# Detektory cząstek

Elementy fizyki cząstek elementarnych

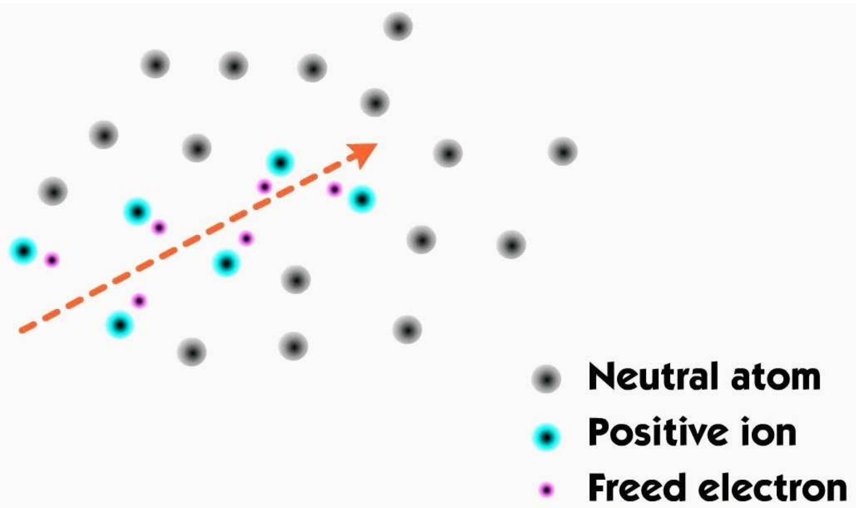
## Wykład III

- 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

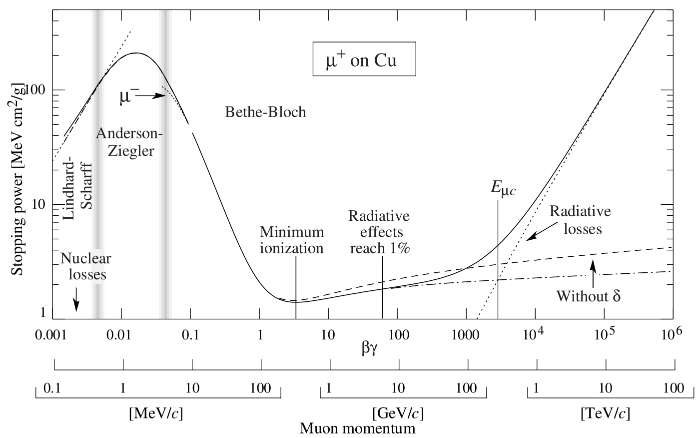
## Jonizacja

Straty energii na jonizację opisuje wzór Bethe-Blocha:

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

gdzie: $z$ - ładunek cząstki,
$\beta$ - jej prędkość
$I$ - energia jonizacji;
dla większości materiałów ~10 eV
$\delta$ - poprawka związana
z polaryzacją ośrodka

← wzór Bethe-Blocha →




Przy założeniu $m \gg m_e$
jonizacja zależy wyłącznie od $\beta$ / $\gamma$

Straty minimalne dla $\gamma \sim 3$: $-\left.\frac{dE}{dx}\right|_{min} \sim 2MeV/\frac{g}{cm^2}$



# 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:

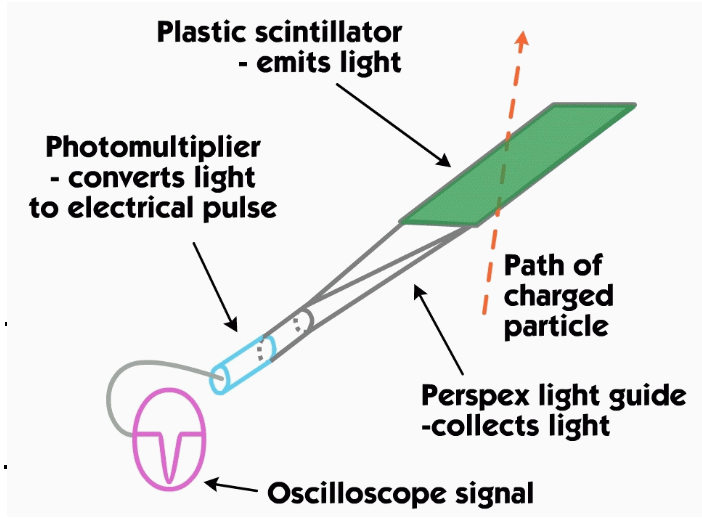
- świecenie (scyntylacja)
  ⇒ liczniki scyntylacyjne
- przepływ prądu
  ⇒ liczniki gazowe
  ⇒ detektory półprzewodnikowe

# Detektory

## Licznik scyntylacyjny

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

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...

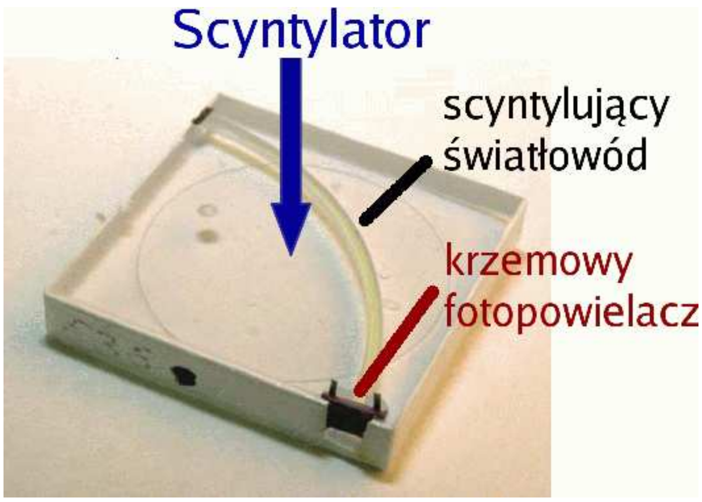


# Detektory

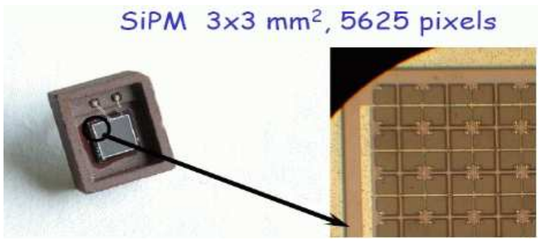
## Licznik scyntylacyjny

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




Krzemowy fotopowielacz



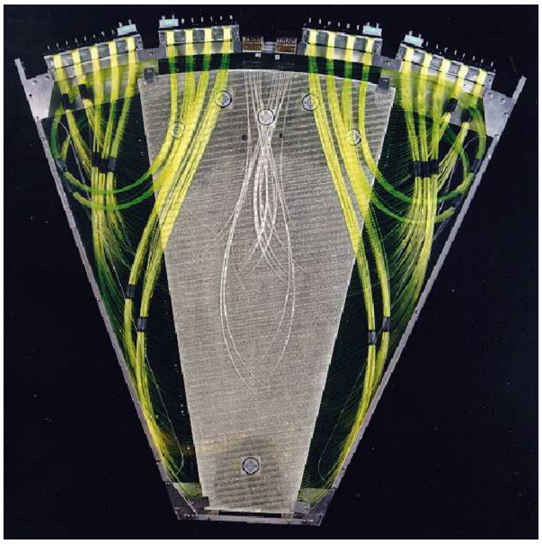

Jeszcze nie tak dokładny jak tradycyjny, ale szybki postęp...

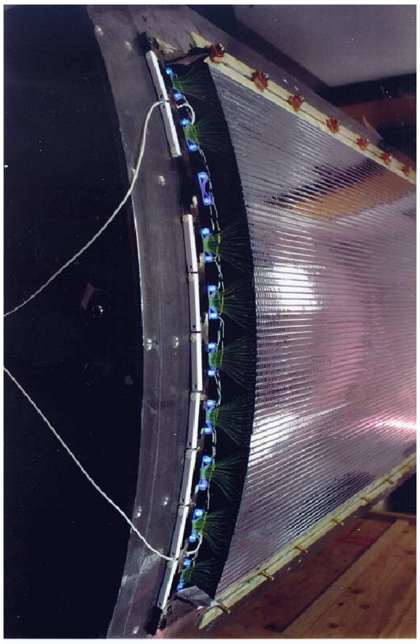
# Detektory

## Licznik scyntylacyjny

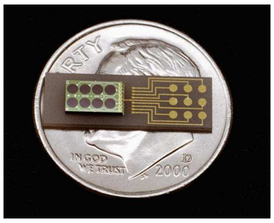
Miniaturyzacja odczytu otworzyła drogę do budowy detektorów śladowych opartych o włókna scyntylujące

