

理論屋さん向けの検出器入門

第1回 Particle ID

陣内 修
東工大物理

第2回コライダー勉強会
2015. 11. 26



Disclaimer

- 検出器の原理はいいから、シミュレーションで使えそうな基礎
- なんでそういう構造を選定したのか等、苦労話・裏話は省く
- 実験屋さんが常識的に知ってる検出器の豆知識を
- 理論屋さんと実験屋さんで話しているときに、「えっ？！・・・^^;)」とならないために
- BUT, 今日いる方々は結構実験寄りの方々なので、釈迦に説法になる可能性あり。「そんなの知ってる」って言わないでくださいね
- ATLAS検出器にかなり偏ります



目次

- 基本中の基本
- 基本となる物質との相互作用
- 磁石
- 飛跡検出(運動量測定)
- エネルギー測定
- 粒子識別

- 利用する力: 電磁力 (ハドロン反応を使うものもあり)
- 検出可能な粒子: 比較的安定なもの (検出器の大きさ以内の崩壊長をもつ)

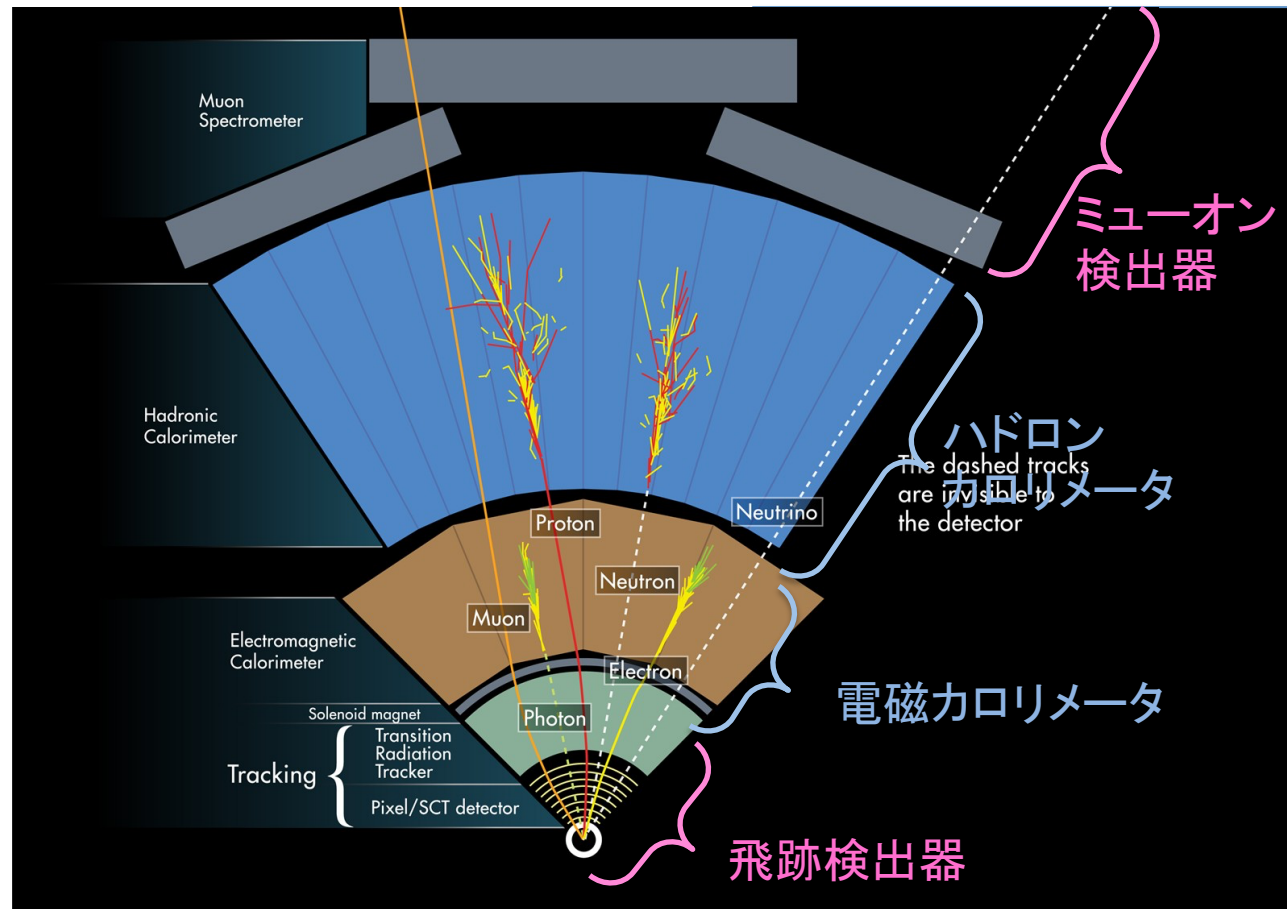
- 測りたいもの
粒子の4元運動量
- $\vec{E}, \vec{p}, \vec{v}, M$ の内2つが
分かれば決まる

- 曲げて測るか
(運動量 p)

- 吸収させて測るか
(エネルギー E)

- 通過時間で測るか
(TOF v)

- 不変質量組むか、もともと知ってるか
(m)



よく使う関係式

速度 β の粒子が持つエネルギーと運動量の大きさ
(E は質量にローレンツ因子をかけたもの、 p は更に速度をかけたもの)

$$E = \gamma m, \quad |\vec{p}| = \beta E = \beta \gamma m$$

例えば 10GeVのパイオン

$$\beta \sim 1, \gamma = E/m = 10/0.14 \sim 70$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad \begin{array}{l} \text{(ローレンツ因子)} \\ \text{Lorentz factor} \end{array}$$

速度 β で移動している質量 m の粒子を想定し、
その粒子の静止系 K' を考える。 K' 系では
 $p' = (m, 0, 0, 0)$ ローレンツ変換は

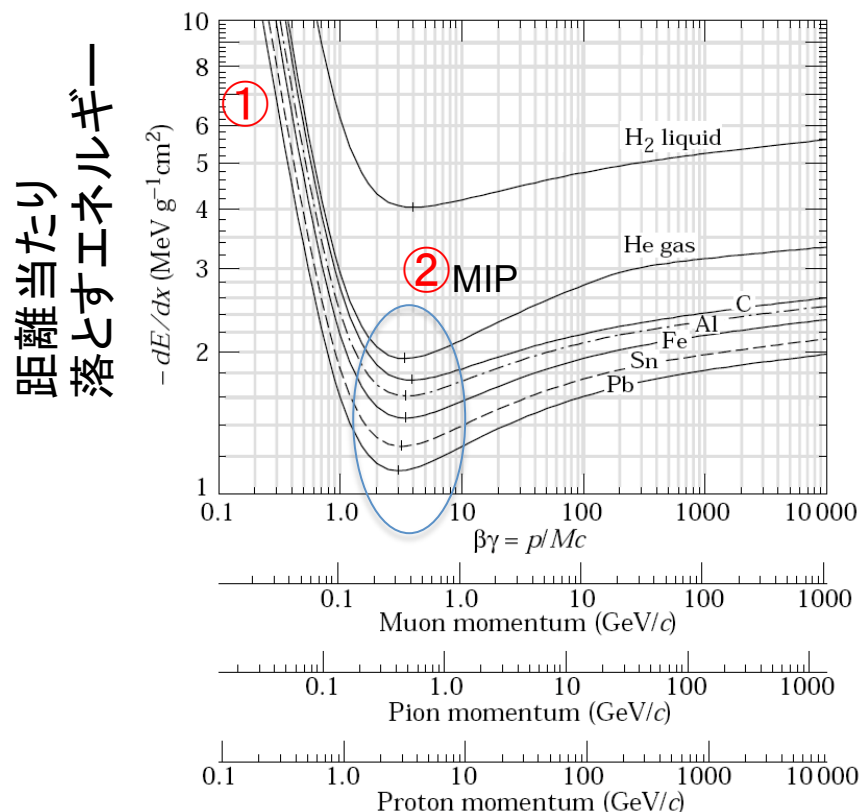
$$\begin{cases} m = \gamma E - \gamma \beta p_x \\ 0 = -\gamma \beta E + \gamma p_x \end{cases} \quad \text{解くと上式が得られる}$$

荷電粒子の基本相互作用

● イオン化損失(Bethe-Blochの式): 一番の基本

電子はちょっと特別
→ 次ページ

- 電磁相互作用
- 物質をイオン化/励起しエネルギーを失う (原子中の電子を弾き飛ばす)
- β ($=v/c$) 速度だけの関数



- ① 低速度で急激に大 (β^{-2})
→ 急激にエネルギー落とす
→ 止まってしまう

- ② $\beta\gamma \sim 3$ より上は余り変わらない

ミューオン、パイオンなど
1 GeV 超えたら余り
エネルギー落とさない
(検出器を貫通)

電子は特別

● 電子の場合

- ① イオン化損失の他に
- ② 原子核から受ける電場の影響で
加速度をうけ制動放射 (ブレムス:
bremsstrahlung = breaking radiation (英))
によりエネルギーを落とす

光子放出割合 $\propto$ 加速度² $\propto (z/m)^2$
電子には大きな効果

MIPより高いエネルギーでは

- ① はBethe-Blochよりほぼ一定 $\left(\frac{dE}{dx} \right)_{ION} \sim const$

② は $\left(\frac{dE}{dx} \right)_{RAD} = - \frac{E}{X_0}$

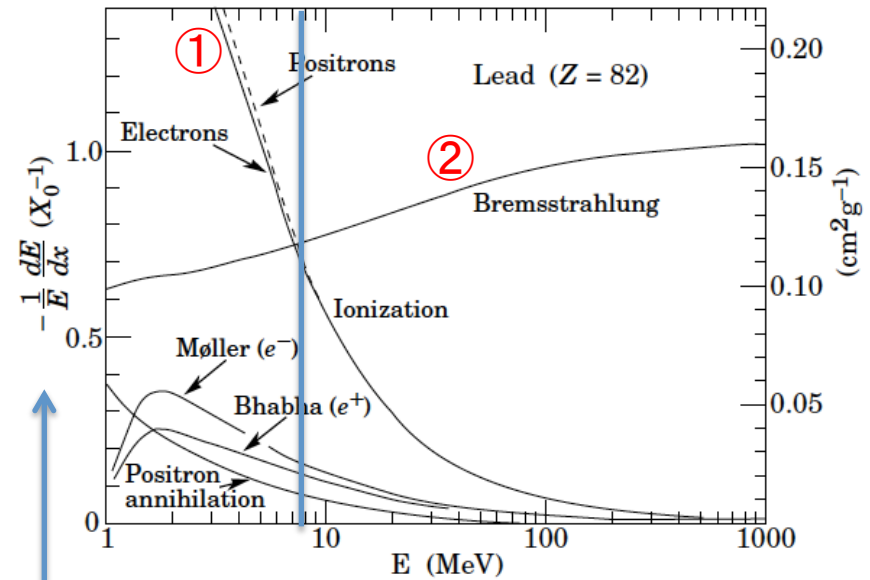
高エネルギーでは②が優勢
(一定の割合でエネルギーを失う)

