

# Oddziaływanie Promieniowania Jonizującego z Materią

**Tomasz Szumlak, Agnieszka Obłąkowska-Mucha**

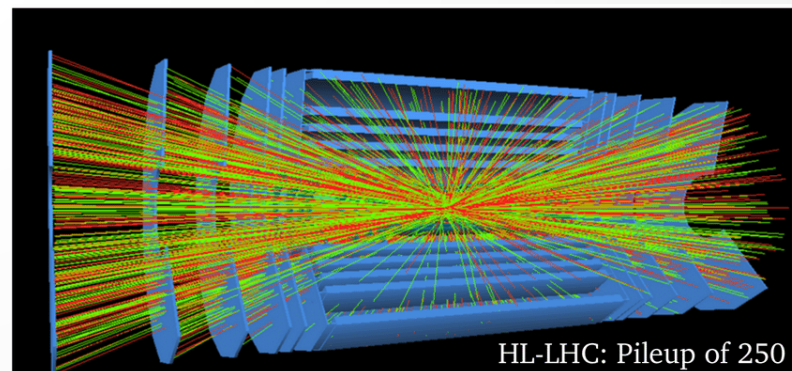
WFiIS AGH  
2021, Kraków

# Idealny detektor:

- ▶ Rejestruje naładowane cząstki (leptony i hadrony)
- ▶ Rejestruje neutralne cząstki (fotony, neutralne hadrony, neutrina)
- ▶ Identyfikuje cząstki
- ▶ Precyzyjnie mierzy energię i pęd każdej cząstki

Czyli:

- rekonstruuje 4-pęd wszystkich cząstek powstałych w zderzeniu
- pracuje przy wysokich częstościach zderzeń



# Pomiar zdeponowanej energii

- Sygnał elektryczny pochodzący z ładunków wytworzonych dzięki energii zdeponowanej przez naładowane cząstki:
  - detektory gazowe,
  - detektory półprzewodnikowe
- Rejestracja fotonów w scyntylatorach
- Pomiar energii w **kalorymetrach**:
  - elektromagnetycznych
  - hadronowych

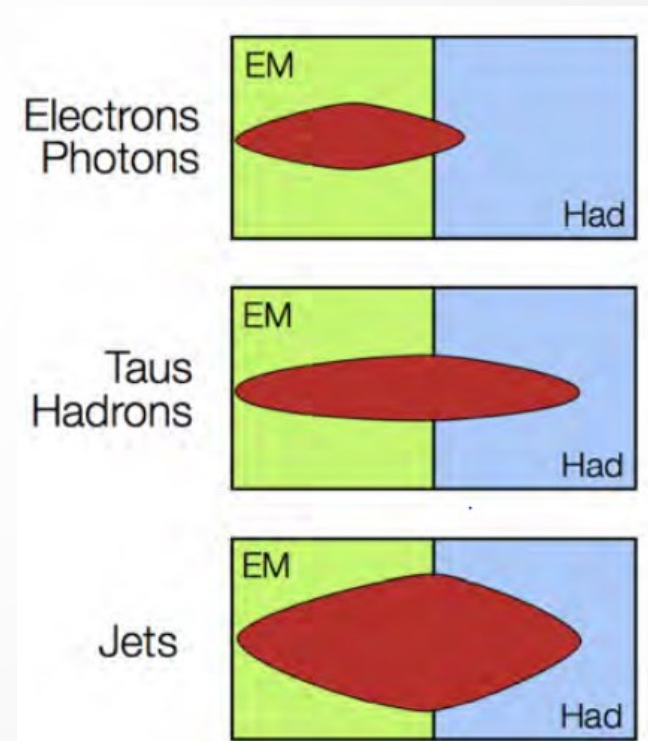


# Pomiar energii

**Kalorymetry** – urządzenia do pomiaru energii cząstek poprzez całkowite ich pochłonięcie.

Jedynie miony i neutrino nie zostają zabsorbowane.

- W procesie absorpcji, prawie cała energia jest finalnie zamieniona na ciepło, stąd nazwa „kalorymetry”.
- Cząstki wchodzące do bloku absorbenta powodują powstanie tzw. kaskady.
- Ze względu na różnice w oddziaływaniach elektromagnetycznych i silnych, kaskady EM i Had rozwijają się inaczej