Ekspertyment D0



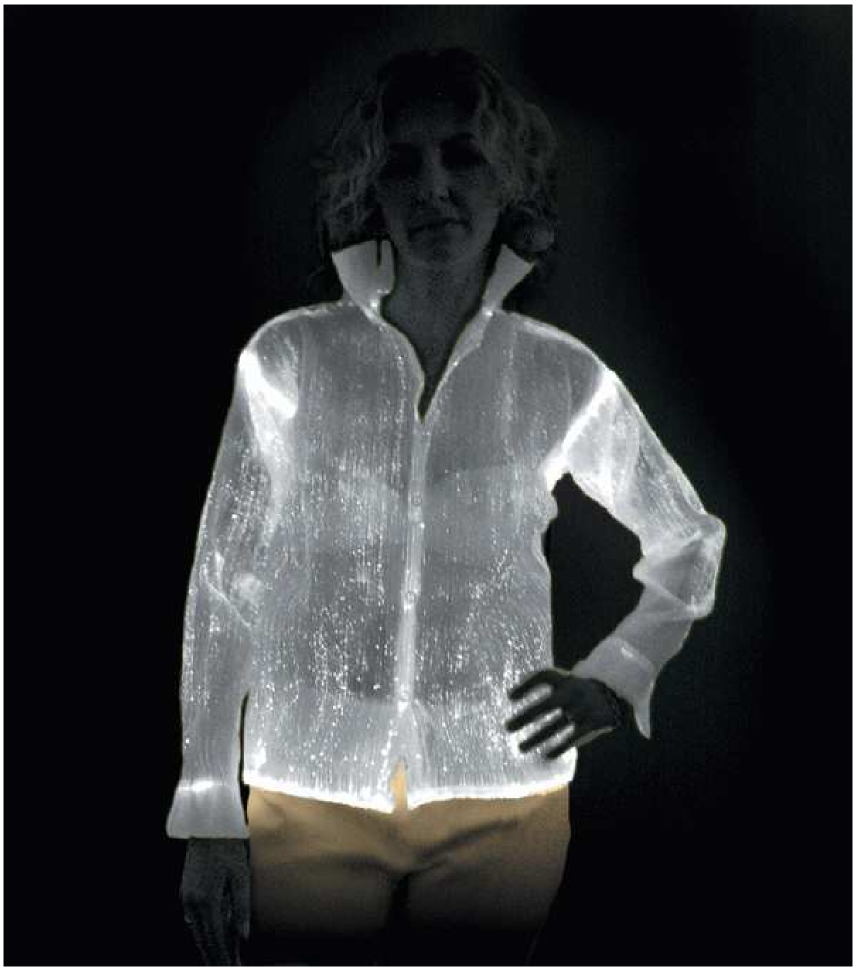


Element odczytu (8 włókien)





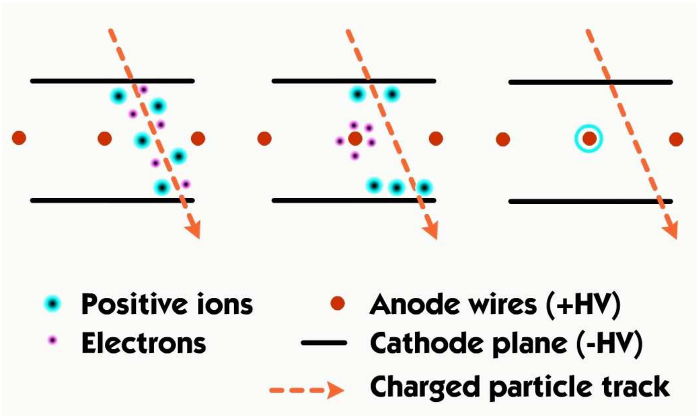

## Zastosowania aplikacyjne



# 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 porzez przyspieszane elektrony

$\Rightarrow$ **"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

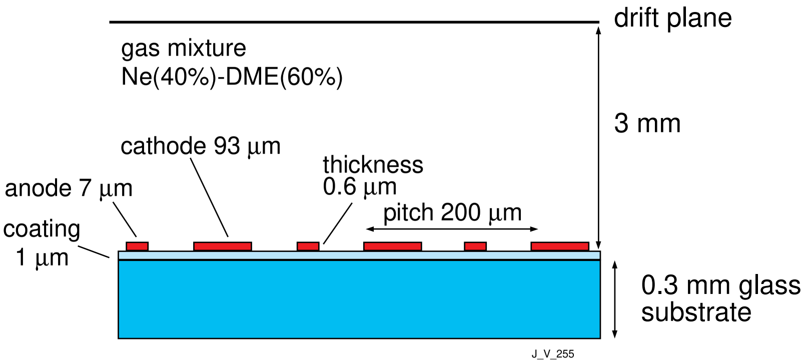
Słabym punktem komory wielodrutowej są... druty.

Ze względu na działające siły nie mogą być zbyt blisko siebie

$\Rightarrow$ ograniczona rozdzielczość przestrzenna ($\geq 1mm$)

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

Nowe pomysły $\Rightarrow$ Micro-Strip Gas Chamber (MSGC):




zamiast drutów - metalowe paski napylone na izolatorze

$\sim$ "pół" komory wielodrutowej

Odległości między paskami mogą być dużo mniejsze

$\Rightarrow$ dokładniejsze pomiary torów ($\sim 100\mu m$)

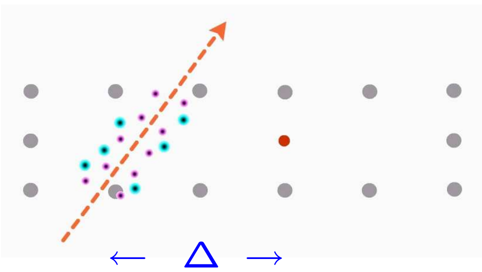
"pixle" zamiast pasków $\Rightarrow$ możliwa rekonstrukcja 2-D !!!

# Detektory

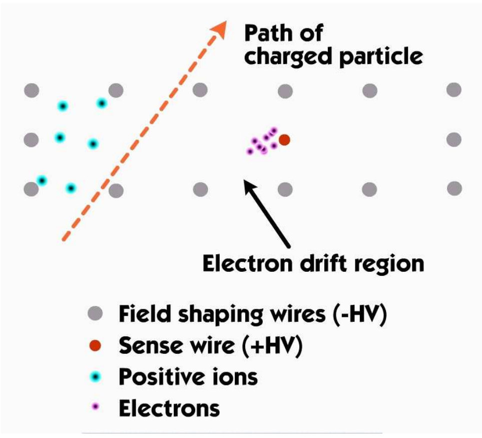
## Komora dryfowa

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: $v_d \sim 10^5\ m/s = 100\ \mu m/ns$

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

Wada: pomiar tylko w jednym wymiarze...



# Detektory

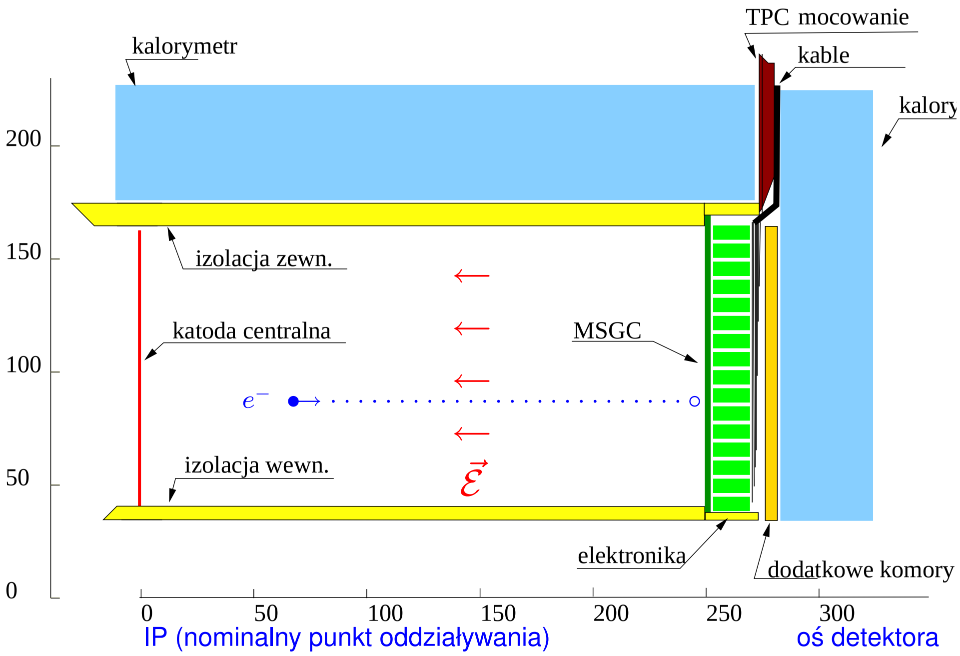
## Komora TPC

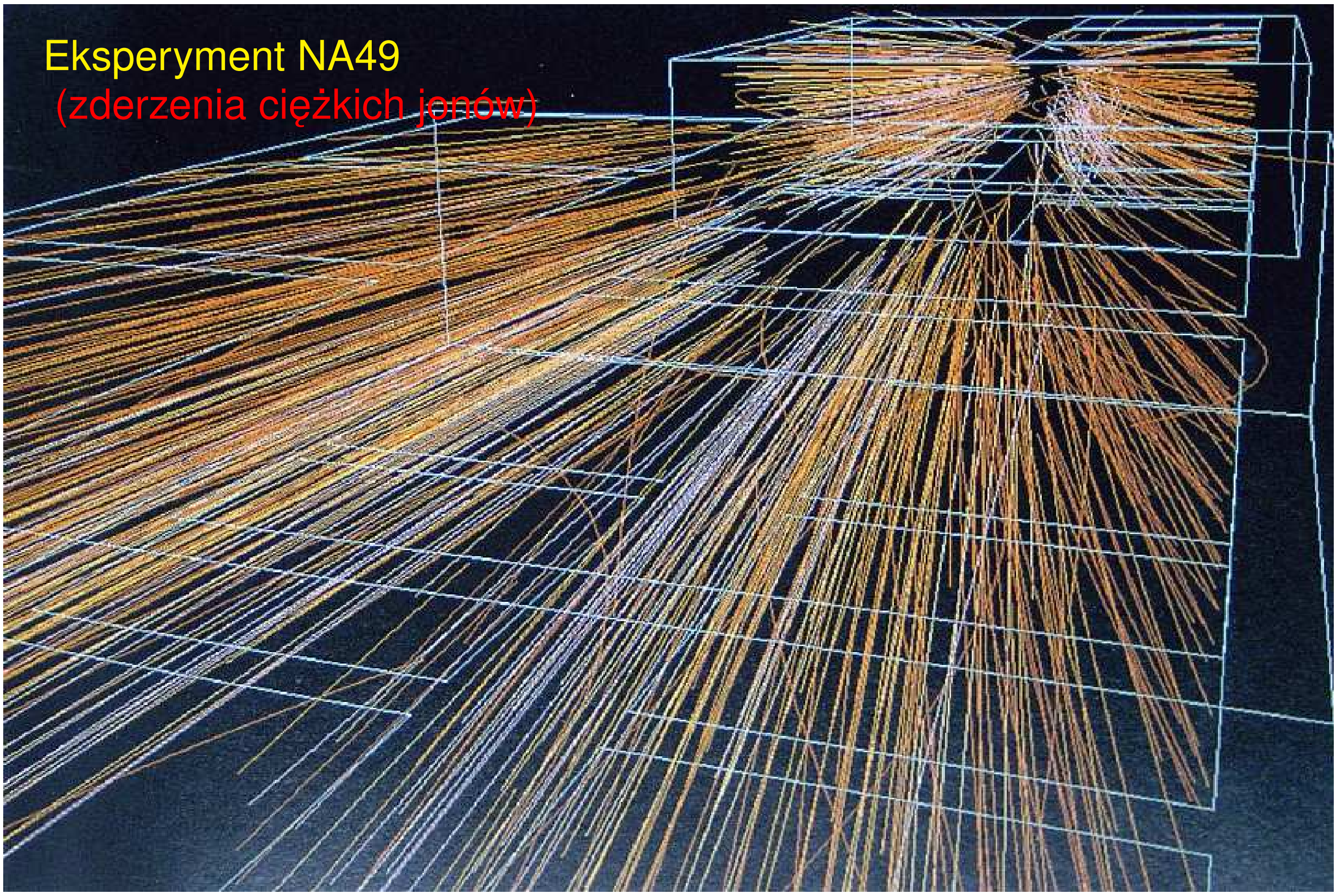
Time Projection Chambre -
"komora projekcji czasowej"

