

# J-PARC muon g-2/EDM 実験 シリコンストリップセンサー用 読み出しASICの開発

佐藤 優太郎

IPNS, KEK

muon g-2/EDM group

2016/10/14

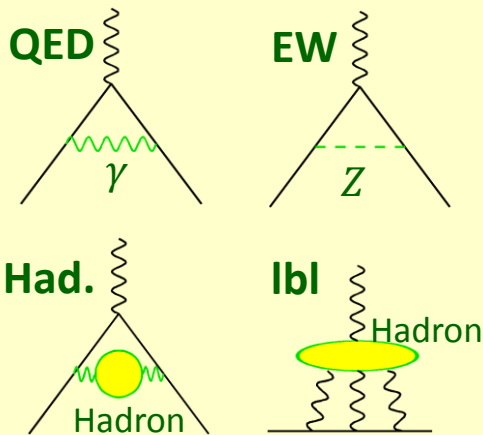
@計測システム研究会

$$(\mu_0 = q/2m)$$

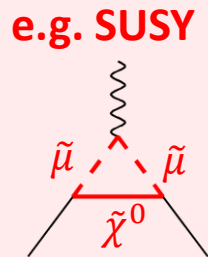
## 磁気双極子

- $\vec{\mu} = g\mu_0\vec{s}$
- 異常磁気モーメント  $a = (g - 2)/2$ 
  - Dirac 理論では  $g = 2$  だが、
  - 放射補正で 2 からずれる。
- あらゆる相互作用が寄与。

### 標準理論

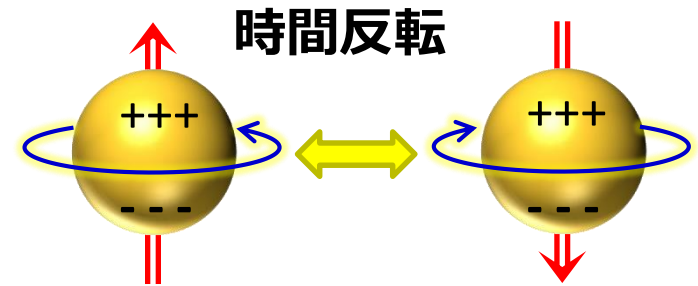


### 新物理



## 電気双極子 (Electric Dipole Moment)

- $\vec{d} = \eta\mu_0\vec{s}$
- T&P-対称性を破る"変な"相互作用によって生じる。

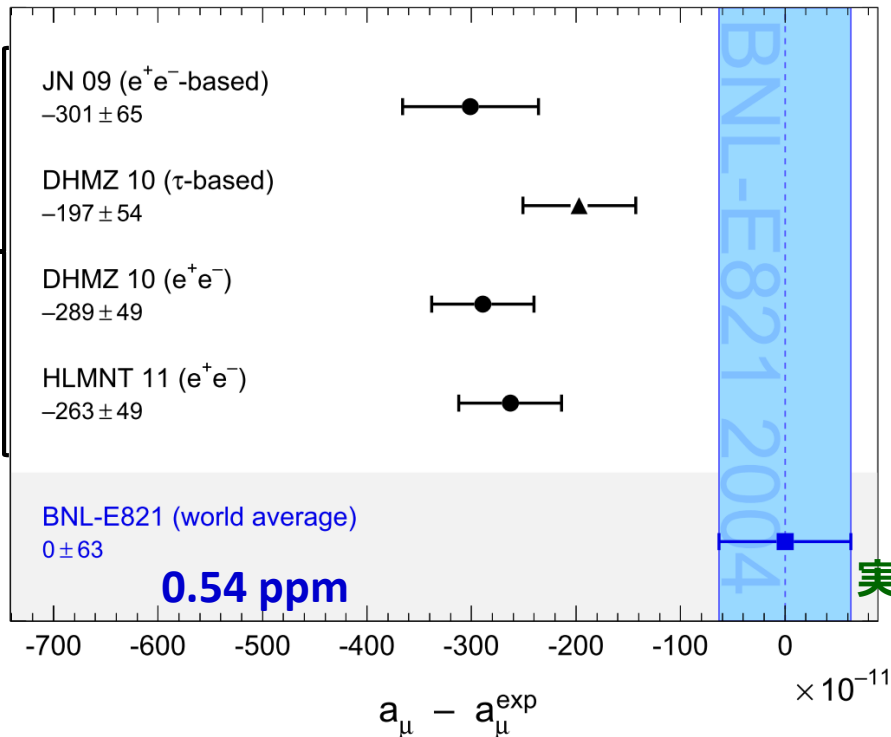


- 標準理論では強く抑制。
  - $|d^{SM}| \sim 10^{-38} e \cdot \text{cm}$
  - 実験感度  $(10^{-19} \sim -21)$  よりはるかに小さい
- Non-zero EDM は新物理の証拠

➤ 標準理論の超精密検証。

理論  
実験

@PDG



## $a_\mu$ Tau 2016 preliminary

$a_\mu^{\text{had LO}}$

DEHZ 2003  $696.3 \pm 6.2_{\text{exp}} \pm 3.6_{\text{rad}}$  (7.1<sub>tot</sub>)

DHMZ 2011  $692.3 \pm 1.4_{\text{stat}} \pm 3.1_{\text{syst}} \pm 2.4_{\text{corr syst}} \pm 0.2_\psi \pm 0.3_{\text{QCD}}$  (4.2<sub>tot</sub>)

DHMZ 2016  $692.8 \pm 1.2_{\text{stat}} \pm 2.6_{\text{syst}} \pm 1.6_{\text{corr syst}} \pm 0.1_\psi \pm 0.3_{\text{QCD}}$  (3.3<sub>tot</sub>)

$a_\mu$

QED 11658471.885  $\pm 0.004$

EW 15.4  $\pm 0.1$

had LBL 10.5  $\pm 2.6$

had LO **692.8  $\pm 3.3$**

had NLO -9.87  $\pm 0.09$

had NNLO 1.24  $\pm 0.01$

理論

prediction 11659181.9  $\pm 4.2$

実験

exp BNL 11659208.9  $\pm 6.3$

実験 - 理論 deviation **27.0  $\pm 7.6$  3.6 $\sigma$**

Tau2016 Beijing Sept. 19-23

Michel Davier (davier@lal.in2p3.fr, LAL, Orsay)

- 標準理論の予言値から $3\sigma$ 以上のずれ。
- 近年、 $e^+e^-$  衝突データを用いて理論(特にhad LO)の予言精度が向上。
  - 今後、Lattice QCD 計算による向上も期待される。
- より精密かつ独立な測定が重要に！

# スピン歳差運動

- 一様磁場中でミュオンが円運動する場合、スピンは  $g - 2$  分だけ早く回転。

$$\vec{\omega} = \vec{\omega}_a + \vec{\omega}_\eta$$

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

- 第二項をキャンセルする2つの方法。

## 1. マジック運動量

" $\gamma = 29.3$ "

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

→ BNL E821(先行実験)

& FNAL E989 (後継実験)

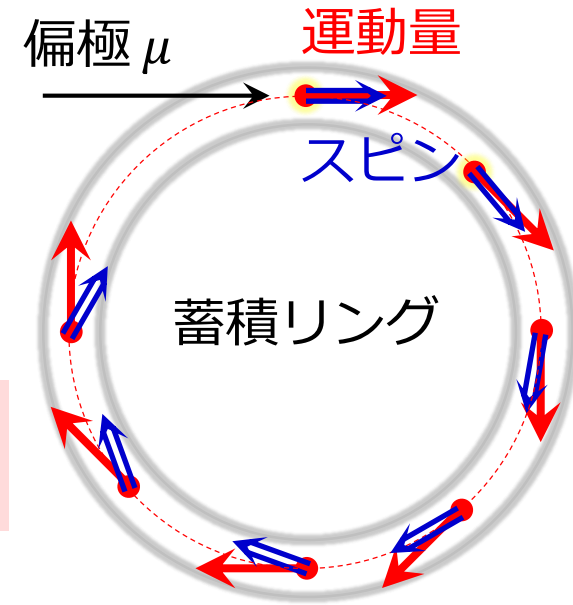
## 2. ゼロ電場

" $E = 0$ " (運動量に依らず)

$$\vec{\omega} = -\frac{e}{m_\mu} \left[ a_\mu \vec{B} + \frac{\eta}{2} (\vec{\beta} \times \vec{B}) \right]$$

→ J-PARC E34 (新実験)

