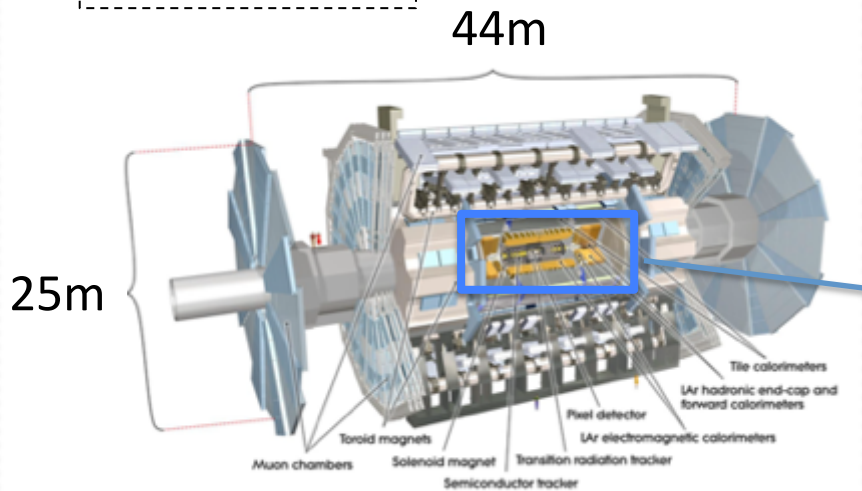


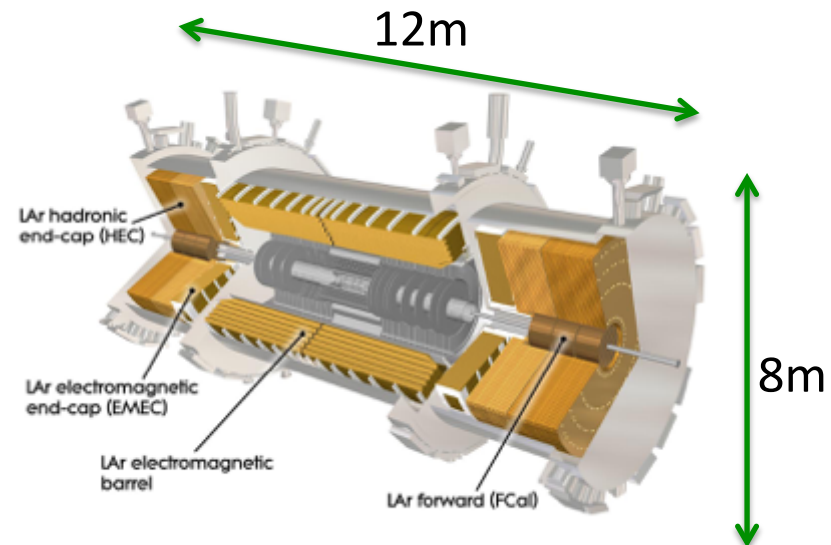
ATLAS LAr カロリーメータアップグレード : エネルギー再構成のための フィルタリングアルゴリズム開発

井口竜之介
(東京大学ICEPP M1)

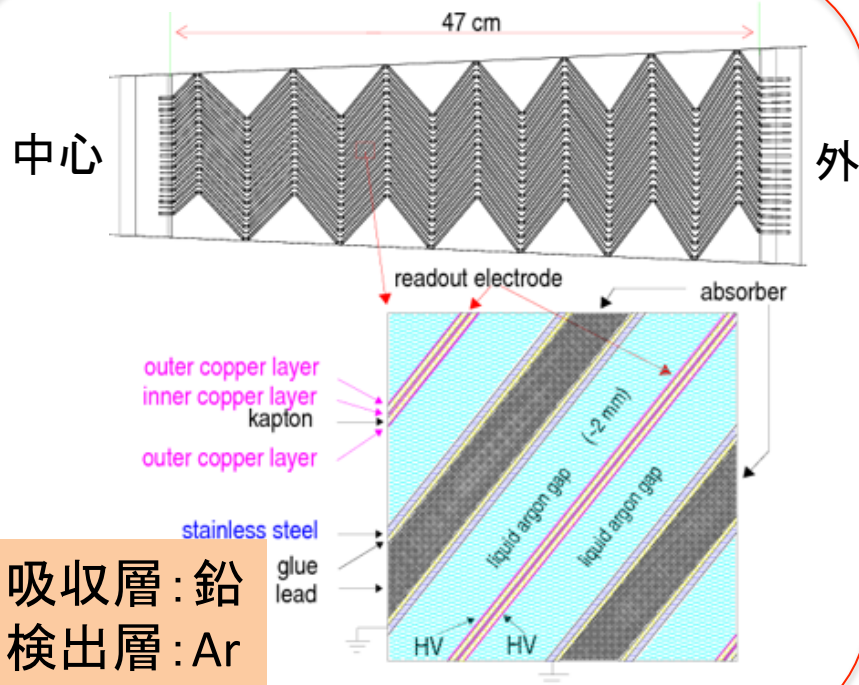
ATLAS検出器



LArカロリメータ



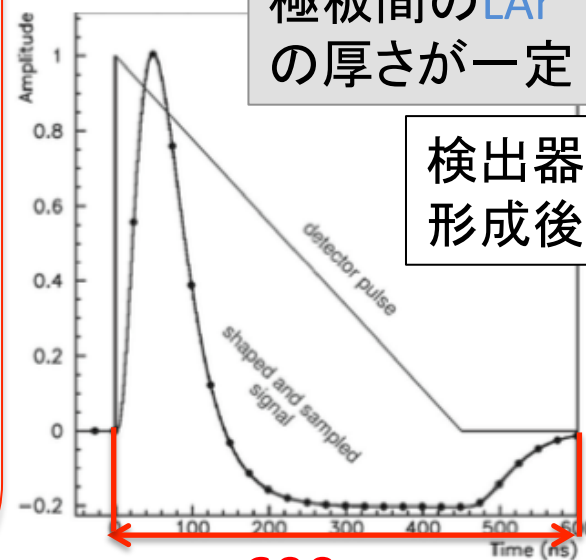
アコーディオン構造



極板間のLAr
の厚さが一定

波形が一定

検出器: 三角波
形成後: バイポーラ波形

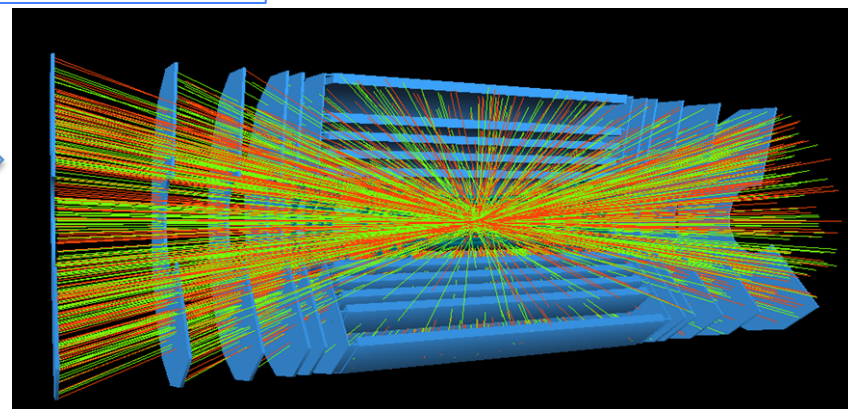
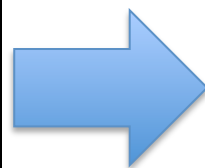
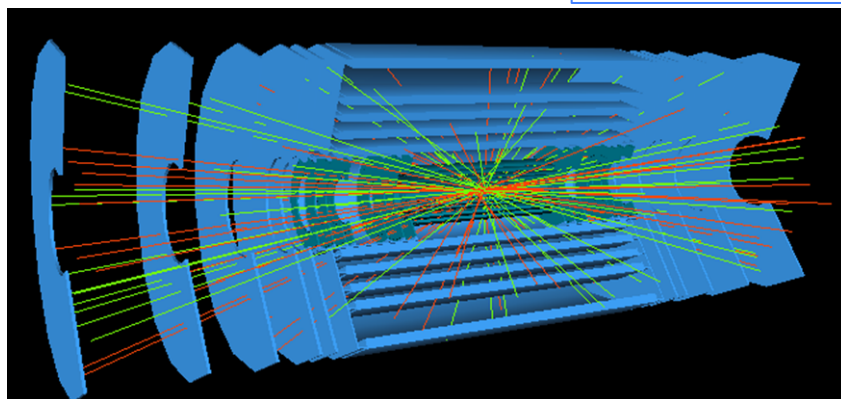


