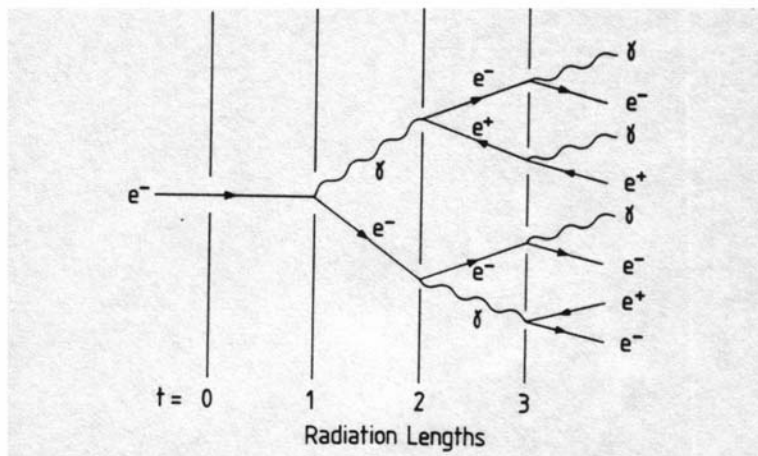
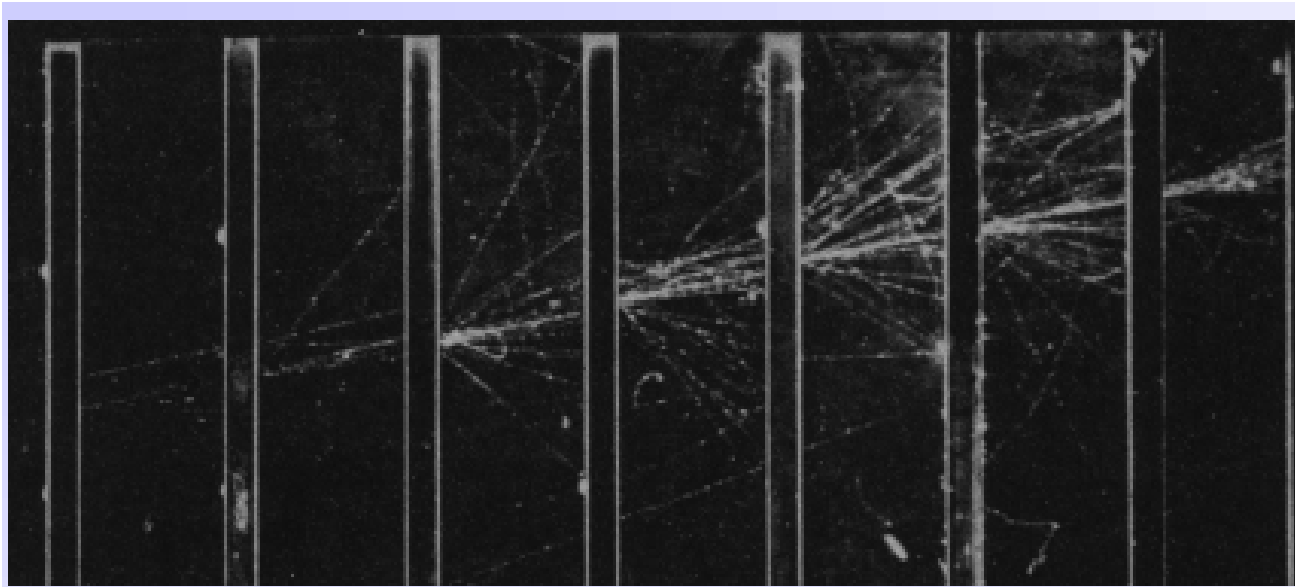