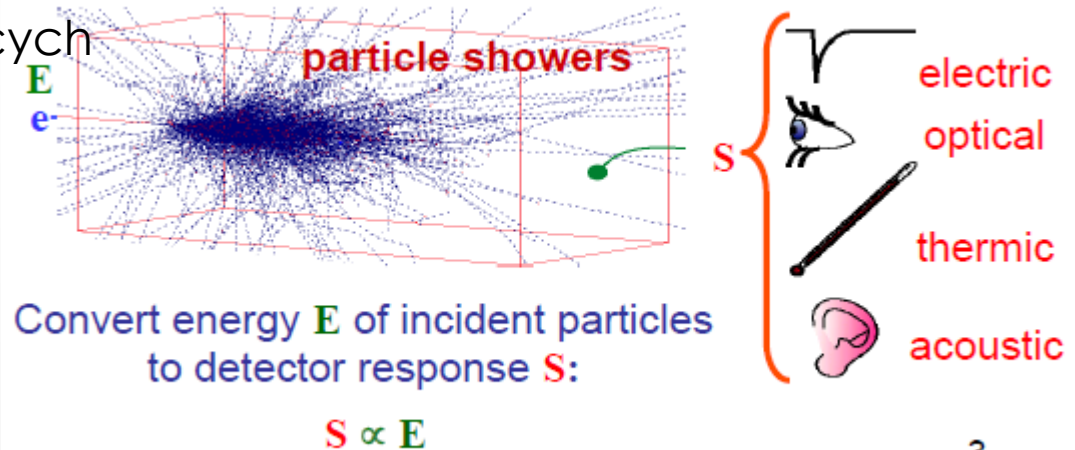
# Kalorymetry

- W kalorymetrach mierzona jest energia cząstek zarówno naładowanych, jak i obojętnych.
- Z reguły im wyższa energia, tym kalorymetry są bardziej efektywne:

$$\frac{\sigma_E}{E} \sim \frac{1}{\sqrt{E}}$$

np. ELM:  $\frac{\sigma_E}{E} \sim \frac{0.4}{\sqrt{E}}$ , a  $\frac{\sigma_p}{p} \sim p$ ,  $\frac{\sigma_p}{p} \sim p$  ok. 5% dla 100 GeV (ATLAS)

- Sygnał z kalorymetrów jest szybki, stąd są zwykle używane w systemach trygerujących



# Kalorymetry elektromagnetyczne

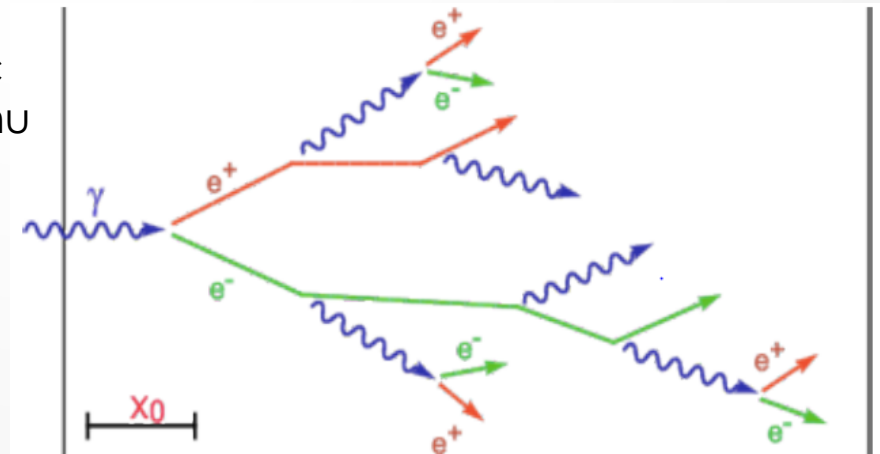
- Dominującym procesem przy wysokich energiach jest:
  - dla fotonów: kreacja par,
  - dla elektronów: bremsstrahlung

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

Po przejściu  $X_0$  elektron ma  $1/e$  energii początkowej (ok.37%)

Kalorymetry ELM mogą zmierzyć energię początkowego elektronu lub fotonu:

$$E_{pocz} = \sum_i E_i$$



# Kalorymetry elektromagnetyczne

## □ Model Heitnera rozwoju kaskady elektromagnetycznej:

- elektron traci  $(1 - 1/e) = 63\%$  energii w każdym  $X_0$ ,
- średnia droga swobodna fotonu wynosi  $9/7 X_0$ .
- Powyżej energii krytycznej:  $E > E_c$  - produkcja par, nie ma jonizacji
- Poniżej energii krytycznej:  $E < E_c$  energia tracona jest wyłącznie na jonizację i wzbudzenia.

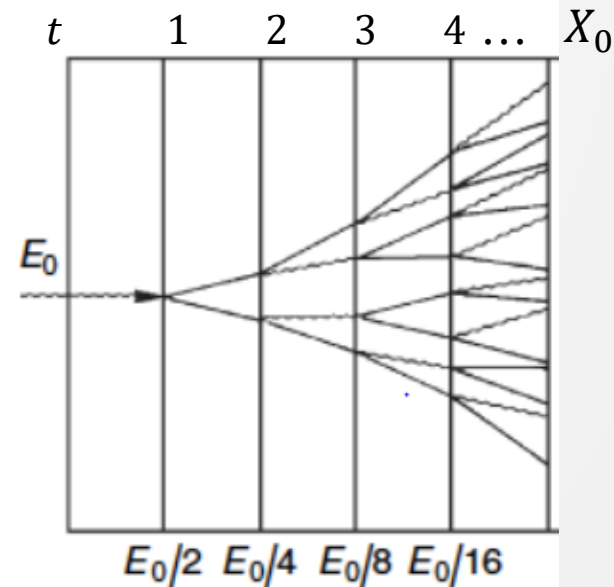
## □ Zakłada się, że po każdym $X_0$ energia dzieli się po równo na wyprodukowane elektrony/fotony:

