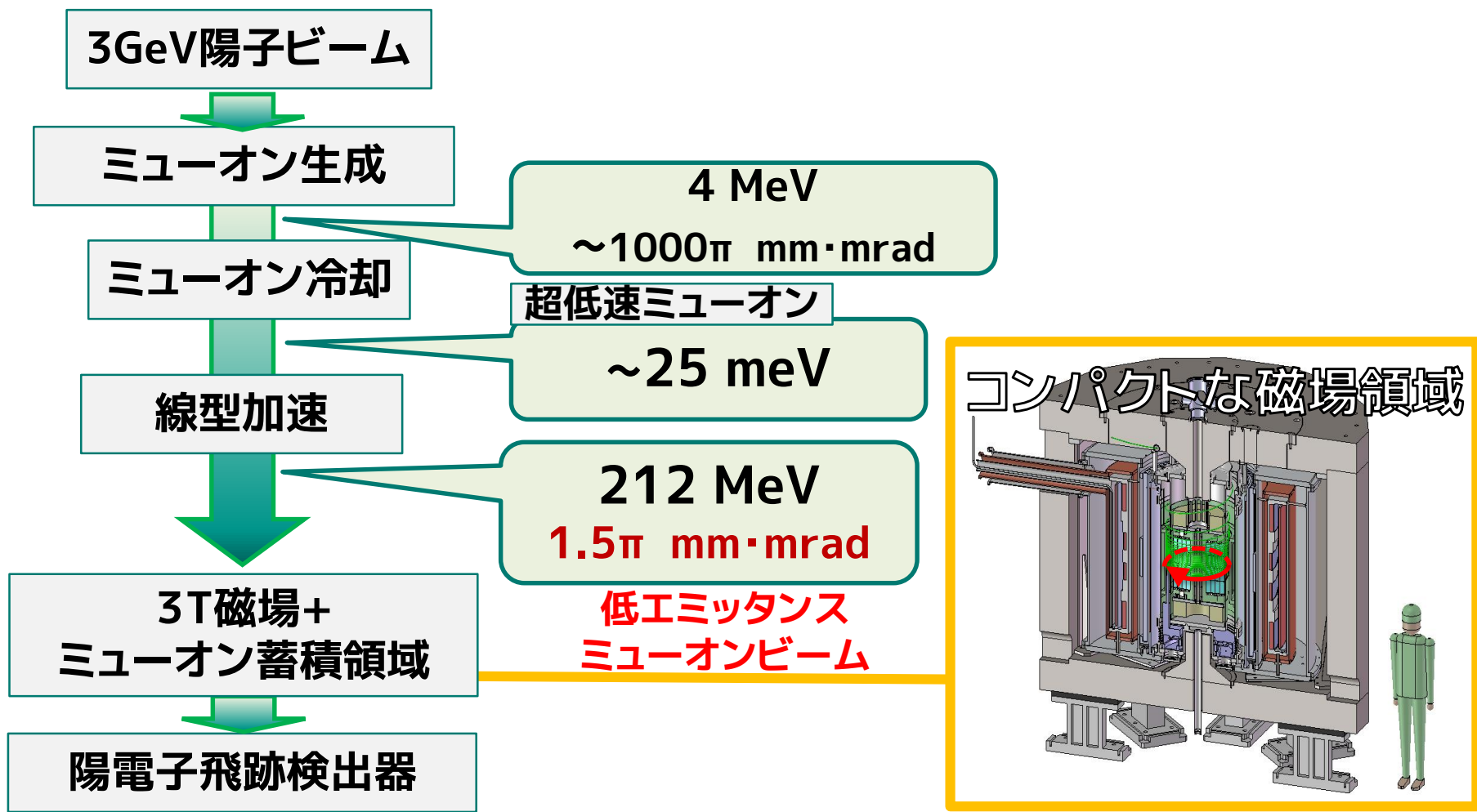
Coherent Betatron  
Oscillation

電場とピッチ



# J-PARC muon g-2/EDM 精密測定実験

従来の実験(BNL・FNAL)とは異なる手法を用いた精密測定



# ミュオン線形加速の現状と課題

## 技術的課題

ミュオンの高周波加速は前例がない  
低エネルギー・低強度のミュオンビーム診断技術が未確立

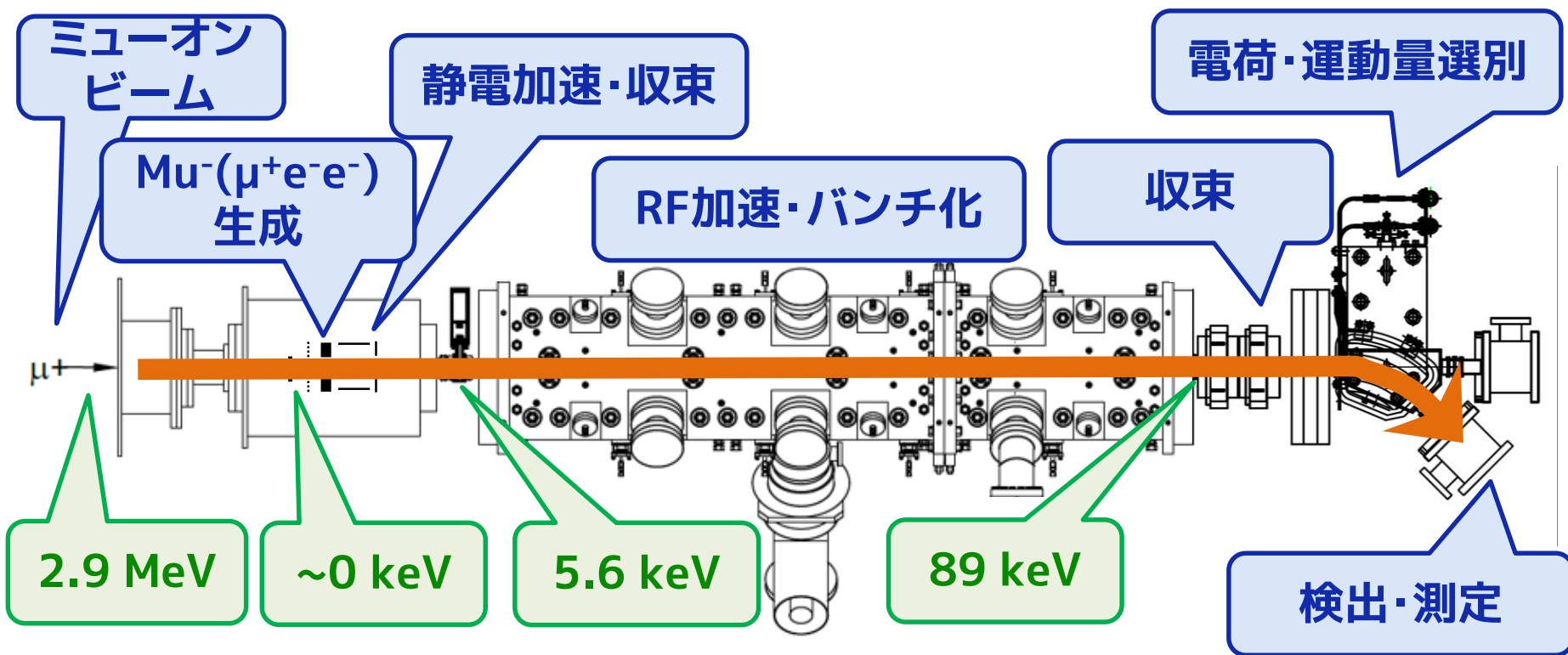
## 現状=加速実証段階

2017年10月 ミュオンRF加速を達成  
2017年12月 横方向ビームプロファイルの測定を実施

## 残る課題と本研究

加速器間のビーム調整が不適切だとエミッタンスは増大する  