Kalorymetria

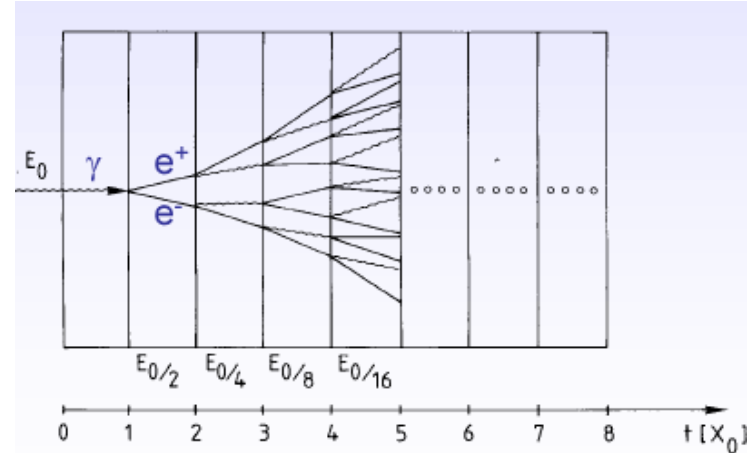
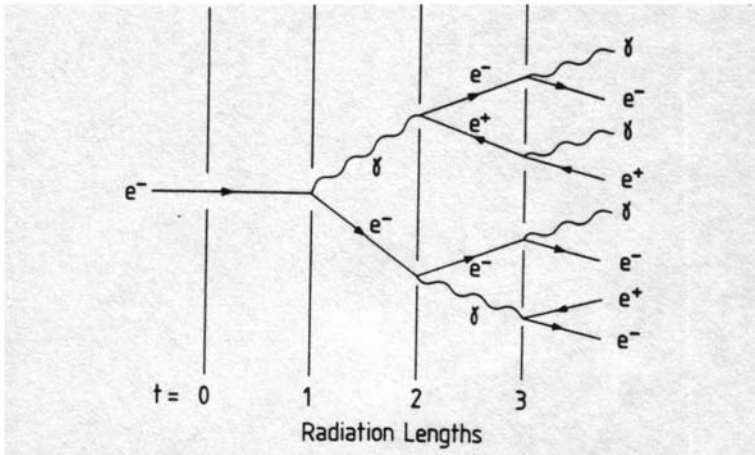
- Kalorymetry elektromagnetyczne
- Kalorymetry hadronowe

Kaskada elektromagnetyczna



- „pierwotny” elektron \rightarrow promieniowania hamowania \rightarrow kreacja par \rightarrow promieniowanie hamowania itd.
- Kaskada wygasa kiedy średnia energia cząstek elektromagnetycznych spada poniżej energii krytycznej

Kaskada elektromagnetyczna-prosty model



- Pojedynczy krok kaskady: $\gamma \rightarrow e^+e^-$; $e \rightarrow e\gamma$
- Średnio 1 konwersja na X_0
- Każdy krok średnio podwaja ilość cząstek
- Każdy krok kaskady połowi średnią energię cząstek
- Kaskada wygasa gdy $E_{\text{średnie}} \cong E_{\text{krytyczne}}$

Kaskada elektromagnetyczna-prosty model

$$N(t) = 2^t$$

$$E(t) = E_0 2^{-t}$$

$$E(t_{\max}) = E_c$$

$$t_{\max} = \frac{\ln E_0 / E_c}{\ln 2}$$

$$N_{tot} = \sum_{t=0}^{t_{\max}} 2^t \approx 2 \bullet 2^{t_{\max}} = \frac{2E_0}{E_c}$$

