Warszawa, 22.09.2001

Grzegorz Wrochna

Instytut Problemów Jądrowych im. A.Sołtana

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

Jak odkryć nową cząstkę?

- Co to jest cząstka elementarna?
- Jak zobaczyć pojedynczą cząstkę?
- Jak rozpoznać co to za cząstka?
- Jak zmierzyć jej pęd, energię, masę itp?
- Jak dostrzec cząstkę żyjącą <10⁻²⁰ s?
- Jak zmierzyć czas życia >10³⁰ 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?

Literatura:

- http://hep.fuw.edu.pl/edu/
- DELTA 5/2000
- Fizyka w szkole 3,4/1999 i 1/2000

Pierwiastki

Otaczająca nas materia jest zbudowna z ~100 pierwiastków.

Pierwiastek to zbiór jednakowych atomów (ściślej: atomów o takiej samej liczbie atomowej Z).

Atomy mogą łączyć się w cząsteczki tworząc związki chemiczne.

Pułapka językowa: <u>cząsteczka</u> (chemiczna) jest znacznie większa od <u>cząstki</u> (elementarnej).

Pierwiastki układają się w <u>Tablicę Mendelejewa</u> w zadziwiający sposób odzwierciedlającą ich własności.

Struktura Tablicy Mendelejewa pozostawała tajemnicą do chwili powstania <u>mechaniki</u> <u>kwantowej</u>, która wyjaśniła prawa rządzące atomami.

Układ Okresowy Pierwiastków

	1																	18	
	\mathbf{H}_{1}																	₂ He	
1	1,008 Wodór	2											13	14	15	16	17	4,003 Hel	
	₃ Li	₄ Be											5 B	6 C	7 N	8 0	9 F	10 Ne	ļ
2	6,941 Lit	9,012 Beryl											10,81 Bor	12,011 Węgiel	14,007 Azot	15,999 Tlen	18,998 Fluor	20,179 Neon	
	11 Na	12 Mg											₁₃ Al	₁₄ Si	15 P	16 S	17 CI	18 Ar	
3	22,989 Sód	24,305 Magnez	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	26,982 Glin	28,086 Krzem	30,974 Fosfor	32,066 Siarka	35,453 Chlor	39,948 Argon	
	₁₉ K	₂₀ Ca	₂₁ Sc	22 Ti	₂₃ V	₂₄ Cr	₂₅ Mn	₂₆ Fe	27 Co	28 Ni	₂₉ Cu	30 Zn	₃₁ Ga	₃₂ Ge	33 As	₃₄ Se	35 Br	36 K 1	•
2 3 4 5 6 7	39,098 Potas	40,08 Wapń	44,956 Skand	47,90 Tytan	50,941 Wanad	51,996 Chrom	54,938 Mangan	55,847 Żelazo	58,933 Kobalt	58,70 Nikiel	63,546 Miedź	65,36 Cynk	69,72 Ga l	72,59 German	74,922 Arsen	78,96 Selen	79,904 Brom	83,80 Krypto	n
5	₃₇ Rb	₃₈ Sr	39 Y	₄₀ Zr	₄₁ Nb	42 Mo	43 Tc	₄₄ Ru	45 Rh	$_{46}$ Pd	₄₇ Ag	$_{48}$ Cd	49 In	₅₀ Sn	₅₁ Sb	₅₂ Te	₅₃ I	₅₄ Xe	ł
5	85,468 Rubid	87,62 Stront	88,906 Itr	91,22 Cyrkon	92,906 Niob	95,94 Molibden	96,906 Technet	101,07 Rubid	102,906 Rod	106,4 Pallad	107,868 Srebro	112,40 Kadm	114,82 Ind	118,69 Cyna	121,75 Antymon	127,60 Te ll ur	126,905 Jod	131,30 Kseno	
5	₅₅ Cs	56 Ba		72 Hf	₇₃ Ta	₇₄ W	₇₅ Re	₇₆ 0s	₇₇ Ir	₇₈ Pt	₇₉ Au	80 Hg	₈₁ TI	₈₂ Pb	₈₃ Bi	₈₄ Po	₈₅ At	₈₆ Rn	
6	132,905 Cez	137,34 Bar	*	178,49 Hafn	180,948 Tantal	183,85 Wolfram	186,207 Ren	190,2 Osm	192,22 I ryd	195,09 Platyna	196,967 Złoto	200,59 Rtęć	204,37 Tal	207,2 Ołów	208,98 Bizmut	208,892 Polon	209,987 Astat	222,01 Radon	8
1 2 3 4 5 7	₈₇ Fr	88 Ra		₁₀₄ Rf	₁₀₅ Db	106 Sg	₁₀₇ Bh	108 Hs	109 Mt	Uun	Uuu	Uub							
7	223,02	226,025	**	261 Duth orford	263 Dubp	265 Seeberg	264 Behr	269	268 Maitpar	110 271	111	112 277							
	FIGIIS	Rau		Rumenora	Dubli	Seabory	BUIII	nas	Meither	271	2.2	277							
			Ŧ	C	D	NT I	ъ	C	Б			D	TT	T	T		71	-	
7	* La	ntanowce	57 La	₅₈ Ce	59 Pr	60 ^{INd}	61 Pm	62 Sm	63 Eu	₆₄ Ga	65 1 D	66 Dy	67 H0	68 ^{Er}	69 I m	1 70 1	71 T	Lu	
	24		138,906 Lantan	5 140,12 Cer	140,908 Prazeodym	144,24 Neodym	144,913 Promet	150,4 Samar	151,96 Europ	157,25 Gadolin	158,925 Terb	162,50 Dyspoz	164,93 Holm	167,26 Erb	168,934 Tul	l 173, Iterb	04 17 Lu	4,97 tet	
			₈₉ Ac	₉₀ Th	₉₁ Pa	₉₂ U	₉₃ Np	₉₄ Pu	₉₅ Am	₉₆ Cm	₉₇ Bk	₉₈ Cf	₉₉ Es	100 Fm	\mathbf{M}_{101}	d 102	No 10	₃ Lr	
	** Aktynowce		227,028 Aktyn	232,038 Tor	231,036 Proaktyn	238,029 Uran	237,048 Neptun	244,064 Pluton	243,061 Ameryk	247,07 Kiur	247,07 Bekerel	251,08 Kaliforn	254,088 Einstein	257,095 Ferm	258,1 Mendel	259, ew Nob	101 26 el Lo	0,1 rens	

