

2019年7月31日 第16回日本加速器学会年会@京都 WEOI05

ミュオン高周波加速のための 高時間分解能バンチ長測定

須江 祐貴^A

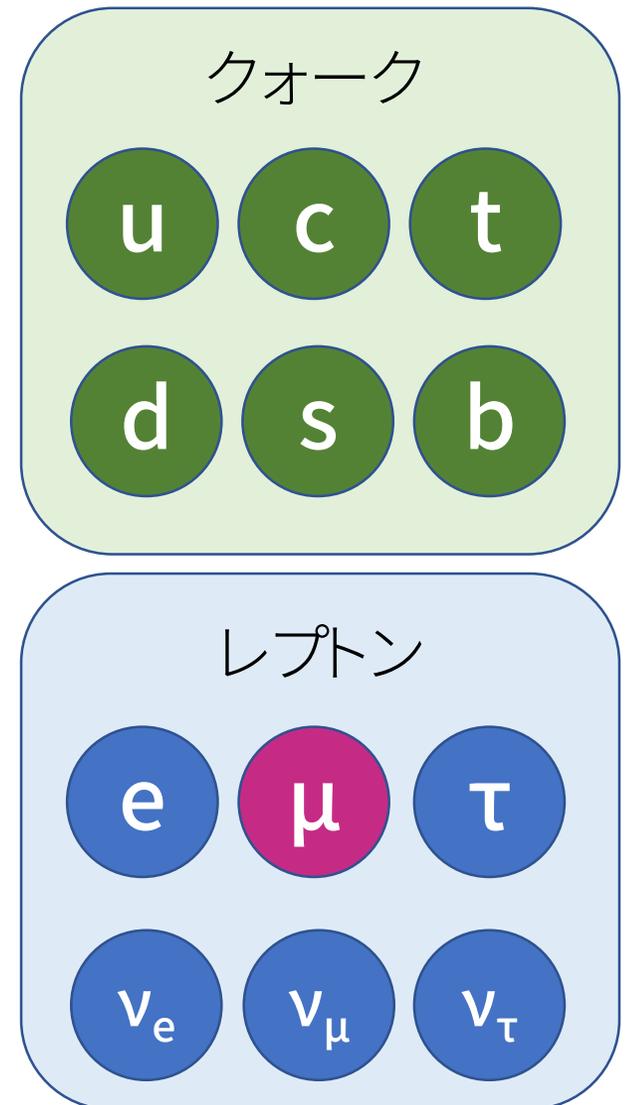
飯嶋 徹^{A,B}, 居波 賢二^A, 四塚 麻衣^A, 飯沼 裕美^C, 中沢 雄河^C, 大谷 将士^D,
河村 成肇^D, 下村 浩一郎^D, 二ツ川 健太^D, 三部 勉^D, 三宅 康博^D,
山崎 高幸^D, 北村 遼^E, 近藤 恭弘^E, 森下 卓俊^E, 長谷川 和男^E,
石田 勝彦^F, 牛沢 昂大^G, 竹内 佑甫^H, 齊藤 直人^I, 安田 浩昌^J

^A名大理, ^B名大KMI, ^C茨大理工, ^D高工研, ^E原研, ^F理研, ^G総研大, ^H九大理, ^IJ-PARCセ, ^J東大理

ミューオン

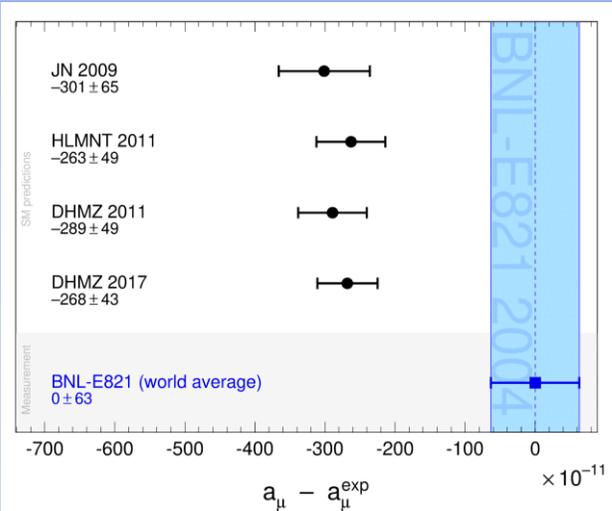
- ミューオンは第2世代荷電レプトン
- 質量は $m_\mu = 207 m_e = 106 \text{ [MeV}/c^2]$
 - 標準模型を超えた物理に高い感度を持つ
- 陽子ビームによって大量の偏極ミューオンが生成可能
- $\mu^\pm \rightarrow e^\pm \nu_e \nu_\mu$ 崩壊(寿命 $2.2 \mu\text{s}$)はスピン方向に感度がある
 - 大統計量によるスピンの精密測定が可能

⇒ ミューオンは新物理の良いプローブ



ミューオン $g-2/EDM$

異常磁気能率: $g-2$



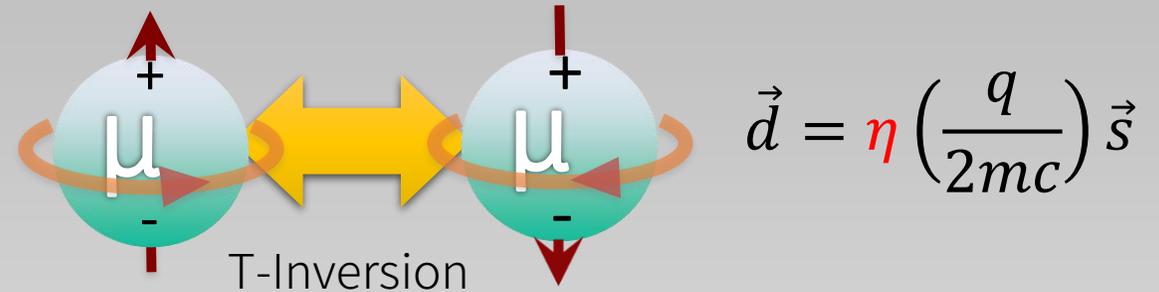
標準模型の予測値と実験値が3σ以上の有意度で乖離

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

[M. Tanabashi et al., Phys. Rev. D 98, 030001 \(2018\).](#)

電気双極子能率: EDM

この測定感度で観測された場合
時間反転対称性の破れにつながる



540 ppb (BNL)

精度/感度

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

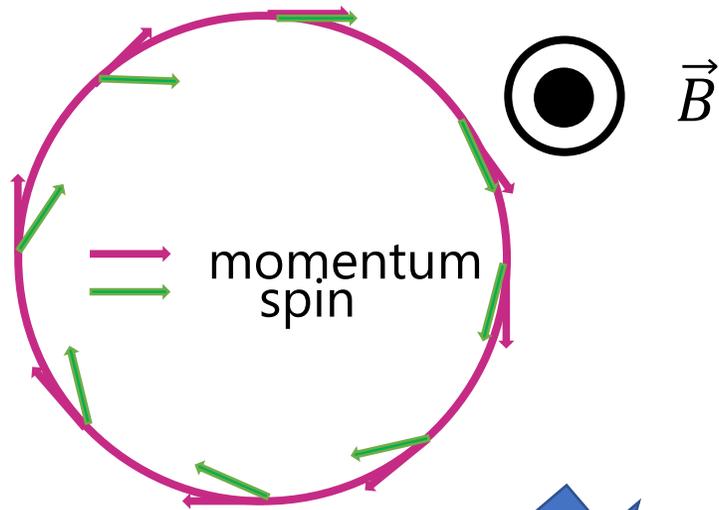
460 \Rightarrow 100 ppb

J-PARC muon $g-2/EDM$ 実験

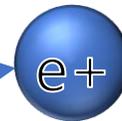
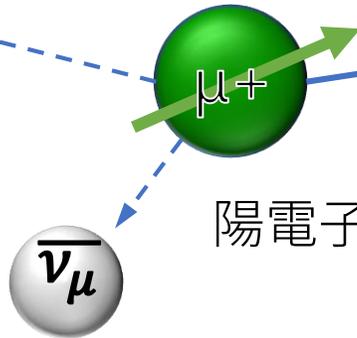
$1 \times 10^{-21} \text{ e} \cdot \text{cm}$

