

Wprowadzenie do fizyki cząstek elementarnych

Karol Adamczyk



INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ
IM. HENRYKA NIEWODNICZAŃSKIEGO
POLSKIEJ AKADEMII NAUK

INTERNATIONAL

MASTERCLASSES

hands on particle physics ¹

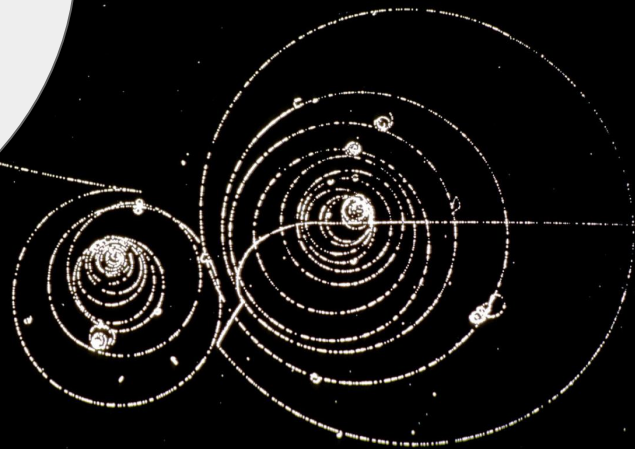


Jak powstał
Wszechświat
i jaki czeka
go los?

Jak wyglądał Wielki Wybuch?
Co się dzieje we wnętrzu
czarnej dziury?
Skąd pochodzi promieniowanie
kosmiczne?
Dlaczego we Wszechświecie jest
więcej materii niż antymaterii?
Czym jest Ciemna Materia?
Czym jest Ciemna Energia?

Jakie są
podstawowe
prawa
przrody?

Jakie są
elementarne
składniki
materii?



Od Kosmosu do mikroświata

czyli podróż po skalach odległości



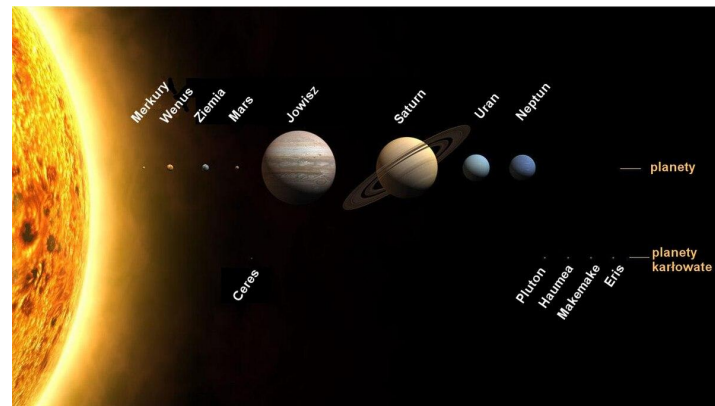
Spojrzenie w daleki Kosmos
Gromada galaktyk SMACS 0723
widziana przez Teleskop Jamesa
Webba

$\sim 10^{26}$ m



Galaktyka spiralna NGC 6744

$\sim 10^{23}$ m



od Słońca do Neptuna Układ Słoneczny $\sim 10^{12}$ m

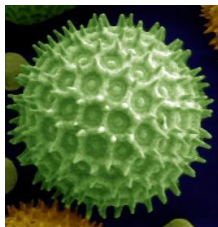
(niezachowane proporcje odległości planet od Słońca) 3

bardziej naturalna jednostka: 1 rok świetlny $\sim 10^{16}$ m

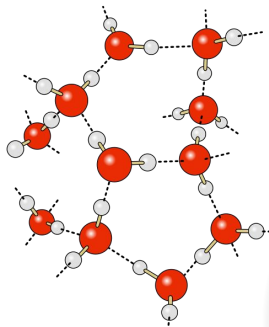
Z czego zbudowany jest otaczający nas świat?



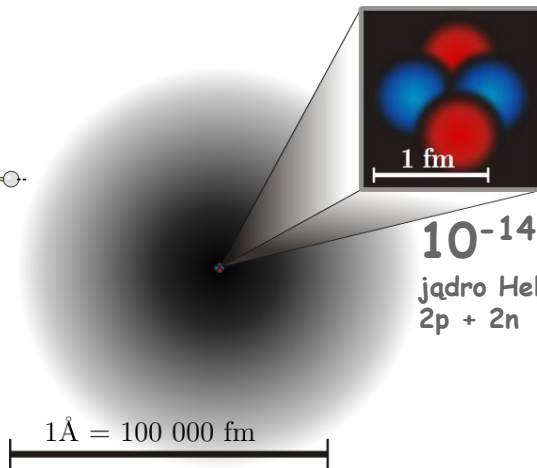
10^{-2} m
pszczoła miodna



10^{-5} m
pyłek roślin



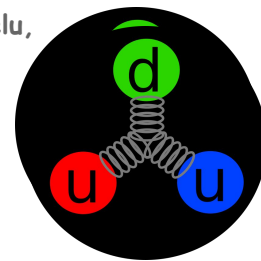
10^{-9} m
cząsteczki wody



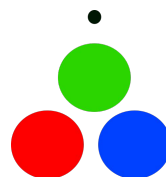
$1 \text{ \AA} = 100\,000 \text{ fm}$

10^{-10} m
atom Helu

10^{-14} m
jądro Helu,
 $2p + 2n$



10^{-15} m
nukleon
(proton lub neutron)

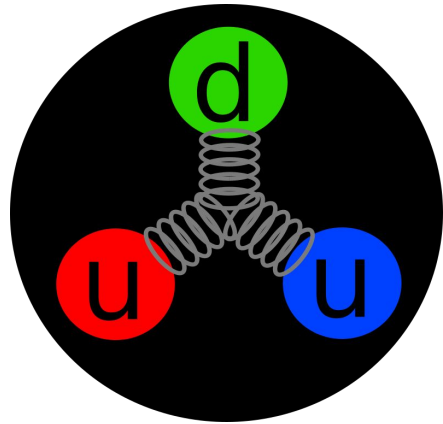
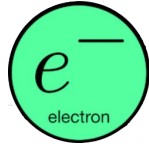


$< 10^{-18}$ m
cząstki elementarne
(kwarki, elektrony, ...)

