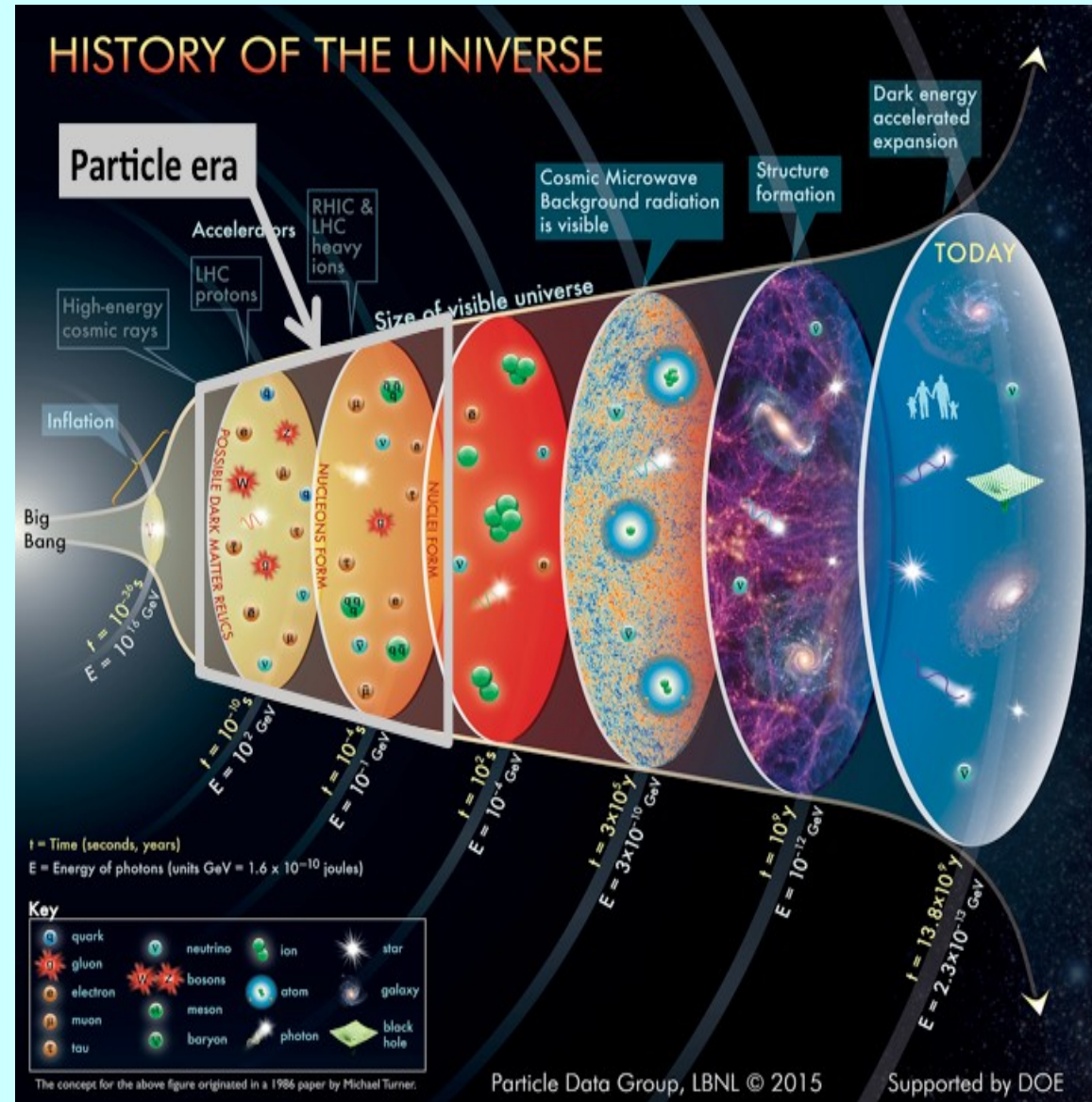


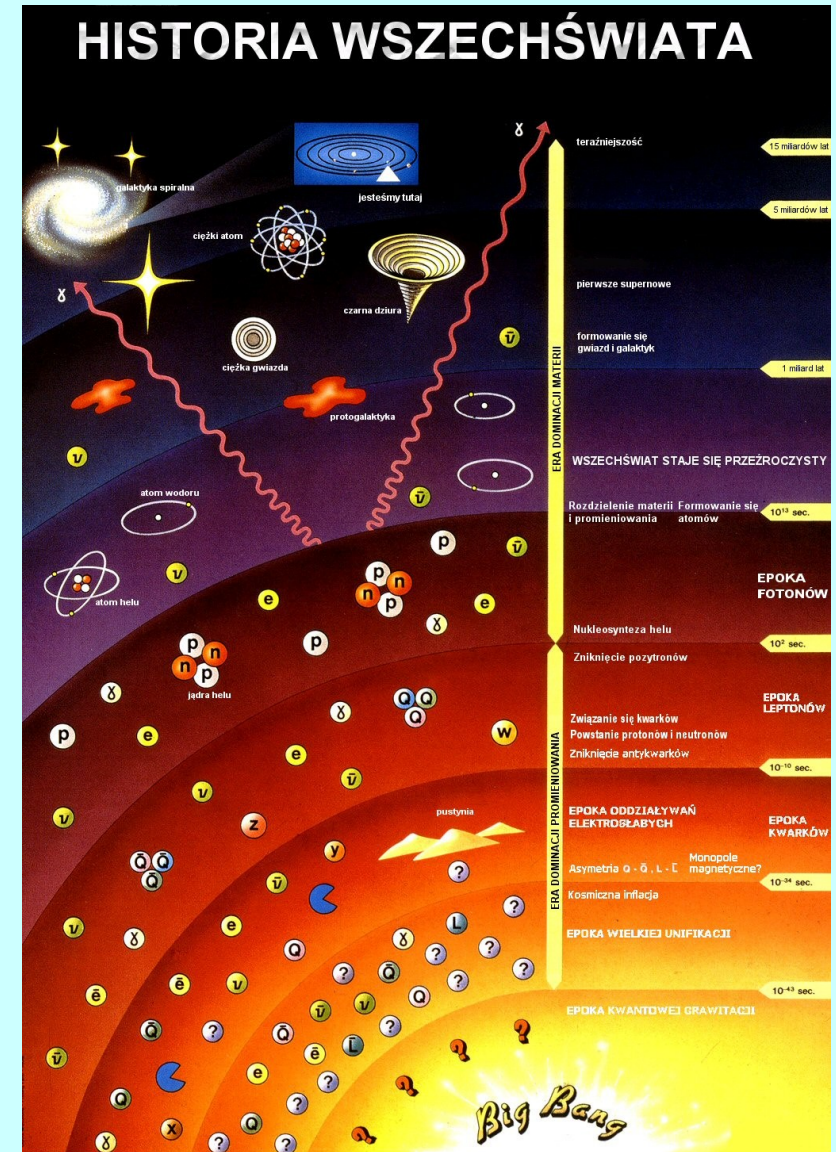
# Model Standardowy budowy Wszechświata

- 1) Jakie są podstawowe cegiełki, z których zbudowany jest Wszechświat?
- 2) Czy znamy prawa rządzące Wszechświatem?
- 3) W jaki sposób zdobywamy wiedzę o funkcjonowaniu Wszechświata



# Model Standardowy budowy Wszechświata

- 1) Przed Modelem Standardowym
  - Oddziaływania
  - Znane cząstki
  - Techniki i urządzenia pomiarowe
  - Teorie oddziaływań
- 2) Symetria w fizyce
- 3) Model Standardowy
  - Oddziaływania
  - Nowe cząstki
  - Akceleratory cząstek (LHC)
- 4) Poza Model Standardowy



# Oddziaływania w makroświecie

## • Grawitacja

- Matematyczne sformułowanie praw grawitacji pochodzi od I. Newtona z XVI w.
- Nowoczesne sformułowanie pochodzi od A. Einsteina (1915)
- nieskończony zasięg
- Jeden rodzaj ładunku (tylko przyciąganie)
- Siła maleje z odległością
- Zaniedbywalnie mała w świecie mikroskopowym

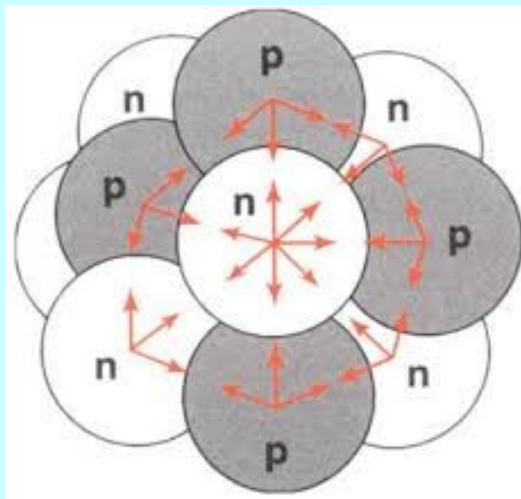
## • Elektromagnetyzm

- Matematyczne sformułowanie praw elektrodynamiki pochodzi od C. Maxwella w połowie XIX w.
- nieskończony zasięg (bezmasywny nośnik)
- Dwa rodzaje ładunków (przyciąganie lub odpychanie)
- Siła maleje z odległością
- Zaniedbywalnie mała w świecie mikroskopowym

# Oddziaływania w mikroświecie

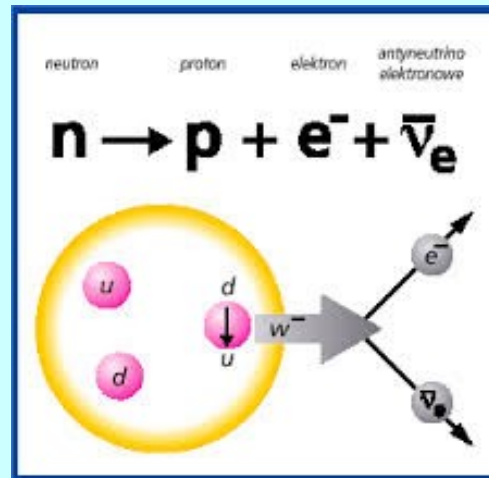
## Jądrowe

- Wiąże protony i neutrony w jądrach atomowych
- Krótkozasięgowe (nośniki masywne)



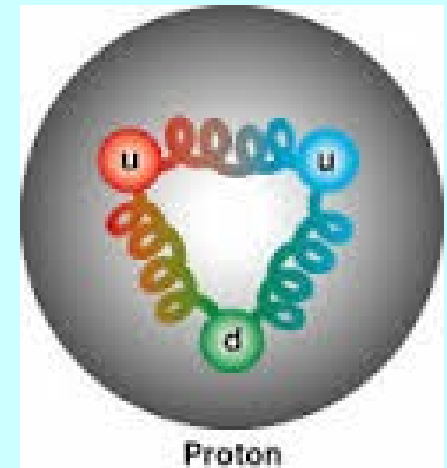
## Słabe

- Odpowiedzialne za rozpady promieniotwórcze  $\beta$
- Krótkozasięgowe (nośniki bardzo masywne)



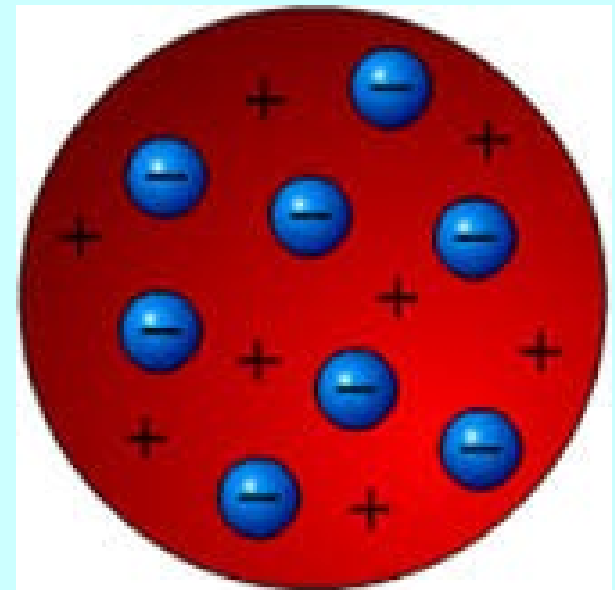
## Silne

- Wprowadzone w połowie lat 60-tych do opisu zjawisk wewnątrz np. protonu



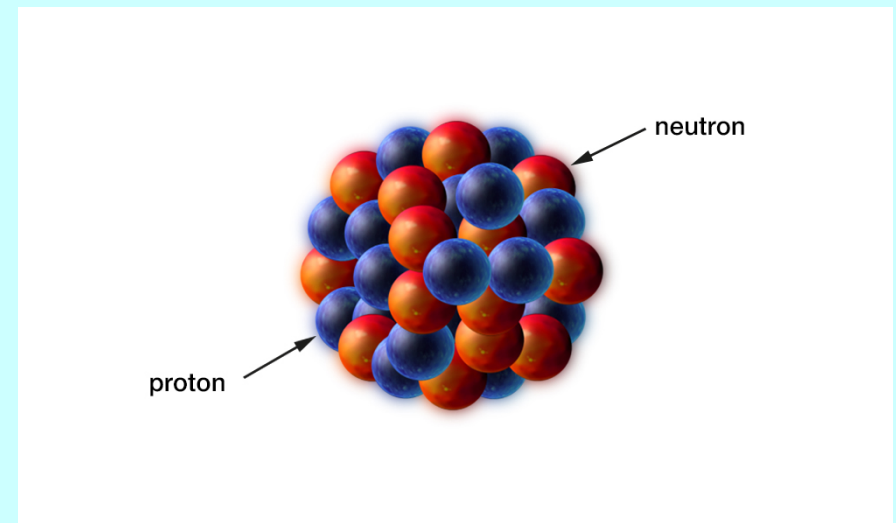
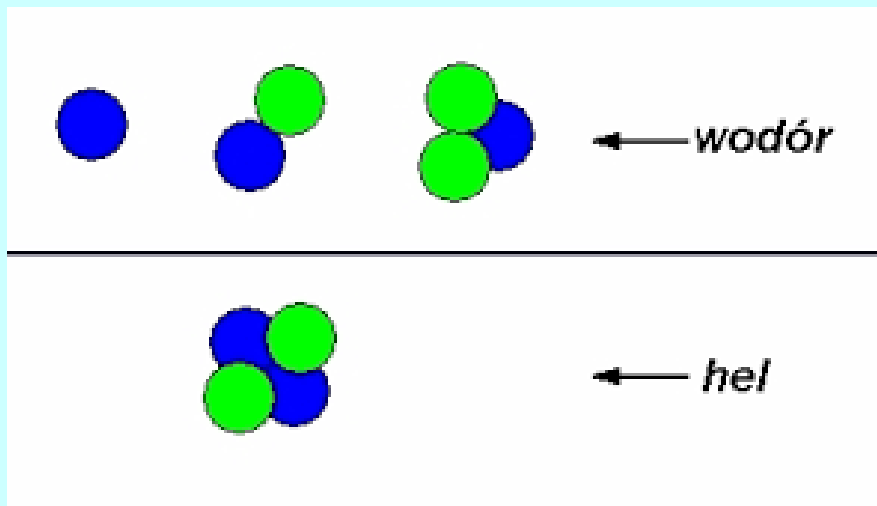
# Elektron

