

Wstęp do fizyki cząstek

Julia Hoffman

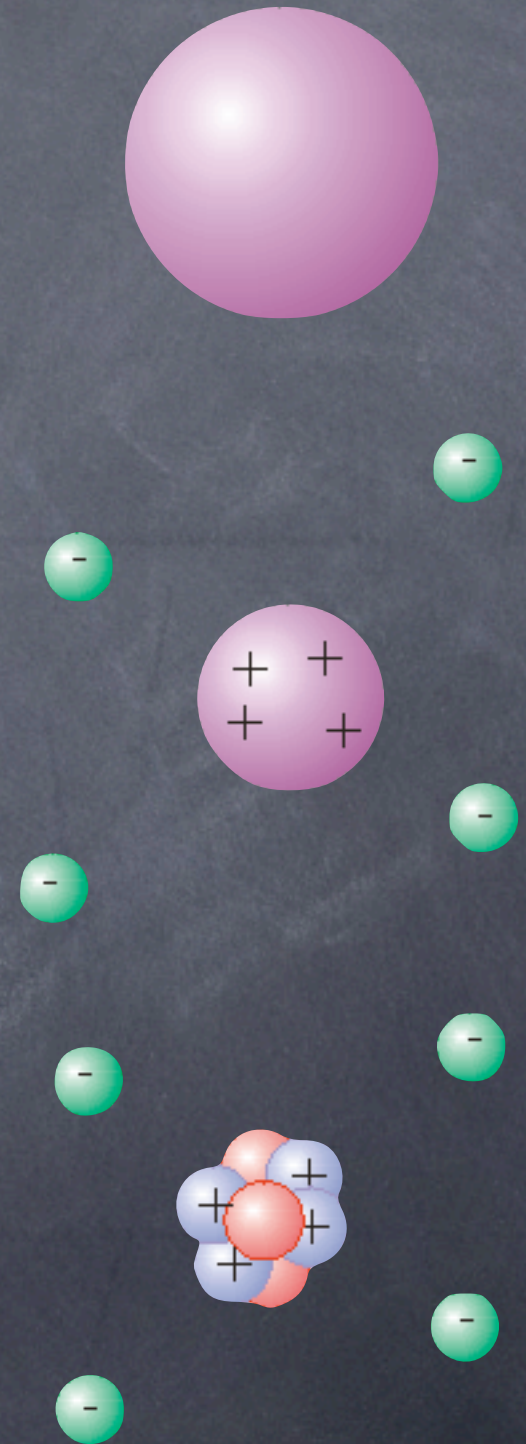
Southern Methodist University

Co to jest fizyka cząstek?

- Fizyka cząstek to nauka o tym, z czego składa się świat, który nas otacza.
- Fizyka cząstek zajmuje się:
 - podstawowymi budulcami materii - cząstkami elementarnymi
 - oddziaływaniami pomiędzy tymi cząstkami

Trochę historii

- Na początku XX wieku wierzono, że atomy są elementarne (gr. atomos - niepodzielny), to znaczy nie składają się z mniejszych elementów
- Eksperymenty ujawniły, że atomy nie są elementarne, ale składają się z dodatnio naładowanego jądra i chmury ujemnie naładowanych elektronów
- Kolejna seria doświadczeń pokazała, że jądro atomowe również składa się z mniejszych elementów: dodatnio naładowanych protonów i neutronów

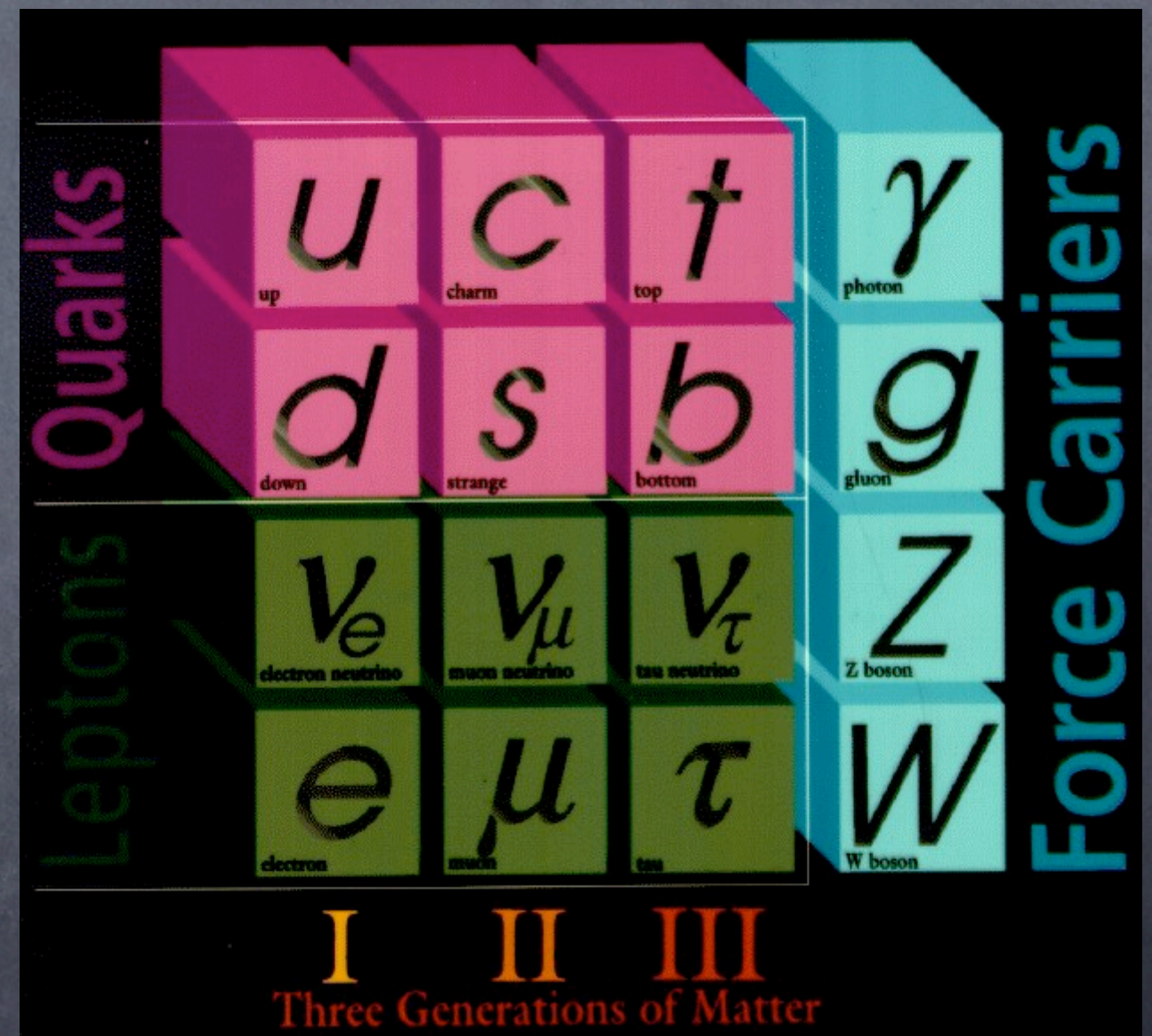


W głąb materii

- Okazuje się, że protony i neutrony jeszcze nie są cząstkami elementarnymi: składają się z kwarków.
- Obecnie uważamy, że kwarki i elektrony (elektrony należą do rodziny “leptonów”) nie składają się z niczego więcej, są zatem cząstkami elementarnymi
- Kwarki i leptony, oraz siły, dzięki którym oddziałują ze sobą można opisać teorią zwaną Modelem Standardowym (SM)

Model Standardowy

- Model Standardowy to teoria, która opisuje organizację cząstek elementarnych, oddziaływania, którym podlegają i sposób, w jaki te cząstki ze sobą oddziałują
- 2 rodziny cząstek:
 - kwarki
 - leptony
- 3 "generacje" cząstek
- 4 rodzaje oddziaływań



Jednostki i konwencje

• Prędkość światła $c \sim 3 \times 10^8$ m/s, HEP: $c = 1$

• Stała Plancka $\hbar = h/2\pi = 1.055 \times 10^{-34}$ J·s

• $E = mc^2$, HEP: $E = m$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

• $p = \gamma mv$, HEP: $p = \gamma m\beta$

• Jednostka energii: 1eV (elektronowolt) - energia kinetyczna elektronu przyspieszonego potencjałem 1V na drodze 1m.

$$1\text{eV} = 1.602 \times 10^{-19}\text{J}$$

• Przykłady:

• masa elektronu: 0.511MeV

• masa protonu: 0.938GeV

• energia zderzenia w LHC: 14TeV

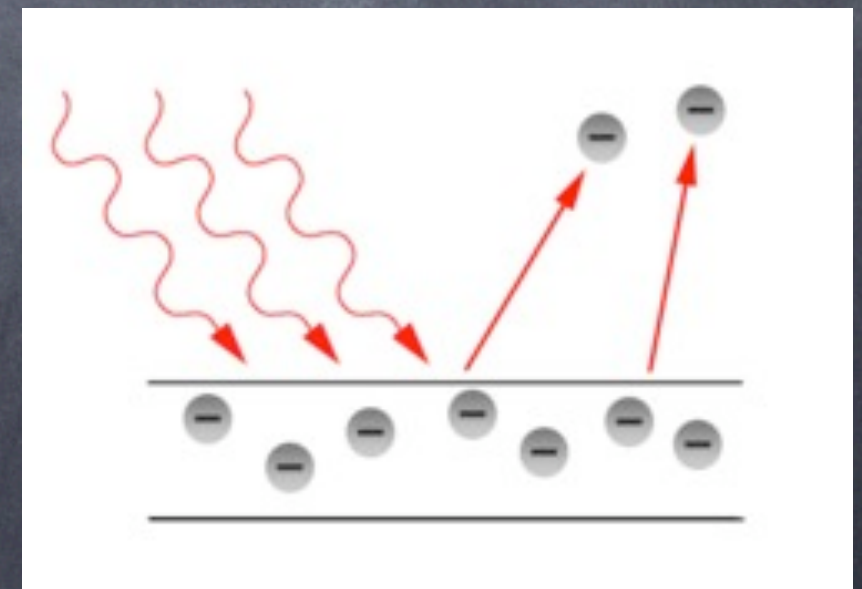
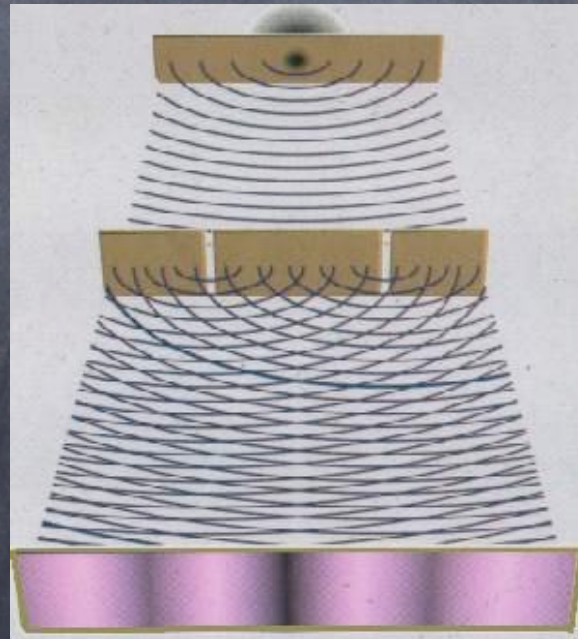
Potęga 10	Liczba	Symbol
10^{-12}	0.000 000 000 001	p (piko)
10^{-9}	0.000 000 001	n (nano)
10^{-6}	0.000 001	μ (mikro)
10^{-3}	0.001	m (mili)
10^0	1	
10^3	1 000	k (kilo)
10^6	1 000 000	M (mega)
10^9	1 000 000 000	G (giga)
10^{12}	1 000 000 000 000	T (tera)

Mechanika kwantowa

- Dualizm korpuskularno-falowy: $p = h/\lambda$ (Louis de Broglie, 1924)
 - w sformalizowanym języku mechaniki kwantowej:

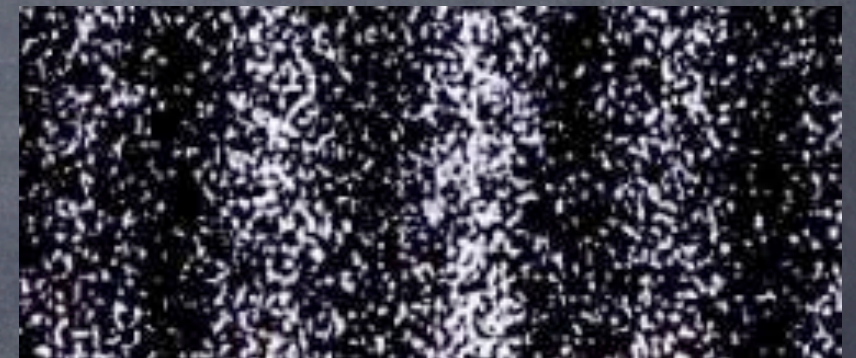
$$H\psi(\vec{x}, t) = i\hbar\frac{\partial}{\partial t}\psi(\vec{x}, t)$$

