

#### Urządzenia do rejestracji cząstek

- Co chcemy zmierzyć i jakie to narzuca warunki aparaturze pomiarowej.
- Geometria detektorów w eksperymentach ze stałą tarczą i w eksperymentach na zderzaczach (akceleratorach wiązek przeciwbieżnych).
- Cząstki mierzone bezpośrednio i pośrednio
- Procesy oddziaływania cząstek z materią wykorzystywane w detektorach cząstek

 Jak rozróżnić cząstki docierające do detektora po ich "zachowaniu" w aparaturze pomiarowej z wykorzystaniem przykładów stanów końcowych dla oddziaływań e+e- w oparciu o dane z eksperymentu DELPHI.

Śladowe detektory krzemowe i detektory
Czerenkowa – standardowe detektory
współczesnych eksperymentów

A.Zalewska

## Co chcemy zmierzyć

## Co tylko się da:

- Położenie cząstki (w detektorach śladowych),
- Pęd i ładunek cząstki (umieszczając detektory śladowe w polu magnetycznym),
- Energię cząstki (w kalorymetrach elektromagnetycznych i hadronowych),
- Prędkość (w detektorach Czerenkowa, w detektorach promieniowania przejścia, w oparciu o pomiar strat energii na jonizację)
- Masę, co oznacza identyfikację cząstki (np. w oparciu o łączny pomiar prędkości i pędu cząstki)
- Spin, parzystości i inne liczby kwantowe, na ogół w dedykowanych eksperymentach



Przypadek oddziaływania ciężkich jonów w eksp. NA49 oraz symulacja oddziaływania w eksp. ALICE ("plasterek" odpowiadający 1/8 aparatury pomiarowej



## Kilka zasad obowiązujących przy budowie aparatury w eksperymentach fizyki cząstek

- Aparatura eksperymentalna składa się z wielu detektorów, spełniających różne funkcje, aby zmierzyć możliwie wszystkie rodzaje cząstek i w możliwie pełnym zakresie kinematycznym,
- Pokrycie kąta bryłowego zależy od tego, czy eksperyment bada zderzenia przeciwbieżnych wiązek czy zderzenia wiązka-tarcza.

Kolejność umieszczania detektorów począwszy od punktu oddziaływania pierwotnych cząstek: najbliżej umieszcza się detektory śladowe, aby zmierzyć położenia cząstek jak najmniej zaburzone procesami oddziaływania cząstek z materią detektora, a dopiero później kalorymetry, w których mierzy się energię cząstek, wykorzystując procesy oddziaływania prowadzące do destrukcji cząstek. Na ogól eksperymenty wyposażone są w komory śladowe umieszczone w obszarze kalorymetrów, które służą do pomiaru torów leptonów μ oraz w detektory służące do pomiaru prędkości cząstek

## Typowa aparatura pomiarowa współczesnego eksperymentu

 Typowy jest tzw. detektor uniwersalny czyli układ wielu różnego typu detektorów, które łącznie mierzą "co tylko się da" dla tych cząstek, które do nich docierają.

• W przypadku aparatury w eksperymencie przy akceleratorze wiązek przeciwbieżnych oznacza to pokrycie detektorami możliwie pełnego kąta bryłowego brak jest detektorów jedynie w obszarze rury akceleratora — przykładem takiej aparatury jest aparatura eksperymentu DELPHI w CERN-ie, w którym badano oddz. e+e- przy energiach 90-209 GeV

 W przypadku eksperymentu typu wiązka-tarcza spektrometr również składa się z wielu detektorów, ale ze względu na ruch układu środka masy wyróżniony jest kierunek wiązki i detektorami pokrywa się stosunkowo mały obszar kąta bryłowego wokół tego wyróżnionego kierunku — przykładem takiej aparatury jest układ detektorów eksperymentu NA48 w CERN-ie, badającego rozpady mezonów K<sup>0</sup>

# Aparatura eksperymentu DELPHI

Przykład aparatury pomiarowej dla eksperymentu przy zderzaczu - rura akceleratora otoczona jest detektorami "beczki", a ta z dwu stron zamknięta jest przez "korki"; wewnątrz nadprzewodzącej cewki umieszczone są detektory śladowe i do identyfikacji cząstek, a na zewnątrz - kalorymetry i detektory śladowe do pomiaru mionów