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

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

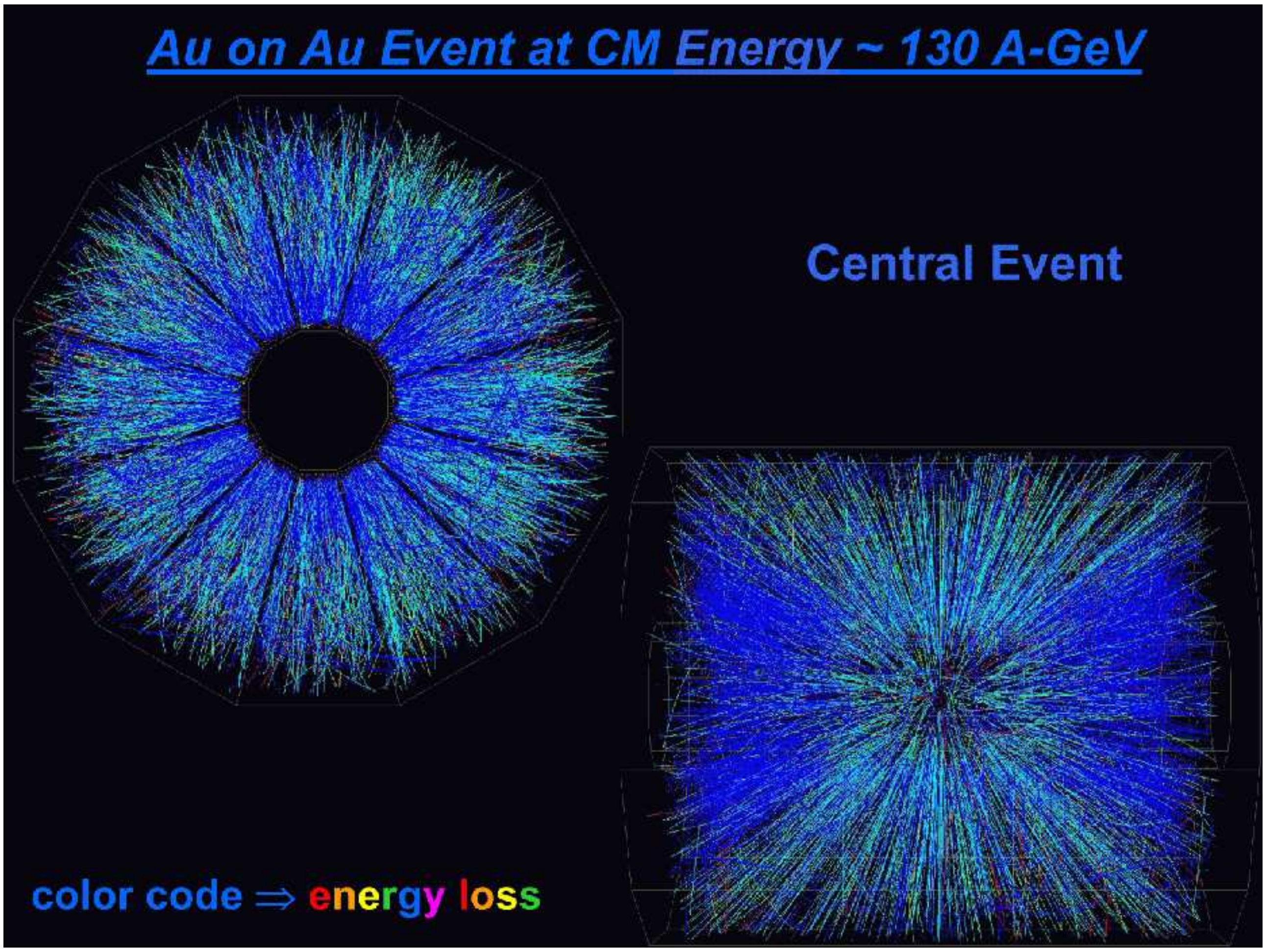
Schematyczny rysunek TPC (1/4 detektora):




Eksperyment NA49
(zderzenia ciężkich jonów)



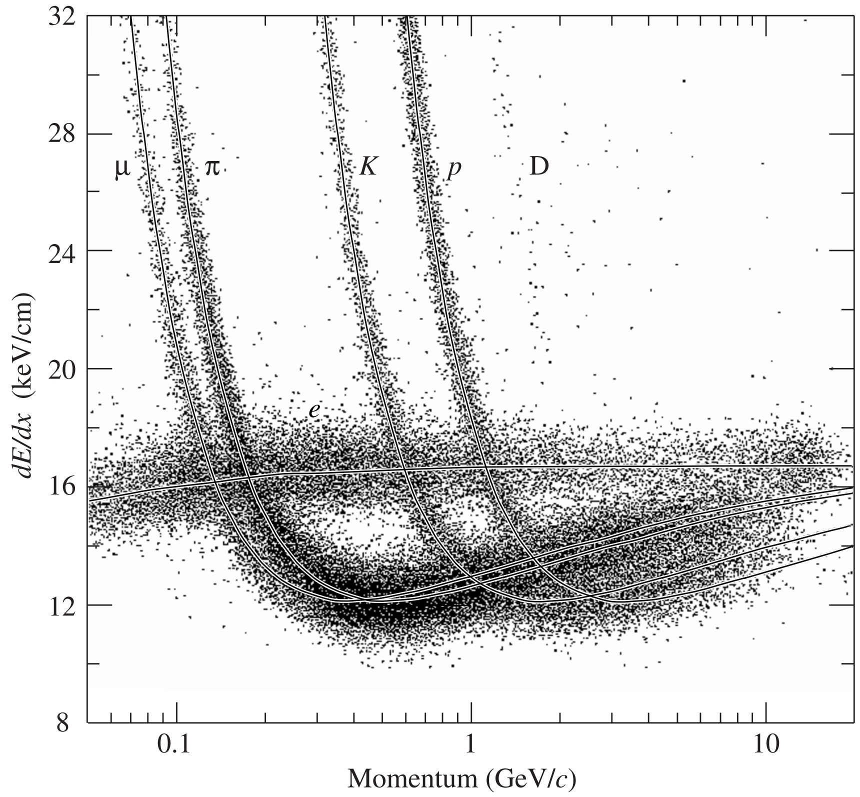
**STAR**


Au on Au Event at CM Energy ~ 130 A-GeV
Central Event
color code ⇒ energy loss

# Detektory

## Komora TPC

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



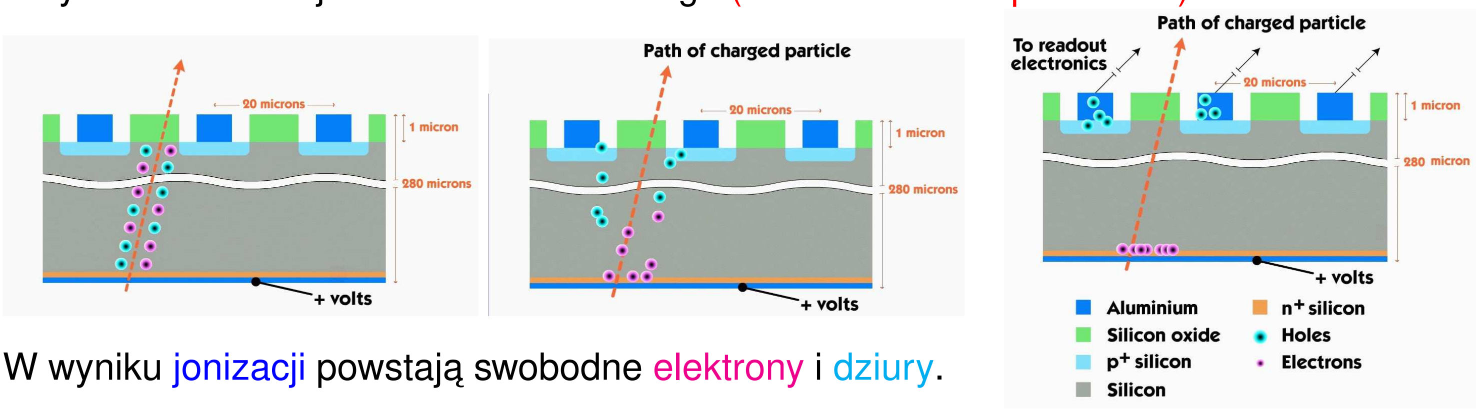



# Detektory

## Detektory półprzewodnikowe

Są coraz powszechniej używane w fizyce cząstek.