1BC = 25ns

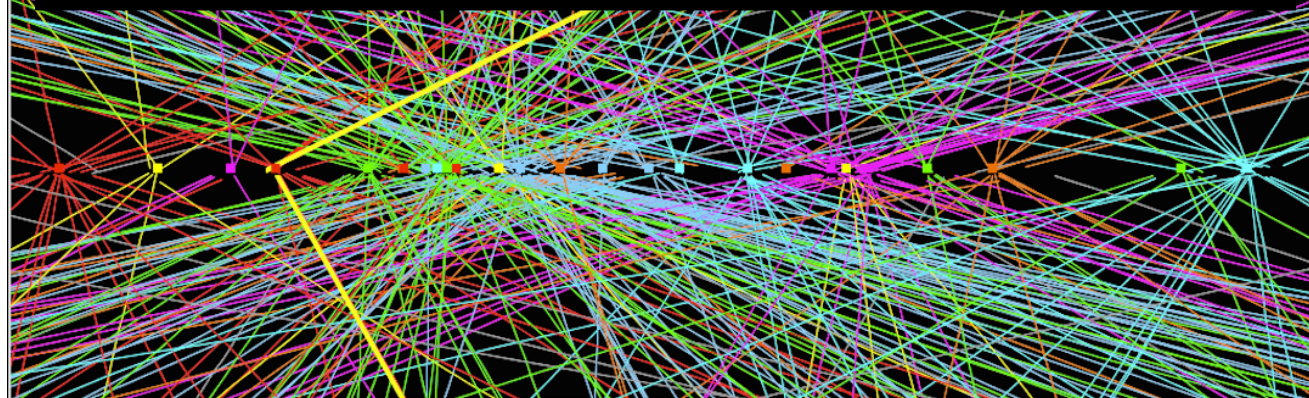
パイルアップが
起こりやすい

	Run2(2015-18)	Run3(2020-22)	HL-LHC Run(2025-30)
瞬間ルミノシティ	$10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$	$2 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$	$5 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
平均相互作用数	$\sim 20/\text{BC}$	$\sim 40/\text{BC}$	$\sim 100/\text{BC}$

パイルアップが増加すると



高パイルアップでの中心部のイベントディスプレイ



イベントレート増大
ノイズ増加

40MHz ← 25nsごとに衝突するのでそれ毎にサンプリング

本研究

Level-1 トリガー

最大で75kHz

基本的にエネルギー閾値を設定して、
トリガーレートを抑える



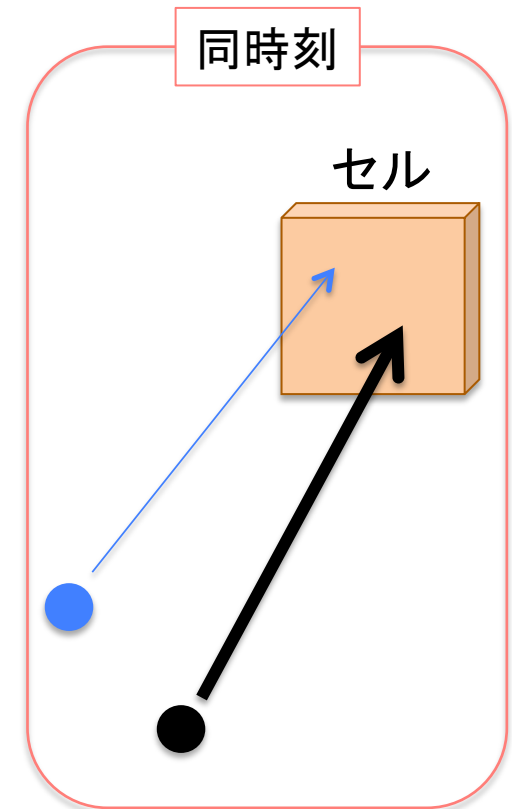
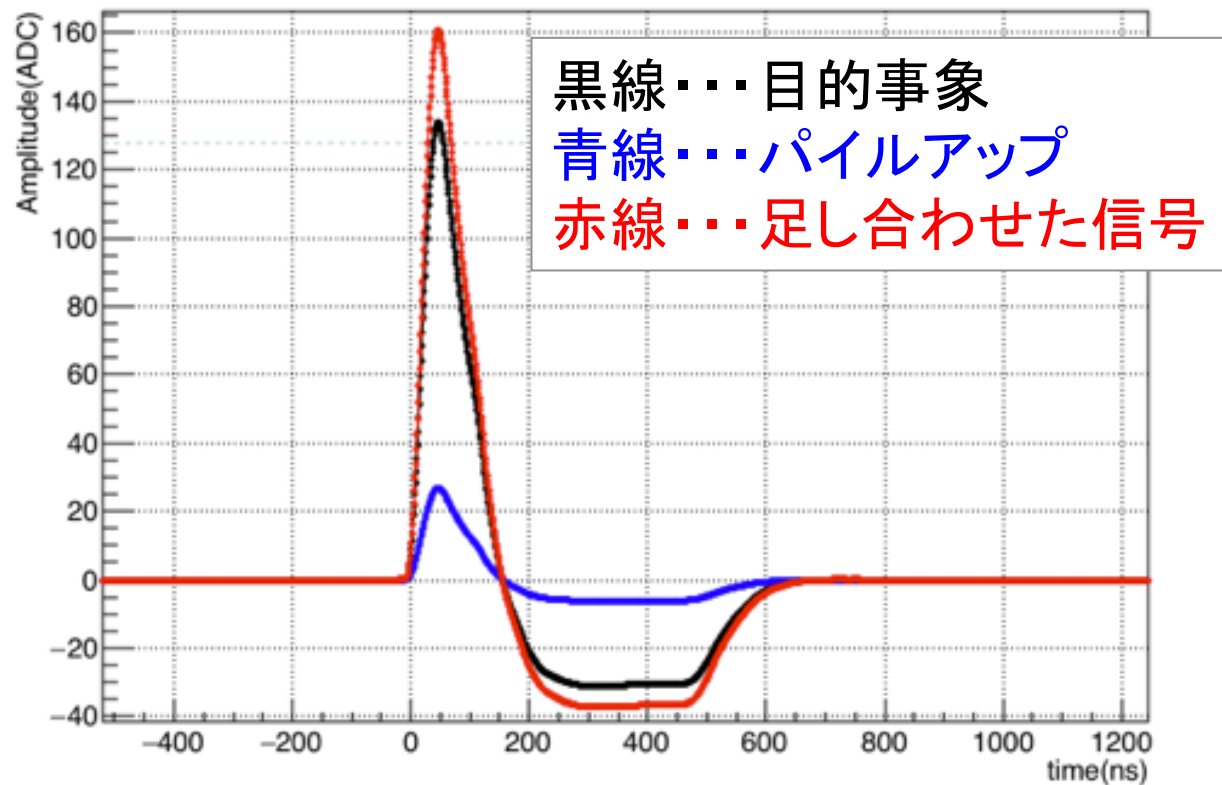
そのためにエネルギーを正確に測定したい。
しかし、pileアップが厄介