$$d = t_{\max} X_0 \propto \ln E_0$$

$$\frac{\sigma(E_0)}{E_0} \propto \frac{1}{\sqrt{E_0}}$$

Ilość cząstek podwaja się

Średnia energia połowi się co krok

Maksymalna ilość kroków
wyliczona z warunku wygasania
kaskady

Całkowita ilość cząstek utworzona
w kaskadzie

Długość kaskady proporcjonalna do energii
cząstki padającej

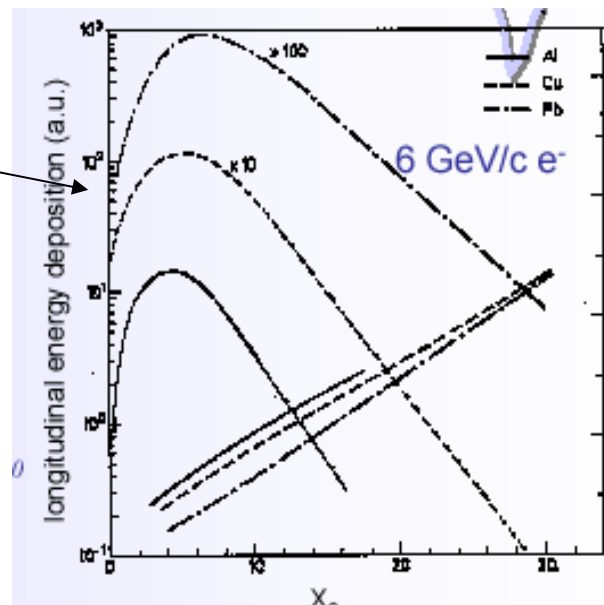
Zdolność rozdzielcza wynikająca z fluktuacji
statystycznych

Kaskada elektromagnetyczna-profil podłużny i poprzeczny

Podłużny rozwój kaskady :

Rozkład deponowanej energii w funkcji odległości od początku kaskady wzdłuż kierunku cząstki początkowej skalowanej przez długość radiacyjną $X_0 \sim A/Z^2$

$$\frac{dE}{dt} \propto t^\alpha e^{-t}$$

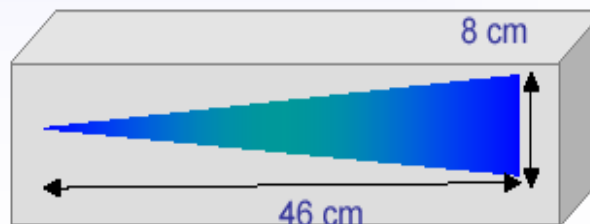


- **Poprzeczny** rozwój kaskady charakteryzuje promień Moliera : promień cylindra w którym zawiera się 95% energii deponowanej
- $R_m \cong 7 Z/A [g/cm^2] \cong 14 [g/cm^2]$
- Promień Moliera charakteryzuje maksymalną przestrzenną zdolność rozdzielczą kalorymetru

Example: $E_0 = 100 \text{ GeV}$ in lead glass

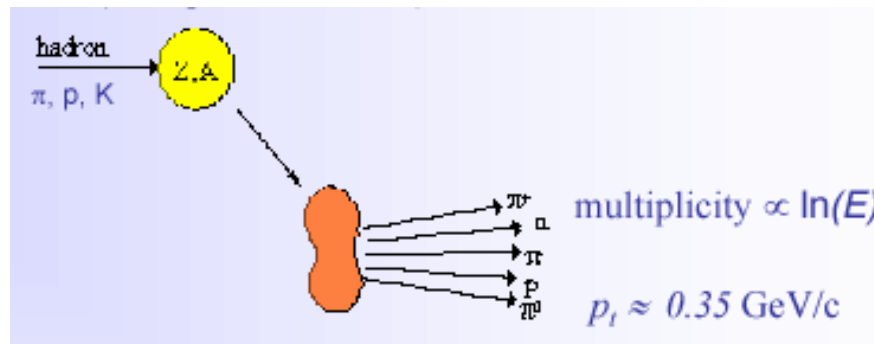
$E_c = 11.8 \text{ MeV} \rightarrow t_{max} \approx 13, t_{95\%} \approx 23$

$X_0 \approx 2 \text{ cm}, R_M = 1.8 \cdot X_0 \approx 3.6 \text{ cm}$



Kaskada hadronowa

- Kaskada hadronowa rozwija się w wyniku oddziaływań neutralnych i naładowanych hadronów w materiale
- „krok” kaskady hadronowej : zderzenie hadron jądro, produkcja wielu cząstek



