



# 国際リニアコライダーのためのシンチレーターストリップ電磁カロリメータの開発

東京大学 山下研究室

家城 齊

21st ICEPP Symposium 2015/2/11

# 概要

---

1. 国際リニアコライダー実験
2. PFA
3. カロリメーター
4. シンチレーション検出器の開発
5. まとめ

# International Linear Collider (ILC)

全長31kmの加速器

電子陽電子衝突

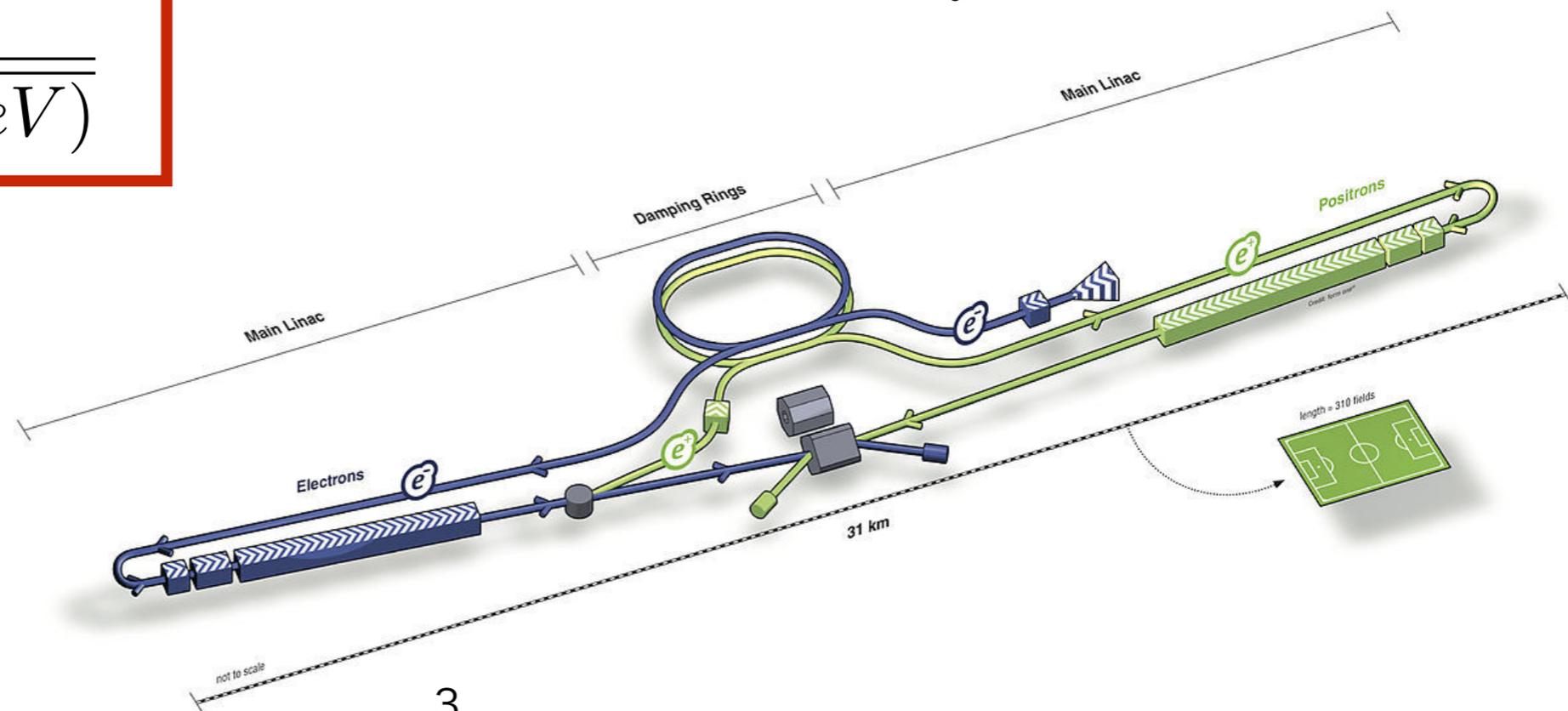
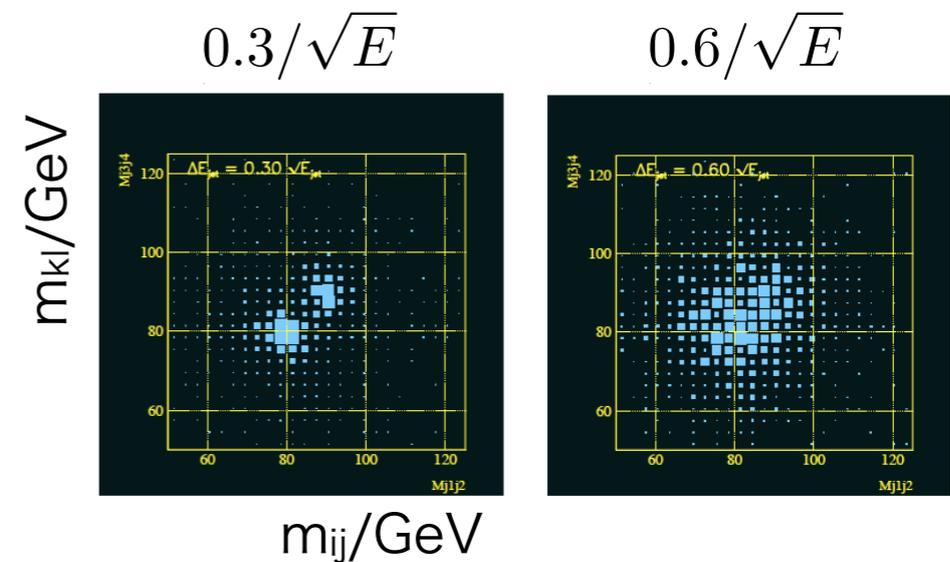
重心系500GeV (将来的に1TeVまでのアップグレードを計画)

[特徴]

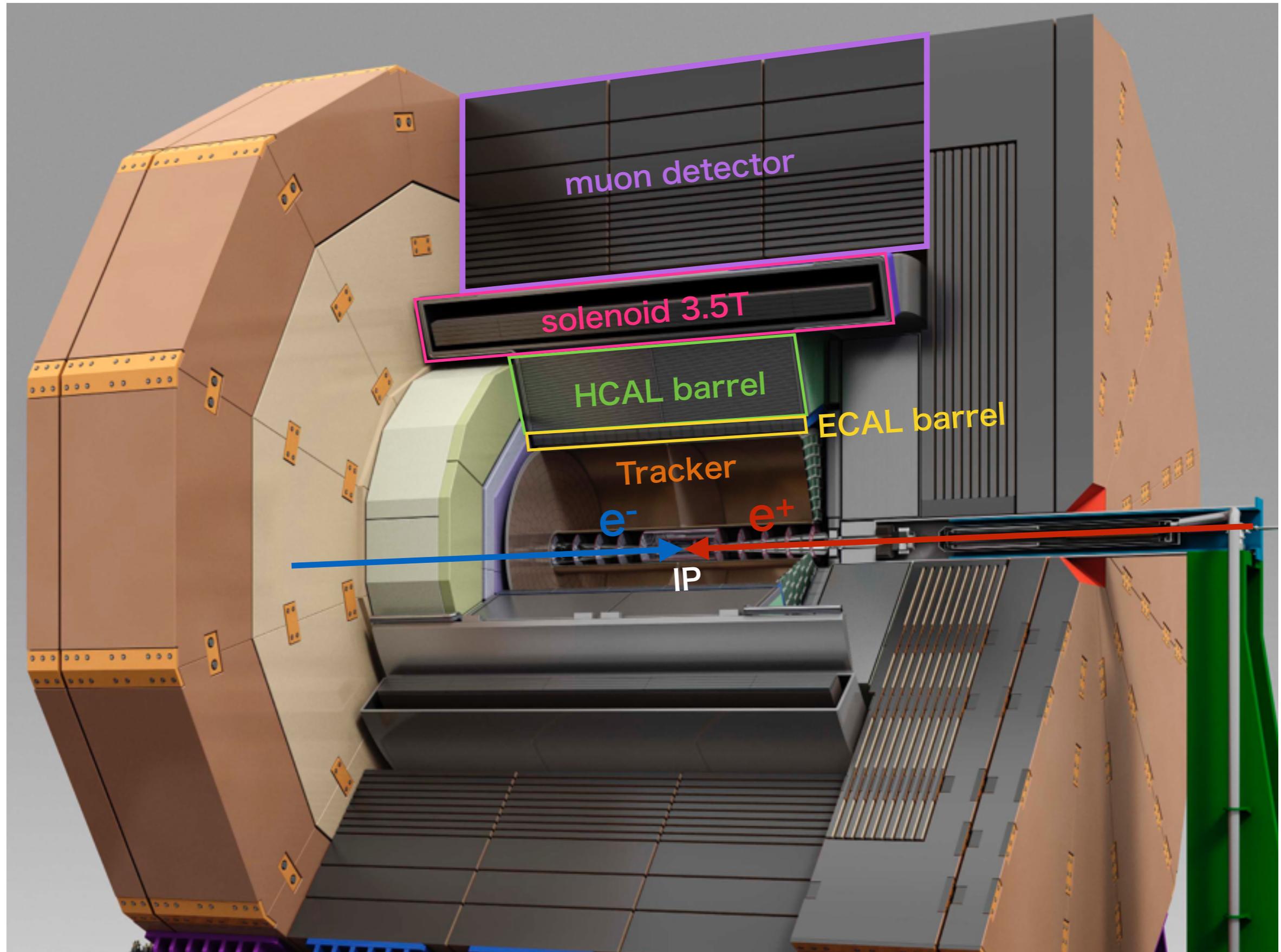
- ・ 背景事象が少ない → トリガーレス
- ・ 精密測定 → 高精細なカロリメーター

ILCが目標とするジェットエネルギー分解能

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{0.3}{\sqrt{E(\text{GeV})}}$$



# International Large Detector (ILD)



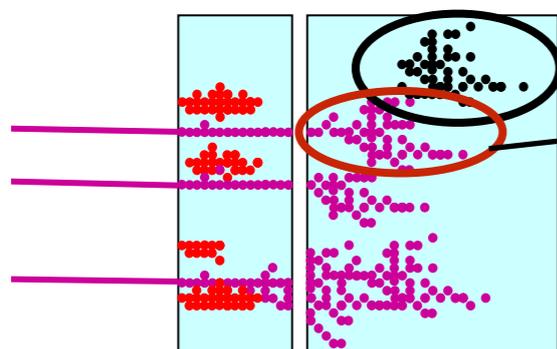
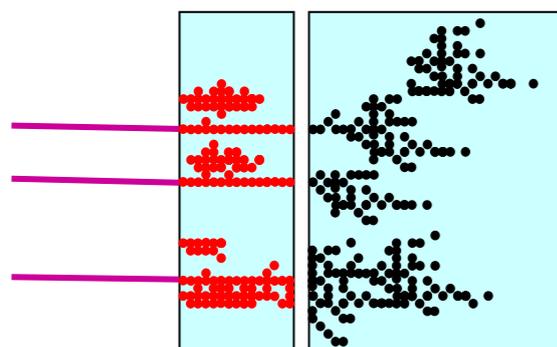
# 高いジェットエネルギー分解能を達成するために

ソフトウェア：個々の粒子を識別

→ 最適な再構成方法の確立

ハードウェア：異なる粒子を分離

→ 高精細なカロリメーター



これらのヒットを分離できない場合  
中性ハドロンによるヒットを荷電ハドロンの一部とみなし、  
荷電ハドロンのエネルギー損失を過大評価してしまう。

ILDのカロリメーターはチャンネル数が1000倍も多い

#ch.	ECAL	HCAL
ILD	100M	10M
LHC	76k (CMS)	10k (ATLAS)

CMSのECAL( $\text{PbWO}_4$ )  
26 x 26 x 230 mm<sup>3</sup>



# 概要

---

1. 国際リニアコライダー実験

2. PFA

3. カロリメーター

4. シンチレーション検出器の開発

5. まとめ

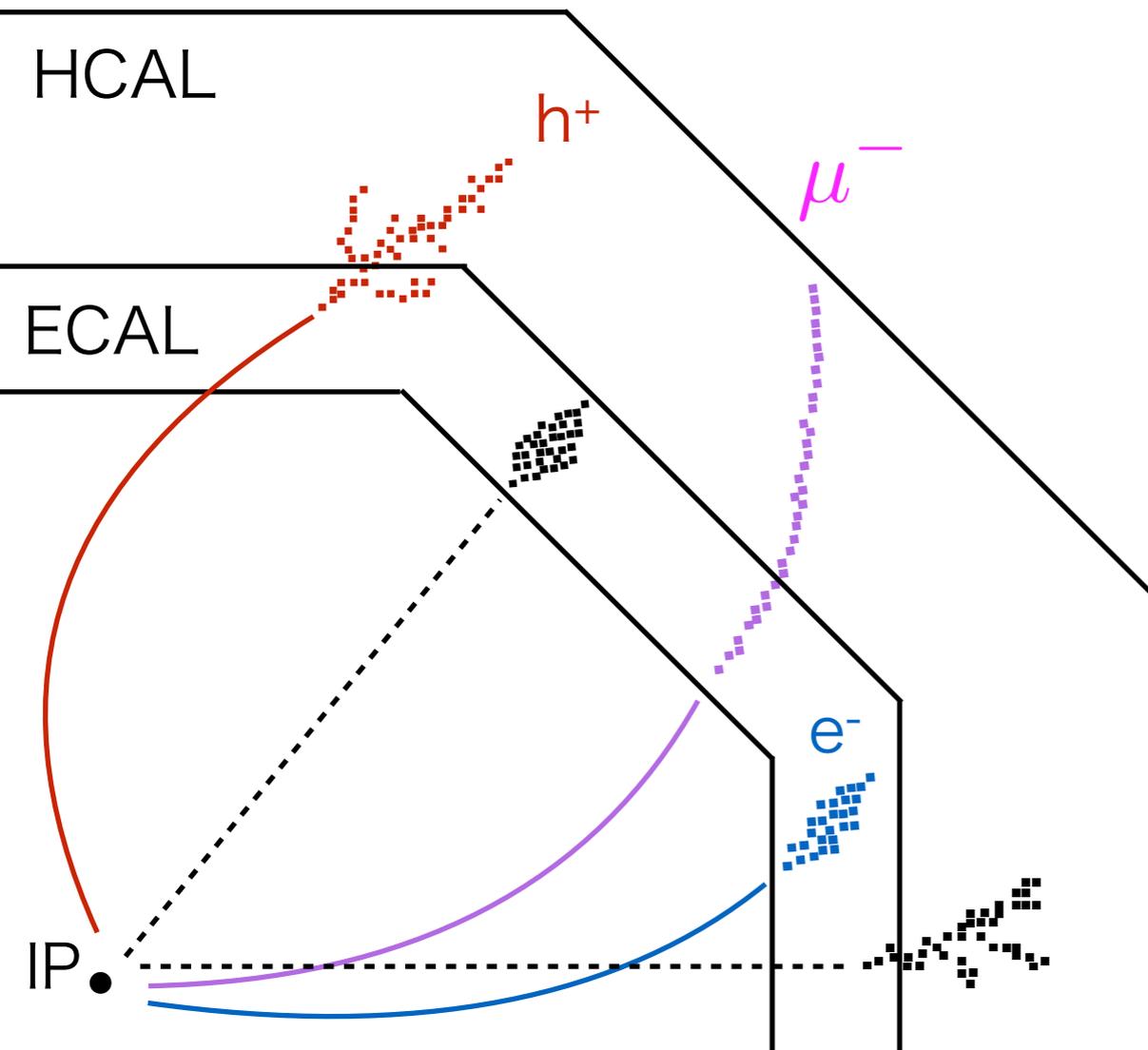
粒子を再構成するためのソフトウェア

# Particle Flow Algorithm (PFA)

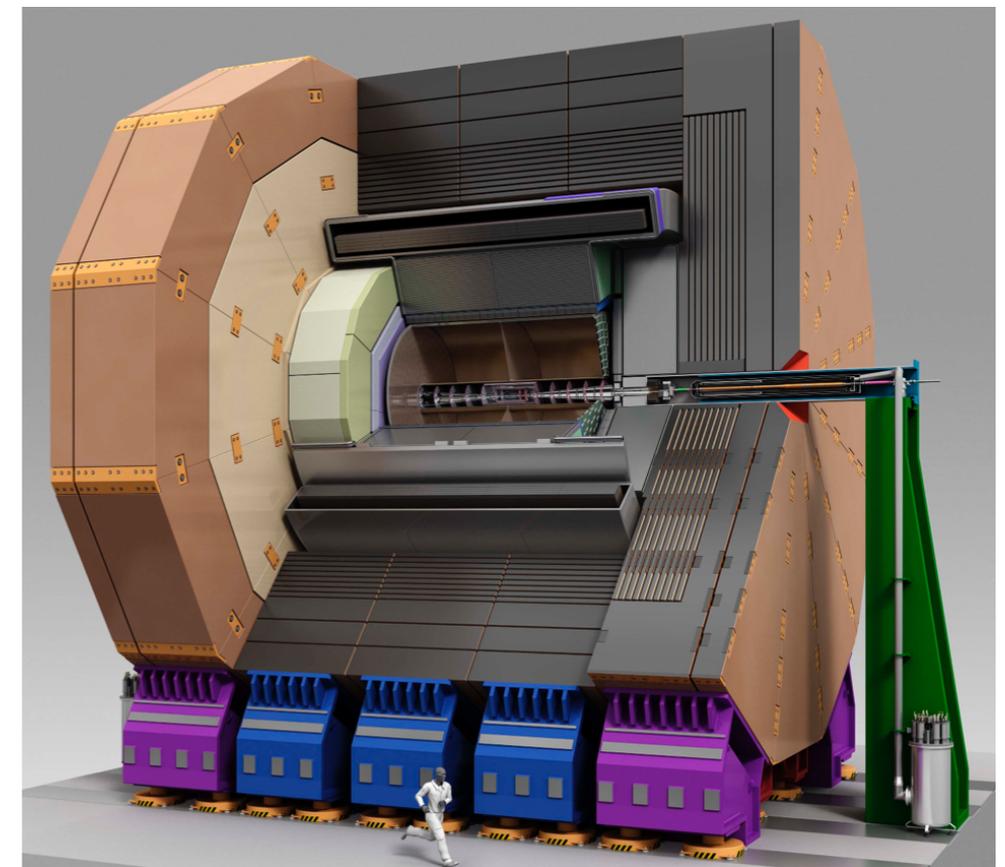
再構成に用いる検出器の情報を粒子の種類によって場合分けする。

- ・ 荷電粒子 → 飛跡検出器
- ・ 光子 → 電磁カロリメーター(ECAL)
- ・ 中性ハドロン → ハドロンカロリメーター(HCAL)

calori meter	fraction	$\sigma_E/\sqrt{E}$
HCAL	10%	55%
ECAL	30%	15%
Track	60%	< 1% @ 30GeV



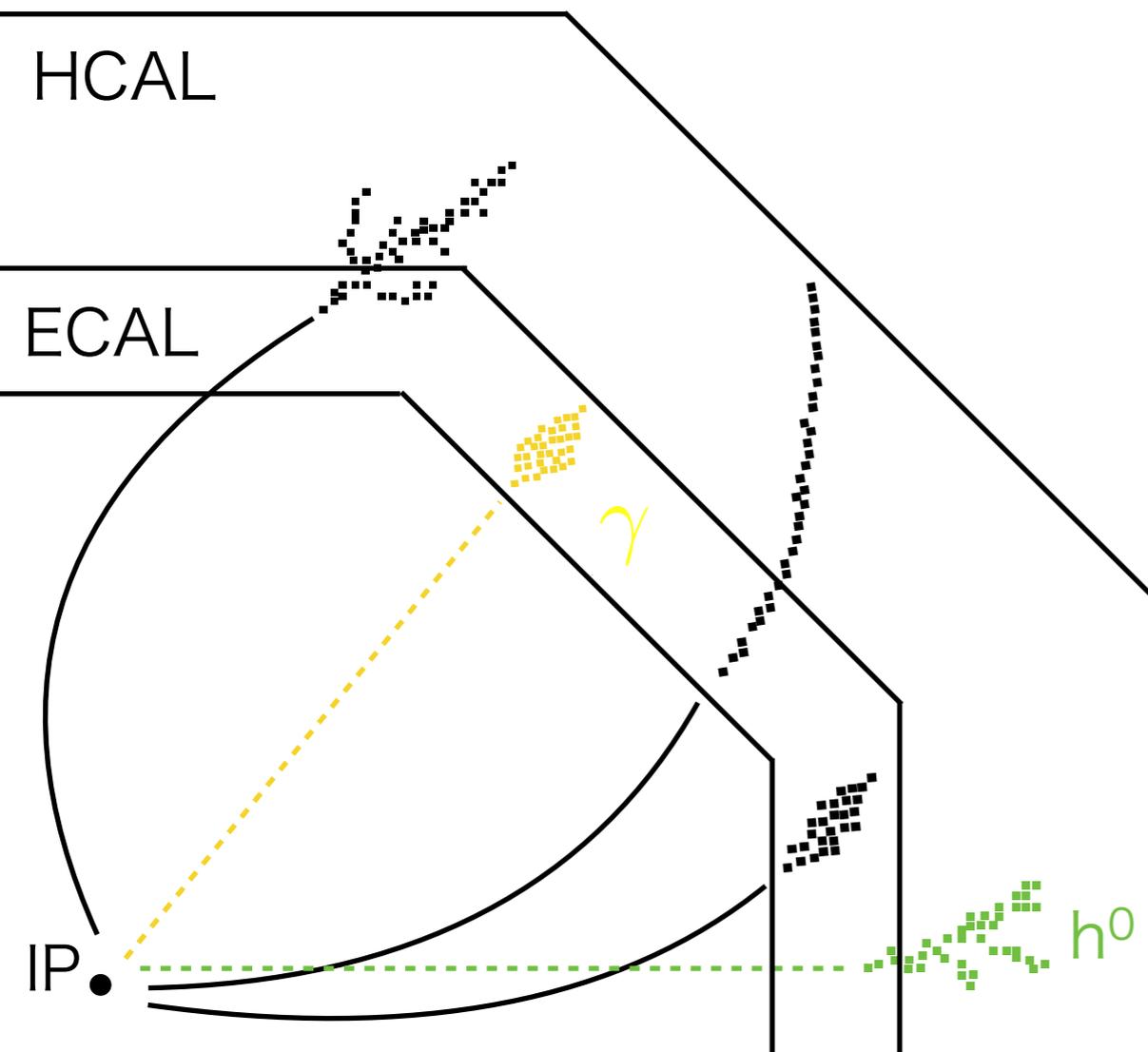
ILD



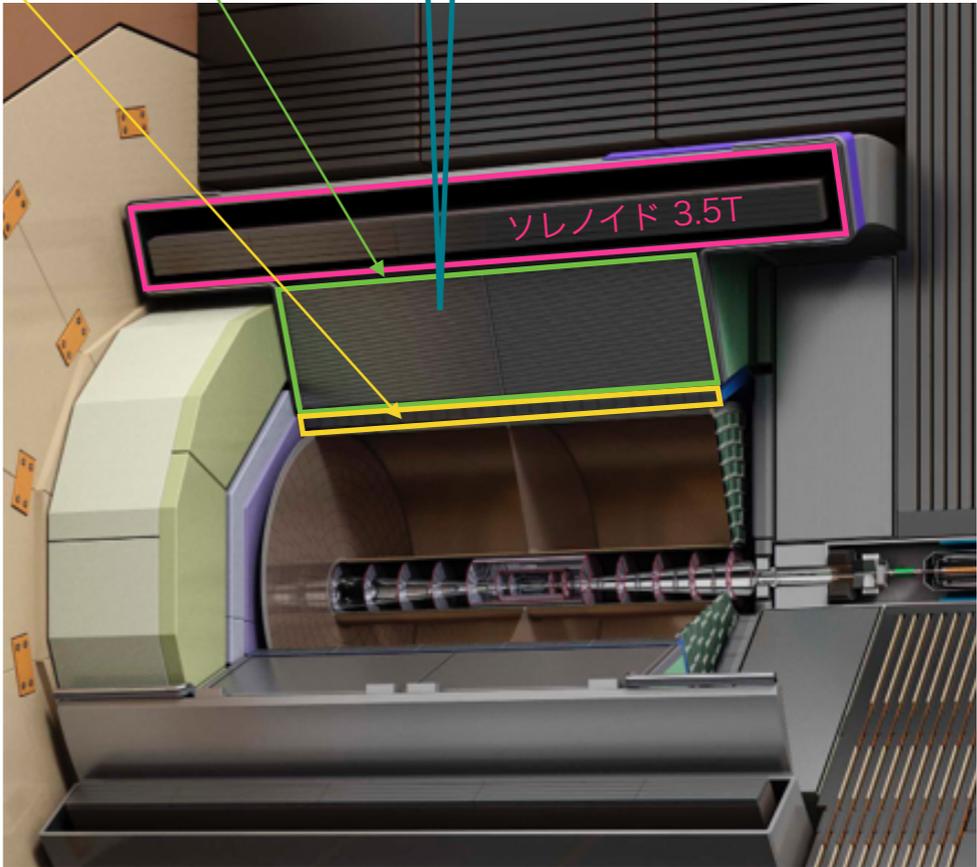
# Particle Flow Algorithm (PFA)

再構成に用いる検出器の情報を粒子の種類によって場合分けする。

- ・ 荷電粒子 → 飛跡検出器
- ・ 光子 → 電磁カロリメーター(ECAL)
- ・ 中性ハドロン → ハドロンカロリメーター(HCAL)