- po drodze  $tX_0$  jest  $2^t$  cząstek,
- każda cząstka ma energię  $E/2^t$ ,
- kaskada kończy się, gdy  $E < E_c$ ,
- liczba cząstek w kaskadzie to:

$$N = E/E_c,$$

- długość kaskady to:

$$t_{max} \propto \ln(E_0/E_c)$$



# Kalorymetry elektromagnetyczne

□ Kaskady charakteryzuje się:

- liczbą cząstek w pęku:  $N_{max} = 2t^{max} = E/E_c$
- położeniem maximum:  $t_{max} \propto \ln(E_0/E_c)$
- rozmiarami poprzecznymi
- rozkładami podłużnymi:  $L \propto \ln(E_0/E_c)$

Podłużne rozmiary kaskady ELM rosną logarytmicznie z energią początkową cząstki, tzn, kalorymetry ELM nie muszą być duże.

np.  $E_c = 10 \text{ MeV}$

$E_0 = 1 \text{ GeV}, \rightarrow t_{max} = \ln 100 \approx 4.5; N_{max} = 100$

$E_0 = 100 \text{ GeV}, E_c = 10 \text{ MeV} \rightarrow t_{max} = \ln 10\,000 \approx 9.2; N_{max} = 10\,000$

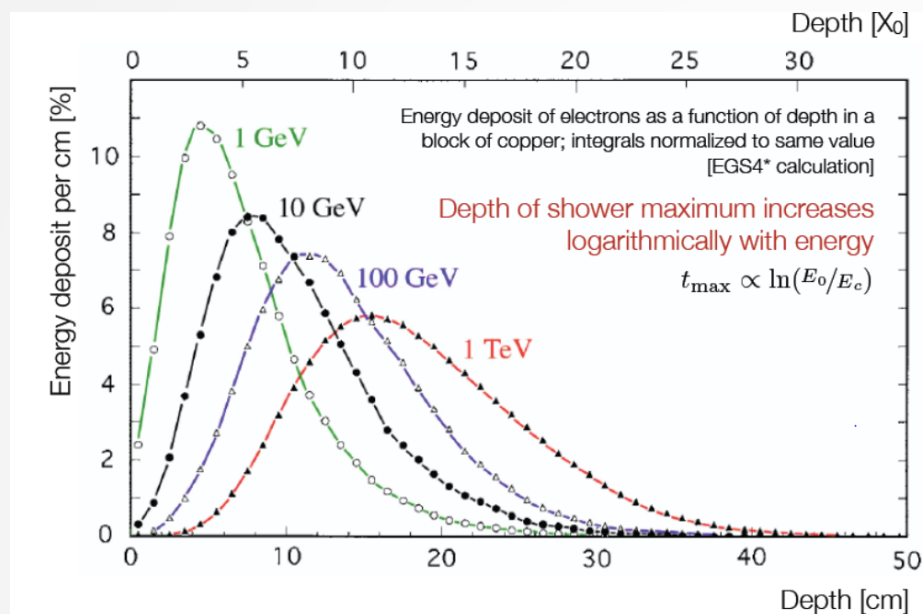
100 GeV elektron będzie pochłonięty w 16 cm Fe lub 5 cm Pb

$$X_0(Fe) = 1.76 \text{ cm}$$

$$X_0(Pb) = 0.65 \text{ cm}$$

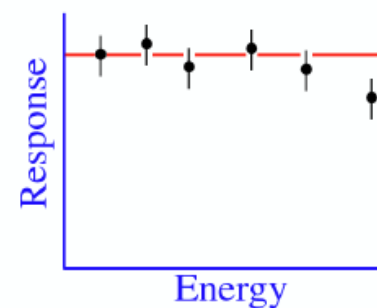
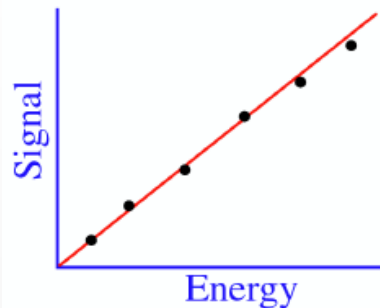


# Kalorymetry elektromagnetyczne



Po  $t_{\max}$  kaskada powoli jest absorbowana, głównie procesy jonizacji i rozpraszania Comptona, brak zależności od  $X_0$

Funkcja odpowiedzi kalorymetru ELM jest liniowa:



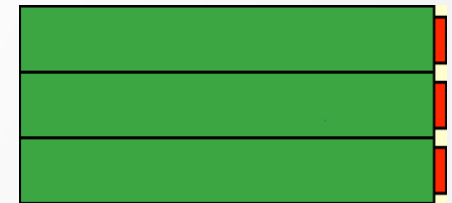
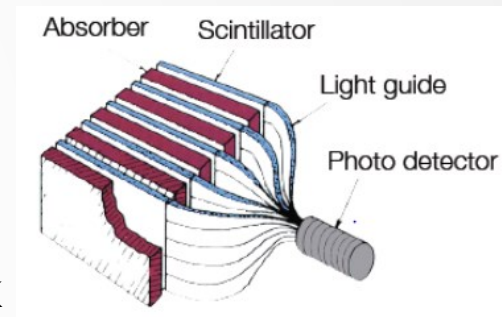
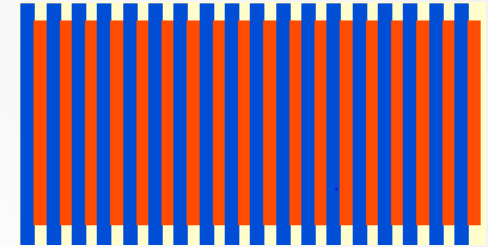
# Kalorymetry elektromagnetyczne

Kalorymetry próbkujące:

- warstwy pasywnego absorbenta (ołów, miedź) ułożone naprzemiennie z warstwami aktywnymi (krzem, scyntylatory, ciekły Ar).