- Popularny przykład: doświadczenie Younga, zjawisko fotoelektryczne



Elektrony jako fale

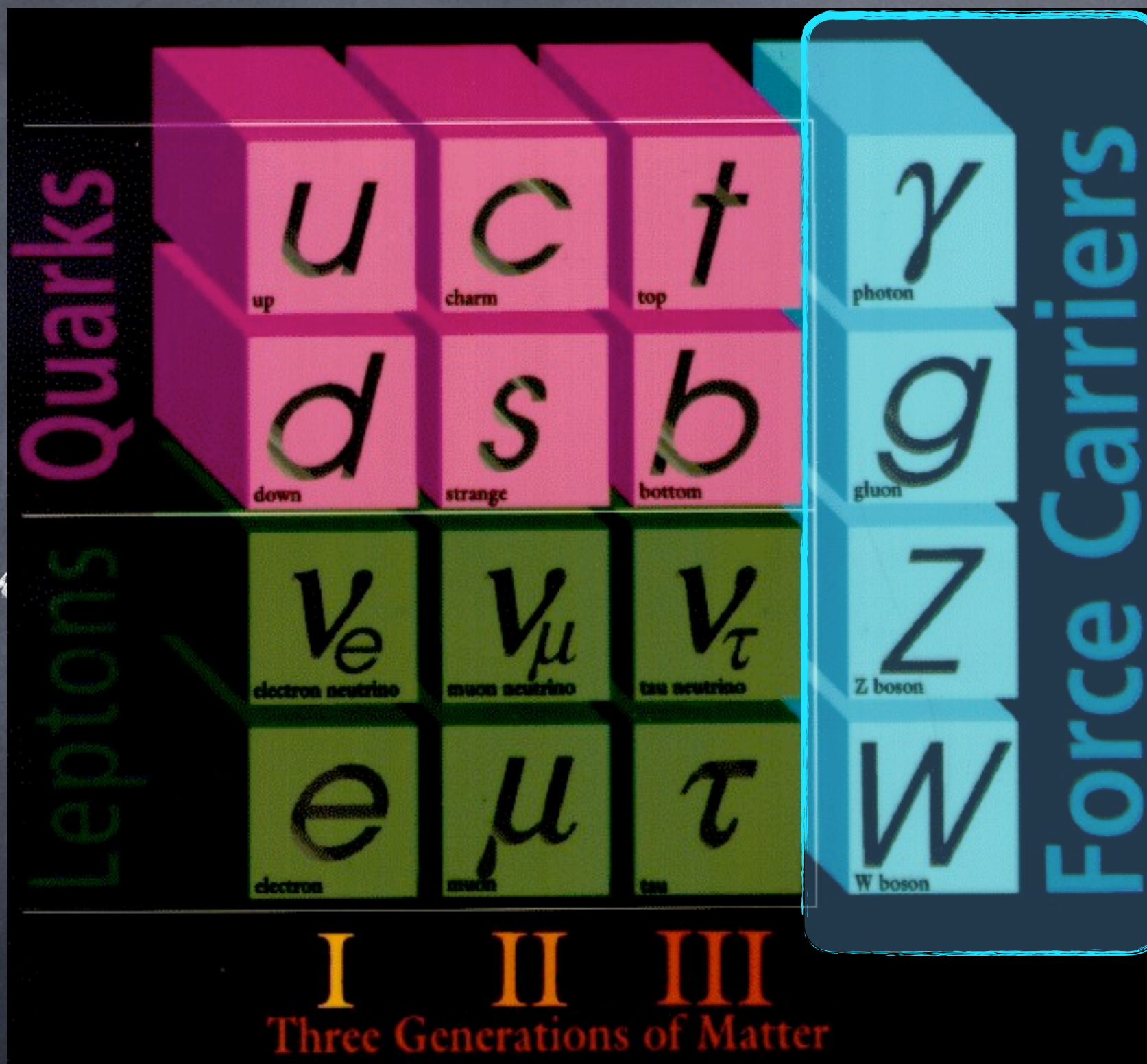
- Dyfrakcja elektronów na kryształach - 1927, C.J. Davidson, L.H. Germer (Nobel 1937)
- Doświadczenie Younga dla elektronów - 1957, J. Faget, C. Fert
 - elektrony przelatują przez szczelinę POJEDYNCZO (z czym interferuje pojedynczy elektron?)



Jeszcze raz mechanika kwantowa

- Zasada nieoznaczoności Heisenberga: $\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar/2$
 - Nie można jednocześnie zmierzyć pędu i położenia cząstki z dowolną dokładnością
- Inna postać zasady nieoznaczoności: $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar/2$
 - Energia może zostać “pożyczona” z próżni tylko na określony czas

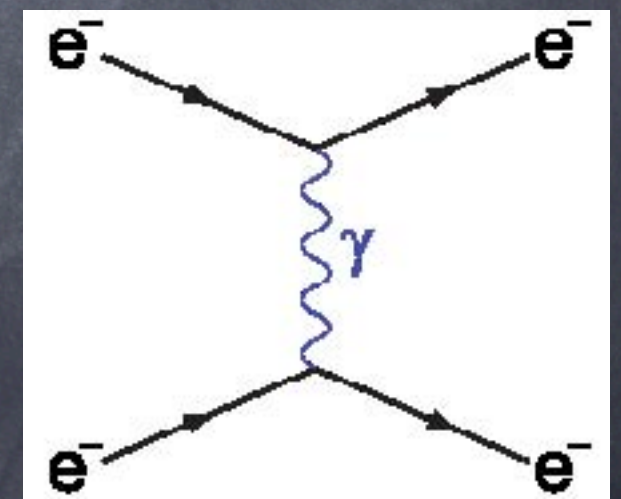
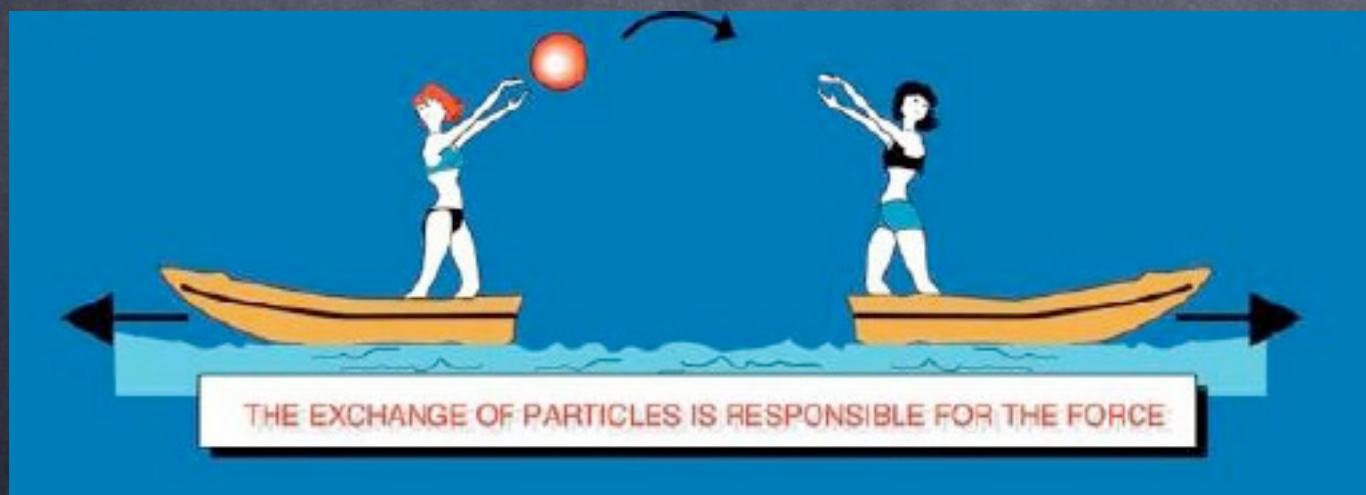
Wracamy do cząstek - nośniki oddziaływań



Bozony

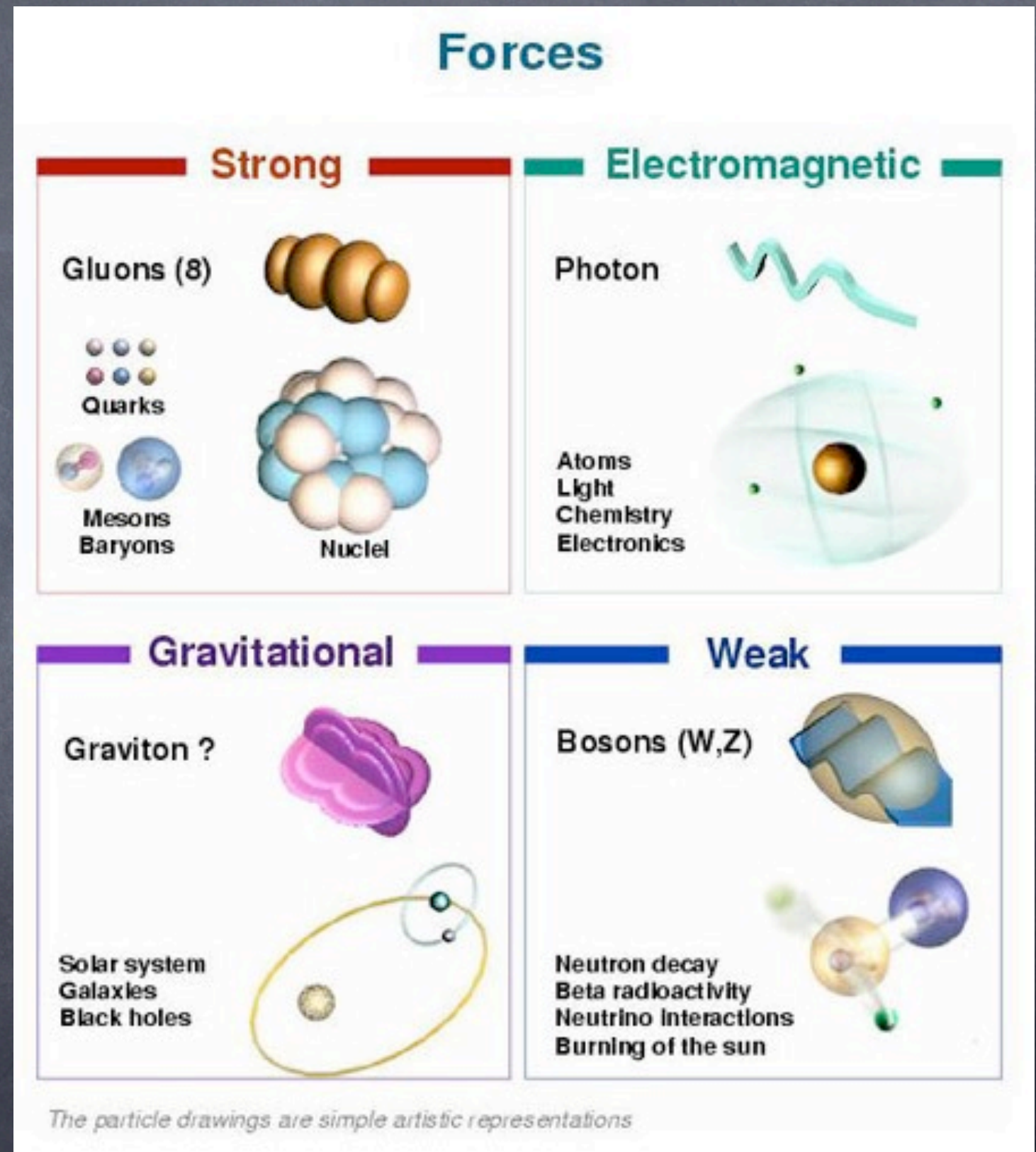
Bozony - nośniki oddziaływań

- Oddziaływanie w świecie cząstek to wymiana bozonu - nośnika oddziaływania
- Przykład: oddziaływanie dwóch elektronów
 - zachodzi przez wymianę fotonu (nośnika oddziaływań elektromagnetycznych)
 - skąd elektron wie, że ma wysłać foton?
 - nie wie, a więc robi to bez przerwy...



