

Wprowadzenie do fizyki cząstek elementarnych


Karol Adamczyk



INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ
IM. HENRYKA NIEWODNICZAŃSKIEGO
POLSKIEJ AKADEMII NAUK

INTERNATIONAL
MASTERCLASSES

hands on particle physics ¹

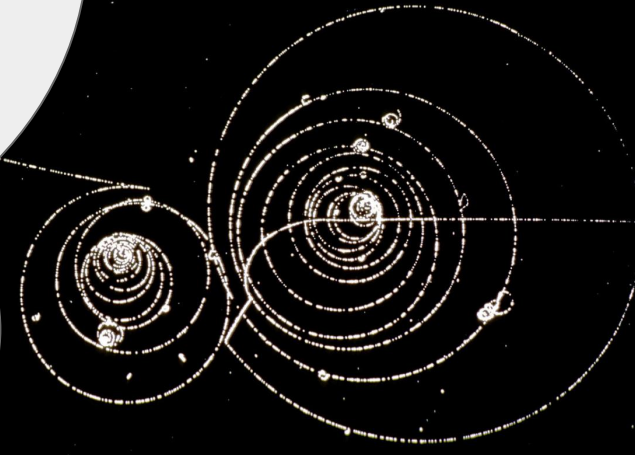


Jak powstał
Wszechświat
i jaki czeka
go los?

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
przyrody?

Jakie są
elementarne
składniki
materii?



Od Kosmosu do mikroświata

czyli podróż po skalach odległości



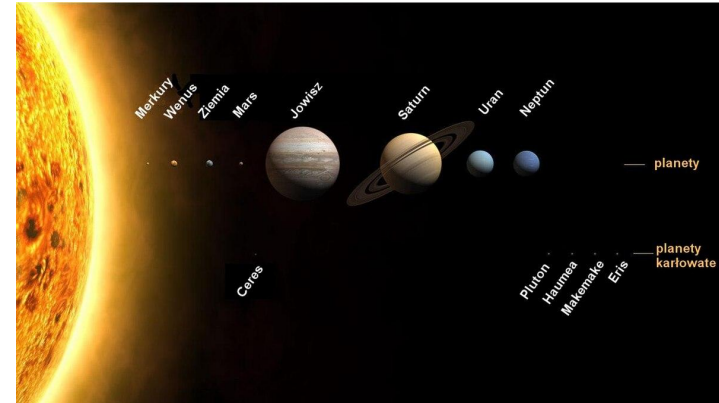
Spojrzenie w daleki Kosmos
Gromada galaktyk SMACS 0723
widziana przez Teleskop Jamesa
Webba

$\sim 10^{26}$ 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

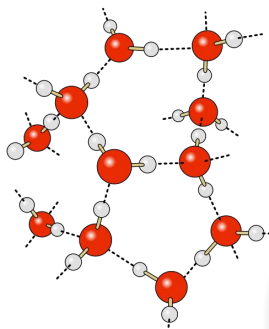
Z czego zbudowany jest otaczający nas świat?



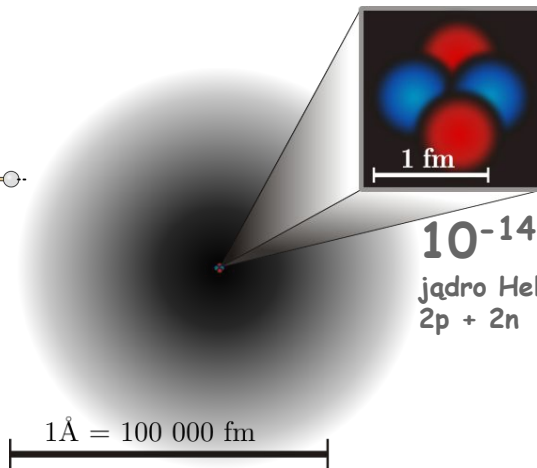
10^{-2} m
pszczola miodna



10^{-5} m
pyłek roślin

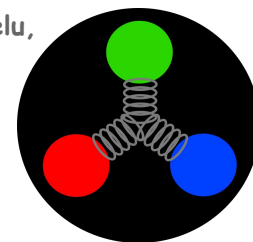


10^{-9} m
cząsteczki wody

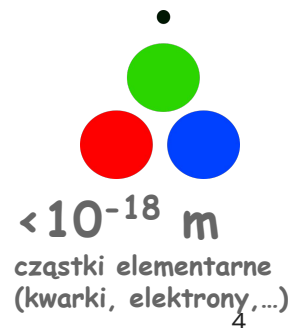


10^{-14} m
jądro Helu,
2p + 2n

$1\text{\AA} = 100\,000\text{ fm}$
 10^{-10} m
atom Helu



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

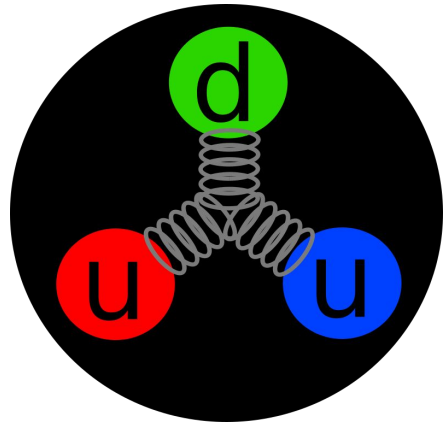
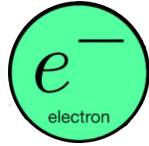


$< 10^{-18}$ m
cząstki elementarne
(kwarki, elektrony, ...)

