

Akceleratorzy i detektory cząstek

Elementy fizyki cząstek elementarnych

Wykład II

- Akceleratorzy cząstek
ograniczenia, świetlność
- Detekcja cząstek
 - ⇒ detektory śladowe
 - ⇒ kalorymetry
- Detektory w dużych eksperymentach

LEP/LHC, CERN, Genewa

27 km obwodu !!!



Akcelerator

Ograniczenia

Aby uzyskiwać coraz wyższe energie zderzających się wiązek musimy budować coraz większe i większe akceleratory...

Dlaczego !?

Co ogranicza energie uzyskiwane w akceleratorach ?

W przypadku kołowych akceleratorów protonów $\Rightarrow$ **pole magnetyczne**

Pole magnetyczne musi rosnąć wraz ze wzrostem energii wiązki, aby utrzymywać cząstki wewnątrz rury akceleratora. W praktyce nie jesteśmy w stanie wytworzyć pól silniejszych niż $B_{max} \sim 8$ T. Ogranicza to dostępne energie do

$$E_{max} \approx e R \cdot B_{max} \cdot c$$

Jeśli przekroczymy E_{max} cząstki 'uciekną' z akceleratora.

W przypadku protonów akcelerator liniowy musiałby być wielokrotnie większy niż akcelerator kołowy...

Akseleratory

Ograniczenia

W przypadku akseleratorów kołowych $e^\pm$: $\Rightarrow$ **pole przyspieszające**

Elektrony krążące po orbicie tracą energię na **promieniowanie hamowania**.

Średnia **energia tracona** na jeden obieg:

$$\Delta^- E \sim E^4 / R \quad (!)$$

Energia którą możemy **dostarczyć** jest proporcjonalna do obwodu akseleratora i średniego pola $\mathcal{E}$

$$\Delta^+ E \sim 2\pi R \langle \mathcal{E} \rangle$$

$\Rightarrow$ maksymalna dostępna energia

$$E_{max} \sim \sqrt{R}$$

LEP (obwód 27 km) był prawdopodobnie **ostatnim akseleratorem kołowym e^+e^-** .

Dalej bardziej opłacalne są **akseleratory liniowe**: $E_{max} \sim L \langle \mathcal{E} \rangle$

Akceleratory

Świetlność

Energia nie jest jedynym istotnym parametrem akceleratora.

W zderzeniach wiązek przeciwbieżnych niezmiernie istotna jest też **świetlność** $\mathcal{L}$.

Świetlność określa **liczbę reakcji** zachodzących w jednostce czasu.

Dla procesu o przekroju czynnym σ :

$$\frac{dN}{dt} = \mathcal{L} \cdot \sigma$$

Ponieważ przekroje czynne maleją zazwyczaj jak E^{-2}
(patrz przykład analizy wymiarowej)

⇒ potrzebujemy coraz większych świetlności

Akceleratory

Świetłość

Świetność zależy od:

- częstości f przecięć wiązek (paczek/pulsów)
- liczby cząstek w paczce n
- poprzecznych rozmiarów wiązki: σ_x, σ_y

Z definicji przekroju czynnego:

$$\mathcal{L} = f \cdot \frac{n_1 n_2}{4\pi\sigma_x\sigma_y}$$

Problem zwłaszcza w akceleratorach liniowych:
po jednym “przecięciu” wiązka jest tracona

$\Rightarrow$ trudno uzyskać jednocześnie duże f i duże n

$\Rightarrow$ konieczne jest uzyskanie bardzo małych rozmiarów poprzecznych wiązek.

LEP:

$$\sigma_x \approx 300 \mu m$$

$$\sigma_y \approx 8 \mu m \quad \mathcal{L} \sim 6 \cdot 10^{31} \frac{1}{cm^2 s}$$

Proj. TESLA:

$$\sigma_x \approx 0.5 \mu m$$

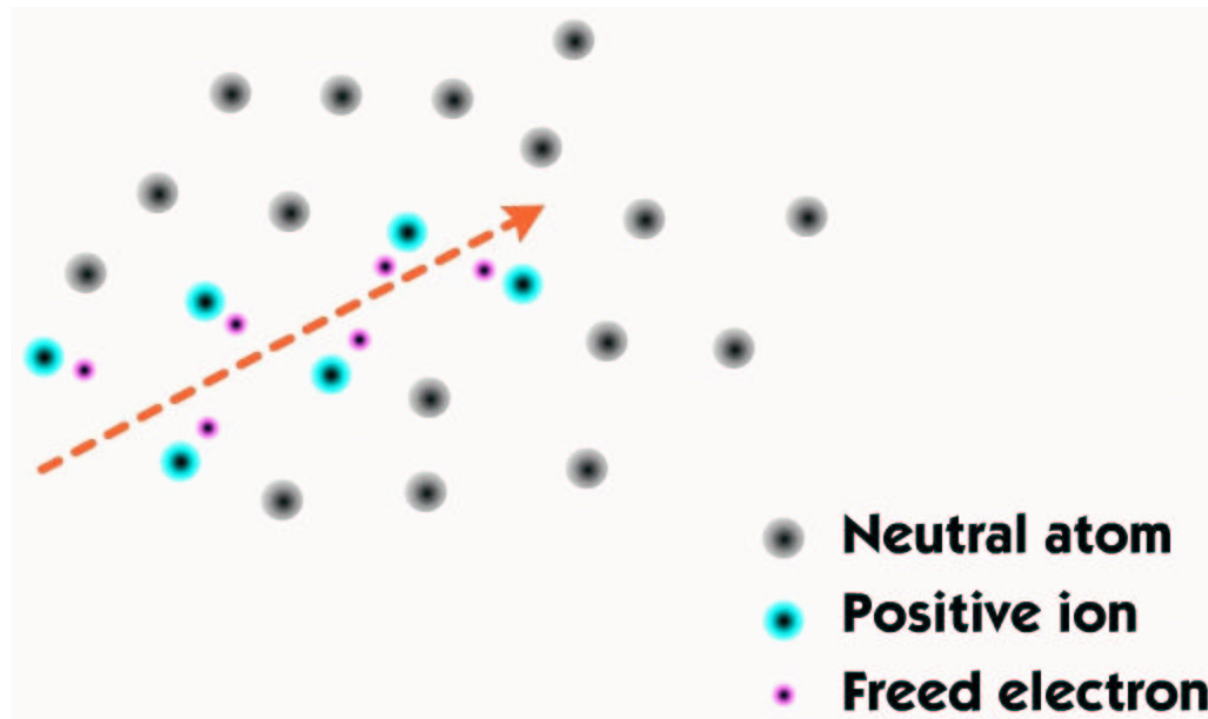
$$\sigma_y \approx 5 nm (!) \quad \mathcal{L} \sim 3 \cdot 10^{34} \frac{1}{cm^2 s}$$

rok “roboczy”: $1y \approx 10^7 s \quad \Rightarrow \sim 300 fb^{-1} y^{-1}$

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,

β - jej prędkość

I - energia jonizacji;

dla większości materiałów ~ 10 eV

δ - poprawka związana

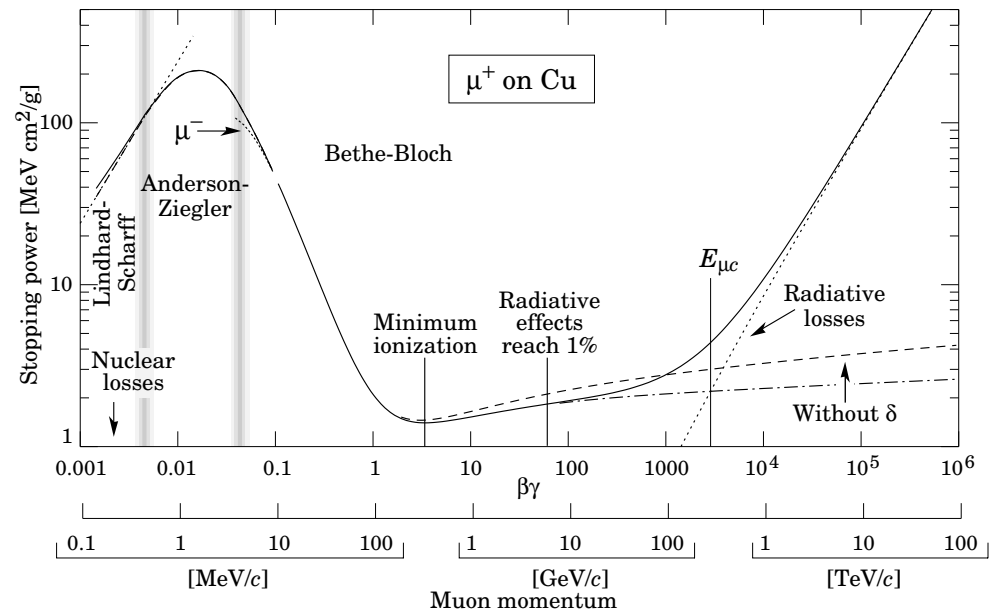
z polaryzacją ośrodka

Przy założeniu $m \gg m_e$

jonizacja zależy wyłącznie od β / γ

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 czasami używane ze względu na precyzję)
- wrzenie cieczy
⇒ komora pęcherzykowa (1952)
- wyładowanie elektryczne
⇒ komora iskrowa

Wykorzystywane współcześnie:

- świecenie (scyntyłacja)
⇒ 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 - **scyntyłacja**

