

ILD のカロリメータ



2012年春 物理学会会場

ILC 夏の学校 @富山
7月 22日 2013年
信州大学 小寺克茂

Jet Energy分解能改善方法3つ

JEResoln. が悪くなる(特にHadronCAL)原因.

- EM interaction と Hadronic interaction では, energy deposition の率が違う ($e/h \neq 1$)

+

- EM interaction と Hadronic interaction の比率(f_{em})の変動



- JER の劣化

対策法

1. $e/h = 1$ のハードウェア-を作る.
2. f_{em} を event 毎に測定 (Čerenkov 光を見る)

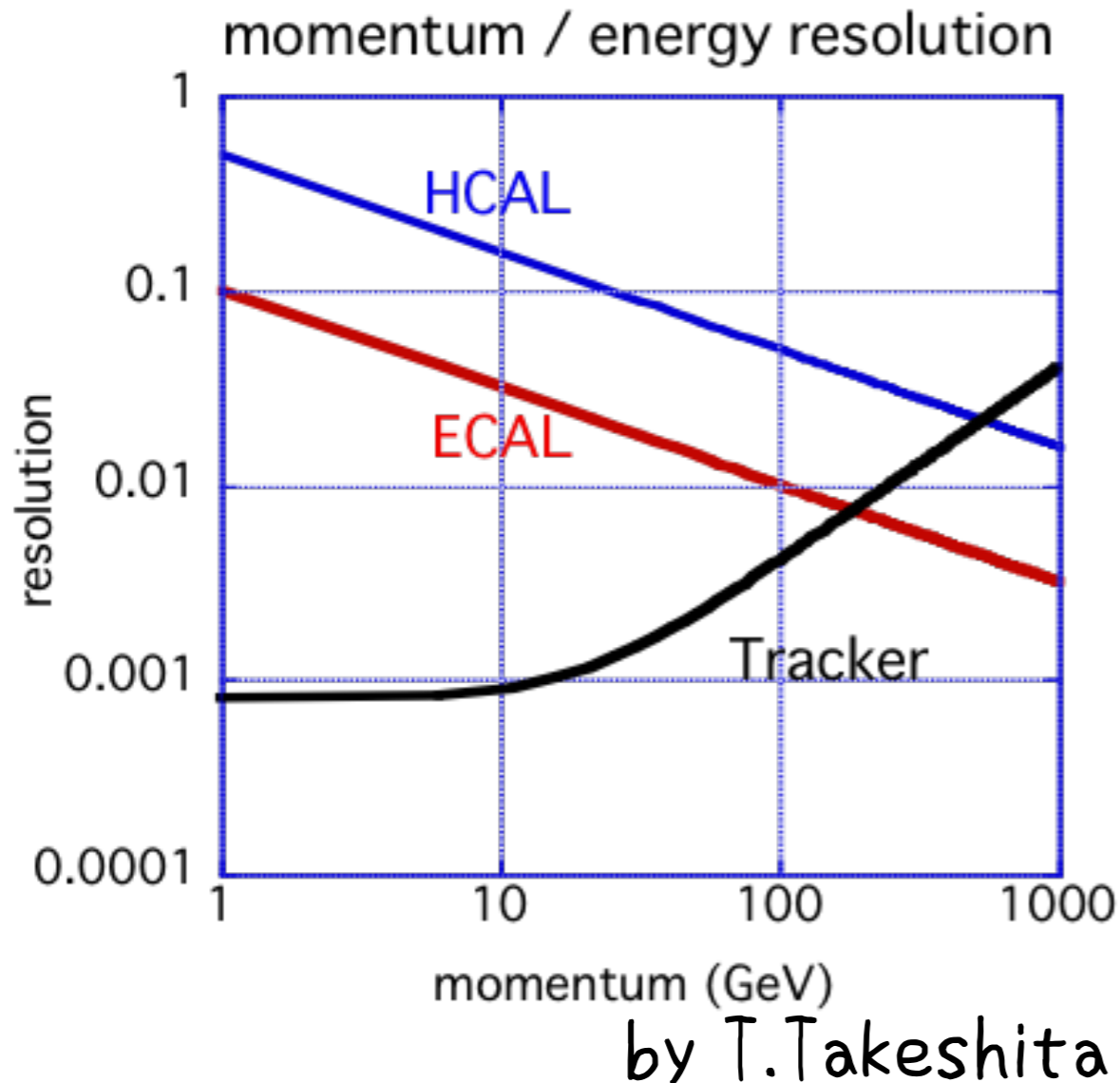
3. 微細分割カロリメータ

Jet 中の粒子毎に解析...

EM shower (photon) Hadronic Shower を分ける.

Particle Flow Algorithm

Tracker の p 分解能高さ

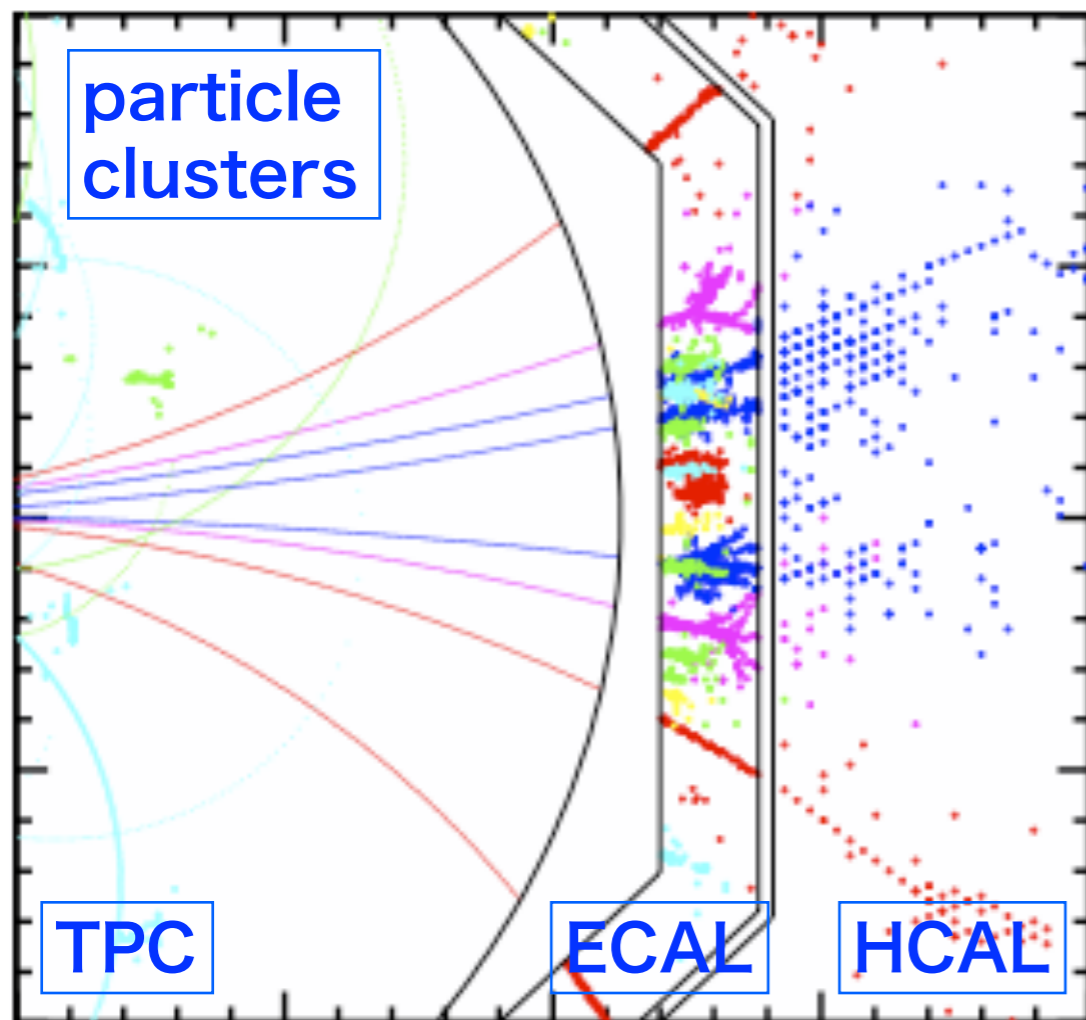


- ◆ かなり高エネルギーのところまで, Tracker のエネルギー分解能がよい。
- ◆ 荷電粒子は実は Tracker でエネルギーを測った方がよさそう...
- ◆ けれどもカロリメータには荷電粒子も中性粒子も一緒くたに入っている。

◆ カロリメータ中の粒子を分けてしまおう!

Imaging Calorimeter

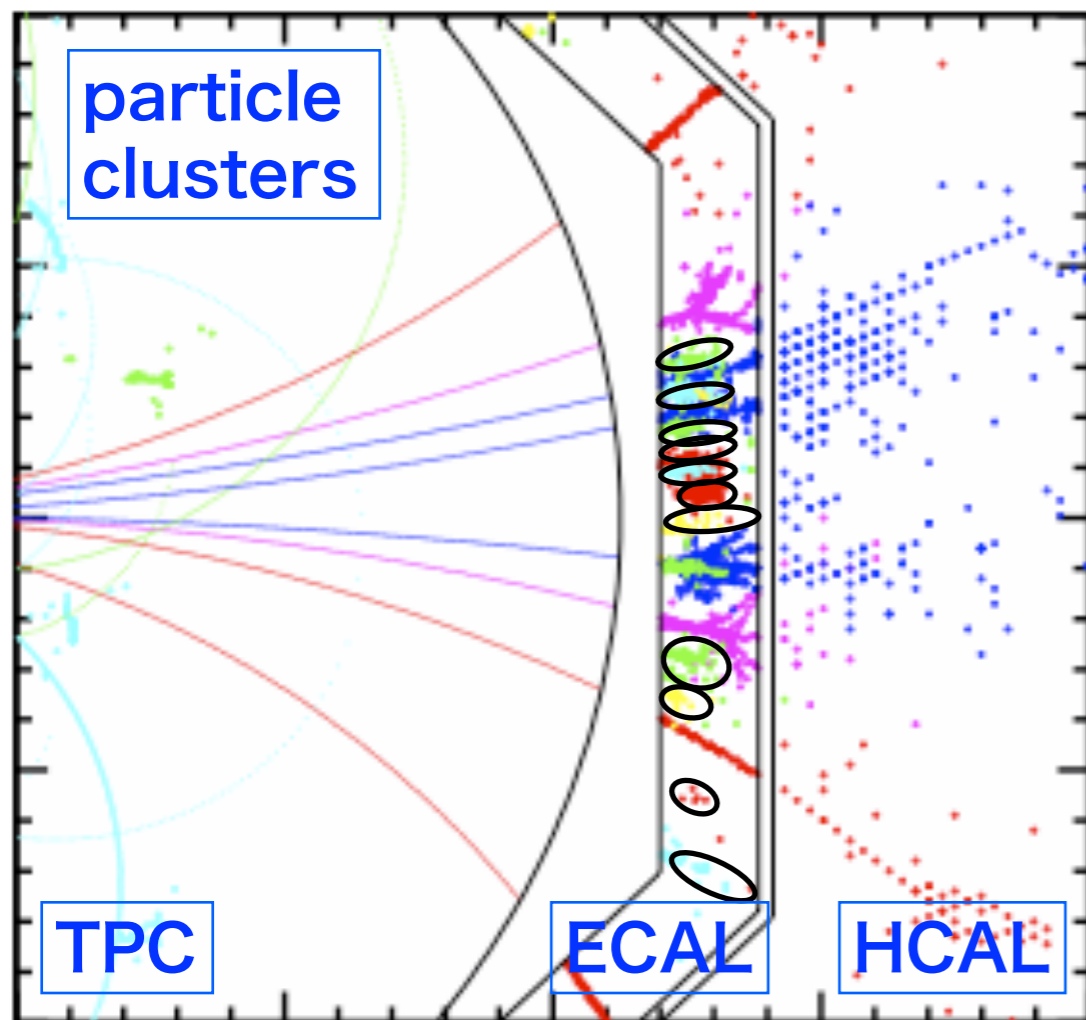
- ◆ カロリメータ中の粒子を分けてしまおう！
クラスタ



- ◆ カロリメータの細分割度を高くすると，粒子クラスタの一つ一つを分離
- ◆ トラックとクラスタを一対一対応できる。

Imaging Calorimeter

- ◆ カロリメータ中の粒子を分けてしまおう！
クラスタ



- ◆ カロリメータの細分割度を高くすると，粒子クラスタの一つ一つを分離
- ◆ トラックとクラスタを一対一対応できる。
- ◆ 対応が無かった中性粒子のエネルギーだけを測定する。

- ◆ クラスタ粒子を同定し，ハドロンシャワーと電磁シャワーでの反応の違いも補正 $\rightarrow e/h \neq 0$ 問題，
 f_{em} 変動問題も解消

Particle Flow Algorithm

calorimeter	fraction	σ_E/\sqrt{E}
HCAL	70%	55%
ECAL	30%	15%



calorimeter	fraction	σ_E/\sqrt{E}
HCAL	10%	55%
ECAL	30%	15%
Track	60%	< 1% @ 30 GeV

Using an algorithm: [PandoraPFA](#) by Mark Thomson

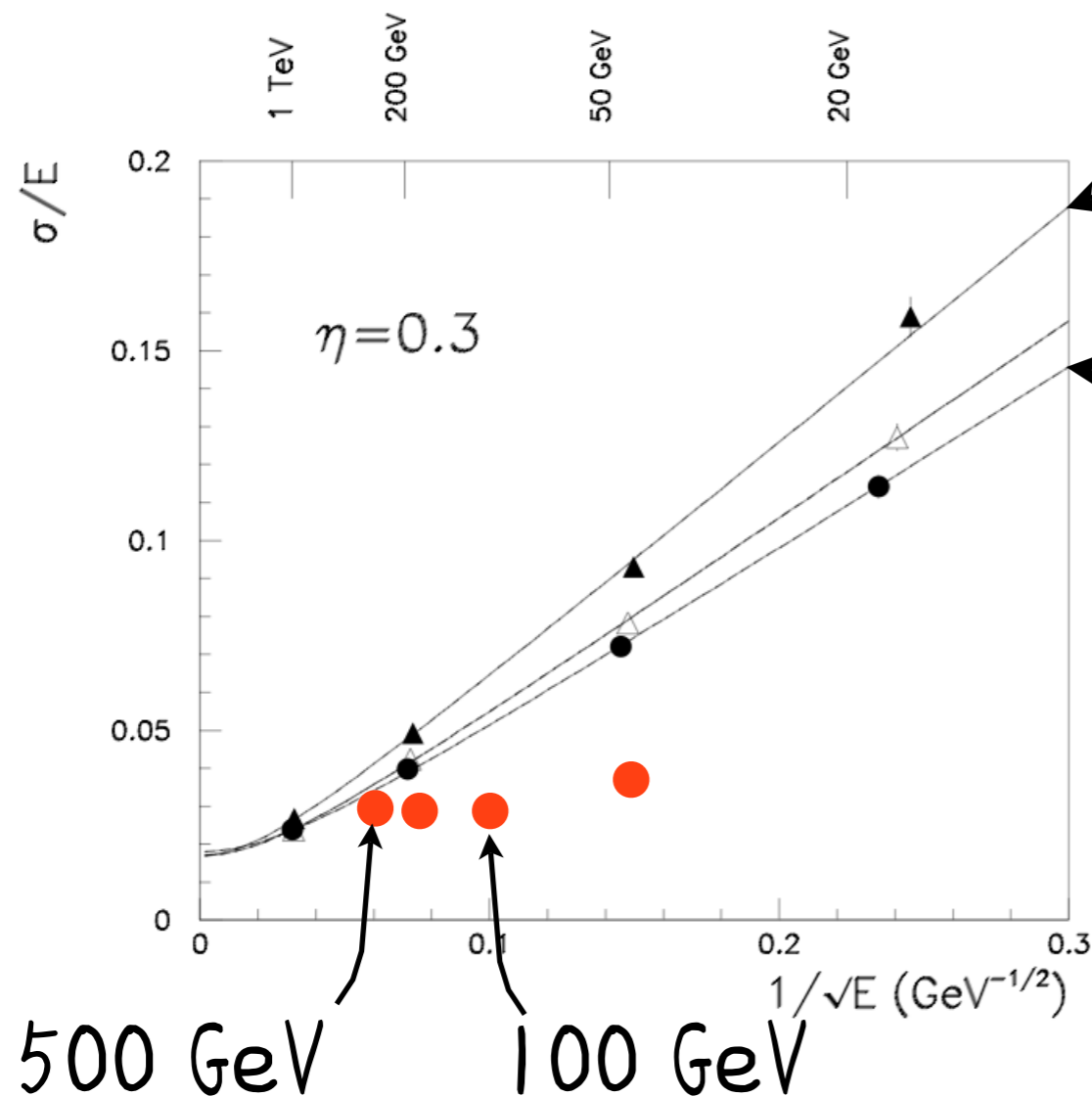
目標のJER $\sigma_E/E < 3.5\%$ for W, Z jet を十分に達成!

PFA では E/H-CAL はもはやカロリメトリーの一部

ATLASとの比較

時間があまればCMSも見せます。

ATLAS TDRより, JEResoln.

