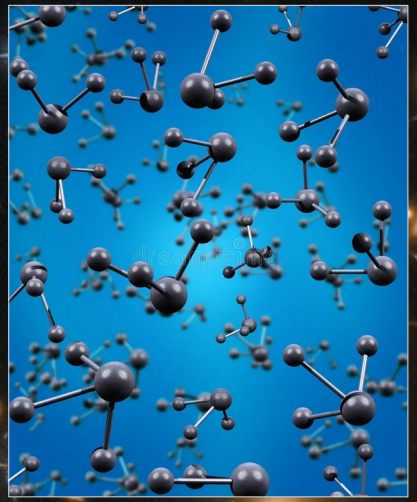
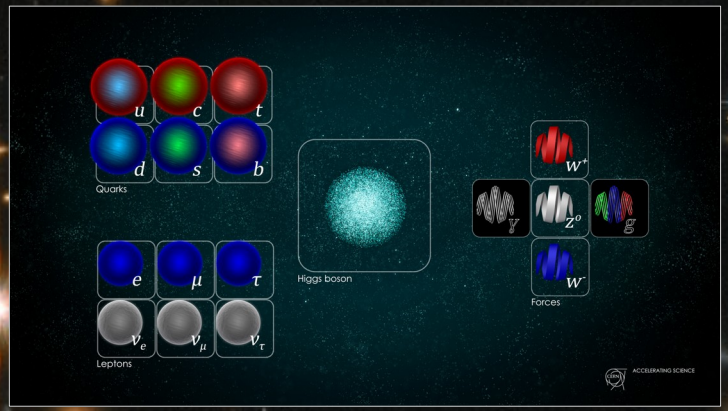
Zrozumieć świat materialny





https://esahubble.org/images
Particles of the Standard Model of particle physics (Image: Daniel Dominguez/CERN)

Krzysztof Woźniak
IFJ PAN, Kraków

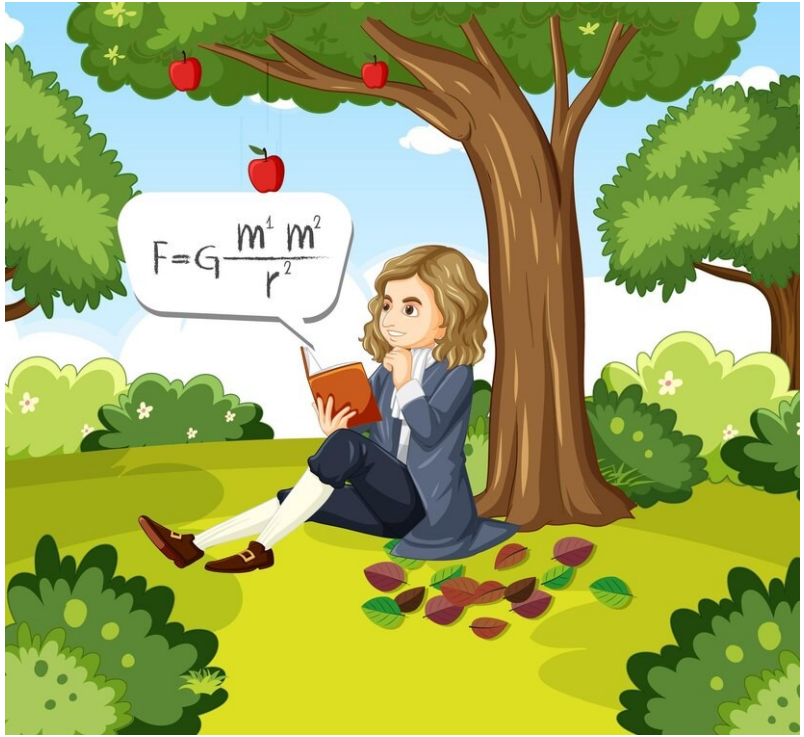
Zadziwiający świat

Ludzie (przynajmniej niektórzy) są ciekawi świata

- obserwują otoczenie i zjawiska
- starają się zrozumieć prawa natury
- tworzą teorie opisujący świat w sposób możliwie **uporządkowany i prosty**

Matematyka okazuje się dobrym narzędziem do opisu rzeczywistości fizycznej.

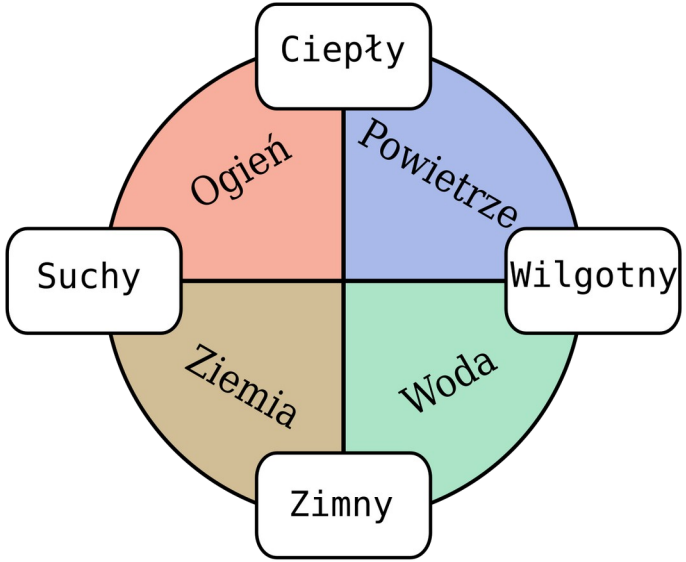
Mimo wysiłków wielu ludzi od tysięcy lat wciąż pozostają zjawiska, który nie są opisywane przez istniejące teorie.



Filozoficzne wyjaśnienia świata materialnego

Empedokles (494-434 p.n.e.):

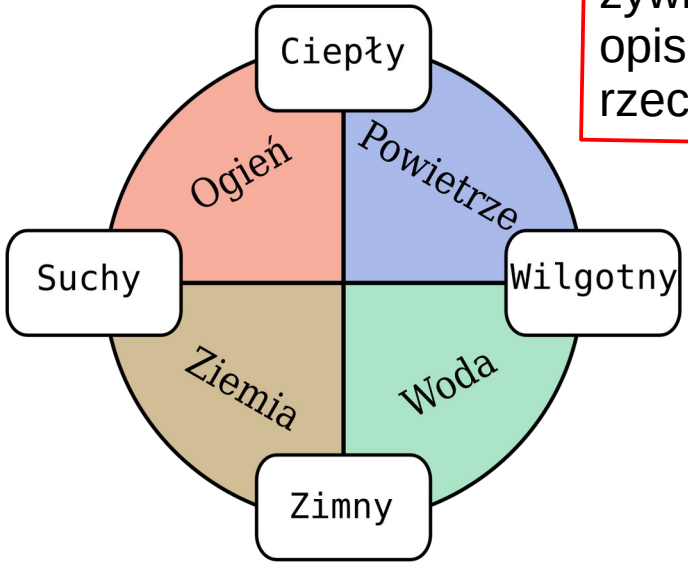
- istnieją **cztery** niezmienne żywioły
- rzeczy różnią się proporcjami w jakich zmieszane są te podstawowe elementy
- **dwie** siły: spajająca (miłość) i odpychająca (waśń)

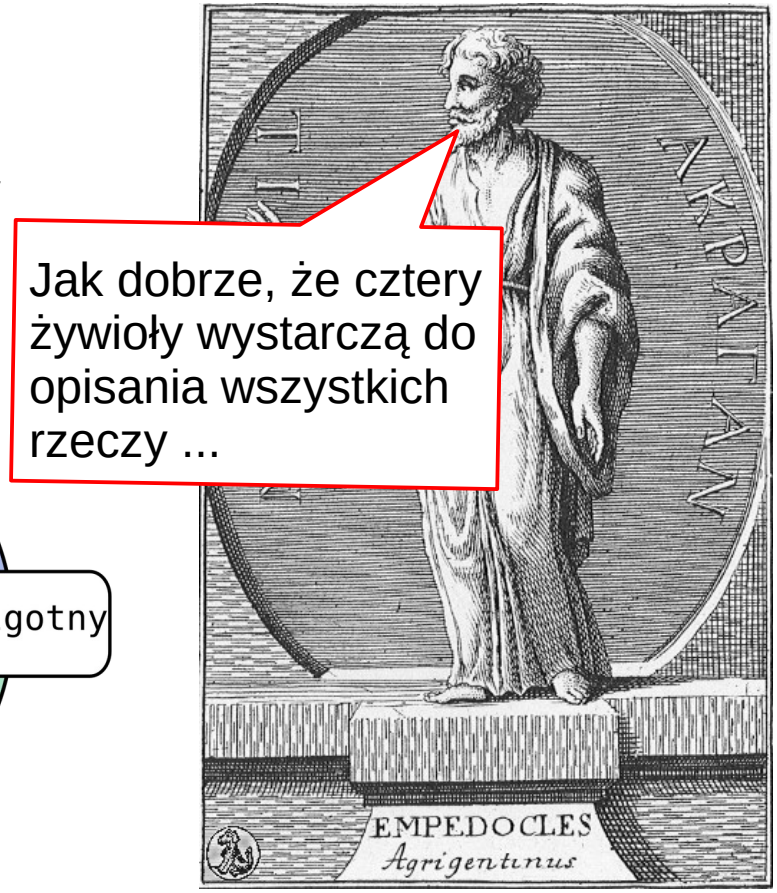


Filozoficzne wyjaśnienia świata materialnego

Empedokles (494-434 p.n.e.):

- istnieją **cztery** niezmienne żywioły
- rzeczy różnią się proporcjami w jakich zmieszane są te podstawowe elementy
- **dwie** siły: spajająca (miłość) i odpychająca (waśń)

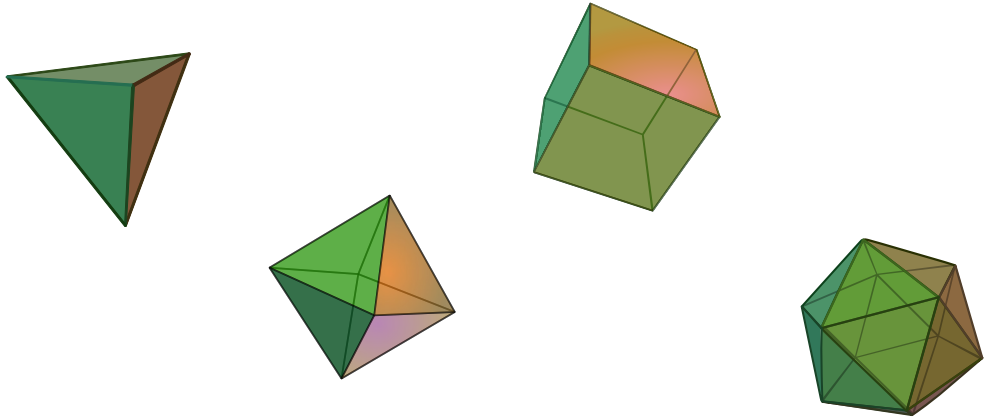


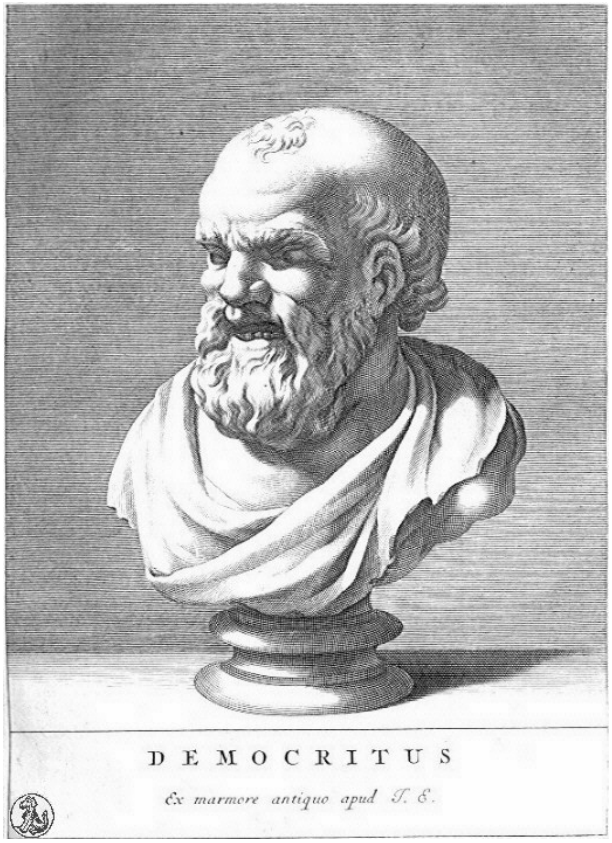


Filozoficzne wyjaśnienia świata materialnego

Demokryt (460-370 p.n.e.):

- **cała materia składa się z niepodzielnych atomów**
- atomy różnią się kształtem
- atomy są w ciągłym ruchu w próżni





Chemiczne wyjaśnienia świata materialnego

Dalton (1776-1844):

- **cała materia składa się z niepodzielnych atomów**
- atomy jednego pierwiastka mają identyczne własności
- atomy różnych pierwiastków mają różne masy

Chemiczne wyjaśnienia świata materialnego

Dalton (1776-1844):

- **cała materia składa się z niepodzielnych atomów**
- atomy jednego pierwiastka mają identyczne własności
- atomy różnych pierwiastków mają różne masy
- **związki chemiczne składają się z określonych atomów**

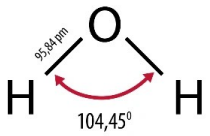
H_2O $C_{12}H_{22}O_{11}$

Chemiczne wyjaśnienia świata materialnego

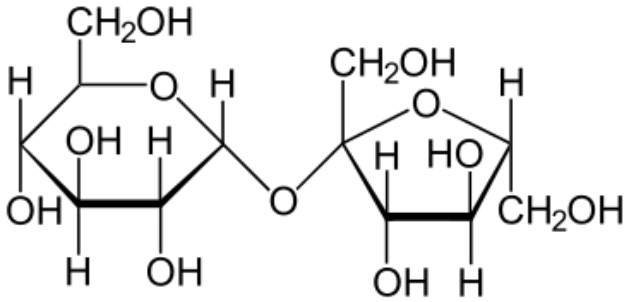
Dalton (1776-1844):

