

# Model Standardowy

## Elementy fizyki cząstek elementarnych

### Wykład VI

- elementy teorii kwantowej
- symetrie a prawa zachowania
- spontaniczne łamanie symetrii
- model Weinberga-Salama
- testy Modelu Standardowego
- poszukiwanie bozonu Higgsa

# Oddziaływania słabe...

## Bozony $W^\pm$ i $Z^0$

Dziś jest dla nas oczywiste, że oddziaływania słabe są przenoszone przez **ciężkie nośniki**.

Jednak ich istnienie zostało doświadczalnie potwierdzone dopiero **15 lat** po ich wprowadzeniu do teorii przez **Weinberg'a i Salam'a**.

### **Dlaczego byli przekonani o ich istnieniu ?**

Odkrycie bozonów  $Z^0$  i  $W^\pm$  przez eksperymenty UA1 i UA2 (1983):

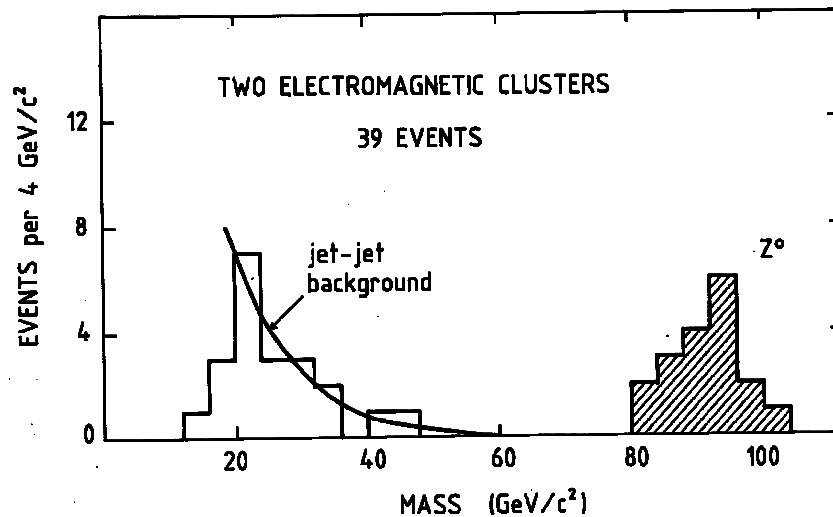


Fig. 1

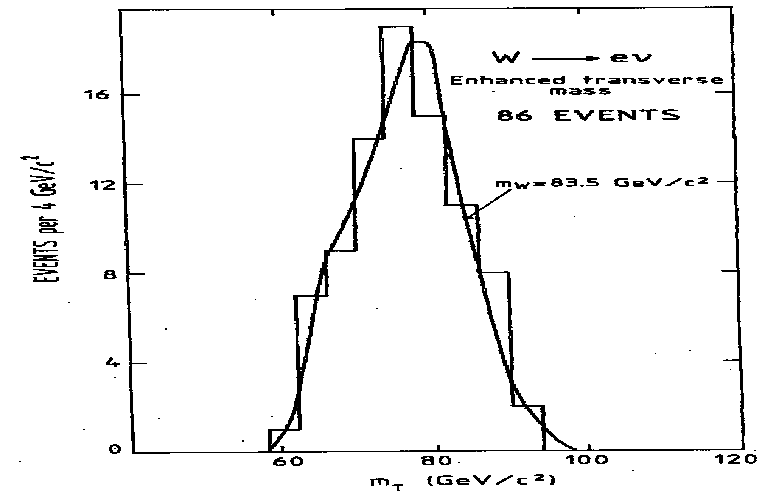


Fig. 3b

# Elementy teorii

## Mechanika klasyczna

Jedną z postaci w jakich możemy przedstawić **równania ruchu** układu cząstek jest **równanie Lagrange'a**

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0$$

Lagrangian układu jest **różnicą energii** kinetycznej i potencjalnej

$$L(q_i, \dot{q}_i, t) = T - V$$

i zależy od **współrzędnych** uogólnionych  $q_i$  oraz **ich pochodnych** po czasie  $\dot{q}_i$ .

## Przykład

Jednowymiarowy ruch w stałym polu grawitacyjnym:

$$T = \frac{mv^2}{2} = \frac{m\dot{x}^2}{2}$$
$$V = mgx$$

$$L(x, \dot{x}, t) = \frac{m\dot{x}^2}{2} - mgx$$

⇒ z równania Lagrange'a:

$$m\ddot{x} = -mg$$

# Elementy teorii

## Teoria kwantowa

Zamiast od “klasycznych” współrzędnych uogólnionych  $q_i$  gęstość lagrangianu zależy od pola cząstki  $\phi(x^\mu)$ :

$$q_i \rightarrow \phi(x^\mu)$$

$$\dot{q}_i \rightarrow \frac{\partial \phi}{\partial x_\mu} \equiv \partial^\mu \phi$$

⇒ gęstość lagrangianu:

$$L(q_i, \dot{q}_i, t) \rightarrow \mathcal{L} \left( \phi, \frac{\partial \phi}{\partial x_\mu}, x_\mu \right)$$

Równanie Lagrangea:  $(\sum_{\mu=0,1,2,3})$

$$\frac{\partial}{\partial x_\mu} \left( \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \left( \frac{\partial \phi}{\partial x_\mu} \right)} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \phi} = 0$$

Definiując lagrangian jednoznacznie **definiujemy teorię**: opisywane cząstek i ich oddziaływania.

W oparciu o lagrangian definiuje się **wszystkie reguły** rachunkowe (w tym diagramy Feynmana).

**Symetria teorii** ⇔ **symetria lagrangianu**

# Symetrie

## Twierdzenie Noether (1918)

Niezmienniczości teorii względem każdej **grupy symetrii** odpowiada **zasada zachowania**.

### **symetria**

przesunięcie w czasie



energia

przesunięcie w przestrzeni



pęd

obrót



moment pędu

odbicie

inwersja przestrzenna



*parzystość  $P$*

sprzężenie

cząstka-antycząstka



*parzystość ładunkowa  $C$*

# Symetrie

## Transformacja cechowania

Lagrangian dla **swobodnego elektronu**

$$\mathcal{L} = i\bar{\psi}\gamma_{\mu}\partial^{\mu}\psi - m\bar{\psi}\psi$$

gdzie  $\psi$  jest spinorem Diraca o **czterech składowych** zespolonych (tyle potrzeba, żeby opisać elektron i pozyton lewo- i prawo skrętny).

⇒ równanie Diraca:

$$(i\gamma^{\mu}\partial_{\mu} - m)\psi = 0$$

por. równanie Schrödingera: ( $\hbar \equiv 1$ )

$$\left(i\frac{\partial}{\partial t} + \frac{1}{2m}\frac{\partial^2}{\partial^2 x}\right)\psi = 0$$

Pola są **zespolone**, ale lagrangian **nie zależy od fazy**

⇒ dodatkowa **symetria “cechowania”**:

$$\psi(x) \rightarrow e^{i\alpha} \cdot \psi(x)$$

Transformacje **obrotu fazy** o kąt  $\alpha$ :

$$U(\alpha) = e^{i\alpha}$$

tworzą grupę abelową znaną jako **U(1)**.

Niezmienniczość względem transformacji cechowania ⇒ z twierdzenia Noether:

**zasada zachowania ładunku**

# Symetrie

## Transformacja cechowania

Czy nasza teoria jest też niezmiennicza względem “lokalnej” symetrii cechowania:

$$\psi(x) \rightarrow e^{i\alpha(x)} \cdot \psi(x)$$

gdzie kąt obrotu fazy  $\alpha(x)$  zależy od położenia i czasu ?

Dla swobodnego elektronu: **NIE**,  
lagrangian zawiera pochodne pola.

Ale jeśli dodamy do teorii **pole wektorowe**  $A_\mu$ ,  
które transformuje się zgodnie z:

$$A_\mu \rightarrow A_\mu + \frac{1}{e} \partial_\mu \alpha \quad \left( \partial_\mu \alpha \equiv \frac{\partial \alpha}{\partial x^\mu} \right)$$

i jednocześnie zastąpimy “zwykłą” pochodną przez “**pochodna kowariantna**”

$$D_\mu \equiv \partial_\mu - ieA_\mu$$

⇒ lagrangian **niezmienniczy** względem  
**transformacji lokalnej**

$A_\mu$  - pole (bozon) cechowania

# Symetrie

## QED

Uwzględniając dodatkowo **energię kinetyczną** dla pola  $A_\mu$  otrzymujemy lagrangian:

$$\mathcal{L} = \bar{\psi} (i\gamma^\mu \partial_\mu - m) \psi + e\bar{\psi}\gamma^\mu A_\mu\psi - \frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}$$

$$\text{gdzie } F_{\mu\nu} \equiv \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$$

Z warunku **niezmienniczości** teorii cząstki swobodnej względem **lokalnej zmiany fazy** otrzymaliśmy...

## Elektrodynamikę kwantową

pełną teorię oddziałujących ładunków elektrycznych

pole  $A_\mu$  - **foton**

Okazuje się, że **foton MUSI** być **bezmasowy** !

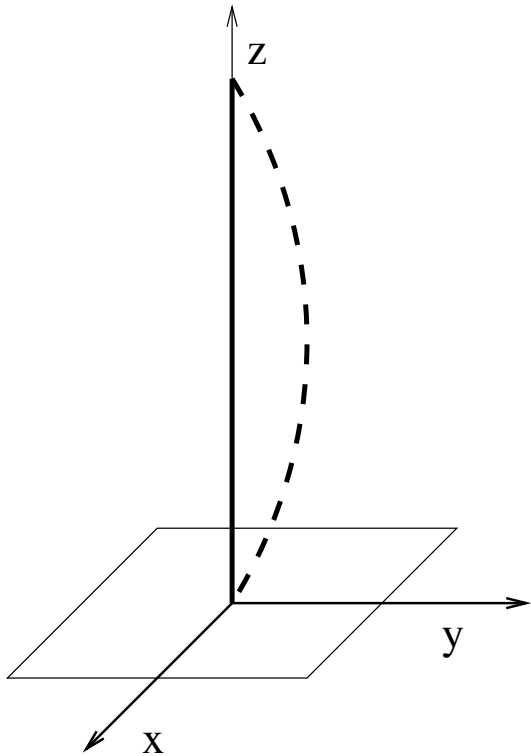
Dodanie do  $\mathcal{L}$  członu **masowego** dla fotonu prowadziło do nieusuwalnych **rozbieżności**



# Spontaniczne łamanie symetrii

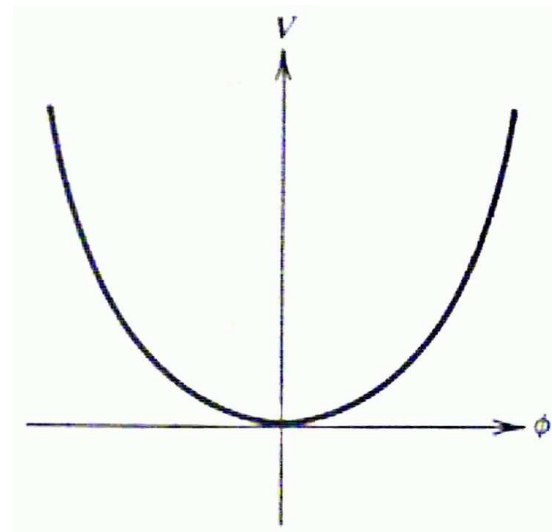
## Model klasyczny

Najprostszy model:  
drgająca struna



Energia potencjalna jest funkcją **wychylenia**  $|\phi| = \sqrt{x^2 + y^2}$

⇒ symetria “teorii” względem **obrotu** wokół osi Z.



