

# Skąd się bierze masa

*Festiwal Nauki  
Wydział Fizyki U.W.  
25 września 2005*

dr hab. A.F.Żarnecki

Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych  
Instytut Fizyki Doświadczalnej

# Plan wykładu

- Wprowadzenie  
Cząstki i oddziaływania w Modelu Standardowym

# Plan wykładu

- Wprowadzenie  
Cząstki i oddziaływania w Modelu Standardowym
- Podwójna natura cząstek  
Cząstki i fale. Problem z opisem mas cząstek

# Plan wykładu

- Wprowadzenie  
Cząstki i oddziaływania w Modelu Standardowym
- Podwójna natura cząstek  
Cząstki i fale. Problem z opisem mas cząstek
- Skąd się bierze masa ?  
Spontaniczne łamanie symetrii i cząstka Higgsa

# Plan wykładu

- Wprowadzenie  
Cząstki i oddziaływania w Modelu Standardowym
- Podwójna natura cząstek  
Cząstki i fale. Problem z opisem mas cząstek
- Skąd się bierze masa ?  
Spontaniczne łamanie symetrii i cząstka Higgsa
- Co wiemy o cząstce Higgsa ?  
Precyzyjne testy Modelu Standardowego  
Wyniki eksperymentów w LEP i SLC

# Plan wykładu

- Wprowadzenie  
Cząstki i oddziaływania w Modelu Standardowym
- Podwójna natura cząstek  
Cząstki i fale. Problem z opisem mas cząstek
- Skąd się bierze masa ?  
Spontaniczne łamanie symetrii i cząstka Higgsa
- Co wiemy o cząstce Higgsa ?  
Precyzyjne testy Modelu Standardowego  
Wyniki eksperymentów w LEP i SLC
- Poszukiwania cząstki Higgsa  
Perspektywy poszukiwań w LHC i ILC

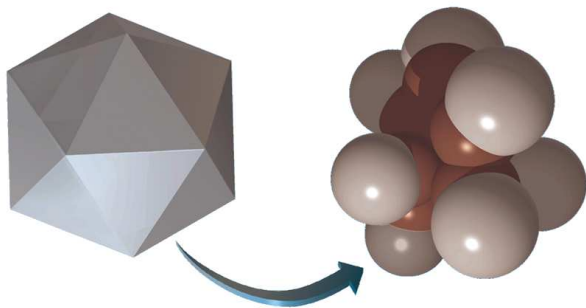
# Plan wykładu

- Wprowadzenie  
Cząstki i oddziaływania w Modelu Standardowym
- Podwójna natura cząstek  
Cząstki i fale. Problem z opisem mas cząstek
- Skąd się bierze masa ?  
Spontaniczne łamanie symetrii i cząstka Higgsa
- Co wiemy o cząstce Higgsa ?  
Precyzyjne testy Modelu Standardowego  
Wyniki eksperymentów w LEP i SLC
- Poszukiwania cząstki Higgsa  
Perspektywy poszukiwań w LHC i ILC
- Podsumowanie

# Model Standardowy

## Budowa materii

Cząsteczka



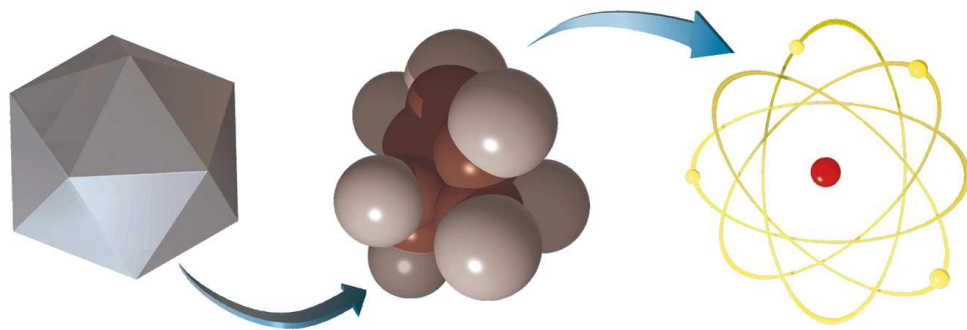
$10^{-9}$  m



# Model Standardowy

## *Budowa materii*

Atom

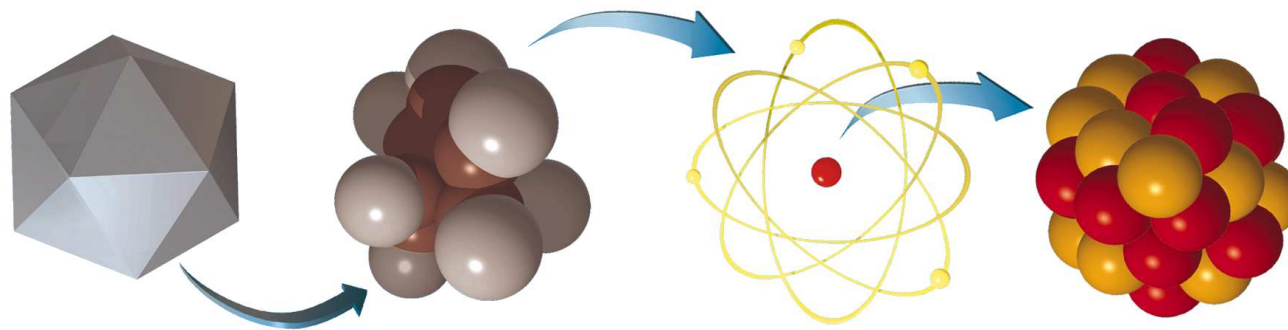


$10^{-10}$  m

# Model Standardowy

## *Budowa materii*

Jądro atomowe

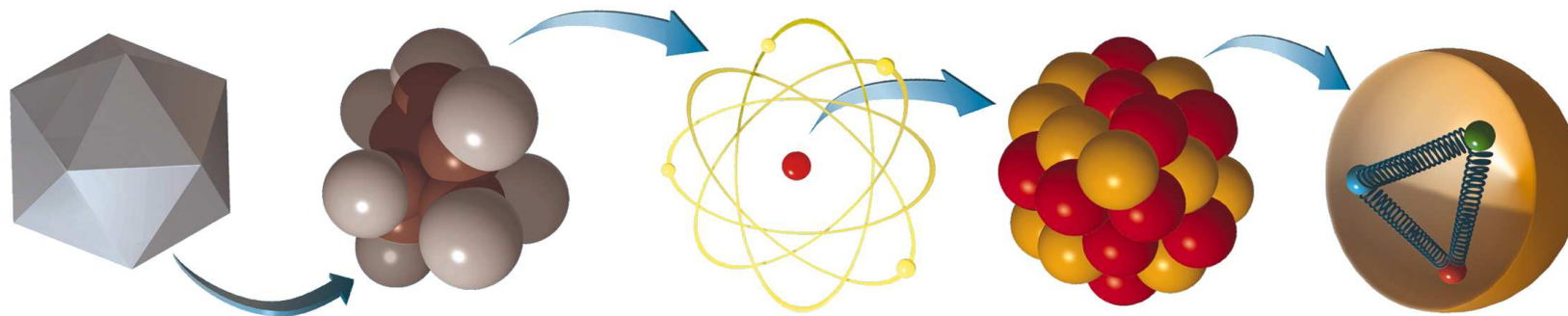


$10^{-14}$  m

# Model Standardowy

## Budowa materii

Nukleony

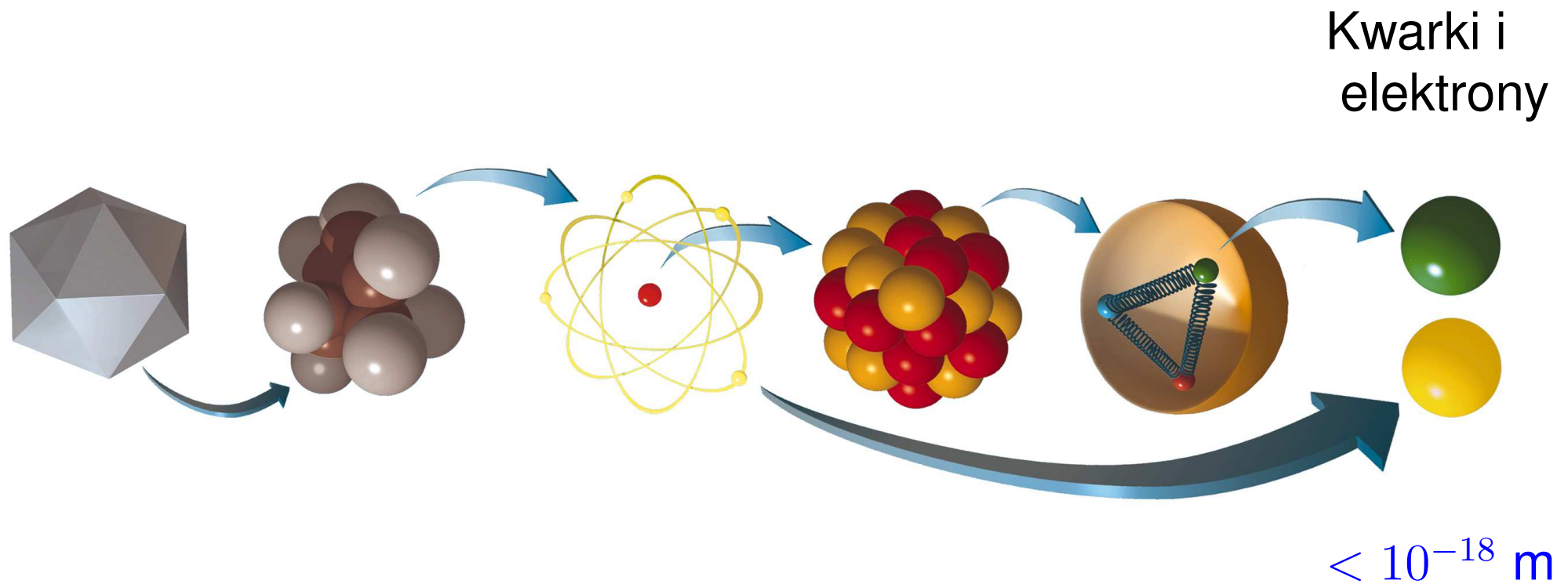


$10^{-15}$  m



# Model Standardowy

## Budowa materii



# Model Standardowy

## *Budowa materii*

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

	leptony		kwarki	
	$e$ <i>elektron</i>		$d$ <i>down</i>	$u$ <i>up</i>
ładunek [e]	-1		-1/3	+2/3

# Model Standardowy

## ***Budowa materii***

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

	leptony		kwarki	
	$e$ <i>elektron</i>	$\nu_e$ <i>neutrino el.</i>	$d$ <i>down</i>	$u$ <i>up</i>
ładunek [e]	-1	0	-1/3	+2/3

# Model Standardowy

## Budowa materii

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

# Model Standardowy

## Budowa materii

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

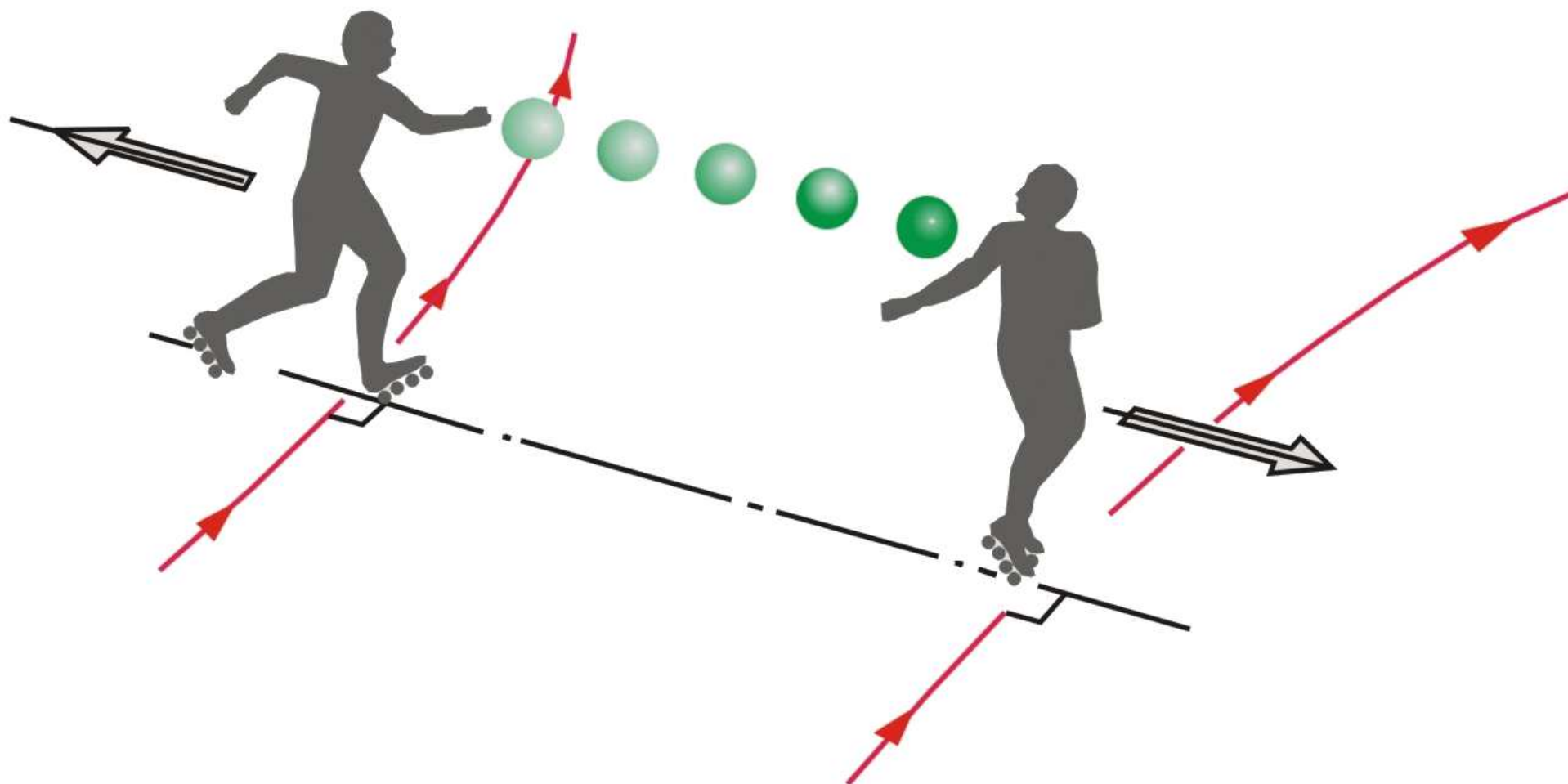
+ anty-fermiony (kolejnych 12)



