

# Akceleratory i detektory cząstek

## Elementy fizyki cząstek elementarnych

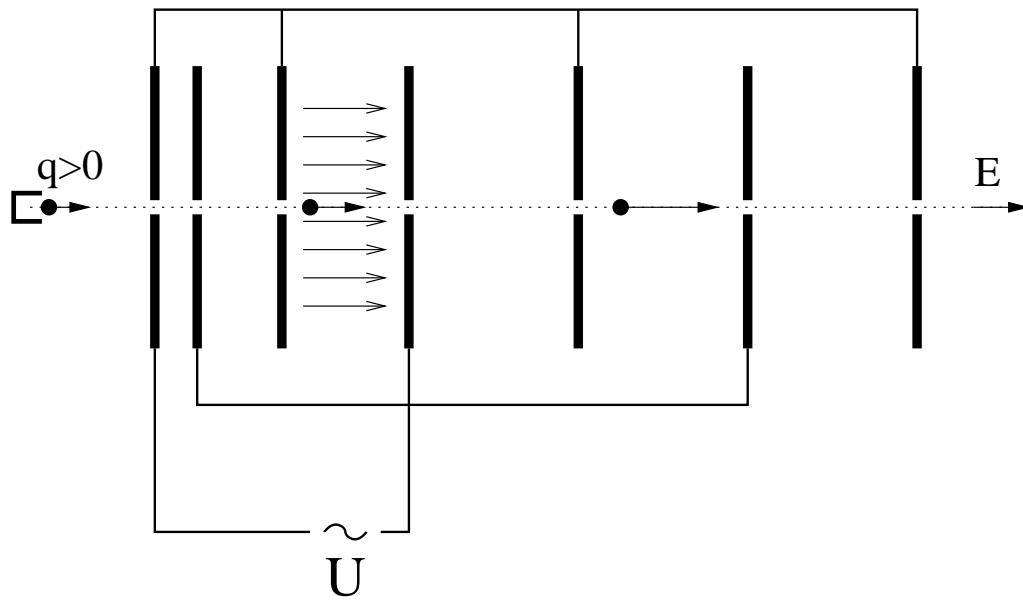
### Wykład II

- Akceleratory cząstek  
akceleratory kołowe, ograniczenia, świetlność
- Detekcja cząstek
  - ⇒ detektory śladowe
  - ⇒ kalorymetry
- Detektory w dużych eksperymentach

# Akceleratory

## Akcelerator liniowy

Cząstka przechodzi przez kolejne obszary, w których wytwarzane jest przemienne pole elektryczne (naogół: **wnęki rezonansowe**)



Przy odpowiednim dobraniu długości kolejnych elementów i częstości napięcia zasilającego, cząstka trafia zawsze na pole przyspieszające.

⇒ **zwielokrotnienie uzyskiwanych energii**

Częstość jest zazwyczaj stała. Długości kolejnych elementów rosną proporcjonalnie do prędkości cząstki.

Dla  $E \gg m$ , prędkość  $\beta \rightarrow 1$ :  $L = \text{const.}$

# Akceleratory

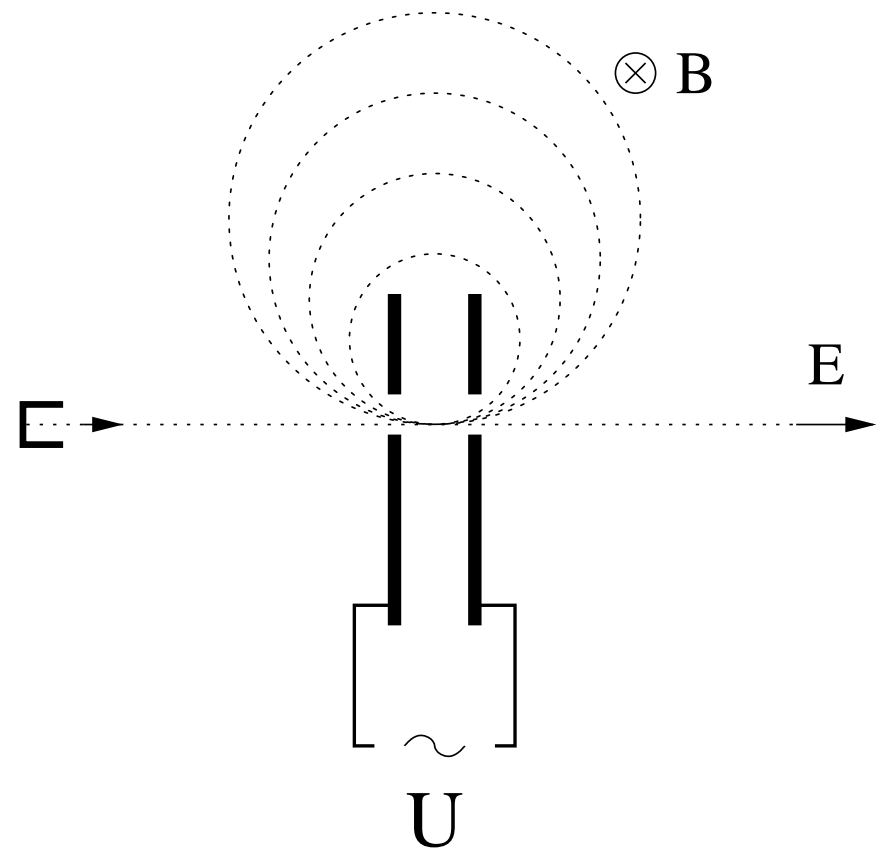
## Akcelerator kołowy

Zamiast używać wielu wnęk możemy wykorzystać pole magnetyczne do “zapętlenia” cząstki.

Cząstki mogą przechodzić przez wnękę przyspieszającą wiele razy...

Pierwszy tego typu akcelerator (**cyklotron**) zbudował w 1931 roku Ernest Lawrence

Schemat poglądowy:



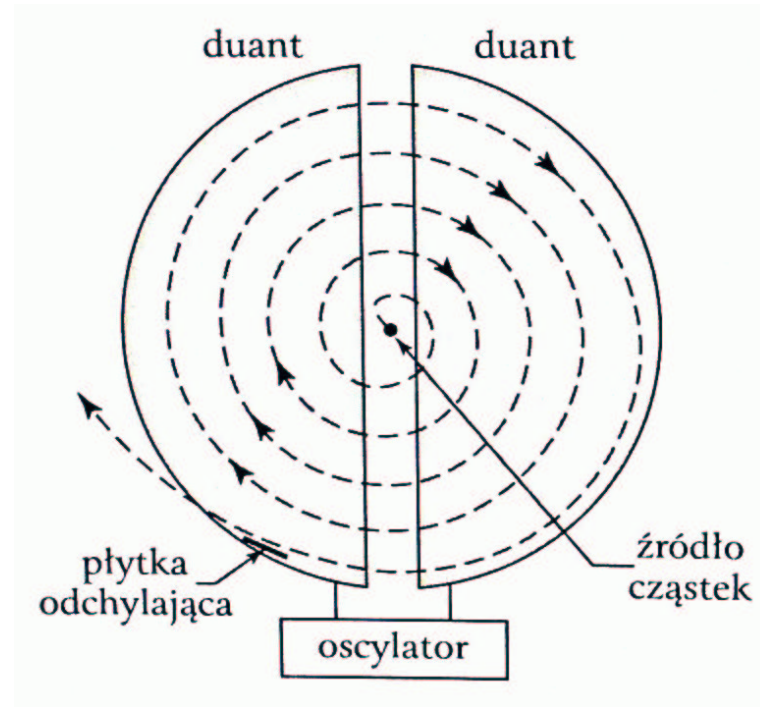
# Akcelerator

## Cyklotron

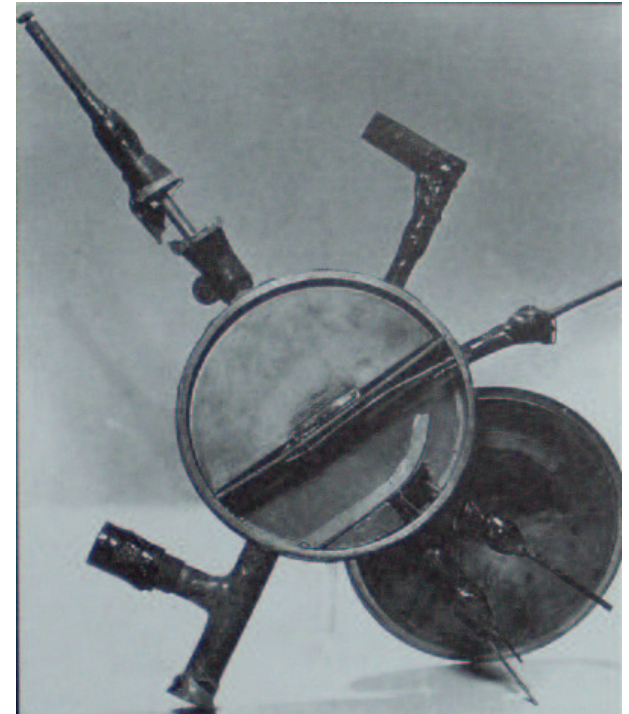
Ernest Lawrence



Schemat



Pierwszy cyklotron



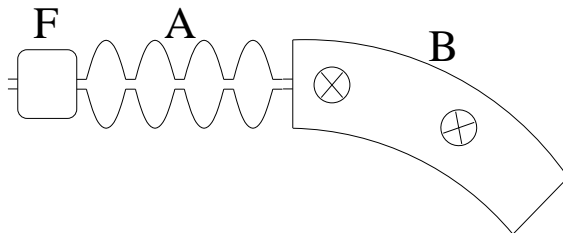
# Akcelerator

## Akcelerator kołowy

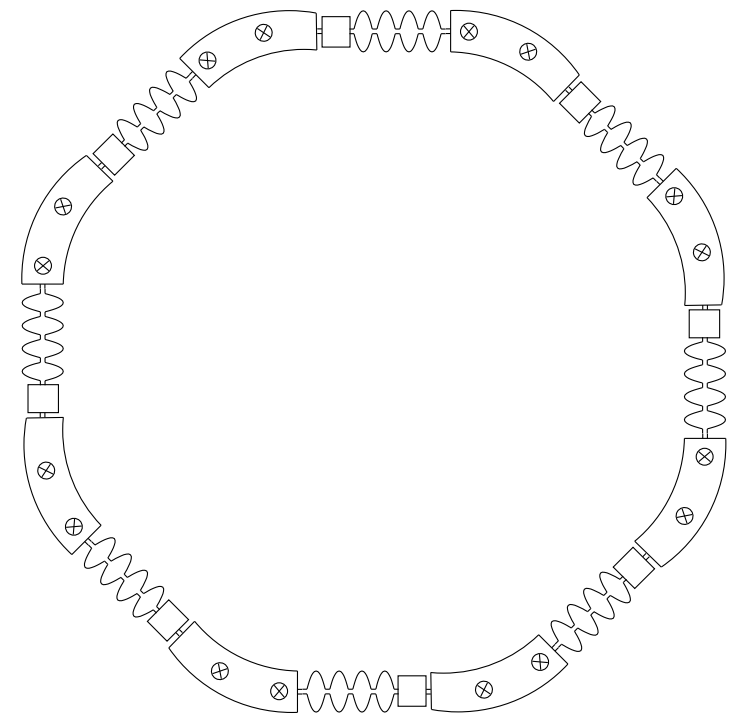
W praktyce akceleratory kołowe zbudowane są z wielu powtarzających się segmentów:

Każdy segment składa się z

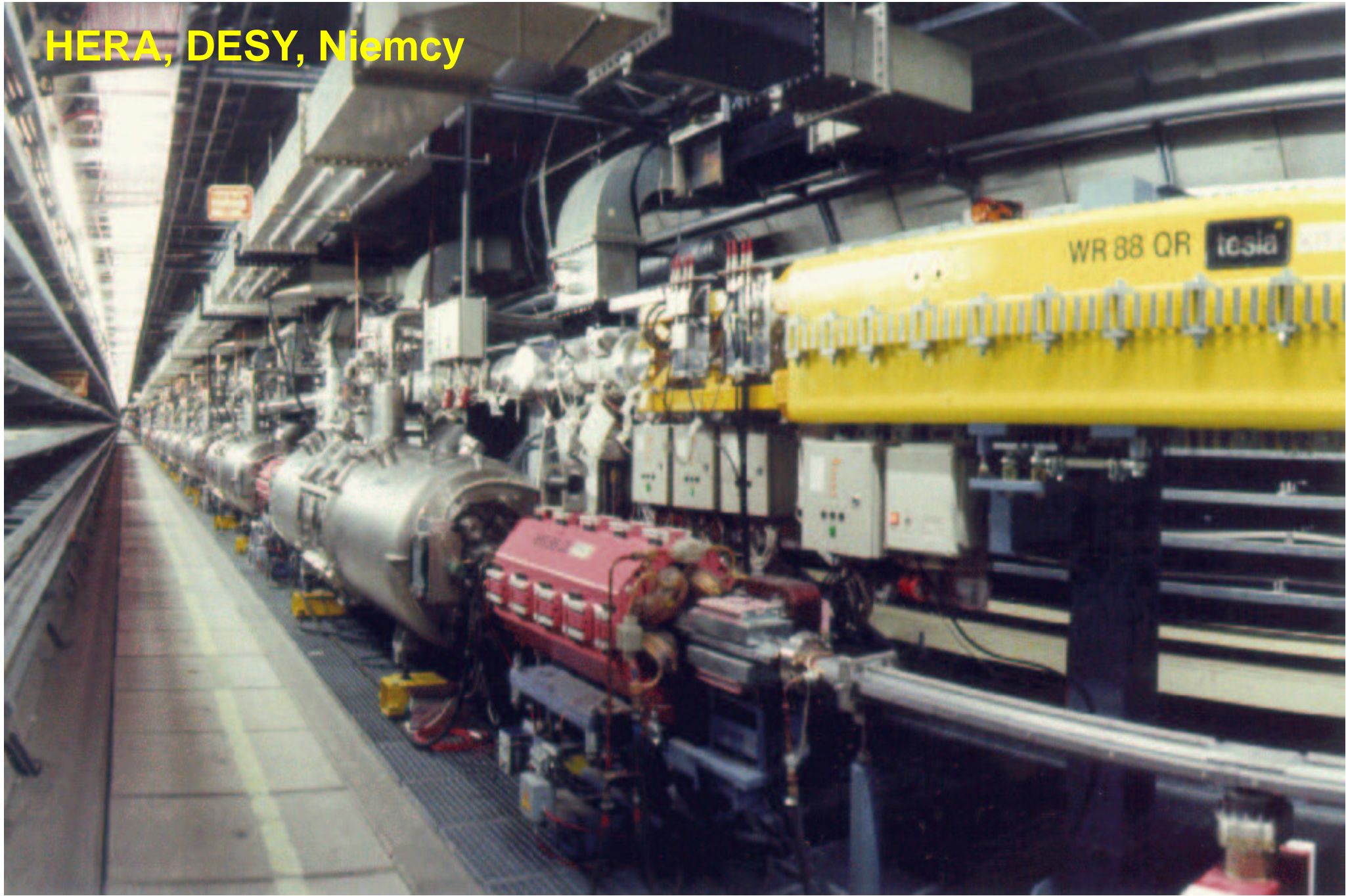
- wnęk przyspieszających (A)
- magnesów zakrzywiających (B)
- układów ogniskujących (F)



Schemat akceleratora:



# HERA, DESY, Niemcy



# Akceleratory

## Największe akceleratory

### Już zbudowane

LEP	$e^+e^-$	1989-2000	$\leq 105$ GeV	
SLC	$e^+e^-$	1989-1998	50 GeV	
HERA	$e^\pm p$	1992/2001 –	27 GeV (e) $\times$ 920 GeV (p)	(modernizacja)
SPS	$(p\bar{p})$	1981-1990	-315 GeV	
Tevatron	$p\bar{p}$	1987/2000 –	0.9-1 TeV	
RHIC	$Au Au$	2000 –	100 GeV/u	

### Budowane i projektowane

LHC	$pp$	2007 –	7 TeV	
TESLA	$e^+e^-$	2012(?) –	250-400 GeV	
THERA	$e^\pm p$	???	500 $\times$ 1000 GeV	
CLIC	$e^+e^-$	2020(?) –	1500-2500 GeV	

# Akceleratory

## Największe akceleratory

Badania fizyki cząstek koncentrują się dużych ośrodkach:

- CERN w Genewie (LEP, SPS, LHC)
- DESY w Hamburgu (HERA, TESLA, THERA)
- Fermilab pod Chicago (Tevatron)
- SLAC w Stanford, Kalifornia (SLC)
- KEK w Japoni



# Akceleratory

## LEP/LHC

Największym zbudowanym dotąd akceleratorem był **LEP**. Zbudowany w **CERN** pod Genewą miał obwód ok. 27 km.

W tym samym tunelu budowany jest obecnie akcelerator **LHC**.



LHC, CERN, Genewa

27 km obwodu !!!



# Tevatron, Fermilab, USA



**SLAC**  
**Stanford, USA**



# KEK Japonia



# Akceleratory

## 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 rosnać wraz ze wzrostem energii wiązki, aby utrzymać 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...

# Akceleratory

## Ograniczenia

W przypadku akceleratorów 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 akceleratora 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 akceleratorem kołowym  $e^+e^-$** .

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

Projekt akceleratora  
kołowego  $e^+e^-$   
o energii 1000 GeV

“LEP 1000”  
2 TeV in Center-of-Mass  
Diameter  $\approx$  900 km  
Linear Collider at 50 MeV/m  
Length = 40 km  $\rightarrow\leftarrow$

**Why LEP 1000 gave  
way to the idea of  
linear colliders**





# Akceleratory

## Świelność

Energia nie jest jedynym istotnym parametrem akceleratora.

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

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

Dla procesu o przekroju czynnym  $\sigma$ :

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

Ponieważ przekroje czynne maleją zazwyczaj jak  $E^{-2}$

(patrz przykład analizy wymiarowej)

⇒ potrzebujemy coraz większych świelności

# Akceleratory

## Świetność

Świetność zależy od:

- częstości  $f$  przecięć wiązek (paczek/pulsów)
- liczby cząstek w paczce  $n$
- poprzecznych rozmiarów wiązki:  $\sigma_x, \sigma_y$

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

⇒ trudno uzyskać jednocześnie duże  $f$  i duże  $n$

⇒ 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:

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

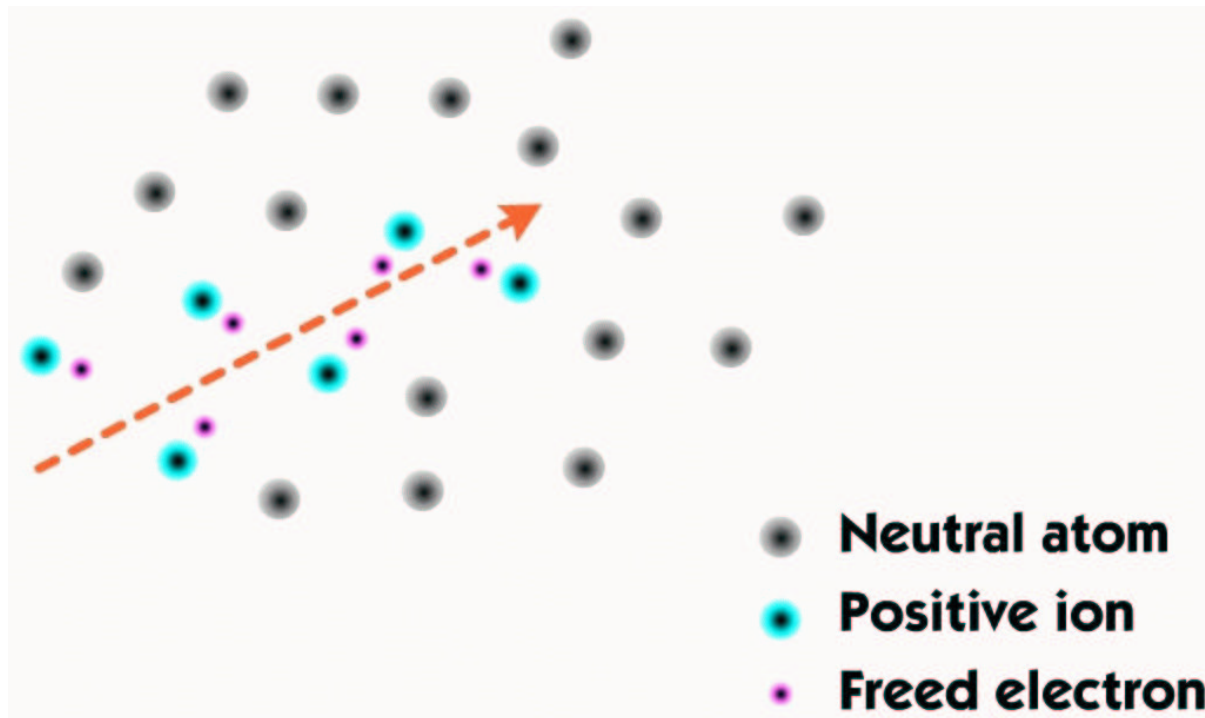
$$\sigma_y \approx 5 \text{ nm (!)} \quad \mathcal{L} \sim 3 \cdot 10^{34} \frac{1}{cm^2 s}$$

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

# 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,

$\beta$  - jej prędkość

$I$  - energia jonizacji;

dla większości materiałów  $\sim 10$  eV

$\delta$  - poprawka związana

z polaryzacją ośrodka

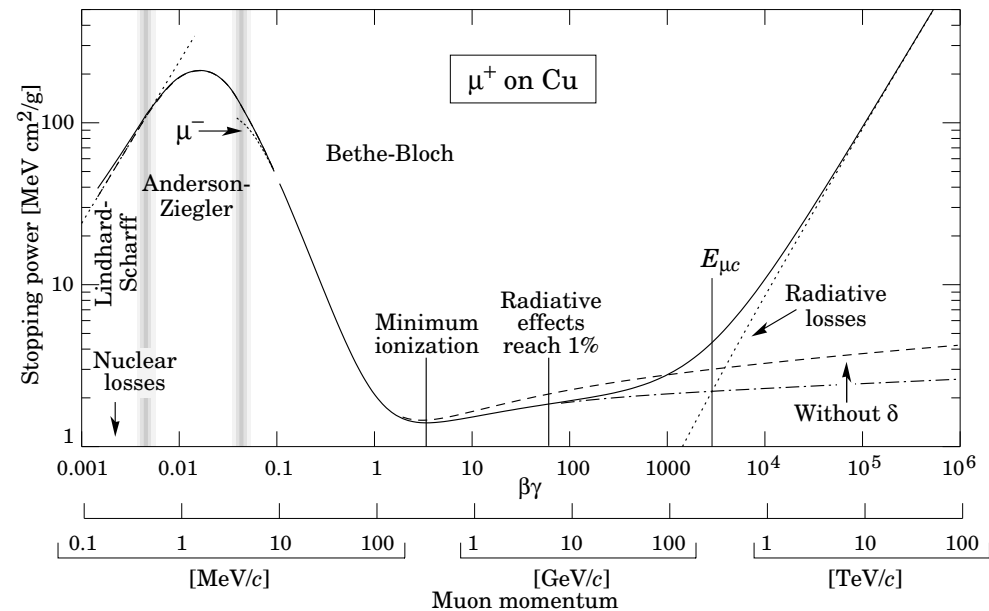
Przy założeniu  $m \gg m_e$

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 czasami 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**

