

# ILCハドロンカロリメータ検出層較正用 宇宙線カウンターの開発

第7回

高エネルギー春の学校

東京大学大学院物理学専攻  
素粒子物理国際研究センター  
(ICEPP)

森研究室M1 小林暁



# Outline

- 背景・動機
  - ILC計画・ILDデザインとその検出器AHCAL
  - 大量試験用テストスタンドの必要性
- 実験・結果・解析
  - Sr線源を用いた実験での再構成の評価
  - 再構成アルゴリズムの開発
- 今後の見通し
  - 実機の製作に向けた研究開発

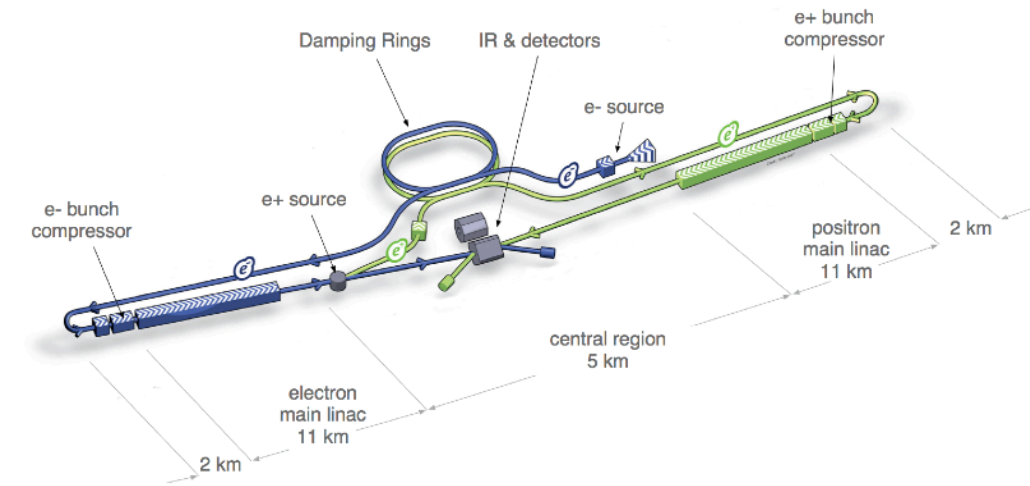
# Outline

- **背景・動機**
  - **ILC計画・ILDデザインとその検出器AHCAL**
  - **大量試験用テストスタンドの必要性**
- 実験・結果・解析
  - Sr線源を用いた実験での再構成の評価
  - 再構成アルゴリズムの開発
- 今後の見通し
  - 実機の製作に向けた研究開発

# ILC(国際リニアコライダー)計画

## ILCの特長

- (完成すれば)世界最大となる電子陽電子衝突型線形加速器
- **Lepton(=素粒子)同士の衝突**なので、背景事象が少ない測定が可能
- エネルギーの拡張性が高い:250~500GeV→1TeV
- ビームエネルギー・偏極度を制御可能



▲ ILCのデザイン

## 新物理の発見

### 新現象の発見

まだ詳しい性質がわかっていない**既存の粒子** (Higgs, Top...)に関して、標準理論とのずれを高い精度で測定する

- トップ結合定数
- ヒッグス自己結合

などなど...

### 新粒子の発見

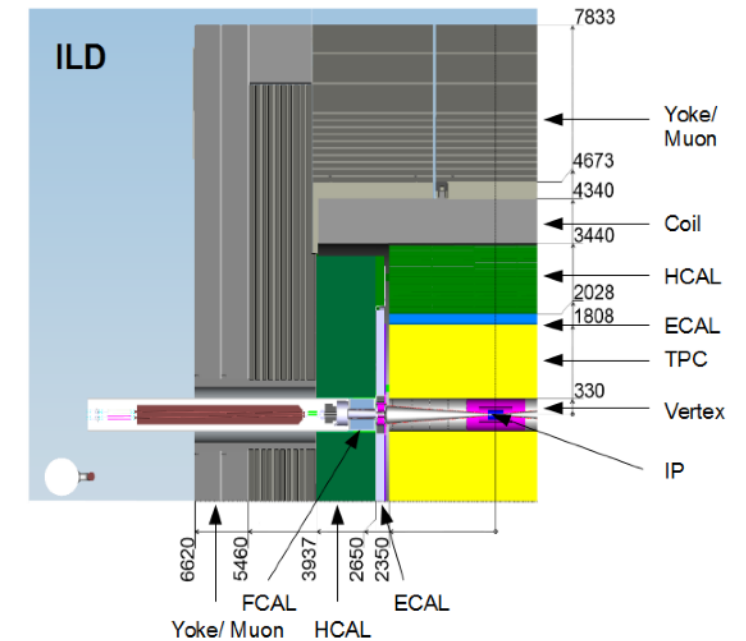
標準理論にはない**新しい粒子**の探索

- ダークマター
- 超対称性粒子

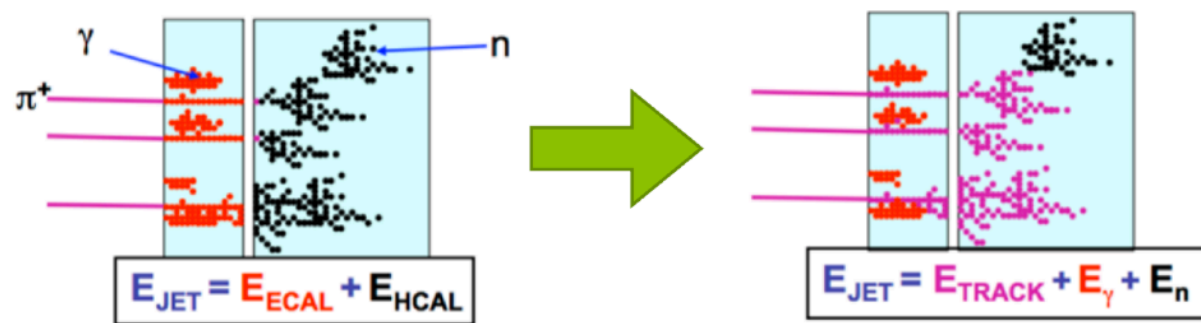
などについての探索を目指す

# PFAとILDデザイン

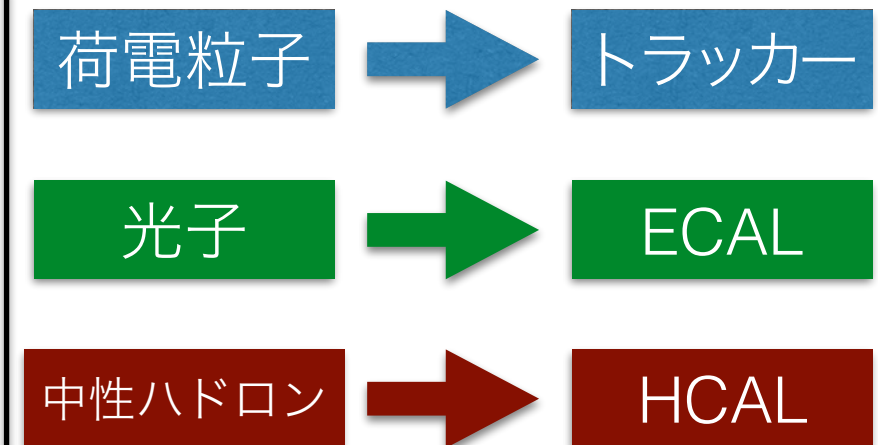
- PFA(Particle Flow Algorithm)
  - ジェット中の**一つ一つの粒子を区別**して事象を再構成するアルゴリズム
    - ▶ それぞれの粒子において**最適な検出器**での測定結果を用いて再構成を行う。
    - ▶ ジェットのエネルギー分解能を向上させることができる。
- ILC検出器の有力候補であるILDデザインは、このPFAに基づいて事象の再構成を行えるよう設計されている。
- HCALの主な目的は**中性ハドロン**のエネルギーを測定することである。



▲ ILDデザイン



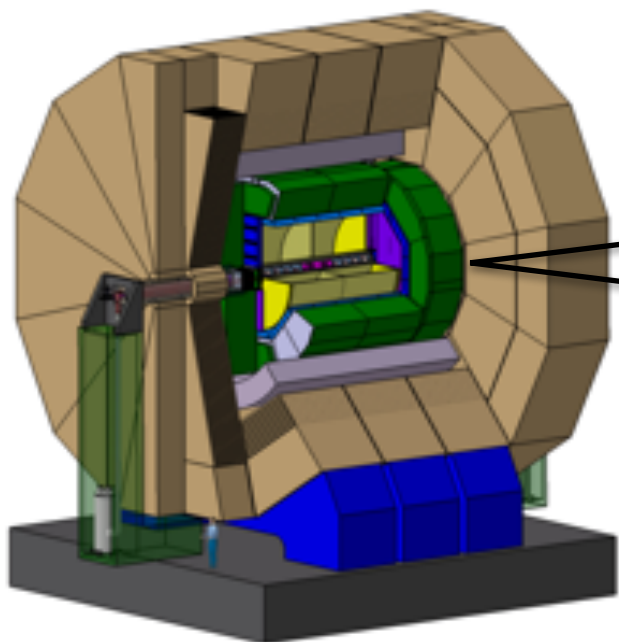
▲ PFAによるエネルギー再構成



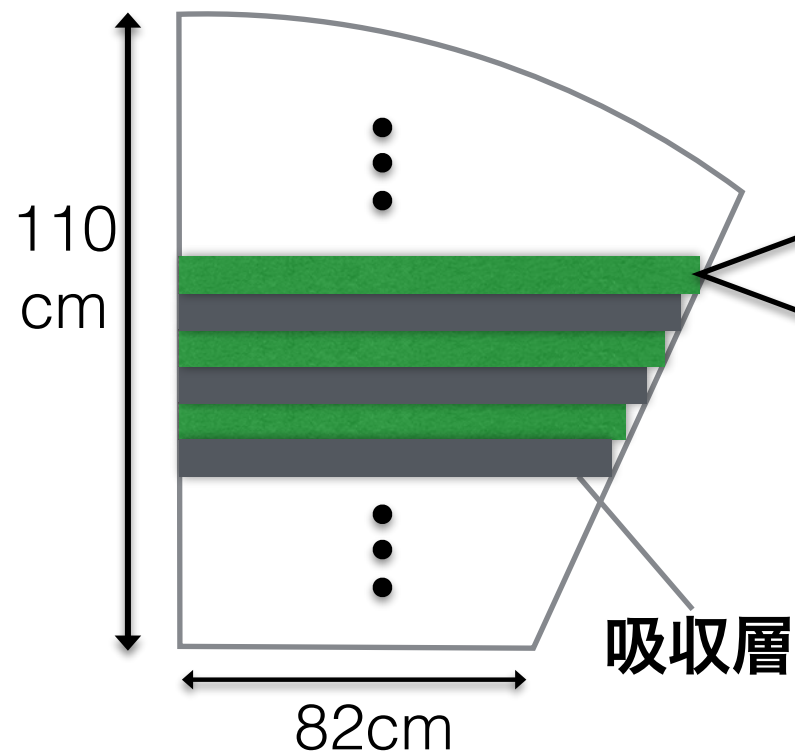


# AHCALデザイン

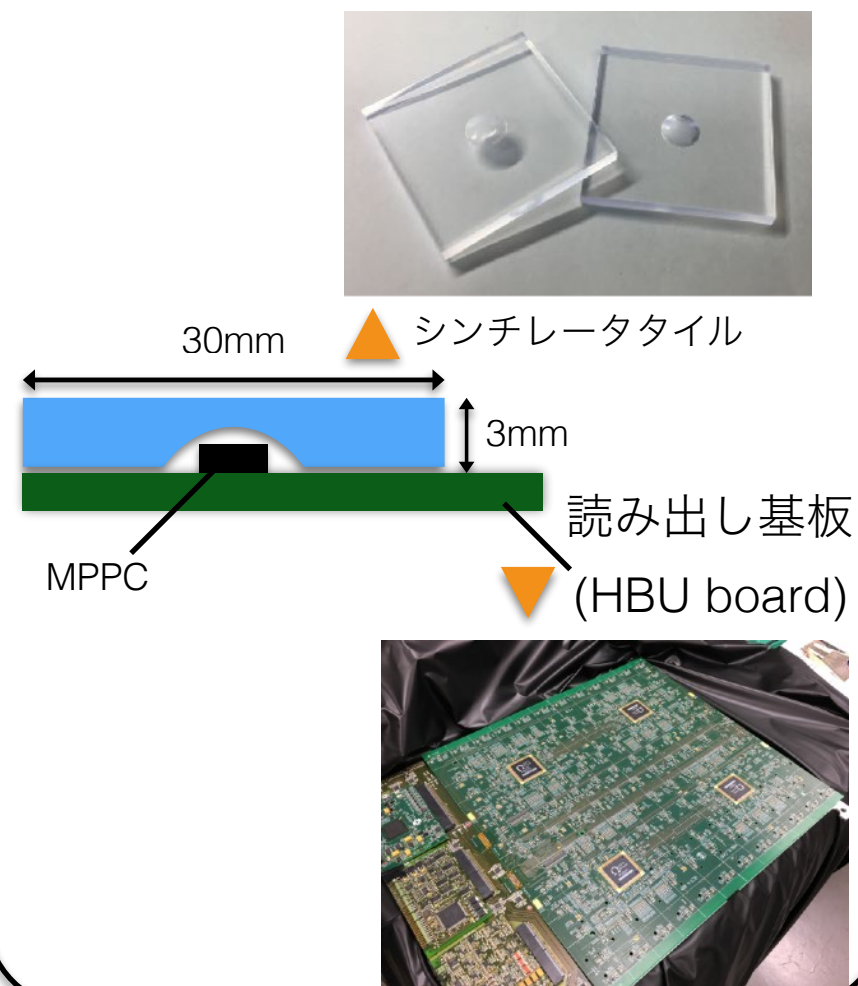
## ILDデザイン



## AHCALモジュール



## 検出層



AHCAL moduleの数: **32** ~~X~~

各層の数: **48**

~~X~~ タイル数/ユニット: **144**  
ユニット数/検出層: **18**

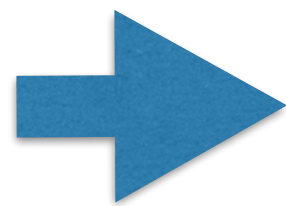
- 非常に**大量**のシンチレータタイルの光量をアナログに読み出すことで、**高精細**な測定が可能

# 大量テストの方法

- ILCの建設に向け、現在検出層**50層**の大型プロトタイプを建設中
- **2万~3万**個にも上るシンチレータタイルに関して入射位置・角度に対する出力の依存性を調べるのが課題となっている
- **大量**のシンチレータタイルを**安価**に**簡単**に試験するセットアップが望ましい

# 大量テストの方法

- ILCの建設に向け、現在検出層**50層**の大型プロトタイプを建設中
  - **2万~3万**個にも上るシンチレータタイルに関して入射位置・角度に対する出力の依存性を調べるのが課題となっている
- **大量**のシンチレータタイルを**安価**に**簡単**に試験するセットアップが望ましい



**宇宙線を用いた試験が好ましい**

## メリット

😄 宇宙線は**無料!**

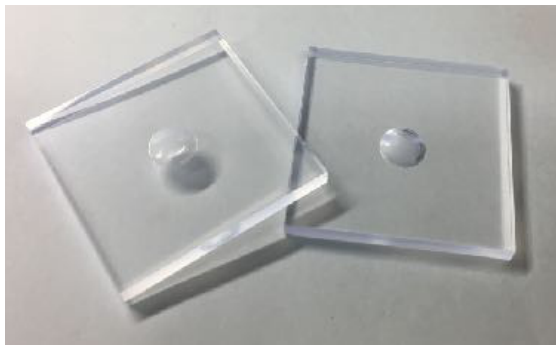
😊 ビームや線源を用意する実験に比べ**簡単**に**大量**に測定できる

## デメリット

😞 統計を貯めるのが難しい



# 宇宙線を用いた校正



AHCALシンチレータ  
タイル(3cm×3cm)