- Każda z wyprodukowanych cząstek oddziałuje z następnymi jądrami
- Kaskada wygasa gdy średnia energia produkowanych cząstek spada poniżej progu na oddziaływanie nieelastyczne
- Cząstki elektromagnetyczne produkowane w kaskadzie hadronowej rozwijają niezależną kaskadę elektromagnetyczną

Kaskada hadronowa

- Skala kaskady hadronowej : długość interakcji (analog X_0 dla kaskady e.m.)

$$\lambda_I = \frac{A}{N_A \sigma_{total}} \propto A^{\frac{1}{3}} \quad \lambda_I < \lambda_a$$

Jest to średnia odległość pomiędzy kolejnymi zderzeniami

- Typowa długość kalorymetru hadronowego to 7-8 λ_I dla obecnie używanych zderzaczy (długość kaskady na szczęście rośnie z energią tylko logarytmicznie !

- Zdolność rozdzielcza kalorymetru hadronowego jest gorsza niż elektromagnetycznego. Wpływają na to dwa czynniki:

- Fluktuacje pomiędzy elektromagnetyczną i hadronową częścią kaskady
- Dużą część energii kaskady pozostaje nieobserwowalna w detektorze (wolne, niekaskadujące neutrony)

- Poprzeczny rozwój kaskady określa pęd poprzeczny cząstek produkowanych w zderzeniach nieelastycznych

Kaskada hadronowa

Kaskada hadronowa ma dwie składowe : elektromagnetyczna i hadronowa

- Hadronowa

- ❖ Naładowane hadrony : p,K, π ..

- ❖ Fragmenty jąder

- ❖ Neutrony, neutrina,miony...

- Elektromagnetyczna : $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma \rightarrow$ kaskada e.m.