Atom

Atomy pierwiastków charakteryzuje:

- liczba atomowa Z (1..118)
 numer pierwiastka w Tablicy Mendelejewa
- liczba masowa A (1...293)
 ≈ masa danego atomu / masa atomu wodoru

atom = jądro + Z elektronów



jądro = Z protonów + (A-Z) neutronów

obiekt	rozmiar	masa	ładunek	
atom	10 ^{–10} m	A GeV	0	
jądro	10 ⁻¹⁵ -10 ⁻¹⁴ m	A GeV	+Ze	
neutron proton	10 ^{–15} m	1 GeV	+e	
elektron	<10 ^{−19} m	0,0005 GeV	- e	

Nowe cząstki

Na początku lat 30-tych wydawało się, że wszechświat jest zbudowany tylko z trzech rodzajów cząstek:

elektron, proton, neutron.

Wkrótce odkryto jednak tyle nowych cząstek, że zabrakło liter w alfabetach łacińskim i greckim do ich oznaczania:



Pojawiła się wątpliwość: czy wszystkie te cząstki są rzeczywiście <u>elementarne</u>?

"Powtórka Mendelejewa"

Powtórzyła się historia Tablicy Mendelejewa.

Cząstki zaczęły układać się w struktury odzwierciedlające ich własności.



Struktury te udało się wyjaśnić zakładając istnienie cząstek "jeszcze bardziej elementarnych": kwarków.

np. proton = uud neutron = udd

Współczesna tablica cząstek

	kwarki							
u	up górny	С	<mark>charm</mark> powabny	t	top szczytowy	+2/3		
d	<mark>down</mark> dolny	S	<mark>strange</mark> dziwny	b	<mark>beauty</mark> piękny	-1/3		

	ładunek					
ν_{e}	neutrino elektronowe	ν_{μ}	neutrino mionowe	v_{τ}	neutrino taonowe	0
e	elektron	μ	mion	τ	taon	-1

+ ich antycząstki o przeciwnych ładunkach

Oddziaływania

W życiu codziennym spotykamy tylko dwa odziaływania fundamentalne:

GRAWITACYJNE

działa na wszystkie ciała bez wyjątku

nośnik: grawiton (jeszcze nie odkryty)

przejawy: ciążenie, przyciąganie ciał niebieskich

ELEKTROMAGNETYCZE

działa na ładunki elektryczne

nośnik: foton γ

przejawy: siły magnetyczne, elektryczne, tarcie, sprężystość, lepkość, wiązania chemiczne itp.

W świecie cząstek elementarnych występują dwa nowe odziaływania:

JĄDROWE SŁABE

działa na leptony i kwarki

nośniki: bozony Z⁰, W⁺, W⁻

przejawy: rozpady promieniotwórcze, synteza jądrowa w gwiazdach

JĄDROWE SILNE

działa tylko na kwarki

nośniki: gluony g

przejawy: stabilność jąder atomowych, wiązanie kwarków w protonach i neutronach

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)

Super Kamiokande



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 ... 10²⁹ lat!

Dla porównania wiek Wszechświata ~10¹⁰ lat.

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

Detektor Super-Kamiokande zawiera 50 000 ton wody,

czyli ~10³⁴ 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 ~10³⁴ lat. Super-Kamiokande zbliża się do tej granicy.

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)

Cząstki długożyciowe

cząstka		czas życia τ	$\textbf{C}\cdot \boldsymbol{\tau}$	
foton	γ	8	∞	
elektron	e [–]	8	8	
neutrino	ν	8	∞	
proton	p ⁺	>1.6 ·10 ³³ lat	8	
neutron	n	887 s	2.7	
mion	μ	2.2 ⋅10 ^{–6} s	659 m	
pion	π^+	2.6 ⋅10 ^{–8} s	7.8 m	
kaon	K ⁺	1.2 ⋅10 ^{–8} s	3.7 m	
kaon	κ ⁰ L	5.2 ⋅10 ^{–8} s	15.5 m	
kaon	κ ⁰ s	0.9 ⋅10 ^{−10} s	2.7 cm	
$\Lambda^0 \Sigma^+ \Xi^{0-} \Omega$	2	~ 10 ^{–10} s	~ 3 cm	
$D^{0+}B^{0+}\Lambda_{c}$	$+ \Lambda_b^0$	~ 10 ⁻¹² s	<mark>~ 300</mark> μm	
pion _{π⁰}		8.4 ⋅10 ⁻¹⁷ s	25 nm	
η,ψ, <mark>rezon</mark>	anse	<10 ⁻¹⁹ s		

W praktyce bezpośredniej detekcji podlegają jedynie

 γ , e[±], p[±], n, μ^{\pm} , π^{\pm} , K[±], K⁰_L.

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, π , 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	p ,π, K	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











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

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_H <140 GeV)



 $H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4$ leptony (130<M_H<500 GeV)



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

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

σ (M_H~170 GeV) = 1 GeV.



Compact Muon Solenoid



