

カロリメータの基礎

2013年7月22日@富山

ILC夏の合宿

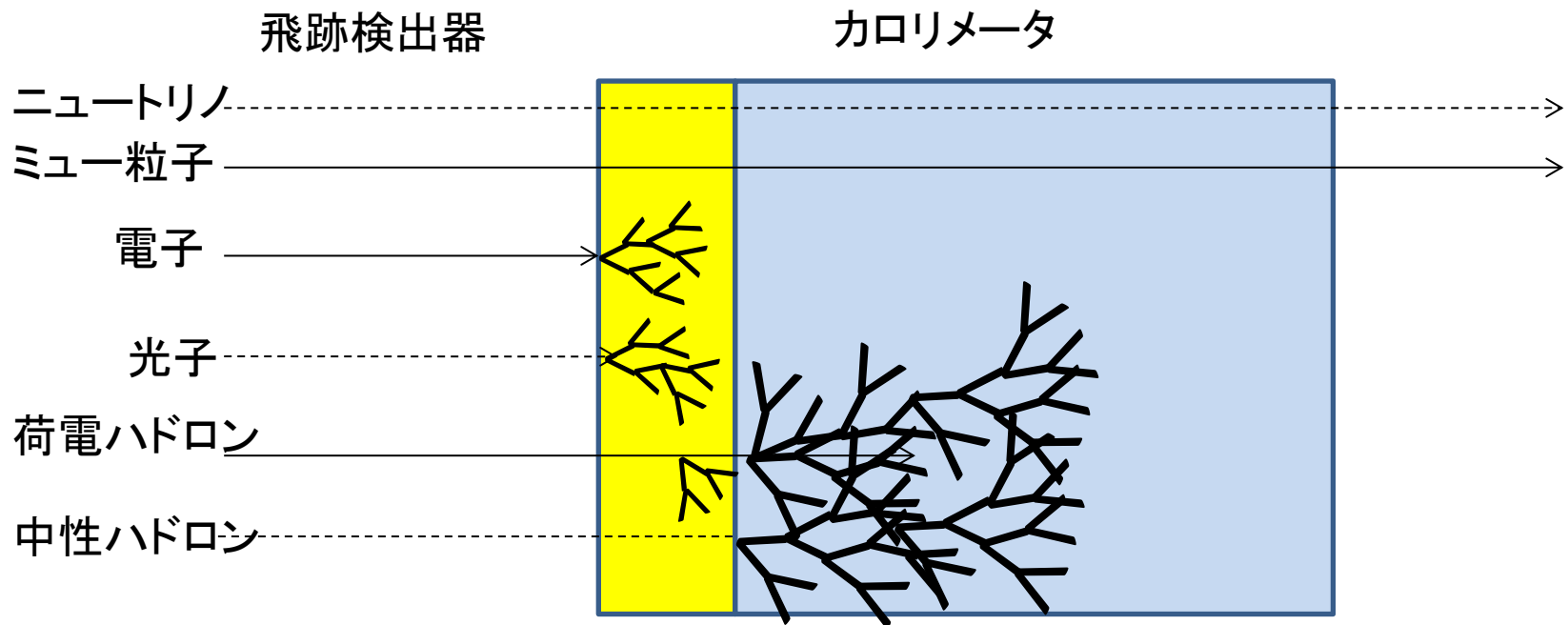
須藤裕司（九州大学）

カロリメータの役割

- 粒子のエネルギーを測定する
- 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（もしくは横方向エネルギー）測定も可能

エネルギーを測定するために

- 粒子をカロリメータ内で止める
- そのため**カロリメータは物質量の大きな材質で**構成される。(鉛、鉄、タングステン、ウラン)
- レプトンとハドロンそれぞれに対応したカロリメータが必要