- **cała materia składa się z niepodzielnych atomów**
- atomy jednego pierwiastka mają identyczne własności
- atomy różnych pierwiastków mają różne masy
- związki chemiczne składają się z określonych atomów
- **możliwe jest określenie geometrii połączeń między atomami**

woda



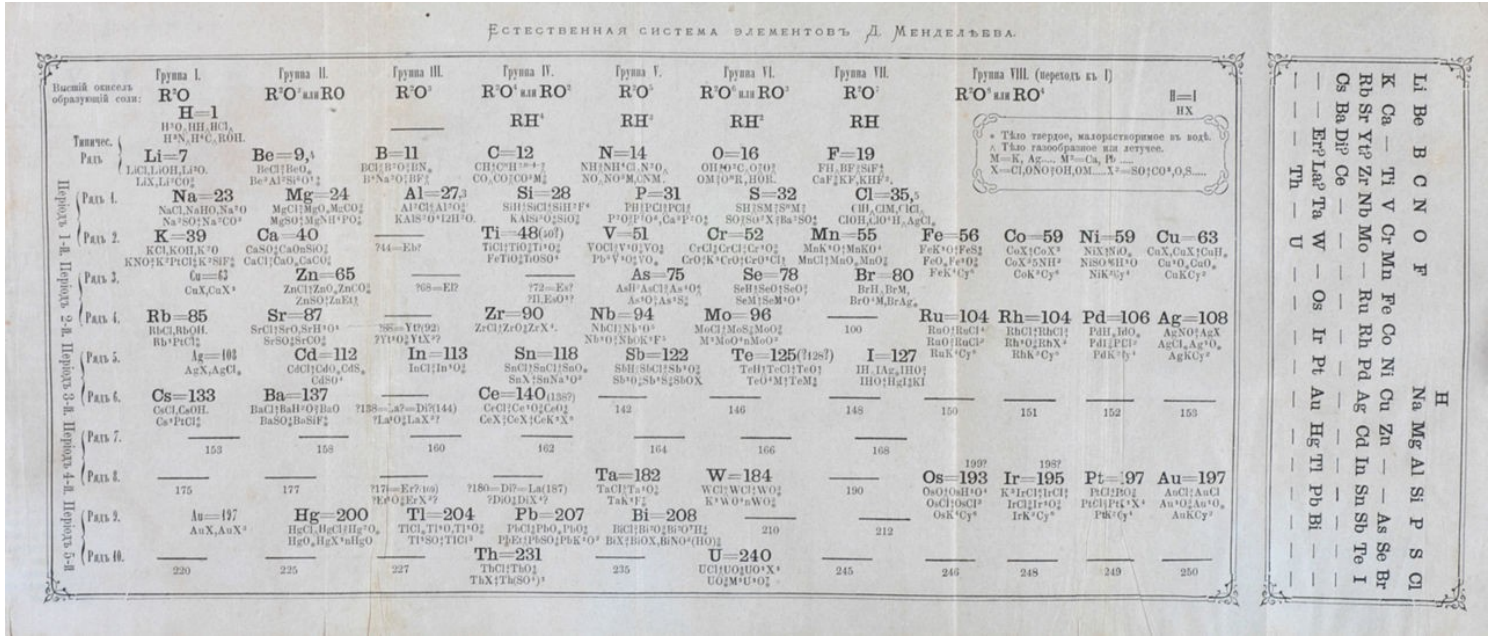
sacharoza



Chemiczne wyjaśnienia świata materialnego

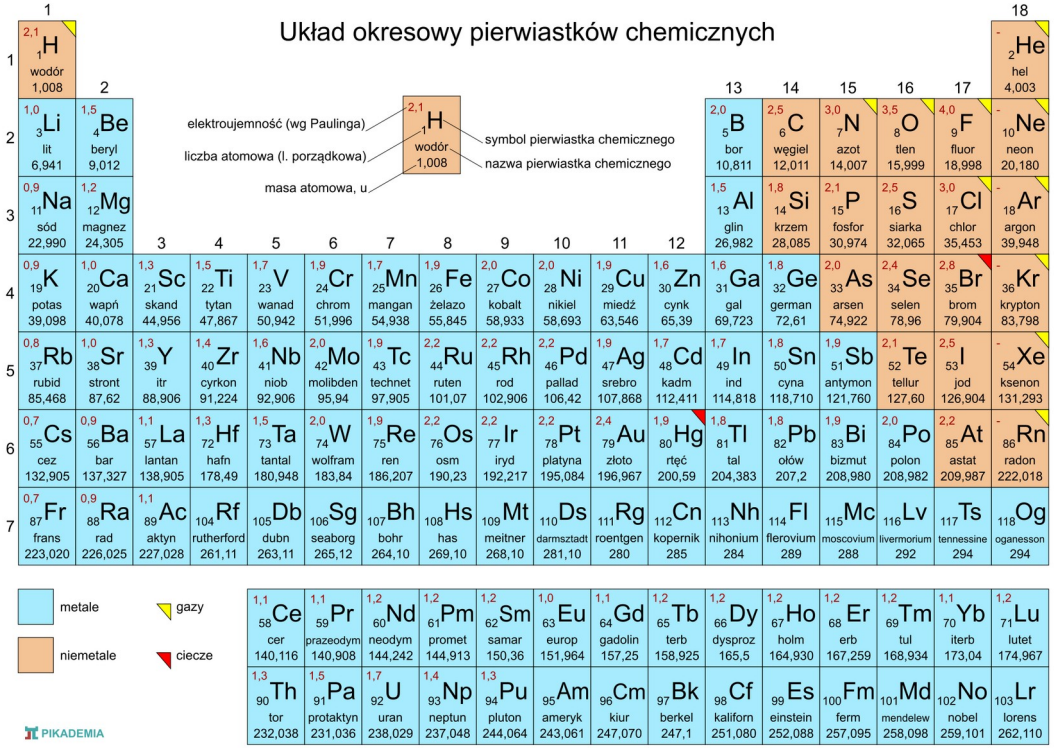
Układ okresowy pierwiastków - próba "uporządkowania" rodzajów atomów o podobnych własnościach

- 8 grup pierwiastków - Mendelejew 1870
- **systematyka doświadczalna - bez głębszego uzasadnienia**



Chemiczne wyjaśnienia świata materialnego

Układ okresowy pierwiastków
- aktualnie kilkanaście grup pierwiastków



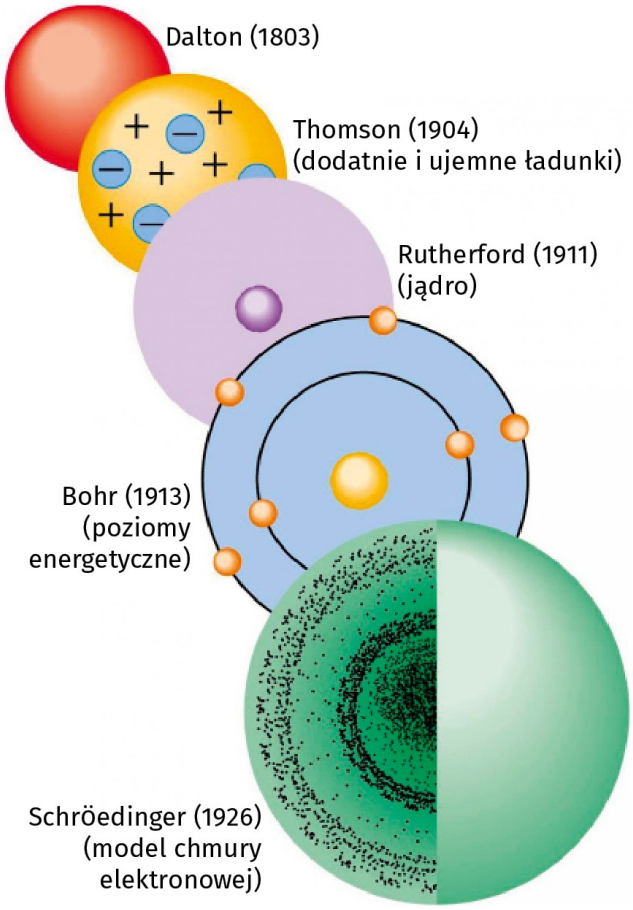
pikademia.pl

Rozwój teorii atomów

- w atomach są ładunki dodatnie i ujemne
- ładunek dodatni jest skoncentrowany w jądrze
- elektrony mają określoną energię
- pozycja elektronów nie jest określona
  są one rozmyte w przestrzeni
- **własności chemiczne wynikają ze sposobu obsadzenia poziomów energetycznych przez elektrony**

Atomy przestały być niepodzielne, ale stały się obiektami złożonymi z mniejszych cząstek:

- **elektronów**
- **kilkuset różnych jąder**



Cząstki elementarne

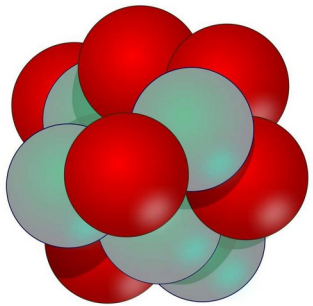
Jądra są obiektami złożonymi z bardziej podstawowych składników. Do opisu powszechnie występującej materii wystarczą cztery rodzaje cząstek:

- proton
- neutron
- elektron
- foton

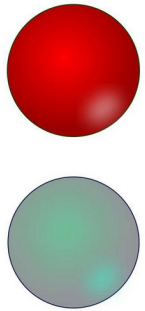
oraz dwa podstawowe oddziaływania:

- elektromagnetyczne
- grawitacyjne

Stan do 1935 r.



Jądro



proton

neutron

Wracamy do **czterech** podstawowych elementów i **dwu** oddziaływań!

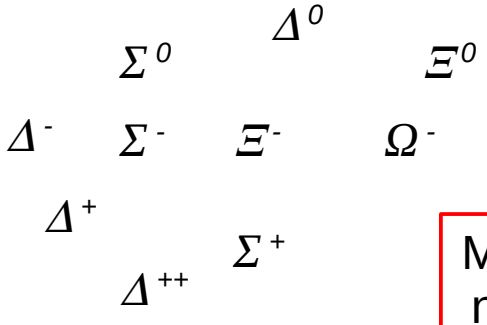
Jedyny problem:
co utrzymuje protony w jądrze? - **hipotetyczne oddziaływanie silne**

ZOO cząstek elementarnych

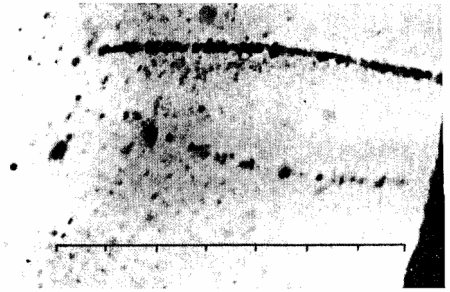
Obserwacja w promieniowaniu kosmicznym cząstki zachowującej się inaczej niż elektron lub proton zapoczątkowała od 1936 r. okres odkrywania **setek** dodatkowych cząstek

- **eksperymenty**: badanie ich własności
- **teoria**: poszukiwanie prawidłowości

Znalezione symetrie przewidywały istnienie cząstek, które potem były znajdowane

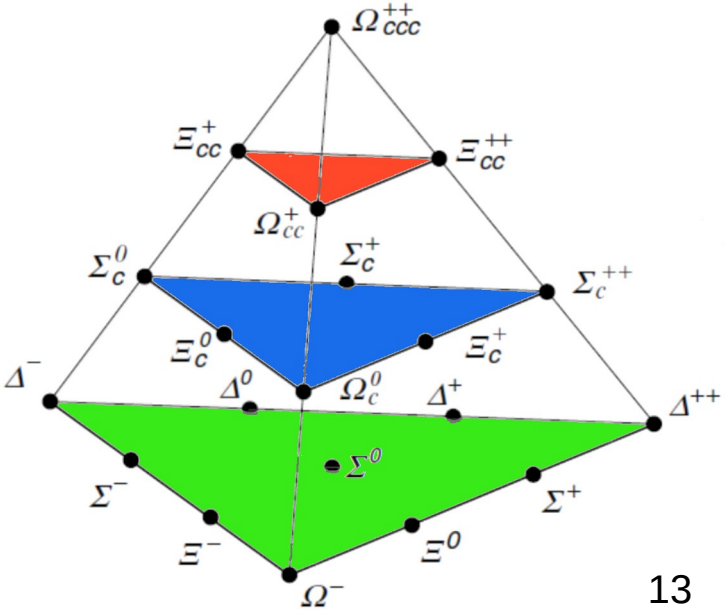


Może te cząstki wcale nie są elementarne?



"The other double trace of the same type (figure 5) shows closely together the thin trace of an electron of 37 MeV, and a much more strongly ionizing positive particle whith a much larger bending radius. The nature of this particle is unknown; for a proton it does not ionize enough and for a positive electron the ionization is too strong. The present double trace is probably a segment from a "shower" of particles as they have been observed by Blackett and Occhialini, i.e. the result of a nuclear explosion".

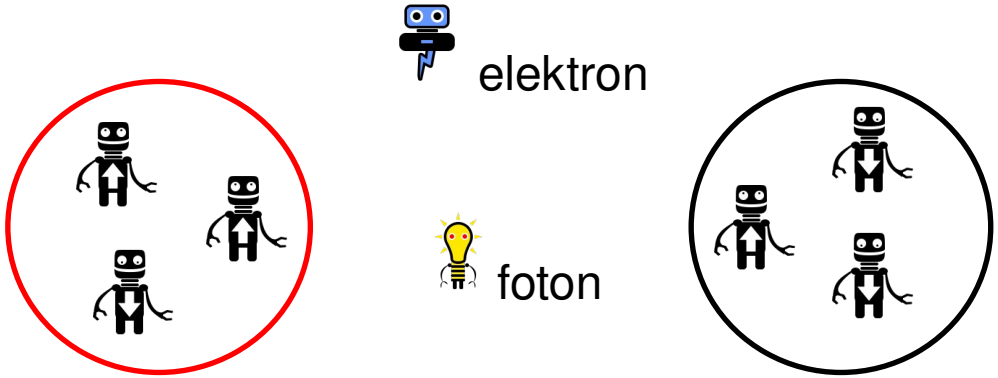
Kunze, P., Z. Phys. 83, (1933) 1



Cząstki rzeczywiście elementarne

Hipoteza kwarków wyjaśniła mnogość i własności znajdowanych cząstek i zredukowała liczbę cząstek elementarnych do kilkunastu.

Elektron i foton pozostały cząstkami elementarnymi, a protony, neutrony i liczne cząstki zwane hadronami są cząstkami złożonymi.



protony i neutrony są zbudowane z dwu rodzajów kwarków, zwanych dolnym i górnym.

Znowu mamy cztery podstawowe składniki materii!