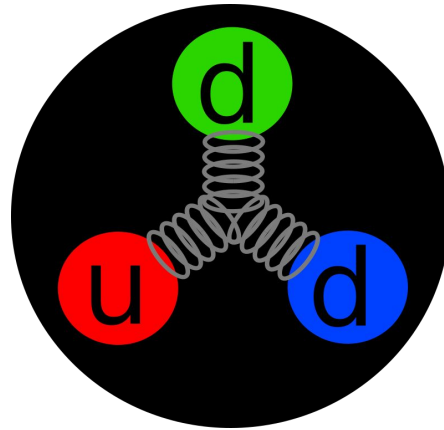
Potęga dziesięciu	Liczba	Skrót
10^{-12}	0,000000000001	p (piko)
10^{-9}	0,000000001	n (nano)
10^{-6}	0,000001	μ (mikro)
10^{-3}	0,001	m (mili)
10^{-2}	0,01	
10^{-1}	0,1	
10^0	1	
10^1	10	
10^2	100	
10^3	1000	k (kilo)
10^6	1 000 000	M (mega)
10^9	1 000 000 000	G (giga)
10^{12}	1 000 000 000 000	T (tera)
10^{15}	1 000 000 000 000 000	P (peta)

<https://scaleofuniverse.com/>

Ile (tak naprawdę) potrzeba składników, żeby zbudować nasz Wszechświat?



Proton
2 kwarki u
1 kwark d



Neutron
2 kwarki d
1 kwark u

Skąd to wszystko
wiemy?

Czy to już naprawdę
wszystkie cząstki
elementarne?

Najbardziej elementarne cząstki obecny stan wiedzy!

- Badania promieniowania kosmicznego oraz eksperymenty na akceleratorach zaowocowały odkryciem olbrzymiej liczby cząstek, **większość z nich nie jest elementarna**
- Opracowano model teoretyczny, który dość dokładnie opisuje obserwacje i wszystkie odkryte cząstki -> **Model Standardowy**
- W modelu tym do zbudowania wszystkich zaobserwowanych cząstek potrzeba tylko **6 kwarków i 6 leptonów** (gr.leptos - lekki)

QUARKS

UP mass $2,3 \text{ MeV}/c^2$ charge $\frac{2}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ 	CHARM $1,275 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ 	TOP $173,07 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ 
DOWN $4,8 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ 	STRANGE $95 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ 	BOTTOM $4,18 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ 

LEPTONS

ELECTRON $0,511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ 	MUON $105,7 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ 	TAU $1,777 \text{ GeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ 
ELECTRON NEUTRINO $<2,2 \text{ eV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ 	MUON NEUTRINO $<0,17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ 	TAU NEUTRINO $<15,5 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ 

- Każdy kwark i lepton ma swoją antycząstkę (antykwar, antylepton)

Najbardziej elementarne cząstki

obecny stan wiedzy!

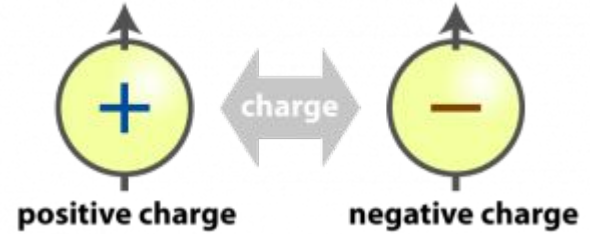
- Dla każdej cząstki istnienie antycząstka
- Cząstki i antycząstki mają przeciwne ładunki oraz rzuty spinu, ale takie same masy
- Kiedy materia i antymateria się spotykają → anihilują. Ich masa zmienia się w energię spoczynkową wg. wzoru: $E_0 = mc^2$

Jednostki w fizyce cząstek:

- Energia: **eV** (elektronowolt)
 - ◆ $1 \text{ eV} = 1 \text{ e} \cdot 1 \text{ V} \approx 1,602 \ 176 \ 53 \times 10^{-19} \text{ J}$
- Masa → **eV/c²**
 - ◆ $1 \text{ MeV}/c^2 = 10^6 \text{ eV}/c^2$

Spin (to spin: wirować) - zjawisko kwantowomechaniczne, niemające odpowiednika w fizyce klasycznej, czyli w skali makro.

Cząstki o spinie połówkowym nazywamy **fermionami** (leptony i kwarki), a natomiast cząstki o spinie całkowitym bozonami.