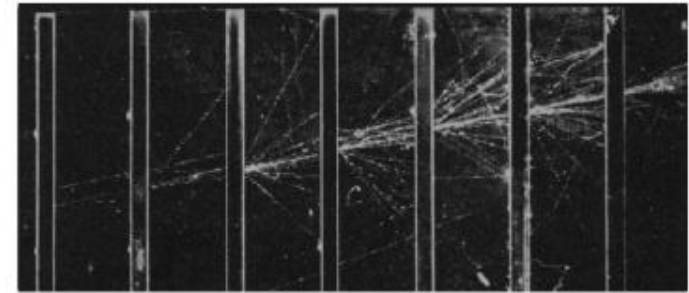
エネルギーの落とし方

- 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 $\frac{\sigma}{E} = \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus \frac{b}{E} \oplus c$
 - 確率的な項
 - 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)

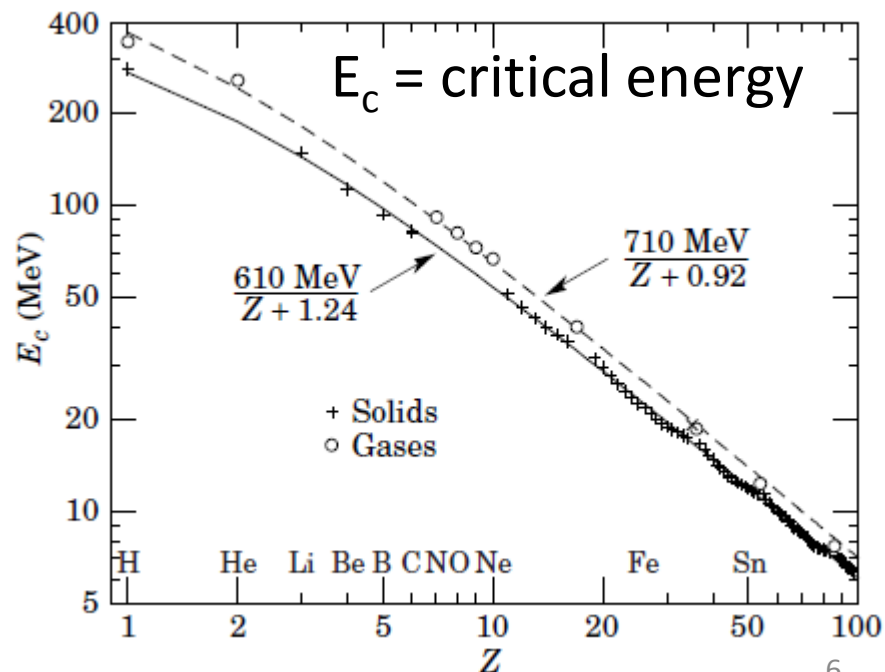
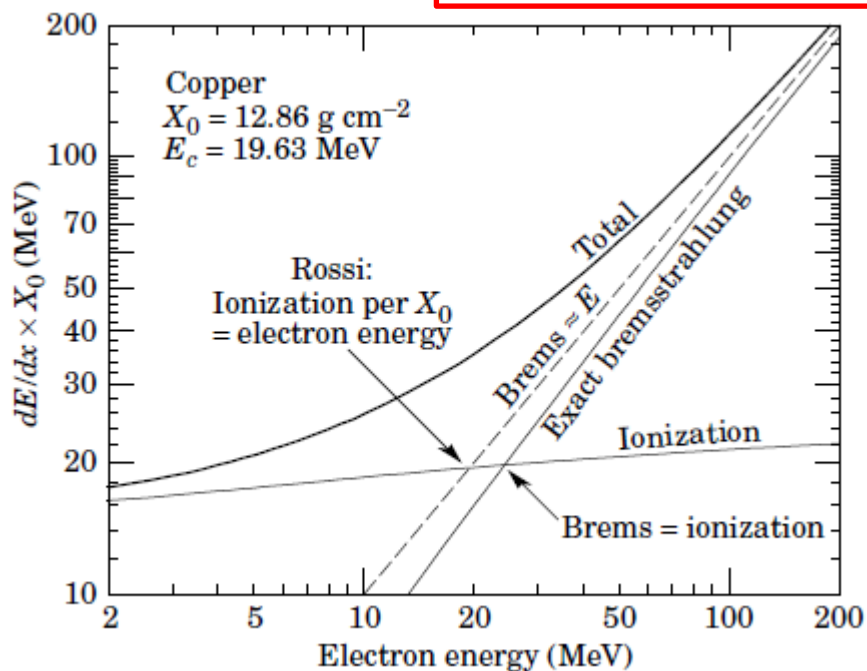
平均自由行程