Stan podstawowy układu:  $\phi = x + iy = 0$

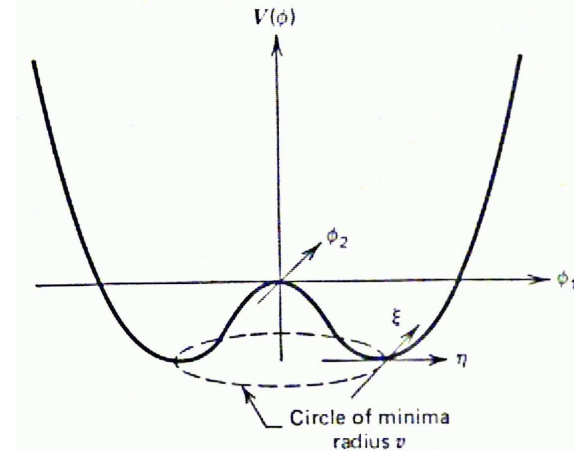
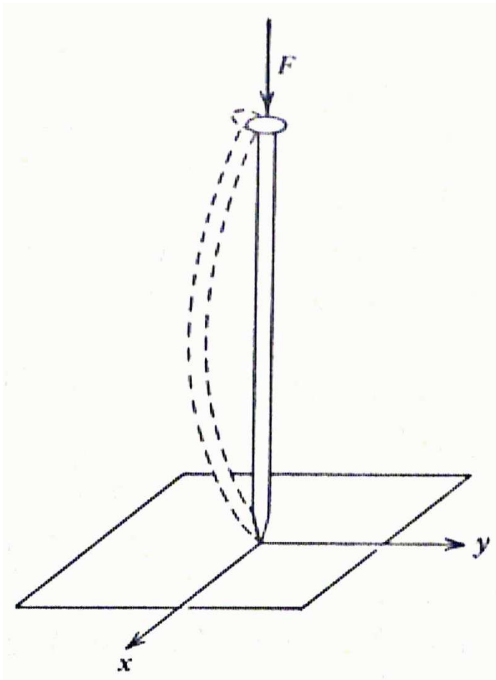
⇒ stan podstawowy **zachowuje symetrię** “teorii”  
(obrotu wokół osi Z)

Ale wcale tak nie musi być...

# Spontaniczne łamanie symetrii

## Model klasyczny

Inny model: drgania ściskanego pręta



Energia potencjalna, a więc i cała “teorii” wciąż ma **symetrię** względem **obrotu** wokół osi Z.

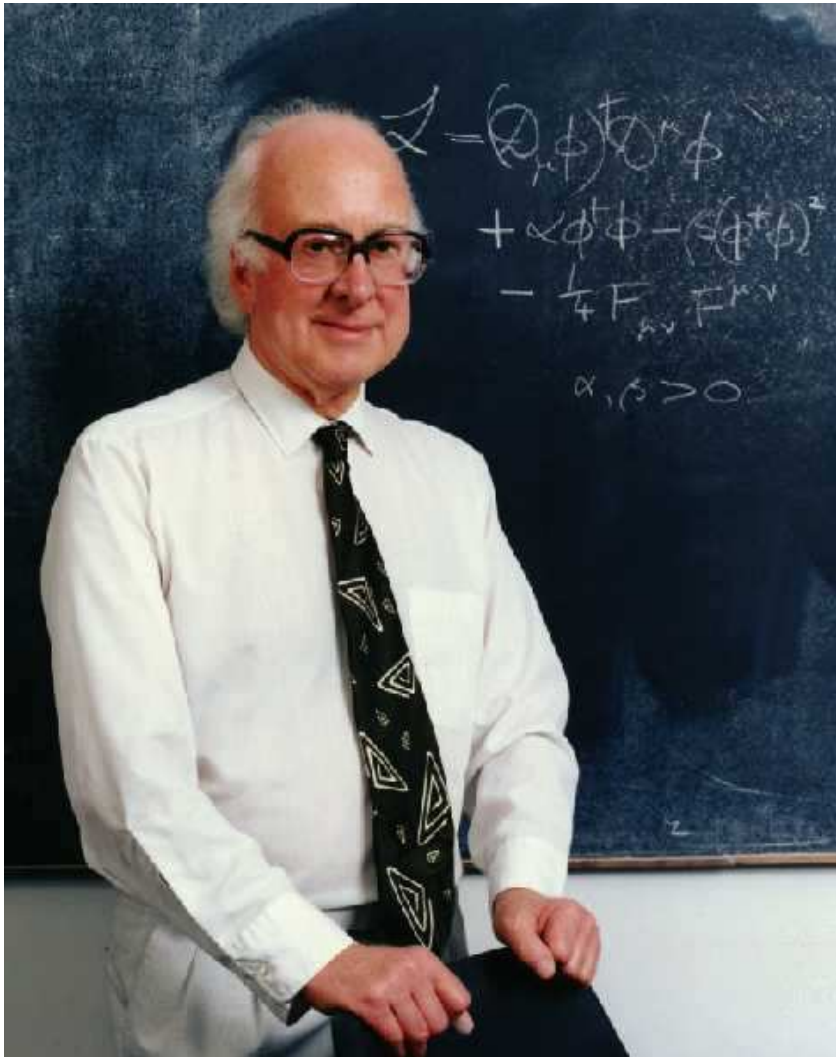
**Ale stan podstawowy** (o najniższej energii) odpowiada  $\phi \neq 0$

Zbiór stanów o  $|\phi| = v$  wciąż jest **osiowo symetryczny** (pręt mógłby się wybrzuszyć w dowolną stronę)

**Ale** “Przyroda” musi **wybrać** jeden **stan podstawowy**  
 $\Rightarrow$  **spontanicznie** łamie symetrię “teorii”

pręt wybrzusza się tracąc symetrię osiową...

# Peter W. Higgs



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.

# Model Weinberga-Salama

## Grupa SU(2)

Doświadczenia wskazywały, że do opisu **oddziaływań słabych** potrzebne są przynajmniej **trzy nośniki**.

Najprostrzą **grupą** cechowania, która daje nam **trzy pola** cechowania jest **SU(2)**

(macierze unitarne  $2 \times 2$  z wyznacznikiem 1)

⇒ otrzymujemy **trzy bozony** cechowania:  $W^+$ ,  $W^-$  i  $W^0$ .

## Mechanizm Higgsa

Możemy “**nadać masy**” bozonom  $W$  wprowadzając dodatkowo **pole skalarne**  $\phi$  o potencjale:

$$V(\phi) = \mu^2 \phi^\dagger \phi + \lambda (\phi^\dagger \phi)^2$$

Jeśli  $\lambda < 0$  potencjał ma minimum dla  $\phi \neq 0$

⇒ spontaniczne łamanie symetrii

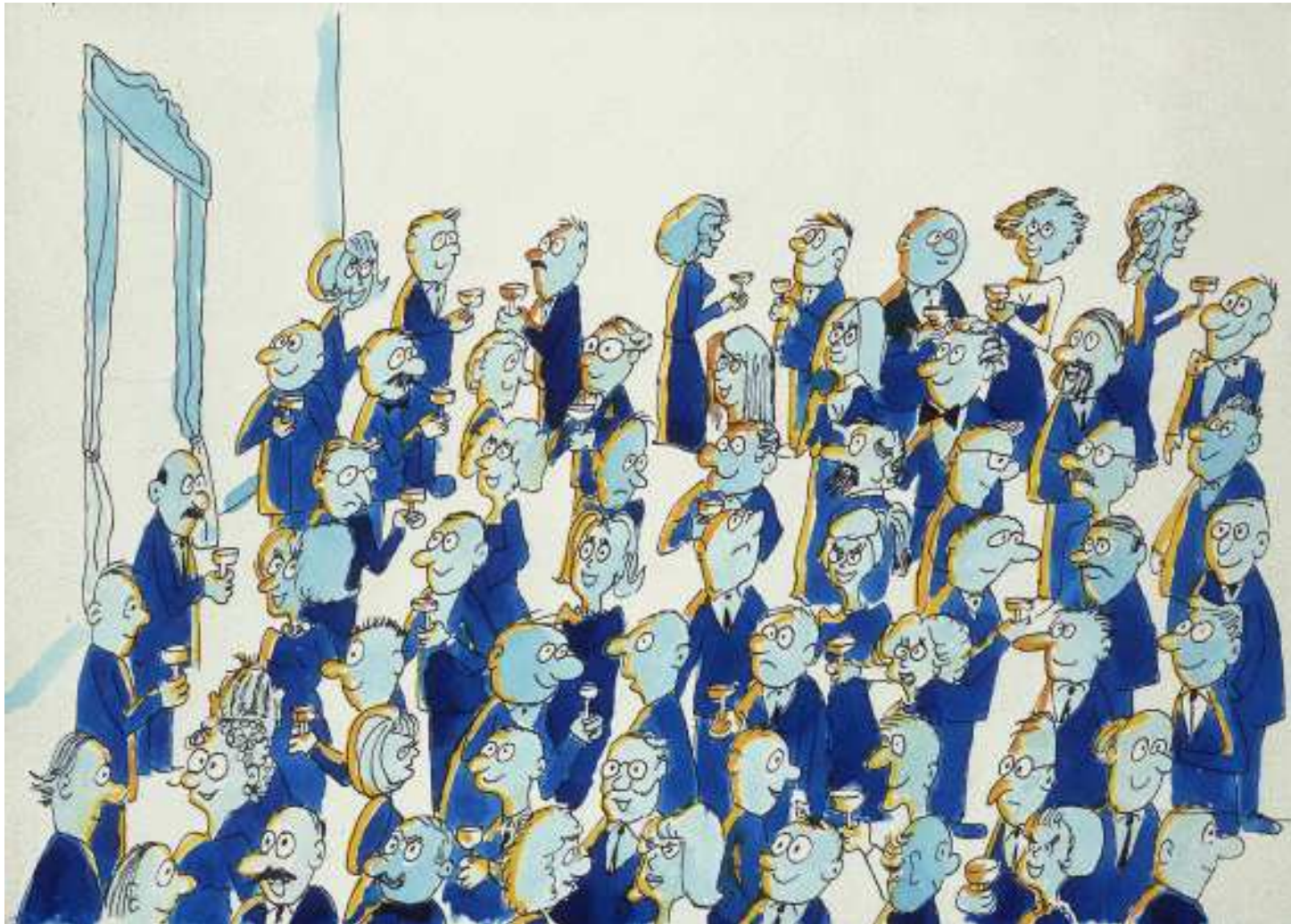
Możemy “**przedefiniować**” nasze **pola** rozwijając potencjał w szereg wokół minimum  $\phi_0$ ,  $|\phi_0|^2 \equiv \frac{v^2}{2}$

