

# Detektory

---

- **Kalorymetry :**
  - rozwój kaskady
  - kalorymetr elektromagnetyczny
  - kalorymetr hadronowy
  - budowa kalorymetru
- **Liczniki Czerenkowa**
- **Układy detektorów**
- **Przykłady wielkich współczesnych detektorów**
- **Wybrane eksperymenty ostatnich lat**

[Lidia.Goerlich@ifj.edu.pl](mailto:Lidia.Goerlich@ifj.edu.pl)

Instytut Fizyki Jądrowej PAN

## Metoda pomiaru :

### **Pełna absorpcja energii padającej cząstki pierwotnej**

(destruktywna metoda pomiaru energii – cząstka pierwotna jest absorbowana w materiale detektora, "nie istnieje" po zakończeniu pomiaru)

**Cząstka pierwotna oddziałuje z materiałem detektora, co w konsekwencji prowadzi do kolejnych generacji cząstek wtórnych ( kaskad cząstek wtórnych ), które w końcowej fazie w procesach jonizacji / wzbudzenia ośrodka generują mierzalny sygnał proporcjonalny do energii cząstki padającej.**

## Kalorymetry :

- Pomiar energii cząstek neutralnych i naładowanych
- Identyfikacja cząstek (np. elektronów, fotonów)
- Optymalizacja kalorymetrów do pomiaru kaskad elektromagnetycznych i hadronowych
- Pomiar współrzędnych przestrzennych cząstki
- Sygnały z kalorymetru - ważna informacja dla układów wyzwalania ( trygerów ) pozwalających na selekcję wybranych procesów
- Redukcja przypadków tła

# Pomiar energii - kalorymetria

- **Detektory śladowe + pole magnetyczne → pomiar pędu naładowanych cząstek**

Pomiar pędu naładowanej cząstki z jej zakrzywienia w polu magnetycznym nie zawsze jest wystarczająco precyzyjny

$$p = 0.3 B r$$

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

- Ważny wkład do zdolności rozdzielczej w pędzie jest proporcjonalny do pędu cząstki

$\sigma_{p_T} / p_T \sim p_T \rightarrow$  precyzja pomiaru pędu cząstki pogarsza się wraz ze wzrostem pędu cząstki

$p_T$  - pęd poprzeczny cząstki

- Precyzyjny pomiar zakrzywienia toru cząstki o dużym pędzie jest trudny  
→ trudność określenia znaku ładunku cząstki
- Wydajność rekonstrukcji śladów ( torów ) cząstek spada w procesach charakteryzujących się dużą krotnością cząstek

# Pomiar energii - kalorymetria

- **cząstki neutralne nie pozostawiają śladów w detektorach śladowych** (praktycznie nie oddziałują z materiałem detektora)

**Kalorymetry** - pomiar energii i pędu cząstek neutralnych (!)

**Kalorymetry** - pomiar energii i pędu dżetów,

skolimowanych pęków cząstek neutralnych i naładowanych powstających w oddziaływaniach przy wysokich energiach

Dżety są "śladami" kwarków i gluonów produkowanych w procesach zachodzących z dużym przekazem czteropędu ( w tzw. twardych procesach )

**Precyzja pomiaru energii cząstek naładowanych i neutralnych w kalorymetrze :**

$$\sigma_E / E \sim 1 / \sqrt{E}$$

**Energetyczna zdolność rozdzielcza**

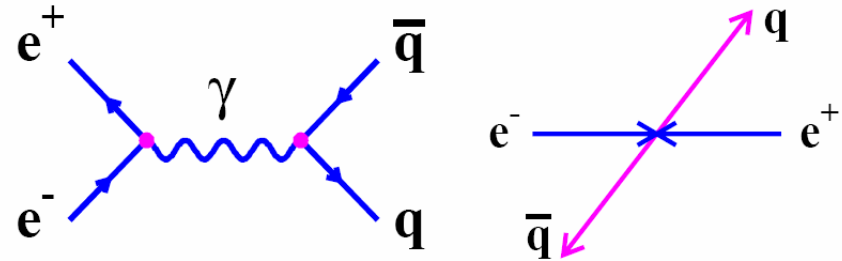
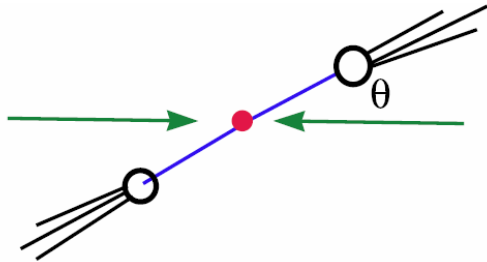


**Przy wysokich energiach pomiary kalorymetryczne są bardziej precyzyjne niż pomiary detektorów śladowych**

# Produkcja dwóch dżetów w procesie anihilacji elektron - pozyton

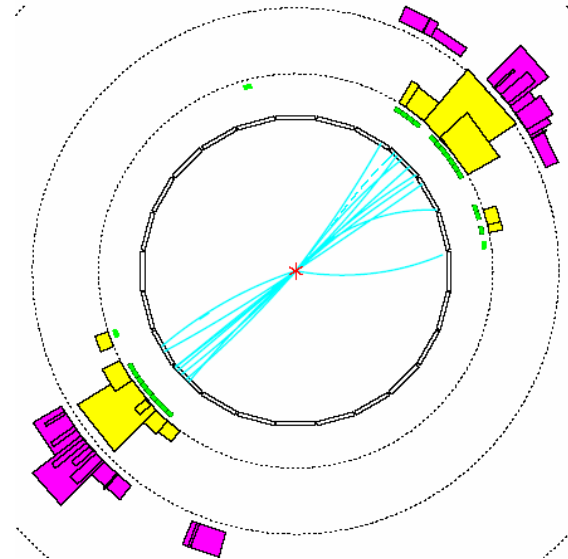
$$e^+e^- \rightarrow q\bar{q} \rightarrow \text{hadrony}$$

Topologia przypadków z dwoma dżetami na zderzaczu  $e^+e^-$



Hadrony w dżecie (anty)kwarkowym są skolimowane w kierunku pierwotnego (anty)kwarka

w procesie anihilacji  $e^+e^-$  obserwujemy więc 2 przeciwie skierowane dżety ( "back-to-back" )

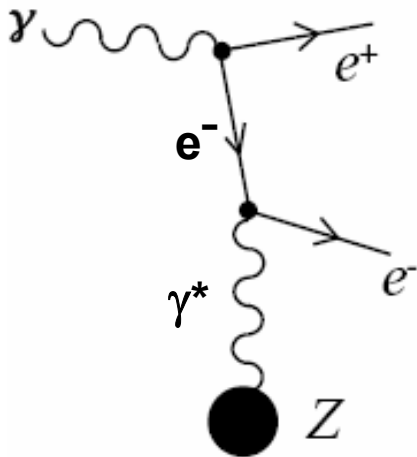


Typowy przypadek  $e^+e^- \rightarrow$  hadrony z 2 dżetami w stanie końcowym zarejestrowany w detektorze OPAL na zderzaczu  $e^+e^-$  LEP

# Kaskady elektromagnetyczne

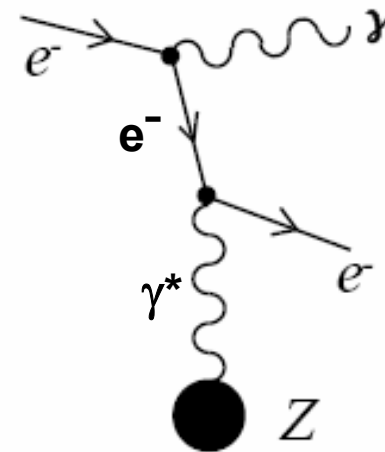
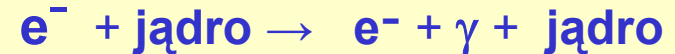
- Elektrony, pozytony, fotony, neutralne mezony  $\pi^0$  ( $\pi^0 \rightarrow 2 \gamma$ ) generują w kalorymetrach **elektronowo - fotonowe kaskady elektromagnetyczne**
- **główne procesy prowadzące do rozwoju kaskady elektromagnetycznej**

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



W polu jądra foton może konwertować na parę elektron-pozyton.  
Wymiana wirtualnego fotonu z jądrem zapewnia zachowanie czteropędu.

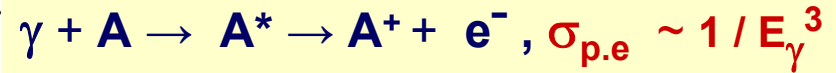
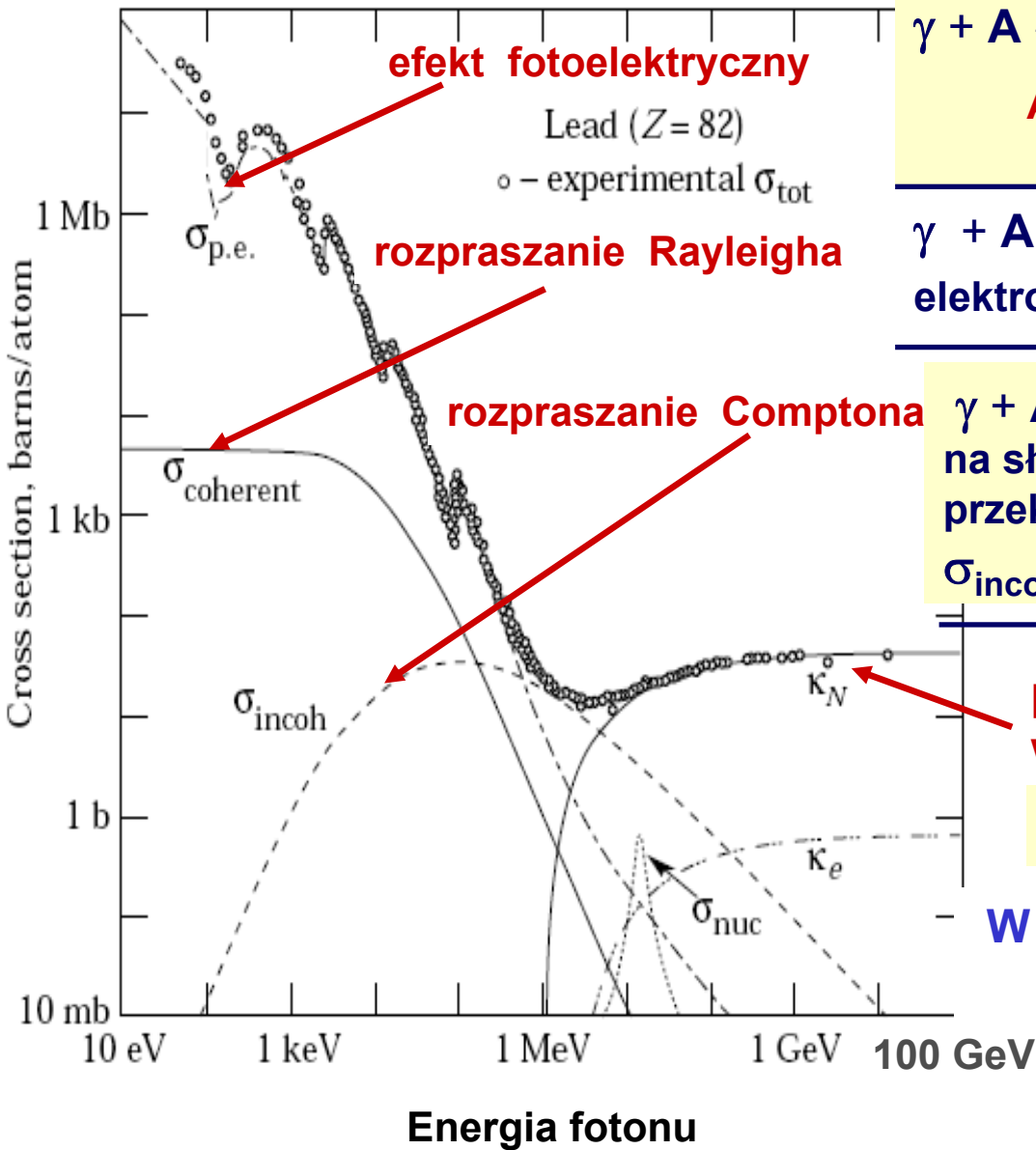
**Promieniowanie hamowania  
( bremsstrahlung )**



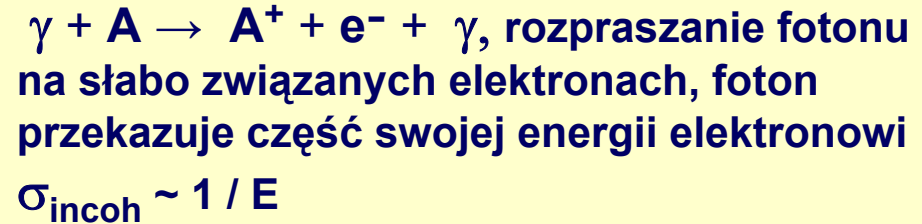
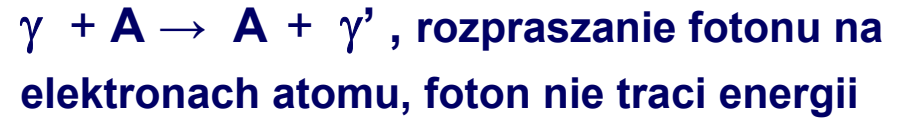
Emisja rzeczywistego fotonu przez elektron wyhamowany w polu jądra o ładunku  $Ze$

# Oddziaływanie fotonów z materią

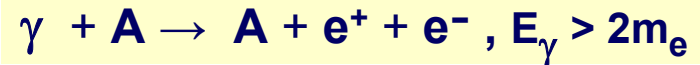
Przekroje czynne na oddziaływanie fotonów z materią ( dla ołowiu ) w funkcji energii fotonu



