

## PLAN ZAJĘĆ

25 III 2014 r. - Wykład eksperymentalny I - akceleratory

1 IV 2014 r. - Wykład eksperymentalny II - detektory

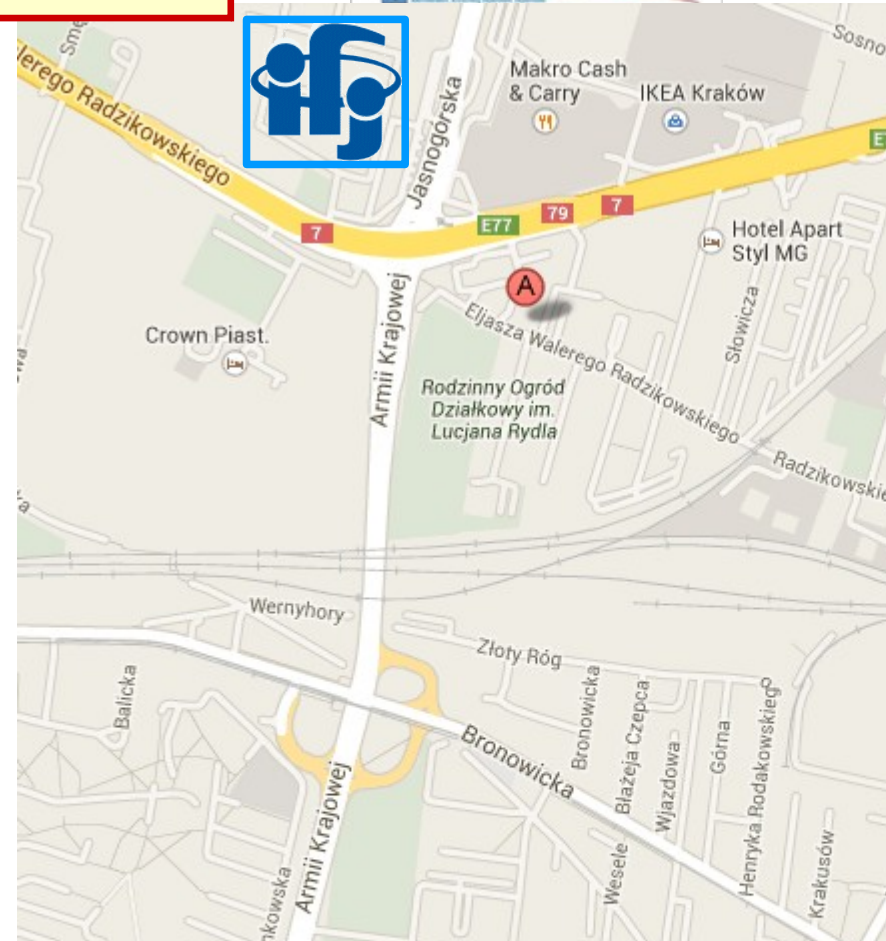
8 IV 2014 r. - Wycieczka do Instytutu Fizyki Jądrowej PAN  
(zamiast wykładu ze wstępu do fizyki cząstek)

**Adres IFJ PAN : ul. Radzikowskiego 152  
(przy Rondzie Ofiar Katynia)**

**Spotykamy się przy portierni IFJ PAN. Osoby  
spóźnione proszone są o zgłoszenie się  
do sekretariatu Oddziału I  
(pokój 5224, korytarz na prawo od głównego  
wejścia, tel. 12 662 8010 (8011)) .**

**W programie spotkanie z fizykami,  
pracującymi w eksperymentach fizyki  
cząstek**

**Serdecznie zapraszamy !**





**Sekretariat  
Oddziału I**



**Wejście  
główne**

**Portiernia**

## DOJAZD

173 – do Ronda Ofiar Katynia ok. 12 min. (10:00)

139 – do Balicka Wiadukt +5 min. pieszo (10:13)

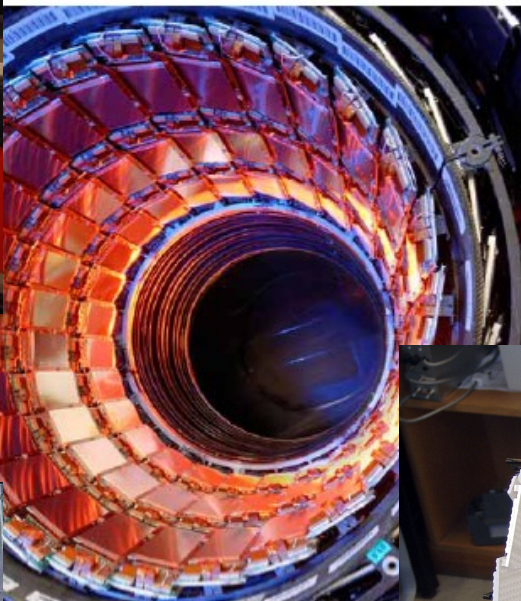
## POWRÓT

173 – (11:47 lub 12:11)

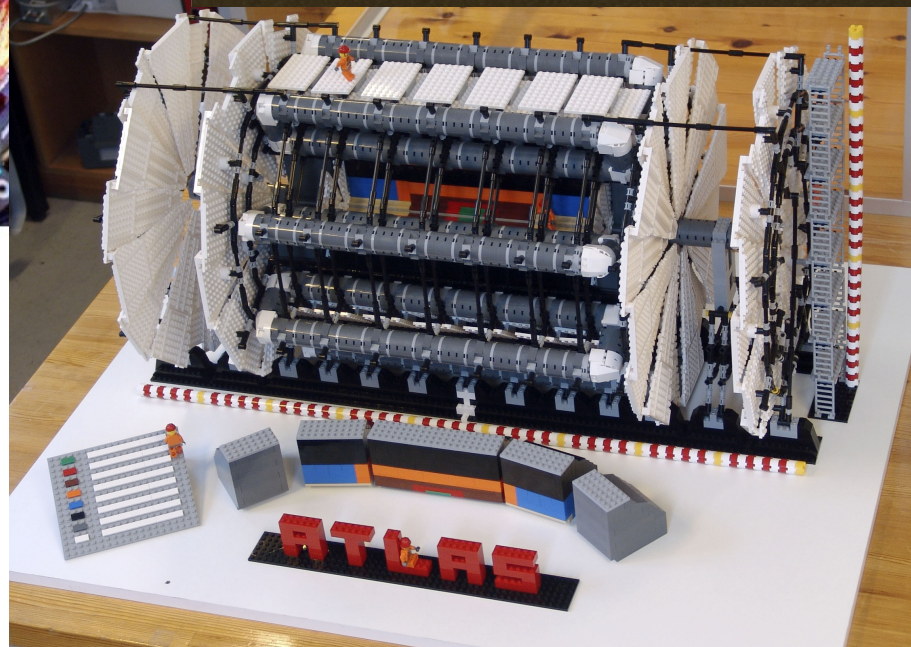




# Detektory



Krzysztof Woźniak  
IFJ PAN



# Detektory

**Zadaniem fizyka eksperymentatora jest uzyskanie informacji o procesie fizycznym - w przypadku zderzeń cząstek chodzi głównie o to jakie cząstki zostały wytworzone**

**Przypomina to pracę śledczego, poszukującego informacji o sprawcach zderzenia na drodze, którzy gdzieś się oddalili**



**o takie informacje  
trudno na asfalcie**



# Detektory

**Zadaniem fizyka eksperymentatora jest uzyskanie informacji o procesie fizycznym - w przypadku zderzeń cząstek chodzi głównie o to jakie cząstki zostały wytworzone**

**Przypomina to pracę śledczego, poszukującego informacji o sprawcach zderzenia na drodze, którzy gdzieś się oddalili**



**o takie informacje  
trudno na asfalcie**



**jednak przy odrobinie szczęścia  
inne podłoże ich dostarczy**



# Detektory

**Jakich informacji poszukujemy:**

- **Skąd pochodziła cząstka - wierzchołek oddziaływania**
- **Dokąd poleciała - wyznaczenie trajektorii cząstki**
- **Jaka to była cząstka - identyfikacja cząstek, wyznaczenie masy**
- **Jakie miała własności - pęd, ładunek elektryczny, energię**

**Detekcja cząstek jest możliwa dzięki ich oddziaływaniom z materią**

**Metody detekcji cząstek opierają się  
na fizyce oddziaływania cząstek z materią**

**Postęp w badaniach fizyki cząstek elementarnych jest ściśle powiązany z rozwojem technik przyspieszania oraz detekcji cząstek, jak również stowarzyszonej z nimi elektroniki.**

# Zjawiska fizyczne

## Oddziaływania elektromagnetyczne:

- jonizacja ośrodka - cząstki naładowane
- luminescencja (scyntyłacja) - cząstki naładowane
- promieniowanie Czerenkowa - cząstki naładowane
- promieniowanie hamowania - przede wszystkim elektrony i pozytony
- rozpraszanie wielokrotne - cząstki naładowane
- efekt fotoelektryczny - fotony
- rozpraszanie Comptona - fotony
- kreacja par  $e^+e^-$  - fotony

## Oddziaływania silne:

- produkcja cząstek w oddziaływaniach - kaskada hadronowa

# Jonizacja

**Strata energii cząstki na skutek procesów jonizacji**

**Wzór Bethego-Blocha:**

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

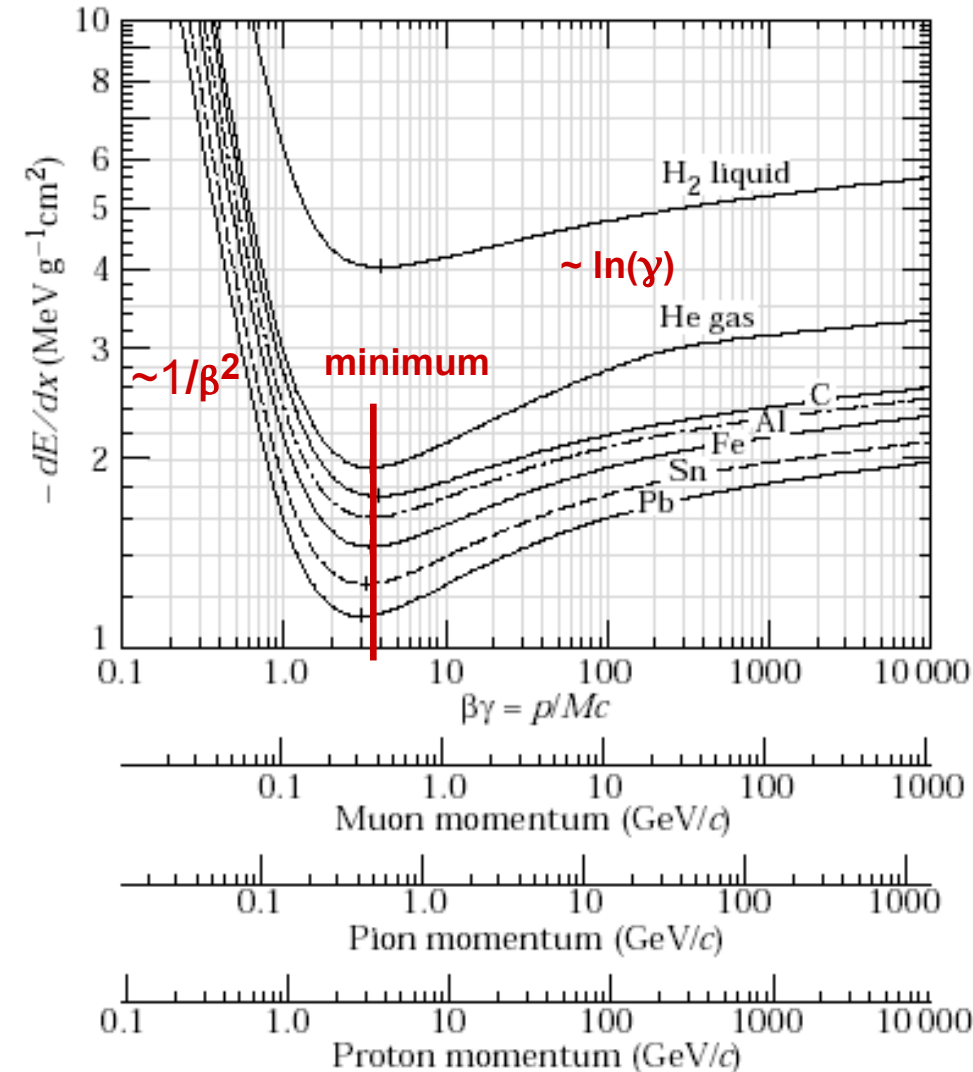
- Z, A** - liczba atomowa oraz liczba masowa atomów ośrodka  
(liczba protonów liczba wszystkich nukleonów w jądrze)
- I** - potencjał jonizacji (dla większości materiałów  $\sim (10\text{eV}) \cdot Z$ )
- z** - ładunek cząstki (w jednostkach ładunku elementarnego)
- $\delta$**  - poprawka związana z polaryzacją ośrodka

**Straty są proporcjonalne do  $z^2$  i zależą od  $\beta$**



# Jonizacja

## Jonizacyjne straty energii w różnych ośrodkach



Dla ciężkich cząstek ( $m \gg m_e$ )  
straty jonizacyjne zależą od  $\beta\gamma$

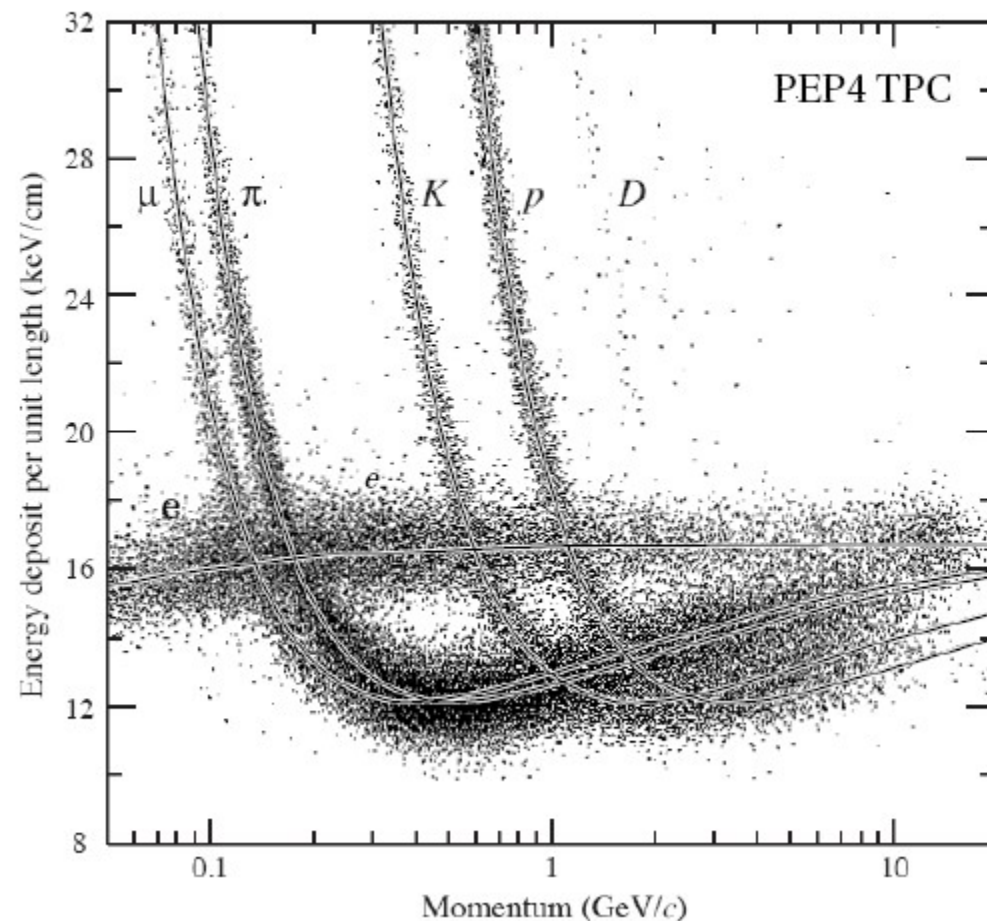
$$-\frac{dE}{dx} \propto \frac{1}{\beta^2} \left[ \ln(\beta\gamma) - \beta^2 + K_1 \right]$$

- małe prędkości - zależność  $\sim 1/\beta^2$
- minimum jonizacji dla  $\beta\gamma = p/m \sim 3.5$  dla wszystkich cząstek
- Położenie minimum jonizacji nie zależy zbyt od rodzaju ośrodka.
- $(dE/dx)_{\min} \sim 1-2 \text{ MeV g}^{-1} \text{cm}^2$  (oprócz  $\text{H}_2$ )
- relatywistyczny wzrost  $\sim \ln(\gamma)$  (bo  $\beta \approx 1$ )



poprzeczne pole elektryczne cząstki  $\sim \gamma$

# Identyfikacja cząstek poprzez $dE/dx$

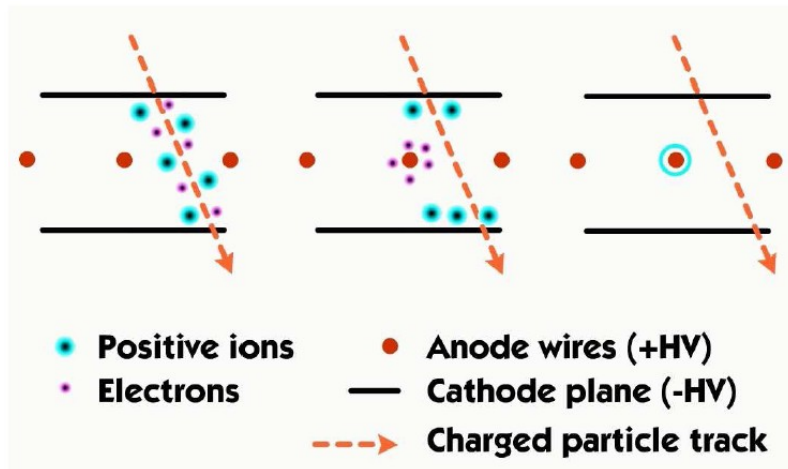


- Jonizacyjne straty energii  $dE/dx$  zależą tylko od  $\beta$ , są niezależne od masy cząstki
- cząstki o danym pędzie i różnych masach mają różne  $dE/dx$
- **pomiar pędu cząstki**  
(z zakrzywienia jej toru w polu magnetycznym)  
+ **pomiar  $dE/dx$**   
(sygnał  $\sim$  jonizacji zostawiony przez cząstkę)  
definiuje masę cząstki
- **metoda identyfikacji cząstek**  
efektywna dla niezbyt dużych pędów

Rozkłady  $dE/dx$  dla mionów ( $\mu$ ), pionów ( $\pi$ ), kaonów ( $K$ ), protonów ( $p$ ) i deuteru ( $D$ ) uzyskane w komorze projekcji czasowej (Time Projection Chamber, TPC, eksperyment PEP4 na zderzaczach  $e^+e^-$  w laboratorium SLAC)

# Detektory wykorzystujące jonizację

## Wielodrutowe komory proporcjonalne



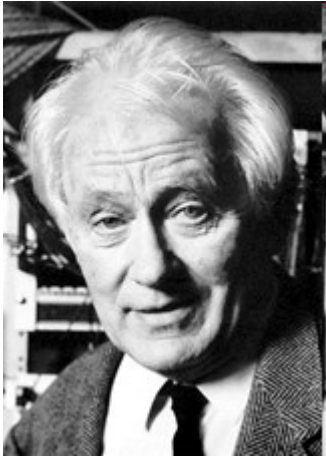
### Typowe parametry

- druty anodowe: średnica = 20  $\mu\text{m}$   
rozstawione co 2 mm
- odległości płaszczyzn katodowych  $\sim 12$  mm
- różnica potencjałów  $\sim 5$  kV,
- gaz : mieszanina argonu i izobutanu
- przestrzenna zdolność rozdzielcza :  
 $\sim 1$  mm
- paskowe katody  $\sim 0.050$  mm  
(pomiar środka ciężkości impulsu katodowego)

Detektor składa się z dwóch płaszczyzn katodowych, między którymi znajduje się wiele drutów anodowych. Obszar między elektrodami wypełniony jest odpowiednim gazem.