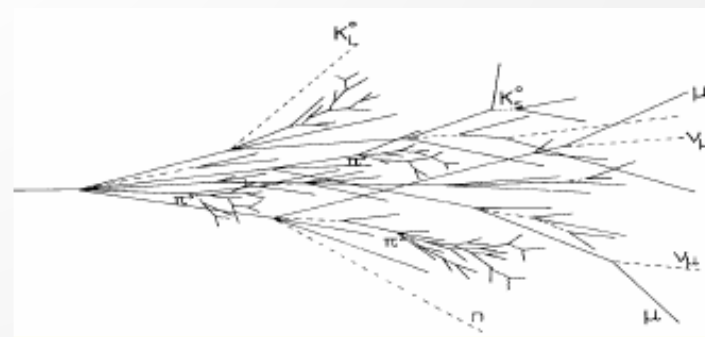
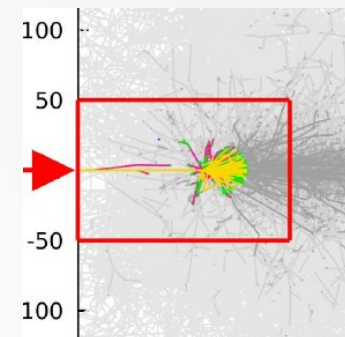
Kalorymetry homogeniczne (jednorodne):

- jeden ośrodek służy jako zarówno absorber jak detektor: gęste kryształy, szkło ołowiowe, ciekłe Xe lub Kr.
- Odczyt w detektorach gazowych lub fotopowielacze

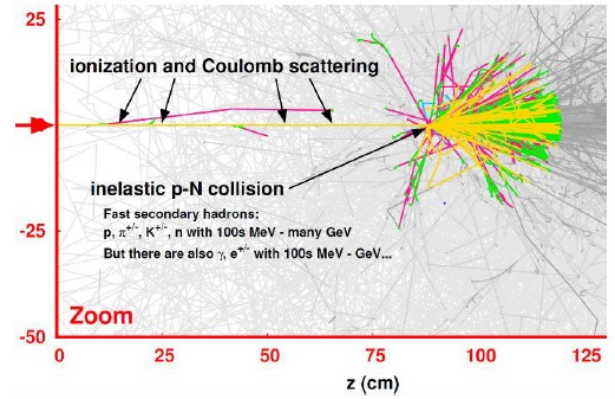
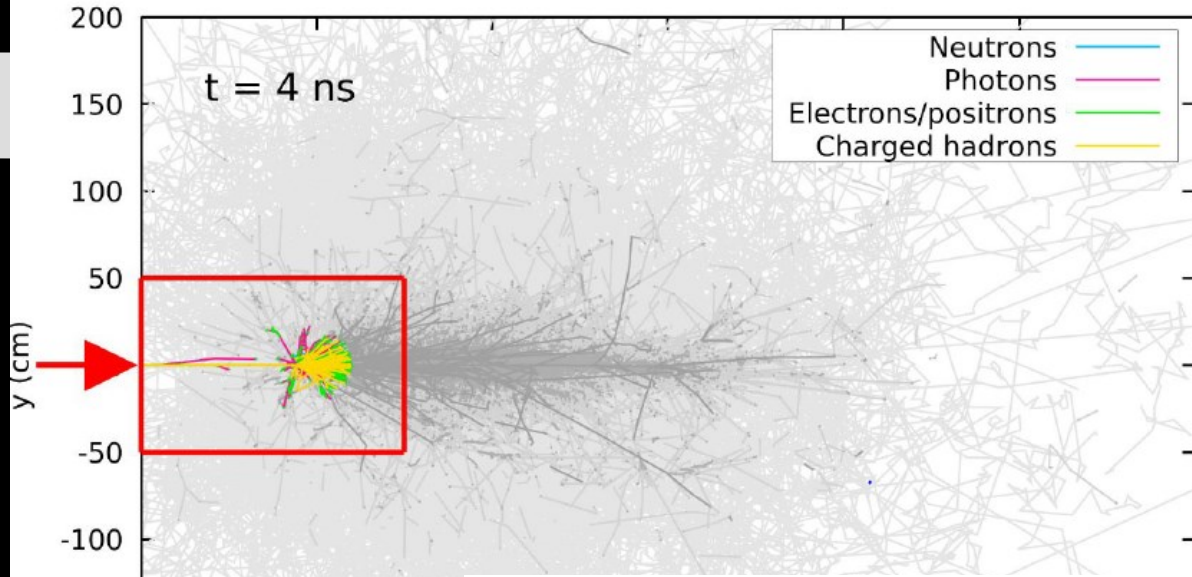