バレルの厚さ  
ECAL 0.185 m  
HCAL 1.1 m



# 概要

---

1. 国際リニアコライダー実験
2. PFA
3. カロリメーター
4. シンチレーション検出器の開発
5. まとめ

粒子のエネルギー損失を測る！

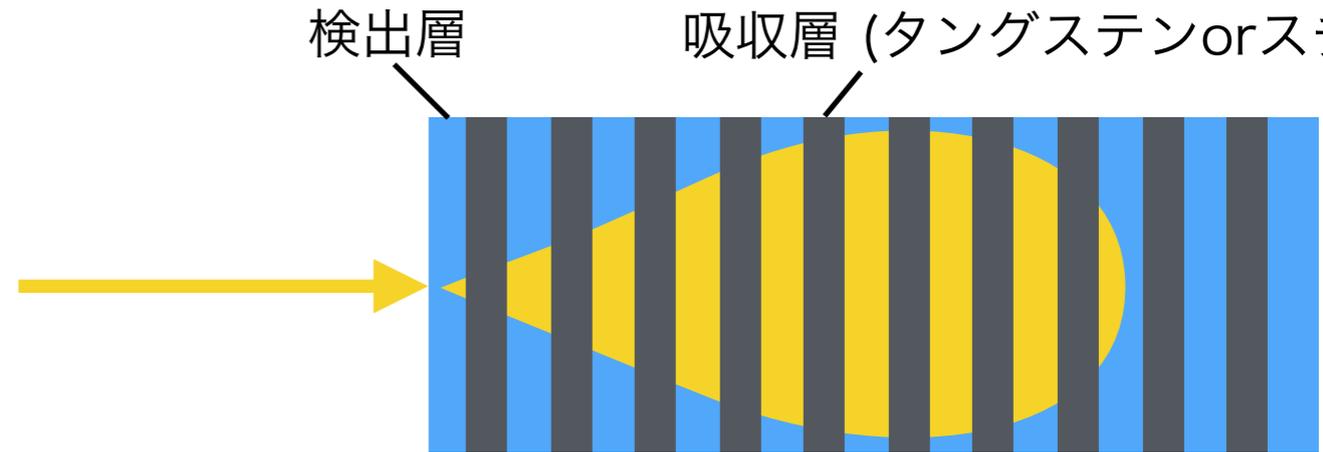
# カロリメーター

## サンプリング型カロリメーター

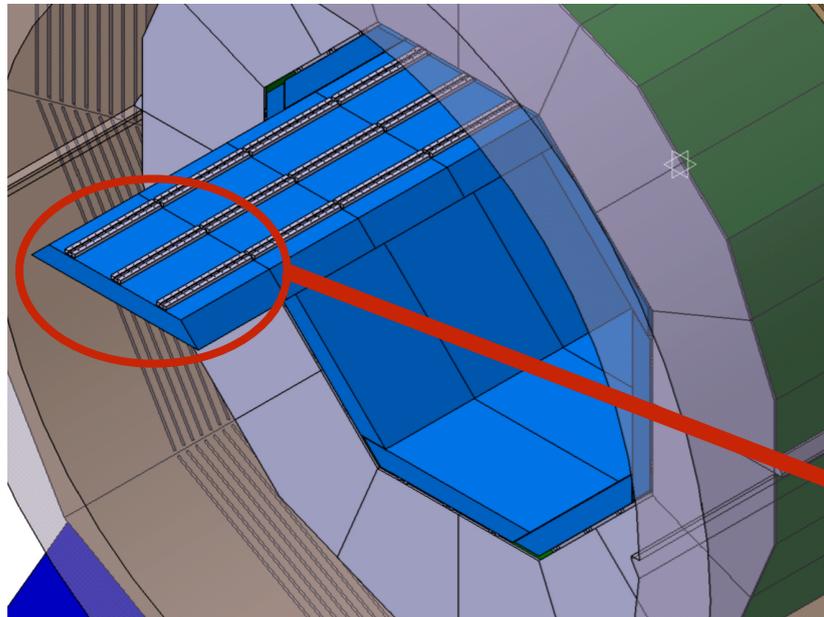
検出層と吸収層で構成

- ・ 高い位置分解能
- ・ 安価
- ・ 小型
- ・ エネルギー分解能は悪い

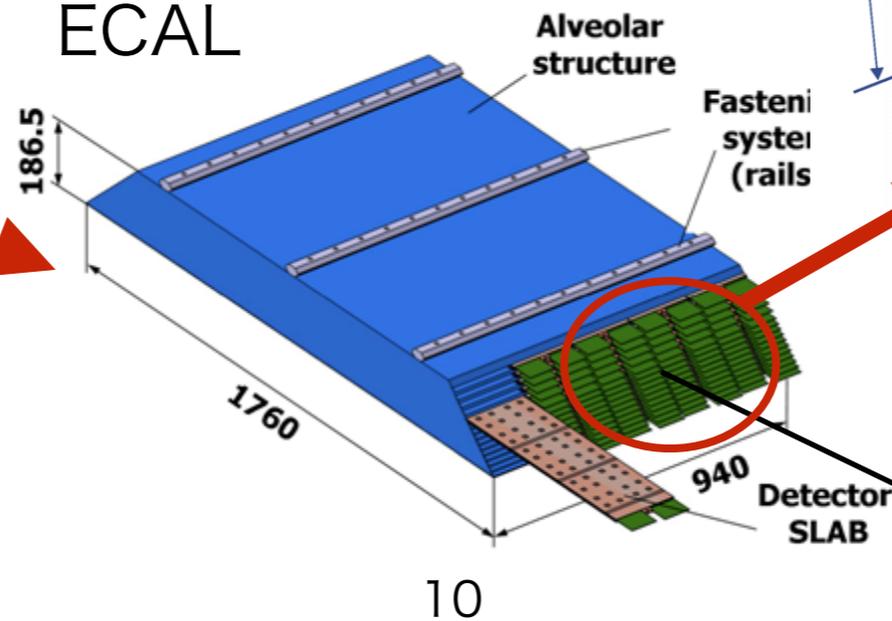
検出層 吸収層 (タングステンorスチール)



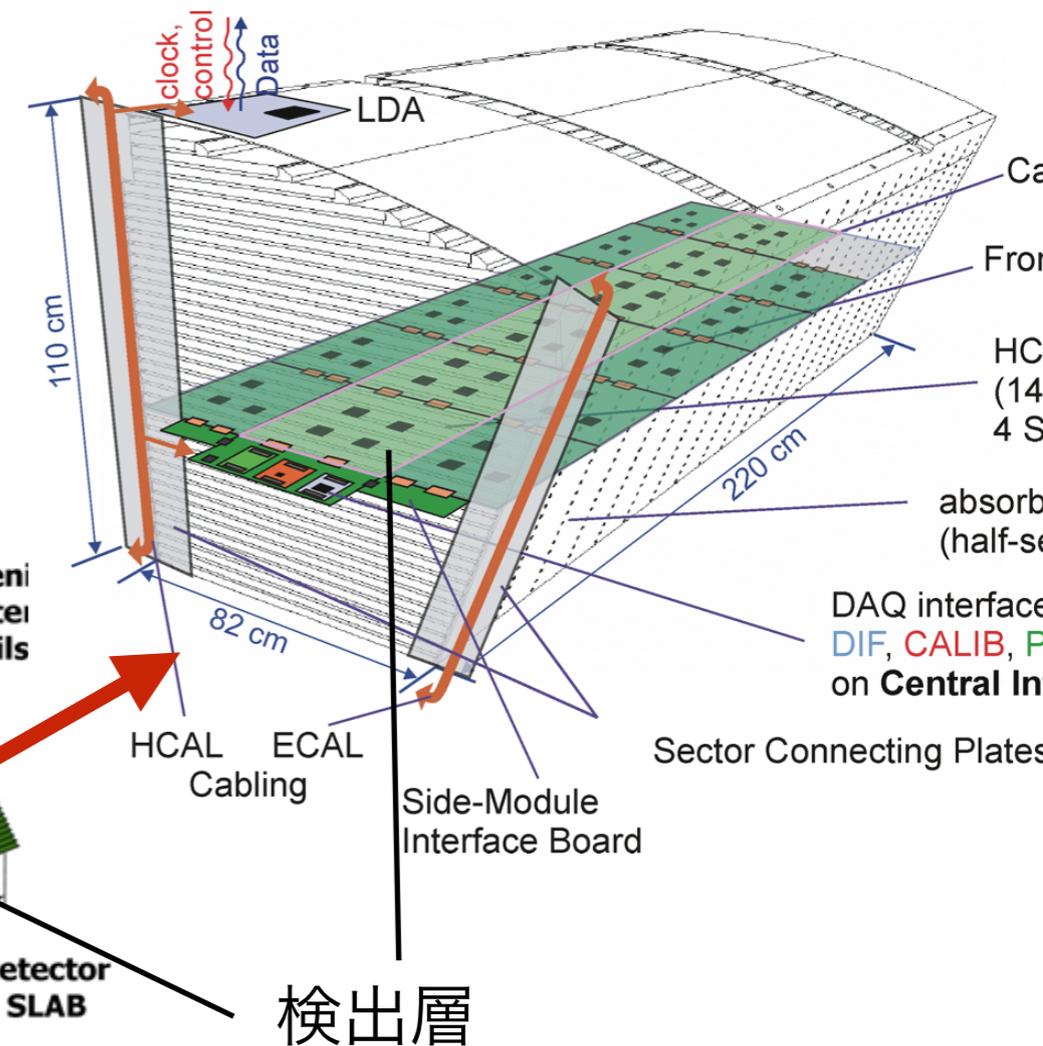
バレル



ECAL



HCAL (ECALも構造は同じ)



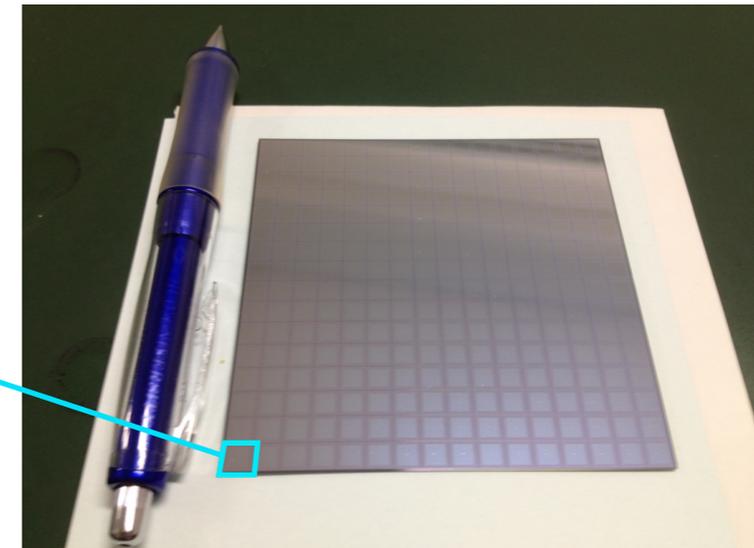
検出層

10

# 電磁カロリメーター

## シリコン検出器 (SiECAL)

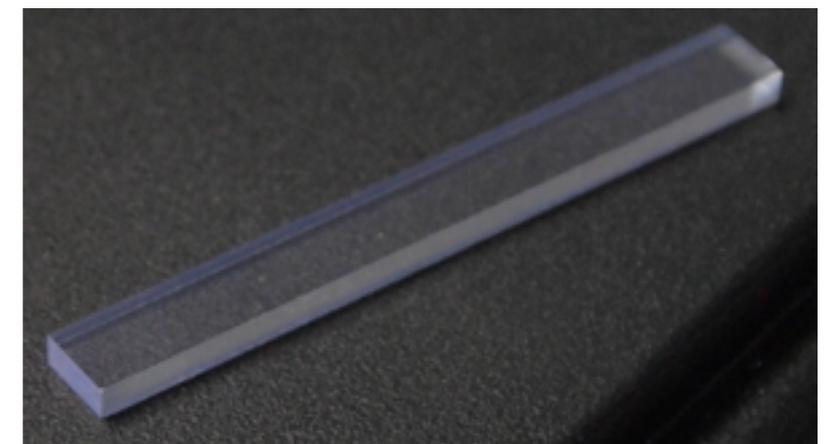
- ・ピクセルサイズ :  $5.5 \times 5.5 \text{ mm}^2$
- ・高いエネルギー分解能
- ・高価
- ・チャンネル数  $\sim 10^8$



## シンチレーション検出器 (ScECAL)

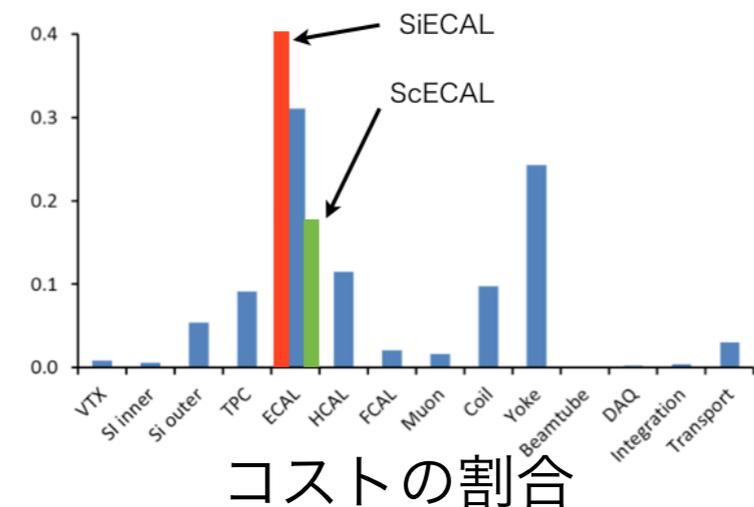
- ・シンチレーター :  $45 \times 5 \times 2 \text{ mm}^3$
- ・光検出器(MPPC) :  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  (受光面)
- ・安価
- ・チャンネル数  $\sim 10^7$

S10362-11-025P



## SiECALとScECALのハイブリッド案

SiECALとScECALの割合を半々にしてもSiECALのみの場合とジェットエネルギー分解能は変わらない。

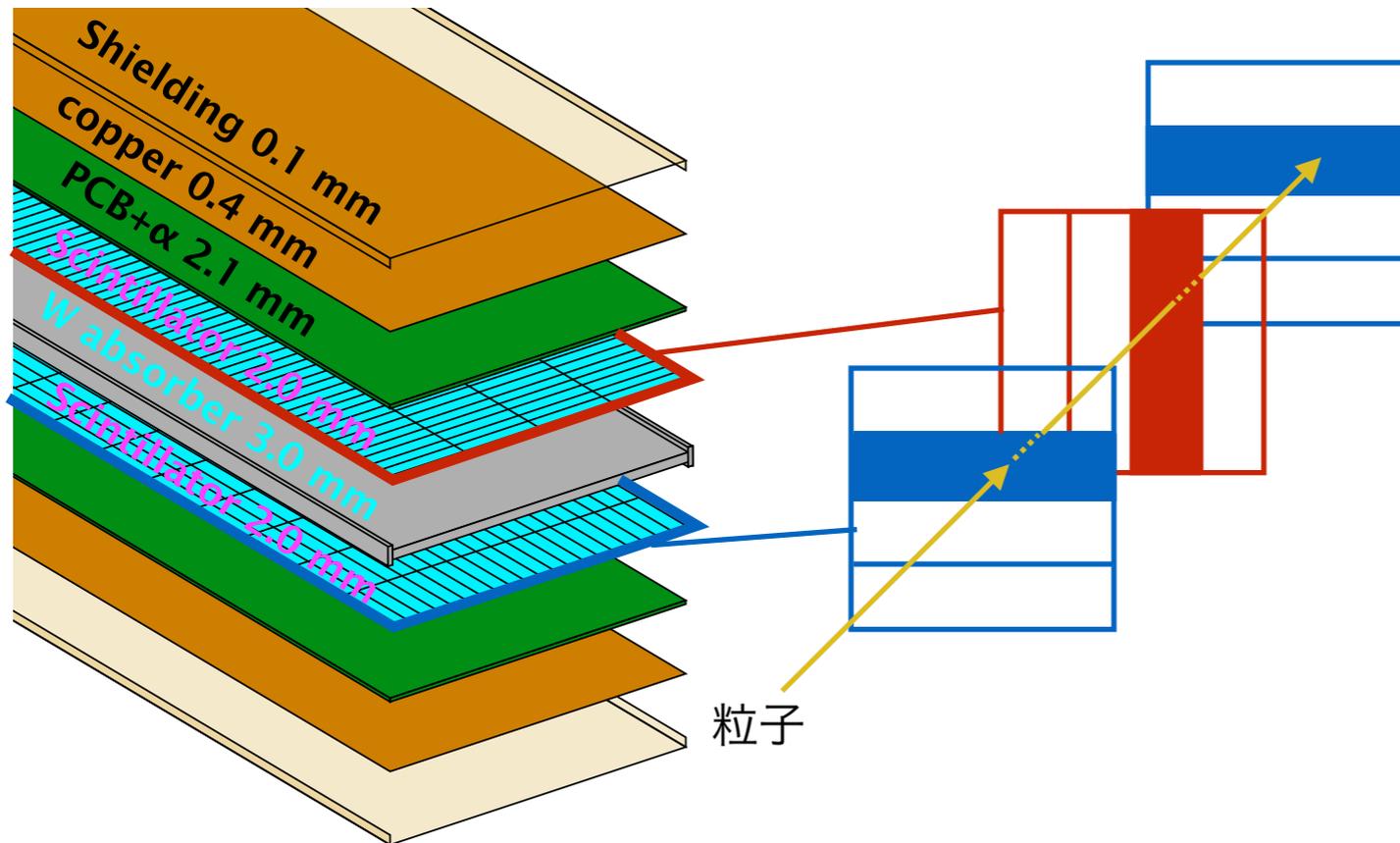


# シンチレーション検出器

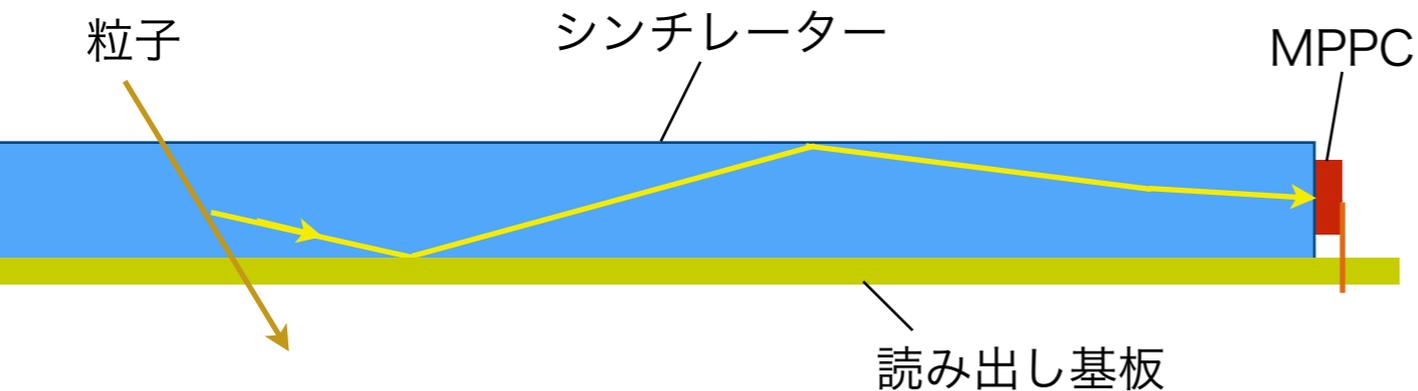
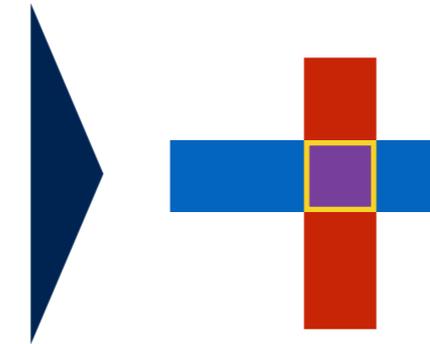
## シンチレーション検出器の構造

直交する2方向にシンチレーターを並べて積層

→ 2方向の層を使って5 x 5 mm<sup>2</sup>の擬似的なセルをつくり、エネルギーを再構成



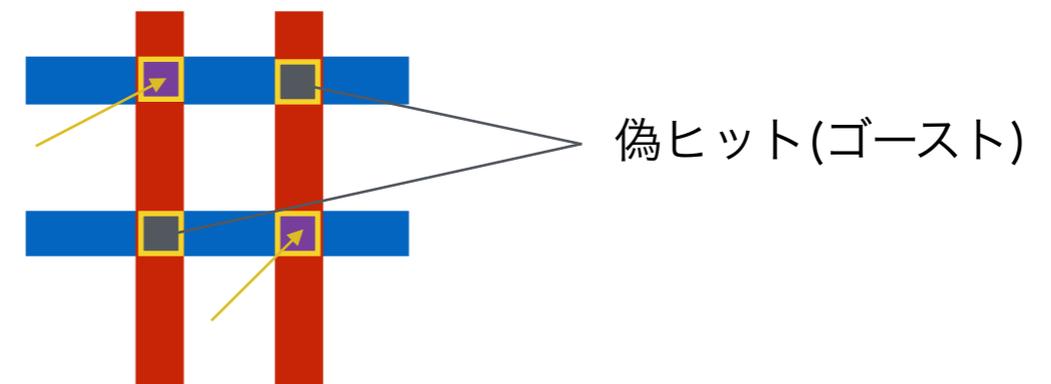
擬似的なセルをつくることで、  
5x5mm<sup>2</sup>のピクセル検出器より  
チャンネル数を少なくできる



## ゴーストの問題

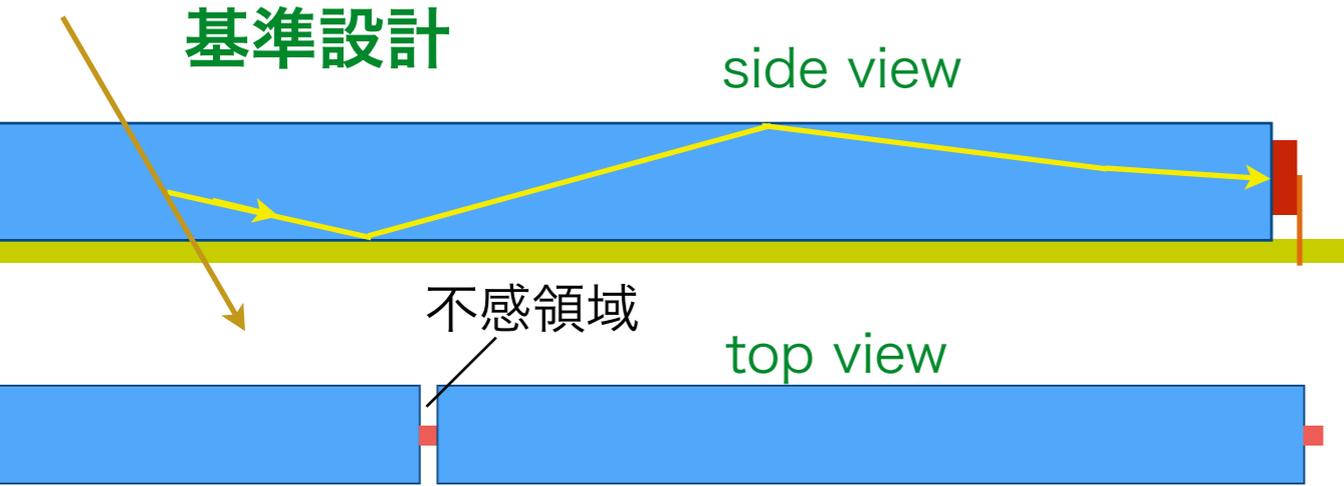
ScECALではゴーストを見分けることができない

→ ピクセル検出器を併用することで解決



# シンチレーション検出器

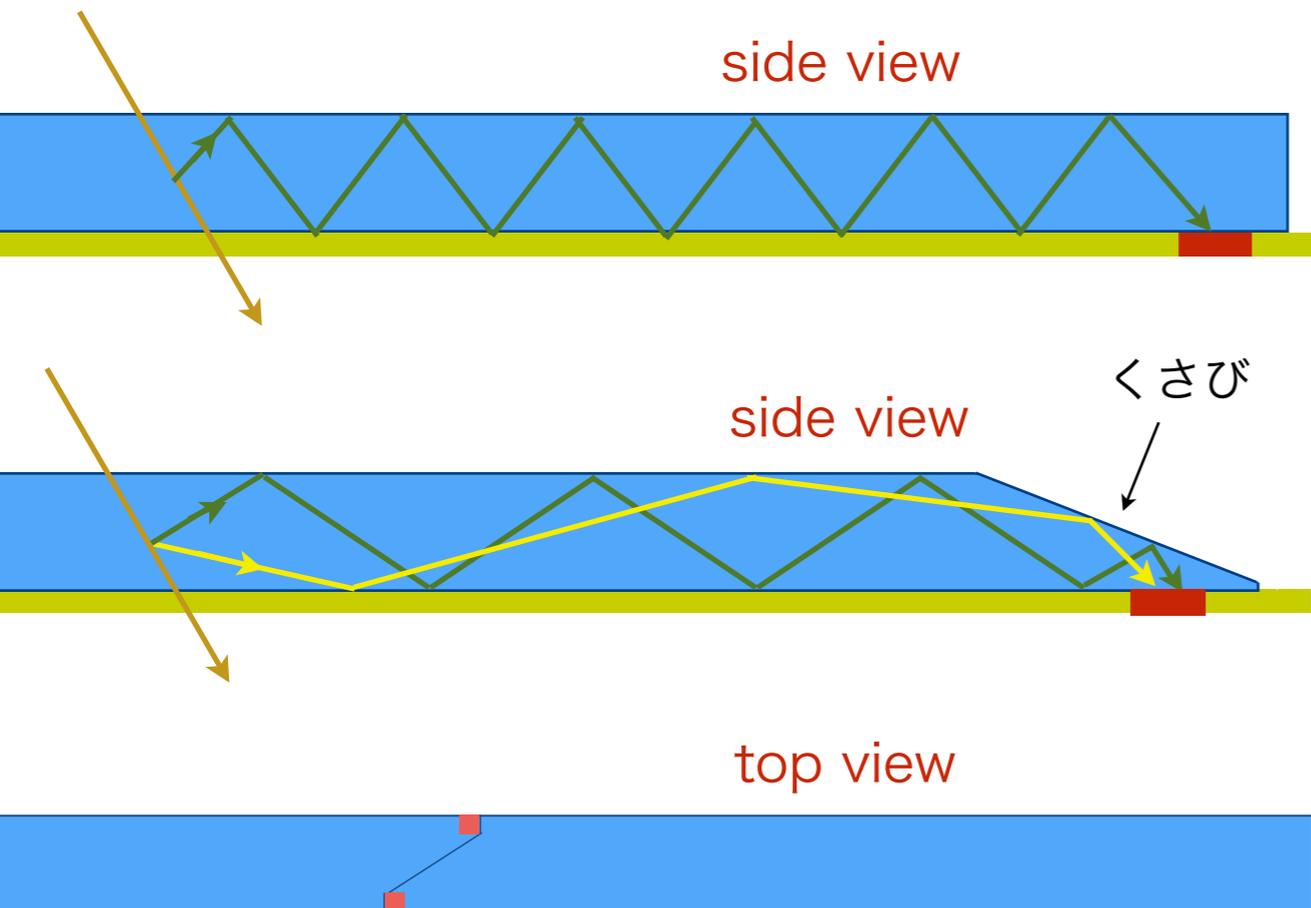
## 基準設計



粒子のエネルギー損失を光に変換し、検出する

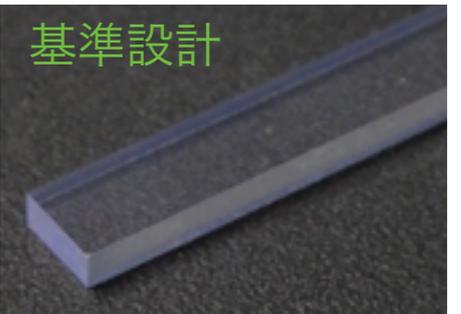
1. 粒子が入射
2. シンチレーターと相互作用してエネルギーを損失
3. シンチレーション光を発生
4. 光はシンチレーターを伝播
5. 光検出器(MPPC)で検出