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



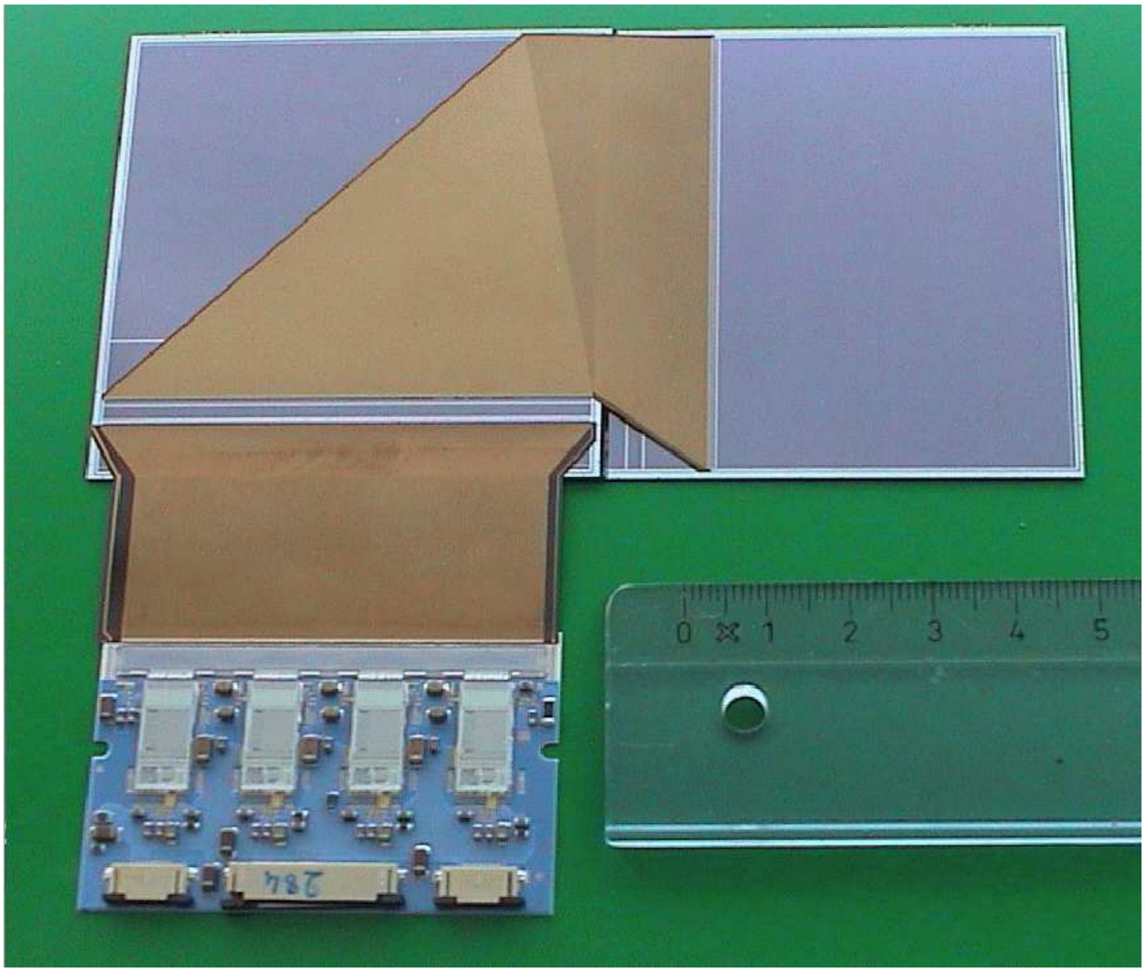

W wyniku jonizacji powstają swobodne elektrony i dziury.

⇒ mierzymy przepływ ładunku przez spolaryzowane w kierunku zaporowym złącze $pn$ (diodę).

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).

Pojedyńczy segment detektora wierzchołka eksperymentu **ZEUS**

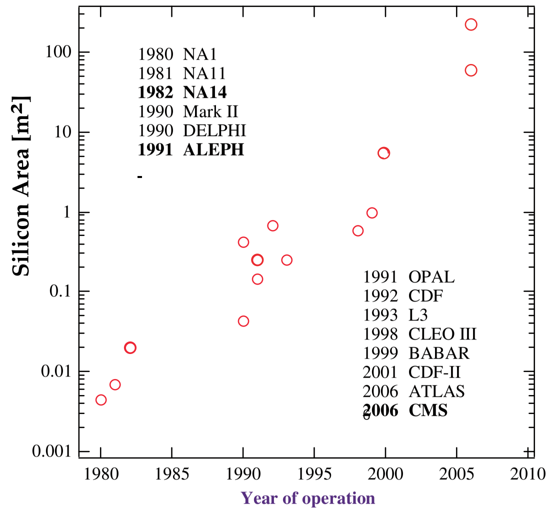




# Detektory

## Detektory półprzewodnikowe

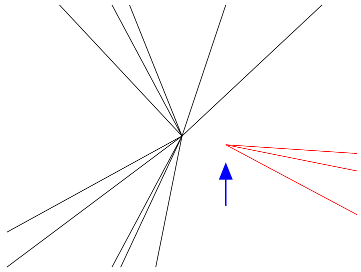
Dzięki rozwojowi technologii możemy budować coraz tańsze i coraz większe detektory:




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

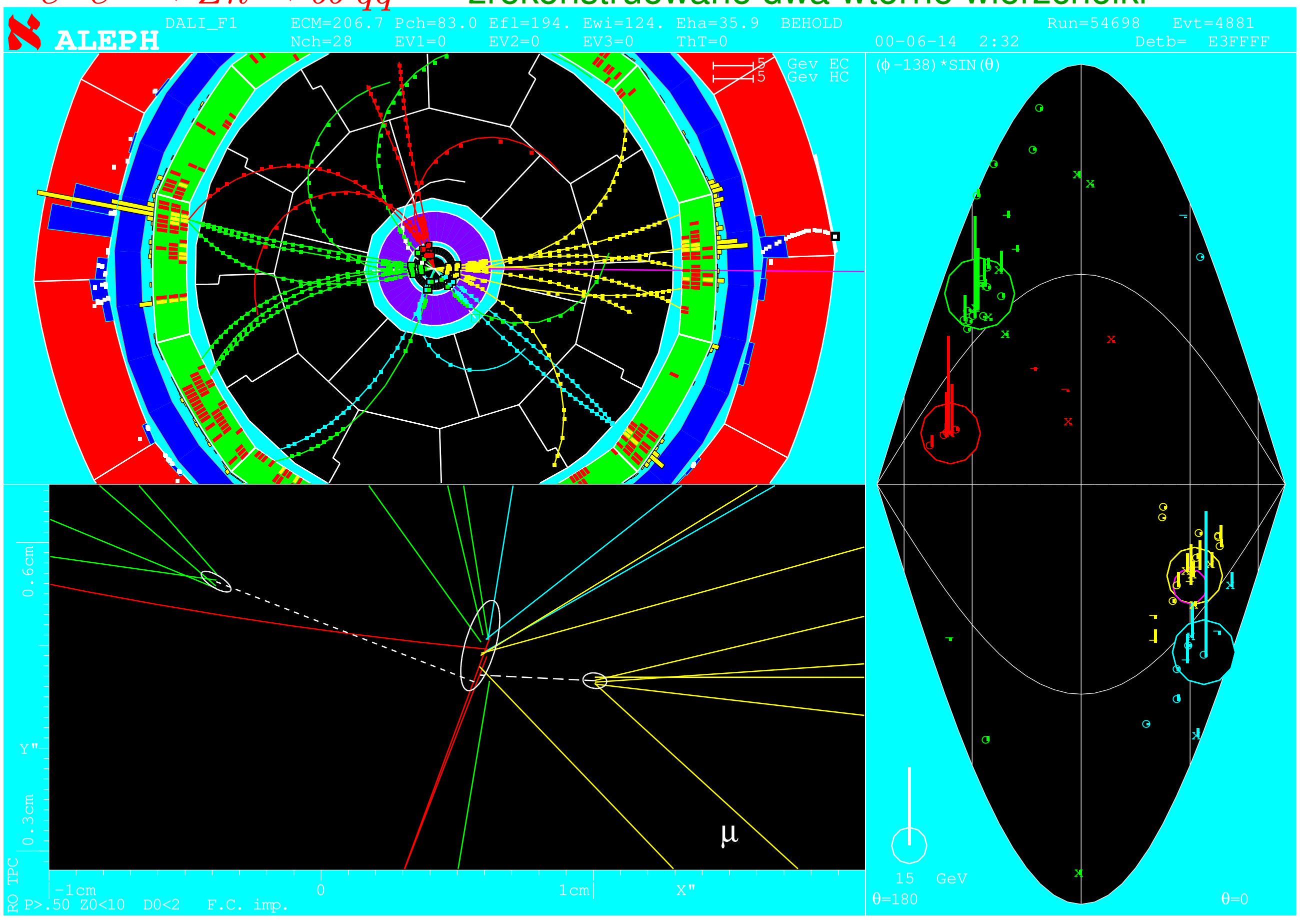
⇒ identyfikacji mezonów B

(kwarku $b$; $c\tau \sim 0.5mm$)





ALEPH $e^+e^- \rightarrow Zh \rightarrow b\bar{b}\,q\bar{q}$ 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 oddziałuję praktycznie w detektorach śladowych

$\Rightarrow$ pozostają "niewidoczne"

$\Rightarrow$ 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):

