

大面積・高時間分解能 Resistive Plate Chamber の開発

京都大学 原子核ハドロン研究室
D1 富田夏希

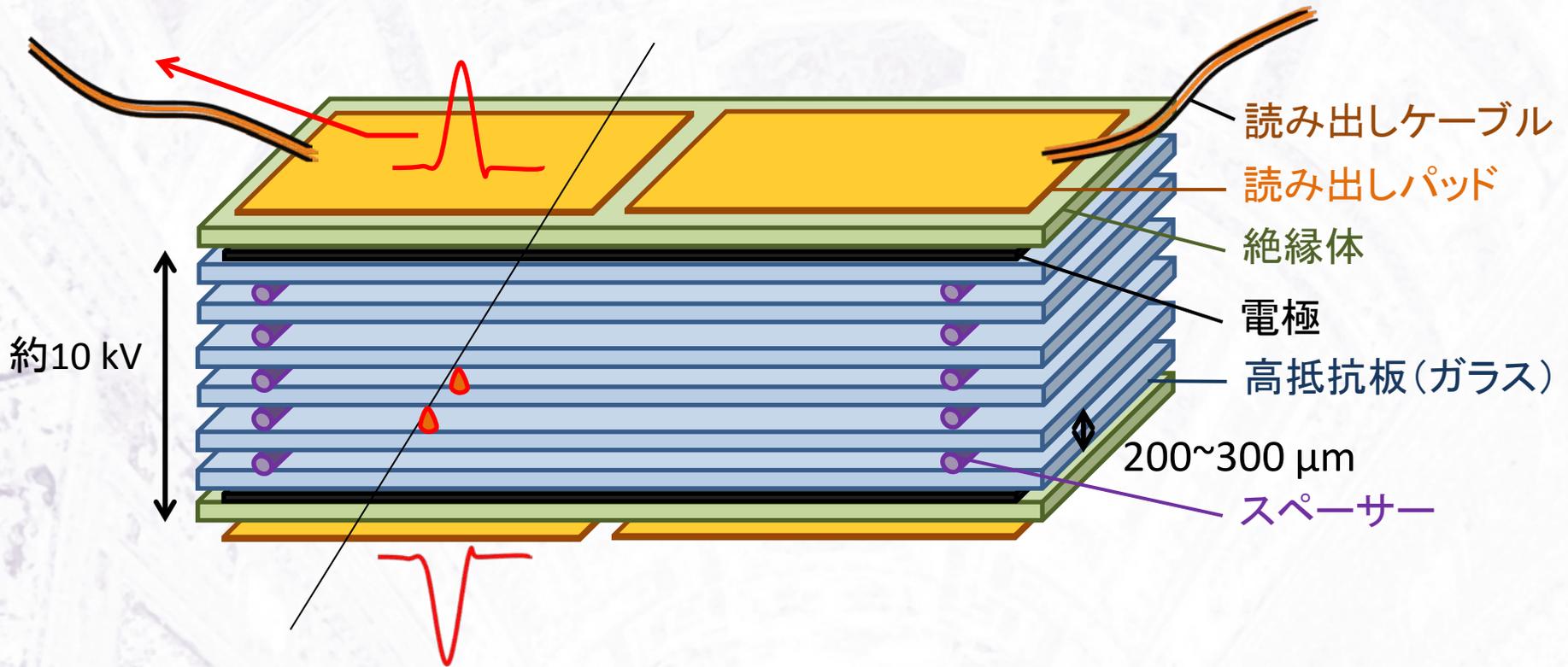
日本物理学会2012年秋季大会
2012年9月13日

大面積・高時間分解能 Resistive Plate Chamber の開発

もくじ

- Resistive Plate Chamberについて
- LEPS2の紹介とLEPS2での要求性能
- Resistive Plate Chamberの製作
- LEPSでのビームテスト
- テスト結果
- まとめ
- 修論後の進展

Resistive Plate Chamber (RPC)



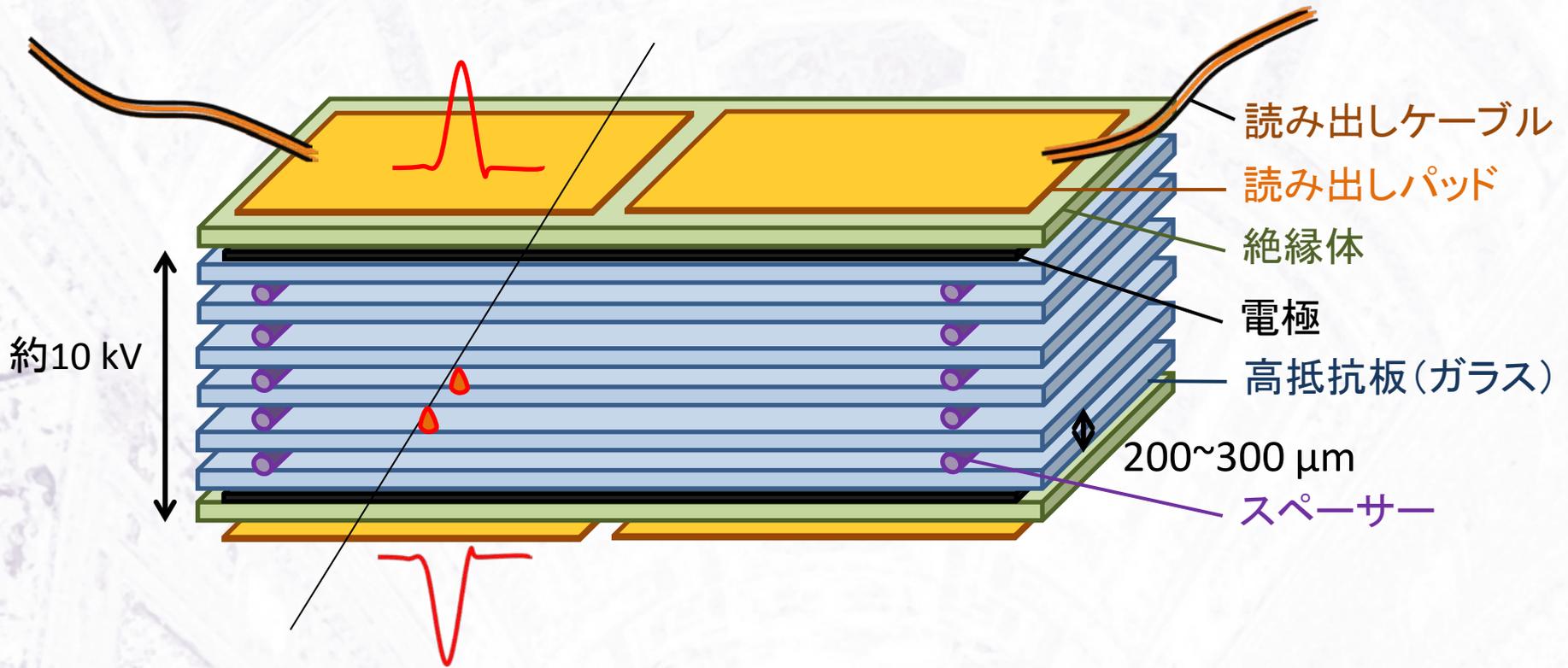
- 高抵抗板を複数枚並べたガスチェンバー
- 高抵抗板の間(ギャップ)で電子を増幅
- 最外層の読み出しパッドに信号を誘起

低いコスト

高い時間分解能

磁場中で使用化

Resistive Plate Chamber (RPC)



- 高抵抗板 → 放電を避ける
- 狭いギャップ
→ ドリフト時間のばらつき小 → 高時間分解能
- 複数のギャップ → 十分な検出効率、高時間分解能

オペレーションモード

ストリーマーモード

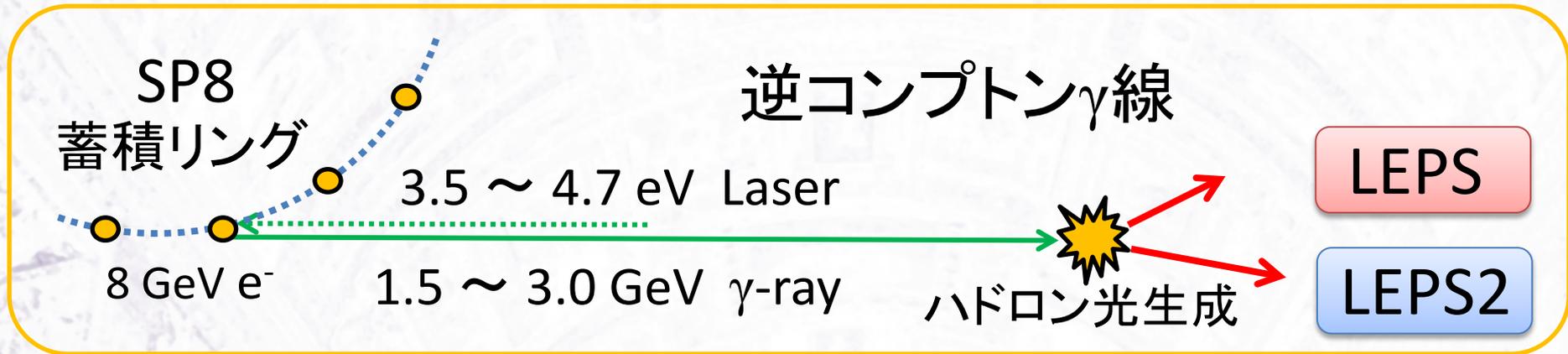
- $e^- > 10^8$ 紫外線
 - Arガス
 - ギャップ幅 ~ 2 mm
 - シングルギャップ
 - 信号 **大** (数10 mV)
(アンプ**不要**)
 - 時間分解能 ~ 1 ns
 - レート耐性 \sim Hz/cm²
- ミュオントリガー
宇宙線
Belle, Babar, OPERA,...

アバランシェモード

- $e^- < 10^7$ ←
 - フロンガス(高電気陰性度)
 - ギャップ幅 200-300 μ m
 - マルチギャップ
 - 信号 **小** (数mV)
(アンプ**必要**)
 - 時間分解能 ~ 50 ps
 - レート耐性 \sim kHz/cm²
- TOF Multigap RPC, Timing RPC
ALICE, STAR, FOPI, ...
日本国内で使用例なし

LEPS2

Laser Electron Photon experiment at SPring-8

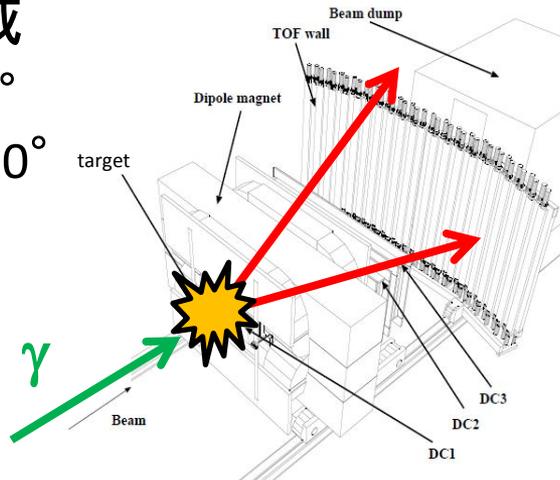


LEPS

2000年～

前方領域

Ver: $\pm 25^\circ$
Hori: $\pm 10^\circ$



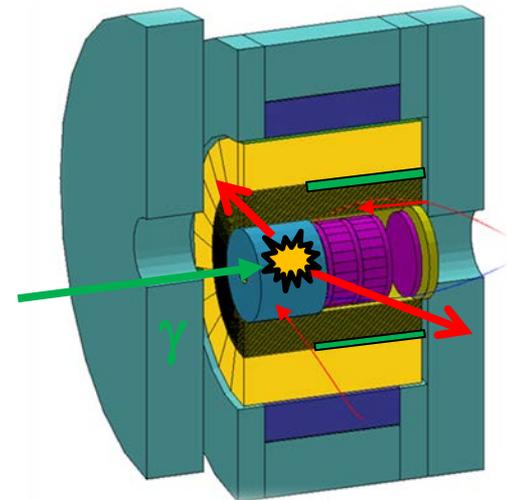
LEPS2

新しいビームライン

ほぼ全立体角

LEPSの10倍の
光子強度

現在建設中



LEPS2でのRPCの要求性能

RPC-TOF

磁場中でオペレート

1 mの短い飛行距離

1.1 GeV/c の K/ π 3 σ で識別

→ $\sigma_{\text{TOF}} \sim 50$ ps (回路込)

トリガーに使用

→ 検出効率 > 99%

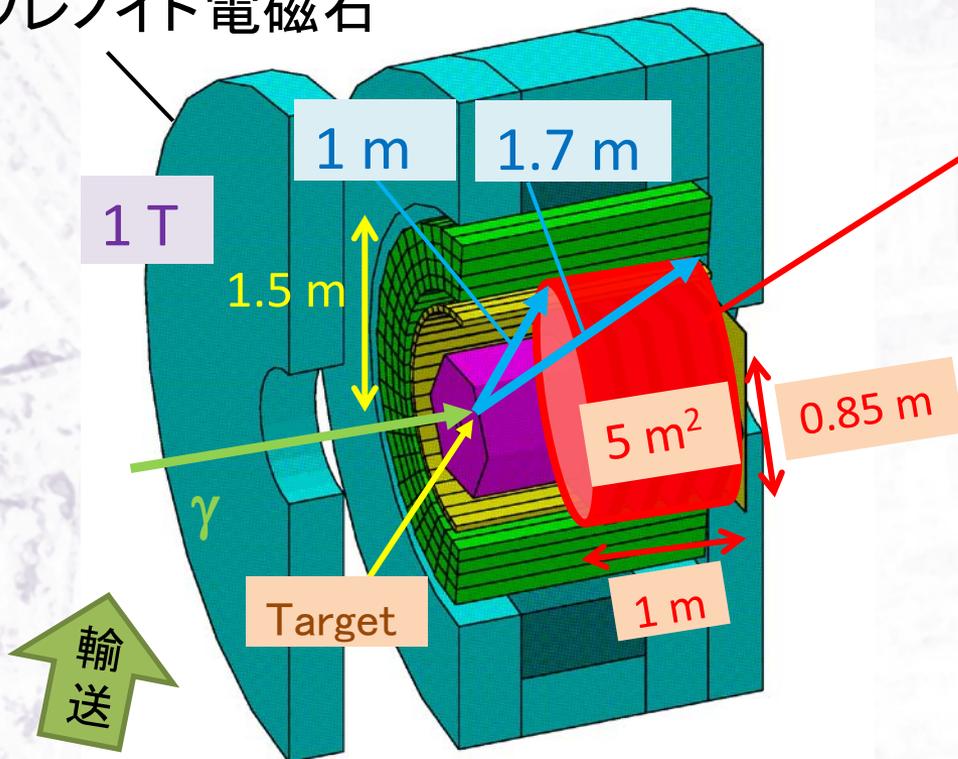
レート耐性 ~ 1 Hz/cm²

5 m² の大面積

チャンネル数 1000ch以下
(少ないほど良い)

