Warsztaty Funduszu na Rzecz Dzieci

Jadwisin, 20.04.1999

dr hab. Grzegorz Wrochna

Instytut Problemów Jądrowych im. A.Sołtana

wrochna@fuw.edu.pl http://cmsdoc.cern.ch/~wrochna

### Detekcja cząstek elementarnych

- Jak zobaczyć pojedynczą cząstkę?
- Jak rozpoznać co to za cząstka?
- Jak zmierzyć jej pęd, energię, masę itp?
- Jak dostrzec cząstkę żyjącą <10<sup>-20</sup> s?
- Jak zmierzyć czas życia >10<sup>30</sup> lat?
- Jak zmierzyć strumień neutrin przelatujących przez Ziemię bez żadnego oddziaływania?
- Jak zobserwować kwarki i gluony, które nie mogą istnieć samodzielnie?
- Jak odkryć nową cząstkę?

## Detekcja cząstek

Pod pojęciem detekcji rozumiemy:

- zaobserwowanie cząstki
- rejestracja obserwacji
- pomiar prędkości, pędu, energii, itp.
- identyfikacja

#### Podstawowe zjawiska

Cząstka naładowana przechodząc przez materię manifestuje swoją obecność poprzez

- jonizację ośrodka
- emisję fotonów

<u>Jonizacja</u>

polega na wybijaniu elektronów z atomów ośrodka.

W półprzewodnikach przechodząca cząstka może tworzyć pary elektron-dziura.

#### <u>Emisja fotonów</u>

- Scyntylacja cząstka przechodząca przez niektóre substancje ( Nal) pobudza atomy, które następnie emitują światło (fotony).
- Promieniowanie Czerenkowa cząstka poruszająca się w ośrodku szybciej niż światło wysyła fotony w stożku przypominającym falę uderzeniową naddźwiękowego samolotu.
- Promieniowanie przejścia emitowane przez cząstkę na granicy dwóch ośrodków
- Promieniowanie hamowania emitowane przez cząstkę zwalniającą w ośrodku.

### **Detektory wizualne**

#### Emulsja fotograficzna

jonizacja powoduje zaciemnienie emulsji wzdłóż toru cząstki

#### Komora mgłowa (Wilsona)

w przechłodzonym gazie na zjonizowanych centrach kondensują się krople tworzące obraz toru cząstki, który może być np. sfotografowany.

#### Komora pęcherzykowa

w przegrzanej cieczy (np. ciekły wodór) na zjonizowanych centrach tworzą się pęcherzyki gazu tworzące obraz toru cząstki, który może być np. sfotografowany.



### Komora pęcherzykowa





**CERN** photos 1970





#### "Komora pęcherzykowa" w kuchni

W kuchence mikrofalowej ogrzewamy wodę w szklanym dzbanku. Gdy zaczną pojawiać się pierwsze duże bąble pary, dzbanek wyjmujemy z kuchenki. Do dzbanka szybko wrzucamy torebkę herbaty ekspresowej. Nagle woda zaczyna gwałtownie wrzeć.

Uwaga! Gwałtownie wrząca woda wylewa się z dzbanka i może nas poparzyć!

W kuchence mikrofalowej woda ogrzewana jest równomiernie w całej objętości

(w przeciwieństwie do np. czajnika na palniku gazowym) i wrzenie "nie ma od czego się zacząć".

Temperatura wody przekracza 100°C.

Jest to tzw. ciecz przegrzana.

Torebka herbaty spełnia rolę "cząstki elementarnej".

Nierówności jej powierzchni stają się centrami, wokół których rozpoczyna się wrzenie przegrzanej cieczy.

### **Detektory gazowe**

Cząstka jonizuje gaz między dwoma elektrodami o wysokim napięciu. Następuje wyładowanie dające rejestrowalny impuls elektryczny.

Najczęściej spotykane:

#### Licznik Geigera-Müllera

Historycznie pierwszy detektor elektroniczny. Katodą jest rurka metalowa, anodą — drut w jej środku, podłączony do wzmacniacza i głośnika.

Przejście cząstki powoduje słyszalny w głośniku trzask.