START

上下のカウンターでの  
ヒット位置が良い精度でわかる

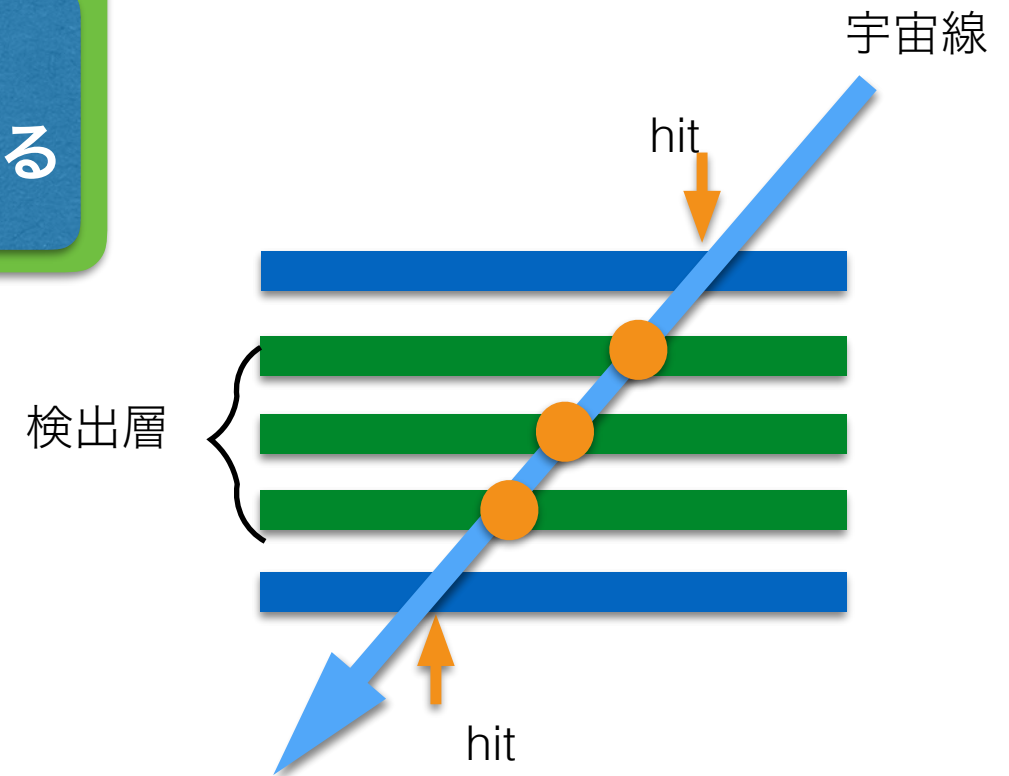
宇宙線の軌道がわかる

シンチレータタイルでの  
ヒット位置・入射角がわかる

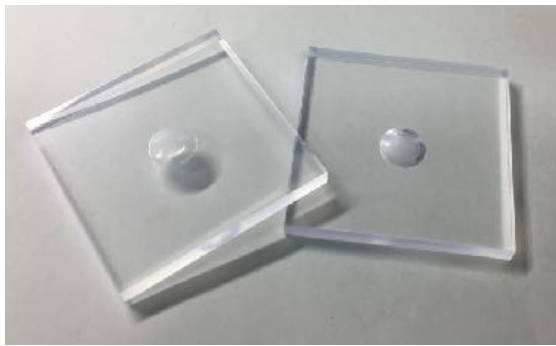
GOAL

タイルの応答のヒット位置  
依存性がわかる

タイルの応答の入射角依存  
性がわかる



# 宇宙線を用いた校正



AHCALシンチレータ  
タイル(3cm×3cm)

START

上下のカウンターでの  
ヒット位置が良い精度でわかる

宇宙線の軌道がわかる

シンチレータタイルでの  
ヒット位置・入射角がわかる

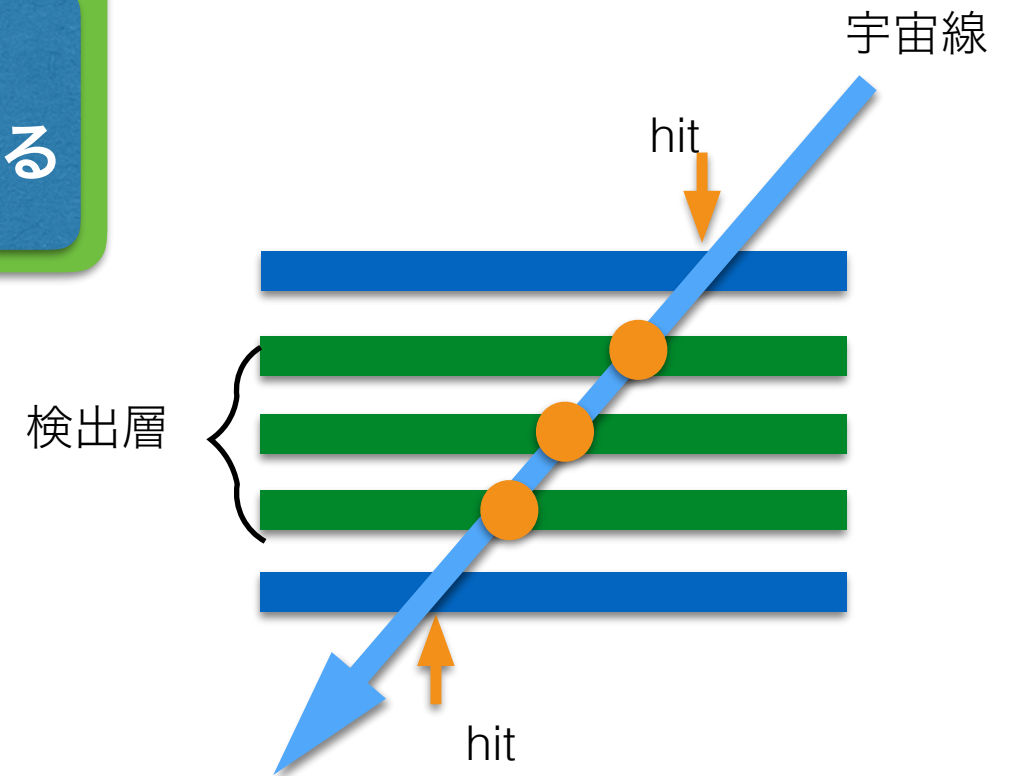
GOAL

タイルの応答のヒット位置  
依存性がわかる

タイルの応答の入射角依存  
性がわかる

REQUIREMENT

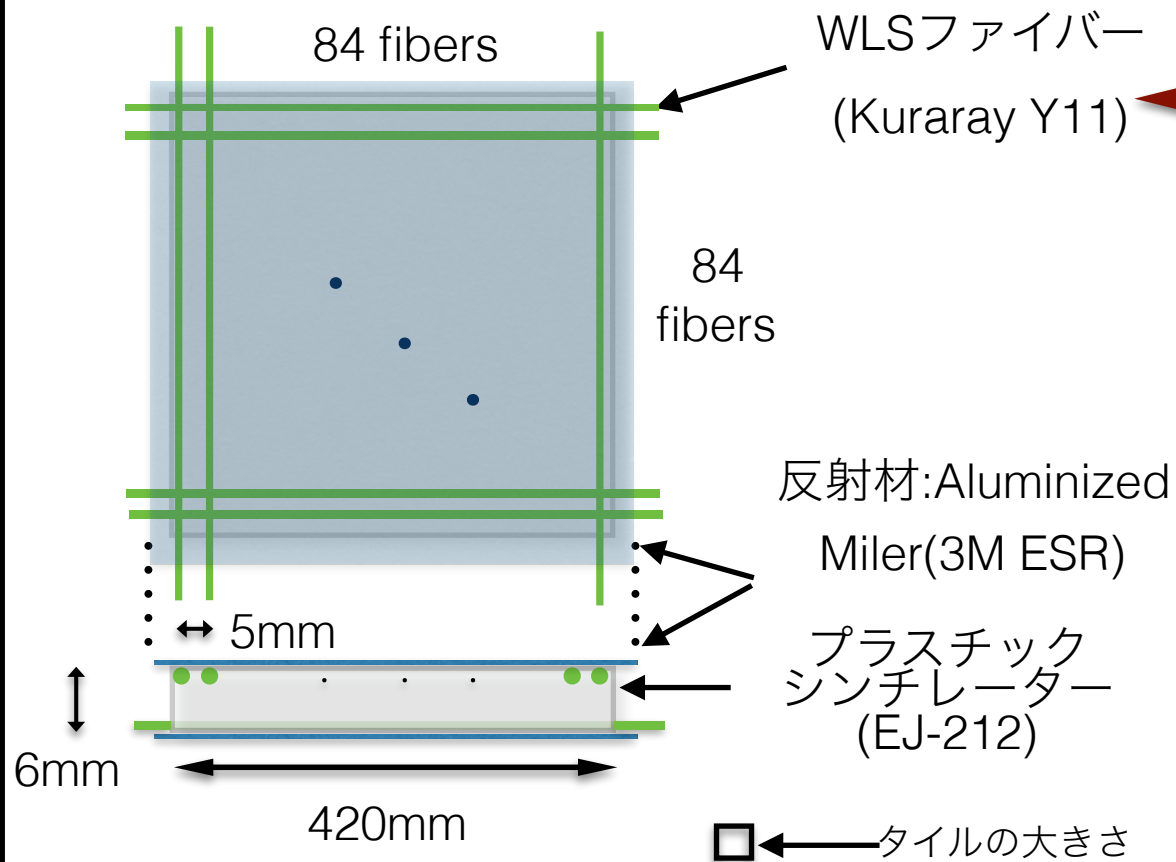
タイルの細かい応答を見るために、  
位置分解能のあるカウンターが必要





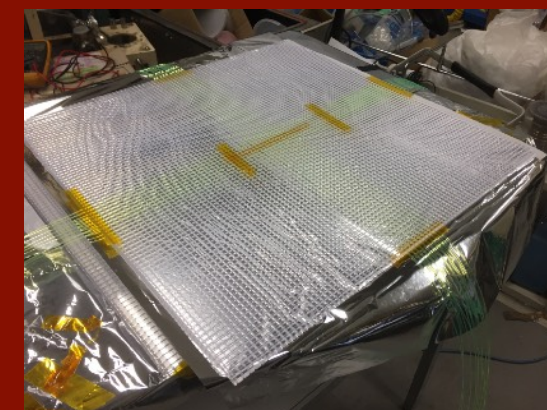
# Counter Design

## Design



XY両方向に5mm間隔の溝が掘られている

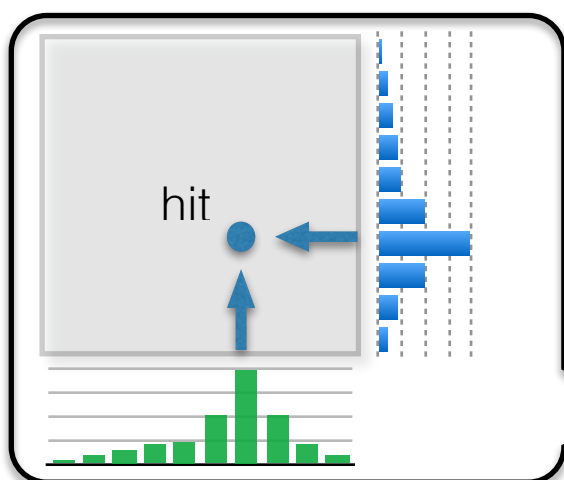
今回は**16本**のファイバーを用いて試験



反射材により集光効率を高める



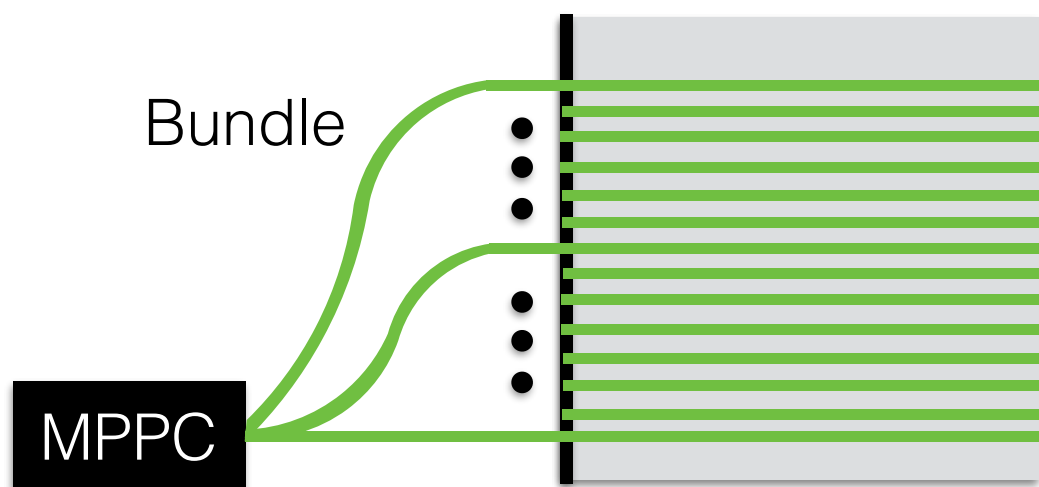
PHOTO



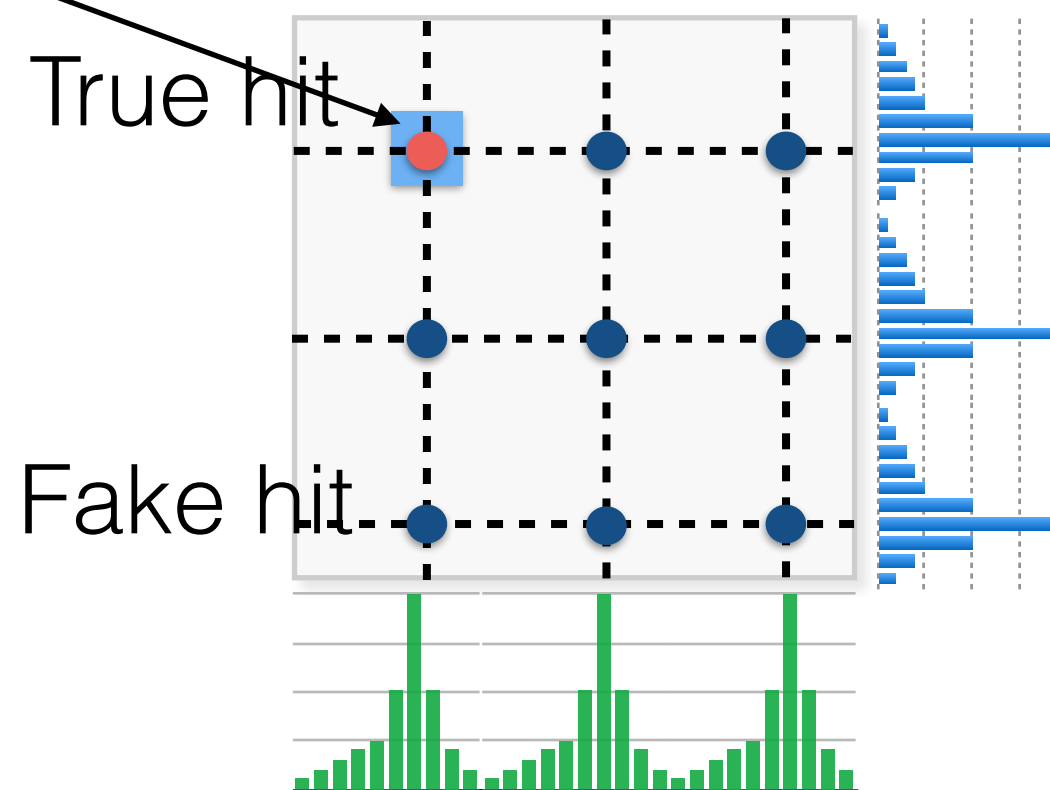
- シンチレータで発生した光をファイバーで読み出し、MPPCによって検出する。
- 光量分布を用いてヒット位置の**2次元再構成**を行う。

# チャンネル数の削減

- プレートの全てのファイバー(168本)の光量を両端で読み出す場合、**336**ものMPPCが必要になってしまう。
  - ▶ ファイバーを約20本ごとに**1chにまとめて**(バンドルして)検出し、読み出しチャンネルの数を抑える。
  - ▶ 光量分布は周期的な分布となるため、**複数の再構成点**が存在してしまう
    - \* 真のヒット位置は検出層のヒット情報を補助的に用いて同定する。



