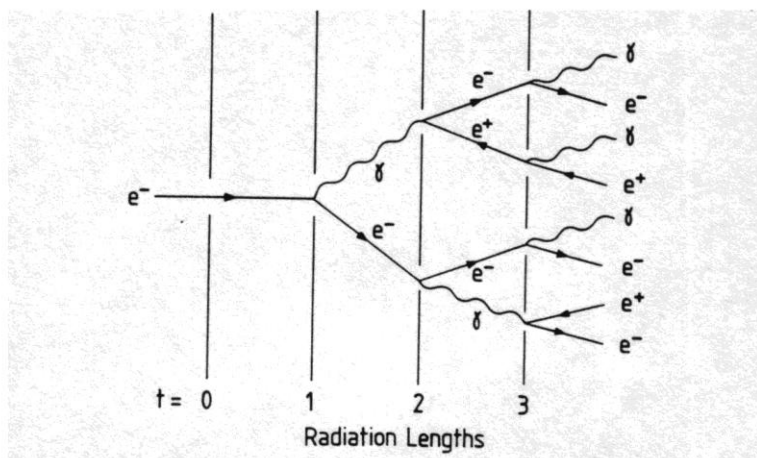
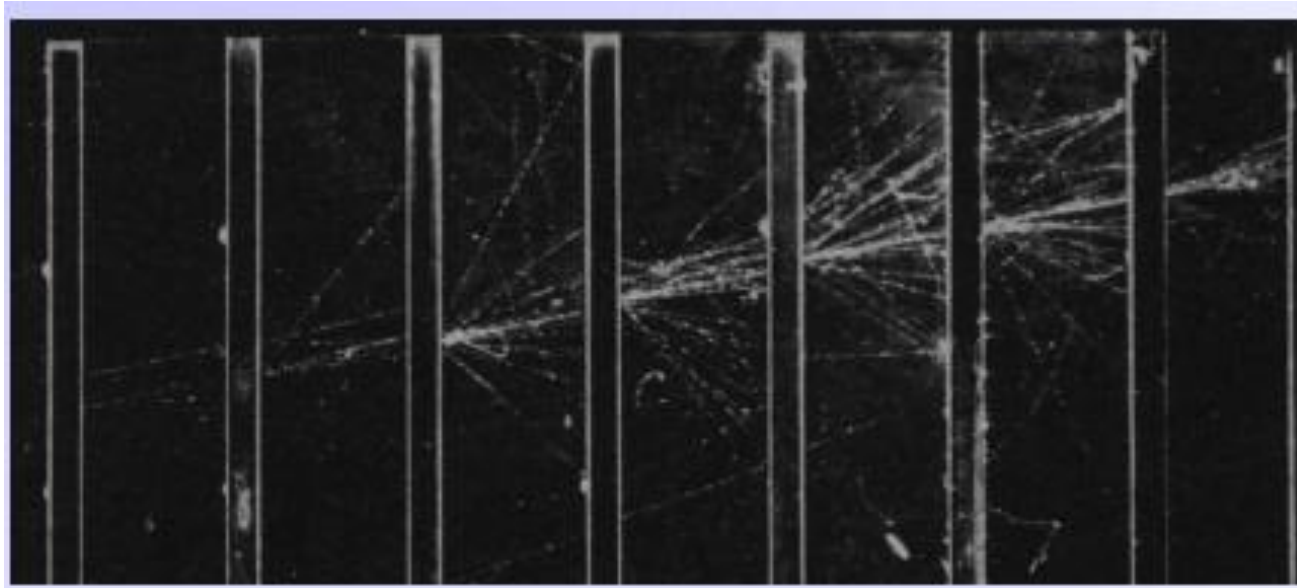