⇒ poprzez oddziaływanie z polem  $\phi$  bozony cechowania **uzyskują masę**  $M_W = \frac{1}{2}gv$  ( $g$  - stała sprzężenia)

**Nadajemy masy nie łamiąc symetrii teorii ( $\mathcal{L}$ )**

# 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)



# Model Weinberga-Salama

## Grupa $SU(2) \times U(1)$

Masa bozonu  $Z^0$  jest wyższa niż masy bozonów  $W^\pm$

Aby to wytłumaczyć musimy wprowadzić **mieszanie** neutralnych **pól** cechowania:

- pola  $W_\mu^0$  grupy  $SU(2)$  i
- pola  $B_\mu$  grupy  $U(1)$

Pola fizyczne **fotonu** i **bozonu**  $Z^0$  definiujemy jako:

$$A_\mu = \cos \theta_W B_\mu + \sin \theta_W W_\mu^0$$

$$Z_\mu = -\sin \theta_W B_\mu + \cos \theta_W W_\mu^0$$

gdzie  $\theta_W$  jest kątem mieszania (**kątem Weinberga**)

Otrzymujemy **związek** na **masy** bozonów

$$\frac{M_W}{M_Z} = \cos \theta_W$$

$$m_\gamma \equiv 0$$

Sprzężenie z polem  $\phi$  pozwala też **nadać masy** pozostałym **cząstkom** teorii (fermionom)

“**Cena**”: (nagroda ?)  
dodatkowa cząstka fizyczna -  
**bozon Higgsa**



# Mechanizm Higgsa

Ludzie na bankiecie mogą też **spontanicznie** tworzyć “zgęszczenia” (bozon Higgsa)



# Model Weinberga-Salama

## Nagrody Nobla

**1979** - Sheldon L. **Glashow**, Abdus **Salam** i Steven **Weinberg**

Za stworzenie model oddziaływań elektro-słabych oraz przewidzenie istnienia bozonów  $W^\pm$  i  $Z^0$

**1984** - Carlo **Rubia** i Simon **Van der Meer**

Za odkrycie bozonów  $W^\pm$  i  $Z^0$

**1999** - Gerardus 't **Hooft** i Martinus J.G. **Veltman**

Za wykazanie spójności modelu

Model oddziaływań elektro-słabych + **chromodynamika kwantowa** (QCD):

Model Standardowy

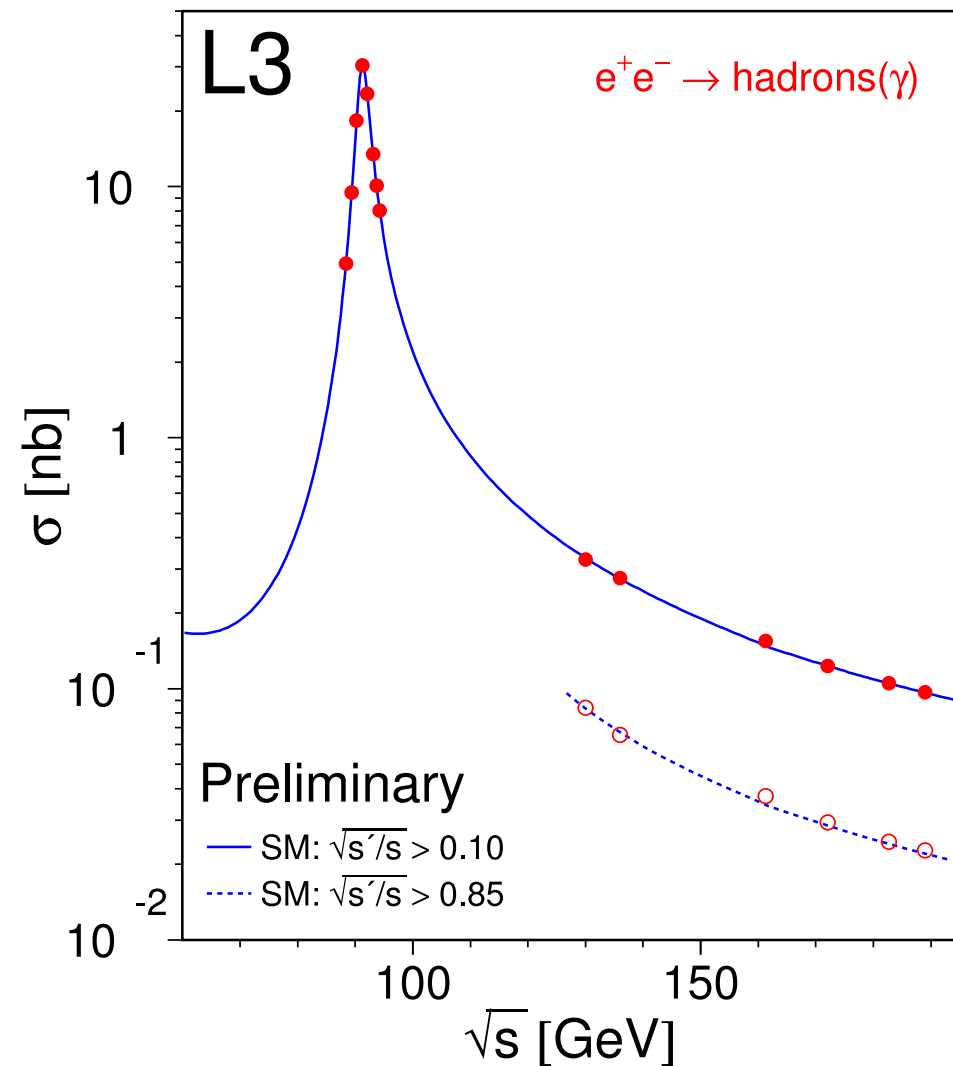
$$SU(2) \times U(1) \times SU(3)$$

# Testy Modelu Standardowego

$$e^+e^- \rightarrow Z^0$$

Model Standardowy został bardzo dokładnie przetestowany w zderzeniach  $e^+e^-$  w akceleratorach LEP i SLC.

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

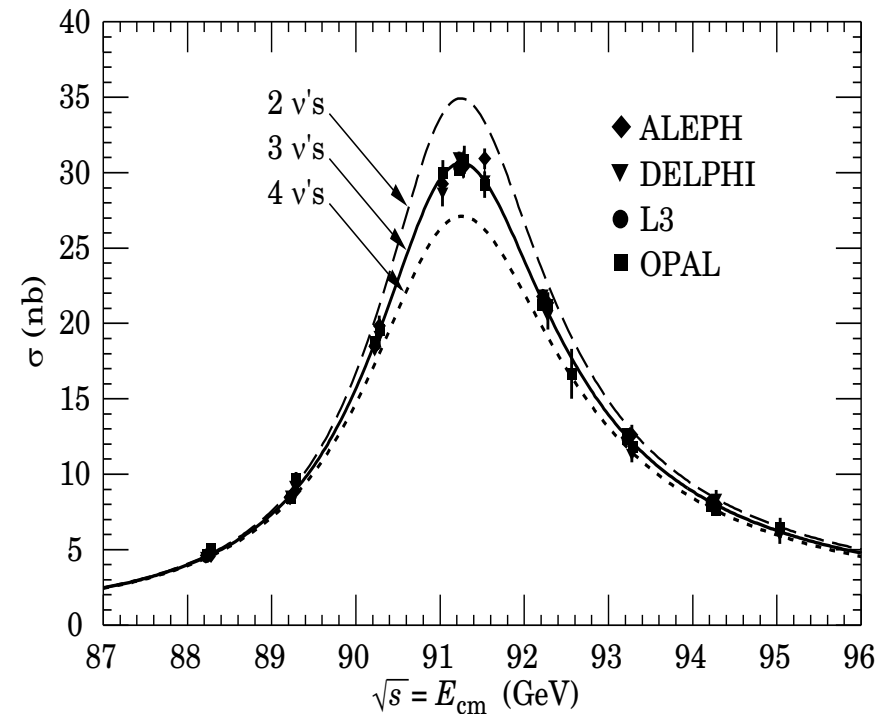


# Testy Modelu Standardowego

## Liczba neutrin

$Z^0$  rozpada się na kwarki, naładowane leptony i neutrino. Stosunki rozpadów proporcjonalne są do liczby stanów. Im więcej neutrin tym mniej rozpadów na inne cząstki.

⇒ mierząc całkowity przekrój czynny w rezonansie  $Z^0$  możemy wyznaczyć liczbę bezmasowych neutrin



