

# J-PARC muon $g-2$ /EDM 実験 に向けたキッカー磁場中での シリコンストリップ検出器の動作試験

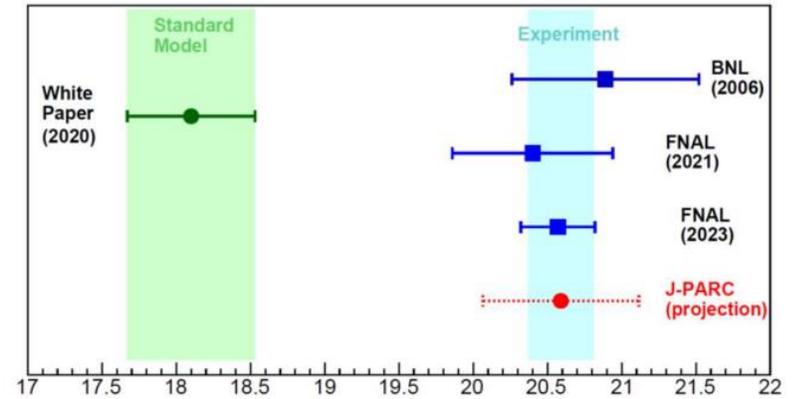
矢村 昂暉  
新潟大学

2023/11/24

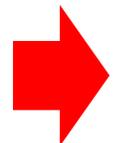
Flavor Physics Workshop 2023

# J-PARC muon g-2/EDM 実験

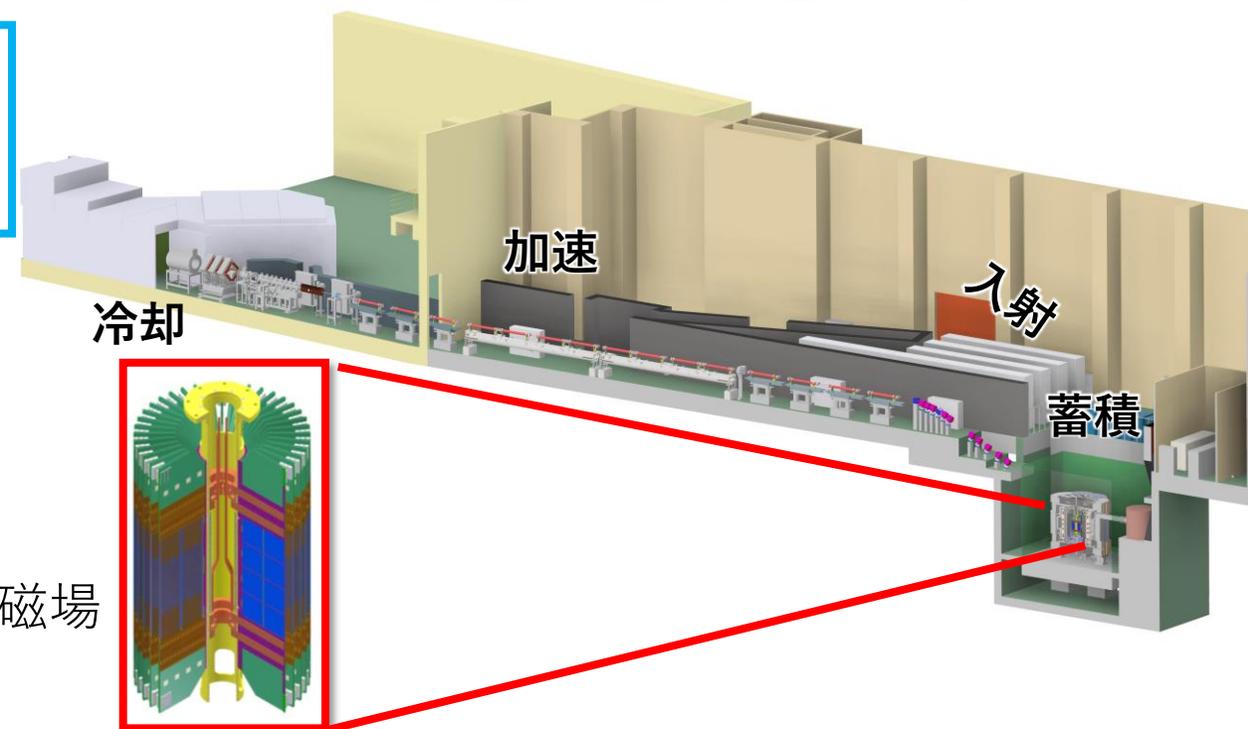
- J-PARC muon g - 2/EDM 実験ではミューオンの異常磁気モーメント(g-2)とEDM(電気双極子モーメント)を独立な手法で精密に測定する。



**先行・進行中の結果**  
g-2 0.54 ppm@BNL  
0.20 ppm@FNAL  
EDM  $<1.8 \times 10^{-19} e \cdot cm$   
@BNL



**最終目標**  
g-2 : 0.1 ppm  
EDM :  $10^{-21} e \cdot cm$

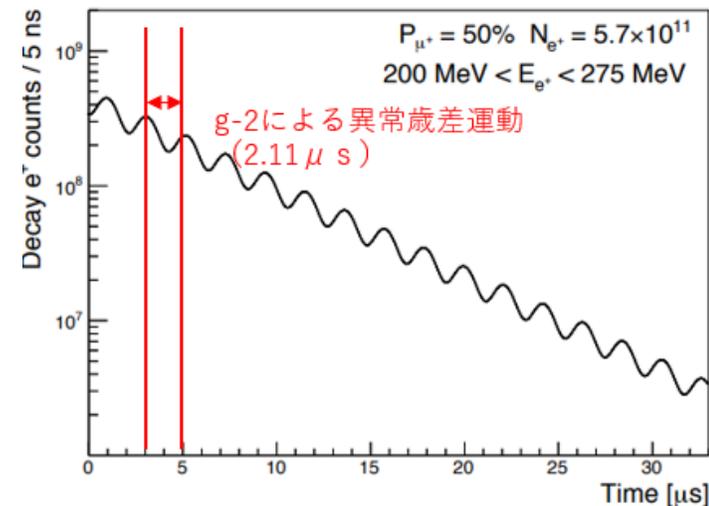
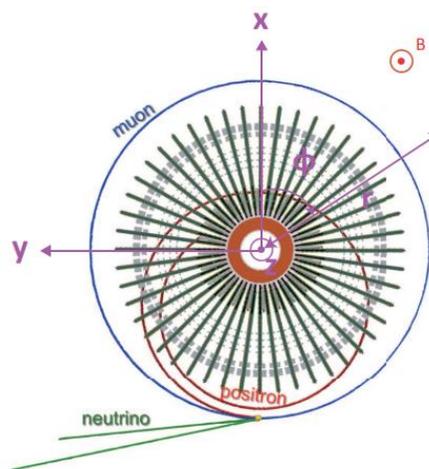
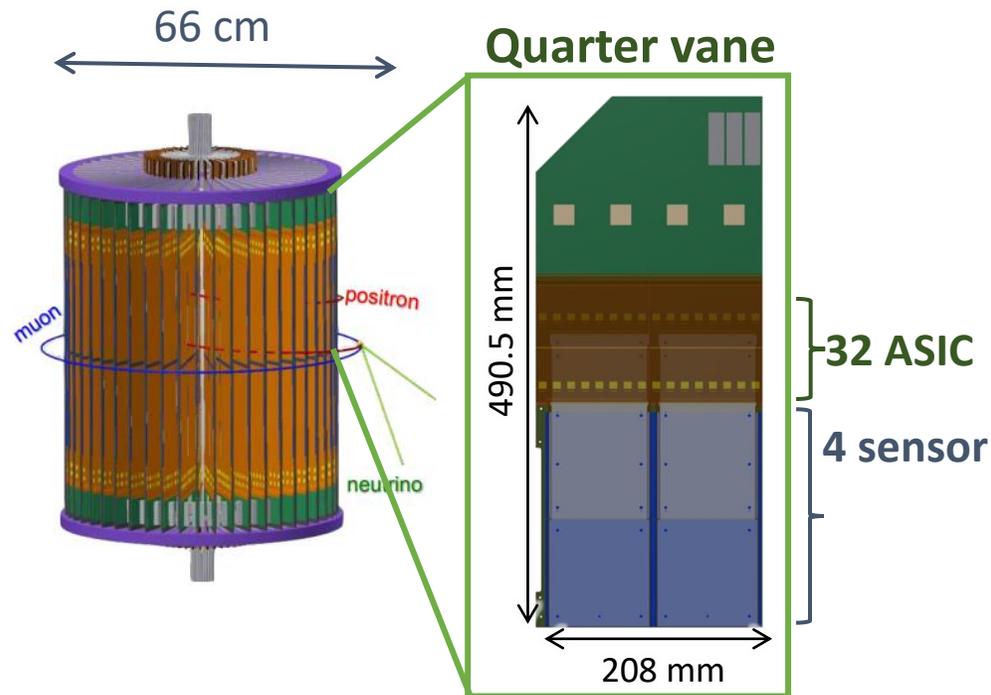


