

O cząstkach, które są falami i próżni, która nie jest pusta

Sebastian Sapeta

IFJ PAN

9 kwietnia 2018

Jak małe jest najmniejsze?

Notacja naukowa

$$10^{-8} = 0.000\,000\,01$$

$$10^9 = 1\,000\,000\,000$$

Jak małe jest najmniejsze?

Notacja naukowa

$$10^{-8} = 0.000\,000\,01$$

$$10^9 = 1\,000\,000\,000$$

femto (f)	pico (p)	nano (n)	mega (M)	giga (G)	tera (T)
10^{-15}	10^{-12}	10^{-9}	10^6	10^9	10^{12}

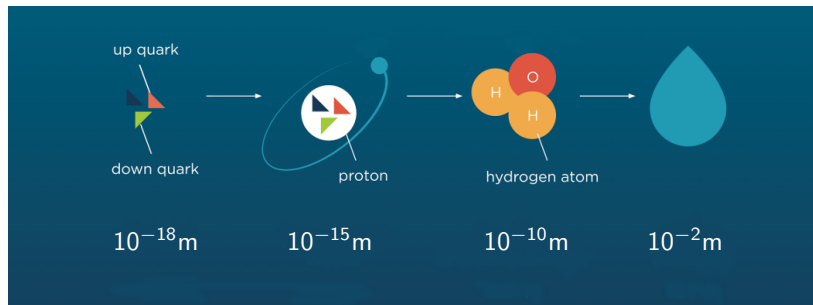
Jak małe jest najmniejsze?

Notacja naukowa

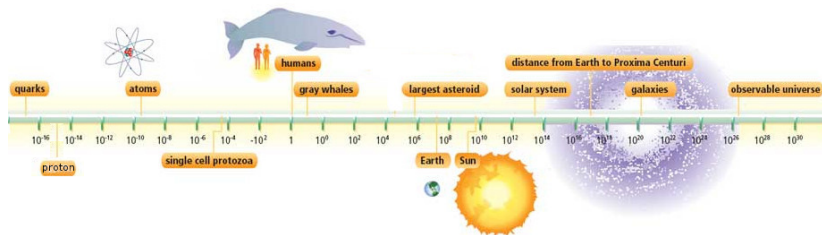
$$10^{-8} = 0.000\,000\,01$$

$$10^9 = 1\,000\,000\,000$$

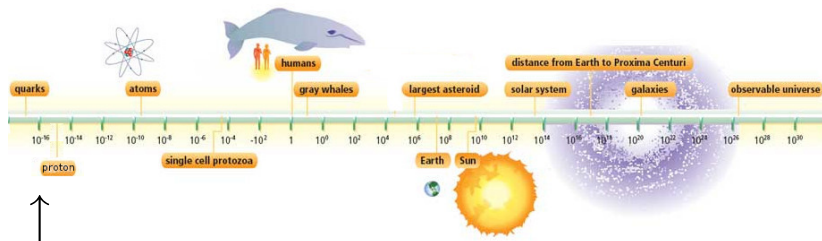
femto (f)	pico (p)	nano (n)	mega (M)	giga (G)	tera (T)
10^{-15}	10^{-12}	10^{-9}	10^6	10^9	10^{12}



Skale we Wszechświecie

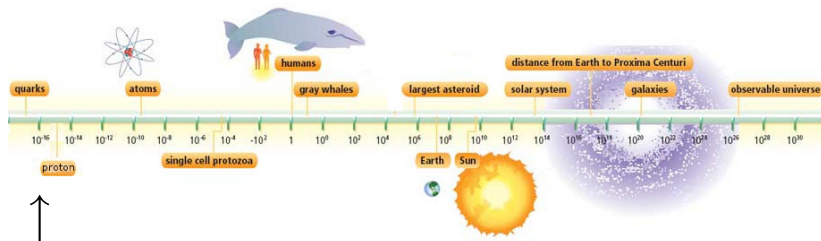


Skale we Wszechświecie



jesteśmy tutaj

Skale we Wszechświecie



jesteśmy tutaj

- ▶ małe obiekty: teoria kwantowa
- ▶ duże energie: teoria relatywistyczna

} Kwantowa Teoria Pola

Cztery siły w przyrodzie

GRAWITACJA

- ↪ spadające jabłka
- ↪ układ słoneczny
- ↪ galaktyki
- ↪ czarne dziury

ELEKTROMAGNETYZM

- ↪ atomy
- ↪ światło
- ↪ chemia
- ↪ elektronika

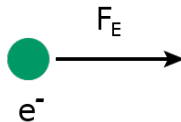
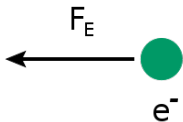
ODDZIAŁYWANIA SŁABE

- ↪ spalanie słońca
- ↪ radioaktywność
- ↪ oddziaływania neutrin

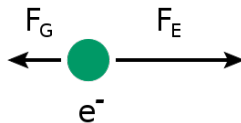
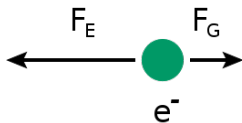
ODDZIAŁYWANIA SILNE

- ↪ jądra atomowe
- ↪ proton, neutron

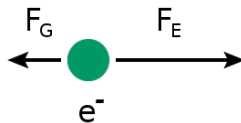
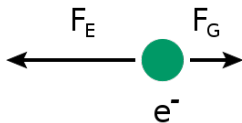
Cztery siły w przyrodzie



Cztery siły w przyrodzie



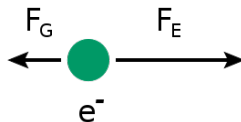
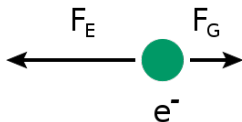
Cztery siły w przyrodzie



- Dla pary elektronów

$$\text{(siła elektryczna)} \quad F_E = 10^{42} F_G \quad \text{(siła grawitacji)}$$

Cztery siły w przyrodzie

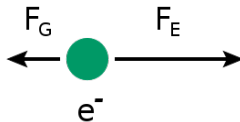
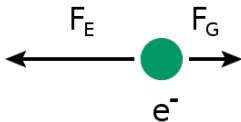


- Dla pary elektronów

$$\text{(siła elektryczna)} \quad F_E = 10^{42} F_G \quad \text{(siła grawitacji)}$$

↪ W świecie cząstek elementarnych możemy zaniedbać grawitację

Cztery siły w przyrodzie



- Dla pary elektronów

$$\text{(siła elektryczna)} \quad F_E = 10^{42} F_G \quad \text{(siła grawitacji)}$$

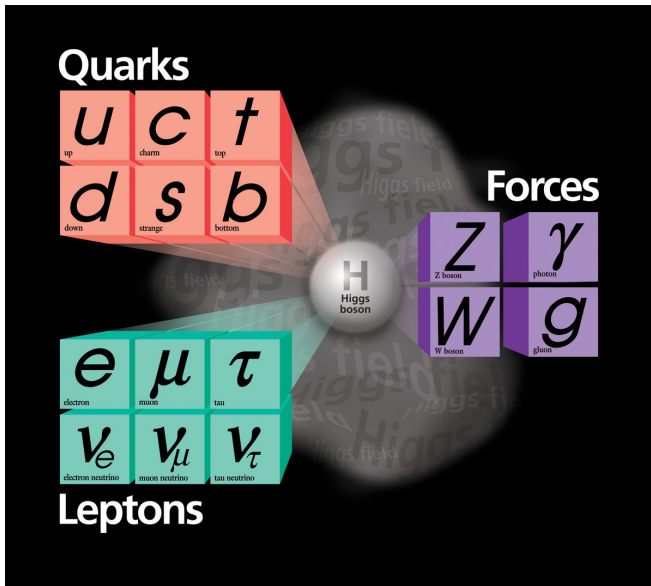
↪ W świecie cząstek elementarnych możemy zaniedbać grawitację