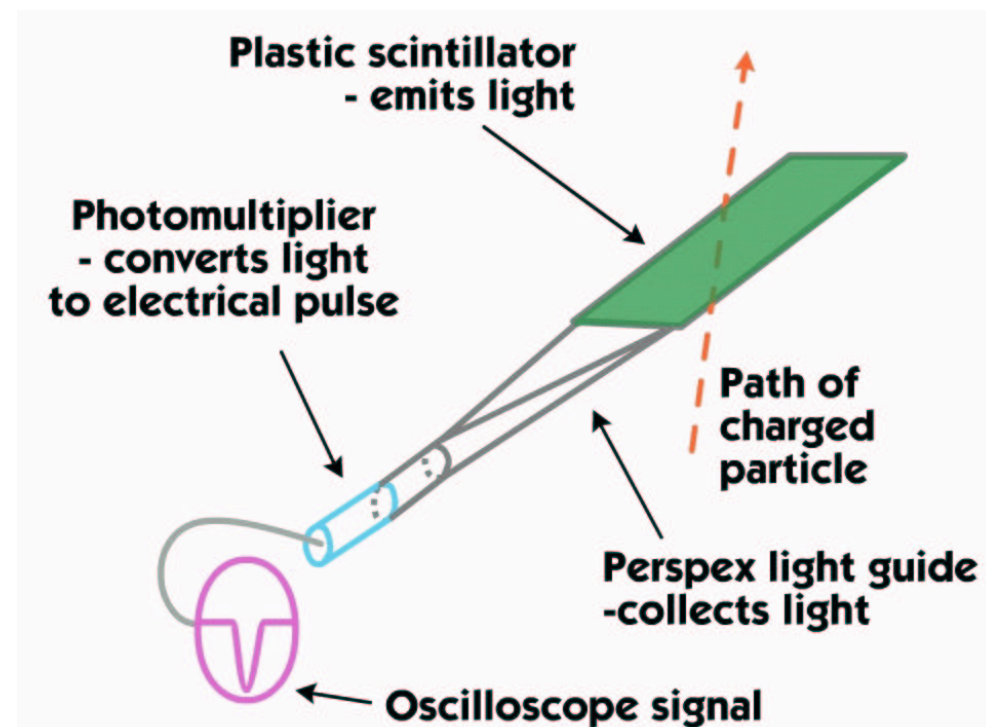
Emitowane fotony mogą być rejestrowane przez fotopowielacze, fotodiody lub inne elementy światłoczułe.

Zalety:

tanie, szybka odpowiedź detektora (kila ns)...

Wady:

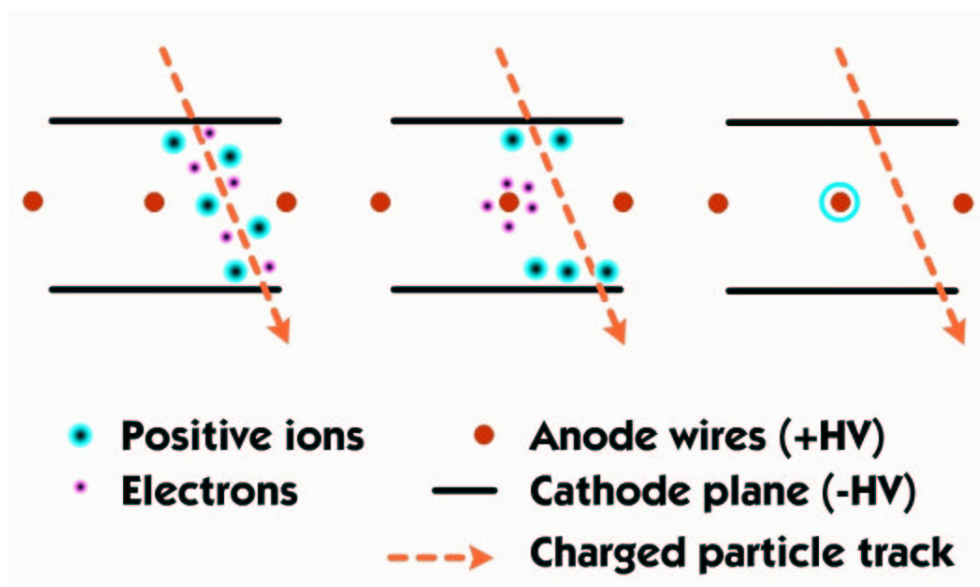
kłopotliwy tor optyczny, brak pomiaru pozycji...



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

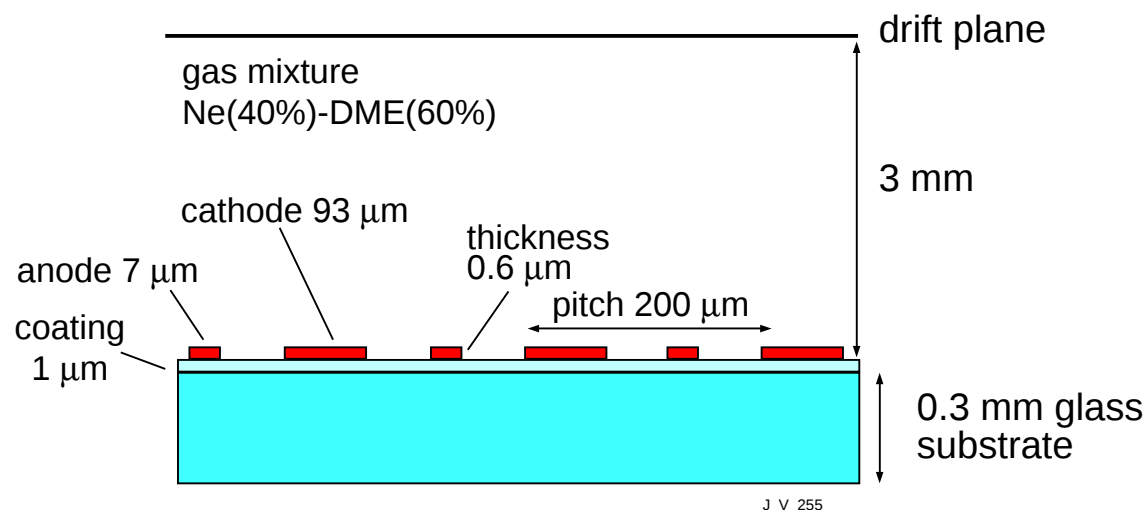
Liczniki gazowe

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

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

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 ($\sim 100\mu m$)**

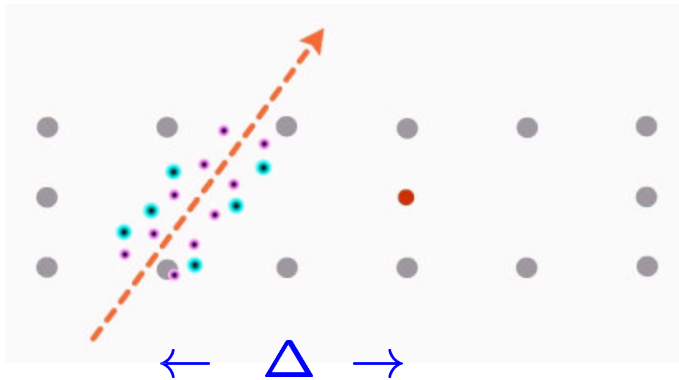
“pixle” zamiast pasków ⇒ możliwa rekonstrukcja 2-D !!!

Detektory

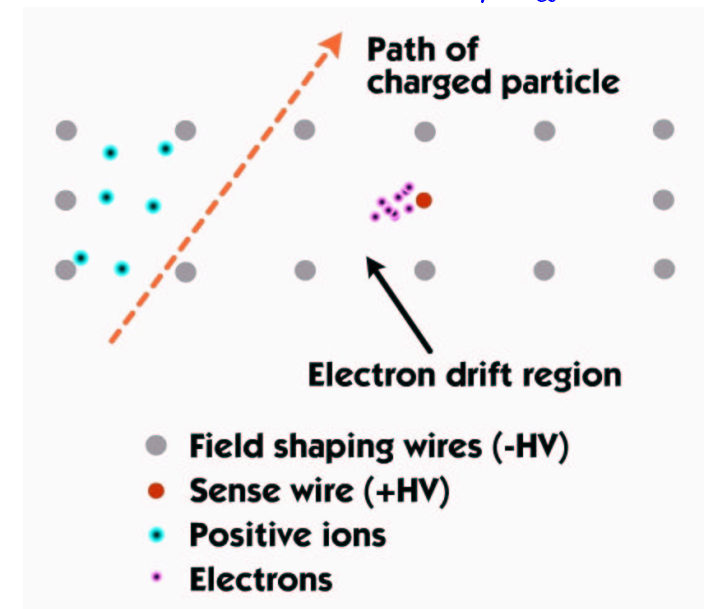
Komora dryfowa

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 Δt
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