- 特徴
- 低エミッタンスのミューオンビーム
  - 電場を用いないビーム収束
  - コンパクトなMRI型ソレノイド磁石による高一様磁場
  - 飛跡検出器による崩壊陽電子の飛跡検出

シリコンストリップ検出器

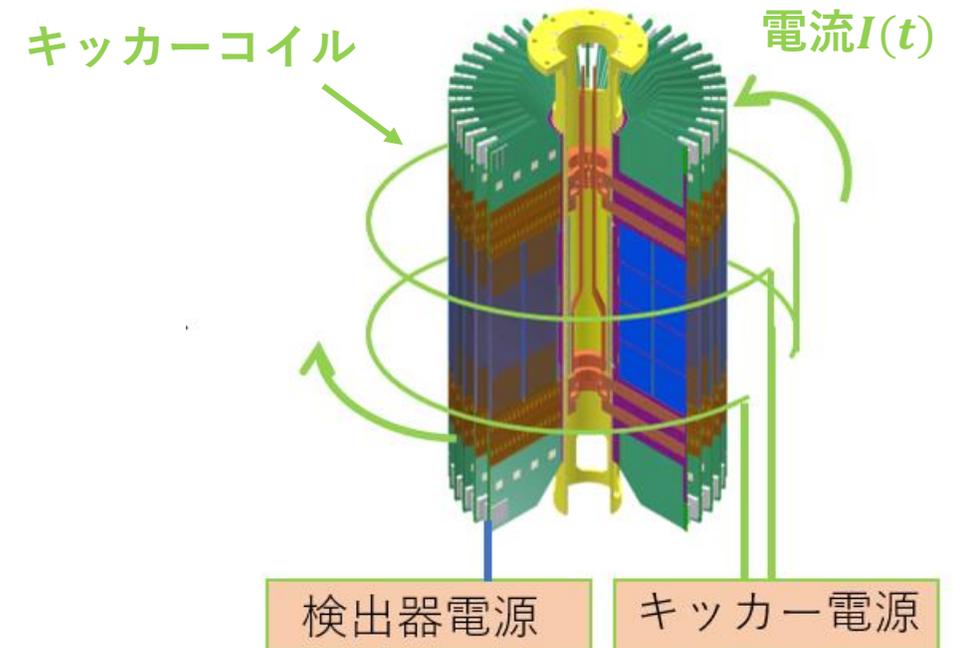
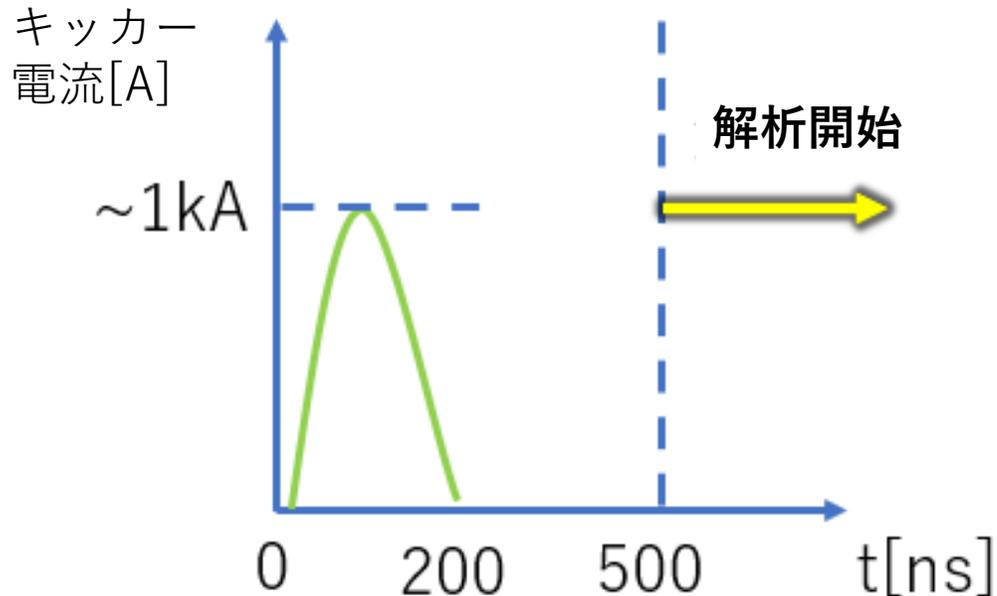
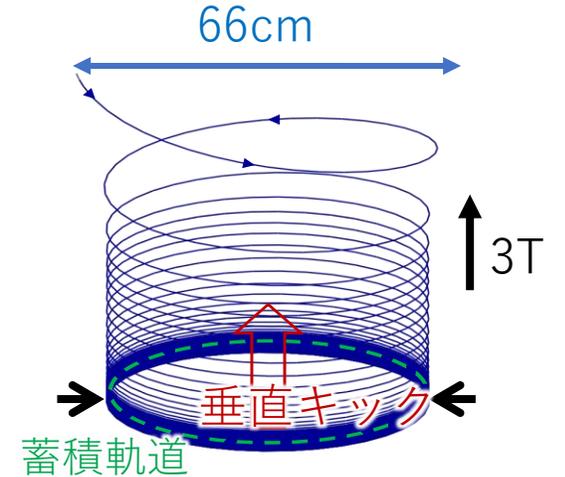
# シリコンストリップ検出器

- ミューオン崩壊から生じる陽電子をシリコンストリップセンサーから構成された飛跡検出器で検出。
- 40枚の検出モジュールを放射状に配置。
- 最大6個/nsの頻度で発生するミューオン崩壊事象を捉えるため、高レート耐性が要求される。
- 測定開始から終了までに150倍のヒットレート変化(寿命5周期分)。



