

# Detektory cząstek

## Elementy fizyki cząstek elementarnych

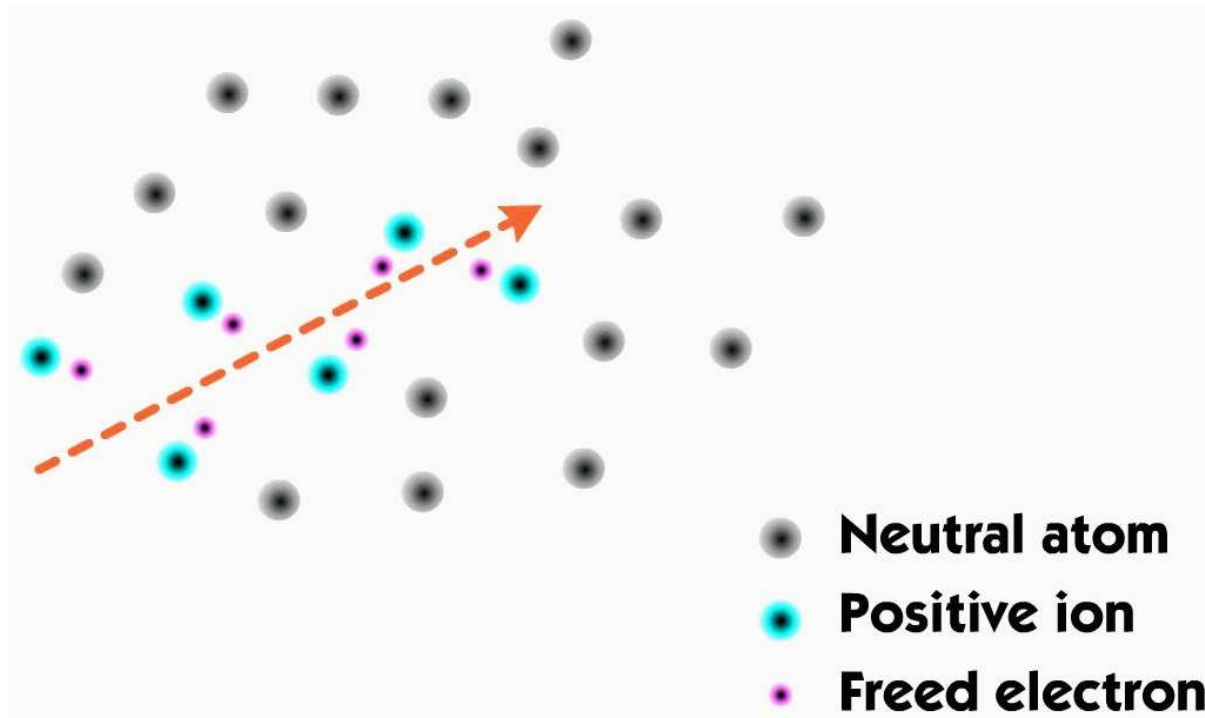
### Wykład III

- Detekcja cząstek
  - ⇒ detektory śladowe
  - ⇒ kalorymetry
- Detektory w dużych eksperymentach

# Detektory

## Jonizacja

U podstaw działania przeważającej większości detektorów cząstek elementarnych leży **zjawisko jonizacji**:



**Cząstka naładowana** przechodząc przez ośrodek **oddziałuje Kulombowsko** z elektronami i oddaje im część swojej energii **“wybijając”** je z atomów.

# Detektory

## Jonizacja

Straty energii na jonizację opisuje wzór Bethe-Blocha:

$$-\frac{dE}{dx} = \left(0.307 \frac{\text{MeV}}{\frac{g}{\text{cm}^2}}\right) z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \ln \frac{2m_e \beta^2 \gamma^2}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right]$$

gdzie:  $z$  - ładunek cząstki,

$\beta$  - jej prędkość

$I$  - energia jonizacji;

dla większości materiałów  $\sim 10$  eV

$\delta$  - poprawka związana

z polaryzacją ośrodka

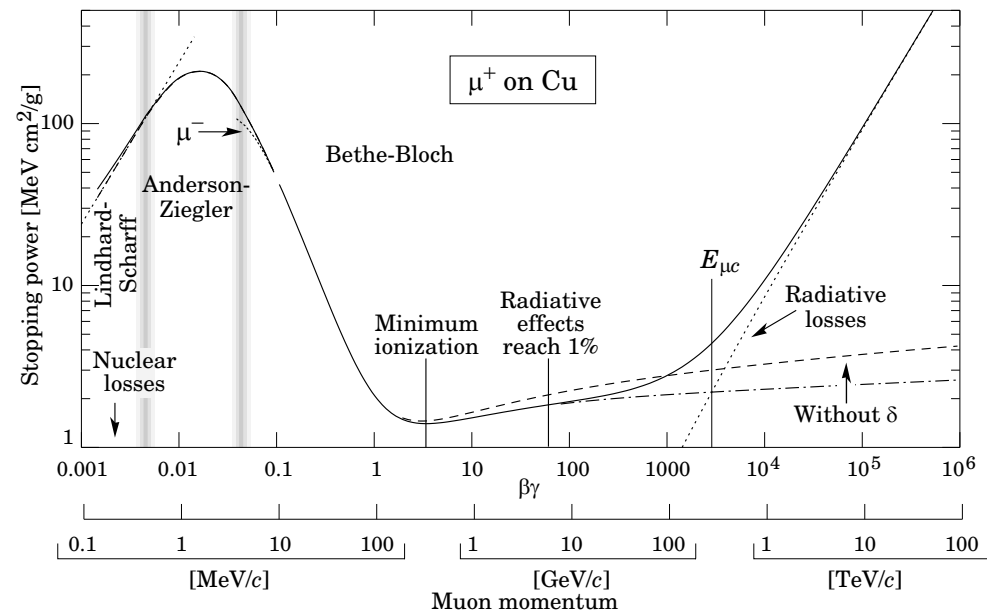
Przy założeniu  $m \gg m_e$

jonizacja zależy wyłącznie od  $\beta / \gamma$

Straty minimalne dla  $\gamma \sim 3$ :

$$-\frac{dE}{dx} \Big|_{min} \sim 2 \text{MeV} / \frac{g}{\text{cm}^2}$$

← wzór Bethe-Blocha →



# Detektory

## Jonizacja

Jonizacja może prowadzić do wielu różnorodnych procesów, będących podstawą detekcji cząstek.

### Metody “historyczne”:

- kondensacja pary  
⇒ komora mgłowa Wilsona (1911)
- reakcje chemicznych  
⇒ ślady w emulsji “fotograficznej” (~1930)  
(wciąż używane ze względu na precyzję)
- wrzenie cieczy  
⇒ komora pęcherzykowa (1952)
- wyładowanie elektryczne  
⇒ komora iskrowa

### Wykorzystywane współcześnie:

- świecenie (scyntyłacja)  
⇒ liczniki scyntyłacyjne
- przepływ prądu  
⇒ liczniki gazowe  
⇒ detektory półprzewodnikowe

# Detektory

## Licznik scyntylacyjny

W niektórych substancjach (kryształach, związkach organicznych) powrotowi wzbudzonego atomu do stanu podstawowego towarzyszy emisja fotonu - **scyntyłacja**

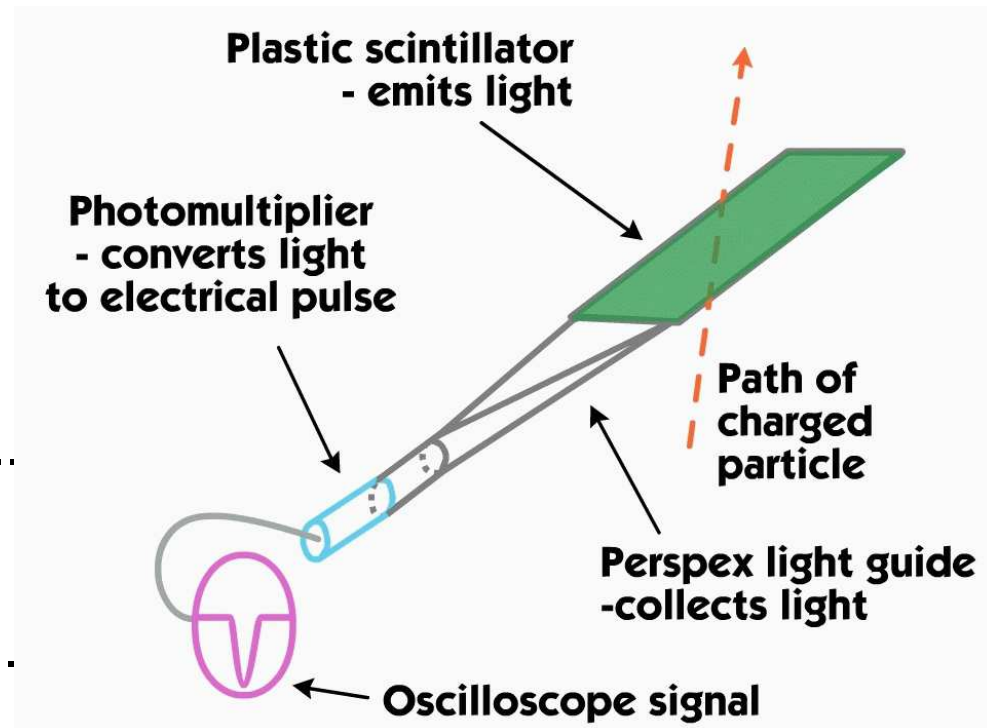
**Emitowane fotony** mogą być rejestrowane przez fotopowielacze, fotodiody lub inne elementy światłoczułe.

### Zalety:

tanie, szybka odpowiedź detektora (kilka  $ns$ )...

### Wady:

kłopotliwy tor optyczny, brak pomiaru pozycji...



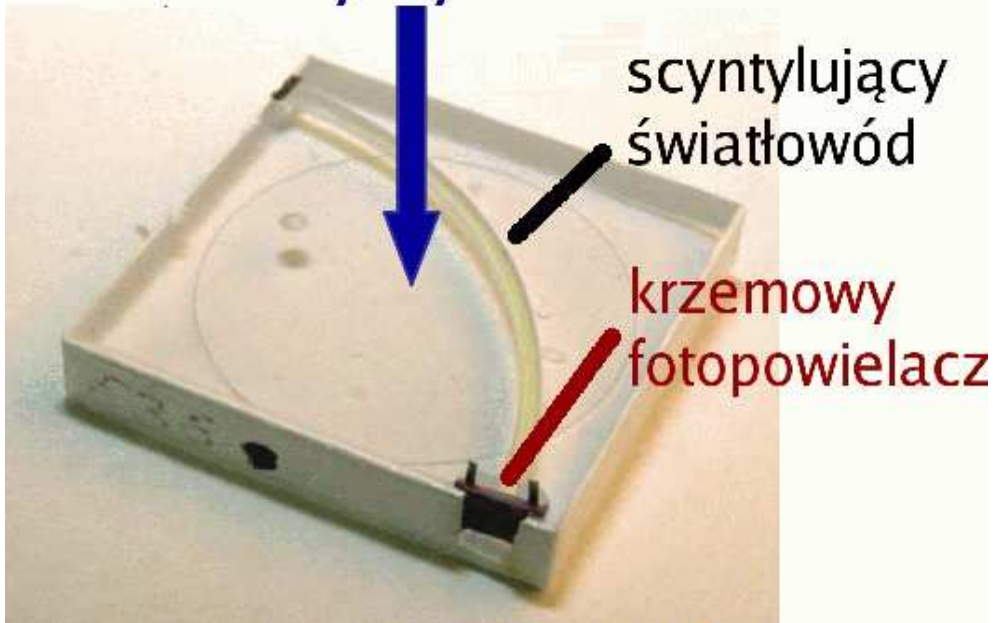
# Detektory

## Licznik scyntylacyjny

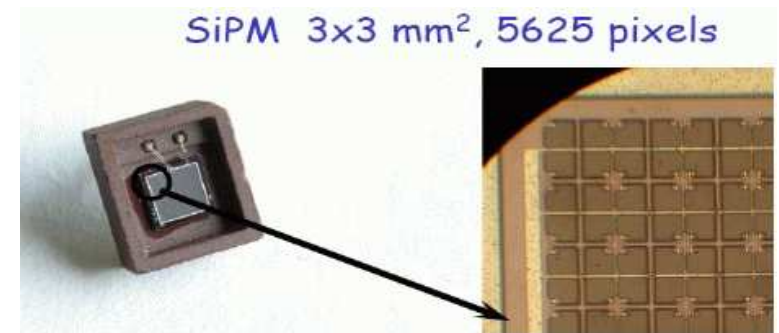
Ogromny postęp w dziedzinie urządzeń **opto-elektronicznych**, jaki dokonał się w ostatnich latach, doprowadził do ponownego wzrostu zainteresowania **scyntylatorami**.