▲ バンドルによるチャンネルの削減

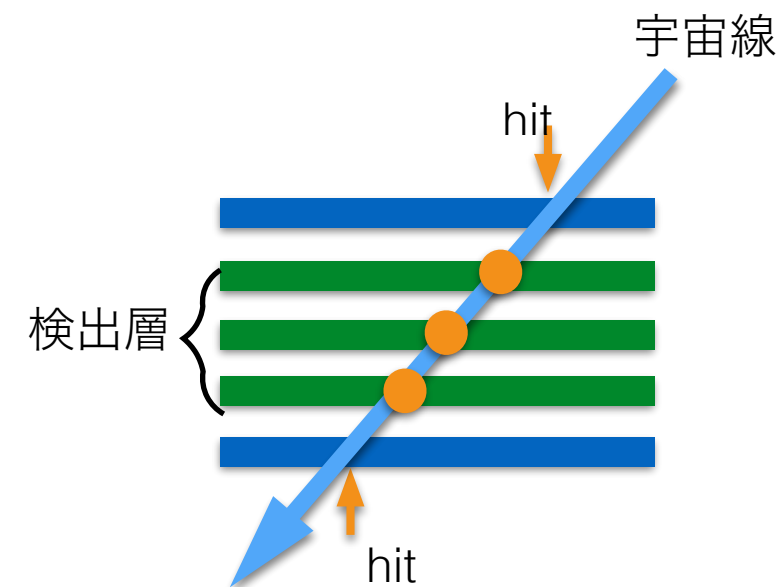


▲ バンドル時のヒット位置の再構成

# 本研究の目的

## 背景

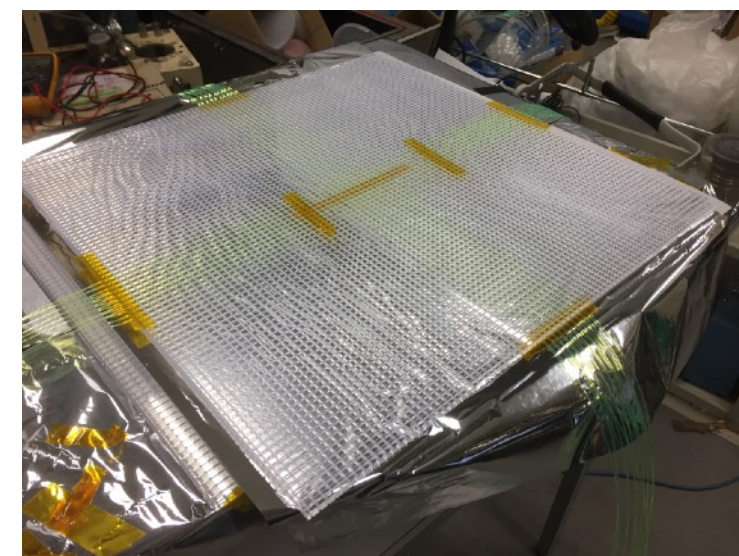
- AHCAL大型プロトタイプを安価、簡単、大量に試験するには位置分解能のあるカウンターが必要
- シンチレータタイルの応答を詳細に試験するために、カウンターには5mm程度の位置分解能が期待される。



## 目的

実機の製作に向けた

- 宇宙線カウンターの原理検証と性能評価
- 適切な読み出し方法と再構成の方法の提案



# Outline

- 背景・動機
  - ILC計画・ILDデザインとその検出器AHCAL
  - 大量試験用テストスタンドの必要性
- **実験・結果・解析**
  - **Sr線源を用いた実験での再構成の評価**
  - **再構成アルゴリズムの開発**
- 今後の見通し
  - 実機の製作に向けた研究開発



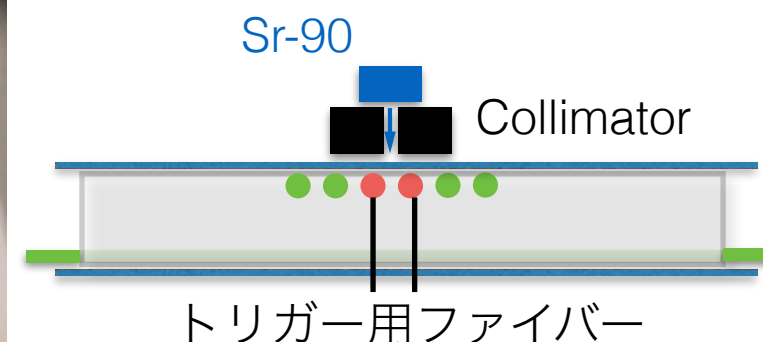
# β線源を用いた測定

## 手法

- 本来のヒット位置との比較によって再構成の精度を評価する。
  - 宇宙線とトリガーカウンターを使用
  - ☑ β線源(Sr-90)を使用
- 上面のファイバー2本の両方の出力が1.5p.e.を上回った時にトリガー
- 下面のファイバー10本で光量重心を用いた再構成を試みる



▲ 使用した線源Sr-90



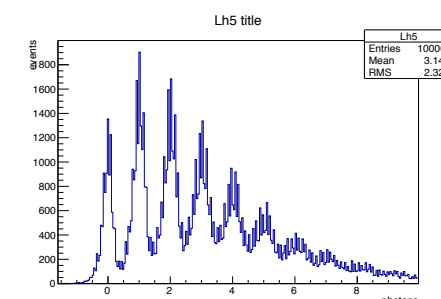
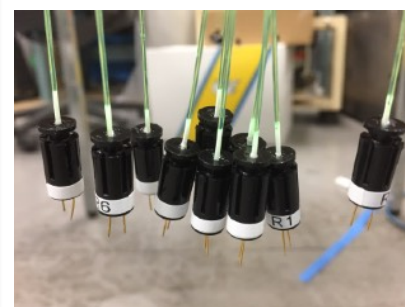
$$y_{rec} = \frac{\sum_{i=1}^{N_f=10} (N_{R_i} + N_{L_i}) \times y_i}{\sum_{i=1}^{N_f=10} (N_{R_i} + N_{L_i})}$$

▲ 光量重心の計算式

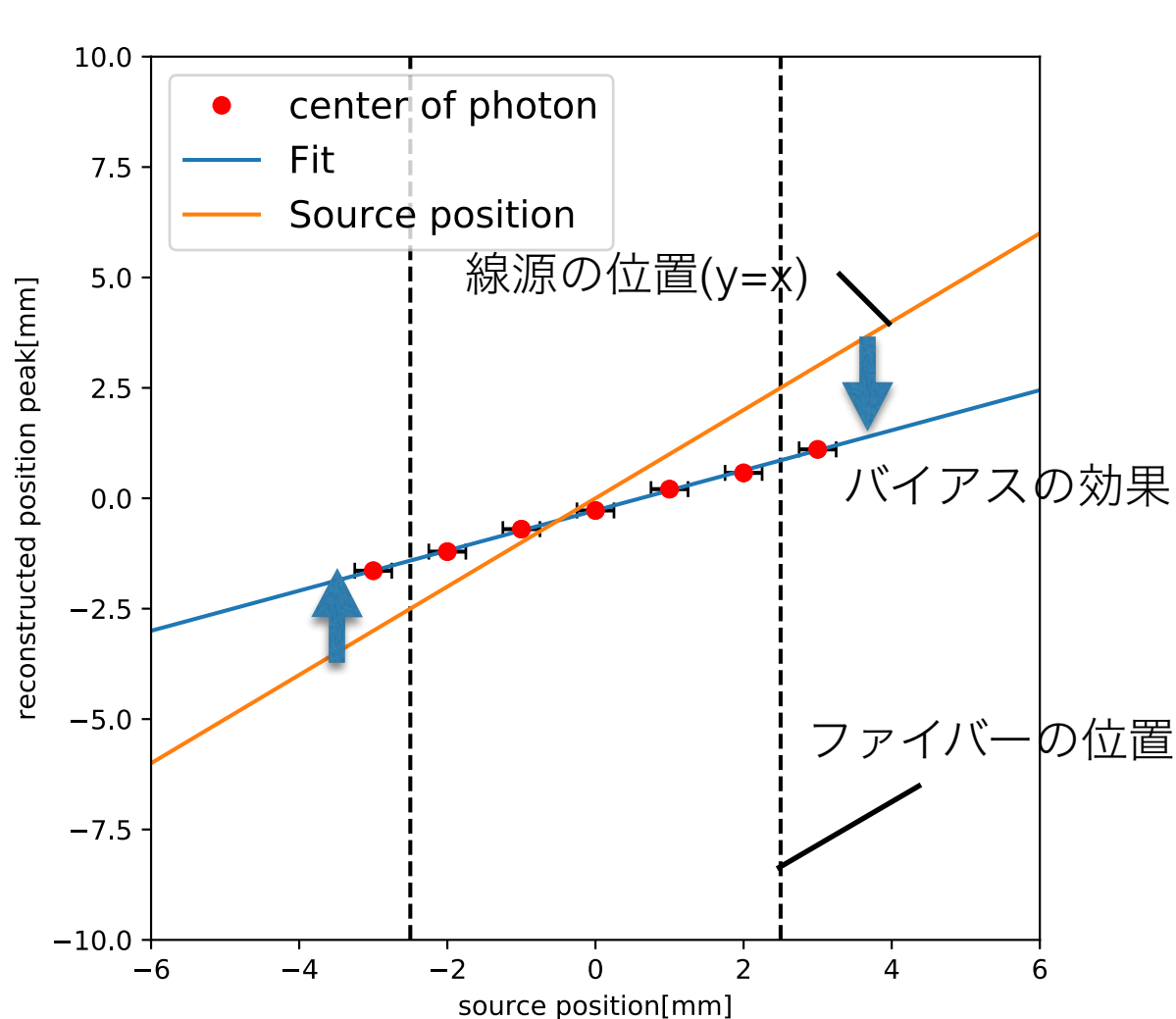
## 条件

- ファイバー16本(6本上面,10本下面)でテストを行った
  - 上面のファイバーについては片側・下面のファイバーについては両側の読み出しを行なった。
  - ファイバーはテープを用いて溝に固定
- \* 実機ではOptical cementで固定するため、光量の増加が見込まれる

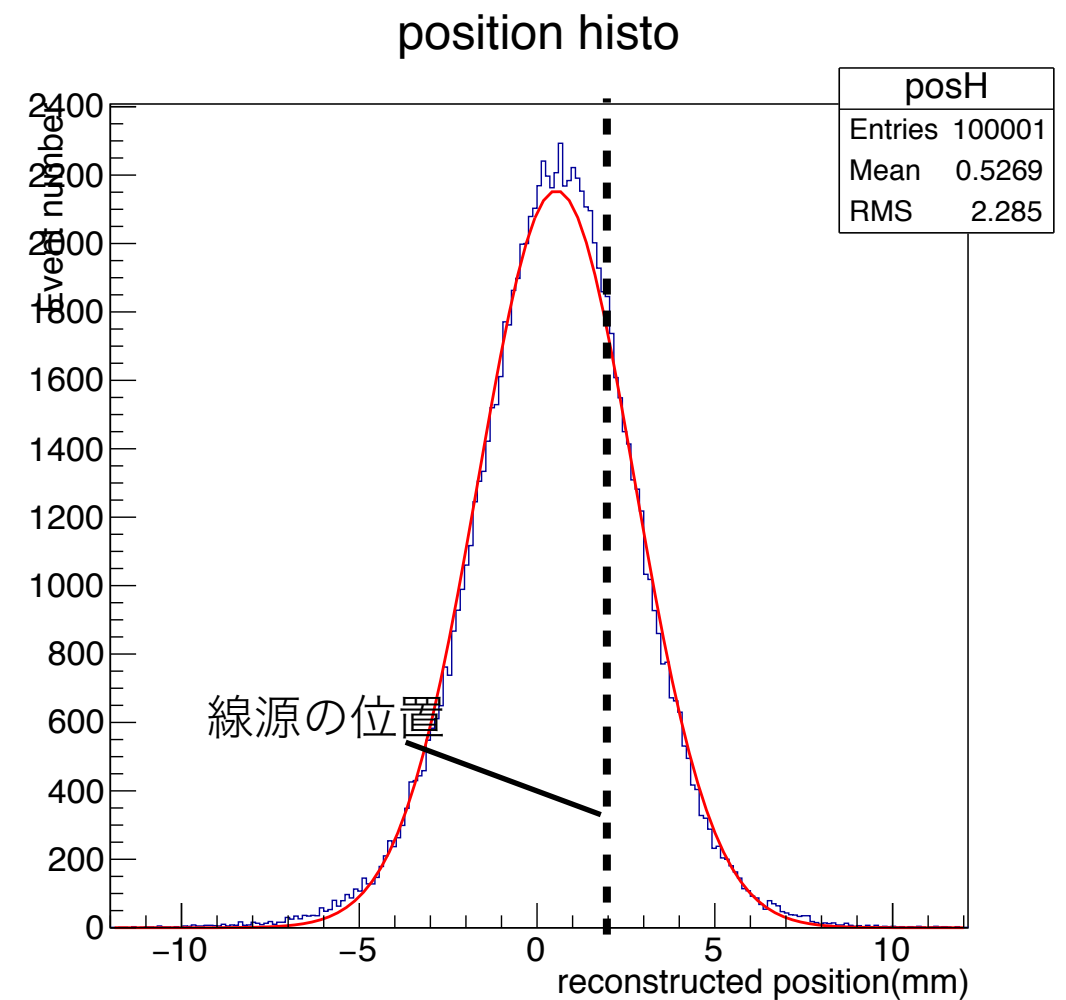
## DAQの流れ



# 光量重心の分布と位置依存性



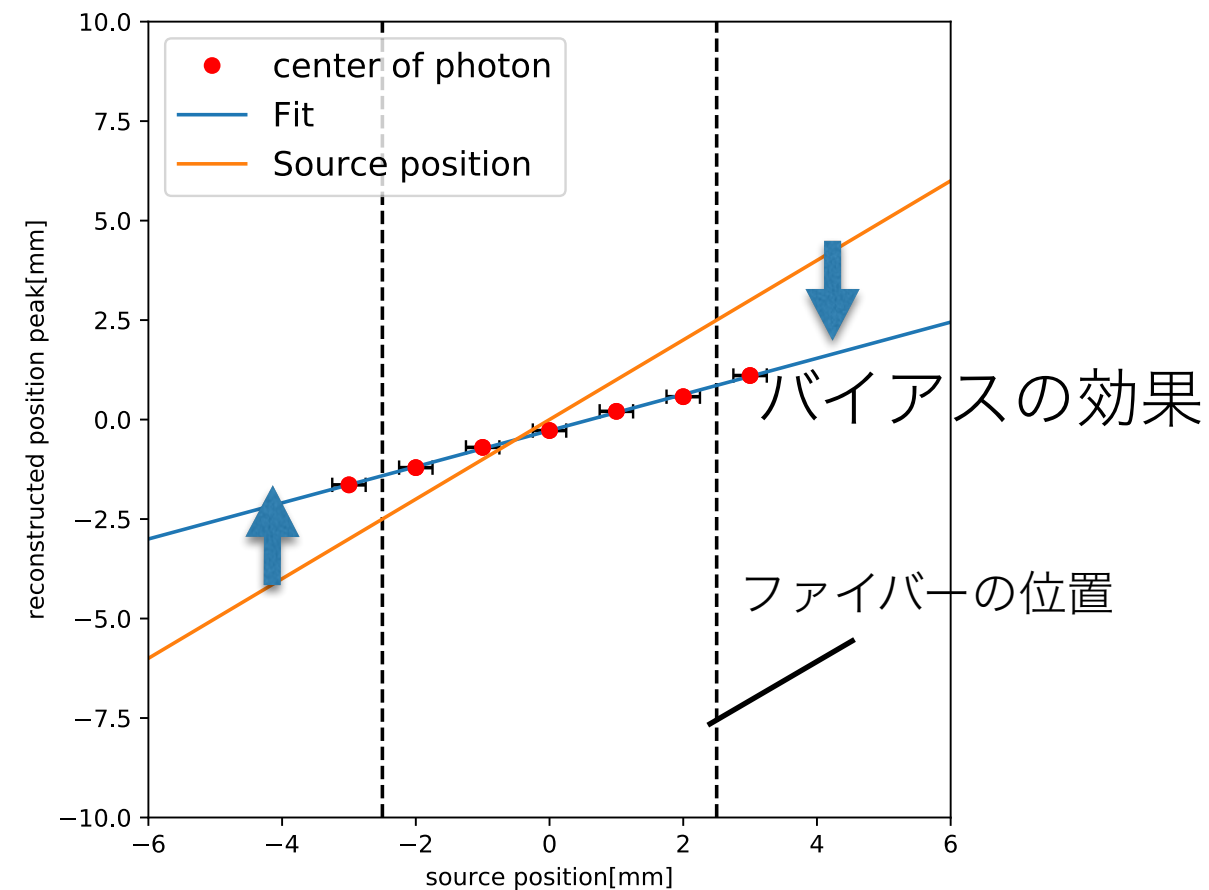
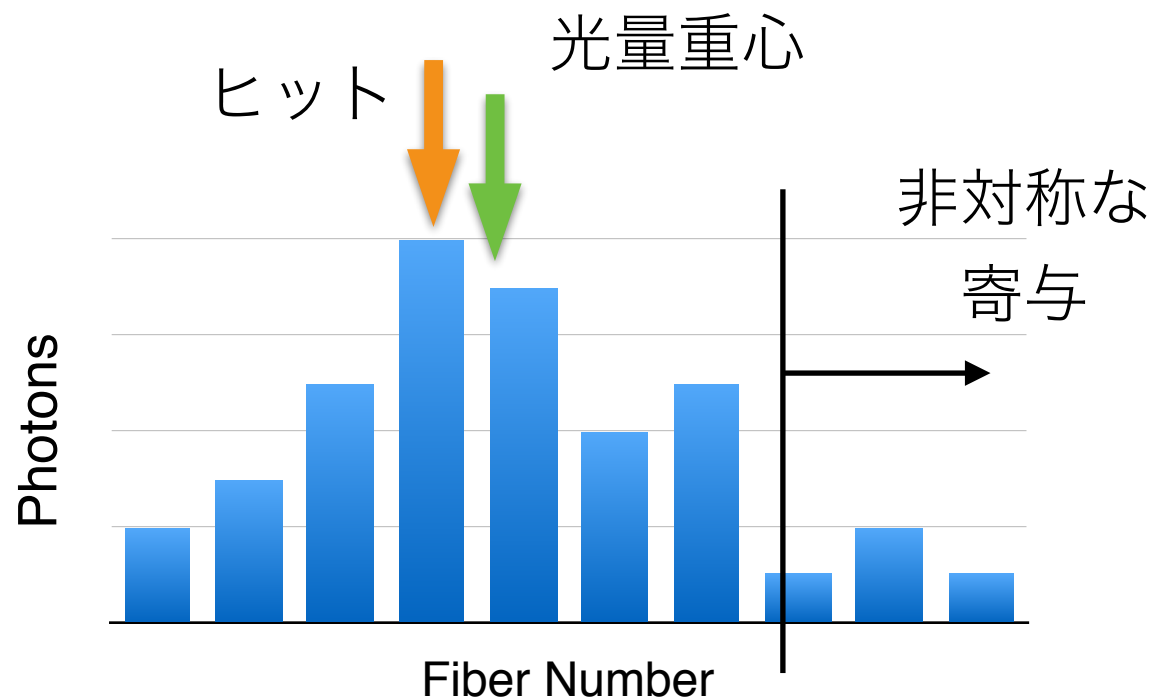
▲ 光量重心のヒット位置依存性



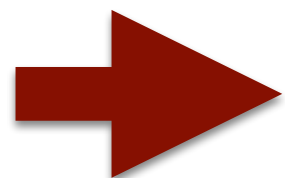
▲ 光量重心のヒストグラム

- 光量重心はヒット位置に対して**線形な応答をする**ことがわかった。
- 光量重心と線源の位置は一致していない。
  - バイアスがかかっているのはなぜか?