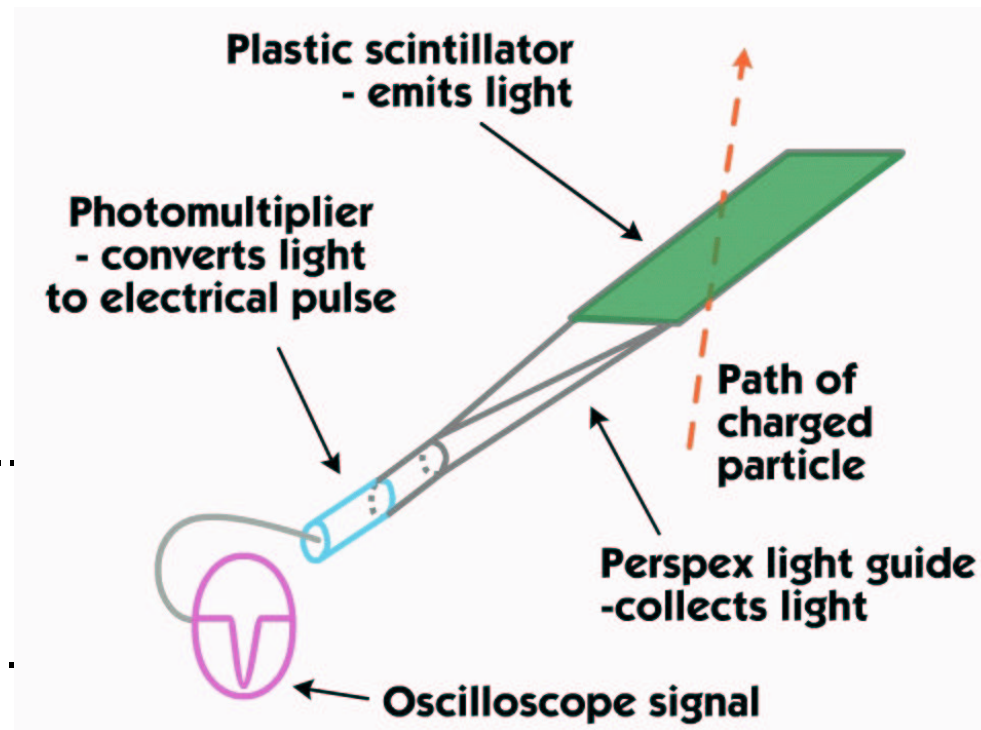
**Emitowane fotony** mogą być rejestrowane przez fotopowielacze, fotodiody lub inne elementy światłoczułe.

### Zalety:

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

### Wady:

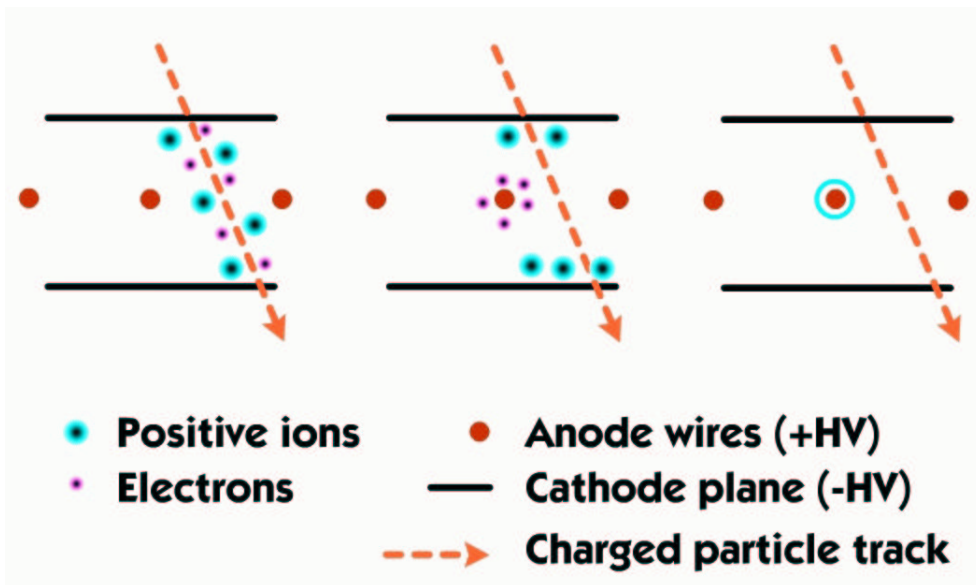
kłopotliwy tor optyczny, brak pomiaru pozycji...



# 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 przez 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

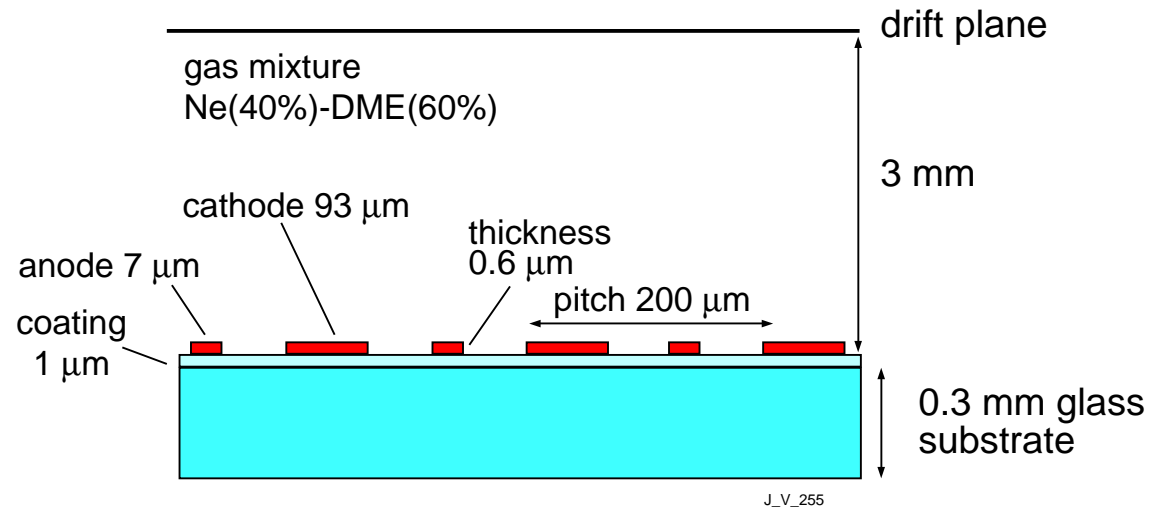
## Liczniki gazowe

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 !!!

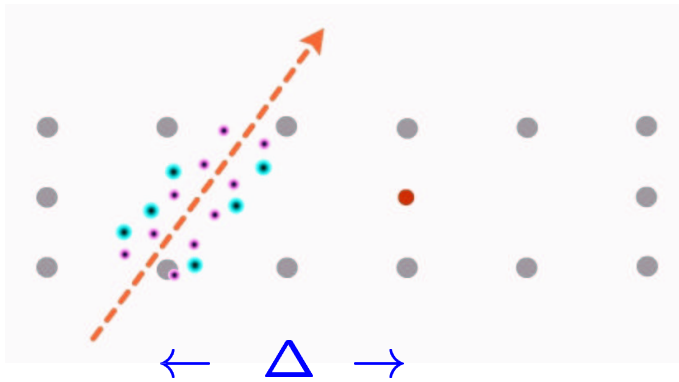


# Detektory

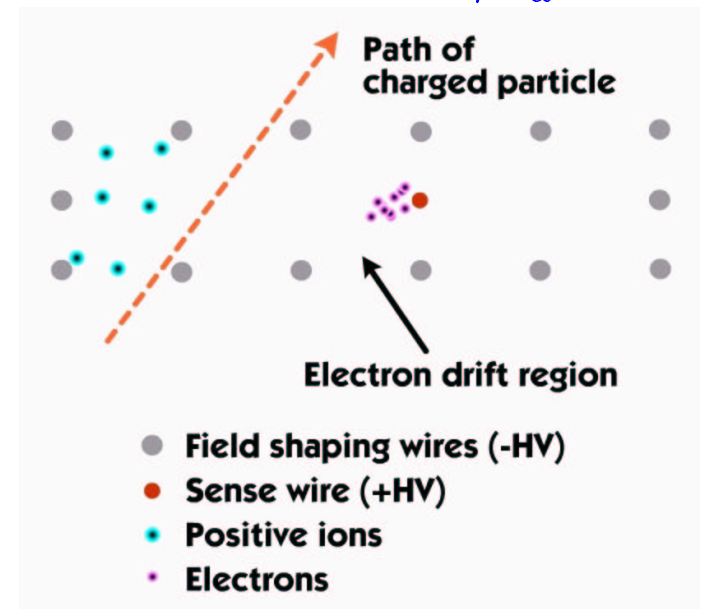
## Komora dryfowa

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

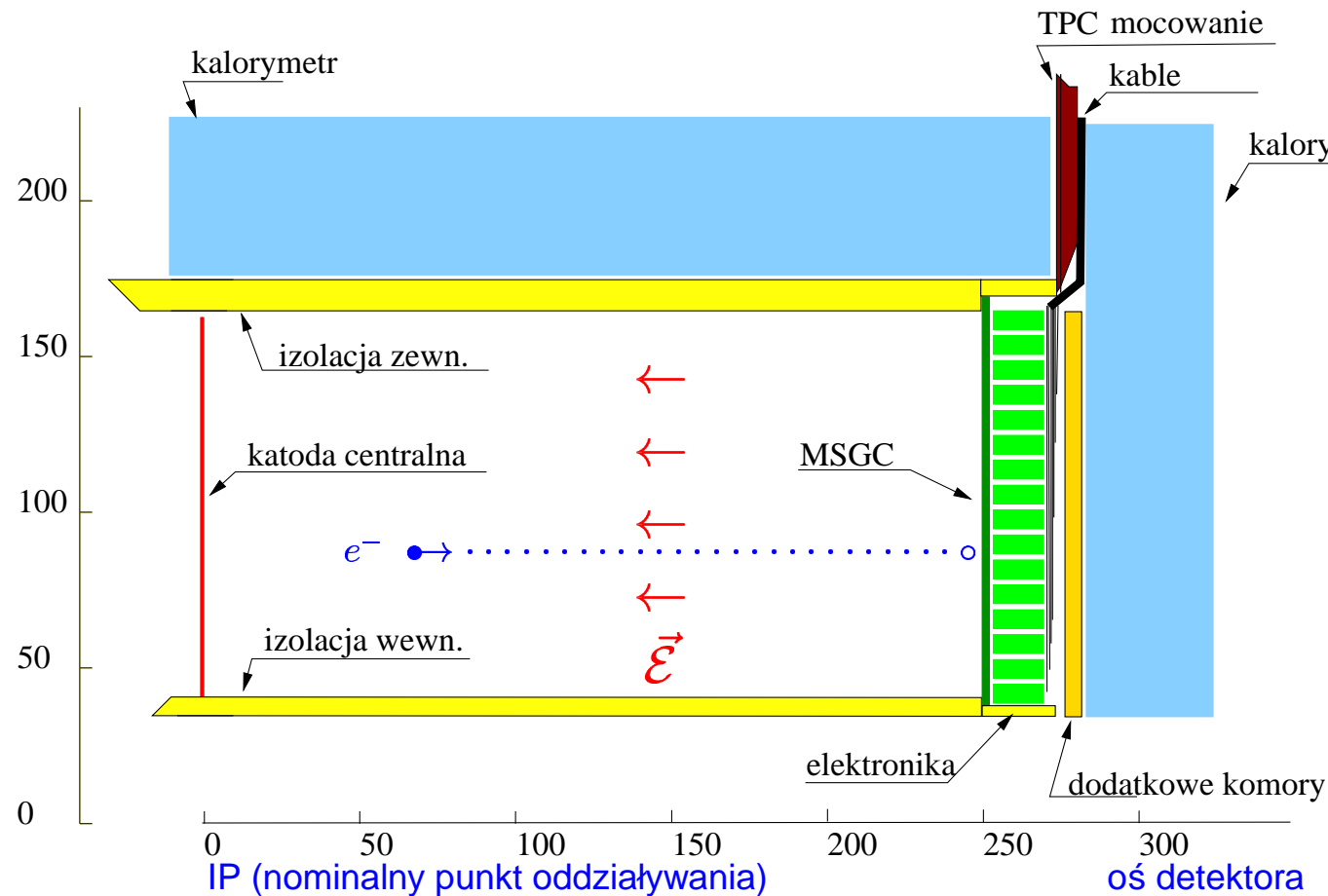
## Komora TPC

Time Projection Chamber -  
“komora projekcji czasowej”