- Odkrycie elektronu przez J. J. Thompsona pod sam koniec XIX w (badania promieni katodowych)
- Pierwsze modele atomu (ciastko z rodzynkami)



# Jądro atomowe

- E. Rutherford (1911) - odkrycie jądra atomowego w zjawiskach rozpraszania cząstek  $\alpha$  na folii ze złota
- Najprostsze jądro atomu wodoru - proton
- W jądrach pozostałych pierwiastków są jeszcze neutrony (odkryte w 1932 r. przez J. Chadwicka)



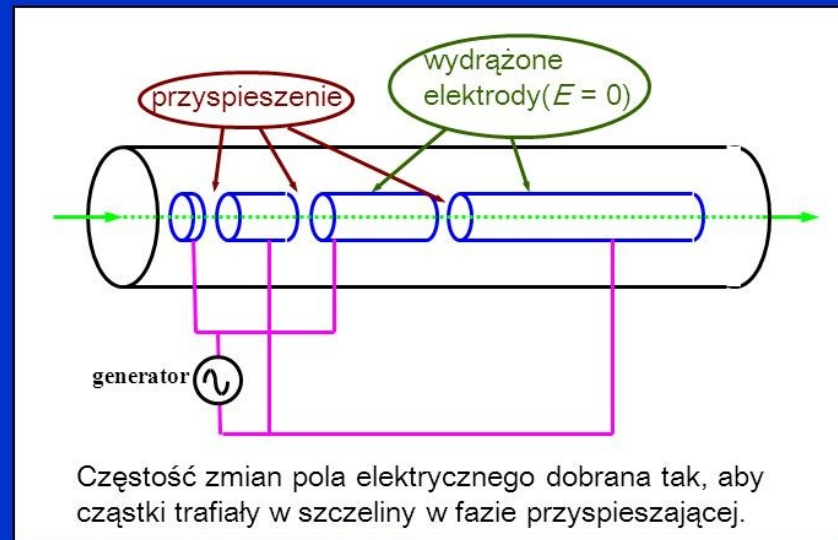
# Aparatura pomiarowa

**Akceleratory cząstek** - urządzenia przyspieszające cząstki do prędkości bliskiej prędkości światła

- Liniowe - np. SLAC (Stanford Linear Accelerator Center)



## Akcelerator liniowy

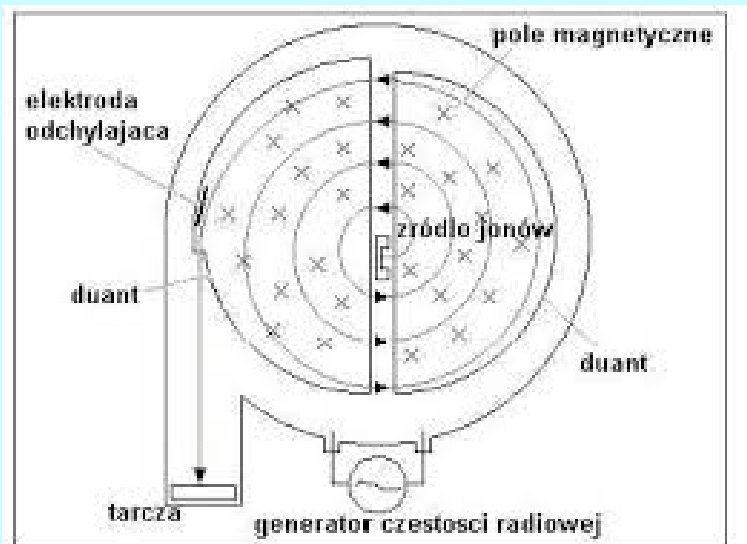


Los Alamos, protony 800 MeV

SLAC (Uniwersytet Stanforda) 3 km, elektrony do ~30 GeV

# Akceleratory

- Kołowe - cyklotrony, synchrotrony, cyklosynchrotrony (LEP, LHC pod Genewą, Fermilab)
- Kaskadowe - wiele etapów przyspieszenia w różnych urządzeniach

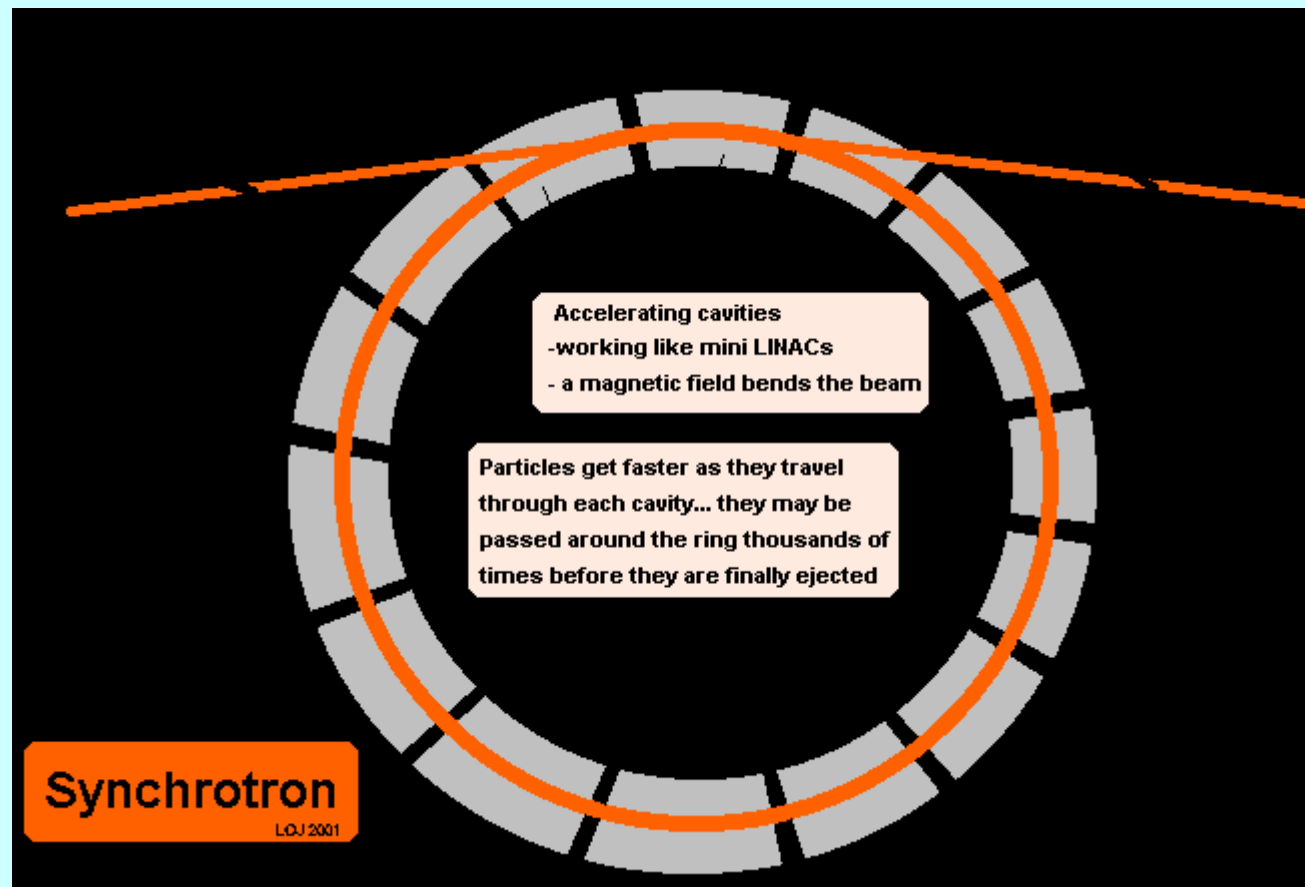


Cyklotron Proteus C-235 firmy Ion Beam Applications, Belgia, przyspieszający protony do energii maksymalnej 230 MeV  
Centrum Cyklotronowe IFJ PAN, Bronowice pod Krakowem



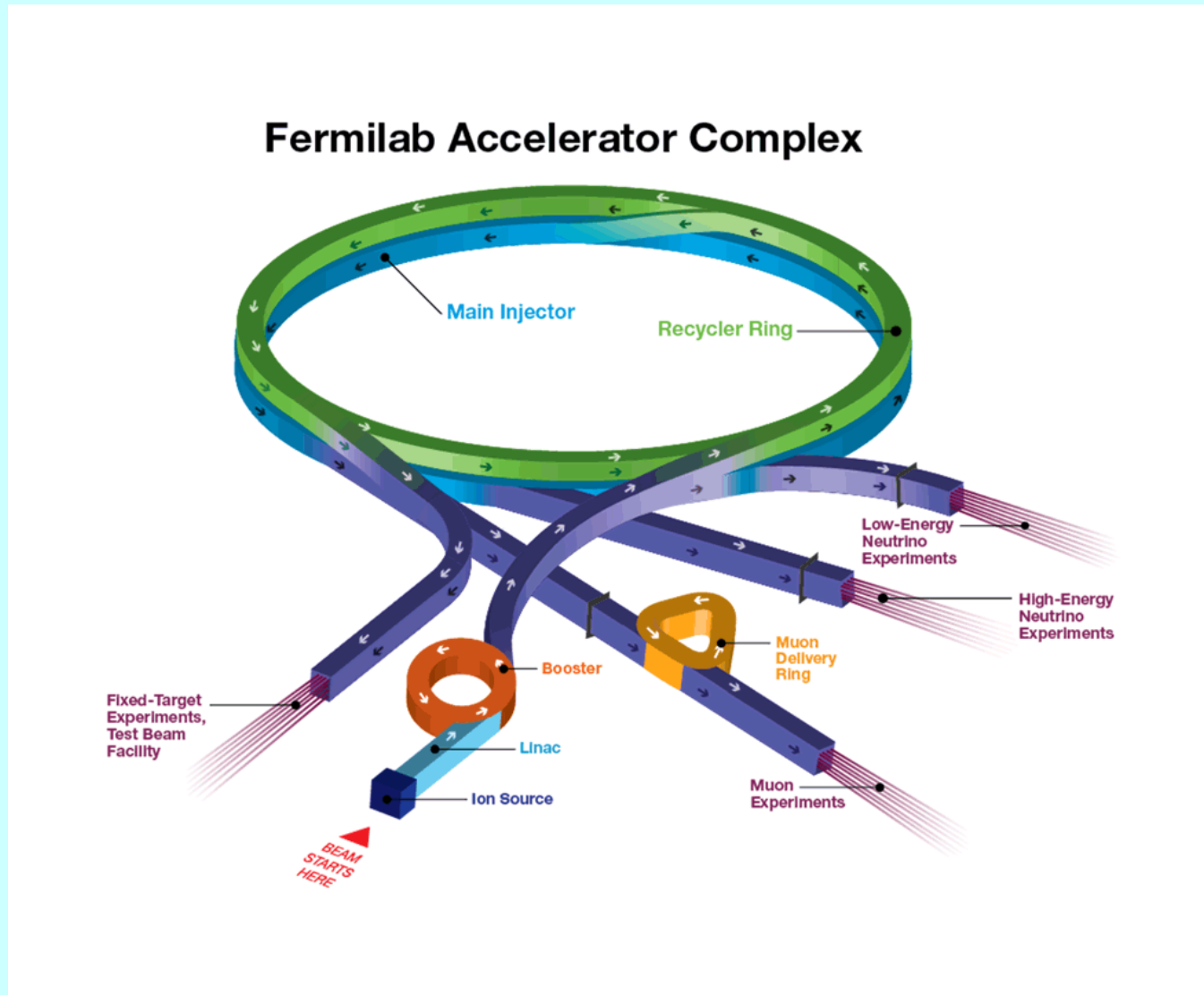
# Synchrotrony

Jak w każdym cyklotronie przyspieszane cząstki krążą w polu magnetycznym. W miarę wzrostu energii przyspieszanych cząstek, pole magnetyczne jest zwiększane, by zachować stały promień obiegu cząstek.



# Przyspieszanie kaskadowe

Wiele etapów przyspieszenia w różnych urządzeniach

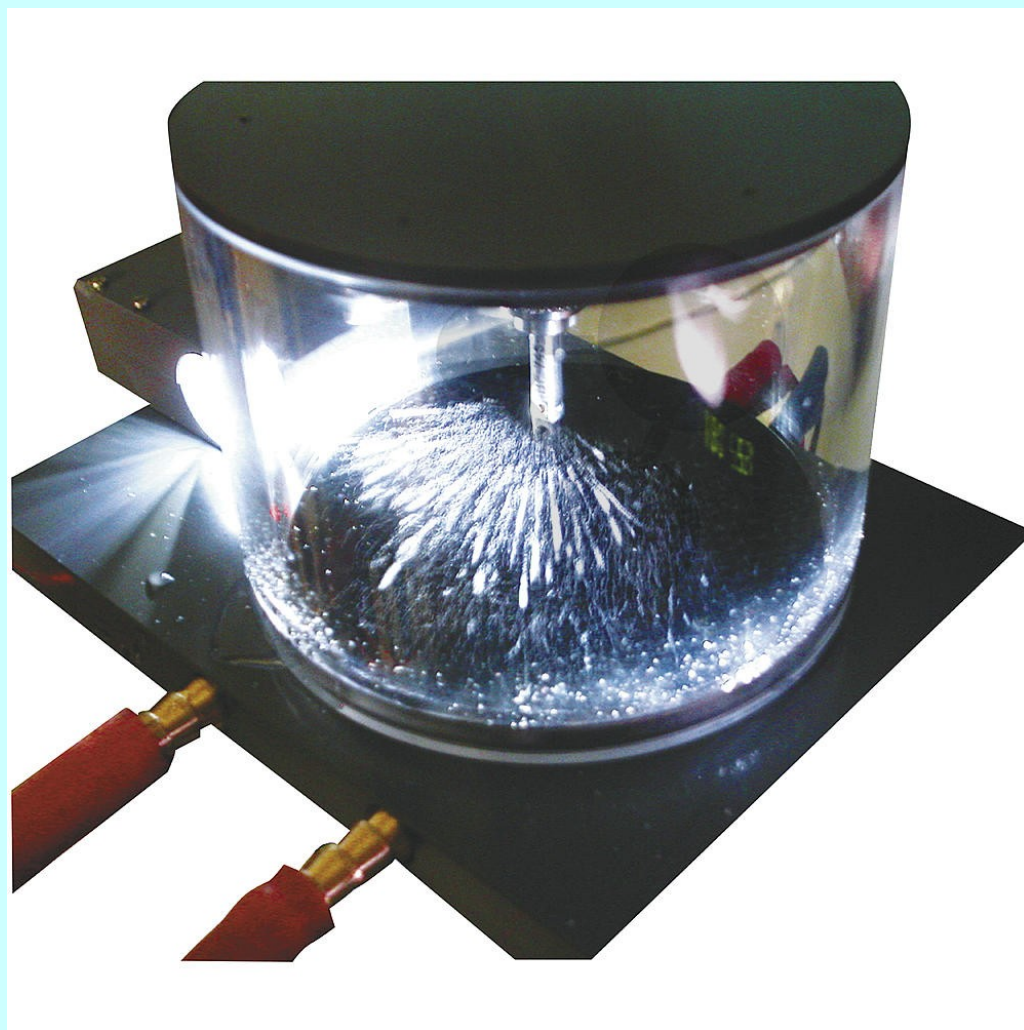


# Zderzenia, tarcze i detektory

Detektory: klisza fotograficzna, komory mgłowe, pęcherzykowe, iskrowe, fotopowielacze,