## 下面読み出し



### 検出器のポイント

- ・ エネルギー損失を十分な光電子数として検出できる
- ・ 光電子数が入射粒子の位置に依存しない
- ・ 量産可能な設計である



基準設計



くさび形

新しい読み出し  
デザインを提案

# 概要

---

1. 国際リニアコライダー実験
2. PFA
3. カロリメーター
4. シンチレーション検出器の開発
5. まとめ

## シミュレーション

- ・ 最適な検出器のデザインを調べる

## 測定

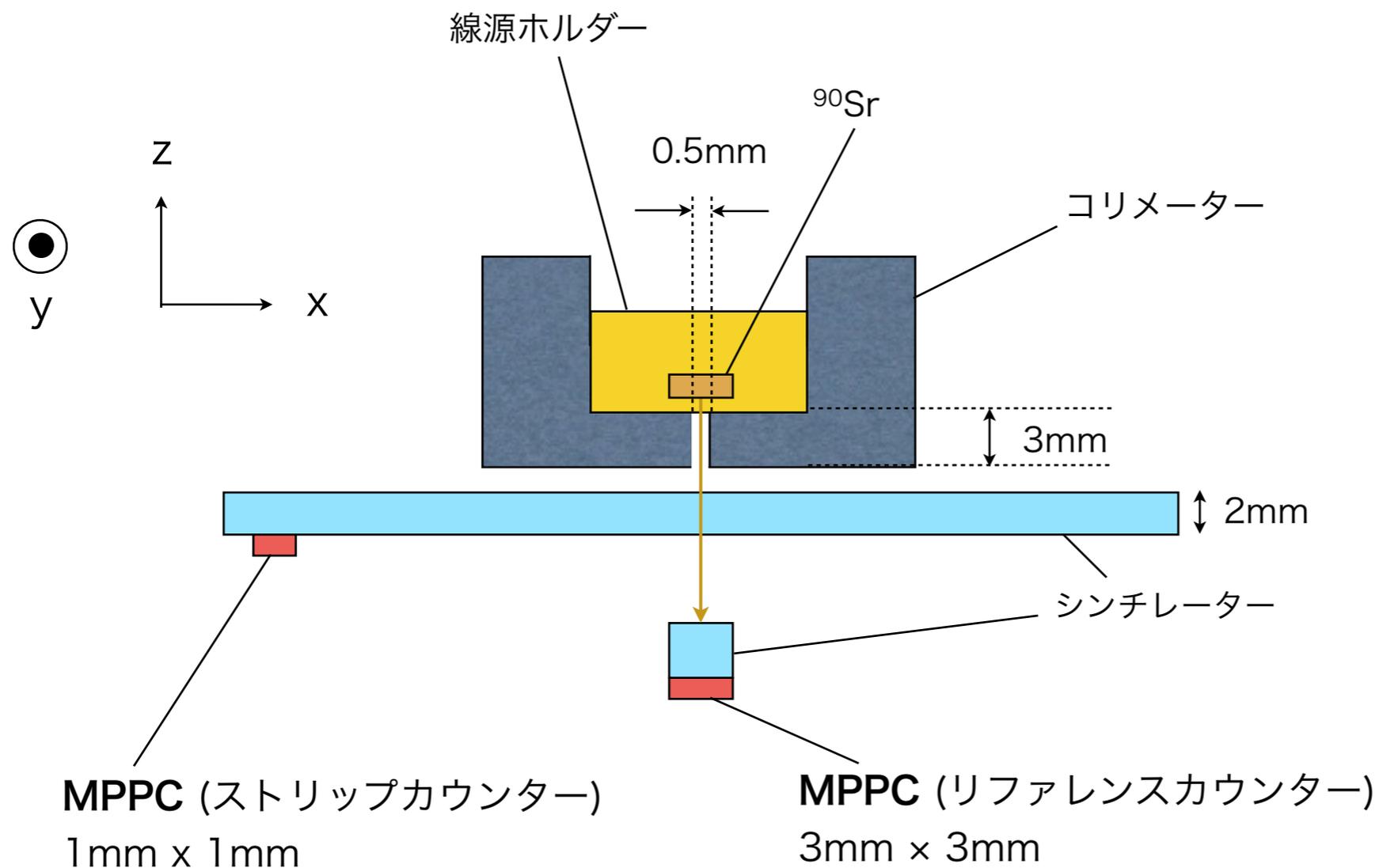
- ・ エネルギー損失を十分な光電子数として検出できる
- ・ 光電子数が入射粒子の位置に依存しない

# シンチレーターの光量と一様性の測定

## セットアップ

シンチレーターストリップに $\beta$ 線源 $^{90}\text{Sr}$ を照射する。

シンチレーターはxy方向に移動可。



Baseline

Simple wedge

Double tapered

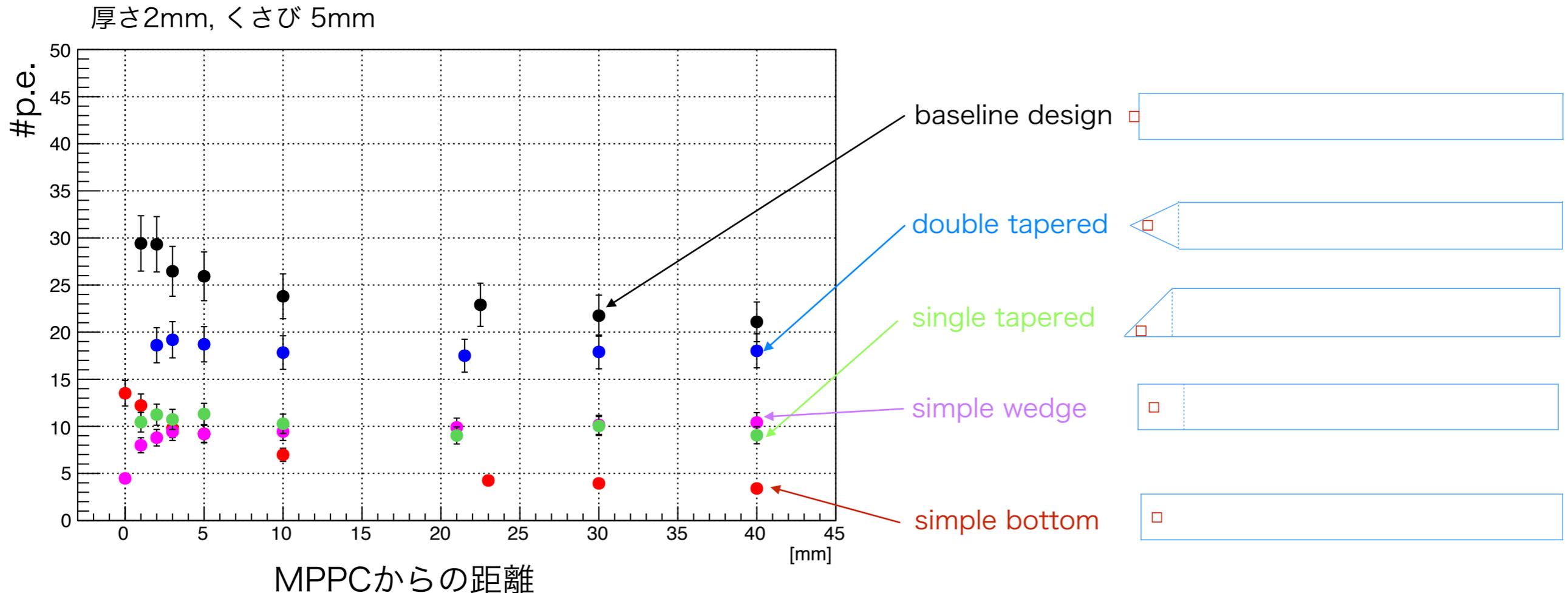
Single tapered

# シンチレーターの光量と一様性の測定

## 測定結果

- ・ 光電子数の位置依存性 → くさび形によって改善
- ・ 光電子数 → 目標の10個を達成

- ・ 光電子数の相対的な値はシミュレーションの傾向を再現
- ・ くさび形の位置依存性が悪い部分はMPPCから5mmの位置までの狭い領域に納まっている



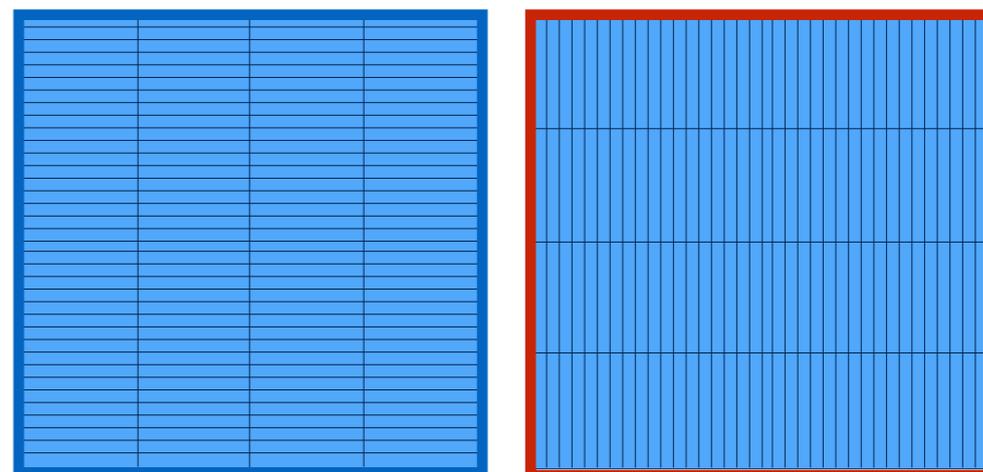
# カロリメーターのプロトタイプ製作

## 読み出し基板 ECAL Base Unit (EBU)

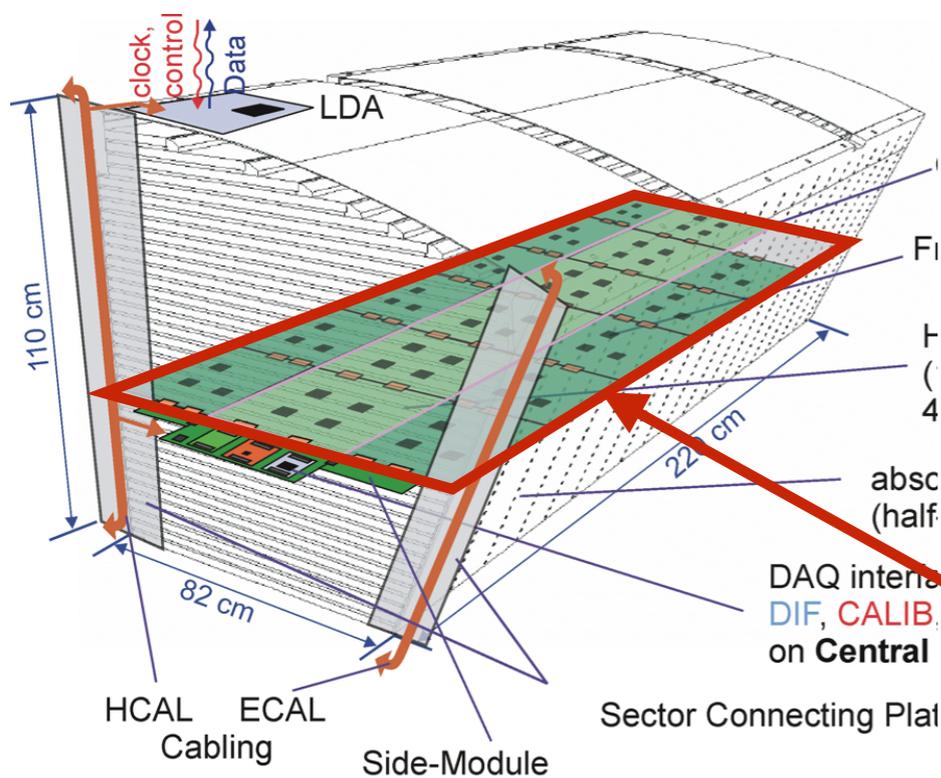
- SPIROC : 36チャンネルを制御、4個内蔵
- LED : 増幅率の較正に使用
- 温度計 : 6個内蔵

transverse EBU

horizontal EBU

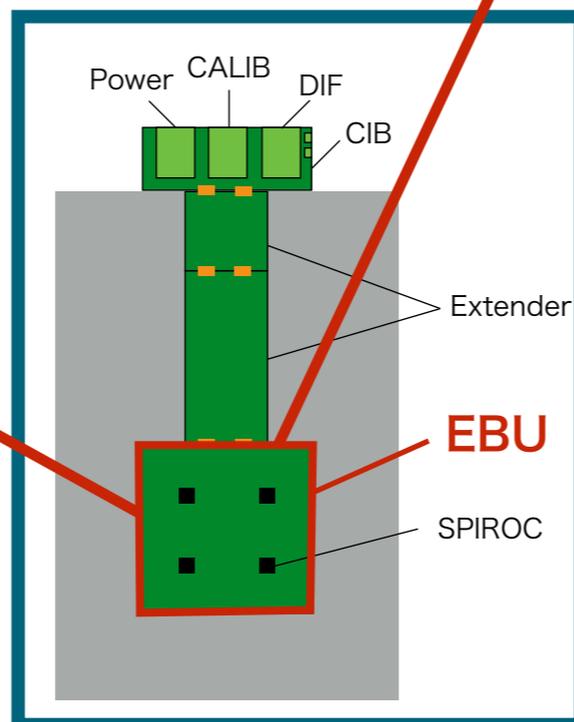


EBUの背面にシンチレーターを配列  
EBU1枚につきシンチレーター144本



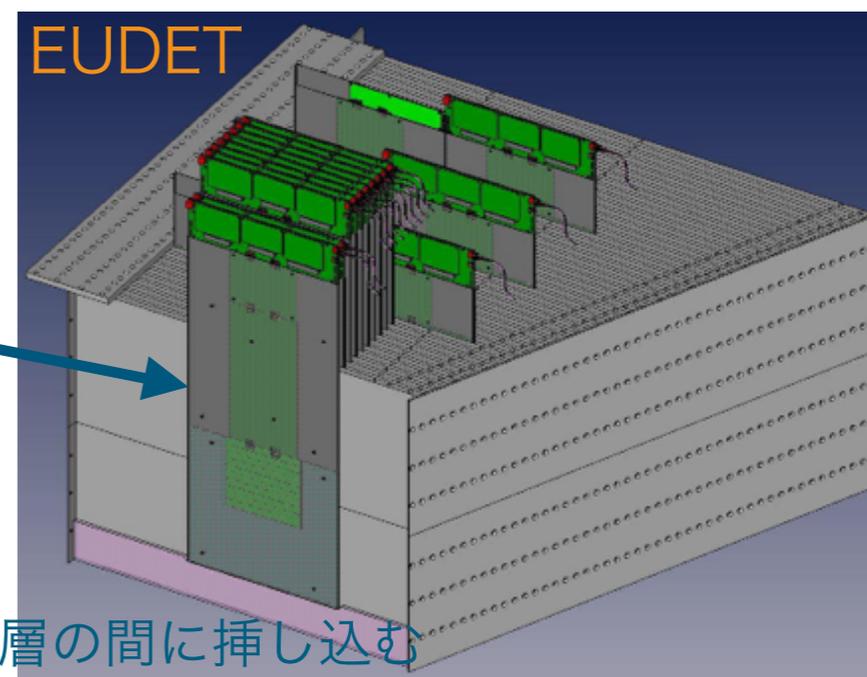
将来的にはEBUを複数連ねて1層を構成

## 検出層



## カロリメーターのプロトタイプ

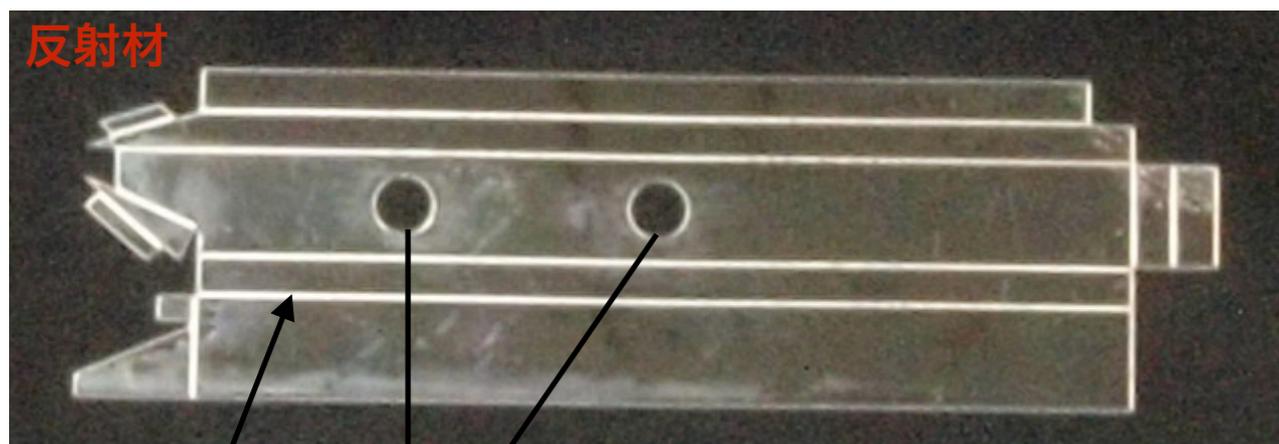
### EUDET



吸収層の間に挿し込む

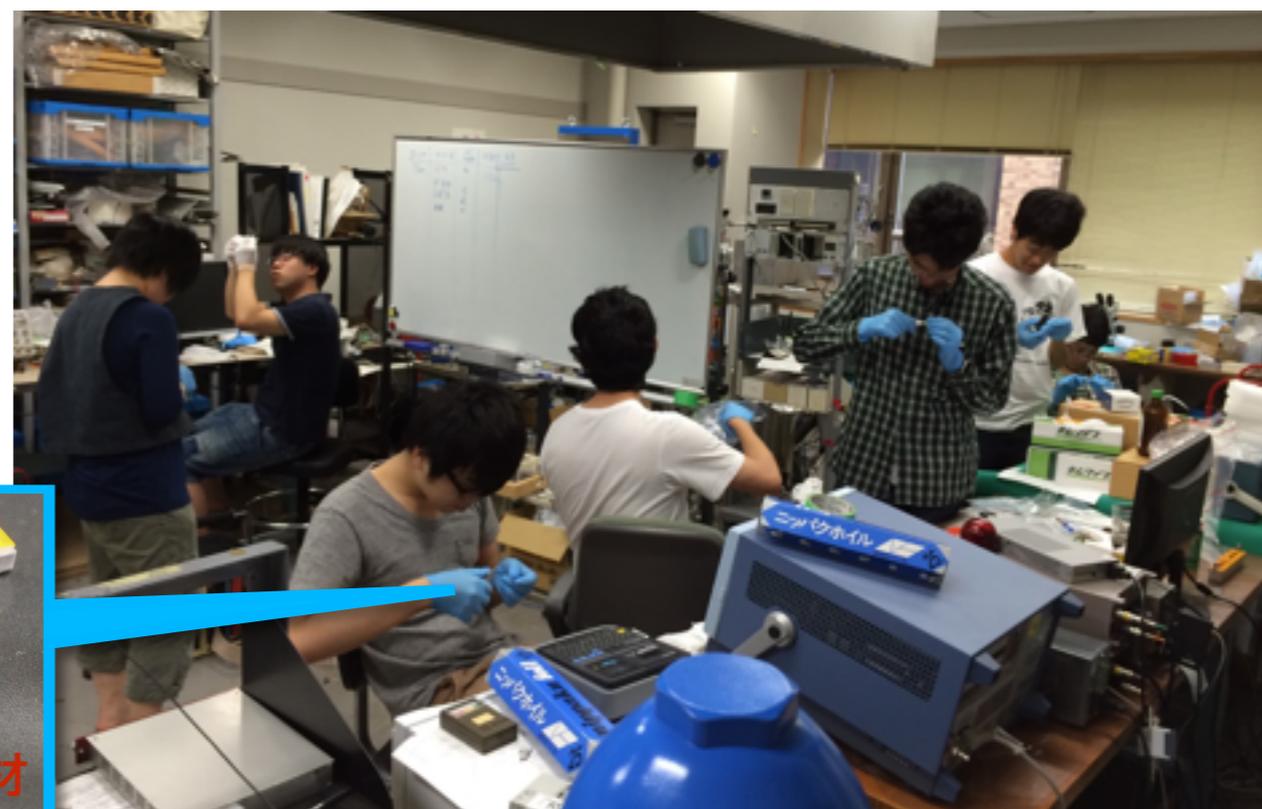
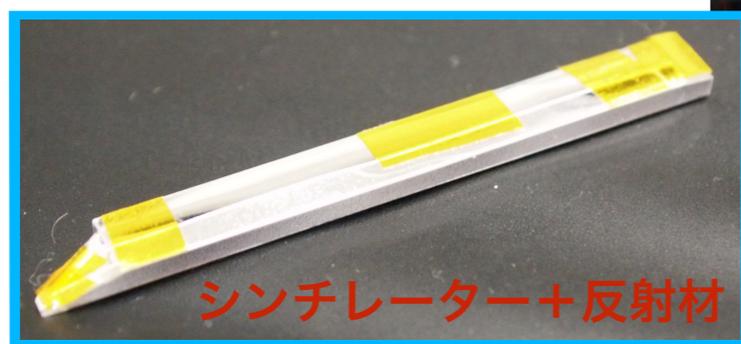
(DESYのスライドより引用)

