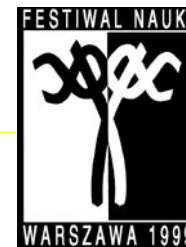
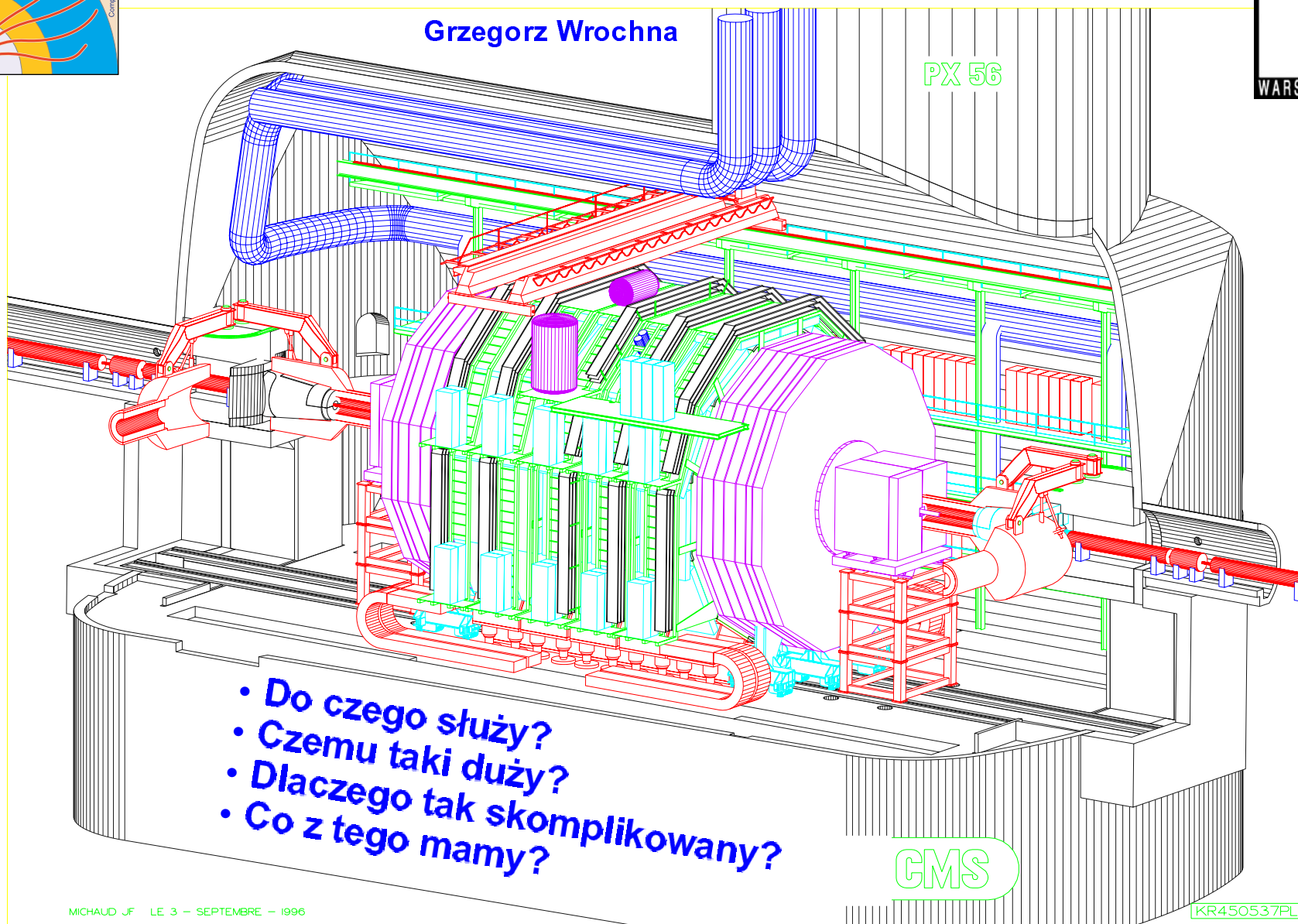


Eksperyment na 2000 fizyków



Grzegorz Wrochna

PX 56



- Do czego służy?
- Czemu taki duży?
- Dlaczego tak skomplikowany?
- Co z tego mamy?

CMS

Pierwiastki

Otaczająca nas materia jest zbudowana 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: cząsteczka (chemiczna) jest znacznie większa od cząstki (elementarnej).

Pierwiastki układają się w Tablicę Mendelejewa w zadziwiający sposób odzwierciedlającą ich własności.

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

Układ Okresowy Pierwiastków

1																	18	
1	1 H 1,008 Wodór											13	14	15	16	17	2 He 4,003 Hel	
2	3 Li 6,941 Lit	4 Be 9,012 Beryl											5 B 10,81 Bor	6 C 12,011 Węgiel	7 N 14,007 Azot	8 O 15,999 Tlen	9 F 18,998 Fluor	10 Ne 20,179 Neon
3	11 Na 22,989 Sód	12 Mg 24,305 Magnez	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13 Al 26,982 Glin	14 Si 28,086 Krzem	15 P 30,974 Fosfor	16 S 32,066 Siarka	17 Cl 35,453 Chlor	18 Ar 39,948 Argon
4	19 K 39,098 Potas	20 Ca 40,08 Wapń	21 Sc 44,956 Skand	22 Ti 47,90 Tytan	23 V 50,941 Wanad	24 Cr 51,996 Chrom	25 Mn 54,938 Mangan	26 Fe 55,847 Żelazo	27 Co 58,933 Kobalt	28 Ni 58,70 Nikiel	29 Cu 63,546 Miedź	30 Zn 65,36 Cynk	31 Ga 69,72 Gal	32 Ge 72,59 German	33 As 74,922 Arsen	34 Se 78,96 Selen	35 Br 79,904 Brom	36 Kr 83,80 Krypton
5	37 Rb 85,468 Rubid	38 Sr 87,62 Stront	39 Y 88,906 Itr	40 Zr 91,22 Cyrkon	41 Nb 92,906 Niob	42 Mo 95,94 Molibden	43 Tc 96,906 Technet	44 Ru 101,07 Rubid	45 Rh 102,906 Rod	46 Pd 106,4 Pallad	47 Ag 107,868 Srebro	48 Cd 112,40 Kadm	49 In 114,82 Ind	50 Sn 118,69 Cyna	51 Sb 121,75 Antymon	52 Te 127,60 Tellur	53 I 126,905 Jod	54 Xe 131,30 Ksenon
6	55 Cs 132,905 Cez	56 Ba 137,34 Bar	*	72 Hf 178,49 Hafn	73 Ta 180,948 Tantal	74 W 183,85 Wolfram	75 Re 186,207 Ren	76 Os 190,2 Osm	77 Ir 192,22 Iryd	78 Pt 195,09 Platyna	79 Au 196,967 Złoto	80 Hg 200,59 Rtęć	81 Tl 204,37 Tal	82 Pb 207,2 Ołów	83 Bi 208,98 Bizmut	84 Po 208,892 Polon	85 At 209,987 Astat	86 Rn 222,018 Radon
7	87 Fr 223,02 Frans	88 Ra 226,025 Rad	**	104 Rf 261 Rutherford	105 Db 263 Dubn	106 Sg 265 Seaborg	107 Bh 264 Bohr	108 Hs 269 Has	109 Mt 268 Meitner	Uun 110 271	Uuu 111 272	Uub 112 277						