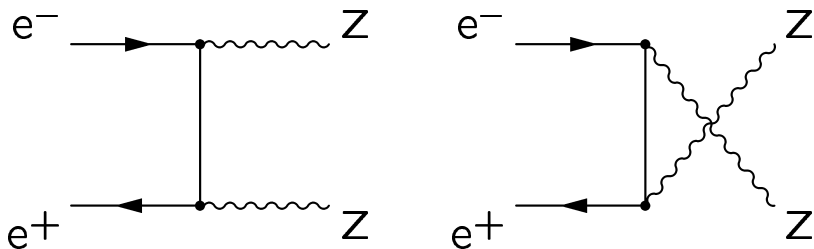
$$N_\nu = 2.9841 \pm 0.0083$$

EPS'2001

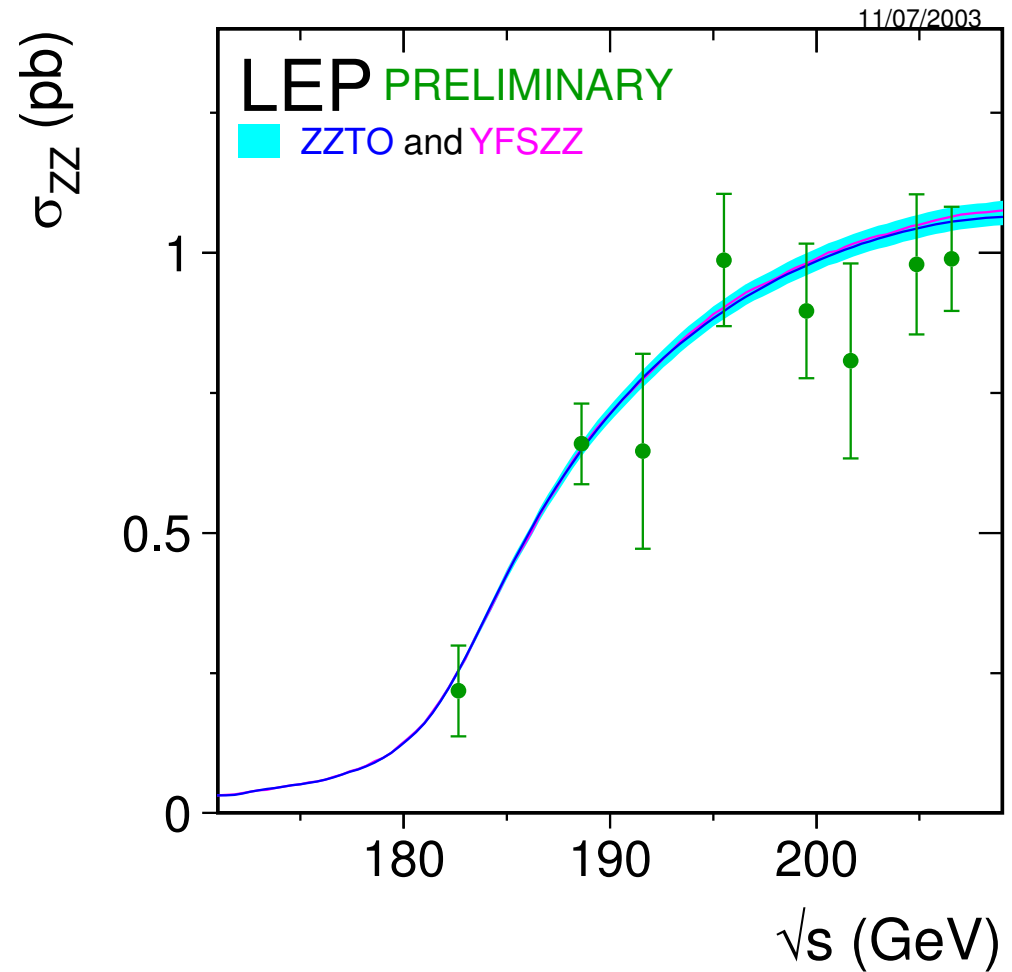
# Testy Modelu Standardowego

$$\underline{e^+e^- \rightarrow Z^0Z^0}$$

Dla  $\sqrt{s} > 2M_Z$  możliwa jest produkcja pary bozonów  $Z^0$



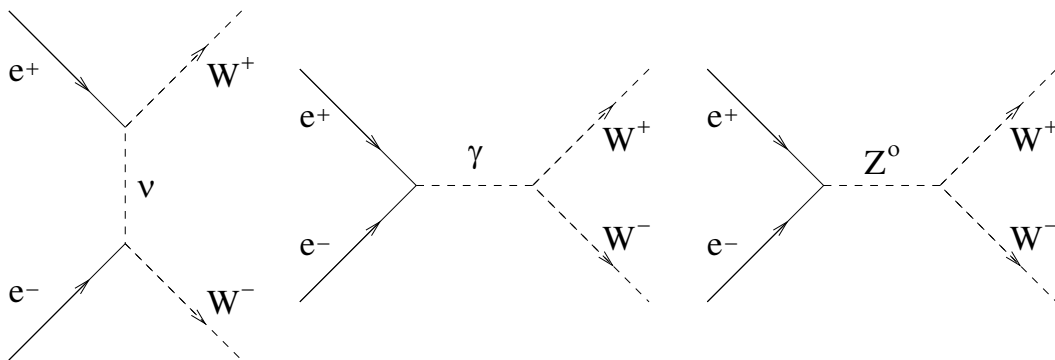
Bardzo dobra zgodność z przewidywaniami Modelu Standardowego  $\Rightarrow$



# Testy Modelu Standardowego

$$\underline{e^+e^- \rightarrow W^+W^-}$$

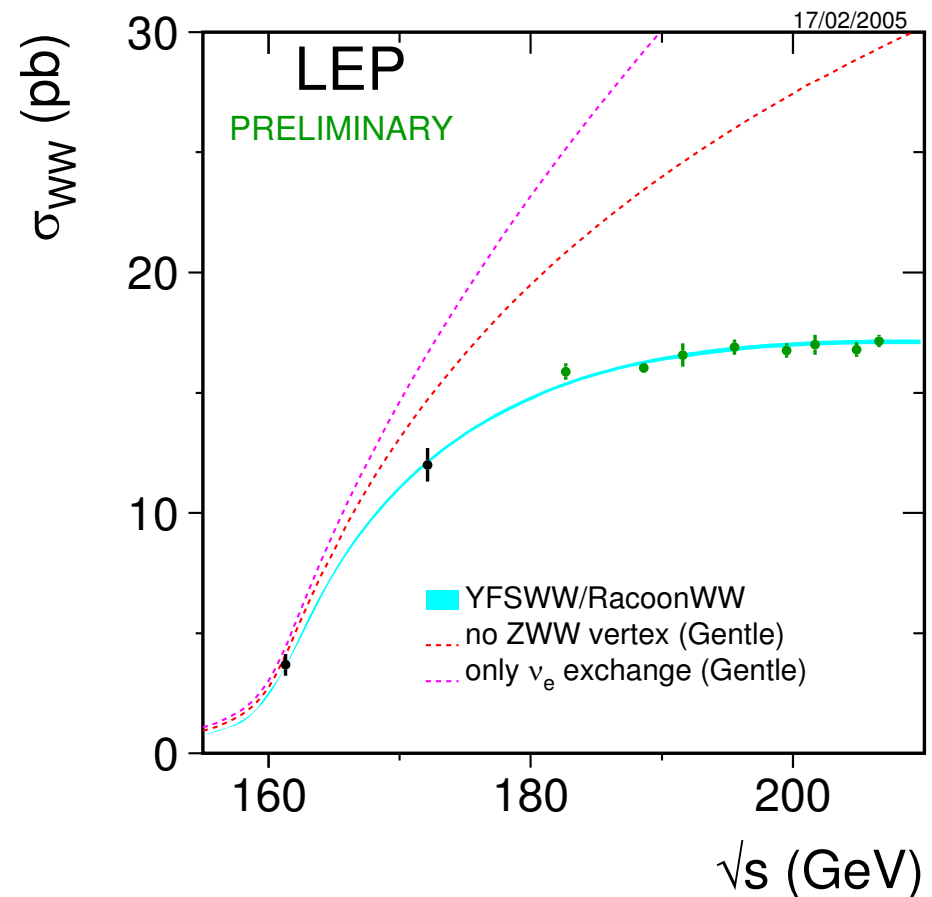
Wkład od **trzech** różnych **procesów**:



**Sprzężenia** wynikają z przyjętych **symetrii cechowania**

$\Rightarrow$  **ściśle przewidywania modelu**

Doświadczalnie potwierdzone **kasowanie wkładów** od różnych procesów  $\Rightarrow$



# Testy Modelu Standardowego

## Porównanie

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

Można wybrać np.  $\alpha_{em}$ ,  $G_F$  i  $M_Z$ .

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

Miara zgodności:  $\text{pull} \equiv \frac{|X_{meas} - X_{SM}|}{\sigma_X} \Rightarrow$



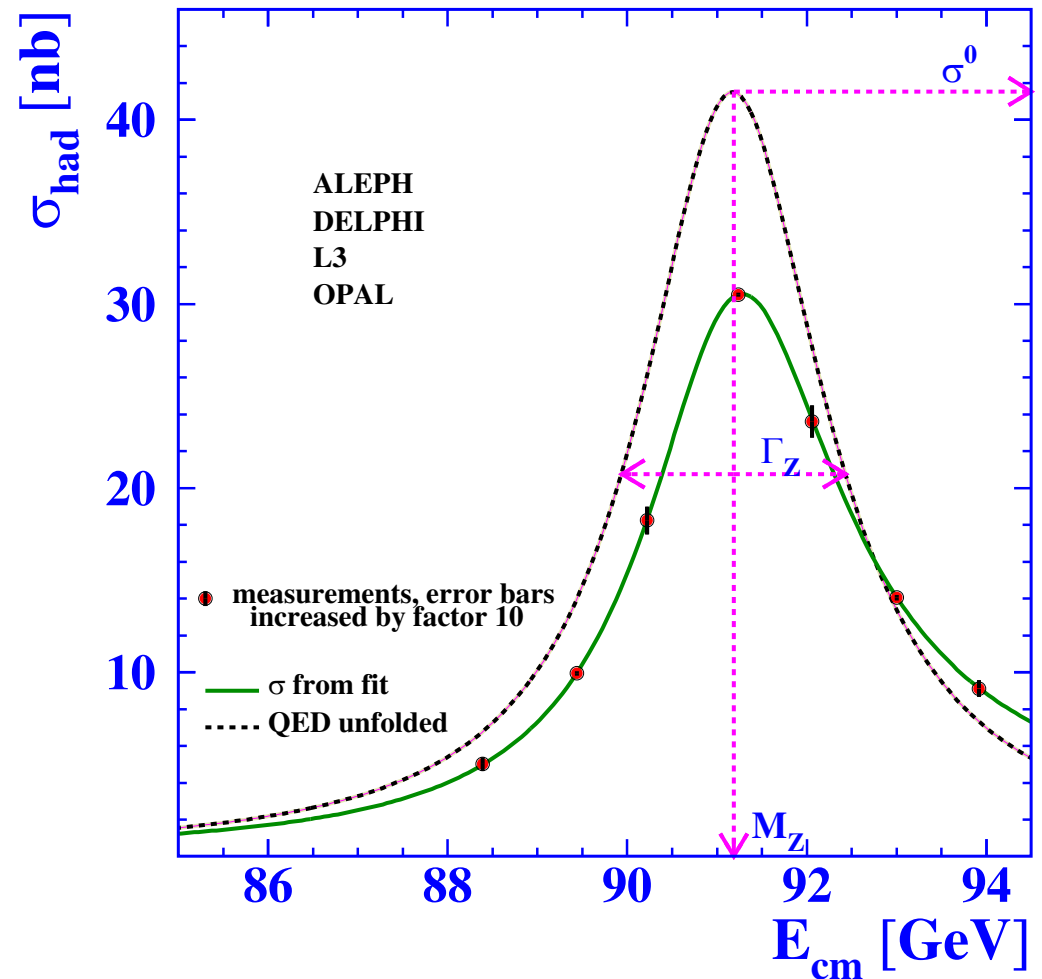
# Testy Modelu Standardowego

## Poprawki

Wielkości fizyczne **zmierzone** w LEP czułe są na **poprawki** “wyższych rzędów”.