- 全く新しい手法
  - 従来とは異なる系統誤差
- よりシンプルな表式に。
  - $g-2$  と EDM を分離

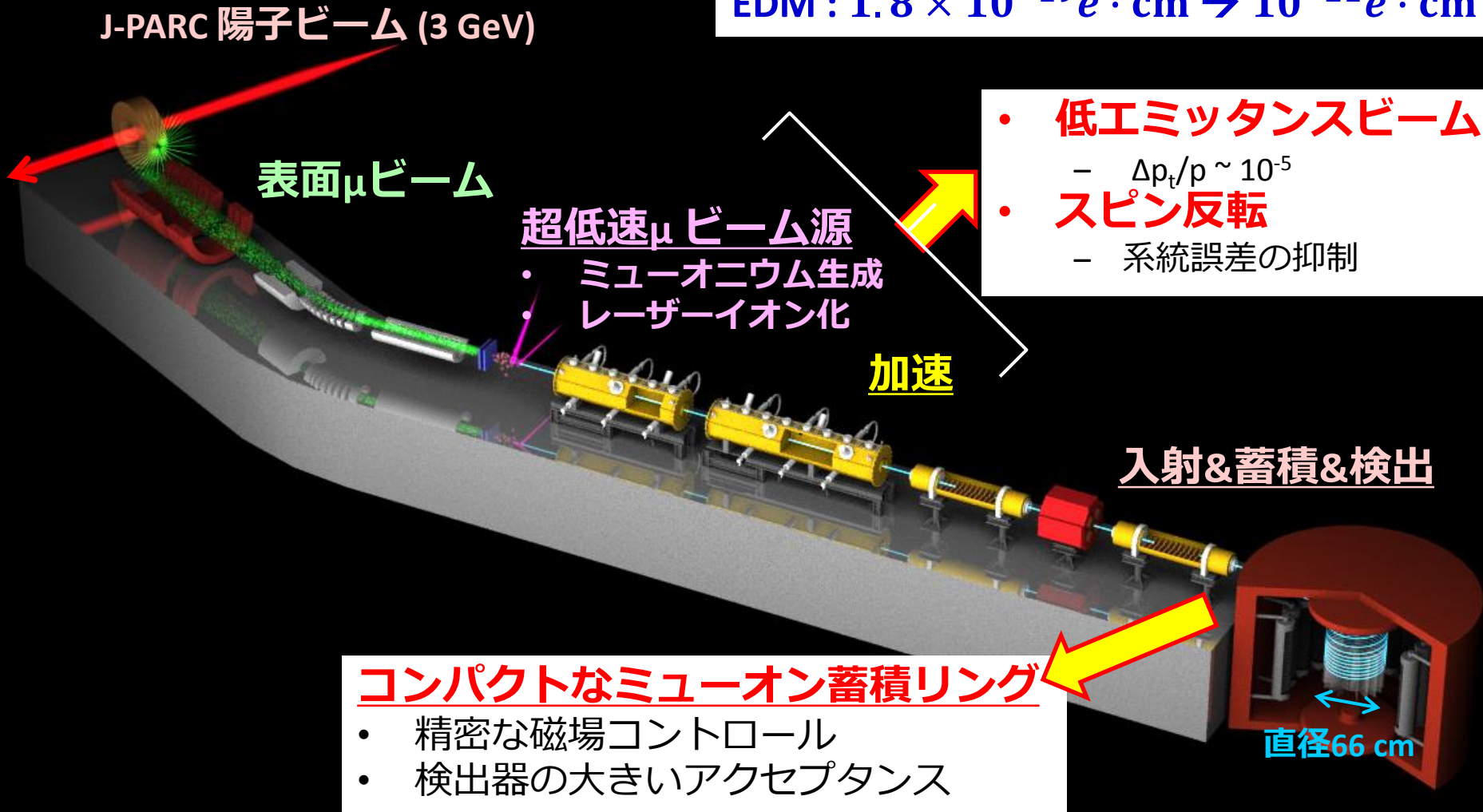


# J-PARC E34 実験

- 全く新しいコンセプトでミュオン $g-2$ /EDM を測定。
  - 物質生命科学実験施設 (MLF)

## 目標精度

$g-2 : 0.54 \text{ ppm} \rightarrow 0.1 \text{ ppm}$   
 $EDM : 1.8 \times 10^{-19} e \cdot \text{cm} \rightarrow 10^{-21} e \cdot \text{cm}$

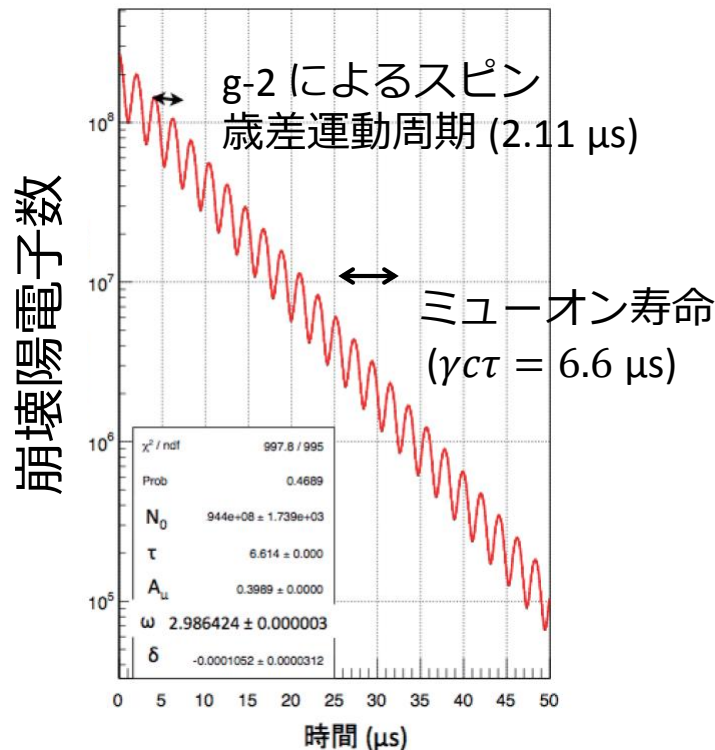


# 予想される信号

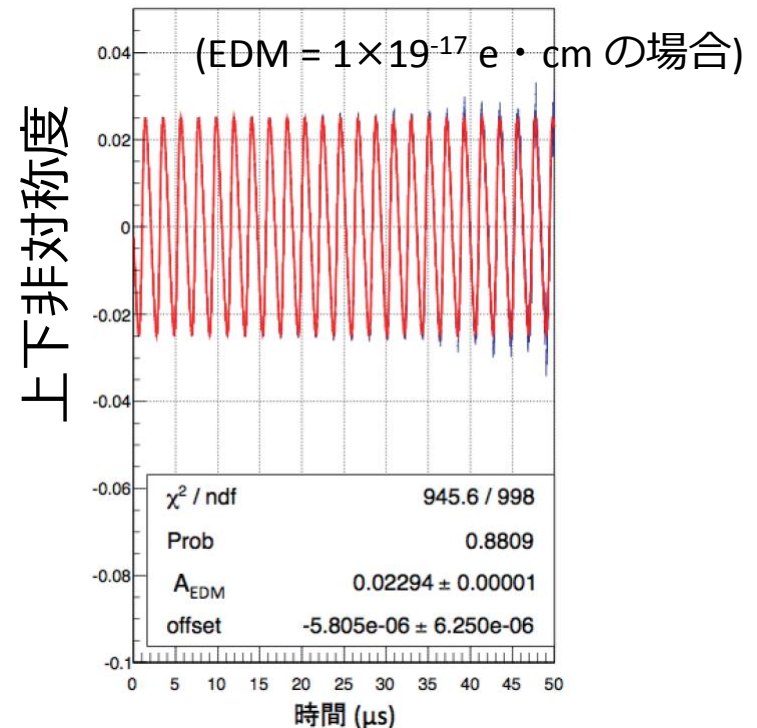
$$\vec{\omega} = -\frac{e}{m_\mu} \left[ a_\mu \vec{B} + \frac{\eta}{2} (\vec{\beta} \times \vec{B}) \right]$$

- ミュオン崩壊 ( $\mu \rightarrow e\nu\nu$ ) ではミュオンのスピンの向きに陽電子が飛びやすい。
  - 高運動量(200 MeV 以上)の陽電子を検出。
- EDM は磁場の向きに対して上下非対称度を生じさせる。