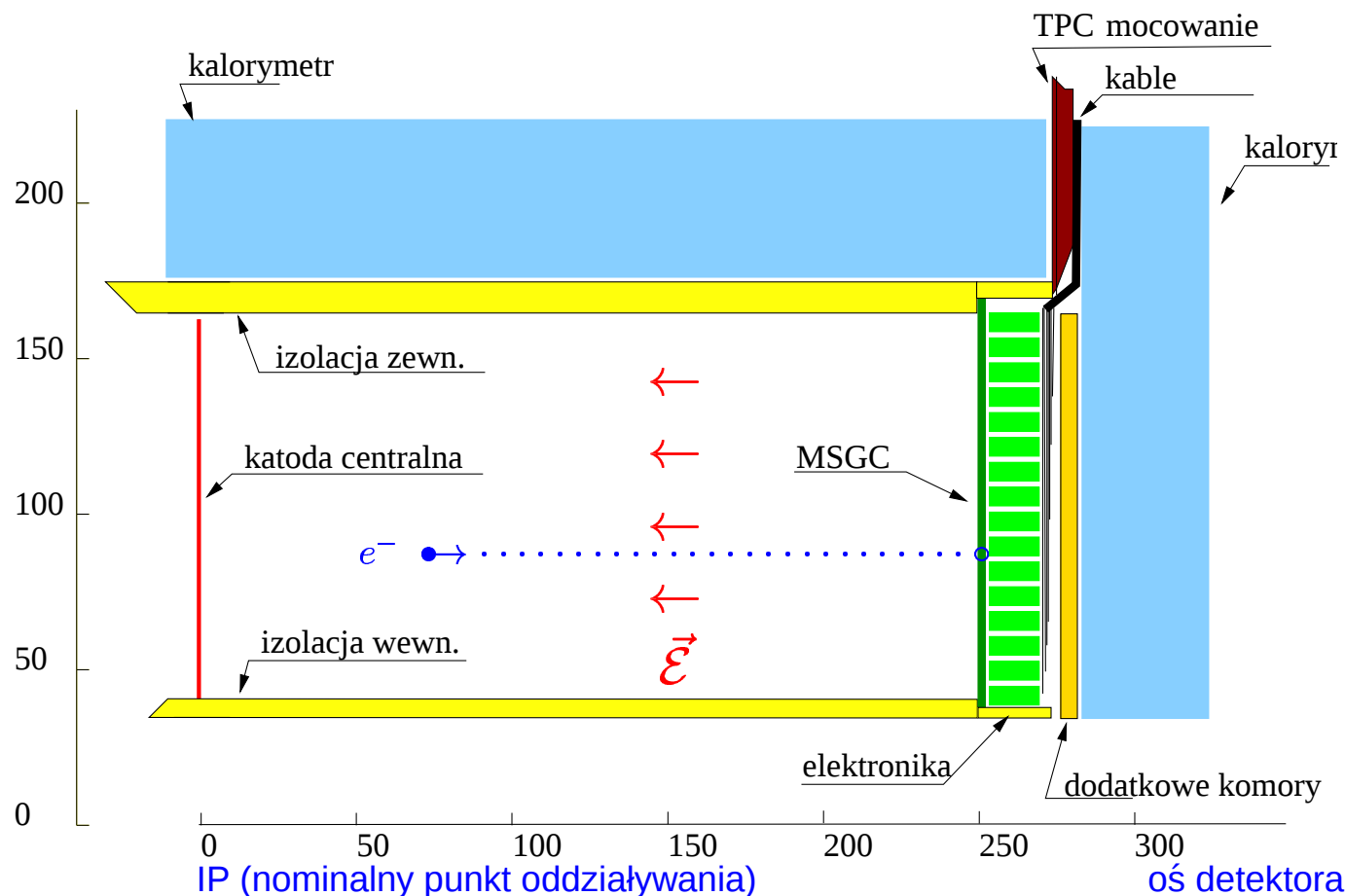
Komora TPC

Time Projection Chamber -
“komora projekcji czasowej”

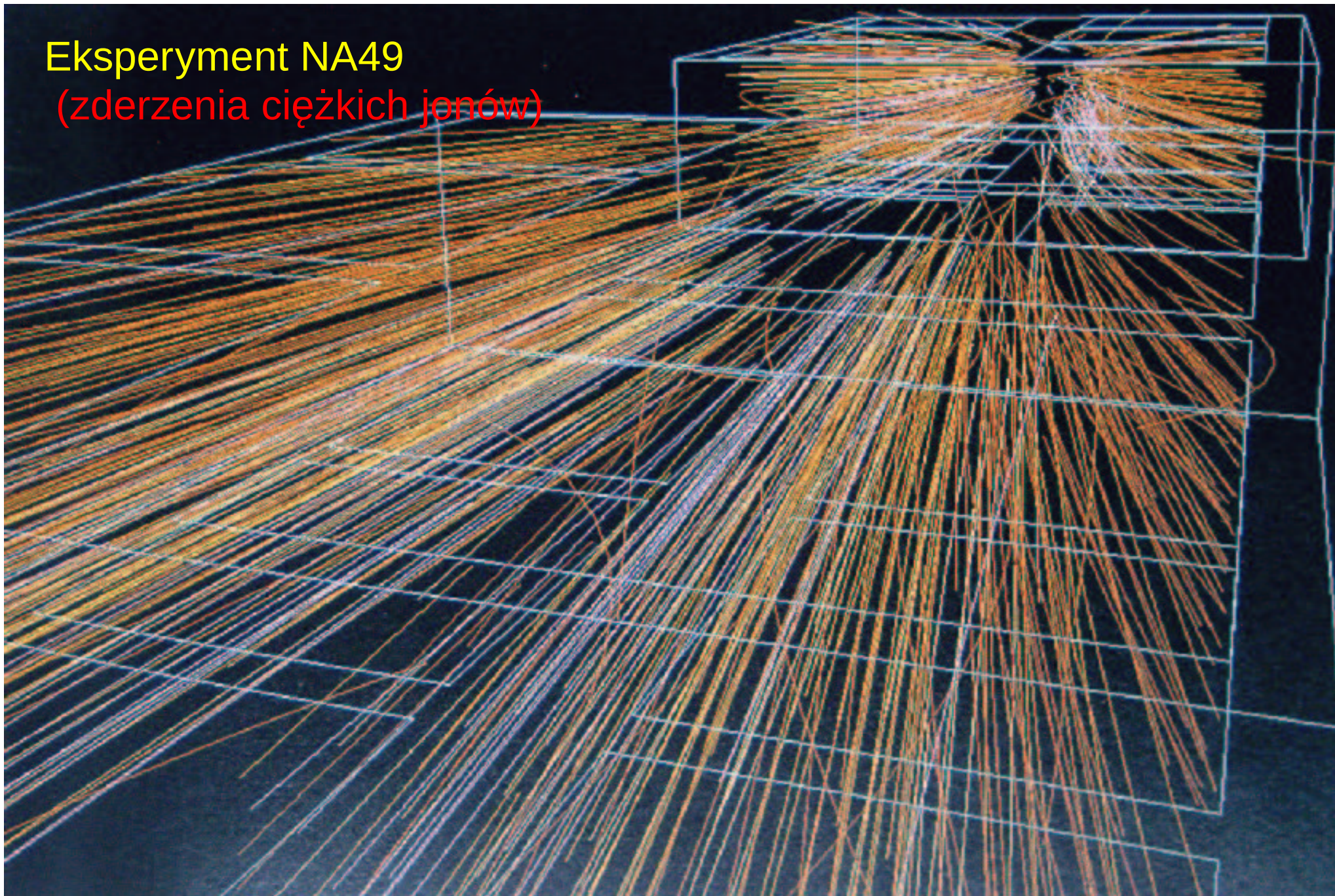
Pełna, **trójwymiarowa** (3D)
rekonstrukcja toru cząstki
na podstawie:

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

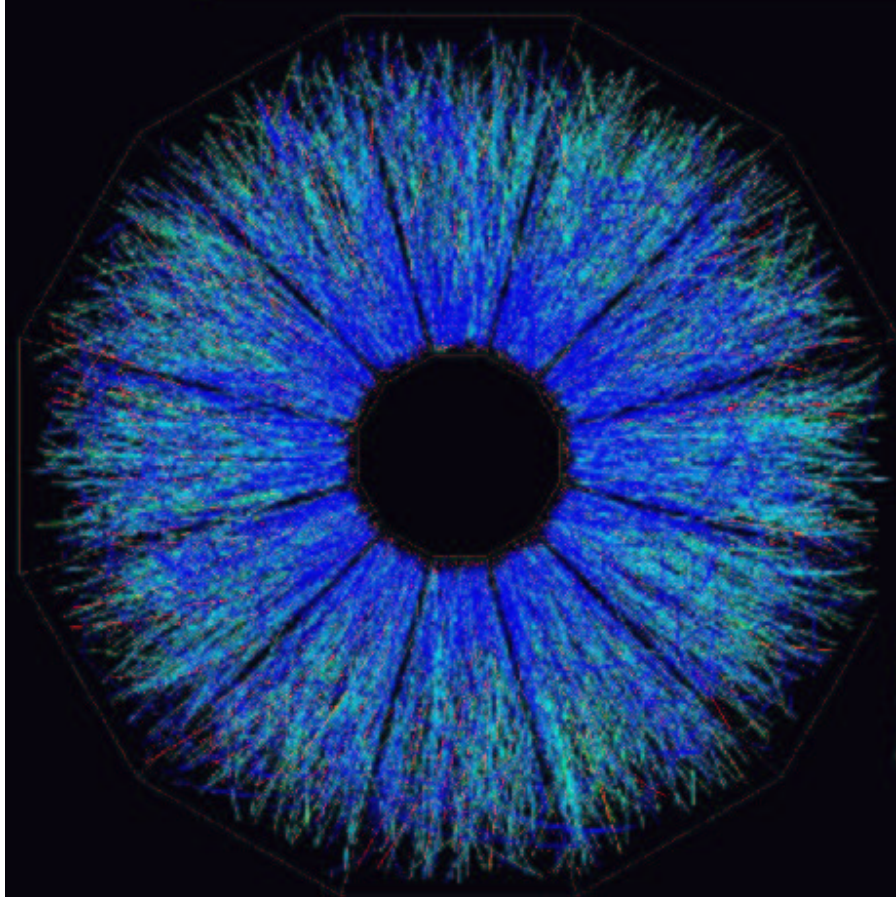
Schematyczny rysunek TPC (1/4 detektora):