→低速部における時間方向の  
ビームプロファイル(バンチ構造)モニターを開発  
→低速の加速ミュオンのバンチが測定可能か**検証**

# ミュオン加速実証試験セットアップ



89 keVのRF加速Mu<sup>-</sup>(μ<sup>+</sup>e<sup>-</sup>e<sup>-</sup>)バンチを生成

- エネルギーの単一化
- 背景事象(μ<sup>+</sup>)との分離

# ミューオン加速実証試験セットアップ

2018/10/2~11/8: J-PARC MLF D2

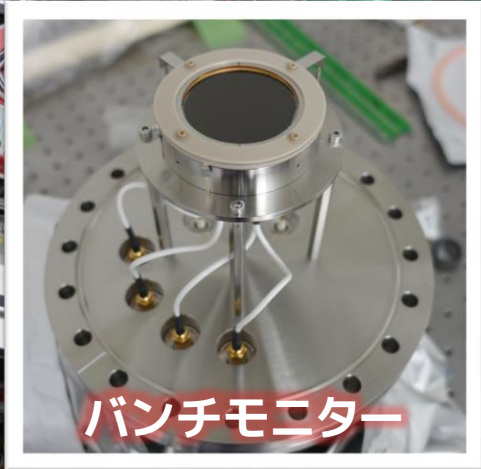
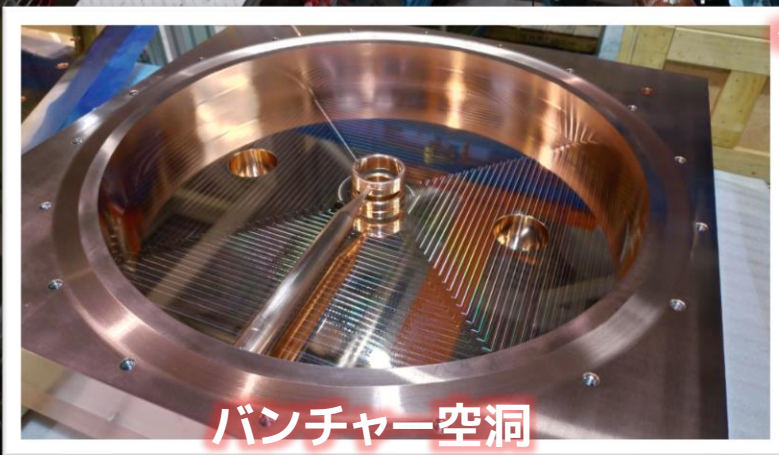
J-PARC  
ビームポート