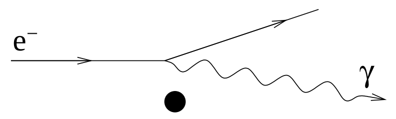
- elektromagnetyczne (elektronowo-fotonowe) - wywoływane przez elektrony, pozytony, fotony, $\pi^\circ$
- hadronowe - wywoływane przez inne, silnie oddziałujące cząstki

# Detektory

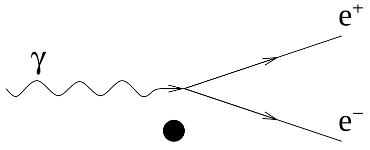
## Kalorymetry elektromagnetyczne

Dla energii powyżej $E_c \sim 10$ MeV:

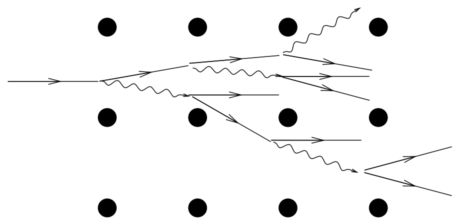
elektrony tracą energię prawie wyłącznie na promieniowanie hamowania




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

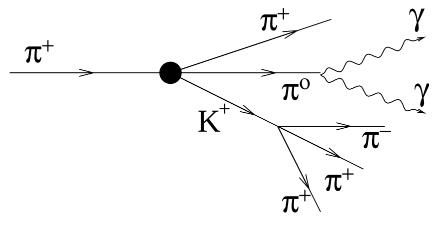
⇒ możliwy jest bardzo dokładny pomiar energii.



# Detektory

## Kalorymetry hadronowe

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




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

Jednak część energii "gubiona" jest na wzbudzenia i rozbicie jąder oraz neutrina produkowane w rozpadach.

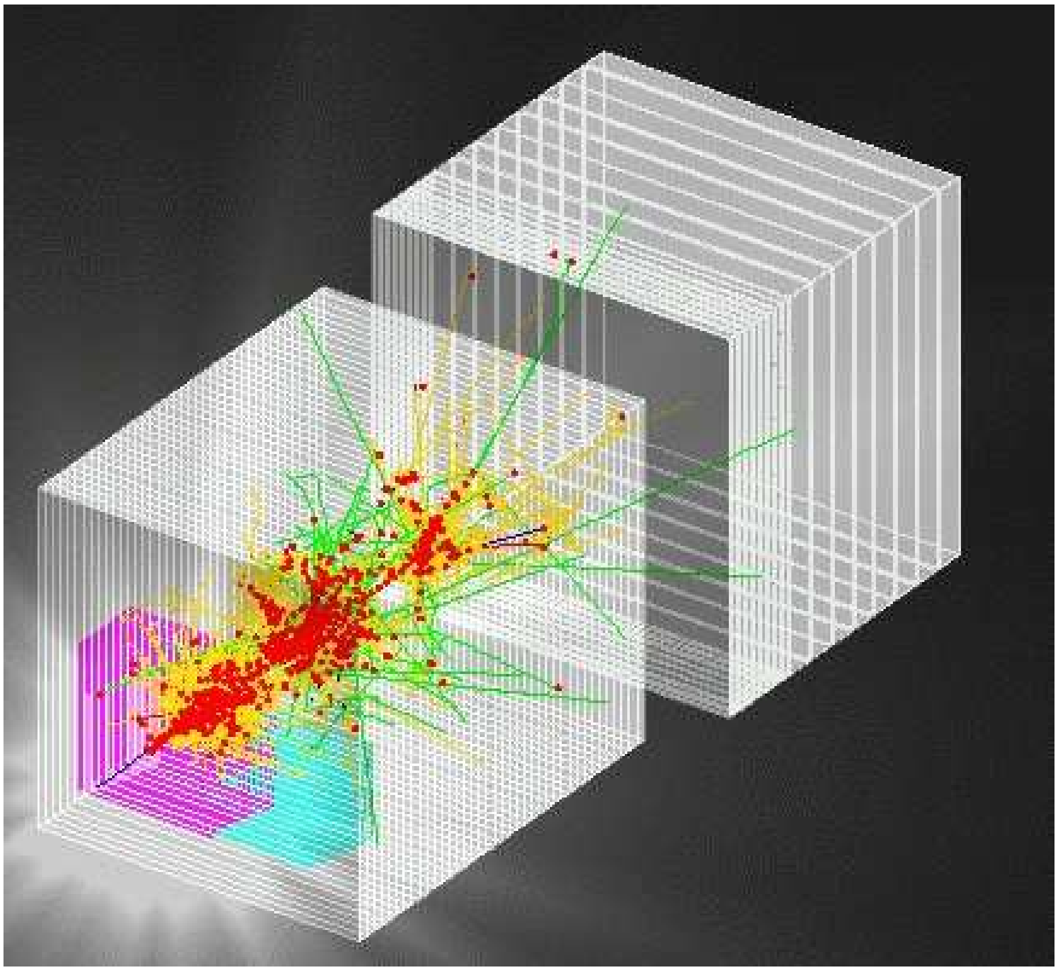
Z uwagi na duże fluktuacje w rozwoju kaskady prowadzi to do niepewności w pomiarze energii:

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

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

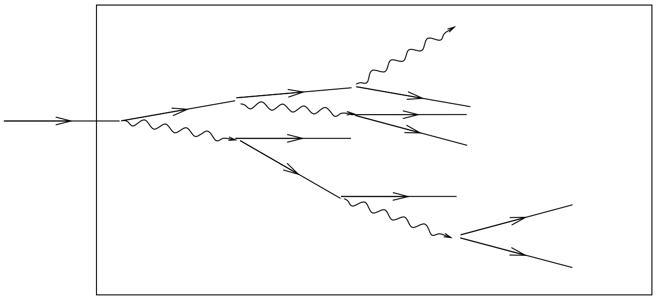




# Detektory

## Kalorymetry jednorodne

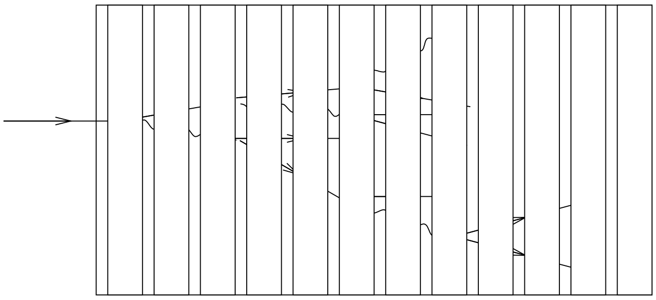
Kaskada rozwija się wyłącznie w materiale aktywnym (pozwalającym na pomiar strat energii):



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

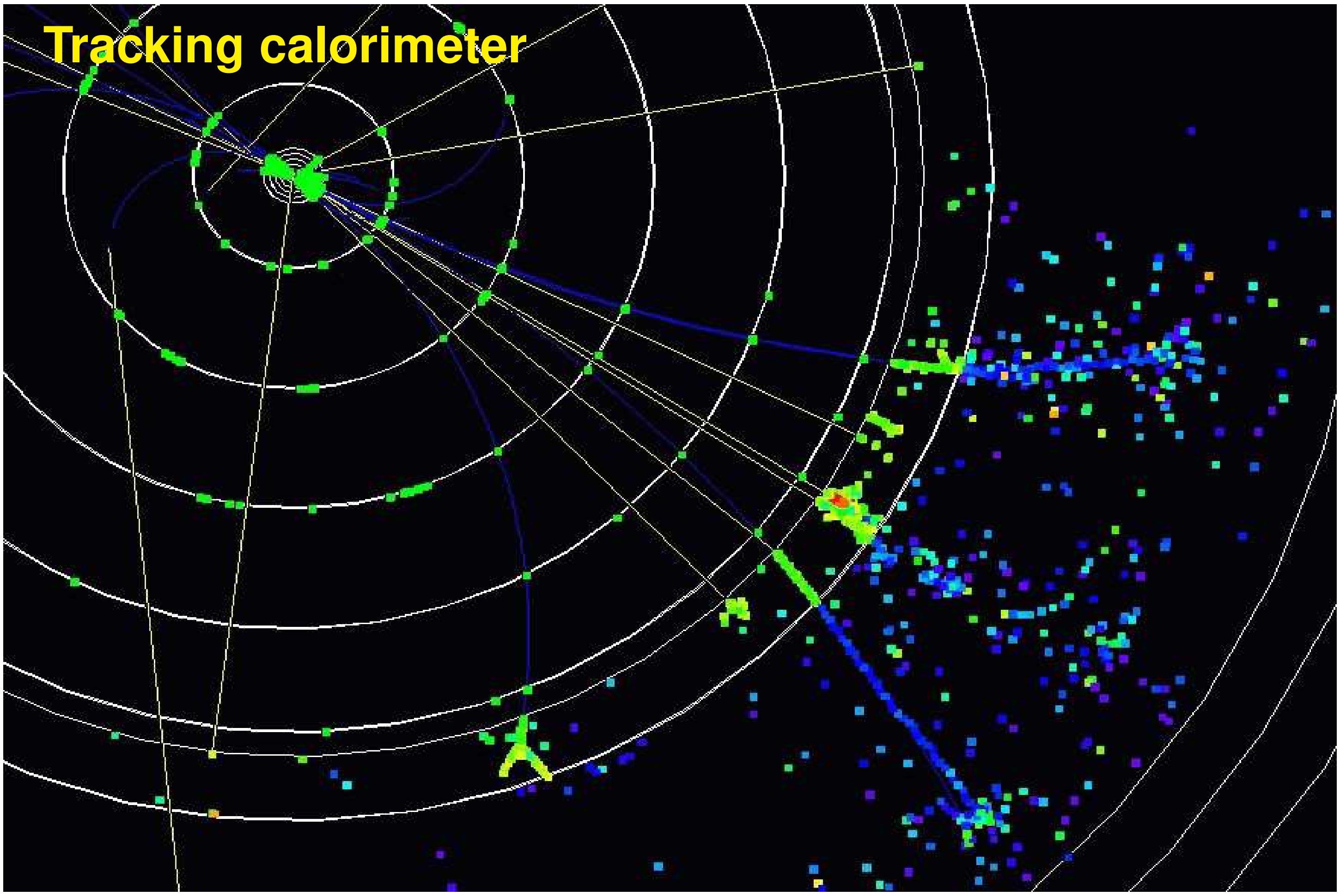
## Kalorymetry próbkujące

Materiał aktywny (pomiar) przekładany wartwami gęstego absorbera (rozwój kaskady):



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

Wpływ fluktuacji maleje ze wzrostem energii






# Detektory

## Detektory są jak ogry...

Ogry są jak cebula...

