

# Supersymetria

## Elementy fizyki cząstek elementarnych

### Wykład XII

- Problemy Modelu Standardowego
- Supersymetria
- Widmo cząstek
- Przewidywania
- Obecne wyniki
- Przyszłe poszukiwania
- Mały Higgs

# Model Standardowy

## Przypomnienie

Cząstki materii  $\Rightarrow$  **fermiony**

Lewoskrętne **dublety** (oddz. słabe)

i prawoskrętne **singlety**.

Pierwsza generacja:

$$\begin{pmatrix} e^- \\ \nu_e \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L \quad e_R^- \quad u_R \quad d_R$$

$\times 3$  generacje

$\times 2$  (antycząstki)

kwarki  $\times 3$  (kolor)

Oddziaływania  $\Rightarrow$  **bozony** cechowania

Grupa cechowania  $U(1) \times SU(2) \times SU(3)$ :

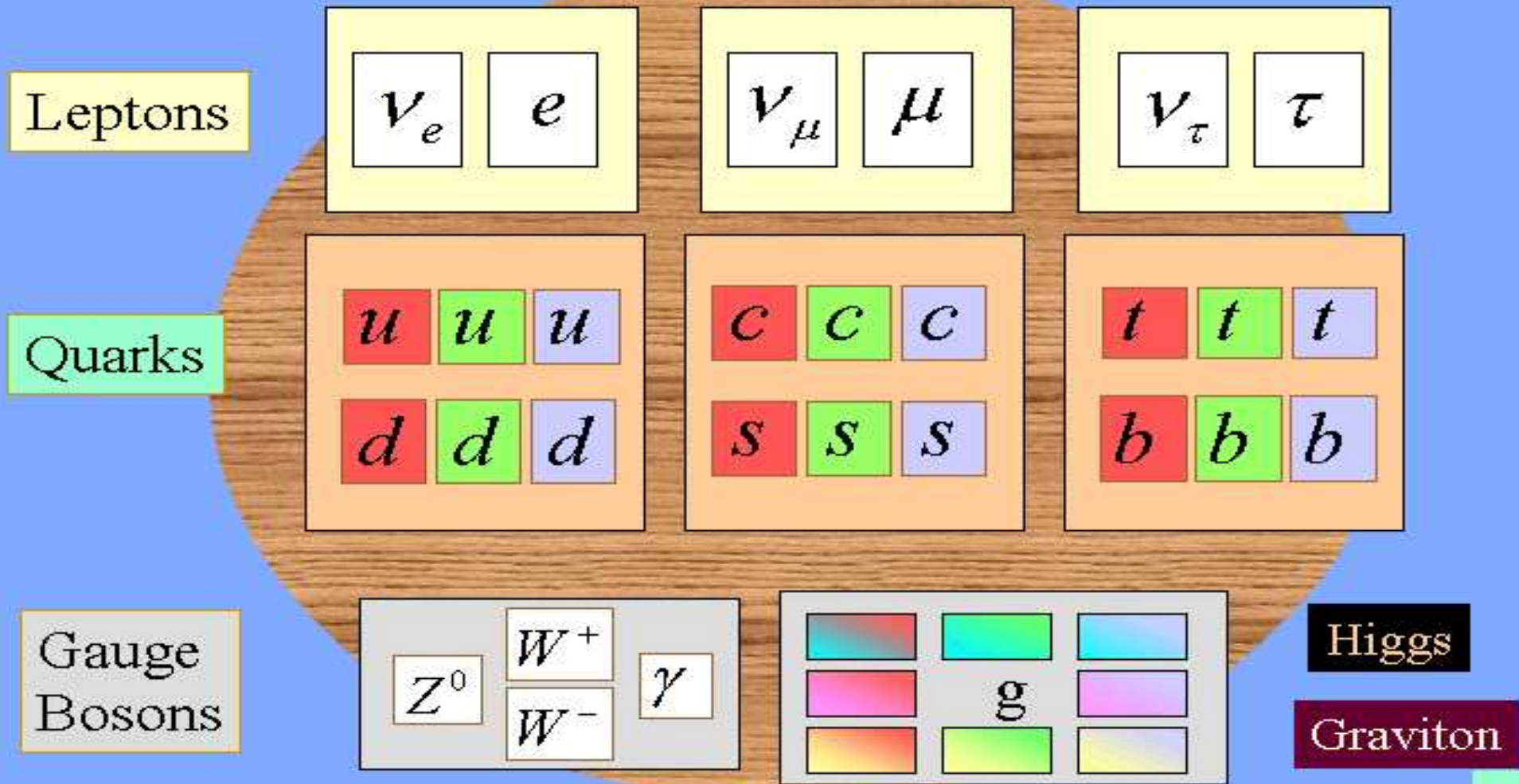
<i>oddziaływanie</i>	<i>symetria</i>	<i>nośniki</i>
elektro –	U(1)	$\gamma$
– słabe	SU(2)	$W^+, W^-, Z^0$
silne	SU(3)	8 gluonów

Spontaniczne łamanie symetrii  $\Rightarrow$  **masy** bozonów cechowania, **cząstka Higgsa**

Oddziaływanie z cząstką Higgsa  $\Rightarrow$  **masy** fermionów

# The Standard Model

Generation I      Generation II      Generation III



# Model Standardowy

## Pytania i problemy

Wszystkie  
obecnie  
dostępne dane  
zgodne są z  
**Modelem  
Standardowym**

ale...

- Dlaczego **materia**  $\equiv$  fermiony, **oddziaływania**  $\equiv$  bozony ?
- Dlaczego **3 pokolenia** kwarków i leptonów ?
- Dlaczego zachowane są **liczby leptonowe** i **barionowa**?
- Jaki jest powód **spontanicznego łamania symetrii** ?
- Gdzie jest **cząstka Higgsa** ?
- brak spójnego opisu **grawitacji**
- co to jest “**ciemna materia**” ?
- co to jest “**ciemna energia**” !?
- **dużo** wolnych **parametrów**, “ręcznie” dopasowywanych...
- ogromne różnice mas  $\Rightarrow$  “**problem hierarchii**”

# Model Standardowy

## Skale masowe

neutrino  $\sim 10^{-11}$  GeV

elektron  $\sim 10^{-3}$  GeV

$W^\pm, Z^0, h$  (?)  $\sim 10^{+2}$  GeV

top  $\sim 2 \cdot 10^{+2}$  GeV

“pustynia”  $\updownarrow$

GUT  $M_X$   $\sim 10^{+15}$  GeV

$M_{Pl}$   $\sim 10^{+19}$  GeV

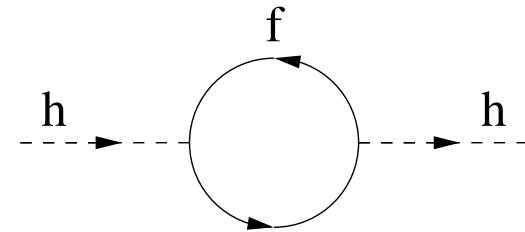
Masa Planka ( $M_{Pl}$ ):

skala unifikacji dla grawitacji,

skala przy której grawitacja staje się “silna”

Czy Model Standardowy może pozostać słuszny aż do skali  $\Lambda \sim M_X$  ?

“Problem hierarchii” - problem ze zdefiniowaniem masy Higgsa:



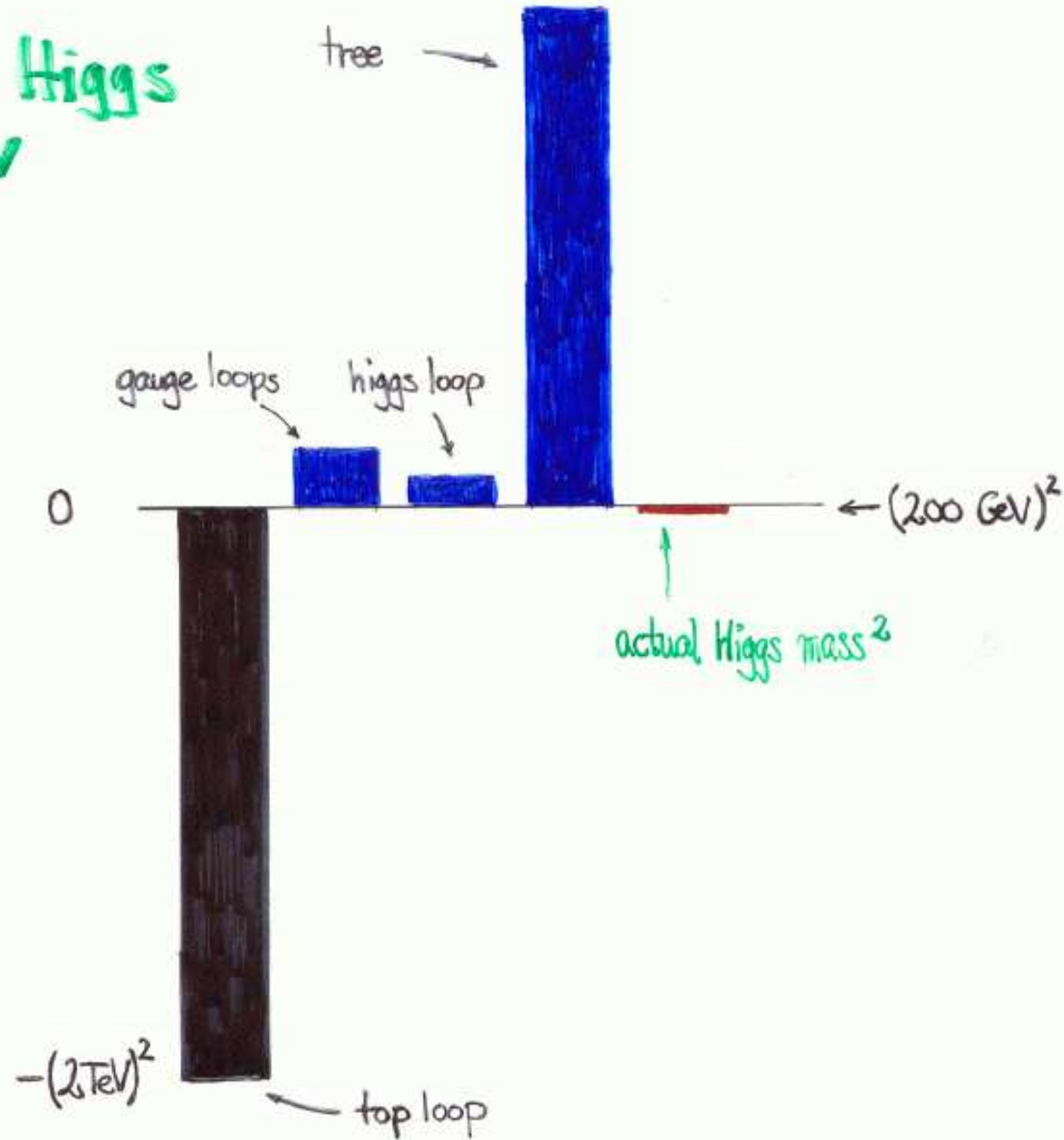
Poprawki związane z pętlami fermionowymi (dominuje kwark t) rosną jak  $\Lambda^2$ ...

Aby uzyskać  $m_h < 1$  TeV musimy niesłychanie precyzyjnie dobrać parametry ( $\delta \sim 10^{-15}$ )

Model przestaje jednak być “naturalny”.

# Fine tuning the Higgs

$\Lambda = 10 \text{ TeV}$



Bardzo duże poprawki  
już dla  $\Lambda \geq 10 \text{ TeV}$

Prawdopodobieństwo, że przy  
losowym wyborze parametrów  
dostaniemy “dobrą” masę  
bozonu Higgsa  $\sim 0$ .

# Rozszerzenia Modelu Standardowego

## Problem hierarchii

Jak “ustabilizować” masę Higgsa (duże poprawki  $\sim \Lambda^2$ ) ?

⇒ doprowadzić do “automatycznego” kasowania się poprawek

⇒ SUPERSYMETRIA

⇒ dodać nowe oddziaływania/cząstki przy skali  $\Lambda' \ll \Lambda$

Wiele możliwości. Przykładowe

“MAŁY HIGGS”      NOWE SPRZĘŻENIA  $W^\pm$

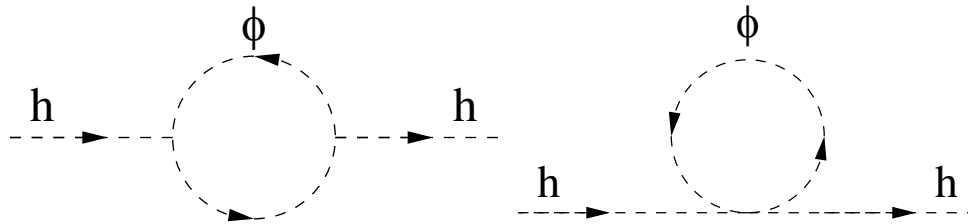
⇒ obniżyć skalę  $\Lambda$  do  $\sim 1$  TeV

⇒ DODATKOWE WYMIARY

# Supersymetria

Problem **rozbieżnych poprawek** do masy Higgsa **nie pojawia się** jeśli dla każdego **fermionu** w teorii dodamy dokładnie mu **odpowiadające bozony**.

