

高時間分解能飛行時間測定器 Multi-gap Resistive Plate Chamber(多段型MRPC)」 の開発；PSI-DRS4を用いたデータ収集システムの構築 と宇宙線による性能評価

筑波大学大学院数理物質科学研究科物理学専攻
高エネルギー原子核実験グループ
野中俊宏, 三明康郎, 江角晋一, 中條達也, 稲葉基, 益井宙

目次

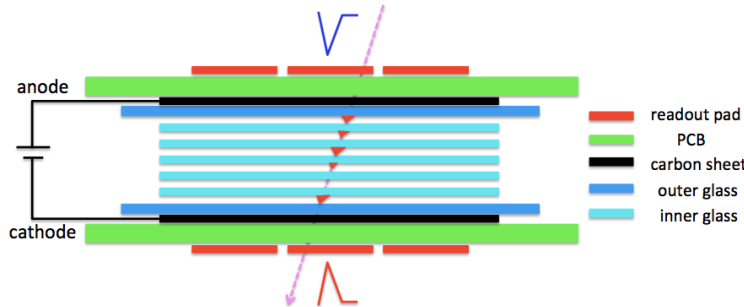
- 導入
 - ✓ Multi-gap Resistive Plate Chamber
 - ✓ 研究目的
- データ収集システム
 - ✓ DRS4 Evaluation Board
 - ✓ 時間分解能
 - ✓ 解析手法
- 性能評価
 - ✓ インピーダンスマッチング
 - ✓ 利得の最適化
- まとめと今後の課題

Multi-gap Resistive Plate Chamber(MRPC)

- 高エネルギー重イオン衝突実験において生成されるハドロンを高い運動量領域まで識別
 - 生成粒子の「通過時間」を精度良く測定(飛行時間測定器)
 - 非常に安価、容易に大方位角を覆うことができる

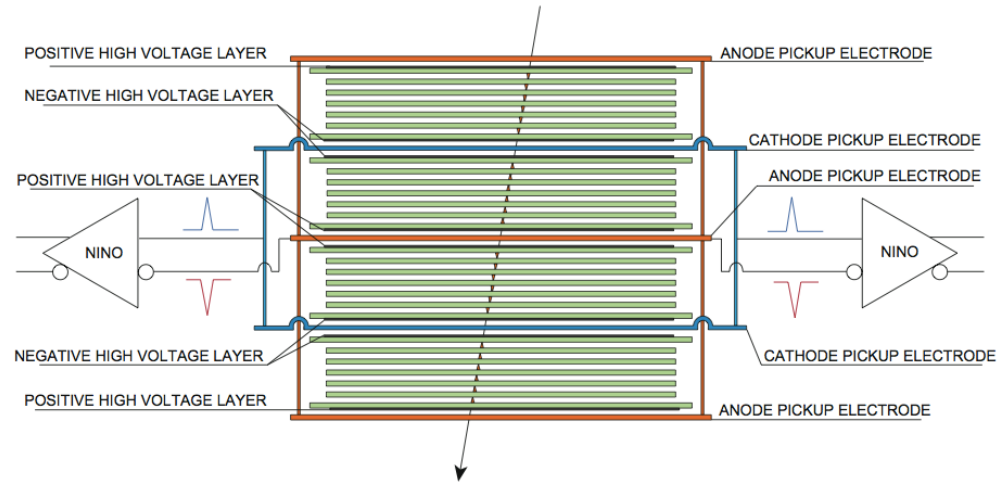
1 段型MRPC : PHENIX, STAR

ギャップ数 : 6
 ギャップ幅 : ~250um
 時間分解能 : ~80ps



4 段型MRPC

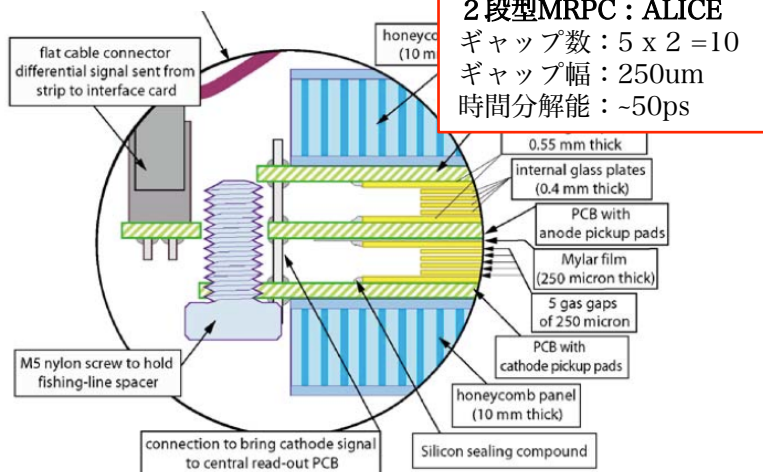
ギャップ数 : 6ギャップ × 4段 = 24
 ギャップ幅 : 160um
 時間分解能 : 20ps



S. An et al. / Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 594 (2008) 39–43

2 段型MRPC : ALICE

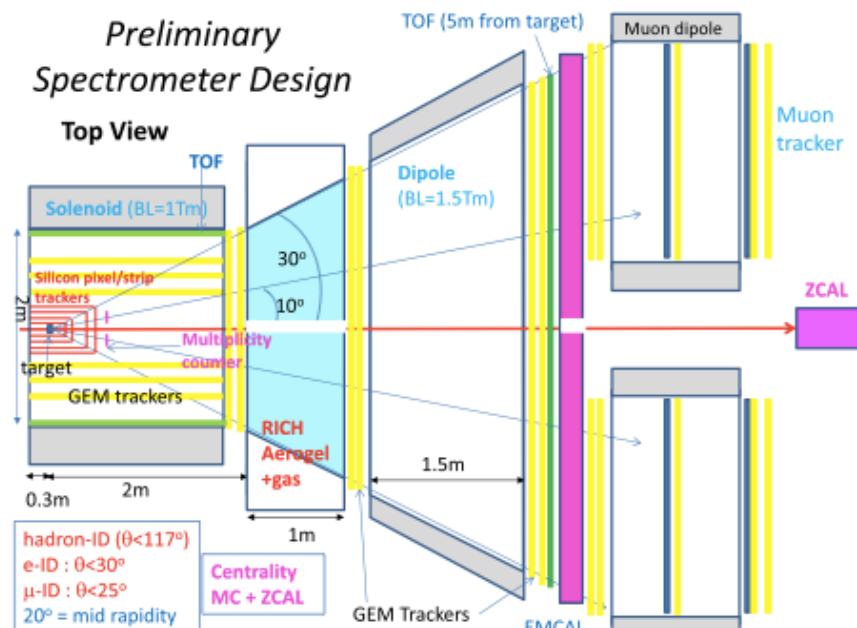
ギャップ数 : 5 × 2 = 10
 ギャップ幅 : 250um
 時間分解能 : ~50ps



段数を重ねることで時間分解能が向上

J-PARC

現在、J-PARCで重イオン衝突実験を行おうと活発な議論が行われている。

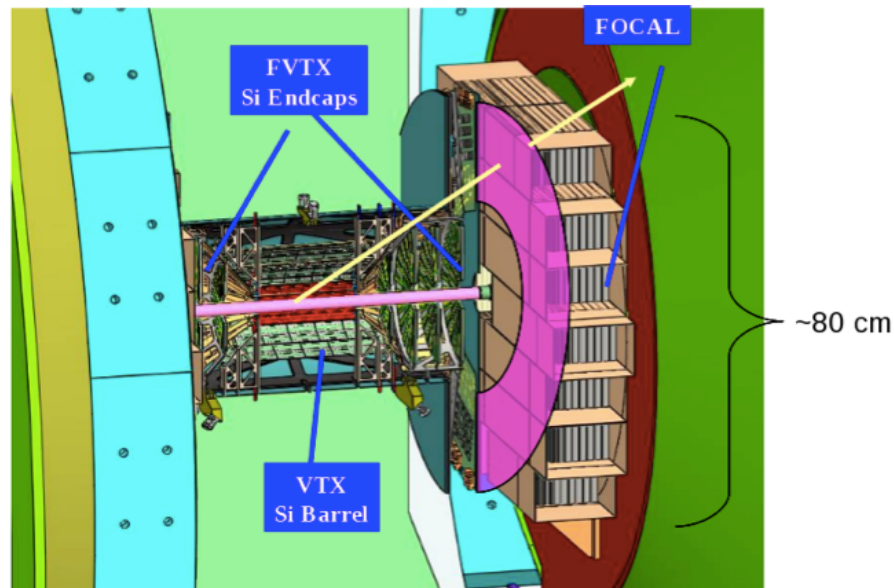


MRPCでミュオンを識別
 衝突点から約5m, $p < 0.8 \text{ GeV}/c$ で μ/π
 時間分解能 : 30ps

Towards the heavy-ion program at J-PARC

sPHENIX

RHIC-PHENIX実験のアップグレード計画



衝突点から約50cm
 $p < 2.5 \text{ GeV}/c$ で π/K
 時間分解能 : 10ps

sPHENIX: An Upgrade Concept from the PHENIX Collaboration

研究動機

MRPC開発の最終ゴール：10psの時間分解能を達成する。

良い時間分解能を得るには..

- ガスギャップを薄くする
- 段数(ギャップ数)を増やす
- 前段増幅器(利得)の最適化 が重要

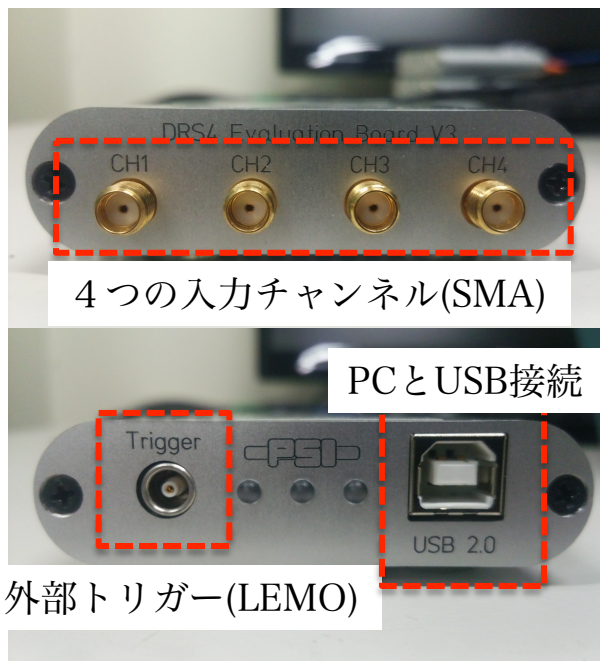
20psの4段型MRPCが報告されたが、3段型や6段型等の報告は無い。

本研究の目的

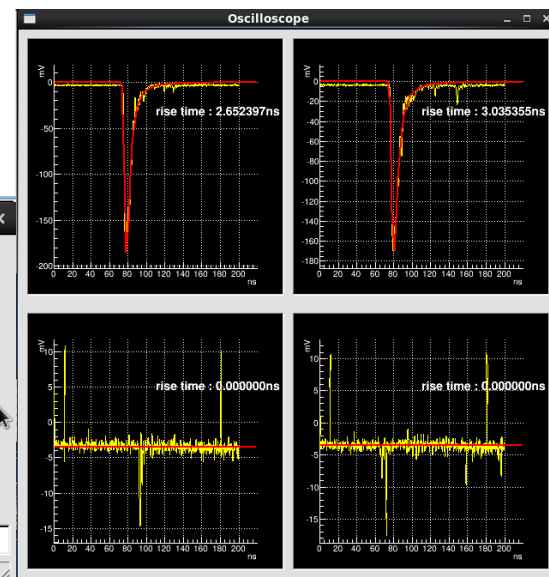
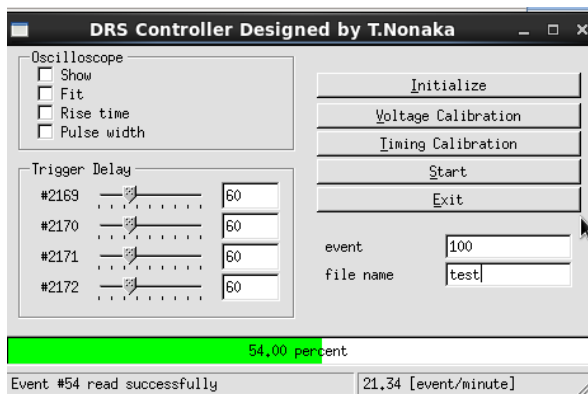
1～4段型のMRPCについて、前段増幅器の最適化を行いながら、段数を増やすことによるメリット・デメリットを、波形解析を通して定量的に理解する。

データ収集システム

- 1～4段型のMRPCで、性質を比較したい。→出力波形
- 細かい波形情報を取得できて、かつ時間分解能を解析できるようなデータ収集システムが必要。
- **DRS4 Evaluation Board**
 - PSI社の開発しているDRS4チップを搭載した評価ボード
 - 5GSPSでA/D変換
 - 約200psの間隔でサンプリングされた、時間 t と 電圧 mV の情報が得られる。

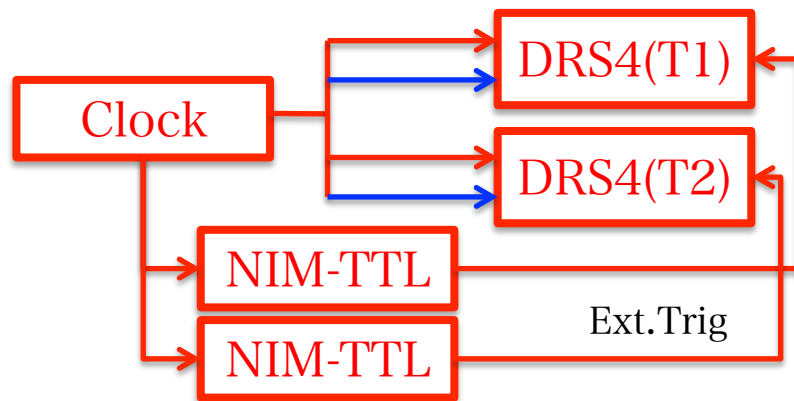


➤ ROOTを用いてGUIコントローラーを作製

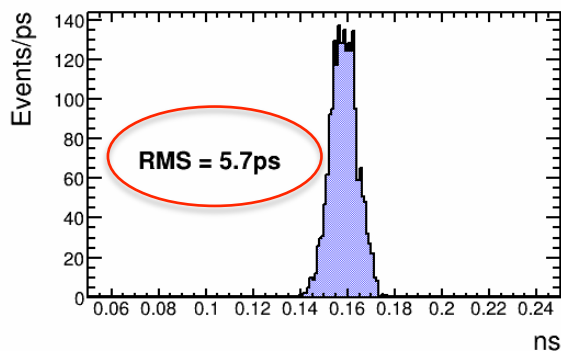


時間分解能

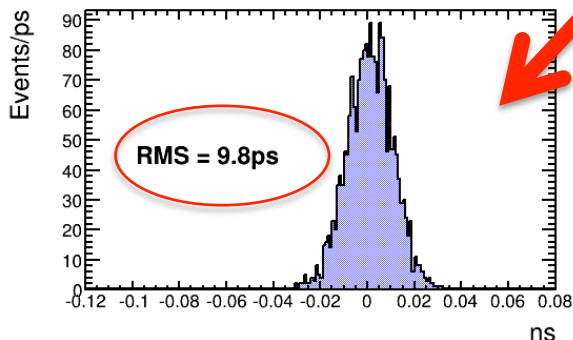
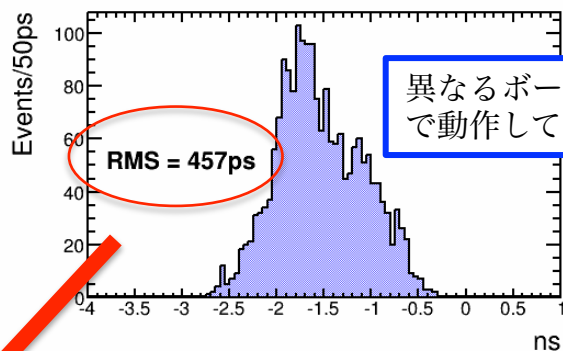
- ある検出器の時間分解能を測定したとき、その値は測定機器の時間分解能を含んだものである。
- 測定機器自身の時間性能が非常に重要。
- 右図の回路にて、2チャンネル間の時間分解能を測定



