

LHCf検出器のキャリブレーション

名古屋大学 牧野友耶

27.11.2015, TA-LHCf勉強会

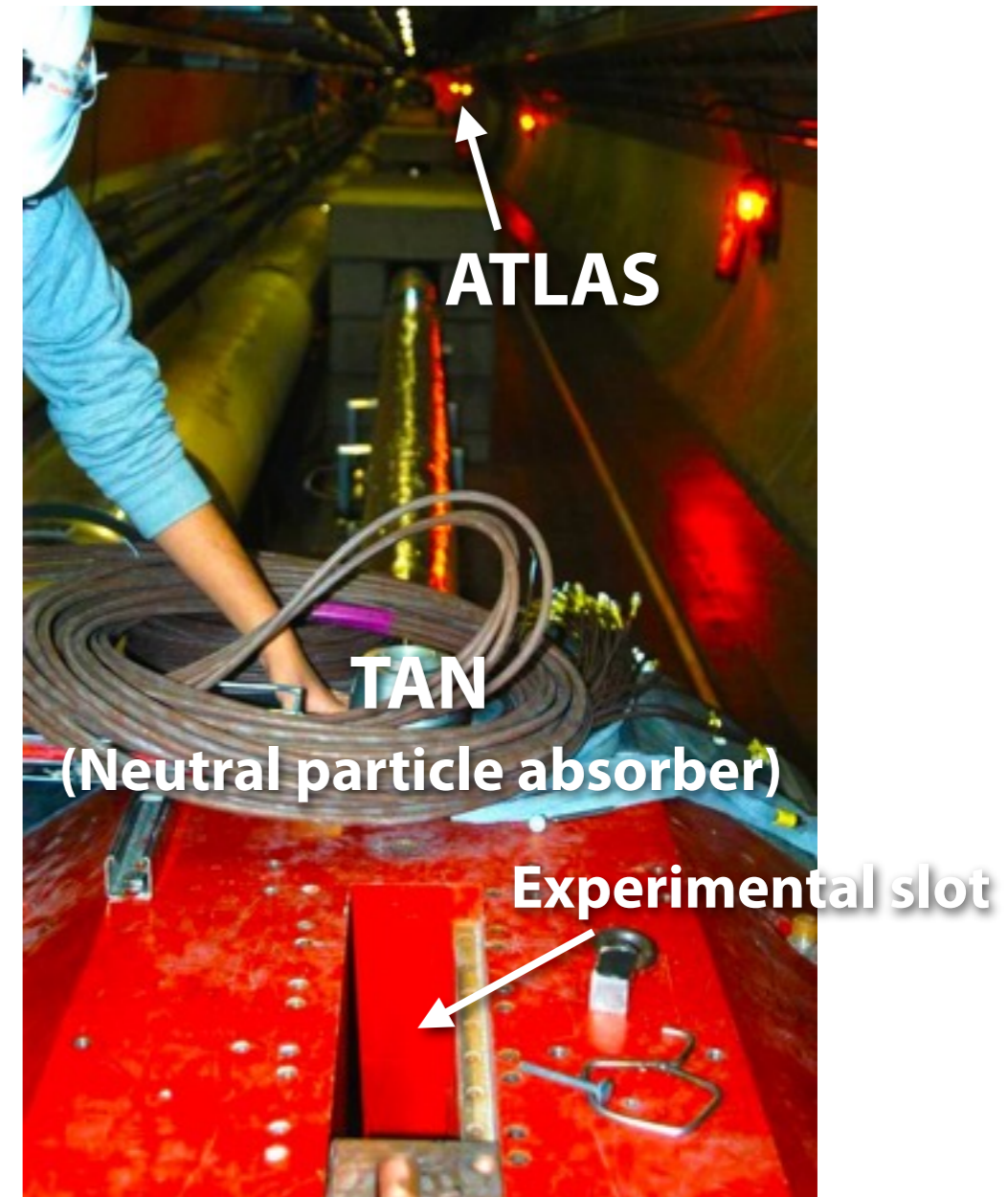
LHCfの検出器の要求と設置場所からの制約

Experimental slot @ TAN

- $\eta > 8.4$ (ゼロ度の測定が可能)
- スロットが98mmと狭い！
- 140m 離れている
- 中性粒子のみ
- LHCの運転への影響がほとんどなく、インストールと運用が比較的容易
- 加速器の中でも放射線環境が厳しい

やりたいこと

- ガンマ、パイゼロ、中性子の測定
- 各粒子のエネルギースペクトル
- 粒子生成の角度依存性
- TeVの粒子の正確なエネルギー測定

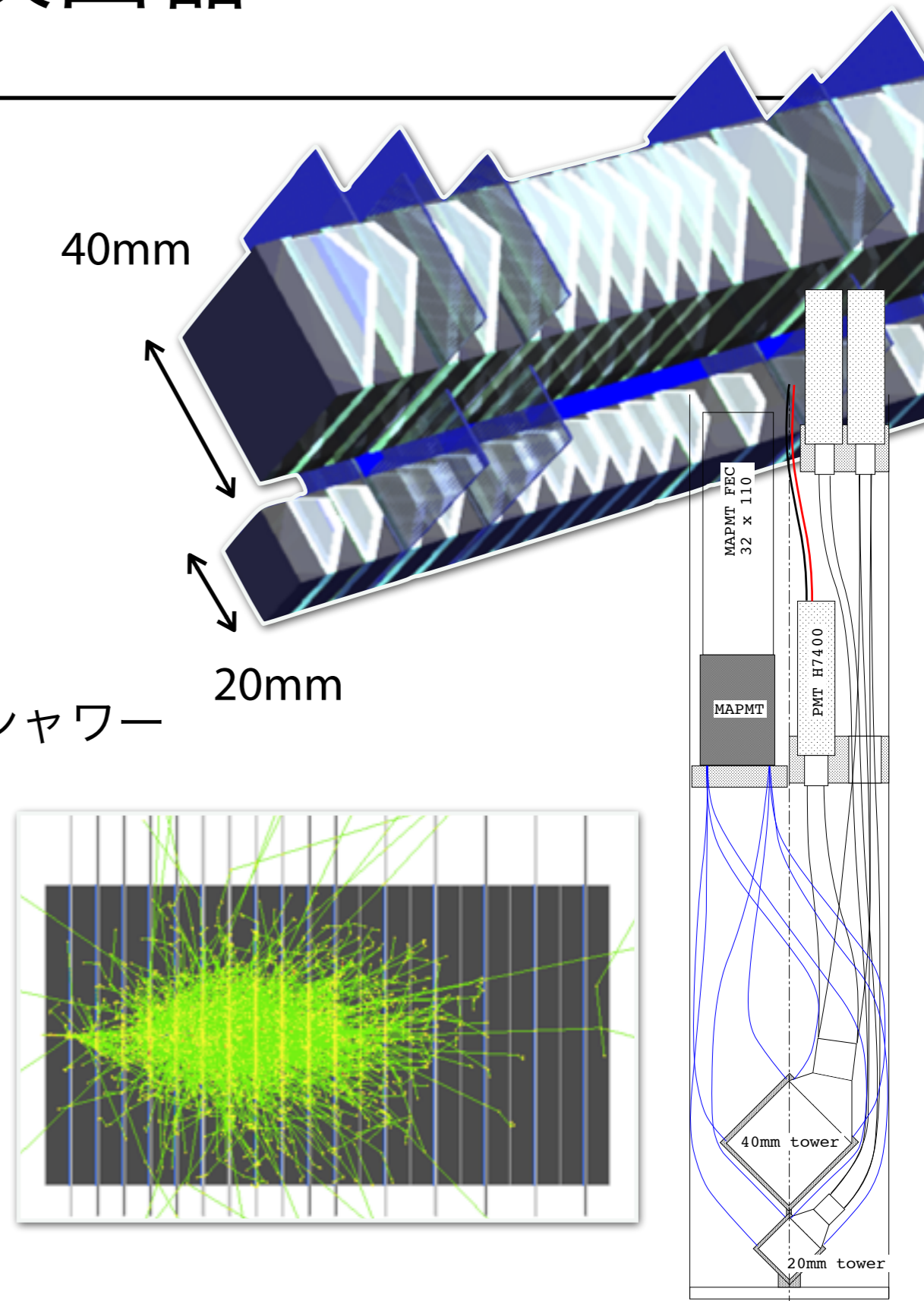


小型、サンプリング型カロリメータ、入射位置検出機能、高放射線耐性、高エネルギーでの高精度がLHCf検出器には求められる。

LHCf 新型検出器

LHCf 新型検出器

- サンプリングカロリメータ
 - 全16層のタイル状GSOシンチレータ
 - 吸収層にはタングステン($44 X_0, 1.6 \lambda_0$)
 - 入射粒子のエネルギーの約3%を計測
- 入射位置検出器(シャワーイメージング)
 - Arm1; GSO-bar hodoscope
 - Bar状のGSOシンチレータを井桁に組んでシャワーの横方向分布を測定 (全4層)
 - Arm2; Silicon strip detector
- 高放射線耐性
 - GSOシンチレータの採用
 - 測定期間内に減光がない (106 Gy)
 - 発光量、decay const. 等で要求を満たす

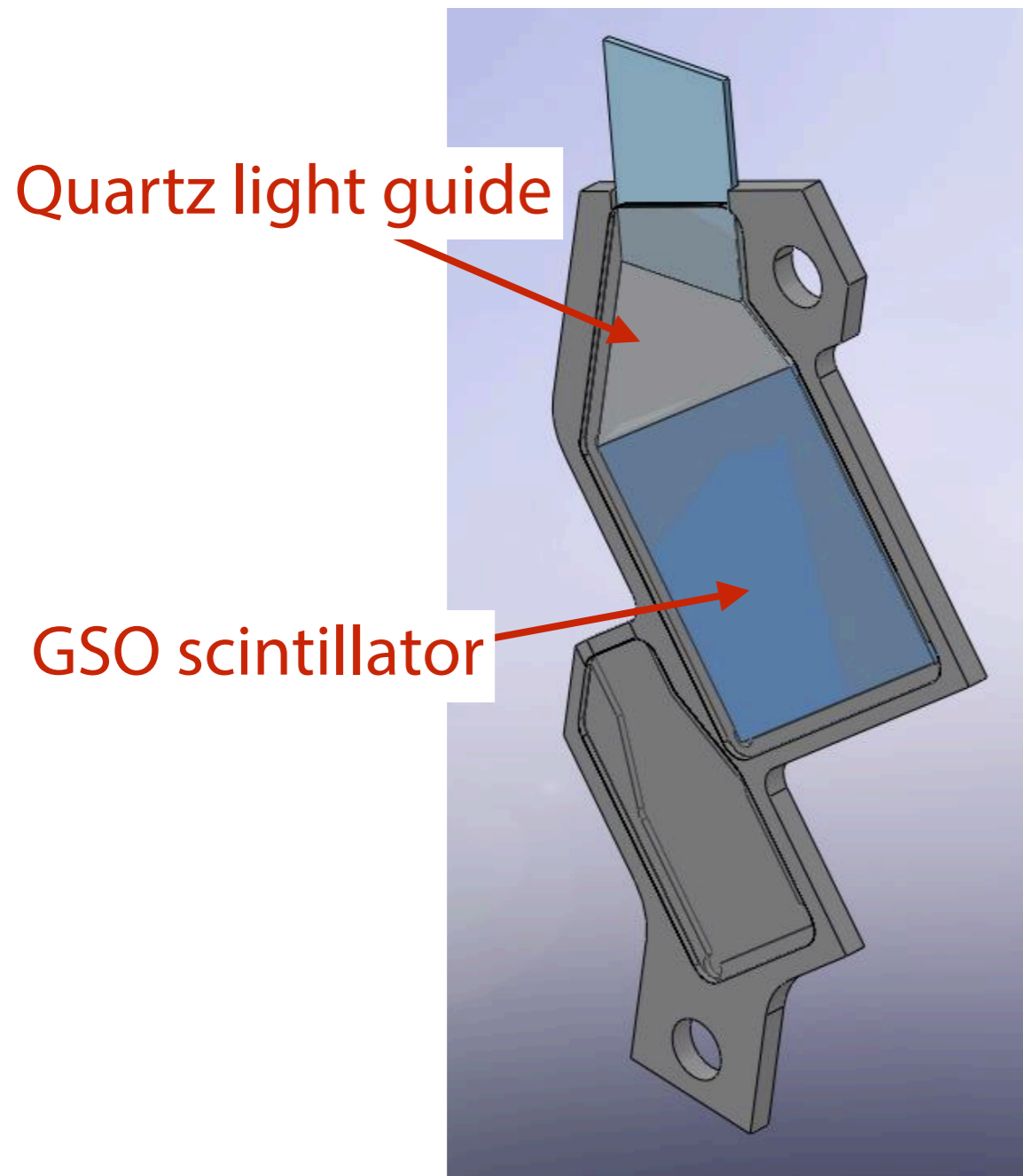


GSO

表 1 各シンチレータの特性

Features	Gd ₂ SiO ₅ (GSO):Ce	EJ-260	NaI:Tl	PbWO ₄ (PWO)
Density [g/cm ³]	6.71	1.023	3.67	8.28
Decay constant [ns]	30-60	9.6	230	6 / 30
Light yield [relative]	20	19.6	100	< 1
Radiation hardness [Gy]	10 ⁶	10 ²	10	10 ⁴⁻⁵
Peak emission [nm]	430	490	415	440 / 530
Radiation length [cm]	1.38	14.2	2.6	0.92
Index of refraction	1.85	1.58	1.85	2.16

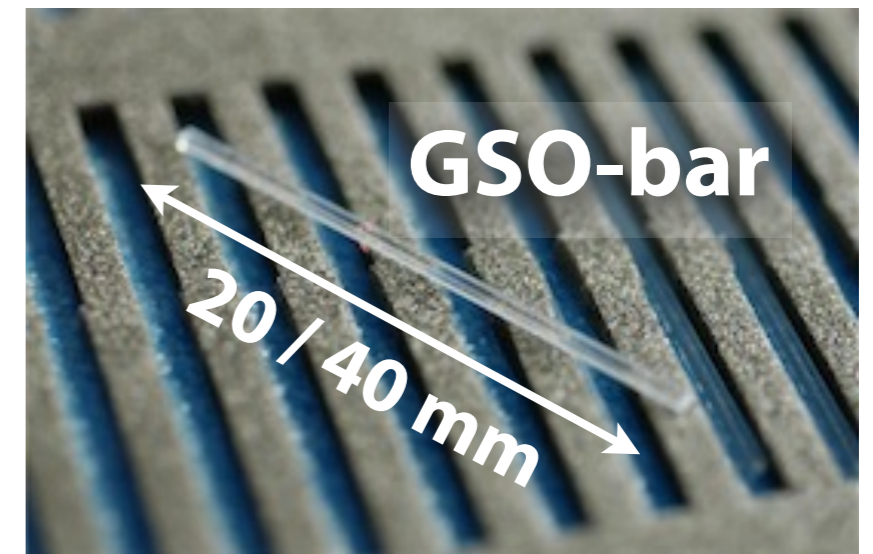
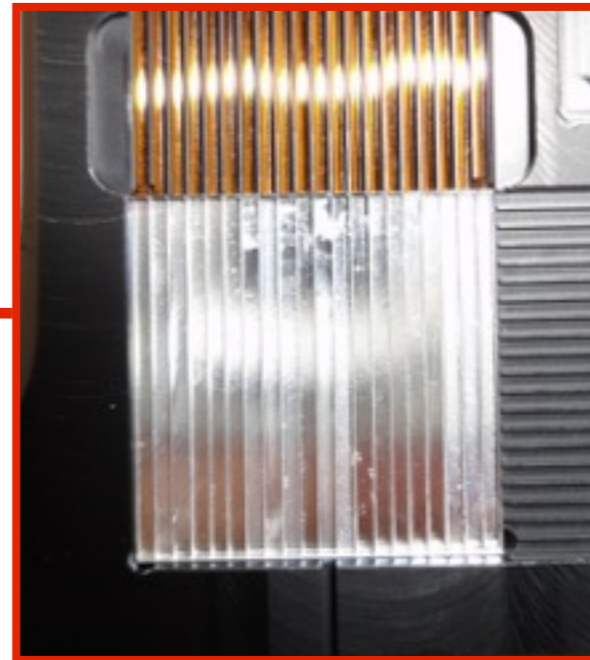
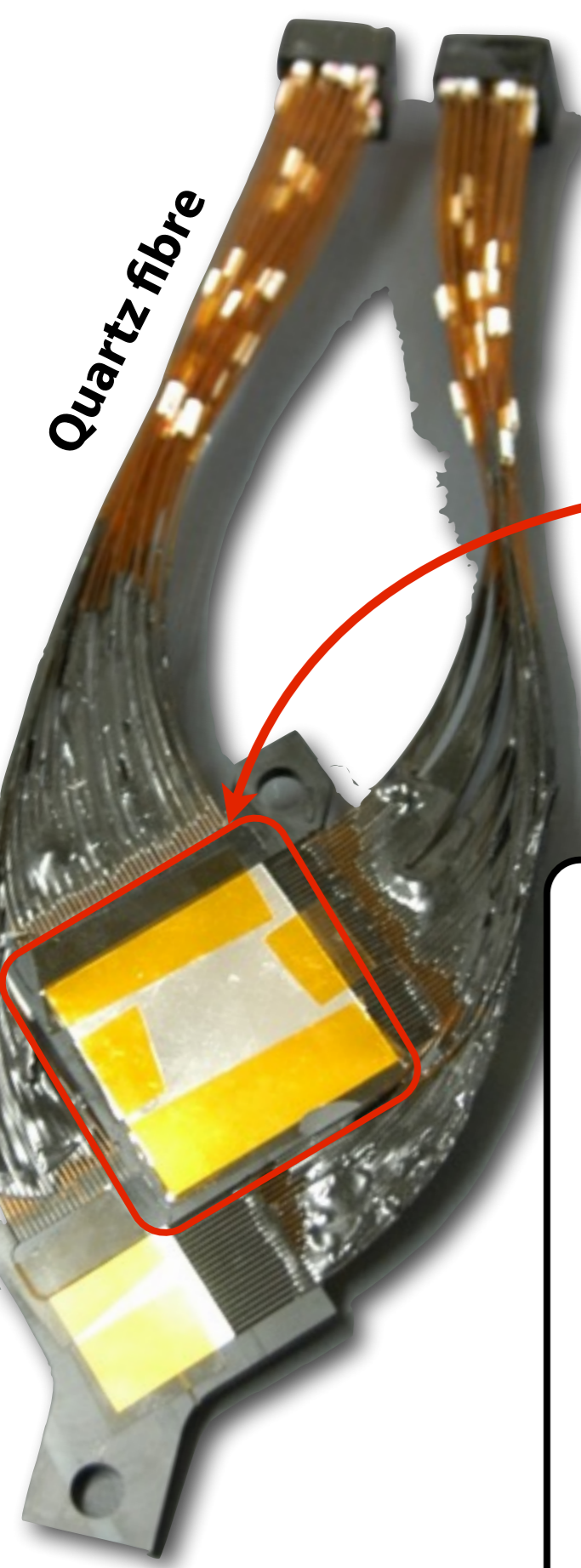
カロリメータ層 GSO-plate



Design

- 全16層で構成
- 20 (40) mm x 20 (40) mm の1mm厚 GSOシンチレータ
- アクリル製のホルダで固定
- 前後のタングステンを吸収層にして入射粒子の数%のエネルギー損失をサンプリング計測

位置検出層 GSO-bar hodoscope



Design

- "Shower-imaging" layers
 - Pt determination, shower-leakage correction, etc...
- 1mm x 1mm x 20(40) mm long and thin GSO scintillator (**GSO-bar**) --> Radiation-hard
- Without cladding materials
- Without coating
- Read by MAPMT with 64 anodes (HAMAMATSU H7546)

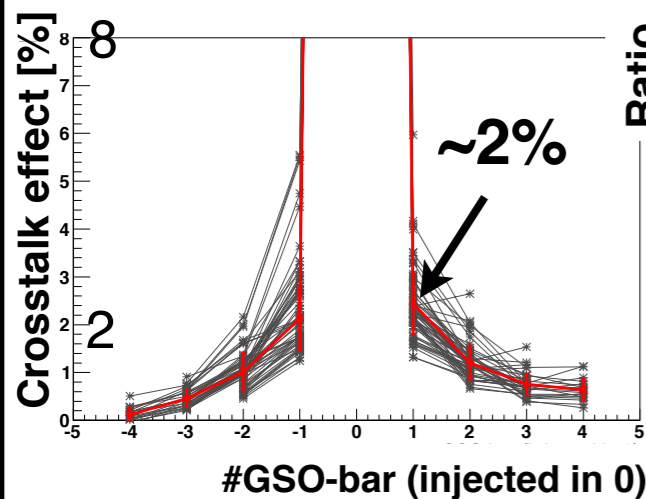
GSO-bar hodoscope プロトタイプ試験

2 prototypes of GSO-bar hodoscope were tested with heavy-ion beams

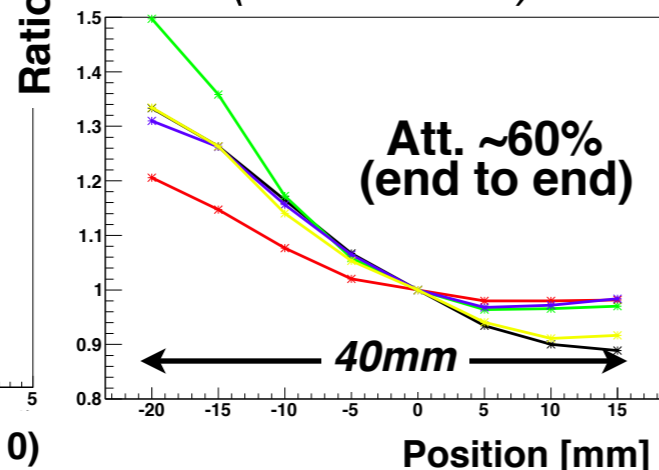
Paint type

With white acrylic coating

Crosstalk



Position dependence (Attenuation)

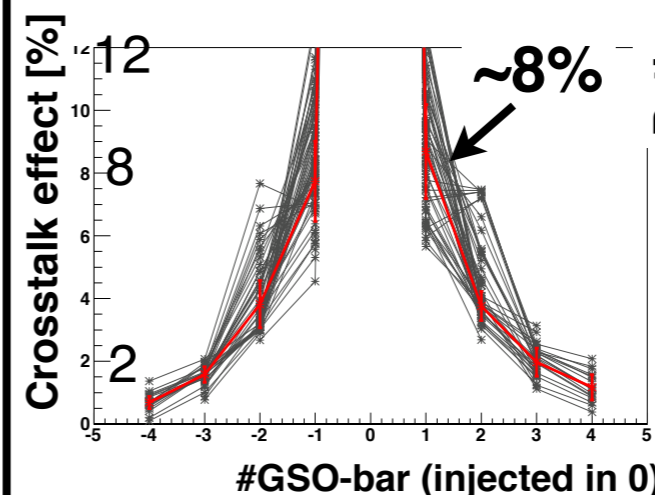


- **Small** cross talk (~2%)
- **Large** position dependence
- **Large** individual differences

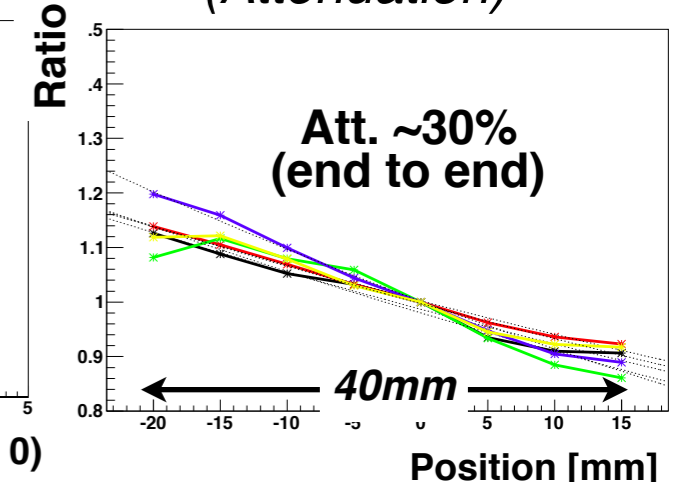
Non-paint type

Without any coating

Crosstalk



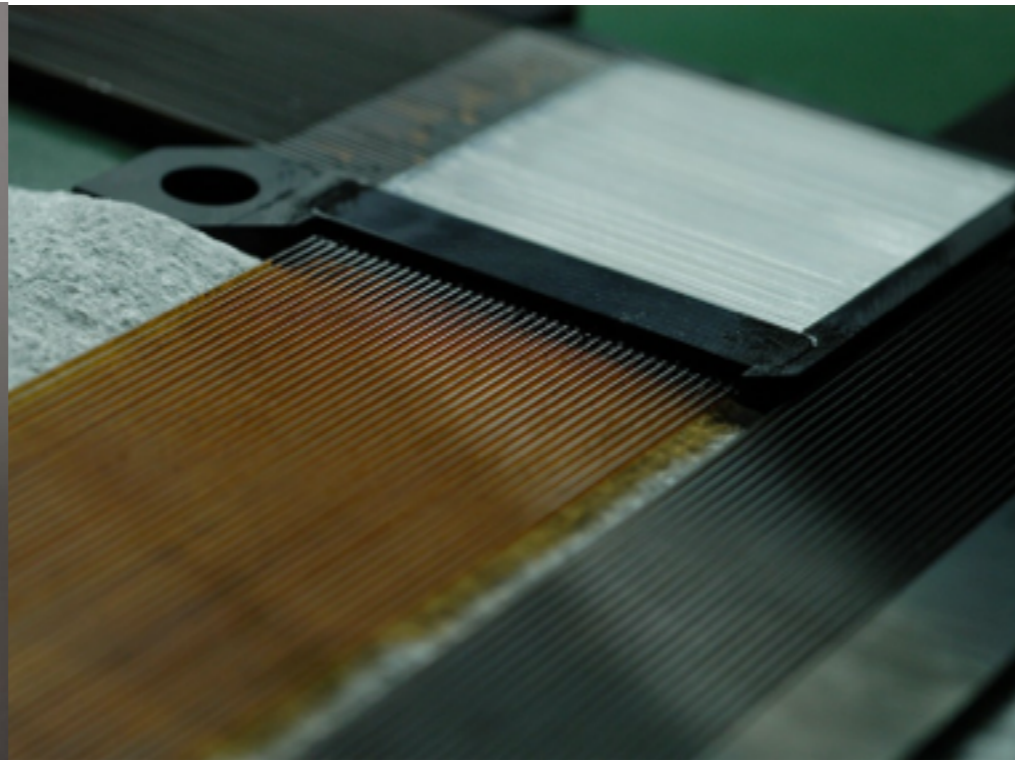
Position dependence (Attenuation)



- **Large** cross talk (~8%)
- **Small** position dependence
- **Small** individual differences

Non-paint type was selected (T. Suzuki, et al., JINST 8, 2013).