# キッカー磁場とシリコンストリップ検出器 4

- コンパクトな蓄積リングにミュオンを3次元的に入射する。
- キッカーコイルに瞬間的に電流を流し、動径方向の磁場(キッカー磁場)を生じさせ、ミュオンを蓄積平面内に留める。
- シリコンストリップ検出器はキッカーコイルの内側に設置する。
  - キッカーコイルの動作により、検出器が壊れないか？
  - キッカーコイル動作直後からデータを取り始められるか？
    - ヒットレートに依存した検出器のヒットタイミングのずれへの要求: ps オーダー



# 試作キッカーコイルを用いた検出器の動作試験<sup>5</sup>

- 試作キッカーコイル内に検出器を設置して、動作試験を行った。
  - 試作キッカーコイルで発生する磁場の大きさは本番の1/10程度
- 測定項目
  - 試作キッカーコイルの磁場により検出器が壊れないか
  - キッカー磁場発生直後の検出器への影響(ノイズ、ヒットタイミングのずれ)を評価

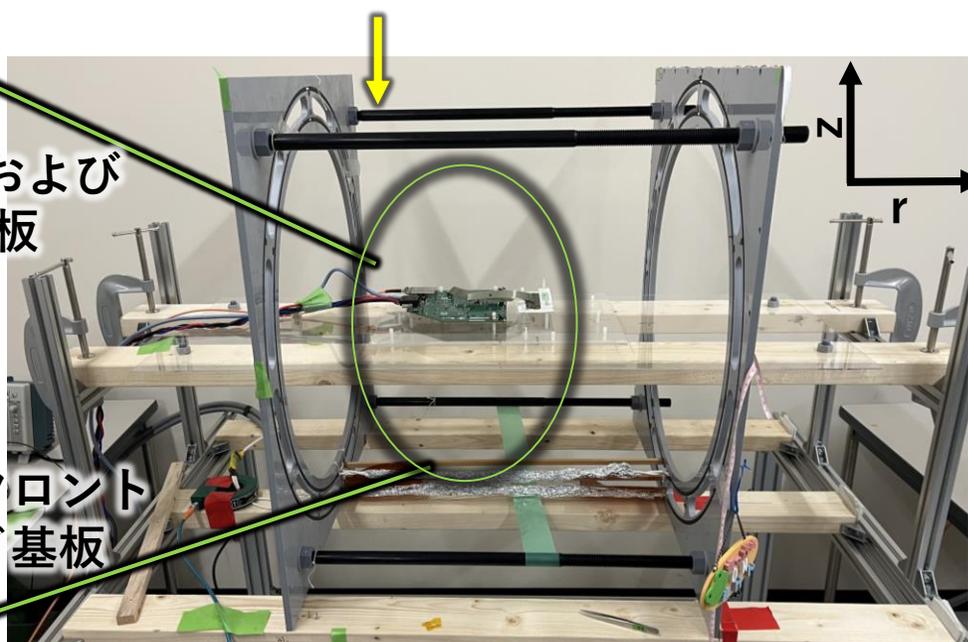
検出器