→ 1chあたり50cm²以上

ソレノイド電磁石



ソレノイド電磁石



アメリカ
ブルックヘブン
研究所
E787/E949実験

Resistive Plate Chamber の開発状況

TOF RPC

パッド小

回路の分解能込み

RPC単体 15~20 ps

- ALICE-TOF ($9 \text{ cm}^2/\text{ch}$, $250 \mu\text{m} * 10 \text{ gaps}$): 50ps, 99%
- STAR-TOF ($20 \text{ cm}^2/\text{ch}$, $220 \mu\text{m} * 6 \text{ gaps}$): 60ps, 97%
- FOPI-TOF ($9 \text{ cm}^2/\text{ch}$, $220 \mu\text{m} * 8 \text{ gaps}$): 60ps, 99%

大面積パッド

パッド中の信号の伝搬 まだ理解が進んでいない

R&D

STAR-MTD, CBM-TOF, R3B-TOF ($50-165 \text{ cm}^2/\text{ch}$)

- A. Blanco et al. ($400 \text{ cm}^2/\text{ch}$, $300 \mu\text{m} * 4 \text{ gaps}$): 50-75ps, 95%
- M. Abbrescia et al. ($225 \text{ cm}^2/\text{ch}$, $300 \mu\text{m} * 5 \text{ gaps}$): 65-85ps, 95%

高時間分解能

RPC単体 8 ps

- S. An et al. ($9 \text{ cm}^2/\text{ch}$, $160 \mu\text{m} * 24 \text{ gaps}$): 20ps, 99%

- 大面積読み出しパッド ($> 50 \text{ cm}^2/\text{ch}$)
- 高時間分解能 (50 ps)
- 高検出効率 ($> 99\%$)

RPCへ挑戦

読み出し回路も重要

Resistive Plate Chamberの製作

手作り

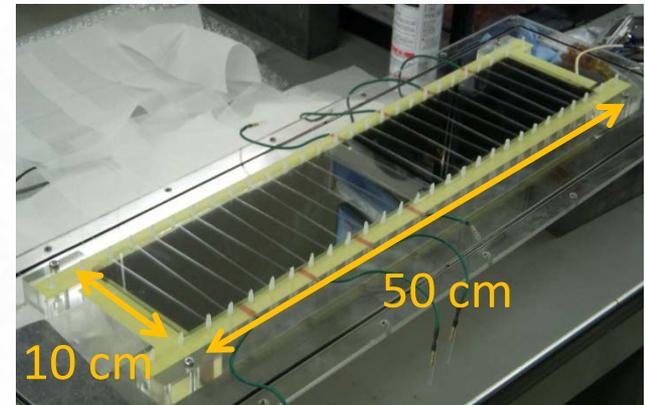
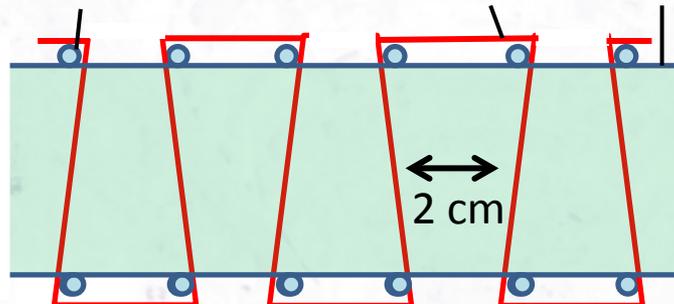
材料



ガラス
10 cm*50 cm

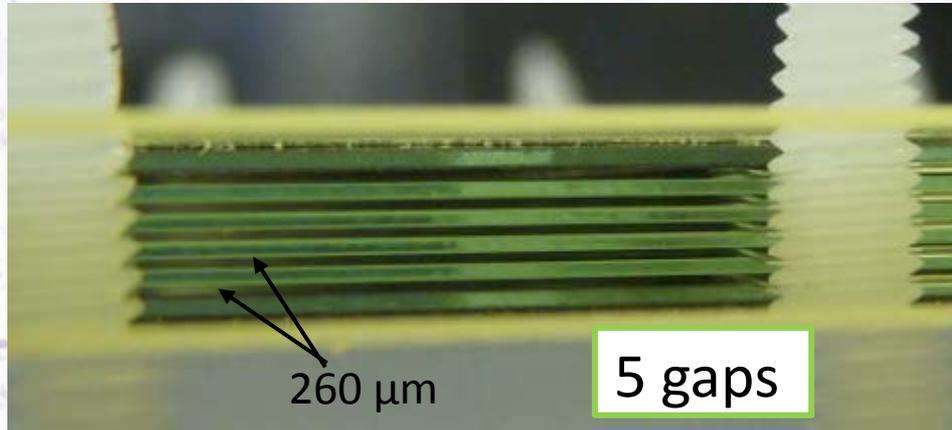
実機の半分

ねじ スペーサー (釣り糸) ガラス

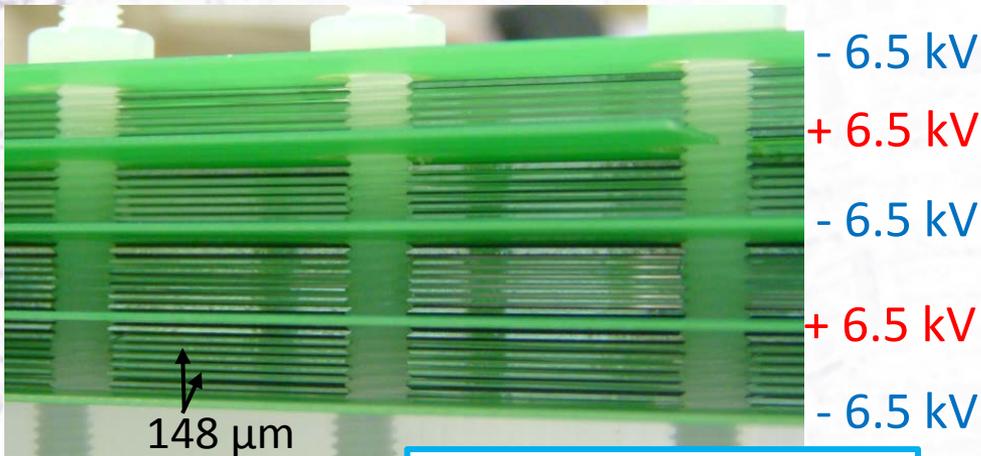
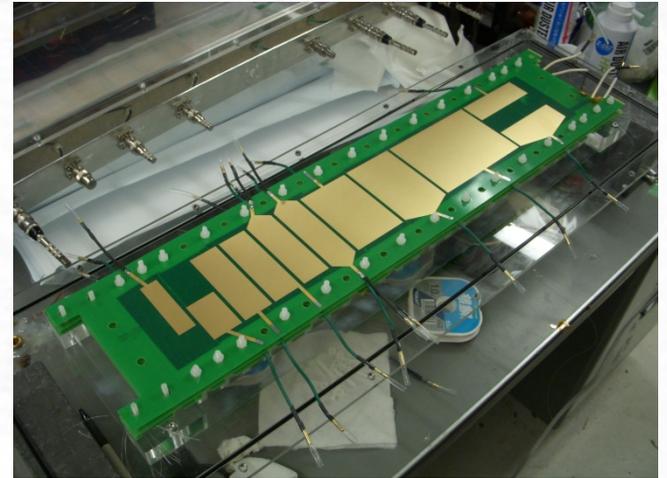


Resistive Plate Chamber の製作

Side View



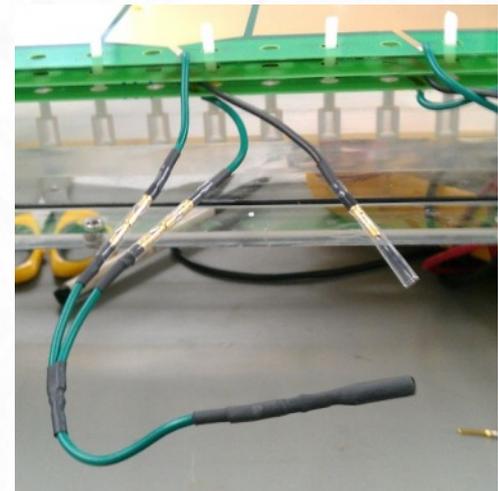
Top View



マルチスタック型

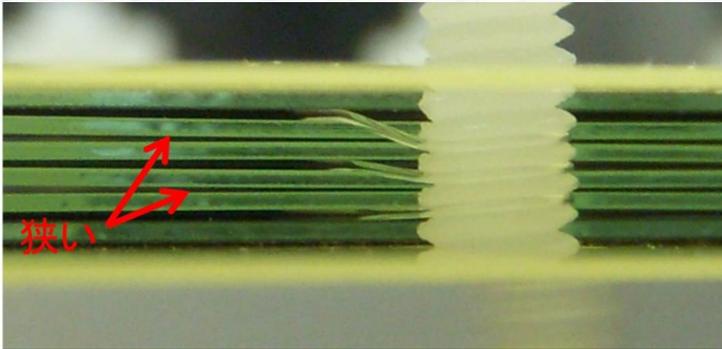
24 gaps

読み出しケーブル



製作 失敗談

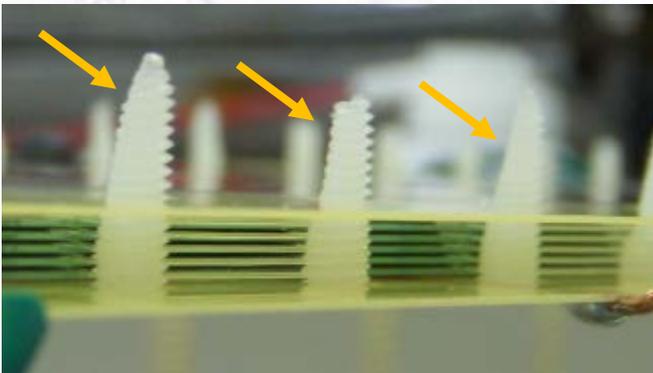
▶ ガラス曲がる...



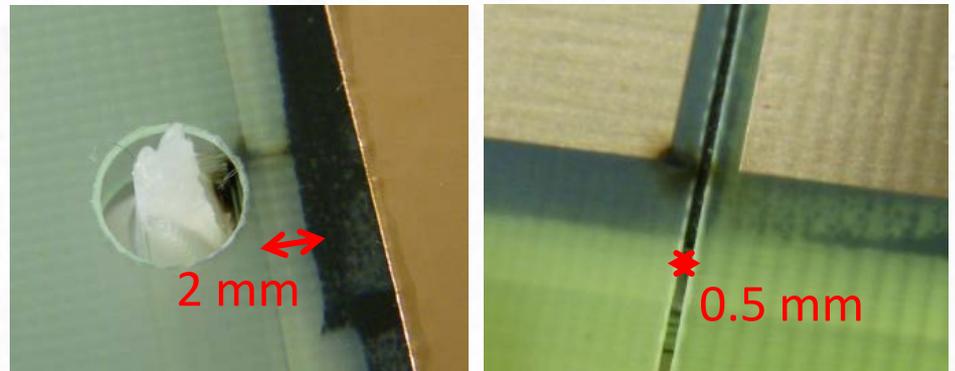
▶ 釣り糸の選定...



▶ ガラス割れる...

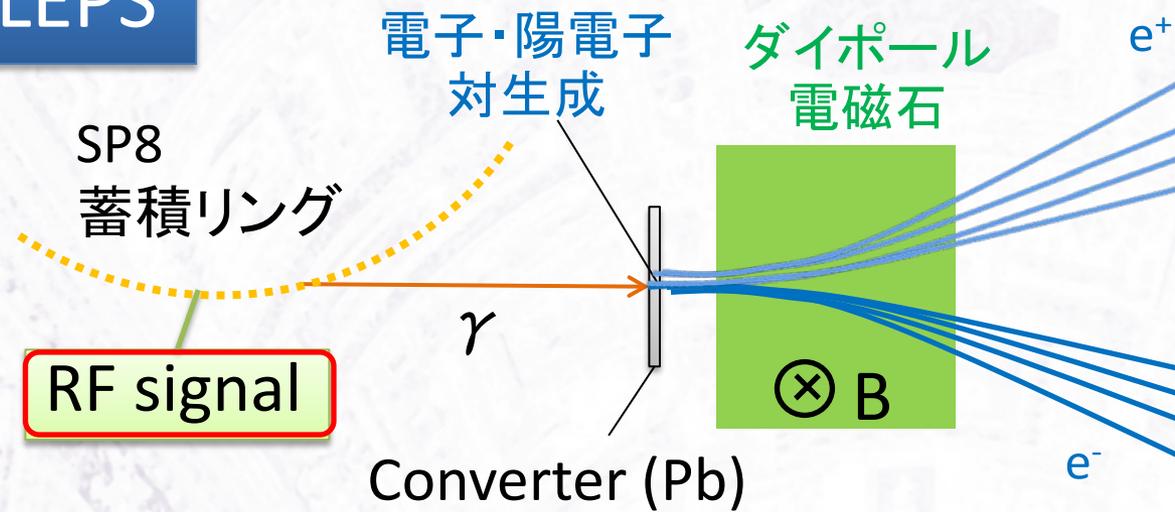


▶ 焦げる...