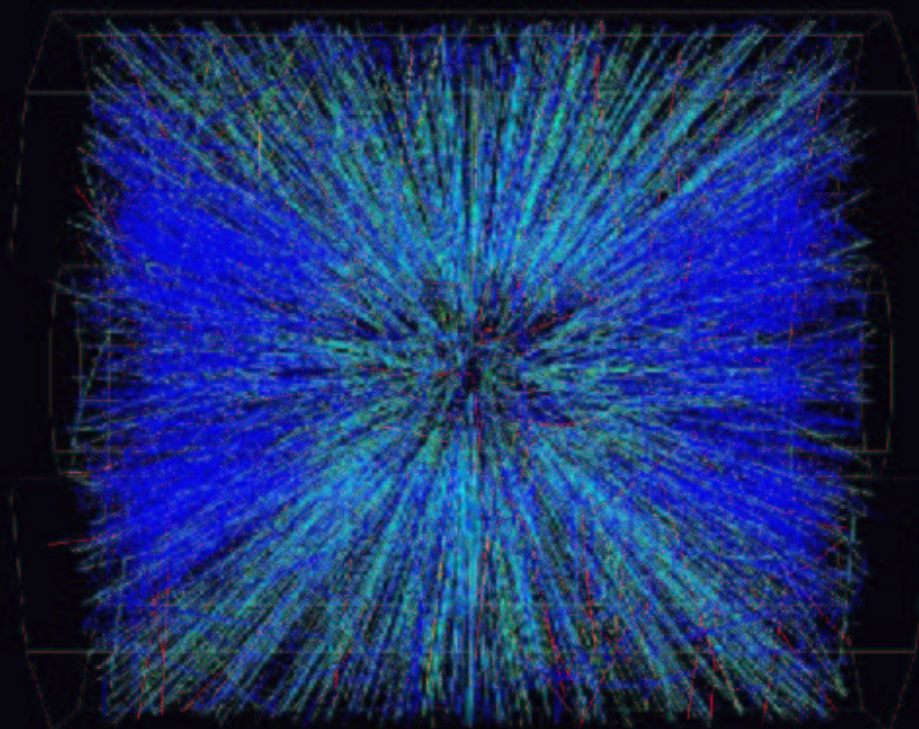
Eksperyment NA49 (zderzenia ciężkich jonów)



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



Central Event

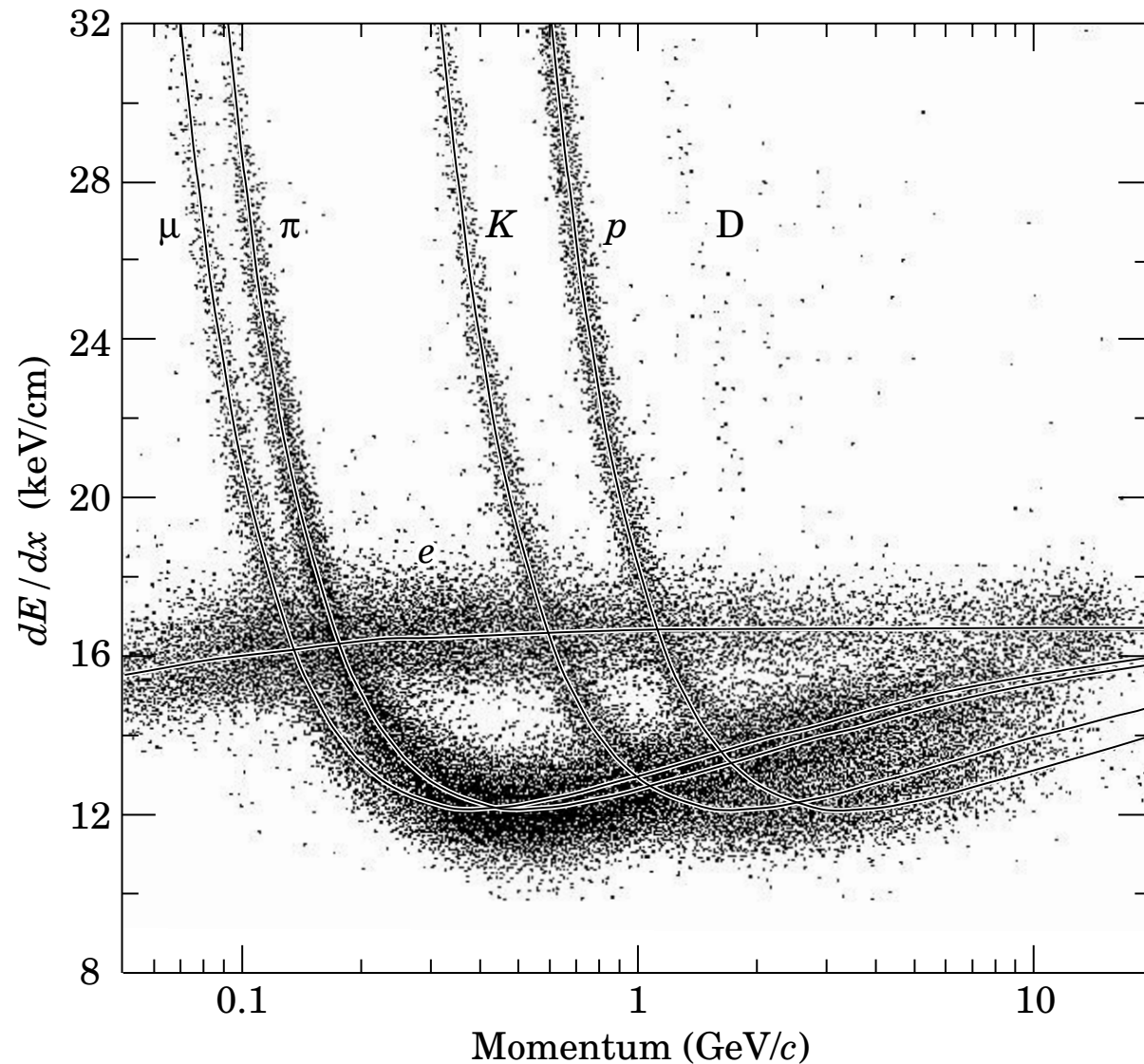


color code $\Rightarrow$ energy loss

Detektory

Komora TPC

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

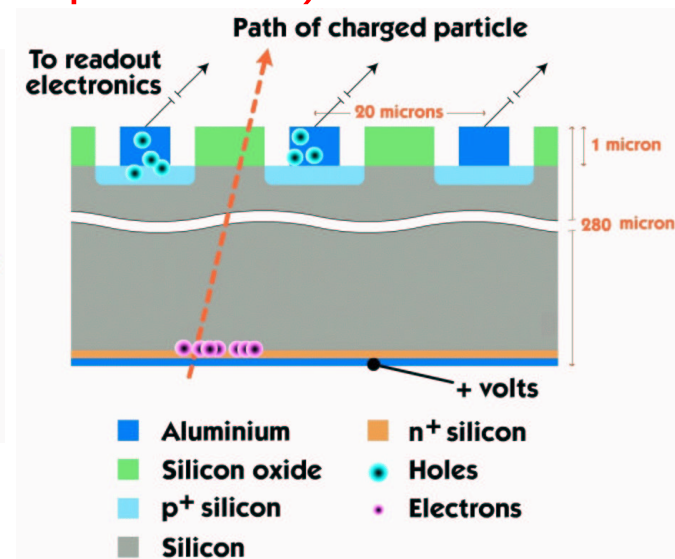
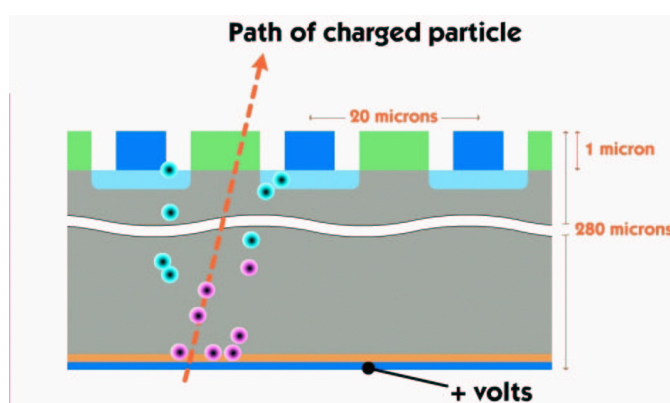
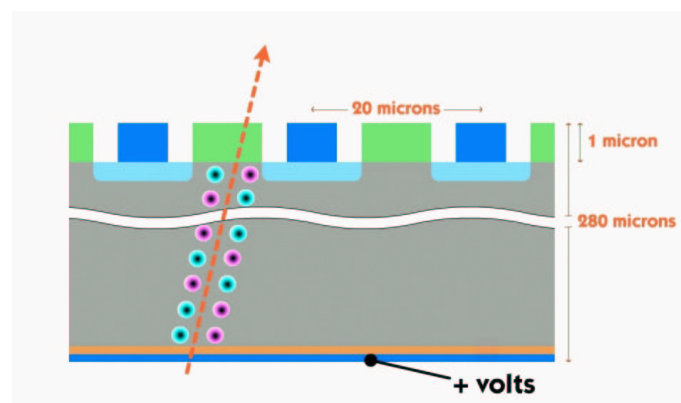


Detektory

Detektory półprzewodnikowe

Są coraz powszechniej używane w fizyce cząstek.