# Model Standardowy

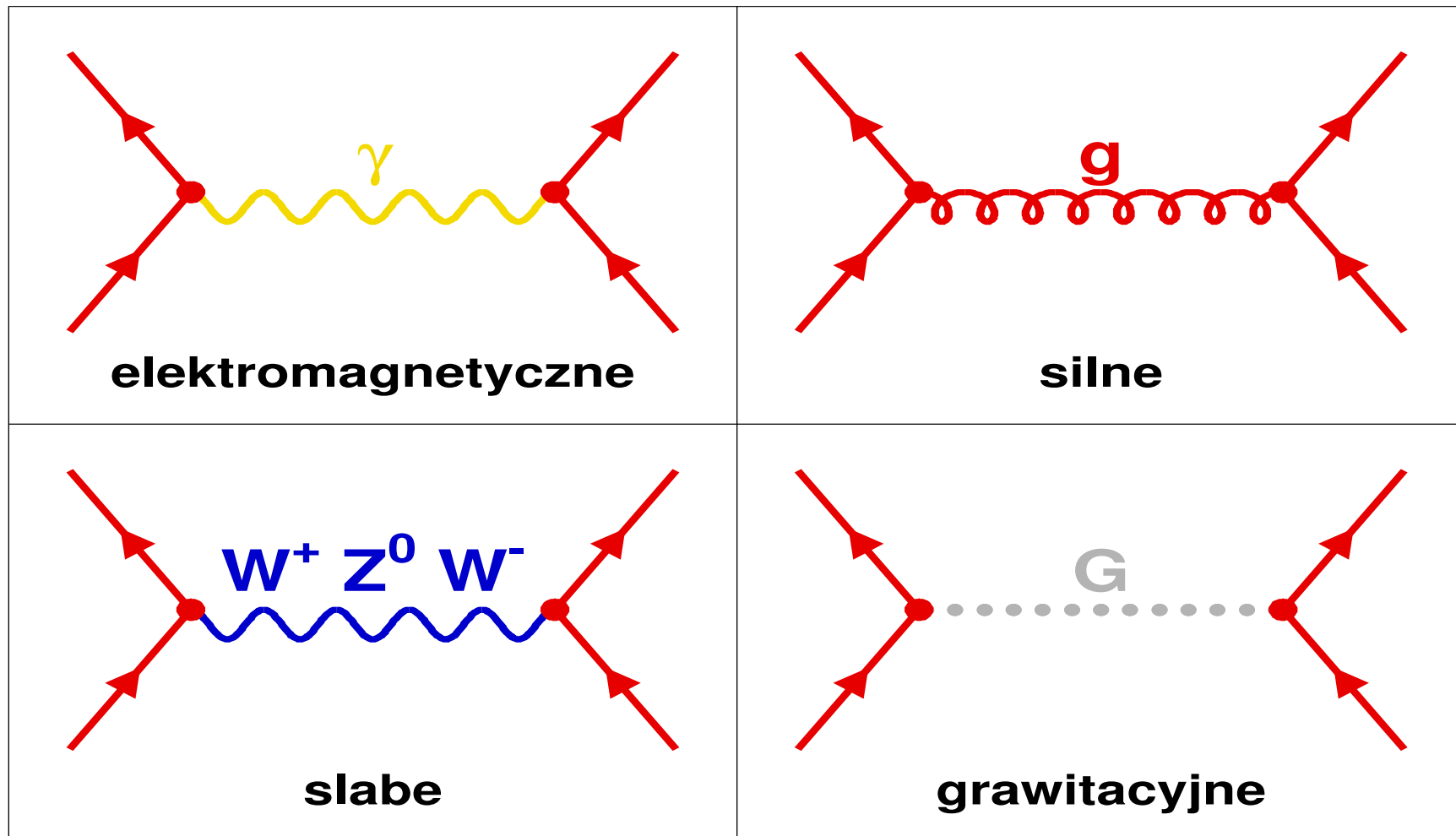
## *Oddziaływania*

Opisujemy je jako wymianę cząstek - “nośników”



# Model Standardowy

Wyróżniamy **cztery** podstawowe oddziaływania przenoszone przez odpowiednie nośniki



# Model Standardowy

## **Oddziaływania**

Nośnik oddziaływania przenosi **energię** i/lub **pęd** między cząstkami będącymi źródłami tego oddziaływania

<i>oddziaływanie</i>	<i>źródło</i>	<i>nośnik</i>		<i>masa</i>
grawitacyjne	masa	grawiton	G	0
elektromag.	ładunek	foton	$\gamma$	0
silne	“kolor”	gluony	$g$	0
słabe	“ładunek słaby”	“bozony	$W^\pm$	80 GeV
		pośredniczące”	$Z^0$	91 GeV

1 GeV = 1 000 000 000 eV  $\approx$  masa protonu

Czy nośniki oddziaływań możemy uważać za **punktowe** i **niepodzielne**, tak jak kwarki i leptony?

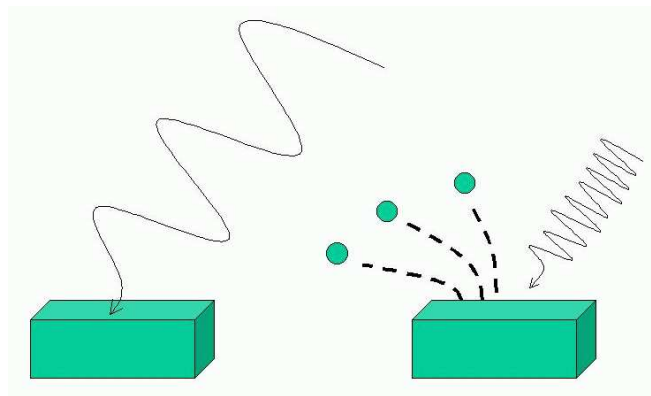


# Cząstki i fale

100 lat temu, w roku 1905, Albert Einstein wysunął hipotezę, że światło jest strumieniem niepodzielnych kwantów energii, które dziś nazywamy fotonami.

## Efekt fotoelektryczny

Hipoteza ta wyjaśniła zależność efektu fotoelektrycznego od długości fali światła

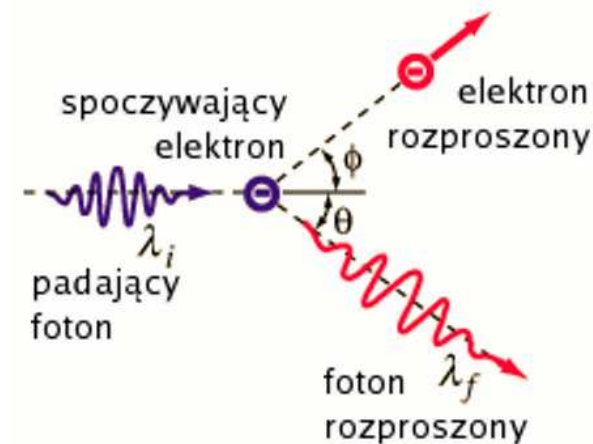


$$h\nu < E_0$$

$$h\nu > E_0$$

## Rozpraszanie Comptona

W roku 1923 Compton pokazał, że fotony niosą nie tylko energię, ale i pęd  $\Rightarrow$  zachowują się jak cząstki

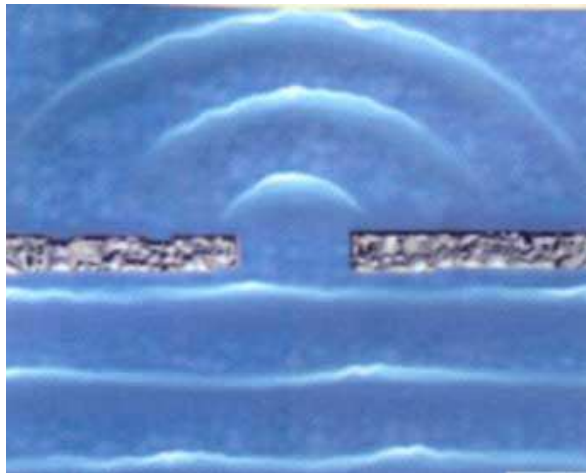


# Cząstki i fale

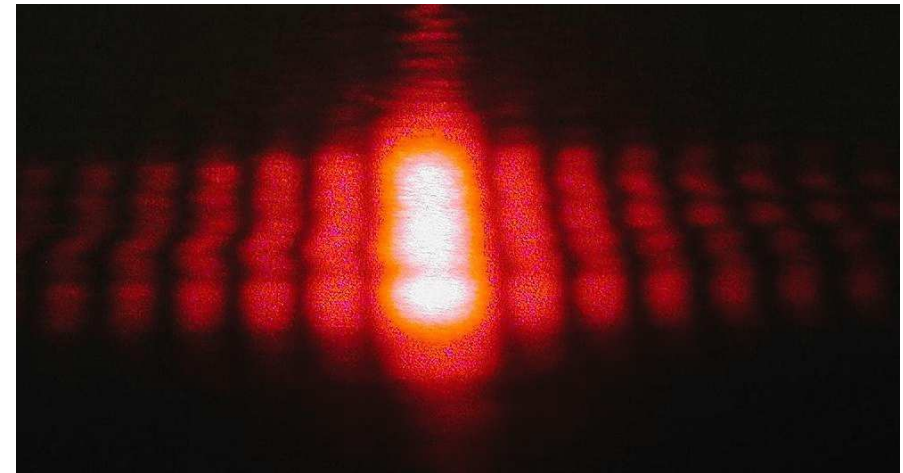
Jednocześnie jednak **fotony** zachowują się jak **fale**.  
Świadczą o tym m.in. zjawiskodyfrakcji i **interferencji** światła.

Ugięcie fal na pojedynczej szczelinie:

***Fale na wodzie***



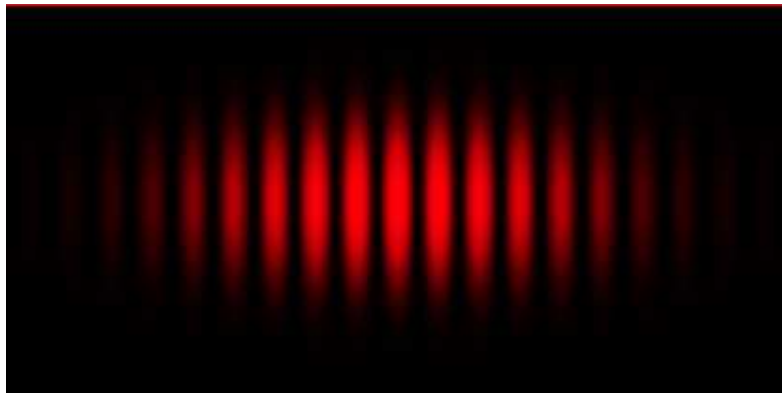
***Światło***



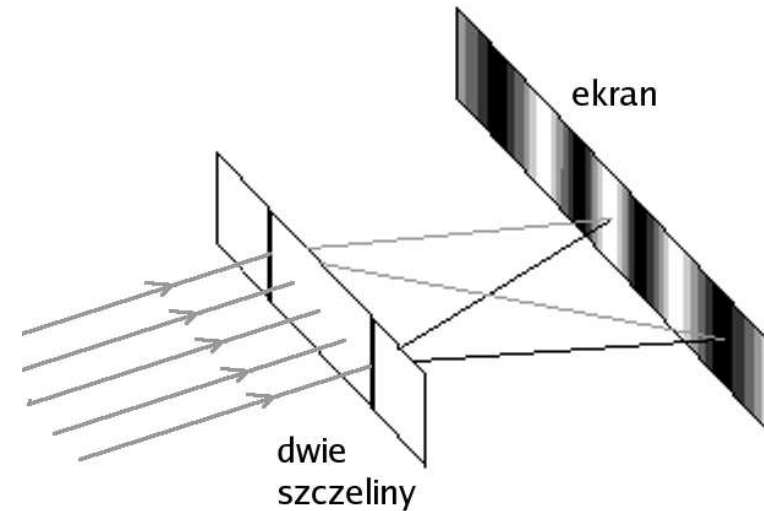
# Cząstki i fale

Obraz przy przechodzeniu przez dwie szczeliny:

## Światło



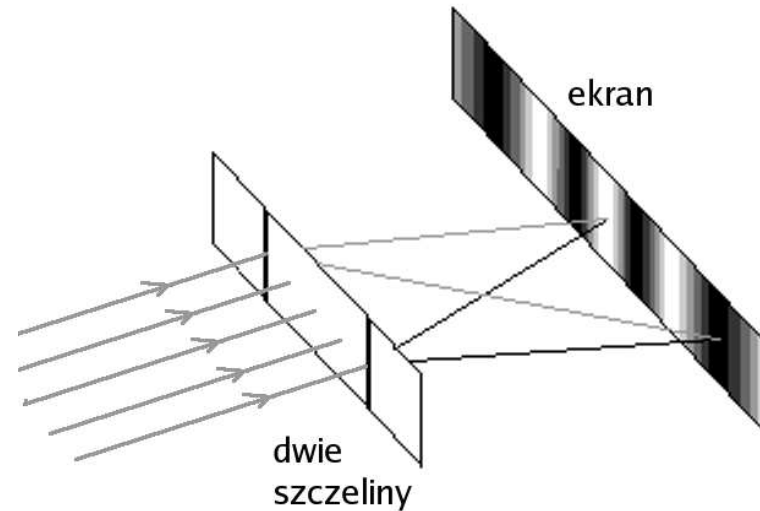
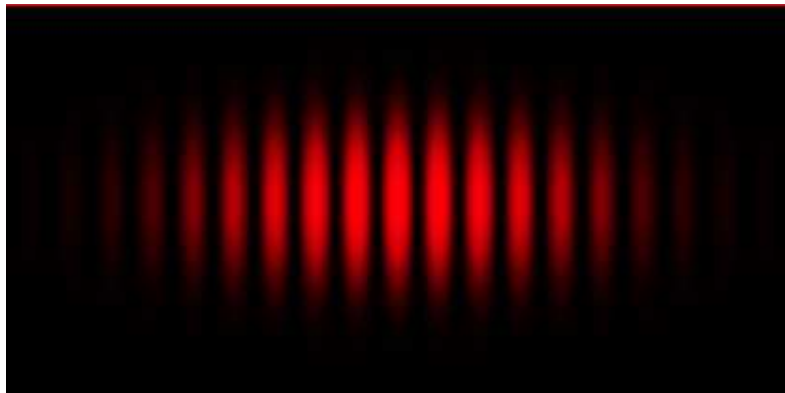
Złożenie fal  
⇒ prążki interferencyjne



# Cząstki i fale

Obraz przy przechodzeniu przez dwie szczeliny:

## Światło



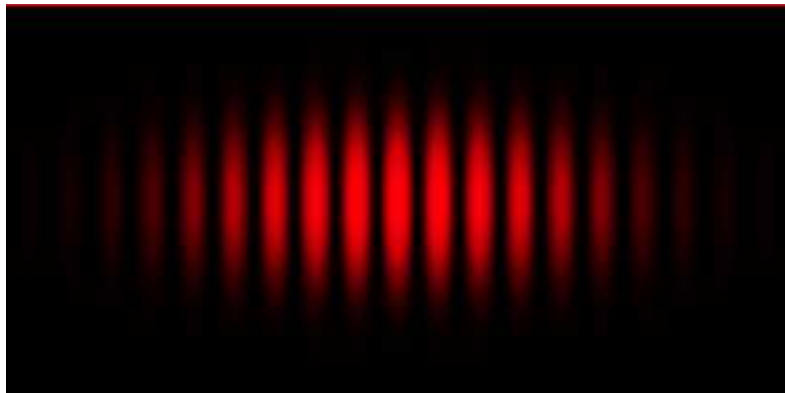
Złożenie **fal**  
⇒ **prążki interferencyjne**

W roku 1923 Louis de Broglie wysunął hipotezę, że **wszystkie cząstki** powinny przejawiać własności **falowe** !