* Lantanowce

57 La 138,906 Lantan	58 Ce 140,12 Cer	59 Pr 140,908 Prazeodym	60 Nd 144,24 Neodym	61 Pm 144,913 Promet	62 Sm 150,4 Samar	63 Eu 151,96 Europ	64 Gd 157,25 Gadolin	65 Tb 158,925 Terb	66 Dy 162,50 Dyspoz	67 Ho 164,93 Holm	68 Er 167,26 Erb	69 Tm 168,934 Tul	70 Yb 173,04 Iterb	71 Lu 174,97 Lutet
89 Ac 227,028 Aktyn	90 Th 232,038 Tor	91 Pa 231,036 Proaktyn	92 U 238,029 Uran	93 Np 237,048 Neptun	94 Pu 244,064 Pluton	95 Am 243,061 Ameryk	96 Cm 247,07 Kiur	97 Bk 247,07 Bekerel	98 Cf 251,08 Kaliforn	99 Es 254,088 Einstein	100 Fm 257,095 Ferm	101 Md 258,1 Mendelew	102 No 259,101 Nobel	103 Lr 260,1 Lorens

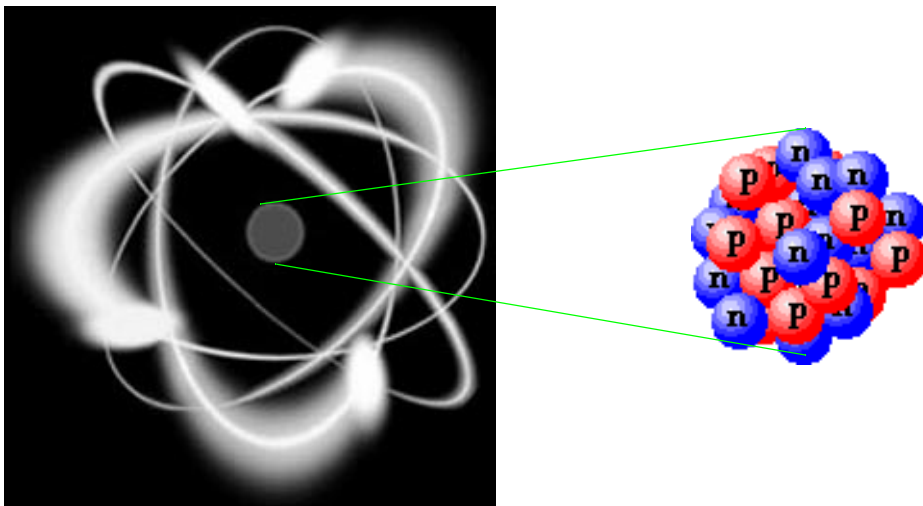
**** Aktynowce**

Atom

Atomy pierwiastków charakteryzuje:

- **liczba atomowa Z** (1..118)
= numer pierwiastka w Tablicy Mendelejewa
- **liczba masowa A** (1...293)
 $\approx$ masa danego atomu / masa atomu wodoru

