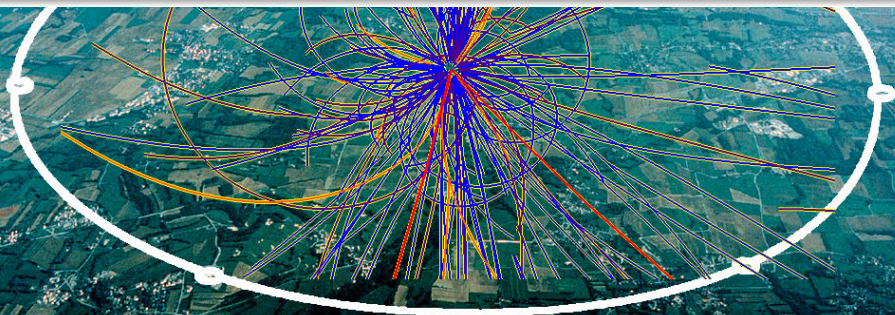


# Świat okiem fizyka cząstek (1)

## Cząstki i ich oddziaływania

Aleksander Filip Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych IFD



- 1 Fizyka końca XIX wieku
- 2 Odkrycia przełomu XIX i XX wieku
- 3 Granice stosowalności fizyki klasycznej
- 4 Budowa materii
- 5 Model Standardowy
- 6 Wyniki eksperymentów przy LHC
- 7 Oscylacje neutrin
- 8 Ciemna materia

- 1 Fizyka końca XIX wieku
- 2 Odkrycia przełomu XIX i XX wieku
- 3 Granice stosowalności fizyki klasycznej
- 4 Budowa materii
- 5 Model Standardowy
- 6 Wyniki eksperymentów przy LHC
- 7 Oscylacje neutrin
- 8 Ciemna materia

## Fizyka klasyczna

Pod koniec XIX wieku fizyka wydawało się, że badania podstawowe w dziedzinie fizyki zmierzają ku końcowi. Praktycznie wszystkie obserwowane zjawiska mogły być wytłumaczone w oparciu o niewielką liczbę **fundamentalnych praw**

- Zasadę względności Galileusza (1632)
- Prawa dynamiki Newtona (1687)
- Prawo powszechnego ciążenia (1687)
- Równania Maxwella (1865)
- Wzór na siłę Lorentza (1895)

które bardzo dobrze opisują otaczający nas świat !

## Budowa materii

W chemii, dzięki pracom Daltona i Avogadro, ugruntowało się pojęcie atomu jako najmniejszej, niepodzielnej drobin pierwiastka chemicznego. Było to jedyne sensowne wytłumaczenie odkrytego w XVIII wieku tzw. prawa stosunków stałych.

Doświadczalnym potwierdzeniem atomowej budowy materii były ruchy Browna (1827), choć wtedy nie potrafiono ich jeszcze opisać ilościowo.

Atomy były głównie domeną zainteresowania chemików

Fizycy mało się nimi interesowali, nie były im potrzebne (!)

## Światło

W XIX wieku przyjęta była powszechnie teoria Younga (1801), zgodnie z którą światło jest falą.

Dowodem była obserwacja zjawisk dyfrakcji i interferencji światła.

Istnienie fal elektromagnetycznych wynikało z równań Maxwella.

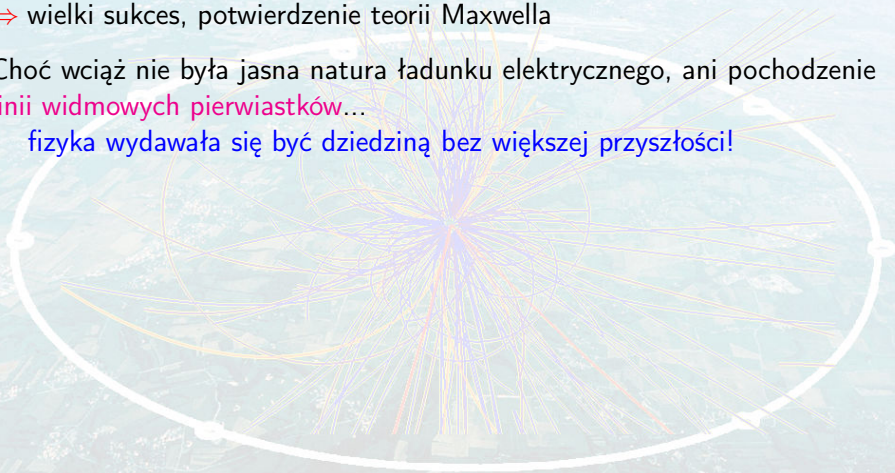
## Koniec XIX wieku

Odkrycie fal elektromagnetycznych przez Heinricha Hertza (1886)

⇒ wielki sukces, potwierdzenie teorii Maxwella

Choć wciąż nie była jasna natura ładunku elektrycznego, ani pochodzenie linii widmowych pierwiastków...

fizyka wydawała się być dziedziną bez większej przyszłości!



## Koniec XIX wieku

Odkrycie fal elektromagnetycznych przez Heinricha Hertza (1886)

⇒ wielki sukces, potwierdzenie teorii Maxwella

Choć wciąż nie była jasna natura ładunku elektrycznego, ani pochodzenie linii widmowych pierwiastków...

fizyka wydawała się być dziedziną bez większej przyszłości!

## Przełom XIX i XX wieku

Przyniósł szereg przełomowych, nieoczekiwanych odkryć

- odkrycie promieni X przez Wilhelma Röntgena w 1895,
- odkrycie promieniotwórczości przez Henri Becquerel'a w 1896,
- odkrycie elektronu przez Josepha Thomsona w 1897,
- badania efektu fotoelektrycznego (Lenard, 1902) ⇒ foton (Einstein)

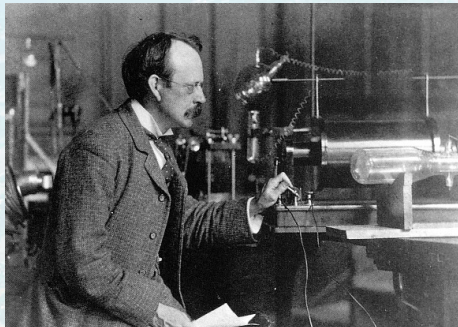
⇒ wszystko to wymagało zupełnie nowego spojrzenia na fizykę

# Cząstki i ich oddziaływania

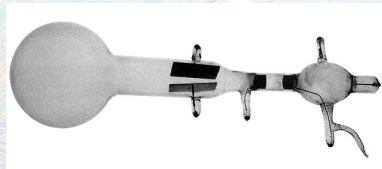
- 1 Fizyka końca XIX wieku
- 2 Odkrycia przełomu XIX i XX wieku**
- 3 Granice stosowalności fizyki klasycznej
- 4 Budowa materii
- 5 Model Standardowy
- 6 Wyniki eksperymentów przy LHC
- 7 Oscylacje neutrin
- 8 Ciemna materia



**Joseph Thomson** 1897



Thomson badał tzw. **promienie katodowe**



pokazał, że promienie te odchylają się w polu elektrycznym

Wyznaczył stosunek ładunku do masy elektronu:

$$\frac{e}{m} \approx 2 \cdot 10^{11} \frac{C}{kg}$$

Ostatecznie Robert Millikan wyznaczył ładunek i masę elektronu w 1909

## Problem:

Z równań Maxwella wynika, że prędkość światła

**nie zależy od układu odniesienia!**

Jest to sprzeczne z zasadami mechaniki klasycznej!

albo światło musiałoby się rozchodzić w ośrodku, eterze...

Doświadczenie potwierdziło słuszność równań Maxwella ! (eter nie istnieje)

## Problem:

Z równań Maxwella wynika, że prędkość światła

**nie zależy od układu odniesienia!**

Jest to sprzeczne z zasadami mechaniki klasycznej!

albo światło musiałoby się rozchodzić w ośrodku, eterze...

Doświadczenie potwierdziło słuszność równań Maxwella ! (eter nie istnieje)

W roku 1905 Einstein opublikował pracę "O elektrodynamice ciał w ruchu".

Zawarł w niej dwa postulaty:

- prawa fizyki są identyczne we wszystkich układach odniesienia (zasada względności - obowiązuje też w fizyce klasycznej!)
- prędkość światła w próżni,  $c$ , jest jednakowa we wszystkich układach odniesienia (uniwersalność prędkości światła)

Drugi postulat Einsteina oznacza, że **czas przestaje być uniwersalny!**

Zdarzenia równoczesne dla jednego obserwatora mogą nie być równoczesne dla innego! (względność równoczesności)

## Równoważność masy i energii

W teorii Einsteina wciąż ściśle obowiązuje **zasada zachowania energii** oraz **zasada zachowania pędu** (jak w fizyce klasycznej)  
Tylko definicja energii i pędu musi zostać zmieniona!



## Równoważność masy i energii

W teorii Einsteina wciąż ściśle obowiązuje **zasada zachowania energii** oraz **zasada zachowania pędu** (jak w fizyce klasycznej)  
Tylko definicja energii i pędu musi zostać zmieniona!

Zawsze zachowana jest energia całkowita układu,  
która uwzględnia **energie spoczynkową** związaną z masą cząstki:

$$E_0 = m c^2$$

## Równoważność masy i energii

W teorii Einsteina wciąż ściśle obowiązuje **zasada zachowania energii** oraz **zasada zachowania pędu** (jak w fizyce klasycznej)  
Tylko definicja energii i pędu musi zostać zmieniona!

Zawsze zachowana jest energia całkowita układu,  
która uwzględnia **energie spoczynkową** związaną z masą cząstki:

$$E_0 = m c^2$$

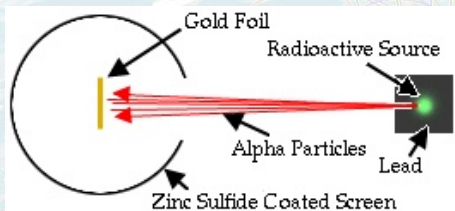
## Masa nie jest zachowana!

Cząstki (masa) **mogą być produkowane** (kosztem np. energii kinetycznej),  
mogą też się rozpadać, anihilować...

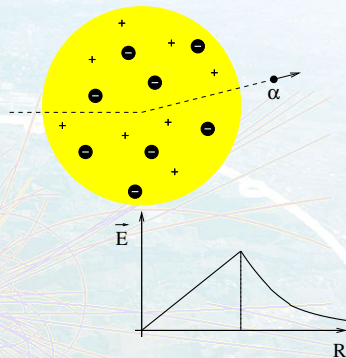
Powoduje to, że możliwe jest wiele procesów, które nie mają klasycznych odpowiedników...

## Doświadczenie Rutherforda

Rozpraszanie cząstek  $\alpha$  na cienkiej złotej folii



Obserwowano błyski wywoływane przez padające cząstki na ekranie scyntylacyjnym - ocena kąta rozproszenia

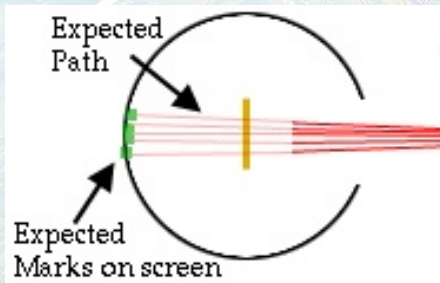


Model Thomsona:  
cała **objętość** atomu jednorodnie **naładowana dodatnio** ("ciasto"), a wewnątrz "pływają" **elektrony** ("rodzynki").

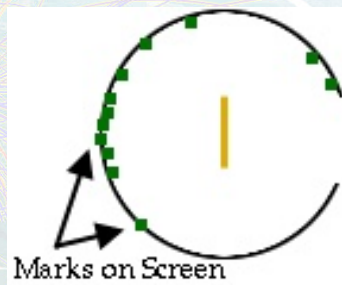
## Doświadczenie Rutherforda

Wyniki pomiarów przeprowadzonych przez H.Geigera i E.Marsdena (1909):

Oczekiwane

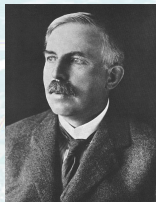


Uzyskane





## Model Rutherforda (1911)



Rutherford zaproponował  
jądrowy model atomu.

Cały dodatni ładunek atomu ( $10^{-10}$  m)  
skupiony jest w praktycznie **punktowym**  
( $10^{-14}$  m) **jądrze** otoczonym przez chmurę  
elektronów.

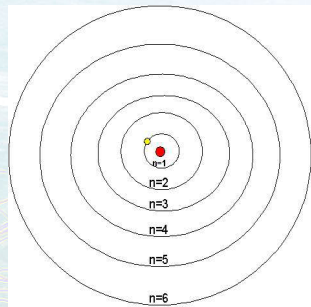


Cząstka  $\alpha$  zawsze czuje cały  
ładunek dodatni  $\Rightarrow$  duże  
kąty rozproszenia

## Atom Rutherforda

Praktycznie punktowe jądro (**dodatnie**)  
otoczone chmurą elektronów (**ujemnych**).

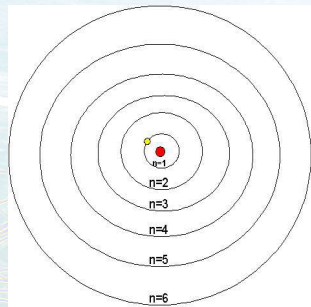
Biorąc pod uwagę tylko oddziaływanie  
elektrostatyczne, taki “planetarny” układ  
mógłby być stabilny.