- naładowana cząstka przechodząc przez licznik gazowy powoduje **jonizację ośrodka**
- **jony dodatnie dryfują w kierunku katody**
- **uwolnione elektrony podążają do anody**
- przy odpowiednio dużej różnicy potencjałów energia uzyskana w polu elektrycznym przez pierwotne elektrony prowadzi do wtórnych jonizacji i kaskadowego powielania ładunku rejestrowanego przez anodę
- **wzmocnienie gazowe  $\sim 10^3 - 10^6$**

# Detektory wykorzystujące jonizację



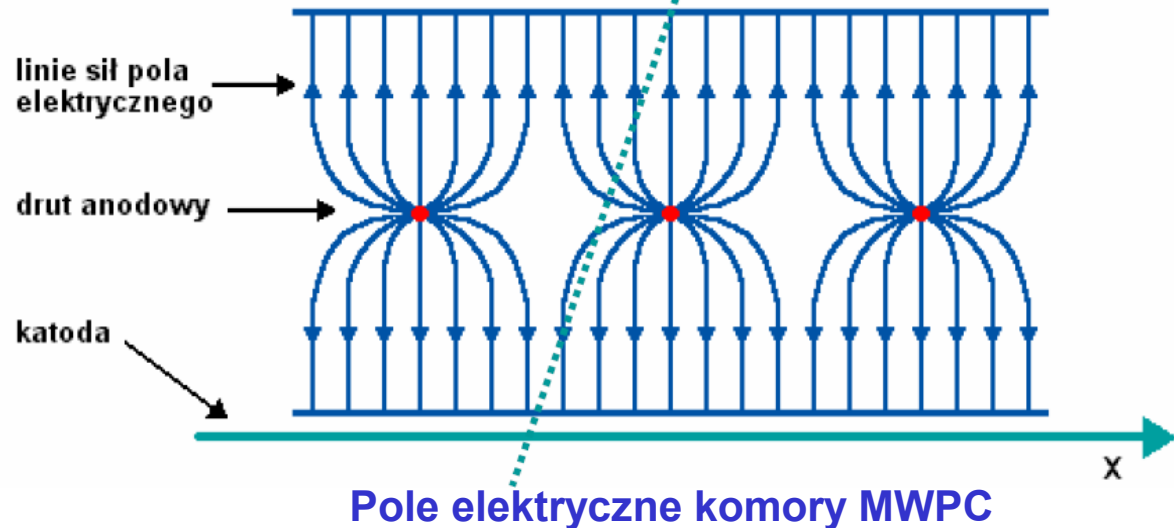
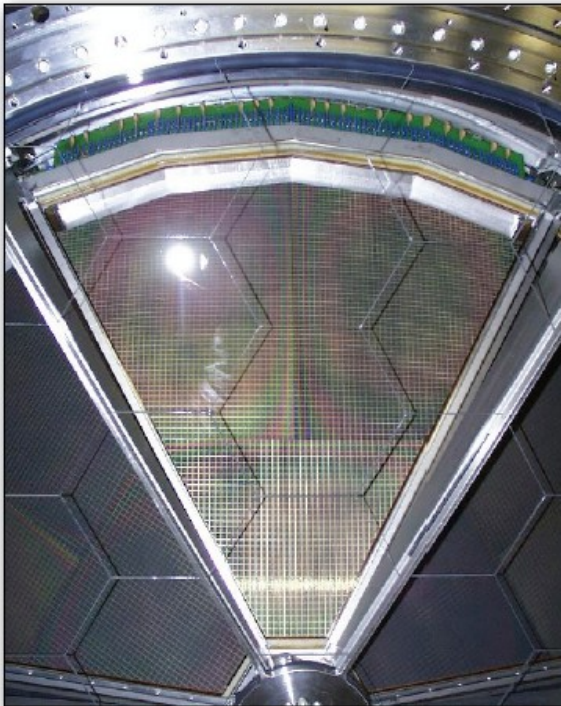
## Wielodrutowe komory proporcjonalne

**Georges Charpak**

1968 – konstrukcja wielodrutowej komory proporcjonalnej

1992 – Nagroda Nobla

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



Obecnie MWPC są rzadko stosowane

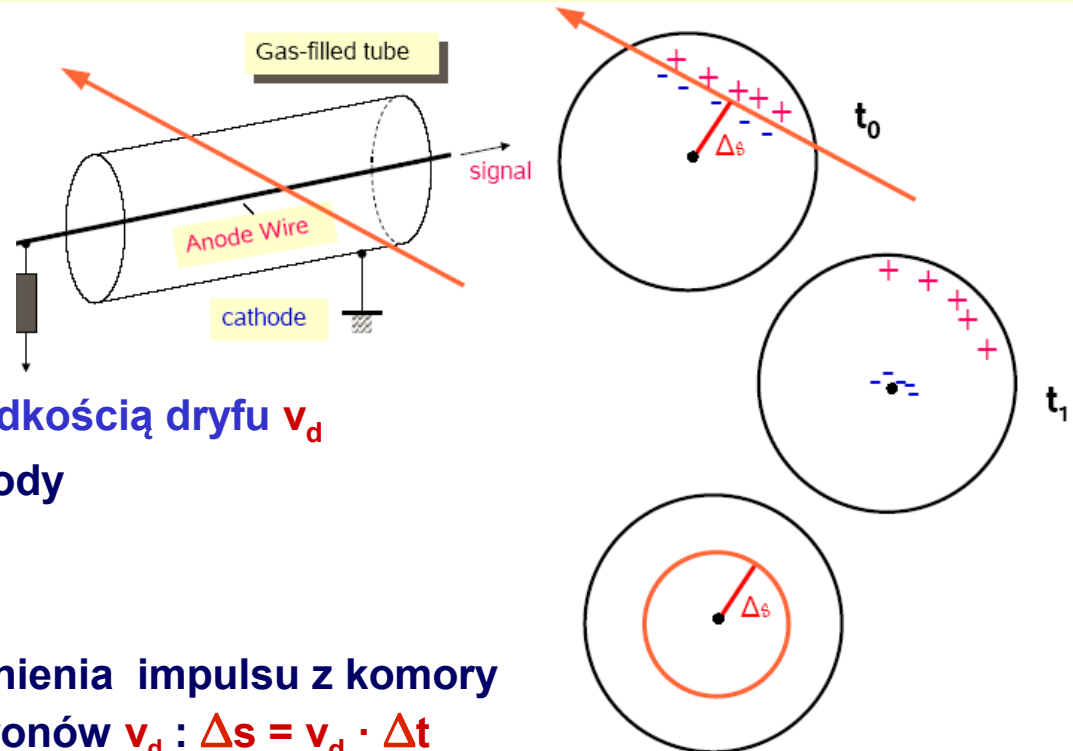
Uzyskanie wysokiej rozdzielczości przestrzennej wymagałoby dużej liczby drutów (ze wzmacniaczami) umieszczonych blisko siebie - problemy techniczne i finansowe



# Detektory wykorzystujące jonizację

**Komora dryfowa** – komora proporcjonalna, w której elektrony z pierwotnej jonizacji dryfują na dłuższym odcinku w obszarze słabego pola elektrycznego zanim osiągną obszar wzmocnienia z silnym polem w pobliżu anody.

- **Cząstka przechodzi przez komorę i jonizuje ośrodek –  $t_0$**   
(czas  $t_0$  - znany z pomiaru w liczniku scyntylacyjnym)
- **Elektrony dryfują do anody z prędkością dryfu  $v_d$**
- **Wzmocnienie sygnału w polu anody**
- **Pomiar czasu dryfu  $\Delta t = t_1 - t_0$**   
dokładność pomiaru czasu  $\sim 1\text{ nsec}$
- **Pomiar położenia cząstki z opóźnienia impulsu z komory  $\Delta t$  i znanej prędkości dryfu elektronów  $v_d$  :  $\Delta s = v_d \cdot \Delta t$**
- **$v_d$  zależy od gazu, jego ciśnienia, różnicy potencjałów, temperatury, pola elektrycznego (typowo  $v_d \sim 10^5 \text{ m / sec}$ )**

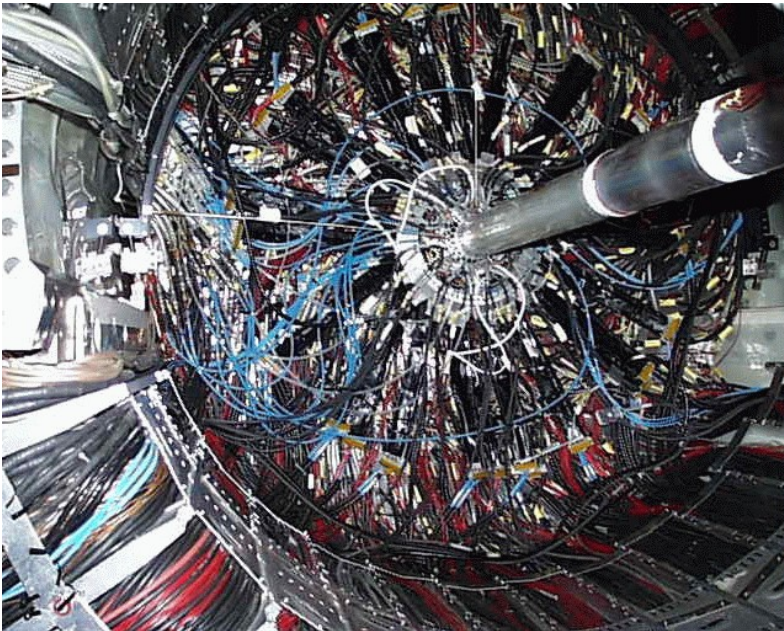


**Pomiar czasu dryfu** - poprawa przestrzennej zdolności rozdzielczej o czynnik 10  
w porównaniu z MWPC : **1mm  $\rightarrow$  100  $\mu\text{m}$**

# Detektory wykorzystujące jonizację



**Komora dryfowa eksperymentu PHENIX na zderzaczu ciężkich jonów w Brookhaven National Laboratory (USA)**



**Komora dryfowa eksperymentu H1 na zderzaczu elektron-proton w ośrodku DESY w Hamburgu**



# Detektory wykorzystujące jonizację

**Komora projekcji czasowej** - Time Projection Chamber (TPC)  
w eksperymencie ALICE w CERN

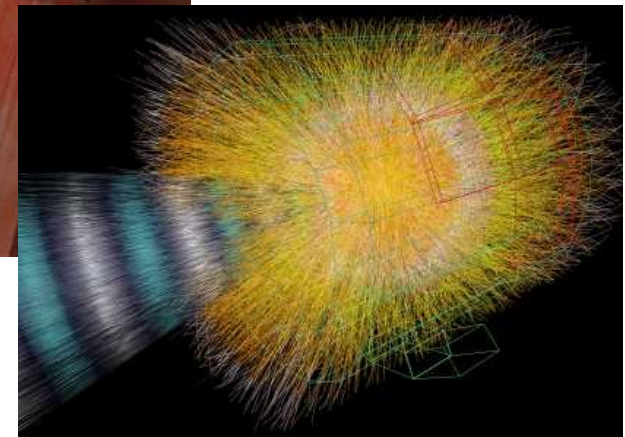


Rozmiar cylindra:  
5,1 m x 5,5 m  
(długość x średnica)

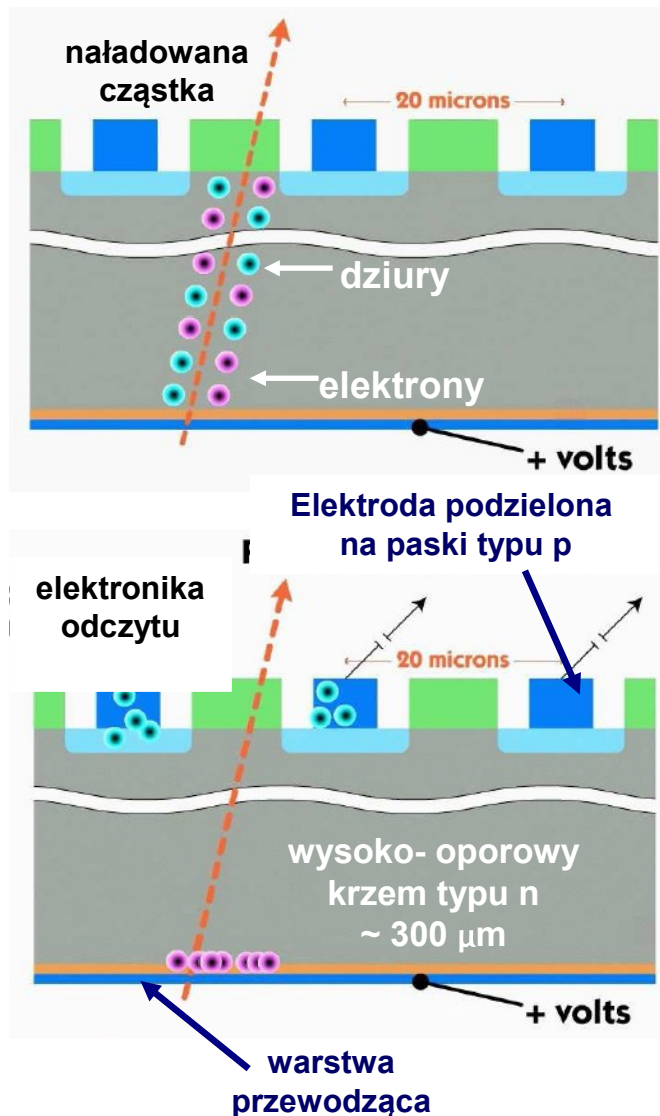
Długość dryfu:  
do 2,5 m

Dokładność pomiaru  
~200  $\mu\text{m}$

Rekonstrukcja do  
20000 śladów cząstek



## Detektory krzemowe

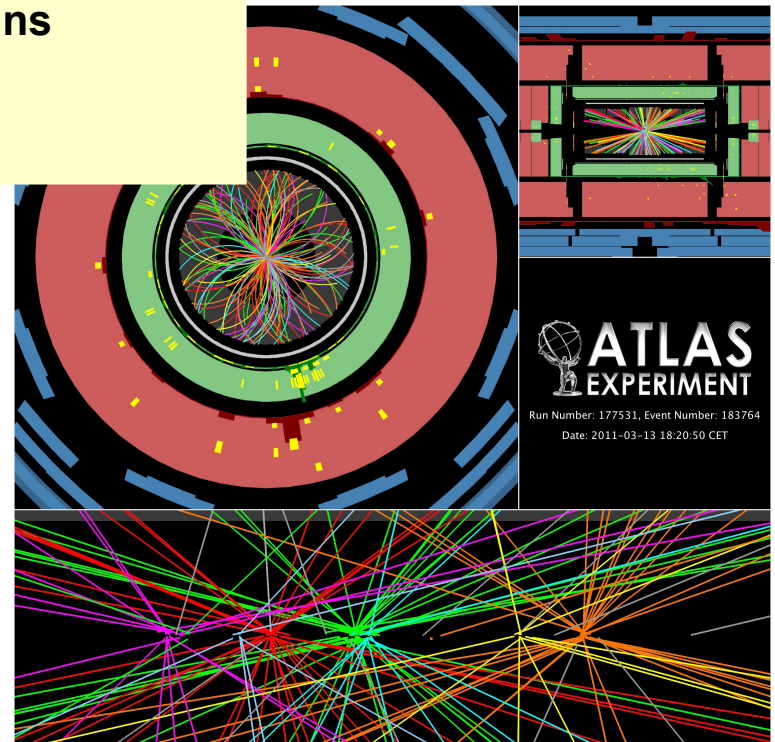
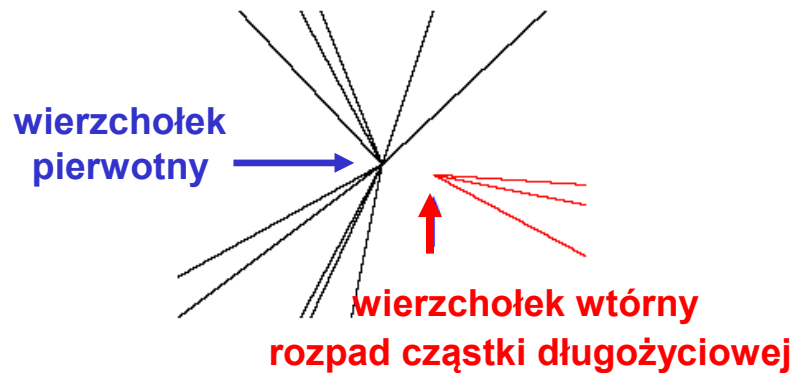