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



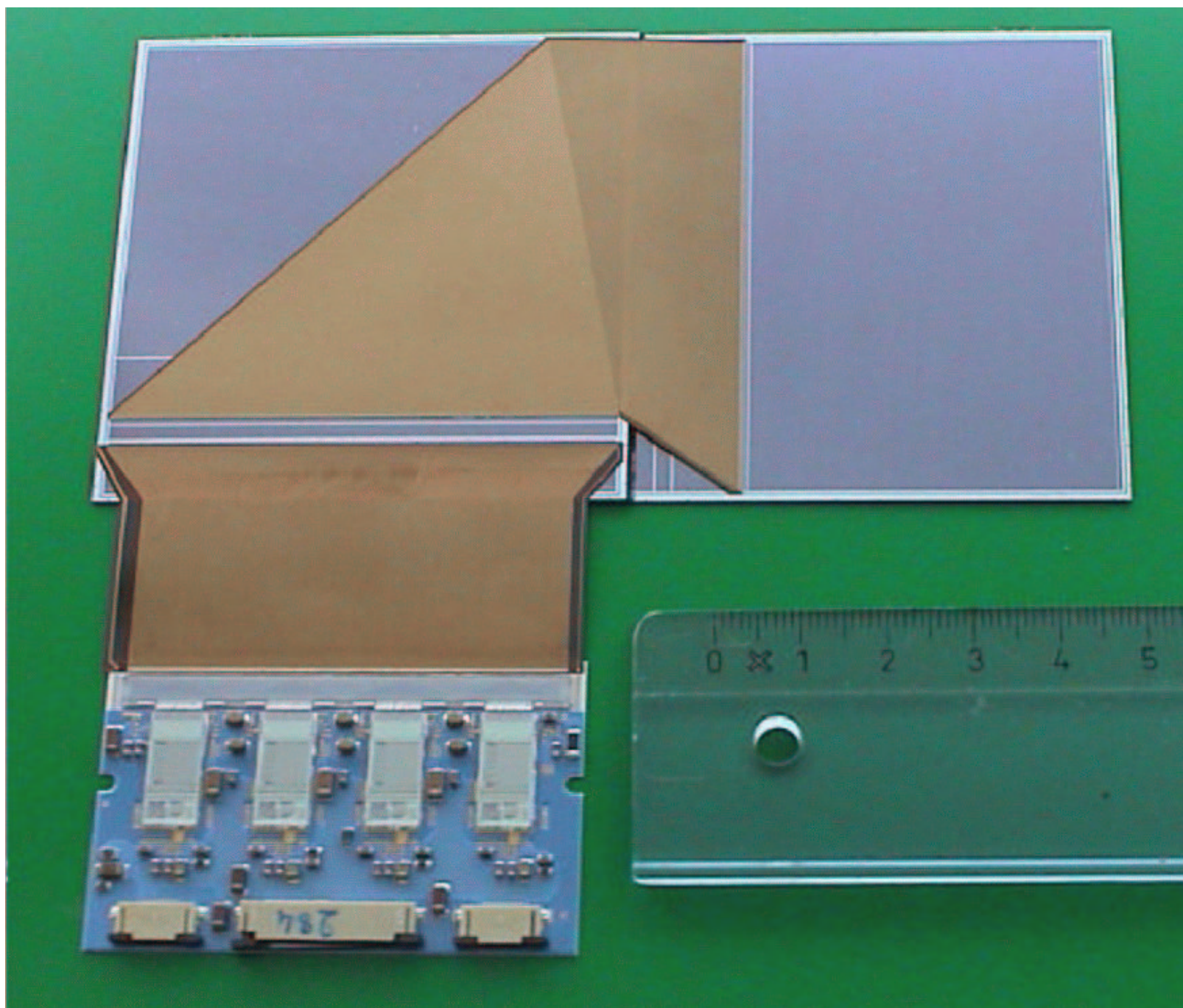
W wyniku jonizacji powstają swobodne elektrony i dziury.

⇒ 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



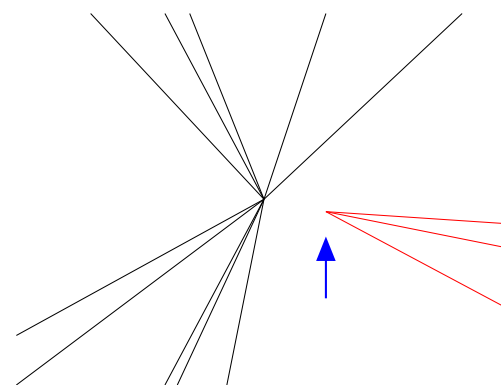
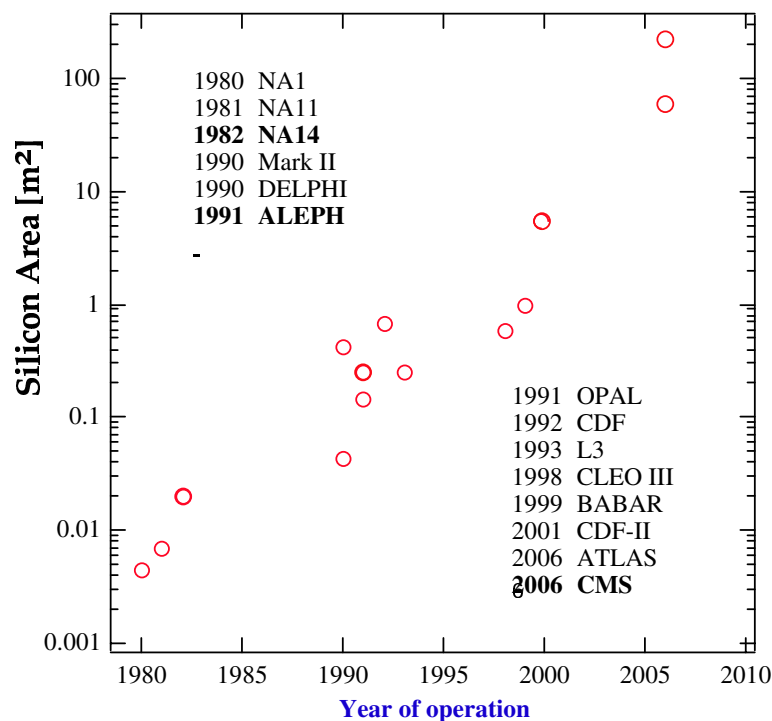
Detektory

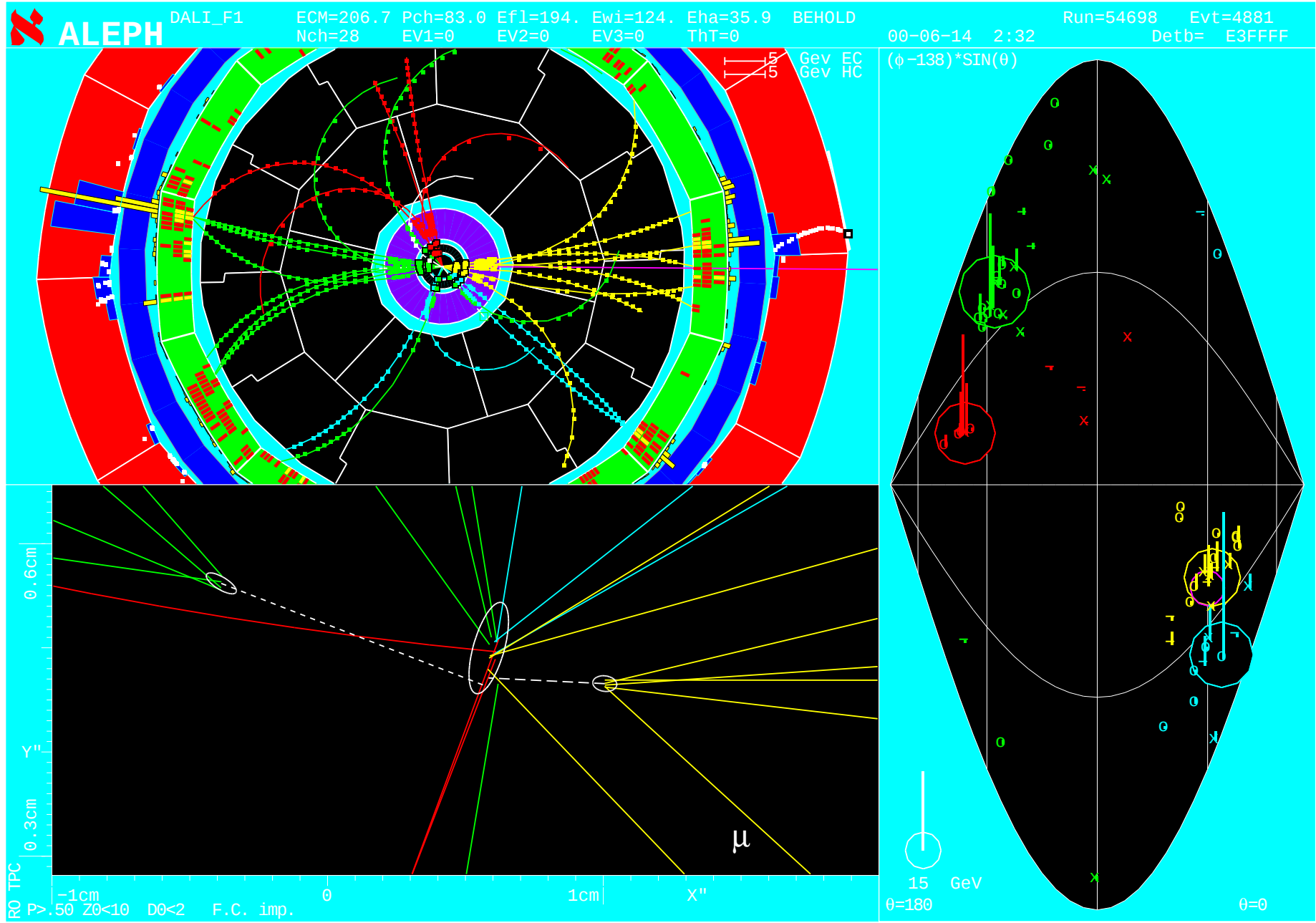
Detektory półprzewodnikowe

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 ; $c\tau \sim 0.5\text{mm}$)





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):

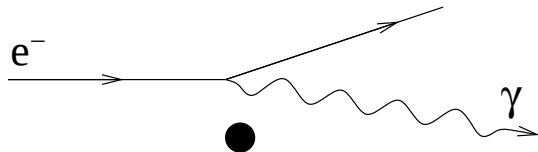
- elektromagnetyczne (elektronowo-fotonowe) - wywoływane przez elektrony, pozytony, fotony, π^0
- hadronowe - wywoływane przez inne, silnie oddziałujące cząstki

Detektory

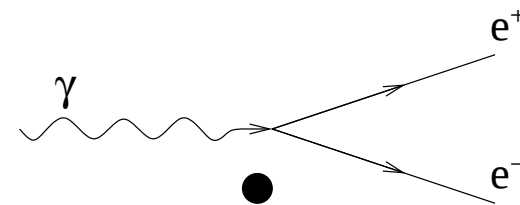
Kalorymetry elektromagnetyczne

Dla energii powyżej $E_c \sim 10$ MeV:

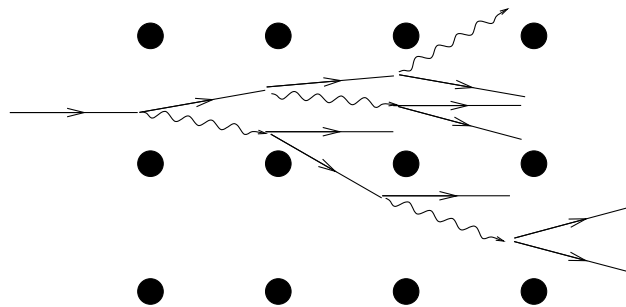
elektrony tracą energię prawie wyłącznie na **promieniowanie hamowania**



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

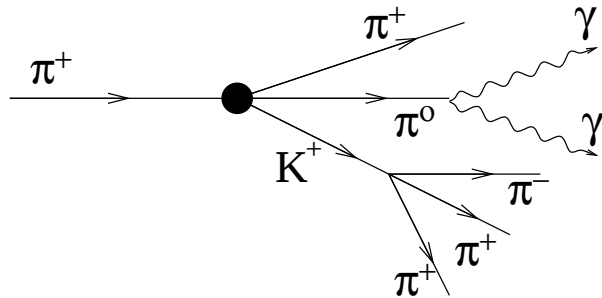
⇒ **100% tracone na jonizację** ośrodka

⇒ 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 rozbite jąder oraz neutrino produkowane w rozpadach.