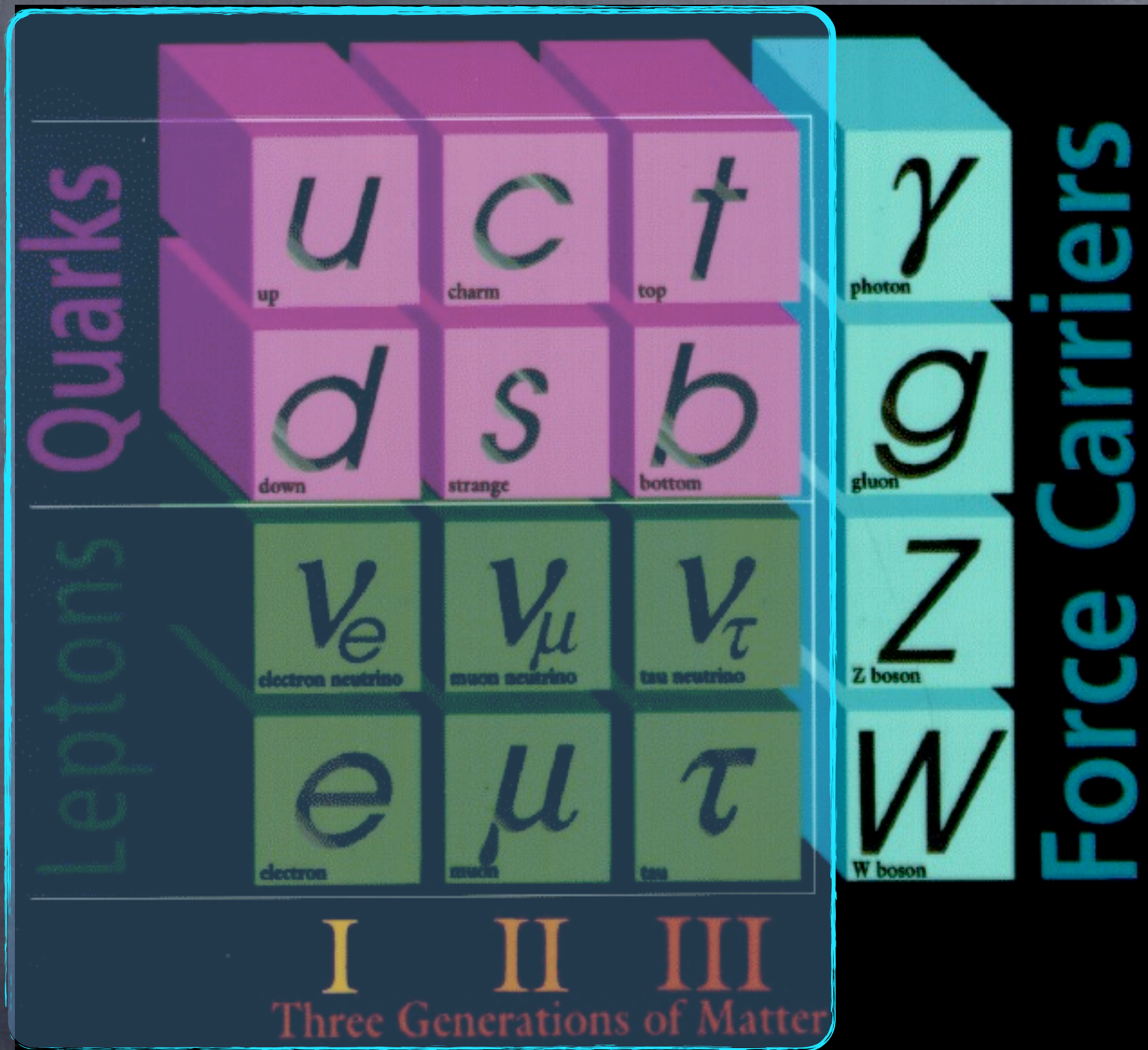
Oddziaływania elementarne

- Grawitacyjne
 - 1 grawiton (?)
- Elektromagnetyczne
 - 1 foton
- Słabe
 - 3 bozony: W^+ W^- Z^0
- Silne
 - 8 gluonów



Cząstki

Fermiony



FERMIONS

matter constituents
spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...

Leptons spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c ²	Electric charge
ν_e electron neutrino	$<1 \times 10^{-8}$	0
e electron	0.000511	-1
ν_μ muon neutrino	<0.0002	0
μ muon	0.106	-1
ν_τ tau neutrino	<0.02	0
τ tau	1.7771	-1

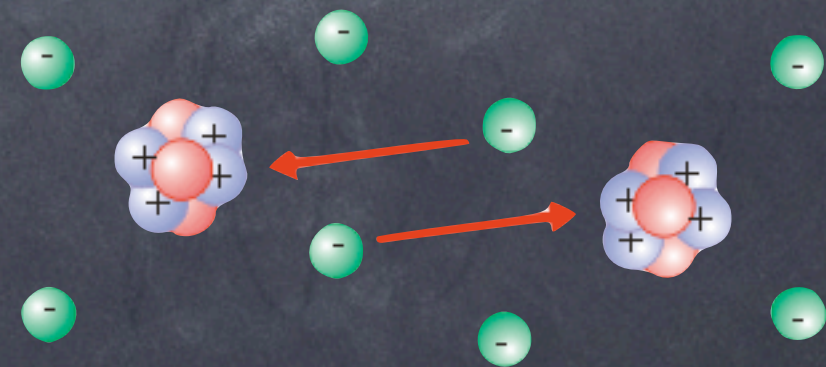
Quarks spin = 1/2		
Flavor	Approx. Mass GeV/c ²	Electric charge
u up	0.003	2/3
d down	0.006	-1/3
c charm	1.3	2/3
s strange	0.1	-1/3
t top	175	2/3
b bottom	4.3	-1/3

Kwarki i leptony

- Kwarki:
 - Nie występują samodzielnie
 - Tworzą cząstki o ładunku całkowitym (hadrony)
 - 2 kwarki (kwark + antykwark) = mezon (pion)
 - 3 kwarki = barion (proton, neutron...)
- Leptony:
 - Rozpadowi ciężkiego leptonu zawsze towarzyszy odpowiednie neutrino
 - Liczba leptonowa przed i po rozpadzie musi być zachowana

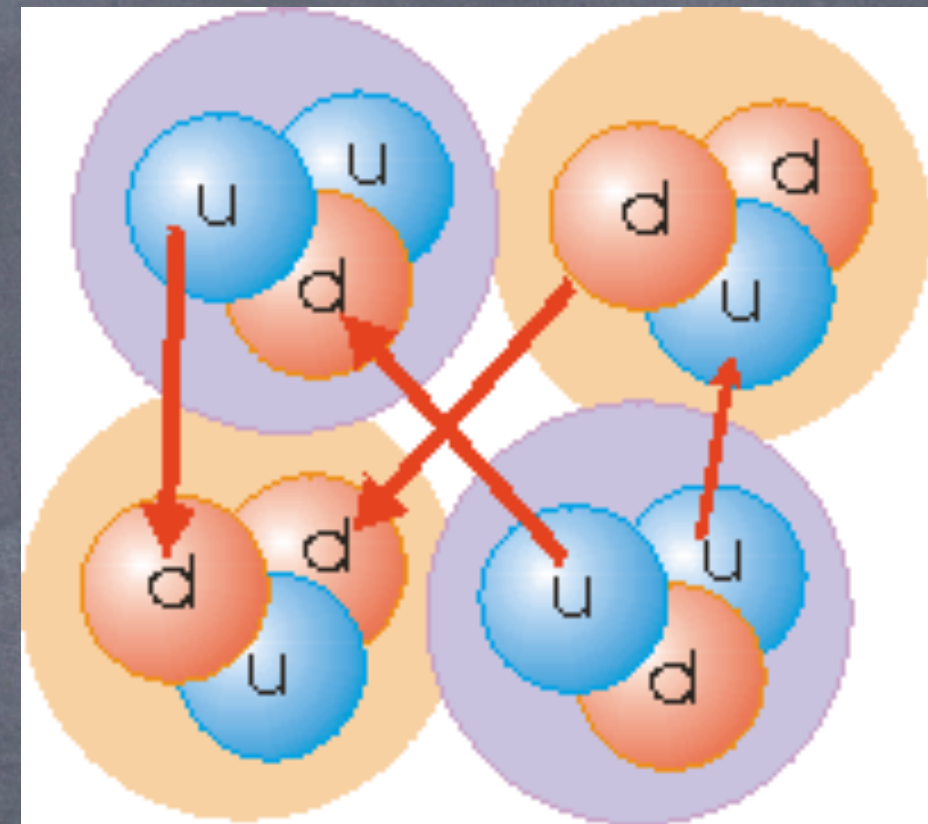
Oddziaływanie elektromagnetyczne

- Jedna z dwóch sił dominujących nasze codzienne życie
- Oddziaływanie elektromagnetyczne zachodzi pomiędzy cząstkami, które posiadają niezerowy ładunek elektryczny
- Działa przyciągająco na cząstki o przeciwnym ładunku i odpychająco na cząstki o tym samym ładunku
- Siła oddziaływania maleje z odległością, ale ma zasięg nieskończony
- Oddziaływanie elektromagnetyczne “trzyma” razem atomy tworzące cząsteczki (molekuły)
- Nośnik: **foton**



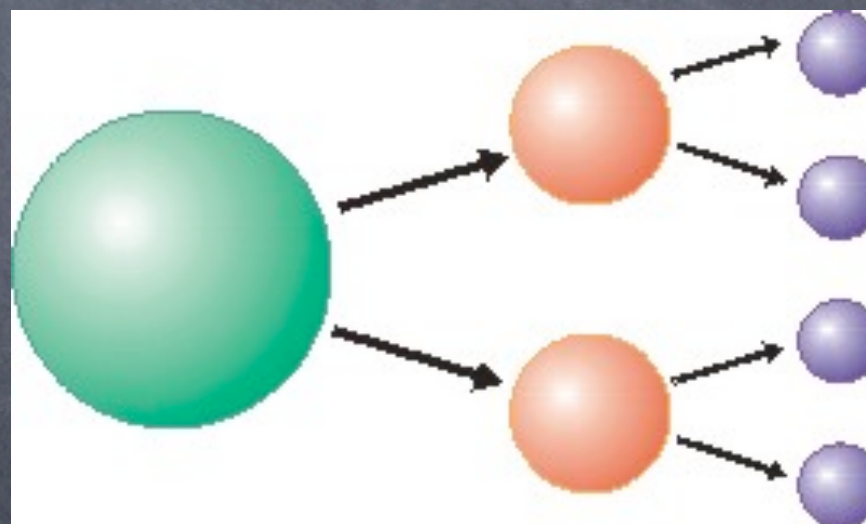
Oddziaływanie silne

- Kwarki posiadają ładunek “kolorowy”
- Oddziaływanie pomiędzy cząstkami o ładunku kolorowym to oddziaływanie silne.
- Zawsze przyciągające.
- Trzyma razem kwarki w hadronach.
- Resztkowe oddziaływanie silne jest silniejsze niż elektromagnetyczna siła odpychająca protony w jądrze atomowym
- Oddziaływania silne nie słabną z odległością (stała powyżej pewnej odl.)
- Nośnik: **gluony (8)**



Oddziaływanie słabe

- Otaczająca nas materia wydaje się być zbudowana z elektronu i 2 rodzajów kwarków.
- Oddziaływanie słabe powoduje rozpad cięższych kwarków i leptonów
- Nośnik: **bozony W^+ W^- Z^0**



Grawitacja

- Grawitacja działa na wszystkie obiekty posiadające masę.
- Oddziaływanie przyciągające, słabnie z odległością.
- Zauważalna w dużej skali, może być pominięta w rozważaniach cząstek, ponieważ jej siła jest $\sim 10^{42}$ słabsza niż oddziaływanie elektromagnetyczne



I znów o Modelu Standardowym

- Opisuje oddziaływania elektroslabe i chromodynamikę kwantową
- Model bardzo dobrze zgodny z doświadczeniem
 - kilka spektakularnych sukcesów - odkrycie bozonów W i Z (1983, CERN), kwarku top (1995, Fermilab)
- A jednak....
- Opisuje, ale nie wyjaśnia
 - masy cząstek, siły oddziaływań, liczba rodzin fermionów
 - ładunek protonu = -ładunek elektronu
 - asymetria materia - antymateria
- Co z grawitacją?
- Co z ciemną materią?
- Masy cząstek - nie potwierdzony doświadczalnie mechanizm Higgsa

Kilka słów o LHC



LHC i liczby...

