Akceleratory

Aby uzyskiwać coraz wyższe energie wiązek musimy budować coraz większe (i droższe) 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 tanie 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 musialby być wielokrotnie większy niż akcelerator kołowy...

Akceleratory

Ograniczenia

W przypadku akceleratorów kołowych $e^{\pm}$:

$\Rightarrow$ pole przyspieszające

Elektrony krążące po orbicie tracą energie na promieniowanie hamowania.

Średnia energia tracona na jeden obieg:

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

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

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

$\Rightarrow$ maksymalna dostępna energia

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

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

Dalej tylko akceleratory liniowe: $E_{max} \sim L \left\langle \mathcal{E} \right\rangle$

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)

$\Rightarrow$ potrzebujemy coraz większych świetlności

Akceleratory

Świetlność

Świetlność zależy od:

- częstości f przecięć wiązek (paczek/pulsów)
- liczby cząstek w paczce n
- poprzecznych rozmiarów wiązki σ

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

Problem zwłaszcza w akceleratorach liniowych:
po jednym "przecięciu" wiązka jest tracona
$\Rightarrow$ trudno uzyskać jednocześnie duże f i duże n

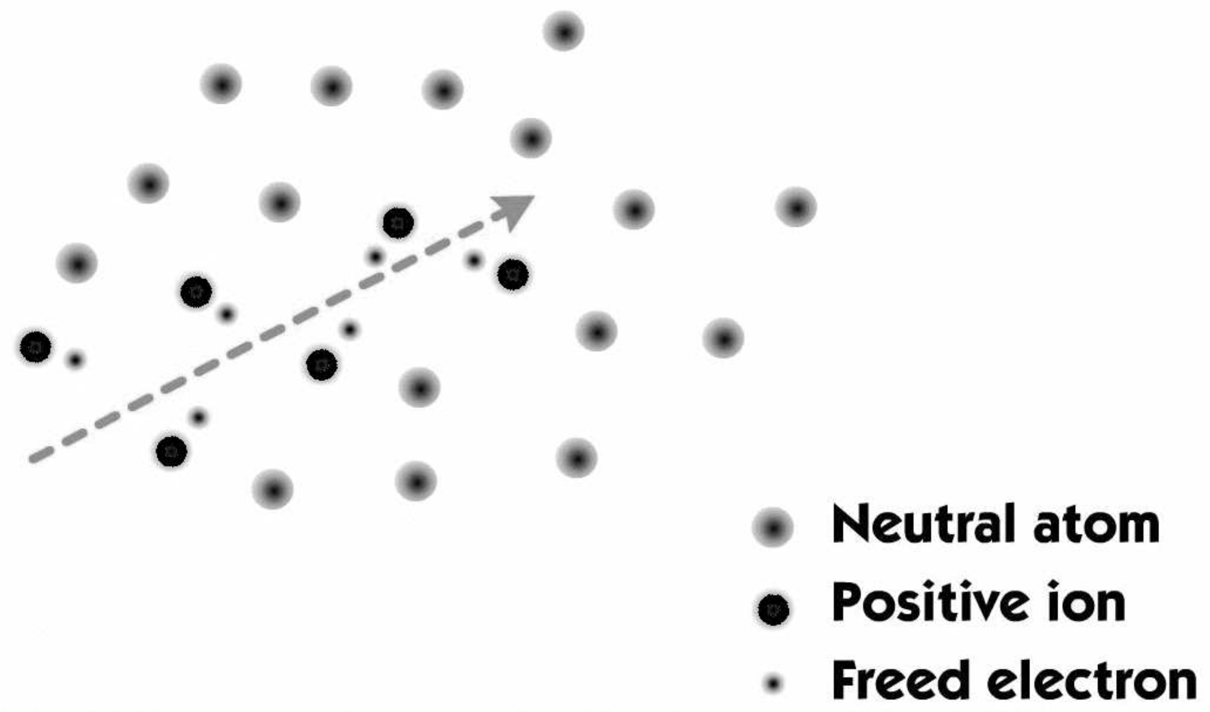
$\Rightarrow$ konieczne jest uzyskanie bardzo małych rozmiarów poprzecznych wiązek.

LEP:	$\sigma_x \approx 300\ \mu m$	
	$\sigma_y \approx 8\ \mu m$	$\mathcal{L} \sim 6 \cdot 10^{31}\ \frac{1}{cm^2 s}$
Projekt TESLA:	$\sigma_x \approx 0.5\ \mu m$	
	$\sigma_y \approx 5\ nm$ (!)	$\mathcal{L} \sim 3 \cdot 10^{34}\ \frac{1}{cm^2 s}$
rok "roboczy":	$1y \approx 10^7 s$	$\Rightarrow\ \sim 300\ fb^{-1}$

Detektory

Jonizacja

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



Cząstka naładowana przechodząc przez ośrodek oddaje część swojej energii elektronom, “wybijając” je z atomów.