#### Komory drutowe

wykorzystują silne pole elektryczne wokół drutu.

- Komora wielodrutowa położenie cząstki określone jest przez numer drutu dającego sygnał (1-2mm).
- Komora dryfowa położenie cząstki określone jest przez czas dryfu elektronów jonizacji (~50μm/ns) do najbliższego drutu (100-200μm).
- Komora z odczytem katodowym położenie cząstki określone jest przez stusunek ładunku indukowanego na różnych elementach katody (50-100µm).
- Komora proporcjonalna wielkość sygnału jest proporcjonalna do liczby zarejestrowanych cząstek. Wykorzystywana m. in. do pomiaru energii kiedy cząstka pierwotna produkuje dużą liczbę cząstek wtórnych.

### **Detektory gazowe**



Wyładowania w gazie wzdłóż torów mionów kosmicznych.



### Nobel dla Charpaka





Do lat 60-tych cząstki elementarne badano głównie rejestrując ich odziaływania w emulsjach i na kliszach fotograficznych. Analiza takiego zdjęcia wymagała ręcznego pomiaru współrzędnych wielu puktów na torze każdej cząstki. Gigantycznym nakładem pracy można było przeanalizować ~10 000 zdjęć z trwającego kilka lat eksperymentu.

Przełomowym momentem było wynalezienie w 1968 r. komory wielodrutowej.

Detektor ten pozwolił na całkowicie automatyczną, elektroniczną rejestrację odziaływań cząstek. Pozwoliło to na pełną, komputerową ich analizę, co dało możliwość przebadania milionów interesujących przypadków z jednego eksperymentu.

Georges Charpak, Polak z pochodzenia, ur. w 1924 r. w Dąbrowicy. Ukończył studia na College de France w Paryżu. Od 1959r pracuje w CERNie. W 1992 r. został uhonorowany nagrodą Nobla za prace nad detektorami cząstek elementarnych, a w szczególności za wynalezienie komory wielodrutowej.

### Detektory półprzewodnikowe

Cząstka przechodząca przez półprzewodnik tworzy pary elektron-dziura. Powoduje to przepływ rejestrowalnego prądu.

Detektory mikropaskowe

Położenie cząstki określone jest przez elektrodę odczytową w kształcie paska o szerokości rzędu 100µm i długości rzędu 10cm.



**Detektory mozaikowe** (pixel detectors)

Położenie cząstki określone jest przez elektrodę odczytową w kształcie prostokąta o bokach rzędu 10µm.

# Detektory optyczne

Detektor optyczny składa się z przezroczystego ośrodka i elementu światłoczułego. W ośrodku, przechodząca cząstka powoduje scyntylację, emisję promieniowania Czerenkowa lub promieniowania przejścia.

Detektor neutrin Super-Kamiokande wykorzystuje zbiornik z 50 000 ton wody jako ośrodek promieniowania Czerenkowa.

Detektor promieniowania kosmicznego Amanda jako scyntylator wykorzystuje lód na Antarktydzie.

Elementem światłoczułym jest zwykle fotopowielacz lub fotodioda.

#### Fotopowielacz

Zespół specjalnie ukształtowanych elektrod umieszczonych w bańce próżniowej. Padający foton wybija z pierwszej elektrody elektron, który po przyspieszeniu w polu elektrycznym wybija kilka elektronów z drugiej elektrody. Każdy z wybitych elektronów jest znowu przyspieszany i wybija kilka nowych elektronów z następnej elektrody. Proces "powielania elektronów" jest kontynuowany aż do uzyskania mierzalnego prądu na ostatniej elektrodzie.



#### Fotodioda

to urządzenie półprzewodnikowe. Padający foton wytwarza nośniki (elektrony i dziury) umożliwiające przepływ prądu w kierunku zaporowym.