## Atom Rutherforda

Praktycznie punktowe jądro (**dodatnie**)  
otoczone chmurą elektronów (**ujemnych**).

Biorąc pod uwagę tylko oddziaływanie  
elektrostatyczne, taki “planetarny” układ  
mógłby być stabilny.

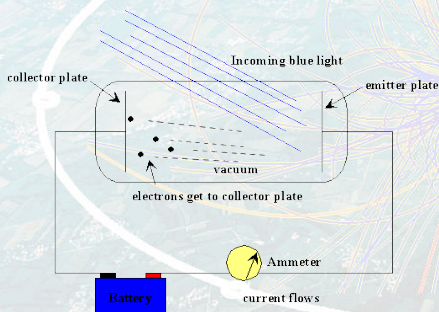


Ale ładunek poruszający się z przyspieszeniem **MUSI** generować falę  
elektromagnetyczną (**równania Maxwella**)  $\Rightarrow$  **wypromieniowywać energię**  
**Elektron powinien spaść na jądro...**

**Budowy atomu nie można było wytłumaczyć w oparciu o klasyczną fizykę!**  
Potrzebne było nowe spojrzenie...

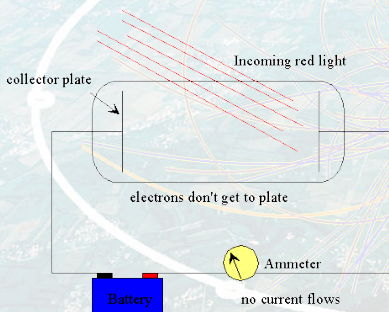
## Efekt fotoelektryczny

Odkryty przez Hertza w 1887  
W 1902 **Philipp Lenard** pokazał, że efekt fotoelektryczny obserwujemy tylko dla wybranych **długości fali** światła:



## Efekt fotoelektryczny

Odkryty przez Hertza w 1887  
W 1902 **Philipp Lenard** pokazał, że efekt fotoelektryczny obserwujemy tylko dla wybranych **długości fali** światła:



Efektu tego nie można było wytłumaczyć w oparciu o falową teorię światła!

## Efekt fotoelektryczny

W roku 1905, Albert Einstein wysunął hipotezę, że światło jest strumieniem niepodzielnych **kwantów** energii, które dziś nazywamy **fotonami**.

Energia fotonu:

$$E_{\gamma} = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

Aby wybić elektron z metalu energia padającego fotonu, musi być większa od tzw. **pracy wyjścia**  
⇒ zależność od długości fali światła

$$E_{\gamma}^{blue} > E_{\gamma}^{green} > E_{\gamma}^{red}$$

W 1923 Arthur Compton wykazał, że fotony niosą nie tylko **energię**, ale i **pęd** ⇒ zachowują się jak “zwykłe” **cząstki**



## Dualizm korpuskularno-falowy

Aby opisać wyniki eksperymentalne musimy przyjąć że:

- światło (każda fala elektromagnetyczna) to **strumień fotonów**
- rozchodzenie się fali (propagację fotonów) opisują **równania Maxwella**  
to nie są “klasyczne” kulki opisane dynamiką Newtona !!!
- **prawdopodobieństwo detekcji** fotonu (obserwowane natężenie światła) jest proporcjonalne do **kwadratu amplitudy fali** elektromagnetycznej

$$p(\vec{r}, t) \sim I(\vec{r}, t) \sim \mathcal{E}^2(\vec{r}, t)$$

⇒ foton jest cząstką, ale jego ruch opisany jest równaniem falowym...

## Opis cząstkowy Einstein

Foton fali o częstotliwości  $\nu$  i długości fali  $\lambda$ :  $\lambda \cdot \nu = c$

$$p c = E = h \nu = \frac{h c}{\lambda}$$





## Opis cząstkowy Einstein

Foton fali o częstotliwości  $\nu$  i długości fali  $\lambda$ :  $\lambda \cdot \nu = c$

$$p c = E = h \nu = \frac{h c}{\lambda}$$

## Opis falowy

Harmoniczna fala płaska: Maxwell

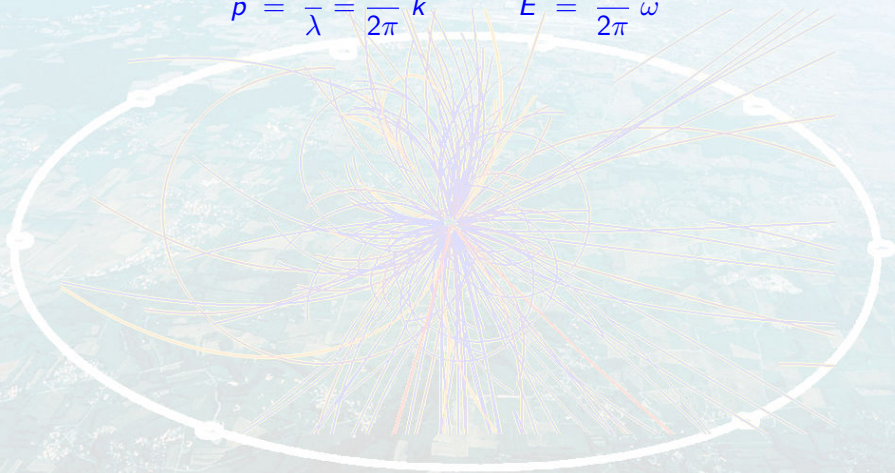
$$\vec{\mathcal{E}}(\vec{r}, t) = \vec{\mathcal{E}}_0 \cos(\vec{k}\vec{r} - \omega t)$$

gdzie:

$$\omega = 2\pi\nu, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Dla fotonu możemy więc zapisać:

$$p = \frac{h}{\lambda} = \frac{h}{2\pi} k \quad E = \frac{h}{2\pi} \omega$$



# Hipoteza de Broigla

Dla fotonu możemy więc zapisać:

$$p = \frac{h}{\lambda} = \frac{h}{2\pi} k \quad E = \frac{h}{2\pi} \omega$$

**Louis de Broigle** 1923/1924

doszedł do wniosku, że falowe własności przynależą **wszystkim cząstkom**.  
Zależność parametrów fali  $\vec{k}$  i  $\omega$  od energii  $E$  i pędu  $\vec{p}$  powinna być taka sama jak dla fotonu (!)

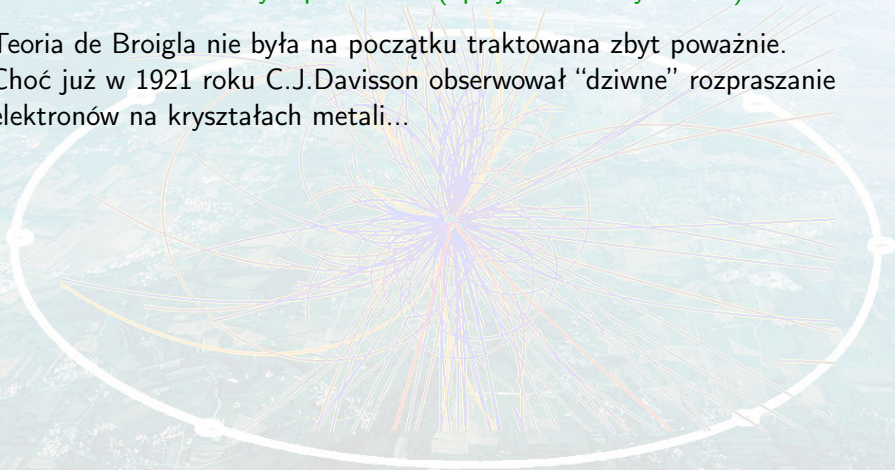
$$\vec{p} = \hbar \vec{k} \quad E = \hbar \omega$$

gdzie:  $\hbar = \frac{h}{2\pi}$

# Hipoteza de Broigla

Luis de Broglie przedstawił swoją teorię w ramach rozprawy doktorskiej z fizyki teoretycznej. W fizyce teoretycznej nie ma wymagania, żeby przedstawiana teoria była prawdziwa (opisywała rzeczywistość)...

Teoria de Broigla nie była na początku traktowana zbyt poważnie. Choć już w 1921 roku C.J.Davisson obserwował “dziwne” rozpraszanie elektronów na kryształach metali...



# Hipoteza de Broigla

Luis de Broglie przedstawił swoją teorię w ramach rozprawy doktorskiej z fizyki teoretycznej. W fizyce teoretycznej nie ma wymagania, żeby przedstawiana teoria była prawdziwa (opisywała rzeczywistość)...

Teoria de Broigla nie była na początku traktowana zbyt poważnie. Choć już w 1921 roku C.J.Davisson obserwował “dziwne” rozpraszanie elektronów na kryształach metali...

## Dlaczego trudno dostrzec fale materii?

Dla nierelatywistycznego elektronu rozpędzonego napięciem  $U$ :  $E = \frac{p^2}{2m}$

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2m_e E}} = \frac{h}{\sqrt{2m_e eU}}$$

# Hipoteza de Broigla

Luis de Broglie przedstawił swoją teorię w ramach rozprawy doktorskiej z fizyki teoretycznej. W fizyce teoretycznej nie ma wymagania, żeby przedstawiana teoria była prawdziwa (opisywała rzeczywistość)...

Teoria de Broigla nie była na początku traktowana zbyt poważnie. Choć już w 1921 roku C.J.Davisson obserwował “dziwne” rozpraszanie elektronów na kryształach metali...

## Dlaczego trudno dostrzec fale materii?

Dla nierelatywistycznego elektronu rozpędzonego napięciem  $U$ :  $E = \frac{p^2}{2m}$

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2m_e E}} = \frac{h}{\sqrt{2m_e eU}}$$

$$\lambda \approx \frac{12.3 \text{ \AA} \sqrt{V}}{\sqrt{U}}$$

# Hipoteza de Broigla

Luis de Broglie przedstawił swoją teorię w ramach rozprawy doktorskiej z fizyki teoretycznej. W fizyce teoretycznej nie ma wymagania, żeby przedstawiana teoria była prawdziwa (opisywała rzeczywistość)...

Teoria de Broigla nie była na początku traktowana zbyt poważnie. Choć już w 1921 roku C.J.Davisson obserwował “dziwne” rozpraszanie elektronów na kryształach metali...

## Dlaczego trudno dostrzec fale materii?

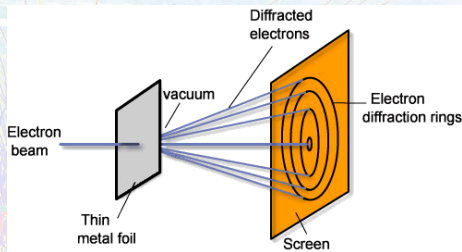
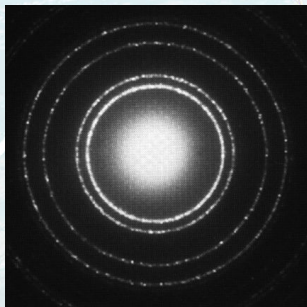
Dla nierelatywistycznego elektronu rozpędzonego napięciem  $U$ :  $E = \frac{p^2}{2m}$

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2m_e E}} = \frac{h}{\sqrt{2m_e eU}}$$

$$\lambda \approx \frac{12.3 \text{ \AA} \sqrt{V}}{\sqrt{U}}$$

Elektron przyspieszony napięciem 100 V:  $\lambda_e \approx 1.2 \text{ \AA}$   $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$   
 tyle samo co dla promieniowania rentgenowskiego przy napięciu 10 kV

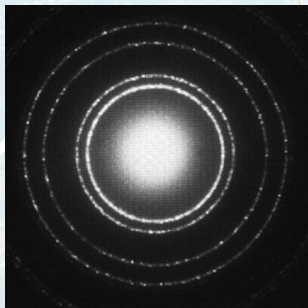
W 1927 roku G.P.Thomson (syn J.J.Thomsona) zaobserwował dyfrakcję “energetycznych” elektronów przy przejściu przez cienką metalową folię



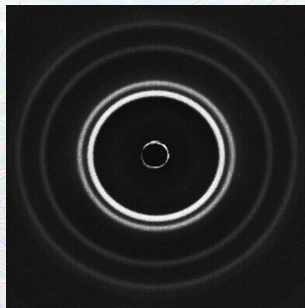
Elektrony o  $E_e = 600 \text{ eV}$   
 $\lambda_e \approx 0.5 \text{ \AA}$   
przechodzące przez folię aluminiową



W 1927 roku G.P.Thomson (syn J.J.Thomsona) zaobserwował dyfrakcję “energetycznych” elektronów przy przejściu przez cienką metalową folię



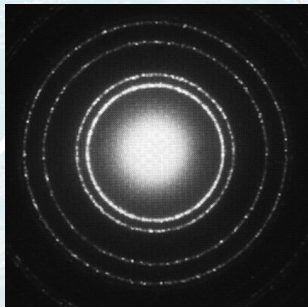
Elektrony o  $E_e = 600 \text{ eV}$   
 $\lambda_e \approx 0.5 \text{ \AA}$   
przechodzące przez folię aluminiową



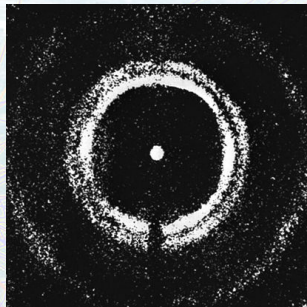
Obraz uzyskany dla promieni  
rentgenowskich  
 $\lambda_\gamma \approx 0.7 \text{ \AA}$

