

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

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 ψ 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 α :

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

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_μ ,
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_μ - pole (bozon) cechowania

Symetrie

QED

Uwzględniając dodatkowo **energię kinetyczną** dla pola A_μ 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_μ - **foton**

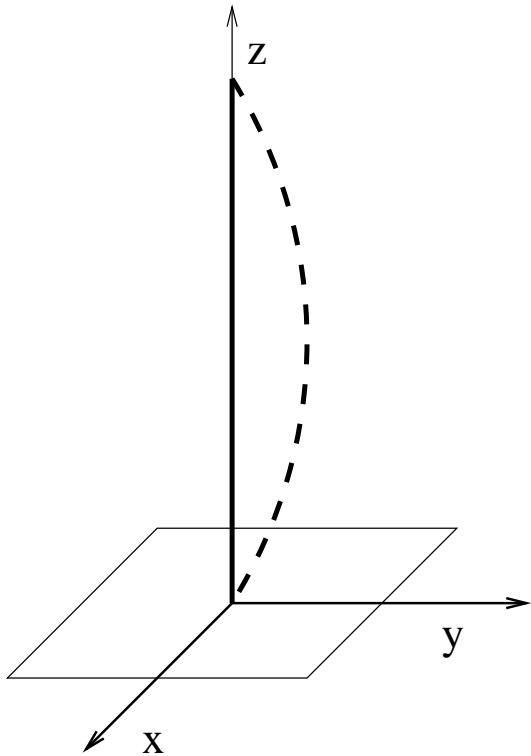
Okazuje się, że **foton MUSI** być **bezmasowy** !

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

Spontaniczne łamanie symetrii

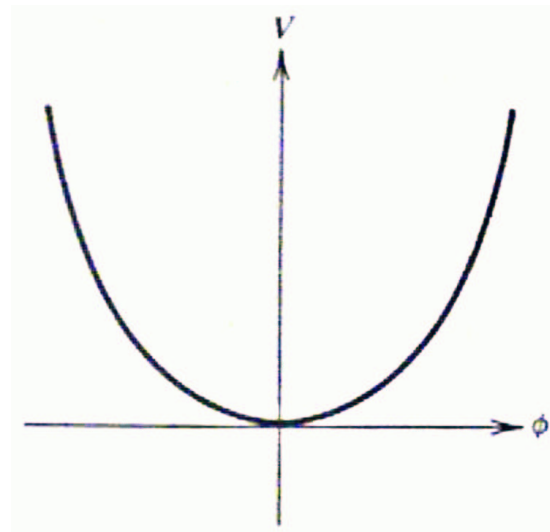
Model klasyczny

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: $\phi = x + iy = 0$

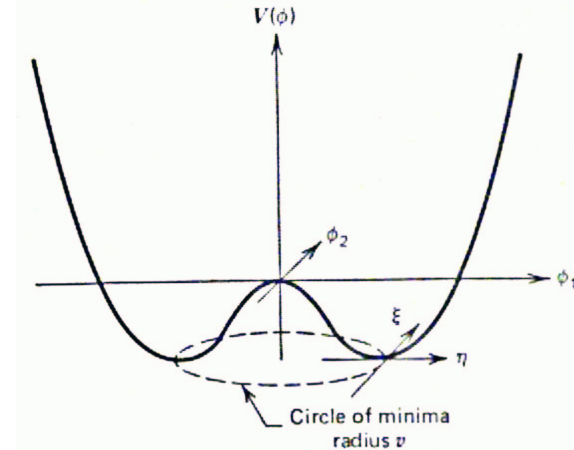
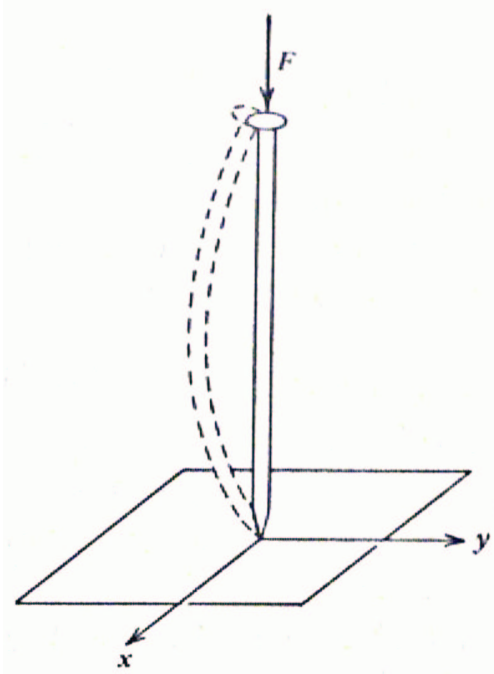
⇒ stan podstawowy **zachowuje symetrię** “teorii”
(obrotu wokół osi Z)

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...

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 2×2 z wyznacznikiem 1)

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

Mechanizm Higgsa

Możemy “**nadać masy**” bozonom W wprowadzając dodatkowo **pole skalarne** ϕ 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 ϕ_0 , $|\phi_0|^2 \equiv \frac{v^2}{2}$

⇒ poprzez oddziaływanie z polem ϕ 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)