Detektory

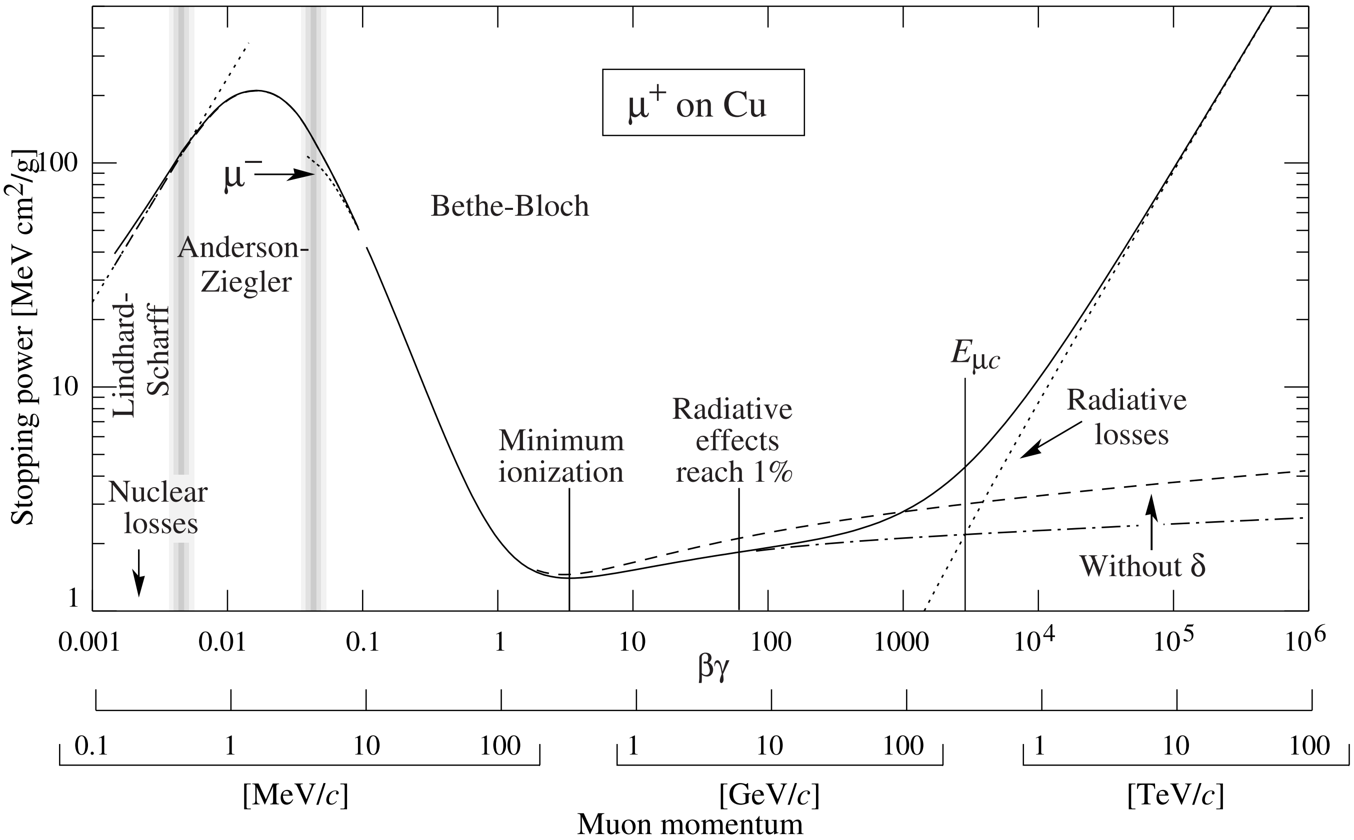
Jonizacja

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, β - jej prędkość
I - energia jonizacji; dla wiekszości materiałów $\sim$10 eV
δ - poprawka związana z polaryzacją ośrodka

$\leftarrow$ wzór Bethe-Blocha $\rightarrow$



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

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

Detektory

Jonizacja

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

Metody “historyczne”:

- kondensacja pary
  $\Rightarrow$ komora mgłowa Wilsona (1911)
- reakcje chemicznych
  $\Rightarrow$ ślady cząstek w emulsji “fotograficznej” ($\sim$1930)
  (wciąż czasami używane ze względu na precyzję pomiaru)
- wrzenie cieczy
  $\Rightarrow$ komora pęcherzykowa (1952)
- wyładowanie elektryczne
  $\Rightarrow$ komora iskrowa

Wykorzystywane współcześnie:

