

Grzegorz Wrochna

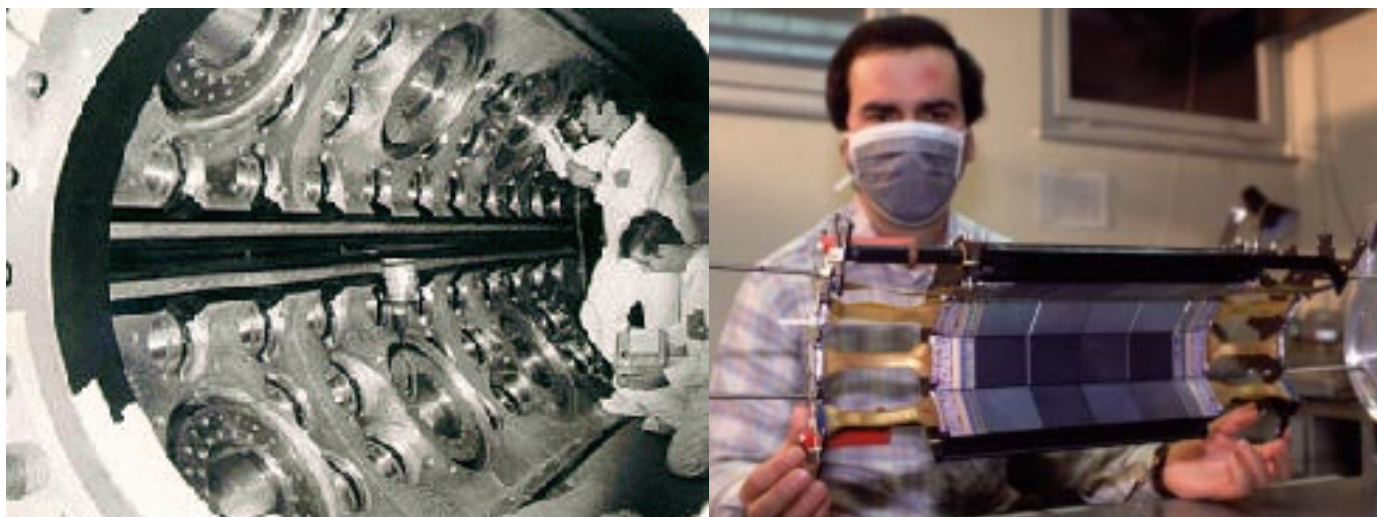
Instytut Problemów Jądrowych im. A. Sołtana

wrochna@fuw.edu.pl

<http://cmsdoc.cern.ch/~wrochna>

Fizyka cząstek

wczoraj i dziś



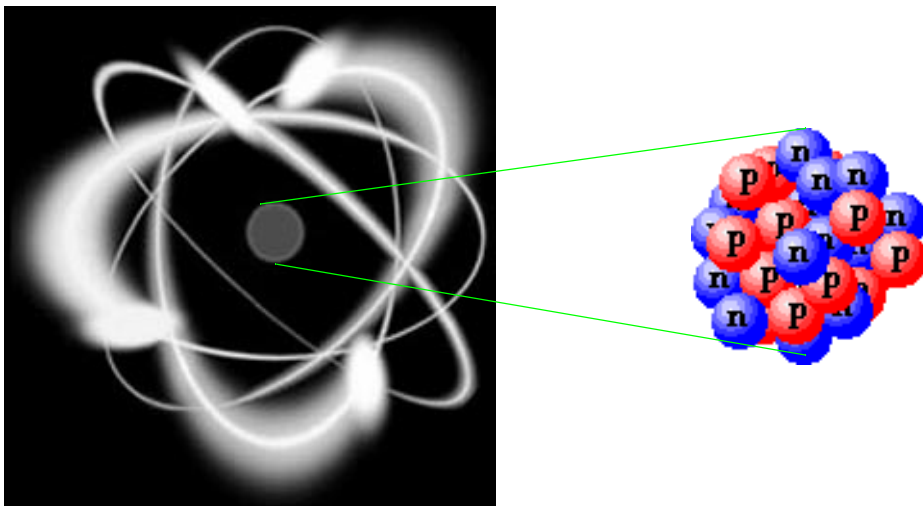
- Cząstki
- Oddziaływania
- Narzędzia
- Metody

Atom

Atomy pierwiastków charakteryzuje:

- **liczba atomowa Z** (1..114)
= numer pierwiastka w Tablicy Mendelejewa
- **liczba masowa A** (1...289)
 $\approx$ masa danego atomu / masa atomu wodoru