RFQ

四重極電磁石x2

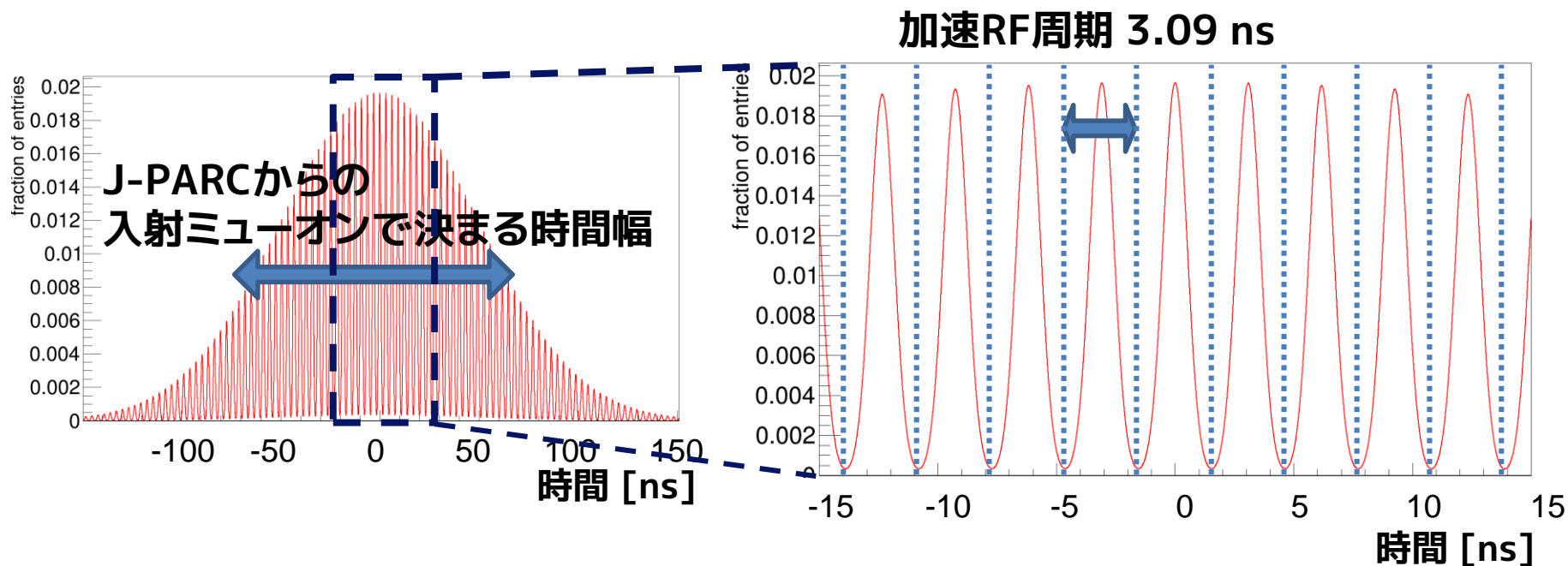
偏向電磁石

Soa レンズ





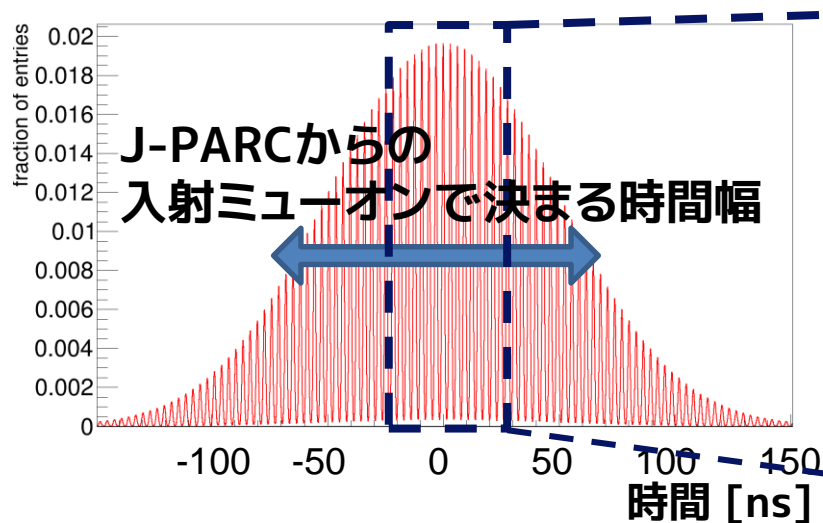
# 予想されるバンチ構造と問題



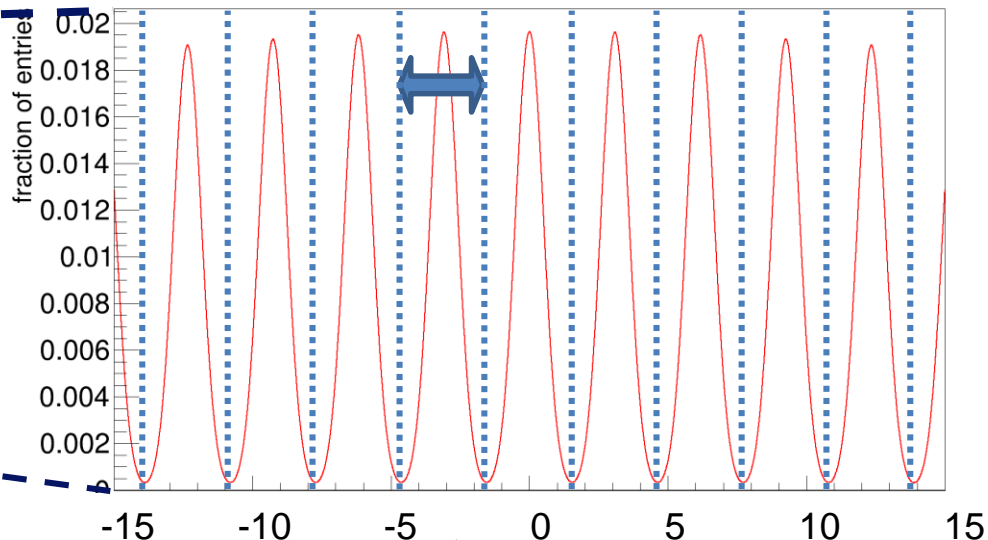
バンチモニター製作のために、測定するバンチを考える

実証段階のため加速 $\mu^-$ レートは1.3 mHz  