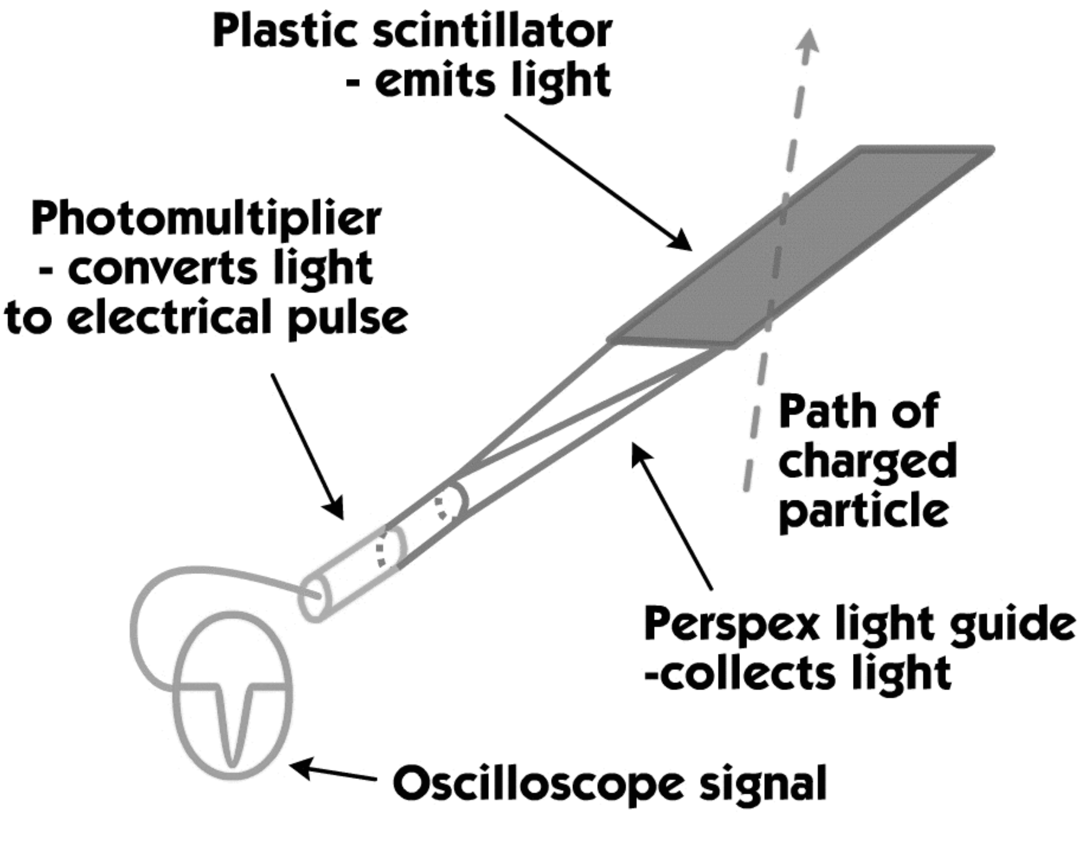
- świecenie (scyntylacja)
  $\Rightarrow$ liczniki scyntylacyjne
- przepływ prądu
  $\Rightarrow$ liczniki gazowe
  $\Rightarrow$ detektory półprzewodnikowe

Detektory

Licznik scyntylacyjny

W niektórych substancjach (kryształach lub 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 (kila ns)...

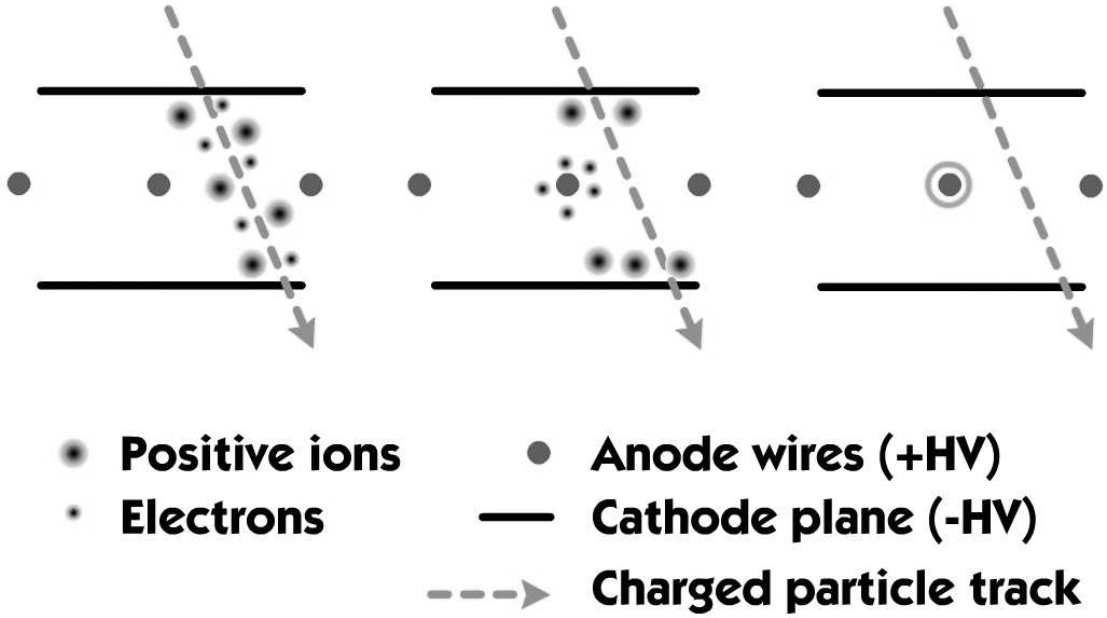
Wady: kłopotliwy tor optyczny, brak pomiaru pozycji...

Detektory

Liczniki gazowe

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

Wielodrutowa komora proporcjonalna:



Pole elektryczne jest najsilniejsze przy drutach anodowych.