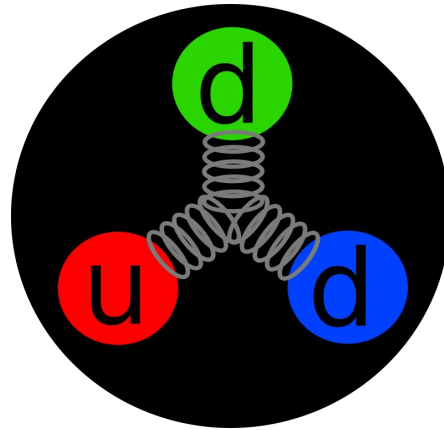
Potęga dziesiąticy	Liczba	Skrót
10^{-12}	0,000000000001	p (piko)
10^{-9}	0,000000001	n (nano)
10^{-6}	0,000001	μ (mikro)
10^{-3}	0,001	m (milli)
10^{-2}	0,01	
10^{-1}	0,1	
10^0	1	
10^1	10	
10^2	100	
10^3	1000	k (kilo)
10^6	1 000 000	M (mega)
10^9	1 000 000 000	G (giga)
10^{12}	1 000 000 000 000	T (tera)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

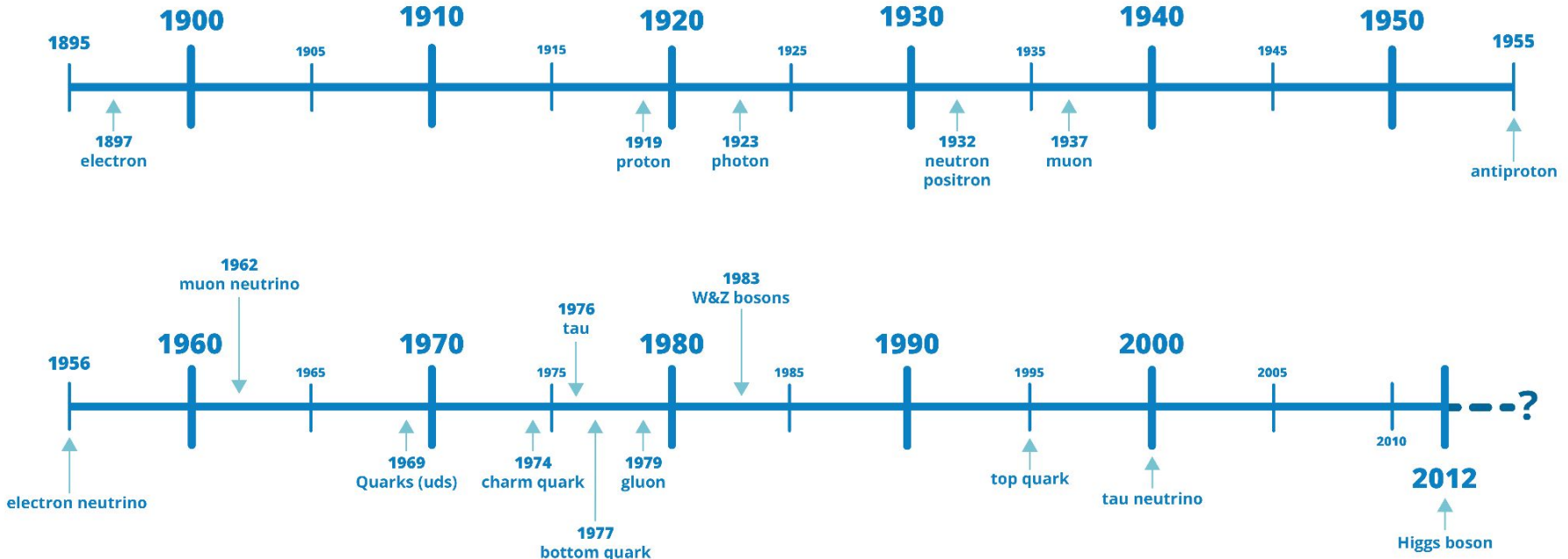
Skąd to wszystko wiemy?

Czy to już naprawdę wszystkie cząstki elementarne?

Historia odkryć w pigułce

Kluczowe odkrycia i obecny stan wiedzy!

- Badania promieniowania kosmicznego oraz eksperymenty na akceleratorach zaowocowały odkryciem olbrzymiej liczby cząstek, **większość z nich nie jest elementarna**

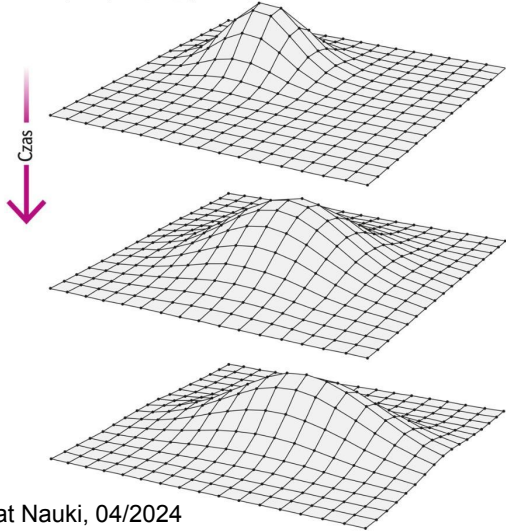


Najbardziej elementarne cząstki obecny stan wiedzy!

- Opracowano model teoretyczny, który dość dokładnie opisuje obserwacje i wszystkie odkryte cząstki -> **Model Standardowy**
- Opis matematyczny -> cząstki jako pola

Dwuwymiarowa reprezentacja prostego pola

Cząstka jest reprezentowana przez zmarszczki,
a nie przez pojedynczy punkt w polu.