Poprawki od pętli bozonowych:



mają **przeciwny znak** i kasują rozbieżności fermionowe.

Pozostają jedynie **skończone wkłady**, proporcjonalne do **różnic mas** bozonów i fermionów.

⇒ aby “uratować”  $m_h$  potrzebujemy **nowych cząstek** (bozonów) przy skalach  $\sim 1 \text{ TeV}$ .



# Supersymetria

## Podstawy teorii

Zaproponowana  $\sim 1970$  na podstawie **czysto teoretycznych** spekulacji...

**Supersymetria**: symetria łącząca cząstki (własności cząstek) o **różnych spinach**.

## Podstawowe założenia:

$\Rightarrow$  Zachowujemy grupę cechowania  $U(1) \times SU(2) \times SU(3)$

$\Rightarrow$  Dla każdej znanej **cząstki** dodajemy jej “**super-partnera**” o spinie różnym o  $\frac{1}{2}$ :

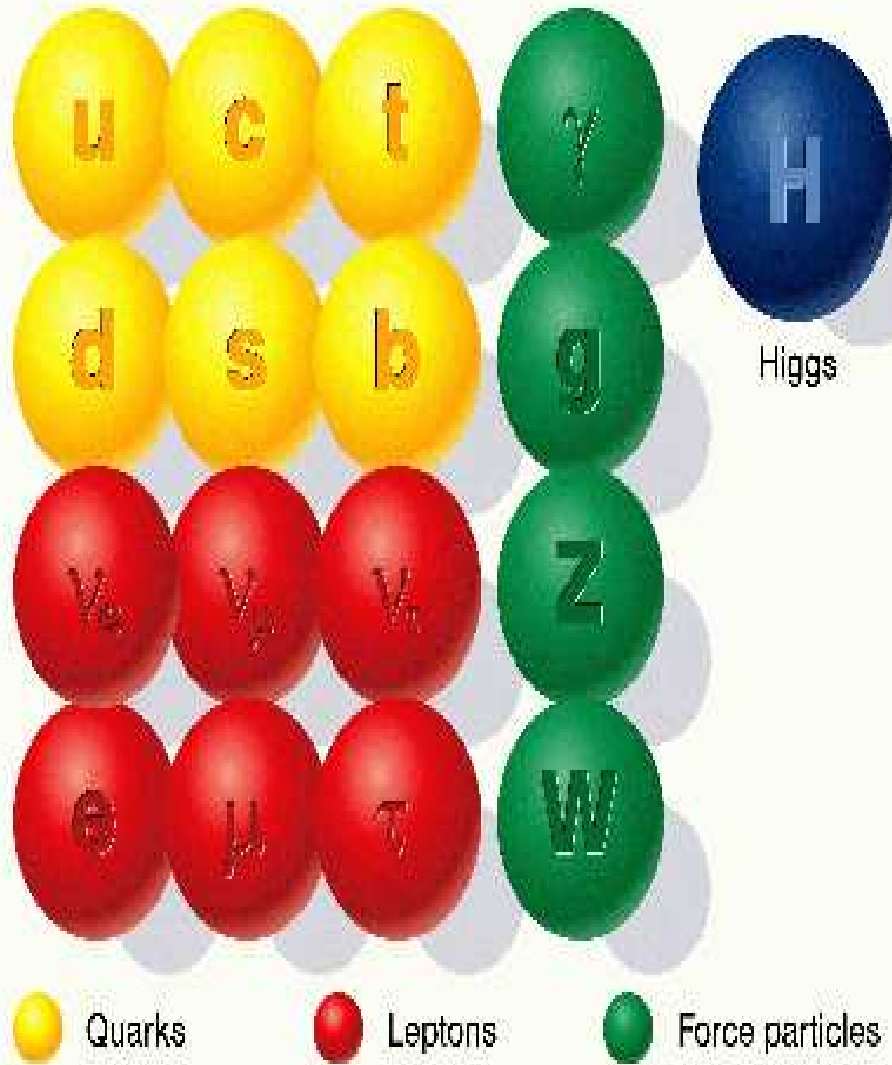
fermion ( $s=\frac{1}{2}$ )  $\rightarrow$  sfermion ( $s=0$ )

bozon

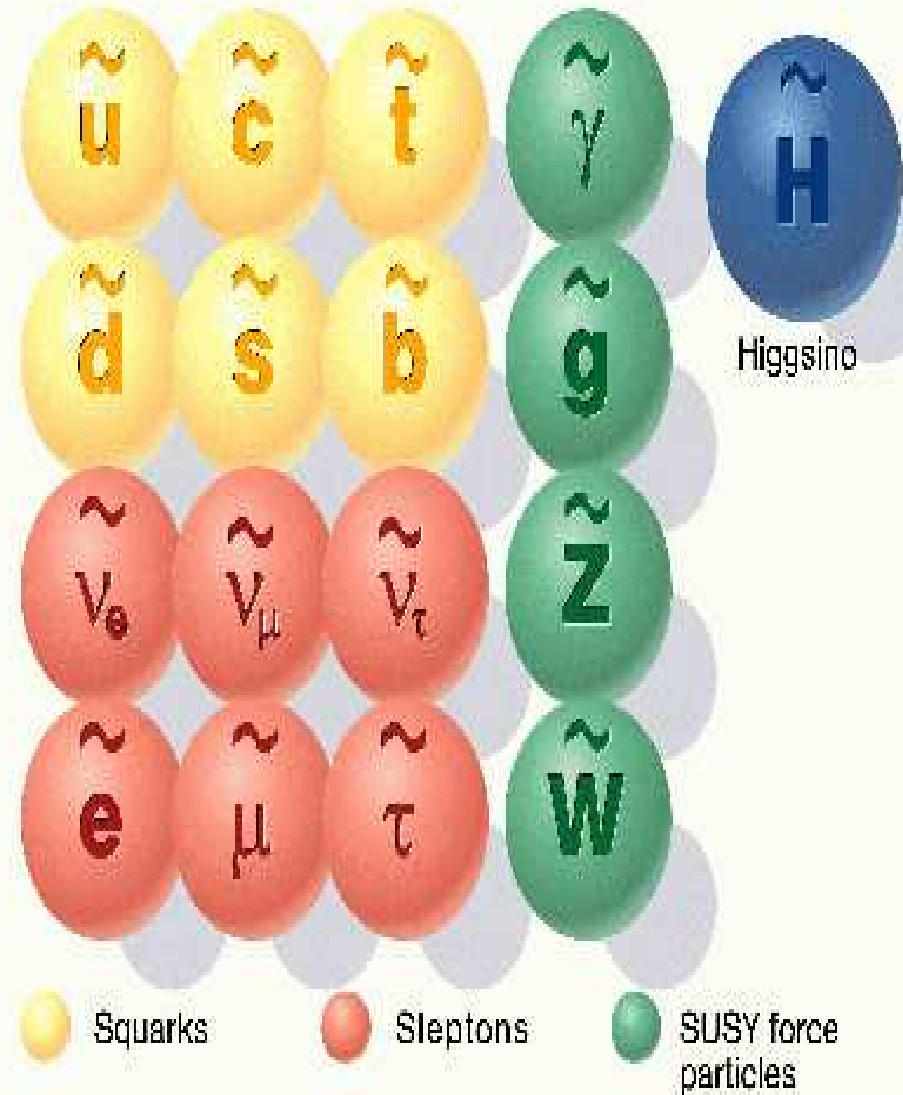
cechowania ( $s=1$ )  $\rightarrow$  gaugino ( $s=\frac{1}{2}$ )

Higgs ( $s=0$ )  $\rightarrow$  higgsina ( $s=\frac{1}{2}$ )

## Standard particles



## SUSY particles



# Supersymetria

## Widmo cząstek

	spin 0	spin $\frac{1}{2}$	spin 1
(s)leptony	$\begin{pmatrix} \tilde{e}_L \\ \tilde{\nu}_e \\ \tilde{e}_R \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} e_L \\ \nu_{eL} \\ e_R \end{pmatrix}$	
(s)kwarki	$\begin{pmatrix} \tilde{u}_L \\ \tilde{d}_L \\ \tilde{u}_R \\ \tilde{d}_R \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} u_L \\ d_L \\ u_R \\ d_R \end{pmatrix}$	
bozony i gaugina		gluina $\tilde{g}$ fotino $\tilde{\gamma}$ zino $\tilde{Z}$ wina $\tilde{W}^\pm$	gluony $g$ foton $\gamma$ $Z^\circ$ $W^\pm$
Higgs(ina)	$h^\circ, H^\circ, A^\circ$ $H^\pm$	$\tilde{H}_1^\circ, \tilde{H}_2^\circ$ $\tilde{H}^\pm$	

# Supersymetria

## Widmo cząstek

Uwagi:

- Tak jak w modelu Standardowym mamy 3 generacje skwarków i sleptonów
- indeksy  $L$  i  $R$  dla sleptonów i skwarków nie oznaczają skrętności (spin = 0)  
 $\tilde{e}_L$  i  $\tilde{e}_R$  są partnerami  $e_L$  i  $e_R \Rightarrow$  różne cząstki !!! (choć mogą mieć tą samą masę)
- Aby nadać masy większej liczbie cząstek musimy “rozszerzyć” sektor Higgsa  
Dwa dublety Higgsa w Modelu Standardowym (możliwe także bez supersymetrii)  
 $\Rightarrow 8 - 3 = 5$  cząstek:

$h^\circ$  lekki Higgs skalarny  
 $H^\circ$  ciężki Higgs skalarny  
 $A^\circ$  Higgs pseudoskalarny  
 $H^\pm$  2 naładowane Higgisy

$\Rightarrow$  4 higgisina w SUSY:  $\tilde{H}_1^\circ, \tilde{H}_2^\circ, \tilde{H}^\pm$

# Supersymetria

## Widmo cząstek

Uwagi (cd.):

- w Modelu Standardowym pola  $B$  i  $W^\circ$  mieszają się dając  $\gamma$  i bozon  $Z^\circ$ .
- ⇒ w ogólności **mieszanie** pól w **SUSY** może być inne, w mieszaniu włączone są także “nowe” pola Higgsa:

$$\begin{aligned} \tilde{\gamma}, \tilde{Z}, \tilde{H}_1^\circ, \tilde{H}_2^\circ &\Rightarrow \tilde{\chi}_1^\circ, \tilde{\chi}_2^\circ, \tilde{\chi}_3^\circ, \tilde{\chi}_4^\circ && \text{neutralina} \\ \tilde{W}^\pm, \tilde{H}^\pm &\Rightarrow \tilde{\chi}_1^\pm, \tilde{\chi}_2^\pm && \text{chargina} \end{aligned}$$

Gdyby **supersymetria** była **pełna** to super-cząstki miałyby takie same **własności** (ładunek, sprzężenia, **masy** !) co ich standardowi **partnerzy**.

Taki scenariusz jest **wykluczony** przez **doświadczenie**, bo nie znaleziono lekkich cząstek supersymetrycznych (o masach  $\sim 1$  GeV) ⇒ **Supersymetria** musi być “**złamana**”

Ale jeśli łamanie jest **spontaniczne**, to możemy uzyskać różne masy “nie psując” teorii...

Rozważanych jest wiele różnych mechanizmów łamania SUSY...

# Supersymetria

Supersymetria “otwiera” przed nami **nowy, bogatszy świat**:

- dziesiątki **nowych cząstek** (do odkrycia)
- setki kanałów **produkcji** (do wykorzystania)
- tysiące kanałów **rozpadu** (do sprawdzenia !!!)

To bogactwo ma jednak swoją cenę:

nawet minimalne rozszerzenie Modelu Standardowego

**MSSM** - Minimal Supersymmetric Standard Model

ma **124** (!) **wolne parametry**...

Zazwyczaj rozważamy modele **SUSY**, w których założono **dodatkowe relacje** między poszczególnymi parametrami (**wynikające z mechanizmu łamania SUSY**)

⇒ możemy “zejść” do (nowych) **4-6 parametrów**...