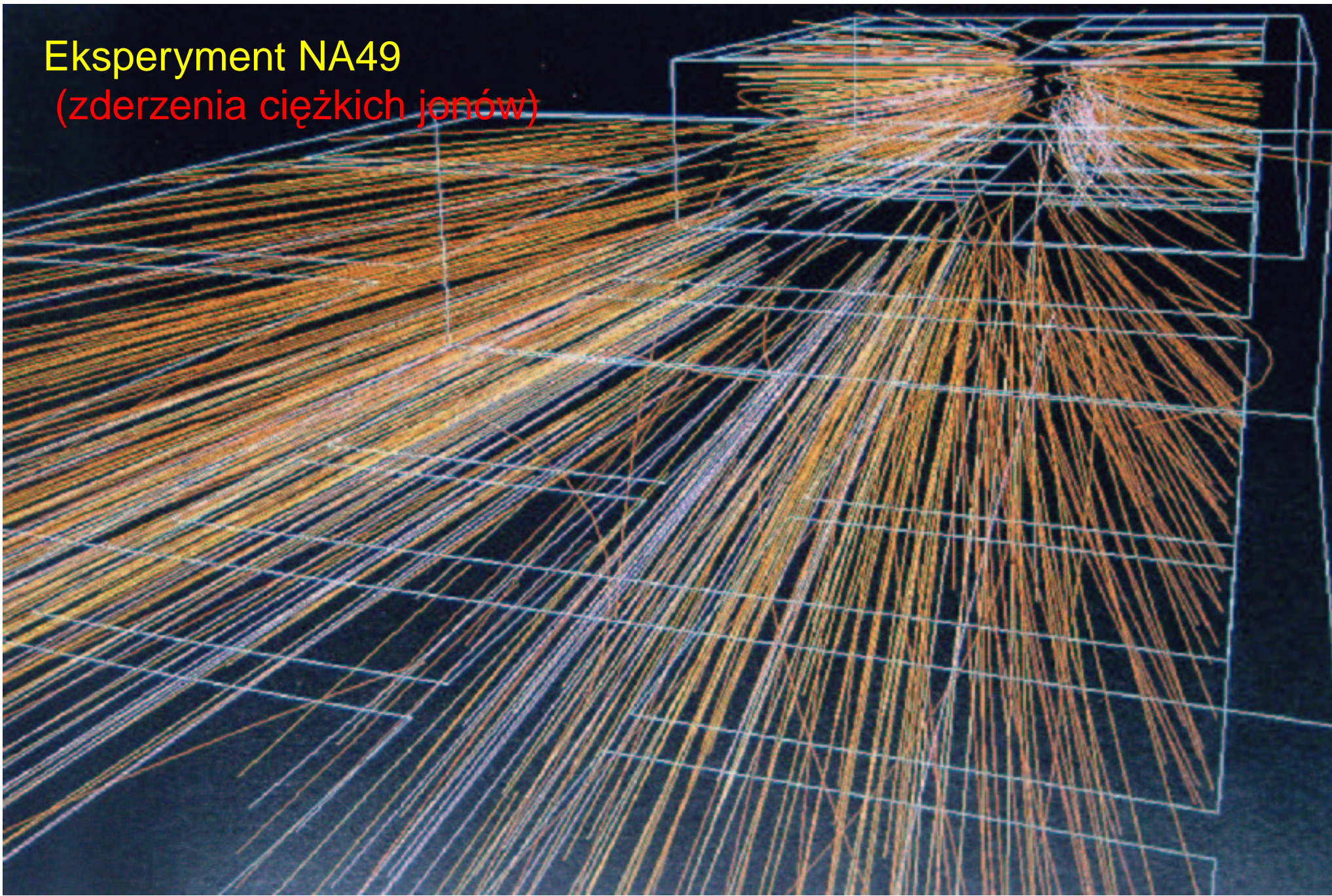
Pełna, **trójwymiarowa** (3D)  
rekonstrukcja toru cząstki  
na podstawie:

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

Schematyczny rysunek TPC (1/4 detektora):