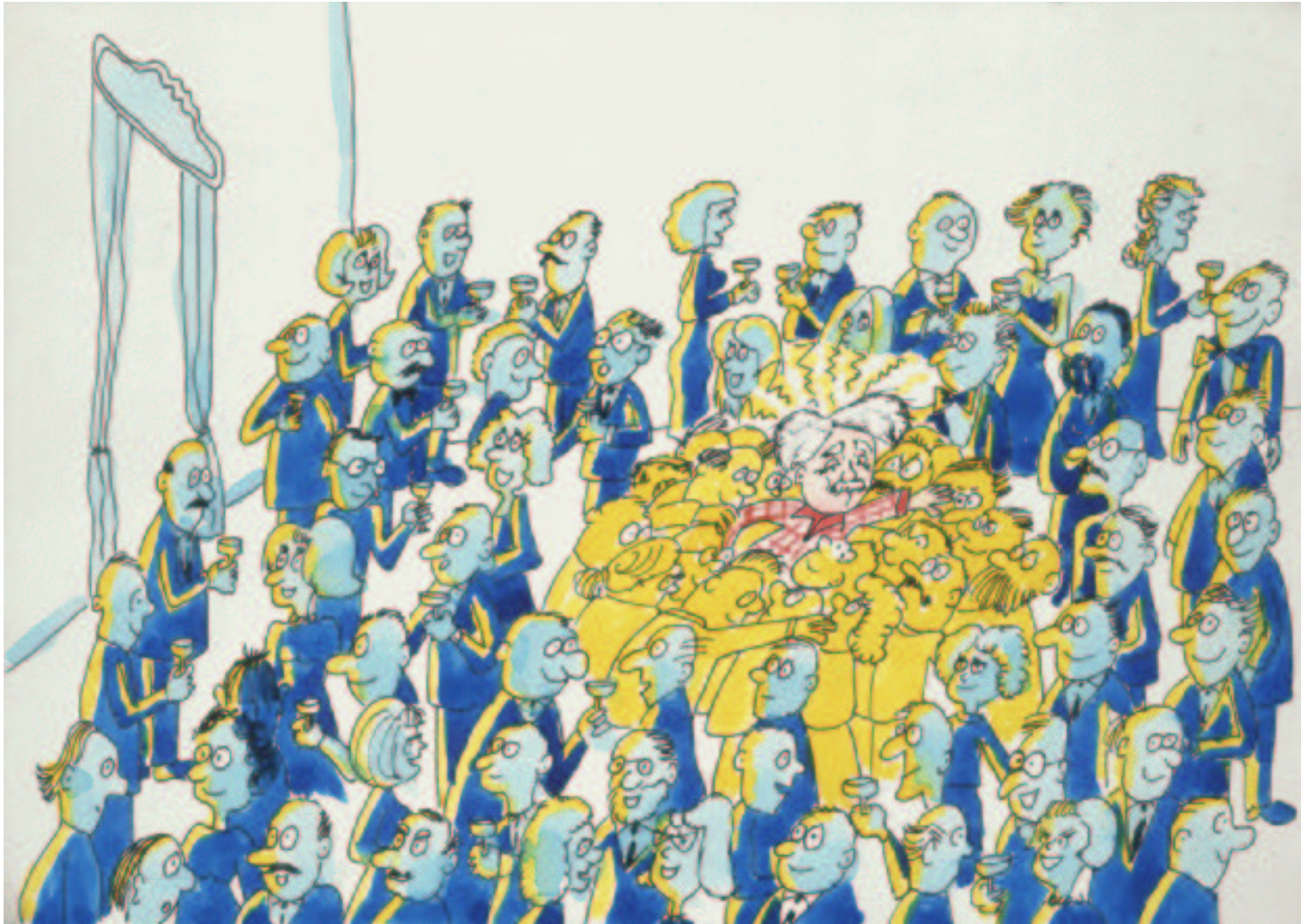
Mechanizm Higgsa

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_μ^0 grupy $SU(2)$ i
- pola B_μ 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 θ_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 ϕ 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**

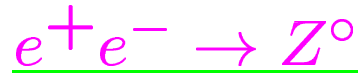
Za wykazanie spójności modelu

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

Model Standardowy

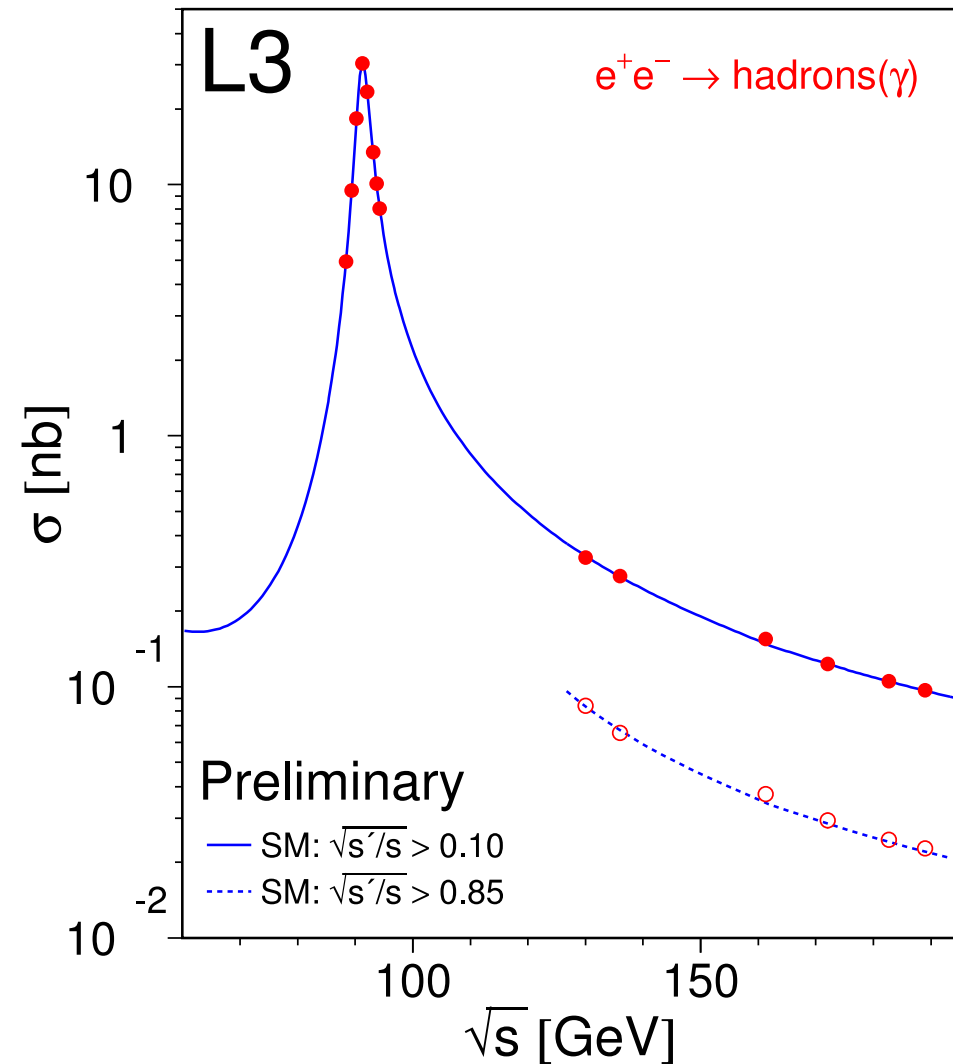
$$SU(2) \times U(1) \times SU(3)$$

Testy Modelu Standardowego



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

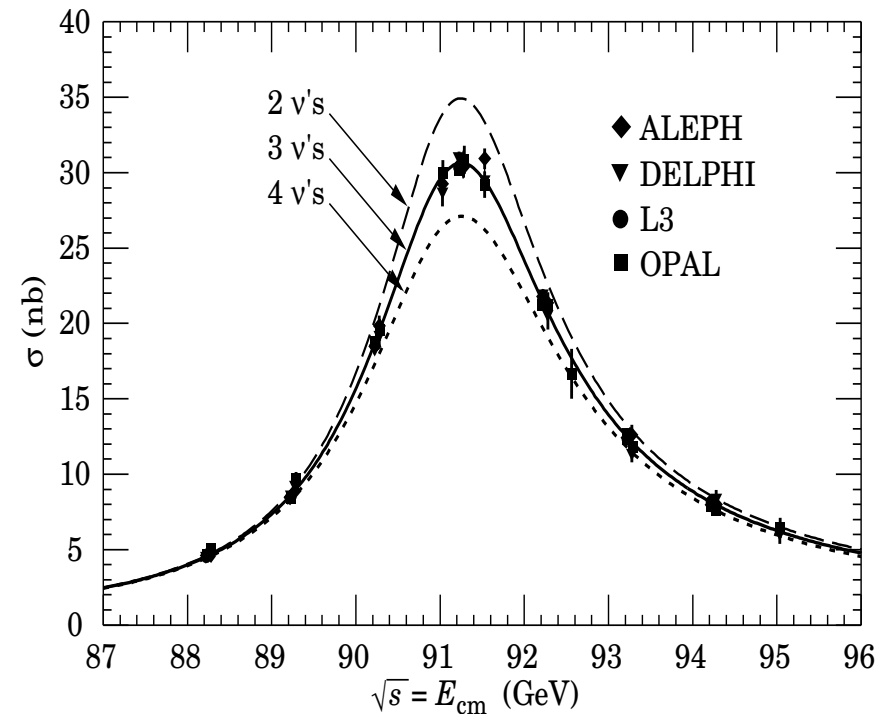


Testy Modelu Standardowego

Liczba neutrin

Z^0 rozpada się na kwarki, naładowane leptony i neutrina. 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