# Kalorymetria

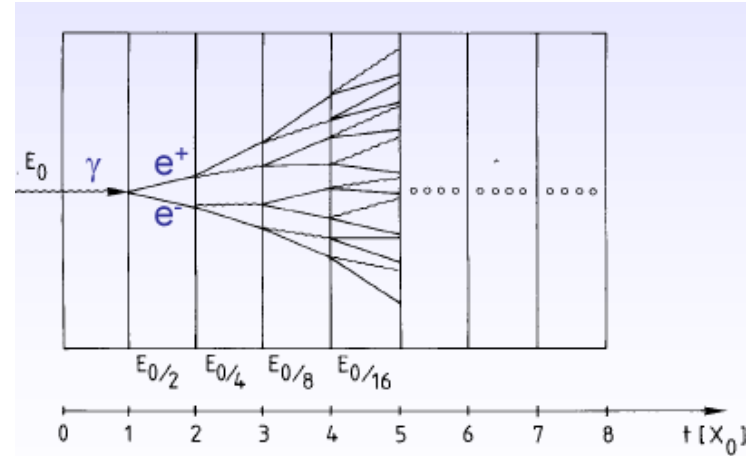
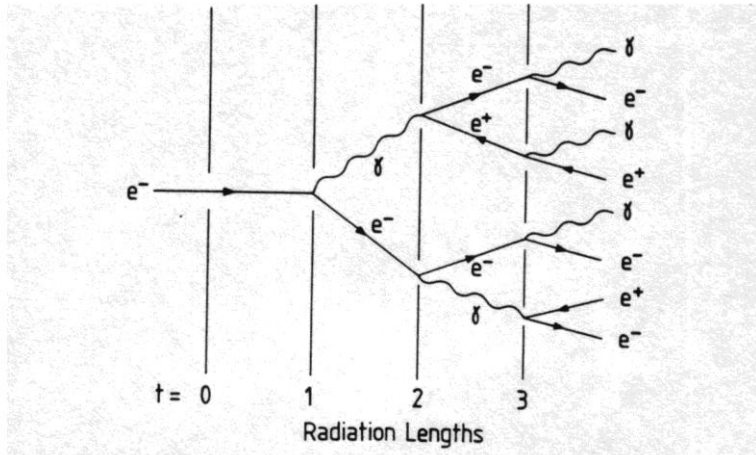
- Kalorymetry elektromagnetyczne
- Kalorymetry hadronowe

# 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

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

Ilość cząstek podwaja się

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

Średnia energia połowi się co krok

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

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

Maksymalna ilość kroków  
wyliczona z warunku wygasania  
kaskady

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

$$= \frac{2E_0}{E_c}$$

Całkowita ilość cząstek utworzona  
w kaskadzie

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

Długość kaskady proporcjonalna do energii  
cząstki padającej

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

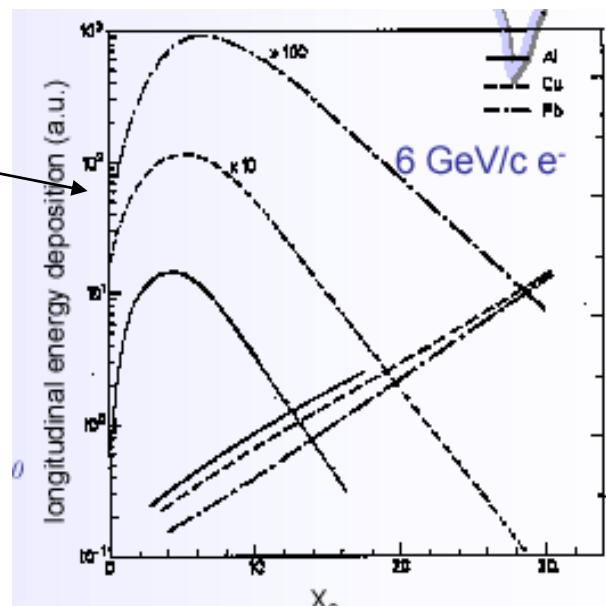
Zdolność rozdzielcza wynikająca z fluktuacji  
statystycznych

# 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

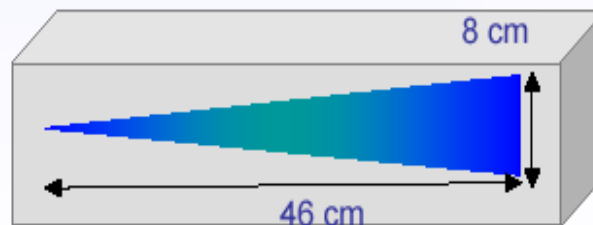
•  $R_m \approx 7 Z/A [g/cm^2] \approx 14 [g/cm^2]$

• Promień Moliera charakteryzuje maksymalną przestrzenną zdolność rozdzielczą kalorymetru