Absorpcja fotoelektryczna dominuje przy małych energiach



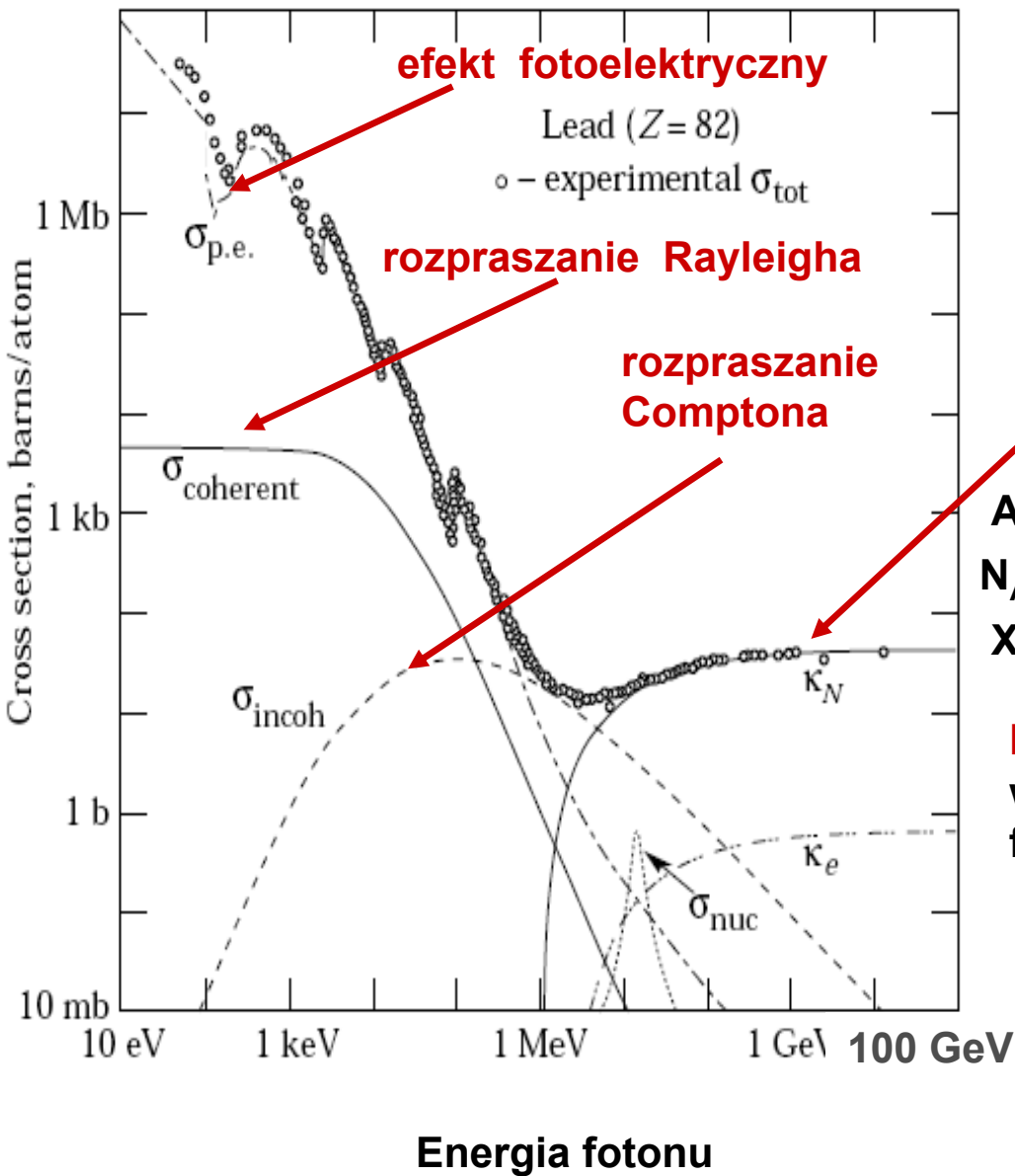
produkcja par elektron - pozyton w polu jądra



W oddziaływaniach fotonów z materią proces produkcji par  $e^+e^-$  dominuje w obszarze wysokich energii ( $E > 10 \text{ MeV}$ )

# Oddziaływanie fotonów z materią

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



W oddziaływaniach fotonów z materią proces produkcji par  $e^+e^-$  dominuje w obszarze wysokich energii



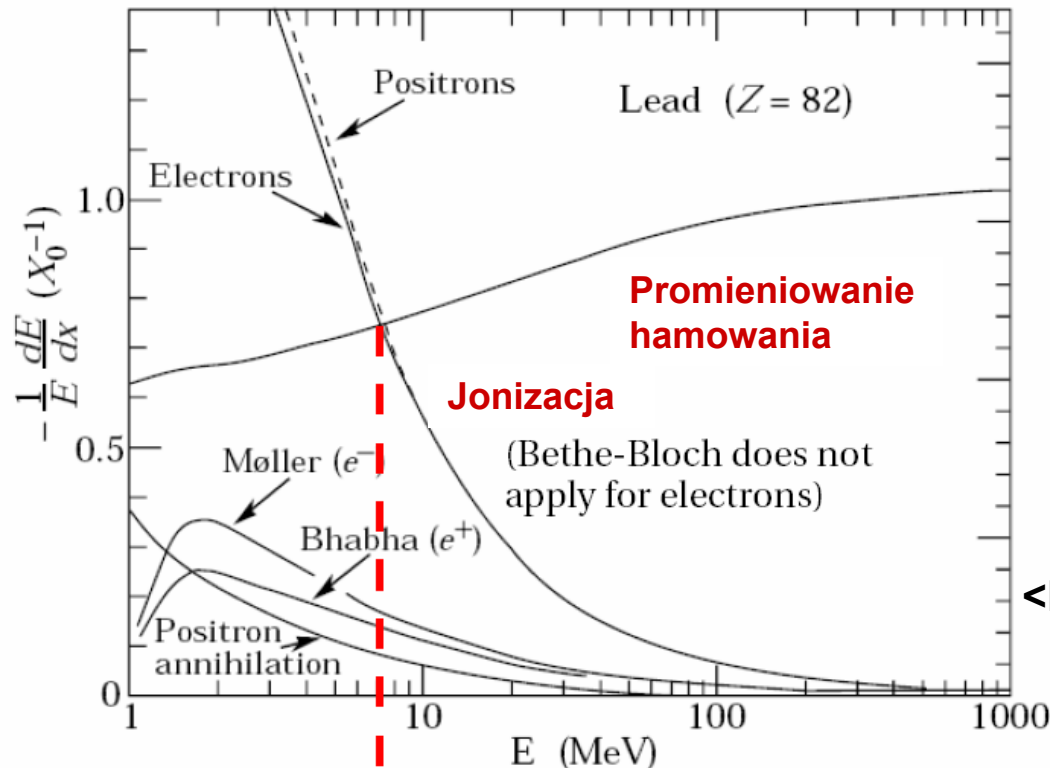
$$\sigma(E \rightarrow \infty) = \frac{7}{9} \frac{A}{N_A X_0}$$

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

**Droga radiacyjna  $X_0$**  charakteryzuje własności ośrodka przy opisie oddziaływ. fotonów i elektronów z materią.

Dla wysokoenergetycznego fotonu odp.  $7/9$  jego średniej drogi swobodnej przed konwersją na parę  $e^+e^-$

## Względne straty energii elektronów w różnych procesach



**Energia krytyczna  $E_k$**  odp. energii elektronów, przy której starty energii na promieniowanie są równe stratom energii na **jonizację**

$E_k \approx 550 / Z$  [ MeV ]

Przy budowie kalorymetrów elektromagnetycznych wykorzystujemy materiały o dużej liczbie atomowej  $Z$  i małym  $X_0 \rightarrow$  "zwarta" przestrzennie struktura ( w kierunku podłużnym i poprzecznym ) kaskady elektromagnetycznej

## Elektrony i pozytony w ołowiu

proces wypromieniowania fotonu poprzez promieniowanie hamowania dominuje już przy energii 10 MeV

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

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

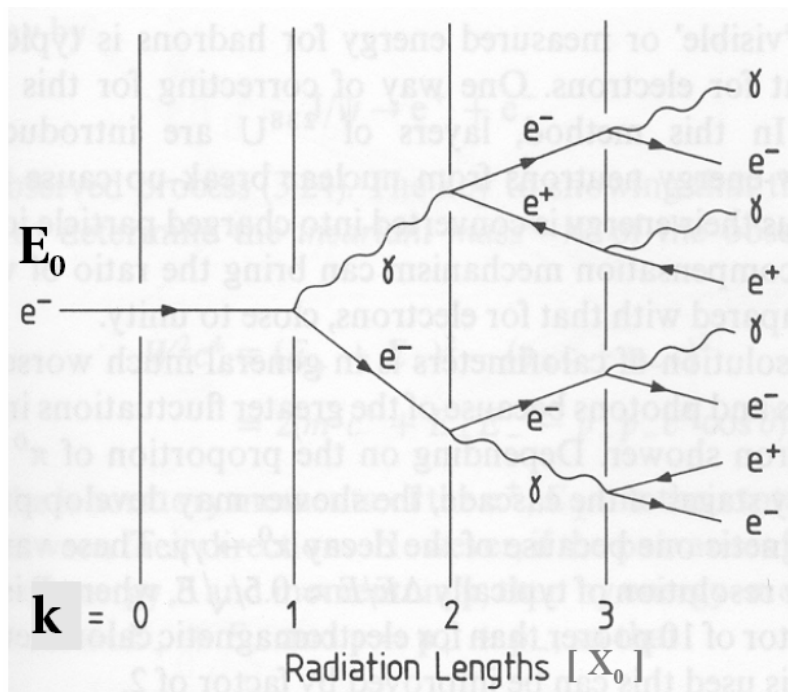
$$\rightarrow \langle E \rangle = E_0 \cdot \exp(-x / X_0)$$

$\langle E \rangle$  ( $E_0$ ) – średnia (początkowa) energia e

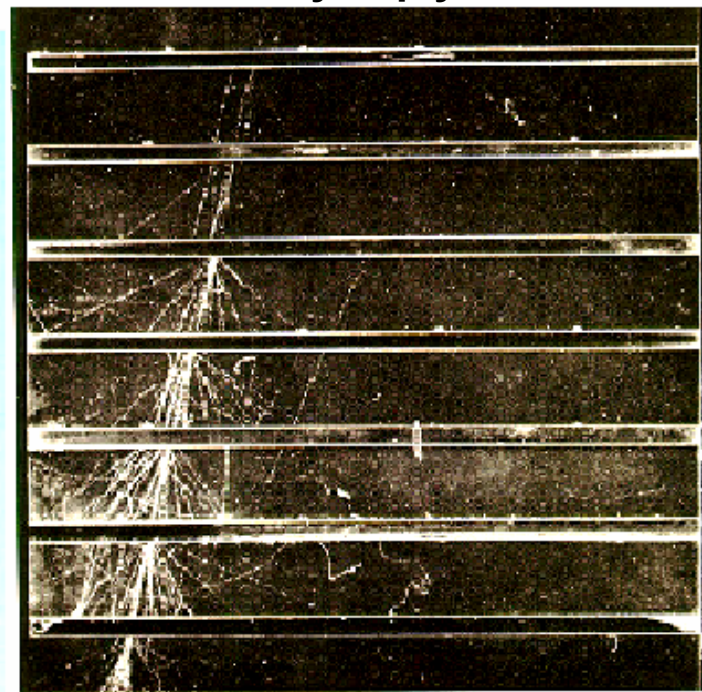
**Jedna droga radiacyjna** odp. średniej drodze, na której energia wysokoenergetycznej cząstki spada o czynnik  $e$  ( poprzez promieniowanie hamowania )

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

# Kaskada elektromagnetyczna



# Kaskada w komorze mgłowej z ołowianymi płytami



## Rozwój kaskady elektromagnetycznej :

**Wysokoenergetyczny początkowy elektron  $\rightarrow$  promieniowanie hamowania  $\rightarrow$  kreacja par  $\rightarrow$  promieniowanie hamowania itd.**

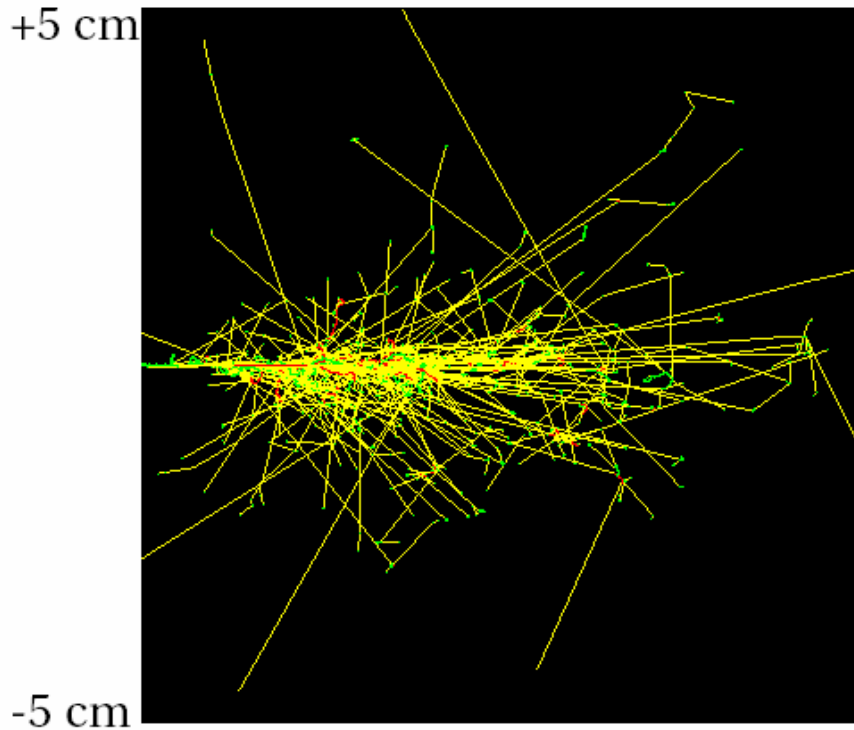
Kaskada wygasa, kiedy średnia energia cząstek oddziałujących elektromagnetycznie spada poniżej energii krytycznej .

Liczba cząstek w kaskadzie zapoczątkowanej przez wysokoenergetyczny foton lub elektron  $N \sim E / E_k$ . Cała energia cząstki początkowej rozdzielona na cząstki wtórne w ostatnim etapie tracona jest na jonizację ośrodka.