### Paskowy detektor krzemowy (Silicon Strip Detector)

- cienka płytki krzemu typu *n* – warstwa wysoko-oporowego krzemu o grubości  $\sim 300 \mu\text{m}$
  - jedna z elektrod detektora z materiału typu *p* jest podzielona na wąskie paski; odległości między paskami  $\sim 20 \mu\text{m}$
  - po drugiej stronie płytki krzemowej jest warstwa przewodząca
  - spolaryzowane w kierunku zaporowym złącze *pn* działa jak dioda
- 
- Naładowana cząstka przechodząca przez zubożony obszar wysoko-oporowego krzemu generuje pary **elektron-dziura**
  - Dziury dryfują w kierunku katody
  - Elektrony dryfują w kierunku anody
  - Średnia energia potrzebna do wytworzenia w krzemie pary elektron-dziura wynosi tylko **3.6 eV !!** (jonizacja gazu wymaga 20 – 40 eV)
- **Pomiar ładunku jonizacji na cienkich paskach**

## Własności detektorów krzemowych

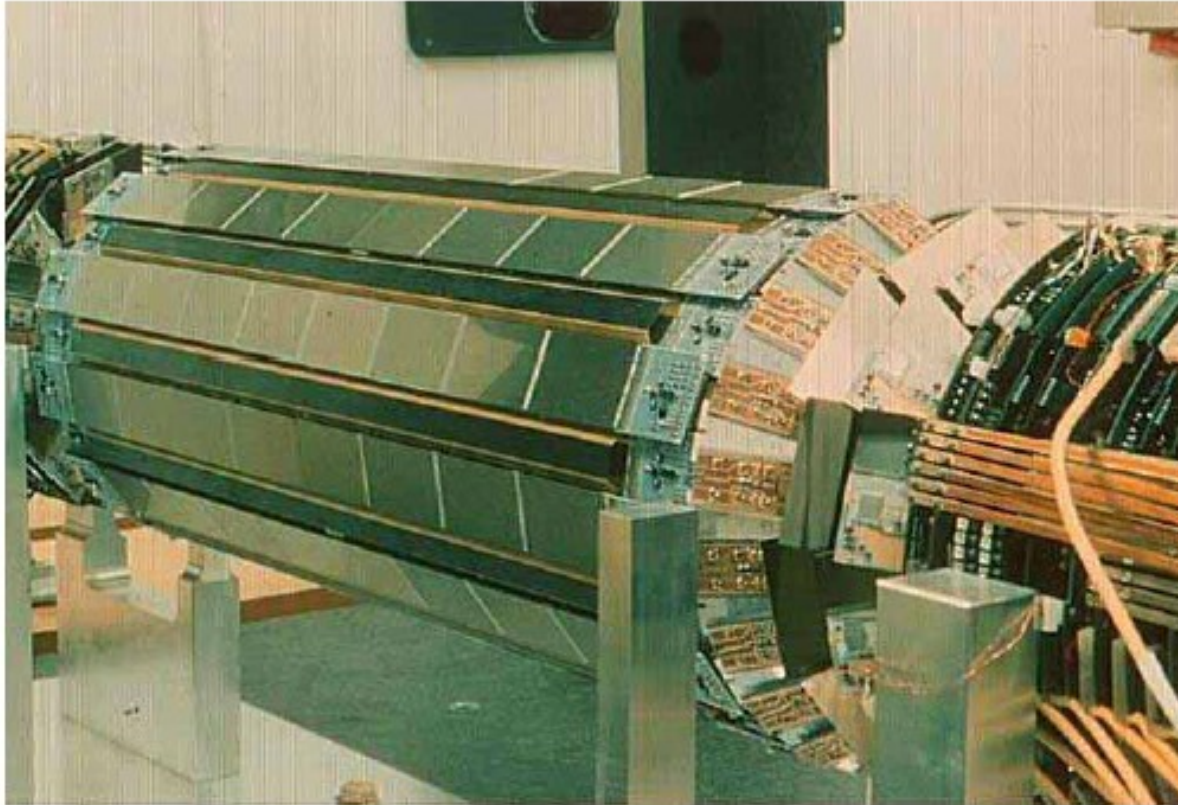
- **Bardzo dobra przestrzenna zdolność rozdzielcza  $< 10 \mu\text{m}$** 
  - pomiar pierwotnego wierzchołka oddziaływania
  - pomiar wierzchołków wtórnych  
badania cząstek składających się z ciężkich kwarków c i b  
(o czasach życia  $10^{-12} - 10^{-13}$  s, np. mezony B:  $c\tau \sim 0.5 \text{ mm}$ )
- **Krótki czas dryfu elektronów  $\sim 10 \text{ ns}$ , dziur  $\sim 25 \text{ ns}$**   
(parametry dla licznika o grubości  $\sim 300 \mu\text{m}$ )



**Zderzenia p+p w detektorze ATLAS  
przy LHC (7 zderzeń w jednym przypadku)**

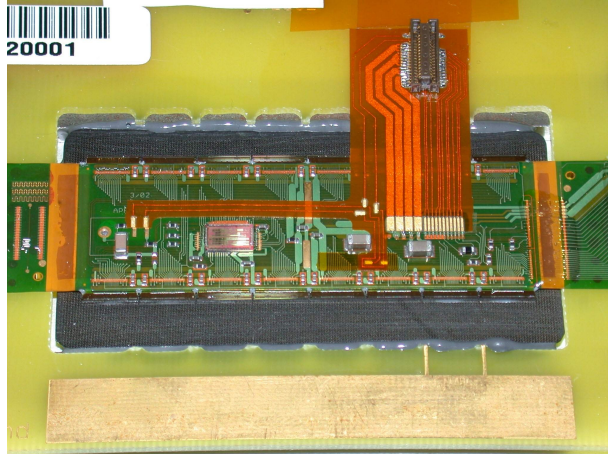


### Eksperyment DELPHI na zderzaczach $e^+e^-$ LEP w CERNie

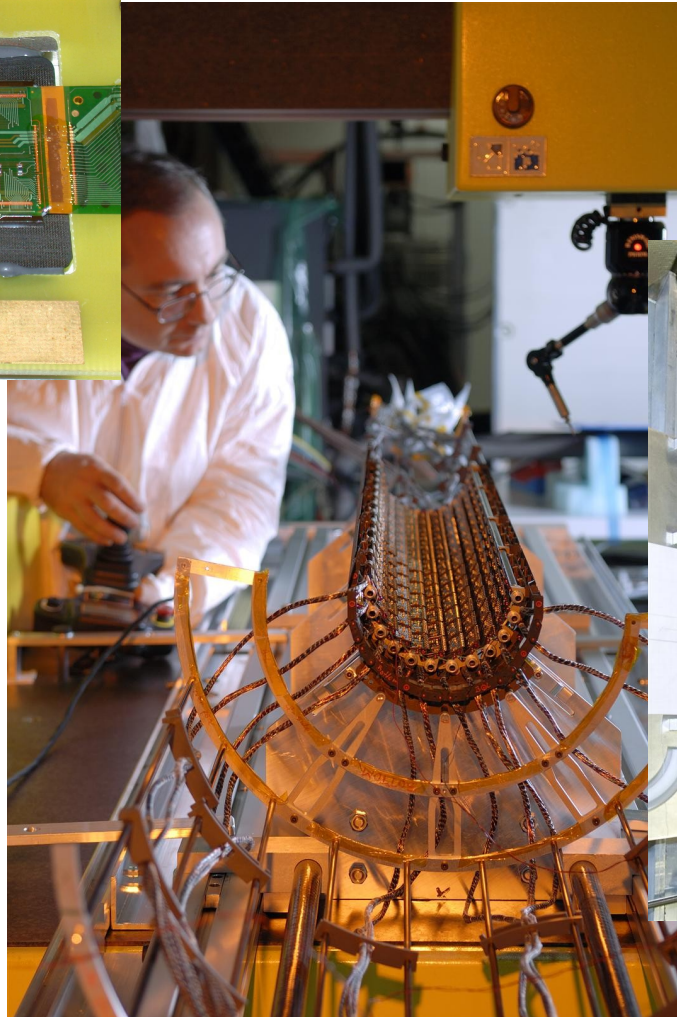


Fotografia przedstawia krzemowy detektor wierzchołka eksperymentu DELPHI na zderzaczach  $e^+e^-$  LEP w CERN przed zamontowaniem w eksperymencie w 1997

## Krzemowy detektor wewnętrzny eksperymentu ATLAS przy LHC

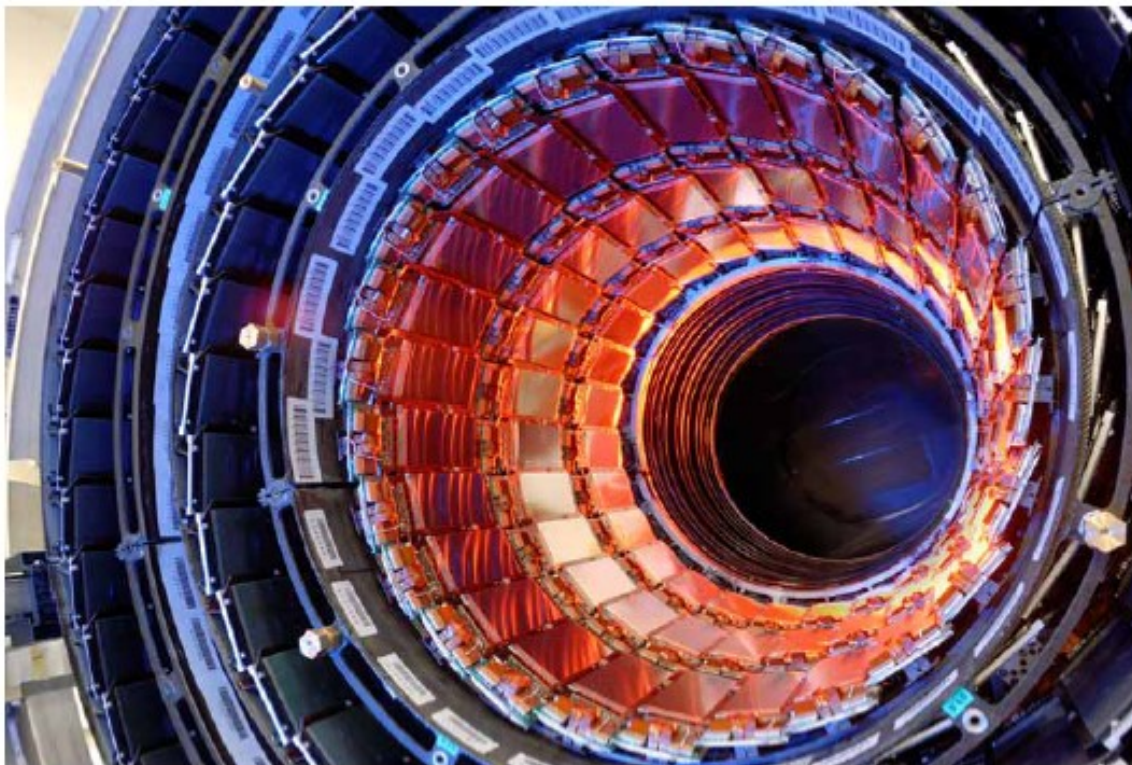


Krzemowy detektor  
eksperymentu ATLAS na  
zderzacz LHC w CERN  
ma powierzchnię aktywnego  
krzemu ok.  $80 \text{ m}^2$





### Krzemowy detektor wewnętrzny eksperymentu CMS przy LHC:



Powierzchnia aktywnego krzemu - ponad 200 m<sup>2</sup>

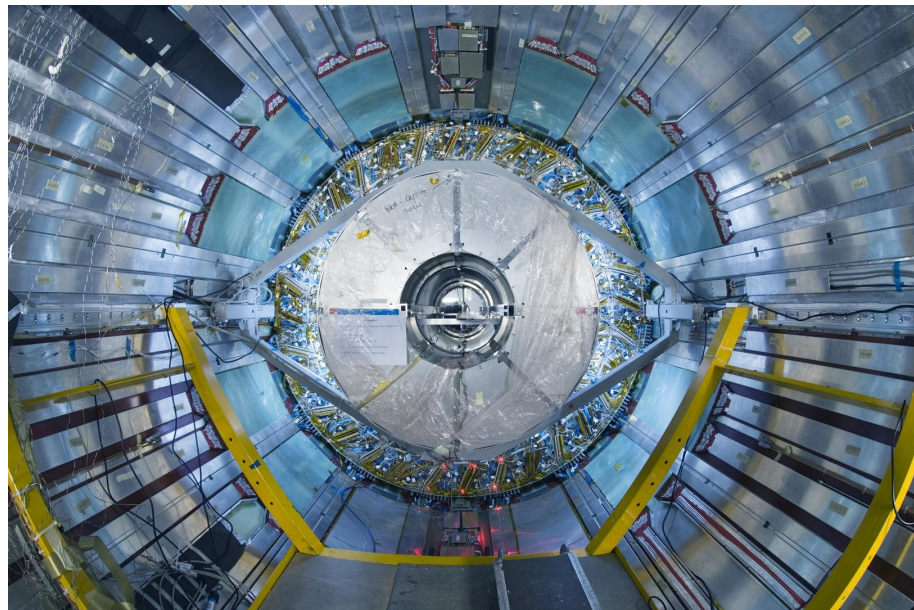
# Promieniowanie przejścia

Przy przejściu cząstki naładowanej, relatywistycznej, przez granicę dwu różnych materiałów (odpowiednio dobranych) pojawia się **promieniowanie przejścia**. Jest ono tym silniejsze, im większą prędkość ma cząstka - co daje szansę na odróżnienie elektronów od innych cząstek.

Detektor TRT (Transition Radiation Tracker) w eksperymencie ATLAS

długość 7m, średnica ~2,2 m

370 000 „słomek”





# Luminescencja i liczniki scyntylacyjne

- Przejście cząstki naładowanej w niektórych materiałach powoduje wybite elektronów z orbit wewnętrznych do pasma przewodnictwa
- Powrót tych elektronów do stanu o najniższej energii następuje w kilku etapach, za każdym razem emitowane są fotony o częstotliwościach w zakresie zbliżonym do światła widzialnego

## Detektor scyntylacyjny składa się z:

- **scyntylatora** - materiału emitującego światło
  - materiały organiczne, z pierścieniami aromatycznymi
  - plastyki, z domieszką luminoforów organicznych
  - kryształy nieorganiczne: NaI, CsI, CsF, BaF<sub>2</sub>, CaF<sub>2</sub> i inne
  - gazy (azot i gazy szlachetne)
- **światłowodu** - odbierającego wyemitowane światło
- **fotopowielacza** - urządzenia w którym:
  - foton wybija z fotokatody elektron (efekt fotoelektryczny)
  - elektron ten jest przyspieszany i uderza w dynodę, wybijając kilka dodatkowych elektronów
  - dodatkowe elektrony trafiają w kolejną dynodę, wybijając jeszcze więcej elektronów
  - proces ten może być powtarzany na kilku kolejnych dynodach, dając wzmocnienie nawet  $\sim 10^8$
  - ostatecznie elektrony trafiają do anody, rejestrującej sygnał

