

ILCのカロリメータ

2015年7月20日@群馬

ILC夏の合宿

須藤裕司（九州大学）

カロリメータの役割

粒子のエネルギーを測定する

カロリメータの役割

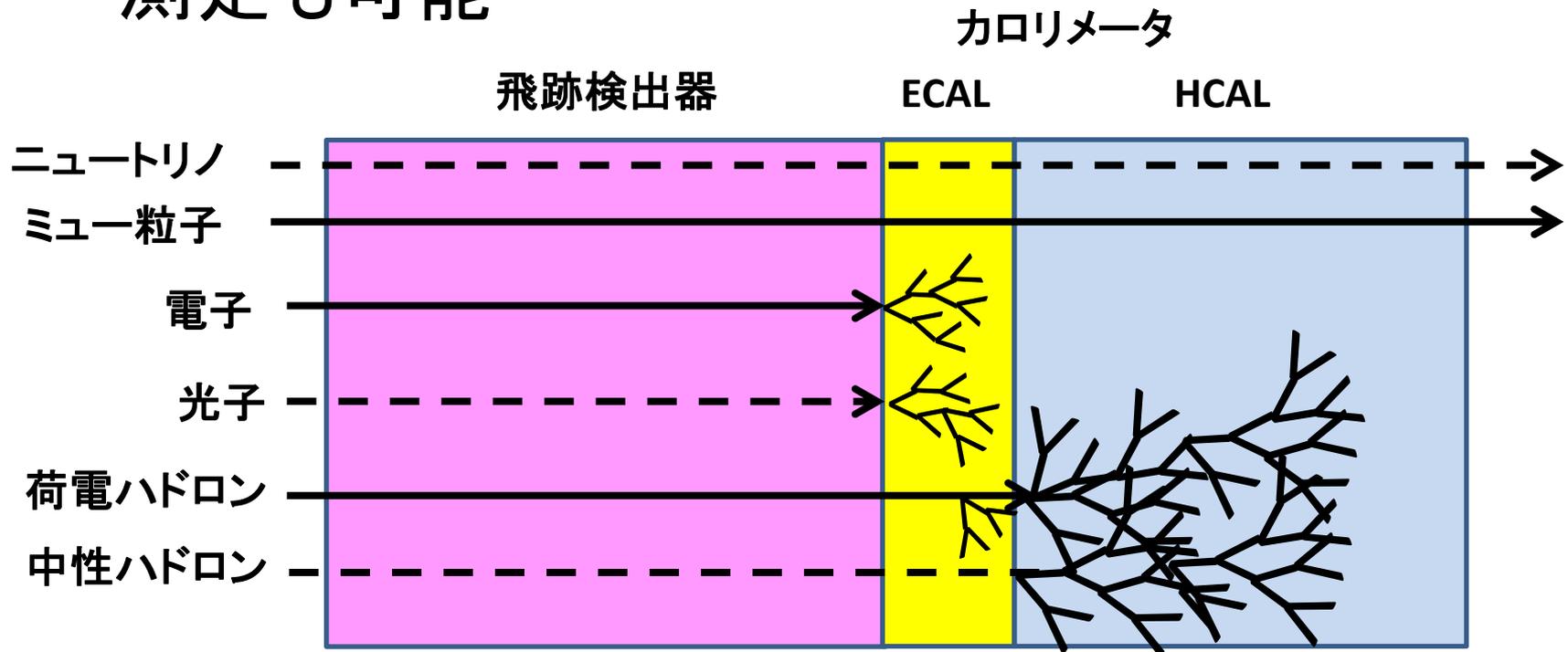
**粒子のエネルギーを測定する
だけではない！**

もくじ

- カロリメータの役割
- 電磁シャワー、ハドロンシャワー
- カロリメータの特徴
- ILDのカロリメータ

カロリメータの役割

- 粒子のエネルギーを測定する
- 荷電粒子及び飛跡検出器ではとらえられない中性粒子の検出とエネルギー測定
- 終状態によってはニュートリノのエネルギー測定も可能



エネルギーの落とし方

- 電子・光子のエネルギー損失の主要因
 - 電磁相互作用
 - : 制動輻射、対生成、イオン化、励起、光電効果
 - 電磁カロリメータ
- ハドロンのエネルギー損失の主要因
 - 強い相互作用、電磁相互作用、原子核衝突
 - ハドロンカロリメータ

- エネルギー分解能

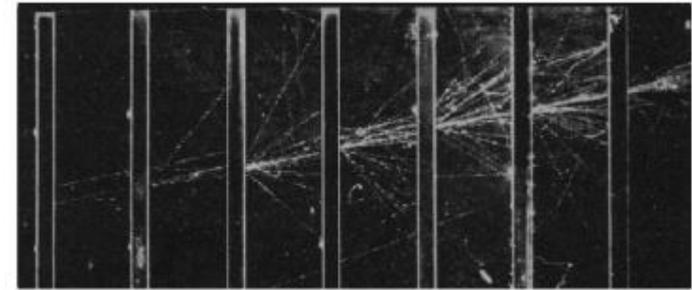
$$\frac{\sigma}{E} = \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus \frac{b}{E} \oplus c$$

統計項

ノイズ項

定数項

電磁シャワー



- X_0 放射長 (radiation length)

- 電磁シャワーのパラメータ

$$X_0(\text{g/cm}^2) \approx \frac{716 \text{ g cm}^{-2} A}{Z(Z+1)\ln(287/\sqrt{Z})}$$

Z は原子核番号、 A は質量数

制動輻射 + 対生成

電子のエネルギー損失

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{E}{X_0}$$

$$E = E_0 e^{-x/X_0}$$

光子の (対生成する)
平均自由行程

$$\lambda_{\text{pair}} = \frac{9}{7} X_0$$

電磁シャワーの発達

- 横方向
- モリエール半径 (Moliere radius)
- 電子・光子のエネルギーの90%が入るシャワーの半径

$$R_M \text{ (g/cm}^2\text{)} \sim \frac{21(\text{MeV})X_0}{E_c \text{ (MeV)}}$$

* E_c = critical energy

- 奥行方向

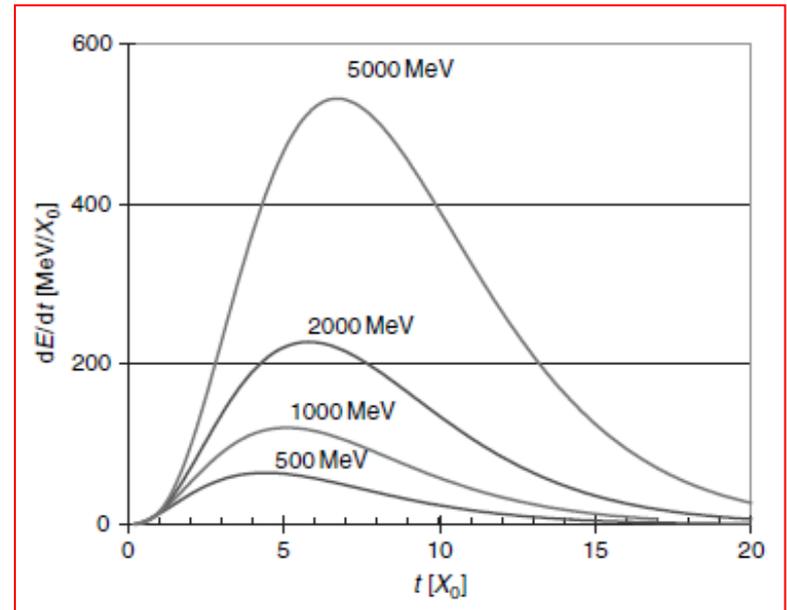
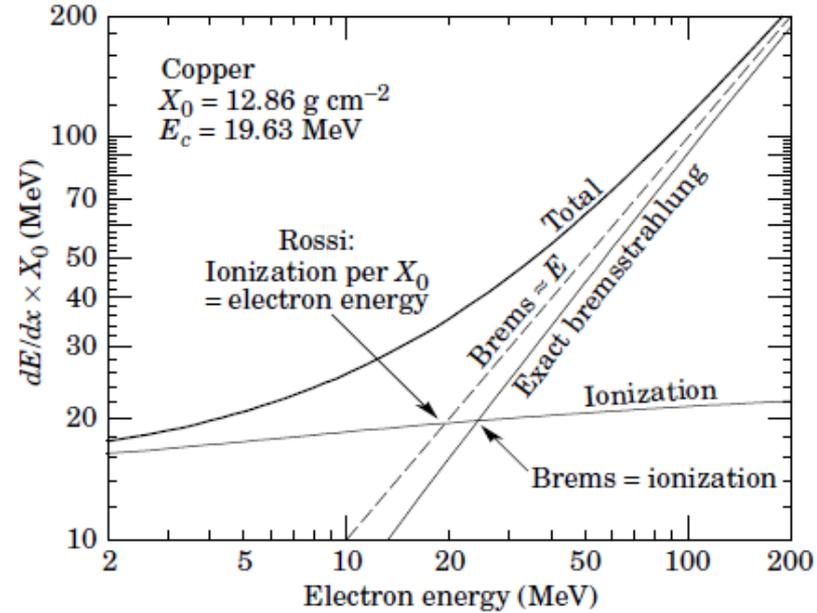
$$\frac{dE}{dt} = E_0 b \frac{(bt)^{a-1} e^{-bt}}{\Gamma(a)}, \quad t = x/X_0$$

shower max $\sim \ln(E/E_c) + t_0$

$t_0 = -0.5 (+0.5)$, electron (photon)

- $25 X_0$ でシャワーの漏れは <1%

(electron 300 GeVまでなら)



ハドロンシャワー

- λ_0 原子核相互作用長

(nuclear interaction length)

- ハドロンと原子核による強い相互作用が起こる平均自由行程

$$\lambda_0 \sim 35 A^{1/3} \text{ (g cm}^{-2}\text{)}$$

- ハドロンシャワー中では $\pi^0(\eta) \rightarrow \gamma\gamma$ による**電磁シャワーも起きる**
- シャワー中のハドロンと電子の割合は入射粒子のエネルギーに依存する。
- $\pi^0 \sim 1/3$, ハドロン $\sim 1/2$ (100 GeV shower)

カロリメータの特徴

高エネルギーの粒子を止めるため**とても重たい**
信号が早いのでトリガーに使える、位置測定

- 全吸収型

- 物質量の大きな検出層

- クリスタル (PbO, CsI, PbWO₄ ...)

- **サンプリング型**

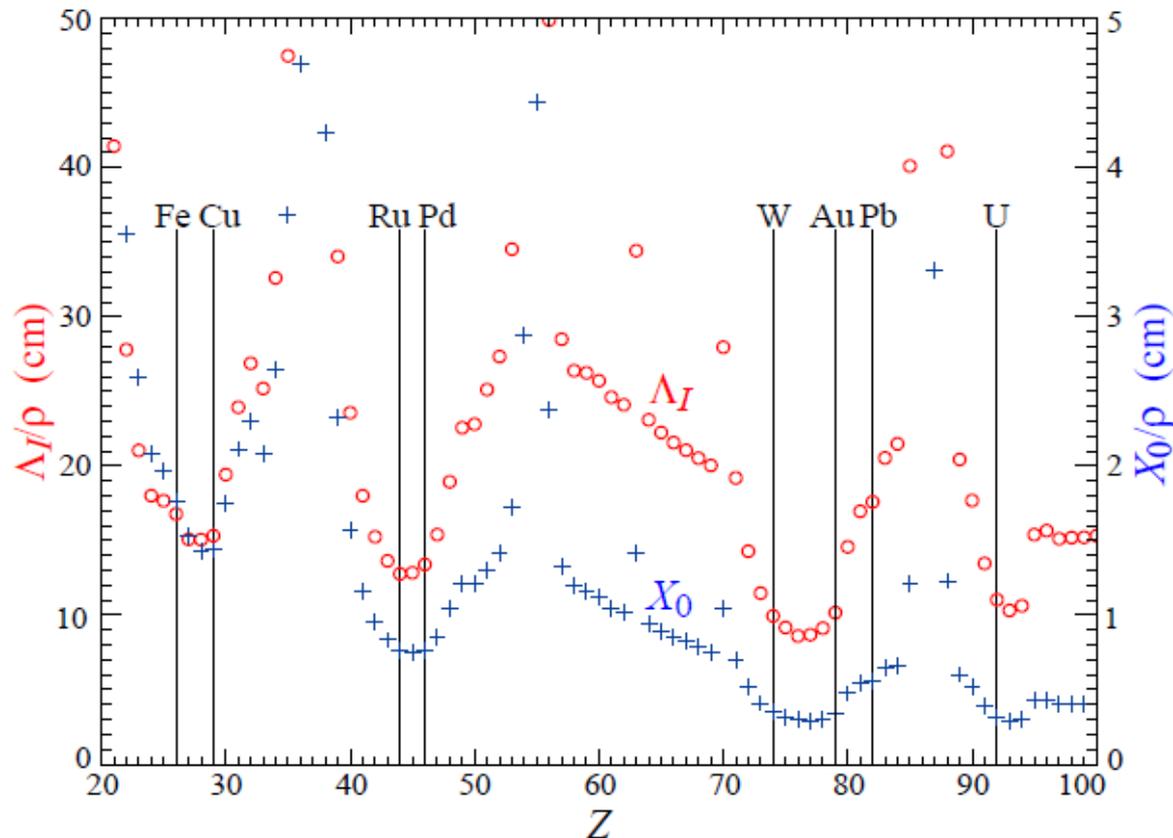
- **物質量の大きな吸収層と物質量の小さな検出層の組み合わせ**

- 吸収層: 鉛・鉄・タングステン・ウラン・真鍮

- 検出層: シンチレータ、シリコン、液体アルゴン

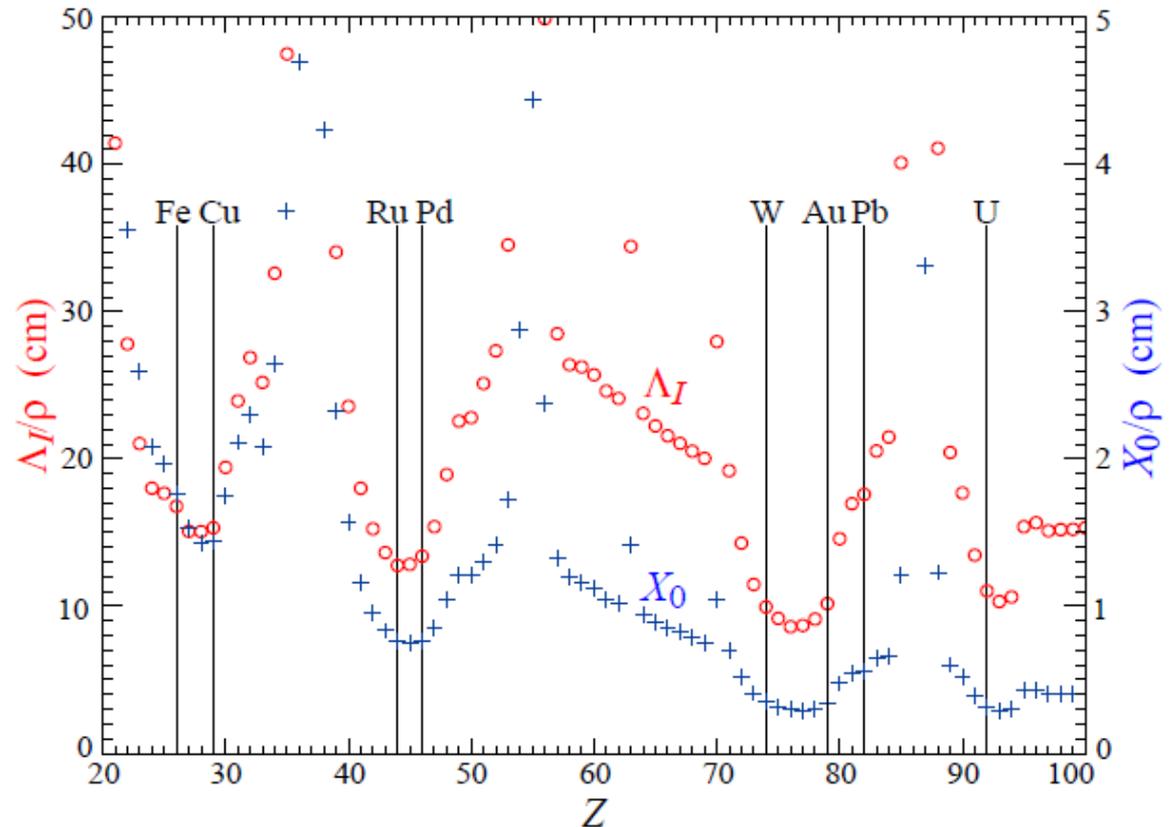
電磁カロリメータの特徴

- 電子・光子のエネルギーを主に測定する
- 電磁シャワーは奥行が短いので比較的薄い→数十cm
- 色々な物質を使える
- X_0/ρ 短い物質を選ぶ (ρ :密度)