### AMANDA



Depth



Eiffel Tower as comparison (true scaling) zoomed in on AMANDA-A (top) AMANDA-B10 (bottom)

zoomed in on one optical module (OM)

# Cząstki długożyciowe

cząstka		czas życia τ	$\mathbf{c}\cdot \mathbf{ au}$	
foton	γ	8	$\infty$	
elektron	e <sup>–</sup>	8	~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	
neutrino	ν	8	∞	
proton	p <sup>+</sup>	>1.6 ·10 <sup>33</sup> lat	$\infty$	
neutron	n	887 s	2.7 ⋅10 <sup>8</sup> km	
mion	μ	2.2 ⋅10 <sup>–6</sup> s	659 m	
pion	$\pi^+$	2.6 ⋅10 <sup>–8</sup> s	7.8 m	
kaon	K <sup>+</sup>	1.2 ⋅10 <sup>–8</sup> s	3.7 m	
kaon	κ <sup>0</sup> L	5.2 ⋅10 <sup>–8</sup> s	15.5 m	
kaon	κ <sup>0</sup> s	0.9 ⋅10 <sup>−10</sup> s	2.7 cm	
$\Lambda^0 \Sigma^+ \Xi^{0-} \Omega^- \dots$		~ 10 <sup>–10</sup> s	~ 3 cm	
$\mathbf{D}^{0+} \mathbf{B}^{0+} \Lambda_{\mathbf{c}}^{\mathbf{+}} \Lambda_{\mathbf{b}}^{0}$		~ 10 <sup>-12</sup> s	~ 300 μm	
pion	<b>π</b> <sup>0</sup>	8.4 ⋅10 <sup>-17</sup> s	25 nm	
η,ψ, rezonanse		<10 <sup>-19</sup> s		

W praktyce bezpośredniej detekcji podlegają jedynie

 $\gamma$ , e<sup>±</sup>, p<sup>±</sup>, n,  $\mu^{\pm}$ ,  $\pi^{\pm}$ , K<sup>±</sup>, K<sup>0</sup><sub>L</sub>.

Inne cząstki badamy obserwując produkty ich rozpadu.

# Cząstki długożyciowe

#### Pomiar prędkości

## Możliwy tylko dla cząstek o niezbyt dużej energii poruszających się z prędkością istotnie mniejszą od *c*.

- czas przelotu między dwoma licznikami ∆t=d/v
- kąt stożka promieniowania Czerenkowa  $\sin\theta = v_c/v$

#### <u>Pomiar pędu</u>

#### Promień krzywizny toru w polu magnetycznym

**R = p / 0.3 B** [R]=m, [p]=GeV, [B]=T

#### Tor może być

- zaobserwowany bezpośrednio w emulsji fotograficznej, komorze mgłowej lub pęcherzykowej.
- wyznaczony przez szereg punktów zmierzonych
  - detektorem mikropaskowym lub mozaikowym
  - komorą drutową

#### Pomiar energii

Elektron i foton "grzęzną" w materii wywołując krótką kaskadę elektromagnetyczną.

Hadrony (p, n,  $\pi$ , K) wywołują kaskadę hadronową.

Liczba cząstek w kaskadzie jest proporcjonalna do energii cząstki pierwotnej.

Do jej zmierzenia może służyć

- scyntylator z fotopowielaczem lub fotodiodą
- komora proporcjonalna

Zespół takich detektorów mierzący energię nazywamy kalorymetrem.

# Identyfikacja cząstek

Cząstki długożyciowe identyfikujemy obserwując jak odziaływują z materią:

- cząstka naładowana ślad
- elektron, foton kaskada elektromagnetyczna
- hadron (p, n, π, K) kaskada hadronowa

Detektor uniwersalny składa się więc zwykle z 4 części:

- wewnętrzny detektor śladowy ("traker")
- kalorymetr elektromagnetyczny
- kalorymetr hadronowy
- zewnetrzny detektor śladowy (det. mionowy)

	γ	e	ν	<b>p</b> ,π, <b>K</b>	n	μ
traker	-	+	I	+	_	+
kalorymetr elektromag.	+	+		—	_	_
kalorymetr hadronowy	_		_	+	+	_
detektor mionowy	_	_	_	_	_	+

Obecność neutrina można rozpoznać jedynie po "brakującej energii" — pozornym złamaniu zasady zachowania.