# 下面読み出し型プロトタイプの製作

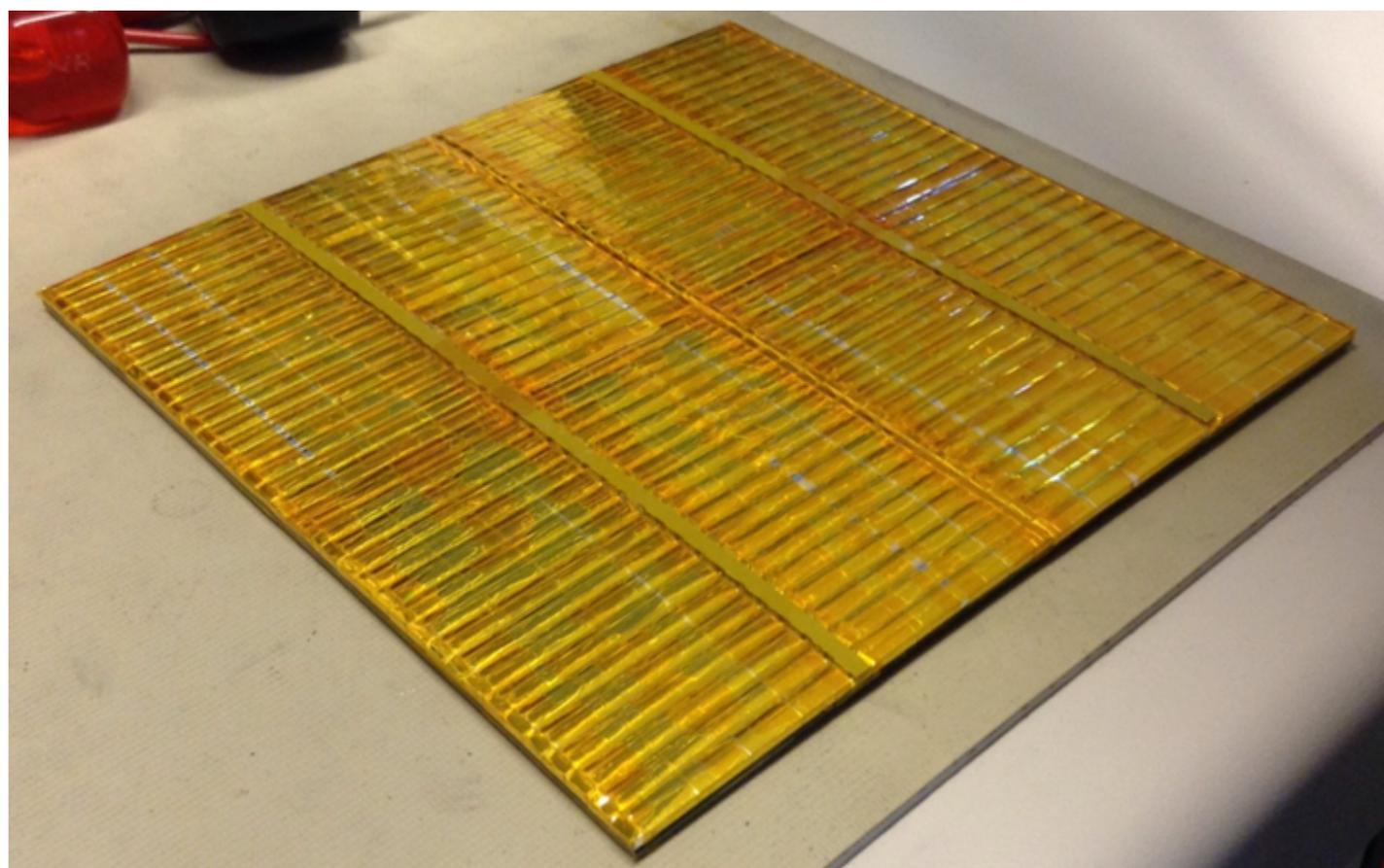


折り目

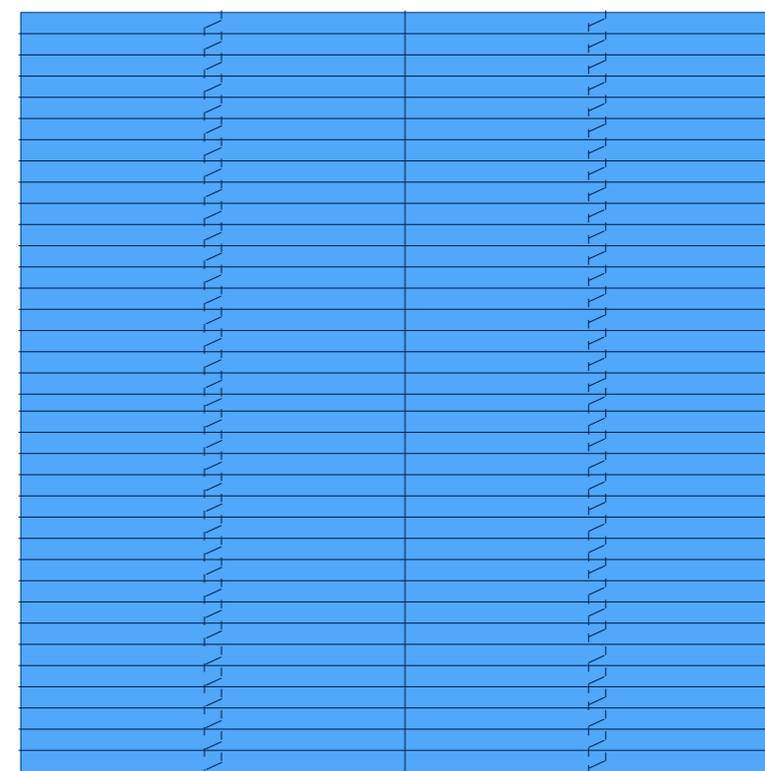
LED用の穴



完成した検出器



18 x 18 cm<sup>2</sup>, 144チャンネル

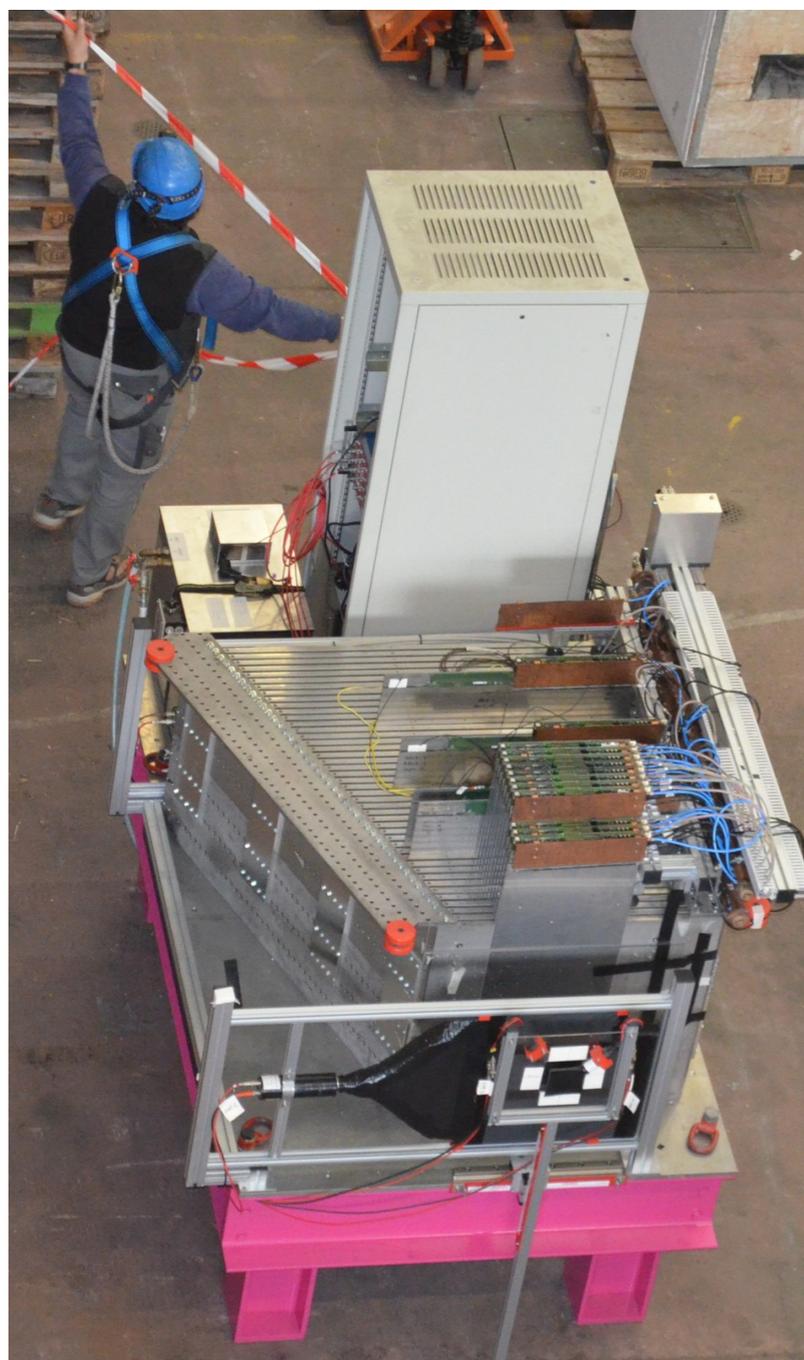


# プロトタイプของBeam测试

期间 : 10/8~22, 11/26~12/8 (2014)

场所 : CERN PS, EAST Area, Beam Line T9

Beam : ~10GeV, ミューオン, パイオン, 電子



1-3層(EBU) 18 x 18 cm<sup>2</sup>

1層 : 下面読み出し, transverse

2層 : 基準設計, horizontal

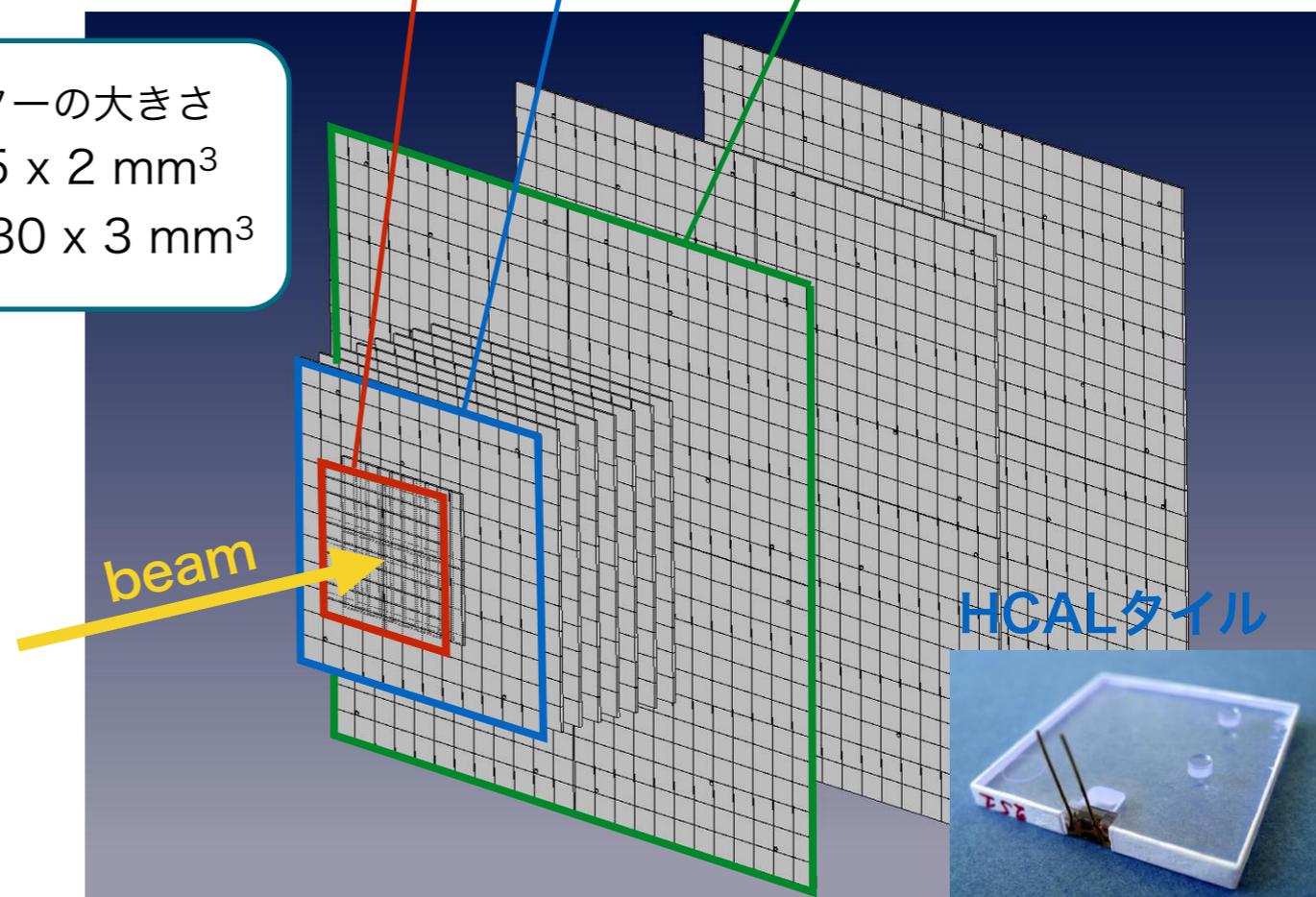
3層 : 基準設計, transverse (2013年製作)

4-11層(HBU) 36 x 36 cm<sup>2</sup>

12-15層(HBU x4) 72 x 72 cm<sup>2</sup>

層構造

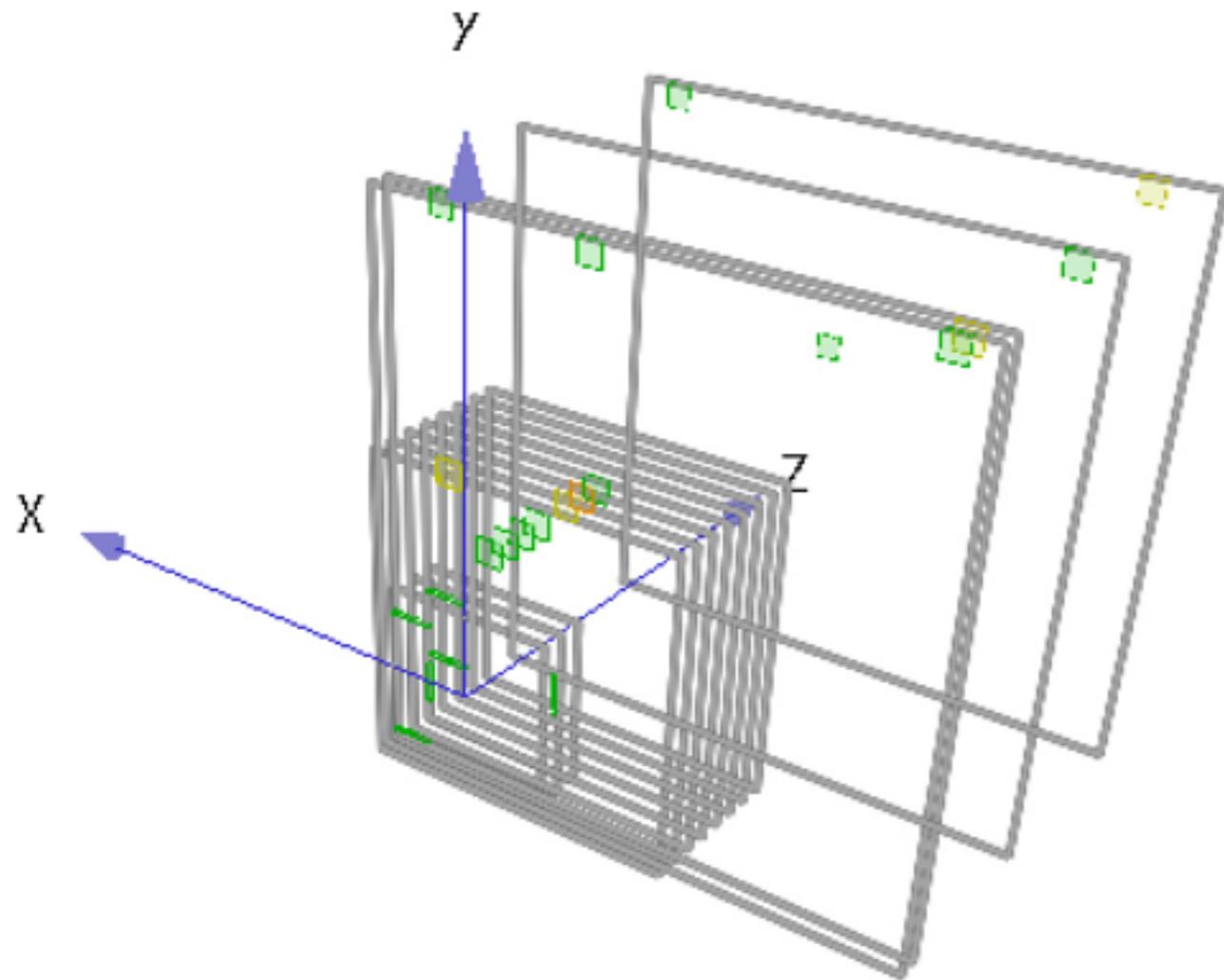
シンチレーターの大きさ  
EBU : 45 x 5 x 2 mm<sup>3</sup>  
HBU : 30 x 30 x 3 mm<sup>3</sup>



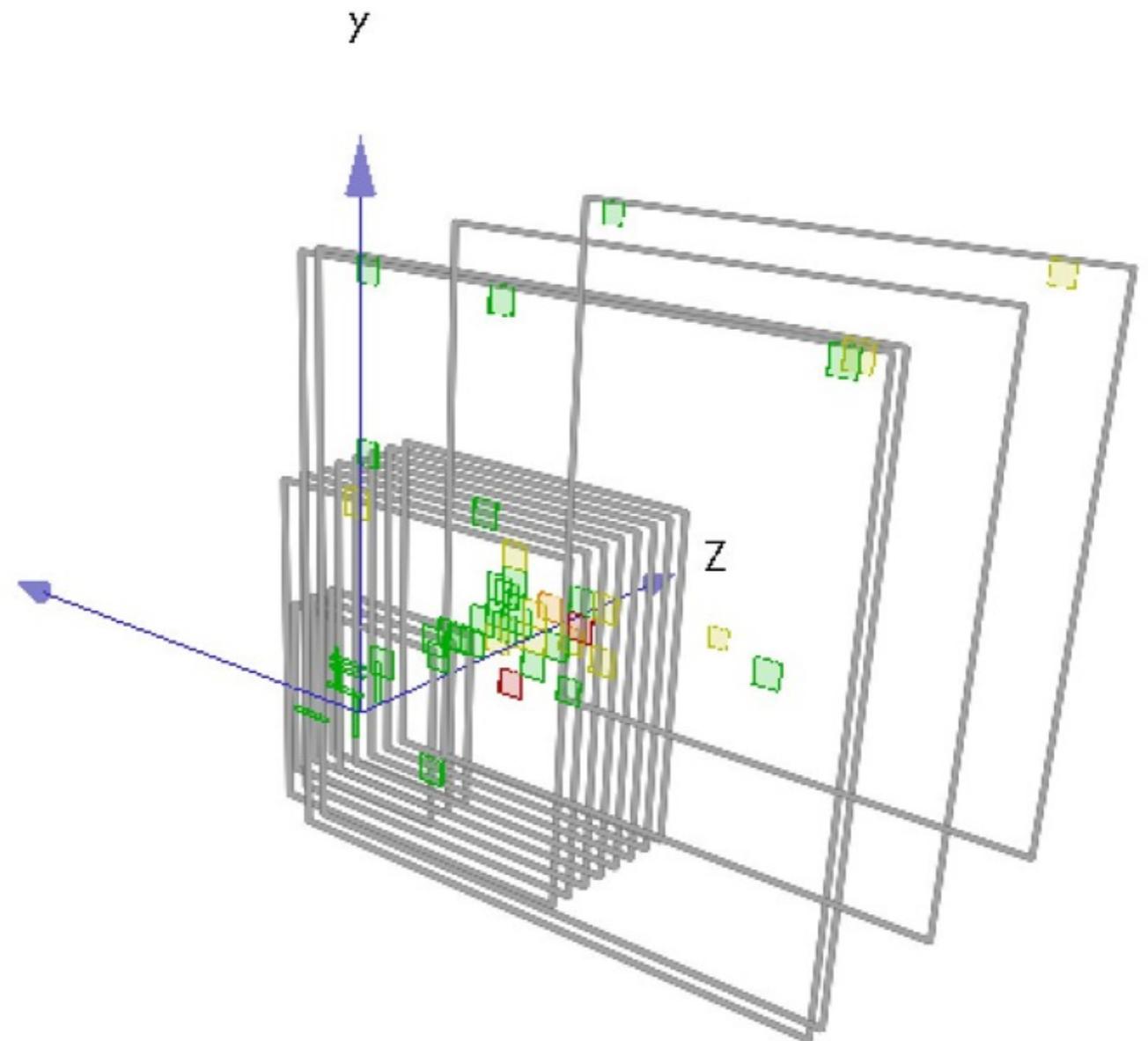
# イベントディスプレイ

ミューオンとパイオンのイベントディスプレイ。  
ヒットの分布の違いが見えている。

ミューオン

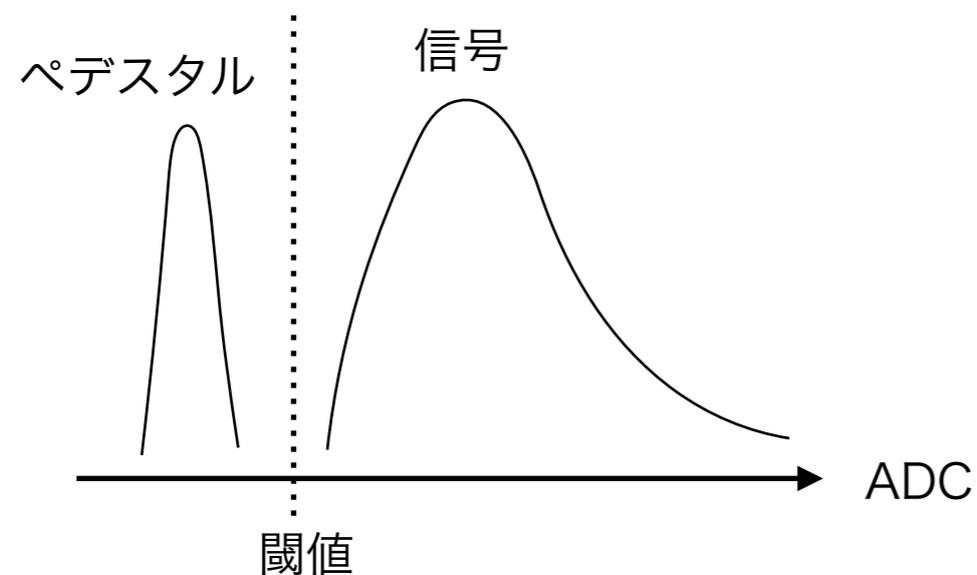


パイオン

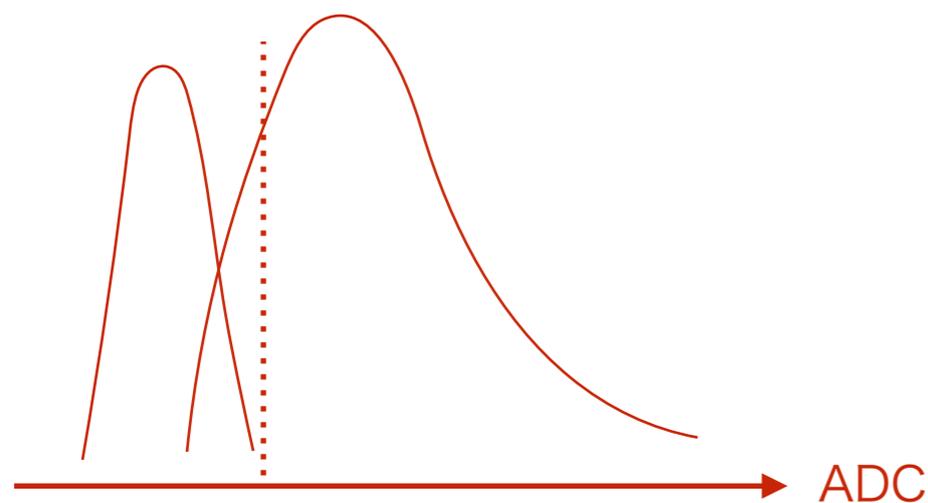


# プロトタイプの動作

本来、意図した閾値設定

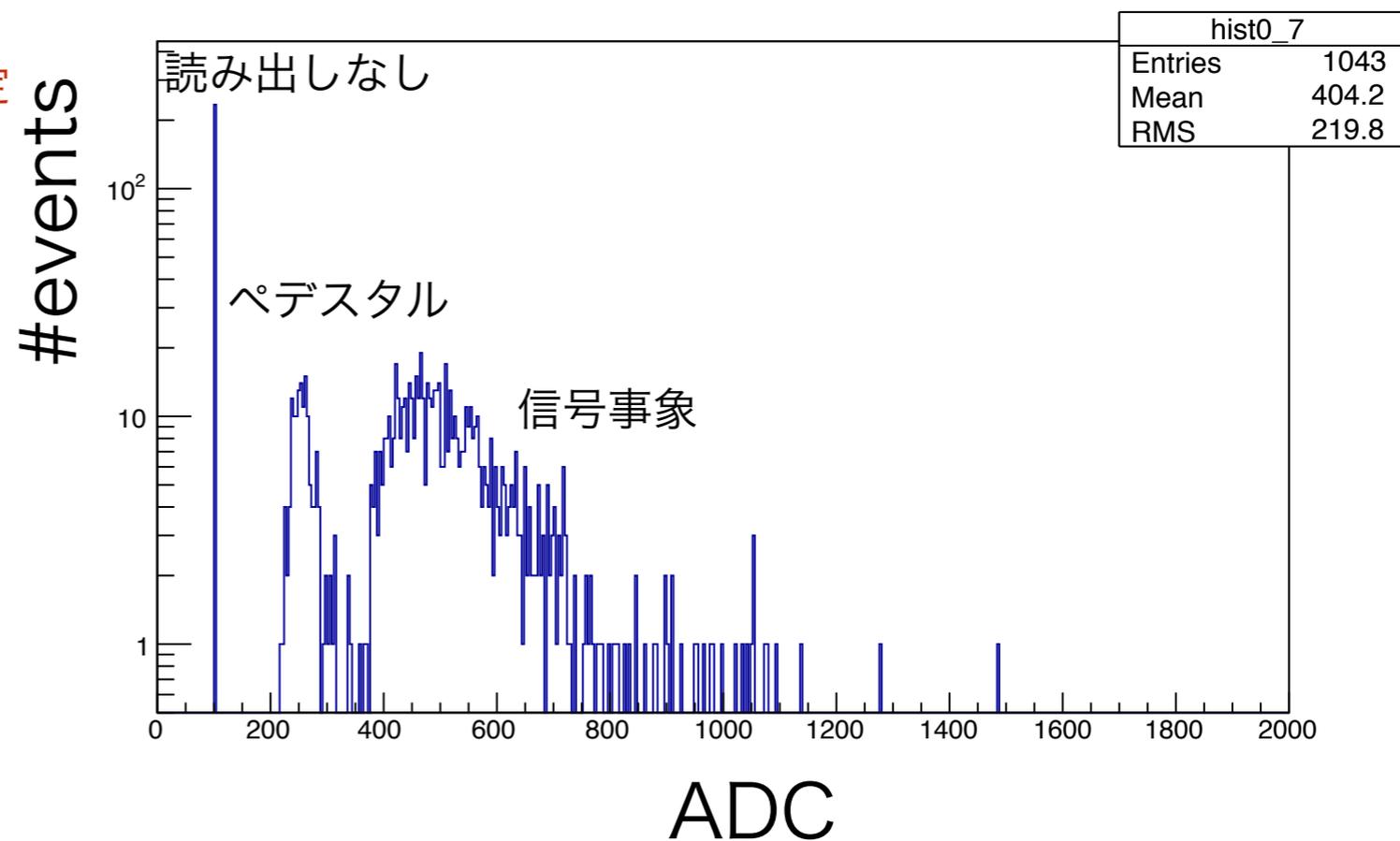


今回はノイズが多かったため、高い閾値を設定



検出器の動作は正常であることを確認

ミュオンビームのときの1chのADC分布



# まとめ

---

- ・ ILC実験では、高いジェットエネルギー分解能で精度の高い測定を行う。

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{0.3}{\sqrt{E(\text{GeV})}}$$