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

電磁シャワーの発達

- 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

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



電磁シャワーの発達2

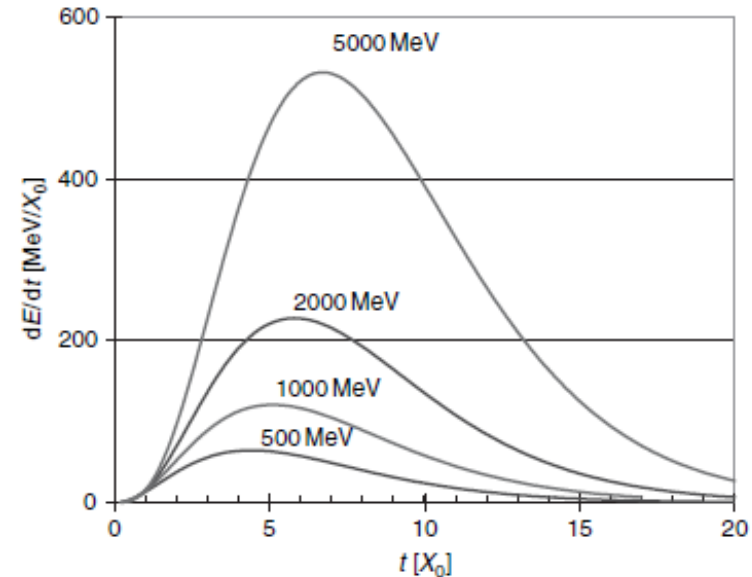
- 奥行方向

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

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 $\sim 1\%$



電磁カロリメータ

- homogeneous calorimeter

- 物質量の大きな検出層

- クリスタル (PbO, CsI, PbWO₄ ...)

- sampling calorimeter

- 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

- 検出層: シンチレータ、シリコン、液体アルゴン

homogeneous calorimeter (全吸収型)

- 利点 高いエネルギー分解能
- 欠点 クリスタルが高価。奥行方向の位置分解能に劣る
- 用途 主に、低エネルギー粒子の精密測定、粒子識別
- エネルギー分解能 $\sigma/E < 5(\%)/\sqrt{E(\text{GeV})}$

homogeneous calorimeter 2

- Si、Ge結晶
 - 低エネルギー、 $\sigma/E \propto \sqrt{F}/\sqrt{N_{eh}} \sim \text{数百eV}$
- 鉛タングステン、液体Al, Kr, Xe
 - シンチレーションカロリメータ
- PbO、PbF₂、水
 - チェレンコフカロリメータ
 - 粒子の同定

* FはFano factor (F~0.13 in Ge)

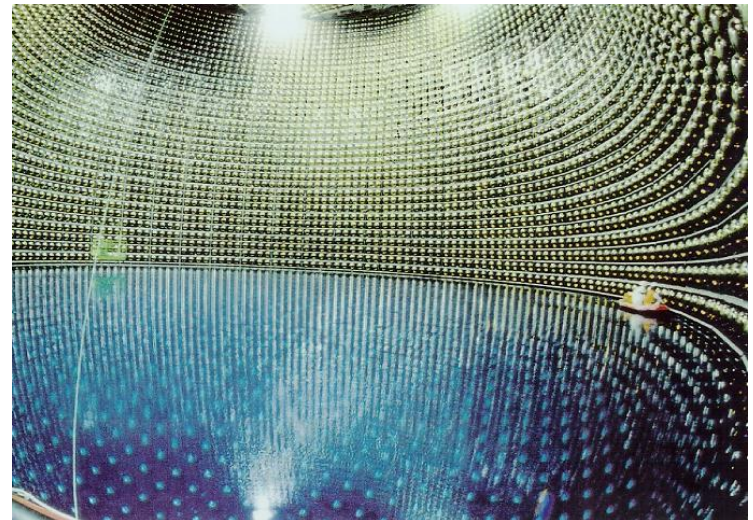
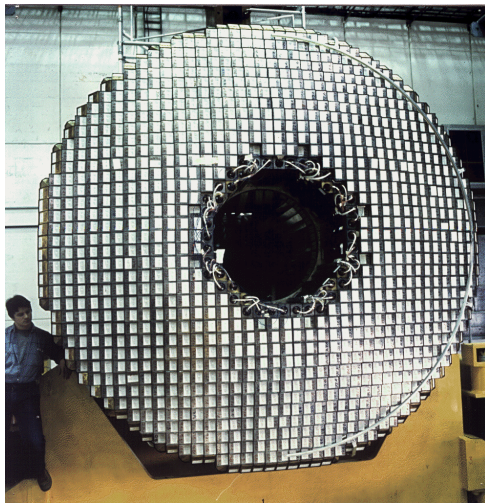
チェレンコフカロリメータ

