

集中講義 2 検出器

- 生成粒子の検出および同定
- トラッキング検出器
- カロリメータ
- ミューオン検出器
- トリガー

生成粒子の検出および同定

イントロ

- 探索したい物理プロセスを知っていたとして、最終的にできる粒子を観測するためにはどのような検出器が必要か？

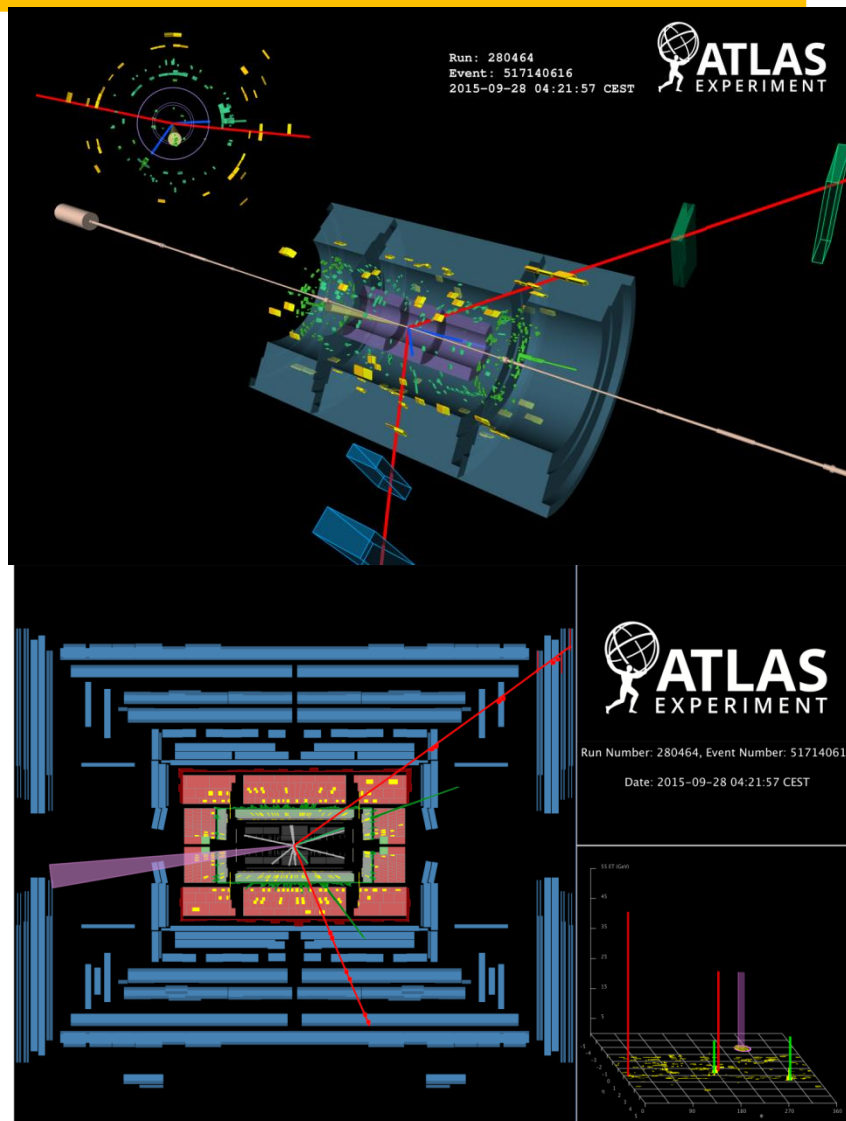
- 各生成粒子の検出器との相互作用
- 検出器の動作原理

を知っておく必要がある。

- それがわかると、終状態の生成粒子の種類と4元運動量から、

- 生成粒子の数(生成断面積)
- 生成粒子の崩壊過程(&分岐比)
- 生成粒子の質量
- 生成粒子のスピン

他、様々な特性を測ることができる。



イントロ

- 探索したい物理プロセスを知っていたとして、最終的にできる粒子を観測するためにはどのような検出器が必要か？

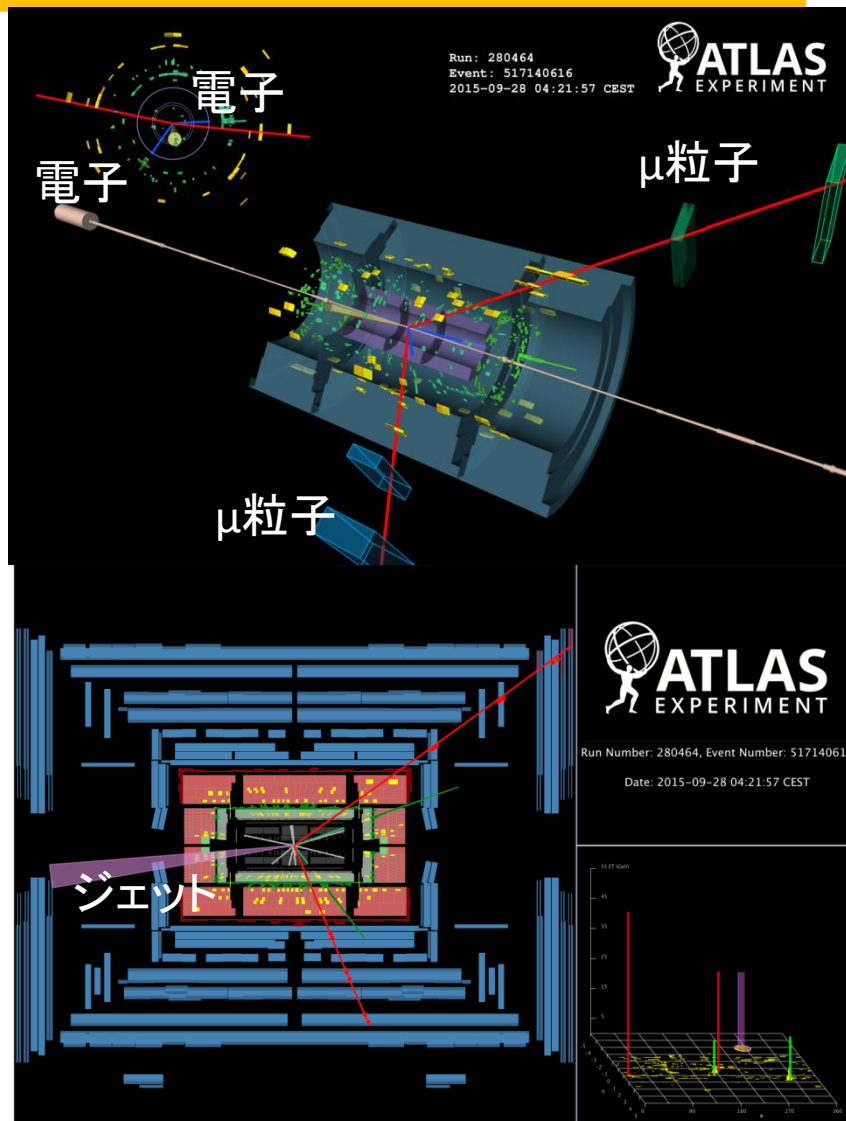
- 各生成粒子の検出器との相互作用
- 検出器の動作原理

を知っておく必要がある。

- それがわかると、終状態の生成粒子の種類と4元運動量から、

- 生成粒子の数(生成断面積)
- 生成粒子の崩壊過程(&分岐比)
- 生成粒子の質量
- 生成粒子のスピン

他、様々な特性を測ることができる。



粒子と物質との相互作用

- 相互作用
 - 荷電粒子
 - 主に電離相互作用(やチェレンコフ、遷移輻射)
 - 軽い(つまり電子)場合は制動放射
 - 光子
 - 光電効果、コンプトン散乱、対生成
 - ハドロン
 - 荷電ハドロンは電離相互作用をするが、中性ハドロンは検出が難しい。これがジェットのエネルギー測定を難しくする。
- 検出器
 - 荷電粒子の検出(e^+ e^- π^+ π^- p μ^+ μ^- etc)
 - 基本的に電離相互作用でできたイオンを検出することで通過位置を特定できる。
 - 磁場中で曲げることで運動量の測定も可能(運動量が低い方が測定しやすい)
 - 相互作用が小さくないもの(μ^+ μ^- 以外)
 - 物質でとめてエネルギー測定(カロリメータ)
 - 中性粒子(光子や中性子)も測定可能(エネルギーが高い方が測定しやすい)

粒子と物質との相互作用

- 相互作用

- 荷電粒子

- 主に電離相互作用(やチェレンコフ、遷移輻射)
 - 軽い(つまり電子)場合は制動放射

- 光子

- 光電効果、コンプトン散乱、対生成

- ハドロン

- 荷電ハドロンは電離相互作用をするが、中性ハドロンは検出が難しい。これがジェットのエネルギー測定を難しくする。

- 検出器

- 荷電粒子の検出(e^+ e^- π^+ π^- p μ^+ μ^- etc)

- 基本的に電離相互作用でできたイオンを検出することで通過位置を特定できる。
 - 磁場中で曲げることで運動量の測定も可能(運動量が低い方が測定しやすい)

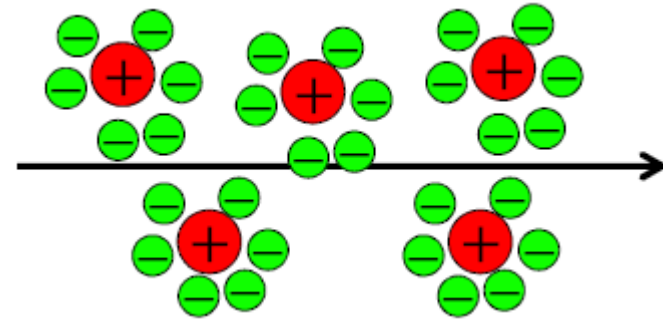
- 相互作用が小さくないもの(μ^+ μ^- 以外)

- 物質でとめてエネルギー測定(カロリメータ)
 - 中性粒子(光子や中性子)も測定可能(エネルギーが高い方が測定しやすい)

電離相互作用

電離相互作用(ionization)

- 物質内で荷電粒子がエネルギーを損失することで、そのエネルギーによる物質内の粒子の“イオン化”が起こる。
- エネルギー損失の大きさは、



Bethe-Blochの式

$$\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = -4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \gamma^2 \beta^2}{I^2} T^{\max} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right]$$

定数パラメータ

$K = 4\pi N_A \cdot r_e^2 \cdot m_e c^2 (=0.307 \text{ MeV} / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}))$, N_A : アボガドロ数 ($\sim 6e+23$)

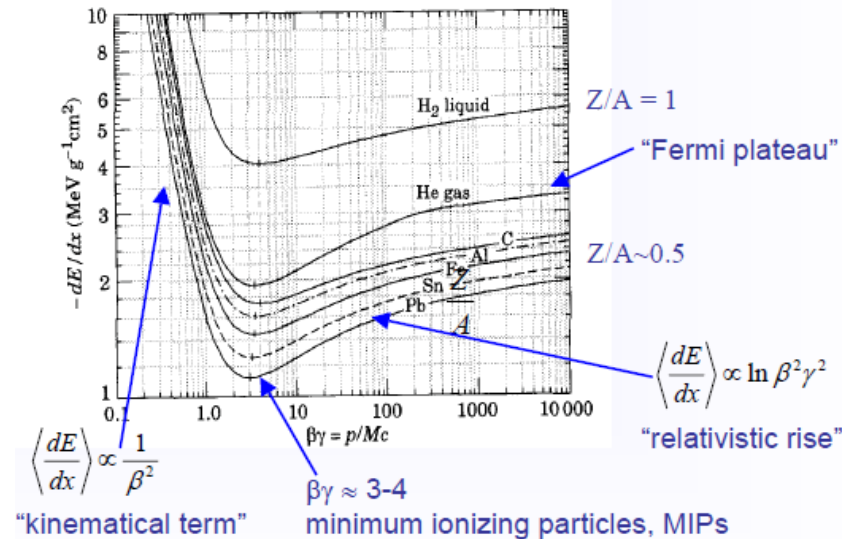
r_e : 電子古典半径 ($\sim 2.8 \text{ fm}$) m_e : 電子質量

物質パラメータ

Z, A : 物質の原子番号および質量数, I : 物質のイオン化エネルギー ($I \sim 16 \cdot Z^{0.9} [\text{eV}]$)

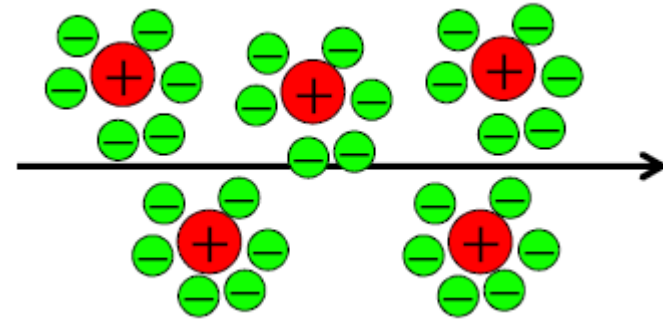
荷電粒子パラメータ

z : 荷電粒子の原子番号 γ, β : 相対論パラメータ



電離相互作用

- 電離相互作用(ionization)
 - 物質内で荷電粒子がエネルギーを損失することで、そのエネルギーによる物質内の粒子の“イオン化”が起こる。
 - エネルギー損失の大きさは、



Bethe-Blochの式

$$\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = -4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2n_e c^2 \gamma^2 \beta^2}{I^2} T^{\max} - \beta^2 \right] \frac{\delta}{2}$$

定数パラメータ

$K = 4\pi N_A \cdot r_e^2 \cdot m_e c^2 (=0.307 \text{MeV}/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}))$, N_A : アボガドロ数 ($\sim 6e+23$)

r_e : 電子古典半径 ($\sim 2.8\text{fm}$) m_e : 電子質量

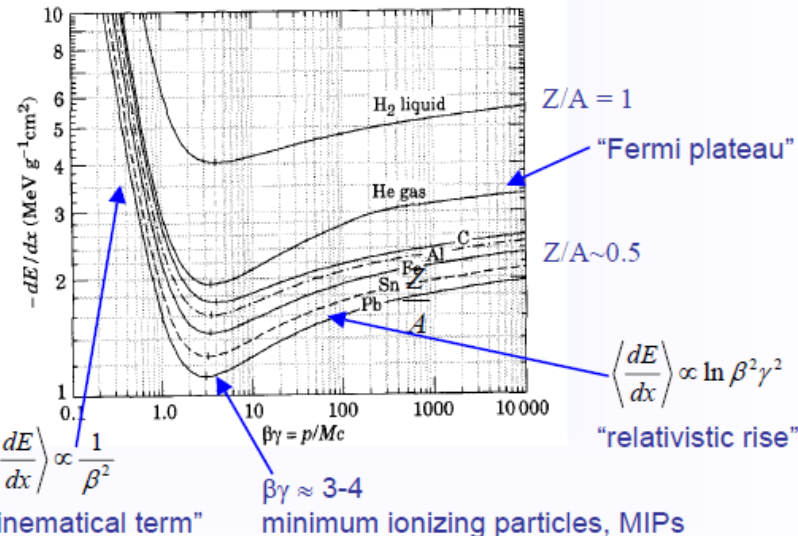
物質パラメータ

Z, A : 物質の原子番号および質量数, I : 物質のイオン化エネルギー ($I \sim 16 \cdot Z^{0.9} [\text{eV}]$)

荷電粒子パラメータ

z : 荷電粒子の原子番号 γ, β : 相対論パラメータ

電荷が同じであれば荷電粒子の速度 β のみで決まる粒子の質量によらない。

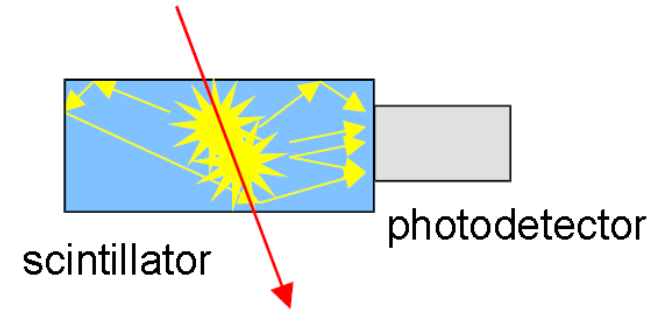
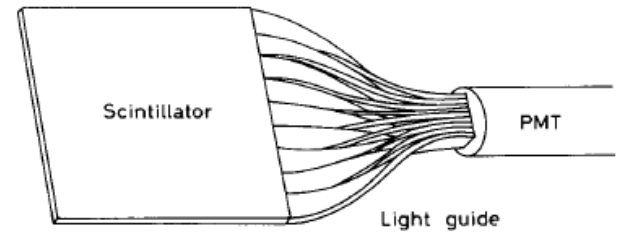


ただし、電子は軽いので制動放射(Bremsstrahlung)の影響が大きい

電離相互作用

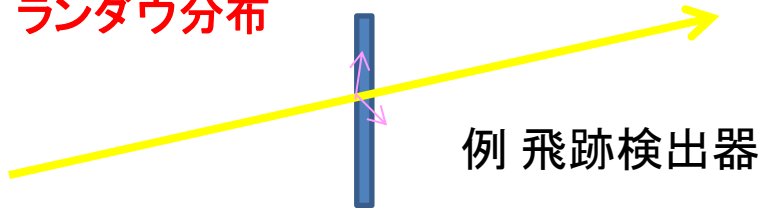
電離相互作用を利用した検出器

- シンチレータ+光電子増倍管
- $\beta \sim 1$ の粒子は、1cmあたり大体2MeVx
密度d
 - プラスチック $d \sim 1.05$
 - NaI $d = 3.7$
 - 鉄 $d = 7.87$
 - 鉛 $d = 11.3$

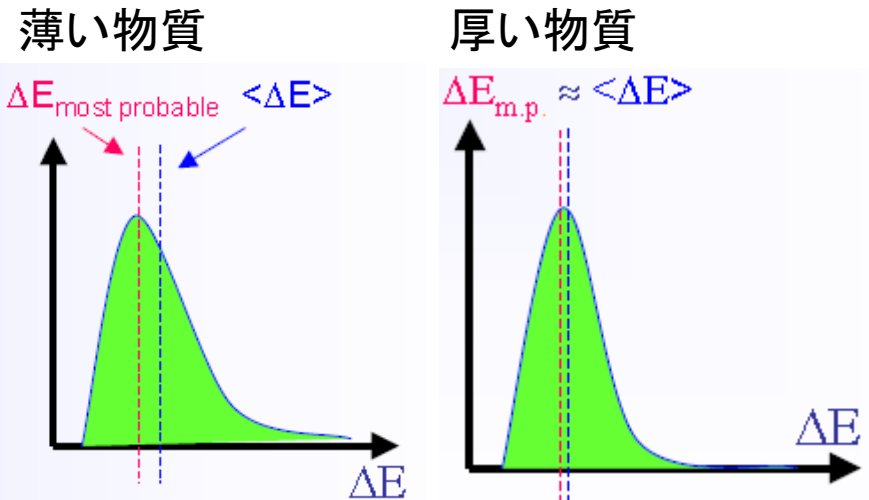
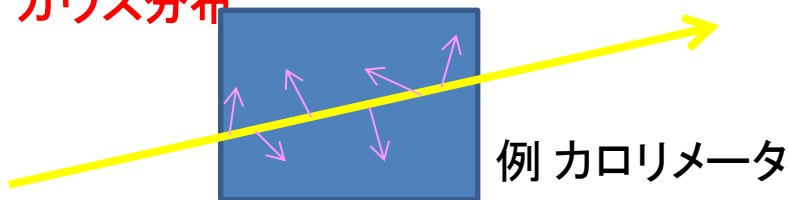


エネルギー損失の大きさは確率分布

- 薄い物質や低密度の物質の場合
ランダウ分布



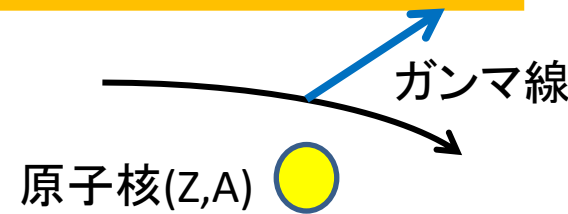
- 厚い物質や高密度の物質の場合
ガウス分布



制動放射

制動放射によるエネルギー損失

- 物質中の原子核によるクーロン力で曲げられることでガンマ線を放出



$$-\frac{dE}{dx} = 4\alpha N_A \frac{Z^2}{A} z^2 \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{mc^2} \right)^2 E \ln \frac{183}{Z^{1/3}} \propto \frac{E}{m^2}$$

- 質量が小さく、エネルギーが大きいほど損失が大きい。主に電子は制動放射の影響を受けやすい。(μ粒子は>1TeVくらいで見えてくる)

電子の場合、

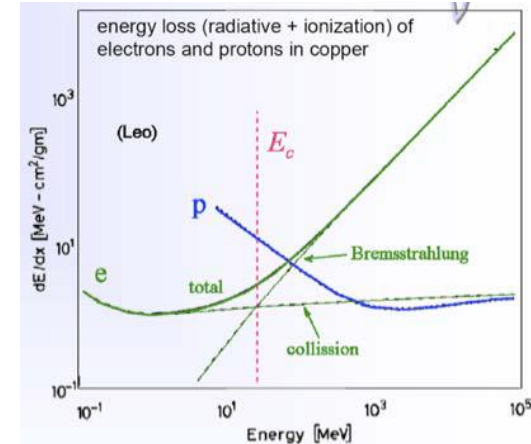
$$-\frac{dE}{dx} = 4\alpha N_A \frac{Z^2}{A} r_e^2 E \ln \frac{183}{Z^{1/3}}$$

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{E}{X_0} \quad \longrightarrow \quad E = E_0 e^{-x/X_0}$$

- 粒子のエネルギー以外は物質のみで決まる定数

– Critical Energy $\frac{dE}{dx}(E_c) \Big|_{Brems} = \frac{dE}{dx}(E_c) \Big|_{ion}$ これより高いエネルギーで制動放射が支配的

– 放射長: $X_0 = \frac{A}{4\alpha N_A Z^2 r_e^2 \ln \frac{183}{Z^{1/3}}}$ 電子のエネルギーが1/eになる長さ



Material	Critical energy [MeV]	Radiation length	
		[gm/cm ²]	[cm]
Al	51.0	24.01	8.9
Pb	9.51	6.37	0.56
Fe	27.4	13.84	1.76
Cu	24.8	12.86	1.43
Air	102	36.20	30050
NaI	17.4	9.49	2.59

つまり、高エネルギー電子は制動放射でエネルギーを失い電離相互作用で止まる

粒子と物質との相互作用

- 相互作用

- 荷電粒子

- 主に電離相互作用(やチェレンコフ、遷移輻射)
 - 軽い(つまり電子)場合は制動放射

- 光子

- 光電効果、コンプトン散乱、対生成

- ハドロン

- 荷電ハドロンは電離相互作用をするが、中性ハドロンは検出が難しい。これがジェットのエネルギー測定を難しくする。

- 検出器

- 荷電粒子の検出(e^+ e^- π^+ π^- p μ^+ μ^- etc)

- 基本的に電離相互作用でできたイオンを検出することで通過位置を特定できる。
 - 磁場中で曲げることで運動量の測定も可能(運動量が低い方が測定しやすい)

- 相互作用が小さくないもの(μ^+ μ^- 以外)

- 物質でとめてエネルギー測定(カロリメータ)
 - 中性粒子(光子や中性子)も測定可能(エネルギーが高い方が測定しやすい)

光子のエネルギーと波長

- 光子のエネルギーは

- $E=h\nu=hc/\lambda$

- h : プランク定数 $6.62607 \times 10^{-34} [\text{Js}] = 4.13566 \times 10^{-15} [\text{eVs}]$

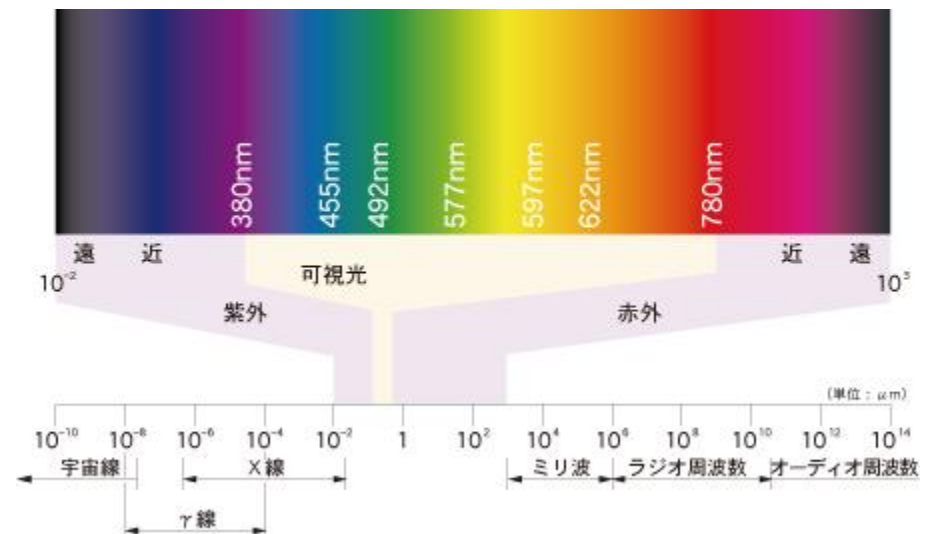
- ν : 振動数

- c : 光速 $2.9979 \times 10^8 [\text{m/s}]$

- λ : 波長 [m]

- $E [\text{eV}] = 1.24/\lambda [\mu\text{m}]$

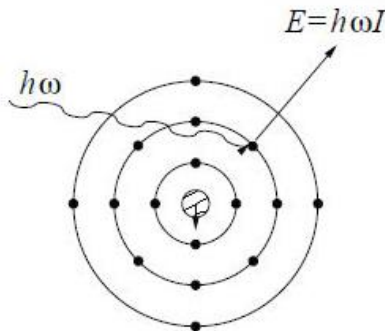
可視光は大体数eVくらい



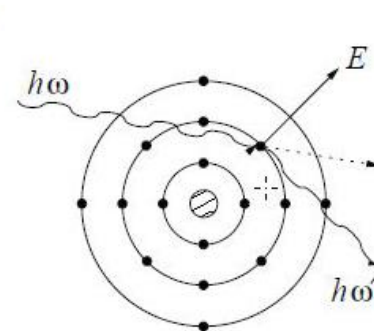
光子と物質の相互作用

- 光電効果 ($E < 100 \text{ keV}$)
 - $\propto Z^4 \rightarrow 5E^{-3.5} \rightarrow -1$
- コンプトン散乱 ($100 \text{ keV} \sim \text{MeV}$)
 - $\propto ZE^{-1}$
- 対生成 ($E > 2 \text{ MeV}$)
 - $\propto Z^2 \ln E$