Q
U
A
R
K
S

UP mass 2,3 MeV/c ² charge 2/3 spin 1/2	CHARM 1,275 GeV/c ² 2/3 1/2	TOP 173,07 GeV/c ² 2/3 1/2
DOWN 4,8 MeV/c ² -1/3 1/2	STRANGE 95 MeV/c ² -1/3 1/2	BOTTOM 4,18 GeV/c ² -1/3 1/2

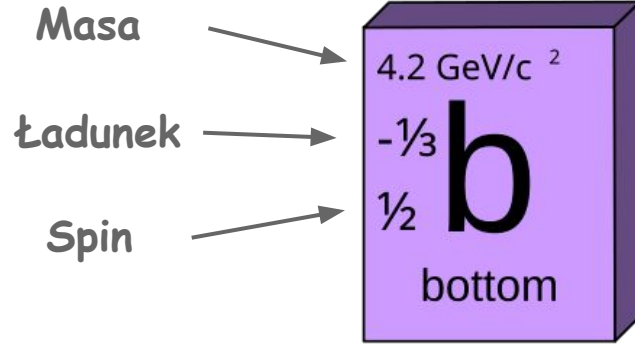
L
E
P
T
O
N
S

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

- W modelu tym do zbudowania wszystkich zaobserwowanych cząstek potrzeba tylko **6 kwarków i 6 leptonów** (gr.leptos - lekki)
- Kwarki: górny, dolny, powabny, dziwny, wysoki, piękny
- Leptony: elektron, mion, tau, + 3 neutrina

Najbardziej elementarne cząstki

cechy cząstek



Q
A
R
K
S

UP mass 2,3 MeV/c ² charge 2/3 spin 1/2 	CHARM 1,275 GeV/c ² 2/3 1/2 	TOP 173,07 GeV/c ² 2/3 1/2
DOWN 4,8 MeV/c ² -1/3 1/2 	STRANGE 95 MeV/c ² -1/3 1/2 	BOTTOM 4,18 GeV/c ² -1/3 1/2

L
E
P
T
O
N
S

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

Jednostki w fizyce cząstek:

- **Energia: eV** (elektronowolt)
 - ◆ 1 eV = 1 e · 1 V ≈ 1,602 176 53 × 10⁻¹⁹ J
- **Masa → eV/c²**
 - ◆ 1 MeV/c² = 10⁶ eV/c²

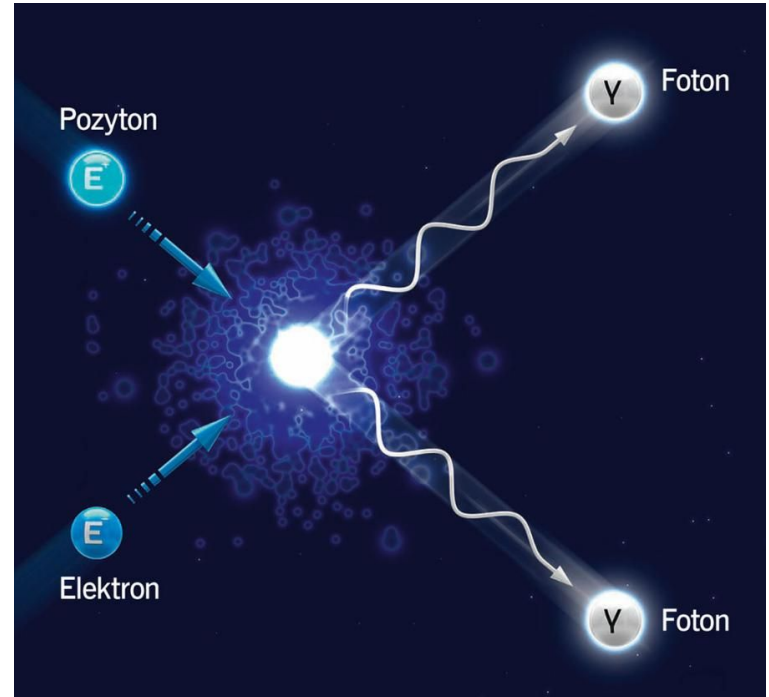
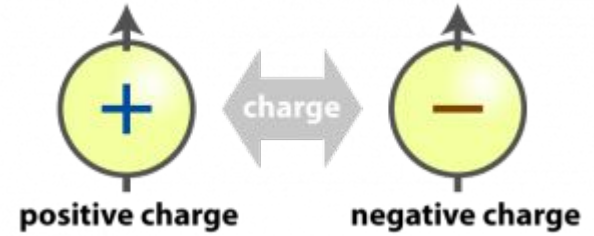
Spin (to spin: wirować) - zjawisko kwantowomechaniczne, niemające odpowiednika w fizyce klasycznej, czyli w skali makro.

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

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 cząstka materii i antymaterii zderzają się to anihilują
- ich masa zmienia się w energię spoczynkową wg. wzoru: $E_0 = mc^2$



Co scala te składniki materii?

czyli 4 podstawowe (fundamentalne) oddziaływania natury

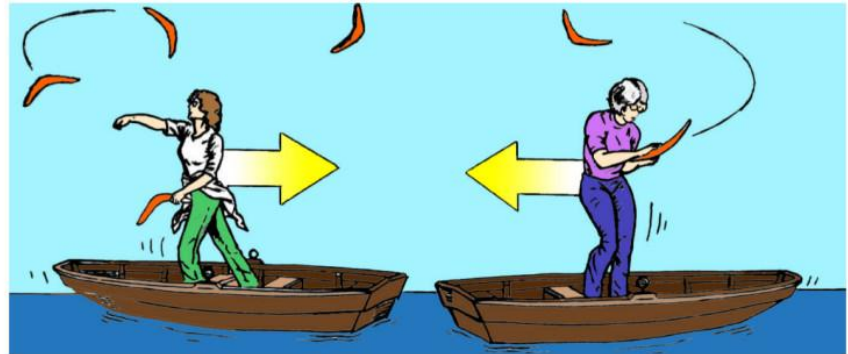
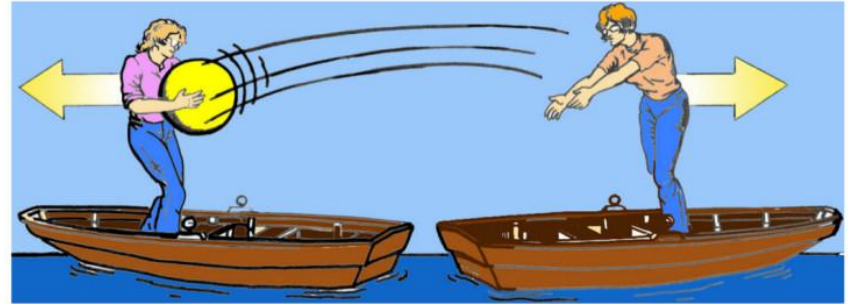
- Elektromagnetyczne
- Słabe
- Silne
- Grawitacyjne