# Kalorymetry hadronowe

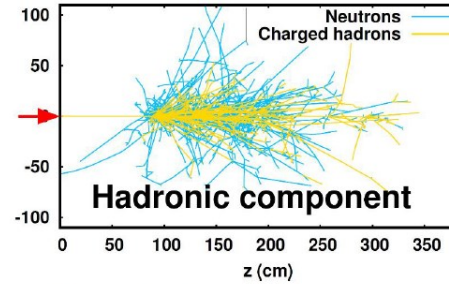
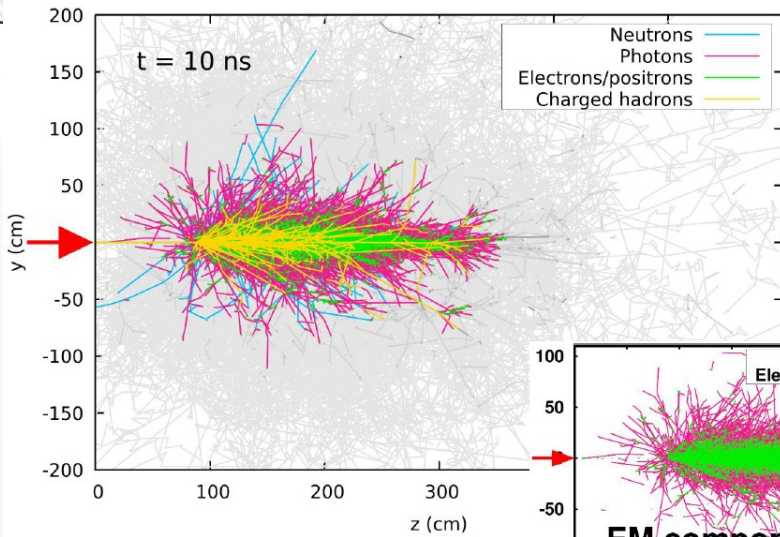
- ❑ W kalorymetrach hadronowych dominującym procesem są **silne oddziaływania**.
- ❑ Pomiary:
  - dla naładowanych hadronów: ostatni etap rekonstrukcji śladu,
  - dla neutralnych: jedyny sposób pomiaru energii.
- ❑ W oddz. jądrowych produkowane pęki hadronów:
  - liczne hadrony wtórne produkujące kaskady hadronów
  - hadrony rozpadające się elm ( $\pi^0, \eta$ ) produkują kaskady ELM
  - część energii jest absorbowana w energii wiązania lub jako en. odrzutu (energia nieobserwowalna)
- ❑ Rozmiary kaskady mierzone długością oddziaływania  $\lambda_i$