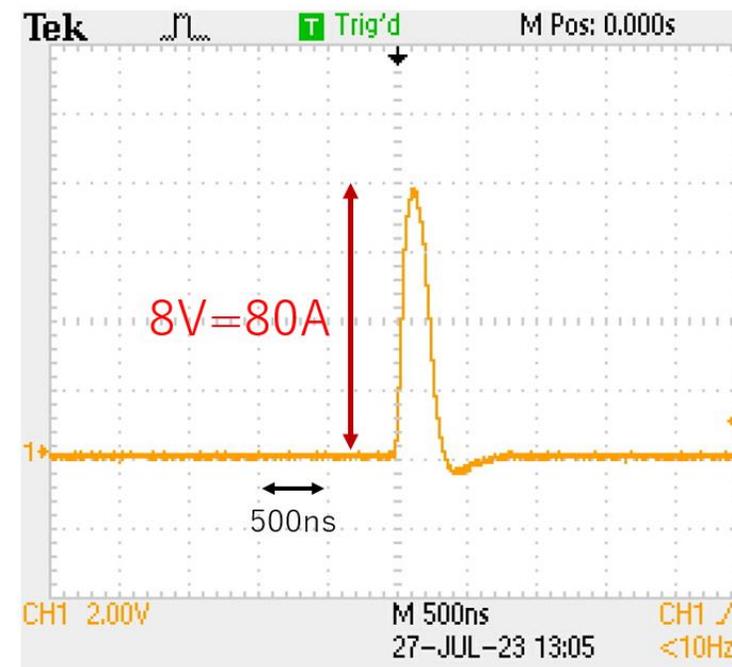
実機ASICおよび  
ASIC用基板

試作フロント  
エンド基板

試作キッカーコイル

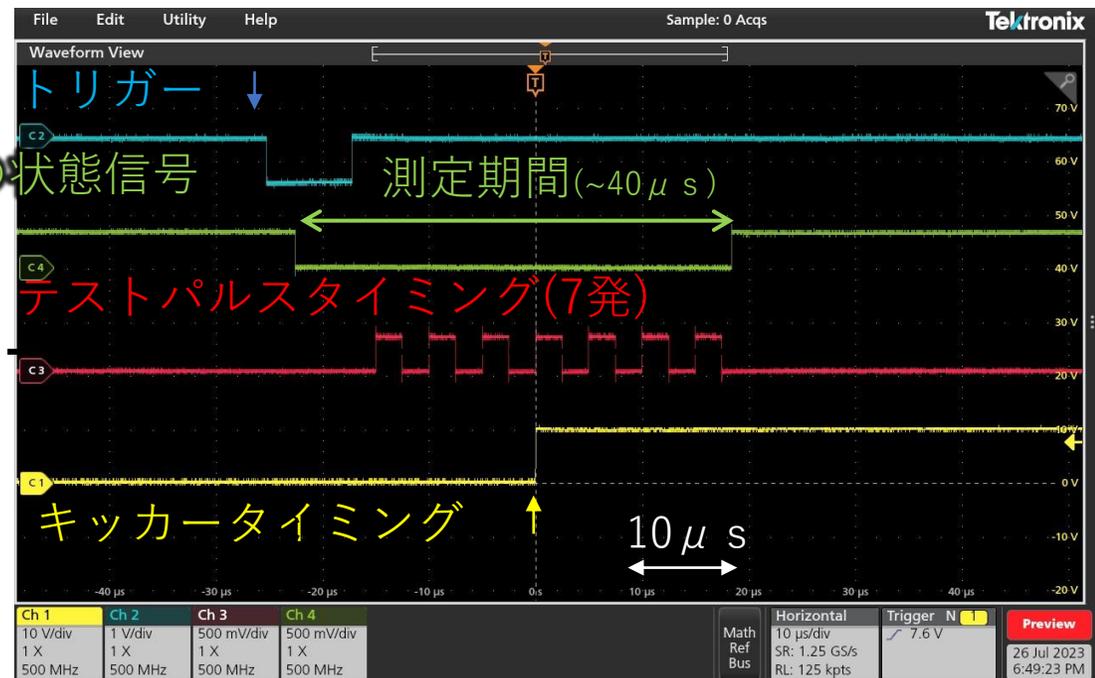
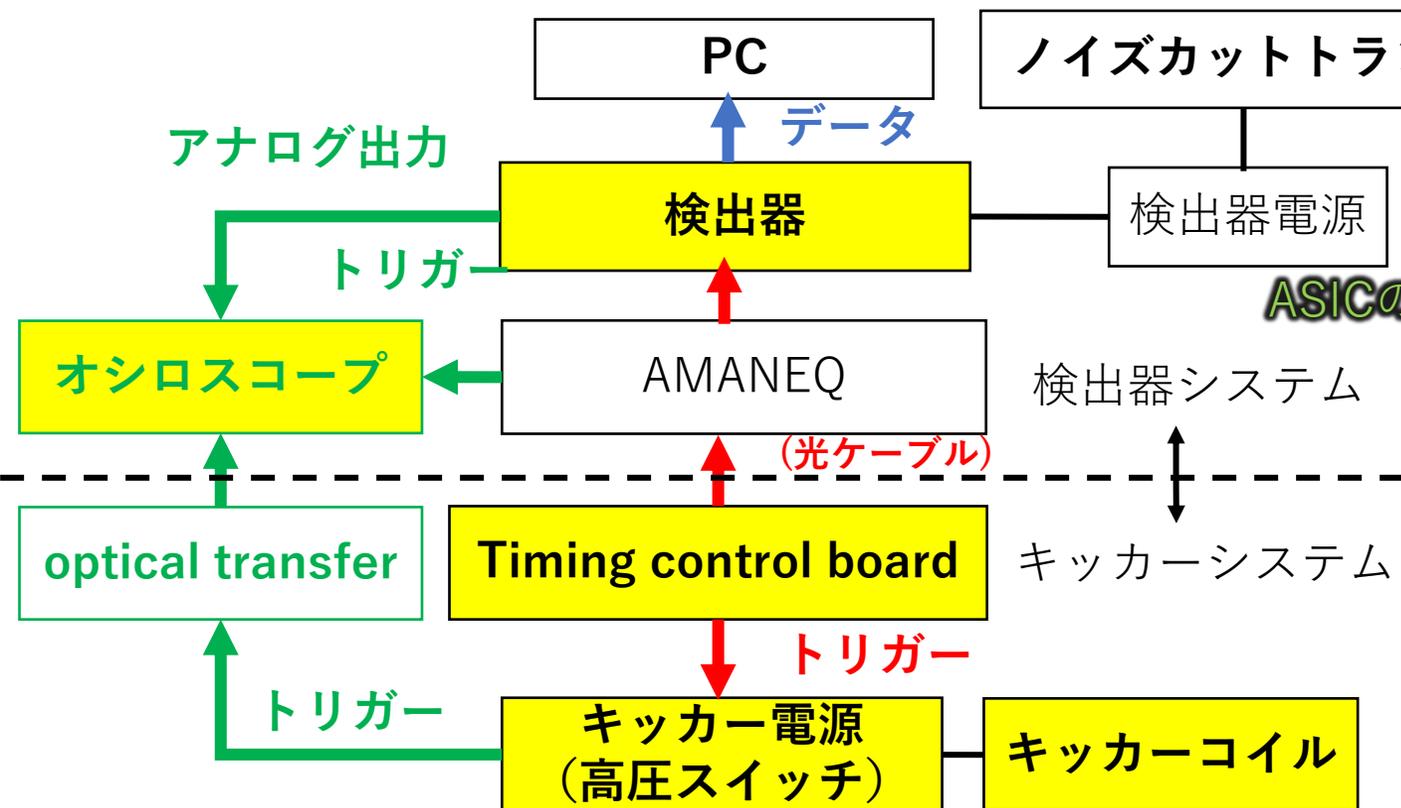


キッカーコイルに流れた電流



# 検出器とキッカーのタイミングの制御

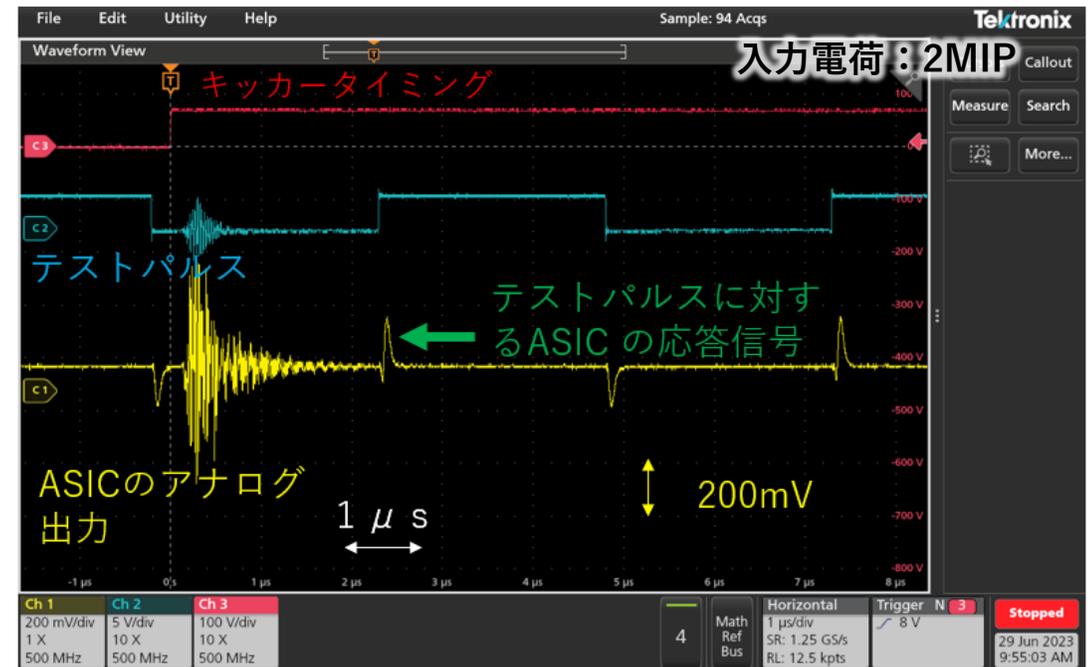
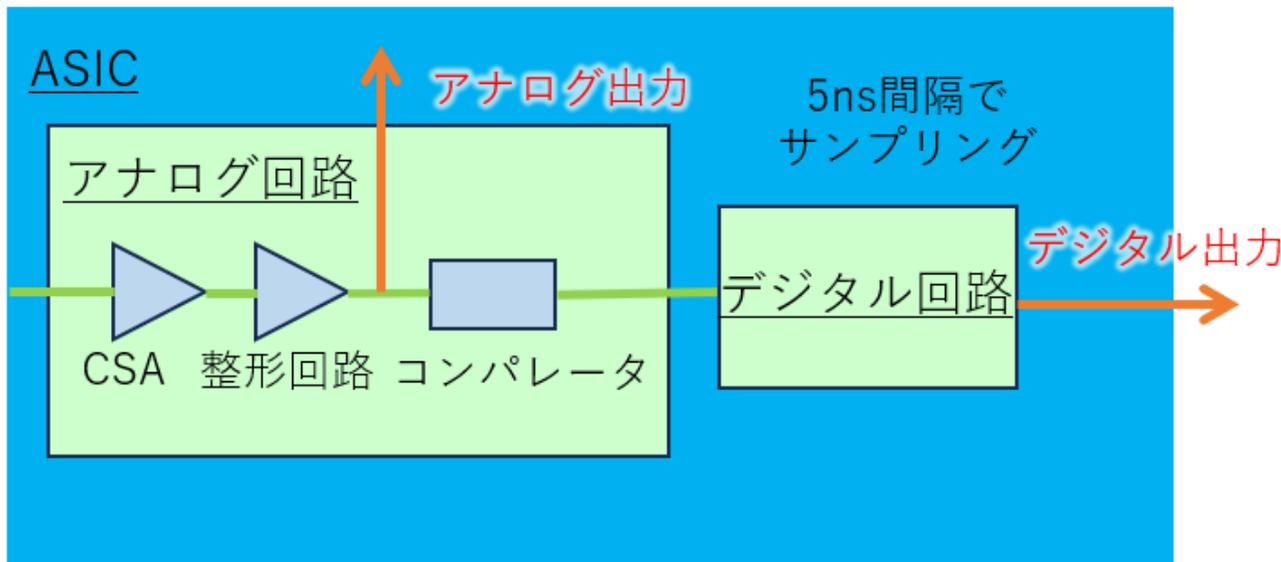
- キッカー磁場発生後の経過時間ごとに影響を評価する必要がある。
- Timing Control boardから検出器システムとキッカーシステムにトリガーを送る。
  - トリガー出力の遅延量は調整可能
- キッカーからの電氣的な影響を避けるために、光ケーブルとoptical transferを用いてグラウンドを分離している。(壁のコンセントを除く)
- ノイズ削減のためにノイズカットトランスを使用している。