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

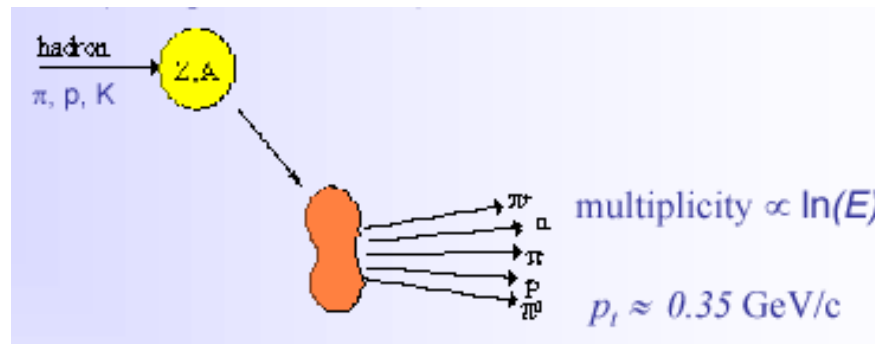
$E_c = 11.8 \text{ MeV} \rightarrow t_{max} \approx 13, t_{95\%} \approx 23$

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



# 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  $\lambda_I$  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, $\pi$ ..

- ❖ Fragmenty jąder

- ❖ Neutrony, neutrina,miony...

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

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

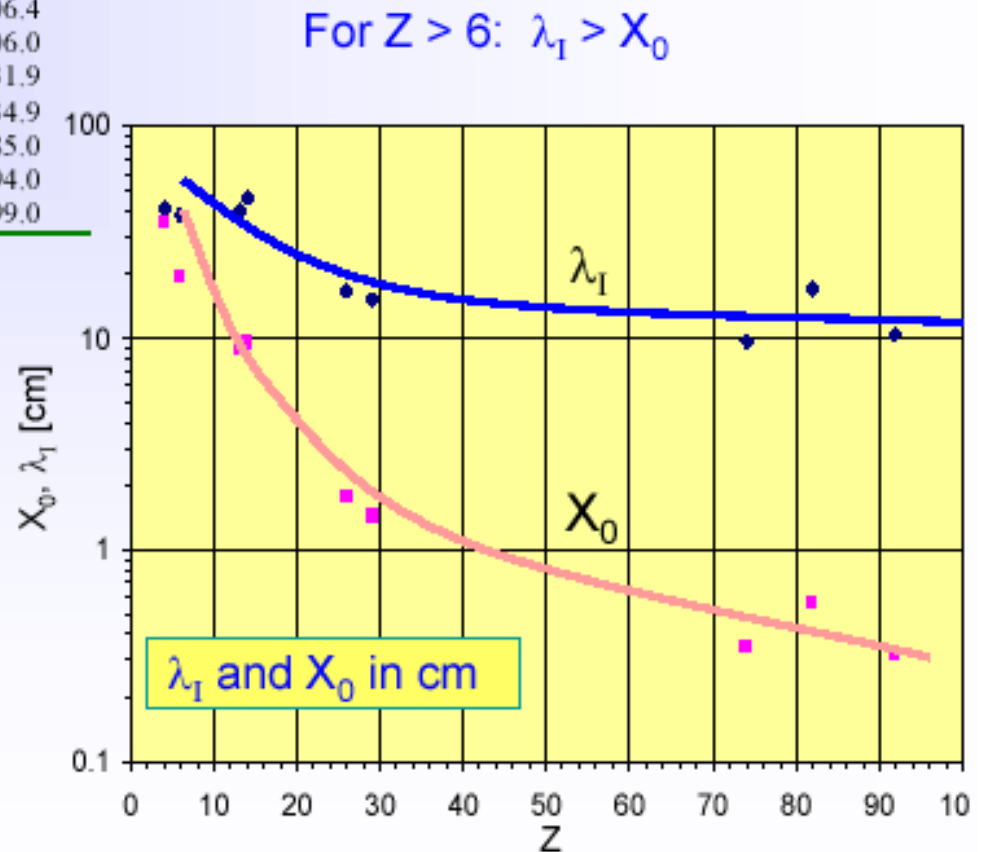
Wolne neutrony, energia rozbicia jąder (binding energy), neutrina  $\rightarrow$  niewidoczna energia  $\rightarrow$  fluktuacje  $\rightarrow$  obniżona energetyczna zdolność rozdzielcza. **Niewidoczna energia stanowi ok. 30% energii pierwotnej hadronu !**