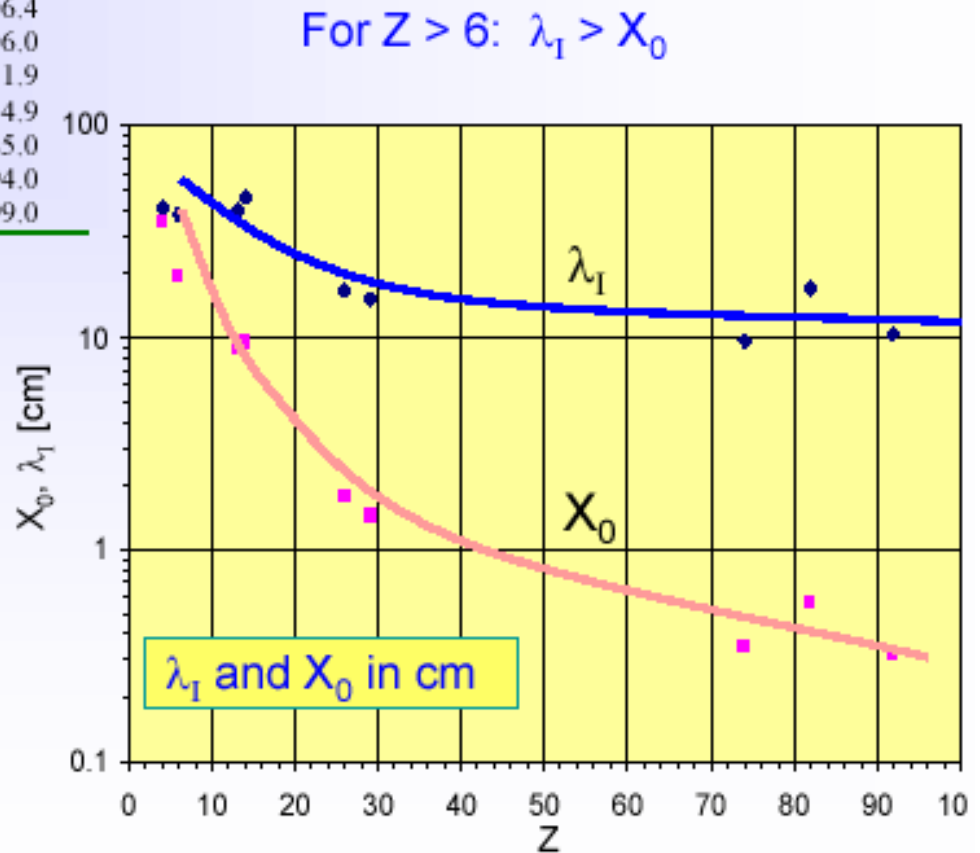
$n(\pi^0) \cong 1/3 n(\text{charged})$

Wolne neutrony, energia rozbicia jąder (binding energy), neutrina \rightarrow niewidoczna energia \rightarrow fluktuacje \rightarrow obniżona energetyczna zdolność rozdzielcza. **Niewidoczna energia stanowi ok. 30% energii pierwotnej hadronu !**

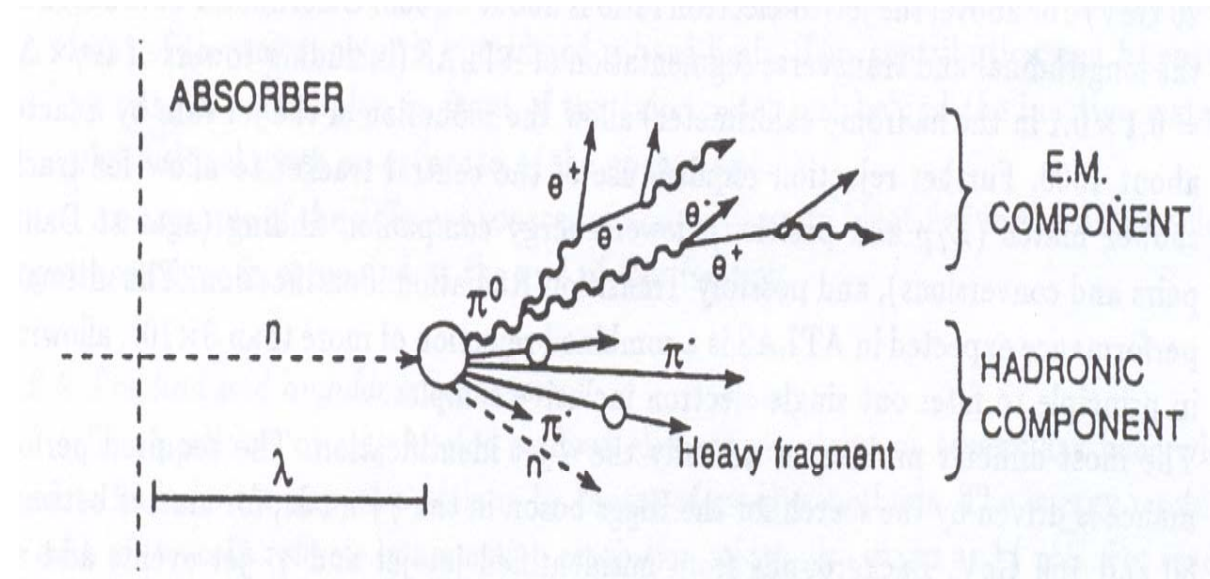
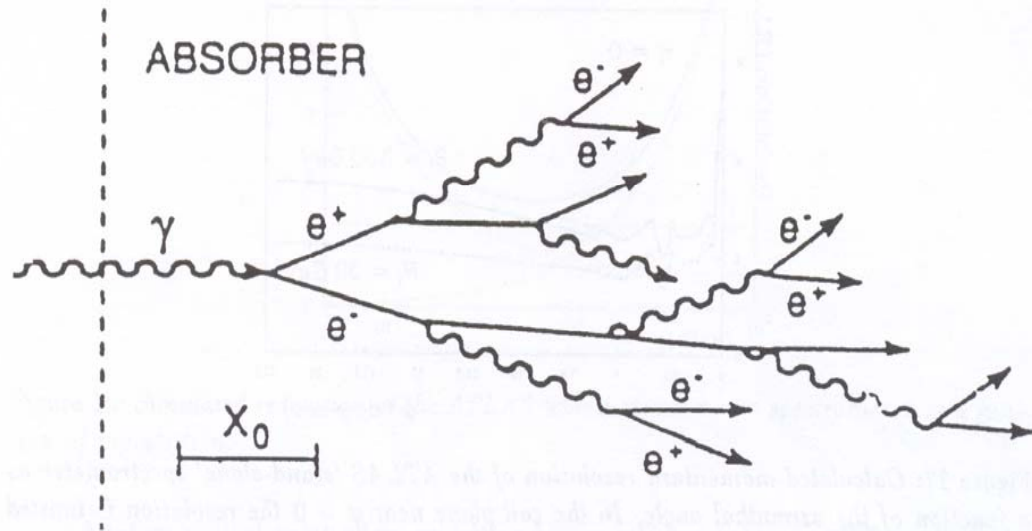
Kaskada hadronowa