Supersymetria: **“Puszka Pandory”**

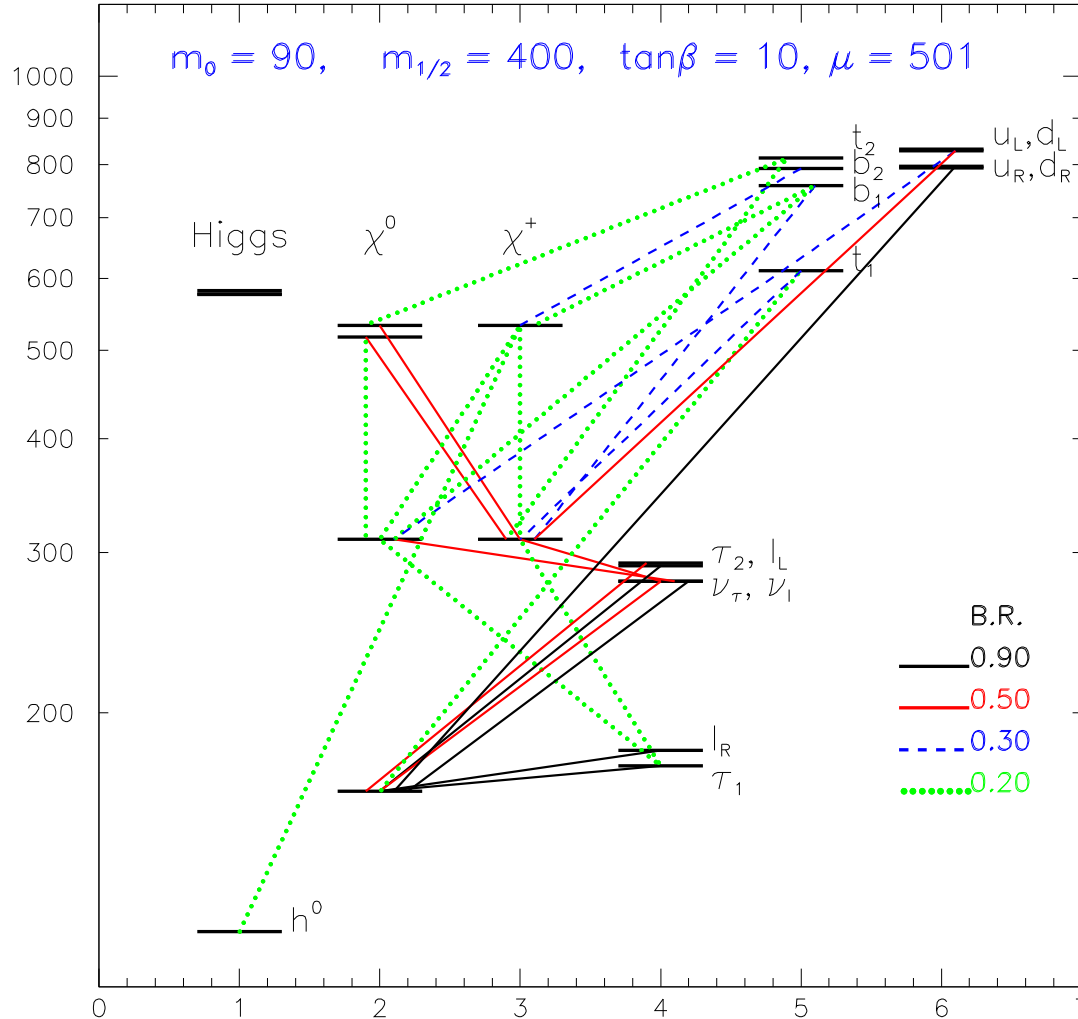
Sami nie wiemy co nas czeka...



# Supersymetria

## SUSY Benchmark Point C

$m_0 = 90, m_{1/2} = 400, \tan\beta = 10, \mu = 501$



## Widmo cząstek

Jeden z przykładowych “scenariuszy” rozważanych w studiach nad **LHC** i innymi **przyszłymi akceleratorami**

$\tan\beta$  - podstawowy parametr opisujący cząstki Higgsa - stosunek **wartości próżniowych** (pozycji minimum potencjału) dla **dwóch dubletów Higgsa**.

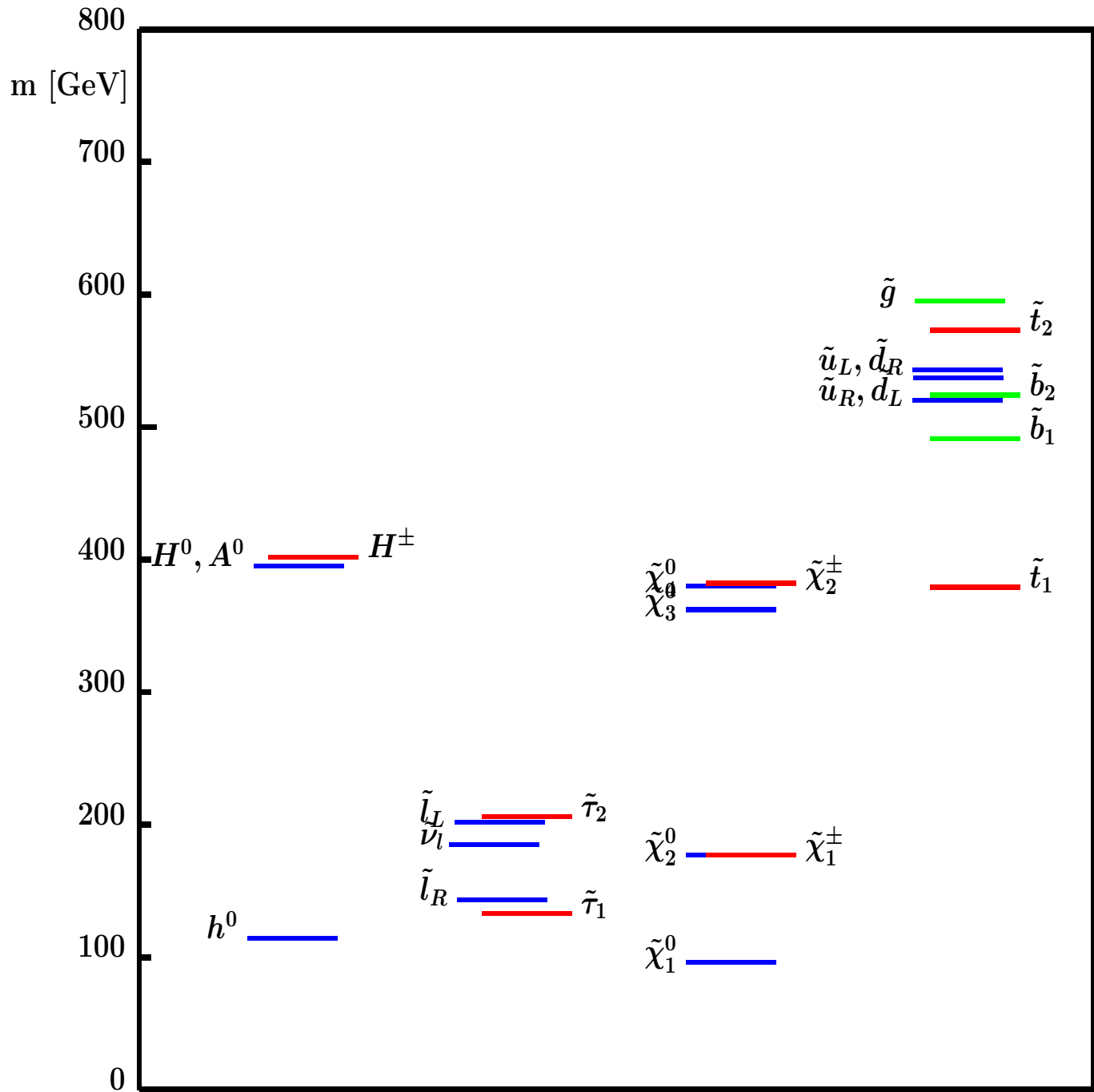
$\tan\beta \sim 1 \Rightarrow$  sprzężenia jak w **SM**



Inny możliwy scenariusz...

**SPS 1**

Standard  
Points and  
Slopes



# Supersymetria

## Przewidywania

- Pełna unifikacja oddziaływań elektroslabych i silnych (przy odpowiednim doborze mas)  $\Rightarrow$
- Słaby kąt mieszania:  $\sin^2 \theta_W \approx 0.23$
- Spontaniczne łamanie symetrii elektroslabej pojawia się “naturalnie” jeśli

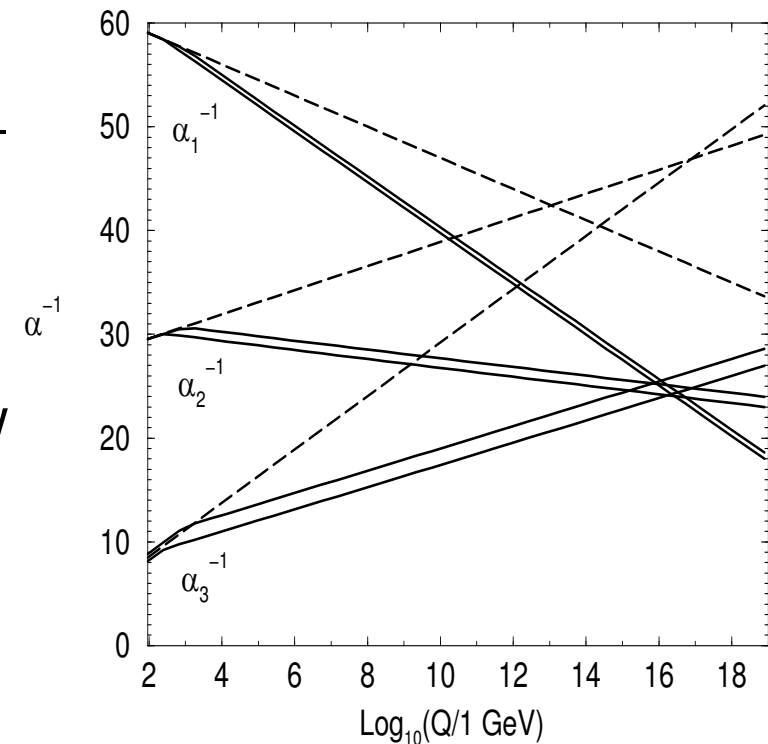
$$m_t \sim 175 \text{ GeV}$$

$\Rightarrow$  duża masa kwarku  $t$  została przewidziana w ramach SUSY 20 lat temu  $\Rightarrow$  ogromny sukces !!!

- najlżejszy bozon Higgsa

$$m_h \leq 135 \text{ GeV}$$

$\Rightarrow$  główny cel łowców supersymetrii



Supersymetria daje też źródła dodatkowego łamania CP (bariogeneza) i kandydatów na ciemną materię...

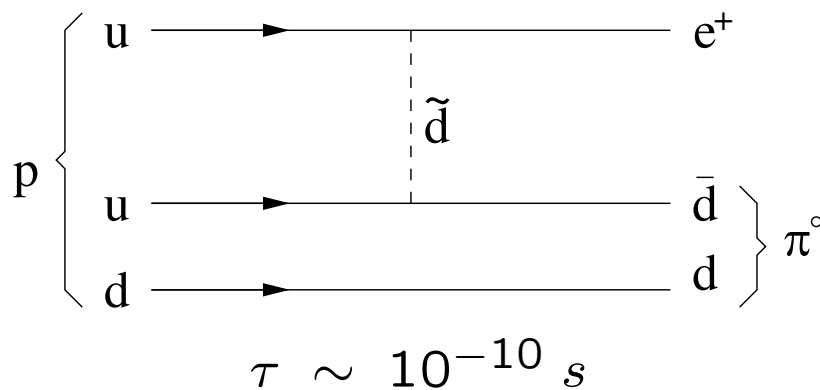
# Supersymetria

## Parzystość R

W ogólnym przypadku supersymetria dopuszcza

łamanie liczby leptonowej  $L$  i barionowej  $B$ .

W szczególności możliwy jest rozpad protonu:



Na ogół wprowadzamy dodatkową symetrię (multiplikatywną liczbę kwantową) zwaną **parzystością R**:

$$R \equiv (-1)^{3(B-L)+2S}$$

$R = +1$  dla cząstek "standardowych"

$R = -1$  dla cząstek supersymetrycznych

Postulat zachowania parzystości **R** ma daleko idące konsekwencje:

- proton **stabilny**
- cząstki SUSY zawsze **produkowane w parach**
- rozpadają się na nieparzystą liczbę cząstek SUSY
- **najlżejsza** cząstka supersymetryczna (LSP) **stabilna**

$\Rightarrow$  zachowuje się jak ciężkie neutrino (nie oddziałuje)

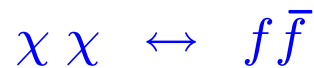
# Supersymetria

## Ciemna materia

W modelach SUSY ciężkie LSP (np. neutralino) jest naturalnym kandydatem na ciemną materię.

