

# Supersymetria

## Elementy fizyki cząstek elementarnych

### Wykład XII

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

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

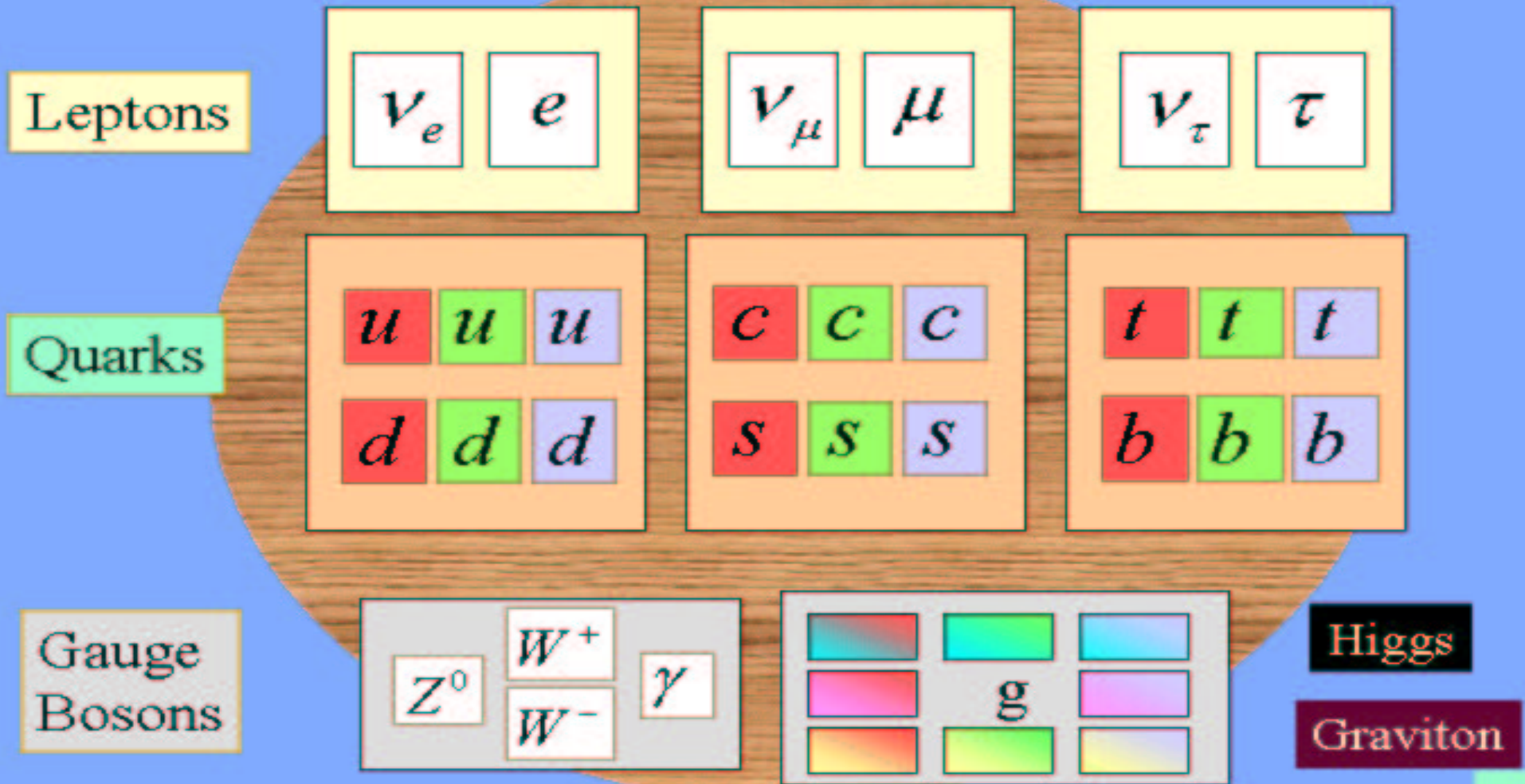
<i>oddziaływanie</i>	<i>symetria</i>	<i>nośniki</i>
elektro –	U(1)	$\gamma$
– słabe	SU(2)	$W^+, W^-, Z^0$
silne	SU(3)	8 gluonów