$\rightarrow$  **bardzo dokładny pomiar energii**

# Symulacja kaskady elektromagnetycznej

Początkowy elektron o energii 1 GeV w ołowiu

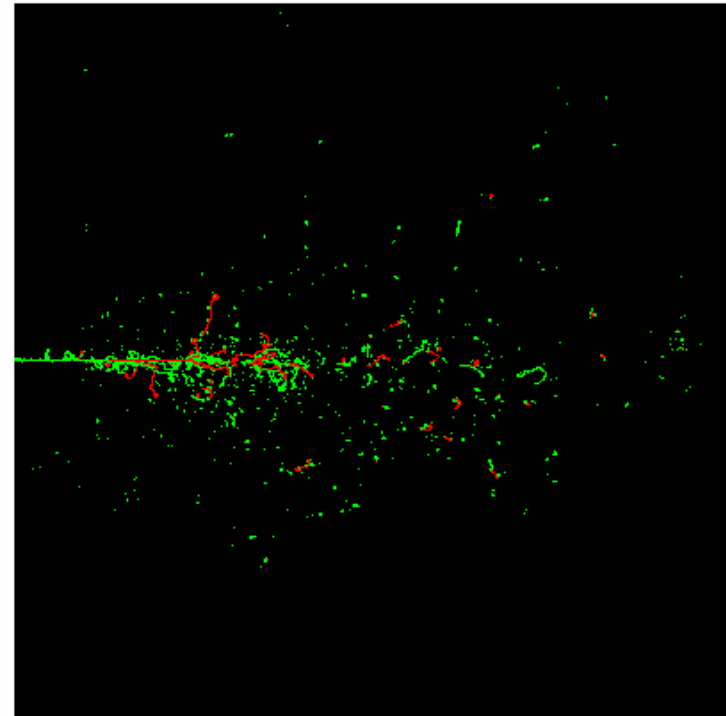


-5 cm

+5 cm

10 cm

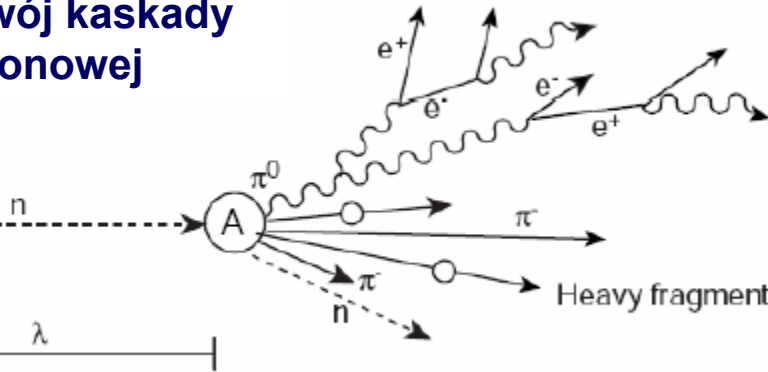
photons  
electrons  
positrons



electrons  
positrons

# Kalorymetr hadronowy – pomiar energii hadronów

Rozwój kaskady hadronowej



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

Składowa hadronowa kaskady hadronowej

$\lambda$  – **droga oddziaływania** : średnia droga w materiale ośrodka, po przebyciu której energia hadronu maleje o czynnik  $e$  w wyniku oddz. nieelastycznych

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

- Padający hadron oddziałuje silnie z jądrami ośrodka  $\rightarrow$  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  
w miarę degradacji energii hadronów zaczynają dominować oddziaływania elektromagnetyczne  $\rightarrow$  większość energii początkowego hadronu mierzona w procesie jonizacji  $\rightarrow$  mierzalny sygnał
- $\sim 15 - 35\%$  energii początkowego hadronu jest tracone na rozbicie jąder, wzbudzenia jądrowe oraz umyka z neutronami produkowanymi w rozpadach  $\rightarrow$  te procesy nie dają mierzalnego sygnału

- duże fluktuacje w rozwoju kaskady hadronowej :

fluktuacje krotności cząstek produkowanych w zderzeniach hadronów, neutrina unoszące część energii i nieoddziałujące w detektorze, składowa elektromagnetyczna kaskady związana z produkcją mezonów  $\pi^0$ , energia wiązania w zderzeniach z jądrami, ...

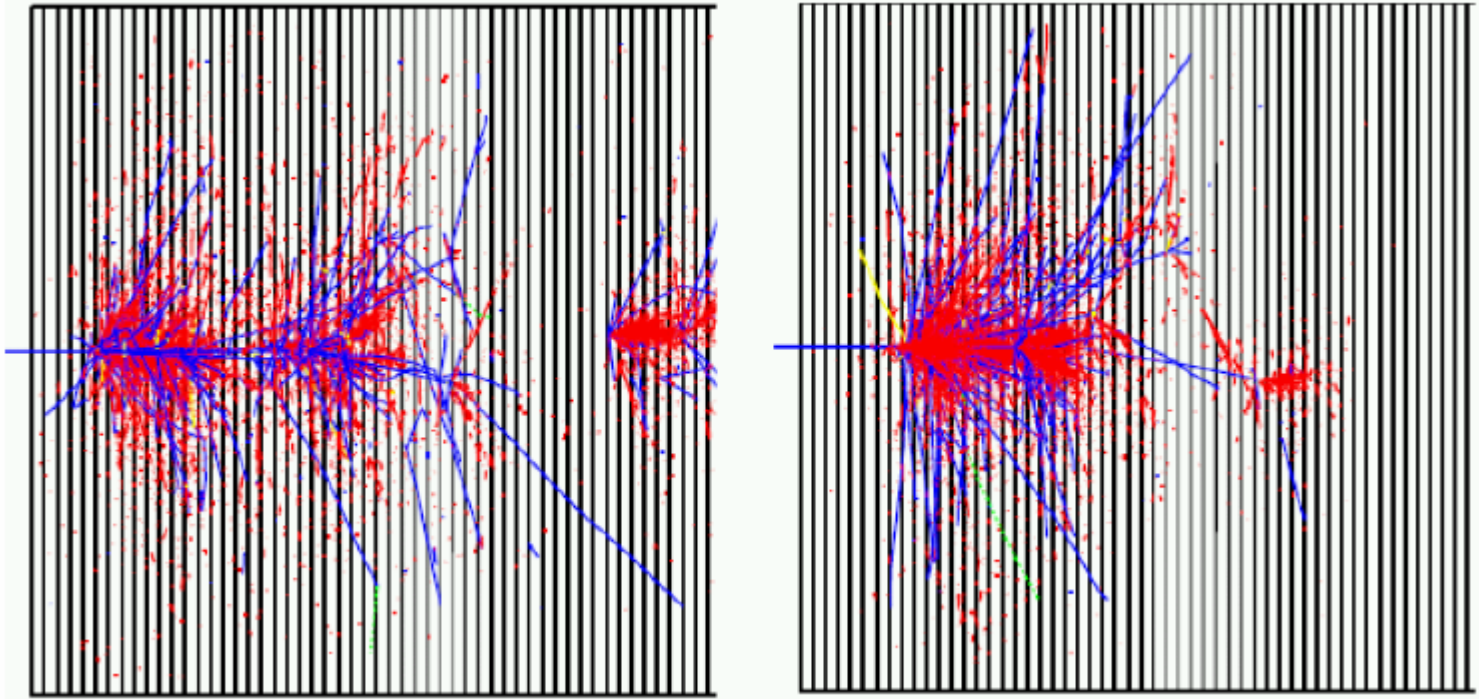


- duże niepewności pomiaru energii

typowa energetyczna zdolność rozdzielcza :  $\sigma_E/E \sim 0.5 / \sqrt{E}$ ,  $E$  [ GeV ]

- metody kompensacji energii traconej w oddziaływaniach jądrowych, poprzez użycie odpowiednich materiałów do budowy detektora (np. uranu)  
→ poprawa energetycznej zdolności rozdzielczej kalorymetru

## Symulacje kaskady hadronowej



**Kolor niebieski** – składowa hadronowa kaskady,  
**Kolor czerwony** – składowa elektromagnetyczna kaskady

Odpowiedź dobrego kalorymetru hadronowego na przejście elektronu i naładowanego pionu o takiej samej energii powinna być jednakowa.

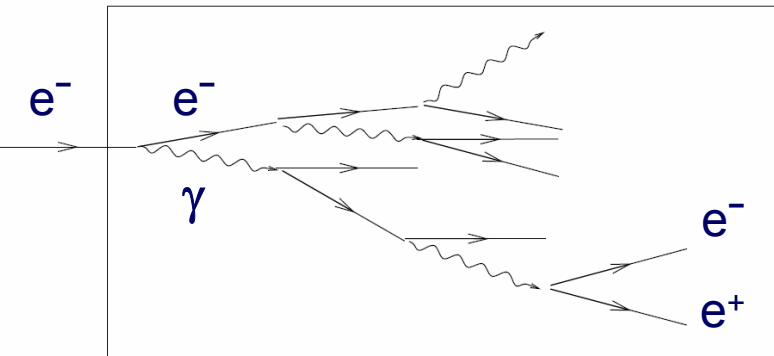
Umożliwiają to :

**Kalorymetr kompensujący** – zastosowanie odpowiednich materiałów (uran)

**Kalorymetr o dużej segmentacji** – programowalne metody analizy sygnałów z kalorymetru wykorzystujące różnice w rozwoju elektromagnetycznej i hadronowej składowej dla kaskady zainicjowanej przez hadron

## Kalometry jednorodne

Rozwój kaskady i proces  
służący detekcji zachodzą w tym  
samym aktywnym materiale.



Materiały aktywne mają małą  
gęstość → detektory są duże  
i drogie

## Kalometry elektromagnetyczne

Materiał aktywny : kryształy NaJ, CsJ

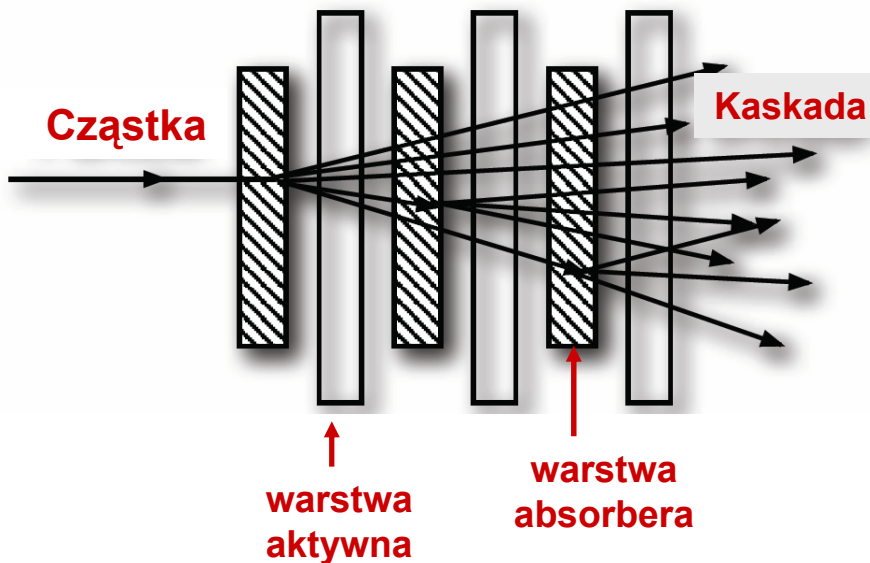
Szkło ołowiowe ( 55% PbO, 45% SiO<sub>2</sub> )

**Materiały o dużej liczbie Z**

**Precyzyjny pomiar energii**

# Kalorymetry próbkujące

Naprzemienne warstwy gęstego absorbera ( materiału w którym rozwija się kaskada ) i aktywnego materiału detekcyjnego, próbującego kaskadę.



## Kalorymetry hadronowe

Absorber : żelazo

Materiał aktywny : scyntylator, ciekły argon

Materiał aktywny i absorber – szkło ołowiowe

**Materiały o dużej liczbie masowej A**

## Kalorymetry elektromagnetyczne

Absorber : ołów

Materiał aktywny : ciekły argon

scyntylator plastikowy

Duża gęstość absorbera → detektory są mniejsze i tańsze

Fluktuacje wpływające na pomiar energii maleją ze wzrostem energii cząstki

## Promieniowanie Czerenkowa

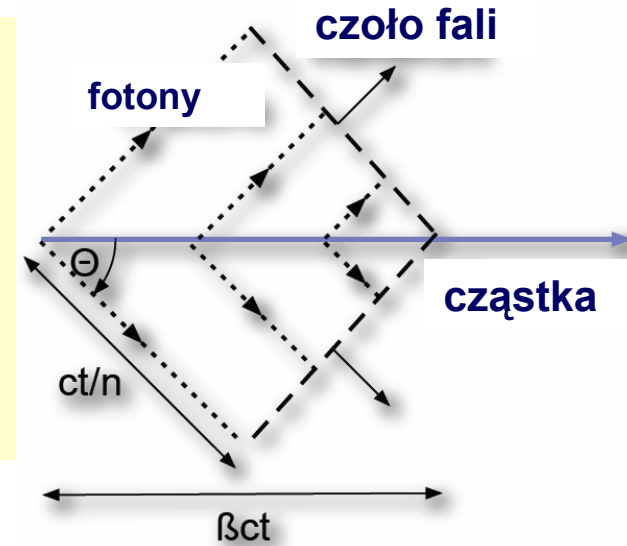
Wysokoenergetyczna naładowana cząstka poruszająca się w ośrodku dielektrycznym z prędkością większą niż fazowa prędkość światła w tym ośrodku emituje fotony.

$$\beta c > c / n$$

$\beta c$  – 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 ).

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

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 b. słaby – straty energii są typowo rzędu 1% strat energii na jonizację

## 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**.

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

- Progowe liczniki Czerenkowa

Sygnal 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 zderzaczach  
(rozwój detektorów fotonów i niskoszumowej elektroniki)

## Progowe liczniki Czerenkowa

Rozróżnianie m-dzy 2 relatywistycznymi cząstkami o tym samym pędzie i różnych masach.