Poprawki pochodzą w szczególności od **procesów** z wirtualną wymianą **bozonu  $W^\pm$** , **kwarku  $t$** , **bozonu Higgsa** lub innych ciężkich cząstek...

**Precyzyjne pomiary** w LEP i innych eksperymentach pozwalają **wnioskować** o **masie bozonu Higgsa**,  $m_h$ .



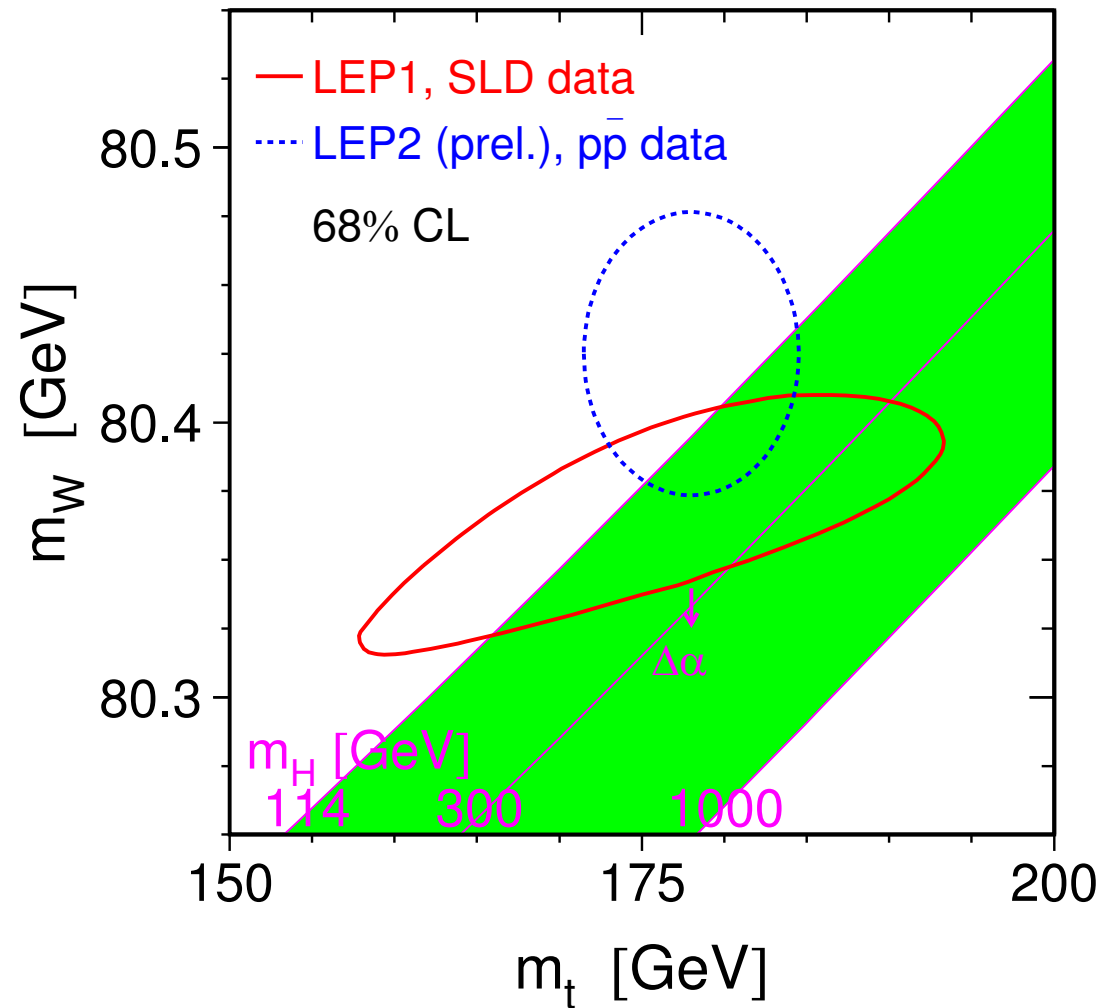


# Testy Modelu Standardowego

## Poprawki

Nie po raz pierwszy staramy się wyznaczyć **masy ciężkich cząstek** na podstawie analizy **precyzyjnych pomiarów** przy **niższych energiach**.

Dla bozonu  $W^\pm$  i kwarku  $t$  wyniki bardzo dobrze zgodziły się z **bezpośrednimi pomiarami**

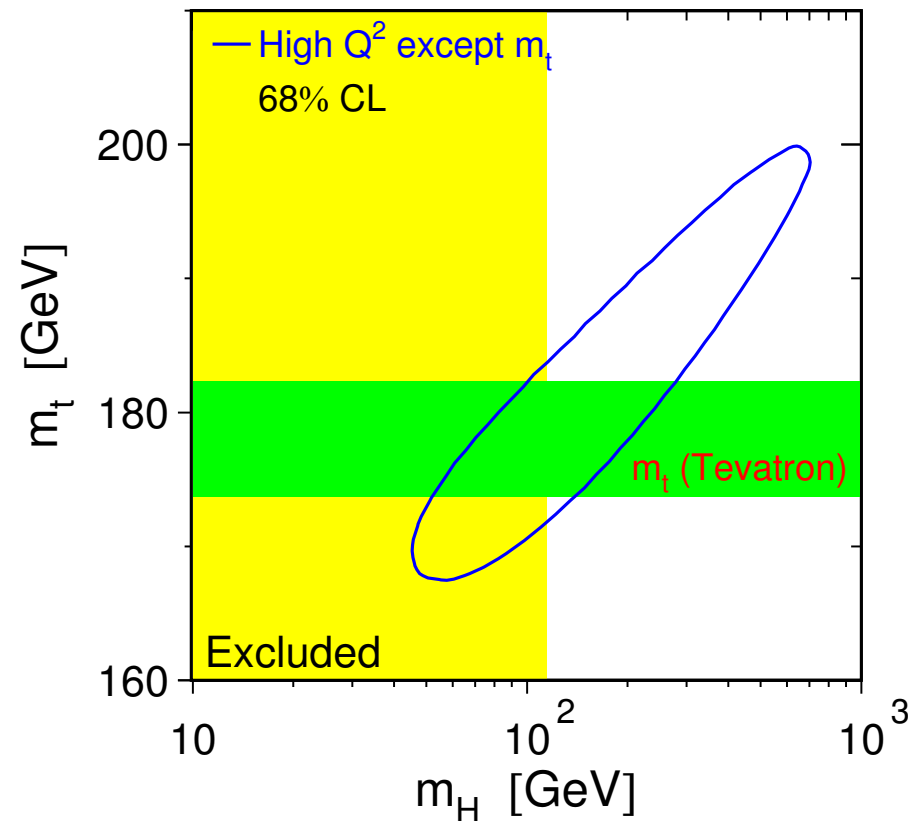
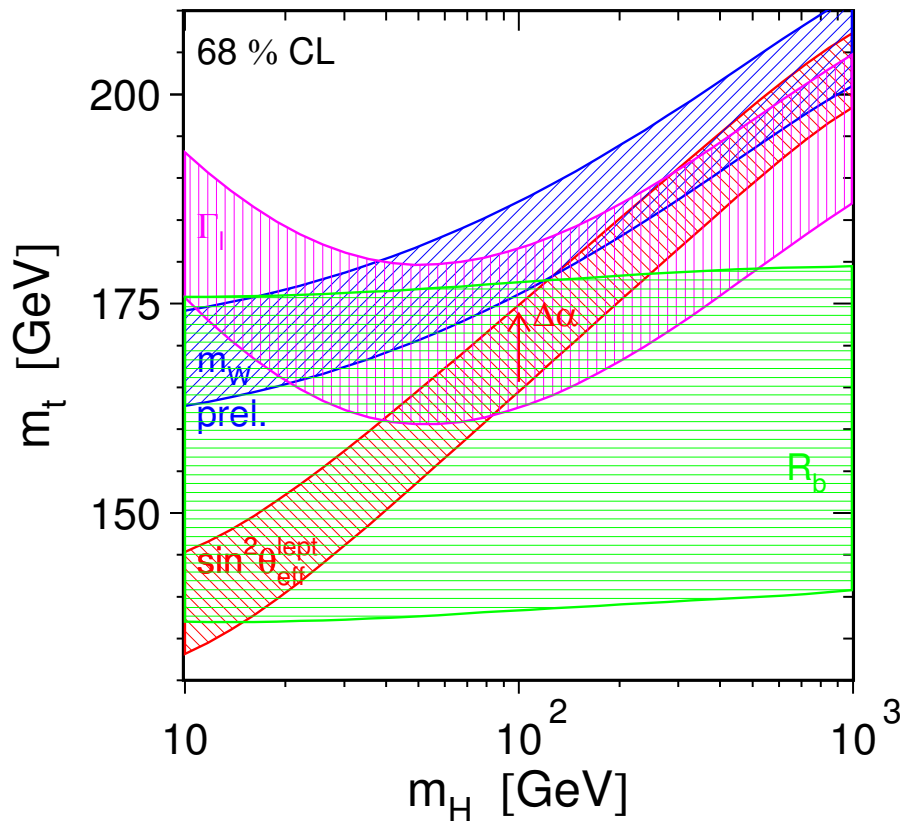


# Testy Modelu Standardowego

## Masa higgosa

Pojedyncze pomiary dopuszczają szeroki zakres wartości  $m_t$  i  $m_H$ .

Jednak z ich łącznej analizy możemy uzyskać istotne ograniczenia...



Zależność od  $m_H$  logarytmiczna !...

# Testy Modelu Standardowego

## Masa higgosa

Analiza **wszystkich** dostępnych **danych** wskazuje, że masa Higgosa powinna wynosić **około 100 – 200 GeV**

$$m_h = 126_{-48}^{+73} \text{ GeV}$$

lub:  $m_h < 280 \text{ GeV}$  (95% CL)

Dlaczego wciąż go nie widzimy ?...