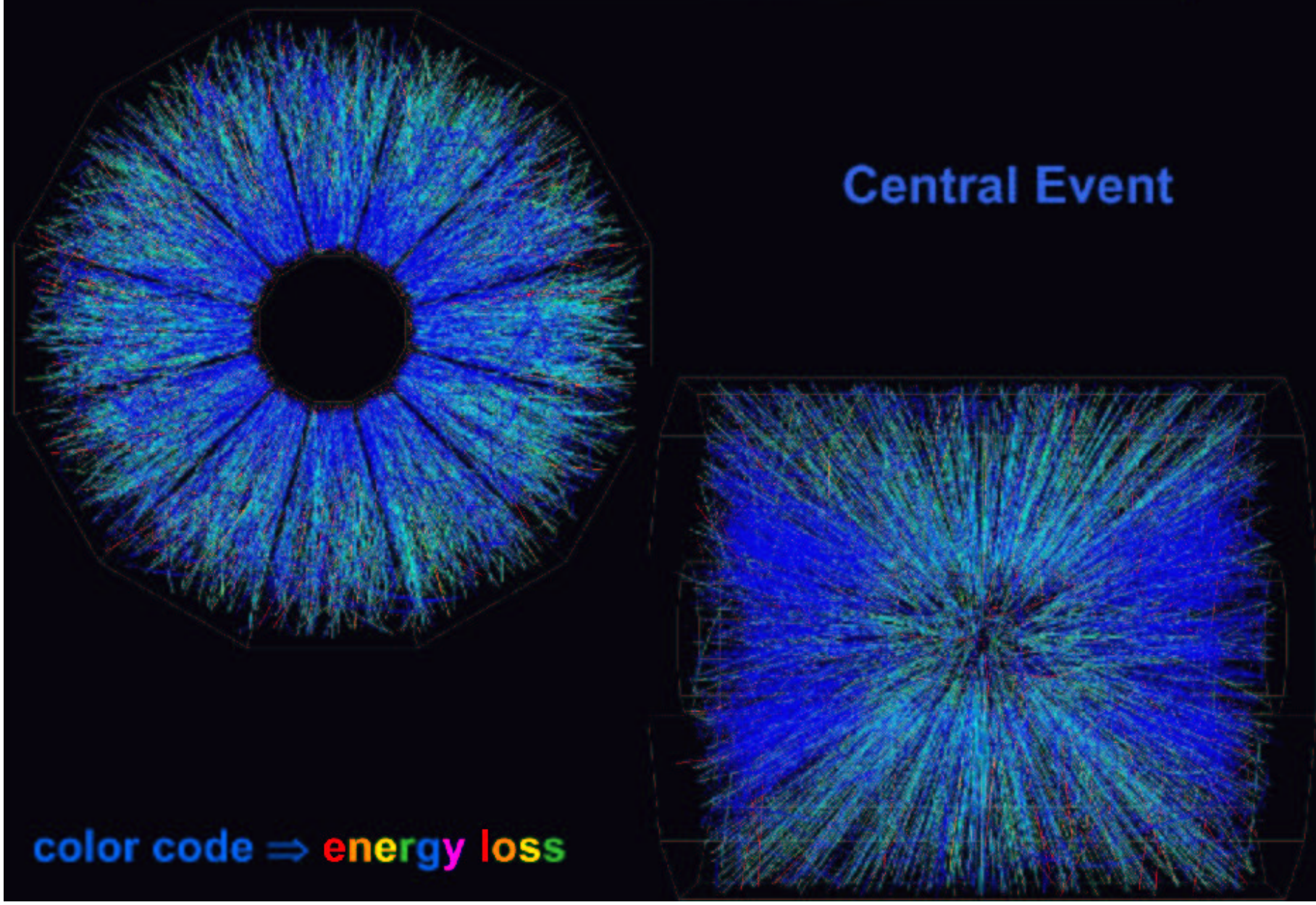


**Eksperyment NA49**  
**(zderzenia ciężkich jonów)**



STAR

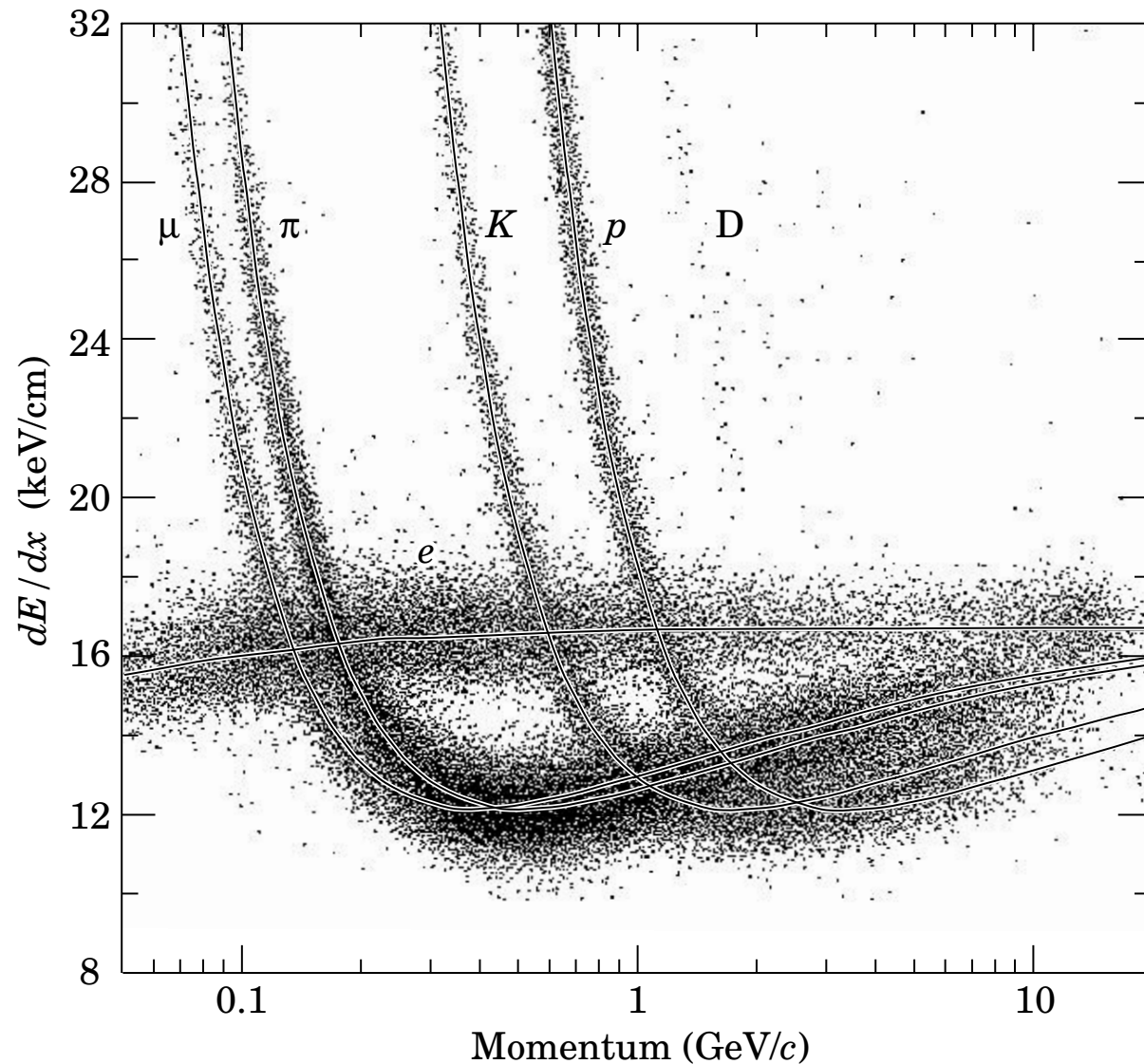
Au on Au Event at CM Energy ~ 130 A-GeV



# Detektory

## Komora TPC

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

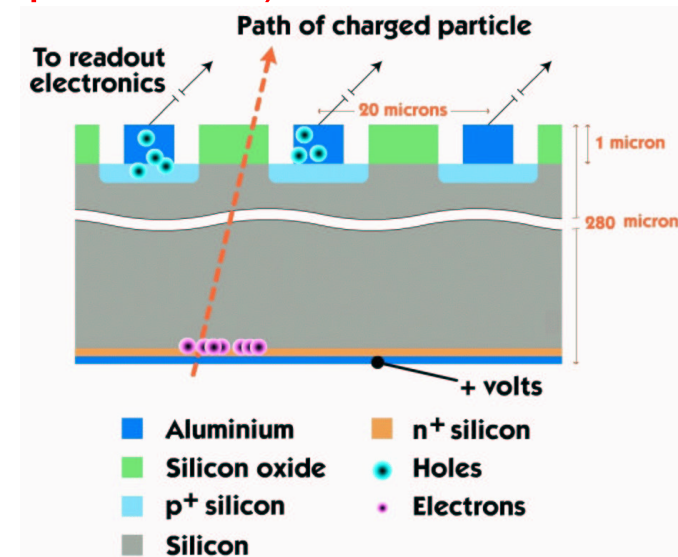
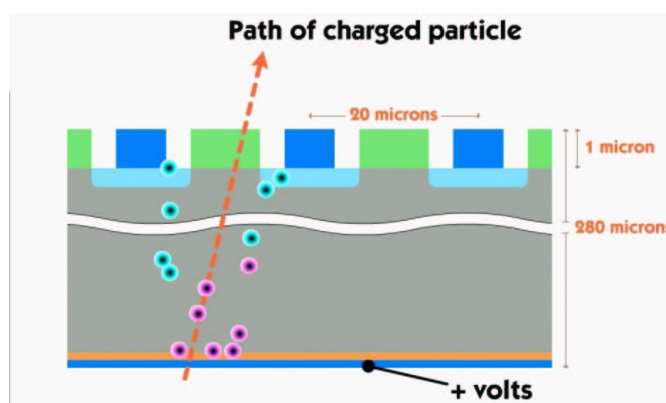
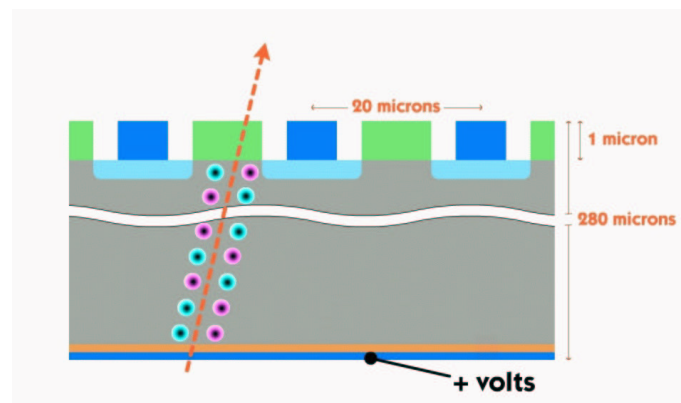


# Detektory

## Detektory półprzewodnikowe

Są coraz powszechniej używane w fizyce cząstek.

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



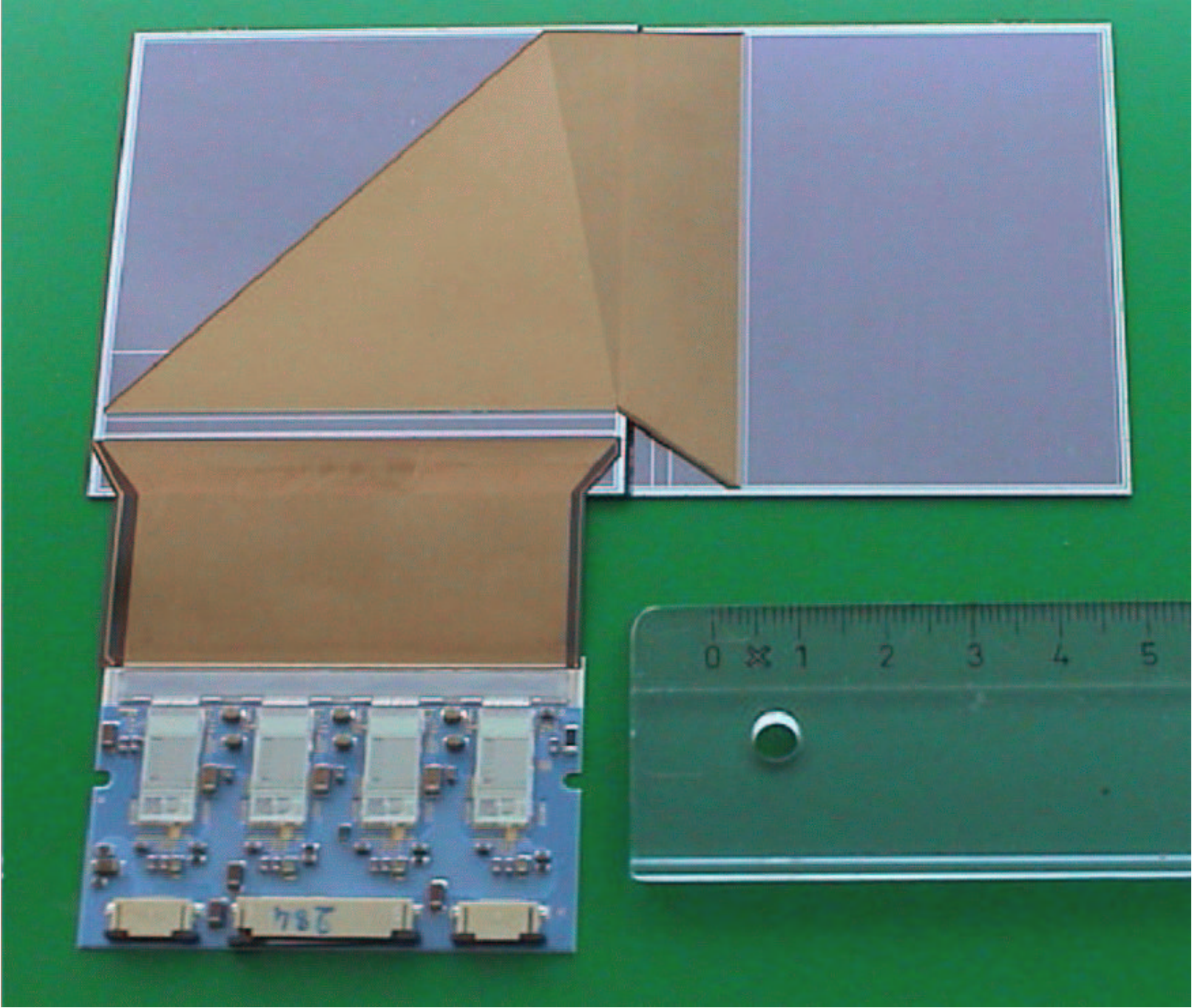
W wyniku **jonizacji** powstają swobodne **elektrony** i **dziury**.

⇒ 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





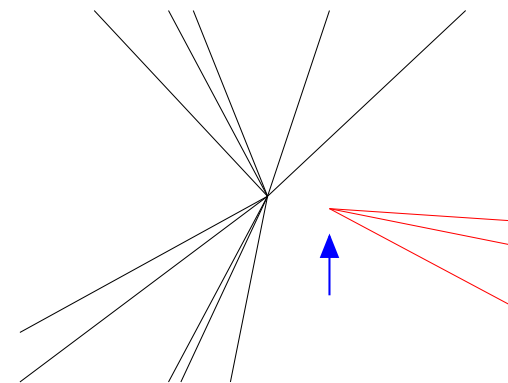
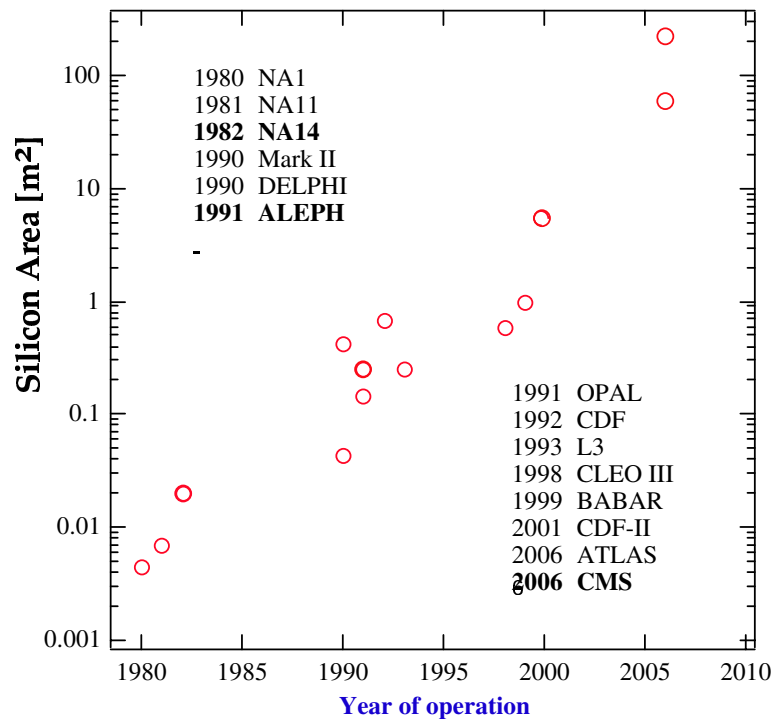
# Detektory