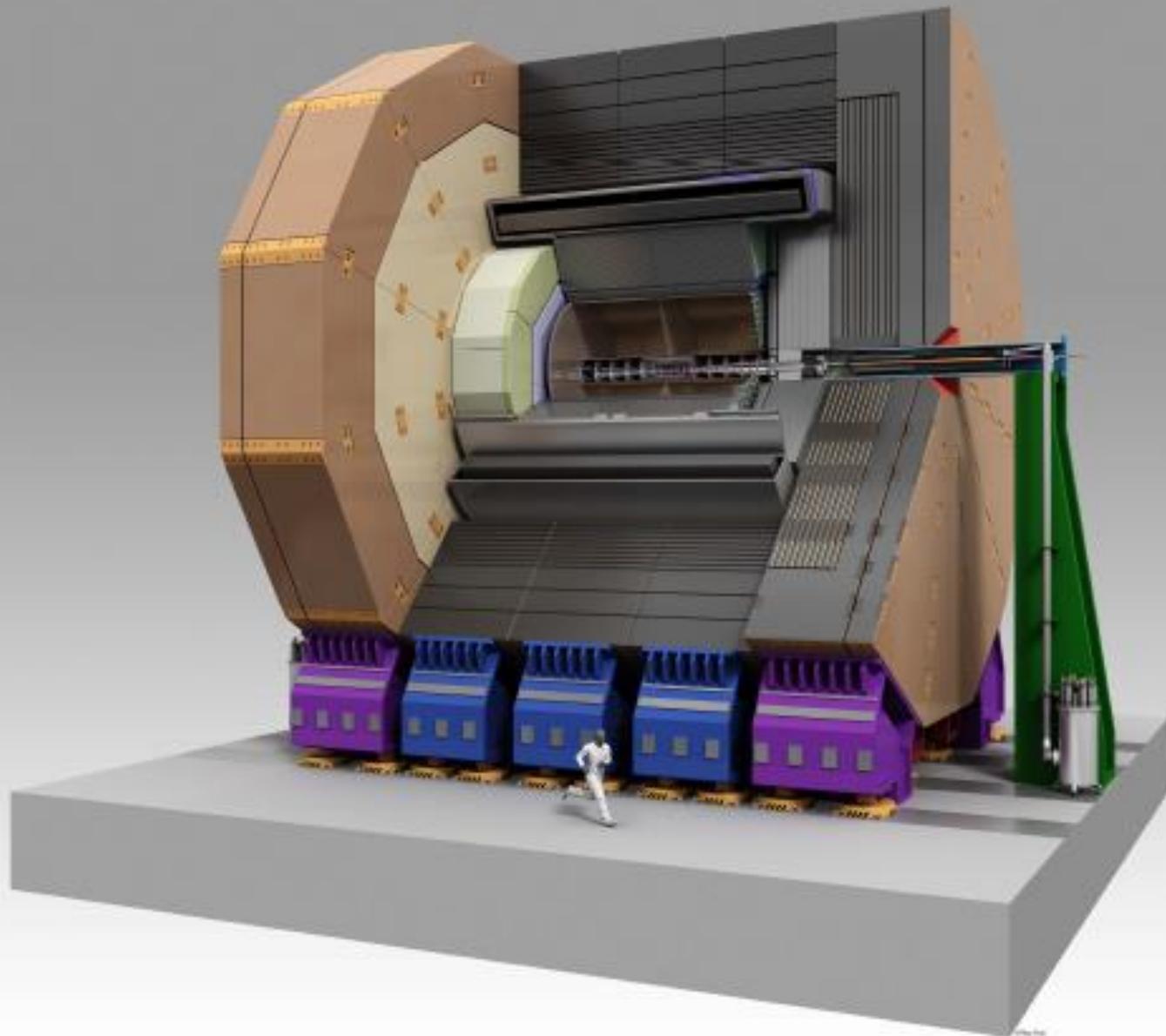


ハドロンカロリメータの特徴

- 電磁カロリメータでは止まらない**ハドロン**の**エネルギー**を測定する
- **相互作用長は長い**ので電磁シャワーに比べて長く範囲の広いシャワーになる → **とても大きな物質が必要**
- 電子とハドロンでは同じエネルギーの場合でも観測できるエネルギー量が違う ($e/\pi \neq 1$)
- λ_0/ρ 短い物質を選ぶ



ILD



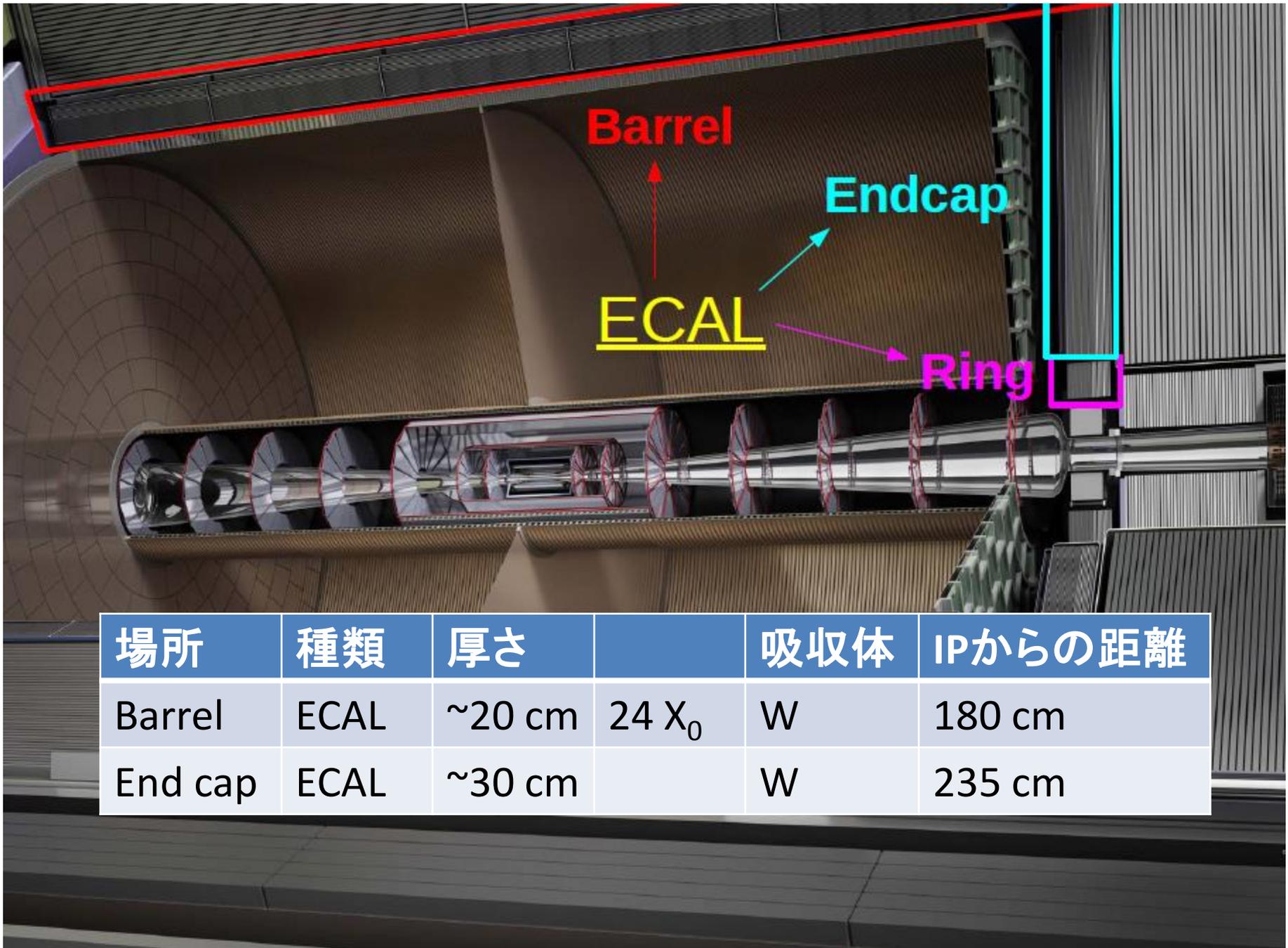
ILD

yoku
muon 検出器

ソレノイド

カロリメータ

飛跡検出器

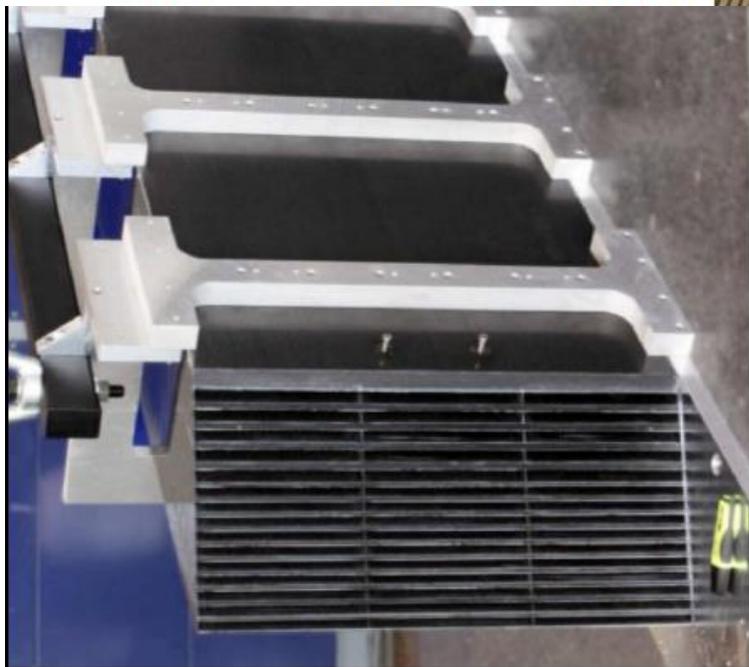
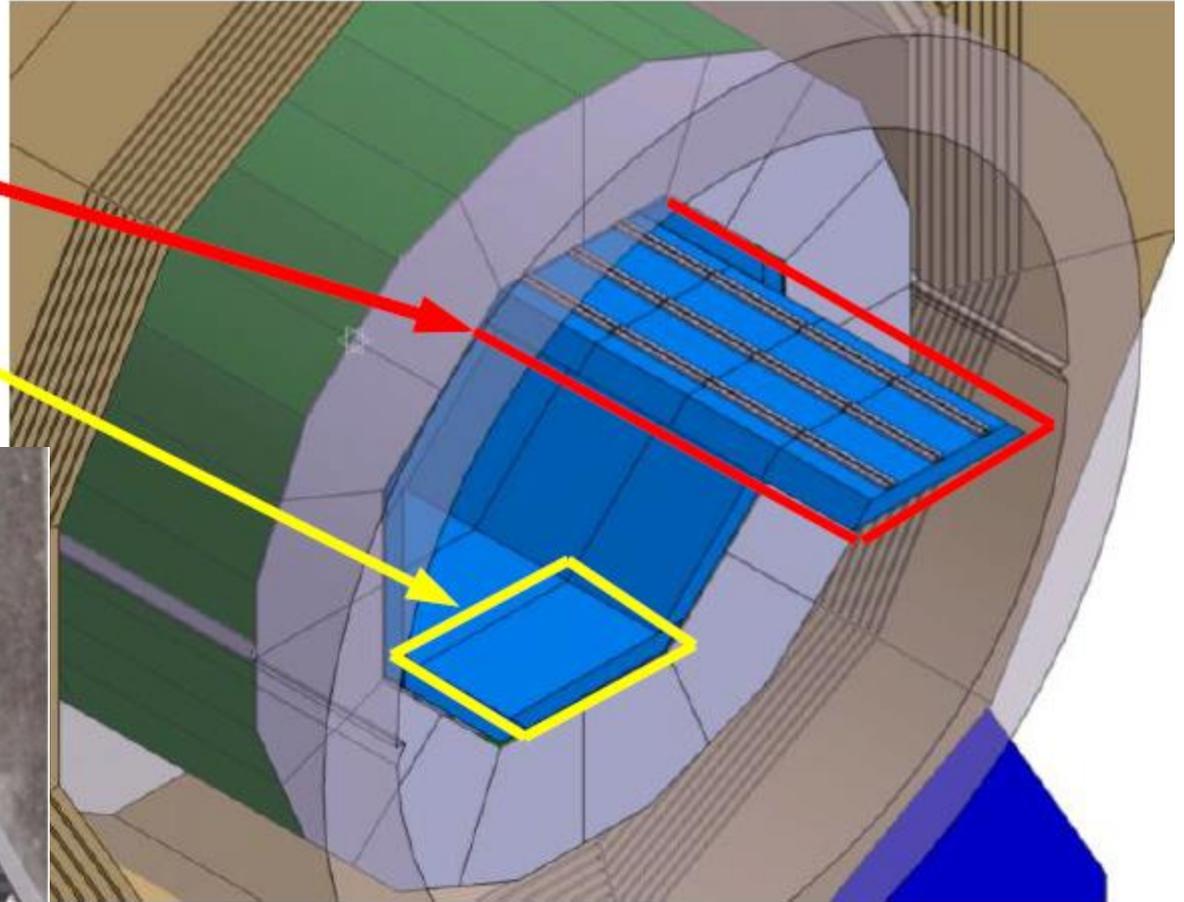


場所	種類	厚さ		吸収体	IPからの距離
Barrel	ECAL	~20 cm	24 X_0	W	180 cm
End cap	ECAL	~30 cm		W	235 cm

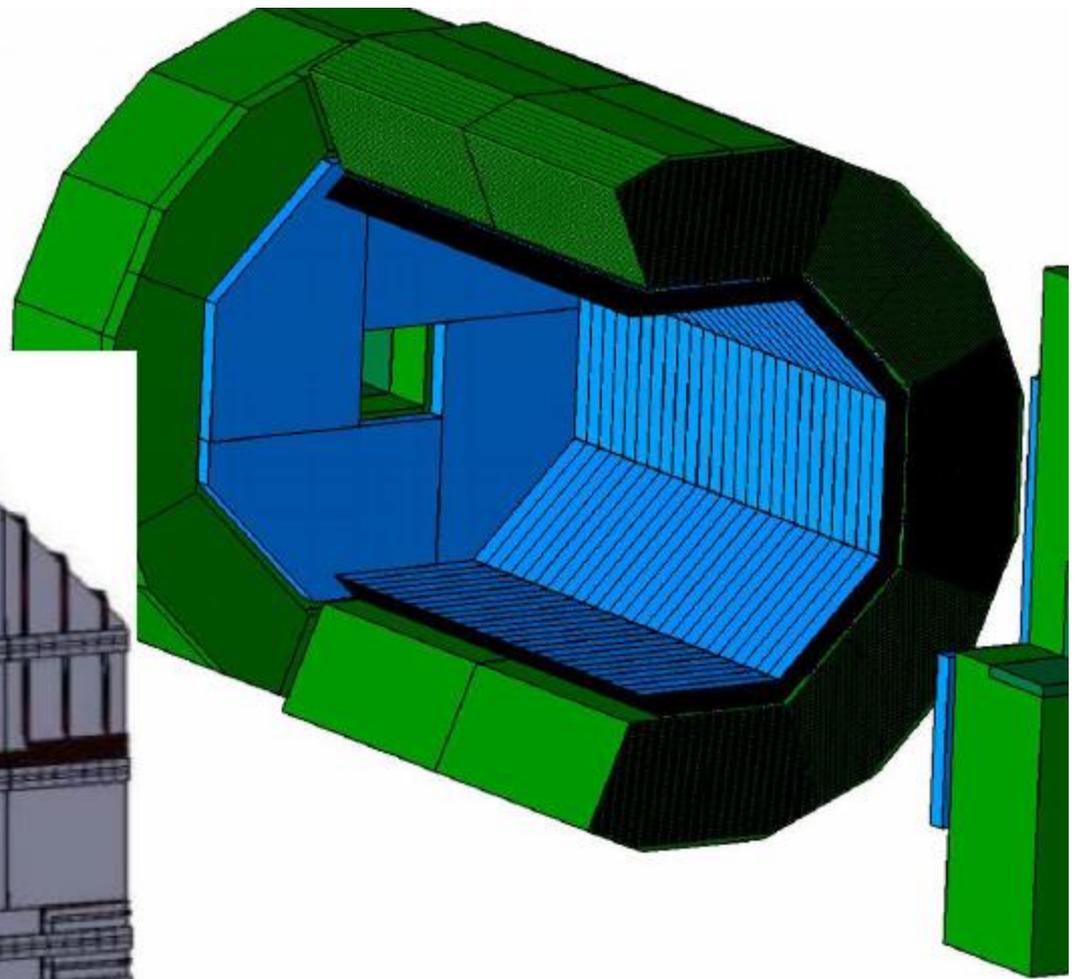
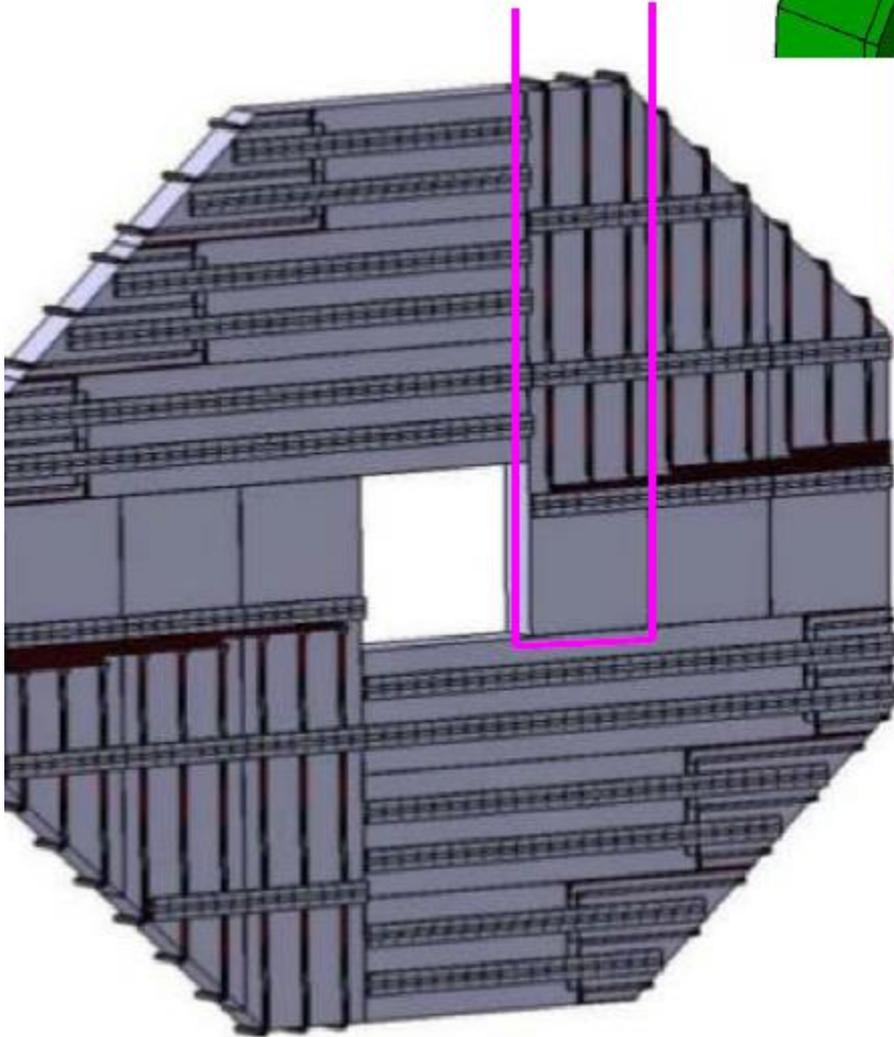
ILDの電磁カロリメータの構造

Barrel:

8 staves in azimuth
each with
5 modules in z

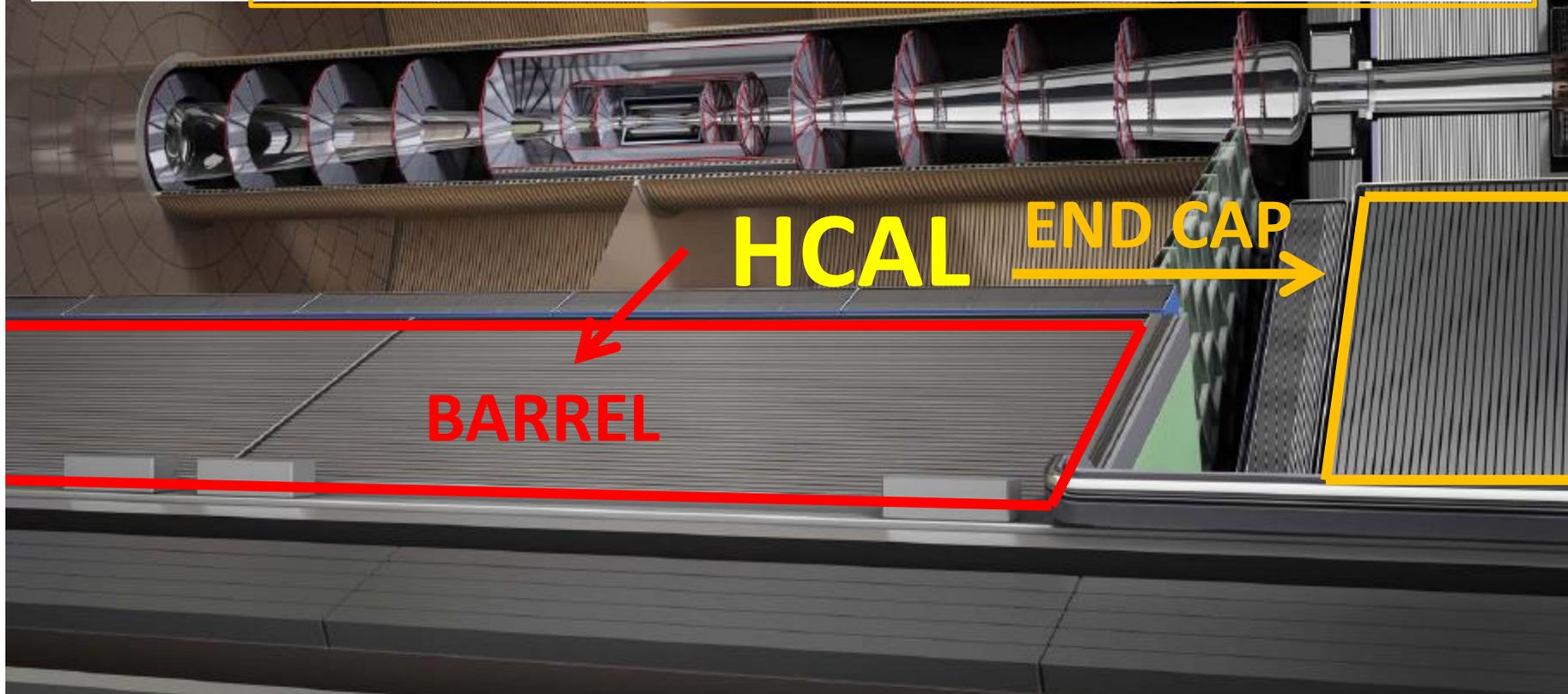


2 endcaps,
4 quadrants,
3 modules



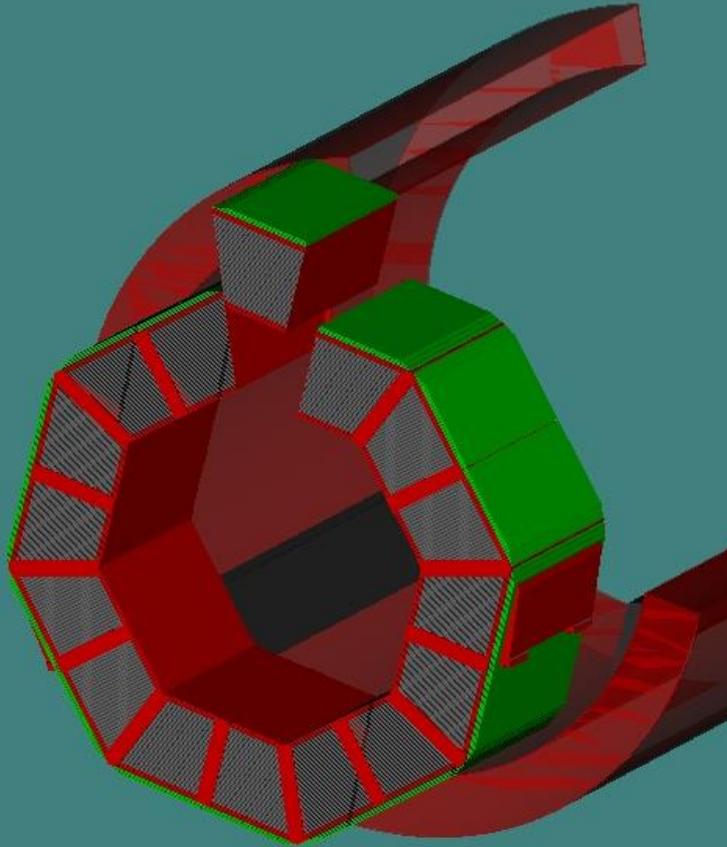
ECAL endcap

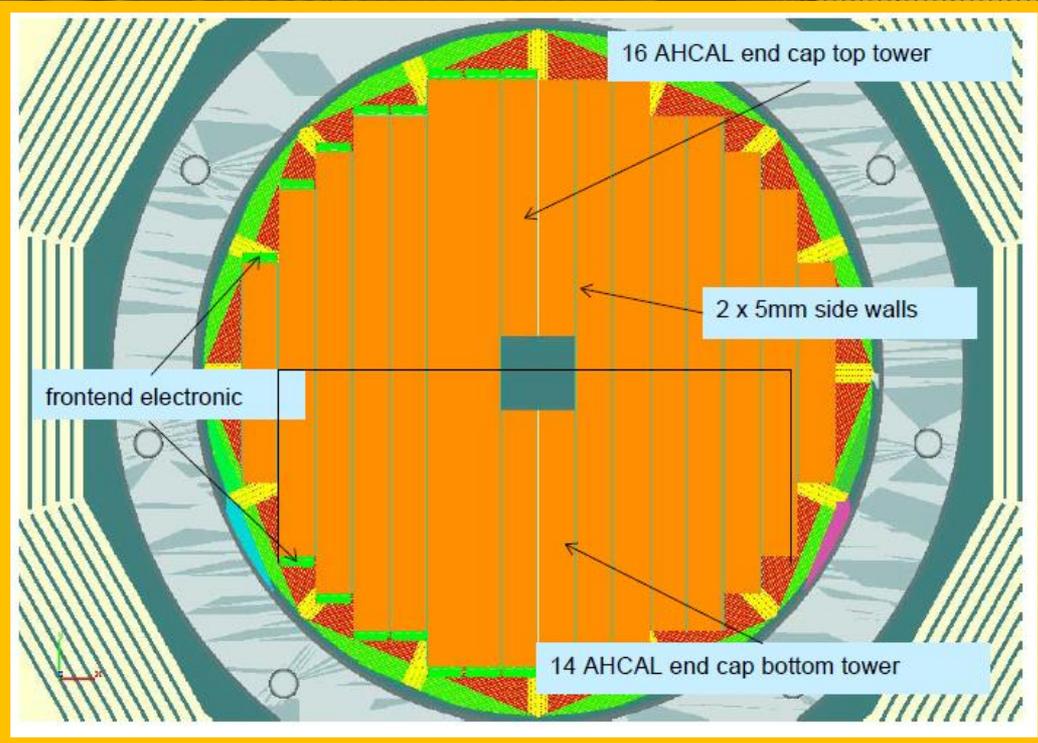
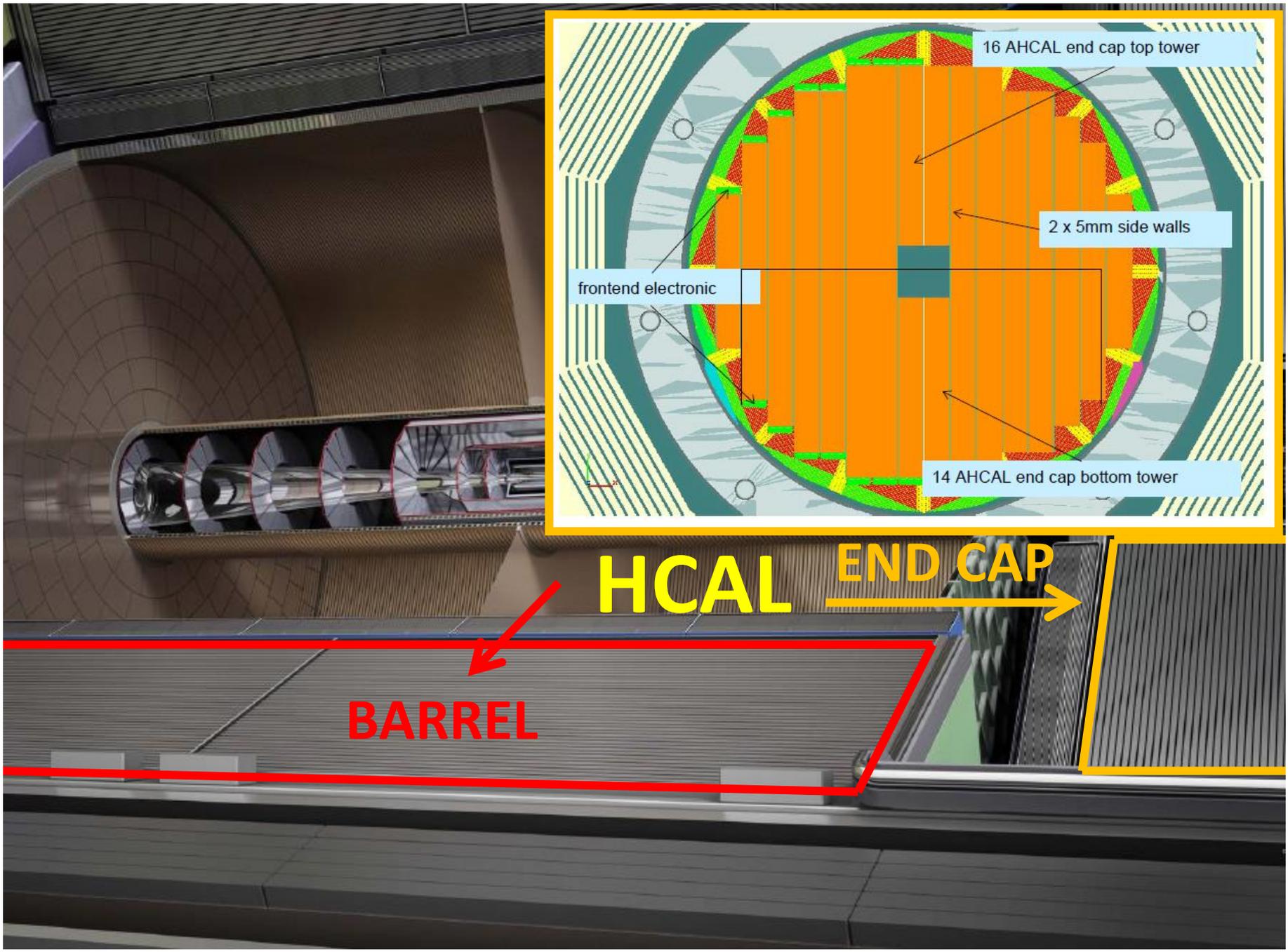
場所	種類	厚さ		吸収体	IPからの距離
Barrel	ECAL	~20cm	$24X_0/\sim 2\lambda_0$	W	~180 cm
	HCAL	~140cm	$\sim 60X_0/\sim 6\lambda_0$	Fe or W	~203 cm
End cap	ECAL	~30cm		W	~235 cm
	HCAL	~130cm		Fe or W	~ 265 cm



Barrel HCAL

mockup

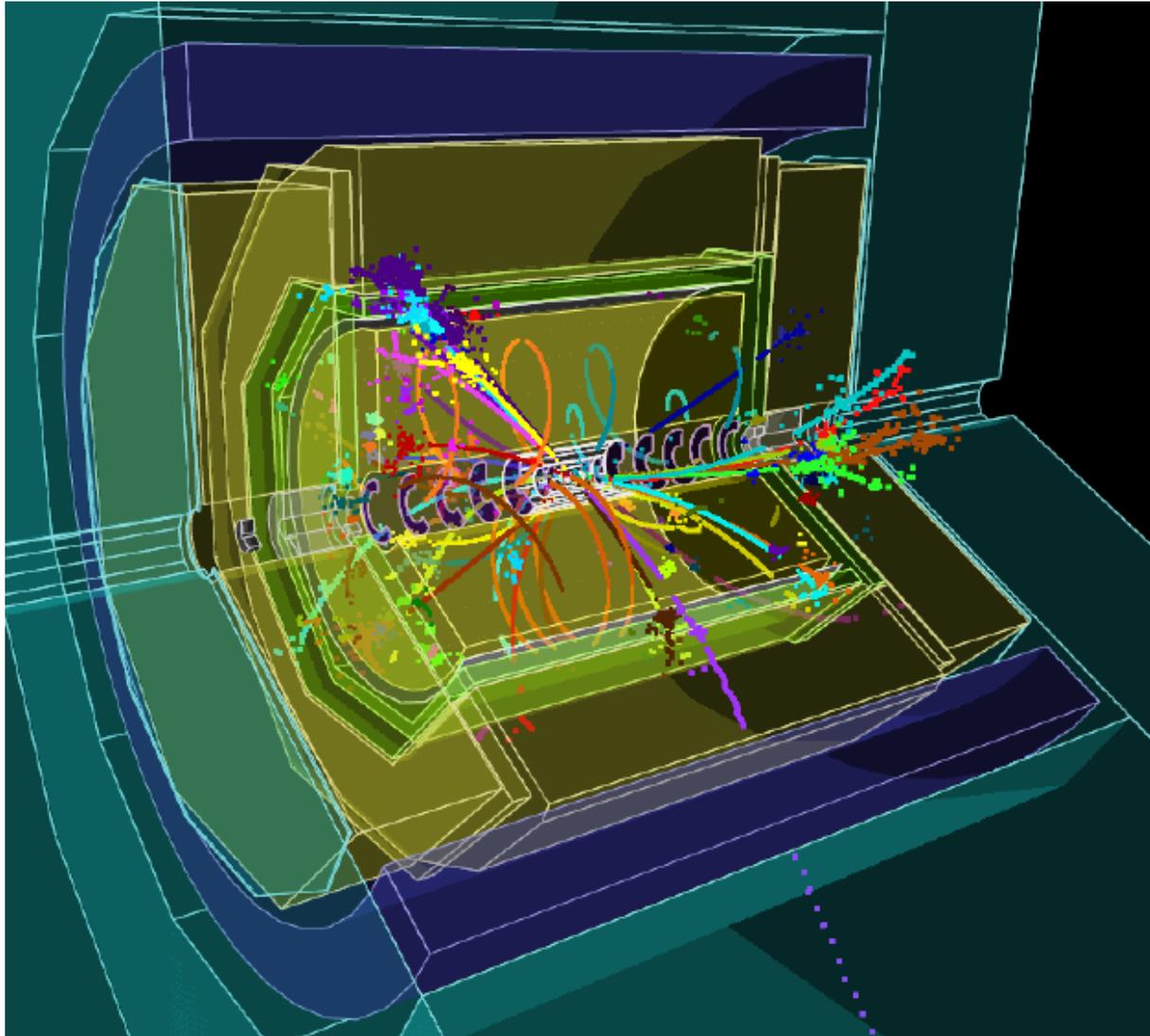




HCAL END CAP

BARREL

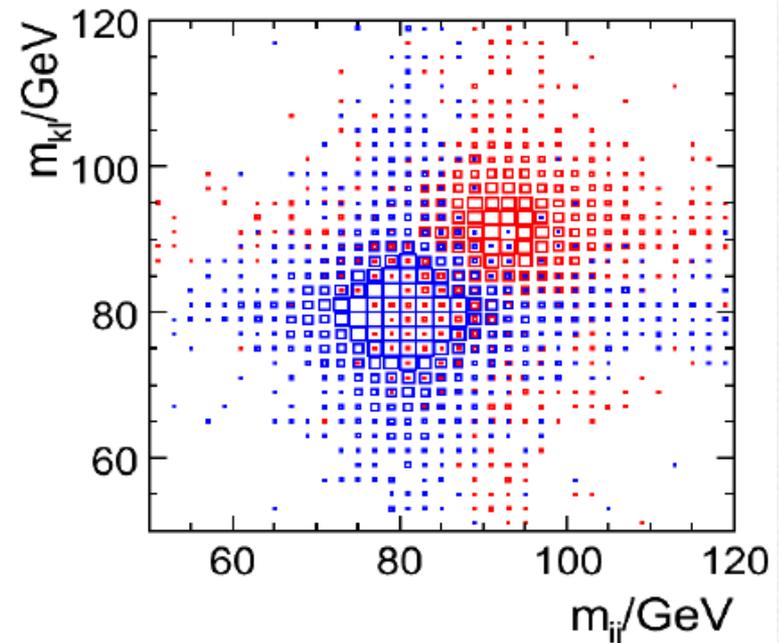
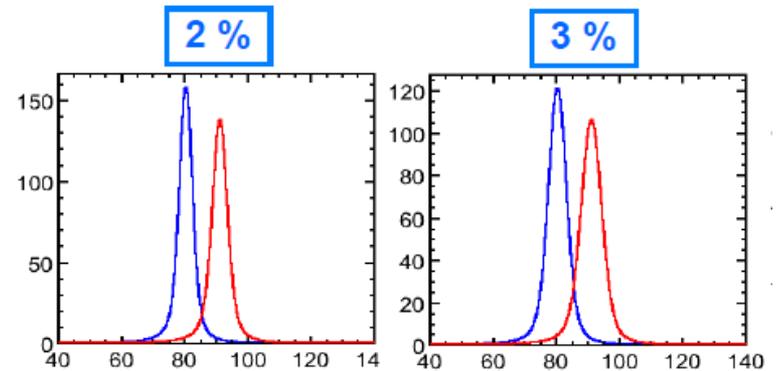
ジェットを測定する



ジェットエネルギー測定 の 目標

$ee \rightarrow \nu\nu WW/ZZ$

M_{ij} 分布



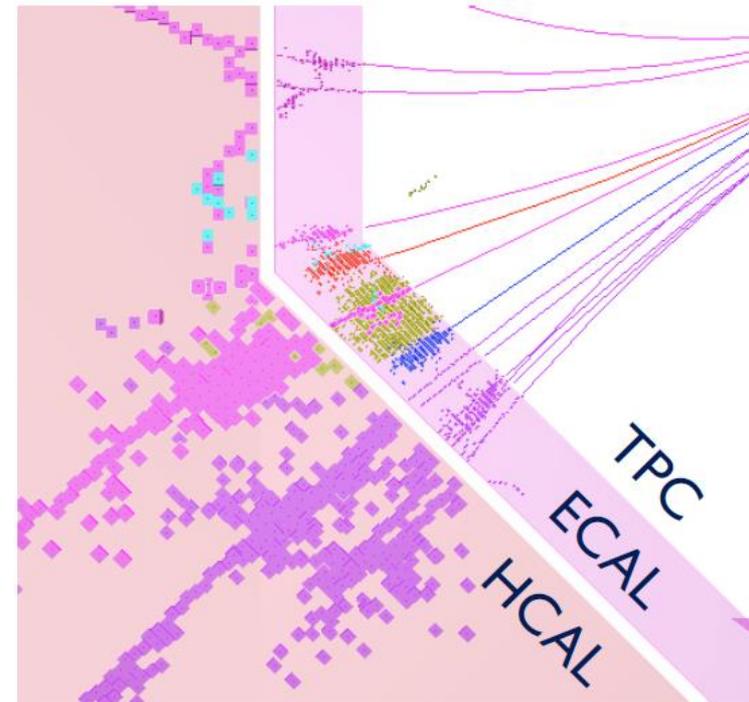
- W/Zを2ジェットで再構成したときに分離できるだけのエネルギー分解能
 - 多数のジェットを含んだ終状態からできるだけ正確に事象を再構成したい
- 3~4% のジェットエネルギー分解能