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

$\Rightarrow$ "wzmocnienie gazowe" ($\sim 10^3$ do 10^6)

Nagroda Nobla 1992 - Georges Charpak:

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

Detektory

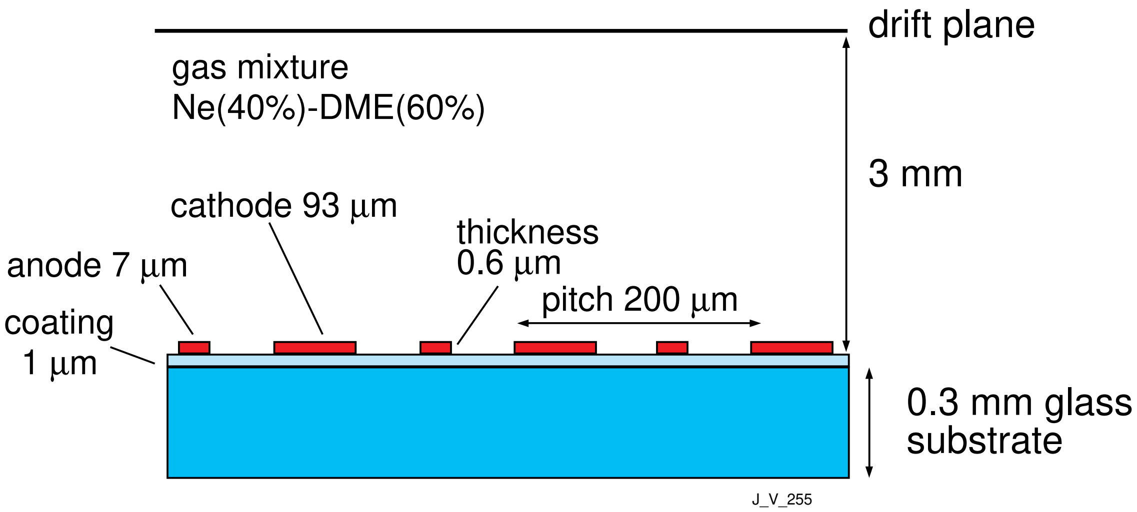
Liczniki gazowe

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 proporcjonalne, 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

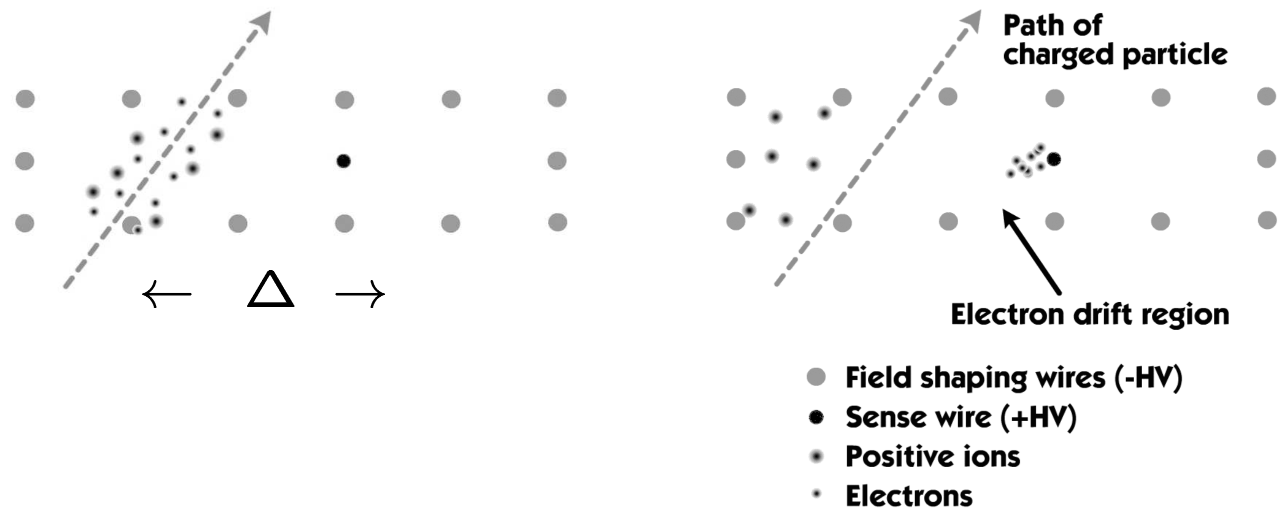
Odległości między paskami mogą być dużo mniejsze
$\Rightarrow$ dokładniejsze pomiary torów ($\sim 100\mu m$)

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

Komora dryfowa

Komora proporcjonalna z wydłużonym obszarem dryfu:

$t = 0$ $\qquad\qquad$ $t = \Delta t \approx \Delta / v_d$



Znając prędkość dryfu elektronów w komorze v_d
oraz opóźnienie impulsu z komory Δt
możemy wyznaczyć pozycję cząstki...

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

Dokładność pomiaru czasu $\sim 1 ns$

$\Rightarrow$ dokładność pozycji $\sim 100 \mu m$

Wada: pomiar tylko w jednym wymiarze...