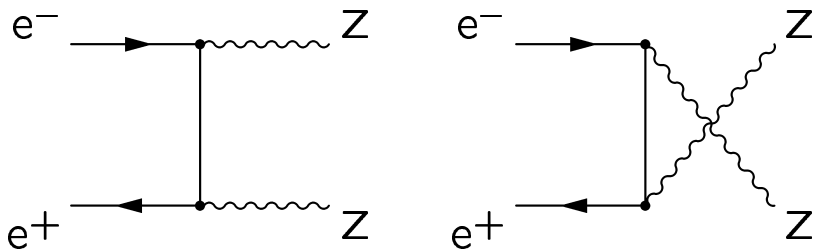
$$N_\nu = 2.9841 \pm 0.0083$$

EPS'2001

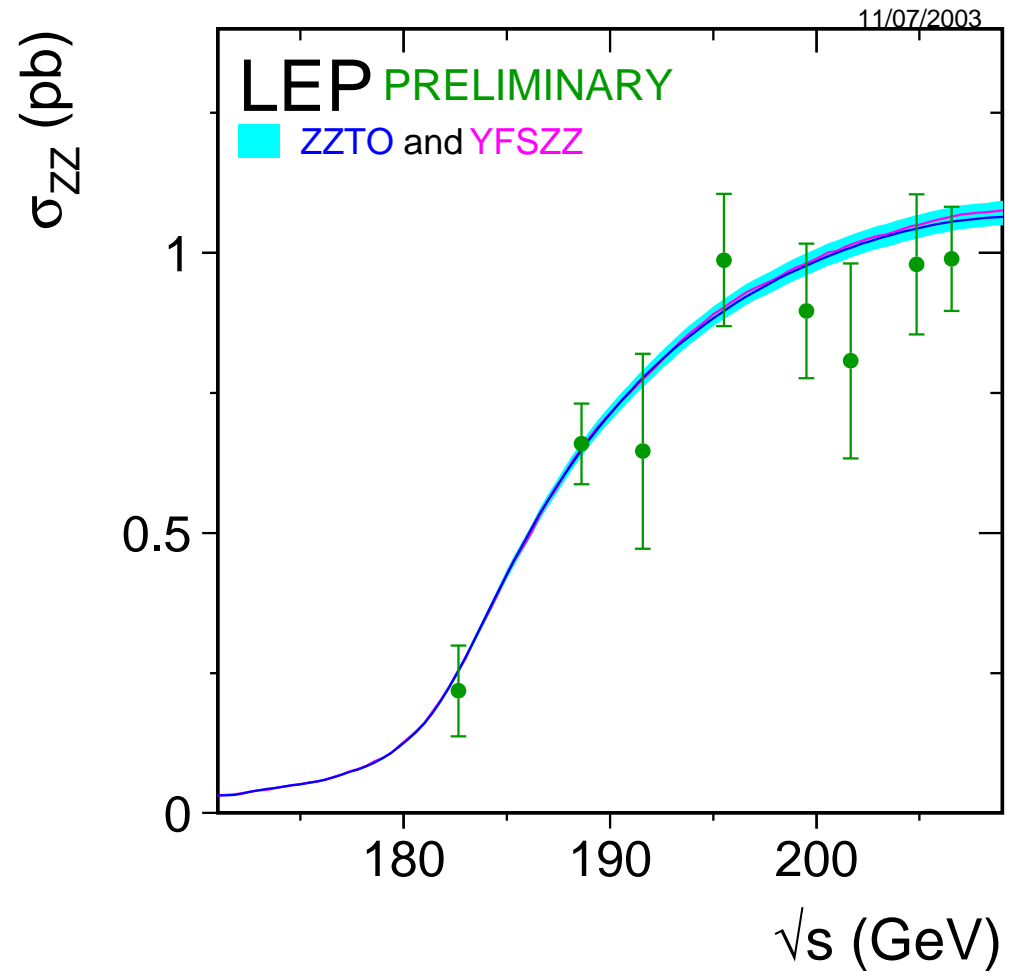
Testy Modelu Standardowego

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

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



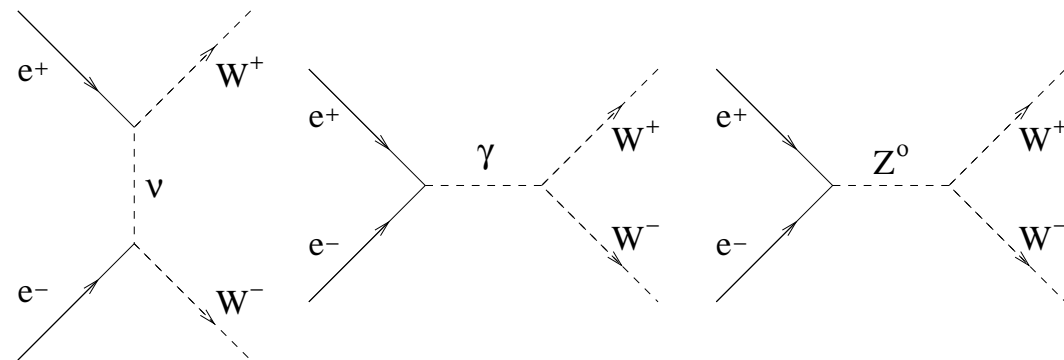
Bardzo dobra zgodność z przewidywaniami Modelu Standardowego \Rightarrow



Testy Modelu Standardowego

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

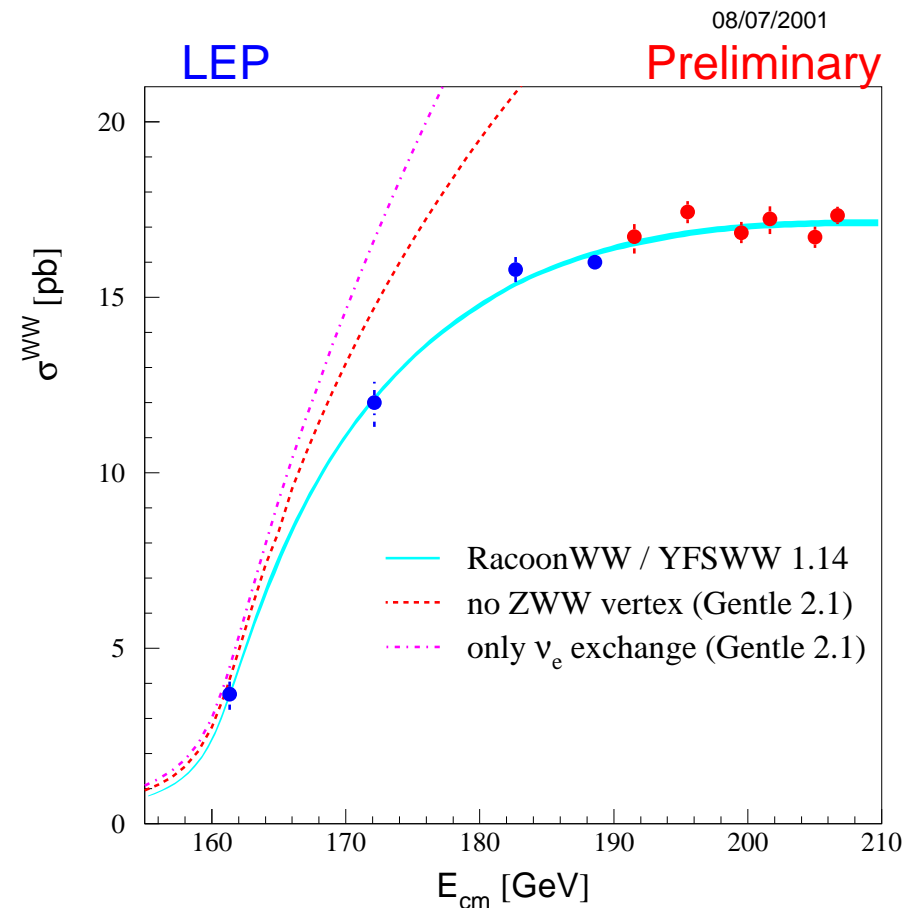
Wkład od **trzech** różnych **procesów**:



Sprzężenia wynikają z przyjętych **symetrii cechowania**

⇒ **ściśle przewidywania modelu**

Doświadczalnie **potwierdzone kasowanie wkładów** od różnych procesów ⇒



Testy Modelu Standardowego

Summer 2003

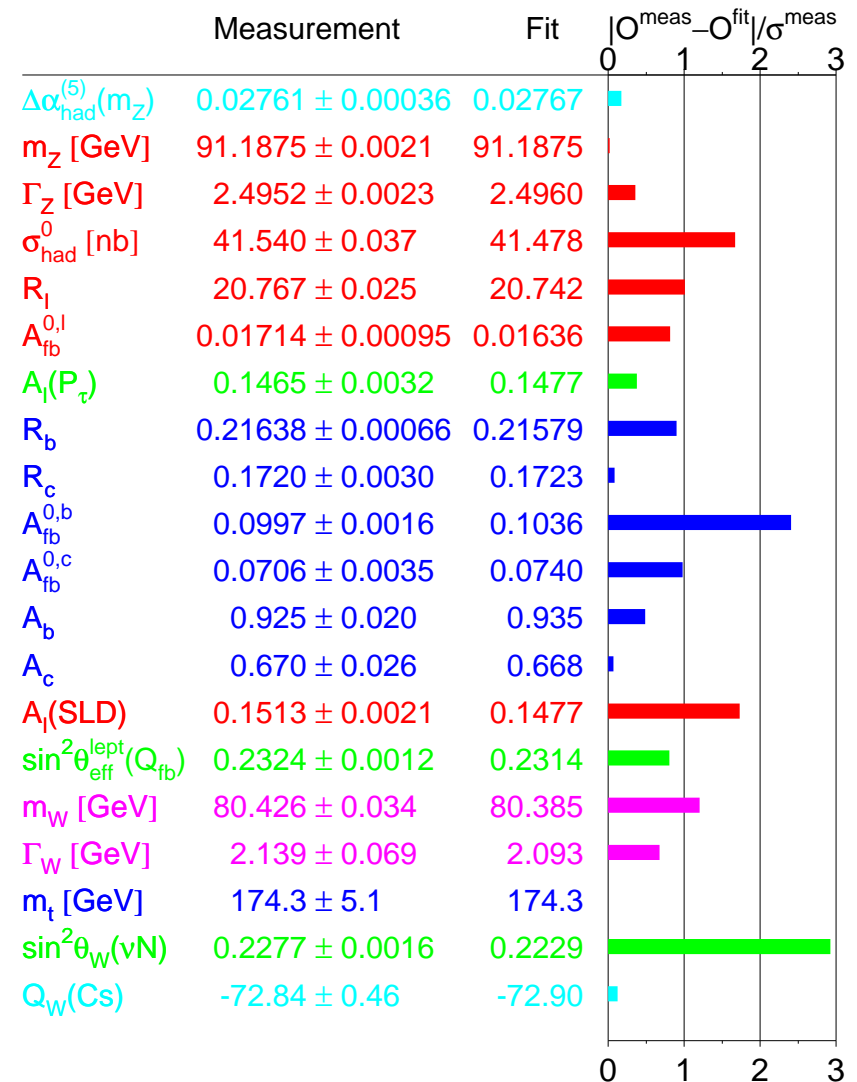
Porównanie

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

Można wybrać np. α_{em} , G_F i M_Z .

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

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



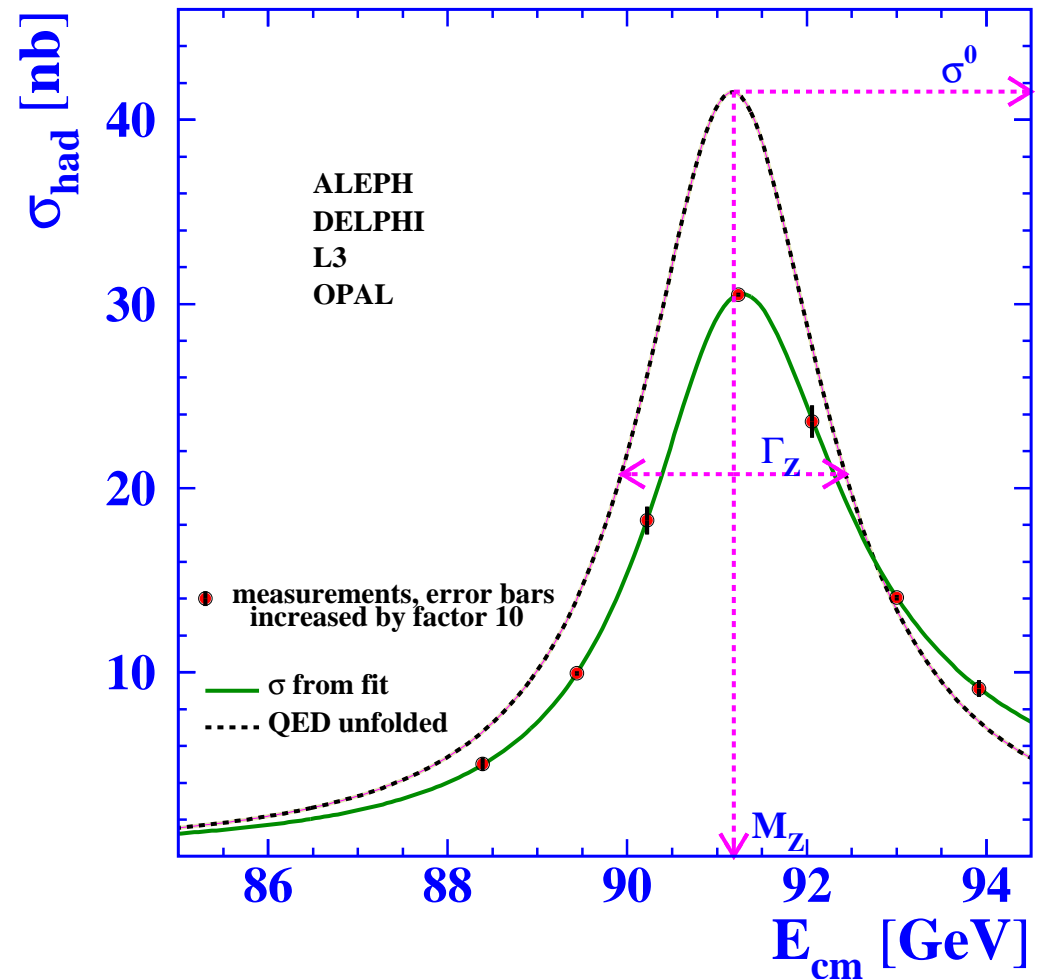
Testy Modelu Standardowego

Poprawki

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

Poprawki pochodzą m.in. od **procesów** z wirualną wymianą **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