上式は

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

X_0 を放射長という (Eが1/e~0.37になる距離)

Critical Energy (物質による)

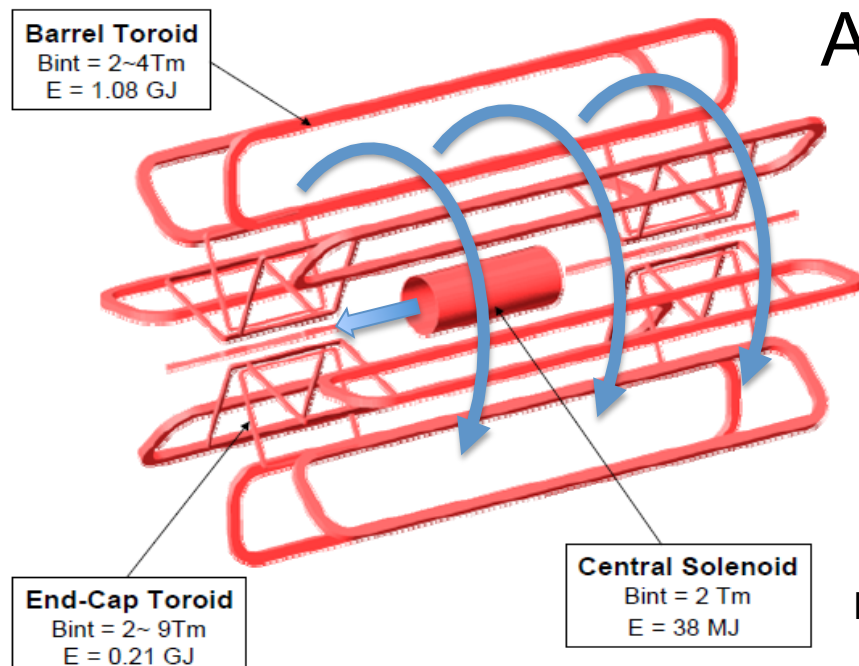


電子のエネルギー損失
電子のエネルギーに対する相対値

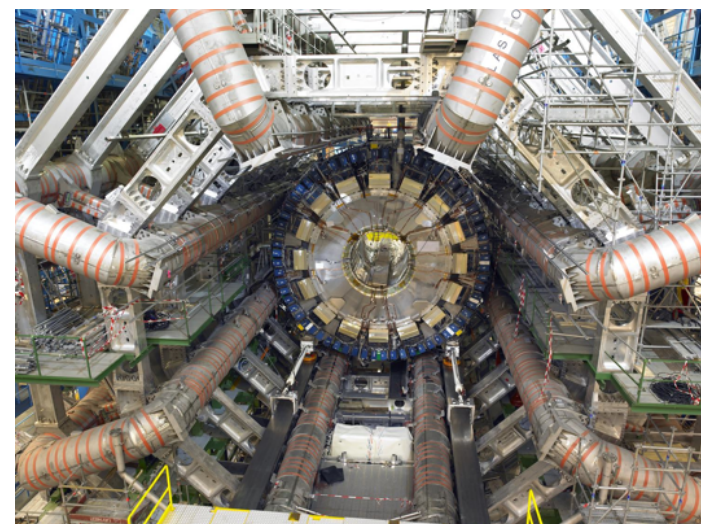
曲げて測る系

磁場はどうかかっているか

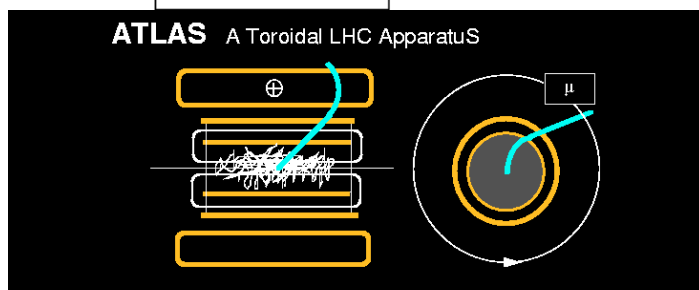
ATLASの場合



Barrel Toroid muonの分解能を上げる
 為空芯にしている

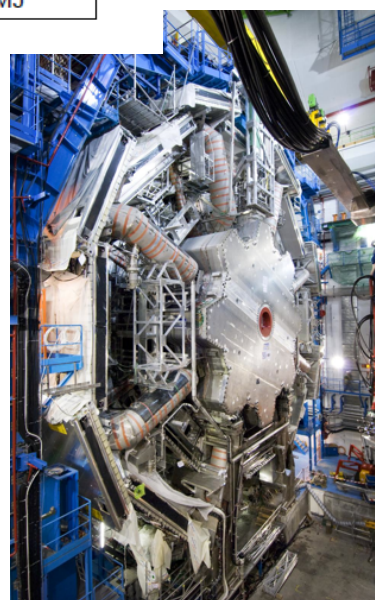


End-Cap Toroid



InnerとOuterで磁場の方向が切り替わる
 特にOuterの磁場は複雑
 カリメータには磁場がかかってない

Innerでは ϕ を測る
 outerでは dR (or dZ) を測る

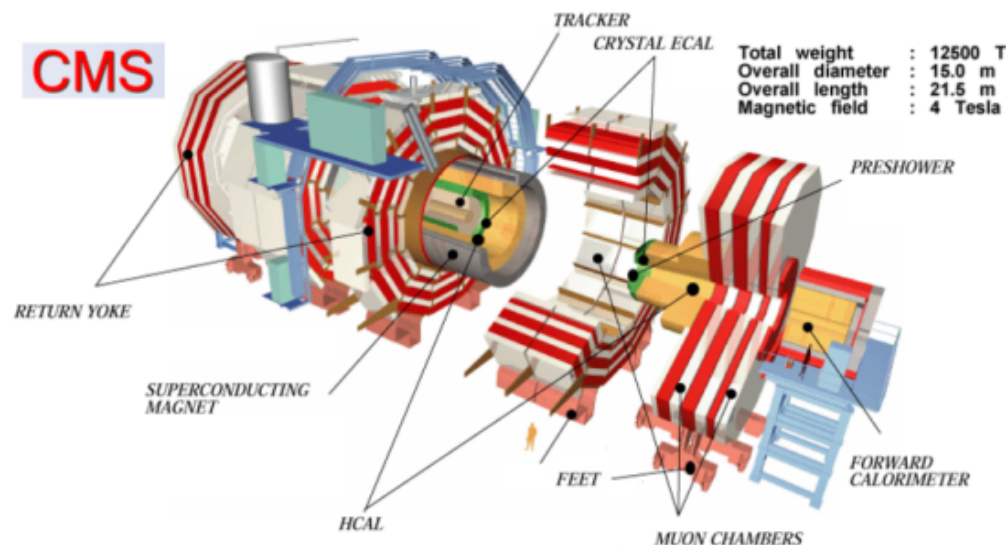
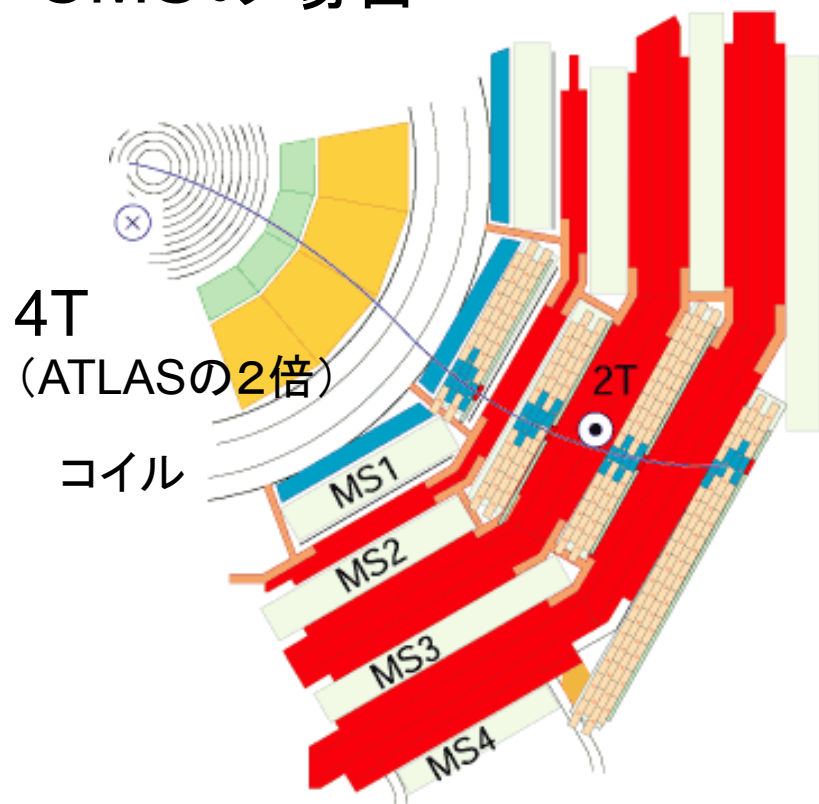


Barrel Solenoid 物質量を減らす為超薄



磁場はどうかかっているか(続き)