atom = jądro + Z elektronów



jądro = Z protonów + $(A-Z)$ neutronów

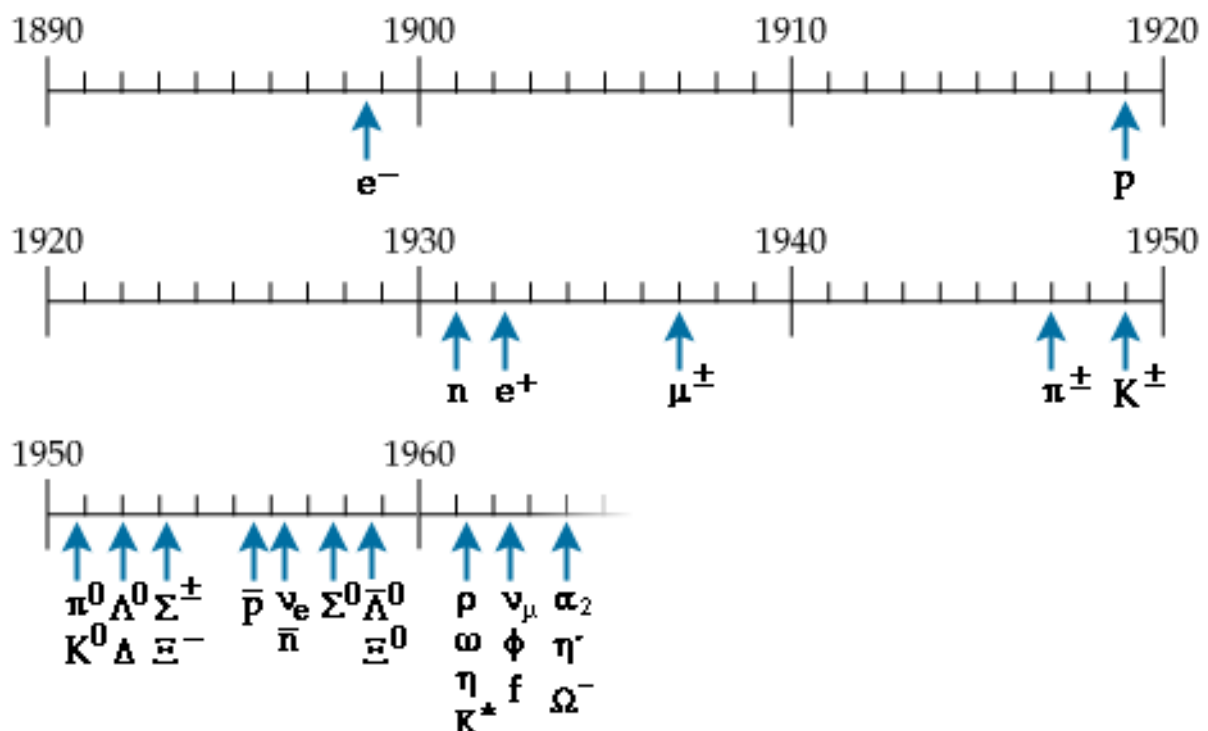
obiekt	rozmiar	masa	ładunek
atom	10^{-10} m	A GeV	0
jądro	10^{-15} - 10^{-14} m	A GeV	$+Ze$
neutron proton	10^{-15} m	1 GeV	$+e$
elektron	$<10^{-19}$ m	0,0005 GeV	$-e$

Nowe cząstki

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

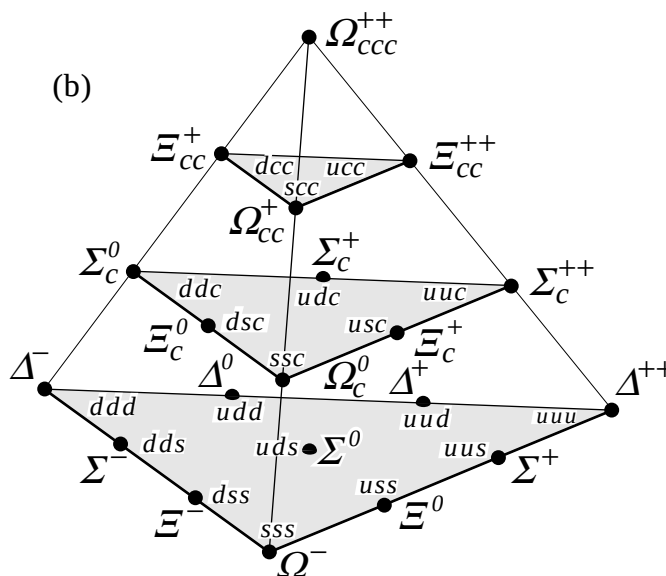
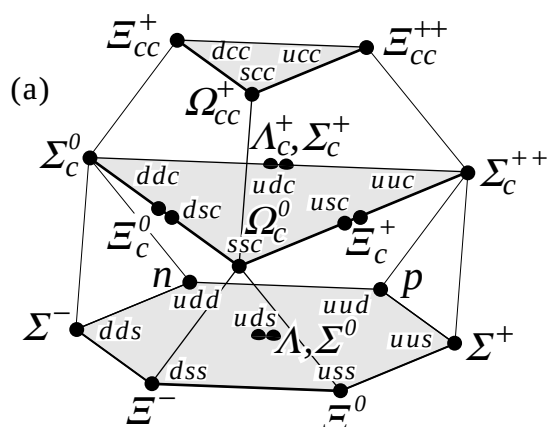
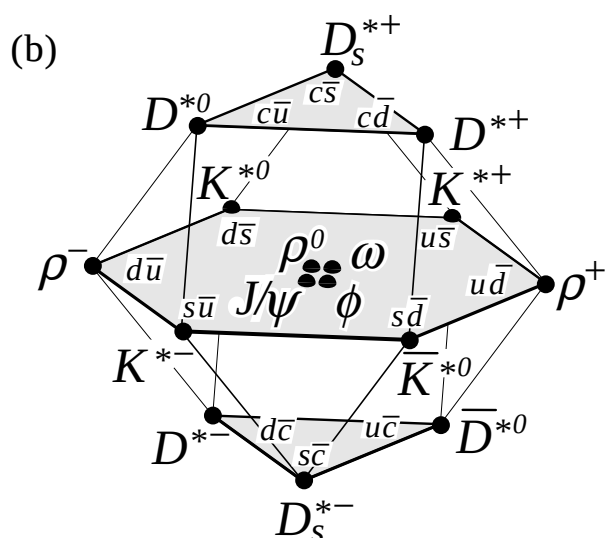
elektron, proton, neutron.