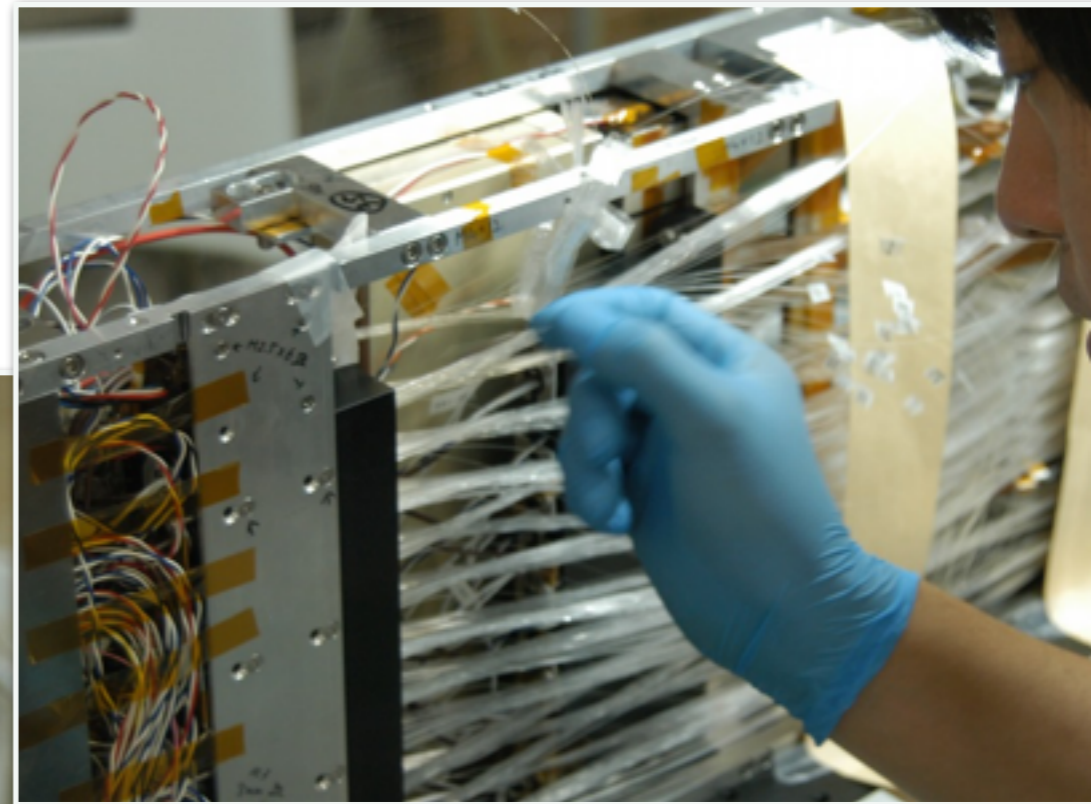
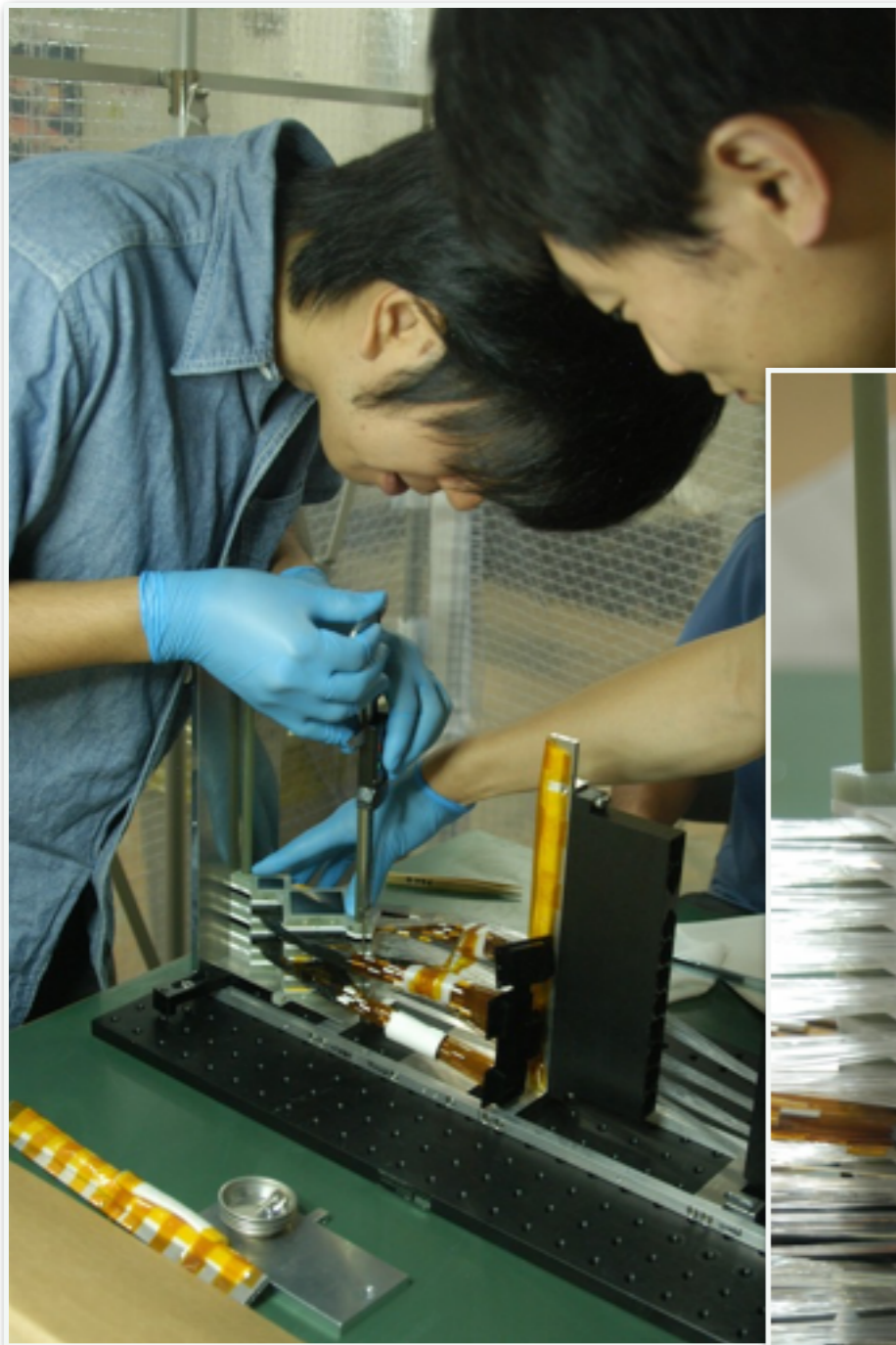
GSO-bar hodoscope 実機製作

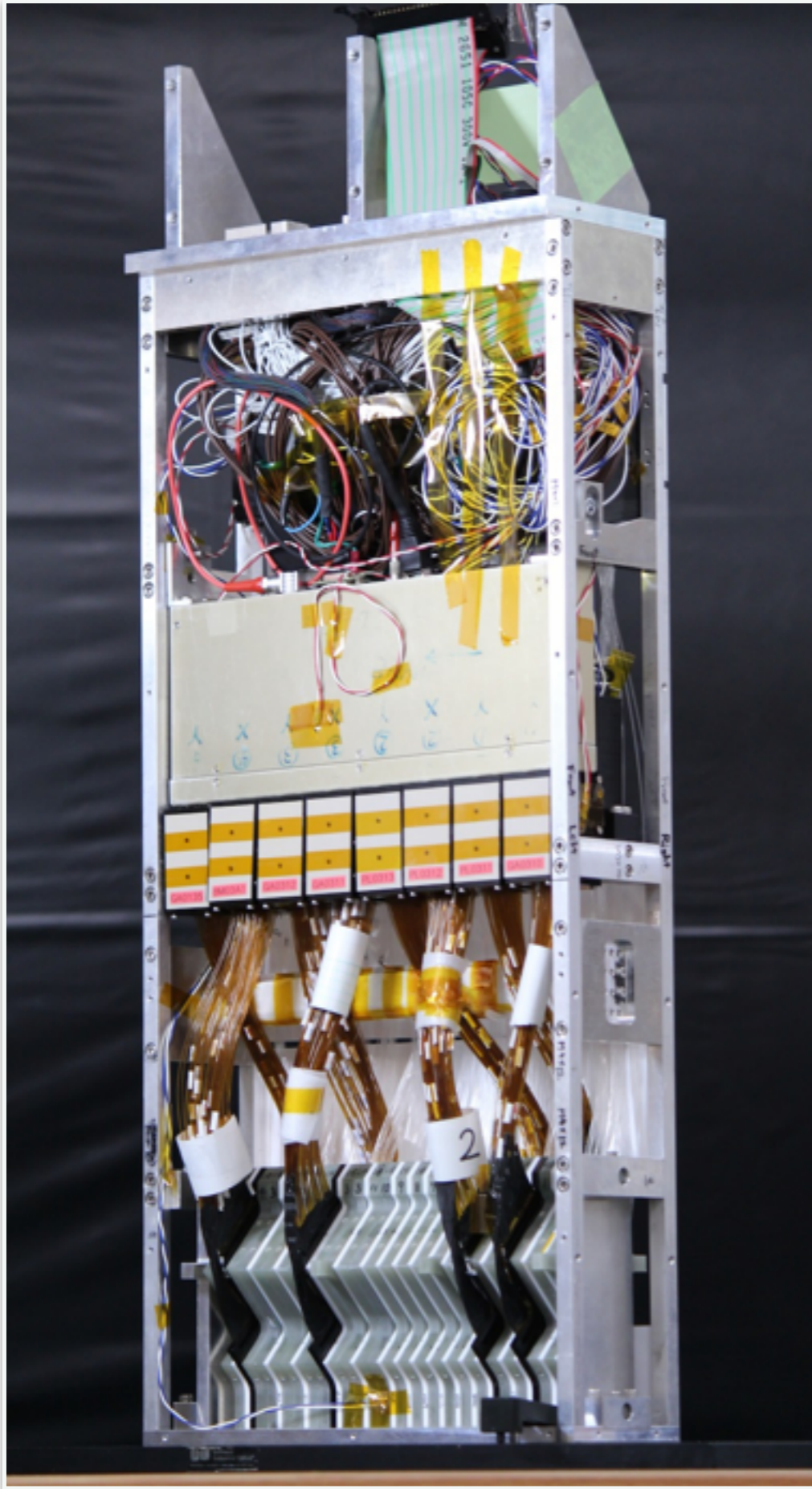


完成!!



検出器最終組立





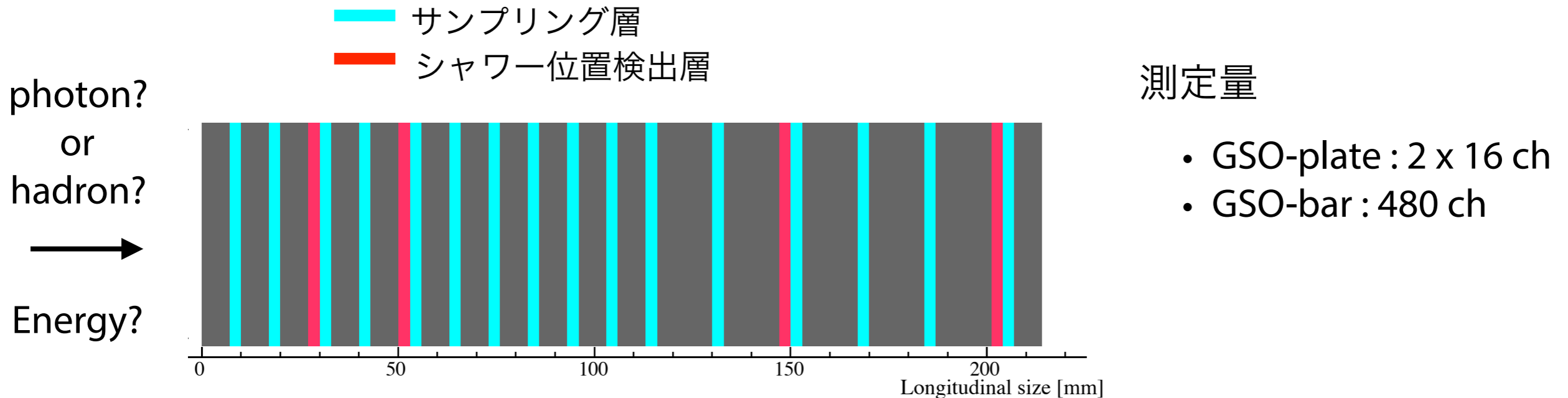
← 完成したArm1検出器本体

2014年11月のインストールの様子



キャリブレーション

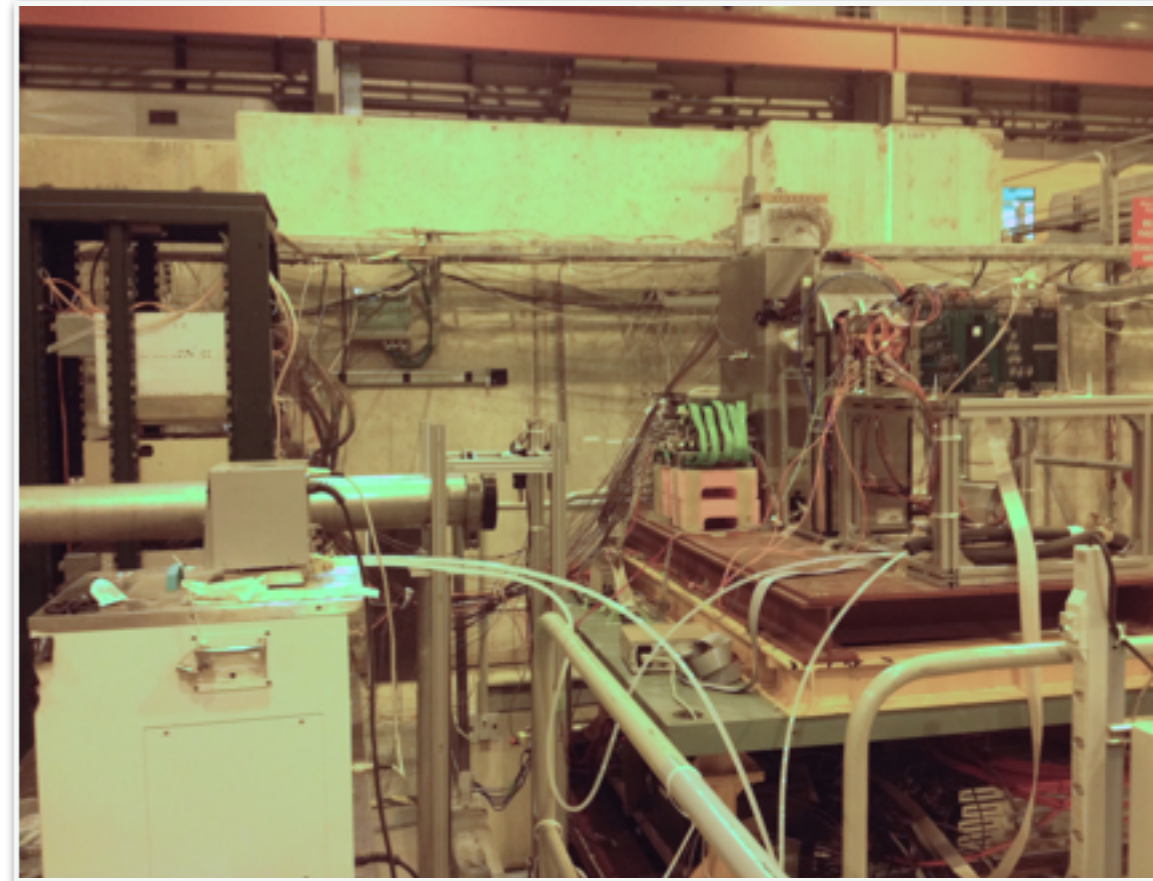
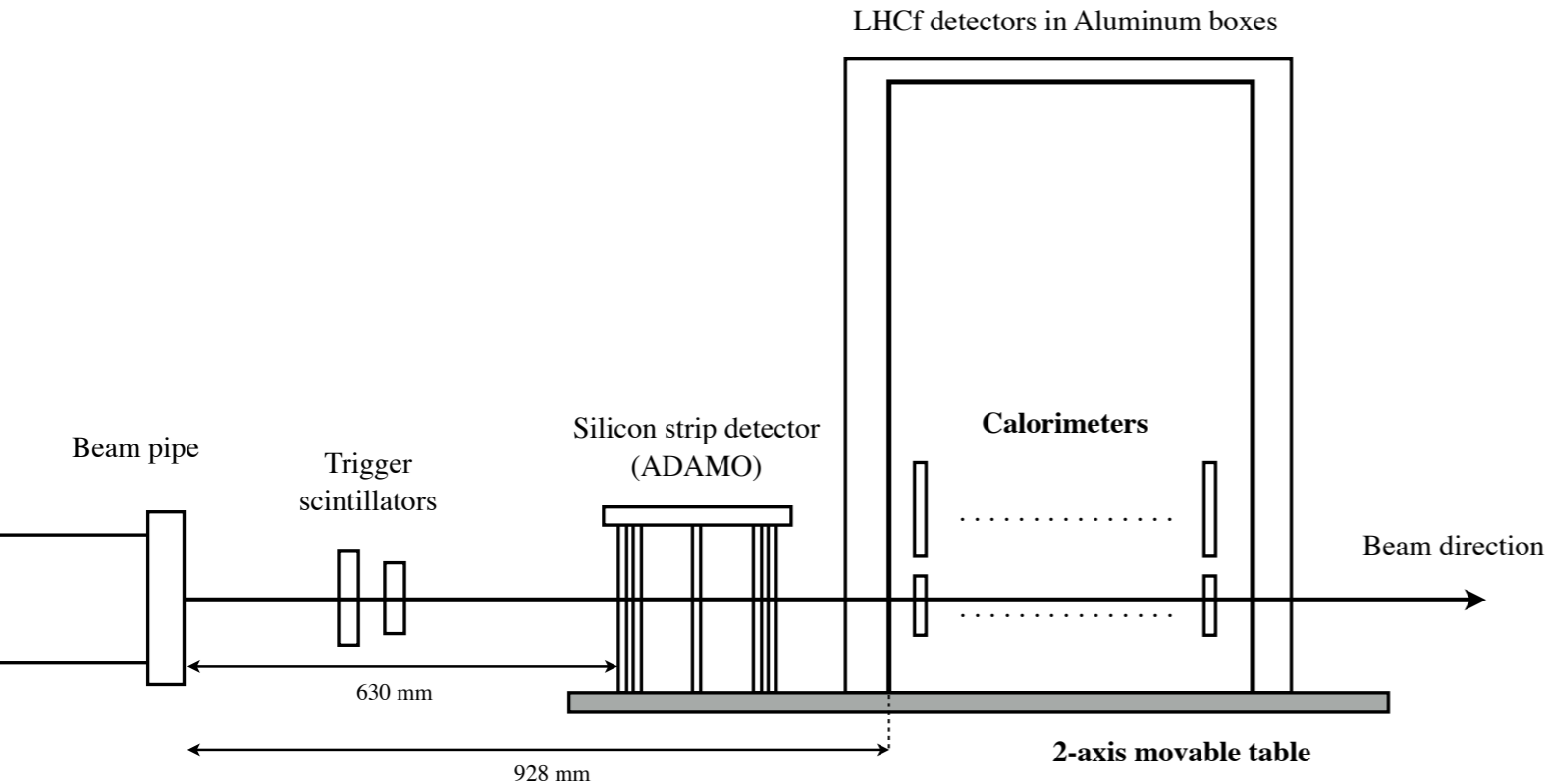
入射粒子の入射位置とエネルギーをだせるように



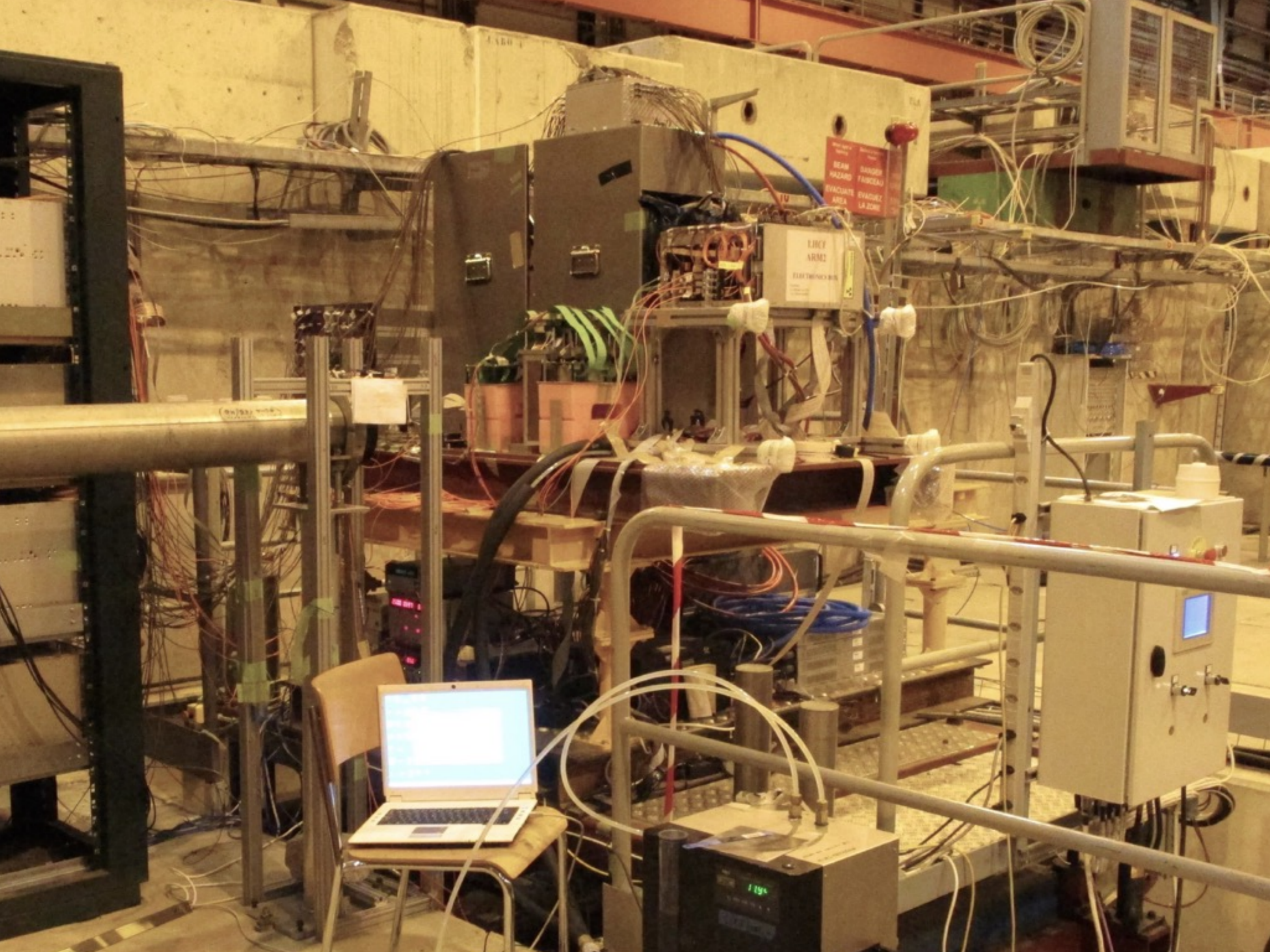
- GSO-plateでの発光量からエネルギー損失への変換
- GSO-barによる位置決定
- 入射位置によるGSO-plateでの発光量の違いの補正
- シャワー漏れ
- サンプリングしたエネルギー損失の和と入射エネルギーの関係