# Cząstki i fale

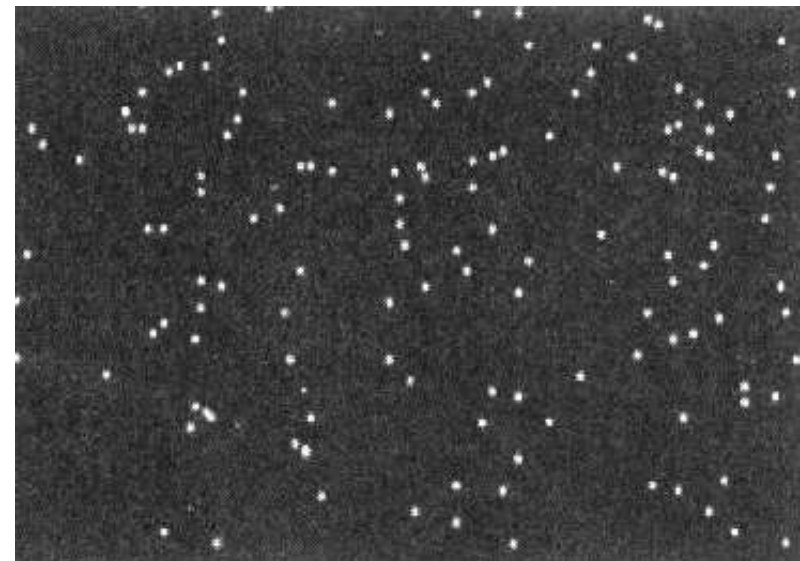
Obraz przy przechodzeniu przez dwie szczeliny:

**Światło**



Złożenie **fal**  
⇒ **prążki interferencyjne**

**Elektrony**



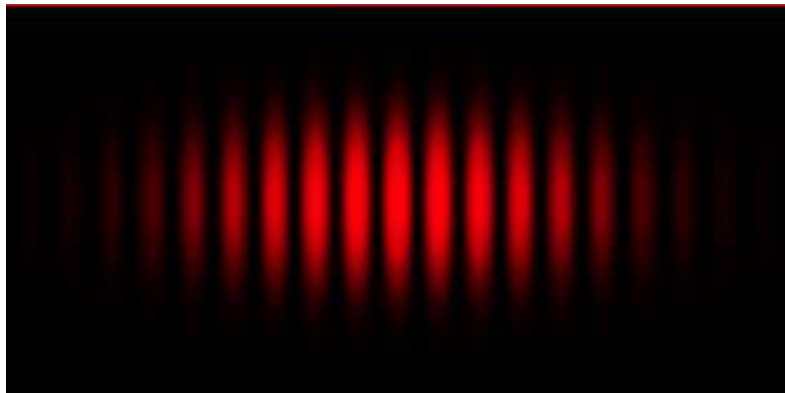
100 elektronów  
rozkład przypadkowy ?



# Cząstki i fale

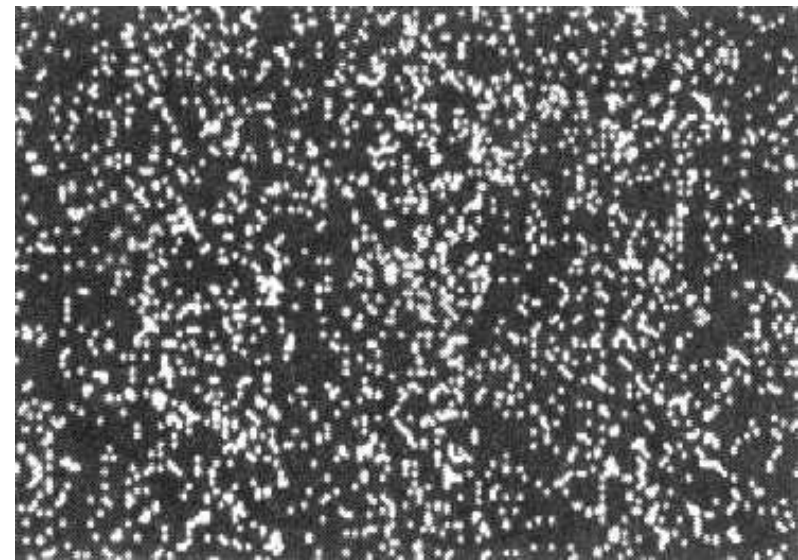
Obraz przy przechodzeniu przez dwie szczeliny:

**Światło**



Złożenie **fal**  
⇒ prążki interferencyjne

**Elektrony**

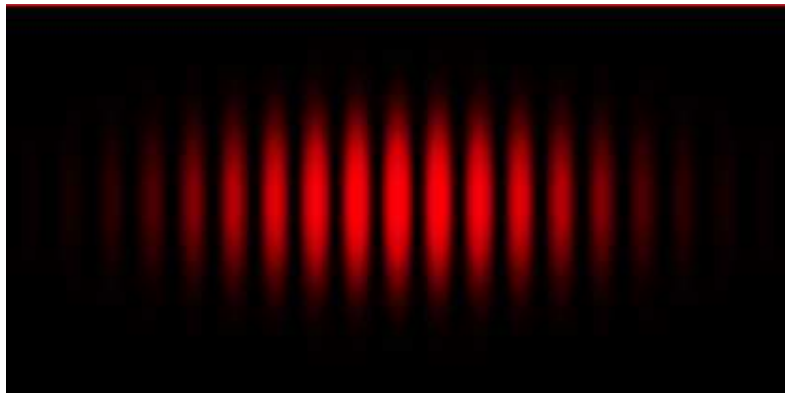


3000 elektronów

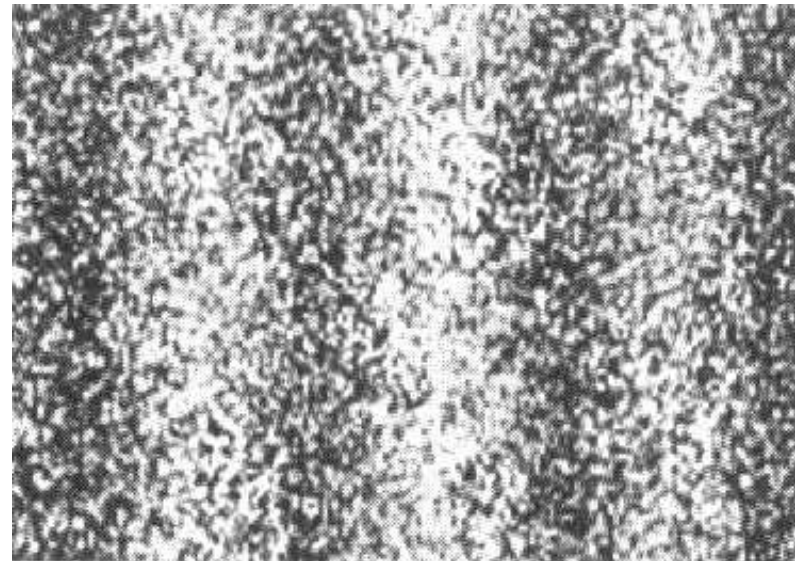
# Cząstki i fale

Obraz przy przechodzeniu przez dwie szczeliny:

**Światło**



**Elektrony**



Złożenie **fal**

⇒ **prążki interferencyjne**

70000 elektronów

**Elektrony też zachowują się jak fale !**  
**Potwierdzenie hipotezy de Broglie'a.**

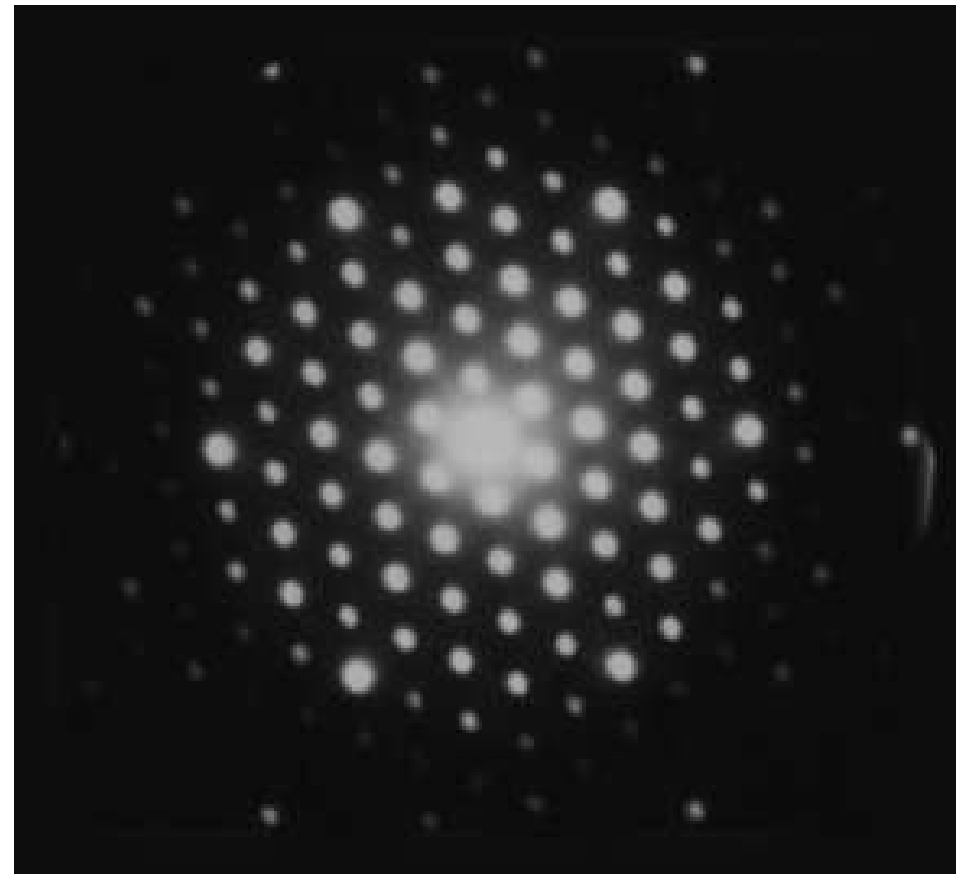
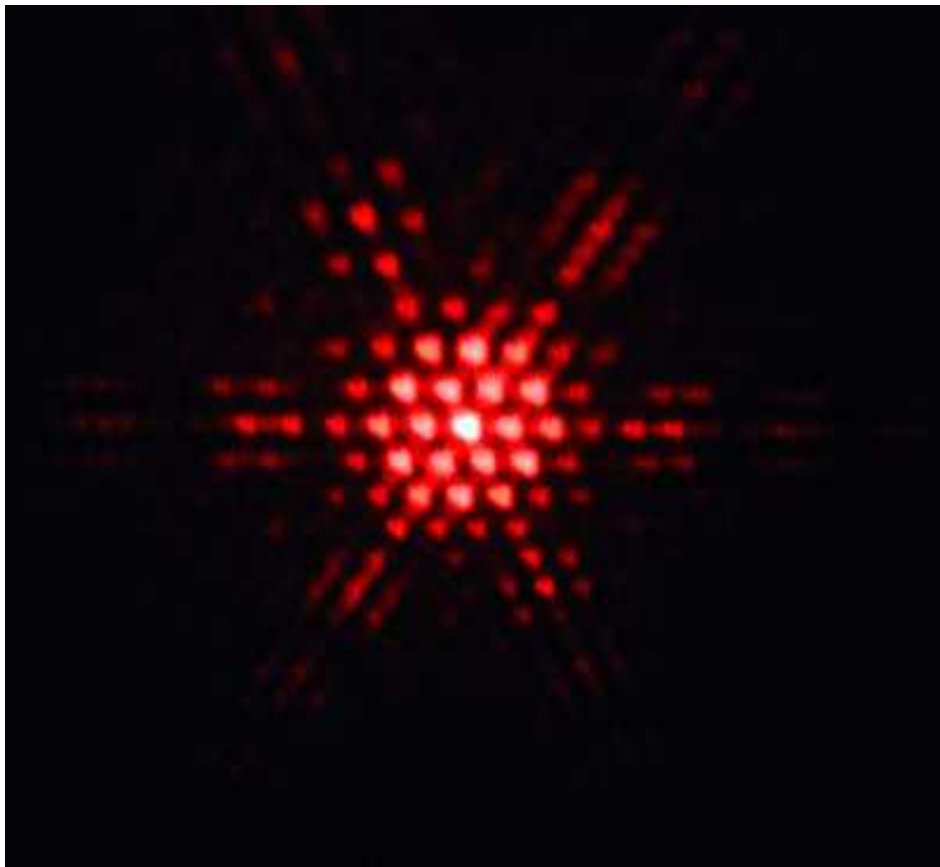