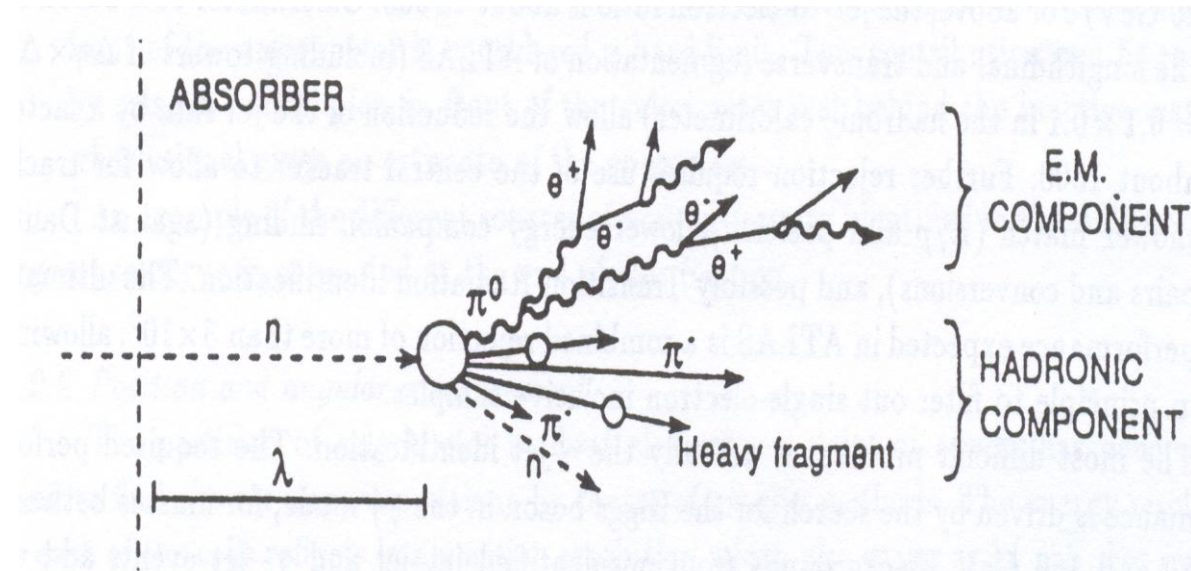
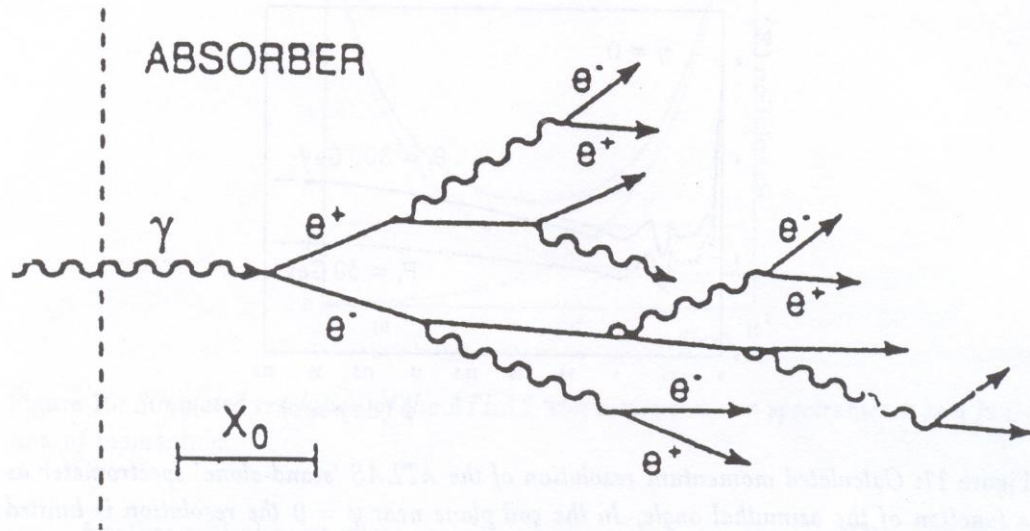
# Kaskada hadronowa

| Material       | Z  | A      | $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ] | $X_0$ [g/cm <sup>2</sup> ] | $\lambda_I$ [g/cm <sup>2</sup> ] |
|----------------|----|--------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------------|
| 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                            |