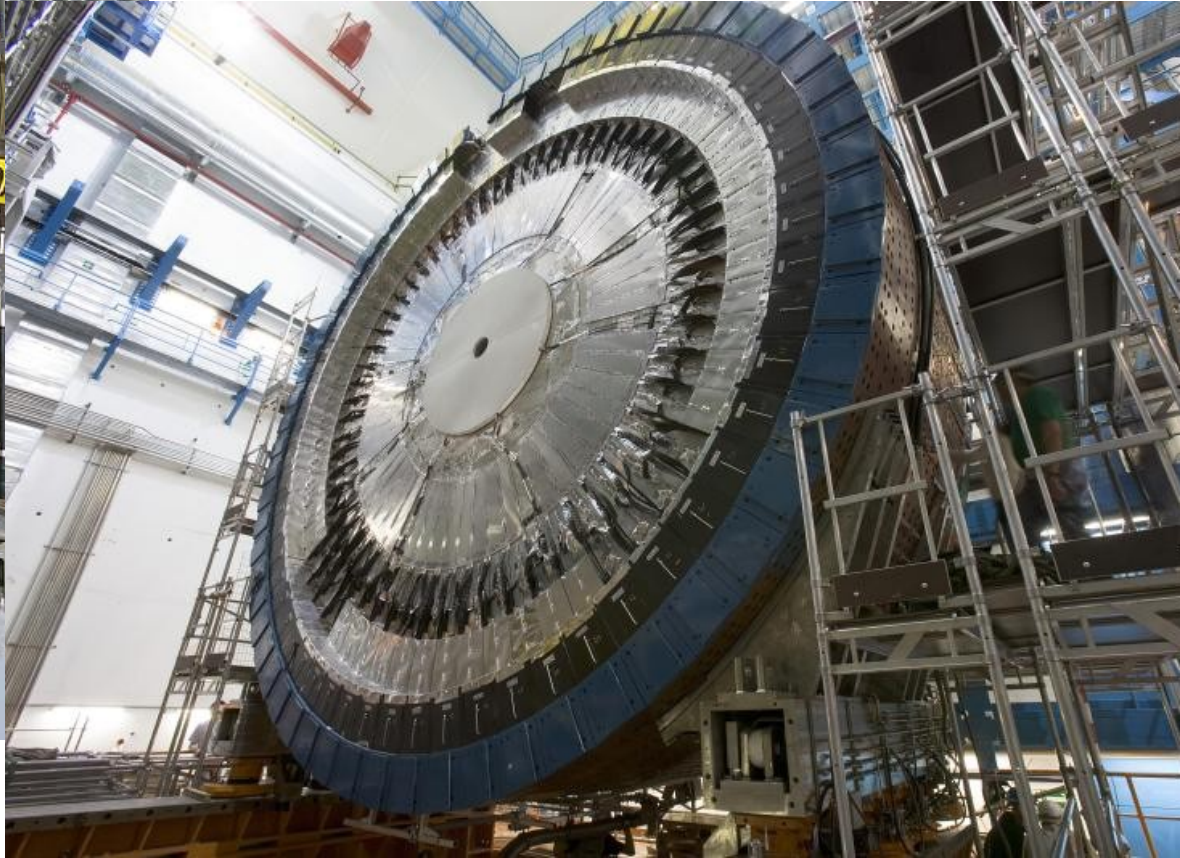


Liczniki scyntylacyjne zapewniają szybki czas reakcji i dokładny pomiar czasu  $\sim 100$  ps ( $\sim 10^{-10}$  s)

# Luminescencja i liczniki scyntylicyjne



**Liczniki scyntylicyjne  
w eksperymencie PHOBOS**

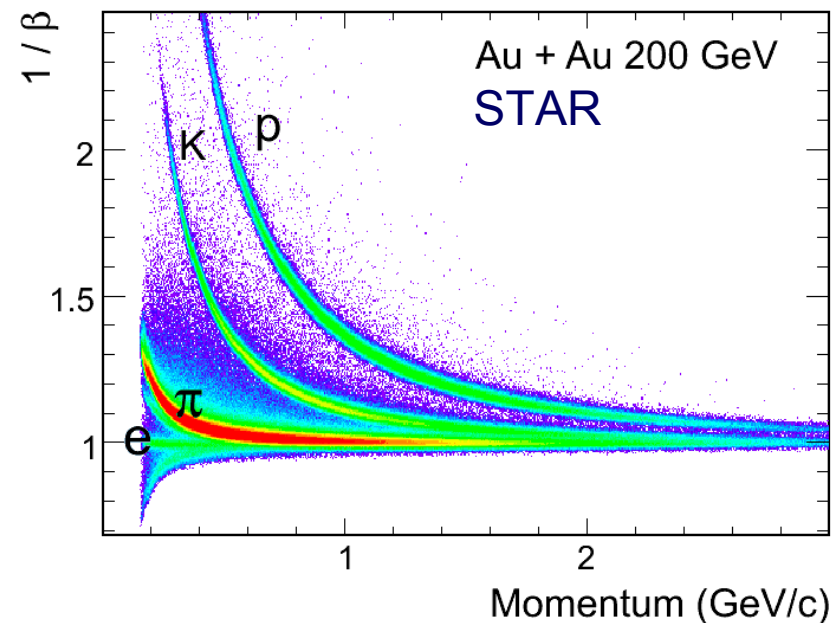
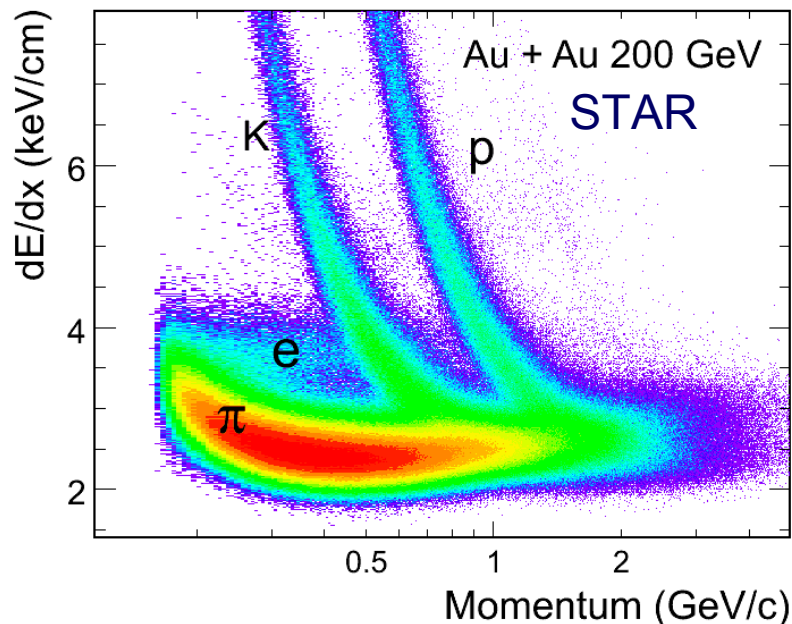


**Detektor Minimum Bias Trigger Scintilators  
w eksperymencie ATLAS**

# Detektory czasu przelotu (TOF)

Przy użyciu detektorów precyzyjnie mierzących czas, można wyznaczyć prędkość cząstek:

- typowy błąd pomiaru  $< 100$  ps
- droga przebyta przez cząstkę to kilka metrów
- można rozróżnić między cząstką z  $\beta=1$  (czas przelotu 10 ns dla  $s=3$  m) oraz cząstką z  $\beta=0.97$  przebywającą tę samą drogę o 300 ps dłużej odpowiada to rozróżnieniu między  $\pi$  oraz K o pędzie  $\sim 2$  GeV/c





# Promieniowanie Czerenkowa

## Promieniowanie Czerenkowa

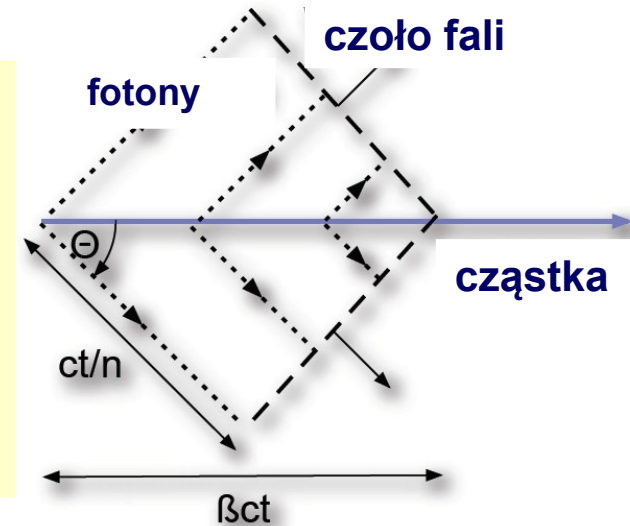
Wysokoenergetyczna naładowana cząstka poruszająca się w ośrodku dielektrycznym z prędkością większą niż fazowa prędkość światła w tym ośrodku emituje fotony.

$$\beta c > c / n$$

$\beta c$  – prędkość cząstki

$c / n$  – prędkość światła w ośrodku

$n$  – współczynnik załamania ośrodka



Emitowane światło tworzy spójne czoło fali rozchodzące się pod pewnym kątem do toru cząstki (elektromagnetyczna fala uderzeniowa).

$$\cos \theta = \frac{ct/n}{\beta ct} = \frac{1}{\beta n}, \quad \beta > \frac{1}{n}$$

**pomiar kąta  $\theta \rightarrow$  pomiar prędkości cząstki**

- promieniowanie Czerenkowa ma widmo ciągłe
- liczba fotonów o określonej długości fali wyemitowana na jednostkę długości drogi cząstki  $\sim d\lambda / \lambda^2$  (dominuje światło niebieskie)
- sygnał od promieniowania Czerenkowa jest bardzo słaby – straty energii są typowo rzędu 1% strat energii na jonizację

# Liczniki Czerenkowa

Liczniki Czerenkowa służą do identyfikacji cząstek.

Pomiar **prędkości** przy znanym **pędzie** cząstki  
(wyznaczonym z zakrzywienia toru cząstki w polu magnetycznym)  
pozwała na określenie **masy**, a tym samym **typu cząstki**.

$$\beta = p / E, \quad E^2 = p^2 + m^2 \quad (c = 1)$$

- Progowe liczniki Czerenkowa

Sygnał z licznika jeżeli  $\beta$  cząstki powyżej wartości progowej  $\beta_{thr} = 1 / n$

Stosowane już w latach 60-tych w eksperymentach na stacjonarnej tarczy

Pomiar całkowitego sygnału fotonowego

- Różniczkowe liczniki Czerenkowa

Pomiar kąta emisji promieniowania Czerenkowa, optyczne ogniskowanie promieniowania, użycie fotopowielaczy

Rozróżnienie naładowanych pionów, kaonów i protonów o energiach do kilkuset GeV

Stosowane też do analizy składu wiązek wtórnych z akceleratorów

- Detektory typu RICH (Ring Imaging Cherenkov)

Możliwość rejestracji fotonów bez użycia fotopowielaczy  
(detektory fotonów o dużej powierzchni)

Stosowane w eksperymentach przy zderzacach  
(rozwój detektorów fotonów i niskoszumowej elektroniki)

# Liczniki Czerenkowa

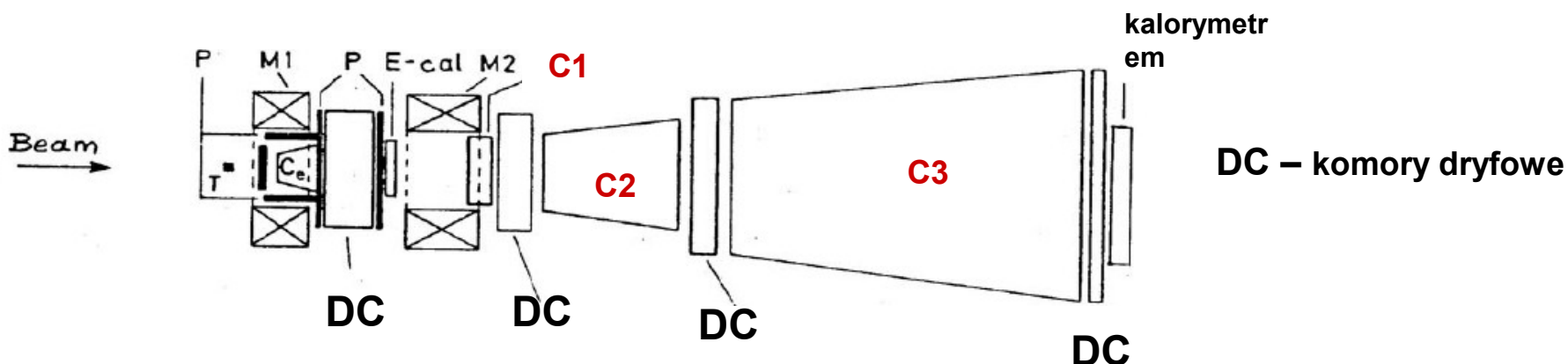
## Progowe liczniki Czerenkowa

Rozróżnianie między 2 relatywistycznymi cząstkami o tym samym pędzie i różnych masach.

$p_1 = p_2$ ,  $m_1 > m_2 \rightarrow v_1 < v_2$  ( $\beta_1 < \beta_2$ ) – cząstka lżejsza jest szybsza

Sygnał w liczniku Czerenkowa jeżeli  $\beta > \beta_{thr} = 1 / n$

2 - 3 detektory z różnymi progami pozwalają na rozróżnianie między  $\pi^\pm$ ,  $K^\pm$  i protonami w pewnym ograniczonym zakresie pędów



Progowe liczniki Czerenkowa  $C_e$ , C1 - C3 w eksp. NA11 (CERN) na stacjonarnej tarczy

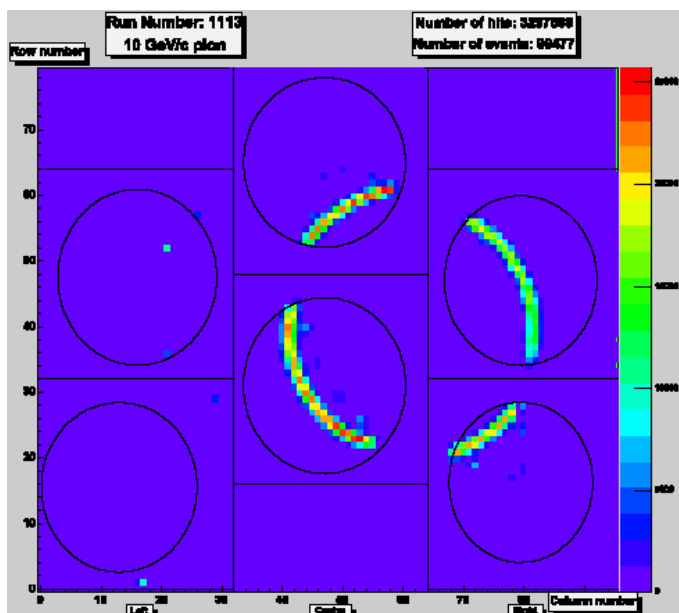


# Liczniki Czerenkowa

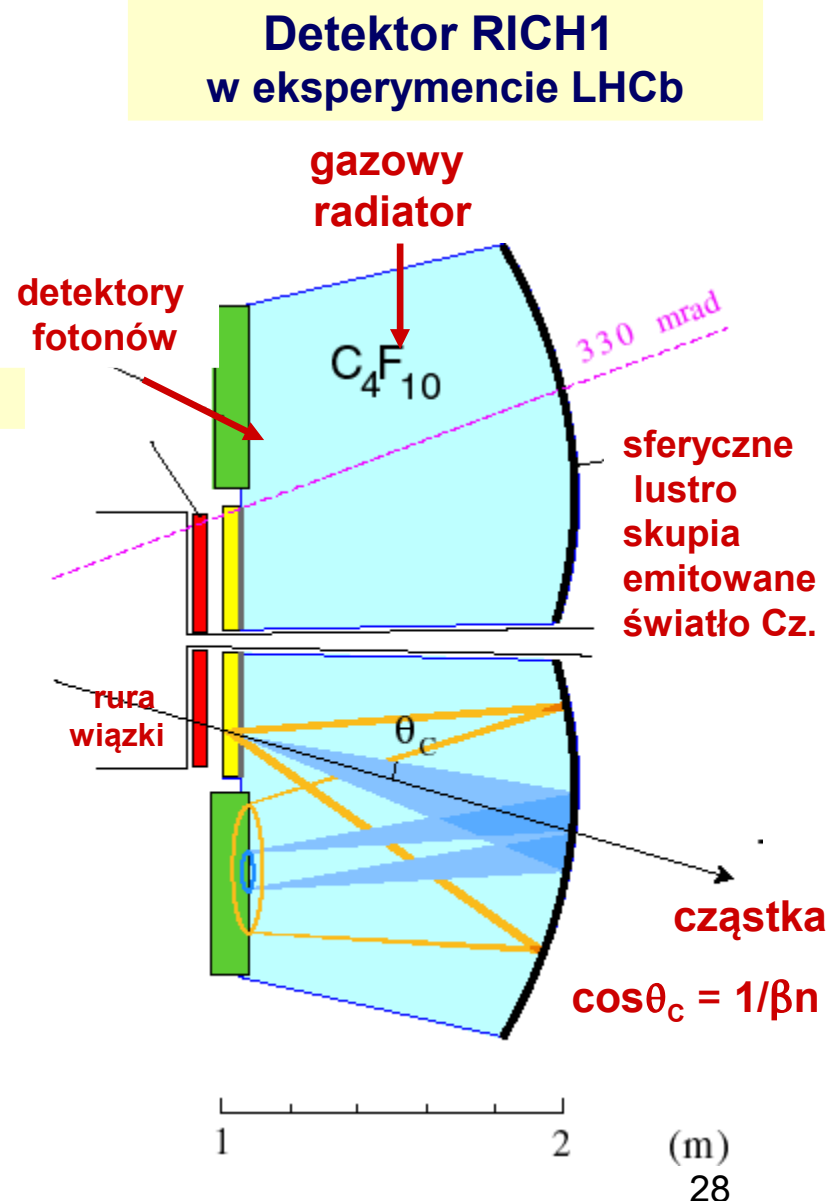
## Ring Imaging Cherenkov

Stożek promieniowania Czerenkowa jest obrazowany w postaci pierścienia w detektorze fotonów o dobrej przestrzennej zdolności rozdzielczej i dużej czułości na

**promień pierścienia** → **kąt Czerenkowa**  
→ **prędkość cząstki**



**Separacja pionów, kaonów, protonów  
w zakresie pędów 16 - 60 GeV**



# Liczniki Czerenkowa

Bardzo duże **wodne detektory Czerenkowa** są używane do detekcji **neutrino** (eksperymenty SuperKamiokande, T2K w Japonii)

