

LHC-ALICE実験のアップグレードに向けた 超前方光子測定用電磁カロリメータ Si PAD検出器 の性能評価

筑波大学大学院

数理物質科学研究科物理学専攻

高エネルギー原子核実験グループ

平野 勝大 for ALICE FoCal collaboration

三明 康郎、中條 達也、稲葉 基、江角 晋一、Oliver
Busch、工藤 咲子、福田 悠裕、金 秉徹、伊藤 喬一郎

ALICE実験アップグレード計画

ALICE実験

- LHCの実験グループの1つ
- 原子核衝突実験に特化

- ・CGCの検証
- ・QGPの早期熱化機構の解明、etc...

検出器の調節・開発

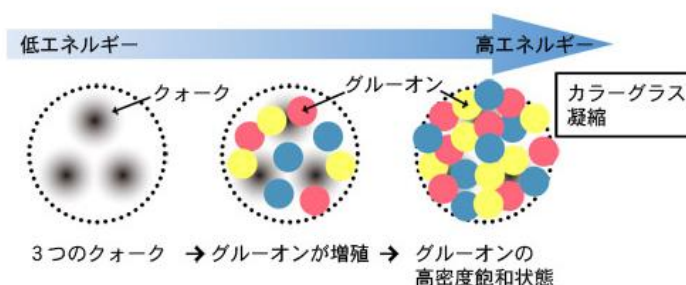
FoCalプロジェクト

LHCの高い衝突エネルギーを用いた前方方向の物理の測定

カラーガラス凝縮(CGC : Color Glass Condensate)

『高いエネルギーの散乱においてハドロンが見せる普遍的な描像』

グルーオンが高密度に飽和した状態



高エネルギー原子核衝突の衝突初期状態

高エネルギー衝突実験による理論モデルの初期パラメーターの決定・検証

☆ 解明するためには...

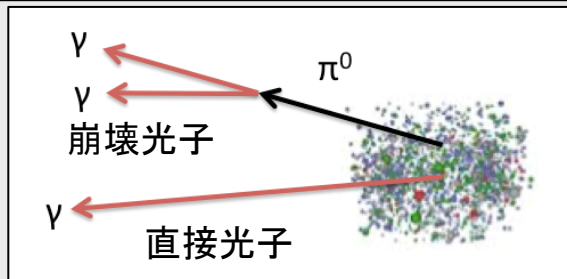
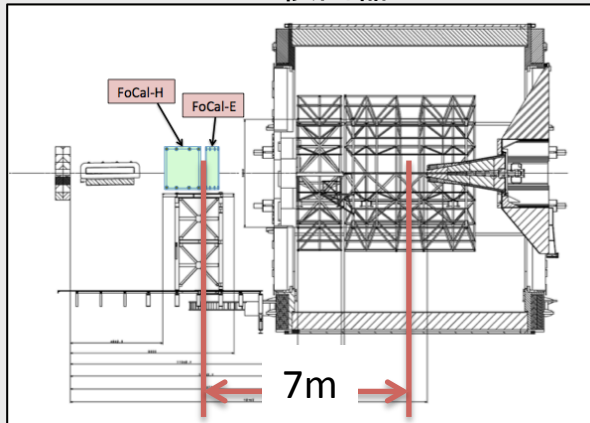
初期状態の反応を残している直接光子

FoCalプロジェクト・FoCal-E

FoCal(Forward Calorimeter)
(アクセプタンス: $3.3 < \eta < 5.3$)

- FoCal-E(電磁カロリメータ) \Leftarrow 本研究
 - 直接光子の測定 $\Rightarrow \gamma/\pi^0$ の識別
- FoCal-H(ハドロンカロリメータ)
 - ジェットの測定

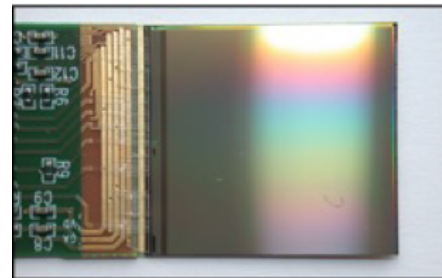
ALICE検出器



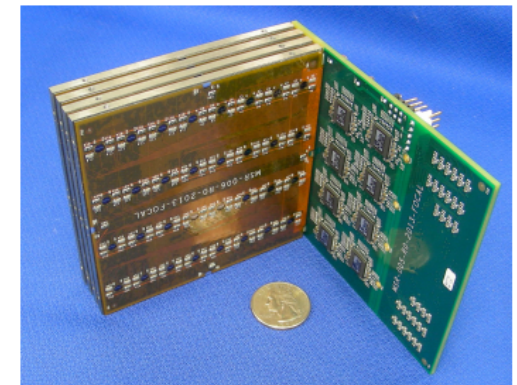
- W/Siのサンドイッチ型サンプリングカロリメータ
 W(タングステン): 吸収層 + Si(シリコン)検出層
 \rightarrow モリエール半径: $R_M = 9.3\text{mm}$
 放射長: $X_0 = 3.5\text{mm}$ (1レイヤーに相当)

• 2種類のモジュール

- HGL(High Granularity Layer) - LGL(Low Granularity Layer)
 - CMOS-pixel
 - 1レイヤー: 64パッド(8×8)
 - ピクセルサイズ: $25 \times 25 \mu\text{m}^2$
 - パッドサイズ: $1 \times 1 \text{cm}^2$
- \rightarrow シャワーの観測
- \rightarrow エネルギーの測定

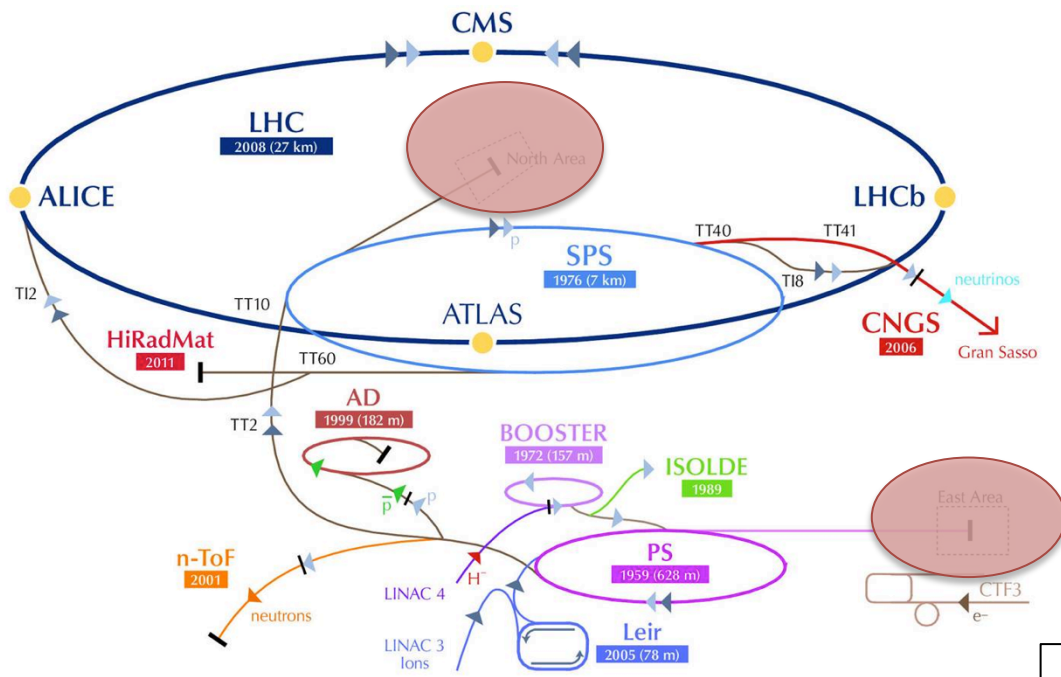


Utrecht University



Oak Ridge National Laboratory & 筑波大学

テストビーム実験



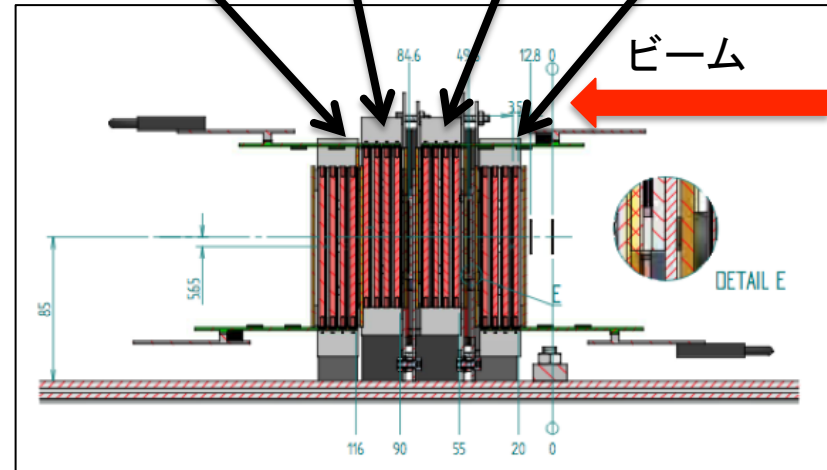
PS

- T9 beam line
- 2015年10/7~10/14
- 0.5 ~ 10GeV
- 電子ビーム、ハドロンビーム

SPS

- T4-H6 beam line
- 2015年10/21~11/4
- 5 ~ 180GeV
- 電子ビーム、ハドロンビーム

LGL4 LGL3 LGL2 LGL1



実験目的

- ・FoCal検出器の性能評価
 - エネルギー依存性の確認
 - エネルギー分解能の評価 etc...