同一ボード上の2チャンネル



異なるボード間の2チャンネル

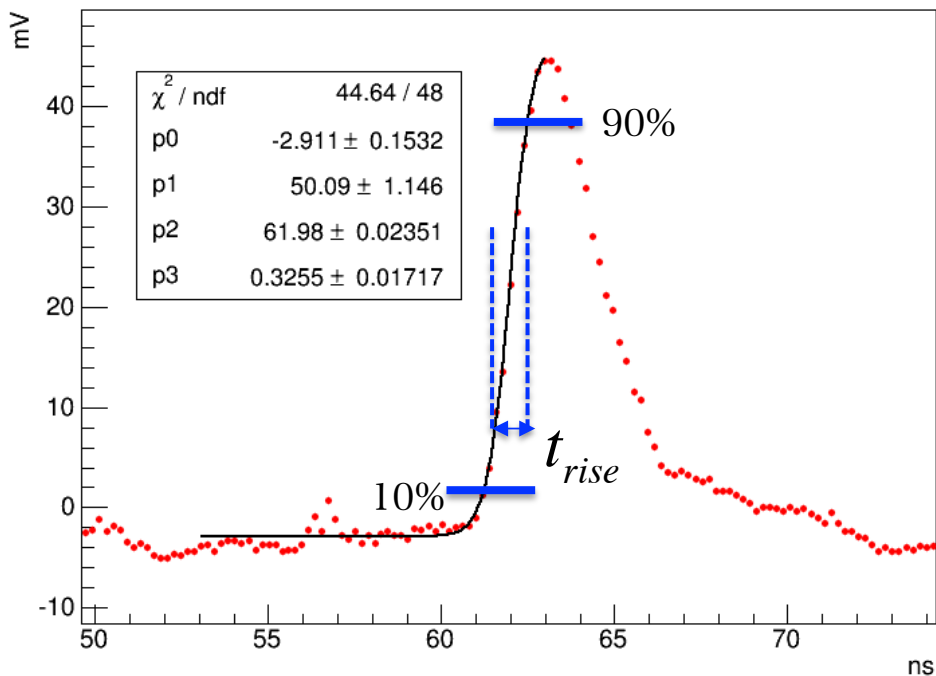


それぞれのボードのch2を使ってTを補正。

- 異なるボード上の2チャンネル間の時間分解能は9.8ps。
- 本研究では、DRS4を4枚使用する。それぞれのボードの各1chにトリガー信号を入力し、これらをreference clockとして補正を施してから、解析を行った。

解析手法

MRPC signal taken by DRS4



$$f(t) = A + \frac{B}{1 + \exp\left(\frac{-(t - t_0)}{C}\right)}$$

立ち上がり部分にフィットを施し、

➤ 時間情報： t_0

➤ 波高： B

➤ 立ち上がり時間： t_{rise}

を得る。

またストリーマイベントをカットするため、データを積分して電荷量[pC]を得る。

$$\sigma_{MRPC} = \sqrt{\sigma_{TOF}^2 - \sigma_{START}^2}$$

σ_{TOF} : $T_{MRPC} - T_{START}$ 分布の幅

σ_{START} : スタートカウンターの時間分解能

$$\sigma_{time} = \frac{\sigma_n}{\left| \frac{dV}{dt} \right|}$$

検出器内での物理過程における揺らぎ、ノイズ

「立ち上がり時間」

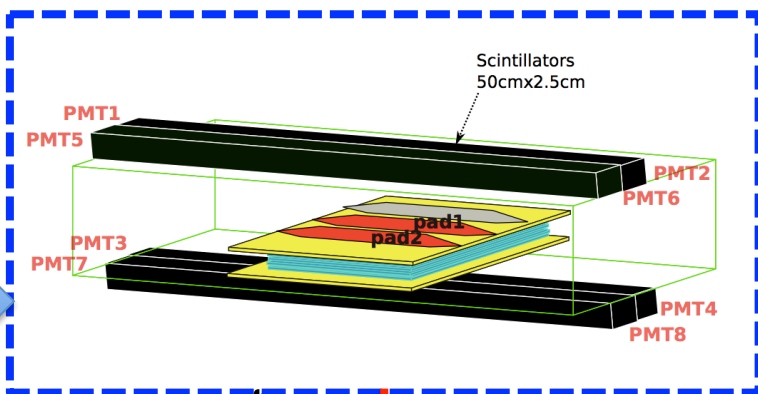
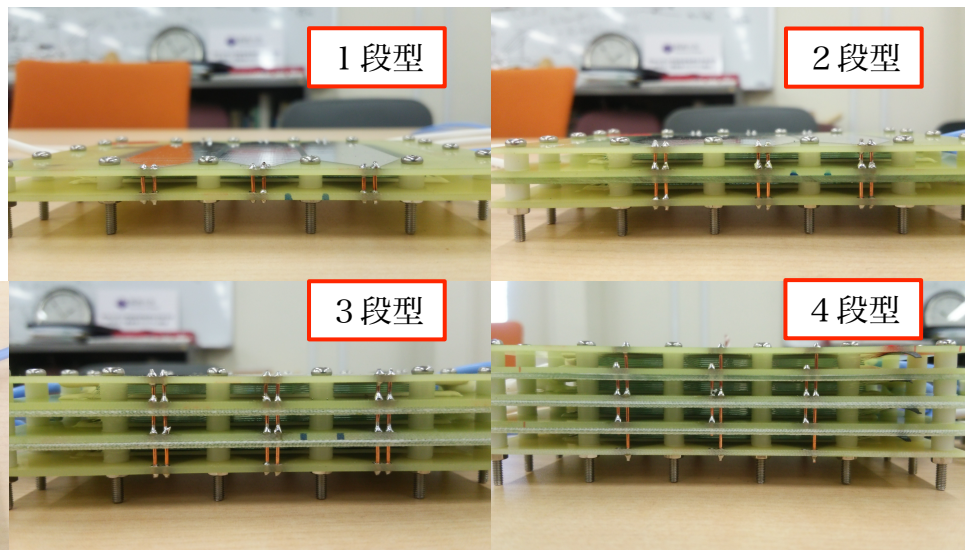
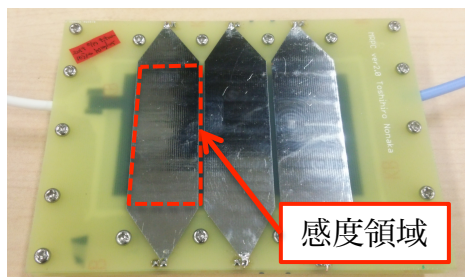
: 波高が10%から90%に達するまでの時間。

: 検出器レベルでは、電子雪崩が発生してからアノード側に到達するまでの時間を表すと考えられる。

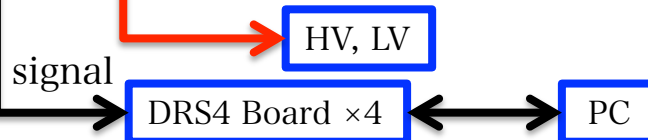
セットアップ

1～4段型のMRPCを製作

- ギャップ幅：165 μ m
- ギャップ数：6/stack
- 感度領域：24x50mm/pad



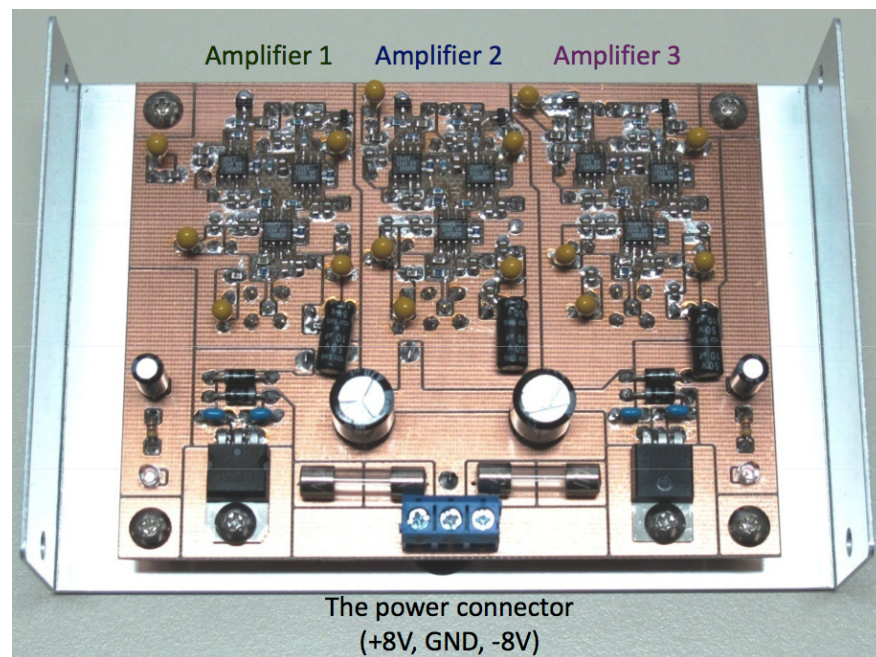
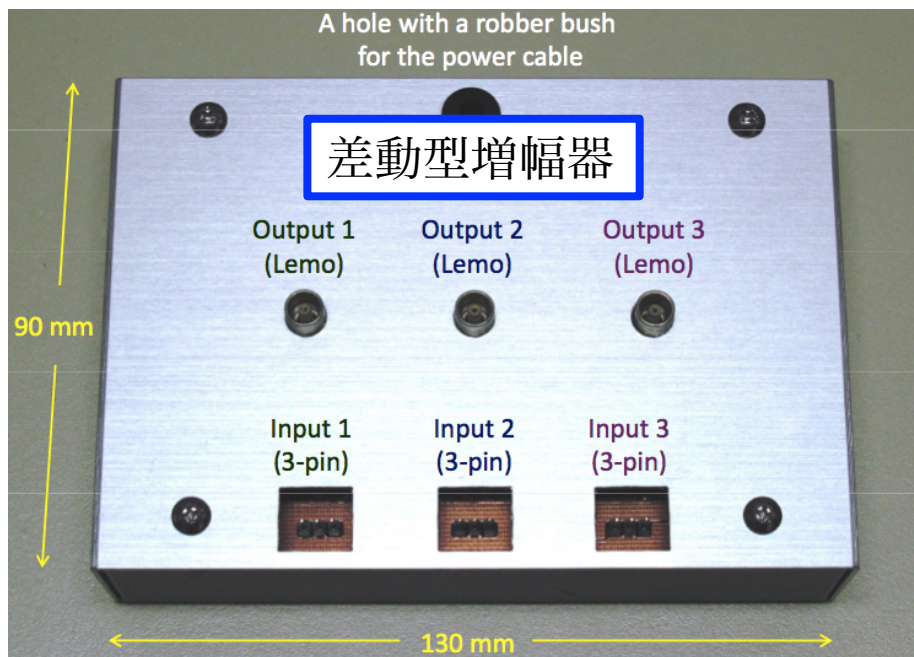
- 上下にトリガー兼スタートカウンター用のシンチレーションカウンター
- スタートカウンターの時間分解能は約70ps
- 4つのPMTのコインシデンスをトリガーとする。
- MRPCにヒットがあったイベントのみ解析。
- ガス：フロン91%，イソブタン9%(大気圧)



前段増幅器

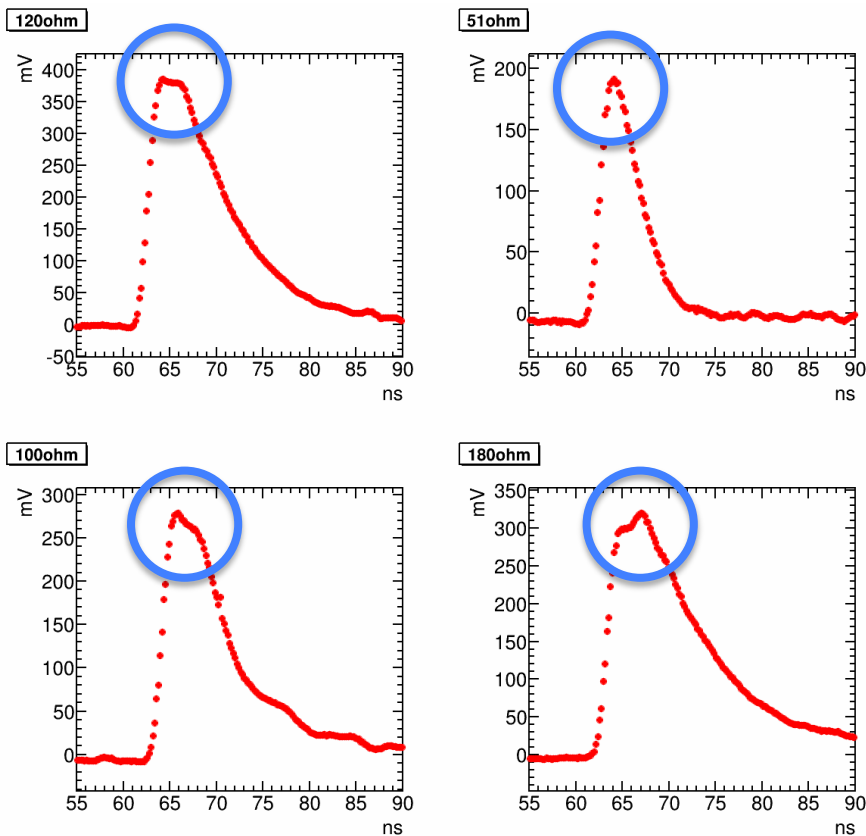
- MRPCの信号は高々数mV程度しかない。
- ただちにプリアンプにて増幅。
- MRPCの立ち上がりの早い信号($\sim 1\text{ns}$)を、波高を損なうことなく引き出すには、
 - インピーダンスマッチング
 - 利得の最適化