 → 20000回の入射で加速 $\mu^-$ は1つ  
 このバンチのどこかにやってくる

# 予想されるバンチ構造への対策

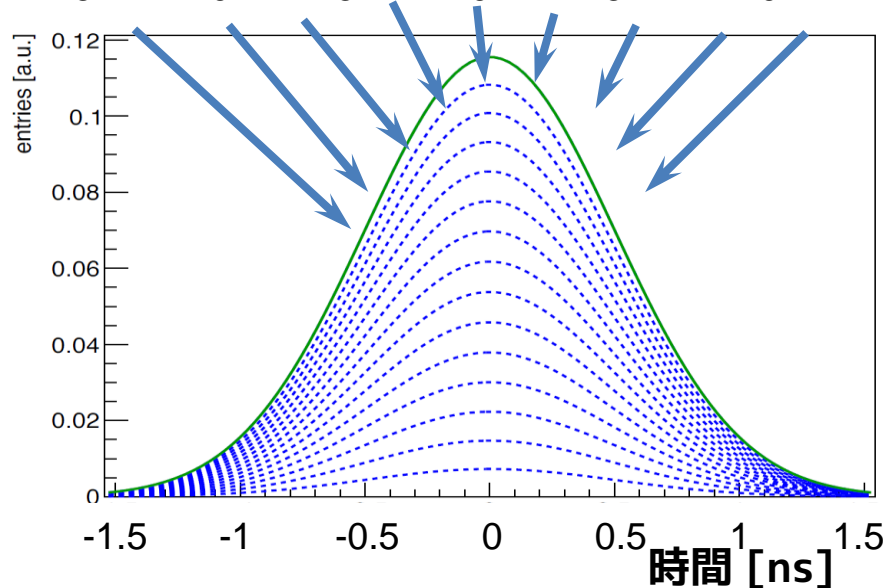


加速RF周期 3.09 ns

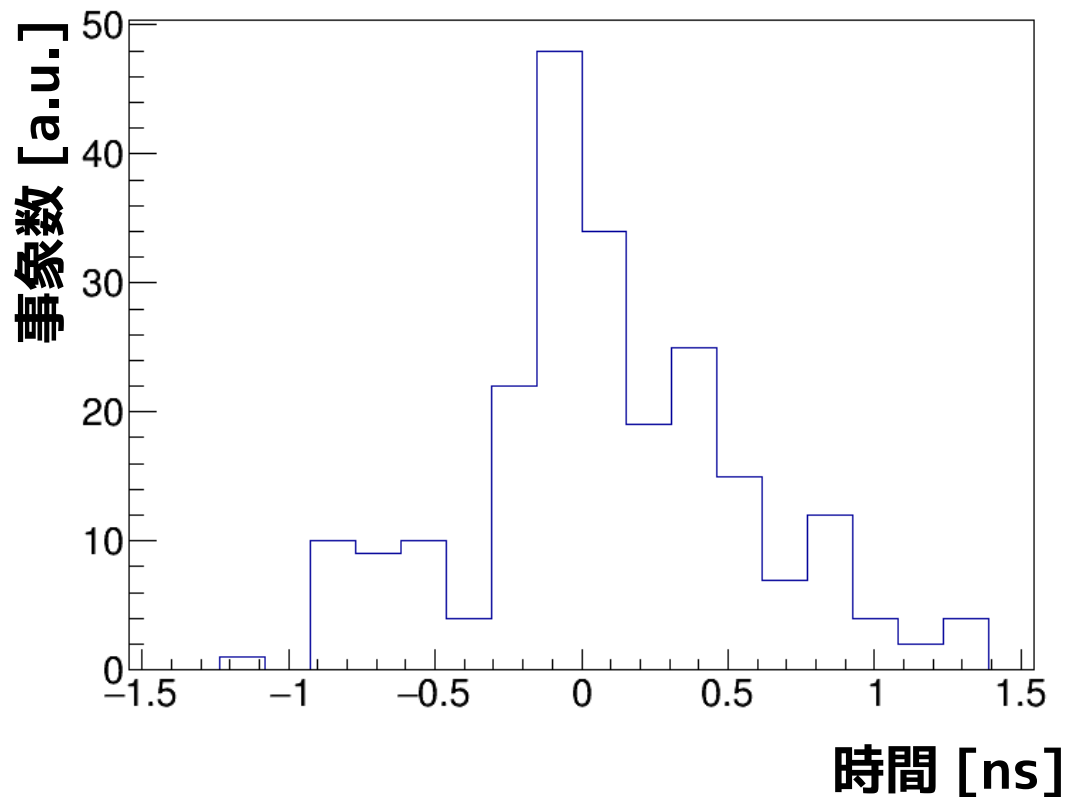


加速RF同期信号との時間差を計測  
→長時間の測定をまとめて扱う

加速RF周期の剰余をとる  
→複数のバンチを重ねる