## Detektory półprzewodnikowe

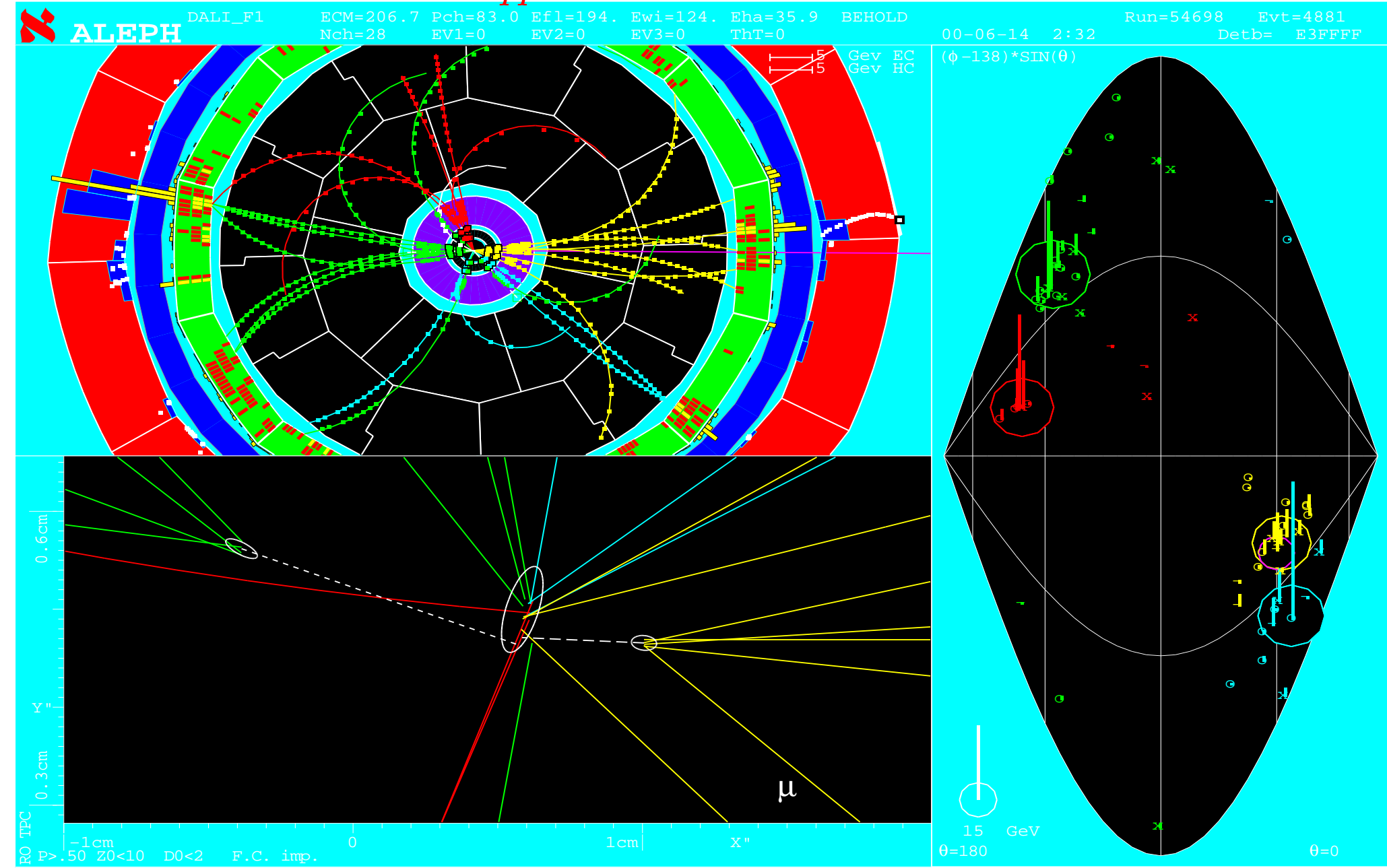
Dzięki rozwojowi technologii możemy budować **coraz tańsze** i **coraz większe** detektory:

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

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



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 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 absorpcji 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):

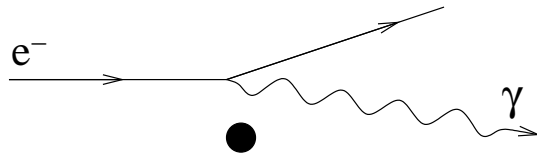
- elektromagnetyczne (elektronowo-fotonowe) - wywoływane przez elektrony, pozytony, fotony,  $\pi^0$
- hadronowe - wywoływane przez inne, silnie oddziałujące cząstki

# Detektory

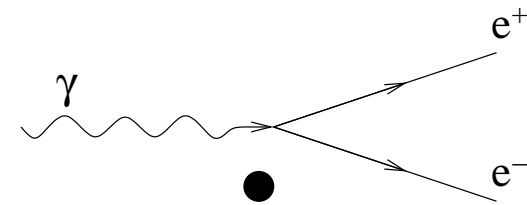
## Kalorymetry elektromagnetyczne

Dla energii powyżej  $E_c \sim 10$  MeV:

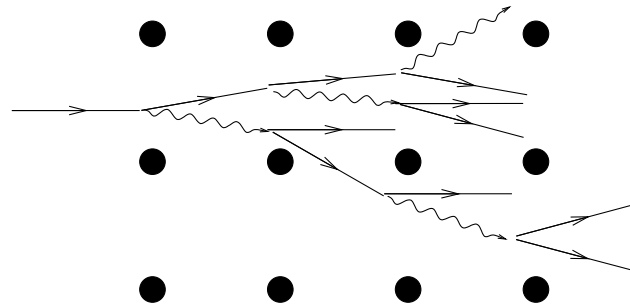
elektrony tracą energię prawie wyłącznie na **promieniowanie hamowania**



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

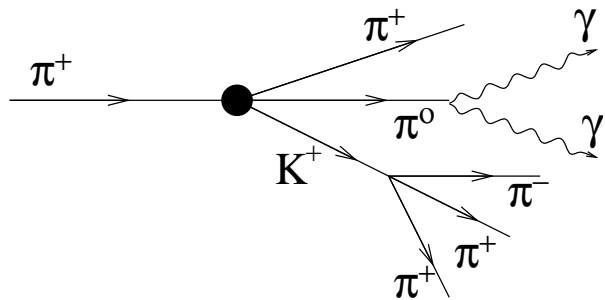
⇒ 100% tracone na jonizację ośrodka

⇒ 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:

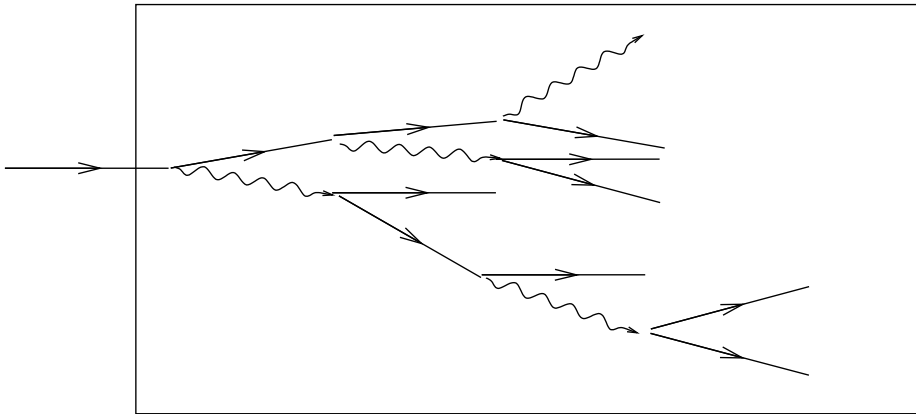
$$\frac{\sigma_E}{E} \sim \frac{50\%}{\sqrt{E[\text{GeV}]}}$$

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

# Detektory

## Kalorymetry jednorodne

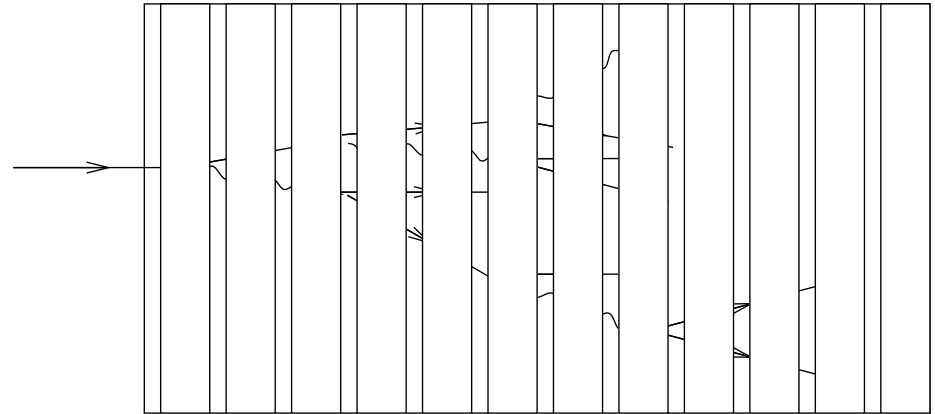
Kaskada rozwija się wyłącznie w materiale aktywnym (pozwalającym na pomiar strat energii):