## g-2 信号



## EDM 信号



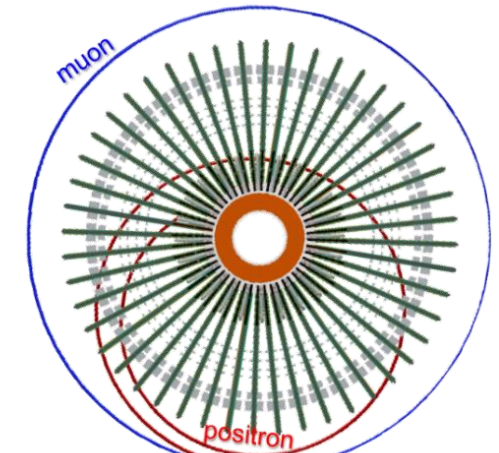
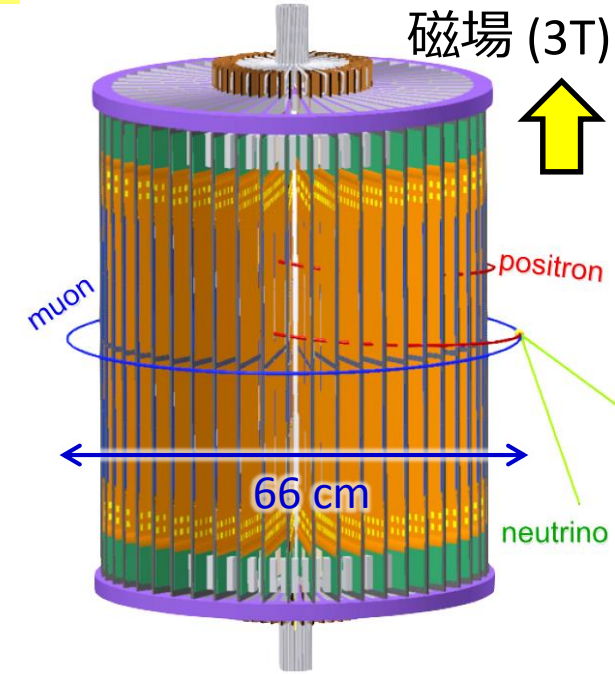


# 検出器への要求

- コンパクトなミュオン蓄積リング (直径66cm)
  - 精密な磁場コントロールが可能。
  - 密集してミュオンが崩壊する。

## 要求

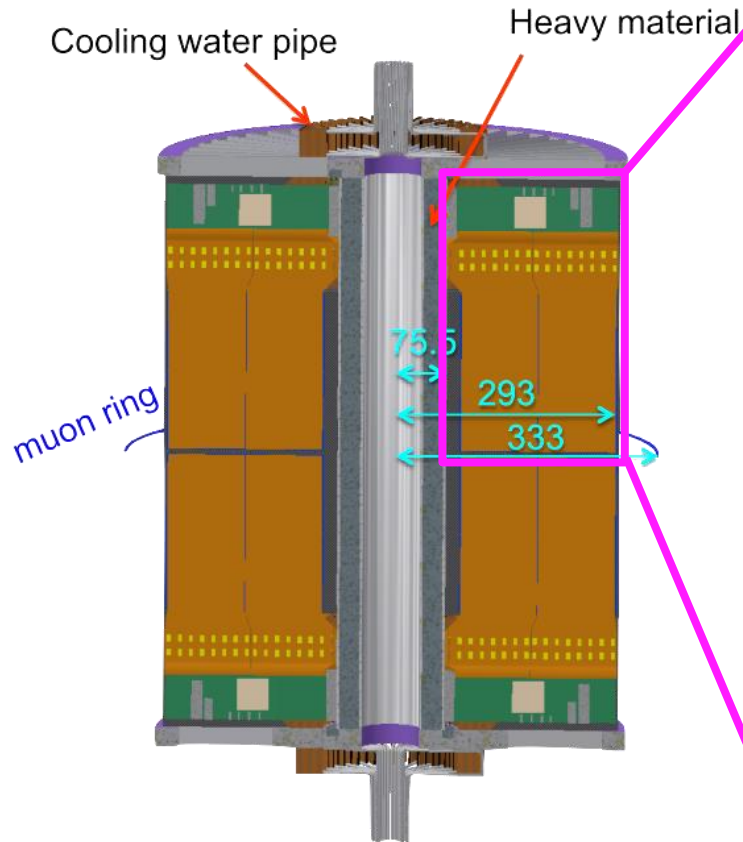
- 高位置分解能・飛跡再構成性能**
  - 200-300 MeV の陽電子
- 高計数率耐性・計数率変化に対する安定性**
  - 5 ns の間に $\mu$ 崩壊から最大30 個の陽電子が生成。
  - 150 倍の計数率変化 @ミュオン寿命5 周期
- ミュオン蓄積領域への電磁場干渉なし**
  - 磁場( $\Delta B/B \ll 10$  ppm), 電場  $E \ll 10$  mV/cm
- 蓄積リング内側に設置できるコンパクトな検出器**
- 設置位置精度**
  - EDM 測定に重要。



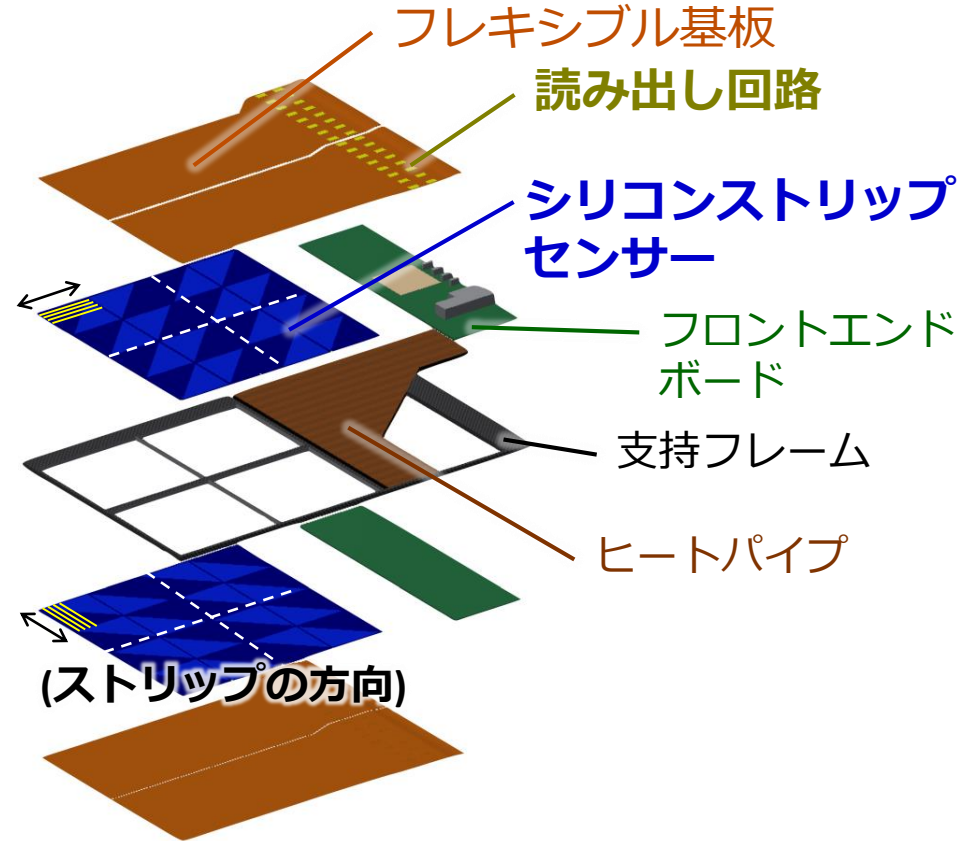
- **シリコンストリップ検出器を採用。**
  - 崩壊陽電子飛跡を効率的に検出するため、48枚の検出層を放射状に配置。

# シリコンストリップ検出器

## 検出器の断面図



センサーを両面に配置して位置(2次元)を測定。



- Belle II SVD と同規模のシリコン検出器
  - 総有感面積:  $\sim 7.3 \text{ m}^2$  (@768 枚sensors)
  - 総チャンネル数: **786,432 ch** (@6144 ASICs)



**Belle II SVD**  
 $\sim 1.2 \text{ m}^2 \times 2$  (両面)  
 $\sim 240,000 \text{ ch}$

➤ 検出器建設フェーズへ(科研費基盤S)



# 読み出し回路への要求

## 要求

### データ処理

- J-PARC のビームパルス構造(25 Hz) に同期したデータ読み出し。
- ミューオン寿命の5 周期以上を測定。

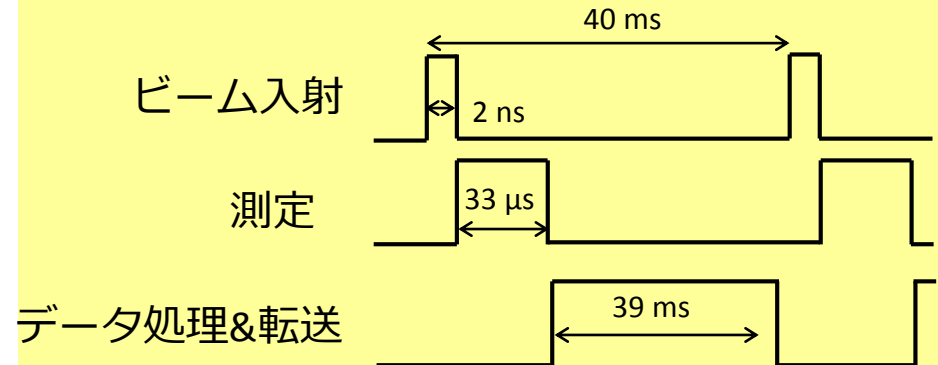
### 性能

- 低ノイズ(ENC < 1600)
- 広いダイナミックレンジ (>3 MIP)
- 高計数率耐性 (>1.4 MHz)
- 短い信号幅 (<100ns)
- 高時間分解能 (time-walk < 5 ns)