# Detektor eksperymentu ATLAS



Aparatura eksperymentu ATLAS w podziemnej hali eksperymentalnej: wysokość detektora – 22 metry, długość – ponad 40 metrów

# Aparatura eksperymentu NA48

Przykład aparatury pomiarowej dla eksperymentu z zewnętrzną wiązka, w tym przypadku wiązką mezonów K<sup>0</sup> - różnego typu detektory umieszczone są wzdłuż kierunku lotu wiązki



A.Zalewska

# Cząstki mierzone bezpośrednio i pośrednio

• Bezpośrednio mierzy się te cząstki, które żyją dostatecznie długo (powyżej 10<sup>-10</sup> sek), aby dotrzeć do detektorów (pierwszy detektor znajduje się zwykle w odległości pojedynczych centymetrów od punktu pierwotnego oddziaływania), np. fotony, elektrony, leptony µ, mezony π i K, protony, neutrony, hiperony Lambda i Ksi (trzeba jednak pamiętać o tym, że rozkład czasów życia dla cząstek nietrwałych –  $\mu$ ,  $\pi$ , K,  $\Lambda$ ,  $\Xi$  – jest wykładniczy)

 Cząstki o czasie życia między 10<sup>-12</sup> sek a 10<sup>-13</sup> sek (leptony tau, cząstki zawierające ciężkie kwarki c i b) identyfikuje się, mierząc w detektorach cząstki pochodzące z ich rozpadów i rekonstruując punkt rozpadu w oparciu o te pomiary. Wymaga to detektorów o bardzo dobrej zdolności rozdzielczej dla pomiarów położenia i pędu cząstek (stąd "kariera" wspomnianych dalej detektorów krzemowych i dużych detektorów gazowych typu TPC),

• Dobry kalorymetr elektromagnetyczny pozwala czasem na identyfikację rozpadu mezonu  $\pi^0$  na dwa fotony, czyli cząstki o czasie zycia ok.  $10^{-16}$  sek,

 Metody identyfikacji cząstek rozpadających się na drodze oddziaływań silnych... wymagają oddzielnego A.Zalewska
<sup>9</sup>

## Zasada działania detektorów cząstek

- W ostatecznym rachunku sprowadza się do wykorzystywania oddziaływań elektromagnetycznych cząstek z atomami materiału detektora, wystarczy więc dobrze poznać oddziaływania cząstek naładowanych i fotonów z materią,
- W przypadku detektorów służących do badania oddziaływań silnych czy słabych najpierw w takim oddziaływaniu powstają cząstki naładowane i fotony i te wtórne cząstki rejestrujemy w detektorach poprzez ich oddziaływania elektromagnetyczne,
- Najczęściej wykorzystywane w detektorach procesy elektromagnetycznych oddziaływań cząstek z materią:
  - Jonizacja i wzbudzenie atomów ośrodka,
  - Promieniowanie hamowania,
  - Proces produkcji par e+e-
  - Scyntylacje
  - Promieniowanie Czerenkowa
- Poza tym coraz częściej wykorzystuje się też promieniowanie przejścia.

## Jonizacja ośrodka przez cząstkę naładowaną



Przechodząc przez ośrodek detektora, cząstka naładowana jonizuje jego atomy. Większość tych oderwanych elektronów znajduje się w odległości mniejszej niż 1 µm od toru cząstki, co oznacza, że teoretycznie możliwe jest osiągnięcie takiej dokładności pomiaru położenia cząstki. W rzeczywistości udało się otrzymać taką dokładność tylko dla małego detektora krzemowego oraz dla pomiarów w emulsjach jądrowych Zjawisko jonizacji wykorzystywane jest przede wszystkim w gazowych i półprzewodnikowych detektorach śladowych (służących do pomiaru położenia cząstek)

## **Śladowe detektory gazowe**

 Powszechnie stosowane w eksperymentach fizyki cząstek, ich wynalazca (G.Charpak) uhonorowany został nagrodą Nobla z fizyki

 Na jonizację pojedynczego atomu gazu potrzeba średnio 30 eV

 Zasadnicze elementy budowy detektora gazowego: katoda (może być podzielona na segmenty) i anoda (najczęściej w postaci drutów), między którymi przyłożona jest różnica potencjałów. Elektrony jonizacji poruszają się w polu elektrycznym w kierunku anody

 W większości detektorów gazowych przyłożone napięcie jest tak duże, że w pobliżu anody pierwotny sygnał ulega zwielokrotnieniu (typowo 10000 razy) na skutek wielokrotnej jonizacji wtórnej spowodowanej przez fakt, że elektrony jonizacji zyskują od pola elektrycznego energię wystarczającą na zjonizowanie dalszych atomów.