Proton, kaon i pion można odróżnić wyznaczając masę cząstki, zmierzywszy uprzednio jej energię i pęd:

$$m^2 = E^2/c^4 - p^2/c^2$$

## Identyfikacja cząstek





## **Budowa detektora CMS**



# Cząstki krótkożyciowe

Cząstki krótkożyciowe badamy obserwując produkty ich rozpadu. Jeżeli znamy energie i pędy cząstek wtórnych to z zasad zachowania możemy wyliczyć energię, pęd i masę cząstki pierwotnej.

Jest to standardowa metoda odkrywania nowych cząstek:

**1. Zastanawiamy się na jakie cząstki mogłaby się ona rozpadać.** 

2. Dla każdego przypadku, w którym takie cząstki pojawiły się wyliczamy masę hipotetycznej cząstki pierwotnej i zaznaczamy ją na wykresie.

Jeżeli rzeczywiście była ona wytworzona w części obserwowanych przypadków, to na tle przypadkowych kombinacji dających rozmaite masy pojawi się "pik" w miejscu masy poszukiwanej cząstki.

### Rekonstrukcja zdarzenia



### Rekonstrukcja zdarzenia



### $H \rightarrow \gamma \gamma$ (80 < M<sub>H</sub> <140 GeV)



 $H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4$  leptony (130<M<sub>H</sub><500 GeV)



Przypadku z czterema wysokoenergetycznymi leptonami ( $e \$  lub  $\mu$ ) nie da się nie zauważyć.

Zwłaszcza pewna identyfikacja mionów ("złoty kanał") pozwala niemal całkowicie wyeliminować tło. *Precyzja:* 

σ (M<sub>H</sub>~170 GeV) = 1 GeV.



### Detekcja neutrin

Prawdopodobieństwo odziałania neutrina z materią jest tak małe, że neutrino może przelecieć przez Ziemię "nie zauważywszy" jej.

Nie ma więc szans na bezpośrednie zaobserwowanie pojedynczego neutrina. Jego obecność możemy jednak rozpoznać po "brakującej energii".

Jeżeli strumień neutrin jest bardzo silny, a detektor dostatecznie duży, to niektóre z nich oddziałają, np. zmieniając neutron w proton+elektron, lub wybijając elektron z atomu.

Detektory takie jak IMB czy Kamiokande obserwują neutrina wyprodukowane w atmosferze przez promieniowanie kosmiczne, mierzą strumień neutrin słonecznych, a nawet w 1987 zarejestrowały neutrina z wybuchu supernowej odległej o 170 000 lat świetlnych!

(Delta 2/1999)

### Rozpad protonu

Czy proton jest rzeczywiście cząstką trwałą?

Jest obiektem złożonym, czemu więc nie miałby się rozpaść?

Rzeczywiście, pierwsze teorie unifikacji odziaływań przewidywały rozpad po czasie rzędu ... 10<sup>29</sup> lat!

Dla porównania wiek Wszechświata ~10<sup>10</sup> lat.

Czy to ma sens? TAK! Potrafimy nawet taki czas zmierzyć!

Detektor Super-Kamiokande zawiera 50 000 ton wody,

czyli ~10<sup>34</sup> protonów. Średnio powinien więc obserwować 100 000 rozpadów rocznie. Przez rok nie zaobserwowano żadnego. Czas życia protonu jest zatem znacznie dłuższy.

Współczesne teorie supersymetryczne przewidują czas życia protonu ~10<sup>34</sup> lat. Super-Kamiokande zbliża się do tej granicy.

# Kwarki i gluony

Jak zaobserwować cząstki, które wogóle nie mogą istnieć samodzielnie, jak np. kwarki i gluony?

Nowopowstały kwark powołuje z próżni do istnienia pary kwark-antykwark kosztem swojej energii.

Łączy się z jednym lub dwoma z nich tworząc hadron. Pozostałe kwarki tworzą kolejne pary, aż do wyczerpania energii i połączenia wszystkich swobodnych kwarków w hadrony.

Powstały strumień hadronów nazywamy dżetem.

 $Z \rightarrow q \overline{q}$ 

Gluon może również dać początek parze kwark-antykwark i utworzyć dżet.

 $Z \rightarrow q \overline{q} g$ 

2 dżety 3 dżety