- OPAL : 鉛ガラス (PbO)

OPAL end-cap : 分解能 $5(\%)/\sqrt{E(\text{GeV})}$

- カミオカンデ : 純水

2.5%(at 1 GeV) ~ 16% (at 10 MeV)

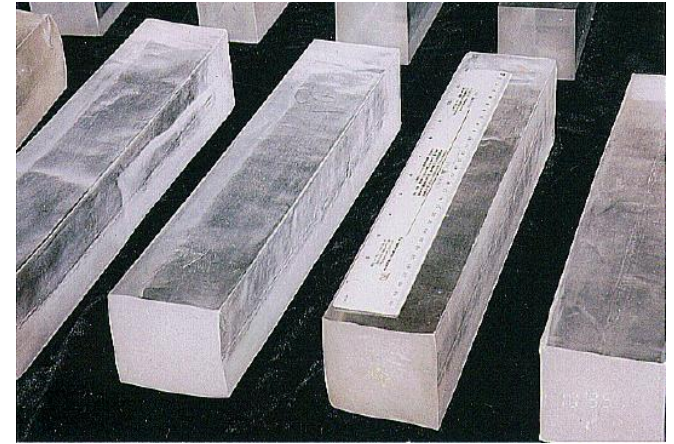


シンチレーションカロリメータ

- Belle, BaBar : CsI(Tl)

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

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

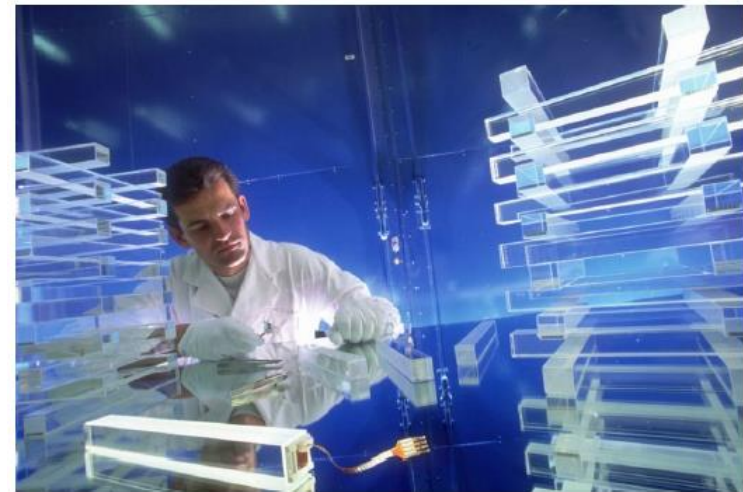


CsI(Tl) (Belle)

- 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)