 W śladowych detektorach gazowych typowa dokładność pojedynczego pomiaru położenia cząstki wynosi 50 - 100 µm

## **Śladowe detektory gazowe**

•W zależności od typu detektora gazowego, położenie cząstki wyznacza się z pozycji drutów, do których dotarły "rozmnożone" elektrony jonizacji, z czasu dryfu elektronów do drutu lub wykorzystuje się obie te informacje łącznie (patrz komora TPC)



Zdolność rozdzielcza pomiaru położenia cząstki zależna od dokładności pomiaru czasu i prędkości dryfu oraz od dokładności pomiaru amplitudy sygnałów na drutach. Gdy położenie cząstki wyznaczane z pozycji drutu z sygnałem od cząstki, to zdolność rozdzielcza  $\sigma = d/\sqrt{12}$ 

## **TPC- Komora Projekcji Czasowej**



Rys. 14. Szkic budowy urządzenia TPC

Najbardziej nowoczesny rodzaj detektora gazowego -- dostarcza trójwymiarowej informacji o położeniu cząstek: dwie współrzędne wyznacza się z rozkładu sygnału od dryfujących elektronów na dwu-wymiarowych padach na obu końcach cylindra, a trzecią współrzędną z czasu dryfu elektronów do padów.

## Straty energii na jonizację dla cząstek naładowanych



Wielkość strat energii na jonizację zależy od prędkości cząstki, więc pomiar tych strat i pędu cząstki pozwala w pewnym zakresie pędu na ich identyfikację. Najpierw ze wzrostem prędkości cząstki straty maleją, gdyż cząstka coraz krócej przebywa w polu pojedynczych atomów. Jednocześnie pole cząstki coraz głębiej wnika w ośrodek, co przeważa i prowadzi do wzrostu strat energii. W końcu powstałe swobodne elektrony izolują elektrycznie dalsze atomy od wpływu cząstki i nastepuje ustalenie wielkosci strat energii cząstki na jonizację. A.Zalewska 15

## **TPC- pomiar strat energii** na jonizację dla cząstek naładowanych



Komory TPC wykorzystywane tez są do pomiaru strat energii na jonizację, a więc wspomagają identyfikację cząstek naładowanych, co ilustruje powyższy rysunek. Widoczne dobre wydzielenie poszczególnych krzywych wymaga ok. 200 pomiarów wartości strat energii wzdłuż toru cząstki

## Komora TPC wypełniona ciekłym argonem



Nowatorska idea – zastosowanie do badań neutrin, nie stosuje się wzmocnienia sygnału w detektorze, gdyż gęstość ciekłego argonu wystarczająca, aby sygnał od pierwotnej jonizacji był wystarczająco duży (kilkaset elektronów na mm drogi cząstki)

#### Kalorymetr elekromagnetyczny

Służy do pomiaru energii elektronów (pozytonów) i fotonów

• Wykorzystuje się fakt, że w materiałach o dużym Z już przy energiach rzędu 10 MeV w oddziaływaniach elektronów z materią dominuje proces wypromieniowania fotonu, a w oddziaływaniach fotonów proces konwersji fotonu na parę e+e- (*patrz rozkłady na następnej stronie*)

 W wyniku tych oddziaływań powstaje kaskada elektronowo-fotonowa o elektronach i fotonach coraz niższych energii, którą trzeba zarejestrować w detektorze i "przetłumaczyć pomiar" (kalibracja kalorymetru) na energię cząstki

