

MEG II 実験の背景事象の抑制に向けた 超低物質質量RPCの開発 -試作機による性能研究-



Core-to-Core Program



大矢 淳史(東大理)

家城 佳^A, 大谷 航^A, 越智 敦彦^B, 恩田理奈, 山本 健介
(東大素粒子センター^A, 神戸大理^B)

Contents

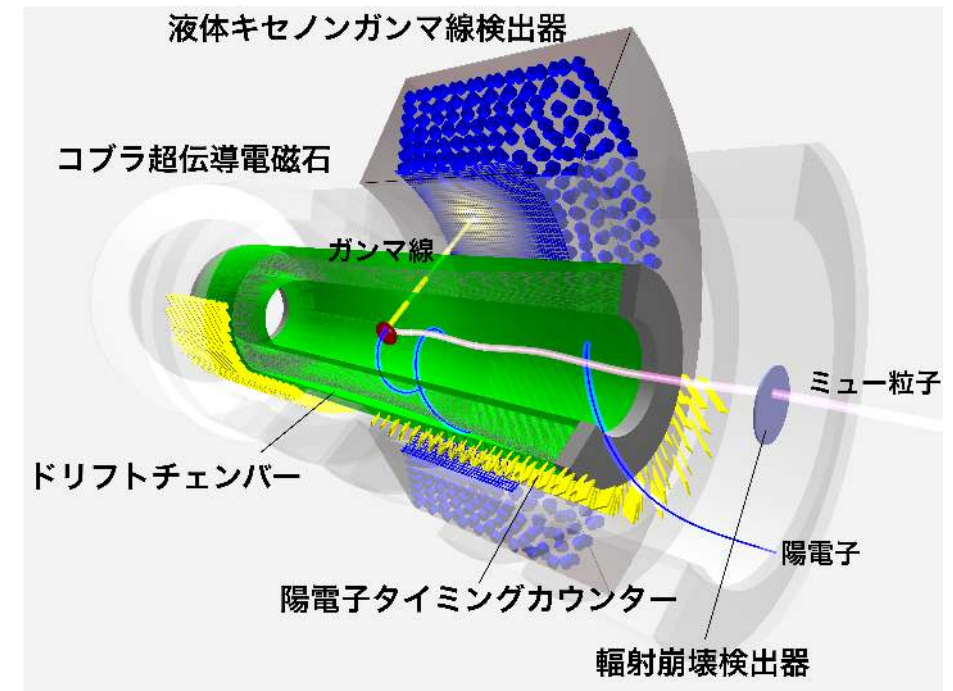
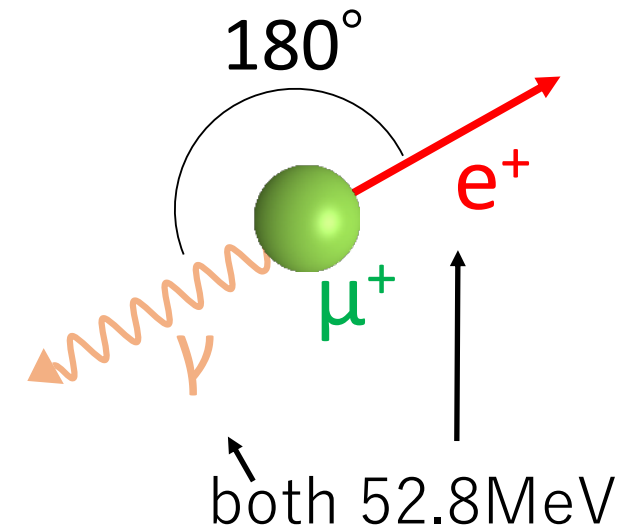
- Introduction
 - ✓ MEG II 実験
 - ✓ MEG II 実験背景事象同定用検出器
 - ✓ MEG II 実験への導入に向けた課題
 - ✓ DLCスパッタリング技術を用いたRPC
- RPC 開発
- Summary and prospects

MEG II 実験

- MEG II実験: $\mu \rightarrow e \gamma$ 崩壊の発見を目指す
 - ✓ 信号: エネルギー、角度、タイミングで識別
 - ✓ 目標感度: 分岐比に対して 6×10^{-14}
 - ✓ PSIの世界最大強度直流 μ ビームを用いる

- 物理モチベーション

- ✓ 荷電レプトンにおける世代混合 (cLFV)
SMで禁止。物質粒子では唯一混合が未発見
 - 探索対象と実験
 1. $\mu \rightarrow e$ 変換: MEG, COMET, Mu2e, Mu3e
 2. $\tau \rightarrow \mu$ 変換: Belle, (LHCb)
 3. 中間子や Z, h の leptonic 崩壊における cLFV: 複数の実験
- ✓ 関連理論: 超対称GUT、超対称seesaw