これを達成するためにはPFAとカロリメーターを細分化が必要！

- ・ ILDのシンチレーション電磁カロリメーターの最適なデザイン決定に向けて色々なデザインを検証した。
  1. シンチレーション検出器の構成による光電子数の違いを予測するシミュレーションを構築
  2. くさび形のシンチレーターによって
    - ・ 光電子数10光子を達成
    - ・ 光電子数の位置依存性を改善
- ・ シンチレーション電磁カロリメーターのプロトタイプを製作した。(144チャンネル)
  1. 反射材の製作とMPPCの実装について、量産性に優れた方法を確認
  2. CERN PSにてプロトタイプのビームテストを行った
  3. シンチレーション検出器が正常に動作していることを確認
  4. ビームテストの結果は解析中

backup

# シンチレーション光の伝播のシミュレーション

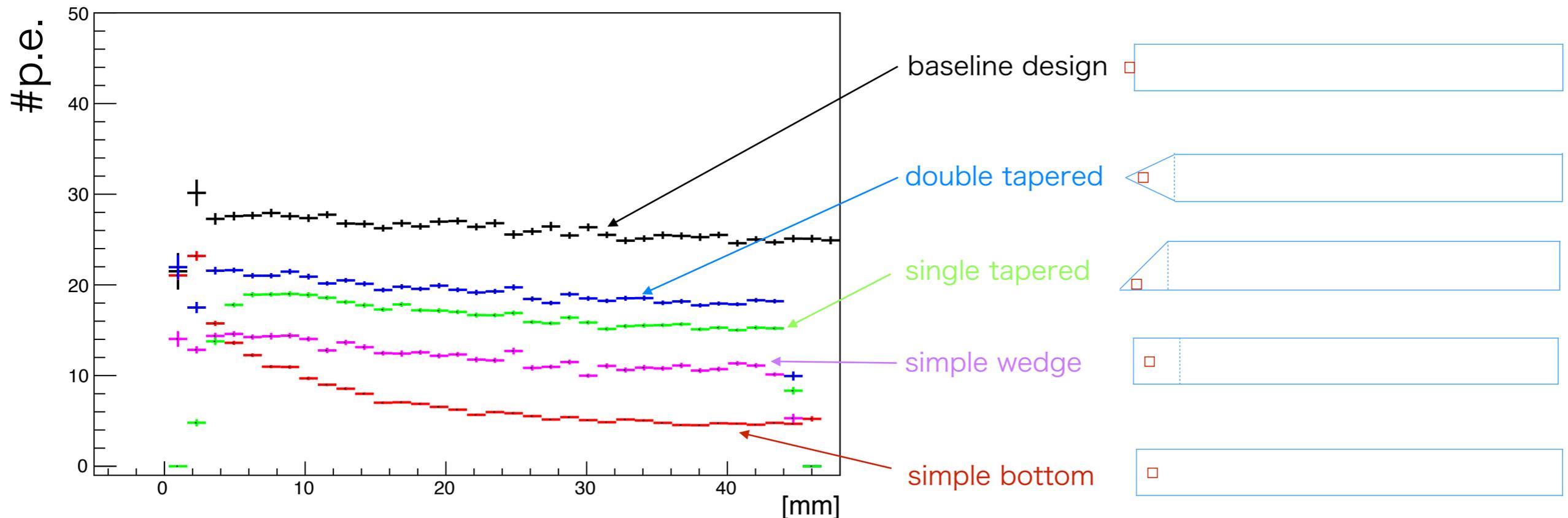
## シミュレーション結果

- ・ 下面読み出しにすると光電子数が減少
- ・ くさびにすることによって光電子数が回復、位置依存性が改善

反射のパラメーターは最適化の余地あり

- ・ 波長依存性
- ・ シンチレーターの表面状態

くさび5mm, 厚さ 2mm



MPPCからの距離

# シンチレーション光の伝播のシミュレーション

- ・シンチレーターとMPPCの構成によって光電子数を予測することができるシミュレーションを構築
- ・シミュレーションによって最適な構成を決定

## MPPCの位置

- ・MPPCはできるだけシンチレーターの端に寄せた方が光電子数が多い

## くさびの長さ

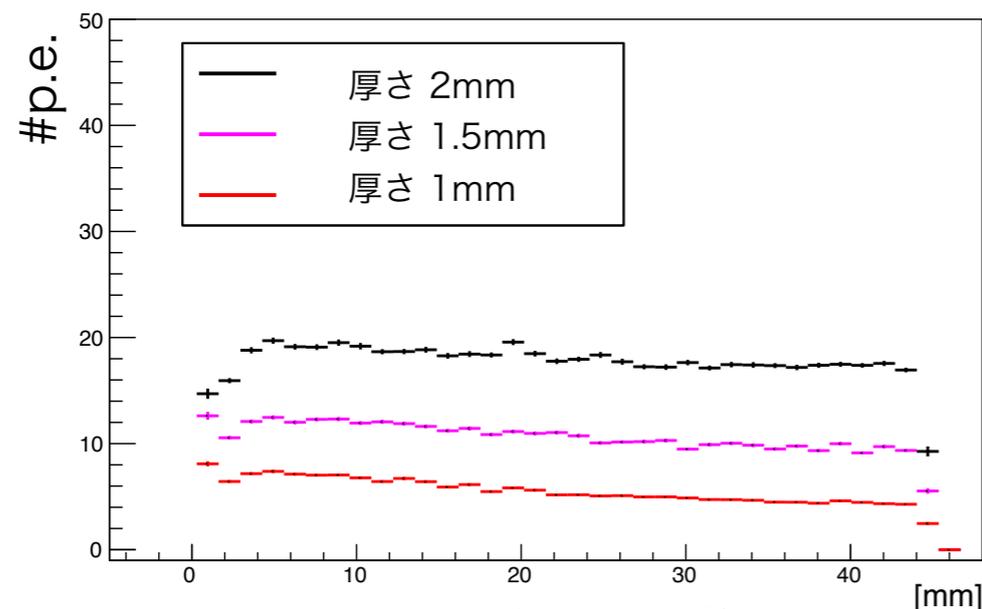
- ・くさびが短い方が光電子数が多い

斜面が急勾配

## シンチレーターの厚さ

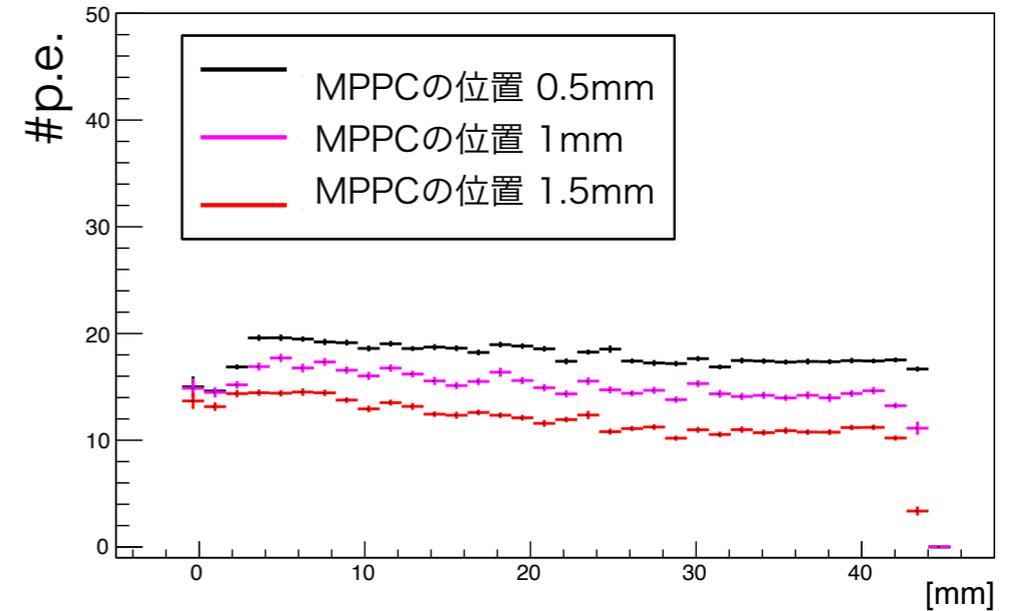
- ・厚さを2mmから1mmにすると光電子数は約3割に減少

シンチレーターの厚さ (Simple wedge, くさび 5mm)



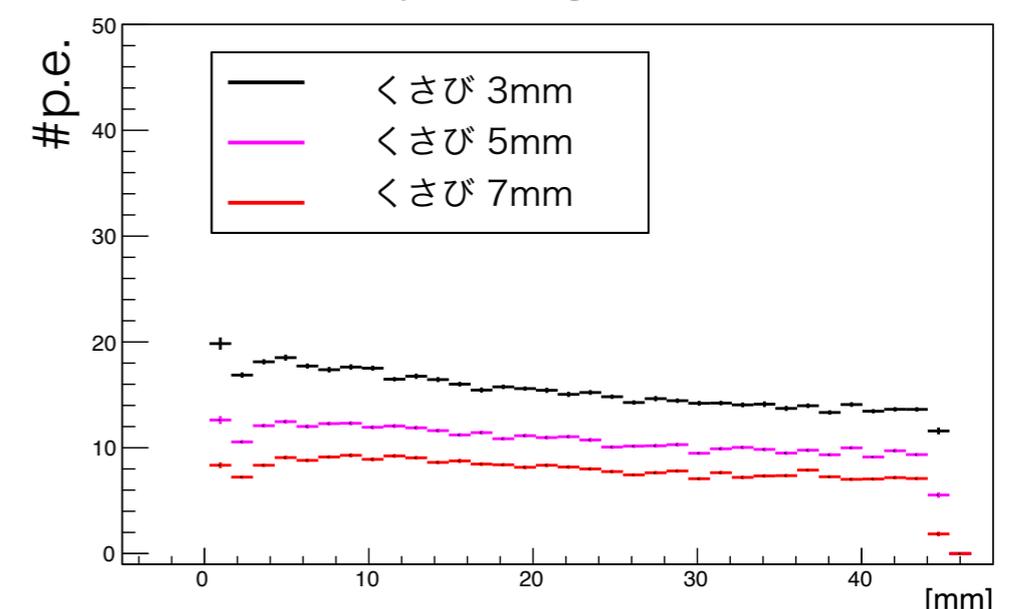
MPPCからの距離

MPPCの位置 (Simple wedge, くさび5mm, 厚さ 2mm)



MPPCからの距離

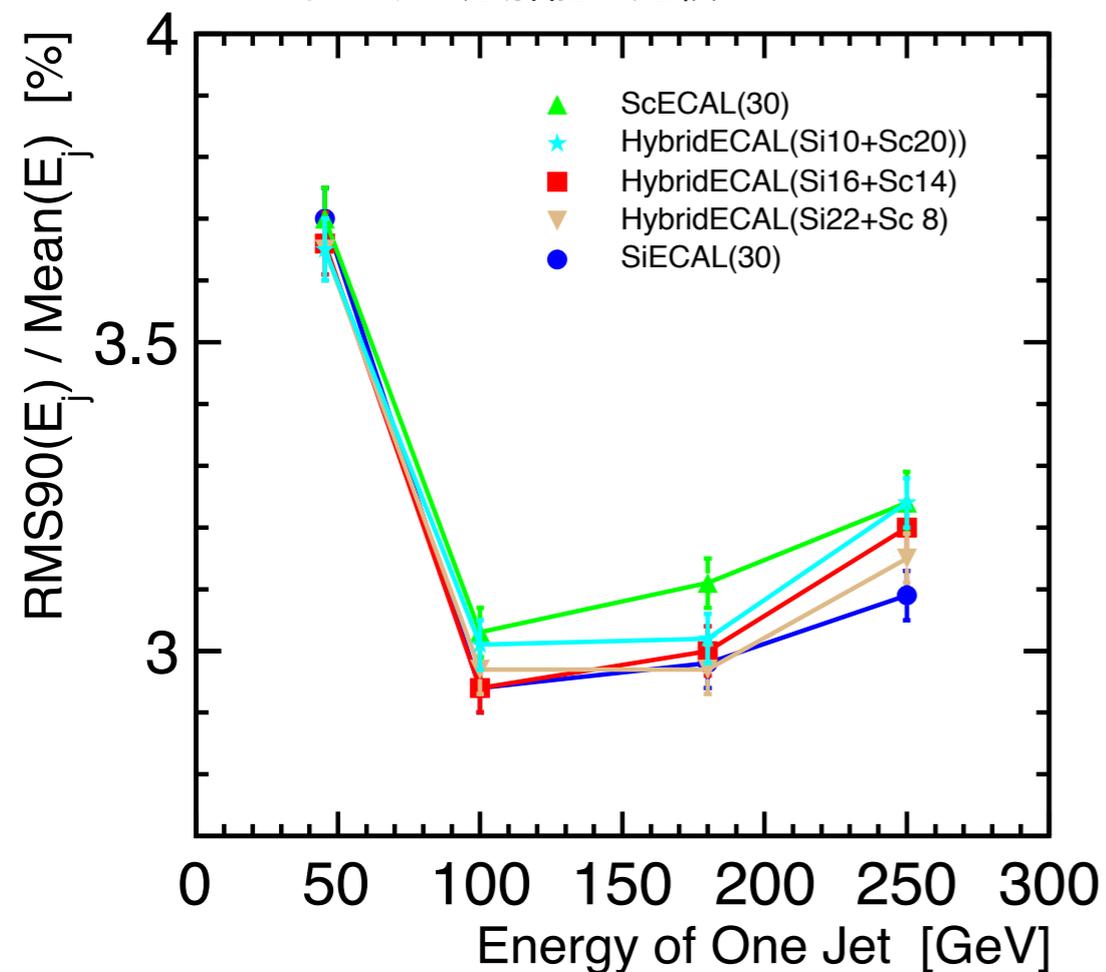
くさびの長さ (Simple wedge, 厚さ 1.5mm)



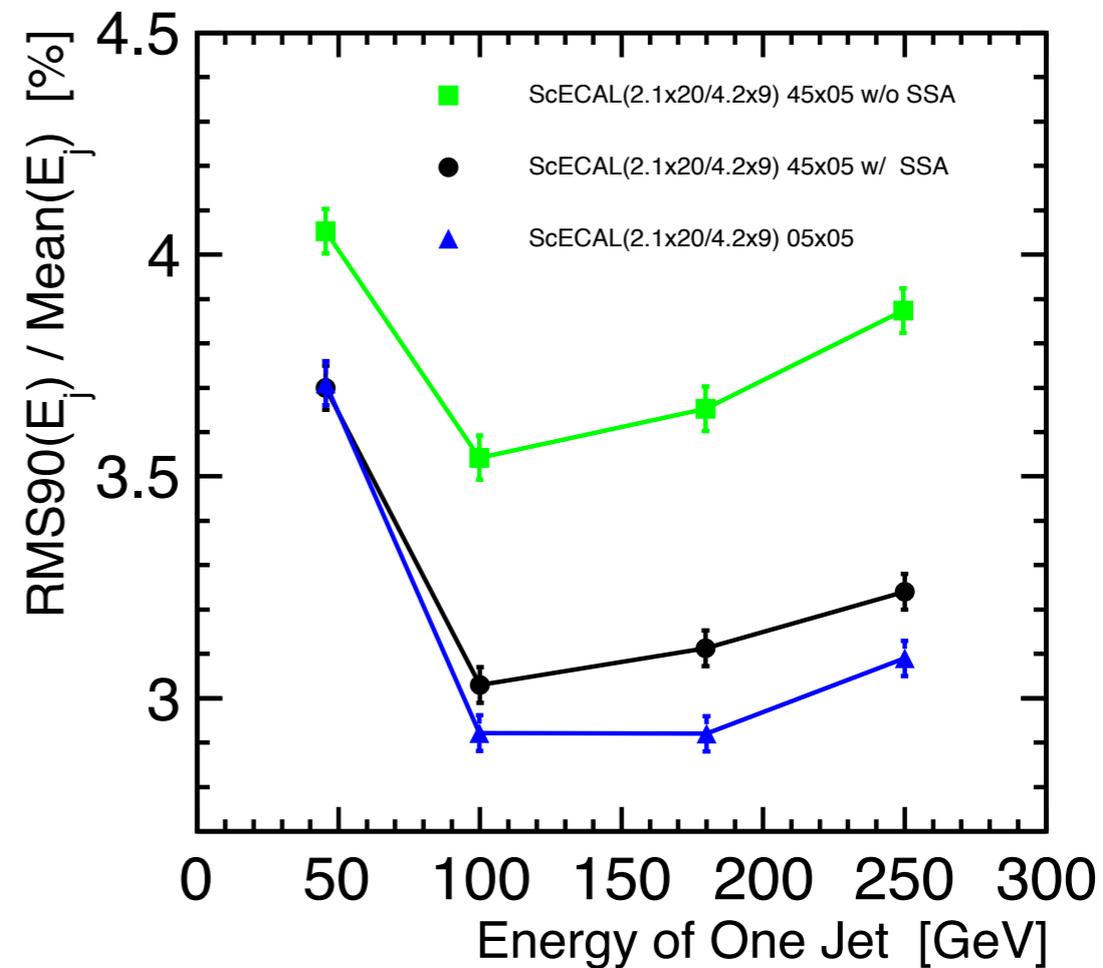
MPPCからの距離

# エネルギー分解能

SiECALのみ、ScECALのみ、ハイブリッド、  
のエネルギー分解能の比較



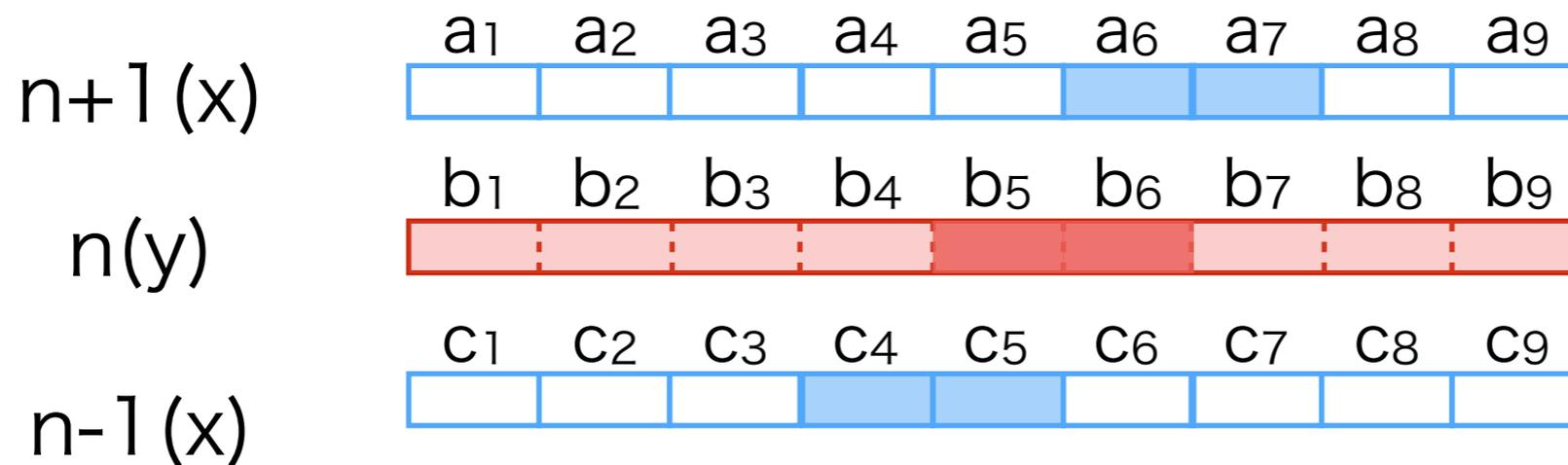
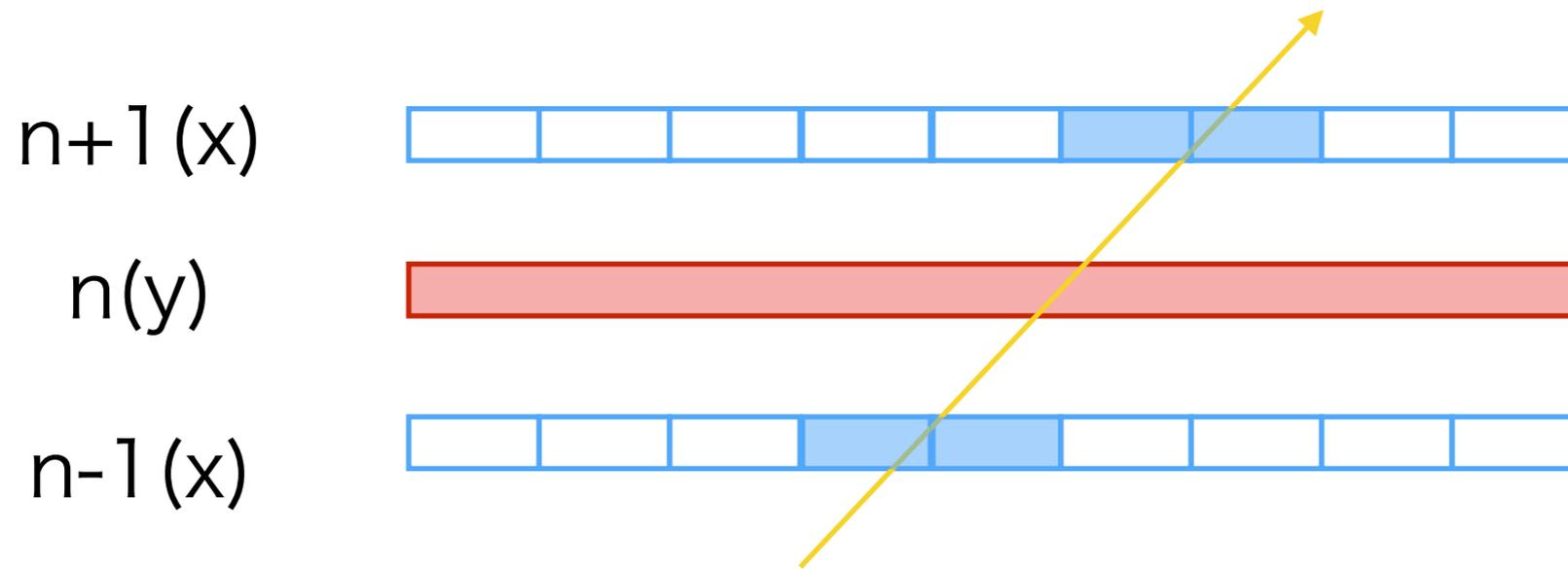
SSAによってエネルギー分解能が向上



(九大上野さんの修論より引用)

# Strip Splitting Algorithm (SSA)

---



# シンチレーション光の伝播のシミュレーション

Geant4を用いたMCシミュレーション

シンチレーター (ELJEN, EJ-204)

発光量 :  $\sim 10^4$  光子/MeV

発光波長 : データシート参照

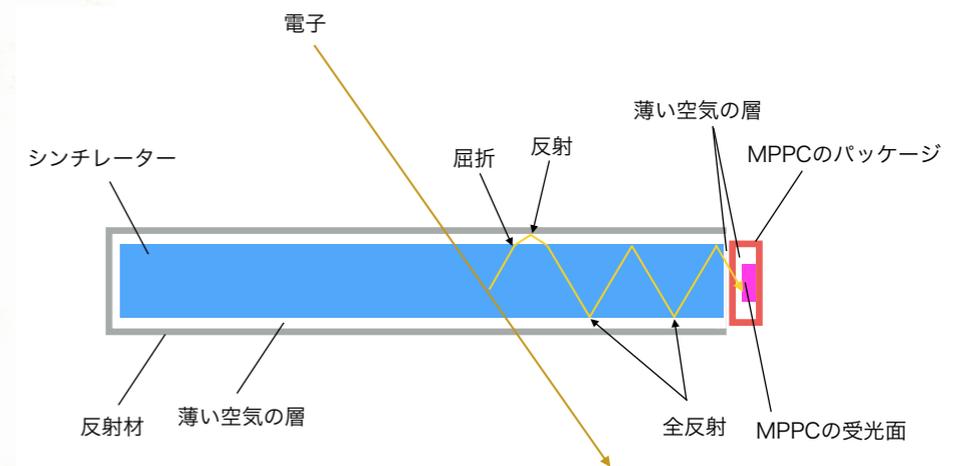
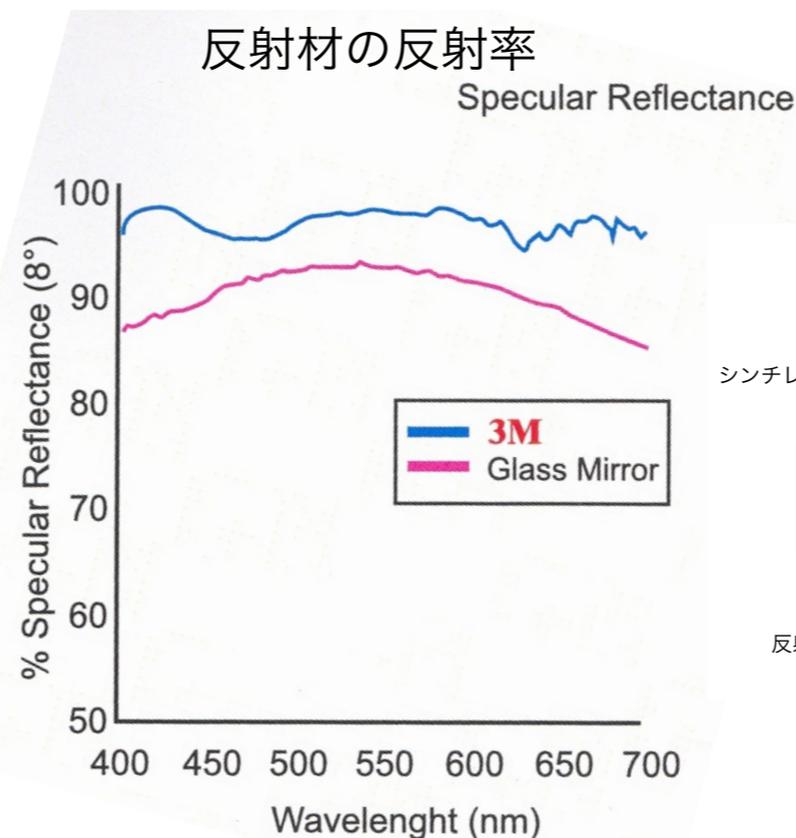
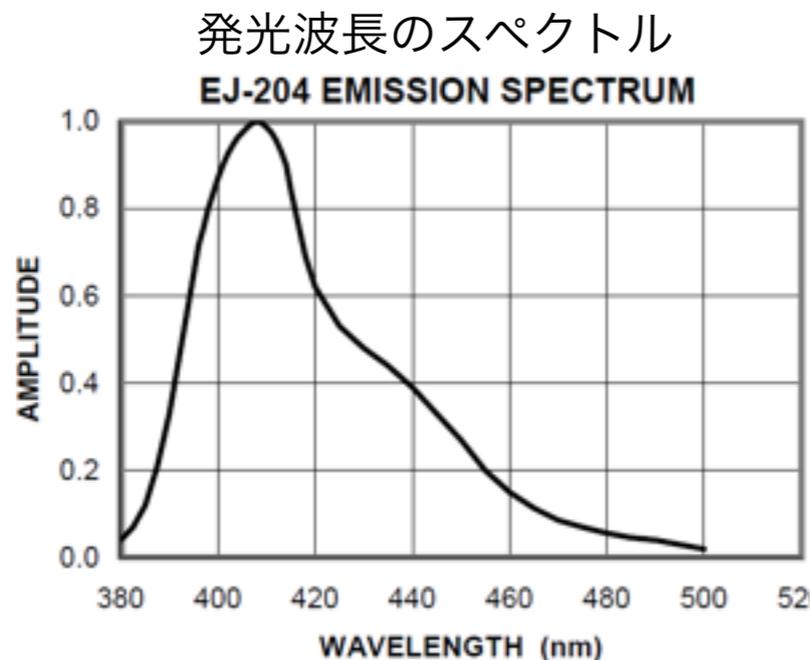
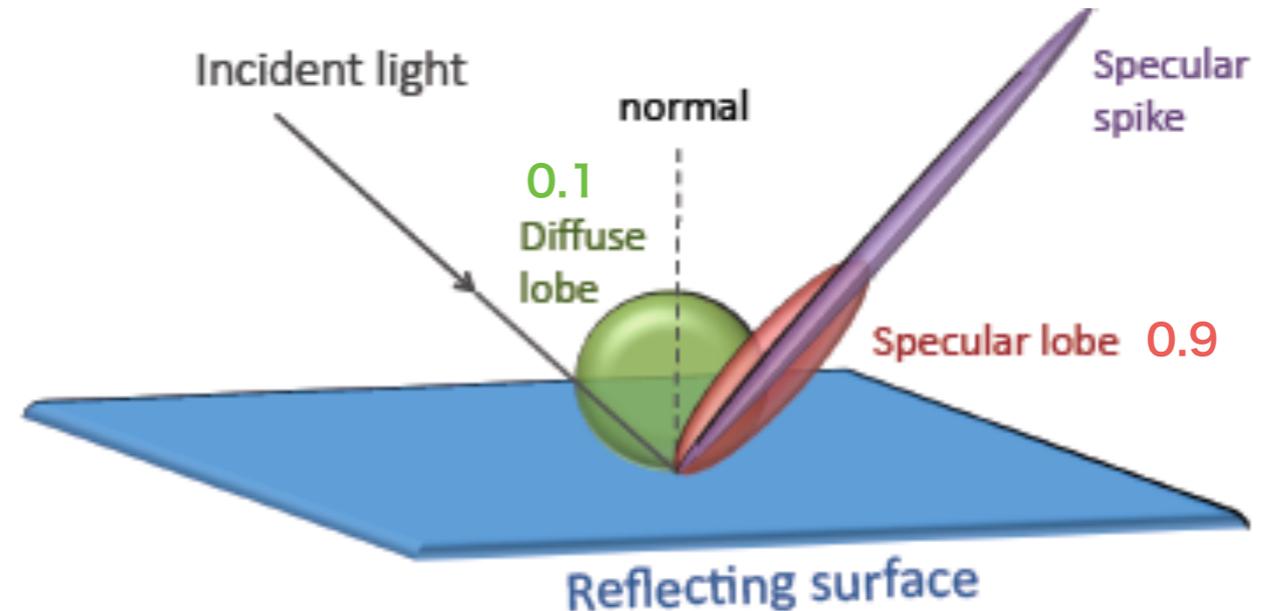
減衰長 : 80 cm