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**

# 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

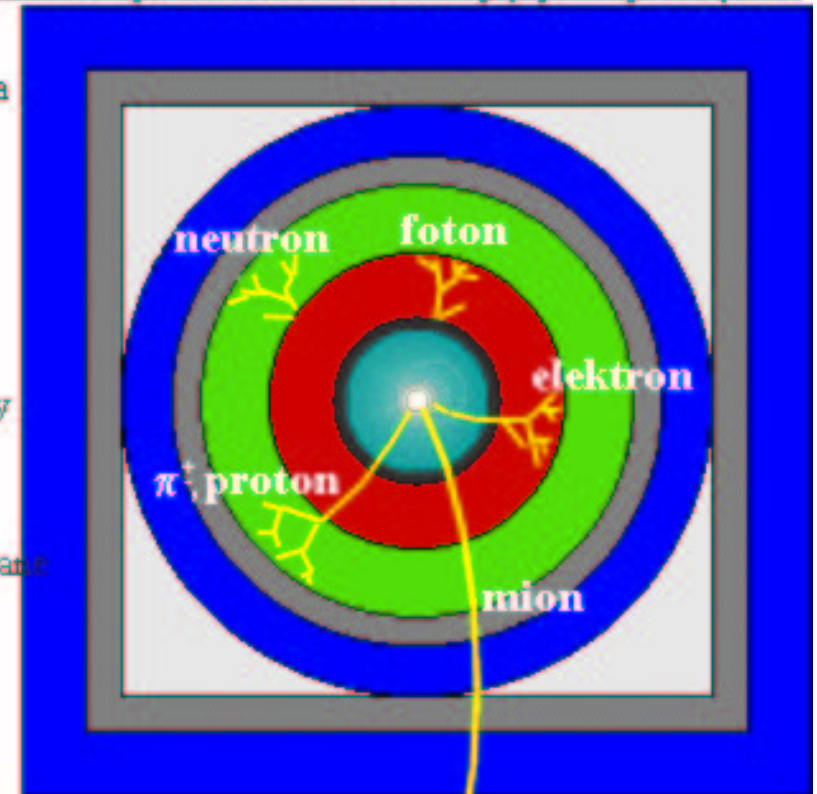
■ solenoid magnesu

■ kalorymetr elektromagnetyczny

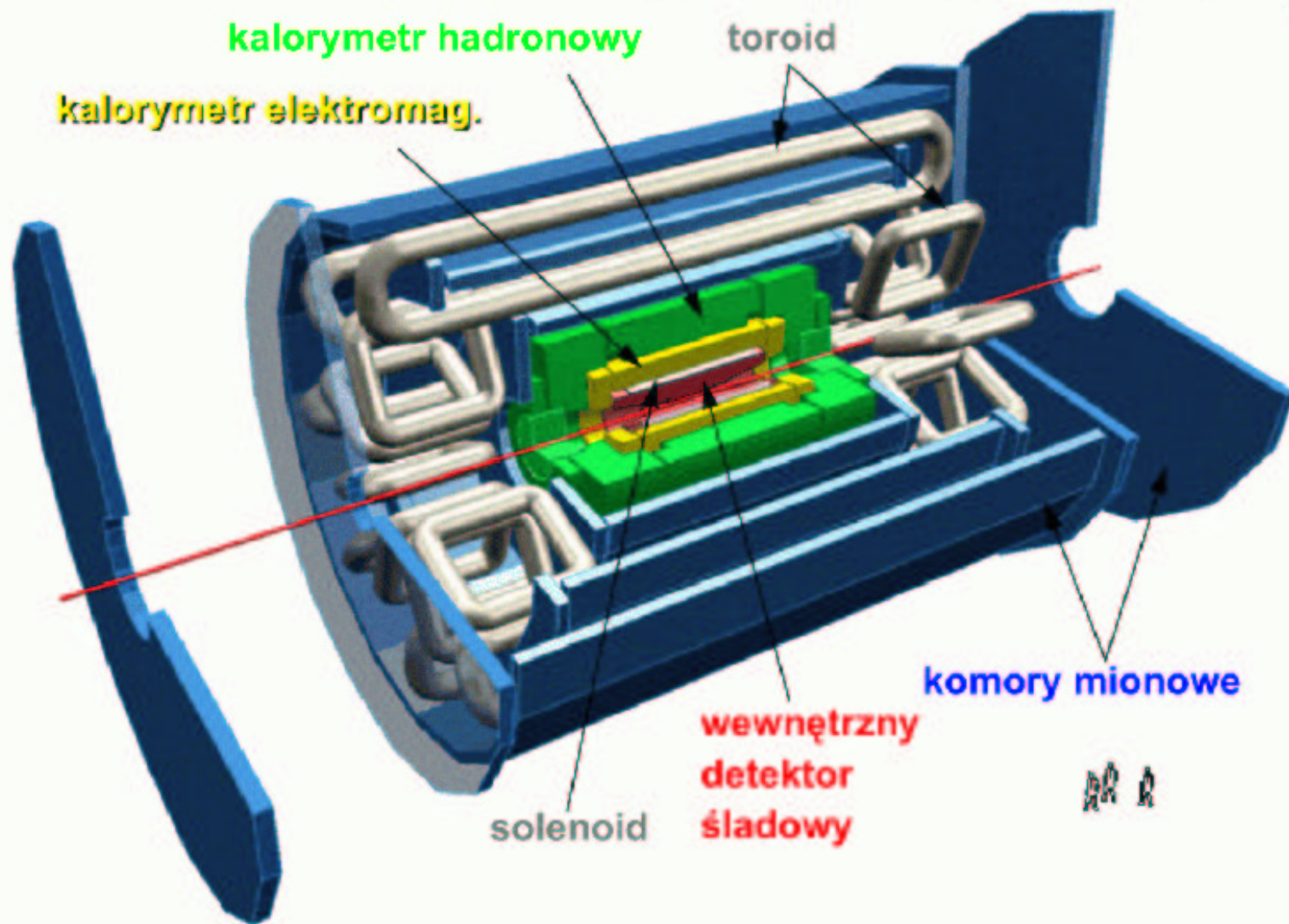
■ kalorymetr hadronowy

■ namagnesowane żelazo

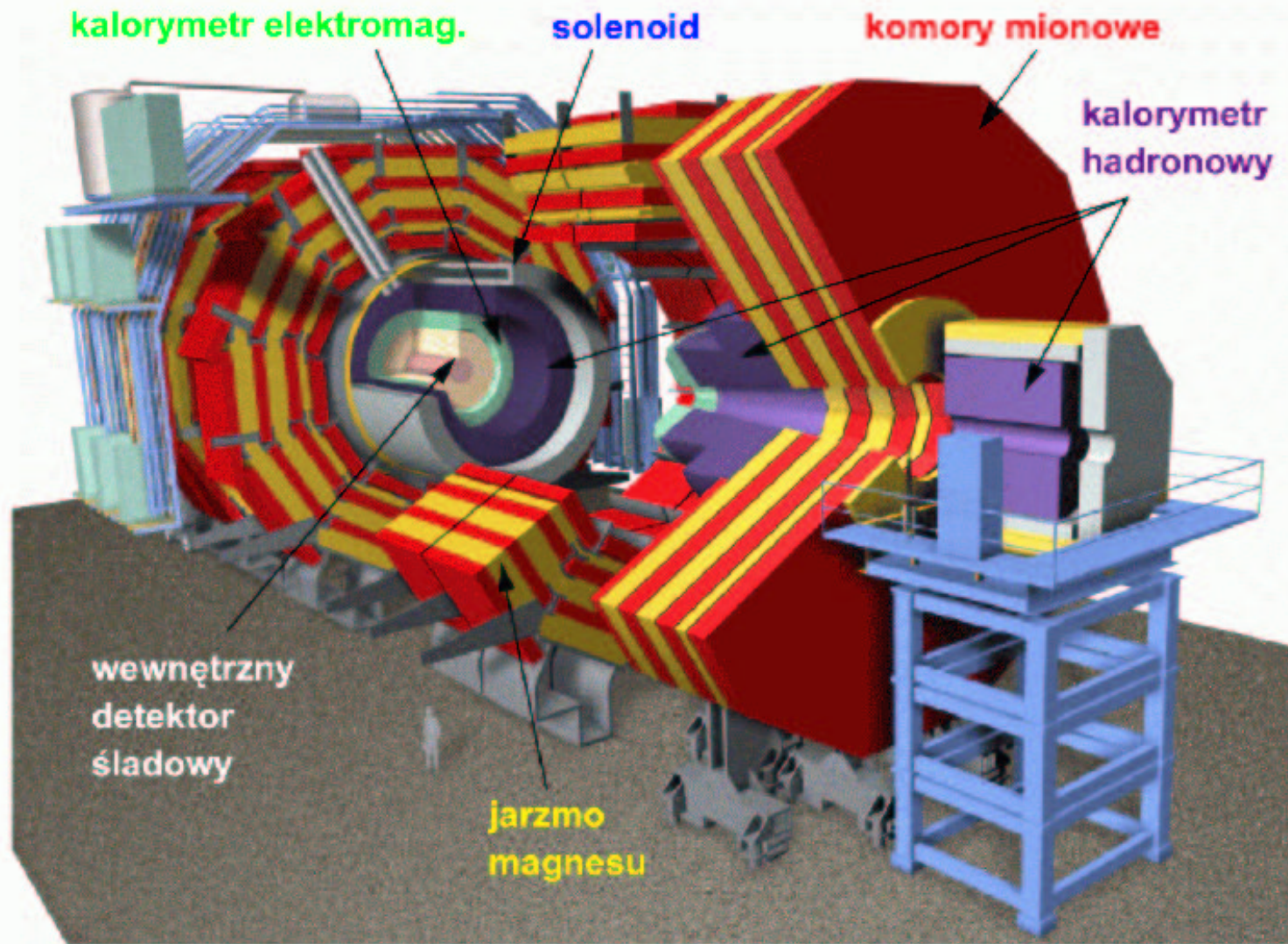
■ komory mionowe

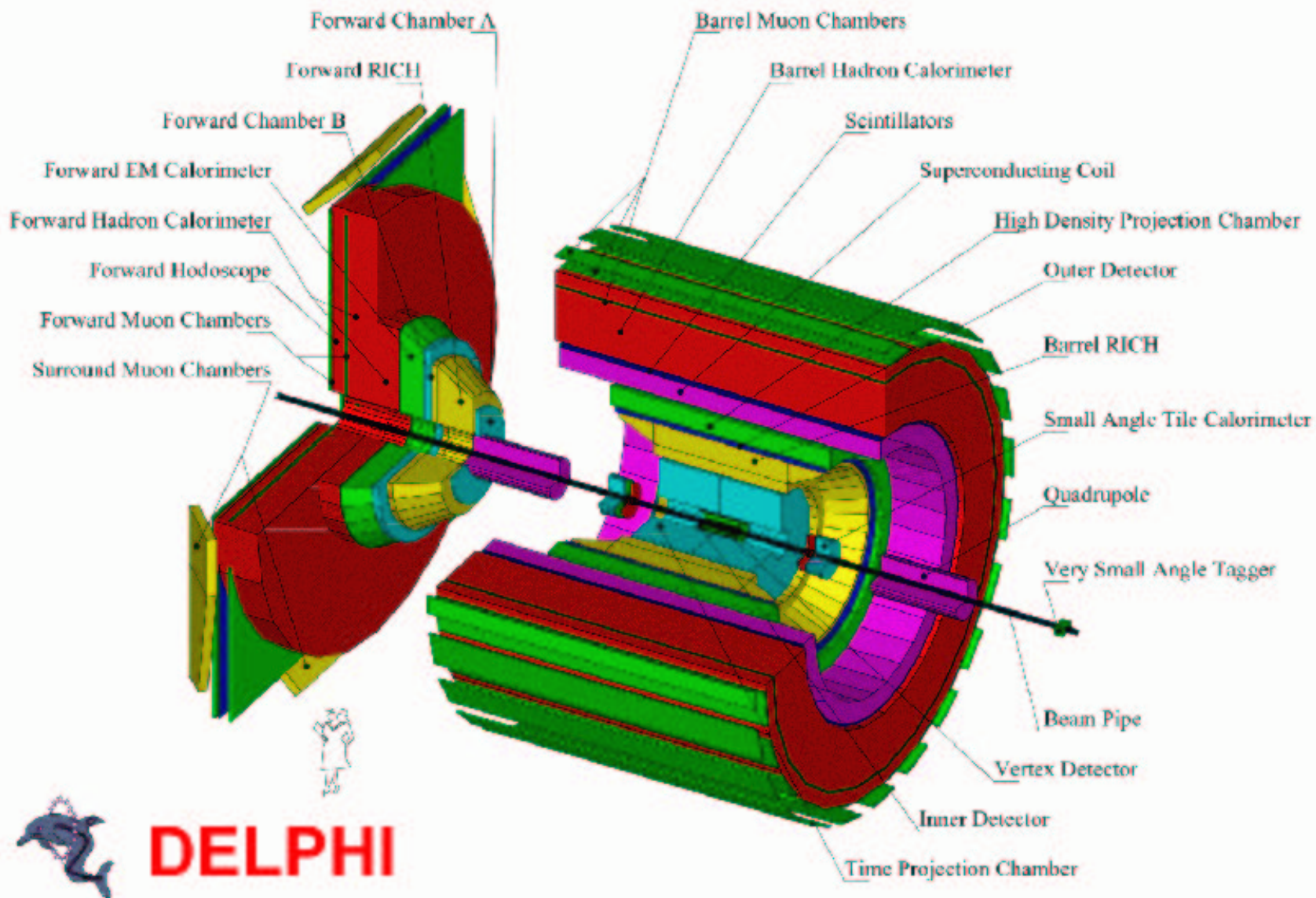