Particle Flow Method による
ジェットの再構成

Particle Flow Method

- ジェットの構成要素は 荷電粒子~60%
光子~30%、 中性ハドロン~10%
- 従来の方法ではHCALでジェットのエネルギーの大半を測定していたためエネルギー分解能が良くならない
- Particle Flow Method によるジェットの再構成では荷電粒子の飛跡とカロリメータ内のクラスターを1対1対応させる
→ ジェット中の粒子同士を空間的に分離できる高精細なカロリメータが必要



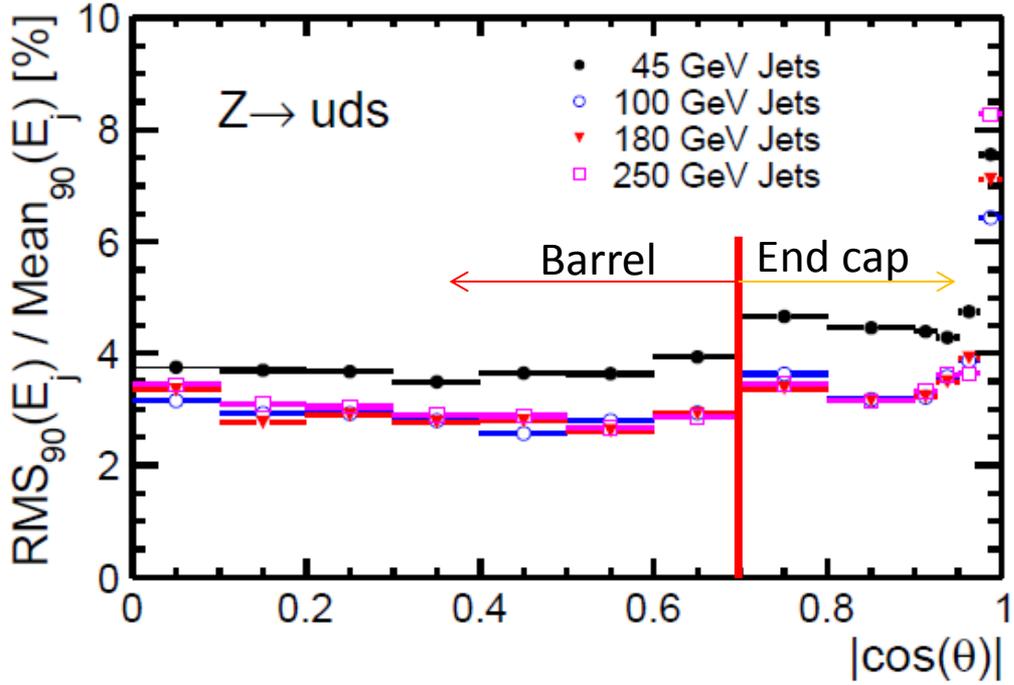
粒子	測定する検出器	分解能	jet中の割合
荷電粒子	飛跡検出器	$10^{-4}P_T(\text{GeV})$	60%
光子	電磁カロリメータ	$15\text{-}20\%/\sqrt{E(\text{GeV})}$	30%
中性ハドロン	ハドロンカロリメータ	$\sim 50\%/\sqrt{E(\text{GeV})}$	10%

ILDのジェットエネルギー測定のパフォーマンス

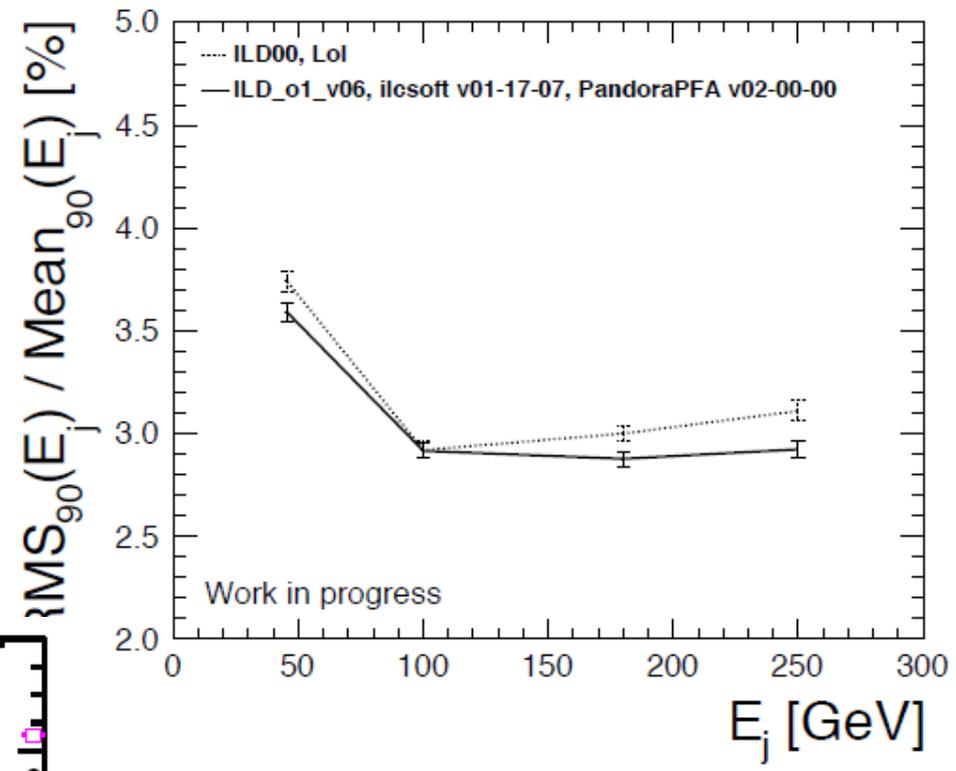
100GeV以上で

- Barrelで3.5%以下
- Endcapで3.5-4%

DBD: シリコンECAL, AHCAL



最新のPandora PFAの結果



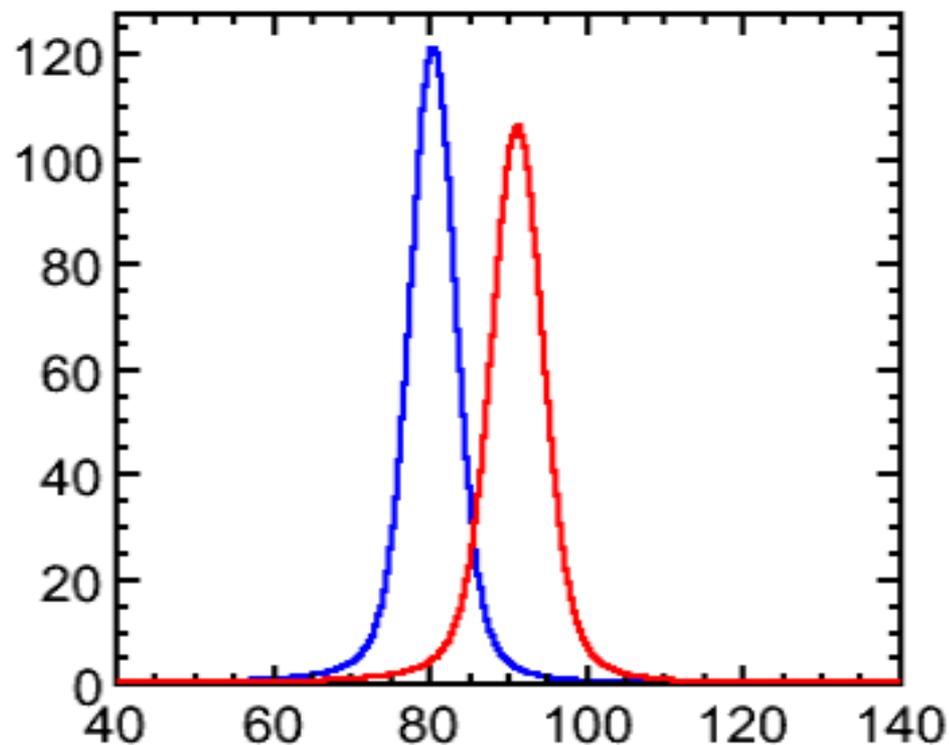
45GeVのジェットに対しては

- Barrelで4%以下
- Endcapで4-5%

$ee \rightarrow \nu\nu WW$ (青) 事象
 $ee \rightarrow \nu\nu ZZ$ (赤) 事象
の M_{jj} 分布

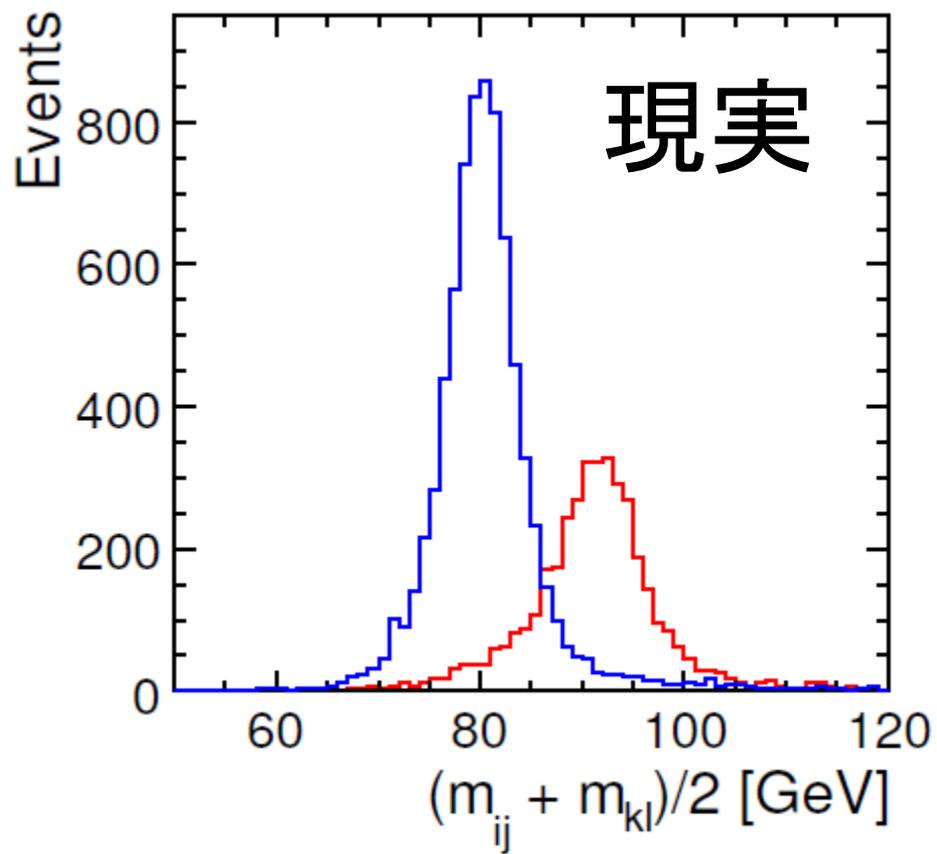
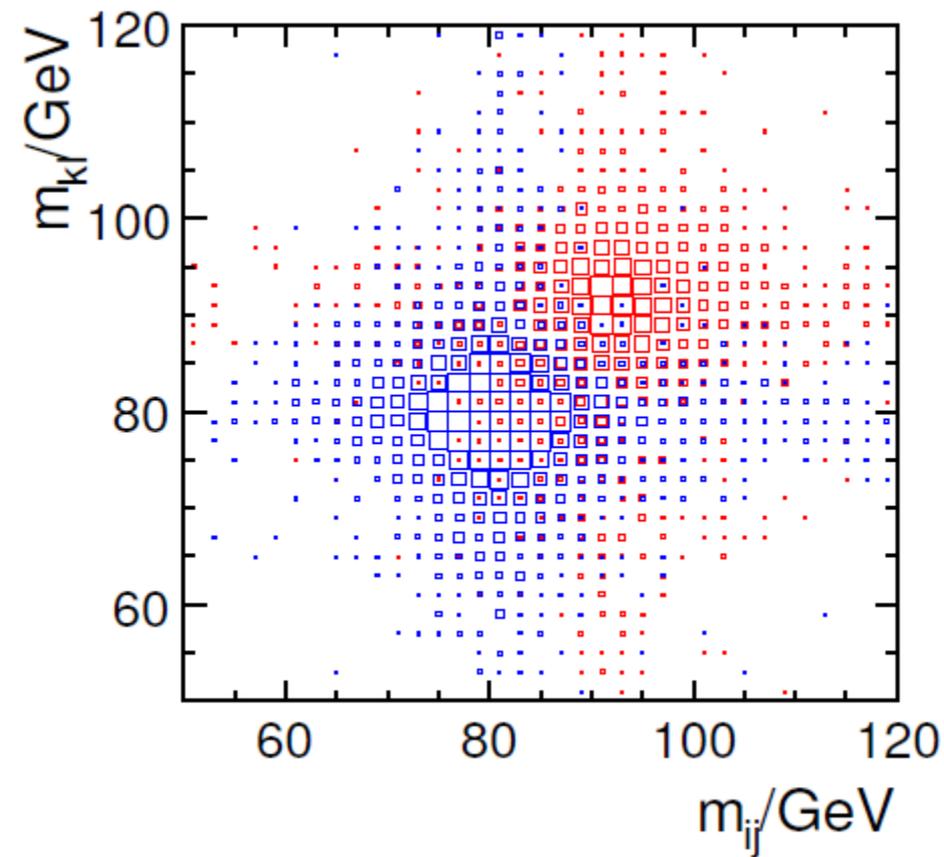
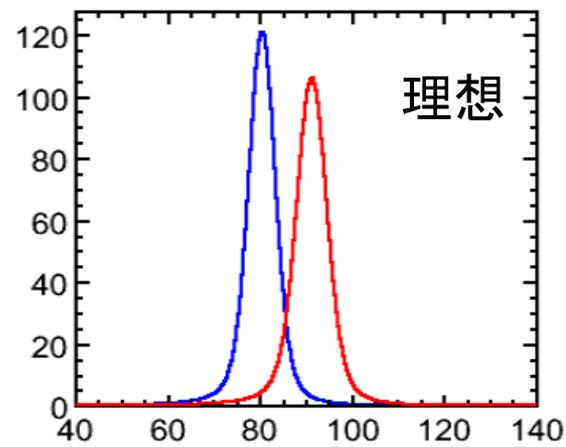
理想

3%



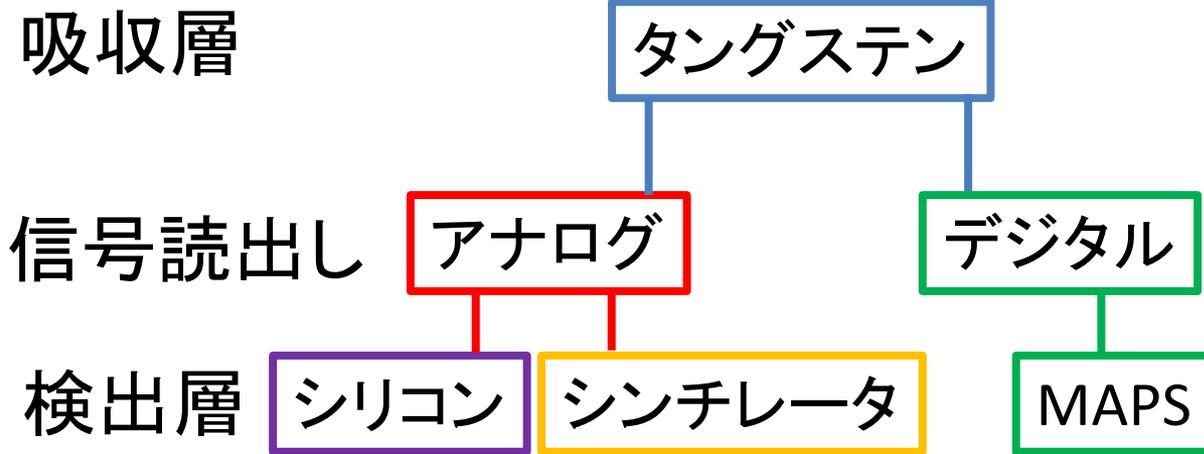
DBD時点での
 $ee \rightarrow \nu\nu WW$ (青) 事象
 $ee \rightarrow \nu\nu ZZ$ (赤) 事象
の M_{ij} 分布 (1TeV)

3%



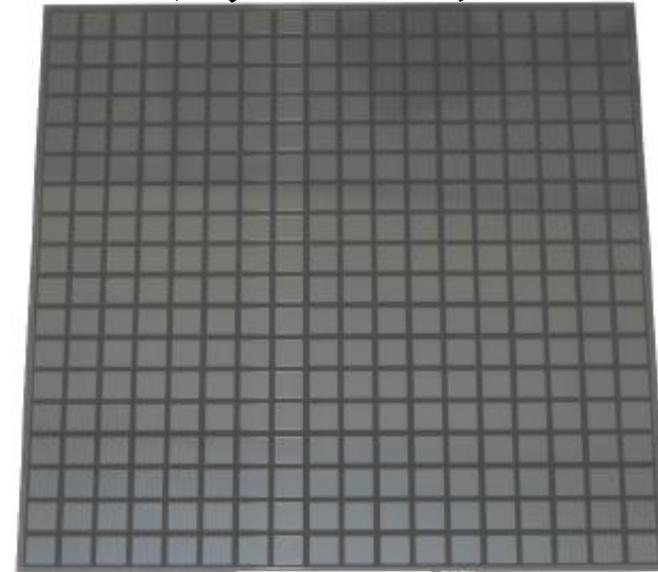
ILCの電磁カロリメータ

- ・ サンプリング型カロリメータ

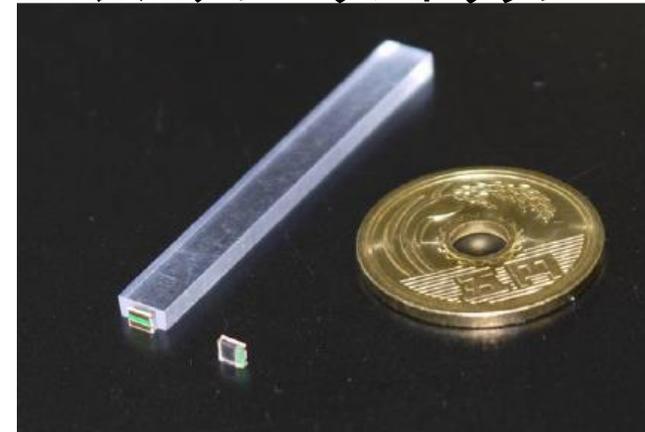


(MAPS: Monolithic Active Pixel Sensors)