Zgodny rozkład maksimum dyfrakcyjnych  $\Rightarrow$  potwierdzenie opisu falowego

W 1927 roku G.P.Thomson (syn J.J.Thomsona) zaobserwował dyfrakcję “energetycznych” elektronów przy przejściu przez cienką metalową folię



Elektrony o  $E_e = 600$  eV  
 $\lambda_e \approx 0.5$  Å  
przechodzące przez folię aluminiową



Obraz uzyskany dla powolnych  
neutronów (0.06 eV) na miedzi  
 $\lambda_n \approx 1.2$  Å

Zgodny rozkład maksimów dyfrakcyjnych  $\Rightarrow$  potwierdzenie opisu falowego

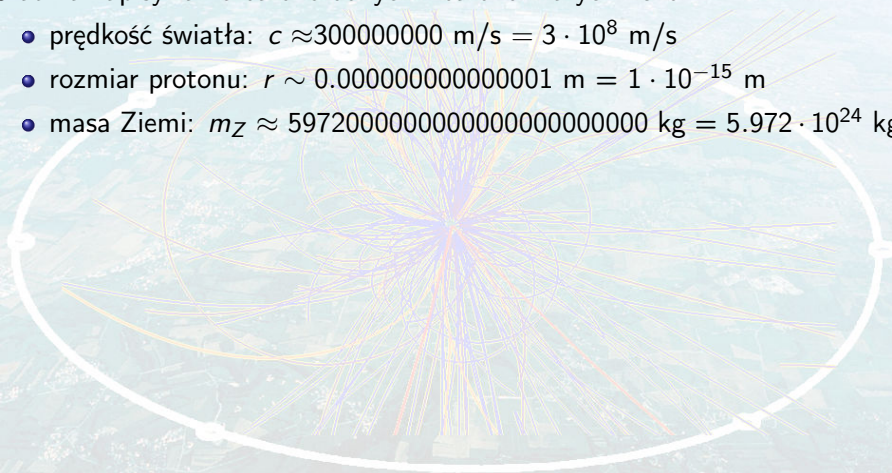
# Cząstki i ich oddziaływania

- 1 Fizyka końca XIX wieku
- 2 Odkrycia przełomu XIX i XX wieku
- 3 Granice stosowalności fizyki klasycznej**
- 4 Budowa materii
- 5 Model Standardowy
- 6 Wyniki eksperymentów przy LHC
- 7 Oscylacje neutrin
- 8 Ciemna materia

## Notacja naukowa

Ułatwia zapisywanie bardzo dużych i bardzo małych liczb:

- prędkość światła:  $c \approx 300000000 \text{ m/s} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
- rozmiar protonu:  $r \sim 0.0000000000000001 \text{ m} = 1 \cdot 10^{-15} \text{ m}$
- masa Ziemi:  $m_Z \approx 5972000000000000000000000 \text{ kg} = 5.972 \cdot 10^{24} \text{ kg}$



## Notacja naukowa

Ułatwia zapisywanie bardzo dużych i bardzo małych liczb:

- prędkość światła:  $c \approx 300000000 \text{ m/s} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
- rozmiar protonu:  $r \sim 0.000000000000001 \text{ m} = 1 \cdot 10^{-15} \text{ m}$
- masa Ziemi:  $m_Z \approx 5972000000000000000000000 \text{ kg} = 5.972 \cdot 10^{24} \text{ kg}$

Wykładnik potęgi 10 określa nam "rzęd wielkości"  
Różnica o rząd wielkości to dużo!



← ×10 ⇒



## Notacja naukowa

Ułatwia zapisywanie bardzo dużych i bardzo małych liczb:

- prędkość światła:  $c \approx 300000000 \text{ m/s} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
- rozmiar protonu:  $r \sim 0.0000000000000001 \text{ m} = 1 \cdot 10^{-15} \text{ m}$
- masa Ziemi:  $m_Z \approx 5972000000000000000000000 \text{ kg} = 5.972 \cdot 10^{24} \text{ kg}$

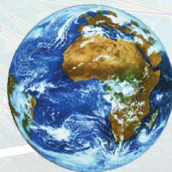
Wykładnik potęgi 10 określa nam “**rzęd wielkości**”

Różnica o rząd wielkości to dużo!

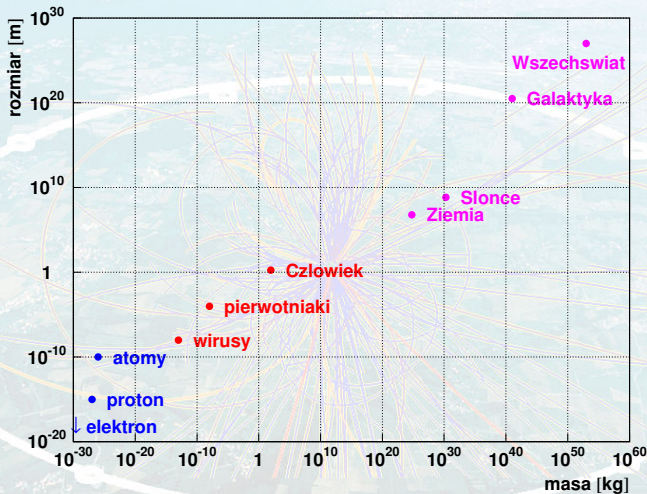
2-3 rzędy to bardzo dużo, **10 rzędów to “przepaść”**



←  $\times 10^{10}$  ⇒



Fizyka stara się opisać procesy zachodzące na bardzo różnych skalach!

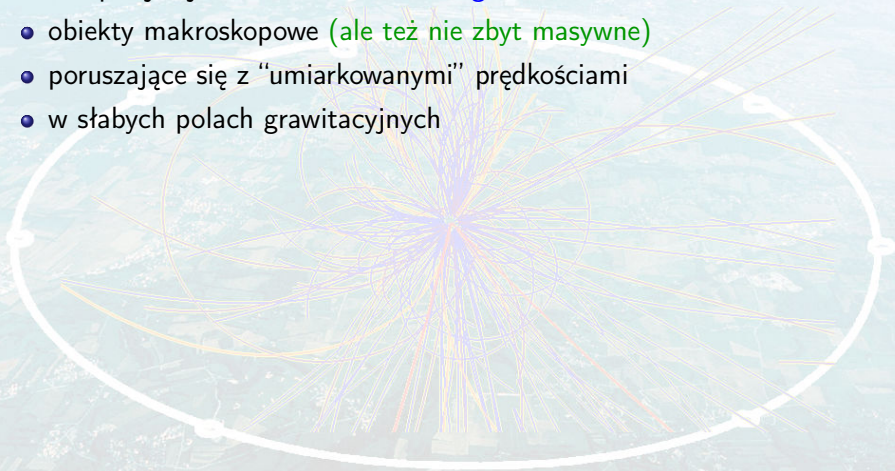


Trudno oczekiwać, żeby ten sam formalizm opisywał wszystkie zjawiska...

## Fizyka klasyczna

Dobrze opisuje zjawiska “dnia codziennego”:

- obiekty makroskopowe (ale też nie zbyt masywne)
- poruszające się z “umiarkowanymi” prędkościami
- w słabych polach grawitacyjnych





## Fizyka klasyczna

Dobrze opisuje zjawiska “dnia codziennego”:

- obiekty makroskopowe (ale też nie zbyt masywne)
- poruszające się z “umiarkowanymi” prędkościami
- w słabych polach grawitacyjnych

## Szczególna Teoria Względności

Wkracza wtedy, gdy prędkości względne stają się porównywalne z prędkością światła  $c \equiv 299\,792\,458\text{ m/s} \approx 300\,000\text{ km/s}$ .

Fizyka współczesna bardzo często wymaga stosowania podejścia relatywistycznego. Nie tylko w przypadku dużych prędkości...

Bez uwzględnienia efektów relatywistycznych nie jest także możliwe pełne zrozumienie wielu “codziennych” zjawisk, np. oddziaływań magnetycznych!

# Granice stosowalności fizyki klasycznej

Odejście od zasad fizyki klasycznej także w przypadku obiektów mikroskopowych. **Ale nie rozmiar jest najistotniejszy!**

## Mechanika kwantowa

Wkracza gdy badane zjawiska zachodzą na skalach porównywalnych ze stałą Plancka:

$$h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

Skala zjawiska może dotyczyć energii i czasu, pędu i długości, momentu pędu

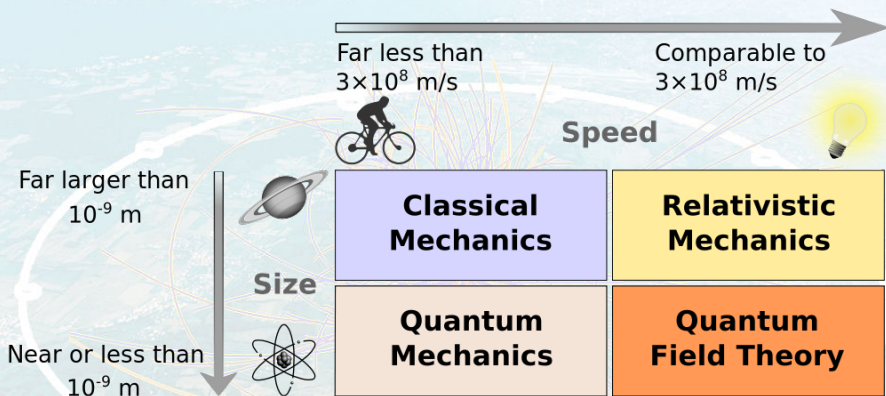
**Stała Plancka jest niesłychanie mała.**

Fizyka kwantowa istotna dopiero na poziomie subatomowym.

$$h \sim m_p \cdot r_p \cdot c \quad m_p, r_p - \text{masa i promień protonu}$$

Dla wszelkich obiektów makroskopowych stosujemy fizykę klasyczną  
 W fizyce cząstek nieodzowna staje się **mechanika kwantowa!**

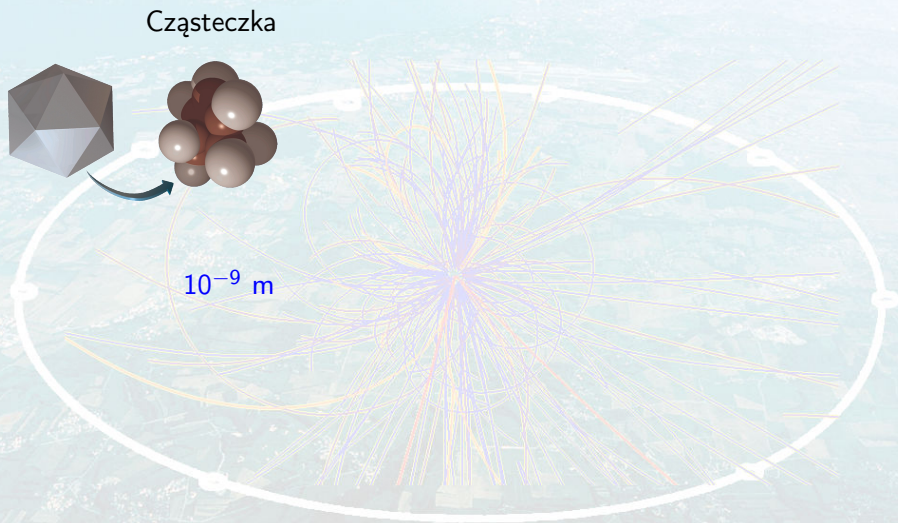
## Relatywistyczne i kwantowe rozszerzenia mechaniki klasycznej

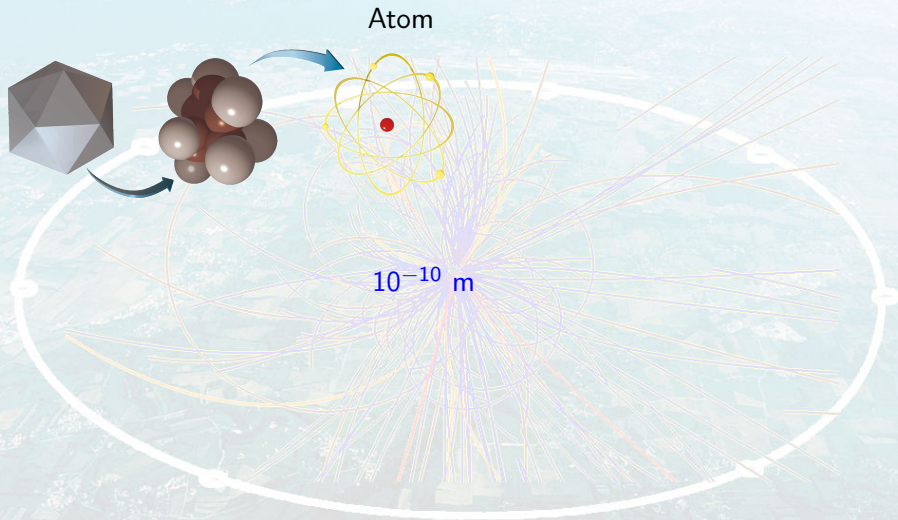


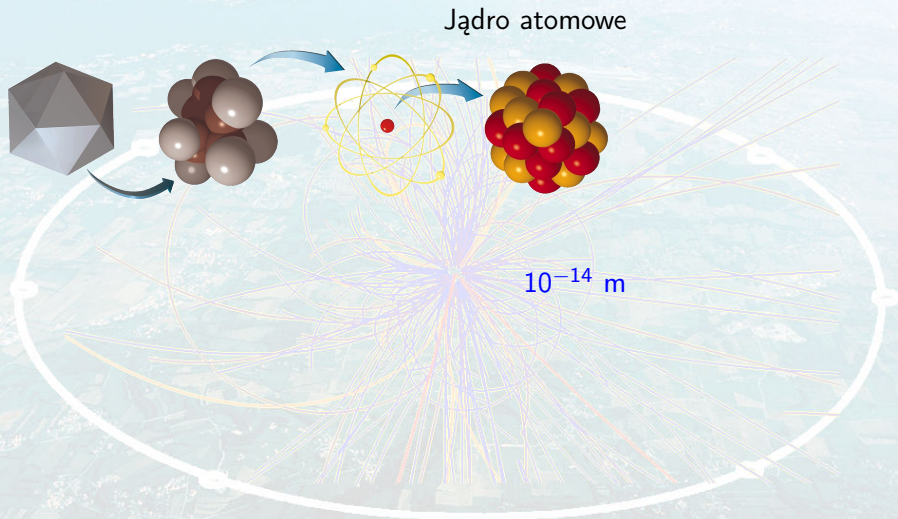
Współczesna fizyka cząstek opisywana jest w języku **Kwantowych Teorii Pola** łączących szczególną teorię względności z mechaniką kwantową  
Jest to świat bardzo różny od tego do którego jesteśmy przyzwyczajeni...