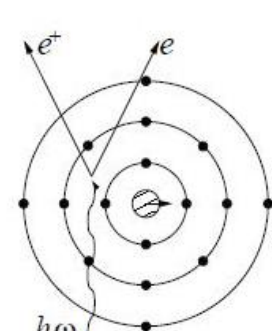
物質のZと粒子のEで決まる



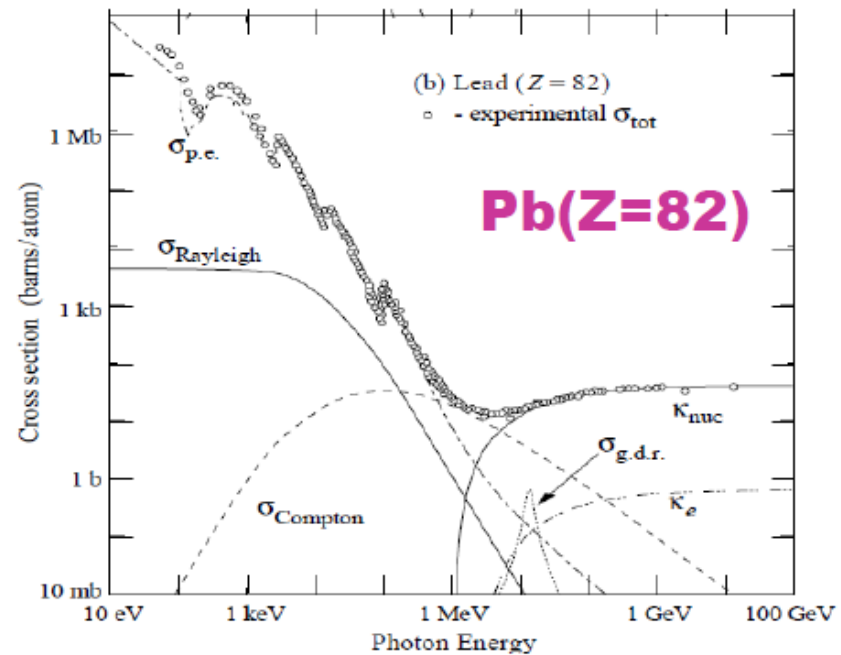
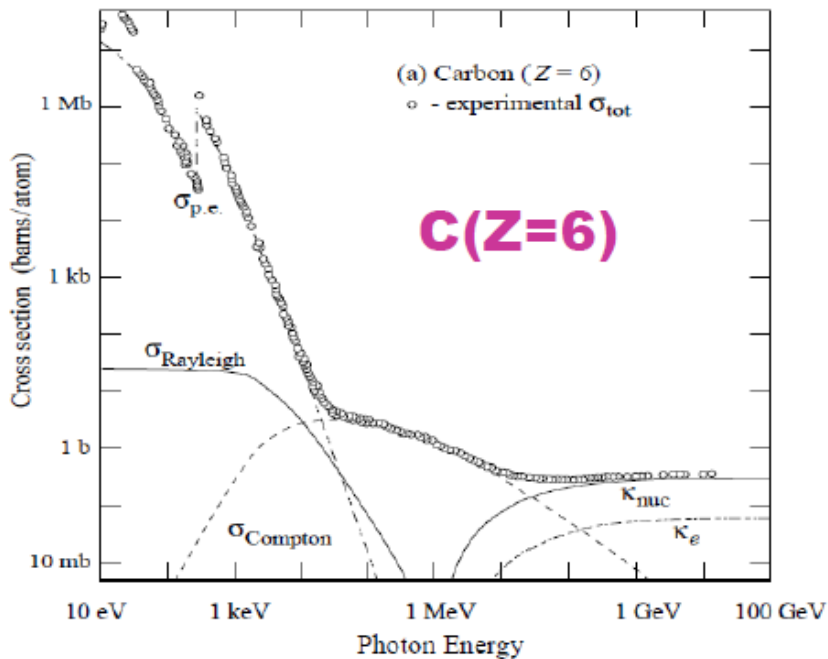
(a) photoelectric effect



(b) Compton scattering



(c) pair production



光子と物質の相互作用

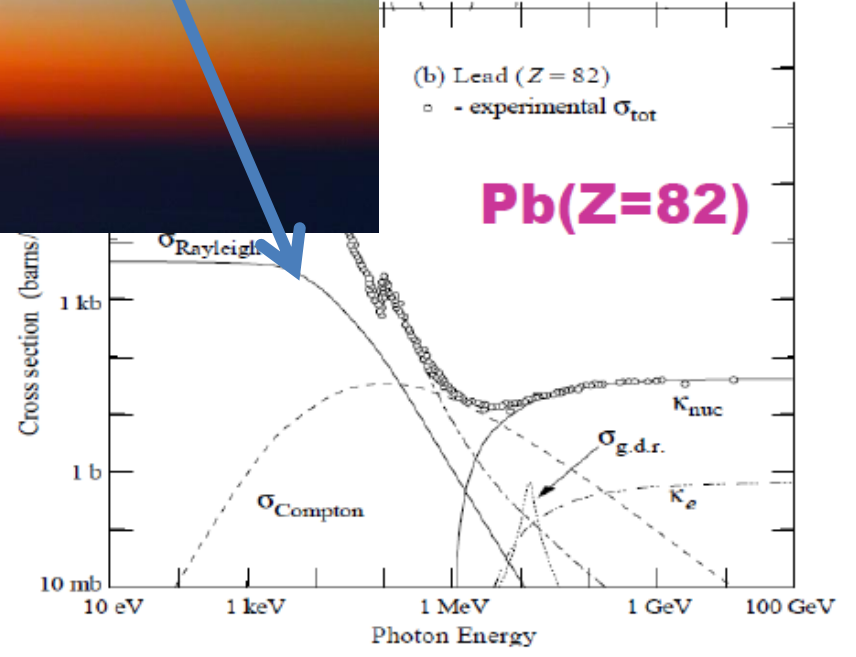
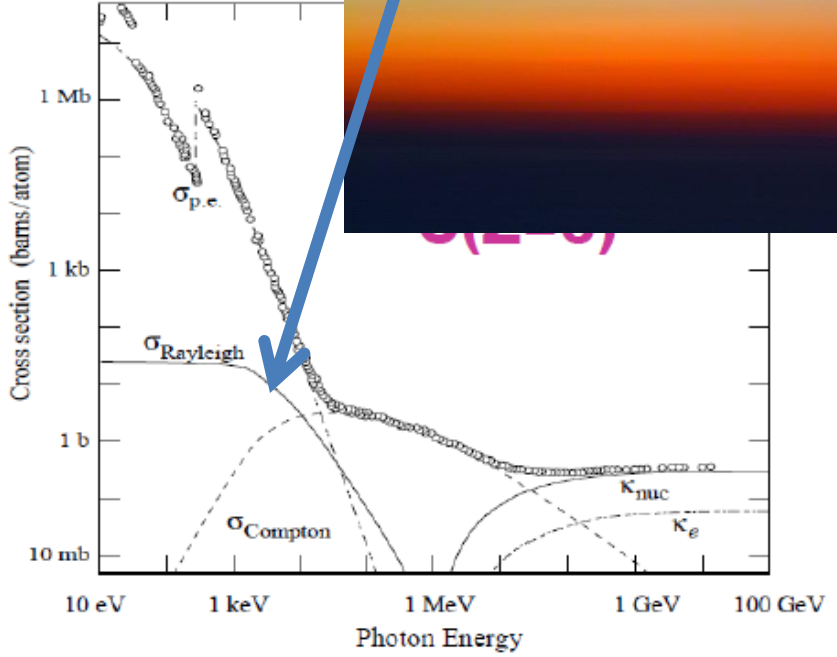
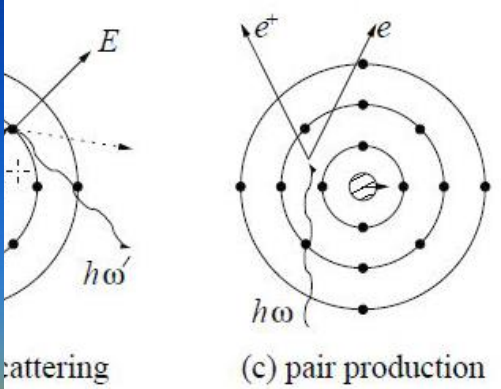
- 光電効果 ($E < 100 \text{ keV}$)
 - $\propto Z^4 \rightarrow 5E^{-3.5}$
- コンプトン散乱
 - $\propto ZE^{-1}$
- 対生成 ($E > 2M_0c^2$)
 - $\propto Z^2 \ln E$

物質のZと

レイリー散乱

$$k_s = \frac{2\pi^5}{3} n \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)^2 \frac{d^6}{\lambda^4}$$

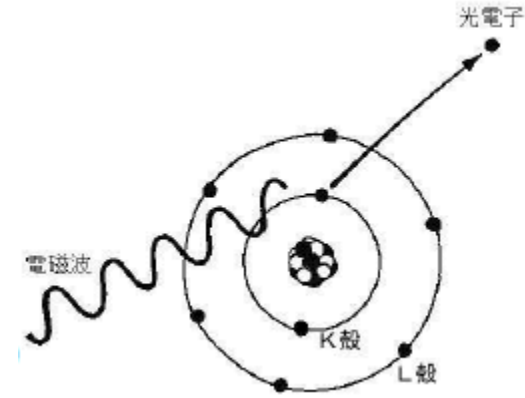
n は粒子数
 d は粒子径
 m は反射係数
 λ は波長



光電効果

光電効果

- エネルギーが100keV以下の時
 - 可視光など
- 吸収した光子のエネルギーが物質中の電子のエネルギーになり、光電子が出る。
 - 薄い物質の場合、光電子が入射光子の反対側に飛び出す。

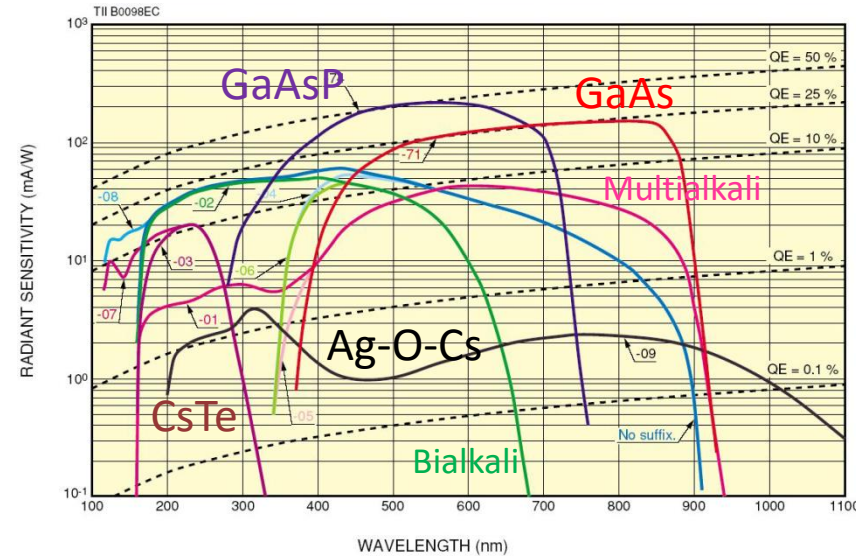
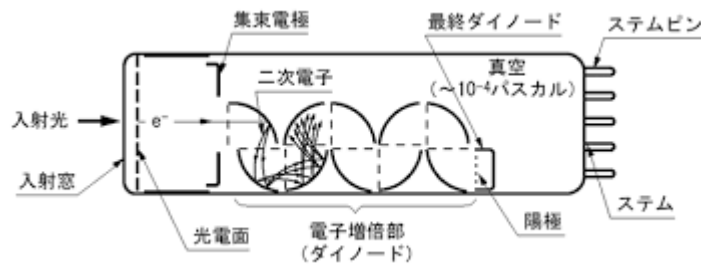
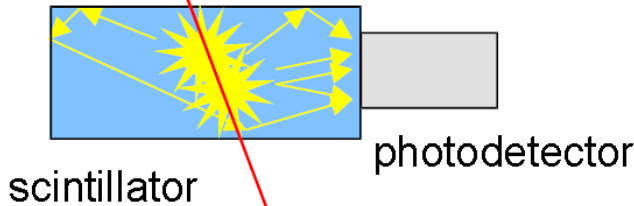


例、光電子増倍管の光電面

- シンチレーション光の可視光領域の光を吸収し、光電子を放出する。
 - 入射光子数に対して出ていく光電子の数の割合を量子効率 (Quantum Efficiency) と呼ぶ。
 - よくても30%。高いとノイズが増えることもある。

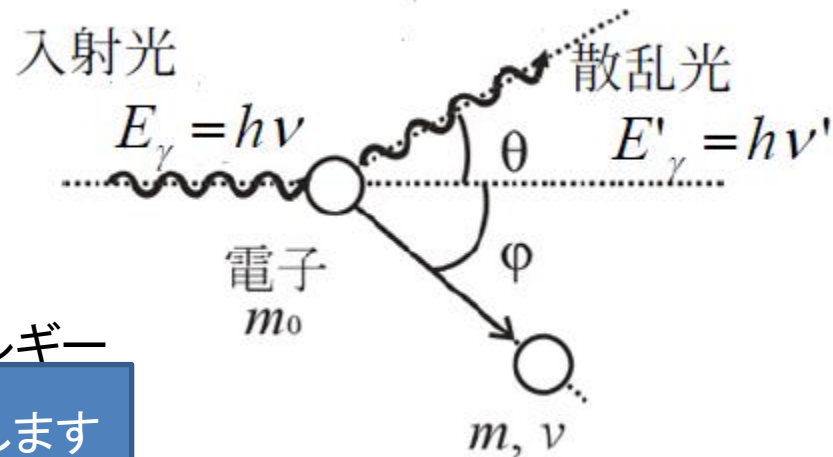
$$E = h\nu - B.E.$$

(B.E. : 電子のbinding energy)



コンプトン散乱

- 少しエネルギーが上がると、
 - 入射光子のエネルギーが電子の質量付近の時
 - 入射光子が電子と衝突散乱しエネルギーを失う。



散乱光のエネルギー

レポート課題にします

散乱電子のエネルギー

レポート課題にします

- 頻度(断面積)

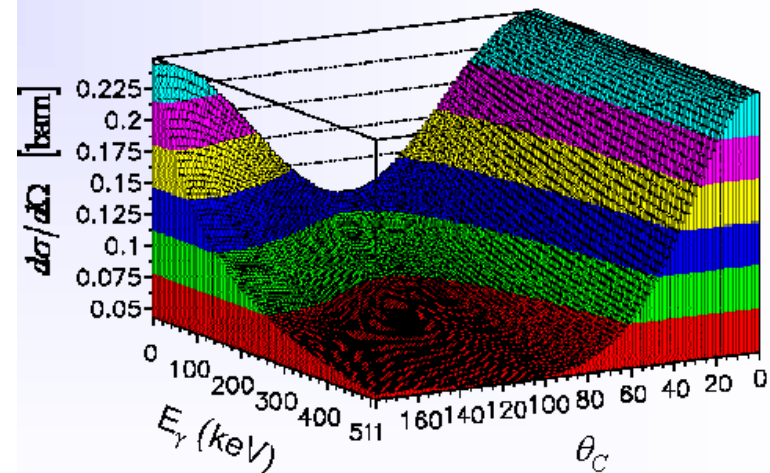
Klein-Nishinaの式 :

m_0

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{Z r_e^2}{2} \cdot \frac{1}{[1 + \gamma(1 - \cos\theta)]^2} \cdot \left[1 + \cos^2\theta + \frac{\gamma^2(1 - \cos\theta)^2}{1 + \gamma(1 - \cos\theta)} \right]$$

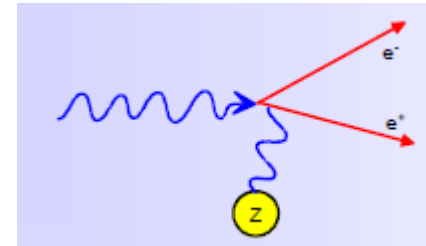
$$\left(\gamma \gg 1 \text{ のとき : } \frac{d\sigma}{d\Omega} \sim \frac{Z r_e^2}{2} \cdot \frac{1}{2\gamma(1 - \cos\theta)} \propto \frac{Z}{E_\gamma} \right)$$

Compton cross-section (Klein-Nishina)



対生成

- 高エネルギー光子の場合
 - $E_\gamma > 2m_e c^2$ の時のみ起こる (対生成: pair production, conversion)
 - 光子 γ は質量0なので $\gamma \rightarrow 2e$ の反応はなく原子核からの作用が必要



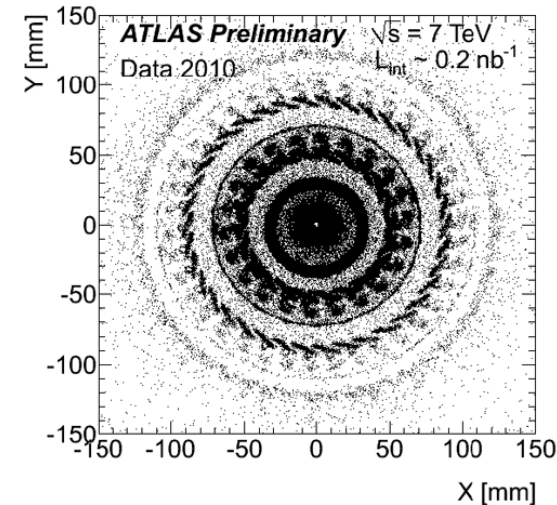
- 頻度

$$\sigma_{pair} = 4\alpha r_e^2 \left(\frac{7}{9} \ln \frac{183}{Z^{1/3}} \right) \approx \frac{7}{9} \frac{A}{N_A} \frac{1}{X_0}$$

制動放射の時の放射長

$$X_0 = \frac{A}{4\alpha N_A Z^2 r_e^2 \ln \frac{183}{Z^{1/3}}}$$

- 吸収長 (Mean Free Path) : $\lambda_{pair} = \frac{9}{7} X_0$
- **高エネルギーでは**
 - エネルギーによらない。
 - e+e- はほぼ symmetric
 - e+e- の方向がほぼ同じ (ただし、磁場で反対に曲がるので観測可)



- Single photon or Two photon??
 - 基本的にATLASの検出器は(もしあれば)2本のe+e-の飛跡を観測できる。カロリメータでも2 photonの分離はある程度可能。
 - 高エネルギーのphotonの場合は一本に見えてしまうこともあるが、conversion rateから統計的に計算することができる。

粒子と物質との相互作用

- 相互作用

- 荷電粒子

- 主に電離相互作用(やチェレンコフ、遷移輻射)
 - 軽い(つまり電子)場合は制動放射

- 光子

- 光電効果、コンプトン散乱、対生成

- ハドロン

- 荷電ハドロンは電離相互作用をするが、中性ハドロンは検出が難しい。これがジェットのエネルギー測定を難しくする。

- 検出器

- 荷電粒子の検出(e^+ e^- π^+ π^- p μ^+ μ^- etc)

- 基本的に電離相互作用でできたイオンを検出することで通過位置を特定できる。
 - 磁場中で曲げることで運動量の測定も可能(運動量が低い方が測定しやすい)

- 相互作用が小さくないもの(μ^+ μ^- 以外)

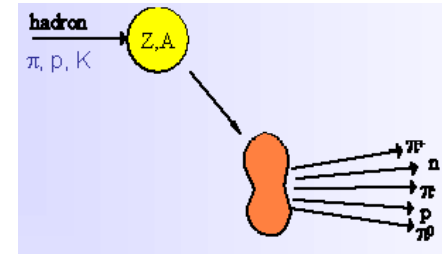
- 物質でとめてエネルギー測定(カロリメータ)
 - 中性粒子(光子や中性子)も測定可能(エネルギーが高い方が測定しやすい)

ハドロン

- ハドロン(π , p , K , n)と物質の衝突は
 - 原子核捕獲 低エネルギー
 - 弾性散乱 \sim MeV region
 - 非弾性散乱 >1 MeV
 - 原子核の励起と崩壊で多数の二次粒子を生成
 - 高エネルギー(>1 GeV)で断面積はあまり入射粒子のエネルギーや種類によらない。

$$\sigma_{inel} \sim \sigma_0 A^{0.7} \quad (\sigma_0 \sim 35 \text{mb})$$
 - 電子や光子の場合の X_0 みたいなものを導入すると、

$$\text{Interaction length} : \lambda = A / (N_A \sigma) \propto A^{1/3}$$

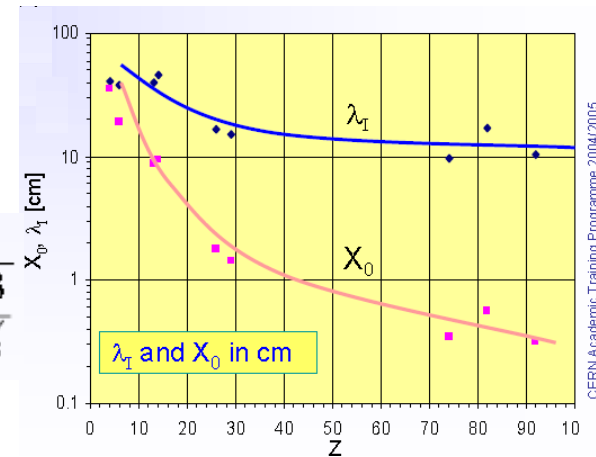


Material	Z	A	ρ [g/cm ³]	X_0 [g/cm ²]	λ_t [g/cm ²]
Hydrogen (gas)	1	1.01	0.0899 (g/l)	63	50.8
Helium (gas)	2	4.00	0.1786 (g/l)	94	65.1
beryllium	4	9.01	1.848	65.19	75.2
Carbon	6	12.01	2.265	43	86.3
Nitrogen (gas)	7	14.01	1.25 (g/l)	38	87.8
Oxygen (gas)	8	16.00	1.428 (g/l)	34	91.0
Aluminium	13	26.98	2.7	24	106.4
Silicon	14	28.09	2.33	22	106.0
Iron	26	55.85	7.87	13.9	131.9
Copper	29	63.55	8.96	12.9	134.9
Tungsten	74	183.85	19.3	6.8	185.0
Lead	82	207.19	11.35	6.4	194.0
Uranium	92	238.03	18.95	6.0	199.0

基本的にハドロンの方が電子よりも吸収長が長い

電子の放射長

$$X_0 = \frac{A}{4\alpha N_A Z^2 r_e^2 \ln \frac{183}{Z^{1/3}}}$$



粒子と物質との相互作用

- 相互作用
 - 荷電粒子
 - 主に電離相互作用(やチェレンコフ、遷移輻射)
 - 軽い(つまり電子)場合は制動放射
 - 光子
 - 光電効果、コンプトン散乱、対生成
 - ハドロン
 - 荷電ハドロンは電離相互作用をするが、中性ハドロンは検出が難しい。これがジェットのエネルギー測定を難しくする。
- 検出器
 - 荷電粒子の検出(e^+ e^- π^+ π^- p μ^+ μ^- etc)
 - 基本的に電離相互作用でできたイオンを検出することで通過位置を特定できる。
 - 磁場中で曲げることで運動量の測定も可能(運動量が低い方が測定しやすい)
 - 相互作用が小さくないもの(μ^+ μ^- 以外)
 - 物質でとめてエネルギー測定(カロリメータ)
 - 中性粒子(光子や中性子)も測定可能(エネルギーが高い方が測定しやすい)

横方向運動量の測定

- 最初の目的は荷電粒子の運動量を測定すること。

- 磁場中の荷電粒子

$$F = \frac{mv^2}{\rho} = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) : \text{磁場、進行方向に垂直な力}$$

v : 速度 ρ : 曲率半径 \mathbf{B} : 磁場

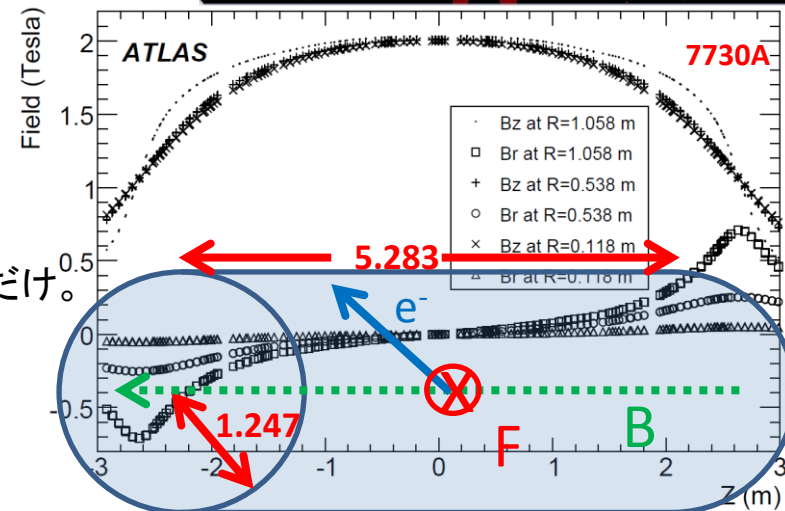
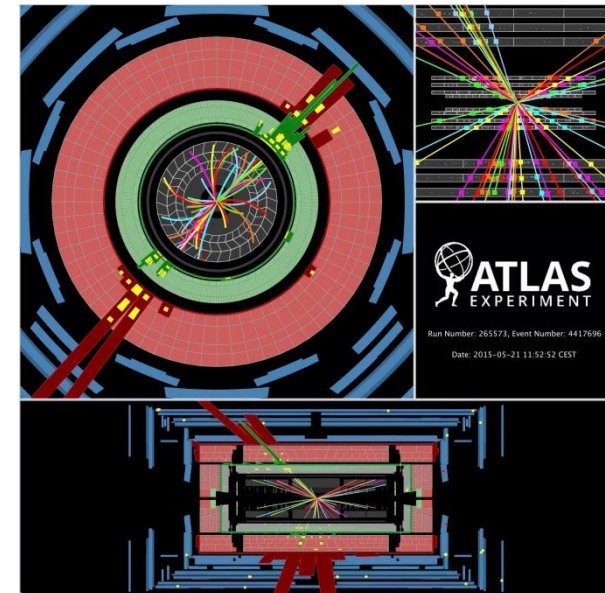
レポート課題にします。

$$p[\text{GeV}/c] = 0.3 \cdot B[\text{T}] \cdot \rho[\text{m}]$$

- ソレノイド磁場中の運動

- ソレノイド磁場
 - ソレノイドを貫くベクトル
- 受ける力は磁場(ビーム軸)に垂直な方向(横方向)だけ。
 - 横方向運動量のみ測定可能

$$p_T = 0.3qB\rho$$



横方向運動量の分解能

- 横方向運動量

$$p_T [GeV] = 0.3 B [T] \rho [m]$$

- 検出器の分解能は一定なので、簡単のためたとえば、サジッタ(s)とアーム(L)を測定

$$\rho = \frac{L^2}{8s} + \frac{s}{2} \approx \frac{L^2}{8s} \Leftrightarrow s = \frac{L^2}{8\rho} = \frac{0.3BL^2}{8p_T}$$

$$\frac{1}{p_T} = \frac{8}{0.3BL^2} s \Leftrightarrow \sigma_{1/p_T} = \frac{8}{0.3BL^2} \sigma_s$$

$$= (4.83 \pm 0.16) \times 10^{-4} \text{ ATLAS}$$

- つまり、 $1/p_T$ の分解能が検出器分解能に相当(一定)
- 別の書き方をすると、運動量の相対分解能は p_T に比例

$$\frac{\sigma_{p_T}}{p_T} = \frac{8}{0.3BL^2} \sigma_s \times p_T \Leftrightarrow \frac{\sigma_{p_T}}{p_T} \propto p_T$$