Summing Board

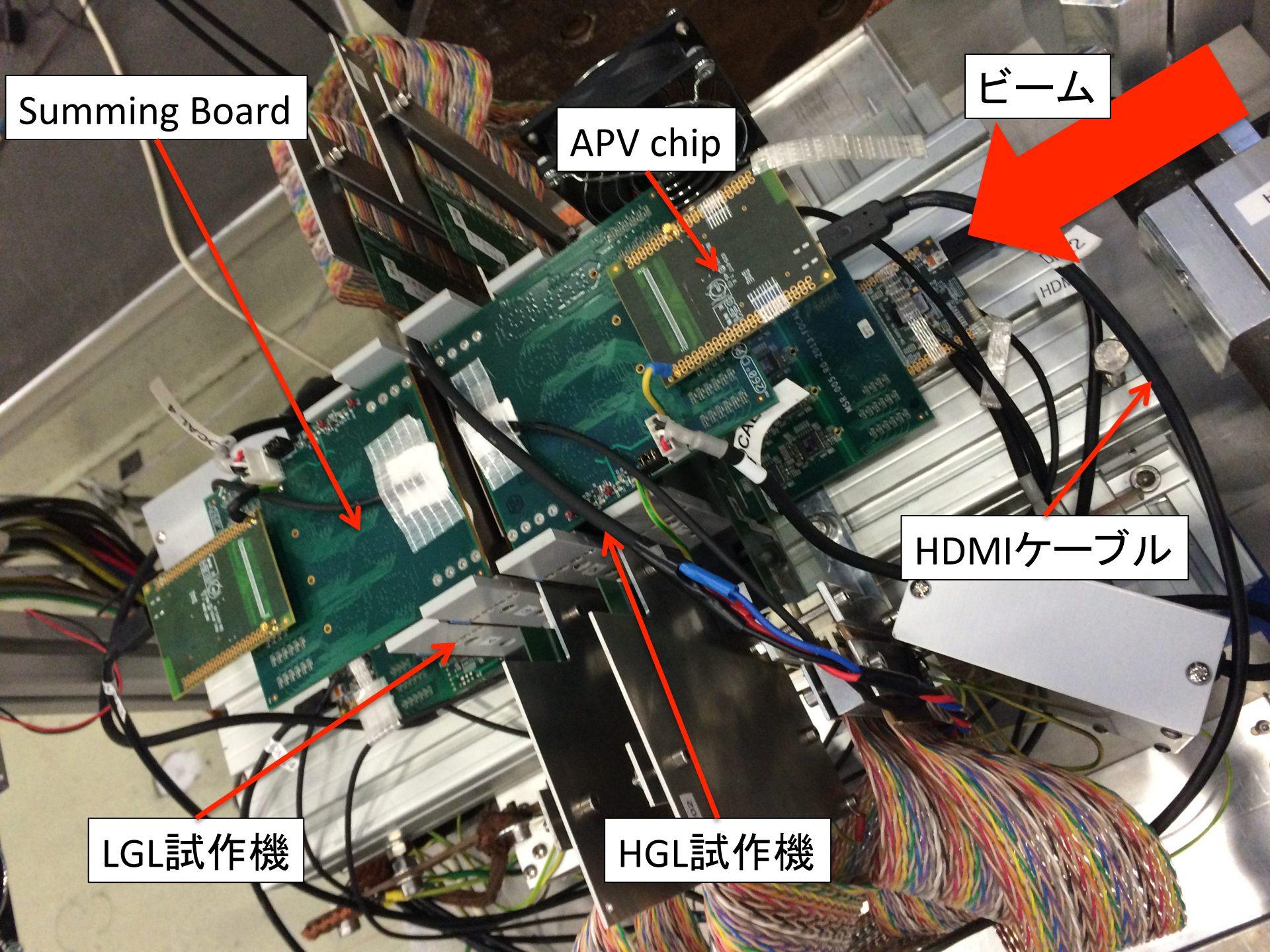
APV chip

ビーム

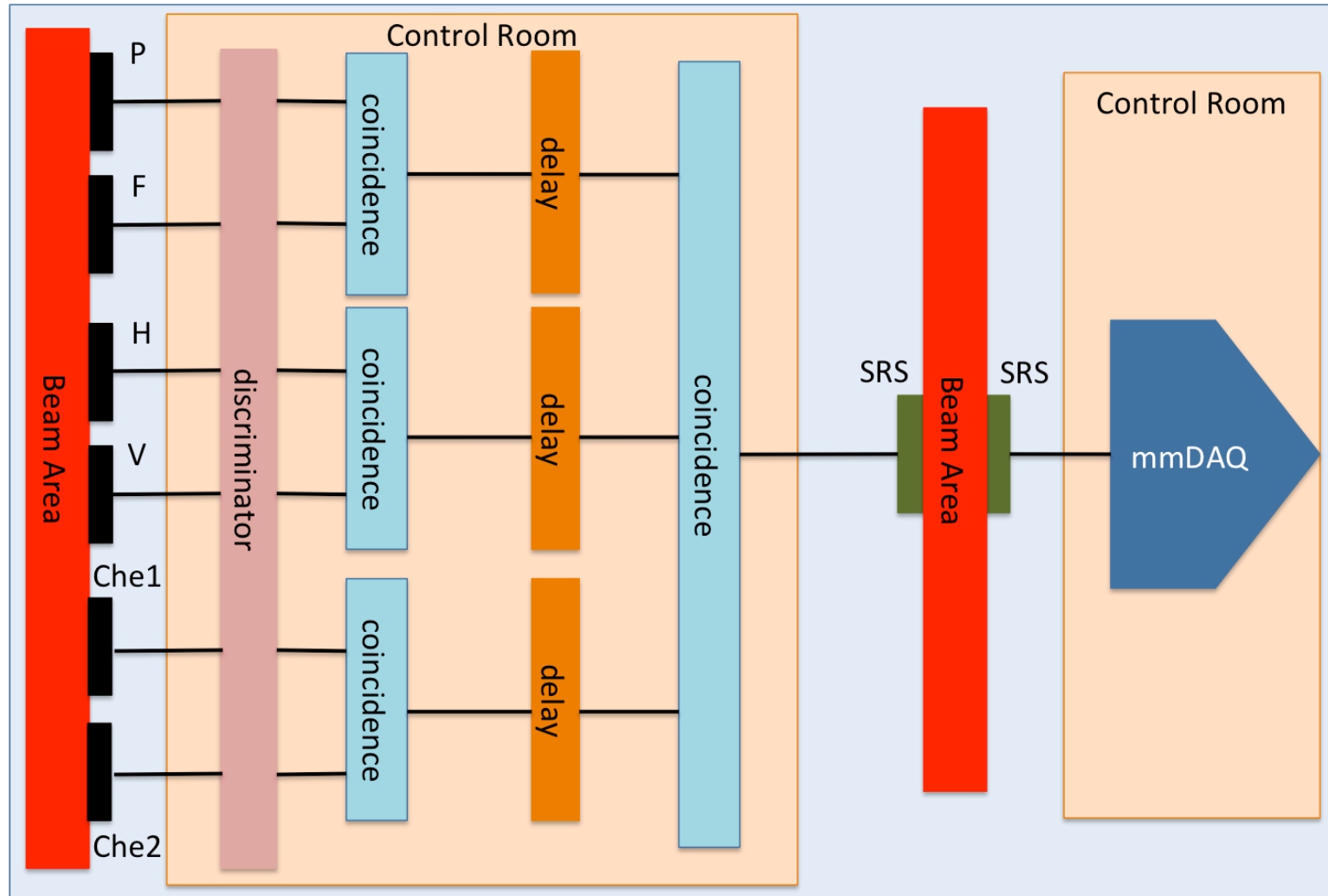
HDMIケーブル

LGL試作機

HGL試作機



テストビームトリガーロジック



解析手法

シグナルの定義

各LGL・chのペDESTAL分布において以下を実施

- ・ガウス関数でフィット

$$f(x) = A \cdot \exp\left\{-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right\}$$

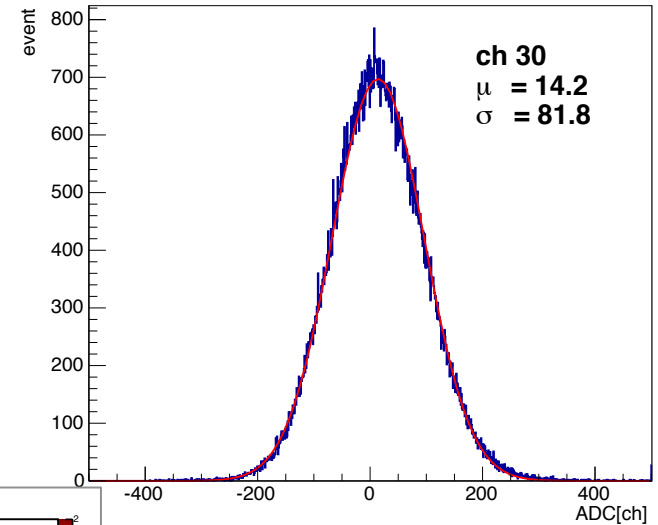
- ・フィットで求めたパラメーターを用いた条件式

$$apv_qmax > \mu + 4\sigma$$

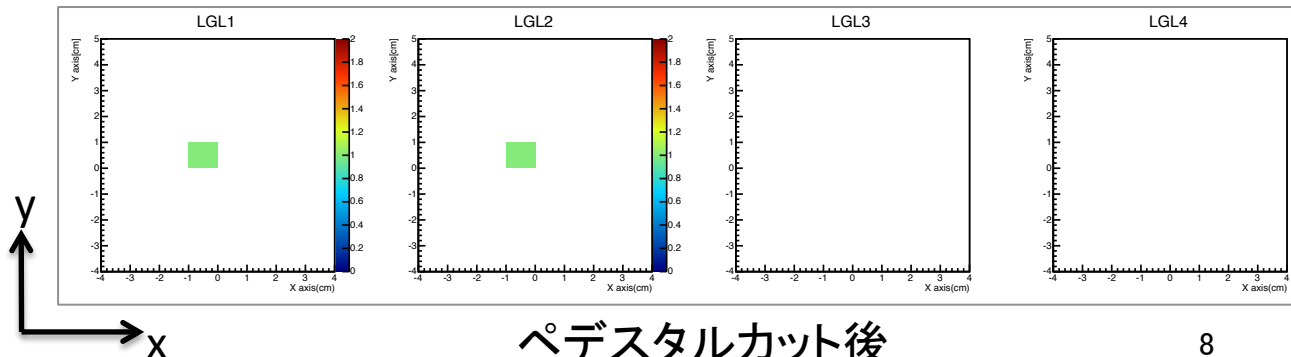
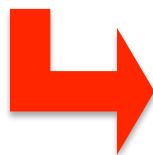
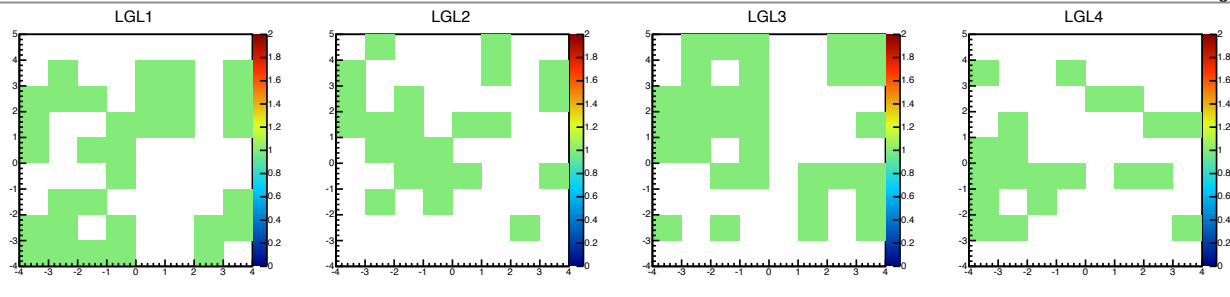
apv_qmax: シグナルのADC値

- ・条件式を満たしたものをシグナルとみなす

ペDESTAL分布



ペDESTALカット前

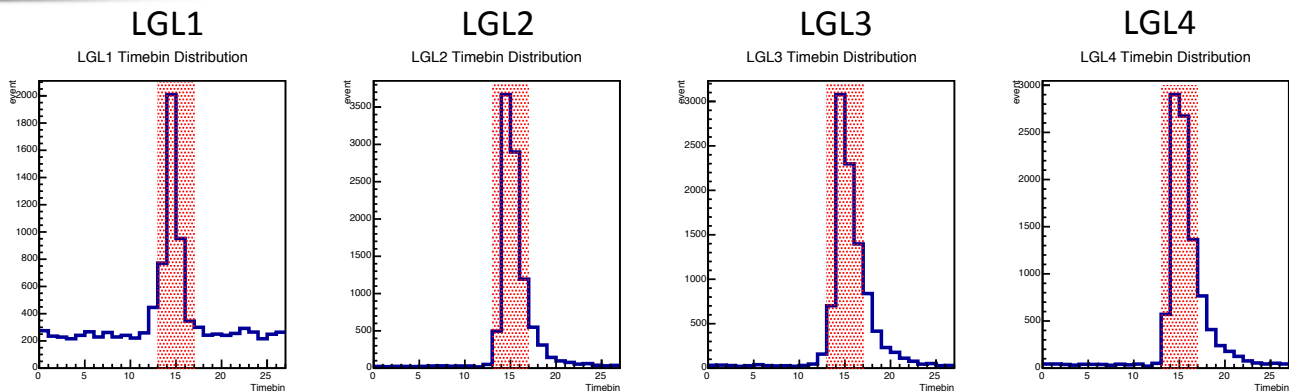


ペDESTALカット後

イベントセレクション

・タイムビンカット

LGL1,2,3,4でシグナルの
タイミングは同一



apv_qmaxのタイムビンヒストグラム

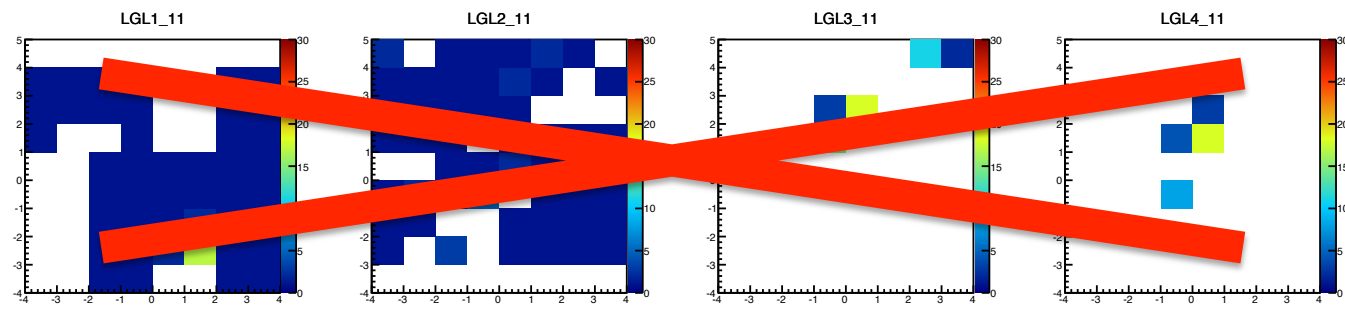
→ タイムビン

・ノイズイベントカット

LGL1,LGL2:ノイズ大(広)



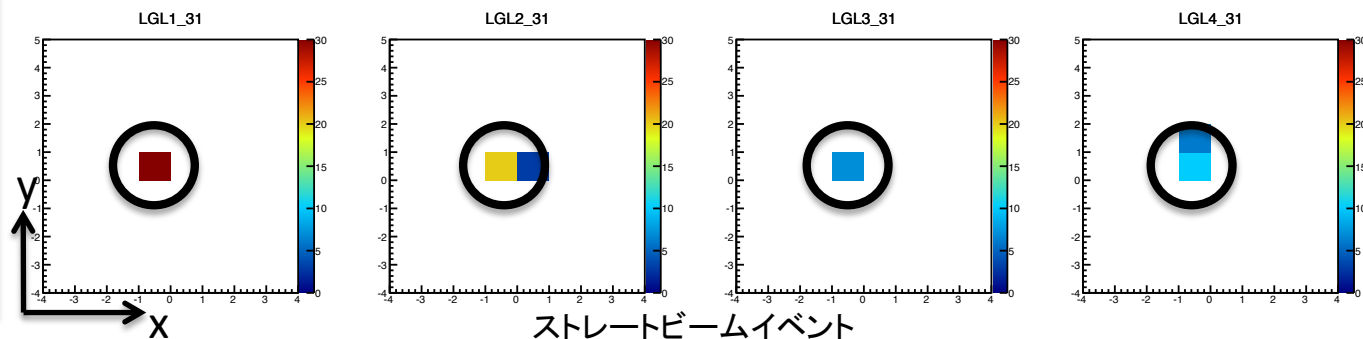
反応したパッドの数で
イベントを選ぶ



ノイズ有りのイベント

・ストレートビームセレクト

各LGLで一番高いシグ
ナル値のチャンネル
が一直線に重なるイ
ベントを選ぶ



ストレートビームイベント

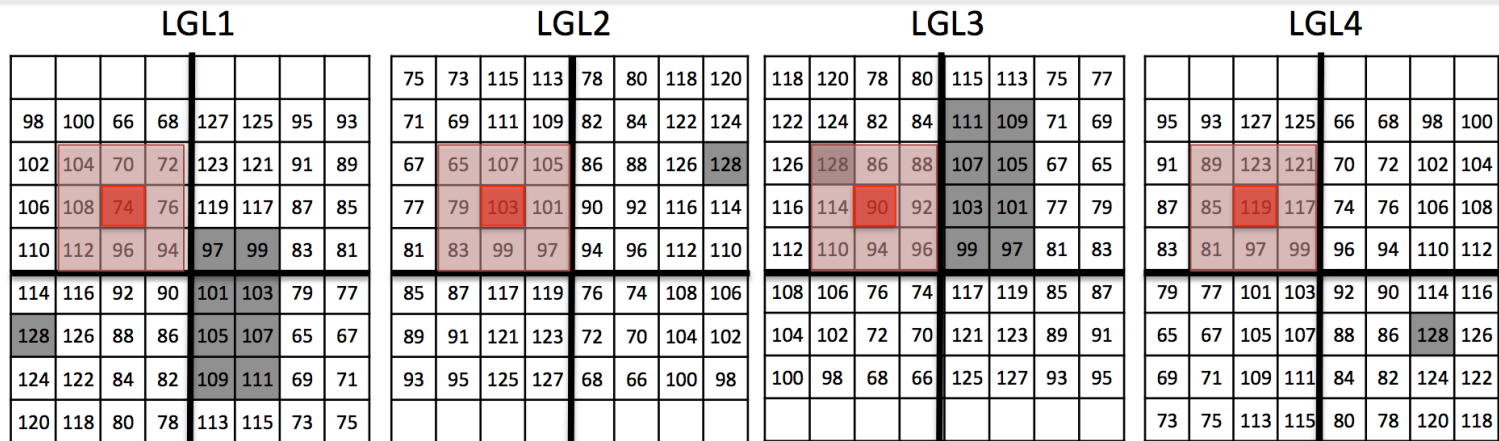
エネルギーの見積り方法

・クラスタリング

ビームがあたったとされるパッドの周辺のみを用いてエネルギーの見積りの計算を行う(ビーム以外でシグナルとみなされているチャンネルを除くため)