MEG II 背景事象

- 実験の背景事象: 背景陽電子と背景ガンマ線の偶発的なコインシデンス
 - ✓ これを削減するのが高感度探索の鍵

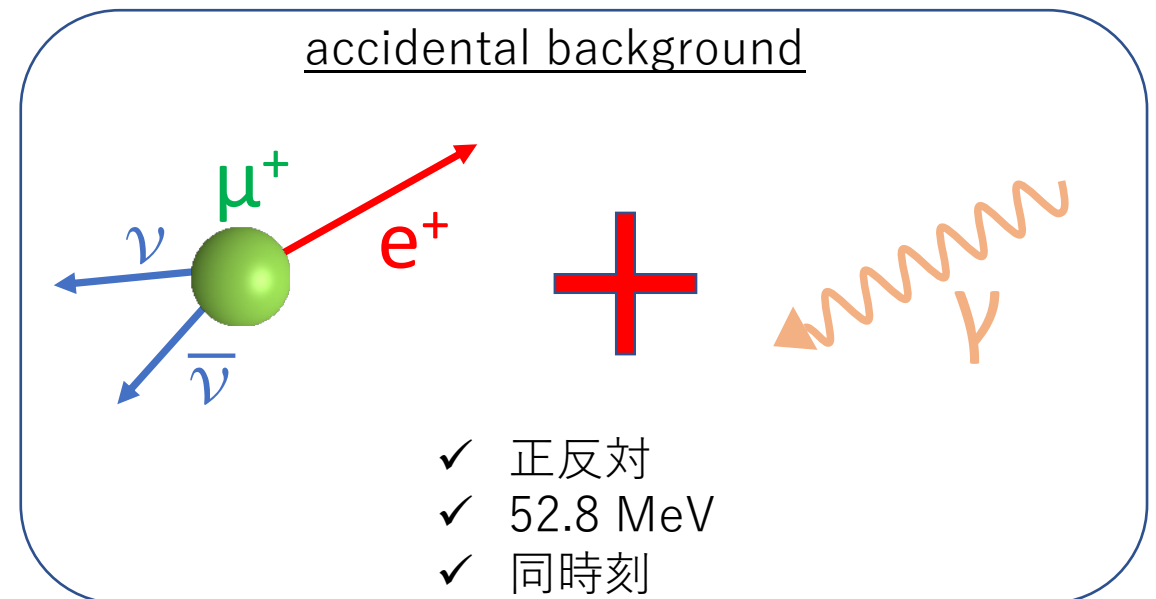
- 背景ガンマ線:由来は二つ

- ✓ 輻射崩壊: $\mu \rightarrow e \nu \bar{\nu} \gamma$
- ✓ 陽電子の飛行中対消滅

→ 輻射崩壊由来が2倍程度多い



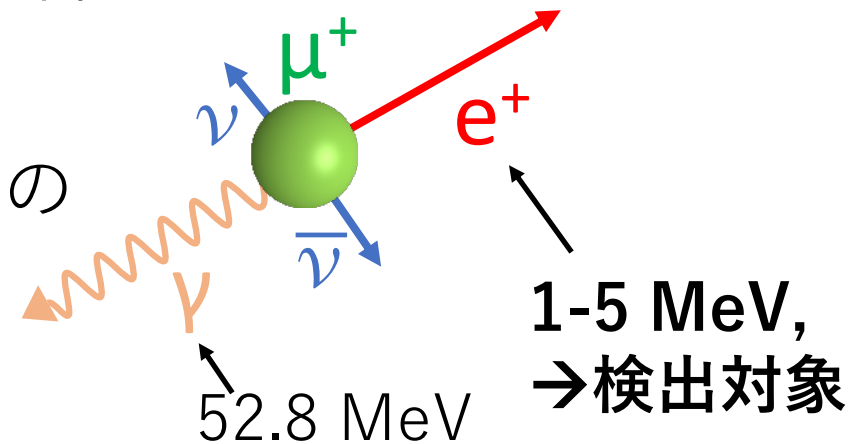
μ 崩壊での $E_\gamma > 48$ MeV のガンマ線放出確率



背景事象同定用検出器

- 輻射崩壊由来の背景ガンマ線を同定するための検出器をインストールして感度向上を図る

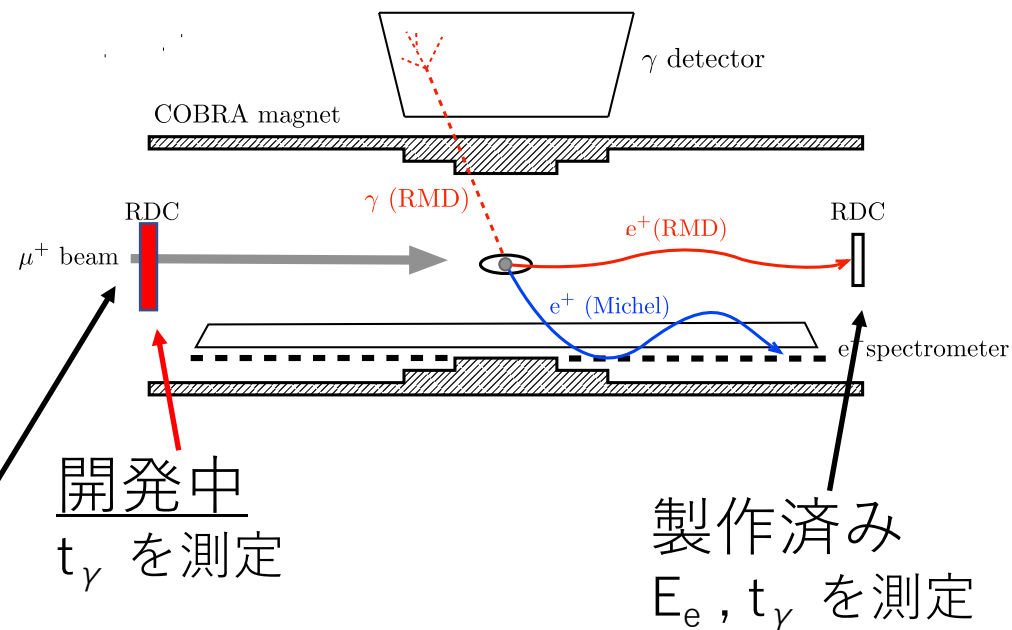
- ✓ ガンマ線 (52.8 MeV付近)に伴う低エネルギー陽電子(1-5 MeV)を捉える



- 2箇所導入の予定

- ✓ ミュー粒子静止ターゲットの上流と下流
 - 下流導入で15% 実験感度向上
 - 上流導入で10% 実験感度向上

- ✓ 上流側が開発中
→ 今日の話



ビームが通るのでチャレンジング

上流側背景事象同定用検出器

- 検出器をビーム($10^8 \mu/s$)が突き抜けるのが難しい点

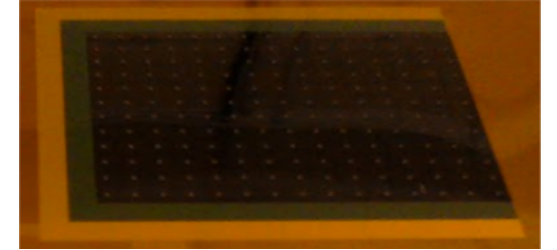
検出器への要求

1. 物質質量: $< 0.1\%$ of X_0
2. 1-5MeV 陽電子に対する効率: 90%
3. 時間分解能: $\sim 1\text{ns}$ (ガンマ線との時間差で輻射崩壊識別)
4. レート耐性、放射線耐性
($21\text{MeV}/c$ の μ が $10^8/s$, 60 週間程度以上の運転)
5. 検出器サイズ: 直径20 cm

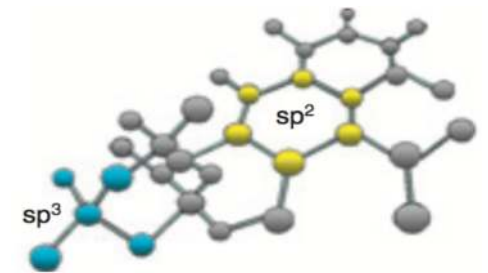
- 候補: Diamond Like Carbon (DLC) を電極に用いた超低物質質量RPC

DLCを用いたRPC

- RPC: 高抵抗電極を平行に配置する
 - ✓ ガス: R134a (フロン) ベース
 - ✓ ギャップ間隔: 典型的に数百 μm
- DLCスパッタリング技術をRPCに用いることを検討している
 - ✓ DLC: 炭素による高抵抗の素材 (sp^2 bond と sp^3 bondの混合)
 - ✓ DLCを用いる利点: 低物質量、抵抗値を調整できる
 - ✓ 神戸大でMPGD用に開発された技術



resistive plate
made of DLC sputtered
Kapton film



Contents

- Introduction
- DLC 電極を用いたRPCの研究開発
 - ✓ 構造
 - ✓ 性能研究 -測定手法と結果-
 - ✓ Discussion
- Summary and prospects

開発課題

- 性能への要求を満たすための設計の最適化が必要

- ✓ ギャップの厚み


- 時間分解能や検出効率に影響する

- ✓ 電極の表面抵抗値

- レート耐性と、検出器の安定性に影響する

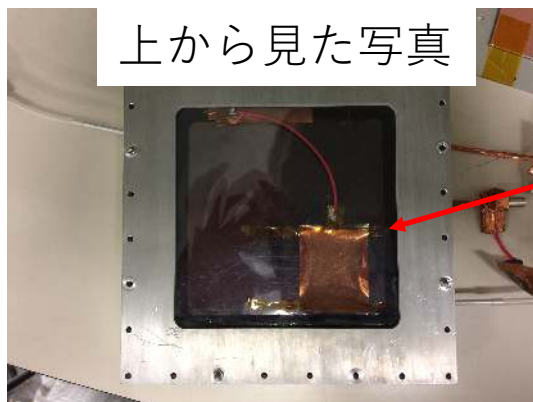
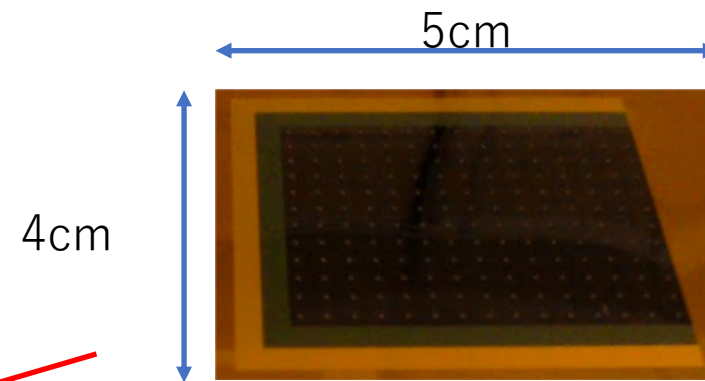
- ✓ 読み出し構造

- 信号波形や、ビーム μ 粒子とのパイルアップに影響する

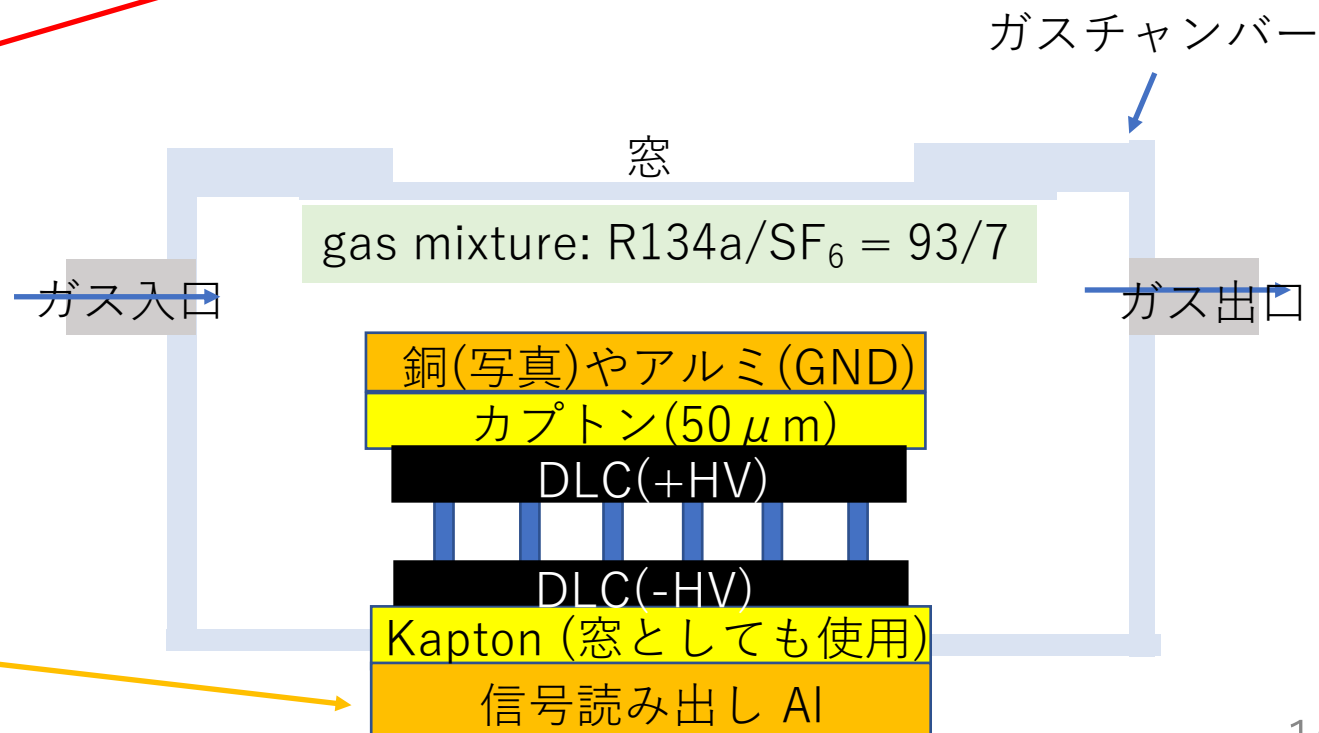
 今日には主にギャップ厚依存性を調べた結果を話します

試作機の組み立て

- 4cm×5cm サイズの試作機を作成した
 - ✓ 実機を想定した、AI 読み出しによる試験
 - ✓ ただし、積層せず、単層で試験を行った



1×10cm
Aluminium
(100nm 厚)