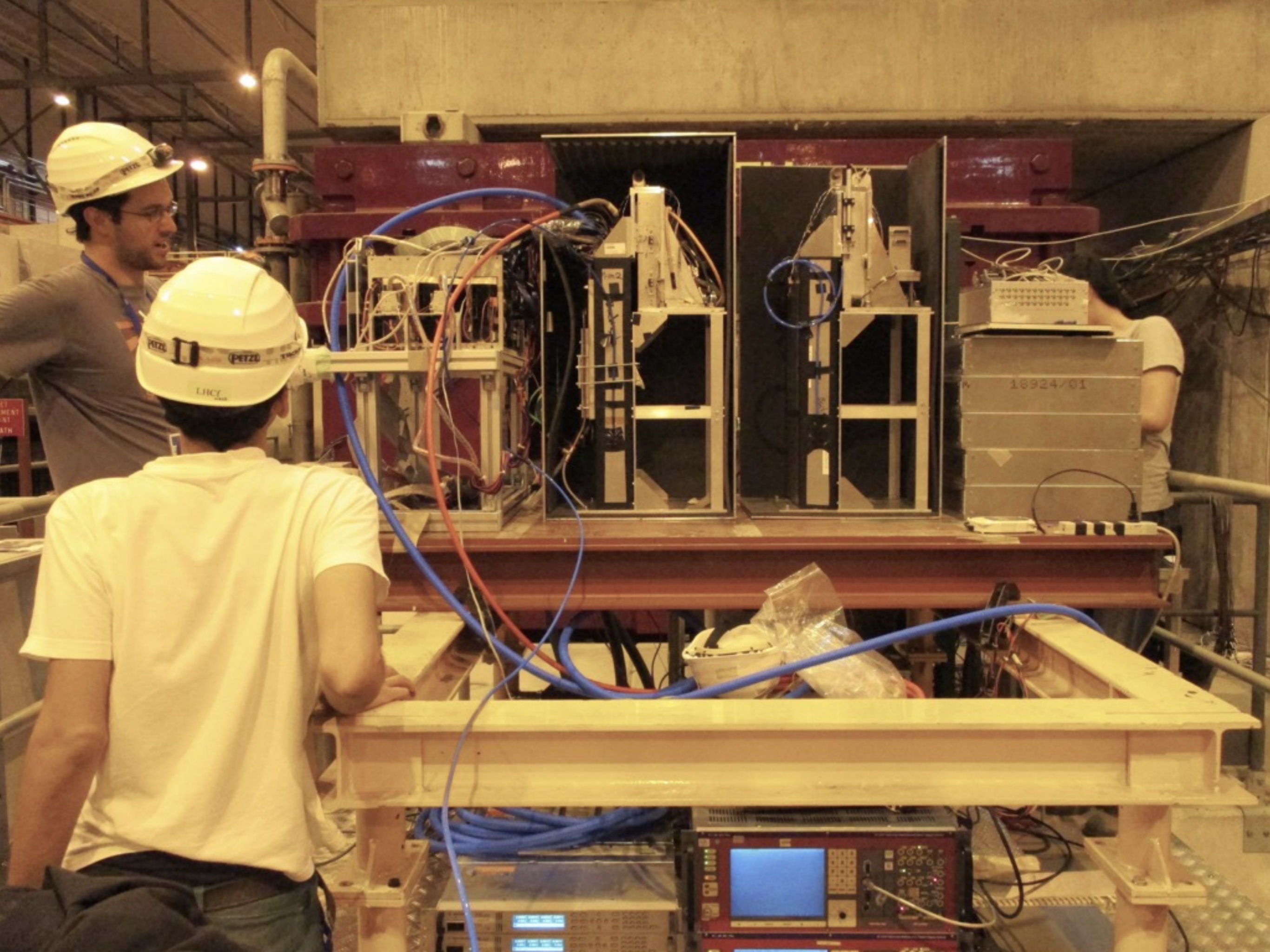
SPS加速器でのビーム試験

LHCfではキャリブレーション試験を主にSPS加速器を用いて実施



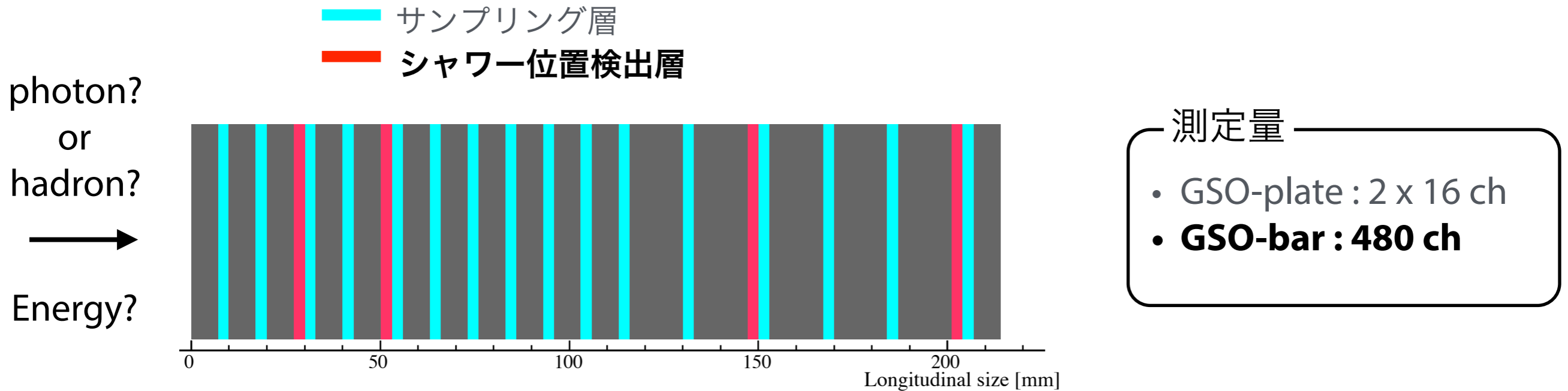
- 2012, 2014, 2015年にそれぞれ2週間程度の試験を実施
- できる限り高いエネルギーで検出器のキャリブレーションを行なう
 - Electron : 100-250 GeV
 - Muon : 150, 250 GeV
 - Proton : 200-350GeV





GSO-bar hodoscopeのキャリブレーション

シャワー位置決定はエネルギー決定の精度の面からも非常に重要。



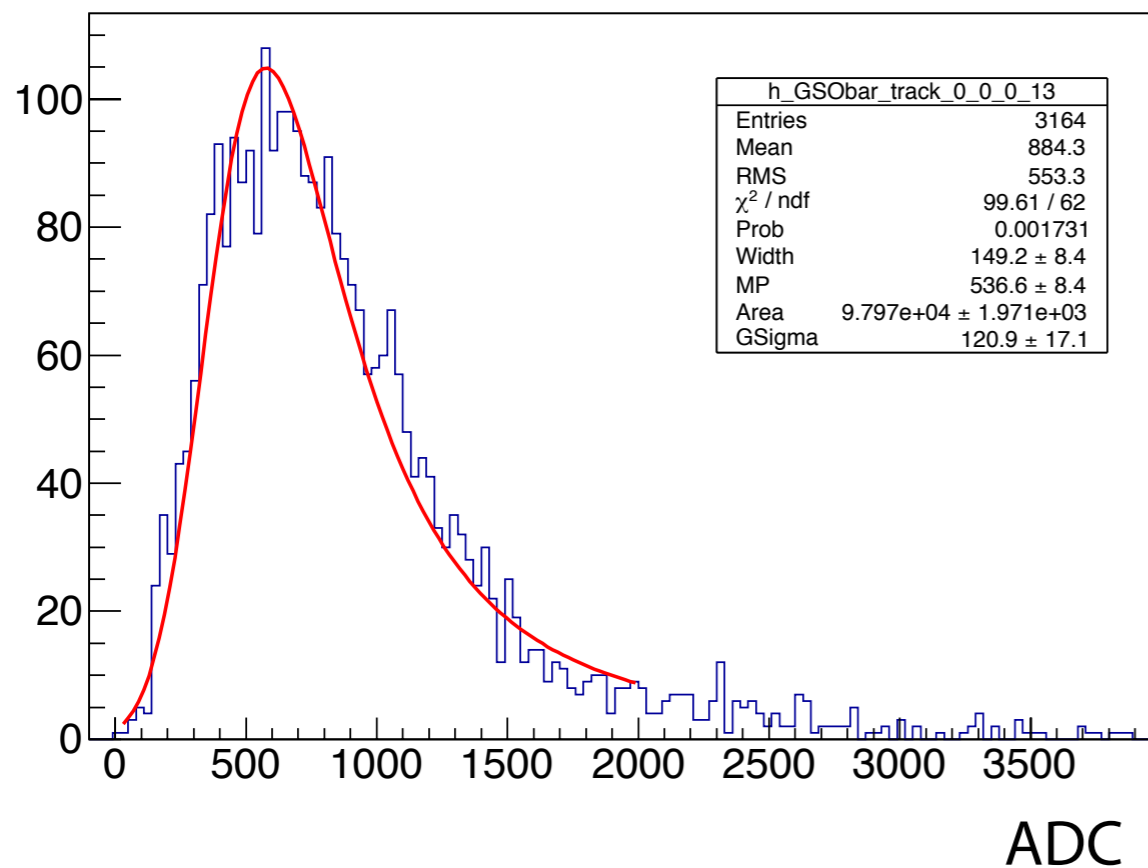
- GSO-plateでの発光量からエネルギー損失への変換
- **GSO-barによる位置決定**
- 入射位置によるGSO-plateでの発光量の違いの補正
- シャワー漏れ
- サンプルングしたエネルギー損失の和と入射エネルギーの関係

100 GeV EMシャワーに対して、200 μ mの位置分解能を要求。

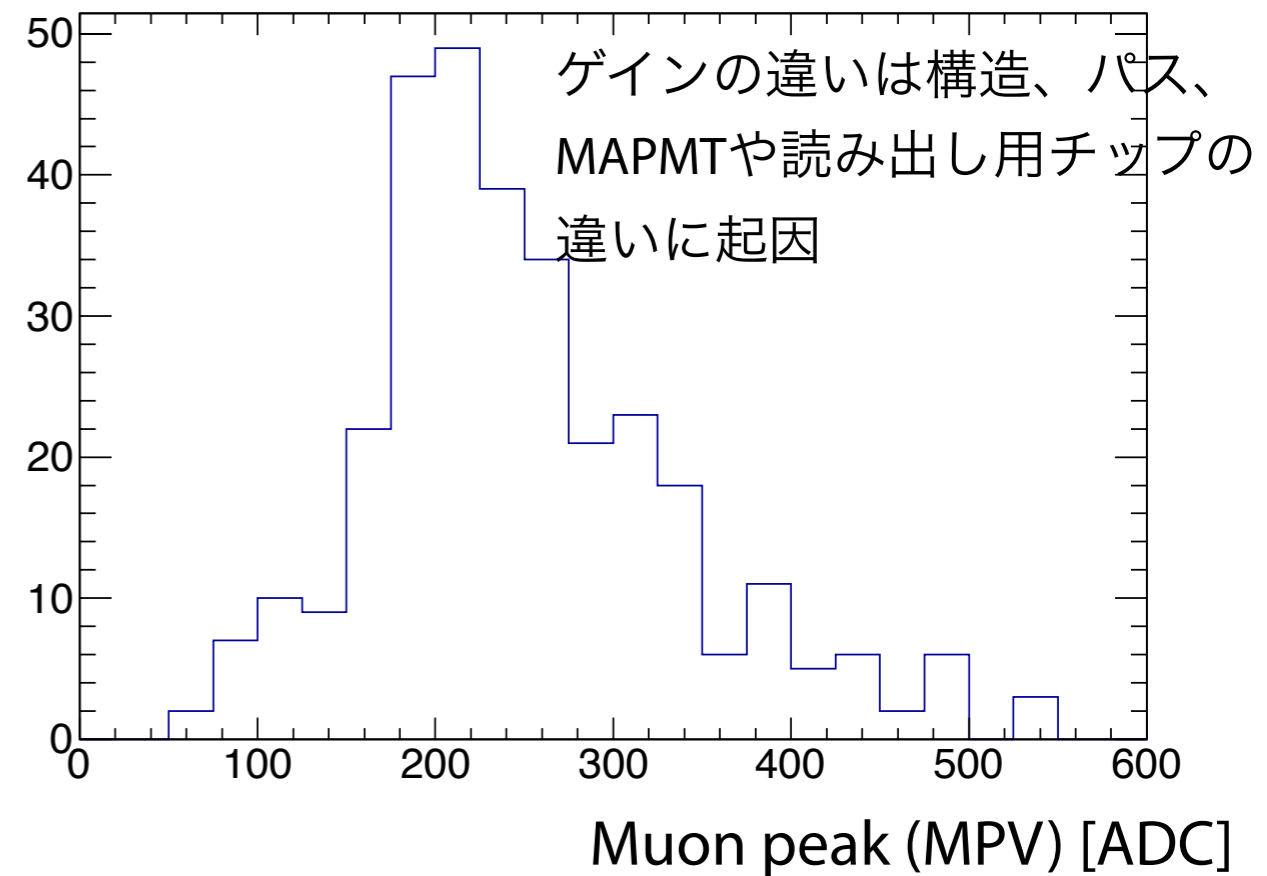
GSO-bar, 各チャンネルのゲイン較正

250 GeV/c Muonを各GSO-barに入射させ、Muon peakからゲインの較正を行なう。

GSO-barでのMuonのADC分布例



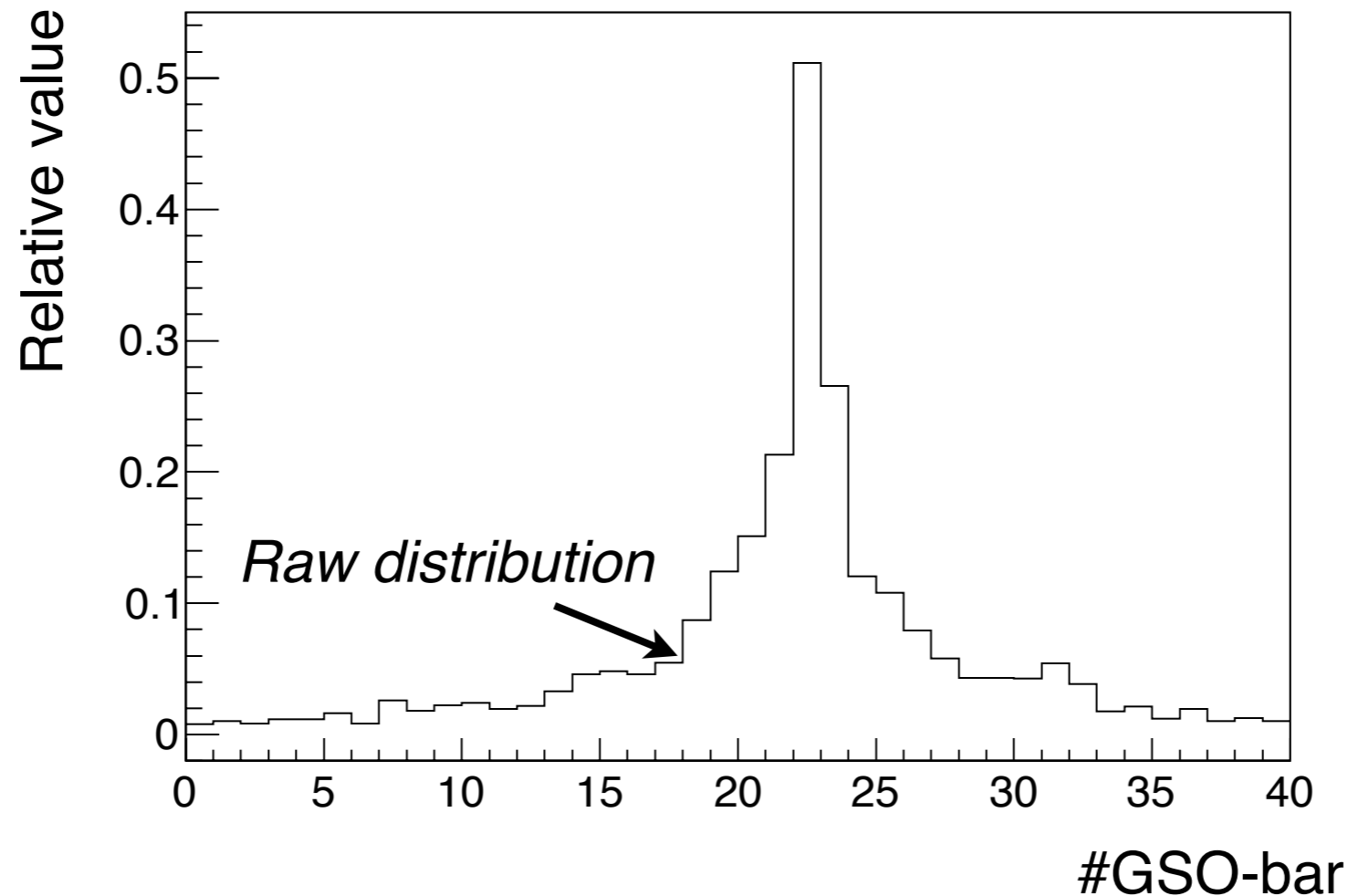
MPVの分布



- 全480本のキャリブレーションOK
 - 後方層に1ch Dead あり (ガンマ線測定への影響はなし)
- MuonのデータはGSO-barのカロリメータに対するアライメントにも使用

GSO-bar hodoscope EMシャワー測定

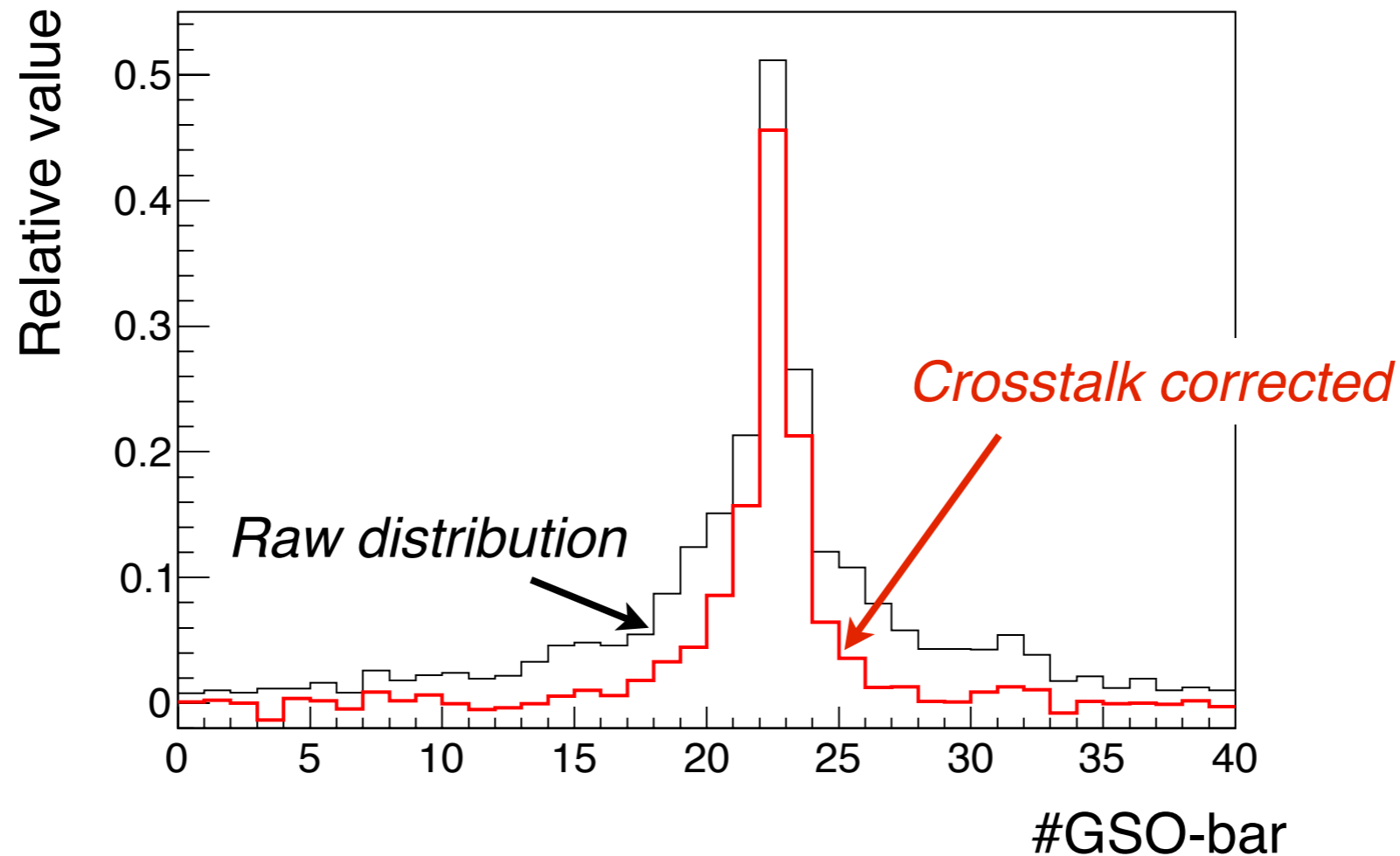
Event view: 250 GeV E.M. shower



- 250 GeVのelectronが入射したときのGSO-bar hodoscopeで捉えたシャワーの横方向分布
- 各CHのゲインの補正後の分布
- 分布はクロストークでスメアされている

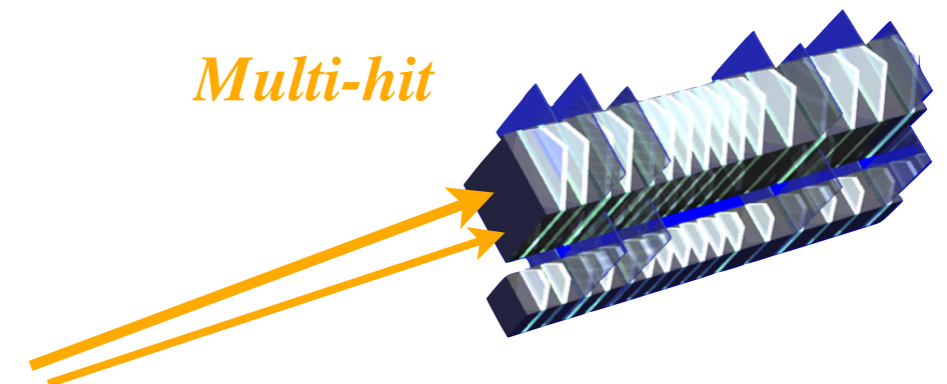
GSO-bar hodoscope EMシャワー測定

Event view: 250 GeV E.M. shower



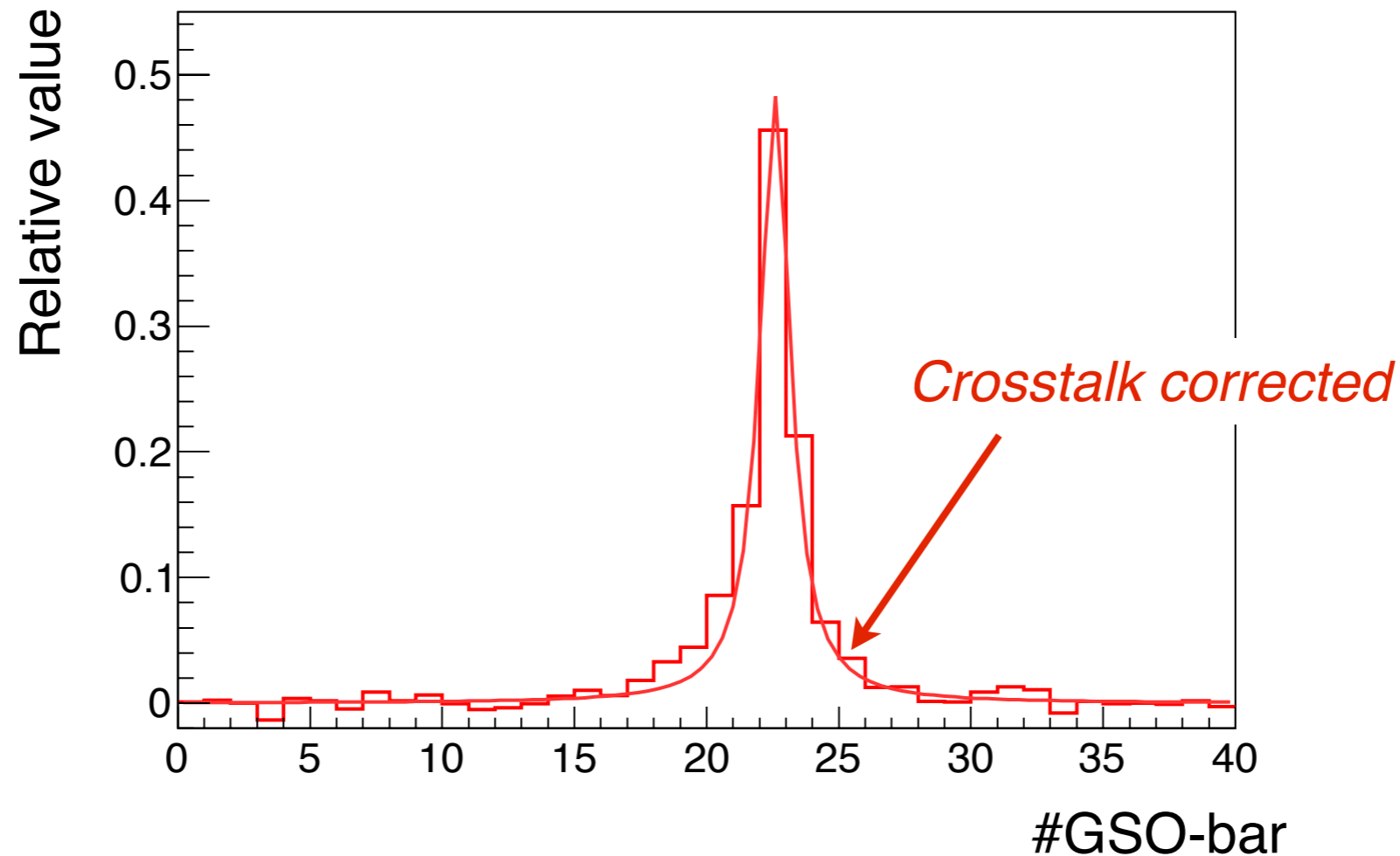
クロストークは位置分解能自体には影響は少ないが、複数粒子の入射時(Multi-hit)の際に問題になる。