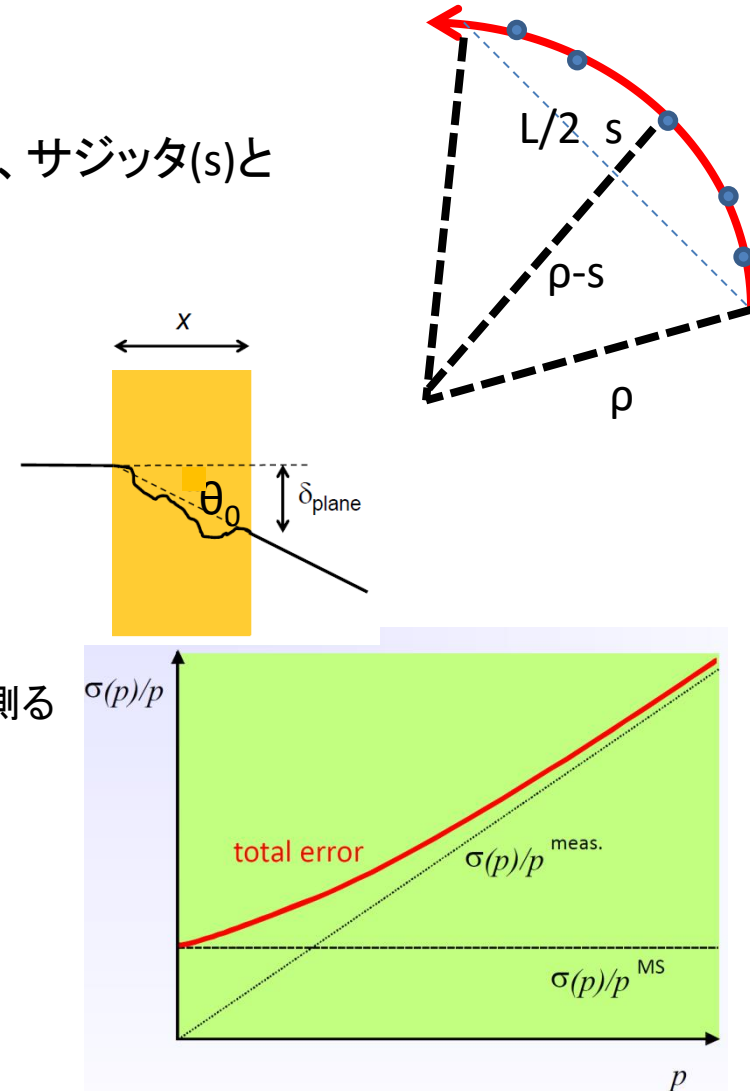
- 分解能を決めているのは、磁場、アーム、検出器分解能
- LHCでは、sを測っているわけではなく、各点での $r\varphi$ 位置を測る

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{720}{N+4} \frac{\sigma_{r\varphi}}{8}} \quad \text{R.L. Gluckstern, NIM 24(1963) 381}$$

- 実際は多重散乱の効果が含まれる

$$\sigma_{r\varphi}^2 = \sigma_{r\varphi}^2 (\text{det}) + \sigma_{r\varphi}^2 (M.S)$$

$$\sigma_{r\varphi} (M.S) \propto \theta_0 = \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta p_T} \sqrt{\frac{x}{X_0}} \Leftrightarrow \frac{\sigma_{p_T}}{p_T} |_{m.s} = \text{const.}$$



衝突点と二次崩壊点再構成

- 簡単な場合(二層)を考えて

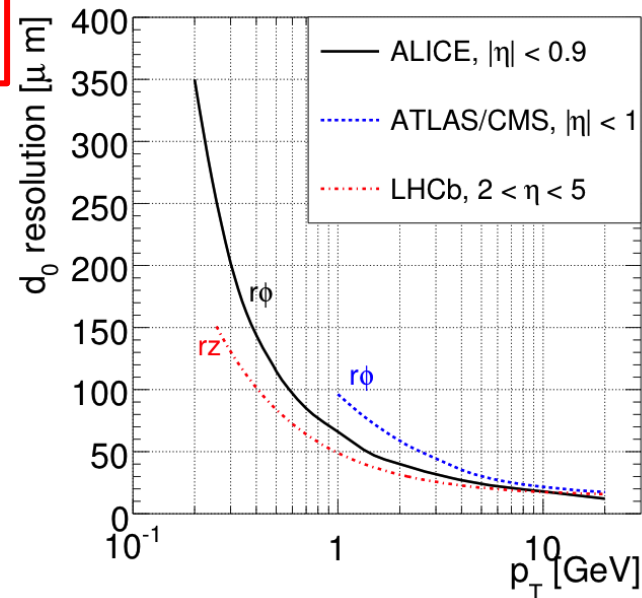
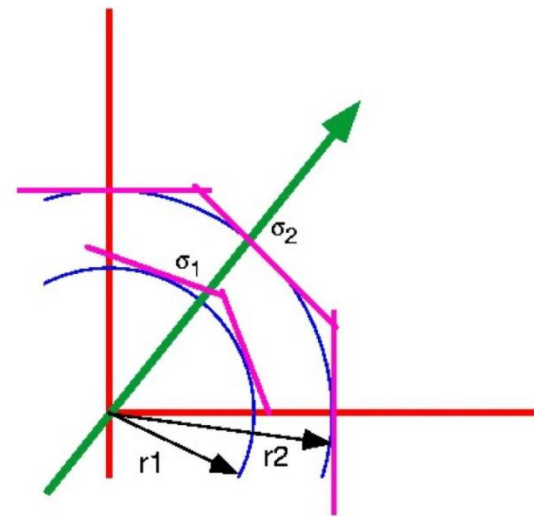
$$\sigma_{d_0}^2 = \frac{r_2^2 \sigma_1^2 + r_1^2 \sigma_2^2}{(r_2 - r_1)^2} + \sigma_{ms}^2$$

$$\sigma_{d_0} = a \oplus \frac{b}{p_T \sin^{1/2} \theta}$$

衝突点に近い検出器の分解能が大事
アーム($r_2 - r_1$)も大きいほうが良い。

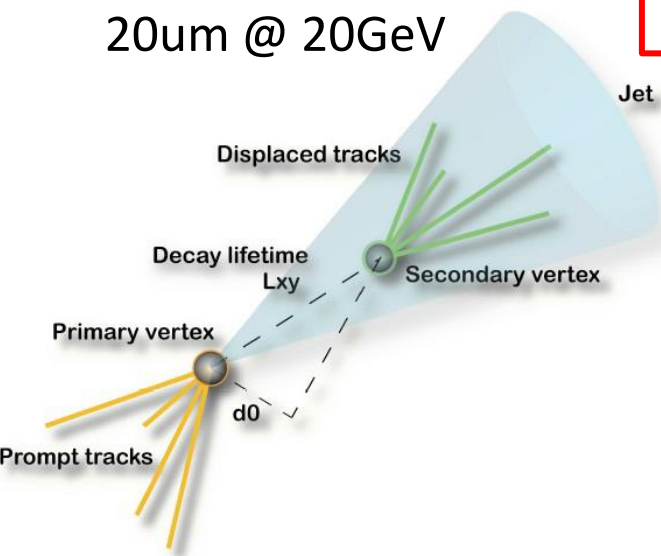
ATLASでは、
100um @ 1GeV
20um @ 20GeV

d_0 は $r\phi$ 平面の衝突点だが、
基本的に z_0 も同じ
→ z_0 はパイルアップ除去で大事



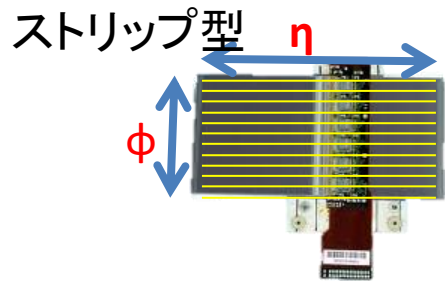
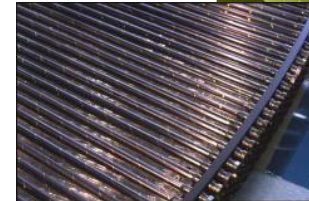
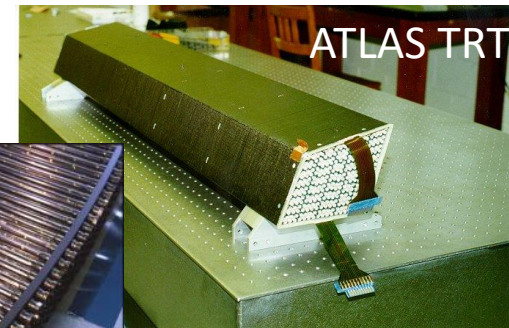
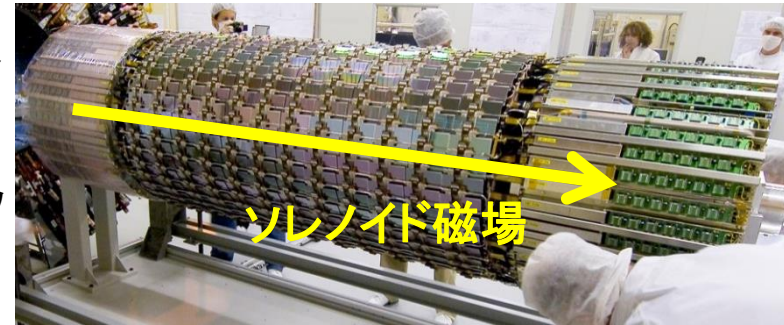
長寿命粒子(e.g. Bメソン)

$c\tau = 500\mu\text{m}$ なので、
25GeVのb-quarkだと、
 $c\tau\beta\gamma = c\tau P/m = 2.5[\text{mm}]$
これは十分分離可能

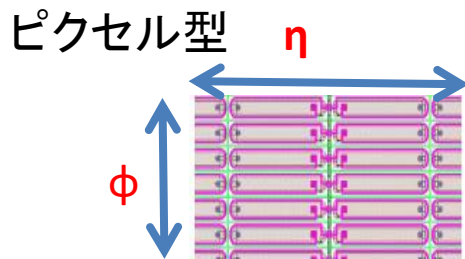
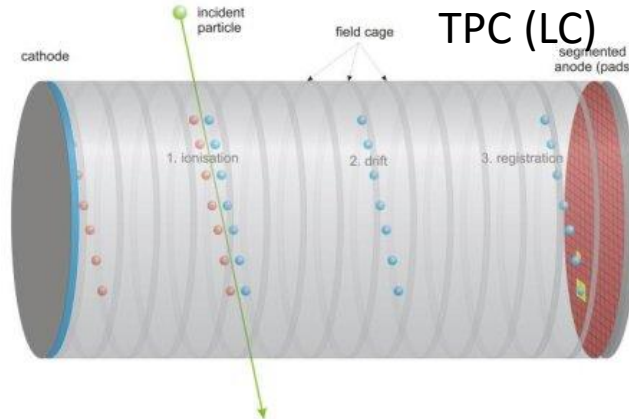


飛跡検出器の代表的な形

- 昔から...
 - 霧箱、ガス検出器、スパークチェンバーなどなど
- ストリップ検出器とピクセル検出器
 - 運動量測定には ϕ 方向の分解能が大事(ストリップ検出器やドリフトチェンバー)
 - η 方向の分解能が必要な理由
 - 長寿命粒子(b-jet, τ 粒子)の二次崩壊点を3次的に再構成
 - パイルアップ衝突点からの飛跡を識別
 - 衝突点(z座標)の決定



ハドロンコライダーでは
ピクセル型検出器がとても重要
 但し、とても新しい技術



粒子と物質との相互作用

• 相互作用

– 荷電粒子

- 主に電離相互作用(やチェレンコフ、遷移輻射)
- 軽い(つまり電子)場合は制動放射

– 光子

- 光電効果、コンプトン散乱、対生成

– ハドロン

- 荷電ハドロンは電離相互作用をするが、中性ハドロンは検出が難しい。これがジェットのエネルギー測定を難しくする。

• 検出器

– 荷電粒子の検出(e^+ e^- π^+ π^- p μ^+ μ^- etc)

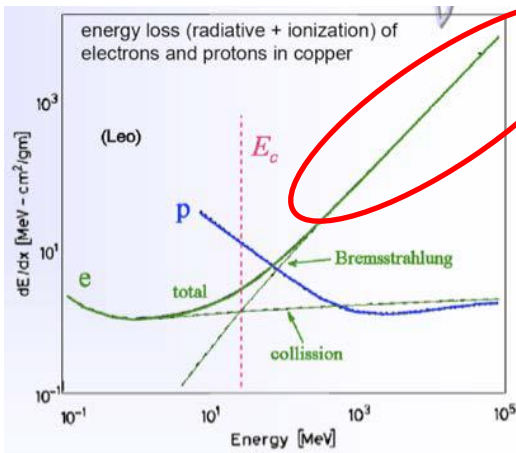
- 基本的に電離相互作用でできたイオンを検出することで通過位置を特定できる。
- 磁場中で曲げることで運動量の測定も可能(運動量が低い方が測定しやすい)

– 相互作用が小さくないもの(μ^+ μ^- 以外)

- 物質でとめてエネルギー測定(カロリメータ)
- 中性粒子(光子や中性子)も測定可能(エネルギーが高い方が測定しやすい)

電磁シャワーとカロリメータ

電子の相互作用



高エネルギー領域
($>1\text{GeV}$)

制動放射

ガンマ線

原子核(Z,A)



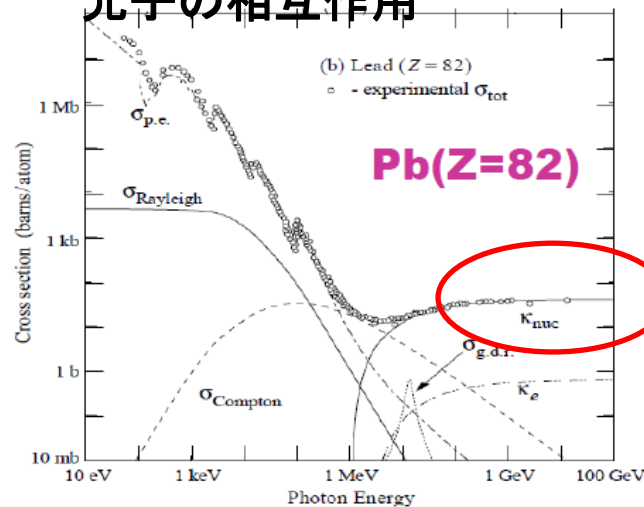
電子

重い物質中(Pb, Cu)では

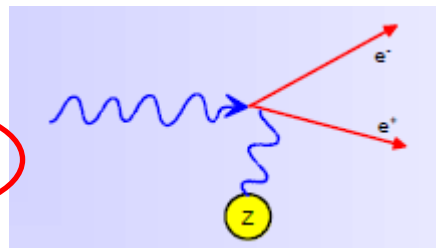
Schematic shower development



光子の相互作用

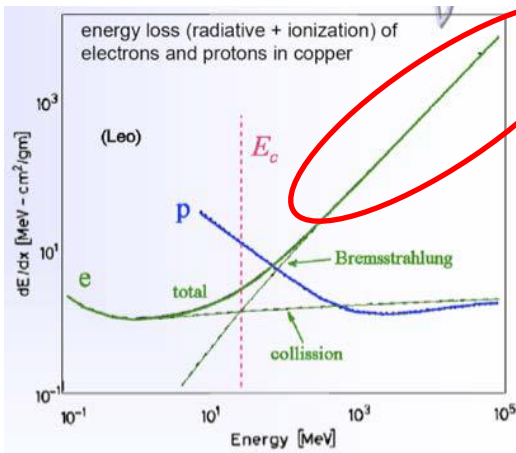


対生成



電磁シャワーとカロリメータ

電子の相互作用



高エネルギー領域 (>1GeV)

制動放射

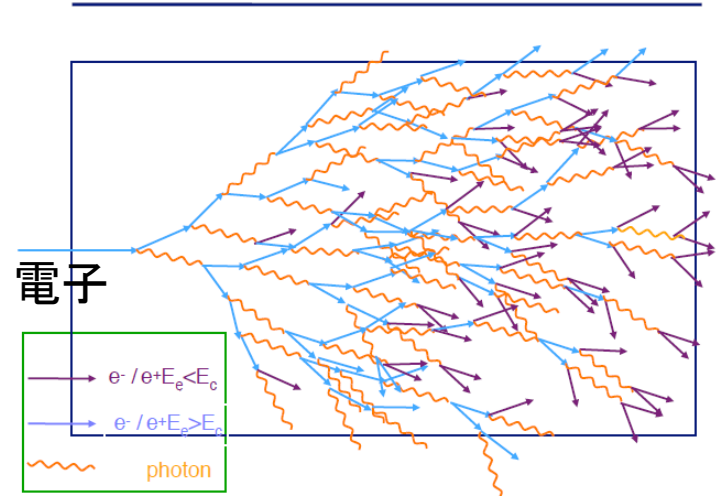
ガンマ線

原子核(Z,A)

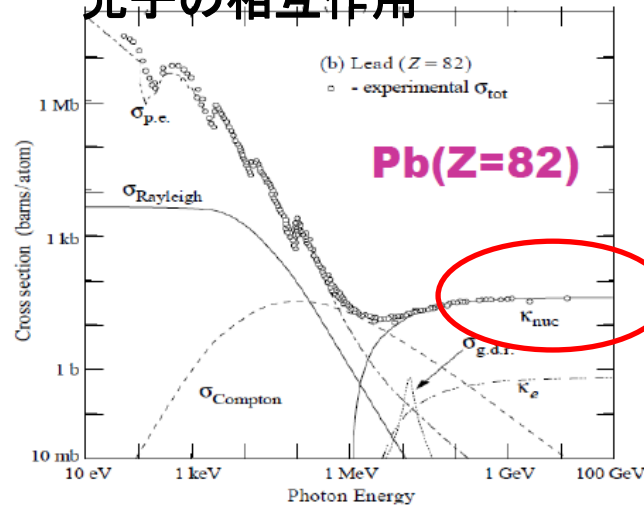


重い物質中(Pb, Cu)では

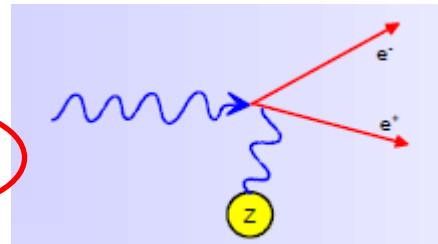
Schematic shower development



光子の相互作用



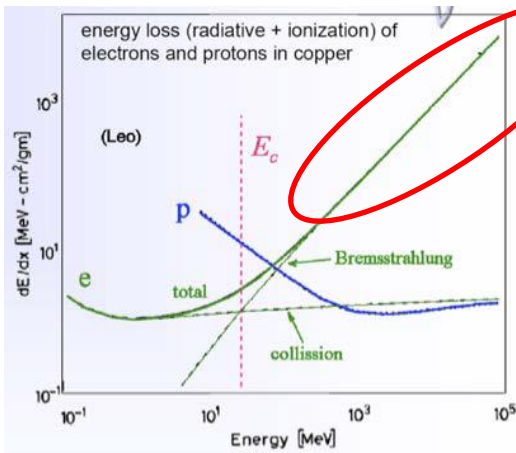
対生成



- 制動放射と対生成で“シャワー”状に粒子が生成する。
- 電磁シャワー(EM shower)

電磁シャワーとカロリメータ


電子の相互作用



高エネルギー領域 (>1GeV)

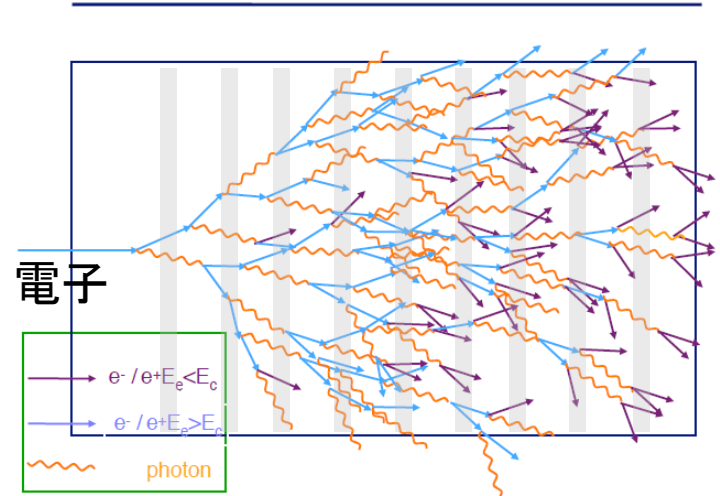
制動放射

ガンマ線

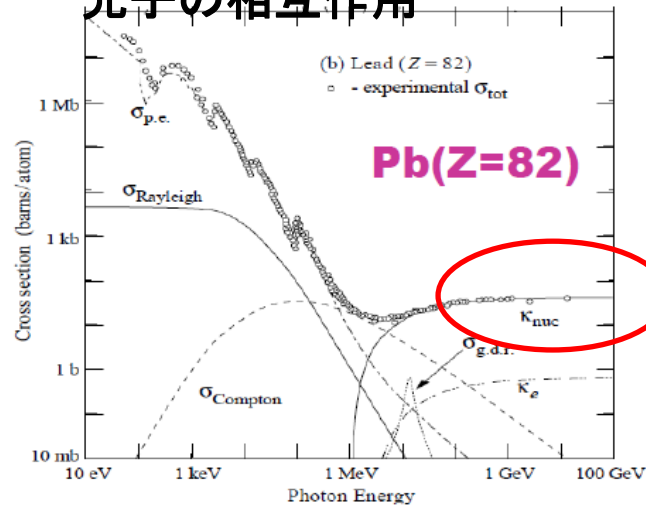
原子核(Z,A) 

重い物質中(Pb, Cu)では

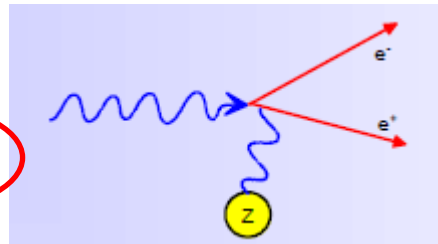
Schematic shower development



光子の相互作用



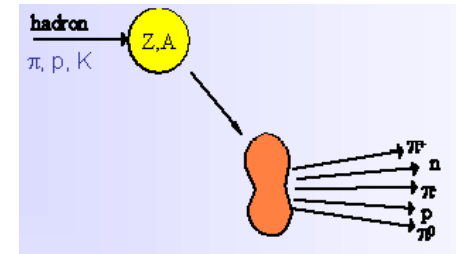
対生成



- 制動放射と対生成で“シャワー”状に粒子が生成する。
 - 電磁シャワー(EM shower)
 - (対生成が起こらないくらい) 薄いサンプリング層(シンチなど)を挿入すると電子の数がカウントできる。
 - **粒子数はエネルギーに比例**

ハドロンシャワーとカロリメータ

- 高エネルギーハドロンが入射すると非弾性散乱で多数の粒子を生成
 - ハドロンシャワー
 - 電磁シャワーと比べて複雑



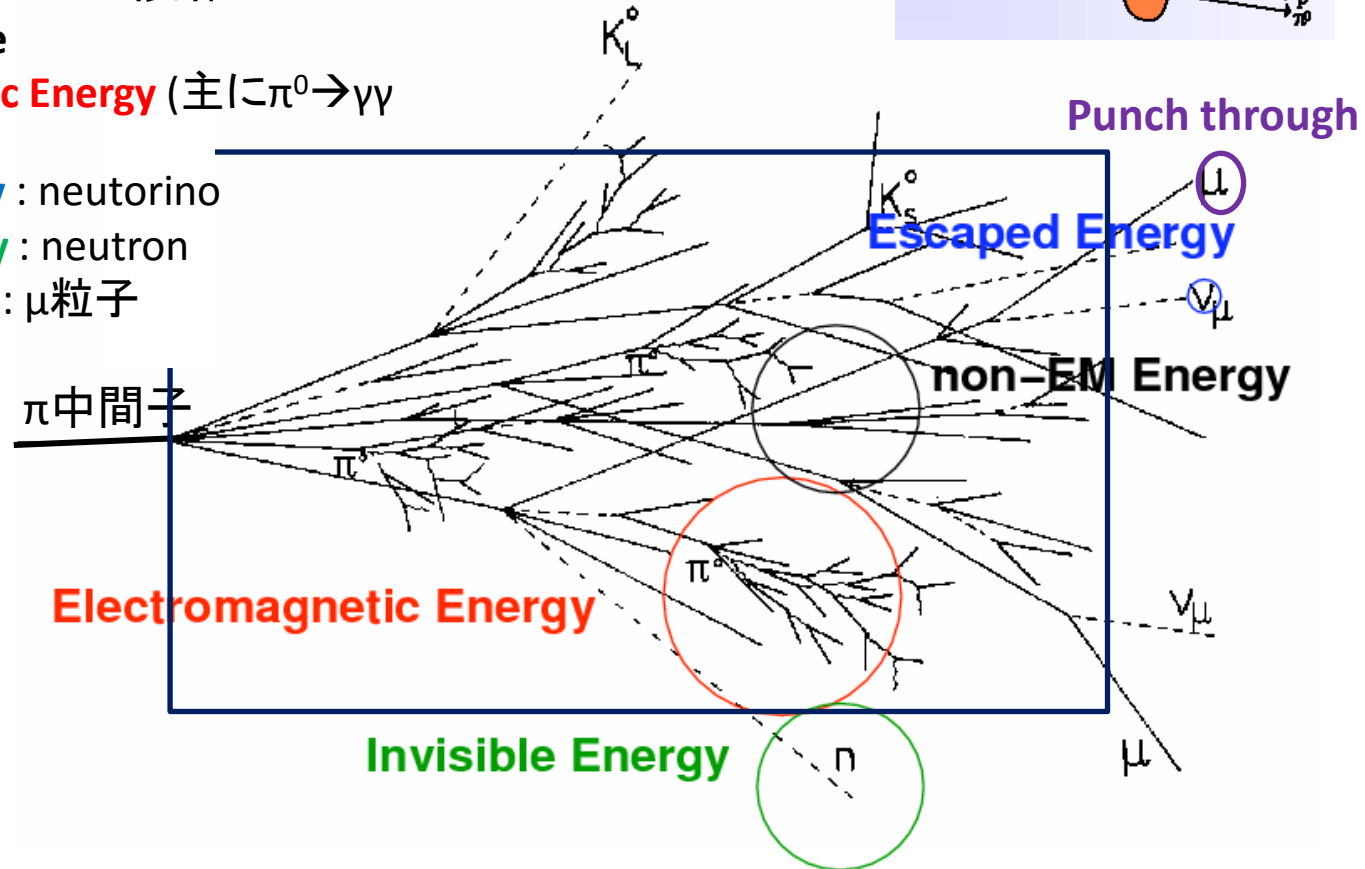
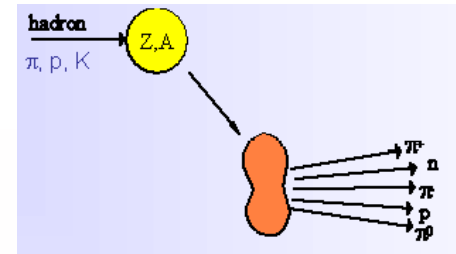
π中間子