Oddziaływania cząstek elementarnych

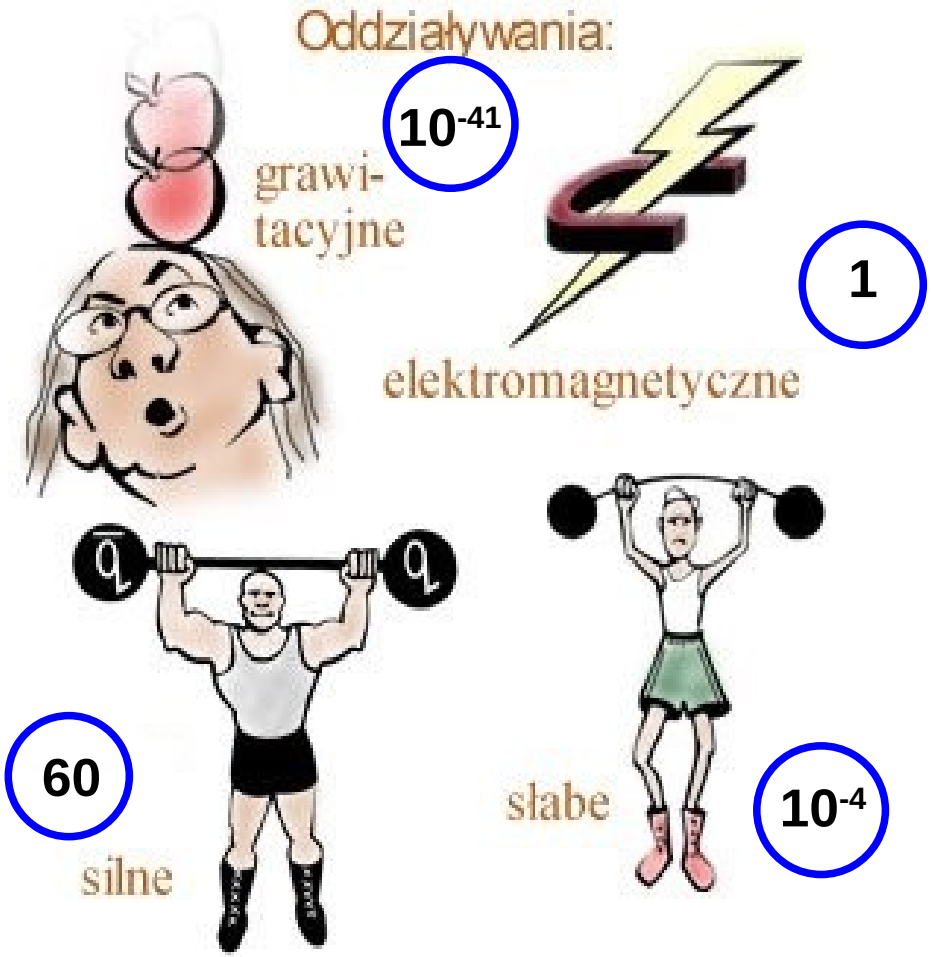
W życiu codziennym bezpośrednio obserwujemy dwa oddziaływania:

- **grawitacyjne**
- **elektromagnetyczne**

Cząstki elementarne "odczuwają" także dwa inne oddziaływania:

- **silne**
- **słabe**

Jest też oddziaływanie z polem Brout-Englert-Higgs'a, ale ma ono inny charakter

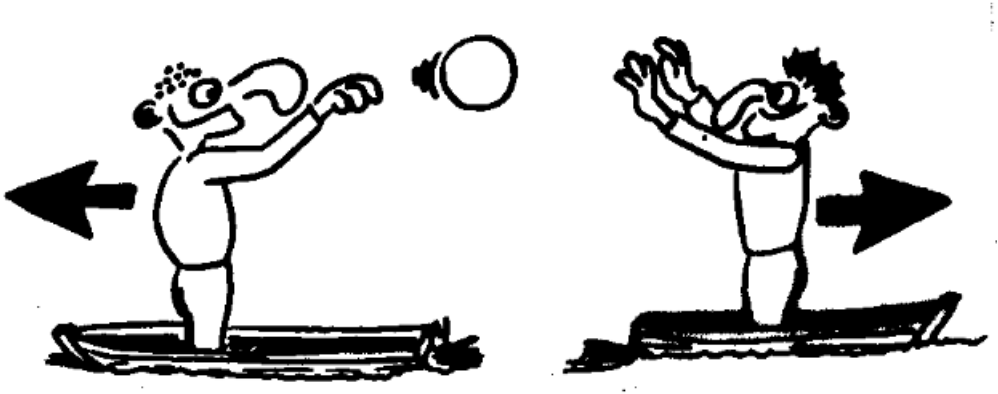


Cząstki pośredniczące

Cząstki elementarne nie oddziałują ze sobą "na odległość", potrzebują do tego pośrednika. Odpychanie się dwu cząstek o takim samym ładunku można porównać do przerzucania piłki przez dwie osoby na łódkach. W wyniku takiej wymiany łódki zaczną się od siebie oddalać.

Dla cząstek naładowanych takimi "piłkami" są **fotony**. Co ciekawe, odpowiadają one zarówno za odpychanie (**+** od **+**) jak i przyciąganie się cząstek (**+** do **-**).

W oddziaływaniu silnym cząstkami pośredniczącymi są **gluony**,
a w oddziaływaniu słabym bozony Z^0, W^+ i W^-.



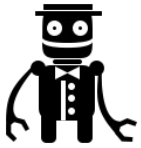
A co z grawitacją?

Więcej cząstek elementarnych - trzy rodziny

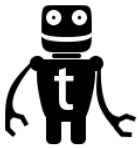
Oprócz trzech cząstek tworzących "zwykłą" materię (kwarki dolny i górny oraz elektron) są jeszcze cztery cięższe kwarki, dwa ciężkie "wersje" elektronu oraz odpowiadające im trzy rodzaje neutrin. Mówimy, ze są trzy rodziny cząstek zwanych fermionami (fermiony = kwarki I leptony)

Kwarki

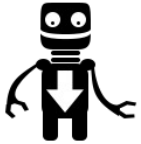
Górny



Powabny



Szczytowy (Wysoki)



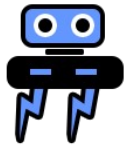
Dolny

Dziwny

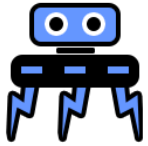
Spodni (Niski) lub piękny

Leptony

Elektron



Mion



Taon

Neutrino elektronowe

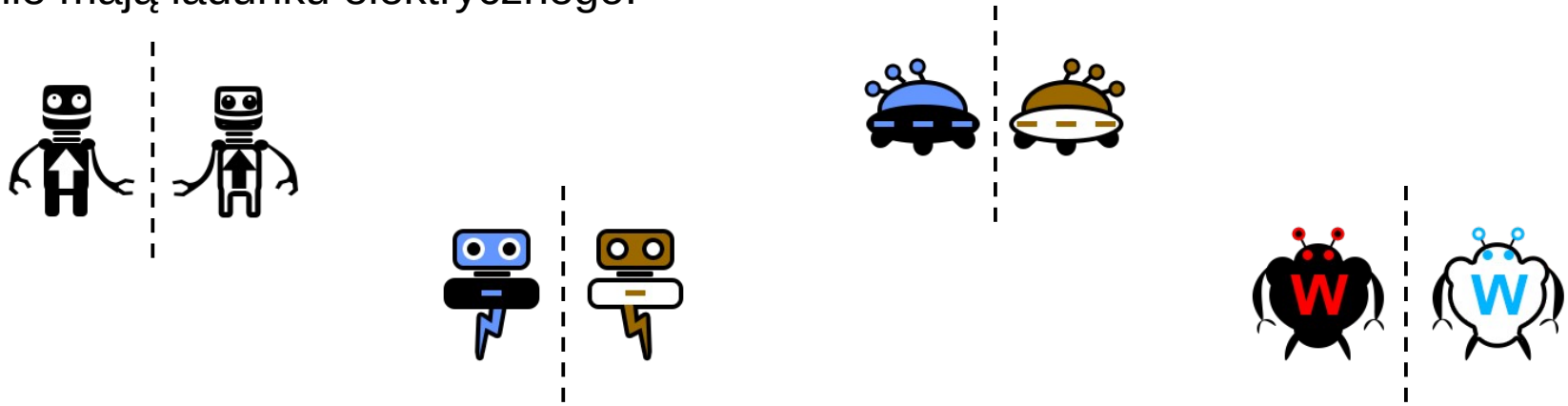
Neutrino mionowe

Neutrino taonowe

Więcej cząstek elementarnych - antycząstki

Oprócz "normalnych" cząstek elementarnych są odpowiadające im antycząstki
Mają one taką samą **masę** i **czas życia**, ale przeciwny **znak ładunku elektrycznego** oraz znaki innych liczb kwantowych (spin, liczba barionowa, leptonowa, ...)

Niektóre cząstki z zerowym ładunkiem elektrycznym (np. foton, bozon Z^0) są same dla siebie antycząstką. Nie dotyczy to neutrin: antyneutrina są różne od neutrin, choć oba nie mają ładunku elektrycznego.

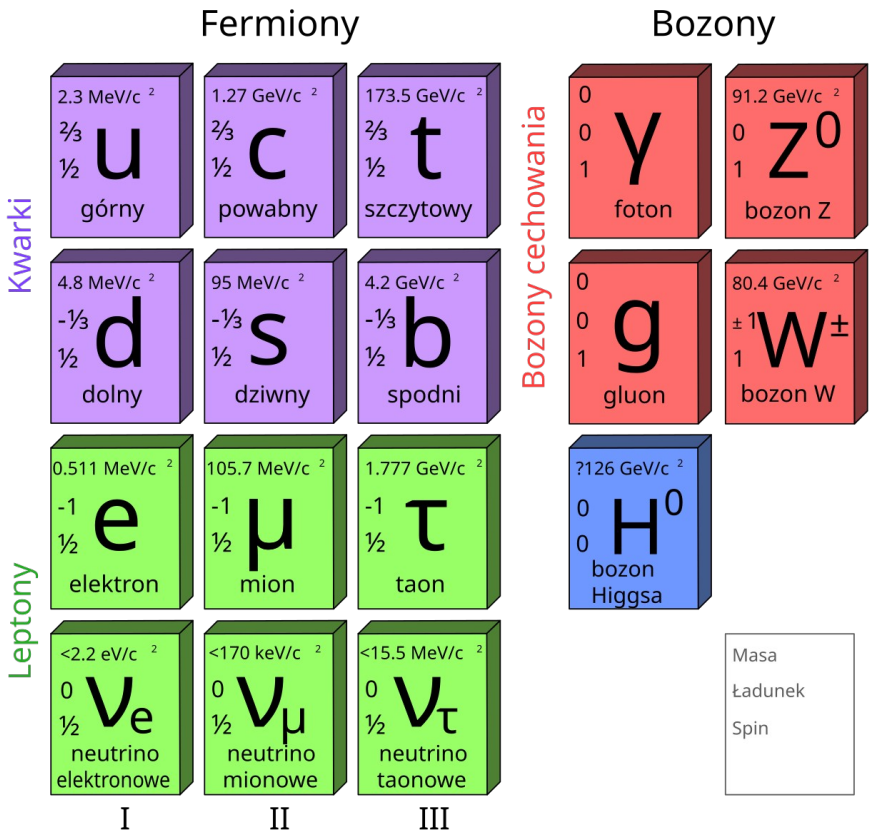


To, że we Wszechświecie nie ma antymaterii jest dotąd nierozwiązaną zagadką

Model Standardowy

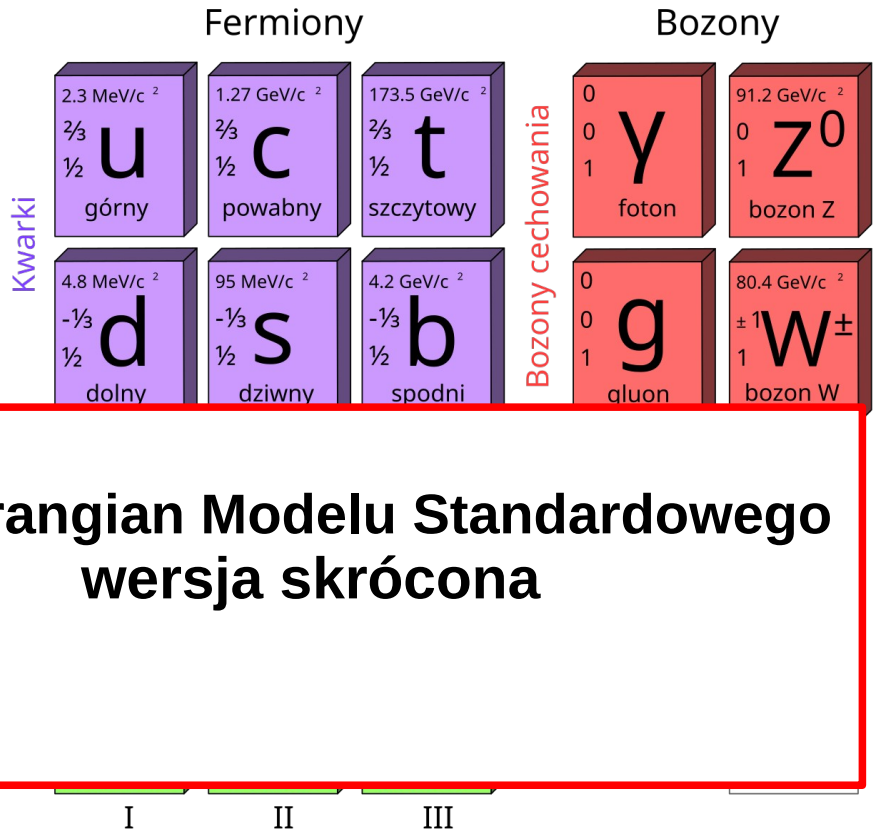
Teoria zwana Modelem Standardowym

- uwzględnia **trzy** rodziny fermionów
- opisuje **trzy** oddziaływania: elektromagnetyczne, słabe i silne
- zawiera mechanizm nadający masę cząstkom - pole Higgs'a



Model Standardowy

Teoria zwana Modelem Standardowym
- uwzględnia trzy rodziny fermionów
- opisuje oddziaływania elektromagnetyczne, słabe i silne
- zawiera mechanizm nadający masę cząstkom - pole Higgs'a



$$\mathscr{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}$$
$$+i\bar{\psi}D\psi + h.c.$$
$$+\bar{\psi}_i y_{ij}\psi_j\phi + h.c.$$
$$+|D_\mu\phi|^2 - V(\phi)$$

Lagrangian Modelu Standardowego wersja skrócona

https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6552/aa5b25

Model Standardowy zawiera wiele parametrów o arbitralnych wartościach oraz nie opisuje grawitacji