Masa higgsa

Analiza **wszystkich** dostępnych **danych** wskazuje, że masa Higgsa powinna wynosić **około 100 GeV**

$$m_h = 96^{+60}_{-38} \text{ GeV}$$

lub: $m_h < 219 \text{ GeV}$ (95% CL)

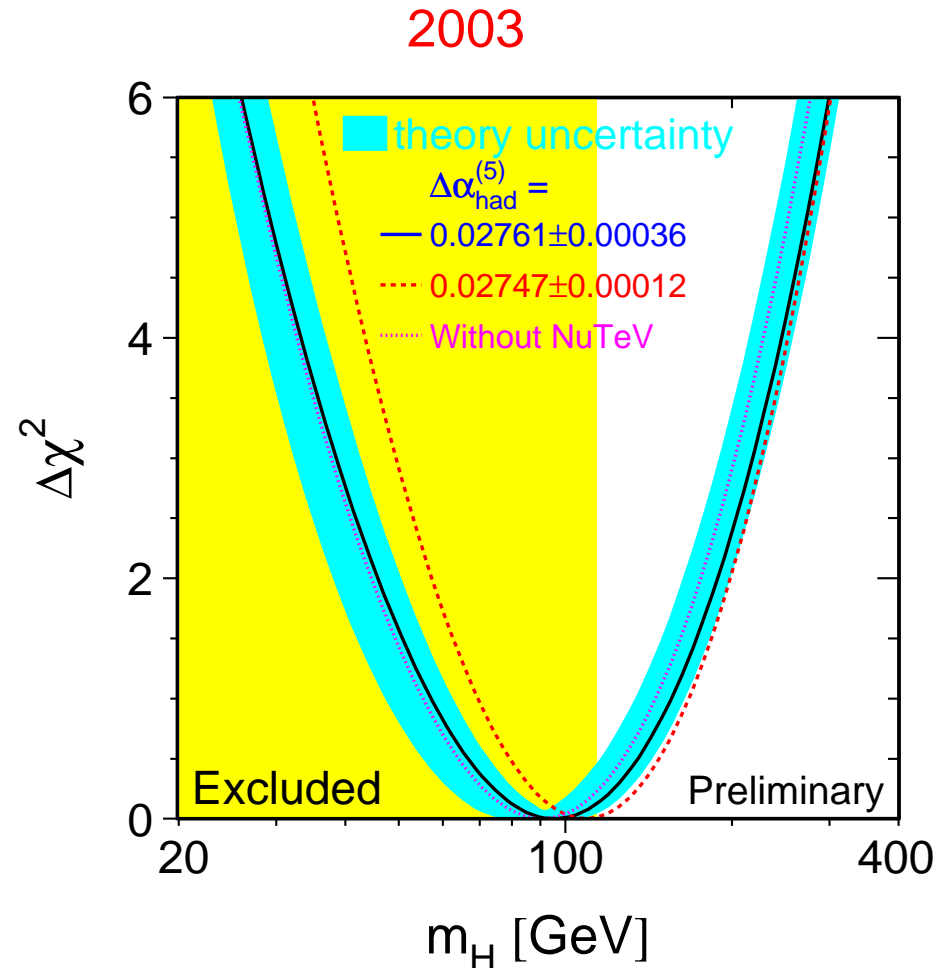
Dlaczego wciąż go nie widzimy ?...

Z bezpośrednich poszukiwań:

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

wszystkie dane LEP:

ALEPH + DELPHI + L3 + OPAL



Poszukiwanie Higgsa

Kanały rozpadu

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

Ma też **szczególne własności**...

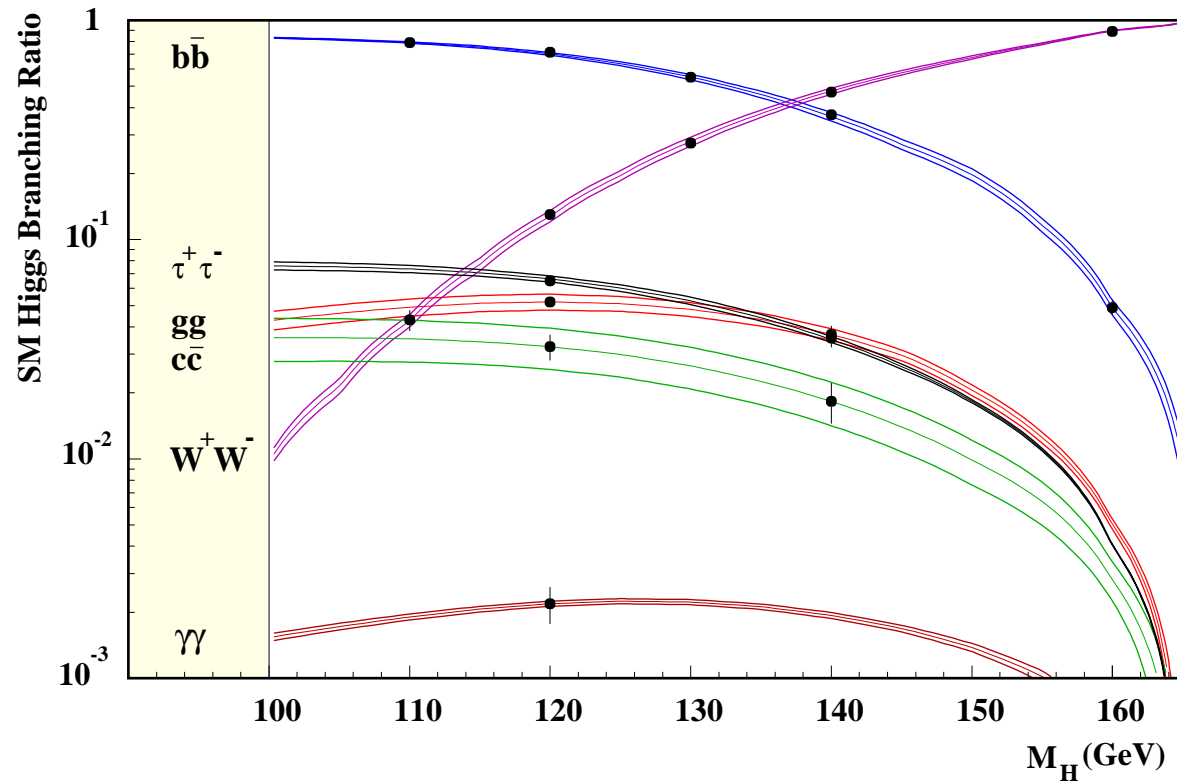
Sprzężenie Higgsa do cząstek są **proporcjonalne do masy**