~~grawitacja~~
elektromagnetyzm
oddziaływania słabe
oddziaływania silne

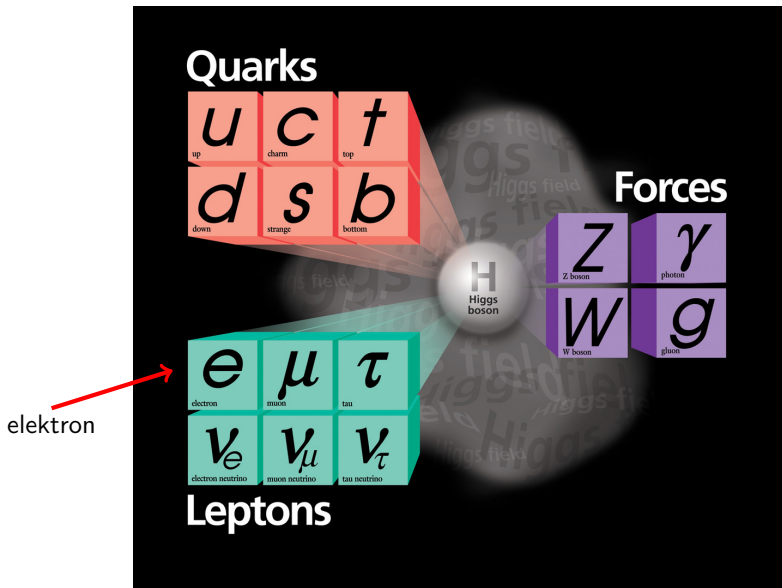


MODEL STANDARDOWY

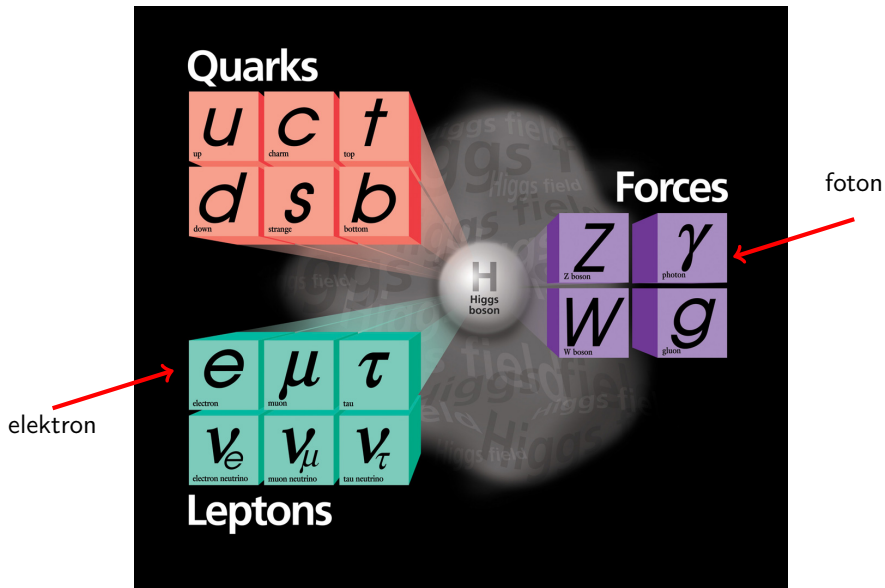
Cząstki elementarne



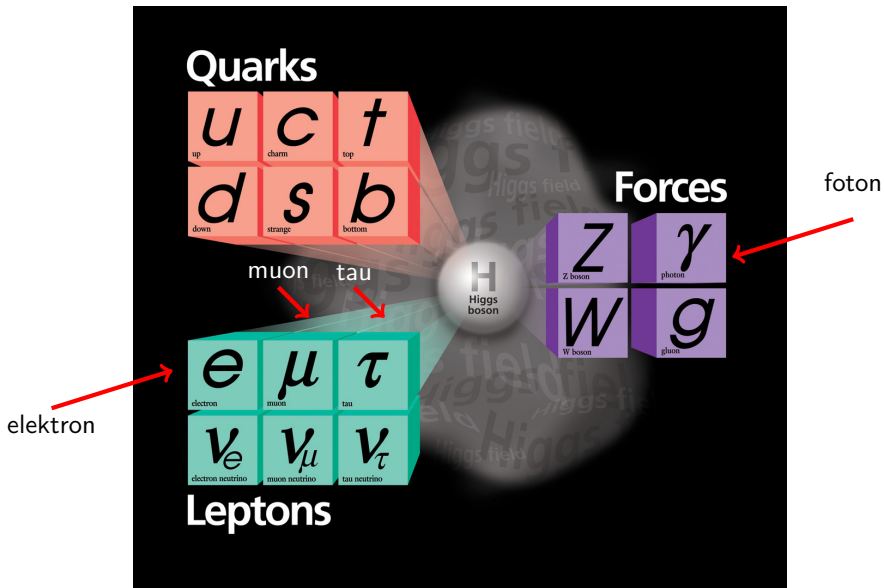
Cząstki elementarne



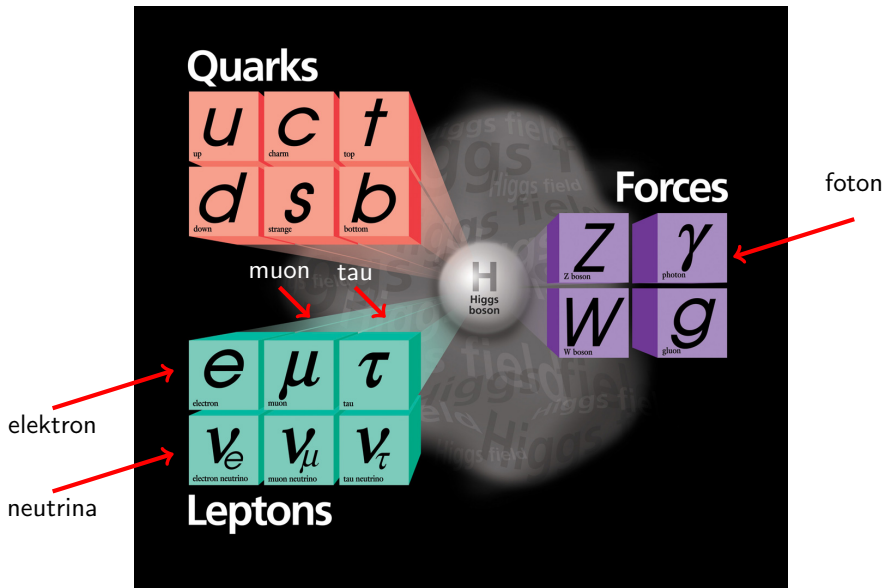
Cząstki elementarne



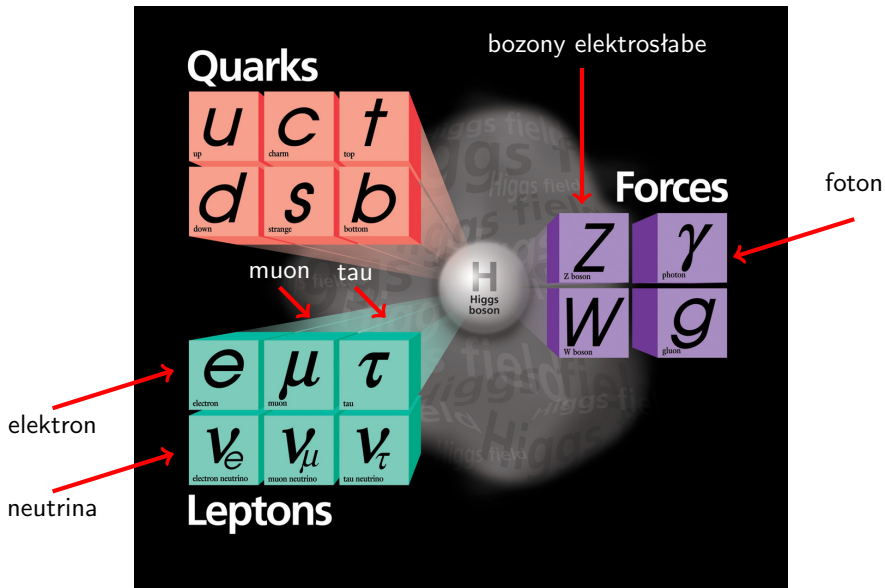
Cząstki elementarne



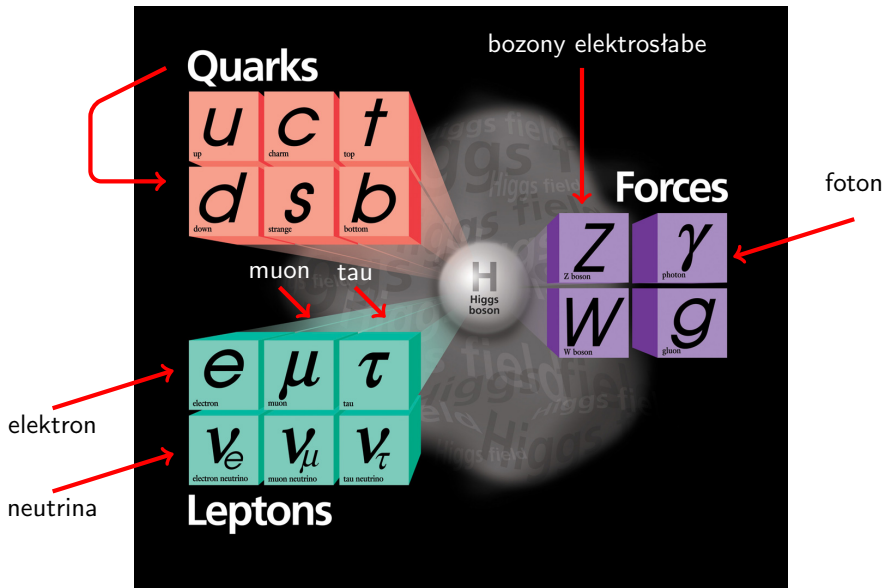
Cząstki elementarne



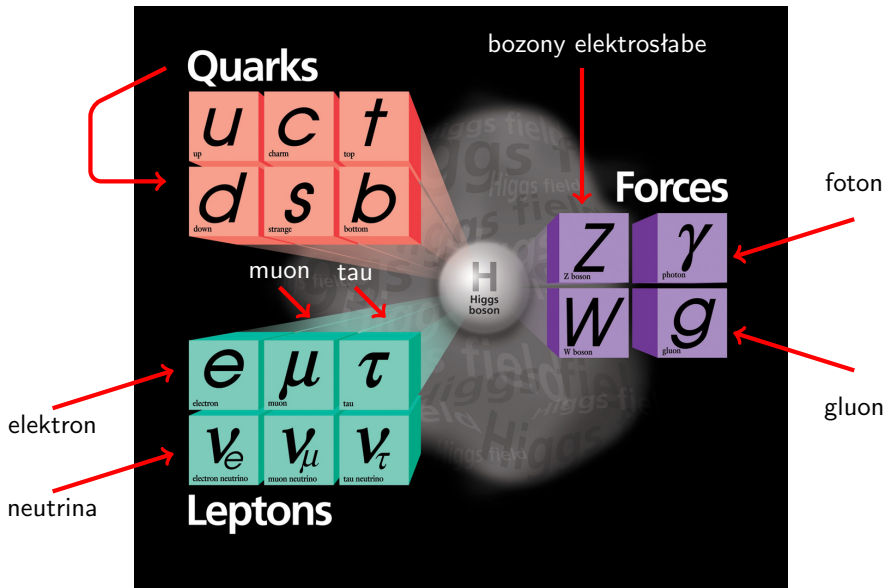
Cząstki elementarne



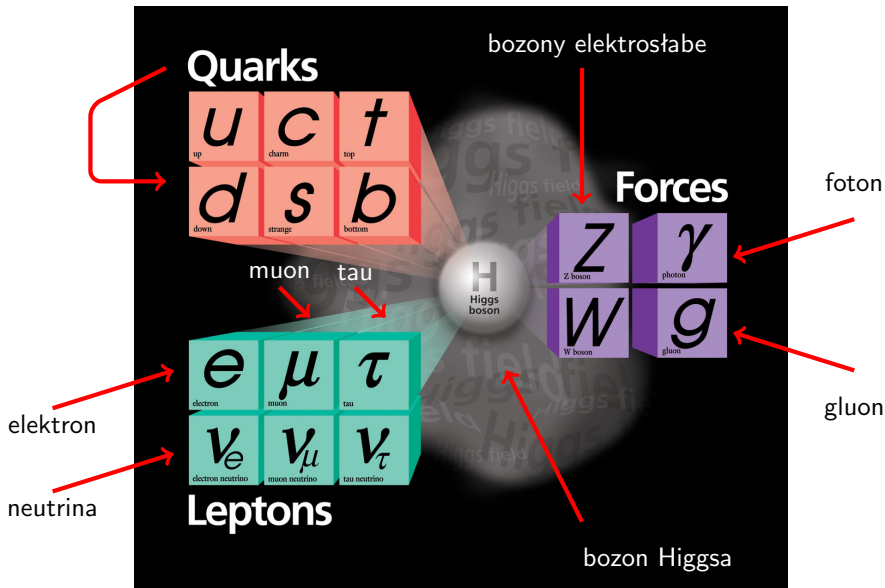