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



Pojawiła się wątpliwość:
czy wszystkie te cząstki są rzeczywiście elementarne?

Cząstki zaczęły układać się w struktury odzwierciedlające ich własności.



np. proton = uud neutron = udd

Współczesna tablica cząstek

kwarki						ładunek
u	up górny	c	charm powabny	t	top szczytowy	+2/3
d	down dolny	s	strange dziwny	b	beauty piękny	-1/3

leptony						ładunek
ν_e	neutrino elektronowe	ν_μ	neutrino mionowe	ν_τ	neutrino taonowe	0
e	elektron	μ	mion	τ	taon	-1

+ ich antycząstki o przeciwnych ładunkach

Oddziaływania

W życiu codziennym spotykamy tylko dwa oddziaływania 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 oddziaływania:

JĄDROWE SŁABE

działa na leptonów i kwarki

nośniki: bozony Z^0 , 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

Unifikacja oddziaływań

Wielki Wybuch Inflacja Anihilacja Bariogeneza Nukleosynteza Rekombinacja

10^{-43} s

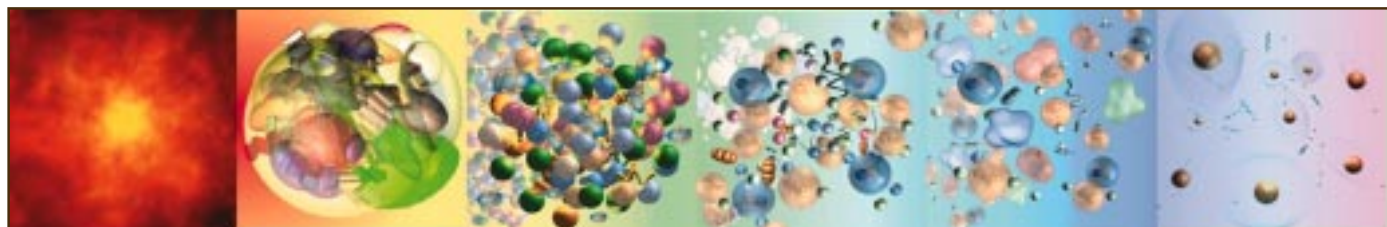
10^{-32} s

10^{-10} s

10^{-4} s

100 s

300000 lat



10^{-35} m
 10^{19} GeV

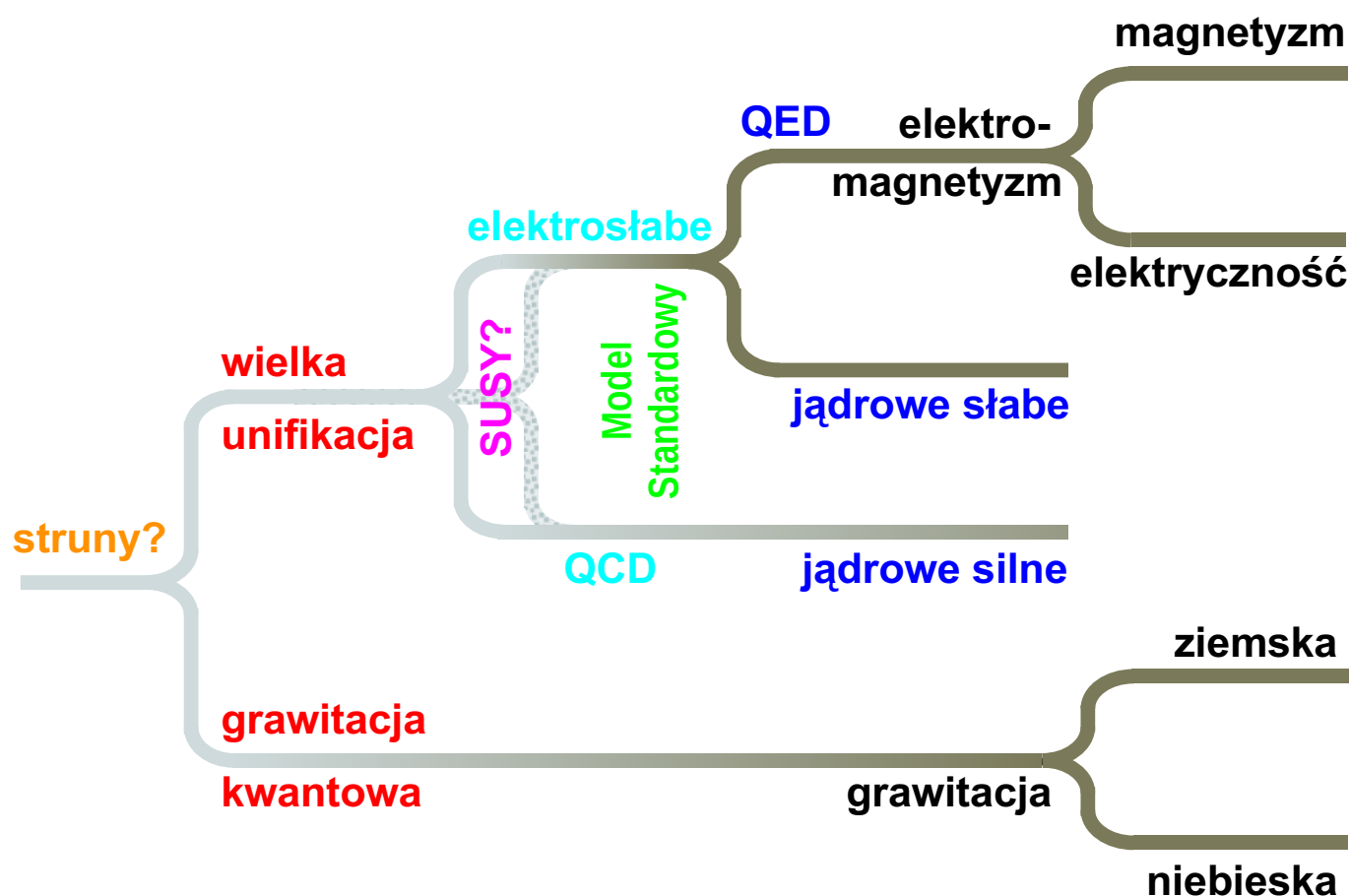
10^{-32} m
 10^{16} GeV

10^{-18} m
 10^2 GeV

10^{-16} m
1 GeV

10^{-15} m
1 MeV

10^{-10} m
10 eV



QED - elektrodynamika kwantowa

QCD - chromodynamika kwantowa

Obecny stan wiedzy

Grawitacja — ogólna teoria względności

dobrze potwierdzona, **ale** próby unifikacji z innymi oddziaływaniami jeszcze nie uwieńczone sukcesem

Elektromagnetyzm — elektrodynamika kwantowa

najdokładniejsza ze znanych teorii, sprawdzona do 10^{-10}

Teoria oddziaływań elektroślabych

sprawdzona do $<1\%$,

ale nie wyjaśnia dlaczego cząstki mają masę

najlepszy pomysł: **mechanizm Higgsa**,

ale przewidywana cząstka Higgsa jeszcze nie odkryta

Oddziaływania silne — chromodynamika kwantowa

dobrze pracuje w dużych energiach,

ale nie umiemy wykonać rachunków dla małych energii

Połączenie teorii oddziaływań elektroślabych
(+ mechanizm Higgsa) z chromodynamiką kwantową

Model Standardowy

znakomicie opisuje wyniki wszystkich eksperymentów,

ale ... jest **brzydki**.