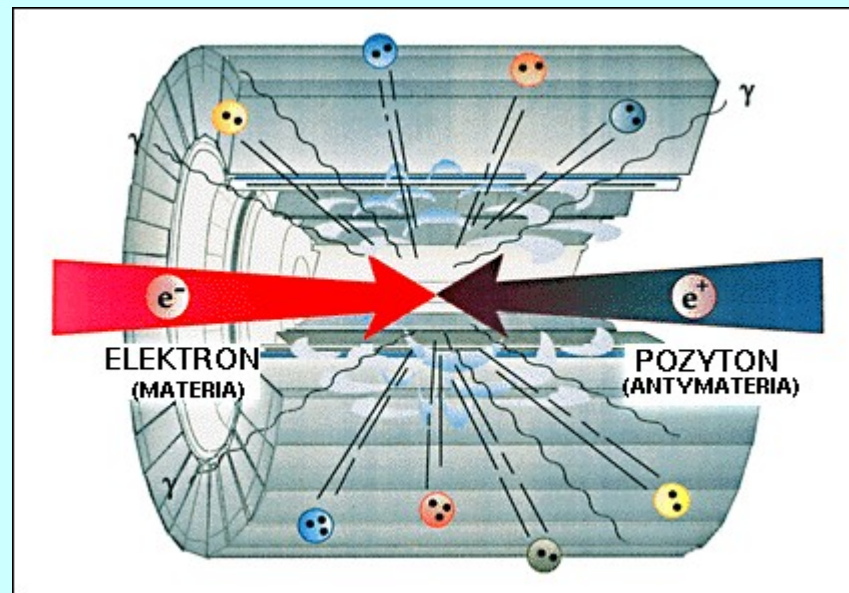


*Cavendish Museum Cambridge, Original Nebelkammer von 1911*



# Antymateria

- P. Dirac - każdej cząstce odpowiada jej antycząstka o tej samej masie i przeciwnych wartościach innych liczb kwantowych
- C. Anderson (1932) - odkrycie w komorze mgłowej pozytonu: antycząstki elektronu



# Prawa zachowania i symetrie

## Symetrie równań teorii

- Zasada zachowania energii
- Zasada zachowania pędu

## Symetrie względem przekształceń

Odbicie - zmiana znaku zmiennej

- Odbicie w czasie - przekształcenie T
- Odbicie w zmiennych przestrzennych - przekształcenie P (parzystość)
- Odbicie w ładunku - przekształcenie C

Każda symetria teorii odpowiada pewnemu prawu zachowania i odwrotnie  
(twierdzenie Noether, 1918)

## 2. Inne “odbicia”

- W czasie:  $t \rightarrow -t$  T
- W przestrzeni:  $x \rightarrow -x, y \rightarrow -y, z \rightarrow -z$  P

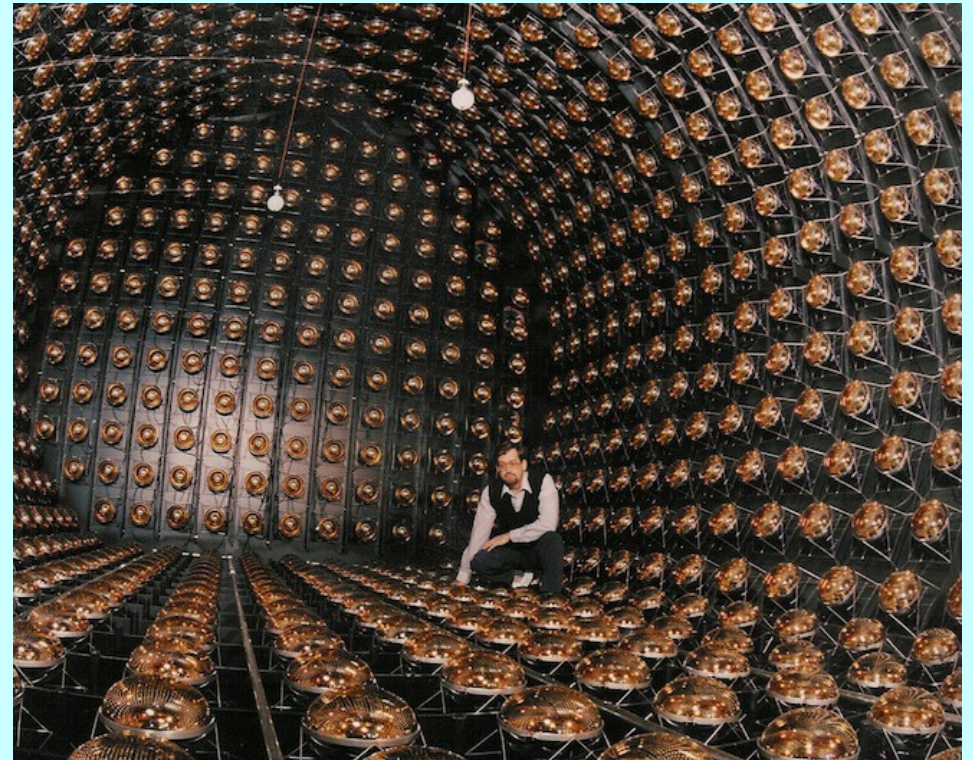
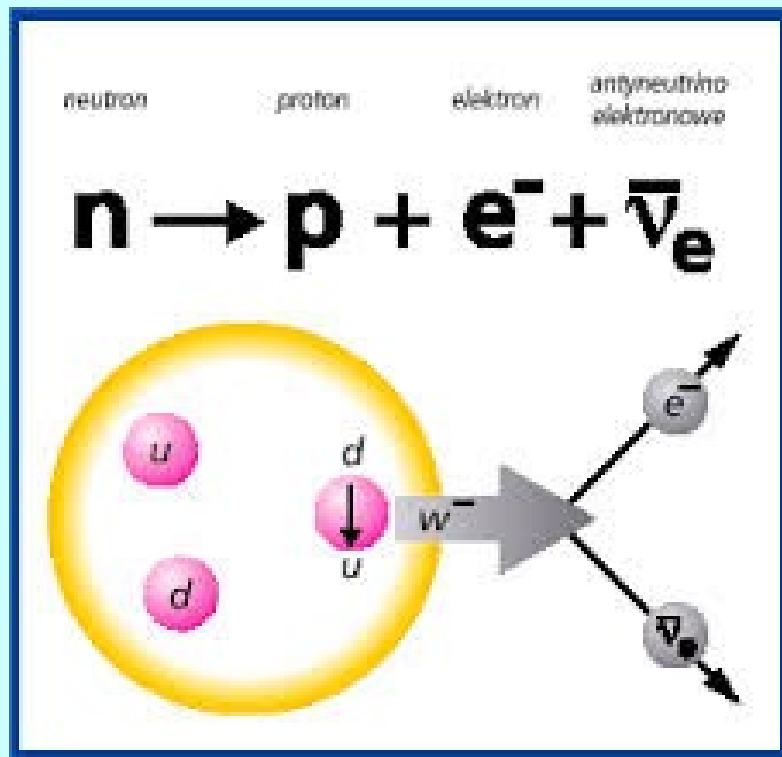


- Cząstka  $\leftrightarrow$  antycząstka C

Elektron  $e^- \leftrightarrow$  pozyton  $e^+$  ;    Proton  $p \leftrightarrow$  antyproton  $\bar{p}$   
 $\bar{p}$   
 $p$

# Eksploracja ilości rodzajów cząstek

- Neutrino (Pauli, 1930) - brakujący pęd i energia w rozpadach promieniotwórczych



# *Eksplozja ilości rodzajów cząstek*

- Miony  $\mu^+$ ,  $\mu^-$  (Anderson, 1937) - ciężkie elektrony obserwowane w górnych warstwach atmosfery jako produkty oddziaływania promieniowania kosmicznego z atmosferą
- Piony  $\pi^+$ ,  $\pi^-$ ,  $\pi^0$  (Yukawa 1935, Powell 1947) - najlżejsze mezony
- Rozróżnienie dwóch rodzajów neutrin (elektronowe i mionowe) eksperyment dwuneutrinowy (Schwartz, Ledermann, Steinberg)
- Protony nie są punktowe - znajdują się w nich skupiska ładunku
- Cząstki  $\Delta$  o spinie  $3/2$
- Cząstki dziwne i powabne (lata 60-te i 70-te)

# Pytania (chwilowo) bez odpowiedzi

- Jak sklasyfikować nowe cząstki?
- Jak opisać zachowanie się nowych cząstek?
- Dlaczego Natura komplikuje nam sprawę!?

$\pi^+$   $\pi^-$   $\pi^0$   
Piony

$\eta'$   
Eta-Prim

$\eta$   
Eta

$\rho^+$   $\rho^-$   $\rho^0$   
Ro

$K^+$   $K^-$   $K^0$   
Kaony (dziwne!)

$\phi$   
Psi

**Mezony** (spin całkowity)

$\Delta^{++}$ ,  $\Delta^+$ ,  $\Delta^0$ ,  $\Delta^-$   
Delta

$\Lambda^0$   
Lambda (dziwne!)

$\Sigma^+$ ,  $\Sigma^0$ ,  $\Sigma^-$   
Sigma (dziwne!)

$\Xi^0$ ,  $\Xi^-$   
Sigma(bardzo dziwne!)

**Bariony** (spin półkowy)



# Co nowego w teorii?

## Lata 30-te

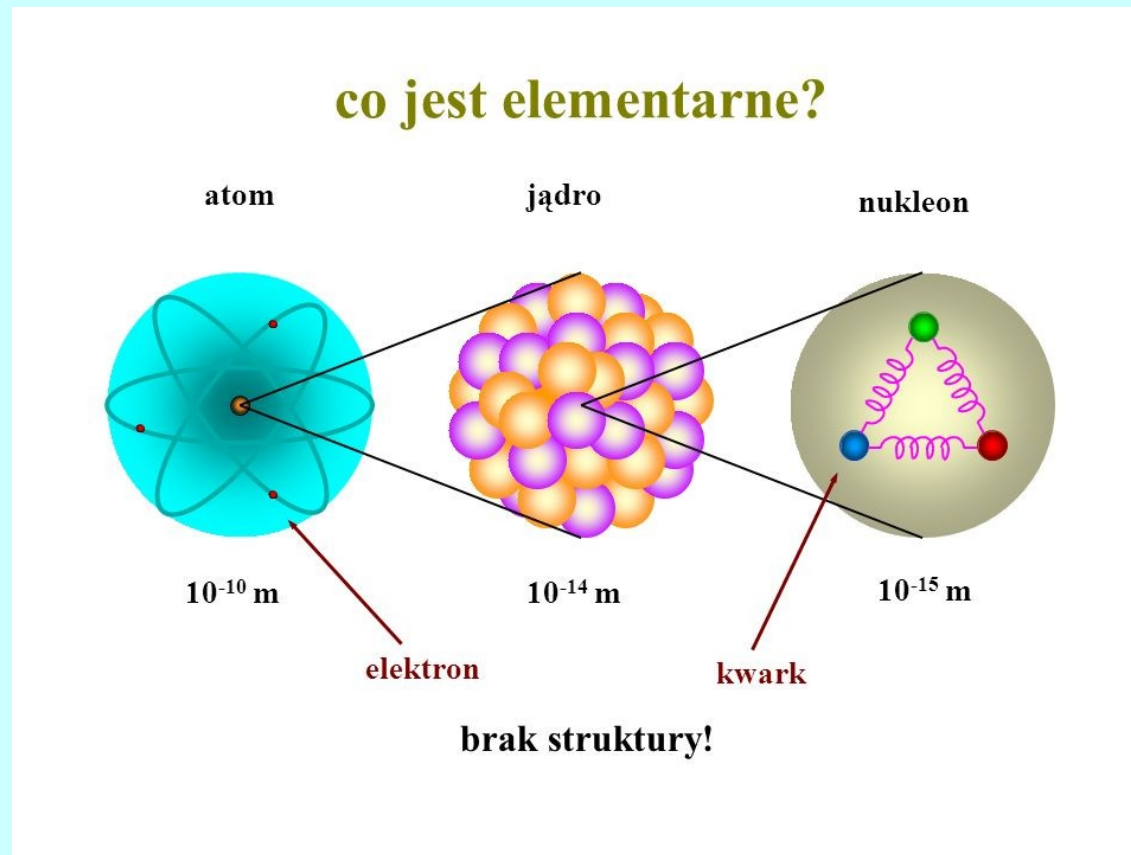
- Teoria Yukawy oddziaływań jądrowych - piony jako cząstki przenoszące oddziaływania jądrowe pomiędzy nukleonami
- Teoria Fermiego oddziaływań słabych - działała poprawnie przy niskich energiach oddziaływania, ale przewidywała błędne wyniki przy energiach większych (kryzys unitarności)

## Lata 40-te

- Elektrodynamika kwantowa (Tomonaga, Schwinger, Feynmann) - niezwykle dokładny opis cząstek naładowanych i ich oddziaływania z polem elektromagnetycznym