スピン歳差運動の測定手法

ミュオンを磁場中で蓄積



2.2 μs の寿命で崩壊

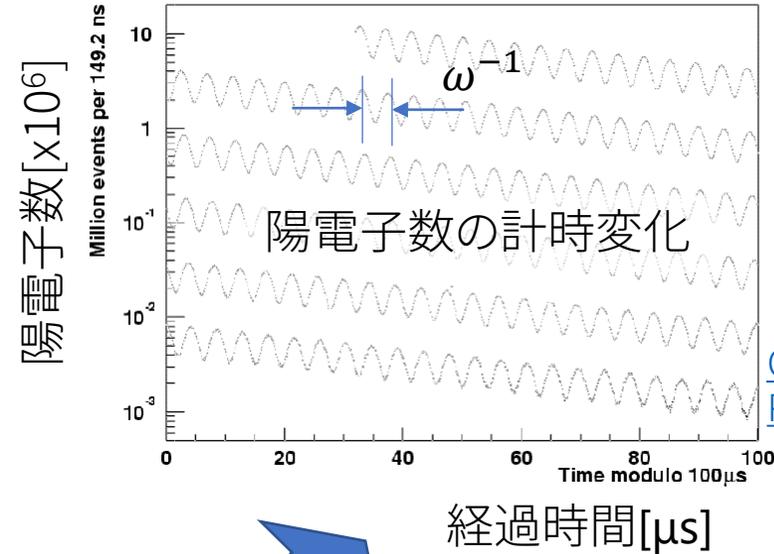


10⁹の陽電子を観測



陽電子はミュオンのスピン方向に放出されやすい

スピンの歳差運動を測定

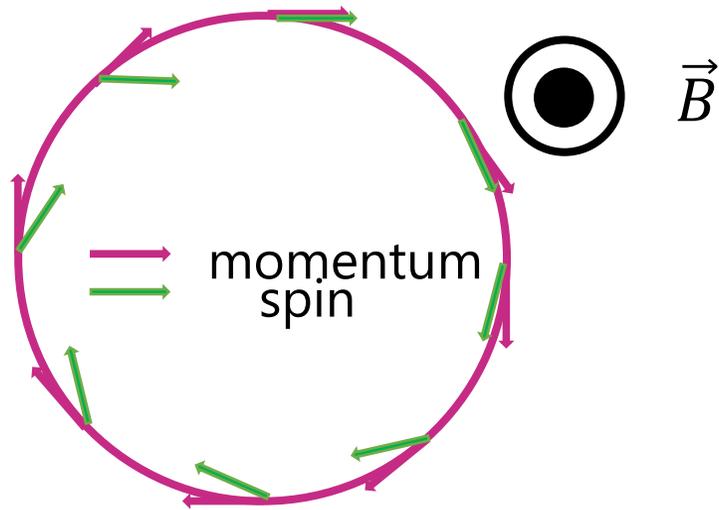


$$\omega = (g - 2) \frac{eB}{2m_\mu}$$

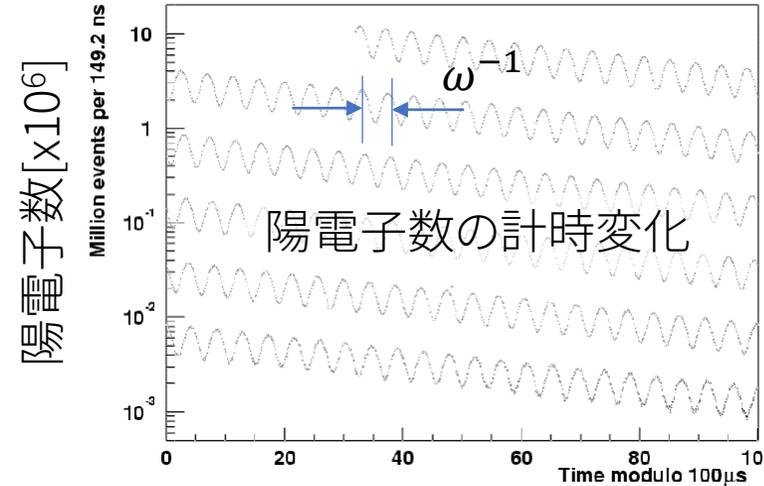
[G. W. Bennett et al., Phys. Rev. D 73, 072003 \(2006\).](#)

スピン歳差運動の測定手法

ミュオンを磁場中で蓄積



スピンの歳差運動を測定



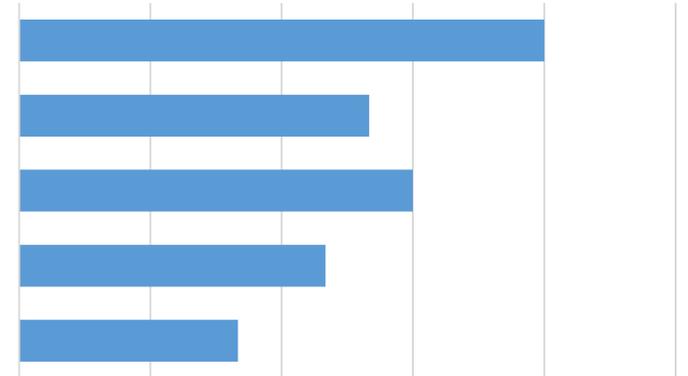
$$\omega = (g - 2) \frac{eB}{2m_\mu}$$

[G. W. Bennett et al., Phys. Rev. D 73, 072003 \(2006\).](#)