が不可欠。



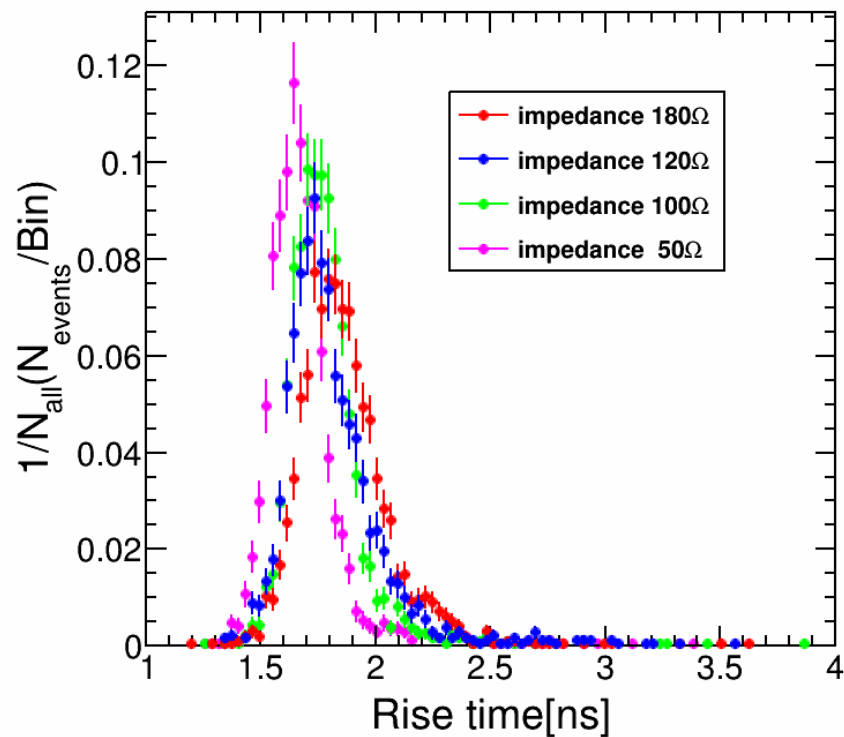
インピーダンスマッチング

➤ 波形の違い



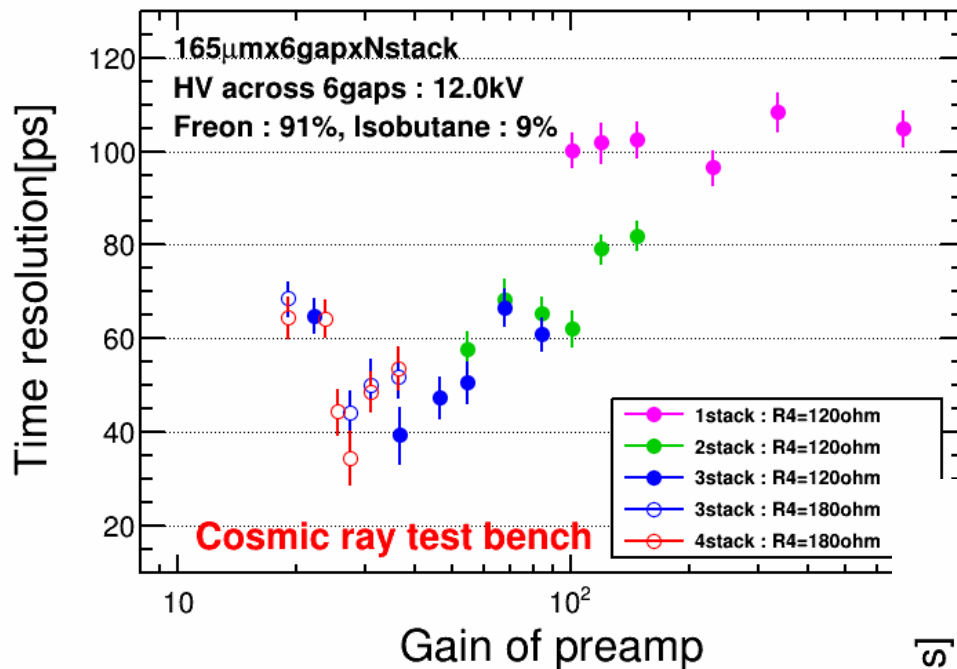
- 50ohm以外は、どれもピーク部に反射成分が見られる。
- 1～4段型について同様の結果。

➤ 立ち上がり時間



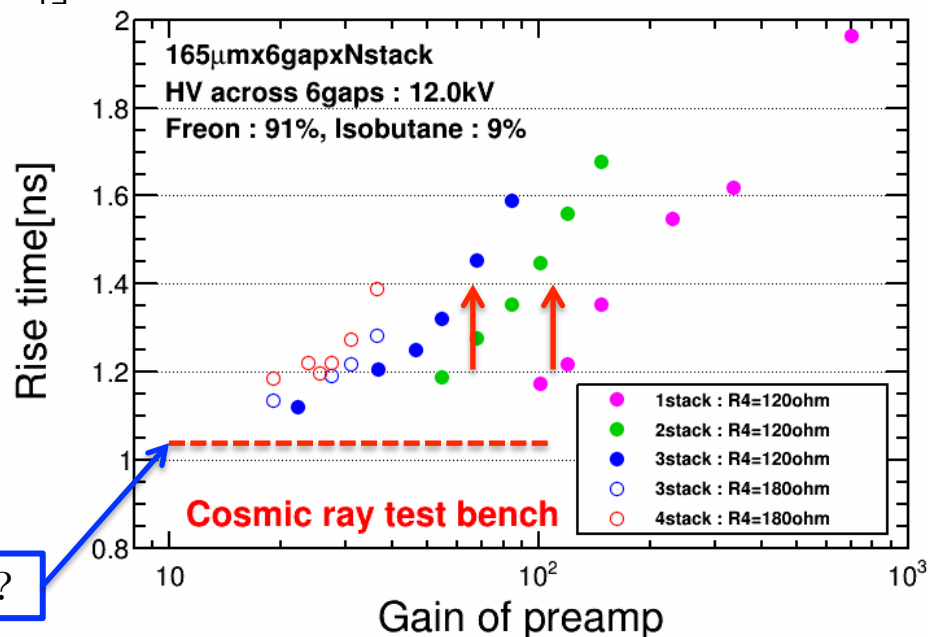
- 立ち上がり時間の一次元ヒストグラム。
- 入力インピーダンスを上げるほど、立ち上がり時間が遅くなっている。

利得の最適化



| 段数 | 利得 | 時間分解能[ps] |
|----|-----|-----------|
| 1 | 231 | 96.5±3.6 |
| 2 | 55 | 57.9±3.8 |
| 3 | 37 | 39.5±6.0 |
| 4 | 27 | 34.6±5.8 |

- 利得を下げると、信号の立ち上がりが早くなり、時間分解能が向上する。
- 段数を増やすと、立ち上がりは遅くなる(寄生容量)。
- 段数を増やすと、利得を下げる必要がある。
- 最適な利得が決定された。



帯域の限界?

まとめと今後の課題

- MRPCの信号波形を解析するために、DRS4 Evaluation Boardを使ってデータ収集システムを構築した。
 - 複数枚の使用において、**10ps**程度の時間分解能
- 1～4段型のMRPCについて、前段増幅器の最適化を行った。
- その過程において、4段型MRPCで時間分解能 **34.6±5.8ps** を達成した。

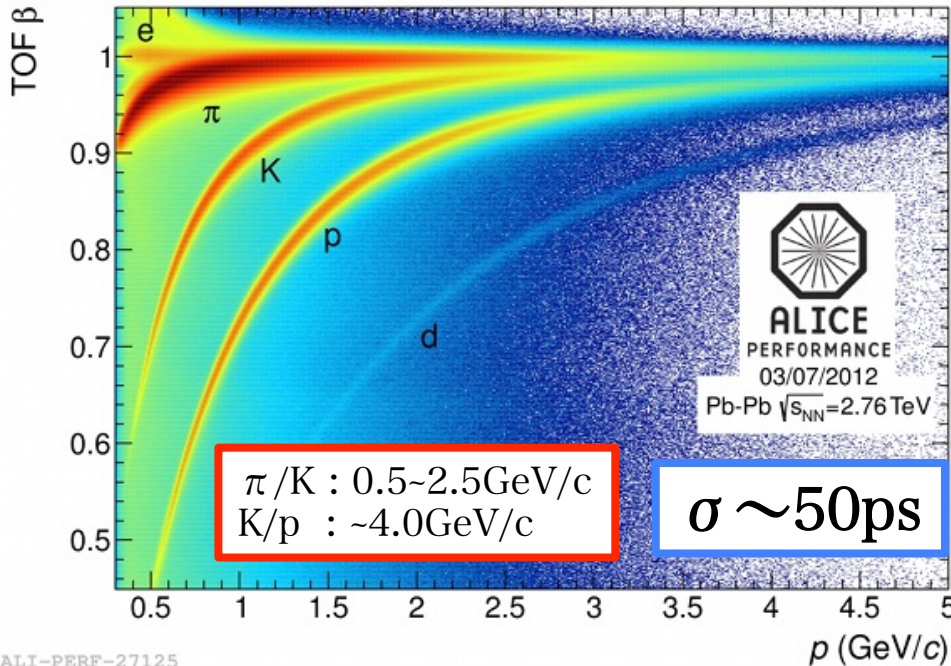
- 段数を増やすことによるメリット
 - 4段までは、明らかに時間分解能が向上した。
- 段数を増やすことによるデメリット
 - 寄生容量により、立ち上がりが遅くなる。
 - プリアンプの利得を下げて、帯域を広げる必要がある。

- スタートカウンターの改善。
- 今後、さらに帯域の広いプリアンプを開発する必要がある。
- 立ち上がりが早くなるほどDRS4のサンプリング数は減るため、最適化が必要。
- シミュレーションによるギャップ幅の最適化。
- テストビーム実験の実施。

BACK UP

飛行時間測定器(Time Of Flight : TOF)

高エネルギー重イオン衝突実験で生成される
ハドロンを高い横運動量領域まで識別



生成粒子の「通過時間」を精度よく測定して、粒子種を識別

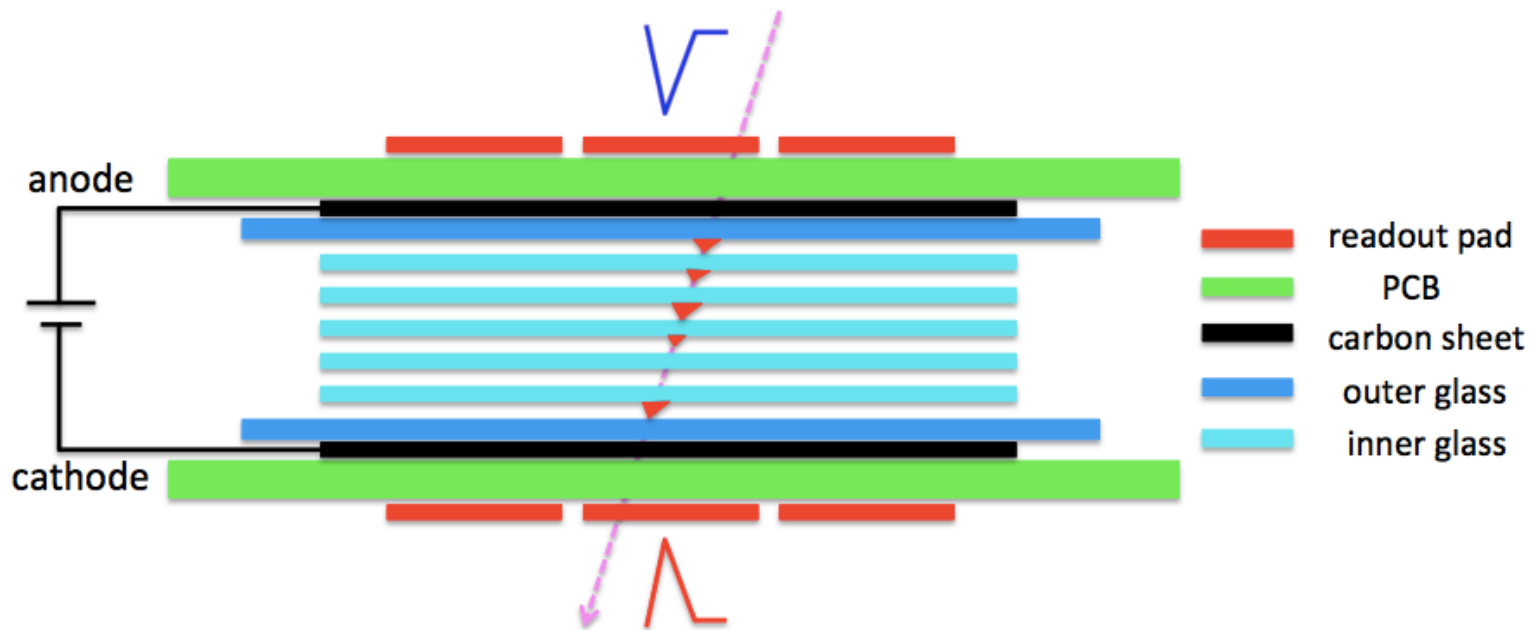
$$m^2 = p^2 \left(\left(\frac{t}{L} \right)^2 - 1 \right)$$

$$\frac{dm}{m} = \sqrt{\left(\frac{dp}{p} \right)^2 + \gamma^4 \left(\frac{dt}{t} + \frac{dL}{L} \right)^2}$$

運動量 p は他の検出器から得られる。
速度 v を求めるには時間 t を精度よく決める必要がある。

Multi-gap Resistive Plate Chamber

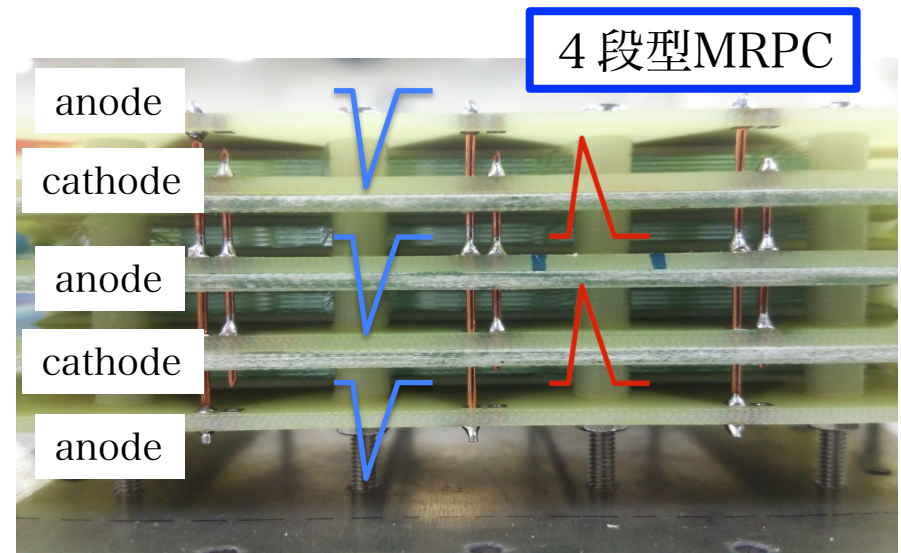
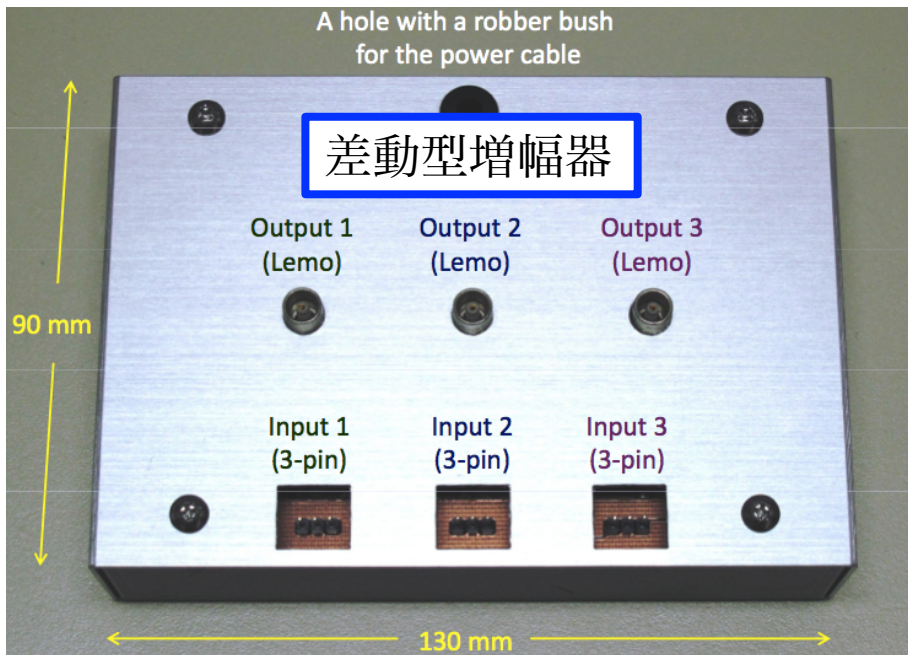
- とても薄いガスギャップ(250um)をいくつか形成。一様な高電場を発生させる($\sim 100\text{kV/cm}$)
- 各ガスギャップで、電子雪崩がほぼ同時に起こる。(中心極限定理)
- 段数を重ねることで、電圧を上げること無くギャップ数を稼ぐことができる。
- 現在実用化されているもので最も時間分解能が良いのは、ALICE実験の2段型MRPC(50ps)