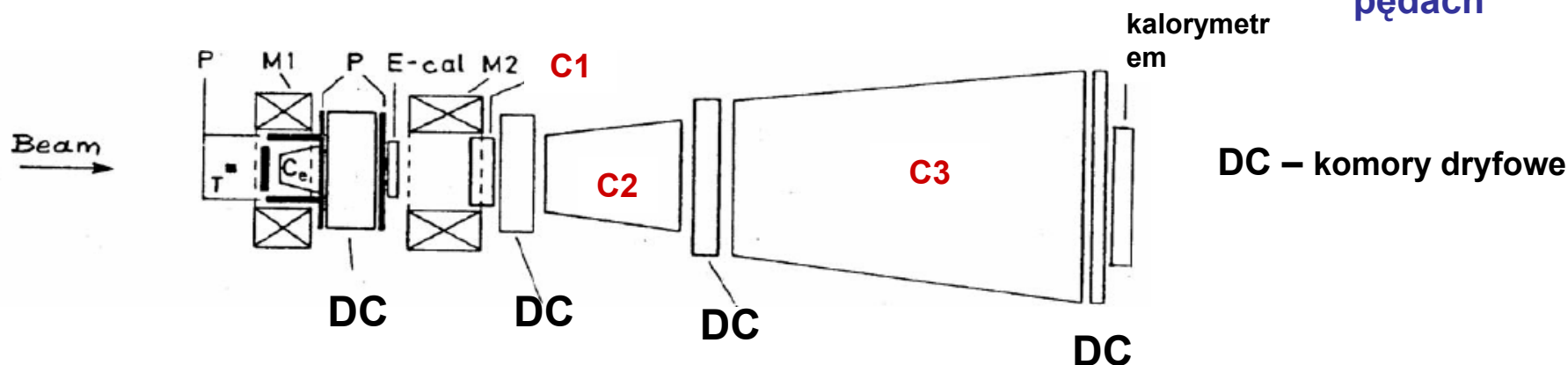
$p_1 = p_2, m_1 > m_2 \rightarrow v_1 < v_2$  ( $\beta_1 < \beta_2$ ) – cząstka lżejsza jest szybsza

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

Wybieramy radiator tak, aby cząstka 2 o pędzie powyżej pewnej wartości progowej  $p_{thr}$  odp.  $\beta_{thr}$  dawała w nim sygnał od promieniowania Czerenkowa. Cząstka 1 o takim samym pędzie ma już prędkość tuż poniżej proggu.

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

$M_\pi$  (140 MeV) <  $M_K$  (490 MeV) <  $M_p$  (980 MeV)  $\rightarrow \beta_\pi > \beta_K > \beta_p$ , przy takich samych pędach



Progowe liczniki Czerenkowa  $C_e, C1 - C3$  w eksp. NA11 (CERN) na stacjonarnej tarczy, który na początku lat 80-tych badał hadronową produkcję cząstek powabnych

# Detektor Czerenkowa RICH

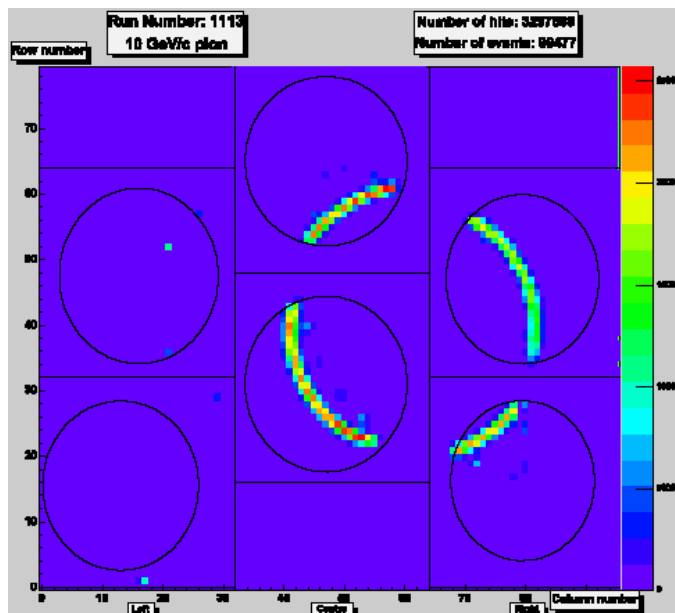
Stożek promieniowania Czerenkowa jest obrazowany w postaci pierścienia w detektorze fotonów o dobrej przestrzennej zdolności rozdzielczej i dużej czułości na pojedyncze fotony.

promień pierścienia → kąt Czerenkowa  $\theta$   
→ prędkość cząstki

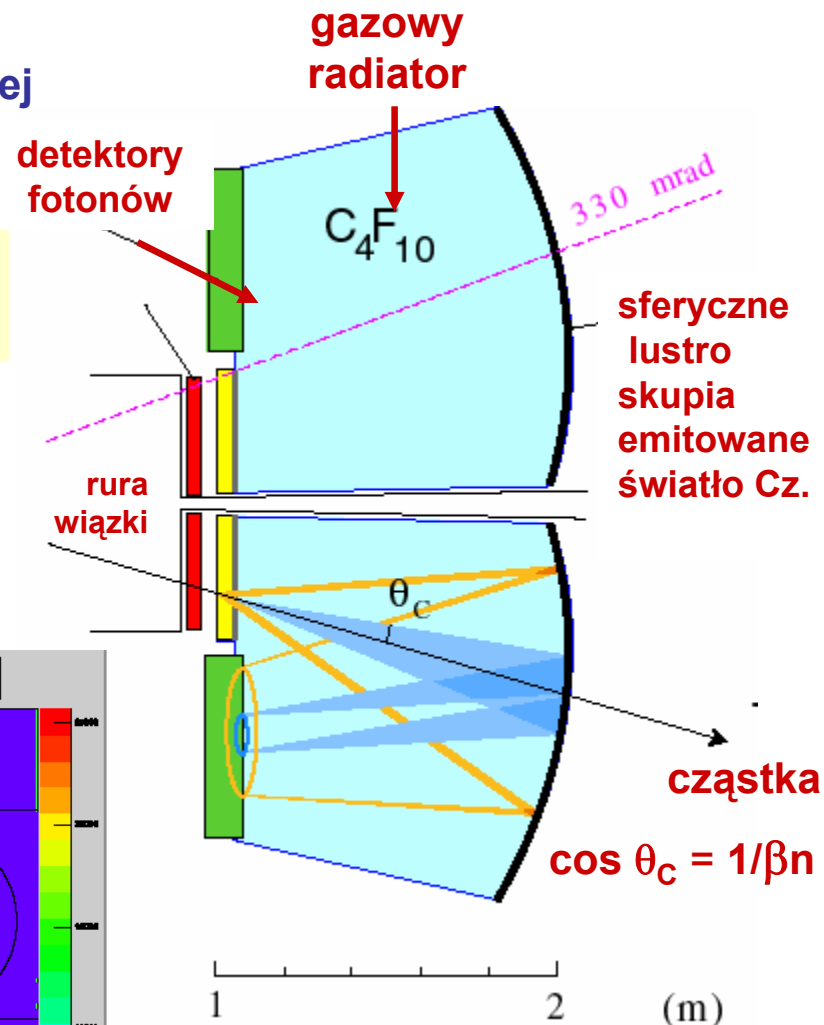
prędkość cząstki + pomiar pędu

→ masa cząstki ( identyfikacja cząstki )

Separacja pionów, kaonów i protonów w szerokim zakresie pędów



# Detektor RICH1 w eksperymencie LHCb



Separacja  $\pi - K - p$  w zakresie pędów 16 - 60 GeV

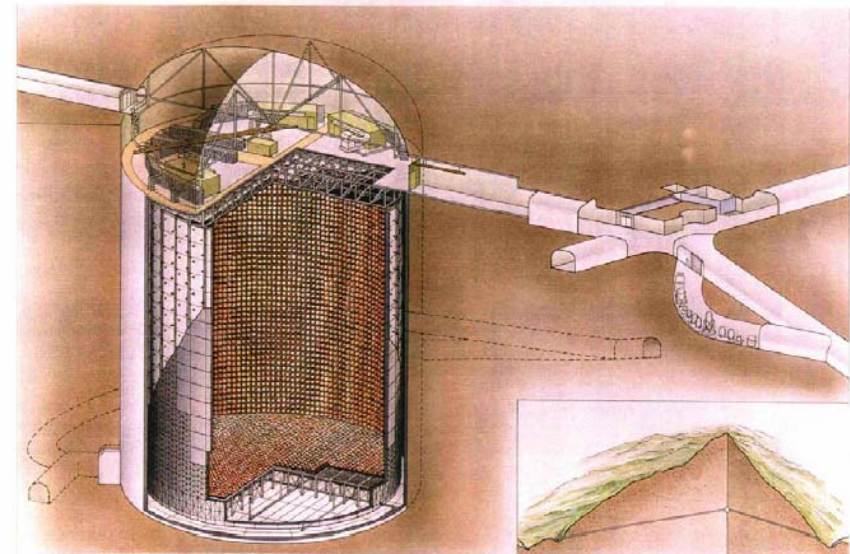
# Wodne detektory Czerenkowa

Bardzo duże **wodne detektory Czerenkowa** są używane do detekcji **neutrino**  
( eksp. SuperKamiokande, T2K )

## Eksperyment SuperKamiokande

Detektor w starej 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. Koshiby koordynatora eksp. SuperKamiokande

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

# Pomiar mionowych i elektronowych neutrino atmosferycznych w eksp. SuperKamiokande w procesach zachodzących poprzez prądy naładowane :



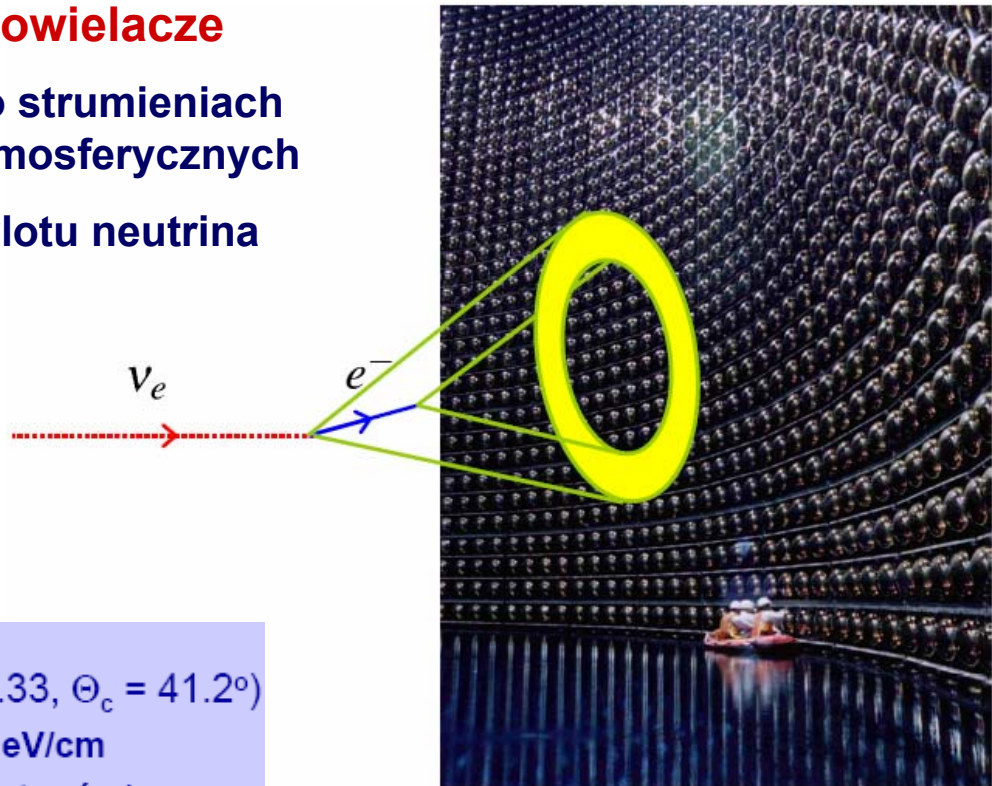
Neutrino oddziałują tylko słabo – identyfikujemy je poprzez procesy, które wywołują

- detekcja elektronów i mionów w wodnym liczniku Czerenkowa ( 50 kton H<sub>2</sub>O ) ( woda stanowi zarówno tarczę jak i detektor oddziaływań neutrinowych )
- produkowane miony i elektrony o odp. dużej energii emitują promieniowanie Czerenkowa wykrywane przez fotopowielacze
  - pomiar rozkładów  $\mu$  i  $e$   $\rightarrow$  informacja o strumieniach mionowych i elektronowych neutrino atmosferycznych
  - metoda pomiaru czuła na kierunek przylotu neutrino

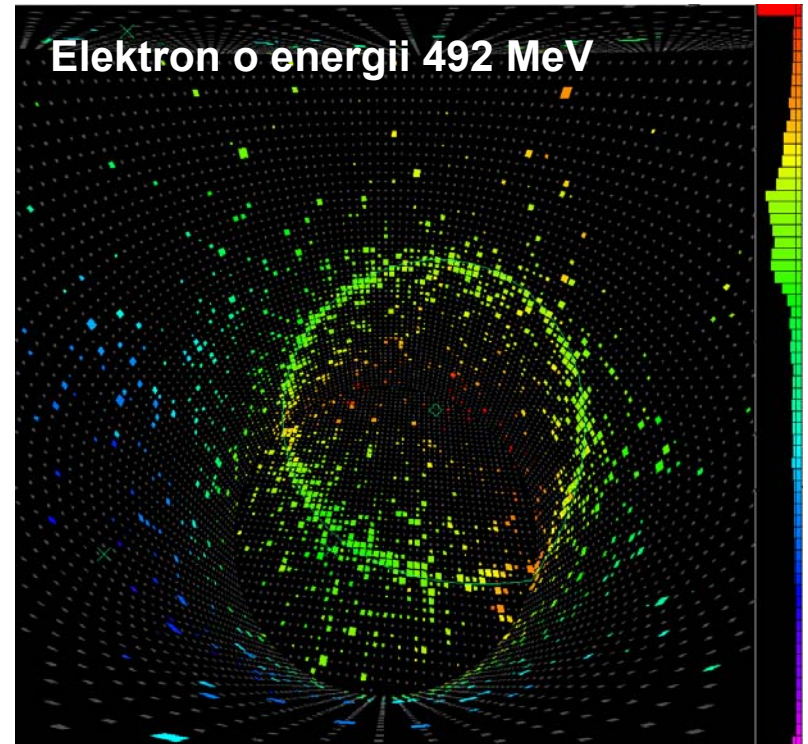
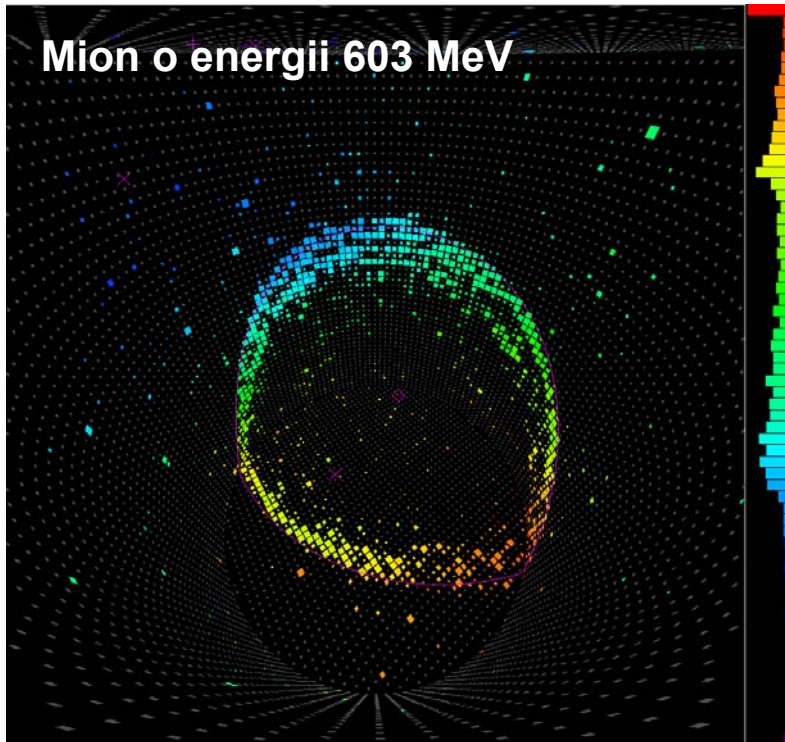
Deficyt neutrino mionowych przechodzących przez Ziemię wyjaśniają oscylacje  $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$