→ スペクトルの形を大きく変える。



GSO-bar hodoscope EMシャワー測定

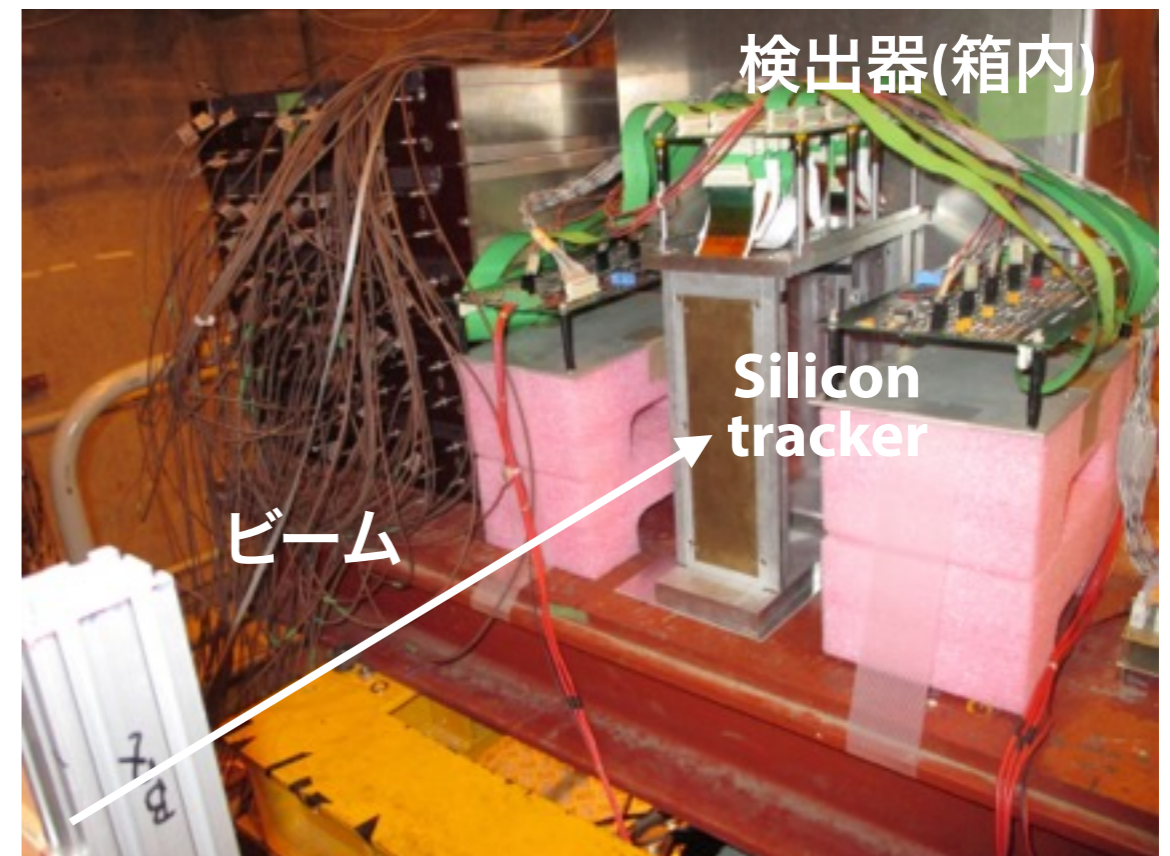
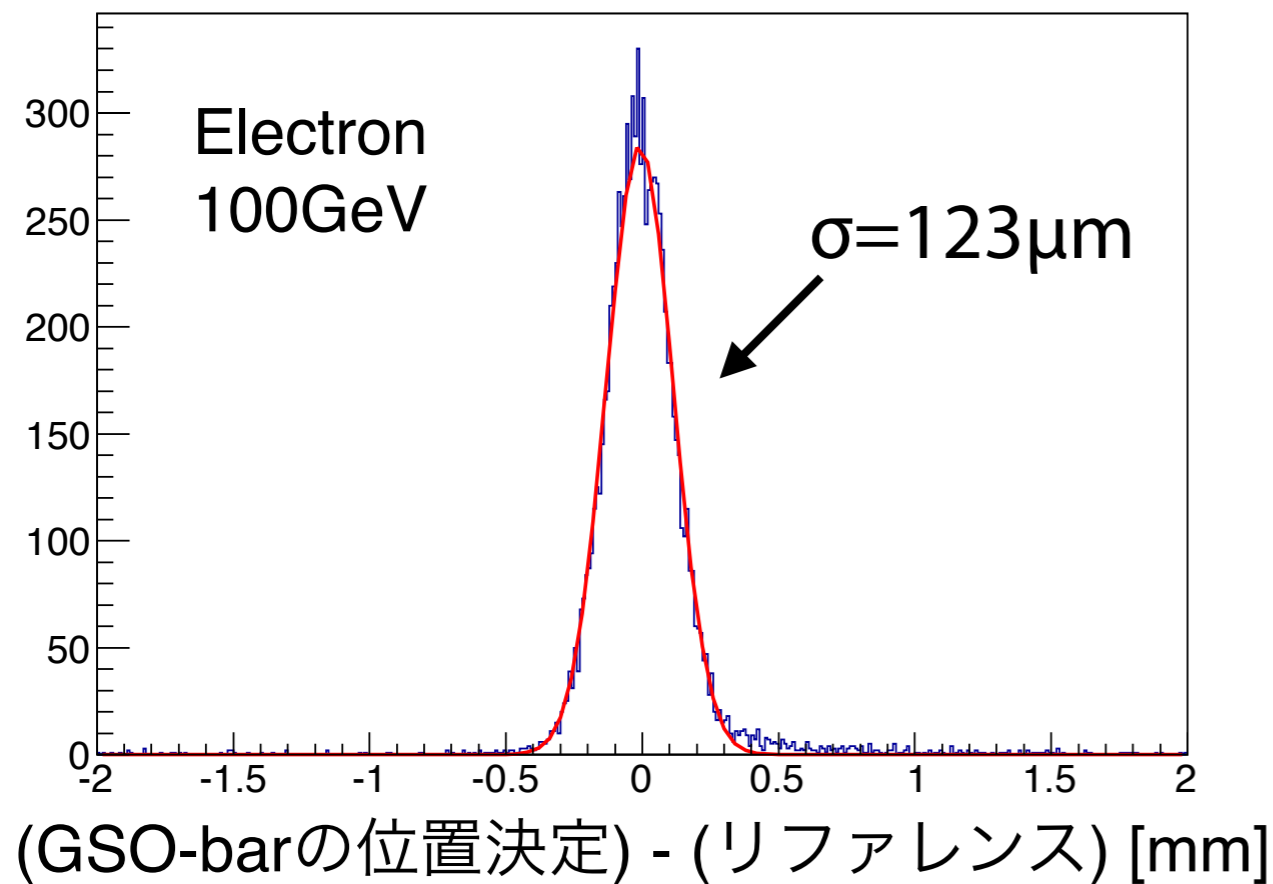
Event view: 250 GeV E.M. shower



- 分布はローレンツ関数を元にした経験的な関数でフィット
- シャワー中心(ピーク)を入射粒子の入射位置とする

GSO-bar hodoscope シャワー位置分解能

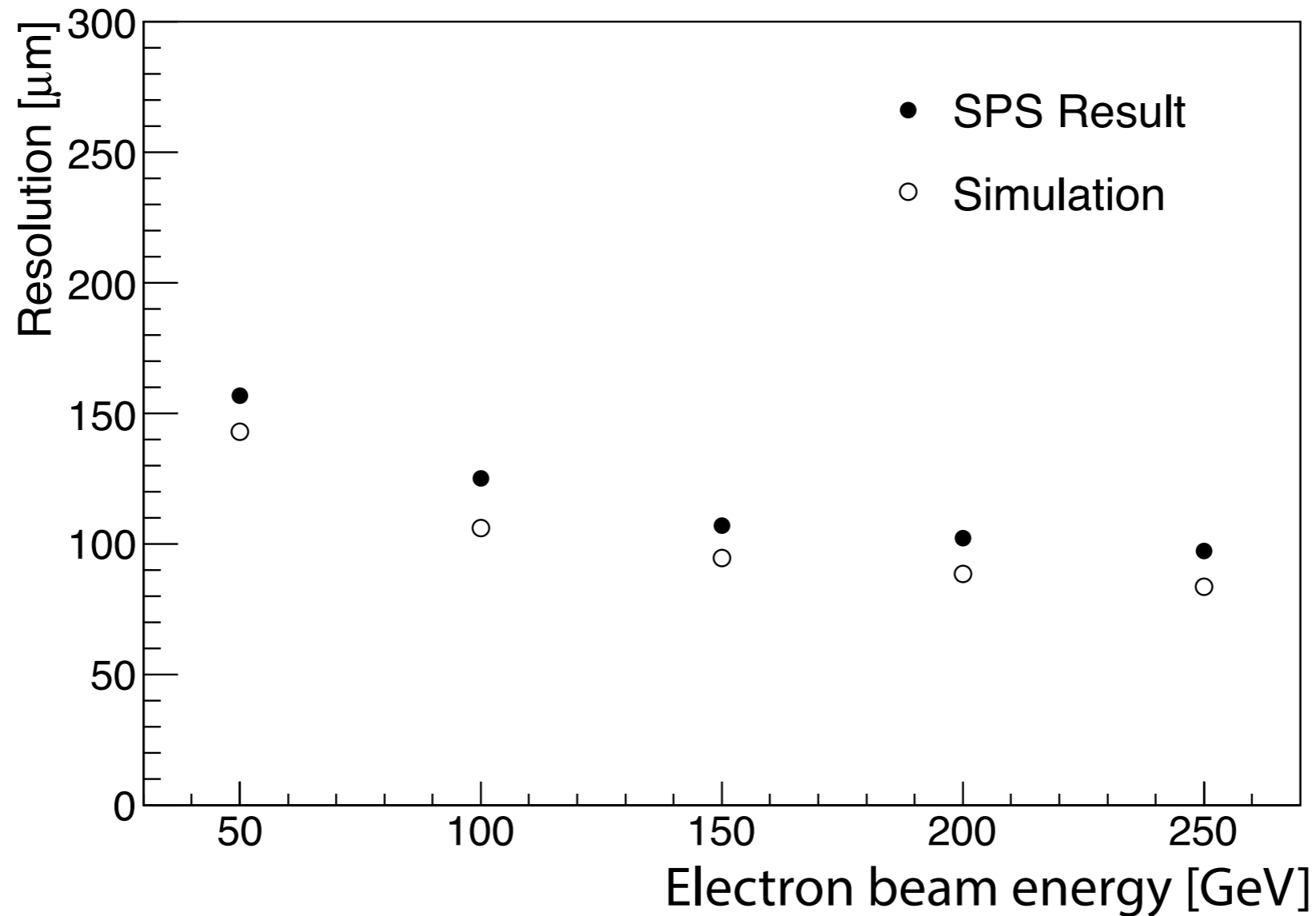
前置検出器のシリコントラッカーを位置決定のリファレンスとして、GSO-barのシャワー位置分解能を評価



100GeVのElectronの入射位置を $123\mu\text{m}$ で決定できることを確認。

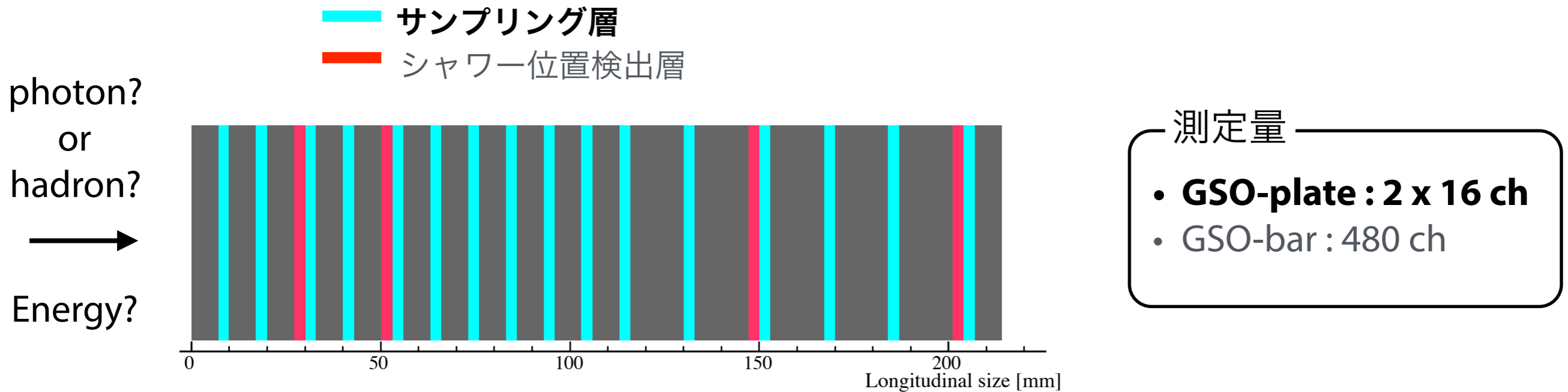
GSO-bar hodoscope シャワー位置分解能

位置分解能のエネルギー依存性



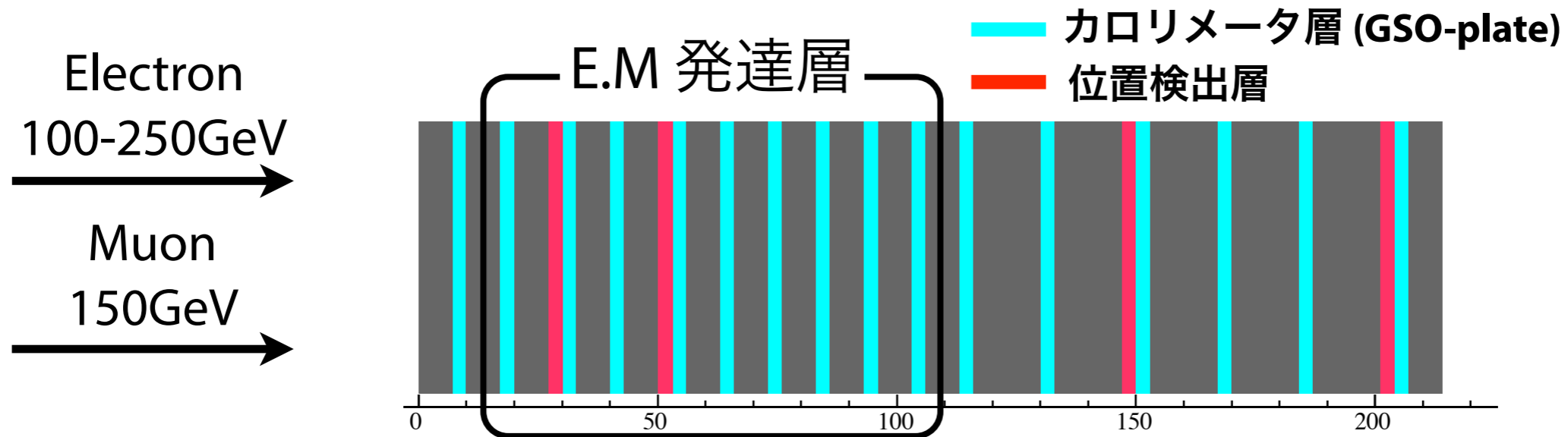
ここまででGSO-bar hodoscopeによる位置決定はOK

GSO-plateのキャリブレーション



- **GSO-plateでの発光量からエネルギー損失への変換**
- GSO-barによる位置決定
- 入射位置によるGSO-plateでの発光量の違いの補正
- シャワー漏れ
- サンプルングしたエネルギー損失の和と入射エネルギーの関係

エネルギー換算係数の決定



- 全16層のGSO-plate
 - **E.M発達層ではelectron**のデータから換算係数を決定
 - それ以外の層は**muon**データから

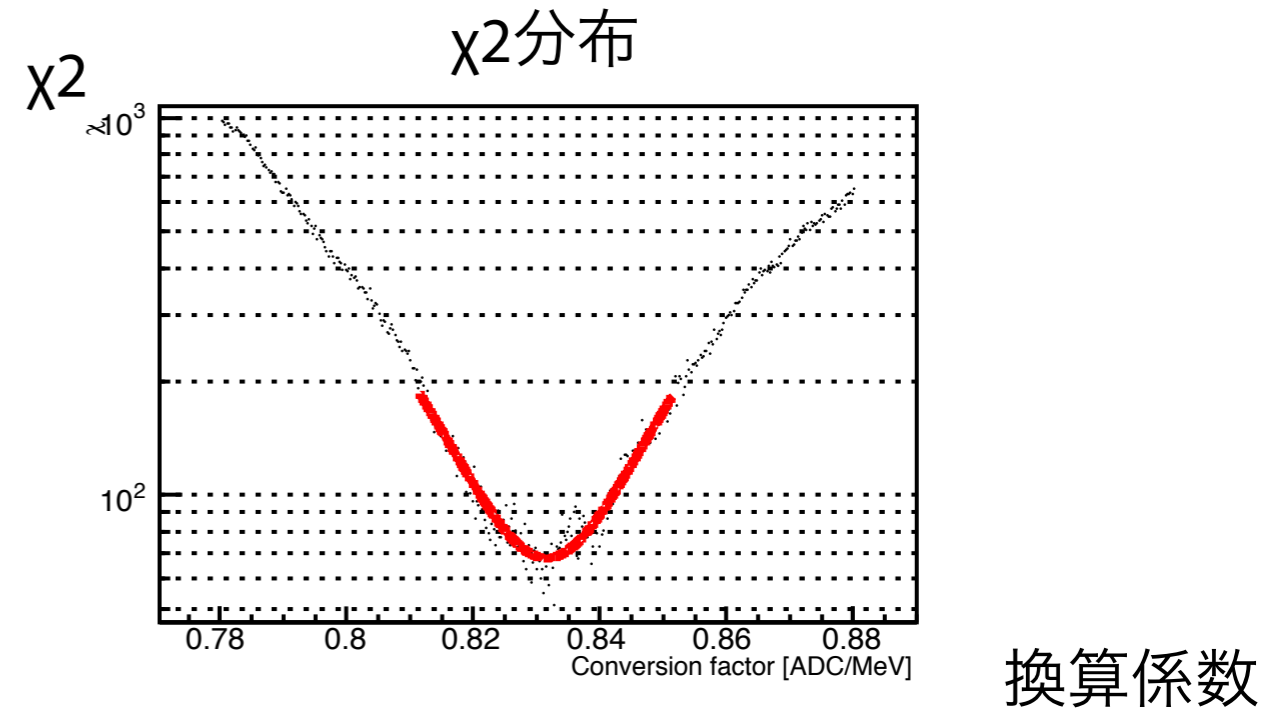
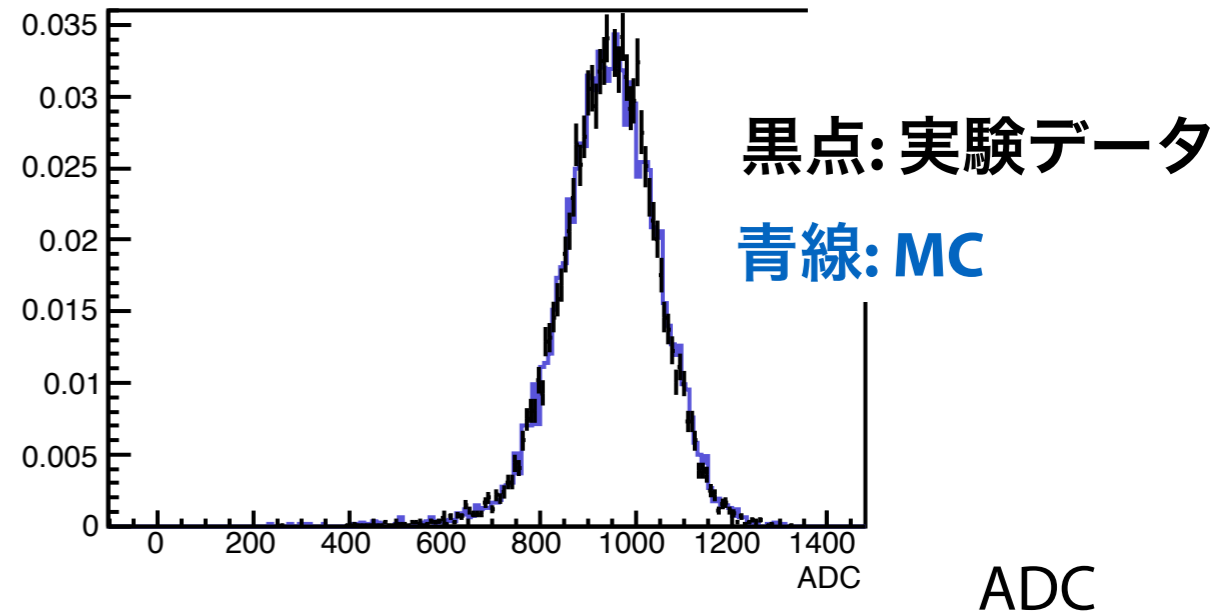
各層での電荷分布とMC(*)のエネルギー損失分布を比較し、 χ^2 検定からパラメータ(エネルギー換算係数)を決定する。