MPPC (浜松, S10362-11-025P)

検出効率 : データシート参照

反射材 (3M, ESR)

反射率 : 0.95 (波長依存性を考慮していない)



(シンチレーターおよび反射材のデータシートより引用)

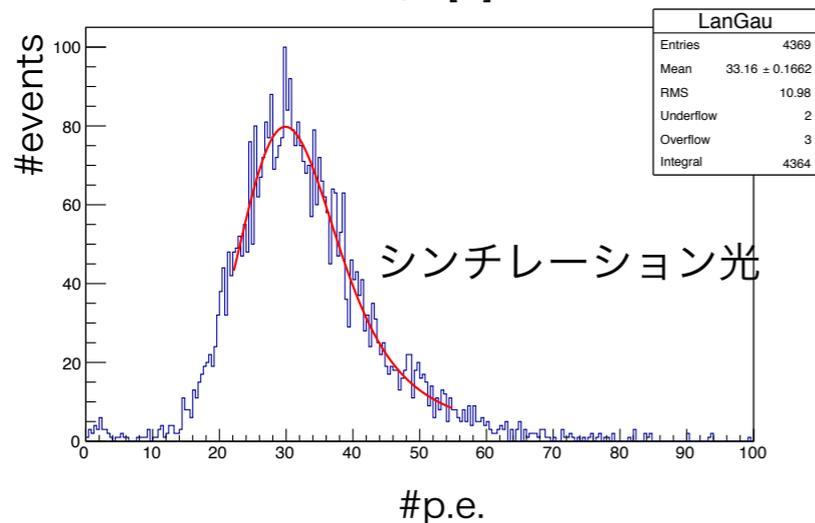
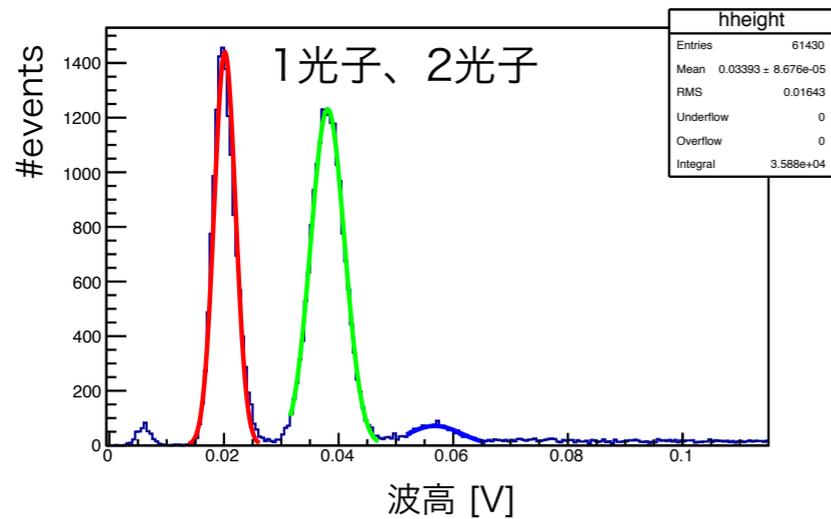
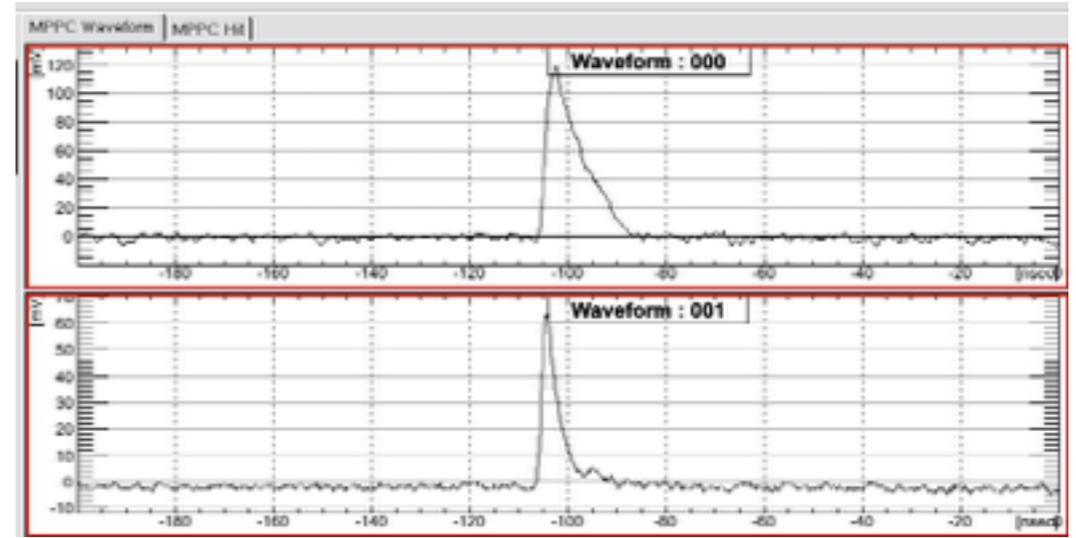
# シンチレーターの光量と一様性の測定

## 論理回路のセットアップ

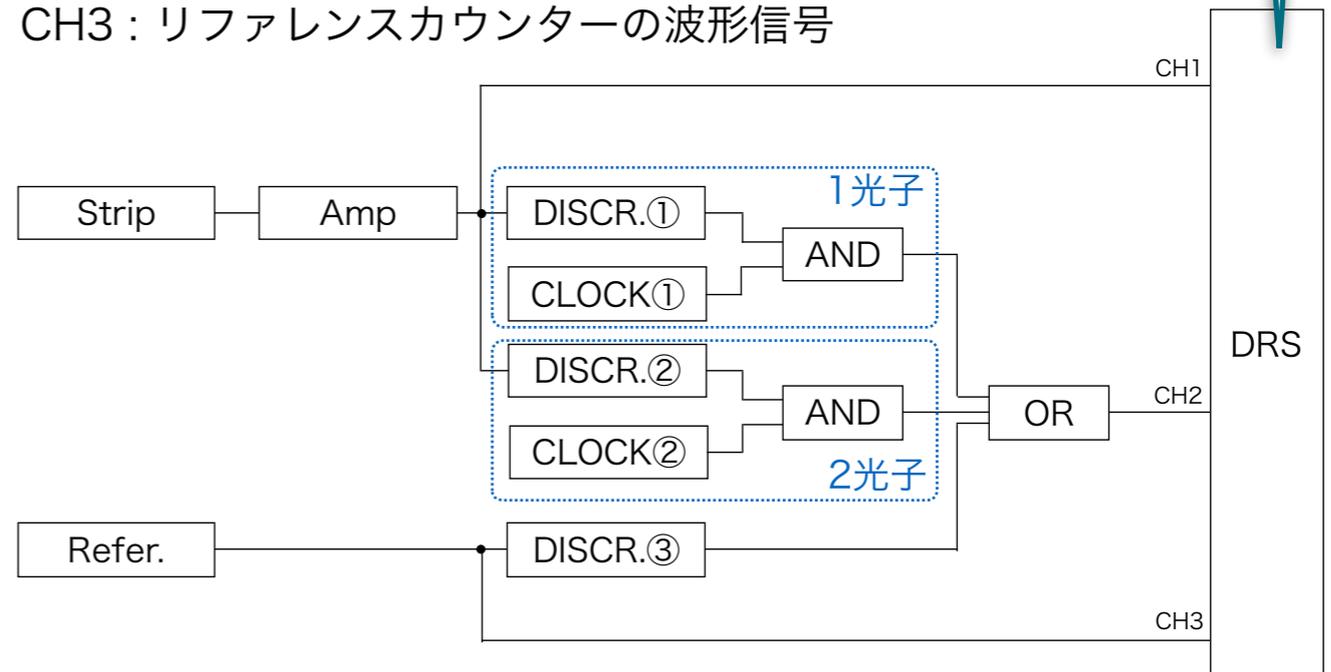
再現性を良くするため、3つの信号でトリガーをかける論理回路を組んだ。

- ・ リファレンスカウンター → シンチレーション光
- ・ 1光子 → 1光子の電荷量を校正
- ・ 2光子

サンプリングスピード 5GHzの  
波形デジタイザー



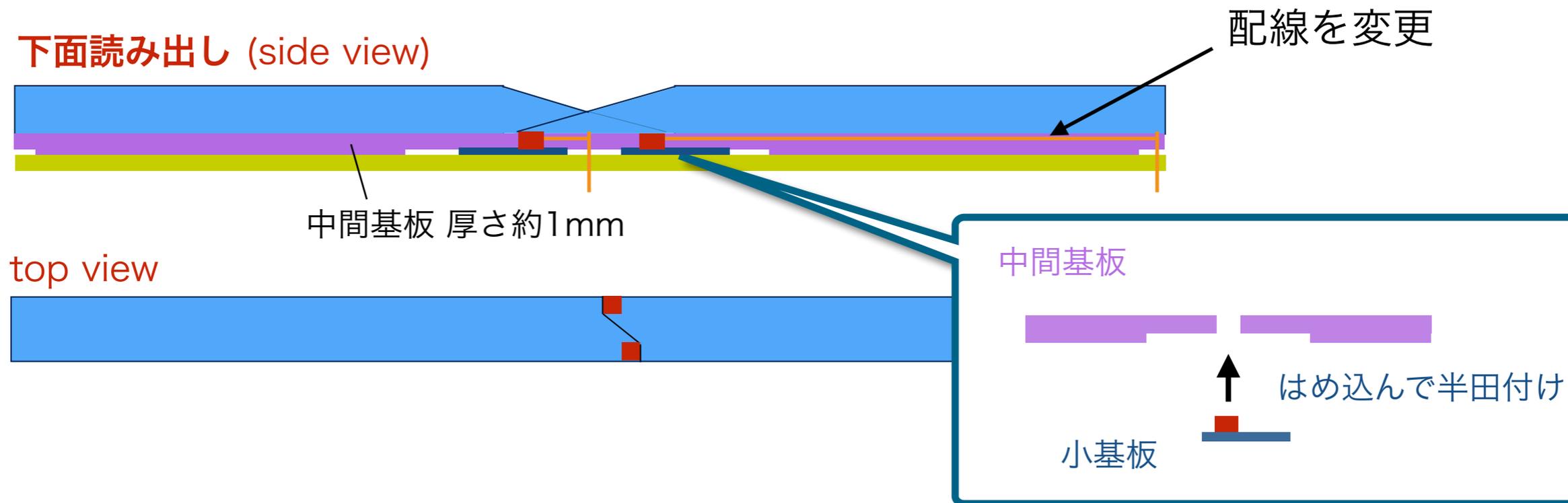
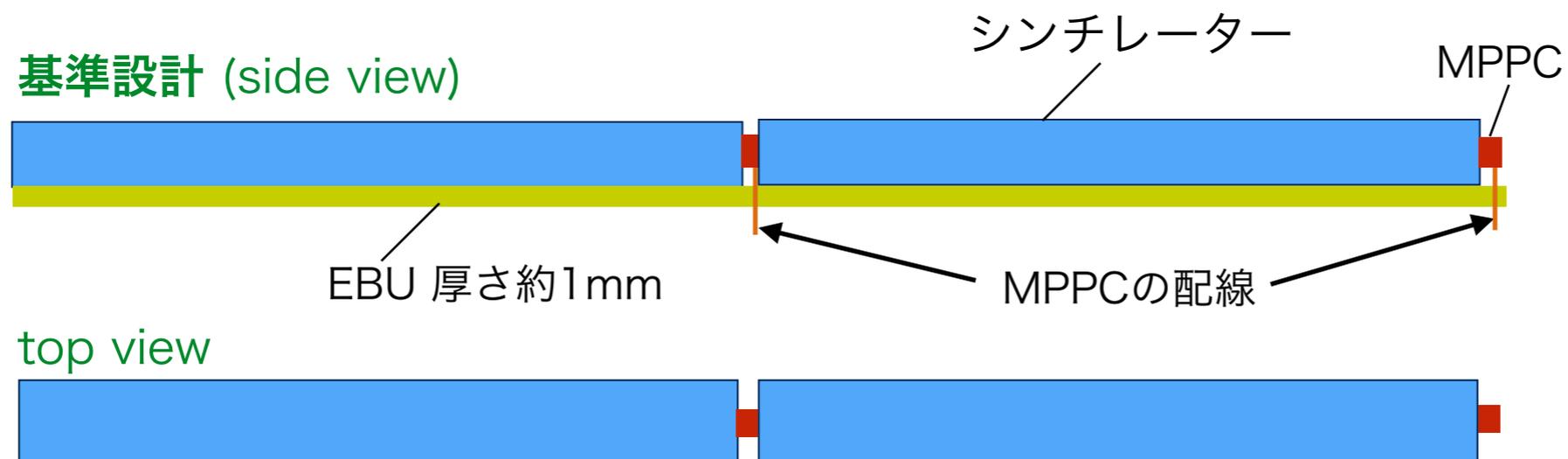
CH1 : ストリップカウンターの波形信号  
CH2 : トリガー信号  
CH3 : リファレンスカウンターの波形信号



# 課題1. 中間基板の製作

MPPCを基板に埋め込んだ基板を製作

→ MPPCの実装方法が量産に向いている (将来的にはMPPCを埋め込んだEBUを製作)



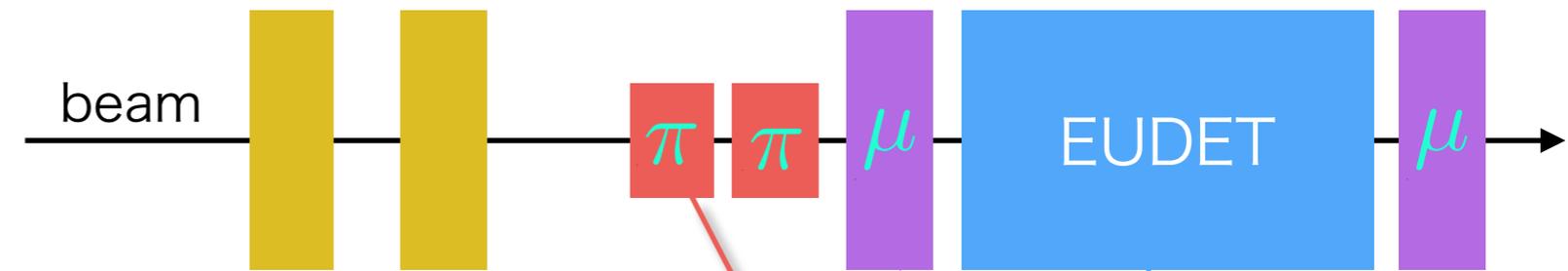
# ビームライン

- チェレンコフガス検出器 x2  
粒子の同定

- シンチレーター(小) x2  
10cm x 10cm  
パイオン、電子用トリガー

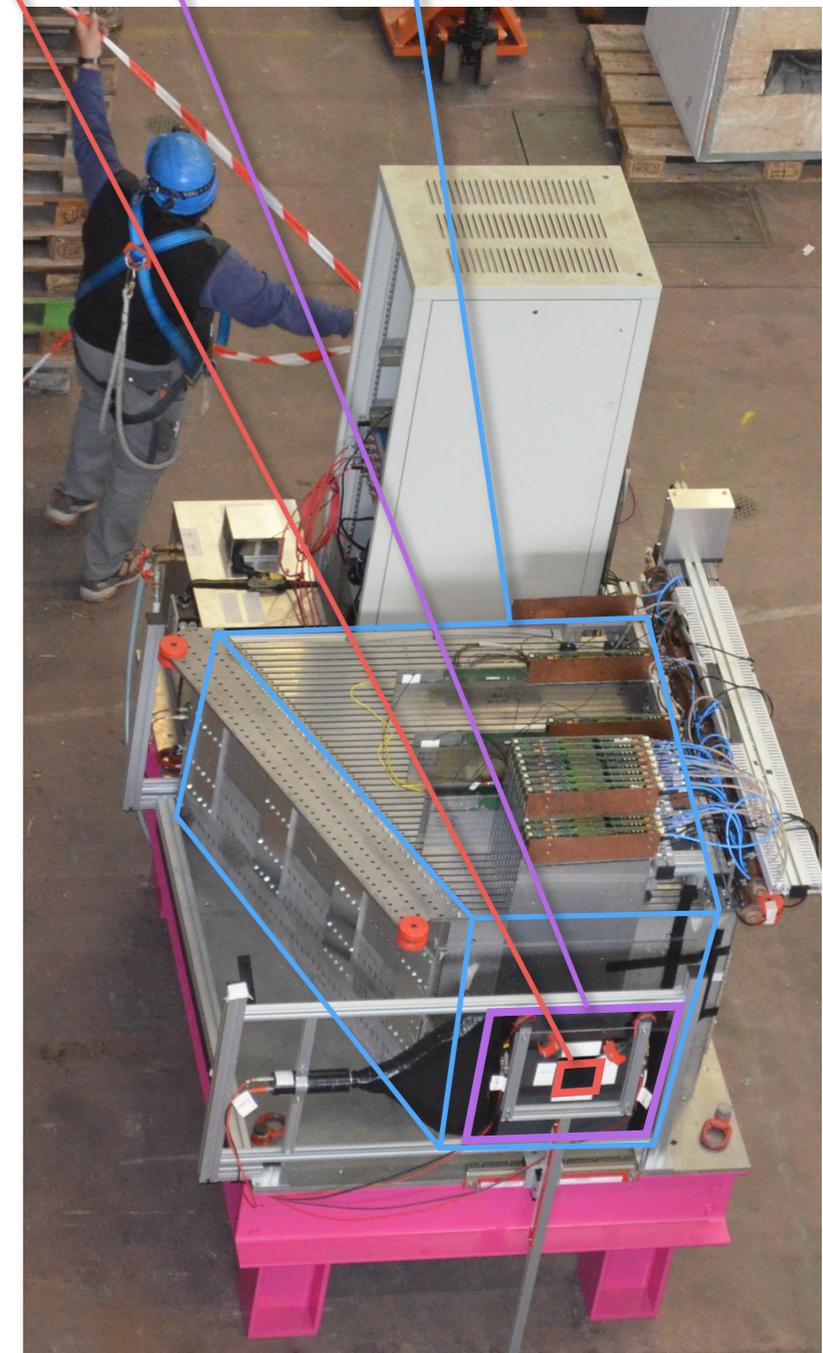
- シンチレーター(大) x2  
50cm x 50cm  
ミューオン用トリガー

- EUDET  
ECAL3層 + HCAL12層



$p_{beam}$ (GeV)	Fraction in beam (%)	
	$e^-$	$\mu^+ + \pi^-$
-1	85	15
-2	40	60
-3	16	84
-4	6	94
-5	4	96
-6	2	98
-7	1	99
-8	1	99
-9	1	99
-10	1	99

(T9の資料より引用)



**Spill** : 加速器の信号(~400ms), CCCに入力する。

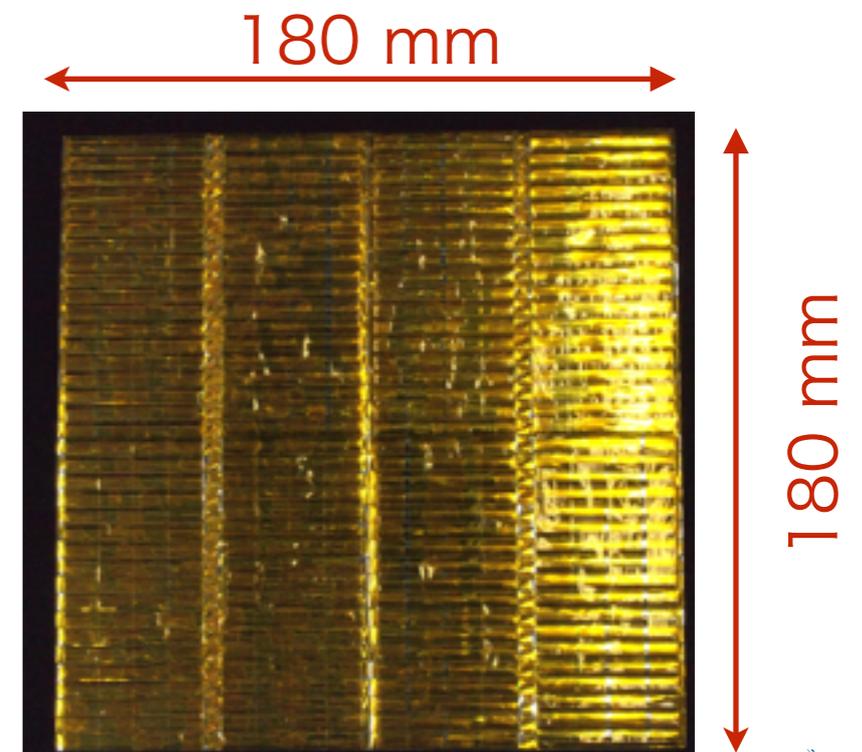
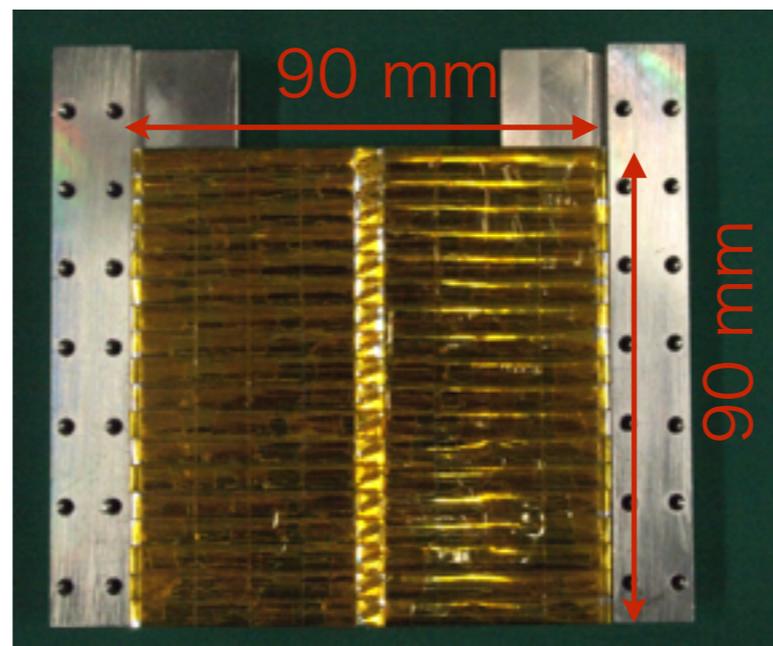
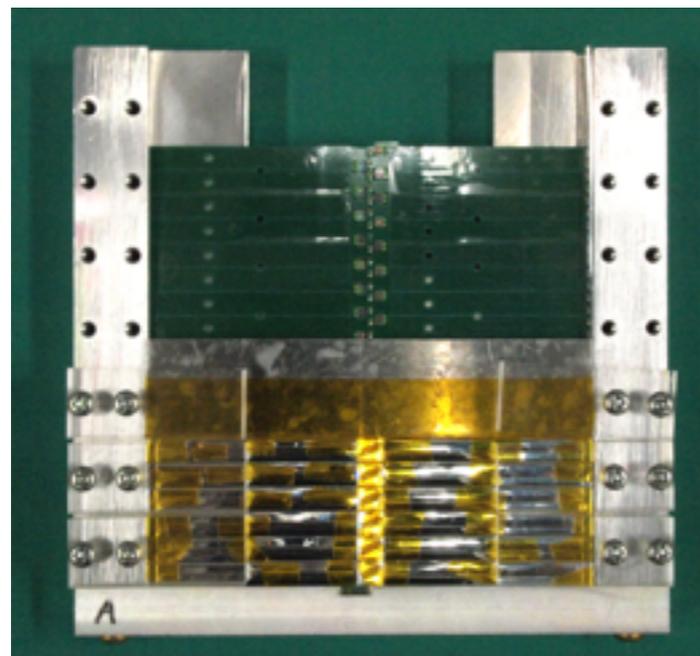
**Validation** : トリガーシンチのコインデンス。CCCに入力する。

**T0** : トリガーシンチのコインデンス。  
HBUの複数のチャンネルに入力する。

# シンチレーターの配列

1. アルミの治具に中間基板を設置
2. 中間基板に両面テープを貼る
3. MPPCの受光面にグリスを塗る
4. シンチレーター6本を並べる
5. アクリルの治具でシンチレーターを固定
6. 2.~5.をくり返す
7. シンチレーター36本を並べ、基板とシンチレーターをカプトンテープで固定
8. 1.~7.の手順で中間基板を4枚製作