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

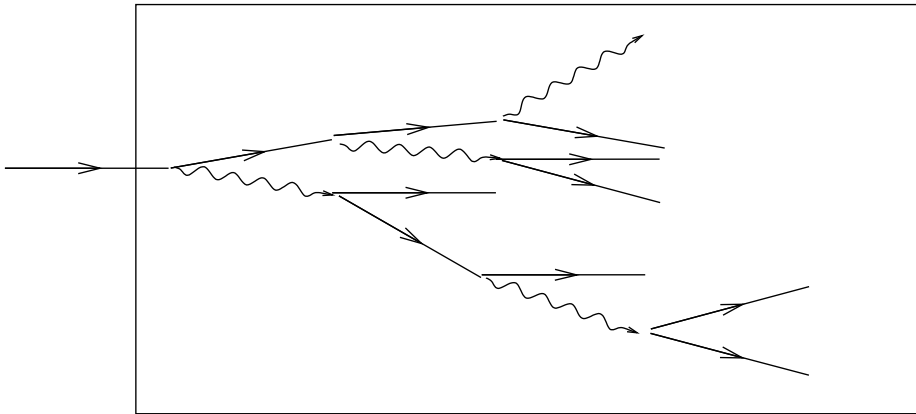
$$\frac{\sigma_E}{E} \sim \frac{50\%}{\sqrt{E[\text{GeV}]}}$$

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

Detektory

Kalorymetry jednorodne

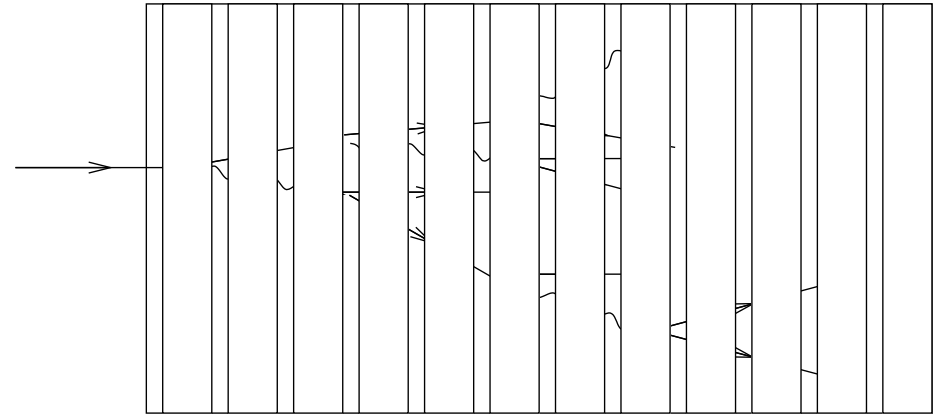
Kaskada rozwija się wyłącznie w materiale aktywnym (pozwalającym na pomiar strat energii):



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**

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**.

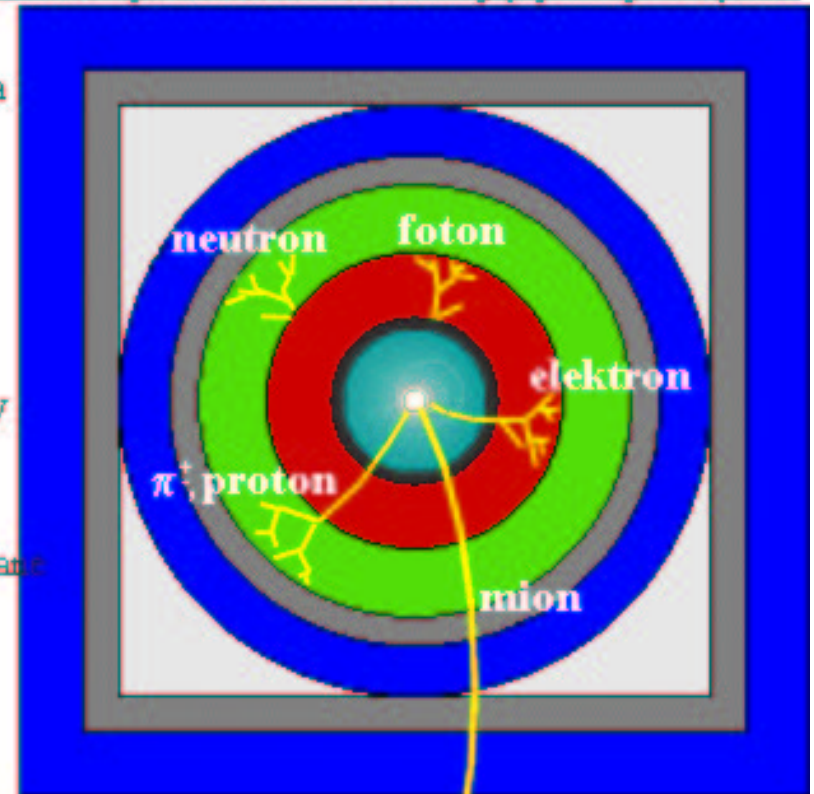
Ułożone **jeden za drugim** detektory umożliwiają optymalny pomiar **wszystkich rodzajów cząstek** i ich (zwykle częściową) identyfikację.