前段増幅器

- MRPCの信号は高々数mV程度しかない。
- ただちにプリアンプにて増幅。
- MRPCの立ち上がりの早い信号($\sim 1\text{ns}$)を、波高を損なうことなく引き出すには、
 - インピーダンスマッチング
 - 利得の最適化

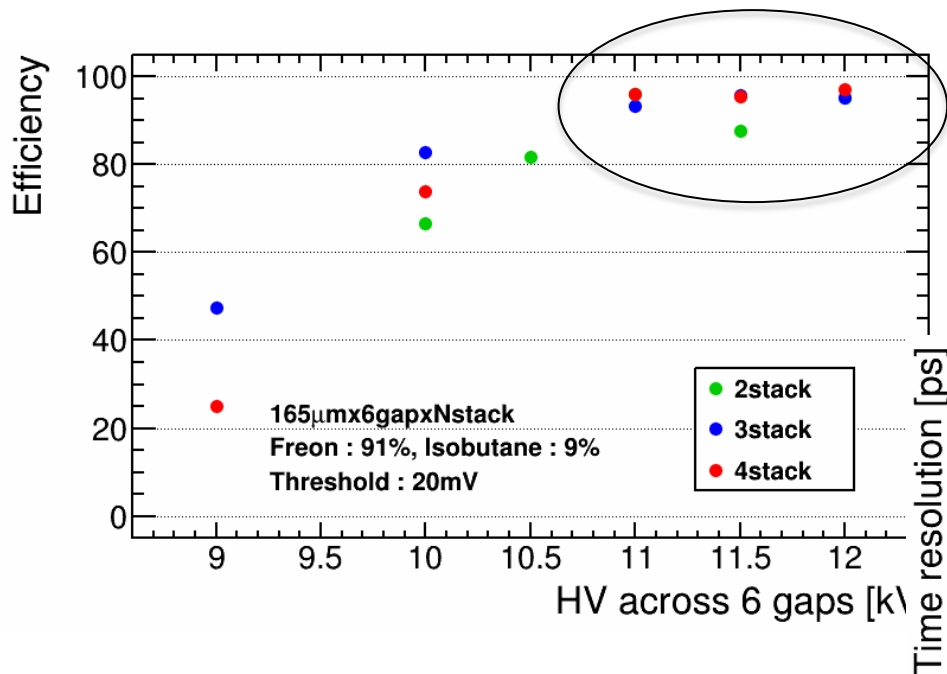
が不可欠。



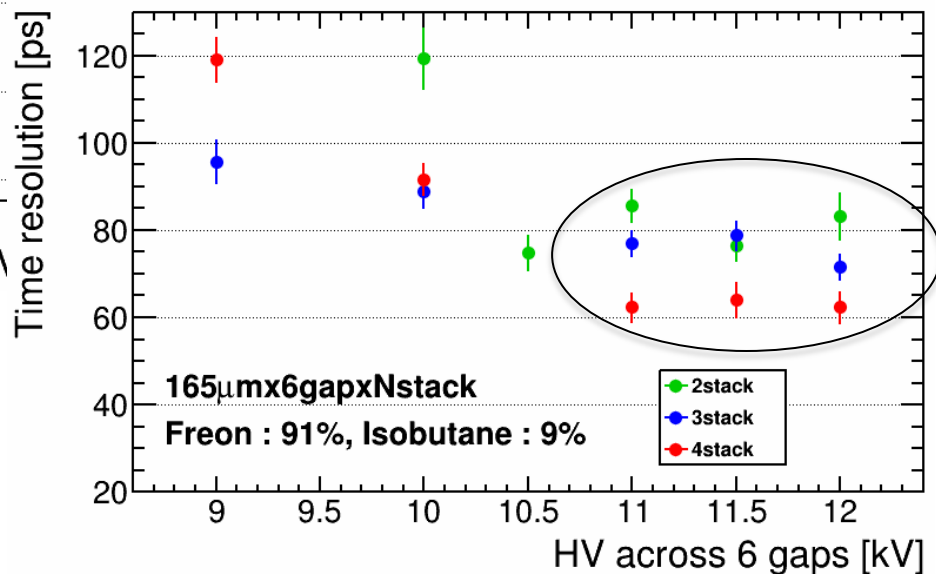
電圧依存性：段数による比較

➤ スタートカウンターを改善し、より正確な測定を行った。

- スタートカウンターを改善し(40ps)、より正確な測定を行えなった。
- Finger counterにヒットがあり、かつシンチによる位置のカットから、ほぼ100%MRPCに入射しているだろうと思われるイベント。(~70event)
- 11kV~12kVではほぼ100%。
- もう少し高い電圧まで、統計をためて測定する必要がある。

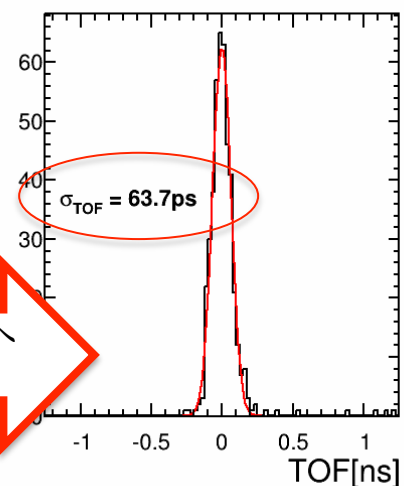
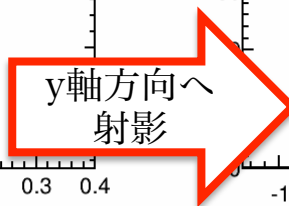
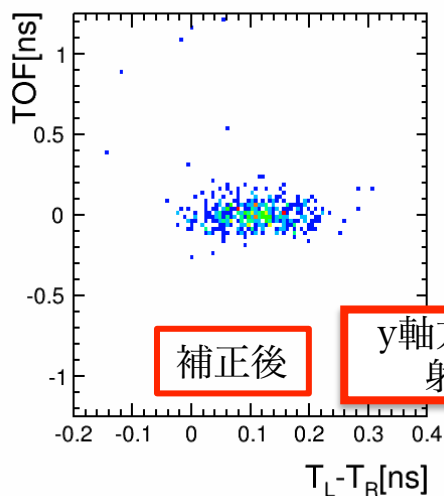
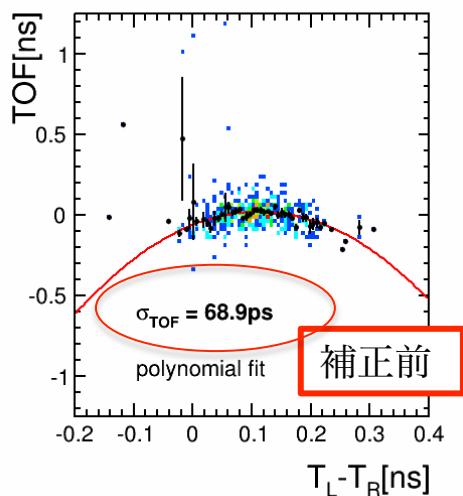
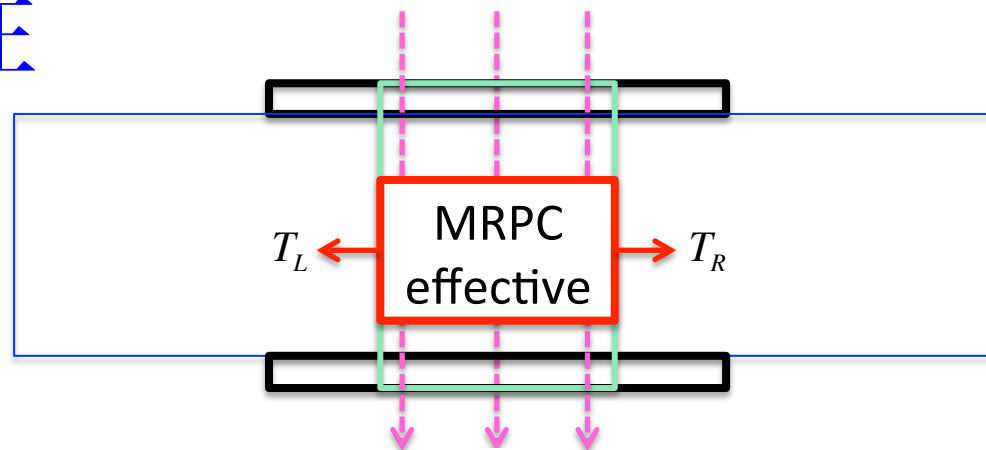


- efficiency plateau の領域ではほぼ一定。
- 段数が増えるほど時間分解能は良い。



入射位置による補正

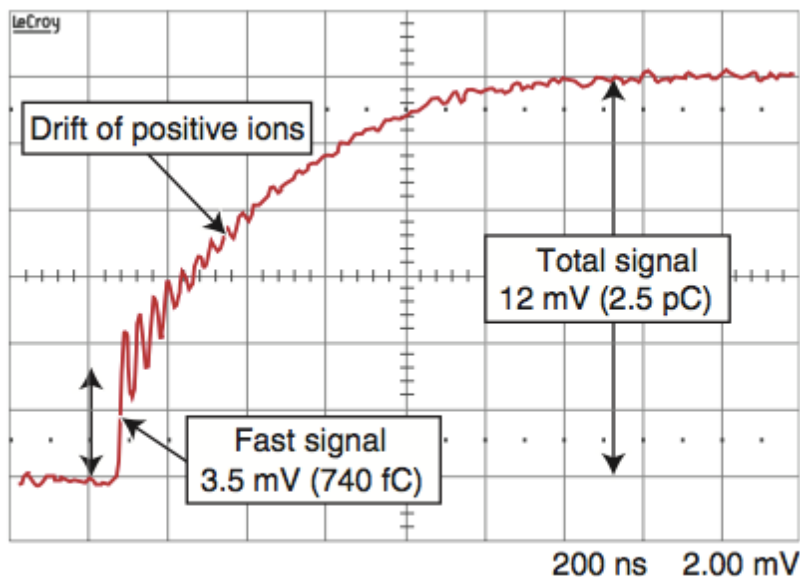
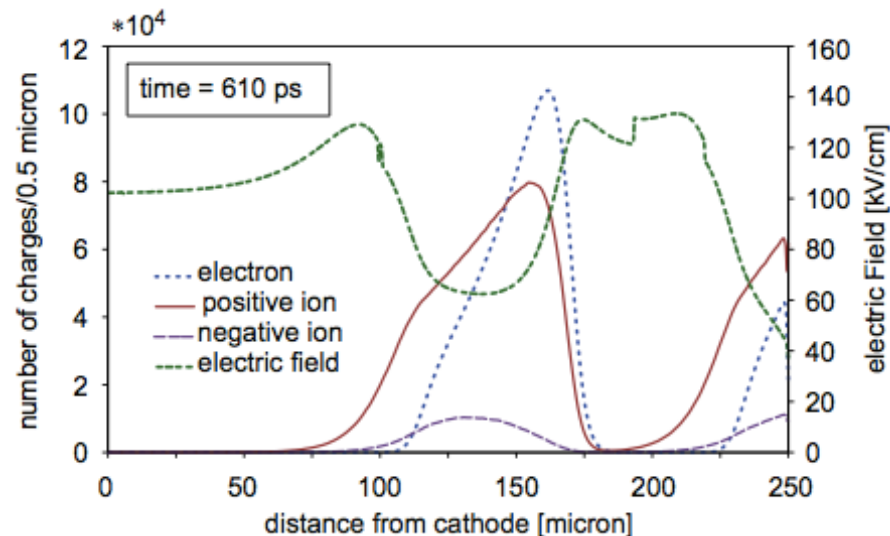
- パッド両端の時間差(宇宙線の入射位置)
- 入射位置が中央からずれるほどスタート時間が遅くなり、TOFが小さくなる。



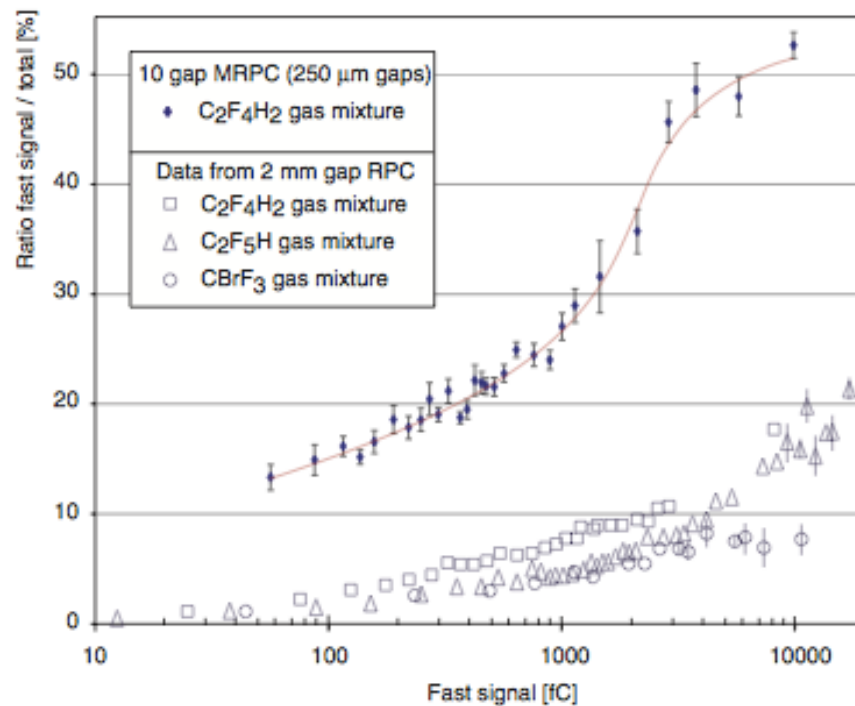
- 補正によってTOFの幅が5.2ps改善
- さらに入射角度、立ち上がり時間による補正を行った結果、TOFの幅は61.0psにまで改善され、MRPCの時間分解能は47.5±3.4psとなった。