atom = jądro + Z elektronów



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

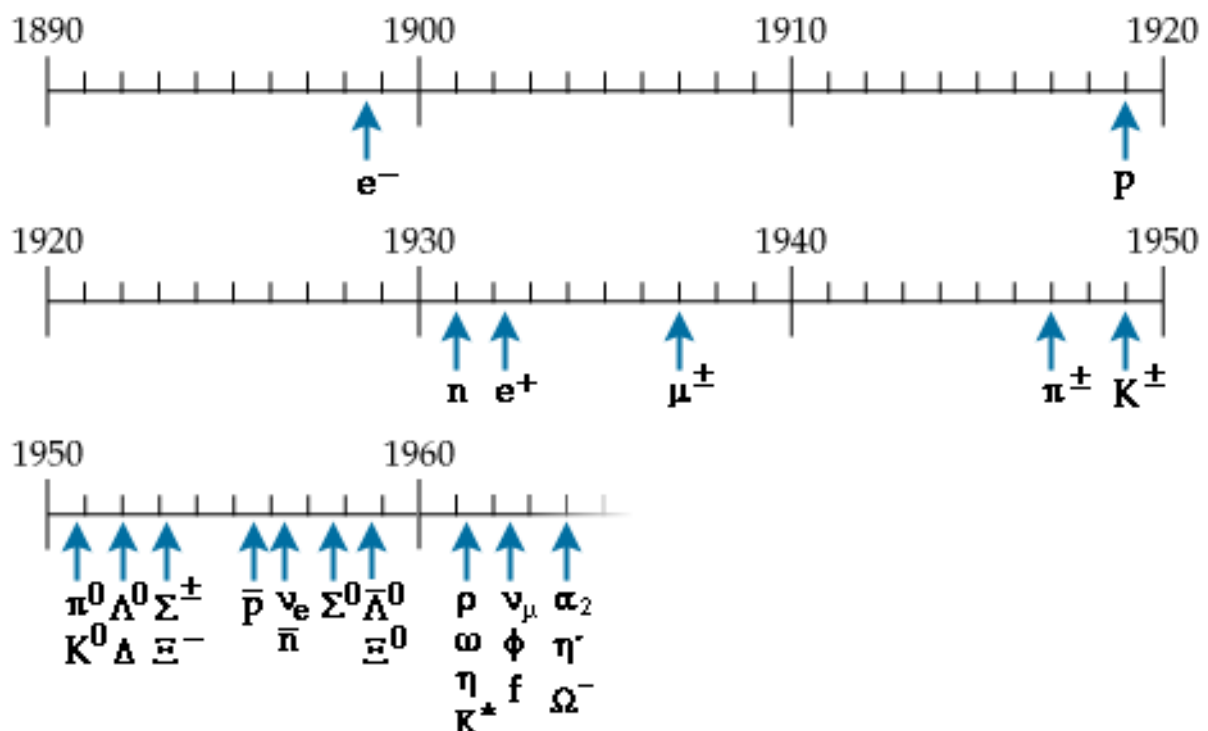
obiekt	rozmiar	masa	ładunek
atom	10^{-10} m	A GeV	0
jądro	10^{-15} - 10^{-14} m	A GeV	$+Ze$
neutron proton	10^{-15} m	1 GeV	$+e$
elektron	$<10^{-19}$ m	0,0005 GeV	$-e$

Nowe cząstki

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

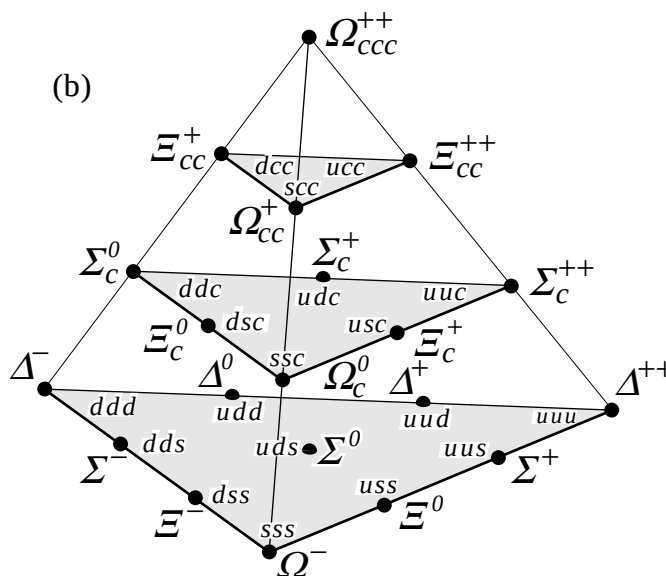
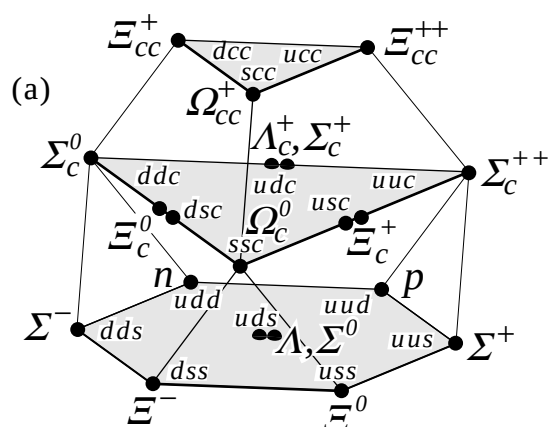
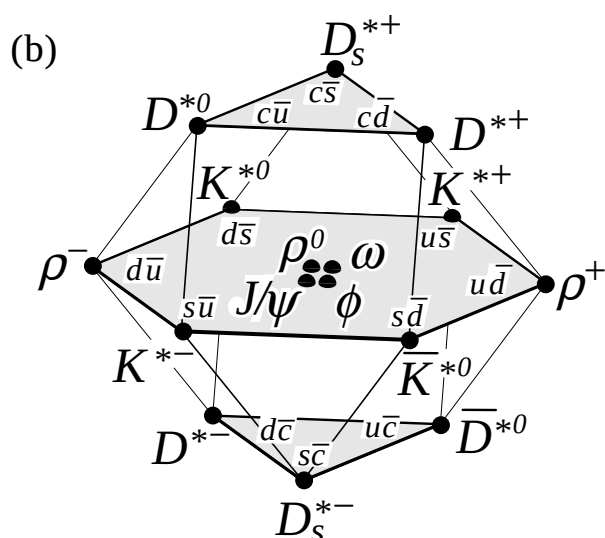
elektron, proton, neutron.

Wkrótce odkryto jednak tyle nowych cząstek, że zabrakło liter w alfabetach 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

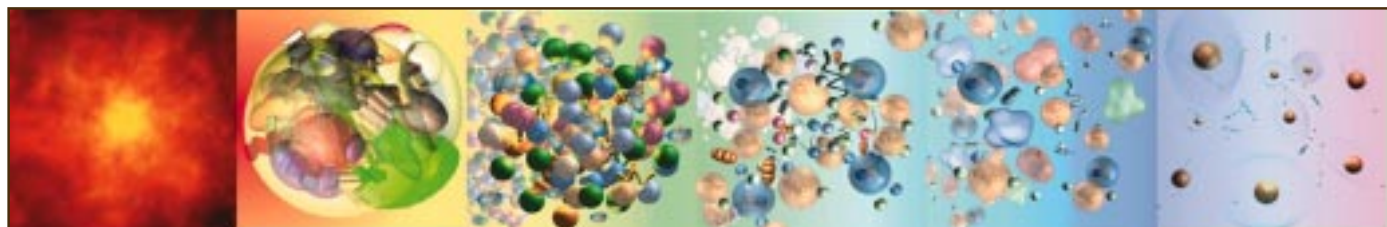
10^{-32} s

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

magnetyzm

QED

elektro-
magnetyzm

elektryczność

elektrosłabe

wielka
unifikacja

SUSY?