ストレートビームセレクトで判明したビームの入射位置を中心とした3×3の領域

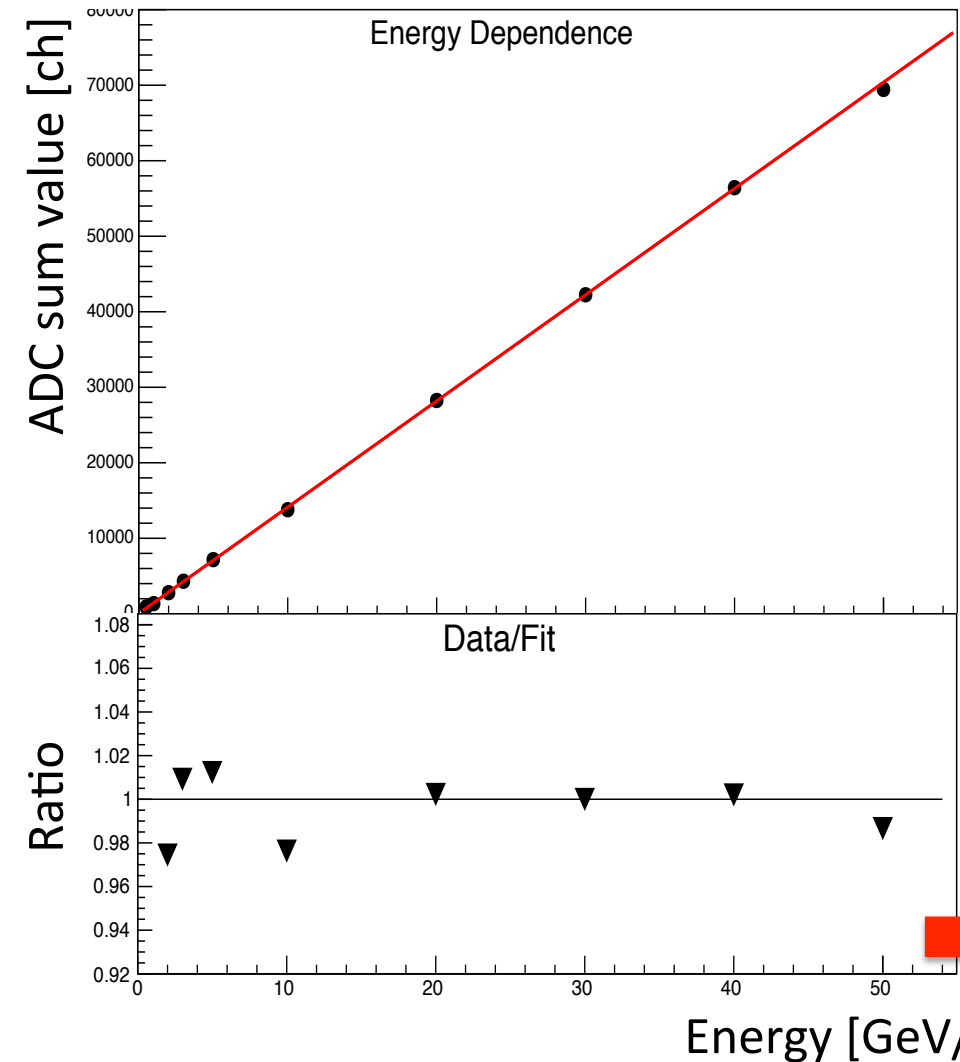


- : Hit channel
- : Clustering region
- : Dead channel

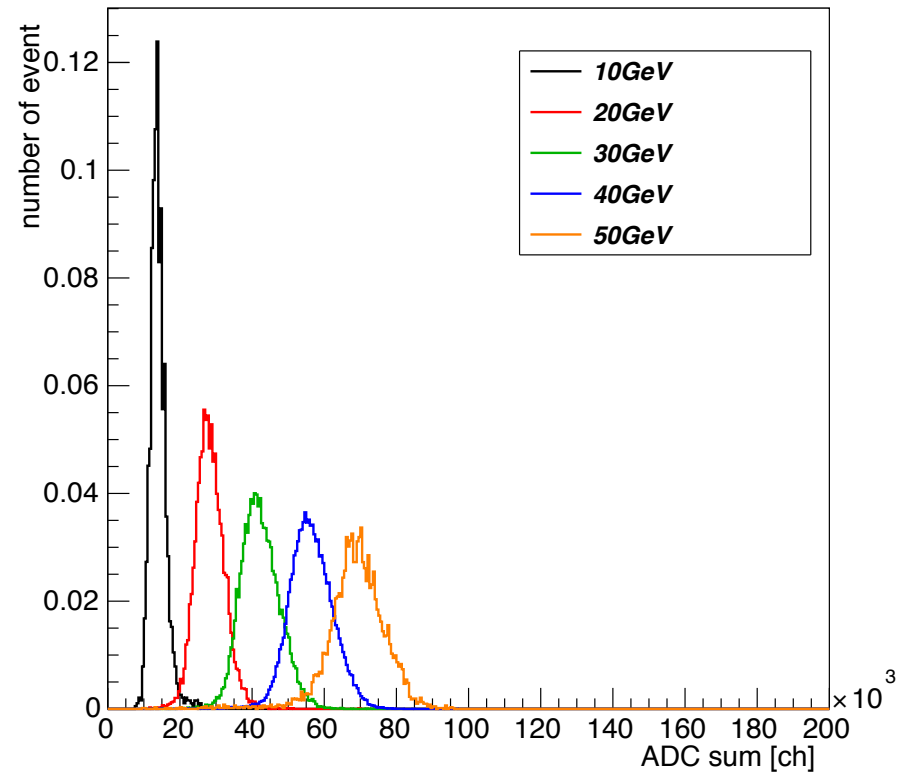
ASICの故障、APV chipの互換性の問題⇒

解析結果

エネルギー分布・線形性



エネルギー分布(10,20,30,40,50GeV)



3%以内の線形性を得ることができた。

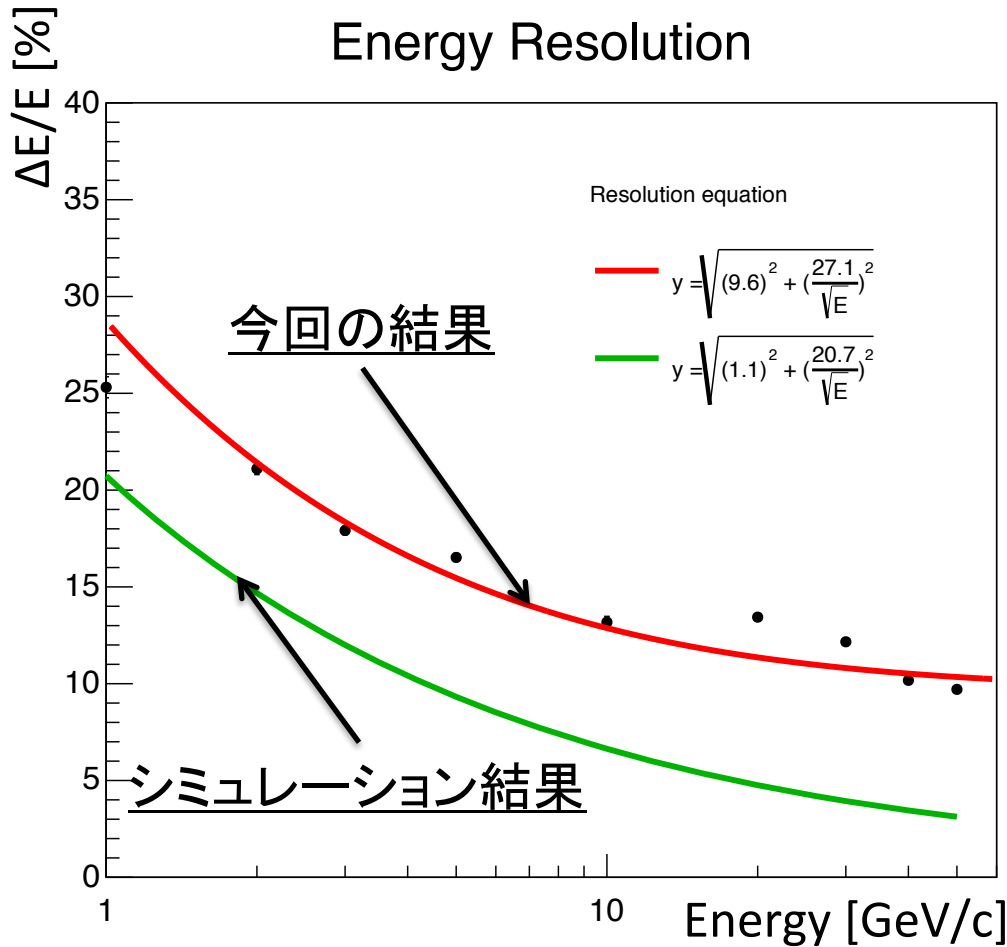
エネルギー分解能

フィット関数

$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{\sigma}{\mu} \times 100 = \sqrt{\left(\frac{\sigma_1}{\sqrt{E}}\right)^2 + \sigma_0^2}$$

σ_1 : 統計項
 σ_0 : 定数項

Energy Resolution



・シミュレーション

$$\sigma_1 = 20.7\%, \sigma_0 = 1.1\%$$

・フィット結果

$$\sigma_1 = 27.3\%, \sigma_0 = 9.6\%$$

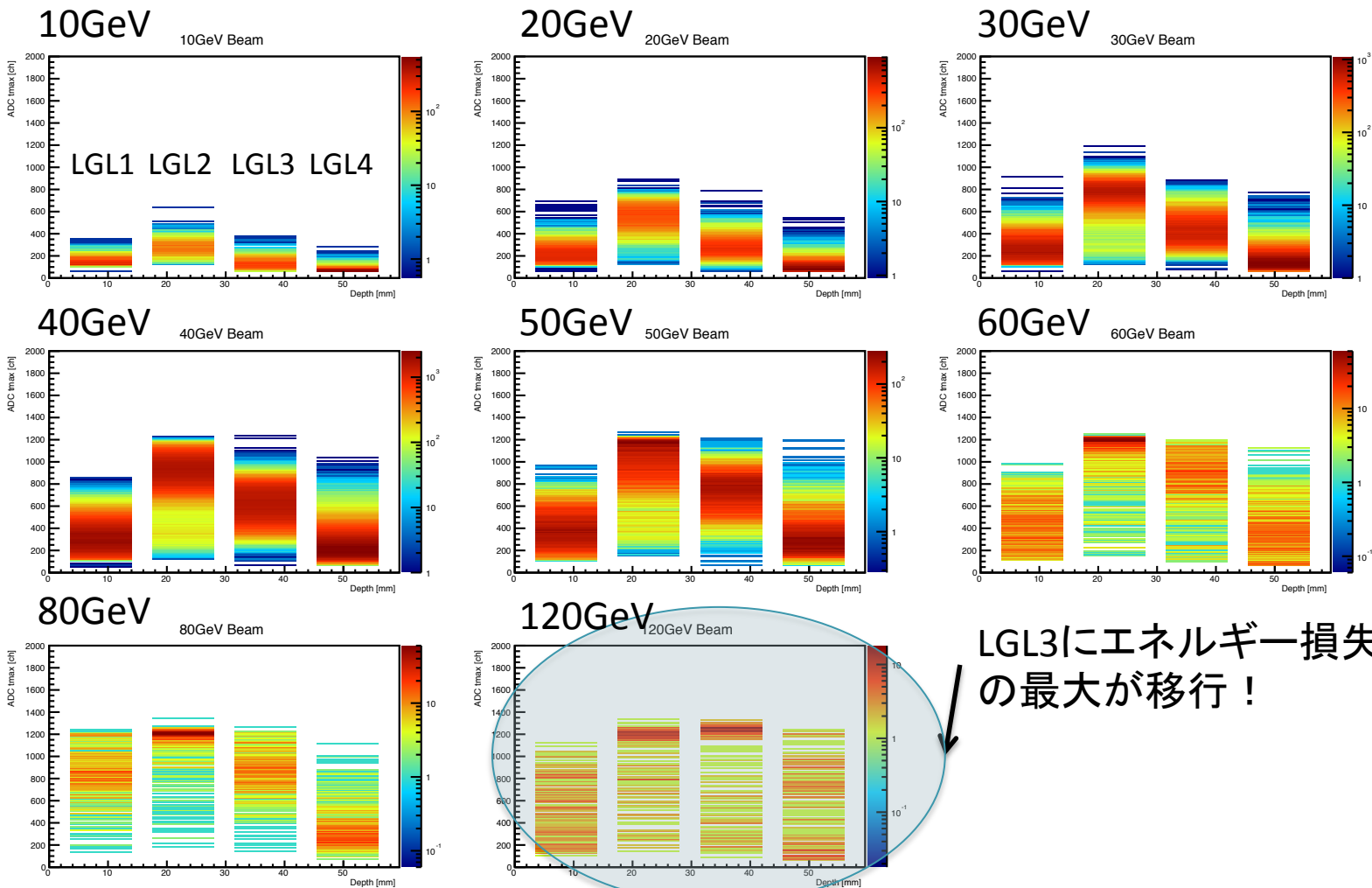
⇒シミュレーションの値に近づく結果を得ることができた。

⇒定数項は改善の余地有り。

→ノイズの削減が必要

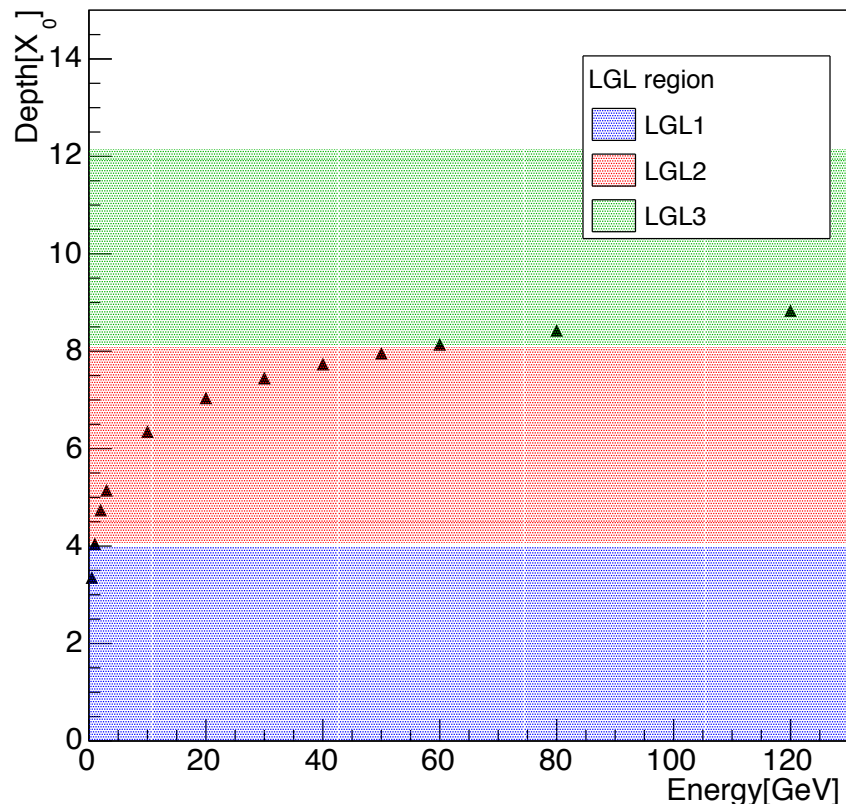
シャワーの縦方向の広がり

各LGLでのapv_qmaxの値 → LGL2がエネルギー損失のピーク



シャワーの縦方向の広がり

shower max depth



↑HGLのアブソーバー分の補正有

$$t_{\max} = 1.0 \times \left(\ln \frac{E_{\text{incident}}}{E_c} + C_j \right)$$

$$\left[\begin{array}{l} t_{\max} = \frac{x}{X_0} : \text{シャワーのピークの位置} \\ E_{\text{incident}} : \text{入射エネルギー} \\ E_c : \text{臨界エネルギー}(W : \sim 10.6 \text{MeV}) \\ C_j : \text{定数(電子: -0.5、光子: 0.5)} \end{array} \right.$$