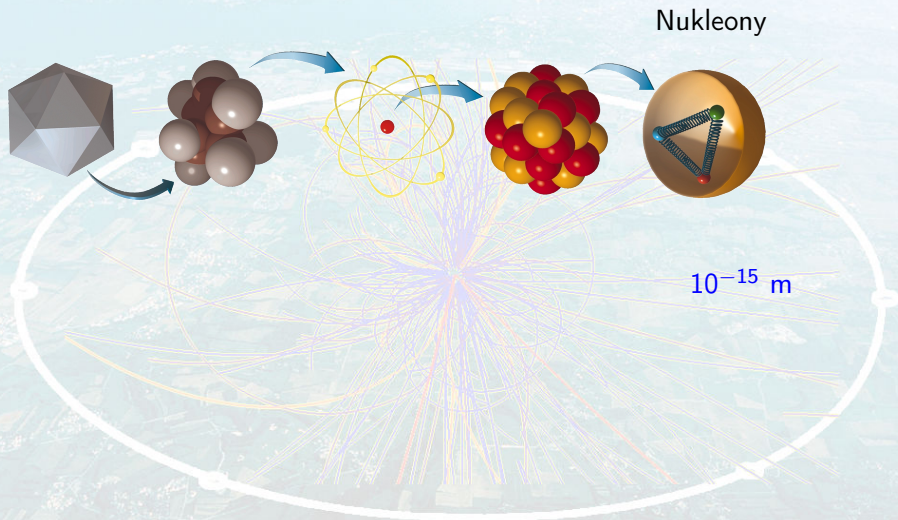
# Cząstki i ich oddziaływania

- 1 Fizyka końca XIX wieku
- 2 Odkrycia przełomu XIX i XX wieku
- 3 Granice stosowalności fizyki klasycznej
- 4 Budowa materii**
- 5 Model Standardowy
- 6 Wyniki eksperymentów przy LHC
- 7 Oscylacje neutrin
- 8 Ciemna materia

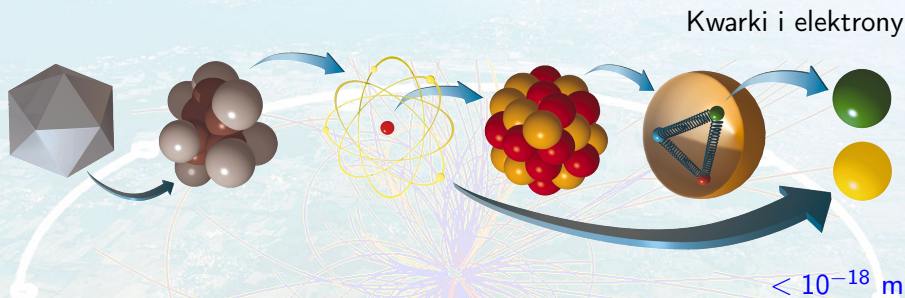












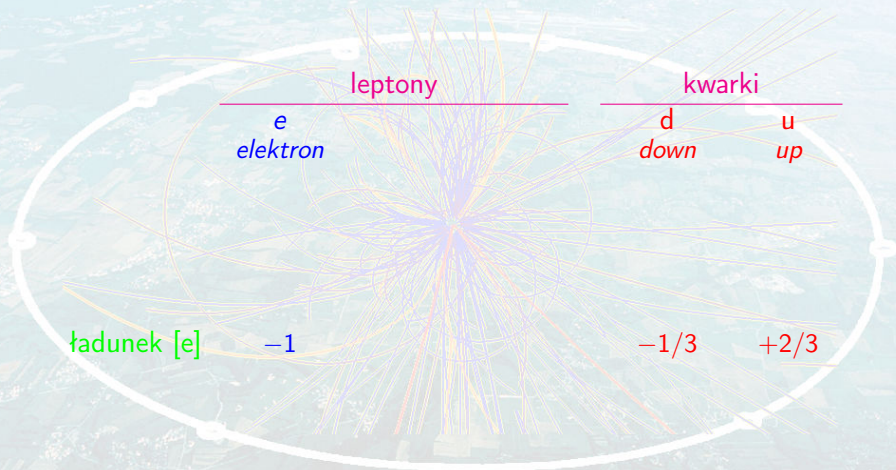
Obecnie za najbardziej fundamentalne, niepodzielne składniki materii uważamy **kwarki** i **leptony**.

Proton i neutron składają się z kwarków *u* i *d*:

$$p = (uud) \quad n = (udd)$$

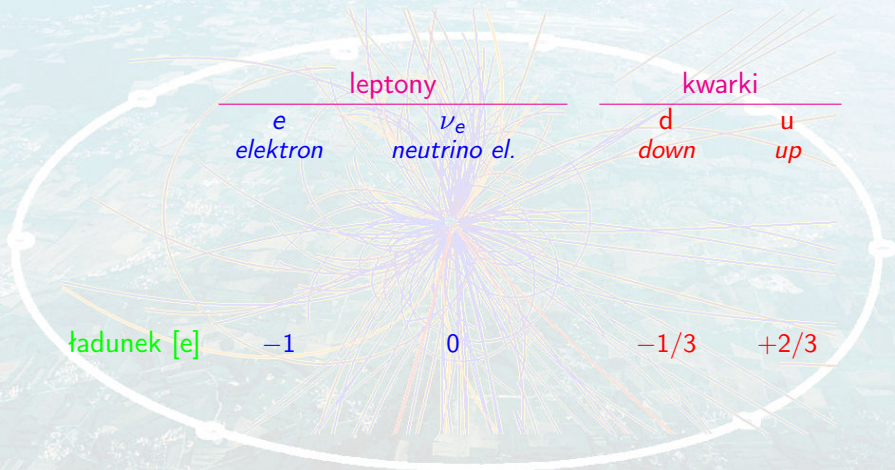
## Fermiony

Świat “codzienny”: 3 “cegietki” (elektron oraz kwarki  $u$  i  $d$ )



## Fermiony

Świat “codzienny”: 3 “cegiełki” (elektron oraz kwarki  $u$  i  $d$ ) + *neutrino*



## Fermiony

Świat “codzienny”: 3 “cegiełki” (elektron oraz kwarki  $u$  i  $d$ ) + *neutrino*

Fizyka cząstek  $\Rightarrow$  12 fundamentalnych “cegiełek” materii, fermionów

	leptony		kwarki	
pokolenie 1	$e$ <i>elektron</i>	$\nu_e$ <i>neutrino el.</i>	$d$ <i>down</i>	$u$ <i>up</i>
pokolenie 2	$\mu$ <i>mion</i>	$\nu_\mu$ <i>neutrino mionowe</i>	$s$ <i>strange</i>	$c$ <i>charm</i>
pokolenie 3	$\tau$ <i>taon</i>	$\nu_\tau$ <i>neutrino taonowe</i>	$b$ <i>beauty</i> <i>(bottom)</i>	$t$ <i>top</i> <i>(truth)</i>
ładunek [e]	-1	0	-1/3	+2/3

## Fermiony

Świat “codzienny”: 3 “cegietki” (elektron oraz kwarki  $u$  i  $d$ ) + *neutrino*

Fizyka cząstek  $\Rightarrow$  12 fundamentalnych “cegietek” materii, fermionów

	leptony		kwarki	
pokolenie 1	$e$ <i>elektron</i>	$\nu_e$ <i>neutrino el.</i>	$d$ <i>down</i>	$u$ <i>up</i>
pokolenie 2	$\mu$ <i>mion</i>	$\nu_\mu$ <i>neutrino mionowe</i>	$s$ <i>strange</i>	$c$ <i>charm</i>
pokolenie 3	$\tau$ <i>taon</i>	$\nu_\tau$ <i>neutrino taonowe</i>	$b$ <i>beauty</i> <i>(bottom)</i>	$t$ <i>top</i> <i>(truth)</i>
ładunek [e]	-1	0	-1/3	+2/3

+ anty-fermiony (kolejnych 12)

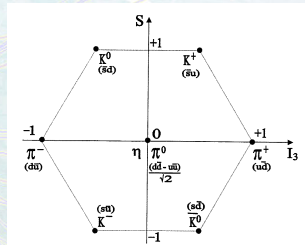
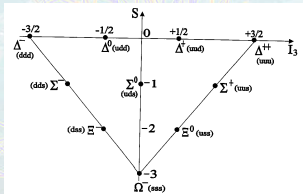
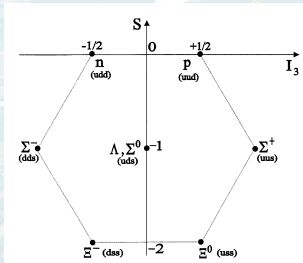
## Fermiony

Wszystkie **leptony** obserwujemy jako cząstki **swobodne**.

**Kwarki** zaś są "uwięzione" w **hadronach** (cząstkach oddziałujących silnie).

Trzy kwarki tworzą **bariony**:

Para kwark-antykwar $\bar{k}$  **mezony**:



trzy antykwarki  $\Rightarrow$  antybariony

Istnienie kwarków zapostulowali w 1964 roku M.Gell-Mann i G.Zweig aby wytłumaczyć symetrie obserwowane wśród znanych już wtedy cząstek...

## Kolor

Każdy z kwarków obdarzony jest "ładunkiem kolorowym": R, G lub B.

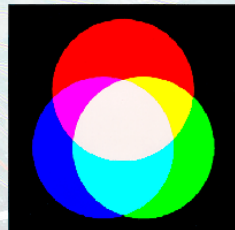


Antykwarki mają odpowiednio anty-kolory (kolory "ujemne"):  $\bar{R}$ ,  $\bar{G}$ ,  $\bar{B}$ .



Jako swobodne mogą istnieć tylko cząstki nie niosące ładunku kolorowego (cząstki "białe"):

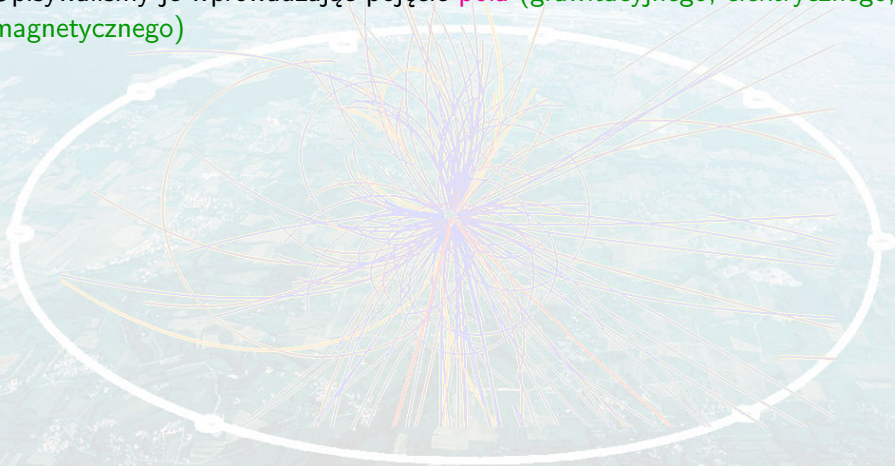
$$\begin{aligned} R + G + B &= 0 \\ R + \bar{R} = G + \bar{G} = B + \bar{B} &= 0 \end{aligned}$$



⇒ "uwięzienie" kwarków w hadronach ⇒ Chromodynamika Kwantowa

## Oddziaływania

W fizyce klasycznej **oddziaływania** między ciałami zachodziły na **odległość**.  
Opisywaliśmy je wprowadzając pojęcie **poła** (**grawitacyjnego, elektrycznego, magnetycznego**)





## Oddziaływania

W fizyce klasycznej **oddziaływania** między ciałami zachodziły na **odległość**.  
Opisywaliśmy je wprowadzając pojęcie **poła** (**grawitacyjnego, elektrycznego, magnetycznego**)

W przypadku **zmiany rozkładu** masy (ładunku) pole grawitacyjne (elektryczne) zmieniało się **natychmiast w całej przestrzeni!**

**Jest to sprzeczne z postulatami Einsteina, że nic nie może przemieszczać się szybciej od prędkości światła, także oddziaływanie...**