(*) 検出器シミュレーションはCOSMOS 7.645/EPICS 9.165を使用

Electronによるエネルギー換算係数の決定

- パラメータ
 - 水平方向のスケール [ADC / MeV]
→ エネルギー換算係数
- 実験データとMCの分布は面積で規格化
- MCはエレキノイズも考慮

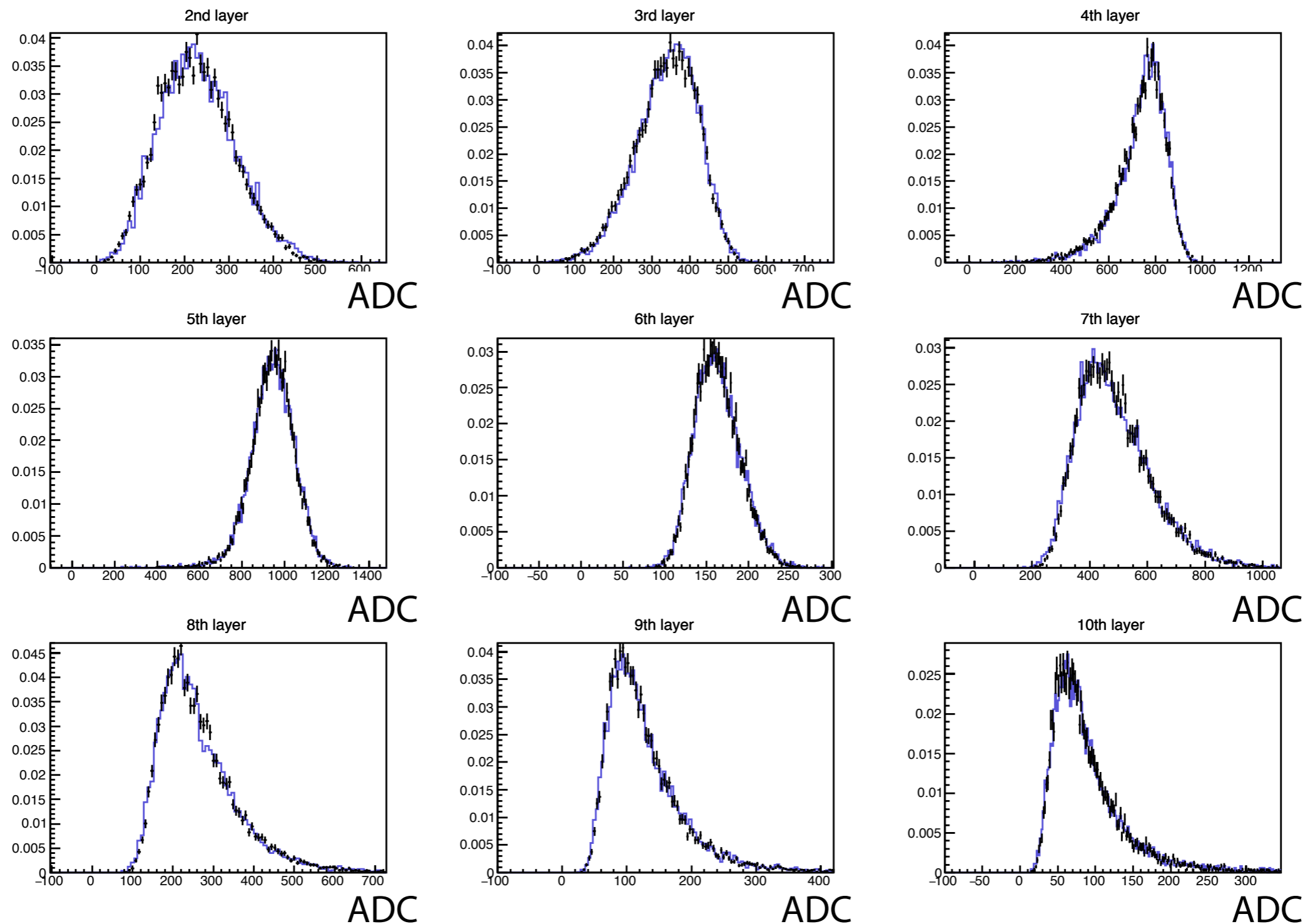
実験データの分布とbest-fit MCの例



換算係数 [ADC/MeV] の決定精度は電子の場合で1%以下

Electronによるエネルギー換算係数の決定

黒点: 実験データ, 青線: MC

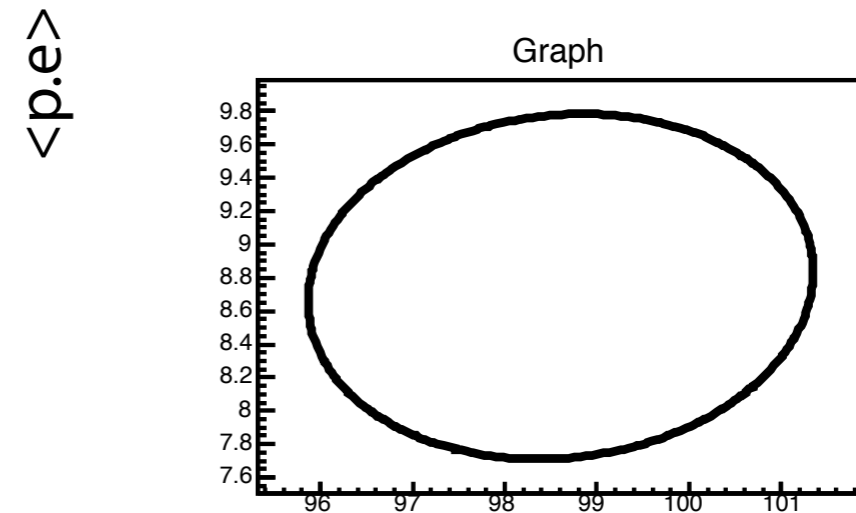
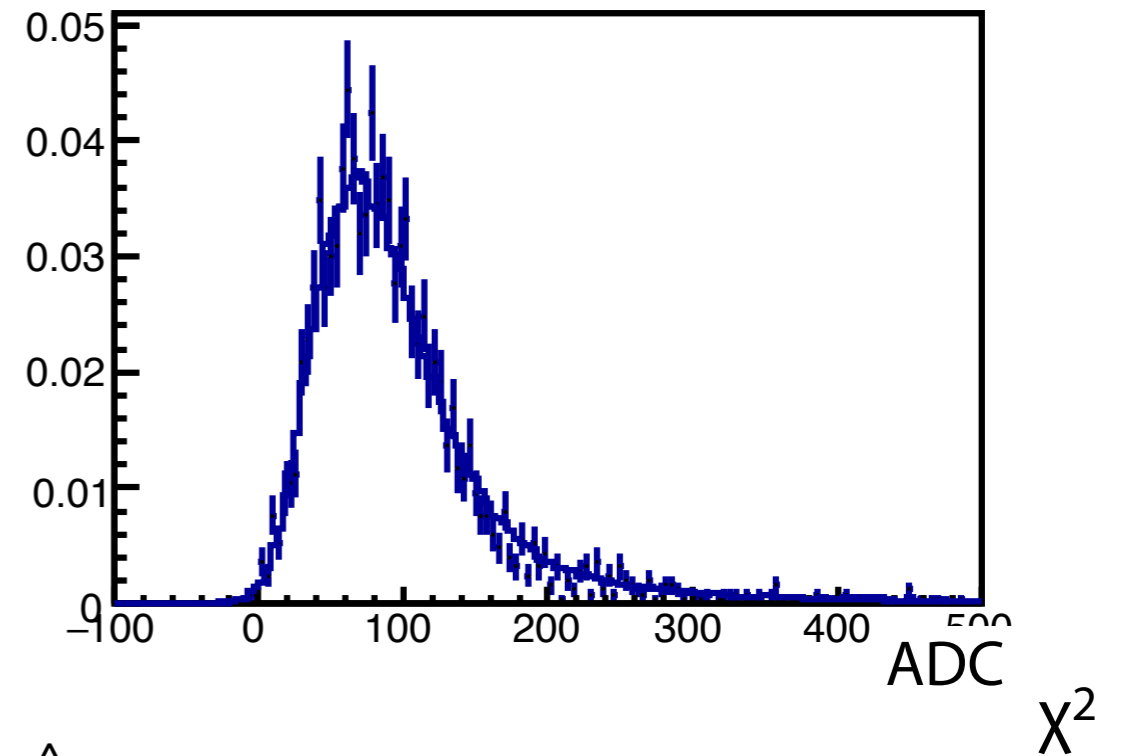


良い一致を見せており、 χ^2 / DOF は概ね 1

Muonによるエネルギー換算係数の決定

実験データの分布とbest-fit MCの例

- パラメータ
 - 水平方向のスケール [ADC / MeV]
 - 平均光電子数 (Poisson fluc.)
- MCはエレキノイズも考慮
- データの分布を再現するためPMTの電荷分布のゆらぎも考慮 (30%)

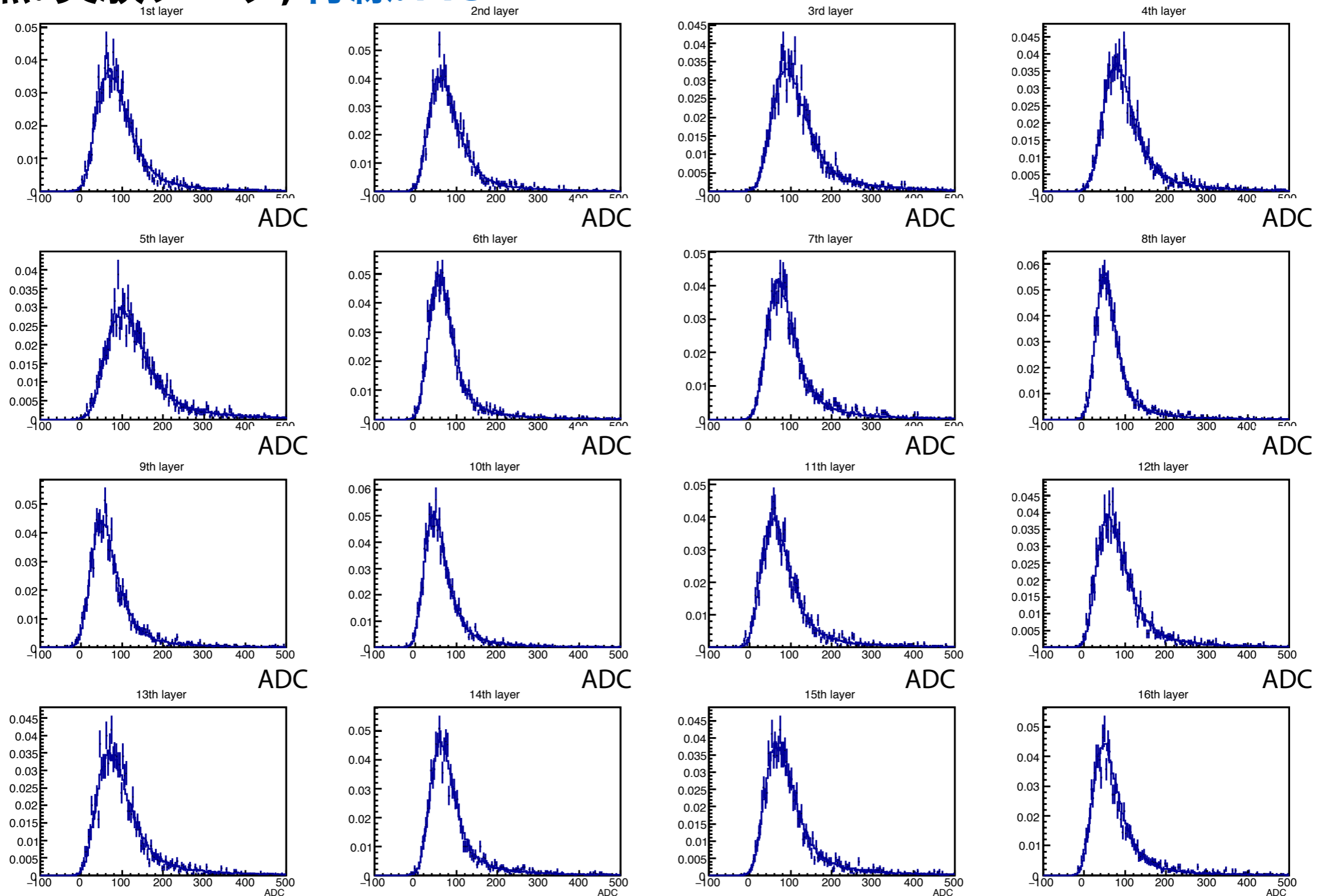


換算係数 [ADC / MeV]

換算係数 [ADC/MeV] の決定精度はミュオンの場合で 1~2 %

Muonによるエネルギー換算係数の決定

黒点: 実験データ, 青線: MC



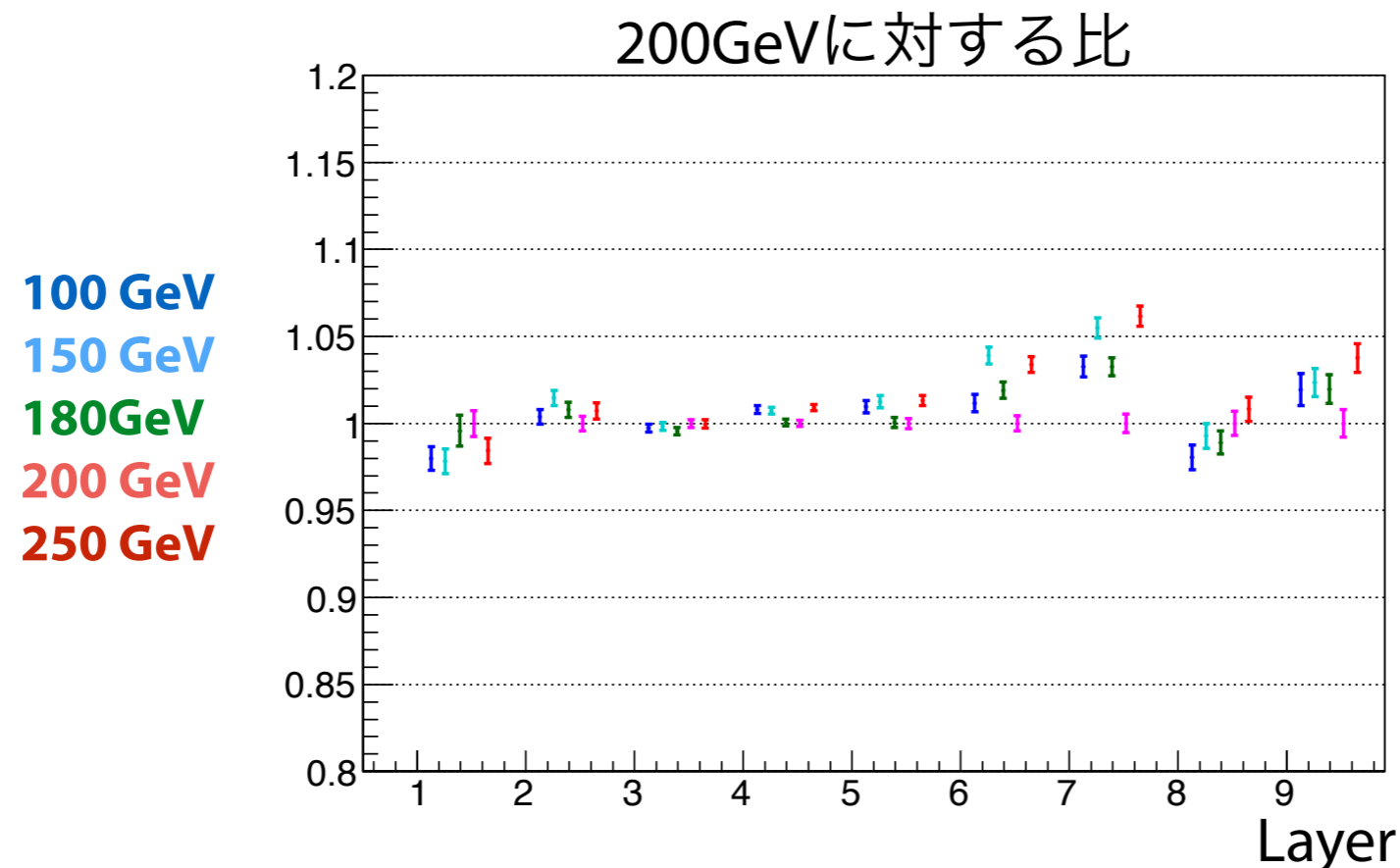
良い一致を見せており、 χ^2 / DOF は概ね 1

エネルギー換算係数

100-250GeV electron, 250GeV muonそれぞれから求めた換算係数を比較、最終的に使用する値を決定する。

• E.M shower 発達層 (2nd-10th)

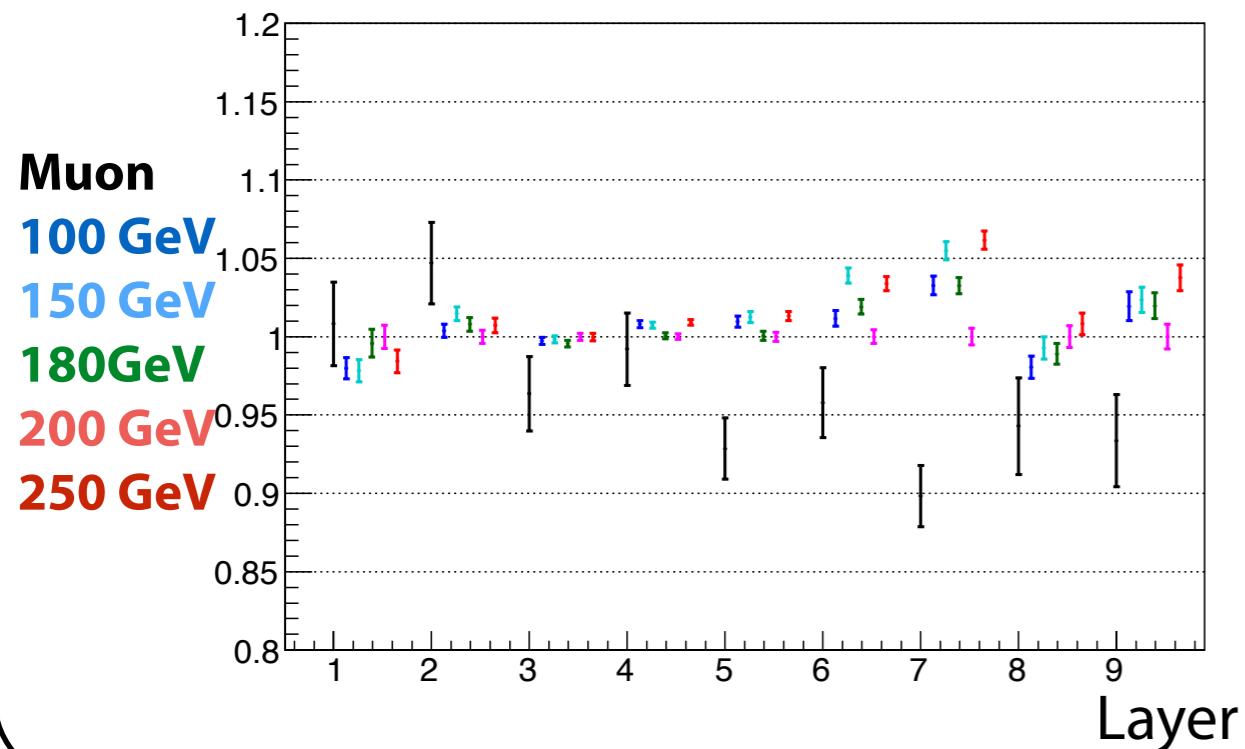
- ▶ Electronのシャワーの大きい信号で、精度良く係数を決定できる
- ▶ 高エネルギーかつ中間のエネルギー、200GeVのデータを採用
- ▶ 係数のエネルギー依存性から見積もった系統誤差は2.8%



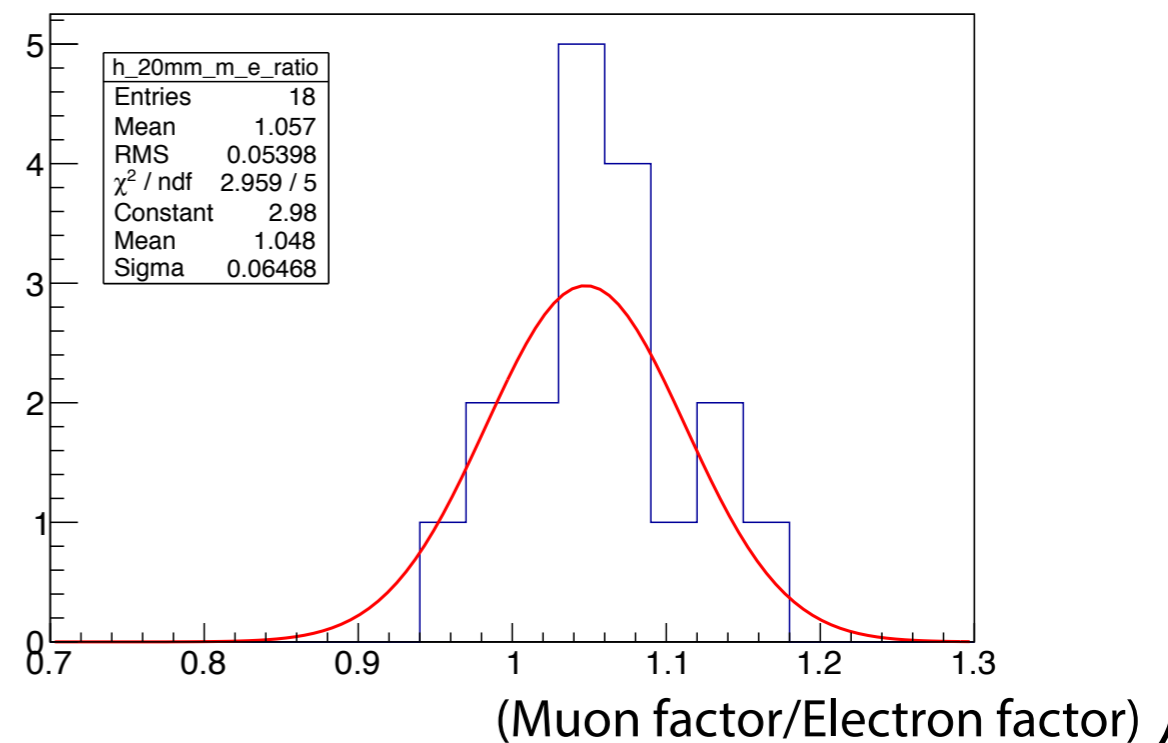
• EM発達層以外の層 (1st, 11th-16th)

- ▶ Electronのデータからは光量が小さくだせない → Muonのデータを使用
- ▶ Muonの結果はElectronに対して系統的に小さい
 - ▶ PMTの温度依存が原因と考えられる (MuonデータはHigh gain modeで測定)
 - ▶ 2nd-10thでのElectron 200GeVとの差の平均、6.1/4.7%を1st, 11-16thでスケール
- ▶ Electronとの比から見積もった系統誤差は5.4%