Element odczytu prototypu kalorymetru dla ILC

### Scyntylator



### Krzemowy fotopowielacz



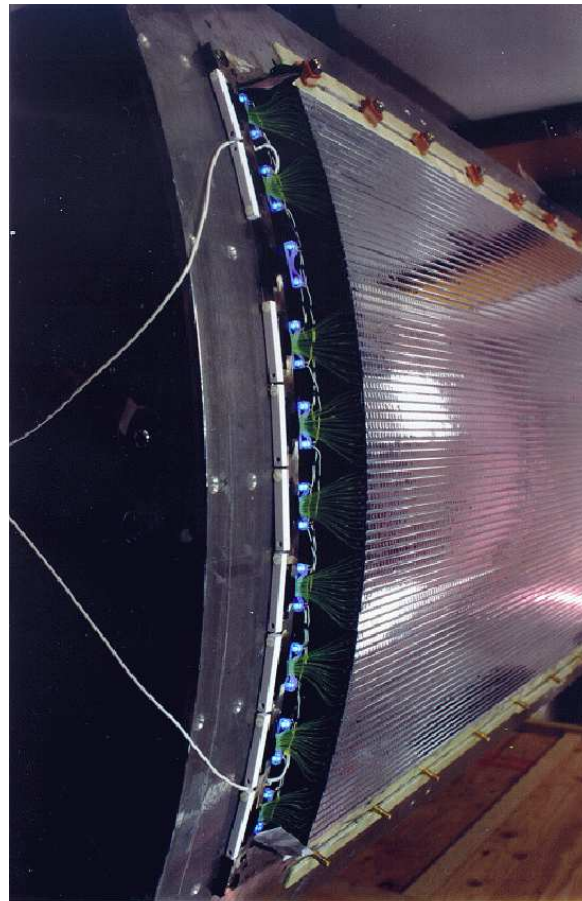
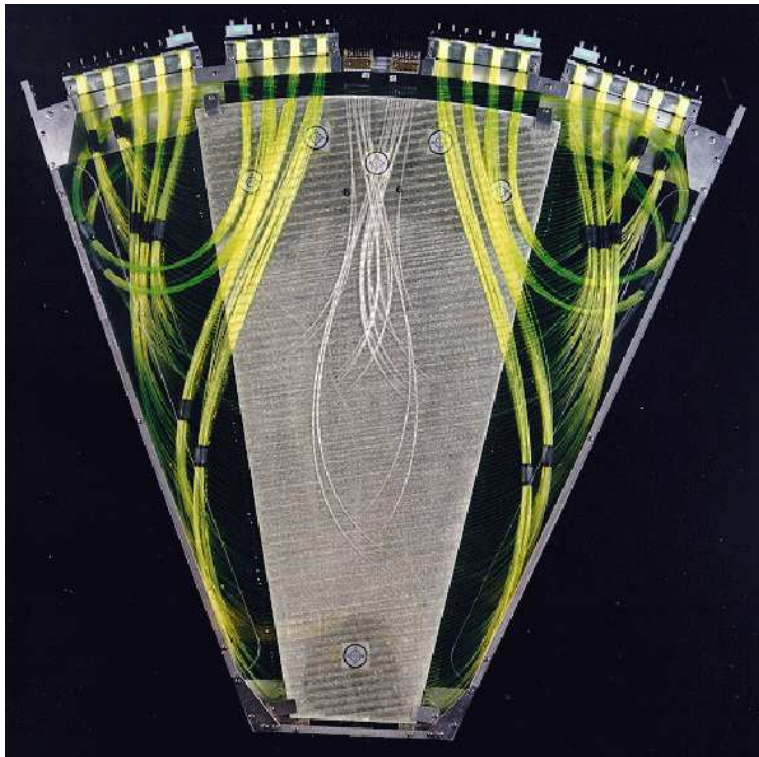
Jeszcze nie tak dokładny jak tradycyjny, ale szybki postęp...

# Detektory

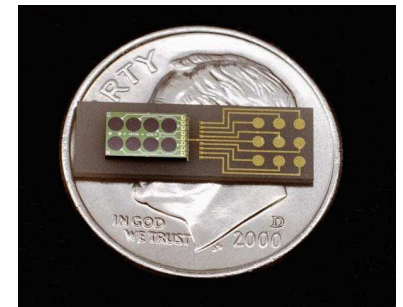
## Licznik scyntylacyjny

Miniaturyzacja odczytu otworzyła drogę do budowy **detektorów śladowych** opartych o **włókna scyntylujące**

## Eksperyment D0



Element odczytu  
(8 włókien)



# Zastosowania aplikacyjne

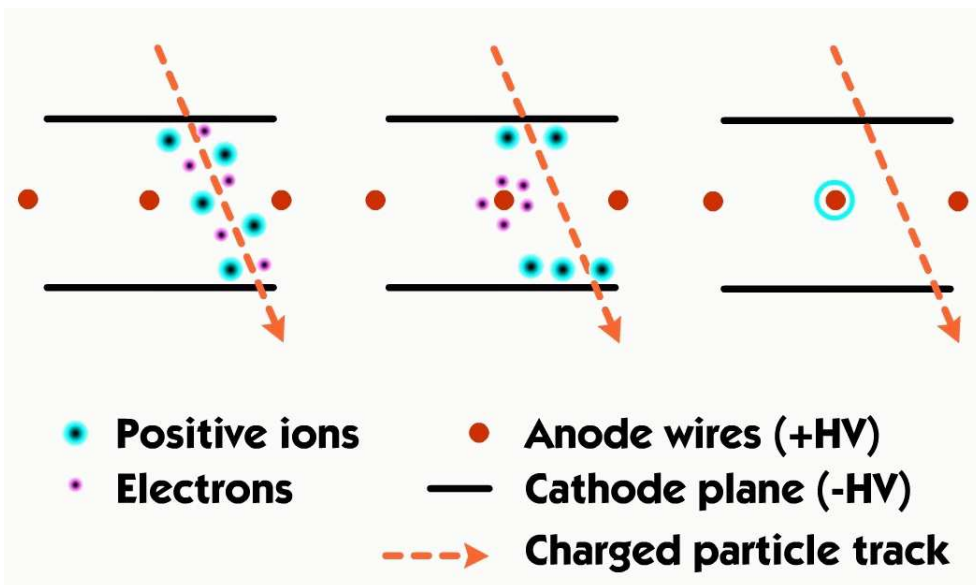




# Detektory

## Liczniki gazowe

Wielodrutowa komora proporcjonalna:



Jony i elektrony swobodne, powstałe w gazie w wyniku jonizacji, dryfują w kierunku odpowiednich elektrod.

Pole elektryczne jest najsilniejsze przy drutach anodowych.

Przy odpowiednim doborze napięcia może tam dojść do wtórnych jonizacji i kaskadowego powielania ładunku poprzez przyspieszane elektrony

⇒ “wzmocnienie gazowe” ( $\sim 10^3 - 10^6$ )

Nagroda Nobla 1992 - Georges Charpak:

“for his invention and development of particle detectors, in particular the multiwire proportional chamber” (MWPC)

# Detektory

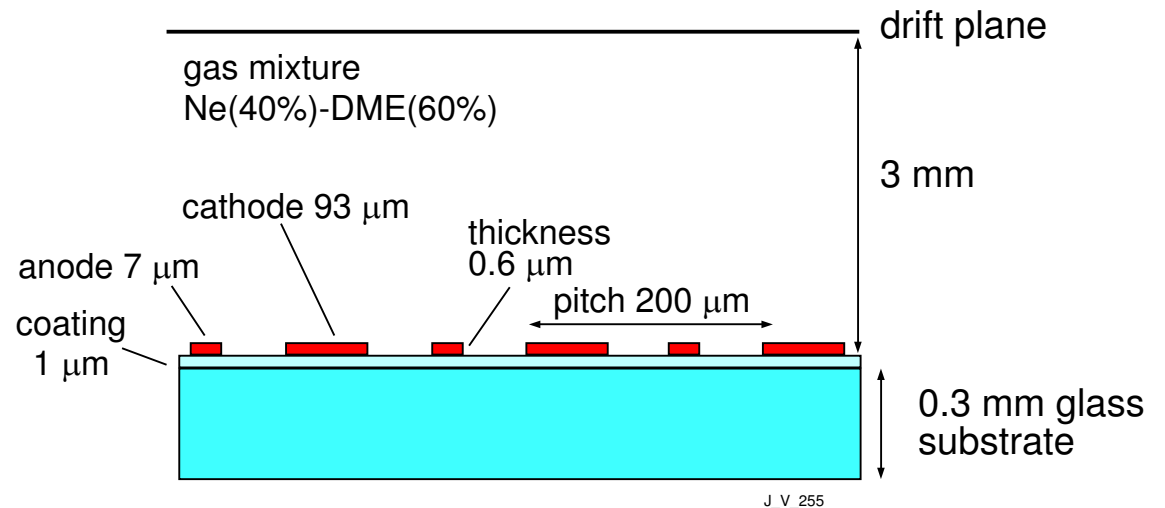
## Liczniki gazowe

Słabym punktem komory wielodrutowej są... **druty**.

Ze względu na działające **siły** nie mogą być zbyt blisko siebie  
⇒ **ograniczona rozdzielczość przestrzenna** ( $\geq 1\text{mm}$ )

Wielodrutowe komory MWPC, oparte na pomysłe Czarpak'a, stosowane są coraz rzadziej.

Nowe pomysły ⇒ **Micro-Strip Gas Chamber (MSGC)**:



zamiast drutów - **metalowe paski** napylone na izolatorze

~ “pół” komory wielodrutowej

Odległości między paskami mogą być dużo mniejsze  
⇒ **dokładniejsze pomiary torów** ( $\sim 100\mu\text{m}$ )

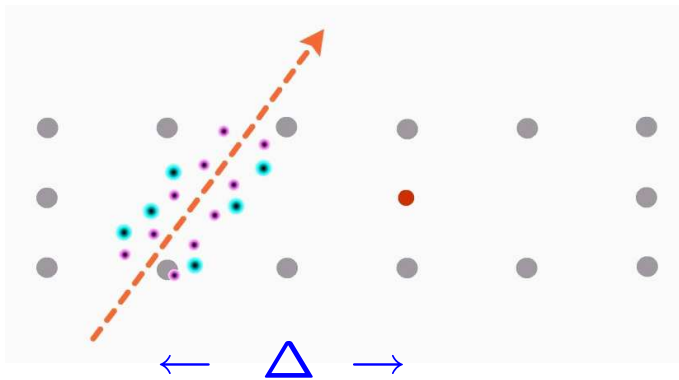
“pixle” zamiast pasków ⇒ **możliwa rekonstrukcja 2-D !!!**

# Detektory

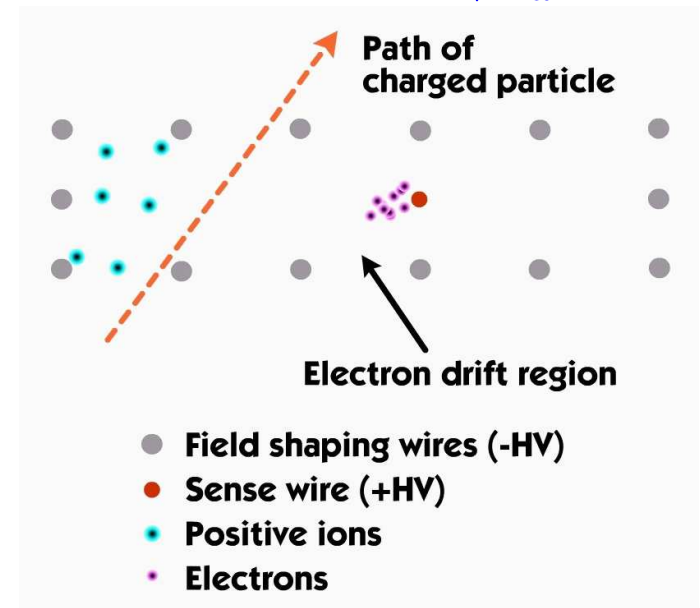
## Komora dryfowa

Komora proporcjonalna z wydłużonym obszarem dryfu:

$t = 0$



$t = \Delta t \approx \Delta / v_d$



Znając **prędkość dryfu** elektronów w komorze  $v_d$  oraz **opóźnienie impulsu** z komory  $\Delta t$  możemy wyznaczyć pozycję cząstki...