Buduje się kalorymetry elektromagnetyczne dwu rodzajów: jednorodne, w których proces oddziaływania i proces służący detekcji zachodzą w tym samym materiale, np. w kryształach Nal czy Csl i warstwowe, w których w pasywnej warstwie ciężkiego materiału (np. Pb) zachodzą oddziaływania, a w aktywnej warstwie detekcyjnej rejestruje się "skutki" rozwoju kaskady (np. elektrony jonizacji w detektorze gazowym)

#### Procesy oddziaływania elektronów i fotonów z materią



#### Procesy oddziaływania elektronów i fotonów z materią



Elektrony i pozytony w ołowiu - proces wypromieniowania fotonu (bremsstrahlung) dominuje już przy energii 10 MeV



W Pb czy Nal prawdopodobieństwo konwersji fotonu na parę e+e- jest rzędu 70-80% już przy energii 10 Mev

A.Zalewska

### Pomiar w kalorymetrze elekromagnetycznym DELPHI



Kształt kaskady wytworzonej przez pojedynczy foton i dwa bliskie fotony, na które rozpadł sie mezon  $\pi^{\circ}$  - ilustracja do możliwości zidentyfikowania tak bardzo krótkożyciowej cząstki jak mezon  $\pi^{\circ}$ 

A.Zalewska

#### **Kalorymetr hadronowy**

Służy do pomiaru energii hadronów

 Wykorzystuje się fakt, że w materiałach o dużym Z wysokie jest prawdopodobieństwo, że hadron oddziała silnie, tworząc inne hadrony, które znów z dużym prawdopodobieństwem oddziałają silnie

 W wyniku tych oddziaływań powstaje kaskada hadronowa. W miarę degradacji energii hadronów zaczynają dominować oddziaływania elektromagnetyczne detekcja rozwoju kaskady często bazuje na rejestracji sygnału od elektronów jonizacji

 Kalorymetr hadronowy ma na ogół strukturę warstwową: płyty ciężkiego materiału, w którym zachodzą oddziaływania poprzekładane sa wasrtwami detektorów, np. gazowych do rejestracji elektronów jonizacji



#### **Kalorymetr hadronowy**



#### Rozwój kaskady hadronowej

 Typowa dokładność pomiaru energii w kalorymetrze hadronowym jest rzędu 100%/sqrt(E)

• Czynniki będące źródłem tej niepewności: fluktuacje krotności cząstek produkowanych w zderzeniach hadronów, obecność neutrin unoszących część energii i nie oddziałujących w detektorze, składowa elektromagnetyczna związana z produkcją mezonów  $\pi^0$ , wysoka energia progowa, energia wiązania w przypadku zderzeń z jądrami, ...

## Procesy oddziaływania leptonów µ z materią



Miony w żelazie - ze względu na dużo większą masę niż masa elektronów procesy emisji fotonów czy produkcji par w oddziaływaniach elektromagnetycznych mionów zaczynają odgrywać rolę dopiero przy energiach rzędu GeV, więc miony praktycznie nie wytwarzają kaskad i dominującym procesem oddziaływania jest jonizacja atomów ośrodka

## Identyfikacja cząstek na podstawie typowych zachowań

- Podsumowanie typowych "zachowań" cząstek w detektorze uniwersalnym bez uwzględnienia wyspecjalizowanych detektorów:
- wszystkie cząstki naładowane tworzą tory w detektorach śladowych
- naładowane i neutralne hadrony tworzą kaskady hadronowe w kalorymetrze hadronowym
- elektrony, pozytony i fotony tworzą kaskady elektromagnetyczne w kalorymetrze elektromagnetycz-nym
- miony tworzą tory w detektorach śladowych, nie tworzą kaskad w kalorymetrach
- neutrina oddziałują wyłącznie słabo i zarejestrowanie ich oddziaływań wymaga dedykowanych eksperymentów przy użyciu detektorów o bardzo dużej masie
- Następne strony pokazują kilka przypadków oddziaływań e+e- zarejestrowanych w detektorze DELPHI, które posłużą zilustrowaniu powyższego podsumowania

## **Elektrony w detektorze DELPHI**



Przykład produkcji bozonu Z<sup>0</sup> rozpadajacego się następnie na parę e+e- -- elektron i pozyton tworzą tory w detektorach śladowych otaczających rurę akceleratora i kaskady w kalorymetrze elektromagnetycznym