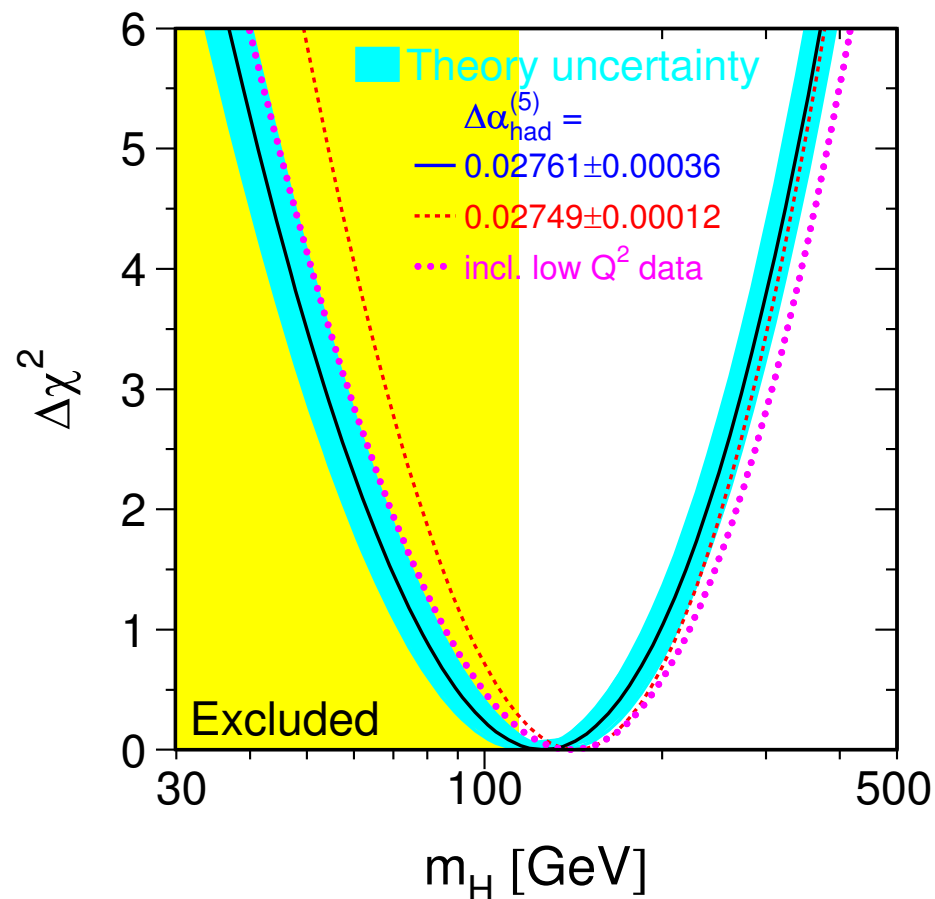
Z bezpośrednich poszukiwań:

$$m_h > 114.4 \text{ GeV} \text{ (95\% CL)}$$

wszystkie dane LEP:

ALEPH + DELPHI + L3 + OPAL

2005



# Poszukiwanie Higgsa

## Kanały rozpadu

Cząstka Higgsa zajmuje bardzo **szczególne miejsce** w teorii.

Ma też **szczególne własności**...

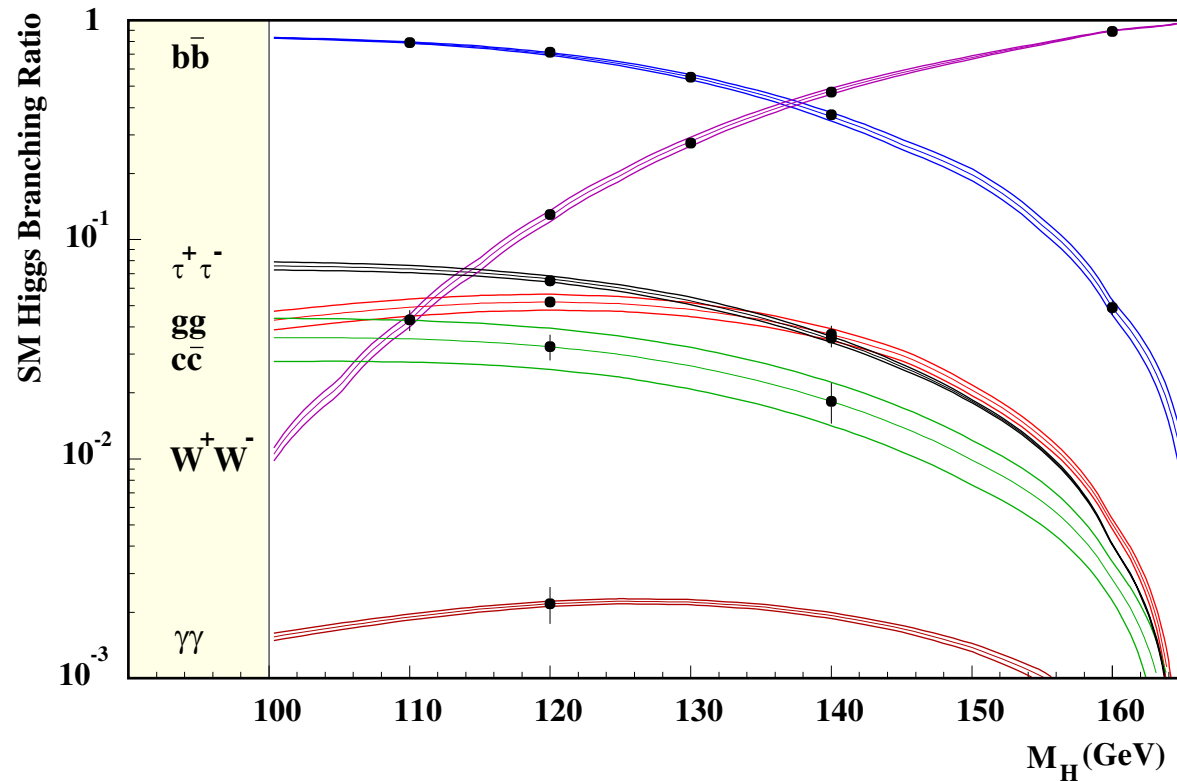
**Sprzężenie** Higgsa do cząstek są **proporcjonalne do masy**

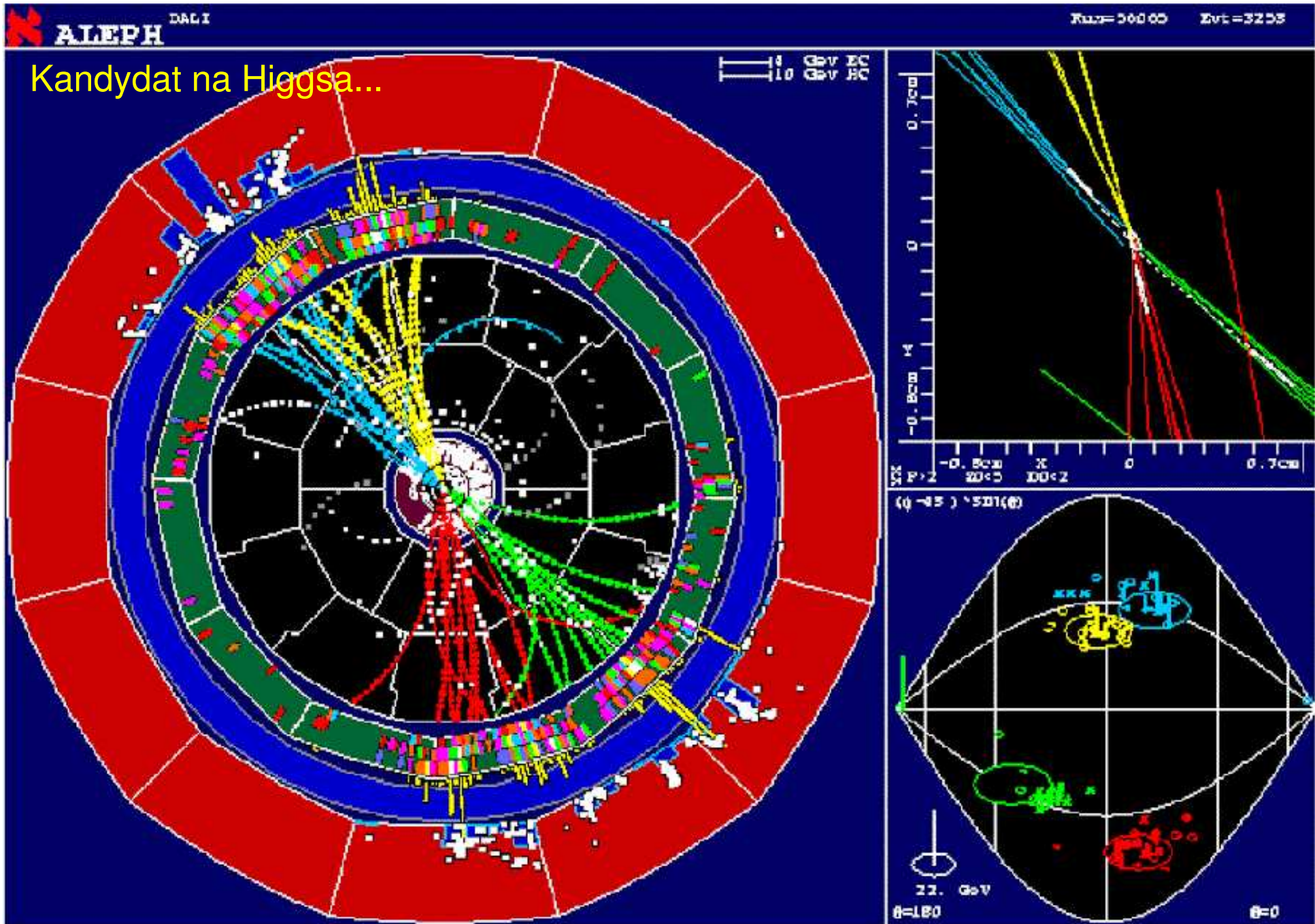
⇒ rozpada się najchętniej na **najcięższe dostępne stany**...

Dla  $m_h < 135 \text{ GeV}$  dominuje rozpad w pary  $b\bar{b}$ ...