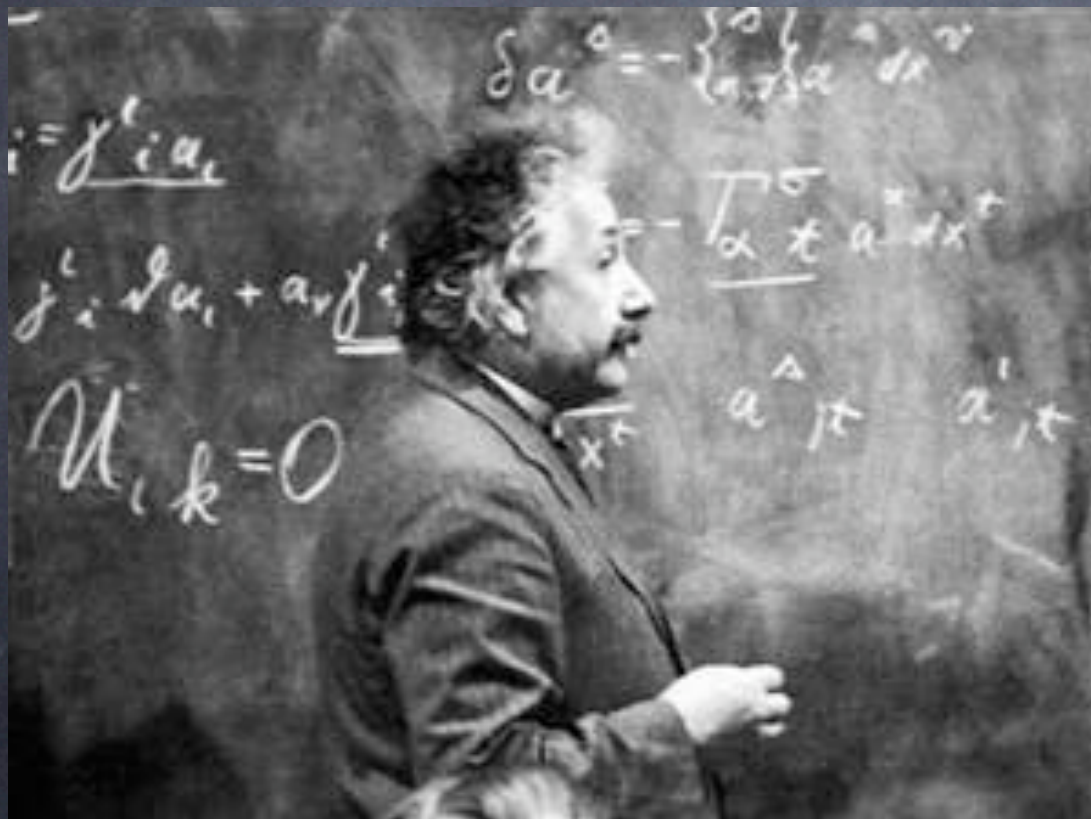
- Zderzenia proton-proton, planowana energia: 14TeV
- Zderzenia ciężkich jonów ($E/\text{nukleon} = 2.76\text{TeV}$)
- Obwód tunelu - 27km
- Prędkość protonów: $0.99999999991c$
- Nadprzewodzące magnesy wytwarzające pole magnetyczne 8.33T
- Temperatura: 1.9K
- Koszt akceleratora: $\sim 4.7\text{GChf}$ (1.5xtyle, co koszt polskiej eskadry F-16)



Potrzebny jeszcze...

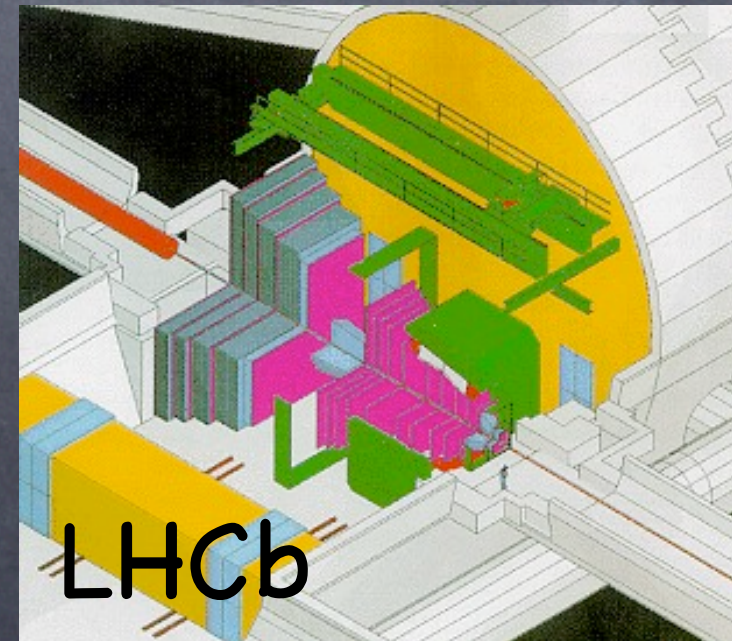
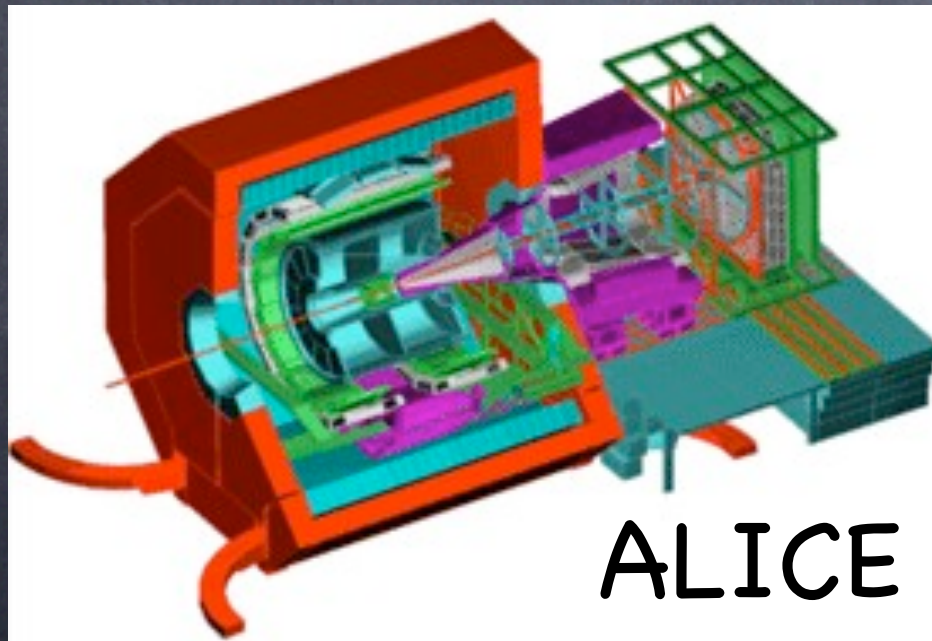
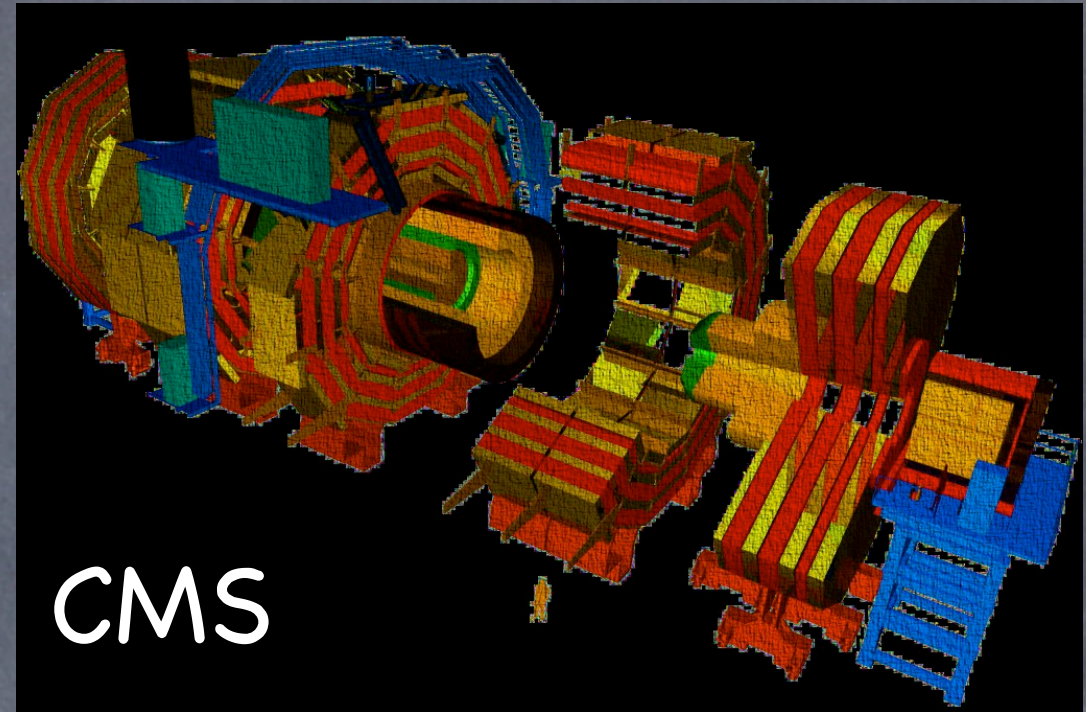
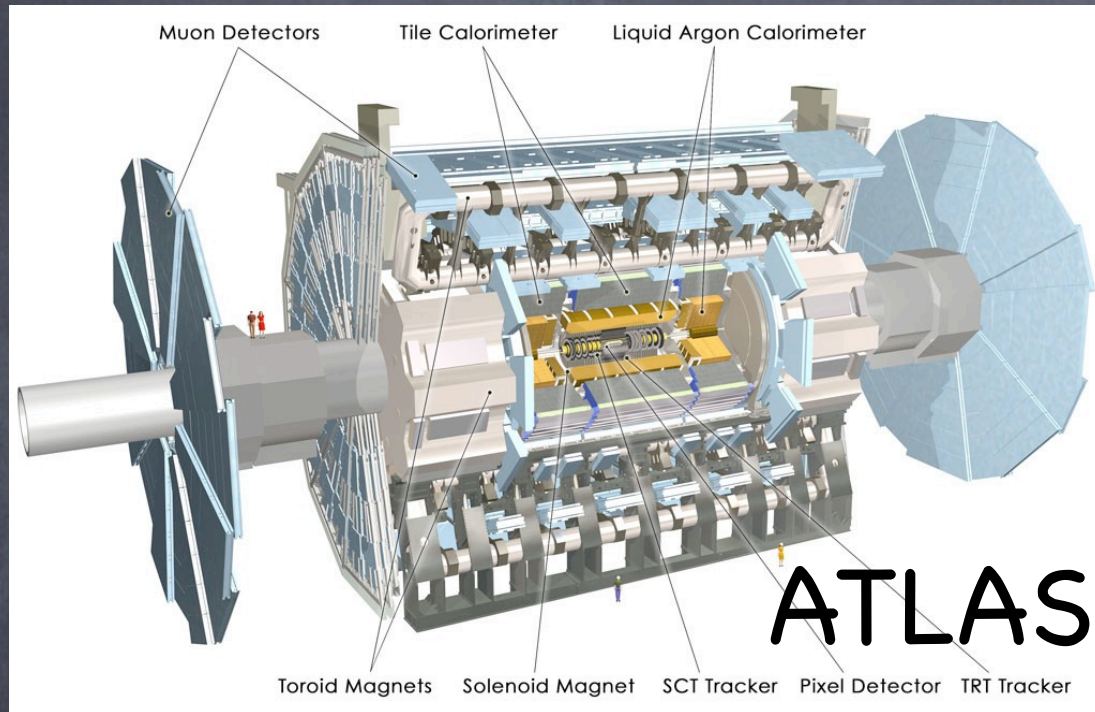
...DETEKTOR

...FIZYK TEORETYK



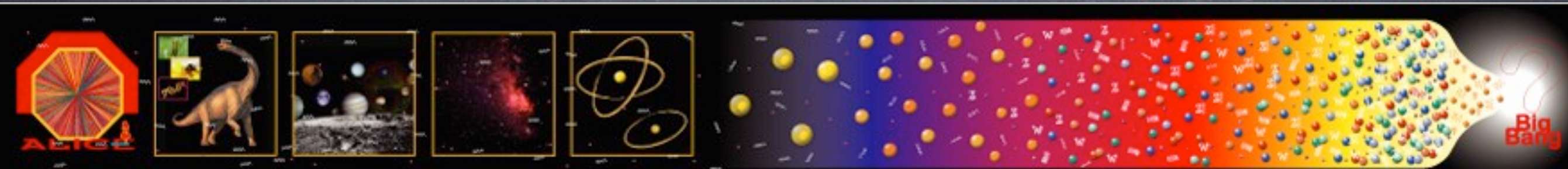
Detektory na LHC

4(+2) eksperymenty na LHC



Co chcemy badać w LHC

- Model Standardowy i cząstka (cząstki?) Higgsa
- Supersymetria, technicolor, wyższe wymiary, nowe oddziaływania, 4-ta rodzina leptonów...
- Fizyka kwarków b: łamanie parzystości CP
- Fizyka ciężkich jonów: poszukiwanie plazmy kwarkowo-gluonowej