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:

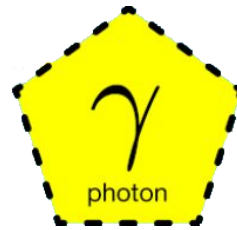
- zasięg (zależność od odległości)
- siła oddziaływania

→ skala oddziaływania (makro/mikro świat)

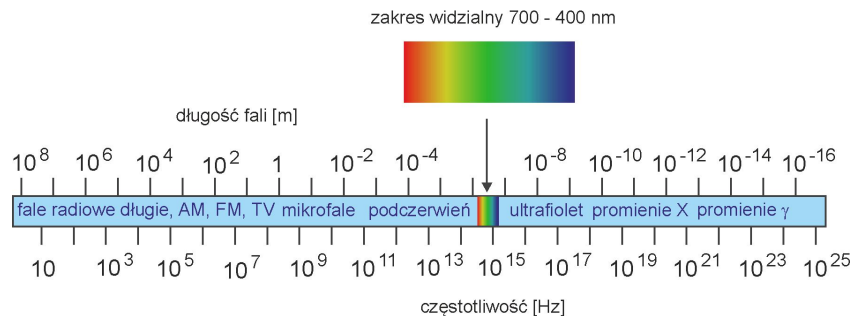
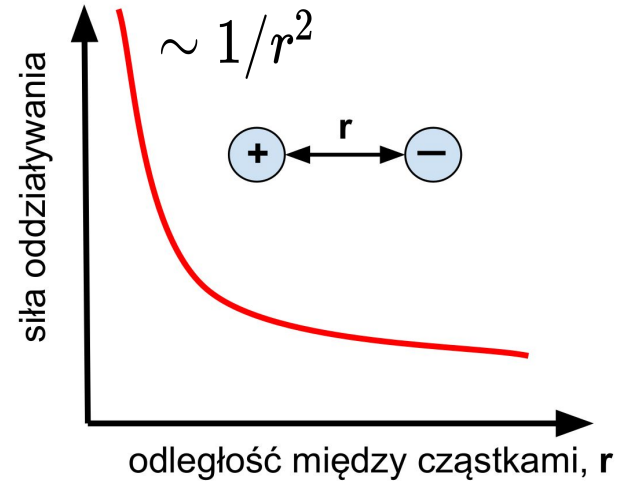


Oddziaływanie elektromagnetyczne

czyli interakcje pomiędzy naładowanymi elektrycznie cząstkami



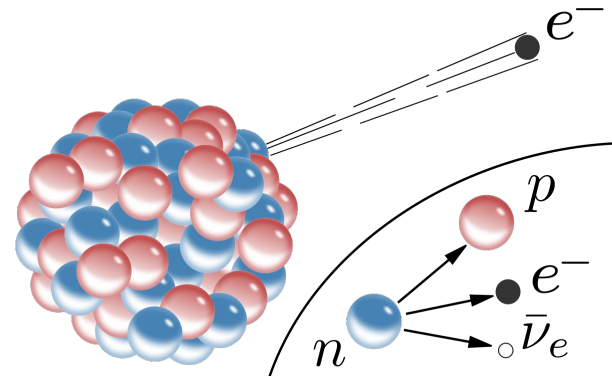
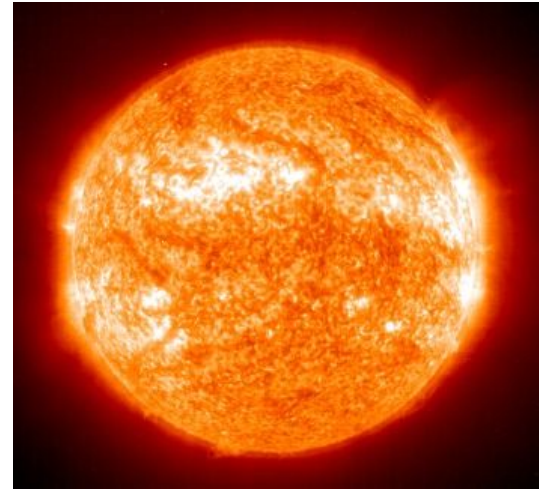
- Tworzy atomy i formuje cząsteczki, dzięki czemu mogło dojść do stworzenia materii
- Nośnikiem oddziaływania jest **foton (γ)**
- Masa: 0 GeV
- Ładunek elektryczny: 0
- Spin: 1
- zasięg: ∞
- Fotony o różnych energiach tworzą widmo fal elektromagnetycznych



Oddziaływanie słabe

czyli krótkozasięgowe oddziaływanie jądrowe

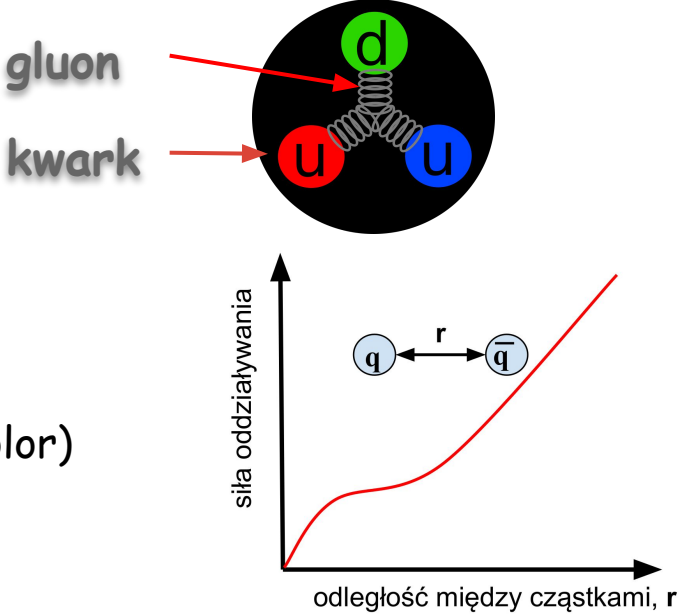
- Odpowiedzialne za rozpady ciężkich kwarków i leptonów na lżejsze kwarki i leptony
- Oddziaływanie słabe odpowiada za promieniotwórczy rozpad beta oraz odgrywa decydującą rolę w procesach produkcji energii w gwiazdach, np: w Słońcu.
- 3 nośnik oddziaływania: bozony W^+ , W^- , Z^0
- masa W : 80 GeV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