Model Standardowy

Lagrangian Modelu Standardowego wersja rozszerzona

Teoria zwana Modelem Standardowym

- uwzględnia trzy rodziny fermionów
- opisuje oddziaływania elektromagnetyczne, słabe i silne
- zawiera mechanizm nadający masę cząstkom - pole Higgs'a

$$
\begin{aligned}
\mathcal{L} = & -\frac{1}{4} W_a^{\mu\nu} W_{\mu\nu}^a - \frac{1}{4} B^{\mu\nu} B_{\mu\nu} + (D_\mu \phi)^\dagger (D^\mu \phi) - \mu^2 |\phi|^2 - \lambda |\phi|^4 \\
& + \sum_i \left(\bar{L}^i i \not{D} L^i + \bar{R}^i i \not{D} R^i + \bar{Q}_L^i i \not{D} Q_L^i + \bar{u}_R^i i \not{D} u_R^i + \bar{d}_R^i i \not{D} d_R^i \right) \\
& - \sqrt{2} \sum_{ij} \left(\lambda^{ij} \bar{L}^i \phi R^j + \lambda_d^{ij} \bar{Q}_L^i \phi d_R^j + \lambda_u^{ij} \bar{Q}_L^i \phi^c u_R^j + \text{h.c.} \right) \\
& - \frac{1}{4} G_a^{\mu\nu} G_{\mu\nu}^a + \sum_f \bar{q}^f i \not{D}_{\text{QCD}} q^f
\end{aligned}
$$

L, R - leptony
Q, u, d, q - kwarki
W, B - fotony, Z^0, W^{+-}
G - gluony
ϕ - pole Higgs'a
D - operator
μ, λ - parametry

https://plus.maths.org/content/our-theory-very-nearly-everything-matter-and-forces

Model Standardowy zawiera wiele parametrów o arbitralnych wartościach oraz nie opisuje grawitacji

Masa cząstek elementarnych

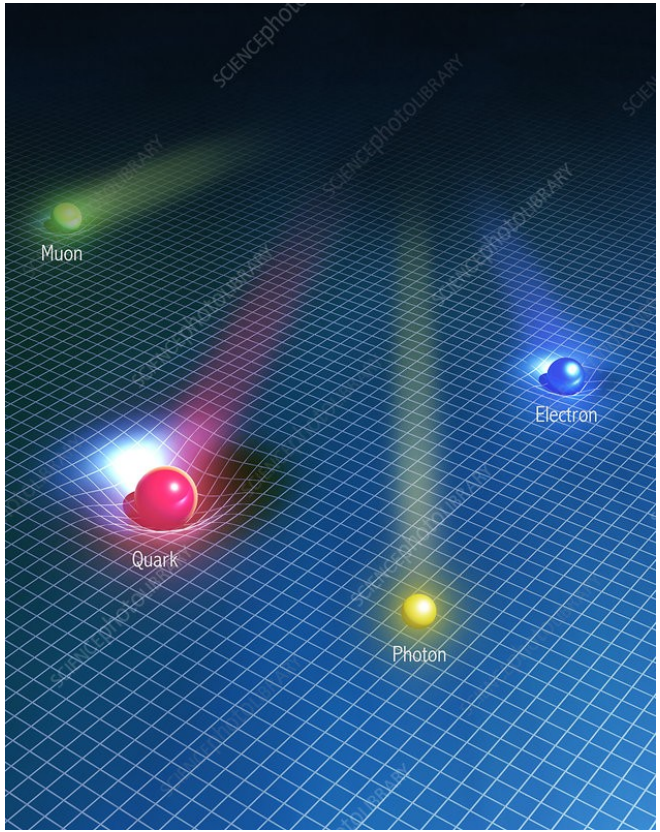
W pierwszej, podstawowej wersji Modelu Standardowego wszystkie cząstki elementarne miały masę zerową - co jest sprzeczne z doświadczeniem.

Dla "nadania" cząstkom masy zaproponowano postulat istnienia **hipotetycznego pola skalarnego nazwanego polem Higgs'a** (choć ten sam pomysł niezależnie zaproponowali Robert Brout i Francois Englert).

Im silniej cząstka oddziałuje z tym polem - tym większą ma masę.

Foton nie oddziałuje z polem Higgs'a - ma zerową masę i może poruszać się w polu Higgs'a z maksymalna prędkością - prędkością światła

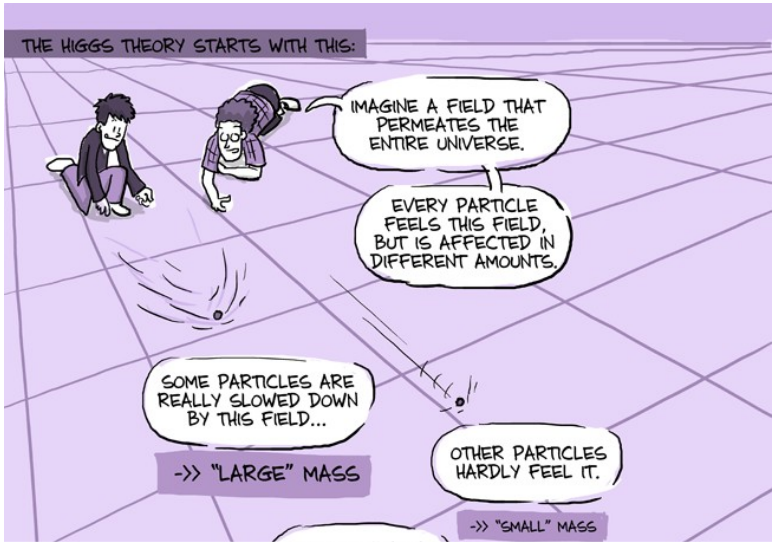
Cząstka Higgs'a jest **stanem wzbudzonym** pola Higgs'a



Credit MARK GARLICK / SCIENCE PHOTO LIBRARY

Masa cząstek elementarnych

Pole Higgs'a rozwiązuje problem mas cząstek - mają różne masy, bo różnie oddziałują z polem Higgs'a



Credit JORGE CHAM / PhD Comics

Masa cząstek elementarnych

Pole Higgs'a rozwiązuje problem mas cząstek - mają różne masy, bo różnie oddziałują z polem Higgs'a

Ale dlaczego cząstki różnie oddziałują z polem Higgs'a ???

Credit JORGE CHAM / PhD Comics

Prawa zachowania

W fizyce klasycznej znanych jest kilka wielkości zachowywanych we wszystkich procesach

- masa
- energia
- pęd (wektorowo)
- moment pędu (wektorowo)
- ładunek elektryczny

W świecie cząstek elementarnych dochodzą dodatkowe wielkości

- masa+energia (zamiast osobno)
- liczba barionowa
- liczba leptonowa

Są też specyficzne dal cząstek elementarnych wielkości zachowywane tylko w niektórych oddziaływaniach

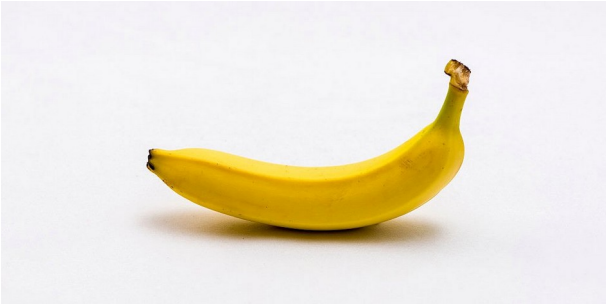
- parzystość (w elektromagnetycznych i silnych)
- izospin (w silnych)

Image by brgfx on Freepik

Antymateria

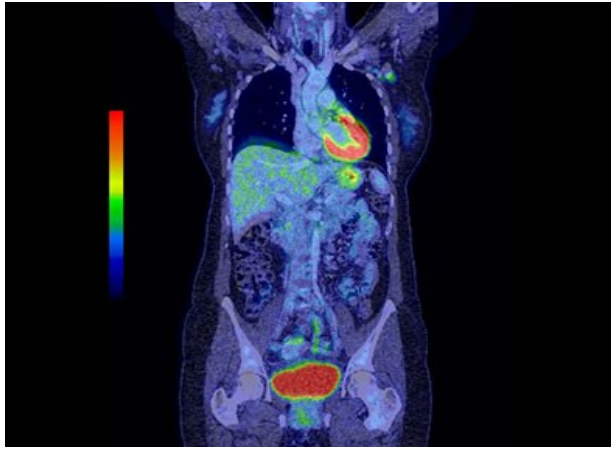
Dotąd we Wszechświecie nie znaleźliśmy skupisk antymaterii.

Antymateria pojawia się naturalnie jedynie w promieniowaniu kosmicznym i w rozpadach promieniotwórczych



Banan zawiera sporo potasu. W rozpadach jego nietrwałego izotopu powstaje 10 pozytonów (= antyelektronów) na sekundę

Zjawisko emisji pozytonów jest wykorzystywane w diagnostyce medycznej - skanowaniu PET (Positron Emission Tomography)



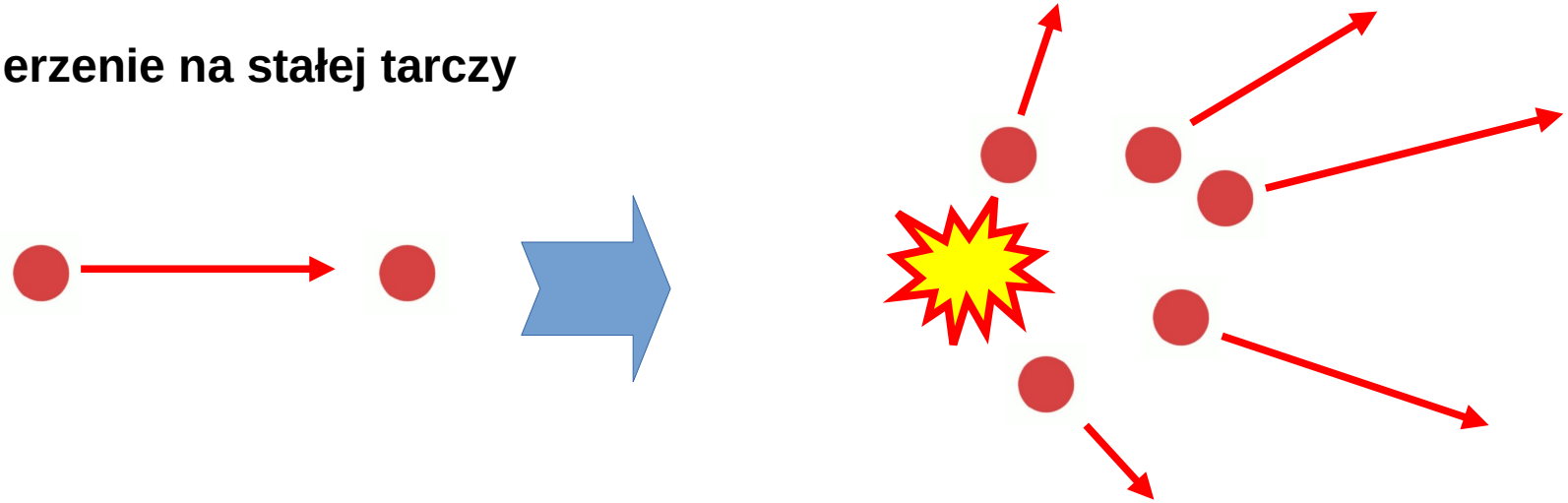
W CERN wytwarzana jest antymateria, ale w minimalnych ilościach. Zebranie 1 g antymaterii zajęło by 1 miliard lat.

Eksperyment ALPHA w CERN bada antyatomy wodoru czyli antyproton z krążącym wokół niego pozytonem.
W 2013 r. wykazał, że **antyatomy są przyciągane grawitacyjnie przez Ziemię.**

Uzyskiwanie nowych cząstek

W "normalnej" materii mamy niewiele cząstek elementarnych. Pozostałe możemy otrzymać zderzając ze sobą cząstki trwałe: protony, elektrony oraz jakoś wcześniej wytwarzane pozytony lub antyprotony.

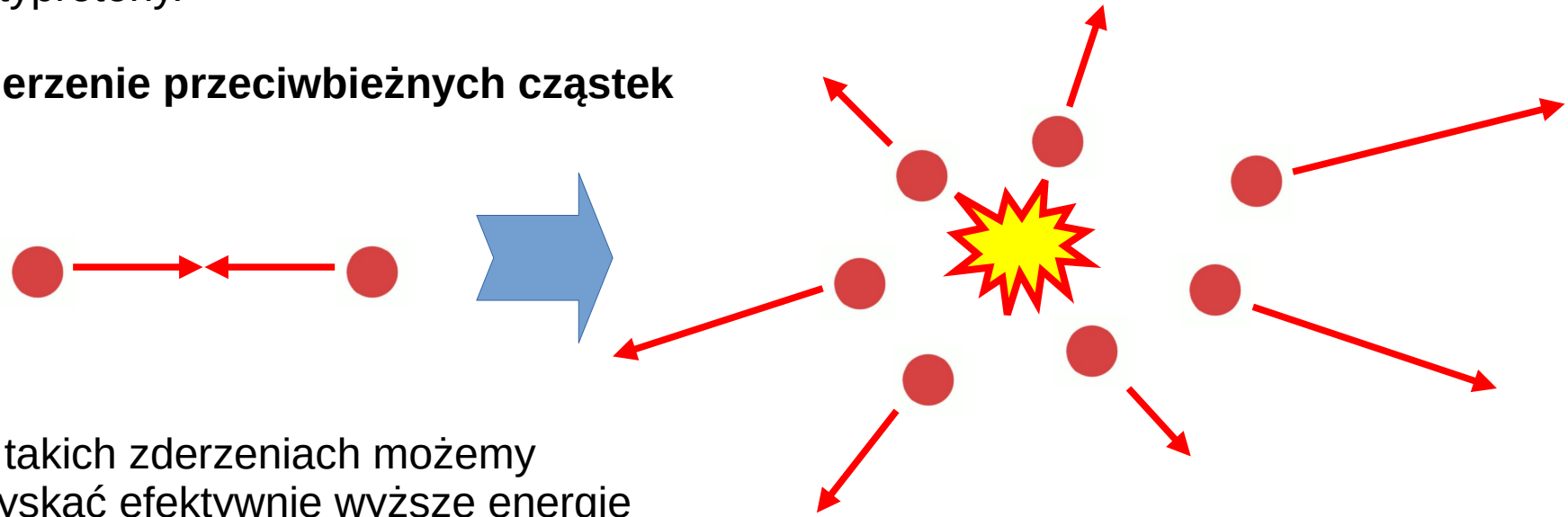
Zderzenie na stałej tarczy



Uzyskiwanie nowych cząstek

W "normalnej" materii mamy niewiele cząstek elementarnych. Pozostałe możemy otrzymać zderzając ze sobą cząstki trwałe: protony, elektrony oraz jakoś wcześniej wytwarzane pozytony lub antyprotony.