MPPCの受光面と接する部分(1.2 x 1.4 mm<sup>2</sup>)



# 下面読み出し型プロトタイプ

## チャンネルの状況

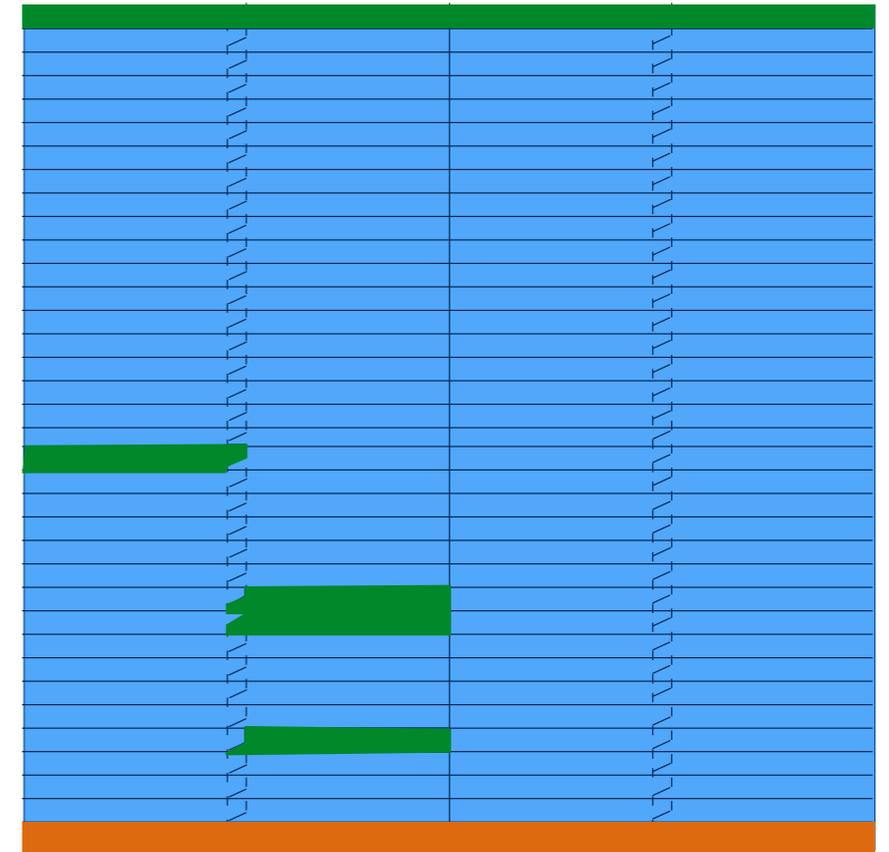
- ・ デッドチャンネル (LEDを当ててもADC値に変化なし) → 0 個
- ・ ヒットの頻度が低いチャンネル → 8 個
- ・ プリアンプを切ったチャンネル → 4 個

EBUを納めるケースの光漏れのため

## 問題点

S/Nが低い

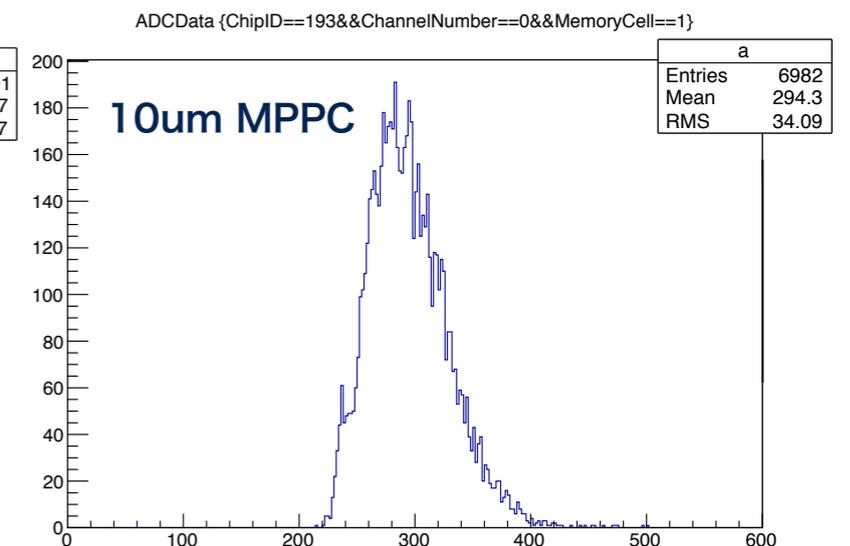
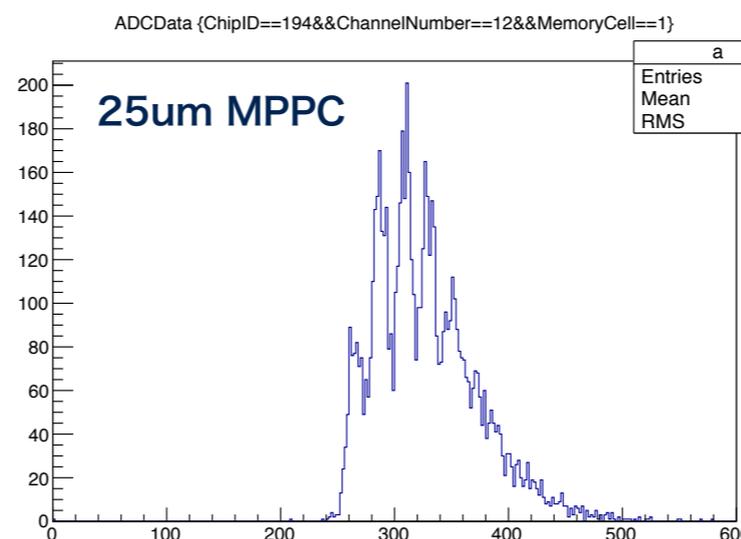
→ ノイズによるヒットを抑制するため、  
高い閾値を設定せざるを得なかった。



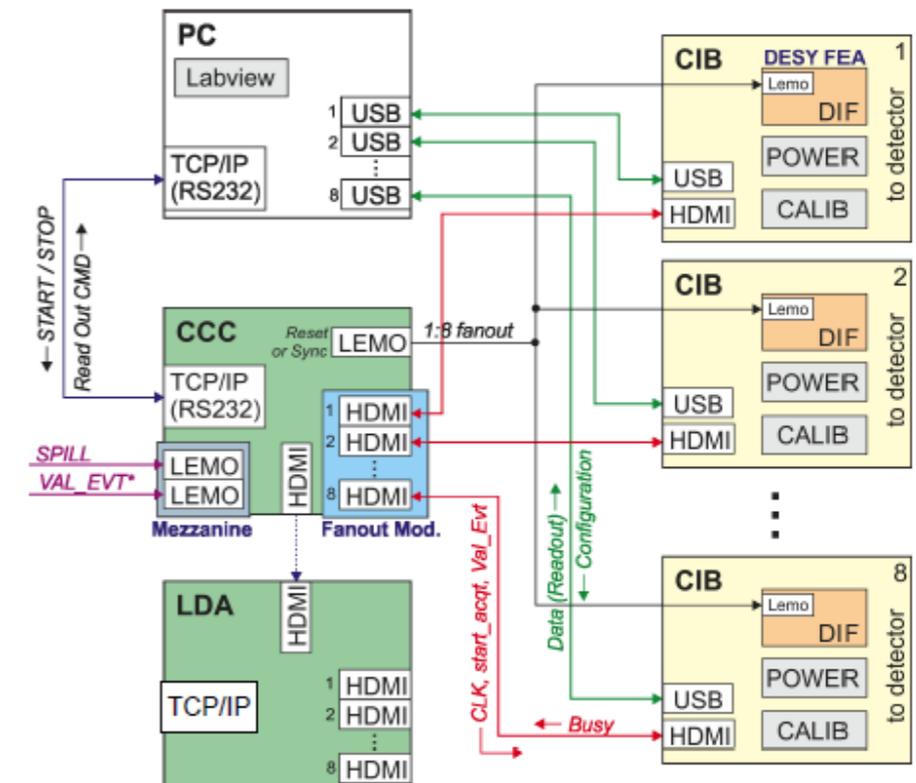
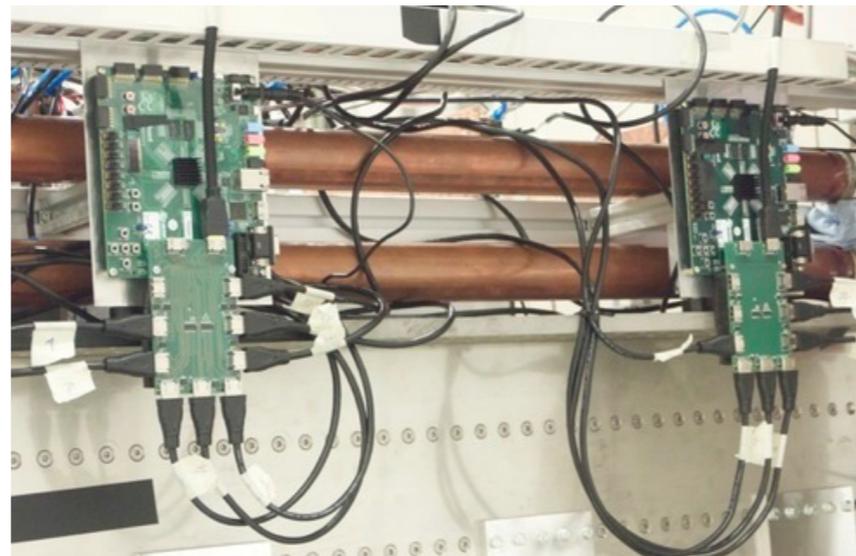
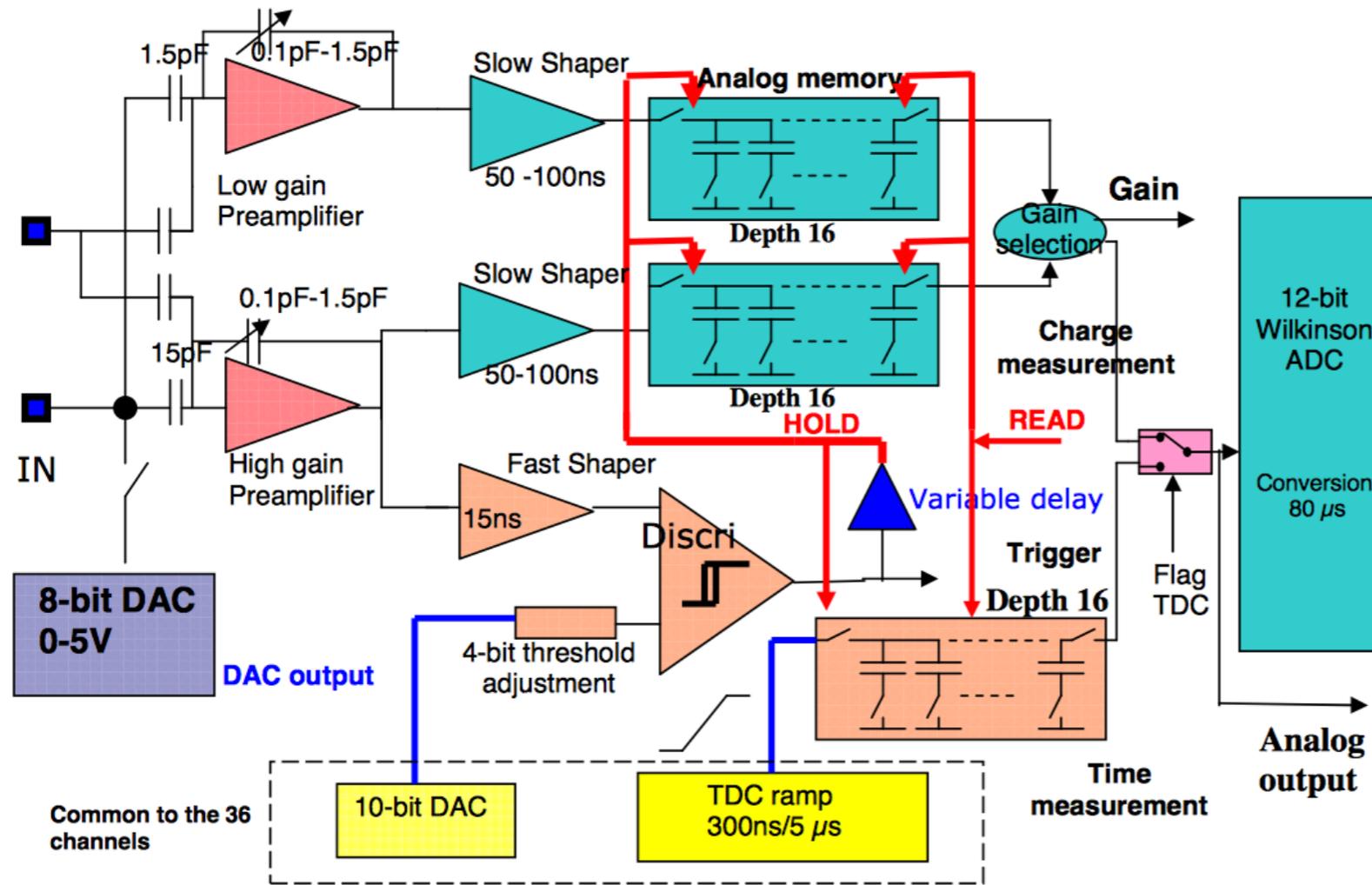
## LEDを用いた増幅率の較正

- ・ 25umのMPPCでは光子のピークを分離できた。
- ・ 10umのMPPCでは光子のピークを分離できなかった。  
→ SPIROCのアンプをピクセルサイズの小さな半導体検出器用に最適化することで解決されることを期待

## 1チャンネルのADC分布



# Signal path of SPIROC



# 課題1. 中間基板の製作

## 中間基板

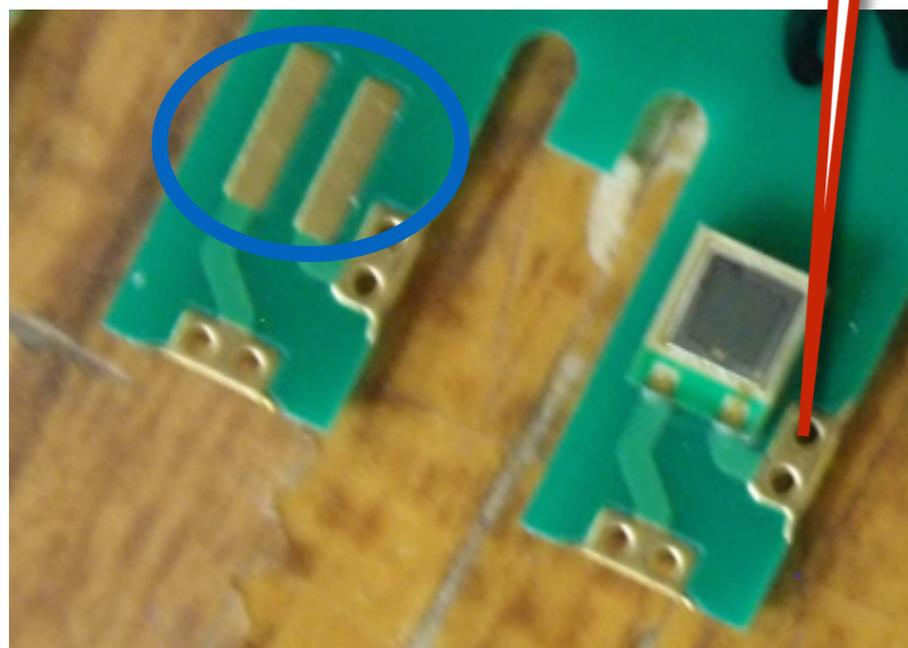
- ・ 大きさ 9 x 9 cm<sup>2</sup> (EBUの1/4)
- ・ 4枚製作

1. MPPCを小基板に半田付け
2. 小基板を中間基板にはめ込んで半田付け

### 2. サイドメッキ

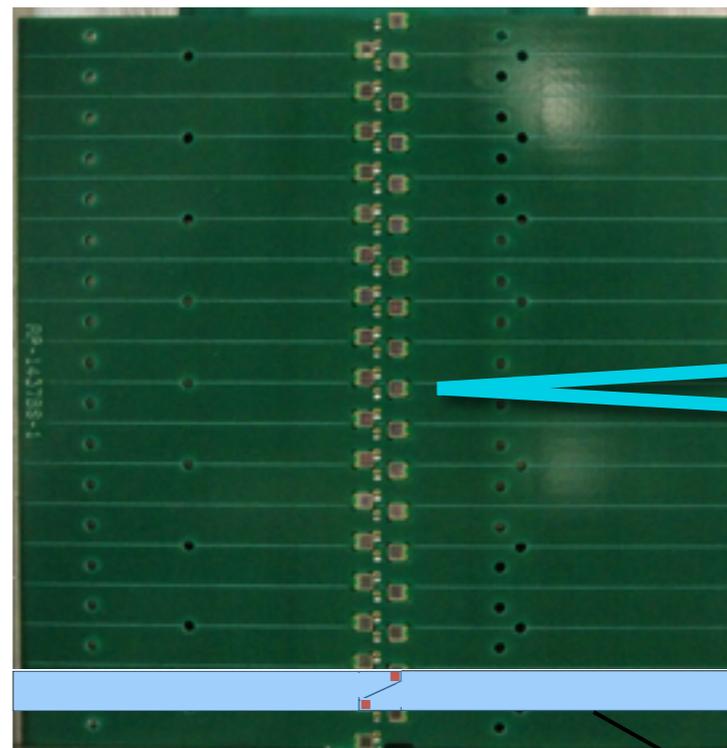


### 1. サーフェスマウント

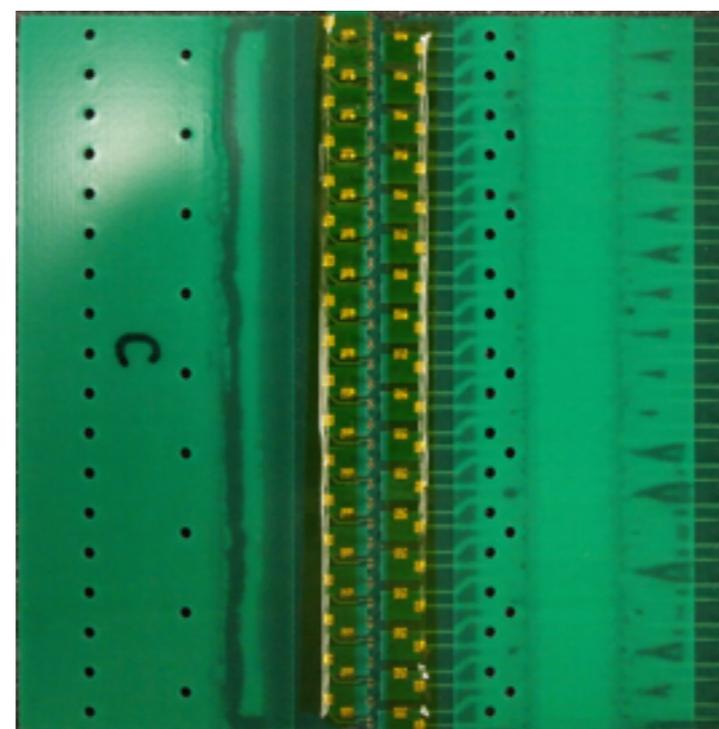


MPPCと小基板

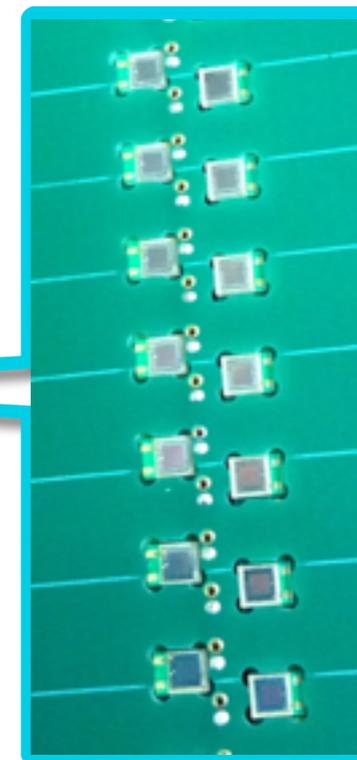
## 中間基板



back side

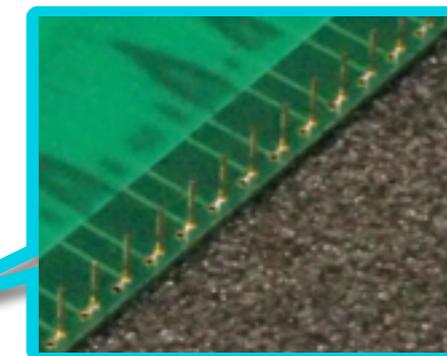


## MPPC



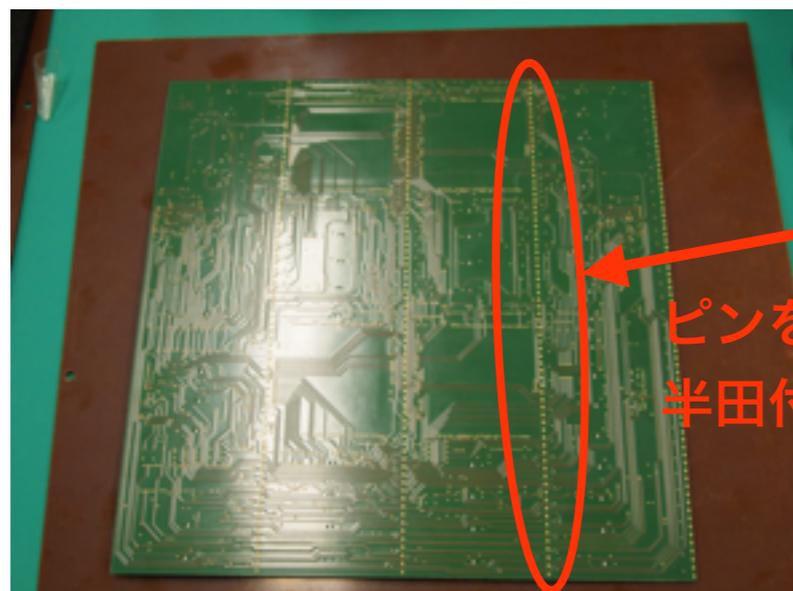
シンチレーター

## MPPCの配線



# 基準設計のプロトタイプ (信州大学が主導)

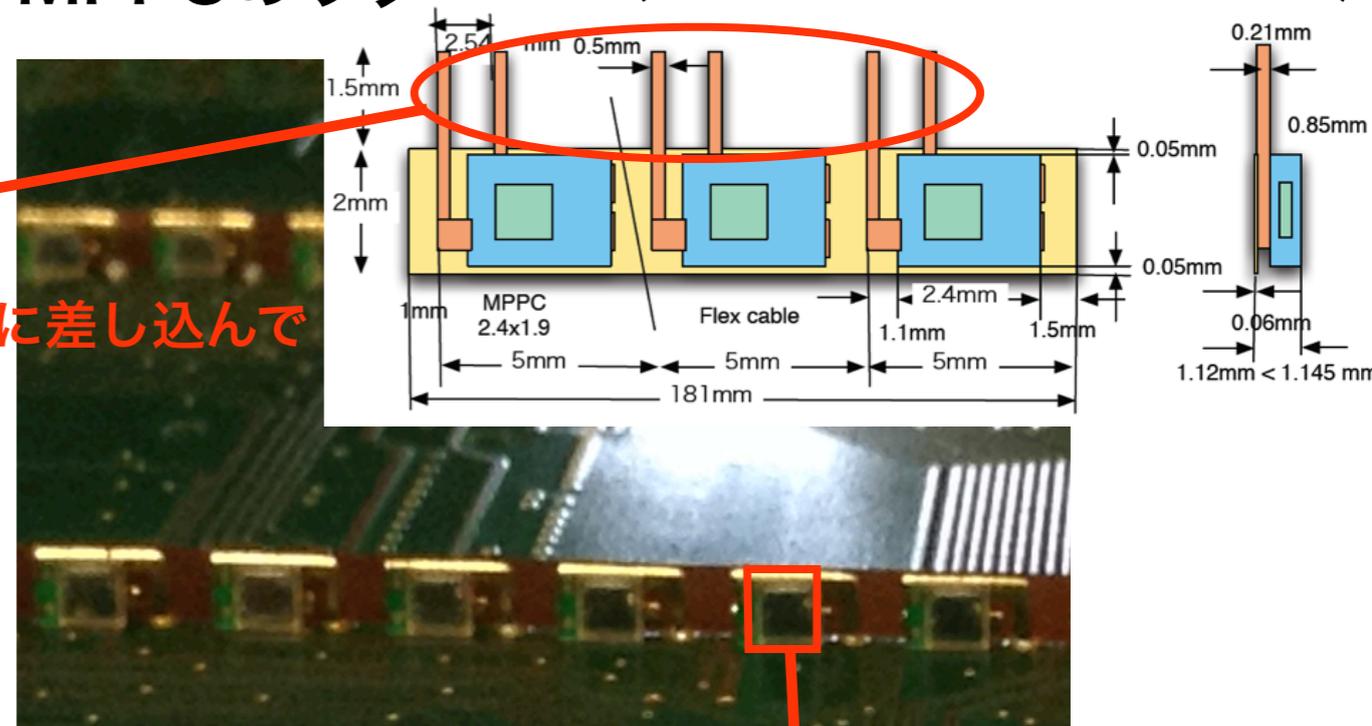
## 読み出し基板ECAL Base Unit (EBU)