Bozon Higgsa

- Masy cząstek elementarnych są niesłychanie zróżnicowane:
 - masa kwarku t : bliska masie atomu złota!
 - masa elektronu: 1 000 000 razy niższa!
 - masa fotonu = 0

Gdy Model Standardowy powstawał, początkowo cząstki nie miały w nim mas – co było dużym problemem. Dopiero potem wykorzystano pomysł, który kilka lat wcześniej wysunął brytyjski uczoney P.W.Higgs

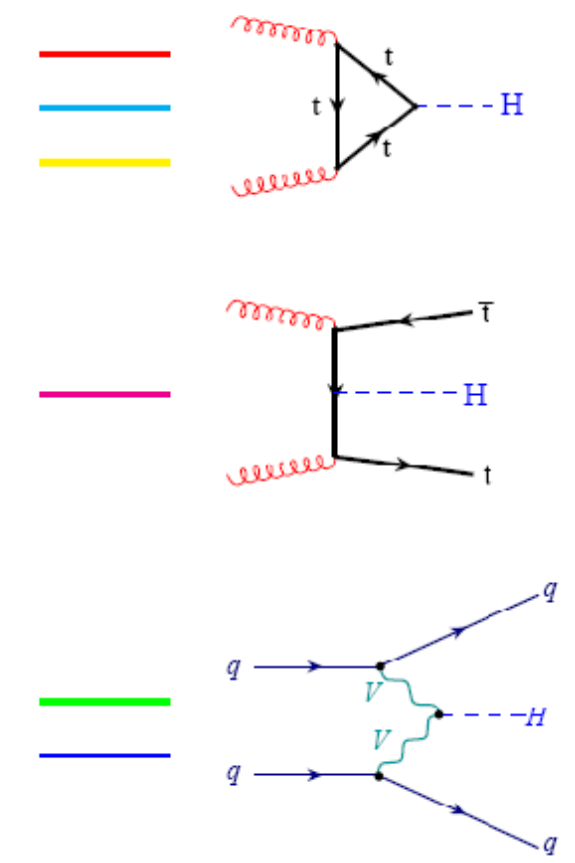
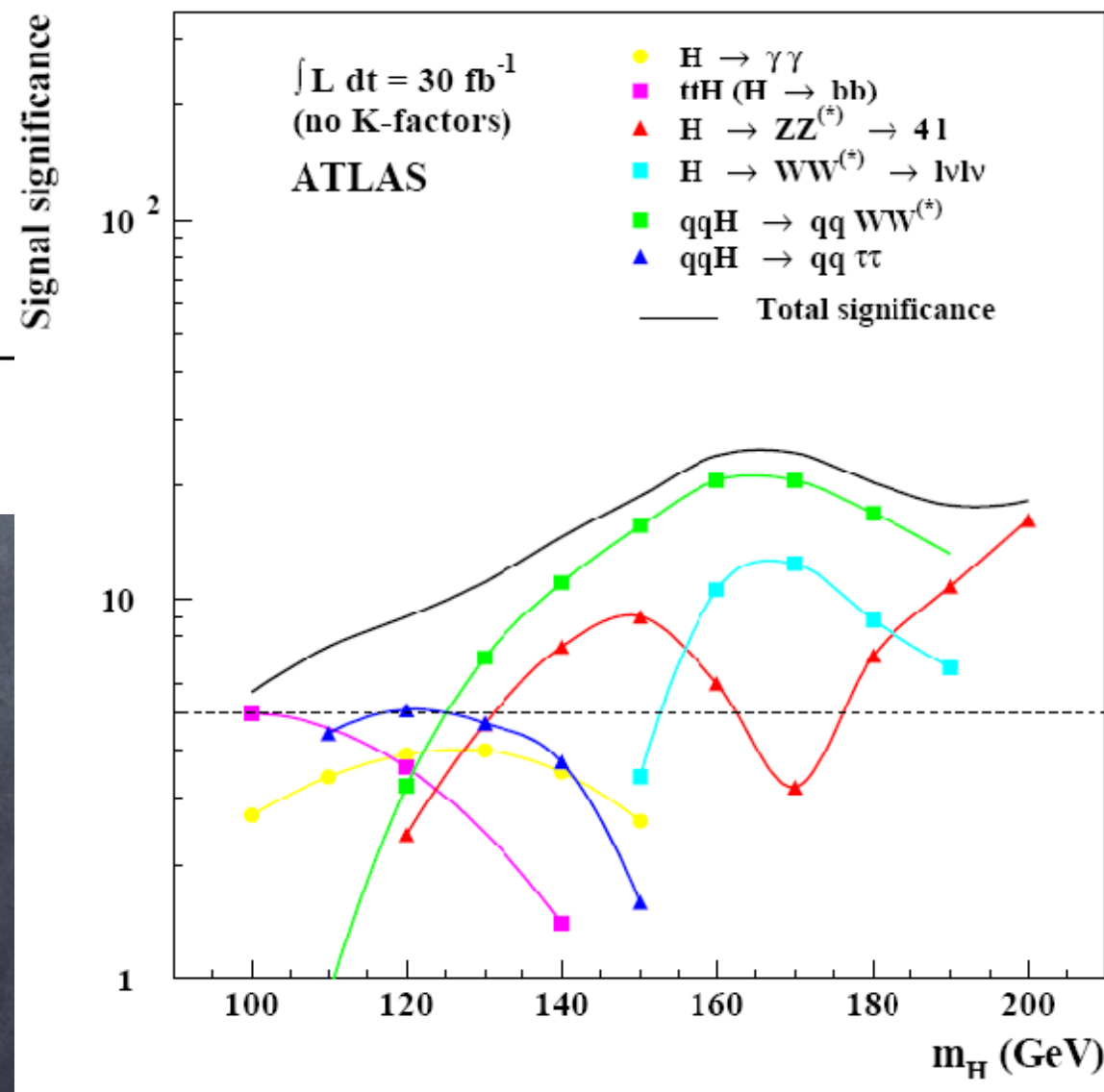
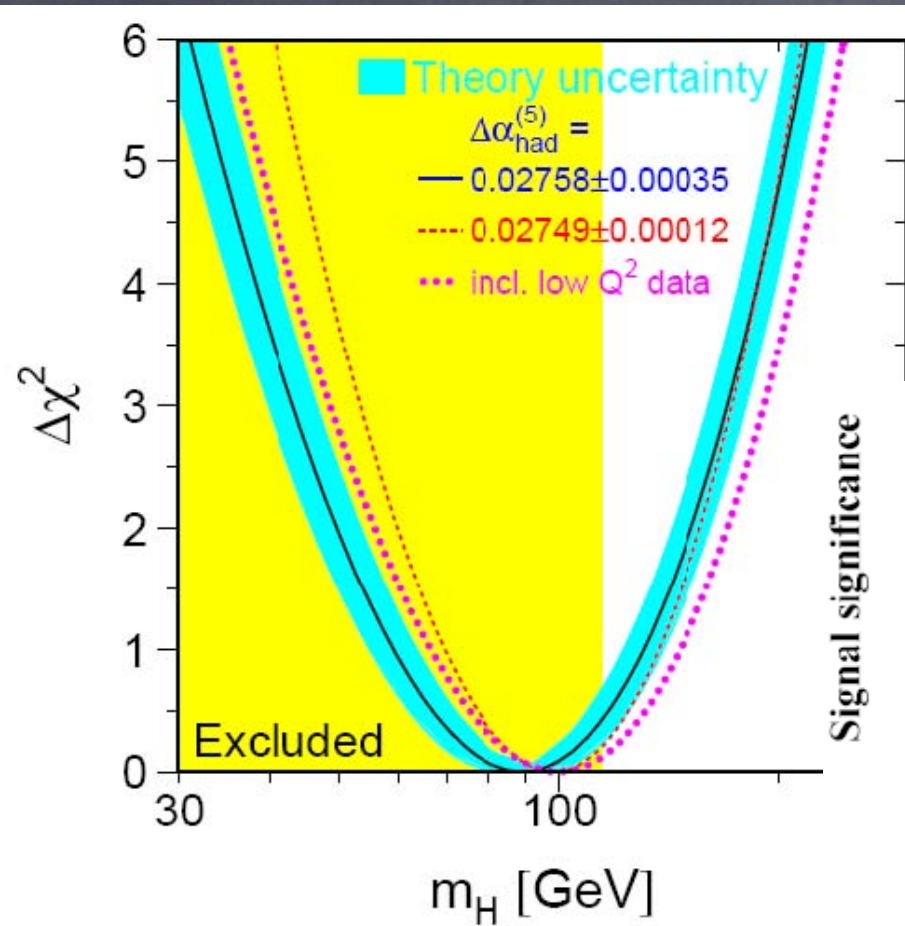
- Mechanizm Higgsa rozwiązywał problem masy cząstek – ale za cenę wprowadzenia (co najmniej jednej) dodatkowej cząstki, w dodatku o dość specyficznych własnościach!

Mechanizm Higgsga (wersja uproszczona)

- W sali znajduje się tłum gości oczekujących na rozdanie nagród. Goście są równomiernie rozproszeni po sali
- Gwiazda Hollywood wchodzi do sali, powodując zamieszanie. Z każdym krokiem gromadzi się wokół sławy coraz większy tłum...
- Naszej sławie coraz trudniej poruszać się swobodnie