ハドロンシャワーとカロリメータ

- 高エネルギーハドロンが入射すると非弾性散乱で多数の粒子を生成

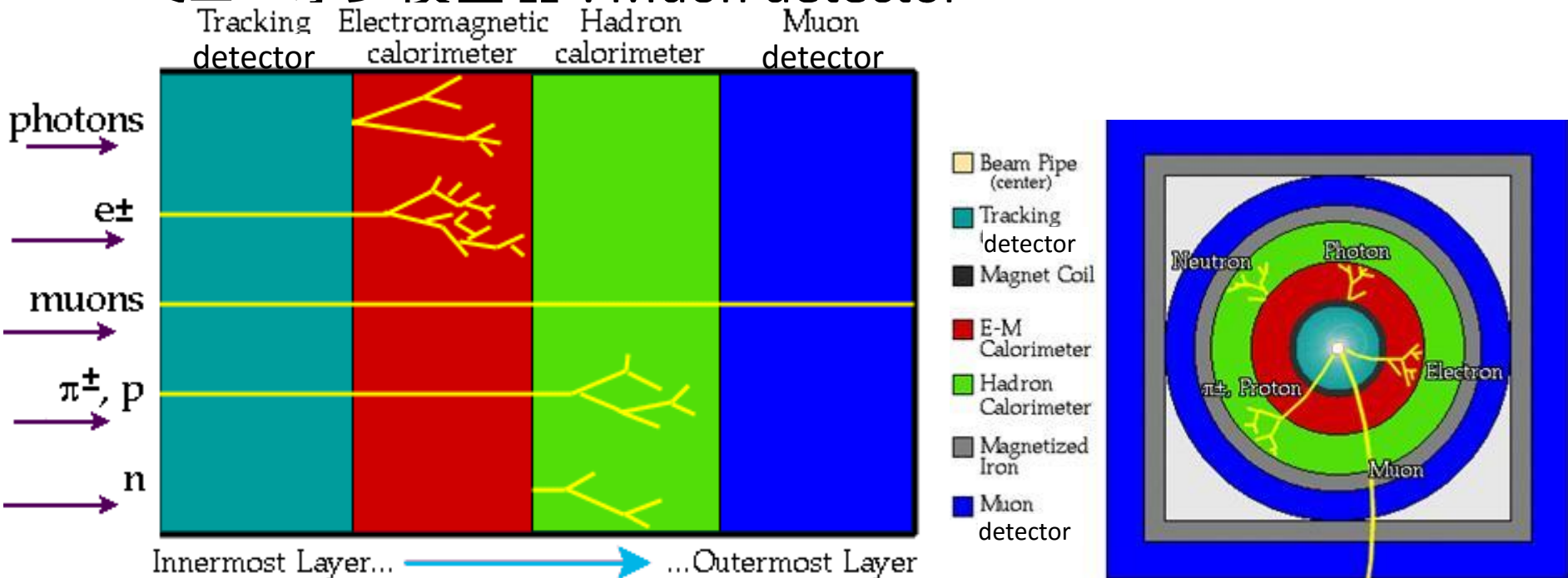
- ハドロンシャワー
- 電磁シャワーと比べて複雑

- Hadron particle
- **Electromagnetic Energy** (主に $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ 起源)
- **Escaped Energy**: neutrino
- **Invisible Energy**: neutron
- **Punch through**: μ 粒子

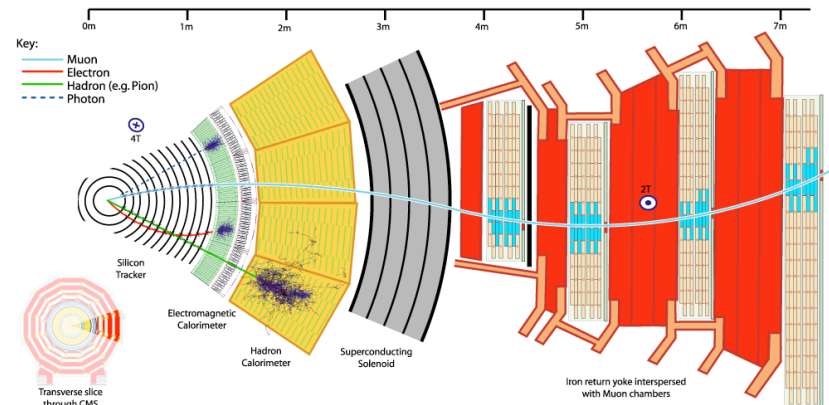
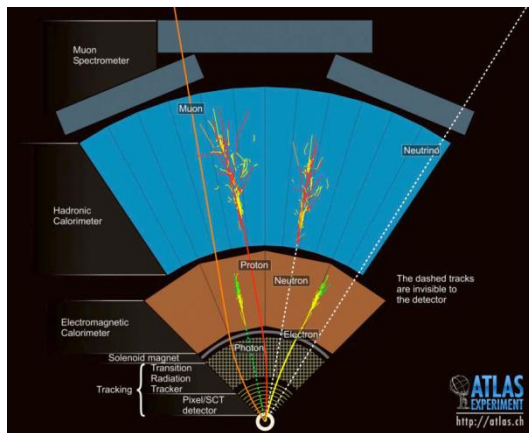
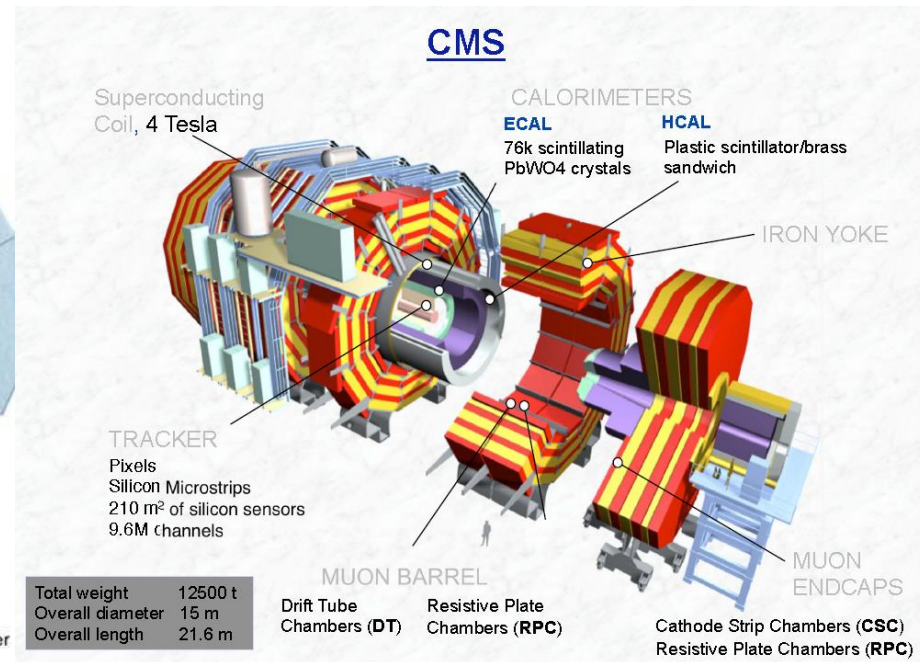
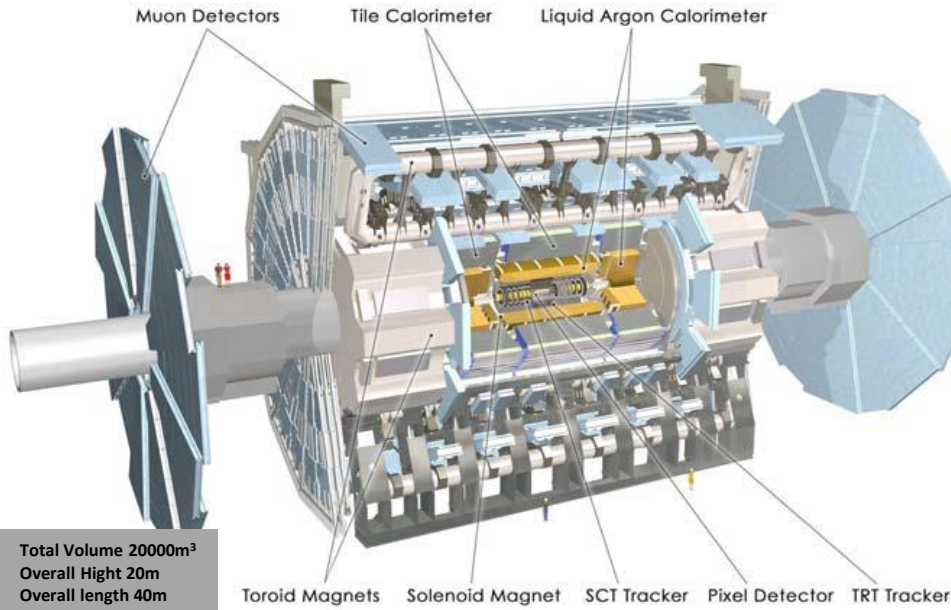


まとめ

- 典型的なハドロンコライダーの検出器は内側から
 - 飛跡検出器 : Tracking detector
 - 電磁カロリメータ : Electromagnetic calorimeter
 - ハドロンカロリメータ : Hadron calorimeter
 - ミューオン検出器 : Muon detector



ATLAS & CMS 検出器(概要)



トラッキング検出器 半導体検出器の動作原理

半導体検出器

半導体(semiconductor)とは？

- 導電性の物質と絶縁体の中間の性質をもつもの。
- 自由電子の少ない4価元素の格子結晶は大体半導体：ダイヤモンド(C), シリコン(Si), ゲルマニウム(Ge), SiC, SiGe....
- 他にも...
 - 2-4価結晶：ZnSe, CdS, ZnO
 - 3-5価結晶：GaAs, InP, GaN

バンドギャップと荷電キャリア

- 伝導体(conduction band)と価電子帯(Valence band)の間のエネルギーギャップ($E_g \sim 6eV$ くらいだとほぼ絶縁体)
- 温度(や圧力)で若干変わる。
 - シリコンのエネルギーギャップ：

$$E_g = 1.17eV - 4.73 \times 10^{-4} \frac{T^2}{T + 636} = 1.1245eV (@300K)$$

荷電キャリア

- 熱や放射線などで電子が伝導体に励起されると電子-ホール対ができる。
- 電圧をかけている場合、伝導体の電子が移動して電流として観測される。(これは暗電流(leakage current)と呼ばれ温度に大きく依存)

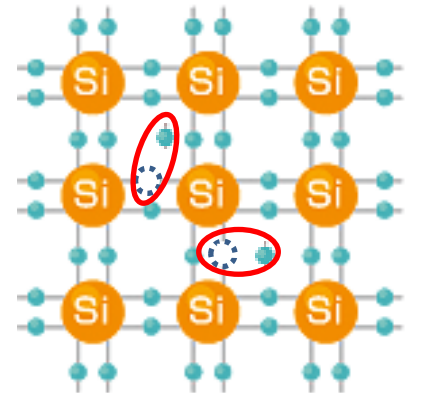
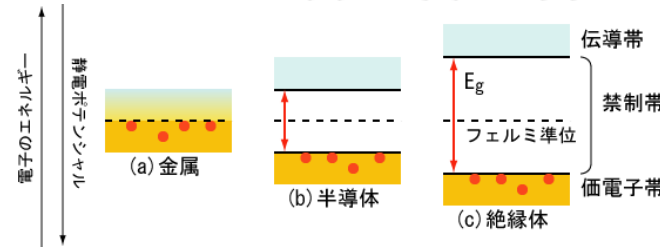
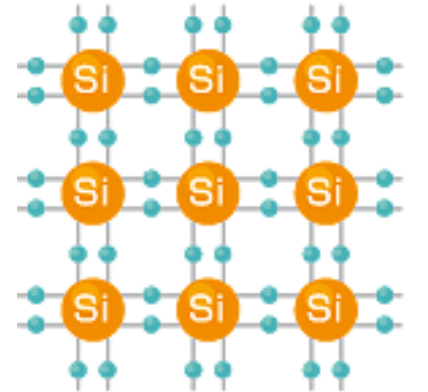
$$\frac{I}{I_0} = \left(\frac{T}{T_0}\right)^2 e^{-\frac{E_g}{2k_B} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)}, \quad \text{7度で二倍とか覚える。}$$

移動速度(Mobility)

- $v_{e/h} = \mu_{e/h} E$: μ はmobility、 E は電場
- シリコンの場合、 $\mu_e = 1400 \text{cm}^2/\text{Vs}$ 、 $\mu_h = 500 \text{cm}^2/\text{Vs}$ ホールが遅い

再結合(Recombination)と捕獲(Trapping)

- ホールと電子の再結合(光子放出)はめったに起こらない。
- 不純物を作るバンドギャップの間にあるエネルギーレベルで捕獲される。



いろいろな半導体の性質となぜシリコンか？

実際の飛跡検出器を作ると

- dE/dx (MIP)でe/hペアをたくさん作れるか？

- e/hペアを作るのに必要なEnergyはBandgapの3-5倍(残りは格子の振動に使われる)
 - シリコンの場合は3.6eV (Geに比べて効率が良い)

• e/hペアの生成数

- dE/dx (MIP)は、Z=14で1.6[MeVcm²/g]
- Si結晶の密度が2.33[g/cm³]
- dE/dx=3.8[MeV/cm] ⇔ 100[e-h/μm]

- つまり、150μm厚のセンサーで15000対(10000対収集可)

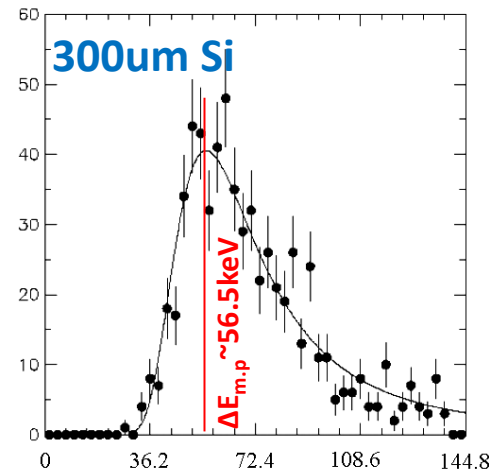
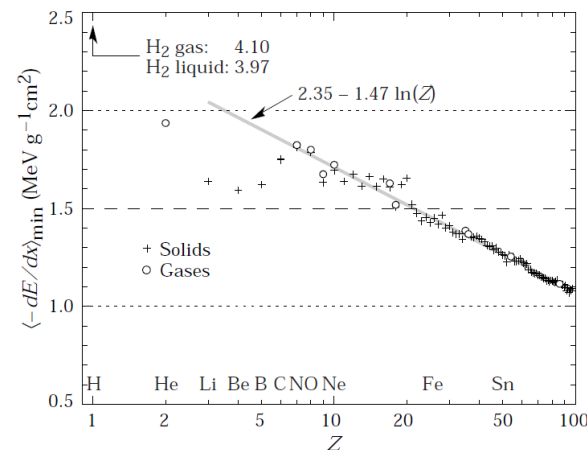
- Radiation/Interaction length が長い(低密度)が良い

- Mobilityが大きい

- 放射線耐性 or 少なくとも理解 (あとで)

- プロセス技術が確立しているか？(産業界の技術これもあとで)

→ シリコンが圧倒的なシェア。ダイヤモンドやゲルマも検出器としては確立されている。



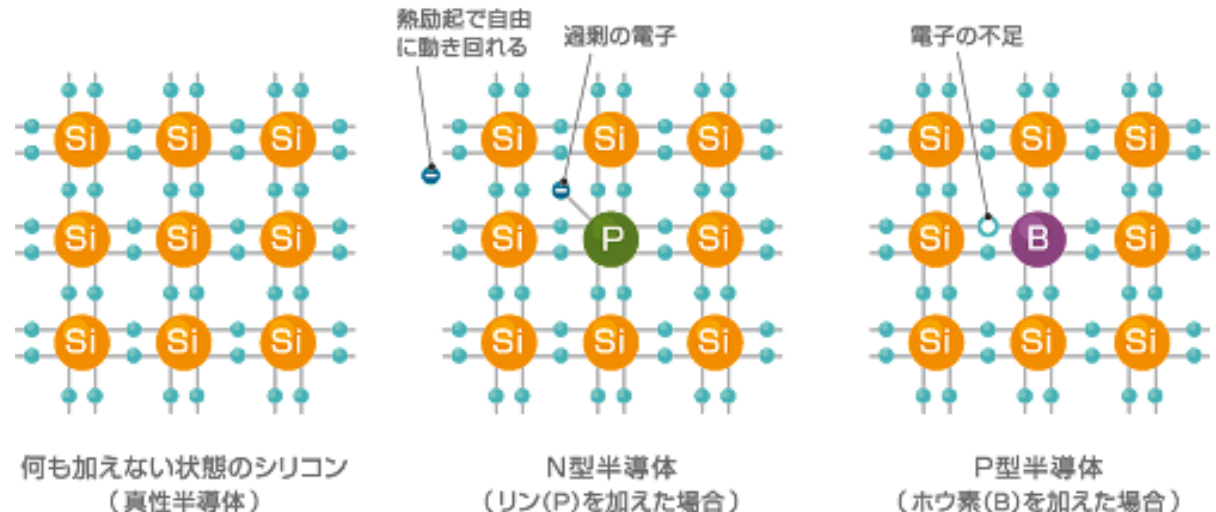
	Diamond	SiC (4H)	GaAs	Si	Ge
Atomic number Z	6	14/6	31/33	14	32
Bandgap E _g [eV]	5.5	3.3	1.42	1.12	0.66
E(e-h pair) [eV]	13	7.6-8.4	4.3	3.6	2.9
density [g/cm ³]	3.515	3.22	5.32	2.33	5.32
e-mobility μ _e [cm ² /Vs]	1800	800	8500	1450	3900
h-mobility μ _h [cm ² /Vs]	1200	115	400	450	1900

不純物のドーピング

真性半導体に3価や5価の元素をドーピングする

- 伝導性がまし、p型/n型などの性質の違う半導体ができる。
 - P(5価)をドーピングするとn型半導体
 - B(3価)をドーピングするとp型半導体
- ドープ濃度
 - シリコンの場合原子の数は 10^{22} atoms/cm²
 - 飛跡検出器に用いるものは大体a few 10^{13} atoms/cm²くらいドーピング(a few ppm)→高抵抗
 - 産業界にあるCMOSなどの場合は 10^{20} atoms/cm²くらい (p+ とかn+とか書く)
 - n型とp型のドーピング量が等しいときCompensationといい、真性半導体のように振る舞う

N型半導体とP型半導体



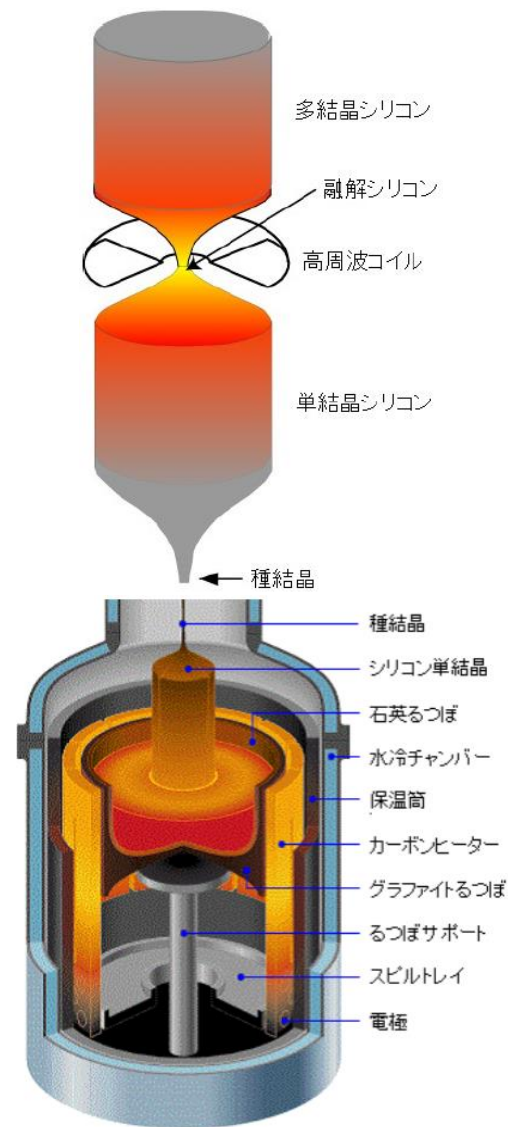
参考:シリコンウェハの製造

• Float Zone (FZ)法

- まず、原料となる多結晶シリコンを吊り下げた状態で固定し、先端に種結晶を取り付ける。シリコンの原料を回転させながら、種結晶から結晶化が始まるように、最下部を高周波コイルで加熱して狭い範囲を融かす。
- FZ法は、ごく低い酸素濃度の結晶が作れるが、大口径化が難しいという問題があり、結晶の半径方向の抵抗率分布にばらつきがあるため、中性子照射による抵抗率の均一化が図られる場合もある

• Magnetic field applied Czochralski(MCZ)法

- 石英るつぼに多結晶シリコンを融解し、不純物としてホウ素やリンを添加する。液面に種結晶を接触させ回転させながら引き上げていくと、種結晶が成長して単結晶シリコンが出来る。
- 大型のるつぼを使うことによりFZ法より比較的大口径の単結晶を得ることが出来る。大口径化すると溶液の対流が発生し、液面の乱れにより単結晶内に格子欠陥が発生してしまう。この対策として、るつぼ全体に磁場を加えて対流を制御する。



p-n 接合と空乏層

• p型とn型の半導体をつつける。

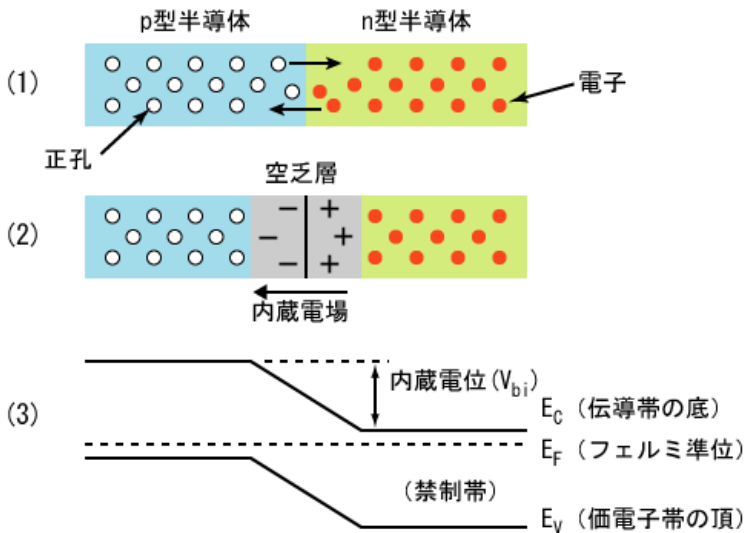
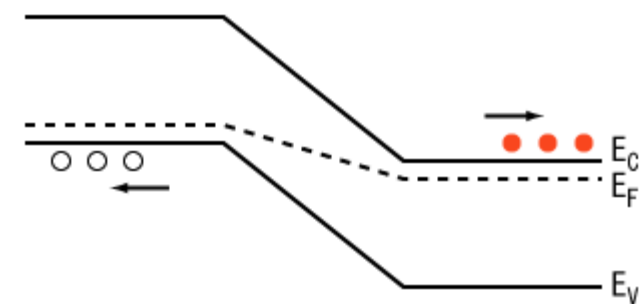
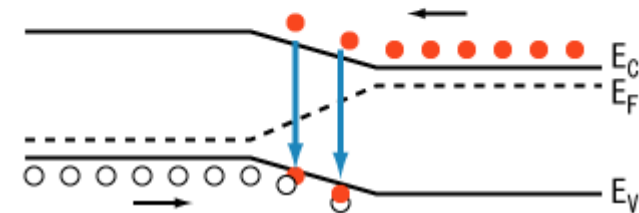
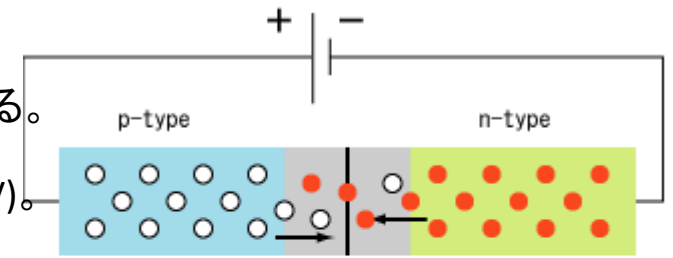
- 実際はたとえば、p型の一部にn+を打ち込む
- e-hの交換が起こりキャリアがない領域(空乏層)が自然にできる。
厚み: $d=(2\epsilon\rho_n\mu_eV_0)^{1/2}$ 静電容量: $C=\epsilon A/d$
- 原子核の電荷数が違うので空乏層には内部電位が生じる(~1V)。
- この領域にできたe/hペアは電場ですぐにはける。