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



ゲイン変化



パイルアップ

ミュオンビームのエミッタンスに由来



ミュオン散失



コヒーレント
ベータatron振動

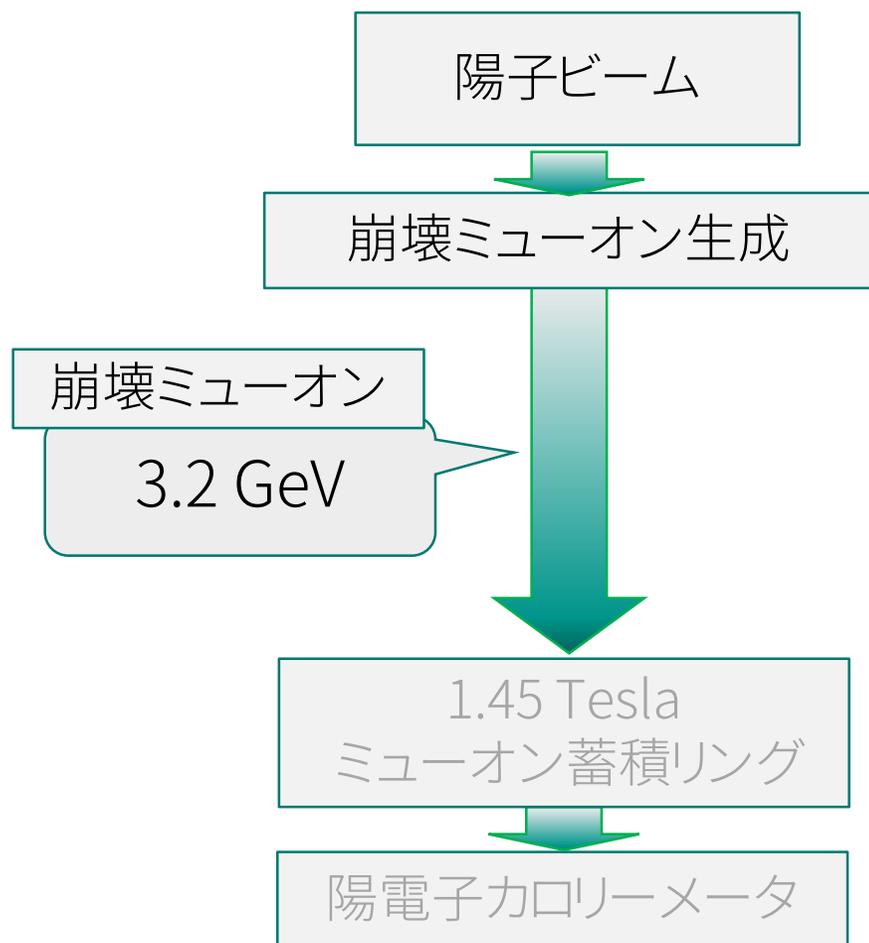


電場とピッチ

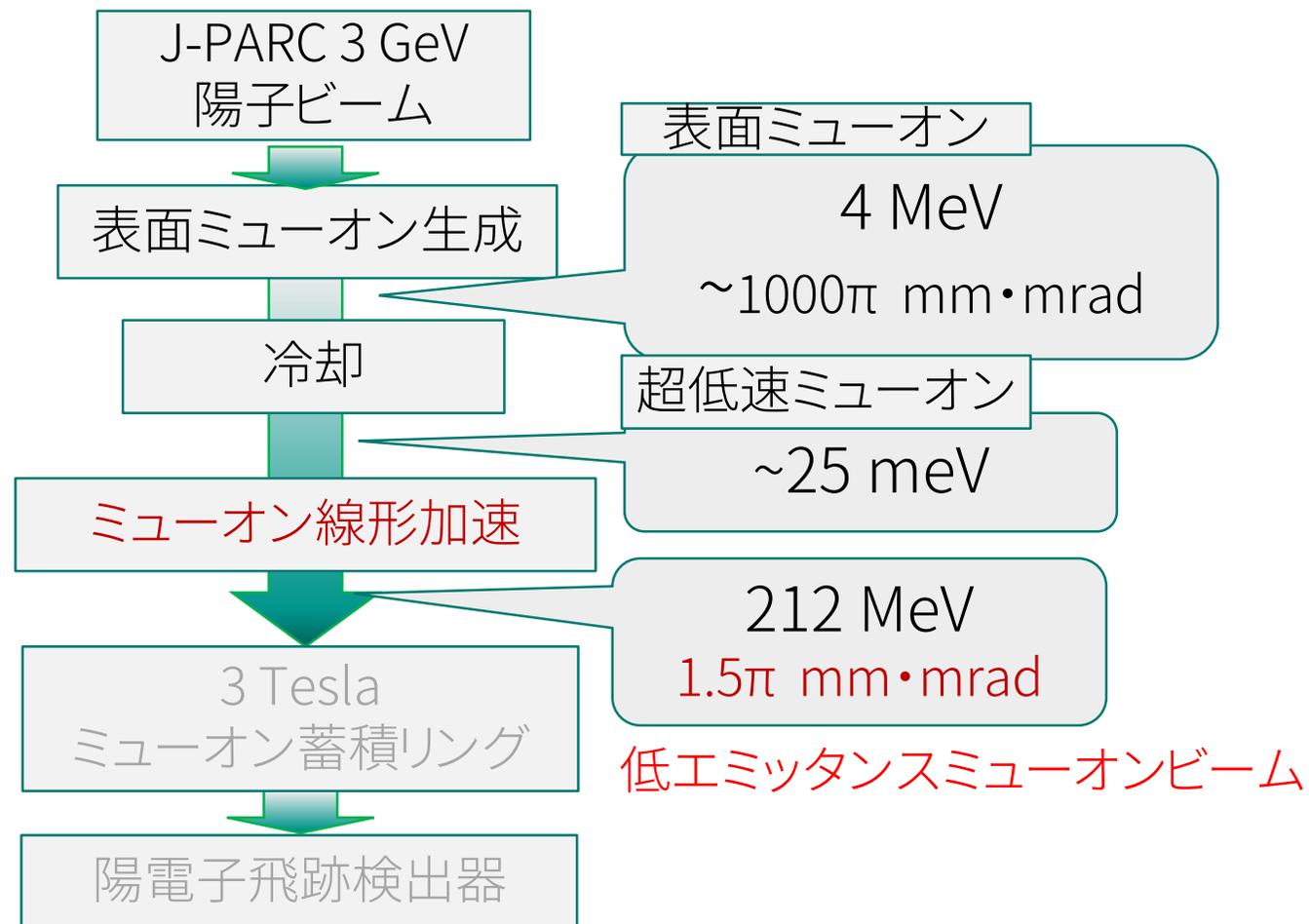
⇒ 低エミッタンスミュオンビームで系統誤差削減を狙う

ミュオンビーム生成

BNL E821 / FNAL E989

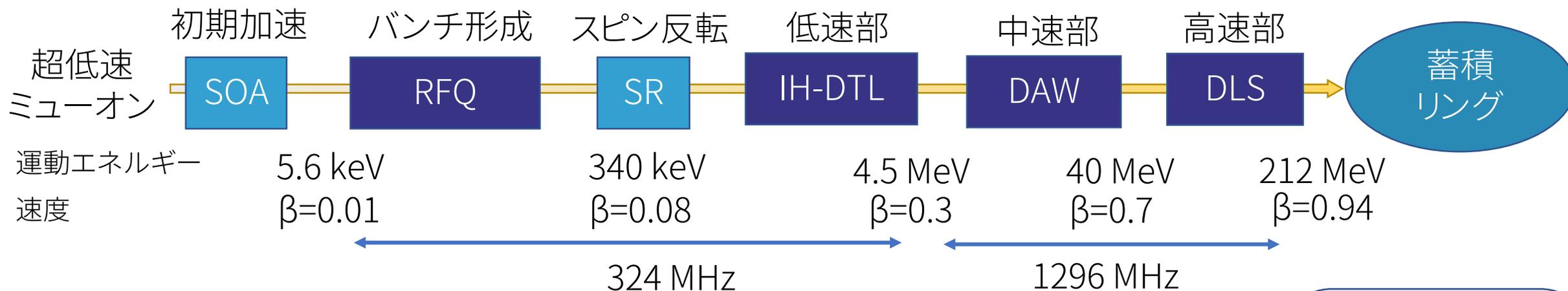


J-PARC E34



低エミッタンスミュオンビームのためにmuon linacが必要!

J-PARC E34 Muon Linacの開発状況



- 40 m程度の線形加速器によって212 MeVまで加速
 - 陽子加速器と電子加速器のハイブリッド
- J-PARC MUSE H-lineで $10^6 \mu^+/\text{s}$ のビーム強度
- 全加速器の基本デザインは完了

関連講演:
THPI031 四塚
WEPH030 安田
WEPI001 中沢
WEPI041 大谷

THOH07 阿部
THOH08 飯沼
WEPH032 平山
THPH033 杉田

J-PARC E34 Muon Linacの開発状況



- 第12回加速器学会年会 [WEOM02](#) : リニアック専用空洞の設計
 - 第13回加速器学会年会 [MOOM04](#) : ビーム力学設計を完了
 - 第14回加速器学会年会 [WEOL05](#) : ミューオンRF加速実証試験準備
 - 第15回加速器学会年会 [FROL14](#) : プロトタイプRFQによるミュオン初RF加速
- ⇒ 第16回加速器学会年会 [WEOI05](#) : バンチ幅モニターの開発と実証試験