さらに、要請されているレイテンシは $2.5\mu\text{s}$ で
FPGA上のファームウェアで計算する必要がある

イベントフィルタ

100～1000Hz

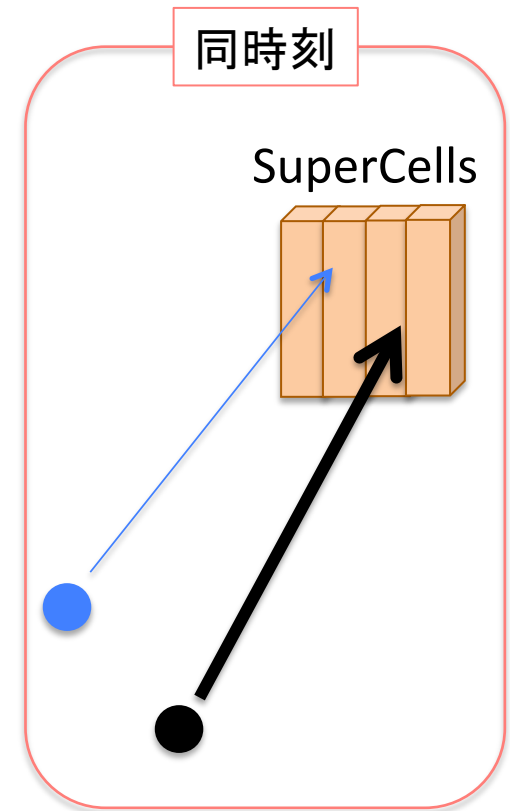
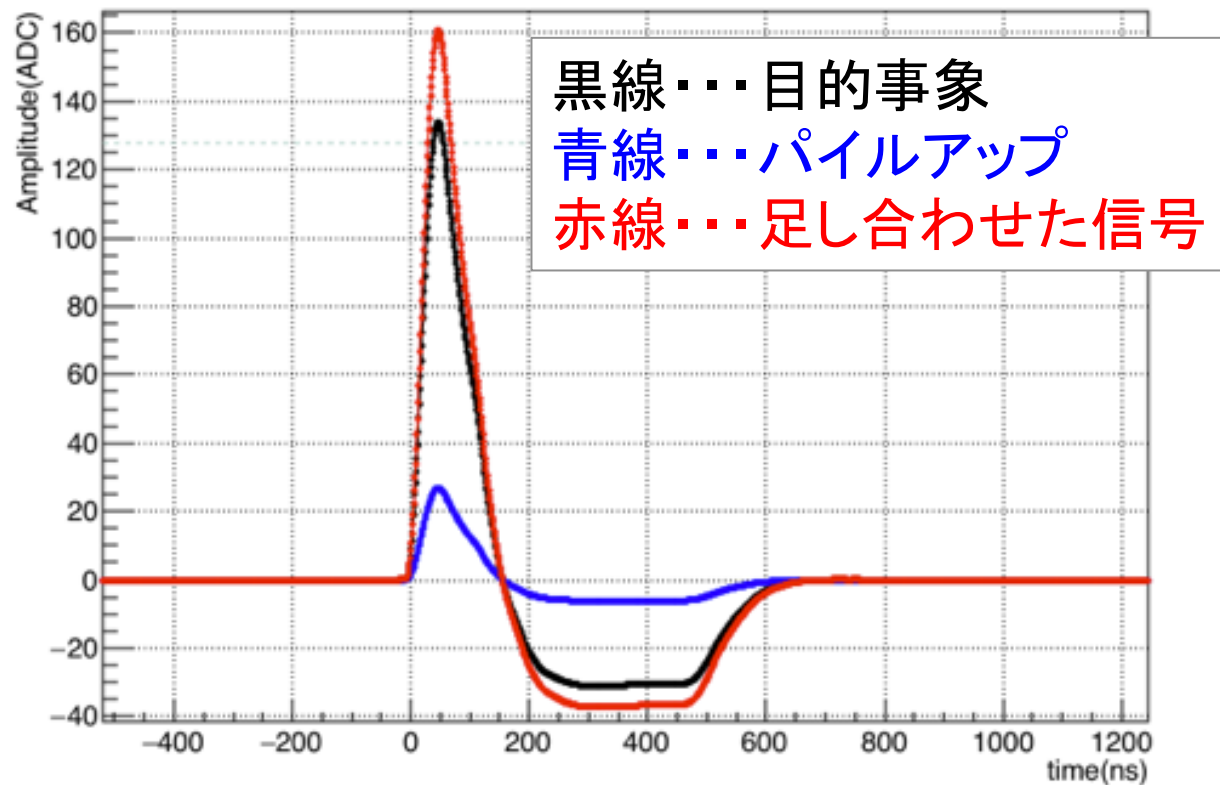
2種類のパイルアップ: ①in-timeパイルアップ