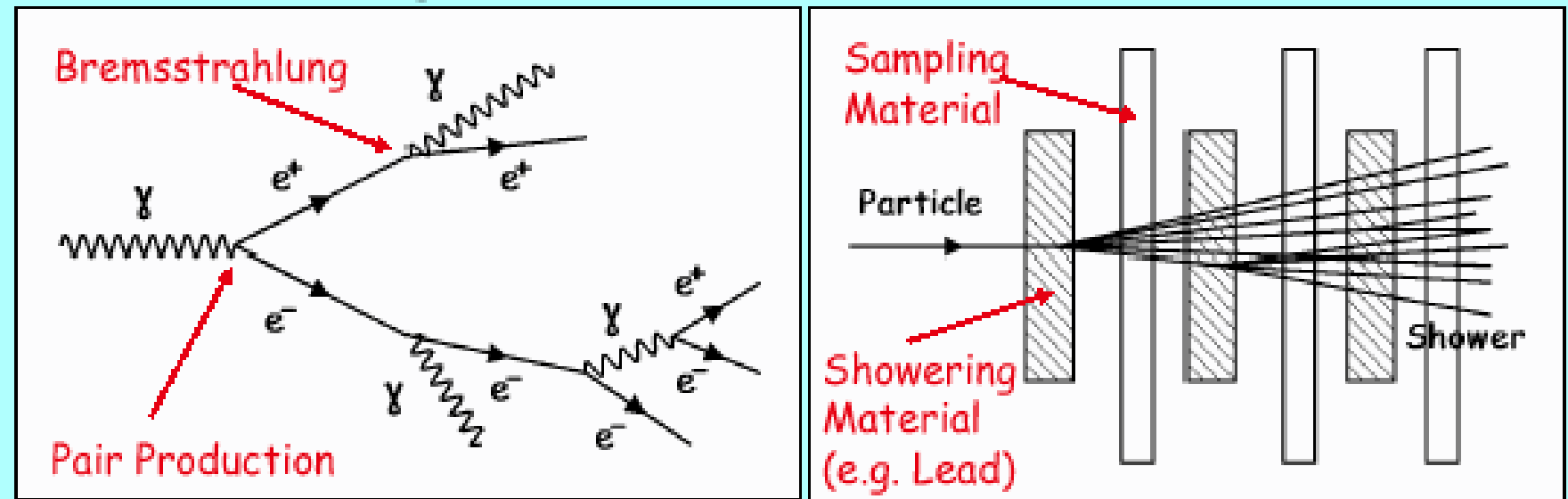
- Kaskada hadronowa jest dłuższa i szersza od elektromagnetycznej
- Rozmiary kaskady e.m. zależą od Z
- Rozmiar kaskady hadronowej zależy głównie od A



# Kaskady hadronowe i elektromagnetyczne

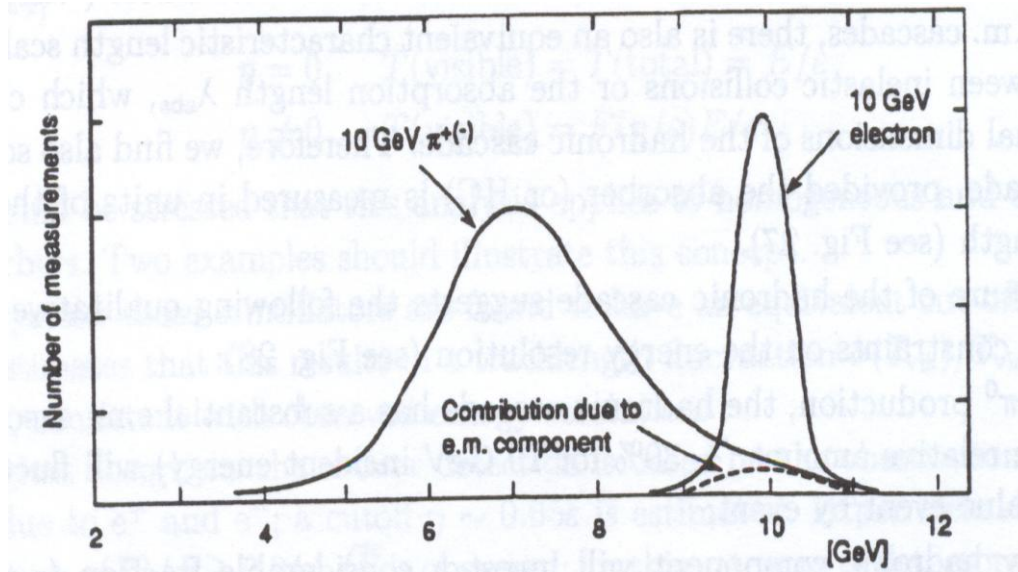
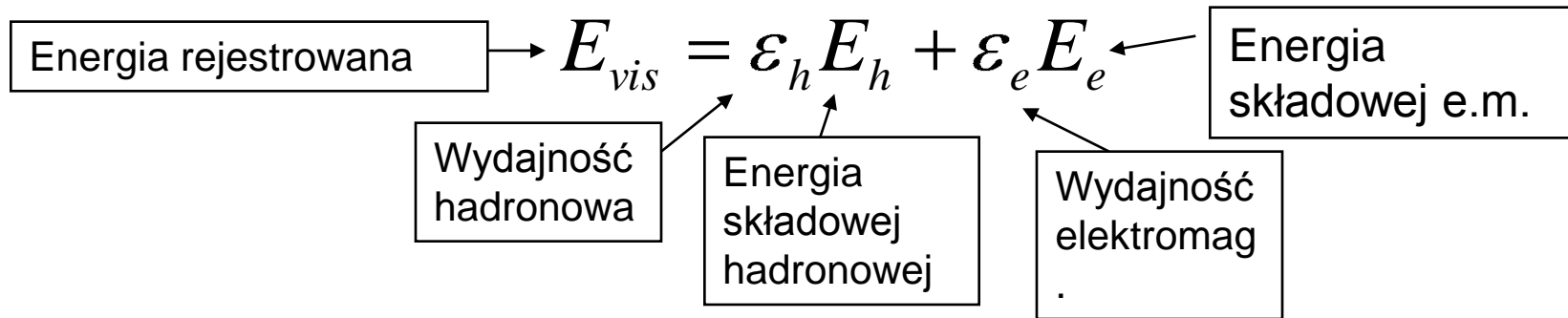