## Eksperyment SuperKamiokande

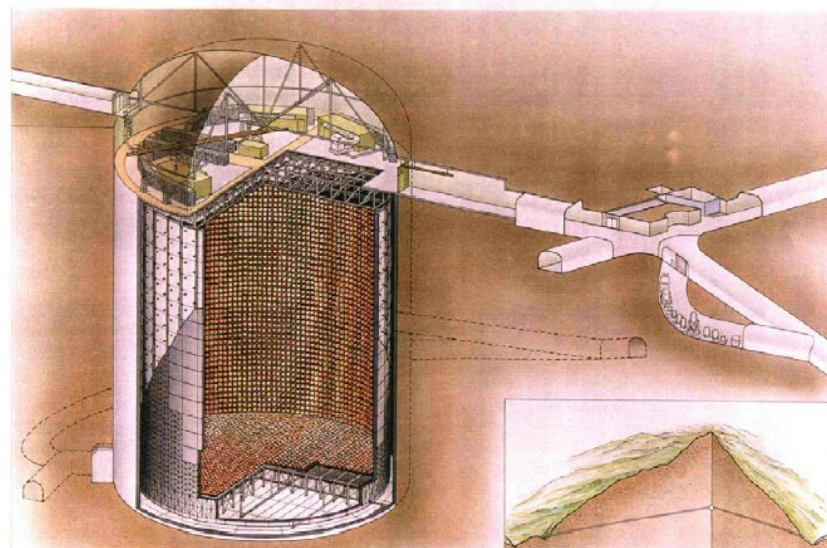
w kopalni pod górą Kamioka w Japonii

- Zbiornik o wysokości 40 m i średnicy 40 m wypełniony 50 000 tonami wody ( $H_2O$ )
- Otoczony ok. 11 000 fotopowielaczy
- 1 km pod ziemią

**1998** – badania neutrino atmosferycznych

pierwsza wiarygodna ewidencja oscylacji neutrino

$$\nu_{\mu} \leftrightarrow \nu_{\tau}$$

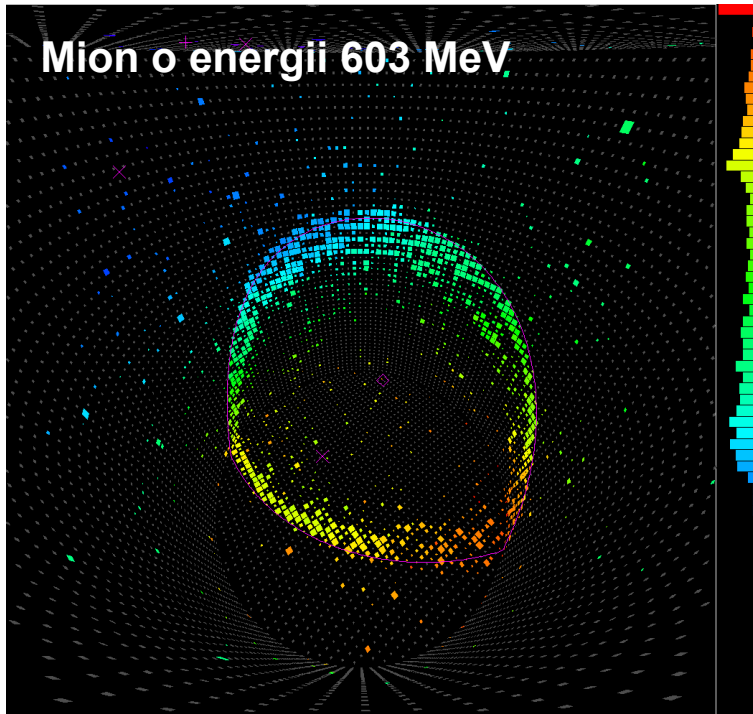


**2002** – nagroda Nobla dla M. Koshiba koordynatora eksperymentu SuperKamiokande

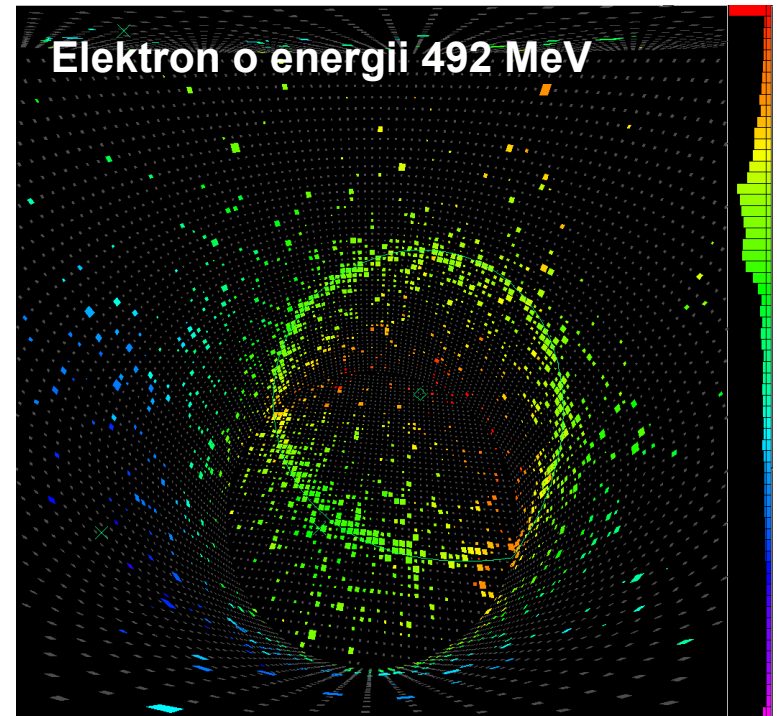
- oscylacje neutrino (przemiany jednego typu neutrino w inne) wyjaśniają wyniki eksperymentów badających neutrino atmosferyczne i słoneczne
- najłatwiej je zrozumieć przy założeniu, że neutrino mają niezerowe masy

# Liczniki Czerenkowa

## SuperKamiokande



$\mu$  – stożek promieniowania Czerenkowa  
o ostrych krawędziach



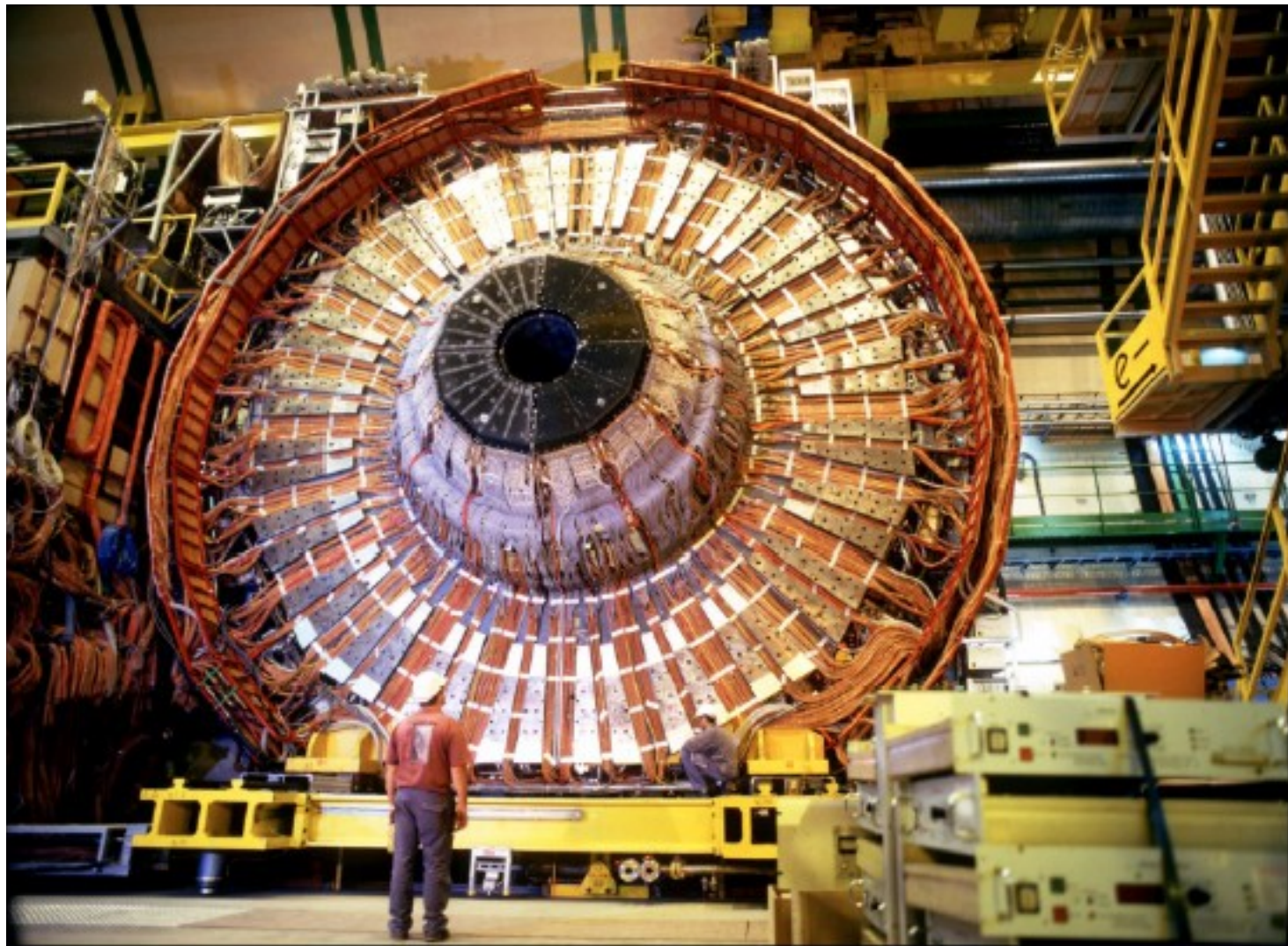
$e$  – rozprasza się w ośrodku, zmiana  
kierunku ruchu, rozmazany stożek

Rozkład kątowy neutrino jest bliski rozkładowi kątowemu  $\mu$  lub  $e$



# Liczniki Czerenkowa

Detektor Forward RICH w eksperymencie DELPHI na zderzaczu  $e^+e^-$   
(CERN, LEP)





# Promieniowanie hamowania

Cząstka o masie  $m$  w polu kulombowskim jądra o ładunku  $Z$  jest wyhamowywana i część jej energii zostaje uwolniona poprzez emisję fotonu

$$\frac{d\sigma}{dE} \propto \frac{Z^2}{m^2} \frac{\ln E}{E}$$

Straty energii na radiację są szczególnie istotne dla cząstek o małej masie

Kiedy straty na promieniowanie hamowania stają się większe od strat jonizacyjnych?

$$m_e = 0.511 \text{ MeV}, m_\mu = 105.7 \text{ MeV}$$

Energia krytyczna dla mionu  $E_{k\mu} \sim E_{ke} (m_\mu^2 / m_e^2)$

Np. w miedzi (Cu,  $Z = 29$ )  $E_{ke} = 20 \text{ MeV}$ ,

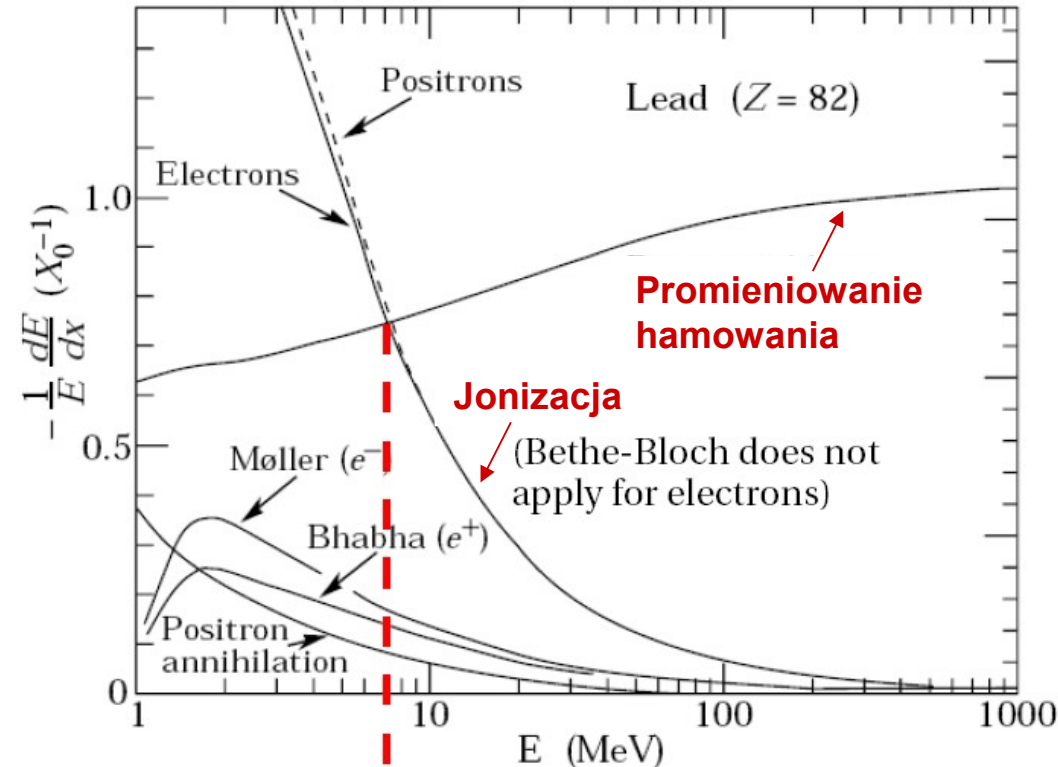
$E_{k\mu}(\text{Cu})$  ok. **450 GeV**,  $E_{k\mu}(\text{Pb})$  ok. **200 GeV**

Dominującym procesem oddziaływania mionów z materią jest proces jonizacji atomów ośrodka.

W materiałach z ciężkimi atomami (Pb) dla elektronów ważniejsze są straty radiacyjne

# Promieniowanie hamowania

Względne straty energii elektronów /  $X_0$   
w różnych procesach



**Energia krytyczna  $E_k$**  - energia elektronów, przy której straty energii na promieniowanie są równe stratom energii na **jonizację**

$$E_k \approx 550 / Z \text{ [MeV]}$$

Radiacyjna strata energii elektronu przy przejściu przez warstwę ośrodka o grubości  $dx$  jest proporcjonalna do energii cząstki :

$$-dE / dx \text{ (bremsstrahlung)} = E / X_0$$

$$\rightarrow \langle E \rangle = E_0 \cdot \exp (-x / X_0)$$

**Droga radiacyjna** - odległość, na której energia wysokoenergetycznej cząstki spada o czynnik  $e$

$$X_0 \approx \sim 180 A / Z^2 \text{ [g/cm}^2\text{]}$$

# Rozpraszanie wielokrotne

Cząstka naładowana o poruszająca się w materii nie tylko traci swoją energię, ale także doznaje kolejnych, niewielkich modyfikacji pędu.

Prowadzi to do odchylenia jej toru o kąt  $\theta_0$  (rzut na płaszczyznę) zależny od prędkości cząstki  $\beta$  oraz przebytej drogi  $x$ :

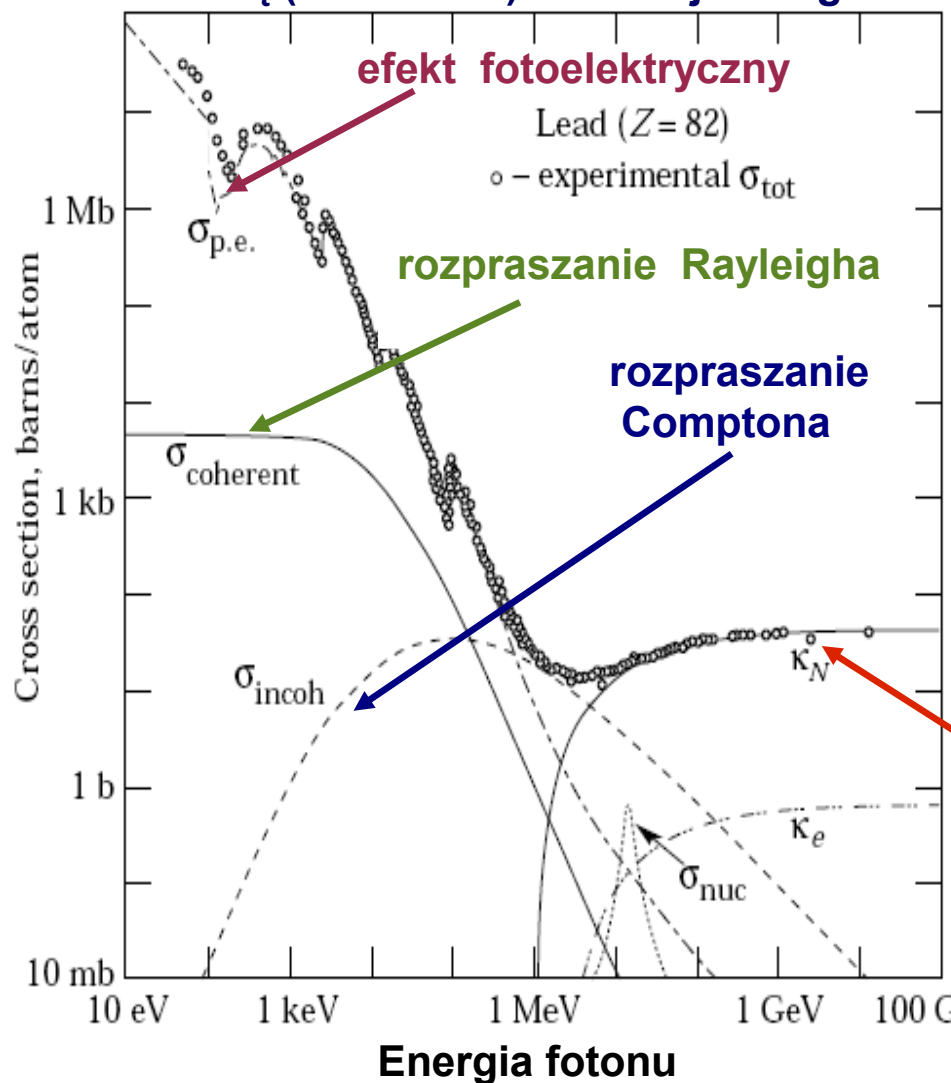
$$\theta_0 = \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta c p} z \sqrt{\frac{x}{X_0}} \left[ 1 + 0.038 \ln \left( \frac{x}{X_0} \right) \right]$$