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

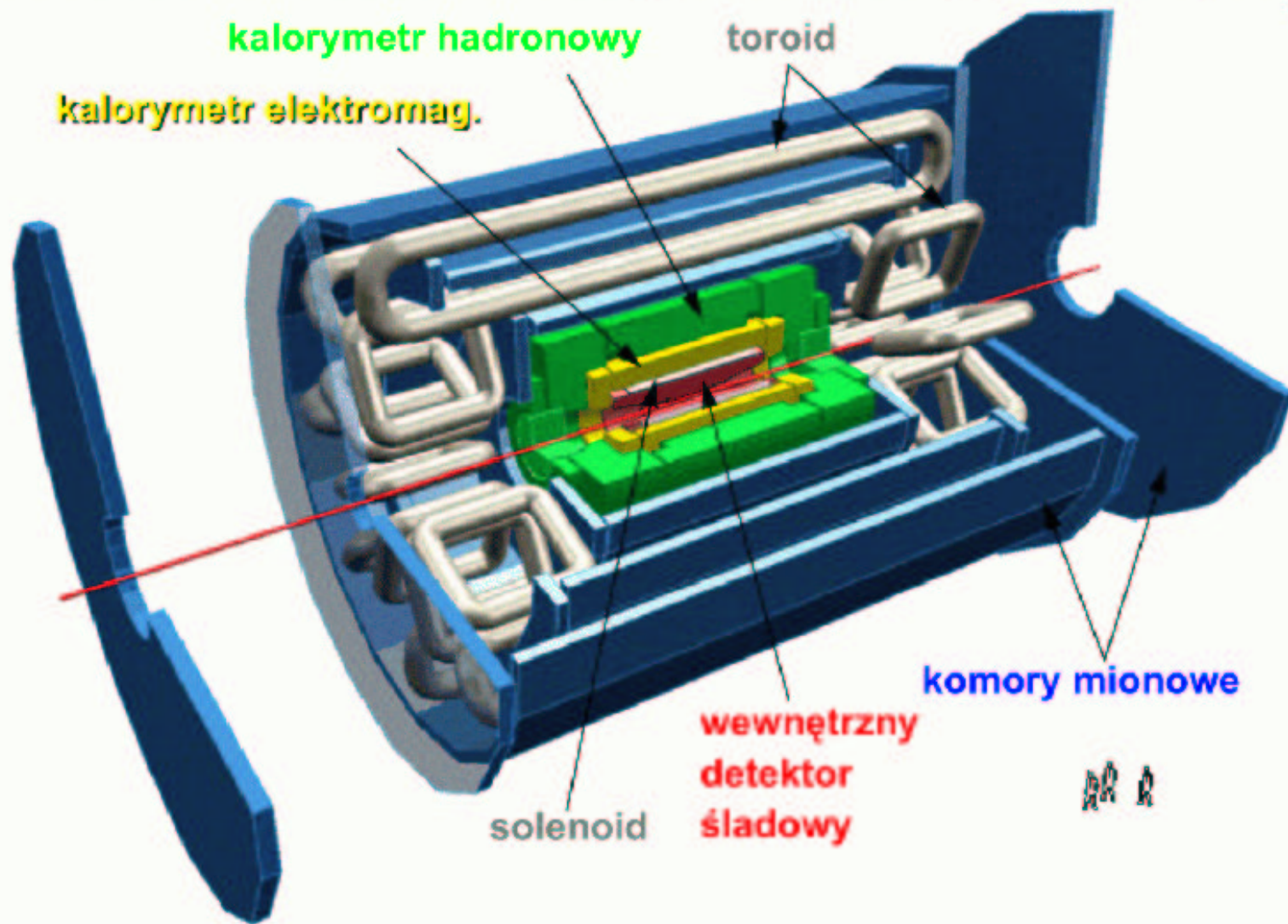
$$1X_0 \ll 1\lambda_{int}$$

Przekrój poprzeczny detektora, ilustrujący tory cząstek

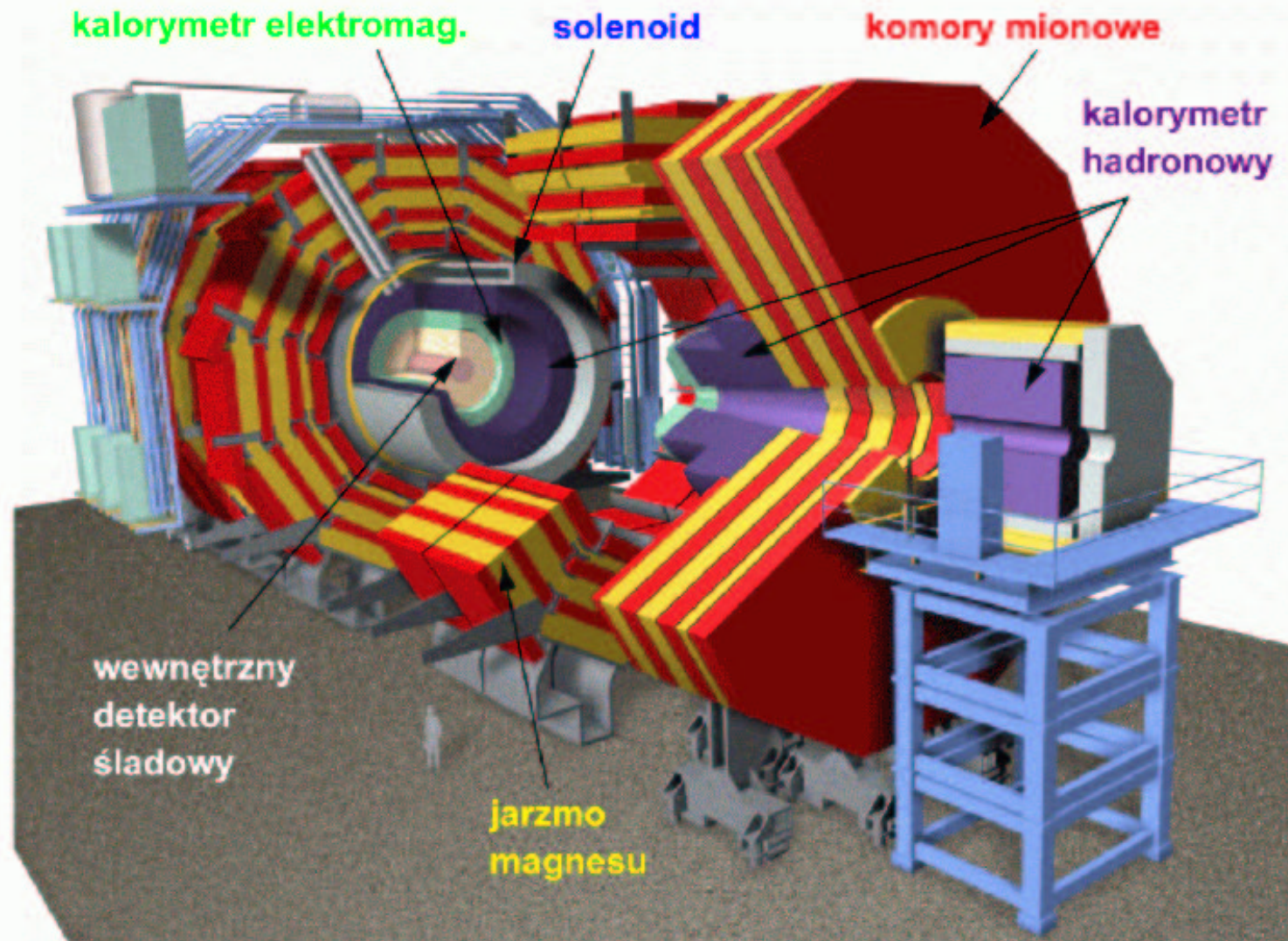
-  rura dryfowa
-  komora trackera
-  solenoid magnesu
-  kalorymetr elektromagnetyczny
-  kalorymetr hadronowy
-  namagnesowane żelazo
-  komory mionowe