Model Standardowy

Wady:

- ma ok. 20 wolnych parametrów, których wartości trzeba „włożyć z zewnątrz”
- nie wyjaśnia do końca dlaczego cząstki mają masy
 - mechanizm Higgsa „przyklejony plastrem”
 - cząstki Higgsa jeszcze nie odkryto
- nie tłumaczy trzech pokoleń kwarków i leptonów

Nadzieja:

- Symetryczna struktura Modelu Standardowego sugeruje, że ukrywa się za nią jakaś bardziej ogólna, a zarazem prostsza teoria
podobnie jak za Tablicą Mendelejewa kryła się struktura atomu, a za multipletami cząstek odkrytych w latach 30-60 — model kwarkowy

Strategia na przyszłość:

- znaleźć cząstkę Higgsa lub wykluczyć jej istnienie
- poszukiwać nowych cząstek
- poszukiwać odchyleń od Modelu Standardowego

Narzędzia badawcze

Nowe cząstki można wytworzyć zderzając rozpędzone do olbrzymich energii elektrony lub protony.

Do rozpędzania służą [akceleratory](#).

Produkty zderzenia są rejestrowane przez [detektory](#).

Niektóre cząstki żyją tak krótko ($<10^{-23}\text{s}$), że o ich istnieniu można się dowiedzieć jedynie badając bardziej stabilne cząstki powstałe w wyniku ich rozpadu.

AKCELERATORY

We współczesnych akceleratorach cząstki naładowane przyspieszane są na zboczu biegnącej fali elektromagnetycznej

podobnie jak deska surfingowa na fali morskiej.

Fala ta jest wytwarzana we wnękach rezonansowych.

Aby te same wnęki wykorzystać wiele razy można przyspieszać cząstki wzdłuż orbity zamkniętej.

Tory cząstek zakrzywiane są wtedy za pomocą magnesów.

Do badań można też wykorzystać promieniowanie kosmiczne docierające do Ziemi.

Detektory

Przykłady technik detekcyjnych:

Cząstka pozostawia ślad w emulsji fotograficznej.

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

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

Cząstka przechodząca przez niektóre substancje (NaJ) pobudza atomy, które następnie emitują światło (fotony). Światło to jest rejestrowane przez fotoczułe elementy elektroniczne.

Cząstka wysyła też fotony (tzw. promieniowanie Czerenkowa) jeżeli porusza się w ośrodku szybciej niż światło.