Typowe prędkości dryfu:  $v_d \sim 10^5 \text{ m/s} = 100 \mu\text{m/ns}$

Dokładność pomiaru czasu  $\sim 1 \text{ ns} \Rightarrow$  dokładność pozycji  $\sim 100 \mu\text{m}$

**Wada: pomiar tylko w jednym wymiarze...**

# Detektory

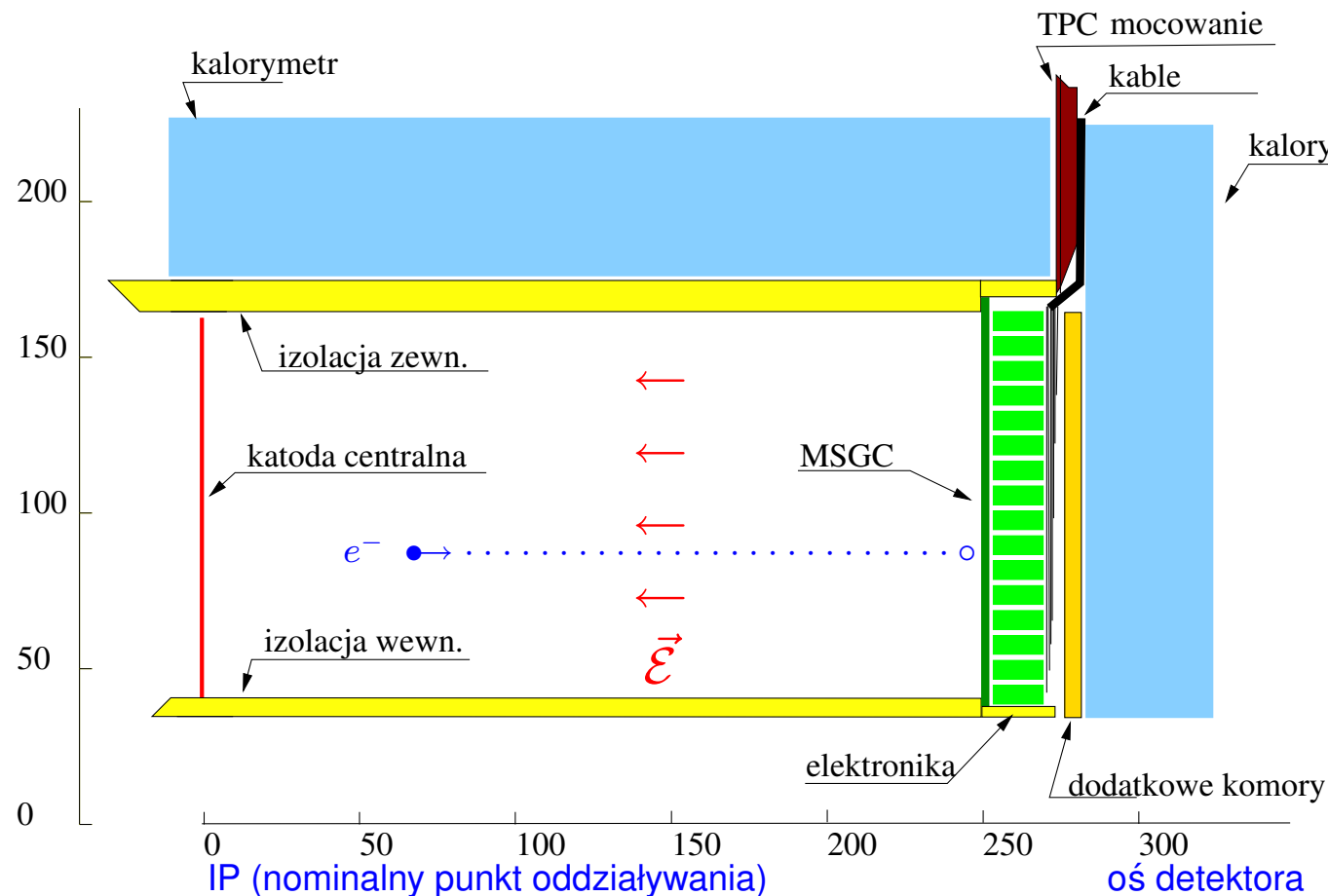
## Komora TPC

Time Projection Chamber -  
“komora projekcji czasowej”

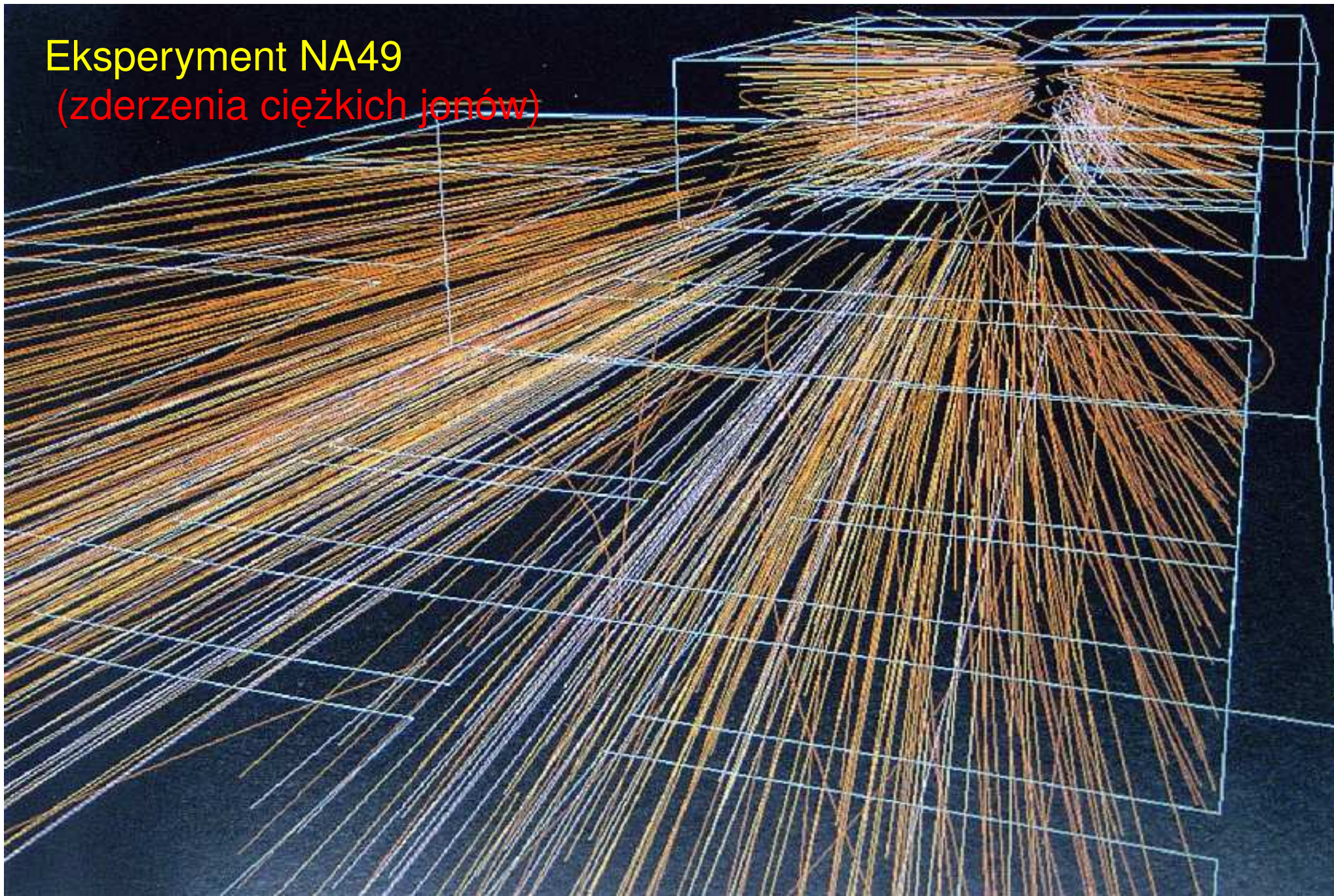
Pełna, trójwymiarowa (3D)  
rekonstrukcja toru cząstki  
na podstawie:

- czasu dryfu elektronów  
(1 współrzędna)
- miejsca rejestracji  
elektronów w MSGC  
(2 współrzędne)

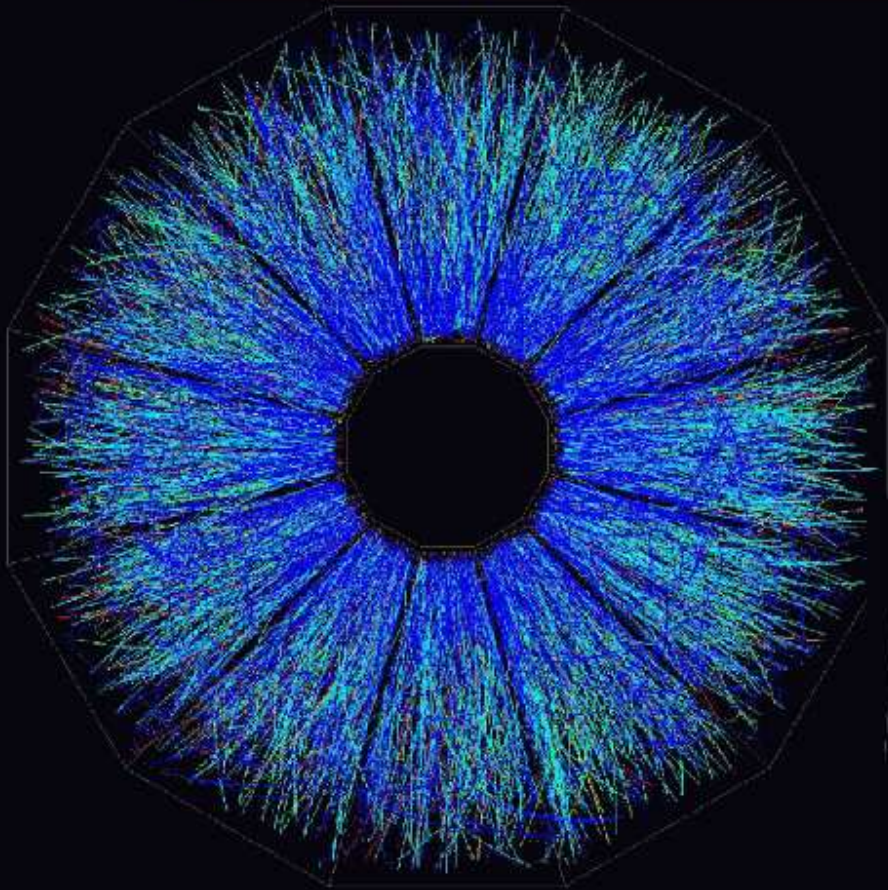
Schematyczny rysunek TPC (1/4 detektora):



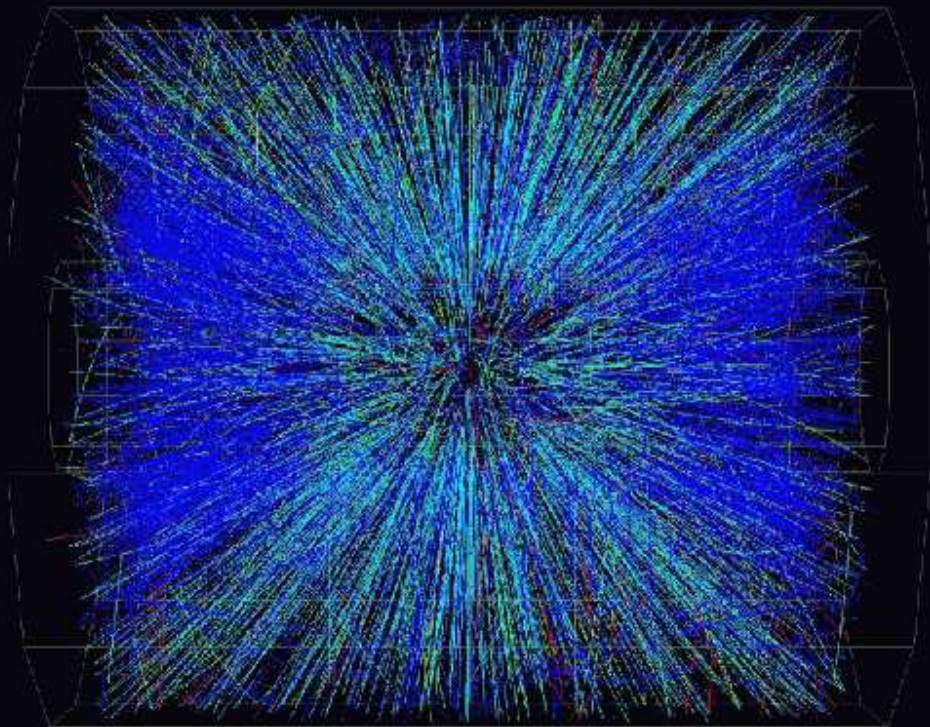
**Eksperyment NA49**  
(zderzenia ciężkich jonów)