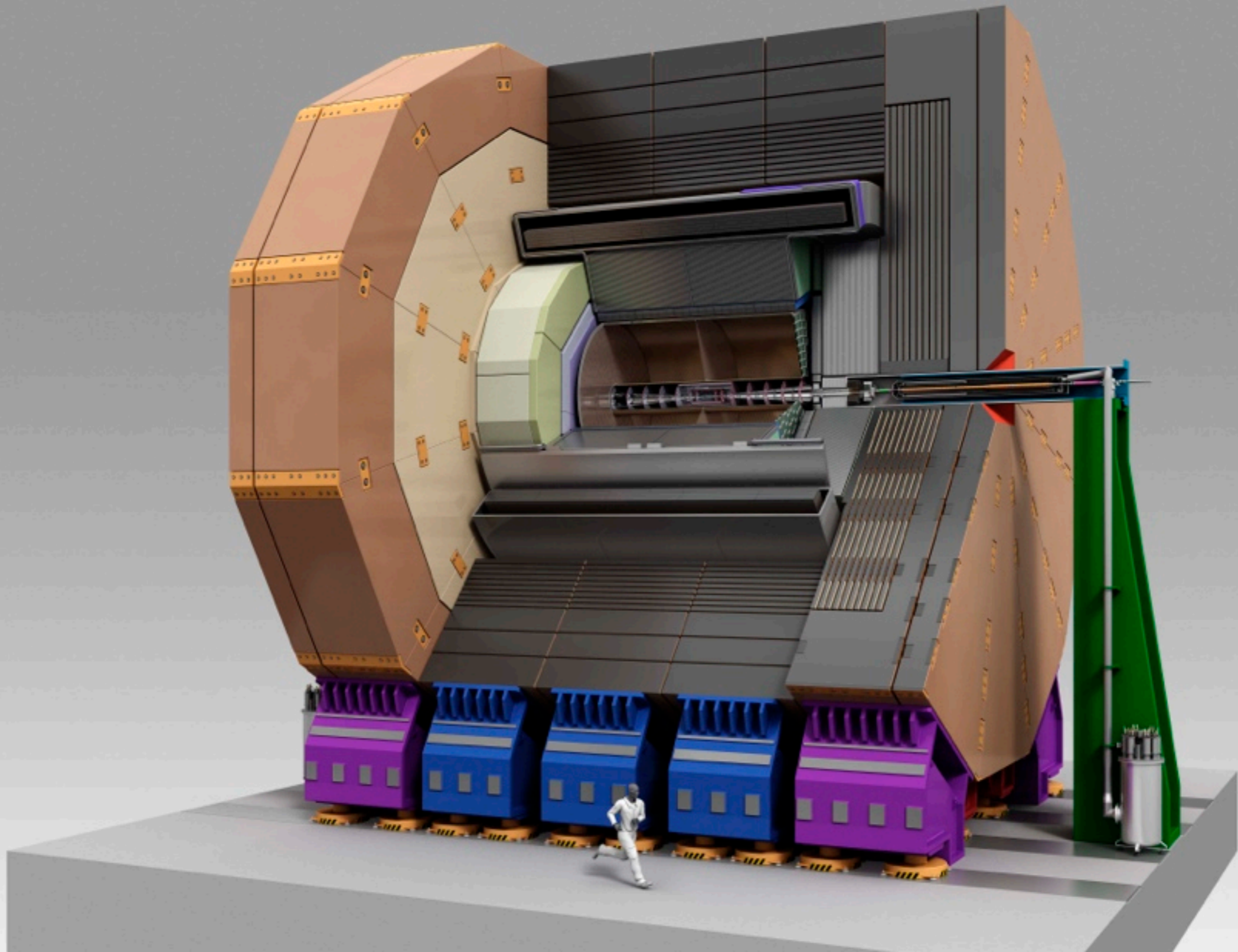


- ◆ 100 GeV 以下では2倍良好な JER を達成。
- ◆ 250 GeV 迄は結構良い。
- ◆ 500 GeV 迄は良い。

よって 1 TeV ILC 迄は明らかに PFAL は有効。

● PFALによるILDの結果

ILD



ILD calorimeters

muon detector

solenoid 3.5 T

1.1m

HCAL barrel

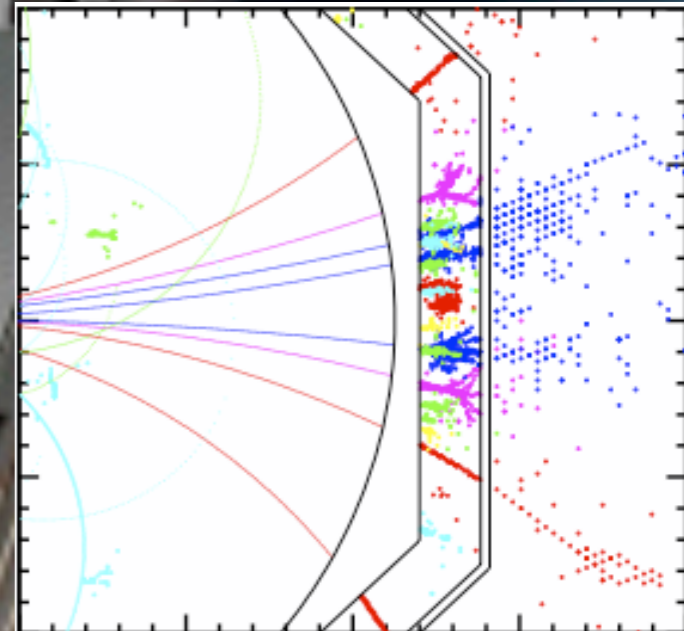
1.85m

ECAL barrel 0.185m

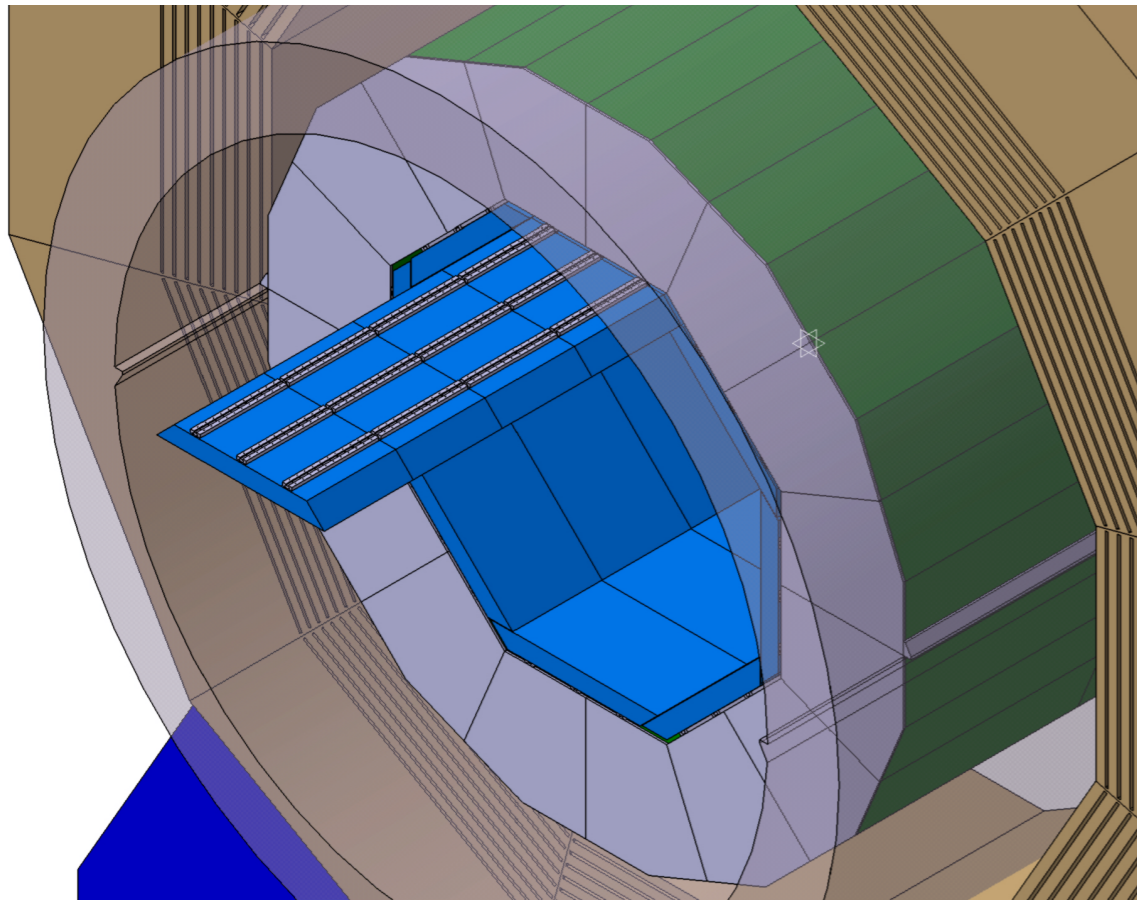
Tracker

HCAL endcap

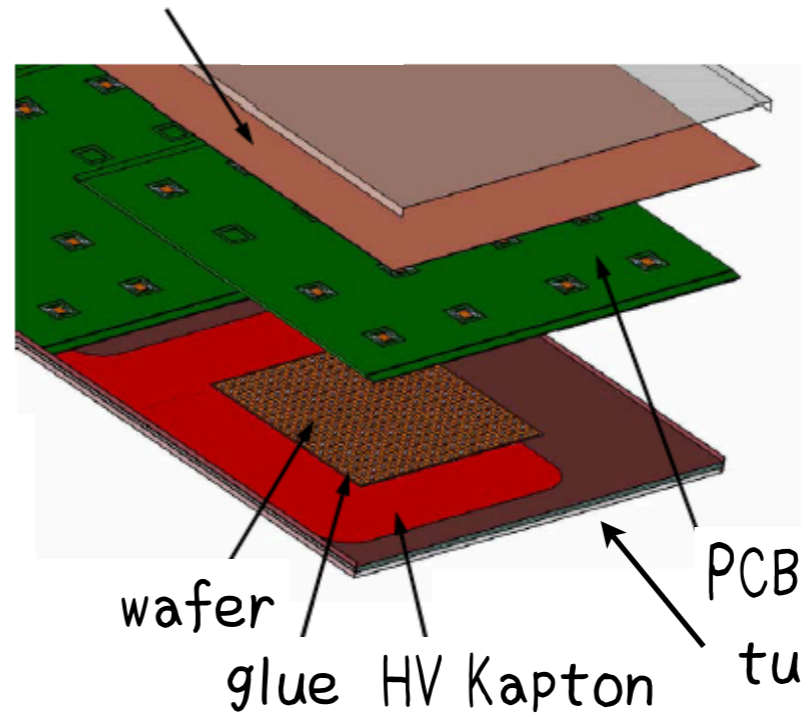
この奥の方に LumiCal
など、省略



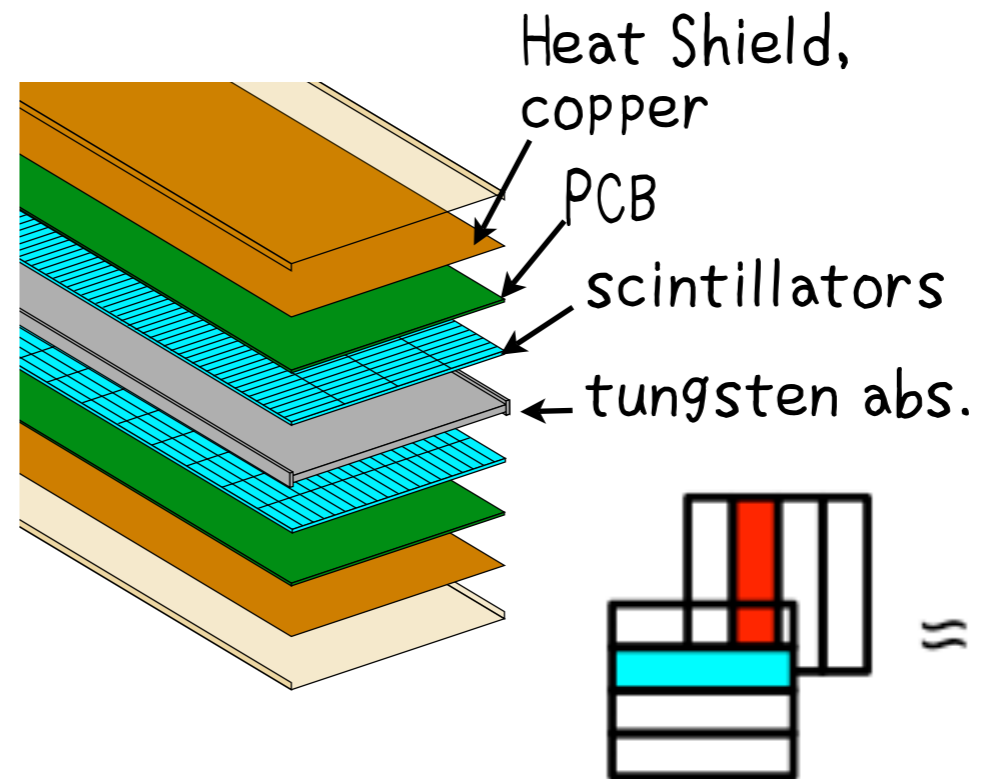
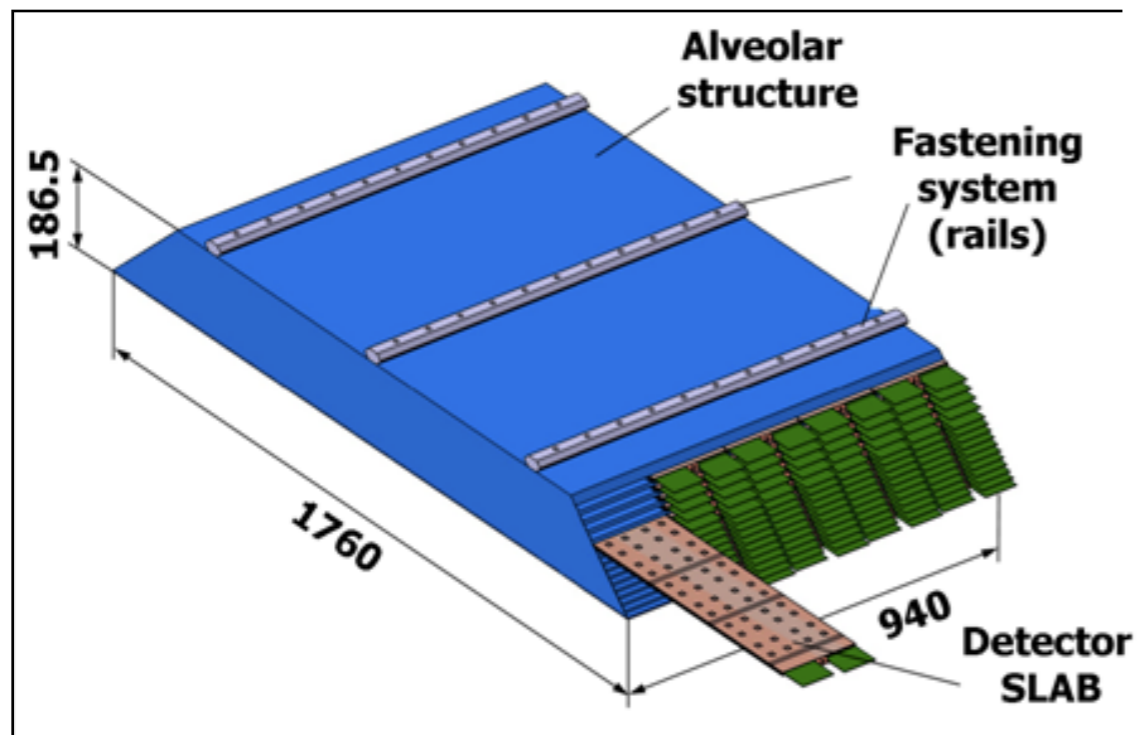
ILD-ECAL



Heat Shield, copper



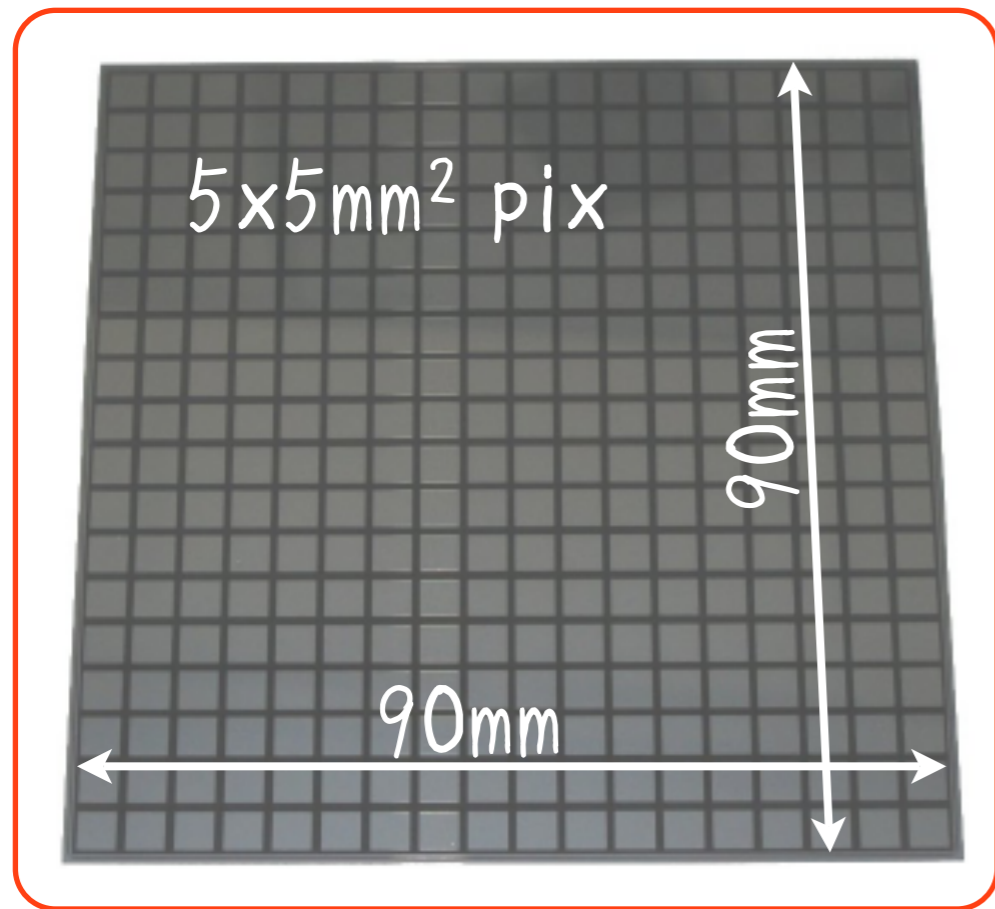
Si(-W)ECAL



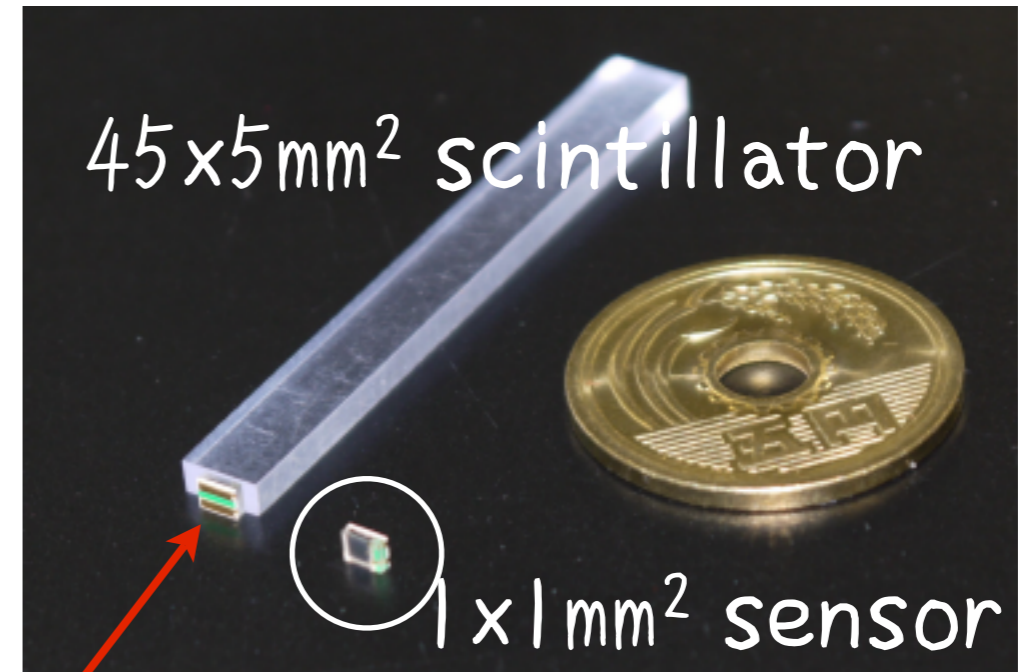
ScECAL

ILD-ECAL sensor

SiECAL



ScECAL



high resistive silicon sensor

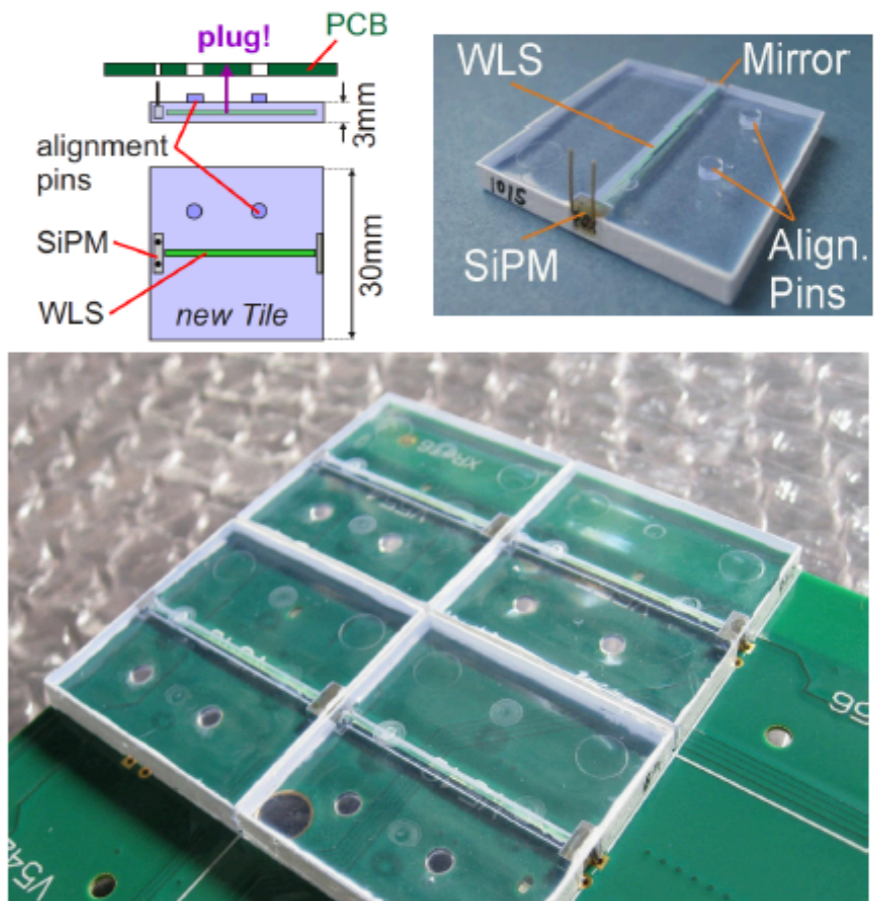
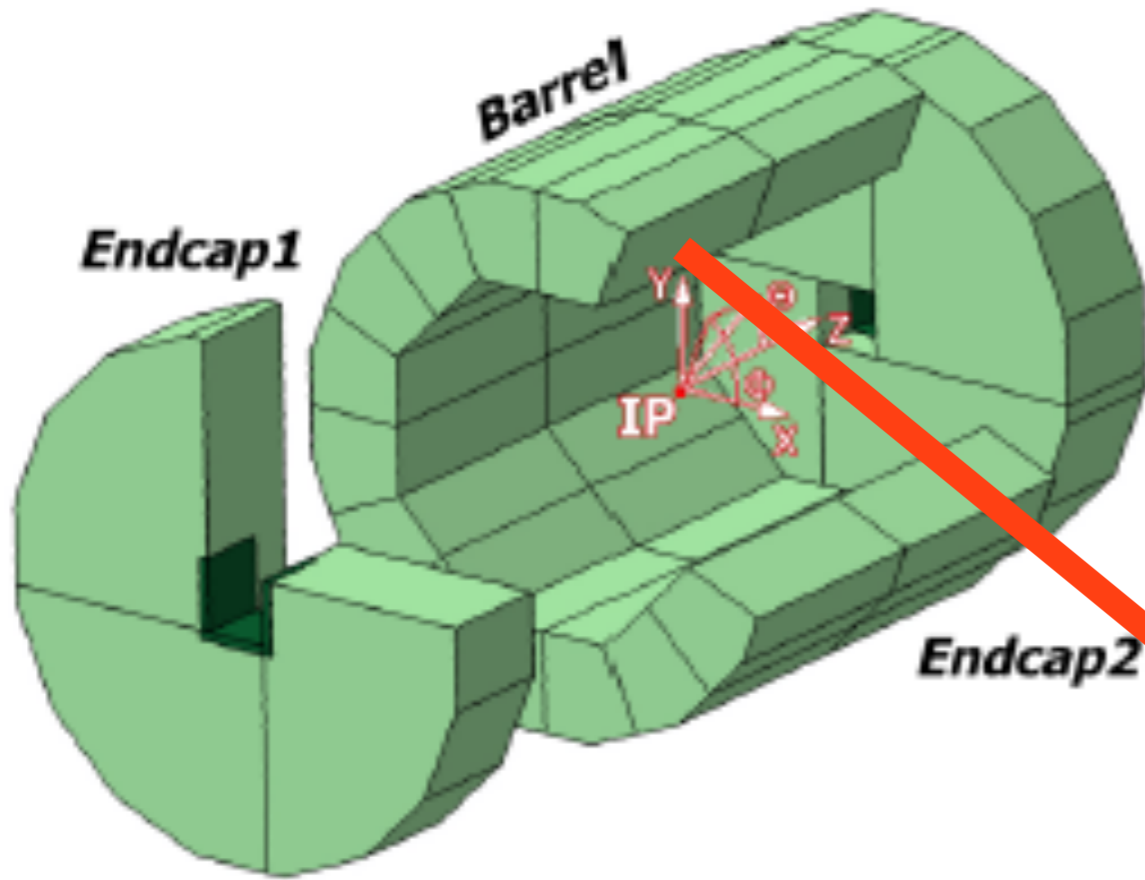
検出器全面がSiセンサー