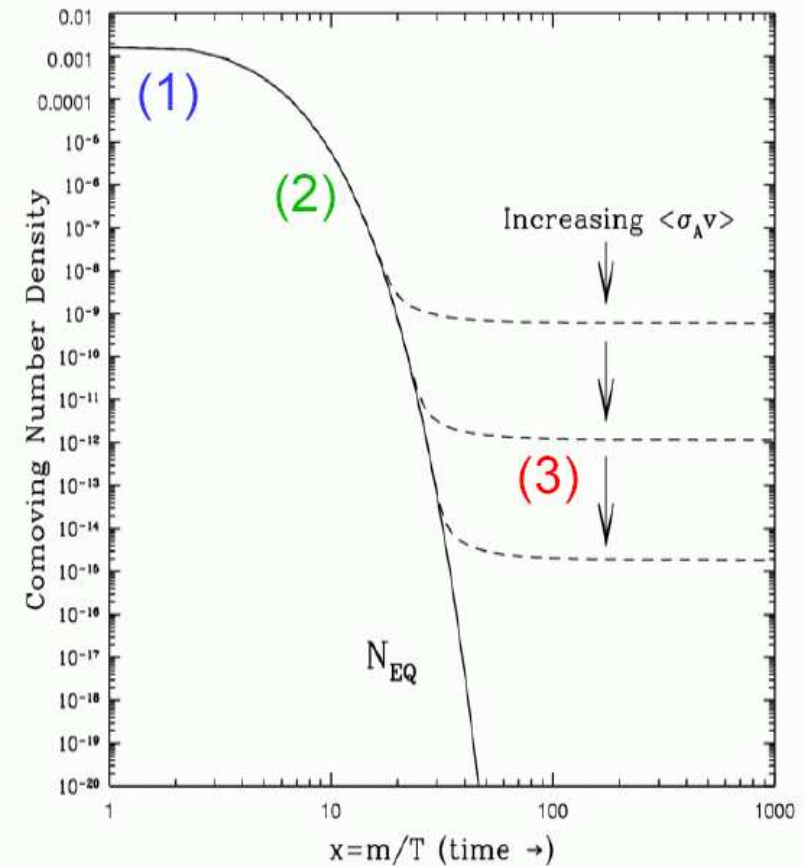
## WIMP - Weakly Interacting Massive Particle

(1) Zaraz po Wielkim Wybuchu ciężkie LSP jest w równowadze termodynamicznej z innymi cząstkami:



(2) Wszechświat się “oziębia” zaczyna przeważać anihilacja ich gęstość szybko maleje

(3) Jednocześnie Wszechświat się rozszerza. Gęstość LSP staje się na tyle mała, że anihilacja przestaje efektywnie zachodzić: “wymrożenie”



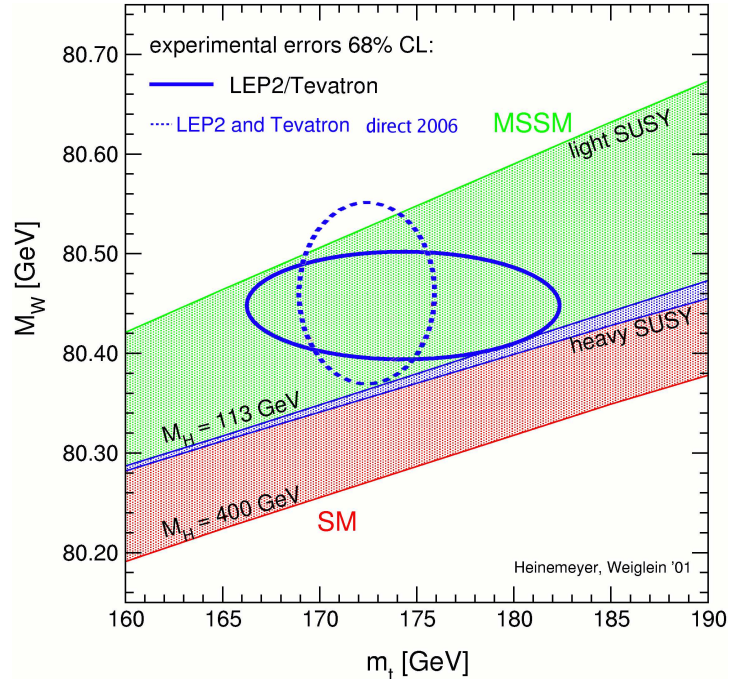
Obecna gęstość silnie zależy od przekroju czynnego na anihilację - parametrów modelu...

# Poszukiwanie SUSY

## Pierwsze ślady ?

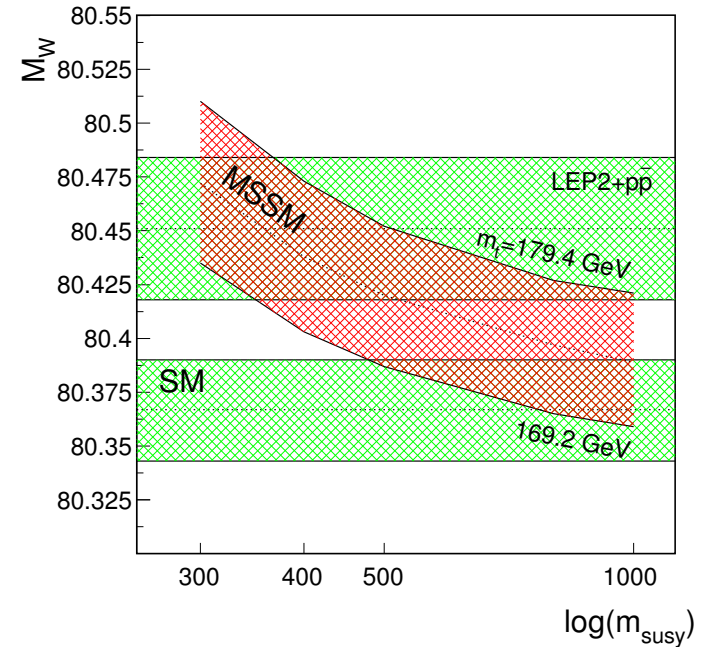
SUSY tłumaczy “rozbieżności” między pomiarami  $M_W$  i  $M_t$  a wynikami dopasowań SM:

Pomiar bezpośredni  $M_W$  i  $M_t$   
vs przewidywania SM i MSSM:



⇒ bardzo dobra zgodność...

Pomiar bezpośredni  $M_W$  (LEP2+ $p\bar{p}$ )  
vs przewidywania SM i MSSM:



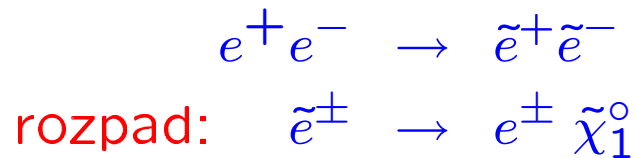
⇒ masy SUSY  $\sim 300 - 500$  GeV

Ostatnie wyniki bezpośrednich pomiarów: wyższa wartość  $M_t$  niższa wartość  $M_W$  ⇒ lepsza zgodność

# Poszukiwanie SUSY

## Sleptony

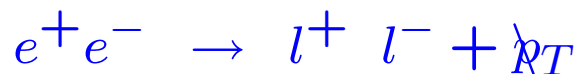
Mogłyby być produkowane w LEP:



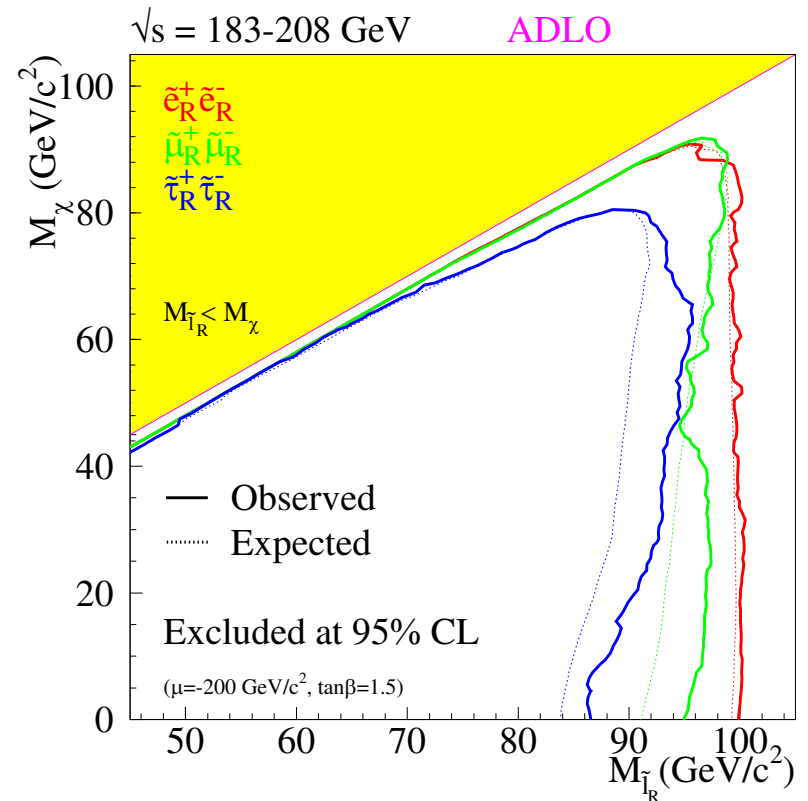
Gdzie neutralino  $\tilde{\chi}_1^0$  jest najbliższą cząstką supersymetryczną (LSP)

⇒ nie oddziałuje, nie podlega detekcji  
(ucieka jak neutrino)

Szukamy więc przypadków produkcji par leptonów z dużym brakującym pędem poprzecznym (unoszonym przez  $\tilde{\chi}_1^0$ ):



Nie obserwujemy takich przypadków:



⇒ wykluczamy istnienie  $\tilde{l}$   
o masach poniżej 85-100 GeV

# Poszukiwanie SUSY

## Stop

Odwrotnie niż w SM, stop powinien być najlżejszym skwarkiem

⇒ najłatwiejszy do wyprodukowania:

$$\text{LEP: } e^+e^- \rightarrow \tilde{t}\tilde{t}^*$$

$$\text{Tevatron: } p\bar{p} \rightarrow \tilde{t}\tilde{t}^* X$$

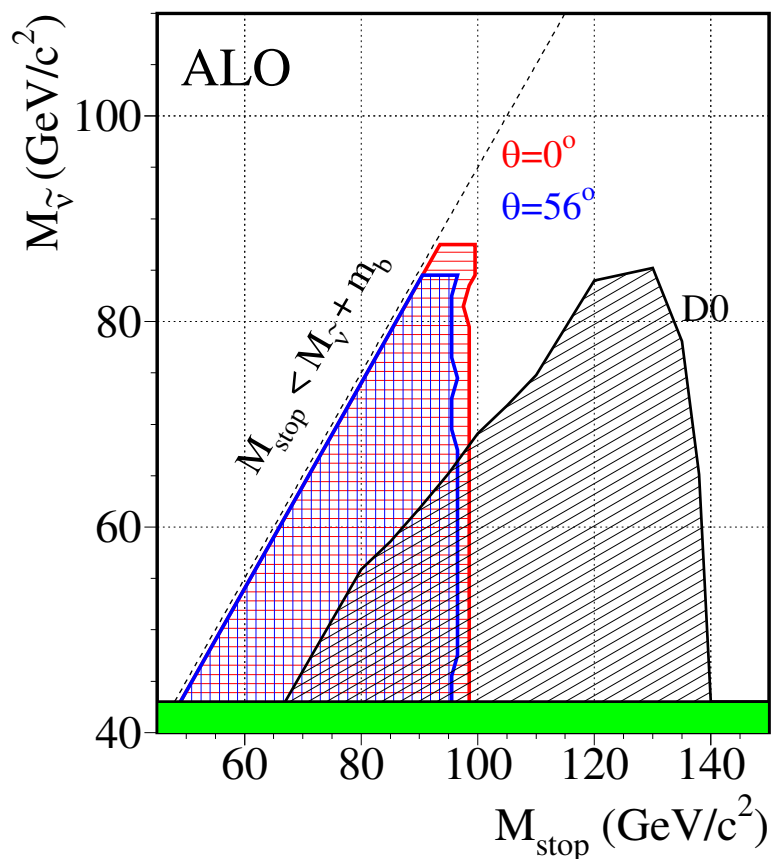
Jeśli  $\tilde{\nu}$  jest LSP to dominują rozpady:

$$\tilde{t} \rightarrow b l^+ \tilde{\nu}$$

$$\tilde{t}^* \rightarrow \bar{b} l^- \tilde{\nu}$$

⇒ 2 leptony + 2 jety +  $\cancel{RT}$

Porównanie wyników z LEP i Tevatronu:

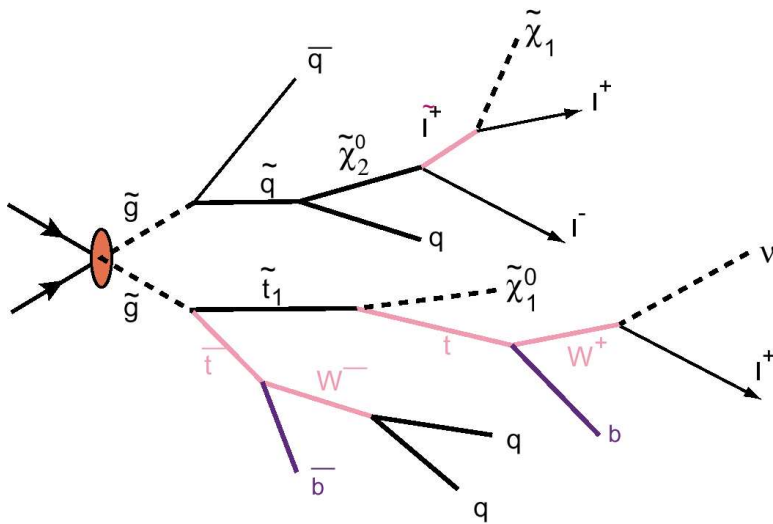


Dolne ograniczenie na masę  $\tilde{\nu}$ : z szerokości  $Z^0$  w LEP I

# Poszukiwanie SUSY

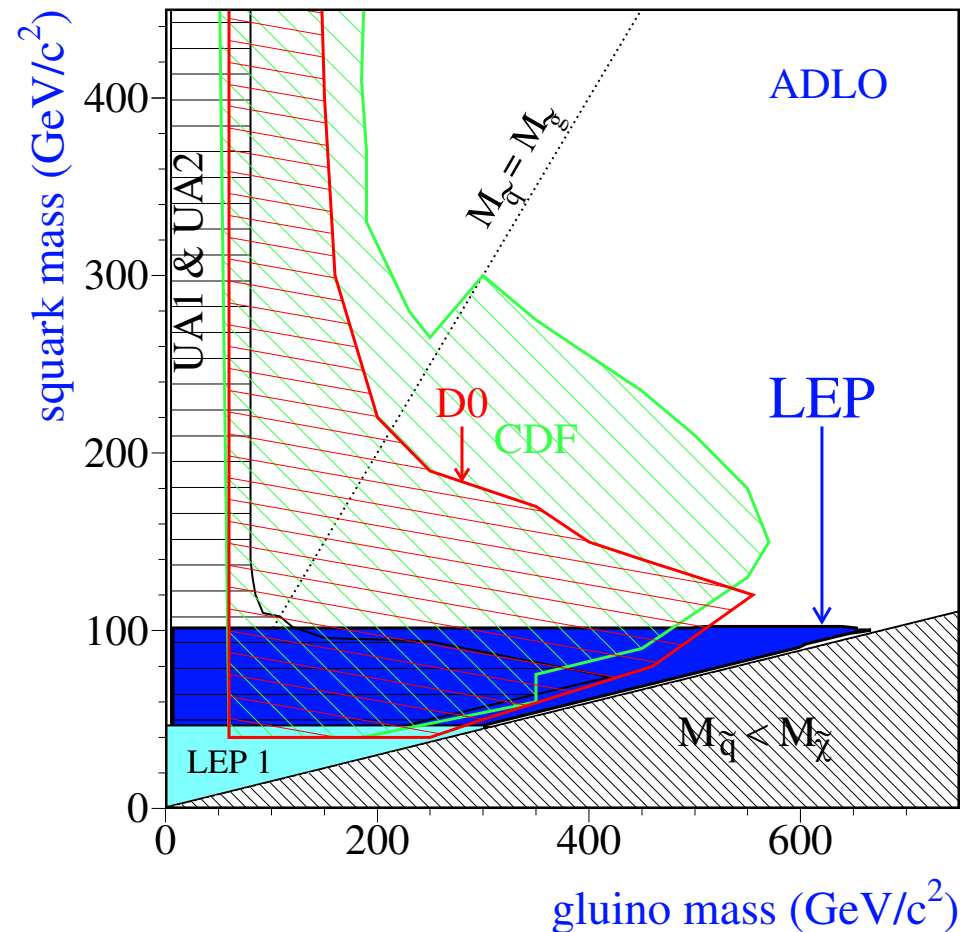
## Skwarki i gluina

Cząstki supersymetryczne nie muszą rozpadać się od razu na LSP. Możliwe są dużo bardziej skomplikowane rozpady “kaskadowe” (poprzez pośrednie stany supersymetryczne):



⇒ wiele jetów ( + leptony ) +  $\cancel{RT}$

Nie obserwujemy nadmiaru tego typu przypadków ⇒ limity:

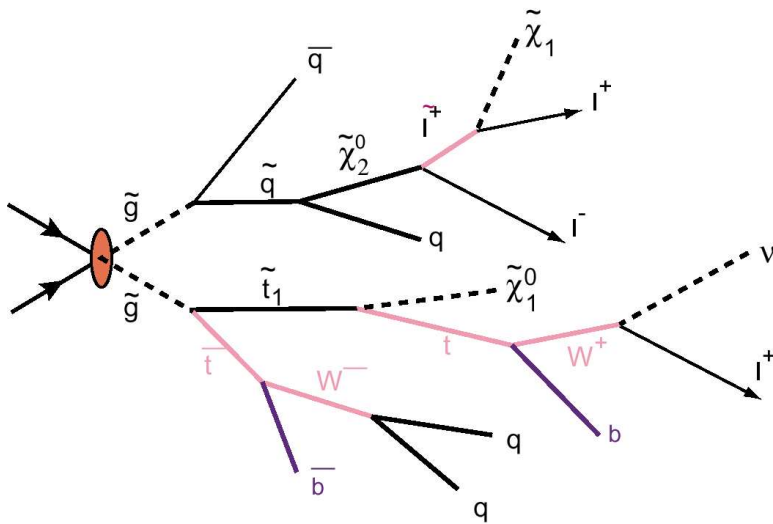




# Poszukiwanie SUSY

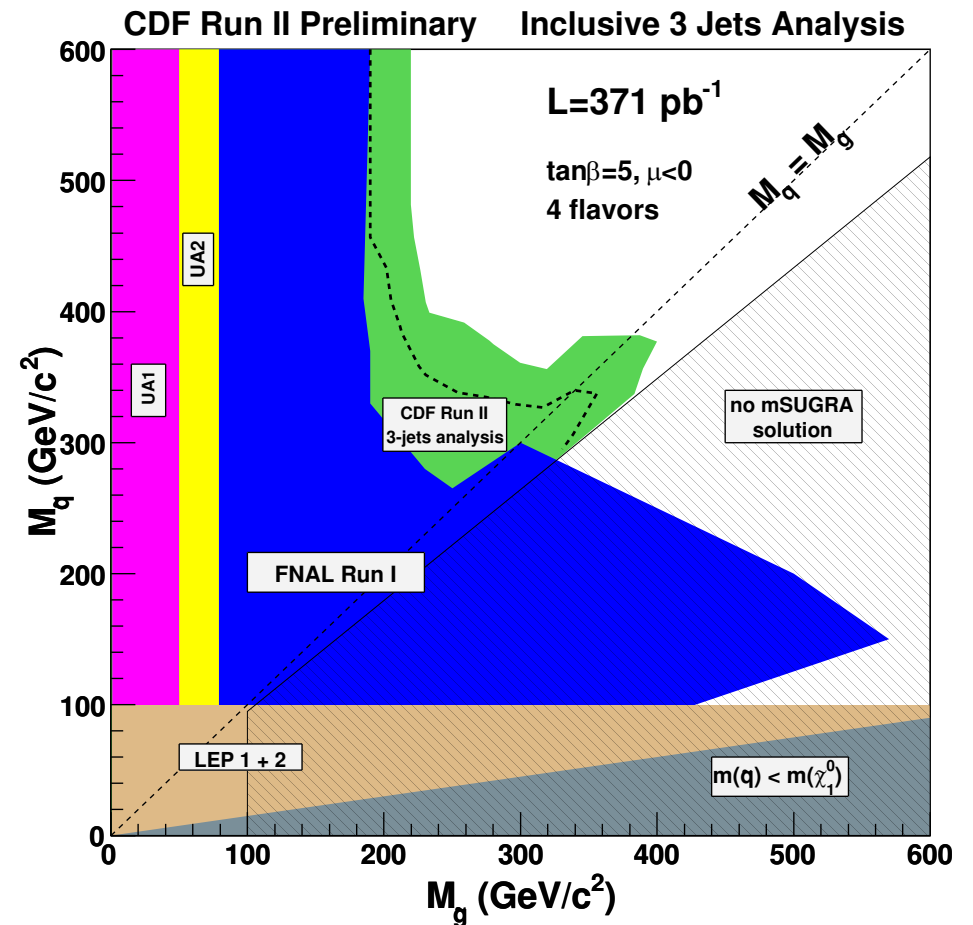
## Skwarki i gluina

Cząstki supersymetryczne nie muszą rozpadać się od razu na LSP. Możliwe są dużo bardziej skomplikowane rozpady “kaskadowe” (poprzez pośrednie stany supersymetryczne):



⇒ wiele jetów ( + leptony ) +  $\cancel{RT}$

Nie obserwujemy nadmiaru tego typu przypadków ⇒ nowe limity z Tevatronu:

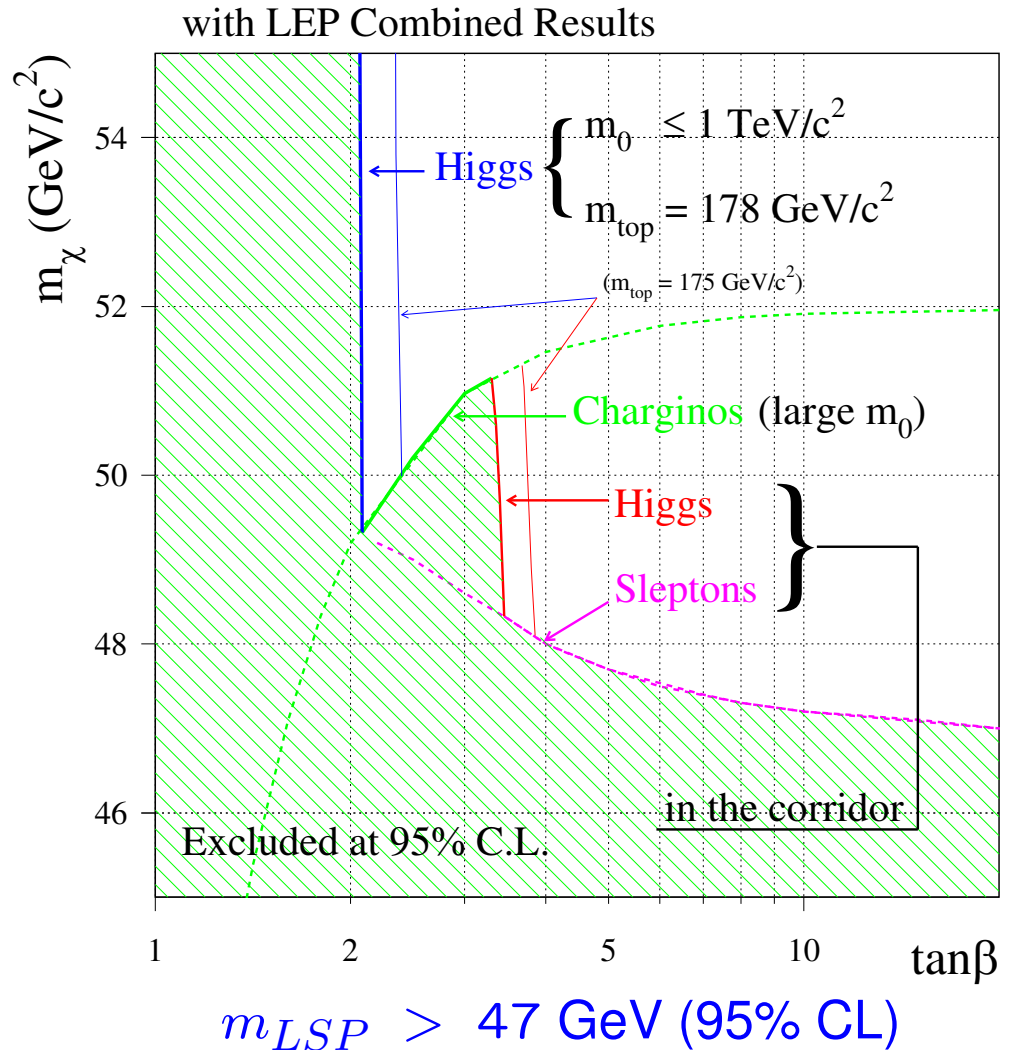


# Poszukiwanie SUSY

## LSP

Masa **LSP**, czyli **najlżejszej** cząstki supersymetrycznej (najczęściej przyjmujemy, że jest nią  $\tilde{\chi}_1^0$ ) decyduje o przebiegu **wszystkich** rozważanych procesów.