Współczesne eksperymenty fizyki cząstek stosują kombinacje wielu elementów działających na różnych zasadach.

Cząstki długożyciowe

cząstka		czas życia τ	$c \cdot \tau$
foton	γ	∞	∞
elektron	e^-	∞	∞
neutrino	ν	∞	∞
proton	p^+	$>1.6 \cdot 10^{33}$ lat	∞
neutron	n	887 s	$2.7 \cdot 10^8$ km
mion	μ^-	$2.2 \cdot 10^{-6}$ s	659 m
pion	π^+	$2.6 \cdot 10^{-8}$ s	7.8 m
kaon	K^+	$1.2 \cdot 10^{-8}$ s	3.7 m
kaon	K_L^0	$5.2 \cdot 10^{-8}$ s	15.5 m
kaon	K_S^0	$0.9 \cdot 10^{-10}$ s	2.7 cm
$\Lambda^0 \Sigma^+ \Xi^{0-} \Omega^- \dots$		$\sim 10^{-10}$ s	~ 3 cm
$D^{0+} B^{0+} \Lambda_c^+ \Lambda_b^0$		$\sim 10^{-12}$ s	~ 300 μ m
pion	π^0	$8.4 \cdot 10^{-17}$ s	25 nm
η, ψ , rezonanse		$<10^{-19}$ s	—

W praktyce bezpośredniej detekcji podlegają jedynie

γ , $e^\pm$, $p^\pm$, n , $\mu^\pm$, $\pi^\pm$, $K^\pm$, K_L^0 .

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 $\Delta t = d/v$
- kąt stożka promieniowania Czerenkowa $\sin\theta = v_c/v$

Pomiar pędu

Promień krzywizny toru w polu magnetycznym

$$R = p / 0.3 B \quad [R]=m, [p]=\text{GeV}, [B]=T$$

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**.

Cząstki krótkożyciowe

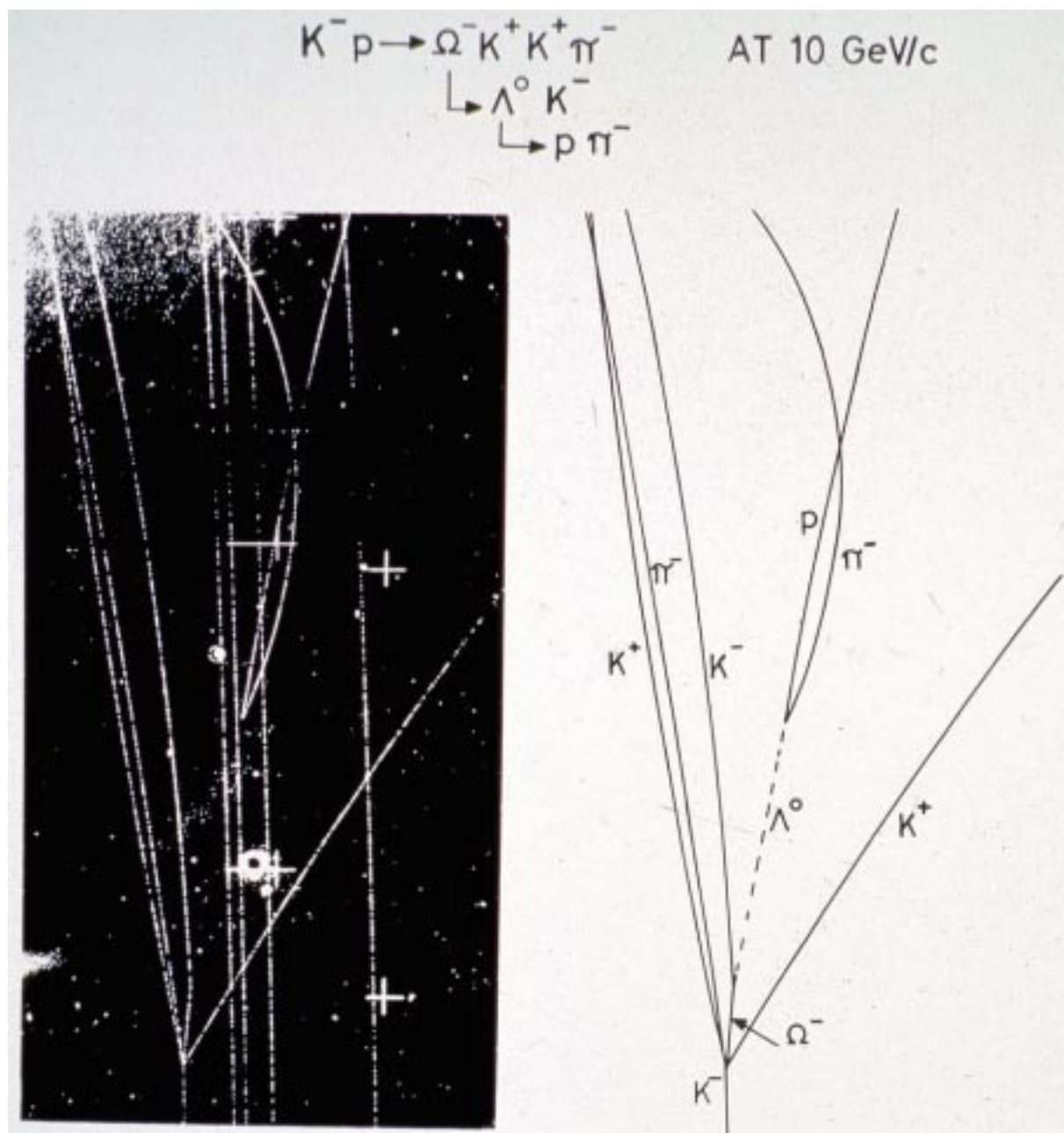
Cząstki krótkożyciowe badamy obserwując produkty ich rozpadu. Jeżeli znamy energie i pędy cząstek wtórnych to z zasad zachowania możemy wyliczyć energię, pęd i masę cząstki pierwotnej.