Muon / Electronによる換算係数



2nd-10thにおけるMuon係数のe-係数に対しての比

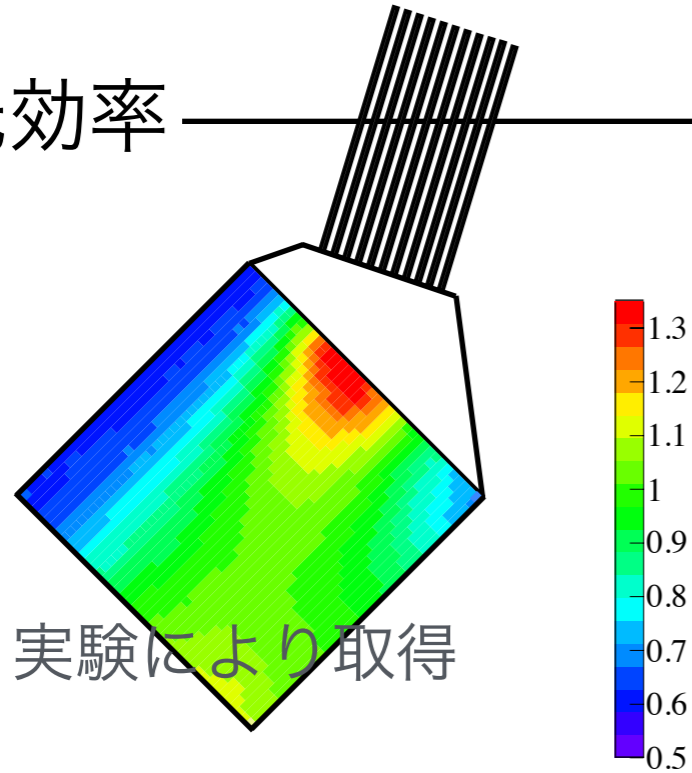


全16層のGSO-plate各層でADC値からdEへの変換が可能

GSO-plate 位置補正

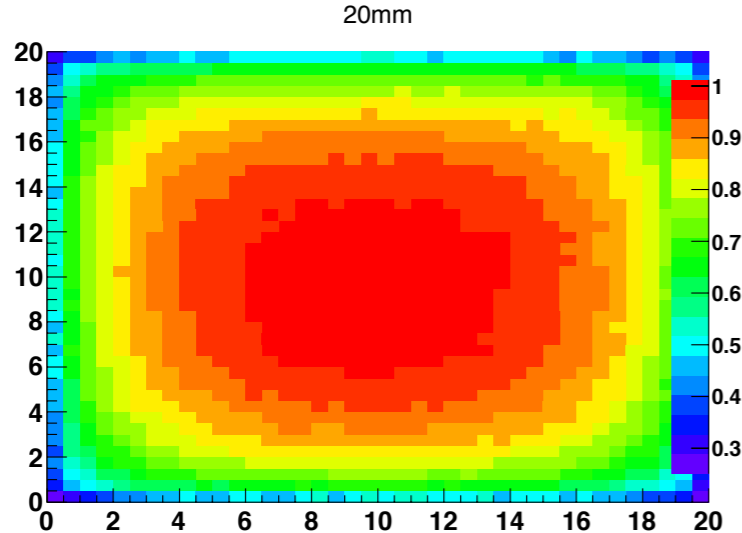
カロリメータが小型であるために避けられない。いかに補正できるか。

集光効率



実験により取得

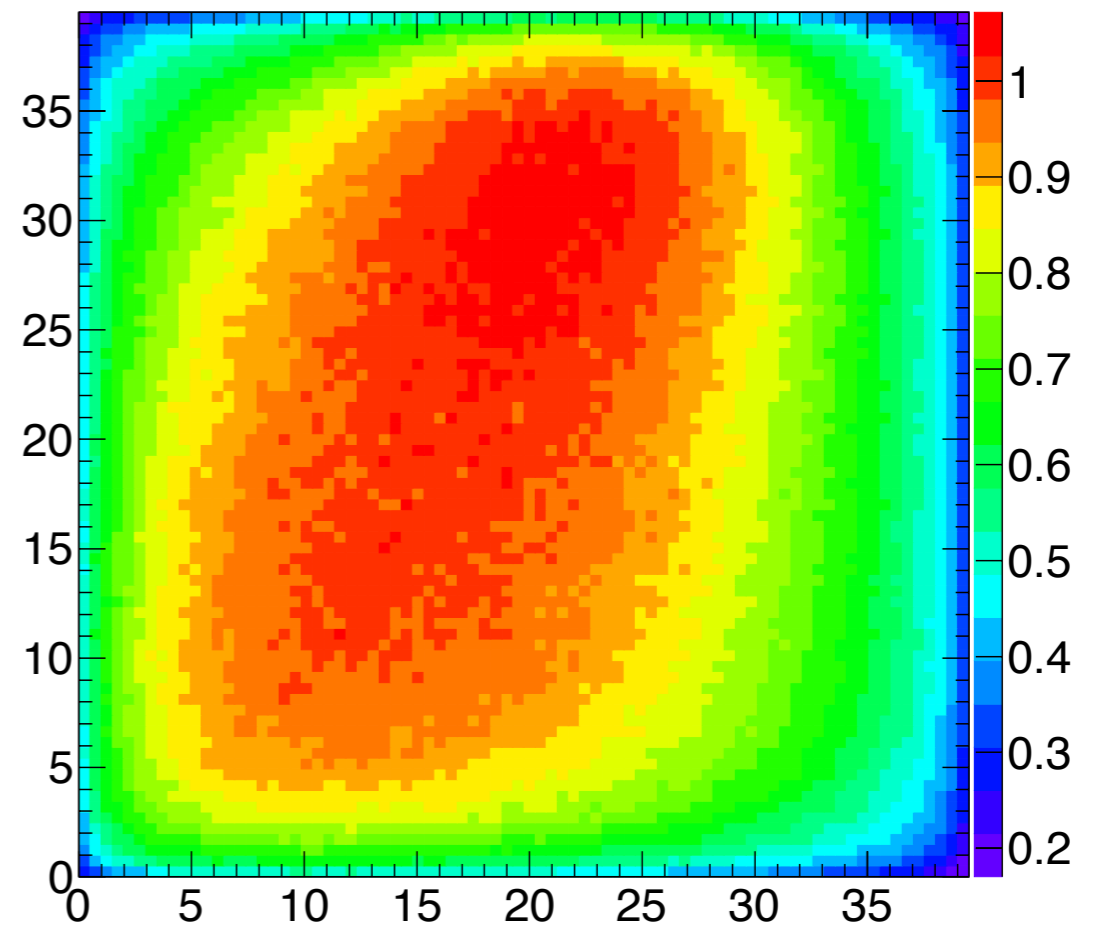
シャワー漏れ



検出器構造とシャワー拡がりによる

集光効率+シャワー漏れ
入射位置毎エネルギー損失マップ

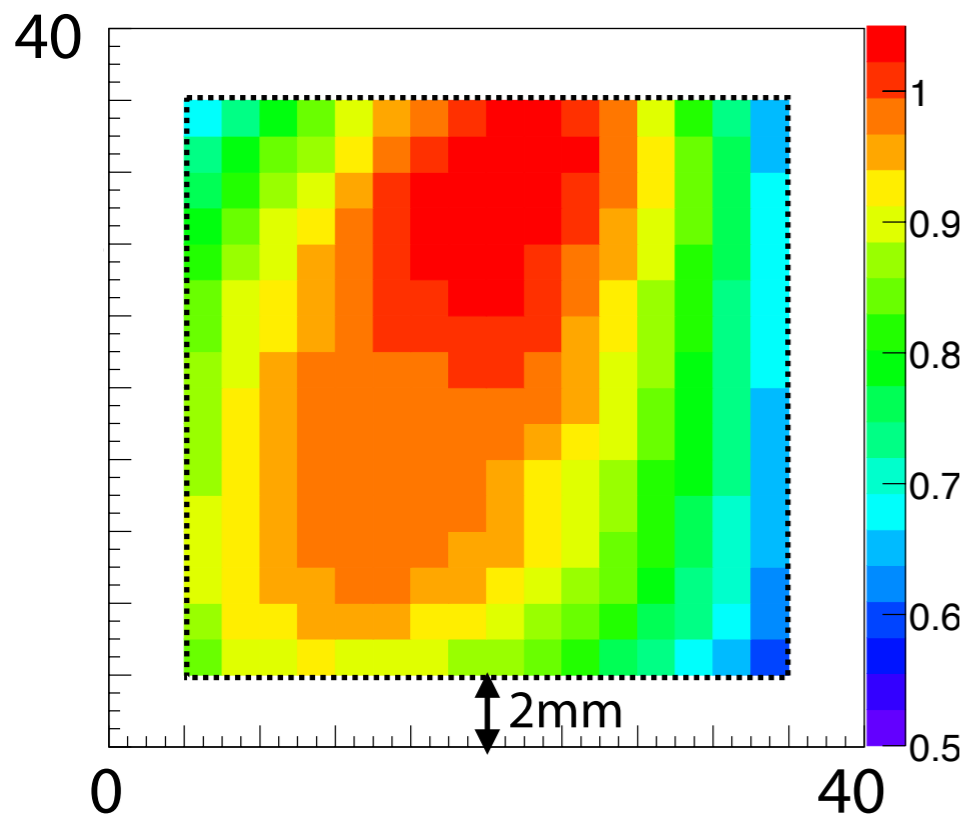
MC



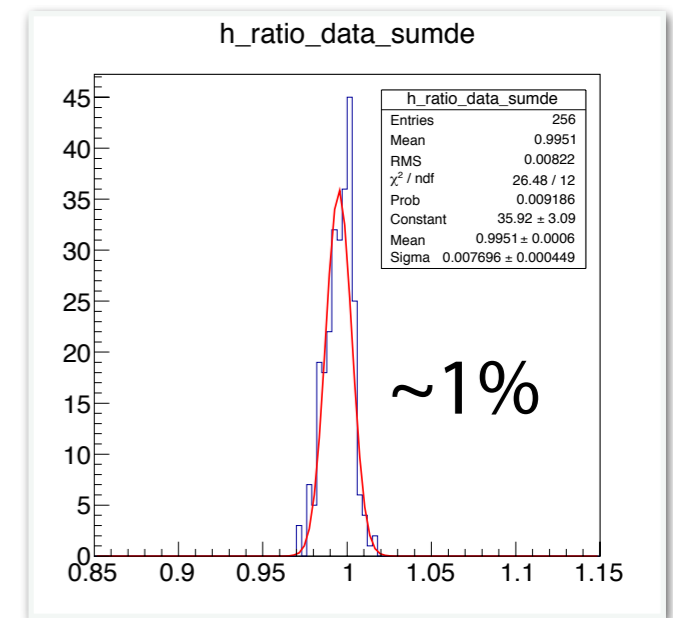
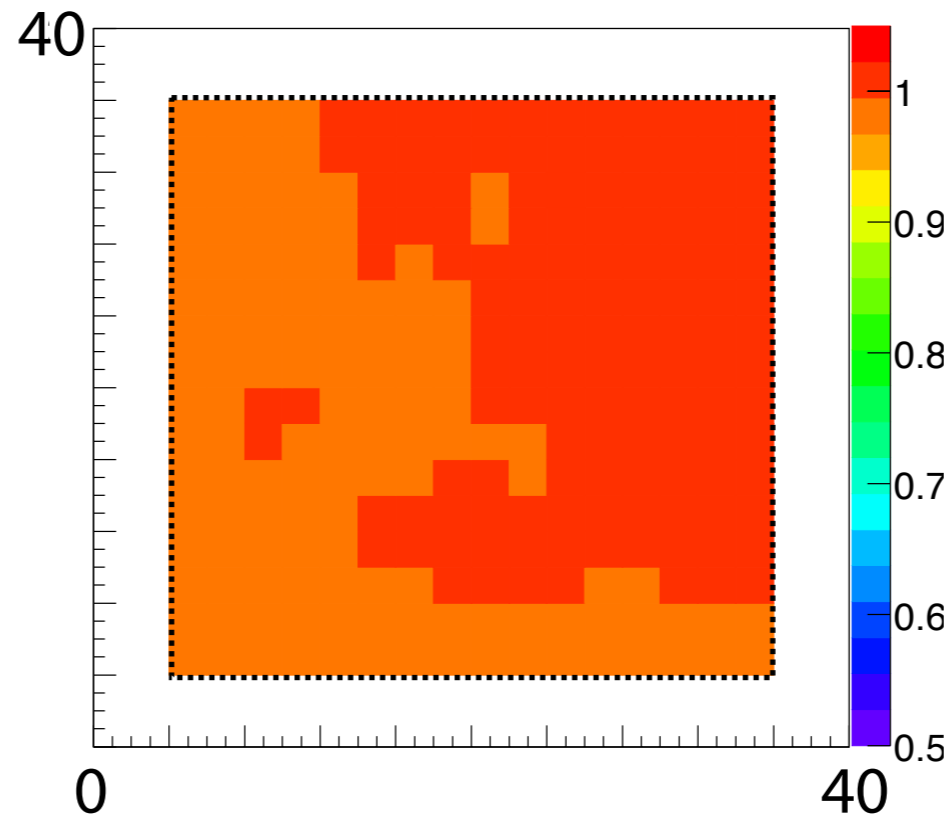
各層ごとに用意し、入射位置情報をもとに位置依存補正をこのマップで行なう。

GSO-plate 位置補正

補正前のエネルギー
損失和の位置依存



補正後のエネルギー
損失和の位置依存

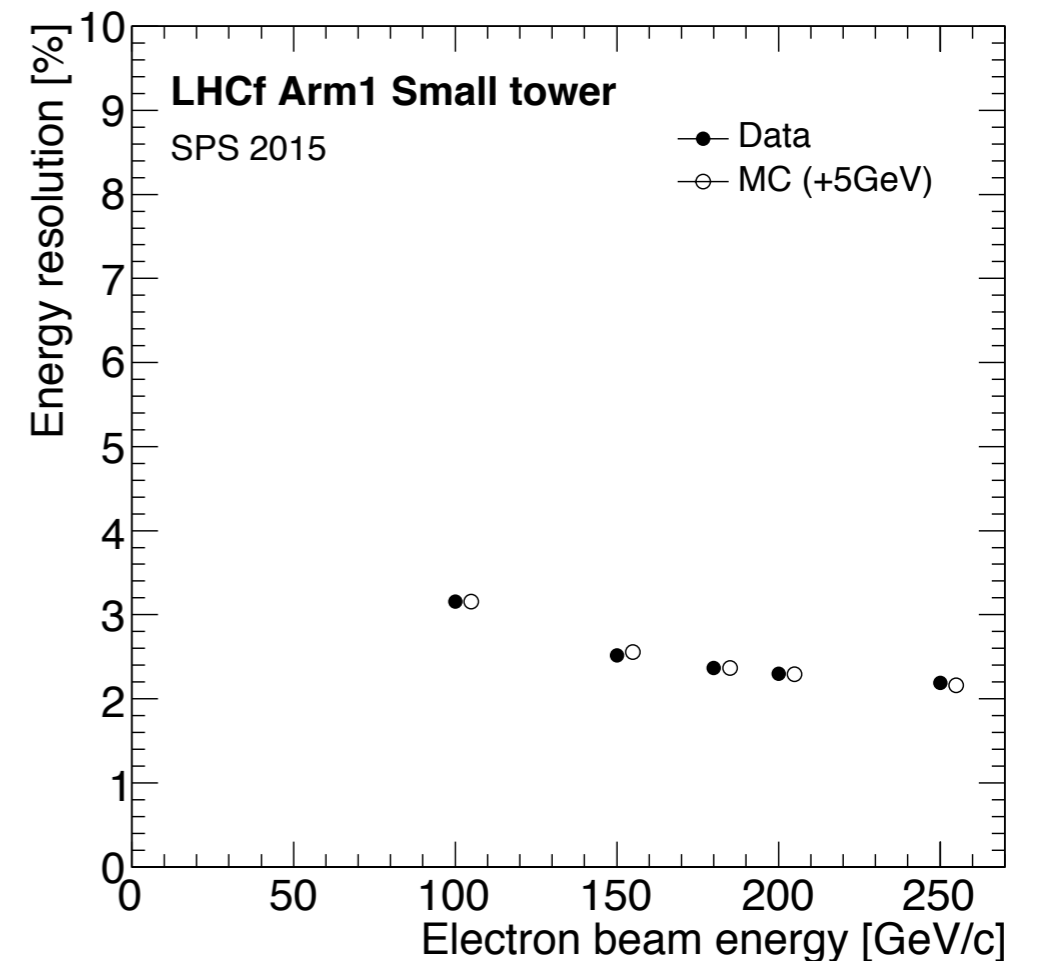
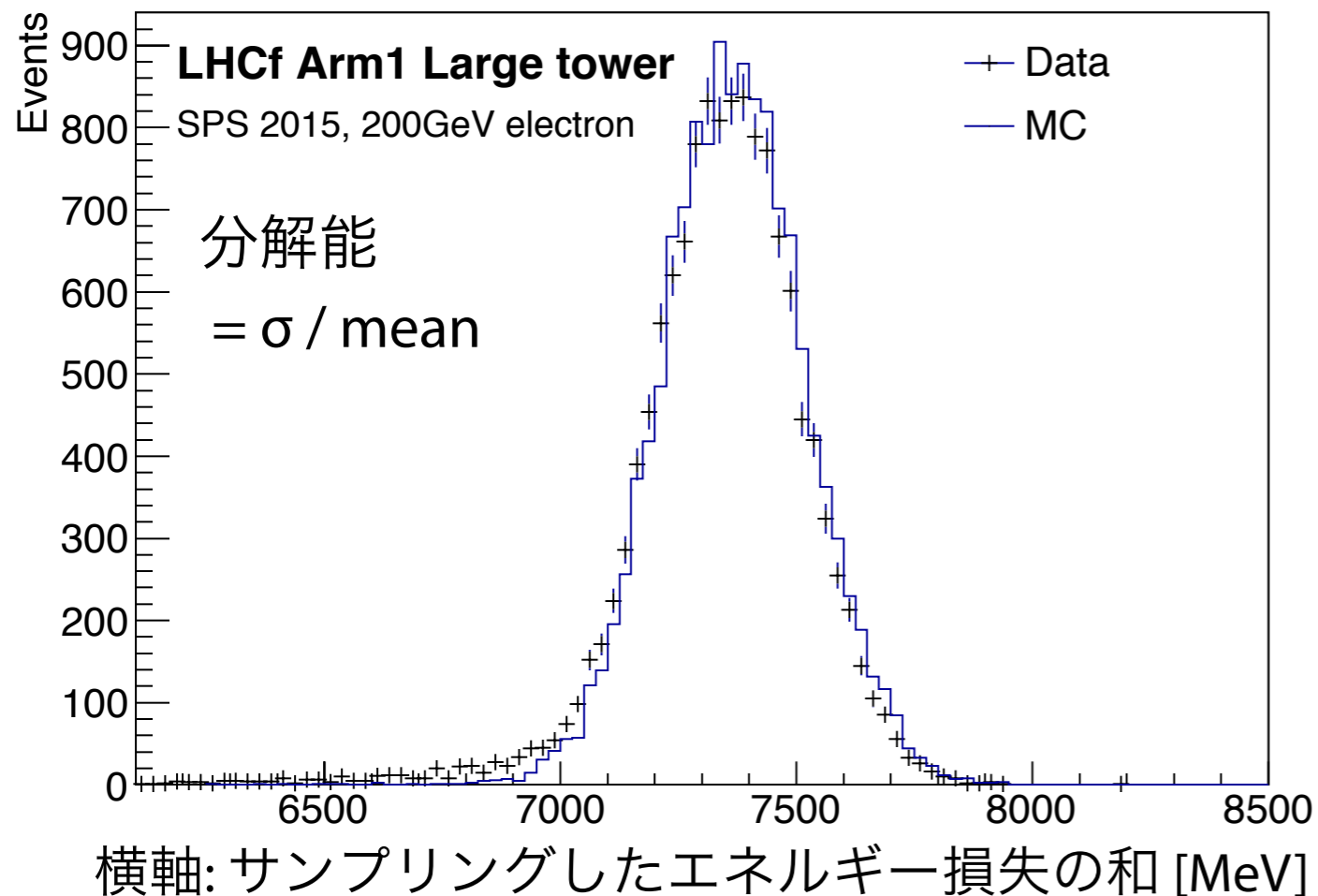


*) 位置依存が補正しきれないエッジ2mmは解析に使用しない予定

補正により位置依存を1%程度に抑えることに成功

エネルギー分解能

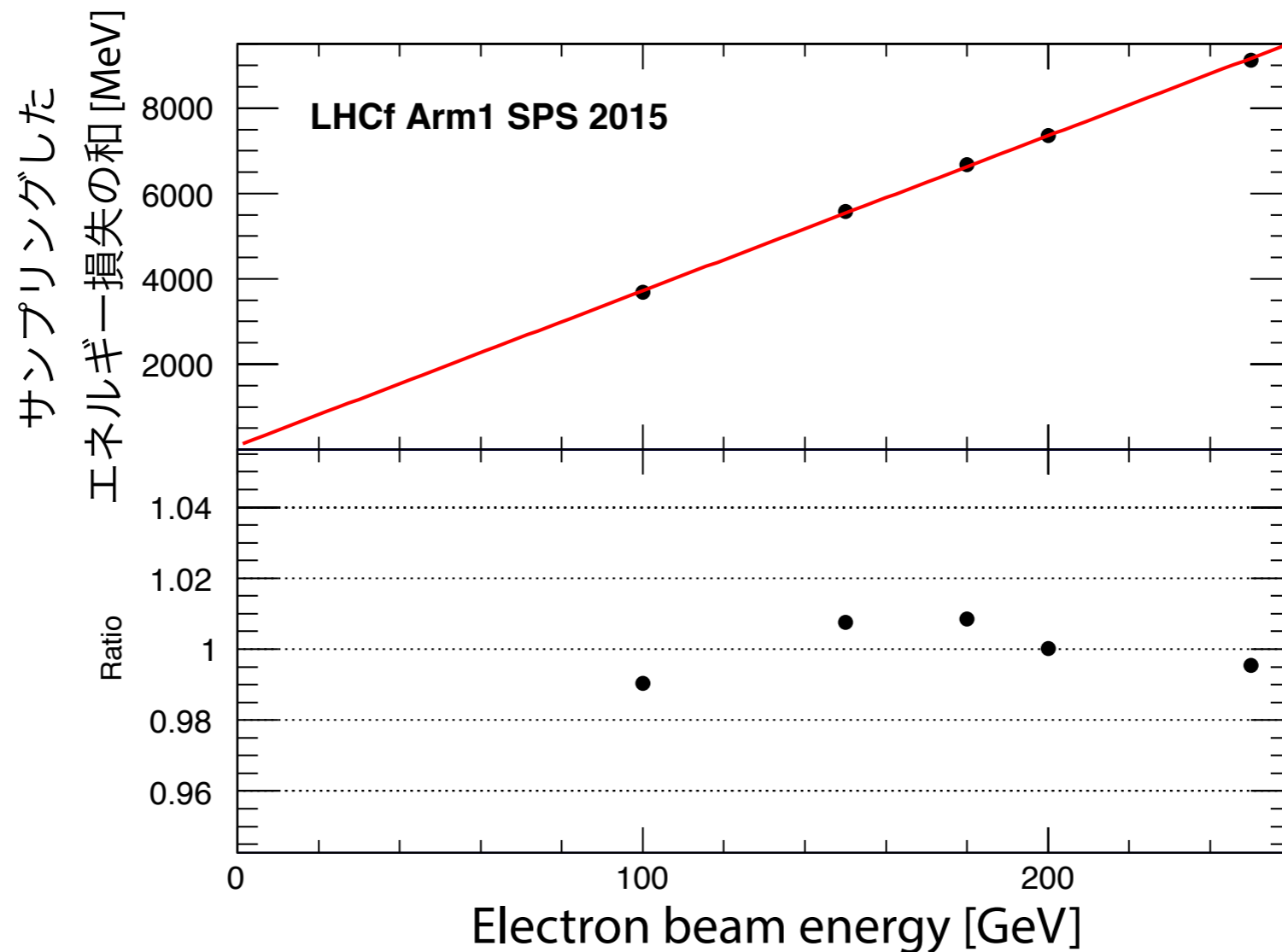
各エネルギーのelectron入射イベントに対してエネルギー損失を計算、その分布からエネルギー分解能を評価する。



100GeV以上のE.Mシャワーに対して分解能 **3%**と目標値(5%) を達成

検出器内でのエネルギー損失 vs 入射エネルギー

入射粒子のエネルギーは、カロリメータでのエネルギー損失と既知のエネルギーの入射粒子との対応から推定する。



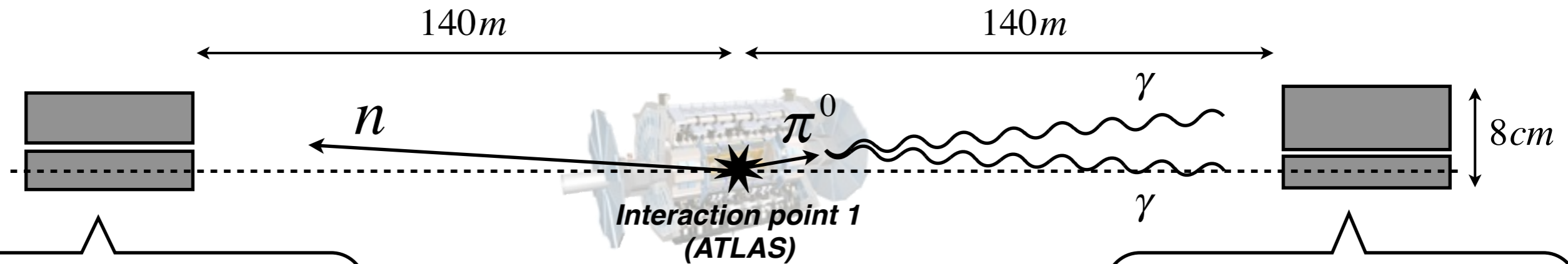
加速器で測定可能な領域でMCとの関係を確認後、高エネルギーへはMCを信頼して外挿を行なう。

まとめ

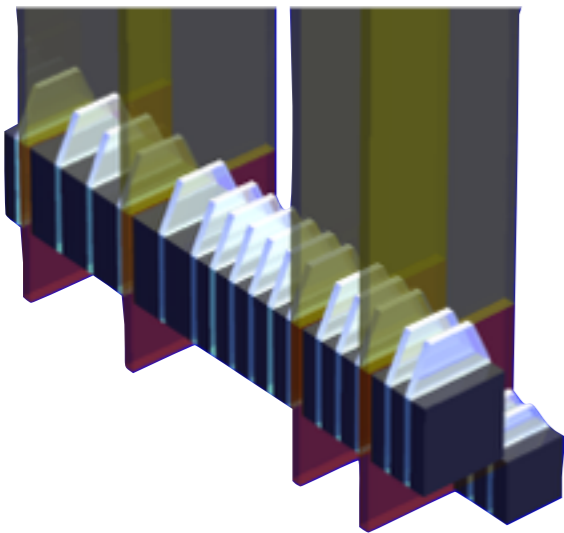
- LHCf実験ではLHC加速器において超前方への粒子生成を測定するために小型の解像型カロリメータを開発
 - 特に $\sqrt{s}=13\text{TeV}$ では、高放射線環境の配慮からGSOシンチレータを採用し、新型検出器を開発
- SPSで検出器のキャリブレーションを実施
- $\sqrt{s}=13\text{TeV}$ 測定に向けて新型検出器の性能は100GeV gammaに対して
 - エネルギー分解能： $< 5\%$ (high gainでは $< 3\%$)
 - (シャワー)位置分解能： $123\mu\text{m}$ (Arm1) $\sim 40\mu\text{m}$ (Arm2)

Location & Detector Layout

LHCf detects high energy (TeV) forward neutral particles



Arm2



- 4 X-Y **Silicon strip** imaging layers
- 25mm x 25mm + 32mm 32mm

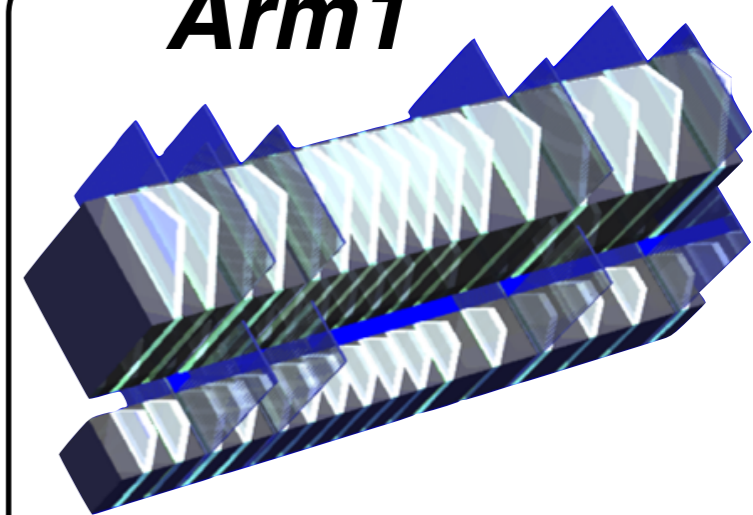
• Sampling & Imaging E.M. calorimeter

- 2 calorimeter towers
- Absorber: Tungsten $44X_0$, $1.6 \lambda_{int}$
- Energy measurement: 16 plastic scintillator tiles
- Imaging: 4 tracking layers

Performance

- Energy resolution (>100GeV)
 - 5% for γ , 40% for neutron
- Position resolution (E.M shower)
 - < 200 μm (#Arm1)
 - $\sim 40 \mu\text{m}$ (#Arm2)