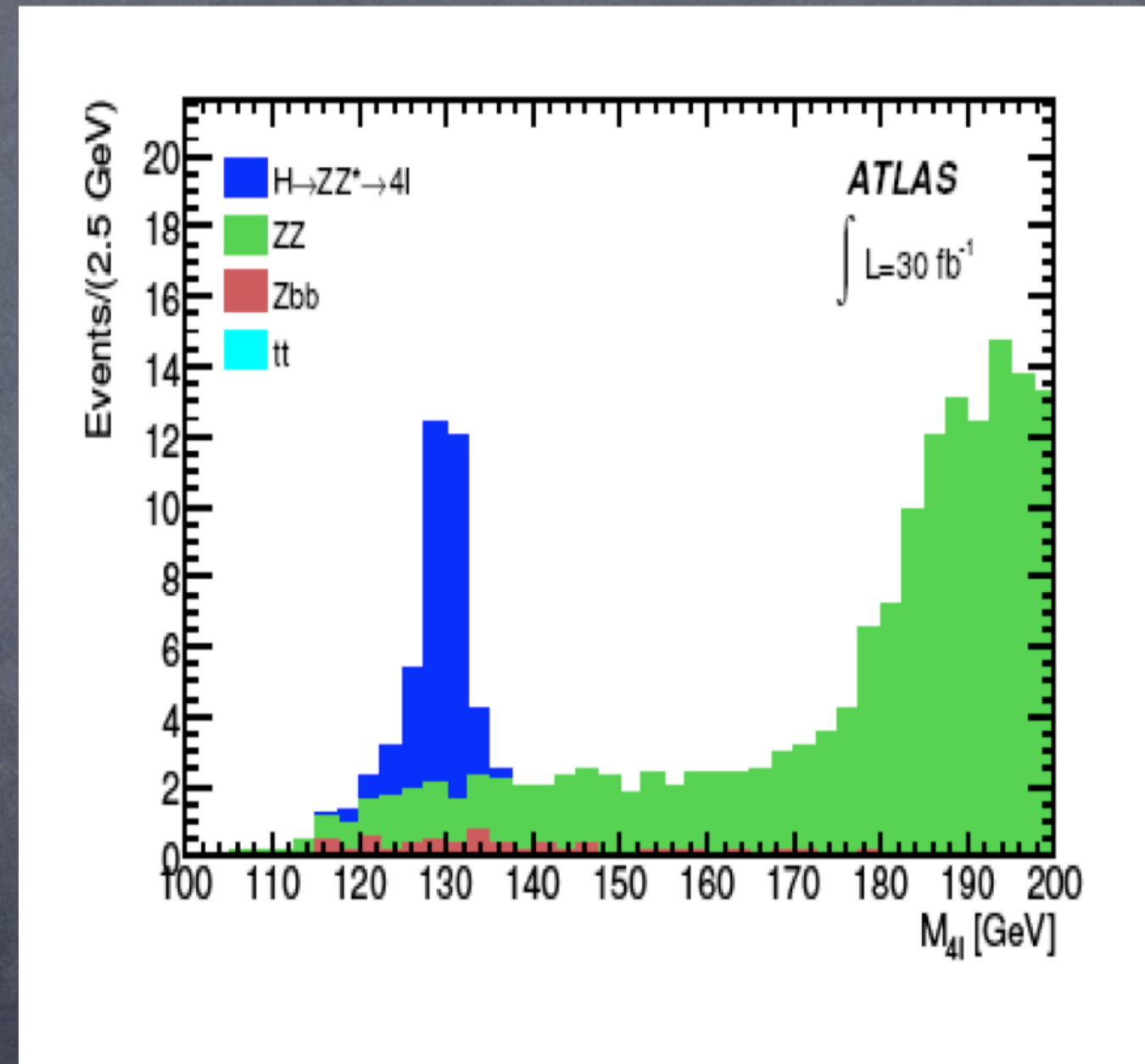
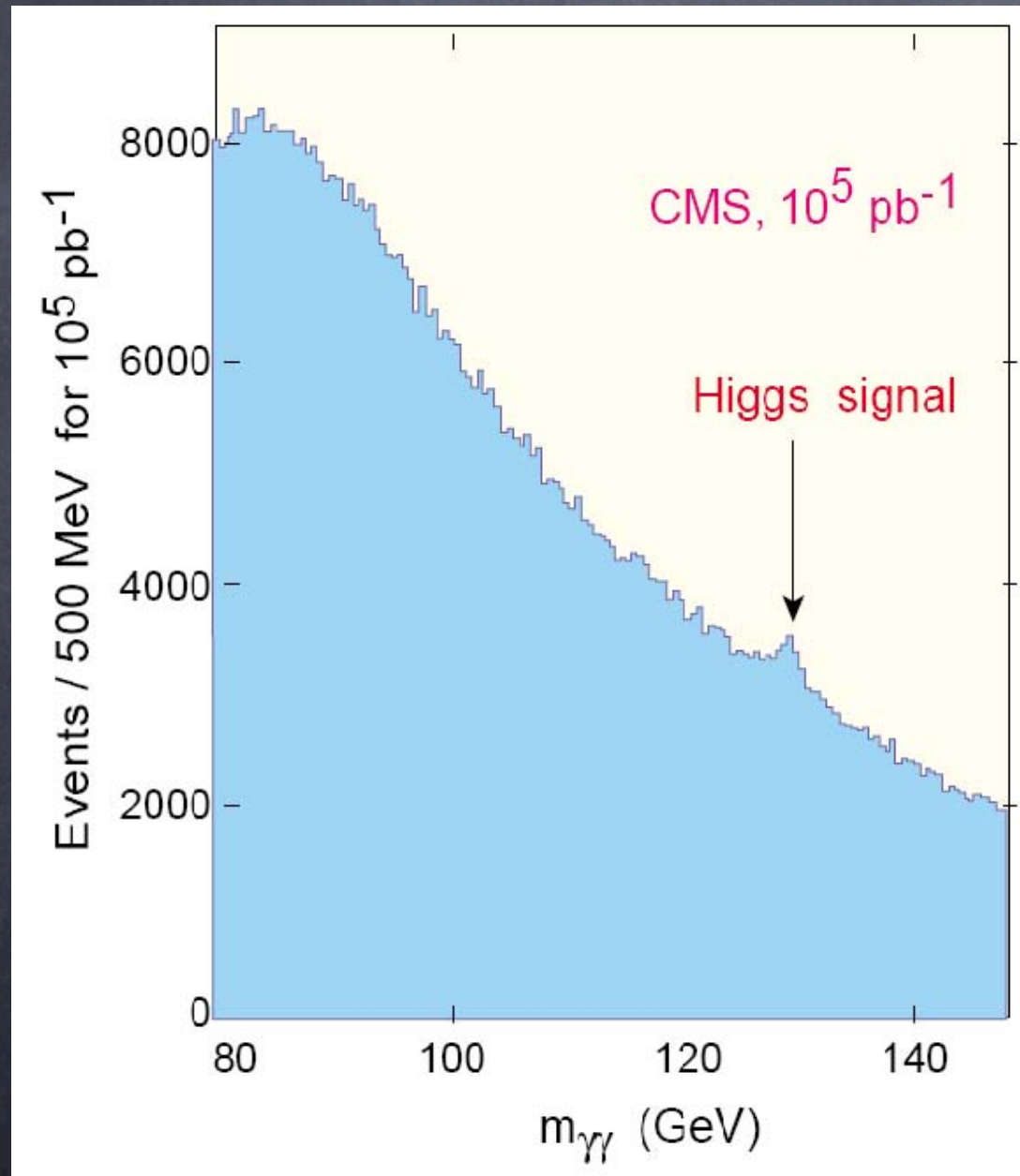


Higgs w danych



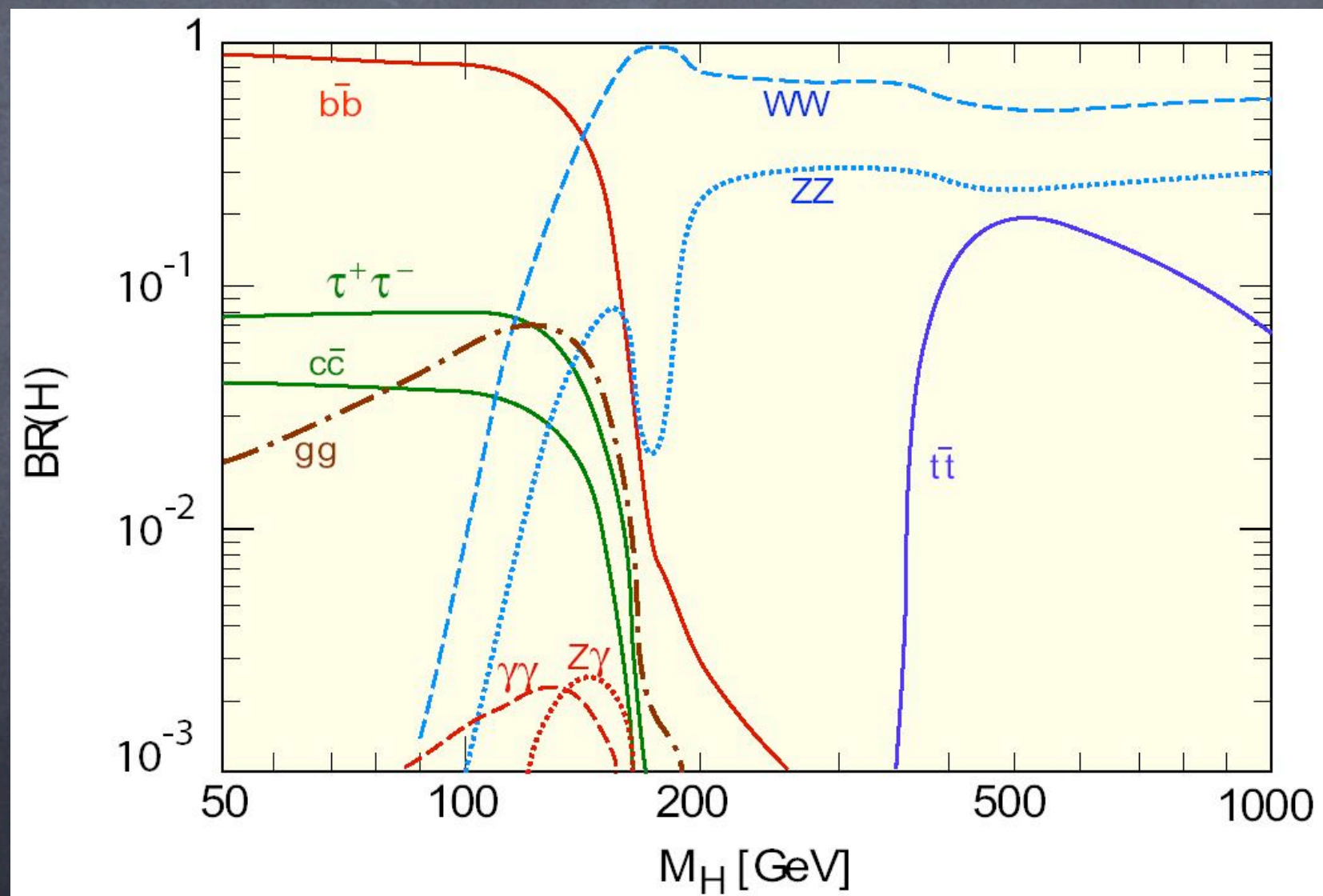
Higgs i LHC

- Ważne słowa: symulacje Monte Carlo, analiza, sygnał, tło, masa niezmiennicza



Jak znaleźć bozon Higgsa?

- Przewiduje się, że bozon Higgsa (podobnie jak bozony W i Z) rozpada się bardzo szybko
- W detektorze zaobserwujemy jedynie produkty rozpadu
- Bozon Higgsa “lubi” cząstki masywne (im ciężej tym łatwiej!)

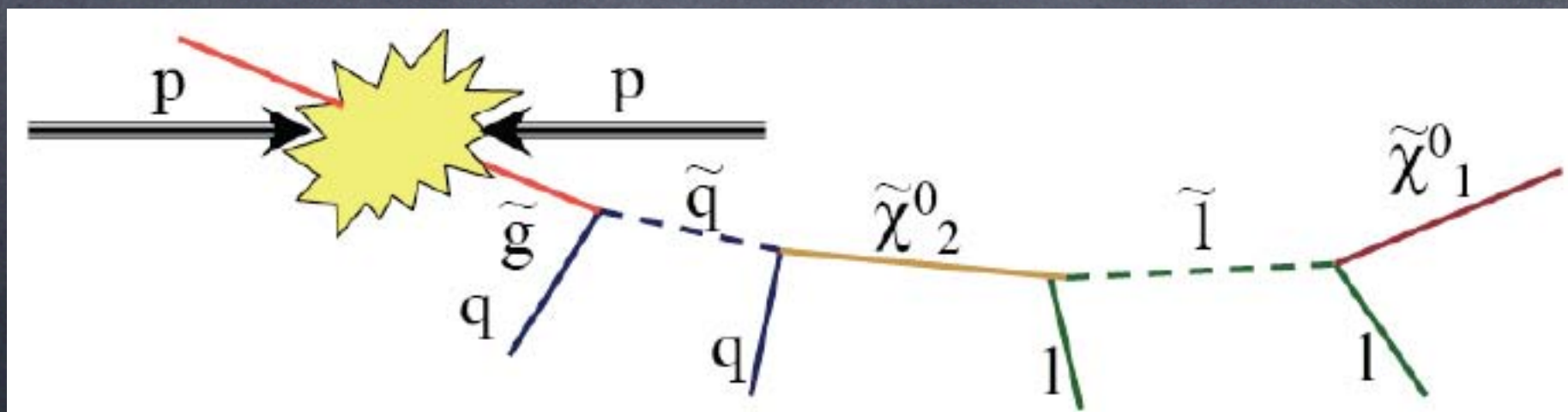


SuperSymetria

- Symetria pomiędzy fermionami i bozonami
- Każdy bozon ma superpartnera o spinie połówkowym, a każdy fermion superpartnera o spinie całkowitym
- Supersymetryczne nazwy:
 - kwarki - skwarki
 - leptony - sleptony
 - gluon, W, Z - gluino, wino, zino
- Parzystość R - nowa liczba kwantowa. Jeśli jest zachowana to supersymetryczne cząstki mogą powstawać i znikać (anihilować) tylko parami