CMSの場合



CMSは全てソレノイド磁石
 ミューオン検出器の鉄(赤い箇所)がリターンヨーク
 磁場の向きがコイルの内・外で逆転

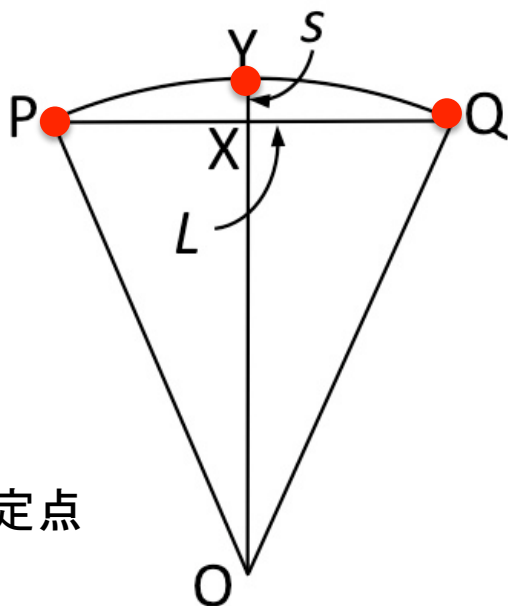
磁場中の荷電粒子

- 磁場中で円運動
磁場に垂直な運動量成分 ← 曲率半径 R 測定

$$p_T [\text{GeV}] = 0.3 \cdot B [\text{T}] \cdot R [\text{m}]$$

単位に注意: 円運動の釣り合いの式からでてくる
 $1[\text{T}] = 1[\text{V} \cdot \text{s} / \text{m}^2]$ の関係を使う

- 実用では円を描けない。サジッタ(s)を使う



●: 測定点

$$p_T \cong \frac{0.3}{8} \frac{L^2 B}{s}$$

$$\delta p_T / p_T = \frac{8 p_T \Delta s}{0.3 B L^2}$$

いくつかの関係

例えばATLASの
内部飛跡検出器

$$p_T = 10 \text{ GeV}$$

$$B = 2 \text{ T}$$

$$L = 0.5 \text{ m}$$

$$\delta p_T / p_T = 0.05$$

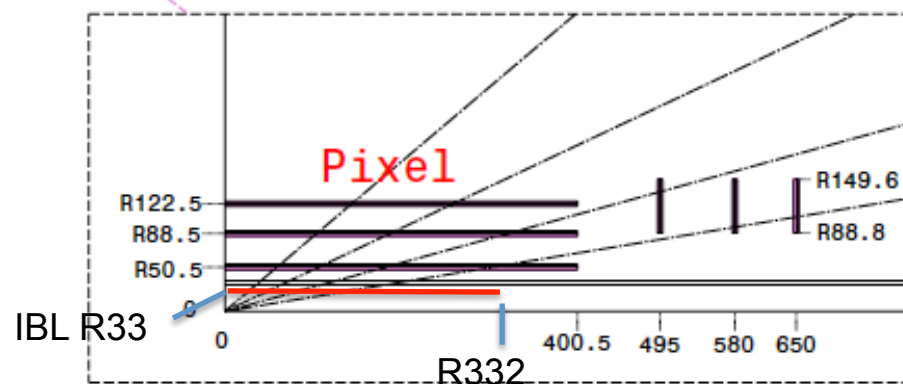
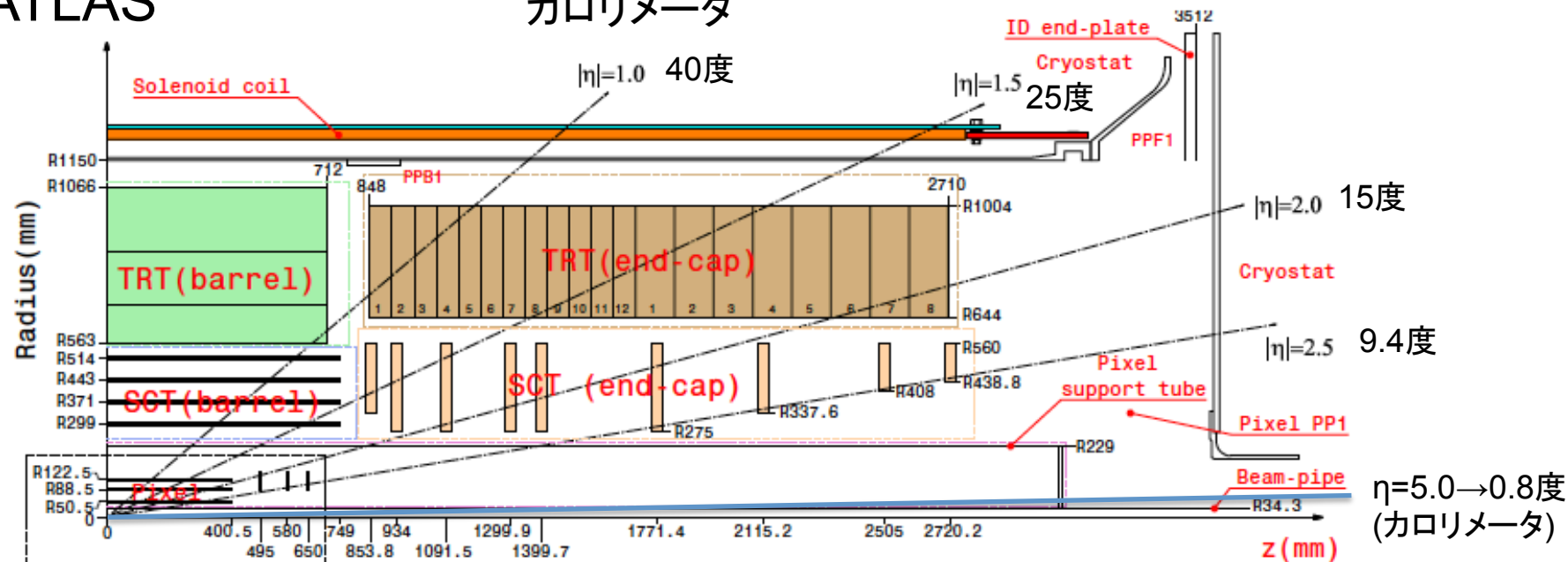
$$\Rightarrow \Delta s \approx 1 \times 10^{-4} \text{ m} \\ (= 100 \mu\text{m})$$

多層ある場合は精度が上がる

$$\eta = -\ln \tan(\theta/2)$$

ATLAS

カロリメータ



η と角度の関係確認

Envelopes

Pixel	---	45.5<R<242mm Z <3092mm
SCT barrel	---	255<R<549mm Z <805mm
SCT end-cap	---	251<R<610mm 810< Z <2797mm
TRT barrel	---	554<R<1082mm Z <780mm
TRT end-cap	---	617<R<1106mm 827< Z <2744mm

覚えておきたい数字
PIXEL 3.3cm ~ 12cm
SCT 30cm ~ 50cm
TRT 50 ~ 100 cm

検出可能な運動量

- ATLAS カロリメータに届くため必要な p_T は？

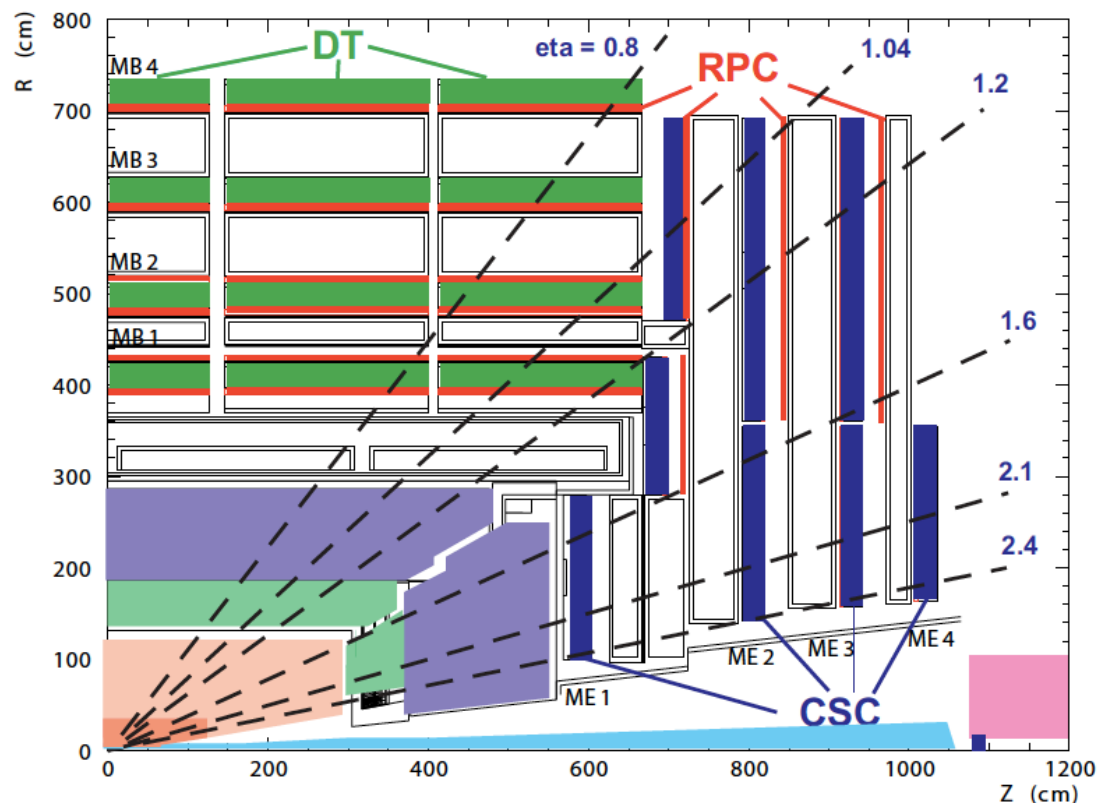
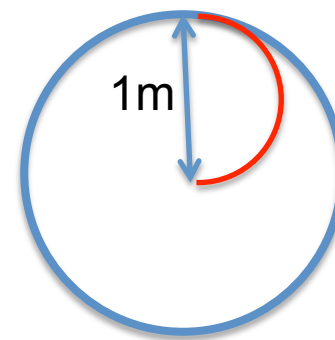
- ぎりぎり届くとき $R=0.5\text{m}$, $B=2\text{T}$

$$p_T[\text{GeV}] = 0.3 \cdot B[\text{T}] \cdot R[\text{m}]$$

- $p_{T\min} = 0.3\text{GeV}$
(tracking自体は0.1GeV程度まで原理的に可能)