LEPTONS

ELECTRON	MUON	TAU
0,511 MeV/c ²	105,7 MeV/c ²	1,777 GeV/c ²
-1	-1	-1
1/2	1/2	1/2
ELECTRON NEUTRINO	MUON NEUTRINO	TAU NEUTRINO
<2,2 eV/c ²	<0,17 MeV/c ²	<15,5 MeV/c ²
0	0	0
1/2	1/2	1/2

Co scala te składniki materii?

czyli 4 podstawowe (fundamentalne) oddziaływania natury

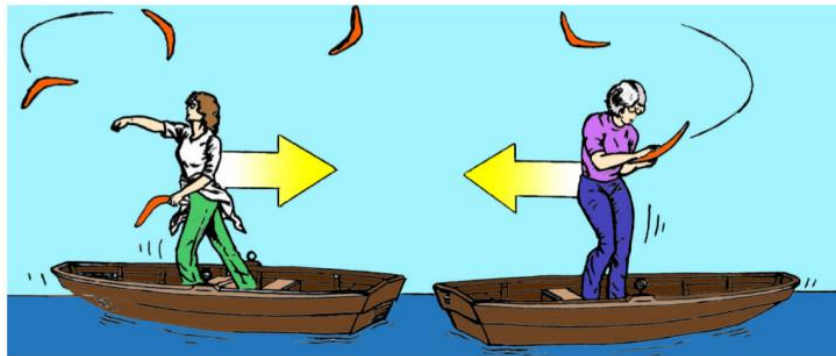
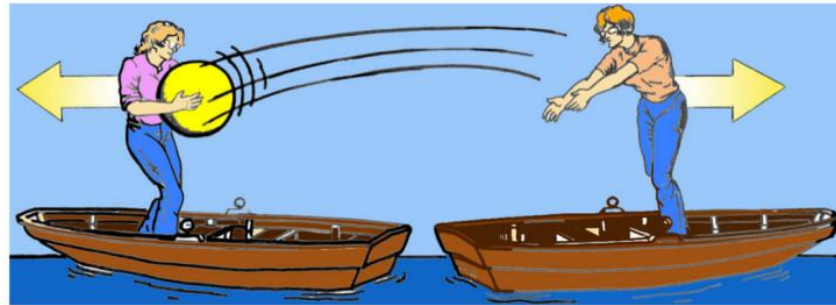
- Elektromagnetyczne
- Słabe
- Silne
- Grawitacyjne

Oddziaływanie są wynikiem **wymiany cząstek pośredniczących**, które są zupełnie innym rodzajem cząstek (**bozony: spin 0,1**) niż leptony i kwarki (**fermiony: spin 1/2**)

Cechy oddziaływań:

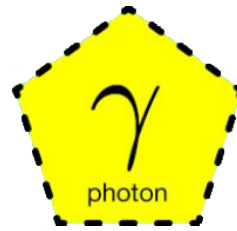
- zasięg (zależność od odległości)
- siła oddziaływania

→ skala oddziaływania (makro/mikro świat)

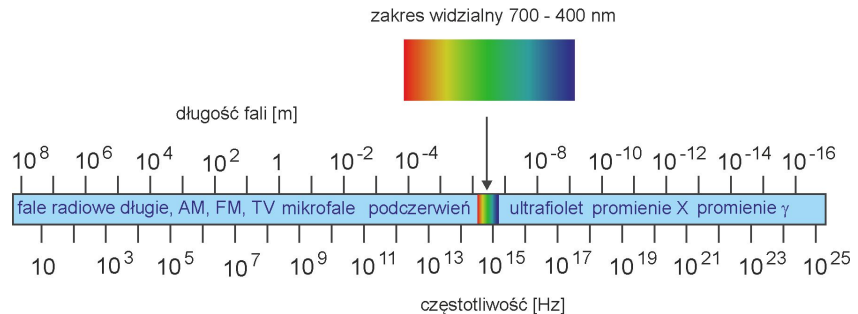
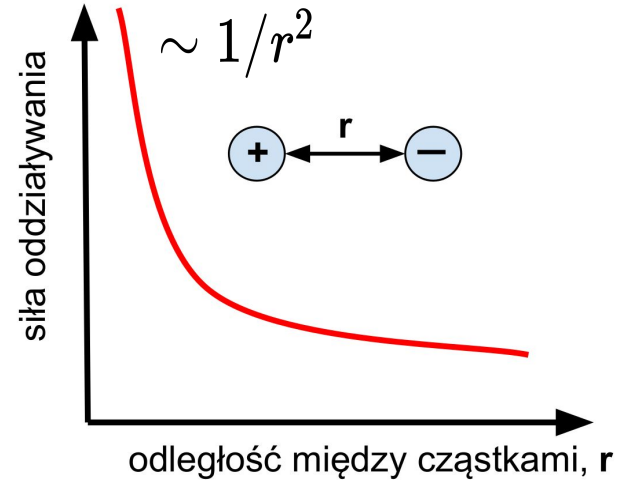


Oddziaływanie elektromagnetyczne

czyli interakcje pomiędzy naładowanymi elektrycznie cząstkami



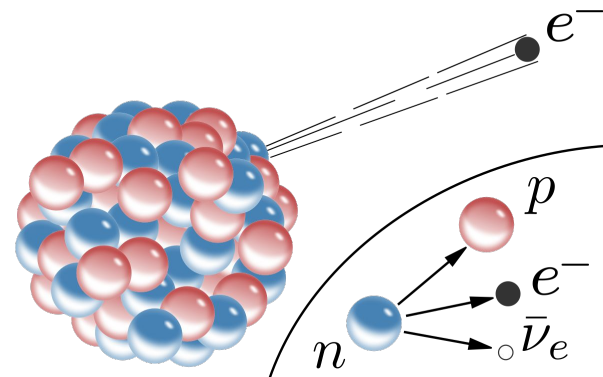
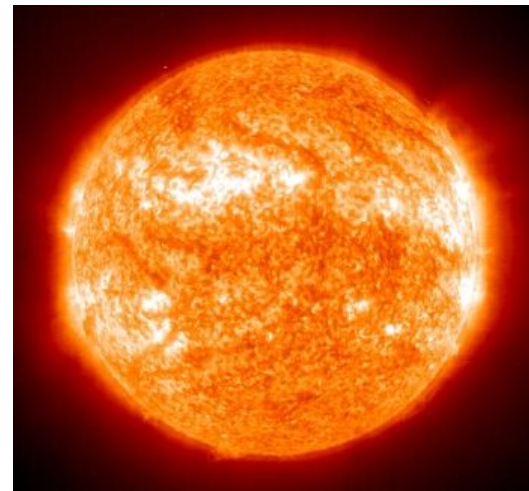
- Tworzy atomy i formuje cząsteczki, dzięki czemu mogło dojść do stworzenia materii
- Nośnikiem oddziaływania jest **foton (γ)**
- Masa: 0 GeV
- Ładunek elektryczny: 0
- Spin: 1
- zasięg: ∞
- Fotony o różnych energiach tworzą widmo fal elektromagnetycznych