Detektory

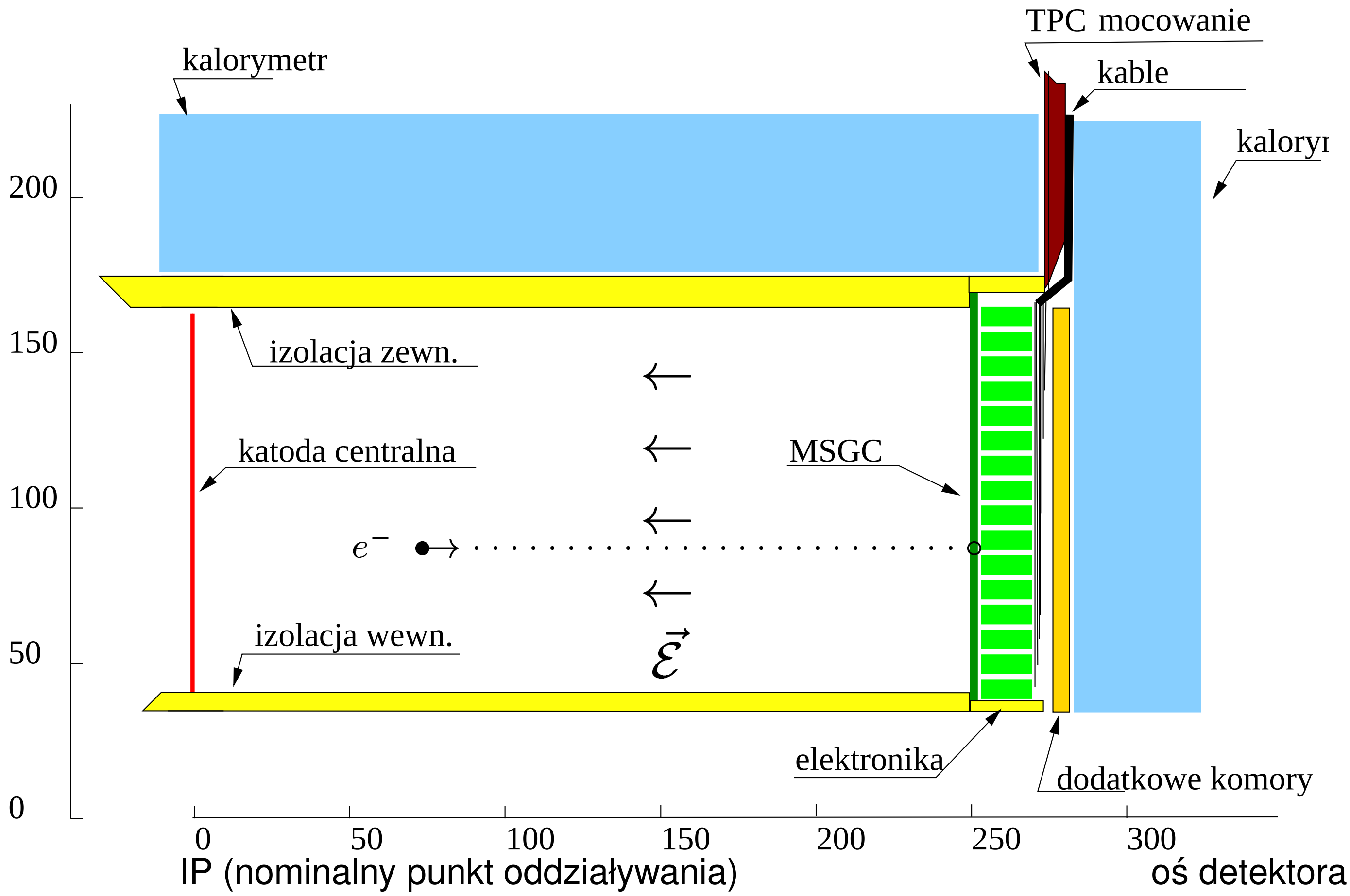
Komora TPC

Time Projection Chambre - “komora projekcji czasowej”

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

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

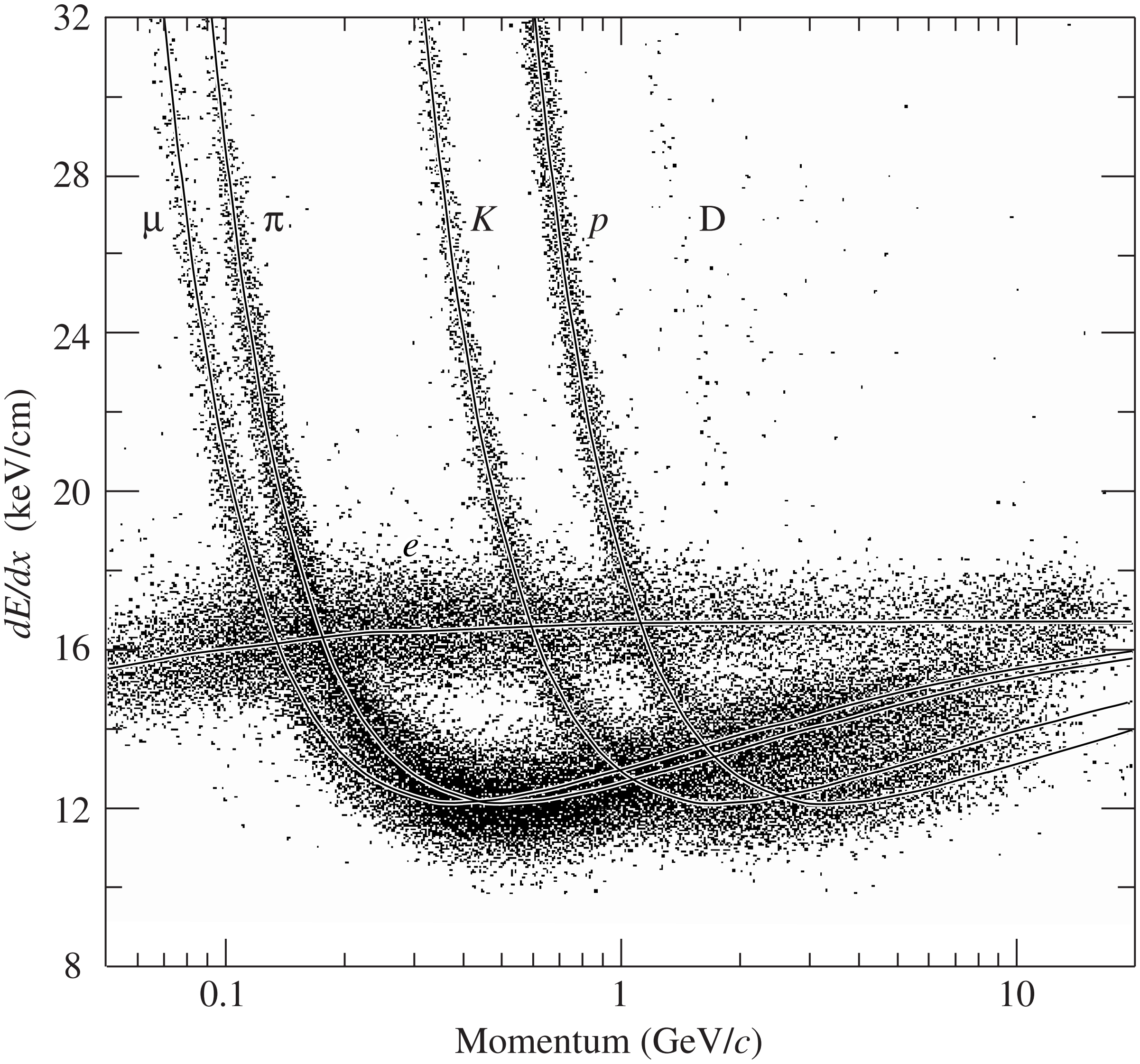
Schematyczny rysunek TPC (1/4 detektora):