W LEP szukano przypadków produkcji Higgsa:

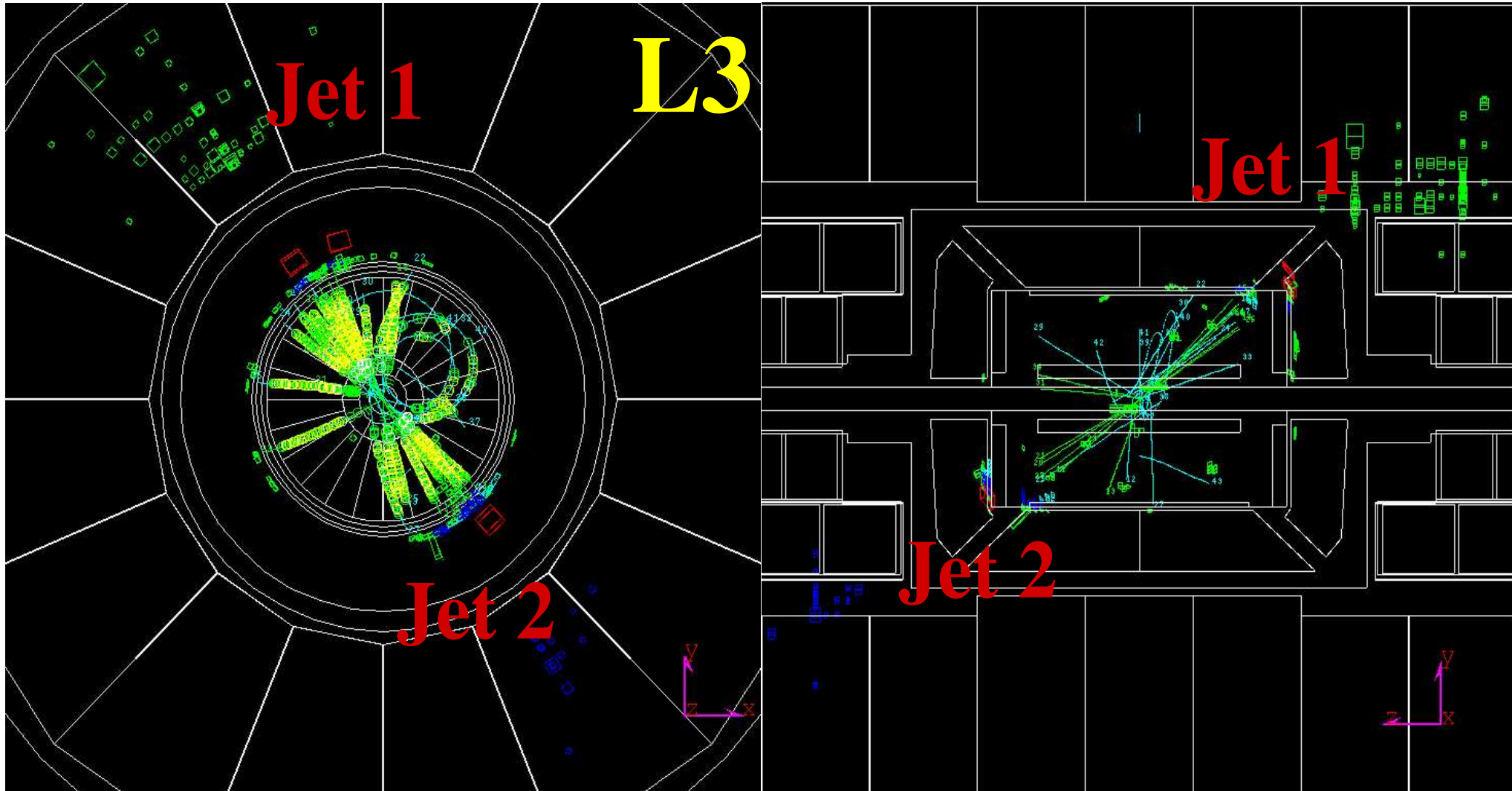
$$e^+e^- \rightarrow h Z^0 \rightarrow b\bar{b} X$$





candidate for

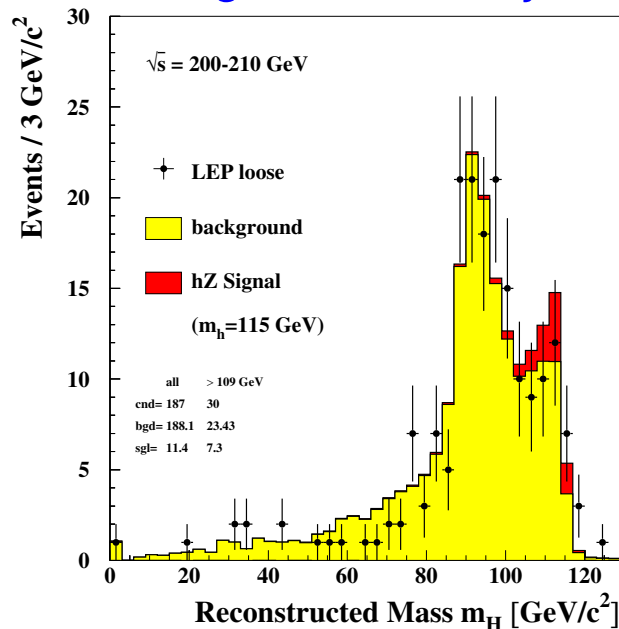
$e^+e^- \rightarrow H\nu\bar{\nu} \rightarrow 2 \text{ jets} + \text{missing energy}$



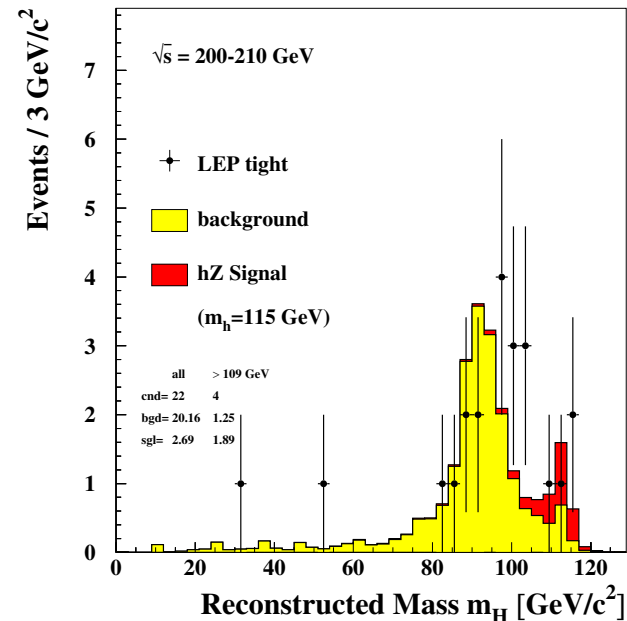
# Poszukiwanie Higgsa

## Rozkład masy

łagodna selekcja



ostra selekcja



W obszarze  $m_h \sim 115$  GeV widać niewielki nadmiar przypadków, który może pochodzić od produkcji Higgsa

Niestety, jest to efekt na poziomie  $\sim 2\sigma$

LEP wyłączono zanim zdołał wyjaśnić ten efekt...

# Poszukiwanie Higgsa

Poszukiwania **bozonu Higgsa** a następnie **pomiar** jego **parametrów** będzie jednym z głównych tematów badań w **przyszłych akceleratorach**.

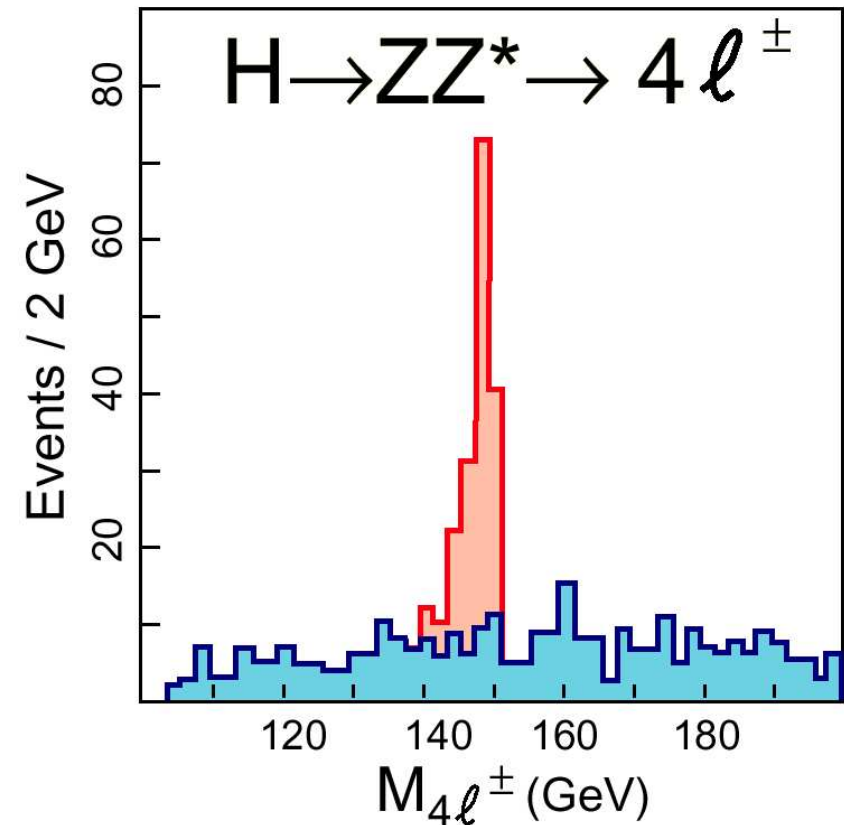
## LHC

W zderzeniach  $pp$  tło hadronowe jest bardzo duże. Najbardziej obiecujący jest **kanał**:

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

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

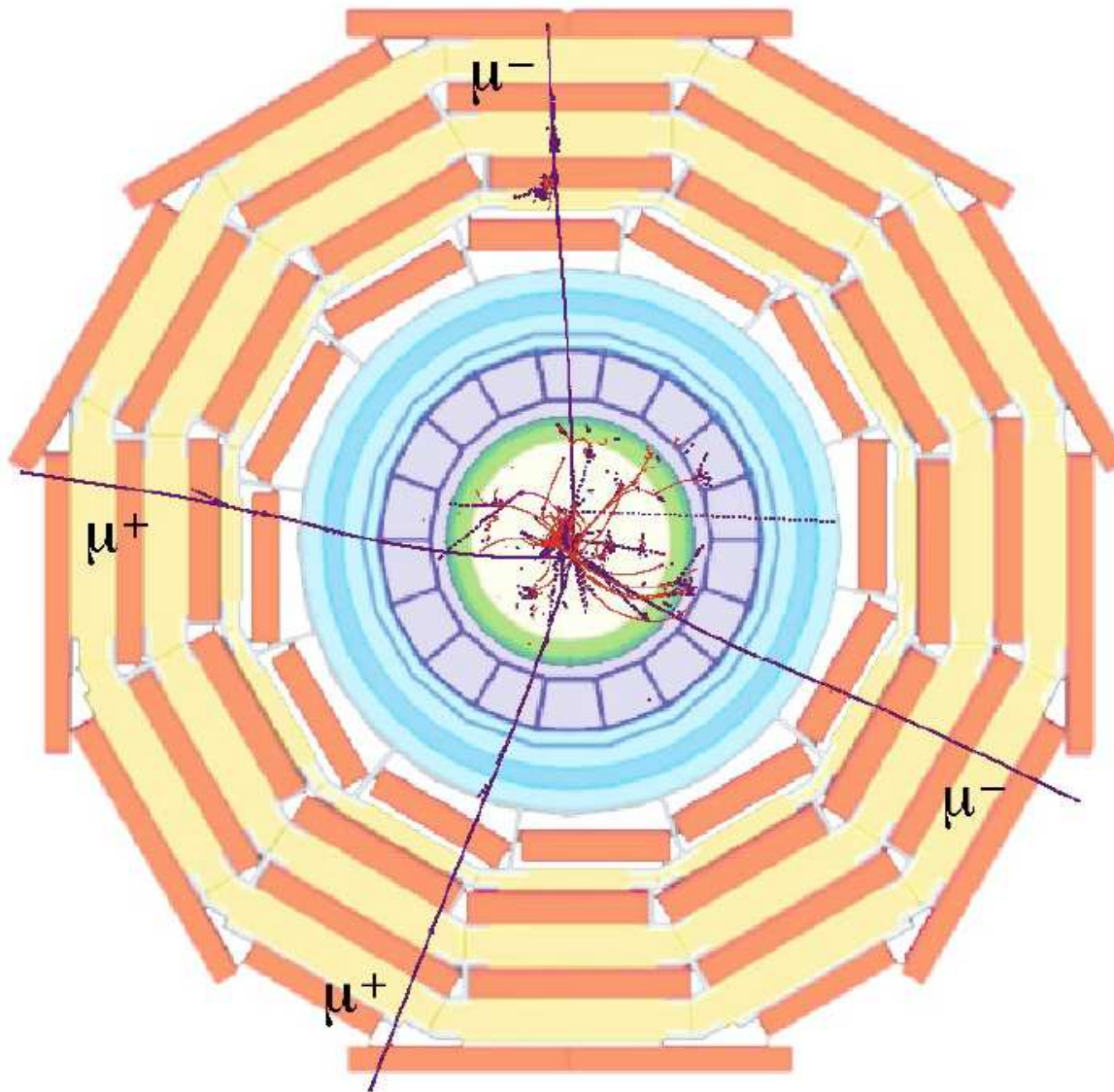
Jeśli Higgs ma rzeczywiście **około 115 GeV** zobaczymy go już wkrótce w **Tewatronie!**