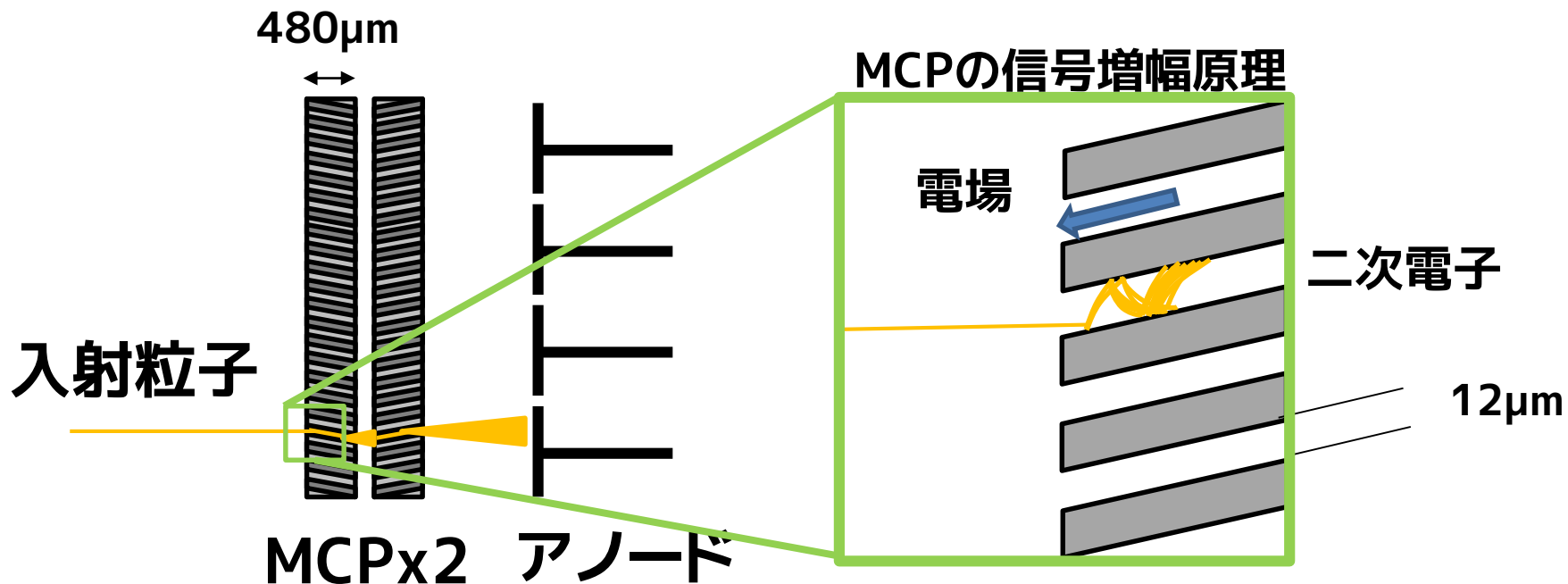


# バンチ構造のシミュレーション



粒子輸送シミュレーションを行った結果  
およそ  $\sigma=0.47$  ns のバンチが生成される  
このバンチが測定可能なモニターを構築する

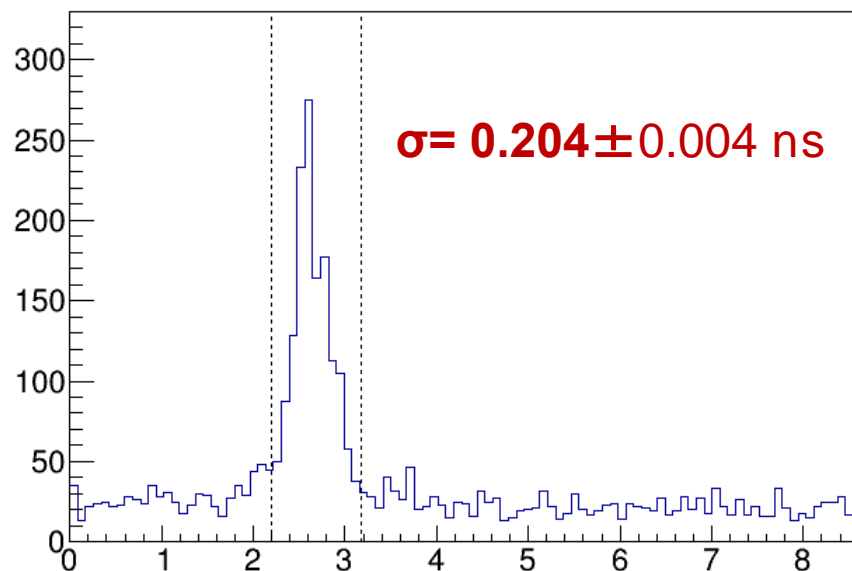
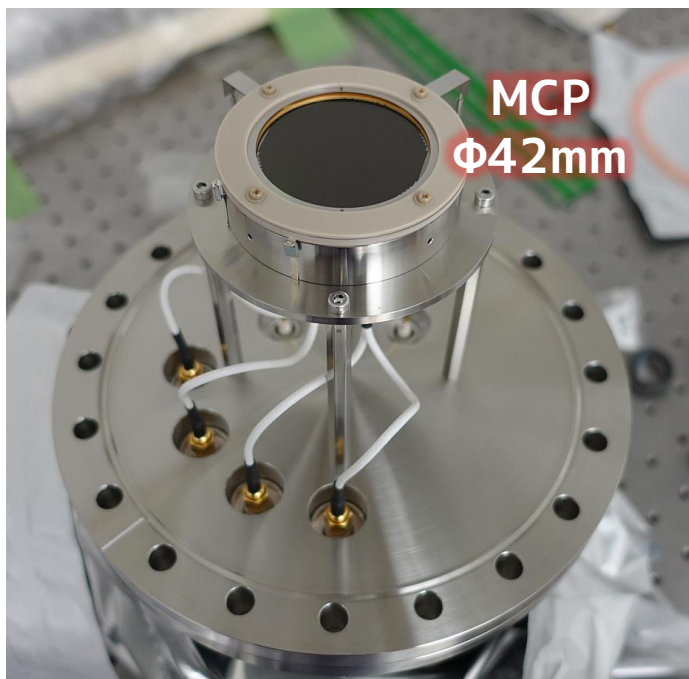
# MCPを用いたバンチ構造測定モニター