Au on Au Event at CM Energy ~ 130 A-GeV



Central Event

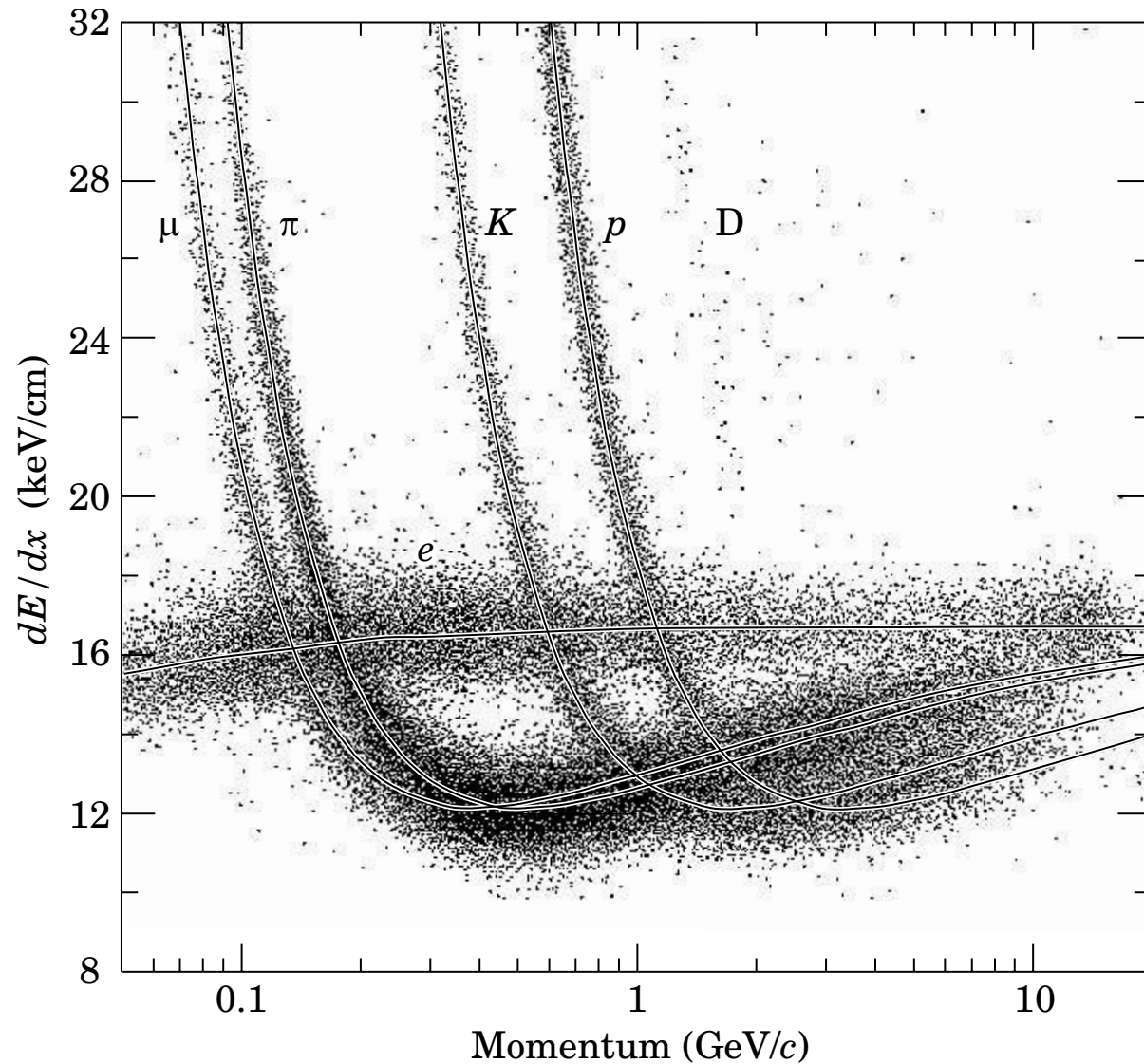


color code  $\Rightarrow$  energy loss

# Detektory

## Komora TPC

Jednoczesny pomiar **pędu** (z zakrzywienia toru w polu magnetycznym) i gęstości strat na **jonizację** pozwala na (częściową) **identyfikację cząstek**:

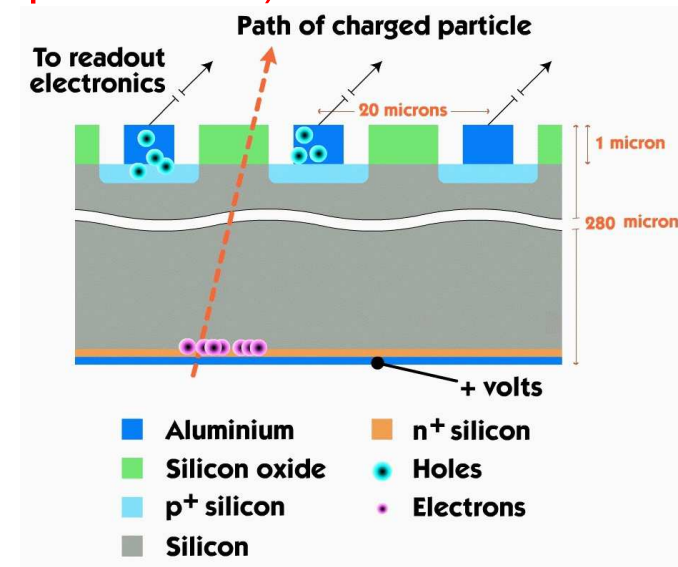
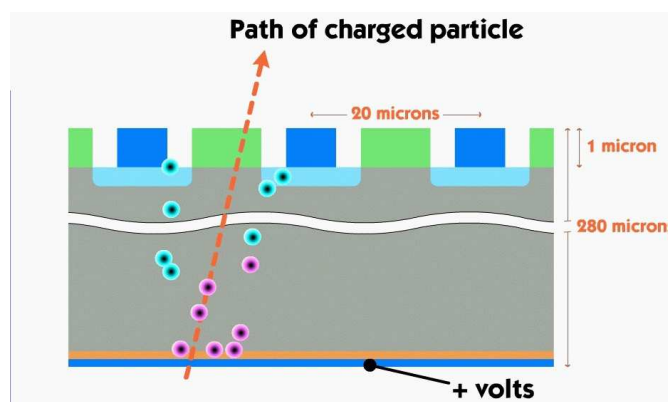
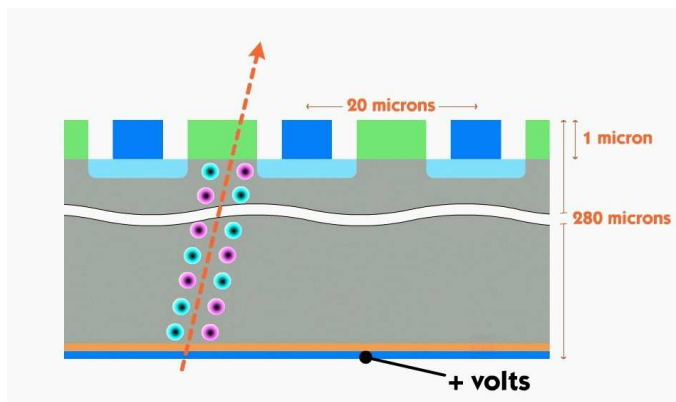


# Detektory

## Detektory półprzewodnikowe

Są coraz powszechniej używane w fizyce cząstek.

Przykład konstrukcji detektora krzemowego (**silicon micro-strip detector**):



W wyniku **jonizacji** powstają swobodne **elektrony** i **dziury**.

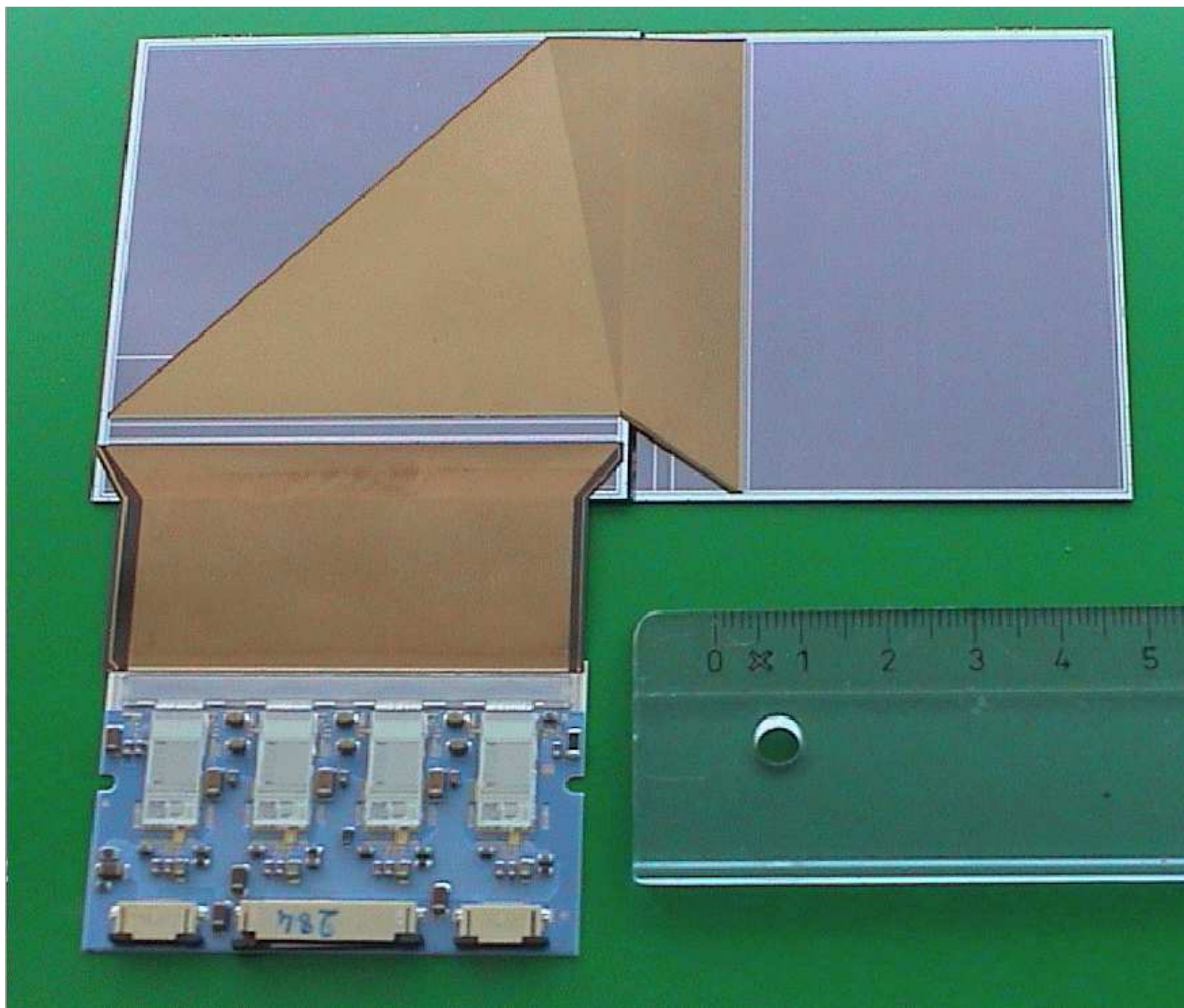
⇒ mierzymy **przepływ ładunku** przez spolaryzowane w kierunku zaporowym **złącze pn** (diode).

Warstwa typu *p* w postaci **wąskich pasków** ⇒ bardzo **dokładny pomiar pozycji** cząstki ( $< 10\mu m$ )

Detektory półprzewodnikowe mogą także wykorzystywać inne technologie, np. układy typu CCD (powszechnie używane w kamerach cyfrowych).



Pojedynczy  
segment  
detektora  
wierzchołka  
eksperymentu  
**ZEUS**



# Silicon Microstrip Tracker

## Eksperyment D0



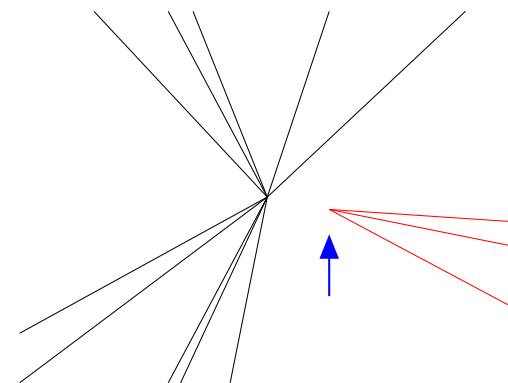
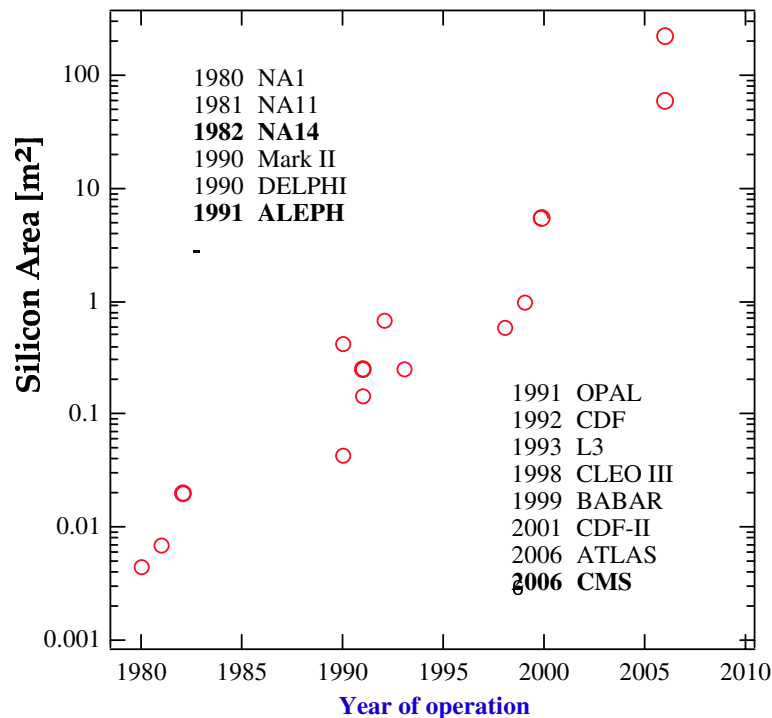
# Detektory

## Detektory półprzewodnikowe

Dzięki rozwojowi technologii możemy budować **coraz tańsze** i **coraz większe** detektory:

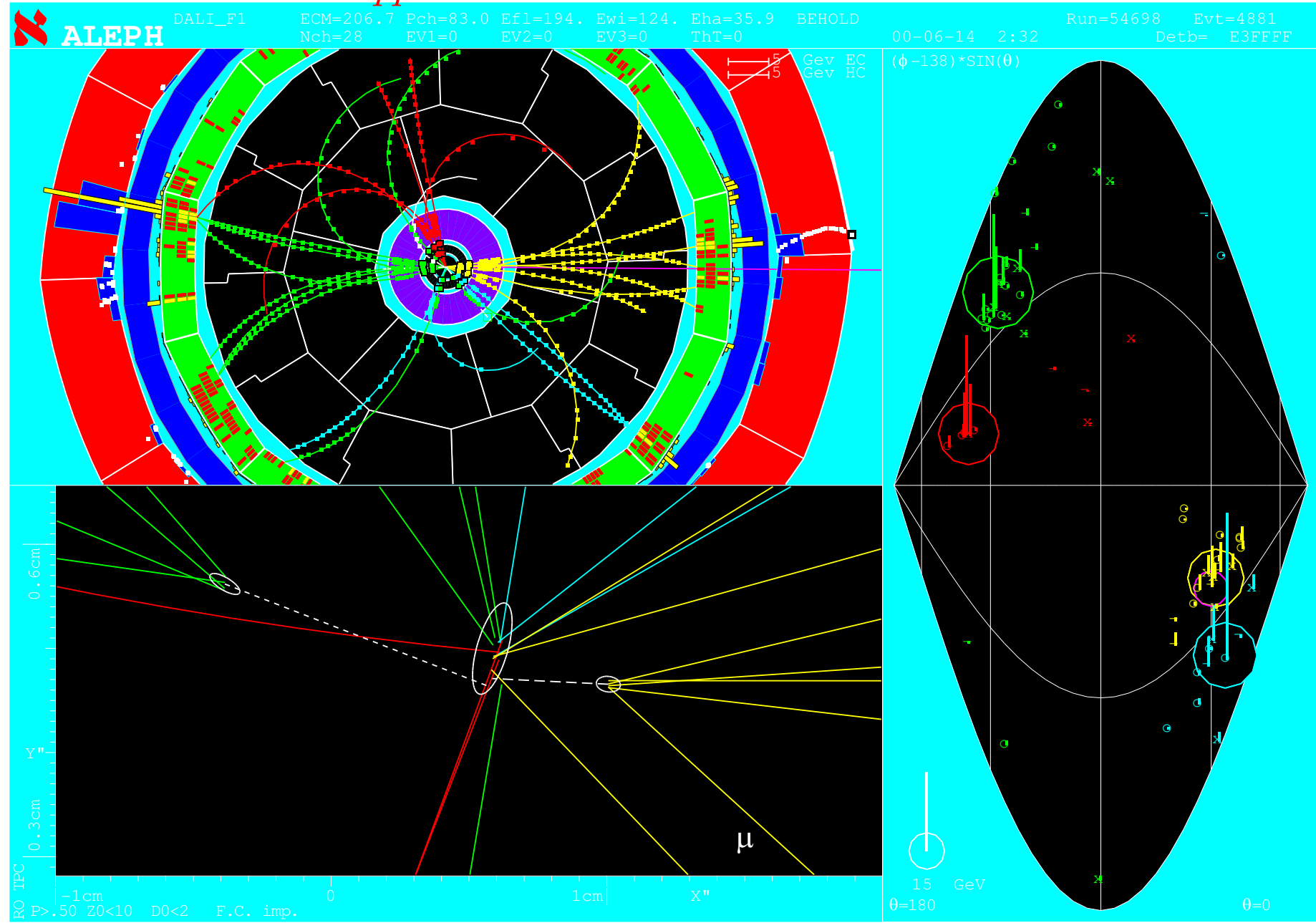
Detektory półprzewodnikowe są używane głównie do **pomiaru wierzchołka** oddziaływania i **wierzchołków wtórnych**

⇒ **identyfikacji mezonów B**  
(kwarku  $b$ ;  $c\tau \sim 0.5\text{mm}$ )



$e^+e^- \rightarrow Zh \rightarrow b\bar{b} q\bar{q}$

zrekonstruowane dwa wtórne wierzchołki



# Detektory

Detektory śladowe (mierzące tory cząstek) pozwalają na pomiar pędu **jedynie dla cząstek naładowanych** (!)

Aby jak najmniej zakłucać lot cząstki detektory śladowe powinny mieć jak najmniejszą gęstość/grubość

Cząstki **neutralne** nie oddziałują praktycznie w detektorach śladowych

⇒ pozostają **“niewidoczne”**

⇒ musimy mieć **inną metodę** dla ich pomiaru

Aby zmierzyć energię **cząstek neutralnych** lub pęków (ang. **jetów**) cząstek (zawierających cz. naładowane i neutralne) budujemy

# Kalorymetry

# Detektory

## Kalorymetry

Pomiar energii w kalorymetrze polega na całkowitej absorbcji cząstki padającej i zamianie jej energii na mierzalny sygnał.

Sygnał pochodzi od kaskady cząstek wtórnych, powstających w oddziaływaniu cząstki pierwotnej z gęstym materiałem kalorymetru.

Cząstki wtórne “dzielą się” energią cząstki pierwotnej, a jonizując ośrodek prowadzą do powstania sygnału proporcjonalnego do początkowej energii.

Rodzaje kaskad (i kalorymetrów):

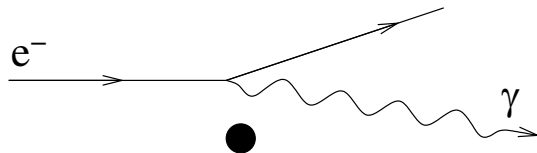
- elektromagnetyczne (elektronowo-fotonowe) - wywoływane przez elektrony, pozytony, fotony,  $\pi^0$
- hadronowe - wywoływane przez inne, silnie oddziałujące cząstki

# Detektory

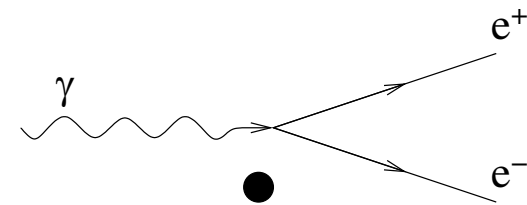
## Kalorymetry elektromagnetyczne

Dla energii powyżej  $E_c \sim 10$  MeV:

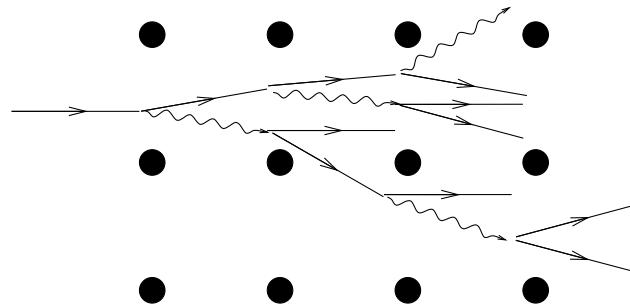
elektrony tracą energię prawie wyłącznie na **promieniowanie hamowania**



fotonów ulegają **konwersji na pary  $e^+ e^-$**



Wysokoenergetyczny **elektron lub foton** wpadając do kalorymetru wywołuje **kaskadę** składającą się z  $N \sim E/E_c$  cząstek



Promieniowanie hamowania i kreacja par nie zmieniają energii kaskady

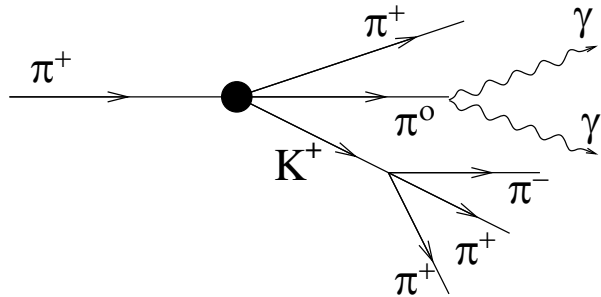
⇒ 100% tracone na **jonizację** ośrodka

⇒ możliwy jest bardzo **dokładny pomiar energii**.

# Detektory

## Kalorymetry hadronowe

Oddziaływania silne hadronów z jądrami ośrodka prowadzą głównie do produkcji pionów ( $\pi^\pm$ ,  $\pi^0$ ) i kaonów ( $K^\pm$ ,  $K^0$ ).



Większość energii początkowej cząstki zostaje ostatecznie zużyta na jonizację ośrodka dając mierzony sygnał.

Jednak część energii “gubiona” jest na wzbudzenia i rozbitcie jąder oraz neutrina produkowane w rozpadach.

Z uwagi na duże fluktuacje w rozwoju kaskady prowadzi to do niepewności w pomiarze energii:

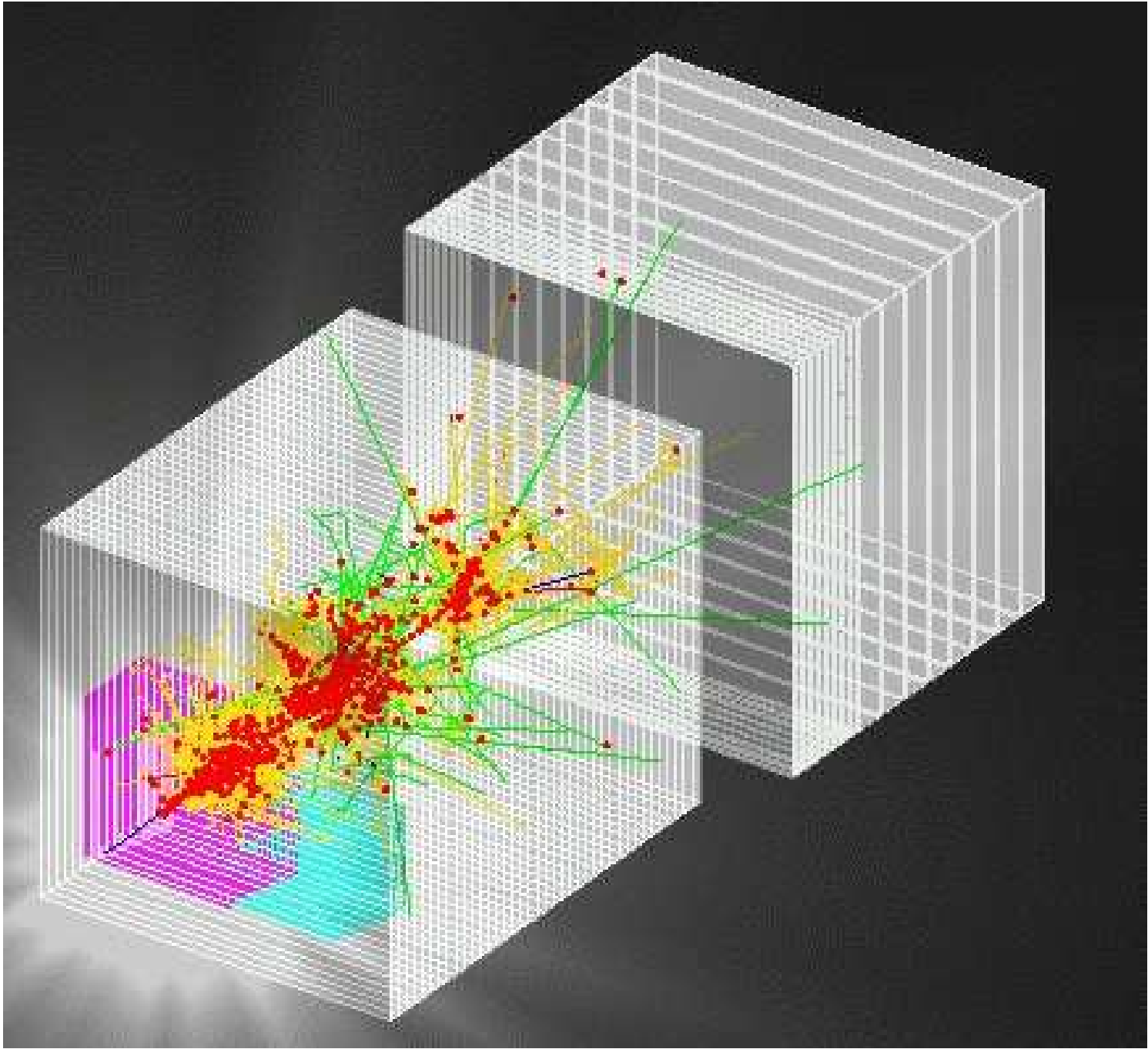
$$\frac{\sigma_E}{E} \sim \frac{50\%}{\sqrt{E[\text{GeV}]}}$$

Stosując odpowiednie materiały (np. uran) możemy “odzyskać” część energii traconej w procesach jądrowych i poprawić dokładność pomiaru (tzw. kalorymetry kompensujące).