- CMSの場合
 $R=1.3\text{m}/2$
 $B=4\text{T}$

- $p_{T\min} = 0.78\text{GeV}$



PIXEL, SCT, TRT

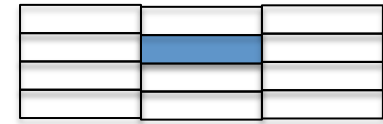
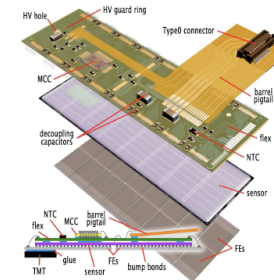
14

Particle ID

長さ単位 μm

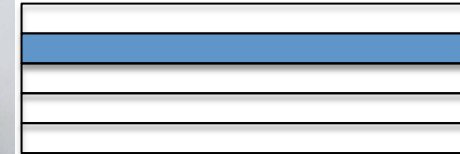
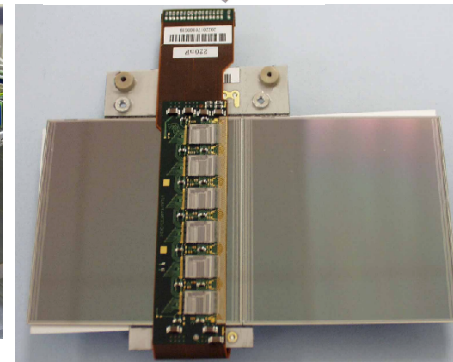
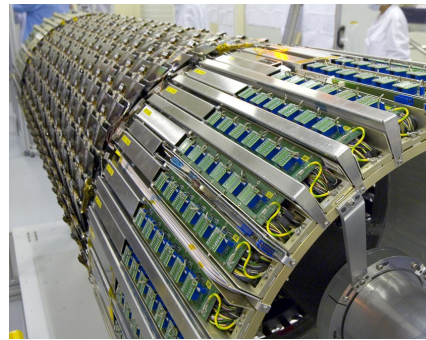
PIXEL (silicon pixels)
total 9000万チャンネル
one Pixel: 50×400 (250)
位置分解能: 12×60

IBL



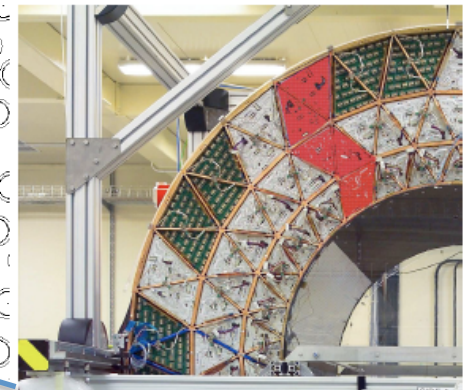
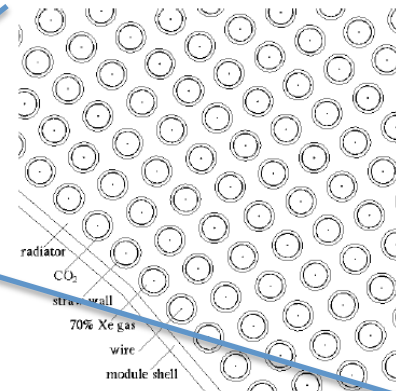
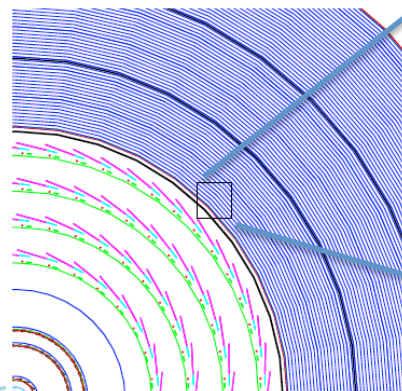
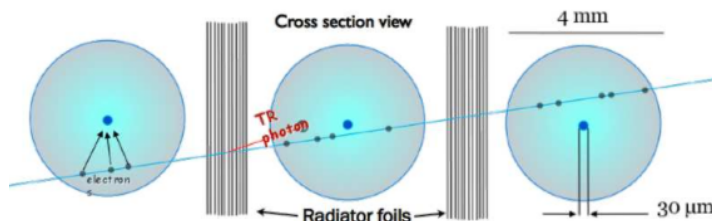
pixel状

SCT (silicon strips)
total 600万チャンネル
strip size: 80×120000
位置分解能: 16×580



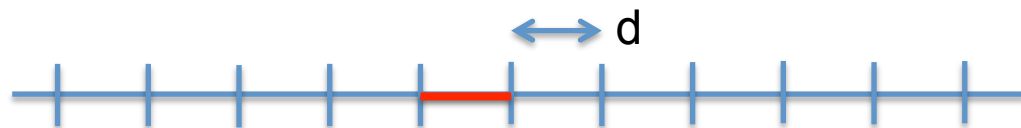
strip状
stereo angle
 $40\text{degree} \Rightarrow 2\text{次元}$

TRT (gas tube)
total 30万チャンネル
tube size: 4000×740000
位置分解能: 170



位置分解能

1ユニット(検出最小単位)の大きさより、分解能がいい？



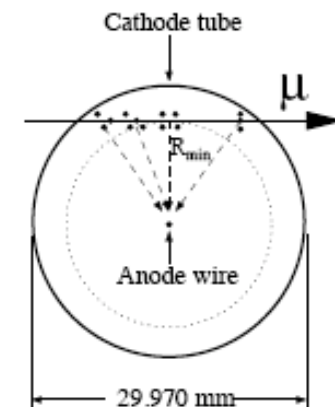
ある一つの要素が反応した、そのときの
位置分解能 $\sigma = d/\sqrt{12} \sim 0.3d$

$-d/2 \sim d/2$ で分散を計算すればよい

- 隣り合って何ヶ所かヒット(クラスタと呼ぶ)
落とした信号の大きさに重み平均 $\rightarrow 0.3d$ よりも良くなる

- TRTの場合

信号の観測時間＝粒子通過時間
＋ドリフト時間(芯線からの距離の関数)



- 多層を通過した時間(粒子で共通)を利用してトラック・フィット

ミュオン検出器

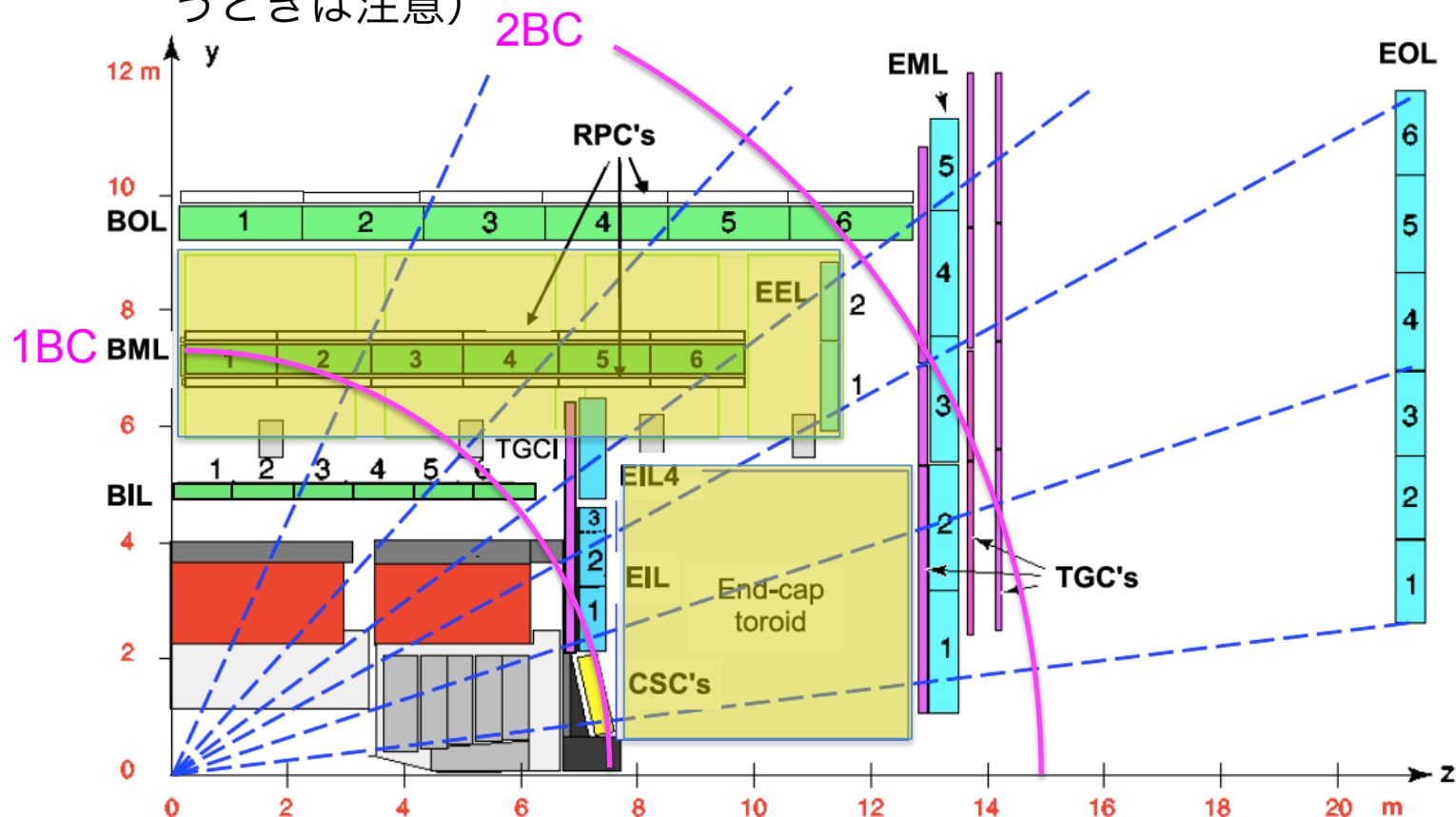
- ミュオン: 突き抜ける (カロリメータに数GeVは落とすが)