• 順バイアス

- n型の電子が空乏層になだれ込み、電流が流れる。

• 逆バイアス

- p-n接合で生じた電位を強める。空乏層が広がる。
- 飛跡検出器として使用する場合p-n接合で生じる電位では(電荷収集に)不十分で大きな電位と空乏層が必要。

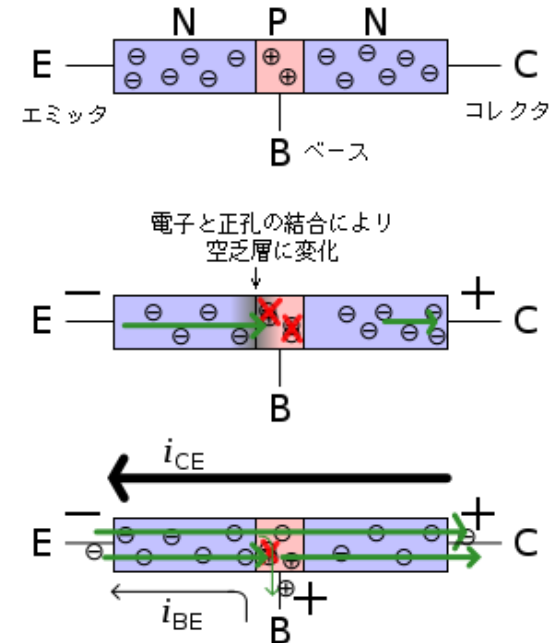
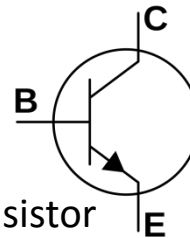


ちょっと余談

p-n接合を利用したデバイス

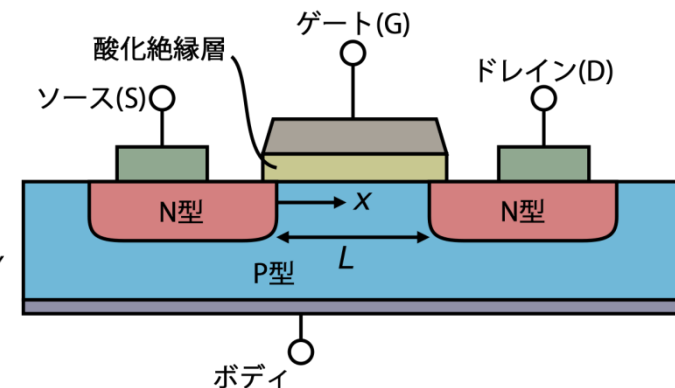
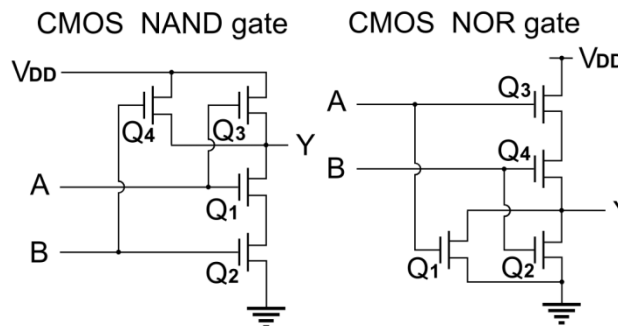
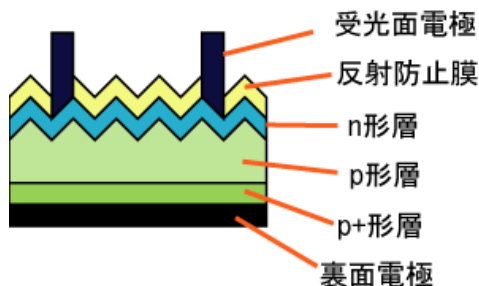
トランジスタ

- バイポーラトランジスタ
 - スイッチ機能と増幅機能
- 電界トランジスタ(MOSFET)
 - Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
 - チャンネルの型でNMOS,PMOSがある。
 - NMOSとPMOSを組み合わせたものを Complementary MOS (CMOS)と呼び、現在のデジタル回路技術で用いられる。(ASIC, FPGA, CPU, Memoryなど)



太陽電池

- 原理は飛跡検出器と似てる。光が当たると空乏層内でe/hペアが作られ電流として観測できる。



全空乏化電圧とI-V測定、C-V測定

全空乏化電圧

- 逆バイアスと空乏層の厚みの関係は、

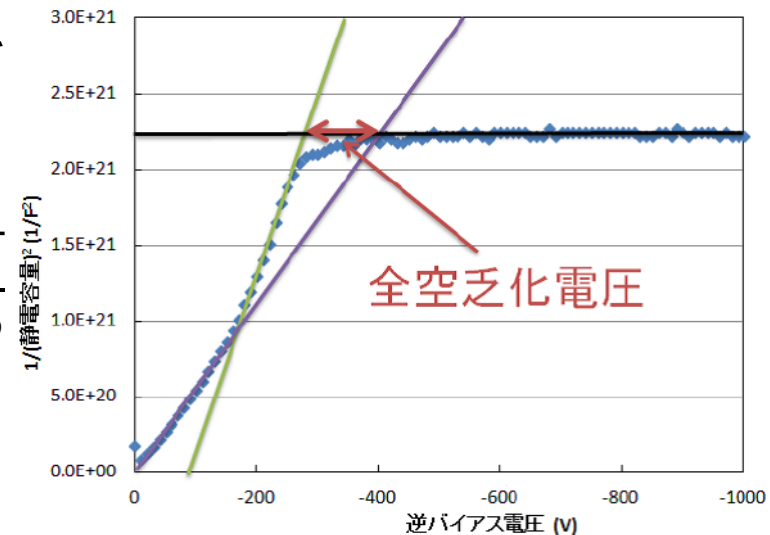
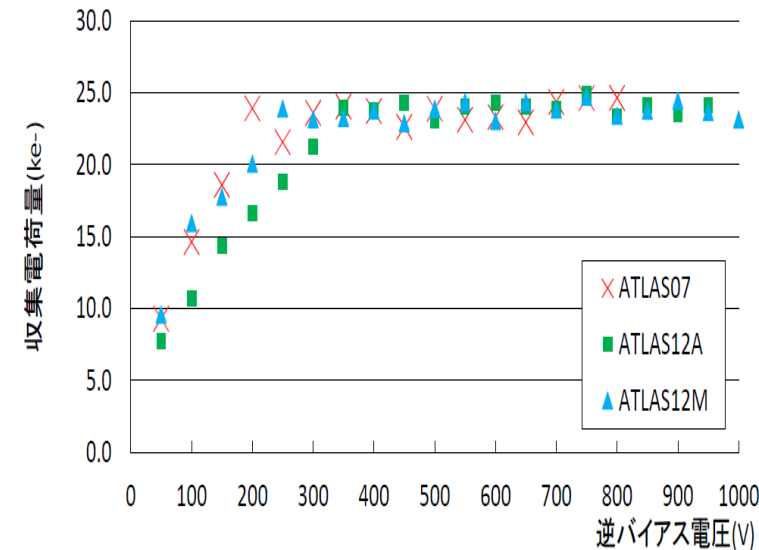
$$V = \frac{ed^2}{2\epsilon_{Si}} \frac{N_A N_D}{N_A + N_D}$$

- Vは逆バイアス電圧
- eは素電荷、dは空乏層の厚さ、 ϵ_{Si} はシリコンの誘電率
- $N_{A/D}$ は有効不純物濃度
- 不純物密度はなかなかはっきりわかりませんが、ATLASアップグレード用は大体150umで80V位

- 暗電流として観測できるのは空乏層でできた熱励起ehペアなので、 $I \propto d \propto \sqrt{V}$

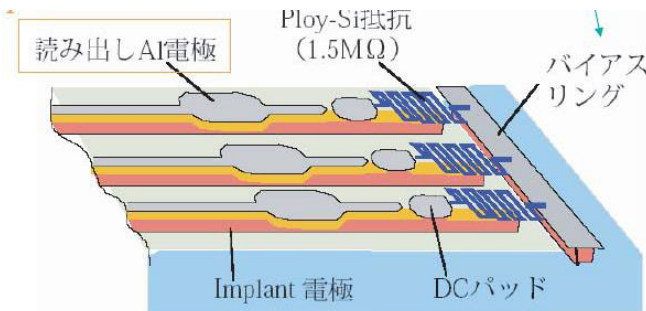
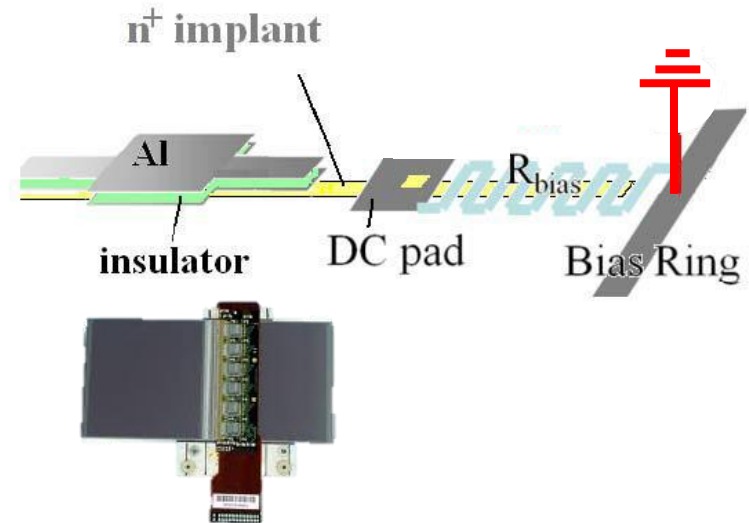
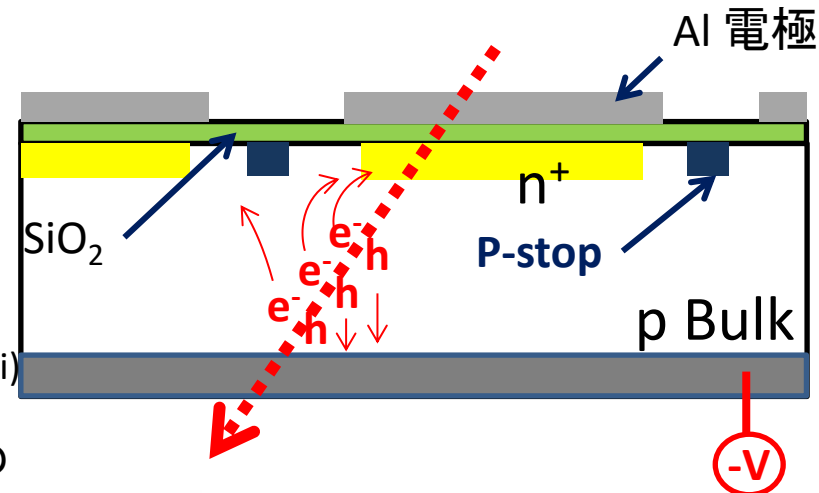
静電容量

- バルク部静電容量は $C_{bulk} = S \sqrt{\frac{e\epsilon_{Si}}{2V} \frac{N_A N_D}{N_A + N_D}}$
つまり、 $\frac{1}{C_{bulk}^2} \propto V$



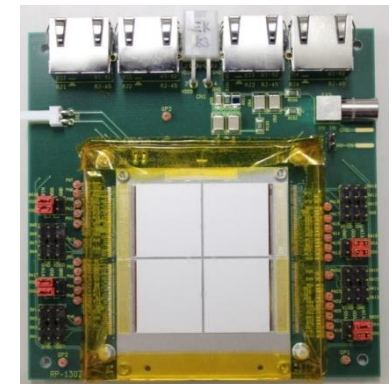
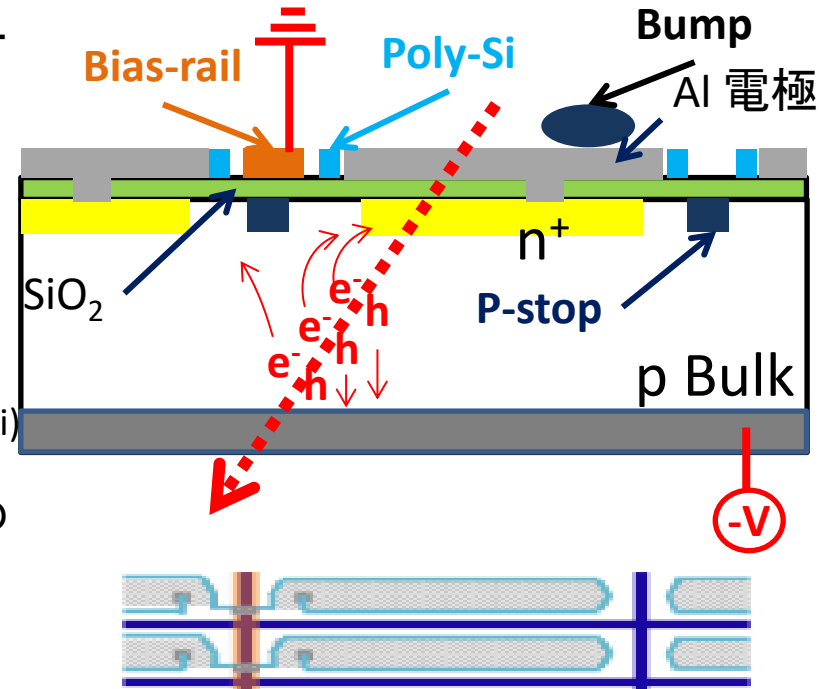
典型的な半導体検出器

- 基本的に n^+ -in-pと p^+ -in-nの二種類
 - たとえば高抵抗のp型半導体にn型不純物を打ち込み(インプラント) p-n接合を作る。
 - n^+ と裏面に逆バイアスかける(p型の場合は負電位)
- ストリップ検出器
 - インプラントを接地(ストリップの端部で設置する)、裏面に逆バイアスかける。
 - インプラント-バイアスリング間には保護抵抗(Poly-si)が必要。
 - 電極の分離をよくするため、 p^+ を電極間に埋め込む(p-stop)
 - 読み出しASICは一次元のwire-bondingで接着可能。



典型的な半導体検出器

- 基本的に n^+ -in-pと p^+ -in-nの二種類
 - たとえば高抵抗のp型半導体にn型不純物を打ち込み(インプラント) p-n接合を作る。
 - n^+ と裏面に逆バイアスかける(p型の場合は負電位)
- ストリップ検出器
 - インプラントを接地(ストリップの端部で設置する)、裏面に逆バイアスかける。
 - インプラント-バイアスリング間には保護抵抗(Poly-si)が必要。
 - 電極の分離をよくするため、 p^+ を電極間に埋め込む(p-stop)→詳細は表面損傷で。
 - 読み出しASICは一次元のwire-bondingで接着可能。
- ピクセル検出器
 - 基本的にはストリップ検出器と同じだが、電極が二次元的に配置されているのですべてのピクセルの n^+ を設置することが困難。
 - バイアスレール、Poly-si抵抗をピクセル全体に引く必要がある。構造が複雑。
 - 読み出しASICは二次元のBump-bondingで行う。

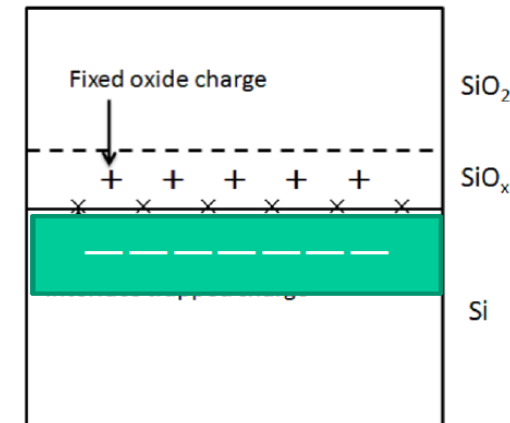
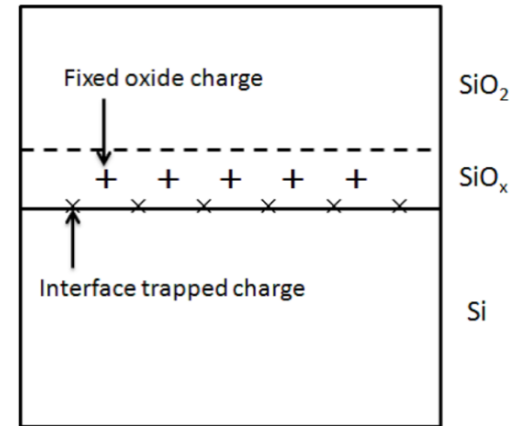


シリコン検出器の表面損傷

- 表面損傷はIonizing lossによって引き起こされる。
 - 主に300keV以下のエネルギーの光子や荷電粒子。
 - SiO₂層とシリコンバルク内で原子をイオン化励起し、エネルギーを落とす。
 - 表面電荷
 - Fixed oxide chargeはホールが捕獲されるもので、正の電荷をもつ。Si-SiO₂界面から数nmの不規則な範囲に存在。
 - Interface trapped chargeは、SiとOの結合のふらつきによるもので、禁制帯に新たなエネルギー準位を形成するため、正負どちらの状態も取り得る。空間電荷として働き移動しない。

影響

- 表面損傷による表面電荷は、暗電流の増加、表面電流の上昇によるブレークダウン電圧の変化、表面上に空乏化しないDead layerの形成などが起こる。
- P-bulkでは、電極分離構造(p-stopなど)が必要。



シリコン検出器のバルク損傷

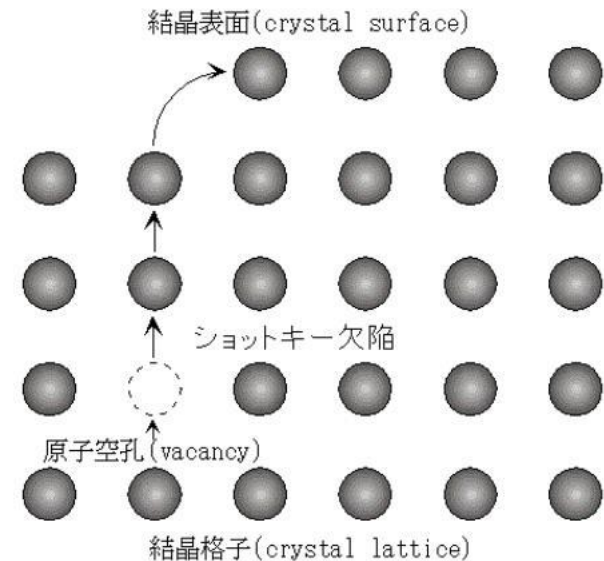
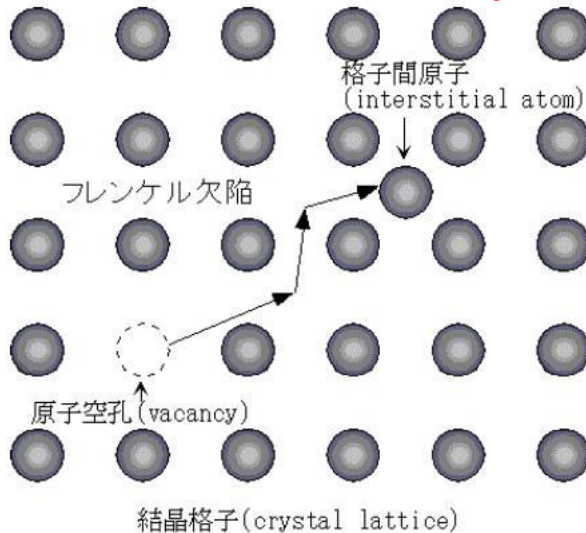
- バルク損傷

- シリコンセンサーに放射線が入射すると、電子を励起、反跳したり、シリコン原子と衝突を繰り返してエネルギーを失っていく。(NIEL: Non Ionizing Energy loss)

- フレンケル欠陥とショットキー欠陥

- シリコン原子が弾き出されて生じた空孔と、弾き出された原子が他の結晶格子間に移動して出来た格子間原子の対をフレンケル欠陥と呼ぶ。
- 弾き出された原子が結晶表面に移動し空孔のみが残った欠陥をショットキー欠陥と呼ぶ。

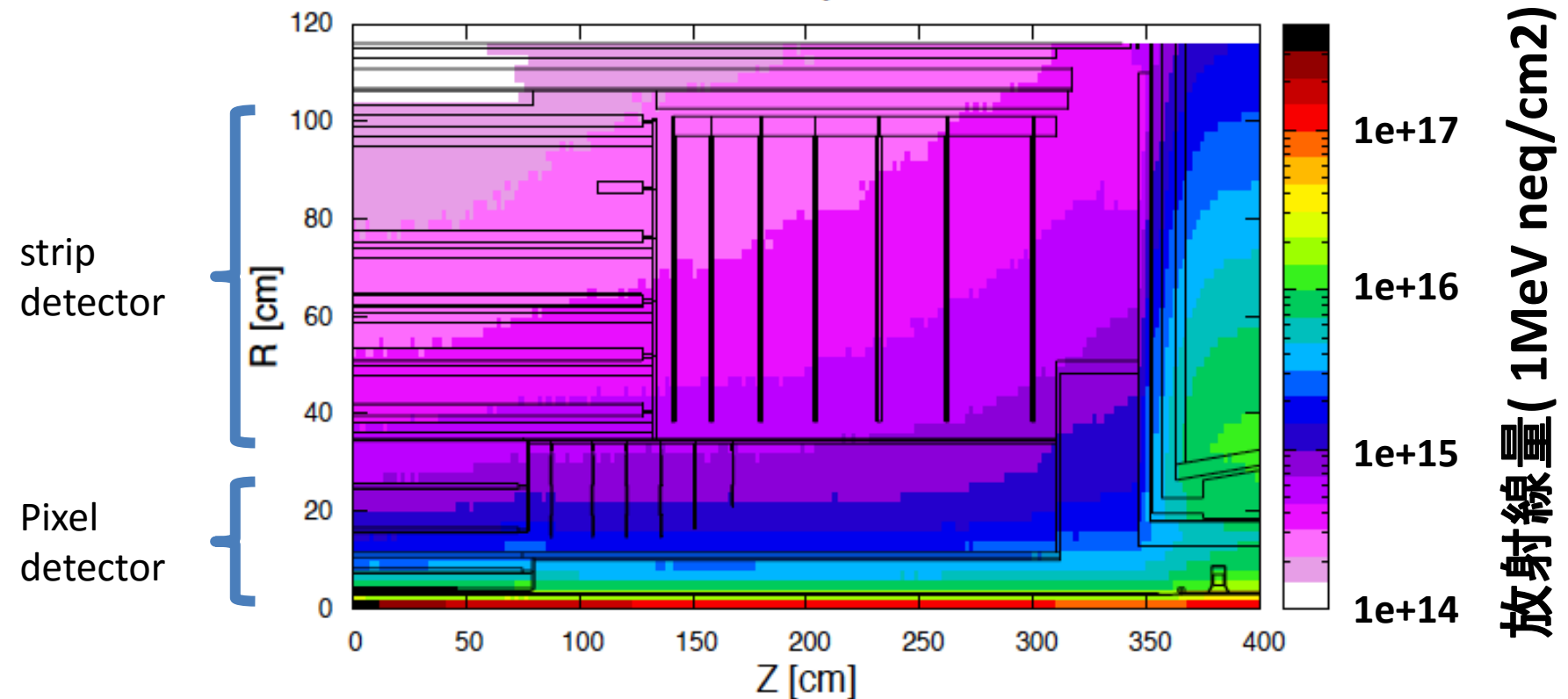
- **いずれも原子核欠損なのでp型不純物として働く→暗電流も劇的に増加**



放射線耐性

- 3000fb^{-1} で予想される放射線量
 - ピクセルの外側 $3 \times 10^{15} \text{ neq/cm}^2$ 内側 $2.2 \times 10^{16} \text{ neq/cm}^2$

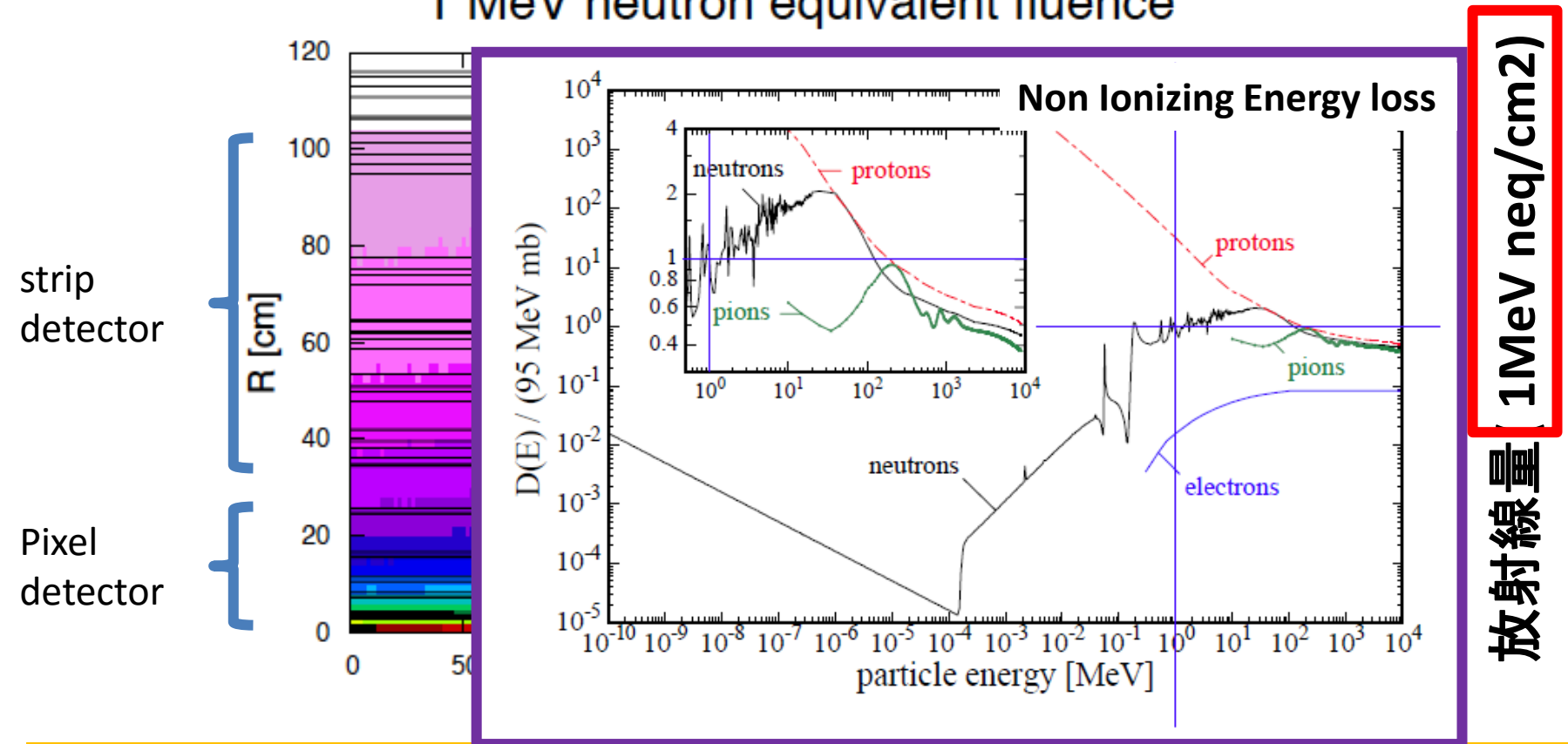
1 MeV neutron equivalent fluence



放射線耐性

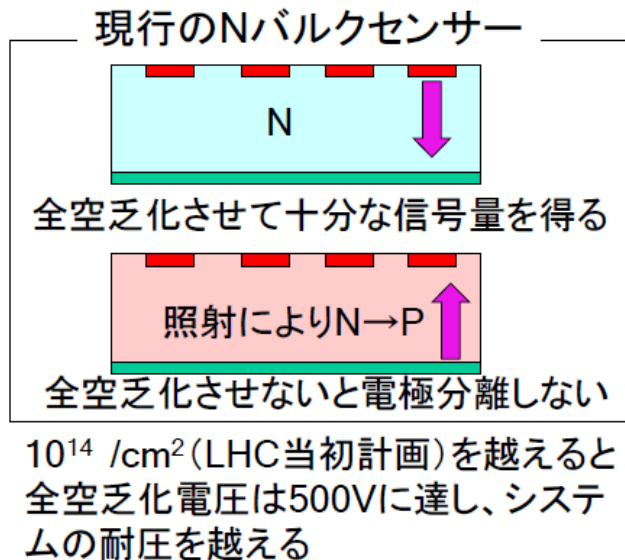
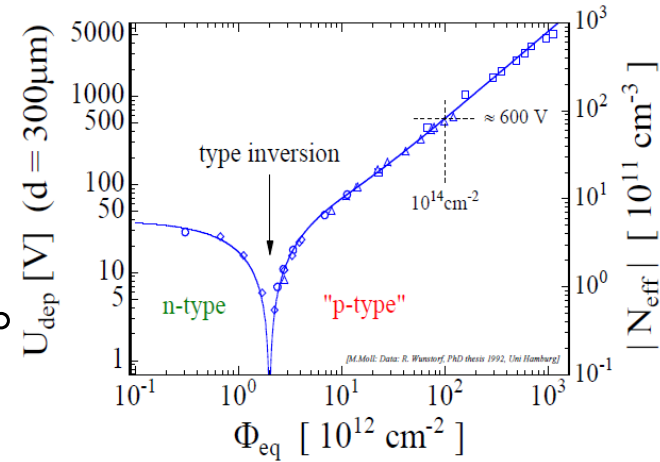
- 3000fb^{-1} で予想される放射線量
 - ピクセルの外側 $3 \times 10^{15} \text{ neq/cm}^2$ 内側 $2.2 \times 10^{16} \text{ neq/cm}^2$