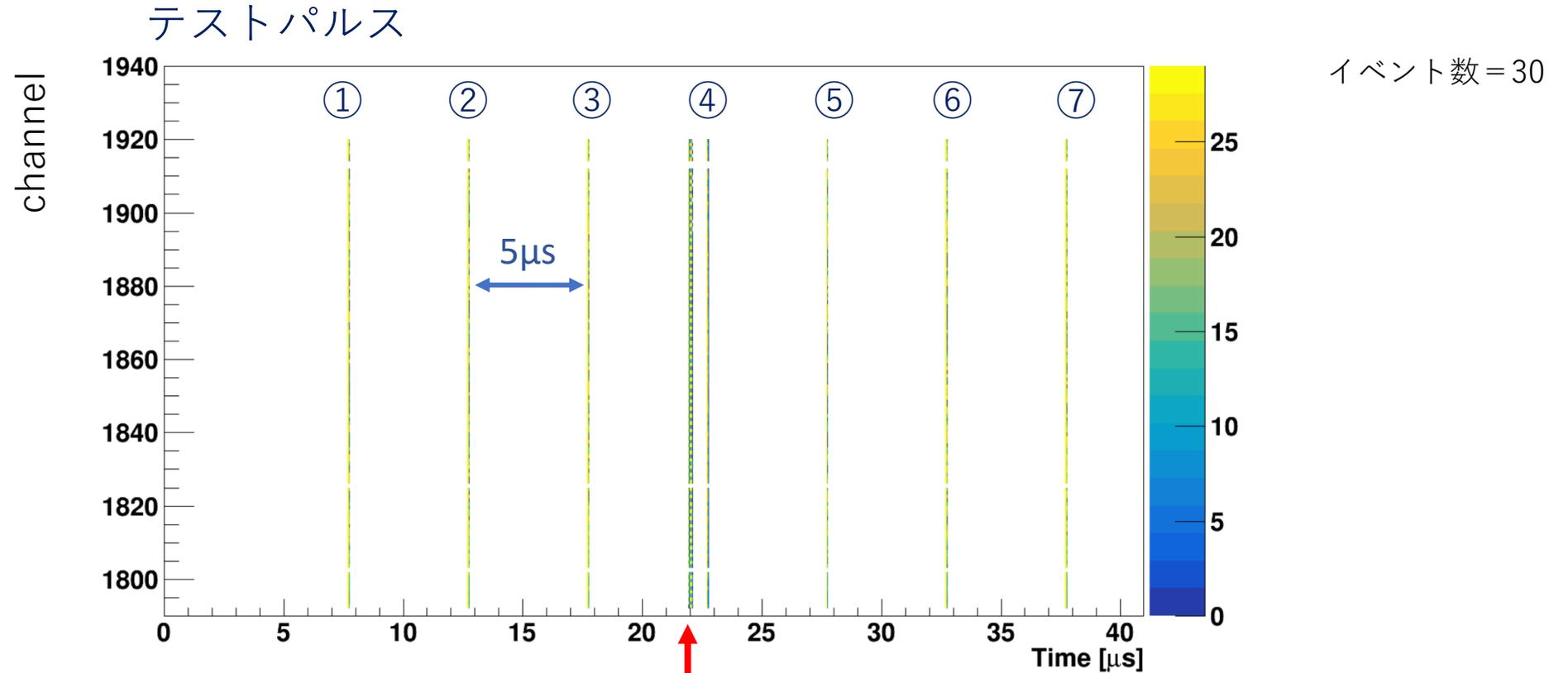
# 読み出しASICのデータ（アナログ出力）

- 読み出しASICにはアナログ出力とデジタル出力がある。
  - アナログ出力：整形回路の出力
  - デジタル出力：コンパレータ出力をサンプリングしたもの →本番の実験ではこちらを使用
- アナログ信号ではオシロスコープで測定する際にノイズを拾っている。
  - これ以降は、デジタル出力を観測して、試験を進めた。

MIP:最小電離損失粒子  
1 MIP = 3.84fC



# 読み出しASICのデータ（デジタル出力）



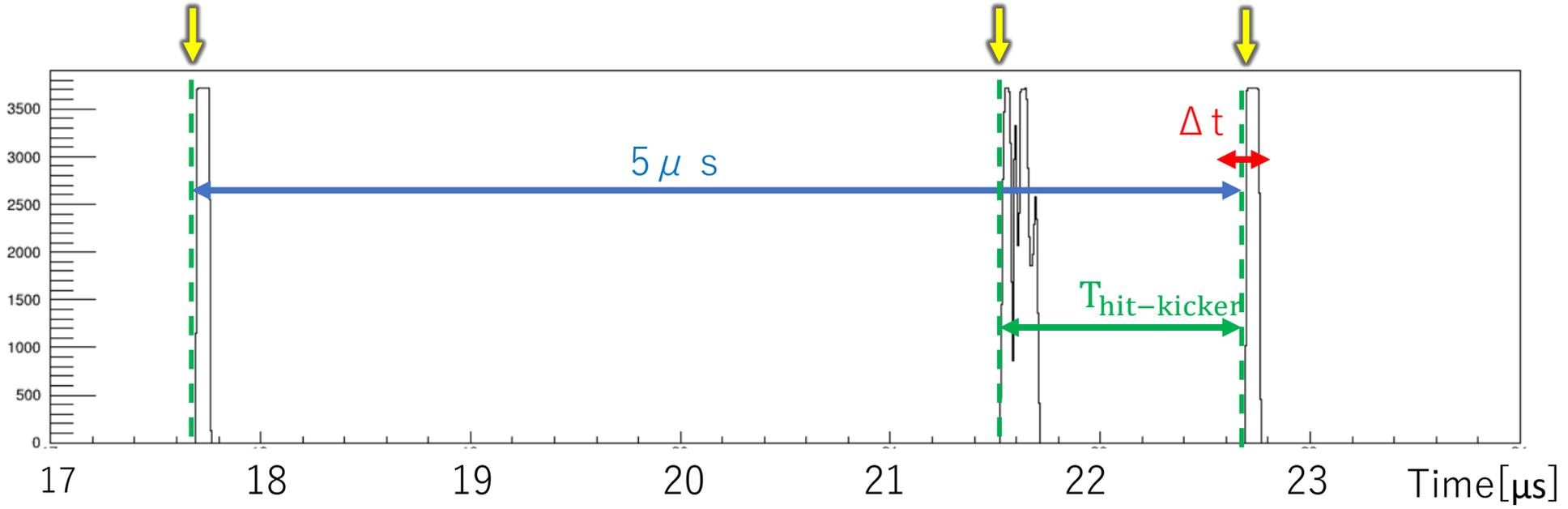
- デジタル出力でASICの信号を確認した。
  - 5μs間隔で7発のテストパルスを入力
  - キッカーコイルのタイミングを3発目と4発目の間に入力
- 試験を通して、試作キッカーコイル内で検出器を動作させても壊れなかった。