Zderzenie przeciwbieżnych cząstek



W takich zderzeniach możemy uzyskać efektywnie wyższe energie

Uzyskiwanie nowych cząstek

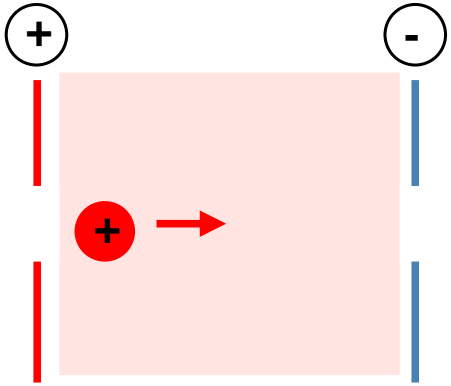
Zderzenia cząstek to brutalna metoda badawcza.
Trochę jak badanie aut przez ich zderzanie.

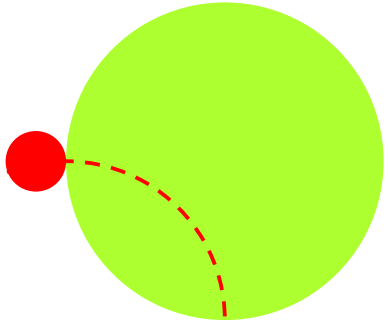
Uzyskiwanie nowych cząstek

Zderzenia cząstek to brutalna metoda badawcza.
Trochę jak badanie aut przez ich zderzanie.
Tyle, że zderzając auta dostajemy zawsze mniejsze elementy,
a zderzając cząstki możemy dostać coś dużo cięższego.

Przyspieszanie cząstek

Cząstki elementarne obdarzone ładunkiem mogą być przyspieszane w polu **elektrycznym**, a ich kierunek może być zmieniany w polu **magnetycznym**.

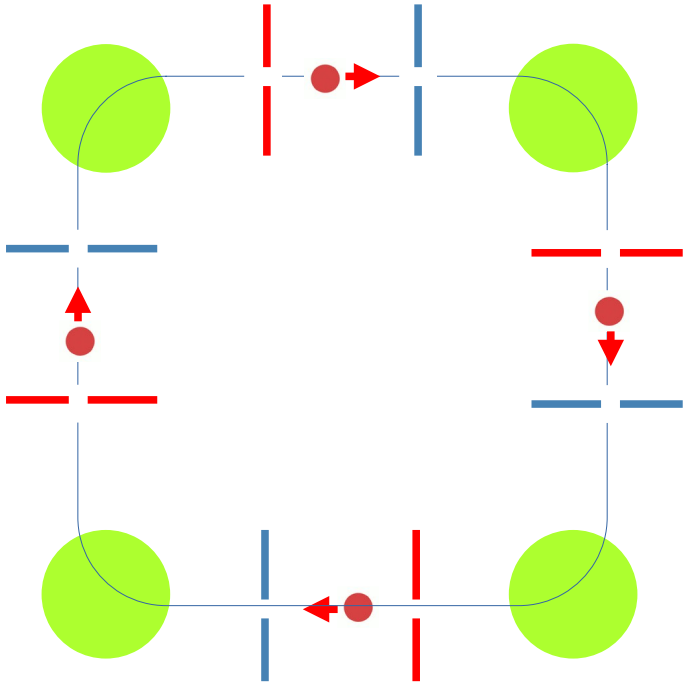




Maksymalne dostępne napięcie daje dość małe przyspieszenie.
Konieczne jest wielokrotne powtarzanie przyspieszania.

Przyspieszanie cząstek

Cząstki elementarne obdarzone ładunkiem mogą być przyspieszane w polu **elektrycznym**, a ich kierunek może być zmieniany w polu **magnetycznym**.



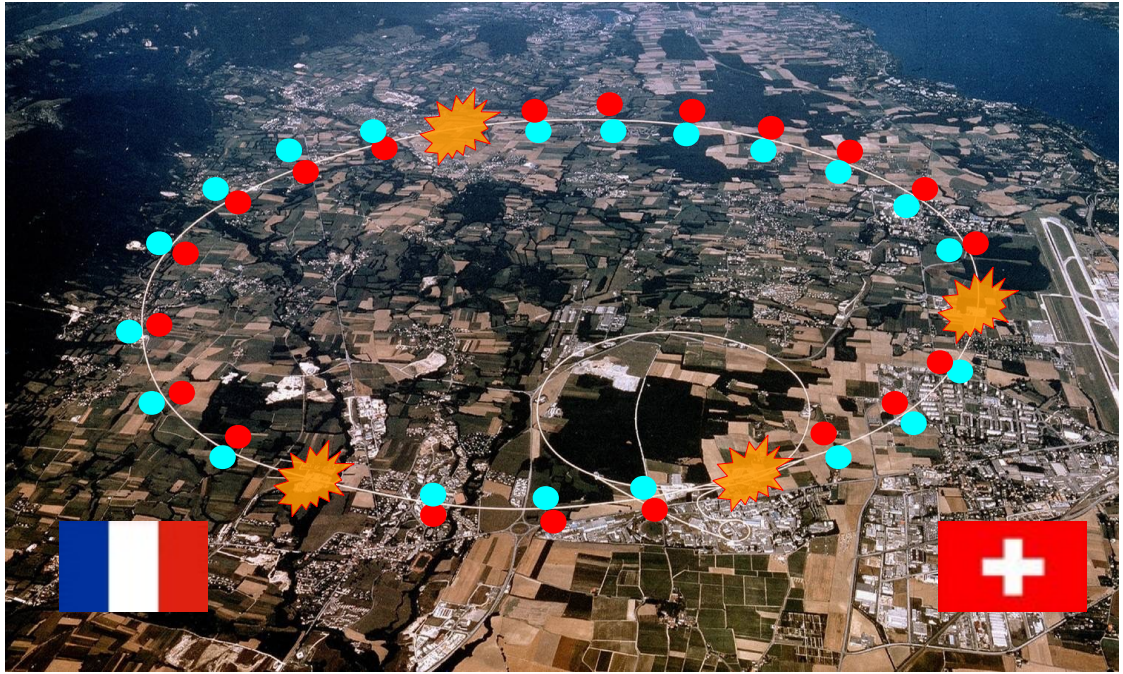
Najłatwiej powtarzać przyspieszanie cząstek krążących po ~okręgu.

Large Hadron Collider (LHC)

Urządzenia służące do przyspieszania (i zderzania) cząstek nazywamy **akceleratorami**. Największym z nich jest **Wielki Zderzacz Hadronów** w CERN pod Genewą.

W LHC zderzane są dwie wiązki protonów o energiach do 6.8 TeV lub jądra ołowiu, ksenonu, tlenu, deuteru ...

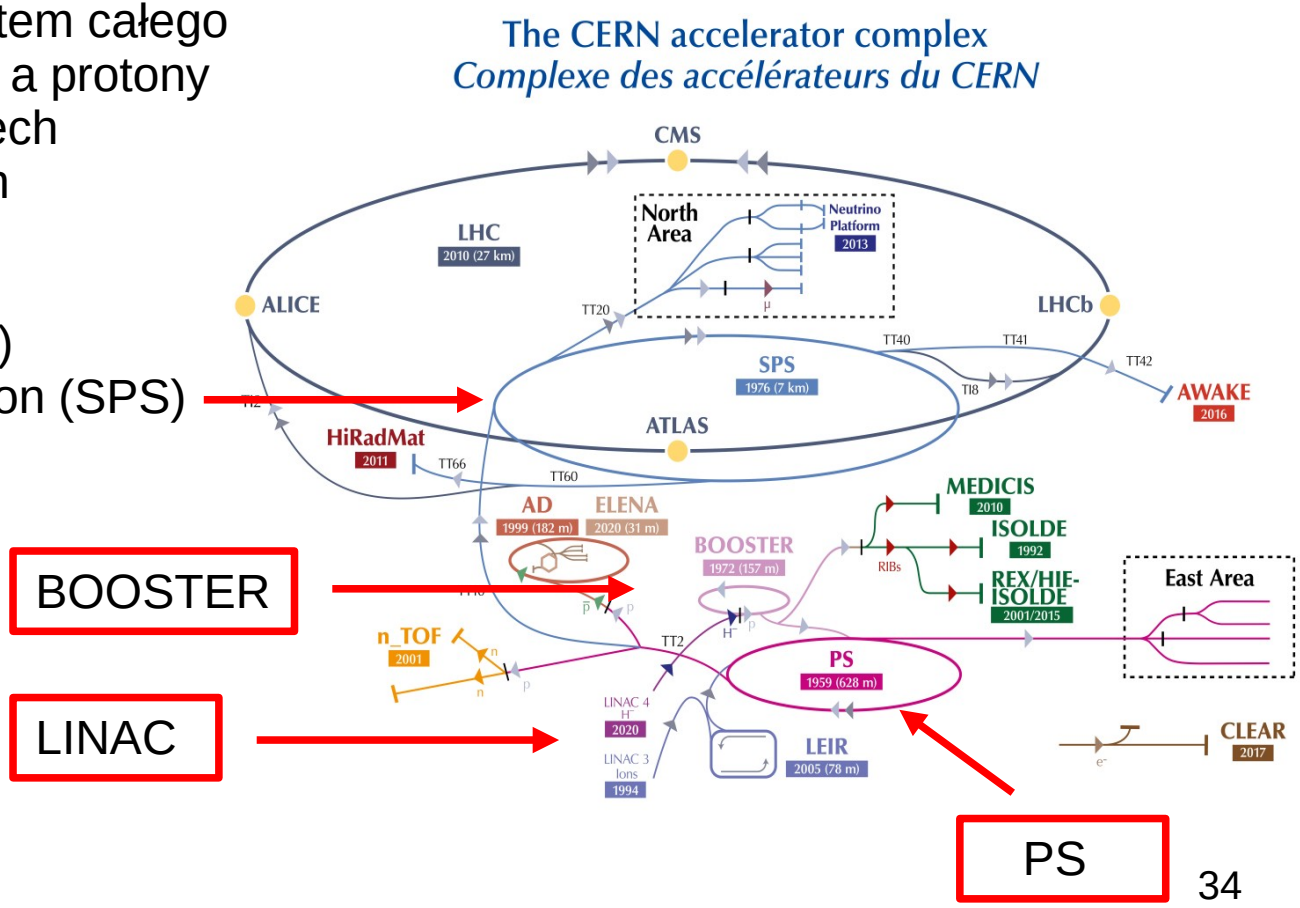
- jest w tunelu o długości 27 km 100 m pod ziemią
- jest najzimniejszym miejscem we Wszechświecie: ~9000 magnesów pracuje w temperaturze 1,9 K
- protony poruszają się w nim z prędkością 0,999999991 prędkości światła



Large Hadron Collider (LHC)

LHC jest ostatnim elementem całego kompleksu akceleratorów, a protony są przyspieszane w czterech kolejnych jego elementach

- LINAC
- BOOSTER
- Proton Synchrotron (PS)
- Super Proton Synchrotron (SPS)



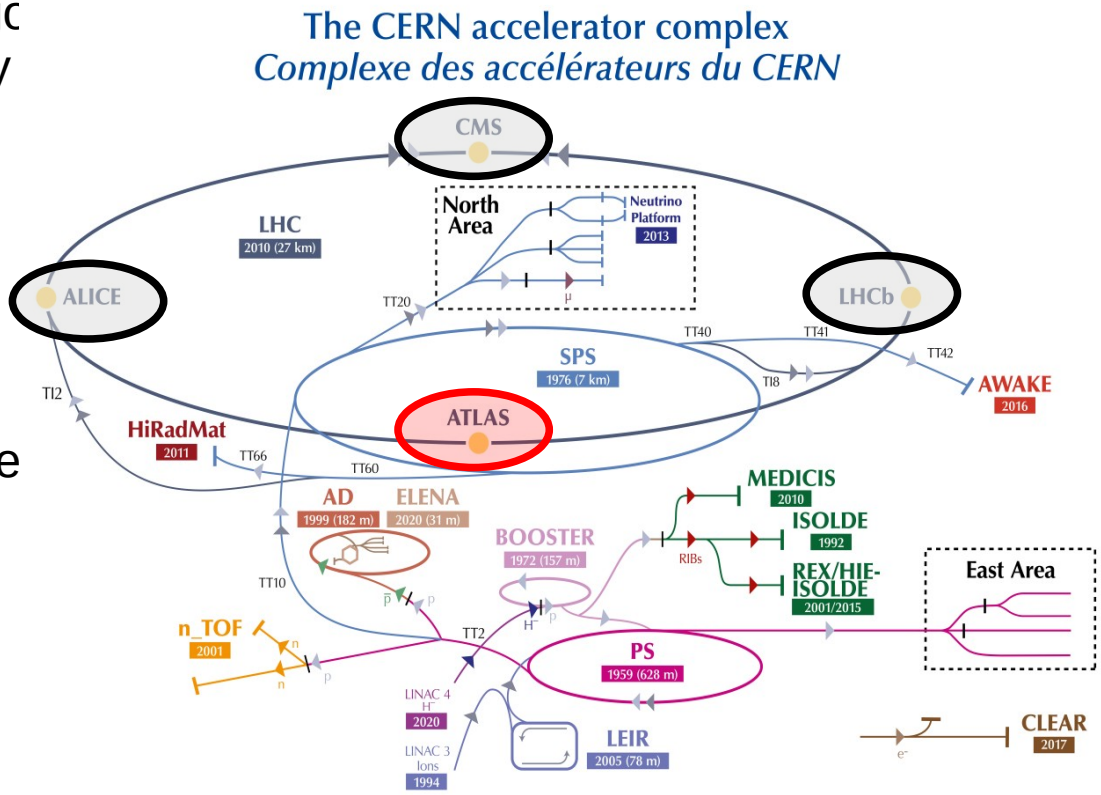
Large Hadron Collider (LHC)

LHC jest ostatnim elementem całego kompleksu akceleratorów, a protony są przyspieszane w czterech kolejnych jego elementach

- LINAC
- BOOSTER
- Proton Synchrotron (PS)
- Super Proton Synchrotron (SPS)

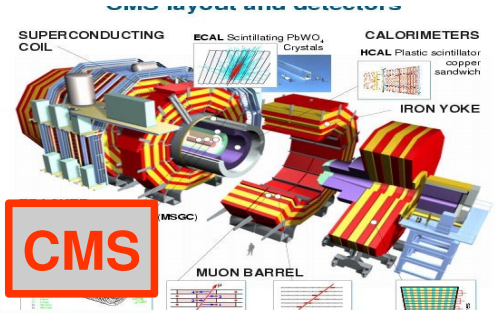
Zderzenia protonów są rejestrowane przez cztery eksperymenty