## Oddziaływania

W fizyce klasycznej **oddziaływania** między ciałami zachodziły na **odległość**.  
Opisywaliśmy je wprowadzając pojęcie **poła** (**grawitacyjnego, elektrycznego, magnetycznego**)

W przypadku **zmiany rozkładu** masy (ładunku) pole grawitacyjne (elektryczne) zmieniało się **natychmiast w całej przestrzeni!**

**Jest to sprzeczne z postulatami Einsteina, że nic nie może przemieszczać się szybciej od prędkości światła, także oddziaływanie...**

W opisie oddziaływań między cząstkami rezygnujemy z pojęcia pola i siły!  
Zamiast tego wprowadzamy (równoważny, jak się okazuje) opis poprzez wymianę **nośników oddziaływań**

## Oddziaływania

W fizyce klasycznej **oddziaływania** między ciałami zachodziły na **odległość**. Opisywaliśmy je wprowadzając pojęcie **poła** (grawitacyjnego, elektrycznego, magnetycznego)

W przypadku **zmiany rozkładu** masy (ładunku) pole grawitacyjne (elektryczne) zmieniało się **natychmiast w całej przestrzeni!**

**Jest to sprzeczne z postulatem Einsteina, że nic nie może przemieszczać się szybciej od prędkości światła, także oddziaływanie...**

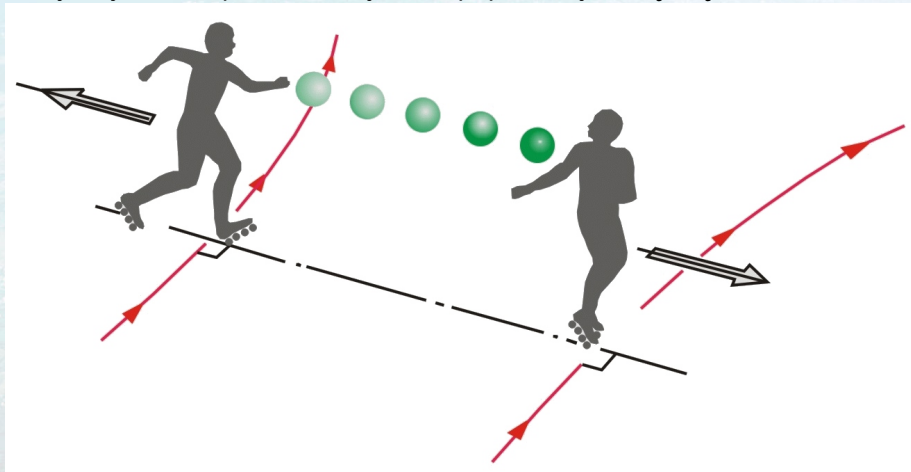
W opisie oddziaływań między cząstkami rezygnujemy z pojęcia pola i siły! Zamiast tego wprowadzamy (równoważny, jak się okazuje) opis poprzez wymianę **nośników oddziaływań**

### Dwa rodzaje cząstek:

- cząstki materii - fermiony (cząstki o spinie  $\frac{1}{2}$ )
- nośniki oddziaływań - bosony (cząstki o spinie całkowitym)

## Bozony

Klasyczny obraz opisu oddziaływania poprzez wymianę cząstek-nośników



## Bozony

“Cegiełki” oddziałują ze sobą poprzez wymianę **nośników oddziaływań**  
 Nośnik przekazuje część energii i/lub pędu jednej cząstki drugiej cząstce



“moc” - przykładowe porównanie wielkości oddziaływań dla dwóch sąsiadujących protonów

# Cząstki i ich oddziaływania

- 1 Fizyka końca XIX wieku
- 2 Odkrycia przełomu XIX i XX wieku
- 3 Granice stosowalności fizyki klasycznej
- 4 Budowa materii
- 5 Model Standardowy**
- 6 Wyniki eksperymentów przy LHC
- 7 Oscylacje neutrin
- 8 Ciemna materia

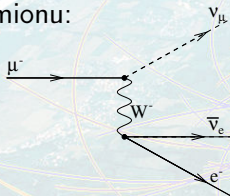
# Spontaniczne łamanie symetrii

## Bozony pośredniczące

Model Weinberg'a-Salam'a (1968) pozwolił wytłumaczyć dlaczego niektóre rozpady cząstek zachodzą **dużo wolniej (oddziaływania słabe)** niż inne (oddziaływania elektromagnetyczne i silne).

Powodem jest wymiana **bardzo masywnego** bozonu  $W^\pm$  lub  $Z^0$ .

Rozpad mionu:



Efektywna stała sprzężenia oddziaływań słabych jest mała z powodu **dużej masy bozonu**:

$$G_F \sim \frac{g^2}{m_W^2}$$

Przyjmując, że **sprężenie**  $g$  powinno być takie jak dla oddziaływań **EM**, Weinberg i Salam **przewidzieli** masy  $W^\pm$  i  $Z^0$ :

$$m_W \sim 80 \text{ GeV} \quad m_Z \sim 90 \text{ GeV}$$

Oddziaływania neutrin z wymianą bozonu  $Z^0$  odkryte w 1973

# Spontaniczne łamanie symetrii

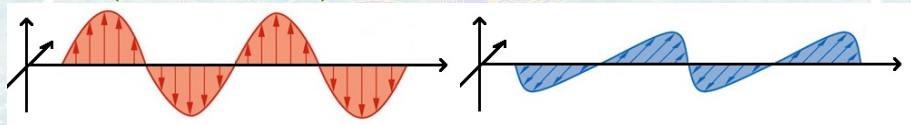
## Symetria cechowania

**Amplituda** funkcji falowej opisuje **prawdopodobieństwo** znalezienia cząstki w danym miejscu i danej chwili czasu.

$$p(\vec{r}, t) = |\psi(\vec{r}, t)|^2$$

Fizycznie mierzalna jest tylko **kwadrat amplitudy** funkcji falowej.

Jej **faza** ("polaryzacja fali") jest **nieistotna**.



## Symetria cechowania

Z założenia **lokalnej** symetrii cechowania możemy wyprowadzić pełną **teorię oddziaływań** elektronów, pozytonów i fotonów (**QED**)

**Symetria cechowania wymaga jednak, żeby foton był bezmasowy!!!**



# Spontaniczne łamanie symetrii

## Symetria cechowania

Założenie **symetrii cechowania** pozwala na bardzo prosty i elegancki opis oddziaływań cząstek w języku **kwantowej teorii pola**.

Opis taki wprowadzono z powodzeniem dla oddziaływań elektromagnetycznych (QED) i silnych (QCD).

Z **symetrii cechowania** wynika jednak, że wszystkie nośniki oddziaływań powinny być **bezmasowe**.

Z drugiej strony **doświadczenie** pokazało, że nośniki oddziaływań słabych, bozony  $W^\pm$  i  $Z^0$ , mają **niezerową masę**...

⇒ czy potrafimy pogodzić wymóg symetrii z doświadczeniem ?!

Jak sformułować kwantową teorię oddziaływań słabych?

**Czy w symetrycznym świecie mogą istnieć stany łamiące symetrię?**

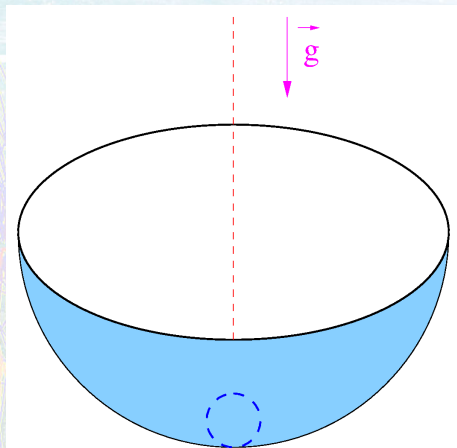
# Spontaniczne łamanie symetrii

## Analogia klasyczna

Podobny problem spotykamy rozważając kulkę w osiowo-symetrycznej czaszy (w jednorodnym polu grawitacyjnym).

Nawet jeśli nie znamy kształtu czaszy możemy oczekiwać, że położenie równowagi kulki znajduje się na osi symetrii czaszy.

Niezależnie od warunków początkowych kulka powinna się tam w końcu znaleźć...

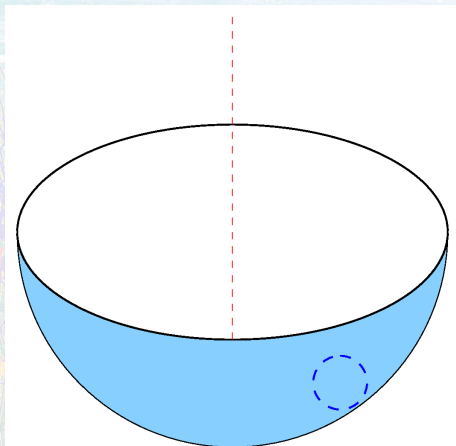


## Analogia klasyczna

Podobny problem spotykamy rozważając kulkę w osiowo-symetrycznej czaszy (w jednorodnym polu grawitacyjnym).

Nawet jeśli nie znamy kształtu czaszy możemy oczekiwać, że położenie równowagi kulki znajduje się na osi symetrii czaszy.

Jednak doświadczenie może wykazać, że kulka nie znajduje się na osi symetrii !...



## Analogia klasyczna

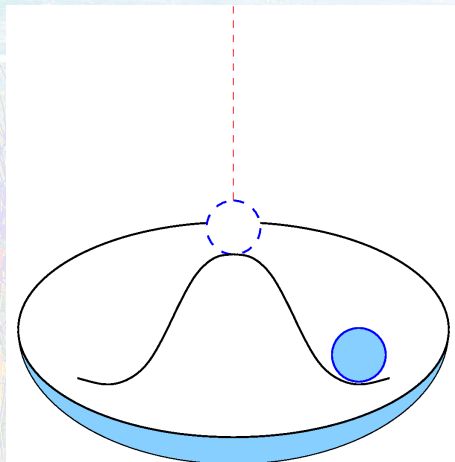
Możliwe wytłumaczenie:

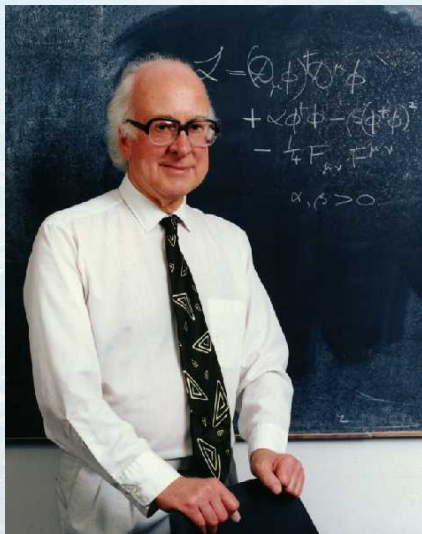
czasza zachowuje symetrię osiową

ale położenie na osi nie jest stanem  
równowagi trwałej

⇒ kulka stacza się wybierając jedno z  
wielu możliwych położeń równowagi

Stoczenie się kulki powoduje  
spontaniczne złamanie symetrii !



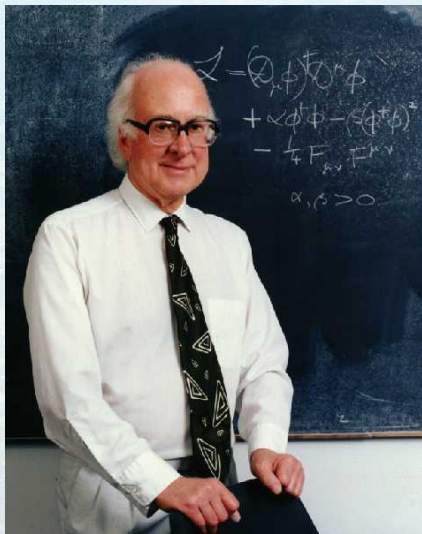


Na możliwość nadania mas nośnikom oddziaływań poprzez spontaniczne łamanie symetrii wskazał czterdzieści lat temu (1964) m.in.† [Peter W. Higgs](#).

Mechanizm spontanicznego łamania symetrii, zwany także **mechanizmem Higgsa**, jest podstawą współczesnej teorii oddziaływań elektroslabych.

Wszystkie cząstki uzyskują **masę** poprzez oddziaływanie z  **polem Higgsa**!

† wymieniani są także Anderson, **Brout**, **Englert**, Guralnik, Hagen, Kibble i 't Hooft



Na możliwość nadania mas nośnikom oddziaływań poprzez spontaniczne łamanie symetrii wskazał czterdzieści lat temu (1964) m.in.<sup>†</sup> **Peter W. Higgs**.

Mechanizm spontanicznego łamania symetrii, zwany także **mechanizmem Higgsa**, jest podstawą współczesnej teorii oddziaływań elektroslabych.

Wszystkie cząstki uzyskują **masę** poprzez oddziaływanie z  **polem Higgsa**!