- 崩壊長は $\beta\gamma c\tau$ 1GeV のミュオンは

$$\beta \sim 1, \gamma = E/m \sim p/m \sim 10, \tau \sim 2.2 \mu\text{sec}, 1 \text{ nsec} \times c = 0.3 \text{ m}$$

$$L = \beta\gamma c\tau \sim 10 \times 2.2 \times 10^3 \times 0.3 \text{ m} \sim 6 \times 10^3 \text{ m}$$

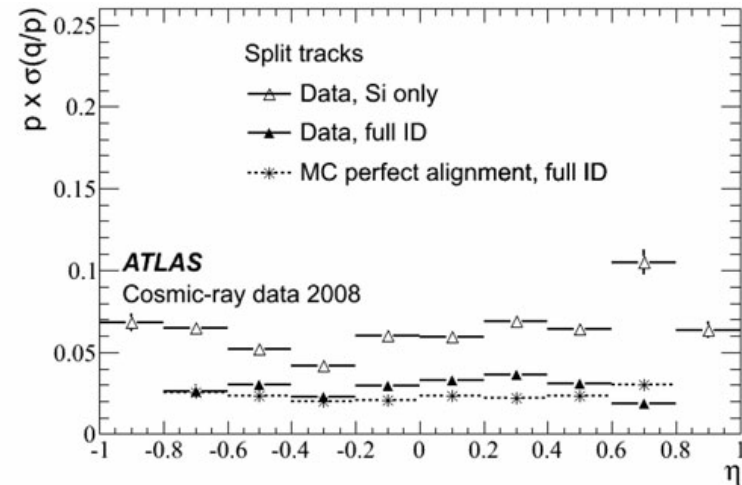
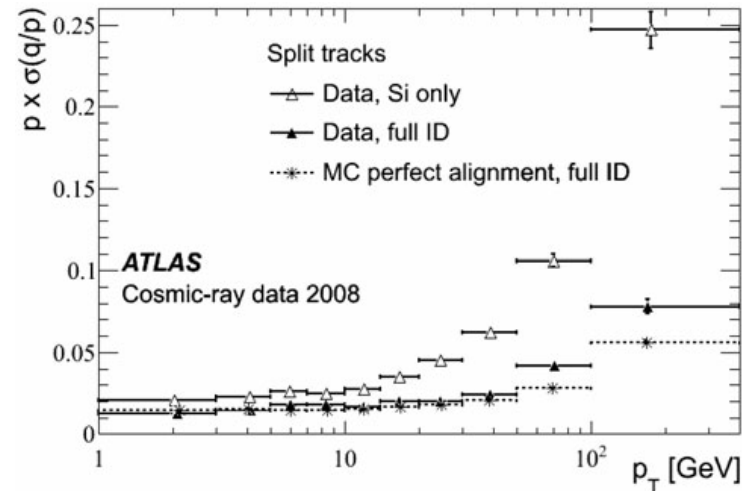
- LHCのバンチ間隔: 25nsec ~ 7.5m (検出器内に3BC共存: 長生き系を扱うときは注意)



磁場があるところ

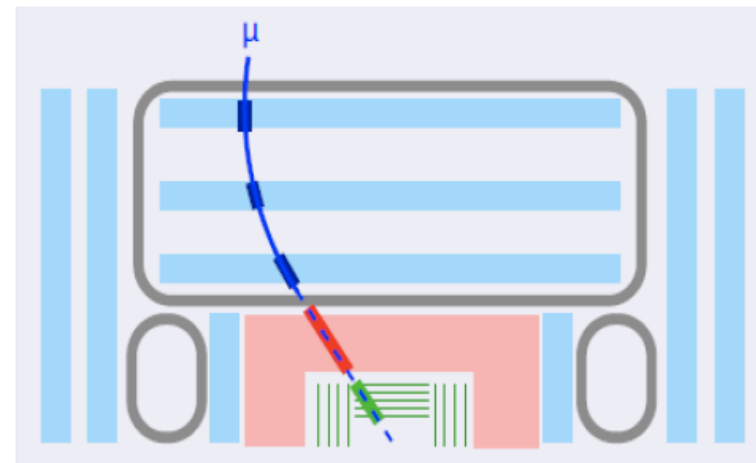
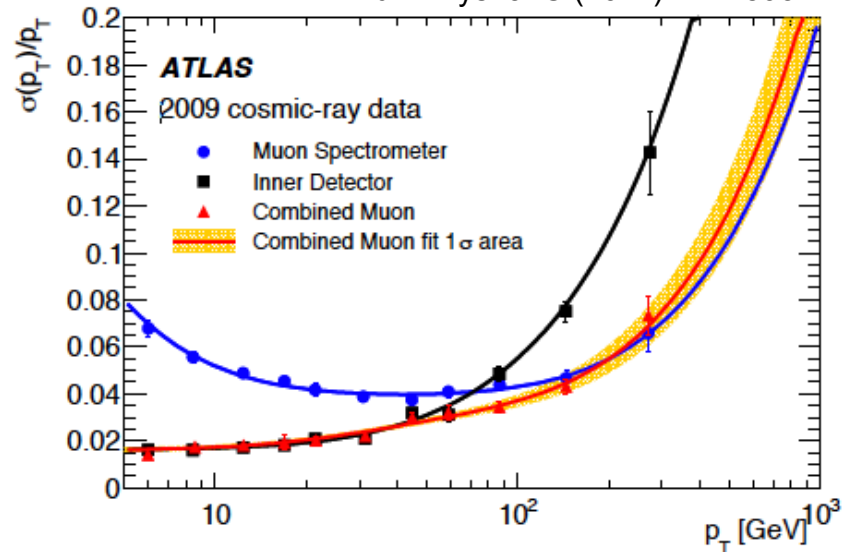
内部飛跡検出器(宇宙線、MC)

Eur. Phys. J. C (2010) 70: 787



ID+ミューオン(宇宙線)

Eur. Phys. J. C (2011) 71: 1593



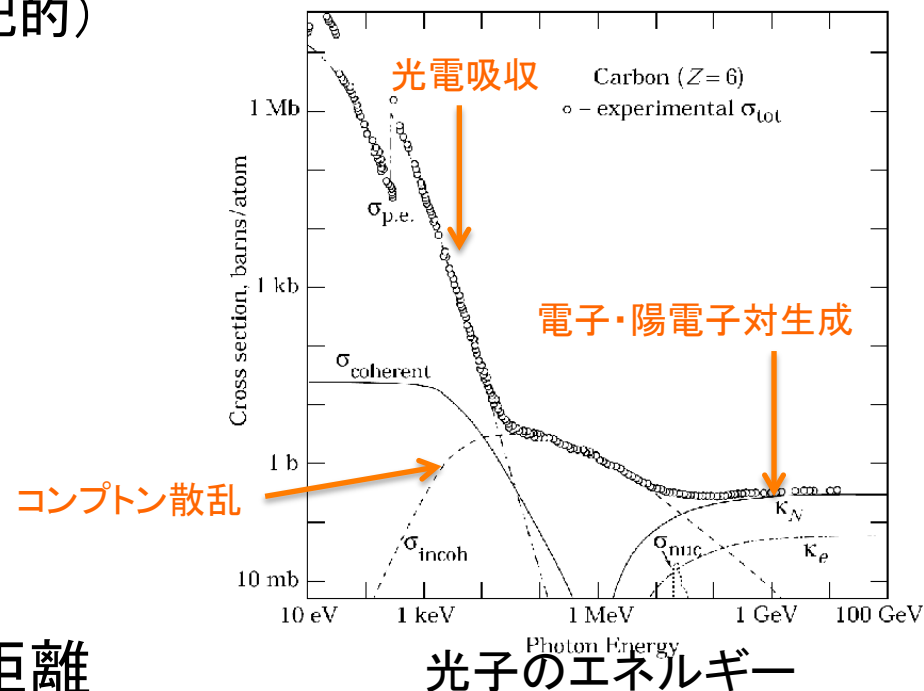
吸収して測る系

γ線と物質の相互作用

- 高エネルギーでは電子・陽電子対生成だけ気にすればよい
(コンプトン、光電吸収は1MeV以下で支配的)
- 1GeV以上ではほぼ100%対生成で、
変換長もほぼ一定