Wodny detektor Czerenkowa

W wodzie ( $n = 1.33$ ,  $\Theta_c = 41.2^\circ$ )  
 $dE/dx = 1530 \text{ eV/cm}$   
 $dN/dx = 170 \text{ fotonów/cm}$



## SuperKamiokande

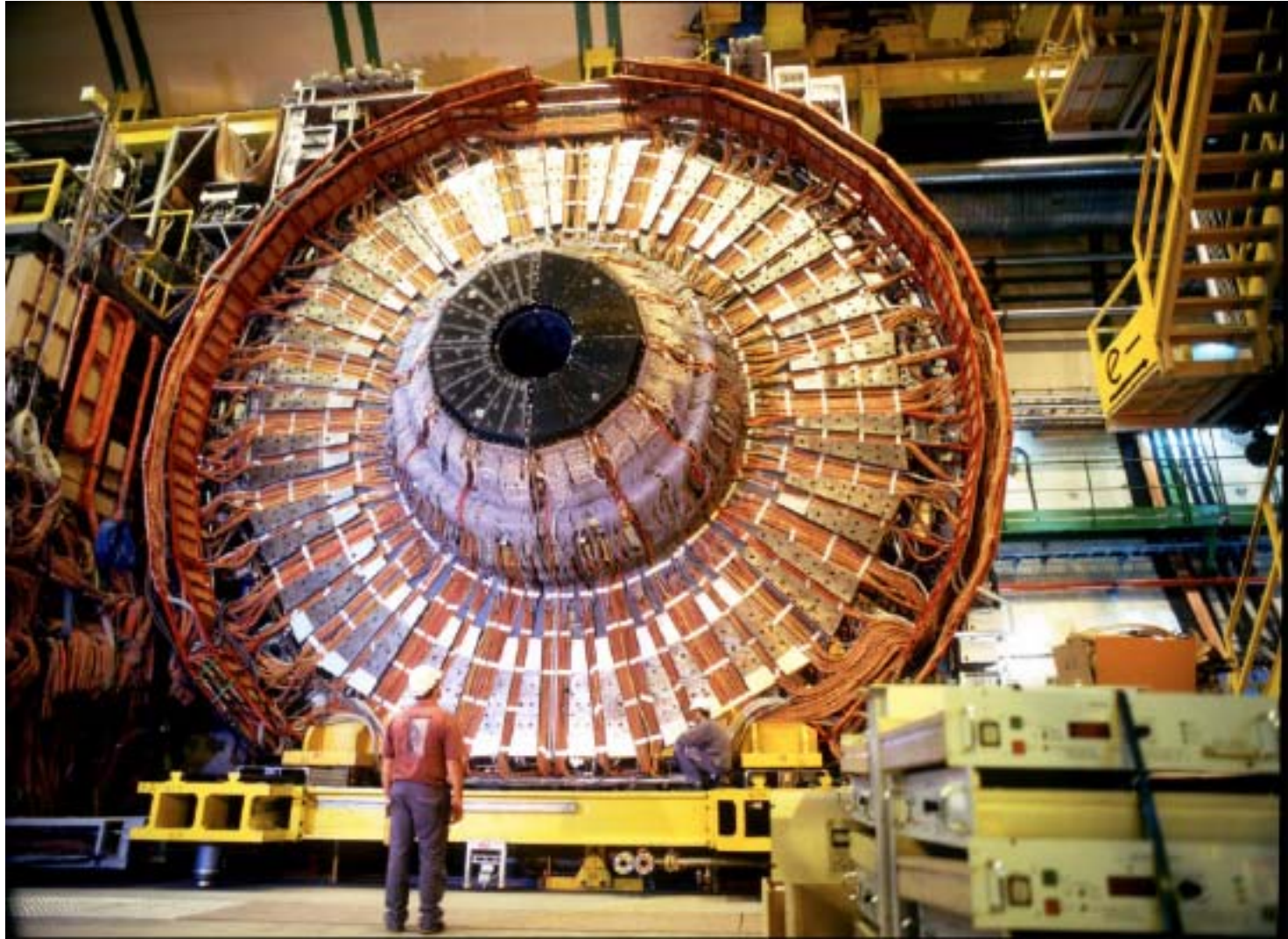


$\mu$  – stożek promieniowania Czerenkowa o ostrych krawędziach

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

- Promieniowanie Czerenkowa wytwarza obraz w kształcie pierścienia, światło rejestruje się przy pomocy fotopowielaczy
- Rozkład kątowy neutrino jest bliski rozkładowi kątowemu  $e(\mu)$
- Przy wysokich energiach rozmycie kątowe  $\nu - e(\mu)$  można pominąć

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



Naładowane leptony  $\mu^\pm$  – oddziałują słabo i elektromagnetycznie

↓  
straty energii na jonizację, promieniowanie hamowania ?

**Promieniowanie hamowania** : cząstka o masie  $m$  w polu kulombowskim jądra o ładunku  $Z$  jest wyhamowana 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 istotne dla cząstek o małej masie**

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

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

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

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

Miony będą generować kaskady elektromagnetyczne dopiero przy wysokich energiach.

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

# Układy detektorów

Typowy eksperyment fizyki cząstek wymaga

detekcji, identyfikacji i pomiarów parametrów wielu cząstek,

naładowanych i obojętnych, produkowanych w procesach zderzeń

→ zbudowany jest z wielu typów detektorów

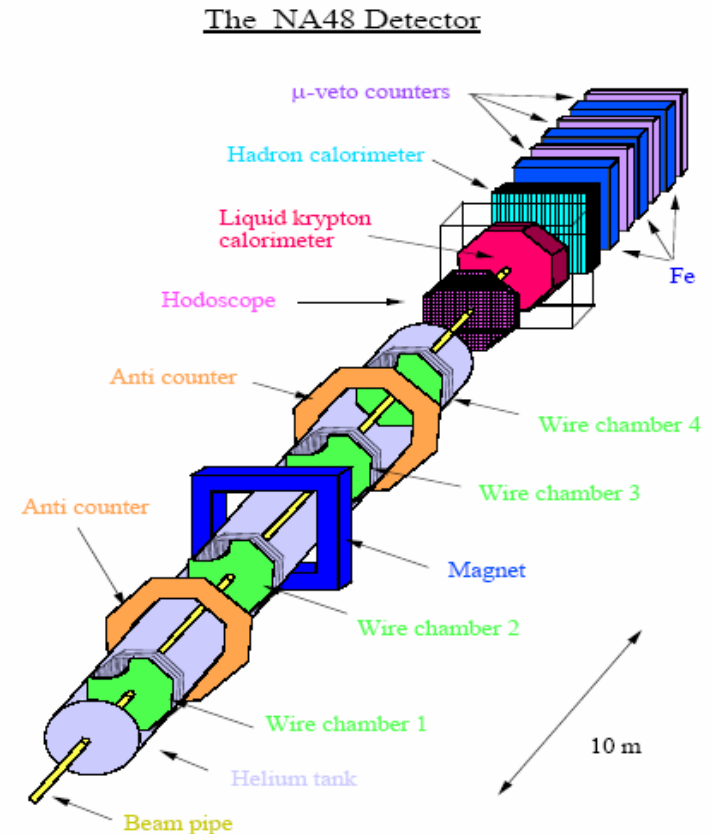
## • Eksperyment na stacjonarnej tarczy



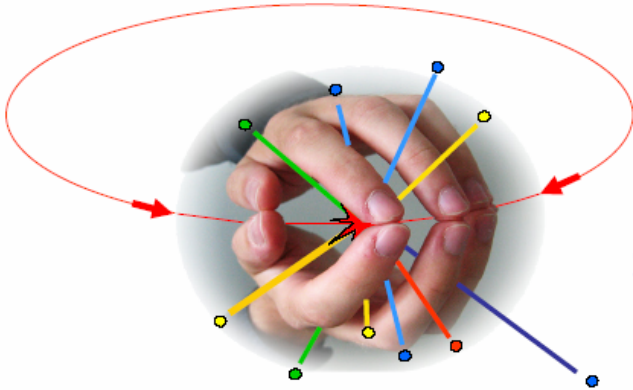
## Układ detektorów w eksperymencie NA48

w CERN badającym niezachowanie CP w rozpadach neutralnych kaonów

Wtórna wiązka **neutralnych kaonów** ( $K_L + K_S$ ) z akceleratora SPS (**S**uper **P**roton **S**ynchrotron)



Otoczenie obszaru skrzyżowania wiązek detektorami w możliwie pełnym zakresie kąta bryłowego.



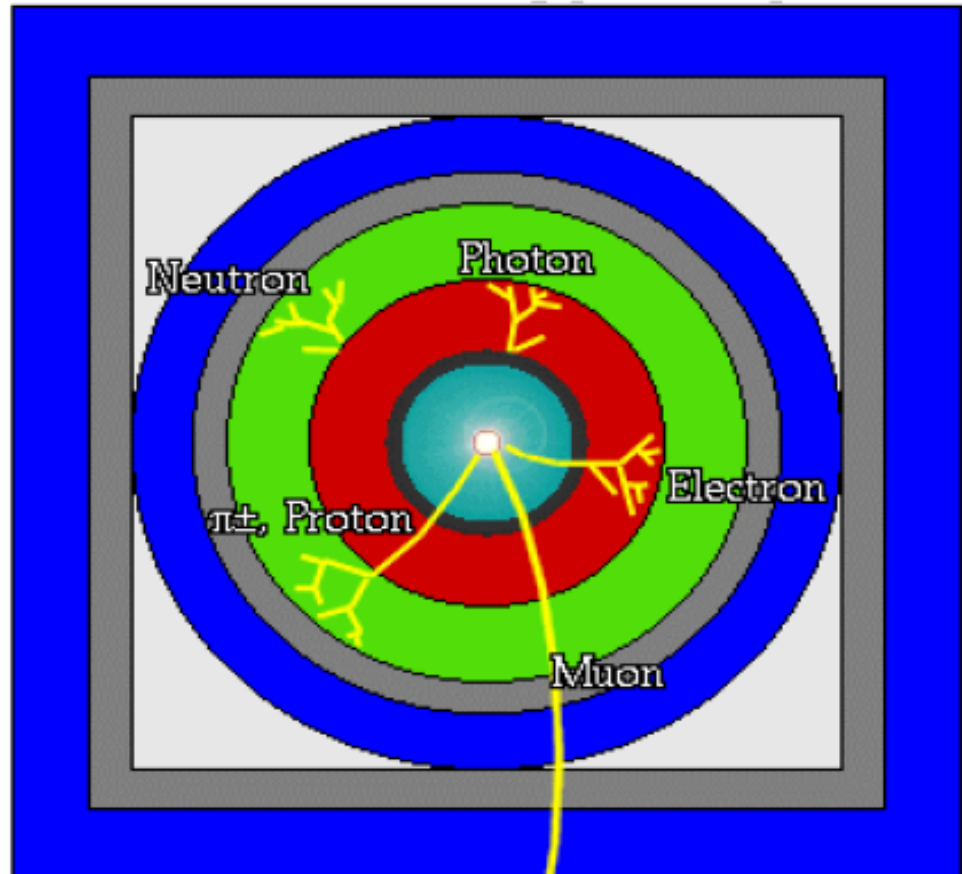
## Kryteria budowy układu detektorów :

- **pomiar wszystkich rodzajów cząstek**
- **hermetyczność** ( brak szczelin m-dzy elementami detektora, brak obszarów martwych )
- **dobra zdolność rozdzielcza** ( wysoka precyzja pomiarów )
  - Rozróżnienie poszczególnych cząstek ( wysoka granulacja, wiele kanałów )
  - Pomiar energii i śladów cząstek z wysoką precyzją

- Ograniczenia :
- koszt i dostępne technologie
  - rura wiązki i magnesy akceleratora ( szczególnie blisko miejsca zderzenia )
  - chłodzenie, kable zasilające i sygnałowe, mechanika
  - odporność detektorów na napromieniowanie


## Typowy układ detektorów wokół osi wiązek zderzacza ( przekrój poprzeczny )

-  rura wiązki
-  komora śladowa
-  solenoid magnesu
-  kalorymetr elektromagnet.
-  kalorymetr hadronowy
-  namagnesowane żelazo
-  komory mionowe