Cebula ma warstwy...

Ogry mają warstwy...

**Detektory mają warstwy...**

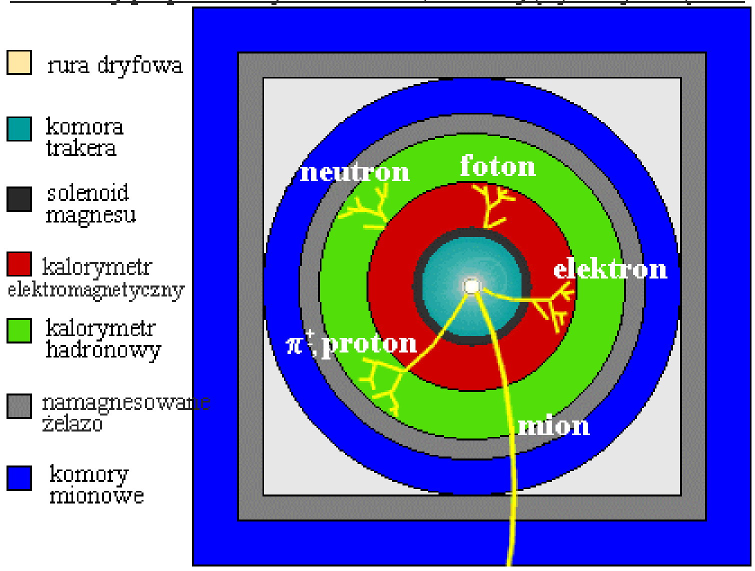
# Detektory

## 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.

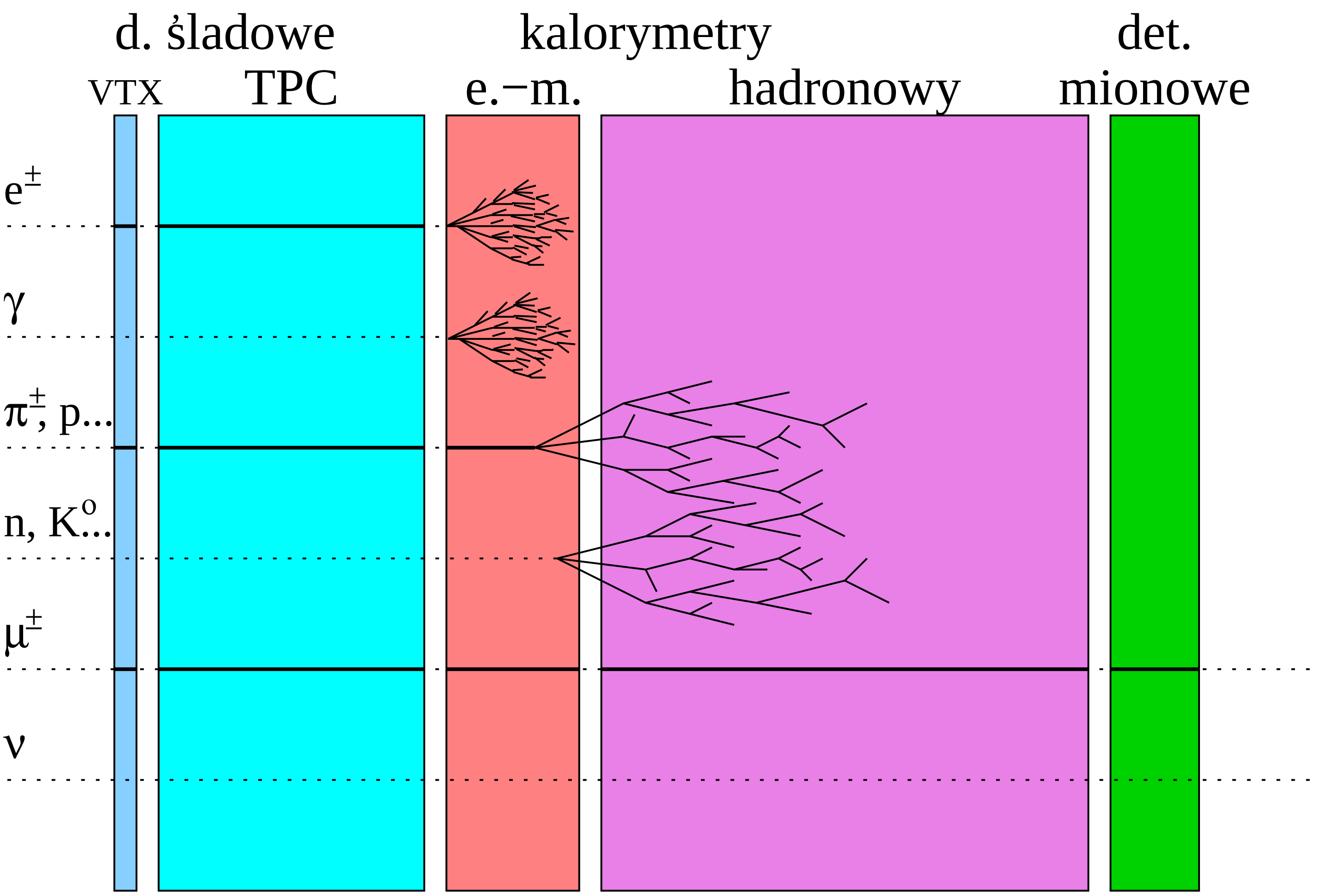
Przekrój poprzeczny detektora, ilustrujący tory cząstek



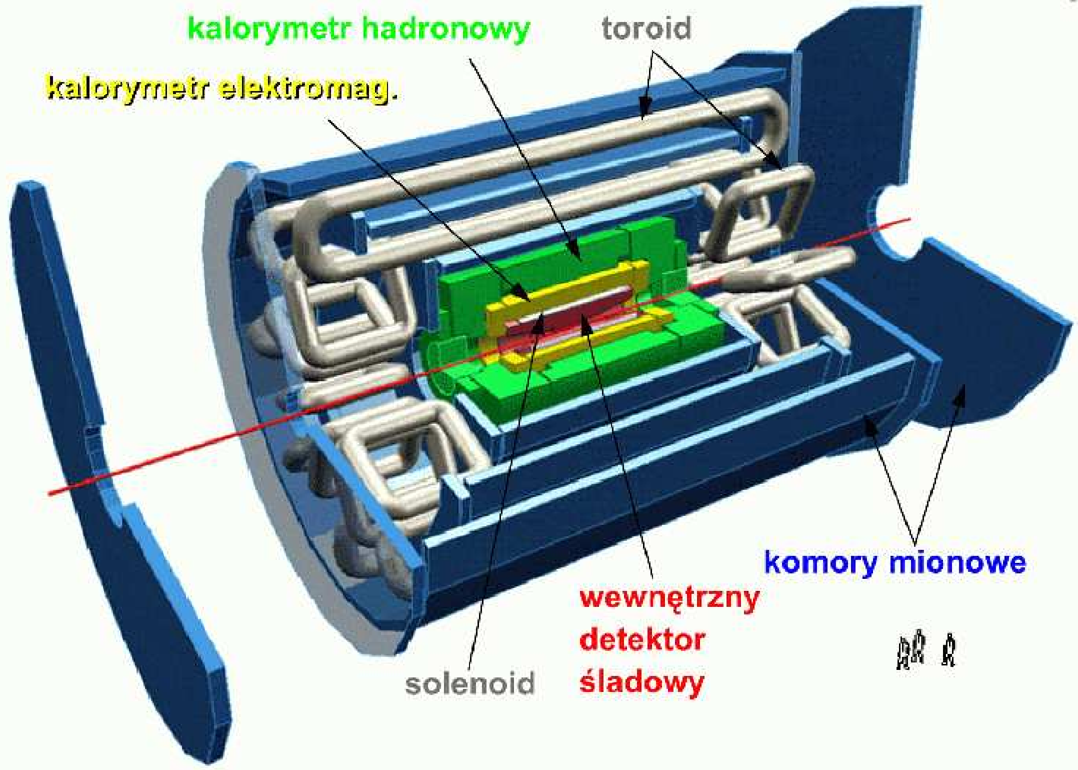

Kaskady elektromagnetyczne są dużo krótsze niż hadronowe, gdyż naogół droga radiacyjna $\ll$ drogi na oddziaływanie (silne)