Detektory

Komora TPC

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

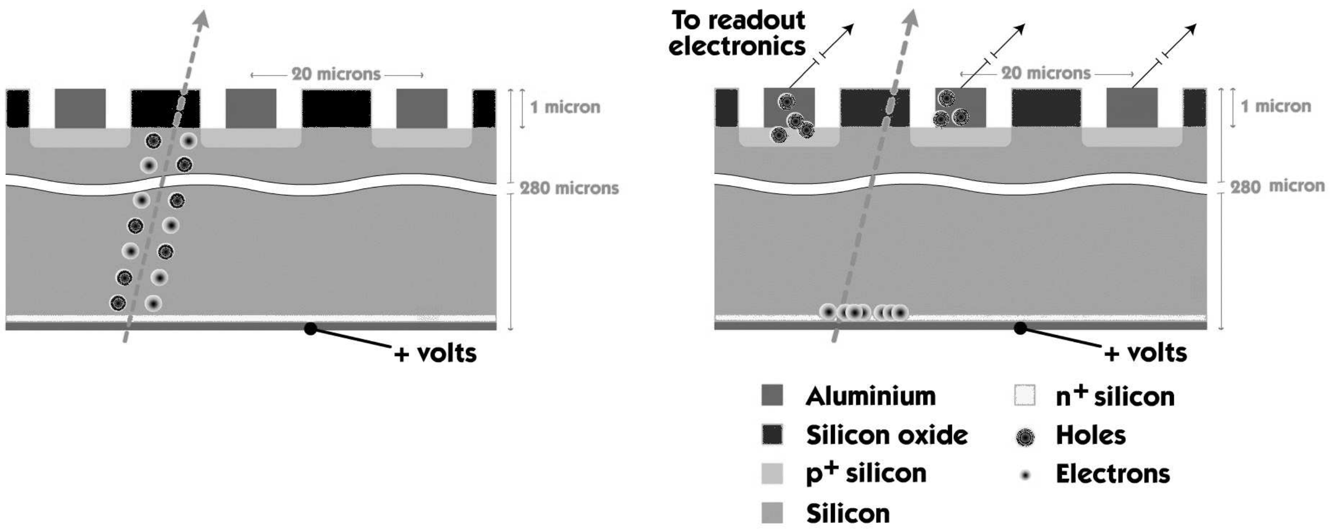


Detektory

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.

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

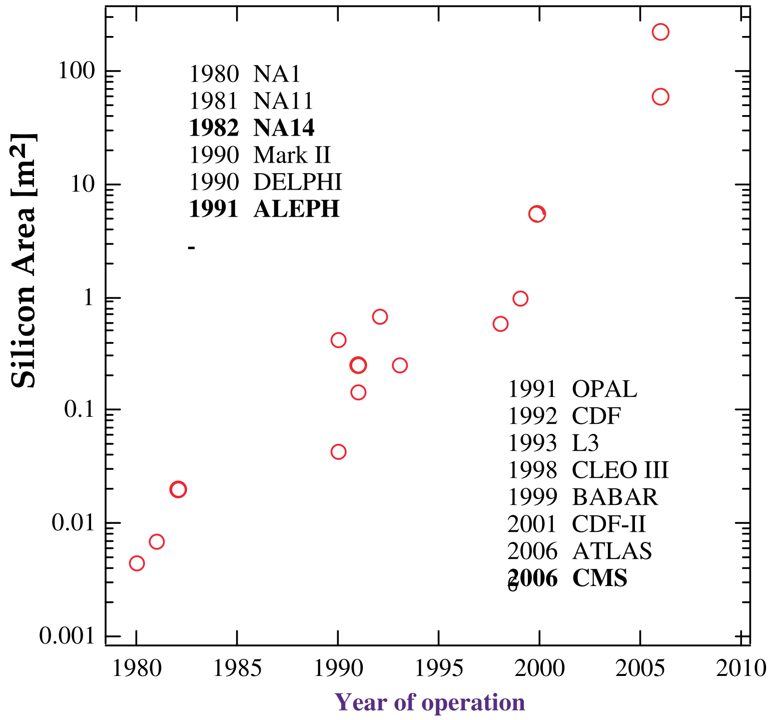
Warstwa typu p w postaci wąskich pasków
$\Rightarrow$ bardzo dokładny pomiar pozycji cząstki ($< 10\mu m$)