# Cząstki i fale

Dyfrakcja na strukturach heksagonalnych

*Światło*

*Elektrony*

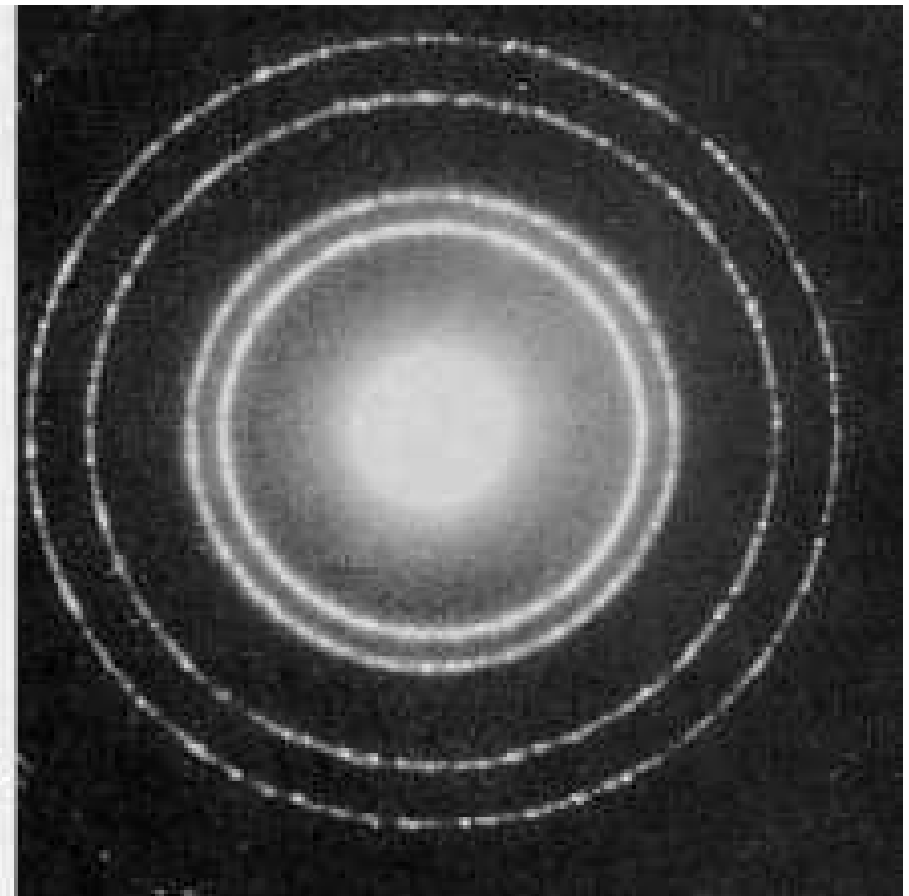
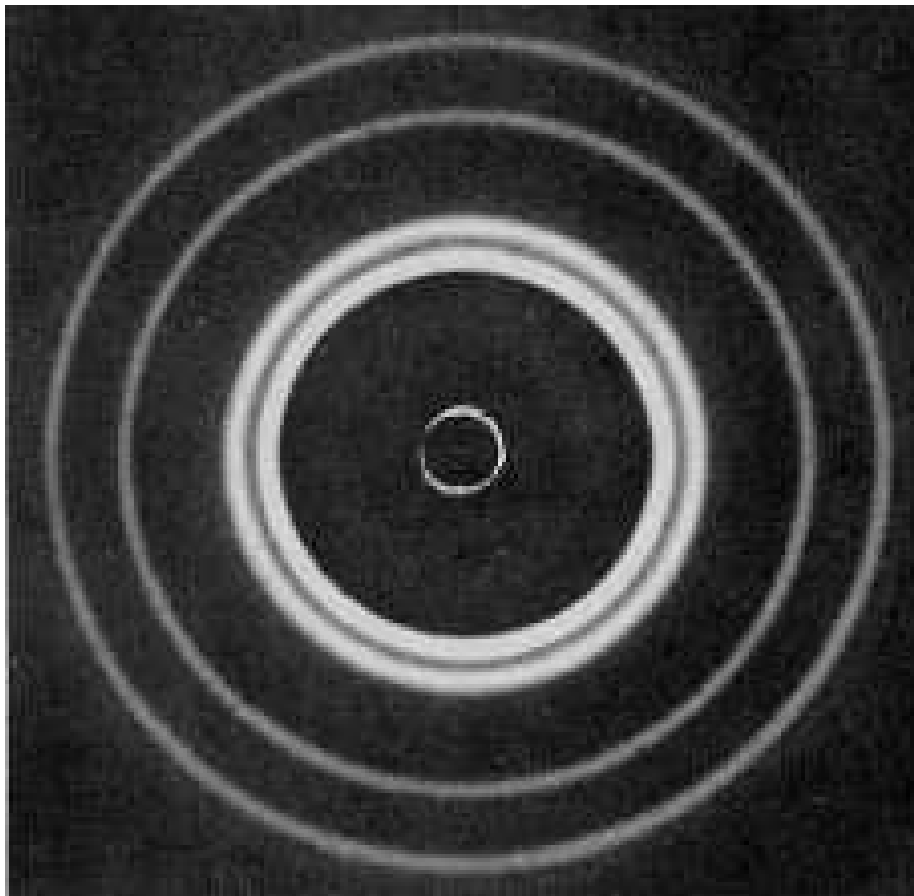


# Cząstki i fale

Obraz przy przechodzeniu przez cienką folię aluminiową

*Promieniowanie X*

*Elektrony*



# Problem masy

Mechanika kwantowa opisuje cząstki poprzez tzw. **funkcje falowe**.

Ruch cząstki to rozchodzenie się **“fal prawdopodobieństwa”**.

**Amplituda** tej fali opisuje **prawdopodobieństwo** znalezienia cząstki w danym miejscu i danej chwili czasu.

# Problem masy

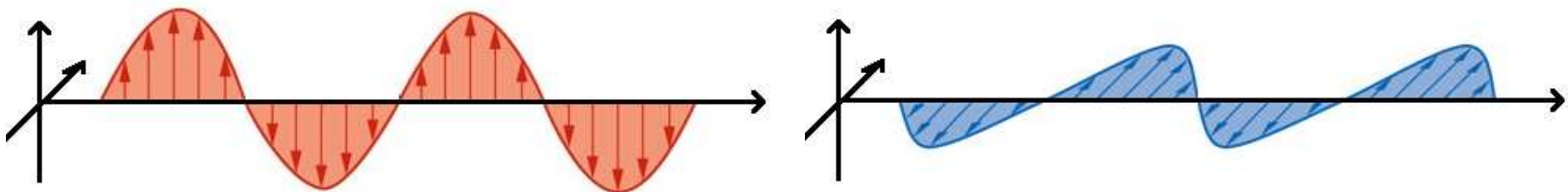
Mechanika kwantowa opisuje cząstki poprzez tzw. **funkcje falowe**.

Ruch cząstki to rozchodzenie się **“fal prawdopodobieństwa”**.

**Amplituda** tej fali opisuje **prawdopodobieństwo** znalezienia cząstki w danym miejscu i danej chwili czasu.

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

Jej **faza** (**“polaryzacja fali”**) jest **nieistotna**.



# Problem masy

Mechanika kwantowa opisuje cząstki poprzez tzw. **funkcje falowe**.

Ruch cząstki to rozchodzenie się **“fal prawdopodobieństwa”**.

**Amplituda** tej fali opisuje **prawdopodobieństwo** znalezienia cząstki w danym miejscu i danej chwili czasu.

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

Jej **faza** (“**polaryzacja fali**”) jest **nieistotna**.

## ***Symetria cechowania***

Niezmienniczość teorii względem zmiany fazy

# Problem masy

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





# Problem masy

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

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

***“Fale oddziaływań” nie mają masy !***



# Problem masy

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

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

Z drugiej strony **doświadczenie** pokazuje, że bozony  $W^\pm$  i  $Z^0$  mają **niezerową masę**...

⇒ czy potrafimy pogodzić wymóg symetrii z doświadczeniem ?!

Czy w symetrycznym świecie mogą istnieć stany łamiące symetrię?



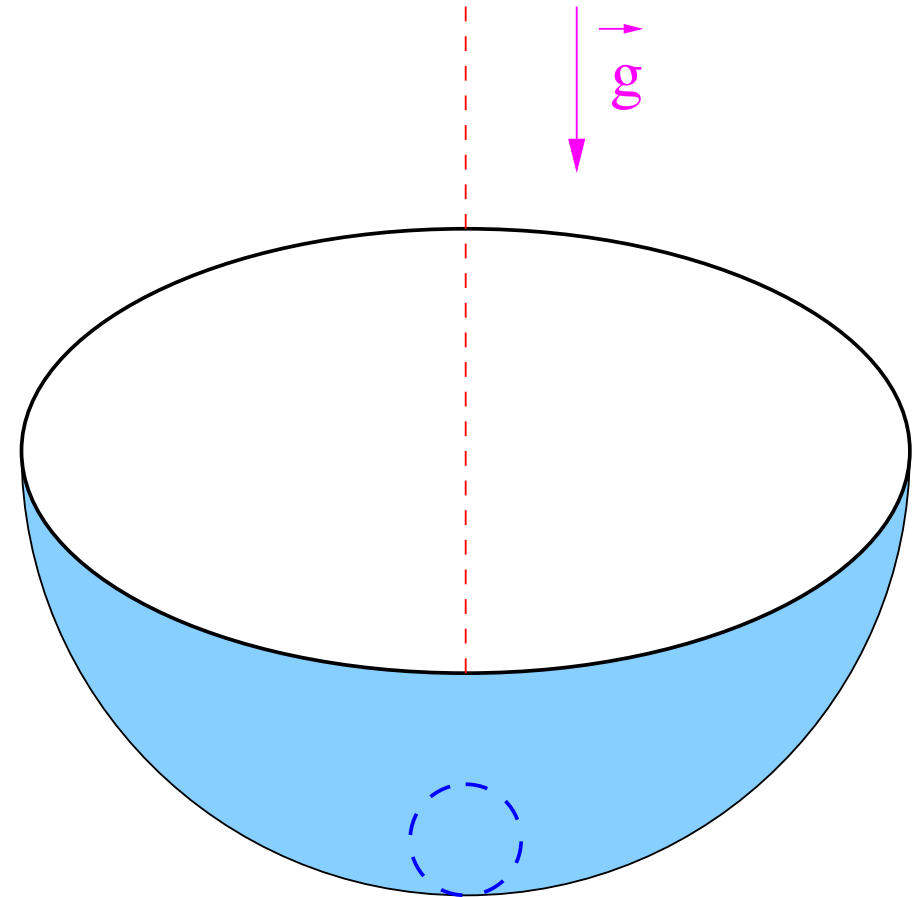
# Problem masy

## **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...



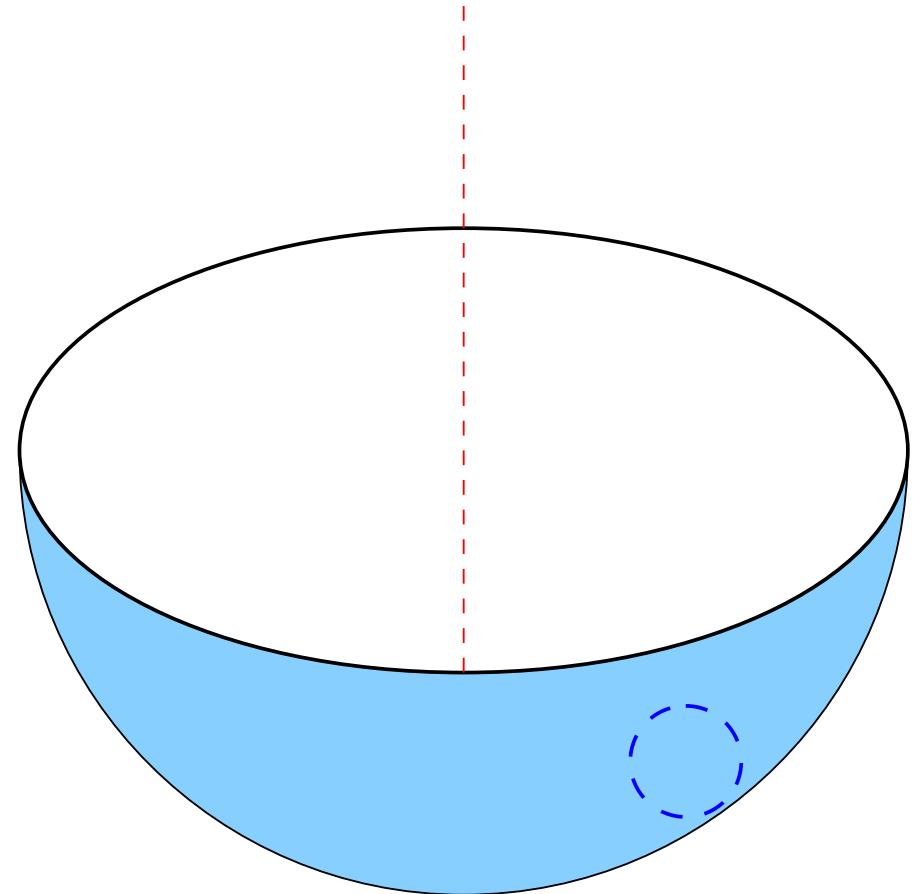
# Problem masy

## **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.

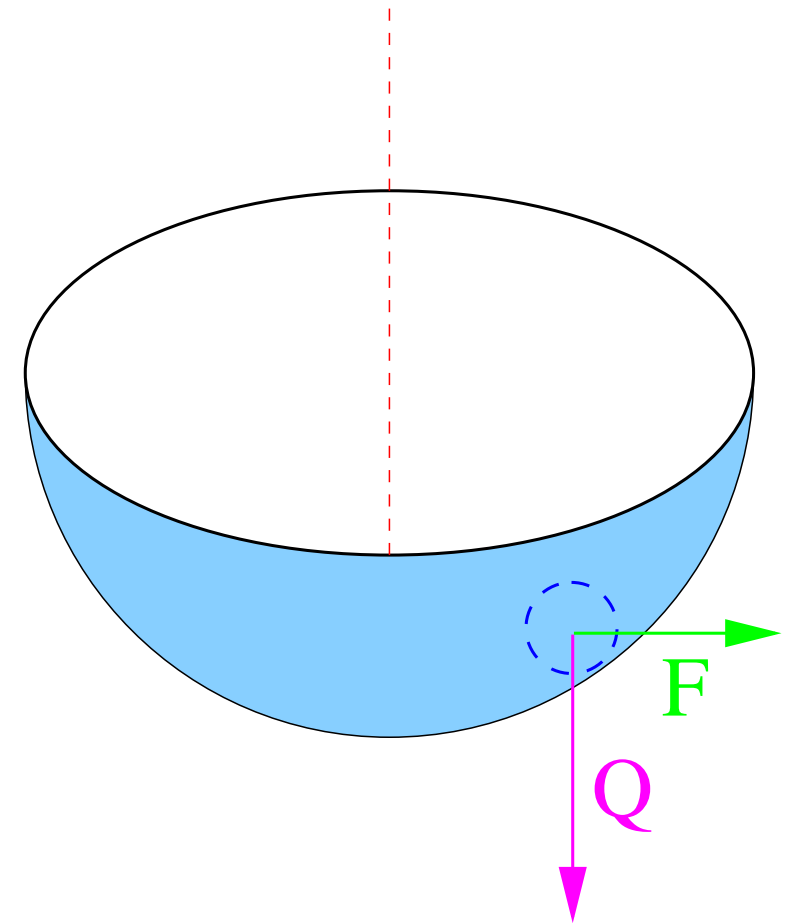
Jednak doświadczenie może wykazać, że kulka nie znajduje się na osi symetrii !...