キッカーによるノイズ



# キッカーノイズによる検出器のヒットタイミングのずれの評価方法 10

基準にするテストパルス (3発目)                      キッカータイミング                      評価するテストパルス (4発目)

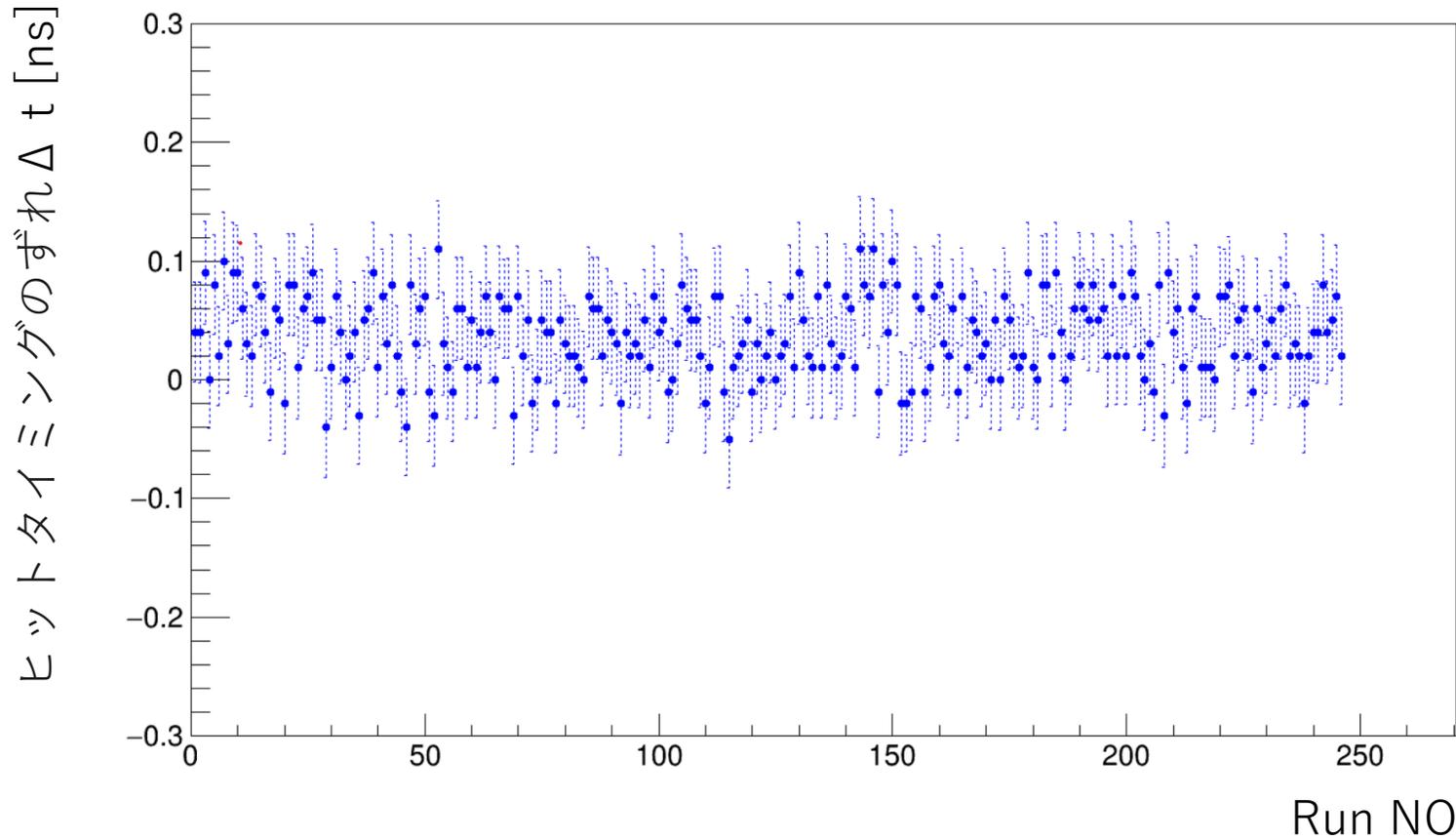


- g-2の測定にはヒットタイミングの測定が重要。
- キッカーノイズの影響で検出器のヒットタイミングがずれる可能性がある。
- キッカー磁場発生後の経過時間ごとにヒットタイミングのずれを評価する。

### 評価に使用する変数

- キッカータイミングからの経過時間 :  $T_{hit-kicker}$   
 $T_{hit-kicker} = (\text{評価するのテストパルスのヒットタイミング}) - (\text{キッカータイミング})$
- キッカーによるヒットタイミングのずれ  $\Delta t$