極小のSiセンサー

ECAL の absorber は tungsten. 厚み 2 mm ~ 4 mm

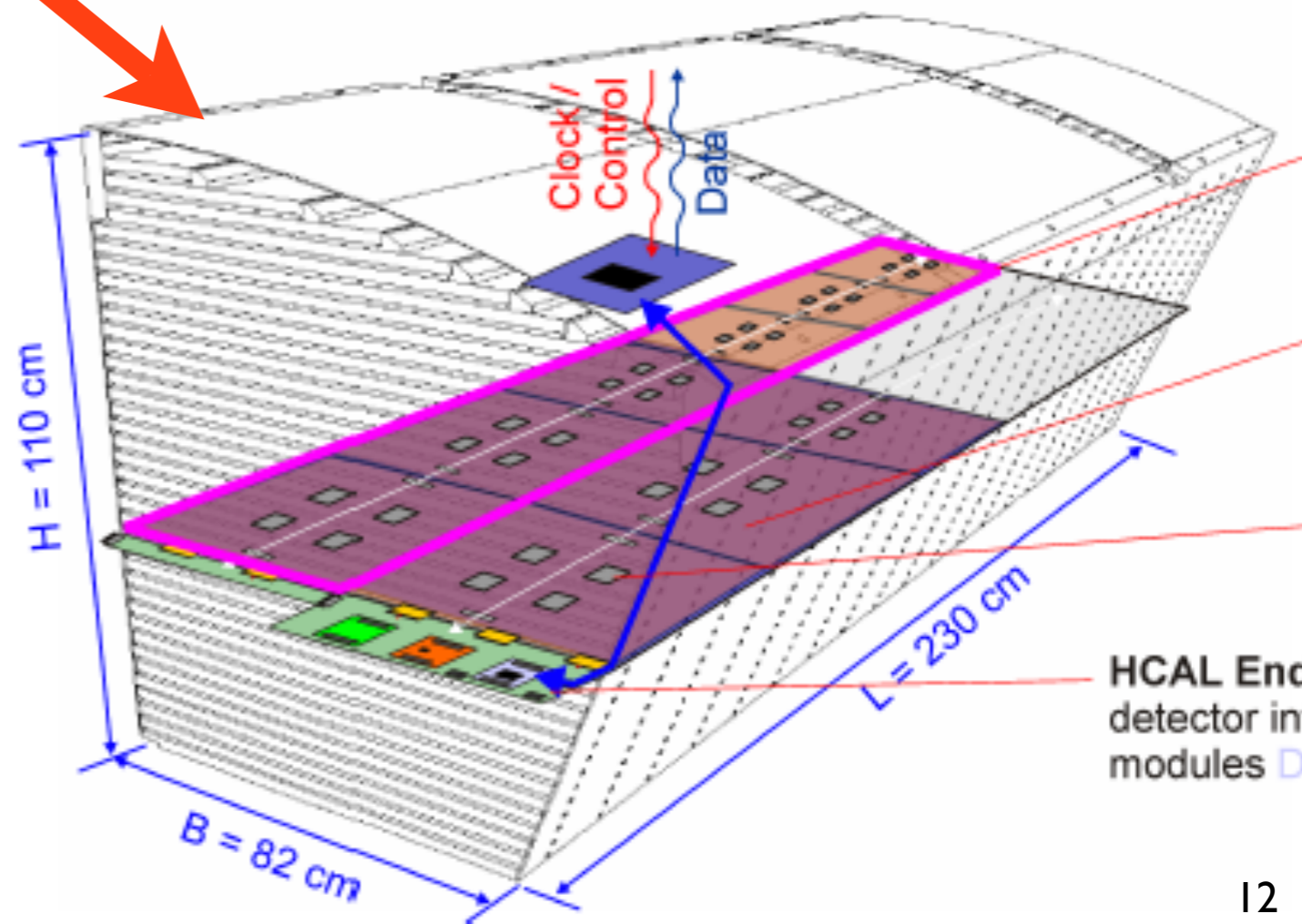
Moliere Radius 小さい, X_0 短い, λ_1 長い, ..cool!

1 LD-HCAL Analog HCAL

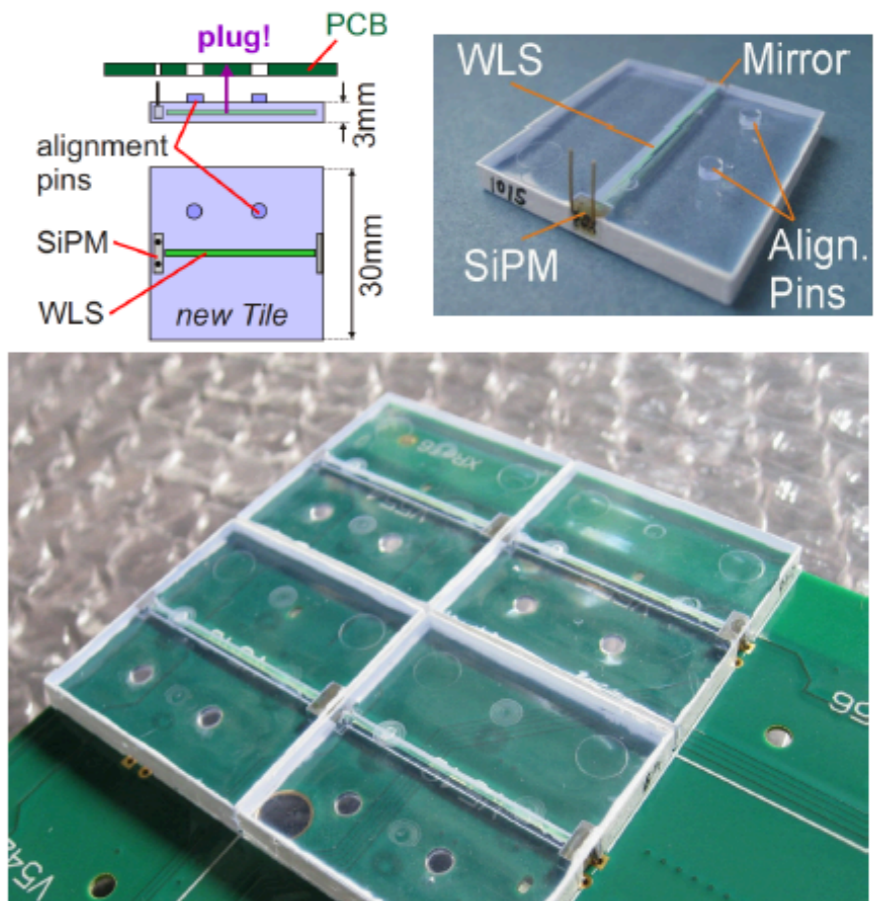
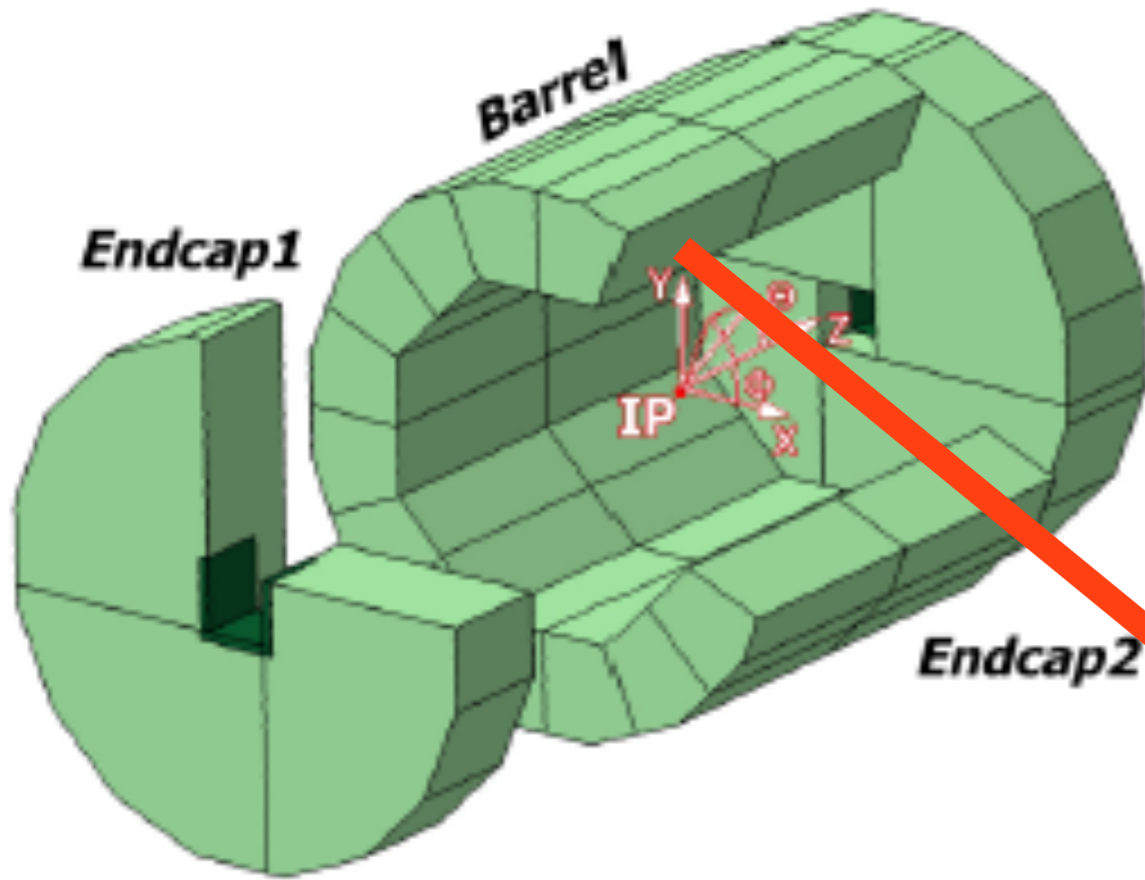


かたい, EM showerの様子も見たい

material	$\lambda_1(\text{cm})$	$X_0(\text{cm})$	λ_1/X_0
Fe	16.8	1.76	9.5
Cu	15.1	1.43	10.6
W	9.6	0.35	27.4
Pb	17.1	0.56	30.5

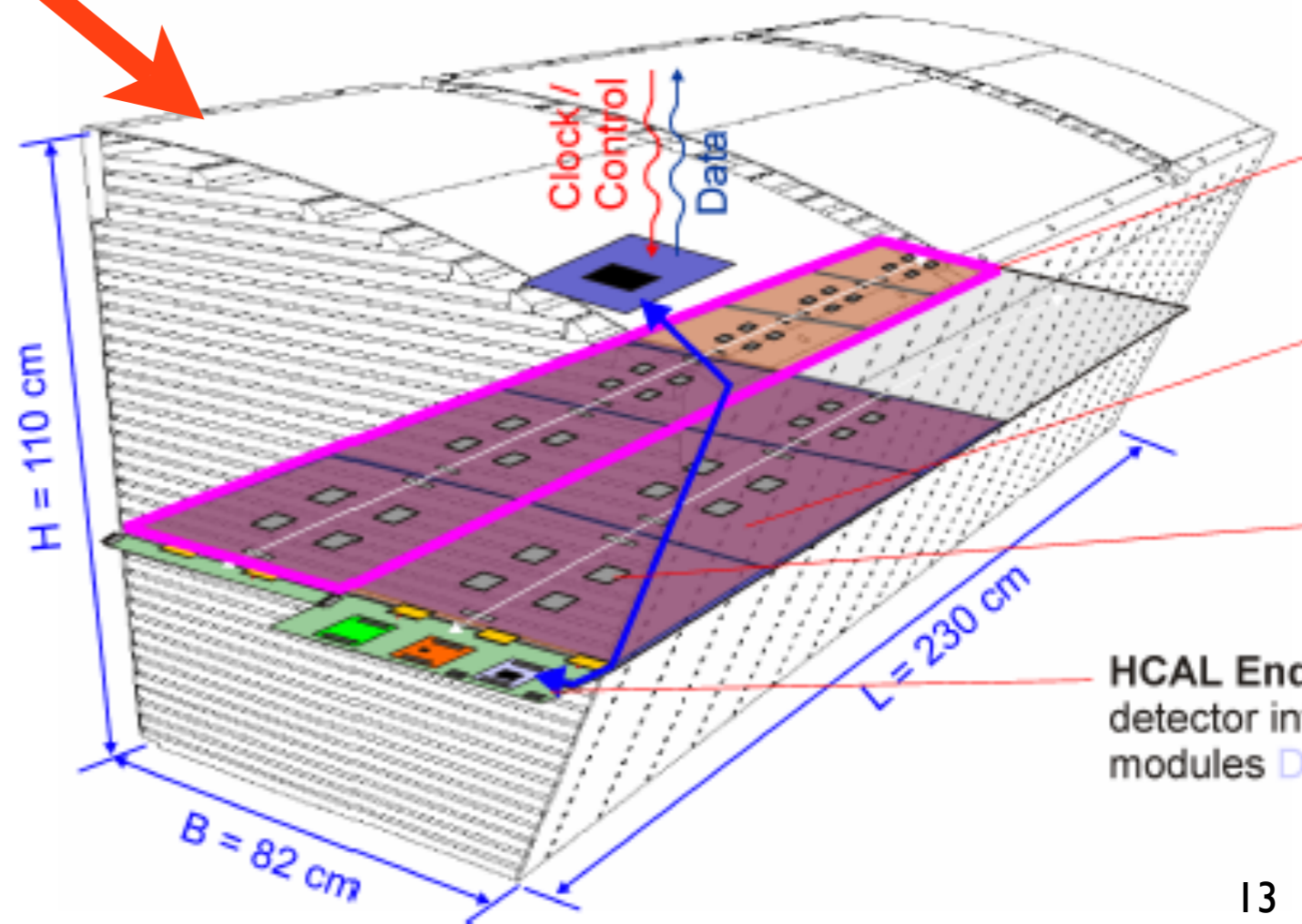


1 LD-HCAL Analog HCAL



かたい → Frame
EM showerの様子も見たい

material	λ_1 (cm)	X_0 (cm)	λ_1 / X_0
Fe	16.8	1.76	9.5
Cu	15.1	1.43	10.6
W	9.6	0.35	27.4
Pb	17.1	0.56	30.5



Digital HCAL
Semi Digital HCAL

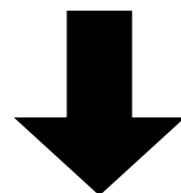
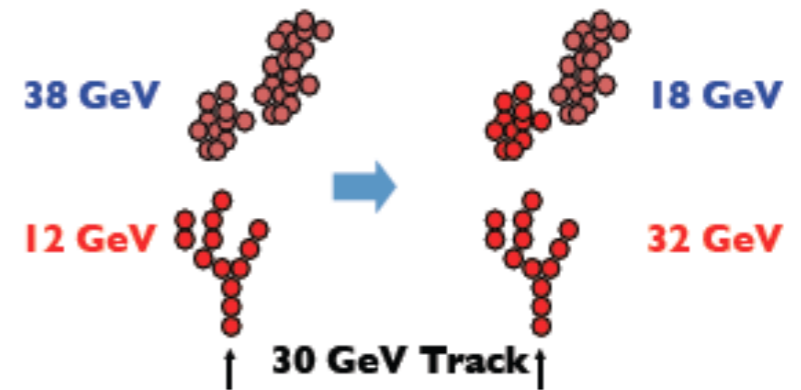
割愛.時間が余れば....

E, H-CALの細粒度

必要な granularity (細粒度)

粒子クラスターの識別

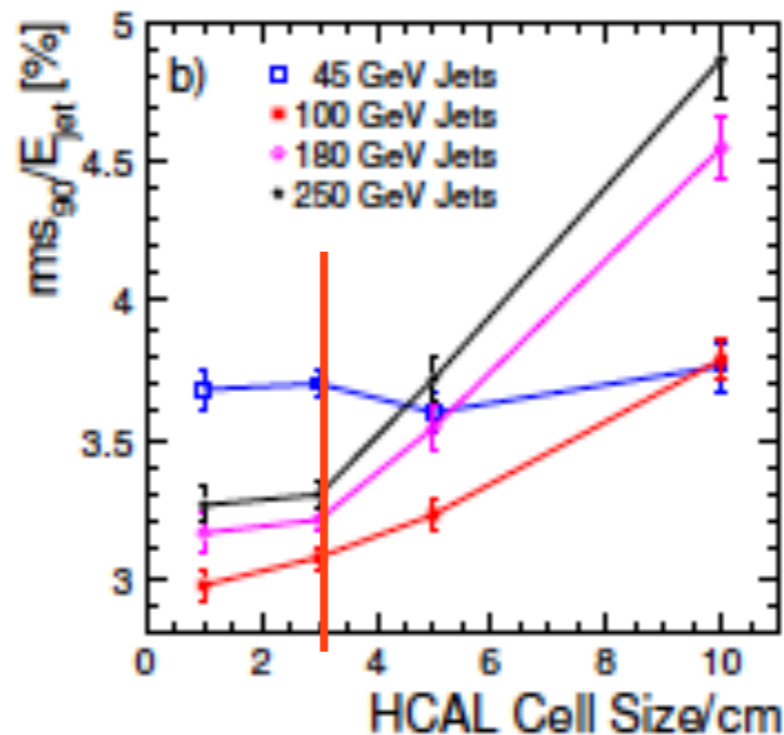
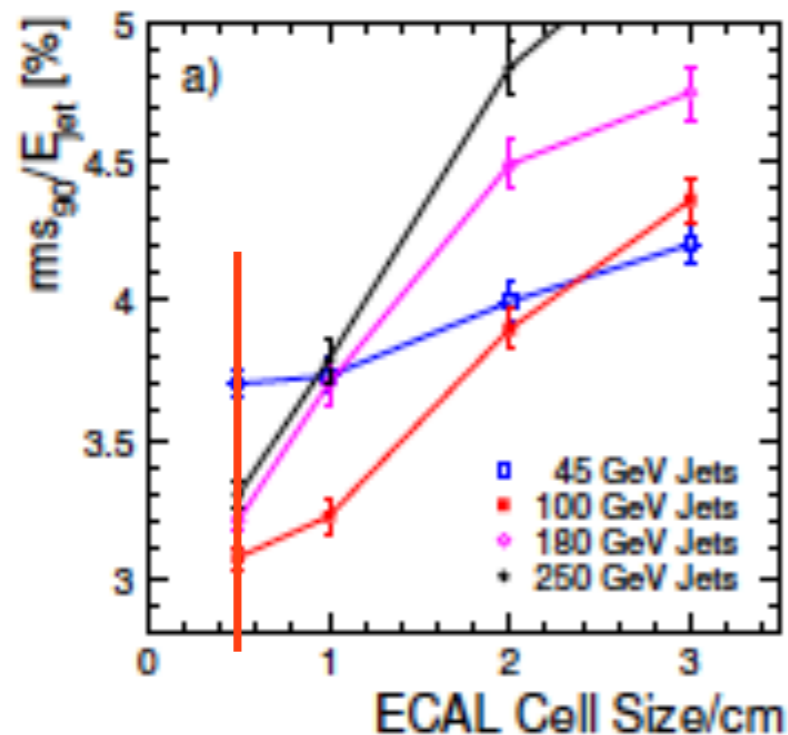
パターン認識への最適性