Cząstki elementarne



Cząstki elementarne



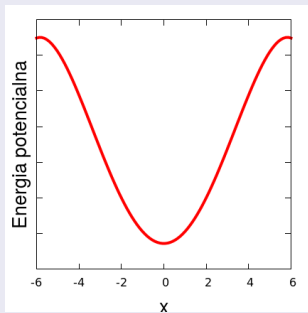
Cząstki elementarne



Jaki świat widzą cząstki elementarne?

Mechanika klasyczna

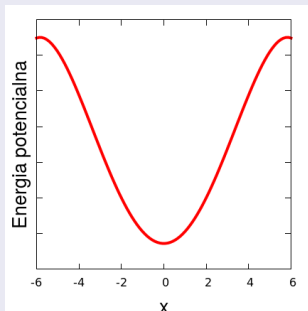
Kulka



Jaki świat widzą cząstki elementarne?

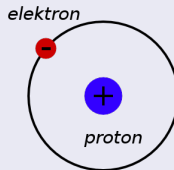
Mechanika klasyczna

Kulka



Mechanika kwantowa

Atom wodoru

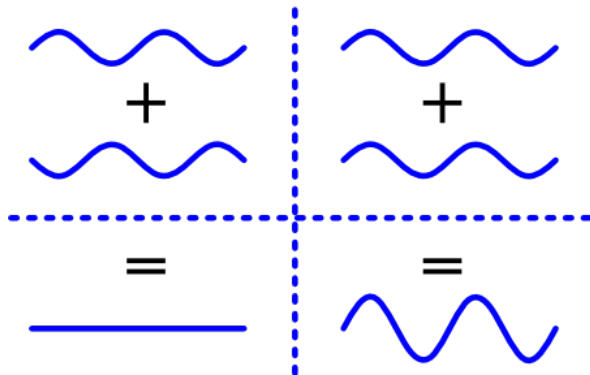


$n = \infty$	-----	$E = 0$
$n = 4$	=====	$E = -0.85 \text{ eV}$
$n = 3$	=====	$E = -1.51 \text{ eV}$
$n = 2$	—————	$E = -3.40 \text{ eV}$
$n = 1$	—————	$E = -13.6 \text{ eV}$