A.Zalewska

#### Leptony µ w detektorze DELPHI



Przykład produkcji bozonu Z0 rozpadającego się następnie na parę µ+µ- -- miony tworzą tory w detektorach śladowych otaczających rurę akceleratora, nie tworzą kaskad w kalorymetrach, dają sygnały w detektorach śladowych (nazywanych komorami mionowymi) umieszczonych wewnątrz i na zewnątrz kałorymetru hadronowego 27

#### Hadrony w detektorze DELPHI



Przykład produkcji bozonu Z0 rozpadającego się następnie na parę kwark-antykwark, które hadronizują w dwa strumienie cząstek -- cząstki końcowe to głównie hadrony, które tworzą tory w detektorach śladowych (jeśli są naładowane) i kaskady w kalorymetrze hadronowym (również te neutralne, np.neutrony)

## **Śladowe detektory krzemowe**

"Przebój" ostatniego dwudziestolecia, gdyż tylko one pozwalają mierzyć położenie cząstek z dokładnością lepszą niż 10 µm dla dużego układu detekcyjnego złożonego z setek krzemowych płytek (typowa powierzchnia płytki to ok. 20 cm<sup>2</sup>), a taka dokładność jest konieczna w badaniach krótkożyciowych cząstek zawierających ciężkie kwarki b i c, których czasy życia są rzędu 10<sup>-12</sup>—10<sup>-13</sup>sek

 Zasady działania: najczęściej diody krzemowe spolaryzowane zaporowo – ma miejsce detekcja ładunku jonizacji ("dziury" i elektrony) wytworzonego przez cząstkę przechodzącą przez zubożony obszar wysoko-oporowego krzemu, poza tym detektory CCD, a ostatnio detektory z celami CMOS

•Zastosowanie planarnej technologii pozwala na produkcję diod niemal dowolnych kształtów i w odległościach praktycznie tylko limitowanych rozmiarami elektroniki (również krzemowej, o wielkiej skali integracji i odpornej radiacyjnie)

 Detektory krzemowe umieszcza się na ogół jak najbliżej punktu pierwotnego oddziaływania i wtedy mówi się o krzemowych detektorach wierzchołka

## Diody spolaryzowane zaporowo - zasada działania

#### Detektory paskowe:

 diody w kształcie pasków, dokładny pomiar jednej współrzędnej czyli prostopadle do pasków, stosowane od początku lat 80-tych



Wybór krzemu spośród innych półprzewodników podyktowany jest jego znakomitymi własnościami z punktu widzenia potrzeb detektorowych:

 -- średnia energia potrzebna na zjonizowanie jednego atomu wynosi 3.6 eV, co oznacza duży sygnał z cienkiego detektora (typowo 25000 par elektron-dziura dla 300 µm krzemu)

 ponieważ sygnał nie wymaga wzmocnienia w samym detektorze, a cele pomiarowe są bardzo małe, stąd świetna dokładność w pomiarze położenia cząstek

 -- czas zbierania ładunku wygenerowanego przez cząstkę jest krótszy niż 20 nsek, są to więc bardzo szybkie detektory

 pomiar strat energii cząstek na jonizację dla detektorów krzemowych umieszczonych w polu magnetycznym wspomaga też identyfikację cząstek

-- łatwa jest obróbka mechaniczna i chemiczna krzemu, a SiO<sub>2</sub> jest znakomitym izolatorem

### Krzemowy detektor eksperymentu DELPHI



Był to największy z krzemowych detektorów śladowych zainstalowanych w eksperymencie przed rokiem 2002. Na ok. 2m<sup>2</sup> aktywnego krzemu składało się ok. 900 płytek detekcyjnych, które w sumie zawierały ok. 1.5 miliona podstawowych cel detekcyjnych (diody w k<u>sztakc</u>je pasków i kwadrat<u>ó</u>w)

## Krzemowy detektor eksperymentu DELPHI



Fotografia przedstawia krzemowy detektor wierzchołka DELPHI przed zamontowaniem w eksperymencie w 1997 roku

## Konstrukcja krzemowego detektora eksperymentu ATLAS



Krzemowy detektor eksperymentu ATLAS ma powierzchnię ok. 80 m<sup>2</sup> aktywnego krzemu