ビームテスト

LEPS



1 cm * 2 cm

4 Finger Scintillators

5~20 Hz/cm²

LEPS

LEPS2

TOF = RPC - RF

- $\sigma_{RF} \sim 14$ ps Very good!
- $\sigma_{回路} \sim 30-35$ ps ?
 - $\sigma_{TDC} \sim 18$ ps
 - $\sigma_{Amp+Discri} \sim ?$ ps

RPC以外の寄与も含めて50 ps

RPC

PMT amp (Kaizu-2104)

Discri. (Phillips-711)

TDC
(GNC-040)

ADC
(RPC-022)

(CAMAC)

ビームテスト

Gas 電子の増幅を抑える

フロン (R134a) : 90%

SF6 : 5%

イソブタン : 5%

Amp

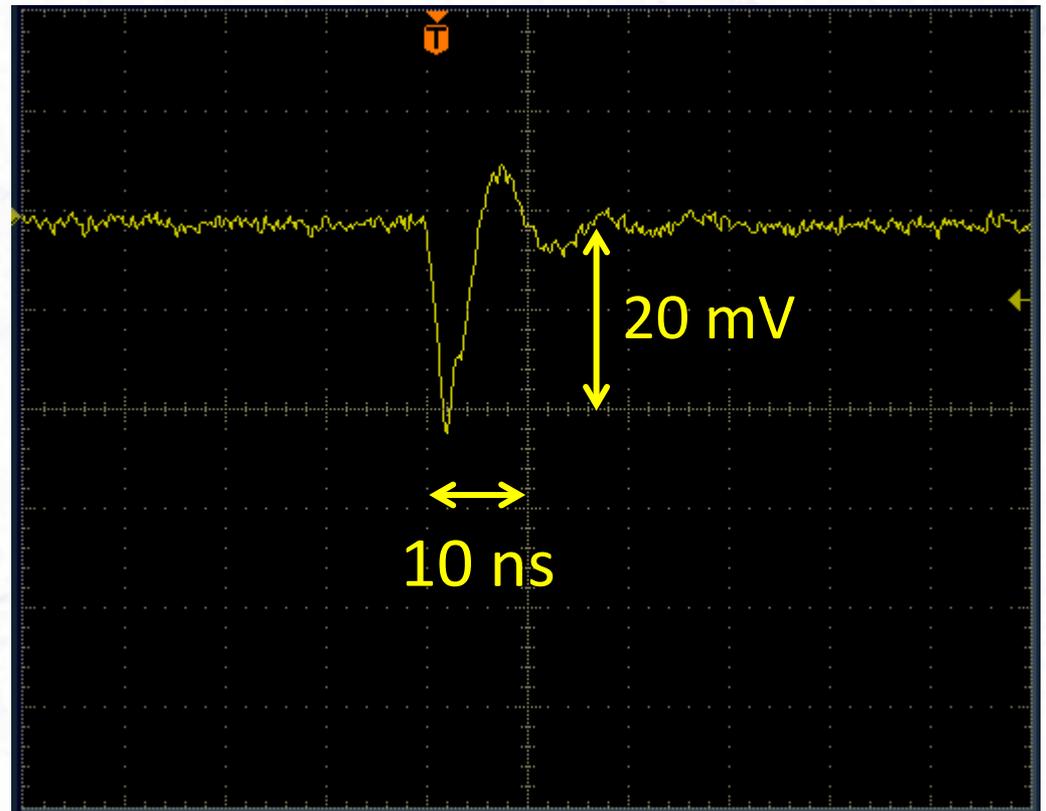
KN2104 PMT amplifier

Kaizu works

Input 50 Ω

500 MHz / Gain 5

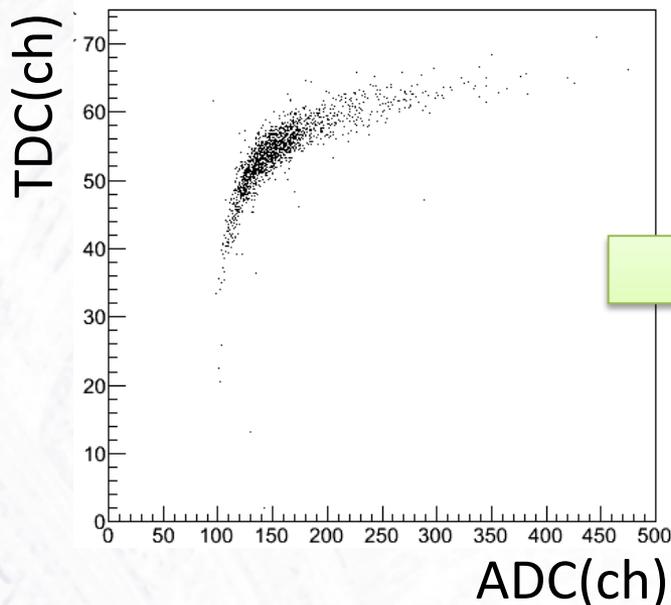
Signal アンプ使用 (ゲイン4倍)



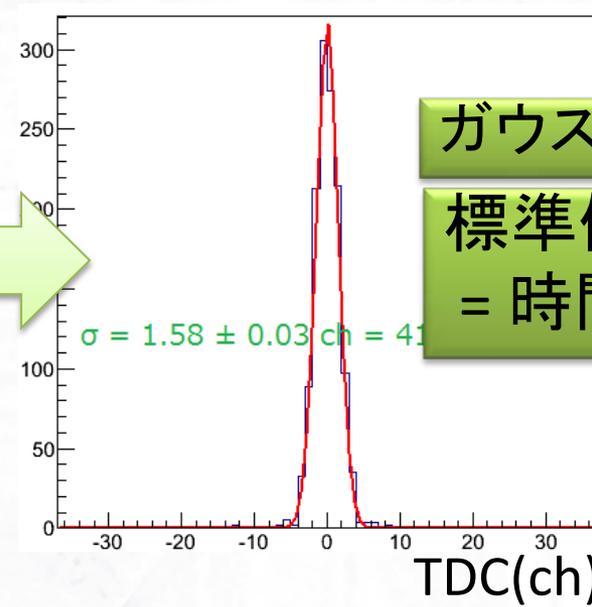
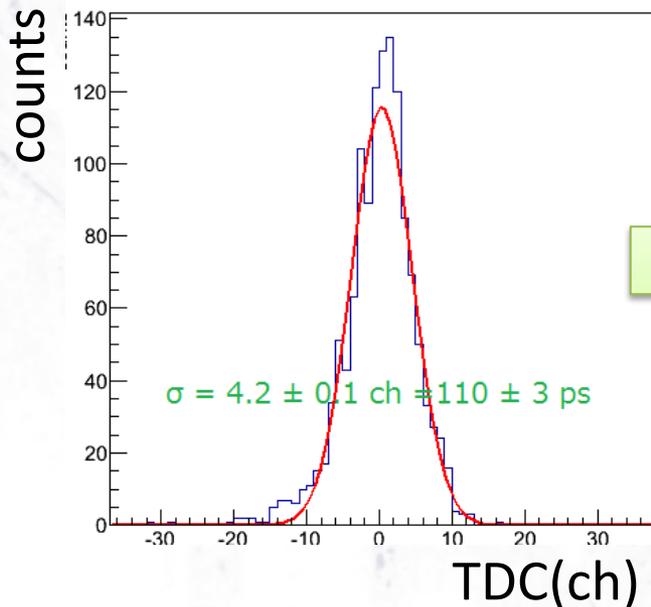
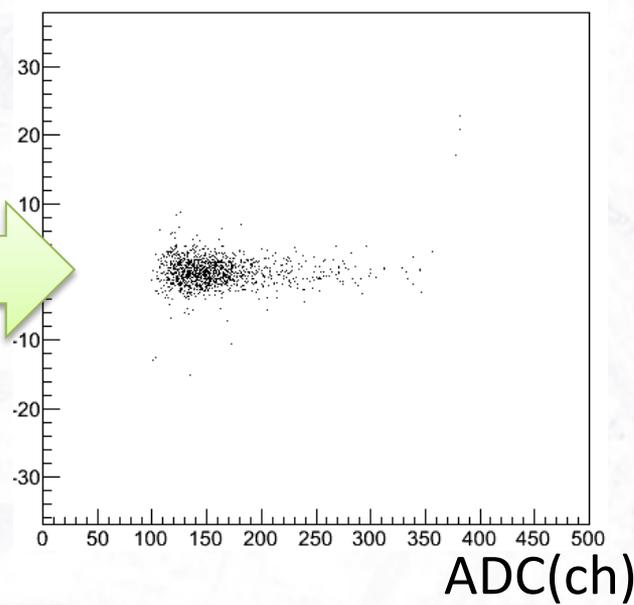
立ち上がり ~ 2 ns

タイムウォーク補正

補正前



補正後



ガウス関数でFit

標準偏差 σ
= 時間分解能

測定項目

目標

- 大面積読み出しパッド ($> 50 \text{ cm}^2/\text{ch}$)
- 高時間分解能 (50 ps) • 高検出効率 ($> 99\%$)

小さい読み出しパッド

• 印可電圧

一般的なTOF RPC ($220\text{-}300\mu\text{m}$)より狭めに挑戦

• ギャップ幅

$104\mu\text{m}$, $148\mu\text{m}$, $260\mu\text{m}$

狭い→ドリフト時間のばらつきが少ない→高時間分解能

• ギャップ数

14 $12, 24$ 1, 2, $5, 10$

多い→信号大(S/N大)→高時間分解能

• パッドサイズ・形状

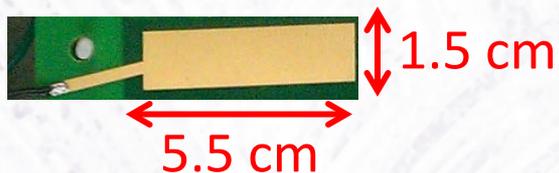
読み出しパッド内での信号の伝搬？

• トリガー位置

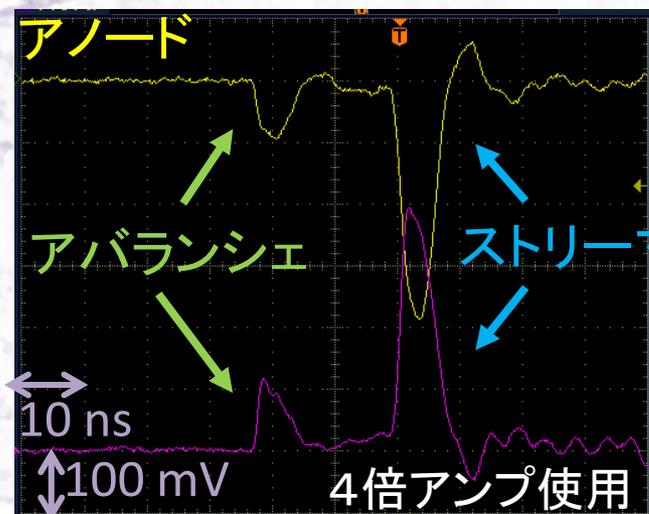
読み出しラインまでの距離に依存しないか？

印可電圧依存性

小さい読み出しパッド
8 cm² (~7000 ch)



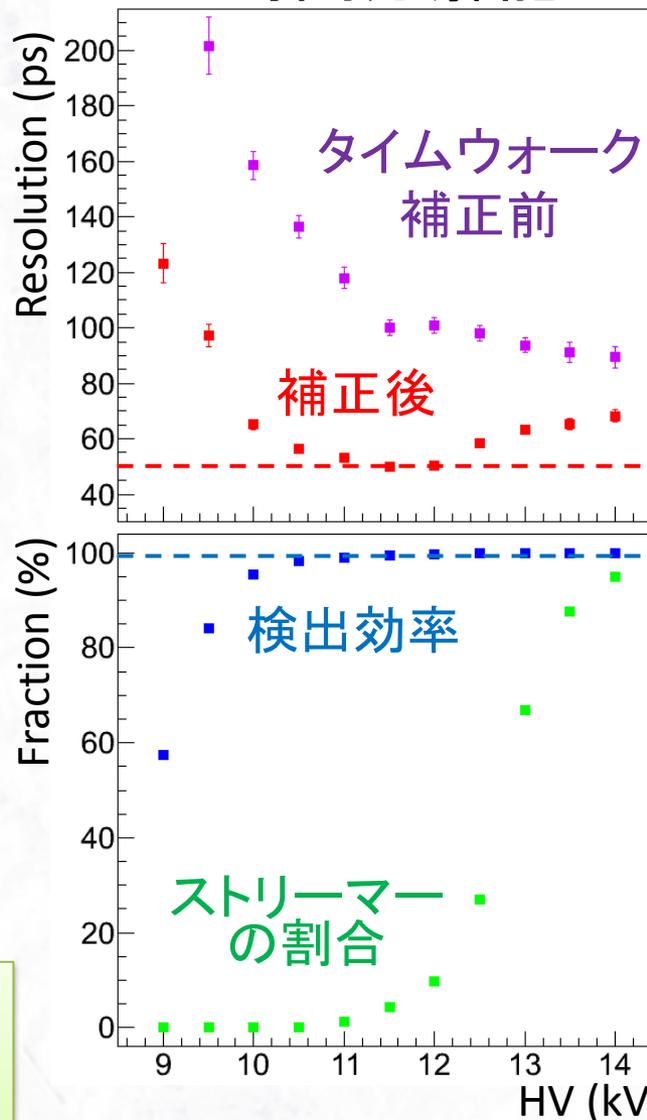
148 μm * 12 gaps



カソード

電圧大 → ストリーマー発生
正しいタイムウォーク補正
ができなくなる

時間分解能



11-12 kV
50 ps / >99 %

50 ps
99 %

小さいパッド
ではあるが

目標の
時間分解能
検出効率
達成

検出効率/ストリーマー

ギャップ幅依存性

ギャップ幅狭



ドリフト時間のばらつきが減る

高時間分解能

小さい読み出しパッド
8 cm² (~7000 ch)

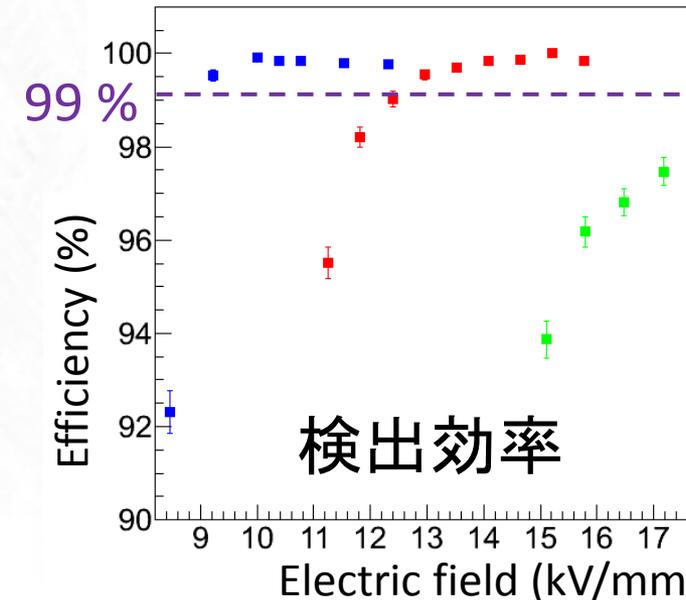
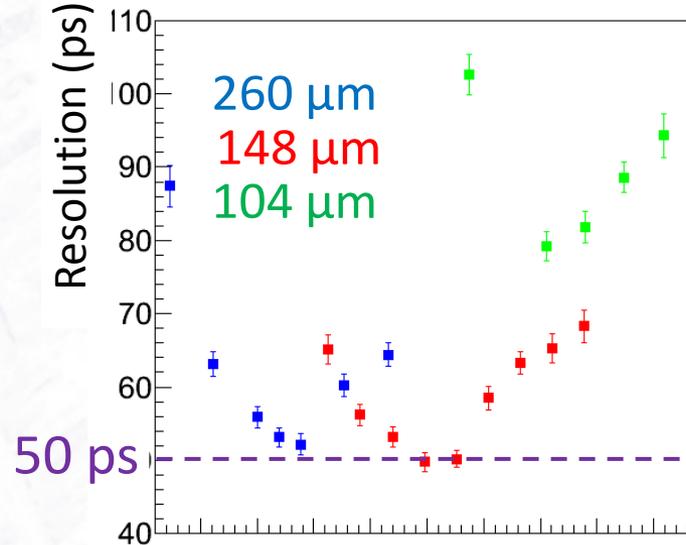