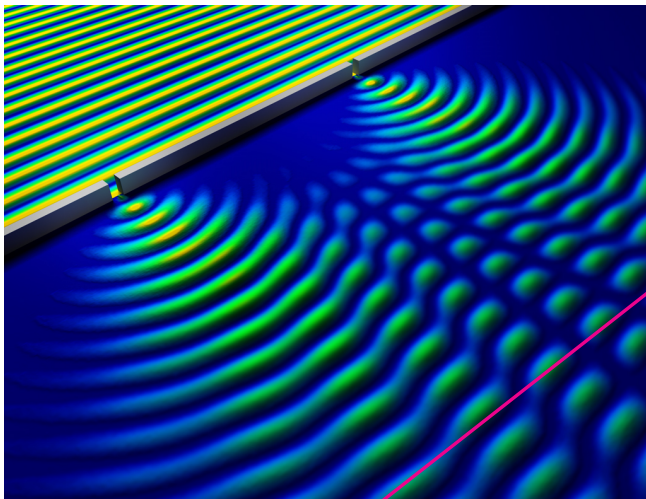
INTERFERENCJA

destruktywna

konstruktywna



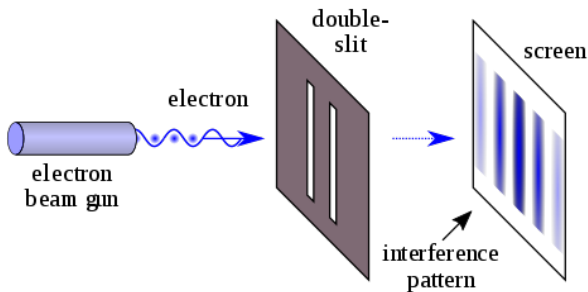
INTERFERENCJA



ekran

Dualizm korpuskularno-falowy

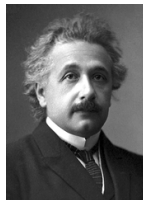
Elektron jest również falą



Szczególna teoria względności

- ▶ Równoważność masy i energii

$$E = mc^2$$



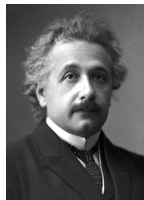
Einstein, 1905

Szczególna teoria względności

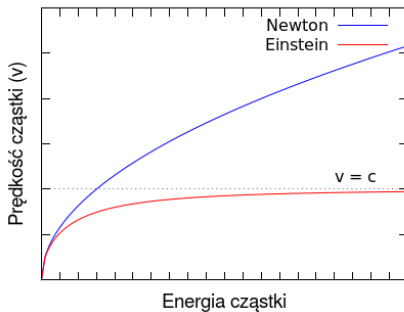
- ▶ Równoważność masy i energii

$$E = mc^2$$

- ▶ Nic nie może poruszać się szybciej niż światło



Einstein, 1905



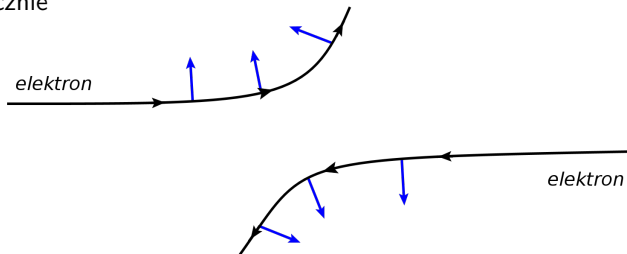
Cząstki elementarne

W świecie kwantowym również oddziaływaniom odpowiadają cząstki

Cząstki elementarne

W świecie kwantowym również oddziaływaniom odpowiadają cząstki

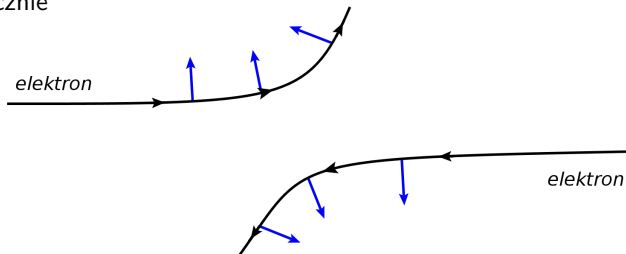
- Klasycznie



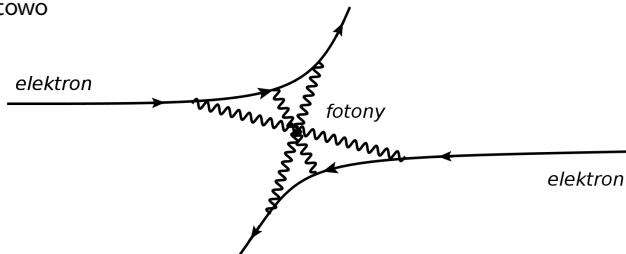
Cząstki elementarne

W świecie kwantowym również oddziaływaniom odpowiadają cząstki

► Klasycznie



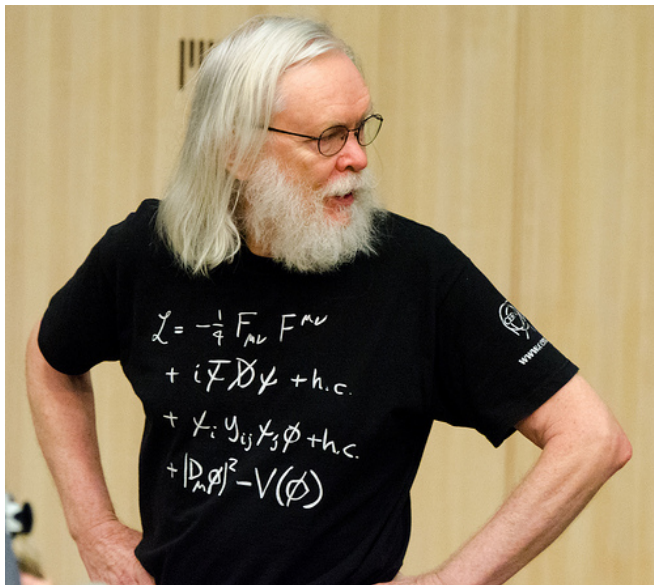
► Kwantowo



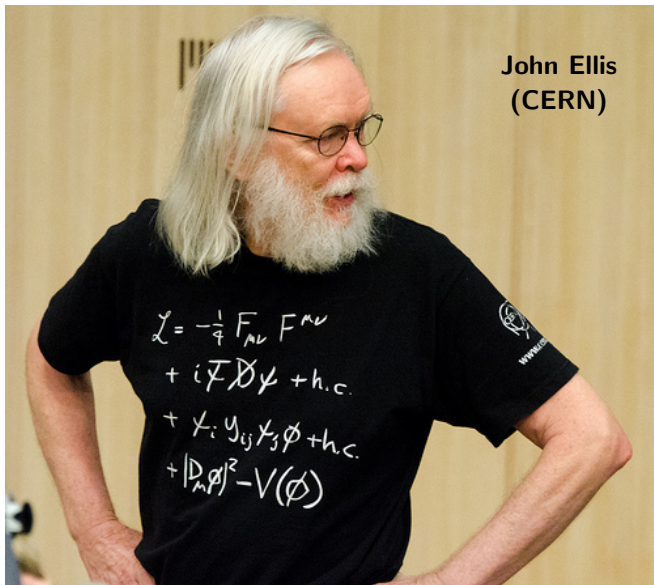
Obecnie obowiązująca teoria opisująca oddziaływania
wszystkich znanych nam cząstek elementarnych to:

Model Standardowy

Lagrangian Modelu Standardowego



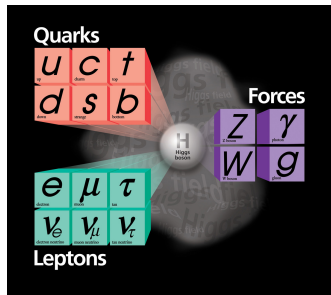
Lagrangian Modelu Standardowego



DO YOU NOT UNDERSTAND?
D. crasped. k. w. sa. zi. mi. p.

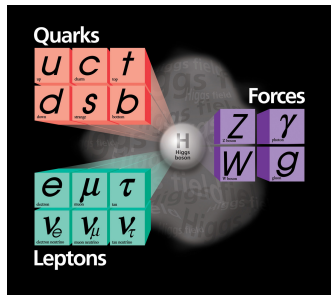
O cząstkach, które są falami i próżni, która nie jest pusta

Model Standardowy



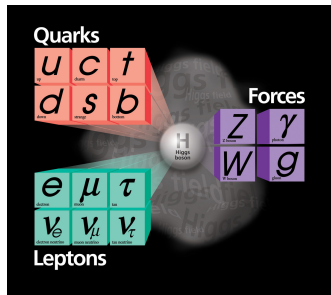
$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + i\bar{\Psi}\not{D}\Psi + \Psi_i y_{ij} \Psi_j \phi + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$

Model Standardowy



$$\mathcal{L} = \underbrace{-\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}}_{\text{bozony}} + \underbrace{i\bar{\Psi}\not{D}\Psi}_{\text{fermiony, oddziaływanie fermion-bozon}} + \underbrace{\Psi_i y_{ij} \Psi_j \phi}_{\text{masy fermionów}} + \underbrace{|D_\mu \phi|^2 - V(\phi)}_{\text{Higgs, masy bozonów}}$$

Model Standardowy



$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + i\bar{\Psi}\not{D}\Psi + \bar{\Psi}_i y_{ij}\Psi_j\phi + |D_\mu\phi|^2 - V(\phi)$$

↑

S Y M E T R I A

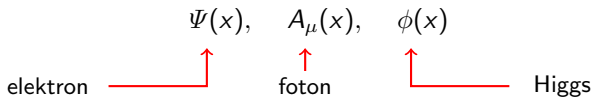
Teoria pola

Cząstki elementarne opisywane są przez pola kwantowe:

$$\Psi(x), \quad A_\mu(x), \quad \phi(x)$$

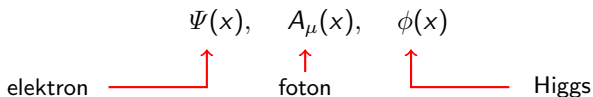
Teoria pola

Cząstki elementarne opisywane są przez pola kwantowe:



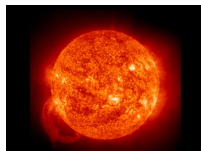
Teoria pola

Cząstki elementarne opisywane są przez pola kwantowe:



Przykłady pól z życia codziennego

Temperatura



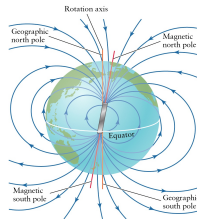
(skalarne)

Natężenie światła



(skalarne)

Pole magnetyczne
Ziemi



(wektorowe)

Symetria cechowania

- ▶ Pola elektronu, fotonu, Higgsa *etc.* posiadają wewnętrzną symetrię.
(Zależą od parametru, który może być zmieniany dowolnie w dowolnym punkcie czasoprzestrzeni.)