Oddziaływanie słabe

czyli krótkozasięgowe oddziaływanie jądrowe

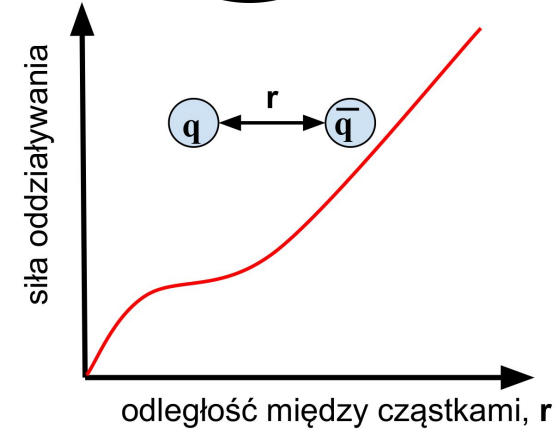
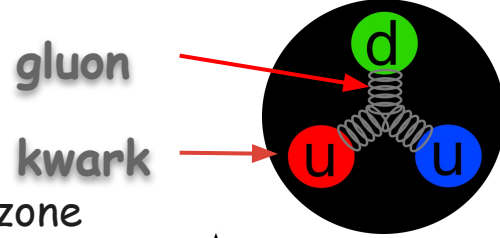
- Odpowiedzialne za rozpady ciężkich kwarków i leptonów na lżejsze kwarki i leptony
- Oddziaływanie słabe odpowiada za promieniotwórczy rozpad beta oraz odgrywa decydującą rolę w procesach produkcji energii w gwiazdach, np: w Słońcu.
- 3 nośnik oddziaływania: bozony W^+ , W^- , Z^0
- masa W: 80 GeV, masa Z: 91 GeV
- Spin: 1
- zasięg: rozmiar nukleonu $\sim 10^{-15}$



Oddziaływanie silne

czyli oddziaływanie spajające kwarki

- spaja również składniki jądra (protony, neutrony) stłoczone w małej objętości jądra
- 8 nośników oddziaływania: glouny
- gluony oddziałują z kwarkami i innymi gluonami, oddziaływanie silne zespala kwarki ze sobą
- masa: 0 GeV
- ładunek: "kolor" (kwarki mają kolor, gluony kolor+antykolor)
- spin: 1
- zasięg: rozmiar nukleonu $\sim 10^{-15}$



Oddziaływanie silne to przyciąganie odczuwane przez kwarki, gdy wymieniają one kolory za pośrednictwem gluonów. Dla przykładu, weźmy kwark niebieski i zielony.



Niebieski kwark emituje gluon, który przenosi kolor niebieski i antyzielony.



Zielony kwark absorbuje gluon i zmienia kolor na niebieski. Jego zielony kolor jest anihilowany przez gluon antyzielony.



Proces powtarza się, wiążąc ze sobą kwarki.



ODDZIAŁYWANIA ŁADUNKÓW KOLOROWYCH

Kwarki występują w trzech kolorach: niebieskim, czerwonym i zielonym. Antykwarki – odpowiedniki kwarków w antymaterii – są antyniebieskie, antyczerwone lub antyzielone. W gluonach występuje mieszanka kolorów i antykolorów.

Kolory kwarków



Kolory antykwarków



Kolory gluonów



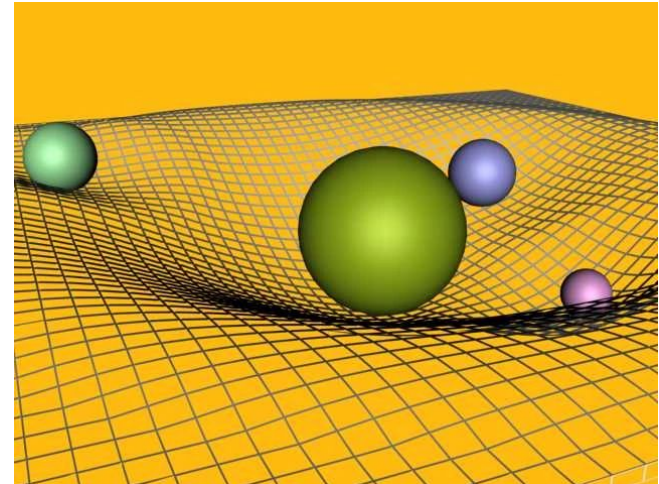
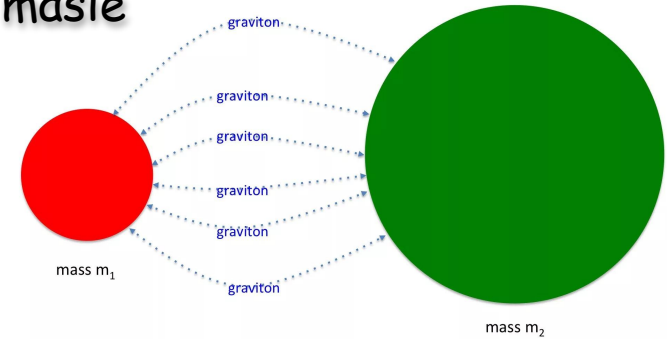
Skąd się bierze masa nukleonów?

ok.99% masy protonów i neutronów energii oddziaływania między gluonami!