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

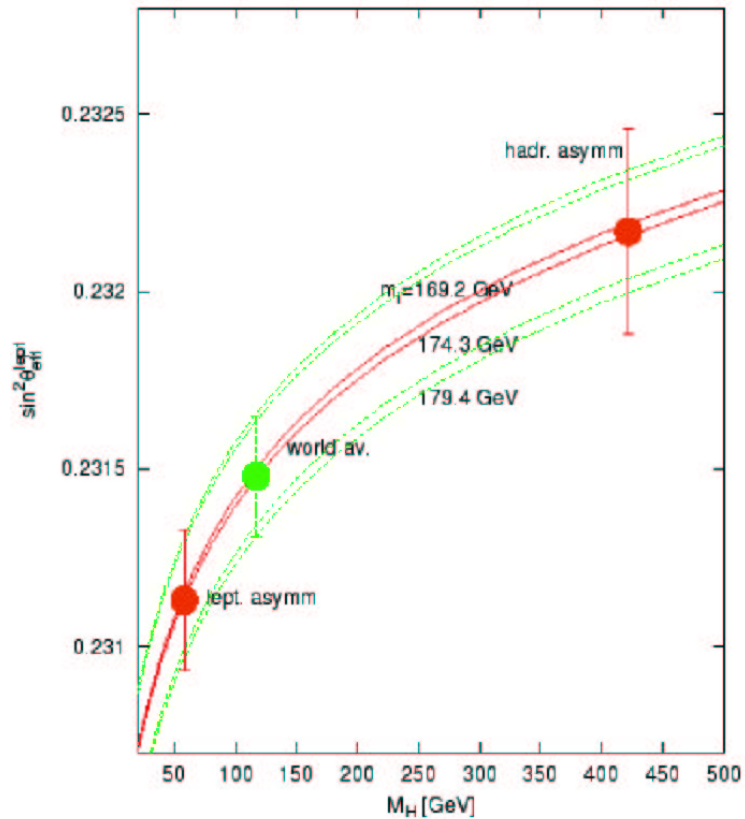
Wszystkie obecnie  
dostępne dane  
zgodne są z  
**Modelem  
Standardowym**

ale...

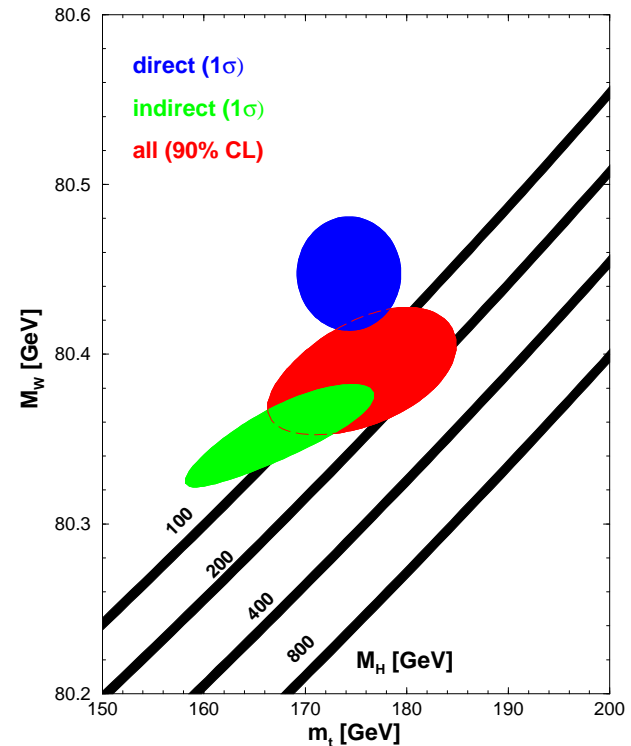
- Dlaczego **materia**  $\equiv$  **fermiony**, a **oddziaływania**  $\equiv$  **bozony** ?
- Dlaczego **3 pokolenia** kwarków i leptonów ?
- Dlaczego zachowane są **liczby leptonowe** i **barionowa**?
- Jaki jest powód **spontanicznego łamania symetrii** ?
- Gdzie jest **cząstka Higgsa** ?
- brak spójnego opisu **grawitacji**
- **dużo** wolnych **parametrów**, “ręcznie” dopasowywanych...
- ogromne różnice mas  $\Rightarrow$  “**problem hierarchii**”
  