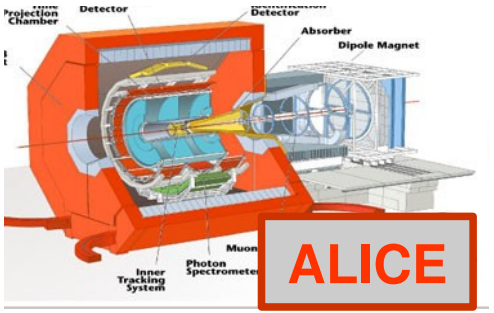
- ALICE
- **ATLAS**
- CMS
- LHCb

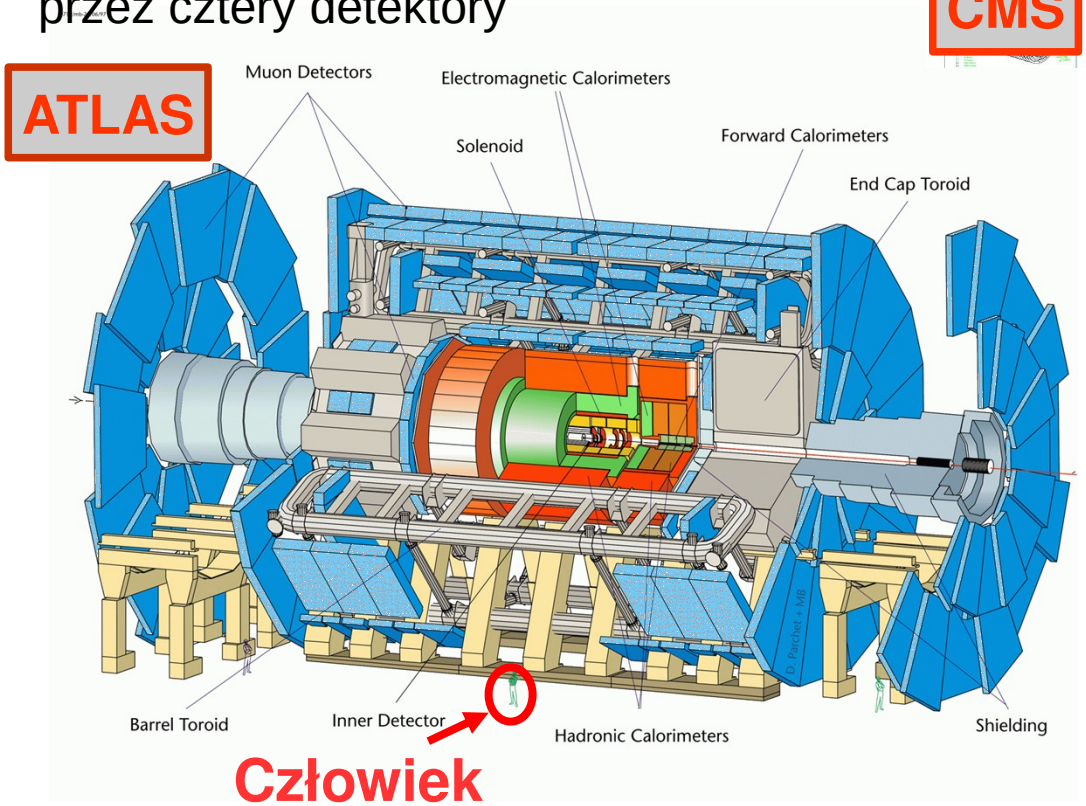


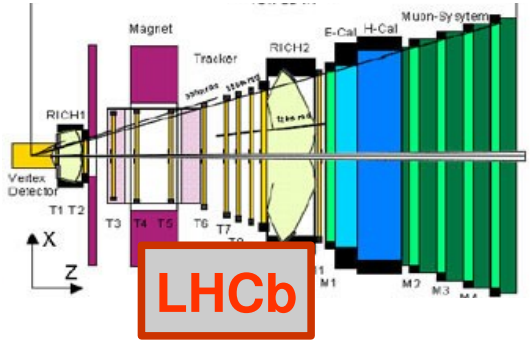
Detektory w LHC

Zderzenia w LHC są rejestrowane przez cztery detektory





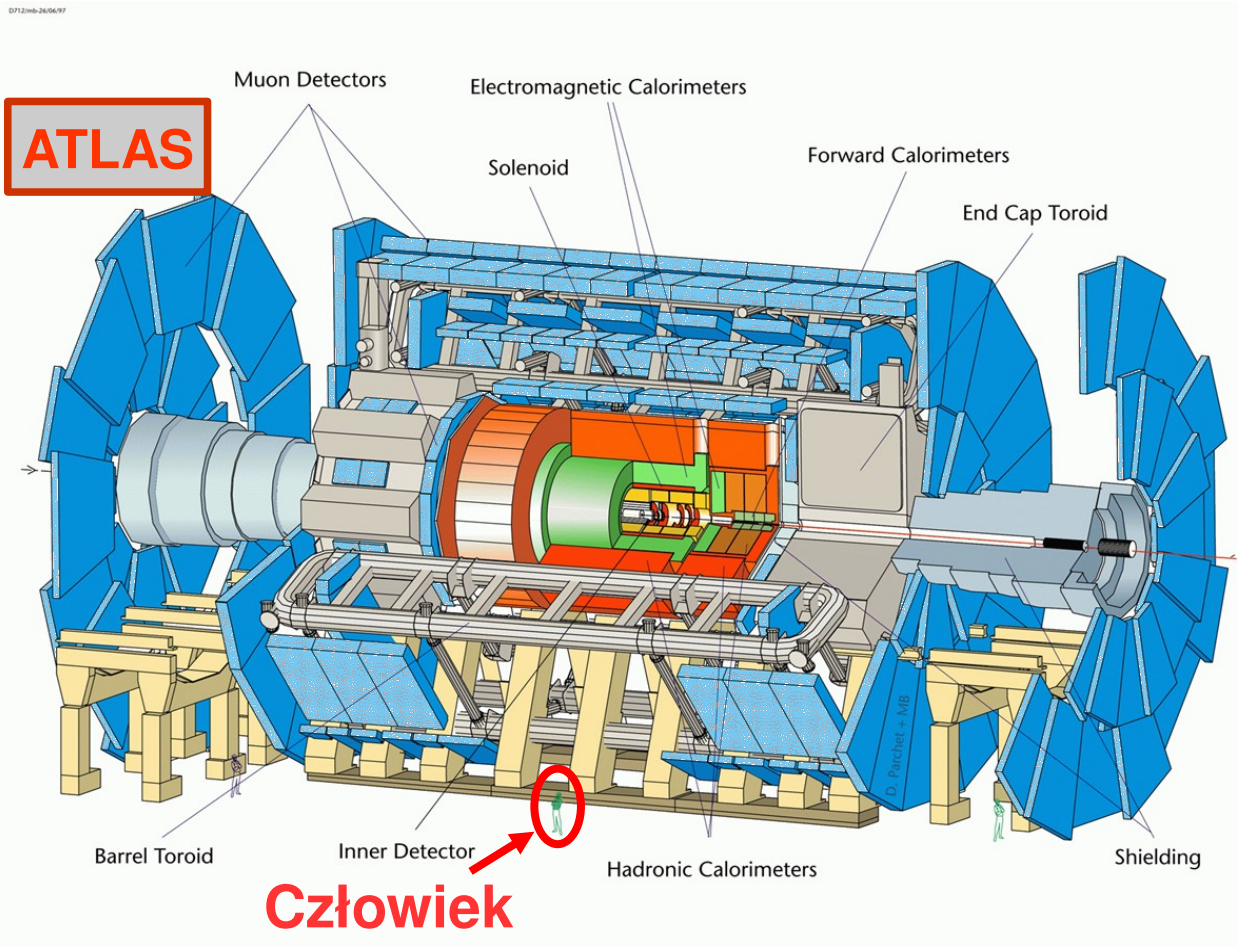




ATLAS - największy
CMS - najcięższy
ALICE - głównie badanie zderzeń jąder
LHCb - głównie badanie kwarków b

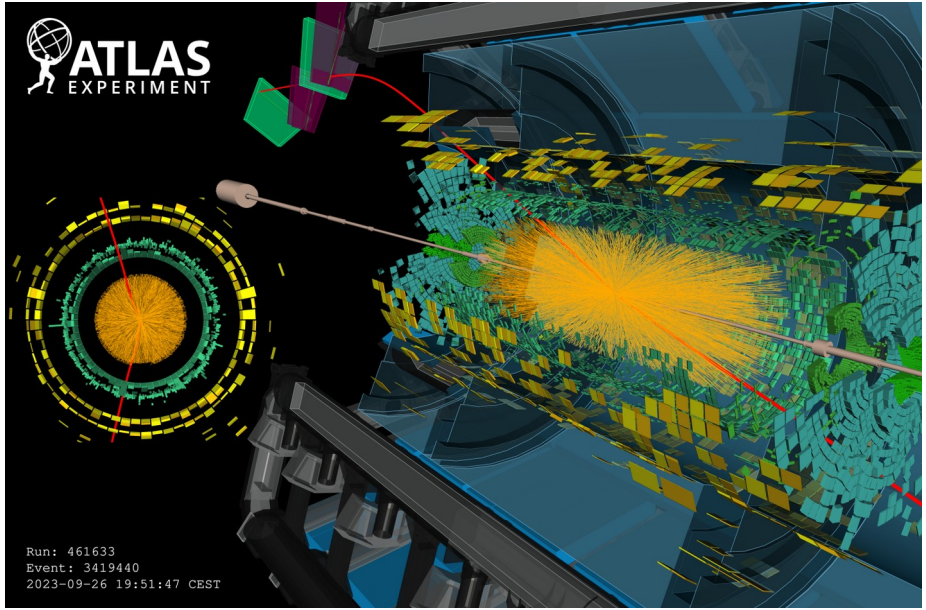
Detektor ATLAS

Długość : ~ 46 m
Średnica : ~ 25 m
Waga : ~ 7 tys. ton
wieża Eiffela 10 tys. ton!
>100 mln kanałów elektroniki
~3000 km kabli
Koszt: 450 MCHF ->
65 CHF/kg



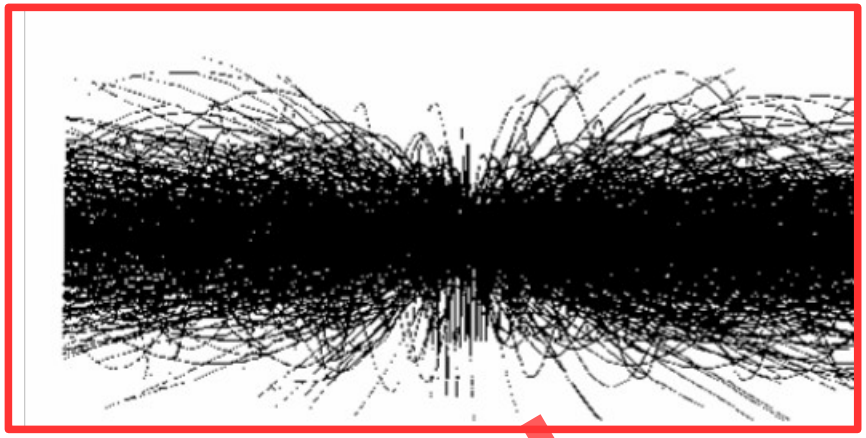
Dane pomiarowe

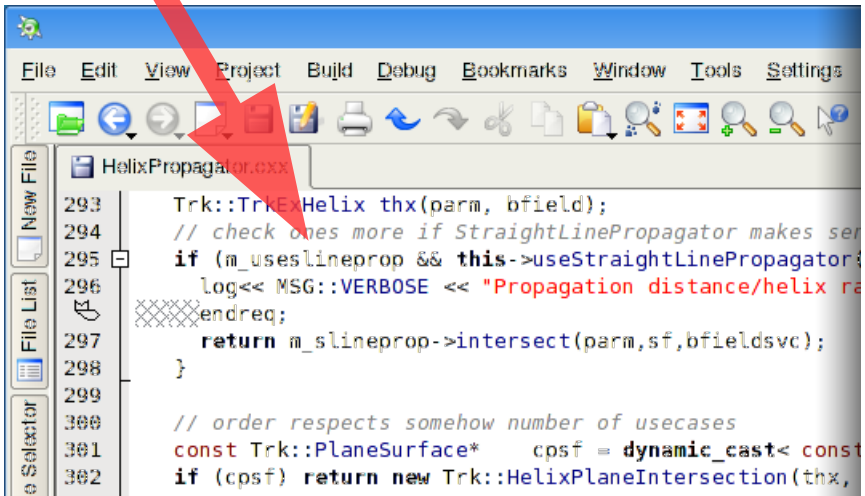
W LHC dochodzi do 40 000 000 zderzeń protonów na sekundę.
Zapisane mogą być jedynie ~ 1000 przypadki na sekundę (0,003%)



W zderzeniach w LHC mogą być rejestrowane tysiące cząstek. Odtworzenie ich torów wymaga pracy tysięcy komputerów.