シリコンセンサー



シンチレータストリップ



ILCの電磁カロリメータ

- ・ サンプリング型カロリメータ

吸収層

タングステン

信号読出し

アナログ

デジタル

検出層

シリコン

シンチレータ

MAPS

ch数

10^8

10^7

10^{12}

cell size

$5 \times 5 \text{mm}^2$

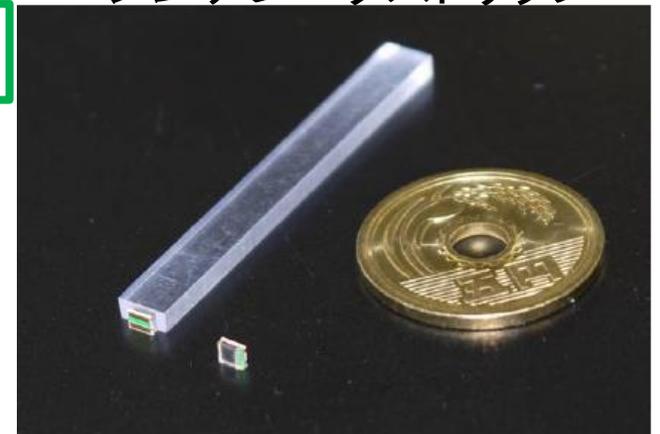
$5 \times 45 \text{mm}^2$

$50 \times 50 \mu\text{m}^2$

シリコンセンサー



シンチレータストリップ



* ATLAS

- liquid argon calorimeter 1.1×10^5 channels

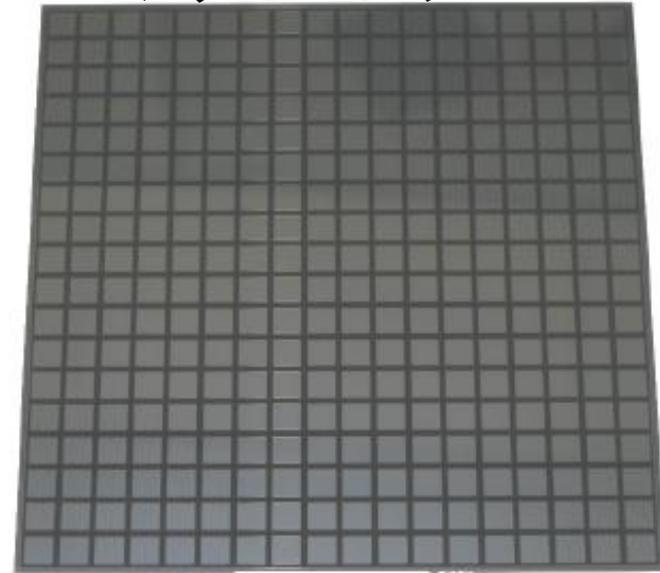
ILCの電磁カロリメータ

- ・ サンプリング型カロリメータ

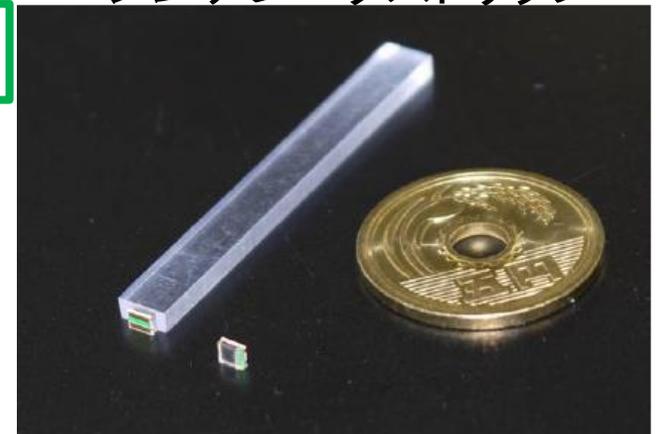
吸収層

タングステン

シリコンセンサー



シンチレータストリップ



信号読出し

アナログ

デジタル

検出層

シリコン

シンチレータ

MAPS

ch数

10^8

10^7

10^{12}

cell size

$5 \times 5 \text{mm}^2$

$5 \times 45 \text{mm}^2$

$50 \times 50 \mu\text{m}^2$

値段

高い

安い

??

粒子の
分離性能

高い
簡単

やや高い~高い
工夫が必要

高い
はず

ILCのハドロンカロリメータ

- ・ サンプリング型カロリメータ

吸収層

鉄・タングステン

信号

アナログ

セミデジタル

デジタル

検出層

シンチレータ

GRPC/ MICROME GAS/GEM

ch数

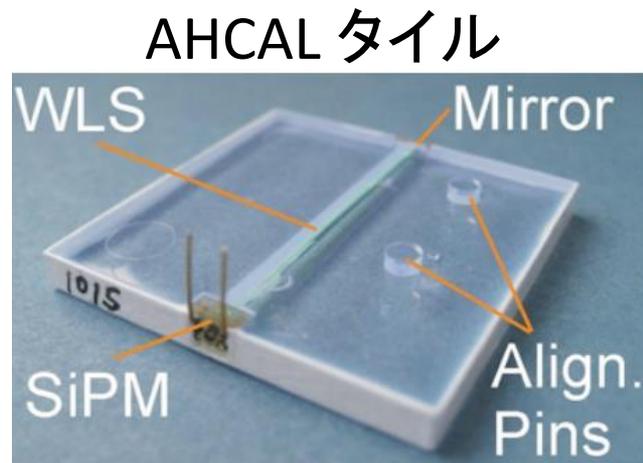
10^7

2×10^8

cell size

$3 \times 3 \text{cm}^2$

$1 \times 1 \text{cm}^2$



GRPC



* ATLAS

- tile calorimeter 5×10^5 channels
(barrelとend cap)

ILCのハドロンカロリメータ

- サンプリング型カロリメータ

吸収層

鉄・タングステン

信号

アナログ

セミデジタル

デジタル

検出層

シンチレータ

GRPC/ MICROME GAS/GEM

ch数

10^7

2×10^8

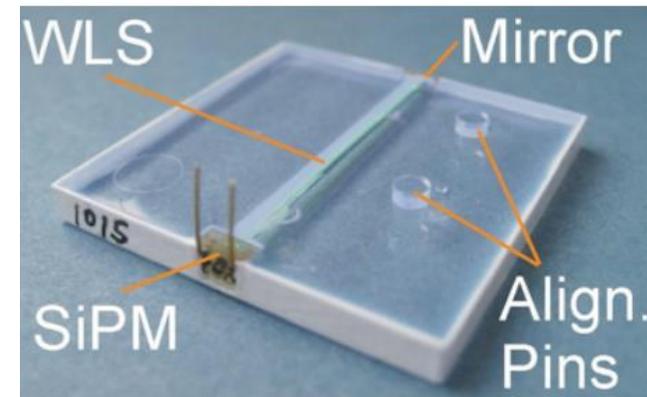
cell size

$3 \times 3 \text{cm}^2$

$1 \times 1 \text{cm}^2$

大型化したときにgasを一様に分布させるところが難しい

AHCAL タイル



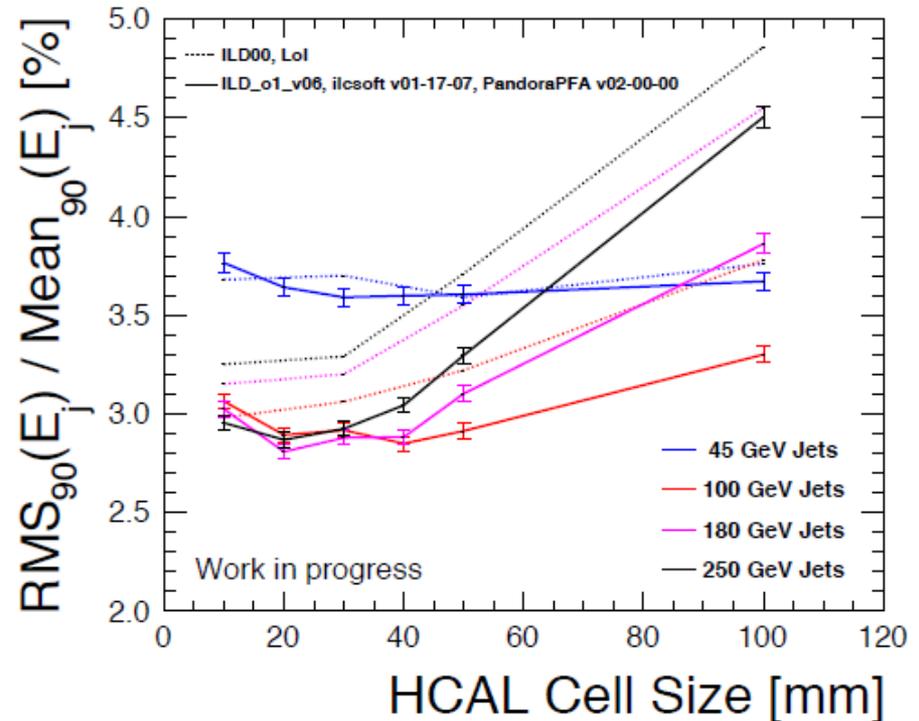
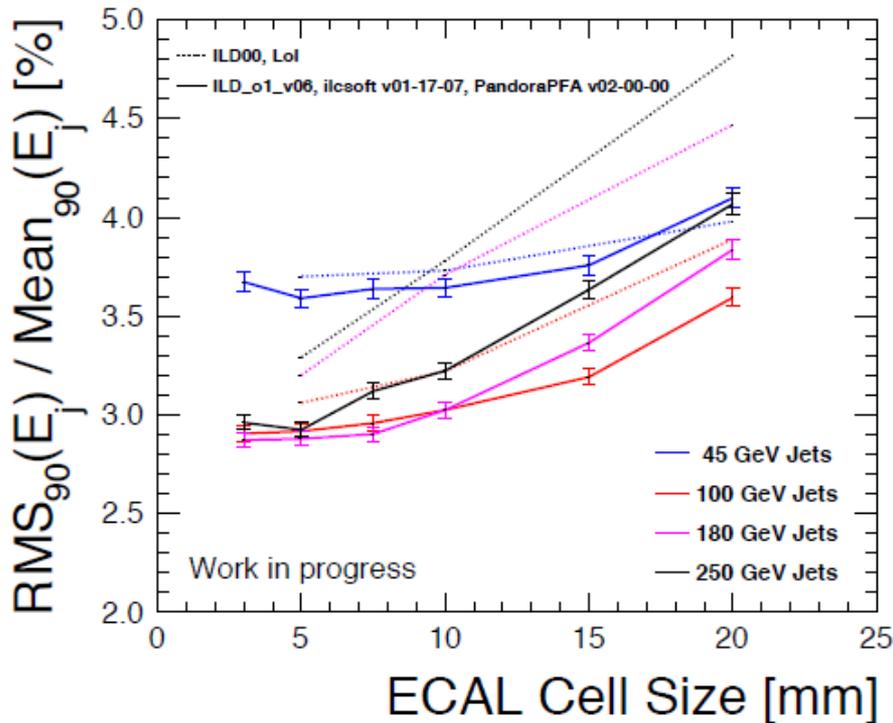
GRPC



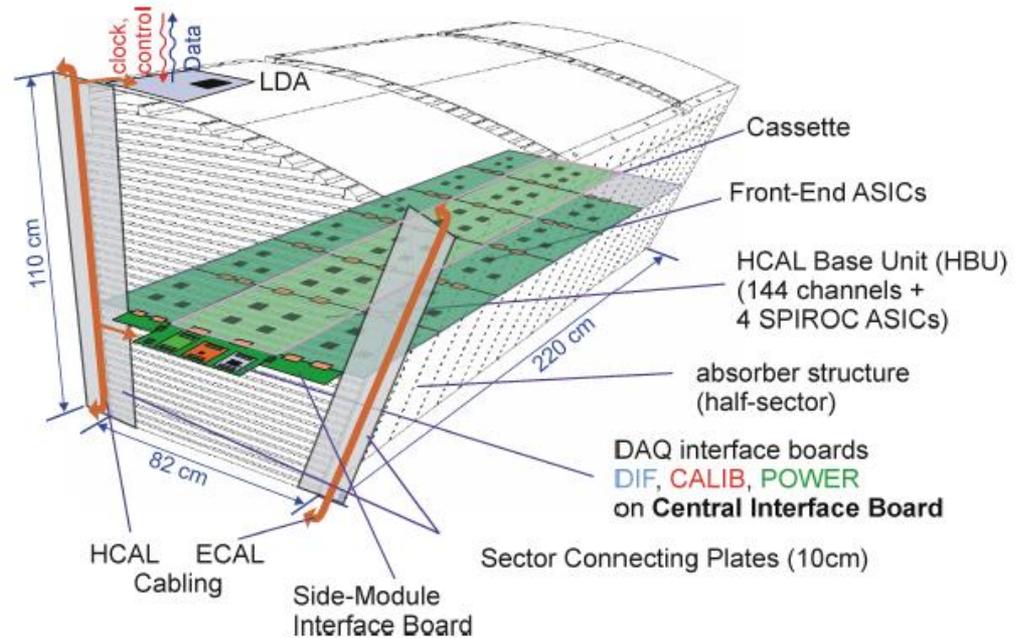
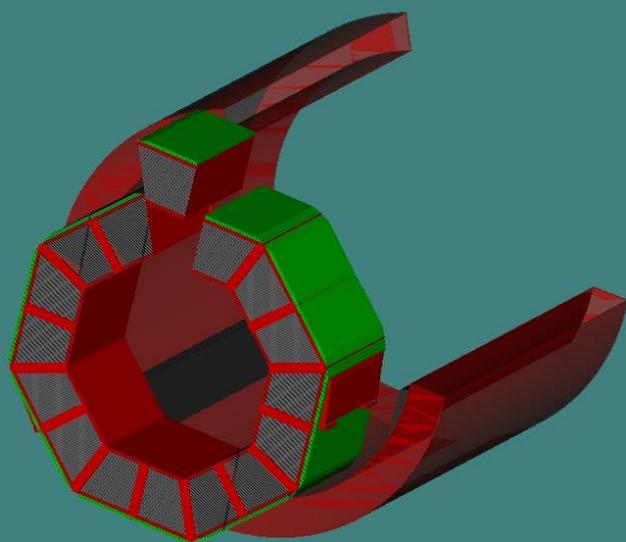
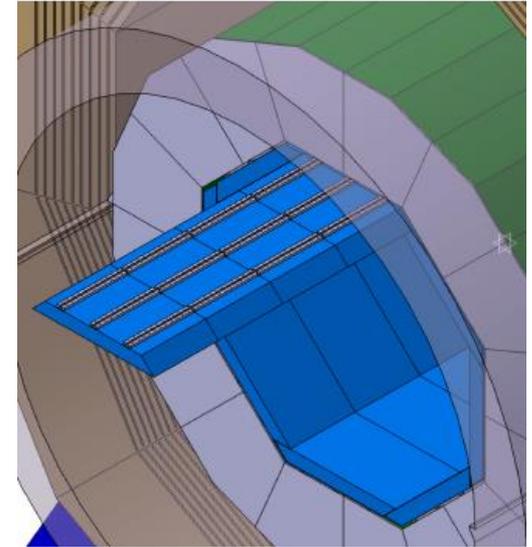
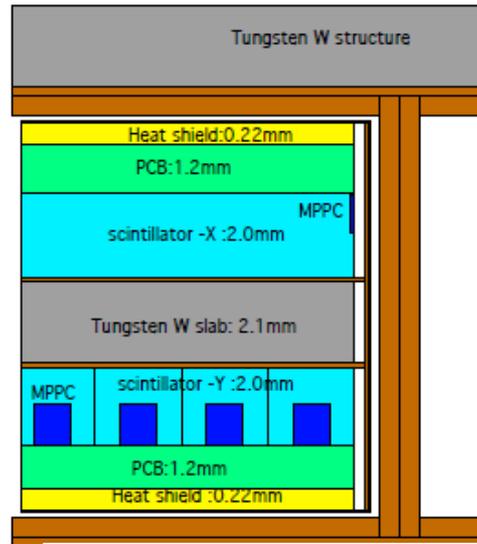
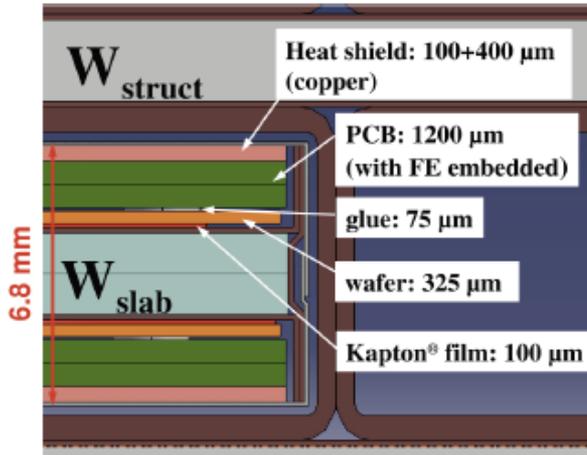
cell sizeの最適化