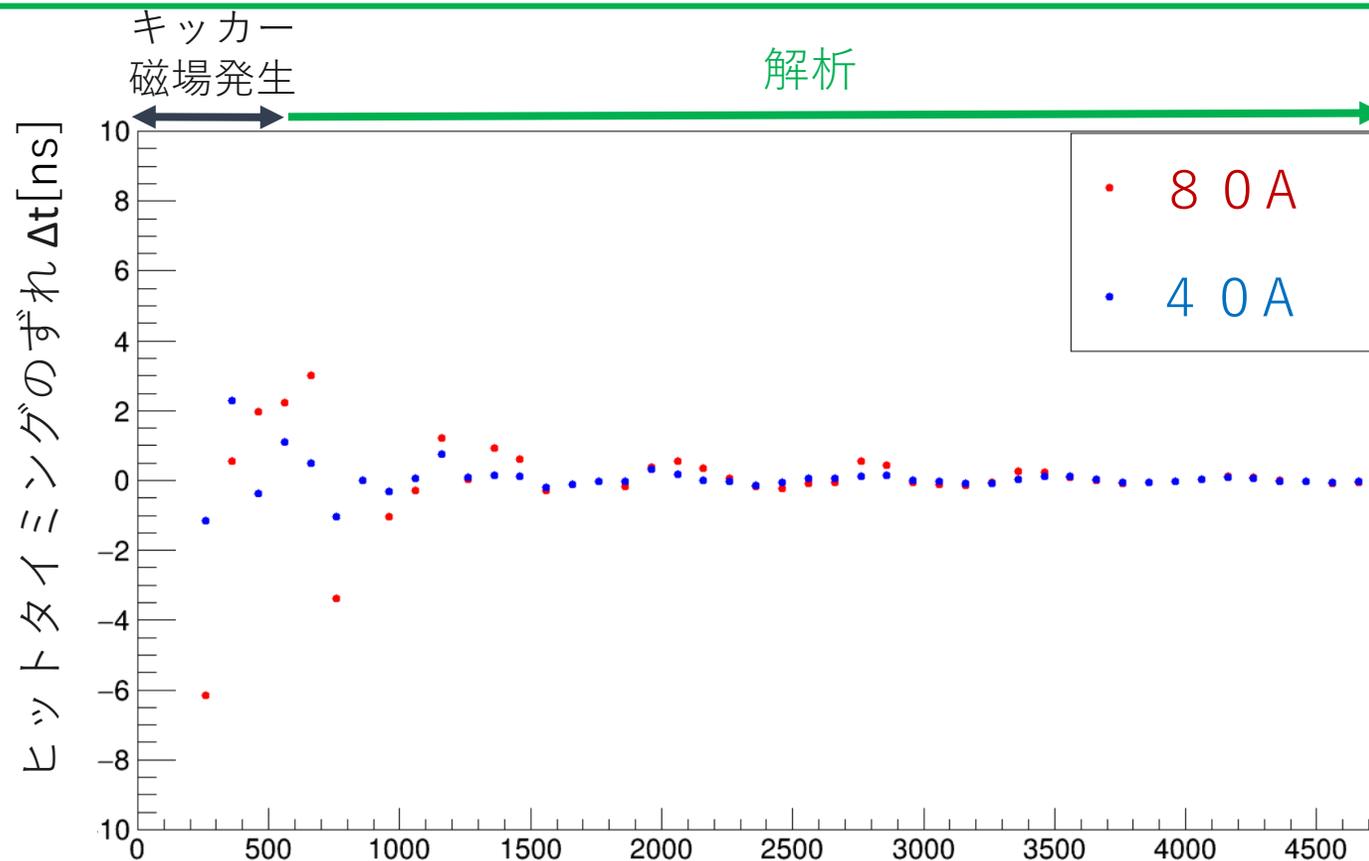
# ヒットタイミング測定の実験結果の安定性の評価



各データ点の測定時間：2s

- キッカータイミングよりも前のテストパルスを使用して、ヒットタイミング測定の実験結果の安定性を評価した。
- 全てのデータの平均を取ると、 $\Delta t = 0.037 + 0.003 \text{ ns}$   
→ バイアスを理解する必要があるが、 $\Delta t$ の測定値が10 psオーダで安定していることを確認した。

# キッカーによるヒットタイミングのずれの測定結果 12

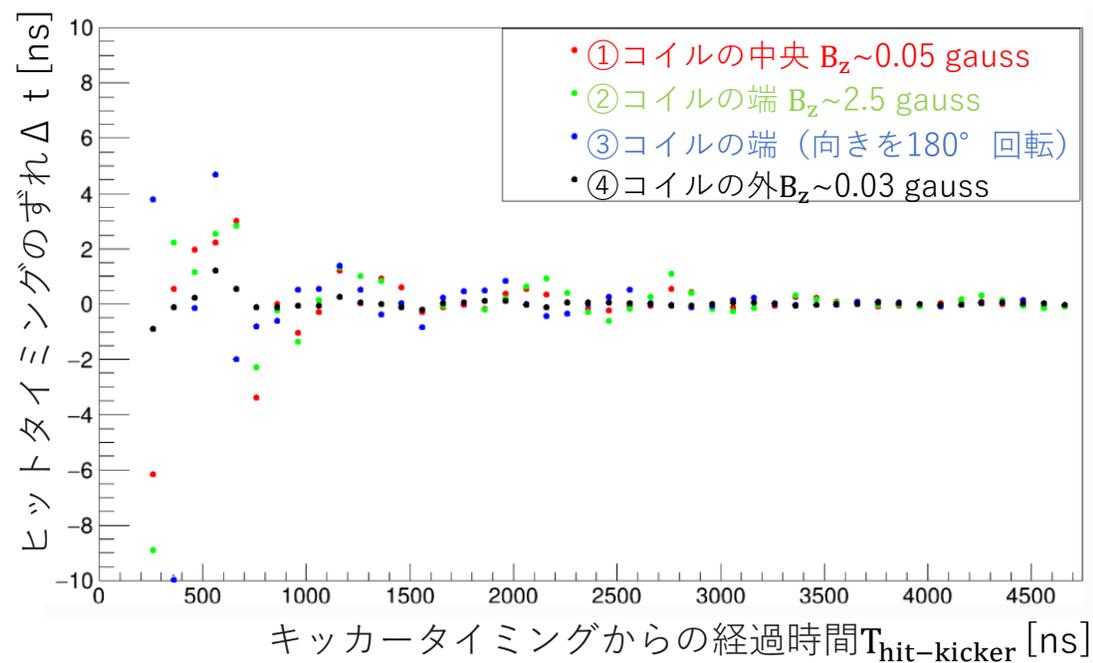
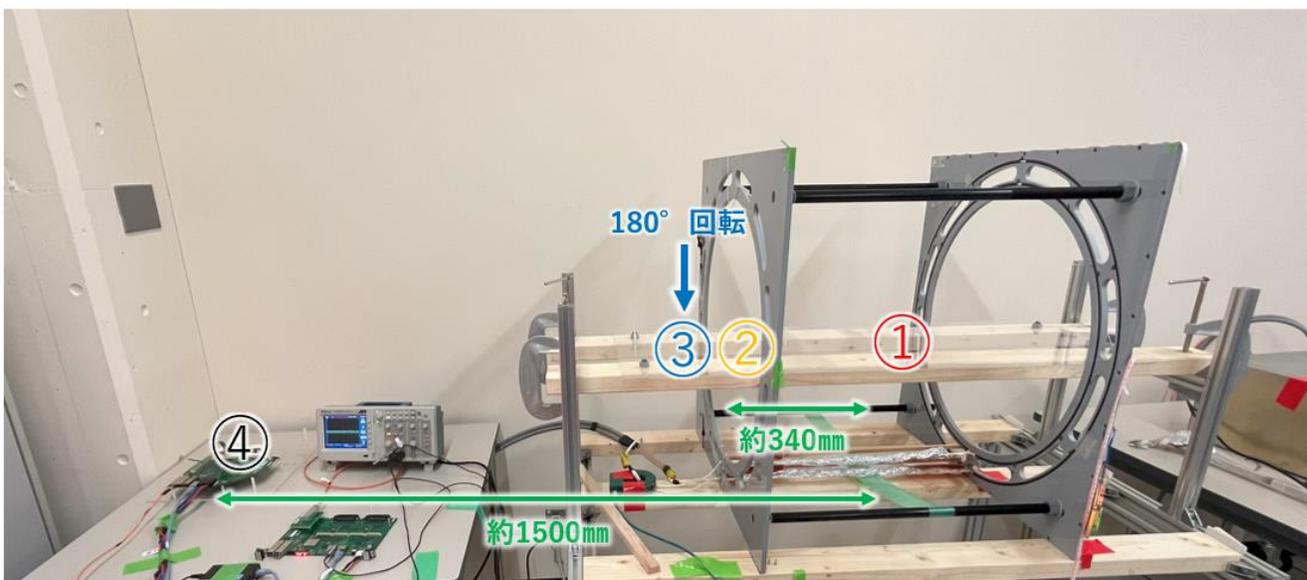


各データ点の測定時間：2s

- キッカーのタイミングから  $T_{\text{hit-kicker}}$  [ns]
  - 0.5  $\mu\text{s}$ 以降では最大4 ns のずれが見えている。
  - 2  $\mu\text{s}$ 以降では、周期的にずれが生じている。
    - 解析に使うためには、ヒットタイミングのずれをpsオーダで理解する必要がある。

# 検出器の位置とヒットタイミングのずれ 13

- 磁場の大きさとヒットタイミングのずれの関係を理解するために検出器の位置を変えて測定
  - コイルの中に検出器がある時はヒットタイミングのずれは大きく変わらない
  - コイルの外に検出器を置くとヒットタイミングのずれは最大で約 1 ns



- J-PARC muon  $g - 2$ /EDM 実験ではミューオンの $g-2$ とEDMを独立な手法で精密に測定する。
- シリコンストリップ検出器はキッカーコイルの内側に設置する。
- キッカー磁場が発生した後、速やかに検出器のデータを取り始める必要がある。
  