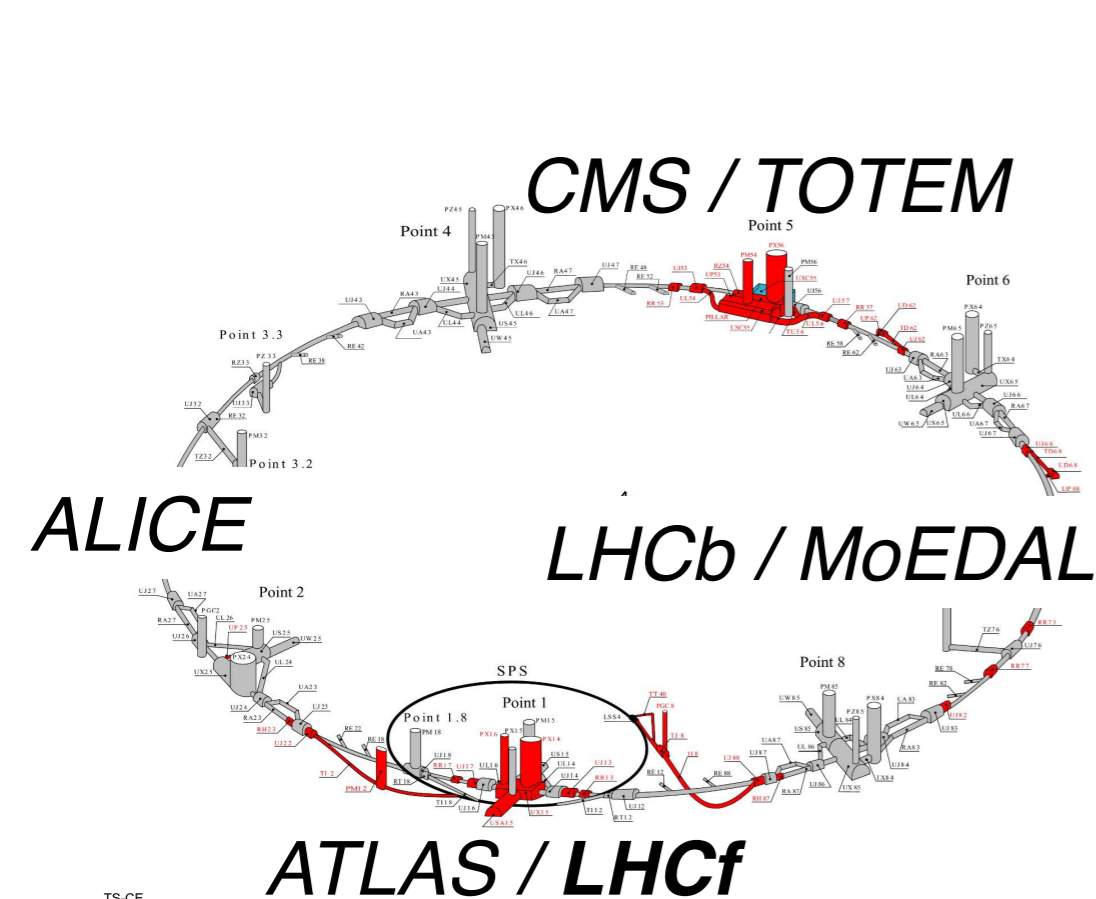
Arm1



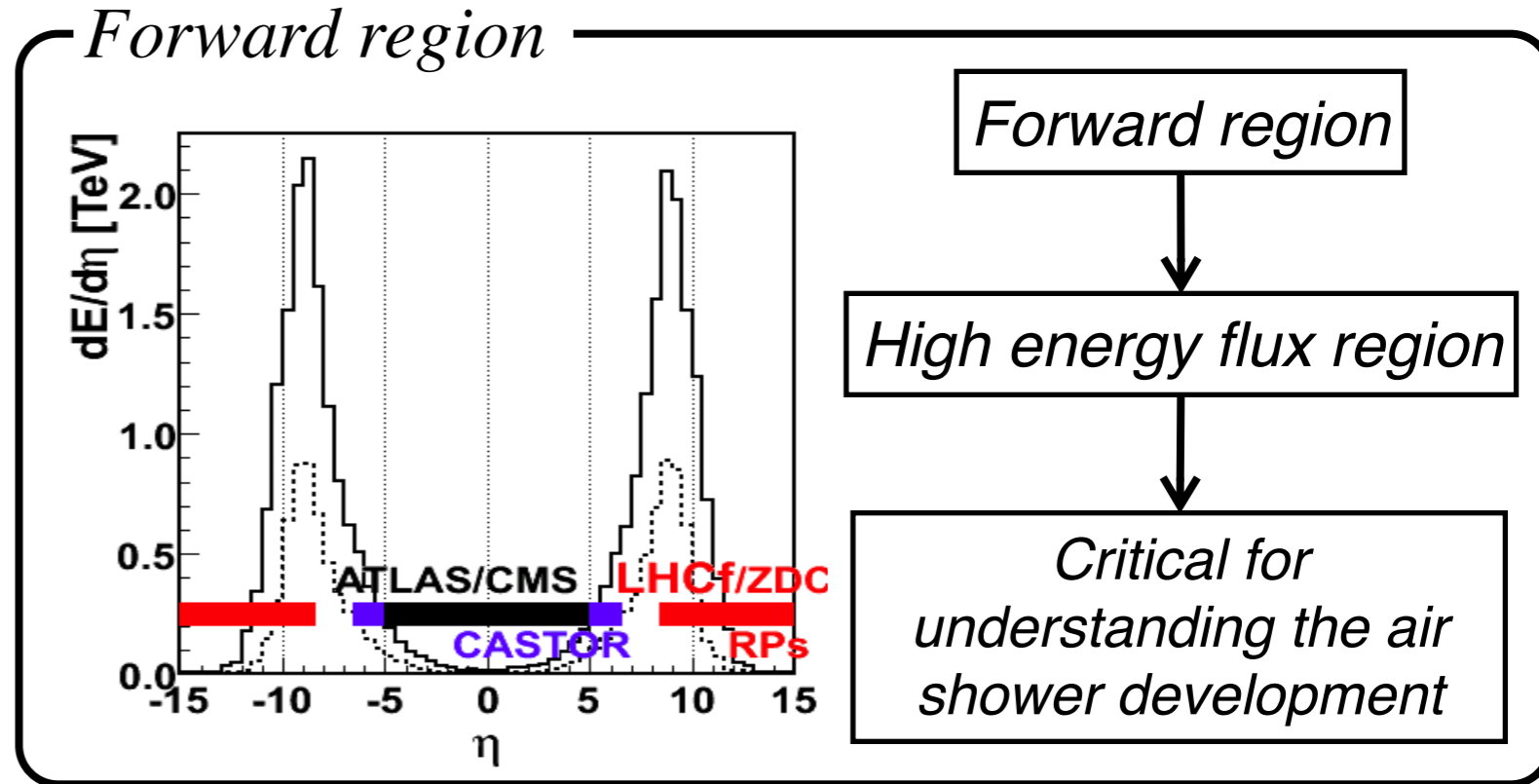
- 4 X-Y **SciFi** imaging layers
- 20mm x 20mm + 40mm 40mm

LHCf Experiment

Large Hadron Collider forward (LHCf) is an experiment dedicated to measure neutral particles emitted in very forward angles ($\eta > 8.4$) in LHC



TS-CE
06.07.2004



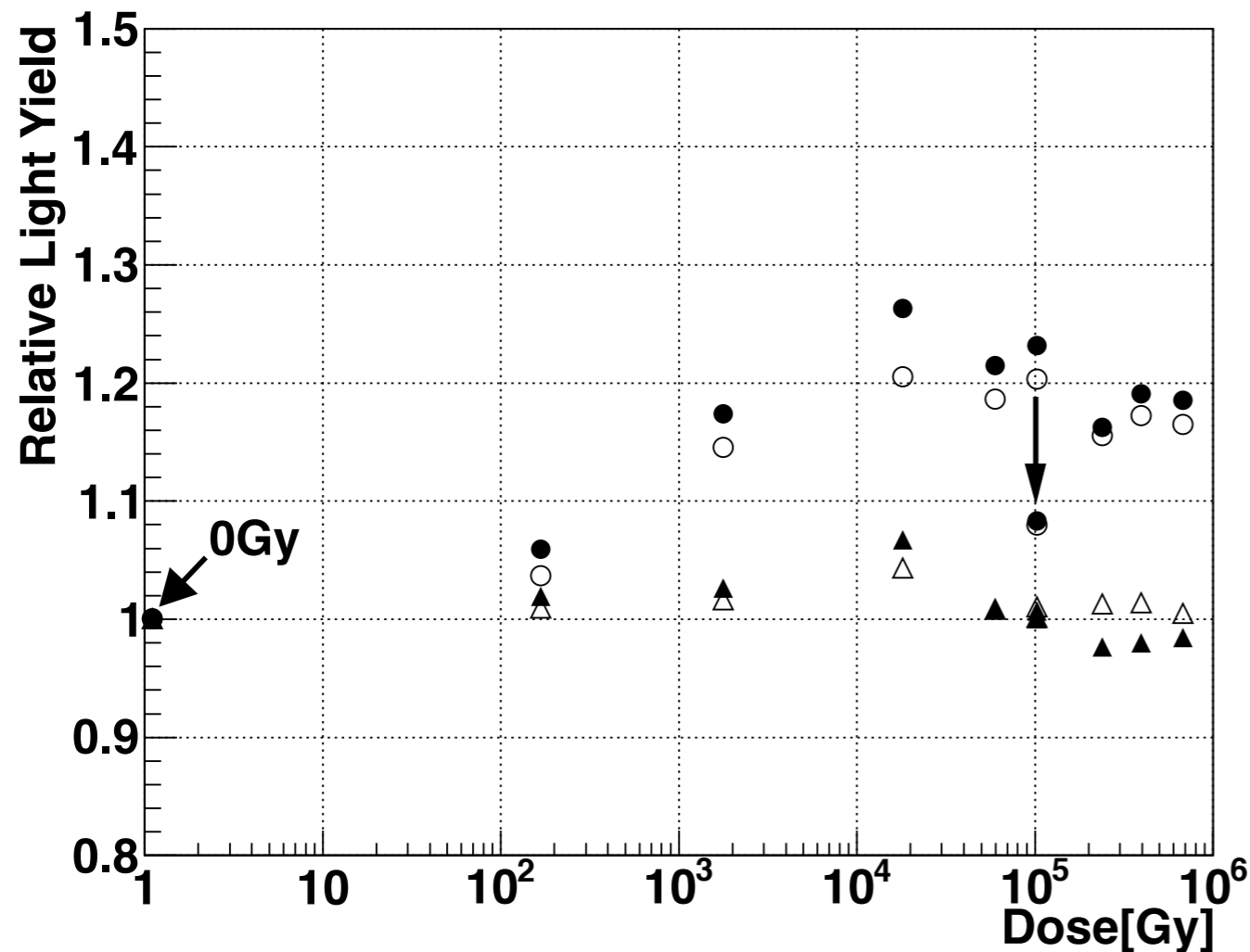
Reproducing the interactions of HECRs
 $p-p, \sqrt{s} = 7\text{TeV} : E_{lab} \sim 2.6 \times 10^{16} \text{ eV}$
 $p-p, \sqrt{s} = 13\text{TeV} : E_{lab} \sim 10^{17} \text{ eV}$

Measurement of forward particles by LHCf can improve the hadronic interaction models used for modeling the cosmic-ray air shower development.

GSO: Radiation Hardness

Radiation hardness of GSO was verified with heavy ion (C, 290MeV) beam

K. Kawade et al., JINST 6, 2011



- Total radiation dose of 7×10^5 Gy
- Any degradation (decrease of light yield) wasn't observed
- Increase of light yield by 25%
- Depends on irradiation rate
- In LHC,
 - No problem under low-luminosity if natural recover considered
 - Calibration (few percent) will be needed under high-luminosity

pp $\sqrt{s}=13\text{TeV}$, 初期解析の結果

- イベント例 (高エネルギーガンマ / π^0)
- ビームセンター
- 粒子選別 (PID)
- π^0 ピーク
- マルチヒット事象

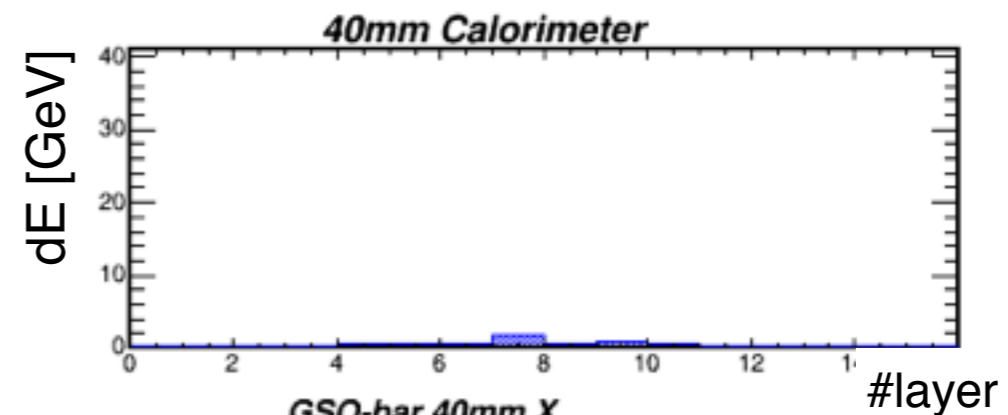
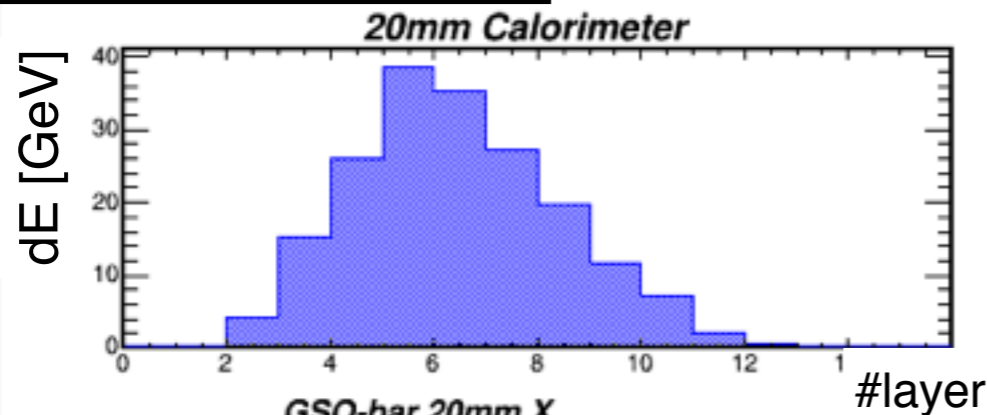
イベント例 (高エネルギーガンマ)

Photon-likeな粒子が検出器に入射、エネルギーは**5777 GeV**

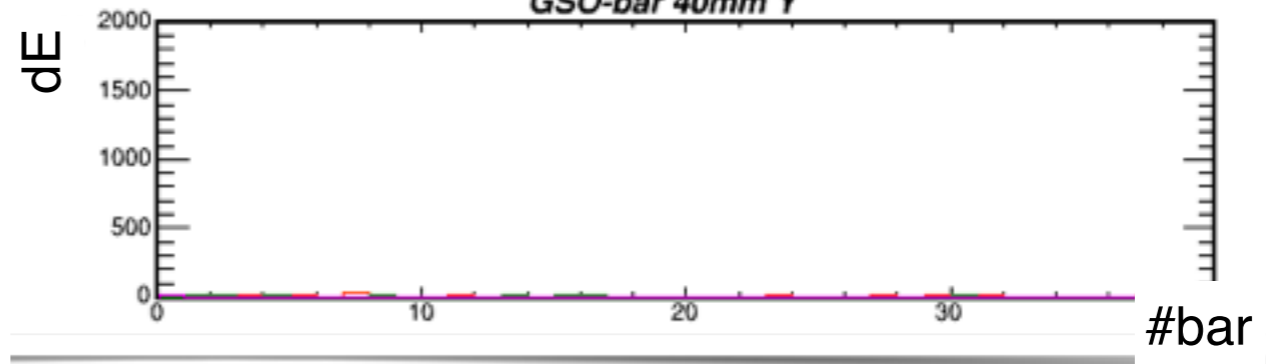
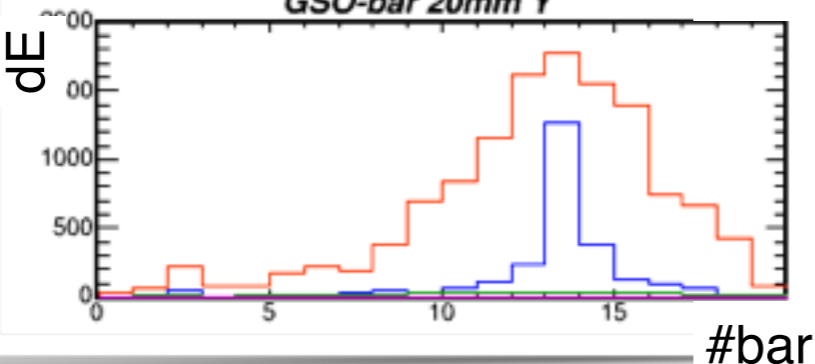
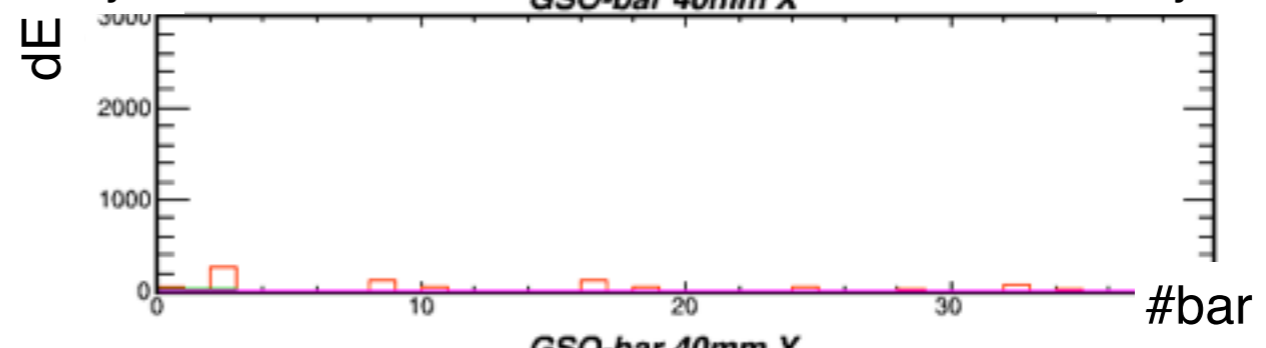
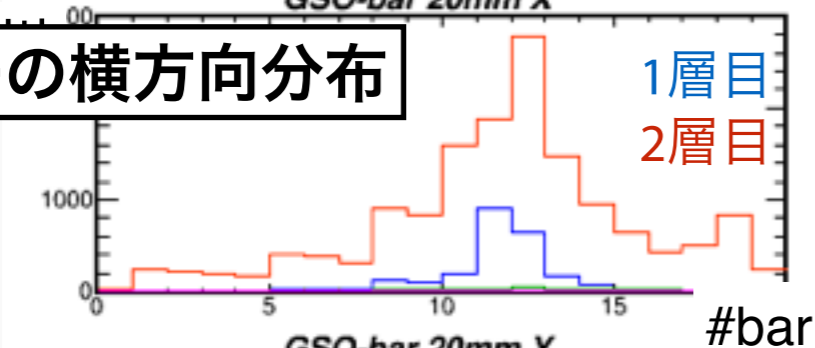


$E = 5777 \text{ GeV}$

カロリメータの各層でのdE



シャワーの横方向分布



ビームエネルギーに近い高エネルギーイベントでも問題なく測定。

イベント例 (π^0 候補イベント)

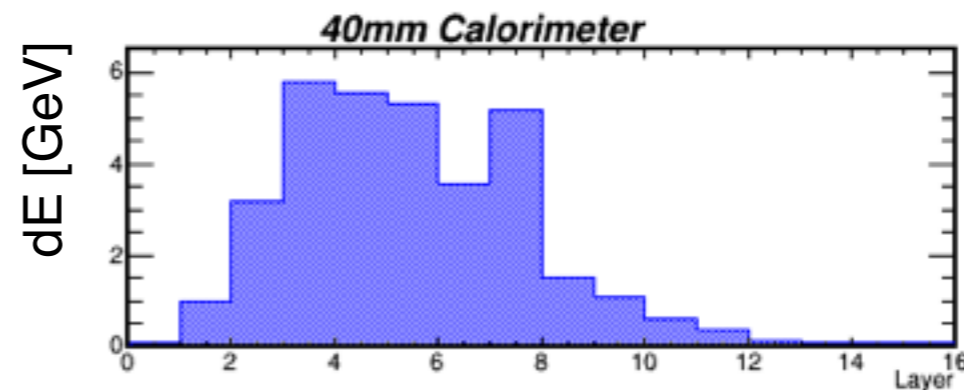
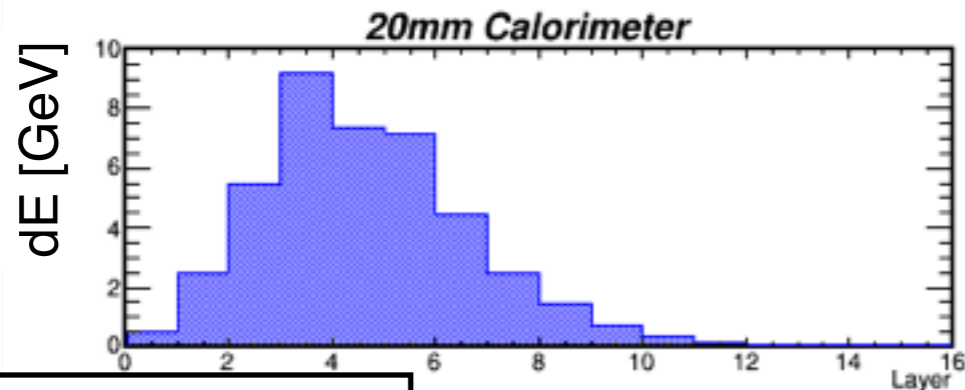
Photon-likeな粒子が1つずつ両カロリメータに入射



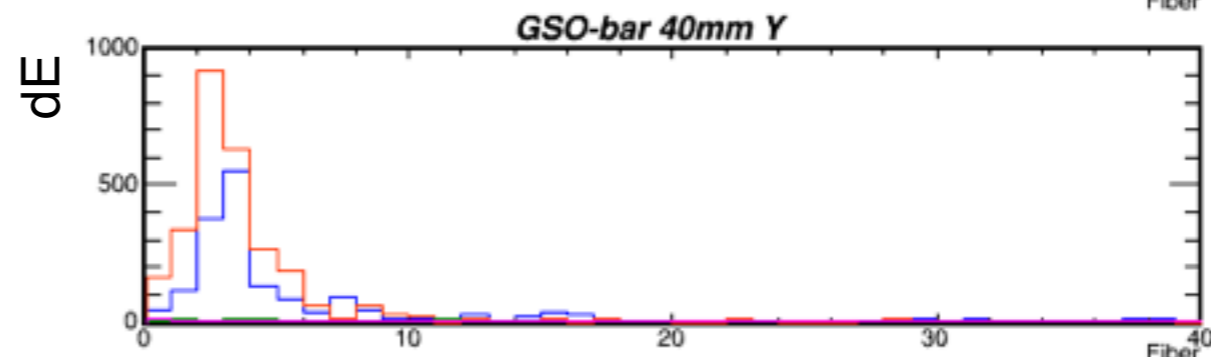
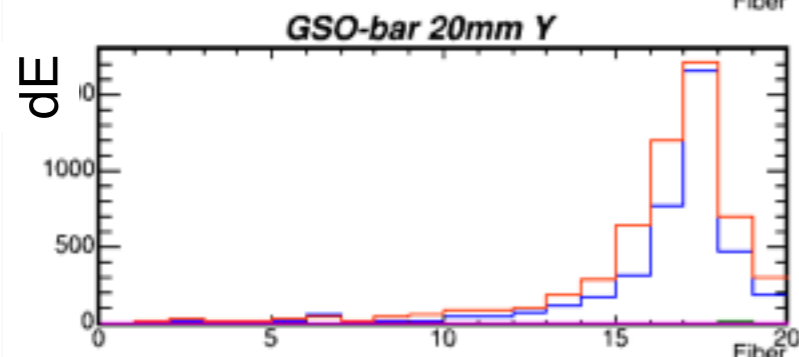
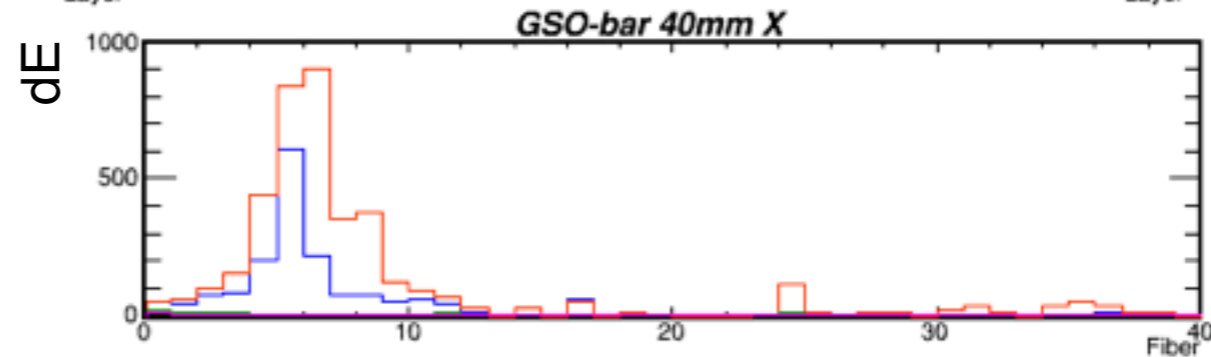
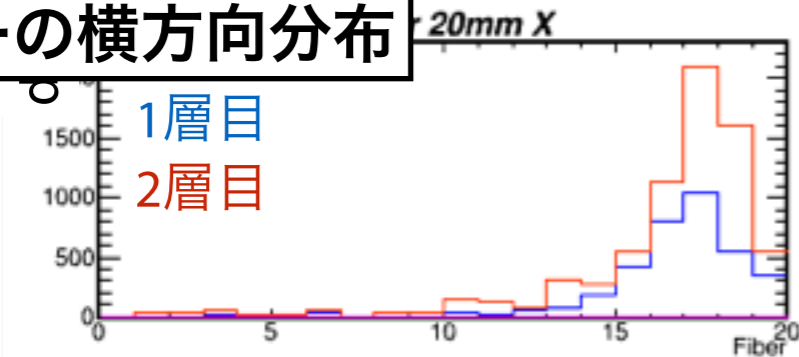
カロリメータの各層でのdE