性能測定のためのセットアップ

直径2 mmに
コリメート

Sr90

RPC

38 dB

DRS
(Waveform digitizer)

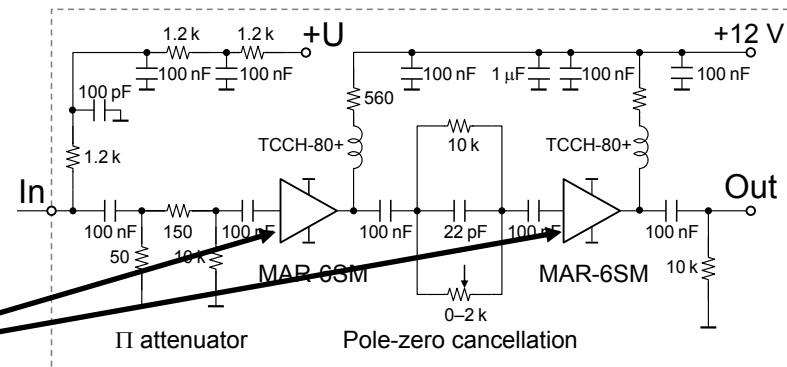
reference
counter

trigger

MEG IIで使用される
DAQ

時間分解能と検出効率を測定

20 dB RF amp



典型的な信号波形と解析手法

- 時間分解能:

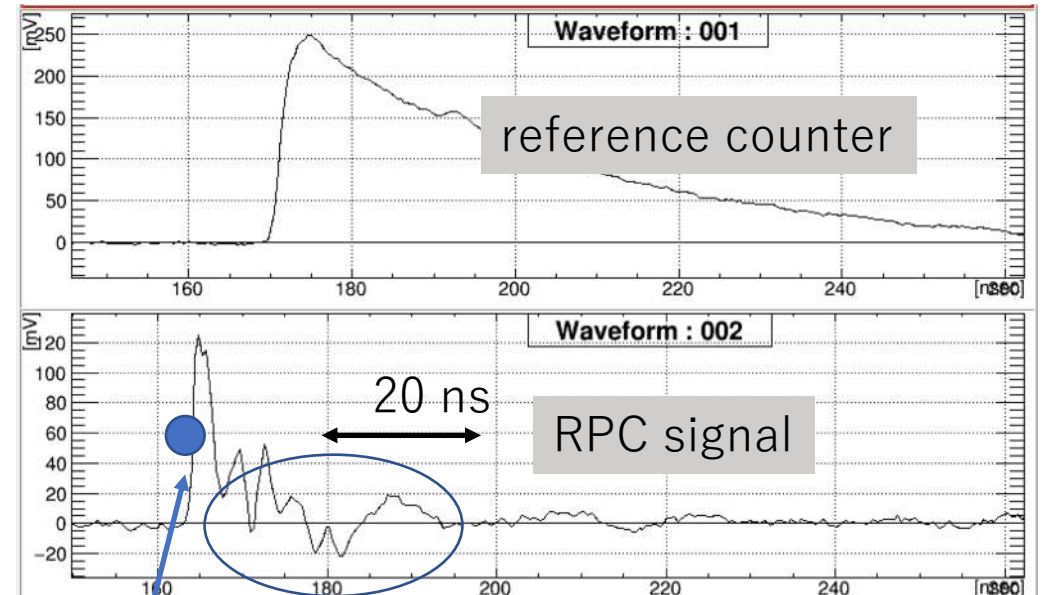
- ✓ RPCの信号タイミングはピークの50%の位置によるconstant fraction で求めた
- ✓ reference counter (50 ps分解能)との時間差分布により分解能を算出

- 検出効率:

- ✓ 10mV のthreshold を設定して事象数をカウントした

- 波形:

- ✓ 5 ns程度の幅のパルス
- ✓ ストリップ上の反射と思われるものもあった

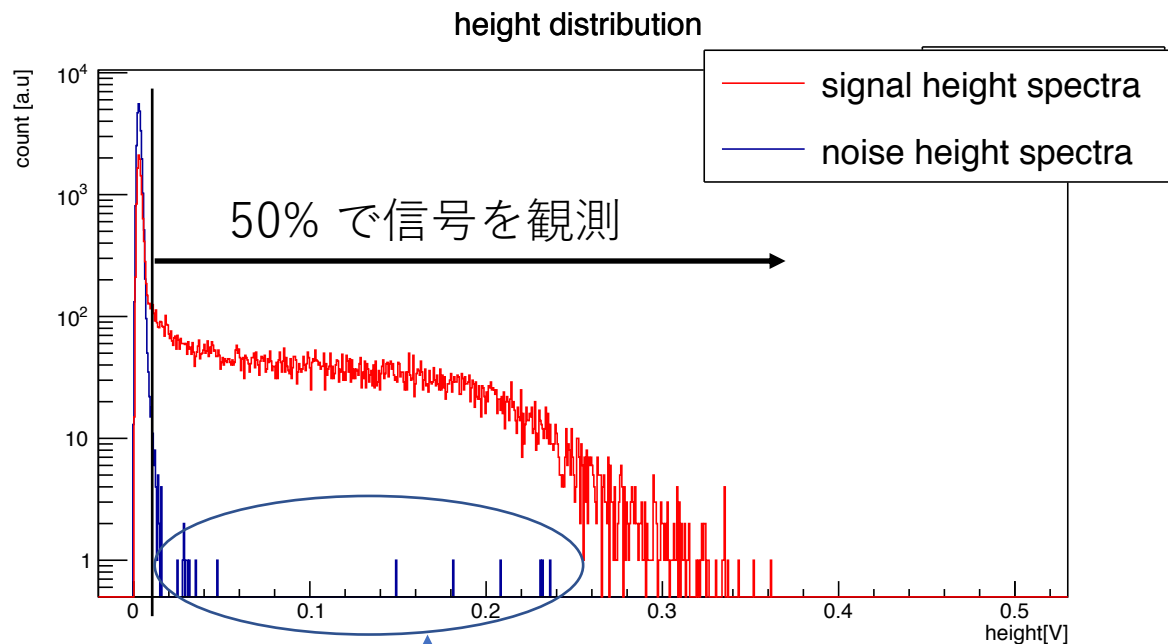


RPC 検出時間

読み出しストリップでの
反射?

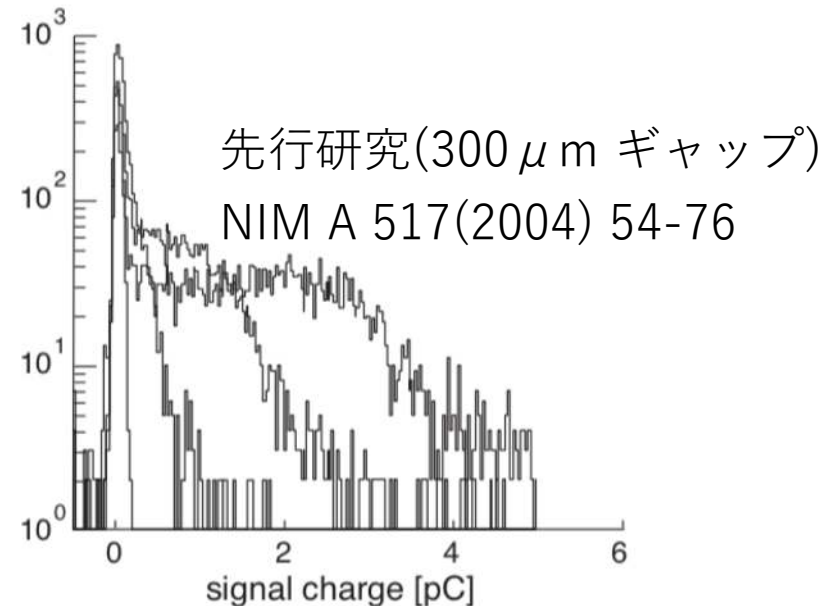
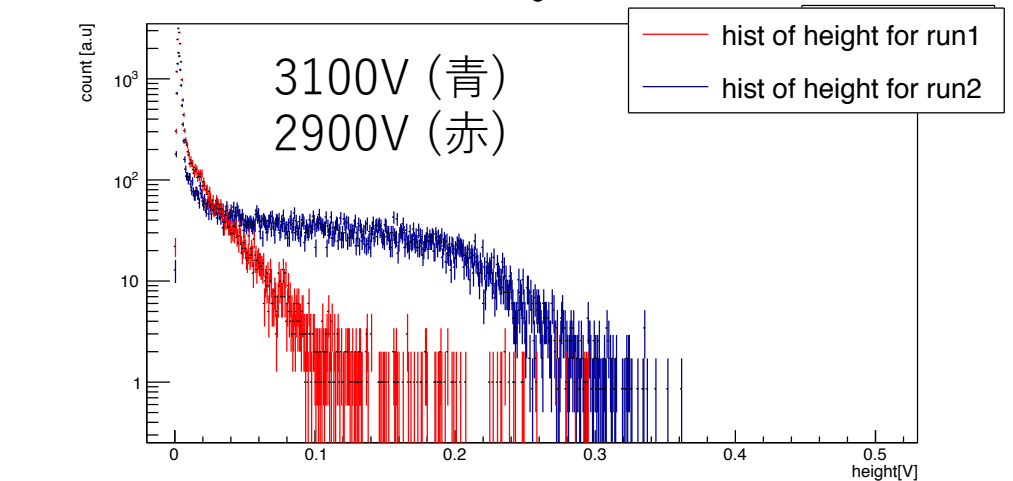
384 μm での検出効率