予想されるバンチ構造と測定手法の考案

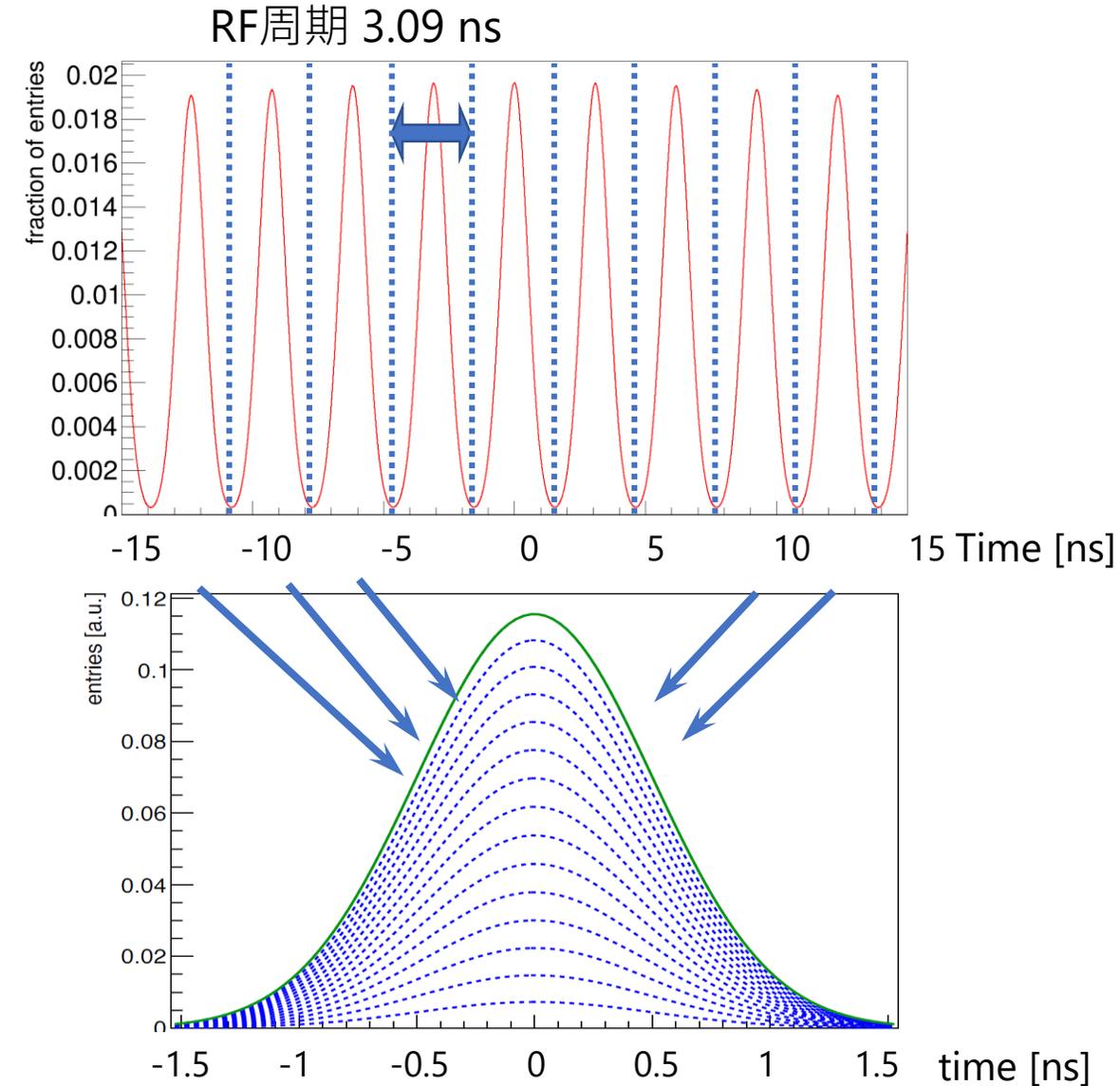
モニターへの要求

- 324 MHz
- 位相分解能のおよそ1%, 30-40 ps
- 低電流ビームに対応

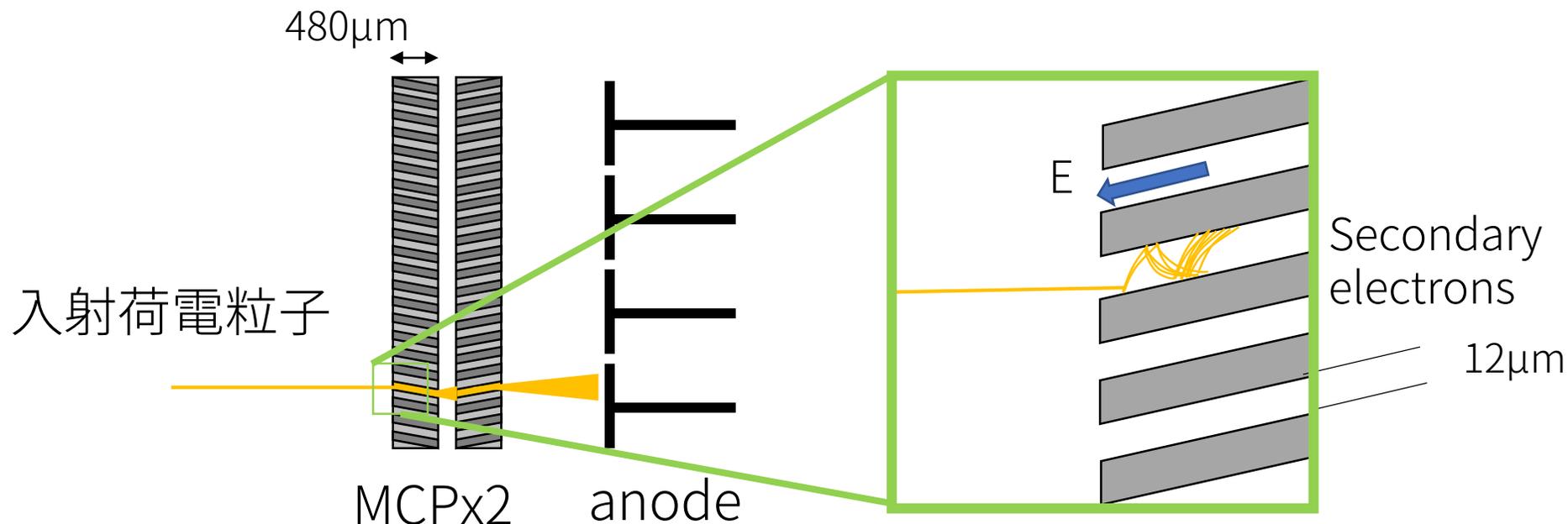
シングルミュオンを長期的に測定し
最終的に重ね合わせて算出する手法を考案

- ミューオンの検出時間と参照信号の時間差を高時間精度で測定
- RF周期で剰余をとる

⇒ シングルミュオン検出と高時間分解能



バンチ幅モニター：ミュオン検出部



Microchannel plate (MCP)を用いて1ミュオンずつの高時間分解能測定を行う

- keV-MeV シングルミュオンに対して高い感度
- 高い時間応答性

アノードの4分割化によって位置依存性による時間分解能の悪化を抑制

バンチ幅モニター：信号処理回路とDAQ

- Constant-Fraction Discriminator

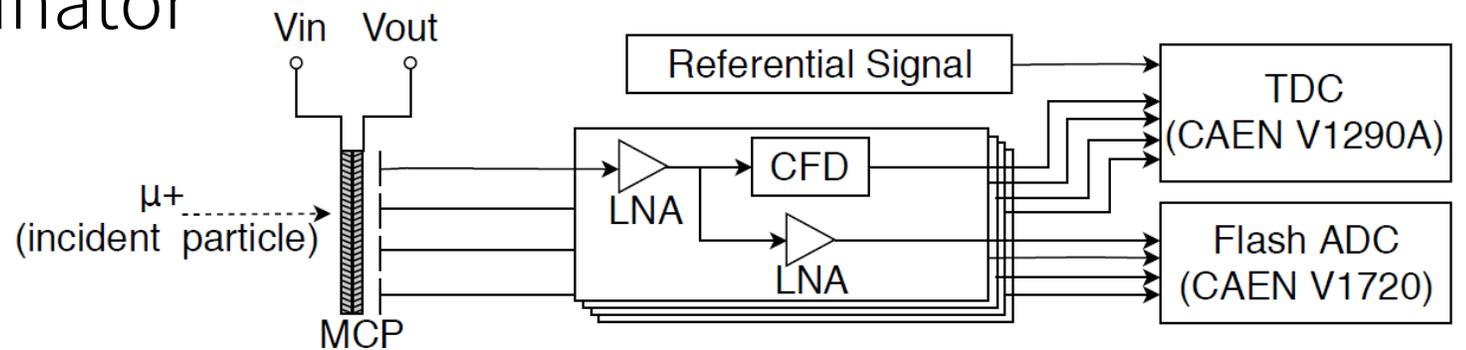
- time-walkの抑制
- ジッター(設計値): $< 5 \text{ ps}$