- どのくらいセルが小さくならないか？
- 小さければ小さいほど性能は良くなるのか？

*SiW-ECALとAHCALを用いた場合



Calorimeter Prototypes



ScW-ECAL

Baseline design prototype by Shinshu group



ECAL Base Unit (EBU) : readout board

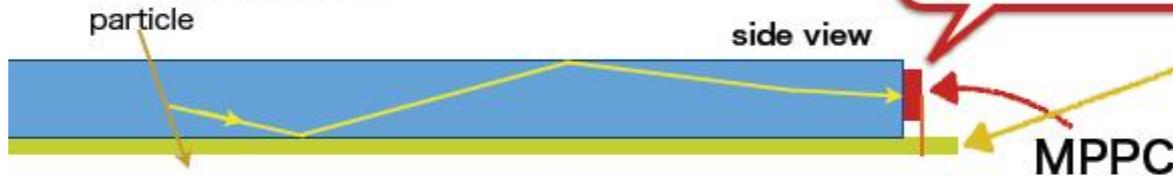
EBU has

- SPIROC x4 : each chip controls 36 channels
- MPPC
- LED
- Thermometer

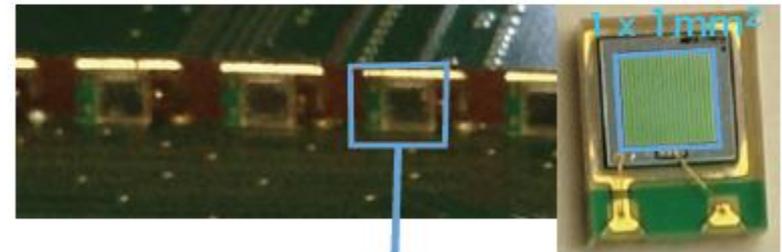
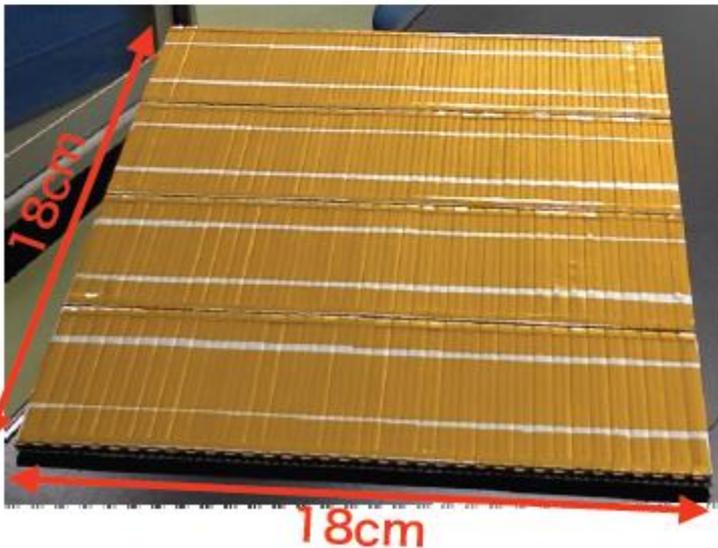
EBU



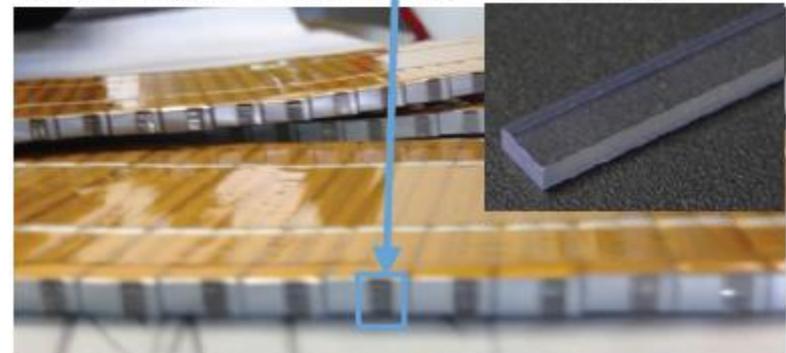
Pixel size
layer2 : 10um
layer3 : 25um



144 channels



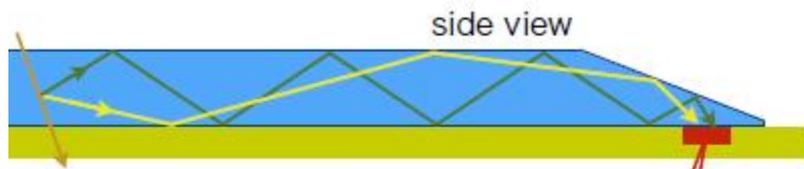
Scintillators (45 x 5 x 2mm³)



ScW-ECAL



Bottom readout prototype by Tokyo group



side view

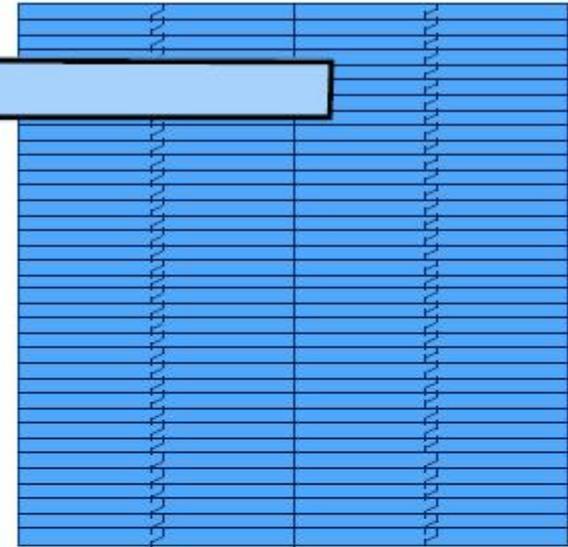
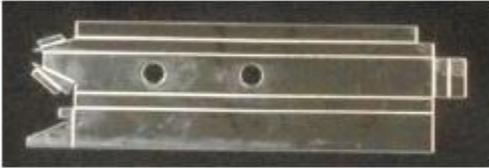
top view

MPPC

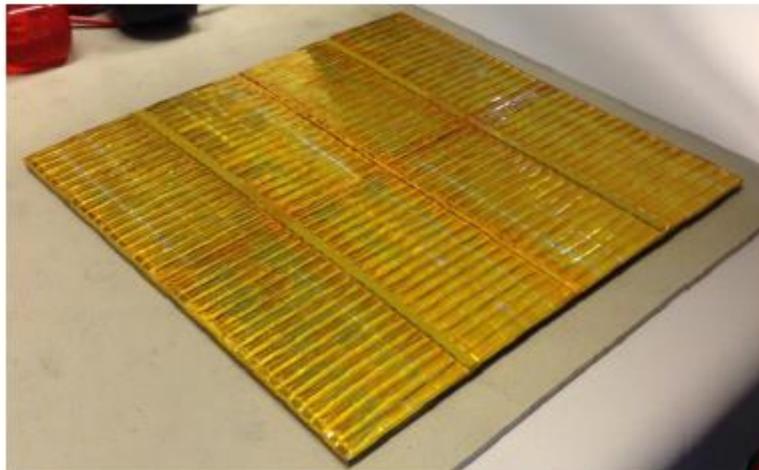
Read out from **bottom side** of scintillator

Scintillator with reflector

Reflector



18 x 18 cm², 144 channels

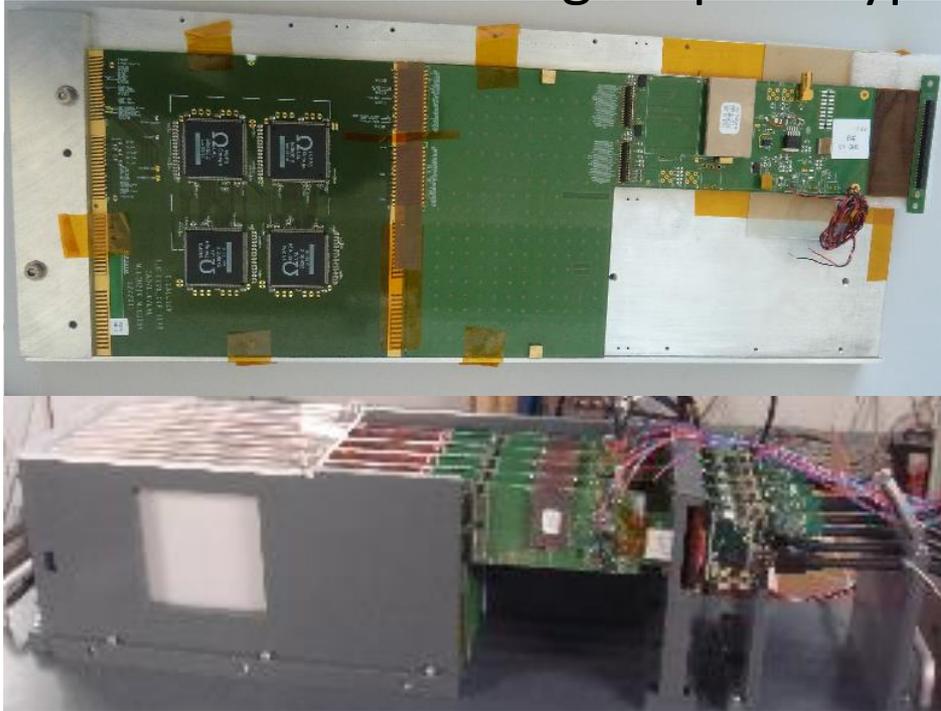


Wrapping scintillators with reflector...

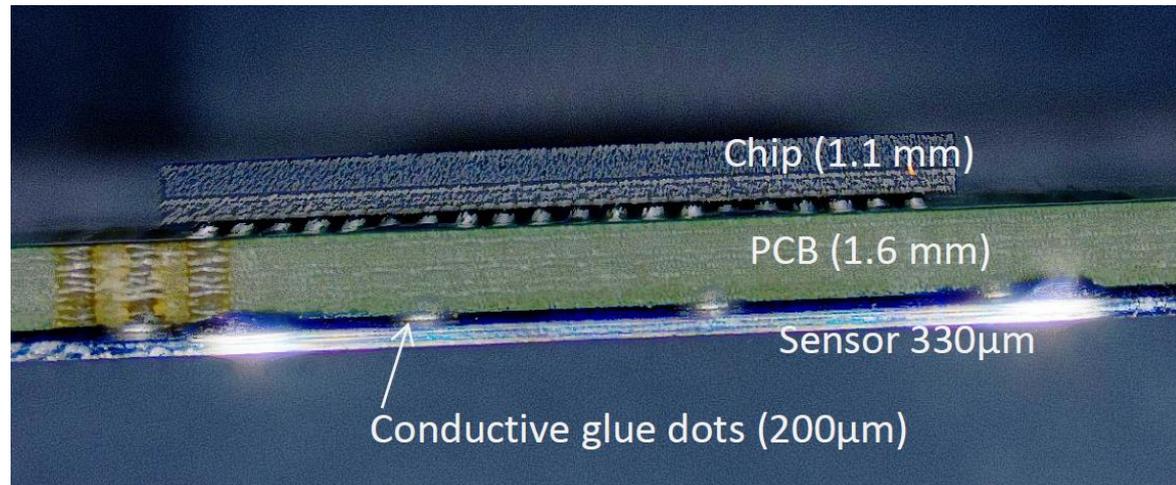
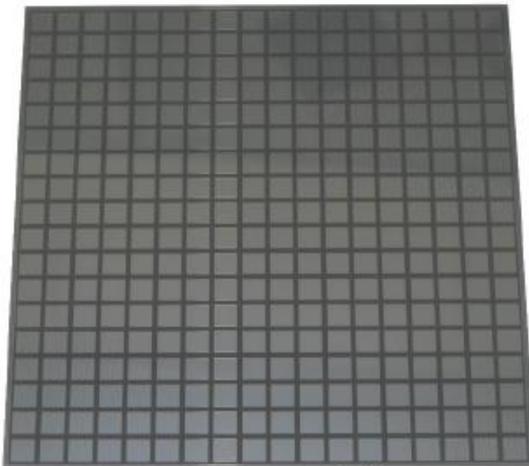
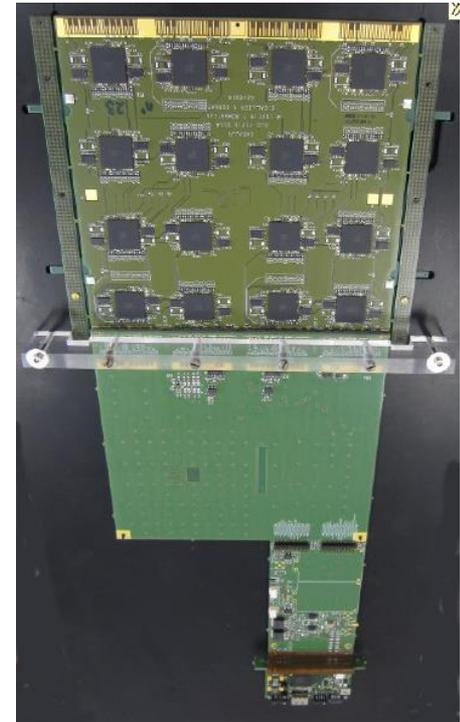


SiW-ECAL

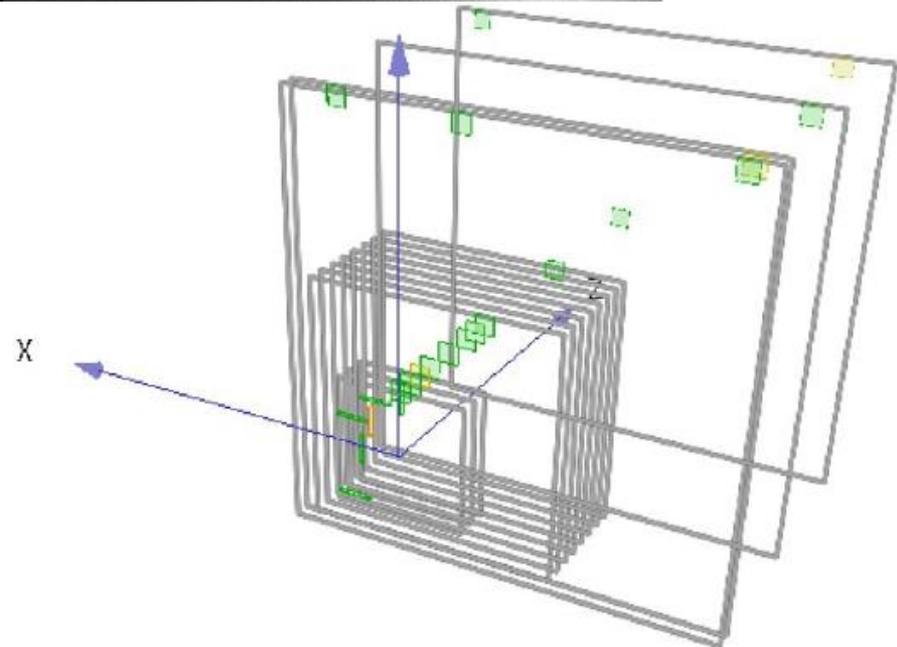
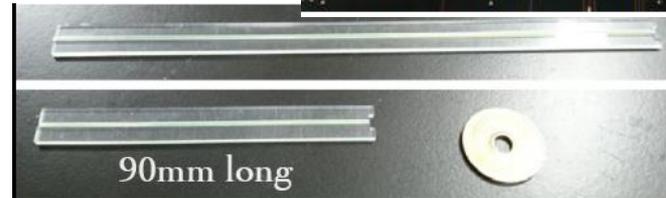
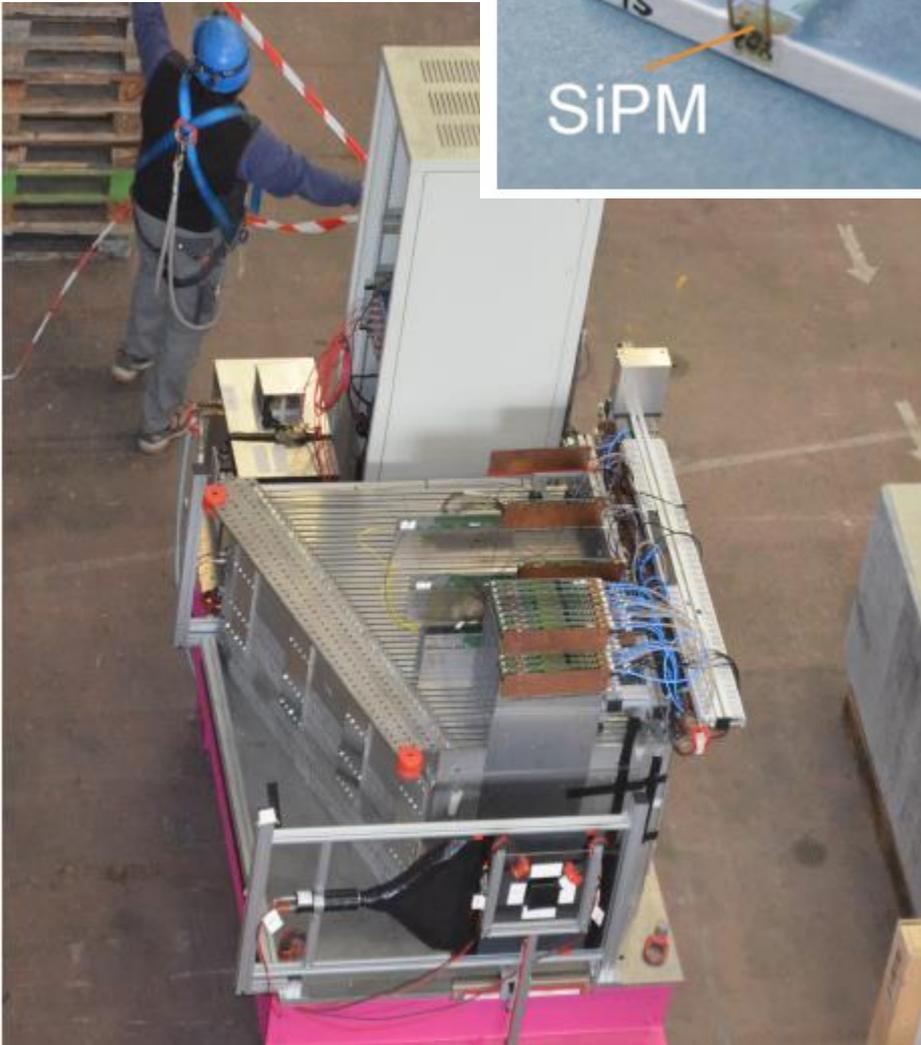
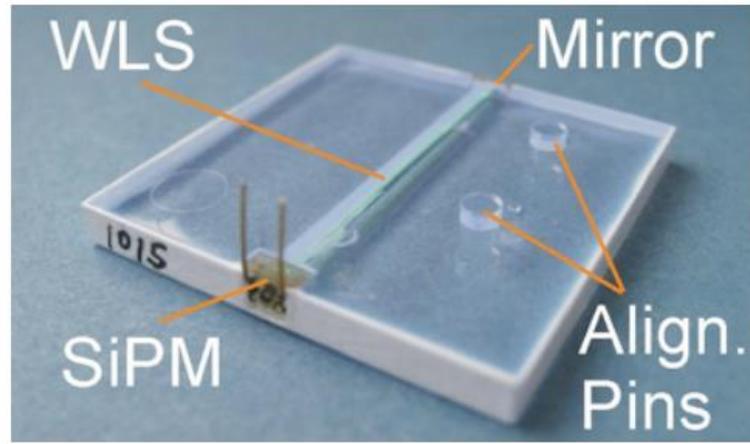
First technological prototype