Przy dodatkowych założeniach (unifikacja mas sfermionów i gaugin przy skali GUT) można próbować wyznaczyć **ograniczenia** na masę  $\tilde{\chi}_1^0$  nie zależne od mas innych cząstek  $\Rightarrow$



# Poszukiwanie SUSY

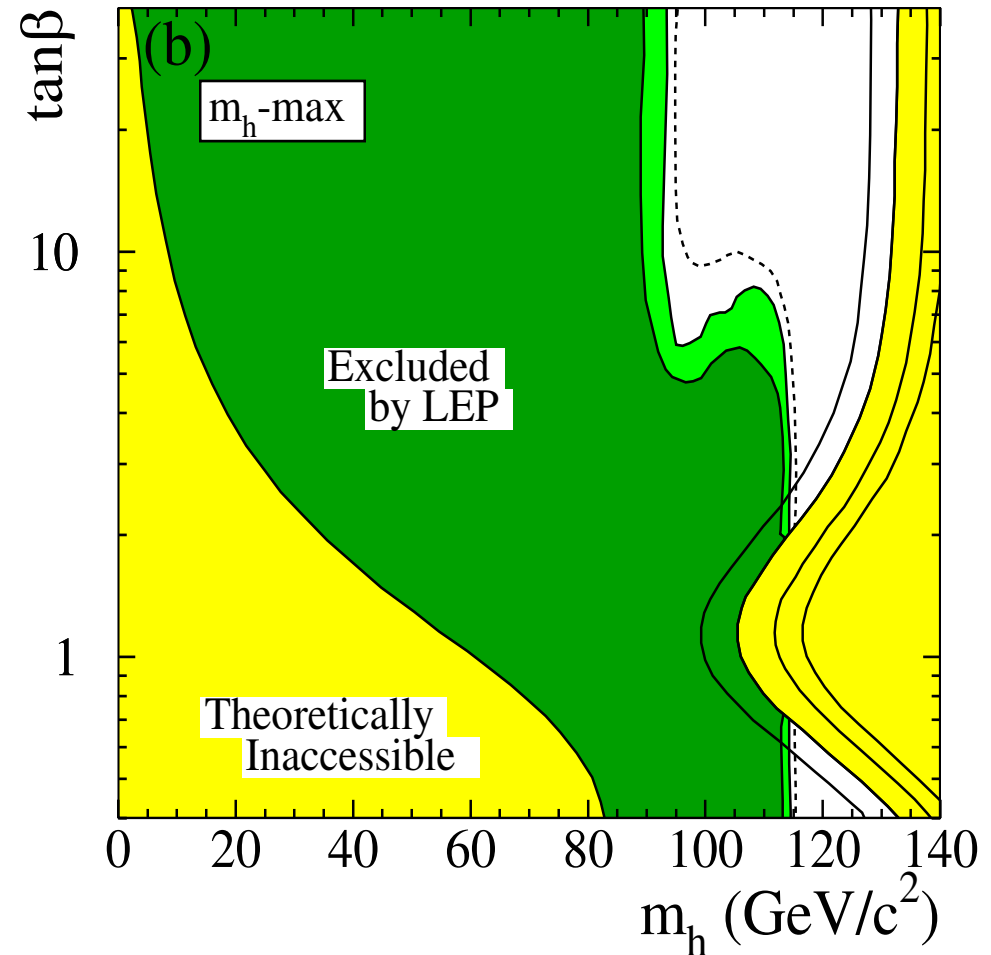
## Higgs

Ograniczenia na masę Higgsa uzyskane w ramach Modelu Standardowego można też “przetłumaczyć” na SUSY  $\Rightarrow$

“Korytarz”, w którym SUSY jest spójną teorią zaczyna się zamykać !...

Higgs musi mieć masę  $m_h \leq 135$  GeV

$\Rightarrow$  albo go znajdziemy,  
albo SUSY jest wykluczone ?!...



# Poszukiwanie SUSY

## Higgs

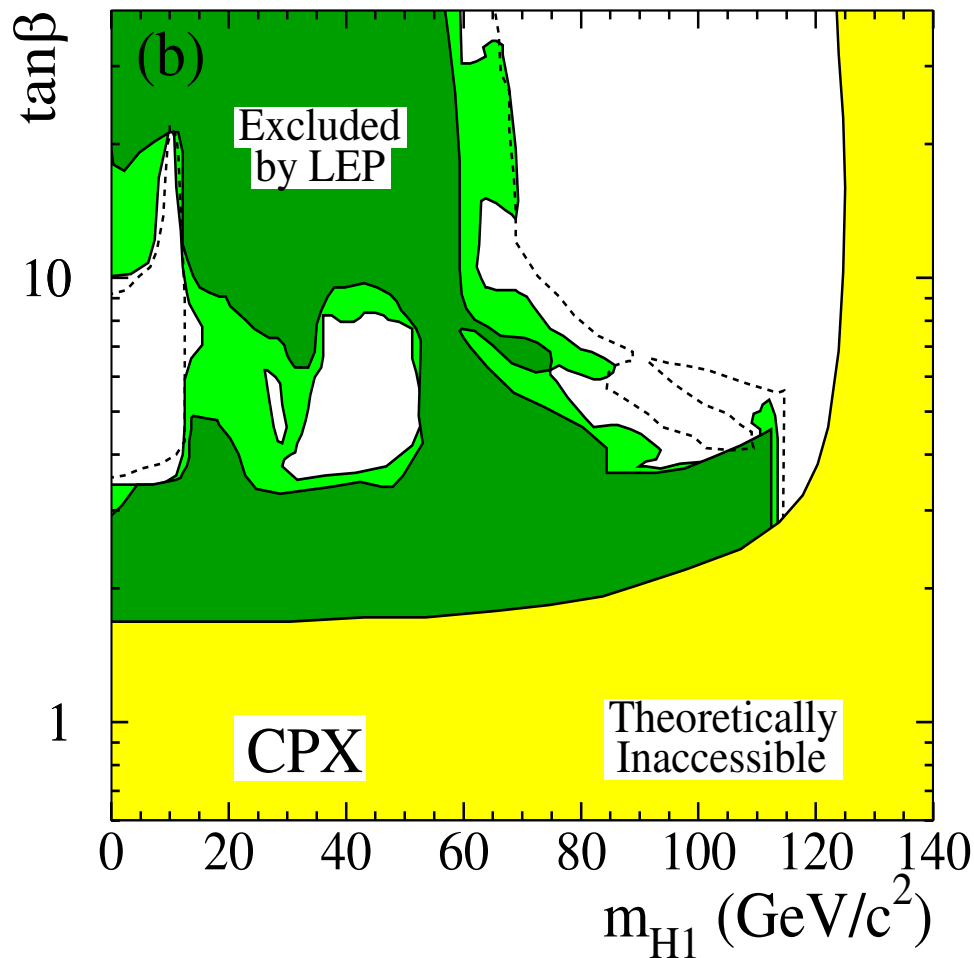
Ograniczenia na **masę Higgsa** uzyskane w ramach Modelu Standardowego można też “przetłumaczyć” na **SUSY**  $\Rightarrow$

“Korytarz”, w którym SUSY jest **spójną** teorią zaczyna się **zamykać** !...

**Higgs** musi mieć masę  $m_h \leq 135$  GeV

$\Rightarrow$  albo go znajdziemy,  
albo **SUSY** jest **wykluczone** ?!...

**Albo musimy rozszerzyć model** !...



Model z łamaniem CP w sektorze Higgsa

# Poszukiwania SUSY

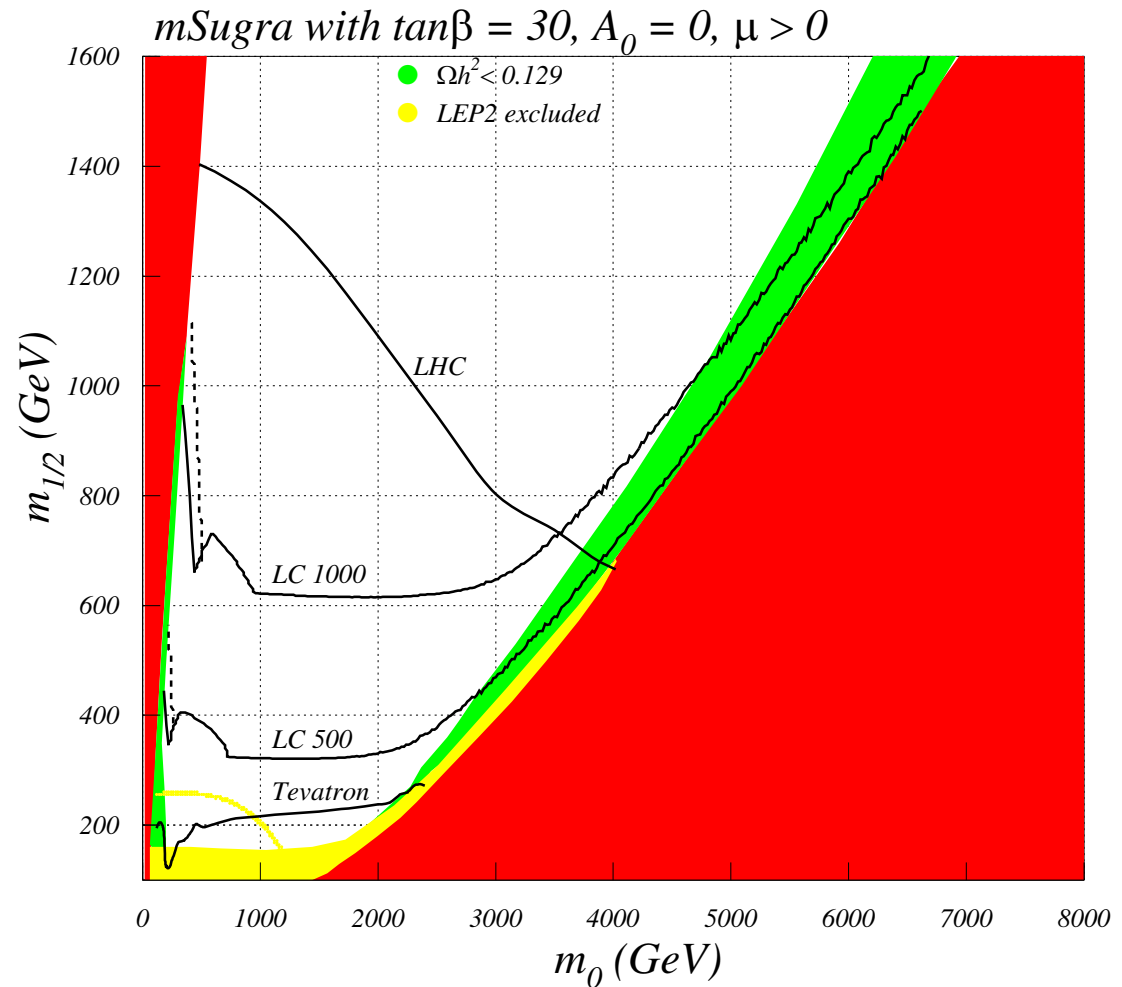
## Ciemna materia...

LSP wydaje się być najlepszym kandydatem na ciemną materię...

Okazuje się jednak, że wiele scenariuszy supersymetria przewiduje znacznie większą ilość ciemnej materii we Wszechświecie!

Pomiary astrofizyczne

⇒ bardzo istotne ograniczenia !



dozwolony tylko obszar zielony !

# Przyszłe eksperymenty

## LHC

“Fabryka” supersymetrii,  
w budowie.

Montaż jarzma magnesu  
detektora **CMS** ⇒

Uruchomienie: 2007 (?)