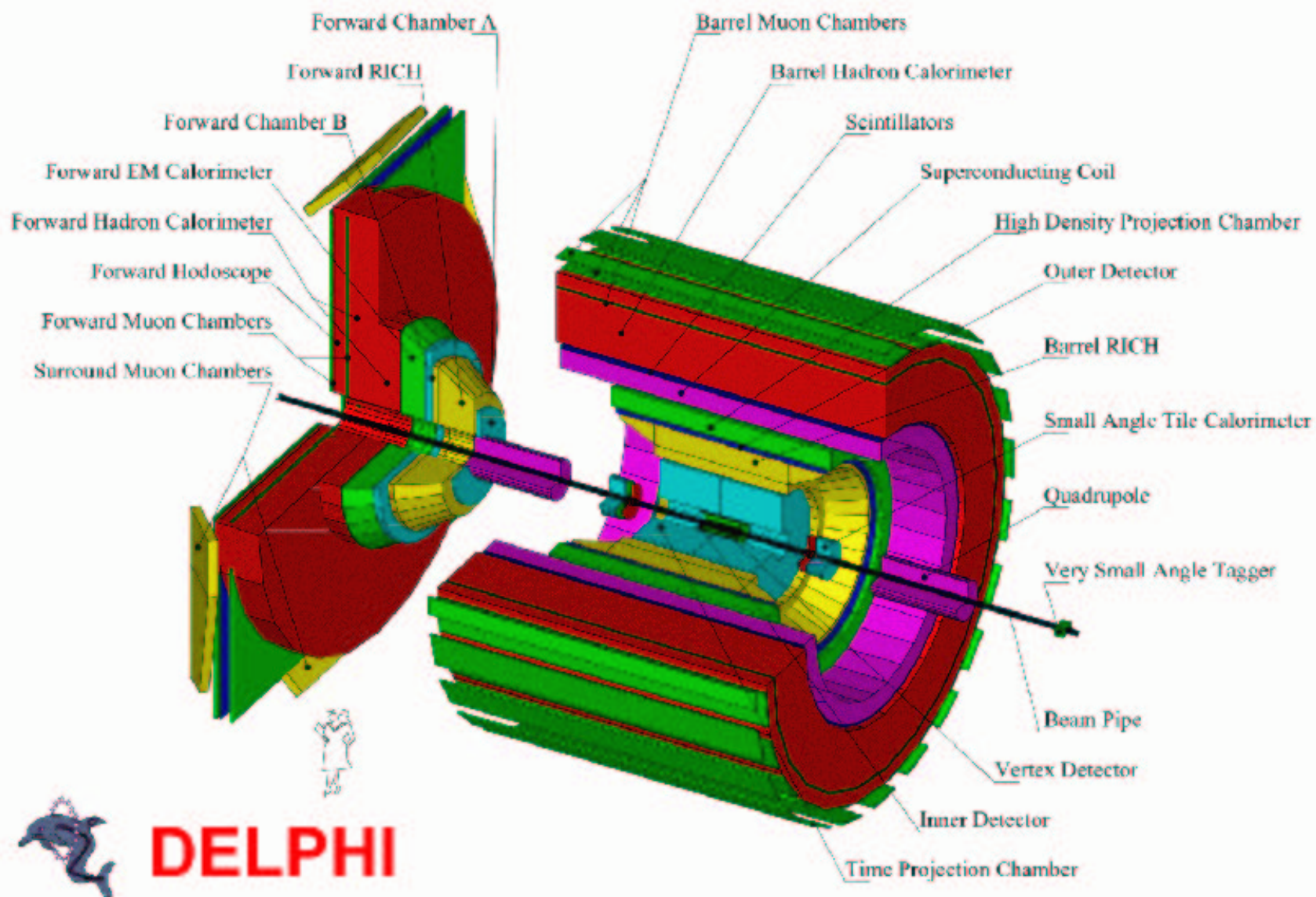


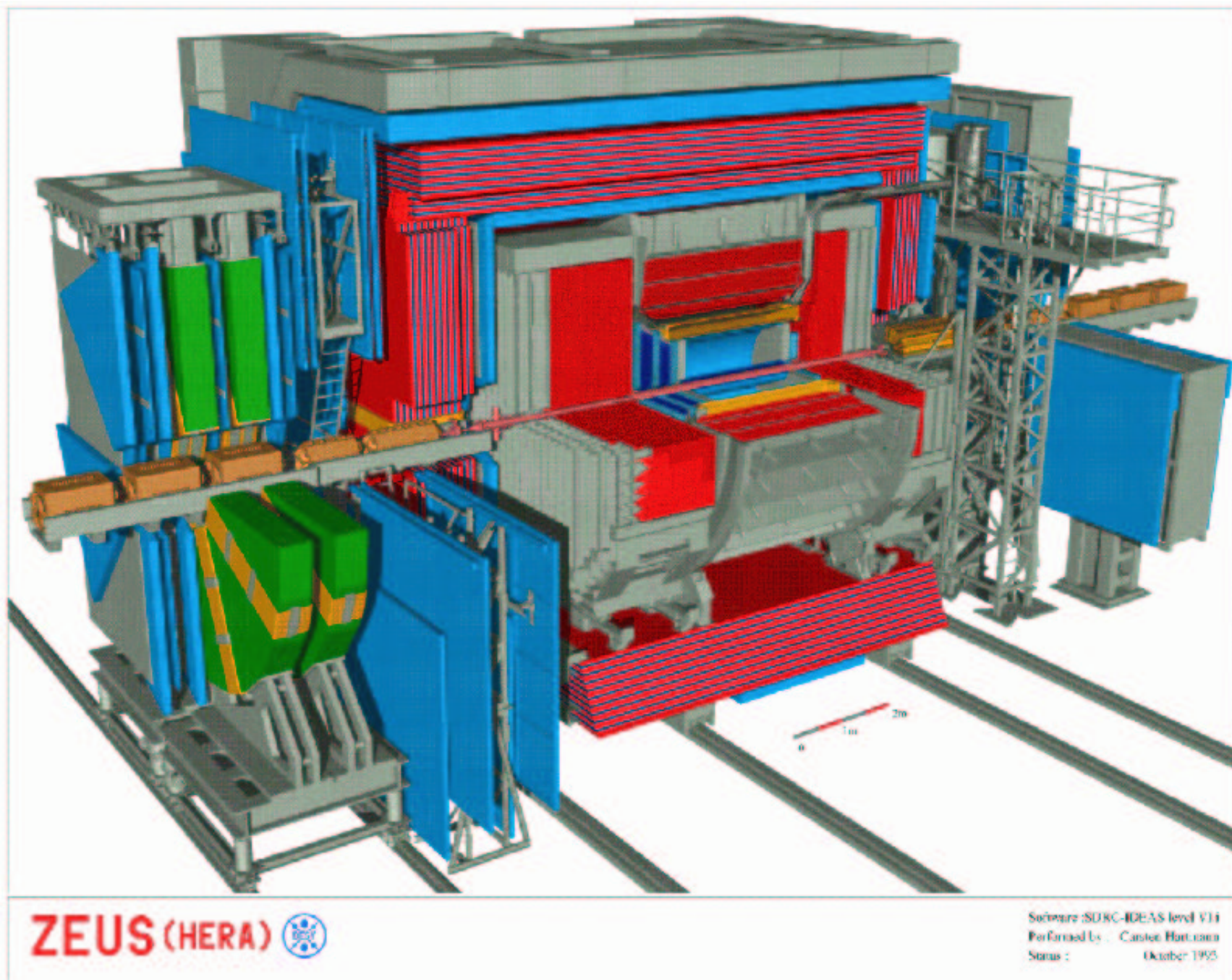
A Toroidal LHC ApparatuS (ATLAS)



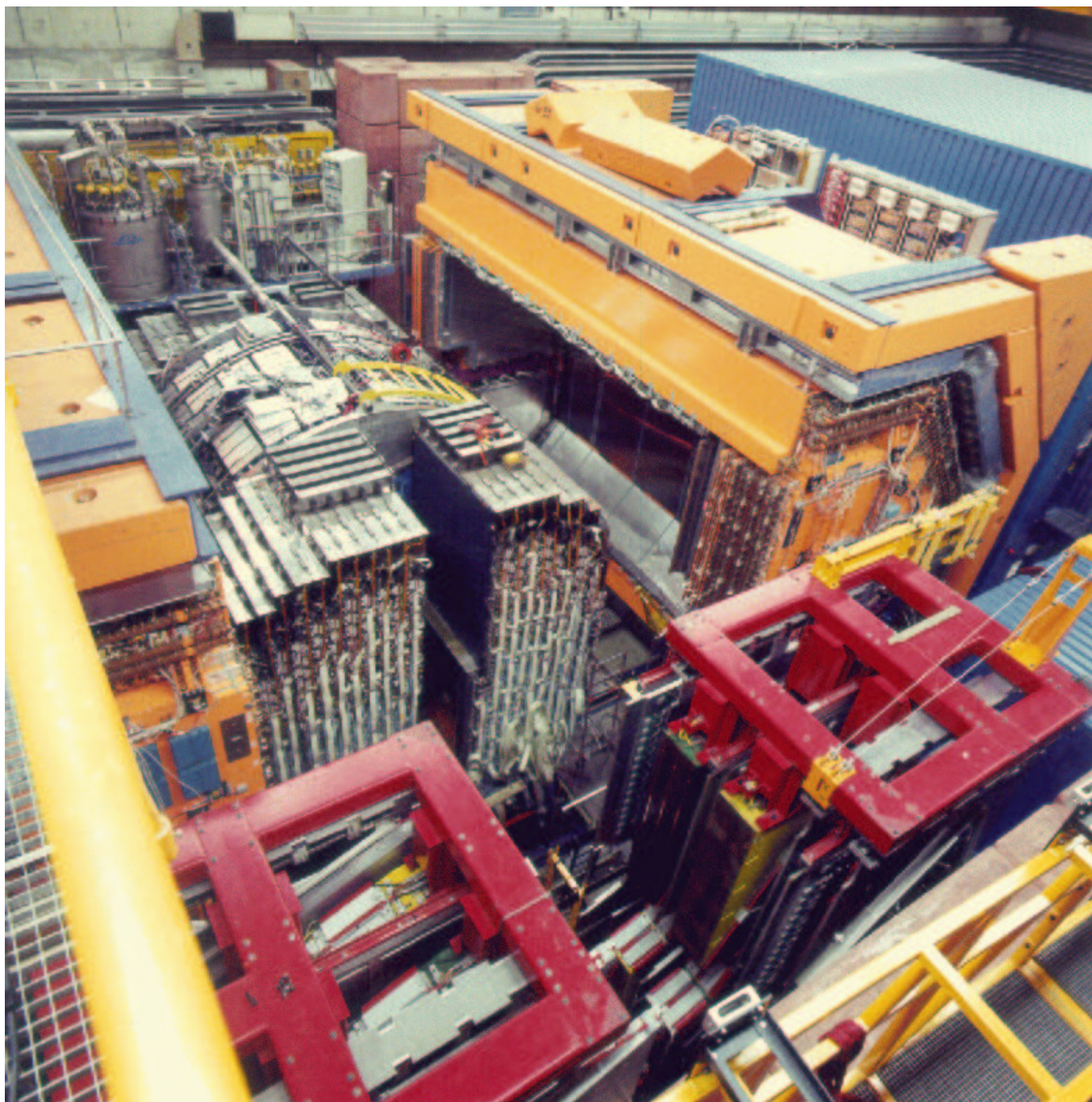
Compact Muon Solenoid

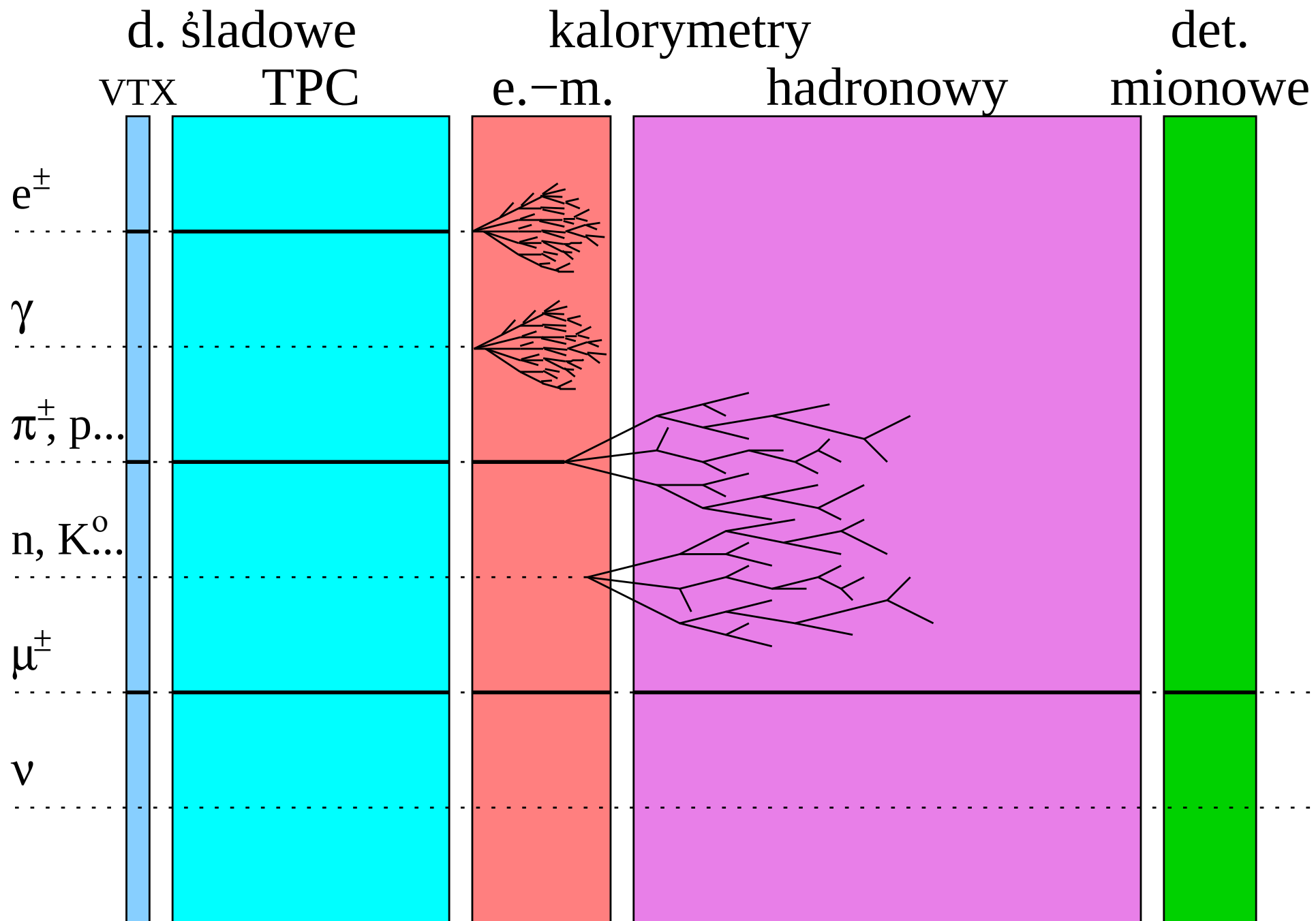






Eksperyment ZEUS





Przypadek
rozpraszania
elektron-proton

Ekspertment H1