Model
Standardowy

jądrowe słabe

QCD

jądrowe silne

struny?

grawitacja

kwantowa

grawitacja

ziemska

niebieska

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.

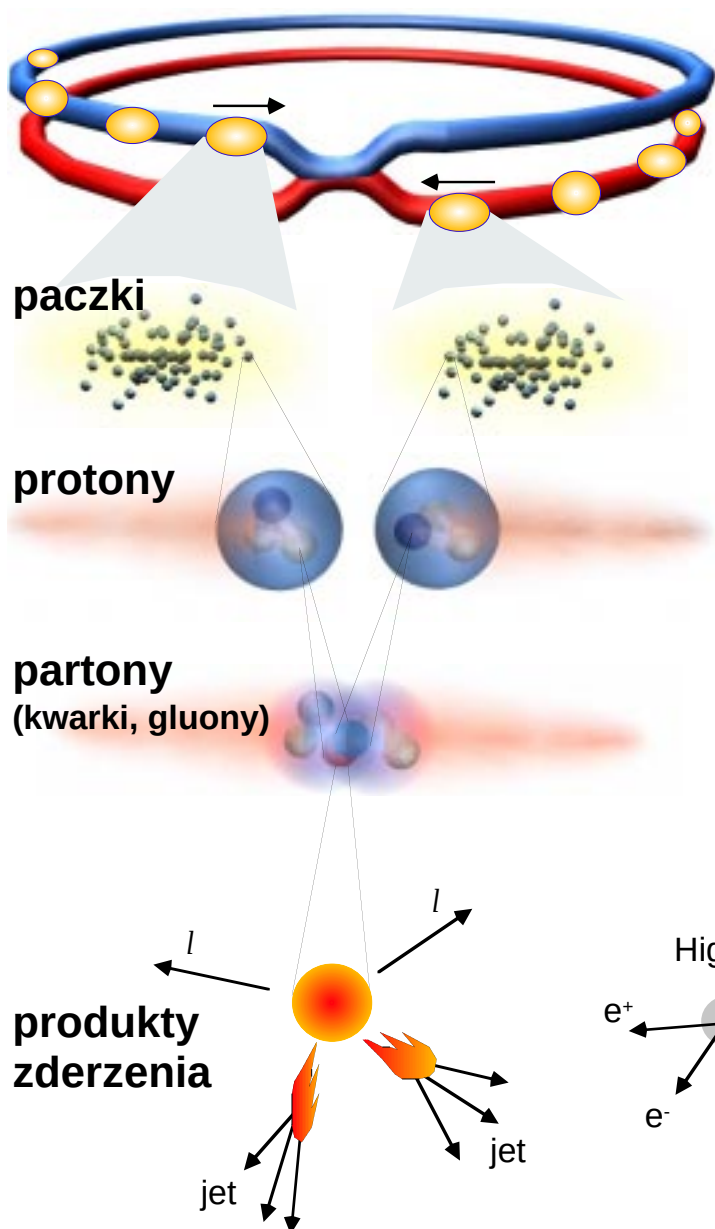
Aby te same wnęki wykorzystać wiele razy można przyspieszać cząstki wzdłuż orbity zamkniętej.

Tory cząstek zakrzywiane są wtedy za pomocą magnesów.

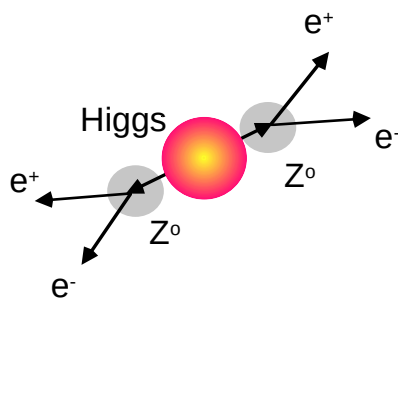
Do badań można też wykorzystać promieniowanie kosmiczne docierające do Ziemi.



Zderzenia proton-proton w LHC



energia	7+7 TeV
obwód	27 km
pole mag.	8.4 T
światłość	$10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
# paczek	2×2875
#p / paczka	10^{11}
przecięcia paczek:	
częstość	40 MHz
odstęp	25 ns
czyli	7.5 m



Przy nominalnej światłości w każdym przecięciu paczek zajdzie 10-20 zderzeń proton-proton.



Detektory

Przykłady technik detekcyjnych:

Cząstka jonizując ośrodek pozostawia ślad w emulsji fotograficznej, przegrzanej cieczy (komora Wilsona), przechłodzonym gazie (komora pęcherzykowa).

Cząstka przechodząca przez półprzewodnik tworzy pary elektron-dziura. Powoduje to przepływ rejestrowalnego prądu — detektory krzemowe mozaikowe i mikropaskowe.

Cząstka jonizuje gaz między dwoma elektrodami o wysokim napięciu. Następuje wyładowanie dające mierzalny impuls elektryczny — komory wielodrutowe, dryfowe, z segmentową katodą, RPC.

Cząstka przechodząca przez niektóre substancje (NaI) pobudza atomy, które następnie emitują światło (fotony) — liczniki scyntylacyjne.
Światło to jest rejestrowane przez fotoczułe elementy elektroniczne — fotopowielacze, fotodiody.

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

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

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**.