**Rozproszenie wielokrotne jest tym większe, im wolniej porusza się cząstka**

- pomiar rozproszenia daje informację o prędkości cząstki ( $B=0$ )
- rozproszenie wielokrotne konkuruje z zakrzywieniem toru w polu magnetycznym - jest źródłem błędów w pomiarze pędu - takie pomiary lepiej dokonywać w ośrodku o dużej wartości  $X_0$  (np. w gazie)

# Oddziaływania fotonów z materią

Przekroje czynne na oddziaływanie fotonów z materią (dla ołowiu) w funkcji energii fotonu



$$\gamma + A \rightarrow A^* \rightarrow A^+ + e^-, \quad \sigma_{\text{p.e.}} \sim 1/E_\gamma^3$$

absorpcja fotonu  $\rightarrow$  emisja elektronu

$$\gamma + A \rightarrow A + \gamma'$$

rozpraszanie fotonu na atomie, atom nie ulega jonizacji ani wzbudzeniu, foton nie traci energii

$$\gamma + A \rightarrow A^+ + e^- + \gamma$$

rozpraszanie fotonu na słabo związanych elektronach, foton przekazuje część swojej energii elektronowi  $\sigma_{\text{incoh}} \sim 1/E_\gamma$

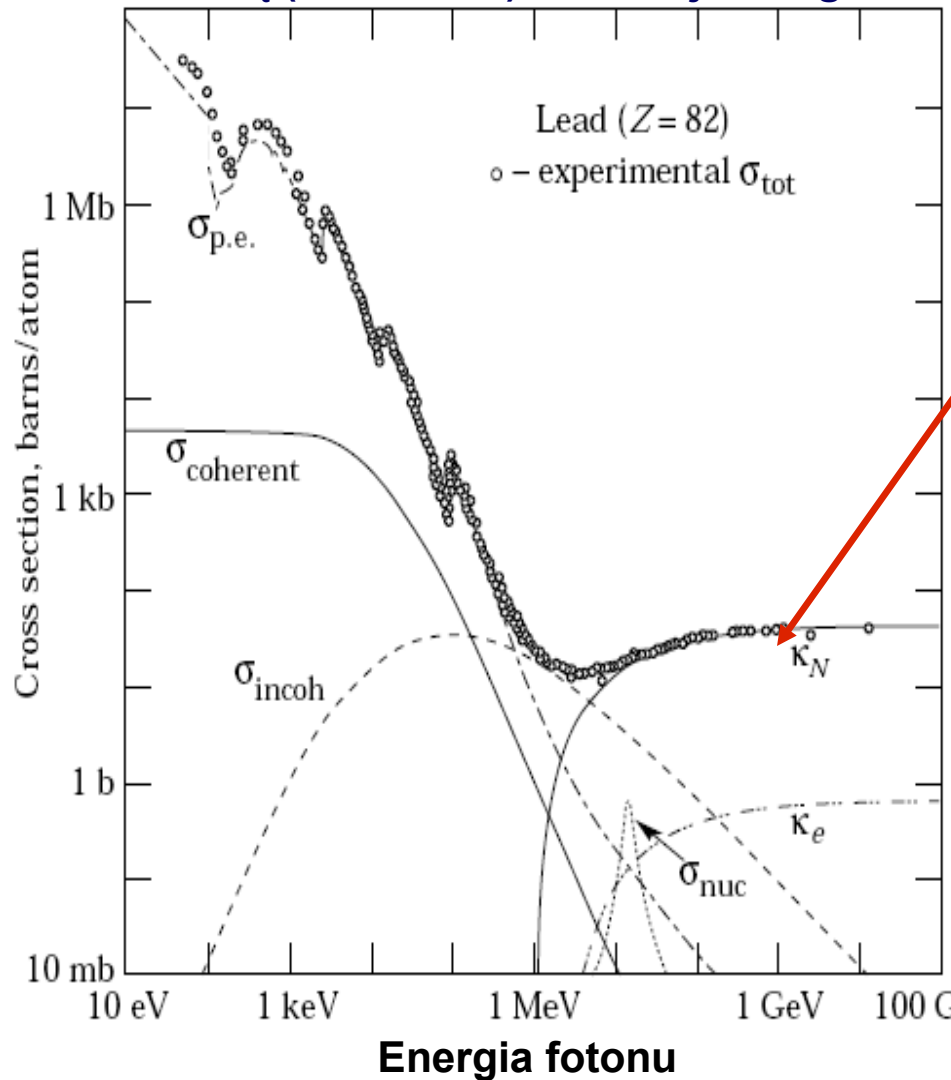
$$\gamma + A \rightarrow A + e^+ + e^-, \quad E_\gamma > 2m_e$$

produkcja par elektron - pozyton w polu jądra



# Oddziaływania fotonów z materią

Przekroje czynne na oddziaływanie fotonów z materią (dla ołowiu) w funkcji energii fotonu



$\gamma + A \rightarrow A + e^+ + e^-$ ,  $E_\gamma > 2m_e$   
 produkcja par elektron - pozyton  
 w polu jądra

$$\sigma(E \rightarrow \infty) = \frac{7}{9} \frac{A}{N_A X_0}$$

$A$  – masa atomowa absorbenta ( $\text{g mol}^{-1}$ )  
 $N_A$  – stała Avogadra ( $6.0221415 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ )  
 $X_0$  – droga (długość) radiacyjna ( $\text{g cm}^{-2}$ )

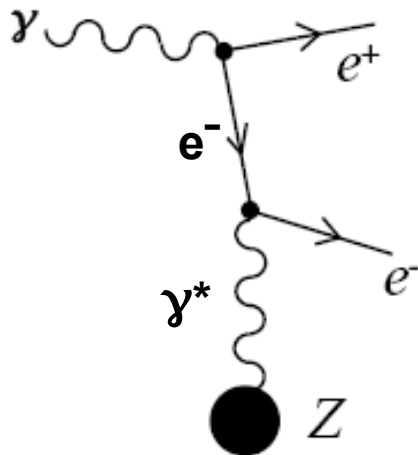
# Kaskada elektromagnetyczna

Elektrony, pozytony oraz fotony tworzą w materii kaskady elektromagnetyczne składające się z wielu cząstek  $e^-$ ,  $e^+$  i  $\gamma$

Główne procesy prowadzące do rozwoju kaskady elektromagnetycznej

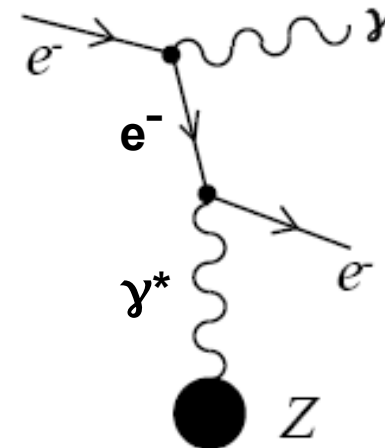
**Kreacja pary  $e^+e^-$   
przez foton w polu jądra**

$$\gamma + \text{jądro} \rightarrow e^+ + e^- + \text{jądro}$$



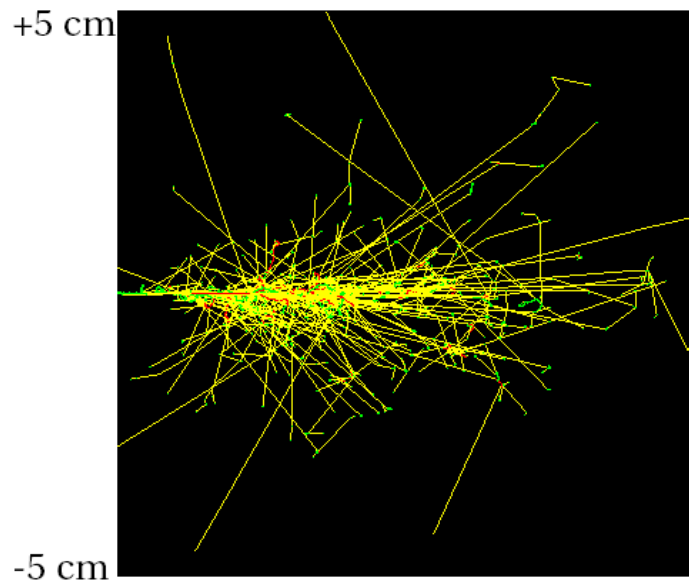
**Promieniowanie hamowania  
(bremsstrahlung)**

$$e^- + \text{jądro} \rightarrow e^- + \gamma + \text{jądro}$$

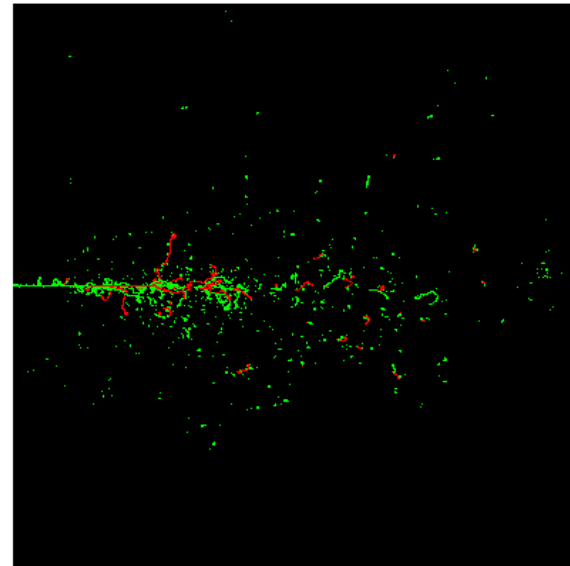


# Kaskada elektromagnetyczna

## Symulacja kaskady elektromagnetycznej



photons  
electrons  
positrons



Początkowy elektron o energii 1 GeV w ołowiu

Rozwój kaskady elektromagnetycznej jest dość regularny

# Kaskada hadronowa

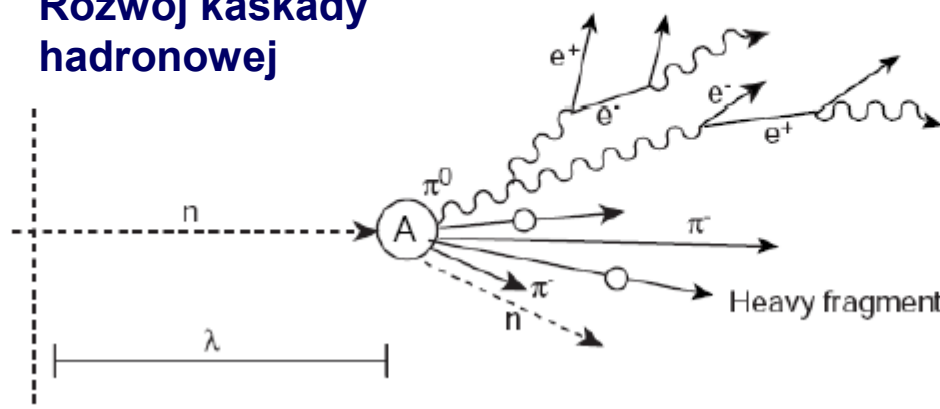
**Padający hadron oddziałuje silnie z jądrami ośrodka → produkcja wtórnych hadronów** (głównie neutralnych i naładowanych pionów,  $\pi^0$  i  $\pi^\pm$ , oraz kaonów,  $K^0$  i  $K^\pm$ )

- Wyprodukowane hadrony ponownie oddziałują silnie i produkują następną generację hadronów
- ~ 15 - 35% energii początkowego hadronu jest tracone na rozbić jąder, wzbudzenia jądrowe oraz umyka z neutrinami produkowanymi w rozpadach cząstek  
→ te procesy nie dają mierzalnego sygnału

**$\lambda$  – droga oddziaływania :** średnia odległość w materiale ośrodka, po przebyciu której liczba hadronów maleje o czynnik e w wyniku oddziaływań nieelastycznych

$$\lambda = A / (N_A \cdot \rho \cdot \sigma_{\text{nieelastyczny}}) \approx 35 A^{1/3} [\text{g/cm}^2], \quad \rho - \text{gęstość ośrodka}$$

## Rozwój kaskady hadronowej



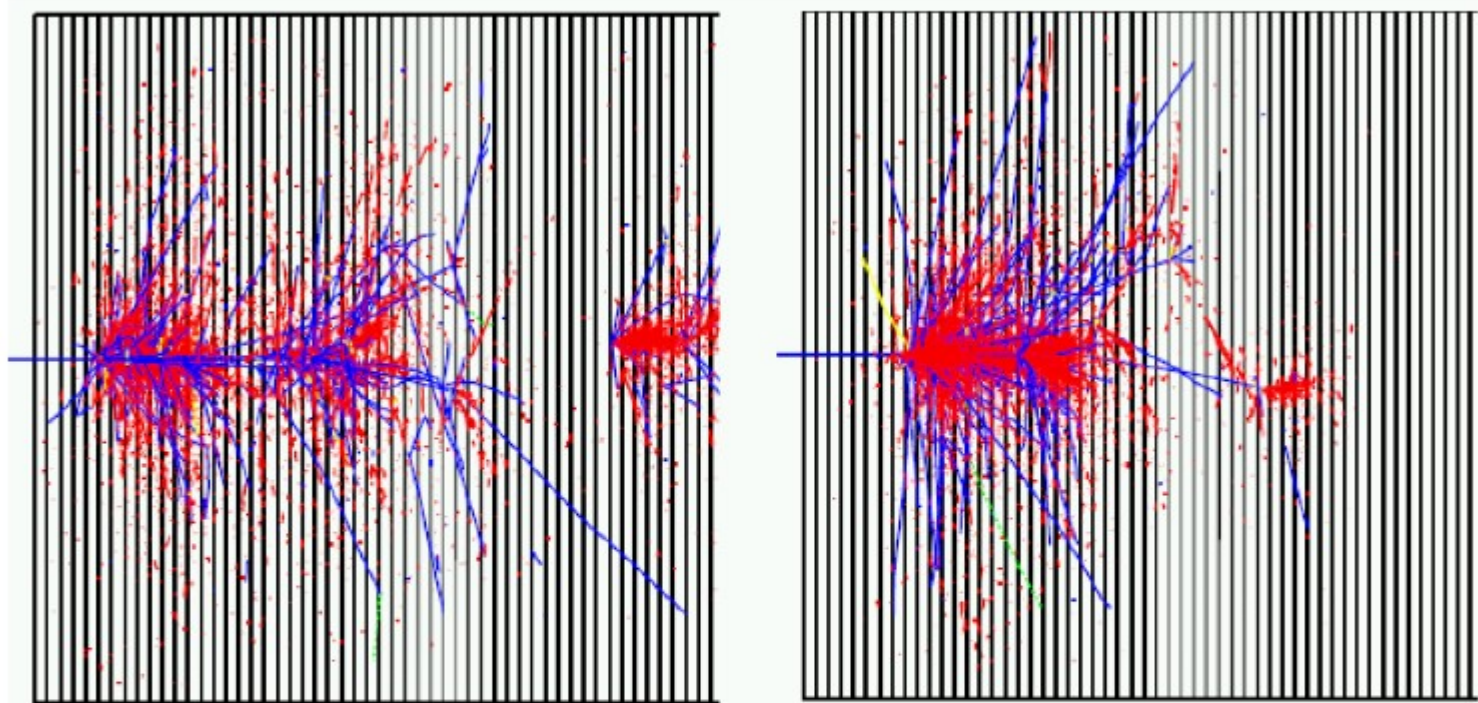
**Składowa elektromagnetyczna**  
kaskady hadronowej generowana  
przez rozpad produkowanego  $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$

**Składowa hadronowa**  
kaskady hadronowej



# Kaskada hadronowa

## Symulacje kaskady hadronowej



**Kolor niebieski – składowa hadronowa kaskady,**

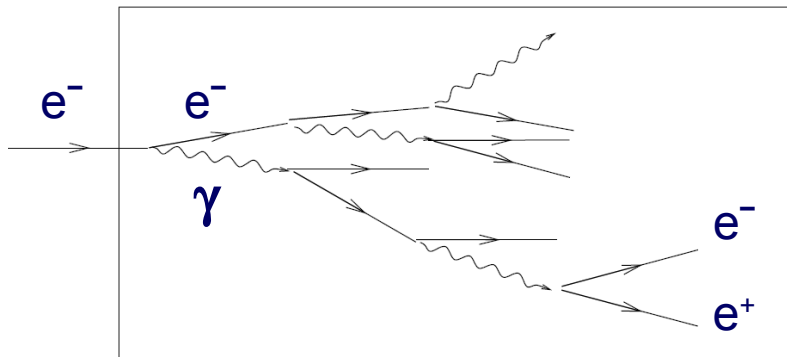
**Kolor czerwony – składowa elektromagnetyczna kaskady**

**Duże fluktuacje w rozwoju kaskady hadronowej**

# Kalorymetry

Detektory całkowicie zatrzymujące cząstki ( $e^+$ ,  $e^-$ ,  $\gamma$ , hadrony) pozwalające zmierzyć całkowitą energię cząstki

- **kalorymetry elektromagnetyczne** - rejestrują energie  $e^+$ ,  $e^-$ ,  $\gamma$
- **kalorymetry hadronowe** - rejestrują energie naładowanych i neutralnych hadronów: pionów, protonów, neutronów, ...