- TDC: CAEN V1290

- LSB: 24.4 ps
- 時間分解能(カタログ値): 35 ps

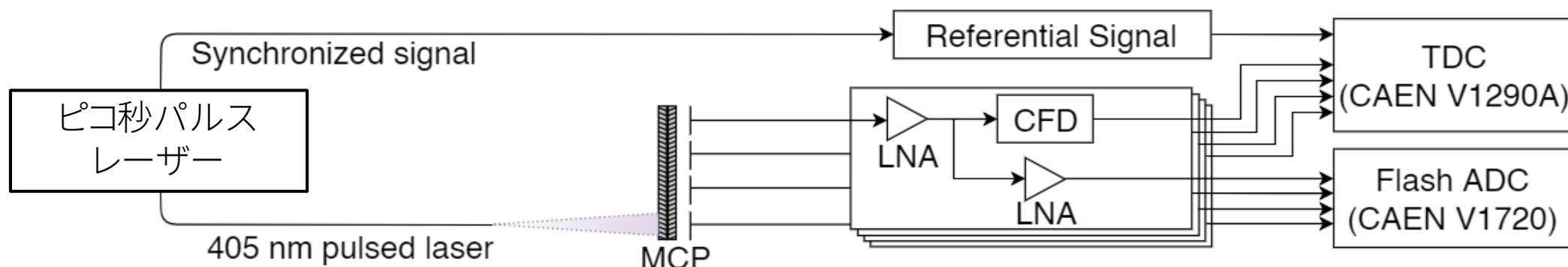
- Flash ADC: CAEN V1720

- サンプルング周波数 250 MHz
- ダイナミックレンジ: $10 \mu\text{s}$



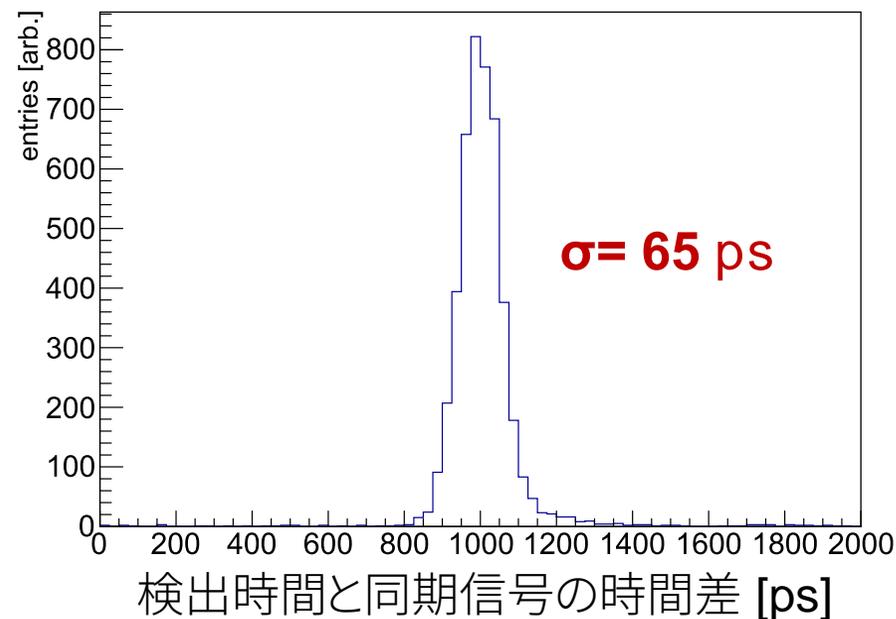
K. Inami [Belle-II PID Group], Nucl. Instrum. Meth. A 766, 5 (2014).

オフラインテストによる時間分解能評価

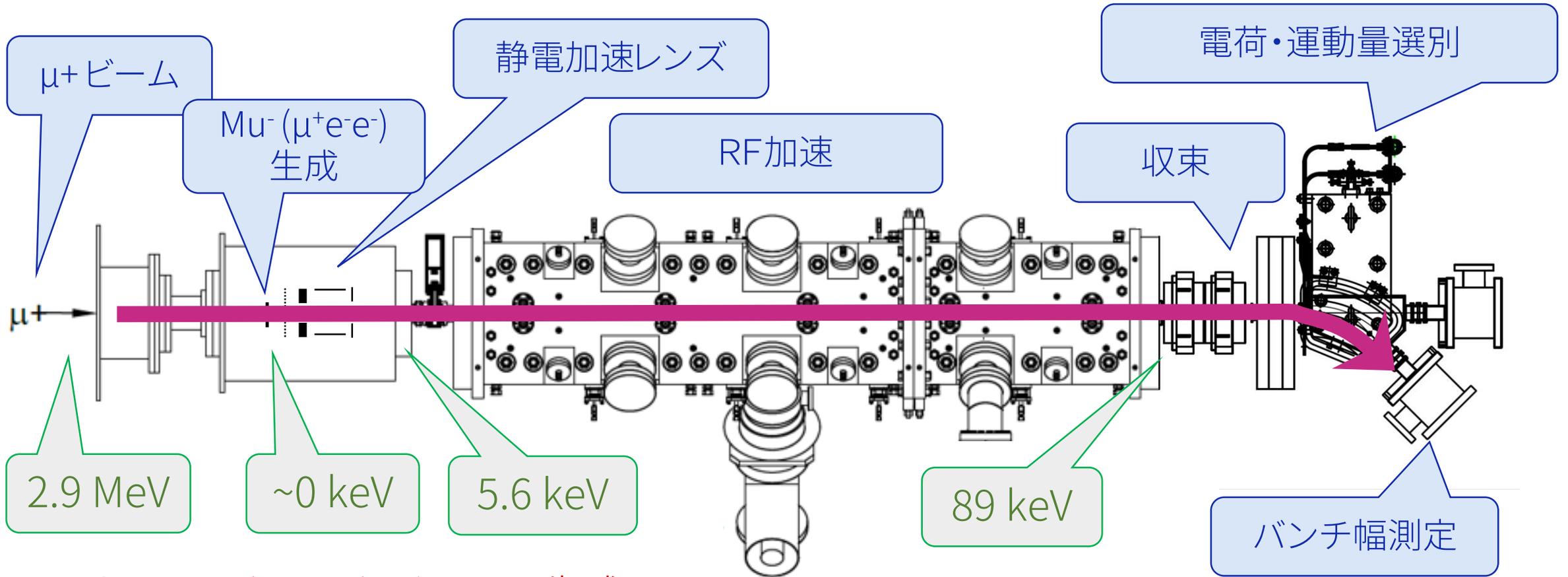


- ピコ秒パルスレーザーを使った時間分解能評価
 - ミューオン ⇒ 光電子(MCP表面での光電効果由来)
 - RF同期信号 ⇒ レーザー同期信号

• $\sigma = 65 \text{ ps}$ (2%の位相分解能) を達成



バンチ幅測定実証実験のセットアップ



89keV Mu⁻(μ⁺e⁻e⁻) バンチを生成

- エネルギーの単一化
- 背景事象の抑制 (貫通してくる μ⁺)