# one 450 GeV proton on aluminum

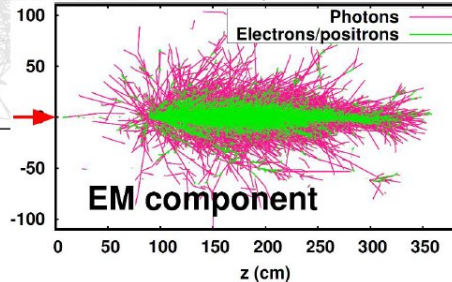


# one 450 GeV proton on aluminum

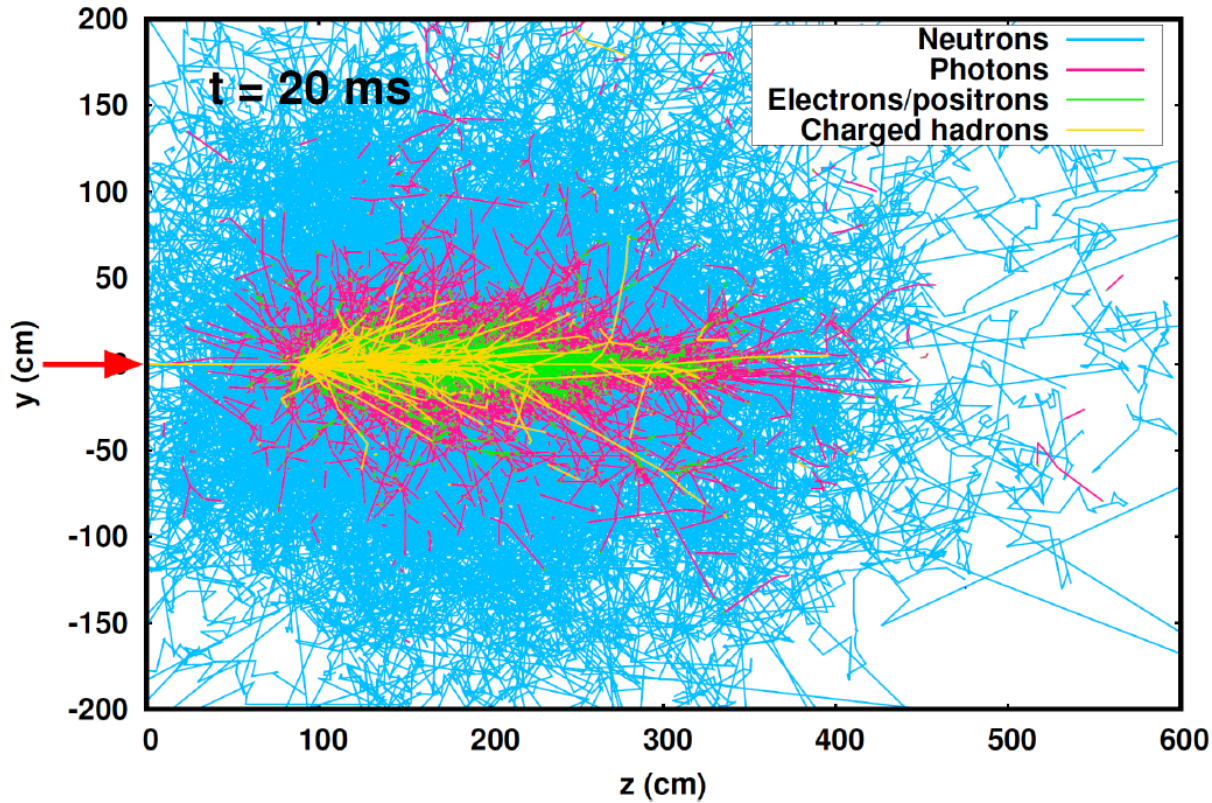


hadronic shower continues until particle energy falls below pion production threshold

non-negligible fraction of initial energy goes to mass by nuclear binding breaking



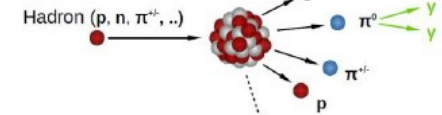
# Kaskady hadronowe



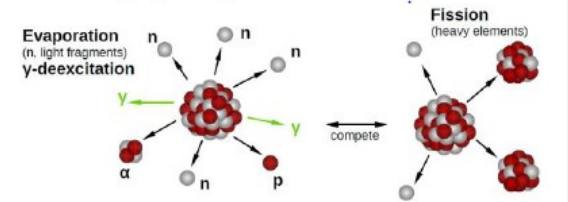
## high energy nuclear reaction

$$\lambda\rho = \frac{A}{\sigma_R N_A} \quad \sigma_R \simeq \pi r_0^2 A^{2/3}$$

Fast stage ( $10^{-22}$  s)



Slow stage ( $10^{-16}$  s)



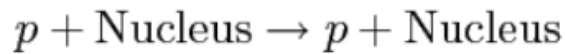
Residual nuclei can be unstable (radioactive)

Fission products can also undergo evaporation

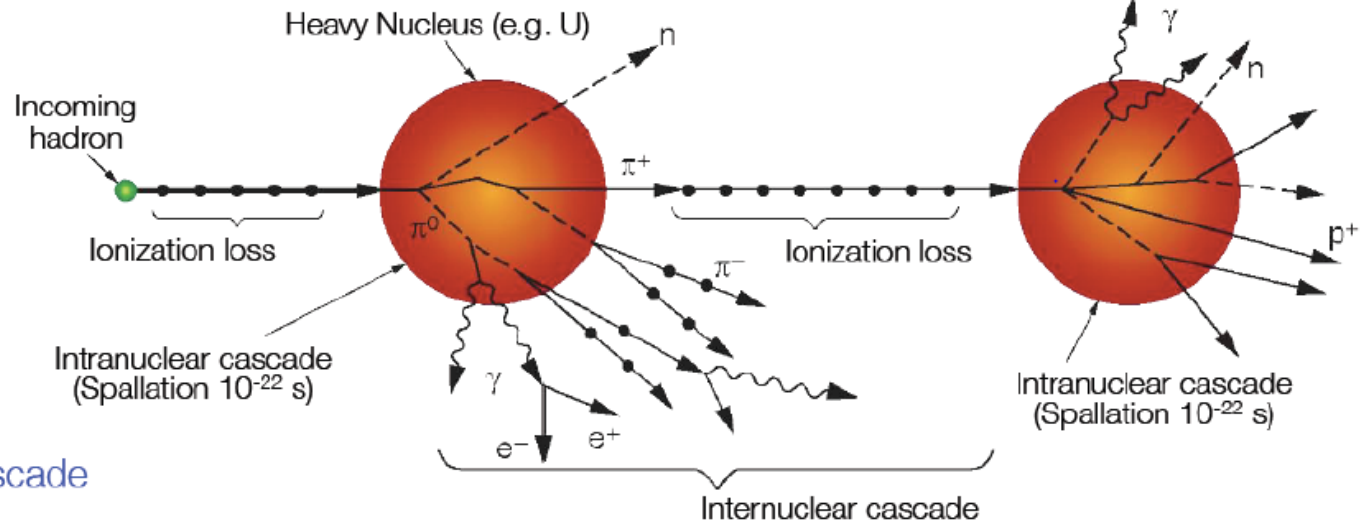
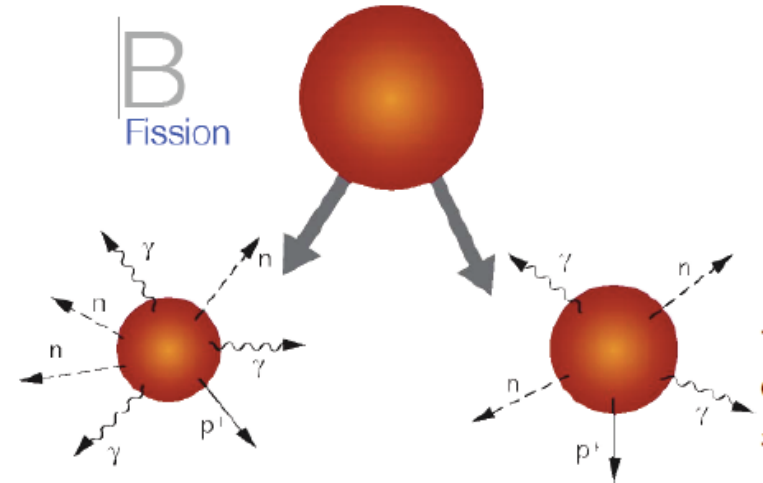
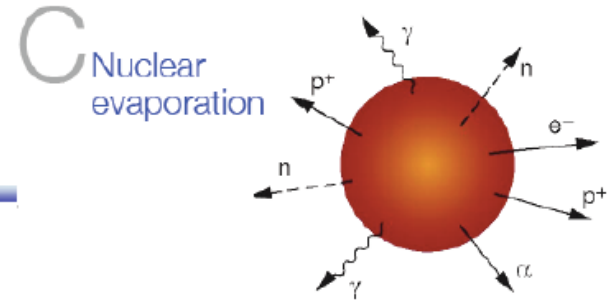
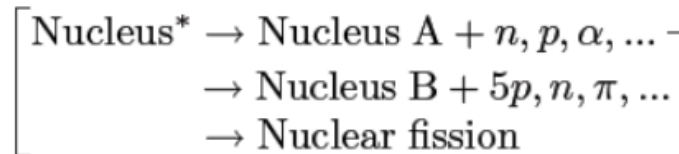
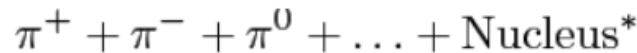
# Hadronic showers