- miejsce oddziaływania → detektory śladowe ( w tym detektory wierzchołka )
- detektory do pomiaru prędkości cząstek → kalorymetr elektromagnetyczny
- kalorymetr hadronowy → komory mionowe

komory mionowe  
kalorymetr elektromagnetyczny

	Detector characteristics	
	Width:	44m
	Diameter:	22m
	Weight:	7000t

CERN AC - ATLAS V1997

solenoid

Kalorymetry do przodu

toroid



ATLAS w zestawieniu z 5 piętrowym budynkiem 40 w CERN

toroid

wewnętrzny detektor śladów

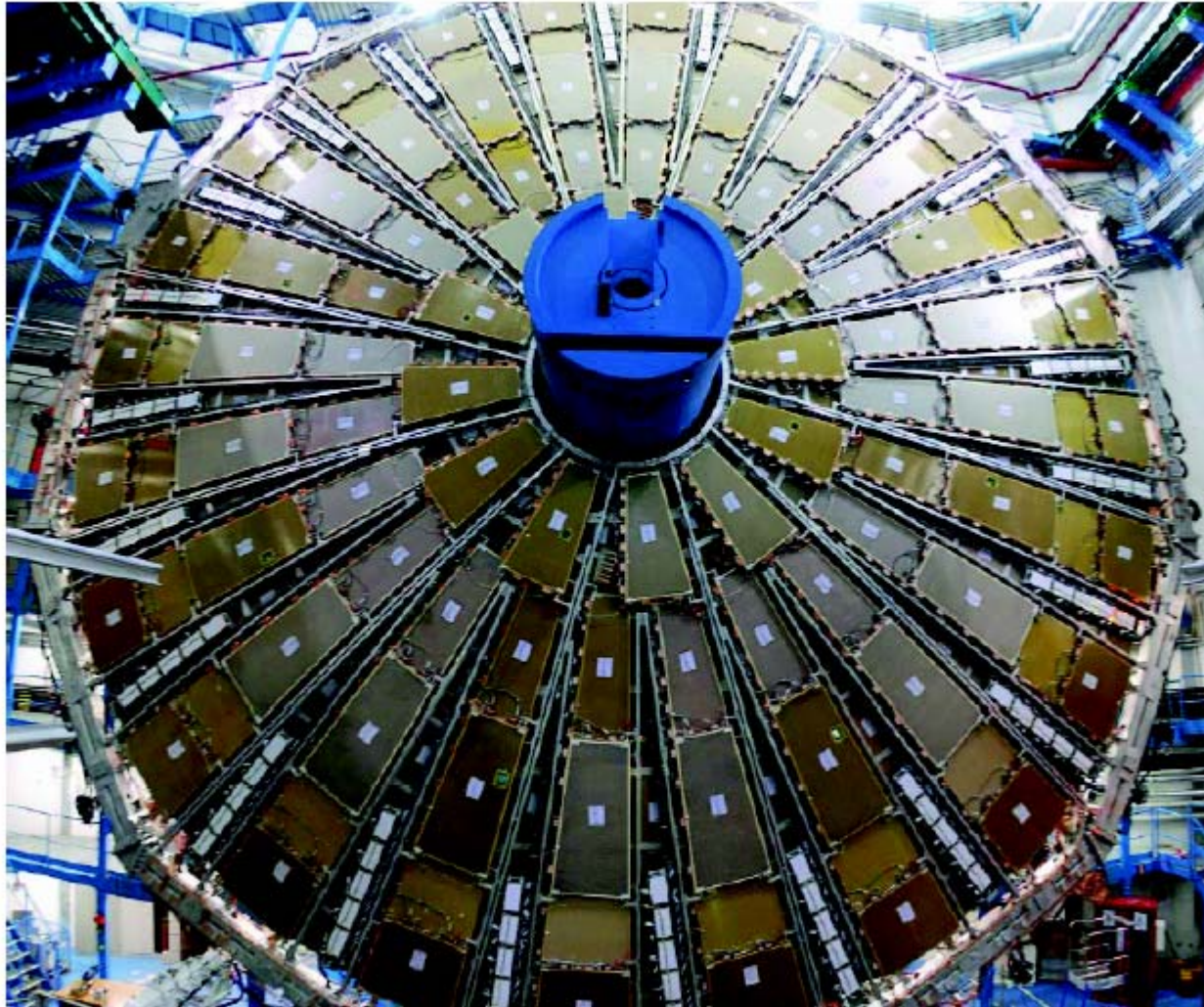
kalorymetr hadronowy

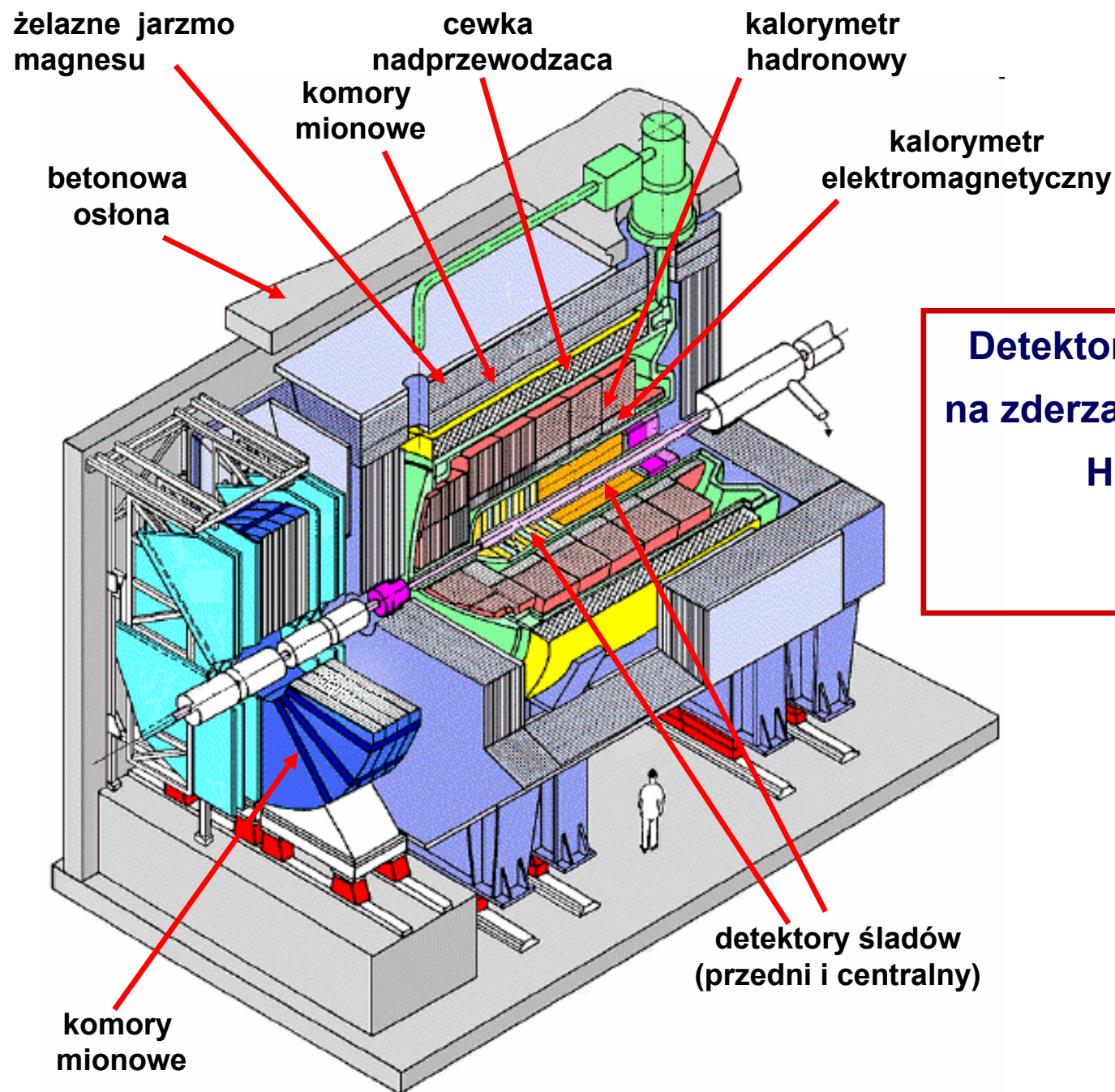
osłona

**Detektor eksperymentu ATLAS na zderzacz protonów LHC w CERN**

## Komora mionowa w eksperymencie ATLAS przy LHC

Ø25m





**Detektor eksperymentu H1  
na zderzacz elektron-proton  
HERA w DESY  
Hamburg**

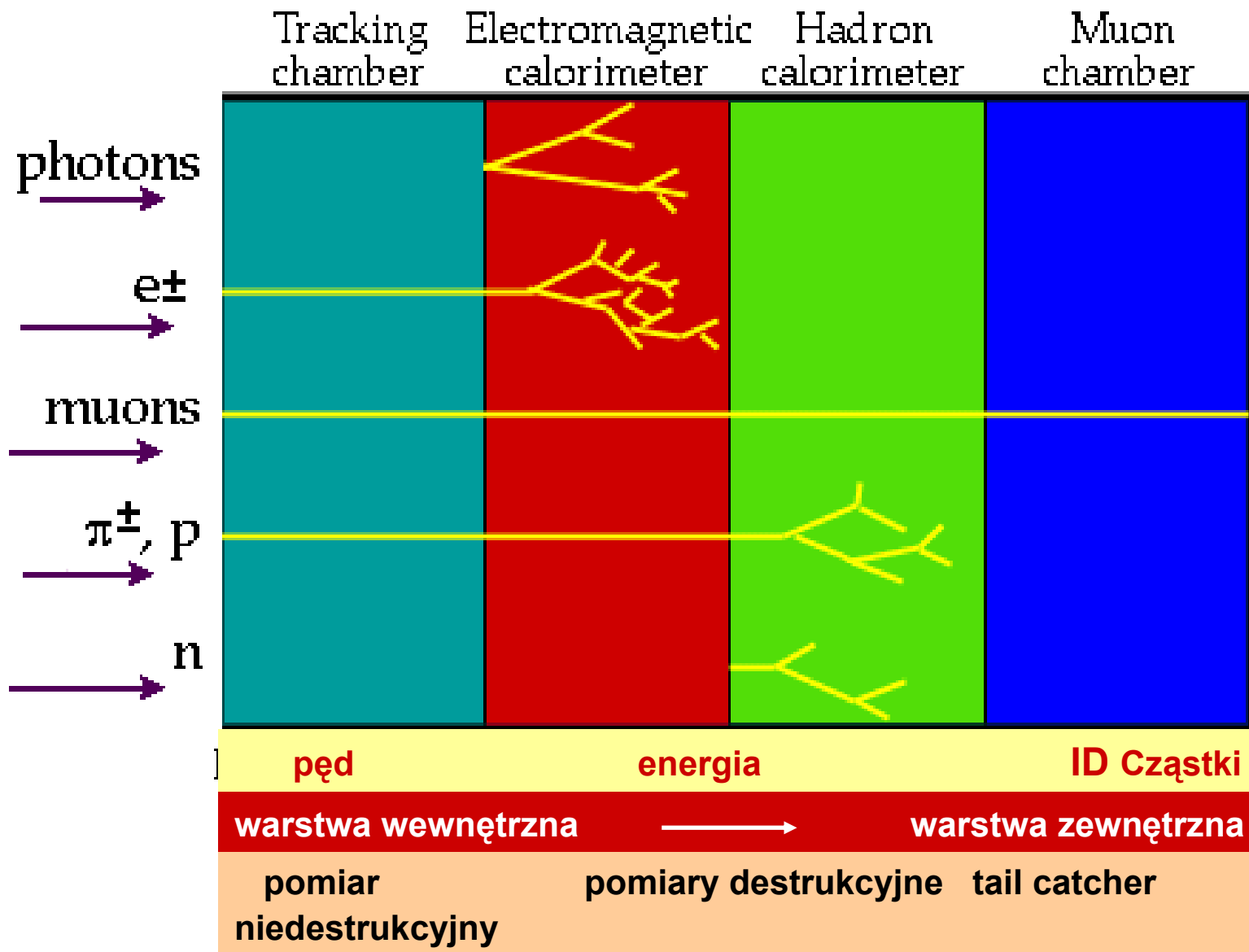
Metody identyfikacji cząstek bazują na charakterystykach ich oddziaływania z materią :

- straty energii na jonizację  $dE / dx$  → pomiar prędkości, przy jednoczesnym pomiarze pędu definiuje masę cząstki → identyfikacja cząstki (  $e / \mu / \pi / K / p / D$  )
- promieniowanie Czerenkowa → pomiar prędkości, przy jednoczesnym pomiarze pędu identyfikuje cząstkę  
prędkość cząstki można także wyznaczyć z czasu przelotu i promieniowania przejścia (nie omawialiśmy)
- kształt kaskady w kalorymetrach elektromagnetycznych i hadronowych  
pozwała odróżnić cząstki elektromagnetyczne (  $\gamma, e^\pm$  ) od hadronów
- miony oddziałują tylko poprzez jonizację,  
nie oddziałują silnie (brak kaskady hadronowej), aż do bardzo wysokich energii nie generują kaskady elektromagnetycznej
- neutrino oddziałują tylko słabo,  
identyfikacja ich oddziaływań wymaga dedykowanych eksperymentów przy użyciu detektorów o dużej masie