# Spontaniczne łamanie symetrii

Możliwe wytłumaczenia:

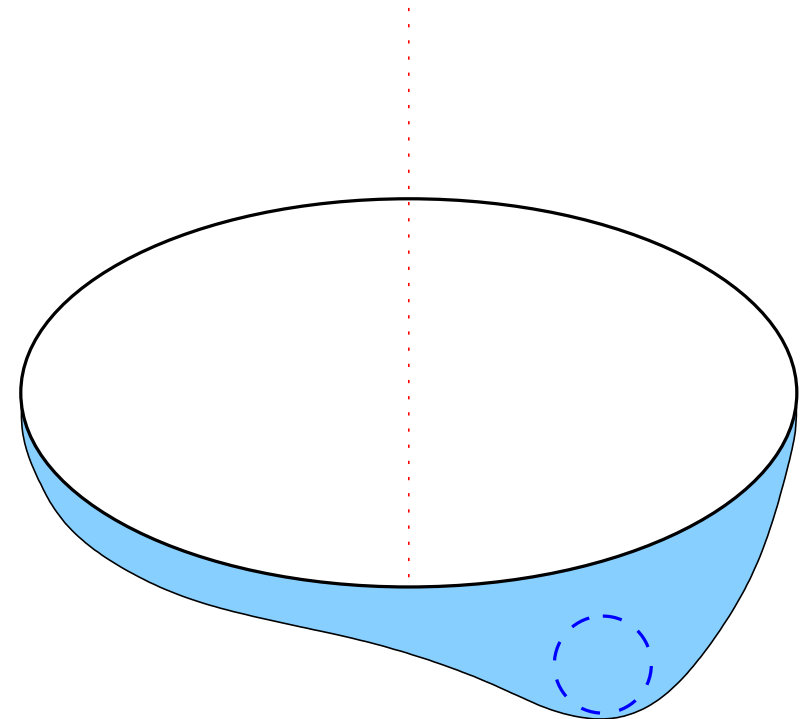
- na kulkę działa dodatkowa siła, skierowana **pod kątem** do osi



# Spontaniczne łamanie symetrii

Możliwe wytłumaczenia:

- na kulkę działa dodatkowa siła, skierowana **pod kątem** do osi
  - czasza **nie ma symetrii** osiowej
- ⇒ w obu tych przypadkach musimy przyznać, że nasza symetria jest **“złamana”** (nie obowiązuje)

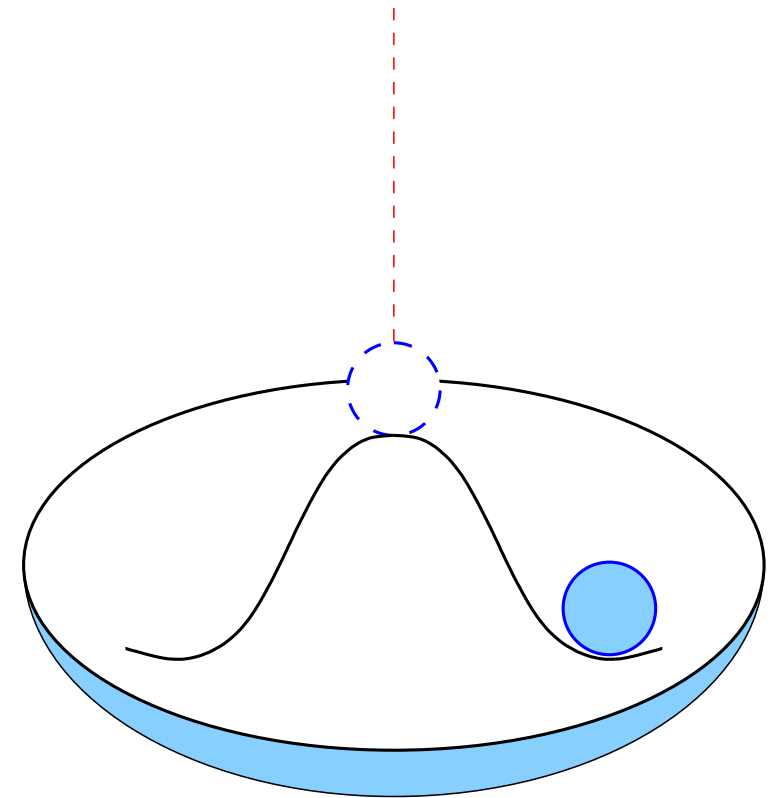


# Spontaniczne łamanie symetrii

Możliwe wytłumaczenia:

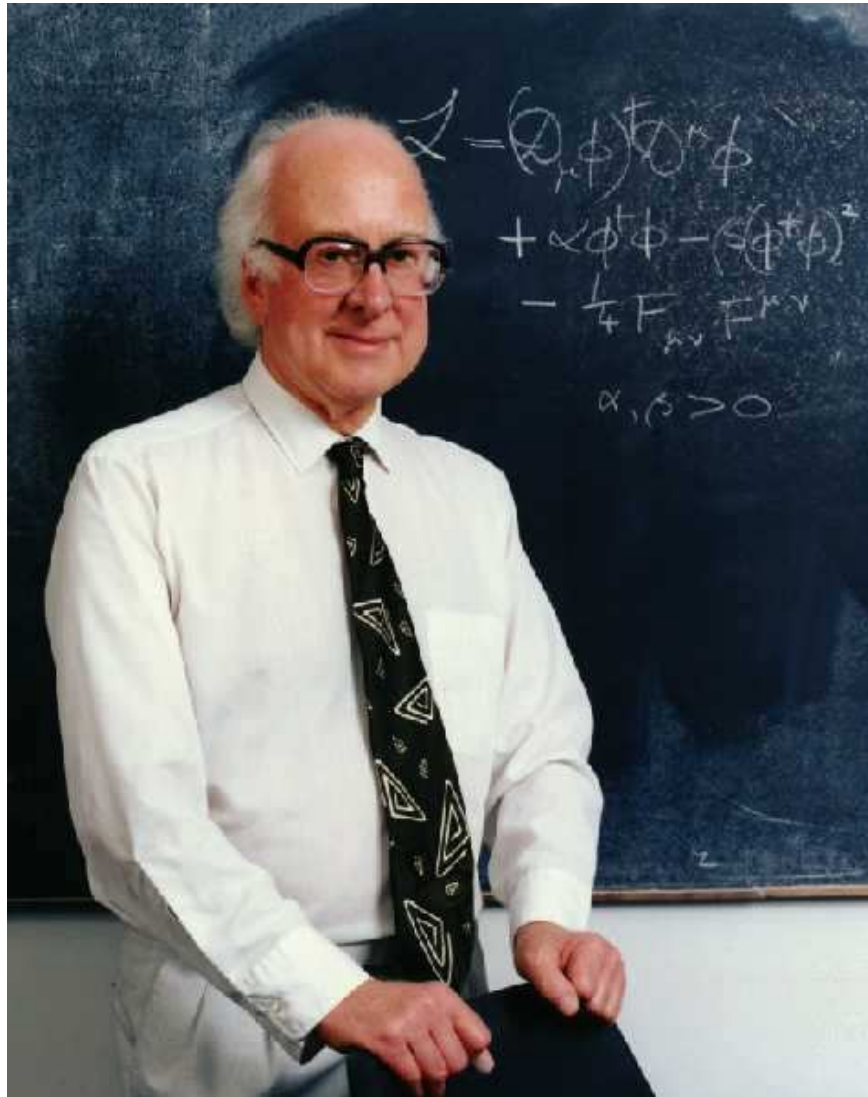
- na kulkę działa dodatkowa siła, skierowana **pod kątem** do osi
- czasza **nie ma symetrii** osiowej  
 $\Rightarrow$  w obu tych przypadkach musimy przyznać, że nasza symetria jest **“złamana”** (nie obowiązuje)
- czasza **zachowuje symetrię osiową**

ale położenie na osi nie jest stanem równowagi trwałej  $\Rightarrow$  kulka stacza się wybierając jedno z **wielu możliwych** położeń równowagi



**Stoczenie się kulki powoduje spontaniczne złamanie symetrii !**

# Spontaniczne łamanie symetrii



Na możliwość nadania mas nośnikom oddziaływań poprzez spontaniczne łamanie symetrii wskazał czterdzieści lat temu (1964) 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!**



# Mechanizm Higgsa

Wyobraźmy sobie salę bankietową  
równomiernie wypełnioną ludźmi (pole Higgsa)



# Mechanizm Higgsa

Pojawia się sławny naukowiec (bozon cechowania) przyciągając uwagę zebranych...



# Mechanizm Higgsa

Ludzie cisnący się wokół naukowca utrudniają mu poruszanie się (nadają mu masę)



# Cząstka Higgsa

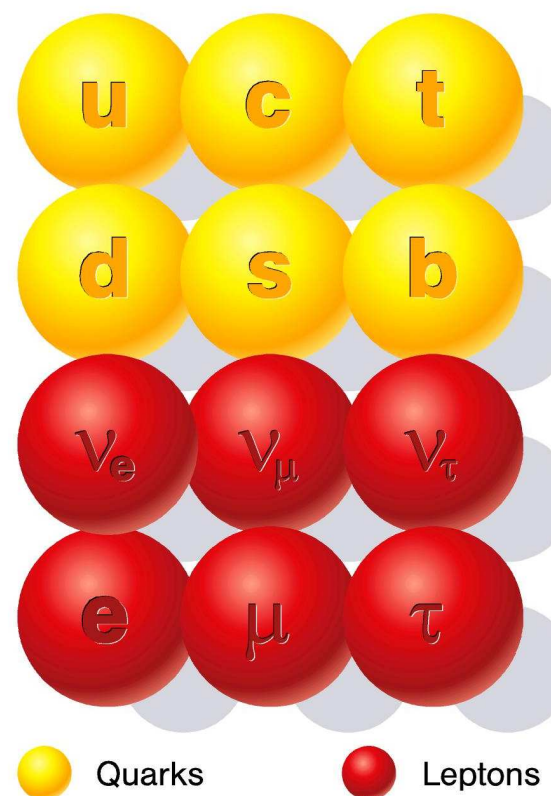
Ludzie na bankiecie mogą też **spontanicznie** tworzyć “zgęszczenia”  $\Rightarrow$  oczekujemy istnienia dodatkowej **cząstki Higgsa**



# Model Standardowy

## Podsumowanie

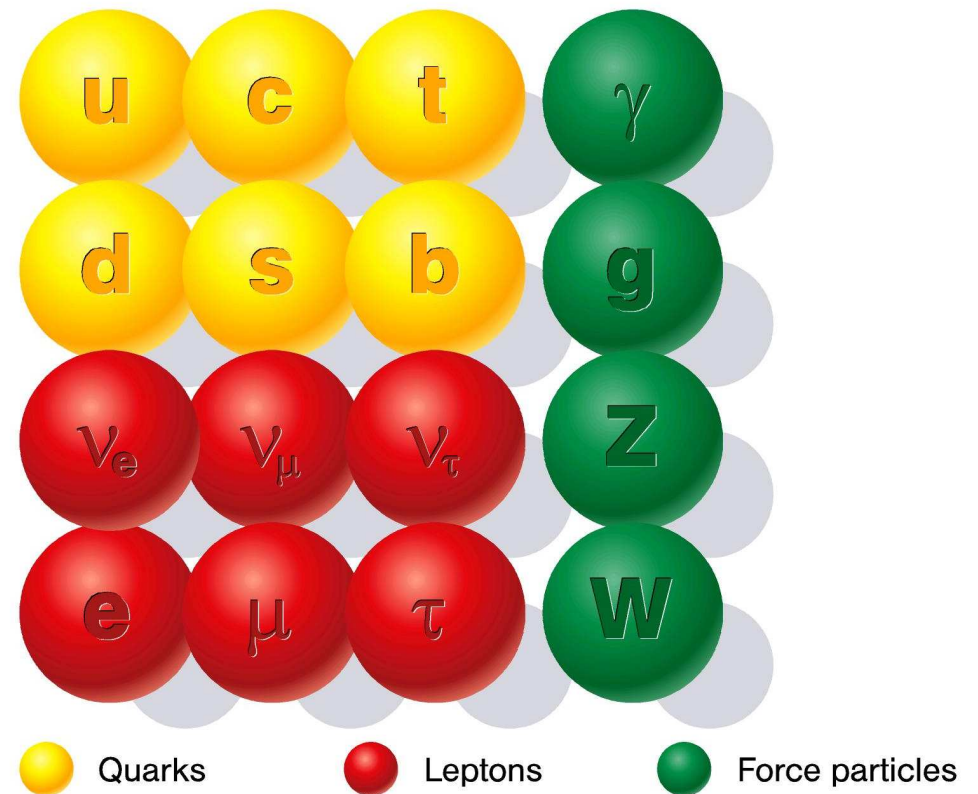
- cząstki materii  
kwarki i leptony



# Model Standardowy

## Podsumowanie

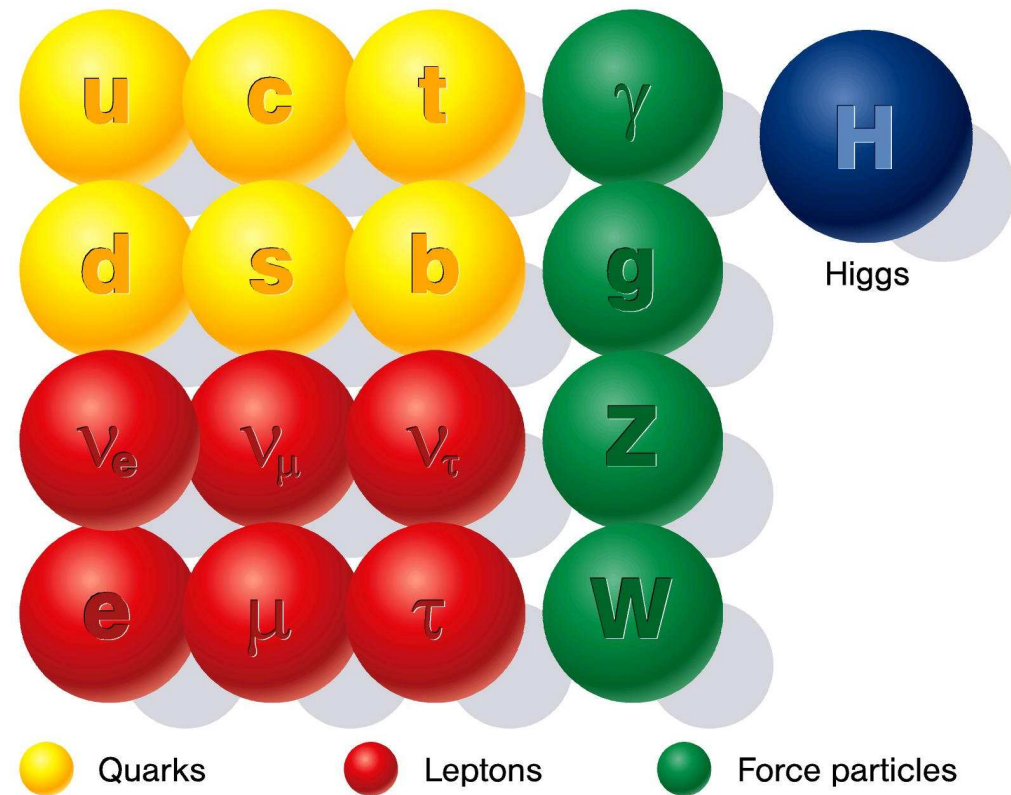
- cząstki materii  
kwarki i leptony
- nośniki oddziaływań  
 $\gamma$ ,  $g$ ,  $W^\pm$  i  $Z^0$