Identyfikacja cząstek

Cząstki długożyciowe identyfikujemy obserwując jak oddziałują 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
- zewnętrzny detektor śladowy (det. mionowy)

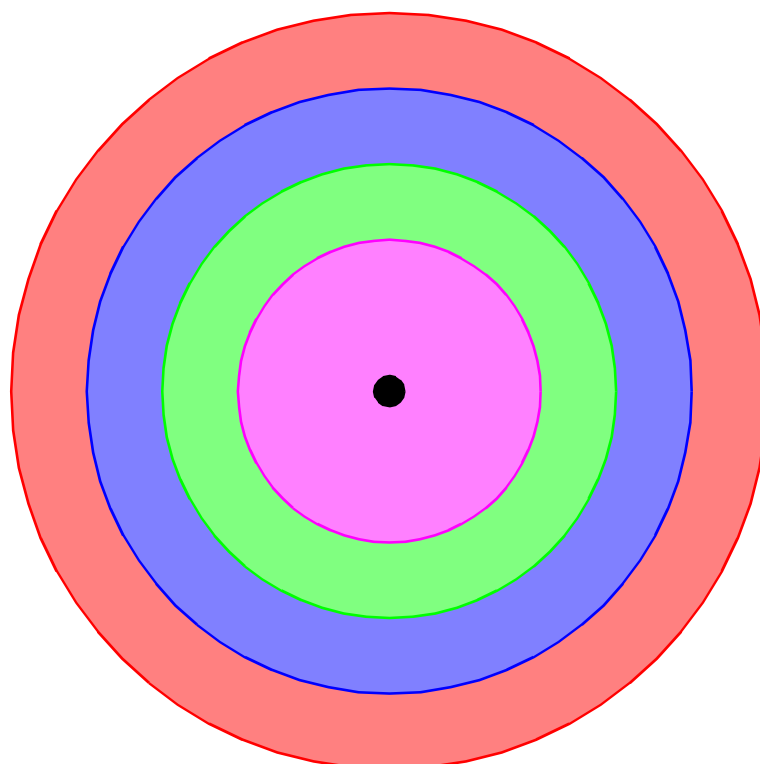
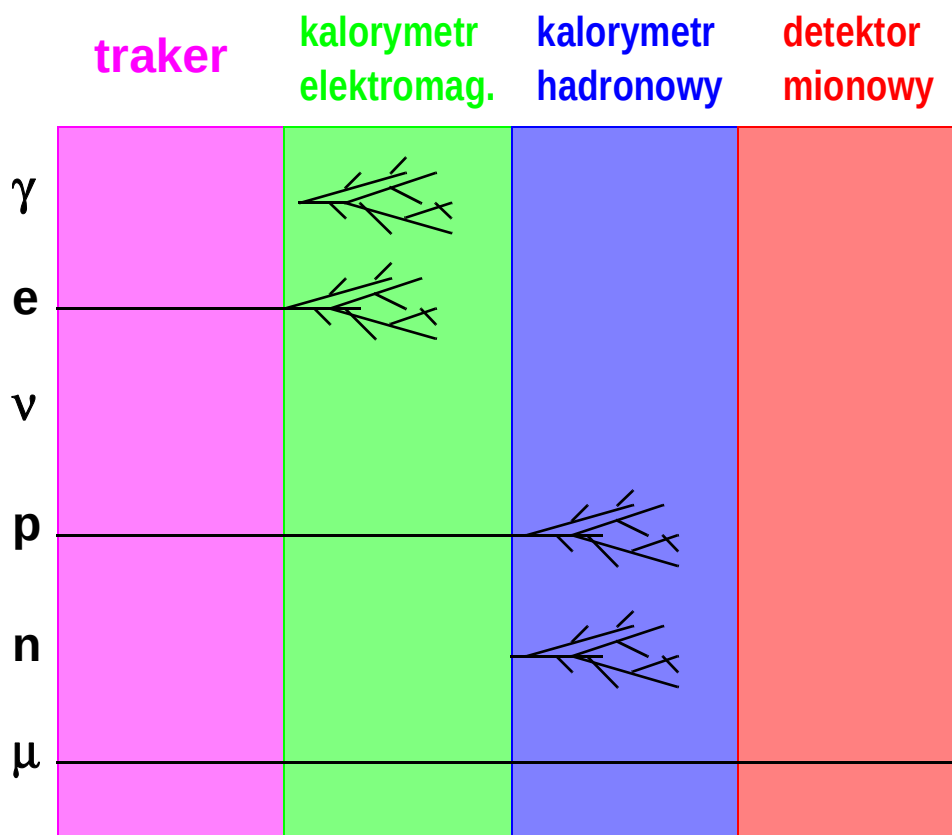
	γ	e	ν	p, π ,K	n	μ
traker	—	+	—	+	—	+
kalorymetr elektromag.	+	+	—	—	—	—
kalorymetr hadronowy	—	—	—	+	+	—
detektor mionowy	—	—	—	—	—	+