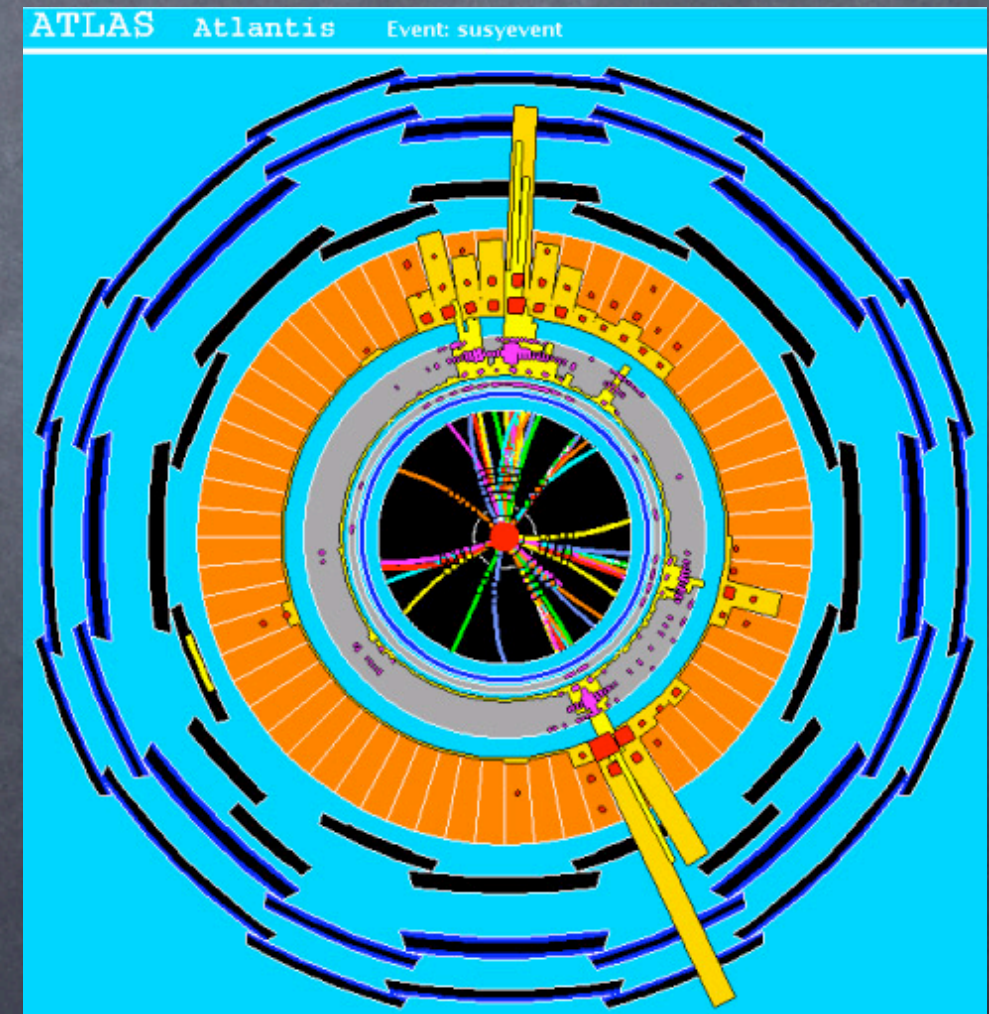
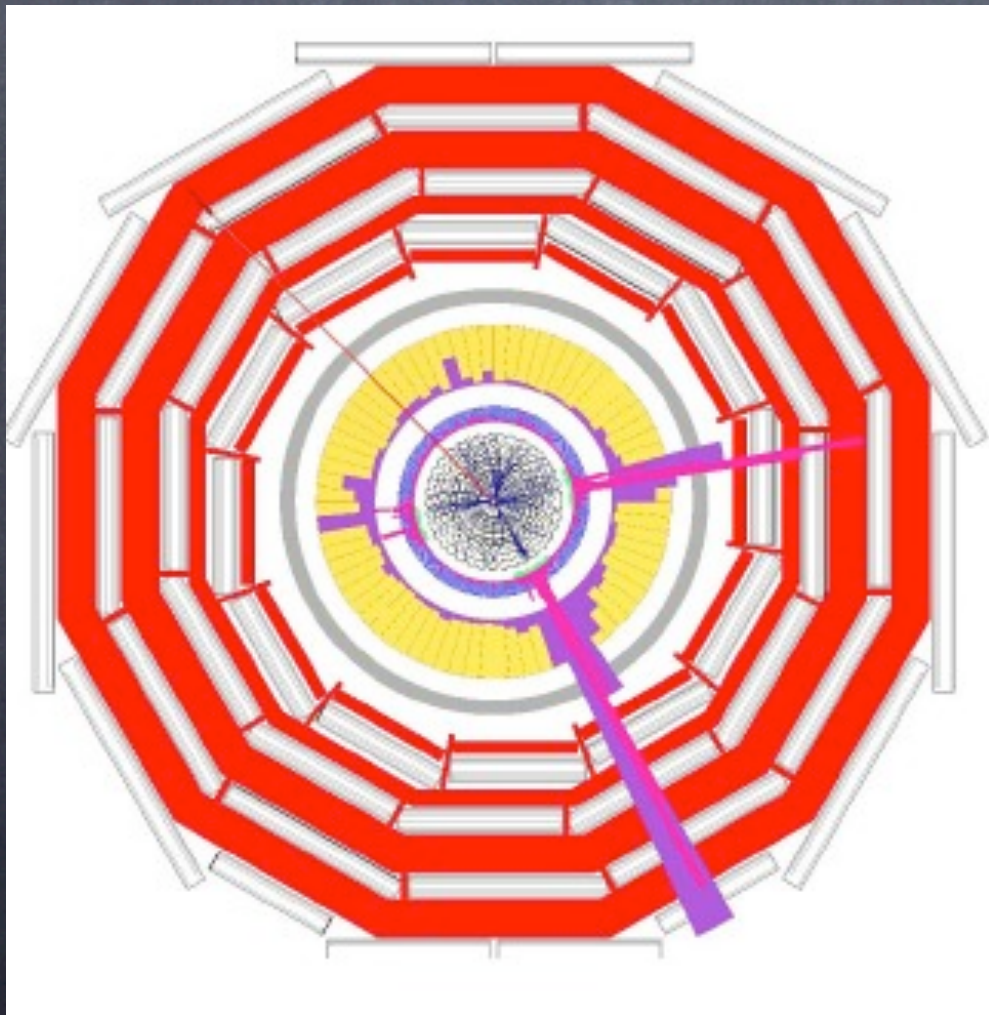
Atrakcyjna SuSy

- Teoria SuperSymetrii pozwala rozwiązać kilka problemów Modelu Standardowego:
 - problem hierarchii - rozbieżności pomiędzy elektroslabą skalą energetyczną (10^2GeV) i skalą Plancka (10^{19}GeV)
 - Teoria zawiera naturalnego kandydata na ciemną materię - LSP (Lightest Supersymmetric Particle)
 - Pasuje do koncepcji unifikacji oddziaływań
 - konieczna w teorii strun



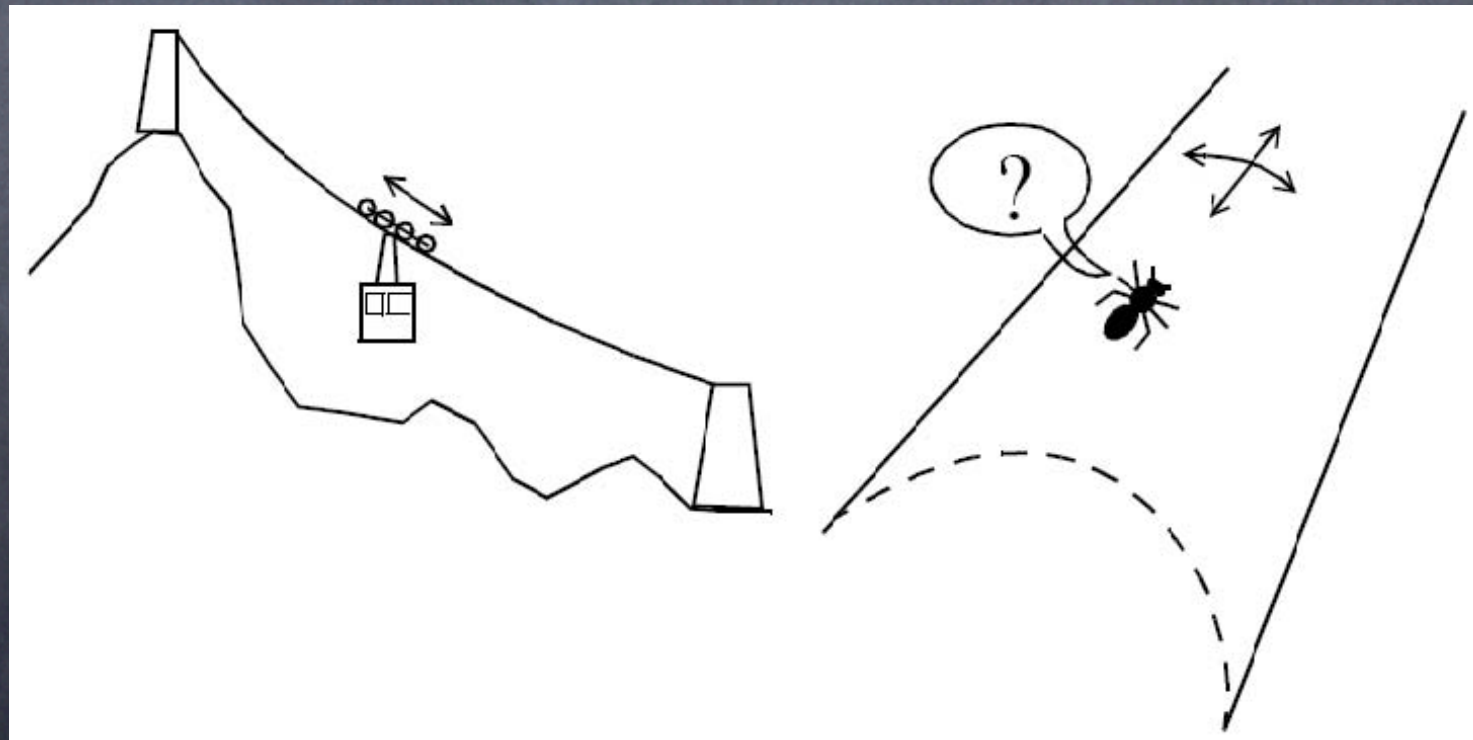
Jak szukać?

- W zderzeniach p-p powstają pary skwarków, gluonów, itp
- Sząstki rozpadają się, tworząc kaskady cząstek wtórnych (znanych)
- Ostatnia sząstka (LSP) nie rozpada się i ucieka niezauważona z detektora
- Widzimy tzw. brakującą energię - potencjalny dowód na istnienie LSP



Wyższe wymiary

- Ogólna Teoria Względności A. Einsteina – siły grawitacyjne wynikają z geometrii 4-wymiarowej czasoprzestrzeni (1916)
- T. Kaluza – dodanie kolejnego wymiaru powoduje, że geometrycznie można opisać również elektromagnetyzm (1921)
- Ale czemu nie widzimy tego piątego wymiaru?
 - kompaktyfikacja (O. Klein, 1926)

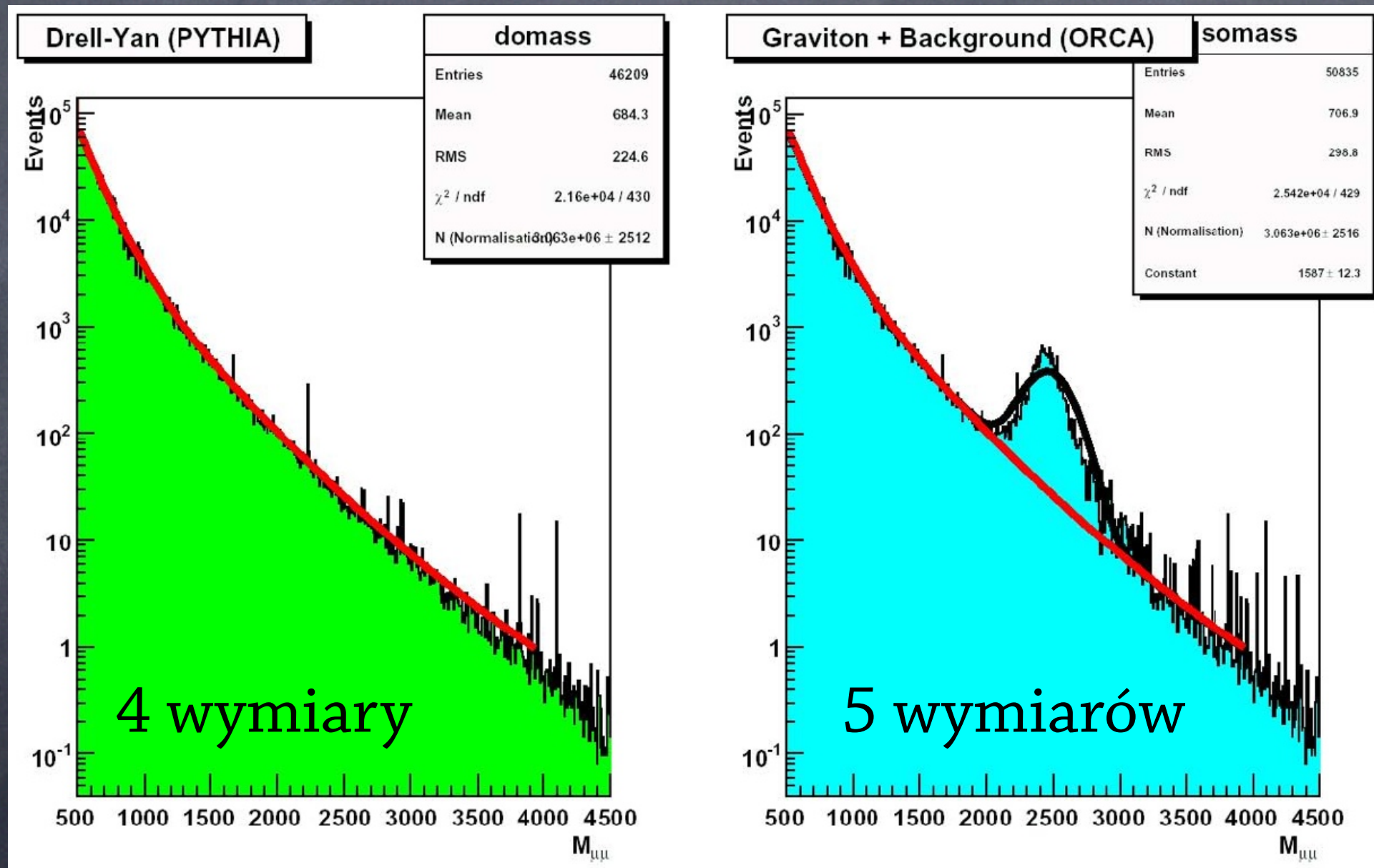


Wyższe wymiary?