# Model Standardowy

## Podsumowanie

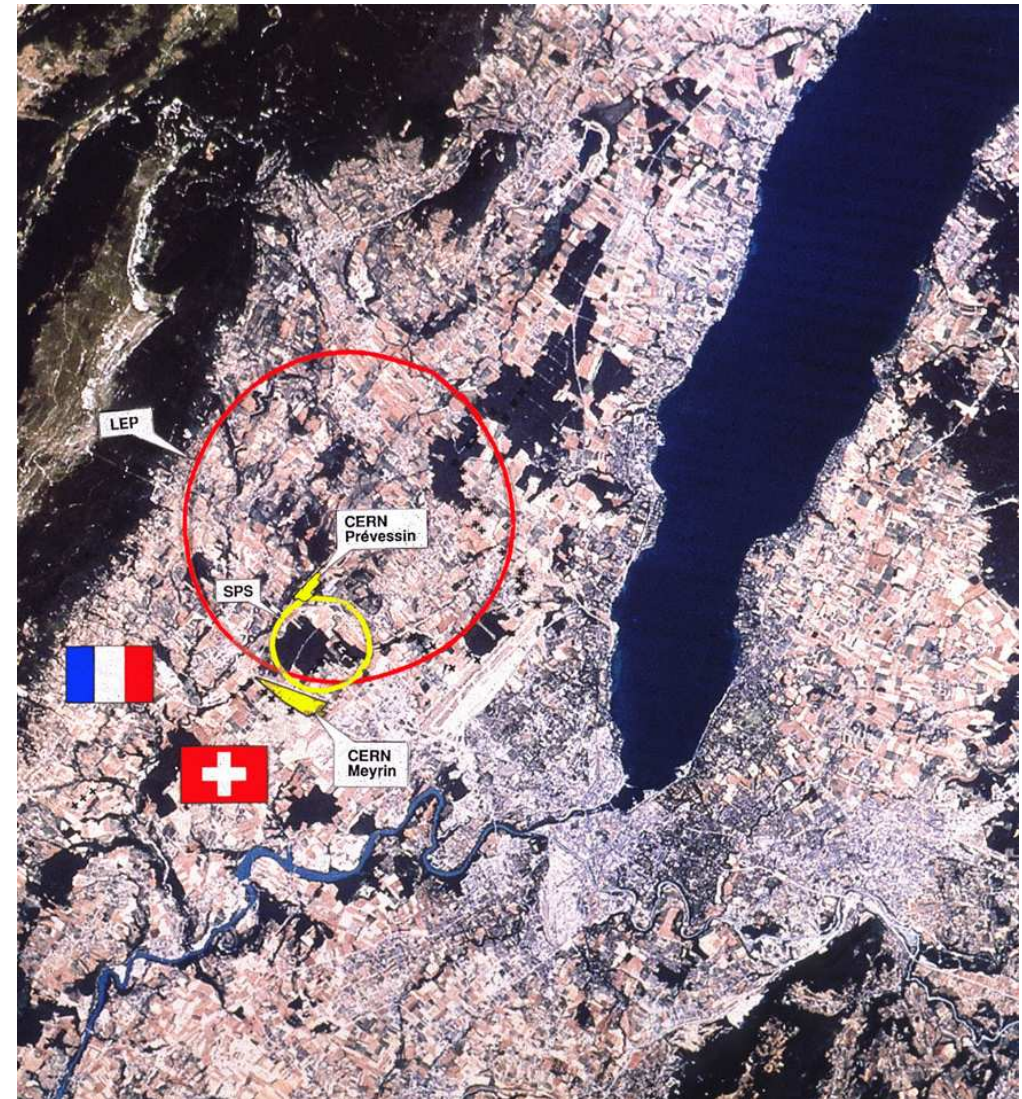
- cząstki materii  
kwarki i leptony
  - nośniki oddziaływań  
 $\gamma$ ,  $g$ ,  $W^\pm$  i  $Z^0$
  - bozon Higgsa  
konieczny dla  
spójności modelu
- “Nadaje masy”  
wszystkim cząstkom



# Testy Modelu Standardowego

Model Standardowy został bardzo dokładnie sprawdzony, m.in. w eksperymentach przy akceleratorze **LEP** w **CERN** pod Genewą.

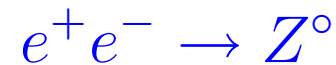
W pierścieniu o obwodzie 27 km rozpędzane i zderzane były przeciwbieżne wiązki **elektronów** i **pozytonów**.





# Testy Modelu Standardowego

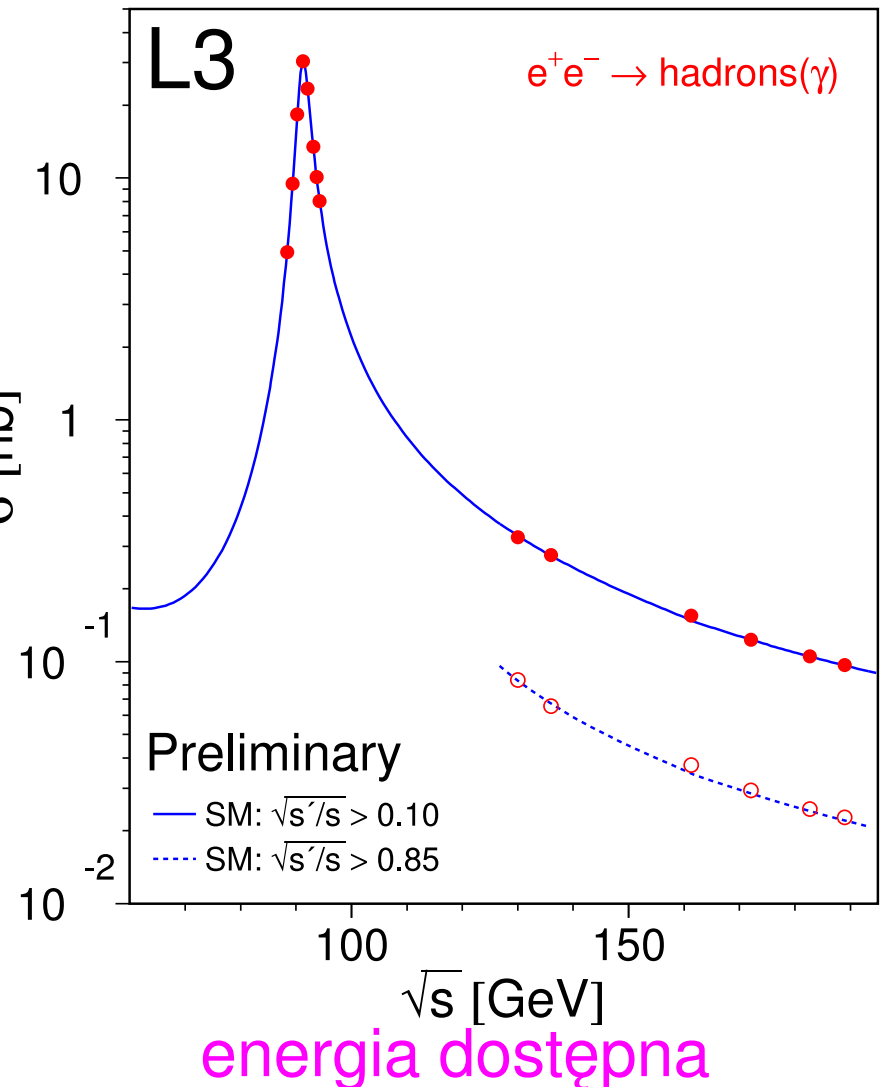
Rezonansowa produkcja ciężkich bozonów pośredniczących:



W przekroju czynnym na produkcję hadronów widać wyraźne **maksimum** odpowiadające **produkcji** bozonu  $Z^0$

Bardzo precyzyjne pomiary:

$$M_Z = 91.1875 \pm 0.0021 \text{ GeV}$$



# Testy Modelu Standardowego

## Porównanie

Model Standardowy ma jedynie **trzy wolne parametry** opisujące oddziaływania (+ masy cząstek i Higgsa).

Model tłumaczy **wyniki wszystkich** dotychczasowych **pomiarów oddziaływań elektroslabych** !

Porównanie pomiarów z teorią  $\Rightarrow$

np.  $m_W = 80.425 \pm 0.034$  GeV pomiar  
 $m_W = 80.390$  GeV dopasowanie

Brakuje nam tylko... cząstki Higgsa !

$\Delta\alpha_{\text{had}}^{(5)}(m_Z)$	$0.02761 \pm 0.00036$	0.02770
$m_Z$ [GeV]	$91.1875 \pm 0.0021$	91.1874
$\Gamma_Z$ [GeV]	$2.4952 \pm 0.0023$	2.4965
$\sigma_{\text{had}}^0$ [nb]	$41.540 \pm 0.037$	41.481
$R_l$	$20.767 \pm 0.025$	20.739
$A_{\text{fb}}^{0,l}$	$0.01714 \pm 0.00095$	0.01642
$A_l(P_\nu)$	$0.1465 \pm 0.0032$	0.1480
$R_b$	$0.21630 \pm 0.00066$	0.21562
$R_c$	$0.1723 \pm 0.0031$	0.1723
$A_{\text{fb}}^{0,b}$	$0.0992 \pm 0.0016$	0.1037
$A_{\text{fb}}^{0,c}$	$0.0707 \pm 0.0035$	0.0742
$A_b$	$0.923 \pm 0.020$	0.935
$A_c$	$0.670 \pm 0.027$	0.668
$A_l(\text{SLD})$	$0.1513 \pm 0.0021$	0.1480
$\sin^2\theta_{\text{eff}}^{\text{lept}}(Q_{\text{fb}})$	$0.2324 \pm 0.0012$	0.2314
$m_W$ [GeV]	$80.425 \pm 0.034$	80.390
$\Gamma_W$ [GeV]	$2.133 \pm 0.069$	2.093
$m_t$ [GeV]	$178.0 \pm 4.3$	178.4

# Poszukiwanie Higgosa w LEP

## Masa bozonu Higgosa

Obecność cząstki Higgosa wpływa na przebieg wielu procesów. Z ich precyzyjnych pomiarów możemy oszacować jej masę.

Analiza wszystkich dostępnych danych wskazuje, że masa Higgosa powinna wynosić około 100 GeV:

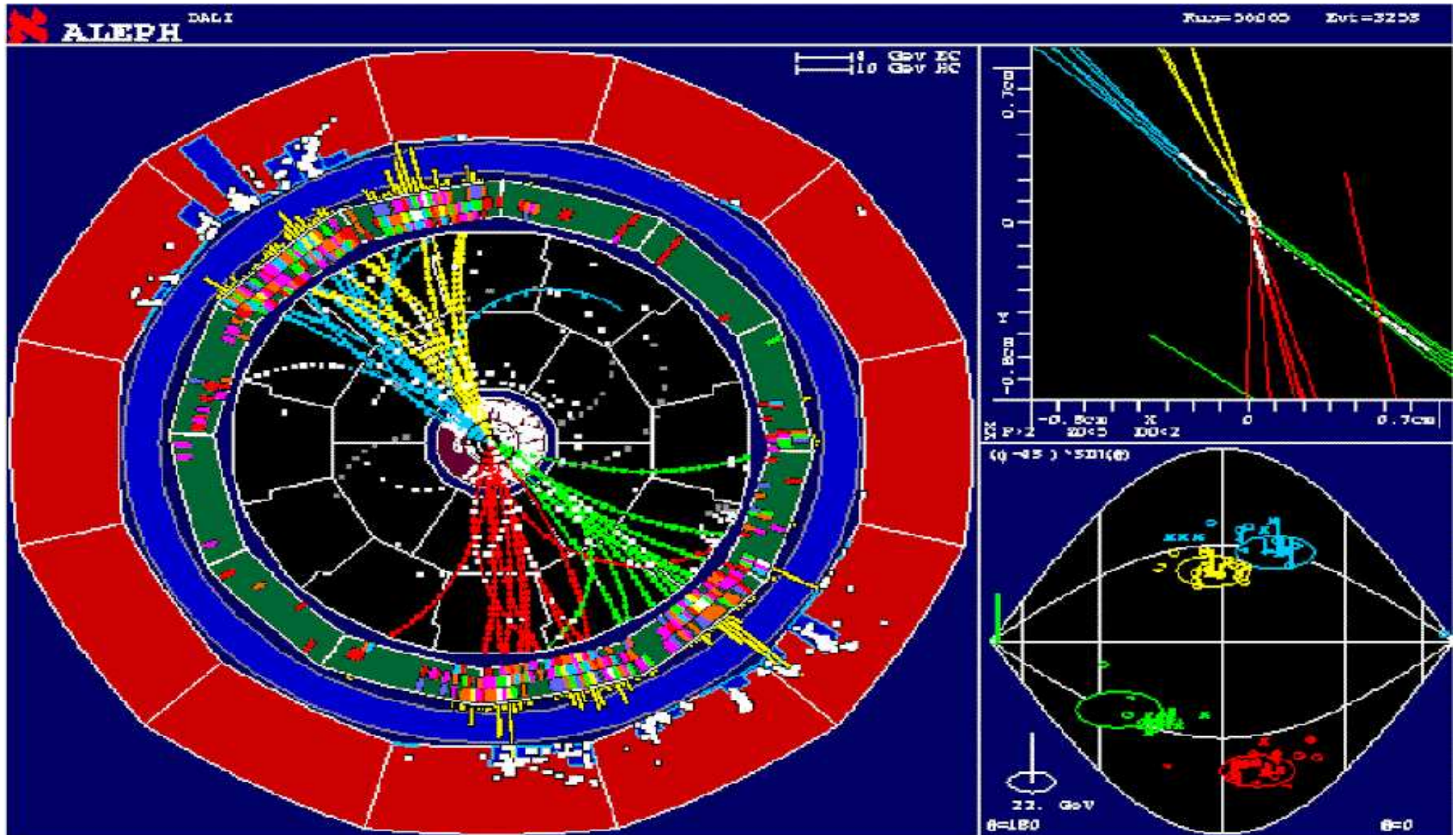
$$m_h = 129_{-49}^{+74} \text{ GeV} \quad \text{lub:} \quad m_h < 285 \text{ GeV}$$

## Poszukiwania

Mimo wieloletniego wysiłku czterech grup eksperymentalnych nie udało się znaleźć bozonu Higgosa w LEP.

Dostępna energia wiązek pozwoliła jednak na poszukiwania cząstki Higgosa jedynie dla mas poniżej około 115 GeV.