空間電荷効果

Total charge : ガスギャップ内で生じる全電荷。
 Total induced charge : 実際に読み出しパッドに誘起される全電荷。
 Fast charge : 電子によって誘起される電荷。



Ratio of fast signal / total = $0.74 / 2.5 = 30\%$



Eur Phys J C 34, s01, s325–s331 (2004)

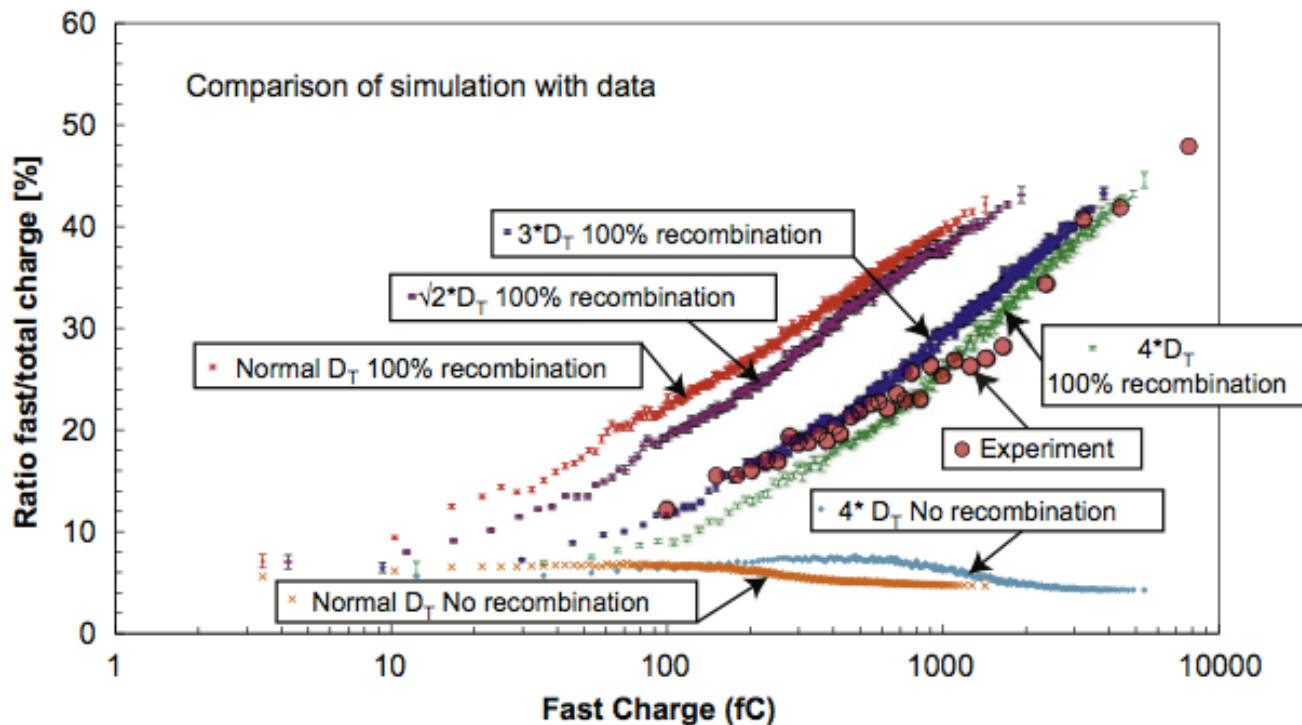
Digital Object Identifier (DOI) 10.1140/epjcd/s2004-04-031-9

再結合

Total charge : ガスギャップ内で生じる全電荷。

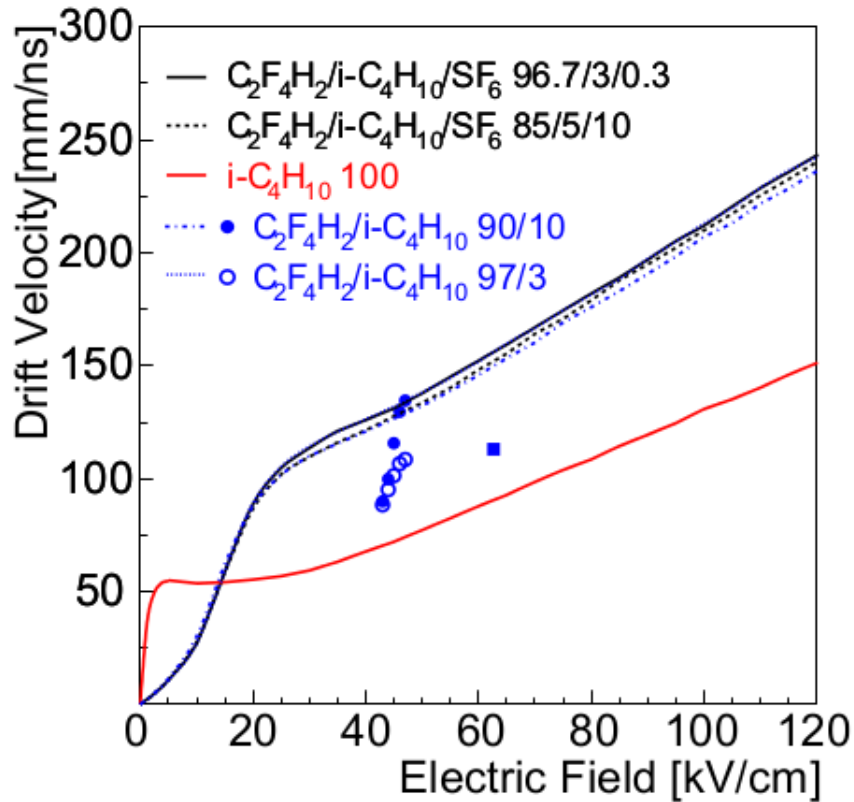
Total induced charge : 実際に読み出しパッドに誘起される全電荷。

Fast charge : 電子によって誘起される電荷。



Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 610 (2009) 649–653

立ち上がり時間について：ドリフト速度



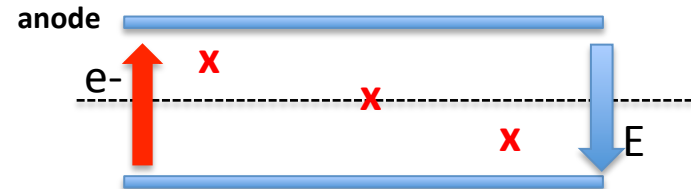
- MAGBOLTZによるシミュレーションの結果、100[kV/cm]での電子のドリフト速度は約200[μ m/ns]

$$T_{risetime} = L_{gap} \div v_{drift}$$

$$= \sim 165[\mu m] \div 200[\mu m / ns]$$

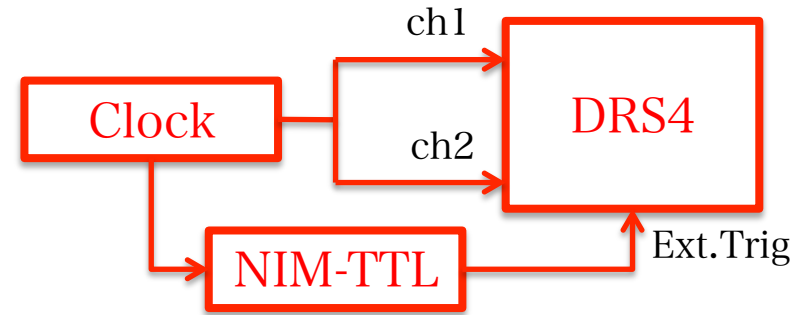
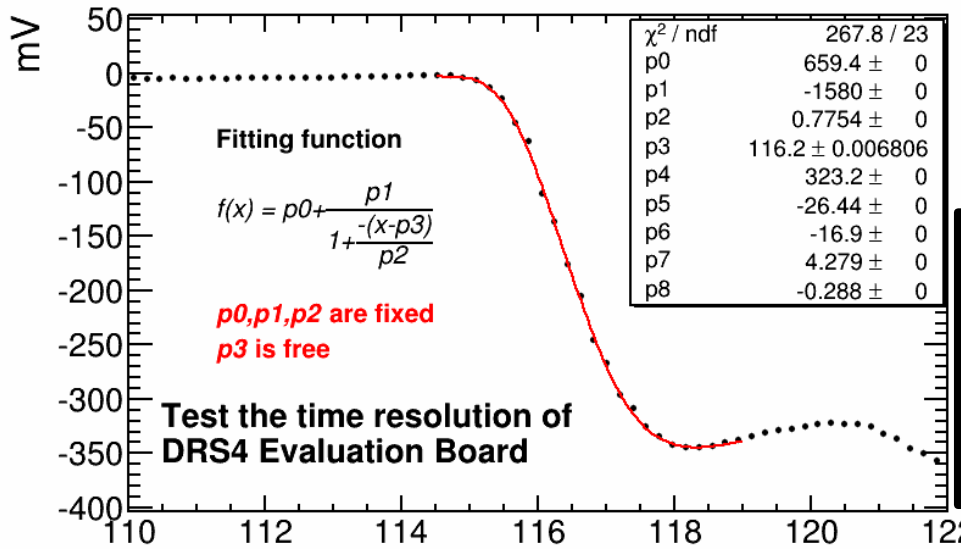
$$\approx 820[ps]$$

- 実際には、ガスギャップの真ん中ほどで電子雪崩がスタートするので、もう少し早い。

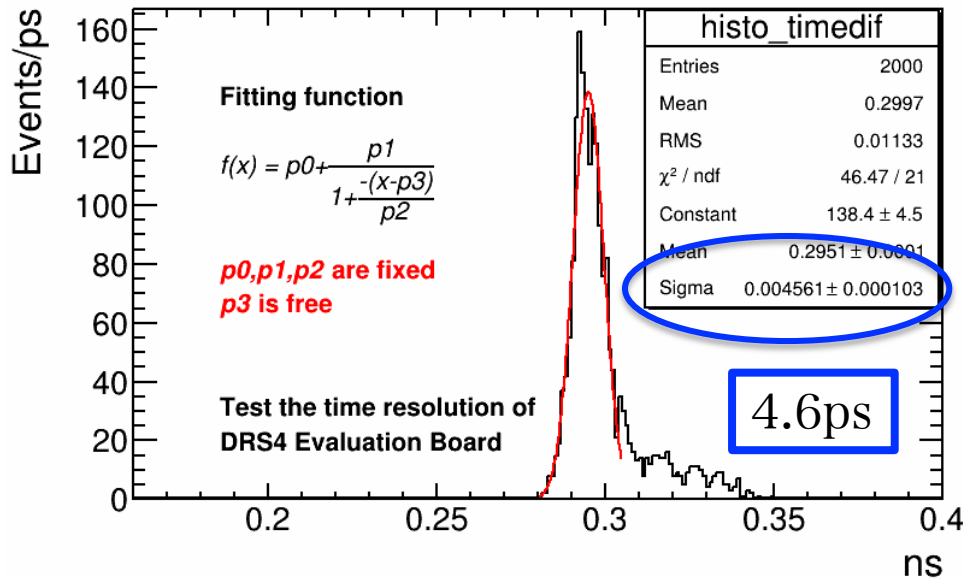


"Detector Physics of Resistive Plate Chambers", Christian Lippmann

フィット方法の変更



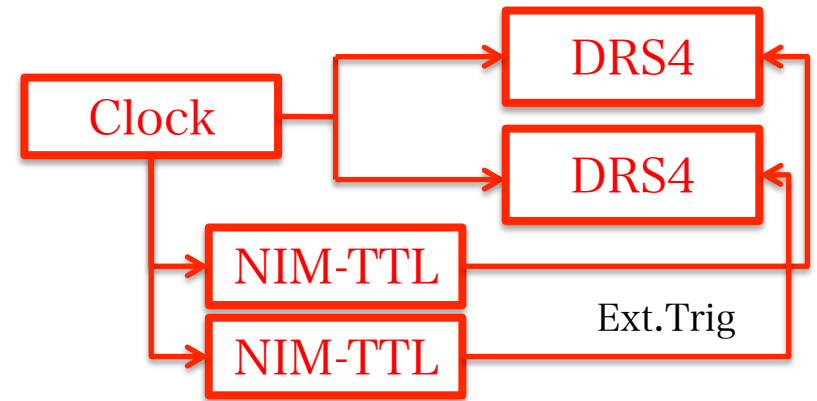
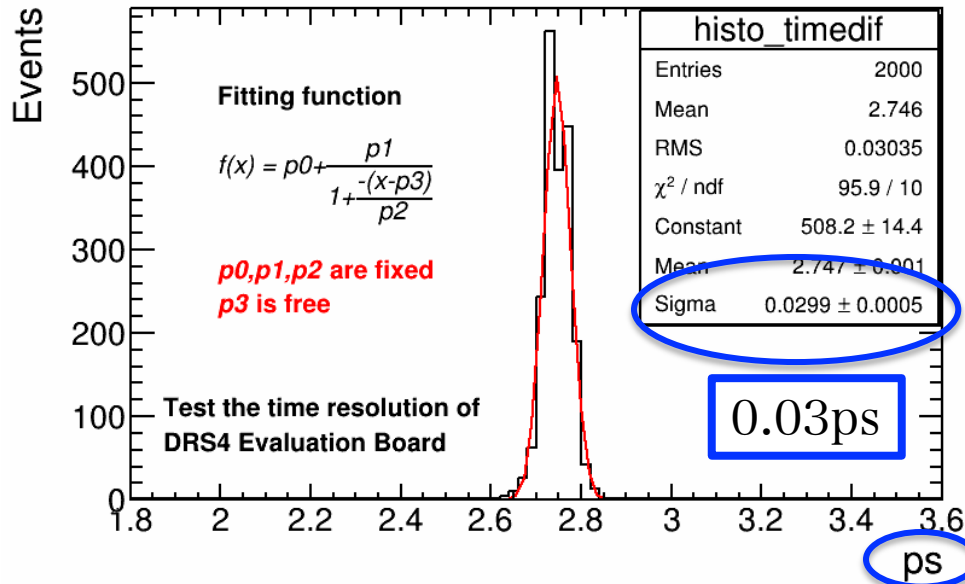
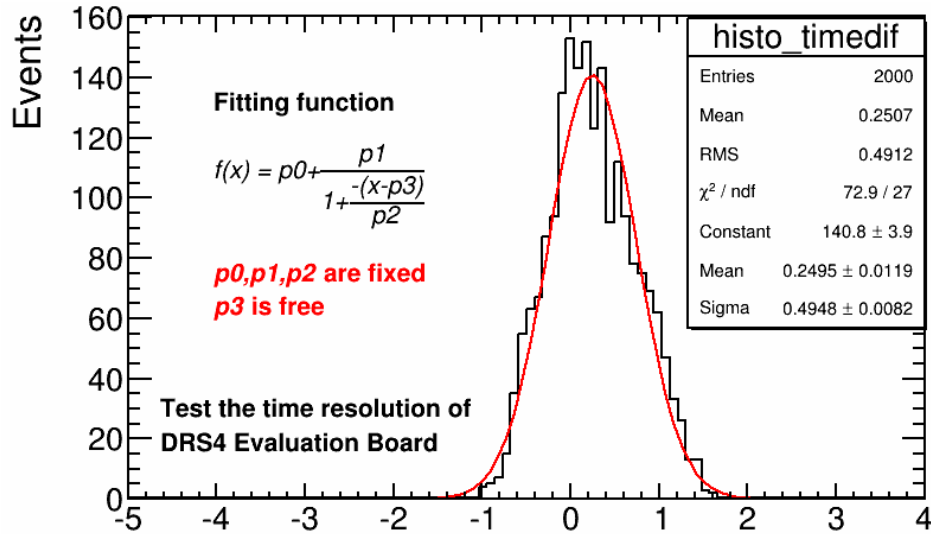
$$f(t) = A + \frac{B}{1 + \exp\left(\frac{-(t-t_0)}{C}\right)} + D(t-t_0) + E(t-t_0)^2 + F(t-t_0)^3 + G(t-t_0)^4 + H(t-t_0)^5$$