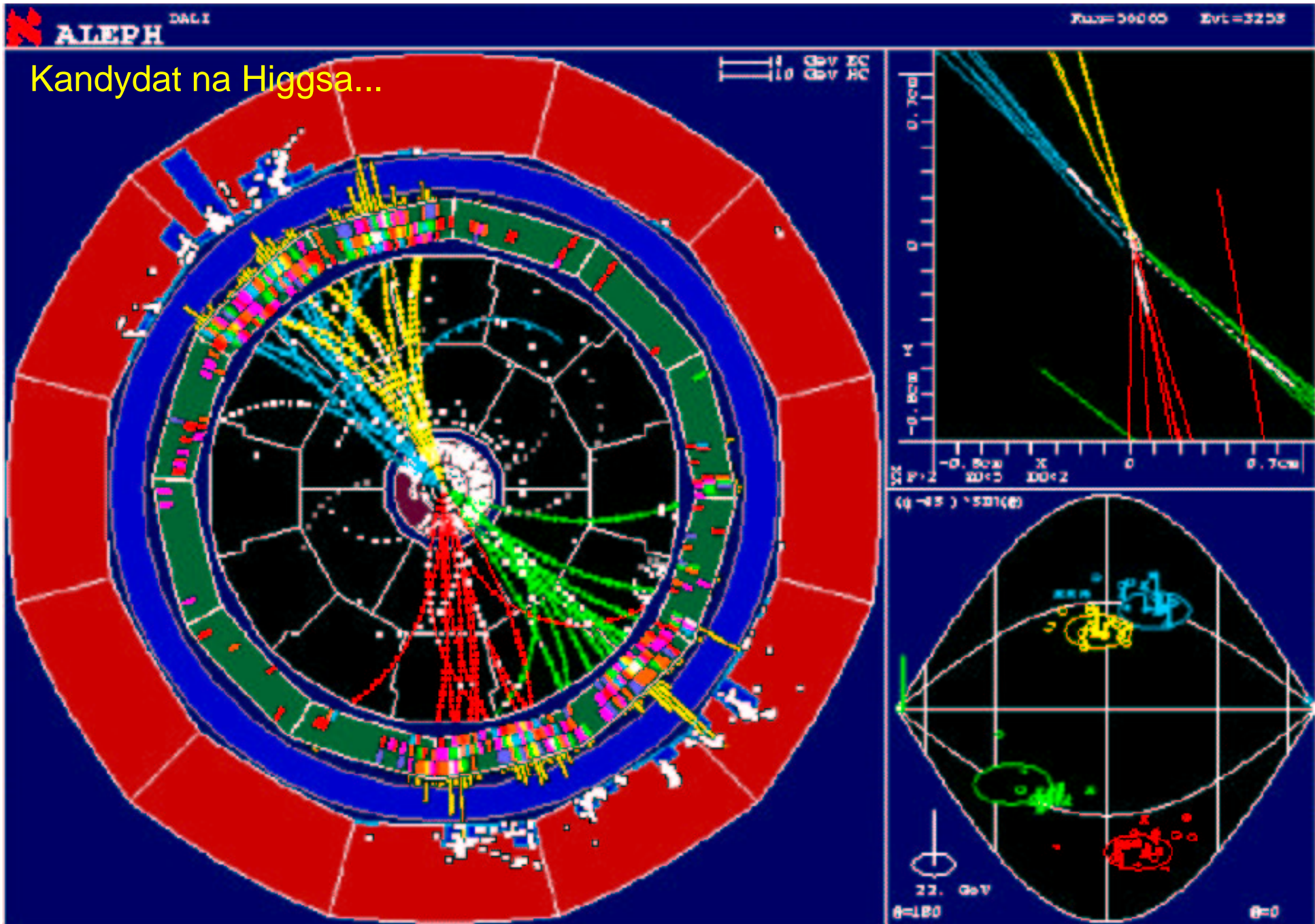
⇒ rozpada się najchętniej na **najcięższe dostępne** stany...

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

W LEP szukano przypadków produkcji Higgsa:

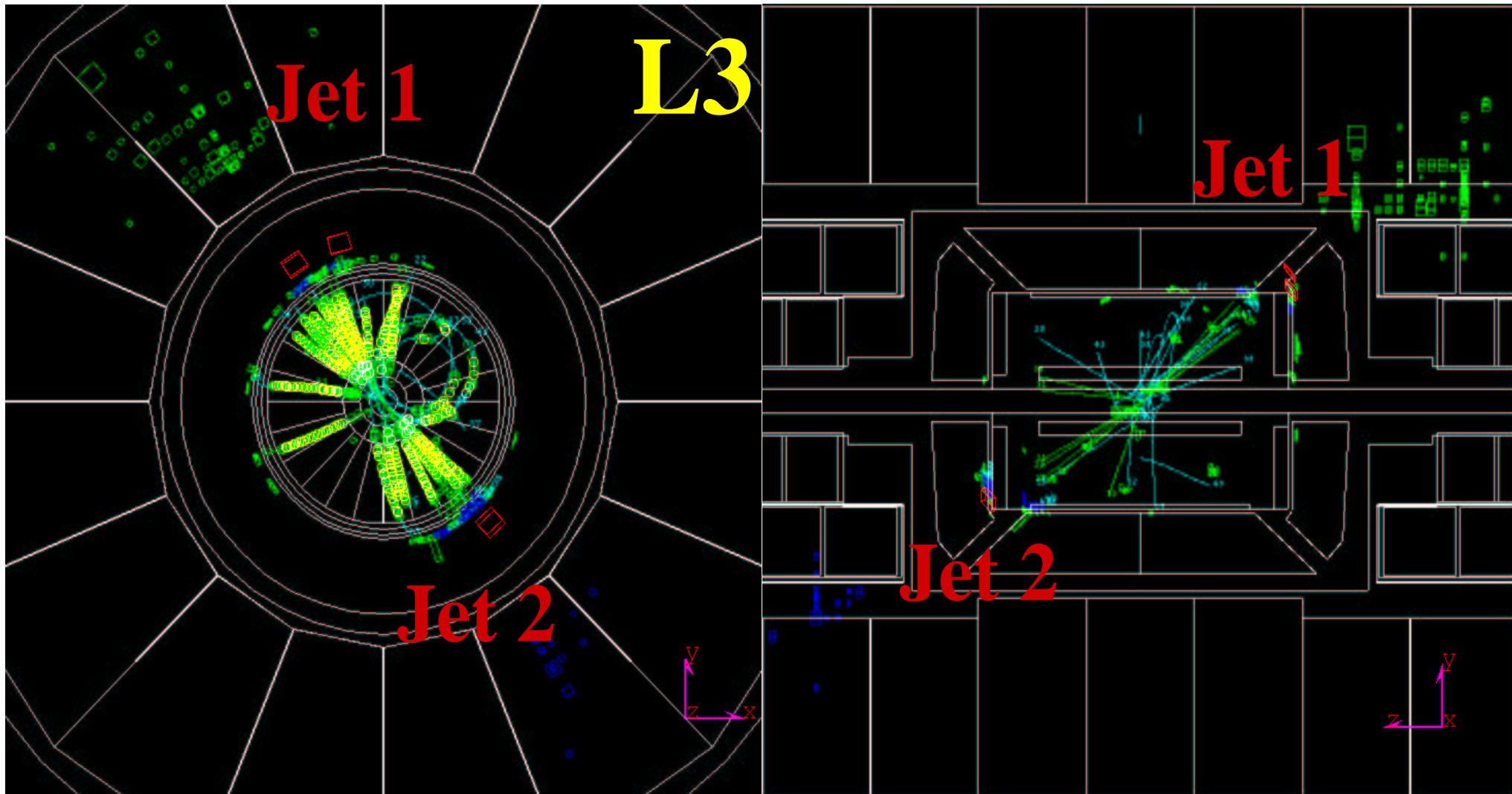
$$e^+e^- \rightarrow h Z^0 \rightarrow b\bar{b} X$$