Jest to standardowa metoda odkrywania nowych cząstek:

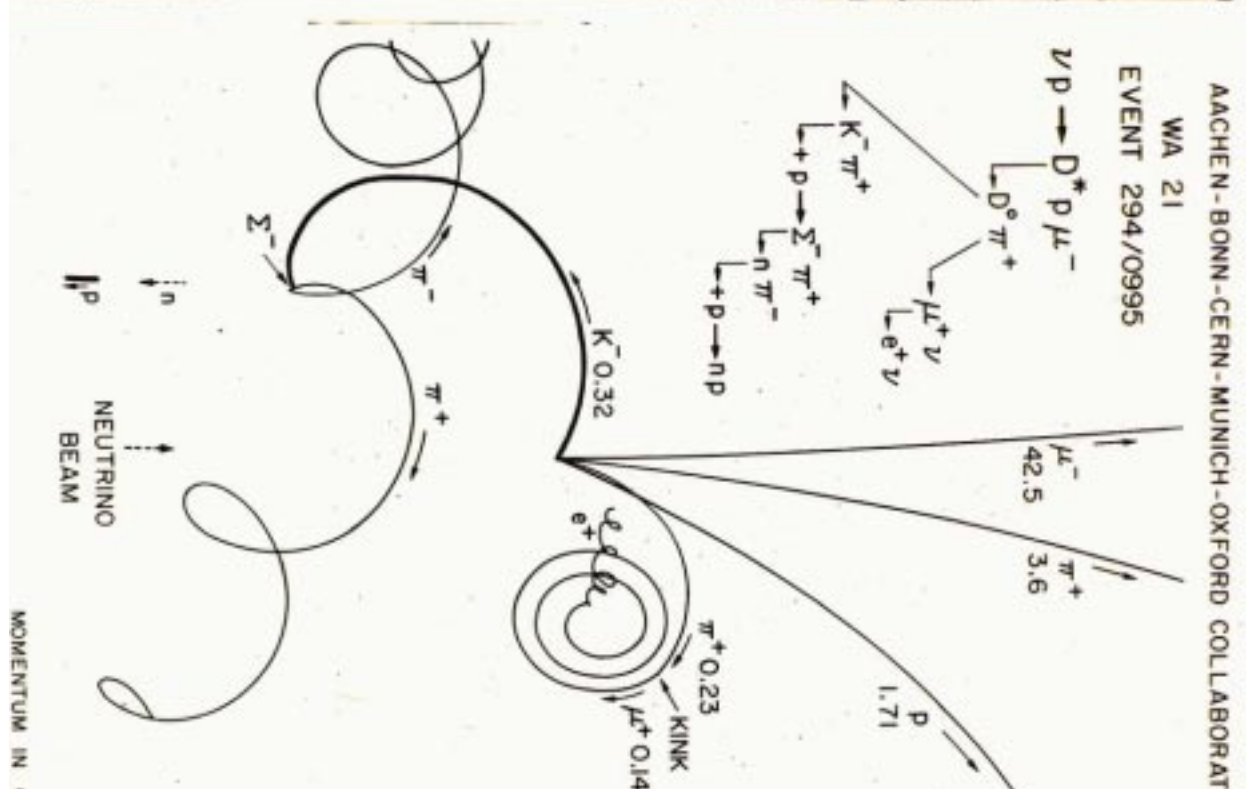
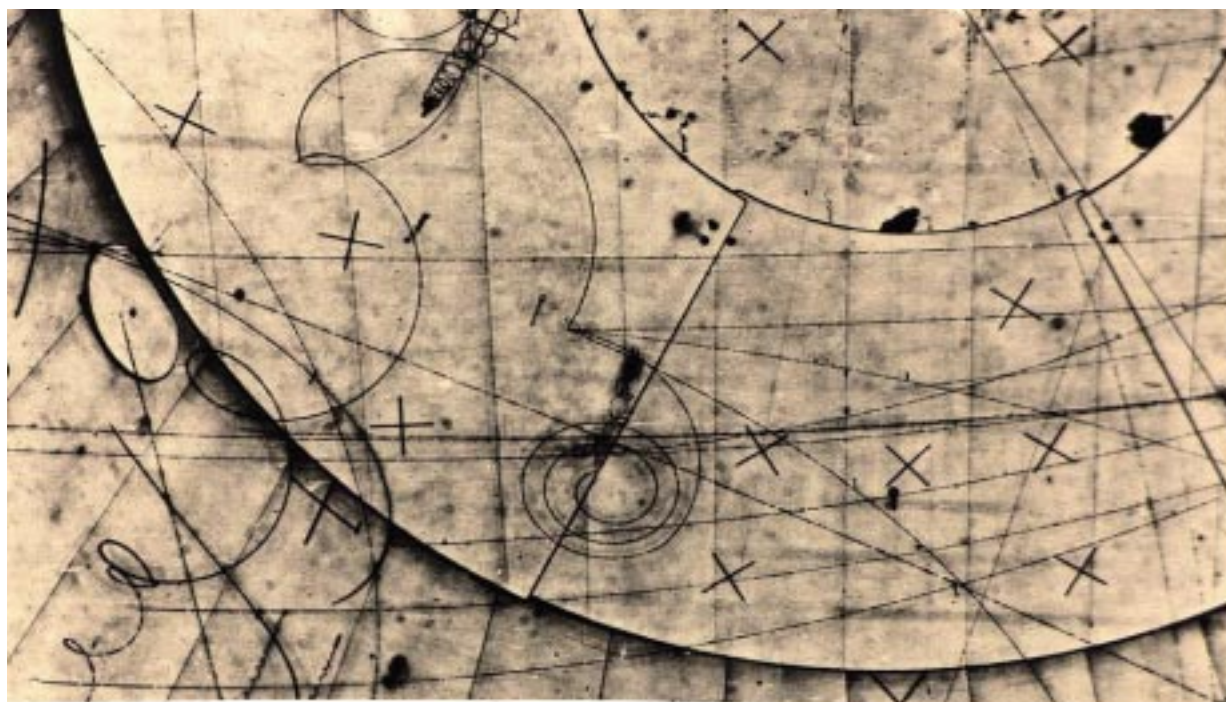
1. Zastanawiamy się na jakie cząstki mogłaby się ona rozpadać.
2. Dla każdego przypadku, w którym takie cząstki pojawiły się wyliczamy masę hipotetycznej cząstki pierwotnej i zaznaczamy ją na wykresie.