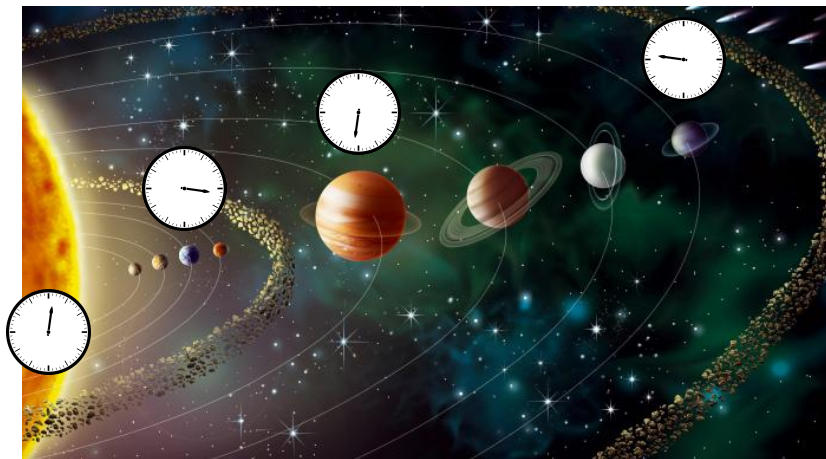
Symetria cechowania

- Pola elektronu, fotonu, Higgsa *etc.* posiadają wewnętrzną symetrię. (Zależą od parametru, który może być zmieniany dowolnie w dowolnym punkcie czasoprzestrzeni.)



Symetria cechowania

- Pola elektronu, fotonu, Higgsa *etc.* posiadają wewnętrzną symetrię. (Zależą od parametru, który może być zmieniany dowolnie w dowolnym punkcie czasoprzestrzeni.)



Problem

Okazuje się, że

- ▶ **jedna prosta reguła**, tj. żądanie lokalnej symetrii cechowania, pozwala stworzyć teorię, która poprawnie przewiduje wszystkie obserwowane w przyrodzie cząstki i wszystkie między nimi oddziaływania.

Problem

Okazuje się, że

- ▶ jedna prosta reguła, tj. żądanie lokalnej symetrii cechowania, pozwala stworzyć teorię, która poprawnie przewiduje wszystkie obserwowane w przyrodzie cząstki i wszystkie między nimi oddziaływania.

Jednak

- ▶ wszystkie cząstki w tej teorii są bezmasowe. A to jest sprzeczne z pomiarami doświadczalnymi.

Na ratunek przychodzi:

Bozon Higgsa

Mechanizm Higgsa

Okazuje się, że jest sposób!

- ▶ Englert–Brout–Higgs–Guralnik–Hagen–Kibble [lata 60-te]
- ▶ potwierdzone odkryciem bozonu Higgsa na LHC [2012]
- ▶ nagroda Nobla [2013]

François Englert



Peter Higgs

Mechanizm Higgsa

Wprowadzenie mas cząstek jest możliwe dzięki tzw. **spontanicznemu łamaniu symetrii cechowania**.

Mechanika Newtona

$$\vec{F} = m\vec{a} = m \frac{\Delta \vec{v}(x)}{\Delta t}$$

warunek początkowy

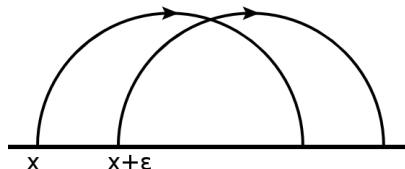
symetria $x \rightarrow x + \epsilon$

Model Standardowy

$$\mathcal{L} = -1/4 F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + i\bar{\Psi} \not{D} \Psi + \Psi_i y_{ij} \bar{\Psi}_j \phi + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$

próżnia

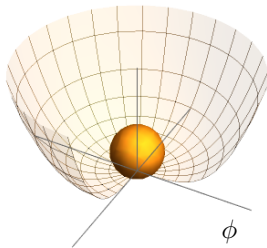
symetria cechowania



Potencjał pola Higgsa

$$\mu^2 > 0$$

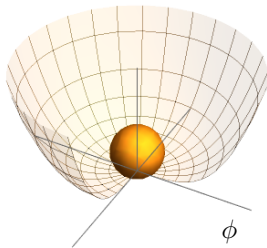
stan symetryczny



Potencjał pola Higgsa

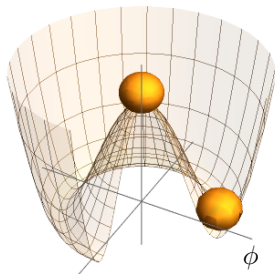
$$\mu^2 > 0$$

stan symetryczny



$$\mu^2 < 0$$

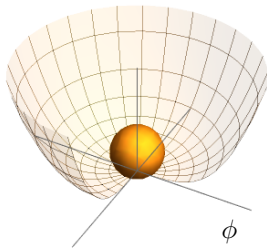
spontanicznie złamana symetria



Potencjał pola Higgsa

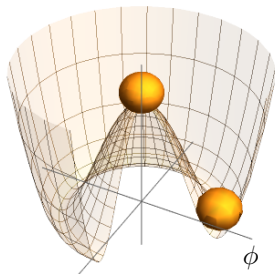
$$\mu^2 > 0$$

stan symetryczny



$$\mu^2 < 0$$

spontanicznie złamana symetria

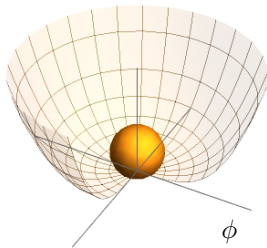


Próżnia to stan o minimalnej energii (stan podstawowy)

Potencjał pola Higgsa

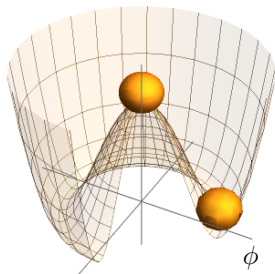
$$\mu^2 > 0$$

stan symetryczny



$$\mu^2 < 0$$

spontanicznie złamana symetria



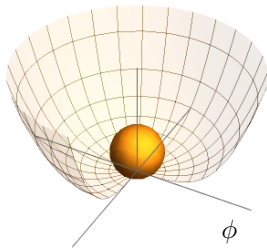
Próżnia to stan o minimalnej energii (stan podstawowy)

- ▶ $\mu^2 > 0$: $\phi = 0$; próżnia jest pusta

Potencjał pola Higgsa

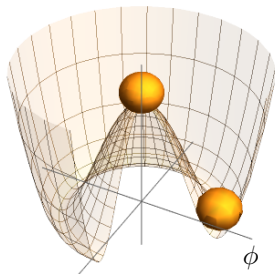
$$\mu^2 > 0$$

stan symetryczny



$$\mu^2 < 0$$

spontanicznie złamana symetria



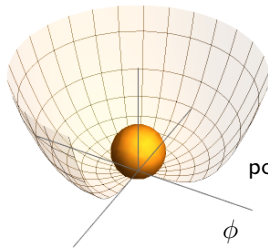
Próżnia to stan o minimalnej energii (stan podstawowy)

- ▶ $\mu^2 > 0$: $\phi = 0$; próżnia jest pusta
- ▶ $\mu^2 < 0$: $\phi = v$; próżnia wypełniona jest niezerowym polem Higgsa