104 μm * 14 gaps
148 μm * 12 gaps
260 μm * 10 gaps

ギャップ数

印可電圧が同程度になるように決定

時間分解能



検出効率

148 μm / 260 μm
大きな違いなし

104 μm
狭すぎる

ギャップ幅200 μm程度から読み出し回路の影響の方が大きくなる

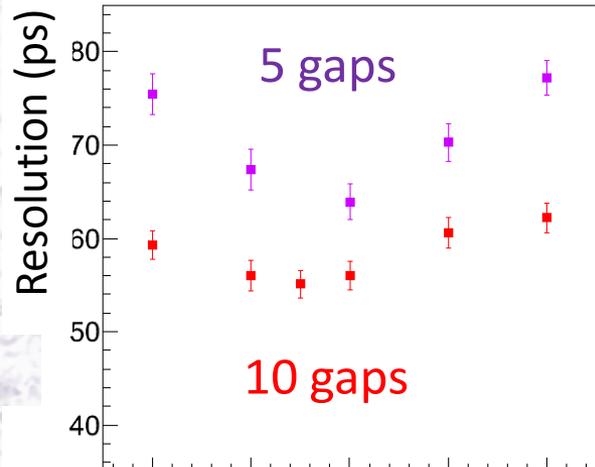
あまり狭くしても効果少ない

狭すぎると
検出効率・
時間分解能
ともに劣化

ギャップ数依存性

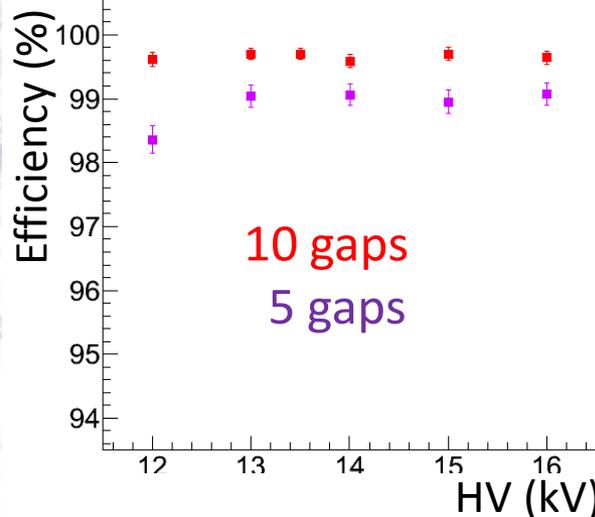
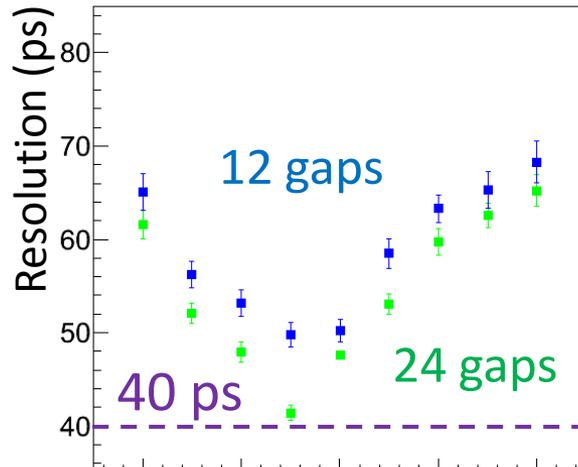
260 μm

時間分解能

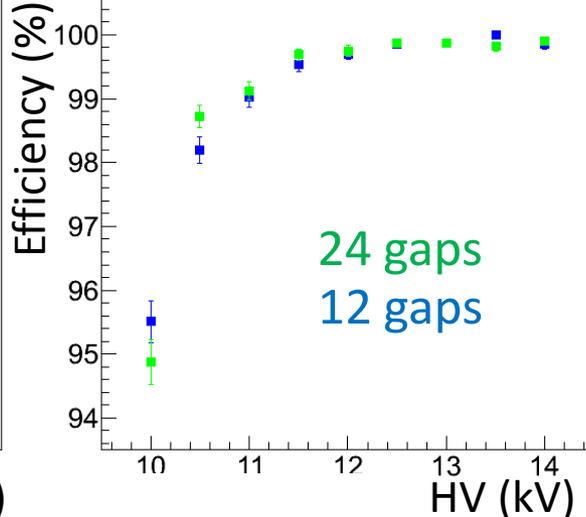


148 μm

時間分解能



検出効率



検出効率

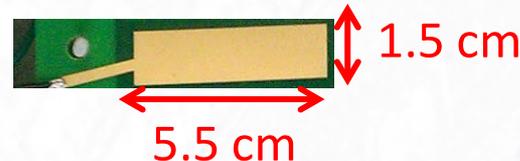
ギャップ数増



信号の起きる
ギャップ数が増える

S/N大
高時間分解能

8 cm²



148 μm / 24 gaps

時間分解能

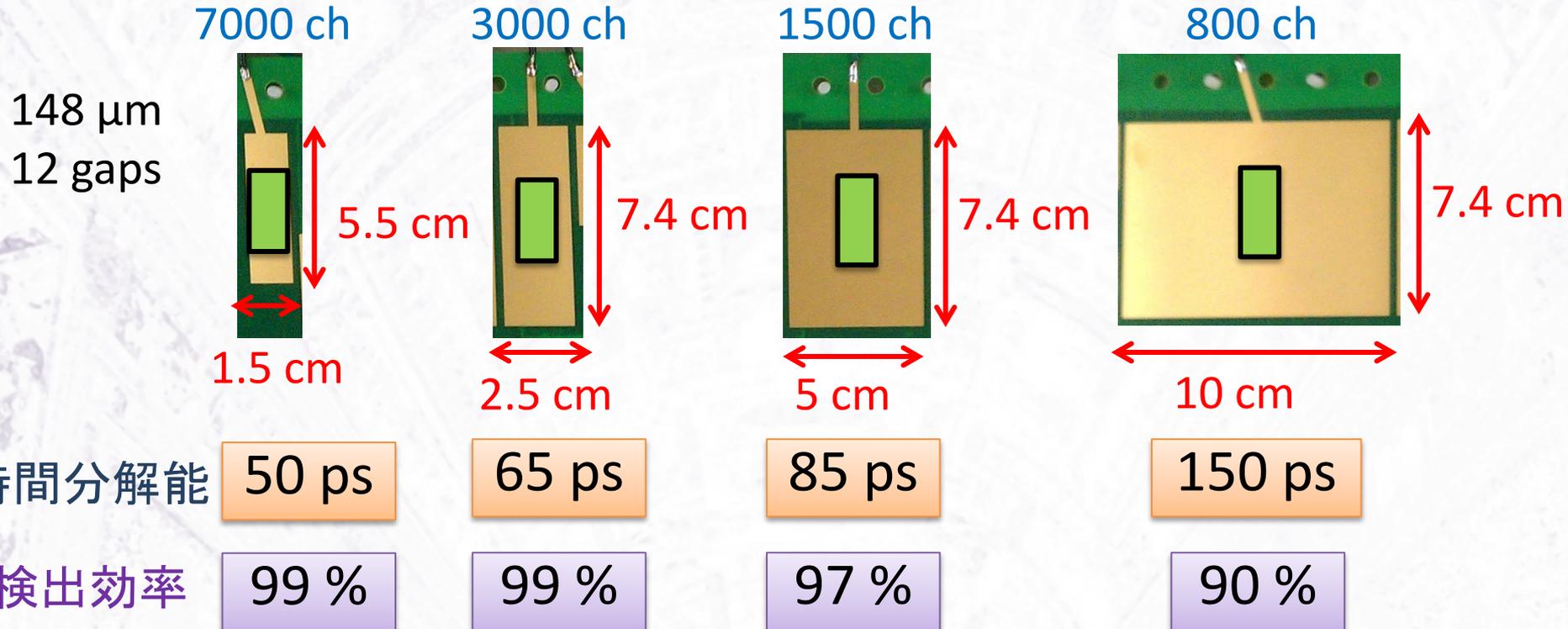
約 40 ps 達成

ギャップ数を増やす
効果は大きい

パッドサイズ依存性

とりにあえず大面積化

トリガー位置 パッド中心



面積の増加とともに、時間分解能・検出効率ともに悪化

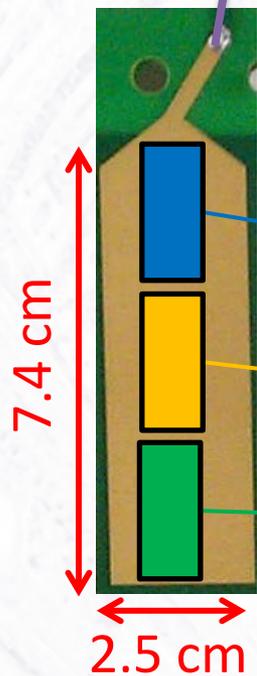
読み出しラインまでの経路差により時間分解能悪化

トリガー位置依存性

読み出しライン
までの距離は？

アンプへ

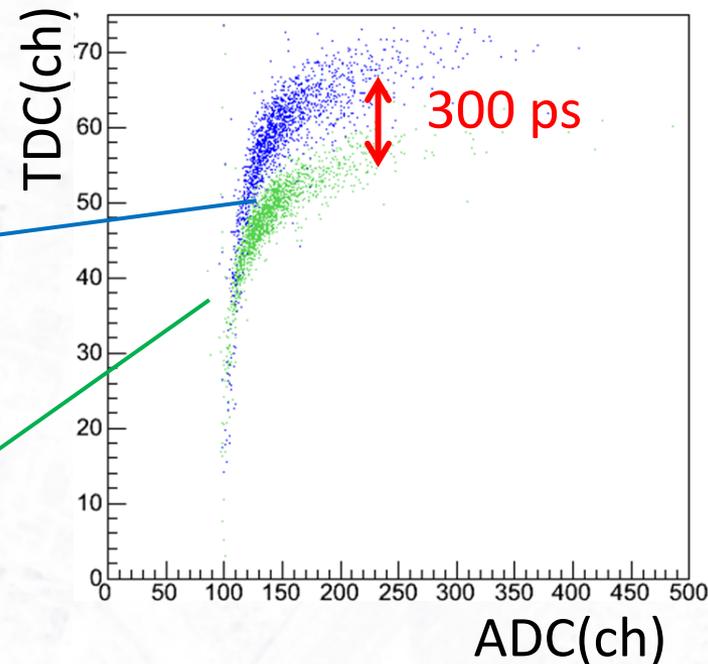
読み出しライン
から遠い方が
分解能が良い



72 ± 2 ps

63 ± 1 ps

50 ± 1 ps



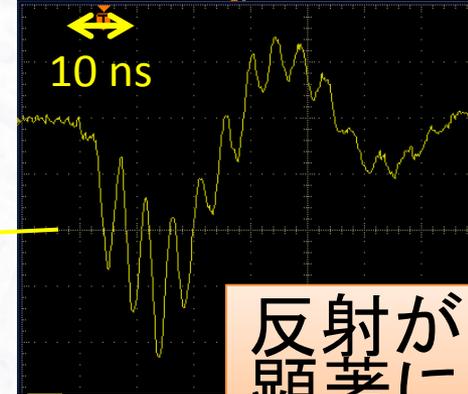
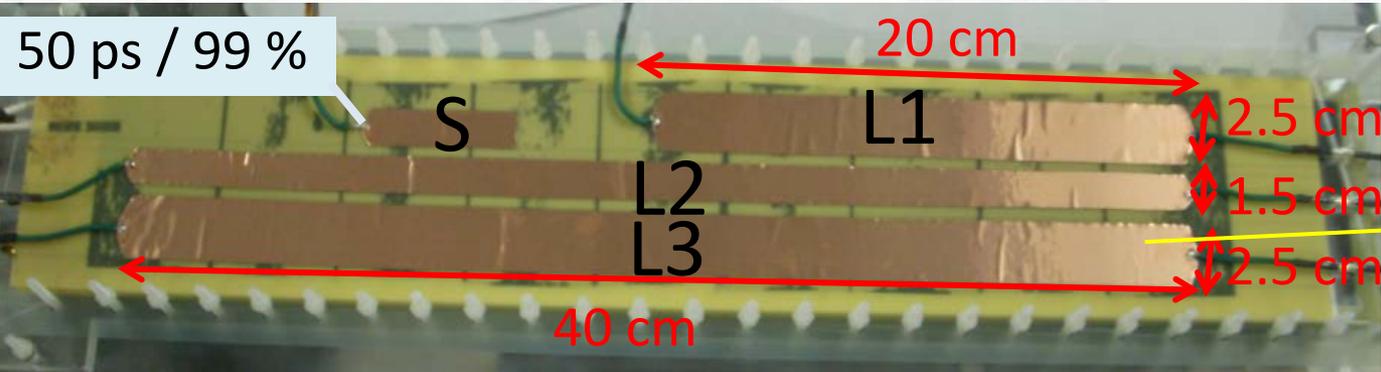
信号が他端での反射との
重ね合わせになり分解能が悪化

読み出しラインまでの
距離の補正が必要

片読みの大面積パッドで高時間分解能を出すのは難しい

ストリップ型読み出しパッド

両読みのストリップ型はどうか(面積当たりのch数は増える)



Gap	Pad	Channel	Resolution	Efficiency
148 μm	L1	2000	61 ± 3 ps	93 %
12 gaps	L2	1700	62 ± 2 ps	96 %
	L3	1000	63 ± 2 ps	90 %
260 μm	L1	2000	56 ± 2 ps	99 %
10 gaps	L2	1700	64 ± 2 ps	98 %
	L3	1000	61 ± 2 ps	99 %

トリガー:パッド中心

時間分解能
どれもほぼ同じ

検出効率
148 μm 充分でない

LEPS2の要求(1000 ch, 50 ps / 99 %)に近い値達成

トリガー位置依存性

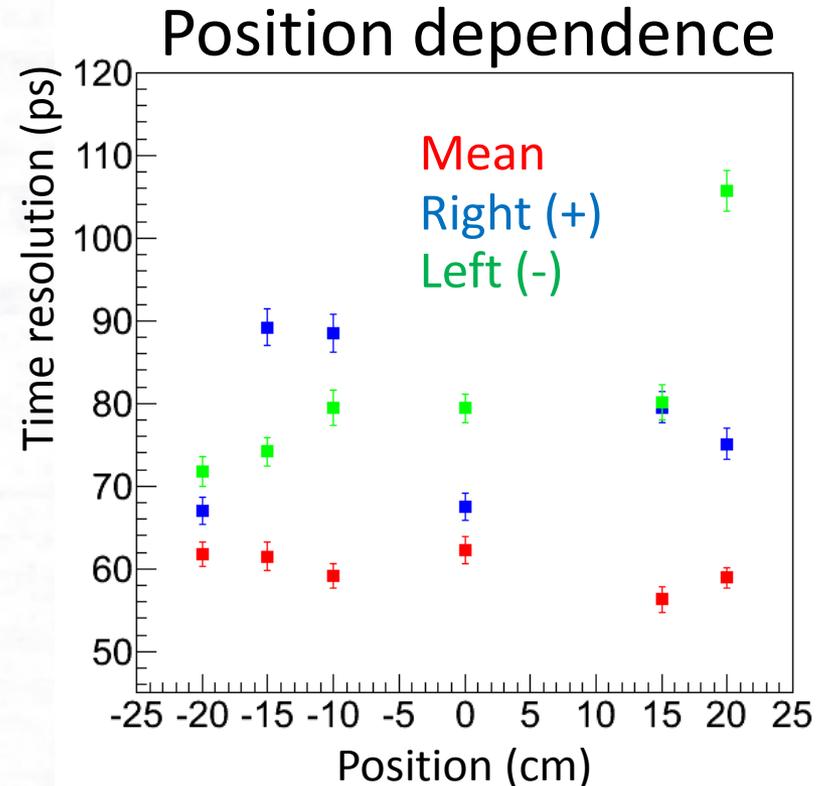
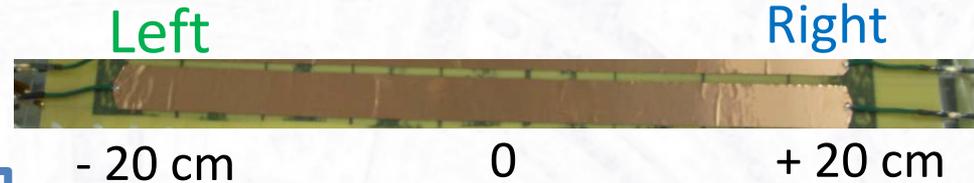
読み出しラインまでの距離は？