Ref : Passage of particles through matter



最大のエネルギー損失の位置と一致している(赤:LGL2、緑:LGL3)

⇒物質から予想されるシャワーマックス位置と一致

まとめ

- CERN-PS/SPSビームラインでビームテストを実施。
 - 幅広いエネルギーの多くのデータを取得。
 - 解析手法の確立。
 - エネルギー依存性: 3%に収まる線形性を持っていることを確認。
 - エネルギー分解能: シミュレーションの値に近い性能を示す。
 - 縦方向のシャワープロファイル: 理論値と一致する結果を得られた。

今後の課題

- エネルギー分解能の更なる向上のためのノイズ削減。
 - Summing Boardによるノイズ ⇒ 新たなSumming Boardの開発。
- HGL(MAPS)とのデータの統合。
- RUN3に導入する予定の実機の最終試作機に向けての新たな読み出しチップVMMなどの開発。



バックアップ



QGP・高エネルギー原子核衝突実験

ビッグバン後の数 μ 秒後の世界 \rightarrow

Quark Gluon Plasma : QGP

クォークとグルーオンが自由に振る舞う物質状態

普段は強い相互作用により核子内に閉じ込められているクォークとグルーオン。

超高温・高密度で存在する。

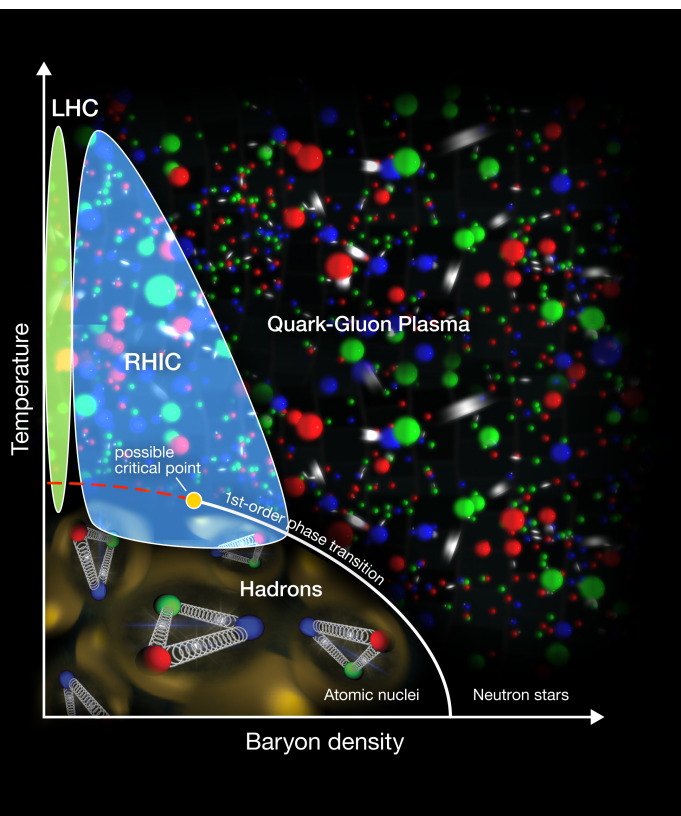
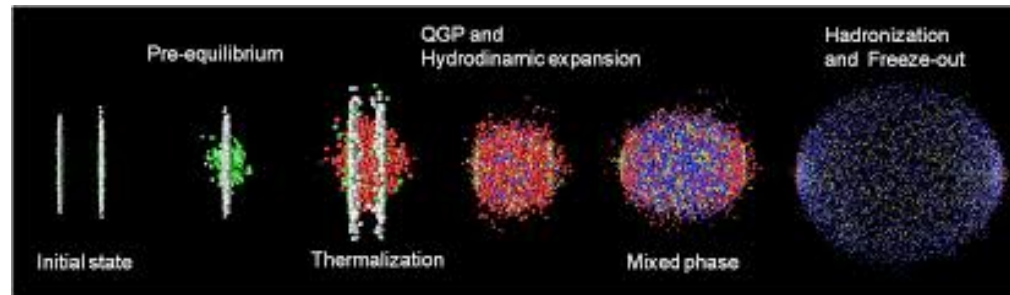
格子QCDによる理論計算

$$T_c \sim 155 \pm 9 \text{ MeV}$$

$$\epsilon_c \sim 1.0 \text{ GeV/fm}^3$$

☆解明のためには...?

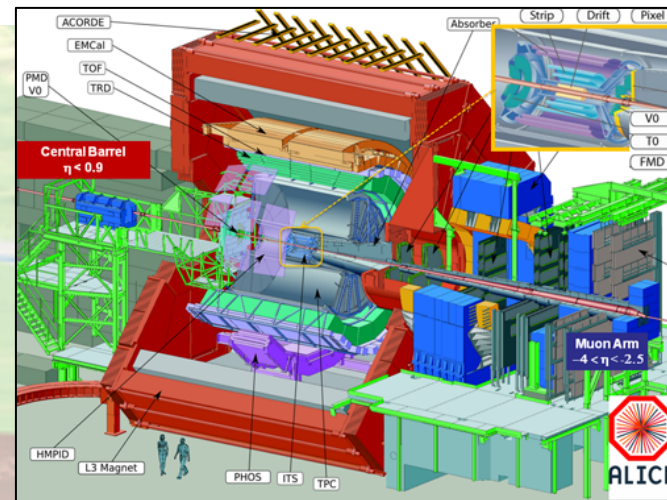
\rightarrow 高エネルギー原子核衝突実験





LHC-ALICE実験

ALICE検出器



- LHC(the Large Hadron Collider) -

欧州原子核研究機構(CERN)が運用している
27kmの周長を持つ世界最大の衝突型加速器

西暦

2010

2011

2012

2013

2014

2015

2016

⋮

第一次稼働(Run1)

$$\sqrt{s_{NN}} = 2.76\text{TeV}, 7\sim 8\text{TeV}(p-p)$$

2.76TeV(Pb-Pb)

5.02TeV(p-Pb)

第一次ロングシャットダウン(LS1)

加速器・検出器などの調整・
アップグレード

第二次稼働(Run2)

$$\sqrt{s_{NN}} = 13\text{TeV}(p-p)$$

5.02TeV(Pb-Pb)

- ALICE実験 - (A Large Ion Collider Experiment)

・LHCの実験グループの一つ

・原子核衝突実験に特化

⇒ QGPの物性解明



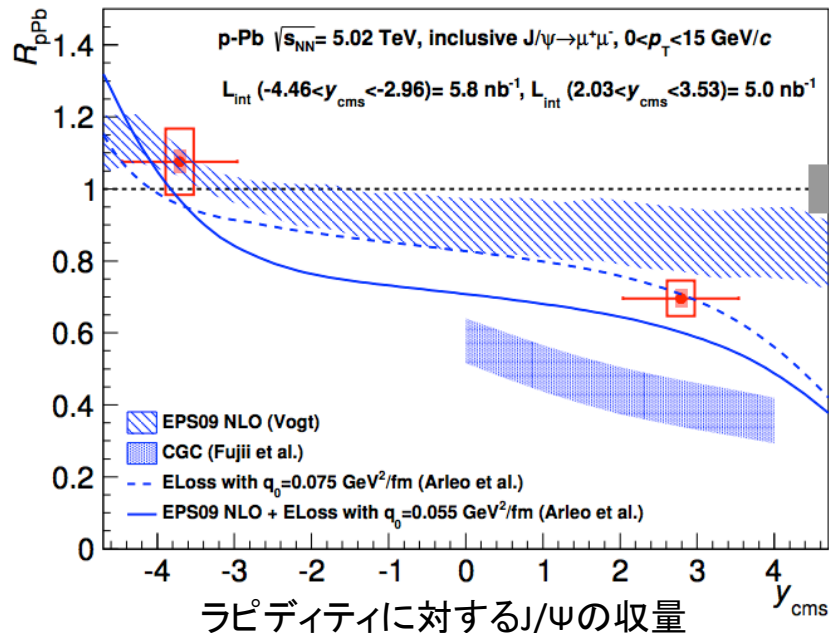
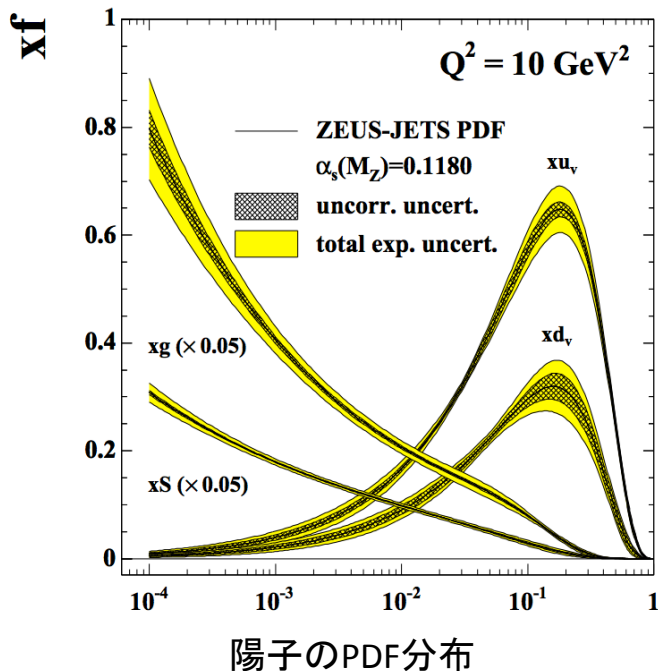
前方方向の物理

- Bjorken-x

ハドロンを持つ縦運動量に対する
パートンが持っている運動量の比

$$x = \frac{2p_T}{\sqrt{s}} e^{-y}$$

p_T : 横運動量
 y : ラピディティ
 \sqrt{s} : 衝突エネルギー



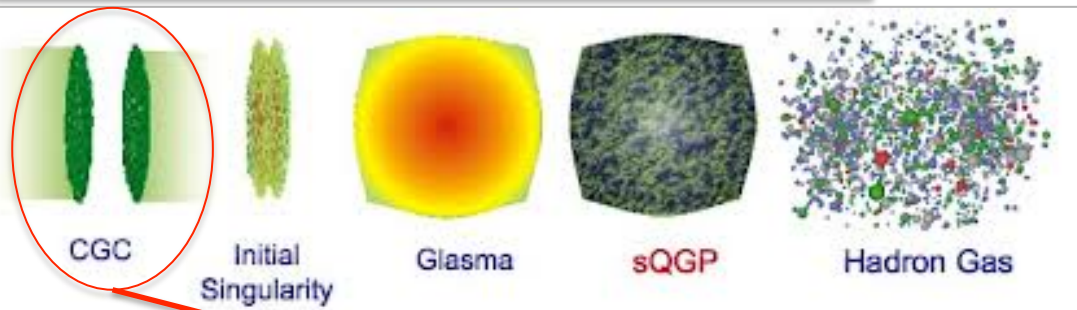
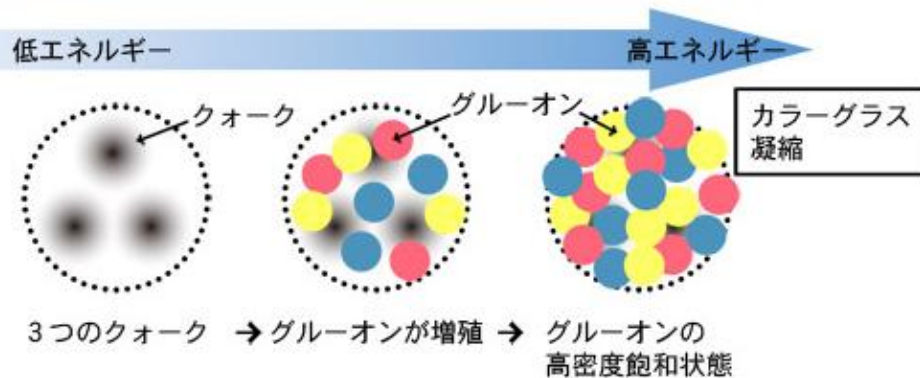
・前方方向で抑制
 ・実験結果 ≠ CGCモデル
 ⇒ハドロンは終状態の反応まで含む
 直接光子なら初期状態の反応を残している

カラーグラス凝縮(CGC : Color Glass Condensate)

CGC : Color Glass Condensate

『高いエネルギーの散乱においてハドロンが見せる普遍的な描像』

グルーオンが高密度に飽和した状態



クォーク(q)とグルーオン(g)の反応のゆらぎ

$$1, q \rightarrow q + g \rightarrow q (\text{放出・吸収})$$

$$2, g \rightarrow g + g \rightarrow g$$

$$3, g + g \rightarrow g$$

高エネルギー原子核衝突の衝突初期状態

⇒

特にCGCはビーム軸方向の
前方方向
において強く起こる

高エネルギー衝突実験による理論モデルの初期パラメーターの決定・検証

☆解明するためには...