wood-saxon + 5th order polynomial

- wood-saxon のみでのフィットでは、2チャンネル間の時間分解能は約4.4psであった。
- ほぼ変化なし。
- wood-saxonでOK。

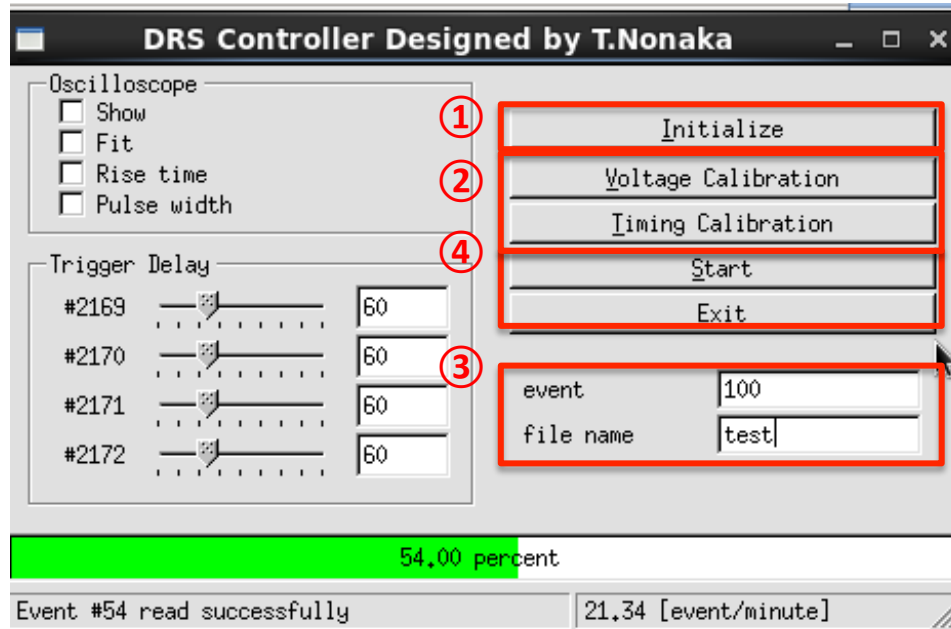
フィット方法の変更



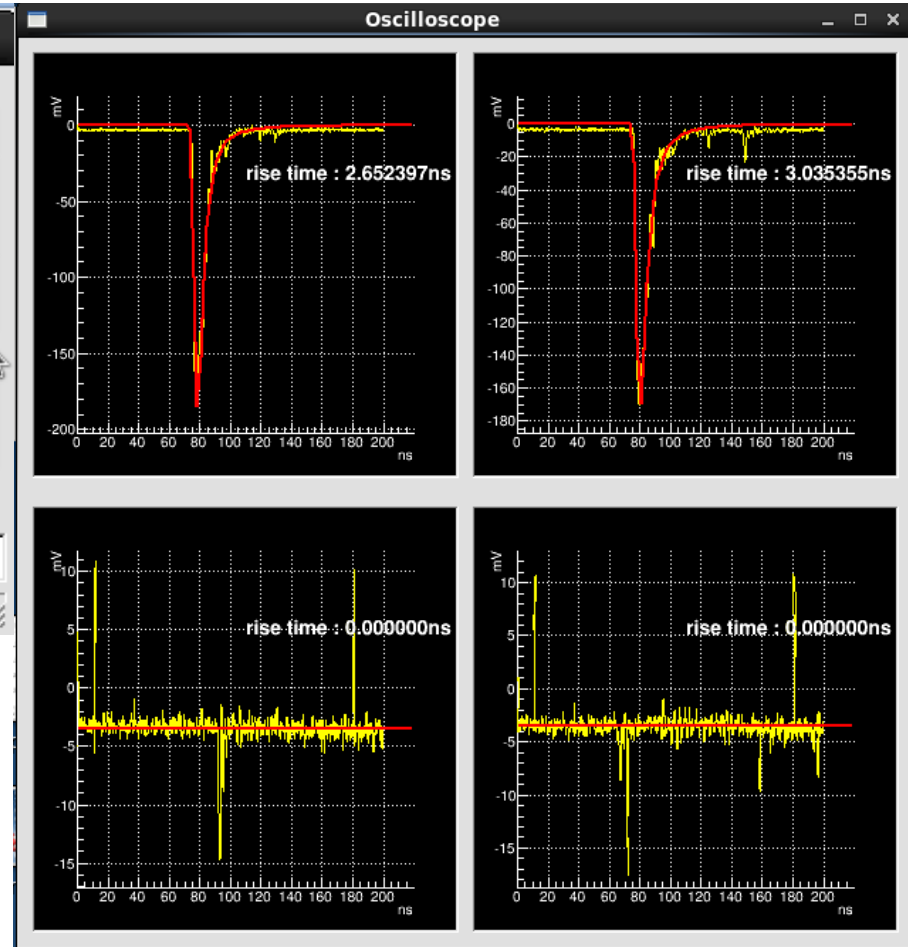
$$f(t) = A + \frac{B}{1 + \exp\left(\frac{-(t - t_0)}{C}\right)}$$

- t_0 以外のパラメータは全て固定する。
- 異なるボード間の時間分解能は0.03ps
- 複数枚使うことによる影響はほとんど無いと言って良いだろう。
- A,B,Cのどれかが t_0 の情報を吸収してしまっている？

DRS Controller

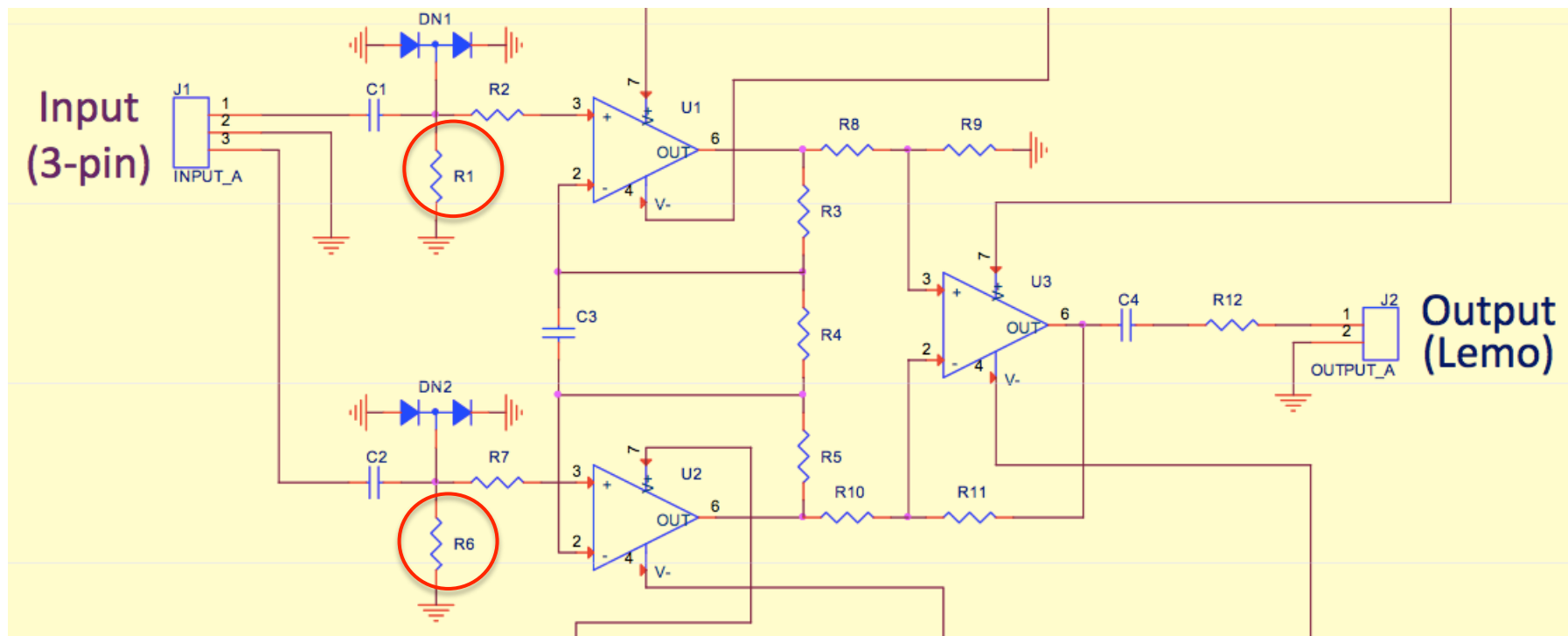


1. DRS4 Boardの認識、初期化
2. “Voltage Calibration”, “Timing Calibration”
3. イベント数、出力ファイル名の決定。
4. データ取得開始、DAQの終了。



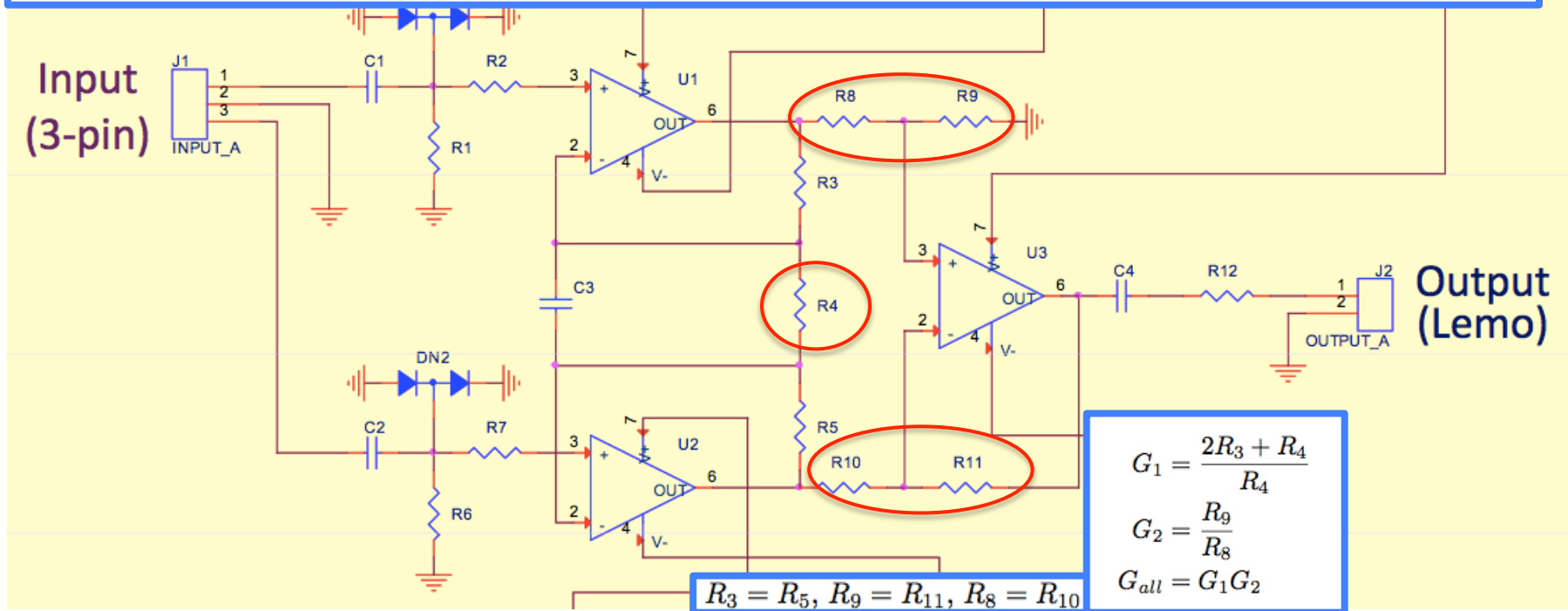
インピーダンスマッチング

- MRPC-プリアンプ間で反射が起きないように、プリアンプの入力抵抗値を最適化してやる必要がある。
- 入力抵抗を変えて、波形の変化を観測する。



利得の最適化

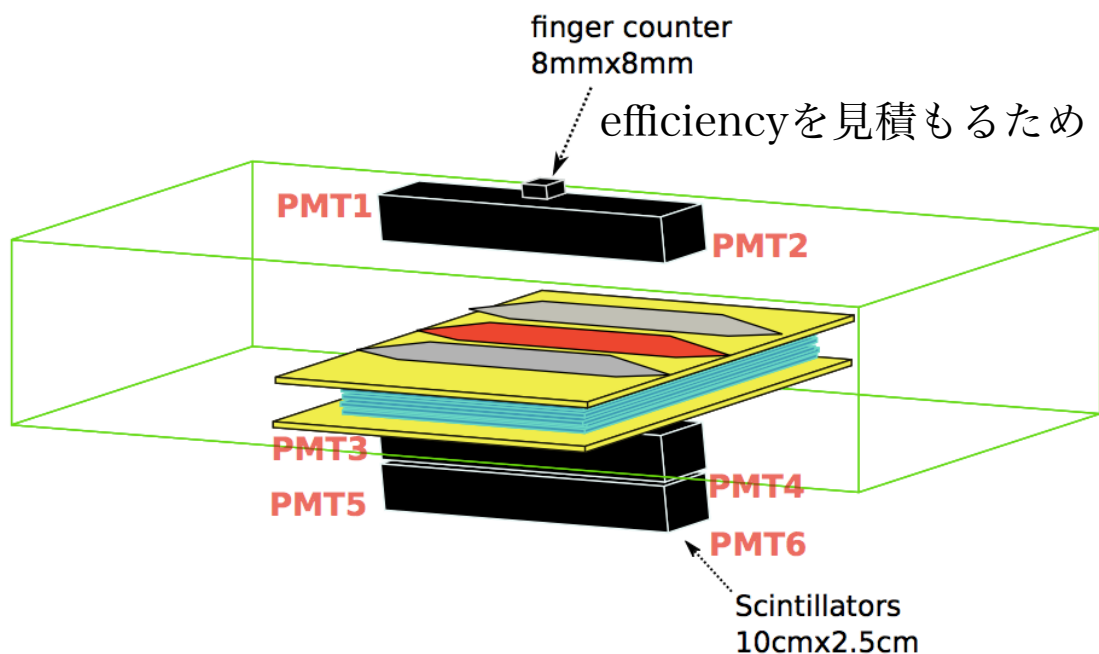
- 利得を下げると、周波数帯域が広がり、より立ち上がりの早い信号を捉えることができるだろう。
- しかし利得を下げすぎると、S/Nが悪くなり、時間分解能は悪くなるだろう。



利得を変えながら時間分解能を評価し、最適な利得を探す。

問題点・セットアップの変更

- 測定できるのは、MRPCとスタートカウンター両方の時間分解能を含んだ量。
- スタートカウンターの時間分解能($\sim 70\text{ps}$)がMRPC($\sim 40\text{ps}$)に比べて悪い。
- 得られたMRPCの時間分解能は、測定誤差の非常に大きいものである。
- MRPCと同等かそれ以上の時間分解能を持つスタートカウンターを構成する必要がある。