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

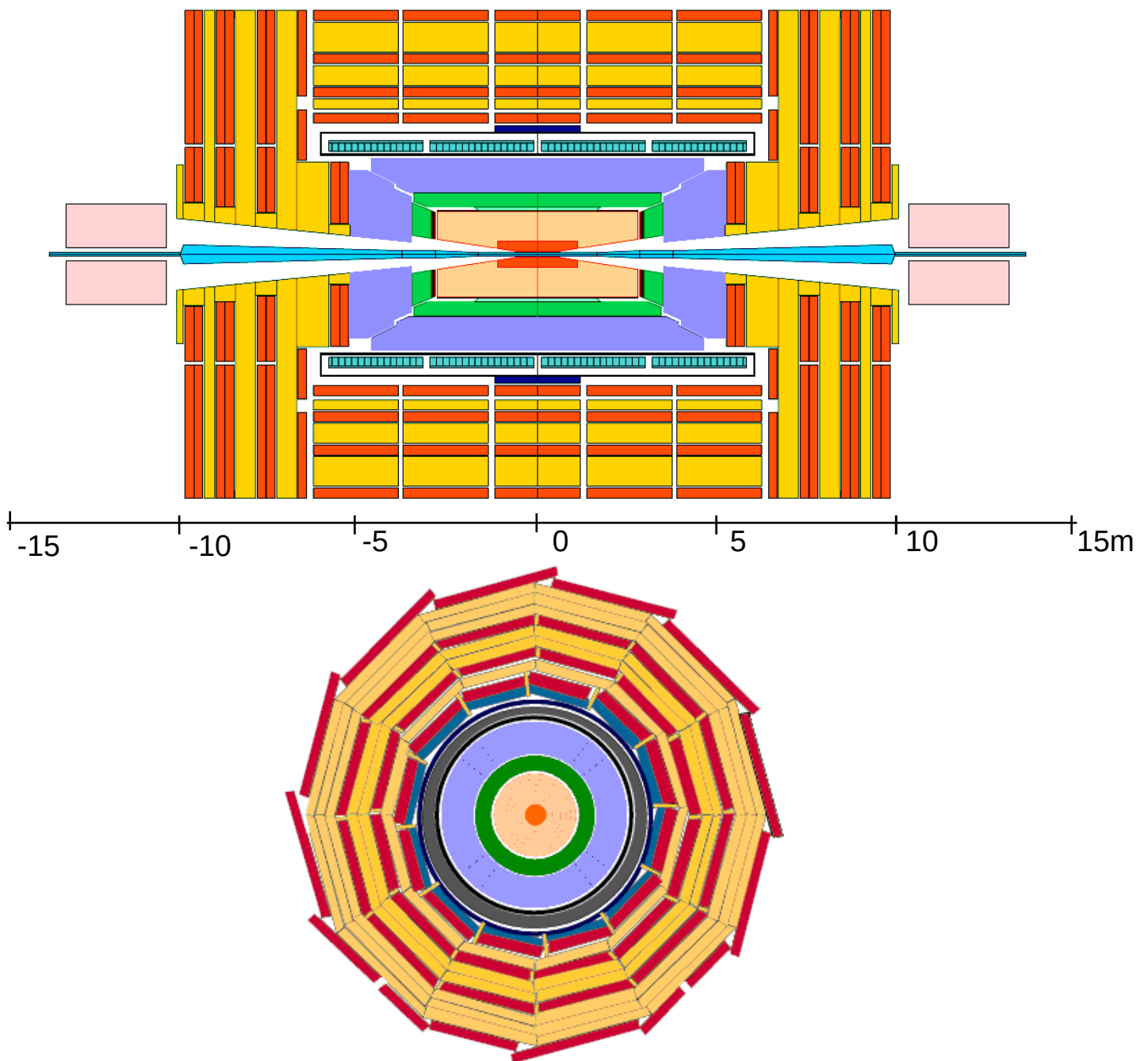
Proton, kaon i pion można odróżnić wyznaczając masę cząstki, zmierzwszy uprzednio jej energię i pęd:

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

Identyfikacja cząstek



The Compact Muon Solenoid CMS experiment at CERN Large Hadron Collider LHC

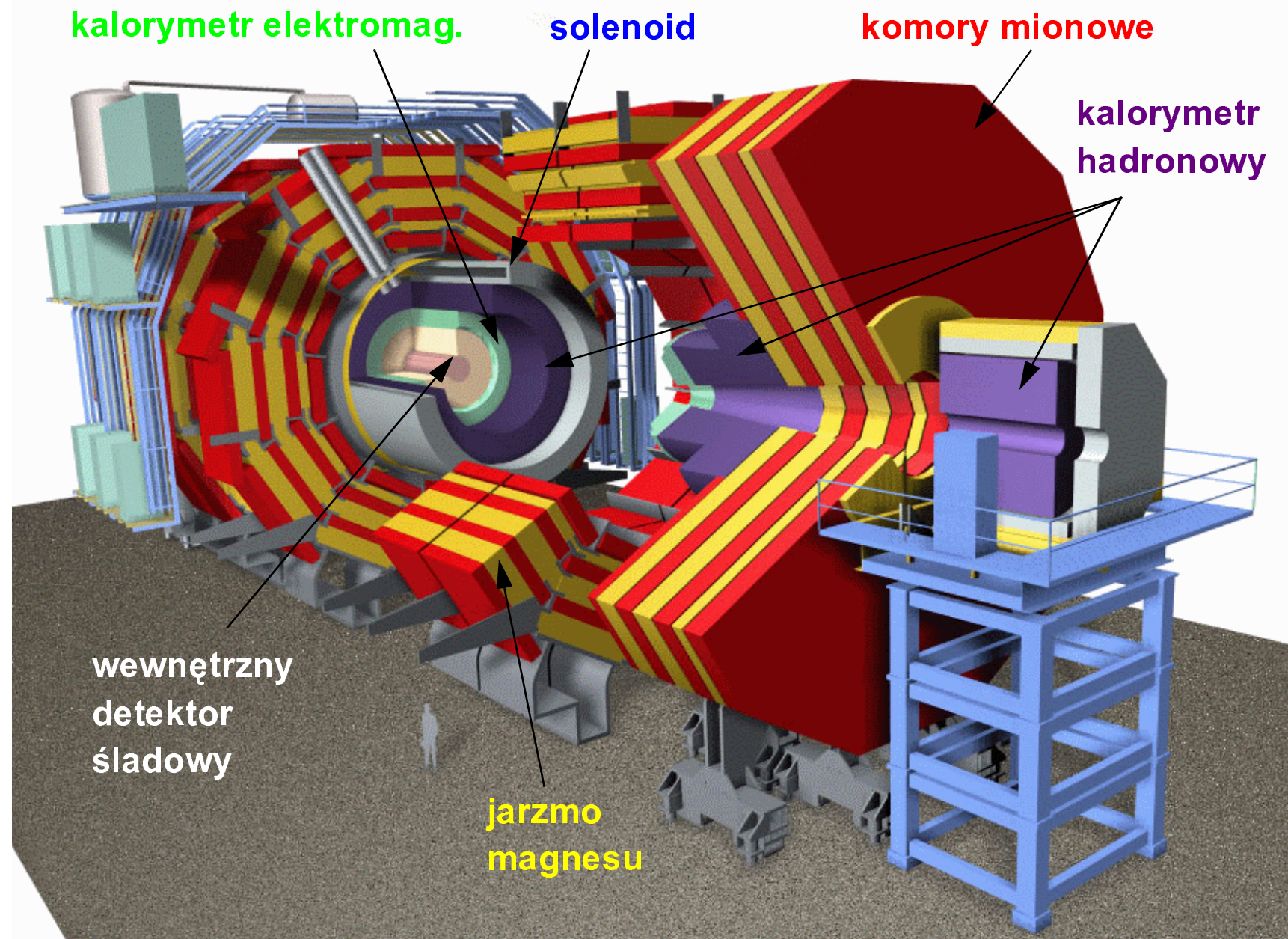


The CMS detector will be built around a high-field superconducting solenoid (4 T) leading to a compact design for the muon spectrometer, hence the name Compact Muon Solenoid (CMS). In order to detect signatures of new physics efficiently, identification and precise measurement of muons, photons, and electrons have been emphasized in the design considerations of CMS.