## Kalorymetry jednorodne

Rozwój kaskady i procesy służące detekcji zachodzą w tym samym **materiale o dużym Z**

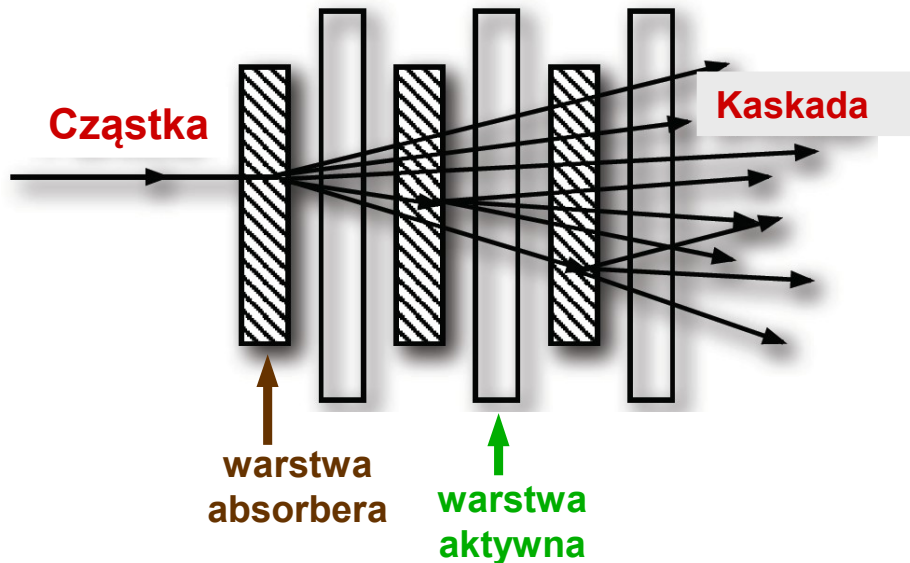
**Materiał aktywny: kryształy NaJ, CsJ**

**Szkło ołowiowe (55% PbO, 45% SiO<sub>2</sub>)**

- + precyzyjny pomiar energii
- materiał ma stosunkowo małą gęstość = potrzebne duże rozmiary
- wysoki koszt materiału

# Kalorymetry

Kalorymetry próbujące: naprzemienne warstwy **gęstego absorbera** (w którym rozwija się kaskada) i **aktywnego materiału detekcyjnego** próbującego kaskadę (w którym mierzy się sygnał od cząstek wtórnych).



## Kalorymetry elektromagnetyczne

**Absorber:** ołów

**Materiał aktywny:** ciekły argon  
scyntylator plastikowy

## Kalorymetry hadronowe

**Absorber:** żelazo

**Materiał aktywny:** scyntylator, ciekły argon

- + duża gęstość absorbera = mniejsze rozmiary
- + niższy koszt materiałów (absorbera)
- większe fluktuacje mierzonej energii

# Detekcja mionów

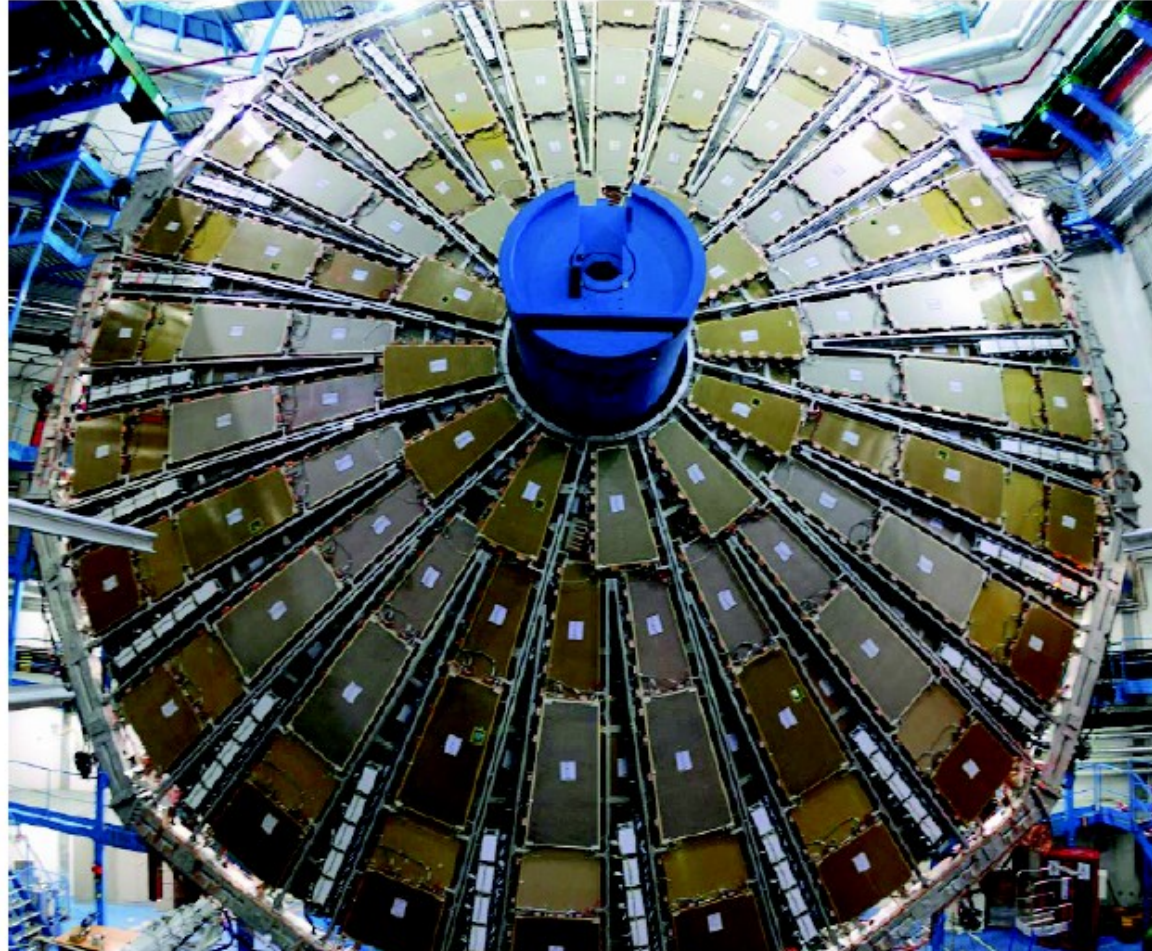
**Miony** uczestniczą w oddziaływaniach elektromagnetycznie (i słabych), ale nie tworzą kaskad i są cząstkami wyjątkowo przenikliwymi. **Przechodzą przez kalorymetry bez znaczącej utraty energii.**

**Miony** są więc rejestrowane w specjalnych detektorach umieszczonych za kalorymetrami.

Są to zwykle komory drutowe poprzedzielane płytami stalowymi.

Ø25m

**Komora mionowa  
w eksperymencie  
ATLAS przy LHC**

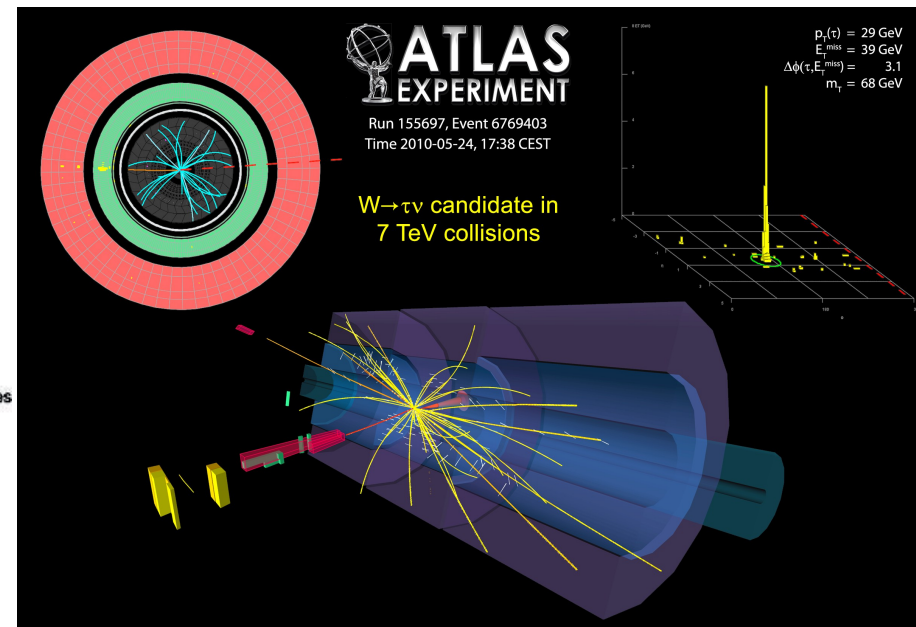
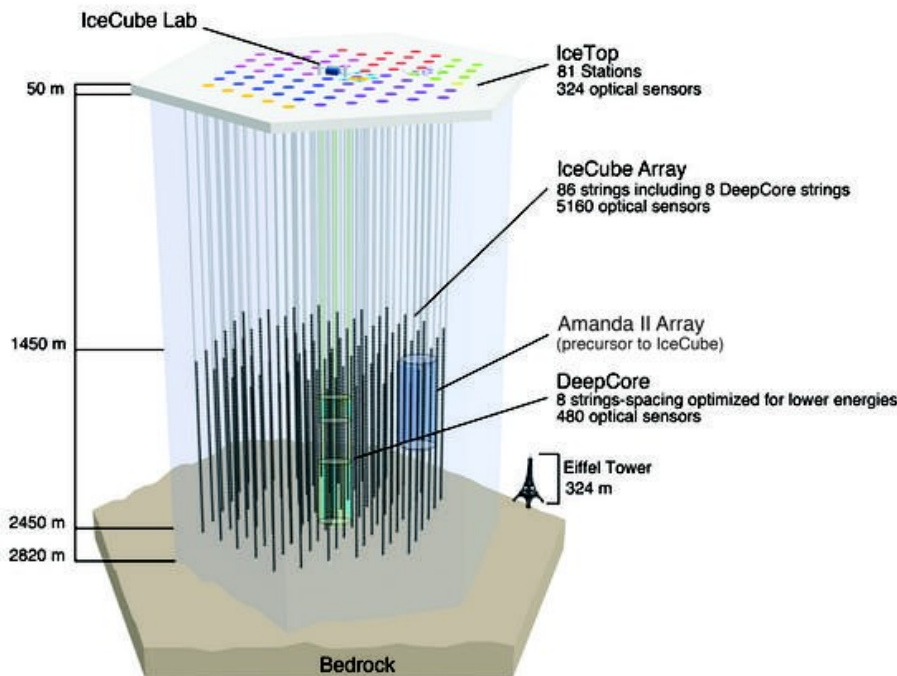




# Detekcja neutrin

**Neutrino** oddziałują wyłącznie słabo

- badanie oddziaływań neutrin słonecznych, kosmicznych - specjalne detektory umieszczane w kopalniach (Kamioka, Gran Sasso) w lodzie (Ice Cube na biegunie południowym)
- badanie oddziaływań wiązek neutrin - w komorach pęcherzykowych, argonowych, w emulsji fotograficznej
- detekcja wyprodukowanych neutrin - na podstawie brakującego pędu

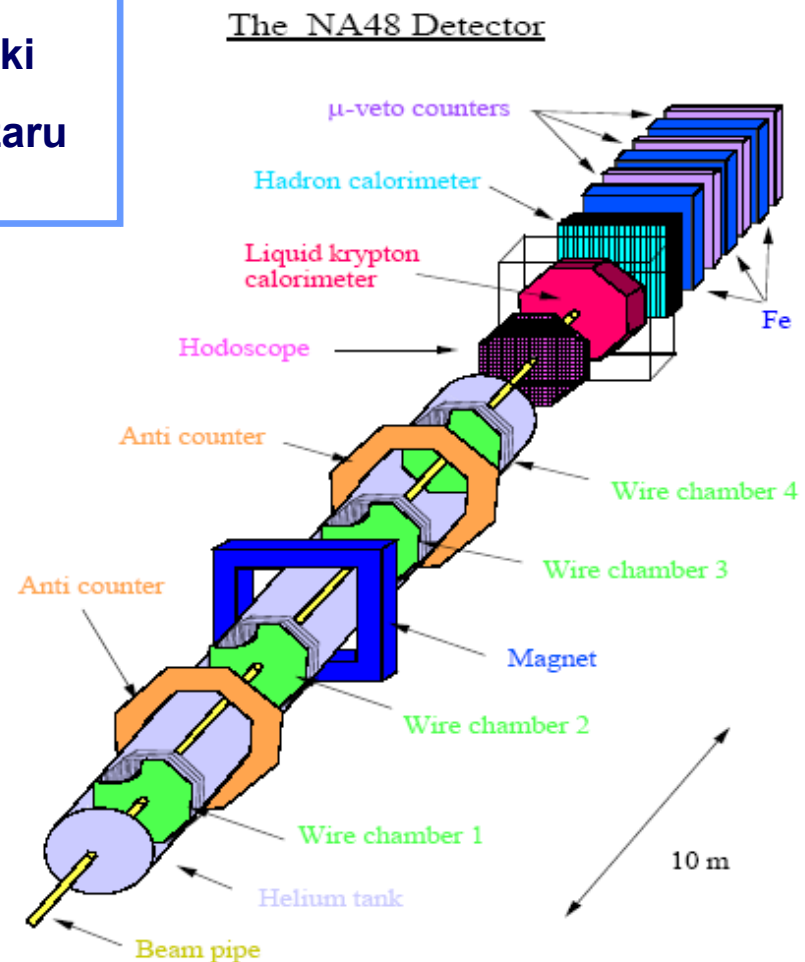


# Układy detektorów

## Eksperyment na stacjonarnej tarczy

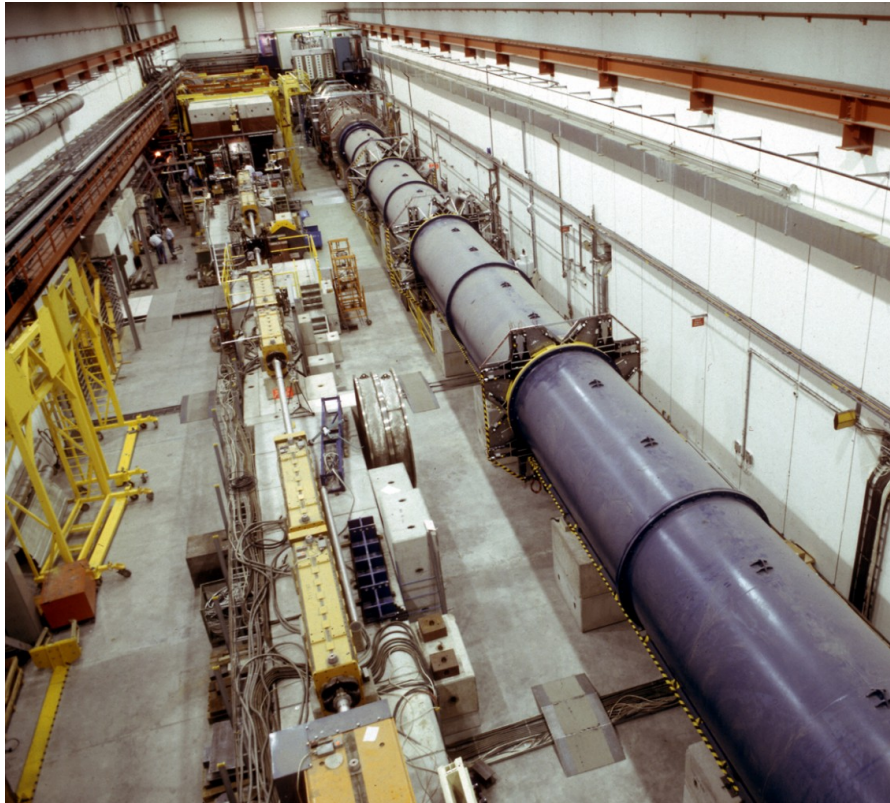


**Eksperyment NA48**  
na wiązce z akceleratora SPS  
(Super Proton Synchrotron)  
w CERN

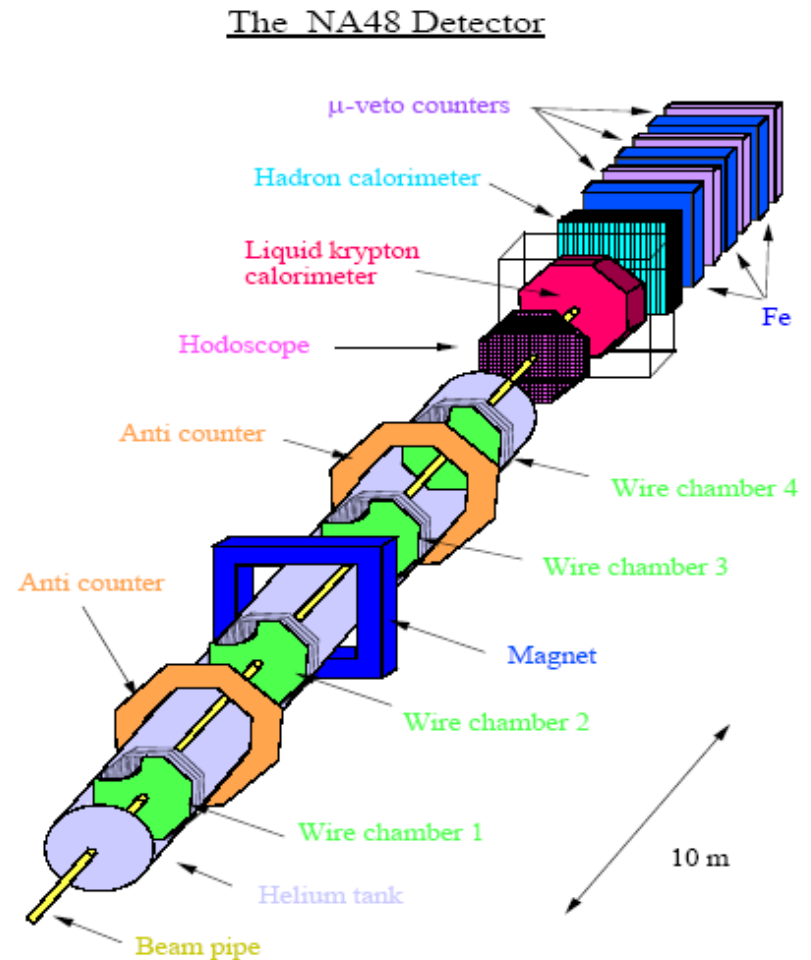


# Układy detektorów

## Eksperyment na stacjonarnej tarczy

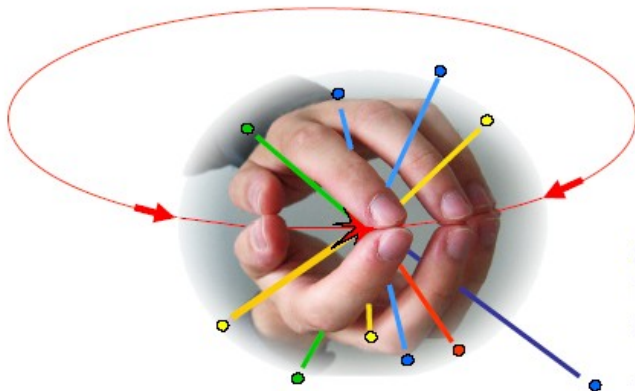


**Eksperyment NA48**  
na wiązce z akceleratora SPS  
(Super Proton Synchrotron)  
w CERN



# Układy detektorów

## Eksperyment na przecięciu wiązek



### Detektory otaczają miejsce zderzenia

- pomiar wszystkich rodzajów cząstek
- hermetyczność (brak szczelin między elementami detektora)
- dobra zdolność rozdzielcza (wysoka precyzja pomiarów)