ECAL : $5 \times 5 \text{ mm}^2 \times 5 \sim 7 \text{ mm (含 W abs)} \times 30 \text{ 層}$

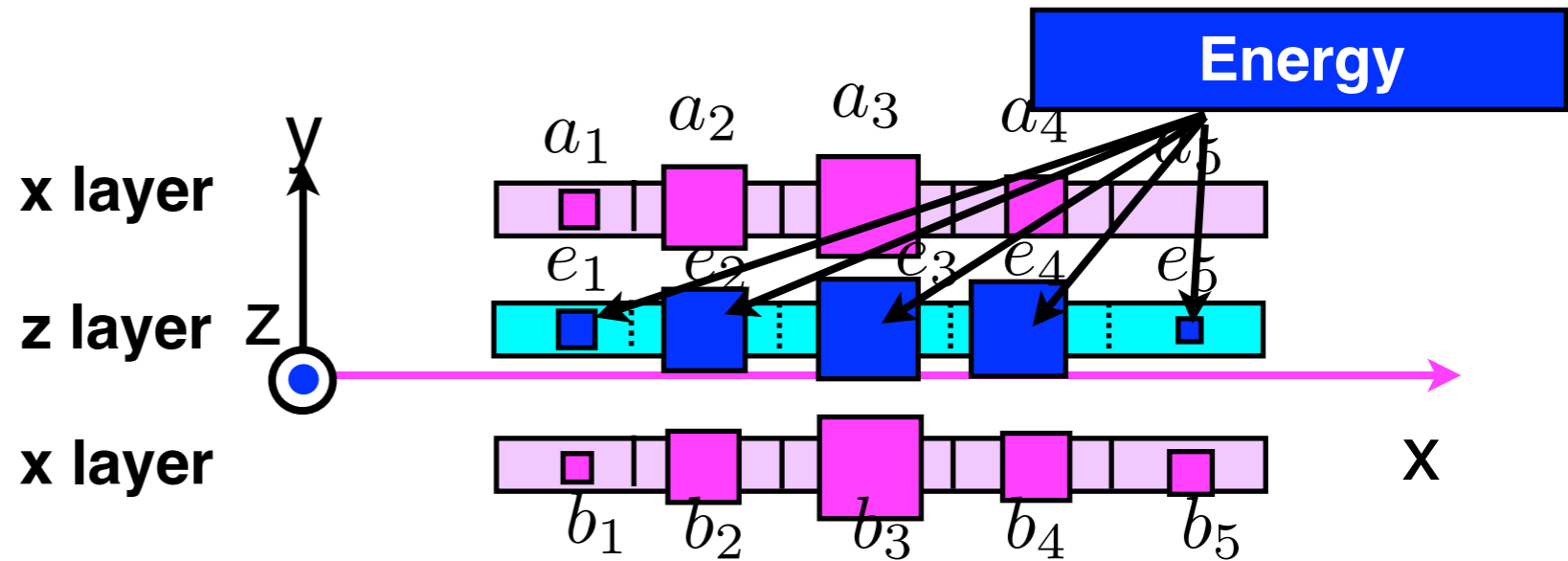
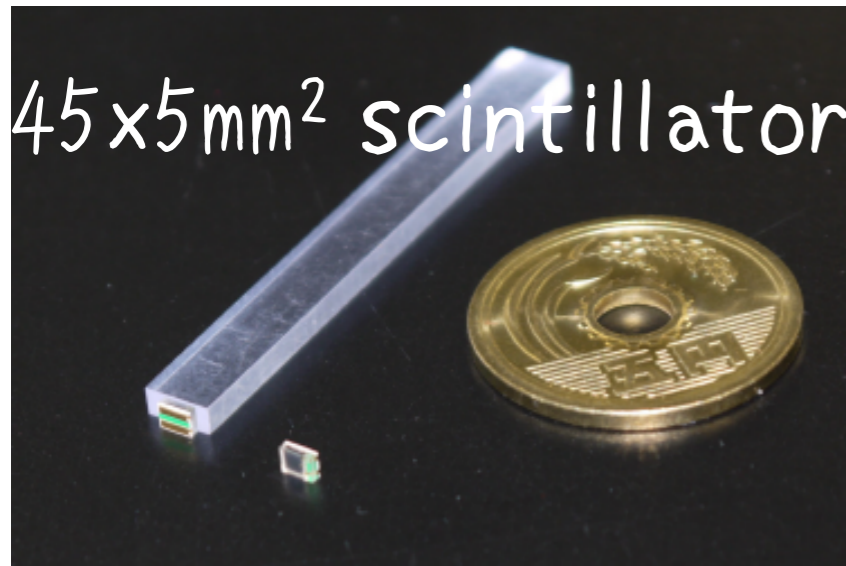
HCAL : $30 \times 30 \text{ mm}^2 \times 23 \text{ mm (含 Iron abs)} \times 48 \text{ 層}$

共に sampling cal.



- 3.5 T
- ECAL r_{\min} 1.85 m
- HCAL r_{\min} 2.04 m

Scinti.Strip で 5mm × 5mm



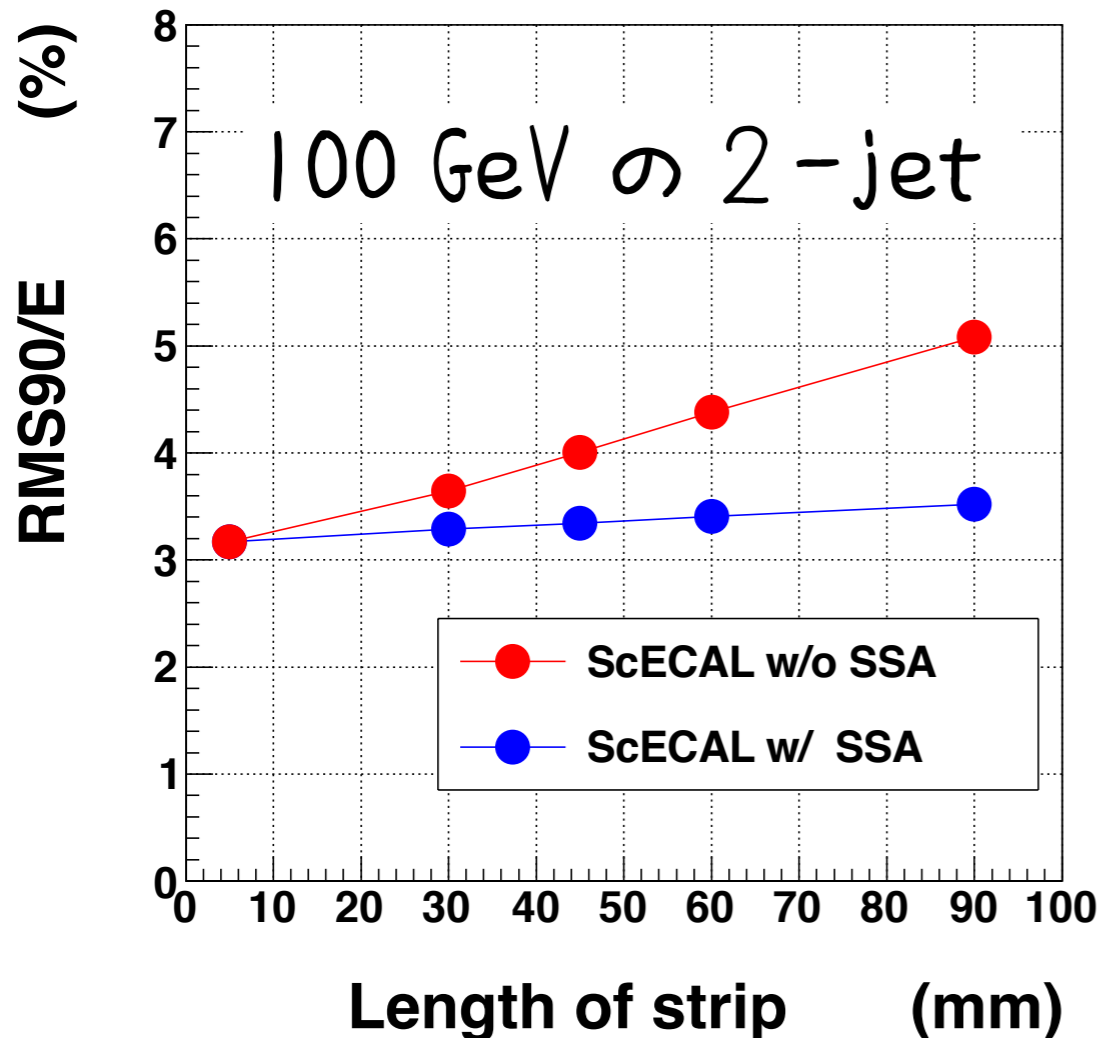
$$e_i = E_n \cdot \frac{a_i + b_i}{\sum a_i + \sum b_i}$$

Strip Splitting Algorithm

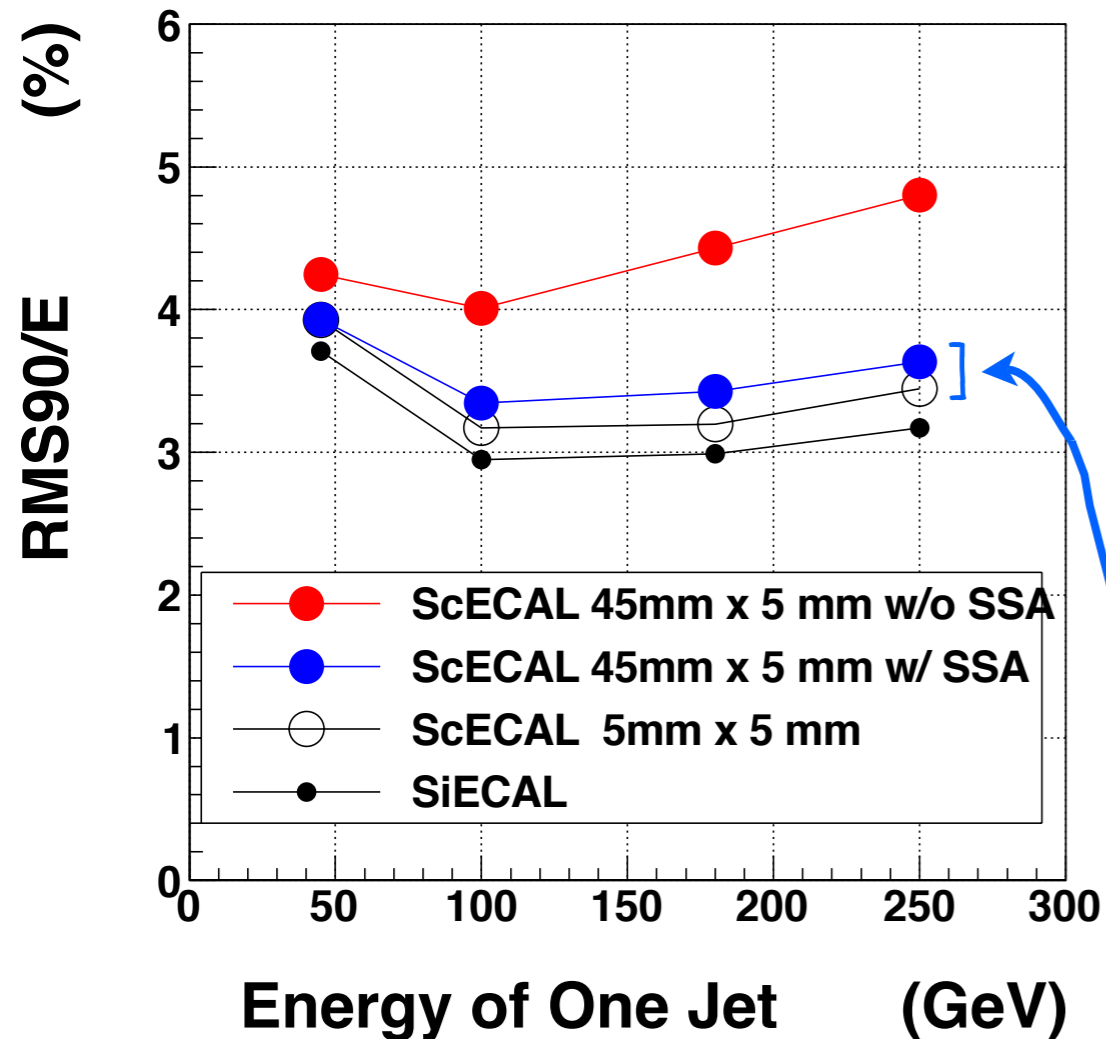
当該 strip と交わる上下層 strip の energy deposit を重みとして当該 strip の energy を
 仮想 正方セルに割り振るだけ



energy 分解能の strip 長依存性は大幅に押さえられる



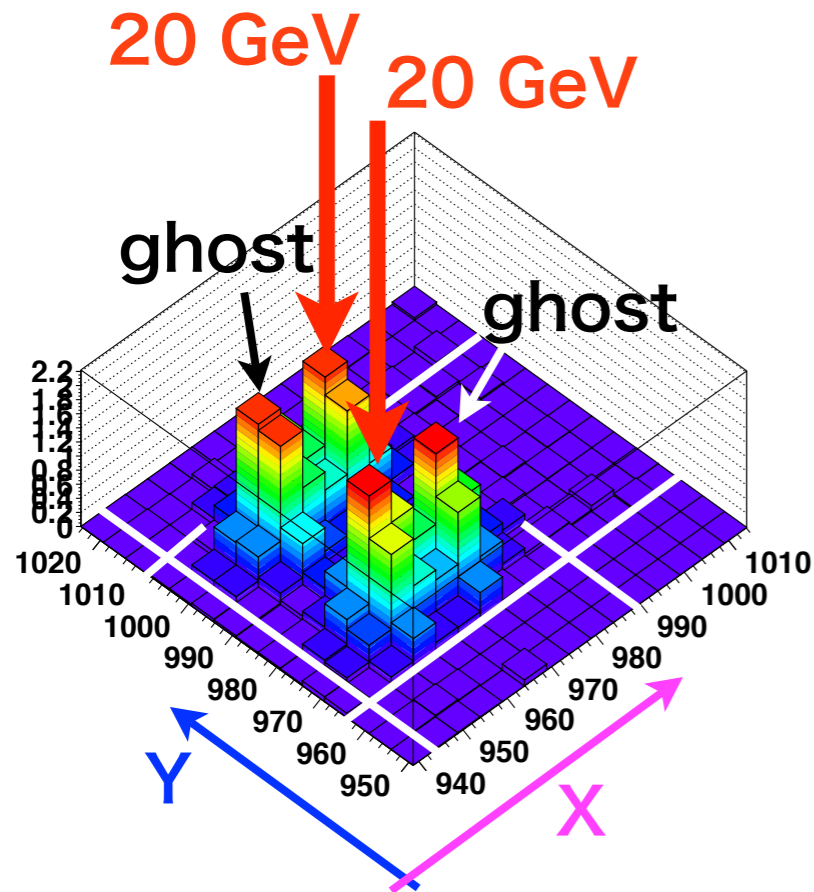
Jet Energy Resolution の jet energy についての依存性



- ● → ○ : JER は SSA で大幅に改善されている。特に高エネルギーでの改善が著しい。
- ○ → ● : 5 mm x 5 mm SiECAL と 5 mm x 5 mm ScECAL の差は現在なくなっている。
- ● → ○ : 45 mm x 5 mm strip scinti. の分解能と 5 mm x 5 mm 正方 scinti. の分解能は, SSA でほぼ同等となる。
とはいえ, まだ無視できない差が残っている。

さらなる改善のために...

SSA に残る問題は ゴースト

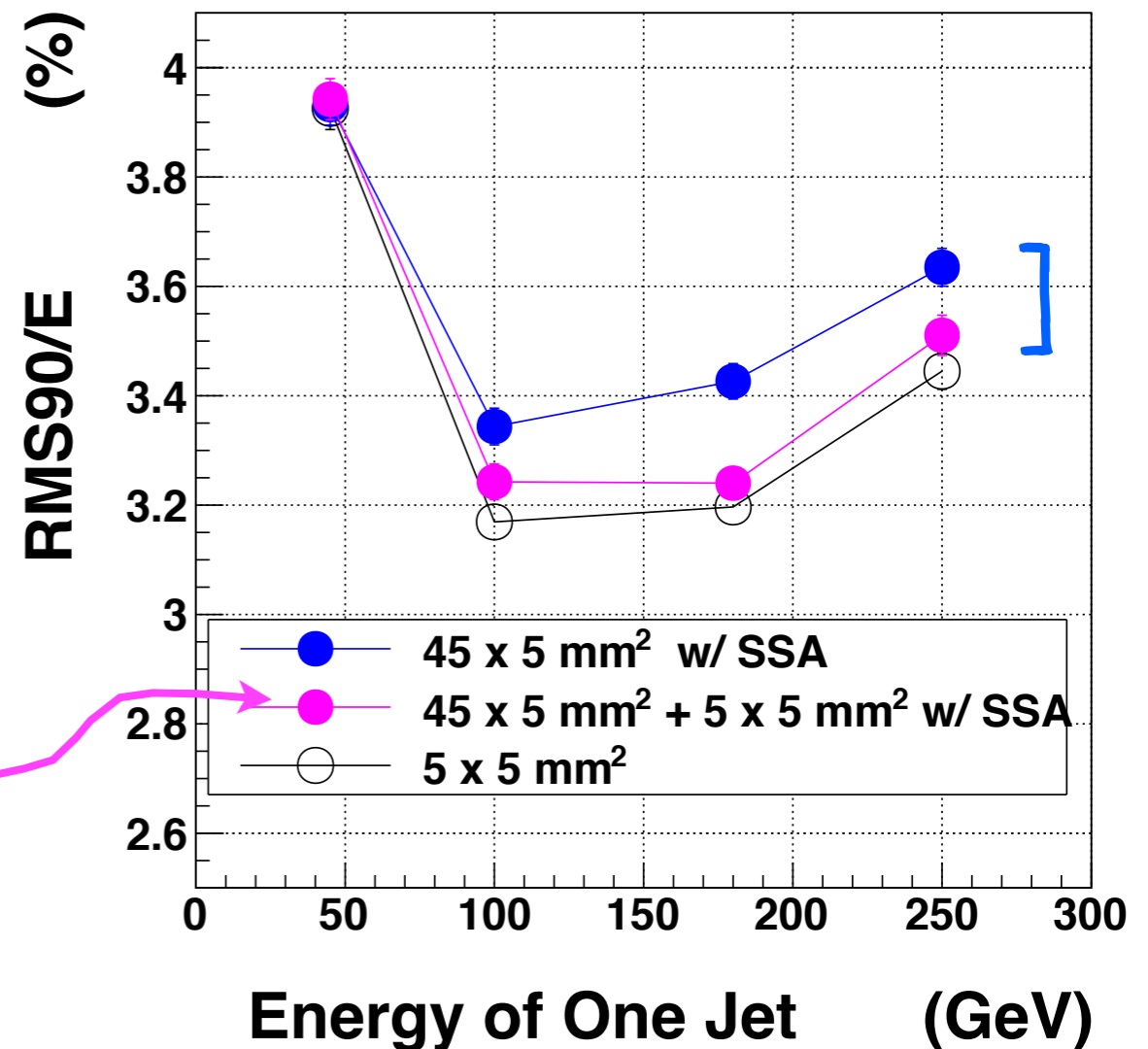


解決法

5 x 5 mm² 正方セルの層を間に入れる

5 x 5 mm² 正方セルの層を **SiECAL層** で

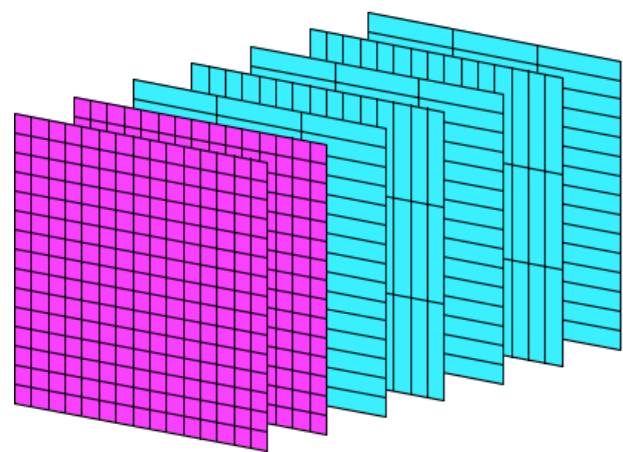
= Hybrid ECAL!