### 環境

- 低消費電力 : 0.64 W/chip

## データ収集の時間構造



## 試作読み出し回路ASIC @Open-It プロジェクト



1. **SlitA** (16 ch プロトタイプ [アナログ部])

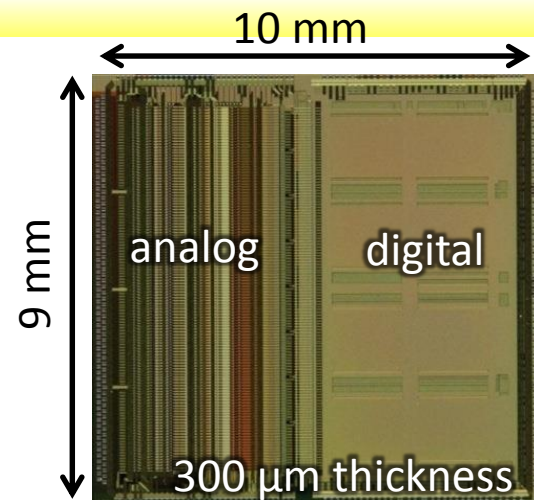
2. **SlitA2013** (64 ch プロトタイプ [アナログ部])

3. **Slit128A** {

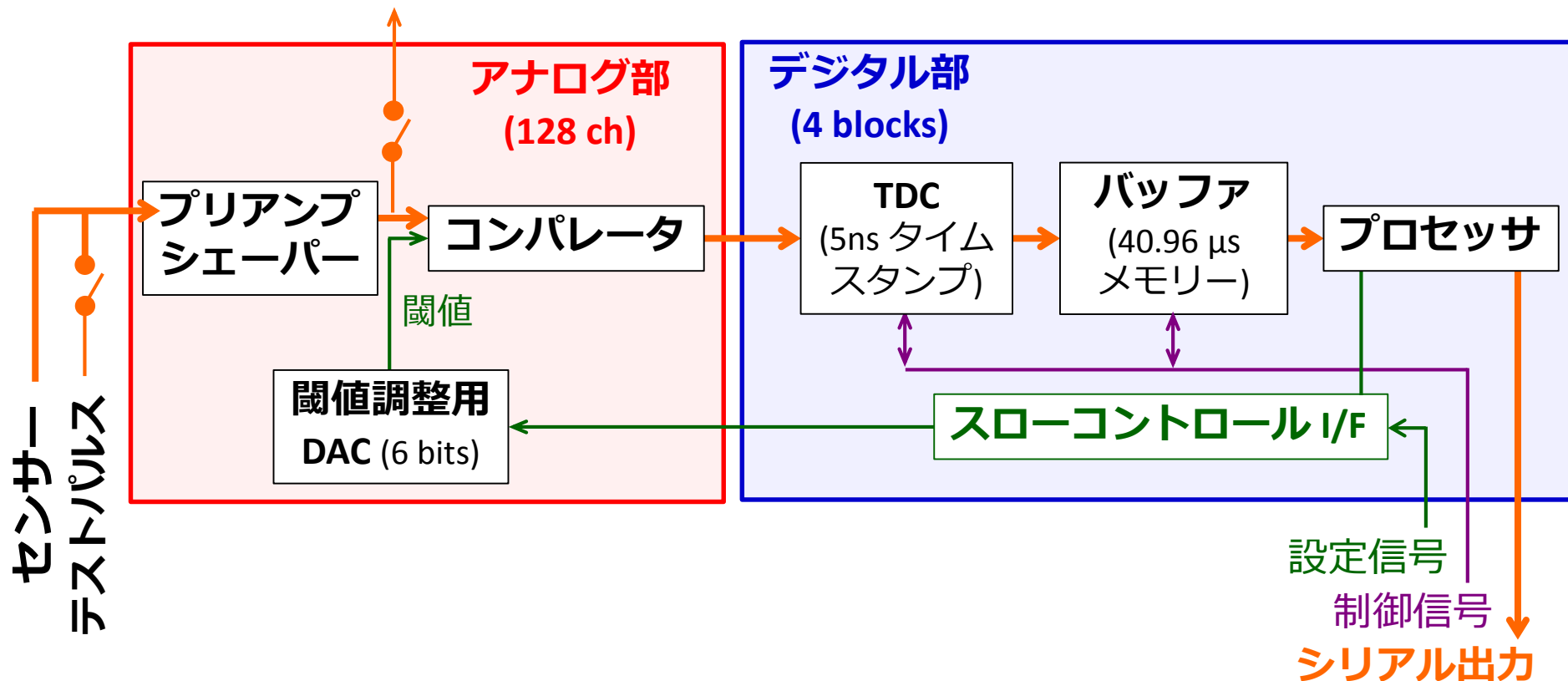
- 1 ch プロトタイプ [アナログ部 TEG]
- **実機仕様 128 ch プロトタイプ [アナログ・デジタル混載回路]**

# Slit128A のデザイン

- プロセス : Silterra 0.18  $\mu\text{m}$  CMOS
- **アナログ部** : 信号を増幅・整形・バイナリ化
- **デジタル部** : 5ns 周期で検出時刻をサンプリング。  
データをシリアル化して、FPGA へ転送



アナログモニター



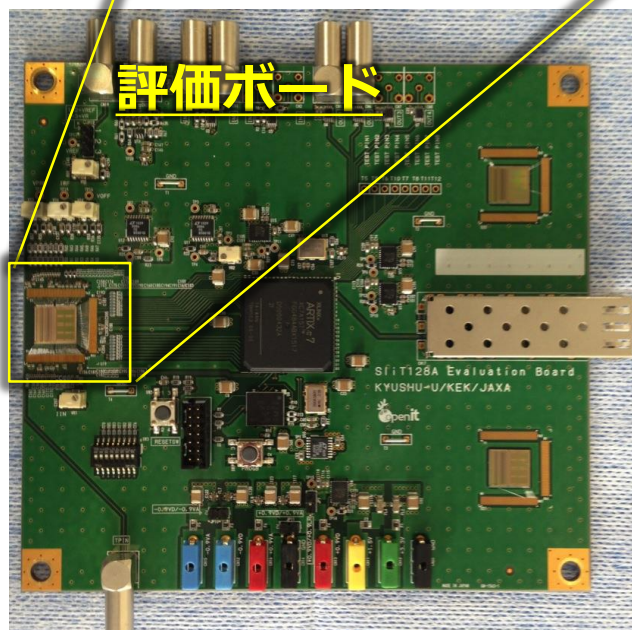
# ワイヤーボンディングによる評価ボードへの実装

11

- [Open-It プロジェクト](#)で評価ボードを製作。



自動ワイヤーボンダー (Kulicke&Soffa 3700plus) @ 九大



- 25  $\mu\text{m}$  径のアルミ線ワイヤーを使用して、198 組の電極パッドに対してワイヤーを形成。

ファンクション  
ジェネレータ

オシロスコープ

データ書込/読出開始信号

アナログ出力

SiT128A

FPGA  
(XC7A15T)