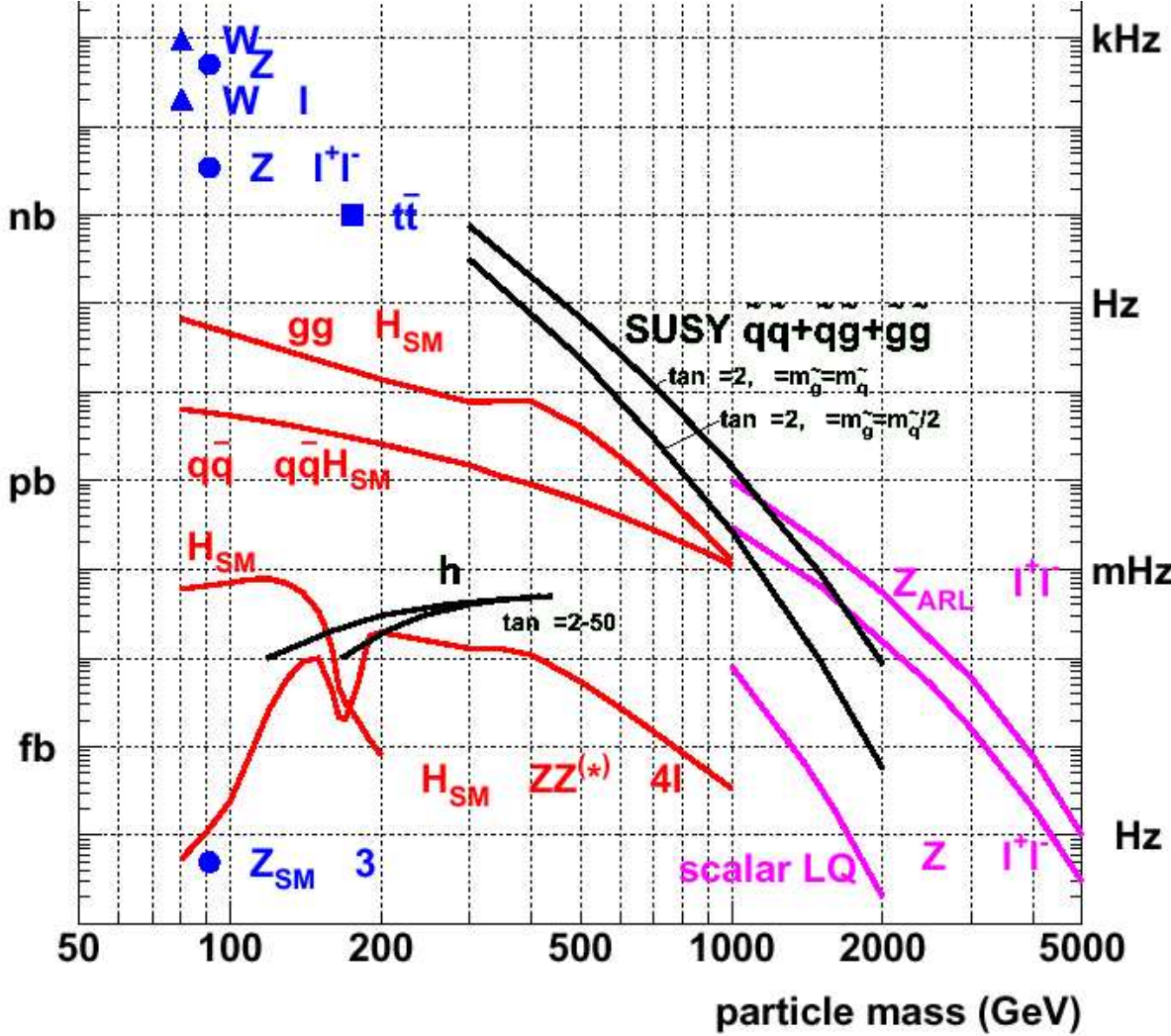
# Przyszłe eksperymenty

## LHC

Jeśli SUSY istnieje, LHC “musi” ją zobaczyć.

Częstość produkcji cząstek supersymetrycznych:

- od  $\sim 3$  Hz dla  $M = 300$  GeV  
 $\Rightarrow > 10^7$  przypadków na rok
- do  $\sim 0.0001$  Hz dla  $M = 2$  TeV  
 $\Rightarrow \sim 10^3$  przypadków na rok  
 wciąż wystarczające do odkrycia



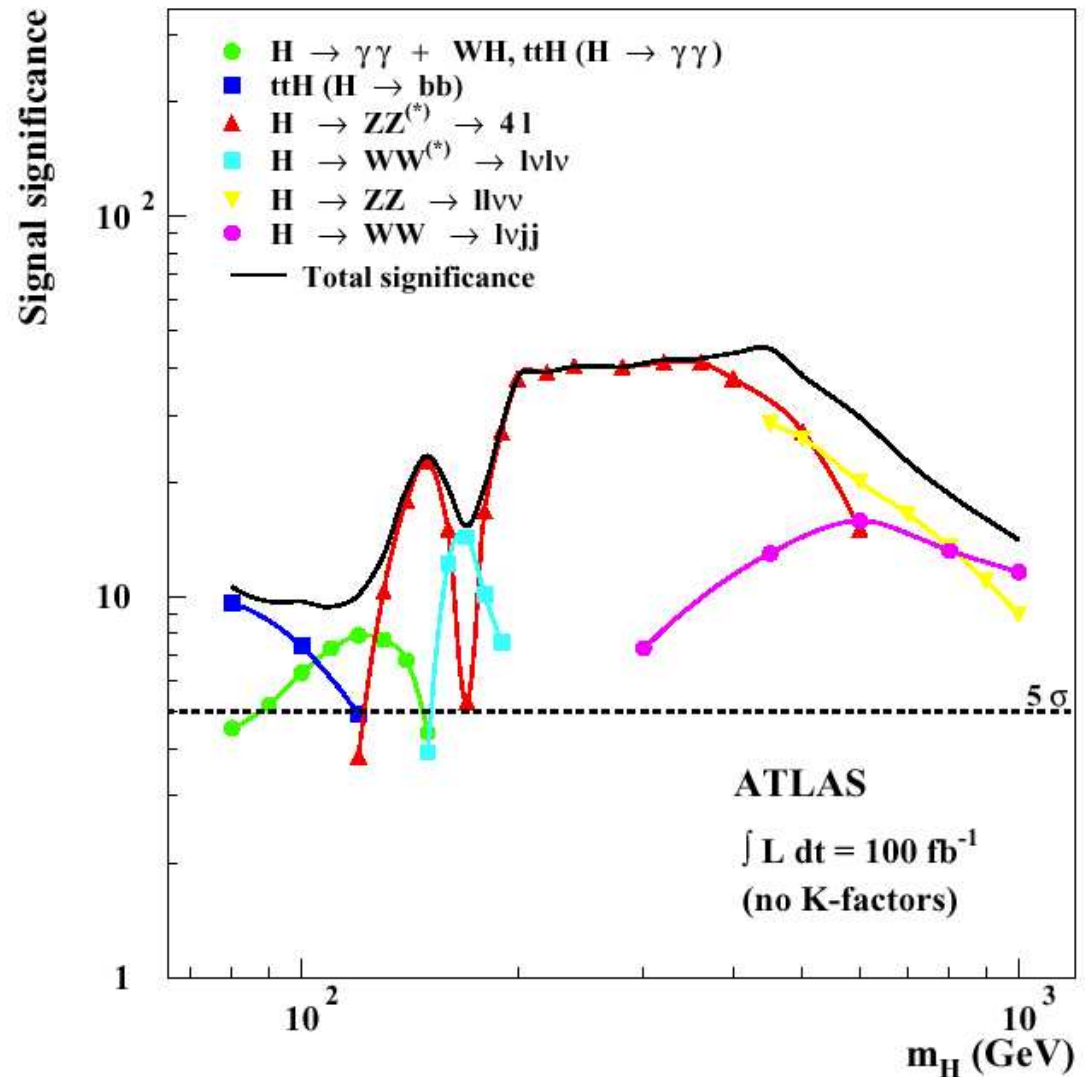
# Przyszłe eksperymenty

## LHC

Higgs może zostać odkryty ponad wszelką wątpliwość w **pełnym zakresie** masy  $\Rightarrow$

**Sprawdzenie** struktury sektora Higgsa (liczby cząstek i ich charakterystyk) będzie niezwykle ważnym **testem SUSY**.

Powinno pomóc w poznaniu **mechanizmu łamania SUSY**



Przy “niefortunnych” wartościach parametrów SUSY możliwe, że LHC zobaczy tylko (jednego) Higgsa...



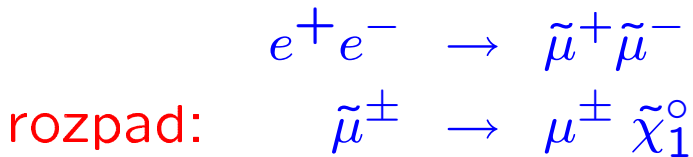
# Przyszłe eksperymenty

## ILC

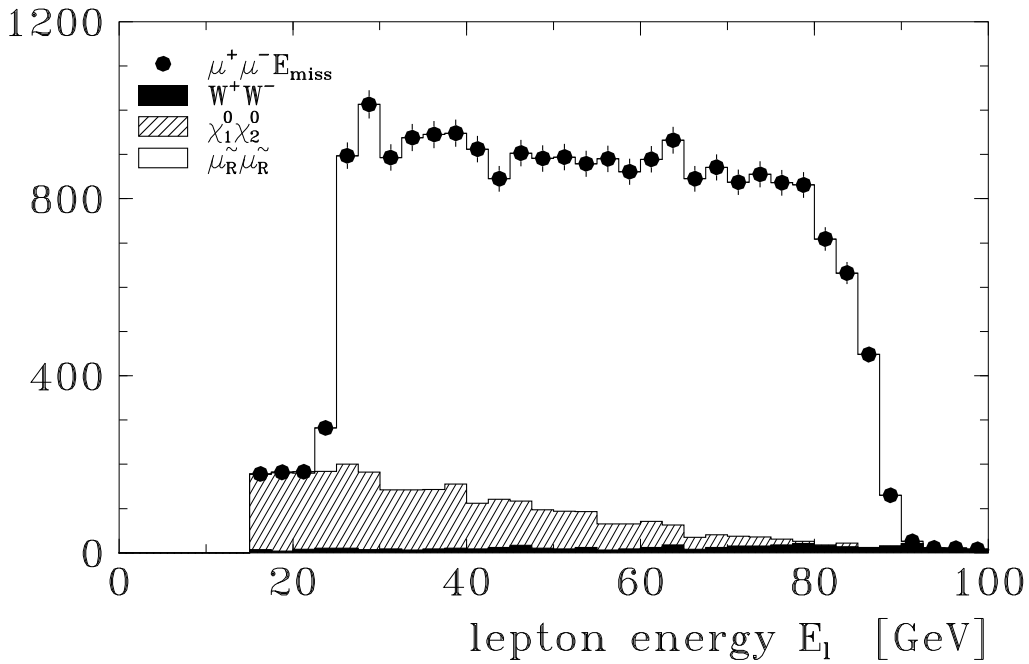
Własności Higgsa i innych cząstek supersymetrycznych odkrytych w LHC będą mogły być szczegółowo zbadane w przyszłym akceleratorze liniowym  $e^+e^-$  ILC.

Niektóre stany mogą zostać odkryte dopiero w ILC!

Przykład: produkcja smionów



Rozkład energii mionów z rozpadu smionów:



Kształt widma  $\iff$  spin (płaski  $\iff$  0)  
 granice widma  $\iff$   $m_{\tilde{\chi}}$  i  $m_{\tilde{\mu}}$

Czy  
odkryjemy  
SUSY ?!

“Supersymmetry...  
has generated so many thousands of papers it must be correct”  
Shelly Glashow



## Mały Higgs

Aby rozwiązać problem hierarchii musimy wprowadzić “nową fizykę” przy skalach  $\sim 1$  TeV.

To jednak nie musi być supersymetria.