The long solenoid allows efficient measurement of forward muons. Muons see the full bending power of the solenoid up to a rapidity of 1.5. For the rapidity range $1.5 < |h| < 2.5$ they are still measured in the inner tracker and in the four forward muon stations (MF1 to MF4). There is enough bending power to maintain good resolution up to a rapidity of 2.5. The muon rate in the forward region is dominated by low pt muons from p/K decays in the inner tracking volume. The forward muon trigger system consists of small pads designed to reduce effectively the high rate of low pt muons.

The combined muon momentum resolution is better than 3% at 0.4 TeV in the central rapidity region $|h| < 2.5$, degrading to 5% at 2 TeV. Low-momentum ($p < 100$ GeV) muons are measured before the absorber with a precision of about 1% up to a rapidity of 2.5.

Compact Muon Solenoid



Budowa detektora CMS

**SUPERCONDUCTING
COIL**

ECAL Scintillating PbWO_4
Crystals

CALORIMETERS

HCAL Plastic scintillator
copper
sandwich

IRON YOKE

TRACKER

Micro Strip Gas Chambers (MSGC)
Silicon Microstrips
Pixels

MUON BARREL

Drift Tube
Chambers (DT)

Resistive Plate
Chambers (RPC)

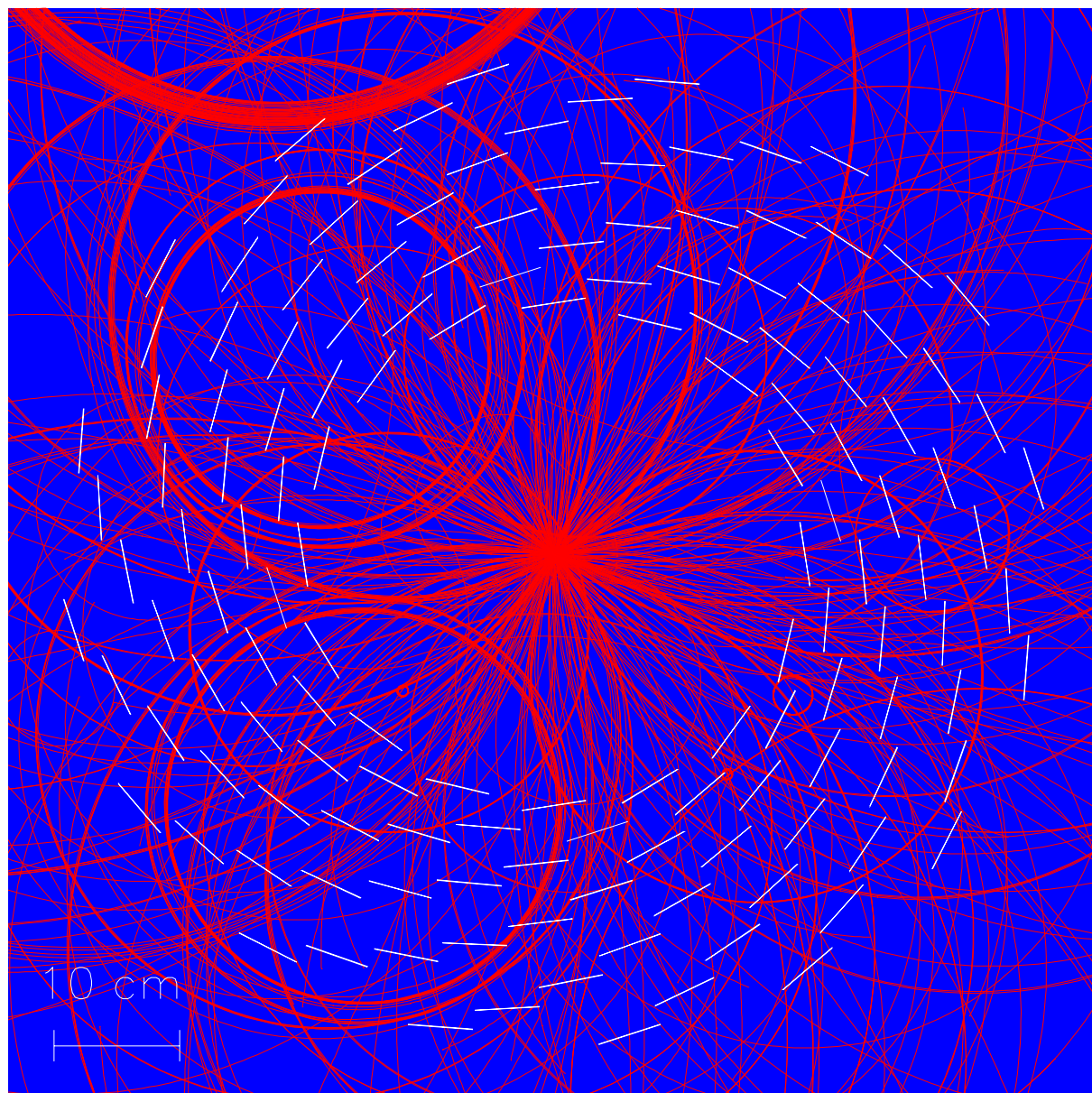
MUON ENDCAPS

Cathode Strip Chambers (CSC)
Resistive Plate Chambers (RPC)