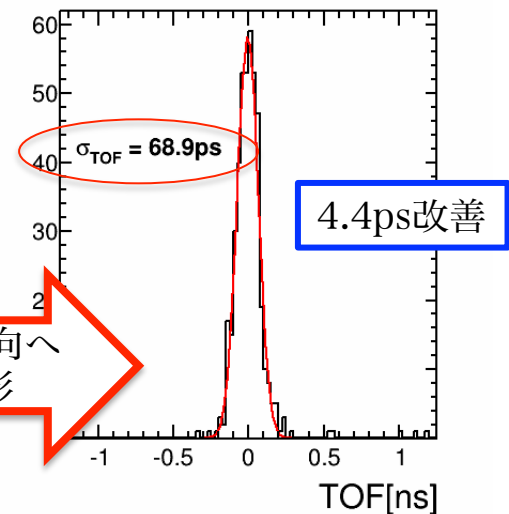
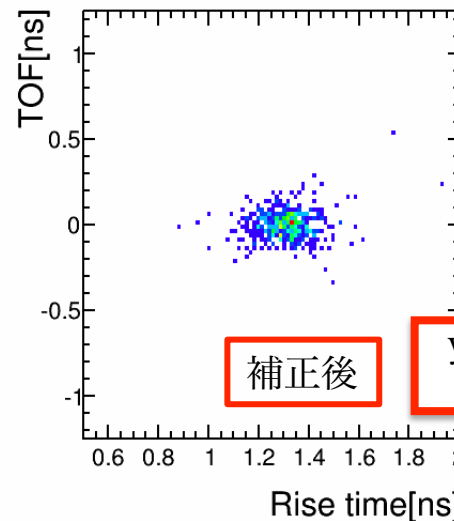
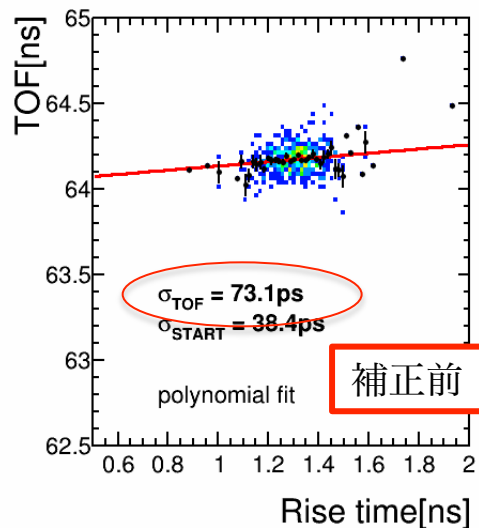
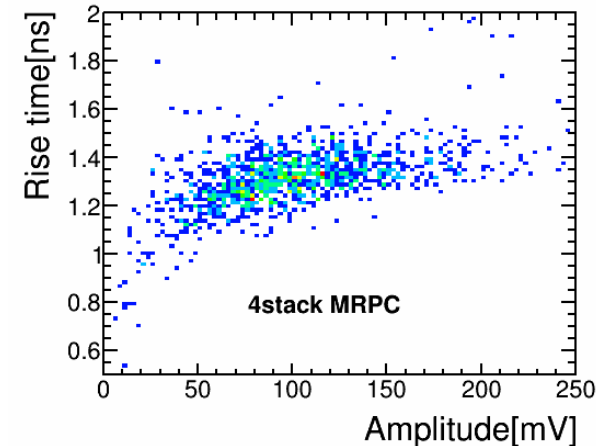
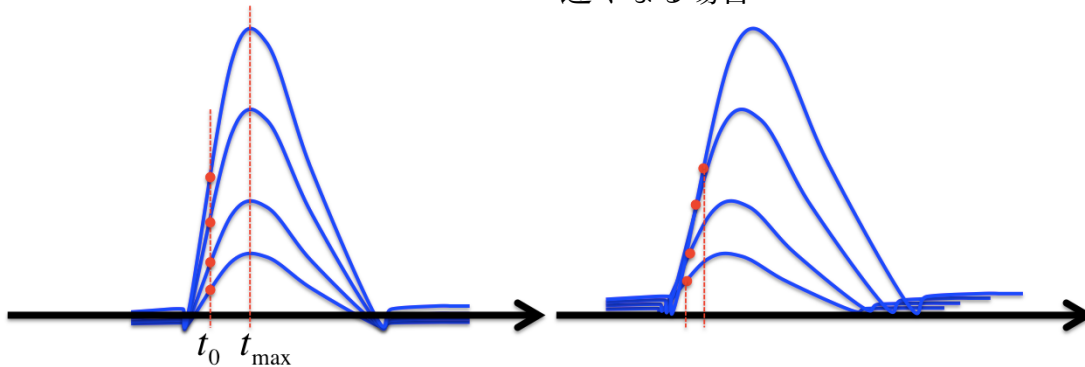
- 短いシンチレーションカウンターを新たに製作
- 時間分解能 $100\text{ps} \rightarrow 60\text{ps}$
- 3本の時間平均をとることにより、スタートカウンターの時間分解能は約 40ps

立ち上がり時間による補正

- MRPCの信号の立ち上がりは波高依存性を持つ。
- 本研究で定義して t_0 は、立ち上がり時間依存性を持つはず。

波高によらず波形が一定な場合

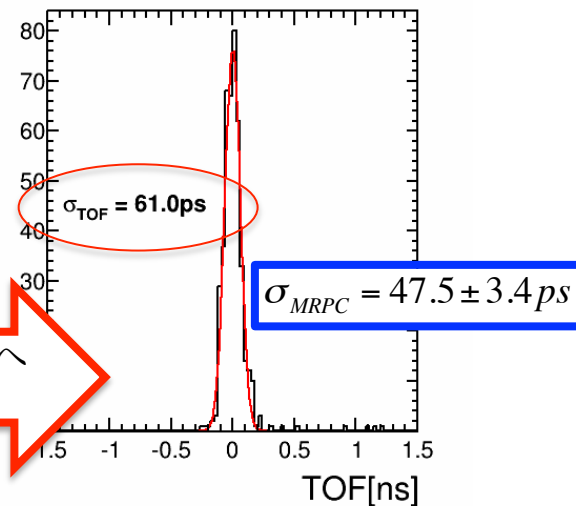
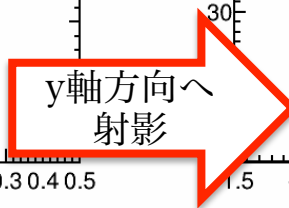
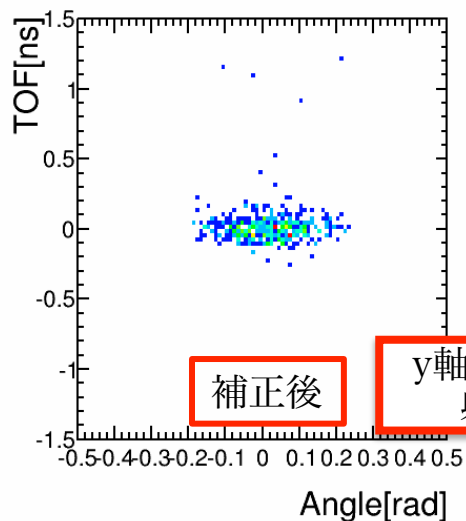
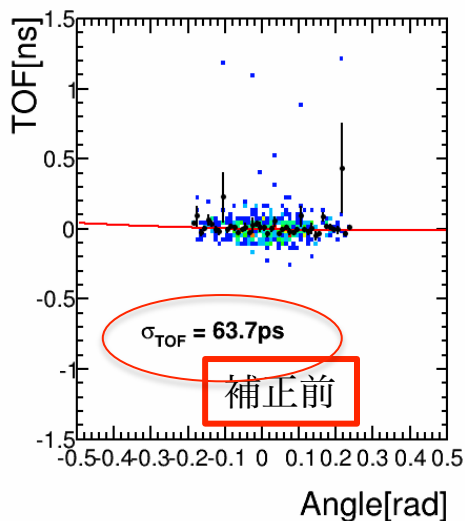
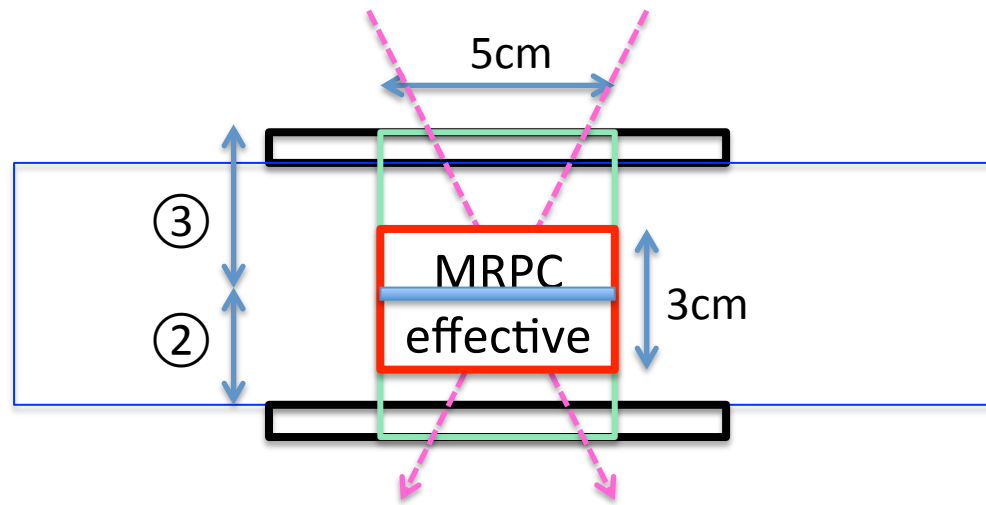
波高が高くなるほど立ち上がりが遅くなる場合



y軸方向へ射影

入射角度による補正

シンチレーションカウンター両端の時間差から計算される宇宙線のヒット位置から、MRPCへの入射角を計算。

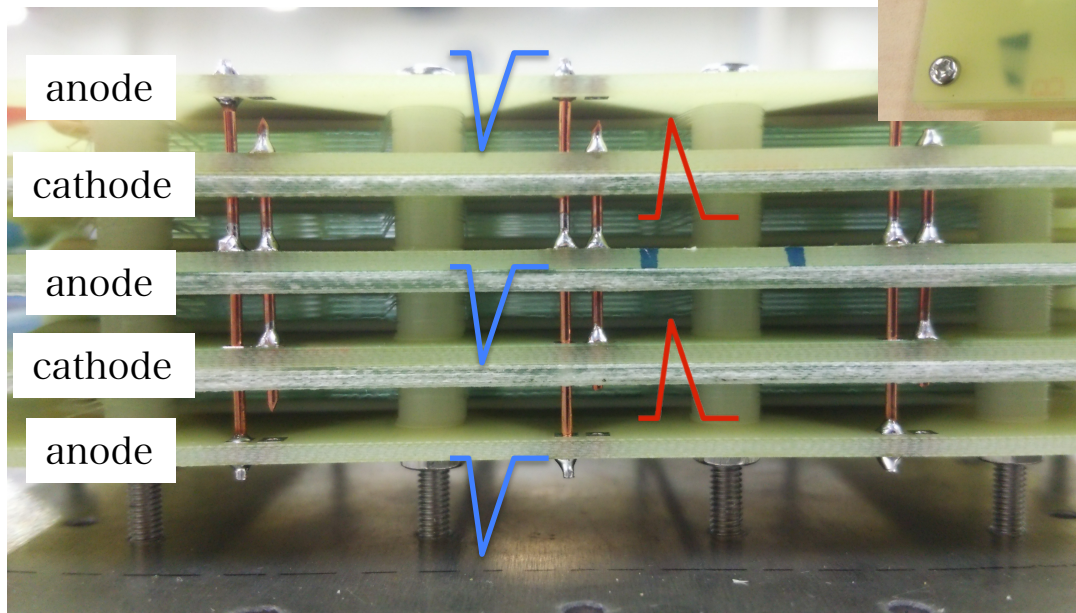
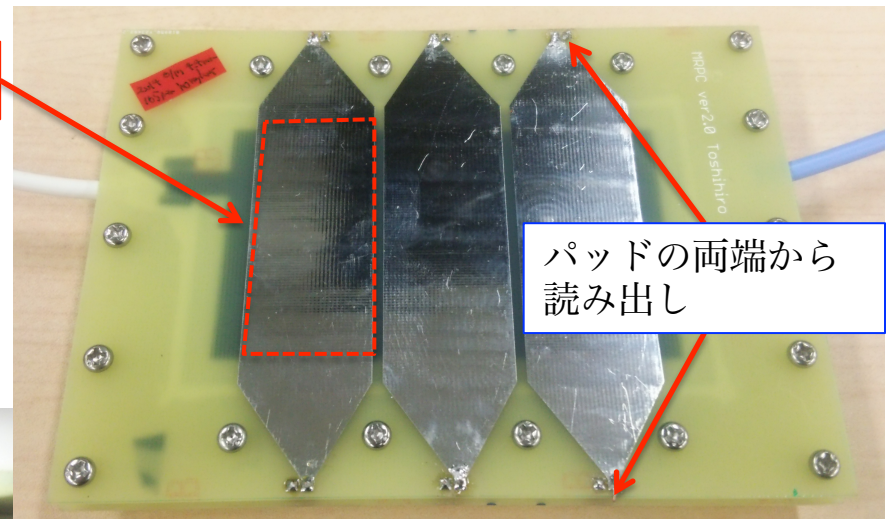