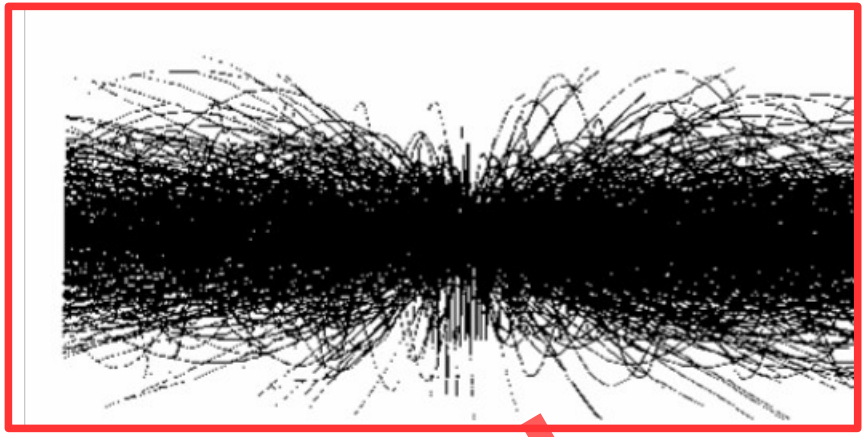
Analiza danych

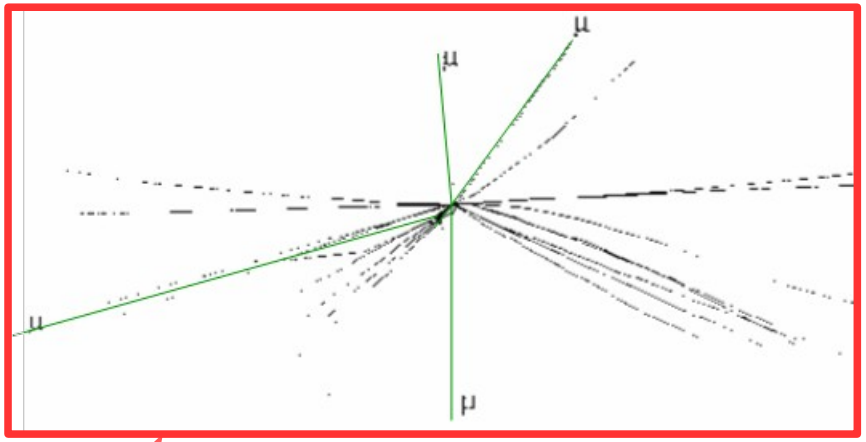


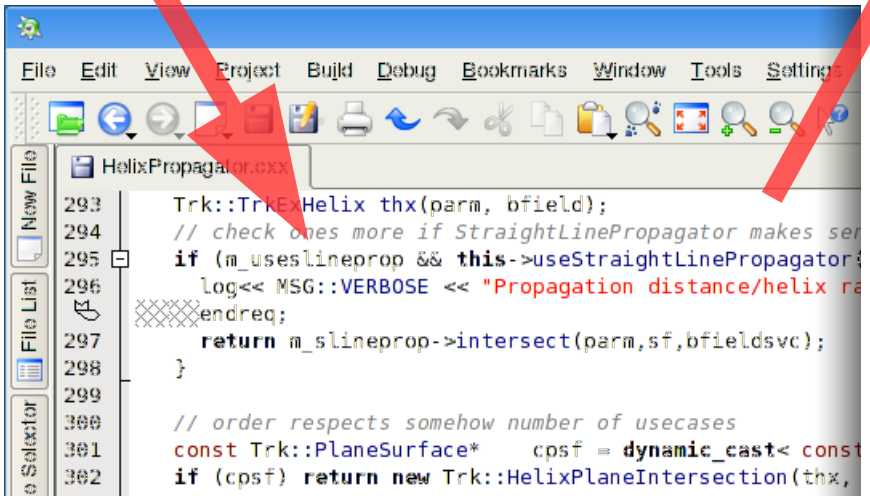


Dane po rekonstrukcji śladów są nadal bardzo skomplikowane i wymagają dalszej obróbki na komputerach.
Konieczne jest znalezienie interesujących nas procesów.
Często wykorzystywane są do tego metody Uczenia Maszynowego (ML - Machine Learning).

Analiza danych

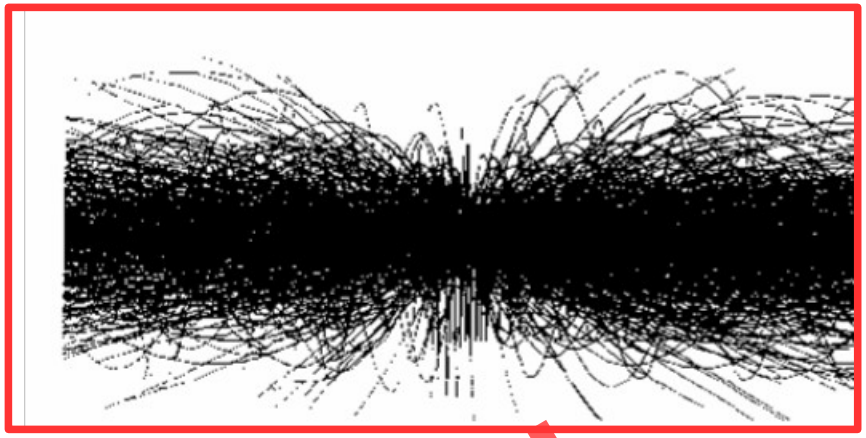


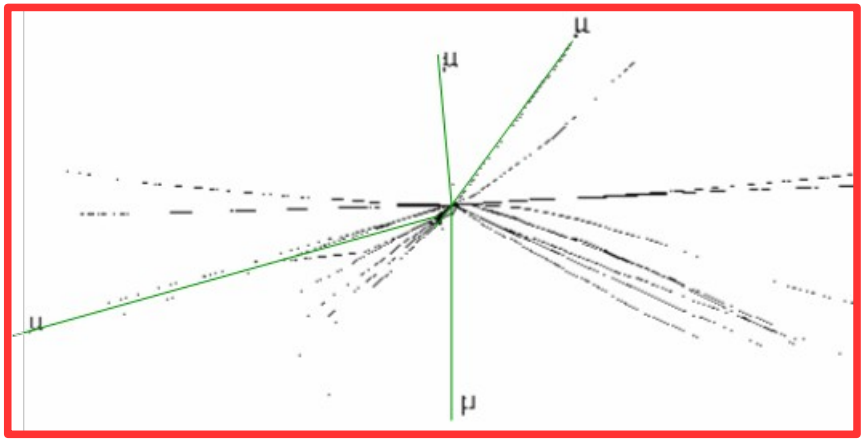


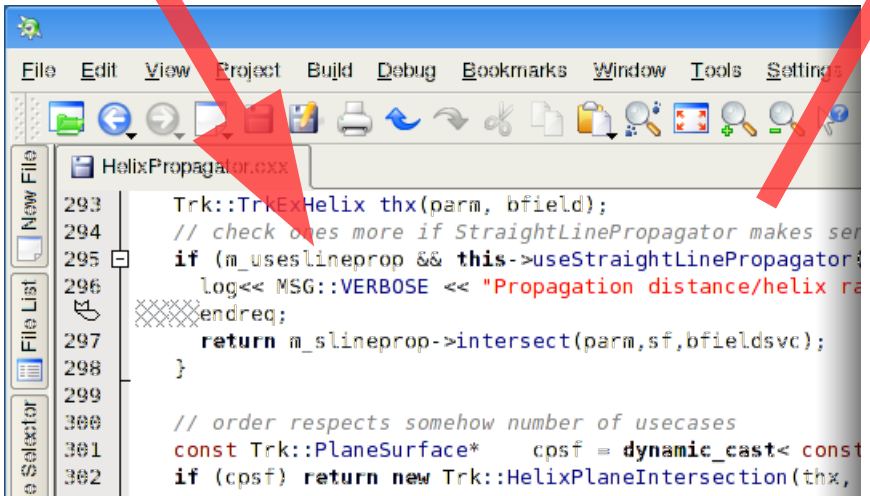


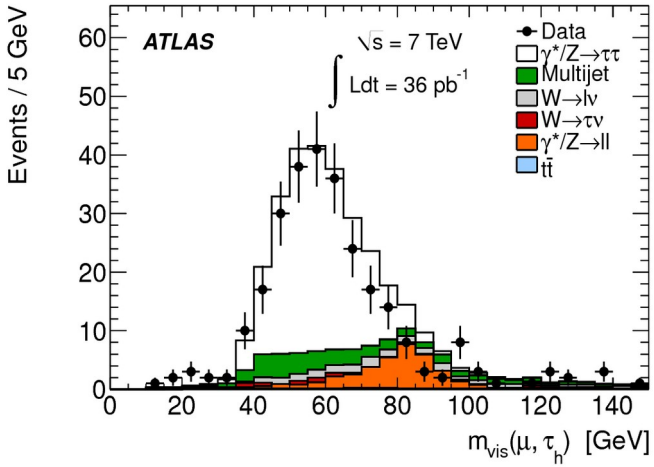
Potem pozostaje do wykonania analiza wybranego procesu oraz obliczenia dla uzyskania ostatecznego wyniku.

Analiza danych









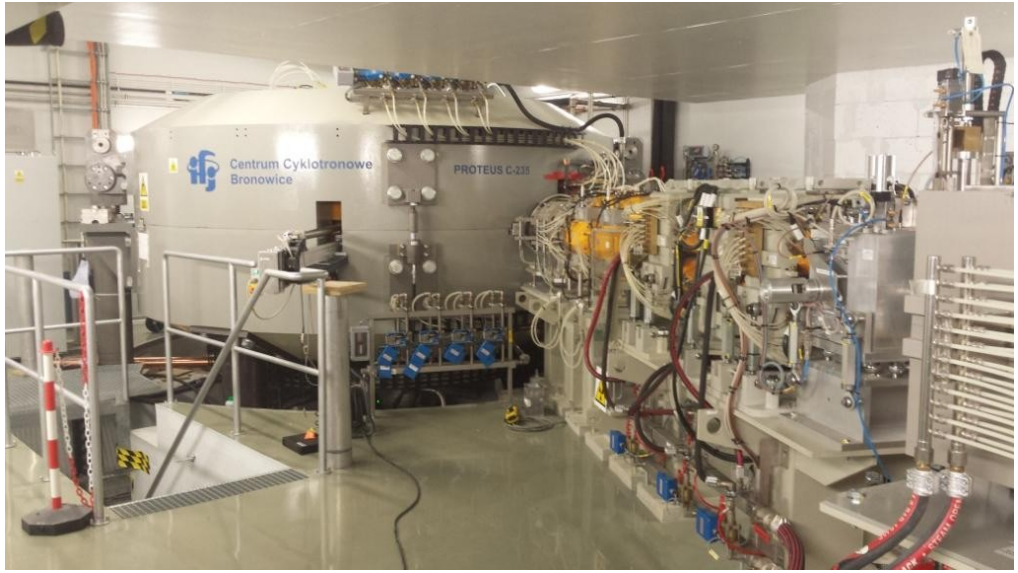
Co z tego mamy?

Czyli czy badania cząstek elementarnych nie są jedynie kosztownym zajęciem dla fizyków?

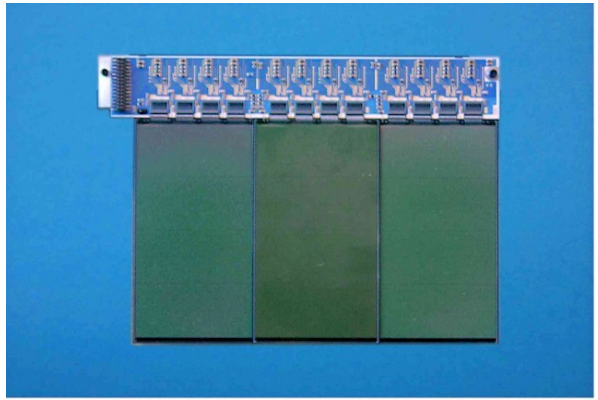
Praktyczne zastosowania akceleratorów

LHC, podobnie jak inne prototypowe urządzenia badawcze nie mają praktycznych, komercyjnych zastosowań.

Jednak mniejsze akceleratory są już powszechnie używane w leczeniu chorób nowotworowych.
Jednym z takich urządzeń jest cyklotron Proteus C-235 w Instytucie Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie



Praktyczne zastosowania narzędzi naukowych



Wiele narzędzi stworzonych przez naukowców stało się użyteczne w codziennym życiu:

- detektory krzemowe znalazły zastosowanie jako **matryce aparatów fotograficznych**
- w CERN został zbudowany pierwszy prosty **ekran dotykowy** do sterowania aparaturą, jako mniej podatny na awarie od przełączników
- metody komunikacji stosowane przez naukowców (sieć komputerowa, e-mail, **WWW**) po kilku-, kilkunastu latach stały się powszechnie używanym narzędziami przez większość ludzi

Czy Model Standardowy wszystko wyjaśnia (a fizycy będą bezrobotni)?

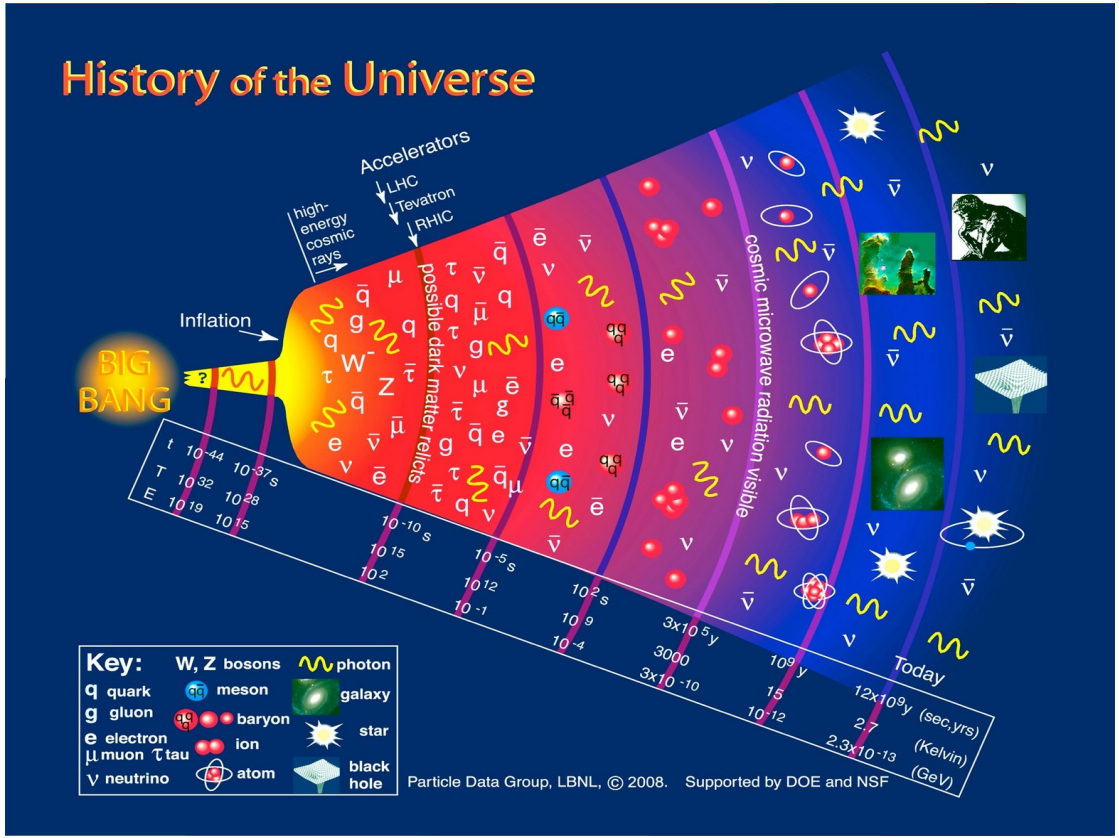
Wyzwania

Pomimo sukcesu **Modelu Standardowego** pozostają **nierozwiązane problemy**:

- początek istnienia Wszechświata
- niewyjaśniony problem **ciemnej materii** i **ciemnej energii**
- przewaga **materii** nad antymaterią we Wszechświecie
- brak powiązania Model Standardowego z **grawitacją**

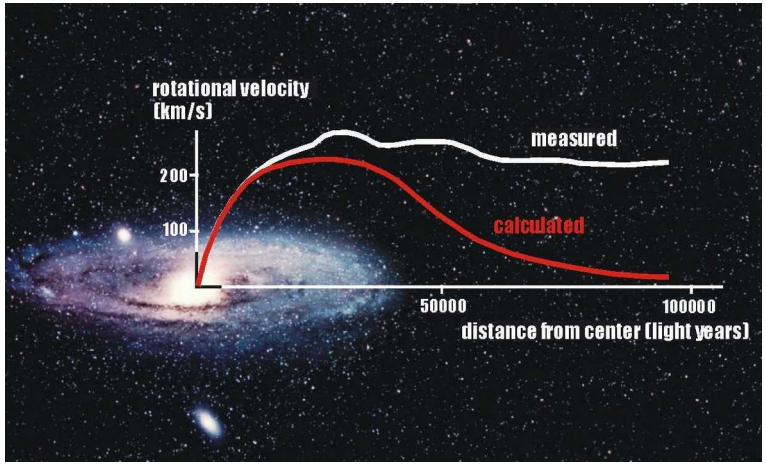
Próba sięgnięcia do początków Wszechświata

W zderzeniach ciężkich jąder atomowych staramy się badać materię w stanie podobnym do tego, w jakim była w wczesnych etapach istnienia Wszechświata, niedługo po Wielkim Wybuchu.