## Hadronic interaction:

Elastic:



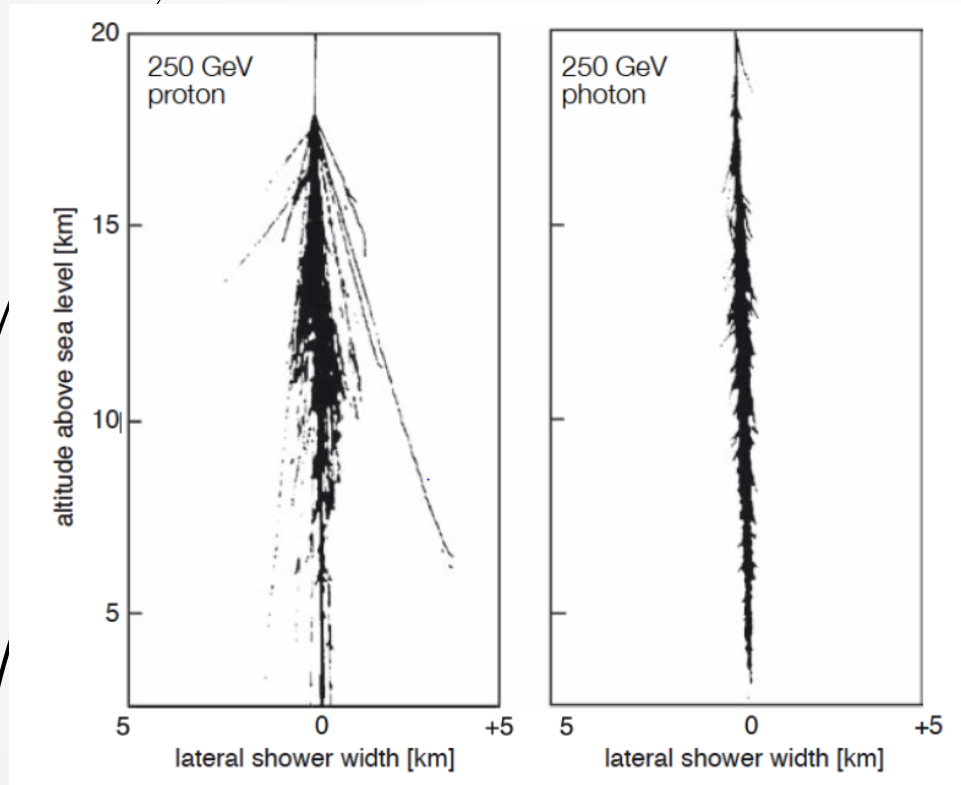
Inelastic:



**A** Inter- and intranuclear cascade

# Kaskady hadronowe vs ELM

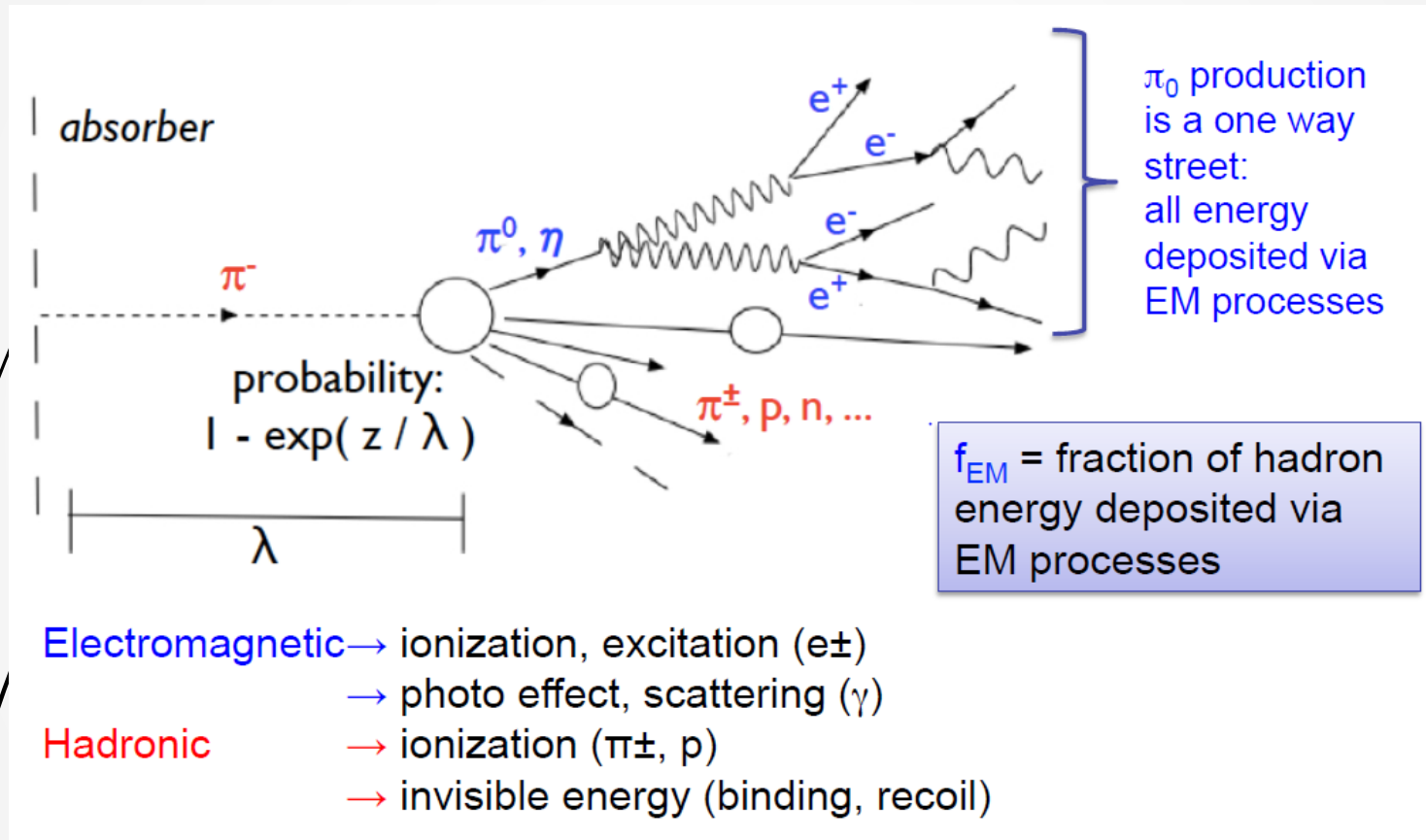
Symulacja (powietrze)



|        | $\lambda_{\text{int}}$ [cm] | $X_0$ [cm] |
|--------|-----------------------------|------------|
| Szint. | 79.4                        | 42.2       |
| LAr    | 83.7                        | 14.0       |
| Fe     | 16.8                        | 1.76       |
| Pb     | 17.1                        | 0.56       |
| U      | 10.5                        | 0.32       |
| C      | 38.1                        | 18.8       |

Kalorymetry hadronowe muszą mieć większe rozmiary niż ELM

# Kaskady hadronowe vs ELM



Energia unoszona przez neutrony jest często gubiona.  
W celu „kompensacji” dodawany jest uran, neutrony powodują rozszczepienie i część energii jest odzyskana.



# Kalorymetry hadronowe

- ❑ W kalorymetrach hadronowych dominującym procesem są silne oddziaływania.
- ❑ Odpowiedź KH nie jest liniowa.
- ❑ Rozdzielczość KH przybliża się jako:

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{a}{\sqrt{E}} + b$$

$$\sigma/E = (93.8 \pm 0.9)\%/\sqrt{E} \oplus (4.4 \pm 0.1)\%$$

- ❑ Kalorymetry hadronowe stosuje się do pomiaru energii pęków (jetów) hadronów, a nie do pomiaru energii indywidualnego hadronu

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{60\%}{\sqrt{E}} \oplus 3\%$$