CMS Warszawa



# Eksperyment CMS przy LHC



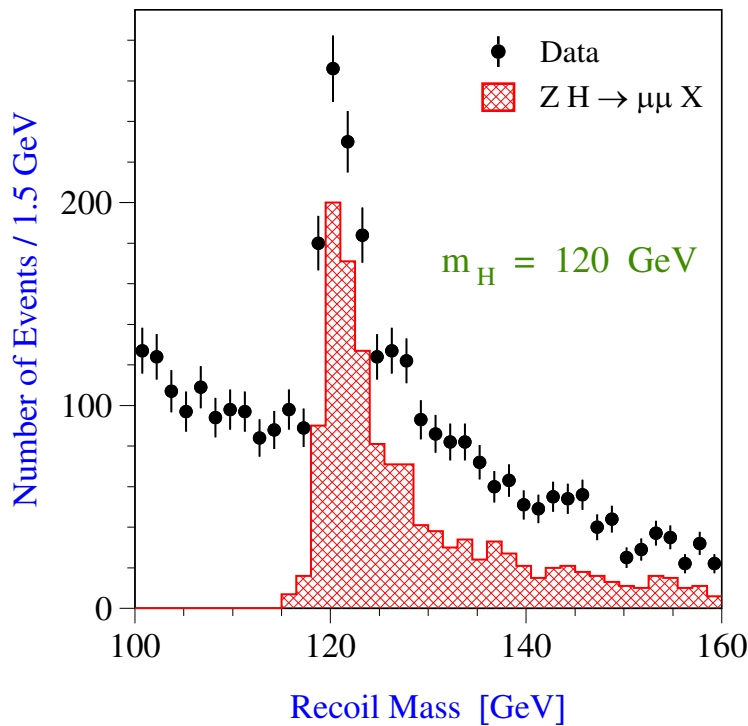
Symulacja działania detektora CMS dla przypadku

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

# Poszukiwanie Higgosa

## TESLA $e^+e^-$

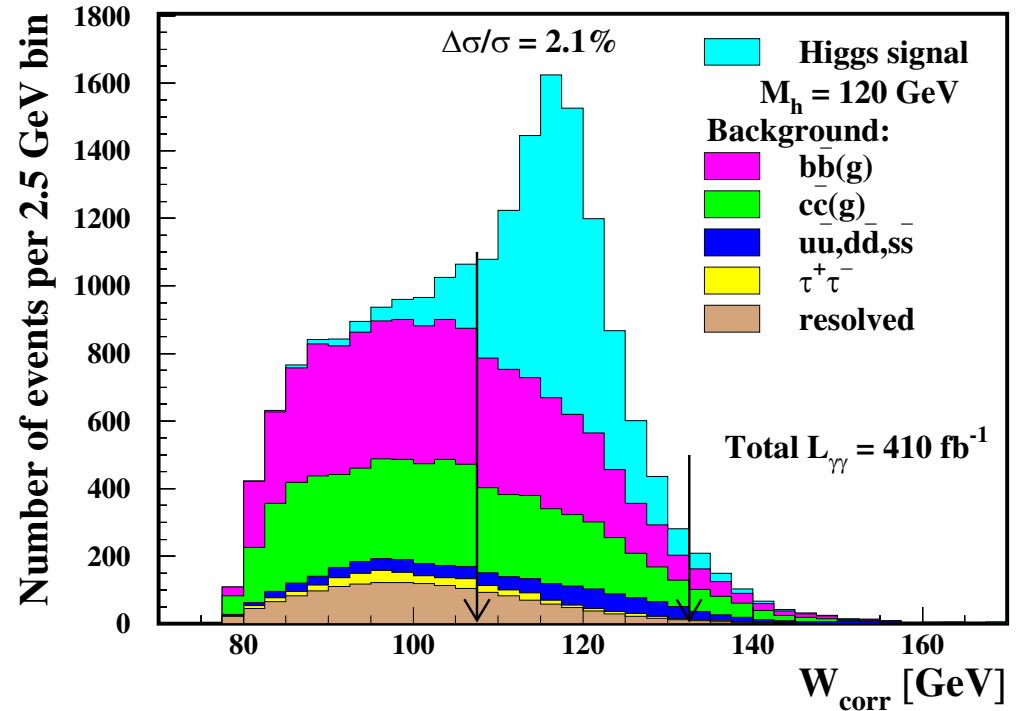
Proces:  $e^+e^- \rightarrow Z^0 h$



Wybór przypadków  $Z^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$   
 $\Rightarrow$  rekonstrukcja niezależna od rozpadu  $h$

## TESLA Photon Collider

Proces:  $\gamma\gamma \rightarrow h, \quad h \rightarrow b\bar{b}$



Pomiar sprzężenia  $h\gamma\gamma$   
 bardzo czułego na “nową fizykę”

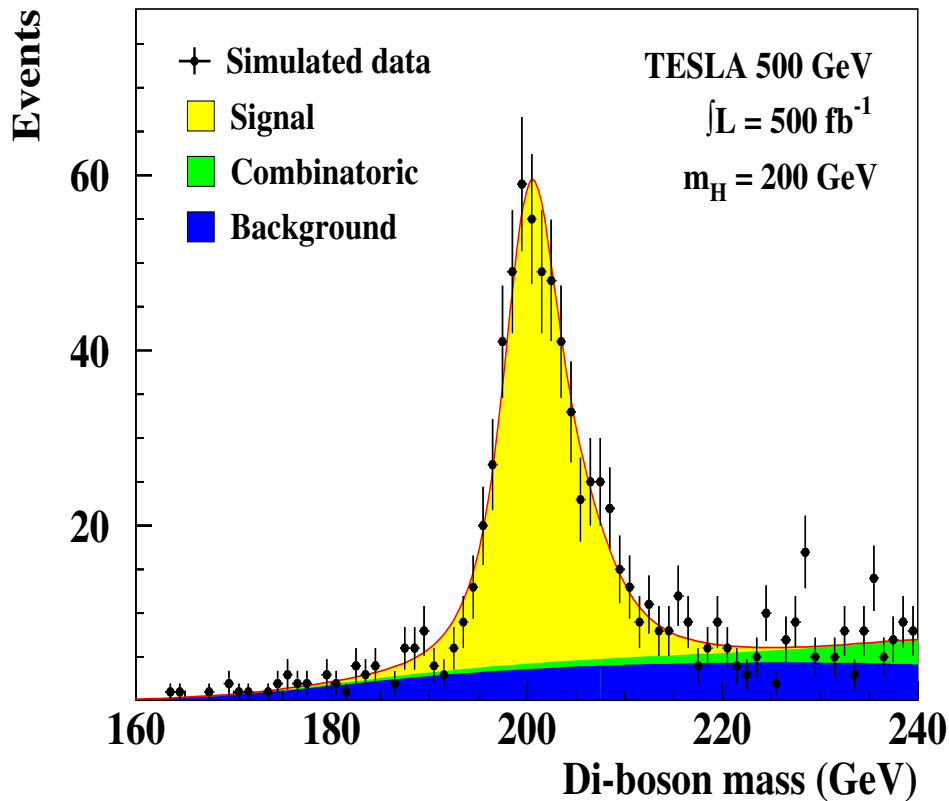
TESLA Warszawa

# Poszukiwanie Higgosa

W rozszerzeniach Modelu Standardowego bozon Higgosa może być cięższy...

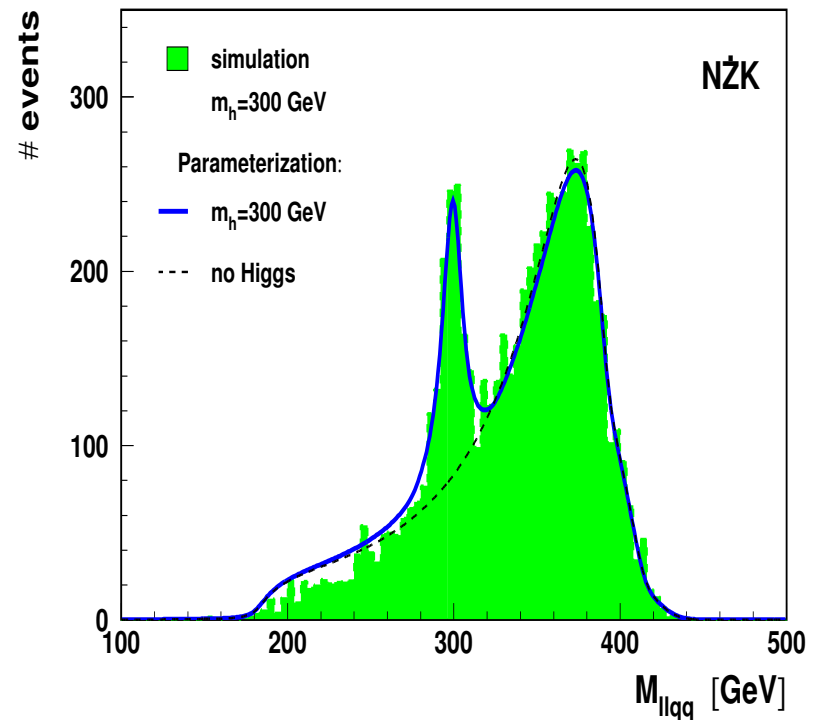
## TESLA $e^+e^-$

Proces:  $e^+e^- \rightarrow Z^0 h, h \rightarrow ZZ, WW$



## TESLA Photon Collider

Proces:  $\gamma\gamma \rightarrow h, h \rightarrow ZZ$



TESLA Warszawa