Oddziaływanie silne

czyli oddziaływanie spajające składniki jądra

- 8 nośników oddziaływania: gluony
- 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 jądra $\sim 10^{-14}$



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 przynosi 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
Niebieski	Antyniebieski	Kolor
Czerwony	Antyczerwony	Antykolor
Zielony	Antyzielony	

Skąd się bierze masa nukleonów?

Masa składników ok. 1%

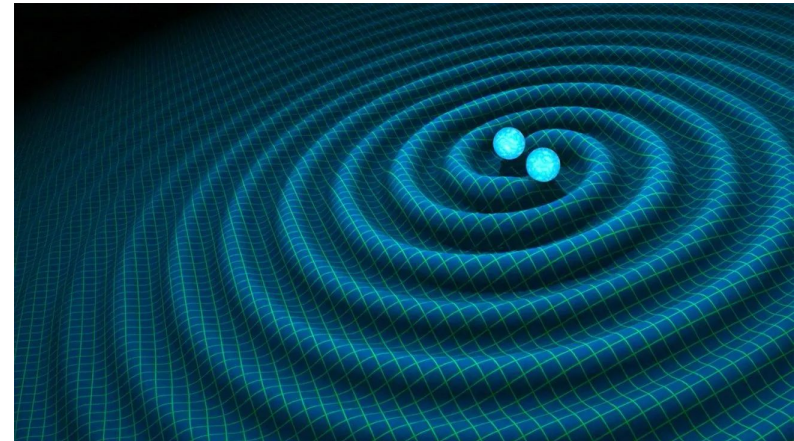
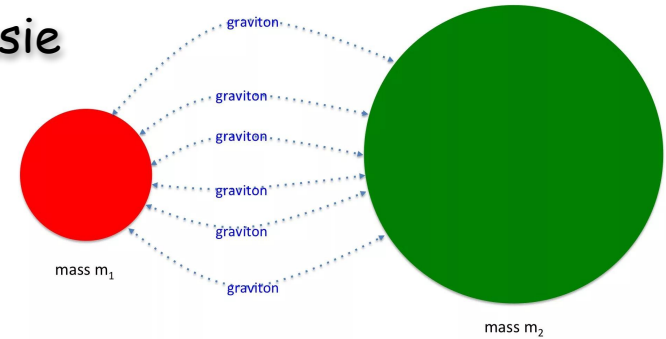
ok. 99% masy protonów i neutronów energii oddziaływania między gluonami!

Oddziaływanie grawitacyjne

czyli oddziaływanie między obiektami o niezerowej masie

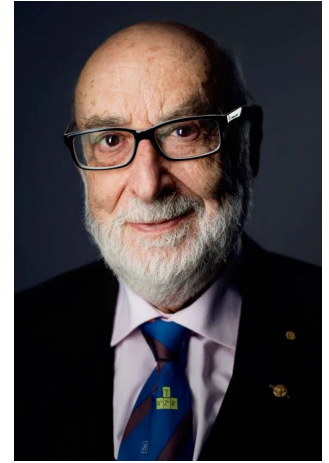
- Powoduje, że jabłko spada na ziemię, łączy materię w planetach i gwiazdach, łączy gwiazdy w galaktyki
- **Model Standardowy nie opisuje tego oddziaływania (brak kwantowej teorii pola)**
- Efekty grawitacyjne są znikome na poziomie cząstek elementarnych (mają bardzo małe masy!)

- 2015 -> "otworzyło się nowe okno obserwacyjne na Wszechświat" -> odkryto fale grawitacyjne



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

- Mechanizm nadawania masy bezmasowym cząstkom zaproponowany w 1964 roku przez Petera Higgsa i Francisa Englerta żeby "ratować" Model Standardowy
- Pole Higgsa 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**
- **Odkryta!**
- **Eksperymenty ATLAS i CMS na LHC, 2012**
- **Nagroda Nobla 2013 (49 lat później!)**



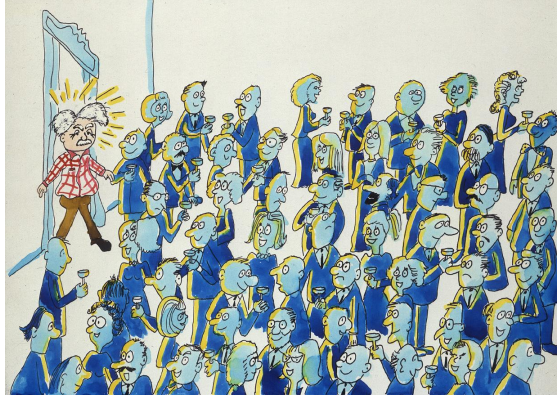
Uzasadnienie nagrody: „za teoretyczne odkrycie mechanizmu, który przyczynia się do naszego zrozumienia pochodzenia masy cząstek subatomowych, a który niedawno został potwierdzony poprzez odkrycie przewidywanej cząstki fundamentalnej, przez eksperymenty ATLAS i CMS w Wielkim Zderzaczu Hadronów w CERN” 15

Na czym polega mechanizm Higgsa?