Oddziaływanie grawitacyjne

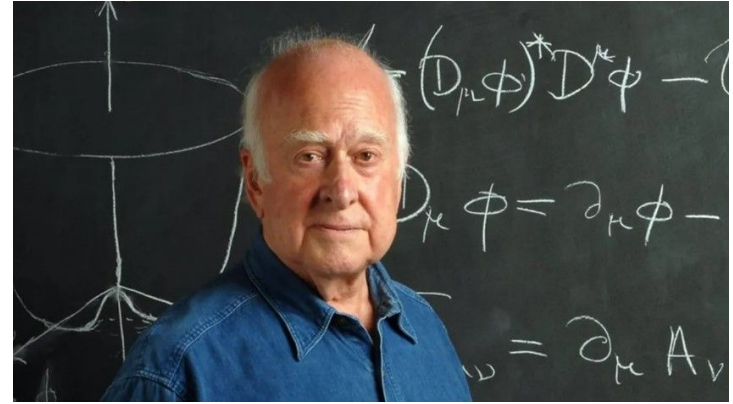
czyli oddziaływanie między obiektami o niezerowej masie

- Powoduje, że jabłko spada na ziemię, łączy materię w planetach i gwiazdach, łączy gwiazdy w galaktyki
- Model Standardowy nie opisuje tego oddziaływania (brak kwantowej teorii pola)
- Efekty grawitacyjne są znikome na poziomie cząstek elementarnych (mają bardzo małe masy!)



W jaki sposób cząstki elementarne nabywaj masę? i czemu mają różne masy?

- Pole Higgsa - zaproponowane w 1964 roku przez prof. Petera Higgsa, żeby "ratować" Model Standardowy
- Jest to specjalne pole wypełniające Wszechświat. Różne masy cząstek są miarą ich oddziaływania z tym polem (im silniejsze jest oddziaływanie z polem, tym większą masę uzyskuje cząstka).
- cząstka związana z tym polem to **cząstka Higgsa**
=> poszukiwana przez fizyków przez prawie 50 lat!
- **Odkryta!**
Eksperymenty ATLAS i CMS na LHC, 2012
- **Nagroda Nobla 2013**



Na czym polega mechanizm Higgsa?

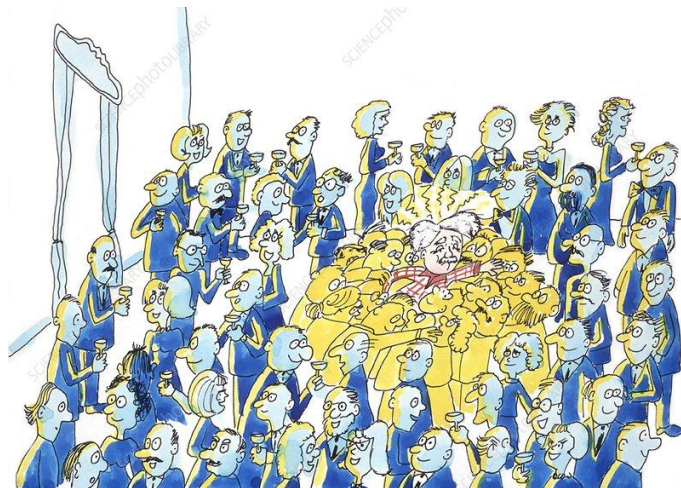
Czym jest cząstka Higgsa?



Próżnia jednorodnie
wypełniona polem Higgsa



Pojawia się bezmasowa cząstka
(z prędkością światła)



Cząstka oddziałuje z polem ->
nabiera masy i zwalnia

Czym jest
cząstka Higgsa?



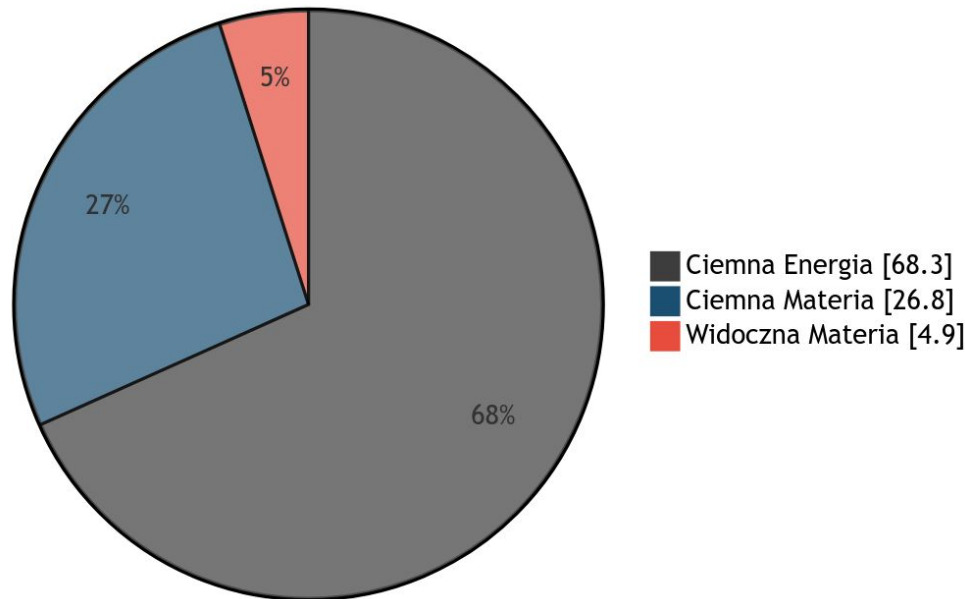
Cząstka Higgsa
jest lokalnym
zagęszczeniem tego
pola