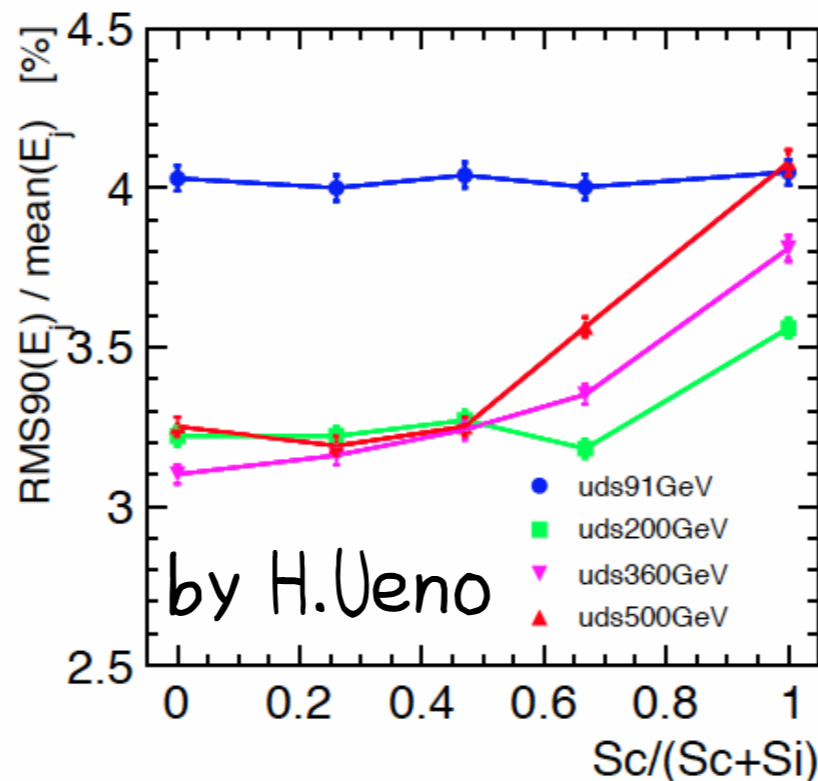
コスト面からみたHybrid



コストを現実的なものにするための Hybrid



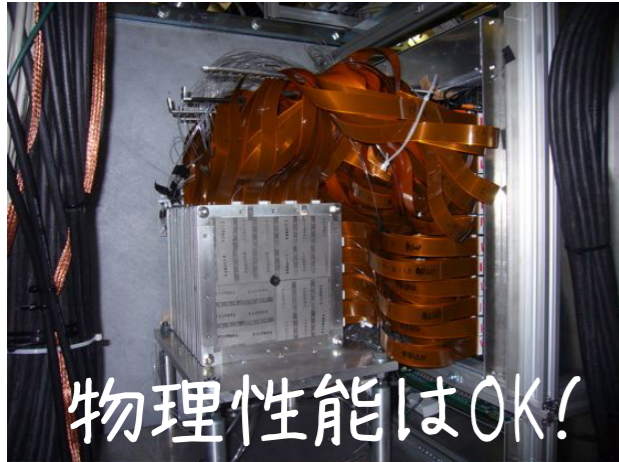
前にSi層, 後ろにSc層
を置く configuration



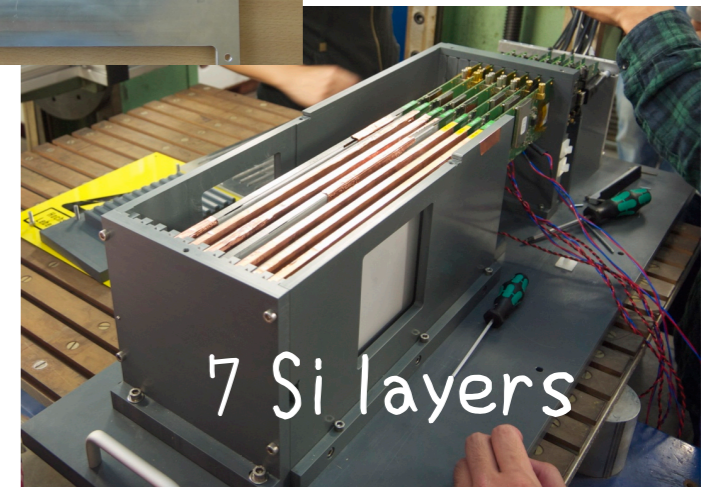
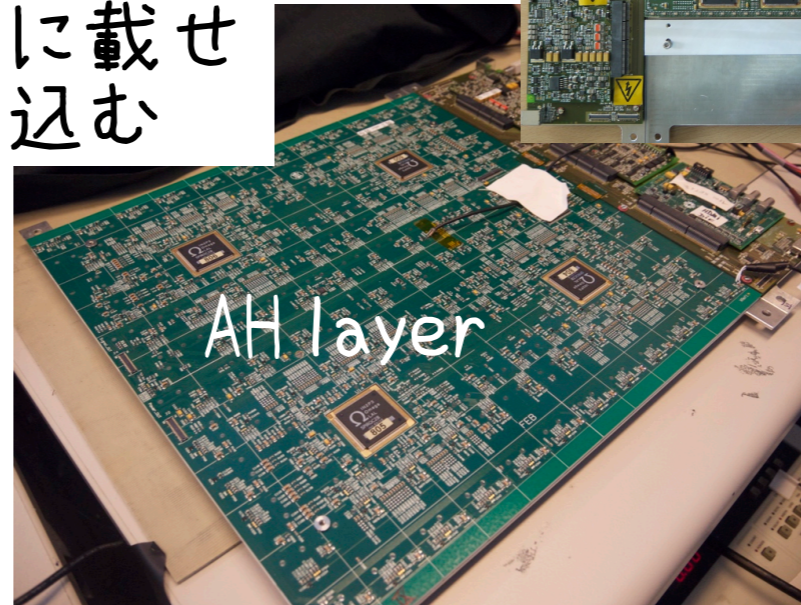
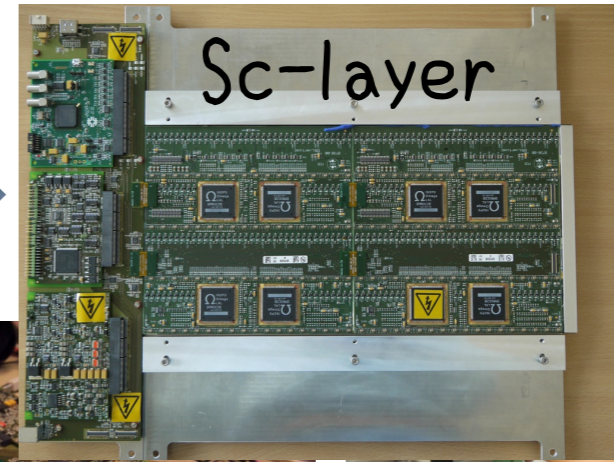
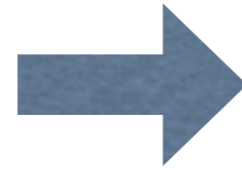
半分Sc-strip にしても
JERは変わらない。

課題(進行中)

Physics Prototype



読み出し
Bias 制御
AMP, ADC,
monitoring LED
全てボードに載せ
層間に挟み込む



2013 7月6-14日 DESY TB
Technological Prototype

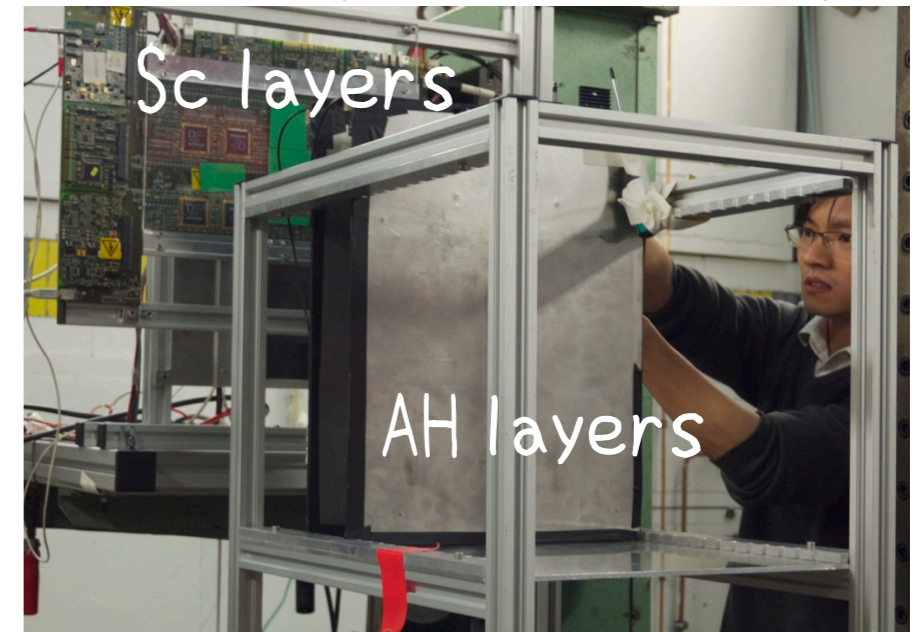
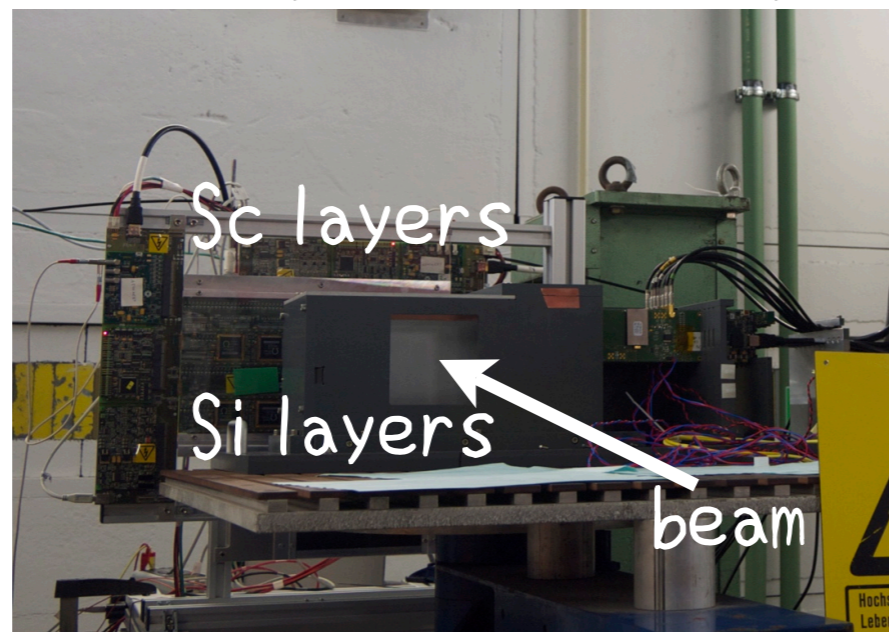
不安定さが残る。
まだ厚い 目標0.8 mm.

7 Si layers + 2 Sc layers

2 AHCAL layers + 2 Sc layers

2 種類 layer
の同期測定

Si + Sc
Sc + AHcal

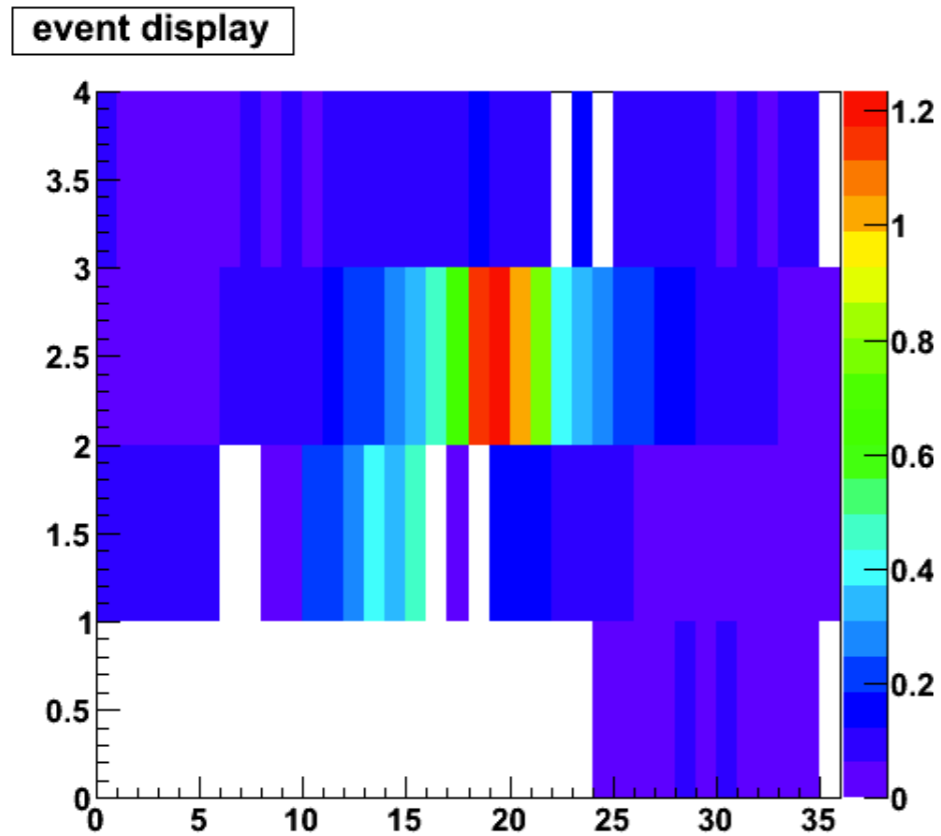


まとめ

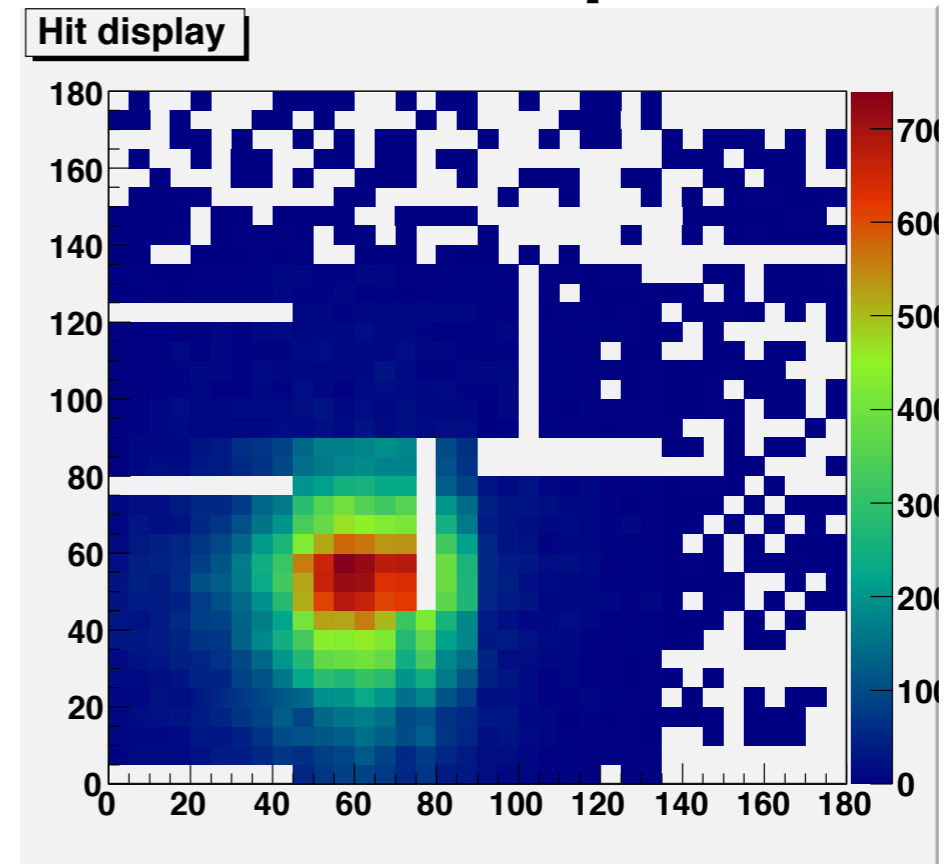
- ILD calorimetry は Particle Flow Algorithm を採用,
- PFA 無しの場合の2倍以上よい jet energy 分解能,
- PFA のための細分化,
 - Ecal $5 \times 5 \text{ mm}^2 \times 5 \sim 7 \text{ mm}$ 分割 (30 層),
 - HCAL $30 \times 30 \text{ mm}^2 \times 23 \text{ mm}$ 分割 (48 層),
- CALICE-ASIA は SiECAL, ScECAL, hybrid-ECAL, さらに Sc-strip HCAL を開発中,
- 実機制作を考慮した Technological prototype の phase \wedge ,
 - ☆ 課題: 読み出し系のコンパクト化もう一息,
MPPC/Scintillator系デザインの詰...