初期状態の反応を残している直接光子

ALICE実験アップグレード計画

LHC Schedule: The Big Picture

• LS = Long Shutdown

2010			2011			2012			2013			2014			2015			2016			2017			2018			2019		
Run 1						LS1						Run 2						LS2											
7-8 TeV, 0.7×10^{34} ($\mu=20$), 25 fb ⁻¹												13-14 TeV, 1.6×10^{34} ($\mu=43$), 150 fb ⁻¹						Phase-I Install											
2020			2021			2022			2023			2024			2025			2026			2027			2028			2029		
Run 3						LS3 - Phase-II Install						Run 4						LS4											
14 TeV, $2-3 \times 10^{34}$ ($\mu=50-80$), 350 fb ⁻¹												14 TeV, $5-7 \times 10^{34}$ ($\mu=140-200$), 3000 fb ⁻¹																	

≡ 今後のLHCスケジュール

LHC : 衝突エネルギーの増強

ALICE実験 : 検出器の調整・開発

ALICE実験アップグレード一覧

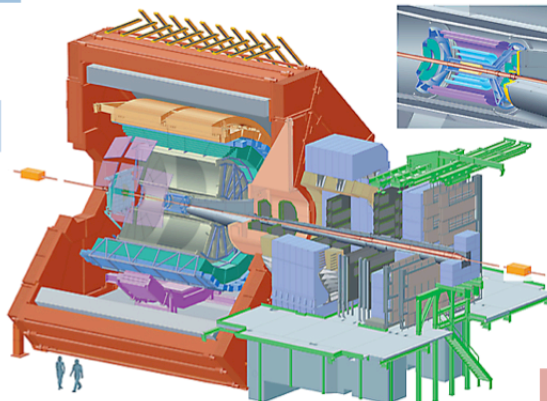
EMCal : extension by DCAL(LS1)

FoCal project

New beam pipe : smaller diameter

Upgrade of forward/trigger detectors
(ZDC, VZERO, T0)

TPC : new GEM readout chambers,
Pipeline readout



■	approved
■	submitted
■	under internal review

New ITS : high resolution,
Low material budget

TRD, TOF, PHOS, EMCal,
Muon spectrometer : new
readout electronics

MFT project

- 目的
LHCの高い衝突エネルギーを活かし、
前方方向の物理の測定

⇒ 直接光子やジェット現象

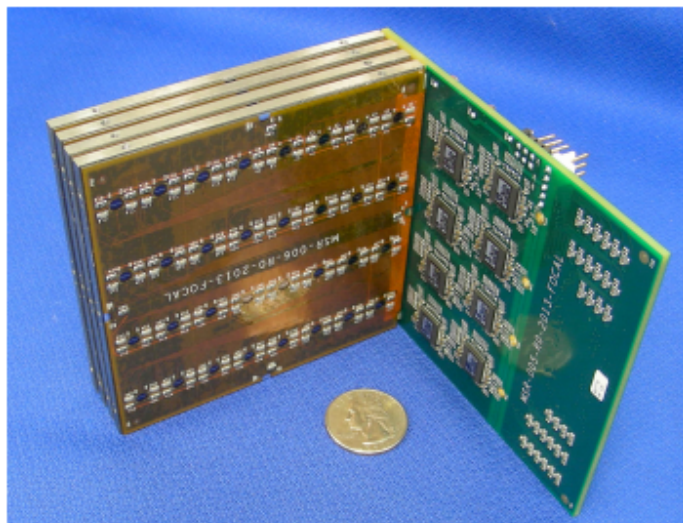
CGCの検証、QGPの早期熱化機構の解明など...



Low Granularity Layer(LGL)

LGLモジュール

構成 : W+Siレイヤー×4
シグナル : 4レイヤーの合計値
読み出し部 : ワイヤーボンディング
→太さ数 μm の導線

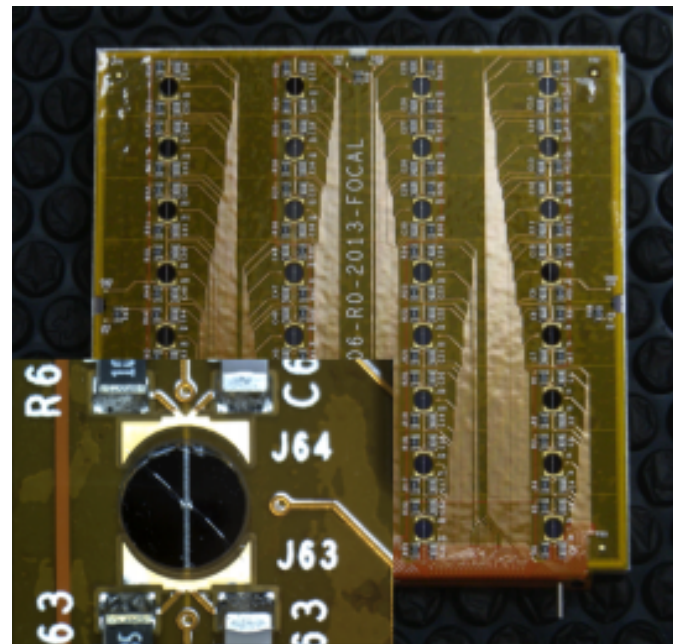


Prototype(made by Oak Ridge National Laboratory)

Summing Board : 128ch出力

- 0 ~ 63ch : 1/1出力(positive signal)
- 64 ~ 127ch : 1/16出力(negative signal)

⇒出力される極性によってゲインが違う





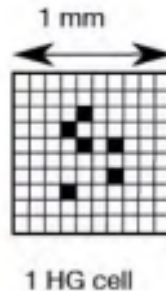
High Granularity Layer(HGL)

- HGL

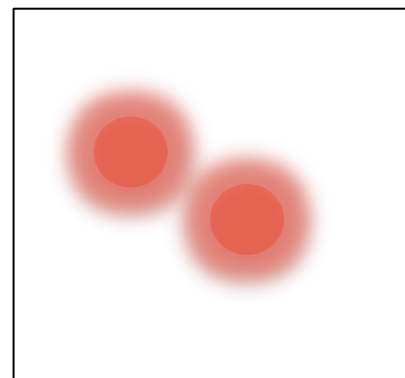
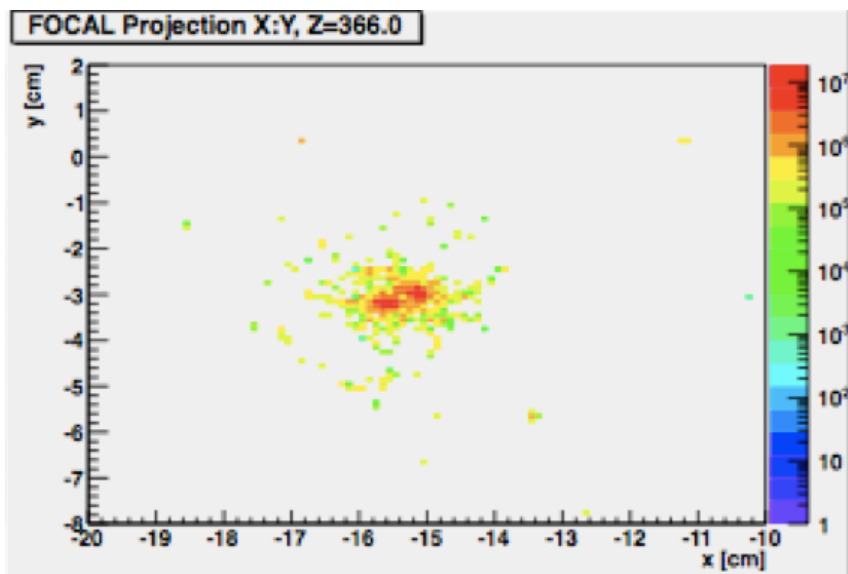
25×25 μm^2 で構成される1 mm^2 のmini-pixel毎の読み出しが可能なCMOS-pixel検出器

- 目的

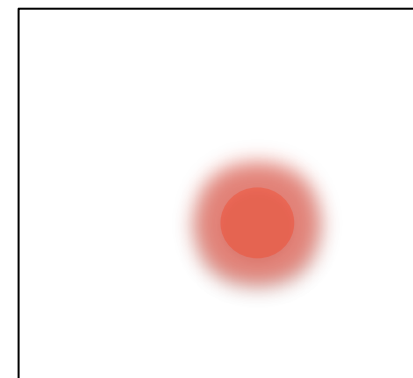
Show shapeを見ることで γ/π^0 の識別を行なう



Prototype :
Made by Utrecht University(the Netherlands)



崩壊光子(2 γ)

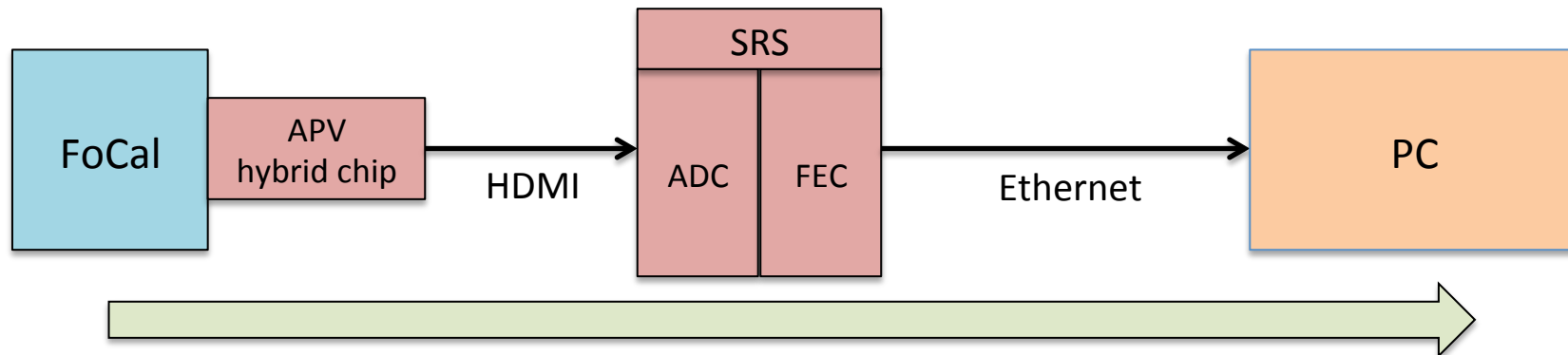


直接光子(1 γ)

シミュレーションによる崩壊光子の観測(200GeV π^0)



データ取得環境



Data Flow Chart

読み出しエレクトロニクス : CERN RD51 group 開発

・APV25 hybrid board

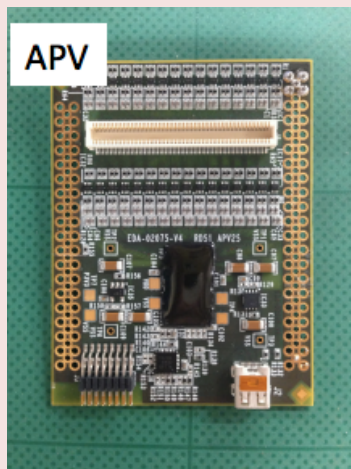
出力 : 128ch

サンプリングスピード :

40MHz

出力極性 : 陽極 & 陰極

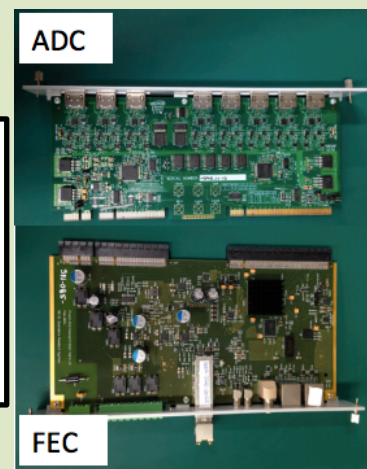
→ 1/1 & 1/16出力



・SRS(Scalable Readout System)

- ADC board : 8つのAPV25から
12bit ADCの同時読み出しが
可能

- FEC board : ADCからの情報を
PCへ送るフロントエンド部





mmDAQソフトウェア

ATLAS micromegas検出器に使われている
↑APV chipと対応している

Run Control

- データ取得

▪ スタート

▪ ストップ

- ランタイプ選択

▪ physics

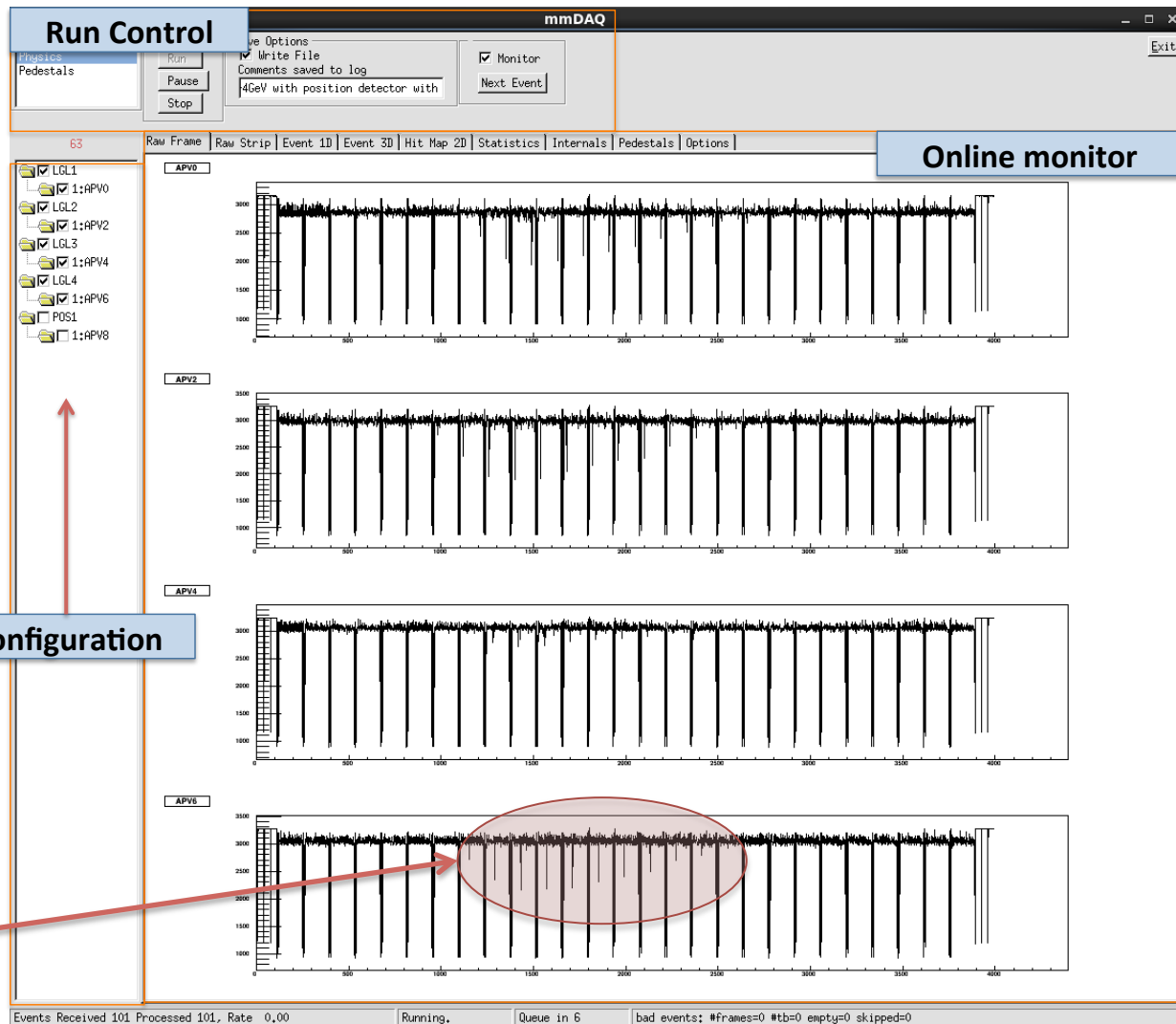
▪ pedestal

- ログ

Online monitor

横軸: 25ns毎のタイムビン

縦軸: ADC値



シグナル

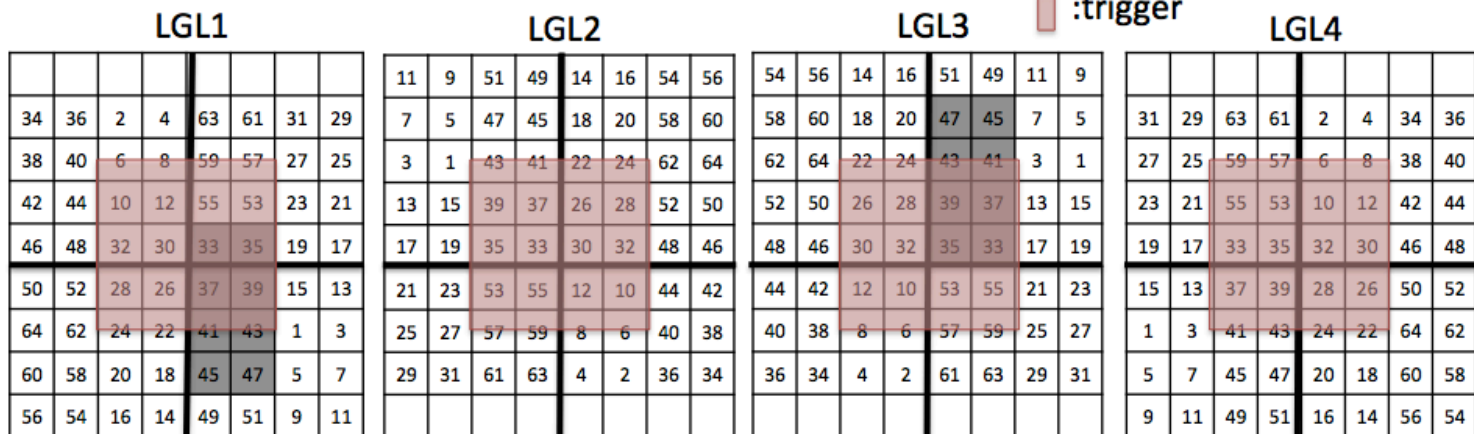


LGLマッピング

Positive output(1/1 output)