$E = 1009 \text{ GeV}$

$E = 1585 \text{ GeV}$



シャワーの横方向分布



このイベントのとき、再構成したInvariant massは136MeV

ビームセンター

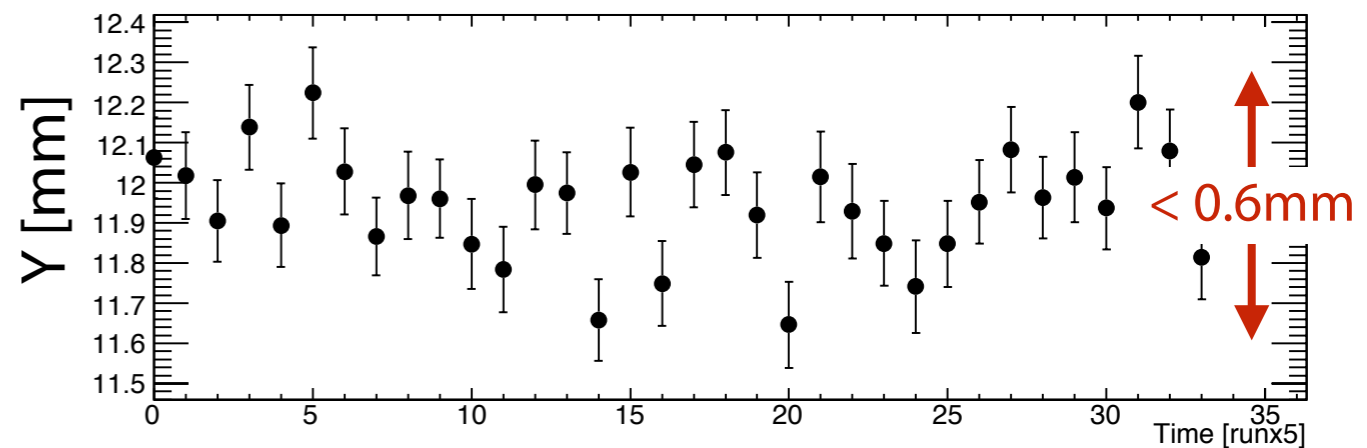
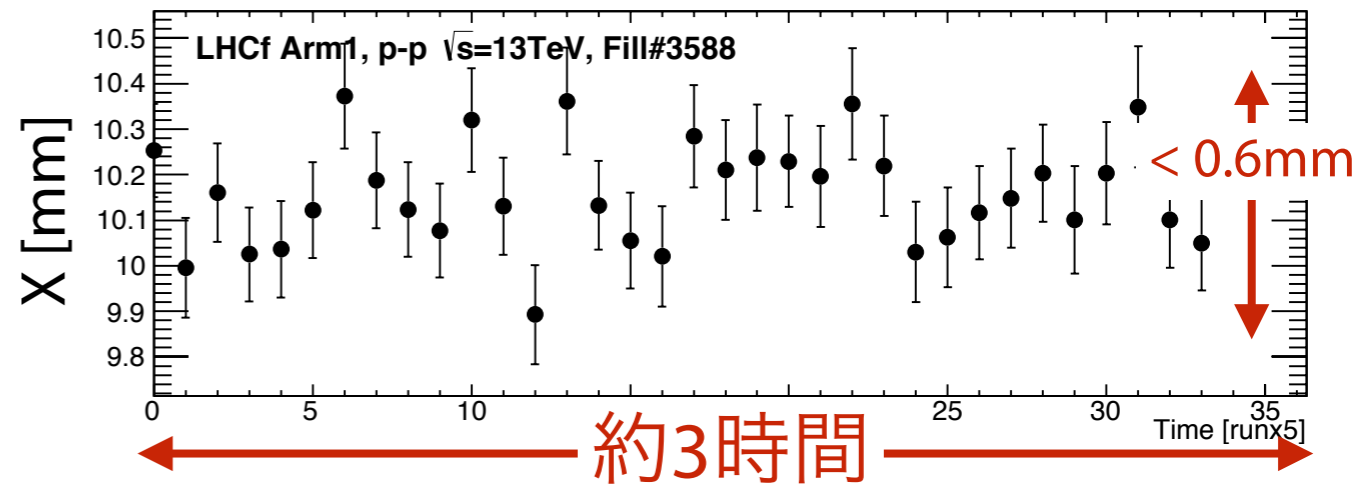
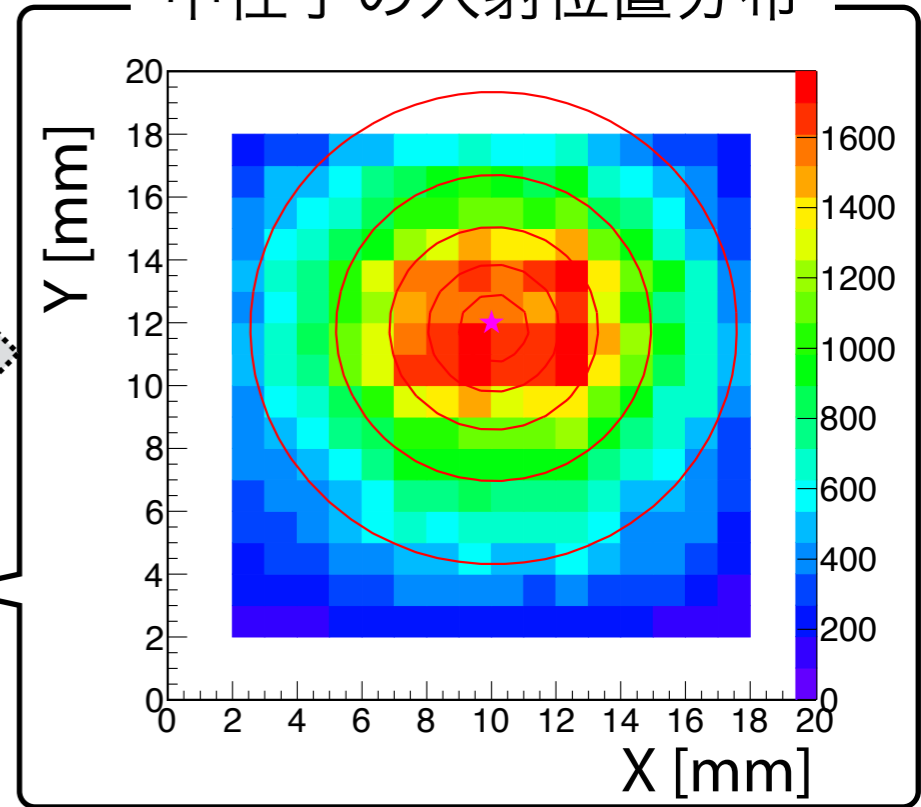
粒子生成の角度分布を知る上で、
ビームセンターの算出が不可欠



ビームセンターは0°方向に集中する
中性子の入射位置分布から算出

- 変動はX/YともにMin-Maxで
0.6mm程度
- 誤差の範囲内とも

中性子の入射位置分布



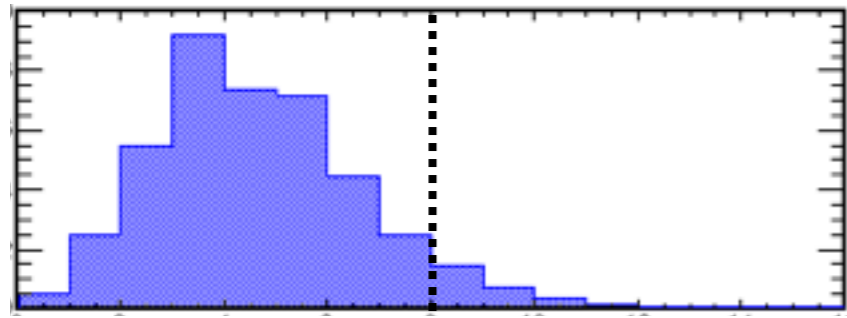
Physics run中のビームセンターはほぼ一定であったといえる。

粒子選別 (PID)

カロリメータ内での発達深さの違いから photon/hadron 事象の選別を行なう。

L_{90%} パラメータ

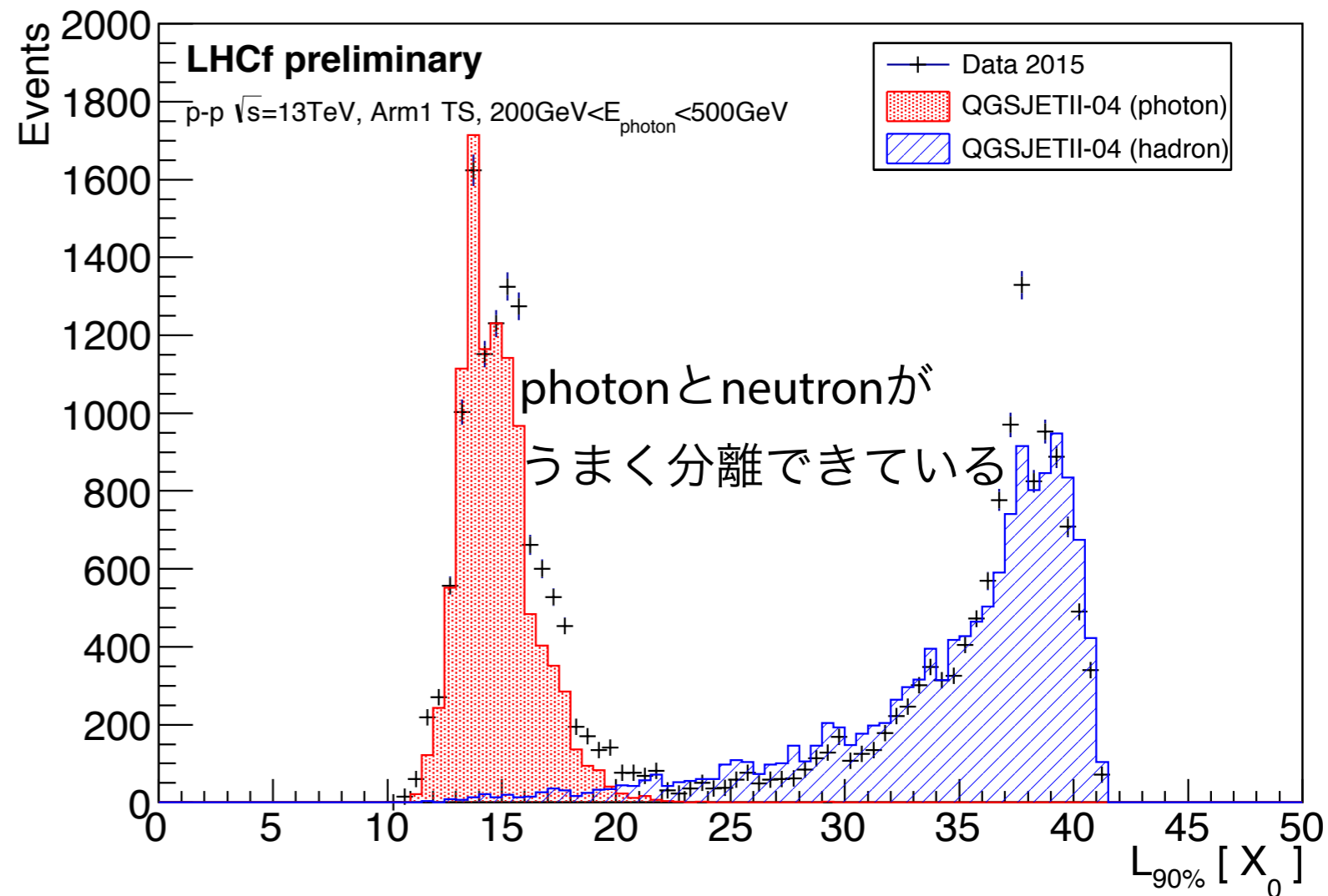
カロリメータ内でのシャワー発達の例



L_{90%} [X₀]

エネルギー損失が全体の和の
90%になる地点

L_{90%} パラメータ [X₀]



各エネルギー領域でL_{90%}分布に対してテンプレートフィットを行い、
purityとefficiencyを考慮して選別のしきい値を決定する

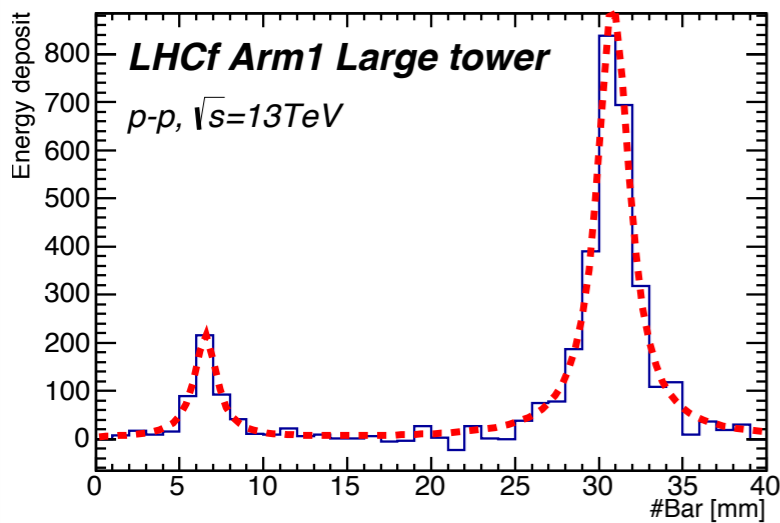
マルチヒット事象

$\sqrt{s}=13\text{ TeV}$ ではこれまでの測定よりも、前方により粒子が集中する。

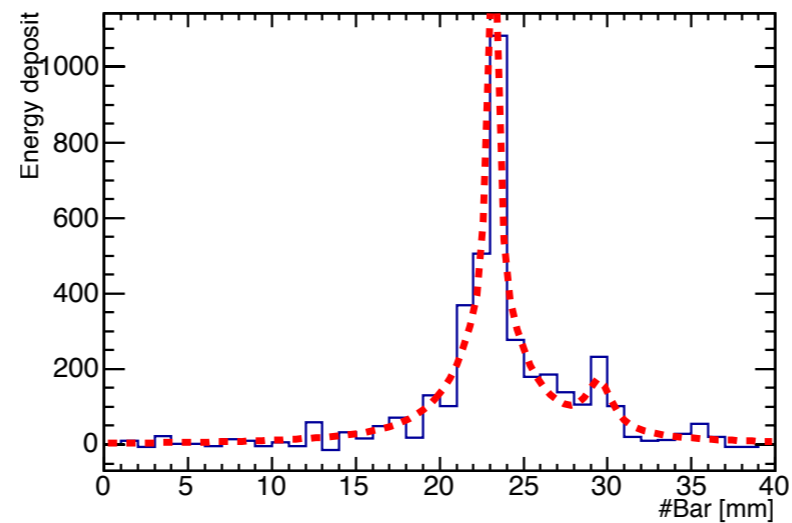
全トリガーイベントの約2% (QGSJETII-04) がマルチヒットイベント。

マルチヒットイベント例

1層目 X

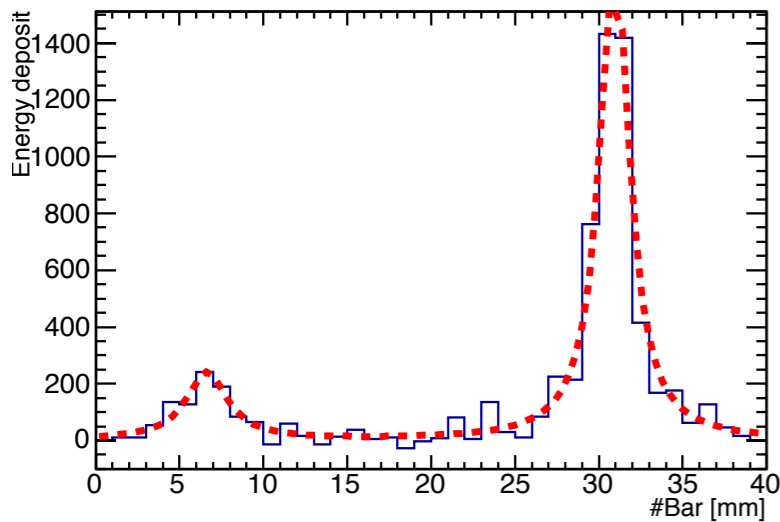


1層目 Y

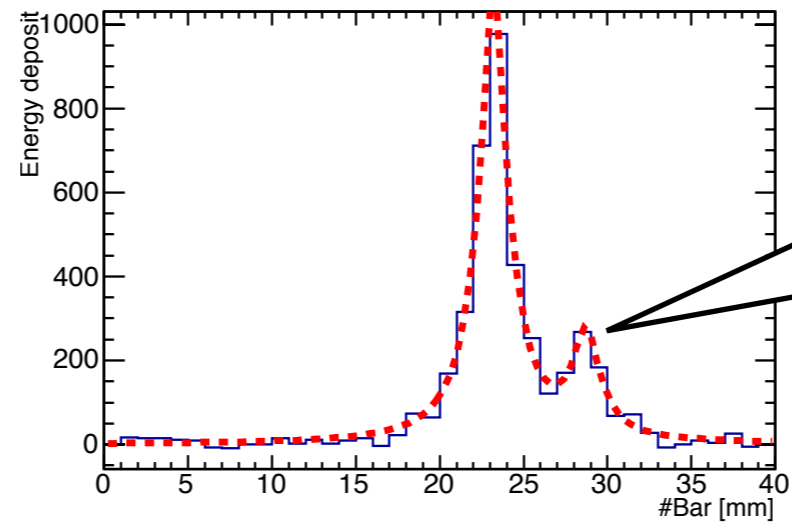


マルチヒットを取り逃すと、粒子のエネルギーをより高く見積もってしまうなど、スペクトルへの影響が大きい。

2層目 X



2層目 Y



このようにシャワーサイズに差があり、距離が近い場合がネックになる。

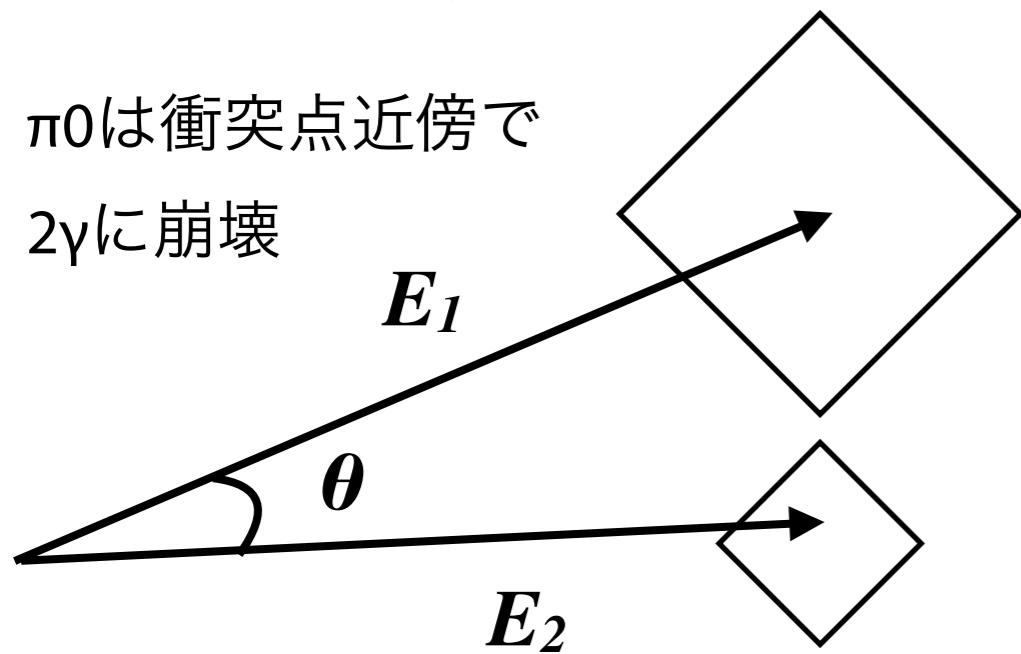
詳細、および定量的な評価に関しては現在研究中。

パイゼロの検出

LHCfでは π^0 の測定が可能。スペクトルの算出だけでなく、測定期間中のエネルギースケールの検証や検出器全体としての動作確認としても重要。

LHCfでの π^0 測定

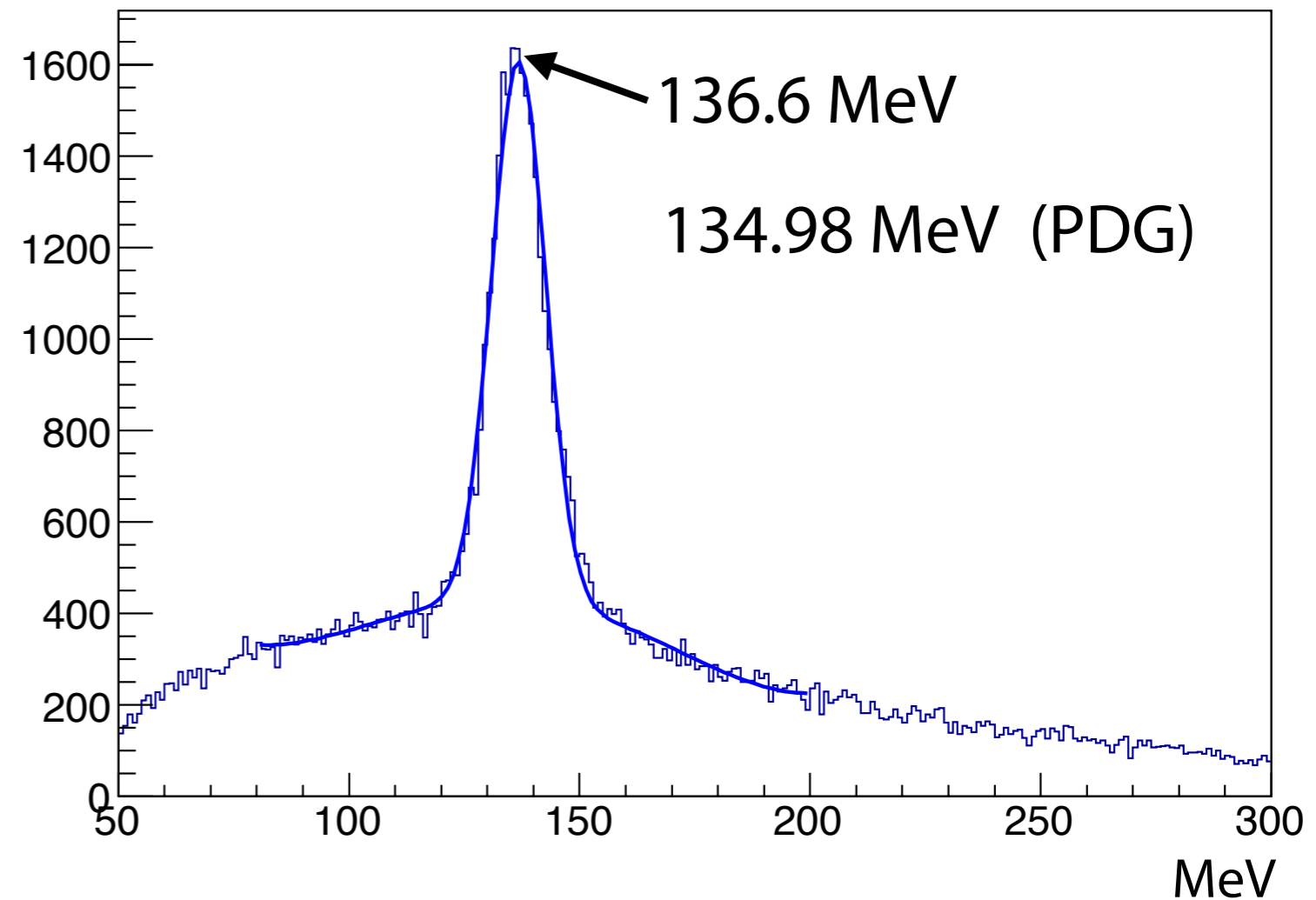
π^0 は衝突点近傍で
 2γ に崩壊



$$M_{\gamma_1\gamma_2} = \theta \sqrt{E_1 E_2}$$

π^0 massを組むにはエネルギーと位置の正確な決定が重要

$M_{\gamma\gamma}$ 不変質量分布



新型検出器でもパイゼロピークを確認することに成功。

Photon解析に使用するデータ中の π^0 peakの変動は1%程度。