①in-time パイルアップ

同時刻にパイルアップが入射したとき1つの信号として認識してしまう

2種類のパイルアップ：①in-timeパイルアップ

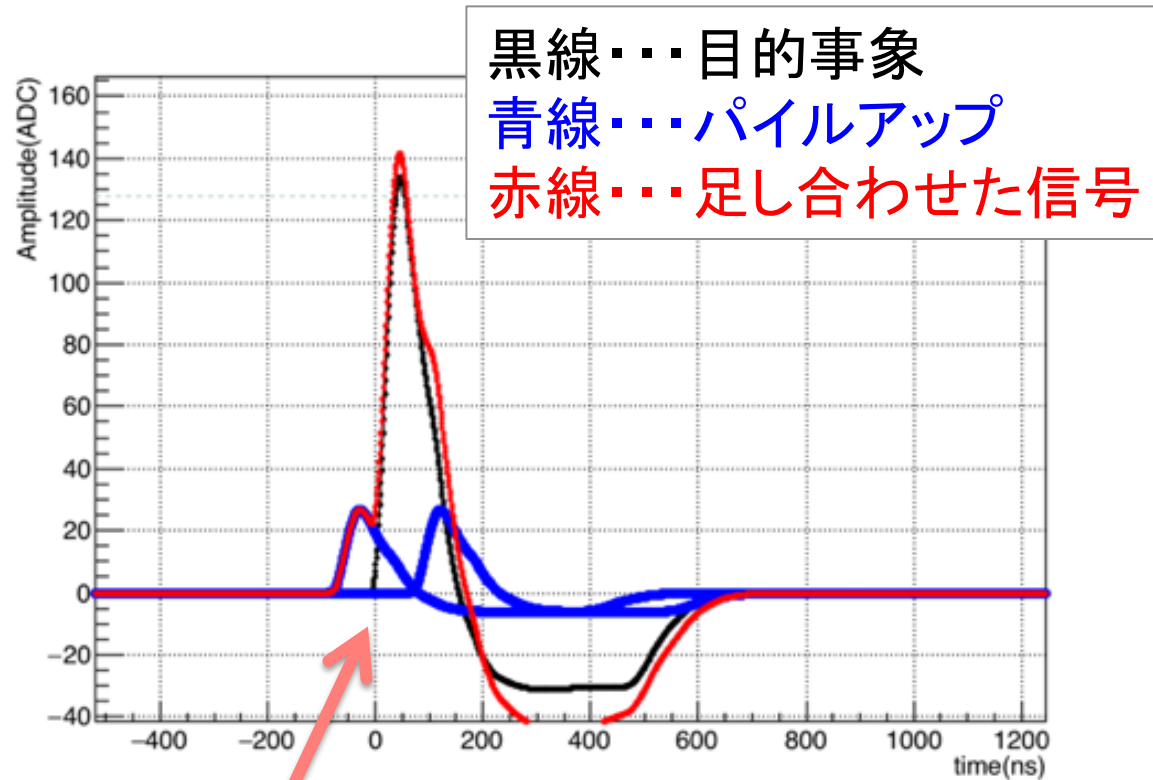


細かく読み出すことで削減

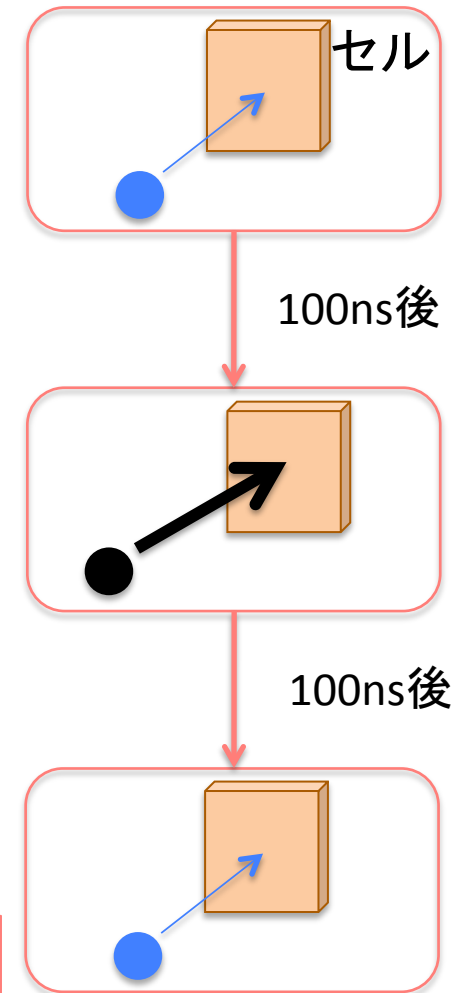
①in-time パイルアップ

同時刻にパイルアップが入射したとき1つの信号として認識してしまう

2種類のパイルアップ：②out-of-timeパイルアップ



本研究目的：信号をそれぞれ正確に測定すること



②out-of-time パイルアップ

異なる時刻にパイルアップが入射したとき信号を歪めてしまう

研究目的

Level-1トリガーにおいて、目的事象とout-of-timeパイルアップの両方のエネルギー再構成をする新たなフィルタリングアルゴリズムを開発

40MHz

Level-1 トリガー

75kHz

エネルギー計算

イベントフィルタ

100～1000Hz

要請

・レイテンシ

Level-1 トリガー全体 = $2.5\mu\text{s}$



エネルギー計算 = 125ns

・FPGA上のファームウェアで計算



同研究室の宇野(M1)が研究

フィルタリングによるエネルギーの再構成

エネルギー再構成の式

$$\underset{\text{output}}{\overset{\uparrow}{A}} = \sum_{i=1}^N \underset{\text{input}}{\overset{\uparrow}{a_i S_i}}$$

A : 振幅(エネルギー)

S_i : 入射信号(サンプリング値)

a_i : 係数

アルゴリズムによって係数を決定する

- ① 上式によって振幅の値を求める
- ② さらに計算した値に**選択条件**をかけて出力する

レイテンシの条件

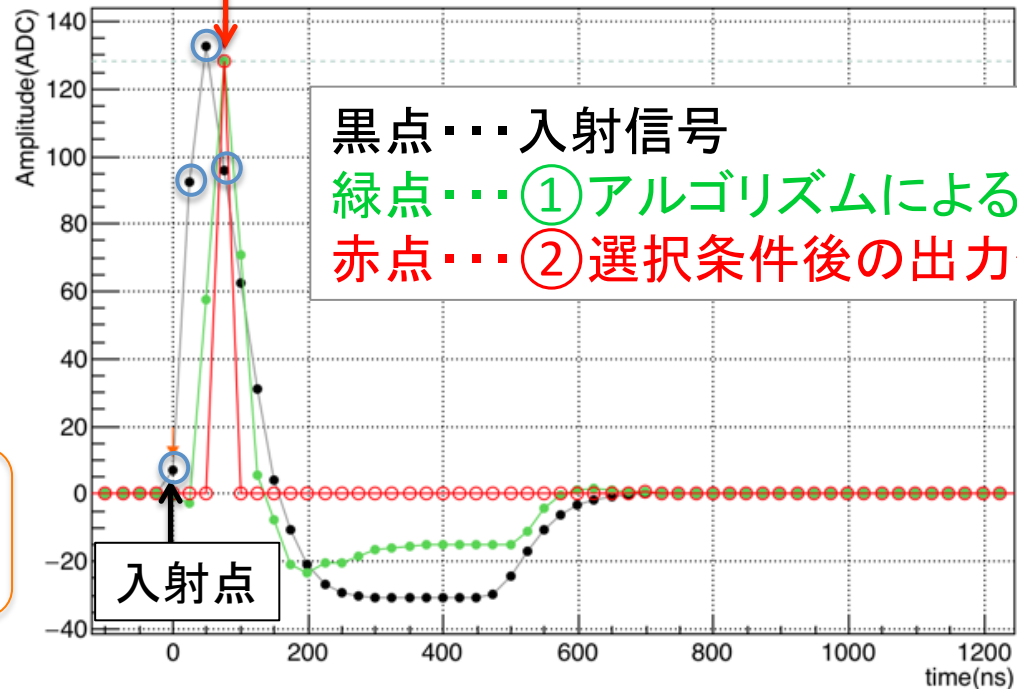
計算に使用可能な点は
入射してから**3BC(=75ns)**

50nsでファーム
ウェア上で処理



信号が入射してから125ns後
に計算値を送る

出力点



黒点・・・入射信号

緑点・・・①アルゴリズムによる計算値

赤点・・・②選択条件後の出力値

入射点

Optimal Filter(デフォルト)