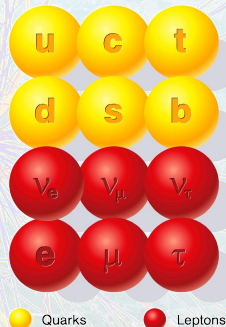
Oczekujemy także istnienia  **dodatkowej cząstki**:  **bozonu Higgsa**

<sup>†</sup> wymieniani są także Anderson, **Brout**, **Englert**, Guralnik, Hagen, Kibble i 't Hooft

## Cząstki fundamentalne

Cząstki, które obecnie uważamy za **fundamentalne** w ramach tzw. **Modelu Standardowego** fizyki cząstek

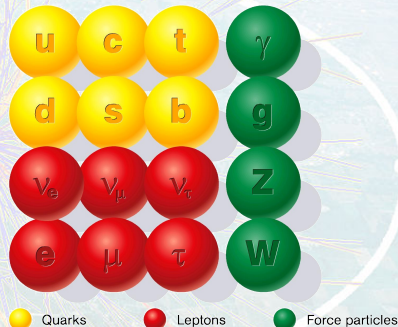
- cząstki materii  
kwarki i leptony



## Cząstki fundamentalne

Cząstki, które obecnie uważamy za **fundamentalne** w ramach tzw. **Modelu Standardowego** fizyki cząstek

- cząstki materii  
kwarki i leptony
- nośniki oddziaływań  
 $\gamma$ ,  $g$ ,  $W^\pm$  i  $Z^0$



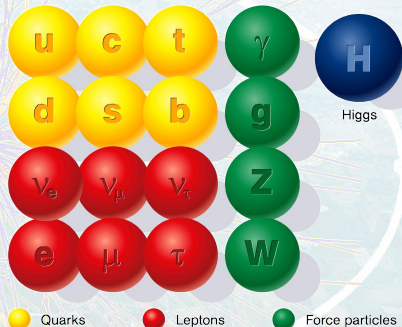


## Cząstki fundamentalne

Cząstki, które obecnie uważamy za **fundamentalne** w ramach tzw. **Modelu Standardowego** fizyki cząstek

- cząstki materii  
kwarki i leptony
- nośniki oddziaływań  
 $\gamma$ ,  $g$ ,  $W^\pm$  i  $Z^0$
- bozon Higgsa  
konieczny dla  
spójności modelu

“Nadaje masy”  
wszystkim cząstkom



# Cząstki i ich oddziaływania

- 1 Fizyka końca XIX wieku
- 2 Odkrycia przełomu XIX i XX wieku
- 3 Granice stosowalności fizyki klasycznej
- 4 Budowa materii
- 5 Model Standardowy
- 6 Wyniki eksperymentów przy LHC**
- 7 Oscylacje neutrin
- 8 Ciemna materia

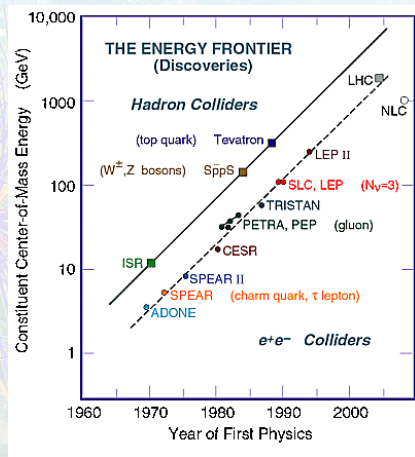
## Akceleratory

Szybki rozwój fizyki cząstek w latach 1970–1990 wiązał się z rozwojem technik akceleracji cząstek i budową kolejnych akceleratorów.

Energie zderzających się cząstek wzrosły o 3 rzędy wielkości

Niestety, rozmiary i koszt budowy nowych akceleratorów też szybko rosły...

Dużo więcej o akceleratorach powiemy za tydzień...



## LEP

Największym zbudowanym akceleratorem był LEP w CERN pod Genewą. Miał obwód ok. 27 km i zderzał przeciwbieżne wiązki  $e^+e^-$ .

## LHC

Został zbudowany w tym samym tunelu (!)  
Przeciwbieżne wiązki protonów o energii do 7 TeV  
W każdej do 2800 "paczek" po  $10^{11}$  protonów.

Energia jednej paczki:  $\sim 10^5$  J

Samochód osobowy jadący ok. 60 km/h

Całkowita zgromadzona energia:  $\sim 6 \cdot 10^8$  J

Docelowo zderzenia paczek co 25 ns  
(40 milionów na sekundę)





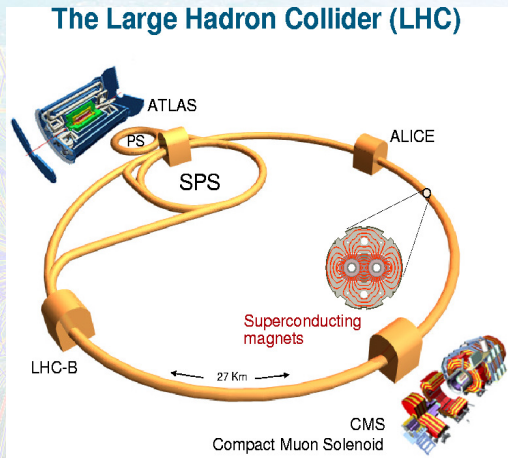


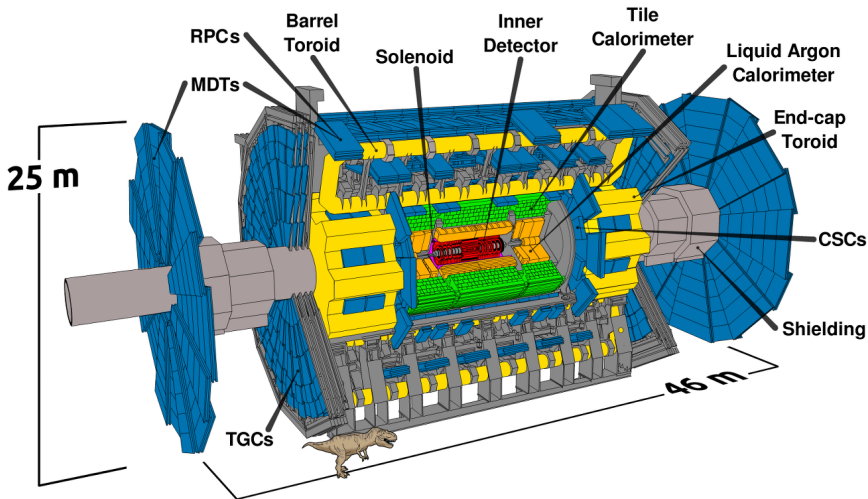
LHC został ostatecznie uruchomiony na jesieni 2009, choć początkowo z niższą niż planowano energią wiązek.

Od 2015 roku pracuje z energią bliską nominalnej.

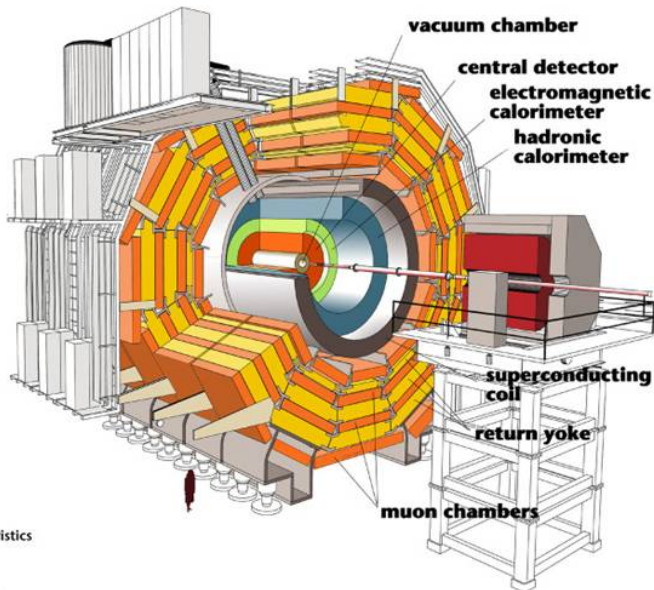
Docelowa intensywność wiązek LHC ma być tak duża, że możliwa będzie produkcja do **1000** cząstek Higgsa **na godzinę** !

Poszukiwanie przypadków produkcji cząstki Higgsa było jednym z głównych celów budowy eksperymentów **ATLAS** i **CMS**





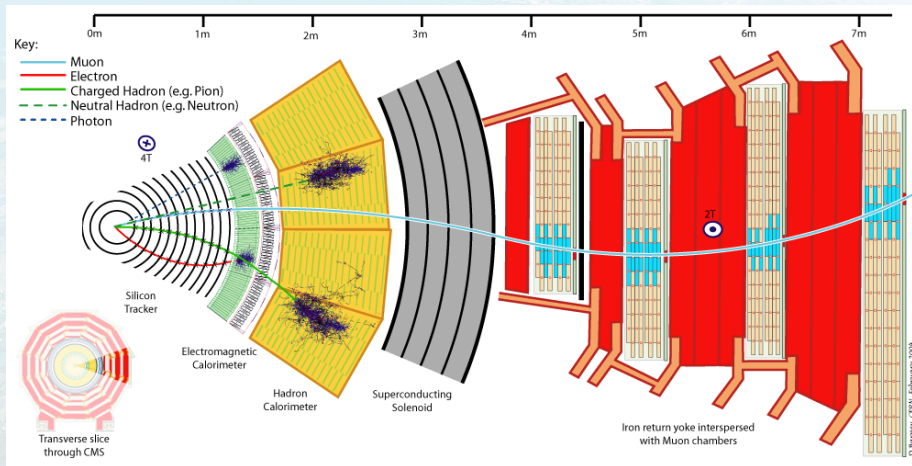




## Detector characteristics

Width: 22m  
Diameter: 15m  
Weight: 14'500t

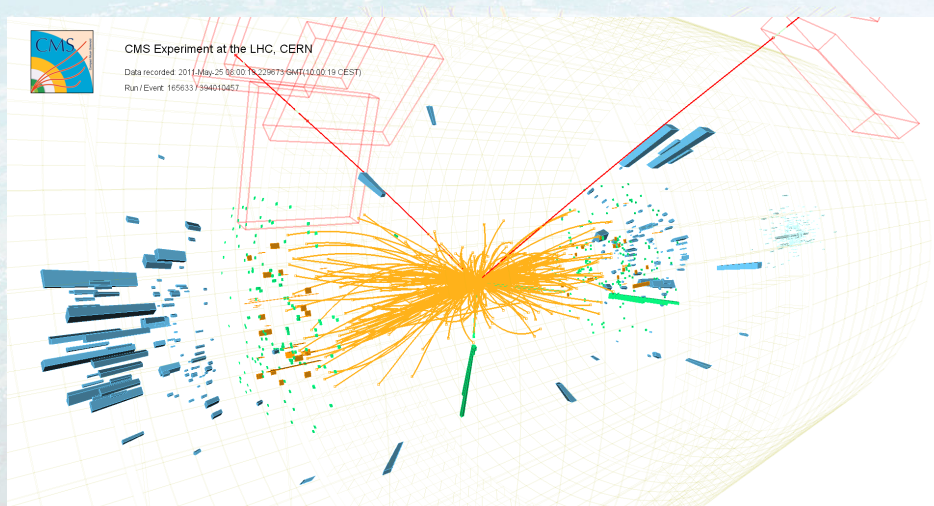
## Schemat budowy widok wycinka detektora



Porównując odpowiedzi różnych pod detektorów możemy rozróżnić cząstki

## Rejestrowane zderzenie $pp$

Przypadek z czterema leptonami (kandydat na  $H \rightarrow ZZ \rightarrow e^+e^-\mu^+\mu^-$ )



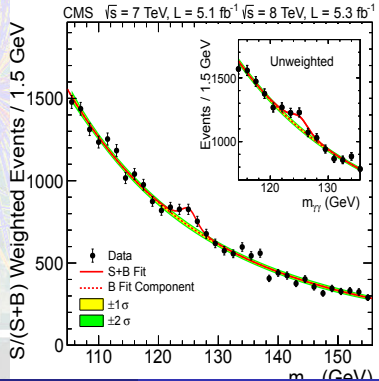
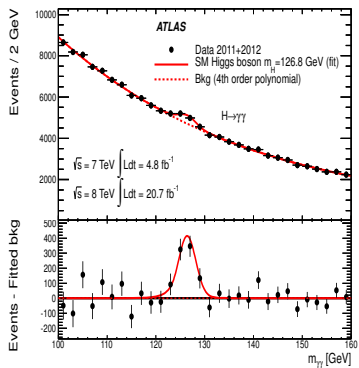
# Higgs w LHC

**Run I** 2009-2012

Wyniki przedstawione przez **ATLAS** i **CMS**, po uwzględnieniu danych zebranych do roku 2012.

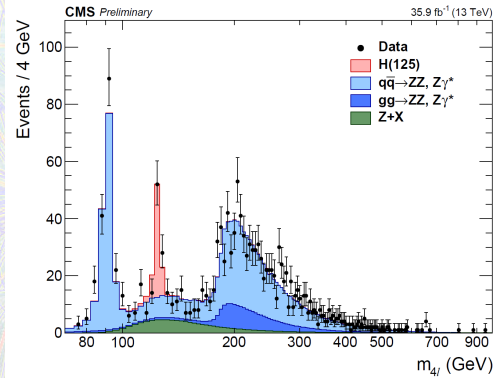
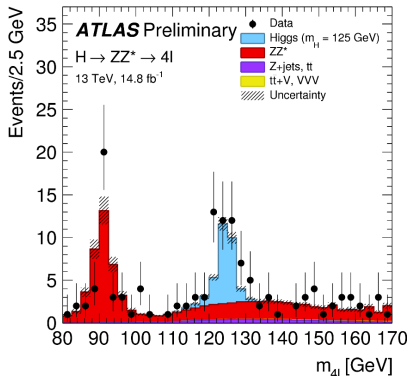
Sygnal widoczny ponad wszelką wątpliwość

$$H \rightarrow \gamma\gamma$$



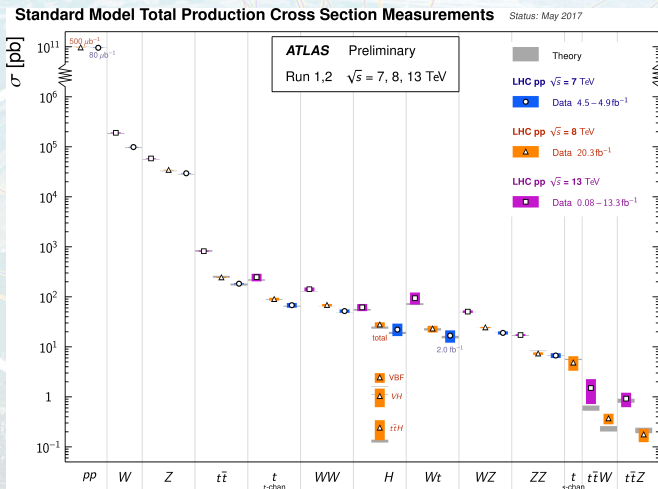
Run II 2015-2016

$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$



Wyniki zgodne ze wcześniejszymi pomiarami w Run I.