1 MeV neutron equivalent fluence

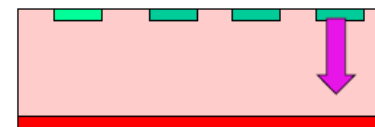


シリコンのバルク損傷とn-in-p検出器

- n型バルクとp型バルク
 - 放射線損傷でn型バルクはp型に型変換する。
 - 型変換すると空乏層の広がりが逆になるので、読み出しには全空乏化が必要。
 - センサーの耐圧で制限される。
- もしくは両面プロセス(ただし高価)



放射線耐性をさらに上げるには、P型バルクセンサー

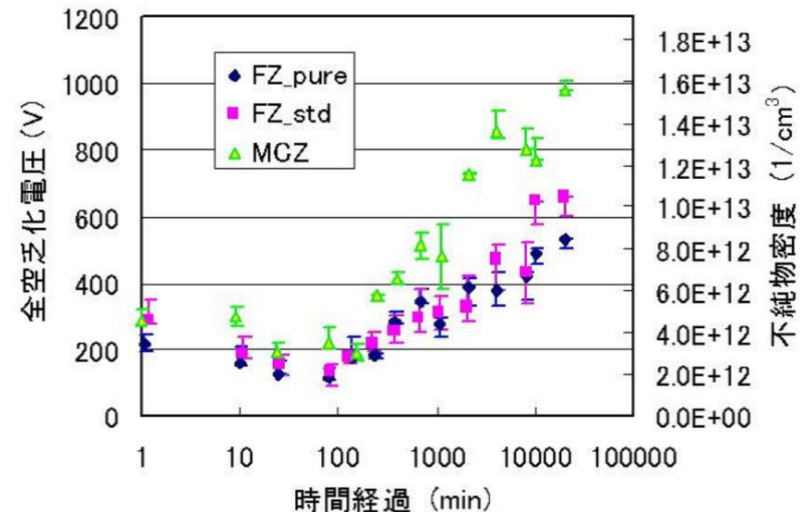
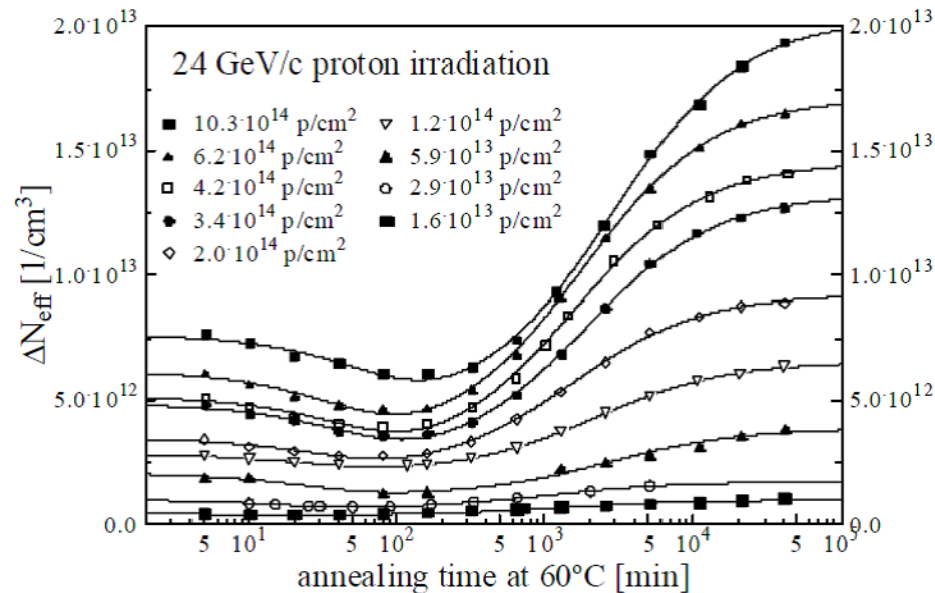


型反転しない
PN接合側の電極は部分空乏化でも分離
耐圧を越えたら、電圧を下げても運転
(信号量は減る)

最近、耐圧~1000Vくらいのn-in-p検出器の開発

アニーリングと逆アニーリング

- 放射線損傷による格子欠陥は、原子の熱振動により時間と共に移動する。その際格子欠陥は消滅する場合もあるが、格子欠陥同士が結合しさらに大きな欠陥へ成長する場合もある。
 - 熱振動によりある時点まで有効不純物濃度が減少する現象をアニーリングと呼ぶ。
 - その後有効不純物濃度が増加する逆アニーリングに移行する。
 - 移行の目安は60°Cで80分(室温で2週間)



照射量と暗電流

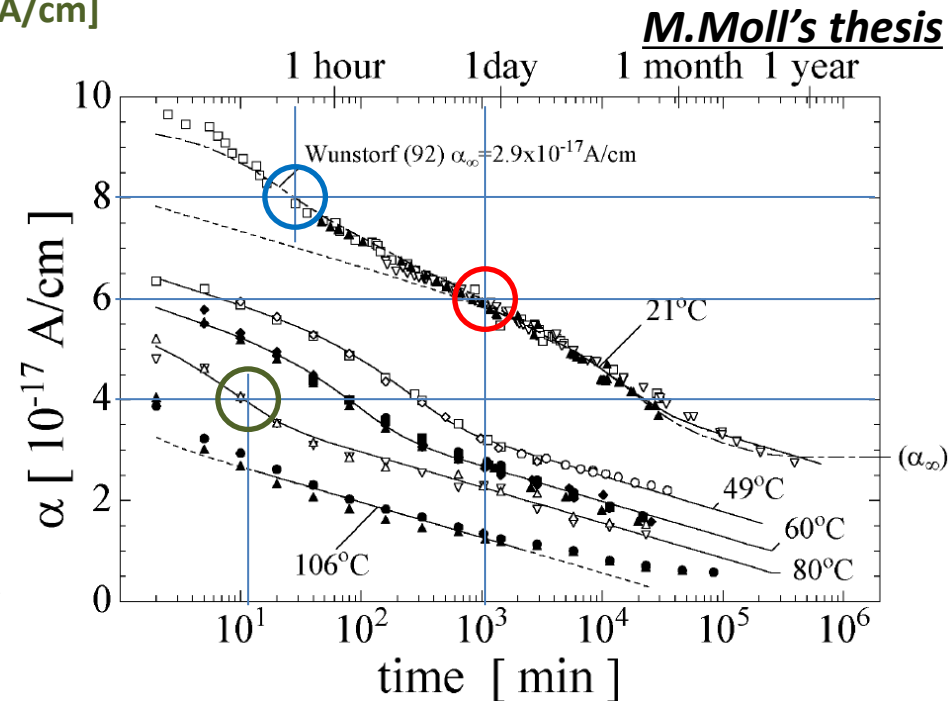
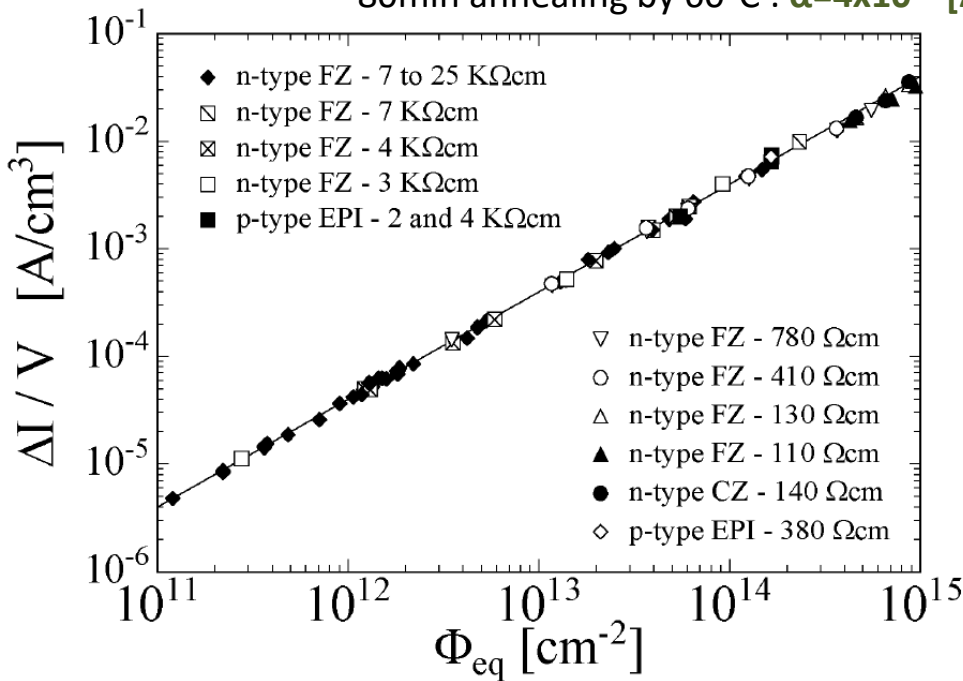
- Fluence dependence of Leakage current are described :

$$\Delta I / v = \alpha \Phi_{eq}$$

where ΔI : leakage current increase from non-irrad sensor [A], v : Volume [cm³],
 Φ_{eq} fluence [cm⁻²] and α : current related damage rate [A/cm³].

- α changes by annealing condition.

- 30 min annealing by room temperature : $\alpha=8 \times 10^{-17}$ [A/cm³]
- 1 day annealing by room temperature : $\alpha=6 \times 10^{-17}$ [A/cm³] (This case?)
- 80min annealing by 60°C : $\alpha=4 \times 10^{-17}$ [A/cm³]



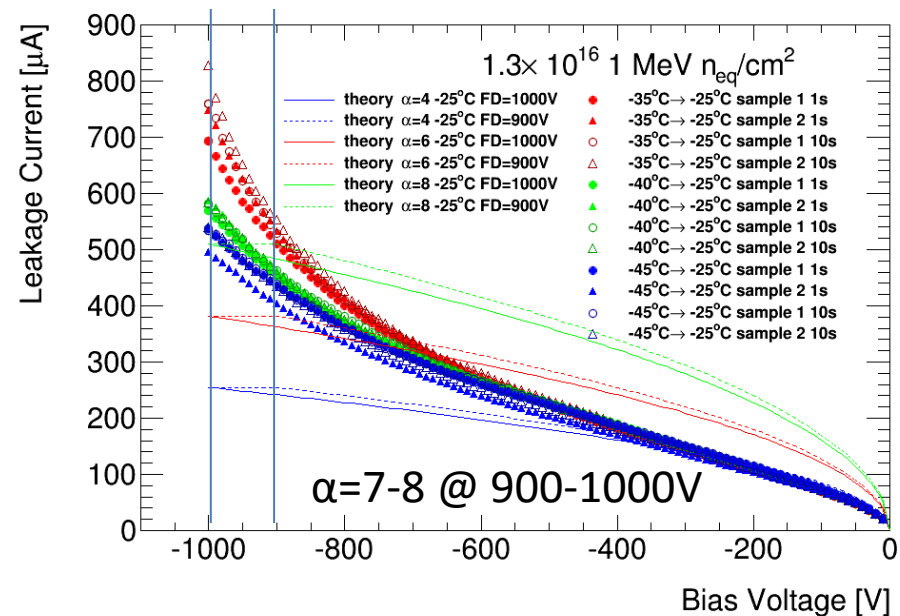
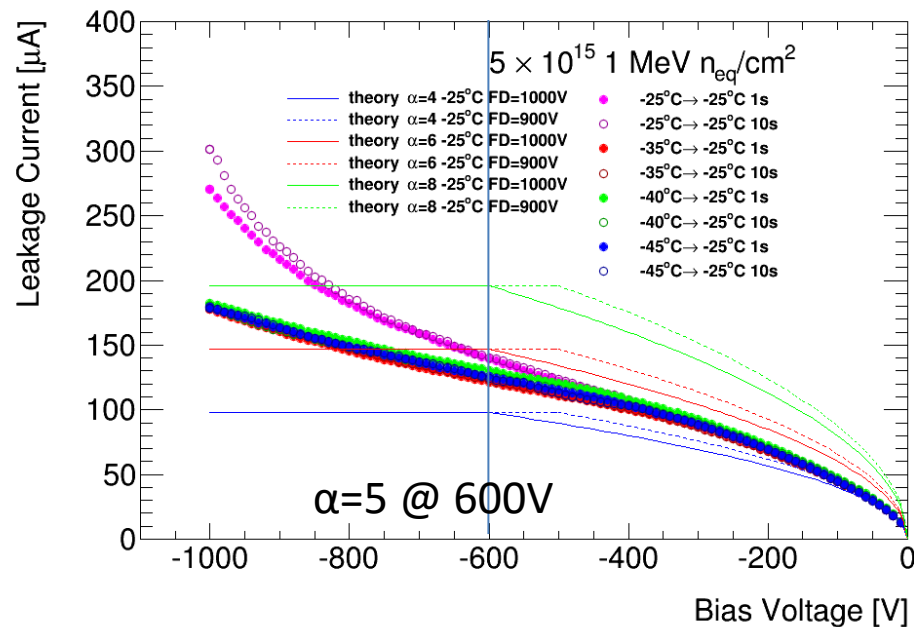
照射量と暗電流

- Theory calculation assuming $\alpha=4,6,8 \times 10^{-17}$ [A/cm] cases. (neglected non-irrad I)

$$\begin{cases} -V > -V_0: I(V) = \alpha \Phi_{eq} v \\ -V < -V_0: I(V) = \alpha \Phi_{eq} v \times \sqrt{V/V_0} \end{cases}$$

– where V_0 : Full depletion Voltage, V : measured voltage, $v = 3.4 \times 0.015 \text{cm}^3$

- The shape of I-V curves are not the same as theory so the line below full depletion voltage might not so useful. But can compare at full depletion voltage.



将来有望なピクセル検出器

ピクセル検出器の種類

- ASIC + センサー接着型(バンプボンディング)
 - Planer型
 - 3D センサー
 - ダイヤモンド
- ASIC + センサー接着型(AC接続)
 - HV/HR-CMOS
- 読み出し+センサー一体型
 - CCD
 - SOI (Silicon-On-Insulator)
 - Monolithic CMOS

ピクセル検出器の種類

- ASIC + センサー 接着型(バンプボンディング)
 - Planer型
 - 3D センサー
 - ダイヤモンド
- ASIC + センサー 接着型(AC接続)
 - HV/HR-CMOS
- 読み出し+センサー一体型
 - CCD
 - SOI (Silicon-On-Insulator)
 - Monolithic CMOS

高い放射線耐性
高速読み出し

→ 高輝度ハドロンコライダー向けに開発

ピクセルサイズの細密化が可能
読み出し速度が遅く、放射線耐性に課題
→ 電子陽電子コライダー向けに使用されることが多い

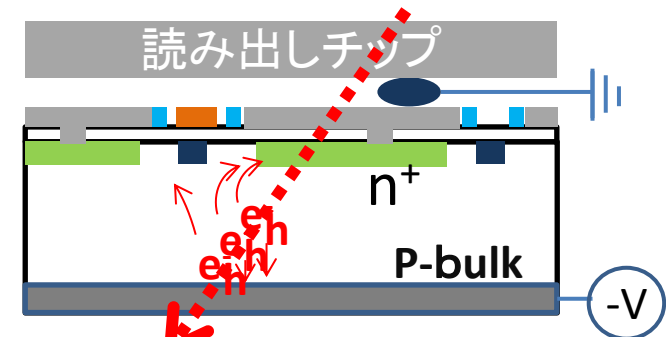
ピクセル検出器の種類

- ASIC + センサー接着型(バンプボンディング)
 - Planer型 (Silicon)
 - Planer型 (ダイヤモンド)
 - 3D センサー
- ASIC + センサー接着型(AC接続)
 - HV/HR-CMOS
- 読み出し+センサー一体型
 - CCD
 - SOI (Silicon-On-Insulator)
 - Monolithic CMOS

Planer 型 ピクセル検出器

主流な型

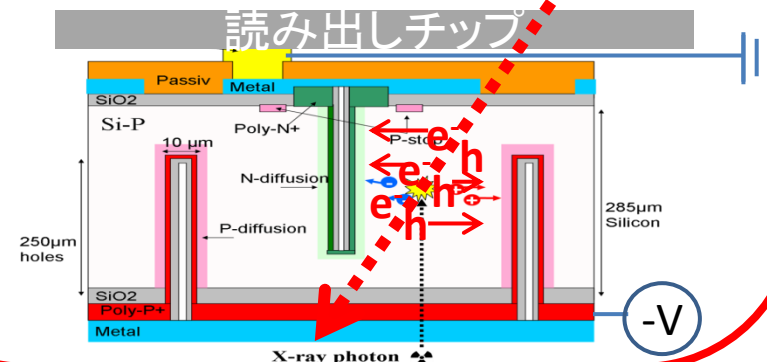
バルク部がダイヤモンドのものも開発中
→ 高放射線耐性、高価



3D型 ピクセル検出器

IBLで初めて実現

→ 高放射線耐性(定電圧で全空乏化)
→ 歩留まり率が低い(60%)



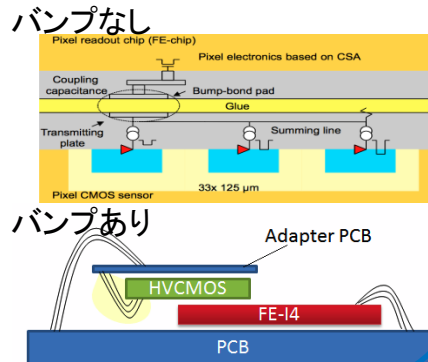
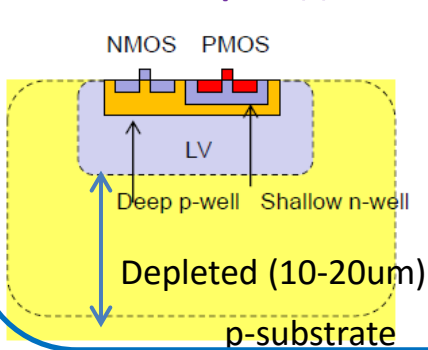
ピクセル検出器の種類

- ASIC + センサー接着型(バンプボンディング)
 - Planer型 (Silicon)
 - Planer型 (ダイヤモンド)
 - 3D センサー
- ASIC + センサー接着型(AC接続)
 - HV/HR-CMOS
- 読み出し+センサー一体型
 - CCD
 - SOI (Silicon-On-Insulator)
 - Monolithic CMOS

HV-CMOS

価格を抑えるため産業界の製品を利用できないか？

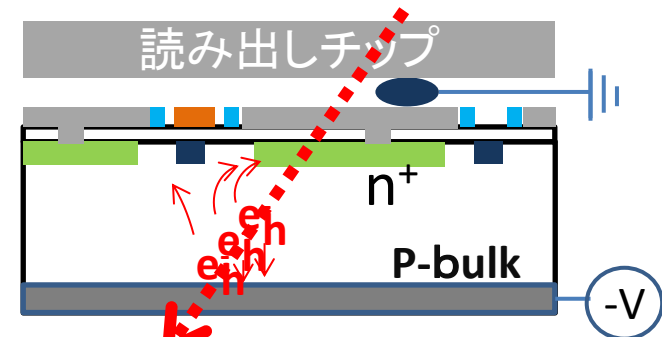
デジタルカメラのCMOSセンサーにバイアスをかけ空乏層を作る。数10Vの運転で読み出しチャージはplanerの1/10程
 接着剤で読み出しチップを接着(AC) → バンプボンドなしも可
 → **低コスト。S/Nに課題**



Planer型ピクセル検出器

主流な型

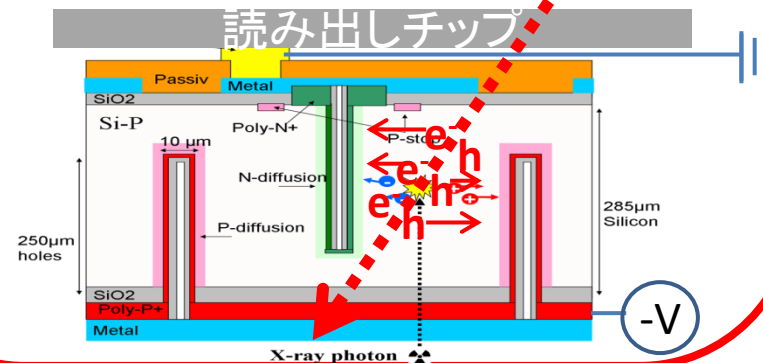
バルク部がダイヤモンドのものも開発中
 → **高放射線耐性、高価**



3D型ピクセル検出器

IBLで初めて実現

→ **高放射線耐性(定電圧で全空乏化)**
 → **歩留まり率が低い(60%)**



ピクセル検出器の種類

- ASIC + センサー接着型(バンプボンディング)
 - Planer型 (Silicon)
 - Planer型 (ダイヤモンド)
 - 3D センサー
- ASIC + センサー接着型(AC接続)
 - HV/HR-CMOS
- 読み出し+センサー一体型
 - CCD
 - SOI (Silicon-On-Insulator)
 - **Monolithic CMOS**



将来的に、
放射線耐性のあるFull Monolithic CMOS検出器が必ず必要

ピクセルサイズの細密化が可能

半導体の放射線限界(空乏化電圧とセンサー耐圧で決まる)

高輝度実験では、頻繁な入れ替えが必要不可欠

→安価な検出器が必要

課題

表面損傷に強い回路層の設計

耐圧のある裏面側面プロセス

カロリーメータ

電磁カロリメータ

電子、光子のエネルギーを測定する検出器

種類

– サンプル型

- 吸収層とサンプリング層をサンドイッチ型に配置
- サンプル層での粒子数をカウントして統計的にエネルギーを測定
- 配置がしやすく位置分解能が良い。

– 全吸収型

- 鉛ガラスなど、Zが大きな物質でかつシンチレーション光を発する物質でシャワーの全粒子を測定。
- エネルギー分解能が良い

シャワーの広がり

縦方向のシャワーの広がり

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

• Shower maximum at:

$$t_{\max} \sim \frac{a-1}{b} \left(\ln \frac{E}{E_c} \right) + C \quad \left[C \sim \begin{cases} -0.5(\text{electron}) \\ +0.5(\text{photon}) \end{cases} \right]$$

→ たとえば、 $E_c=20\text{MeV}$ のとき、 $t_{\max} \sim \begin{cases} 6.8 (E=30\text{GeV}) \\ 8.0 (E=100\text{GeV}) \\ 9.6 (E=500\text{GeV}) \end{cases}$
($C = -0.5$)

横方向のシャワーの広がり

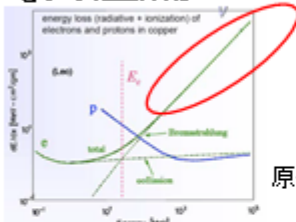
モリエール半径というパラメータで記述される。

$$\text{Molière radius } R_M = \frac{21 \text{ MeV}}{E_c} X_0 \quad [g/cm^2]$$

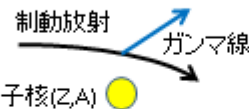
- 半径 r_M 内に、シャワーのエネルギーの90%が収まる。
- r_M の大きさ：粒子の入射エネルギーによらない。
(物質の特性で決まる。)

電磁シャワーとカロリメータ

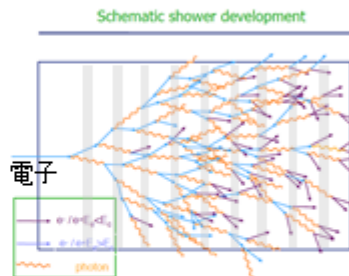
電子の相互作用



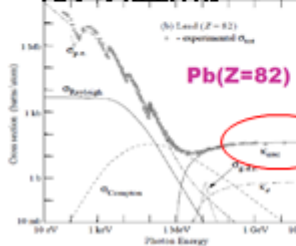
高エネルギー領域 (>1GeV)



重い物質中(Pb, Cu)では



光子の相互作用



対生成



- 制動放射と対生成で“シャワー”状に粒子が生成する。
 - 電磁シャワー(EM shower)
 - (対生成が起こらないくらい) 薄いサンプリング層(シンチなど)を挿入すると電子の数がカウントできる。
- 粒子数はエネルギーに比例