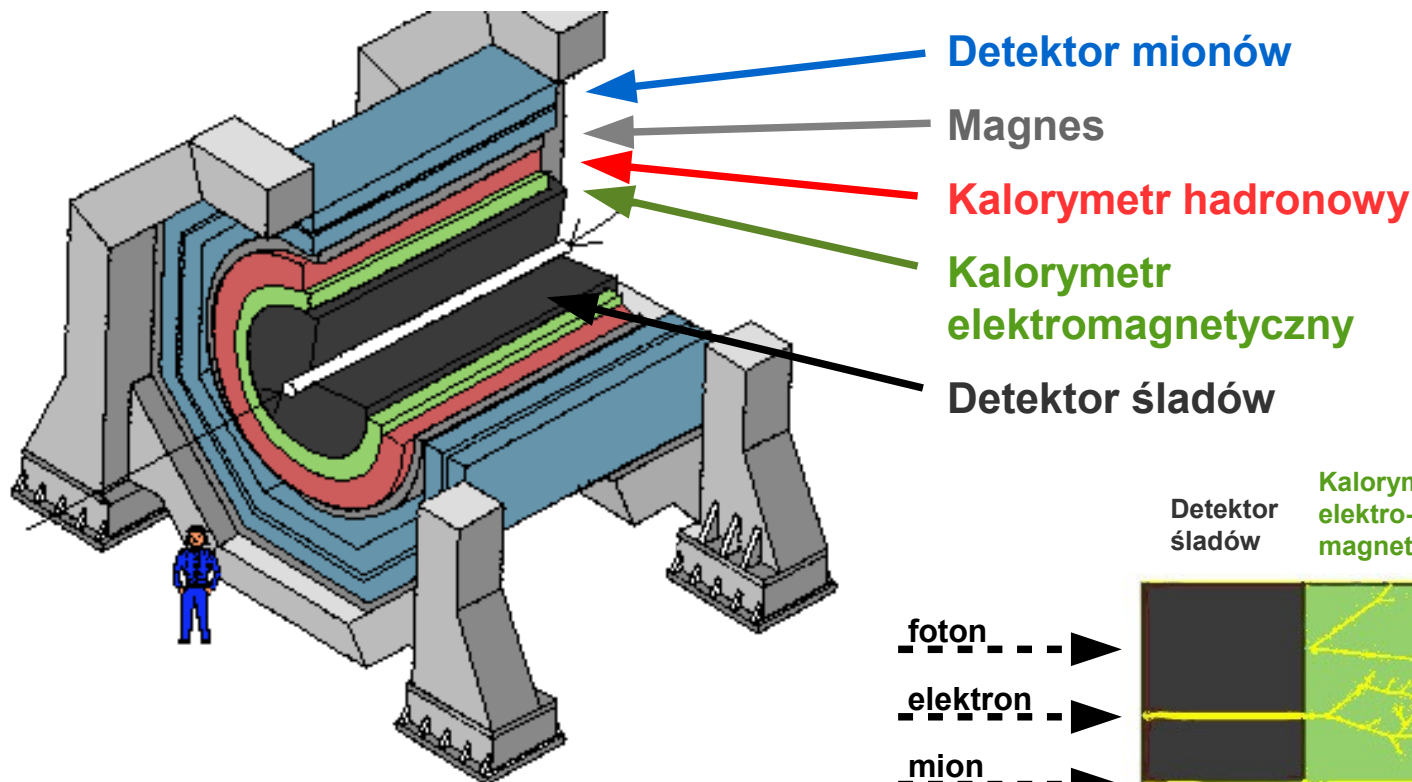
### Ograniczenia:

- rura wiązki i magnesy akceleratora
- chłodzenie, kable zasilające i sygnałowe, mechanika
- odporność detektorów na napromieniowanie



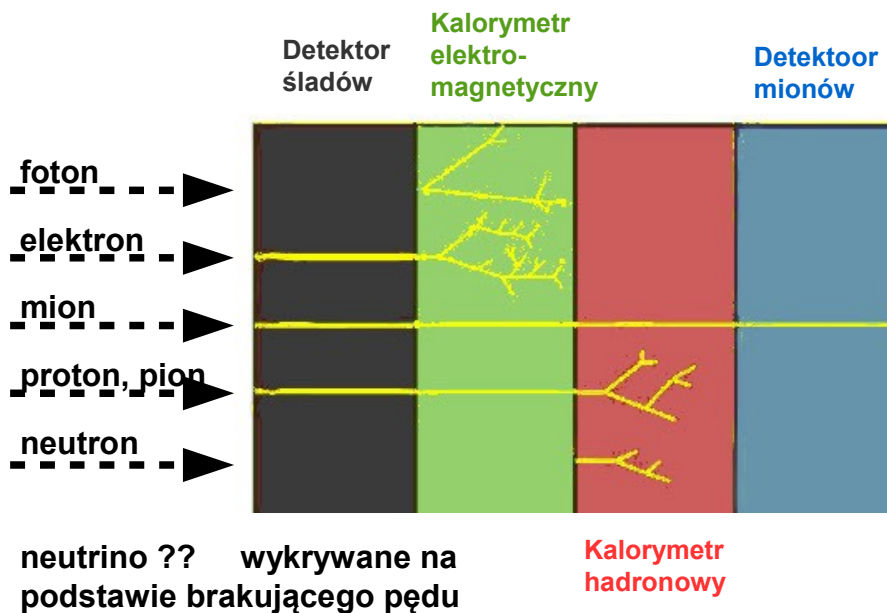
# Układy detektorów

## Eksperyment na przecięciu wiązek



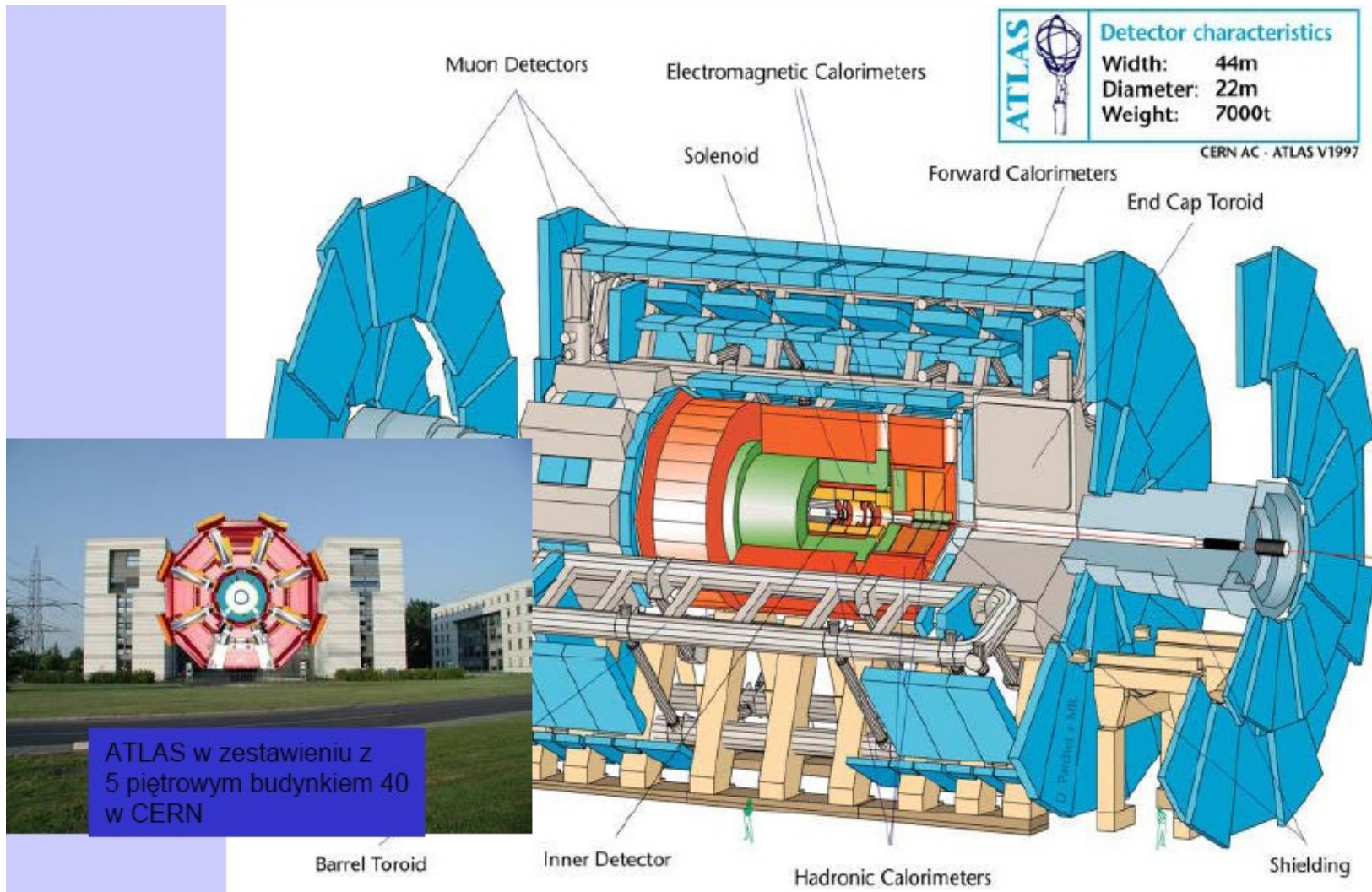
### Detektor śladów

zbudowany z detektorów krzemowych, komór drutowych, dryfowych itp. mających możliwie małą średnią gęstość materiału



# Układy detektorów

## Detektor eksperymentu ATLAS na zderzaczu protonów LHC w CERN



# Pomiary

- pęd naładowanych cząstek → detektory śladowe + pole magnetyczne

$$p = 0.3 B r$$

pęd cząstki  $p$  [GeV / c], indukcja magnetyczna  $B$  [T], promień  $r$  [m]

$\sigma_p / p \sim p$  → precyzja pomiaru pędu cząstki pogarsza się wraz ze wzrostem pędu cząstki

- znak, ładunek cząstki → detektory śladowe + pole magnetyczne

według kierunku zakrzywienia toru cząstki  
(niepewny przy bardzo dużych pędach)

ładunek (ne): według strat jonizacyjnych  $dE/dx$

- energia całkowita cząstek → kalorymetry

$\sigma_E / E \sim 1/\sqrt{E}$  → pomiar energii cząstki może być dokładniejszy od pomiaru pędu cząstki (przy bardzo dużych energiach)

# Pomiary

| Cząstka                                                    | Metoda detekcji                                                                                                                                                      |
|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>naładowane hadrony</b><br>$\pi^\pm, K^\pm, \bar{p} / p$ | komory dryfowe / liczniki krzemowe w polu magnetycznym<br>kalorymetr hadronowy<br>identyfikacja: pomiar $dE/dx$ lub promieniowania Czerenkowa                        |
| $e^\pm$                                                    | detektory śladowe tak jak dla pionów, kaonów i protonów<br>kalorymetr elektromagnetyczny                                                                             |
| $\mu^\pm$                                                  | detektory śladowe (jak dla pionów, kaonów i protonów)<br>b. przenikliwe cząstki, w kalorymetrze elektromagnetycznym kaskadują dopiero przy bardzo wysokich energiach |
| <b>fotony</b>                                              | kalorymetr elektromagnetyczny                                                                                                                                        |
| <b>neutralne hadrony</b><br>$n, K_L^0$                     | kalorymetr hadronowy                                                                                                                                                 |
| <b>neutrino</b>                                            | cząstki oddziałujące tylko słabo<br>praktycznie nie oddziałują w detektorach                                                                                         |



# Pomiary

| Cząstka                         | Sygnatura                                                                                      |
|---------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\pi^\pm, K^\pm, p, p$          | śląd + kaskada hadronowa                                                                       |
| $e^\pm$                         | śląd + kaskada elektromagnetyczna                                                              |
| $\mu^\pm$                       | śląd w najbardziej zewnętrznych detektorach<br>brak kaskady w kalorymetrze elektromagnetycznym |
| $\gamma$                        | brak sygnałów w detektorach śladowych,<br>kaskada elektromagnetyczna                           |
| neutralne<br>hadrony $n, K_L^0$ | kaskada hadronowa                                                                              |
| neutrino                        | brakująca energia w przypadku                                                                  |
| $J/\psi, \Upsilon, W, Z, H, t$  | szybki rozpad $\rightarrow$ masa niezmiennicza                                                 |

# Pomiary

| eksperyment                             | akcelerator                                   | energia                            | status                                 |
|-----------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------------|
| ALEPH, DELPHI, L3,<br>OPAL              | LEP $e^+e^-$<br>CERN                          | 100 + 100 GeV                      | zakończono zbieranie<br>danych         |
| H1, ZEUS                                | HERA $e^+p$<br>DESY / Hamburg                 | 27.5 + 920 GeV                     | zakończono zbieranie<br>danych         |
| BaBar                                   | PEP II $e^+e^-$<br>SLAC / USA                 | 3 + 9.1 GeV                        | zakończono zbieranie<br>danych         |
| <b>BELLE</b>                            | KEKB $e^+e^-$<br>Japonia                      | 3.5 + 8 GeV                        | zakończony I etap                      |
| CDF, D0                                 | Tevatron $p\bar{p}$<br>Fermilab / USA         | 1 + 1 TeV                          | zakończono zbieranie<br>danych, X 2011 |
| <b>STAR, PHENIX</b><br>(PHOBOS, BRAHMS) | RHIC pp do AuAu<br>BNL USA                    | AuAu 100+100 GeV<br>pp 202+205 GeV | działa od 2000                         |
| <b>T2K</b>                              | J-PARC $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$<br>Japonia | 0.4-1.0 GeV                        | działa od XI 2009                      |
| <b>ALICE, ATLAS, CMS,<br/>LHCb</b>      | LHC pp<br>CERN                                | 3.5 + 3.5 TeV                      | działa od 2009                         |

## Podsumowanie :

Główna tematyka badań w fizyce cząstek koncentruje się na :

- **sprawdzaniu przewidywań Modelu Standardowego (SM)**  
w najbliższej przyszłości poszukiwania skalarne bozonu Higgsa będą bardzo intensywne (końcowa analiza danych w Tevatronie, LHC)
- **poszukiwaniu nowych cząstek wynikających z wyższych symetrii**  
cząstki supersymetryczne, leptokwarki, ...
- **badaniu niezachowania symetrii CP w rozpadach mezonów B i K**  
zderzacze elektron – pozyton
- **badaniu plazmy kwarkowo-gluonowej**
- **badaniu oscylacji neutrin**

**Wykłady będą na stronie internetowej IFJ PAN (<http://www.ifj.edu.pl>) :**

**Dla studentów → Zajęcia dla studentów UJ → Wykłady - dostępne teksty**

**Podręcznik np. D. Perkins "Wstęp do fizyki wysokich energii"**

**Particle Data Group <http://pdg.lbl.gov>**



# **Doświadczalna fizyka cząstek elementarnych**

**(Fizyka wysokich energii)**

**Specjalizacja prowadzona w Instytucie Fizyki UJ  
wspólnie z Instytutem Fizyki Jądrowej PAN  
im. Henryka Niewodniczańskiego**

**Badania fundamentalnych / elementarnych składników materii  
i ich oddziaływań**

- **Badania prowadzone w dużych, międzynarodowych zespołach naukowych**
- **Eksperymenty z użyciem akceleratorów wysokich energii**
- **Badania nad promieniowaniem kosmicznym**

# Udział w eksperymentach i przyszłych projektach naukowych

## Wielki zderzacz hadronów LHC (CERN)

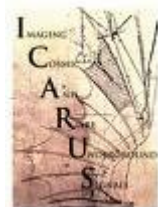


## Zderzacz $e^+e^-$ w KEK



**Instytut Fizyki Jądrowej PAN  
udział w eksperymentach**

## Zderzacz $e - p$ HERA (1992 – 2007)



**Eksperymenty neutrinowe,  
poszukiwanie ciemnej  
materii**



**Projekt związany z przyszłym  
międzynarodowym liniowym  
zderzaczem  $e^+e^-$  ILC**

## Zderzacz ciężkich jonów RHIC