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

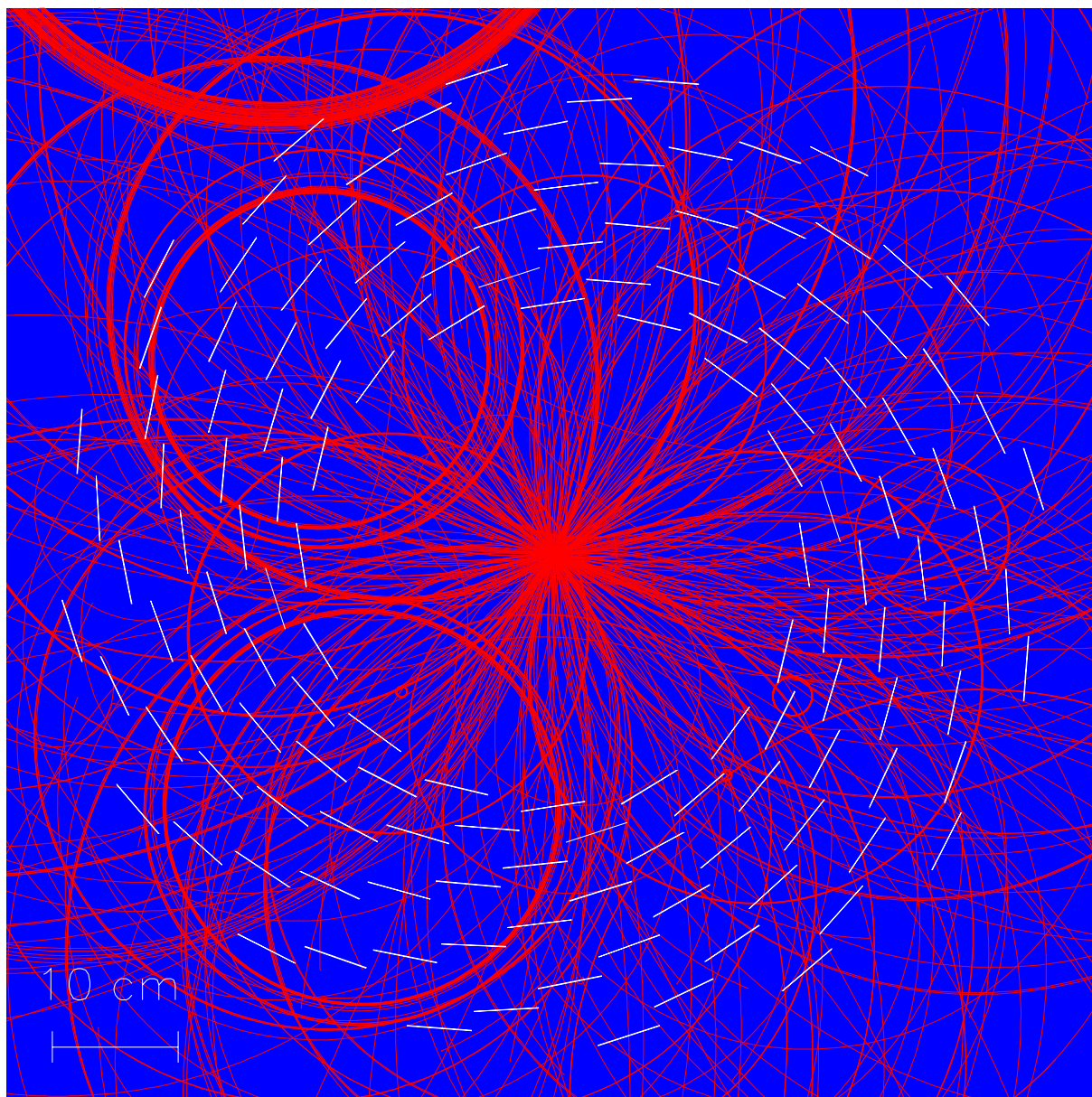


Rekonstrukcja zdarzenia



Łamigłówka

18 nałożonych zderzeń pp,
widzianych przez wewnętrzną część krzemowego detektora
mikropaskowego.
Wśród nich rozpad cząstki Higgsa na 4 miony.

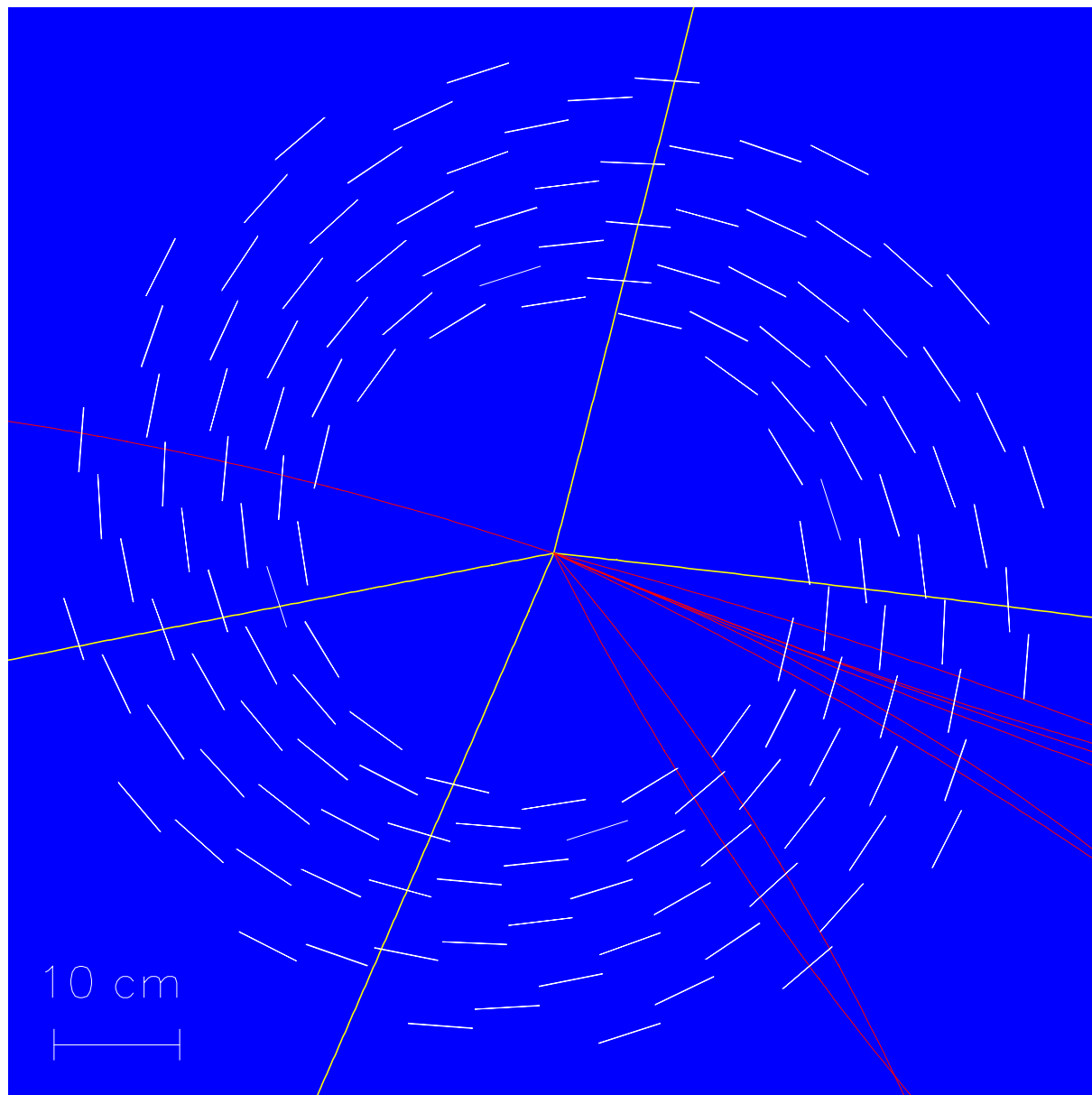


Znajdź 4 proste ślady.

Rozwiązanie łamigłówki

Zrekonstruowane ślady o $p_t > 2 \text{ GeV}$.

Wśród nich dobrze widoczne 4 miony z rozpadu Higgsa.



Rozwiązanie możliwe jeśli zajętość detektora $\sim 1\%$

→ powierzchnia mikropaska $\sim 1 \text{ mm}^2$

→ $> 10^7$ kanałów odczytu