Możemy też starać się zmierzyć udział różnych procesów w rozwoju kaskady (“tracking calorimeter”)



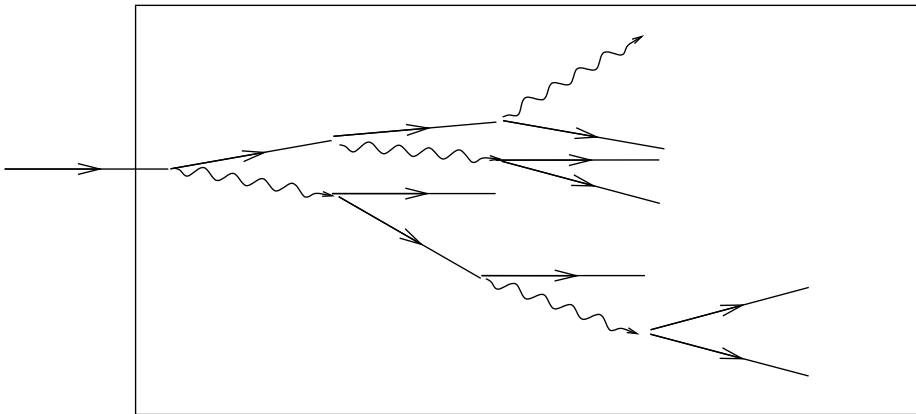
Symulacja rozwoju  
kaskady  
hadronowej



# Detektory

## Kalorymetry jednorodne

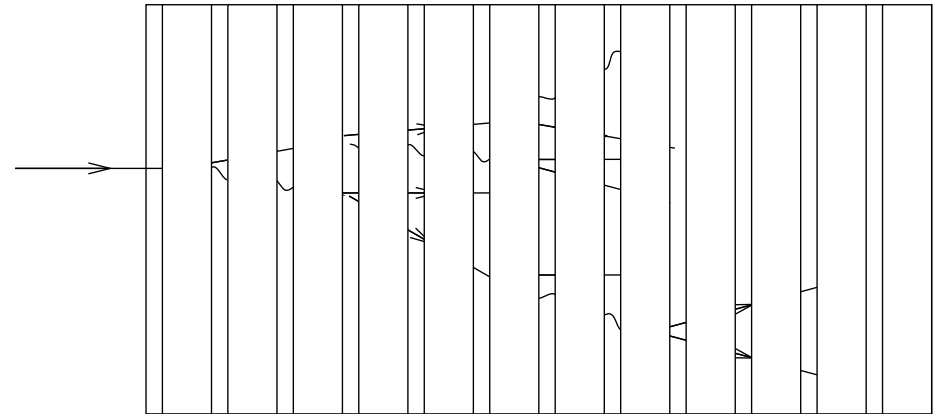
Kaskada rozwija się wyłącznie w materiale aktywnym (pozwalającym na pomiar strat energii):



Precyzyjny pomiar, ale kalorymetr **duży** i **kosztowny** (materiały aktywne mają naogół niewielkie gęstości)

## Kalorymetry próbkujące

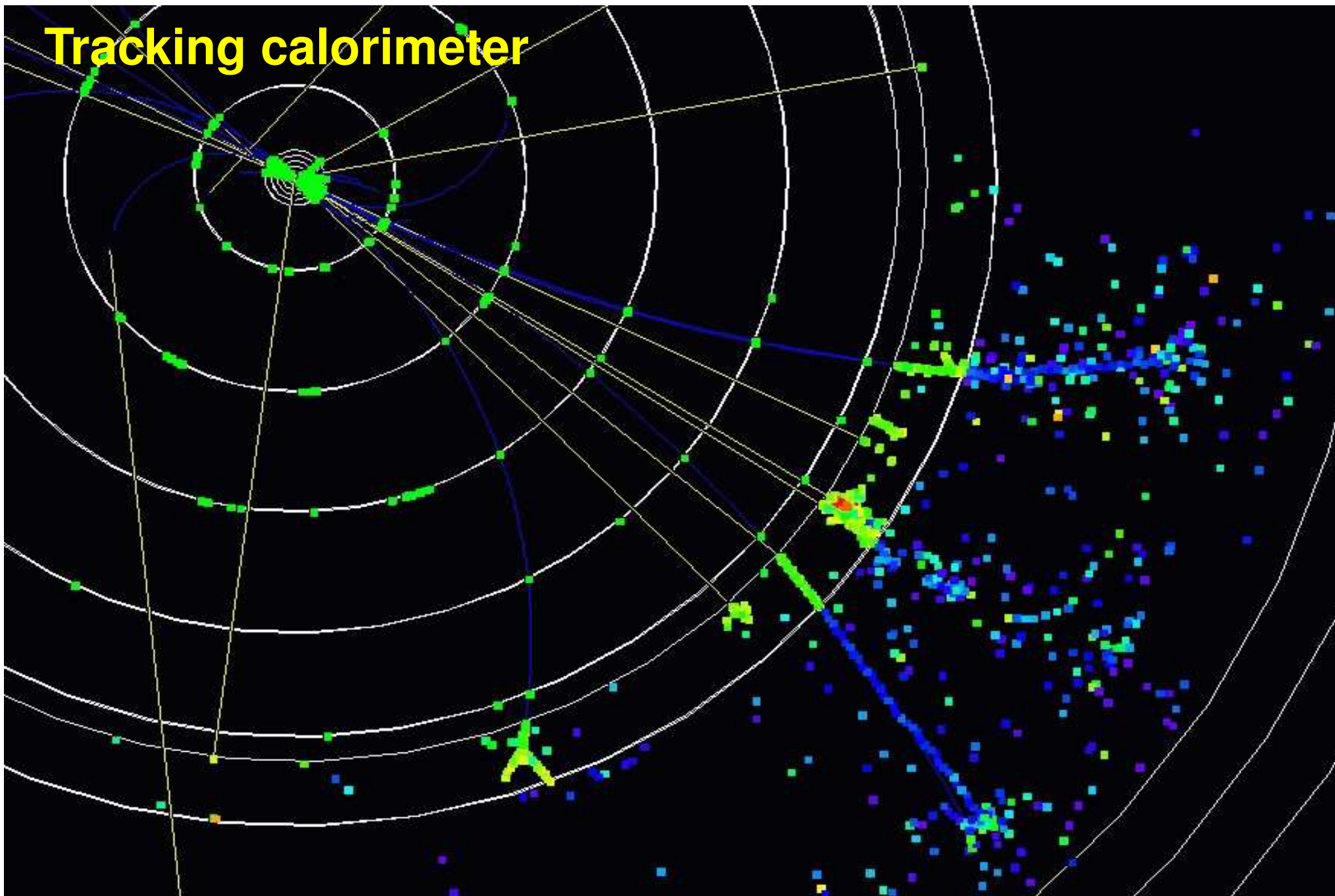
Materiał **aktywny** (pomiar) przekładany warstwami gęstego **absorbera** (rozwój kaskady):



Dodatkowe fluktuacje **pogarszają pomiar**, ale kalorymetr jest dużo **mniejszy** i **tańszy**

Wpływ fluktuacji maleje ze wzrostem energii

# Tracking calorimeter



# Detektory

Detektory są jak ogry...

Ogry są jak cebula...

Cebula ma warstwy...

Ogry mają warstwy...

**Detektory mają warstwy...**



# Detektory

## Struktura warstwowa

Współczesne eksperymenty fizyki wysokich energii (zwłaszcza te na wiązkach przeciwbieżnych) są naogół zbudowane z **wielu różnorodnych elementów**.

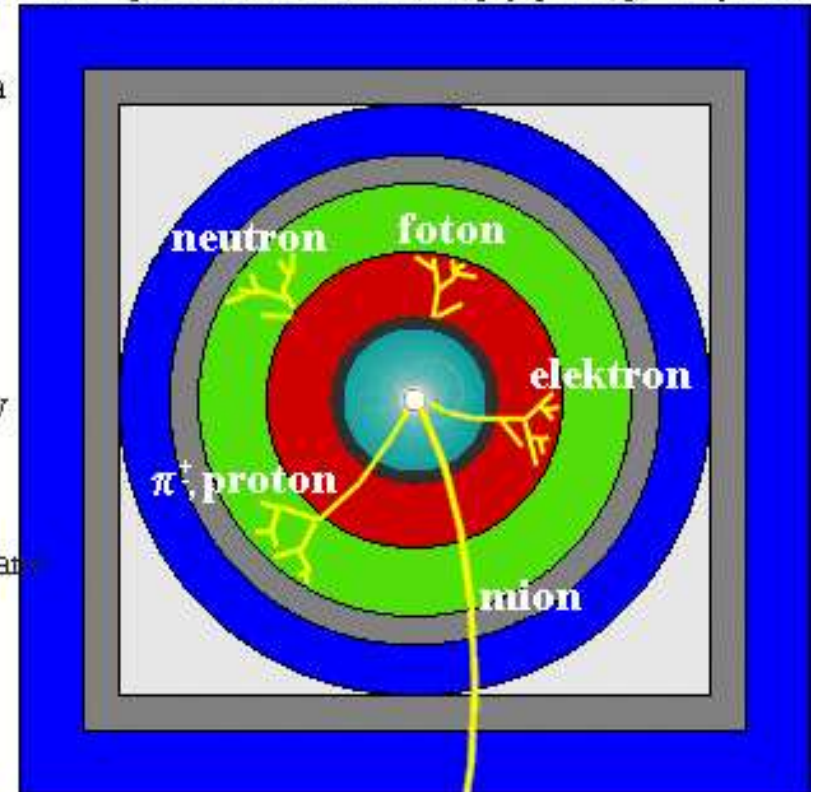
Ułożone **jeden za drugim** detektory umożliwiają optymalny pomiar **wszystkich rodzajów cząstek** i ich (zwykle częściową) identyfikację.

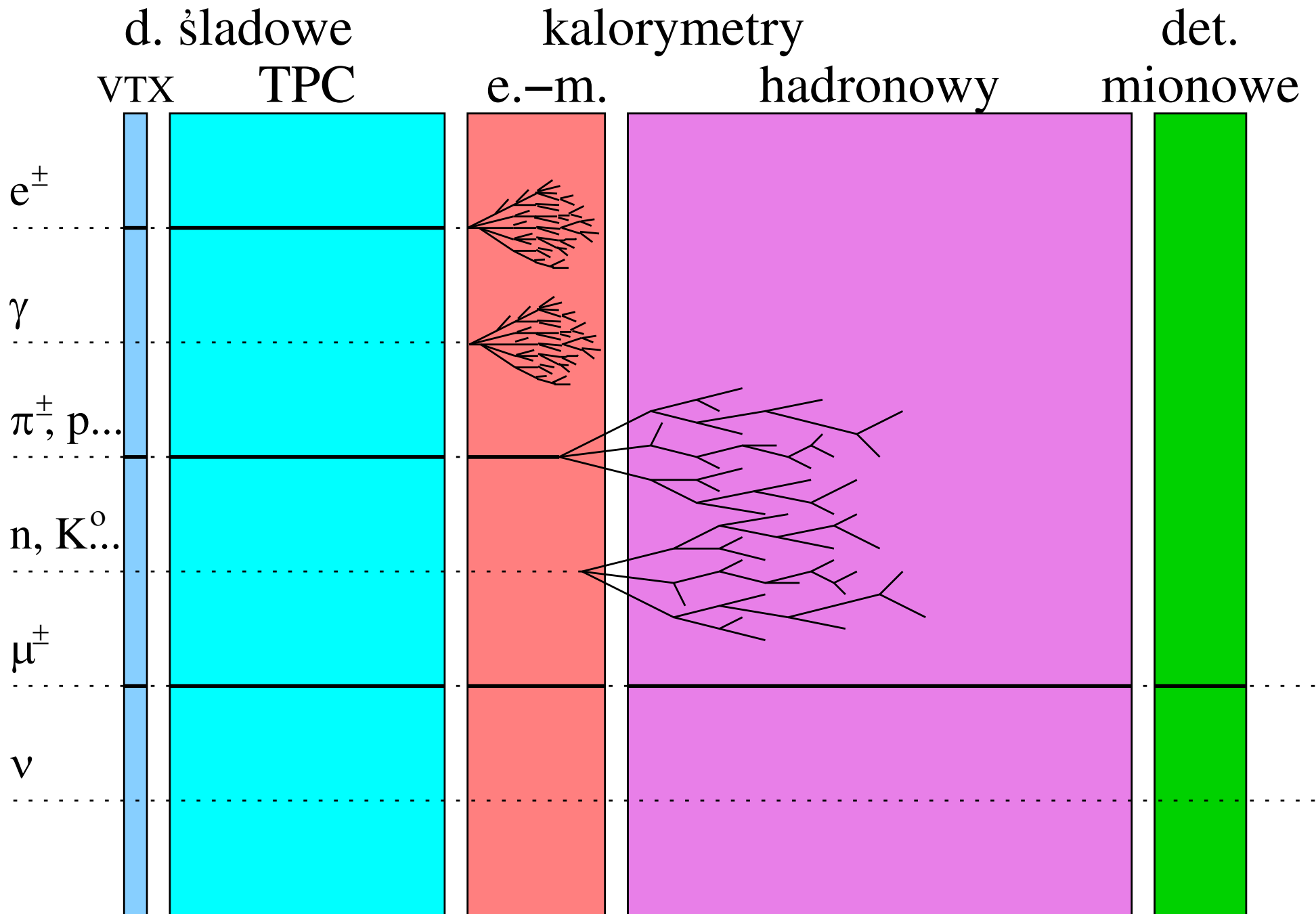
**Kaskady elektromagnetyczne** są dużo krótsze niż **hadronowe**, gdyż naogół droga radiacyjna  $\ll$  drogi na oddziaływanie (silne)