260 μm * 10 gaps

片方ずつの読み出しは
大きな位置依存性

左右非対称
より細かい位置に依存

両読みの平均の分解能
は大きな位置依存性なし



260 μm * 10 gaps ストリップ型読み出しパッドを採用

まとめ (修論まで)

- LEPS2実験で使用する大面積・高時間分解能の Resistive Plate Chamber を開発
- ギャップ幅・・・148 μm と 260 μm で分解能違いなし
148 μm は両読みでは検出効率足りない
- ギャップ数・・・増加で高い時間分解能

$$148\mu\text{m} * 24 \text{ gaps} \rightarrow 40 \text{ ps}$$

- 大面積パッド・・・ストリップ型が適している

$$2.5 \text{ cm} * 40 \text{ cm} (260\mu\text{m} * 12 \text{ gaps}) \rightarrow 60 \text{ ps} / 99 \%$$



LEPS2の開発目標 (> 50 $\text{cm}^2/\text{channel}$, <50 ps, >99 %) をほぼ満たす

修論後

- さらなるチャンネル数の削減
- ストリップの詳細な性能試験

実機と
同サイズ

↓ 新たなプロトタイプを製作

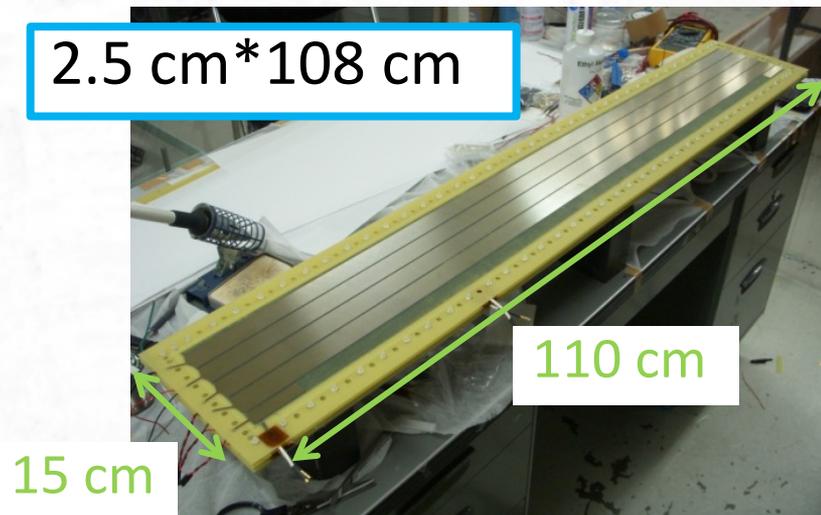
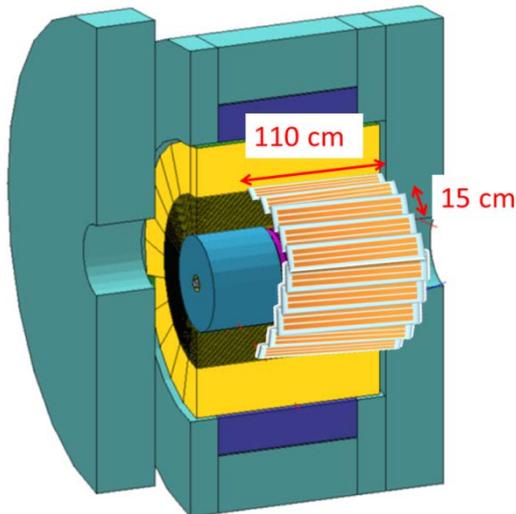
ガラス 110 cm * 15 cm

ストリップ 2.5 cm * 108 cm (400ch)

4本 (ストリップ間 2mm)

ギャップ 260 μ m * 10 gaps

- ストリップ間
- まとめ読み



波形

位置依存性

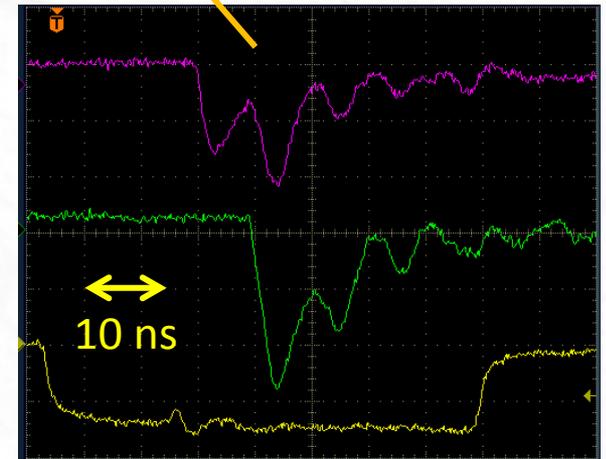
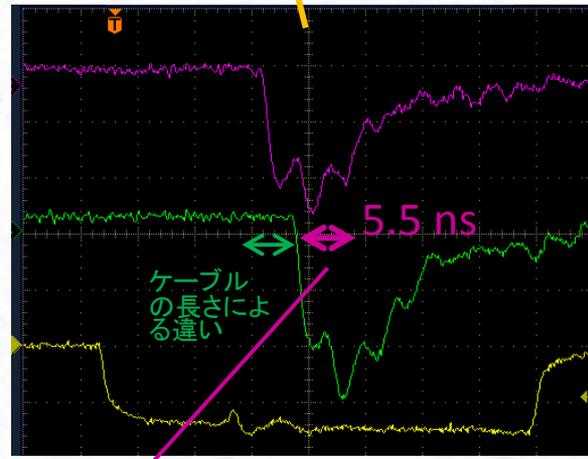
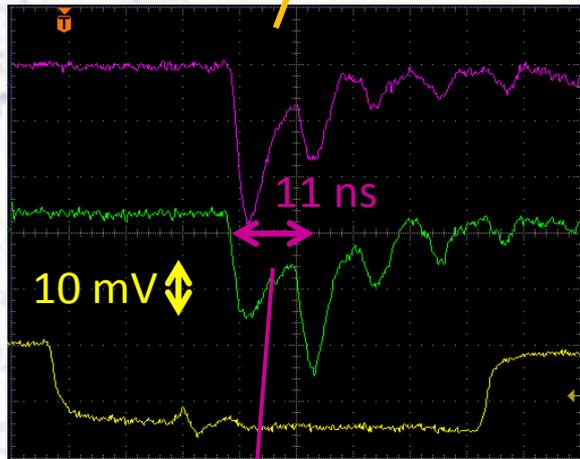
2.5 cm*108 cm

インピーダンス

- ストリップ 5 Ω ?
- アンブ 50Ω

Left

Right



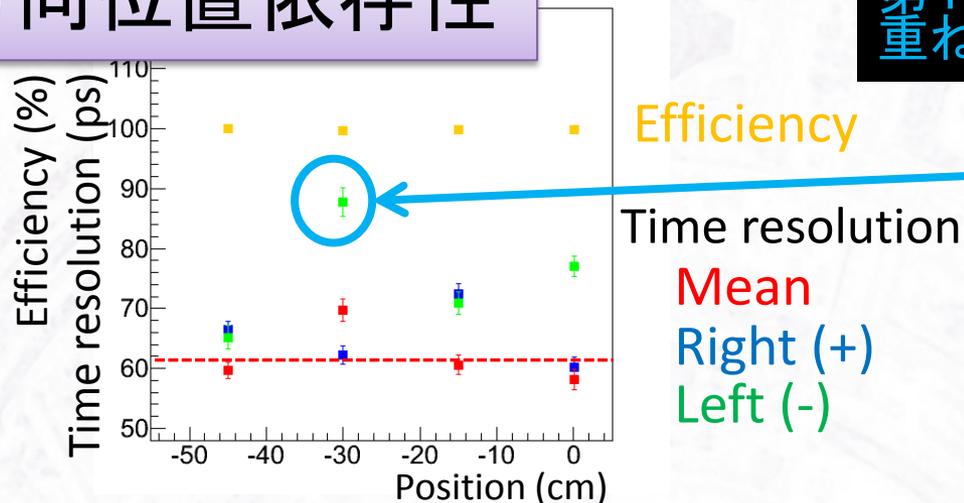
11ns/216cm ~ 5.5ns/108cm ~ 50ps/cm

2.5 cm × 108 cm

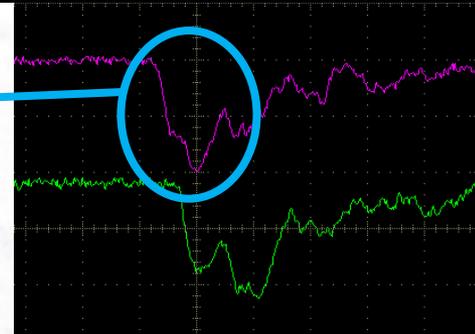
ストリップ方向位置依存性

時間分解能

検出効率



第1ピークが2つの波の重ね合わせ

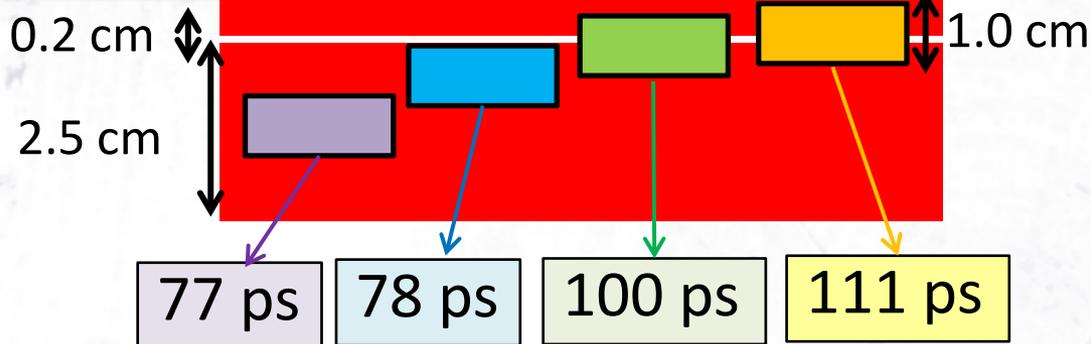


時間分解能 60-70 ps・検出効率 99%以上

40cmとあまり変わらない

ストリップ垂直方向位置依存性

(開発中のAmp(50Ω)使用)



ADCの値が大きい方のストリップを選択

ストリップ間では 30 ps 程度時間分解能が悪化

ストリップを狭める/シフトする

まとめ読み

2.5 cm × 108 cmのストリップを2つまとめてアンプへ

HARP RPCなどで実績あり

ストリップ中心

70 ps

100 ps

Amp

1つのストリップだけを
読むのと変わらない
分解能達成

ストリップ間

(開発中のAmp(50Ω)使用)

まとめ読みでチャンネル数削減

2.5 cm × 108 cmストリップ2つまとめ読み



LEPS2で200ch相当(270 cm²/ch)
までチャンネル数を削減

まとめ

- ストリップ長さ・・・100cmまで伸ばしても
時間分解能・検出効率は劣化しない
- まとめ読み・・・2つのストリップはまとめ読みできる
- 270 cm²/ch (200ch相当) で60ps/99%達成 (ストリップ上)
- 読み出し回路
 - アンプ・・・インピーダンスマッチしたものを開発中
(台湾 Academia Sinica)
HADES RPCのものも試す
 - TDC・・・CAEN VME V1290を使用予定 (トリガー～10kHz)

今後

- ストリップ間を狭く/シフトしたものをテスト(10月)
- 2013年LEPS2へインストール予定

謝辞

- LEPS/LEPS2の皆様
- Chia-Yu Hsieh さん、野沢勇樹くん、
橋本敏和くん、水谷圭吾くん、濱野博友くん
- 永江知文教授はじめ原子核ハドロン研究室の皆様
- 修士論文賞の審査員の皆様
- 理化学研究所の大西宏明研究員
- 指導教員の新山雅之助教

お世話になりました
ありがとうございました

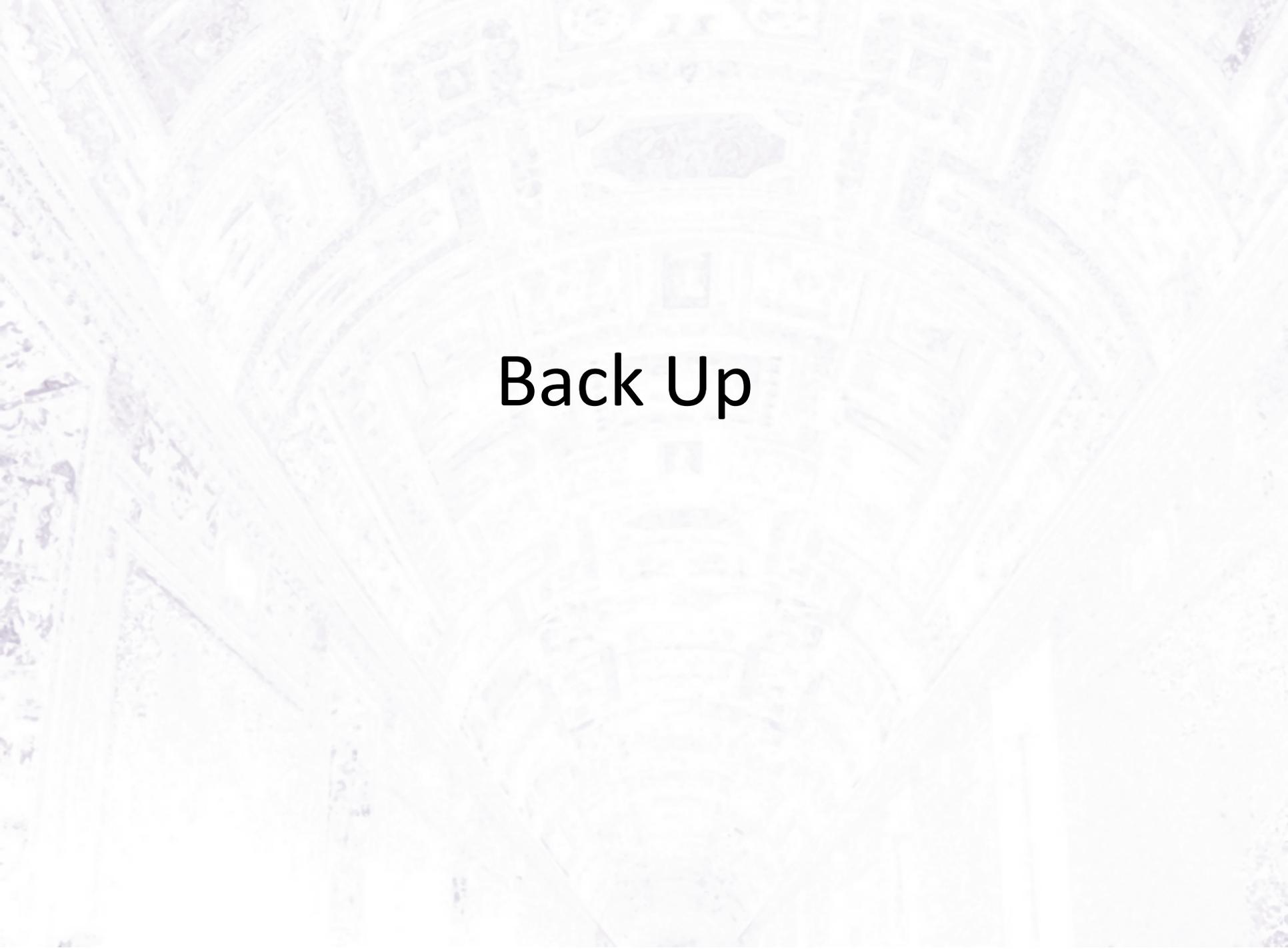
おわりに

RPCはまだまだ可能性が...