$$1X_\circ \ll 1\lambda_{int}$$



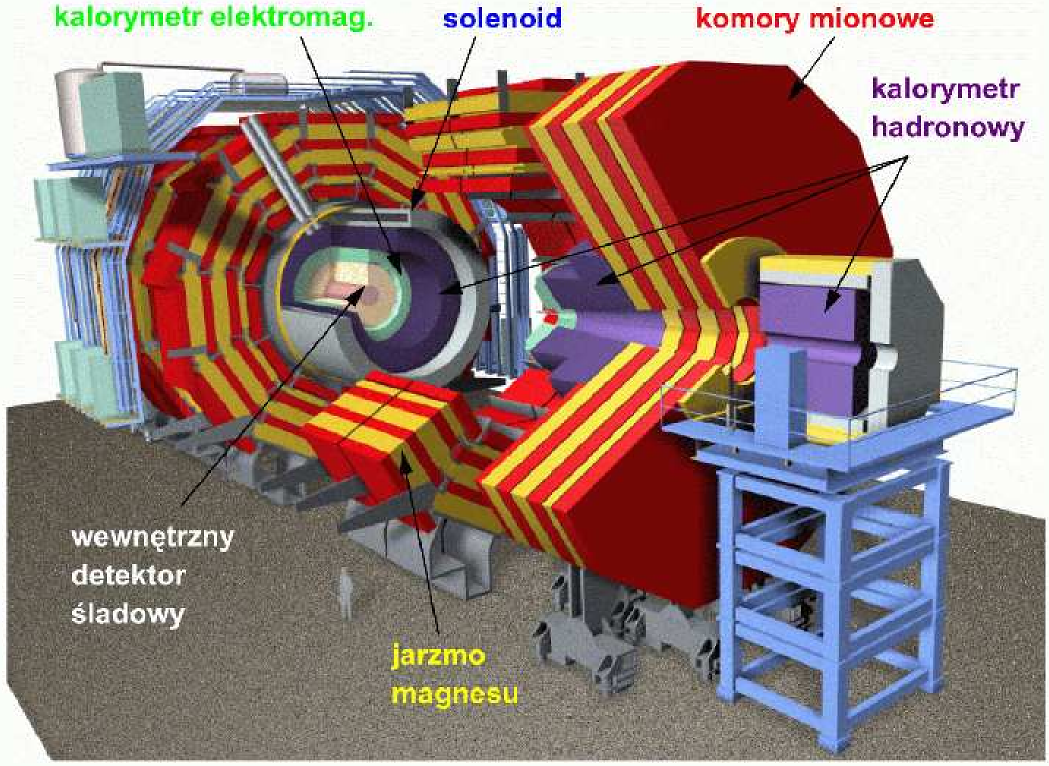


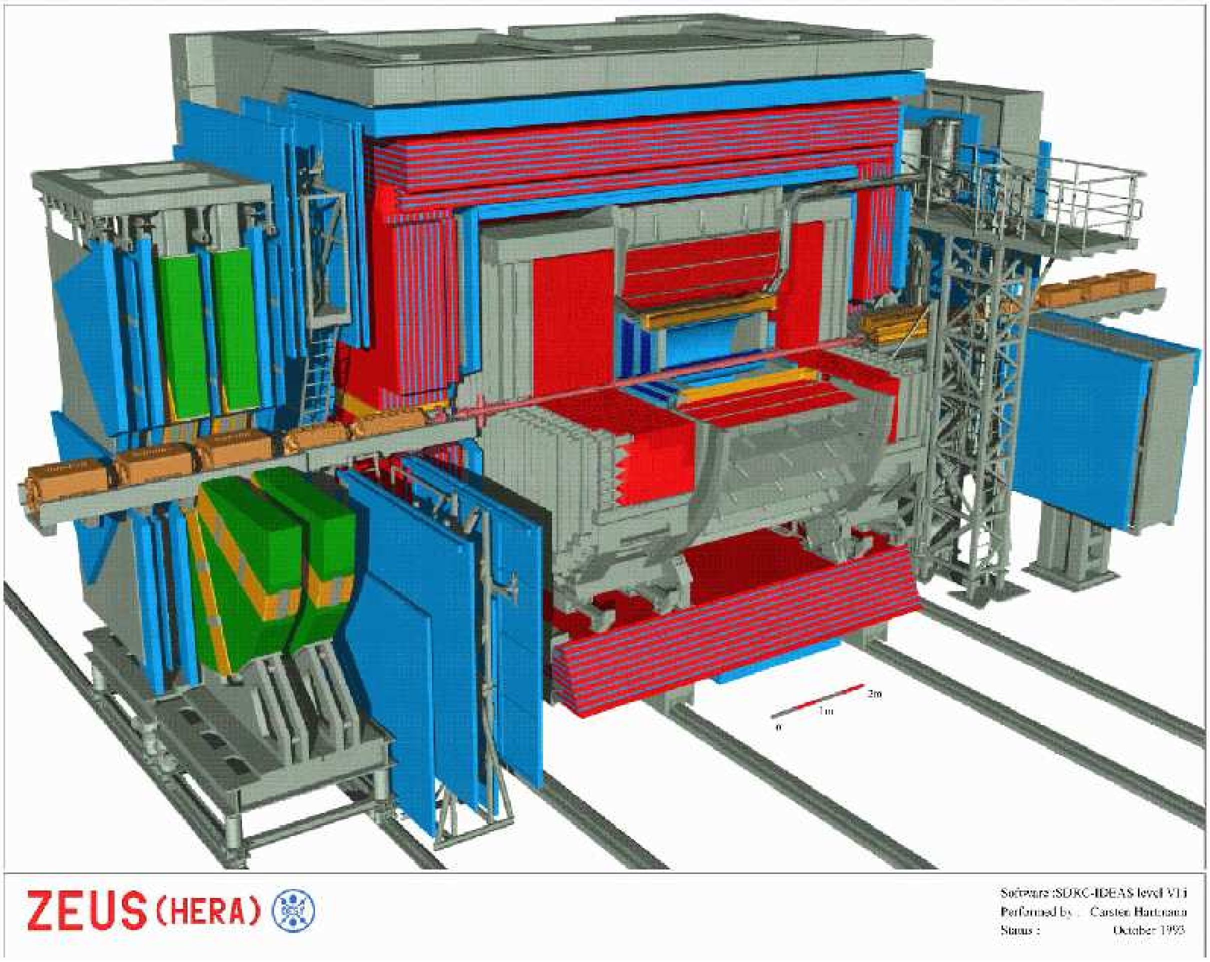
# A Toroidal LHC ApparatuS (ATLAS)