# Model Standardowy, czyli z czego zbudowany jest Wszechświat?

## Cząstki + oddziaływania elementarne

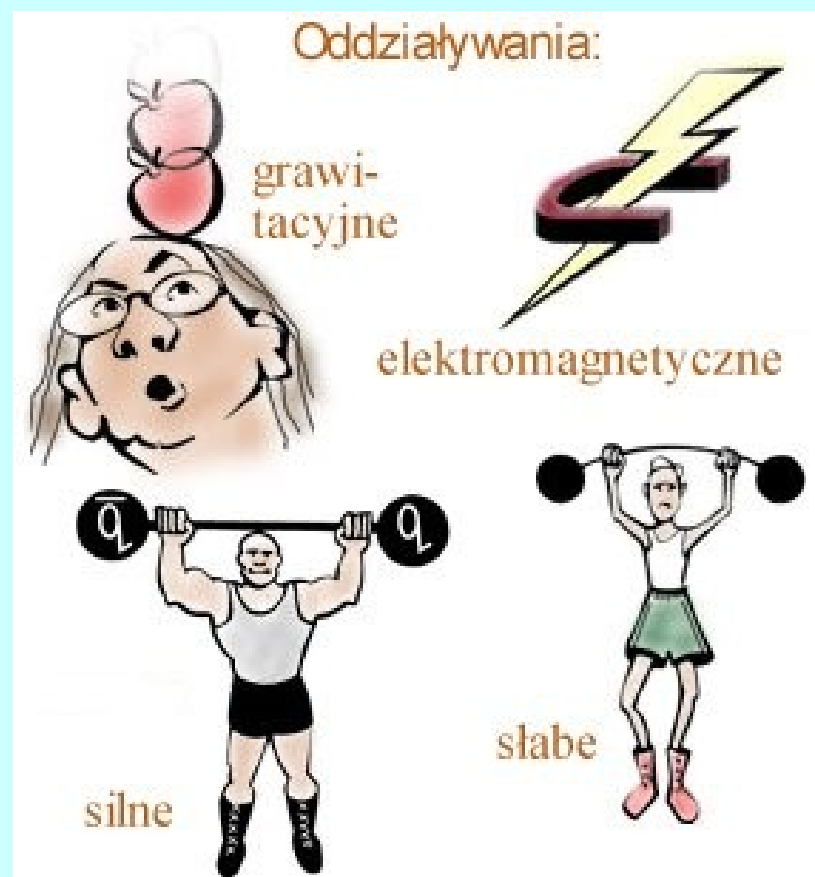


# Model Standardowy, czyli z czego zbudowany jest Wszechświat?

- Cząstki punktowe (*prawdziwie elementarne*)
- Cząstki złożone (zbudowane z bardziej podstawowych)
- Nośniki oddziaływań
- Cząstki mają wiele przypisanych im własności: masa, ładunek, liczby kwantowe (spin, kolor, liczba leptonowa, barionowa,...)
- Teoria i klasyfikacja cząstek oparte są o symetrie

# Oddziaływania fundamentalne

- Grawitacja
- Elektromagnetyczne
- Słabe
- Silne



# Kwantowa teoria pola

- Wojna z Nieskończonościami (czy  $\infty - \infty = 0$ )
- Kwantowa próżnia i cząstki wirtualne
- Relacje nieoznaczoności
- Renormalizacja
- Elektrodynamika kwantowa (QED)
- Chromodynamika kwantowa (QCD)

$$\Delta E \circ \Delta t \geq \frac{h}{4\pi}$$



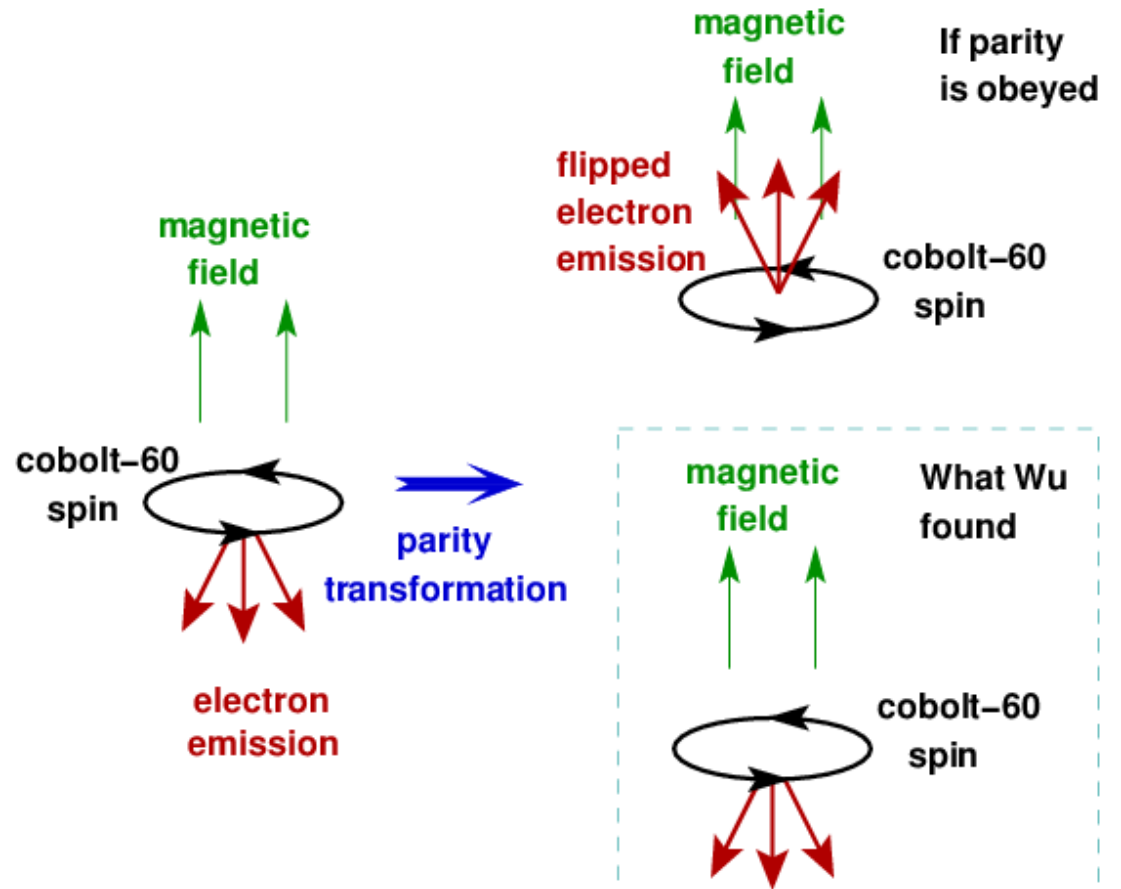
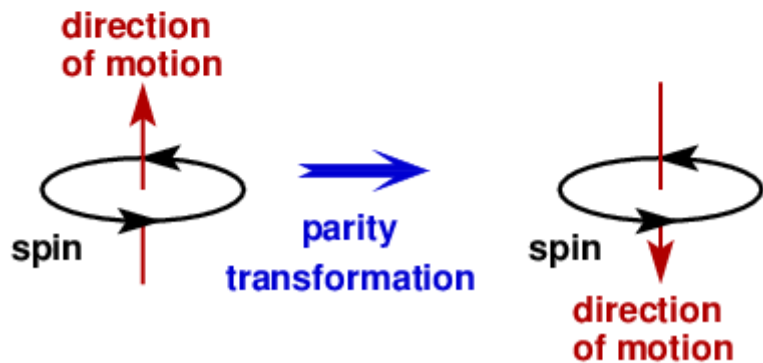
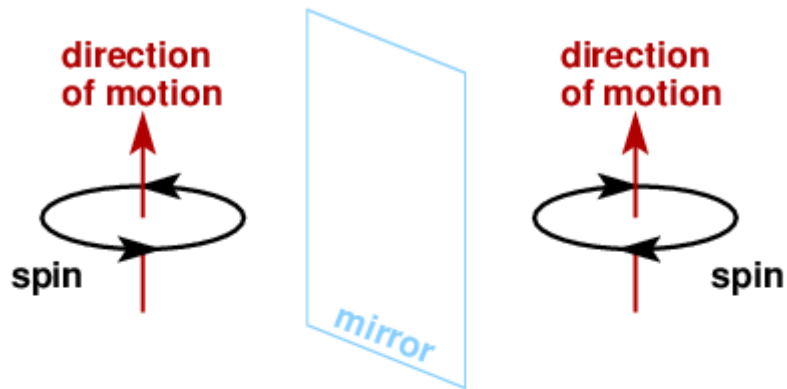
# Złamanie symetrii

Lata 50-te

- Złamanie symetrii P oraz (później) CP  
doświadczenie Madame Wu
- Przyroda rozróżnia  
prawoskrętność od lewoskrętności



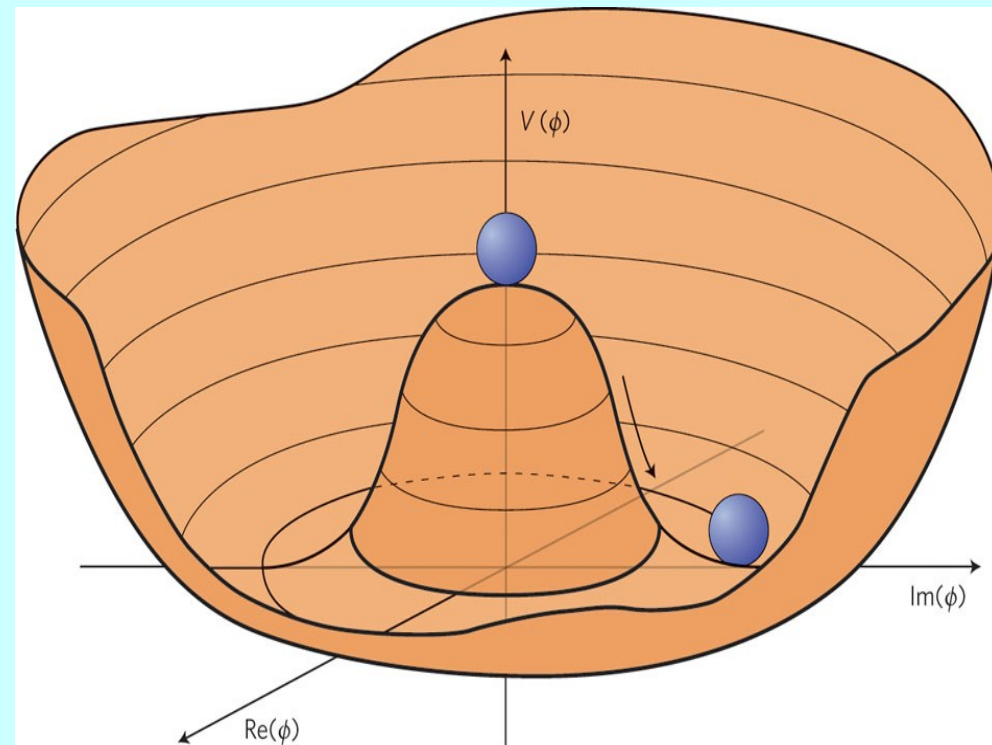
# Złamanie parzystości



# Łamanie symetrii w teorii pola

Skąd cząstki elementarne biorą masę?

- Mechanizm Higgsa
- Masywne nośniki oddziaływania słabego -  
przewidywane od końca  
lat 60-tych  
i znalezione w końcu w 1983  
roku w CERNie





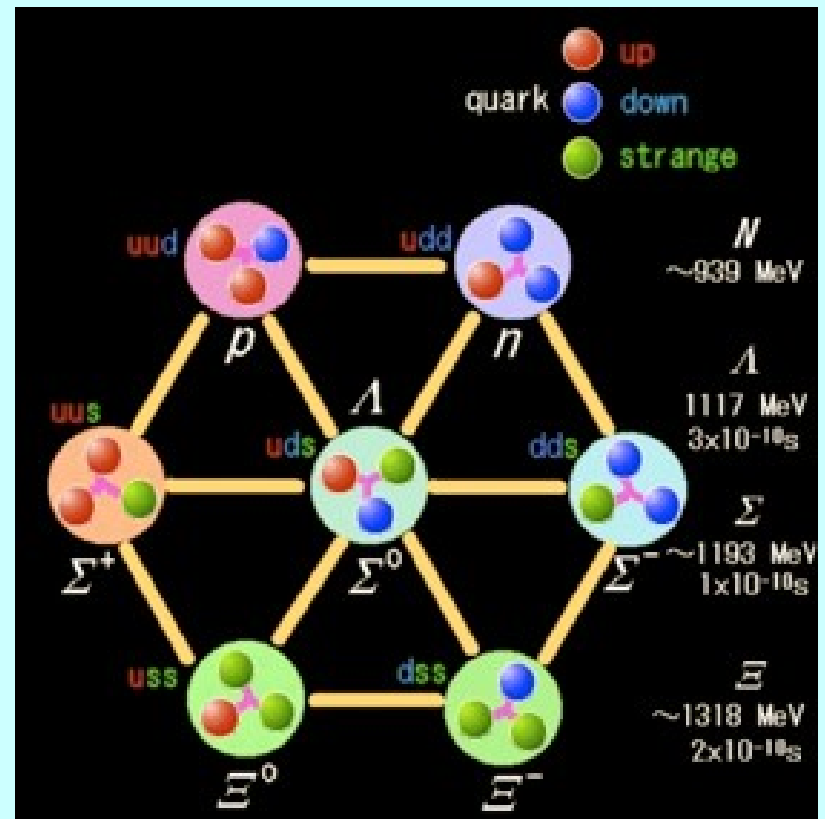
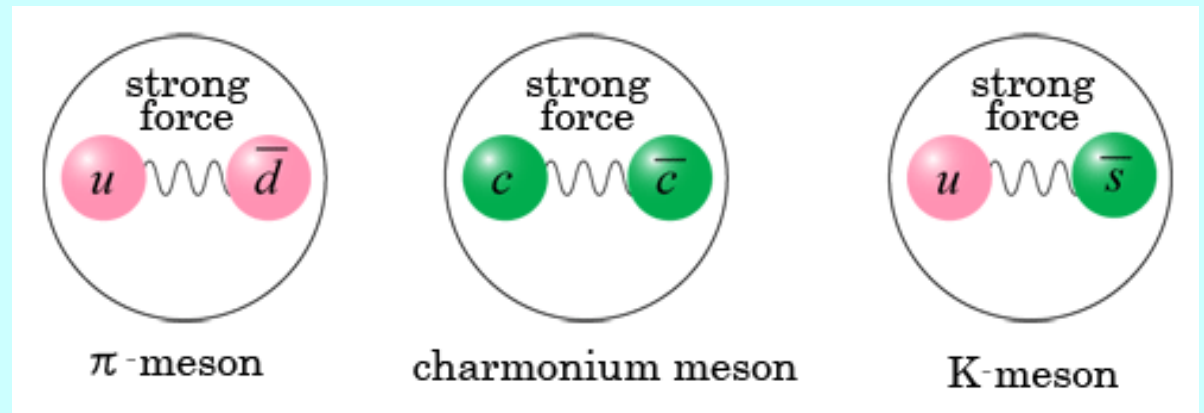
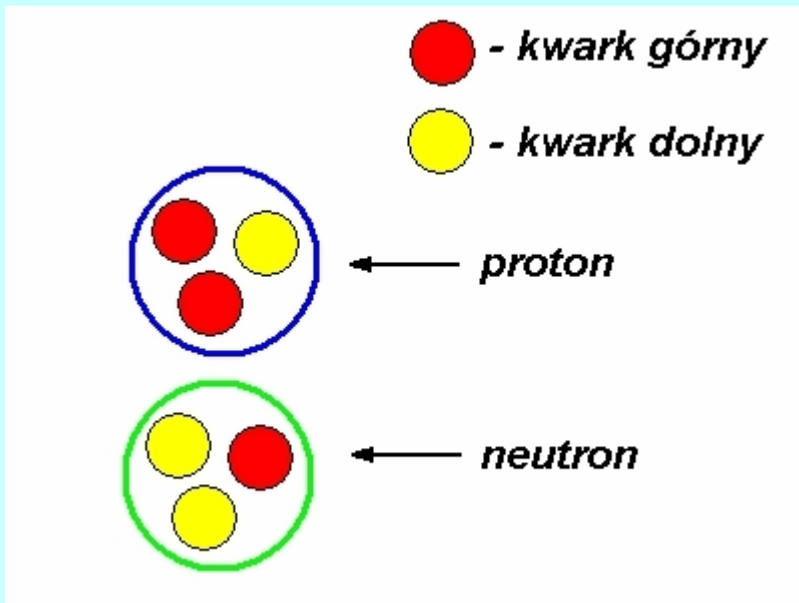
# Model Standardowy