- ストリップ中の信号の伝搬
- 高時間分解能
- 高レート耐性($\sim 10\text{kHz}/\text{cm}^2$)
- トラッカー($\sigma \sim$ 数 $10\mu\text{m}$)
- カロリメーター
- 中性子カウンター

⋮

ご清聴ありがとうございました

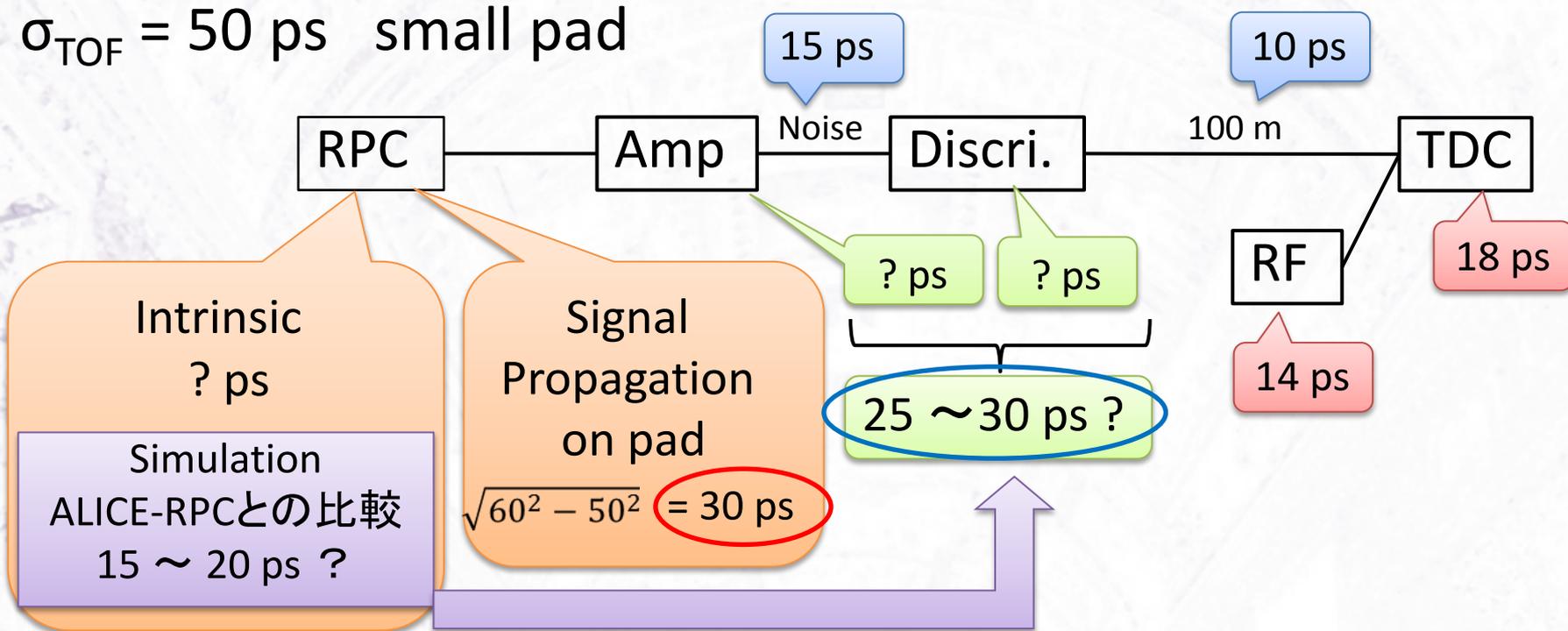
An aerial photograph of a city street grid. A prominent feature is a large, circular road interchange or roundabout in the center of the frame. The streets are arranged in a regular, rectangular pattern, with the circular road cutting through it. The text "Back Up" is overlaid in the center of the image.

Back Up

時間分解能の内訳

$$\sigma_{\text{TOF}} = 60 \text{ ps} \quad \begin{array}{l} 260 \mu\text{m} * 10 \text{ gaps} \\ 2.5 \text{ cm} * 108 \text{ cm Long pad} \end{array}$$

$$\sigma_{\text{TOF}} = 50 \text{ ps} \quad \text{small pad}$$



改善点

読み出しパッド伝搬の際の時間分解能の悪化を抑える

低ノイズ・小ジッターのアンプの開発

読み出し回路

アンプ+ディスクリ

- インピーダンスマッチしたものを開発中
- HADES RPCで使用されているものもテスト予定

TDC

- V1290A (CAEN製VME)

高トリガーレート(10kHz)

Leading/Trailing edge両方読める

→ パルスハイト測定にTime-Over-Threshold法の使用

時間分解能 40ps ⇔ 18ps GNC-040 (CAMAC)



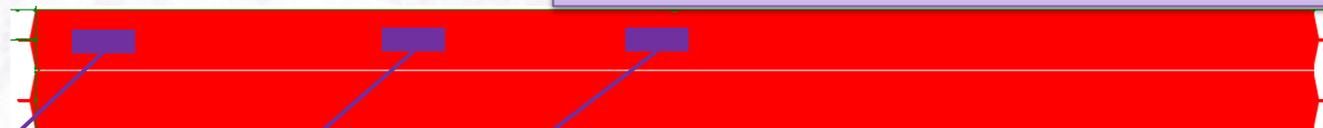
分解能 60 ps → 70 ps



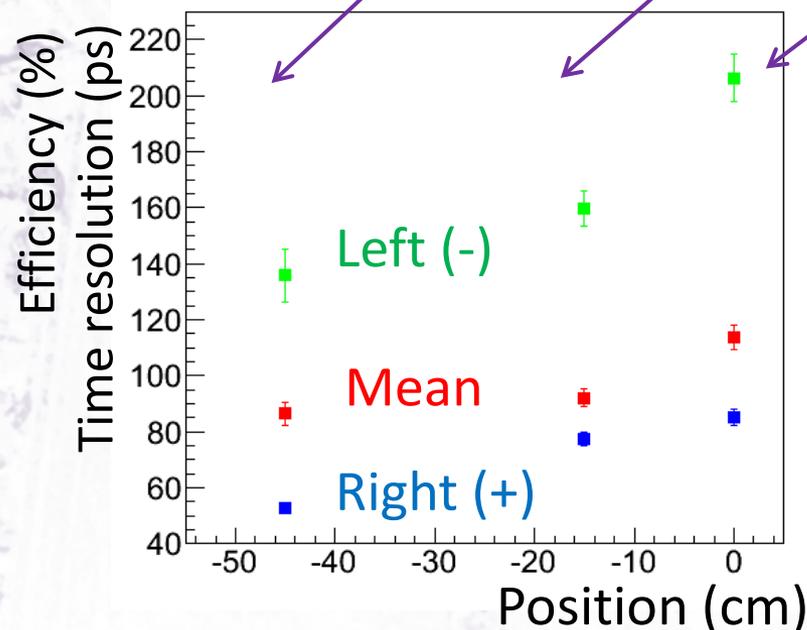
70 ps 2層で 50 ps ($\sqrt{70}/2 = 50$)

5.0 cm × 108 cm ストリップ

トリガー高さ:パッド中心



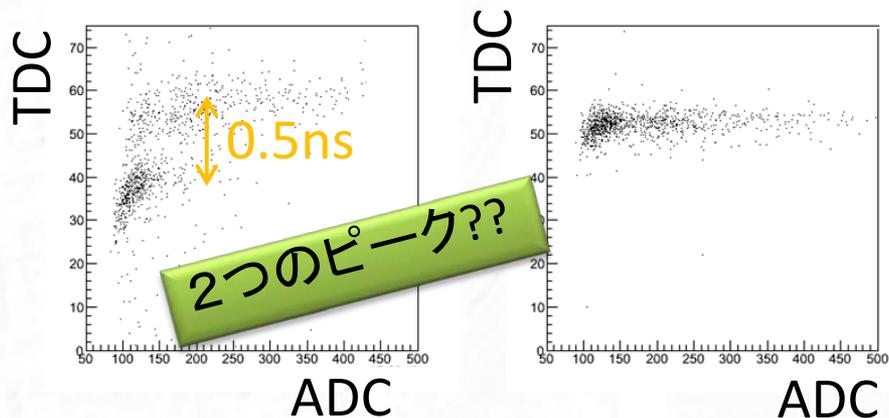
時間分解能



左側の読み出しのみ分解能が悪い

左

右



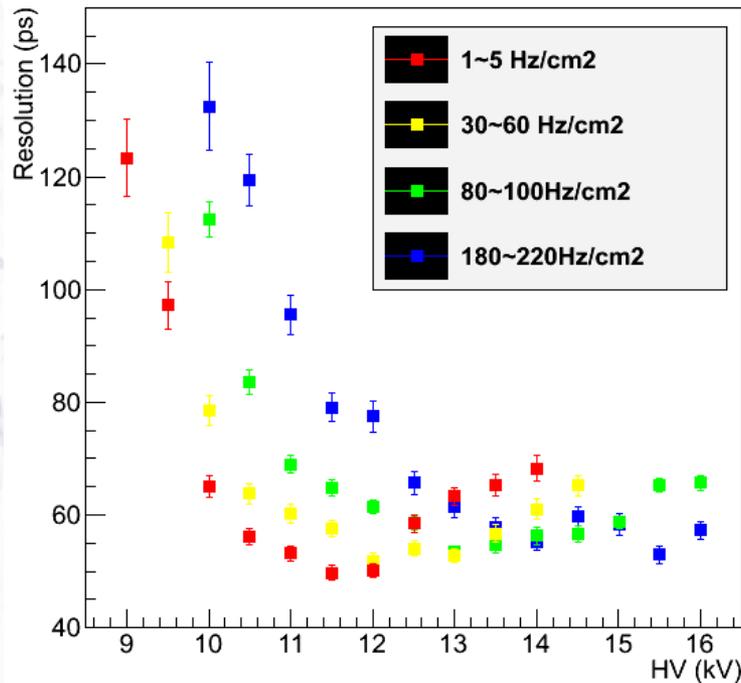
幅 5cm -> インピーダンス 2Ω



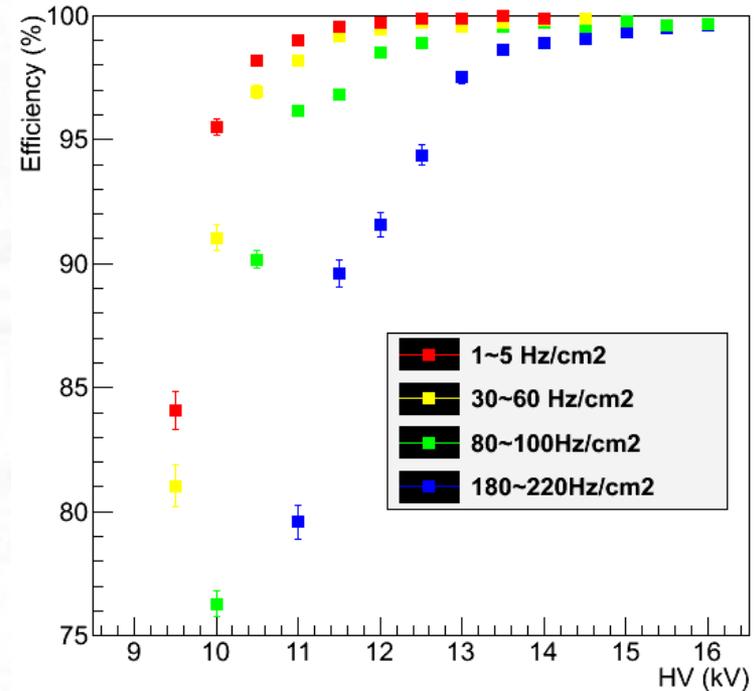
幅を広げるのは難しい

レート依存性

時間分解能



検出効率

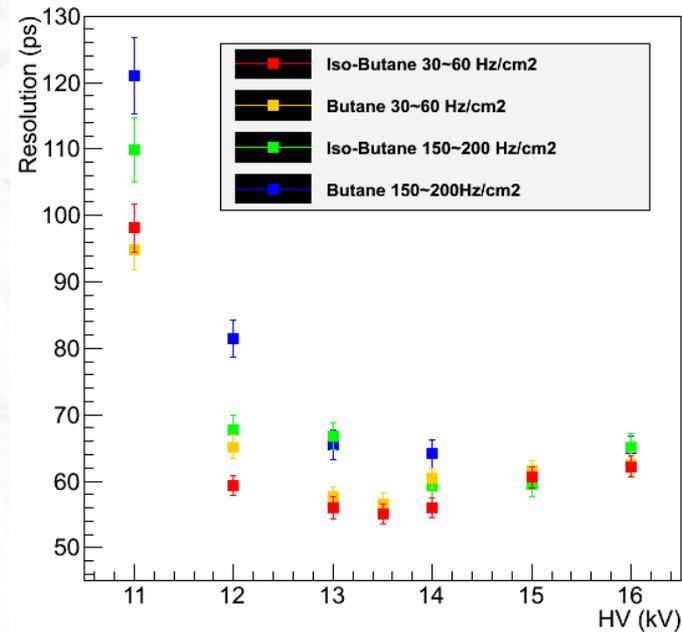


148 μm *12 gaps Small pad

200 Hz/cm²までのレート耐性を確認

ガス・レート依存性

時間分解能



260 μm * 10 gaps

Iso-butane/Butaneで大きな差なし

主なRPC

Group	Pad size	Gap width	Gaps	Stacks	Resolution	Efficiency
ALICE[8]	2.4 cm × 3.7 cm	250 μm	5	2	< 50 ps	> 99 %
STAR[7]	3.15 cm × 6.3 cm	220 μm	6	1	60 ps	> 97 %
FOPI[25]	0.194 cm × 90 cm	220 μm	4	2	60 ps	> 99 %
HARP[26]	2.9 cm × 10.4 cm	300 μm	2	2	130 ps	97~98 %