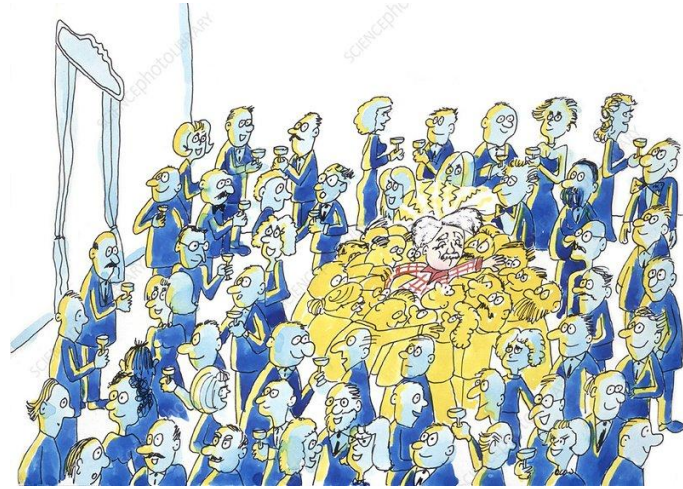
Czym jest cząstka Higgsa?



Próżnia jednorodnie
wypełniona polem Higgsa



Pojawia się bezmasowa cząstka
(z prędkością światła)



Cząstka oddziaływuje 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 oddziaływań między nimi

QUARKS

UP mass 2,3 MeV/c ² charge 2/3 spin 1/2 u	CHARM 1,275 GeV/c ² 2/3 1/2 c	TOP 173,07 GeV/c ² 2/3 1/2 t
DOWN 4,8 MeV/c ² -1/3 1/2 d	STRANGE 95 MeV/c ² -1/3 1/2 s	BOTTOM 4,18 GeV/c ² -1/3 1/2 b

LEPTONS

ELECTRON 0,511 MeV/c ² -1 1/2 e	MUON 105,7 MeV/c ² -1 1/2 μ	TAU 1,777 GeV/c ² -1 1/2 τ
ELECTRON NEUTRINO <2,2 eV/c ² 0 1/2 ν_e	MUON NEUTRINO <0,17 MeV/c ² 0 1/2 ν_μ	TAU NEUTRINO <15,5 MeV/c ² 0 1/2 ν_τ