入力信号は決まった波形をスケール倍したもの

$$S_i = Ag(t_i - \tau)$$

- ① $\sum_{i=1}^4 a_i g_i = 1$ ← 入射3BC後にエネルギーを出力
- ② ノイズを最小化

$$A = \sum_{i=1}^4 a_i S_i$$

$$A\tau = \sum_{i=1}^4 b_i S_i$$

同様の方法で
位相 τ も計算

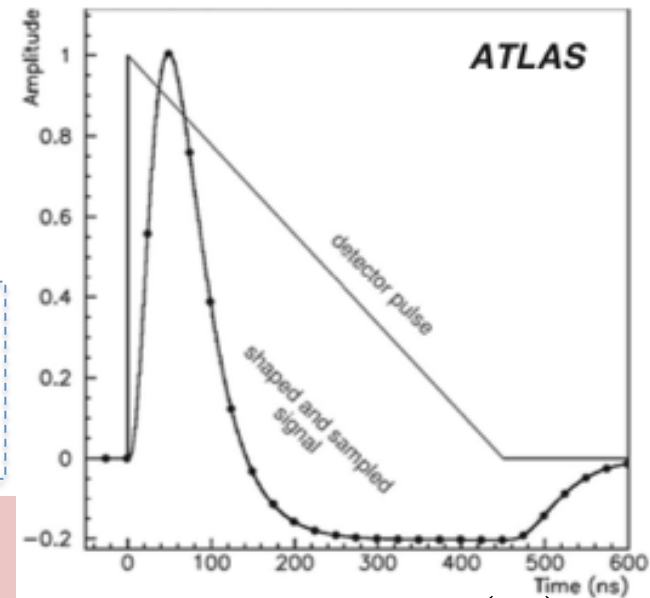
選択条件

$$|\tau| < 12.5\text{ns} \quad \& \quad A > 0$$

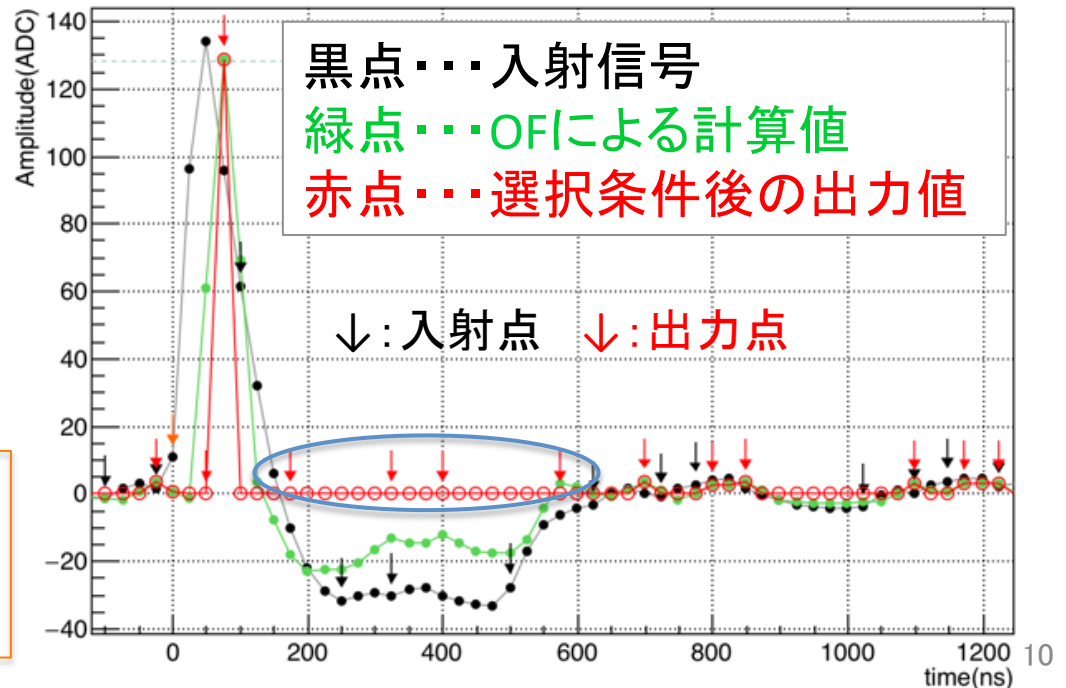
$\tau = 0$ が理想的であるので
それと離れた値は除外

特徴

- ・ノイズを最小化
- ・パイルアップは検出できない



バイポーラ波形 $g(t_i)$



Expanded Optimal Filter(開発している手法)

サンプリング値は過去に入射した信号の線形和

$$S_i = A_i g(t_i - \tau) + A_{i-1} g(t_{i+1}) + A_{i-2} g(t_{i+2}) + \dots$$

① $\sum_{i=1}^4 a_i g_i = 1$

② ノイズを最小化

③ 過去の波を考慮

$$A = \sum_{i=1}^{24} a_i S_i \quad A\tau = \sum_{i=1}^8 b_i S_i$$

入射から20BC前
まで考慮

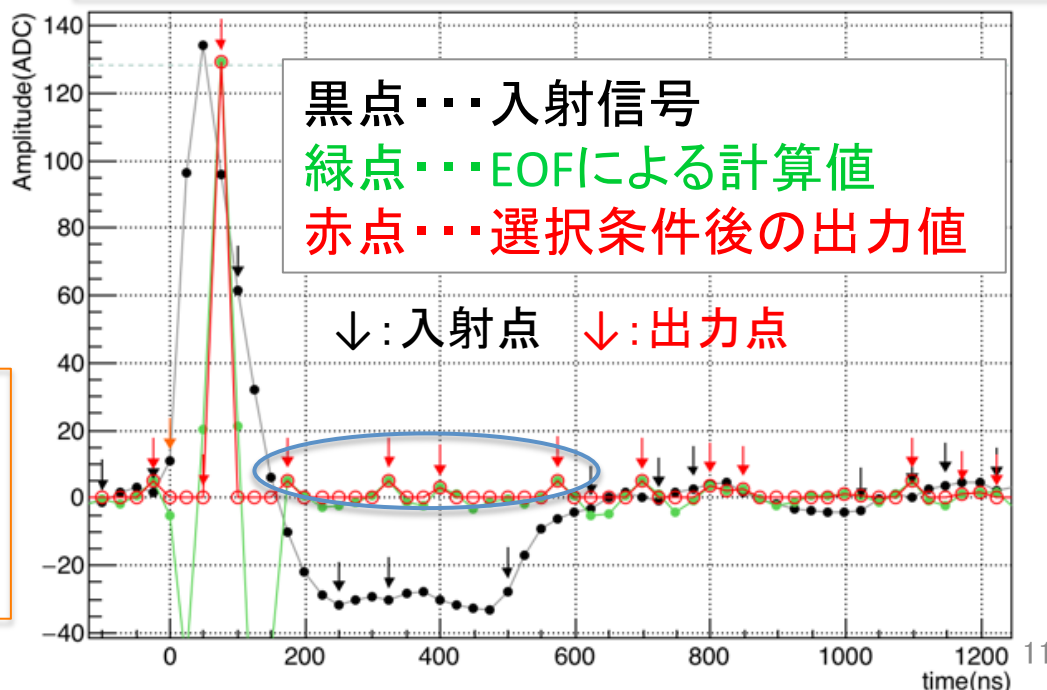
計算に用いる点数
にも制限があるため

選択条件

$$|\tau| < 12.5\text{ns} \quad \& \quad A > 0$$

特徴

- 過去の波を考慮しているため、**パイルアップに対応している**
- ノイズを最小化している



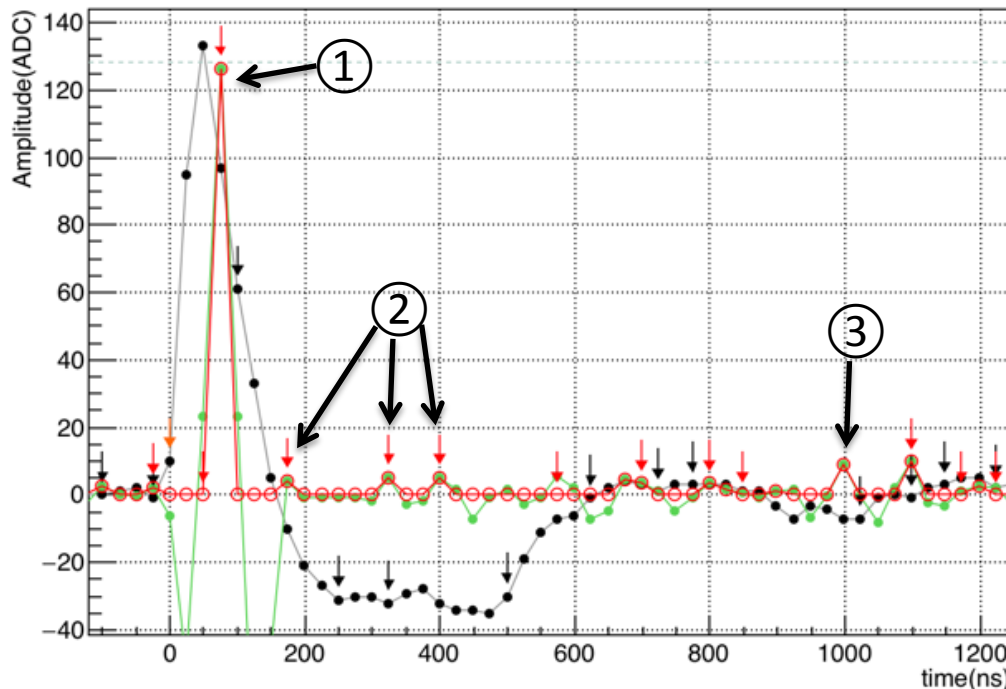
性能評価のためのシミュレーション

OFとEOFの性能を比較するためにシミュレーションを行なった

条件

1. Main pulse (16GeV)
2. Pileup pulse (625MeV, 0.2/BC) → ちょうどBCのときに入射
3. Random pileup(100MeV, 1.0/BC) → BC以外でも入射 (ex. slow neutron)
4. Thermal noise (Gauss distribution, mean = 0, $\sigma=160$ MeV)
5. Digitization (1ADC = 125MeV)