candidate for

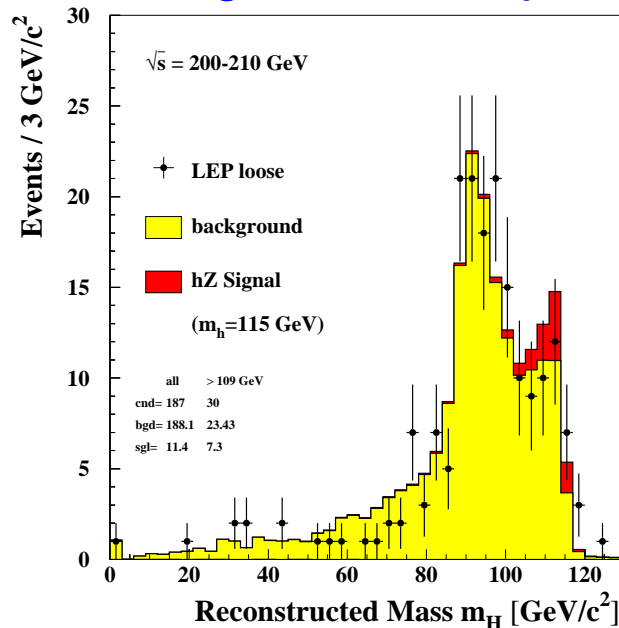
$e^+e^- \rightarrow H\nu\bar{\nu} \rightarrow 2 \text{ jets} + \text{missing energy}$



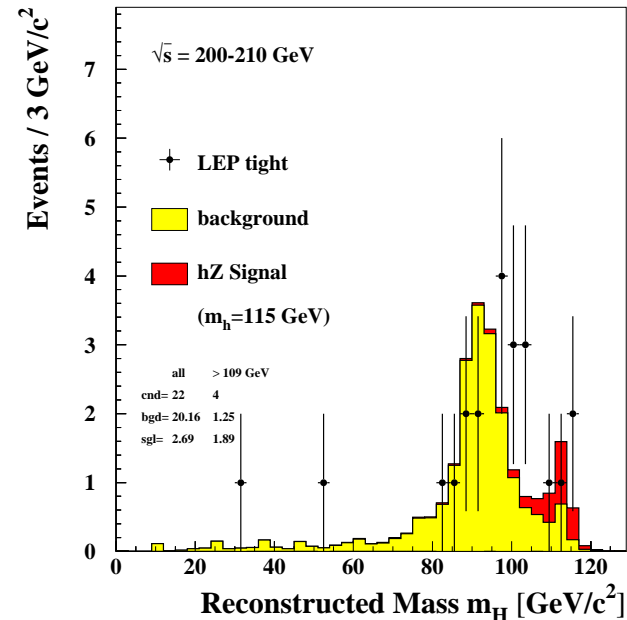
Poszukiwanie Higgsa

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**.