サンプリング型カロリメータ

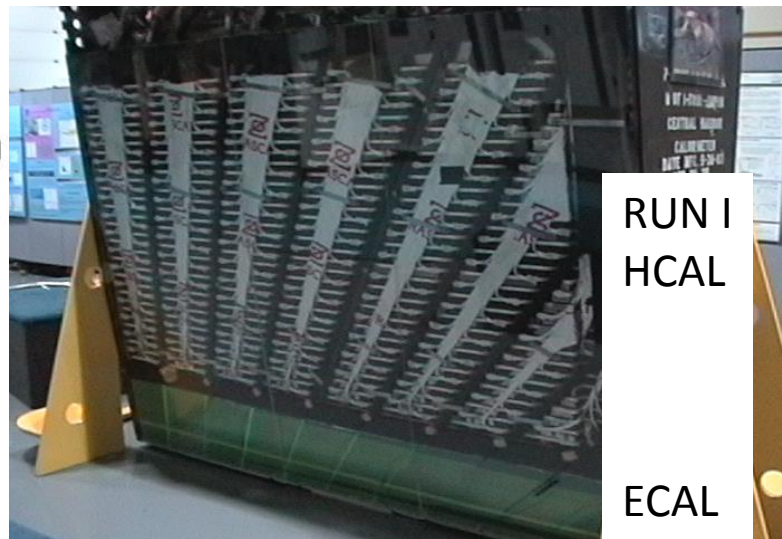
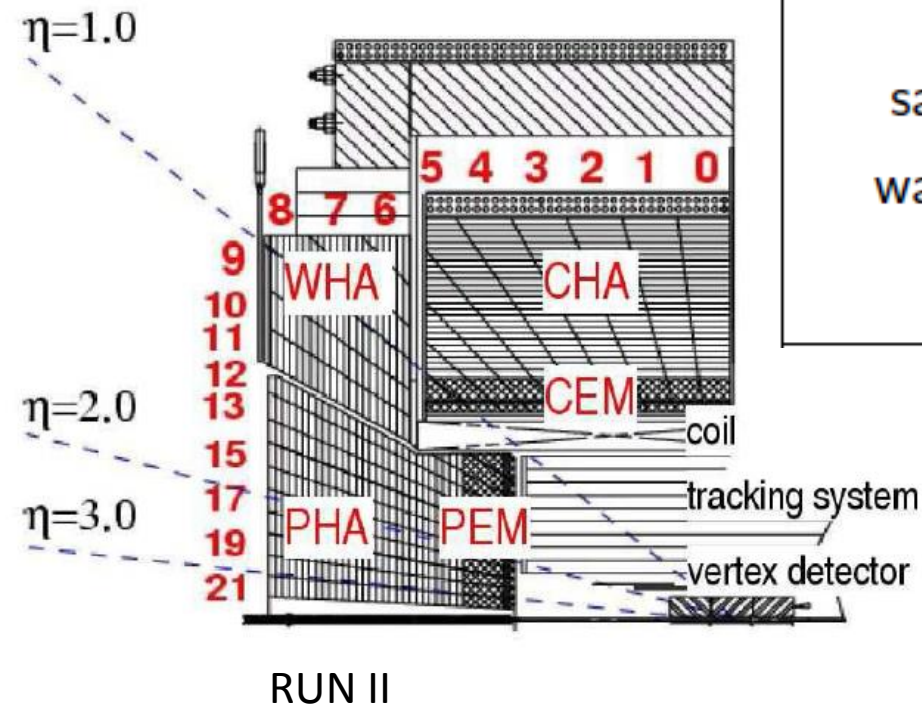
- 利点 エネルギー測定範囲が広い (大型化)
三次元的なシャワーの観測が可能
クリスタルに比べて安価
- 欠点 全吸収型に比べてエネルギー分解能に劣る
- 用途 主に高エネルギーの電子・光子
- エネルギー分解能 $10\sim 20\%/\sqrt{E(\text{GeV})}$

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	$\frac{13.5\%}{\sqrt{E_T}} \oplus 2\%$	$\frac{14.5\%}{\sqrt{E}} \oplus 1\%$