W ostatnich latach pokazano, że kasowanie rozbieżnych poprawek do masy bozonu Higgsa można także uzyskać dodając nowe cząstki tego samego rodzaju:

- nowy ciężki fermion  $T \Rightarrow$  kasowanie poprawek od  $t$
- nowe ciężkie bozony  $W_H$  i  $Z_H \Rightarrow$  kasowanie poprawek od  $W^\pm$  i  $Z^0$
- nowe skalary  $\Rightarrow$  kasowanie (samo)poprawek Higgsa

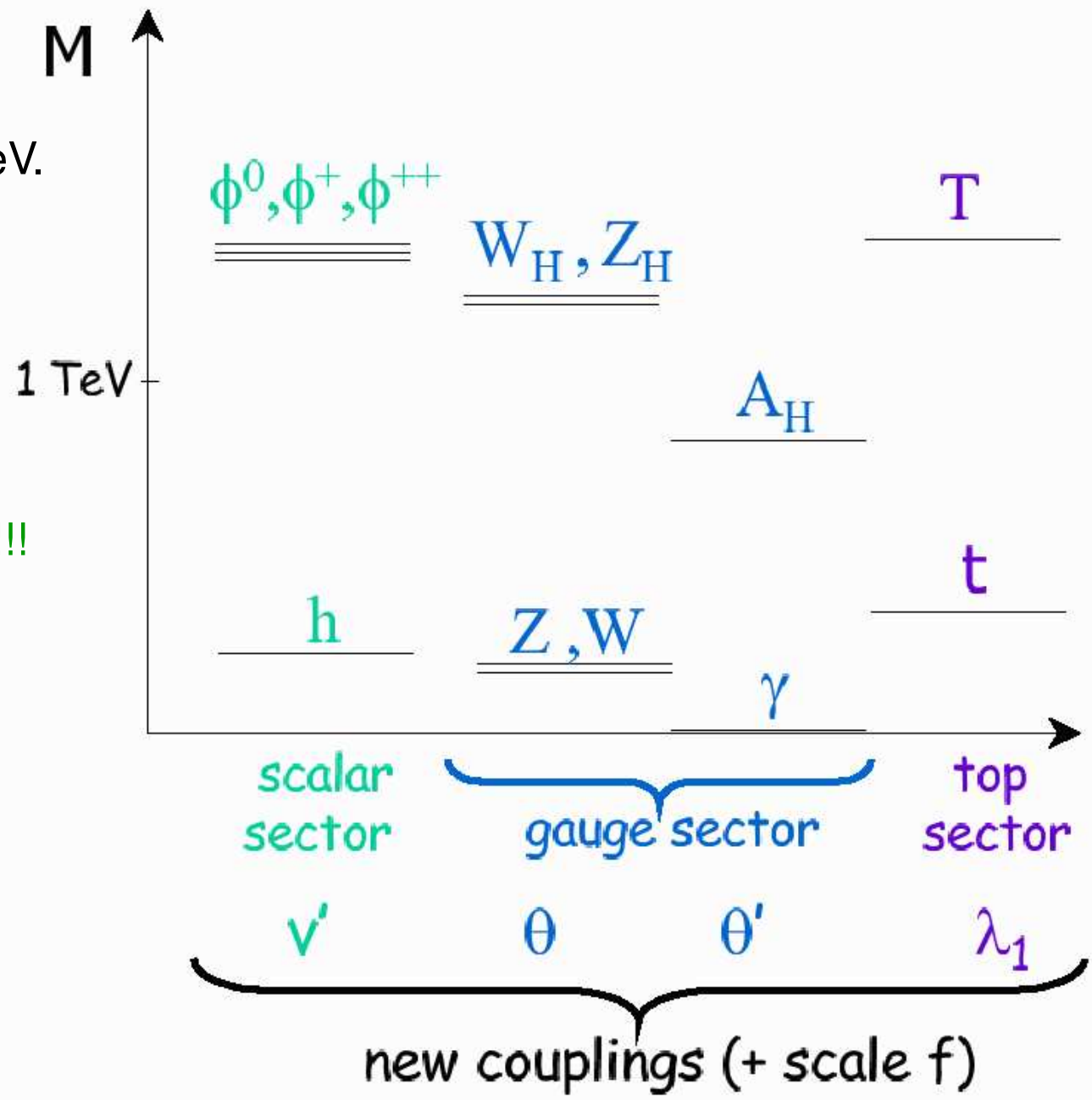
Kasowanie uzyskujemy poprzez odpowiedni wybór sprzężeń nowych cząstek.

Nie rozwiązujemy problemu hierarchii do skali GUT, ale odsuwamy go do skali  $\sim 10$  TeV...

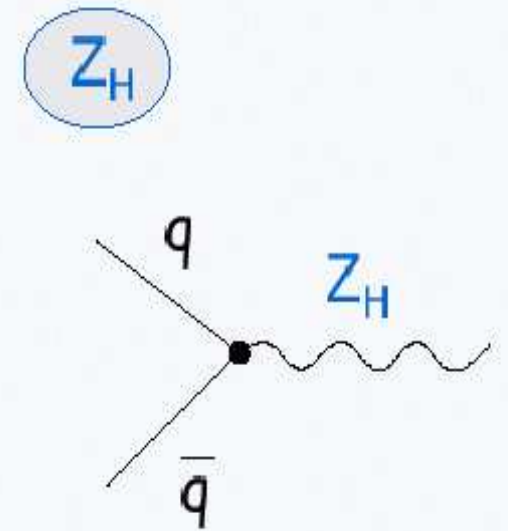
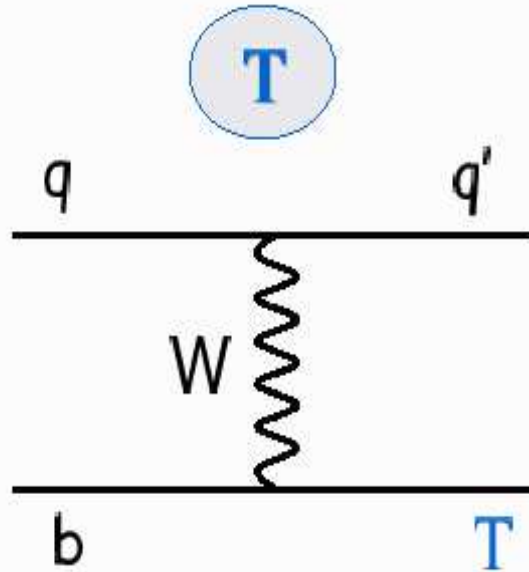
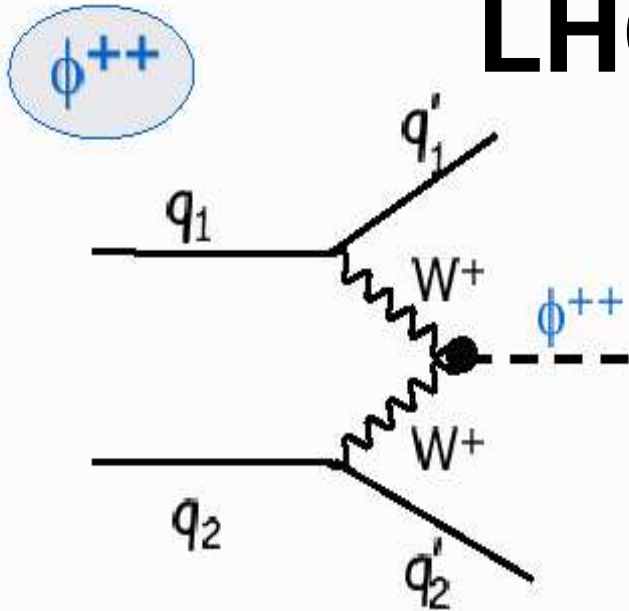
Wszystkie nowe cząstki  
powinny mieć masy rzędu 1 TeV.

⇒ łatwe do znalezienia w  
przyszłych eksperymentach

Podwójnie naładowany Higgs !!!



# LHC



## VBF mechanism

$$\sigma \sim (v')^2$$

$v'$  should be small

$$\phi^{++} \rightarrow W^+W^+$$

large SM bkg

## Wb fusion

$$\sigma \sim (\lambda_1)^2$$

$\lambda_1 \sim 1$  but suppressed by  $b$ -quark PDF.

$$T \rightarrow \underbrace{bW, tZ}_{\text{clear signal}}$$

## $q\bar{q}$ annihilation

$$\sigma \sim (\cot\theta)^2$$

Wide range in  $\cot\theta$  possible.

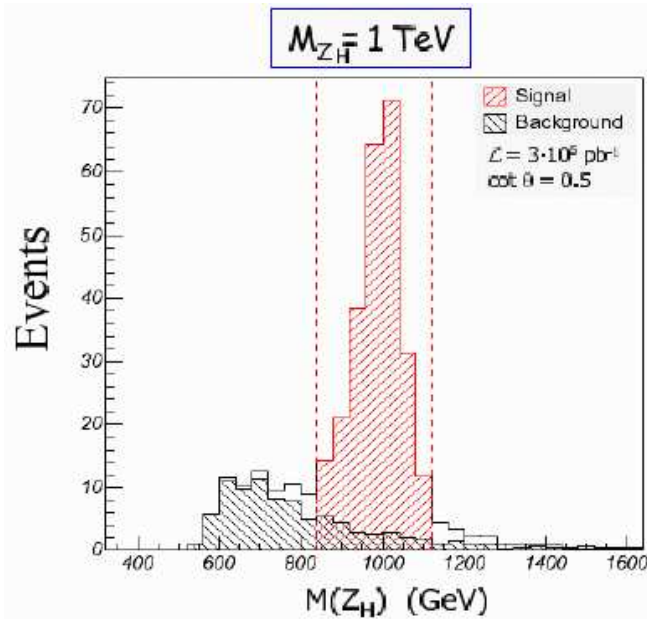
$$Z_H \rightarrow \underbrace{e^+e^-}_{\text{clear signal}}$$



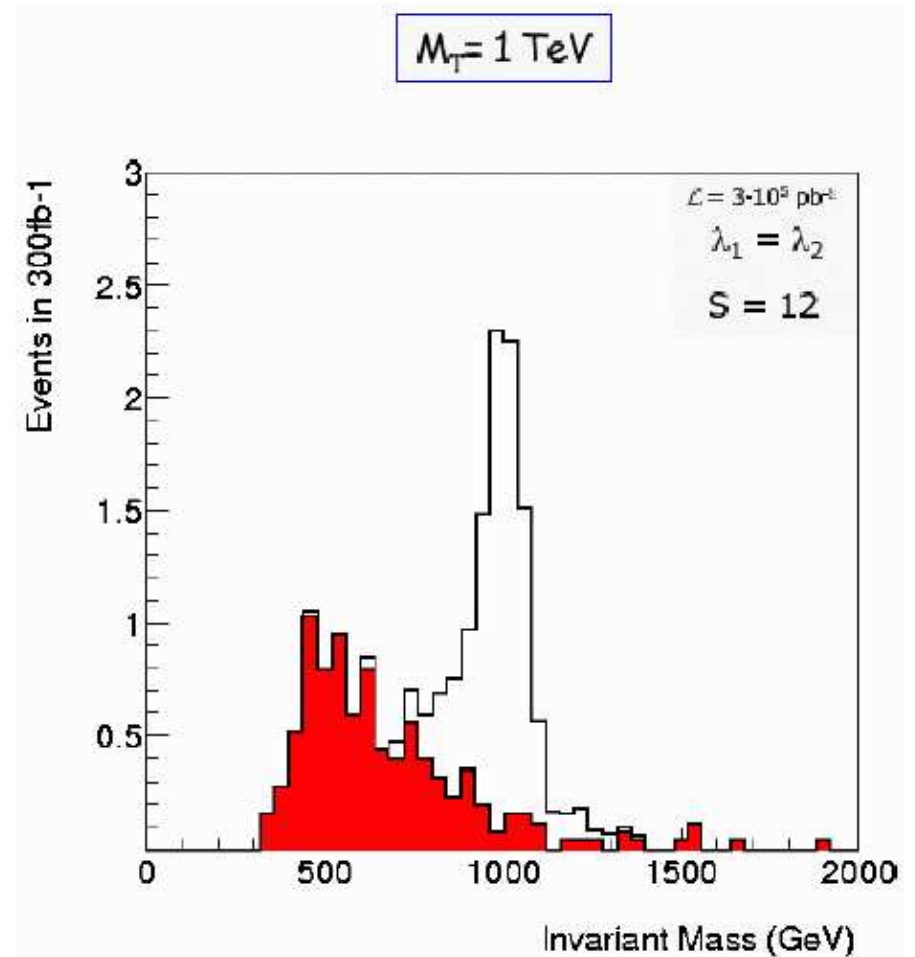
# Mały Higgs

## Little Higgs Searches with ATLAS

E.Ros, EPS'2003



b-tag:  $\varepsilon_b = 50\%$ ,  $R_u = 100$   
 Inside mass window:  
 $S = 195$   
 $B = 16$  }  $\frac{S}{\sqrt{B}} = 50$



# Mały Higgs

## Podsumowanie

Model “małego Higgsa” (Little Higgs) wywołał duże zainteresowanie.

Przewiduje wiele nowych, ciekawych reakcji (innych niż w SUSY)

⇒ należy ich poszukiwać nawet jeśli nie jesteśmy przekonani co do słuszności modelu

Nawet jeśli nie wydaje się tak “naturalny” i “elegancki” to przełamał “monopol” SUSY na rozwiązanie problemu hierarchii...

W następnych latach mogą pojawić się kolejne modele...

**Ale przede wszystkim czekamy na dane z LHC !**