A.Zalewska

## Konstrukcja krzemowego detektora eksperymentu CMS



# Krzemowy detektor eksperymentu CMS ma powierzchnię ponad 200 m<sup>2</sup> aktywnego krzemu

#### **Promieniowanie Czerenkowa**

Identyfikacja cząstek – najlepsze są metody z wykorzystaniem pomiaru prędkości cząstek poprzez: pomiar strat energii na jonizację, czasu przelotu, promieniowania Czerenkowa, promieniowania przejścia

Promieniowanie Czerenkowa polega na emisji fotonów wzdłuż drogi cząstki, która w danym ośrodku porusza się prędzej niż światło w tym ośrodku – detektory Czerenkowa są teraz powszechnie wykorzystywane w eksperymentach akceleratorowych i w badaniach oddziaływań neutrin.



#### **Promieniowanie Czerenkowa**

Sygnał Czerenkowa jest bardzo mały – straty energii na to promieniowanie są typowo rzędu 1% strat energii na jonizację

Liczba wyemitowanych fotonów na jednostkę długości drogi cząstki zależy od ich długości fali



Przykłady materiałów wykorzystywanych w detektorach Czerenkowa

medium	n	$\theta_{max}(\beta=1)$	$N_{ph} (eV^{-1} cm^{-1})$
air	1.000283	1.36	0.208
isobutane	1.00127	2.89	0.941
water	1.33	41.2	160.8
quartz	1.46	46.7	196.4

## Typy detektorów Czerenkowa

#### Progowe detektory Czerenkowa

Stosowane w eksperymentach wiązka – tarcza (małe ograniczenia miejsca) już w latach 60-tych, mierzony całkowity sygnał fotonowy, 2-3 detektory z różnymi progami pozwalały na rozróżnianie  $\pi$ , K, p

#### Różniczkowe detektory Czerenkowa

Rejestracja stożka promieniowania Czerenkowa dla cząstek o różnej masie, ale ze współosiowej wiązki – na wiązkach cząstek wtórnych służą do analizy składu wiązki

#### Detektory typu RICH (Ring Imaging Cerenkov)

Pełne obrazowanie stożka promieniowania Czerenkowa, rozwój detektorów fotonów i niskoszumowej elektroniki pozwolił na ich zastosowanie w eksperymentach przy zderzaczach

# Detektor SuperKamiokande Wodny detektor Czerenkowa

e/μ



Pierwsza obserwacja oscylacji neutrin w 1998 roku



## Detektor SuperKamiokande



#### Zdjęcia sprzed wypadku w 2001 roku

## Zasada działania detektora SuperK

Zbiornik z bardzo czystą wodą, - jeśli naładowane cząstki powstałe w oddziaływaniach neutrin poruszają się w wodzie szybciej niż światło, to wzdłuż ich torów emitowane jest promieniowanie Czerenkowa (niebieskawe światło z widzialnej części widma).



Światło, w postaci pierścienia, rejestruje się przy pomocy fotopowielaczy

 rozkład i czas powstania sygnału służą do wyznaczenia kierunku naładowanej cząstki (-> kierunku neutrina),

 wielkość sygnału, kąt rozwarcia stożka oraz identyfikacja cząstki naładowanej pozwalają wyznaczyć jej energię (-> energię i rodzaj neutrina)





# SuperK - rejestracja e i µ.



#### $v_e N \rightarrow e N'$

 $\nu_{\mu} N \rightarrow \mu N'$ 

# Detektor ICECUBE - objętość 1 km<sup>3</sup>



Poszukiwanie kosmicznych źródeł neutrin skrajnie wysokich energii

Detektor ICECUBE budowany jest w lodzie w pobliżu bieguna południowego, od kilku lat zbiera już dane mniejszy detektor AMANDA

A.Zal



## Wstępne wyniki z AMANDY



## Podwodne teleskopy neutrinowe

Trzy różne programy R&D realizowane w Morzu Śródziemnym – program ANTARES w pobliżu Tulonu, na głębokości 2400 m, udane testy fragmentu detektora → cel: detektor o objętości ~1km<sup>3</sup>