$$X_p = \frac{9}{7} X_0$$

変換長は少しだけ放射長より長い



変換長は光子フラックスが1/eになる距離

放射長は荷電粒子エネルギーが1/eになる距離

大事なのはこの2つが同じスケールであること

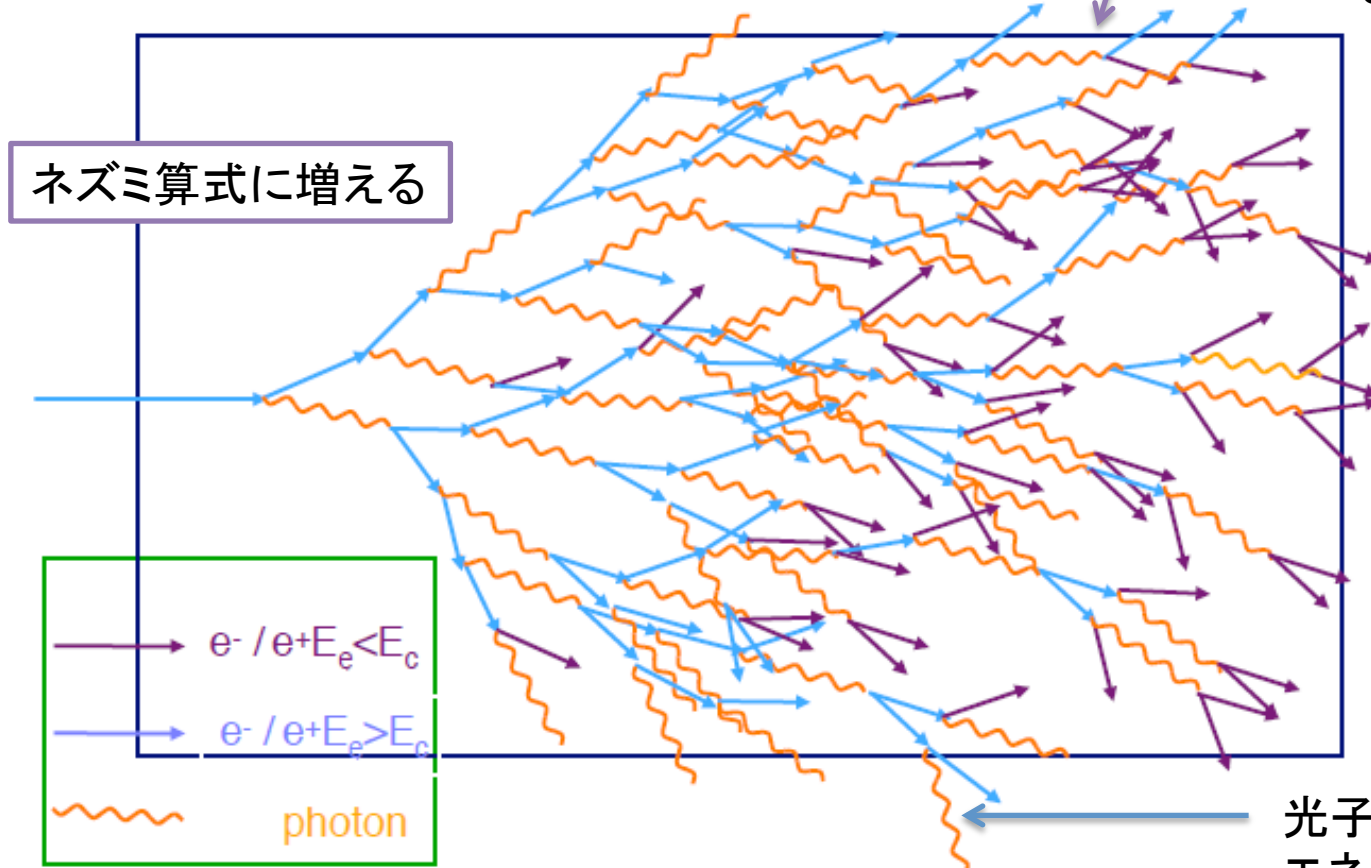
物質によって X_0 は違う。粒子の飛んだ方向にどれだけ物質があるかをこの X_0 で表す(物質量=budgetを共通通貨で表す)

電磁シャワー

ネズミ算式増加が途中で止まる
電子・光子数最大 = Shower Max

- 電子 $\Rightarrow$ 制動輻射で γ 線を放出
 - γ 線 $\Rightarrow$ 対生成で電子・陽電子を放出
- この2過程が繰り返す $\Rightarrow$ カスケード・シャワー

電子がCritical Energy
よりも下がると、イオン化
損失でエネルギーを落とし始める



光子が1MeV付近になると
エネルギーを落とし始める

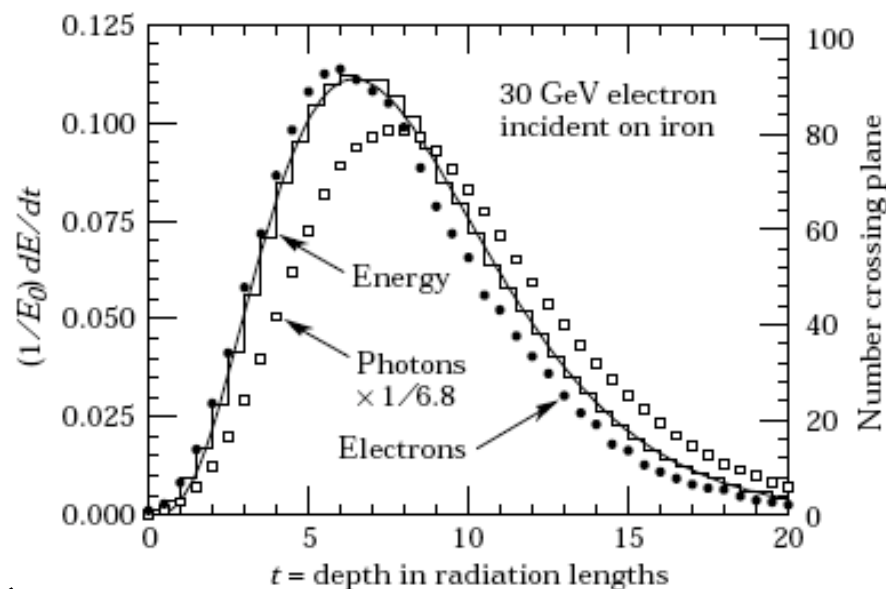
電磁シャワー縦方向の広がり

- 高エネルギー電子、光子が入射すると電磁シャワー発生

シャワーの縦方向の長さ $\propto \ln E_0$

($\ln$ で効く、 E が10倍になっても、シャワー長さ ~ 2.3 なので電磁カロリメータの深さを10倍にする必要はない)

- shower max後は指数関数的に減少
- シャワーの全エネルギー＝測定可能
全シャワーを捉えるには $\sim 25X_0$ の厚さが欲しい



- シャワーの簡易モデル(電子)

- 厚さ $t = x / X_0$, $\sim 1X_0$ 進む度に**粒子数2倍**
- shower maxの時に $t=t_{\max}$ だとすると
その時のエネルギーが E_C だとして解く

$$\begin{cases} N(t) = 2^t \\ E(t) = E_0 / N(t) = E_0 2^{-t} \\ E(t_{\max}) = E_0 2^{-t_{\max}} \equiv E_C \end{cases}$$

$$t_{\max} = \ln \left(\frac{E_0}{E_C} \right) / \ln 2 \propto \ln E_0$$

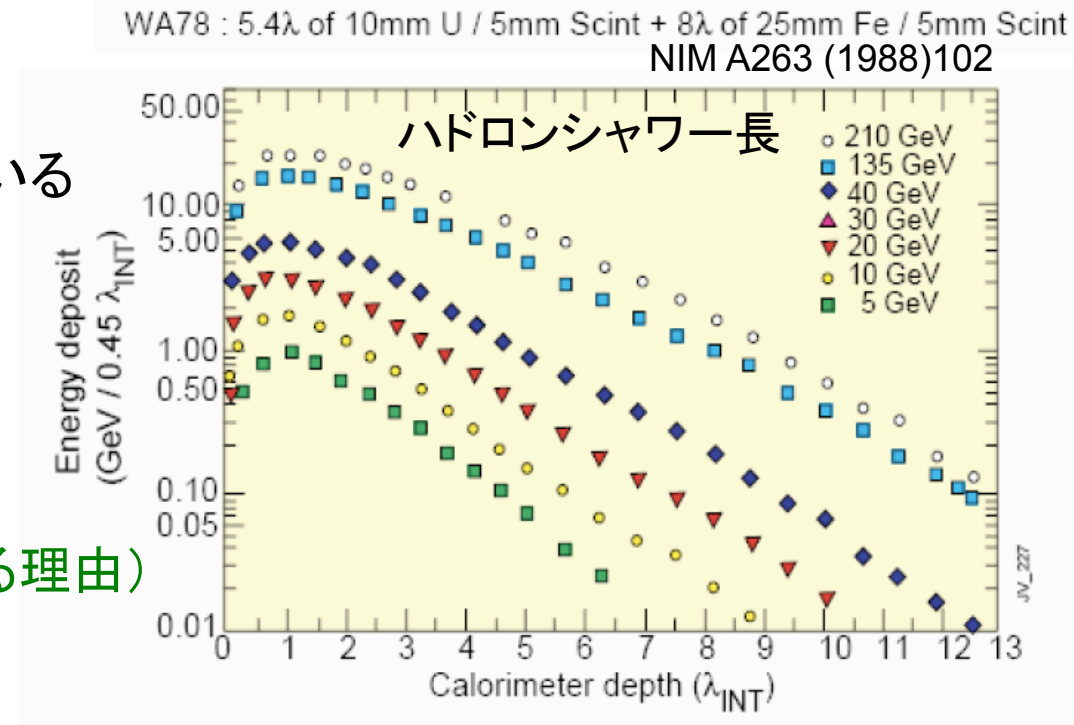
ハドロンと物質の反応

- 高エネルギーハドロン、核破砕反応→たくさんの粒子
- 同様にカスケードシャワーを起こす
止まるのは $E < 2m_\pi$ まで落ちたときd

放射長(X_0)の代わりに、吸収長(λ)を用いる
一般的に

$$\lambda \gg X_0$$

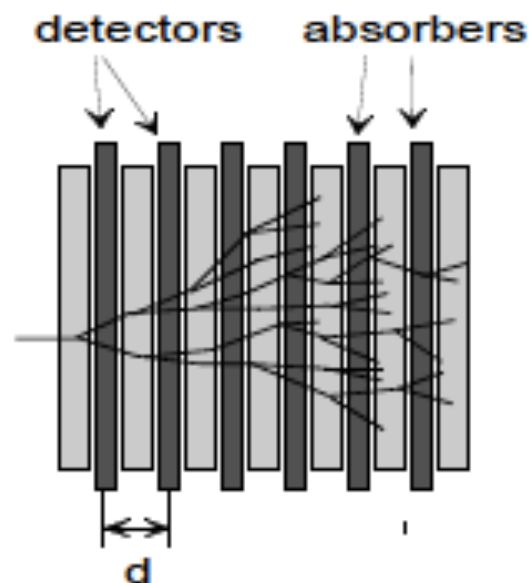
電磁シャワー長 $\ll$ ハドロンシャワー長
(電磁カロが内側、ハド・カロが外側にある理由)