Model Standardowy

Obowiązujący obecnie opis cząstek materii i działających między nimi sił



Szacowana zawartość materii i energii we Wszechświecie

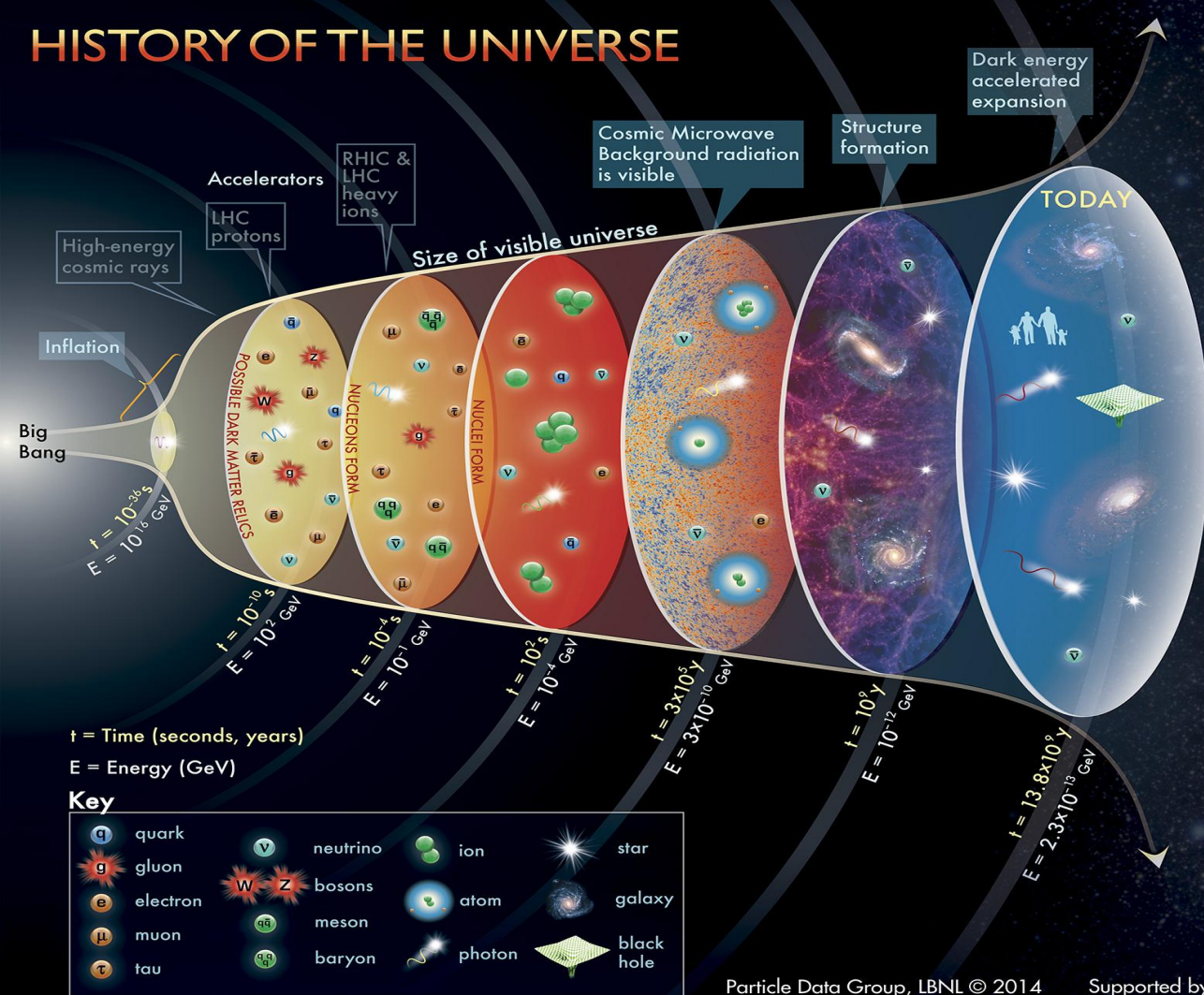


Czyli po ponad 100 latach badania naszego Wszechświata rozumiemy tylko jego 5%!

Astronomia mówi nam, że:

- Normalna, **widzialna materia** (gaz intergalaktyczny, gwiazdy etc) to tylko ~ 5% wszechświata!
- Reszta to **ciemna materia** (~27%) - jej obecność stwierdzamy poprzez jej wpływ na ruchy gwiazd i galaktyk;
- i **ciemna energia** (~68%) z przyspieszającej ekspansji Wszechświata; związana jest z „tajemniczą siłą odpychania” działającą przeciwnie jak grawitacja

HISTORY OF THE UNIVERSE



Rozwiązanie?

Próba
odtworzenia
Wielkiego
Wybuchu!

Jak?

Potrzebny
przepis i
narzędzia

Czy mamy przepis na wytwarzanie cząstek?