$$1X_0 \ll 1\lambda_{int}$$

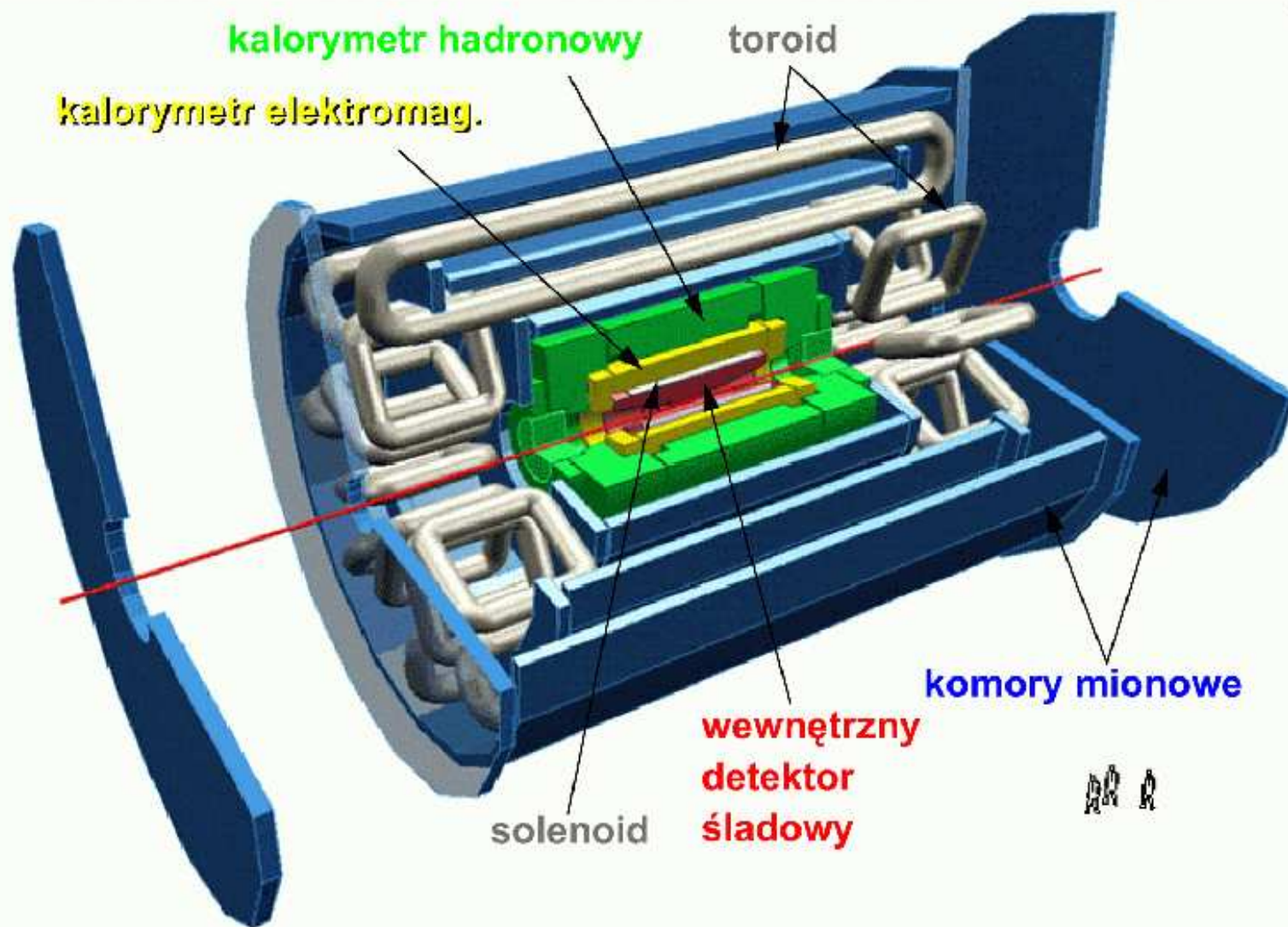
Przekrój poprzeczny detektora, ilustrujący tory cząstek

- rura dryfowa
- komora trackera
- solenoid magnesu
- kalorymetr elektromagnetyczny
- kalorymetr hadronowy
- namagnesowane żelazo
- komory mionowe

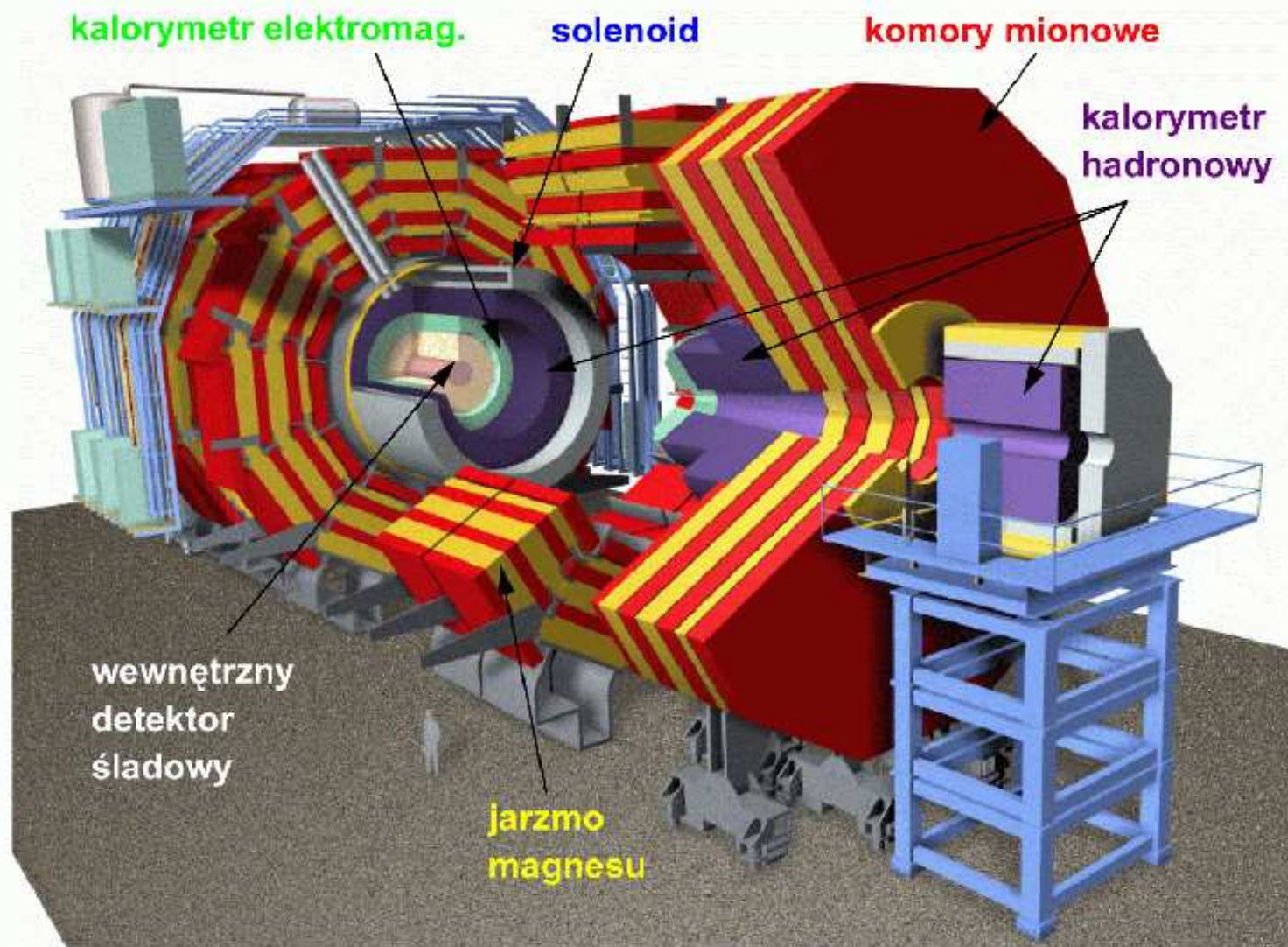




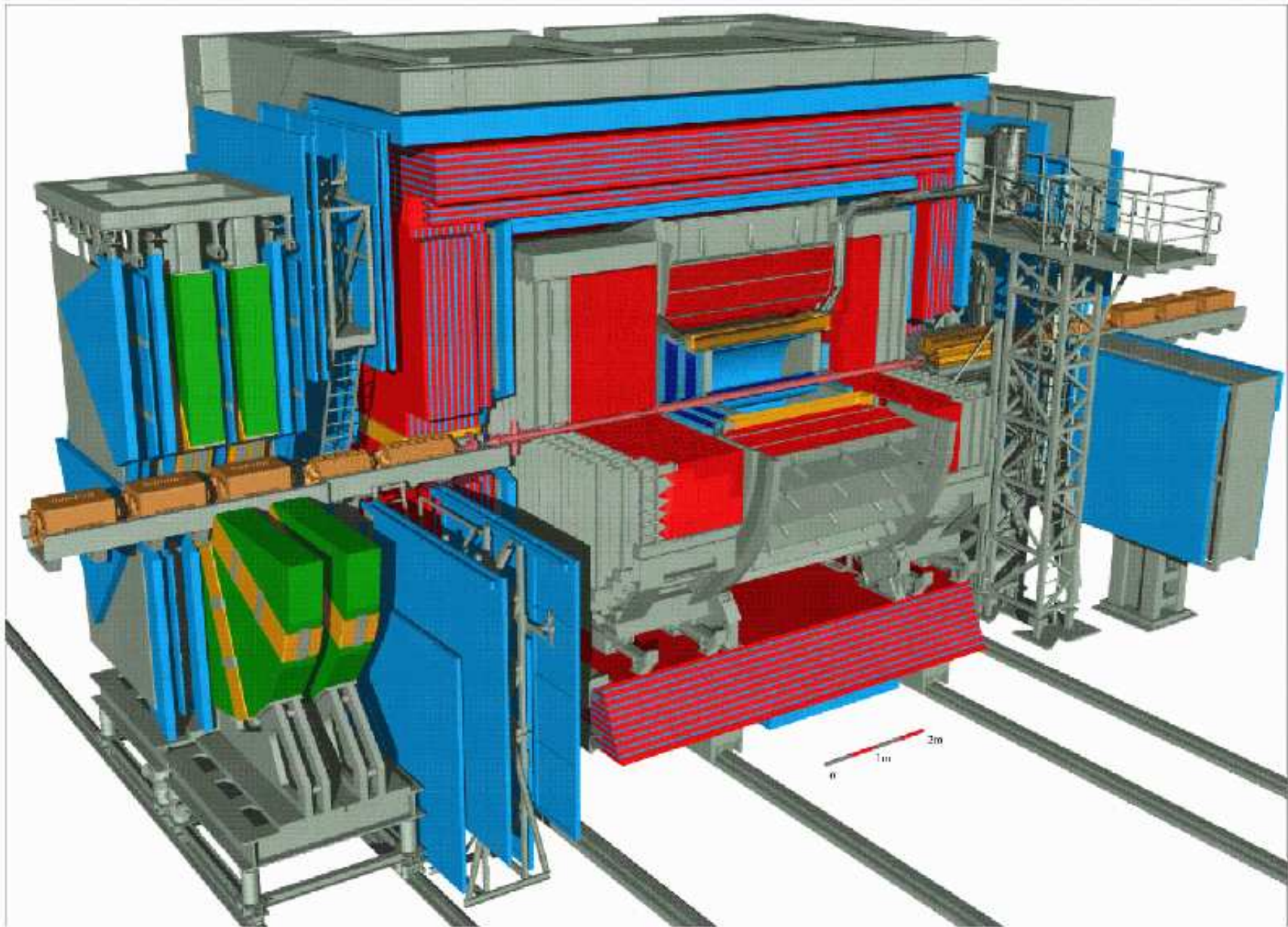
# A Toroidal LHC ApparatuS (ATLAS)