- Dodatkowy wymiar można ukryć poprzez “zwinięcie” go w okrąg o bardzo małym promieniu (np. $r_c \sim 10^{-33}$ cm)
- 1970: teoria strun, 11 wymiarów – niesprawdzalna doświadczalnie
- 1998: nowa fala – modele ADD, RS, UED ...
 - ADD (Arkani-Hamed, Dimopoulos, Dvali): modyfikacja grawitacji na bardzo małych odległościach
 - RS (Randall-Sundrum): jeden, „zakrzywiony” nowy wymiar, nowe ciężkie cząstki w LHC
 - UED (Universal Extra Dimensions): wszystkie cząstki mają wzbudzenia KK, doświadczalnie wynik podobny do supersymetrii

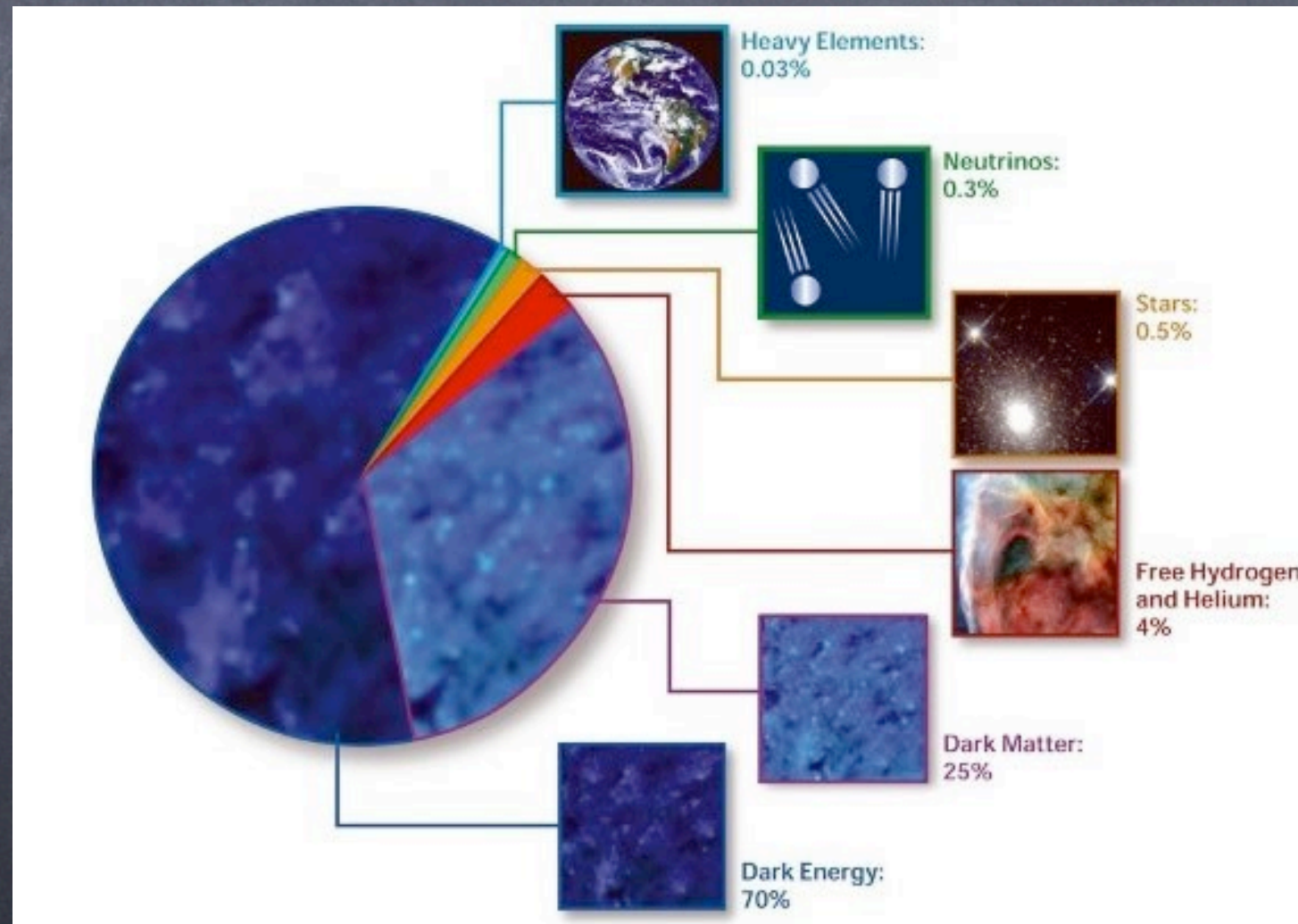
Jak szukać wyższych wymiarów?

- To zależy od modelu...
- Szukamy grawitonów, brakującej energii, nowych cząstek...



Ciemno...

- Z czego składa się Wszechświat?
 - gwiazdy, planety, gaz międzygwiazdny
- Widać tylko ok. 5% wkładu do gęstości Wszechświata
- Gdzie się podziało pozostałe 95%???



Ciemna materia

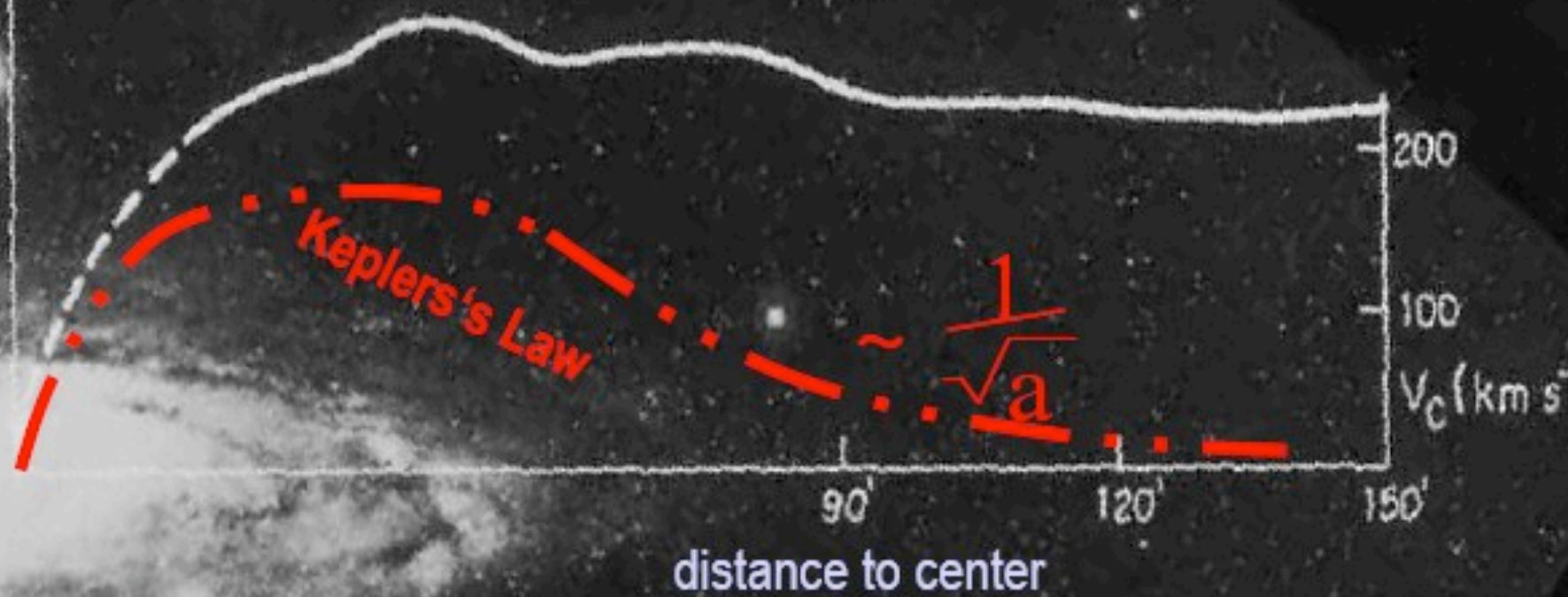
rotation curves
(orbital speed vs radius)
of galaxies

orbital
velocity

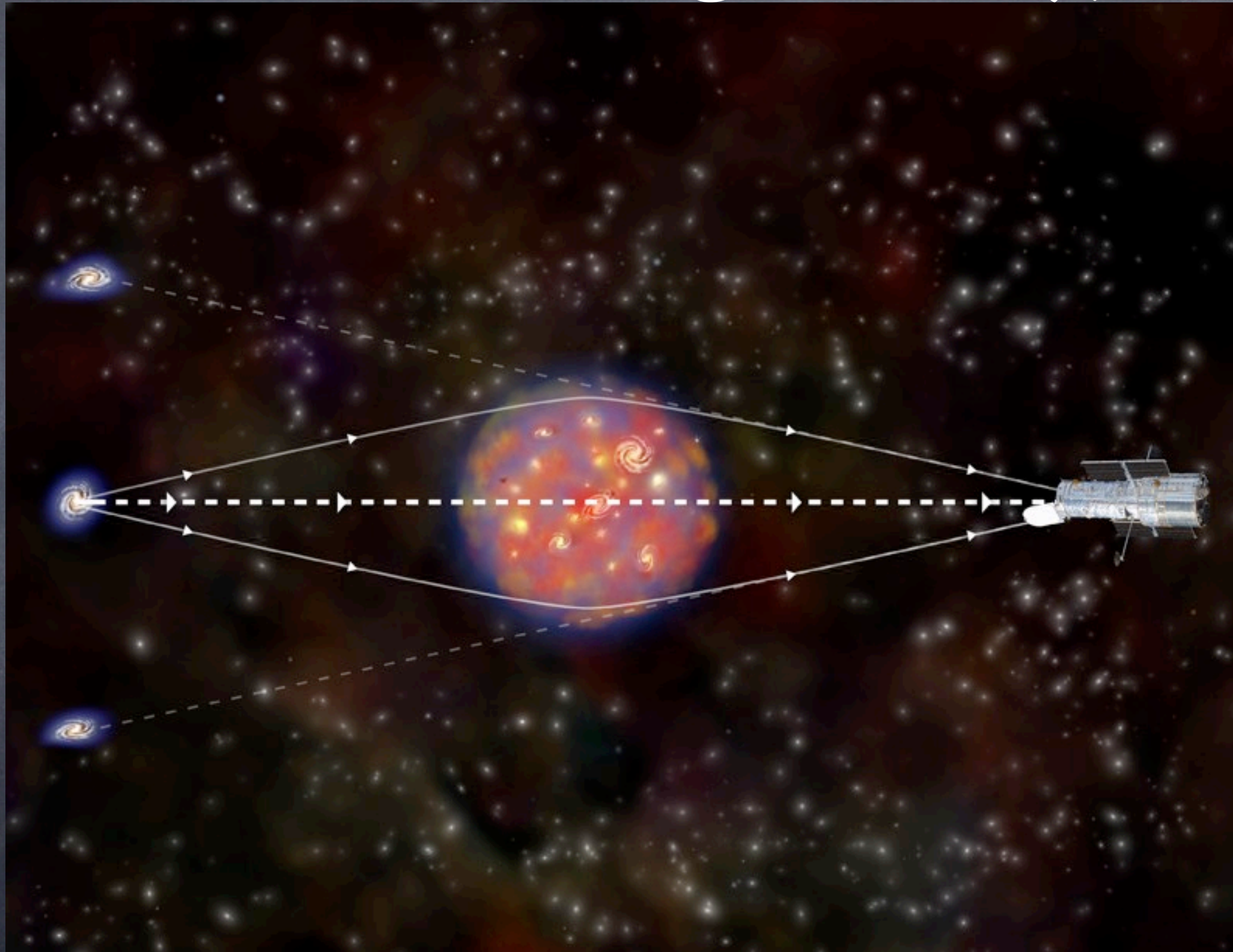
$$\frac{GMm}{R^2} = \frac{mv^2}{R}$$



$$v = \sqrt{\frac{GM}{R}}$$



Soczewkowanie grawitacyjne



Z czego składa się ciemna materia?

- Nie wiemy, ale mamy kandydatów:

- Massive Astrophysical Compact Halo Object (MACHO)



- czarne dziury, planety, gwiazdy neutronowe
- Z obserwacji wynika, że jest ich zbyt mało

- Weakly Interacting Massive Particle (WIMP)

- masywna cząstka oddziałująca tylko grawitacyjnie i ew. słabo



- Inni kandydaci...

- Neutralina, masywne neutrino, axiony, sneutrino, Q-balls, WIMPZILLAs...