Material	Z	A	ρ [g/cm ³]	X_0 [g/cm ²]	λ_I [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

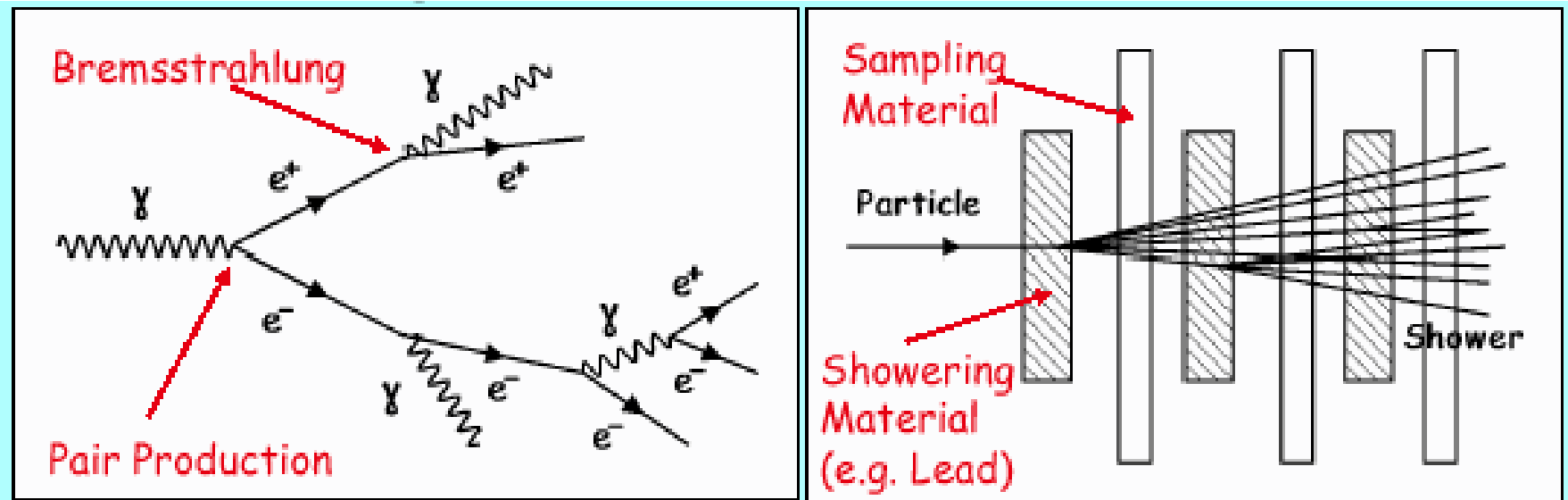
- Kaskada hadronowa jest dłuższa i szersza od elektromagnetycznej
- Rozmiary kaskady e.m. zależą od Z
- Rozmiar kaskady hadronowej zależy głównie od A