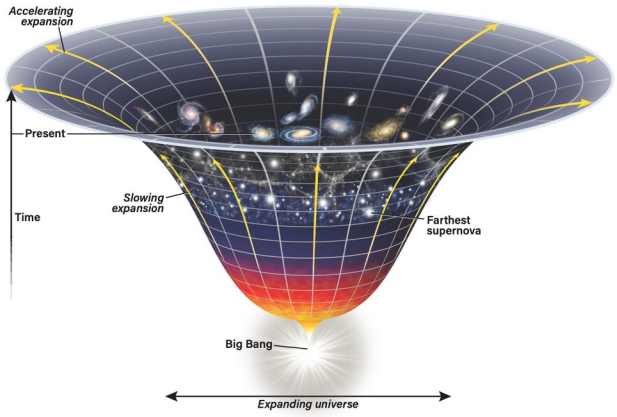


Ciemna materia i ciemna energia

Obserwacje astronomiczne rotacji w galaktykach nie zgadzają się z siłą grawitacyjną pochodzącą od widzialnej materii (zarówno świecącej jak i pochłaniającej światło).
Konieczna jest dodatkowa masa składająca się z nieznanej **ciemnej materii**



Credit: Queens Uni.



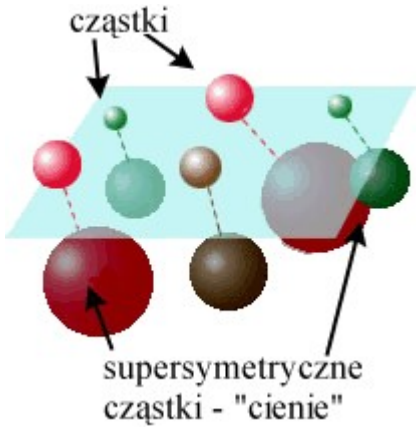
Wszechświat jest w stanie ciągłego rozszerzania się, co wymaga istnienia jeszcze bardziej tajemniczej **ciemnej energii**

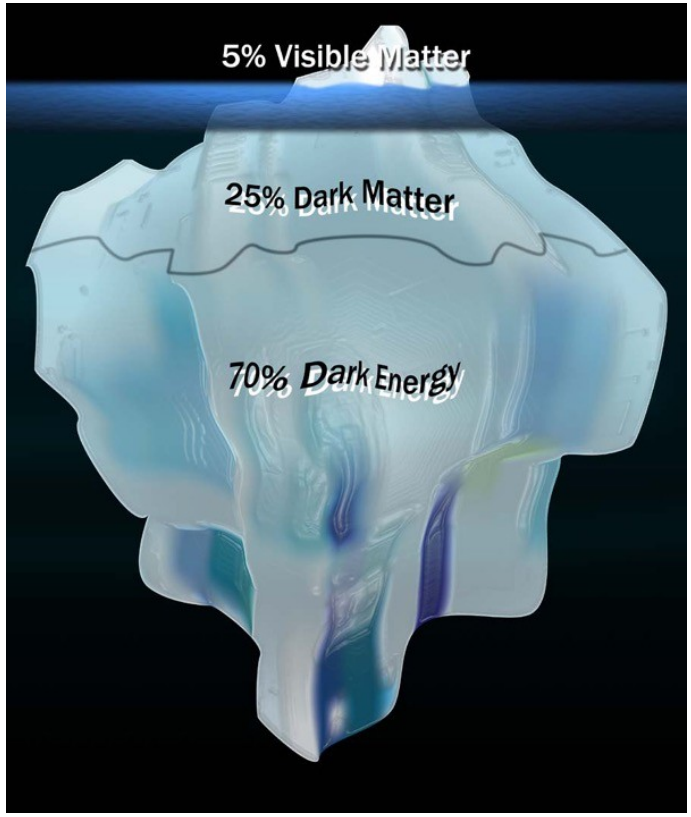
Credit: Astronomy: Roen Kelly, after NASA/STSci/Ann Feild

Ciemna materia i ciemna energia

Oszacowania pokazują, że materii składającej się ze **znanych cząstek elementarnych** jest we Wszechświecie zaledwie **ok. 5%**

Dotąd nie obserwowane dodatkowe cząstki są postulowane np. przez teorie supersymetrii

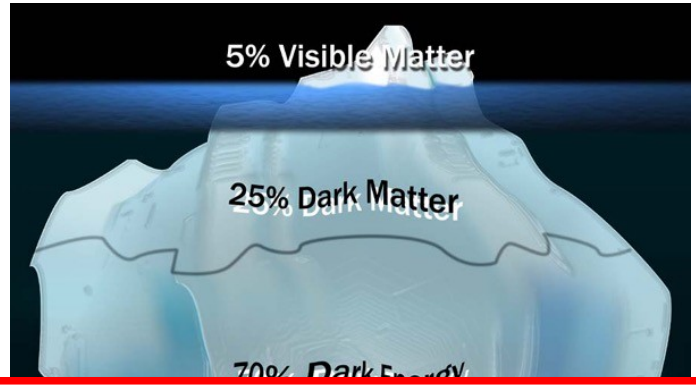




Ciemna materia i ciemna energia

Oszacowania pokazują, że materii składającej się ze **znanych cząstek elementarnych** jest we Wszechświecie zaledwie **ok. 5%**

Postulowane są dodatkowe cząstki dotąd nie obserwowane, np. przez teorie supersymetrii



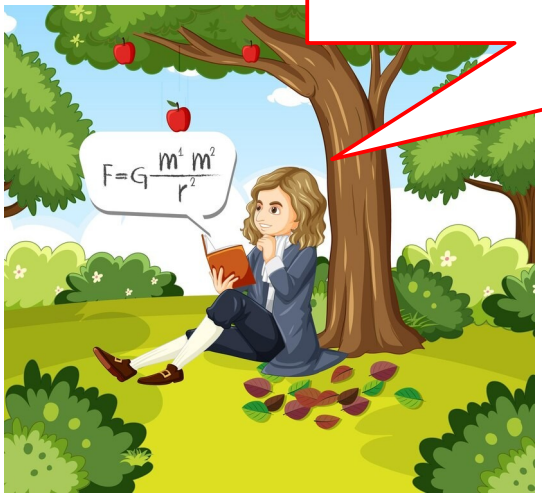
Zadanie dla fizyków-eksperymentatorów:
poszukiwanie nowych cząstek lub nieznanych zjawisk

Zadanie dla fizyków-teoretyków:
tworzenie teorii zgodnych ze znanymi zjawiskami i przewidujących istnienie nowych

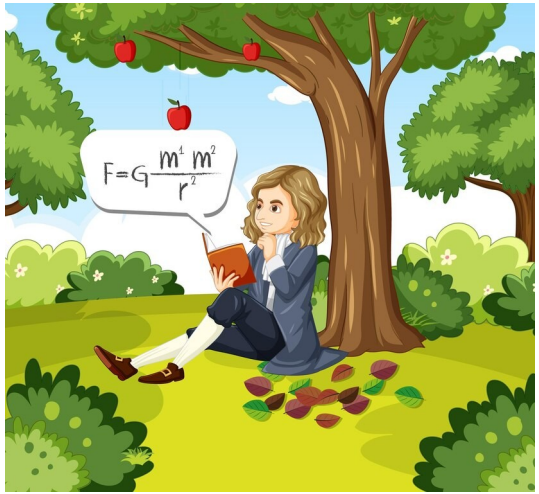
Grawitacja

Newtonowski opis grawitacji sprawdza się w przypadku Ziemi i planet.

Jak dobrze, że we wzorze jest $1/r^2$, a nie $1/r^{1,95}$ lub $1/r^{2.1}$ ...



Grawitacja



Newtonowski opis grawitacji sprawdza się w przypadku Ziemi i planet.

Jednak gdy **masy są bardzo duże** pojawiają się efekty dobrze opisywane dopiero przez ogólną teorię względności stworzoną przez Alberta Einsteina - w której za grawitację odpowiada **zakrzywienie czasoprzestrzeni.**

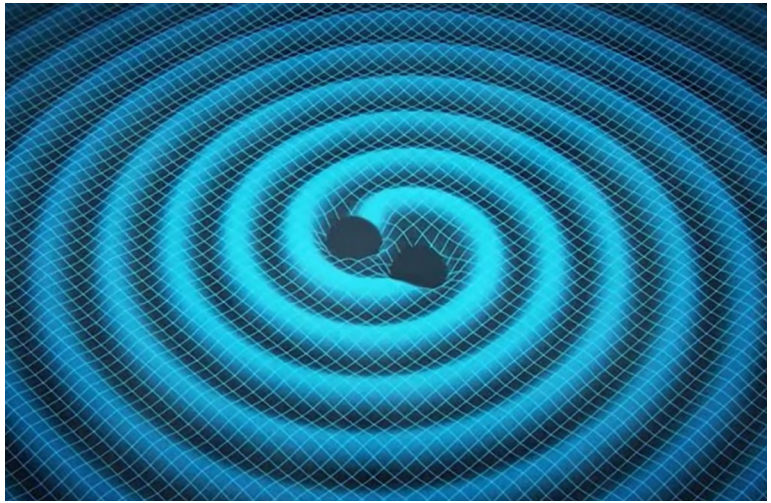
Ta teoria wyjaśnia np. skąd bierze się **soczewkowanie grawitacyjne** czyli zakrzywianie toru światła w pobliżu masywnych obiektów.

Credit: William Sheu/UCLA

Fale grawitacyjne

Kolejnym dowodem na związek grawitacji z czasoprzestrzenią są niedawno zaobserwowane **fale grawitacyjne.**

Credit: The Virgo collaboration/CCO 1.0

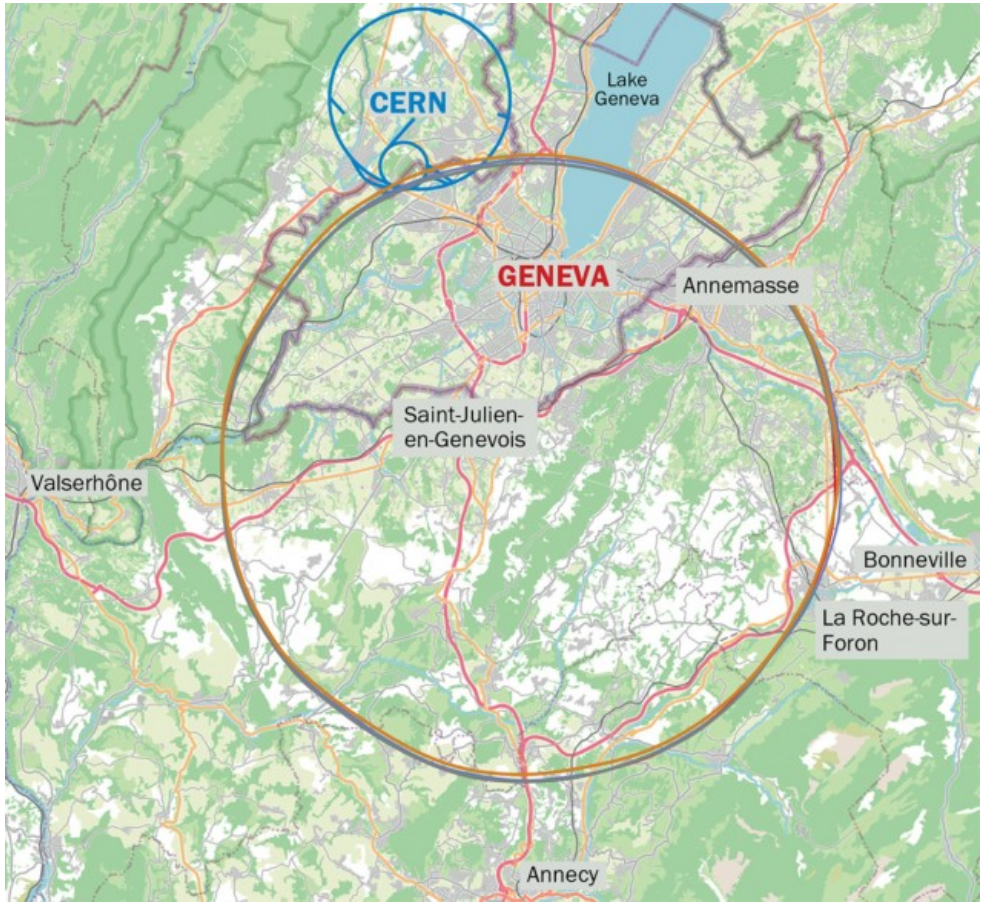


Nadal nie ma teorii opisującej zarówno grawitację jak i oddziaływania cząstek elementarnych.

Hipotetyczną cząstką przenoszącą oddziaływania grawitacyjne ma być **grawiton**. Skoro to oddziaływanie jest bardzo słabe, to grawiton musi być bardzo ciężki.

Future Circular Collider

Narzędziem do poszukiwania "nowej fizyki" ma być kolejny akcelerator Future Circular Collider (FCC)

Ma on mieć blisko 100 km obwodu, otaczać Genewę i przebiegać pod Jeziorem Genewskim.

Obecnie trwają analizy przygotowujące do prac projektowych, które zaczną się po zatwierdzeniu budowy FCC.