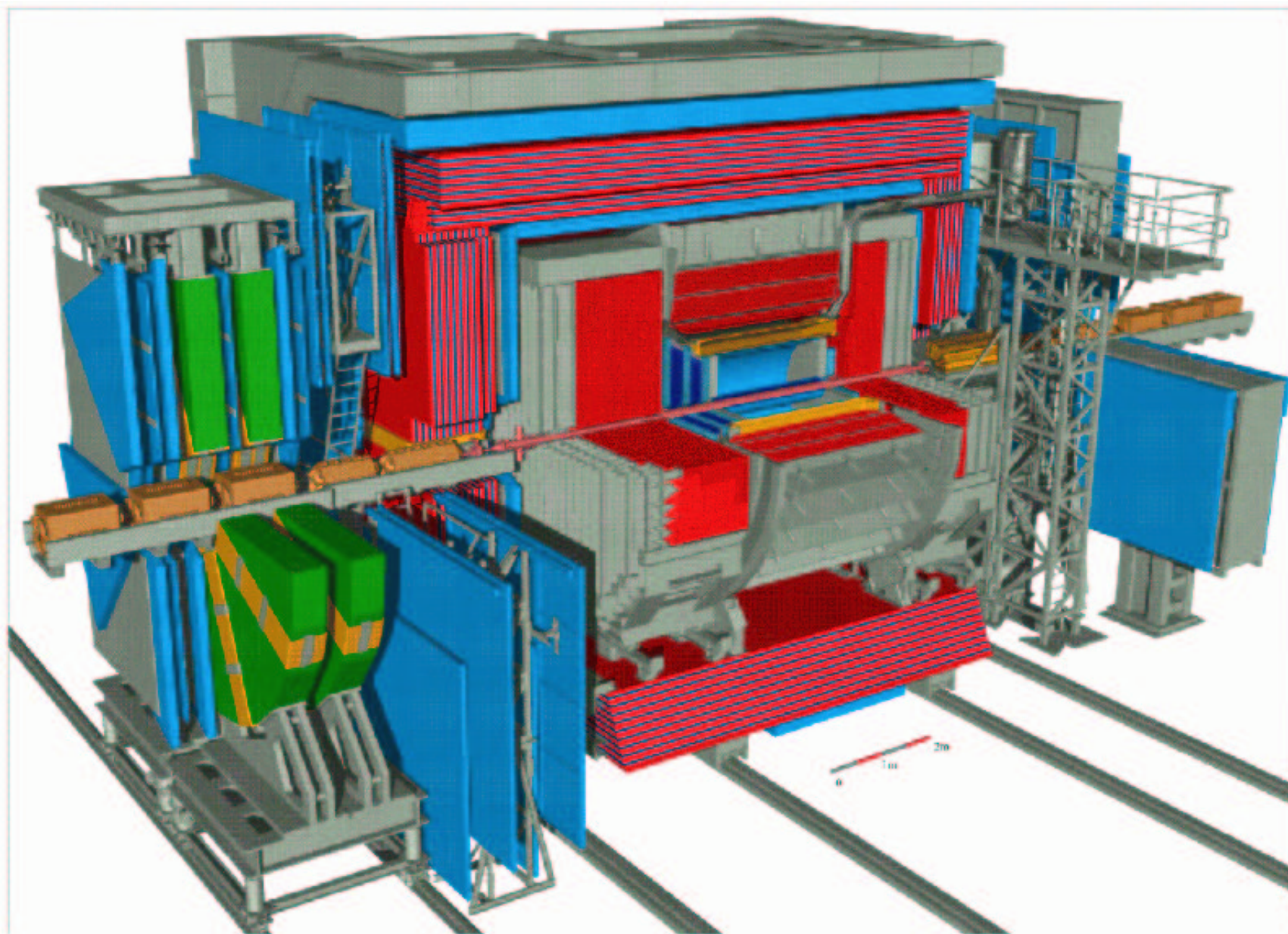
# A Toroidal LHC ApparatuS (ATLAS)



# Compact Muon Solenoid



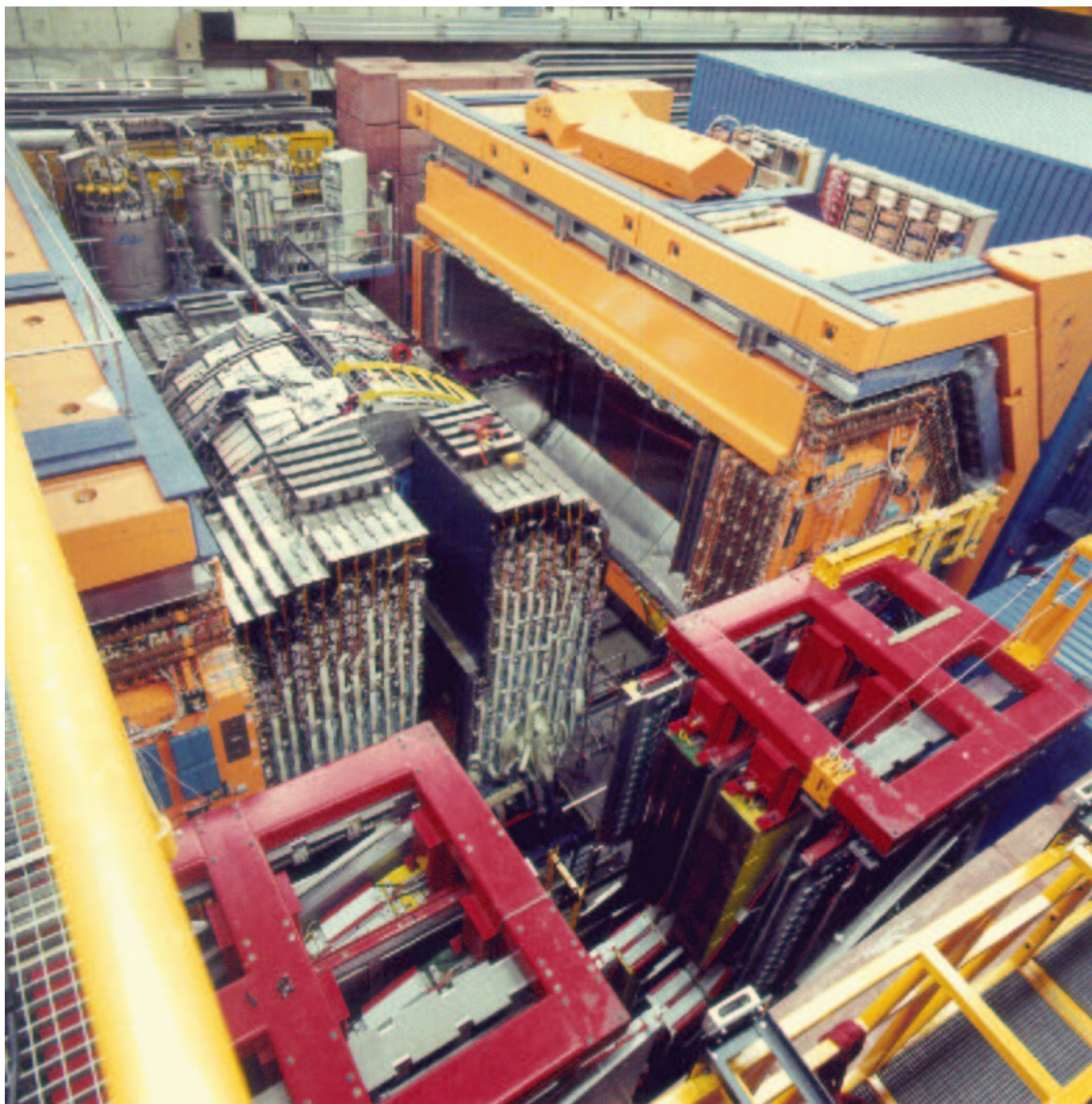


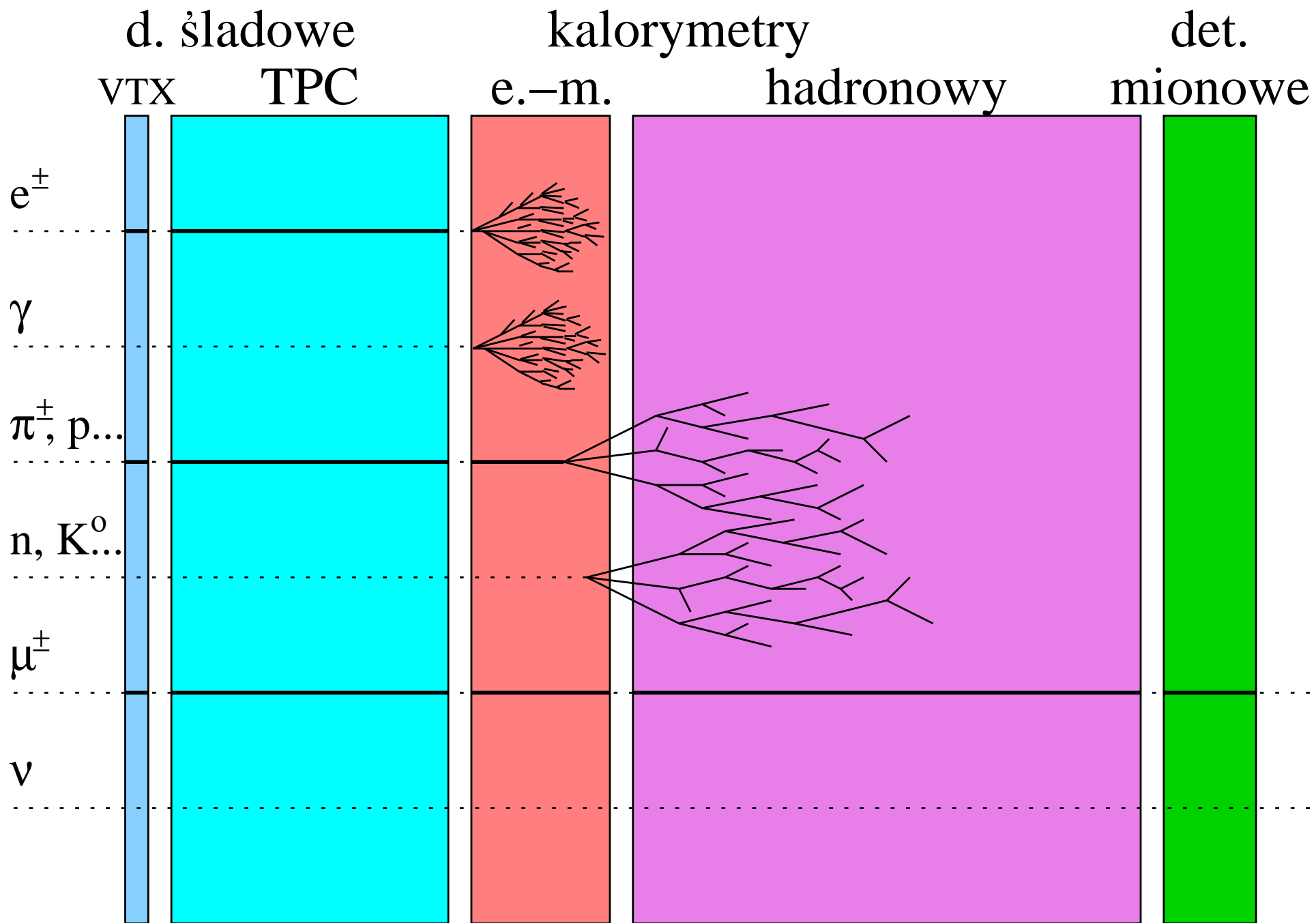


**ZEUS (HERA)** 

Software :SDRC-IDEAS level V11  
Performed by : Czesław Bartłomiej  
Status : October 1995

# Eksperyment ZEUS





Przypadek rozpraszania elektron-proton

**Ekspertment H1**