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

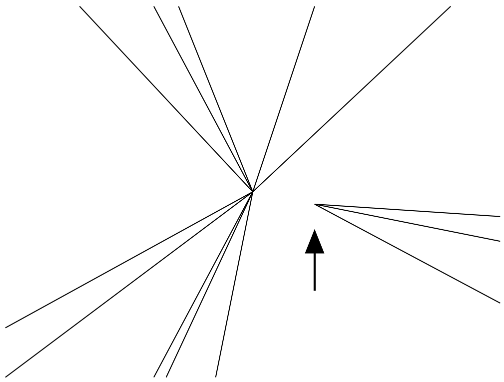
Detektory

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 $\Rightarrow$ identyfikacji mezonów B (kwarku b; $c\tau \sim 0.5mm$)



Detektory

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

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

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.

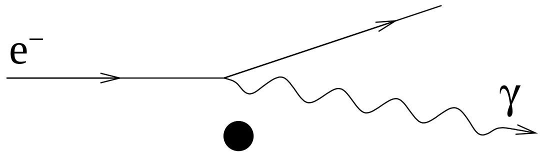
Rodzaje kaskad (i kalorymetrów):

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

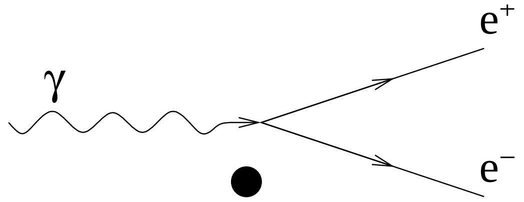
Detektory

Kalorymetry elektromagnetyczne

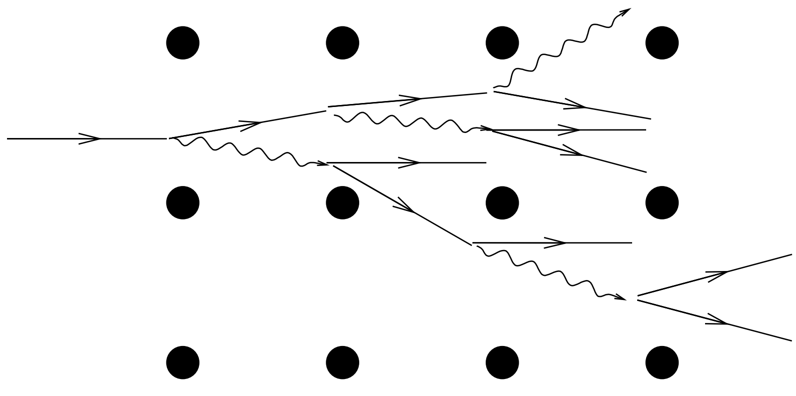
Elektrony o energii powyżej $E_c \sim 10$ MeV tracą energię prawie wyłącznie na promieniowanie hamowania



Z kolei odziaływanie fotonów o energii powyżej 10 MeV prowadzi prawie wyłącznie do kreacji par $e^+ \, e^-$



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



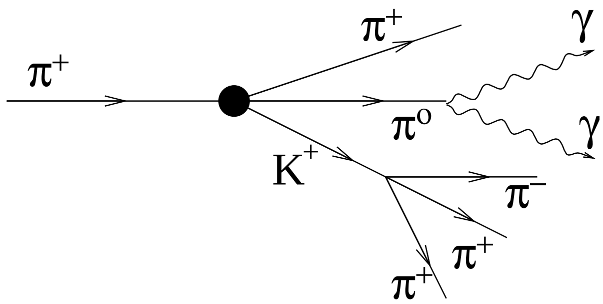
Promieniowanie hamowania i kreacja par nie zmieniają energii kaskady $\Rightarrow$ 100% tracone na jonizację ośrodka

$\Rightarrow$ Możliwy jest bardzo dokładny pomiar energii.