- 3100Vでの波高分布:
効率は50%(要求達成)



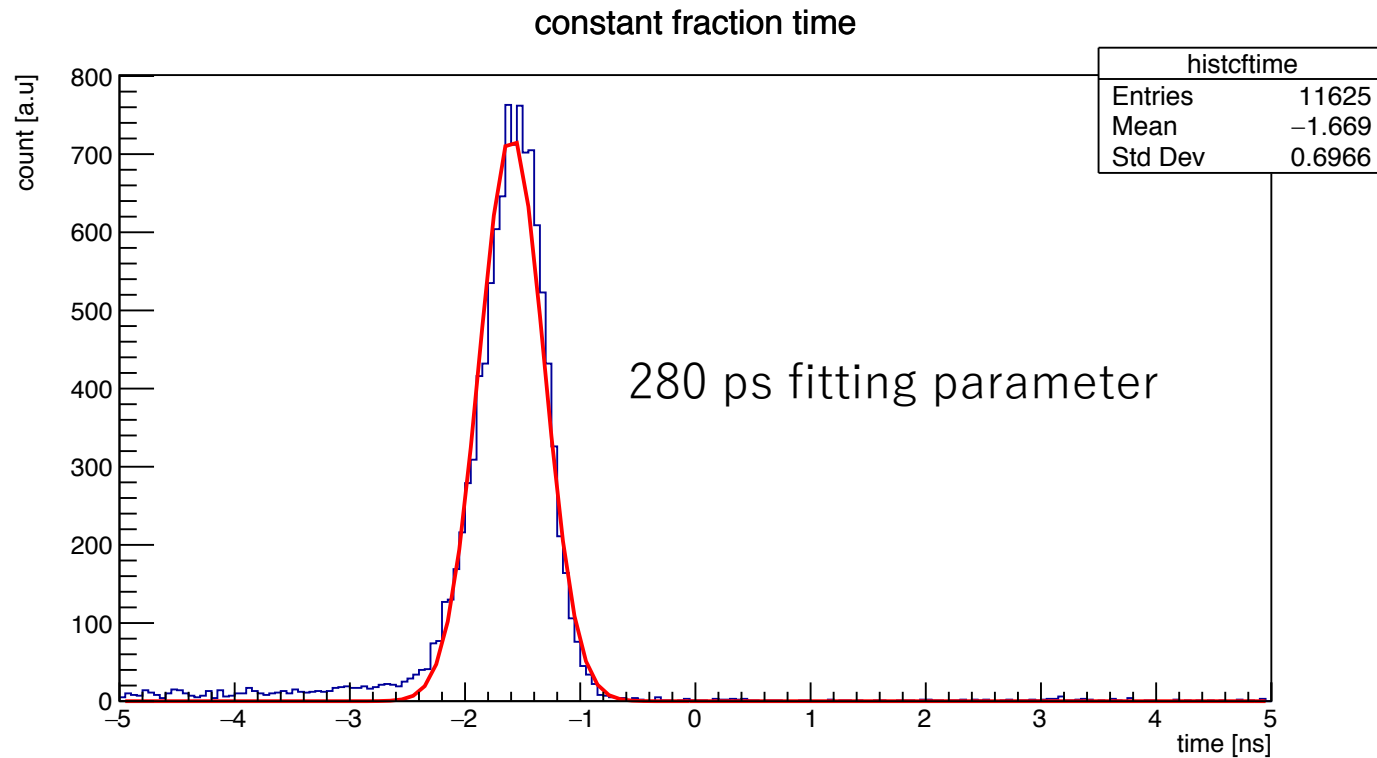
reference counter は
反応していないが
RPC信号が見られた

- 異なる電圧での分布の比較



384 μm での時間分解能

- 3100 Vでの測定: 280 ps の時間分解能 (要求達成)
(referenceカウンターの分解能含む)



RPC timing – reference counter timing

ギャップ依存性の調査(1/2)

- 要求性能を達成するために最適なギャップ厚を調べた
 - ✓ 計5種類のギャップ厚についての試験を行った

- スペーサーとして釣り糸を用いて4種類のギャップ厚について試験
 - ただし、厚さ依存性の試験のみの使用で、実機には採用しない
 - ギャップ厚のコントロールが難しく →
 - 不感領域も大きくなる

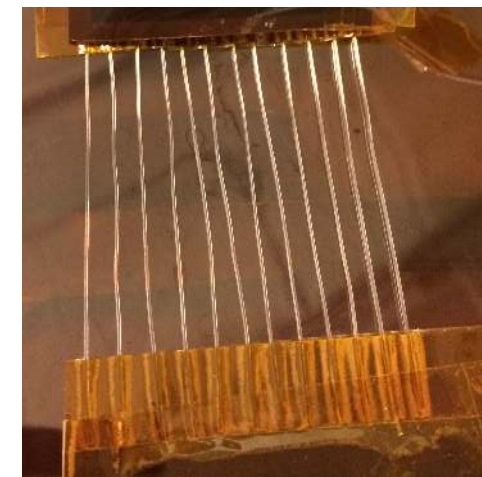
285 μm

370 μm

435 μm

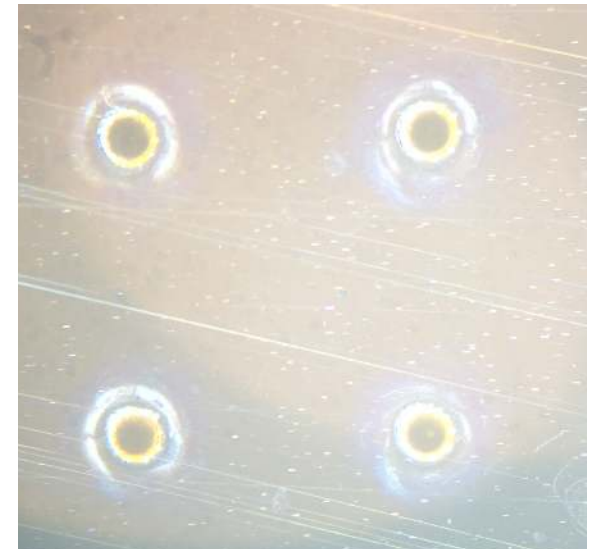
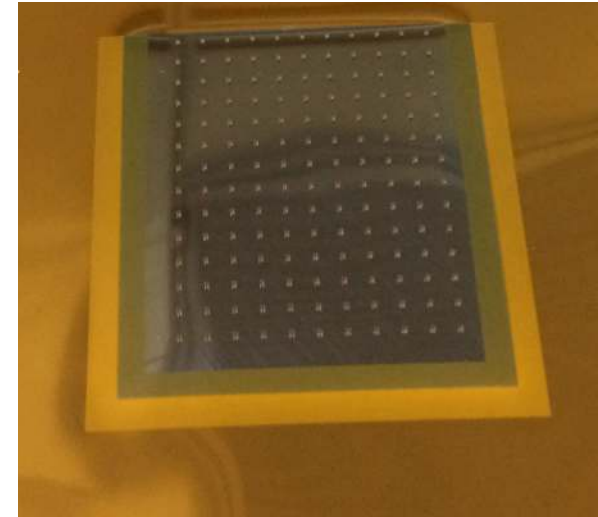
520 μm

ギャップの厚みについては不定性あり



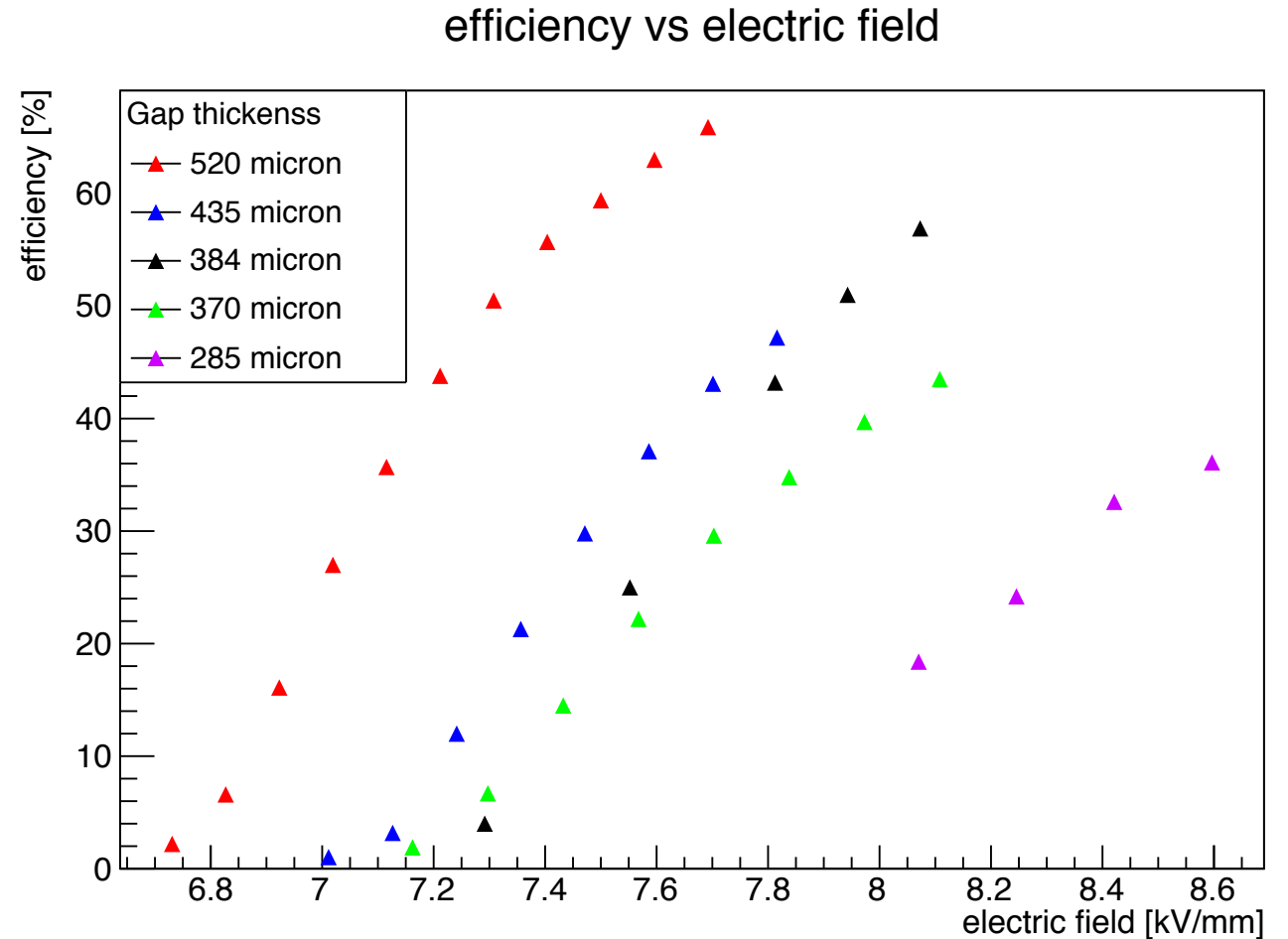
ギャップ依存性の調査(2/2)