# 光量重心のずれ

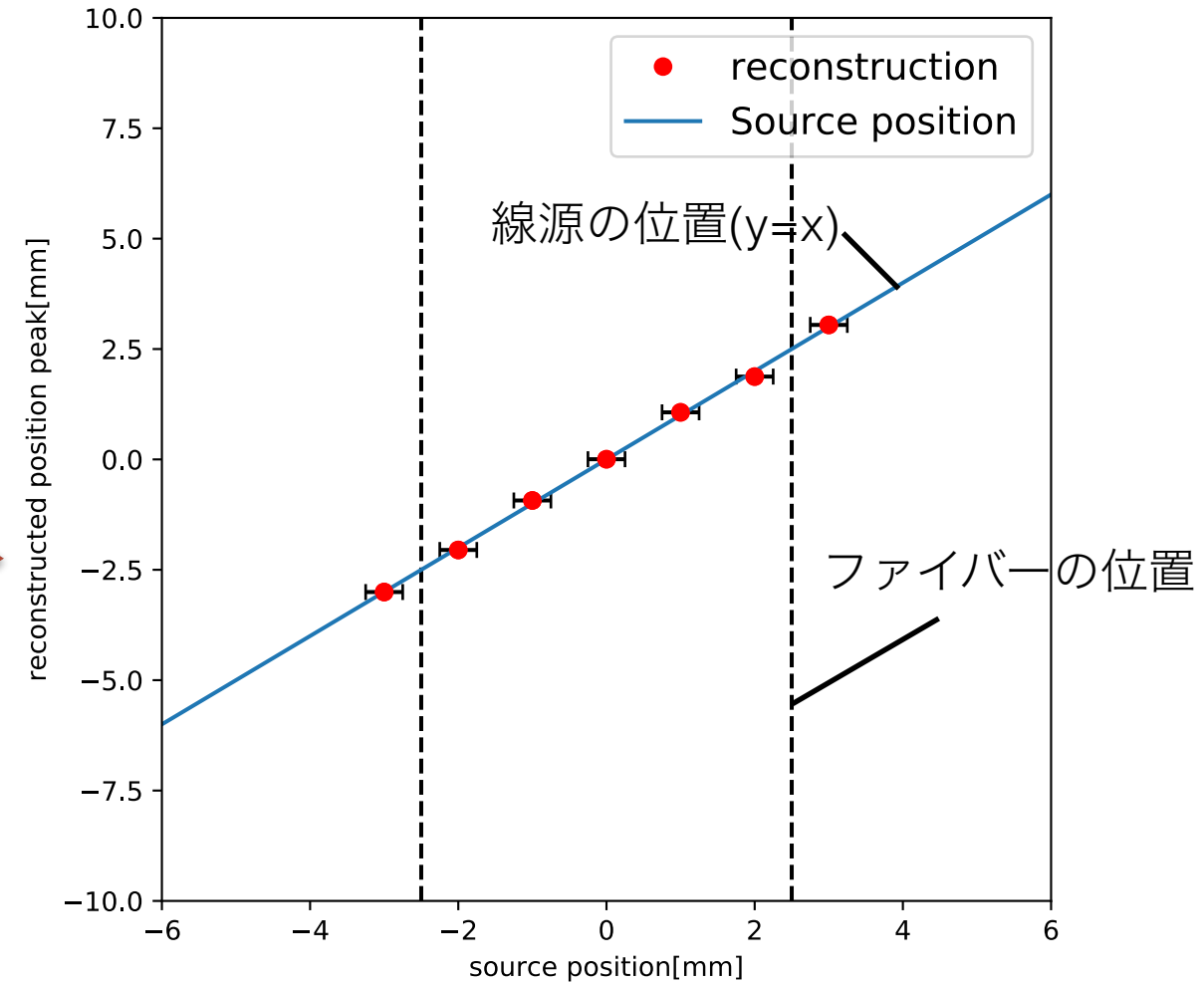
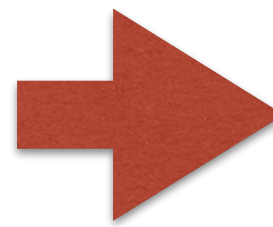
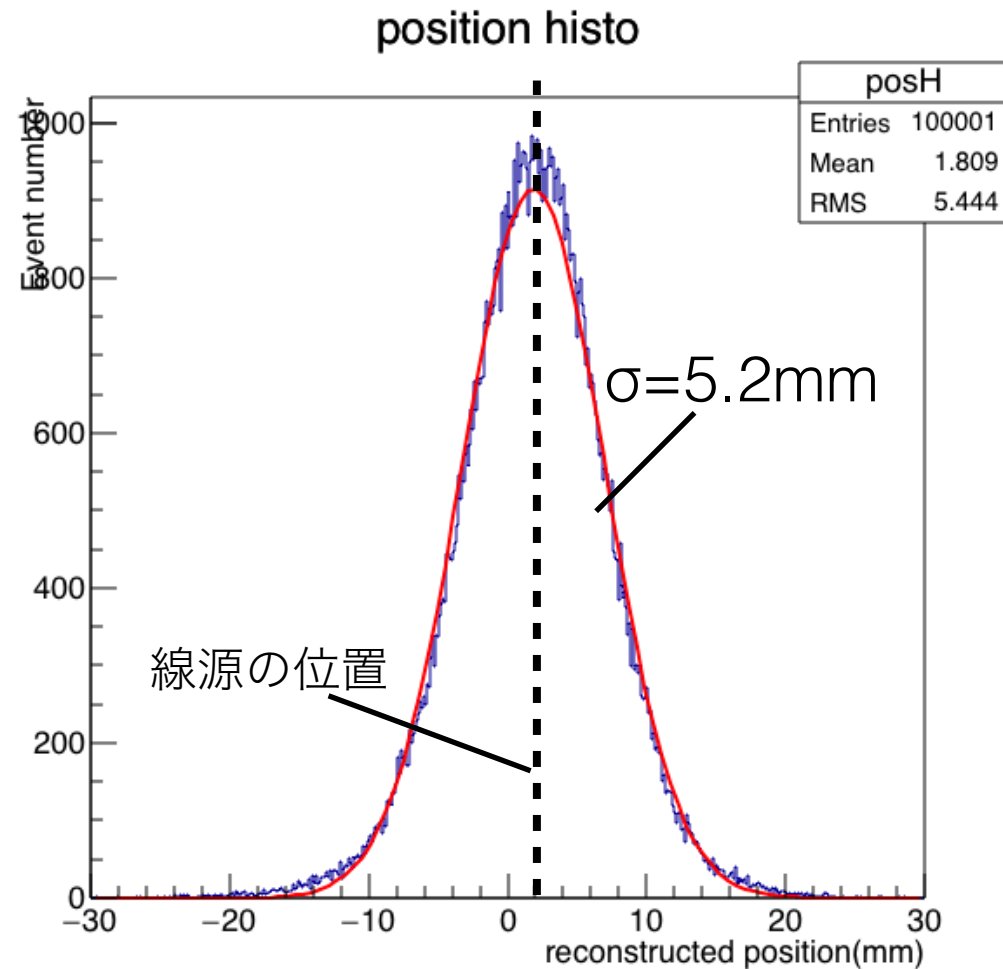


- 今回のテストでは、本番より大幅に少ない10本のファイバーの光量を使用
- A. 実際のヒット位置から見てファイバーの数が左右対称ではないため、光量重心と実際のヒット位置がずれる。
- B. 線源の位置のアライメントのずれ(系統誤差)も存在する。



直線によるフィットで較正

# 光量重心を用いた再構成の結果

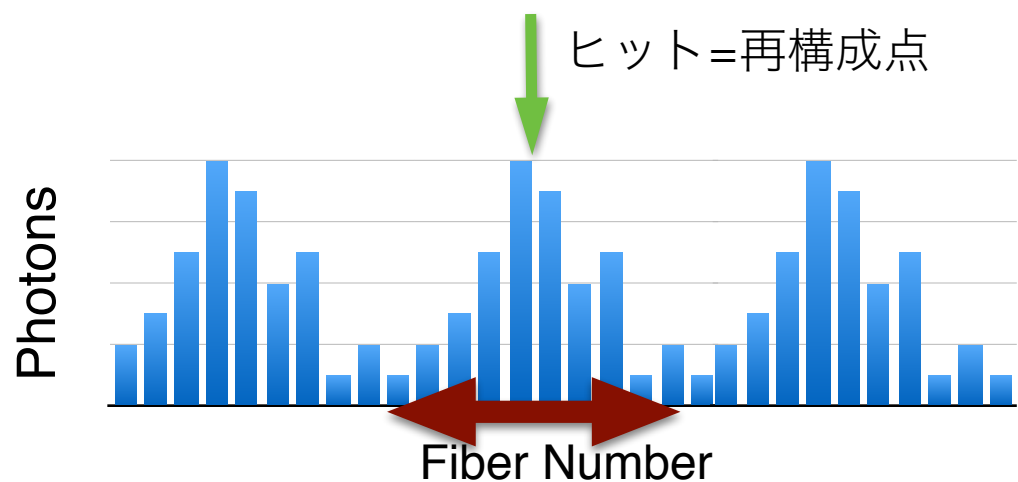


▲ 再構成位置のヒストグラム

▲ 補正の結果(位置依存性)

- **σ~5mm**の位置分解能が得られた。
- 宇宙線によるバックグラウンドやフィット誤差は極めて微小である。
- 実機でもこの手法を使うことができるだろうか？