MCP(マイクロチャンネルプレート)を用いて  
**到達時間を高時間分解能**で測定

バンチモニターのためにマルチアノード状に設計

# バンチ構造測定モニターの時間分解能測定

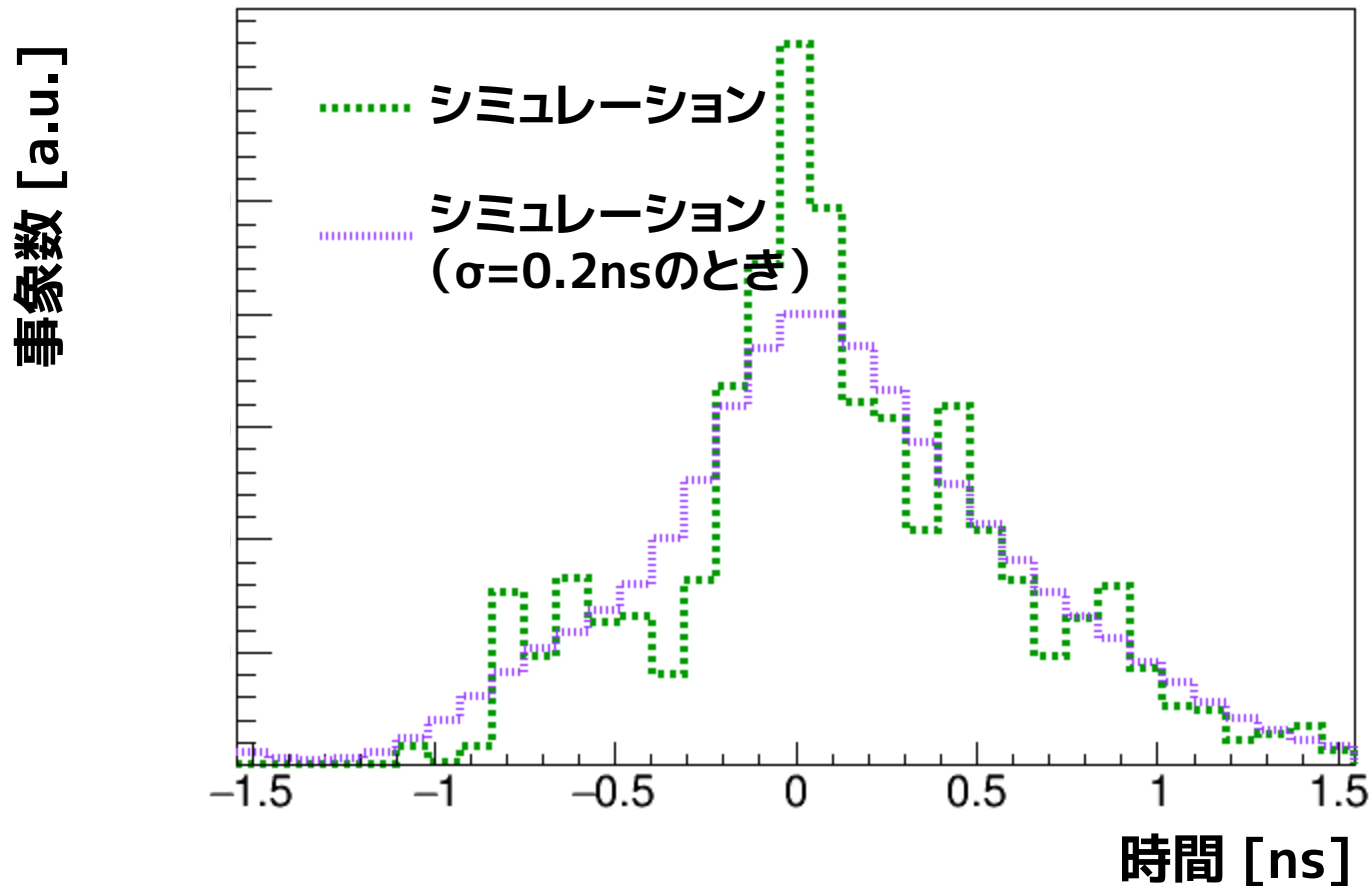


電子源によるMCP信号の時間分布 [ns]