GLUON 0 0 1 g

HIGGS BOSON 126 GeV/c ² 0 0 H
--

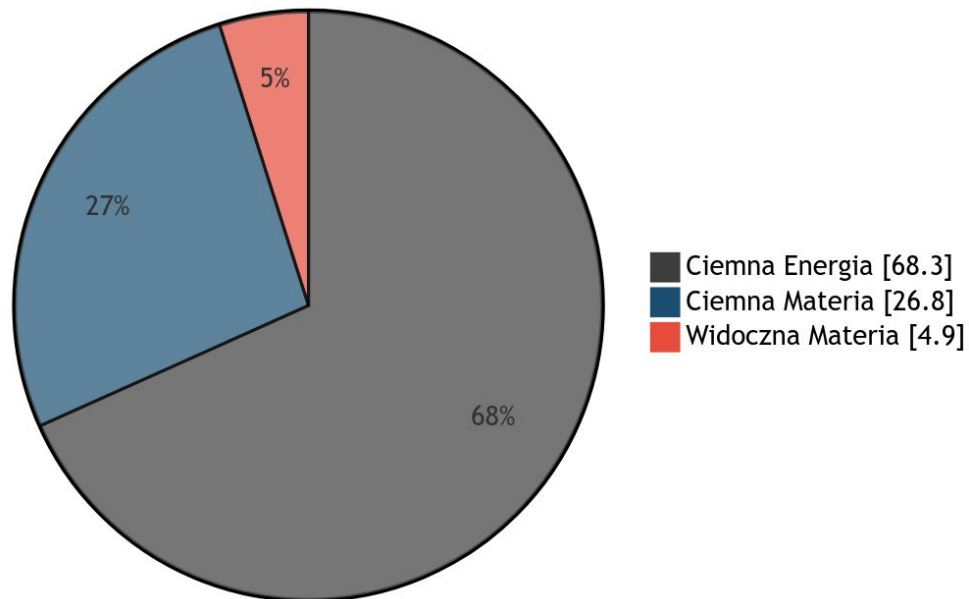
PHOTON 0 0 1 γ
--

Z BOSON 91,2 GeV/c ² 0 1 Z

W BOSON 80,4 GeV/c ² ±1 1 W
--

GAUGE BOSONS

Szacowana zawartość materii i energii we Wszechświecie

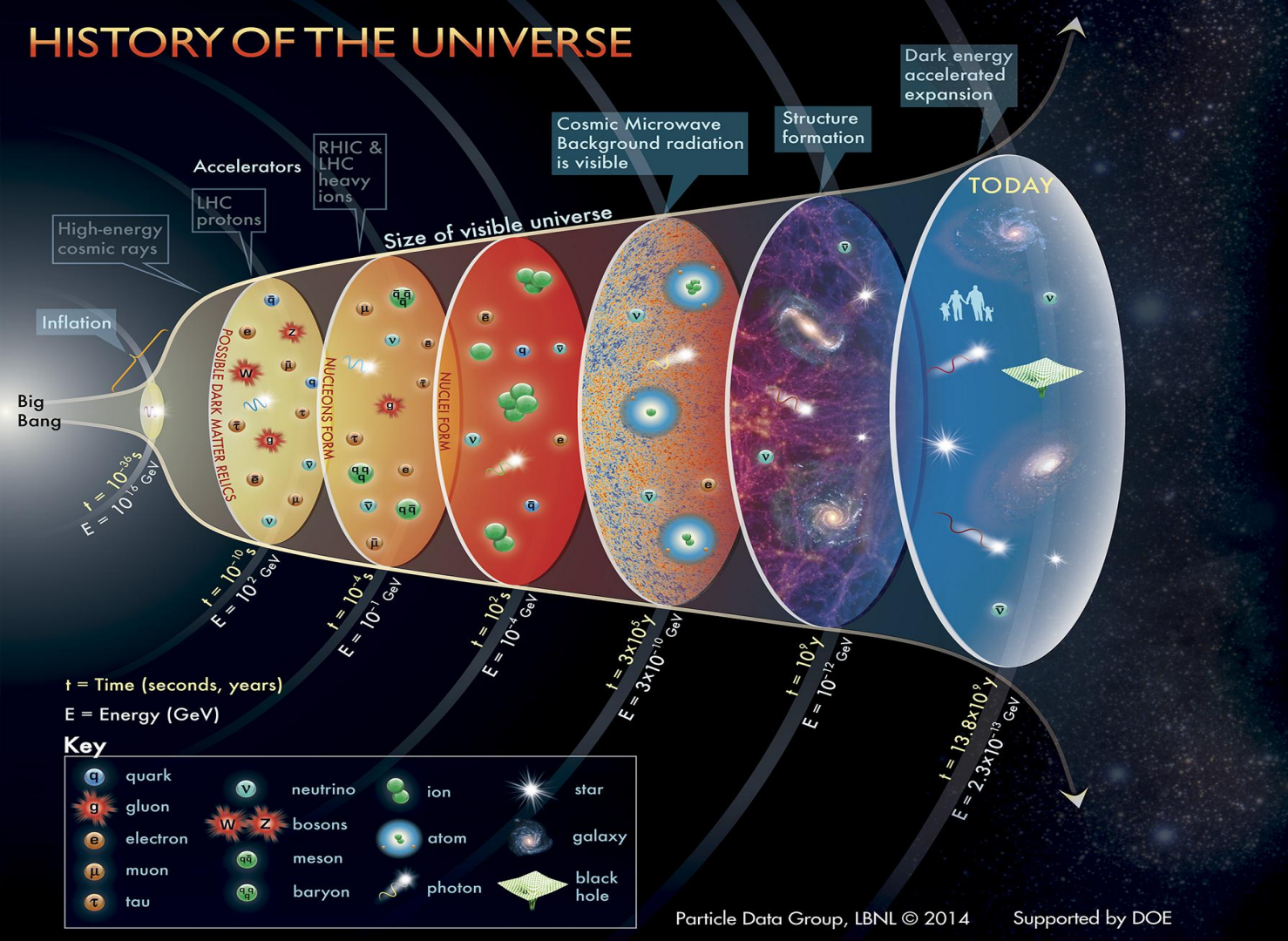


Czyli po ponad 100 latach badania naszego Wszechświata znamy tylko 5% jego zawartości !!!

Astronomia/Astrofizyka 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



t = Time (seconds, years)
E = Energy (GeV)

Key

quark	neutrino	ion	star
gluon	bosons	atom	galaxy
electron	meson	photon	black hole
muon	baryon		
tau			

Rozwiązanie?

Próba odtworzenia warunków po Wielkim 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 (niezmiennik)

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)

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

$$E = pc$$

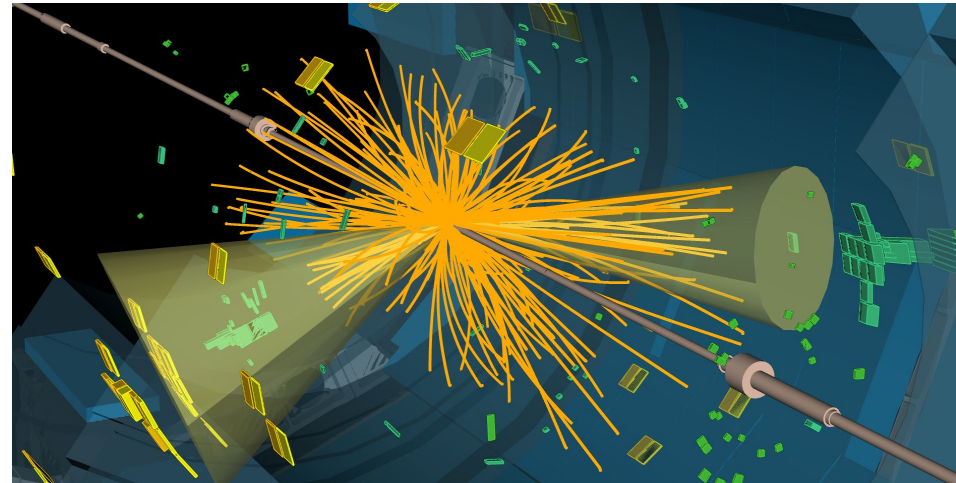
Narzędzia?