■ :dead channel

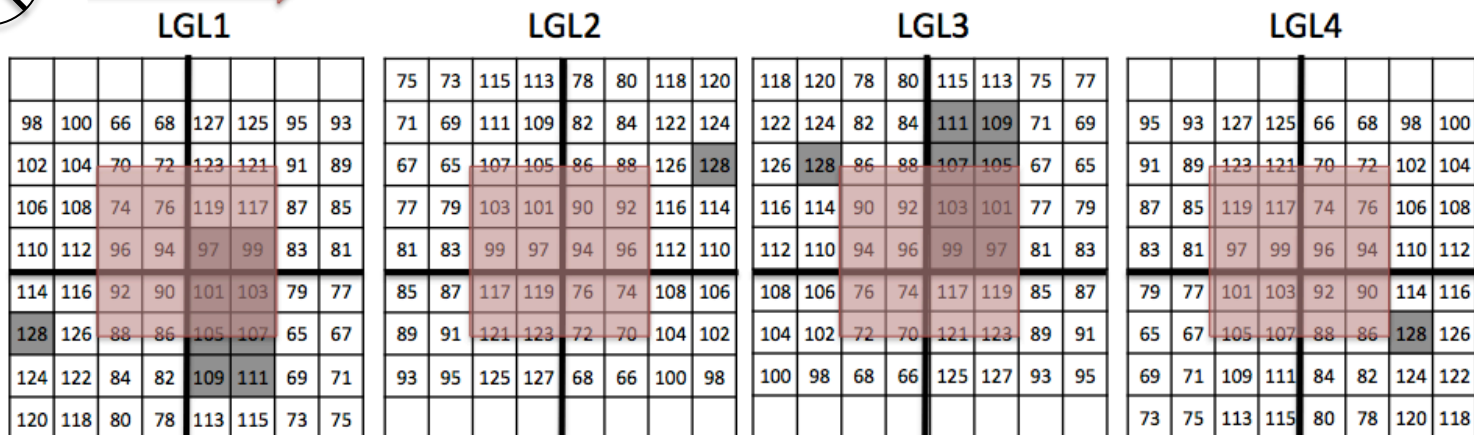
■ :trigger



beam



Negative output(1/16 output)





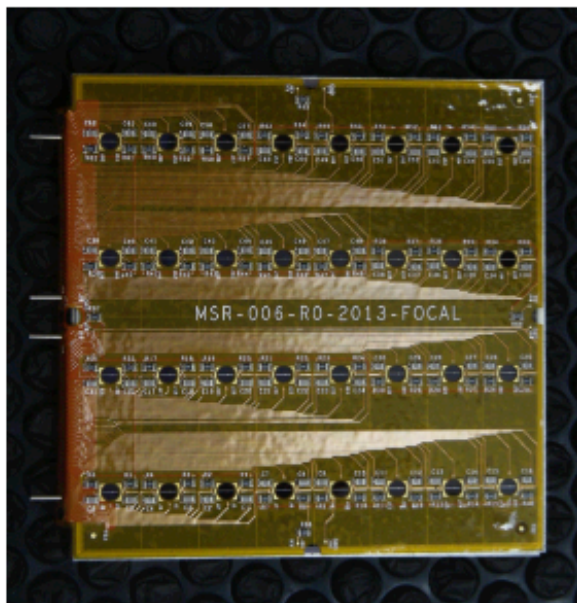
データ・フォーマット

```
root [0]
Attaching file run200.root as _file0...
root [1] .ls
TFile**          run200.root
TFile*           run200.root
KEY: TTree       raw;1   rawapvdata
KEY: TTree       pedestals;1   apvp pedestals
KEY: TTree       data;1   apvdata
KEY: TTree       run_info;1   run_info
KEY: TDirectoryFile config;1   parameters from config file
root [2] raw->Show(0)
=====> EVENT:0
apv_evt          = 1
time_s           = 1446376318
time_us          = 444581
apv_fecNo        = (vector<unsigned int>*)0x7fcea2d56e60
apv_id           = (vector<unsigned int>*)0x7fcea2c258a0
apv_ch           = (vector<unsigned int>*)0x7fcea07eb370
mm_id            = (vector<string>*)0x7fcea2d57710
mm_readout       = (vector<unsigned int>*)0x7fcea07b52f0
mm_strip         = (vector<unsigned int>*)0x7fcea07bb290
apv_q            = (vector<vector<short> >*)0x7fcea07b8ff0
apv_presamples   = 0
root [3] █
```

- apv_id: LGLの番号
- apv_ch: APV25 chipの出力チャンネル
- apv_q: 各タイムビンでのADCの値



LGLマッピング



MSR-006-R0-2013-FOCAL

LGL1,2

56	60	64	50	46	42	38	34
54	58	62	52	48	44	40	36
16	20	24	28	32	10	6	2
14	18	22	26	30	12	8	4
49	45	41	37	33	55	59	63
51	47	43	39	35	53	57	61
9	5	1	15	19	23	27	31
11	7	3	13	17	21	25	29

LGL3,4

11	7	3	13	17	21	25	29
9	5	1	15	19	23	27	31
51	47	43	39	35	53	57	61
49	45	41	37	33	55	59	63
14	18	22	26	30	12	8	4
16	20	24	28	32	10	6	2
54	58	62	52	48	44	40	36
56	60	64	50	46	42	38	34

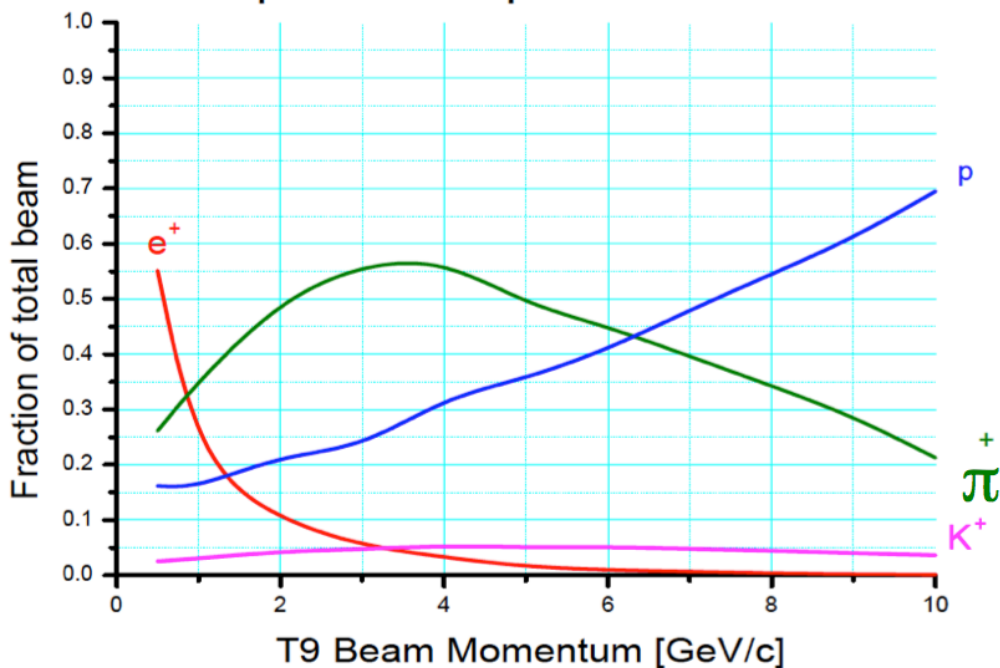
Summing Boardが逆方向に付いているためマッピングも上下反転している。



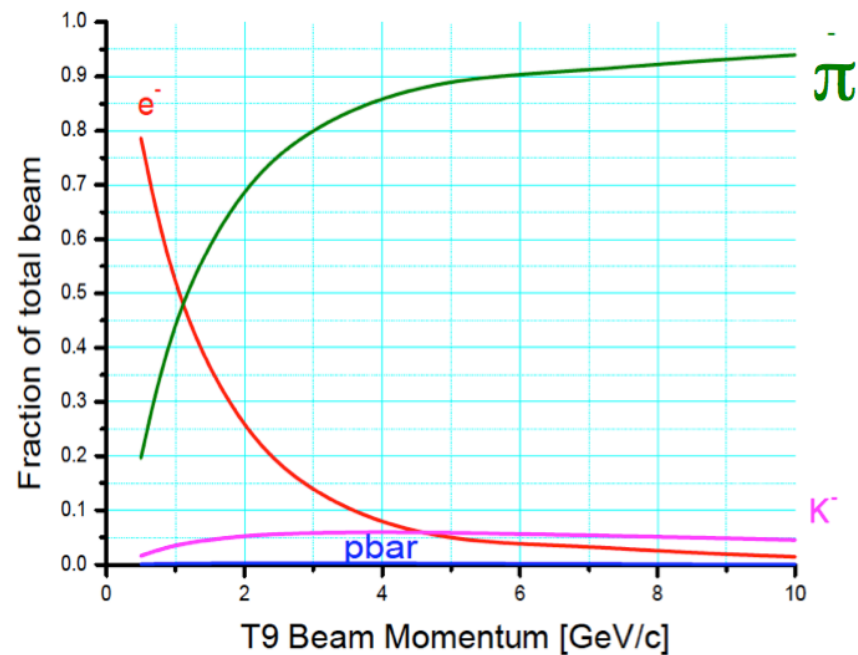
PSビーム成分

T9 Beam Composition

Composition of positive beam

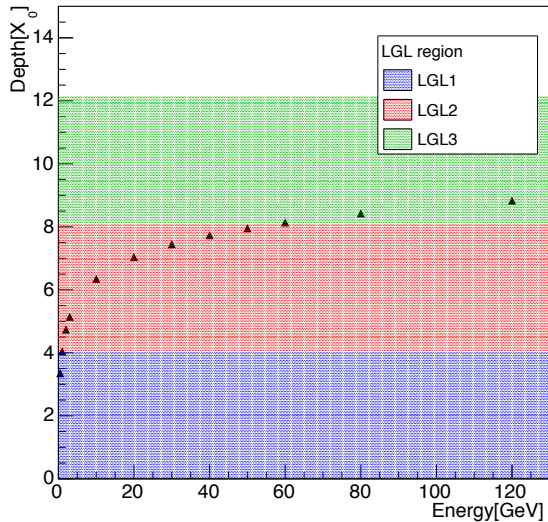


Composition of negative beam

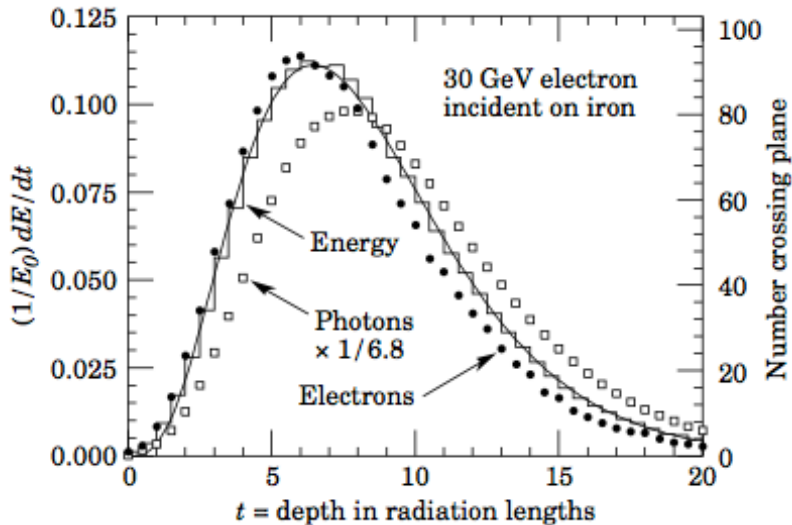




縦方向のシャワーの広がり



↑HGLのアブソーバー分の補正有



なだらかなテイルも同様な傾向

$$t_{\max} = 1.0 \times \left(\ln \frac{E_{\text{incident}}}{E_c} + C_j \right)$$

- $t_{\max} = \frac{x}{X_0}$: シャワーの最大の位置
- E_{incident} : 入射エネルギー
- E_c : 臨界エネルギー
- C_j : 定数 (電子: -0.5、光子: 0.5)

Ref : Passage of particles through matter

・HGL

LGL1とLGL2の間: 3mm厚の治具×2

LGL2とLGL3の間: 3mm厚の治具×2

アルミニウムの $X_0=89\text{mm}$

$$4 \times X_0 + 6/89 X_0 + 4 \times X_0 + 6/89 \times X_0 + 4 \times X_0 + 4 \times X_0$$