Detektory

Kalorymetry hadronowe

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



Większość energii 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:

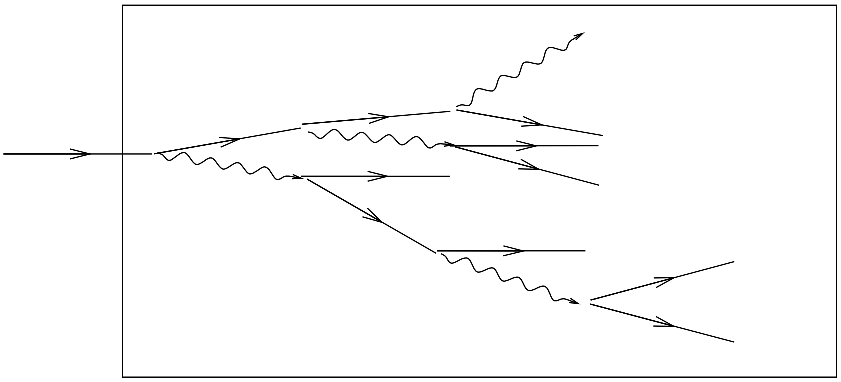
$$\frac{\sigma_E}{E} \sim \frac{50\%}{\sqrt{E[GeV]}}$$

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

Detektory

Kalorymetry jednorodne

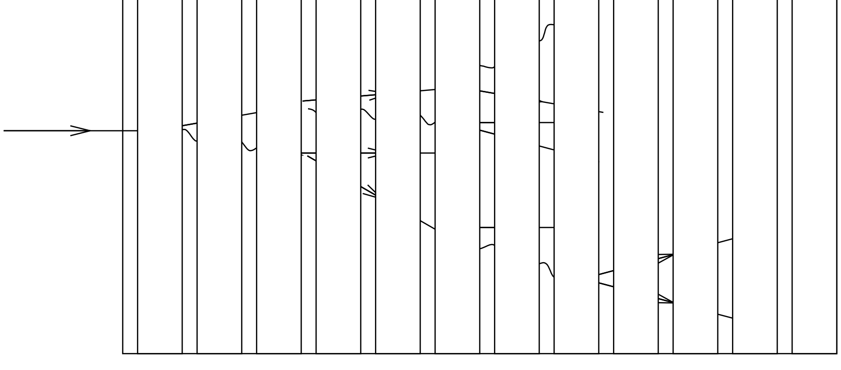
Kaskada rozwija się wyłącznie w materiale aktywnym (pozwalającym na pomiar strat energii):



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...

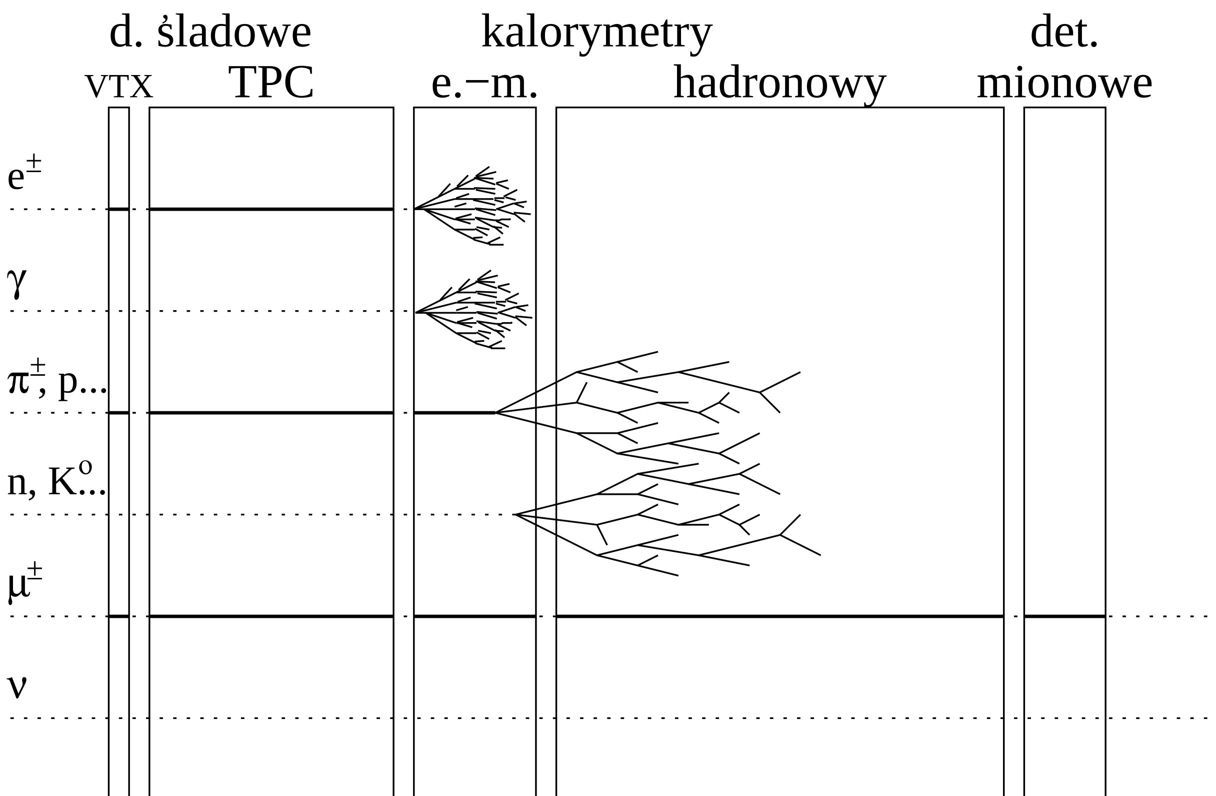
Detektory mają warstwy...

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 (częściową) identyfikację:



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

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

Detektory

Przykład

Przypadek rozpraszania elektron-proton (akcelerator HERA) rejestrowany w detektorze H1