# 再帰的再構成アルゴリズムの開発



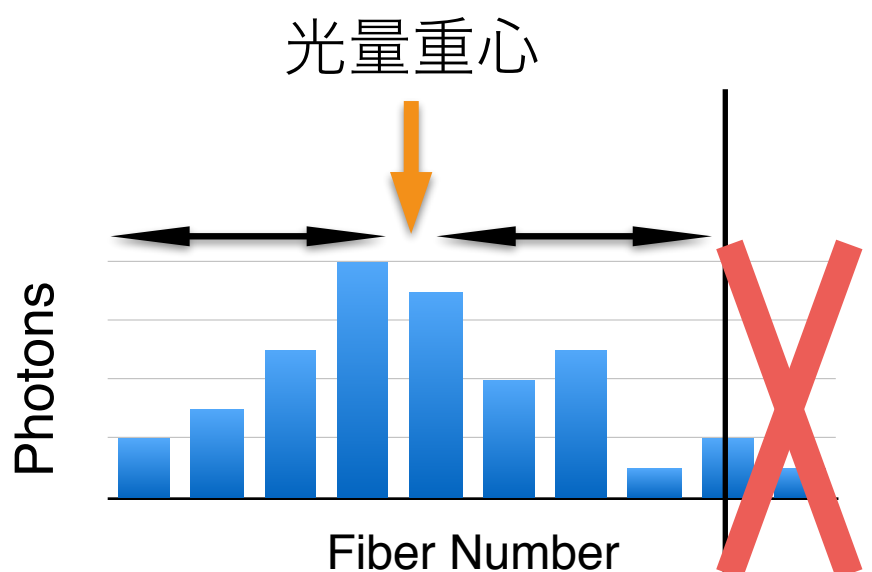
▲ 周期的な光量分布に対して適切な計算区間を選ぶことが必要

## 動機

- ファイバーをバンドルする場合、光量重心を計算する区間を適切に選ぶアルゴリズムが必要。

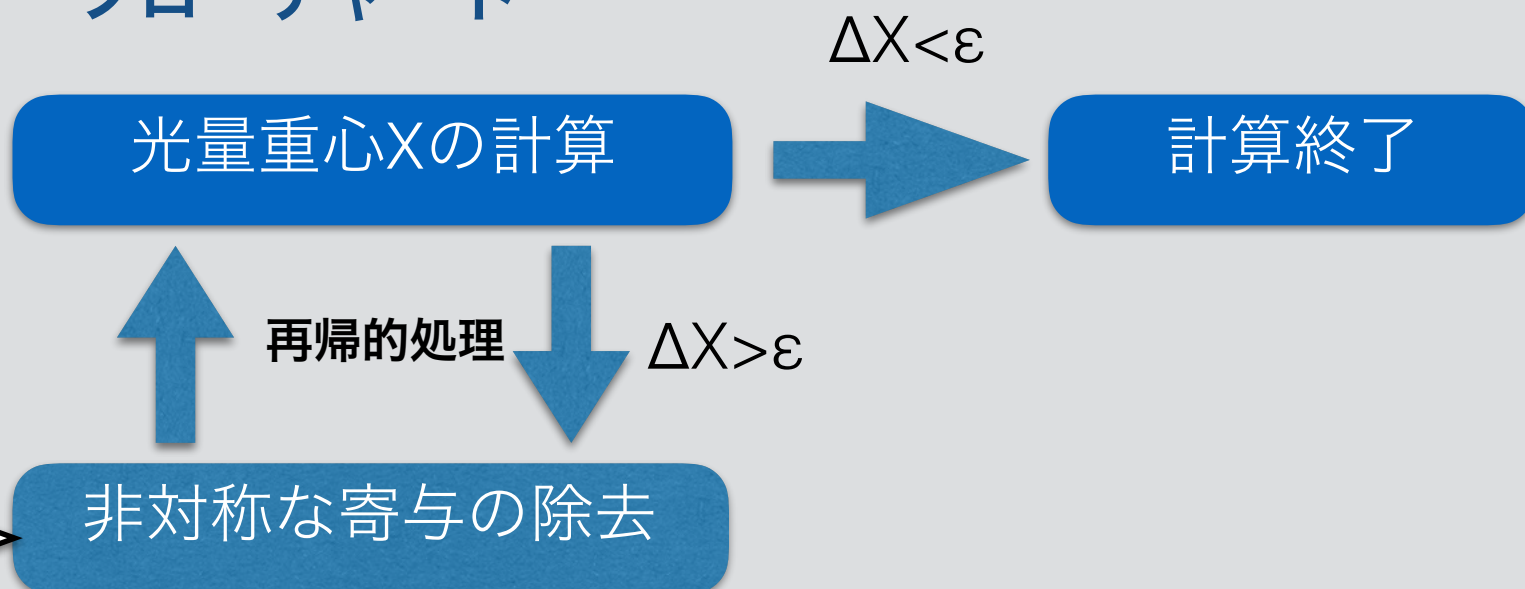
## 開発

- 今回、ファイバーの寄与のバイアスを是正する再帰的アルゴリズムを実装し試験した。

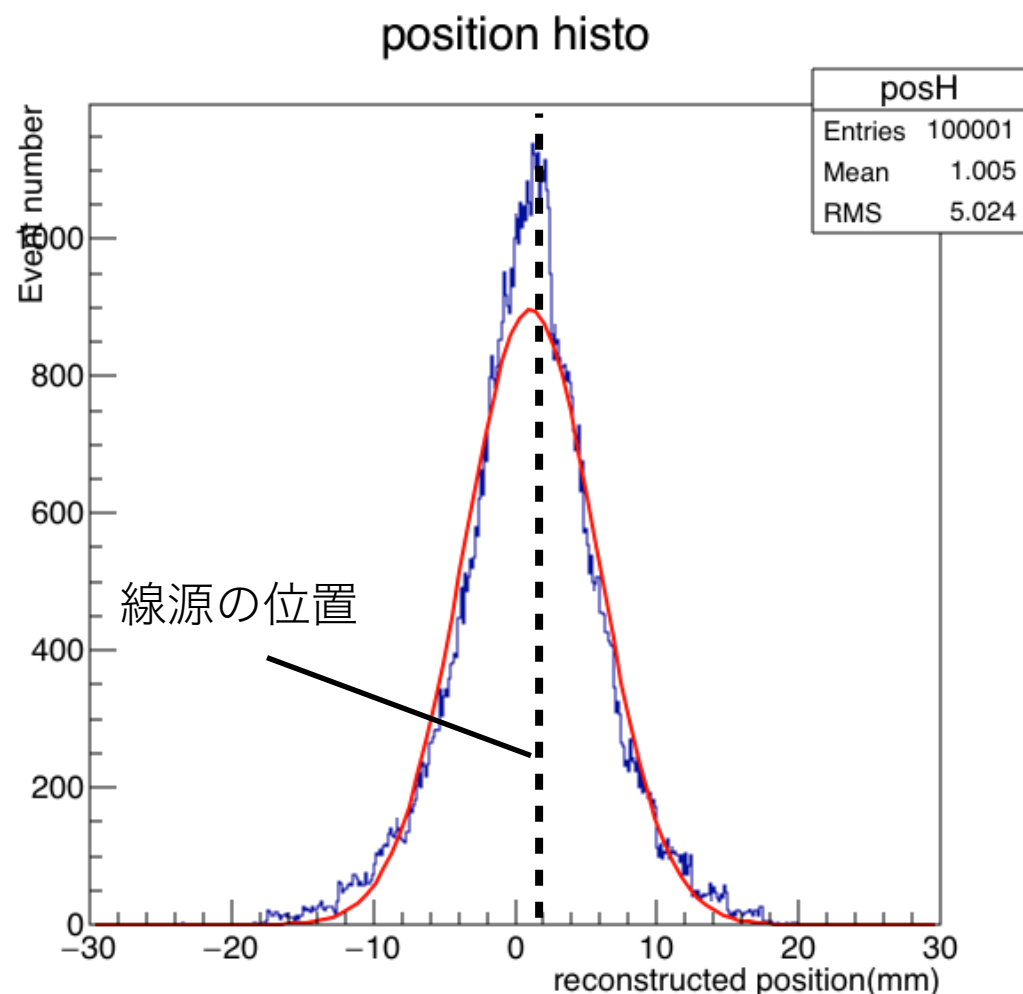


▲ 光量重心から見て左右のファイバーが均等な寄与をするよう重みを調整

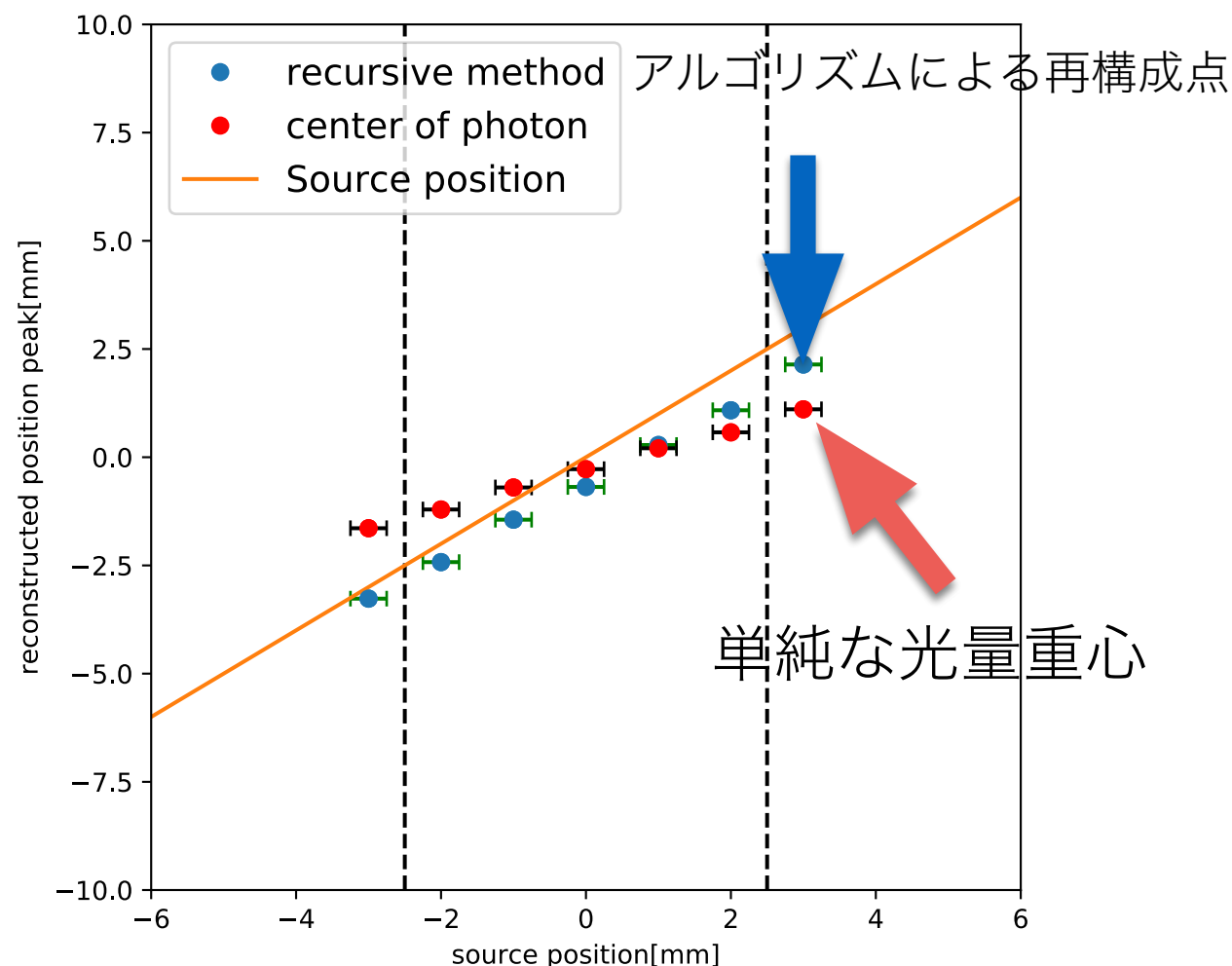
## フローチャート



# 再構成の結果



▲ 再構成位置のヒストグラム



▲ 再構成の位置依存性  
(線源の位置について系統的ずれが存在)

- 光量重心のバイアスがある程度是正することに成功した
- ただし、実際の線源の位置と再構成のピーク位置は一致しない

➡ 実機の製作に向けさらなる改良が必要



# Summary

## 背景

- ILCのAHCALの検出層の大型プロトタイプを**大量・安価・簡単**に試験したい
- **宇宙線を用いた試験**のために、5mm程度の位置分解能のあるカウンターが必要

## 目的

実機の製作に向けた

- 2次元的なヒット再構成を行う**カウンターの原理検証・性能評価**
- より良い**再構成手法・読み出しの提案**

## 結果

- 光量重心を用いた単純な再構成によって**5mm**程度の分解能を確認した
- バンドルを意識した再構成手法により、**自動的なバイアスの是正**を実現した

# Outline

- 背景・動機
  - ILC計画・ILDデザインとその検出器AHCAL
  - 大量試験用テストスタンドの必要性
- 実験・結果・解析
  - Sr線源を用いた実験での再構成の評価
  - 再構成アルゴリズムの開発
- **今後の見通し**
  - **実機の製作に向けた研究開発**

# 今後の課題

## 更なる原理実証

- より一般的な状況での再構成の評価
  - 放射線が斜めに入射した場合
  - プレートの端近くに入射した場合
- バンドルした状態でのヒット位置分解能の評価(シミュレーション)

## 実機の製作に向けた準備

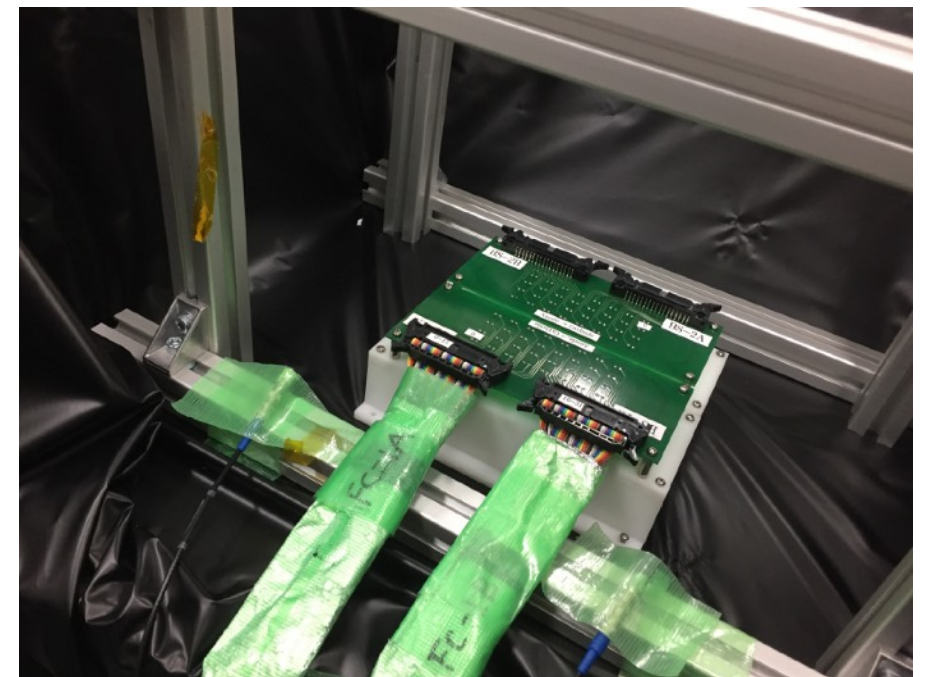
- バンドルした場合に用いる再構成アルゴリズムの改良
- コミッショニングに向けたエレキの整備
- バンドルしたファイバーをMPPCにどうアラインメントするか

6月から実機を製作

7月末での完成・導入を目指す

# 謝辞

- 東大横山研の横山先生と竹馬さん(D2)にはMPPCの読み出し設備(EASIROCなど)に関して非常に手厚いサポートをいただきました。
- 信州大の竹下教授にはEASIROCモジュールをお借りいたしました。
- ご協力ありがとうございました。



ご静聴ありがとうございました

Back Up



# Back up index

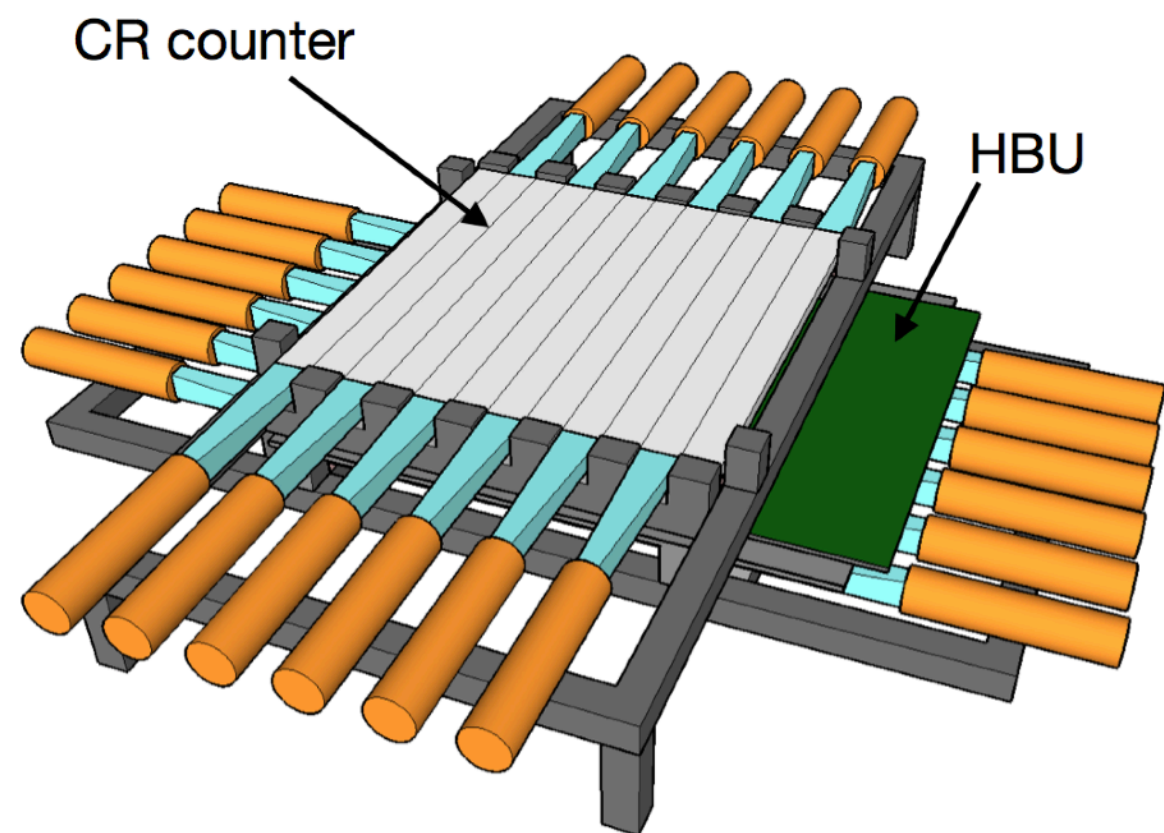
- Mainz における先行研究
- AHCALの詳細なデザイン(ILC TDRより)
- HBU(Hadron Base Unit)の詳細なデザイン
- 実験セットアップの詳細
- EASIROC出力の光量への変換
- シンチレータ内での光の減衰
- プレート上の座標系
- ファイバー出力の補正
- 線源を用いた実験の正当性
- WLSファイバーについて
- EASIROCモジュールの機能について
- EASIROCモジュールにおけるPeak Holdの様子
- 片側での読み出し結果について

# 先行研究(Mainz)

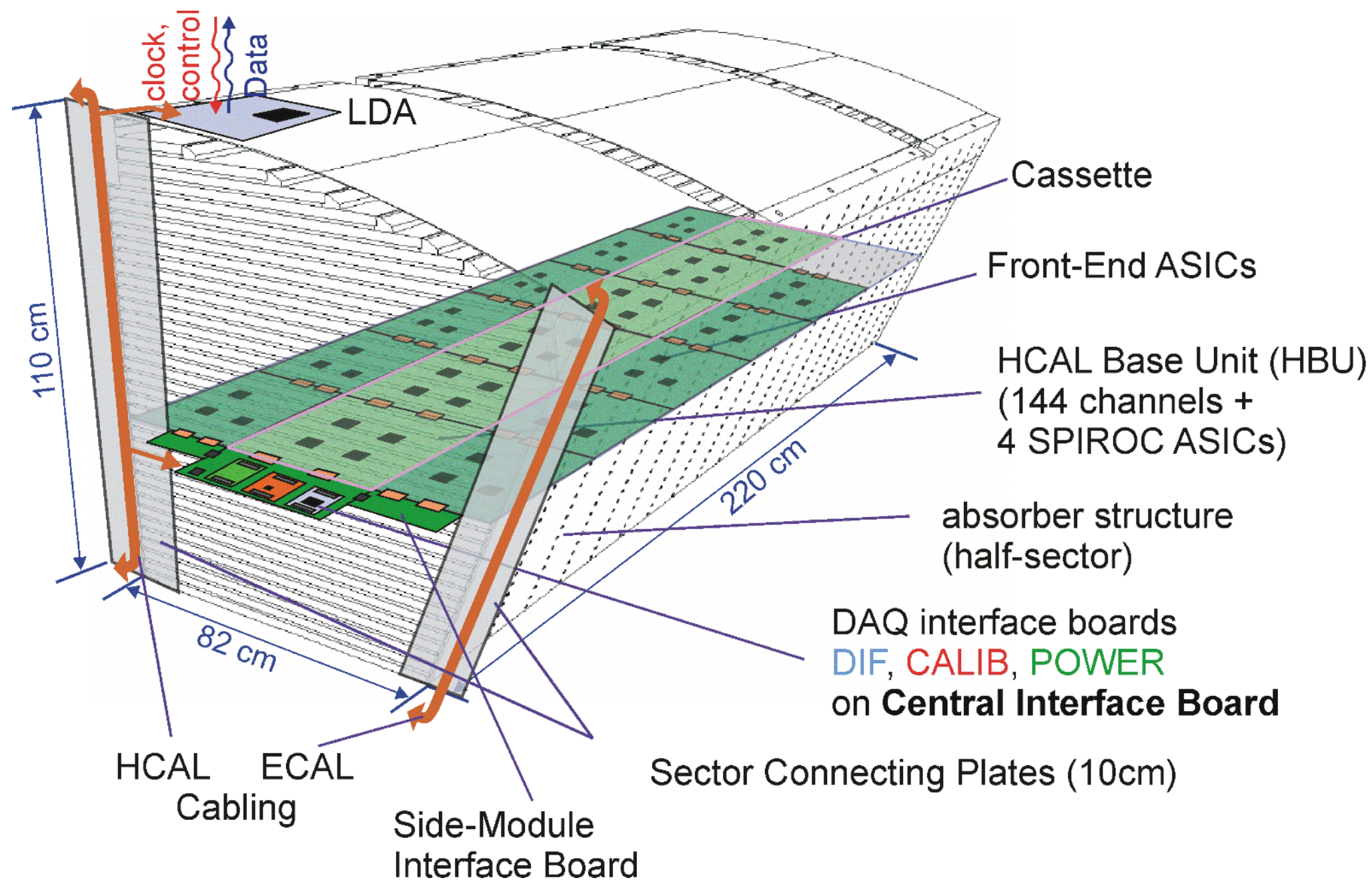
- マインツ大学でも同様のテストスタンドが開発されているが、単なるトリガーカウンターとしての機能にとどまっている。