2012年, 2013年テストビーム

2012年

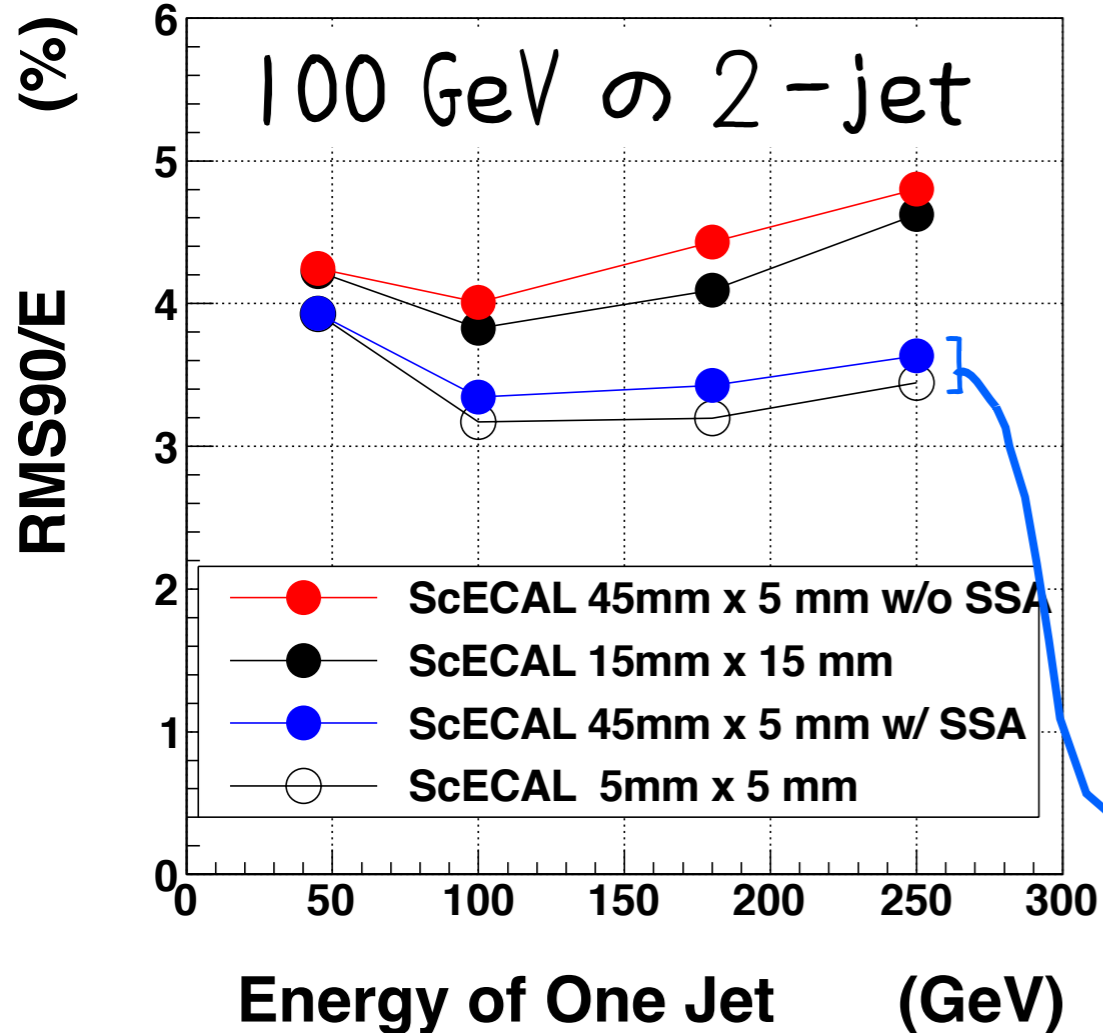


2013年



by T.Ogawa

Jet Energy Resolution の jet energy についての依存性



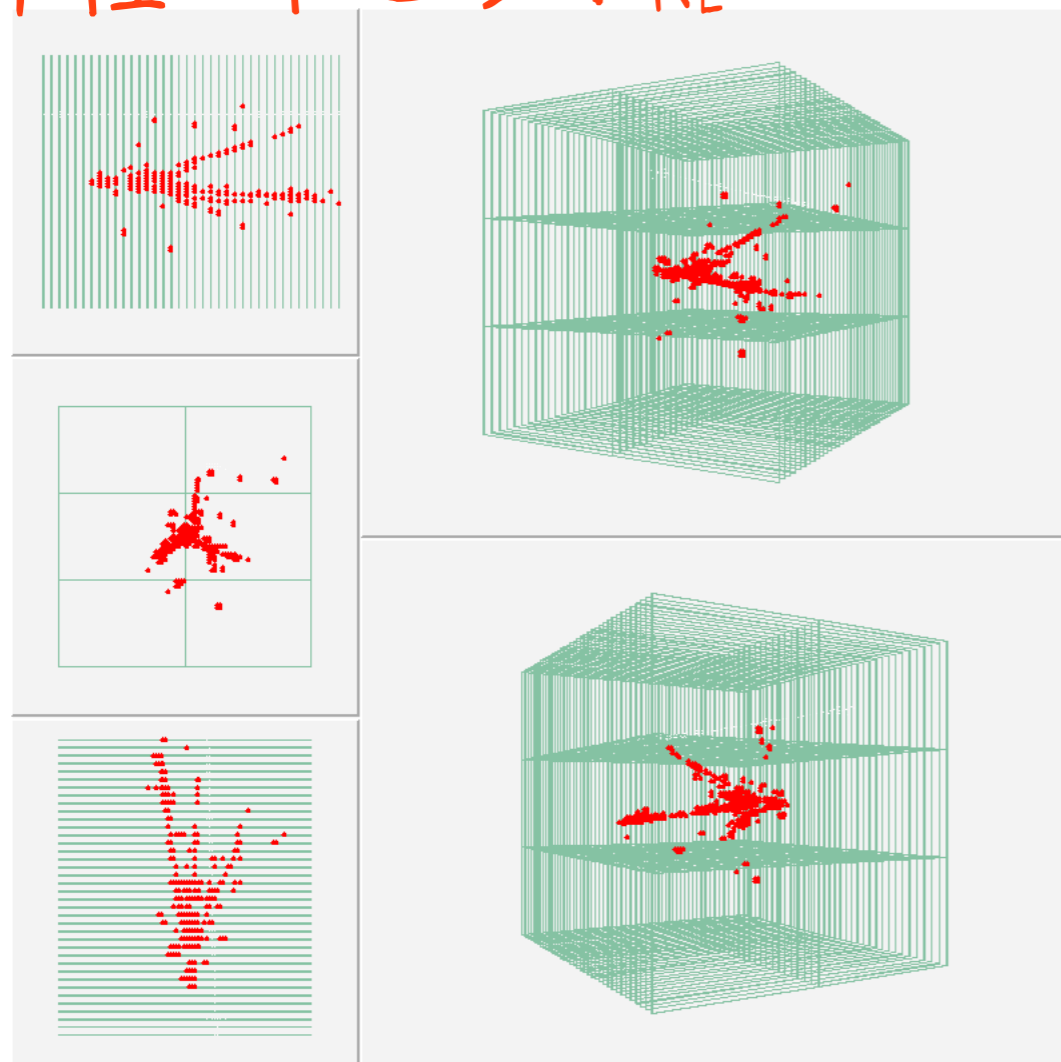
- ● → ● : JER は SSA で大幅に改善されている。特に高エネルギーでの改善が著しい。
- ● → ● : 面積が同等の 15 mm x 15 mm 正方 scinti. の分解能と比べても 45 mm x 5 mm strip + SSA は良い分解能を持つ
- ● → ○ : 45 mm x 5 mm strip scinti. の分解能と 5 mm x 5 mm 正方 scinti. の分解能は, SSA でほぼ同等となる。とはいえ, まだ無視できない差が残っている。

RPC-DHCAL (for SiD)

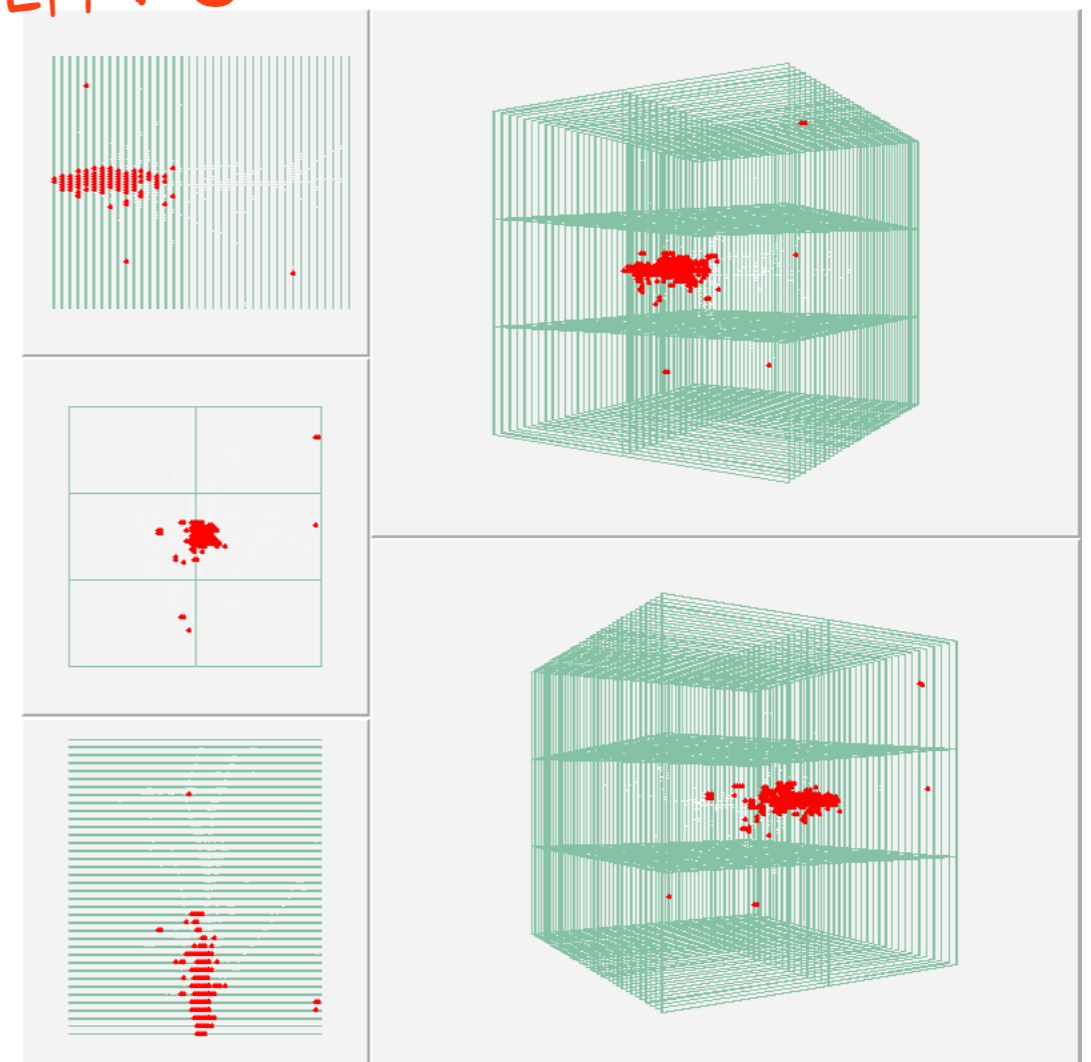
PFA にとって、**クラスター分離**と **interaction 弁別**が重要
∴**細分割度が重要**.

Energy は、細分割度をあげれば、hit 数だけでもはかれる
という思想： $1 \times 1 \text{ cm}^2 \text{ pad}$

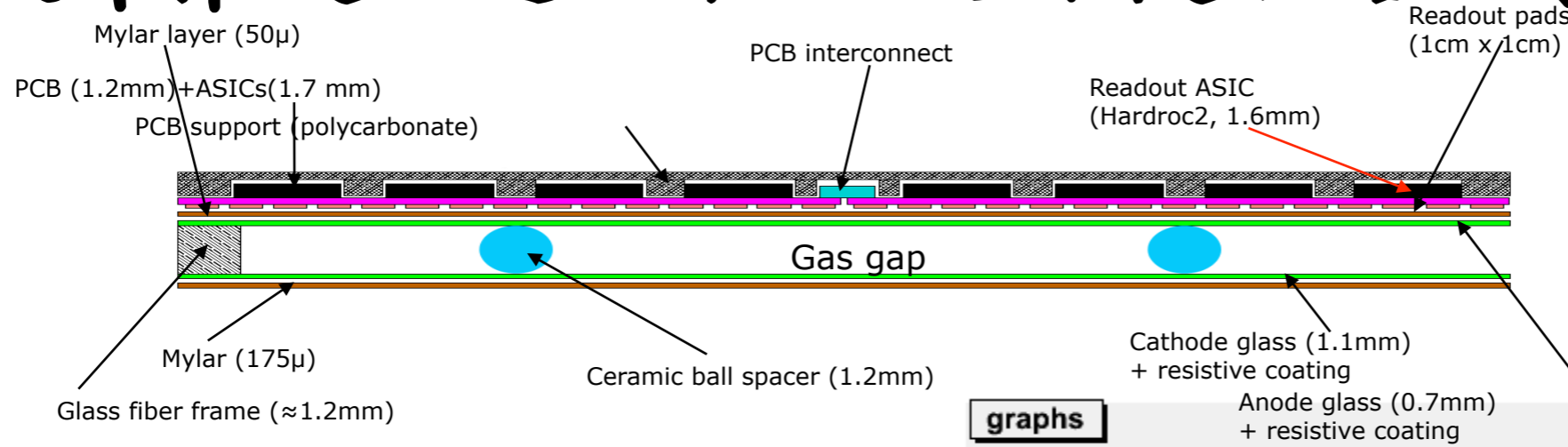
中性ハドロン： K_L



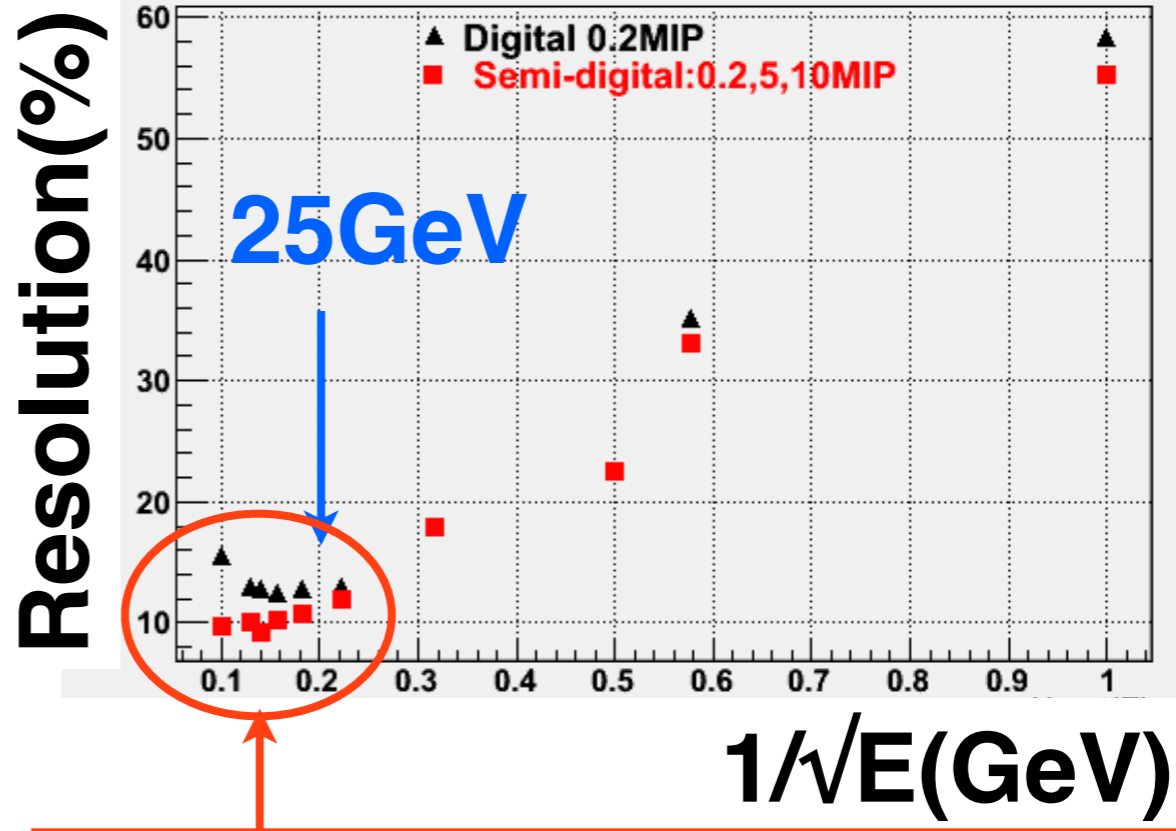
EM： e^+



GRPC-semi-DHCAL (ILD)



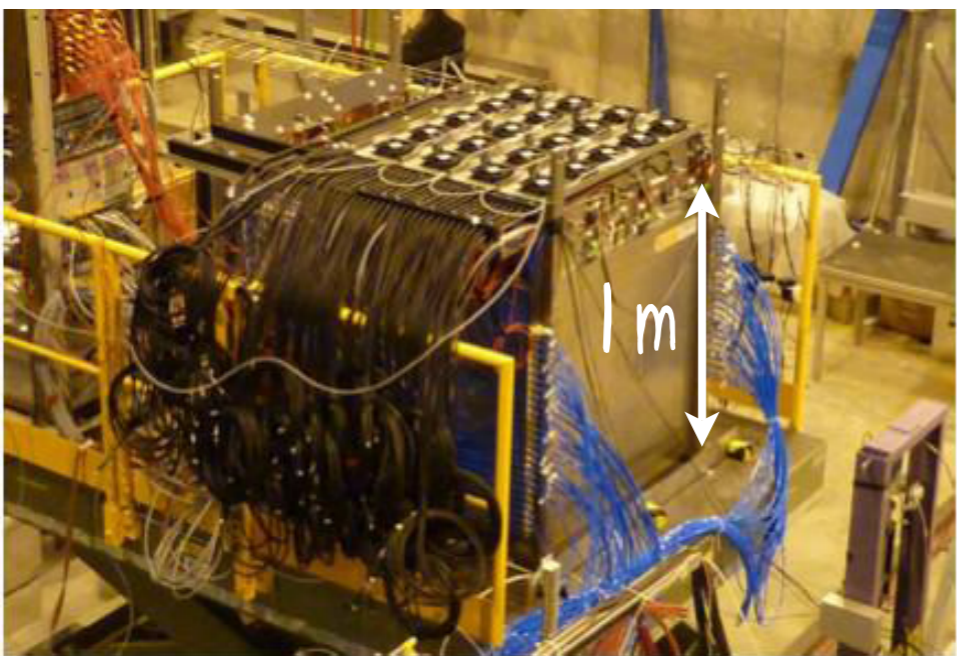
graphs simulation



さすがにhit数だけではenergy resolutionが出せないだろう....



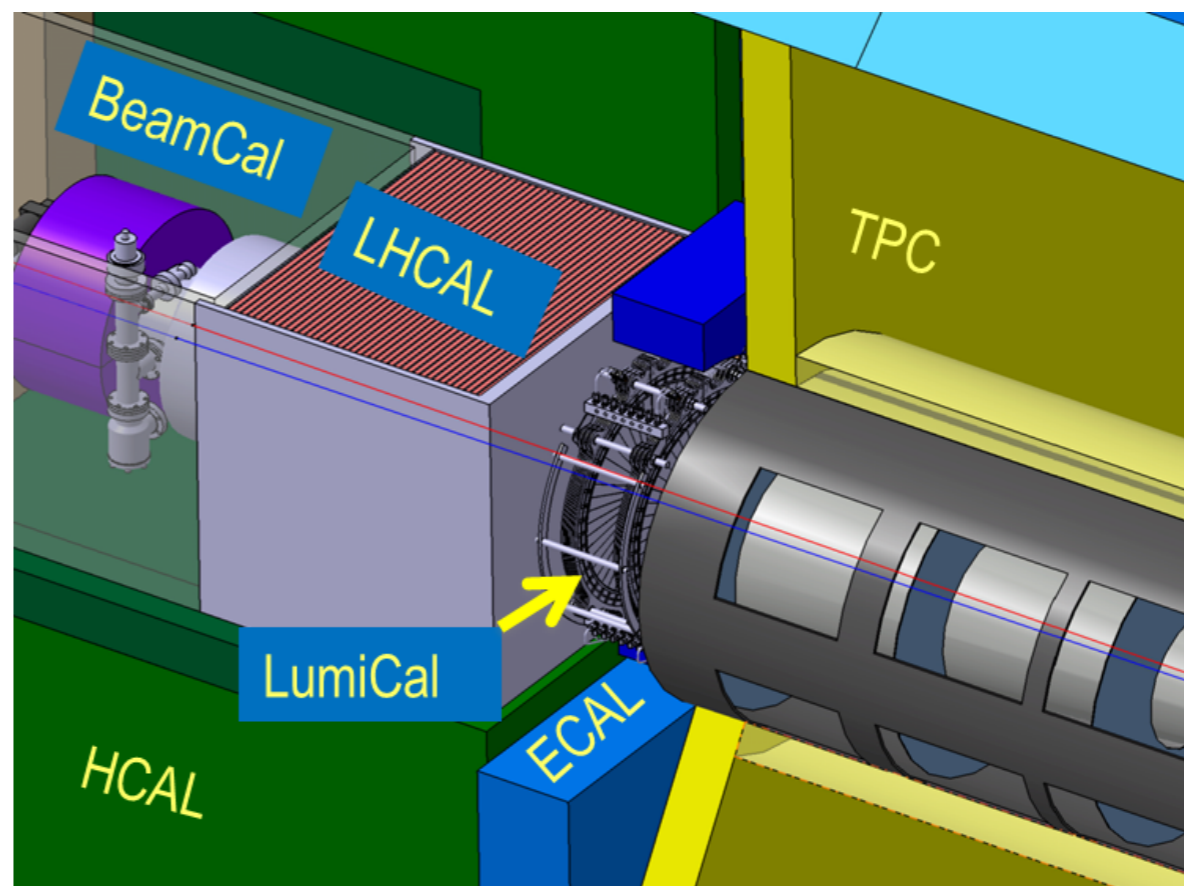
3 stepのthresholdなら....