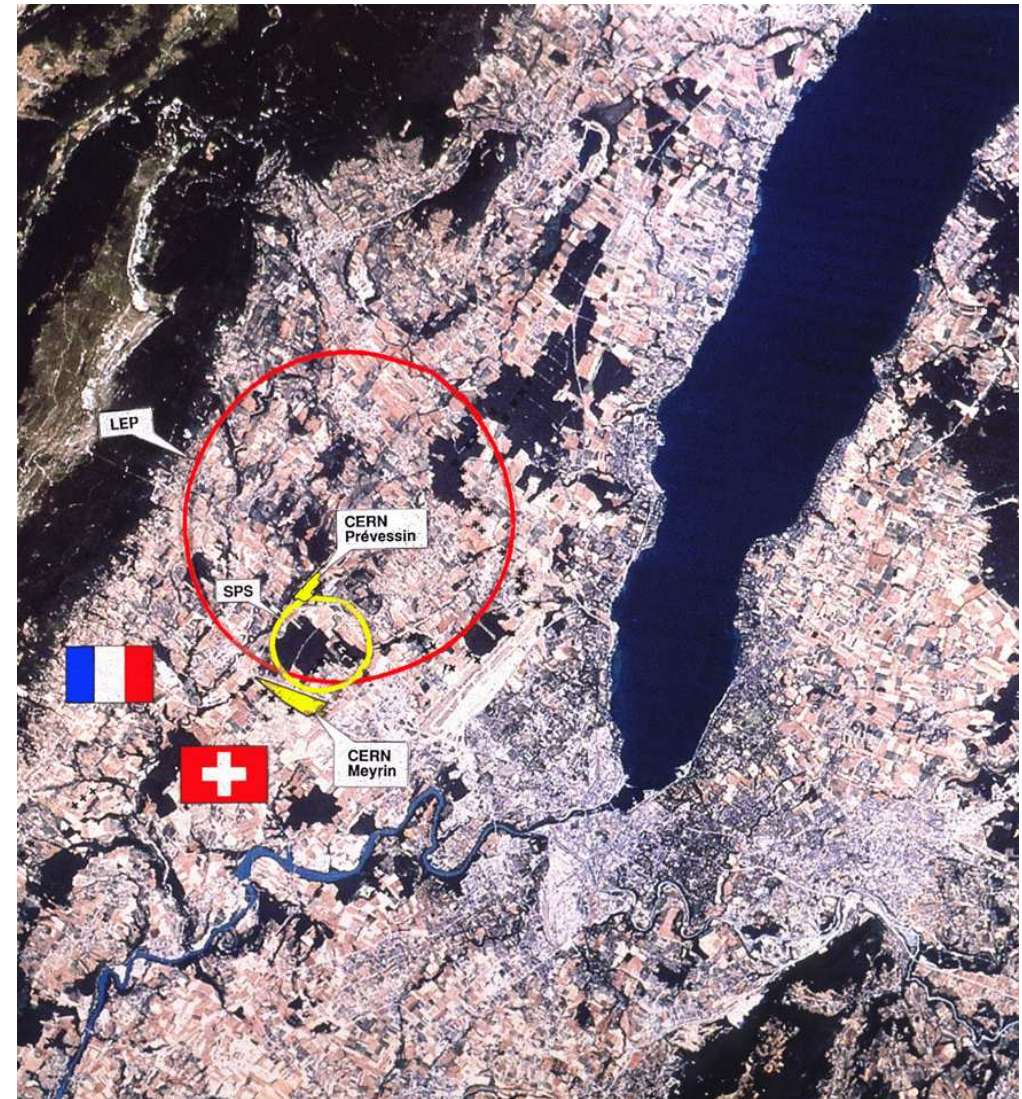
# Przypadek z eksperymentu ALEPH



# LEP

LEP był największym dotąd zbudowanym akceleratorem.

Zbudowany w CERN pod Genewą miał obwód ok. 27 km.



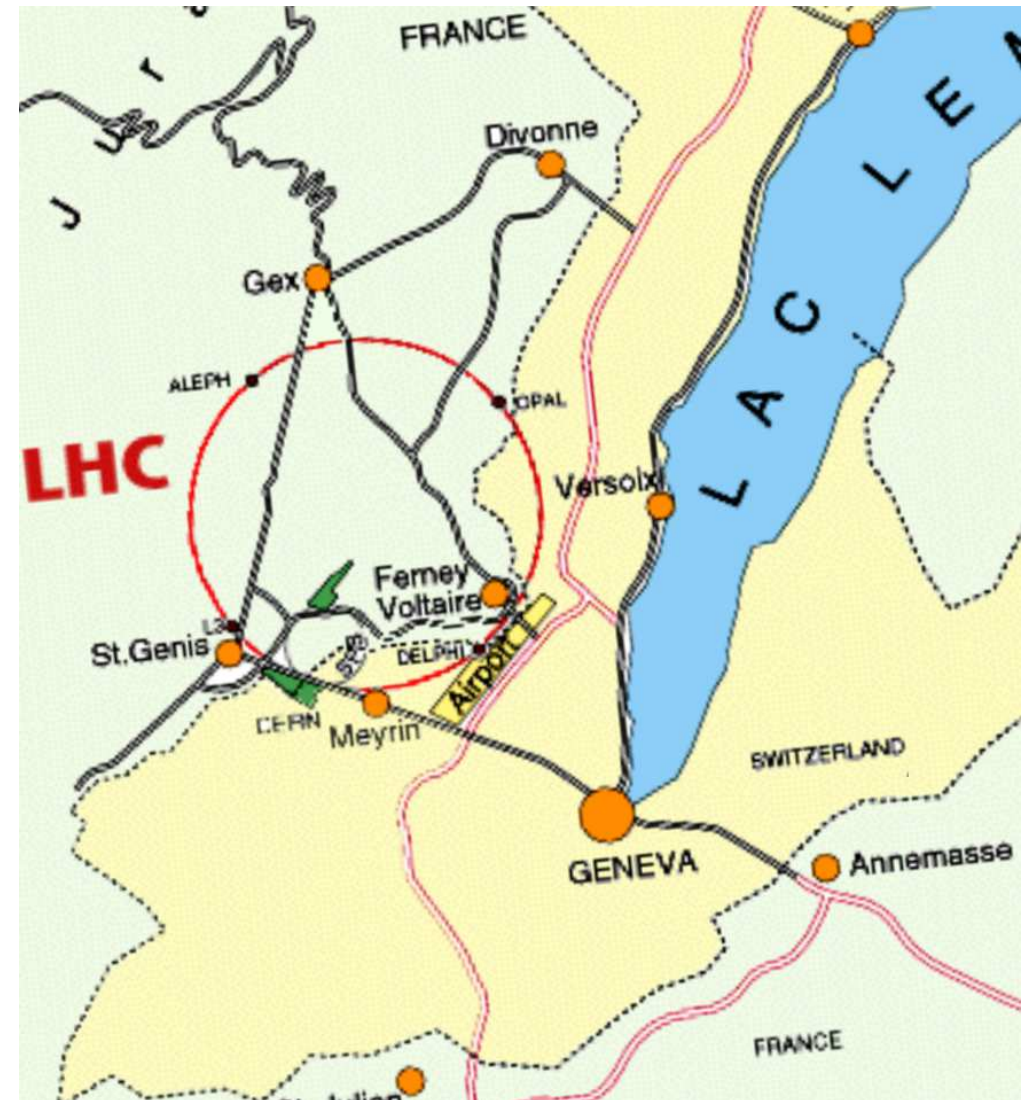
# LEP ⇒ LHC

**LEP** był największym dotąd zbudowanym akceleratorem.

Zbudowany w **CERN** pod Genewą miał obwód ok. 27 km.

W tym samym tunelu budowany jest obecnie akcelerator **LHC**.

Uruchomienie **LHC** planowane jest na rok **2007**.



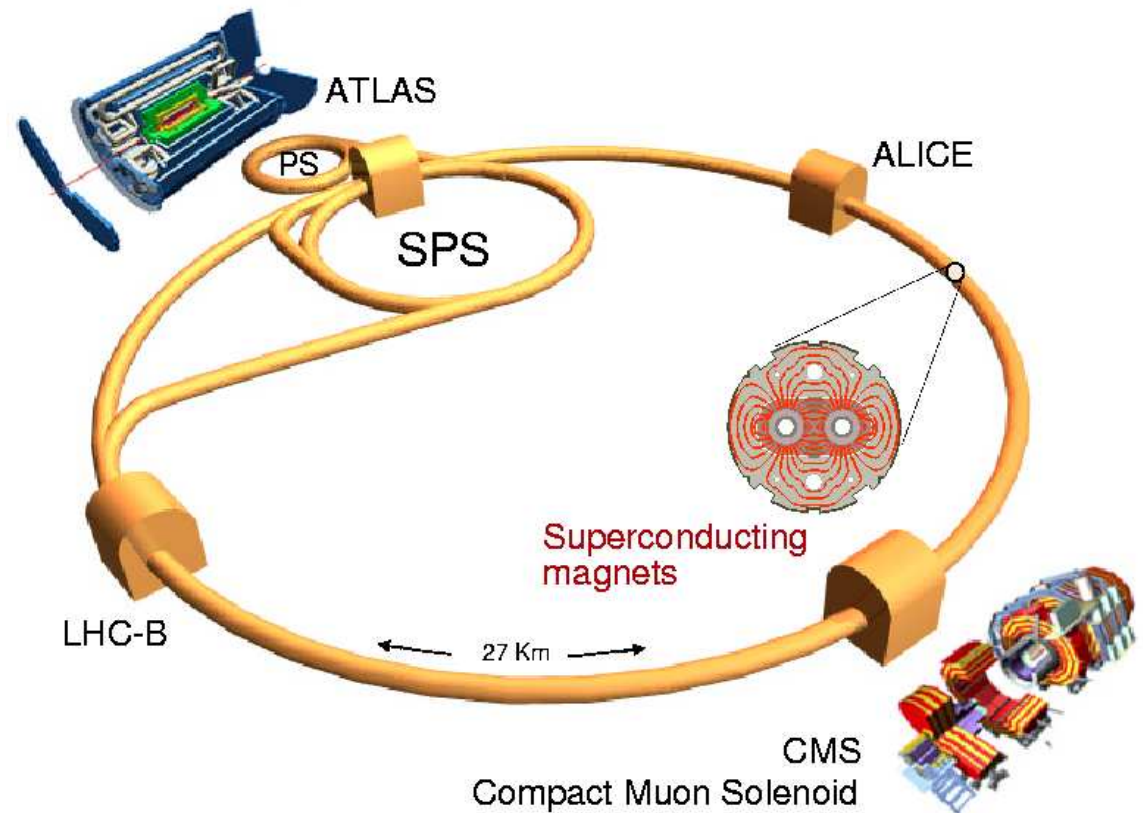
# LHC

Przeciwbieżne wiązki protonów w LHC mają mieć energię  $2 \times 7 \text{ TeV}$  ( $1 \text{ TeV} = 1000 \text{ GeV}$ )

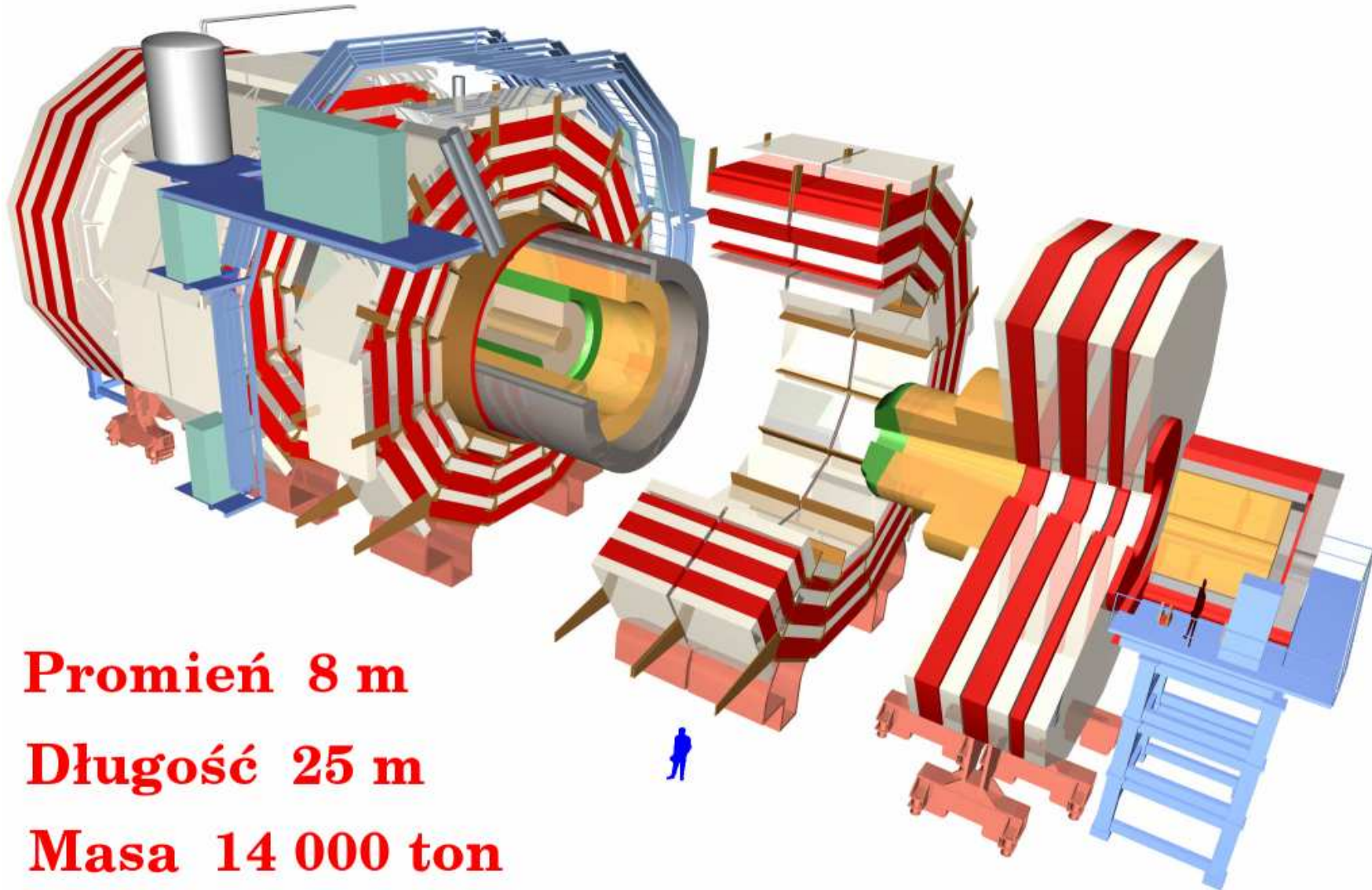
Intensywność wiązek będzie tak duża, że oczekujemy produkcji do 1000 cząstek Higgsa na godzinę!