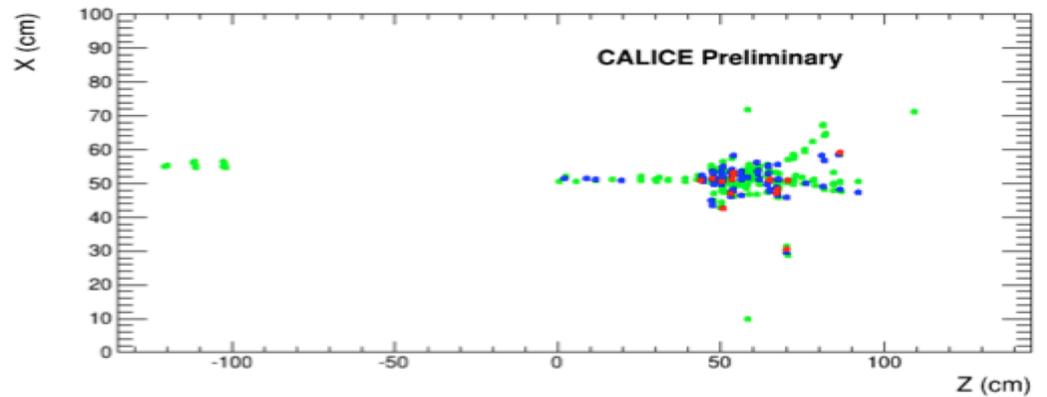
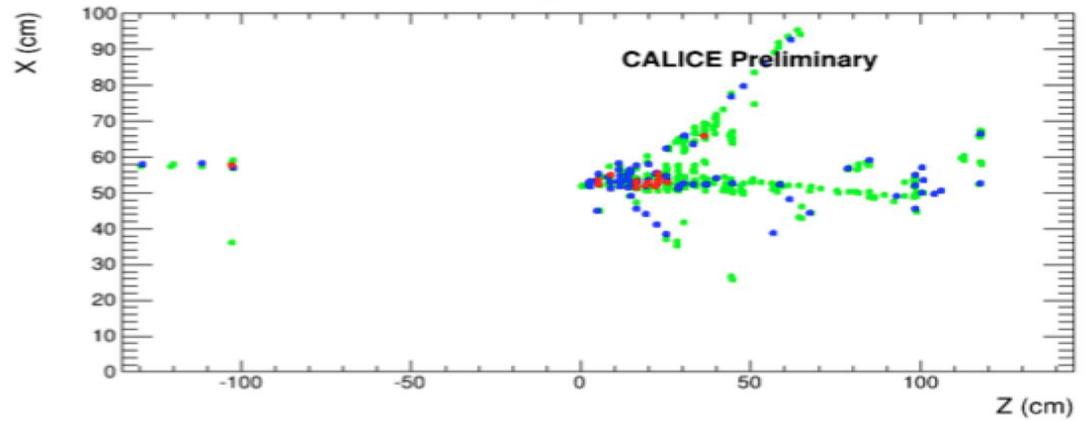
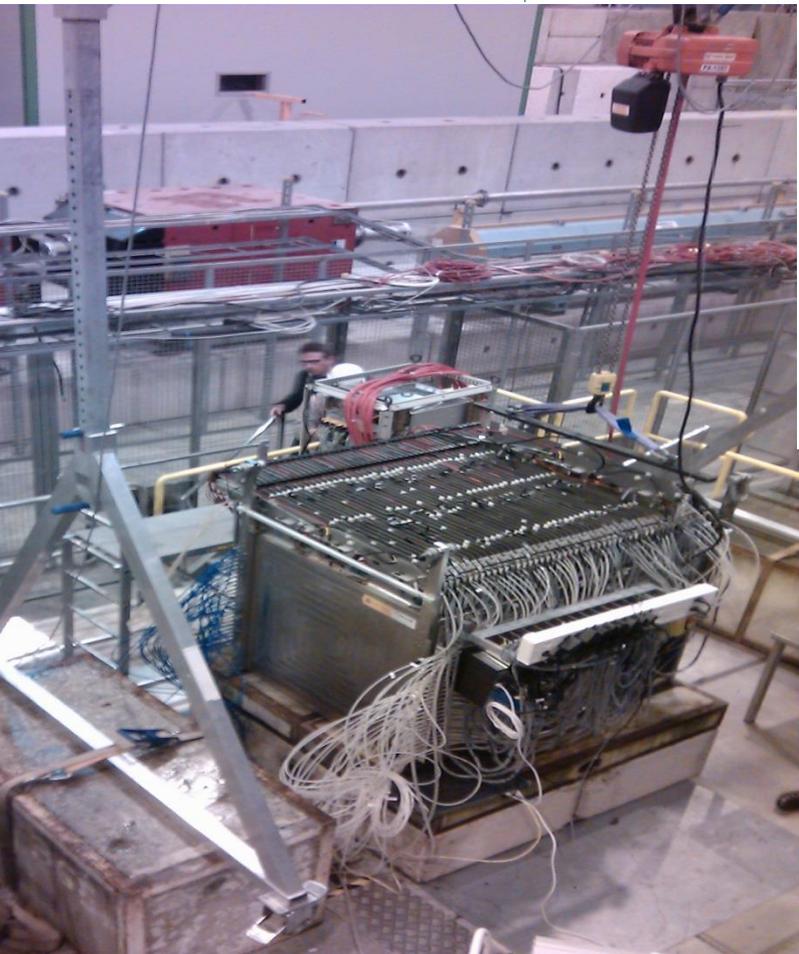
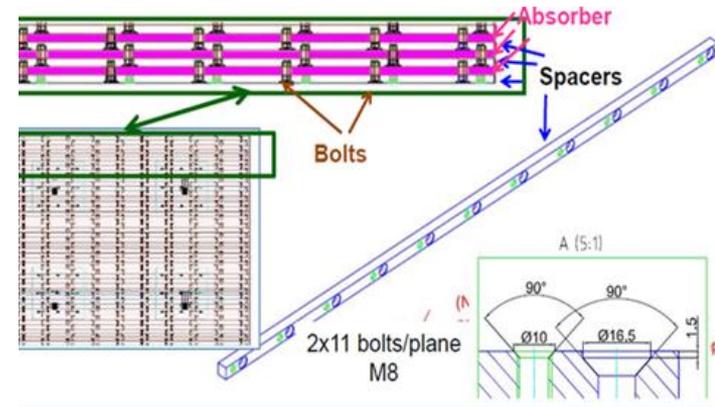
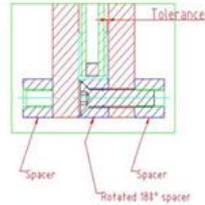
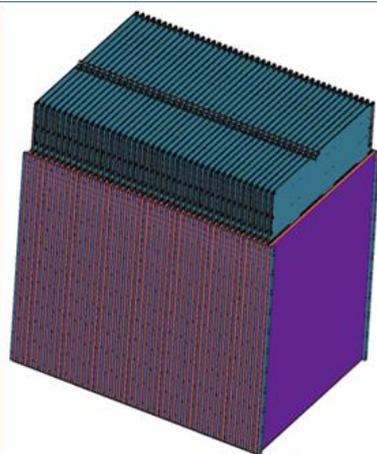
現在の状況



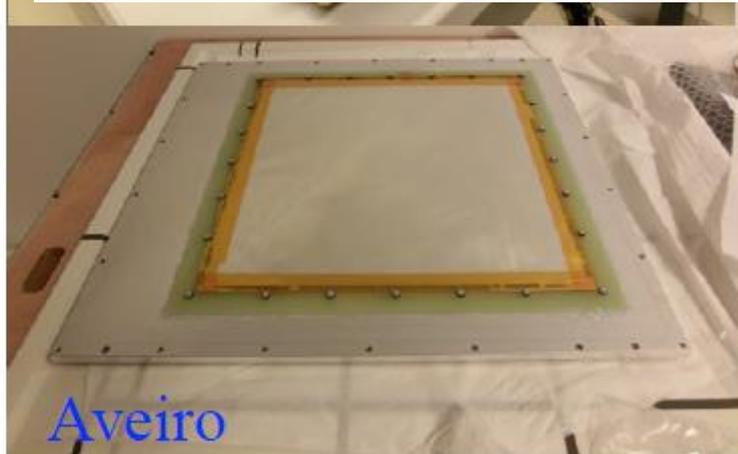
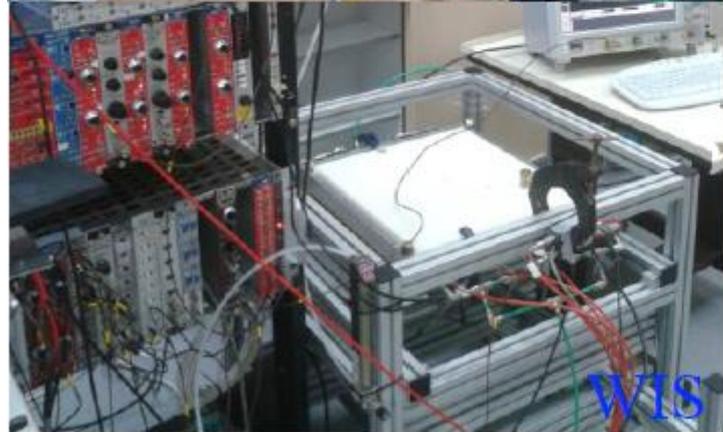
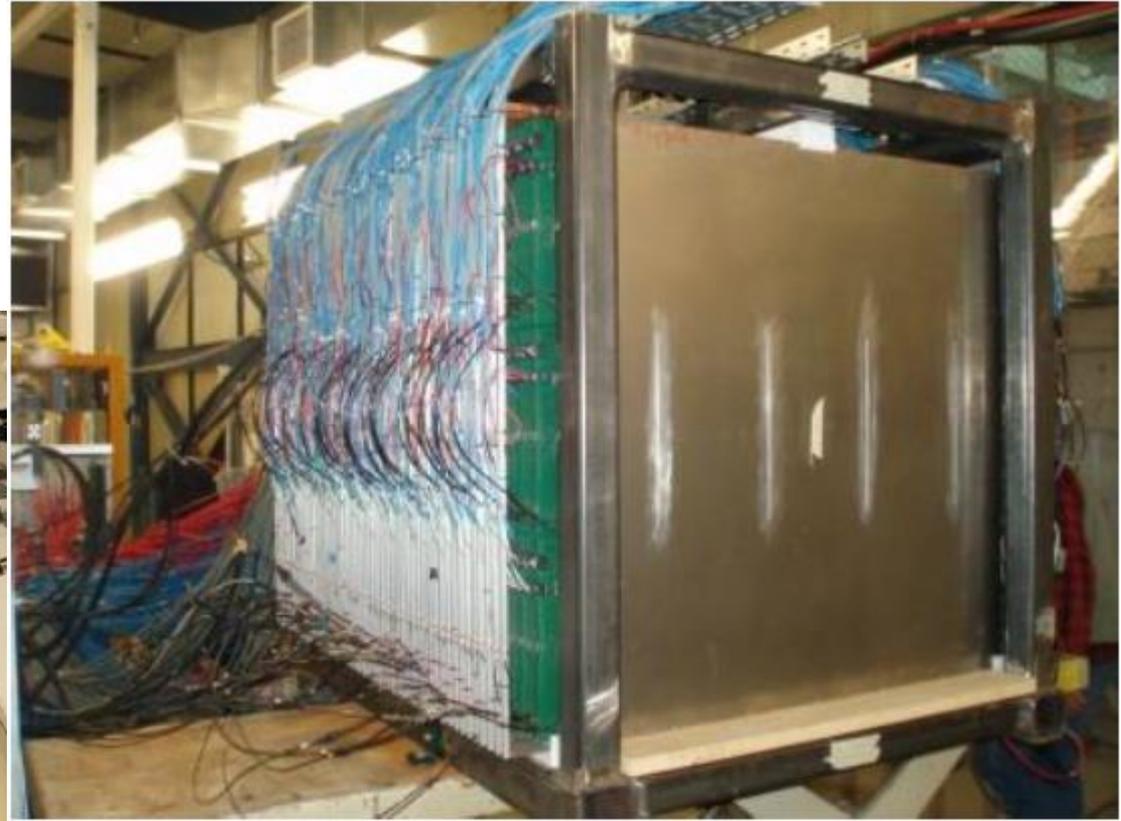
AHCAL