全エネルギーを評価するためには、シャワー全体を覆う必要がある。およそ **10 λ** の深さがないと、エネルギーを逃してしまう

エネルギー測定

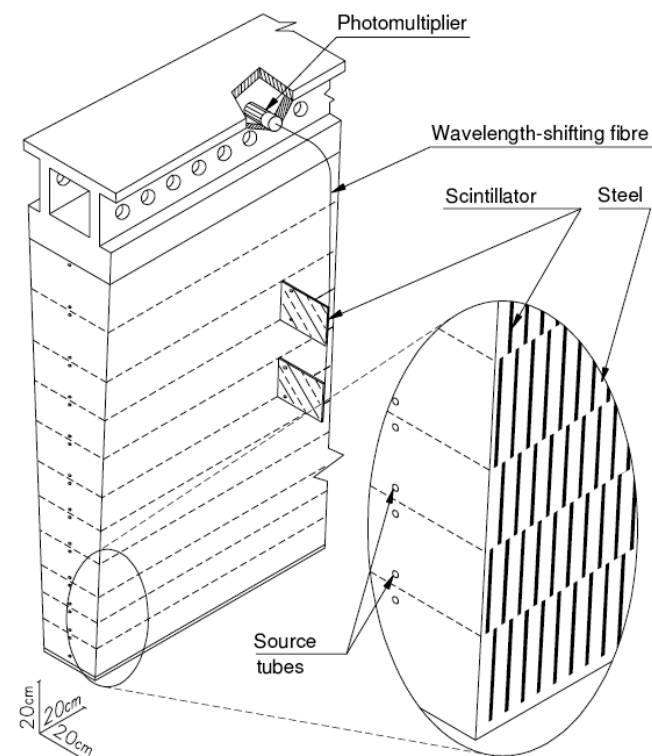
- 全吸収型では(通常)シャワーが止まらないので、Absorbers(鉛or鉄)をDetectorsにサンドイッチ状に挟む
- サンプリング型カロリメータと呼ぶ
(CMSのEM Calは全吸収型)



ATLAS

EM CAL : $22 X_0$
HAD CAL : $8 \sim 10 \lambda$

全部測ってるわけではない
でもOK



アトラス実験ハドロンカロリメータ
の模式図、光ファイバーで
両面から読み出している

カロリメータのエネルギー分解能

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

a: 確率論的な項(Stochastic term)

- サンプリング型ならサンプル比に関係
- 全吸収型はこの項が小さい

b: ノイズからの寄与

- 電氣的なノイズ、パイルアップによるノイズ 等
- 高エネルギーでは気にならなくなる

c: 定数項

- 検出器が持つ本来の分解能 (均一性等)
- 高エネルギーでこの項が主に効く

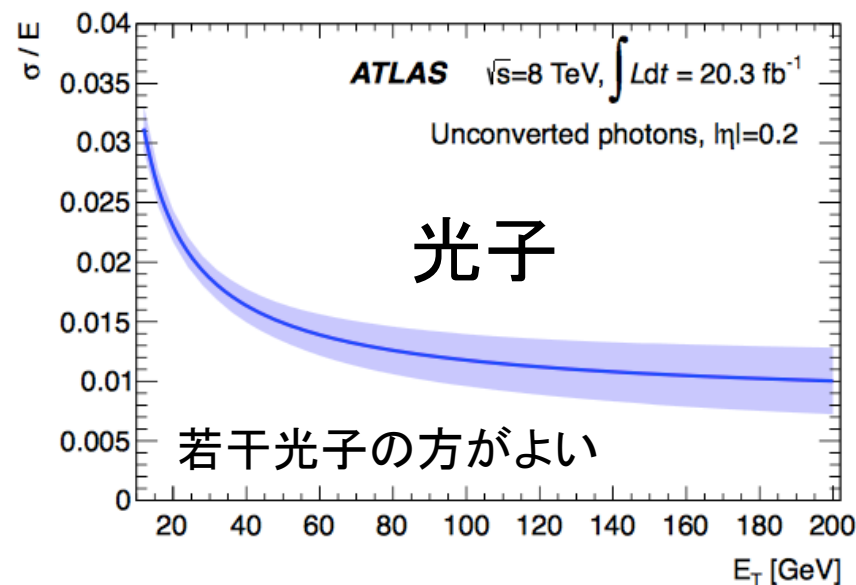
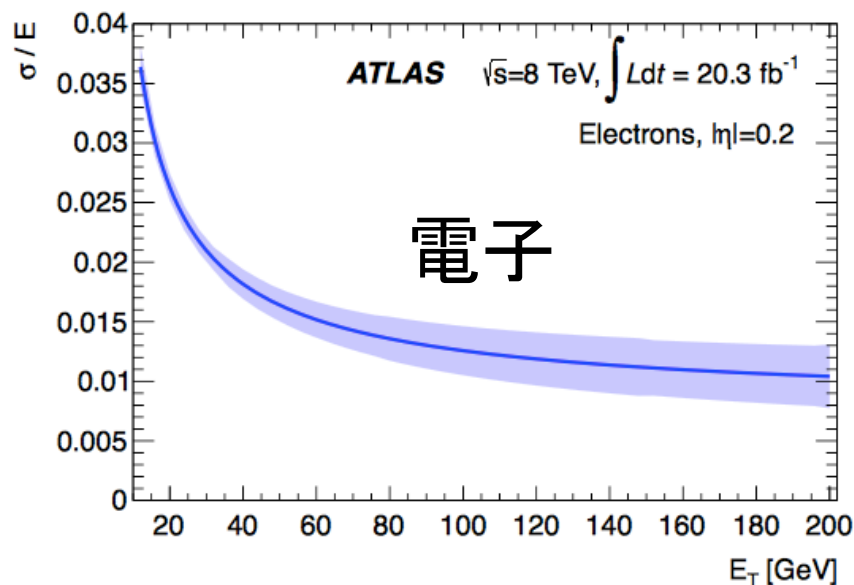
電磁力ロリメータ

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

設計値
 ATLAS : $a=0.1$, $b=0.3$, $c=0.007$
 CMS : $a=0.03$, $b=0.3$, $c=0.005$

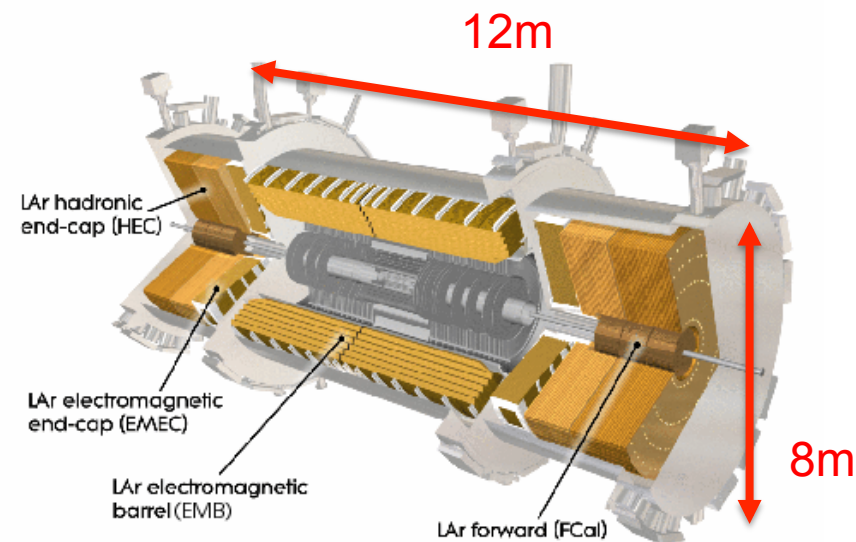
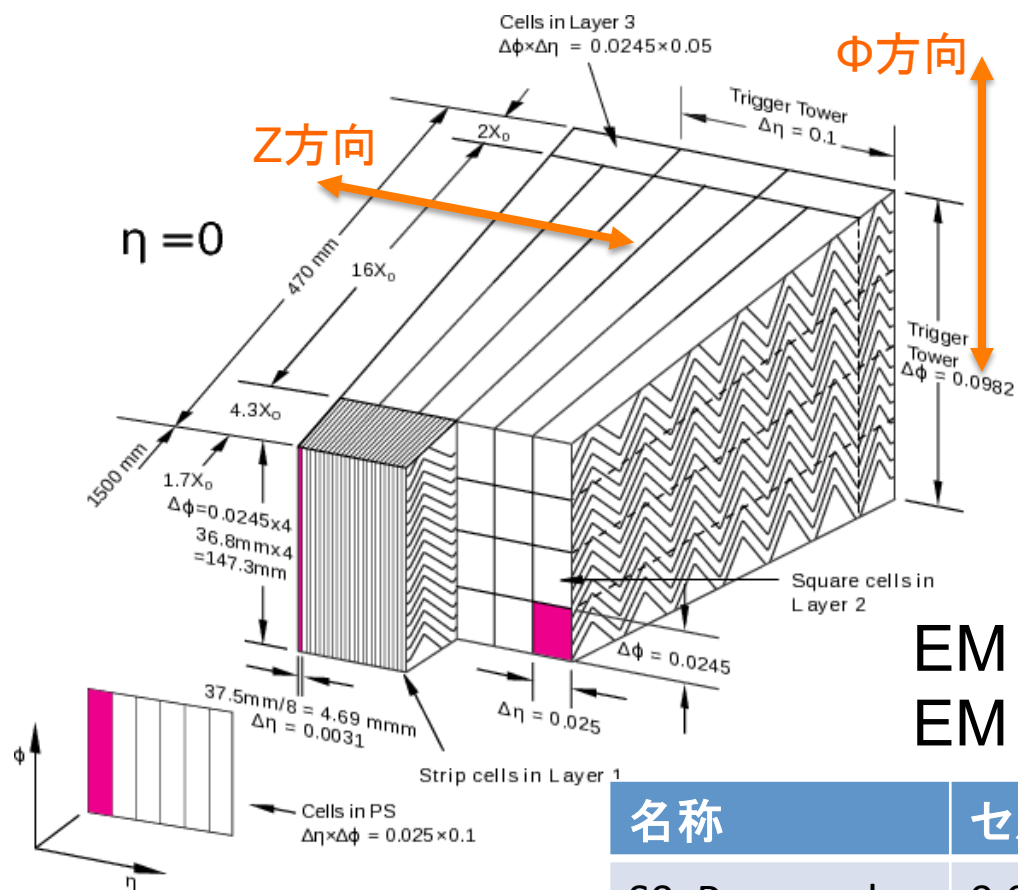
全吸収型なのでいい

Eur. Phys. J. C (2014) 74



低エネルギー側 a few %
 高エネルギー側 → 0.7 %

検出器各コンポーネントの大きさ



EM Barrel : ($|\eta| < 1.475$) [Pb-LAr]
 EM End-caps : $1.4 < |\eta| < 3.2$ [Pb-LAr]