Shower Profile

・方法

- イベント毎に重心系の計算

$$x^{(s)} \equiv \langle x^{(s)} \rangle \equiv \frac{\sum_{i,j} ADC_{i,j}^{(s)} \cdot x_i^{(s)}}{\sum_{i,j} ADC_{i,j}^{(s)}}$$

$$y^{(s)} \equiv \langle y^{(s)} \rangle \equiv \frac{\sum_{i,j} ADC_{i,j}^{(s)} \cdot y_i^{(s)}}{\sum_{i,j} ADC_{i,j}^{(s)}}$$

s : # of LGL

i, j : # of x, y axis

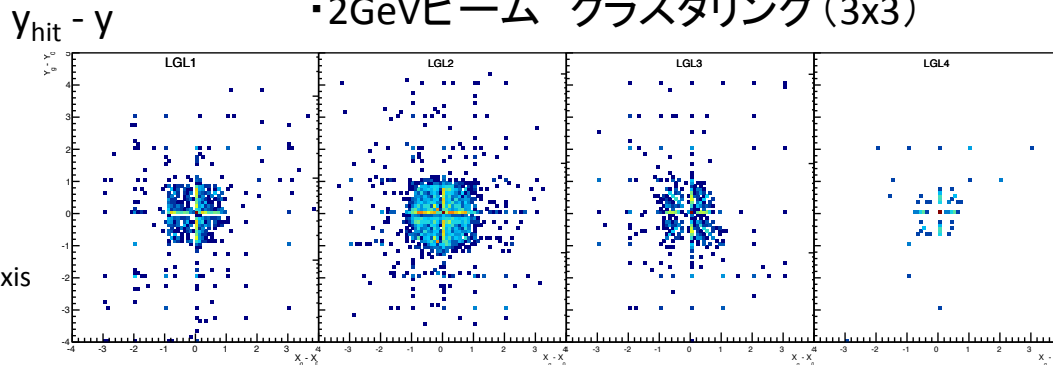
- 重心系と実際の位置の差を求める

$$x_{hit}^{(s)} - x^{(s)} \quad y_{hit}^{(s)} - y^{(s)}$$

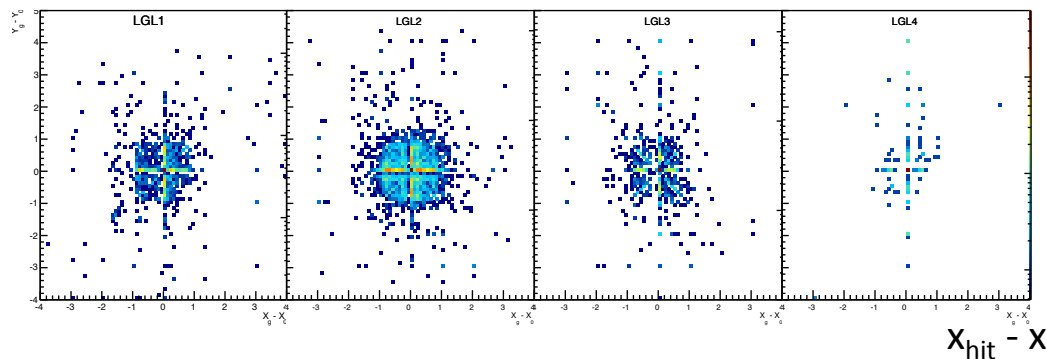
・イベントセレクト

- ペDESTALカット
- タイムビンカット
- ストレートビームセレクト
- クラスタリング(3x3、5x5)

・2GeVビーム クラスタリング(3x3)



・2GeVビーム クラスタリング(5x5)



クラスタの領域を変えたがシャワーの広がりはそれほど大きくなっていない



Shower Profile

クラスタリング (3x3) クラスタリング (5x5)
 $2\sigma = 8.3\text{mm}$ $2\sigma = 8.5\text{mm}$

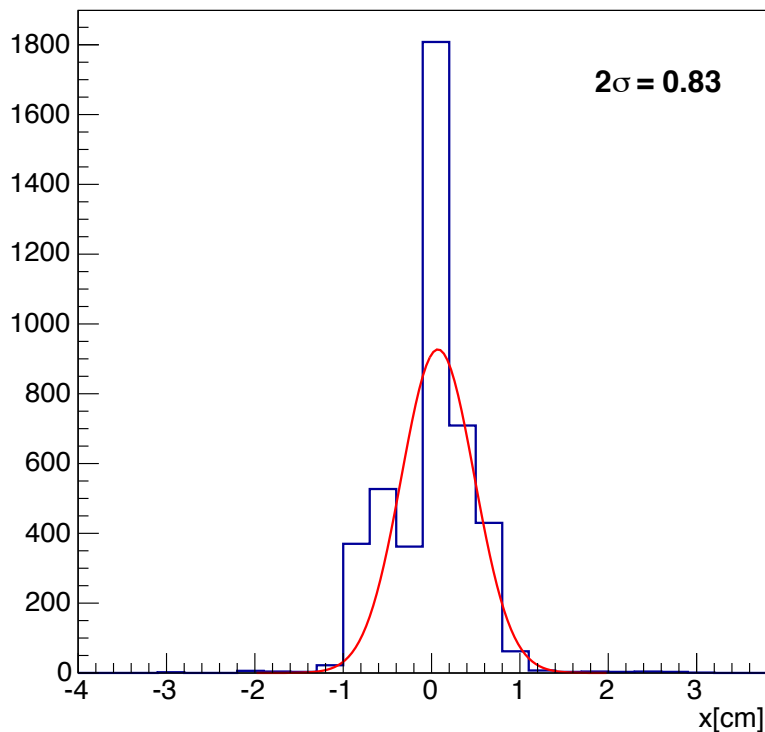


- X軸に射影: ガウシアンフィット

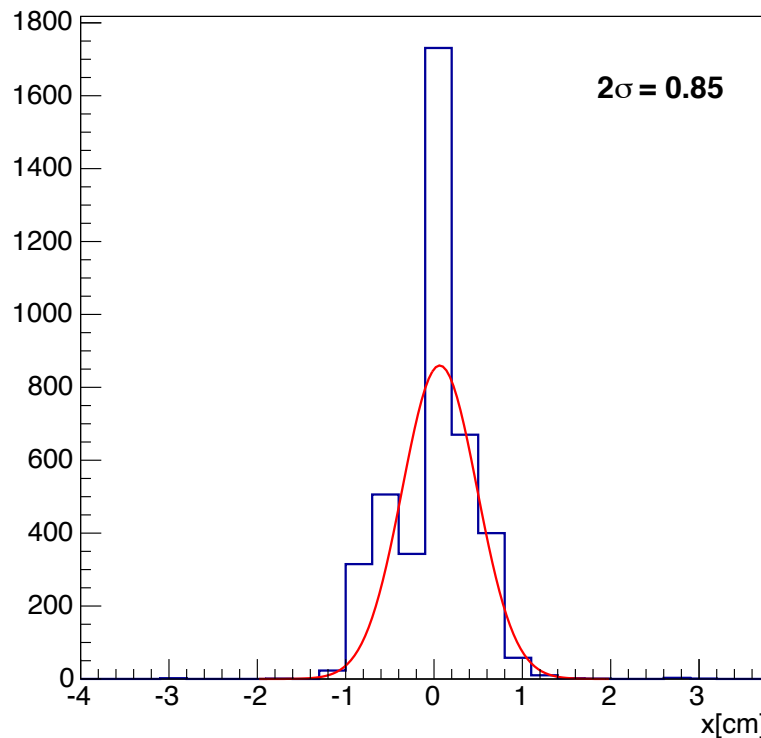
- ・ $\pm 2\sigma$ はガウス分布の95.5%を占める
- ・モリエール半径: $R_M = 9.3\text{mm}$ (for tungsten)

3x3領域と5x5領域で広がりはだいたい一致。モリエール半径とも近い値を示す。
⇒シャワーの広がりがモリエール半径と一致する性能を示している。

2GeV LGL2(3x3)



2GeV LGL2(5x5)





HGLとのデータマージ

・動機

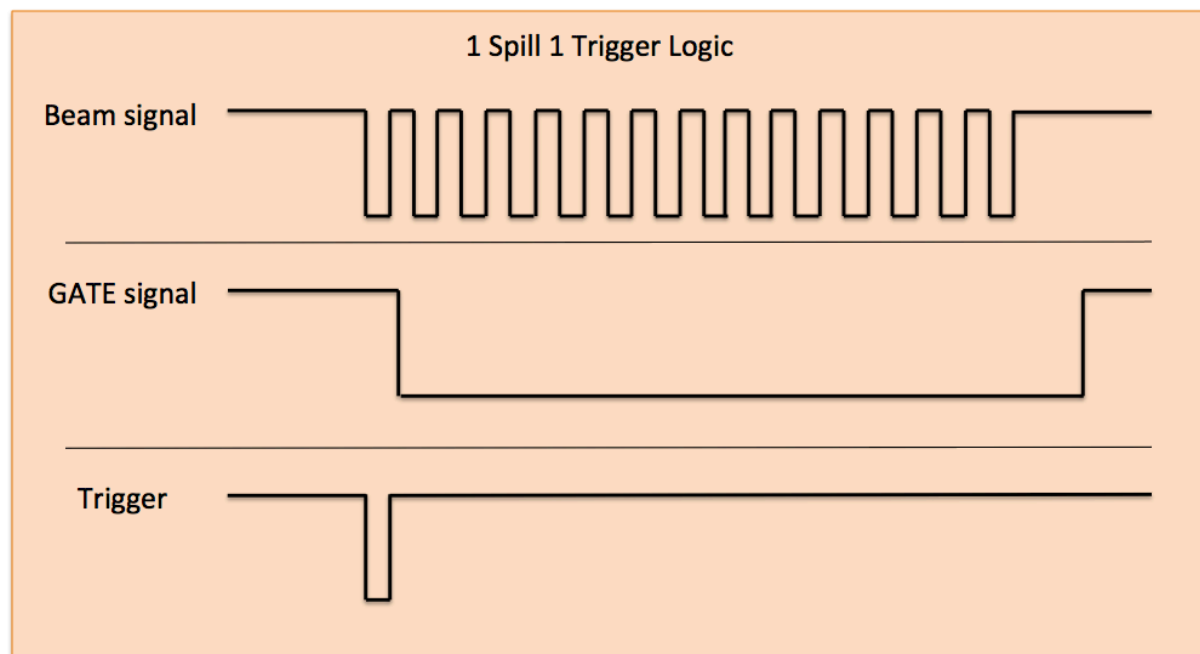
HGLとLGLのデータが一致していることがFoCal-Eを完成させるために必要

問題点: LGLとHGLのトリガーの一致ができていない

解決方法:

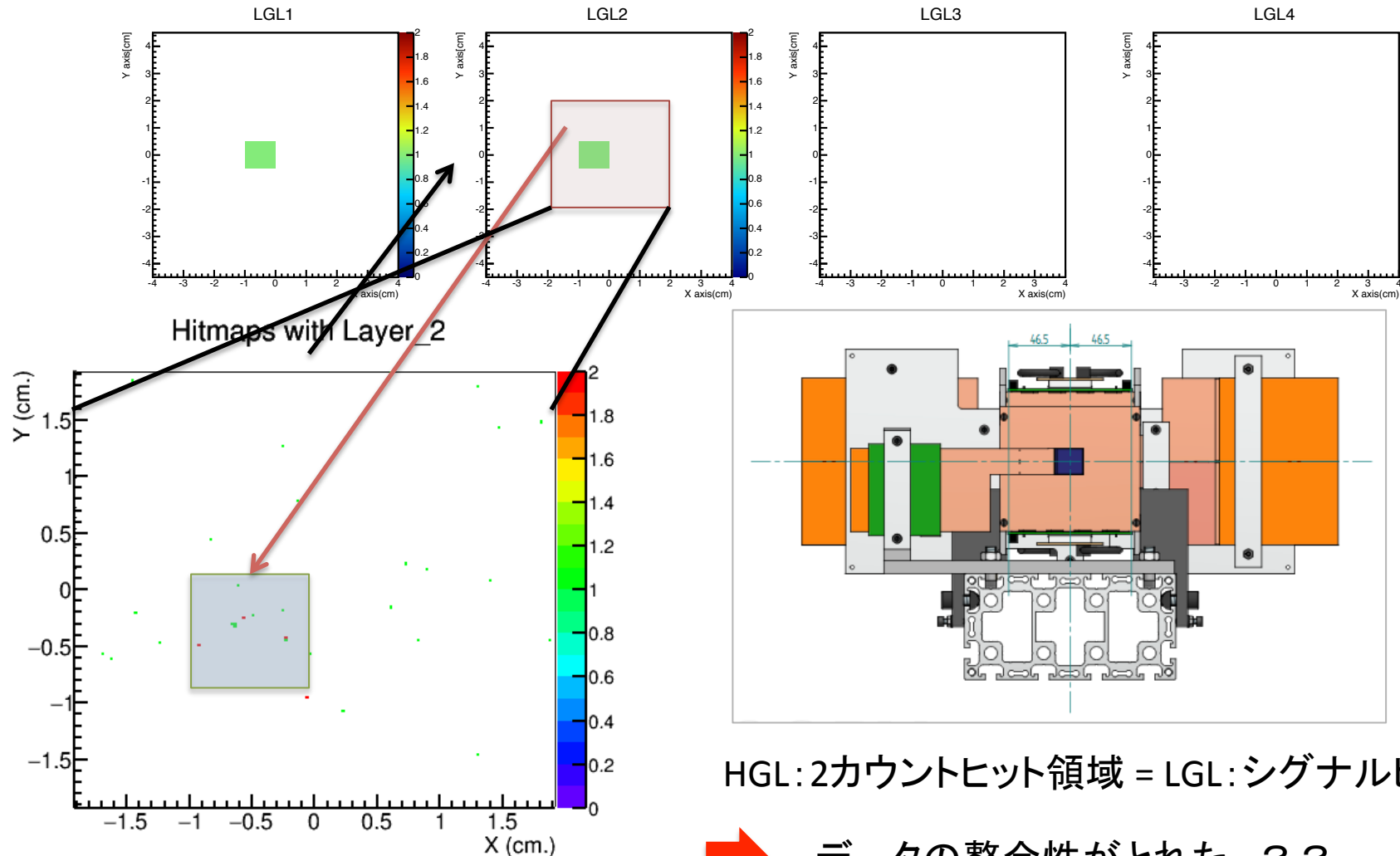
1ビームに対して1つの粒子イベントのみをトリガーするようにする。

→1つの粒子が入ってきたらGATE信号を長時間開くようにし、その間はトリガー信号を出さない





HGLとのデータマージ





チャンネル特性

↓1チャンネルヒット(20GeV)

エネルギーの計算方法

- ・ペDESTアルカット
- ・タイムビンカット
- ・ノイズイベントカット
- ・ストレートビームセレクト
- ・クラスタリング(3x3)