バンチ幅測定の設定アップ

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

J-PARC
D2 Port

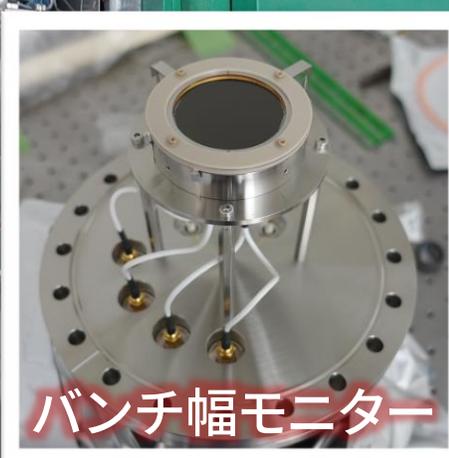
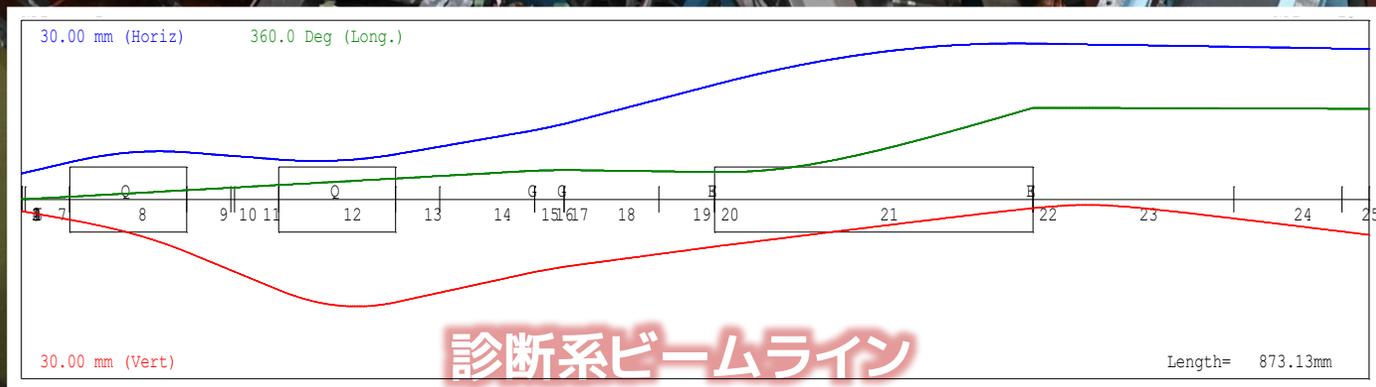
Soa レンズ

RFQ

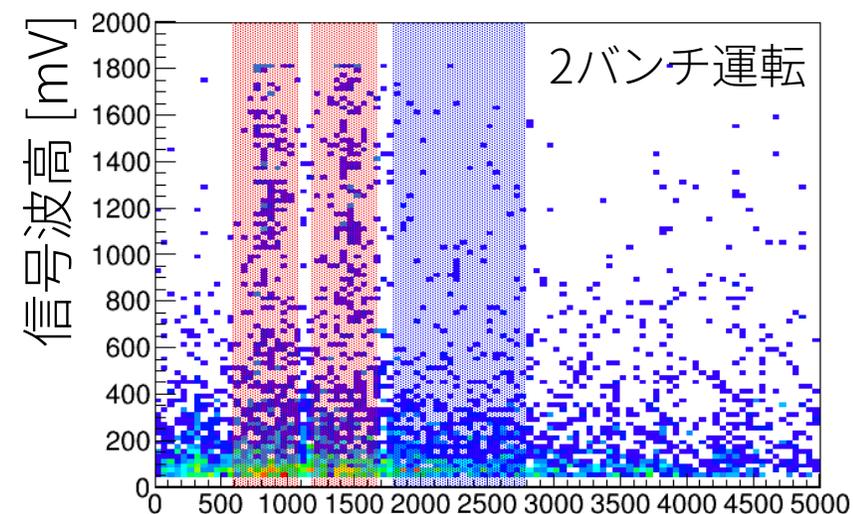
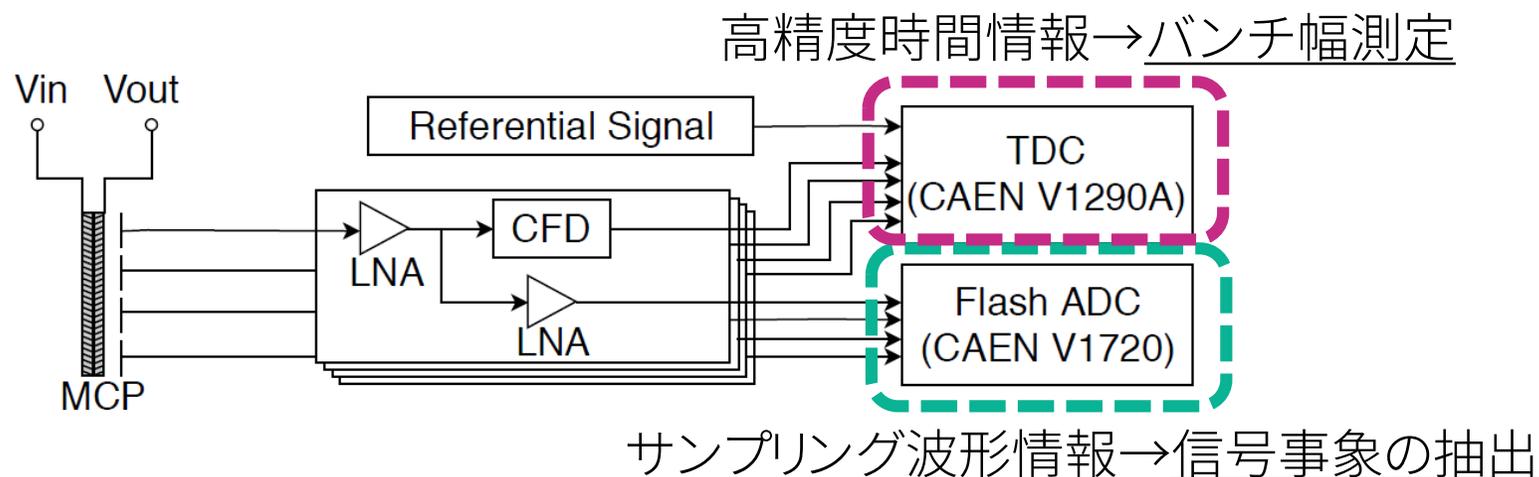
四重極電磁石x2