Akcelerator cząstek

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

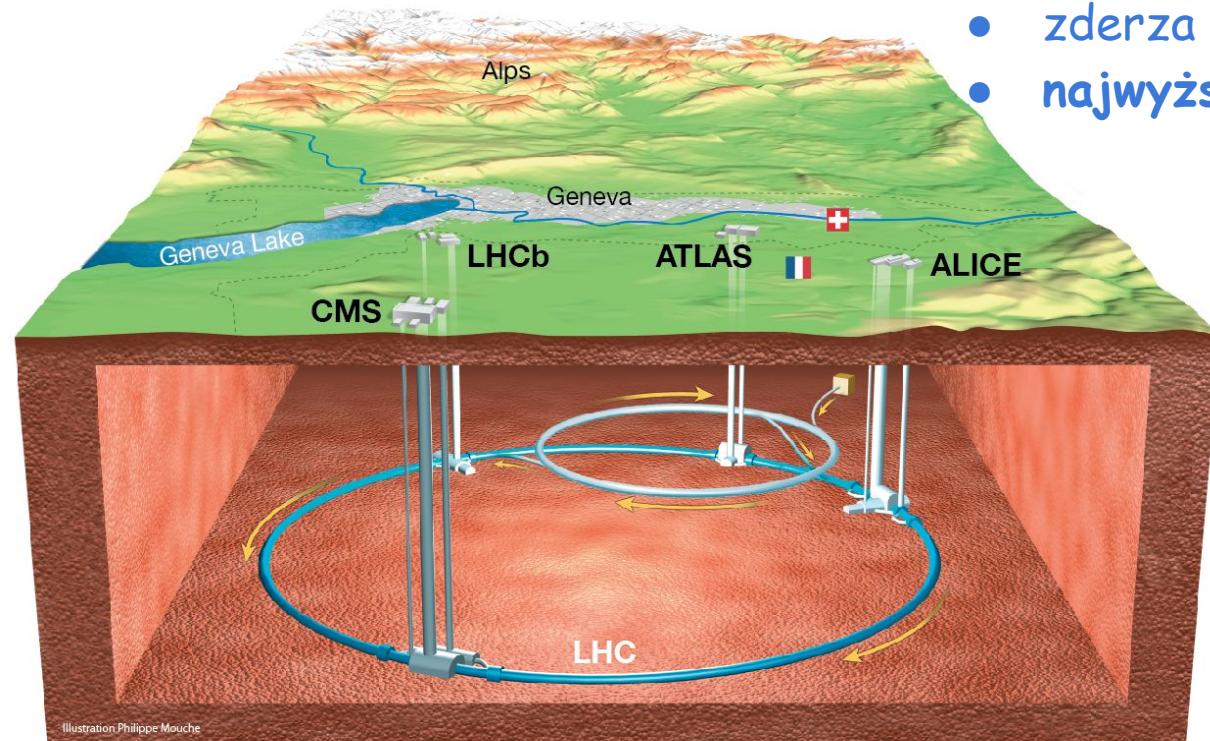


© Markus Friedl



Large Hadron Collider czyli Wielki Zderzacz Hadronów

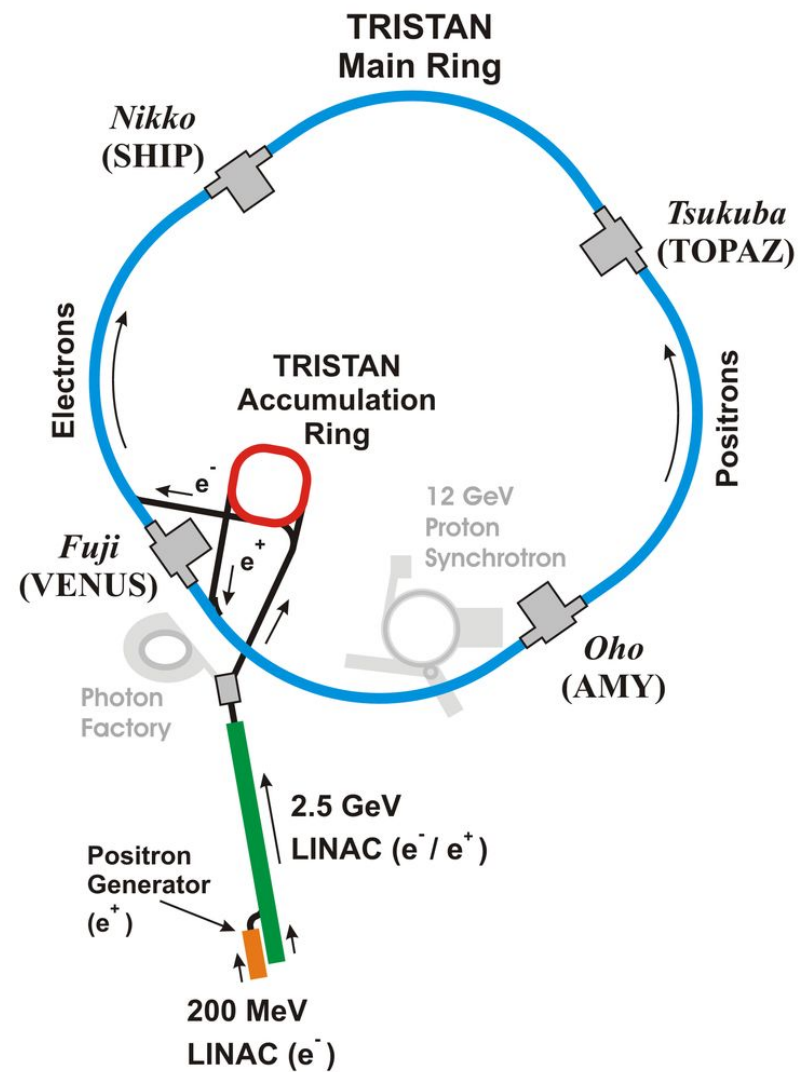
- znajduje się w CERNie, koło Genewy, w Szwajcarii
- w tunelu o obwodzie 27 km, ~100 m pod ziemią
- zderza protony albo jądra ołowiu
- najwyższe energie zderzeń ~14 TeV



SuperKEKB

czyli zderzacz e^+e^-

- znajduje się w laboratorium KEK, w Tsukubie, blisko Tokio, w Japonii
- w tunelu o obwodzie 3 km, ~11 m pod ziemią
- zderza ze sobą elektrony i pozytony
- najwyższe światłości zderzeń
 $\sim 5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- rozpędzanie cząstek naładowanych
-> pole elektryczne
- zakrzywianie torów cząstek naładowanych
-> pole magnetyczne



Niewyjaśnione tajemnice

... przed nami jeszcze wiele do odkrycia

Dlaczego Wszechświat rozszerza się coraz szybciej?

Dlaczego obserwujemy tak mało jest antymaterii we Wszechświecie?

Czym jest niewidzialna Ciemna Materia?

Czym jest Ciemna Energia?

Dlaczego masy cząstek elementarnych tak bardzo różnią się od siebie?

...

czyli czego jeszcze poszukują astrofizycy i fizycy cząstek.