Digitalでは25 GeV以上でresolutionが悪くなるが、0.2, 5, 10の3 step thresholdで、resolutionは良くなる。

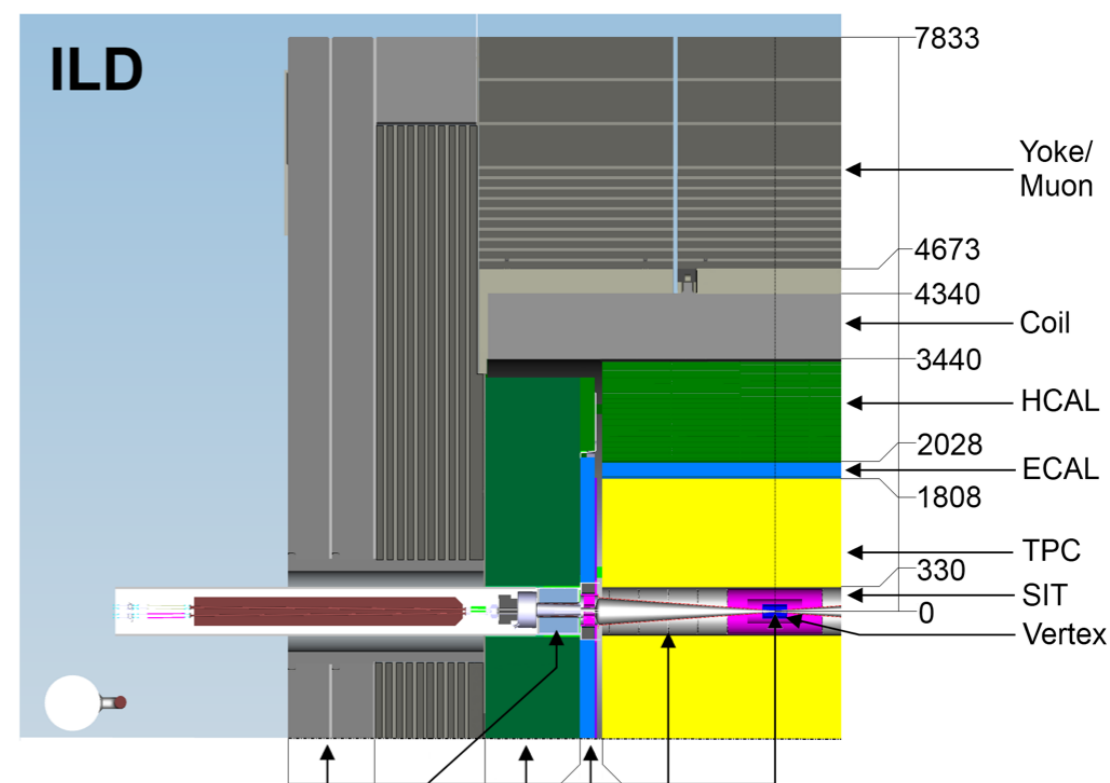
E/H-CAL 以外のCAL

- LumiCal
beam ルミノシティー
(10^{-3} の精度@ 500 GeV \sqrt{s})
- BeamCal
bunch 毎のルミノシティー
fast feed back system
- LHCAL
Low angle HCAL



Muon system = Return yoke

$(7-10) \times (25-30) \times (\sim 2700) \text{ mm}^3$
plastic scintillator



ILD の E/H-CAL

ECAL : $5 \times 5 \text{ mm}^2 \times 3\text{-}6 \text{ mm}$ (含W abs) $\times 30$ 層

HCAL : $30 \times 30 \text{ mm}^2 \times 25 \text{ mm}$ (含Iron abs) $\times 40$ 層

よく似たコンセプトの LHC detector

CMS の ECAL

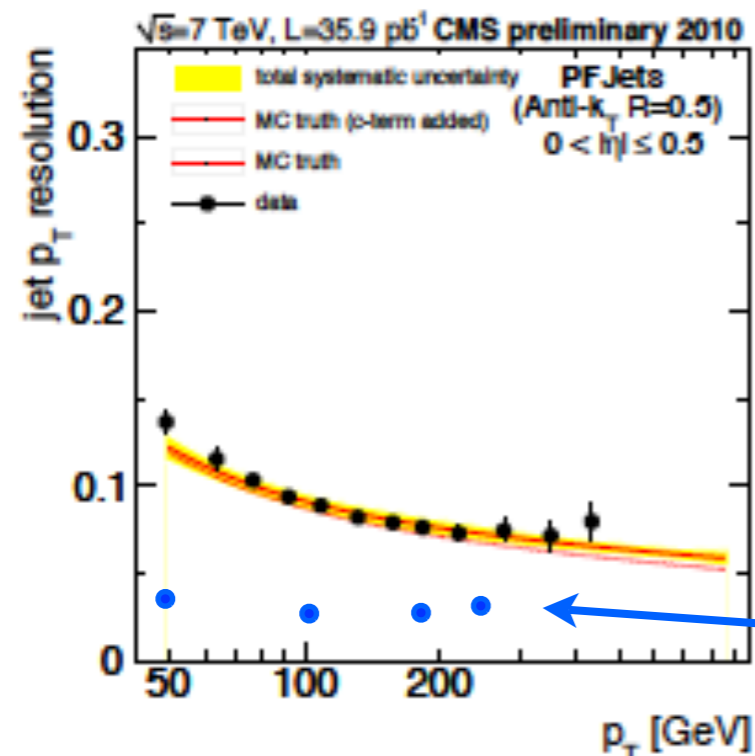
$21.8 \times 21.8 \text{ mm}^2 \times 230 \text{ mm}$, PbWO_4 $r = 1240 \text{ mm}$

単粒子 energy resolutionは非常に良い: $2.7\%/\sqrt{E}$

ILD ECAL は $\sim 15\%/\sqrt{E}$

CMS の HCAL

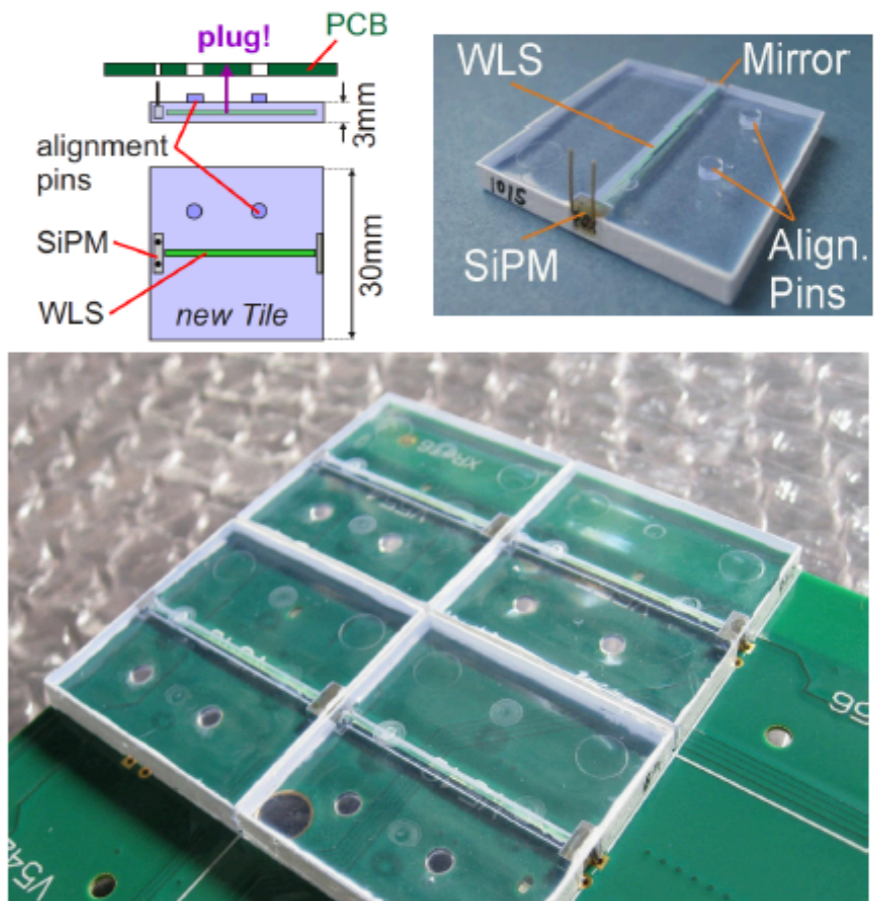
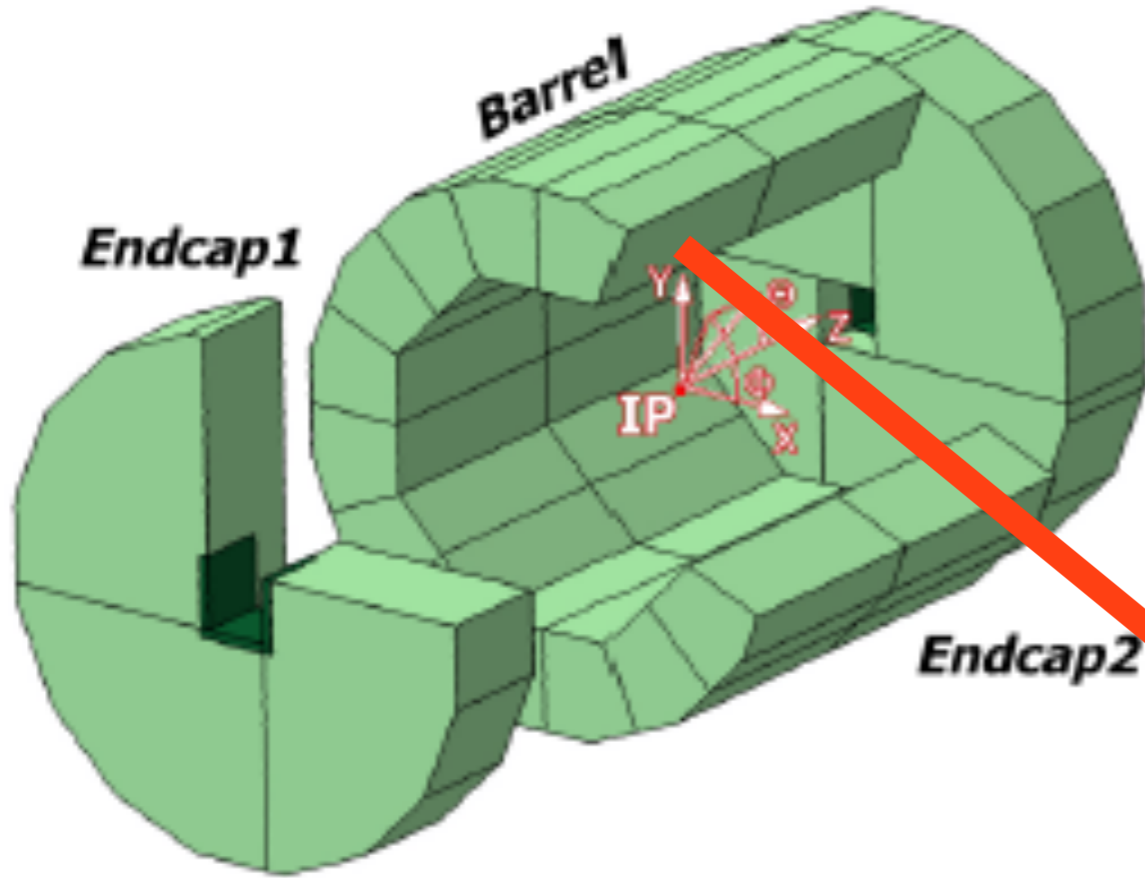
$200 \times 200 \text{ mm}^2 \sim \times 50 \text{ mm}$ Cu abs + 4mmscinti.,
 $r_{\text{min}} = 1.8 \text{ m}$



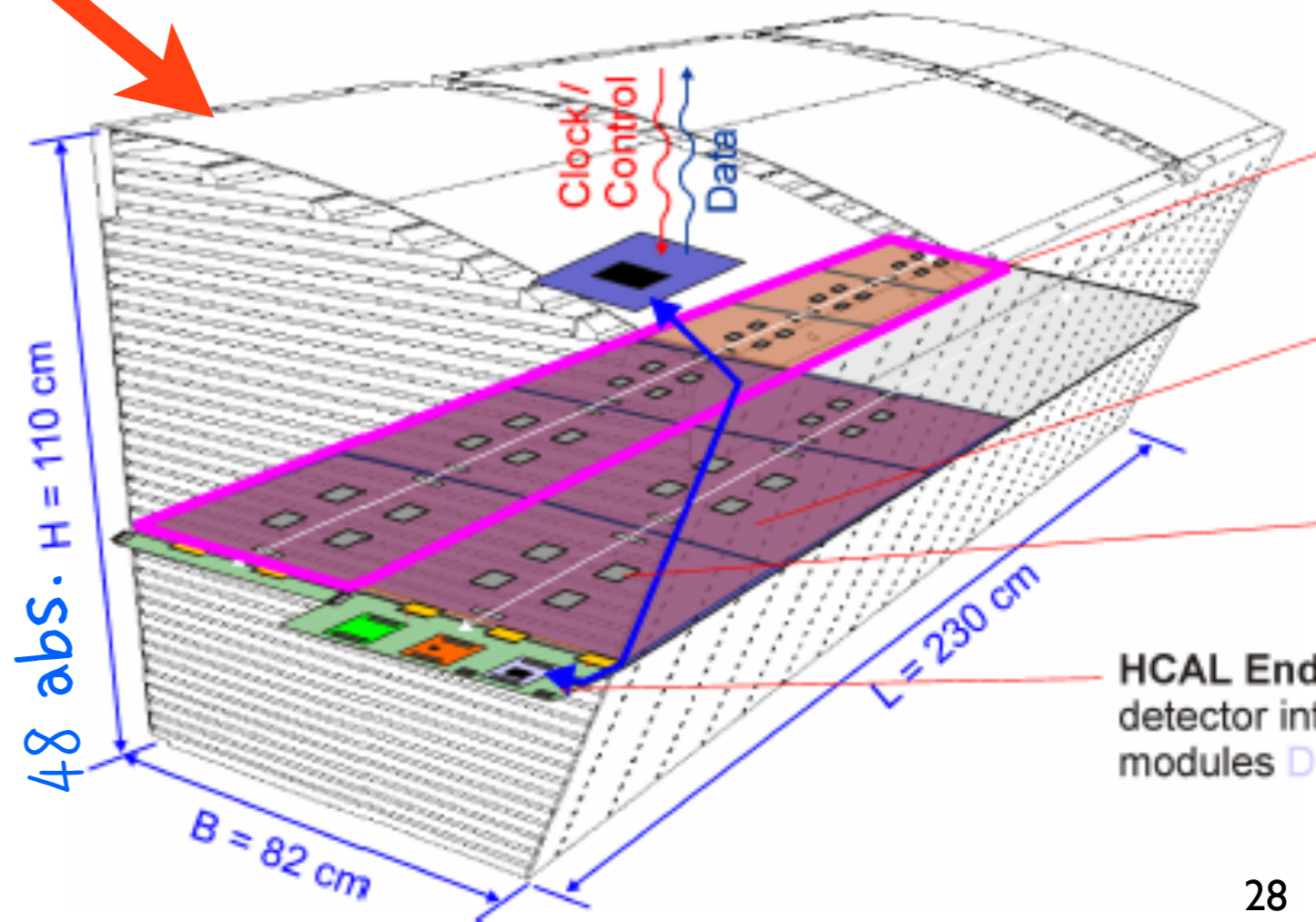
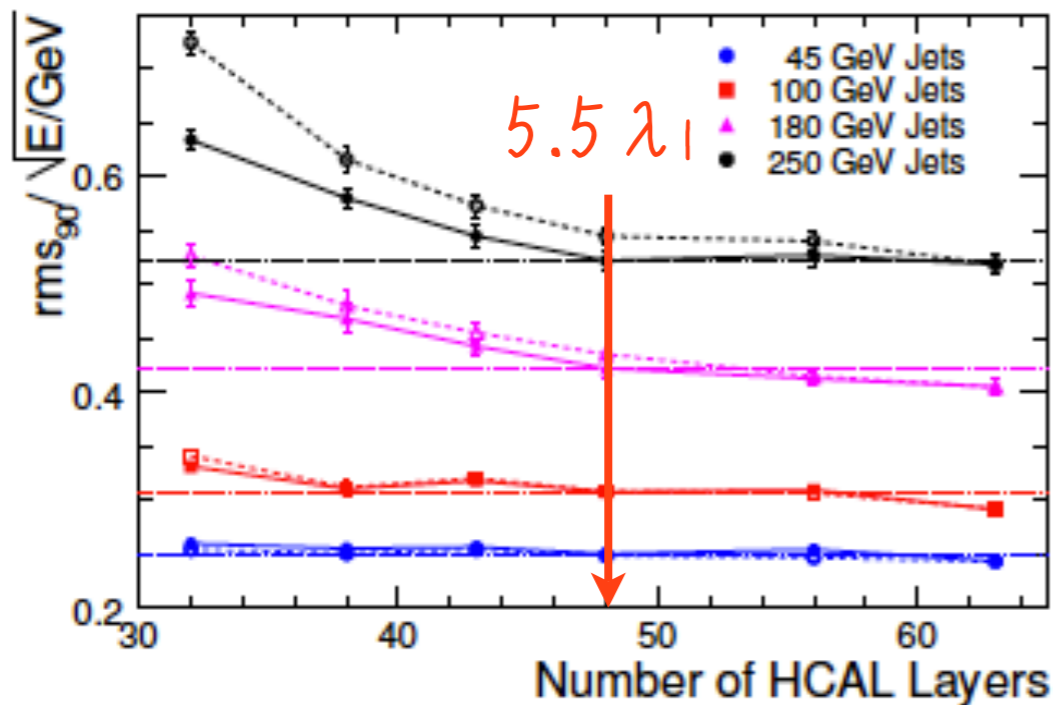
ILD calorimetry の Jet energy 分解能
(in 2-jet events)

Jet energy (GeV)	45	100	180	250
J.E.R.	0.035	0.030	0.030	0.033

ILD-HCAL Analog HCAL



何層つくるか？

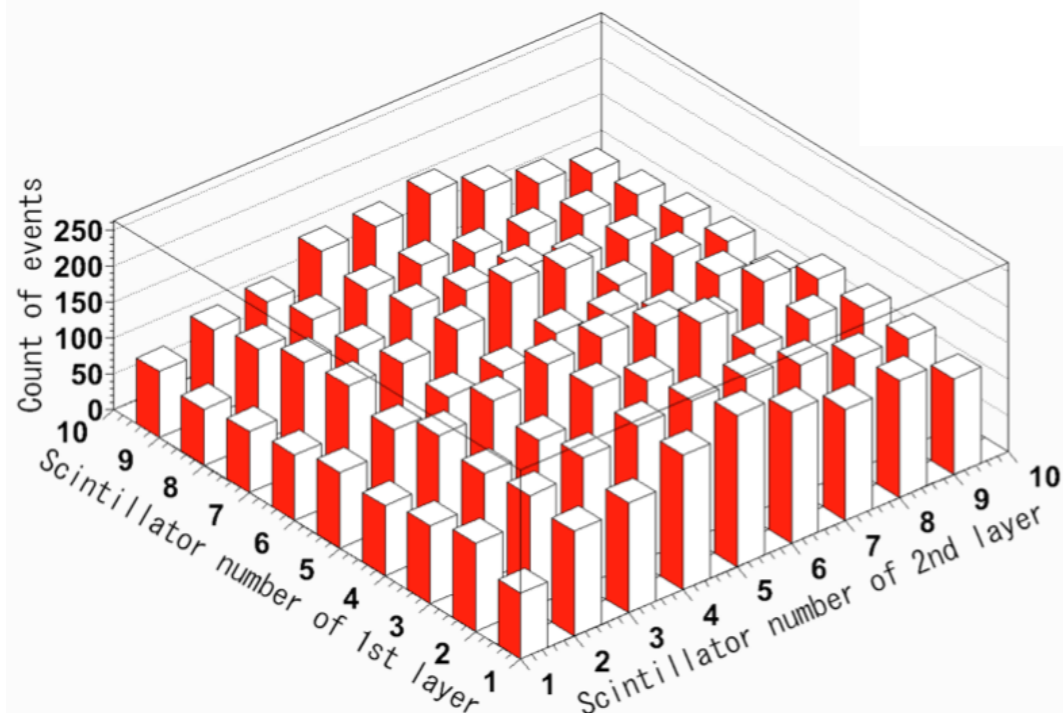
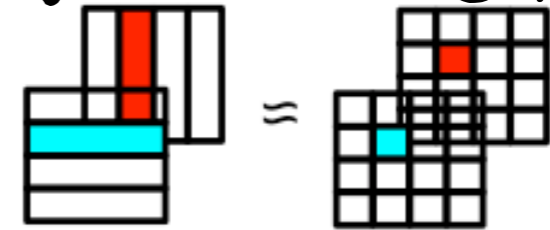


Digitalほどの微細分割度で analog HCALが可能か？

Yes, 現在のscintillator AHCALは $30\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 3\text{ mm}$.