Eksperymenty przy LHC bardzo szczegółowo badają procesy z produkcją bozonów  $W^\pm$ ,  $Z^0$  i  $H$ , oraz kwarku  $t$ . Wszystkie dotychczasowe pomiary w **znakomitej zgodności z przewidywaniami (Modelem Standardowym)**.



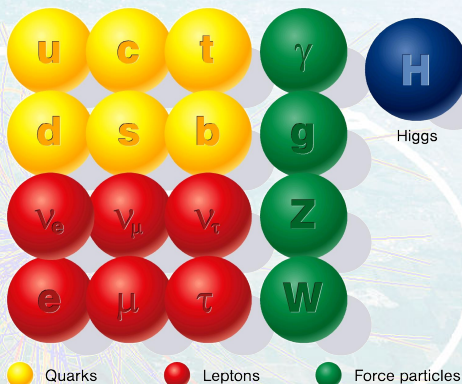
- 1 Fizyka końca XIX wieku
- 2 Odkrycia przełomu XIX i XX wieku
- 3 Granice stosowalności fizyki klasycznej
- 4 Budowa materii
- 5 Model Standardowy
- 6 Wyniki eksperymentów przy LHC
- 7 Oscylacje neutrin**
- 8 Ciemna materia

## Model Standardowy

Wyniki doświadczeń pokazały, że każdy naładowany lepton sprzęga się do innego neutrino  
 ⇒ trzy “zapachy” neutrino

Do końca XX wieku wierzyliśmy że

- neutrino są **bezmasowe**
- **zapach** neutrino jest ściśle zachowany



Ale postulat zachowania zapachu neutrino nie wynikał z teorii, był oparty wyłącznie na wynikach doświadczeń...



Neutrina są niesłychanie przenikliwe, praktycznie nie oddziałują z materią. Nie zdajemy sobie sprawy jak wiele ich jest wokół nas...

## Słońce

Jest niezwykle intensywnym źródłem **neutrin elektronowych** produkowanych w reakcjach termojądrowych (**większość z  $p + p \rightarrow D + e^+ + \nu_e$** ).

Całkowity strumień neutrin docierających do Ziemi (150 mln km):

$$\Phi_S \sim 6 \cdot 10^{10} \text{ 1/s} \cdot \text{cm}^2 \text{ (!)} \quad \text{jednak dominują niskie energie...}$$

## Reaktory jądrowe

W każdym akcie rozszczepienia jądra uranu  $^{238}\text{U}$  wyzwala się ok. 200 MeV energii i powstaje średnio 6 **antyneutrin elektronowych**.

**Blok o mocy 1GW** produkuje około  $\sim 6 \cdot 10^{20}$  neutrin na sekundę.

W odległości **1 km od reaktora**:  $\Phi_R \sim 5 \cdot 10^9 \text{ 1/s} \cdot \text{cm}^2$

## Promieniowanie kosmiczne    tzw. neutrina atmosferyczne

Promieniowanie kosmiczne oddziałuje w atmosferze Ziemi produkując liczne **cząstki wtórne**, w większości piony  $\pi^\pm$ .

W wyniku ich rozpadów powstają neutrina i antyneutrino. Przykładowo:



⇒ (anty)neutrino elektronowe i mionowe o wysokich energiach (!)

## Akseleratory cząstek

Procesy zachodzące w atmosferze możemy też inicjować w laboratorium, wykorzystując dużej intensywności wiązki protonów

⇒ produkujemy wiązki wysokoenergetycznych (anty)neutrino mionowych

Intensywności tych wiązek są ograniczone, ale mamy pełną kontrolę...

# Pomiary neutrin

Neutrino oddziałują niesłychanie słabo. Aby zaobserwować choćby pojedyncze oddziaływania musimy budować ogromne detektory.

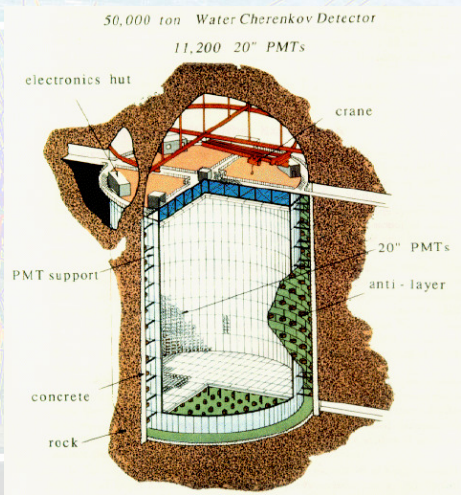
## Super Kamiokande

Detektor zbudowany w starej kopalni, pod górą Mt Kamioka w Japoni

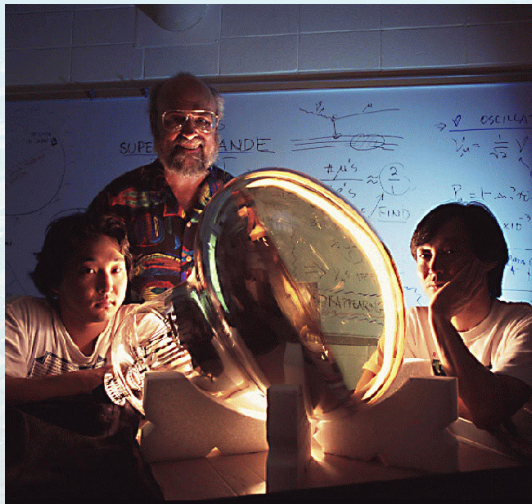
Stalowy zbiornik wypełniony 50,000 tonami czystej wody.

Szukamy "błysków światła" (tzw. promieniowania Czerenkowa) wywołanych oddziaływaniami neutrin.

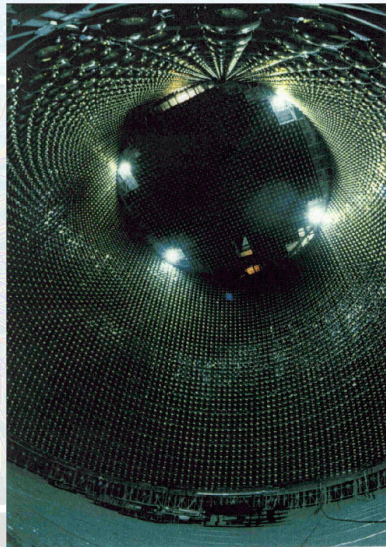
~11'000 fotopowielaczy czułych na pojedyncze fotony...

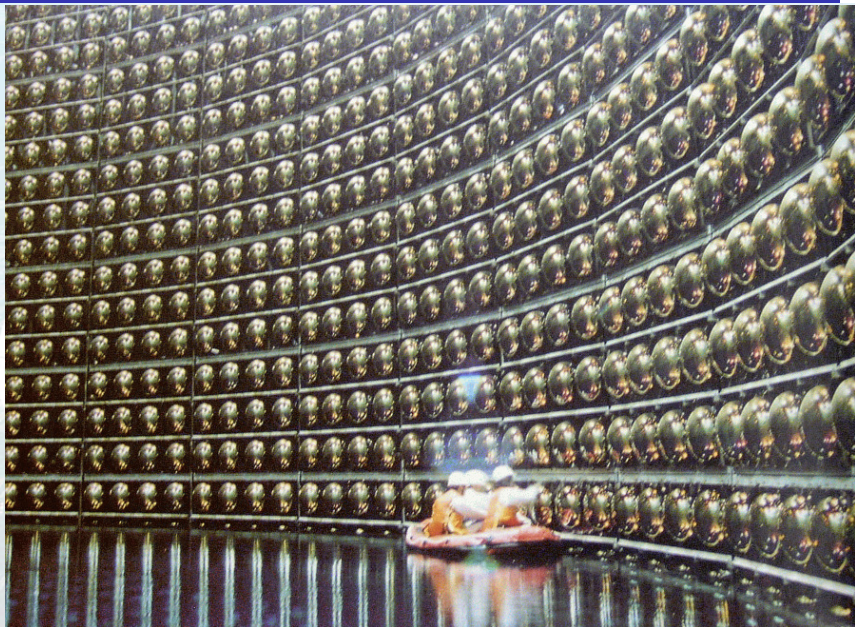


## Fotopowielacz



## Detektor

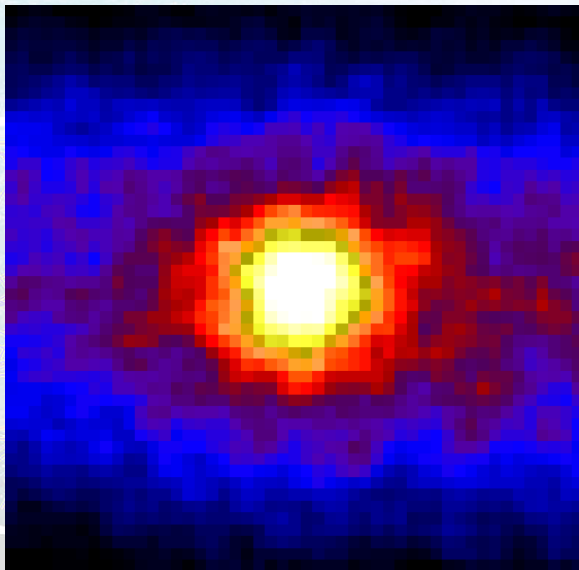




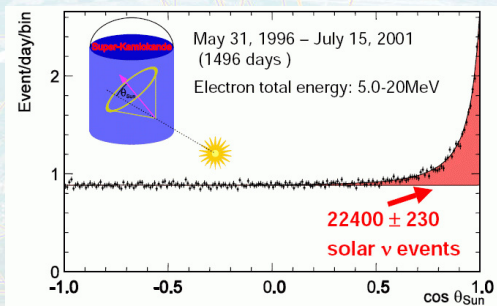
## Obraz Słońca

zrekonstruowany przez  
Super Kamiokande na  
podstawie kierunku  
rejestrowanych neutrin

rzeczywisty rozmiar  
Słońca  $\sim \frac{1}{2}$  piksela



Oddziaływania **neutrín słonecznych** możemy identyfikować na podstawie kierunku ich lotu względem **kierunku od Słońca**



Wyniki pomiarów nie zgadzały się jednak z naszymi rachunkami!  
Wygłądało to tak, jakby ponad połowa neutrín elektronowych “znikała” na drodze od Słońca do Ziemi...  
**To niemożliwe !?!**

## Model jak to sobie wyobrazić

Wyobraźmy sobie, że są trzy kalibry broni, z której możemy strzelać do tarczy, trzy rodzaje pocisków:

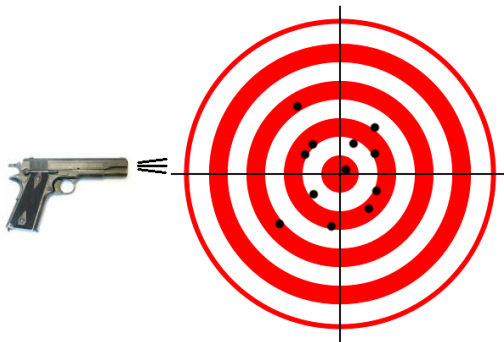


Każdy pocisk zostawia w tarczy inny ślad...



## Model jak to sobie wyobrazić

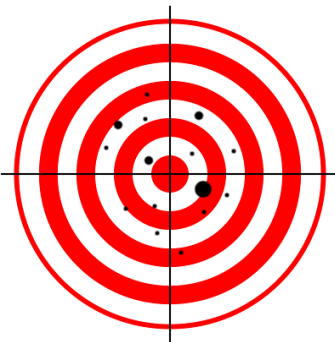
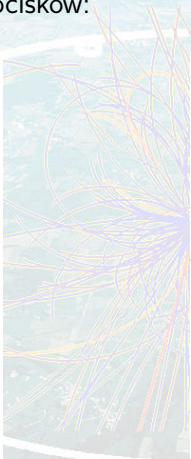
Wyobraźmy sobie, że są trzy kalibry broni, z której możemy strzelać do tarczy, trzy rodzaje pocisków:



Gdy strzelamy na małą odległość, ślady odpowiadają kalibrowi broni...