- 試作キッカーコイル内に検出器を設置して、動作試験を行った。
  - キッカー磁場により検出器が壊れないことを確認した。
  - キッカー磁場発生直後の検出器への影響(ノイズ、ヒットタイミングのずれ)を評価した。
    - キッカー磁場が収まった後のキッカーノイズの大きさは0.2MIP相当
    - ヒットタイミング測定の安定性は10 ps のオーダー
    - キッカー磁場が収まった後でも、最大3 ns のヒットタイミングのずれが生じている
  
- 今後の予定
  - キッカーノイズと対応づけてヒットタイミングがずれるメカニズムを理解していく。
  - 本番に近い磁場の強さで測定する。

# バックアップ

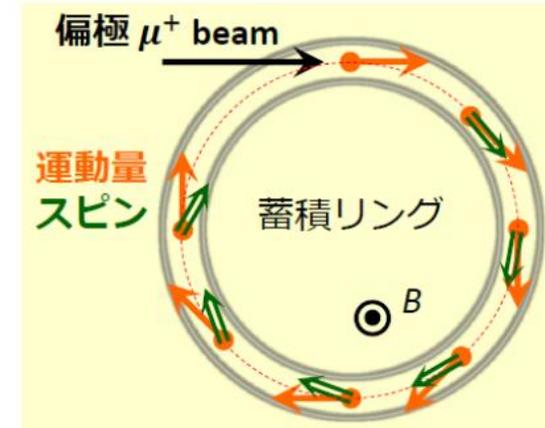
---

# Muon g-2

- 磁気双極子能率の係数をg因子と呼ぶ2からのずれを異常磁気能率 $a_\mu$ という。

$$a_\mu = \frac{g-2}{2}$$

- g-2は異常歳差運動を用いて調べる。



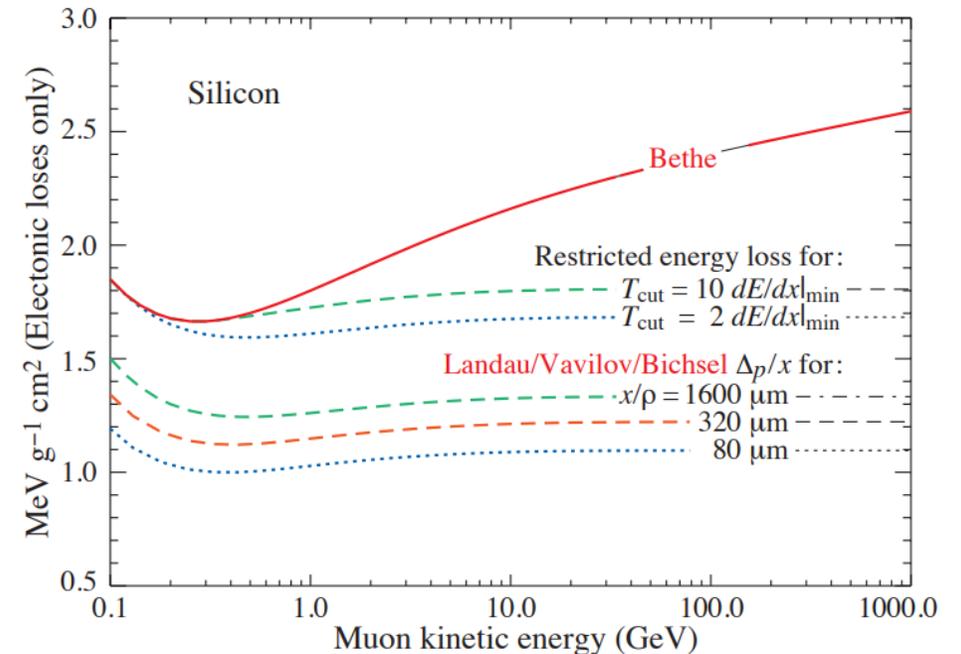
$$\begin{aligned}\vec{\omega}_a &= \vec{\omega}_s - \vec{\omega}_c \quad \leftarrow \text{サイクロトロン運動} \\ &= -\frac{e}{m_\mu} a_\mu \vec{B}\end{aligned}$$

← スピン運動

- 異常歳差運動の周期とミュオンが感じた磁場を測定することで $a_\mu$ を決定する。

- シリコンストリップセンサーで落とすエネルギーを粒子速度の関数として見た時、ある特定の粒子速度で最小値をとり、その速度を持った粒子を最小電離損失粒子（MIP）と呼ぶ。
- 荷電粒子がセンサーで落とすエネルギーはベーテ・ブロッホの式から導出できる
- MIP が入射されるとセンサー内部に 24000 対の電子と正孔を生成し、3.84 fC 相当の電荷が出力信号として得られることがわかる。

$$-\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = D \frac{Z}{A} z^2 \frac{1}{\beta^2} \left( \ln \left[ \frac{2mc^2\beta^2}{I(1-\beta^2)} \right] - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right)$$



(ベーテ・ブロッホの式)

# シリコンストリップ検出器

- ミューオン崩壊で生じる陽電子をシリコンストリップセンサーを用いて検出する。

- シリコンストリップ検出器の原理

1. 荷電粒子がセンサーを通過すると、電子・ホールが生成される。
2. センサーに逆バイアス電圧を引加し、生成された電荷をアルミ読み出し電極で収集し、電気信号として読み出す。
  - どのアルミ読み出し電極がなったかで、1次元の位置情報を得る。
  - 2枚のセンサーから2次元の位置情報を得る。
3. 専用の読み出し回路で信号を増幅し処理する。

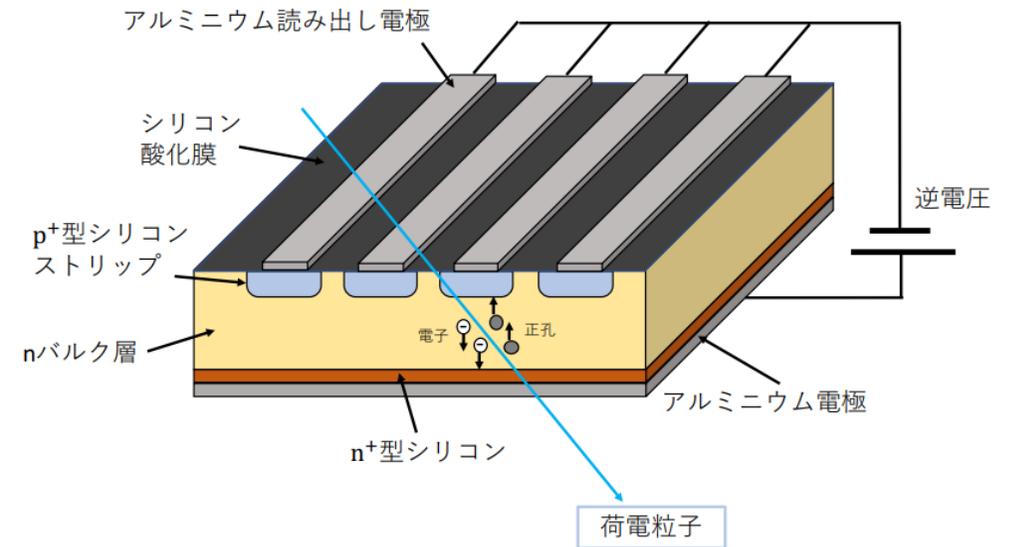


図 2.4: シリコンストリップセンサーの構造。