同体積 $10\text{ mm} \times 90\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ scintillator にすることは、ハードウェア開発については何の困難も伴わない。

ECAL について開発した StripSplitting method を使えば、 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 近い細分割度が可能。



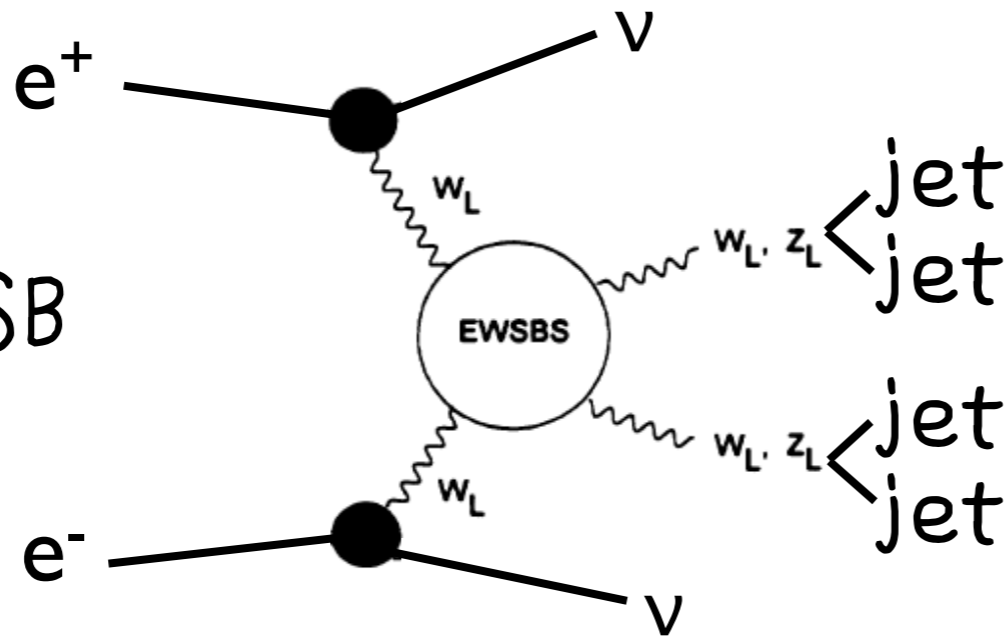
$10\text{ mm} \times 180\text{ mm} \times 2\text{ mm.Sc}$ を使って $180\text{ mm} \times 180\text{ mm}$ 2層の detector で宇宙ミューオンの天頂角分布を測った。

原田 信州大学4年(2010年)

Jet energy resolu. Performance のバロメータとして,

W^+W^- と Z^0Z^0 pair の識別

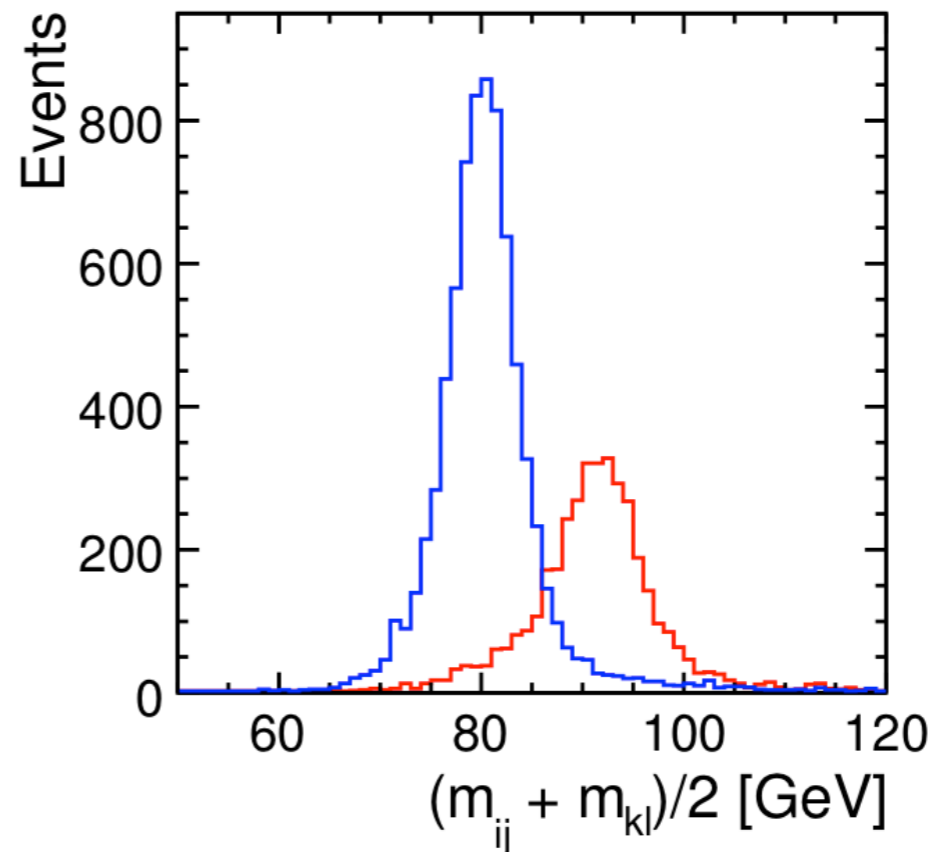
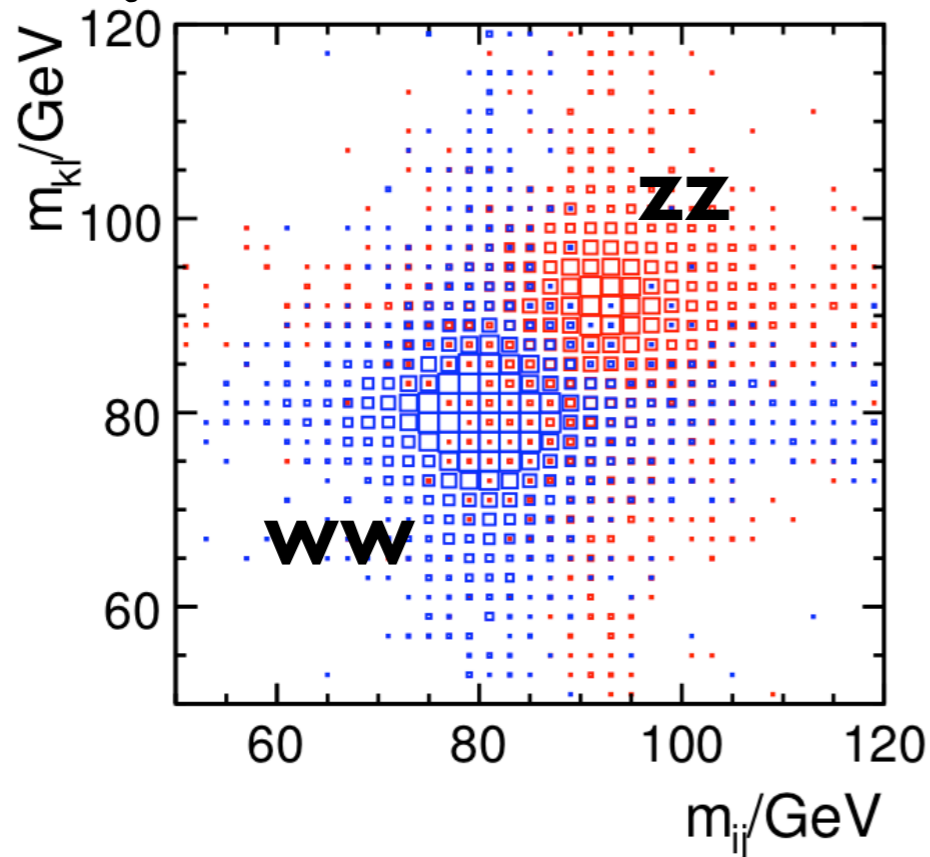
Strong EWSB



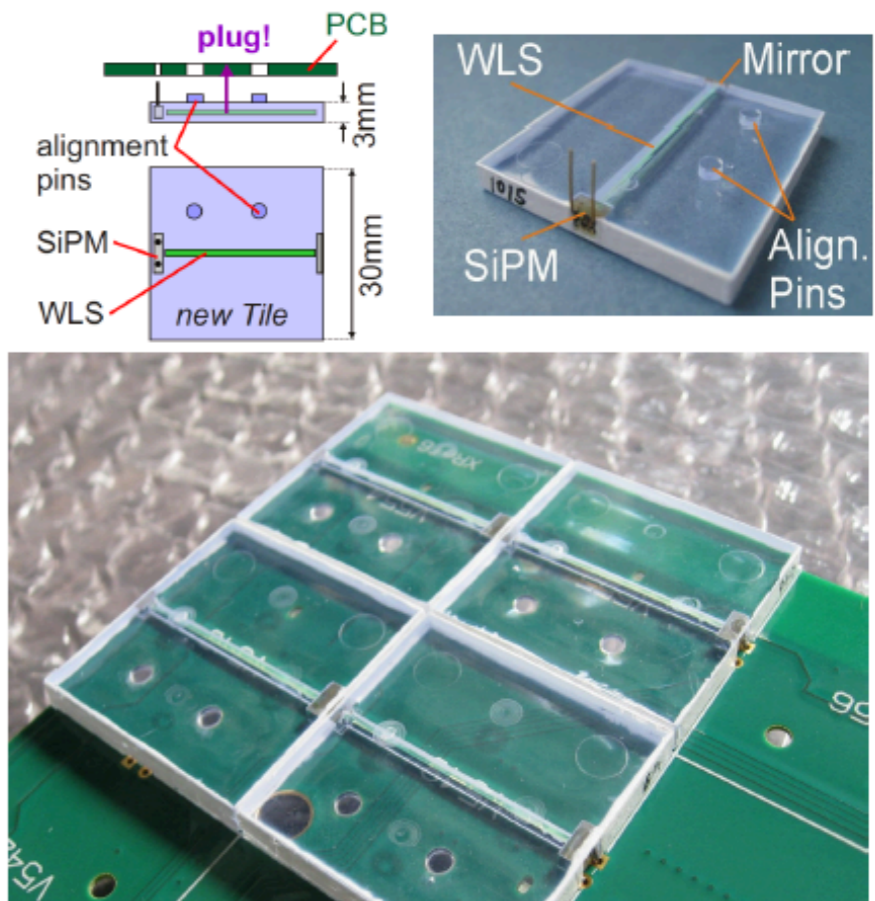
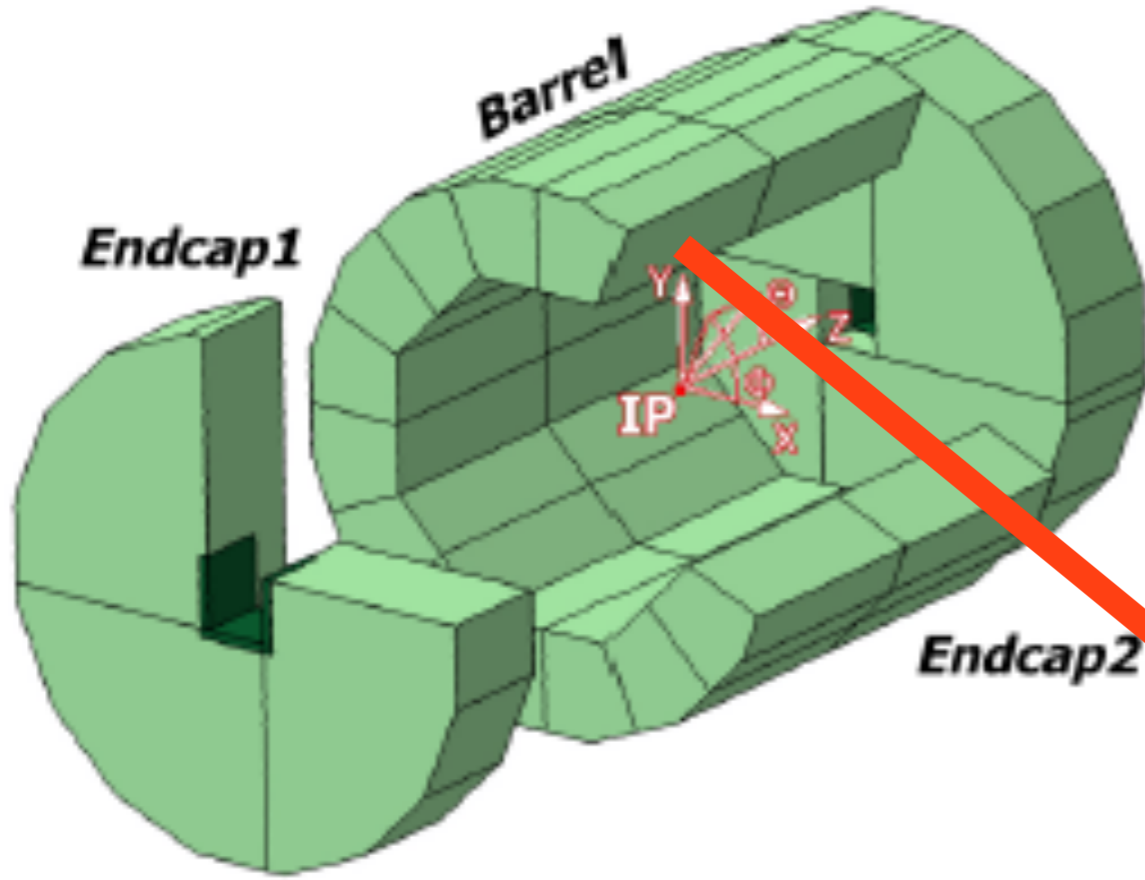
Higgs あってしまっただけ
みたいだけど...

Detector performance
としては大切。(why?は現地で)

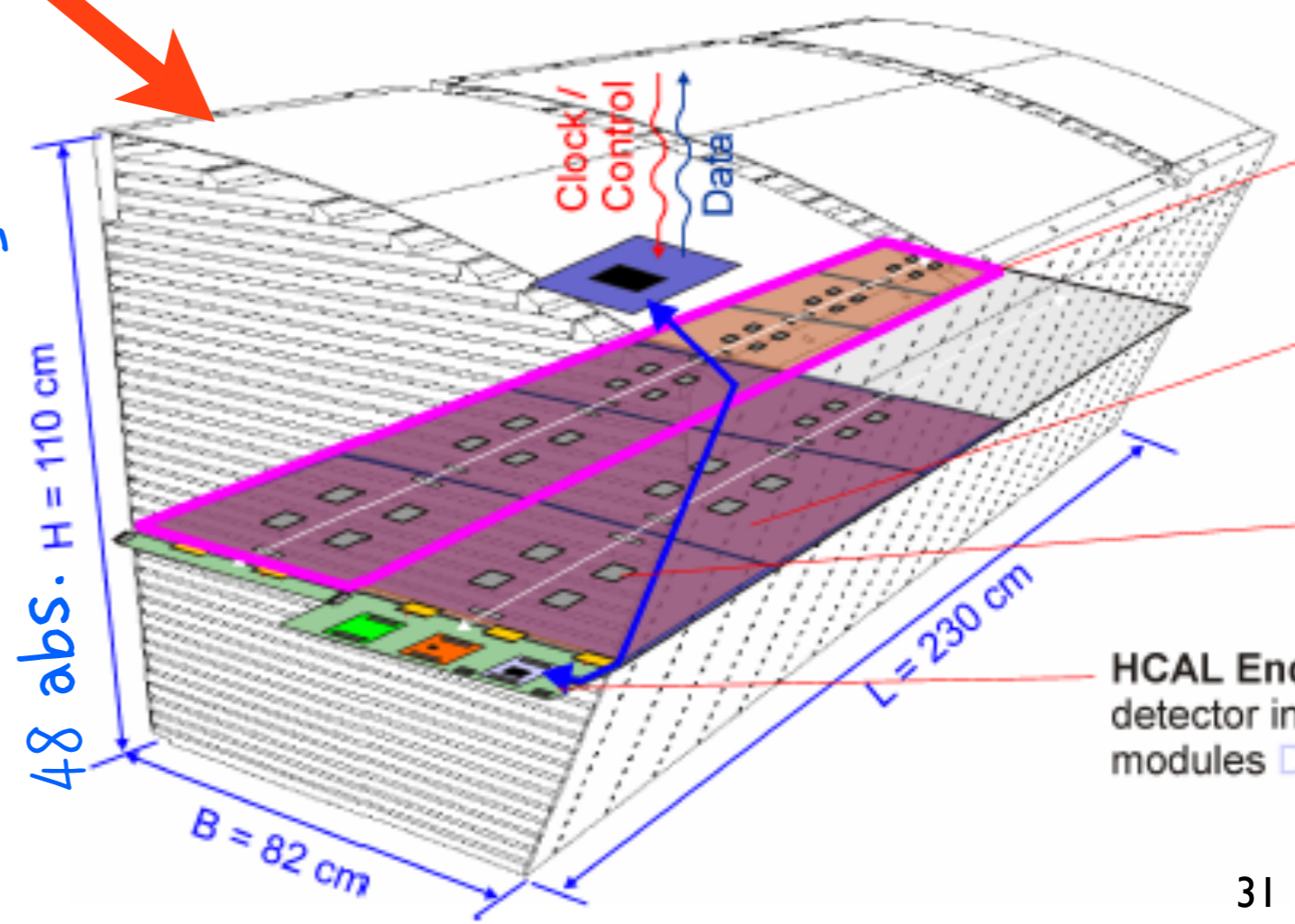
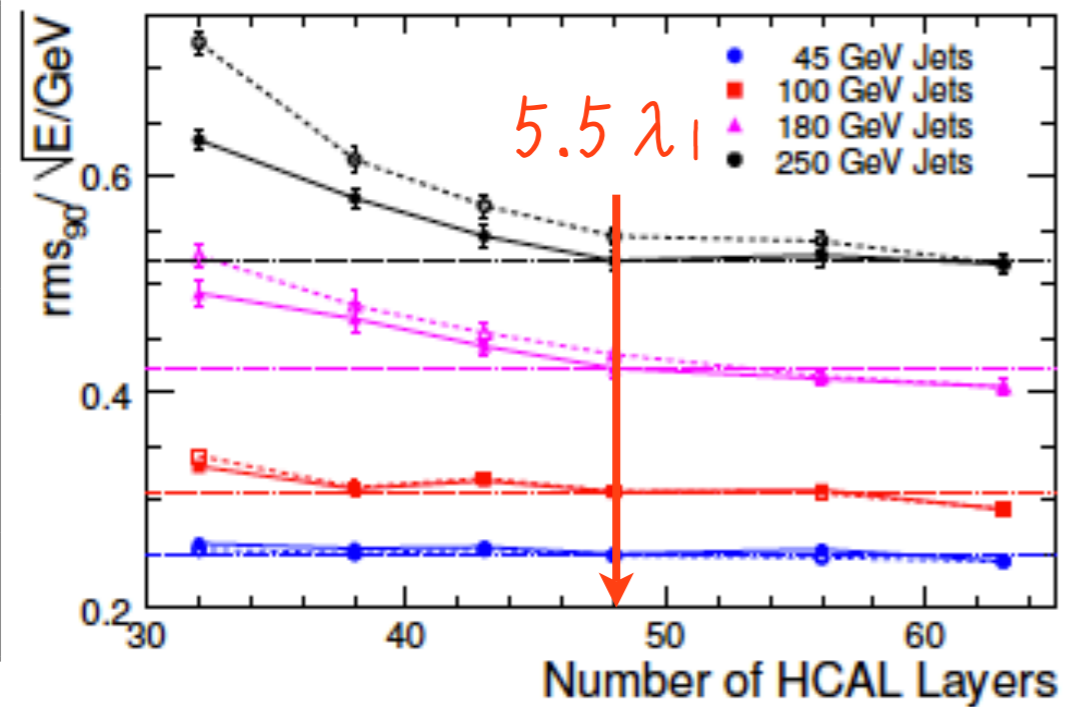
4 jets reconstruction



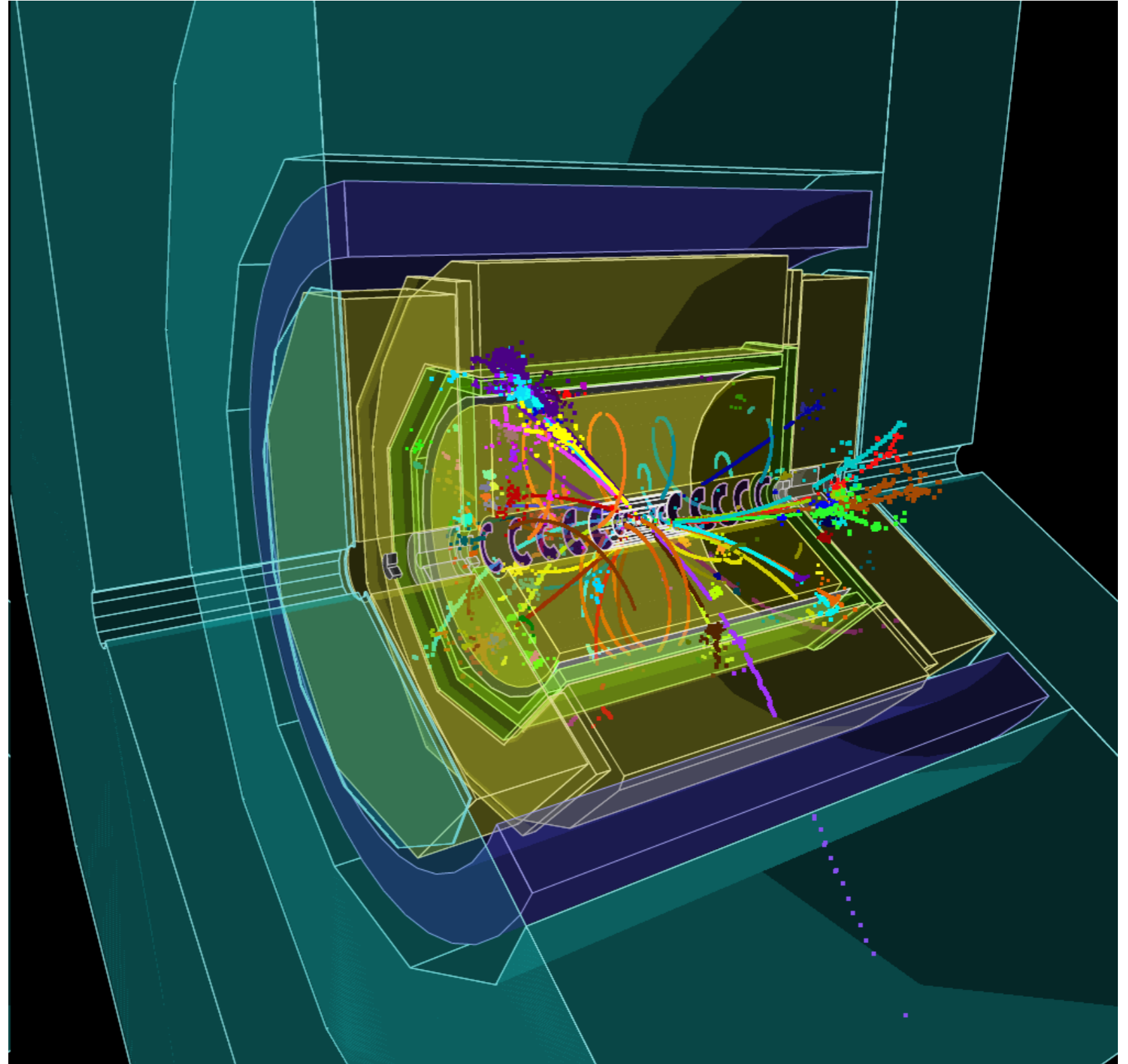
ILD-HCAL Analog HCAL



かたい, EM showerの様子も見たい



カロリメータの構造



カロリメータの構造