Relatywistyczny związek między energią, masą i pędem

$$E^2 = (mc^2)^2 + (pc)^2$$

E - energia

m - masa (niezmiennicza)

p - pęd

c - prędkość światła w próżni

- **czyli energię można zamienić na materię, a materię na energię!**
- aby odtworzyć warunki z młodego Wszechświata koncentrujemy energię w małym obszarze -> **potrafimy to zrobić zderzając rozpędzone cząstki!**
- **w zderzeniu wyzwala się energia z której mogą powstać nowe cząstki!**

Przypadek gdy $p = 0$

(czyli nieruchoma cząstka o masie m)

$$E^2 = (mc^2)^2 + (0c)^2$$

$$E = mc^2$$



Przypadek gdy $m = 0$ (np: foton)

$$E^2 = (0c^2)^2 + (pc)^2$$

$$E = pc$$

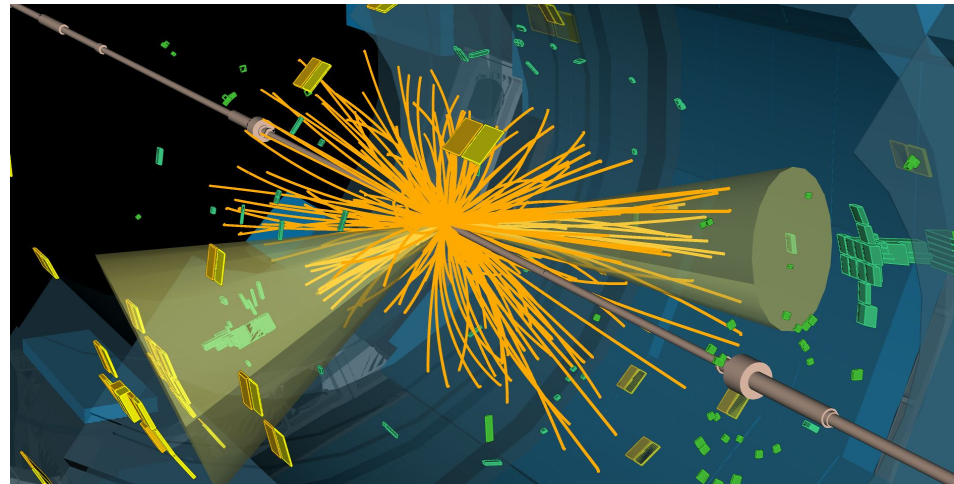
Narzędzia?

Akcelerator cząstek

- maszyna do rozpędzania cząstek i ich zderzania
- narzędzie, które pozwala "zajrzeć" w głąb materii, odkrywając jej tajemnice

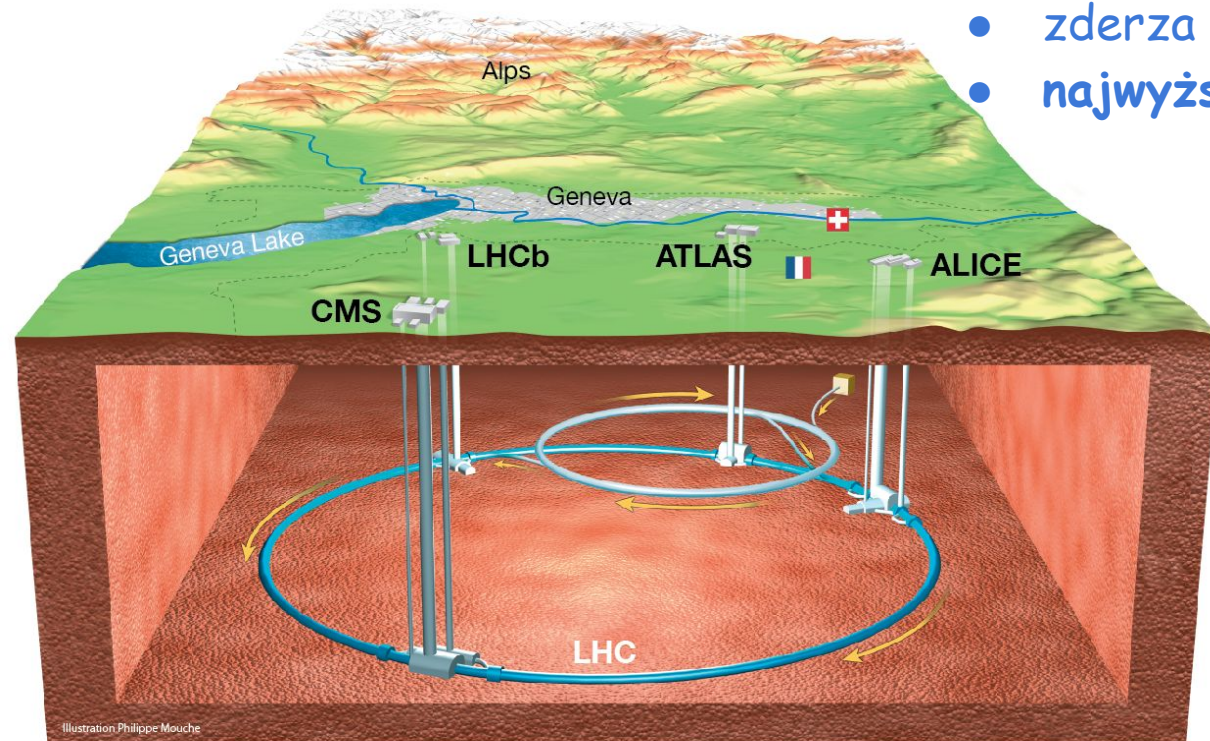


© Markus Friedl



Large Hadron Collider czyli Wielki Zderzacz Hadronów

- znajduje się w CERNie, koło Genewy, w Szwajcarii
- w tunelu o obwodzie 27 km, ~100 m pod ziemią
- zderza protony albo jądra ołowiu
- najwyższe energie zderzeń ~14 TeV