- スペーサーとしてレジスト素材のピラー (2.5 mmピッチ、400 μm 径)を用いて384 μm のギャップ厚について試験
 - 不感領域が小さく、組み立ても容易であるため、実機に採用することを想定した手法
- 384 μm 厚 のピラーは感光レジストによって製作されるので、どこまでも厚くすることはできない。
 - ✓ 384 micron では、pillarの試験をした際に一部のpillarの周辺に付着物が見られた(厚いのが原因か否は不明)



検出効率のギャップ厚依存性

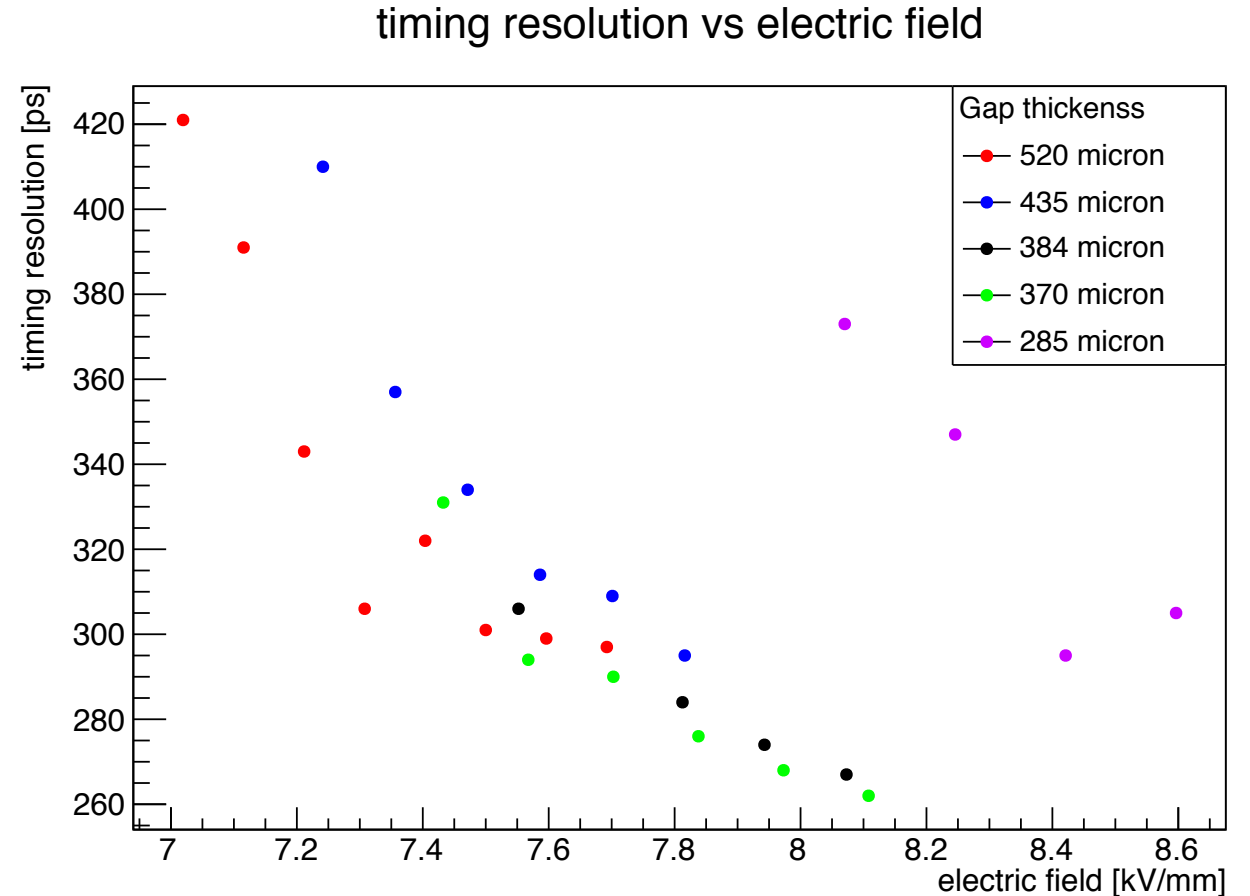
- 単層ギャップのRPCで検出効率のギャップ厚依存性を調べた
- 厚い方が検出効率は高くなる
→この傾向は、先行研究と
コンシステント
- e.g. arXiv:1809.10497 や
G. Aielli et al 2016 JINST 11 P07014
- $400\ \mu\text{m}$ の厚みで40-50%の
検出効率に到達
✓ 単層あたりの効率



ギャップ厚の不定性由来のuncertaintyあり (5%程度)
(384 μm のものについては1%)

時間分解能のギャップ厚依存性

- 単層RPCの場合に
時間分解能のギャップ厚
依存性を調べた
- 厚みによる違いは大きくない
 - ✓ 電圧を上げれば300 ps程度まで
良くなる → 全て要求達成
- 薄めのギャップの方が良い傾向
 - ✓ 285 μm は S/Nが悪いから
時間分解能が悪い



Discussion: ギャップの厚み

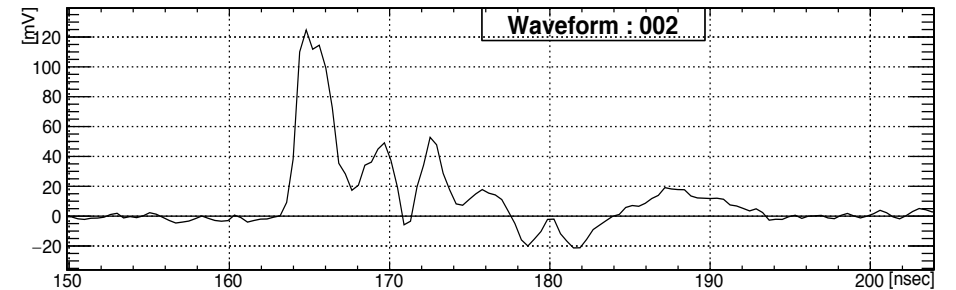
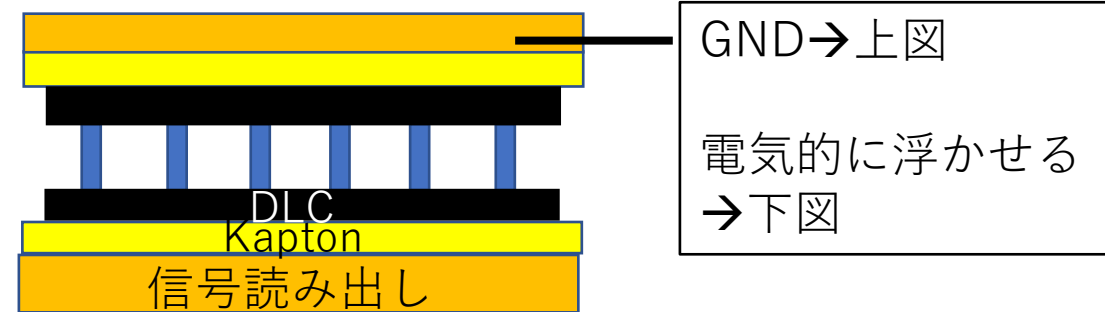
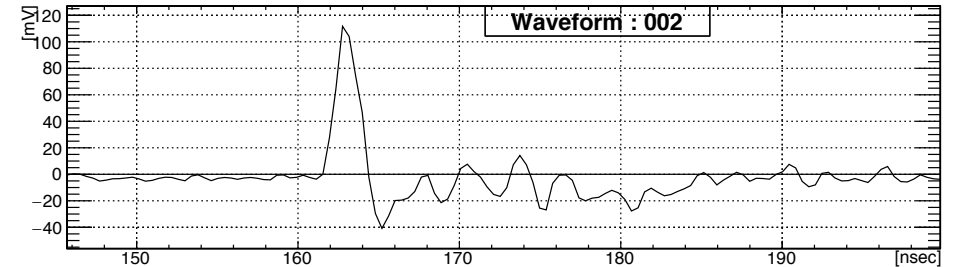
- ギャップの厚みを大きくすると
 - 検出効率は改善の傾向
 - 時間分解能は少し悪化(無視できる程度)
 - 動作電圧が高くなる
 - 500 μm を要求するとして、pillar を建てることのできるかは自明でない
- 動作電圧が上がる場合、運用上の問題も
 - ✓ 検出器にHVを供給するためのフィードスルー(<3.5kV)
 - ✓ 検出器がHeガス中に置かれるので、HV供給線における放電からの保護も必要になる