Kaskady hadronowe i elektromagnetyczne

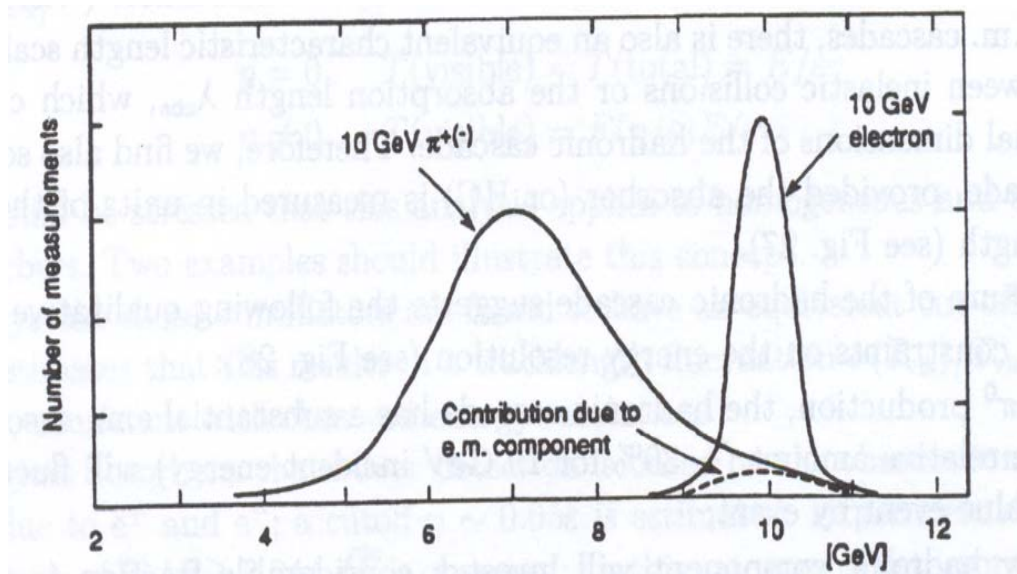
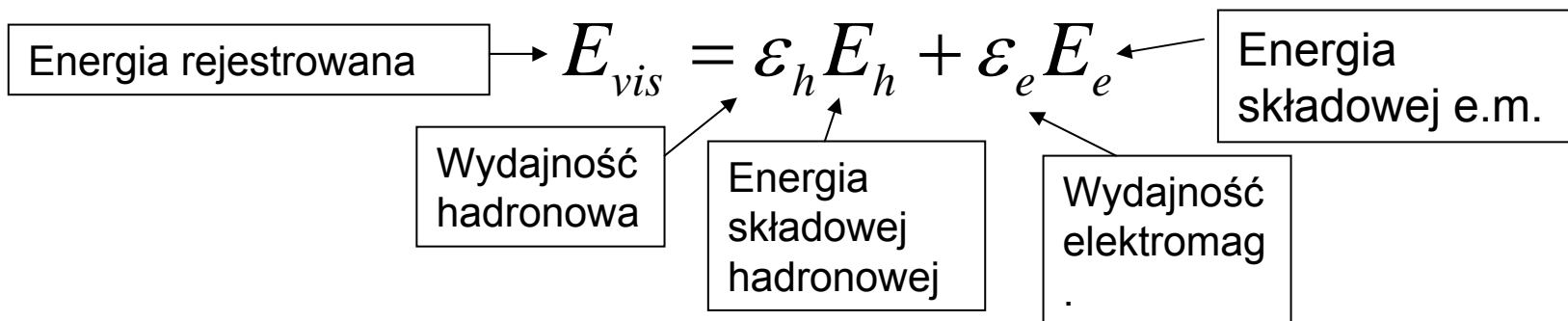


Kalorymetr próbkujący



Kalorymetr próbkujący składa się z naprzemiennych warstw absorbera (materiału w którym rozwija się kaskada) i detektora (próbkującego kaskadę). Dla kalorymetrów e.m. jako absorber wybiera się materiały z możliwie dużym Z natomiast dla kalorymetrów hadronowych wystarcza duże A