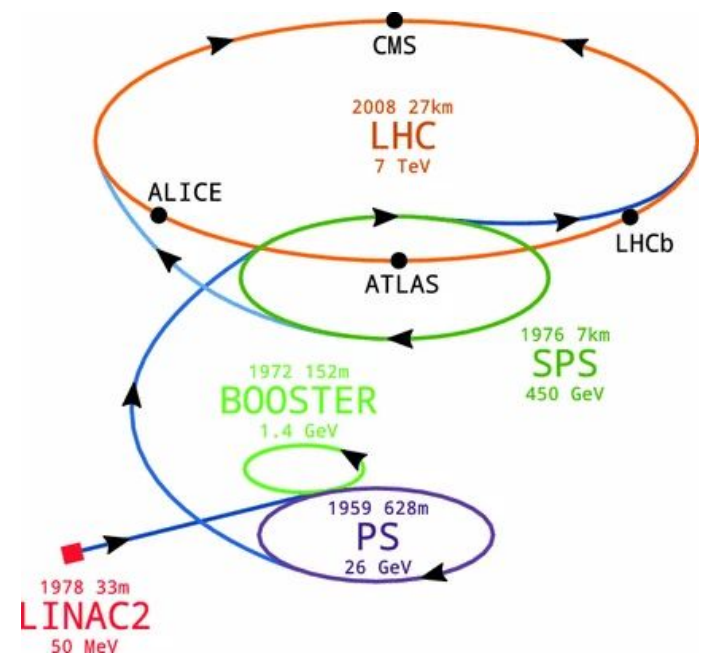
Large Hadron Collider

czyli Wielki Zderzacz Hadronów

Energia kinetyczna protonu (K)	Prędkość (% c)	Akcelerator
50 MeV	31,4	Linac 2
1,4 GeV	91,6	PS Booster
25 GeV	99,93	PS
450 GeV	99,9998	SPS
7 TeV	99,9999991	LHC

Zależność między energią kinetyczną a prędkością protonu w akceleratorach CERN-u.

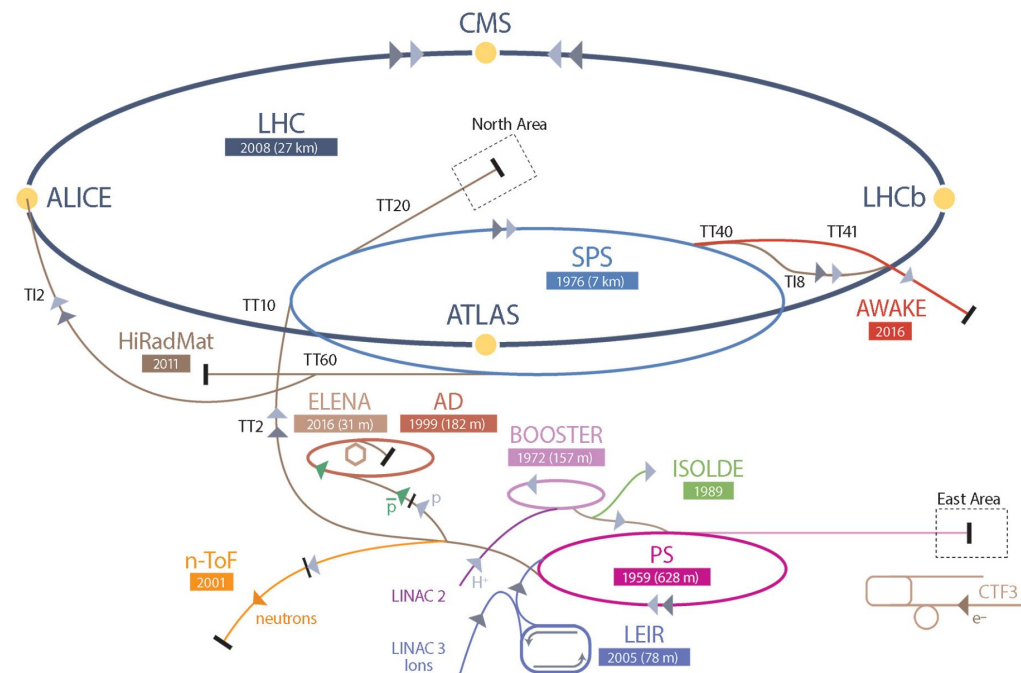
Masa spoczynkowa protonu wynosi $0,938 \text{ GeV}/c^2$



- wiązka protonów ma energię 400-tonowego pociągu jadącego z prędkością $\sim 200 \text{ km/h}$
- energia w pojedynczym zdarzeniu protonów jest porównywalna do zderzenia 2 lecących komarów, ALE "skoncentrowana" w miliardy razy mniejszym obszarze, gdzie temperatura przewyższa 100'000 razy temperaturę w środku Słońca
- całkowity koszt samego LHC to $\sim 4 \text{ mld CHF}$ (1 CHF $\sim 4 \text{ PLN}$)

Eksperymenty na LHC

CERN's Accelerator Complex



- krążące protony zderzają się ze sobą $\sim 600'000'000$ razy na sekundę
- "obserwujemy" cząstki za pomocą detektorów otaczających punkt zderzenia
- 4 duże detektory: ALICE, ATLAS, CMS, LHCb
- mniejsze eksperymenty: FASER, LCHf, NA61/Shine, TOTEM

Co i jak mierzymy w eksperymencie ATLAS?
Jak wygląda analiza danych z ATLASA?
-> w kolejnych prezentacjach :)

Niewyjaśnione tajemnice

... jeszcze do odkrycia

Dlaczego Wszechświat rozszerza się
coraz szybciej?

Gdzie jest antymateria?

Czym jest niewidzialna Ciemna
Materia?

Czym jest Ciemna Energia?

Czy jest więcej wymiarów?

...

czyli czego jeszcze poszukują fizycy?

...