- Klasyfikacja (M. Gell-Mann)
- Leptony i kwarki
- Bariony (trzy kwarki)
- Mezony (kwark i antykwark)
- Nośniki oddziaływań (foton, 8 gluonów,  $Z^0$ ,  $W^\pm$ )

**Trzy pokolenia materii (fermiony)**

	I	II	III	
masa →	2.4 MeV/c <sup>2</sup>	1.27 GeV/c <sup>2</sup>	171.2 GeV/c <sup>2</sup>	0
ładunek →	2/3	2/3	2/3	0
spin →	1/2	1/2	1/2	1
nazwa →	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>γ</b> photon
kwarki	4.8 MeV/c <sup>2</sup>	104 MeV/c <sup>2</sup>	4.2 GeV/c <sup>2</sup>	0
	-1/3	-1/3	-1/3	0
	1/2	1/2	1/2	1
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>g</b> gluon
leptony	<2.2 eV/c <sup>2</sup>	<0.17 MeV/c <sup>2</sup>	<15.5 MeV/c <sup>2</sup>	91.2 GeV/c <sup>2</sup>
	0	0	0	0
	1/2	1/2	1/2	1
	<b>ν<sub>e</sub></b> electron neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> tau neutrino	<b>Z<sup>0</sup></b> Z boson
	0.511 MeV/c <sup>2</sup>	105.7 MeV/c <sup>2</sup>	1.777 GeV/c <sup>2</sup>	80.4 GeV/c <sup>2</sup>
	-1	-1	-1	±1
	1/2	1/2	1/2	1
	<b>e</b> electron	<b>μ</b> muon	<b>τ</b> tau	<b>W<sup>±</sup></b> W boson
				gluony cechowania

# Bariony i mezony



# Oddziaływania

## Kwantowa teoria pola

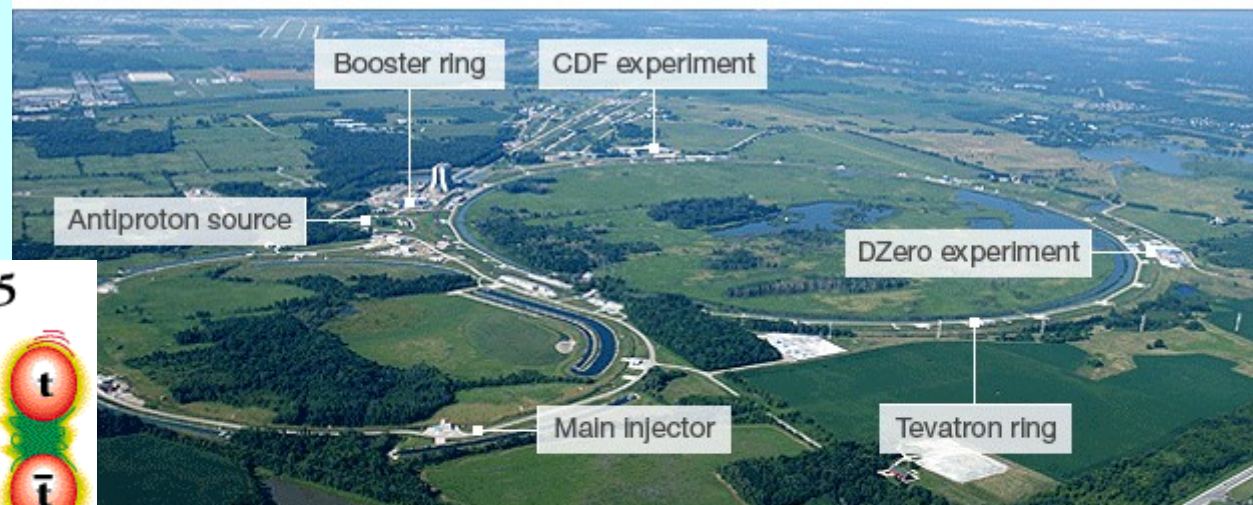
- Elektrodynamika kwantowa (QED) - elektromagnetyczne
- Chromodynamika kwantowa (QCD) - silne
- Zunifikowana teoria oddziaływań elektrostałych (Weinberg, Salam, Glashow)  
(elektromagnetyczne i słabe)
- Pole Higgsa (bozon Higgsa)

# Nowoczesna aparatura badawcza

## USA

- Tevatron w Fermilab niedaleko Chicago (1983-2011). Zderzenia proton-antyproton przy energii prawie 1 TeV rozpędzane w pierścieniu o długości ponad 6 km
- Wykrycie kwarka  $t$  (1995)

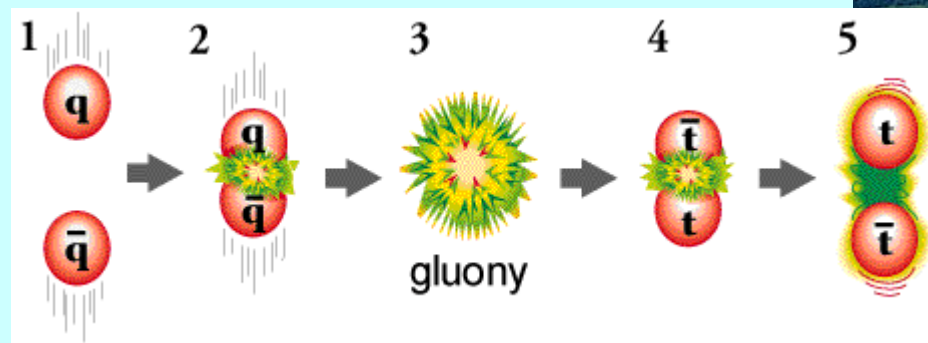
The Tevatron accelerator



tunnel of Tevatron ring



Source: Fermilab



# Nowoczesna aparatura badawcza

## USA

- Następca Tevatronu nazwany Superconducting Super Collider (SSC) o długości ponad 80 km budowany w Teksasie nie został ukończony (wstrzymano fundusze w 1993)

## Europa

- Akcelerator LHC (Large Hadron Collider) w Europejskim Ośrodku Badań Jądrowych CERN koło Genewy

# LHC



- Synchrotron w tunelu długości 27 km po akceleratorze LEP (Large Electron Positron Collider) zamkniętym w 2000 roku
- Uruchomiony w 2008 roku
- Zderzane są protony w przeciwbieżnych wiązках przy docelowej energii 14 TeV
- Odkrycie cząstki Higgsa

# LHC – Wielki Zderzacz Hadronów w CERN

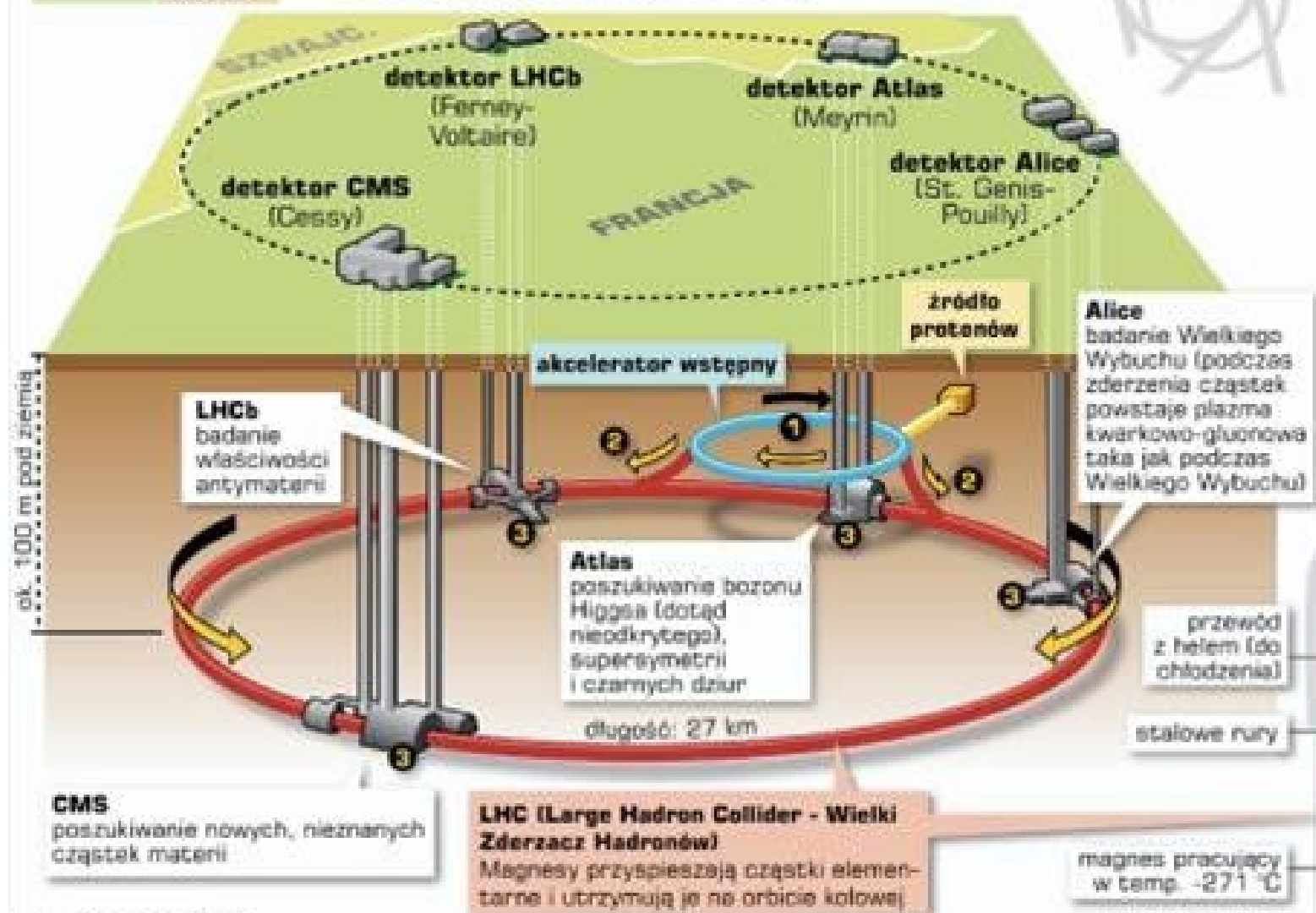


- CERN - Europejskie Laboratorium Fizyki Cząstek; powstało w 1954 r.
- 20 państw członkowskich, w tym Polska od 1991 r.
- Koszt LHC: ok. 3 mld euro
- Uruchomienie: 10 września 2008 r.



## Przebieg procesu

- 1 Jądra atomu wodoru (protony) i ołowiu (jony) zostają przyspieszone...
- 2 ... i skierowane w przeciwnych kierunkach w LHC, po czym przyspieszone dalej do prędkości równej 99,9% prędkości światła
- 3 W czterech miejscach dochodzi do zderzenia strumieni tych cząstek. Ok. 6 mln razy na sekundę ma miejsce bezpośrednie zderzenie dwóch cząstek i powstaje wyjątkowo wysoka temperatura. Fizycy oceniają zderzenie korzystając z czterech detektorów.