256BCの長さを持つ入射信号10000個を発生させてシミュレーション



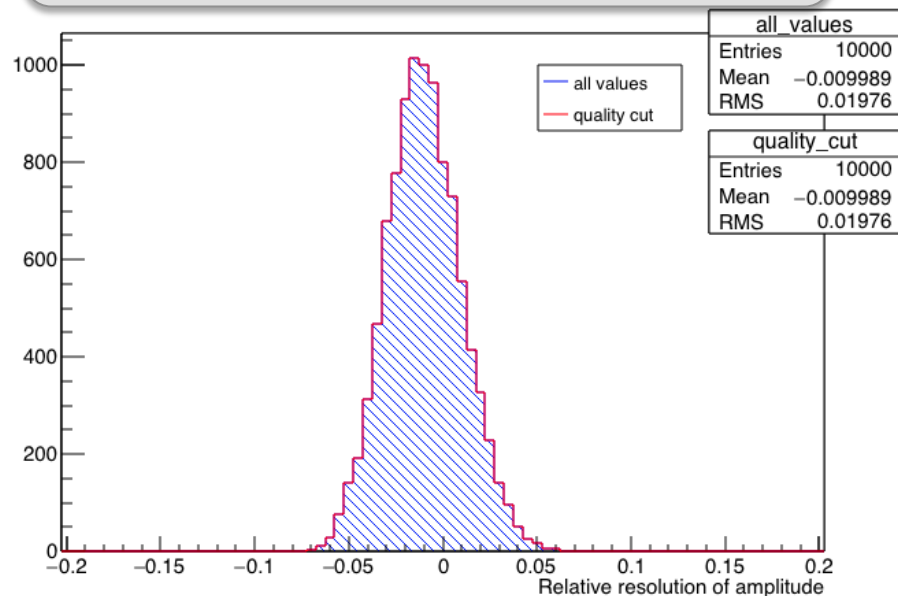
3つの観点から評価する

- ① Main pulseの検出効率
- ② Pileup pulseの検出効率
- ③ フェイク事象について

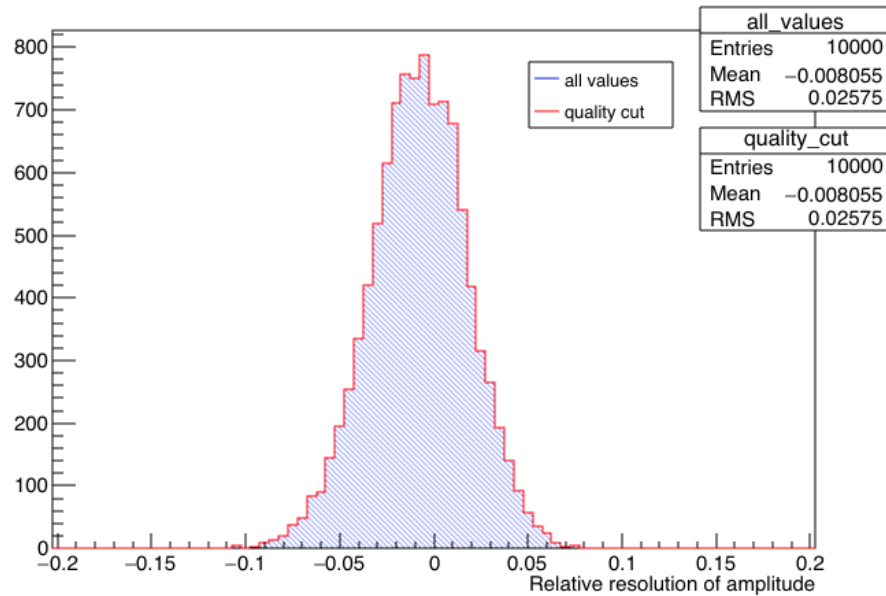
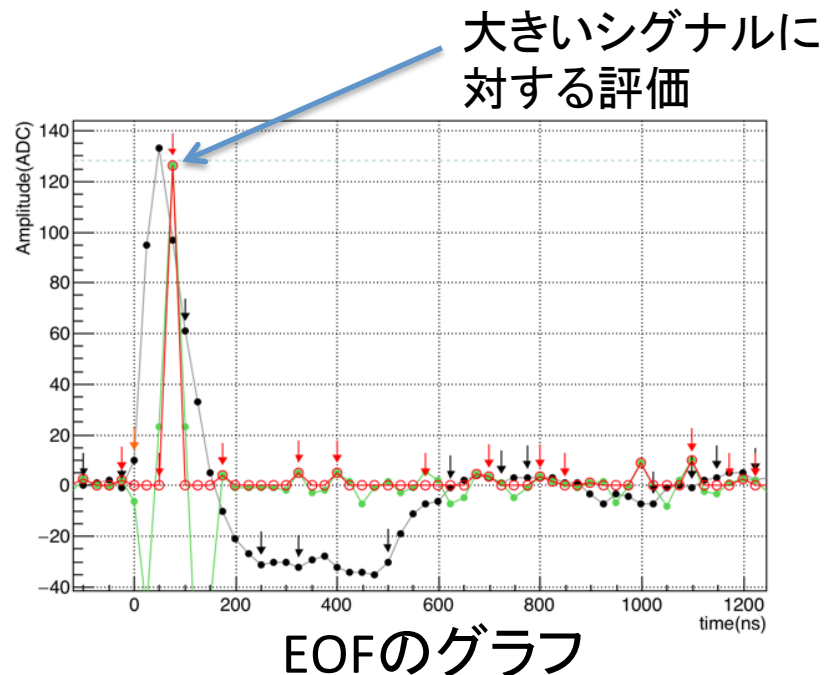
Main pulseの検出効率