400 μm	3kV
-------------------	-----

500 μm	4kV
-------------------	-----

Discussion: 波形について

- 信号波形については、ストリップ周辺的设计によって波形は大きく変わる
→ 反射の原因がストリップ周辺にあるのは確か
(e.g. 近くの導電体、ストリップの反対端)
- ここまでの報告は波形が同じになるように統一して測定した結果
- 波形が変わることの影響
 - ✓ 時間分解能はある程度変化するが、悪くなって400 ps
 - ✓ 波高への影響は限定的
 - ✓ パイルアップが検出効率に悪影響(これは問題)



Contents

- Introduction
- DLC電極を用いたRPCの研究開発
- Summary and prospects

まとめ

- MEG II 実験の実験感度を向上させるために背景事象同定用の検出器を導入する
 - ✓ DLCスパッタリング技術を用いたRPCを開発
- 試作機を用いて単層RPCの性能を様々なギャップ厚で測定
 - ✓ 時間分解能は要求性能(1 ns)よりも良い結果
 - ✓ アルミを読み出し電極に用いる検出器構成を実証
 - 物質量への要請も満たすことができる
 - ✓ 単層RPCを用いて40 %の検出効率を達成した
 - 積層すれば90% の検出効率を達成できる見込み

今後

● 積層型のRPCの試作機を用いた性能評価

- ✓ 4層のギャップのRPCで目標検出効率を達成できることを実証する
- ✓ レート耐性の測定を行う
 - 高強度X線を用いた試験を行う

レート耐性

- 去年のMPGD研究会で報告 (Cu ターゲットの特性X線照射)
- ただし、エレキ、ガスギャップ、ガスが現在とは異なっていたので、再測定が必要

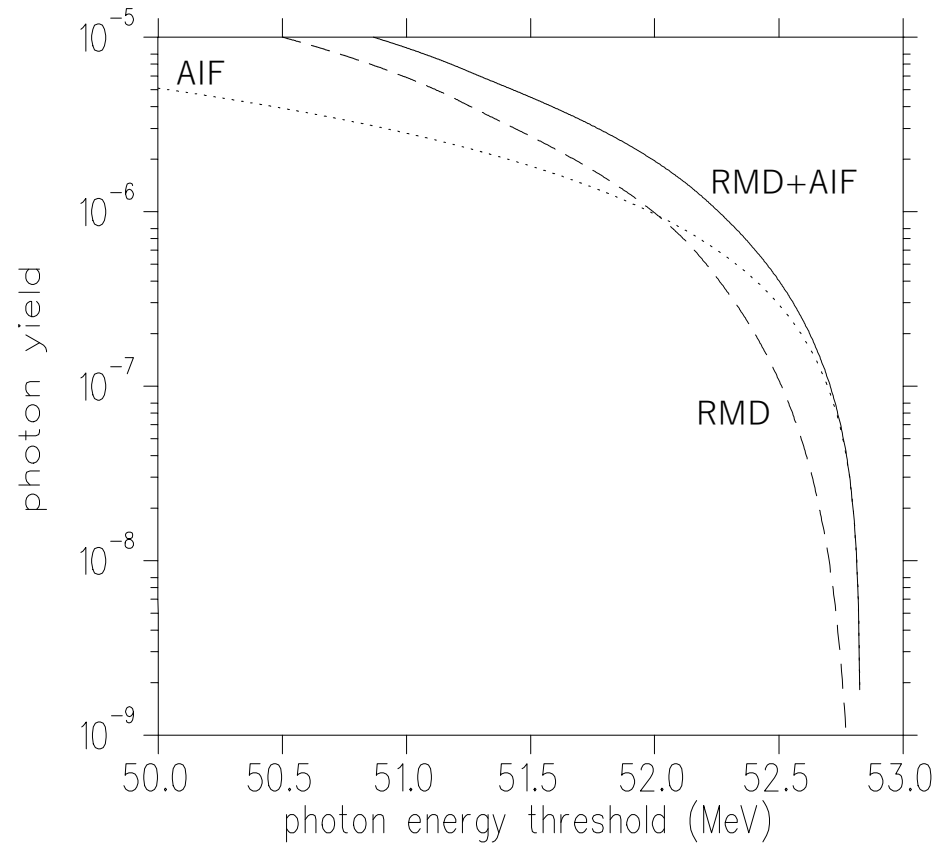
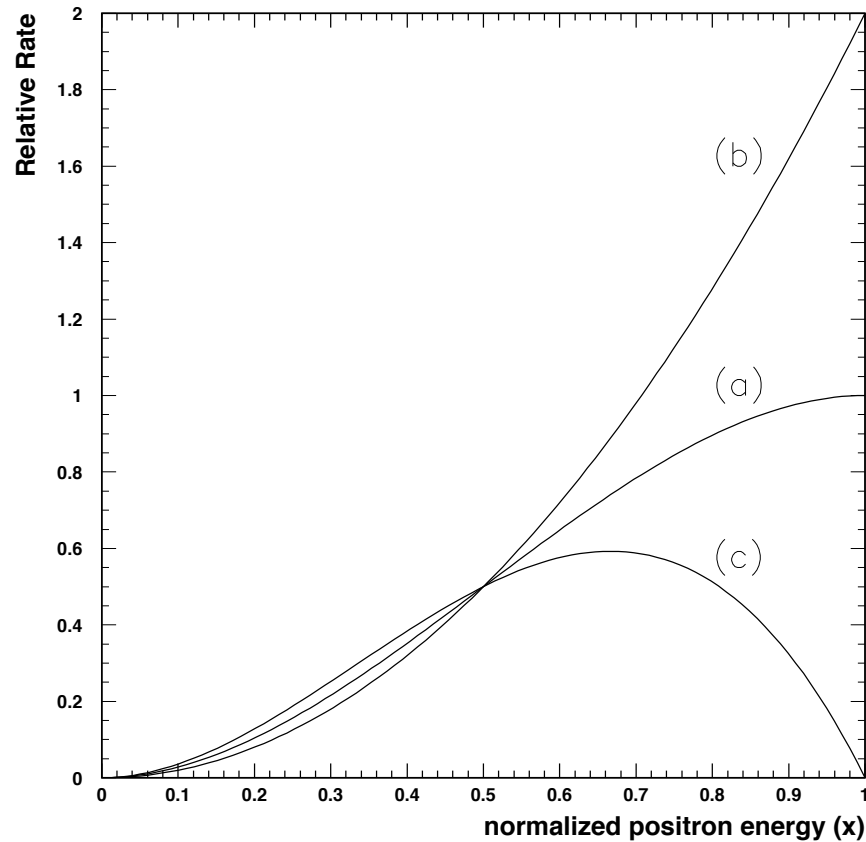
● 実機デザイン

- ✓ 実機向けのエレクトロニクスの開発
- ✓ 信号波形が読み出しセットアップに依存して変化するのが確認されている
 - 読み出しの最適化 (波形がビーム μ 粒子とのパイルアップに影響)
- ✓ 動作電圧が大きく、検出器がHeガス中に設置されるので、運用上の課題もある