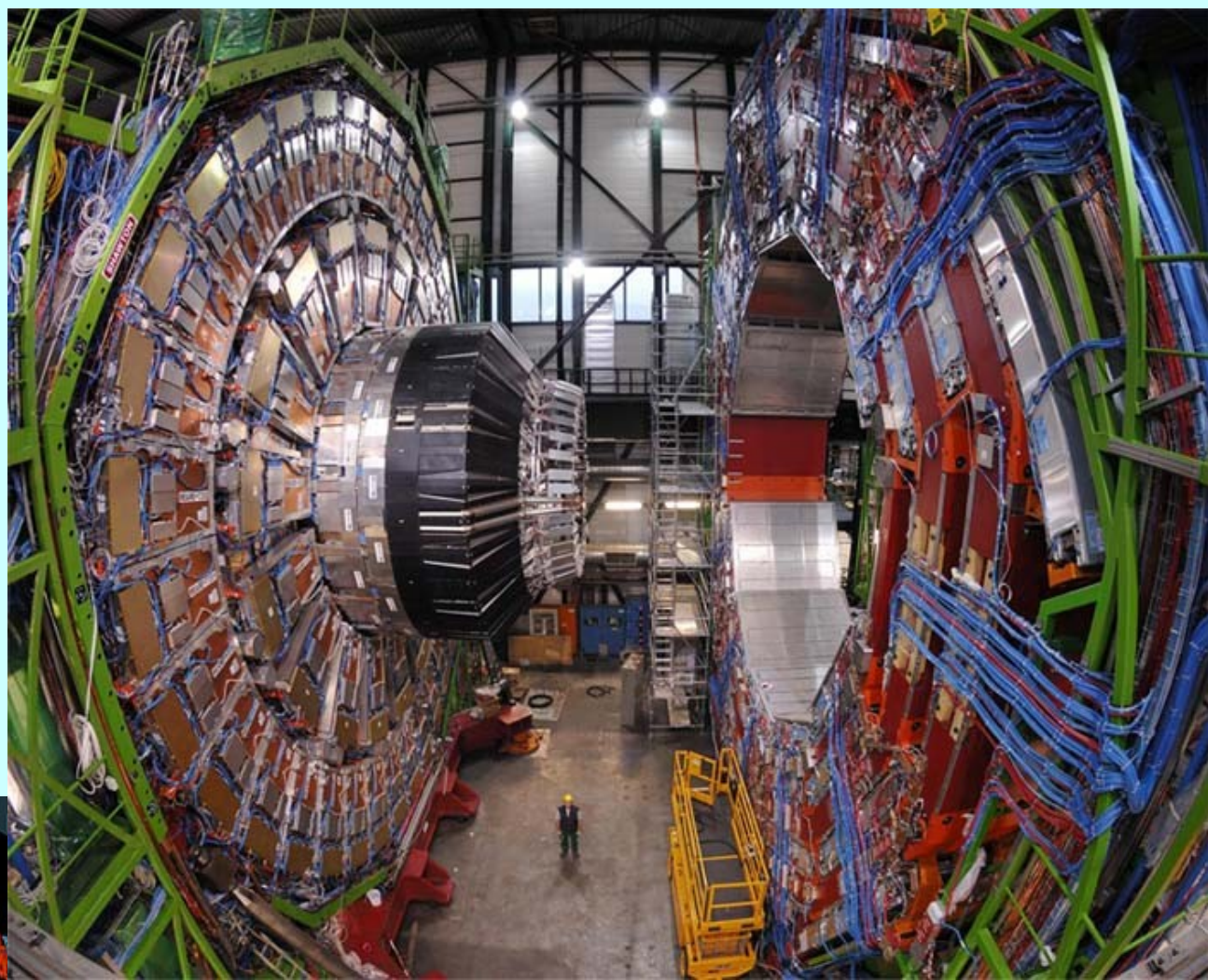


## Przekrój pierścienia



Źródło: CERN

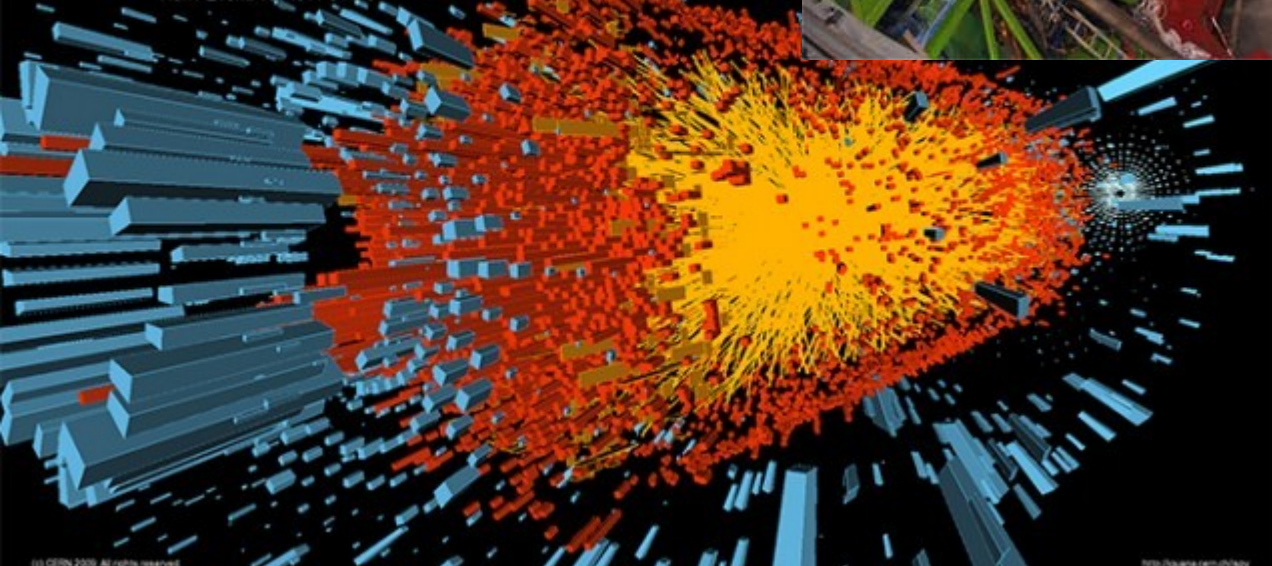
# Poszukiwania cząstki Higgsa



CMS Experiment at the LHC, CERN

Data recorded: 2010-Nov-08 10:22:07.828203 GMT(11:22:07 CEST)

Run / Event: 150431 / 541464

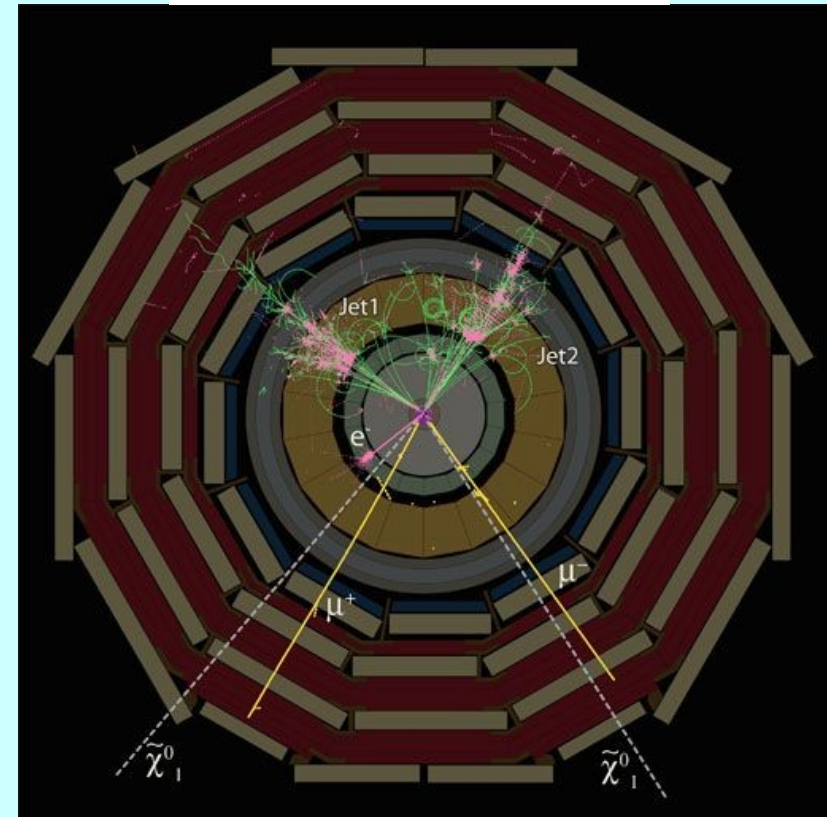
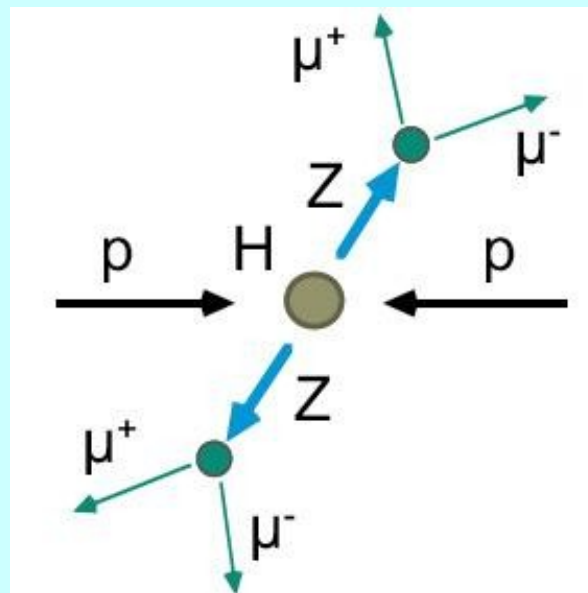
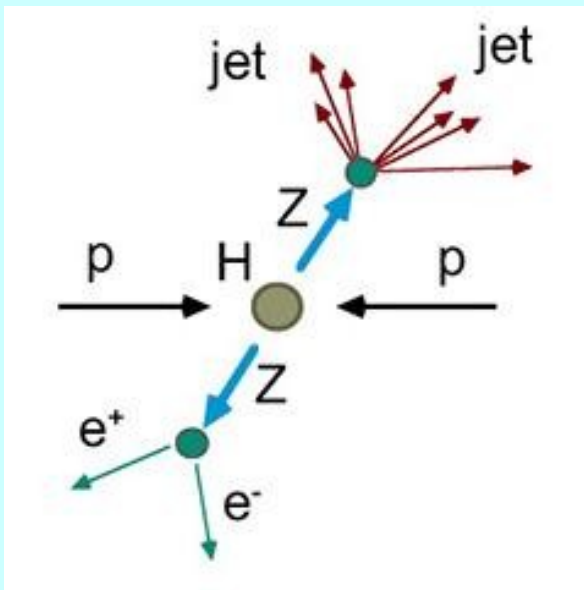
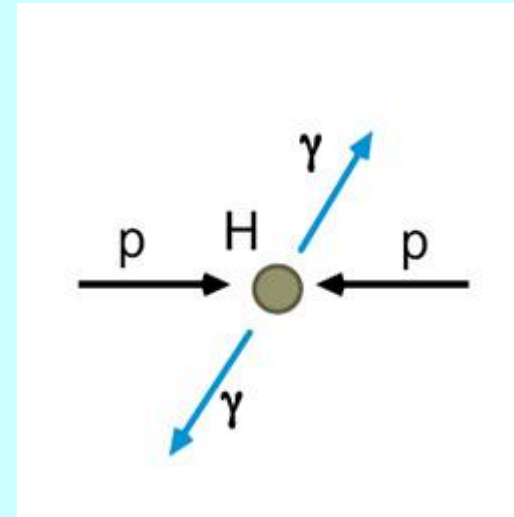


2012



# Poszukiwanie cząstki Higgsa przez CMS

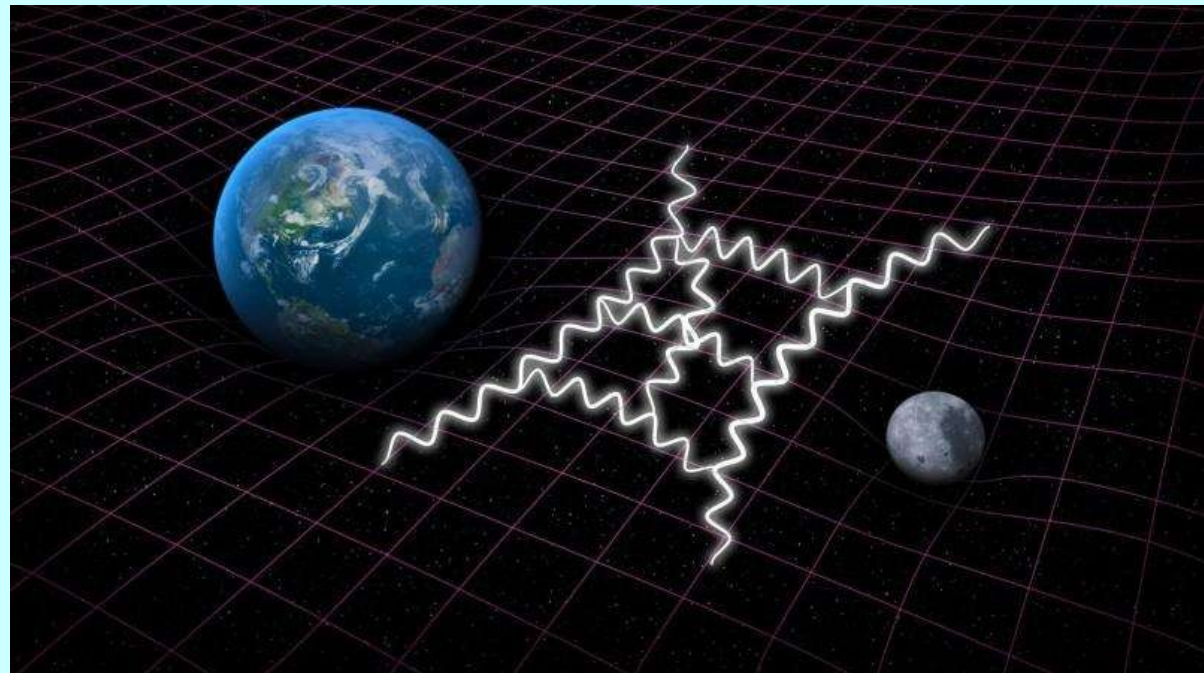
- CMS (Compact Muon Solenoid) - podstawowy detektor cząstek powstających w zderzeniach
- ECAL (Electromagnetic Calorimeter), HCAL - czułe urządzenia do mierzenia energii (masy)



# Co dalej?

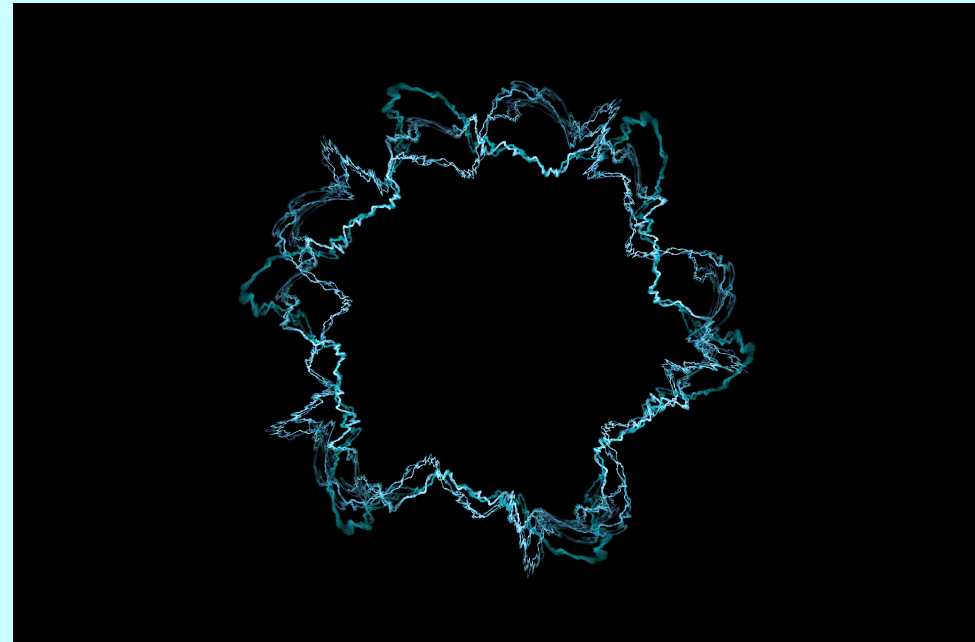
## Problemy Modelu Standardowego

- Zbyt duża liczba nieznanymi parametrów (ponad 20!)
- Czy jest tylko jedna cząstka Higgsa?
- Dlaczego są trzy generacje kwarków i leptonów?
- Brakuje grawitacji!
- Z czego zbudowana jest ciemna materia?
- Co to jest ciemna energia?