Wydajność kalorymetru hadronowego



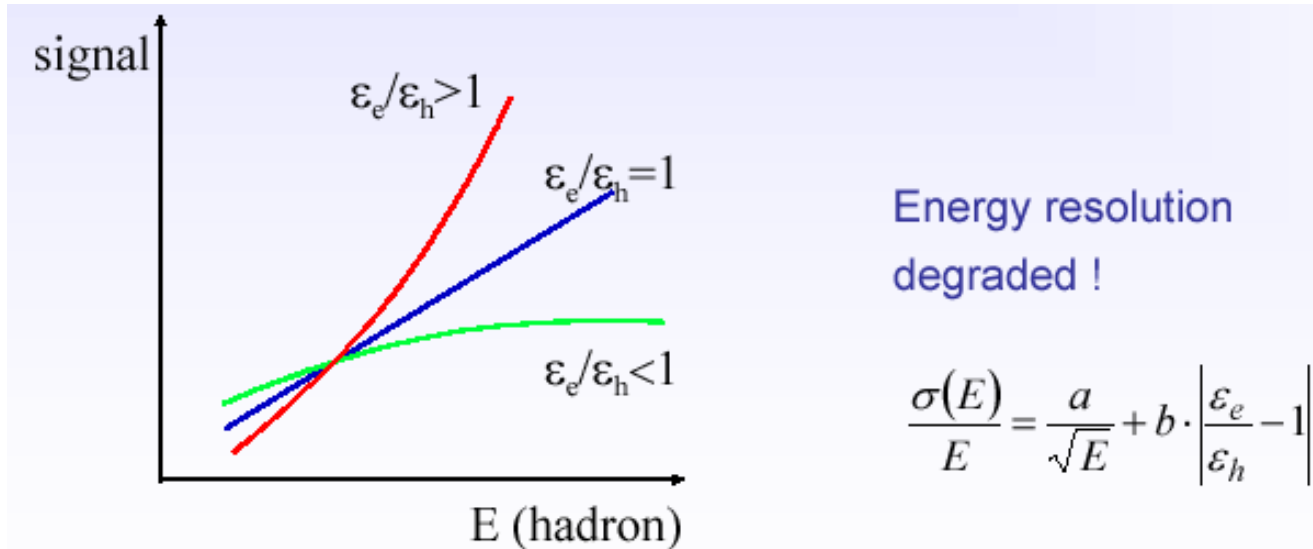
$\varepsilon_e > \varepsilon_h \rightarrow$ fluktuacje $E_h - E_e \rightarrow$ fluktuacje E_{vis}

Czy można uzyskać $\varepsilon_e = \varepsilon_h$?

Nieliniowość kalorymetru hadronowego

Część energii zdeponowanej przez składową hadronową zależy od energii

$$\frac{E_h}{E_{vis}} = 1 - \frac{n(\pi^0)}{n} = 1 - k \ln(E)$$



Metody kompensacji e/h :

- Podwyższyć $\epsilon_h \rightarrow$ np.. Absorber uranowy (ZEUS), inne specjalne absorbery
- Obniżyć $\epsilon_e \rightarrow$ detektor z małym Z, absorber z dużym Z (atenuacja fotonów niskiej energii $\sim 1/Z^5$)
- metody softwarowe (wstępna ocena składu kaskady, H1)

Typy kalorymetrów

•Kalorymetry jednorodne: detektor = absorber

- Szkło ołowiowe, kryształy np.. Kwarc, BGO,...
- Dobra zdolność rozdzielcza (energetyczna)
- Ograniczona zdolność obserwacji podłużnego rozwoju kaskady (identyfikacja kaskad)
- Tylko kalorymetria elektromagnetyczna

•Kalorymetry próbkujące

- Detektor przekładany absorberem → tylko część energii rejestrowana → ograniczona zdolność rozdzielcza
- W zamian : możliwość rejestracji rozwoju kaskady w trzech wymiarach (trójwymiarowa zdolność rozdzielcza (cele kalorymeru)
- Kalorymetria elektromagnetyczna i hadronowa