SFP slot

SiT128A Evaluation Board  
KYUSHU-U/KEK/JAXA

openit

電源供給

テストパルス

SiTCP を通して、  
PC で制御。

データの読み出し

光ケーブル/イーサネット

スローコントロール

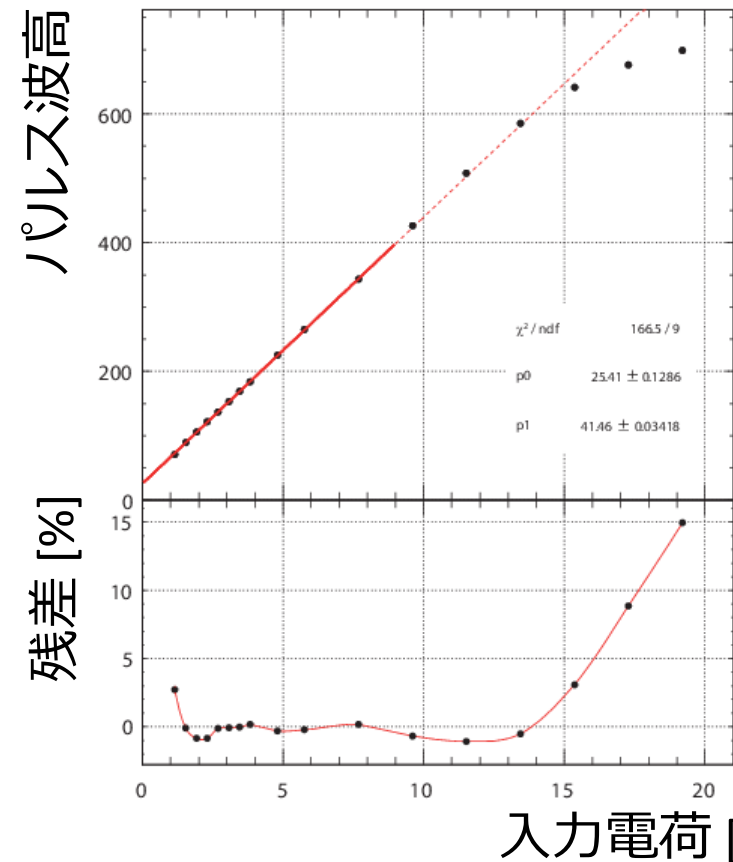
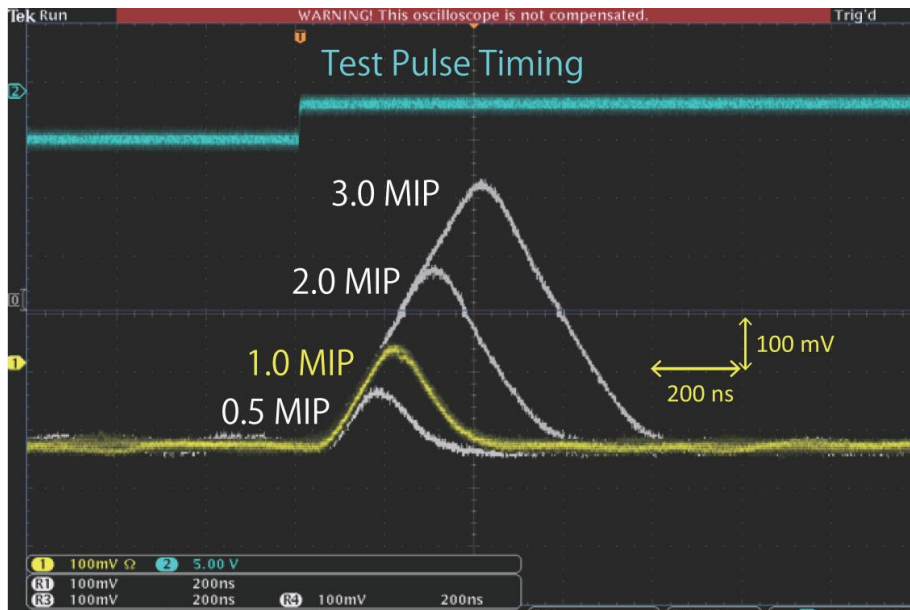




# ダイナミックレンジ

- テストパルスに対するアナログ出力を確認。
  - 0-9 fC の領域でフィット。残差  $\pm 5\%$  以内の領域をダイナミックレンジと定義。
  - 予想されるセンサーからの信号は3.84 fC (1 MIP@320  $\mu\text{m}$  Si)。

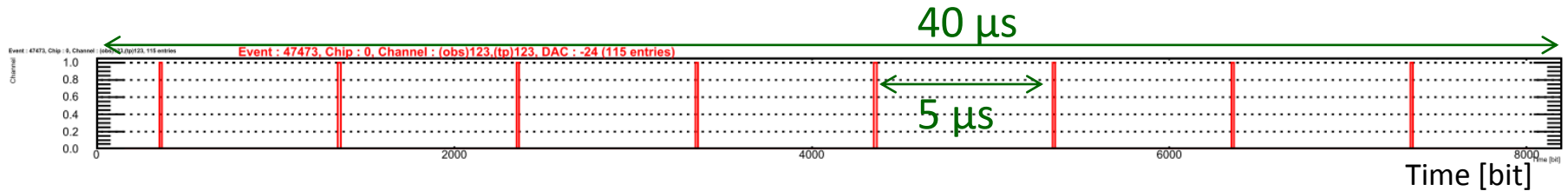
## 出力波高 v.s. 入力電荷



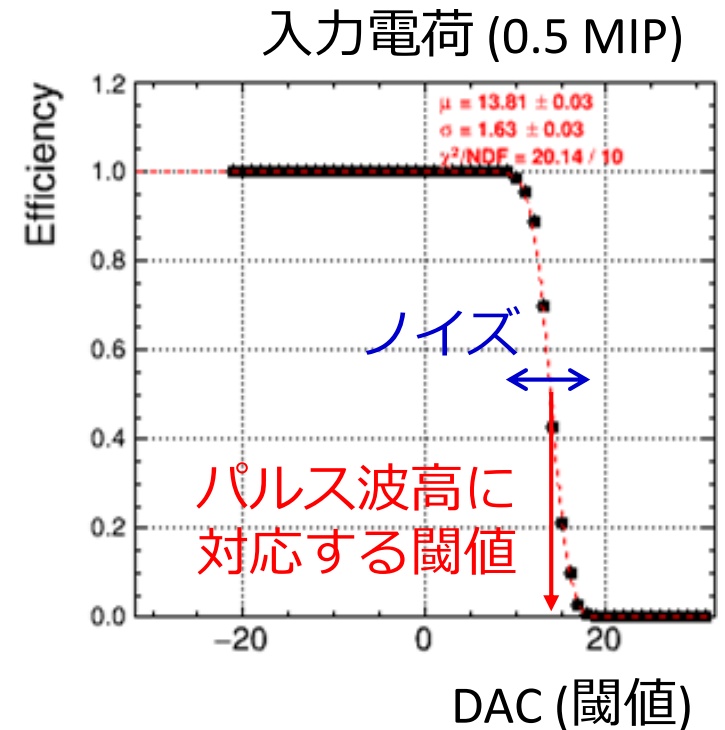
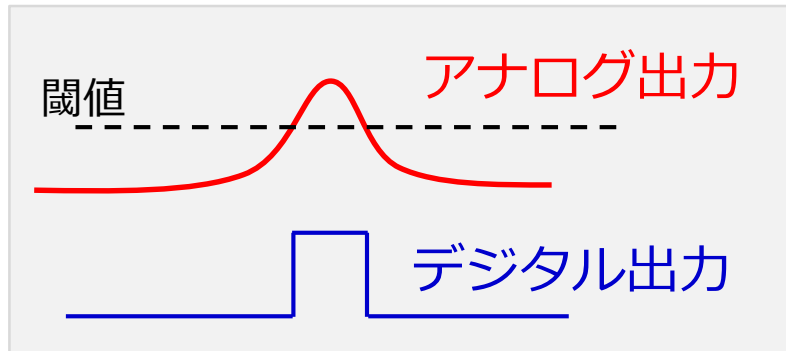
- 十分なゲイン(50 mV/fC) とダイナミックレンジ(~4 MIP) があることを確認。

# S-Curve スキャン

- デジタル出力の例

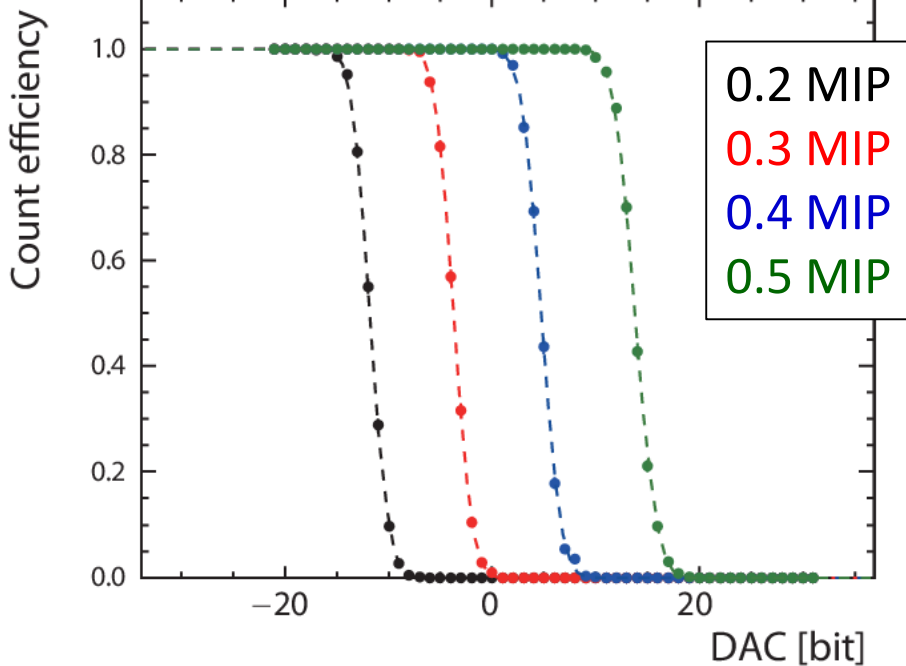


- 入力電荷量を入力して、閾値を変えながらカウント効率を測定。
  - 閾値は6-bit DAC でチャンネル毎に調整可能。
  - データは誤差関数でフィット。