# Compact Muon Solenoid



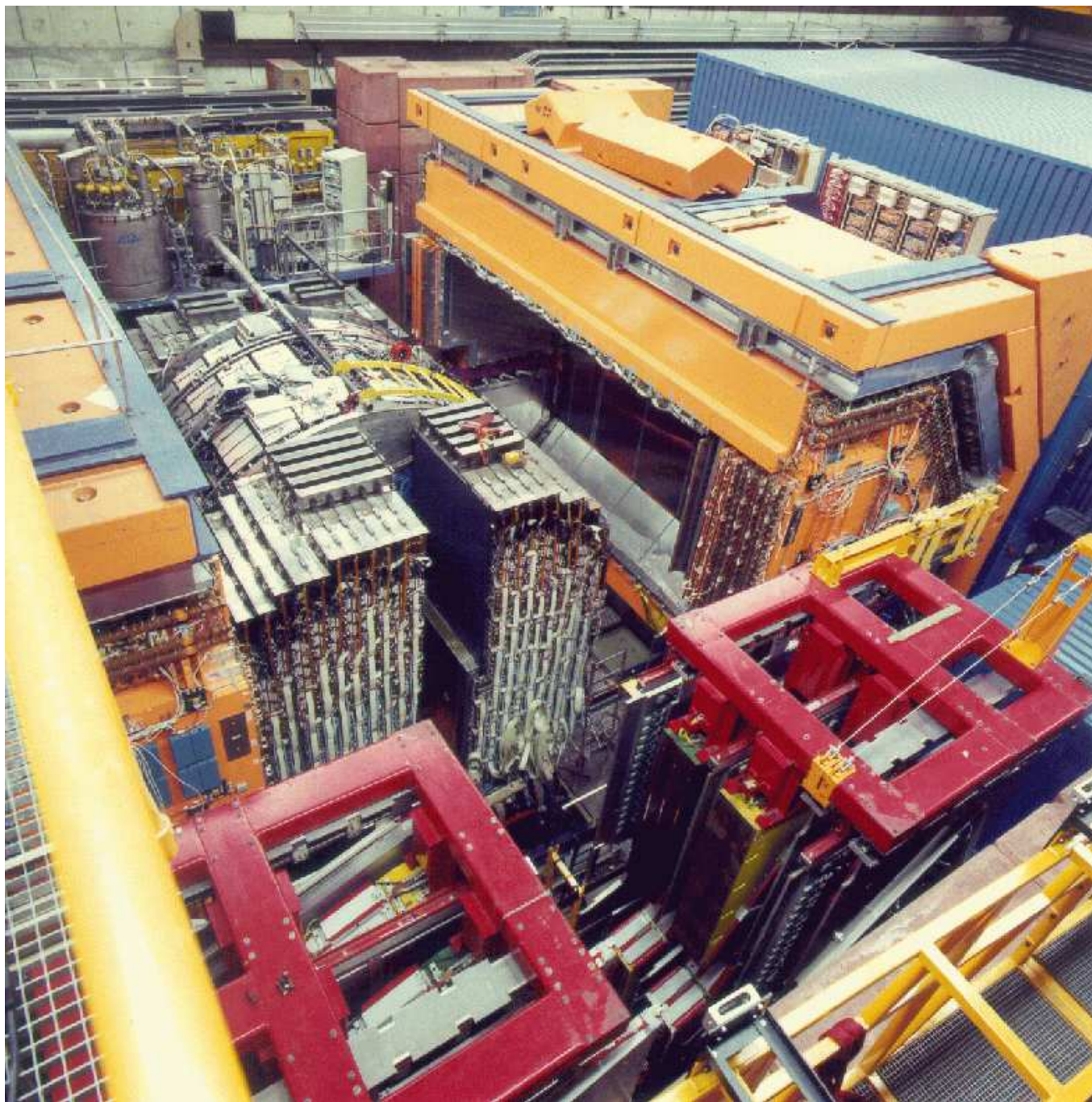




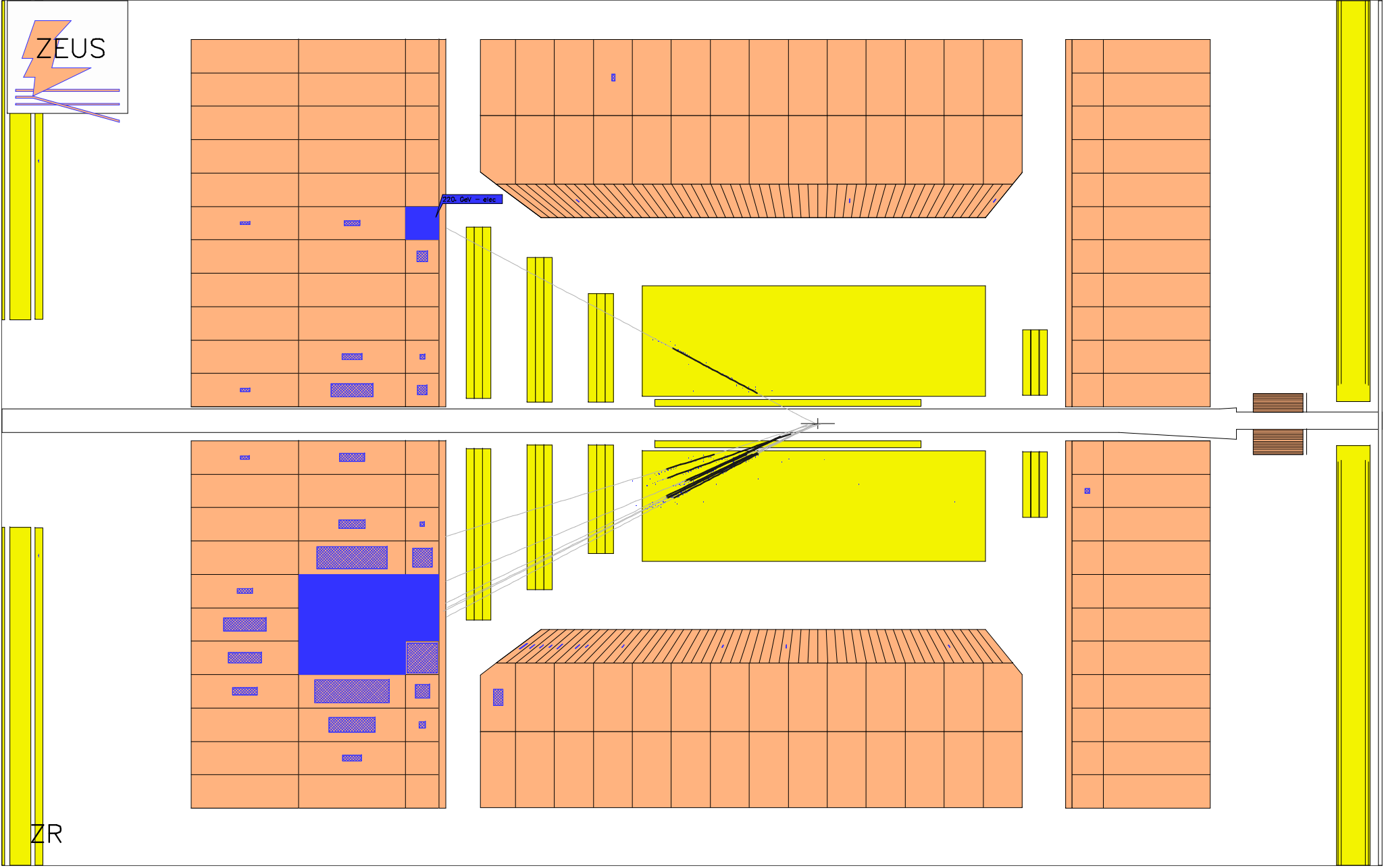
**ZEUS (HERA)** 

Software :SDRC-IDEAS level V11  
Performed by : Carsten Hartmann  
Status : October 1993

# Eksperyment ZEUS

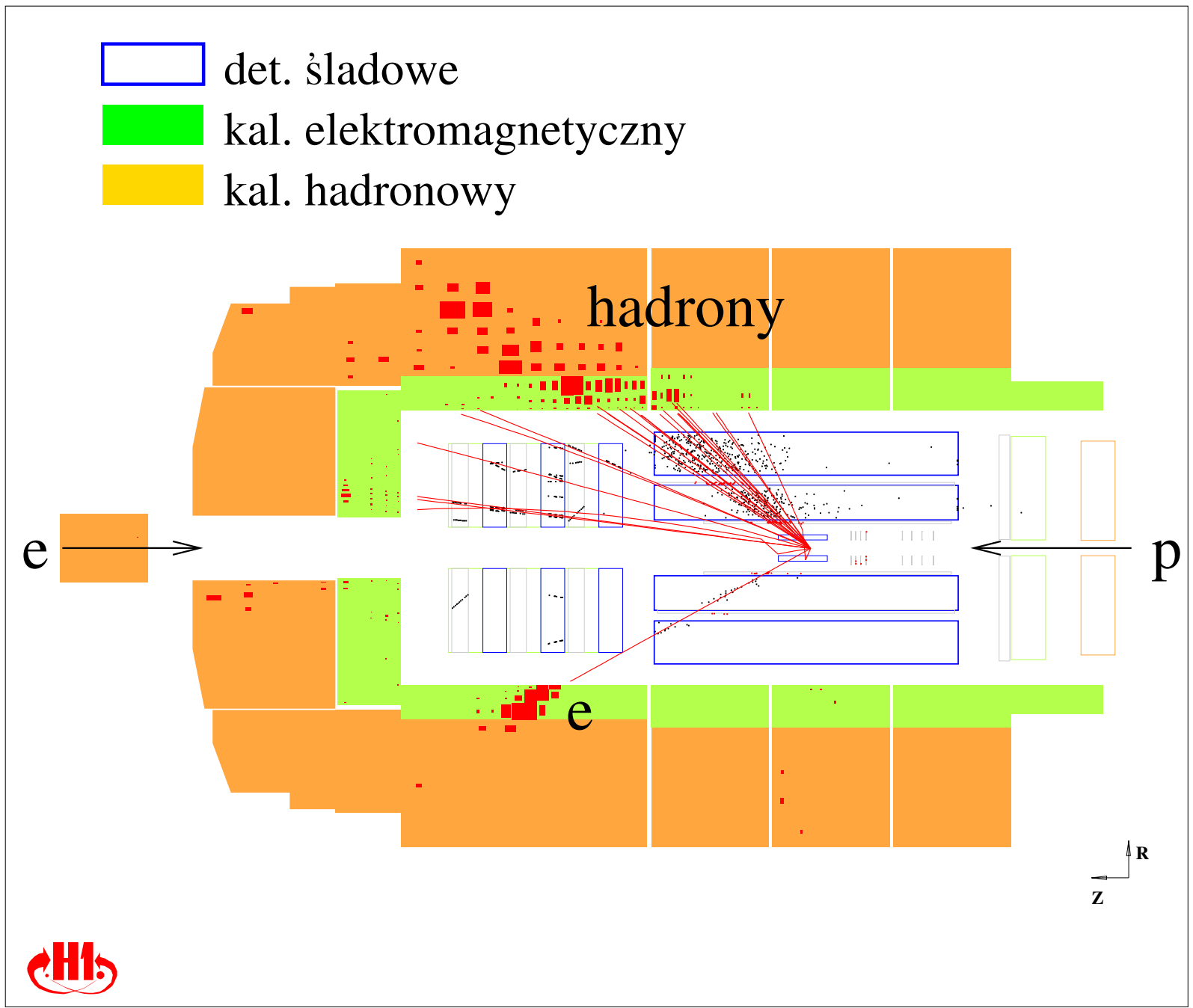


# Przypadek rozpraszania elektron-proton **Ekspertment ZEUS**



Przypadek rozpraszania elektron-proton

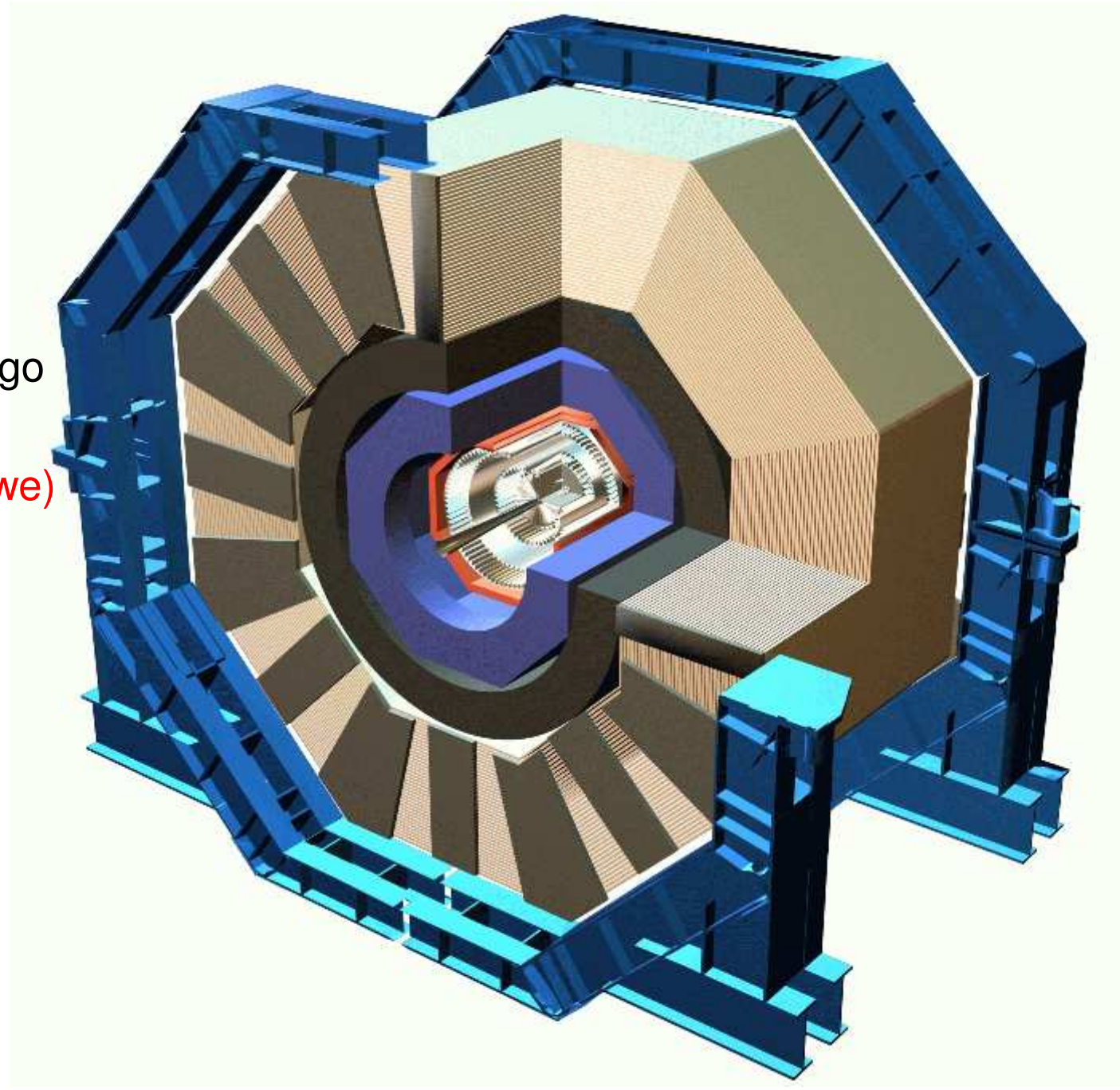
**Ekspertment H1**



# SiD

Projekt detektora dla  
eksperymentu przy ILC

Koncepcja detektora opartego  
w całości o detektory  
półprzewodnikowe (krzemowe)



# Przyszłe detektory

## Rekonstrukcja cząstek

## Particle Flow Algorithm (PFA)

Detektor wyposażony w “kalorymetr śladowy” umożliwia pełną identyfikację wszystkich produkowanych cząstek i optymalny pomiar ich energii.