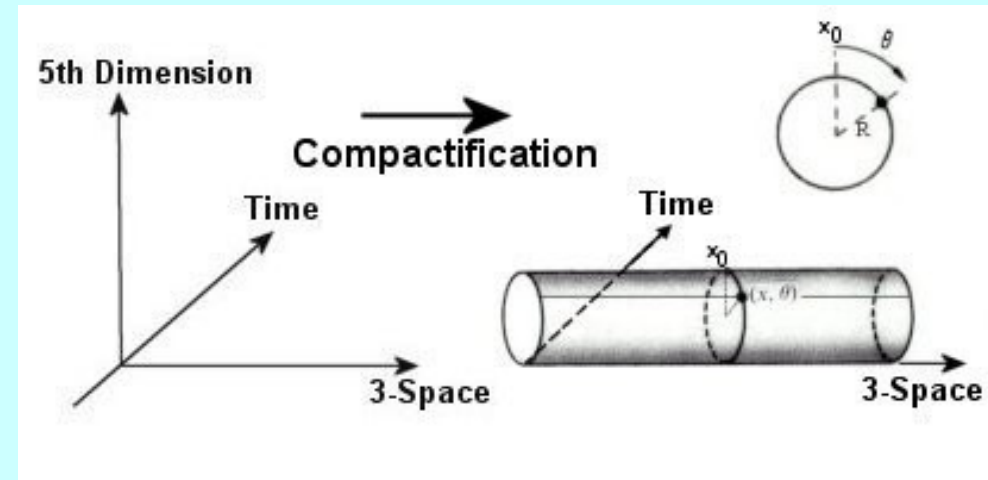
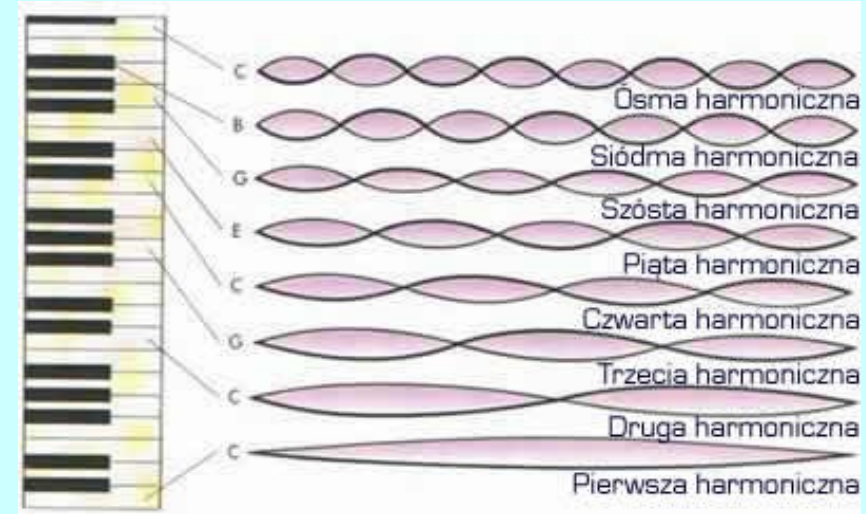
# Poza Model Standardowy

- GUT (Grand Unified Theory) - połączyć oddziaływania elektrosłabe i silne w jednym opisie
- SUSY (Supersymetryczna Teoria Pola)
- Teoria strun - łączy grawitację z pozostałymi oddziaływaniami, ale ... w wielowymiarowej przestrzeni
- Problemy z kwantowym opisem grawitacji

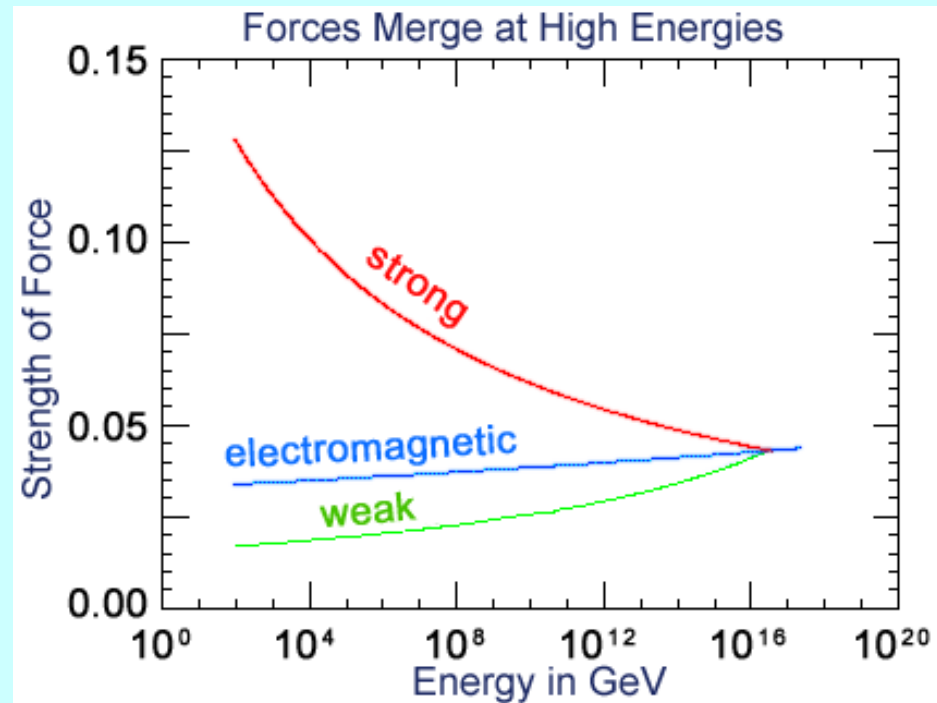


# Teoria strun

- Drgające struny w 10-wymiarowej przestrzeni, w której 6 wymiarów zostało zredukowanych do wymiaru Plancka  $10^{-35}$  m, 20 rządów wielkości mniejszej niż rozmiary protonu.
- Własności przestrzeni w zredukowanych wymiarach wpływają na cztery pozostałe określając cechy kwantowych teorii pola (np. masy cząstek, ilość generacji leptonów!)



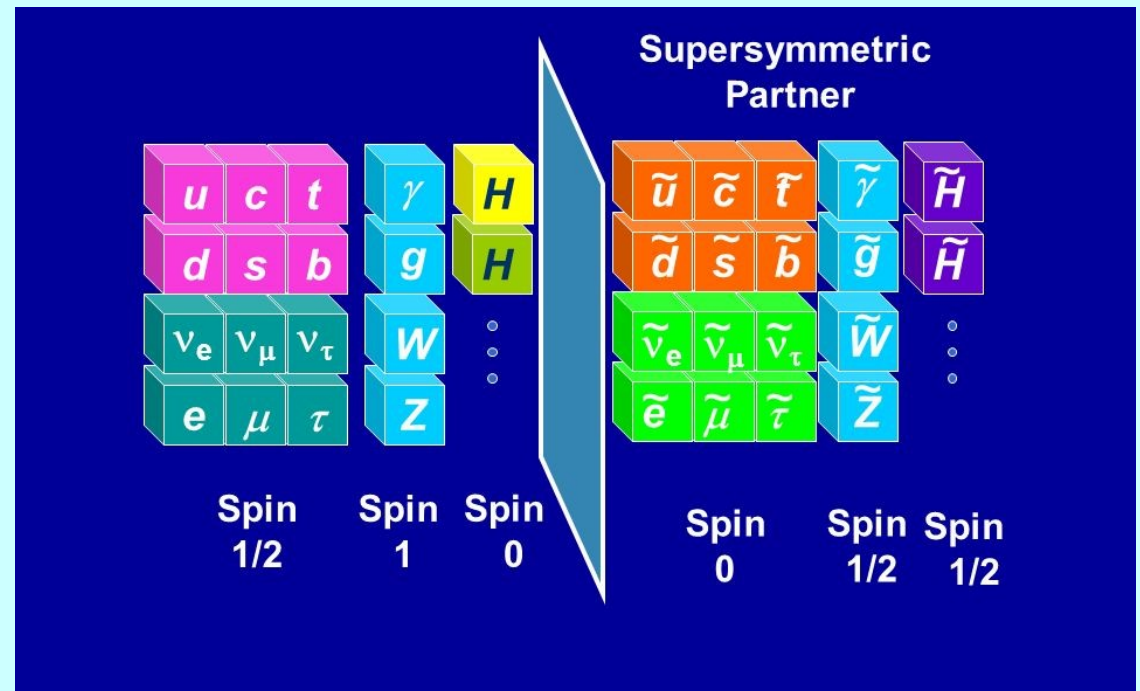
# Teoria Wielkiej Unifikacji



- Przy energiach rzędu  $10^{16}$  GeV następuje unifikacja oddziaływań elektrosłabych i silnych
- Przy jeszcze większych energiach unifikuje się z nimi także oddziaływanie grawitacyjne

# Supersymetria

- Symetria wiążąca fermiony (cząstki o spinie połówkowym) z bozonami (cząstkami o spinie całkowitym)
- Każda cząstka ma swojego supersymetrycznego partnera,  
kwark (spin  $\frac{1}{2}$ )  $\longleftrightarrow$  skwark (spin 0)  
foton (spin 1)  $\longleftrightarrow$  fotino (spin  $\frac{1}{2}$ )
- Cząstek takich nie zaobserwowano, ale mogą być składnikami ciemnej materii



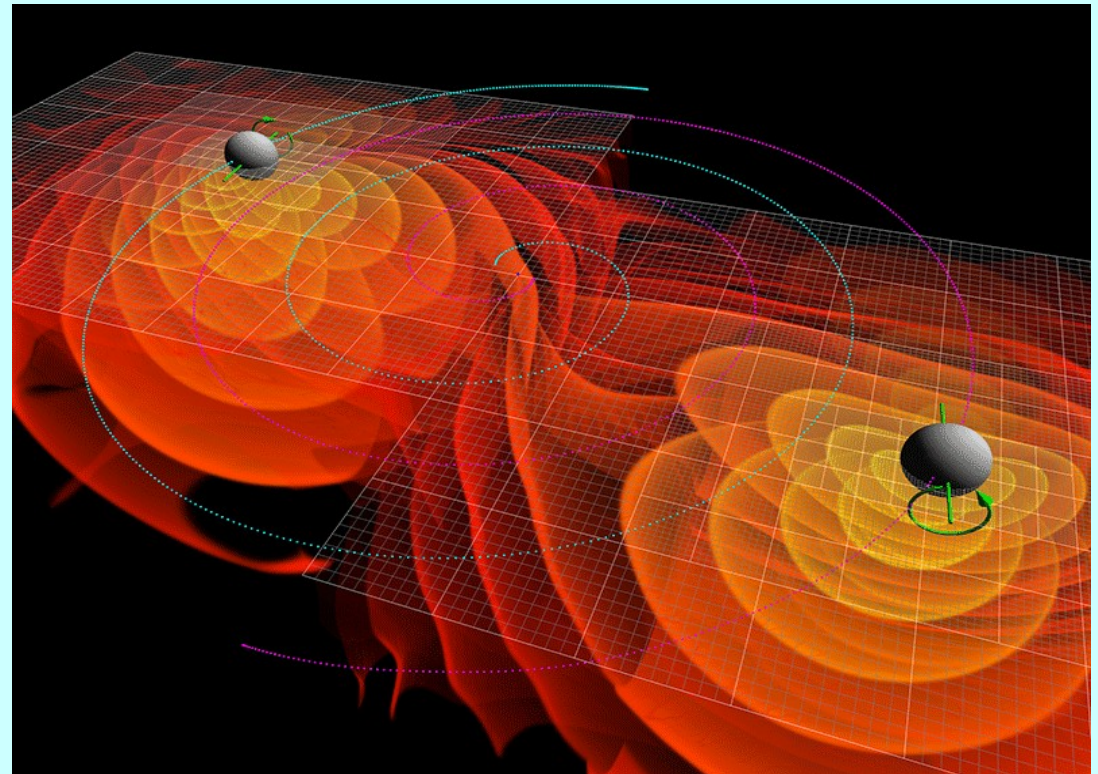


*Fale grawitacyjne.*

*Nowe okno na Wszechświat*

# Problemy z grawitacją

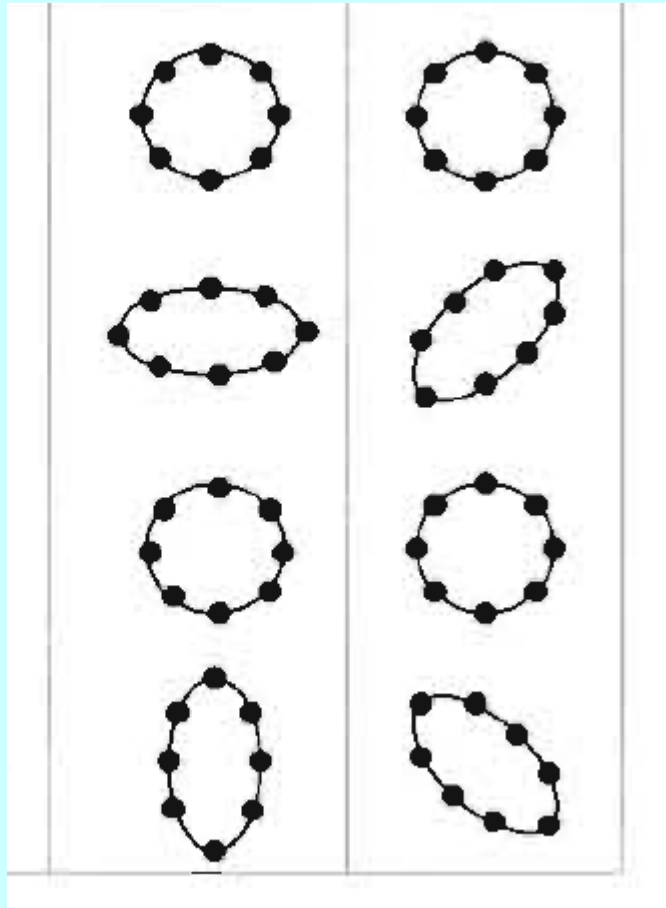
- Fale grawitacyjne poszukiwane od 100 lat!
- Postulowane przez A. Einsteina w roku 1916
- Pierwsza obserwacja 14 września 2015
- Ogłoszono ten fakt 11 lutego 2016