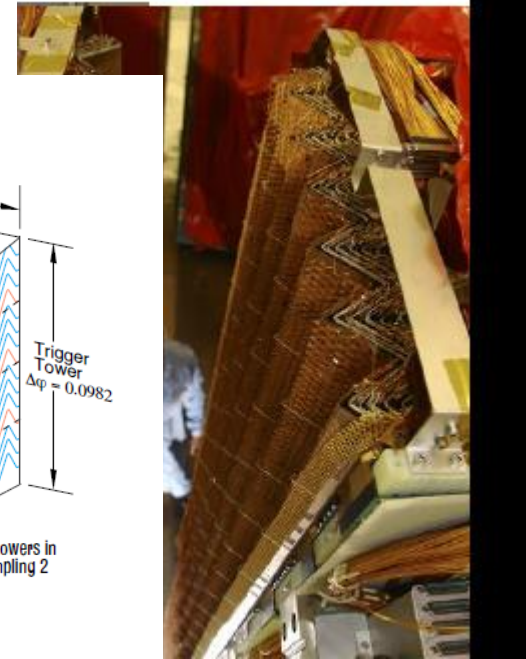
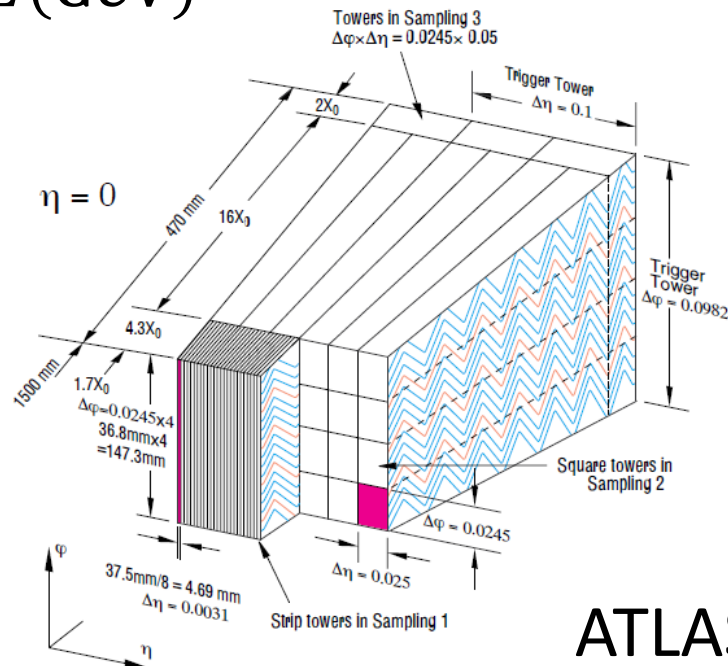
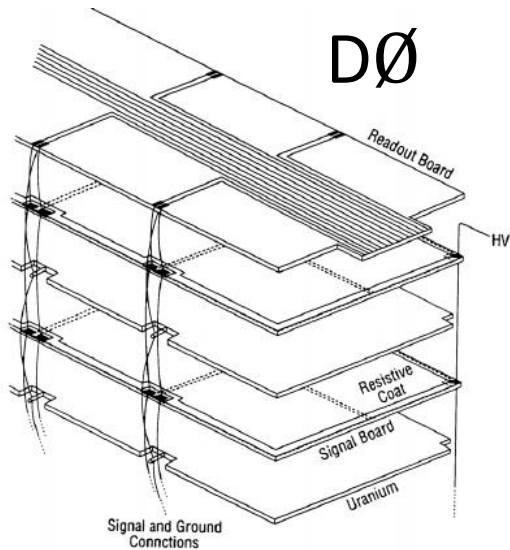


サンプリング型電磁カロリメータ 液体アルゴン

- 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)

ハドロンカロリメータ

- 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
→ 大きな物質が必要
- シャワー中に含まれるニュートリノや原子核の影響があるため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
 $e/\pi \neq 1$
- 補償型カロリメータ ($e/\pi=1$)
- サンプリング型カロリメータ