BACK UP

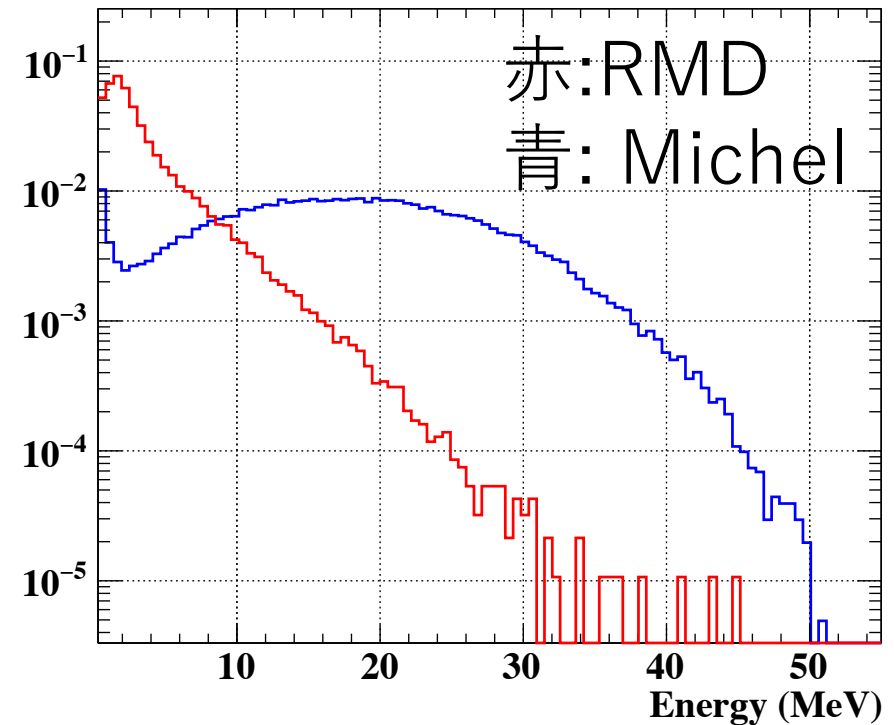
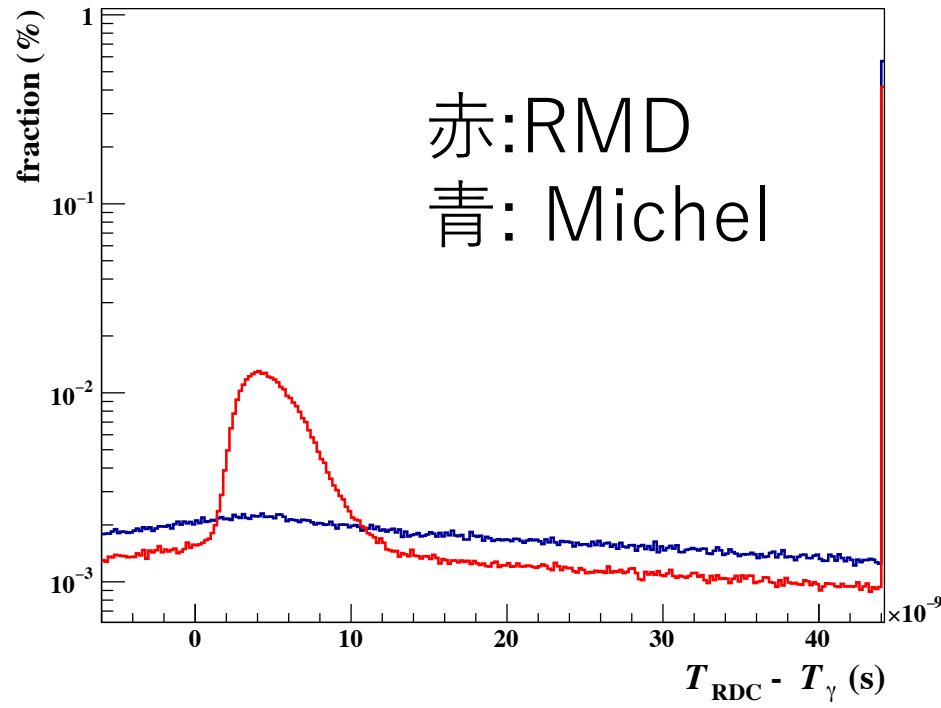
Accidental background

$$N_{\text{acc}} \propto R_{\mu}^2 \times \Delta E_{\gamma}^2 \times \Delta E_e \times \Delta \Theta_{e\gamma}^2 \times \Delta t_{e\gamma} \times T$$

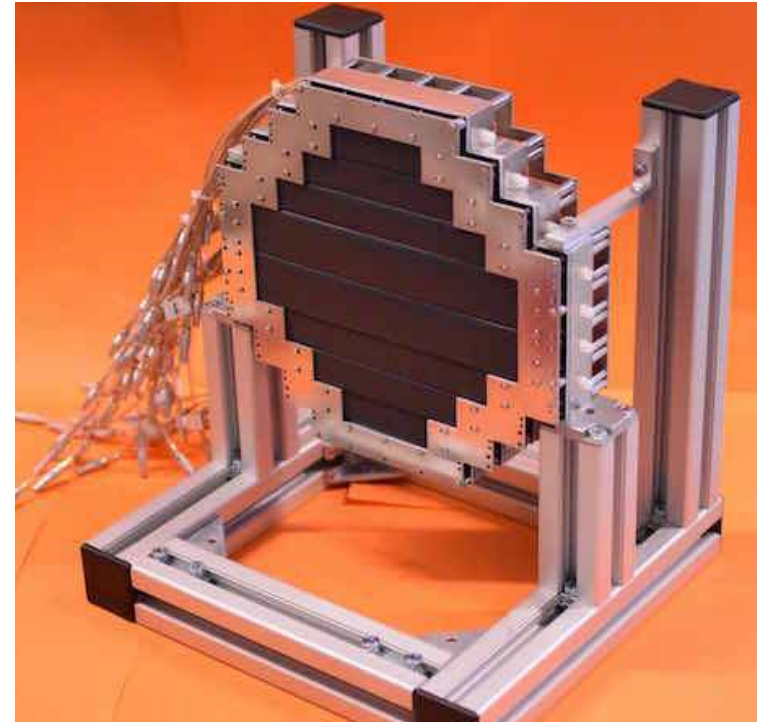
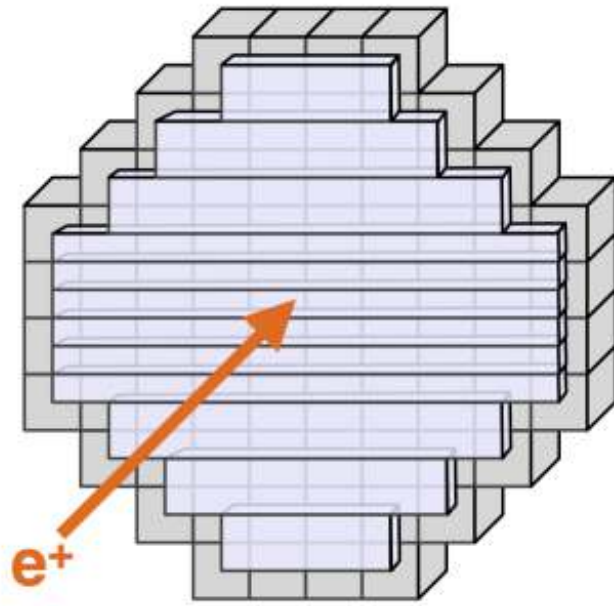


背景事象同定用検出器

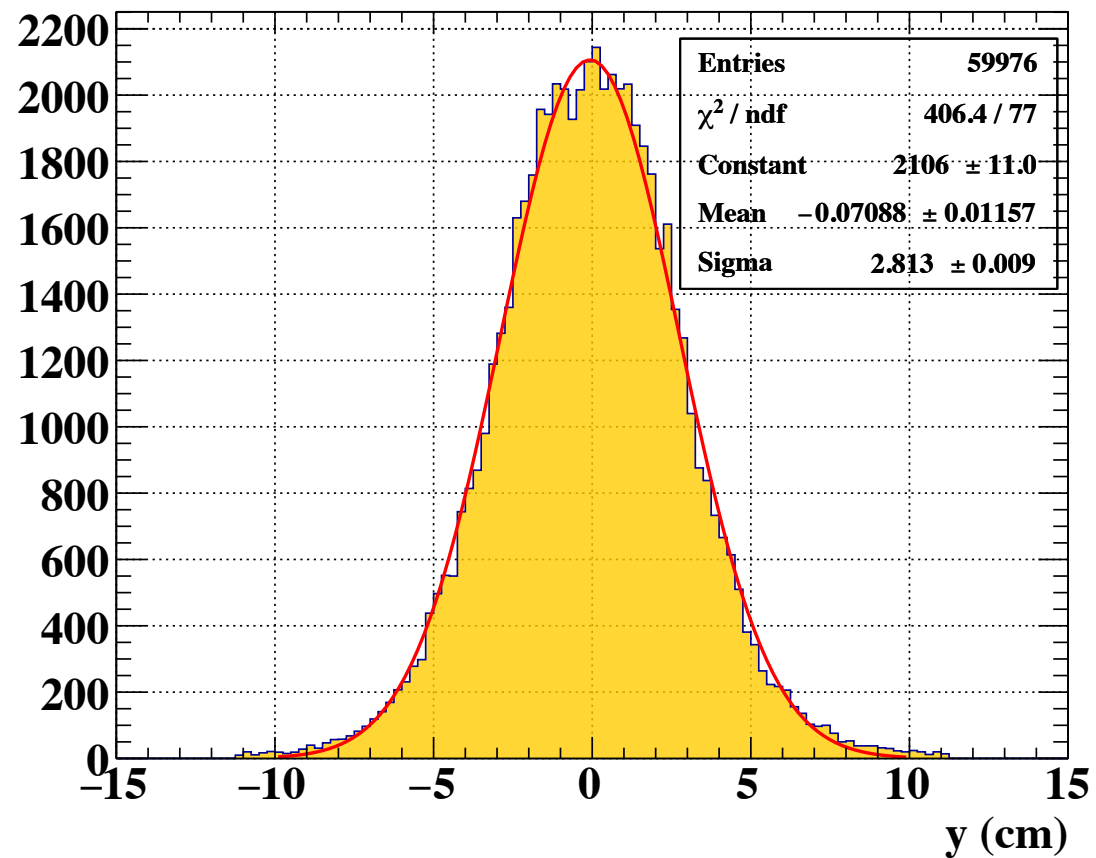
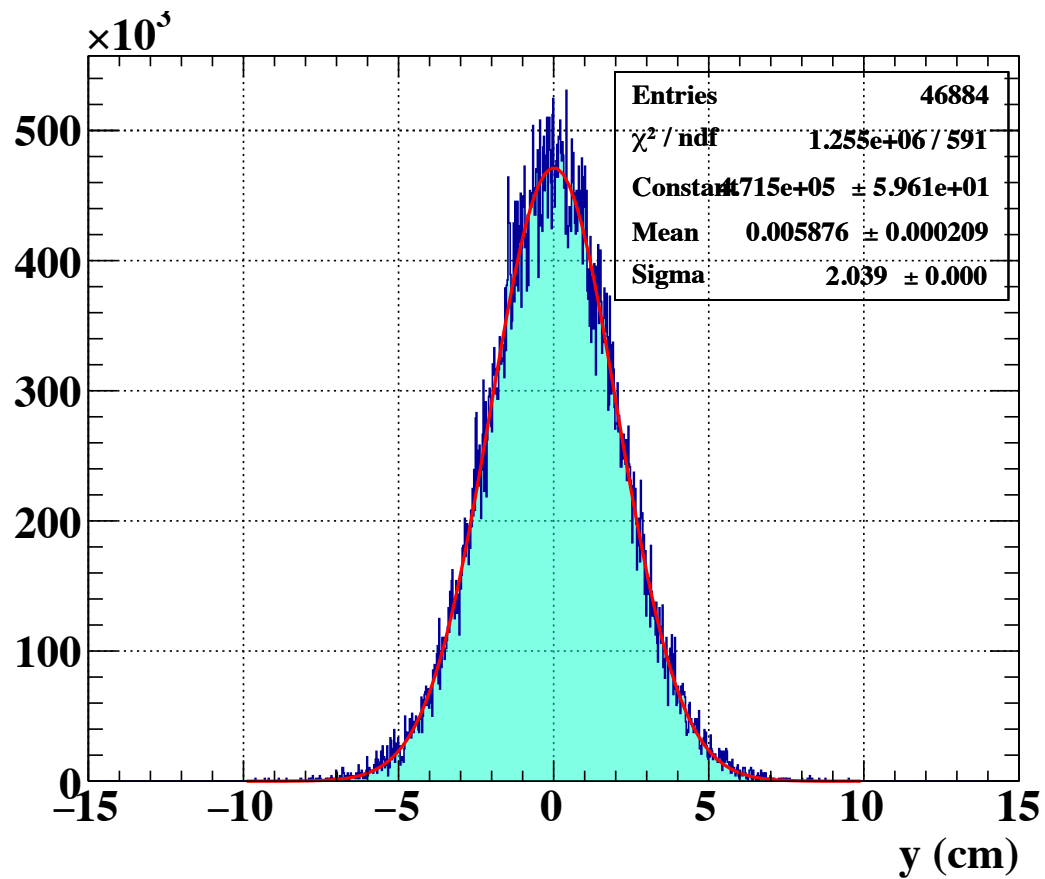
- 上流では左の分布のみ用いる（物質量が低いのでエネルギー測れない）
- 下流ではエネルギー分布も用いることができる