	OF	EOF
検出率	100%	100%
平均値	-0.009989	-0.008055
RMS	0.01976	0.02575

横軸: $(A_{\text{output}} - A_{\text{input}}) / A_{\text{input}}$
縦軸: イベント数



OF



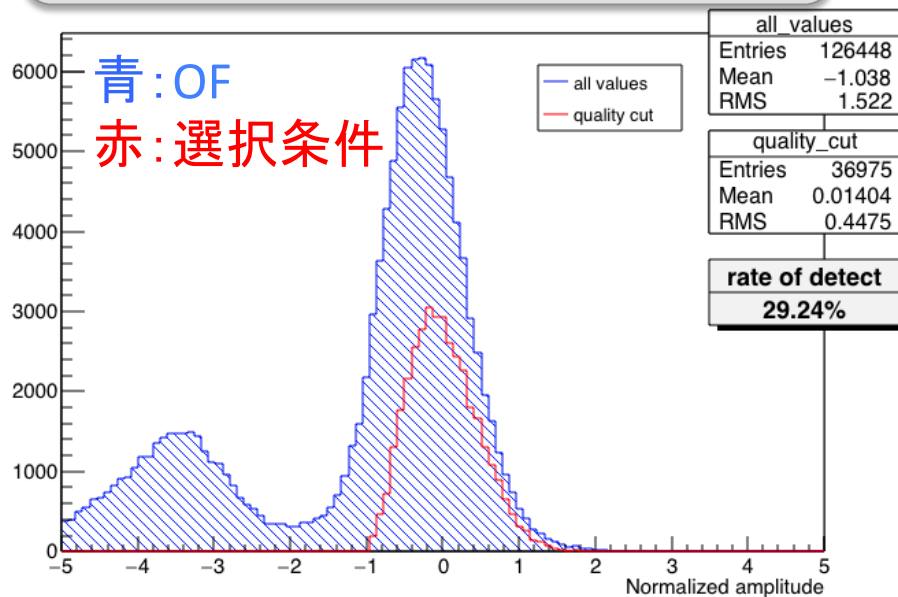
EOF

Pileup pulseの検出効率

	OF	EOF
検出率	29.24%	43.83%
平均値	0.01404	0.1936
RMS	0.4475	0.5049

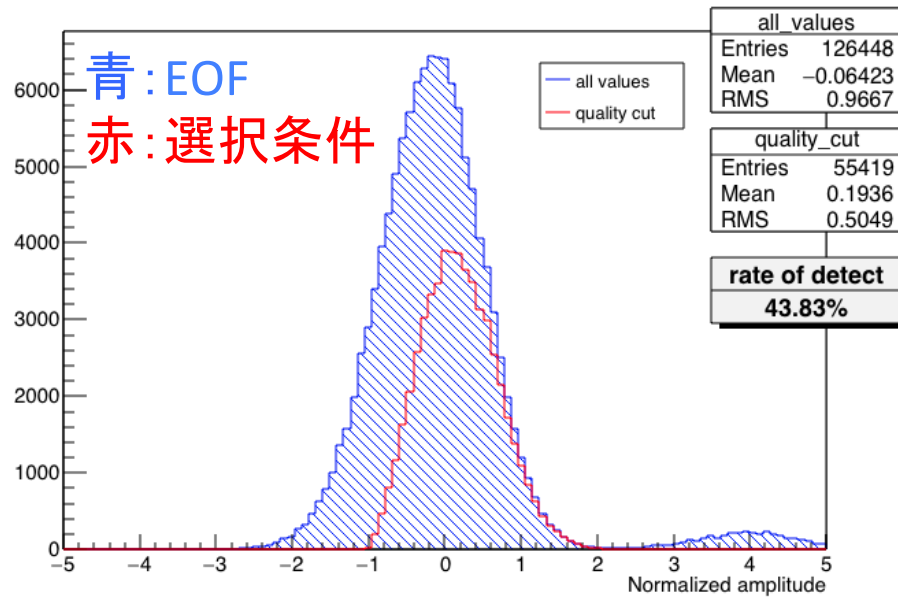
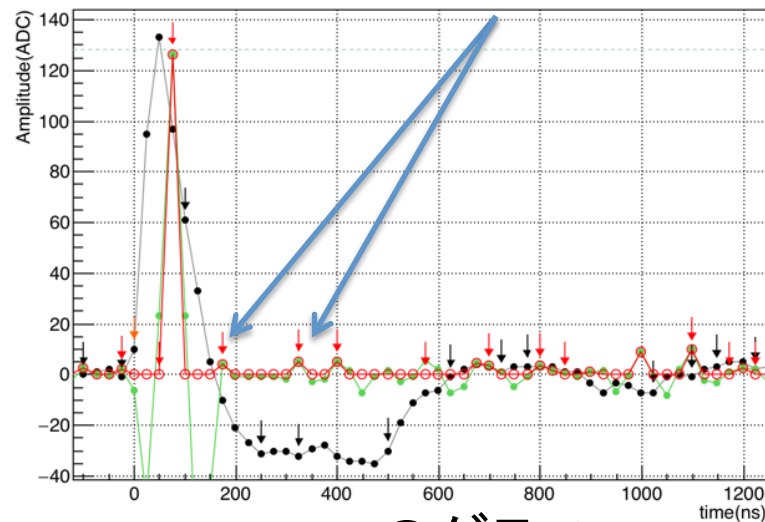
→ 1.50倍

横軸: $(A_{\text{output}} - A_{\text{input}}) / A_{\text{input}}$
縦軸: イベント数



OF

小さいシグナルに対する評価



EOF

Fake事象について

Fakeに対する評価

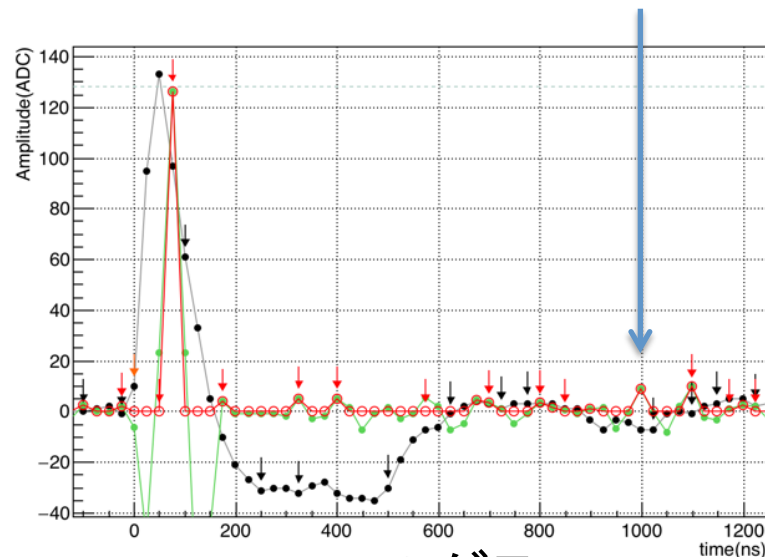
Fake＝入力信号がないのに出力してしまうこと

	OF	EOF
発生率	3.887%	10.14%
平均値	2.94	3.437
RMS	1.627	1.85

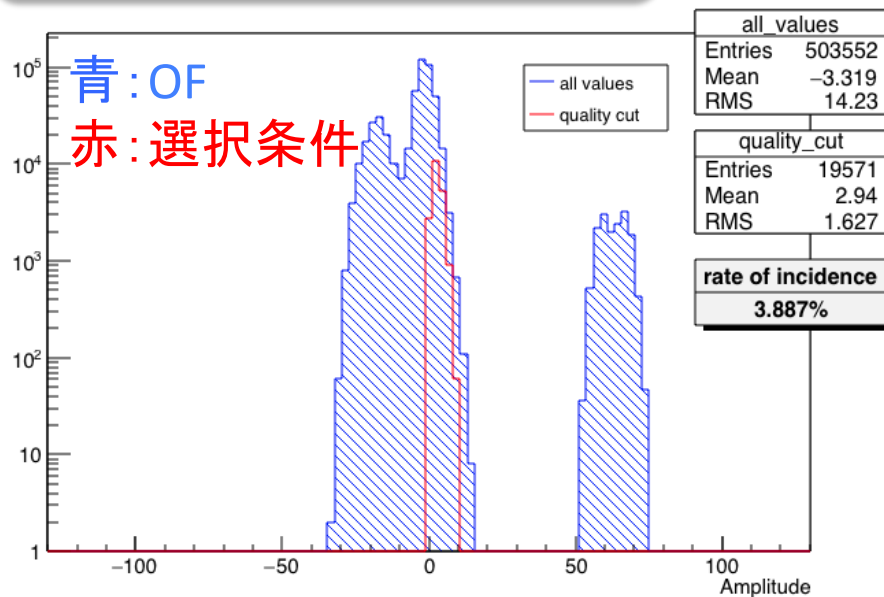
→ 2.61倍

横軸：振幅(ADC=125MeV)