Potencjał pola Higgsa

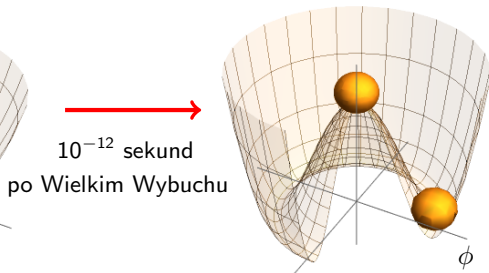
$$\mu^2 > 0$$

stan symetryczny



$$\mu^2 < 0$$

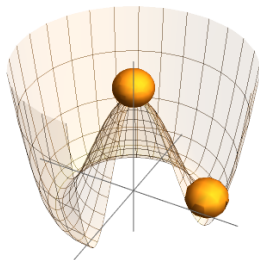
spontanicznie złamana symetria



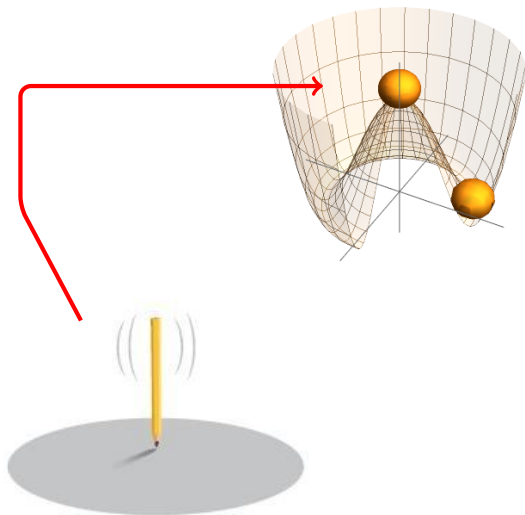
Próżnia to stan o minimalnej energii (stan podstawowy)

- ▶ $\mu^2 > 0$: $\phi = 0$; próżnia jest pusta
- ▶ $\mu^2 < 0$: $\phi = \nu$; próżnia wypełniona jest niezerowym polem Higgsa

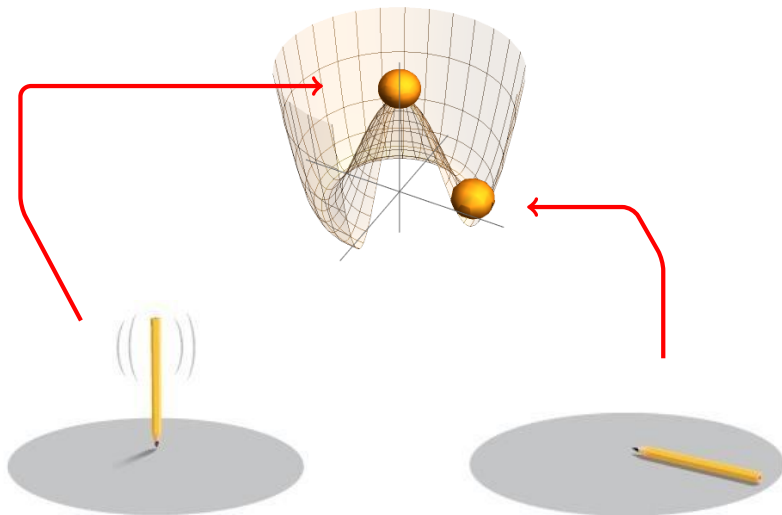
Spontaniczne łamanie symetrii



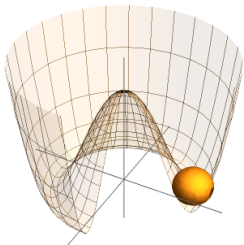
Spontaniczne łamanie symetrii



Spontaniczne łamanie symetrii



Higgs nadaje masy cząstkom



Gdy symetria jest złamana, próżnia wypełniona jest polem Higgsa i to właśnie to pole nadaje masy cząstkom.

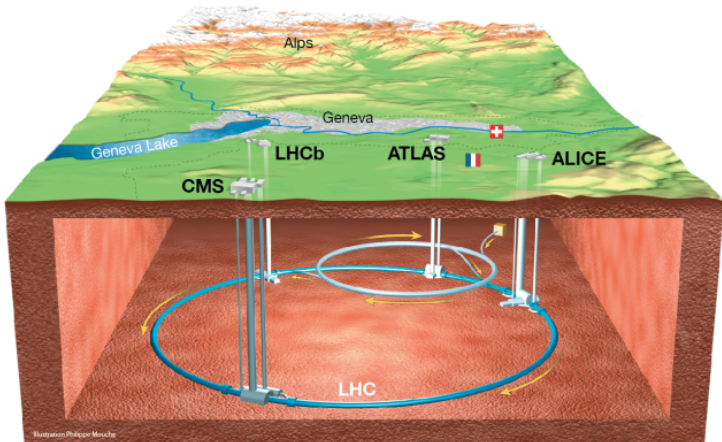
Analogia pola Higgsa



Large Hadron Collider (LHC)



Akcelerator LHC



- ▶ 27 km tunel 100 m pod ziemią
- ▶ 4 duże eksperymenty: ATLAS, CMS, LHCb i ALICE

Akcelerator LHC



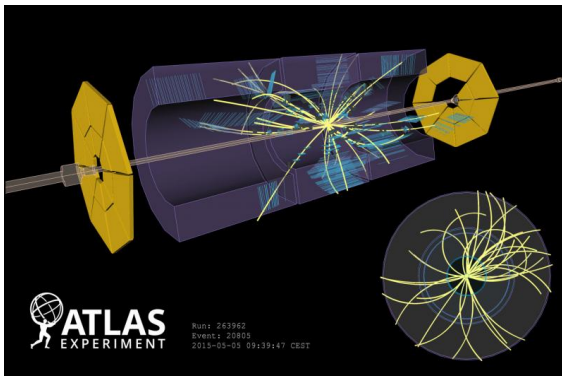
- ▶ Rura z magnesami schłodzonymi do temperatury 2 K
- ▶ Protony podróżują z prędkością 99.9999991% prędkości światła
- ▶ Każdy proton przebiega 27 km tunel 11 000 razy na sekundę

Dlaczego przyspieszamy cząstki?

- Ponieważ

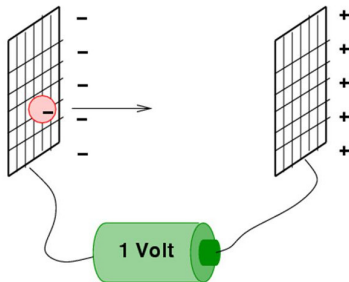
$$E = mc^2$$

i energia kinetyczna zderzających się cząstek może przekształcić się w masę produkowanych cząstek.



Całkowita energia protonów zderzanych na LHC to: 13 TeV. Czy to dużo?

Elektronowolt



- ▶ do rozbicia atomu wodoru na proton i elektron potrzeba 13.6 eV
- ▶ elektron w telewizorze: kilka tysięcy eV $\sim$ keV
- ▶ proton na LHC: 6.5 TeV $= 6.5 \times 10^{12}$ eV

Energia LHC

Proton na LHC: $6.5 \text{ TeV} = 6.5 \times 10^{12} \text{ eV}$

Czy to dużo?

$$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$6.5 \text{ TeV} = 1.04 \times 10^{-6} \text{ J}$$

1 J = energia potrzebna do podniesienia jabłka o 1 m lub podgrzania 1g wody o 0.24 C.

Energia LHC

Proton na LHC: $6.5 \text{ TeV} = 6.5 \times 10^{12} \text{ eV}$

Czy to dużo?

$$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

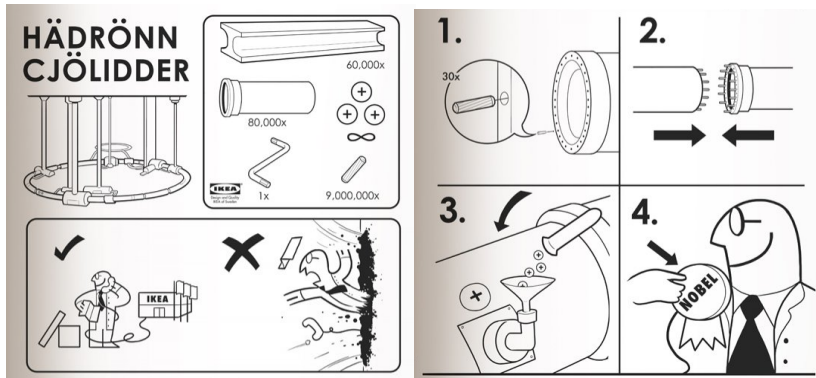
$$6.5 \text{ TeV} = 1.04 \times 10^{-6} \text{ J}$$