## Mainz CR test stand

- Scintillators on top and bottom of SMD HBU board to trigger cosmics
- Strip design for cost reduction
  - Each strip  $36,5 \times 3,015 \text{ cm}^2$
- Components:
  - 24 PMTs
  - 24 ch. HV
  - 24 ch. VME discriminator
  - Dark box ( $1,8 \times 1,3 \times 0,8 \text{ m}^3$ )
  - FPGA for trigger logic, event validation, time stamping of triggered events

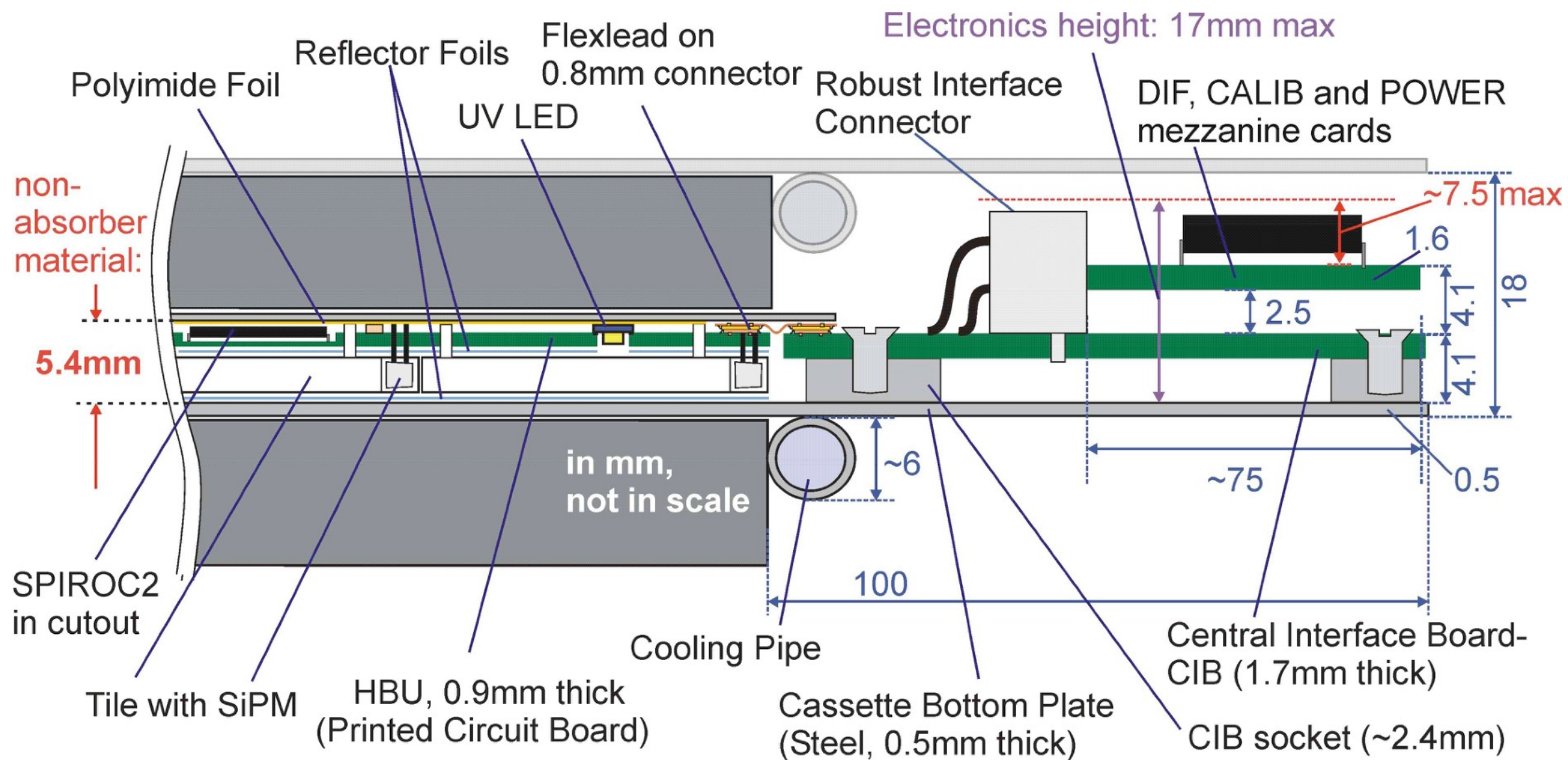


# AHCAL Design





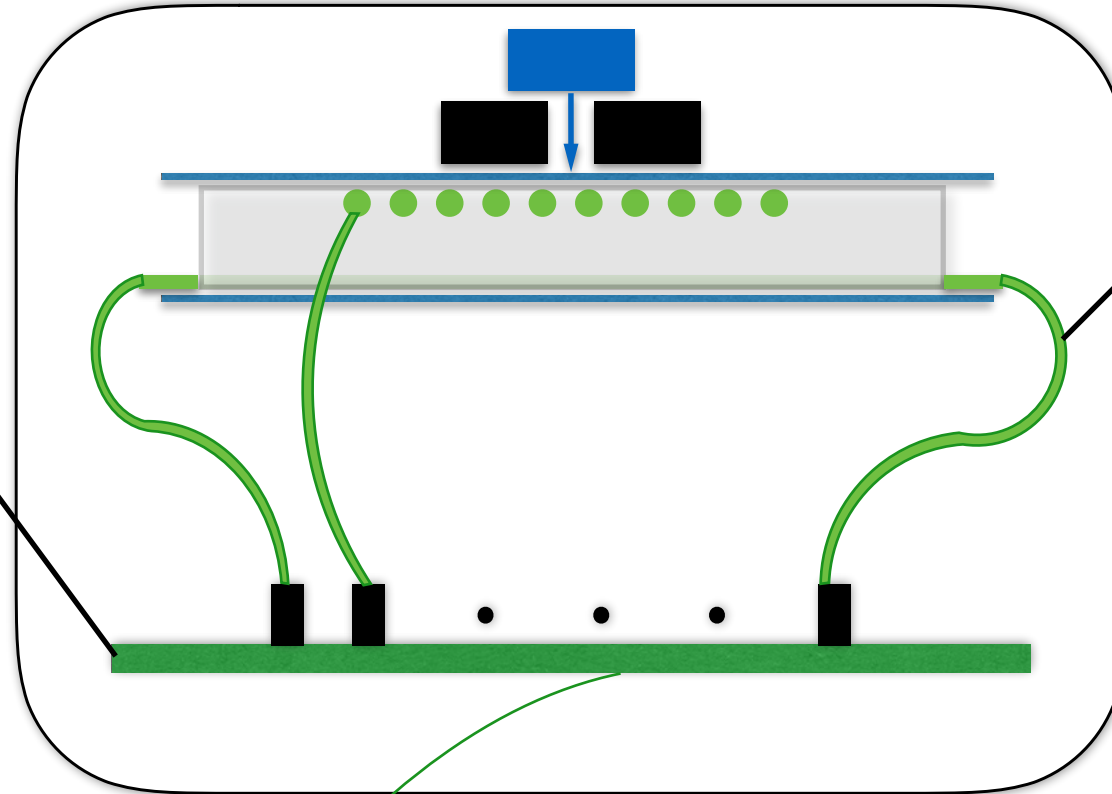
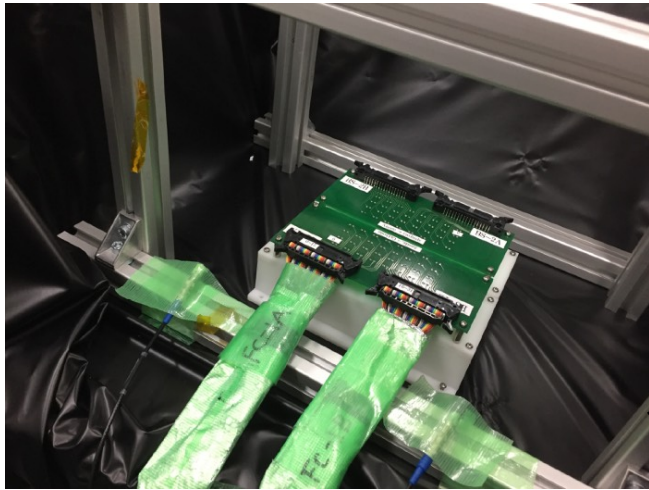
# HBU (Hadron Base Unit)



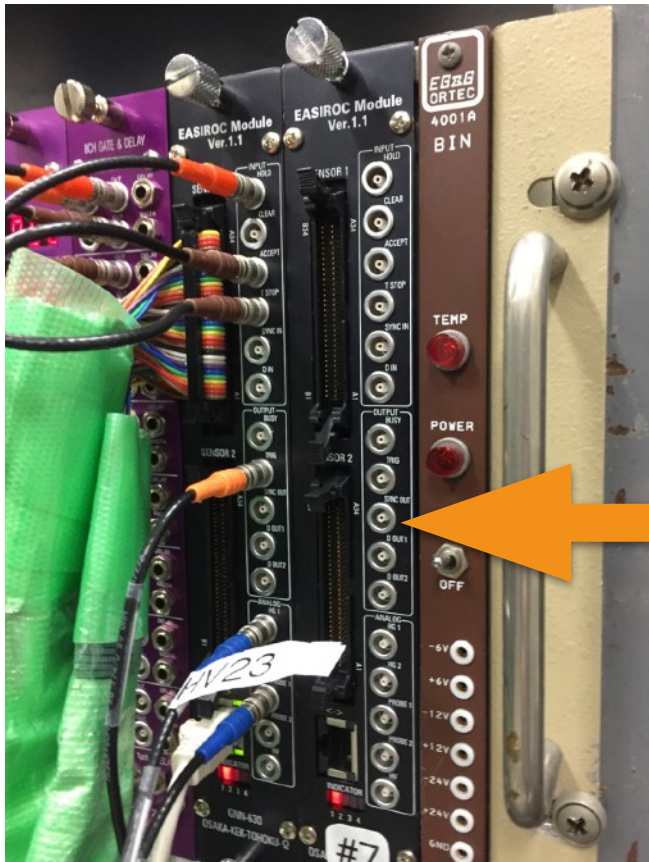
# 実験セットアップの詳細

遮光用ブラックシート

WLSファイバー

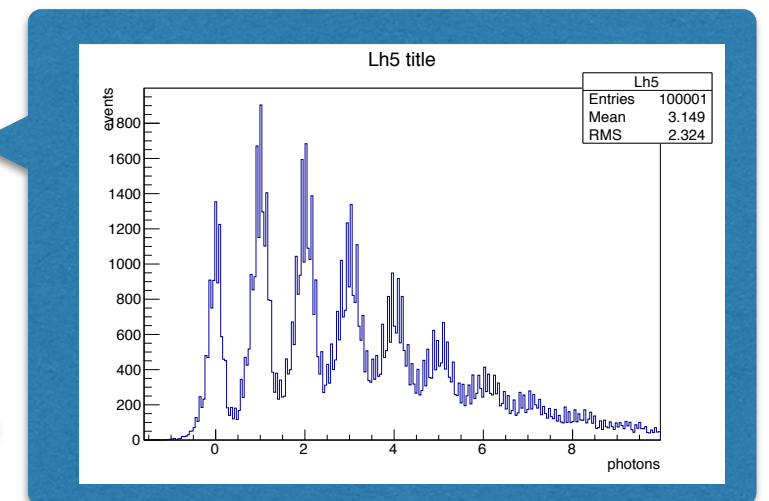
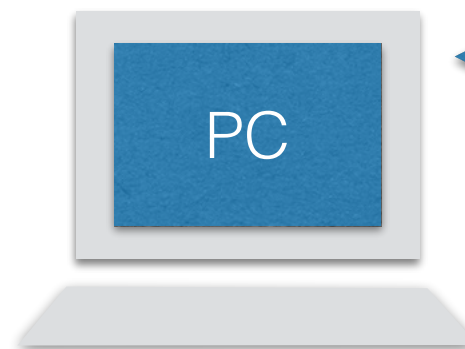