Przypadków produkcji cząstki Higgsa będą poszukiwać dwa eksperymenty: ATLAS i CMS

## The Large Hadron Collider (LHC)



# Detektor CMS



**Promień 8 m**

**Długość 25 m**

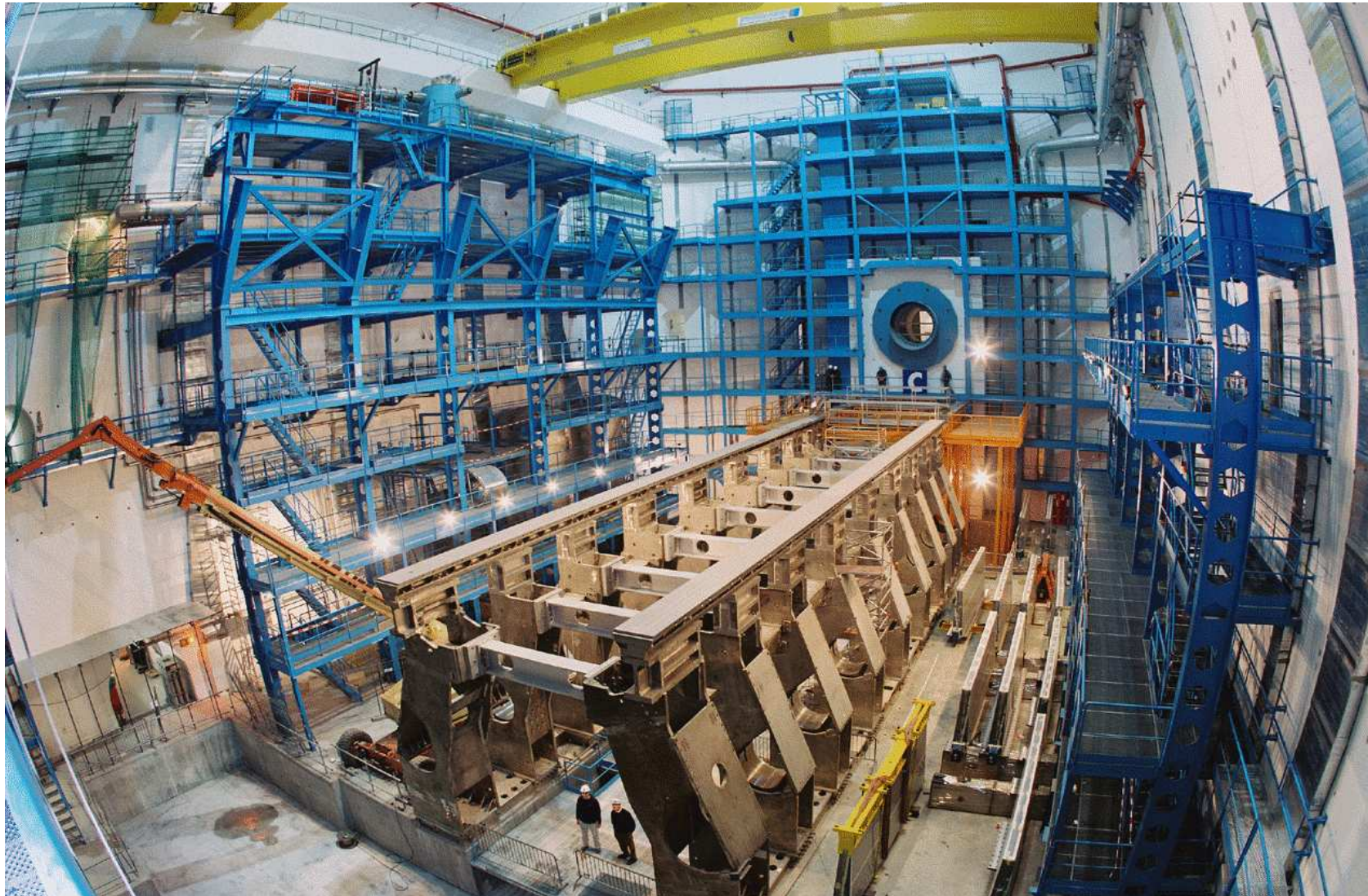
**Masa 14 000 ton**





# Stan przygotowań - ATLAS

11 czerwca 2004



# Stan przygotowań - ATLAS

20 września 2005



# Poszukiwanie Higgosa w LHC

Poszukiwania **bozonu Higgosa** a następnie **pomiar** jego **parametrów** będzie jednym z głównych tematów badań w LHC.

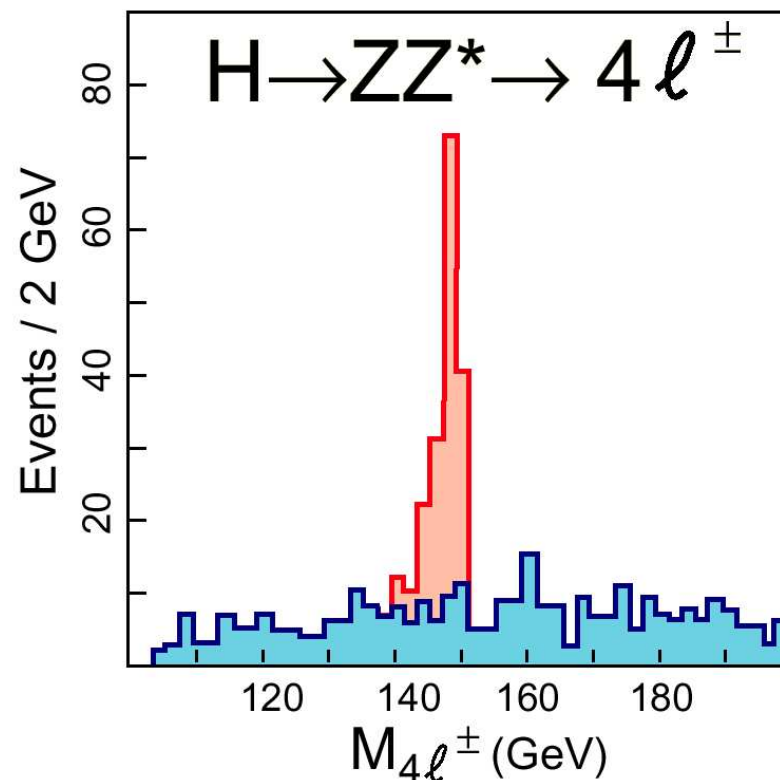
Najbardziej obiecujący jest **kanal**:

$$pp \rightarrow H \rightarrow Z^0 Z^0 \rightarrow l^+ l^- l^+ l^-$$

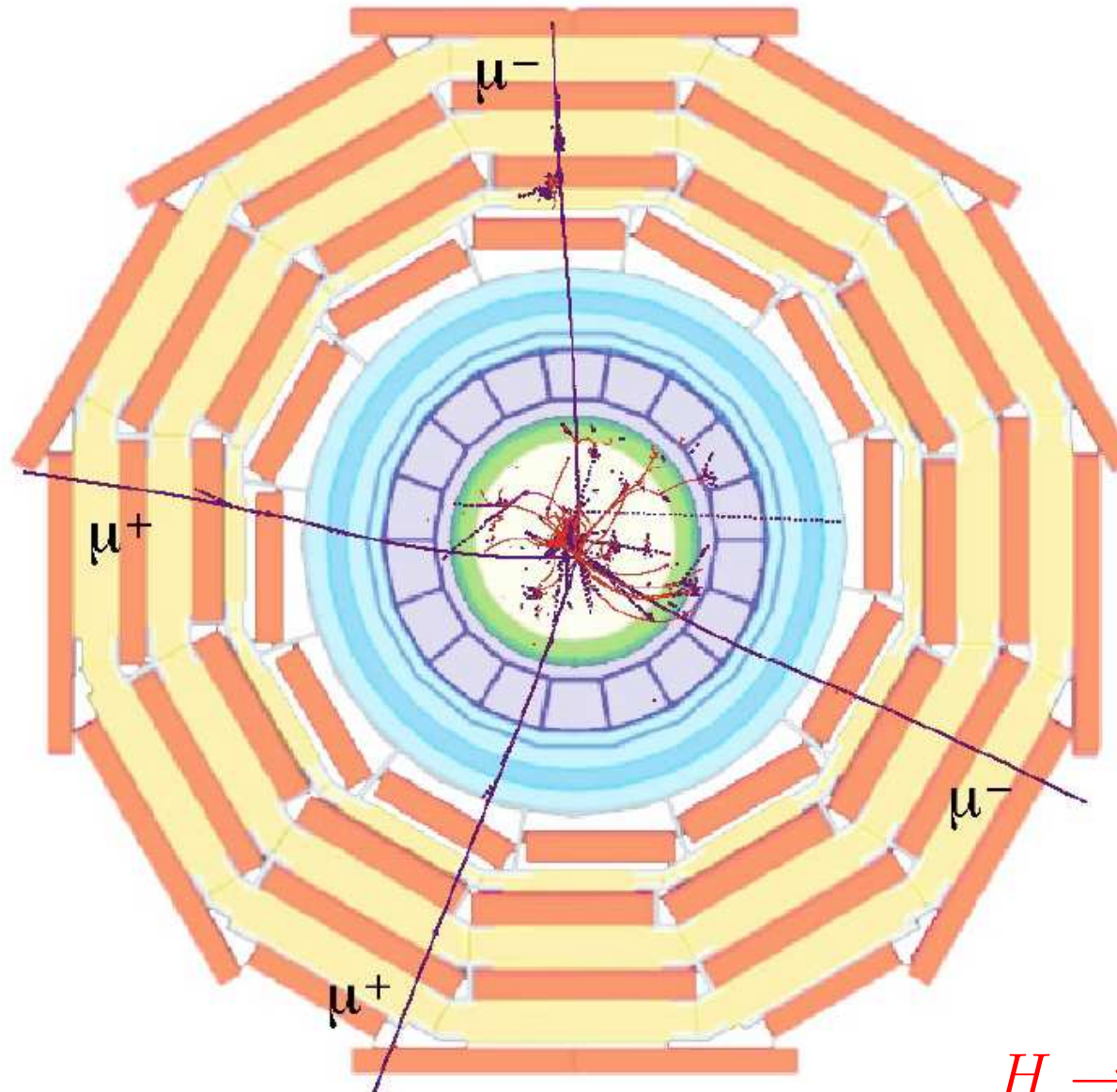
gdyż naładowane leptony ( $e^\pm$  i  $\mu^\pm$ ) można **łatwo zidentyfikować**

Eksperymenty przy **LHC** będą mogły zidentyfikować bozon Higgosa w **Modelu Standardowym w pełnym zakresie** mas.

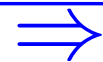
Uruchomienie **LHC** otworzy **nowy rozdział** w fizyce cząstek elementarnych...



# Symulacja eksperymentu CMS



$$H \rightarrow ZZ \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$$

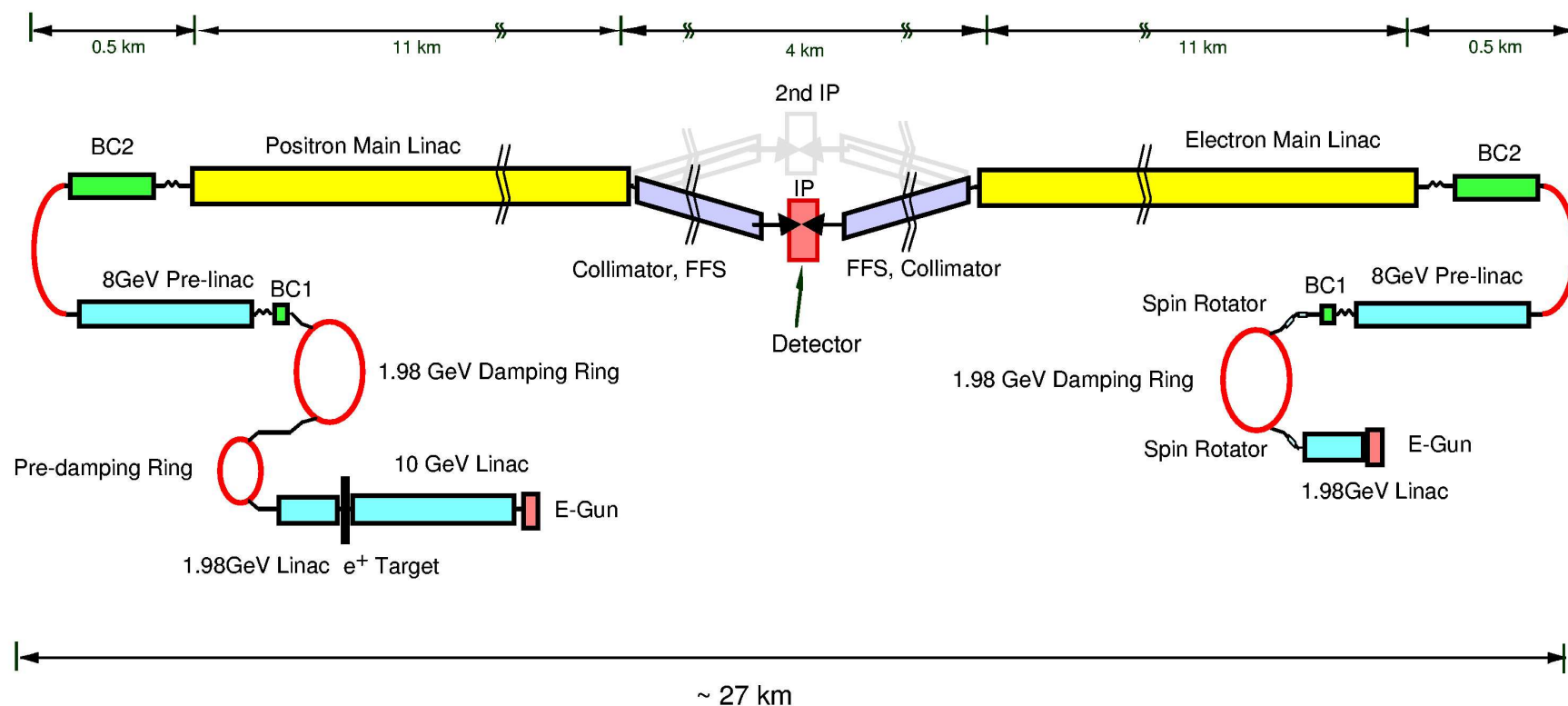


# Projekt ILC

Aby precyzyjnie zmierzyć własności cząstki Higgosa planowana jest już budowa kolejnego akceleratora - akceleratora liniowego  $e^+e^-$ .

## International Linear Collider (ILC)

Ogólna koncepcja akceleratora:



# Precyzyjne pomiary w ILC



W 2008 roku powinniśmy wiedzieć **skąd się bierze masa**.  
Rozpocznie się **nowy rozdział** w fizyce cząstek.  
Wciąż możesz wziąć w tym udział !...



**Czekamy także na Ciebie !**



# Nie tylko Higgs...

Cząstki supersymetryczne ?...





# Nie tylko Higgs...

Ukryte wymiary ?...



# Nie tylko Higgs...

A może będzie to “wyprawa w nieznanne”...