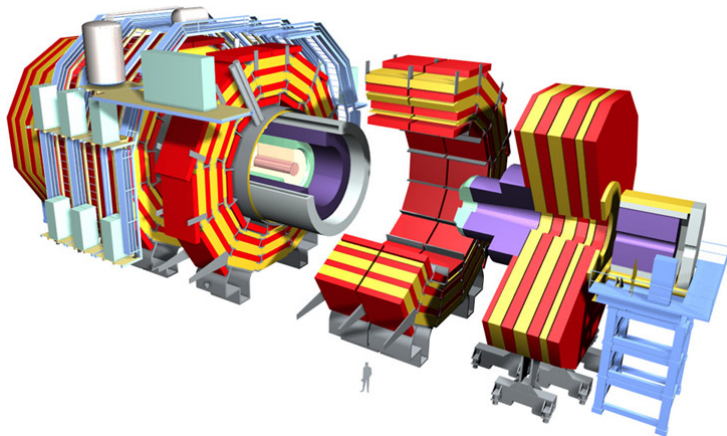
1 J = energia potrzebna do podniesienia jabłka o 1 m lub podgrzania 1g wody o 0.24 C.

Energia protonu na LHC to niewiele z punktu widzenia życia codziennego, ale

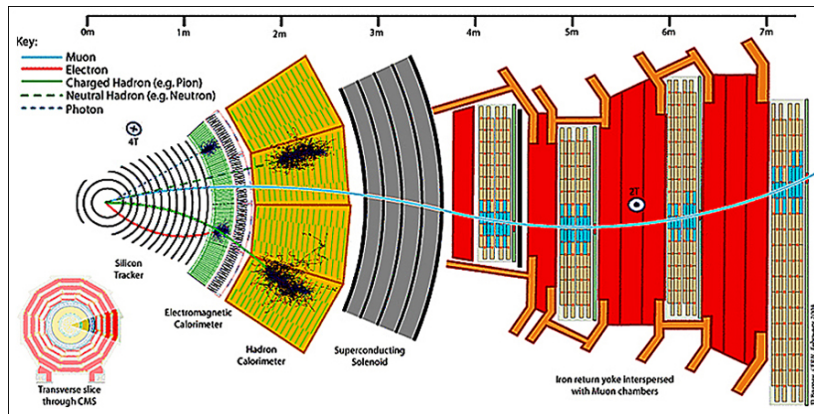
- ▶ 10^{18} protonów $\times$ 6.5 TeV = energia 300 tonowego pociągu pędzącego z prędkością 100 km/h
- ▶ Najcięższa cząstka (kwark top) waży 170 GeV. Tak więc 13 TeV pozwala na produkcję wielu ciężkich cząstek.

Akcelerator LHC



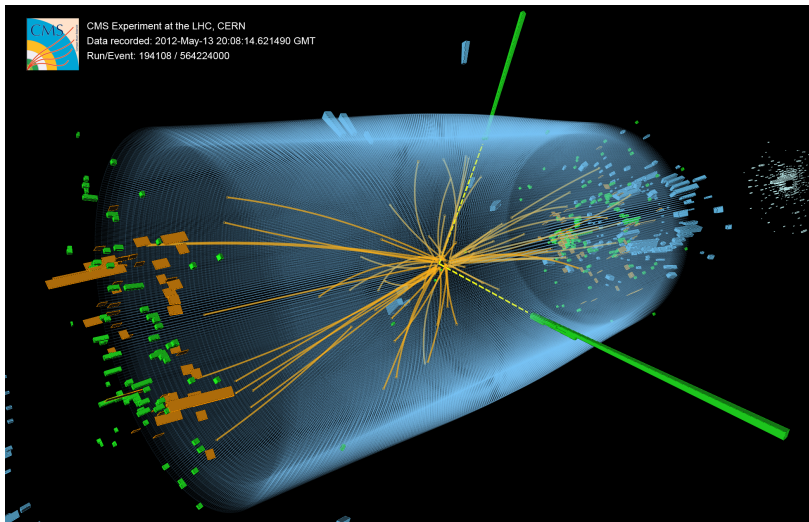


Komponenty detektora



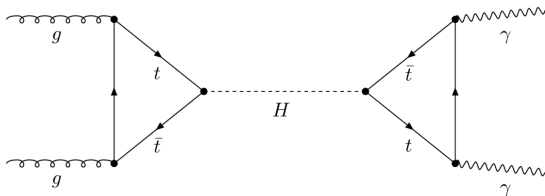
- Zbiór danych z poszczególnych komponentów detektora pozwala uzyskać komplet informacji na temat produkowanej cząstki takich jak: energia, pęd, masa, ładunek.

Higgs w eksperymencie ($H \rightarrow \gamma\gamma$)

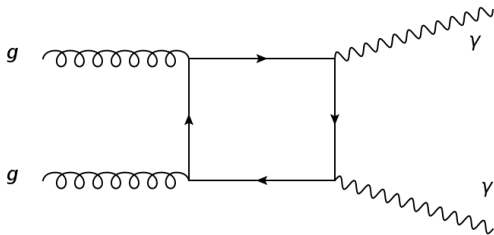


Produkcja i rozpad

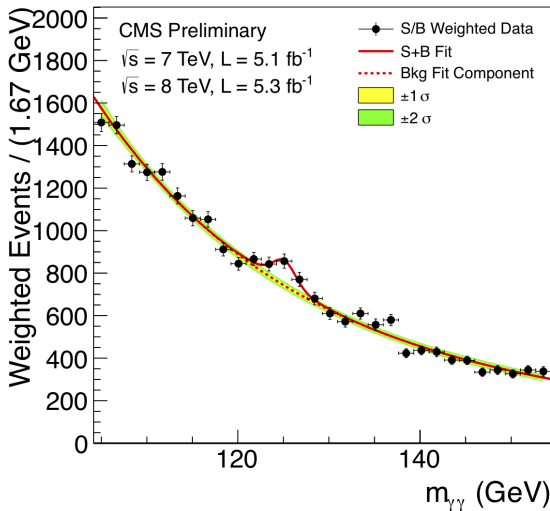
► Sygnał



► Tło



Odkrycie Higgsa



Co dalej?

Model Standardowy



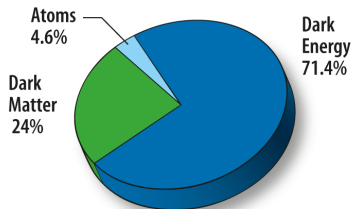
Co dalej?

Wiele pytań pozostaje bez odpowiedzi w ramach Modelu Standardowego

Co dalej?

Wiele pytań pozostaje bez odpowiedzi w ramach Modelu Standardowego

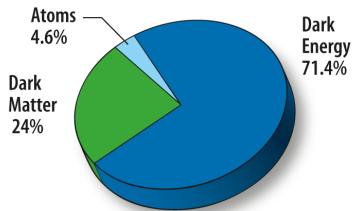
- ciemna materia/energia



Co dalej?

Wiele pytań pozostaje bez odpowiedzi w ramach Modelu Standardowego

- ▶ ciemna materia/energia



- ▶ problem hierarchii
- ▶ masy neutrin
- ▶ trzy generacje kwarków/leptonów
- ▶ unifikacja oddziaływań
- ▶ kwantowa grawitacja
- ▶ asymetria materia-antymateria
- ▶ stabilność próżni
- ▶ inflacja
- ▶ elementarność Higgsa

Po co to robimy i ile to kosztuje?



Michael Faraday 1791-1867



William Gladstone, 1809-1898

168 lat temu **Michael Faraday** został zapytany przez ówczesnego ministra finansów Wielkiej Brytanii Williama Gladstone'a o praktyczne znaczenie elektryczności. Faraday odpowiedział:

*Nie wiem, ale jestem pewien, że wkrótce będzie pan mógł
ściągać z tego podatki.*

Po co to robimy i ile to kosztuje?