Waga 12 500 ton
Średnica 15 m
Długość 22 m
Pole magn. 4 Tesle

Łamigłówka

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

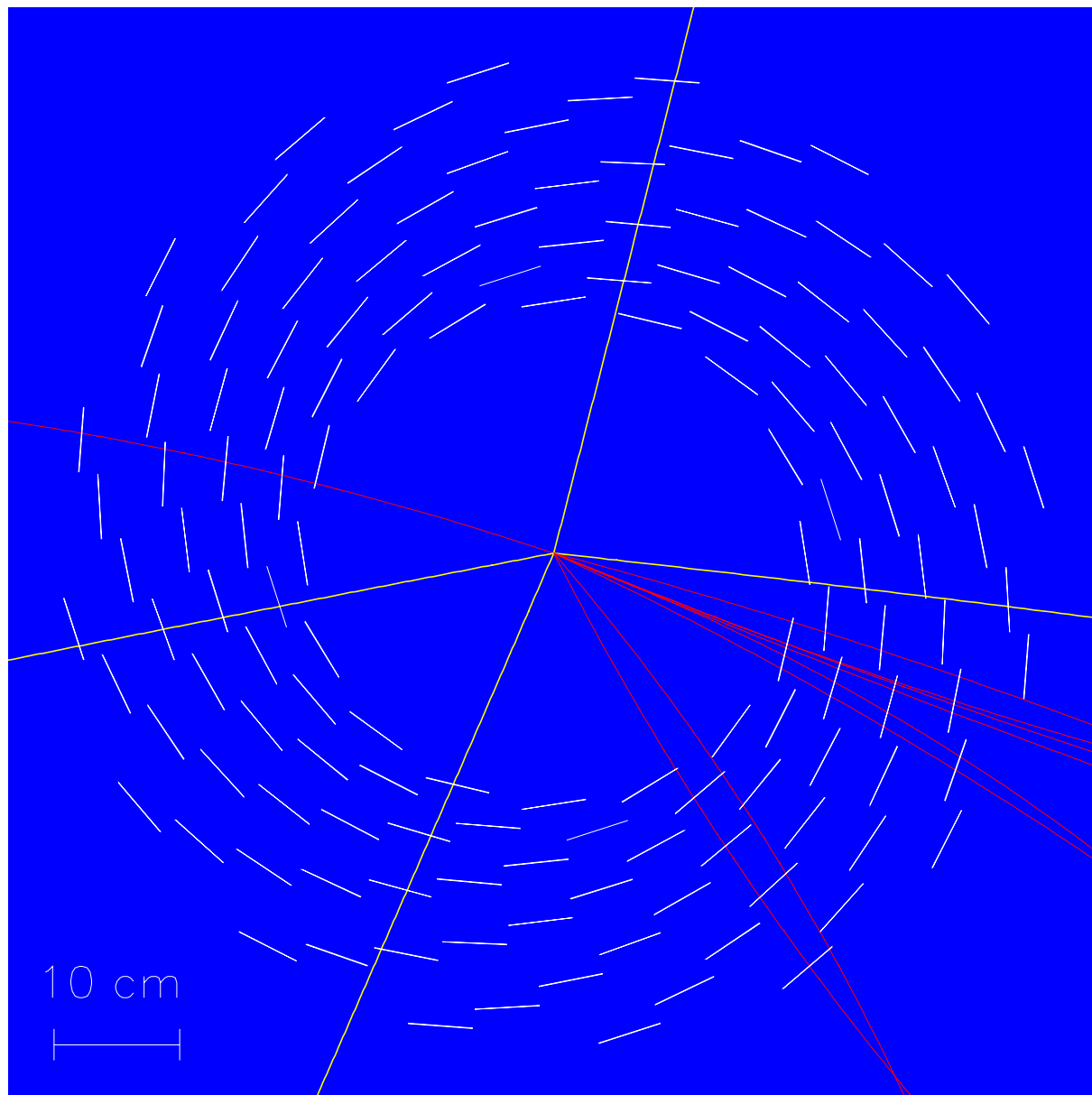


Znajdź 4 proste ślady.

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

Selekcja przypadków

W ciągu 10 lat pracy LHC zajdzie 10^{17} zderzeń pp.

Zaobserwowanie 10 “egzotycznych” przypadków może stanowić epokowe odkrycie “nowej fizyki”.

Należy jednak umieć odszukać owe **10** przypadków wśród wszystkich **10^{17}** .

Szukanie igły w stogu siana?

- typowa igła — 5 mm^3
- typowy stóg siana — 50 m^3

$$\text{igła : stóg} = 1 : 10^{10}$$

**Poszukiwanie “nowej fizyki” w LHC
to szukanie igły w milionie stogów siana.**

Eksperyment CMS w liczbach

fizyków: ~2000

instytucji: 150

krajów: 30

rozpoczęcie projektowania: rok 1990

planowane uruchomienie: rok 2005

zakończenie analizy danych: rok 2020?

masa: 12 500 ton

średnica: 15 m

długość: 22 m

prąd magnesu nadprzewodzącego: 1000 A

pole magnetyczne: 4T = 80 000 x ziemskie (W-wa)

precyzja pomiaru toru cząstki: 20-100 μm

liczba zderzeń pp: miliard/s = 10^{16} /rok

liczba kanałów elektroniki: 100 000 000

strumień danych przetwarzanych: 500 Gbitów/s

strumień danych zapisanych: 100 MB/s = 10 000 GB/dzień

moc obliczeniowa: 5 000 000 MIPS

Co z tego mamy?

Motyw zasadniczy:

Ludzkie dążenie do poznania i zrozumienia świata.

Nauka jako jeden z podstawowych składników kultury.

“Produkt uboczny”:

Rozwój technik akceleratorowych i detektorowych.

Zastosowania w medycynie, przemyśle, kryminalistyce, archeologii.

Daleka perspektywa

Praktyczne zastosowania odkryć CMS/LHC przyjdą za 50-100 lat, ale przyjdą na pewno!

Przykłady z historii:

- Faraday (~1850) — pole elektryczne i magnetyczne
– dziś nie wyobrażamy sobie życia bez elektryczności
- Mechanika kwantowa (~1920)
– elektronika, komputery, ...