- 4 段型MRPCの時間分解能は $47.5 \pm 3.4 \text{ ps}$
- 補正によって約20psほど改善された。

本研究で用いたMRPC

感度領域：24 x 50mm

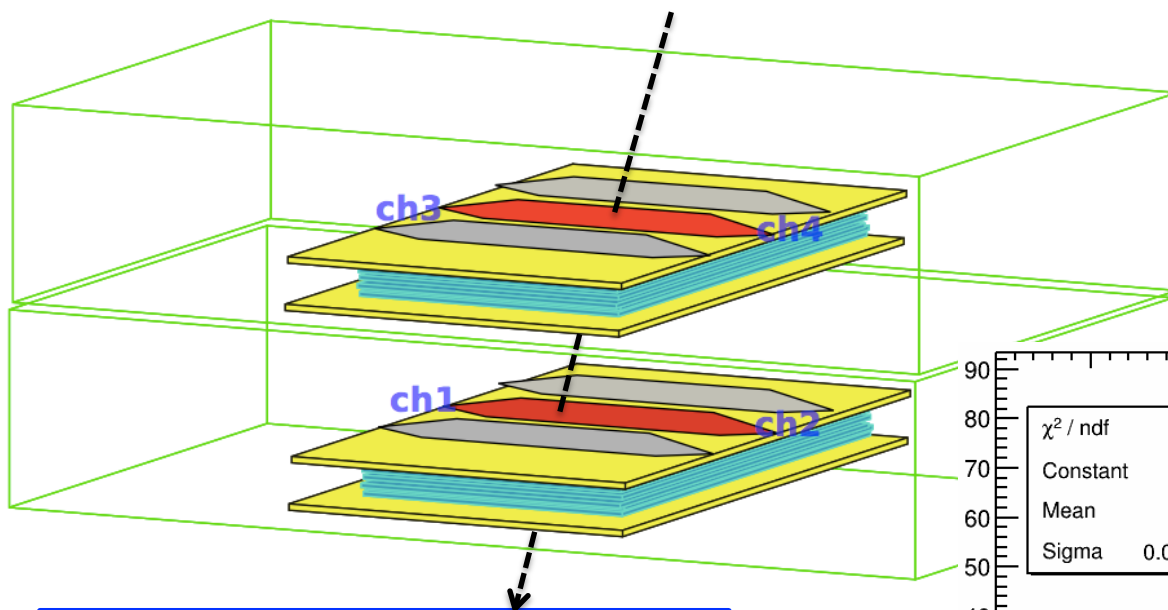
1～3段型も同様に製作



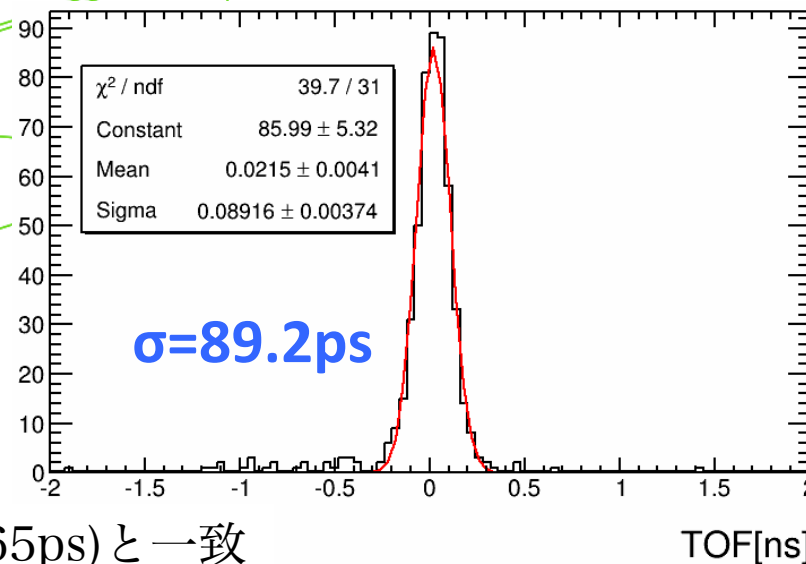
ギャップ幅：165 μm
ギャップ数：6 ギャップ x N
外側ガラス厚み：550 μm
内側ガラス厚み：400 μm
基板厚み：1.6mm

セットアップの変更②

- 4 段型MRPC× 2
- 4チャンネルのANDをトリガーとする。
- 先行研究ではこのようなセットアップが多い。

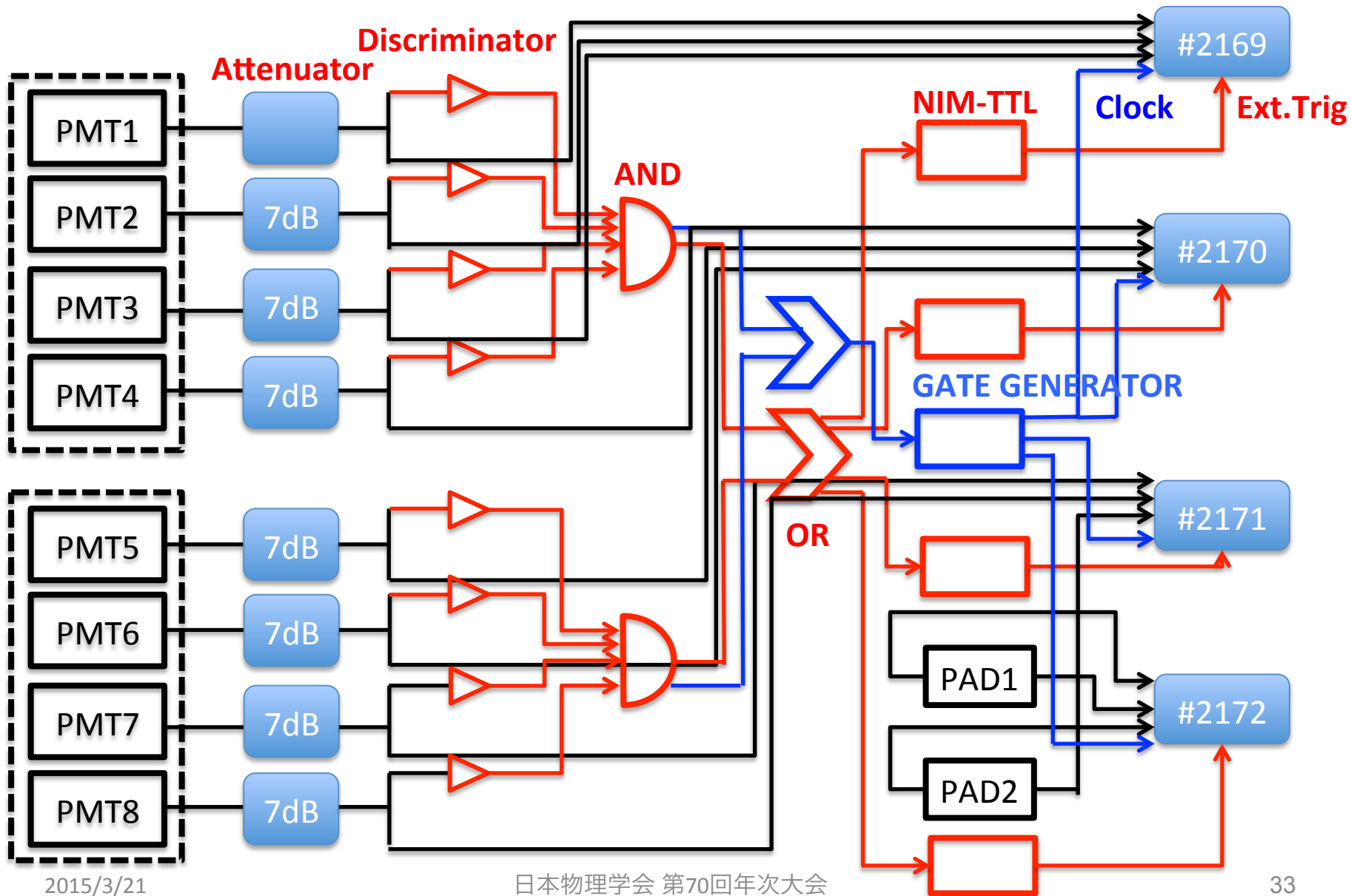


$$T_{TOF} = T_{MRPC1} - T_{MRPC2}$$
$$\sigma_{MRPC} = \frac{\sigma_{TOF}}{\sqrt{2}} = 63.0 \pm 2.6 ps$$



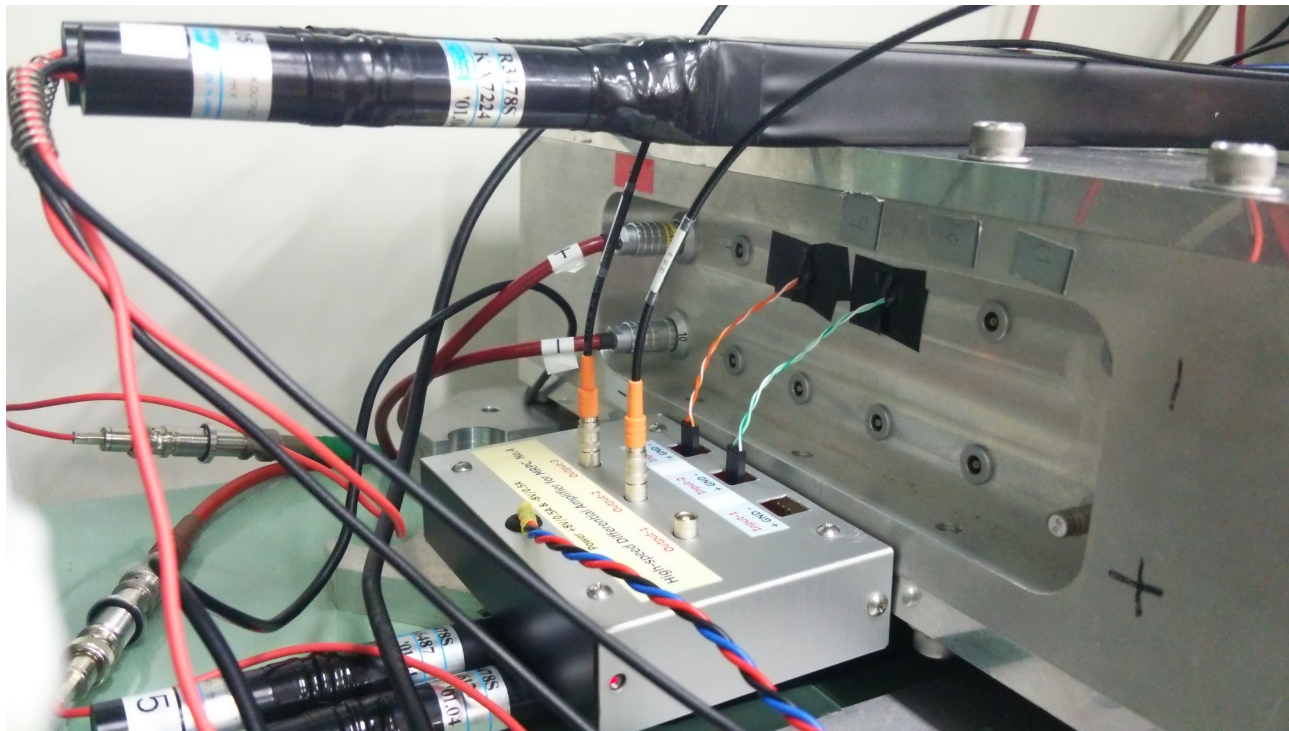
さきほどの結果(65ps)と一致

前段増幅器の最適化：測定回路

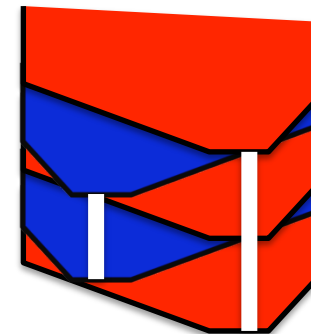
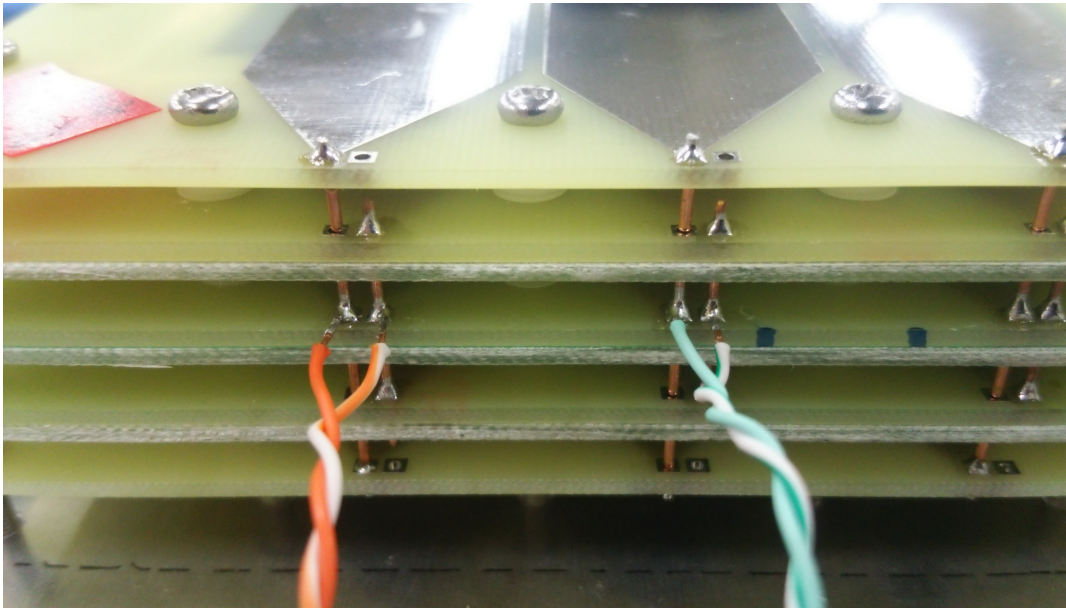


前段増幅器の最適化：セットアップ

- MRPCは動作が安定するのに時間がかかる(~12時間)
- 抵抗等の付け替えを簡単にするために、ガスボックスのリモネクタを外し、そこからケーブルを引き出し、プリアンプを外に置いている。
- ガスはただ漏れ。イソブタンが足りない?(5ml/m)



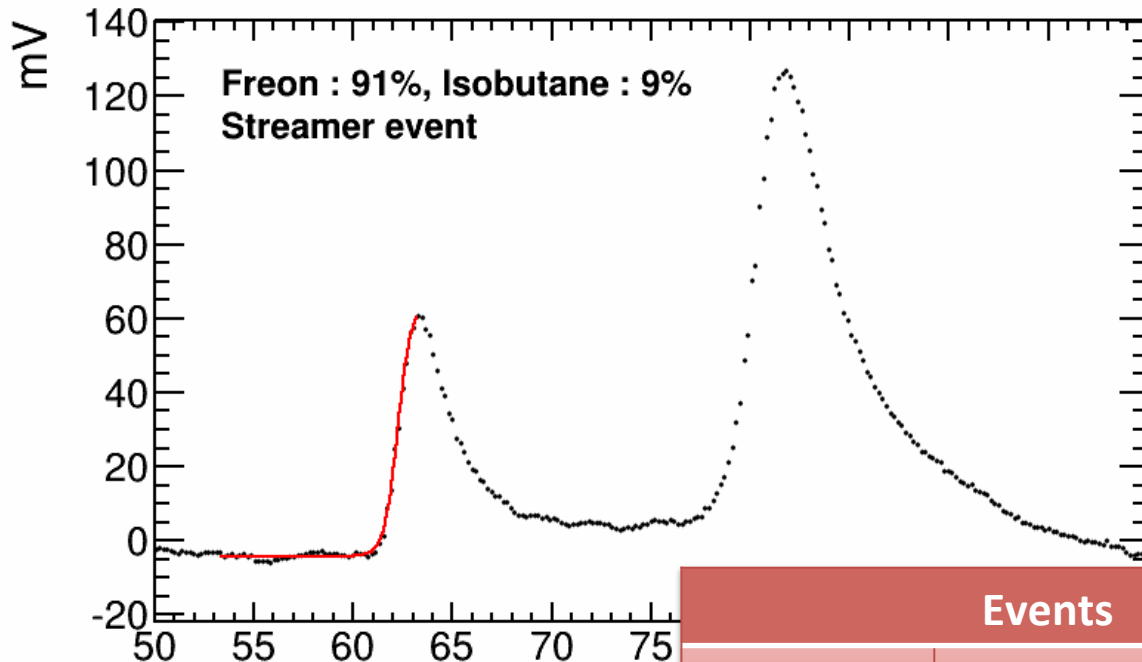
Read out



Readout pad is asymmetric shape, so if I put the pad left and right reversely I can connect between pads straight directly by copper wire

ストリーマー

- 4段型では、全体の約50%がストリーマー。
- 電子雪崩による信号部分にのみフィットを行う。



時間分解能には影響が無い

| | Events | TOF σ [ps] | Rise time[ns] |
|-----------|--------|-------------------|---------------|
| ALL | 1580 | 84.3 ± 1.7 | |
| Avalanche | 774 | 86.6 ± 2.5 | 1.17 |
| Streamer | 802 | 85.1 ± 2.6 | 1.36 |

電圧依存性：時間分解能

- 11kV~12kVでは、時間分解能はほぼ一定(60ps-)。
- イベントカットによって値は変わる。
- セットアップの問題。