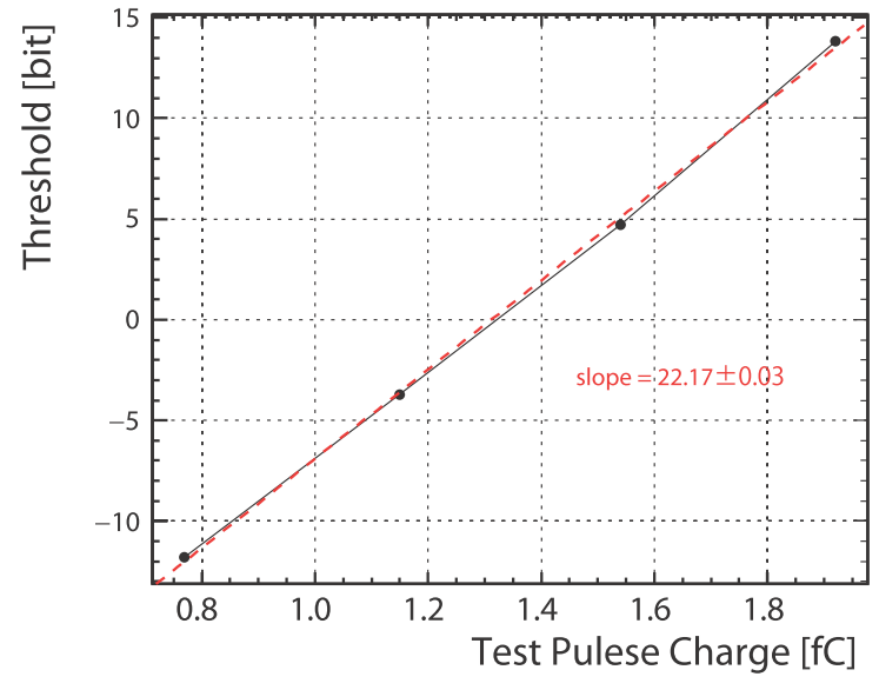




# ノイズ性能



## DAC bit と入力電荷の関係



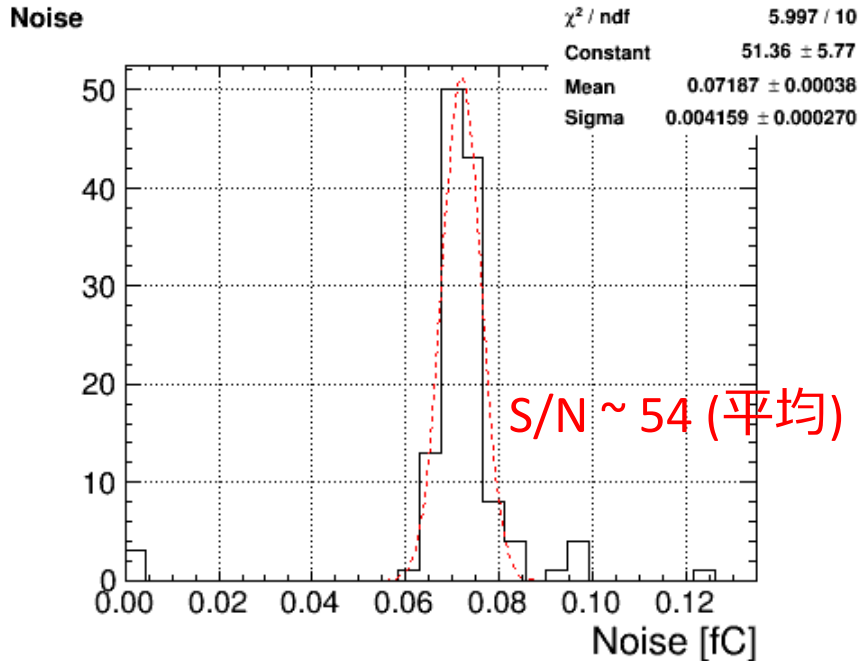
## ノイズ性能

- S/N  $\sim 56$  (ENC  $\sim 430$  e)
- 読み出し回路単体では十分なノイズ性能がある事を確認。
  - センサーと接続した時の性能は次のトークで。

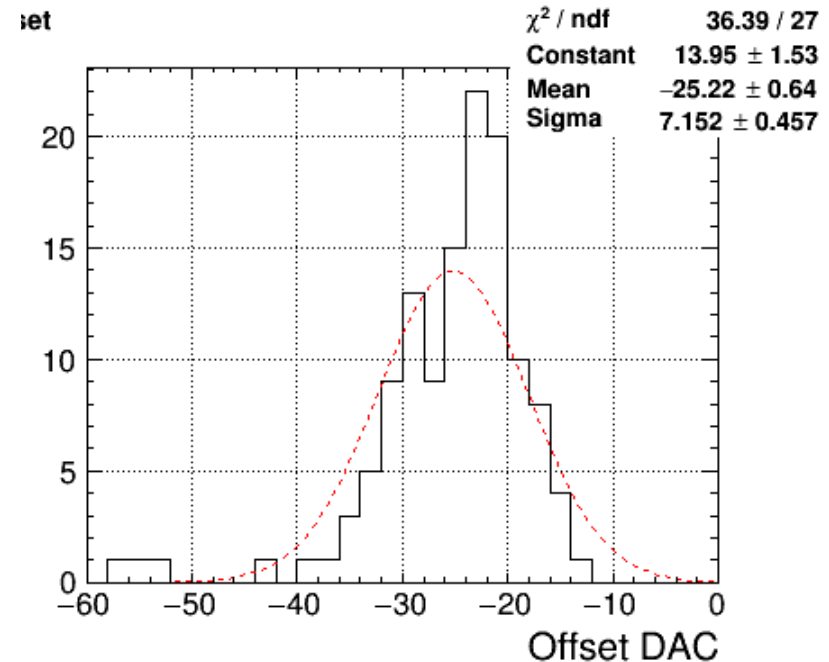
# チャンネル特性

- 全チャンネル(128 ch) に対してS-curve スキャンを行い、ノイズ・オフセットを評価。

## ノイズ

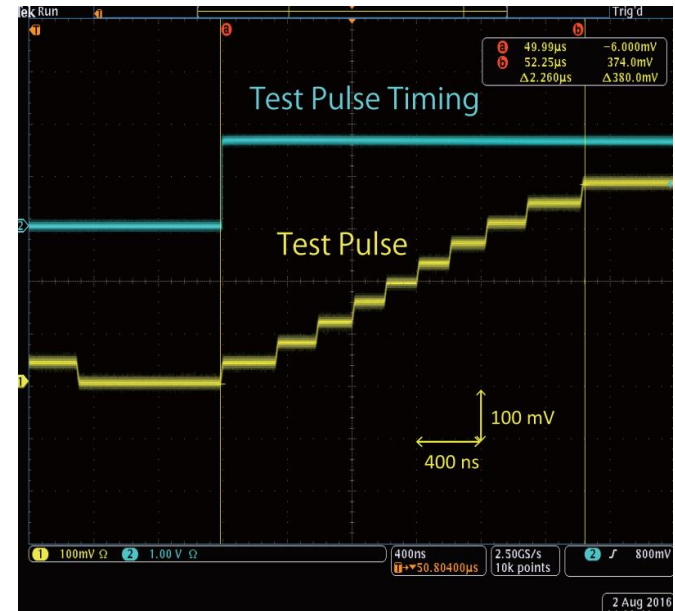


## オフセット

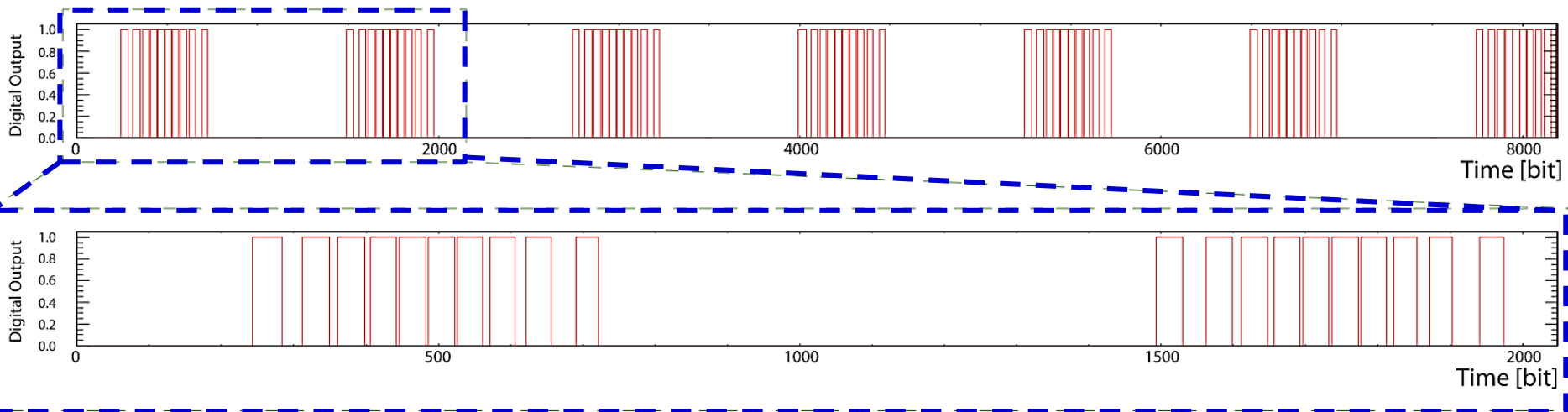


- 3つのチャンネルで信号が確認できなかったが、それ以外のチャンネルでは十分なノイズ性能がある事を確認。
  - 次期読み出し回路でバイアスの調整及びアナログ・デジタル間のクロストークの抑制を行う。
- オフセットのチャンネルばらつきは6-bit DACで補正可能。