Moja ulubiona odpowiedź:

Bo ciekawość jest częścią naszej natury. Poznawanie Świata pozwala nam w pełniejszy sposób być ludźmi.

W istocie, robimy mnóstwo rzeczy które nie mają i nigdy nie doprowadzą do praktycznych zastosowań:



Po co to robimy i ile to kosztuje?

Badania podstawowe zawsze posiadają jednak wiele doraźnych korzyści:

- ▶ rozwój technologii
- ▶ produkty uboczne (terapia protonowa, promieniowanie synchrotronowe, WWW, ...)
- ▶ wspieranie doświadczenie zawodowe
- ▶ tworzenie sieci międzynarodowych
- ▶ pokój na Świecie

Po co to robimy i ile to kosztuje?

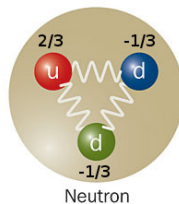
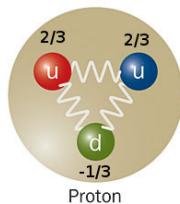
Badania podstawowe zawsze posiadają jednak wiele doraźnych korzyści:

- ▶ rozwój technologii
- ▶ produkty uboczne (terapia protonowa, promieniowanie synchrotronowe, WWW, ...)
- ▶ wspieranie doświadczenie zawodowe
- ▶ tworzenie sieci międzynarodowych
- ▶ pokój na Świecie

Koszty LHC

\$13 miliardów za cały okres / 500 milionów mieszkańców/ 10 lat
= \$2.6 (10 zł) rocznie

Znaczenie praktyczne



$$m_u = 2.3 \text{ MeV}$$

$$m_d = 4.8 \text{ MeV}$$

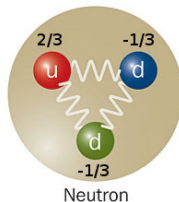
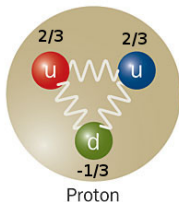
Znaczenie praktyczne

pochodzą od Higgsa



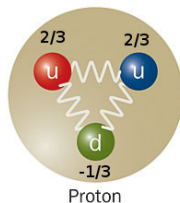
$$m_u = 2.3 \text{ MeV}$$

$$m_d = 4.8 \text{ MeV}$$

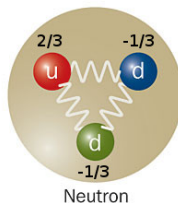


Znaczenie praktyczne

pochodzą od Higgsa



$$m_p = 938.27 \text{ MeV}$$



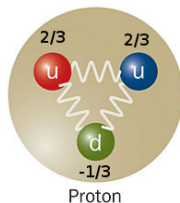
$$m_n = 939.565 \text{ MeV}$$

$$m_u = 2.3 \text{ MeV}$$

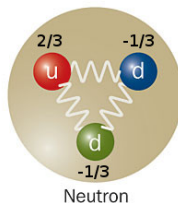
$$m_d = 4.8 \text{ MeV}$$

Znaczenie praktyczne

pochodzą od Higgsa



$$m_p = 938.27 \text{ MeV}$$



$$m_n = 939.565 \text{ MeV}$$

$$m_u = 2.3 \text{ MeV}$$

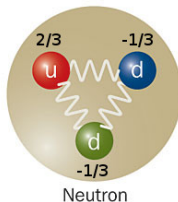
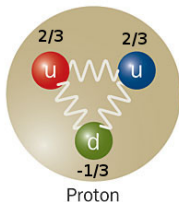
$$m_d = 4.8 \text{ MeV}$$

98% masy nukleonów pochodzi od energii związanej z oddziaływaniami kwarków:

$$m = \frac{E}{c^2}$$

Znaczenie praktyczne

pochodzą od Higgsa



$$m_u = 2.3 \text{ MeV}$$

$$m_d = 4.8 \text{ MeV}$$

$$m_p = 938.27 \text{ MeV}$$

$$m_n = 939.565 \text{ MeV}$$

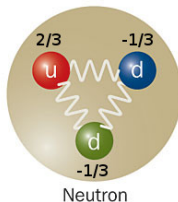
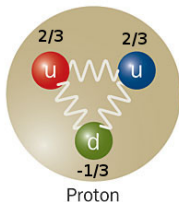
98% masy nukleonów pochodzi od energii związanej z oddziaływaniami kwarków:

$$m = \frac{E}{c^2}$$

► oddziaływania silne

Znaczenie praktyczne

pochodzą od Higgsa



$$m_u = 2.3 \text{ MeV}$$

$$m_d = 4.8 \text{ MeV}$$

$$m_p = 938.27 \text{ MeV}$$

$$m_n = 939.565 \text{ MeV}$$

98% masy nukleonów pochodzi od energii związanej z oddziaływaniami kwarków:

$$m = \frac{E}{c^2}$$

- ▶ oddziaływania silne
- ▶ oddziaływania elektromagnetyczne

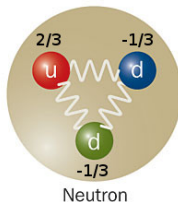
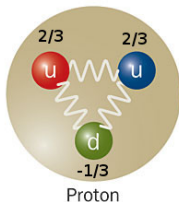
Znaczenie praktyczne

pochodzą od Higgsa



$$m_u = 2.3 \text{ MeV}$$

$$m_d = 4.8 \text{ MeV}$$



$$m_p = 938.27 \text{ MeV}$$

$$m_n = 939.565 \text{ MeV}$$

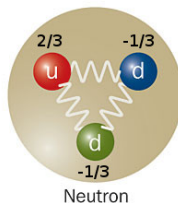
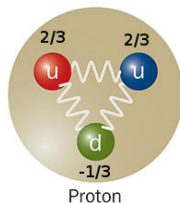
98% masy nukleonów pochodzi od energii związanej z oddziaływaniami kwarków:

$$m = \frac{E}{c^2}$$

- ▶ oddziaływania silne
- ▶ oddziaływania elektromagnetyczne

Znaczenie praktyczne

pochodzą od Higgsa



$$m_u = 2.3 \text{ MeV}$$

$$m_d = 4.8 \text{ MeV}$$

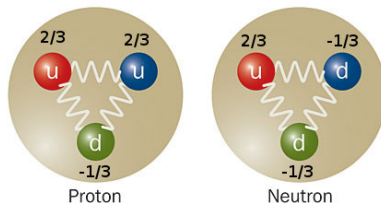
silne: $m_p = m_n$

EM: $m_p > m_n$

Higgs: $m_p < m_n$

Znaczenie praktyczne

pochodzą od Higgsa



$$m_u = 2.3 \text{ MeV}$$

$$m_d = 4.8 \text{ MeV}$$

silne: $m_p = m_n$

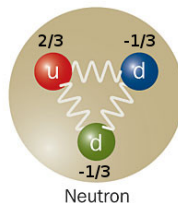
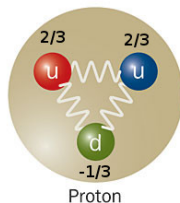
EM: $m_p > m_n$

~~Higgs: $m_p < m_n$~~

↪ bez Higgsa: $p \rightarrow n$

Znaczenie praktyczne

pochodzą od Higgsa



$m_u = 2.3 \text{ MeV}$

$m_d = 4.8 \text{ MeV}$

silne: $m_p = m_n$

EM: $m_p > m_n$

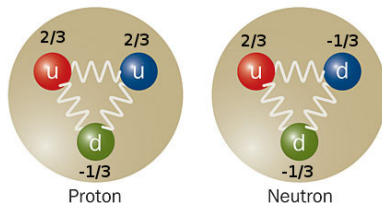
Higgs: $m_p < m_n$

↪ bez Higgsa: $p \rightarrow n$

↪ z Higgsem: $n \rightarrow p$

Znaczenie praktyczne

pochodzą od Higgsa



$$m_u = 2.3 \text{ MeV}$$

$$m_d = 4.8 \text{ MeV}$$

silne: $m_p = m_n$

EM: $m_p > m_n$

Higgs: $m_p < m_n$

↪ bez Higgsa: $p \rightarrow n$

↪ z Higgsem: $n \rightarrow p$

Gdyby nie bozon Higgsa, który nadaje masy kwarkom u i d , wszystkie protony rozpadłyby się do neutronów. Nigdy nie powstałyby atomy, gwiazdy, galaktyki i ludzie ...