SDHCAL



DHCAL



カロリメータについて役に立つ参考文献

Christian W.Fabjan, CALORYMETRY IN HIGH-ENERGY PHYSICS

Christian W.Fabjan and Fabiola Gianotti, Calorimetry for Particle Physics

PDG

6. Atomic and nuclear properties of materials

28. High energy collider parameters

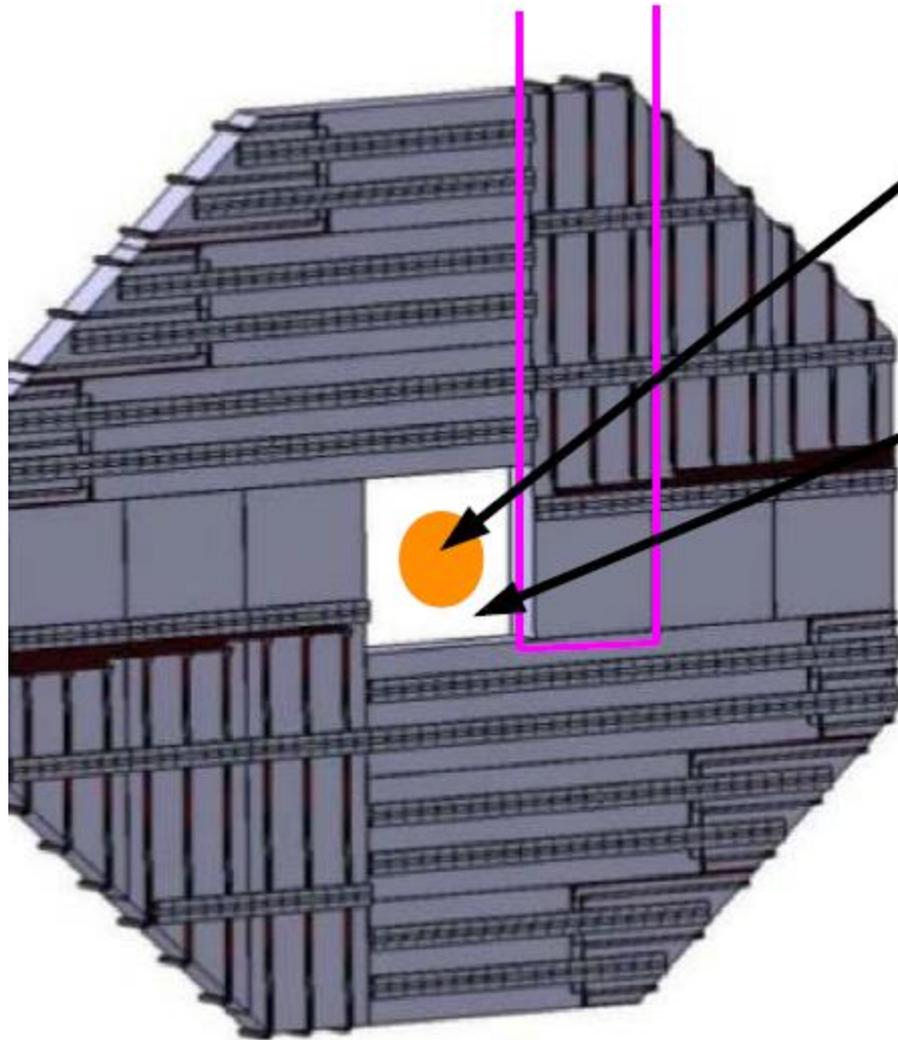
30. passage of particles through matter

31. Particle detectors for accelerator-based physics

32. Particle detectors for non-accelerator physics

backup

2 endcaps,
4 quadrants,
3 modules



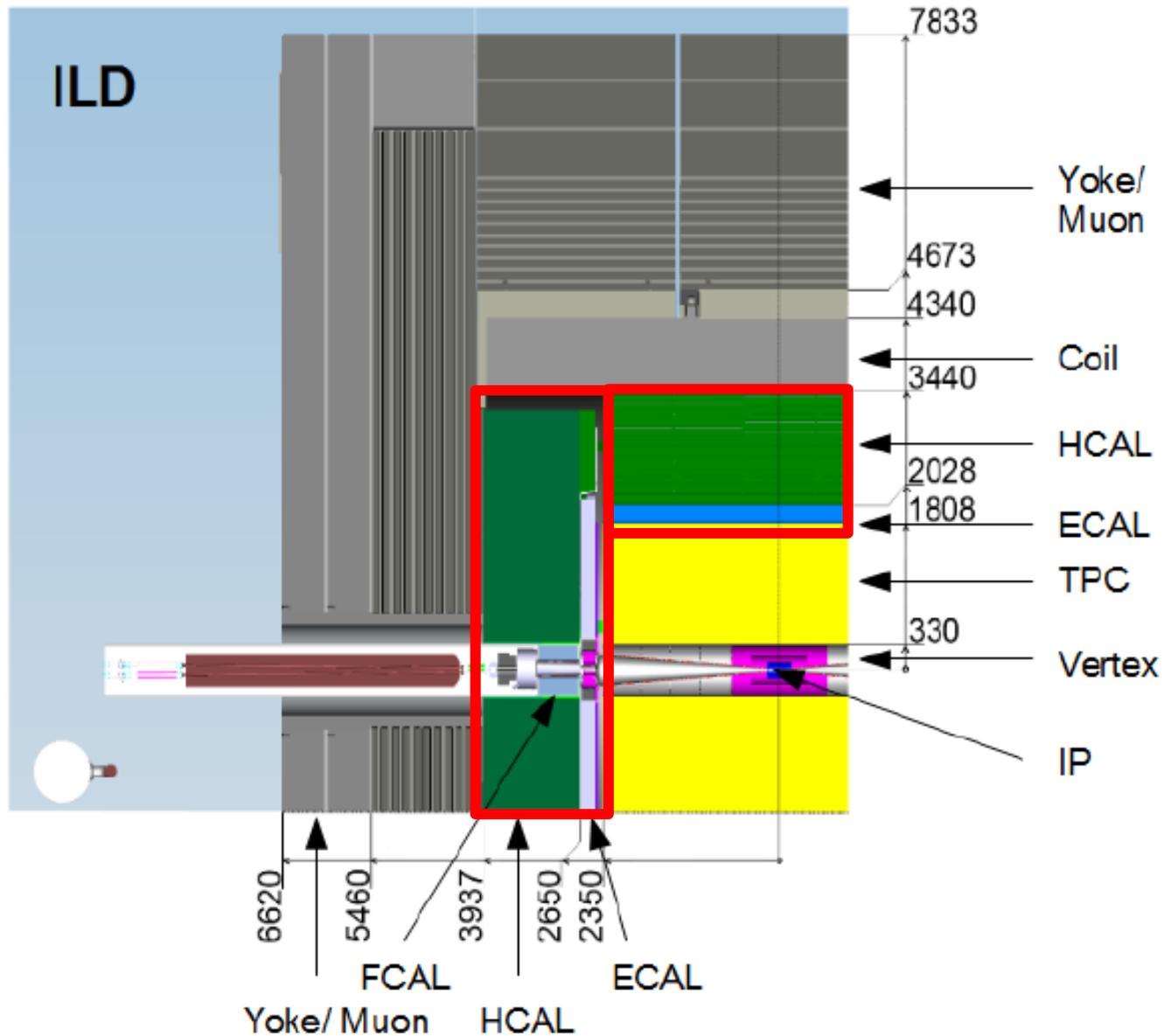
LumiCal
- belongs to FCAL

ECAL ring

No detailed mechanical
design exists

→ geometrically simplistic
simulation based on
si-ECAL

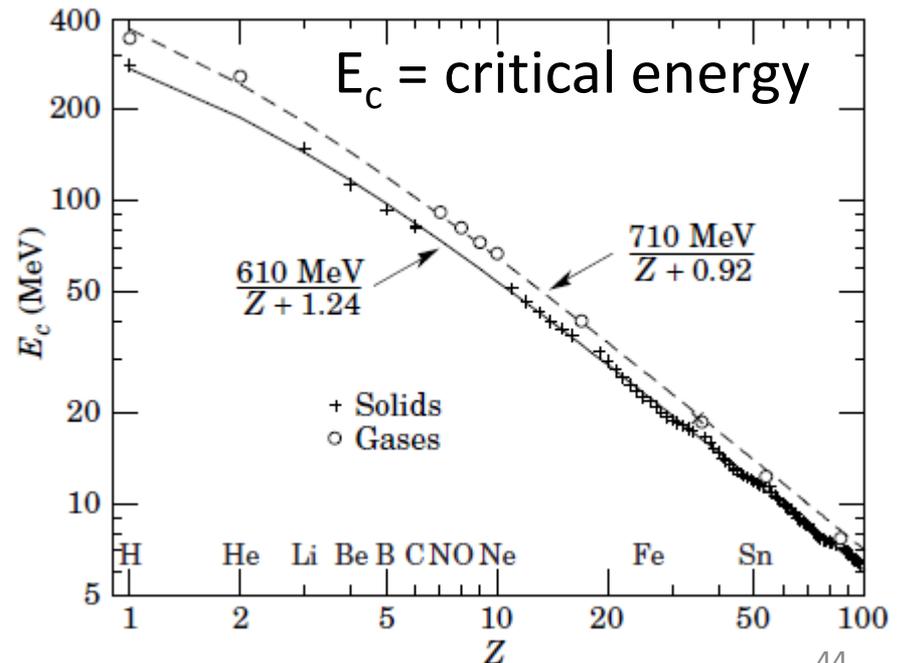
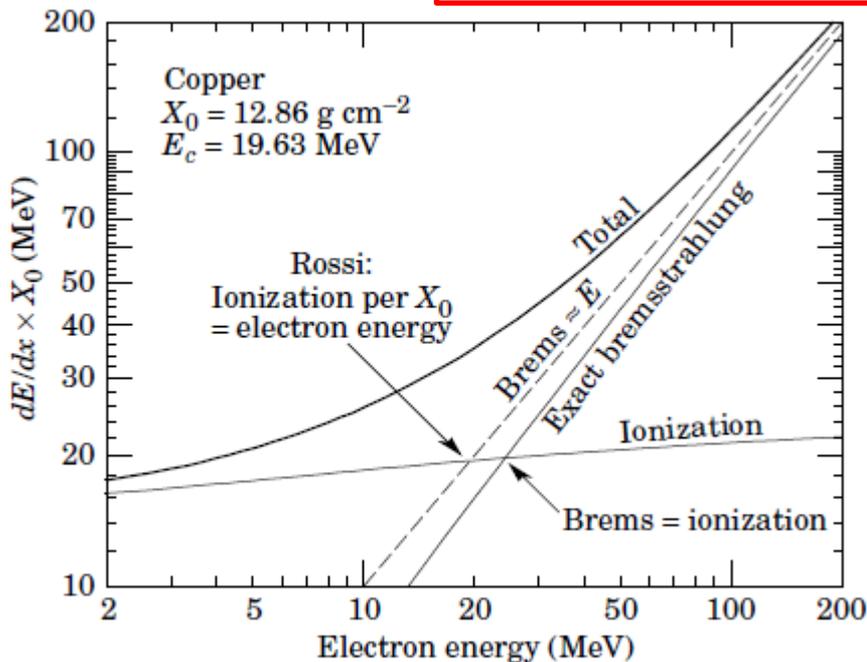
ILD



電磁シャワーの発達

- モリエール半径 (Moliere radius)
- エネルギーの90%が入るシャワーの半径

$$R_M (\text{g/cm}^2) \sim \frac{21(\text{MeV})X_0}{E_c(\text{MeV})}$$

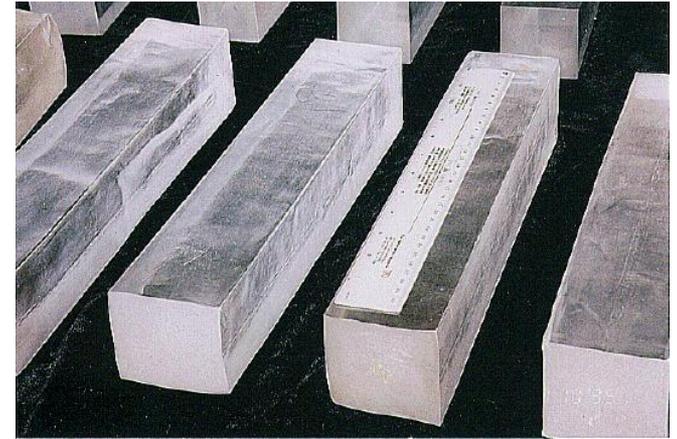


シンチレーションカロリメータ

- Belle, BaBar : CsI(Tl)

BaBar : $2.3\%/E^{1/4} \oplus 1.4\%$

Belle : 1.7% for $E_\gamma > 3.5$ GeV

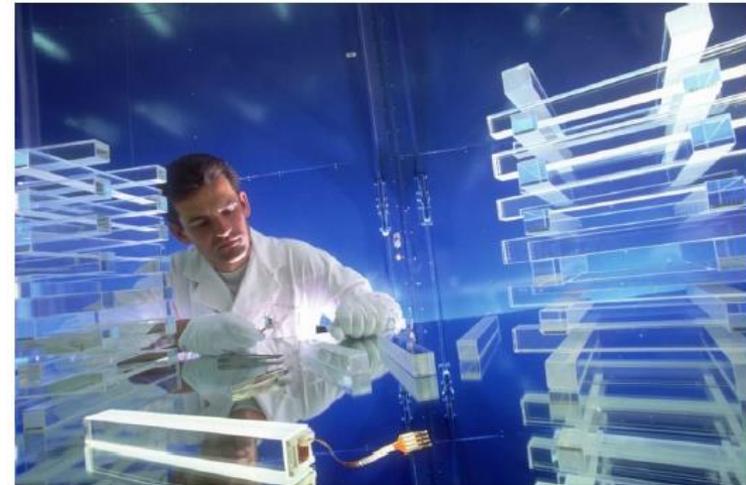


CsI(Tl) (Belle)

- CMS : PbWO₄

バレル部分 test beam result

$$\frac{2.8\%}{\sqrt{E(\text{GeV})}} \oplus \frac{0.128}{E(\text{GeV})} \oplus 0.3\%$$



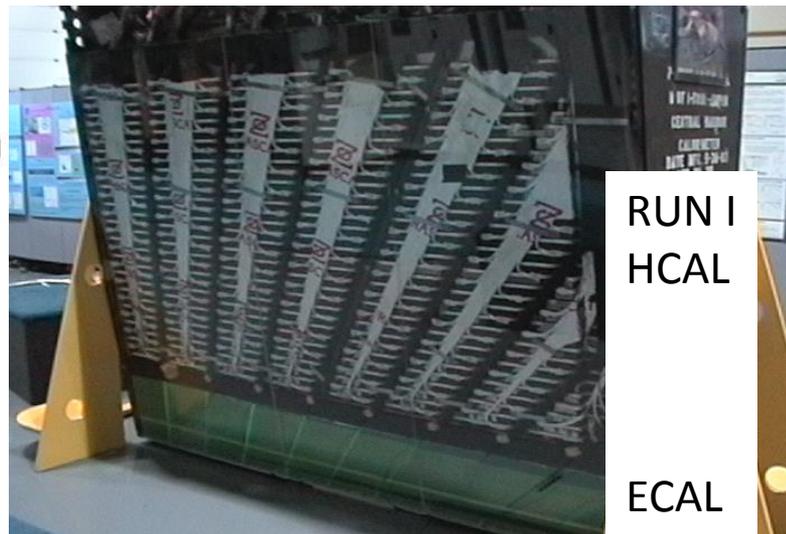
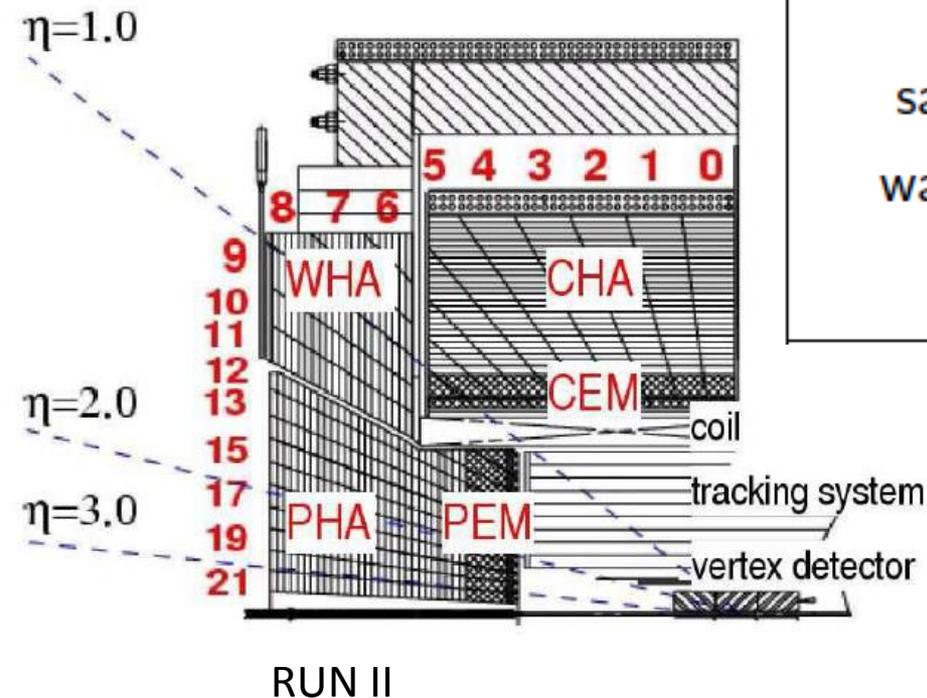
PbWO₄ (CMS)

サンプリング型電磁カロリメータ シンチレータ

• CDF :

鉛+シンチレータ

		Central	Plug
EM	thickness	$19 X_0, 1\lambda$	$21 X_0, 1\lambda$
	sample(Pb)	$0.6 X_0$	$0.8 X_0$
	sample(scint.)	5 mm	4.5 mm
	wavelength sh.	sheet	fiber
	resolution	$\frac{13.5\%}{\sqrt{E_T}} \oplus 2\%$	$\frac{14.5\%}{\sqrt{E}} \oplus 1\%$

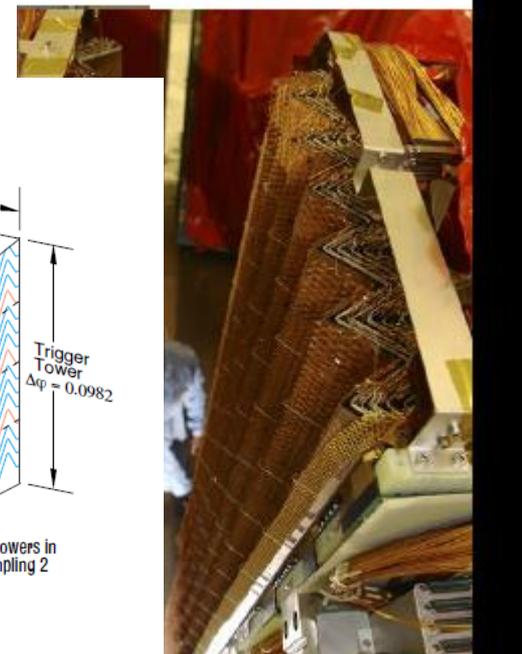
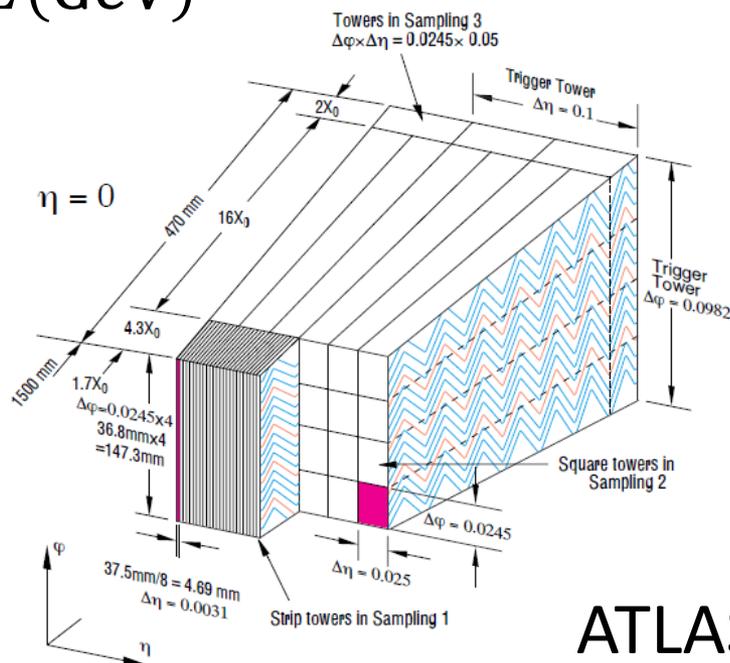
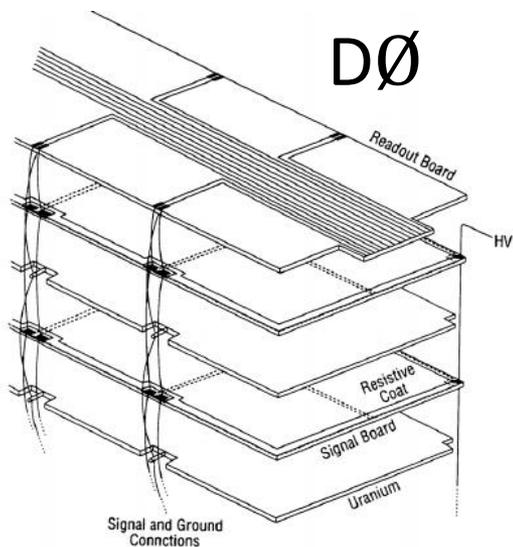


サンプリング型電磁カロリメータ 液体アルゴン

- DØ(HCALも液体アルゴン), ATLAS

DØ : 吸収層 ウラン、銅 $\frac{16\%}{\sqrt{E(\text{GeV})}} \oplus \frac{0.3}{E(\text{GeV})} \oplus 0.3 \%$

ATLAS : 吸収層 鉛 $\frac{10\%}{\sqrt{E(\text{GeV})}} \oplus 0.7 \%$



ATLAS

ハドロンカロリメータの例

- ATLAS (ソレノイドコイルの外)

- barrel : 鉄 + シンチレータ $\frac{50\%}{\sqrt{E(\text{GeV})}} \oplus 3\%$

- end-cap : 銅 + 液体アルゴン $\frac{75\%}{\sqrt{E(\text{GeV})}} \oplus 5.8\%$

- CMS (ソレノイドコイルの中)

- 真鍮 + シンチレータ $\frac{100\%}{\sqrt{E(\text{GeV})}} \oplus 5\%$

衝突型加速器実験のカロリメータ

	電磁カロリメータ	ハドロンカロリメータ
Sampling Calorimeter	吸収層： 鉛、ウラン、 タングステン 検出層： シンチレータ、液体 アルゴン、シリコン $10 \sim 20\% / \sqrt{E (\text{GeV})}$	吸収層： 鉛、ウラン、銅、真鍮 タングステン 検出層： シンチレータ、液体ア ルゴン $35 \sim 100\% / \sqrt{E (\text{GeV})}$
Homogeneous Calorimeter	クリスタル $< 5\% / \sqrt{E (\text{GeV})}$	

他、純水、ガス、液化希ガスなどいろいろ

Table 31.8: Resolution of typical electromagnetic calorimeters. E is in GeV.

Technology (Experiment)	Depth	Energy resolution	Date
NaI(Tl) (Crystal Ball)	$20X_0$	$2.7\%/E^{1/4}$	1983
Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂ (BGO) (L3)	$22X_0$	$2\%/\sqrt{E} \oplus 0.7\%$	1993
CsI (KTeV)	$27X_0$	$2\%/\sqrt{E} \oplus 0.45\%$	1996
CsI(Tl) (BaBar)	$16-18X_0$	$2.3\%/E^{1/4} \oplus 1.4\%$	1999
CsI(Tl) (BELLE)	$16X_0$	1.7% for $E_\gamma > 3.5$ GeV	1998
PbWO ₄ (PWO) (CMS)	$25X_0$	$3\%/\sqrt{E} \oplus 0.5\% \oplus 0.2/E$	1997
Lead glass (OPAL)	$20.5X_0$	$5\%/\sqrt{E}$	1990
Liquid Kr (NA48)	$27X_0$	$3.2\%/\sqrt{E} \oplus 0.42\% \oplus 0.09/E$	1998
Scintillator/depleted U (ZEUS)	$20-30X_0$	$18\%/\sqrt{E}$	1988
Scintillator/Pb (CDF)	$18X_0$	$13.5\%/\sqrt{E}$	1988
Scintillator fiber/Pb spaghetti (KLOE)	$15X_0$	$5.7\%/\sqrt{E} \oplus 0.6\%$	1995
Liquid Ar/Pb (NA31)	$27X_0$	$7.5\%/\sqrt{E} \oplus 0.5\% \oplus 0.1/E$	1988
Liquid Ar/Pb (SLD)	$21X_0$	$8\%/\sqrt{E}$	1993
Liquid Ar/Pb (H1)	$20-30X_0$	$12\%/\sqrt{E} \oplus 1\%$	1998
Liquid Ar/depl. U (DØ)	$20.5X_0$	$16\%/\sqrt{E} \oplus 0.3\% \oplus 0.3/E$	1993
Liquid Ar/Pb accordion (ATLAS)	$25X_0$	$10\%/\sqrt{E} \oplus 0.4\% \oplus 0.3/E$	1996