バンチャー空洞

偏向電磁石



バックグラウンド事象の削減



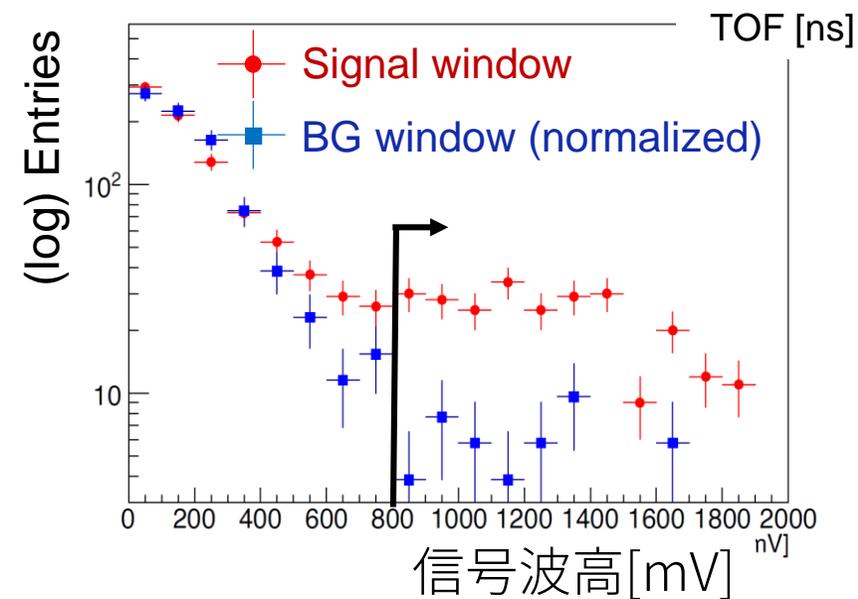
ビーム強度が低いいため背景事象が支配的

- 主要な背景事象は崩壊陽電子

→信号事象(ミュオン)はMCPに高い信号波高

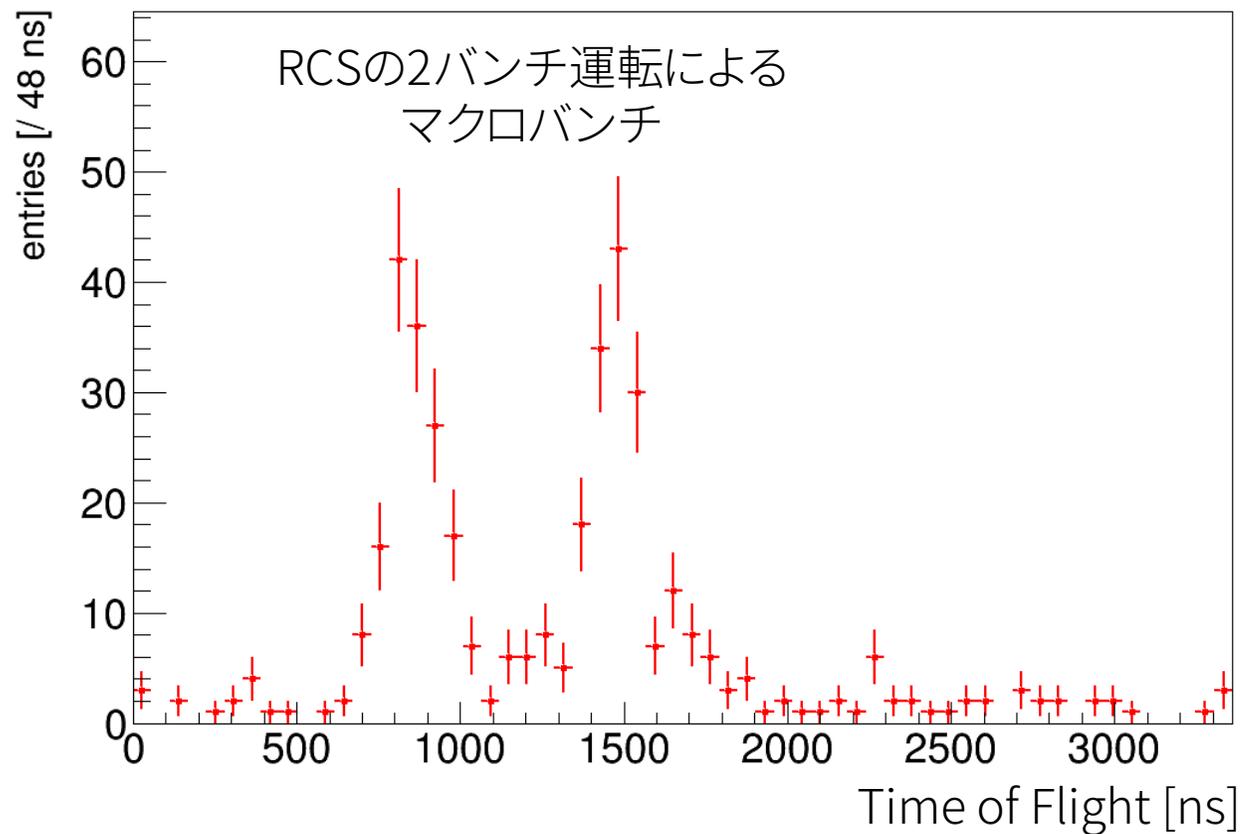
→ Time-of-Flight(TOF)と信号波高を用いて削減

1. 加速 Mu^- の到来時間をTOFから推定
2. 高信号波高のイベントのみを抽出

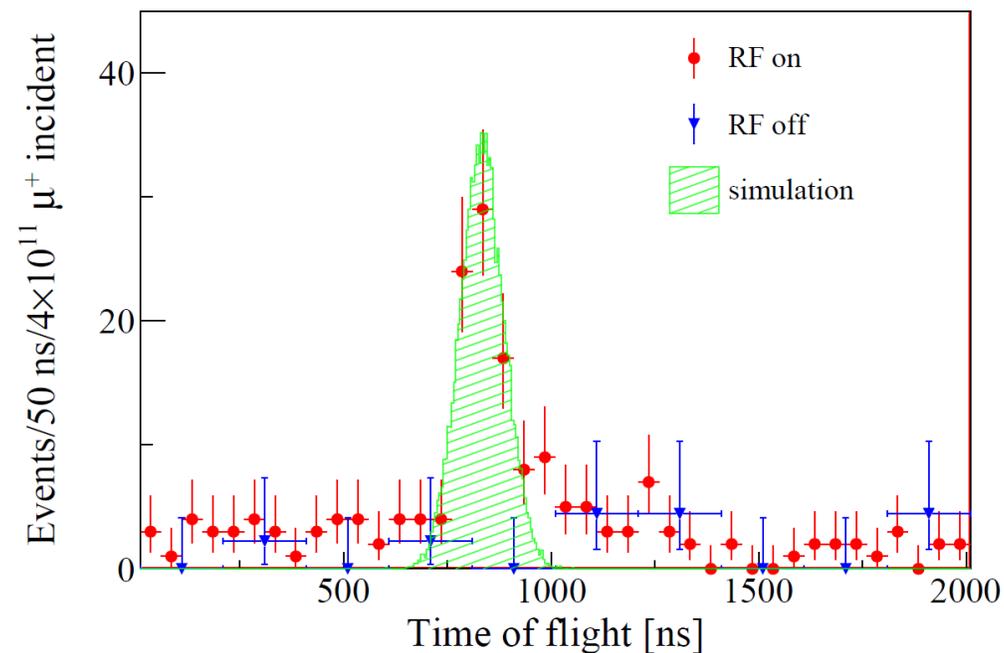


加速Mu-事象の抽出

イベント抽出後のTOF分布



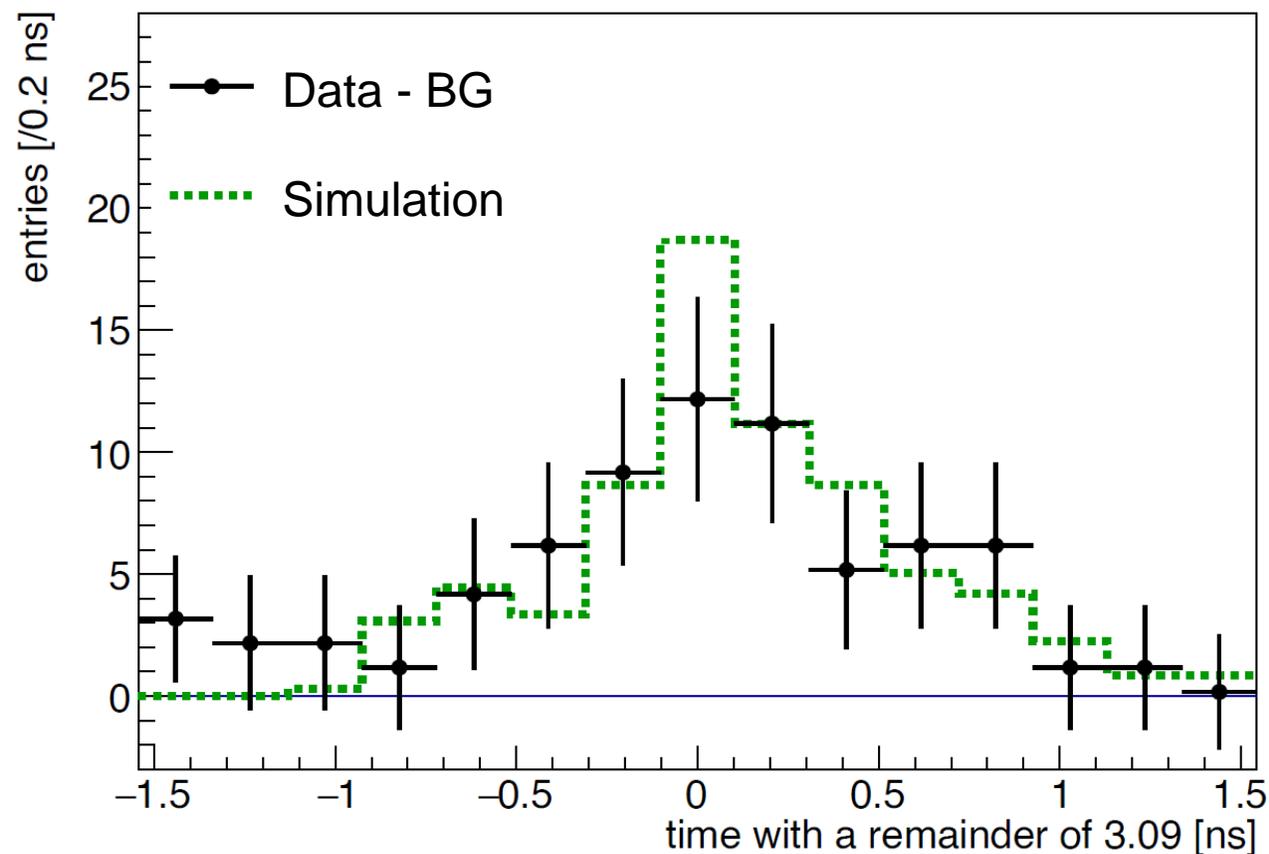
2017 ミューオンRF加速実証試験



Mu-加速とイベントの抽出に成功

⇒ピーク周辺のイベントを用いてバンチ幅測定を行う

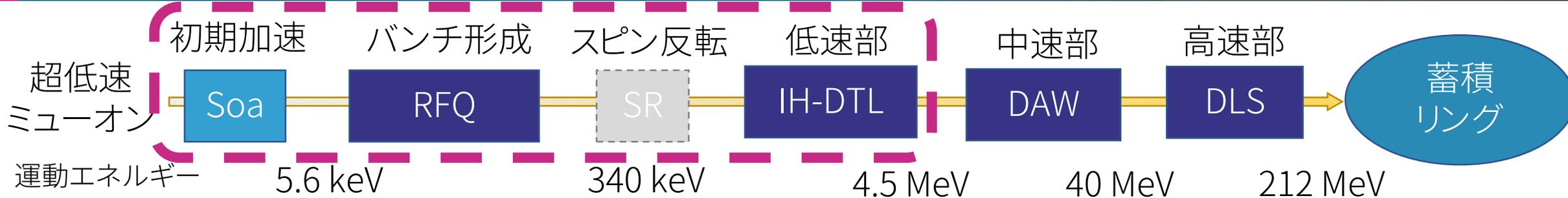
バンチ幅測定結果