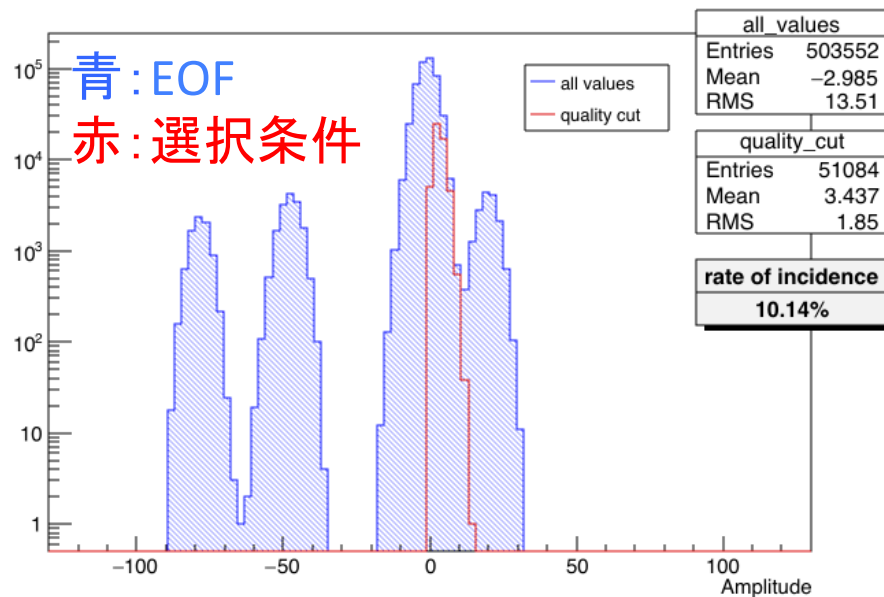
縦軸：イベント数



EOFのグラフ



OF



EOF

まとめ

正確にエネルギーを再構成するために新しいフィルタリングアルゴリズム
Expanded Optimal Filterを開発した

成果

- Pileup pulseの検出率がOFに比べて1.5倍

課題

- Fake事象の削減 ← Fakeの発生率がOFの2.61倍

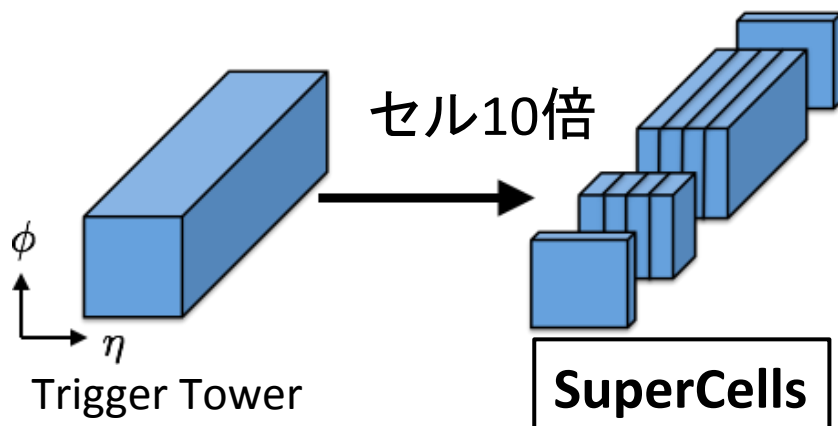
今後の目標

- Fake事象の削減
- ファームウェアへの実装
- 多数セルを用いてのシミュレーション(MET計算など)

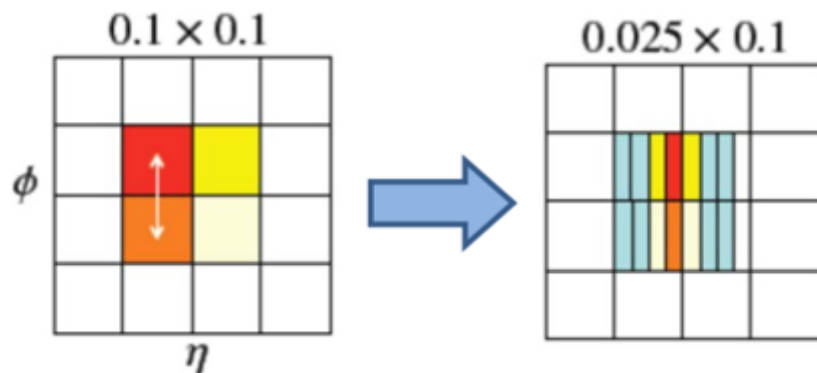
BUCK UP

SuperCells読み出し

細かく読み出すことでin-timeの
パイルアップを減少させる
(検出器はそのまま読み出しのみ変更)



さらに、シャワーの形を3次元で読み出す
ことで電子とジェットを識別できる

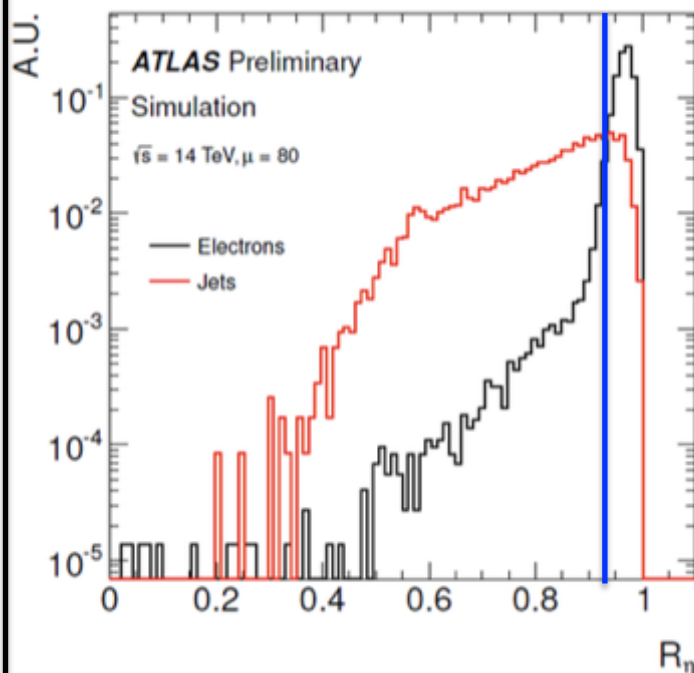


SuperCellsによるパラメータの例

ジェットをカットするためのパラメータ

$$R_{\eta} = \frac{E_{T, \Delta\eta \times \Delta\phi=0.075 \times 0.2}^{(2)}}{E_{T, \Delta\eta \times \Delta\phi=0.175 \times 0.2}^{(2)}}$$

→ 1に近いほどシャワーが狭い



$Z \rightarrow e^+e^-$

— 電子

— ジェット

$R_{\eta} > 0.93$ という条件を課すことで
エネルギー閾値を上げずに
トリガーレートを抑えられる

Principle of Extended Optimal Filter

The amplitude S_i can be expressed by superposition of waves generated in the past BCs.

$$S(t_i) = A_0g(t_i - \tau) + A_1g(t_{i+1}) + \cdots + A_{N'}g(t_{i+N'}) + \textcolor{green}{p} + n_i$$

a first order approximation

pedestal term

$$S_i = A_0g_i + A_1g_{i+1} + \cdots + A_{N'}g_{i+N'} - A_0\tau g'_i + p + n_i$$

$$A_0 \equiv \langle u \rangle = \left\langle \sum_{i=0}^{N-1} a_i S_i \right\rangle$$

$$A_0 = \sum_{i=1}^N \{ A_0 a_i g_i + A_1 a_i g_{i+1} + \cdots + A_{i+N'} a_i g_{i+N'} - A_0 \tau a_i g'_i + \textcolor{green}{a_i p} + a_i \langle n_i \rangle \}$$

three equations are the conditions for nominal OF

$$\sum_{i=1}^N a_i g_i = 1 \quad \sum_{i=1}^N a_i g'_i = 0 \quad \textcolor{green}{\sum_{i=1}^N a_i = 0}$$

N' equations are added the conditions for EOF

$$\sum_{i=1}^N a_i g_{i+k} = 0 \quad \text{for } k = 1, N'$$

method of Lagrange multiplier for minimization of noise

$$\sum_{j=1}^N R_{ij} a_j - \lambda_0 g_i - \lambda_1 g_{i+1} - \cdots - \lambda_{N'} g_{i+N'} - \kappa g'_i - \nu = 0 \qquad i = 1, N$$