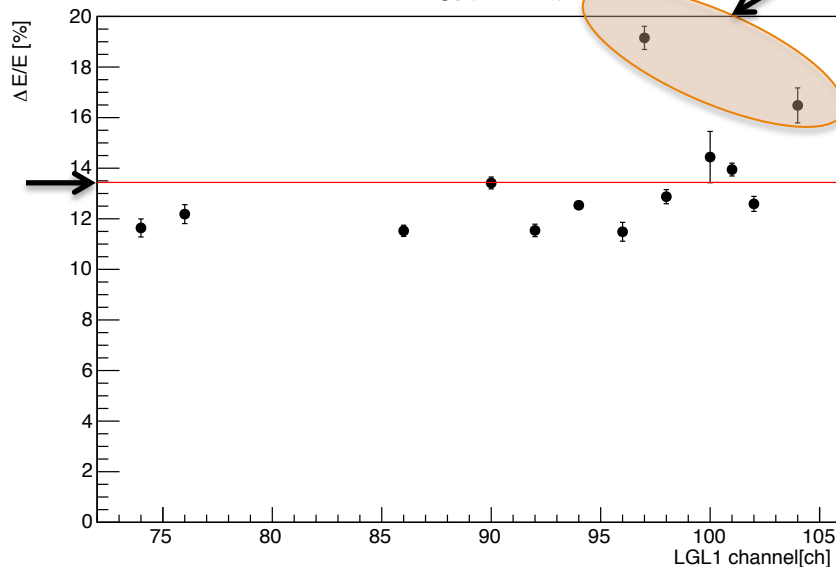
LGL1

98	100	66	68	127	125	95	93
102	104	70	72	123	121	91	89
106	108	74	76	119	117	87	85
110	112	96	94	97	99	83	81
114	116	92	90	101	103	79	77
128	126	88	86	105	107	65	67
122	120	82	80	109	111	69	71

エネルギー分解能比較

Dead channel

20GeVの分解能



それぞればらつきを持っており
一様性が見られない

⇒ PADそれぞれ固有な特性を持っている



ハドロンと電子

・電子とハドロンの違い

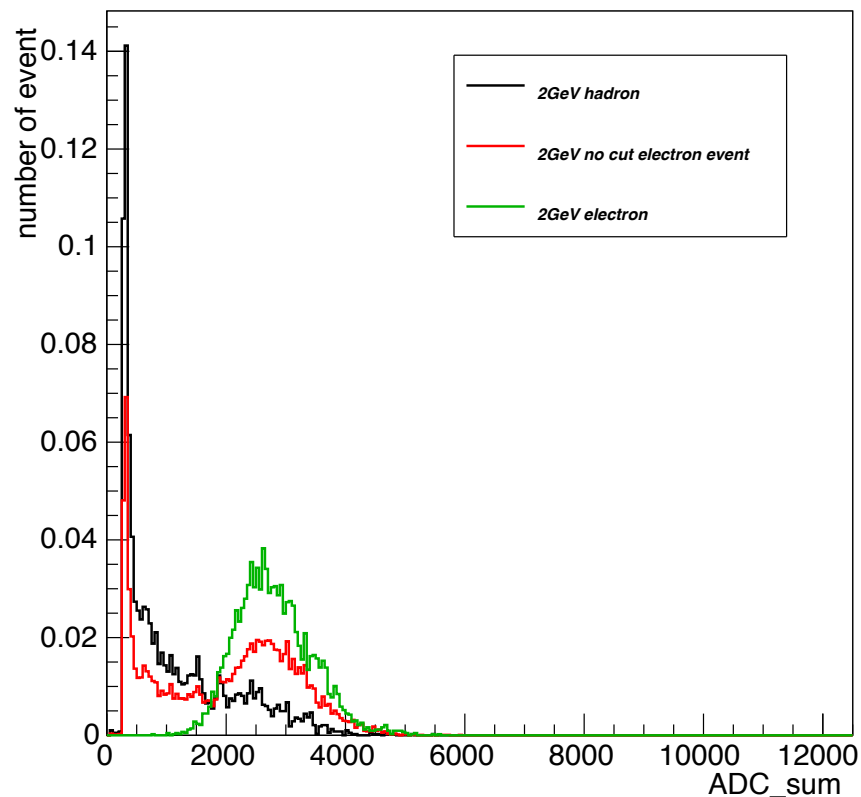
電子: 短い放射長

ハドロン: 長い放射長

⇒ FoCal-E内はシャワーを起こす確率過程中

緑: 電子 ← ピークが立っている

黒: ハドロン ← ピークが無い



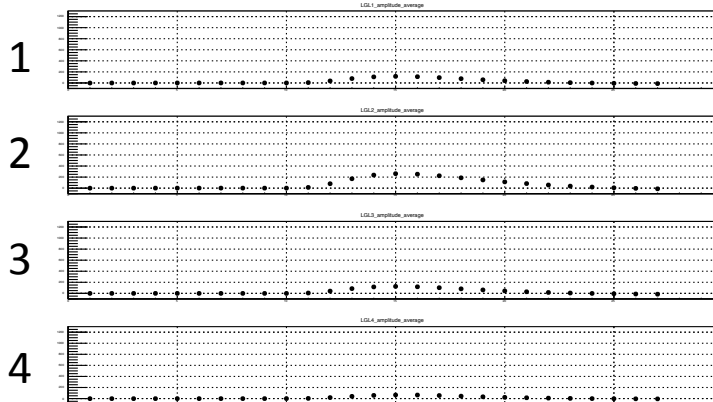
シグナルが長いテールを持つような形が示される



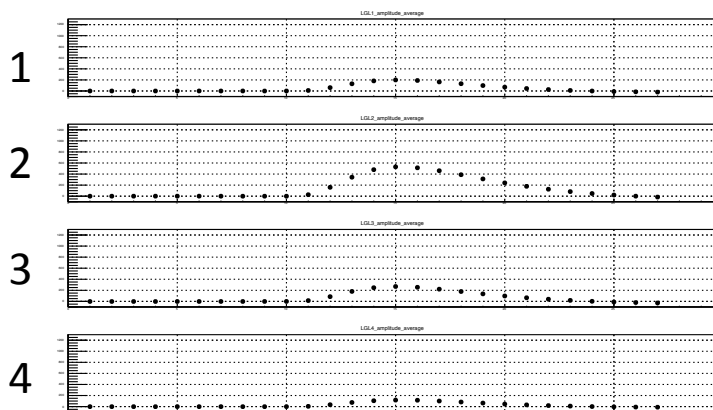
ADCの波高

各エネルギーの電子ビームの平均波高

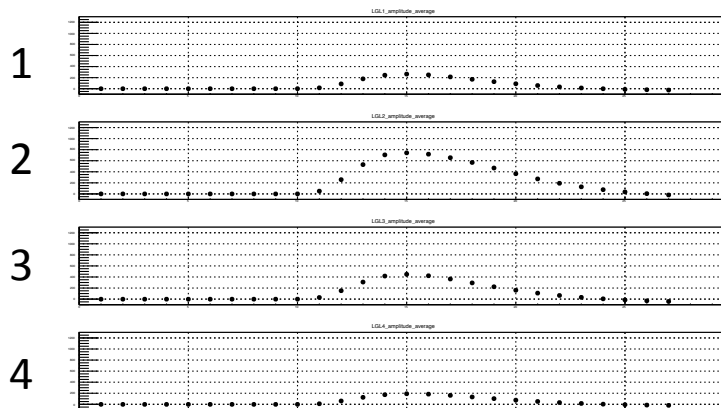
10GeV



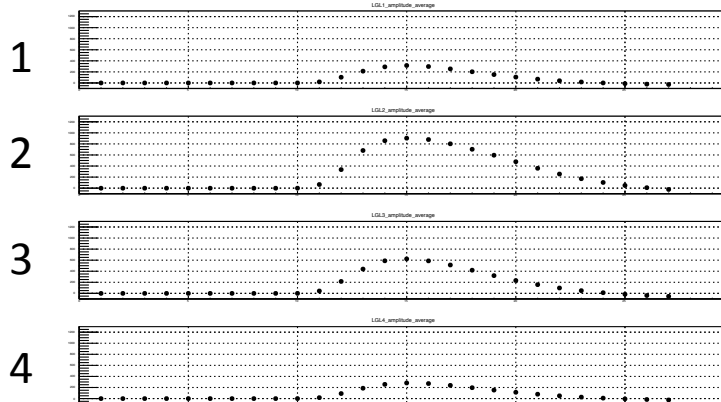
20GeV



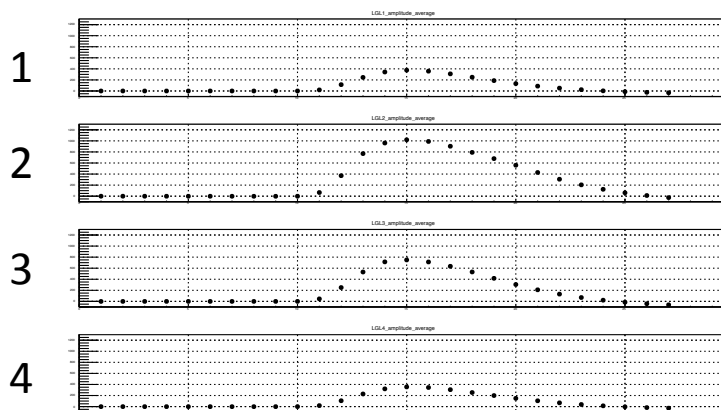
30GeV



40GeV

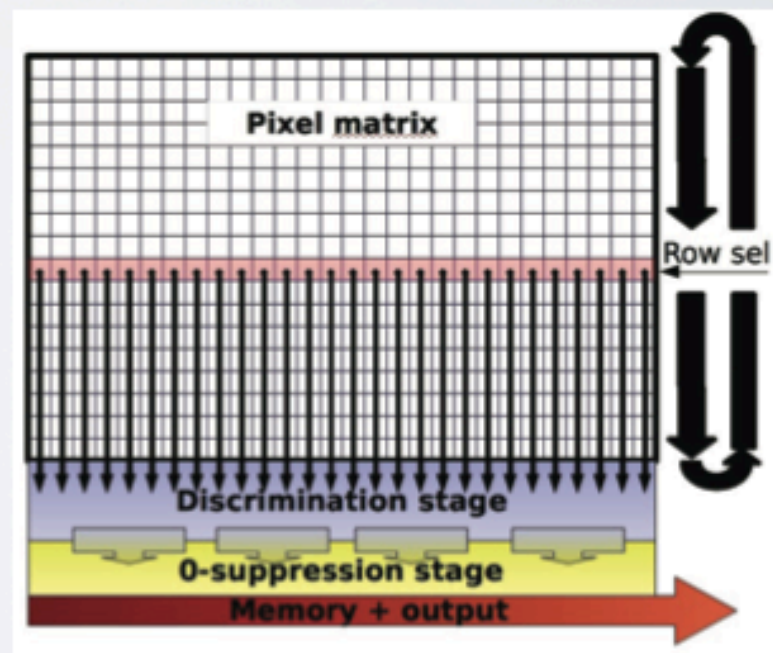
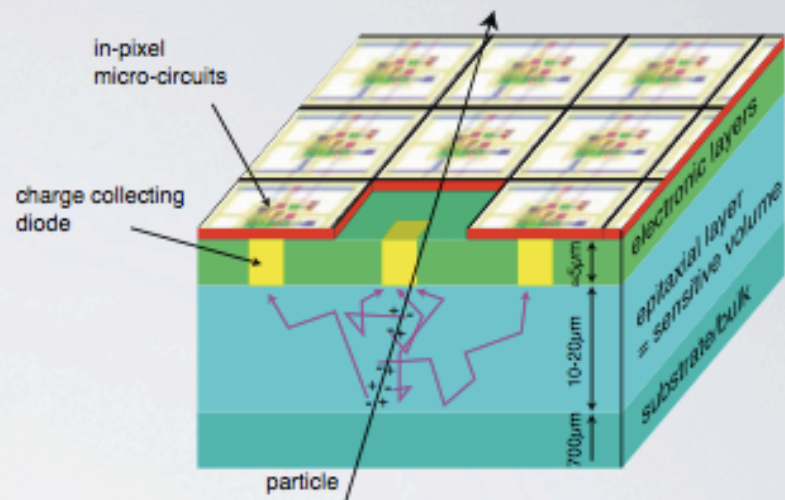


50GeV



MIMOSA Sensors

- Monolithic Active Pixel Sensors (MAPS)
 - Si-sensors + electronics in CMOS on single substrate
 - thin sensitive layer ($\approx 20\mu\text{m}$)
 - charge collection by diffusion
- existing chips
 - readout of analog signals by rolling shutter
 - **slow: $640\mu\text{s}$ readout time**
 - $0.35\mu\text{m}$ technology



■外形寸法図 (単位: μm)

■ 材料仕様

項目	値	単位
結晶面方位	(1, 0, 0)	
厚さ	500 \pm 15	μm
裏面不感層	20	μm

■ 外形仕様

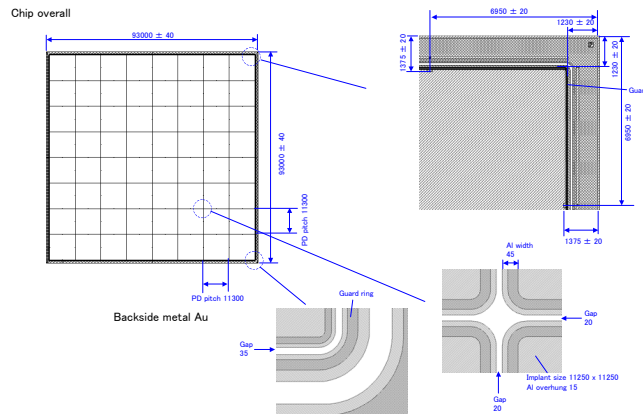
項目	値	単位
chip size	93 × 93	mm
Number of PDs	64 (8 × 8)	ch
PD pitch(X)	11300	μm
PD pitch(Y)	11300	μm
Single P+ size	11250 × 11250	μm
Single Al size	11280 × 11280	μm
PAD size	100 × 200	μm
Number of PADs	4	/ch

■ 特性仕様

項目	値	単位
Vfd	< 220	V
Id	< 20	nA/ch(VR=Vfd)
Ct	30	pF/ch(VR=Vfd)
NG ch	< 2	%(1ch MAX)

■ 検査仕様

項目	内容
Id	各 ch の Id、Vr=100V、150V、200V、250V
Ct	各 ch の Ct、Vr=100V、150V、200V、250V
Vfd	モニタ PD での Ct 測定値より換算



このカタログの記載内容は、平成22年4月現在のものです。製品の仕様などは予告なく変更することがありますので、あらかじめご了承ください。ご購入の際はお手数ですが弊社窓口にてご確認ください。

浜松ホトニクス株式会社
 固体営業部 □〒436-8558 浜松市東区南野町1126-1
 東京支店 □〒105-0001 東京都港区虎ノ門3-8-21(第33森ビル)
 大阪営業所 □〒541-0051 大阪府中央区安土町2-3-13(大阪国際ビル10階)

☎(053)434-3311 ファックス(053)434-5184
 ☎(03)3436-0491 ファックス(03)3433-6997
 ☎(06)6271-0441 ファックス(06)6271-0450

HAMAMATSU