▲ ブラックシートによる遮光



EASI  
ROC

Ethernet

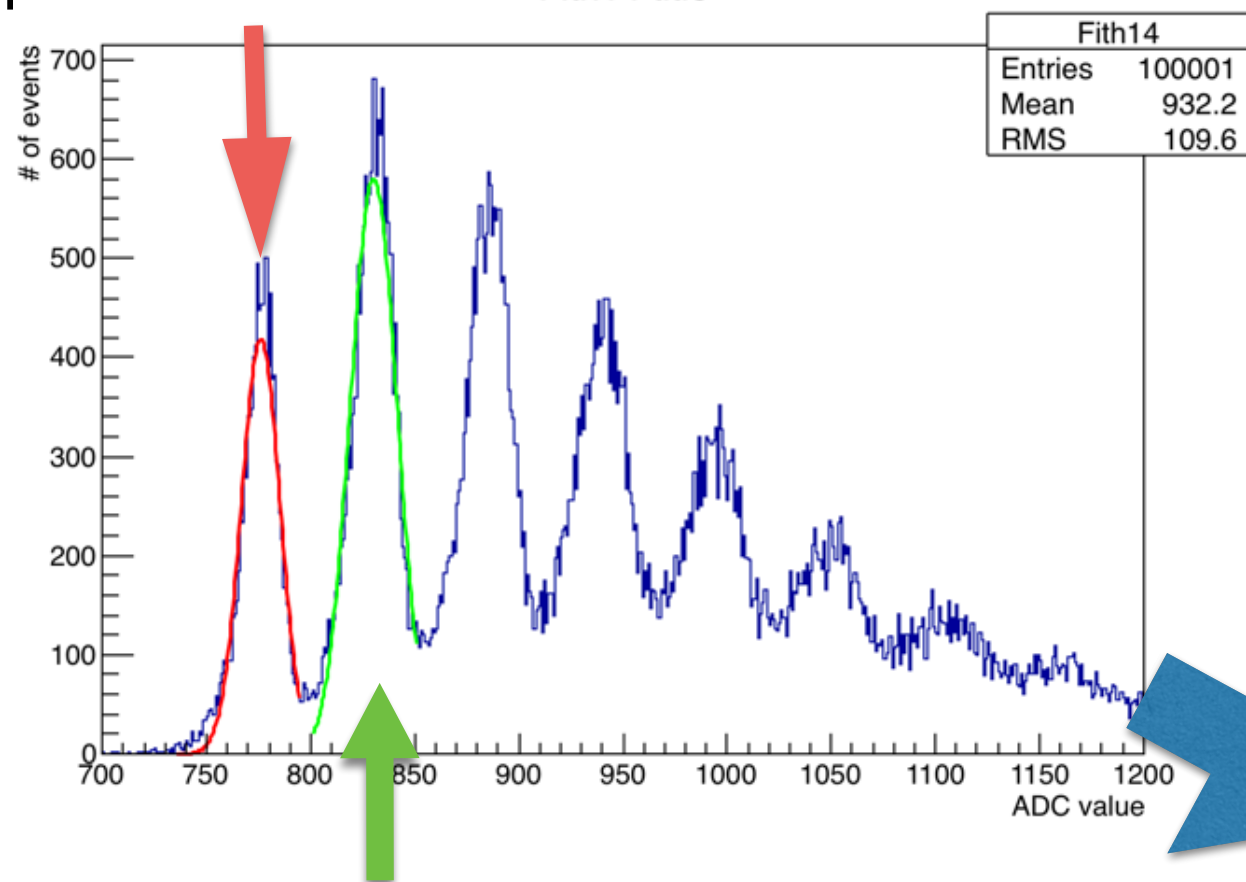




# ADC → Photon Count

pedestal

Fith14 title

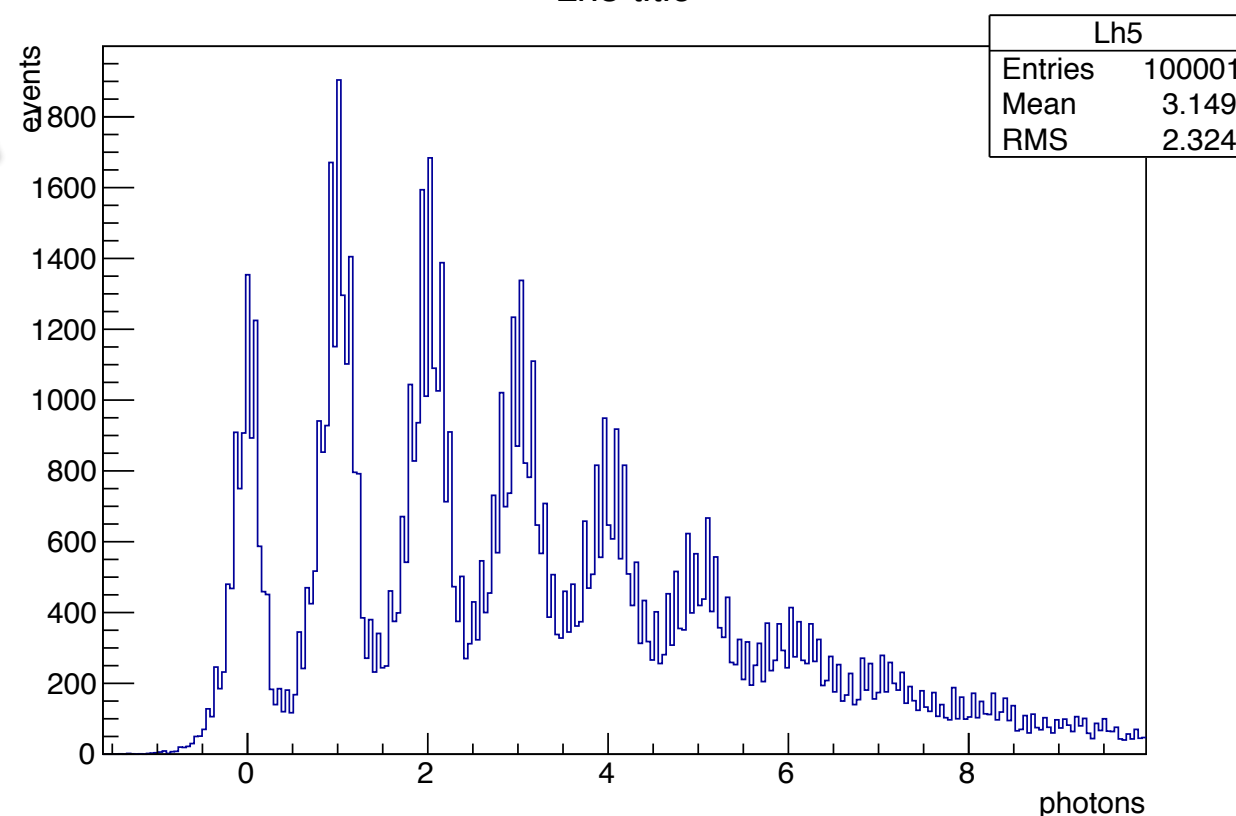


- フィットによりペDESTALとゲインを求めた

1 photon

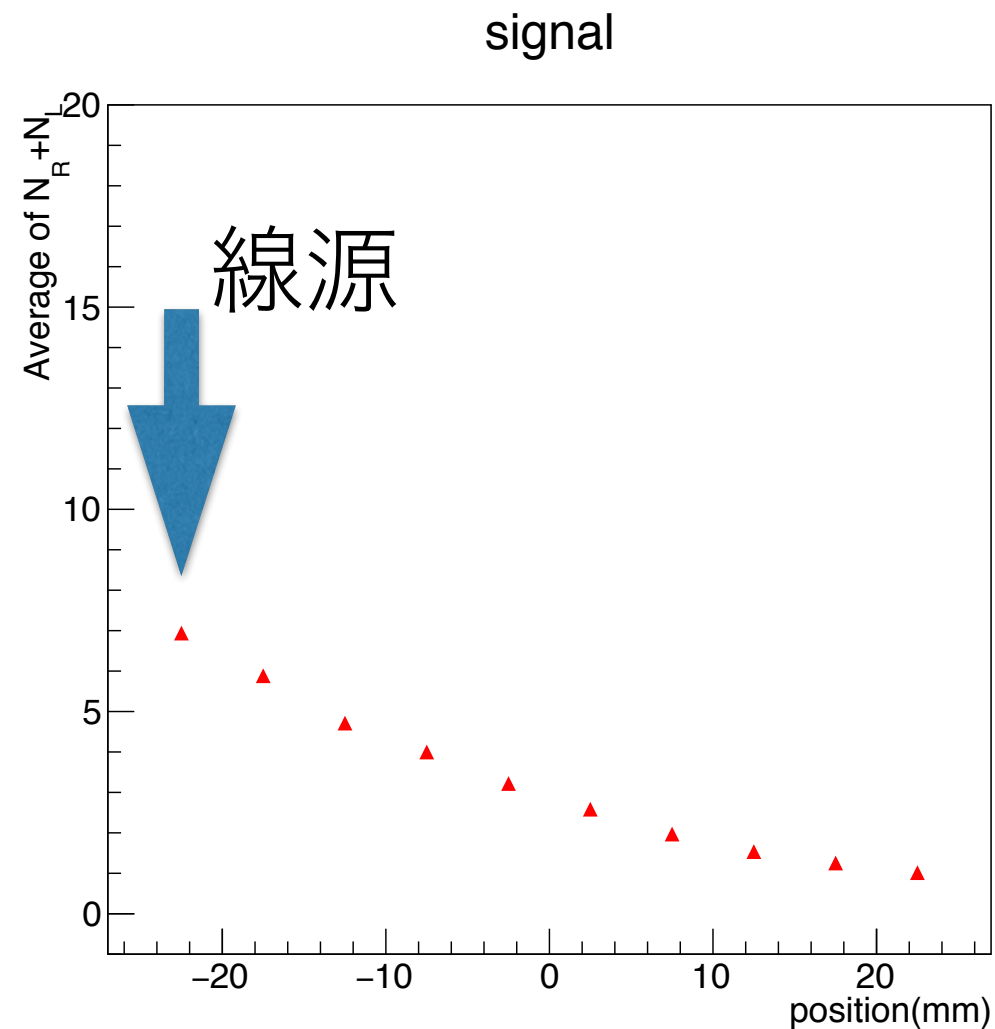
- EASIROC moduleはMPPCの信号をshapingして波高をデジタルに出力する

Lh5 title



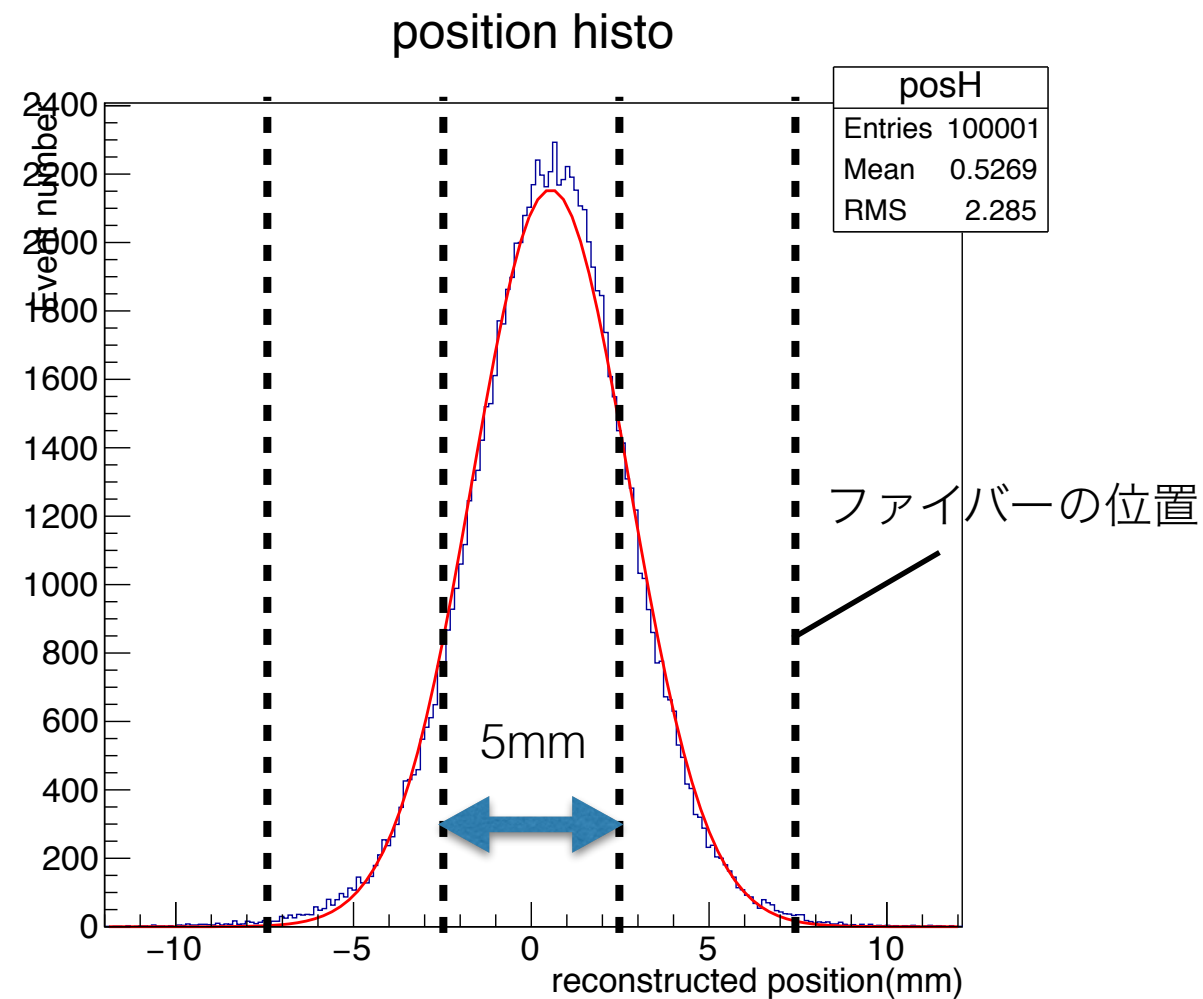


# シンチレータ内での光の減衰



- 10本のファイバーのうち、端のファイバーの直上に線源を置いた場合の両端の光量の和の平均のグラフ。
- 線源から離れるにつれ、ファイバーが集光できなくなっていることが確認できる。

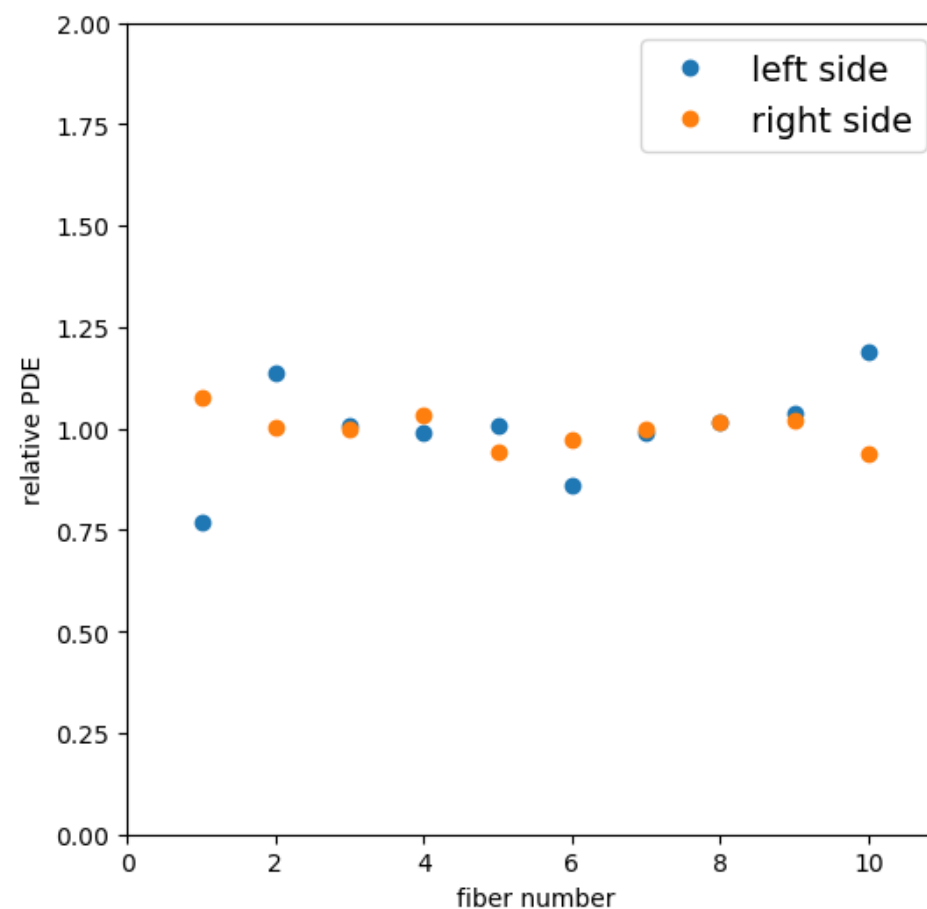
# プレート上の座標



- 10本のファイバーの真ん中を原点とした。
- WLSファイバーは5mm間隔で彫られている溝に埋められている。

# Equalization

- チャンネルごとの集光率(Photon Detection Efficiency,PDE)は、線源を直上に置いた場合の平均の発光量で比較し、較正した。

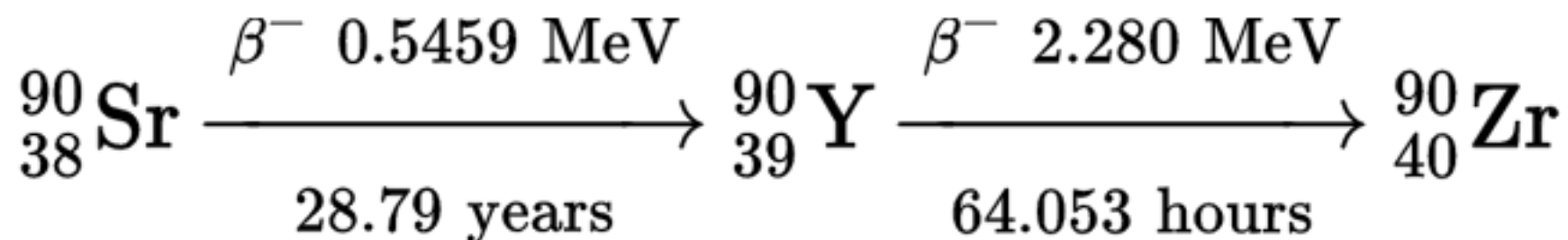


発光量の差異はファイバーの浮き具合や、MPPCとのアライメントなどが原因だと考えられる。

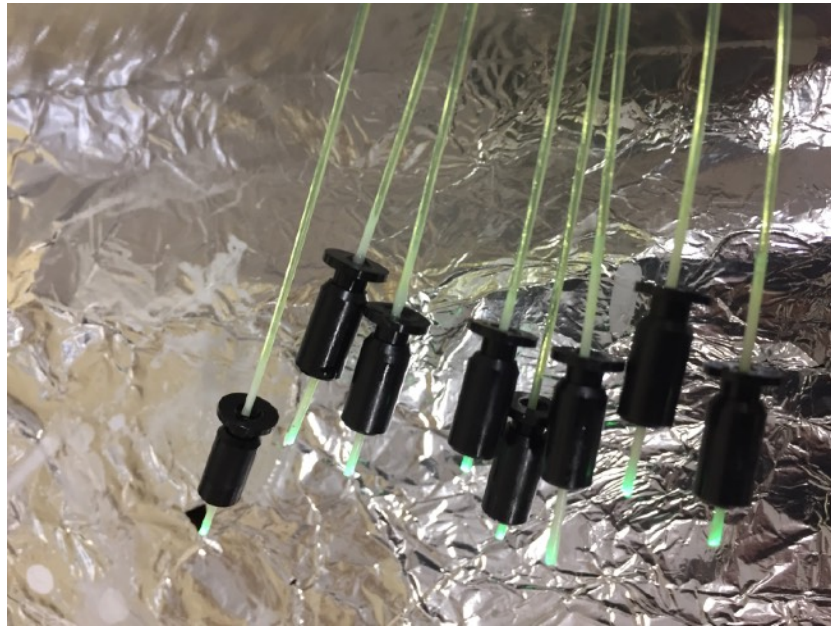
# 線源を用いた実験の正当性

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 z^2}{m_e v^2} N Z \left[ \ln \frac{2m_e v^2}{I} - \ln \left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \right) - \frac{v^2}{c^2} \right]$$

- エネルギー損失は粒子の質量ではなく速度による。
- 宇宙線のミュオンは相対論的であり( $\beta \sim 0.99$ )、最小電離粒子(MIP)である。
- Sr-90線源からは連続スペクトルを持つ $\beta$ 線が放出される。そのため最小電離粒子とは言えないが、エネルギー損失は15%程度しか変わらないことがわかっている。
- 今回の実験では線源によるイベントは宇宙線によるイベントより $10^3$ 程度頻度が高いため、宇宙線バックグラウンドをほぼ無視することができた。