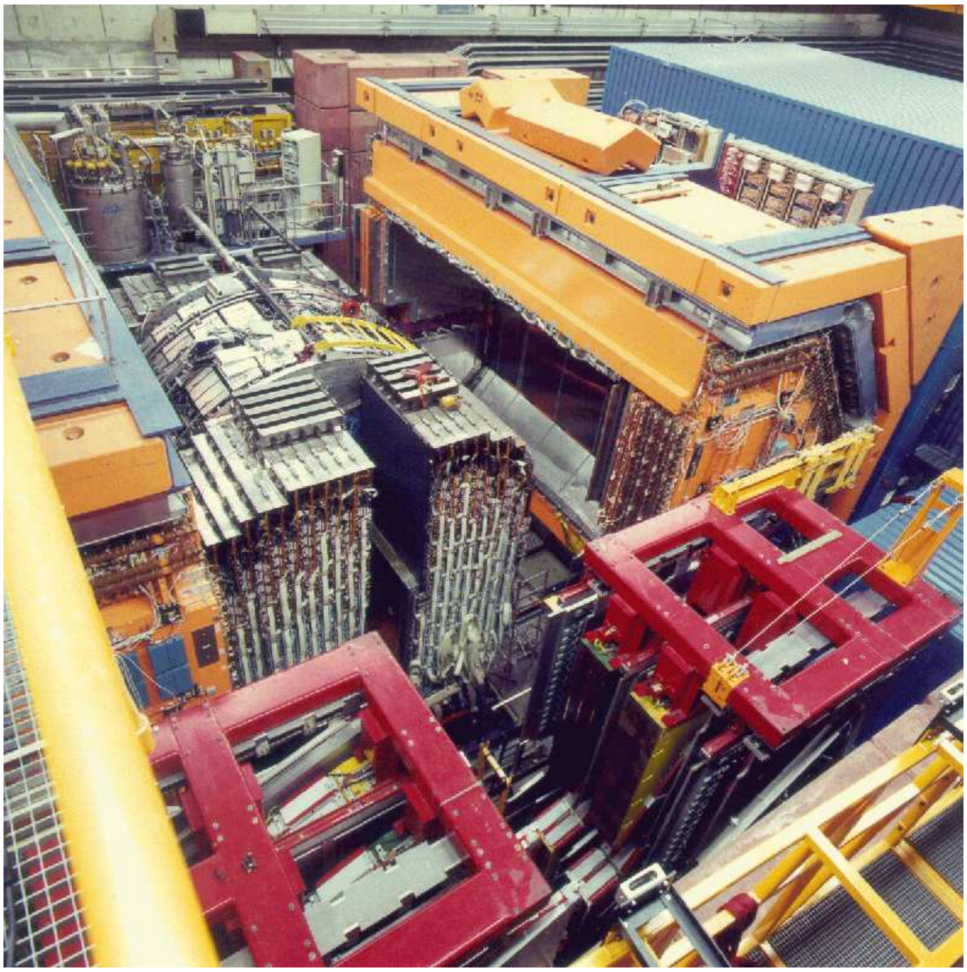

# Compact Muon Solenoid



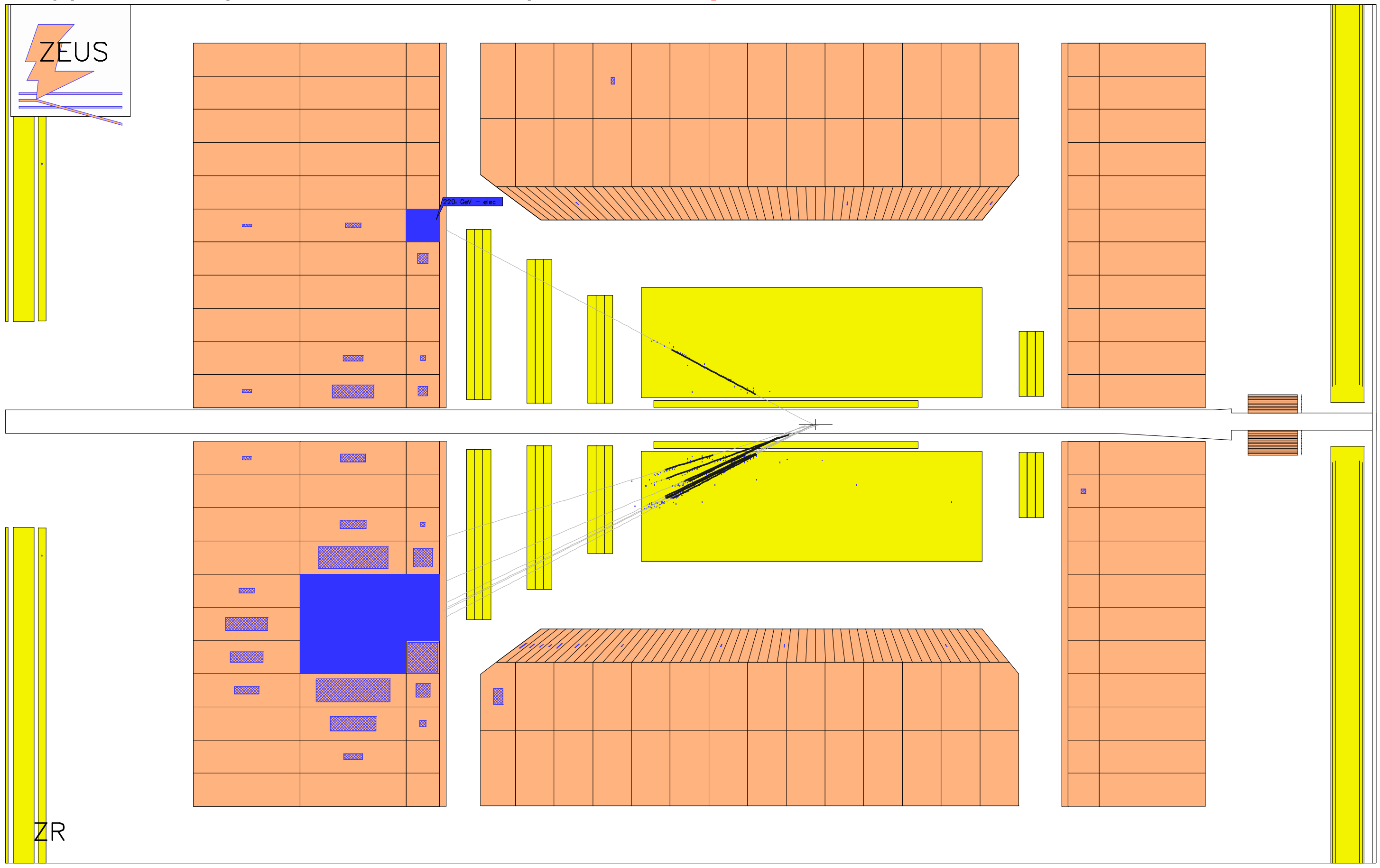





# Eksperyment ZEUS



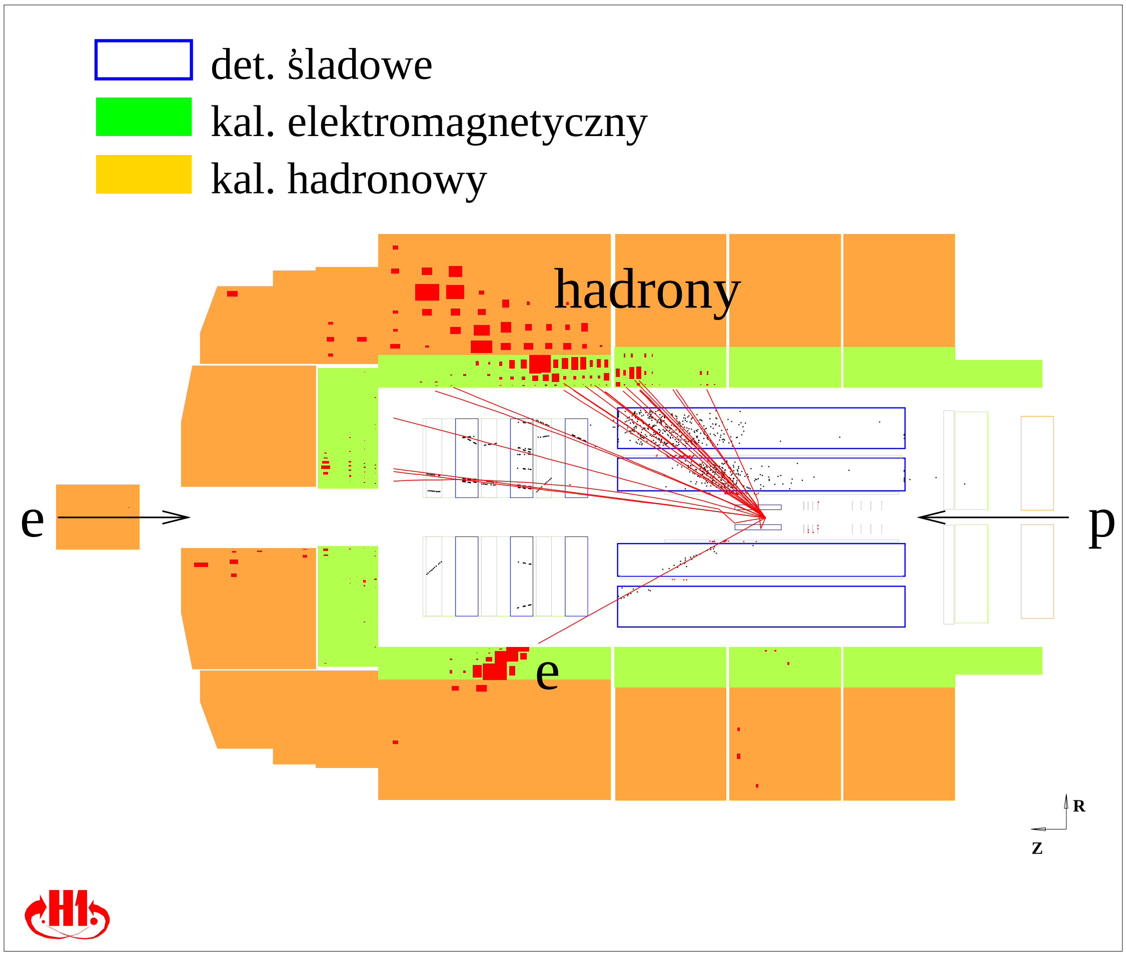
Przypadek rozpraszania elektron-proton **Eksperyment ZEUS**





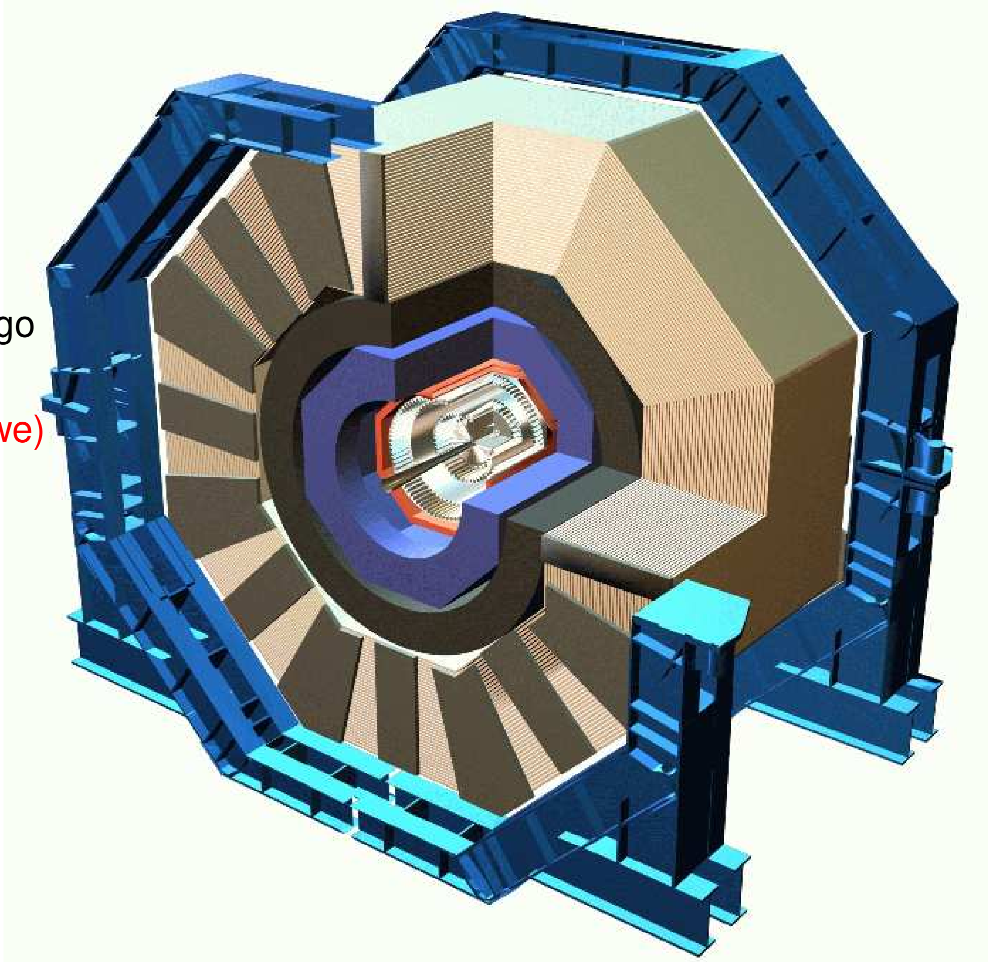

Przypadek
rozpraszania
elektron-proton

**Eksperyment 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.