表 2.1: 主な実験で使用されている TOF 用 RPC

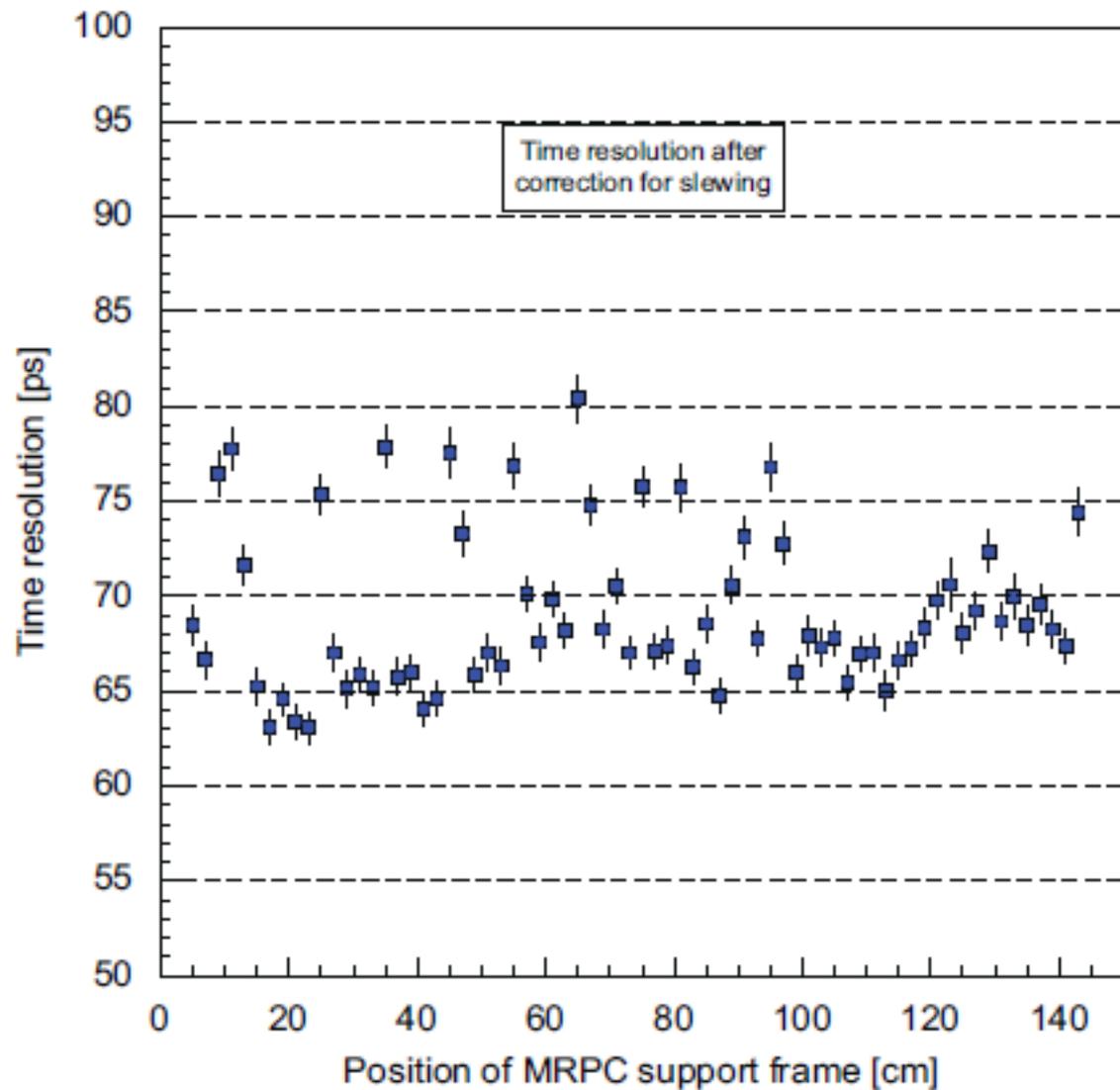
Group	Pad size	Gap width	Gaps	Stacks	Resolution	Efficiency
[19]	5 cm × 1.6 m	300 μm	4	1	50~75 ps	95 %
[20]	2.5 cm × 1.8 m	300 μm	5	1	65~85 ps	~95 %
[22]	2.5 cm × 31 cm	300 μm	3	2	45 ps	> 98 %
[23]	2.5 cm × 90 cm	250 μm	5	2	60~70 ps	> 95 %
[11]	3.0 cm × 85 cm	220 μm	6	2	80 ps	> 90 %

表 2.2: 主なストリップ型大面積パッドの RPC

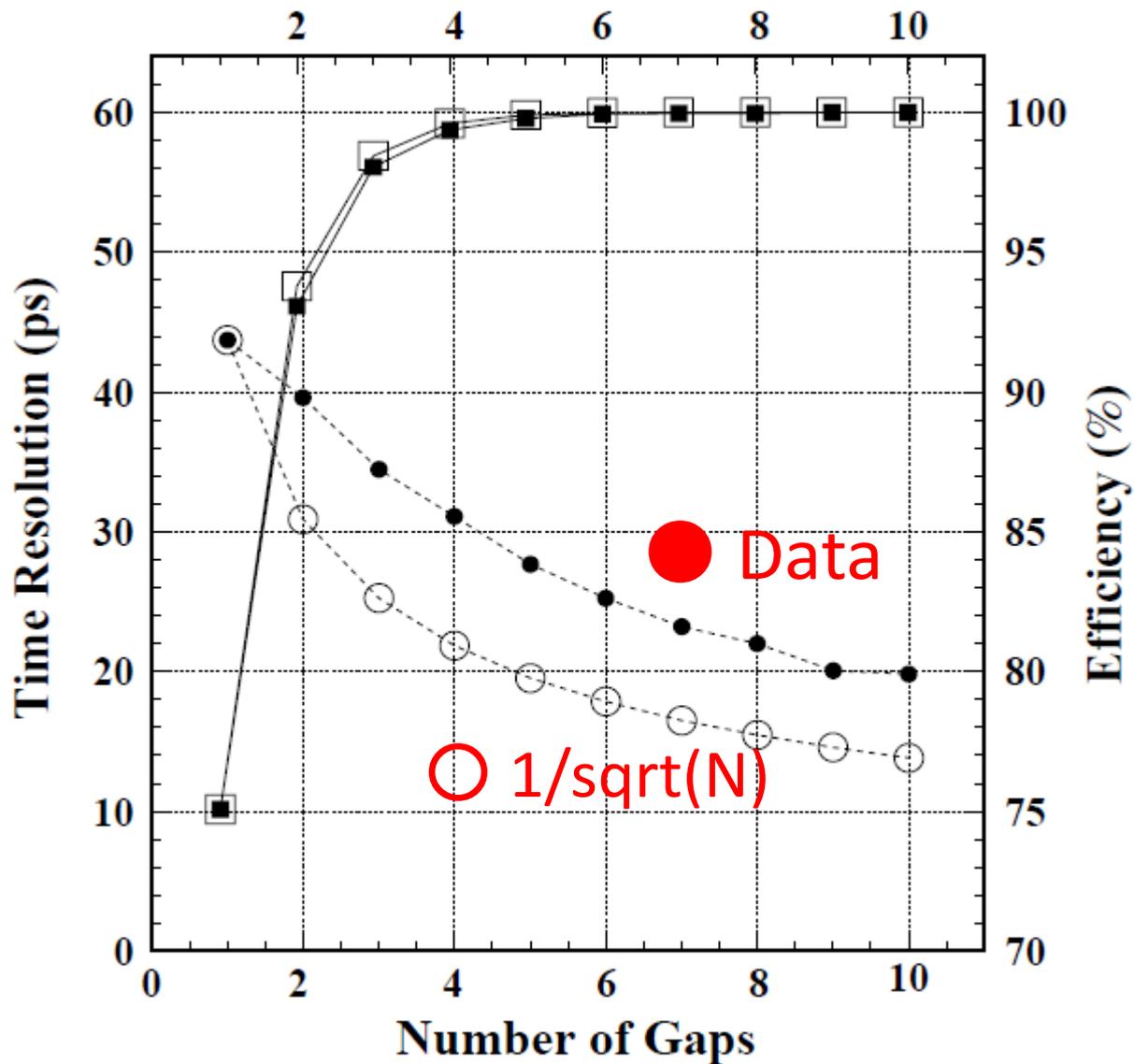
位置依存性

2.5 cm × 180 cm

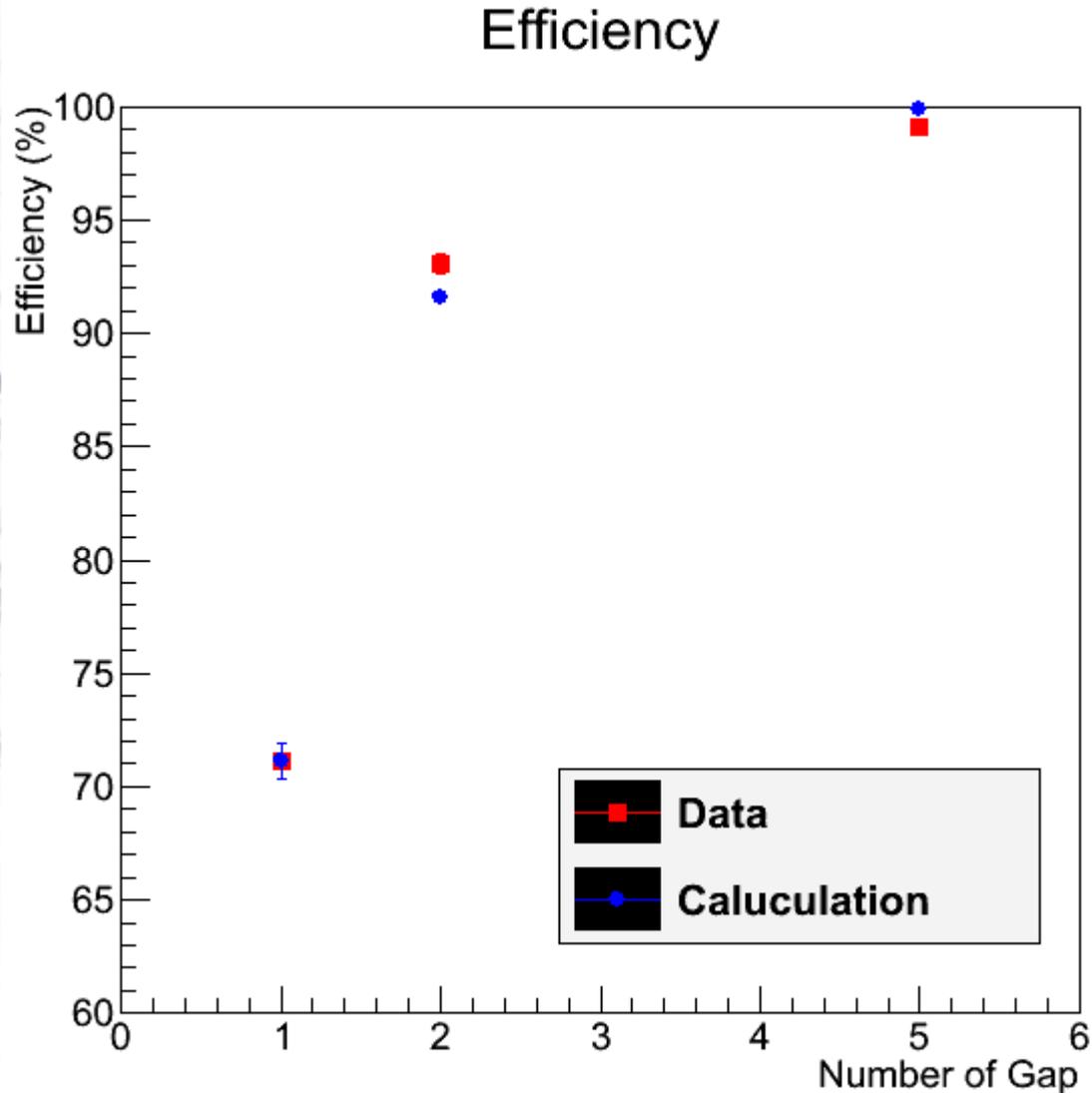
トリガー 1cm*1cm



ギャップ数依存性

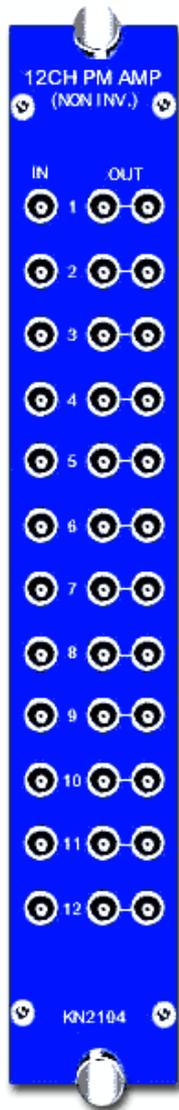


ギャップ数依存性



$$\text{Eff}(N) = 1 - (1 - \text{Eff}(1))^N$$

PMT Amp



NIMモジュール

Kaizu Works 製

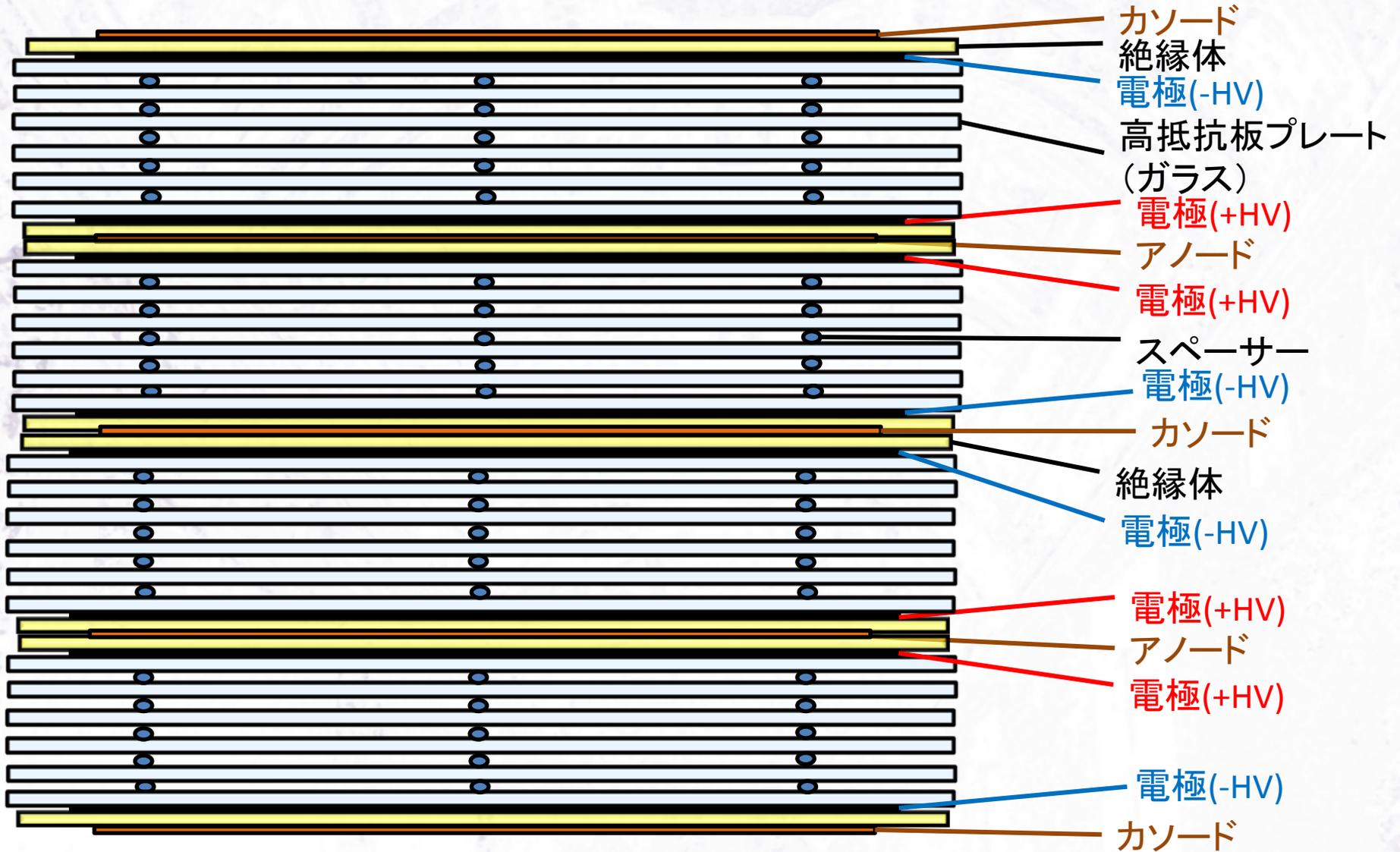
KN2104型アンプ

入力インピーダンス 50Ω

最高繰り返し周波数 850MHz

500 MHz / 増幅率5倍

24ギャップ



釣り糸

号数	標準直径
0.1号	0.053mm
0.2号	0.074mm
0.3号	0.090mm
0.4号	0.104mm
0.5号	0.117mm
0.6号	0.128mm
0.8号	0.148mm
1号	0.165mm
1.2号	0.185mm
1.5号	0.205mm
2号	0.235mm
2.5号	0.260mm
3号	0.285mm
3.5号	0.310mm
4号	0.330mm
5号	0.370mm
6号	0.405mm
7号	0.435mm
8号	0.470mm
10号	0.520mm