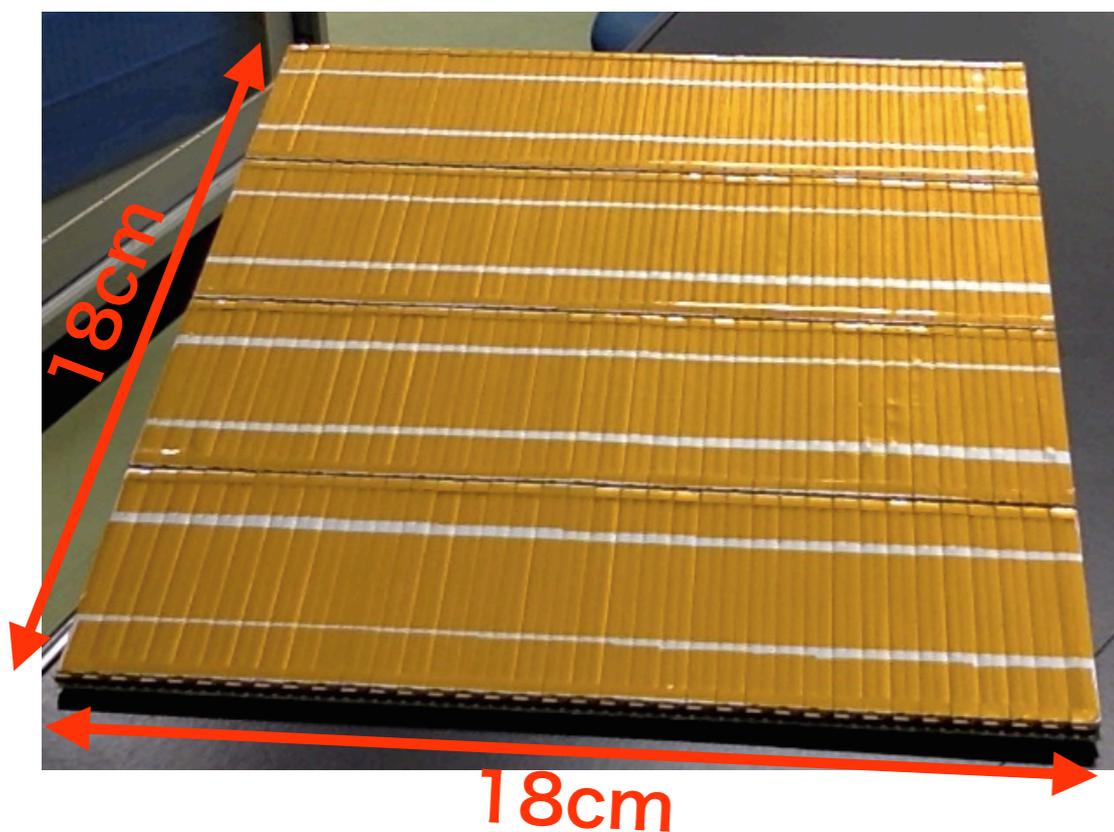
ピンをEBUの穴に差し込んで  
半田付け

## MPPCのラダー

(信州大 小川さんの修論より引用)

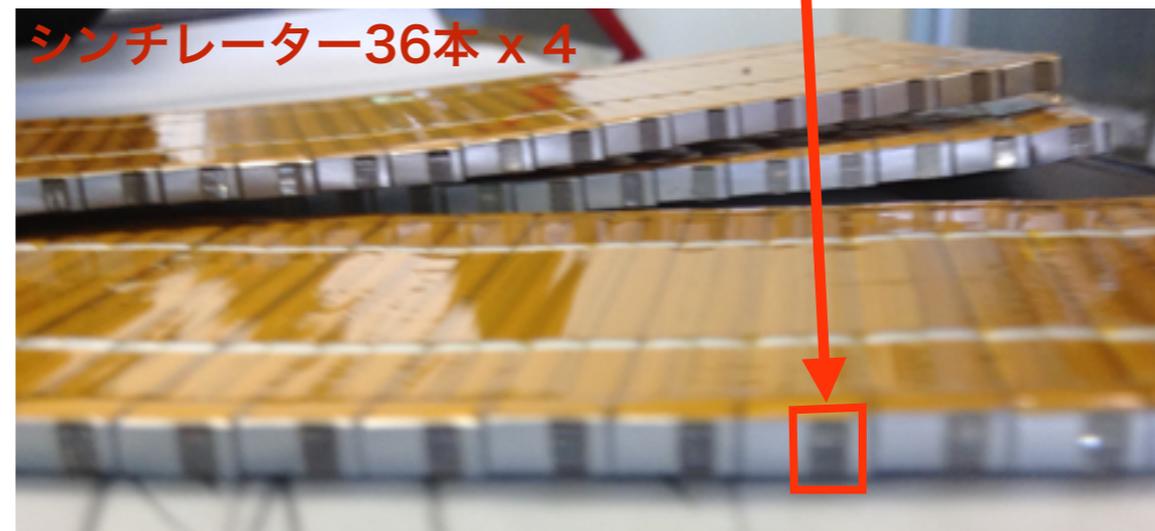


## 完成したEBU



## シンチレーターのラダー

シンチレーター-36本 x 4



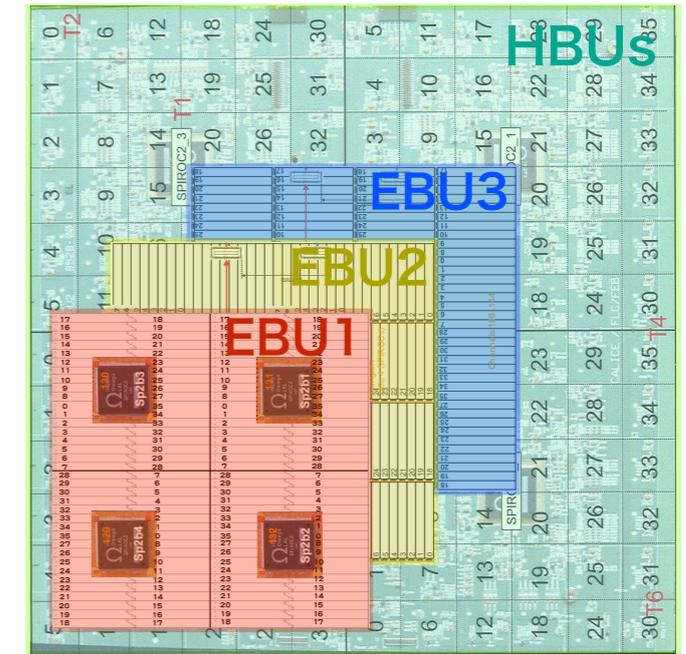
MPPCの受光面と接する部分以外は反射材で覆う  
ラダーはカプトンテープで固定

# MIPビームを用いたエネルギーの較正

EBUはノイズによるヒットが多数を占める

→ Hit bitのみによらないミュオンのイベント判定の条件を設定

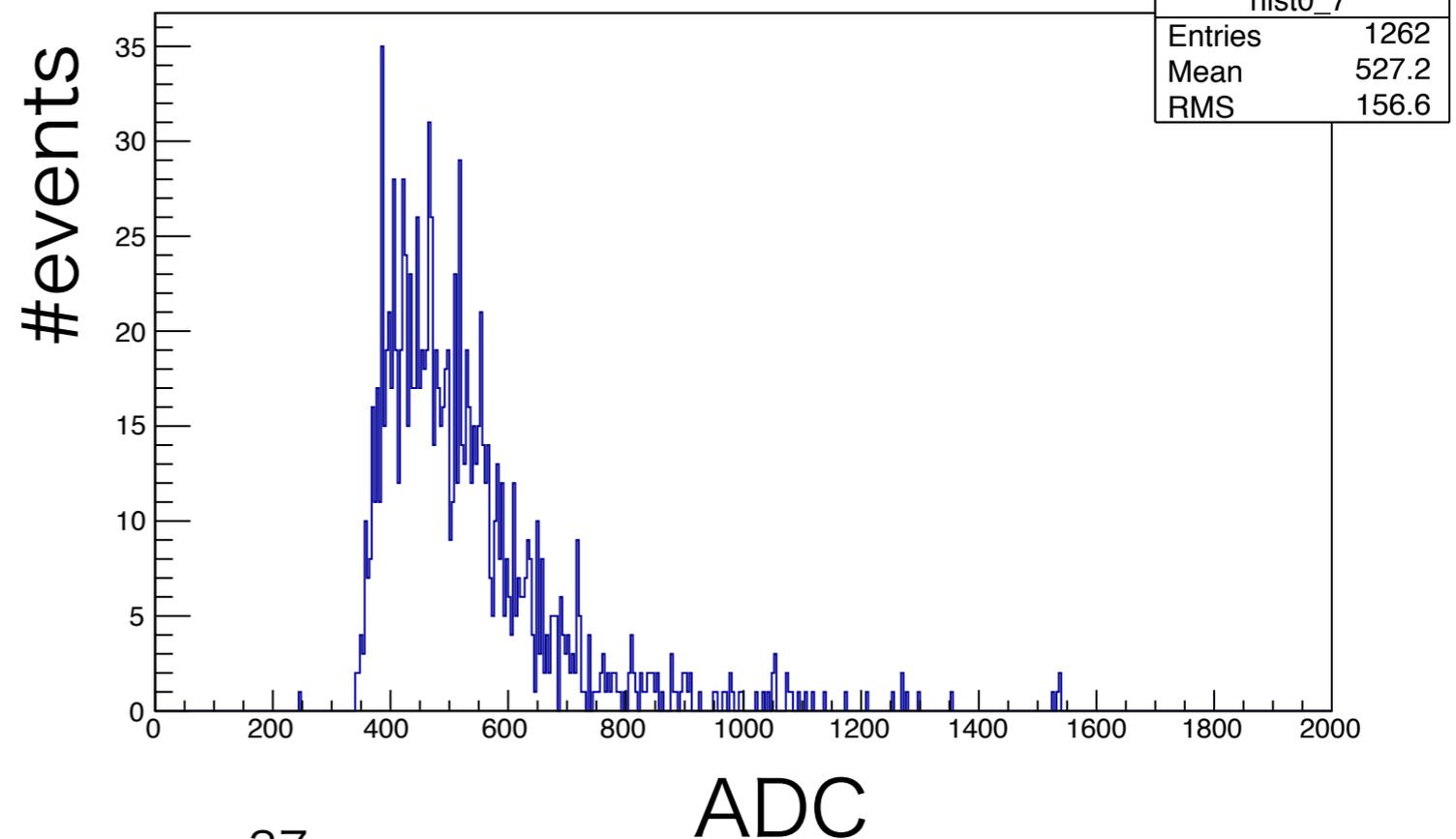
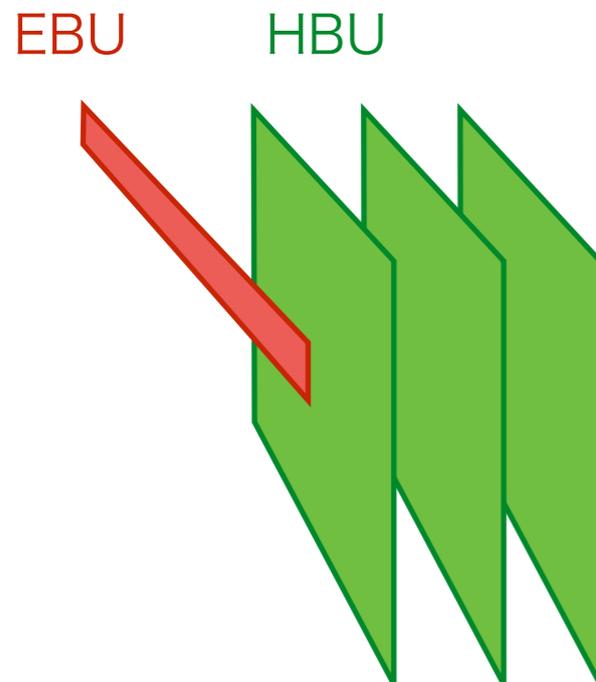
“HBU3層以上にヒットあり” & “HBUと重なるEBUにヒットあり”



## 結果

閾値を高く設定せざるを得なかったため、ほとんどのチャンネルにおいてMIPピークの全容を見ることができなかった。

EBUの1チャンネルのADC分布



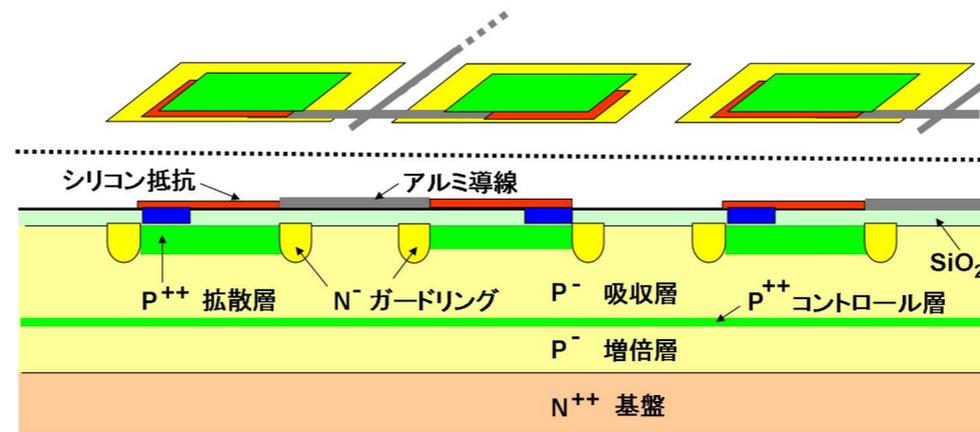
# Multi-Pixel Photon Counter (MPPC)



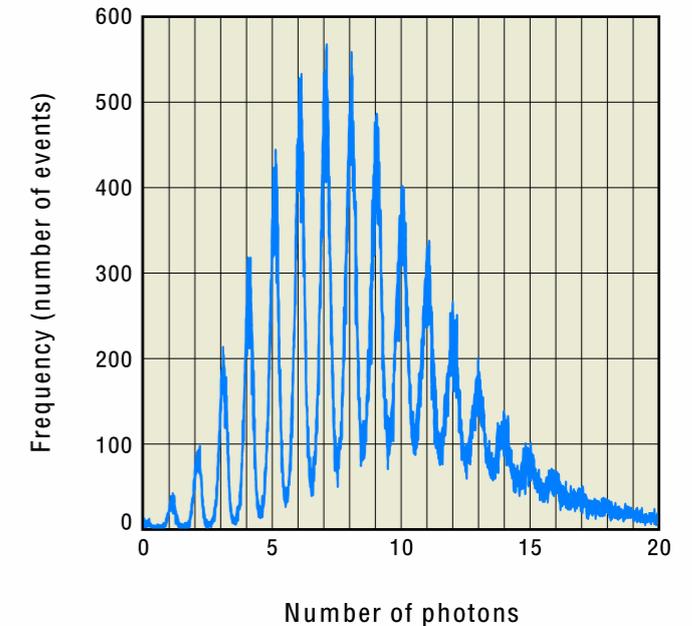
ガイガーモードで動作するAPDを2次元に並列接続した半導体検出器

- ・ 光子数を数える
- ・ 優れた磁場耐性
- ・ 小型
- ・ 増幅率は $10^5 \sim 10^6$  程度  
 $\propto (V_{op} - V_{bk})$
- ・ 降伏電圧は温度依存  
 $\sim 50 \text{ mV/K}$

MPPCの構造



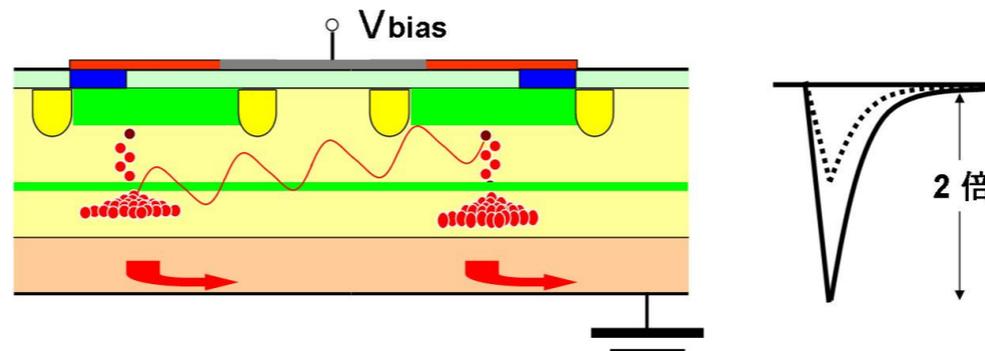
波高分布



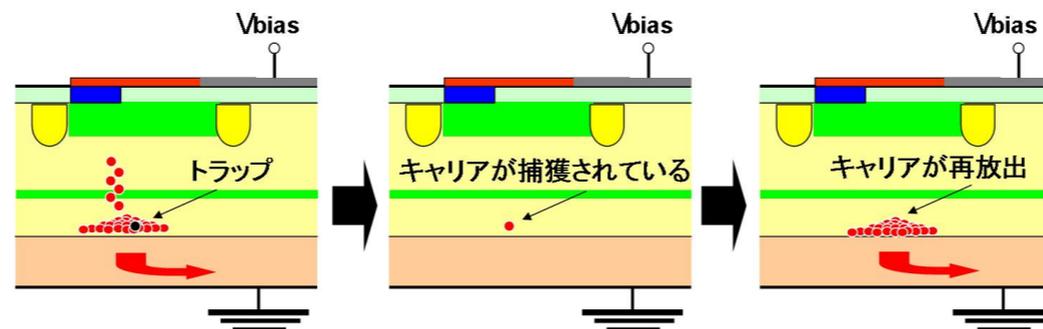
## ノイズ

熱励起ノイズ：半導体内の熱励起した自由電子がアバランシェ増幅を誘起

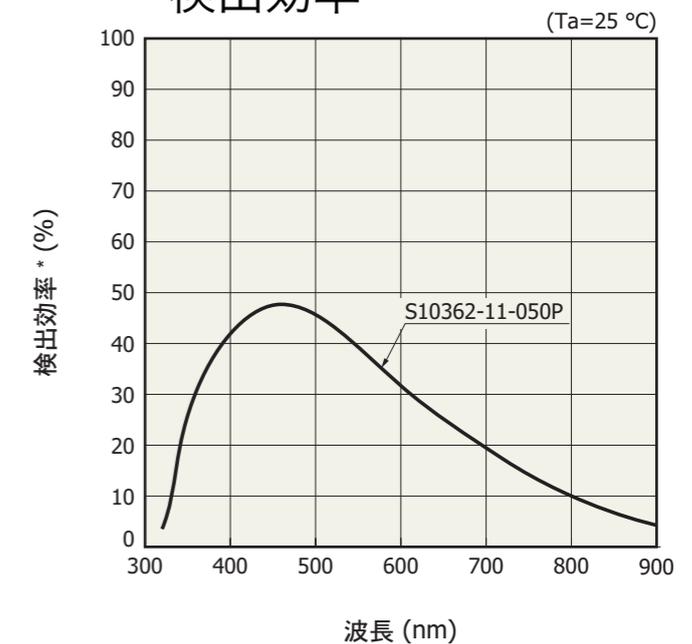
クロストーク：  
隣接するピクセルに  
アバランシェ増幅を誘起



アフターパルス：  
信号事象から一定時間  
遅れてアバランシェ増  
幅を生じる

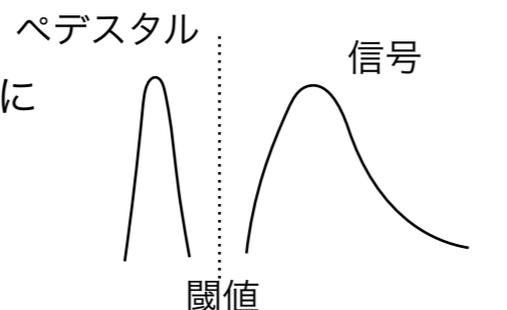


検出効率

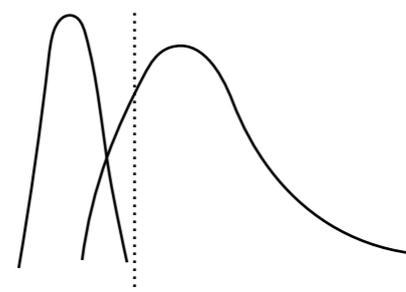


# 検出効率の評価

本来ならば、このように  
閾値を設定したい

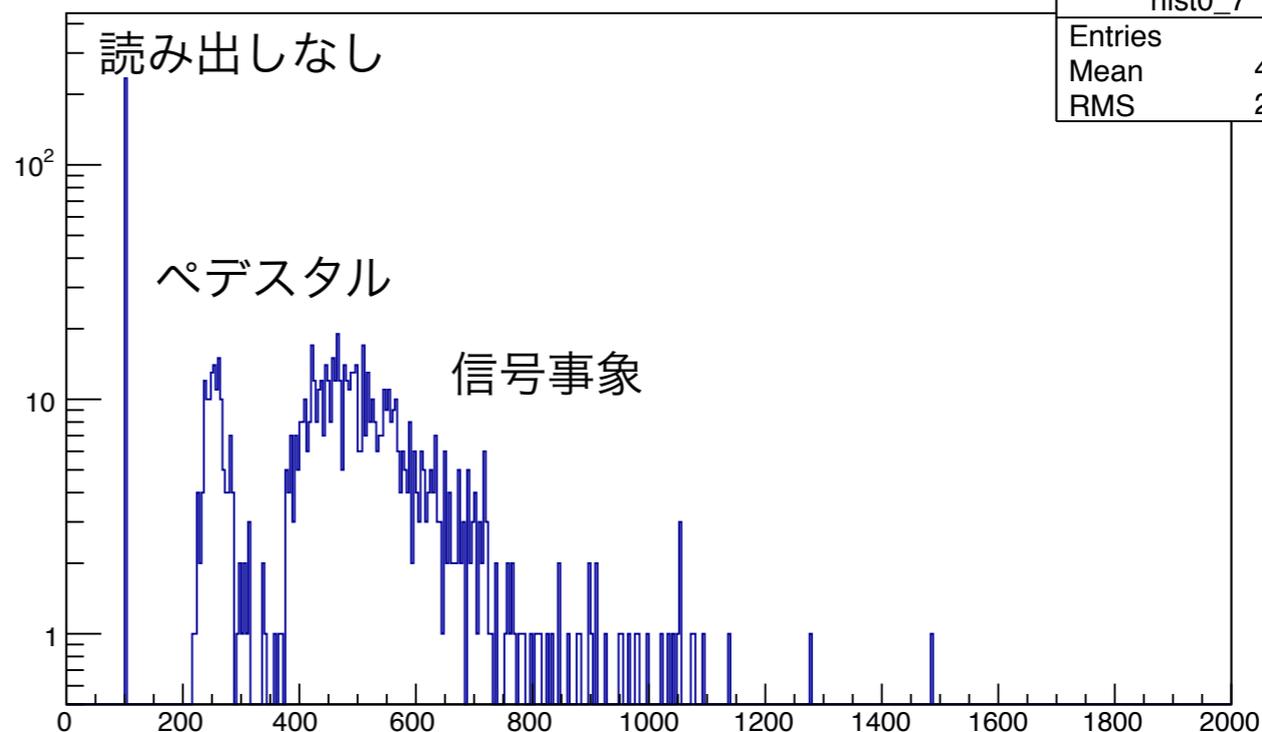


今回の測定ではノイズが多かっ  
たため、高い閾値を設定



検出器の動作は正常であることを確認

#events



ADC

検出効率の評価方法

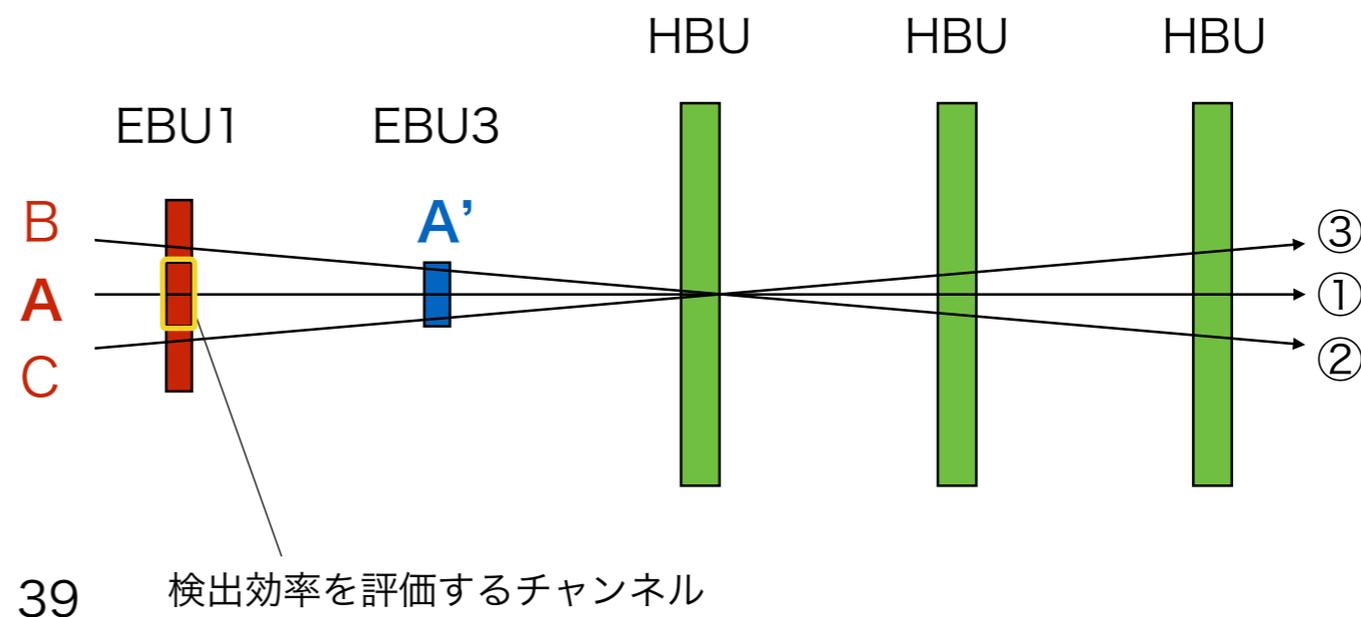
“HBU3層以上にヒットあり” &  
“HBUに重なるEBU3(A')にヒットあり”  
→ EBU3と重なるEBU1(A)を評価する

ビームの角度分布、検出層の配置の精度  
を考慮すると、

全イベント = ① + ② + ③

- ① AとA'を通過
- ② BとA'を通過
- ③ CとA'を通過

検出効率 = 60 ~ 70 %



# 吸収層について

---

Material	$\lambda_I/\text{cm}$	$X_0/\text{cm}$	$\rho_M/\text{cm}$	$\lambda_I/X_0$
Fe	16.8	1.76	1.69	9.5
Cu	15.1	1.43	1.52	10.6
W	9.6	0.35	0.93	27.4
Pb	17.1	0.56	1.00	30.5

M.A. Thomson氏の論文より引用

$X_0$  : 放射長

$\lambda_I$  : ハドロンの相互作用長

$\rho_M$  : モリエール半径