バンチ幅 : $\sigma = 0.55 \pm 0.14$ ns

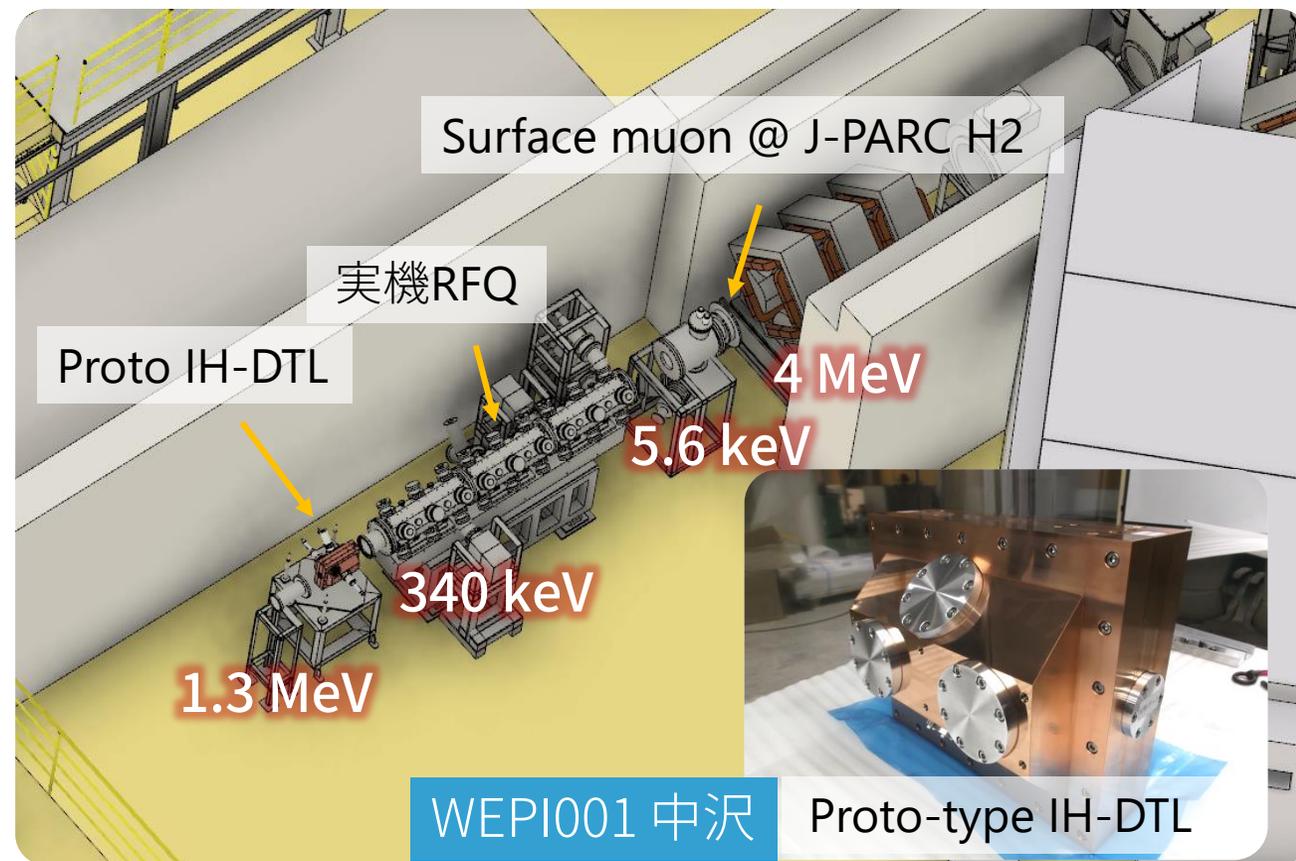
低エネルギー・低強度のミュオンビームに対してバンチ幅測定に成功した

Next step!



実機RFQとProto-type IH-DTLを用いた
1.3 MeVまでの加速

⇒ IH-DTL前後でのバンチ幅測定を目指す



まとめ

J-PARCで Muon $g-2$ /EDM の精密測定実験を準備中
→ 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モニターを開発中
→ $\sigma=65$ ps以下の時間分解能を達成した

89 keV加速 Mu^- を用いたバンチ幅測定の検証実験を実施
→ 幅 $\sigma=0.55 \pm 0.14$ 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

今後、

実機RFQとプロトタイプIH-DTLを用いた1.3 MeVまでの加速を目指す