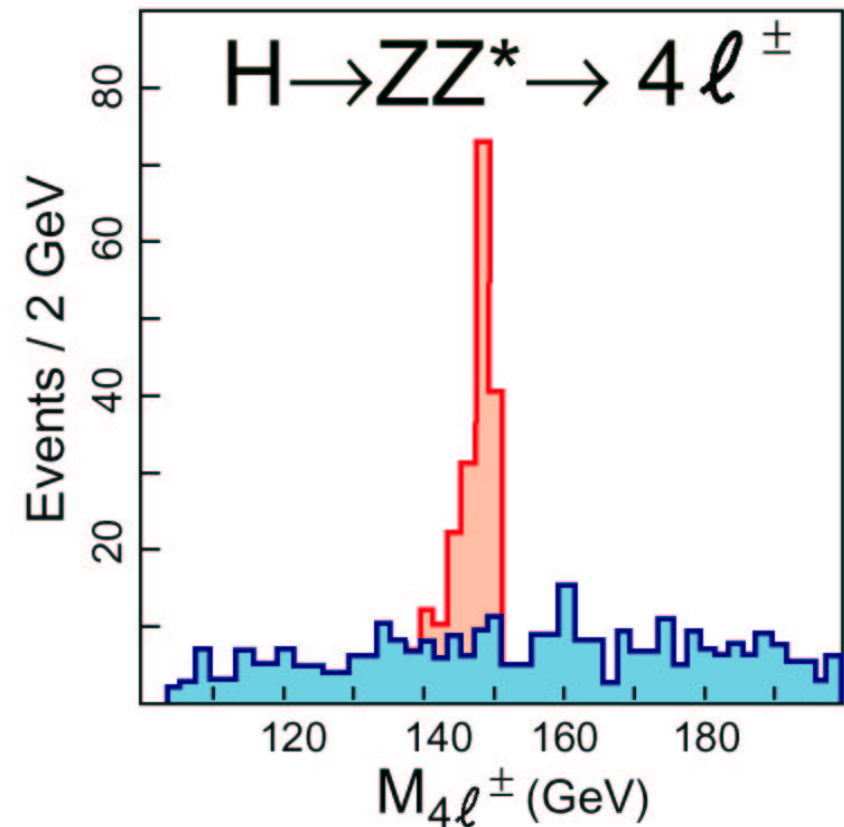
LHC

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

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

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

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

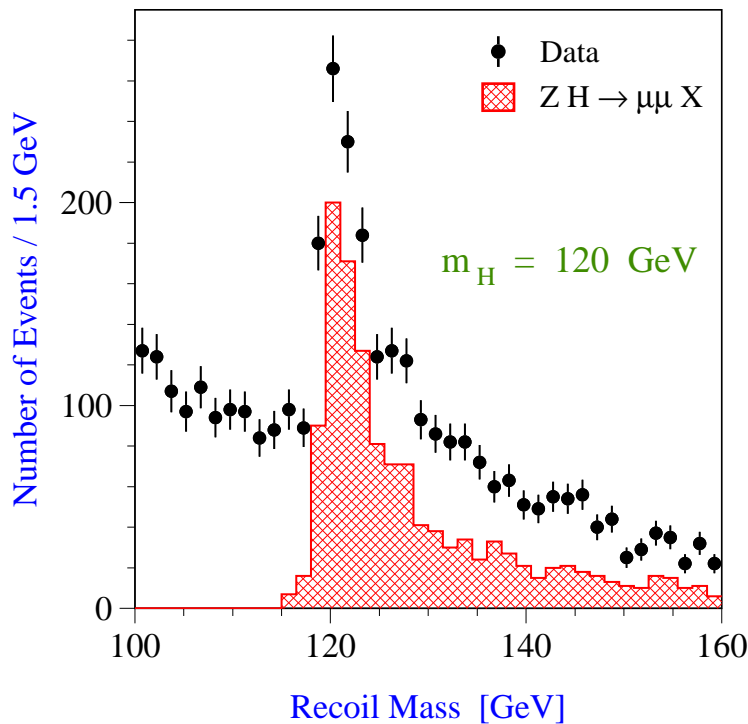


CMS Warszawa

Poszukiwanie Higgosa

TESLA e^+e^-

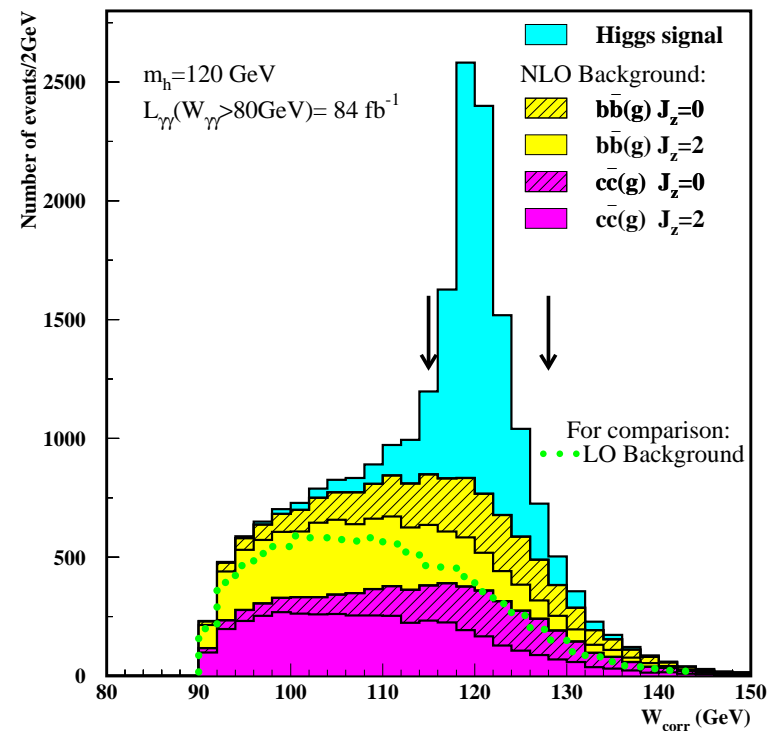
Proces: $e^+e^- \rightarrow Z^0 h$



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

TESLA Photon Collider

Proces: $\gamma\gamma \rightarrow h, \quad h \rightarrow b\bar{b}$
 e^-e^- beams with $\sqrt{s_{ee}} = 210 \text{ GeV}$



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

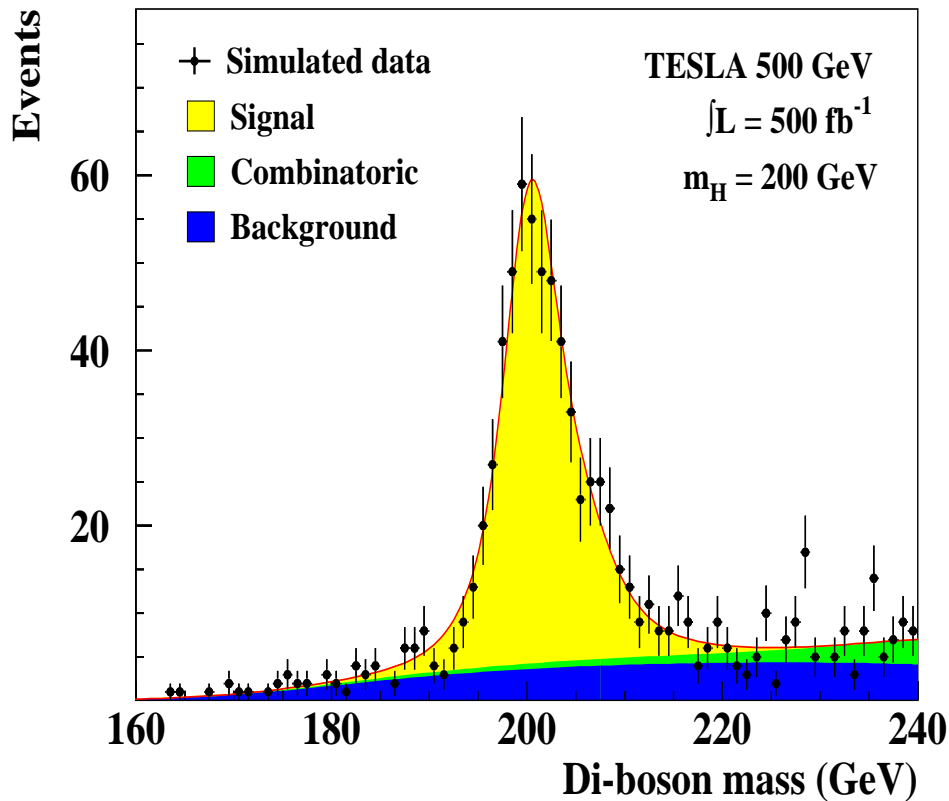
TESLA Warszawa

Poszukiwanie Higgosa

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

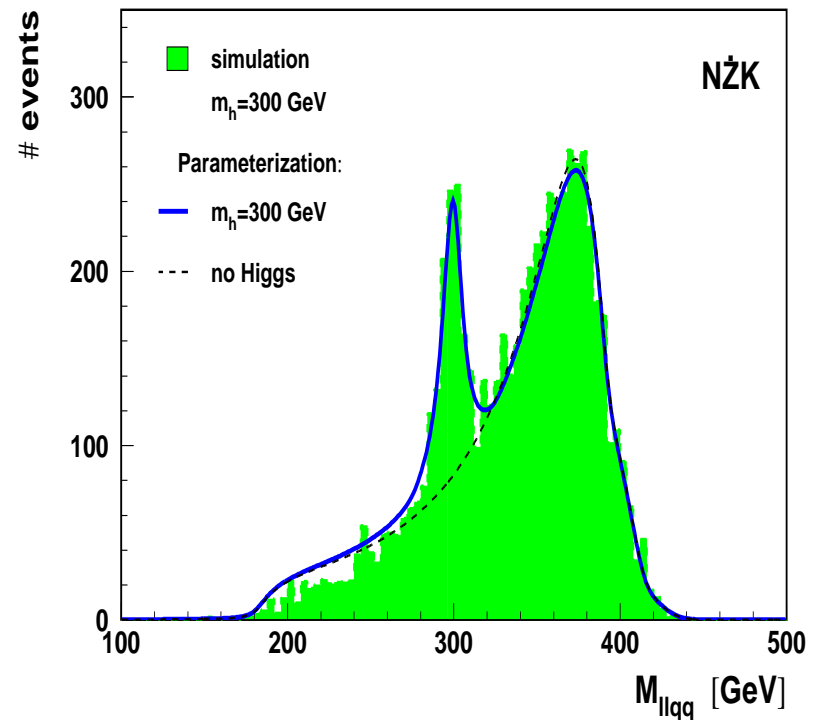
TESLA e^+e^-

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



TESLA Photon Collider

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



TESLA Warszawa