検証試験に向けて**電子源**を用いたテストベンチを構築し  
 $\sigma = 0.204 \pm 0.004 \text{ ns}$ の時間分解能を達成

↓  
電子源の時間分解能が十分でないため、この値は分解能の上限値となる

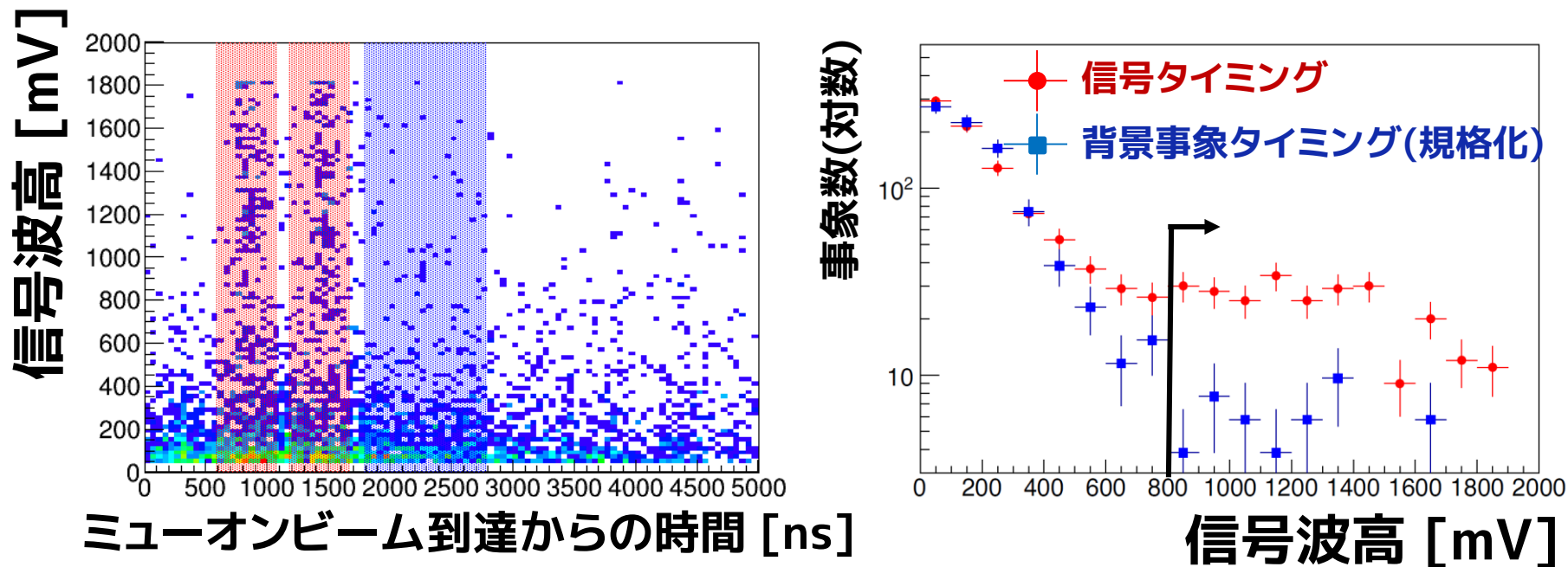
# バンチ構造のシミュレーション



モニターによって測定されたバンチは分解能でなまって検出される  
幅 $\sigma=0.47\text{ ns}$ のバンチを測定するためには十分な分解能

# 加速 $\text{Mu}^-$ 抽出のための事象選別

RF加速試験の結果から加速 $\text{Mu}^-$ を抽出する



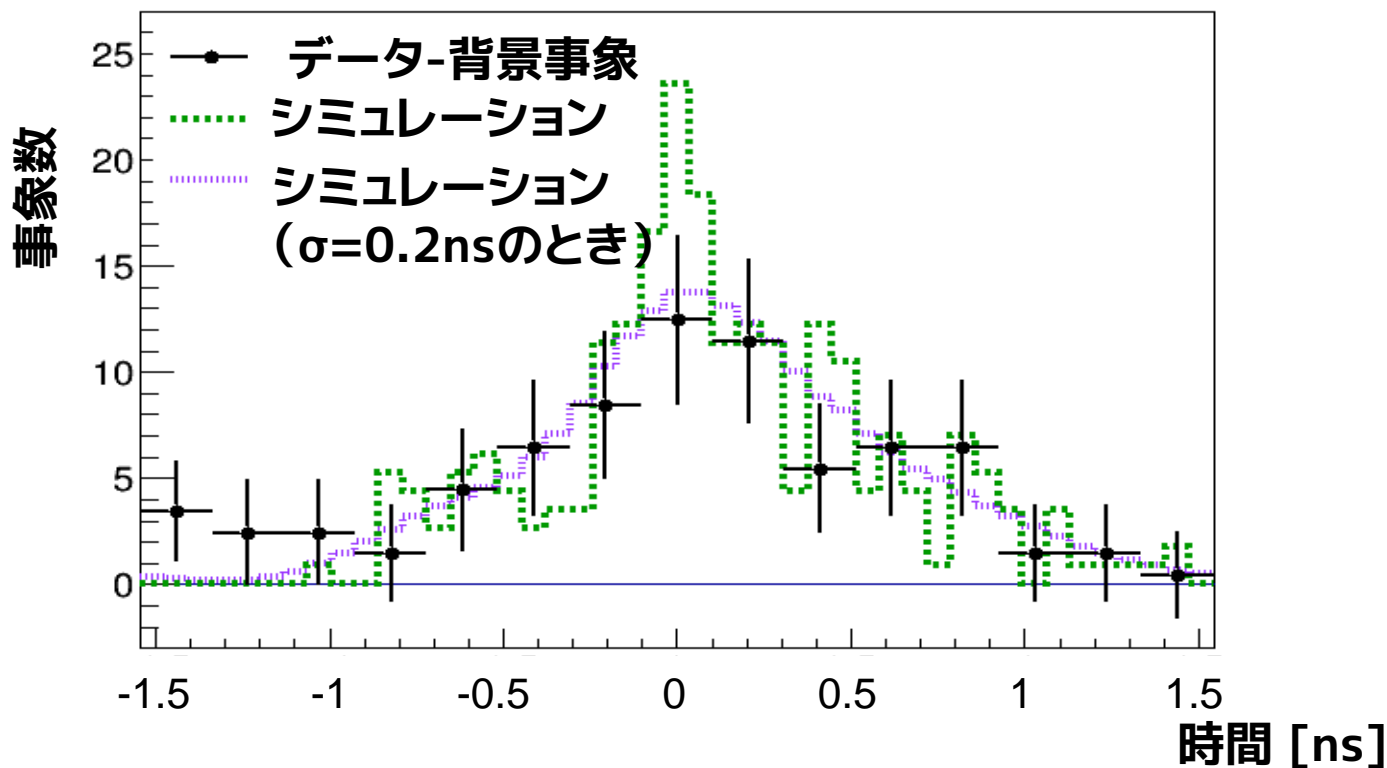
ミュオンビーム到達からの時間 [ns]

信号波高 [mV]

ミュオンが $\text{Mu}^-$ 生成標的に到着してからの飛行時間で加速 $\text{Mu}^-$ を抽出

加速 $\text{Mu}^-$ の信号波高は背景事象(陽電子)よりも高い  
 → 高い信号波高の事象を抽出

# バンチ構造の測定結果



測定結果は  $\sigma=0.58\pm0.12_{\text{stat.}}-0.04_{\text{sys.}}\text{ ns}$  となった  
→RF加速ミュオン( $\text{Mu}^-$ )のバンチ測定に成功



# まとめ

J-PARCで Muon  $g-2$ /EDM の精密測定実験の準備を進行中

- 先行の実験とは異なるコンセプトで精密測定を行う

マイクロチャンネルプレートを用いた高時間分解能モニターによって $\sigma=0.204\pm0.004$  ns以下の時間分解能を達成

幅  $\sigma=0.58\pm0.12_{\text{stat.}}-0.04_{\text{sys.}}$  nsのバンチ測定に成功

- 開発中のモニターによる測定手法の有効性を検証した
- ミューオンRF加速のより直接的な実証となった

今後、

- 実機ビームラインでの測定に向け、モニターの詳細な性能評価を行う