名称	セルの大きさ($\delta\eta \times \delta\phi$)	主な役目
S0 Presampler	0.025 x 0.1	物質でのEnergy Loss補正
S1 Strips	0.003 x 0.1	γ と π^0 の識別
S2 Middle	0.025 x 0.025	main energy deposit
S3 Back	0.05 x 0.025	had/em separation

0.1 radian = 5.7度
 0.003 radian = 0.17度

隣り合うヒット・セルをつなげたもの: 「クラスター」

光子に関する話

- カロリメータ前の物質層
 γ -conversion (電子対生成)
を起こす
- 2-6割 ($|\eta|$ 依存性)

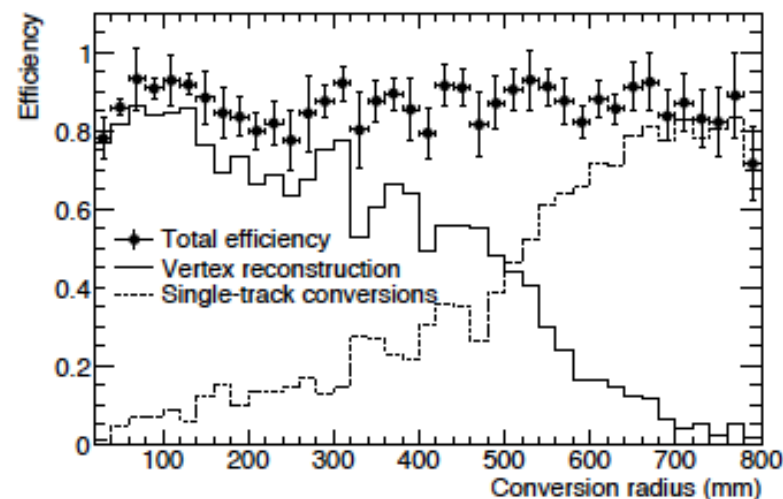
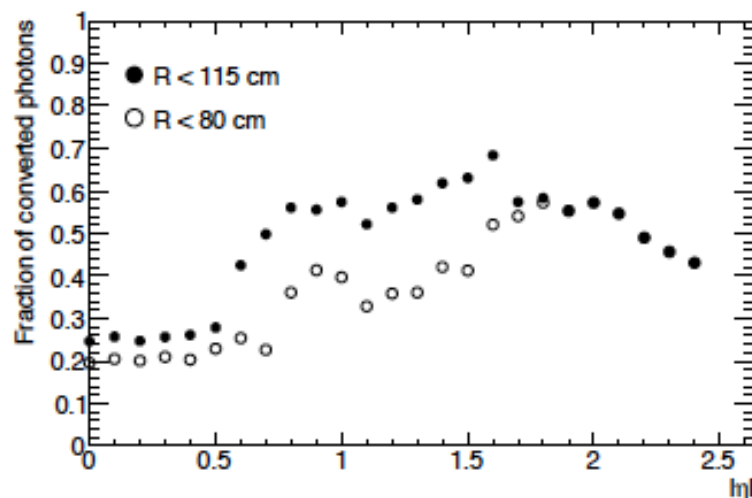
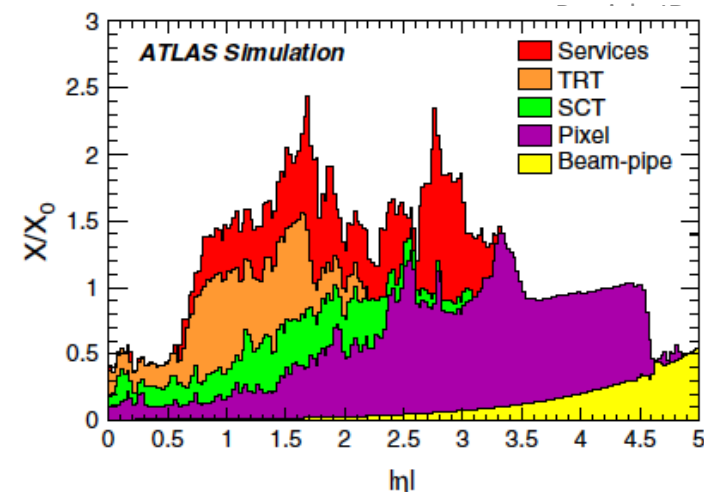
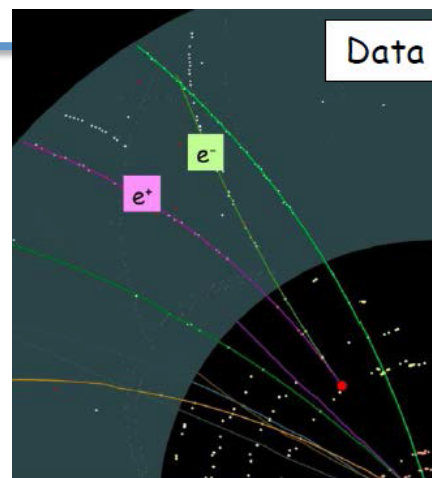


Figure 10.43: Fraction of photons converting at a radius of below 80 cm (115 cm) in open (full) circles as a function of $|\eta|$.

- early conversion (SCT2段目前)についてはconversion再構築から見積もれる
- 再構成したphotonはconverted-photonとして使う(それ以外はunconverted-photon)

電磁カロリメータ

内部飛跡検出器

cluster (seed)

track

Matching

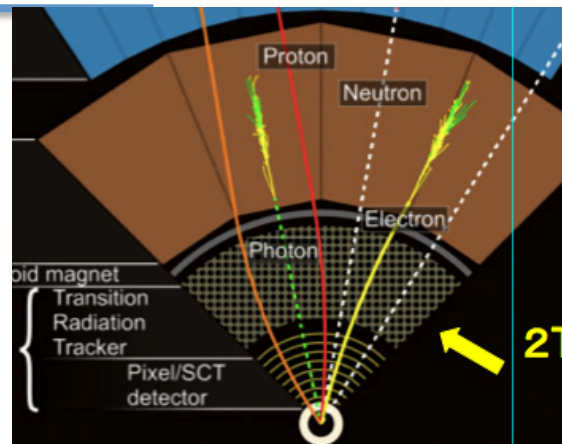
e or γ 候補

Correction, Calibration

e or γ 候補

Identification

e or γ



MATCHING

- マッチする: 電子 or Converted photon
- マッチしない: Unconverted photon

CORRECTION

- 候補の種類別にサイズを変えてclusterを作り直し trackがあるものは ϕ 方向に広げる

CALIBRATION

- 奥行き方向のenergy depositを基にenergyを再計算

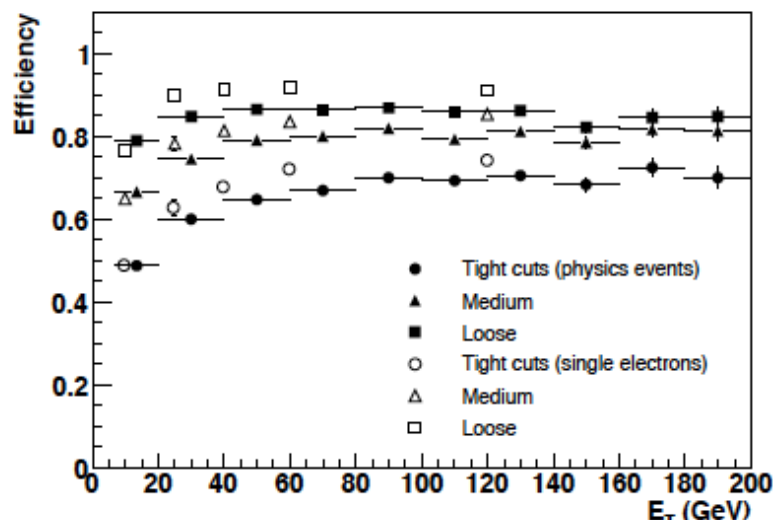
IDENTIFICATION

- clusterの広がり、trackの質、E/Pなどからjet, pi0と識別

electron/photonのパフォーマンス

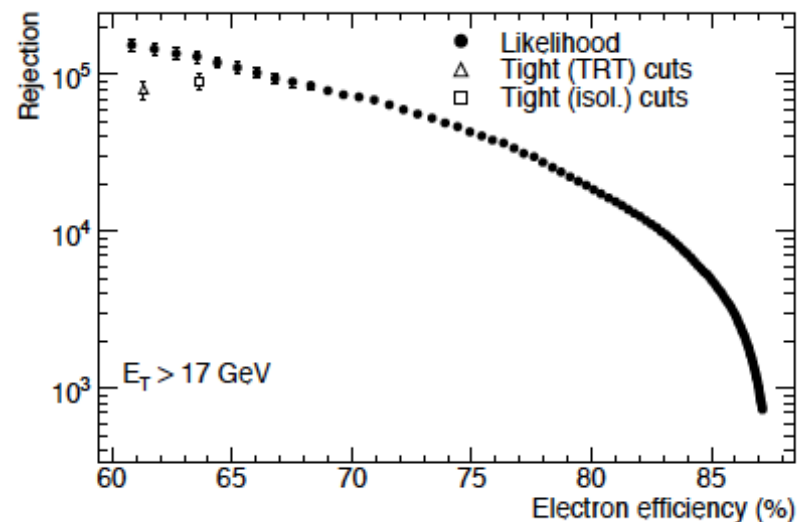
- 非常に雑多な条件の組み合わせ(頻繁にUpdate)
- 通常、松竹梅コースを用意
選び方: 上位グループのお達し、前回のpaperで使ってたから、何か理由がある

electron efficiency



JINST 3 S08003 (通称detector paperより)
2010年データ取得前のsimulationによる評価

fake rejection (for electron)



typicalには
Electron 80% -- rejection $\sim 10^4$
photon 85% -- rejection $\sim 10^4$

(注: 使うプロセス、アルゴリズム、 E_T のカット等で動く数字)

まとめ

- Fast simulationで気をつけること
 - 大まかな分布作り、数进行评估する上ではとても便利
 - 弱点：物質に影響される物理、統計が余りない物理
信号読み出しのタイミング等を気にする事象、
背景事象の見積り(特にfakeからくるreducible)
(基本的にFull simulationでも自信がない話は全て)
- 本日カバーしていないこと
 - ジェット, b-tag, tau
 - Missing Energy
 - トリガー
 - 結果の統計的な扱い