表 3.1: 日本で販売されている釣り糸の直径一覧

RF

TOF

START

STOP

RF signal

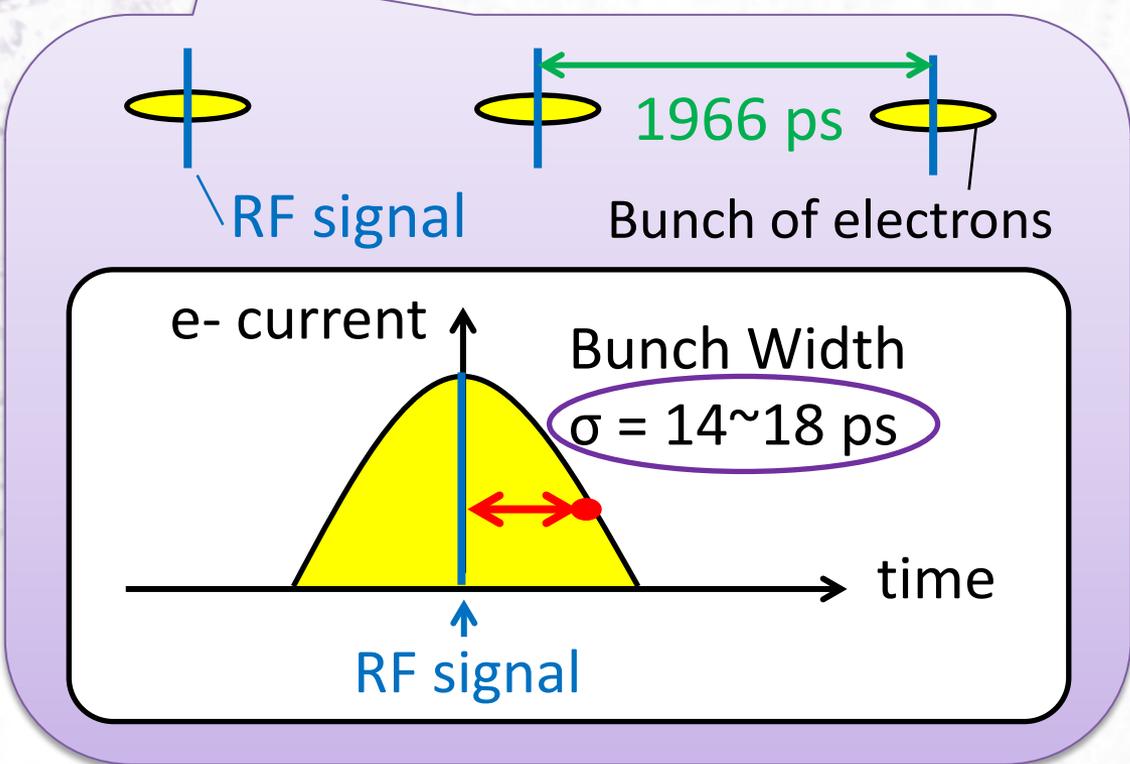
RPC

TDC

Amps

14~18 ps \ll 50 ps

Main contribution



物質質量

ガラス

Plate glass

Quantity	Value	Units	Value	Units
$\langle Z/A \rangle$	0.49731			
Density	2.40	g cm^{-3}		
Mean excitation energy	145.4	eV		
Minimum ionization	1.684	$\text{MeV g}^{-1}\text{cm}^2$	4.040	MeV cm^{-1}
Nuclear collision length	66.1	g cm^{-2}	27.53	cm
Nuclear interaction length	99.6	g cm^{-2}	41.50	cm
Pion collision length	92.7	g cm^{-2}	38.63	cm
Pion interaction length	130.5	g cm^{-2}	54.36	cm
Radiation length	25.66	g cm^{-2}	10.69	cm
Critical energy	47.48	MeV (for e^-)	46.14	MeV (for e^+)
Molière radius	11.46	g cm^{-2}	4.775	cm
Plasma energy $\hbar\omega_p$	31.48	eV		
Muon critical energy	671.	GeV		

ポリエチ

Polyethylene ($[\text{CH}_2\text{CH}_2]_n$)

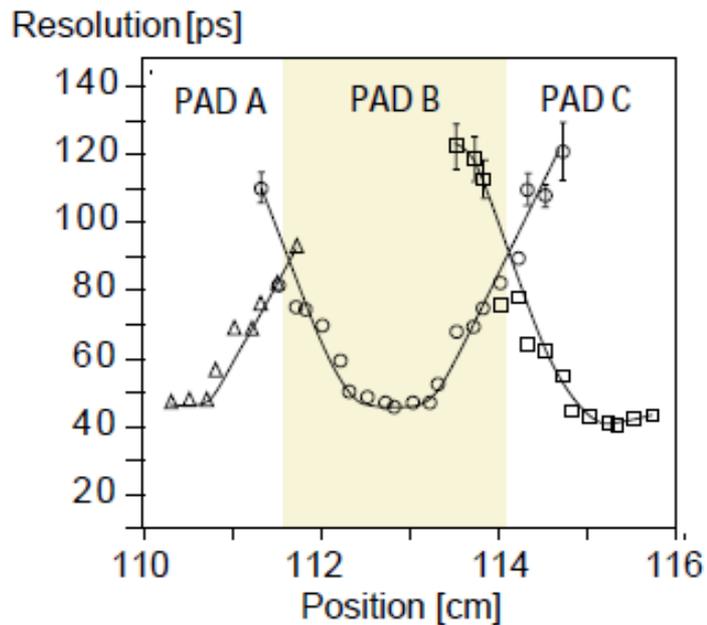
Quantity	Value	Units	Value	Units
$\langle Z/A \rangle$	0.57034			
Density	0.890	g cm^{-3}		
Mean excitation energy	57.4	eV		
Minimum ionization	2.079	$\text{MeV g}^{-1}\text{cm}^2$	1.850	MeV cm^{-1}
Nuclear collision length	56.1	g cm^{-2}	63.05	cm
Nuclear interaction length	78.5	g cm^{-2}	88.18	cm
Pion collision length	83.7	g cm^{-2}	94.07	cm
Pion interaction length	110.4	g cm^{-2}	124.0	cm
Radiation length	44.77	g cm^{-2}	50.31	cm
Critical energy	101.79	MeV (for e^-)	99.13	MeV (for e^+)
Molière radius	9.33	g cm^{-2}	10.48	cm
Plasma energy $\hbar\omega_p$	20.53	eV		
Muon critical energy	1282.	GeV		

5gaps 2.4mm

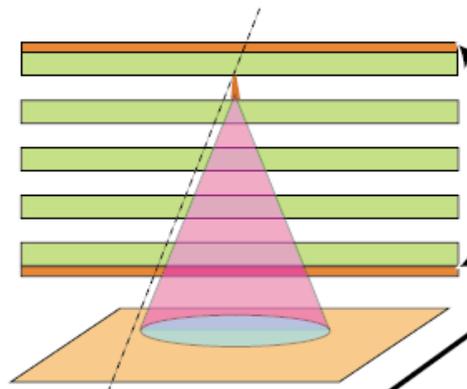
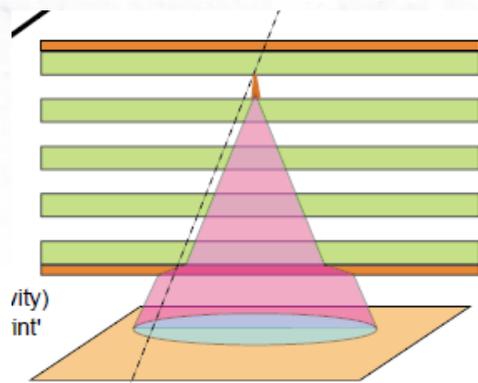
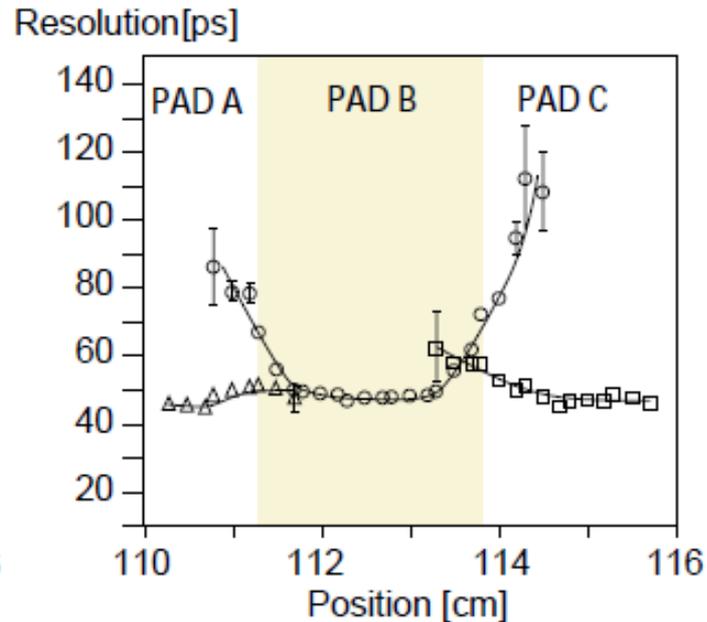
RPC 5gap ~ sinti 1 cm

ALICE TDR

Strip 10 (10 gaps of 220 μm)
Resistive layer 200 $\text{k}\Omega/\text{square}$



Strip 12 (10 gaps of 220 μm)
Resistive layer 5 $\text{M}\Omega/\text{square}$



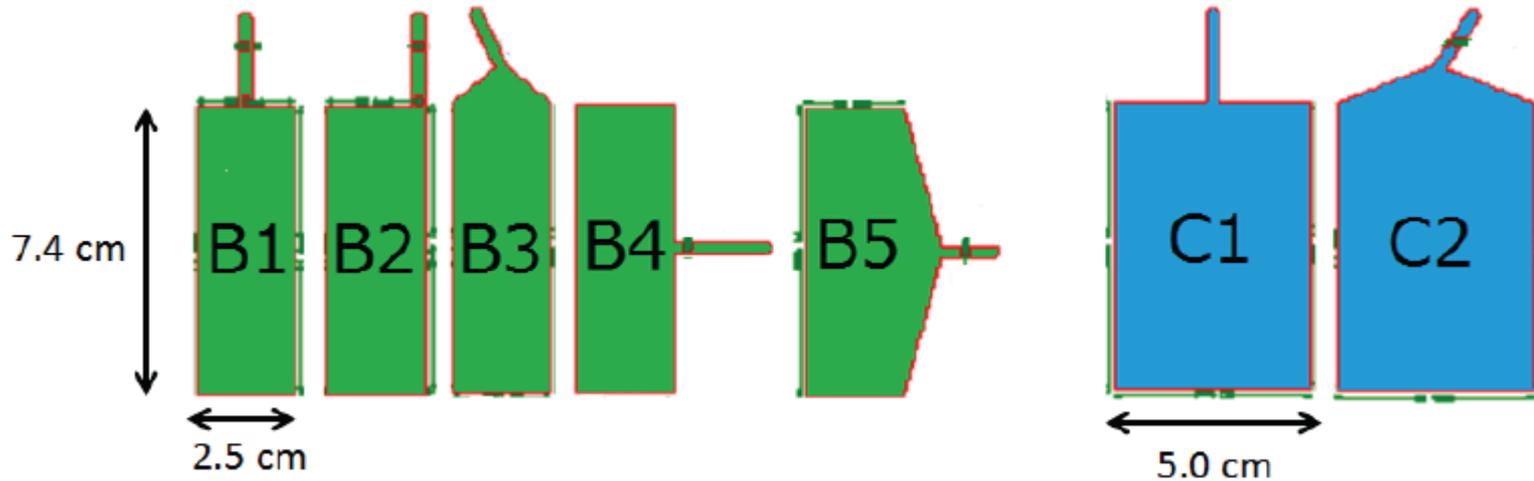
コスト

100cm × 23cm 3台

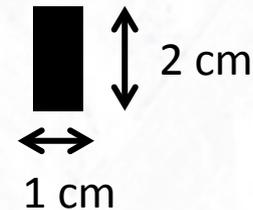
- ガラス 1枚~3000円
- 印刷基板 1枚~3000円
- カーボン電極 1枚~6000円(開発費込)
- 10gaps 2.5cm*100cm 8strips -> ~50000円
- 製作費 学生が頑張る
- チェンバー ~50000円 なしにもできる

読み出しライン位置依存性

- 148um * 12gaps



Pad	Resolution	Efficiency
B1	65 ± 3 ps	99.4 ± 0.2 %
B2	74 ± 2 ps	99.0 ± 0.2 %
B3	65 ± 2 ps	99.6 ± 0.1 %
B4	78 ± 2 ps	96.5 ± 0.3 %
B5	84 ± 2 ps	98.0 ± 0.2 %
C1	85 ± 3 ps	97.3 ± 0.3 %
C2	77 ± 2 ps	97.3 ± 0.3 %



- Trigger (1cm * 2cm)
at the center of pad