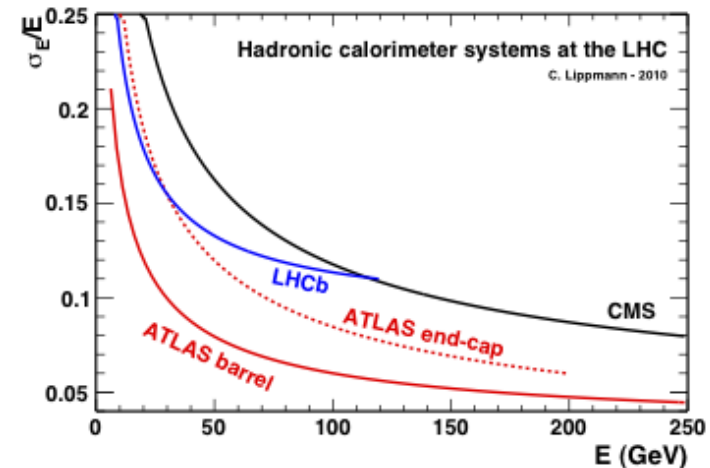
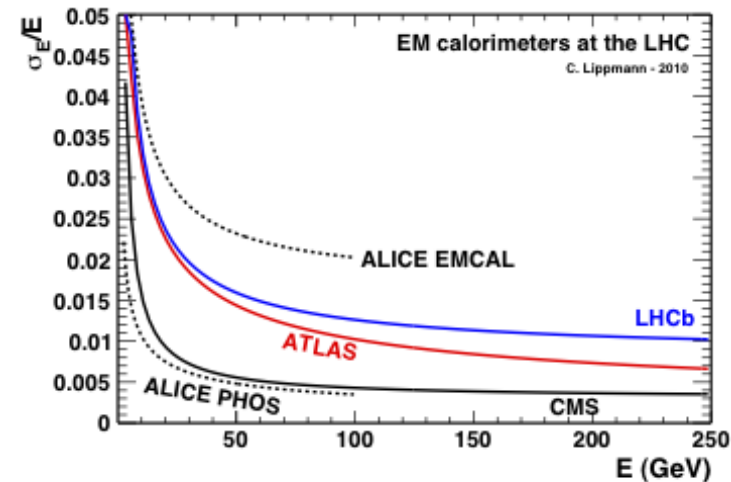
Material	Atomic No. (Z)	Critical Energy (E_c) (MeV)	Radiation Length (X_0) (g/cm^2)	(cm)	Moliere Radius (R_M) (cm)
Beryllium	4	116.	65.19	35.28	6.4
Carbon	6	84.	42.70	18.8	4.7
Aluminum	13	43.	24.01	8.9	4.4
Iron	26	22.	13.84	1.76	1.7
Copper	29	20.	12.86	1.43	1.5
Tungsten	74	8.1	6.76	0.35	0.9
Lead	82	7.3	6.37	0.56	1.6
Uranium	92	6.5	6.00	0.32	1.0

エネルギー分解能

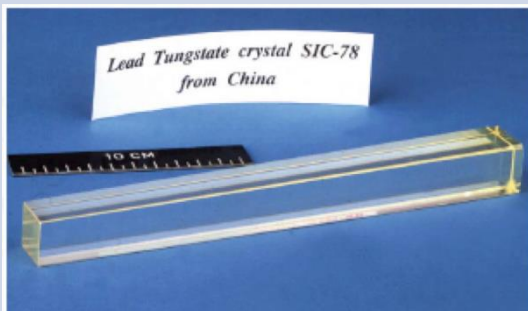
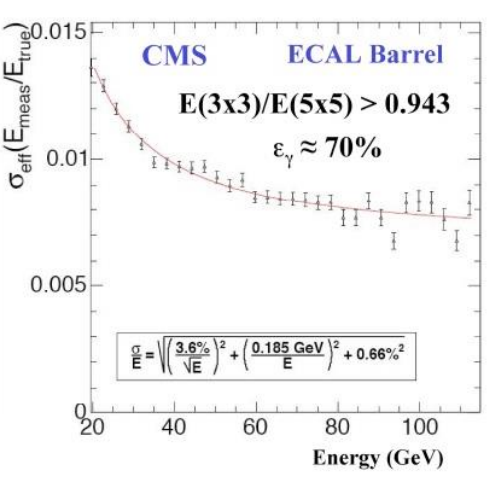
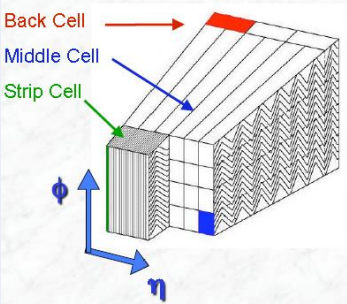
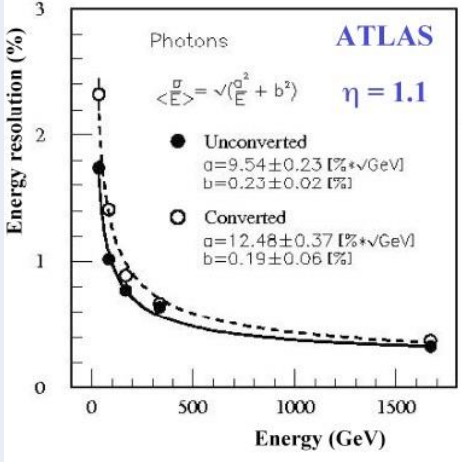
- 基本的にエネルギーが高い方が分解能が良い。

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

- a: 統計的な項 (stochastic term)
 - 観測粒子 N に対して \sqrt{N} の分散があるので。
 - 全吸収型はこの項が小さい。
- b: ノイズからの寄与
 - 読み出しの電氣的なノイズ
 - パイルアップによるノイズ
- c: 定数項
 - 検出器が持つ本来の分解能(不均一性など)
 - 高いエネルギーではこの項が効く

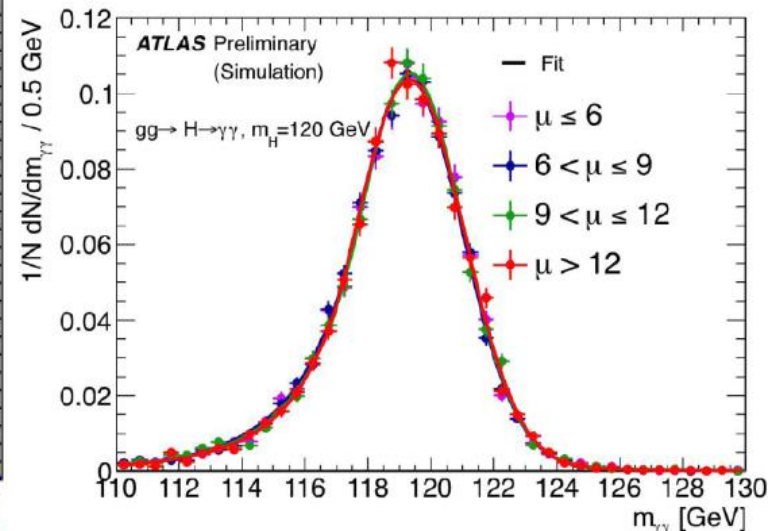
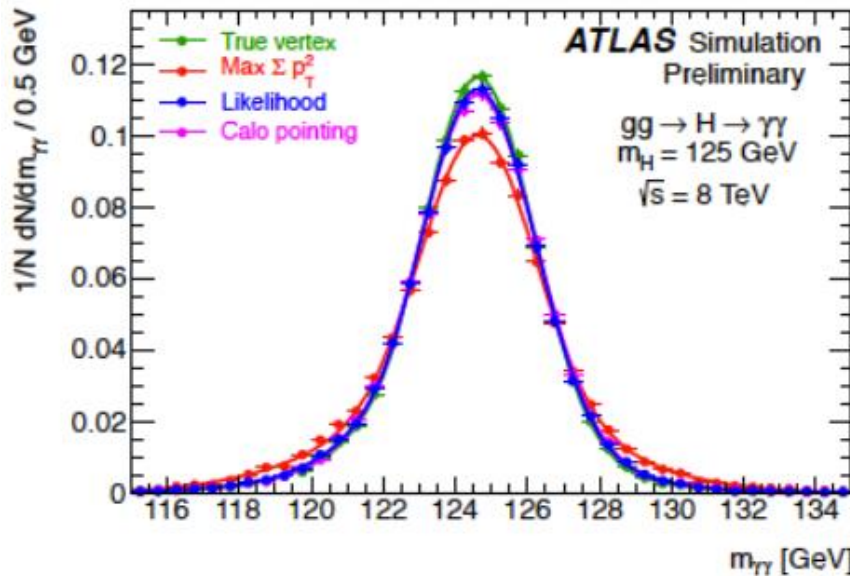
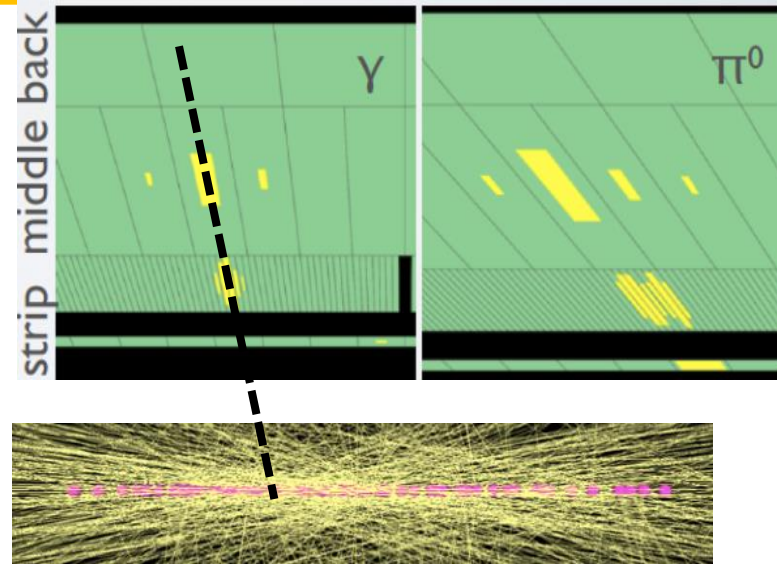


ATLAS&CMS 電磁カロリメータ

	Type	Photon E resolution	Typical point
CMS	<p>全吸収型 PbWO₄ crystal 高エネルギー分解能 Issue of stability in calibration & radiation</p> 	 <p> $\sigma_{\text{eff}}(E_{\text{meas}}/E_{\text{true}})$ CMS ECAL Barrel $E(3x3)/E(5x5) > 0.943$ $\epsilon_{\gamma} \approx 70\%$ $\frac{\sigma}{E} = \sqrt{\left(\frac{3.6\%}{\sqrt{E}}\right)^2 + \left(\frac{0.185 \text{ GeV}}{E}\right)^2 + 0.66\%^2}$ </p>	<p>Photon @100GeV 0.8% (70% efficiency) Electron @50GeV 2.0%(combined with tracker)</p>
ATLAS	<p>サンプリング型 Liquid argon + Pb 高位置分解能 High stability in calibration&radiation</p> 	 <p> Photons ATLAS $\langle \frac{\sigma}{E} \rangle = \sqrt{a^2 + b^2}$ $\eta = 1.1$ </p> <ul style="list-style-type: none"> ● Unconverted $a = 9.54 \pm 0.23$ [%+√GeV] $b = 0.23 \pm 0.02$ [%] ○ Converted $a = 12.48 \pm 0.37$ [%+√GeV] $b = 0.19 \pm 0.06$ [%] 	<p>Photon @100GeV 1-1.5% Electron @50GeV 1.3-2.3</p>

2photon separation & Photon Pointing

- ATLAS検出器は位置分解能に優れているので
 - 衝突点のpointingができる。パイルアップをのぞける!
 - 2 photonが分けられる
 - $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ がsingle photonと分けられる。



エネルギー/運動量分解能

カロリメータvs飛跡検出器

横方向運動量の分解能

エネルギー分解能

横方向運動量

$$p_T [\text{GeV}] = 0.38 [T] p [\text{m}]$$

検出器の分解能は一定なので、簡単のためたとえば、サジッタ(s)とアーム(L)を測定

$$\rho = \frac{L^2 + s^2}{2Ls} \approx \frac{L}{2s} \quad \text{かつ} \quad \epsilon = \frac{L^2}{2s\rho} = \frac{0.38L^2}{2s\rho}$$

$$\frac{1}{\rho T} = \frac{s}{0.38L^2} \epsilon \quad \text{かつ} \quad \sigma_{1/\rho T} = \frac{s}{0.38L^2} \sigma_s$$

$$= (4.83 \pm 0.16) \times 10^{-4} \text{ ATLAS}$$

- つまり 1/ρTの分解能が検出器分解能に相当(一定)
- 別の書き方をすると、運動量の相対分解能はρ₁に比例

$$\frac{\sigma_{p_T}}{p_T} = \frac{s}{0.38L^2} \sigma_s \times p_T \quad \text{かつ} \quad \frac{\sigma_{p_T}}{p_T} \propto p_T$$

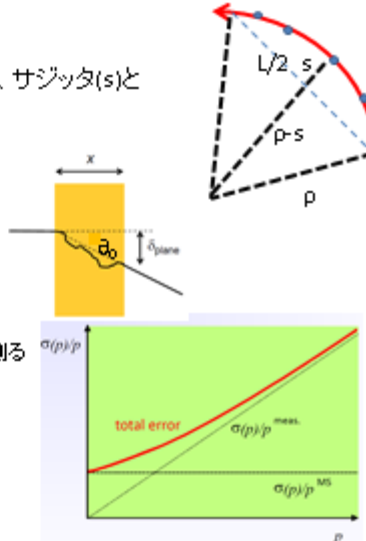
- 分解能を決めているのは、磁場、アーム、検出器分解能
- LHCでは、sを測っているわけではなく、各点でのrφ位置を測る

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{220 \cdot \sigma_{\text{mag}}}{N \cdot 14 \cdot s}} \quad \text{R.L. Gluckstern, NIM 24(1963) 381}$$

- 実際は多重散乱の効果が含まれる

$$\sigma_{\text{tot}}^2 = \sigma_{\text{mag}}^2 (\det) + \sigma_{\text{mag}}^2 (M.S)$$

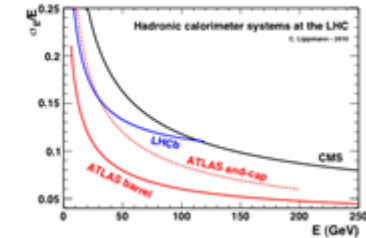
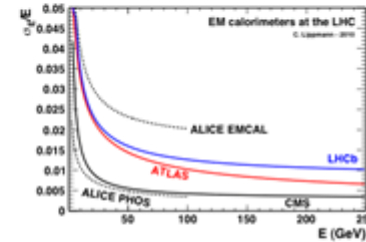
$$\sigma_{\text{tot}} (M.S) \propto \theta_0 = \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta p_T} \sqrt{\frac{s}{x_0} \text{ かつ} \frac{\sigma_{p_T}}{p_T} |^{m.a} = \text{const.}}$$



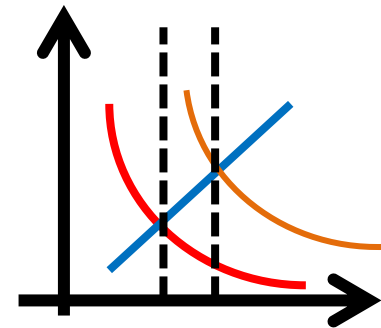
- 基本的にエネルギーが高い方が分解能が良い。

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

- a: 統計的な項 (stochastic term)
 - 観測粒子 N に対して \sqrt{N} の分散があるので。
 - 全吸収型はこの項が小さい。
- b: ノイズからの寄与
 - 読み出しの電気的なノイズ
 - パイルアップによるノイズ
- c: 定数項
 - 検出器が持つ本来の分解能 (不均一性など)
 - 高いエネルギーではこの項が効く

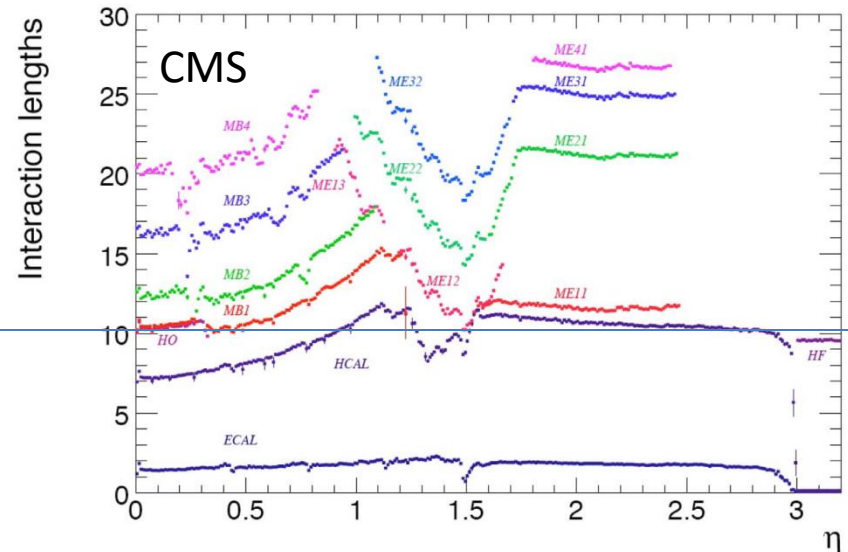
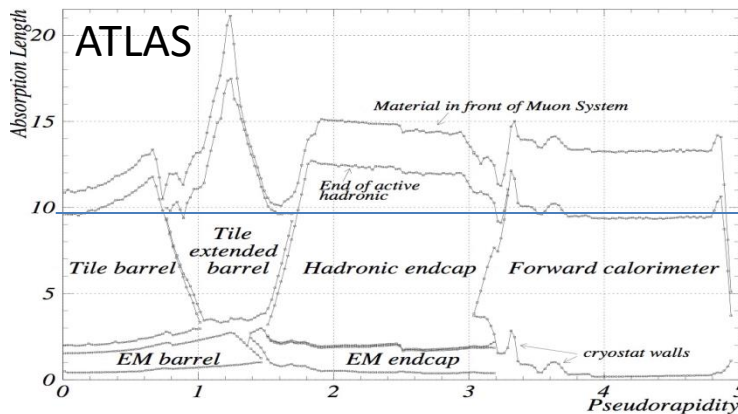
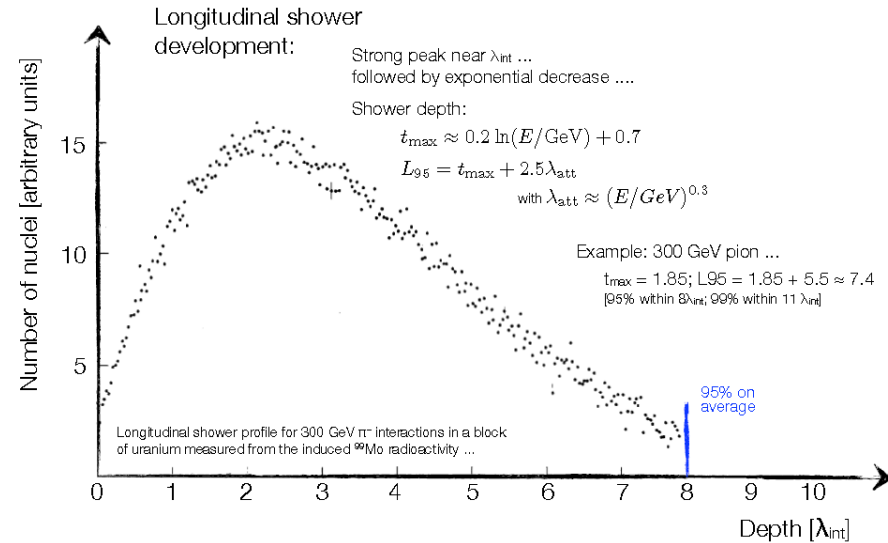


	ATLAS	CMS
Tracker	Silicon pixels and strips + transition radiation tracker $\sigma/p_T \approx 5 \cdot 10^{-4} p_T + 0.01$	Silicon pixels and strips (full silicon tracker) $\sigma/p_T \approx 1.5 \cdot 10^{-4} p_T + 0.005$
EM calorimeter	Liquid argon + Pb absorbers $\sigma/E \approx 10\%/\sqrt{E} + 0.007$	PbWO ₄ crystals $\sigma/E \approx 3\%/\sqrt{E} + 0.003$
Hadronic calorimeter	Fe + scintillator / Cu+LAr (10λ) $\sigma/E \approx 50\%/\sqrt{E} + 0.03 \text{ GeV}$	Brass + scintillator (7 λ + catcher) $\sigma/E \approx 100\%/\sqrt{E} + 0.05 \text{ GeV}$



ハドロンカロリメータ

- ハドロンシャワーのエネルギーを測定
 - サンプリング型のみ
 - ATLAS : tile 型(シンチ+鉄)
 - CMS : シンチ+銅
 - 奥行のinteraction length $> 10\lambda$
 - 分解能は
 - ATLAS : 50%/ \sqrt{E}
 - CMS : 100%/ \sqrt{E}

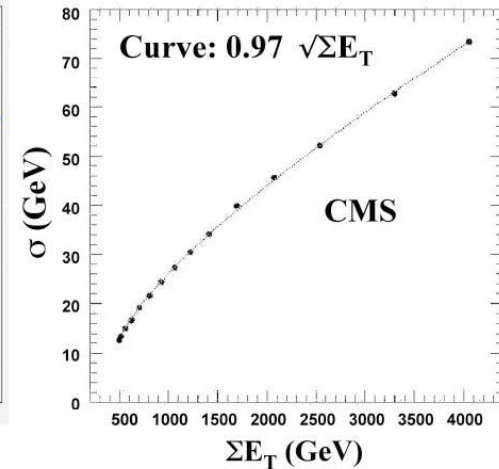
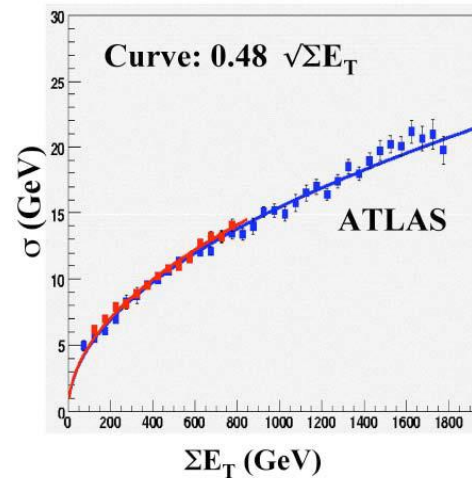
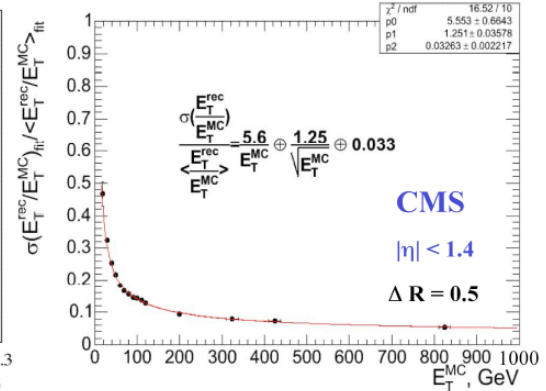
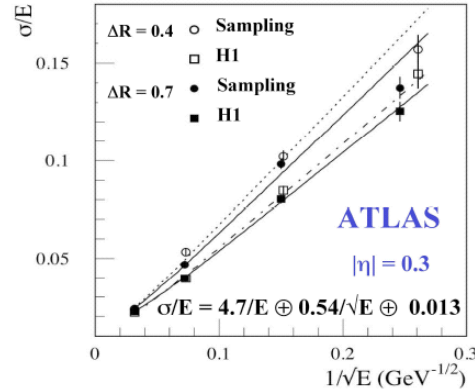


参考: エネルギー分解能

TABLE 10 Main performance parameters of the different hadronic calorimeter components of the ATLAS and CMS detectors, as measured in test beams using charged pions in both stand-alone and combined mode with the ECAL

	ATLAS				CMS	
	Barrel LAr/Tile		End-cap LAr		Had. barrel	Combined
	Tile	Combined	HEC	Combined		
Electron/hadron ratio	1.36	1.37	1.49			
Stochastic term	45%/√E	55%/√E	75%/√E	85%/√E	100%/√E	70%/√E
Constant term	1.3%	2.3%	5.8%	< 1%		8.0%
Noise	Small	3.2 GeV		1.2 GeV	Small	1 GeV

The measured electron/hadron ratios are given separately for the hadronic stand-alone and combined calorimeters when available, and for the contributions (added quadratically except for the stand-alone ATLAS tile calorimeter) to the pion energy resolution from the stochastic term, the local constant term, and the noise are also shown, when available from published data.