- 250 ns 間隔 (4 MHz) で連続したテストパルスを入力。
  - 想定している計数率は最大1.4 MHz。
  - 閾値は0.2 MIP に設定。



## デジタル出力

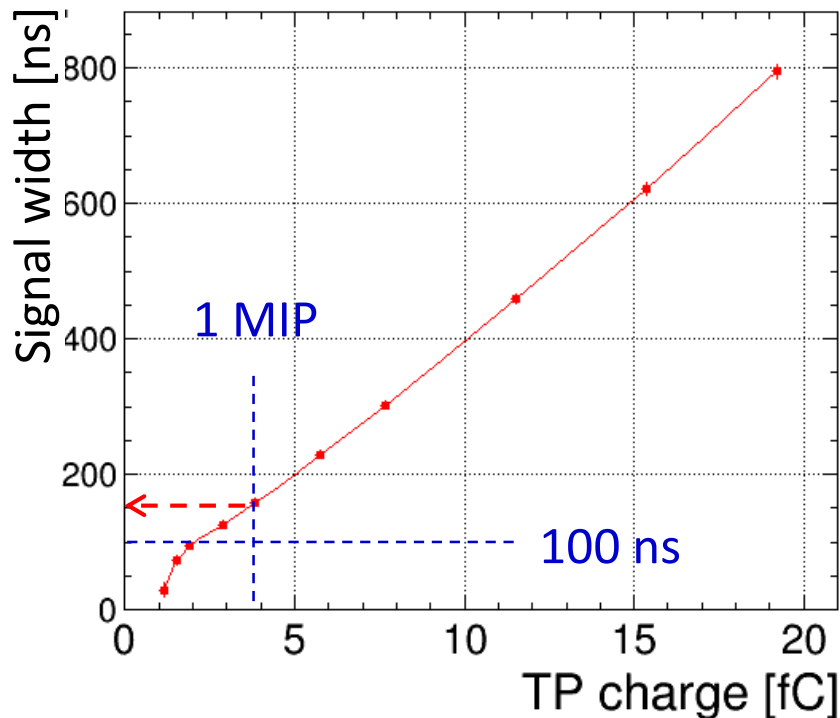


➤ 信号をきちんと分離できていることを確認。

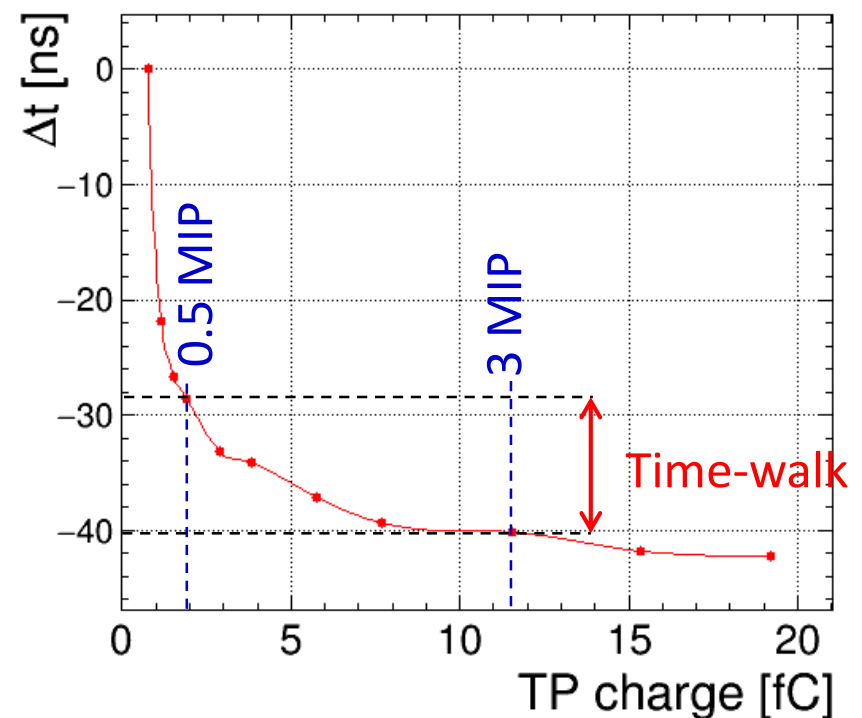
# 信号幅とtime-walk

- 1 MIP に対する信号幅 : 155 ns (要求値 : <100 ns)
- Time-walk : 11.5 ns (要求値 <5 ns)
  - Time-walk は0.5 MIP と3.0 MIP の時間差で定義。

## 信号幅と入力電荷の関係



## Time-walk と入力電荷の関係



# まとめ

- J-PARC E34 実験は全く新しい技術を用いてミュオン $g-2$ /EDM を測定することを目指している。
- シリコンストリップ検出器用読み出し回路を開発。
  - 初めての实機仕様アナログ・デジタル混載回路で基本的な動作を確認。

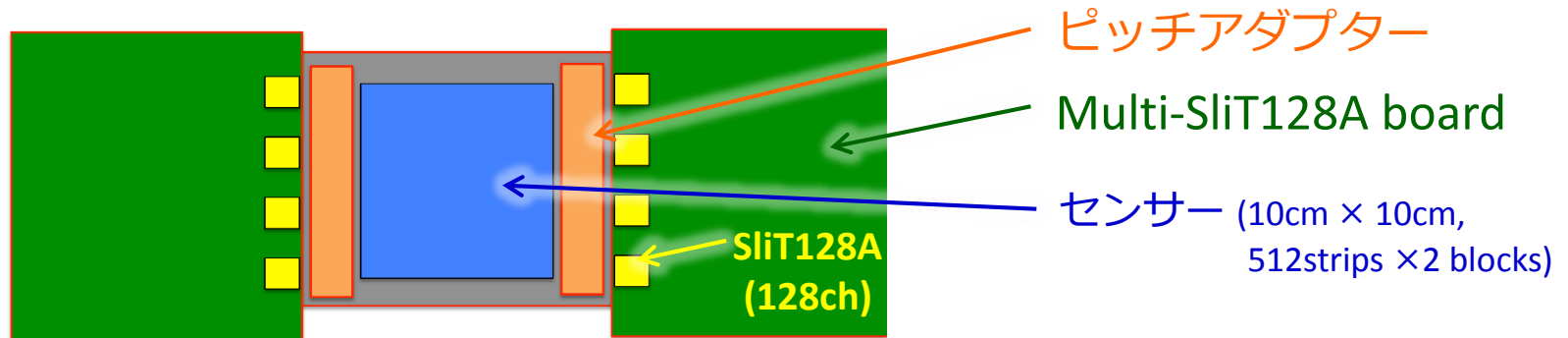
項目	要求値	Slit128A
		測定結果
ダイナミックレンジ	~ 3MIP	4 MIP
ENC	< 1600 e	430 e (* 検出器容量無しの場合)
信号幅 (1 MIP)	< 100 ns	155 ns
Time walk (0.5 MIP→3MIP)	< 5 ns	11.5 ns
消費電力	0.64 W/chip	0.44 W/chip

- J-PARC のビーム構造に対応したデータ取得が可能なので、J-PARC の他の実験でも使用可能。



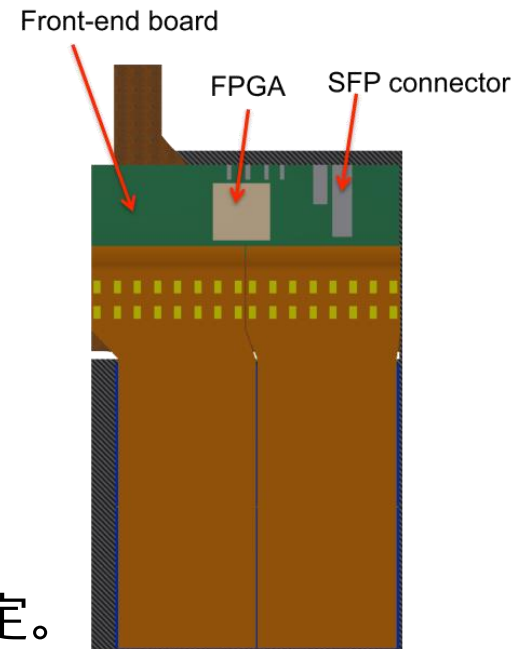
## センサーとの接続

- センサーの全ストリップ読み出しのために、複数枚の読み出し回路を搭載できるボードを製作中([Open-It プロジェクト](#))。



## 次期(実機用)読み出し回路

- 検出器建設に向けた仕様の調整
  - チップサイズ、パッドの配置・数
- 性能改善
  - 配線の最適化。
  - コンパレーターの最適化。
- 今年度、32チャンネルのTEGを試作、来年度チャンネルの実機用読み出し回路を製作する予定。