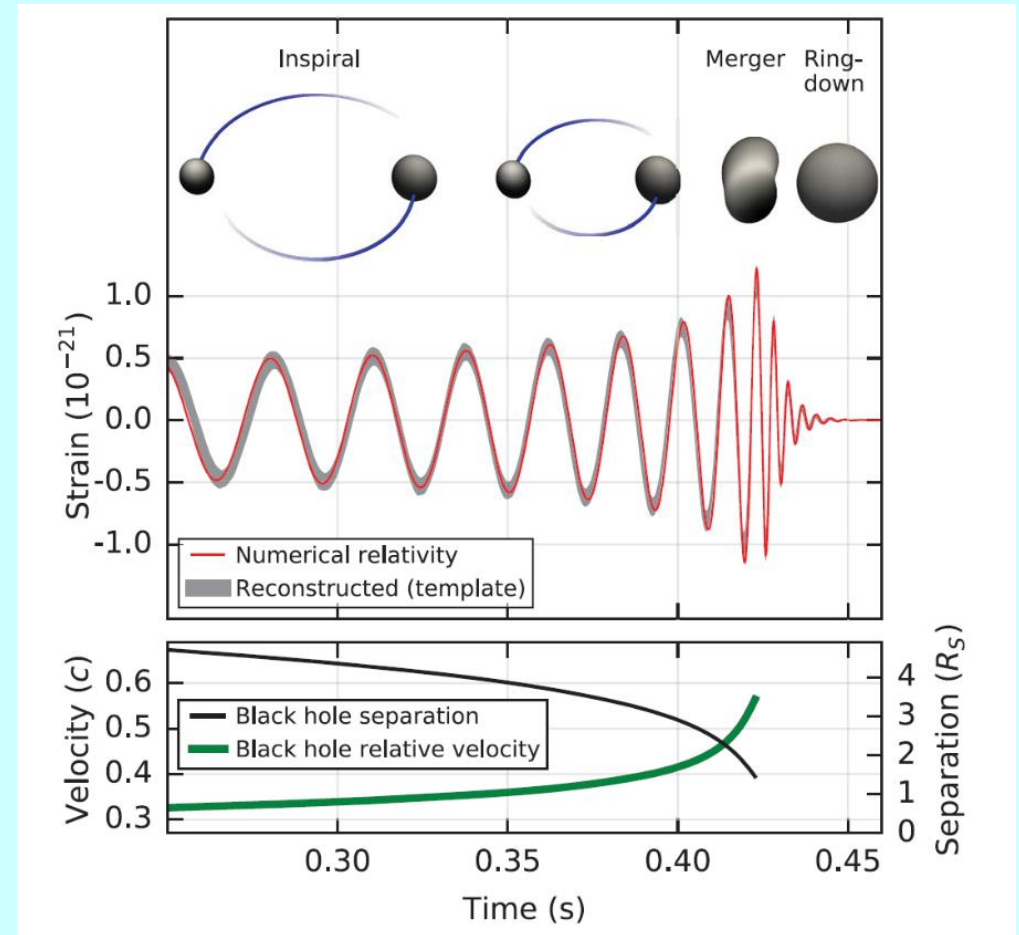
- Fale grawitacyjne to zaburzenia czasoprzestrzeni pochodzące od najbardziej gwałtownych zjawisk we Wszechświecie - np. **zderzenia** dwóch czarnych dziur



# Fale grawitacyjne



Oddziaływanie fali grawitacyjnej na gumkę



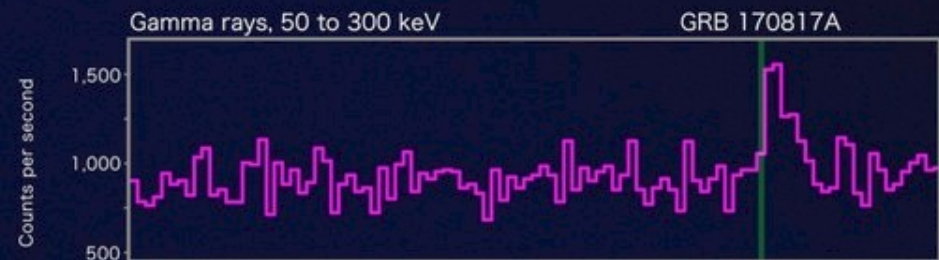
Obliczony sygnał grawitacyjny dla zbliżania się i zderzenia czarnych dziur

# Zderzenie gwiazd neutronowych

## GRB (Gamma Ray Burst)

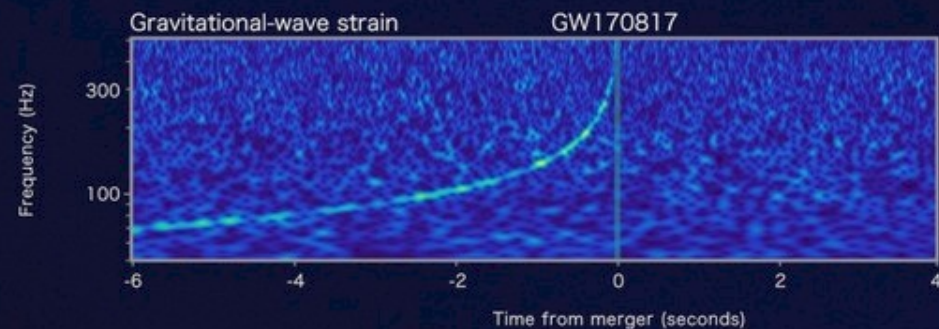
### Fermi

Reported 16 seconds after detection



### LIGO-Virgo

Reported 27 minutes after detection



### INTEGRAL

Reported 66 minutes after detection

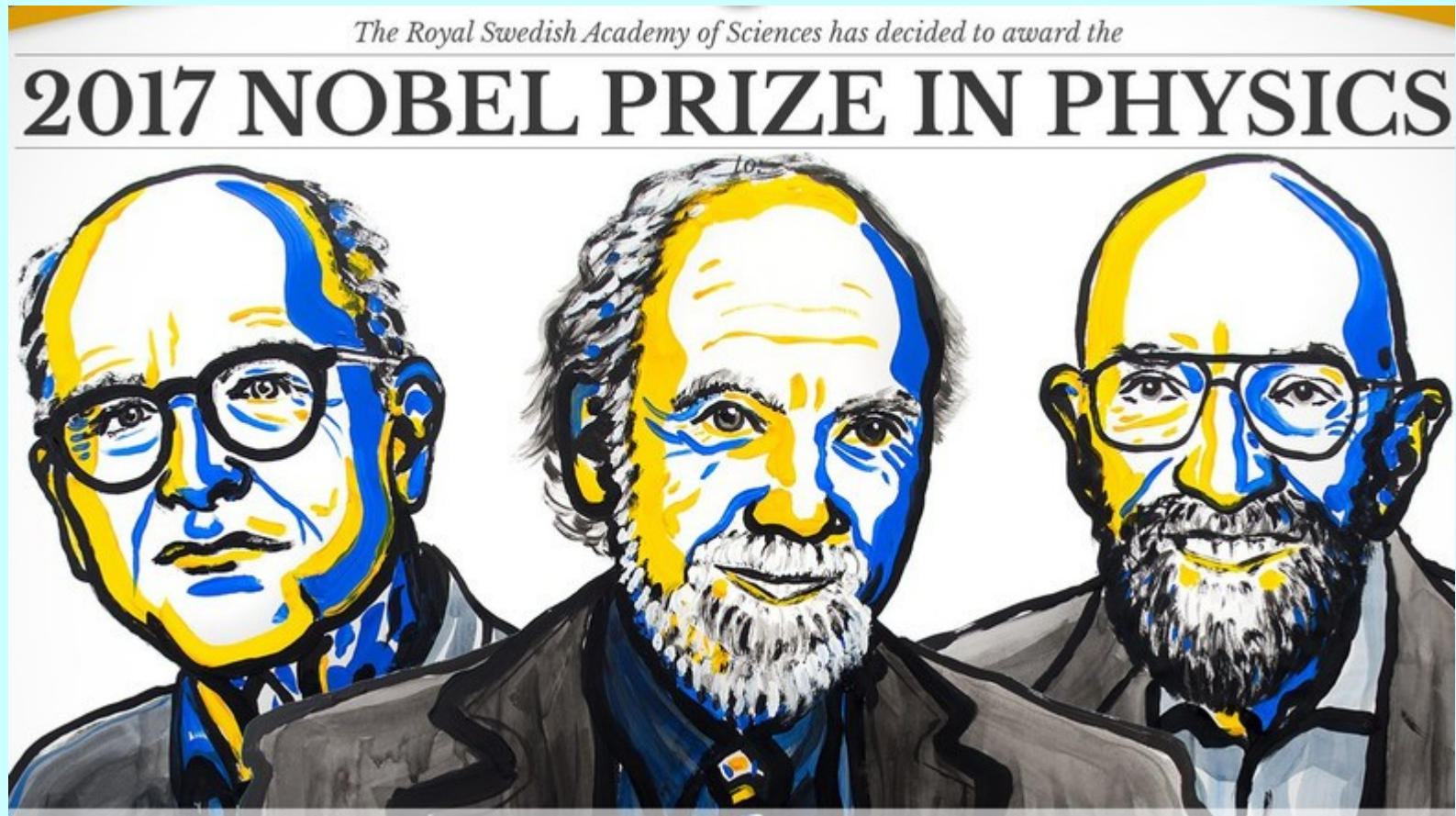


# Interferometry fal grawitacyjnych



LIGO (Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory) - dwa bliźniacze obiekty w Hanford w stanie Waszyngton i w Livingston w stanie Luizjana

# Nagroda Nobla 2017



Reiner Weiss

MIT

Barry C. Barish

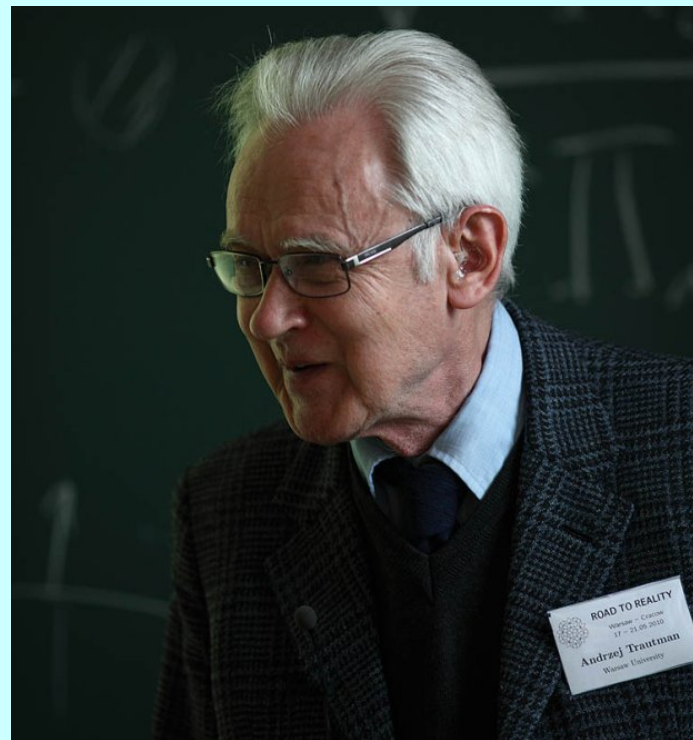
Cal Tech

Kip S. Thorne

Cornell Univ.

# Polacy i fale grawitacyjne

- W 1958 wygłosił w Londynie cykl wykładów na temat ogólnej teorii względności, które ugruntowały istnienie fal grawitacyjnych
- Prof. A. Trautman jako pierwszy podał rozwiązanie pełnego równania Einsteina w postaci rozchodzącej się fali grawitacyjnej
- Prof. A. Królak kieruje polską grupą badawczą Virgo-Polgrav, która współpracuje z grupami francuską i włoską skupioną wokół interferometru Virgo, niedaleko Pizy we Włoszech



# Projekt LIGO

- LIGO rozpoczęło swoją działalność w 2002 roku po 6 latach budowy i zainwestowaniu 365 mln \$
- Jest kierowane przez zespoły naukowców z CalTechu i MIT
- Współpraca międzynarodowa obejmuje obserwatorium fal grawitacyjnych VIRGO we Włoszech
- Możliwości rejestracji sygnału zostały znacząco zwiększone w połowie 2015 roku

# Pytania kontrolne

1. Na Model Standardowy składają się cząstki budujące Wszechświat i opis oddziaływań pomiędzy nimi. Jakie są cztery fundamentalne oddziaływania w przyrodzie i które z nich udało się zunifikować?
2. Na czym polegało doświadczenie Rutherforda i jaki wniosek fizycy wyciągnęli z jego wyników?
3. Czy prawdą jest, że neutrony zostały odkryte przez J. J. Thompsona pod koniec XIX wieku?
4. Gdzie znajduje się najnowocześniejszy w Polsce ośrodek protonoterapii raka wykorzystujący nowoczesne cyklotrony do precyzyjnego niszczenia tkanek rakowych?
5. Jakie cząstki są wykorzystywane w zderzeniach w głównym akceleratorze o nazwie Tevatron w ośrodku Fermilab w USA?
6. Wymienić co najmniej trzy metody (przrzędy) służące do detekcji cząstek elementarnych.
7. Jakim najważniejszym odkryciem może pochwalić się Tevatron z ośrodka Fermilab w USA?
8. Ile mamy rodzajów neutrin? Wymienić co najmniej dwa z nich.
9. Czy teoria oddziaływań silnych Yukawy wykorzystywała miony jako nośniki oddziaływań?
10. Z jakich kwarków składa się neutron?
11. Cząstka  $K^+$  ma budowę  $u\bar{s}$ . Czy zaliczamy ją do mezonów?
12. Jak nazywa się kwantowa teoria pola opisująca oddziaływania silne pomiędzy kwarkami?
13. Jaki symbol nadano obojętnemu elektrycznie nośnikowi oddziaływań słabych?
14. Jakie są dwa główne kanały rozpadu cząstki Higgsa obserwowane w LHC?
15. Czy Large Hadron Collider (LHC) znajduje się w Brookhaven niedaleko Nowego Jorku?
16. Kto i kiedy jako pierwszy przewidział istnienie fal grawitacyjnych?
17. Jakie zjawisko astrofizyczne było źródłem obu dotychczas zarejestrowanych przez detektory zjawisk przejścia fali grawitacyjnej
18. Czy to prawda, że niewielkie modyfikacje akceleratora LHC pozwolą w najbliższej przyszłości na osiągnięcie energii Teorii Wielkiej Unifikacji?
19. Czy to prawda, że niewielkie modyfikacje detektorów fal grawitacyjnych pozwolą w najbliższej przyszłości na zarejestrowanie fali grawitacyjnej powstającej w wyniku zderzenia i połączenia się dwóch gwiazd neutronowych?
20. Czy Nagrodę Nobla z fizyki w 2017 roku przyznano za odkrycie bozonu Higgsa?