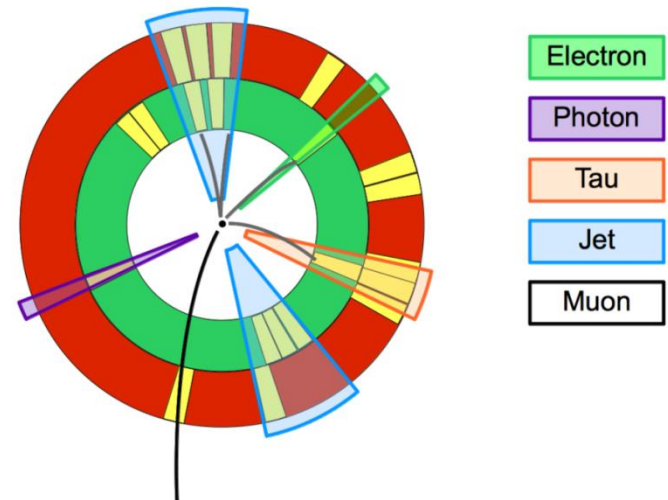
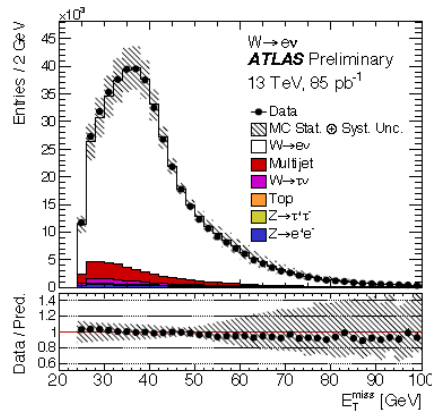
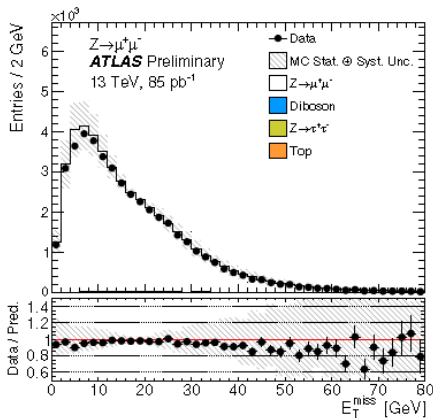
損失エネルギーの再構成

ニュートリノや、検出器と相互作用しない新粒子(LSPなど)は、検出器で直接観測はできないが、運動量保存則から計算できる。

- ただし、ビーム軸方向はinitialのパートンのエネルギーがわからないので、横方向のみ。
- 損失エネルギーをMissing transverse momentum と呼ぶ。
- 基本的にはカロリメータのエネルギーのベクトル和の逆向き
- ただし、粒子によってカロリメータの応答が違うので粒子を同定してそれぞれの補正を掛けた後ベクトル和を取る。

$$E_{x(y)}^{\text{miss}} = -p_{x(y)}^e - p_{x(y)}^\gamma - p_{x(y)}^{\text{Thad,vis}} - p_{x(y)}^{\text{jets}} - p_{x(y)}^\mu - p_{x(y)}^{\text{soft}}$$

- どのオブジェクトにも属さないものを“soft”とする。



ATLAS vs CMS

注意：2倍検出器性能が違うからといって感度が2倍違うわけではない！！

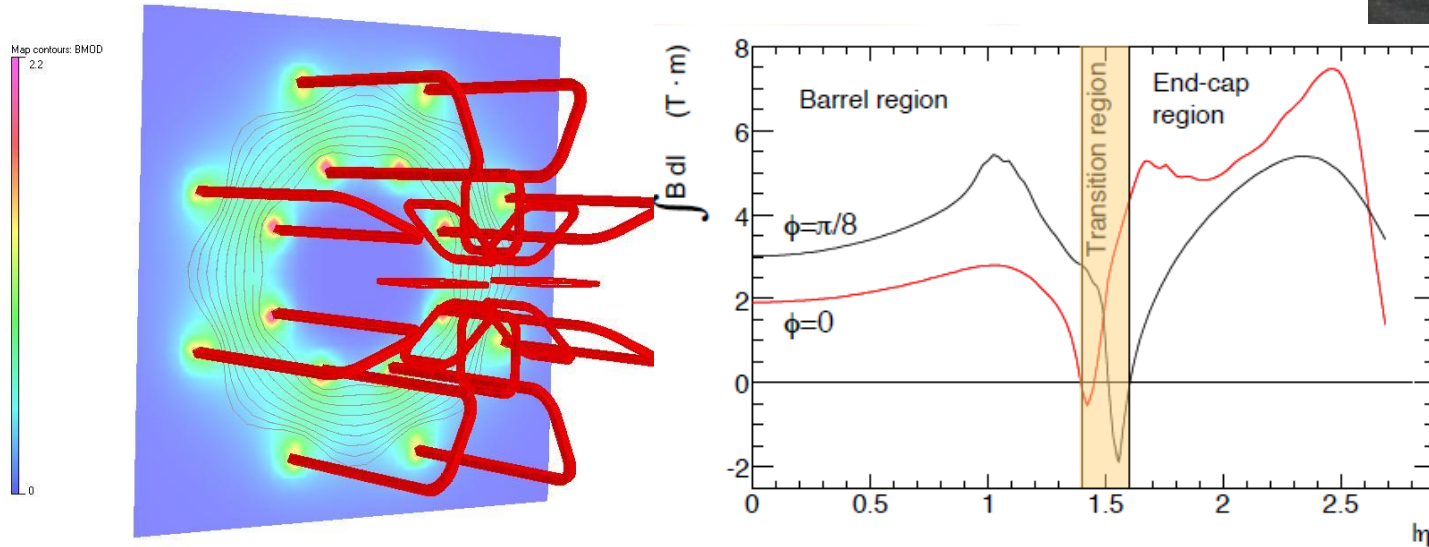
	ATLAS	CMS
Magnetic field	2 T solenoid + toroid: 0.5 T (barrel), 1 T (endcap)	4 T solenoid + return yoke
Tracker	Silicon pixels and strips + transition radiation tracker $\sigma/p_T \approx 5 \cdot 10^{-4} p_T + 0.01$	Silicon pixels and strips (full silicon tracker) $\sigma/p_T \approx 1.5 \cdot 10^{-4} p_T + 0.005$
EM calorimeter	Liquid argon + Pb absorbers $\sigma/E \approx 10\%/\sqrt{E} + 0.007$	PbWO ₄ crystals $\sigma/E \approx 3\%/\sqrt{E} + 0.003$
Hadronic calorimeter	Fe + scintillator / Cu+LAr (10λ) $\sigma/E \approx 50\%/\sqrt{E} + 0.03 \text{ GeV}$	Brass + scintillator (7 λ + catcher) $\sigma/E \approx 100\%/\sqrt{E} + 0.05 \text{ GeV}$
Muon	$\sigma/p_T \approx 2\% @ 50\text{GeV}$ to $10\% @ 1\text{TeV}$ (Inner Tracker + muon system)	$\sigma/p_T \approx 1\% @ 50\text{GeV}$ to $10\% @ 1\text{TeV}$ (Inner Tracker + muon system)
Trigger	L1 + HLT (L2+EF)	L1 + HLT (L2 + L3)

ミューオン検出器

ミュオン検出器

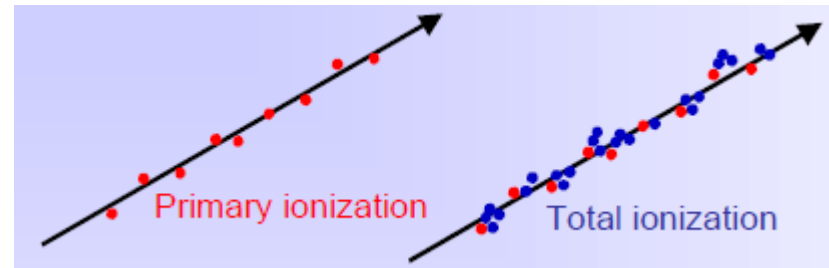
- 基本的に内部飛跡検出器と同じ
 - 歴史的にはこちらの方がずーと長い
 - 磁場中に位置検出器を設置→運動量を測定
 - CMSはソレノイドの磁場のリターンで曲げる
 - ATLASは専用のトロイド磁石を設置
 - 全部半導体検出器にすれば分解能は良くなるのかもしれないが実際はお金がかかりすぎ

現在のミュオン検出器は主にガス検出器



ガス検出器

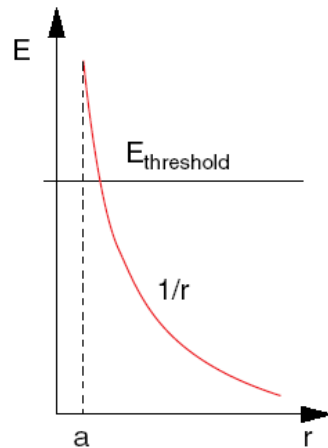
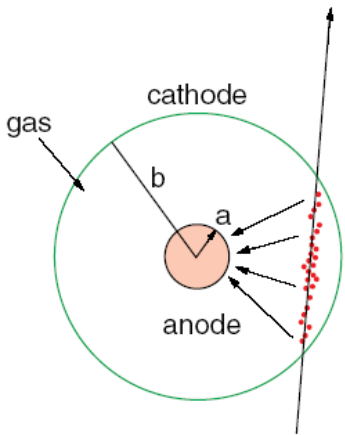
- 電離相互作用を利用した検出器
 - 通過粒子がガスをイオン化
 - ただし、1cmあたり高々100イオン程度でこれを検出するのは困難
 - 電場をかけてアバランシェ増幅させる。
 - この増幅の機構が開発されてガス検出器が実用化された。



$$n_{total} = \frac{\Delta E}{W_i} = \frac{\frac{dE}{dx} \Delta x}{W_i}$$

$$n_{total} \approx 3 \dots 4 \cdot n_{primary}$$

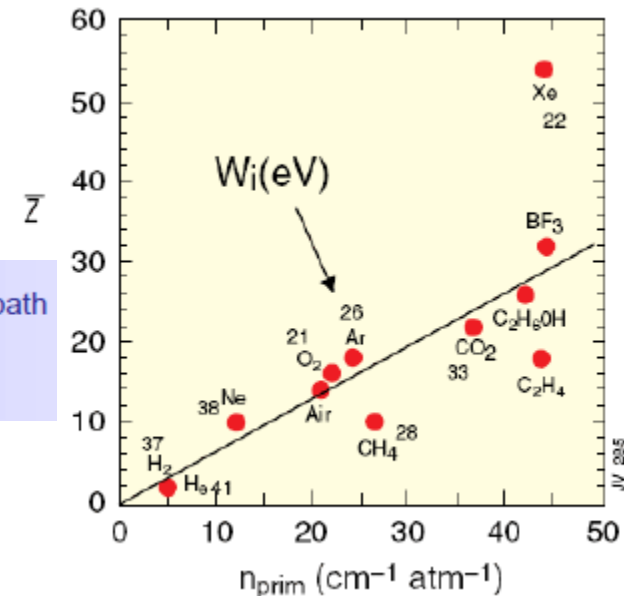
n_{total} - number of created electron-ion pairs
 ΔE = total energy loss
 W_i = effective <energy loss>/pair



Townsend coefficient $\alpha(E)$

$$dn = n \alpha dx \quad \alpha = \frac{1}{\lambda} \quad \lambda - \text{mean free path}$$

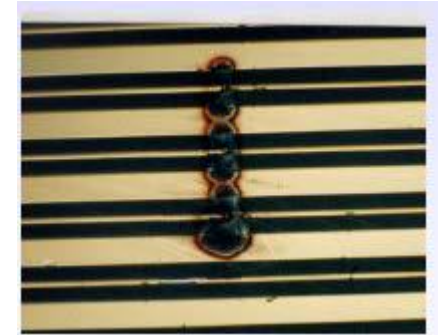
$$n = n_0 e^{\alpha(E)x} \quad \text{or} \quad n = n_0 e^{\alpha(r)x}$$



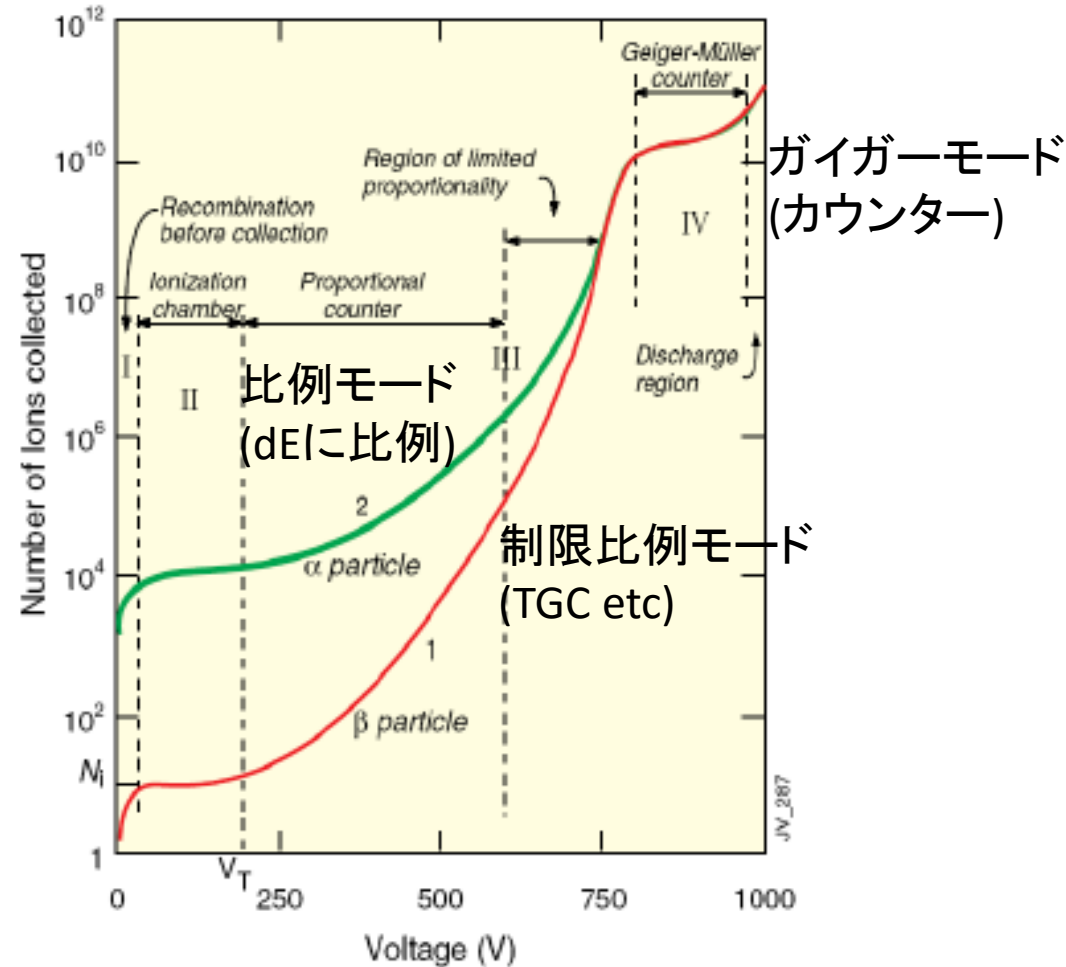
ガス検出器

ガス増幅モードと放電対策

放電：ガス検出器の天敵

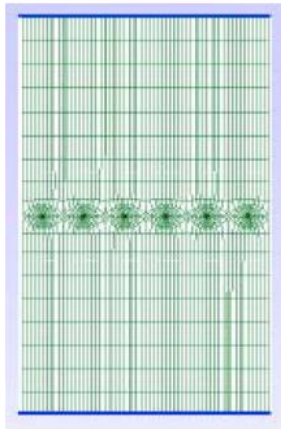


放電対策として、
クエンチガス(CO_2)
Resistive layerを入れる。



ガス検出器の種類

- MWPC

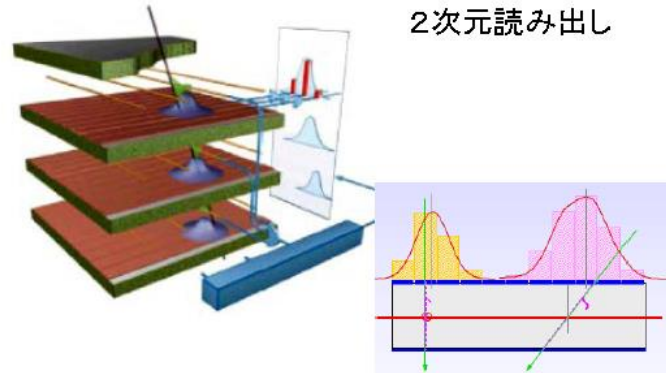


多チャンネル
高位置分解能

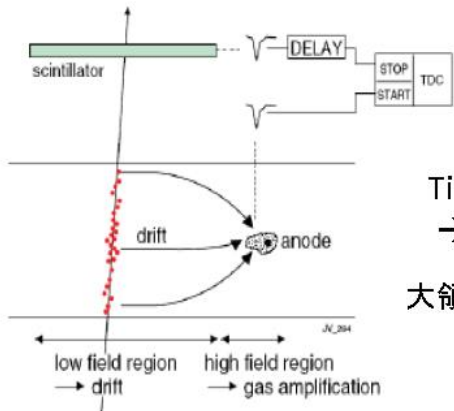
$$\sigma_x \approx \frac{d}{\sqrt{12}}$$

$$d = 1 \text{ mm } \sigma_x = 300 \mu\text{m}$$

- Cathode Strip

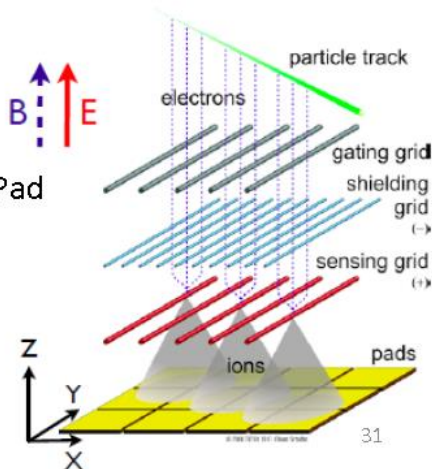


- Drift chamber



- TPC

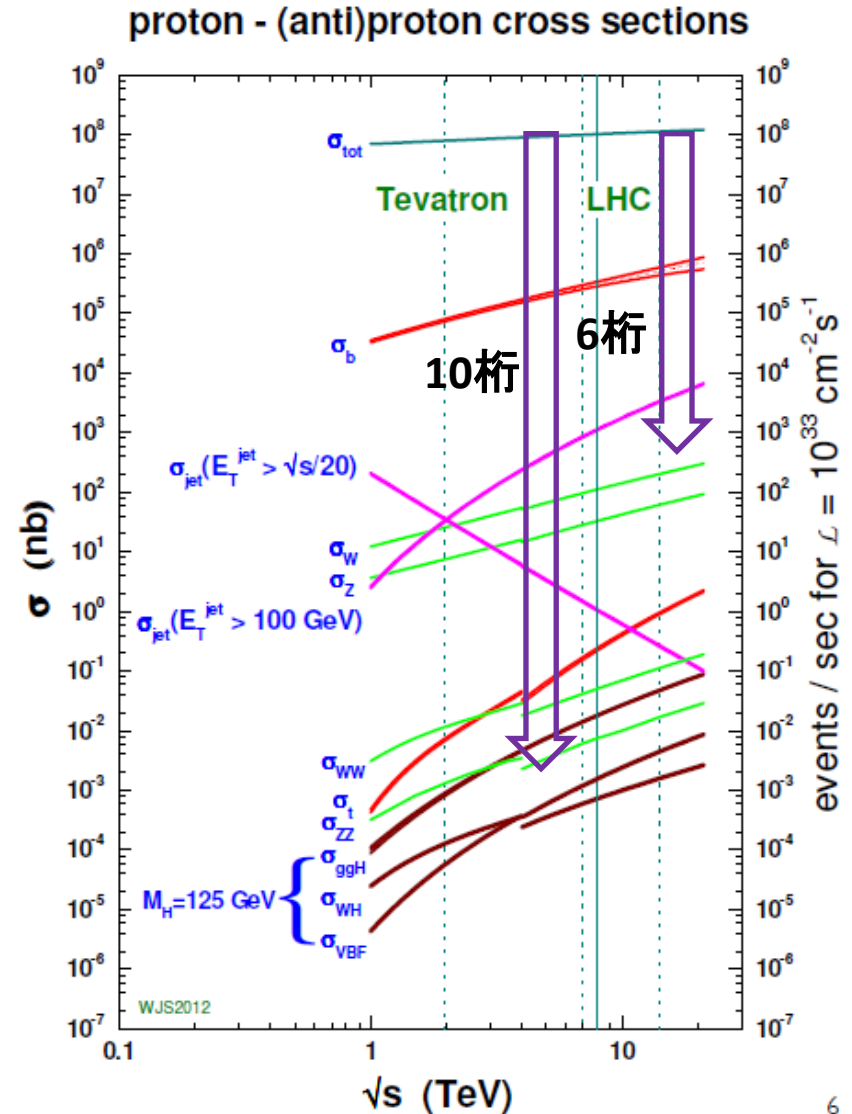
3次元測定
Z ... timing
X,Y ... MWPC, Pad



トリガーシステム

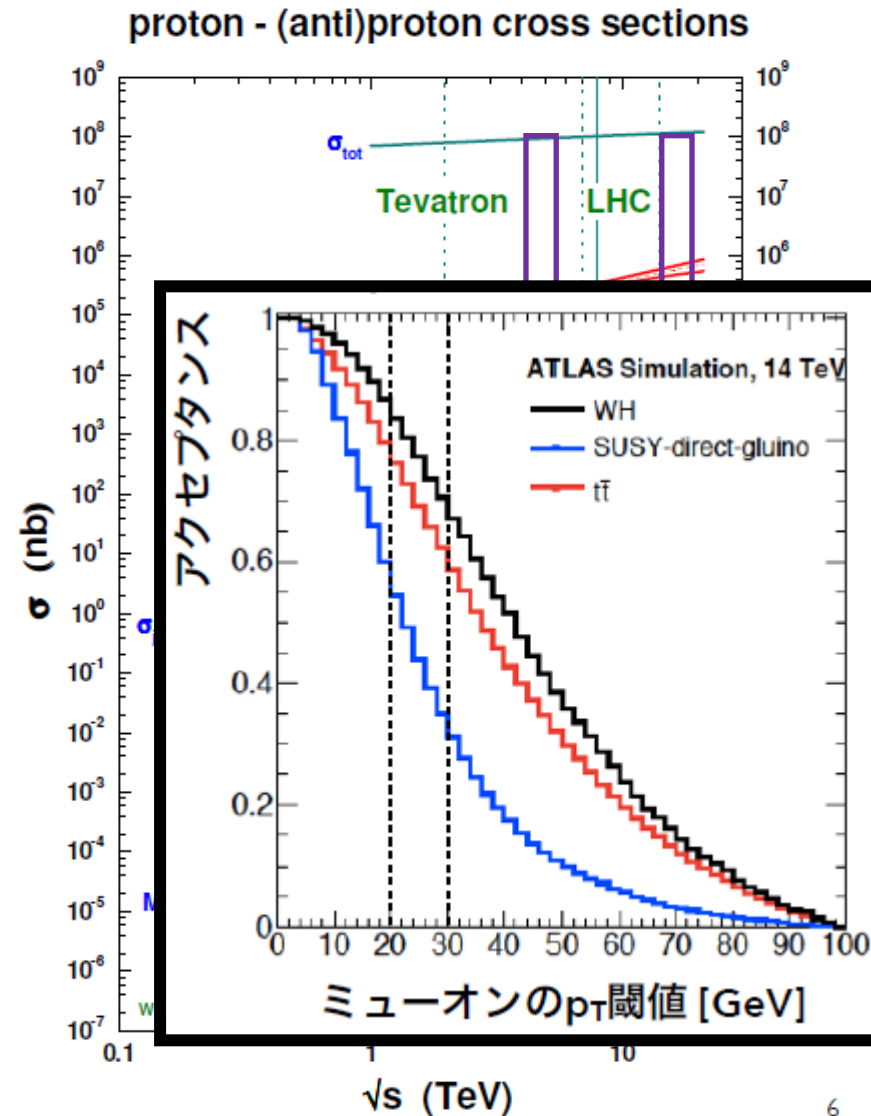
トリガー

- 全部取れないので見たい事象のみを記録
 - e+e-コライダー: 見たい物理の断面積が比較的小さい。全部取る。Efficiency は100%。
 - ATLAS : 低い断面積の新物理を探索 + QCD反応は見たい物理(e.g. Higgs)の10桁上
→想像を絶する帯域争い
- (とはいえ)共通して使えるものをやはり取りたい
 - (QCDを除く)レプトントリガー
 - これだけで6桁くらい落とせる
 - (信号を犠牲にしても)閾値をあげる。→どこまで下げられるかが鍵
 - レプトン以外のオブジェクトと統合



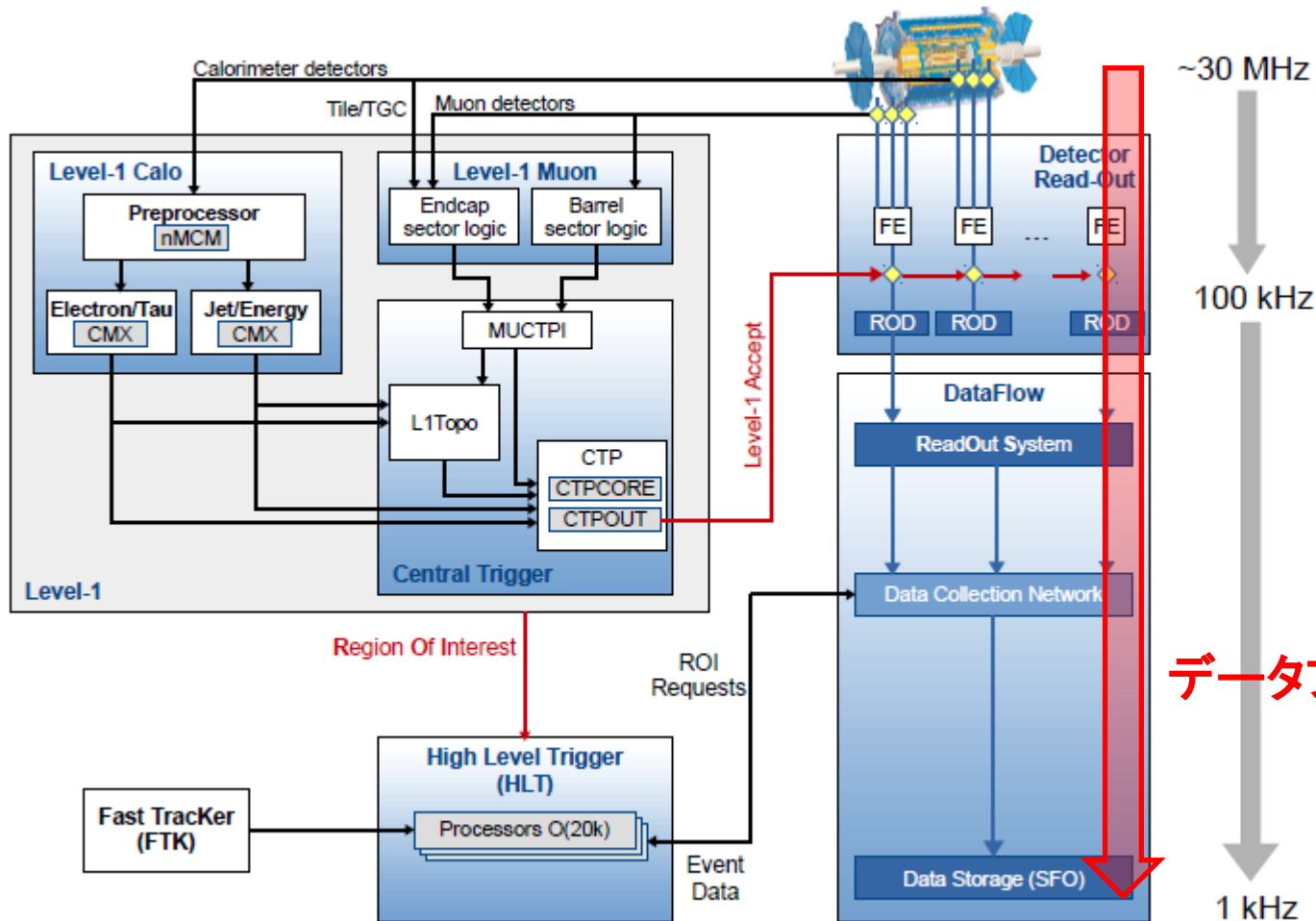
トリガー

- 全部取れないので見たい事象のみを記録
 - e+e-コライダー: 見たい物理の断面積が比較的小さい。全部取る。Efficiency は100%。
 - ATLAS : 低い断面積の新物理を探索 + QCD反応は見たい物理(e.g. Higgs)の10桁上
→想像を絶する帯域争い
- (とはいえ)共通して使えるものをやはり取りたい
 - (QCDを除く)レプトントリガー
 - これだけで6桁くらい落とせる
 - (信号を犠牲にしても)閾値をあげる。→どこまで下げられるかが鍵
 - レプトン以外のオブジェクトと統合



トリガー

- Run2, Run3のトリガー



データフロー

Backup