# Backup

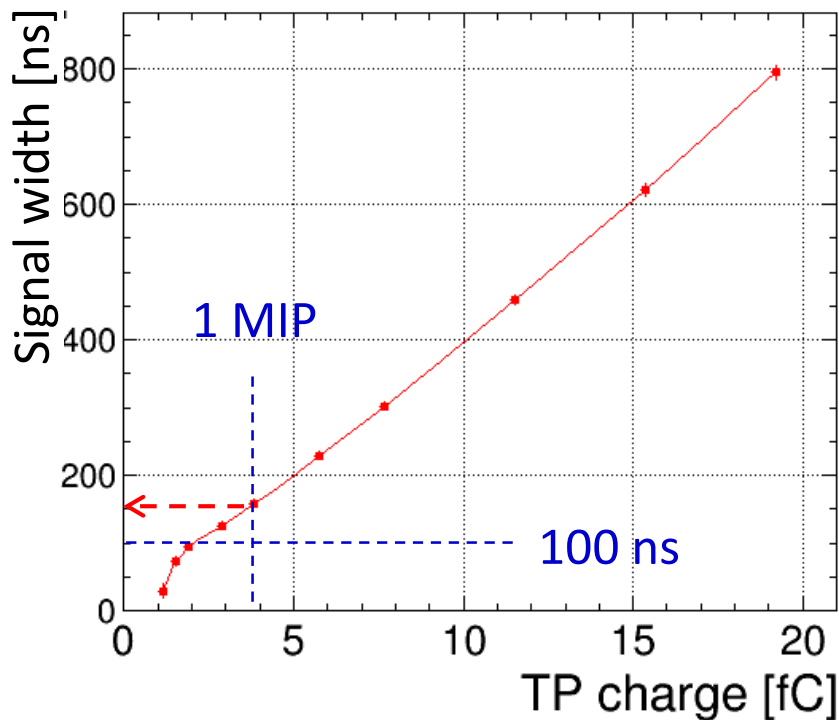
- Requirement : < 5 mW/ch (0.64 W/chip).

	Supply Voltage [V]	Current [A]	Power consumption [W]
VD (digital)	+0.9	0.125	0.11
VD (digital)	-0.9	0.125	0.11
VA (analog)	+0.9	0.169	0.15
VA (analog)	-0.9	0.07	0.06
+2.4 V	+2.4	0.001	0.003
Total			0.44

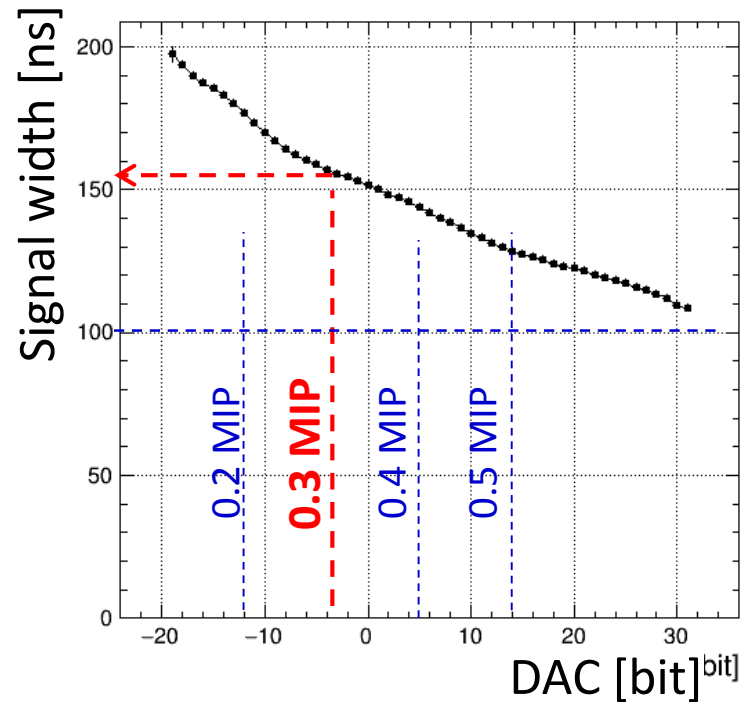
- Measured power consumption is 0.44 W/chip.

- Requirement :  $< 100$  ns to 1MIP signal output with 0.3 MIP threshold
- Measured signal width is **155 ns**.

## Signal width with 0.3 MIP threshold



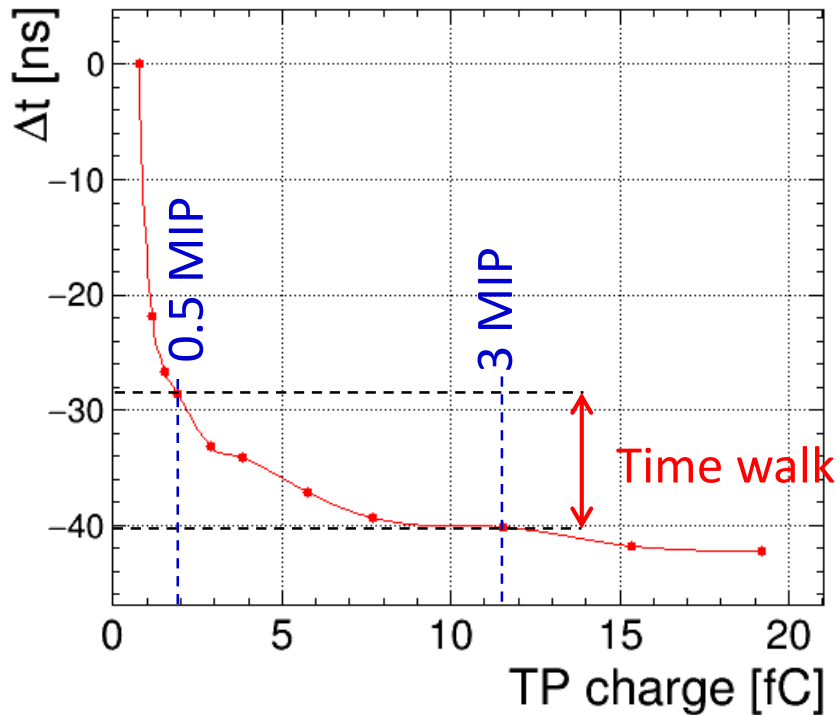
## Signal width at 1 MIP TP charge



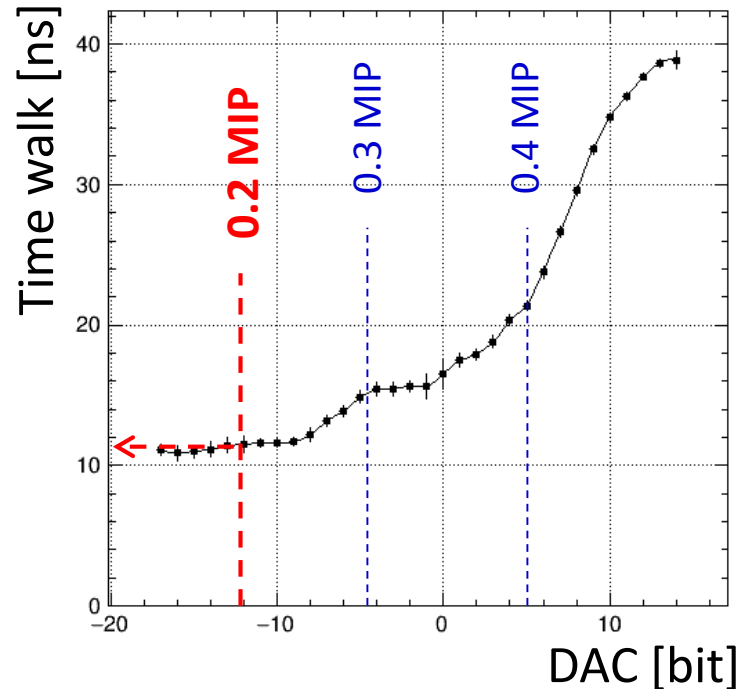
# Time-walk

- Requirement :  $< 5 \text{ ns}$  between 0.5 MIP and 3 MIP with  $5\sigma$  noise threshold.
- Measured time walk is **11.5 ns**, assuming noise of ASIC connected with sensor is 1000 e.

## Time walk with 0.2 MIP ( $\sim 5000e$ ) threshold



## Time walk btw 0.5 MIP and 3 MIP



# S-curve

S-curve (vref=0.00, tpchg=1.54, 0)