# Kalorymetr próbkujący



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



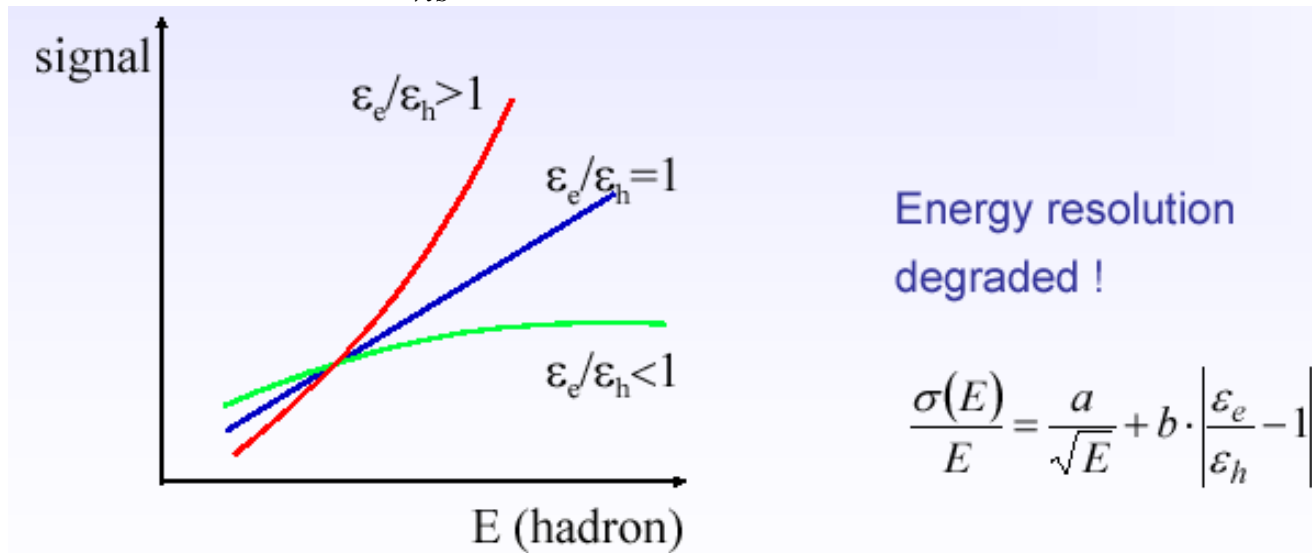
$\varepsilon_e > \varepsilon_h \rightarrow$  fluktuacje  $E_h - E_e \rightarrow$  fluktuacje  $E_{vis}$

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