## Model jak to sobie wyobrazić

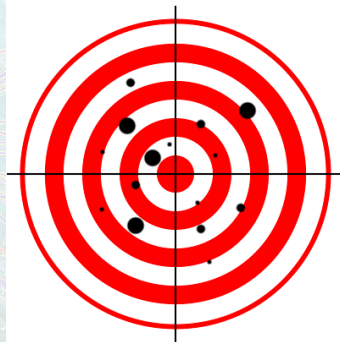
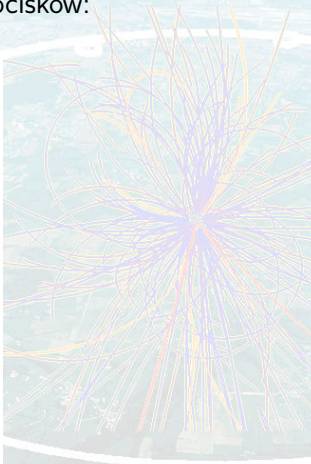
Wyobraźmy sobie, że są trzy kalibry broni, z której możemy strzelać do tarczy, trzy rodzaje pocisków:



Ale przy większej odległości, kaliber kuli może zmienić się w locie...

## Model jak to sobie wyobrazić

Wyobraźmy sobie, że są trzy kalibry broni, z której możemy strzelać do tarczy, trzy rodzaje pocisków:



Na dużych odległościach wszystkie kalibry dokładnie się mieszają...

## Pomiary

“Deficyt” neutrin słonecznych był pierwszym zauważonym efektem, który dziś tłumaczymy jako przejaw **oscylacji neutrin**

Mierzmy tylko 1/3 neutrin elektronowych ze Słońca bo pozostałe zamieniają się (oscylują) na inny zapach (mionowe, taonowe), niewidoczny w doświadczeniu.

Obecnie zjawisko oscylacji neutrin zostało już potwierdzone w wielu różnych eksperymentach, dla neutrin z różnych źródeł: różnych zapachów i energii.

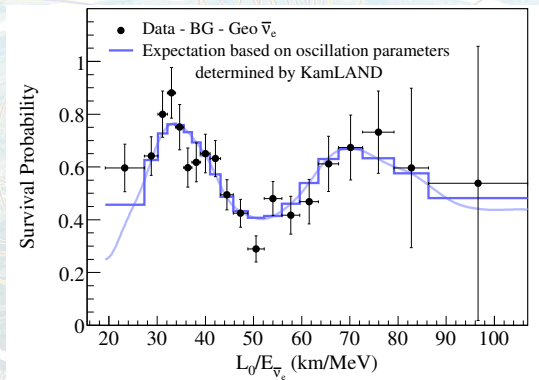
**Mechanika kwantowa** pozwala nam zrozumieć i opisać zjawisko oscylacji. Jest jednak jeden warunek:

**Neutrino muszą mieć masę !!!**

może ona być bardzo mała, ale jednak niezerowa...

## Eksperyment KAMLAND

Najbardziej przekonujący wynik potwierdzający oscylacje neutrin  
Stosunek rejestrowanej do oczekiwanej liczby neutrin reaktorowych w funkcji stosunku odległości od reaktora do energii neutrina:

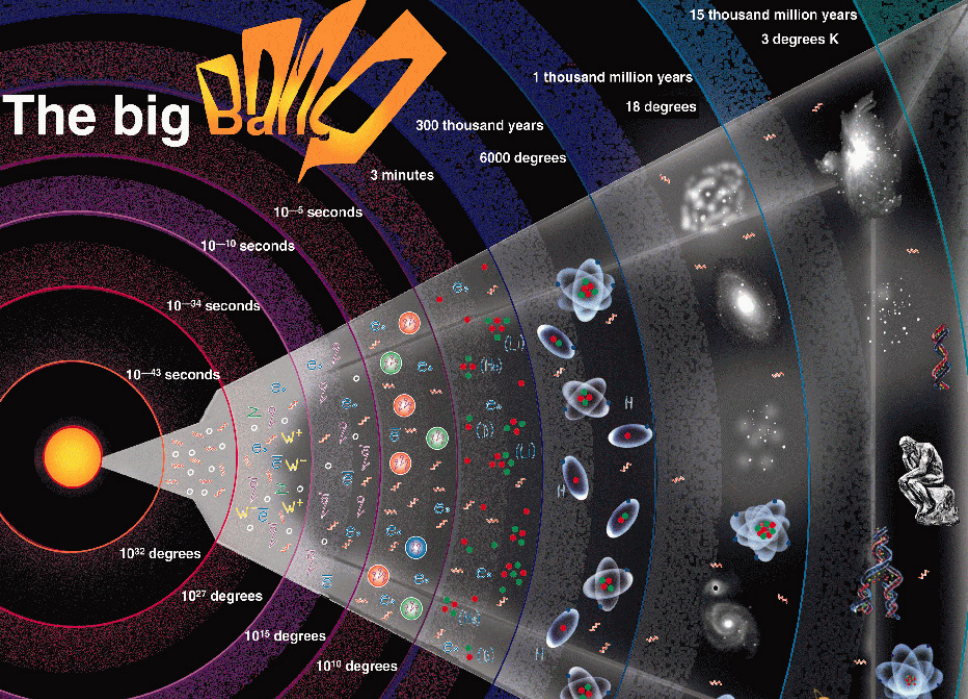


Widać wyraźne oscylacje: neutrina znikają i pojawiają się ponownie...

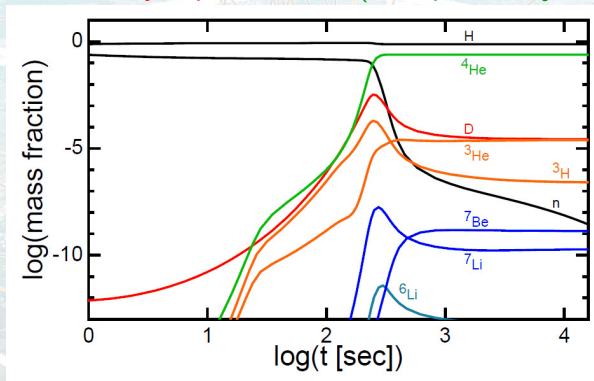
# Cząstki i ich oddziaływania

- 1 Fizyka końca XIX wieku
- 2 Odkrycia przełomu XIX i XX wieku
- 3 Granice stosowalności fizyki klasycznej
- 4 Budowa materii
- 5 Model Standardowy
- 6 Wyniki eksperymentów przy LHC
- 7 Oscylacje neutrin
- 8 Ciemna materia

# The big Bang



Wszystkie dostępne obserwacje kosmologiczne zgodne są z modelem **Wielkiego Wybuchu** - ekspansji punktowego skupiska nieskończonej energii. Znajomość fizyki cząstek i fizyki jądrowej pozwala nam w tym modelu opisać **powstawanie różnych pierwiastków** (tzw. **pierwontą nukleosyntezę**).



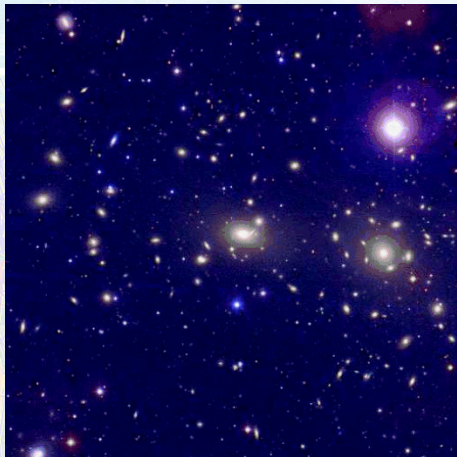
Z dopasowania obserwacji do teorii możemy wyznaczyć jaka jest średnia **gęstość atomów we wszechświecie**  $\Rightarrow$  ok. 0.5 protonu na  $\text{m}^3$ ...



## Przesłanki

W roku 1933 Fritz Zwicky zauważył, badając obiekty w Gromadzie Warkocza Bereniki (Coma Cluster), że poruszają się one ze zbyt dużymi prędkościami, większymi niż szacowana “prędkość ucieczki”.

Gromada powinna się rozlecieć...



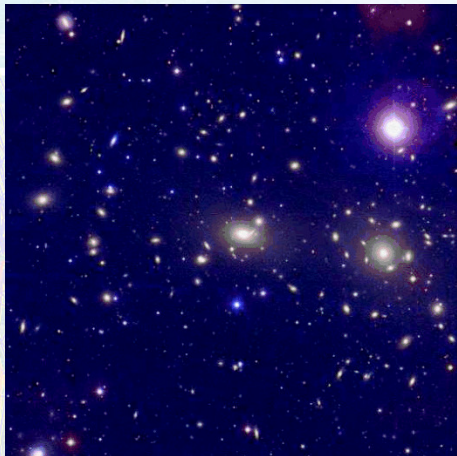
## Przesłanki

W roku 1933 Fritz Zwicky zauważył, badając obiekty w Gromadzie Warkocza Bereniki (Coma Cluster), że poruszają się one ze zbyt dużymi prędkościami, większymi niż szacowana “prędkość ucieczki”.

Gromada powinna się rozlecieć...

Wyznaczona na podstawie rozkładu prędkości masa “grawitacyjna” gromady była około 400 razy większa niż oczekiwano z obserwacji!

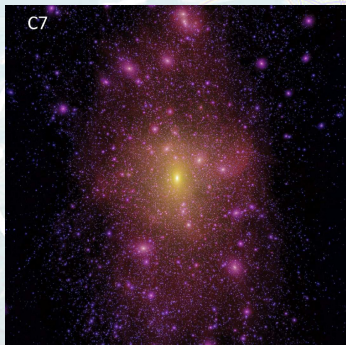
⇒ część tej materii musi być “ciemna”... ⇒ Ciemna Materia



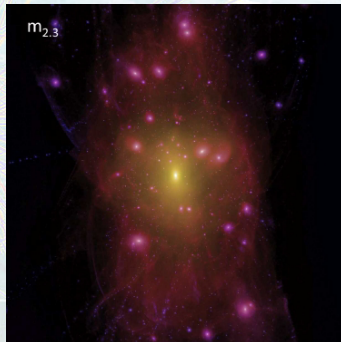
## Przesłanki

Dodanie “zimnej” (złożonej z masywnych cząstek) ciemnej materii jest też konieczne, żeby wymodelować **tworzenie się struktur we Wszechświecie**.

Zimna ciemna materia



Ciepła ciemna materia (np. neutrino)

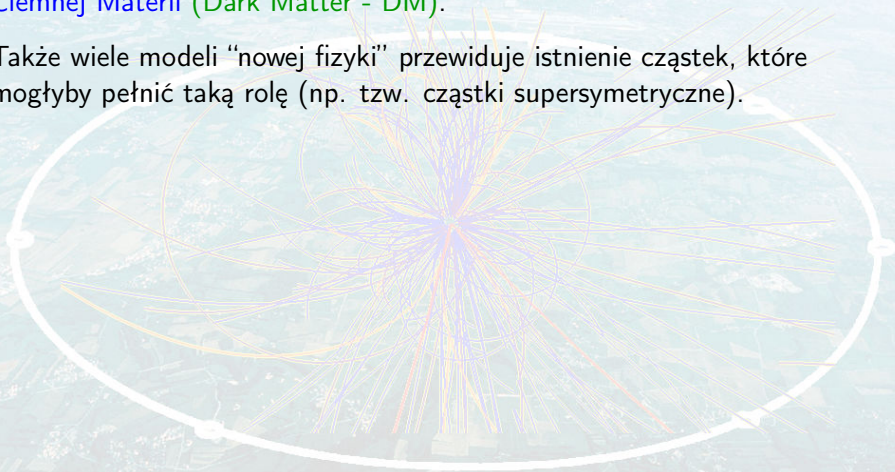


Bez zimnej ciemnej materii galaktyki nie zdążyłyby się uformować...

## Poszukiwanie

Mamy wiele innych obserwacji astrofizycznych świadczących o istnieniu Ciemnej Materii (Dark Matter - DM).

Także wiele modeli "nowej fizyki" przewiduje istnienie cząstek, które mogłyby pełnić taką rolę (np. tzw. cząstki supersymetryczne).



## Poszukiwanie

Mamy wiele innych obserwacji astrofizycznych świadczących o istnieniu Ciemnej Materii (Dark Matter - DM).

Także wiele modeli "nowej fizyki" przewiduje istnienie cząstek, które mogłyby pełnić taką rolę (np. tzw. cząstki supersymetryczne).

Poszukujemy ich na różne sposoby:

- szukając oddziaływania przelatujących cząstek DM w detektorach
- szukając sygnałów ich anihilacji z miejsc, gdzie mogłyby się gromadzić (Słońce, centrum Galaktyki, sąsiednie galaktyki karłowate)
- próbują je wyprodukować w zderzaczach cząstek (np. LHC)

## Poszukiwanie

Mamy wiele innych obserwacji astrofizycznych świadczących o istnieniu Ciemnej Materii (Dark Matter - DM).

Także wiele modeli "nowej fizyki" przewiduje istnienie cząstek, które mogłyby pełnić taką rolę (np. tzw. cząstki supersymetryczne).

Poszukujemy ich na różne sposoby:

- szukając oddziaływania przelatujących cząstek DM w detektorach
- szukając sygnałów ich anihilacji z miejsc, gdzie mogłyby się gromadzić (Słońce, centrum Galaktyki, sąsiednie galaktyki karłowate)
- próbują je wyprodukować w zderzaczach cząstek (np. LHC)

Niestety wszystkie dotychczasowe eksperymenty zakończyły się niepowodzeniem...

**Jedno z największych wyzwań współczesnej fizyki cząstek!**