## Detekcja i identyfikacja cząstek

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

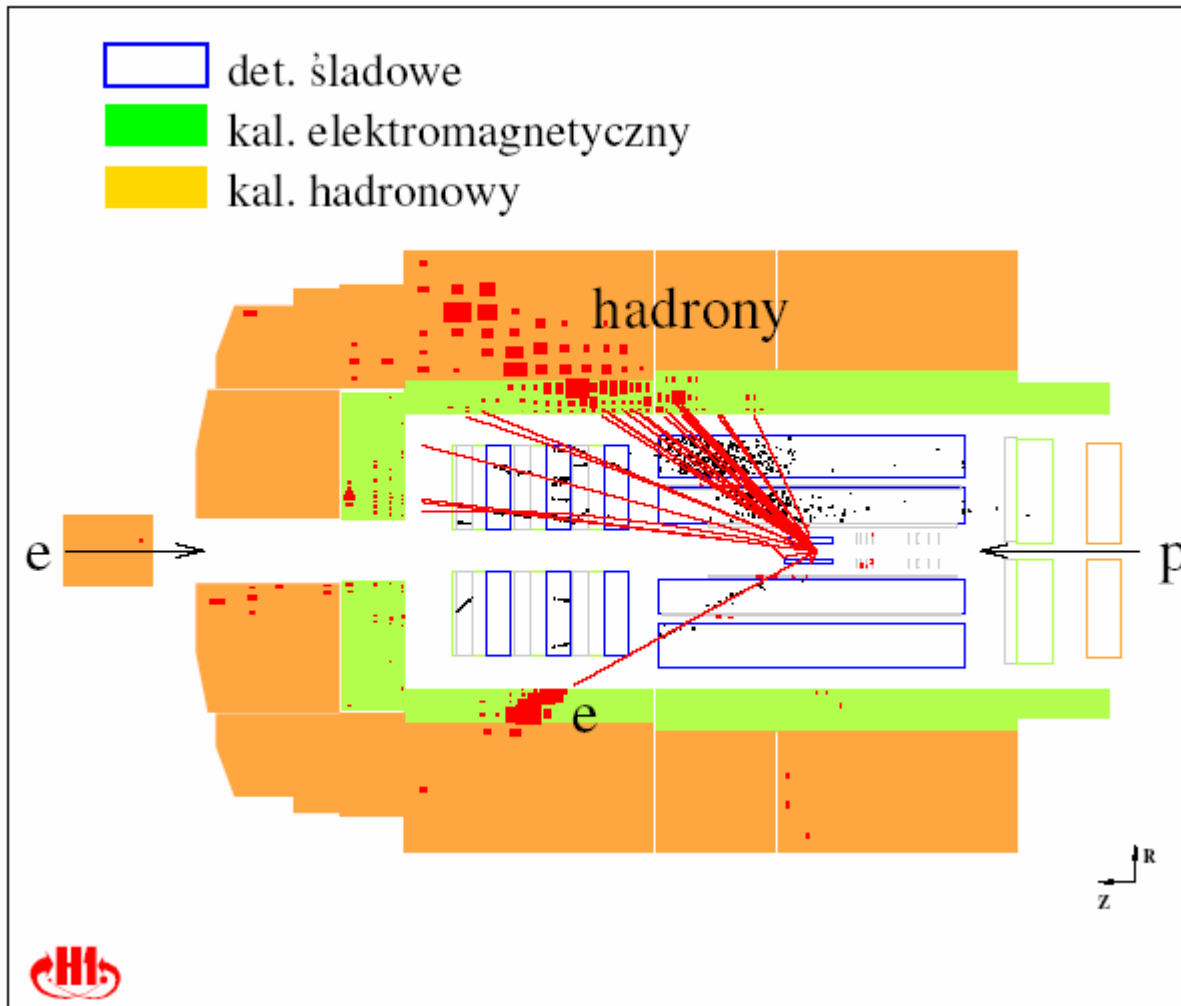
# Detekcja i identyfikacja cząstek



<b>Cząstka</b>	<b>Sygnatura</b>
$\pi^\pm, K^\pm, \bar{p} / p$	śląd + kaskada hadronowa
$e^\pm$	śląd + kaskada elektromagnetyczna
$\mu^\pm$	śląd w najbardziej zewnętrznych detektorach brak kaskady w kalorymetrze elektromagnetycznym ( cząstka w minimum jonizacji )
<b>fotony</b>	brak sygnałów w detektorach śladowych, kaskada elektromagnetyczna
neutralne hadrony $n, K_L^0$	kaskada hadronowa
<b>neutrino</b>	brakująca energia w przypadku
$J/\psi, Y, W, Z, H, t$	szybki rozpad $\rightarrow$ masa niezmiennicza

# Eksperyment H1

## Przypadek rozpraszania $e^- + p \rightarrow e^- + X$



## Ważne eksperymenty ostatnich lat

Eksperymenty na zderzaczach  $e^+e^-$ , ep, pp i  $p\bar{p}$

eksperyment	akcelerator	energia	status
<b>ALEPH, DELPHI, L3, OPAL</b>	LEP $e^+e^-$ CERN	100 + 100 GeV	zakończone zbieranie danych
<b>H1, ZEUS</b>	HERA $e^\pm p$ DESY / Hamburg	27.5 + 920 GeV	zakończone zbieranie danych
<b>BaBar</b>	PEP II $e^+e^-$ SLAC / USA	3 + 9.1 GeV	zakończone zbieranie danych
<b>BELLE</b>	KEKB $e^+e^-$ Japonia	3.5 + 8 GeV	zakończony I etap
<b>CDF, D0</b>	Tevatron $p\bar{p}$ Fermilab / USA	1 + 1 TeV	koniec zbierania danych, X 2011
<b>T2K</b>	J-PARC $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ Japonia		działa od XI 2009
<b>ALICE, ATLAS, CMS, LHCb</b>	LHC pp CERN	3.5 + 3.5 TeV	działa od końca 2009

## Podsumowanie :

Główna tematyka badań w fizyce cząstek koncentruje się na :

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

## Wykłady

<http://www.ifj.edu.pl/cmstest>

Zakładka :

Edukacja → Zajęcia dla studentów UJ → Wykłady - wybrane teksty → 2010 / 2011

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

Zachęcam do udziału w szkole :

European Summer Campus, Strasbourg, 6-13.07.2011

**Between two infinities : Particle Physics, Astroparticles and Cosmology**

<http://esc.u-strasbg.fr/index.php>

Składanie wniosków do 5.06.2011

lidia.goerlich@ifj.edu.pl

**Dodatkowe przeżrocza nt. wybranych eksperymentów fizyki cząstek**  
**( nie były omawiane na wykładzie )**

Laboratorium **CERN** ( European Organization for Nuclear Research ) pod Genewą

Eksperymenty **ALEPH, DELPHI, L3, OPAL**  
na wielkim zderzaczu elektronów i pozytonów **LEP**  
**LEP** ( **L**arge **E**lectron **P**ositron **C**ollider ) 1989 - 2000

- wiązki  $e^+e^-$  o maksymalnym pędzie 104.5 GeV / c
- tematyka naukowa
  - badania bozonów pośredniczących  $Z^0$  i  $W^\pm$
  - badania cząstek z ciężkimi kwarkami c i b
  - poszukiwanie nowych cząstek ( bozonu Higgsa, cząstek supersymetrycznych )

Krakowskie grupy fizyków, inżynierów i techników uczestniczyły w eksp. DELPHI

# Liczba zapachów lekkich neutrin

**1990** Określenie liczby zapachów lekkich neutrin  $N_\nu = 3$

Kołowy zderzacz  $e^+ e^-$  LEP w CERN – fabryka bozonów  $Z^0$

→ precyzyjna weryfikacja przewidywań **Modelu Standardowego**, opisującego oddziaływania silne i elektroślabe  
( teoria oddziaływań silnych - chromodynamika kwantowa + zunifikowana teoria oddziaływań elektromagnetycznych i słabych )

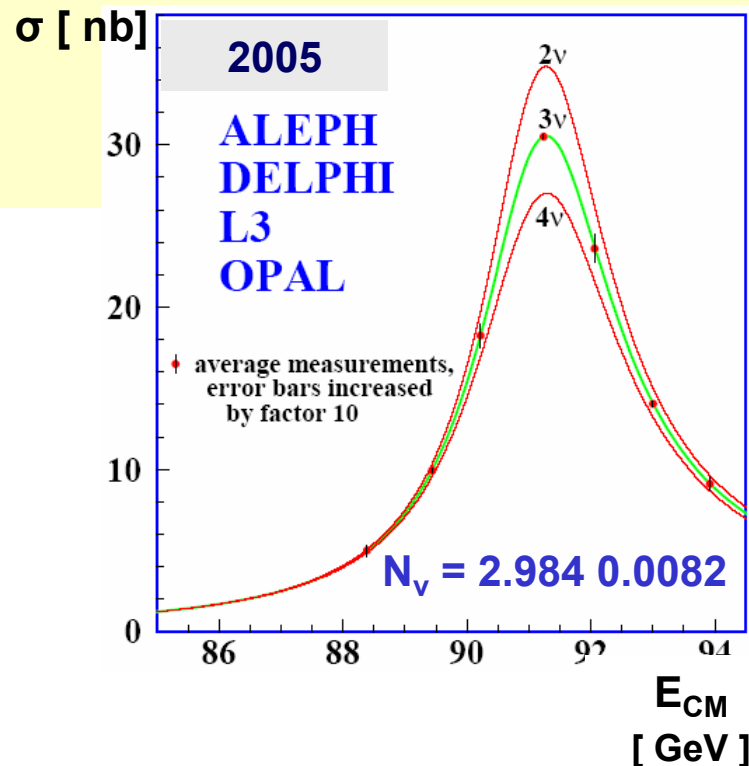
**pomiar szerokości bozonu  $Z^0$**



**istnieją 3 zapachy lekkich neutrin**

przekrój czynny  $\sigma( e^+e^- \rightarrow Z^0 \rightarrow \text{hadrony} )$

w funkcji energii w układzie środka masy



Eksperymenty **H1** i **ZEUS**

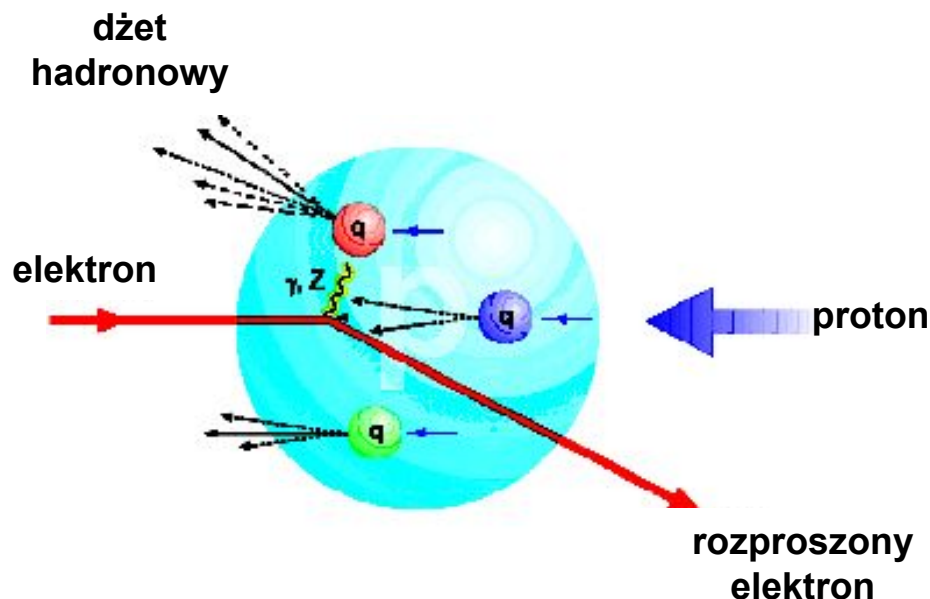
na jedynym na świecie zderzaczu elektron - proton **HERA**

**HERA** ( **H**adron **E**lektron **R**ing **A**nlage ) 1992 - 2007

- zderzenia  $e^+ / e^-$  o energii 27.5 GeV z protonami o maksymalnej energii 920 GeV

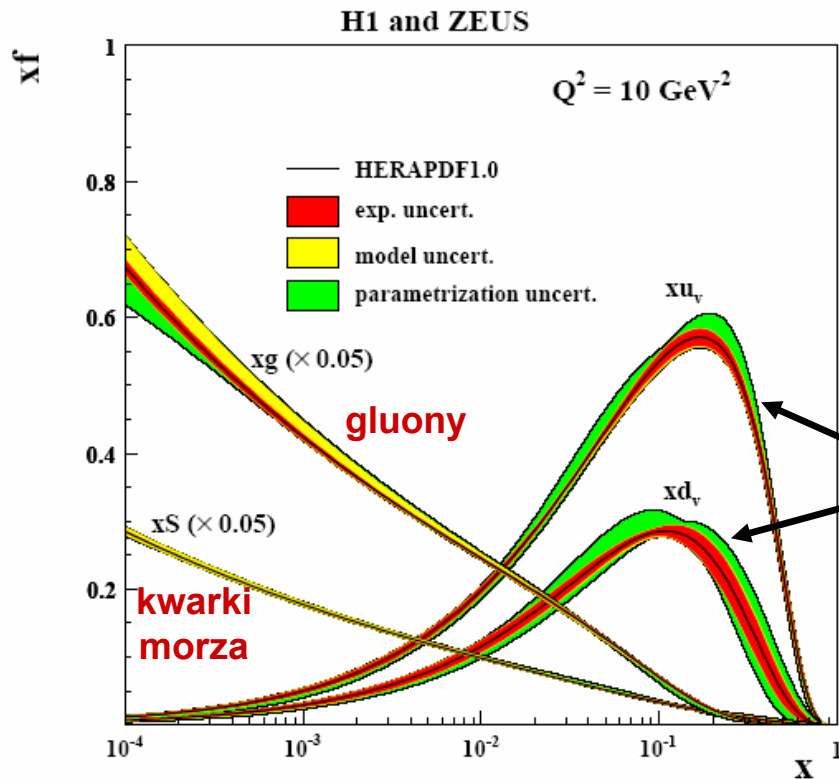
Głęboko nieelastyczne rozpraszanie  
elektron – proton

→ badania struktury protonu do odległości rzędu  $10^{-18}$  m



Krakowskie grupy fizyków, inżynierów i techników uczestniczyły w eksp. H1 i ZEUS

- Badania struktury protonu
- Testowanie teorii oddziaływań silnych : chromodynamiki kwantowej
- Poszukiwania nowych cząstek



Podręcznikowymi wynikami z HERA są funkcje rozkładu partonów :  
kwarków walencyjnych,  
kwarków morza i gluonów w protonie.

**kwarki walencyjne**

$x$  – bezwymiarowa zmienna, definiująca ułamek pędu protonu uniesiony przez parton, na którym rozproszył się elektron

# Fabryki mezonów B

- **SLAC** National Accelerator Laboratory w Stanford / USA  
eksperyment **BaBar** na kołowym zderzaczach elektronów i pozytonów **PEP II**
- Laboratorium **KEK** w Tsukubie / Japonia  
eksperyment **BELLE** na kołowym zderzaczach elektronów i pozytonów **KEKB**
- **Fabryki mezonów B** :  $e^+e^- \rightarrow \Upsilon(4S) \rightarrow \bar{B}B$  , ponad milion par  $\bar{B}B$  / dzień  
piękne mezony B składają się z kwarka lekkiego i ciężkiego kwarka b :  
 $B^+ = \bar{u}b$ ,  $B^0 = \bar{d}b$ ,  $B_s = \bar{s}b$
- **Tematyka badawcza** : precyzyjne testy Modelu Standardowego (MS)  
i poszukiwania Nowej Fizyki ( wykraczającej poza MS )  
**w tym badania zjawiska łamania parzystości kombinowanej CP w rozpadach B**  
( parzystość przestrzenna  $P \quad r \leftrightarrow -r$  , sprzężenie ładunkowe C cząstka  $\leftrightarrow$  antycząstka)

Krakowska grupa fizyków, inżynierów i techników uczestniczy w eksp. BELLE

# Nobel 2008 : Makoto Kobayashi i Toshihide Maskawa

” za odkrycie mechanizmu złamanej symetrii, przewidującego istnienie przynajmniej trzech rodzin kwarków w przyrodzie” (50% nagrody)

czyli za wyjaśnienie jak uzyskać łamanie CP w Modelu Standardowym

Wyniki eksperymentów **BaBar** i **Belle**, potwierdzające model KM, przyczyniły się do przyznania tej nagrody Nobla.