下流側検出器

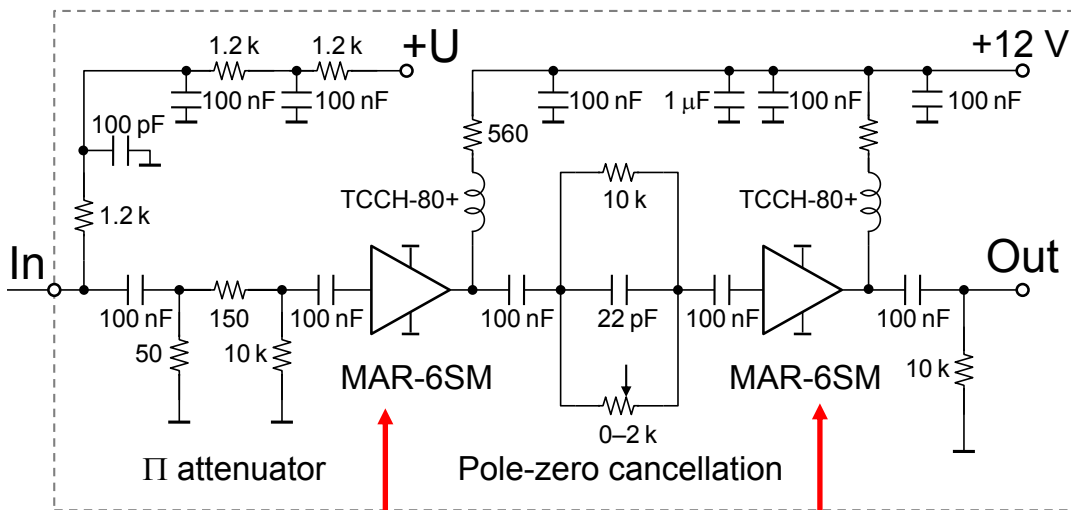


分布



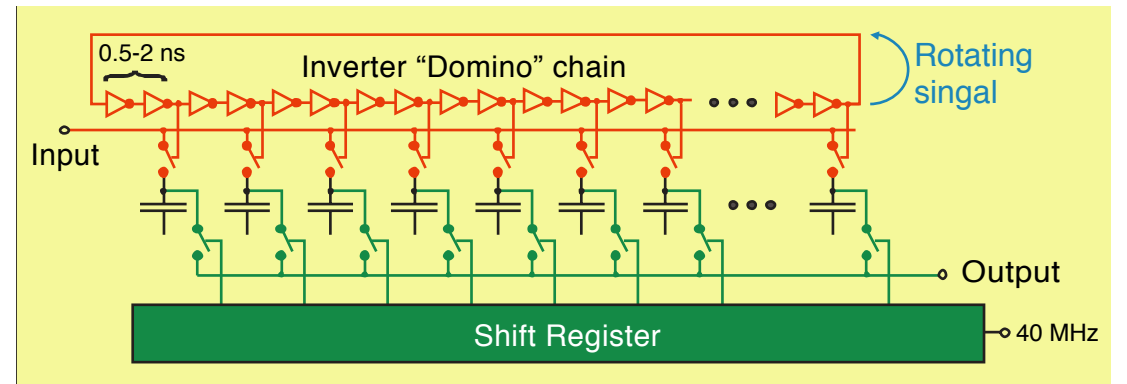
エレクトロニクス

- アンプの回路図
→ 元々はSiPMの信号を読むために開発されたものだが、高速応答、低ノイズ特性が良い



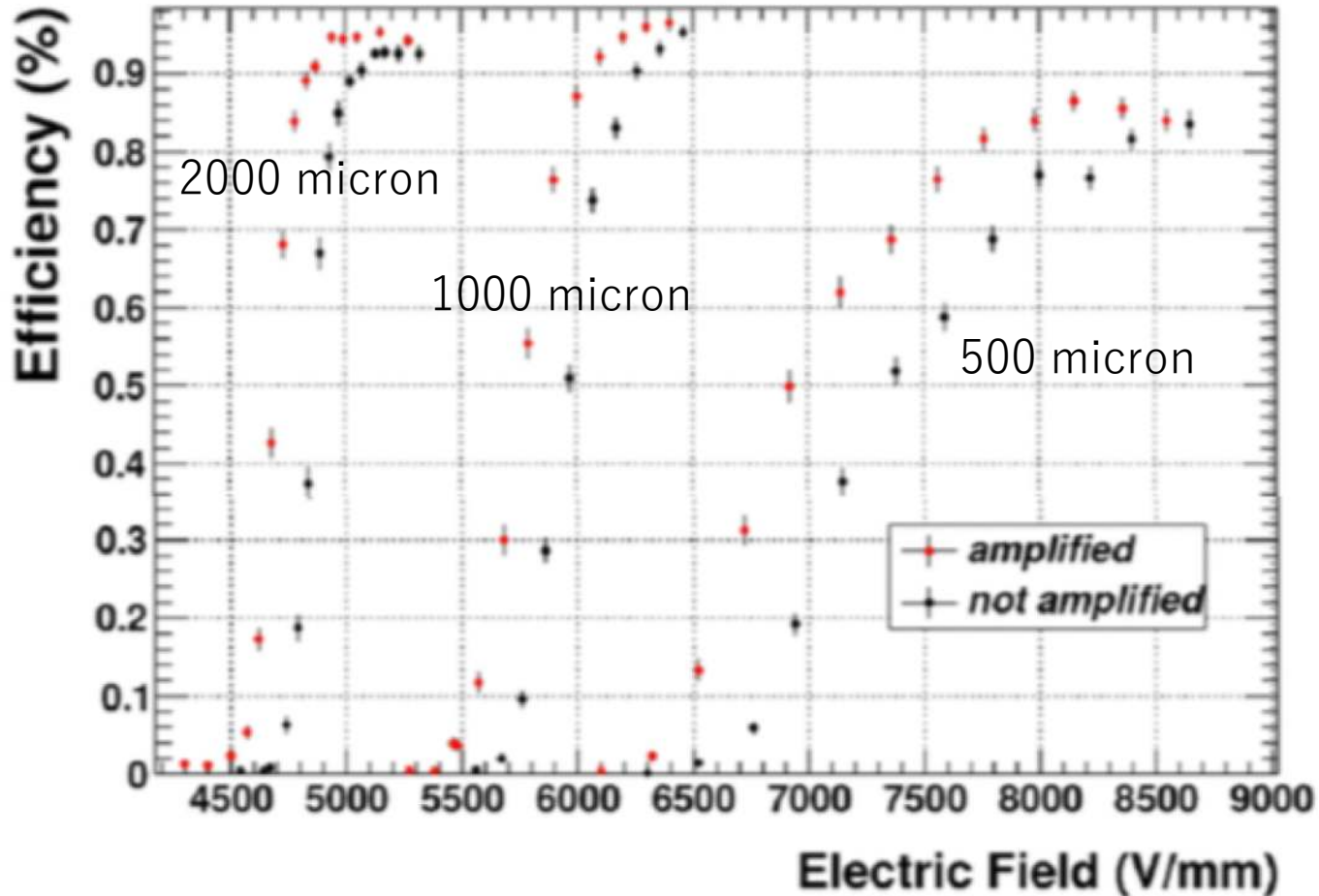
2GHz bandwidth, 20dB RF amplifier

DRS: inverter delay chain による
波形サンプリング
(1024個のキャパシタ配列)



Gap dependence of efficiency

G. Aielli et al 2016 JINST 11 P07014



- ガスの違いにより
こちらの方が低めの
電場で動作している