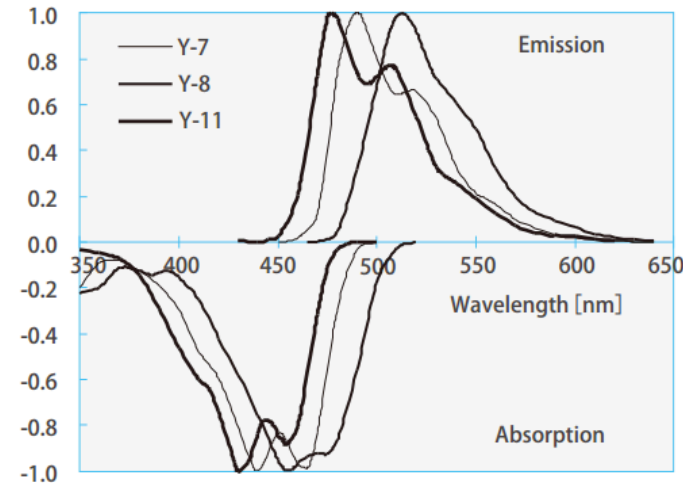
# WLS(WaveLength Shifting)ファイバーとは？



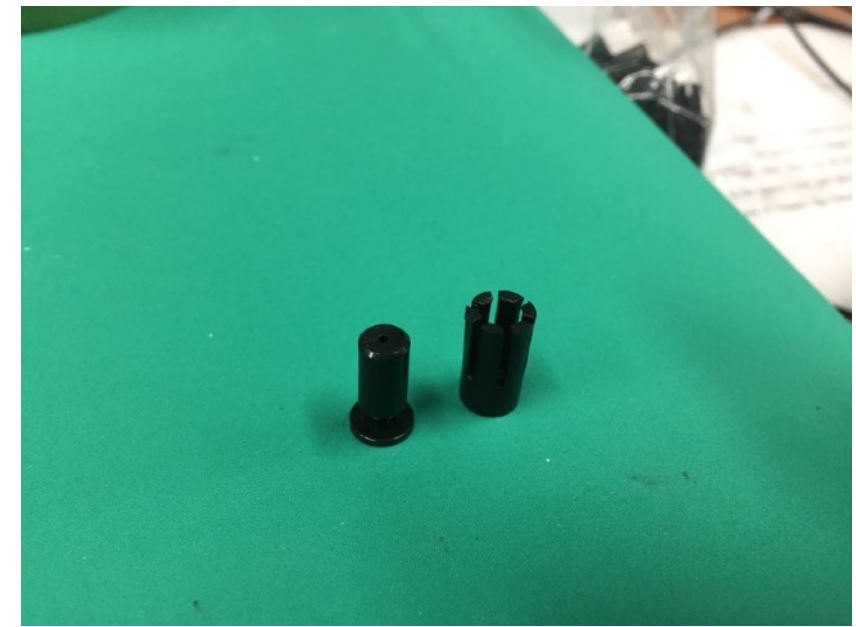
▲ WLSファイバーとGOMIコネクタ

Absorption and Emission Spectra .....

Y-7, Y-8, Y-11



▲ 吸収/発光特性



▲ GOMIコネクタ

- シンチレーション光をMPPCで検出するのに適した波長に変換するファイバー。
  - 内側の波長変換材が光を吸収し、より長い波長の光を出す。
  - そのうちファイバーの境界面で全反射する光が伝播する。
- MPPCとのアライメントにはGOMIコネクタ(T2K実験にて開発)を用いた。



# EASIROCモジュールとは

Discriminator

ADC

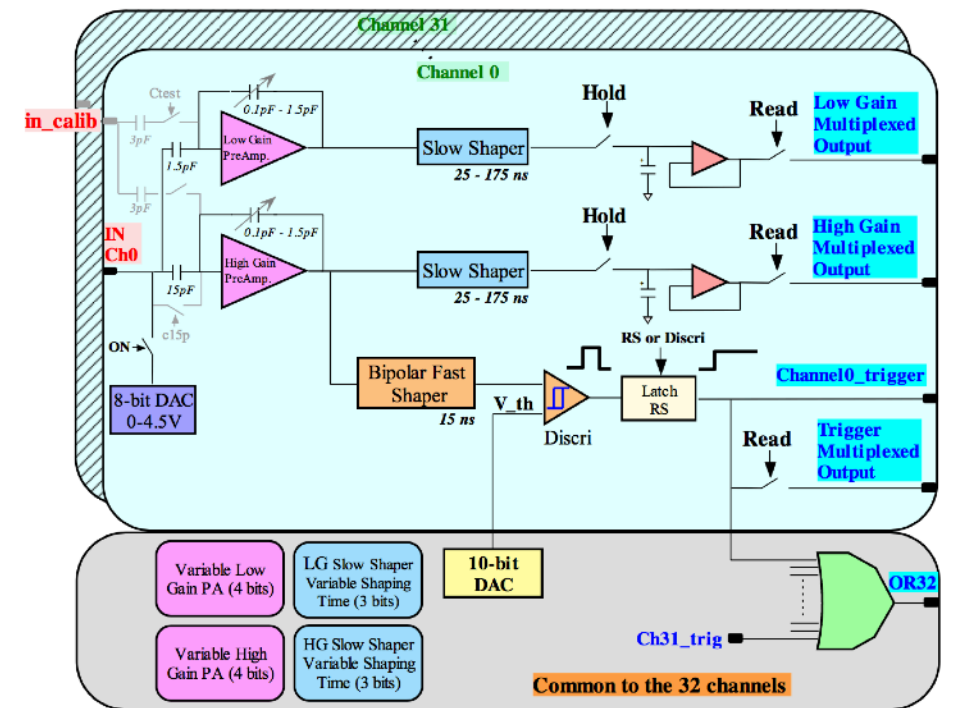
HV微調整  
用DAC



HV

Amp

Shaper

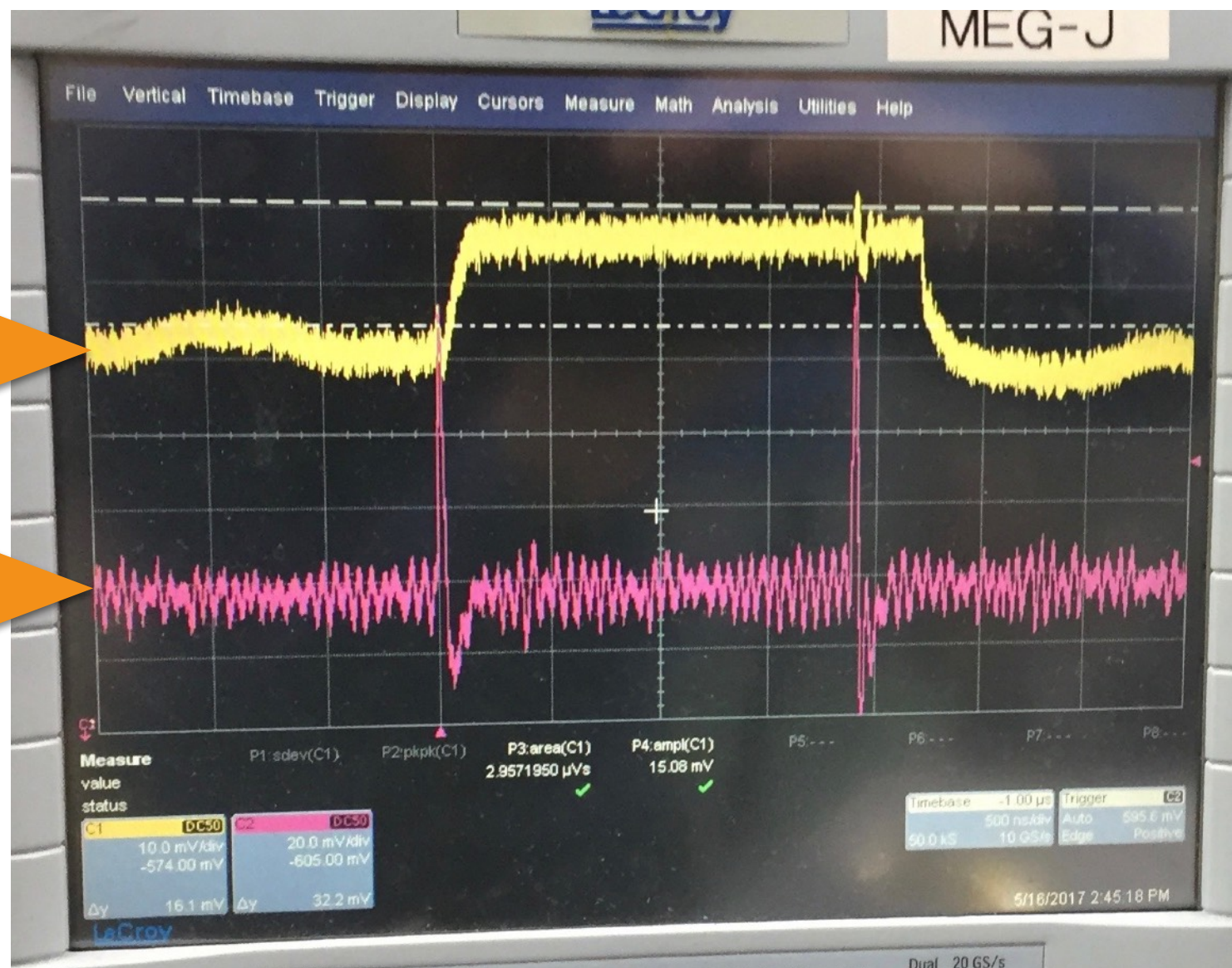


▲ EASIROCモジュールの回路図

- EASIROCモジュールは、多チャンネルのMPPCの信号をまとめて読み出すことのできるモジュールである。
- Shaperの波高をADCで変換し、Ethernetを介したTCP通信でPCに転送する。

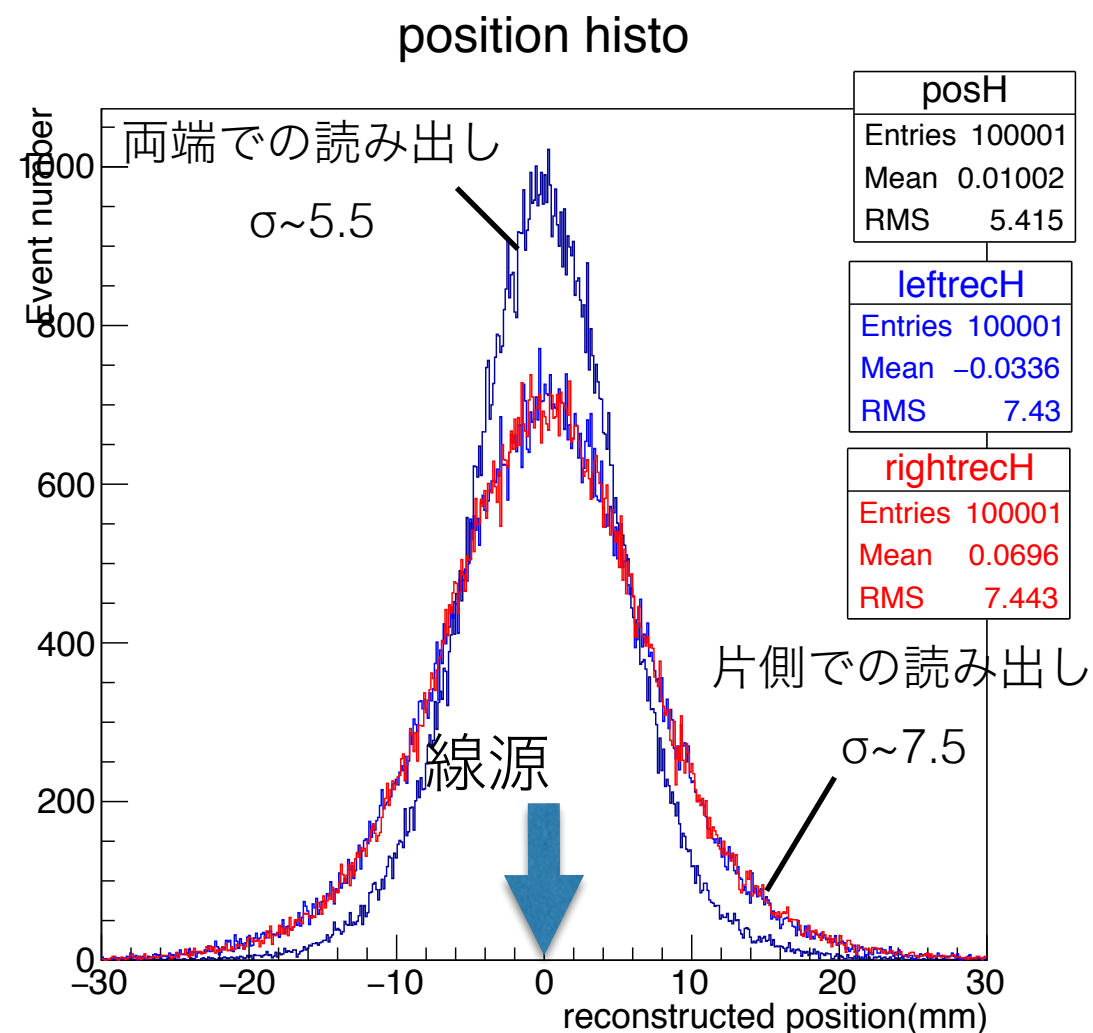
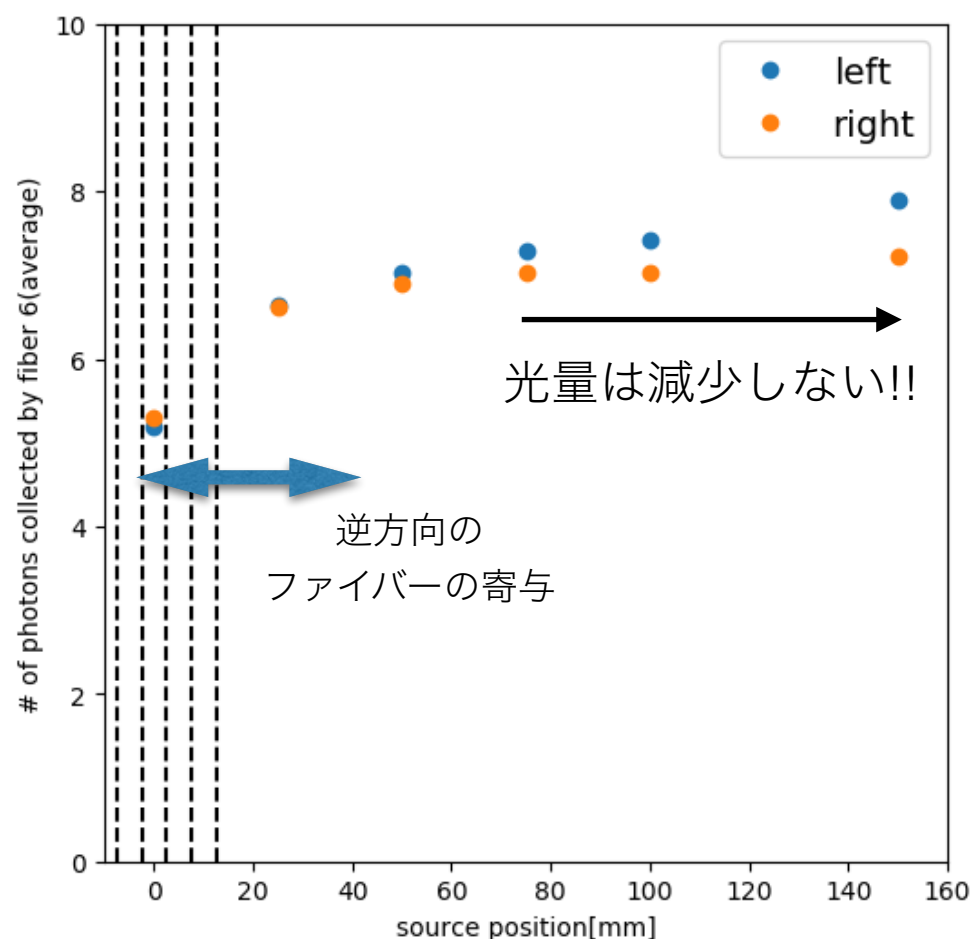


# EASIROCにおけるPeak Holdの様子



- 私が今回使用したEASIROCでは、Shaperの波形のピークを手動でホールドする必要があった。

# 片側での読み出し



▲ 光量のファイバーに平行な方向の依存性

▲ 読出しと光量重心の分布

- ヒット位置から離れた側から読み出しても光量は減少しない。
- 片側で読み出した光量のみを使用する場合、分解能は40%程度悪化する。