Obydwa eksperymenty zostały wymienione w komunikacie prasowym Komitetu Noblowskiego.

Eksperymenty **CDF i D0**

na zderzaczach protonów i antyprotonów **Tevatron**

- odkrycie kwarka t
- badania cząstek z kwarkiem b
- **poszukiwania nowych cząstek, w szczególności bozonu Higgsa**

- **Program badań z wiązkami wtórnymi –**

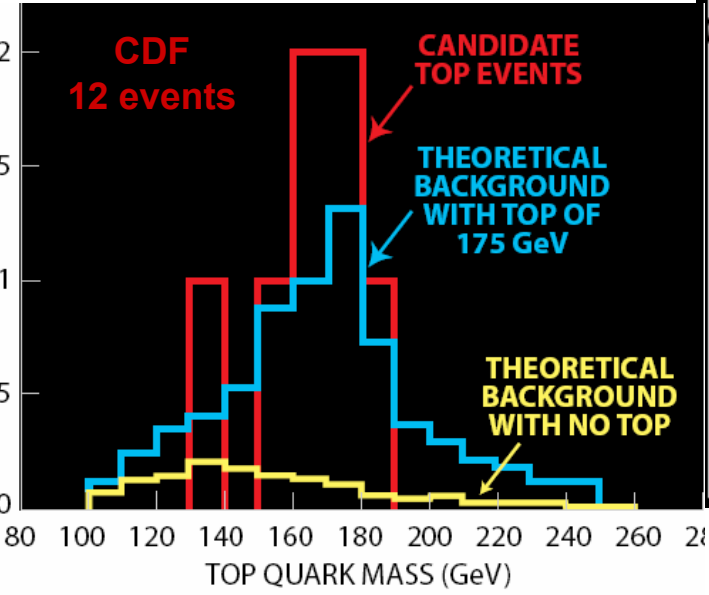
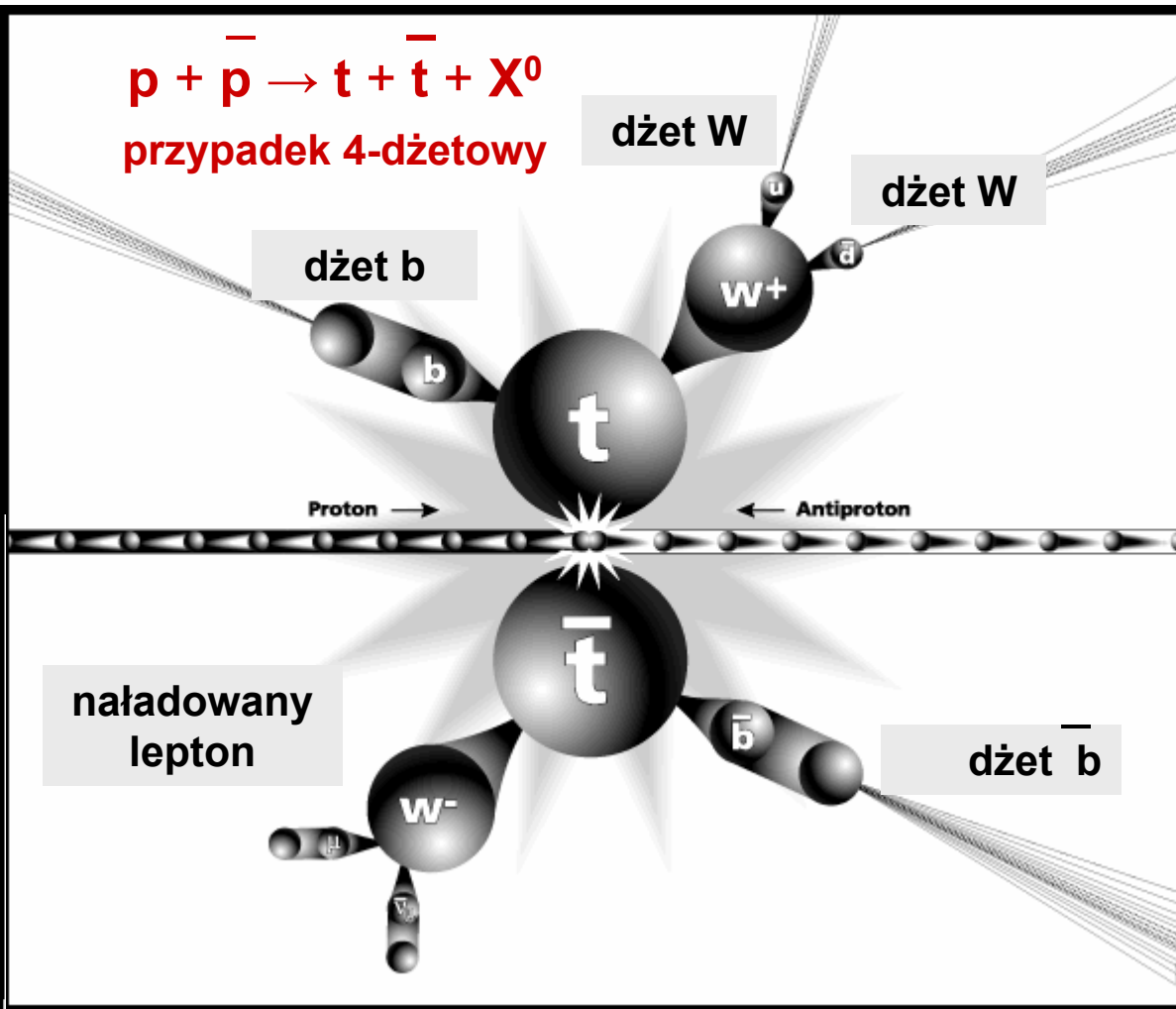
2000 - pierwsza obserwacja neutrina taonowego,  $\nu_\tau$ ,  
stowarzyszonego z ciężkim leptonem  $\tau$  (  $M_\tau \sim 1777$  MeV )

● 1995 Odkrycie kwarka t ( truth / top, trzecia generacja kwarków, Q = +2/3 )

Eksperymenty CDF i D0 na zderzacz proton – antyproton w Fermilabie (  $E_{CM} = 1.8 \text{ TeV}$  )

**Kwark t jest b. niestabilny**  
 (  $\tau \sim 10^{-25} \text{ s}$  ) i po kreacji rozpada się zbyt szybko, aby utworzyć jakiegokolwiek hadrony

**Dominujący kanał rozpadu t**  
 $t \rightarrow b + W^+$  (  $m_t \gg m_W$  )  
**Rozpady  $W^+$**   
 $W^+ \rightarrow q_1 + \bar{q}_2$  i  $W^+ \rightarrow l^+ + \nu_l$



(2008)  $M_{top} = 170.9 \pm 1.1 \text{ (stat)} \pm 1.5 \text{ (syst)} \text{ GeV } / c^2$

## Model Standardowy :

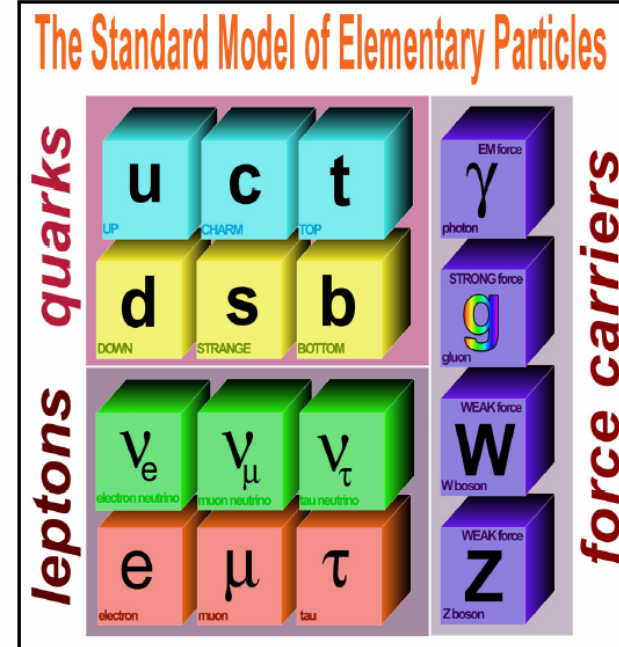
### 3 rodziny kwarków i leptonów o spinie $1/2$

#### Neutralne leptony – neutrina i antyneutrina :

- oddziałują tylko słabo
- neutrina i antyneutrina – jedyne fundamentalne fermiony o masie równej zero
- w Naturze istnieją tylko **lewoskrętne neutrina** oraz **prawoskrętne antyneutrina**
- oddzielne zachowanie 3 liczb leptonowych

$$L_e, L_\mu, L_\tau$$

Rodziny leptonowe :  
naładowany ( $e, \mu, \tau$ ) i  
neutralny lepton ( $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ )



Dane ze zderzacza  $e^+e^-$  LEP ( pomiar szerokości rezonansu  $Z^0$ ) są zgodne z istnieniem tylko 3 zapachów neutrin ( $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ )

#### Silna ewidencja doświadczalna na oscylacje neutrin :

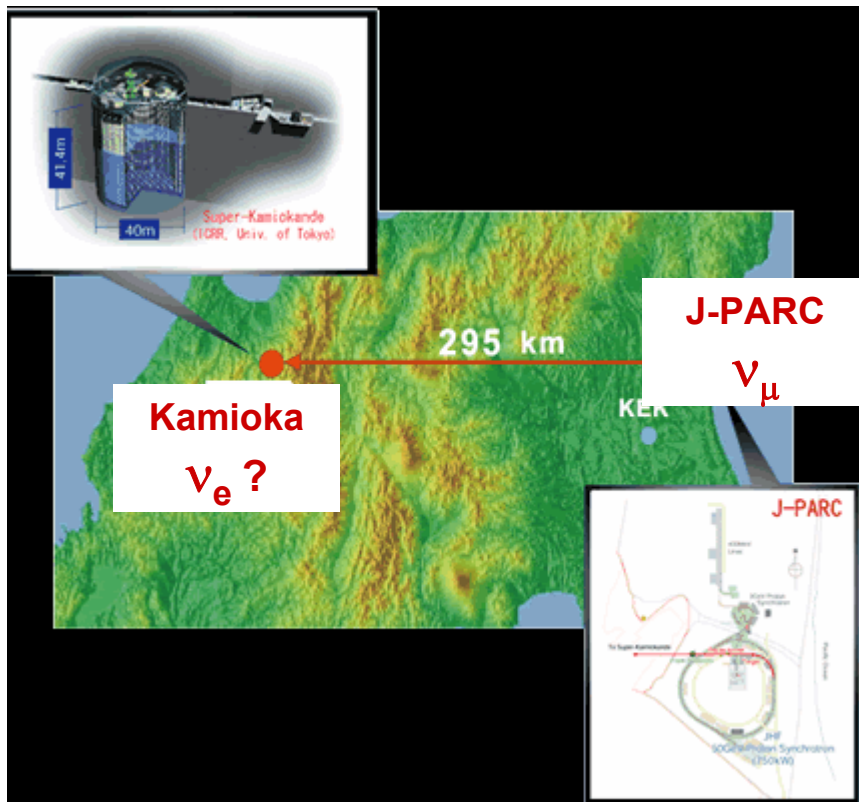
eksp. ze słonecznymi, atmosferycznymi, reaktorowymi i akceleratorowymi neutrinami

- przynajmniej 2 typy neutrin mają masę i 3 zapachy leptonowe się mieszają
- Model Standardowy wymaga modyfikacji

# J-PARC ( Japan Proton Accelerator Complex), Tokai

Nowy ośrodek akceleratorowy z synchrotronem protonowym ( $E_p = 50 \text{ GeV}$ ) dostarczający bardzo intensywne wiązki protonów, a tym samym intensywne wiązki wtórnych, w tym również neutrinowych

Eksperyment **T2K** - badania oscylacji neutrin



## Akceleratorowy eksperyment z długą bazą pomiarową

**Zasada działania:**

Poszukiwanie sygnałów oddziaływań neutrin elektronowych w detektorze **SuperKamiokande** (wodny detektor Czerenkowa) pochodzących z oscylacji pierwotnych neutrin mionowych produkowanych w laboratorium **J-PARC**.

$$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{e} ??$$

Krakowska grupa fizyków, inżynierów i techników uczestniczy w eksp. T2K

# Wielki Zderzacz Hadronów **LHC** ( **L**arge **H**adron **C**ollider ) w **CERN**

## Eksperymenty **ALICE**, **ATLAS**, **CMS**, **LHCb**

### Bardzo dobre działanie detektorów Pierwsze analizy / publikacje

zderzacz protonów

$$E_{\text{CM}} = 3.5 + 3.5 = 7 \text{ TeV}$$

( docelowo 14 TeV )



Krakowskie grupy fizyków, inżynierów i techników uczestniczą w eksperymentach **ALICE**, **ATLAS** i **LHCb**

- poszukiwanie cząstki Higgsa – ostatniej brakującej cegiełki Modelu Standardowego

**Skalarna cząstka Higgsa** związana z mechanizmem spontanicznego łamania symetrii w zunifikowanej teorii oddziaływań elektroslabych Modelu Standardowego

- bogaty program fizyki b ( łamanie parzystości CP – eksp. **LHCb** )
- badanie własności plazmy kwarkowo-gluonowej ( zderzenia ciężkich jąder – **ATLAS**, **ALICE** )
- Poszukiwanie cząstek supersymetrycznych ( Nowa Fizyka )

**LHC – fabryka supersymetrii ??**

Supersymetria – symetria łącząca cząstki o różnych spinach fermion ↔ bozon