ハドロンカロリメータの例1 補償型カロリメータ

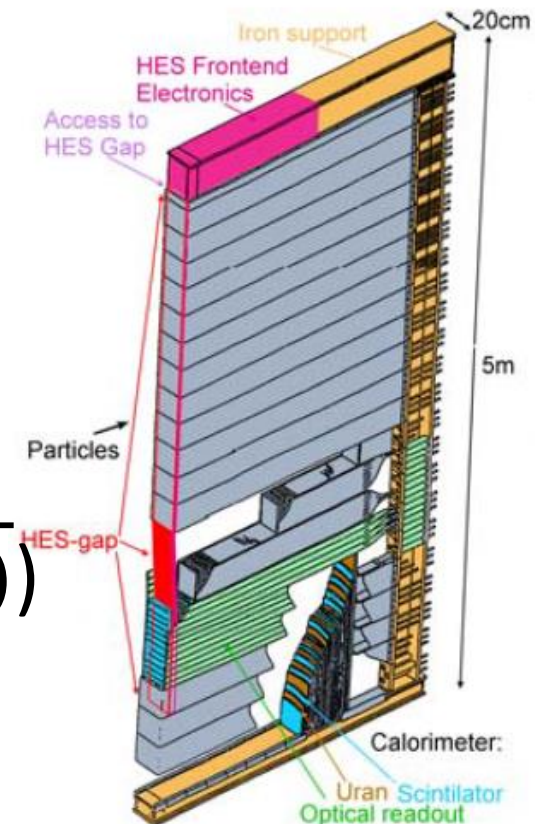
- 使用する材質の厚さと種類しだいで $e/\pi \sim 1$
- $e/\pi \sim 1$ とすることで電磁シャワーとハドロンシャワーを同等に扱える

- ZEUS @HERA

^{238}U (3.3mm) + Sc. (2.6mm)

- 分解能 $35\%/\sqrt{E(\text{GeV})}$

(電磁シャワー $18\%/\sqrt{E(\text{GeV})}$)



ハドロンカロリメータの例2

- 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 $< 5\% / \sqrt{E (\text{GeV})}$	

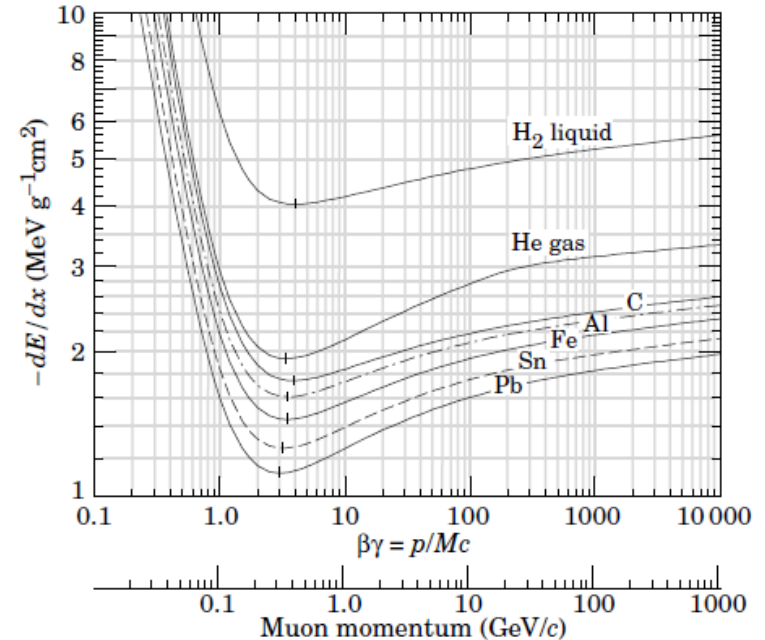
他、純水、ガス、液化希ガスなどいろいろ

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

応答の較正

- 各チャンネルから均質な応答を得るためにミュー粒子を使った較正をする
- Test beamで応答を検証する
- 運転中の較正
 - Z_0 , π^0/η などよく知っている物理
 - LED, laser, 放射線源
 - 宇宙線に含まれるミューオン



ILCのカロリメータ

- 電磁カロリメータ

吸収層 タングステン

検出層 シリコン、シンチレータ(アナログ)

MAPS (デジタル)

- ハドロンカロリメータ

吸収層 鉄、タングステン

検出層 シンチレータ(アナログ)

RPC, GEM, Micromegas((セミ) デジタル)