- wyniki pomiaru  $g_\mu - 2$  ( $\sim 3\sigma$ )
- wyniki pomiaru  $\sin^2 \theta_W$  (NuTeV)
- wyniki pomiaru  $m_W$

# Model Standardowy

## Pomiary $\sin^2 \theta_W$



## Pomiar $m_W$



Sprzeczne wyniki różnych pomiarów...

Asymetrie leptonowe  $\Rightarrow m_h < 100$  GeV ?

Pomiar **bezpośredni**  $\Rightarrow$  niska masa Higgosa

Kiepska zgodność z pom. "pośrednim"

(dopasowaniem do wszystkich danych)

# 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

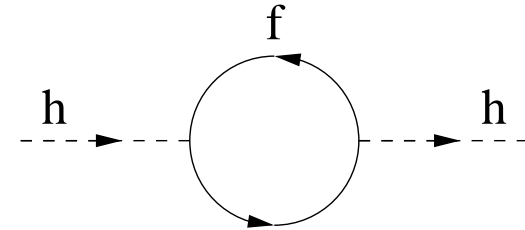
Masa Planka ( $M_{Pl}$ ):

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 z masą Higgsa:



Poprawki związane z pętlami fermionowymi rosną jak  $\Lambda^2$ ...

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

$\Rightarrow$  “problem hierarchii”

# Supersymetria

## Problem hierarchii

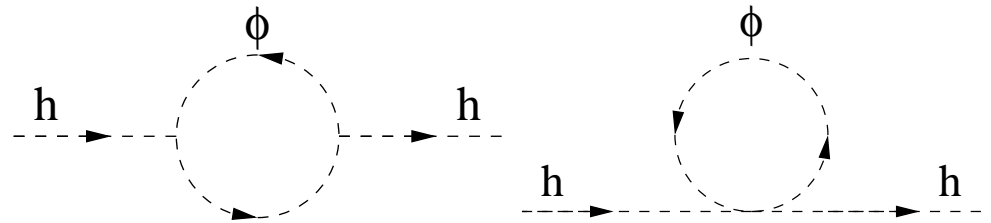
Jak “ustabilizować” masę Higgsa (duże poprawki  $\sim \Lambda^2$ ) ?

- ⇒ dodać nowe oddziaływania/cząstki przy skali  $\Lambda' \ll \Lambda$ 
  - ⇒ czekamy na pomiary...
- ⇒ obniżyć skalę  $\Lambda$  do  $\sim 1$  TeV
  - ⇒ dodatkowe wymiary (za tydzień)
- ⇒ doprowadzić do “automatycznego” kasowania się poprawek

⇒ SUPERSYMETRIA

Problem rozbieżnych poprawek do masy Higgsa nie pojawia się jeśli w teorii jest tyle samo bozonów i fermionów.

Poprawki od pętli bozonowych:



mają przeciwny znak i kasują rozbieżności.

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

⇒ aby “uratować”  $m_h$  potrzebujemy nowych cząstek (bozonów) przy skalach  $\sim 1$  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 ( $s=0$ )

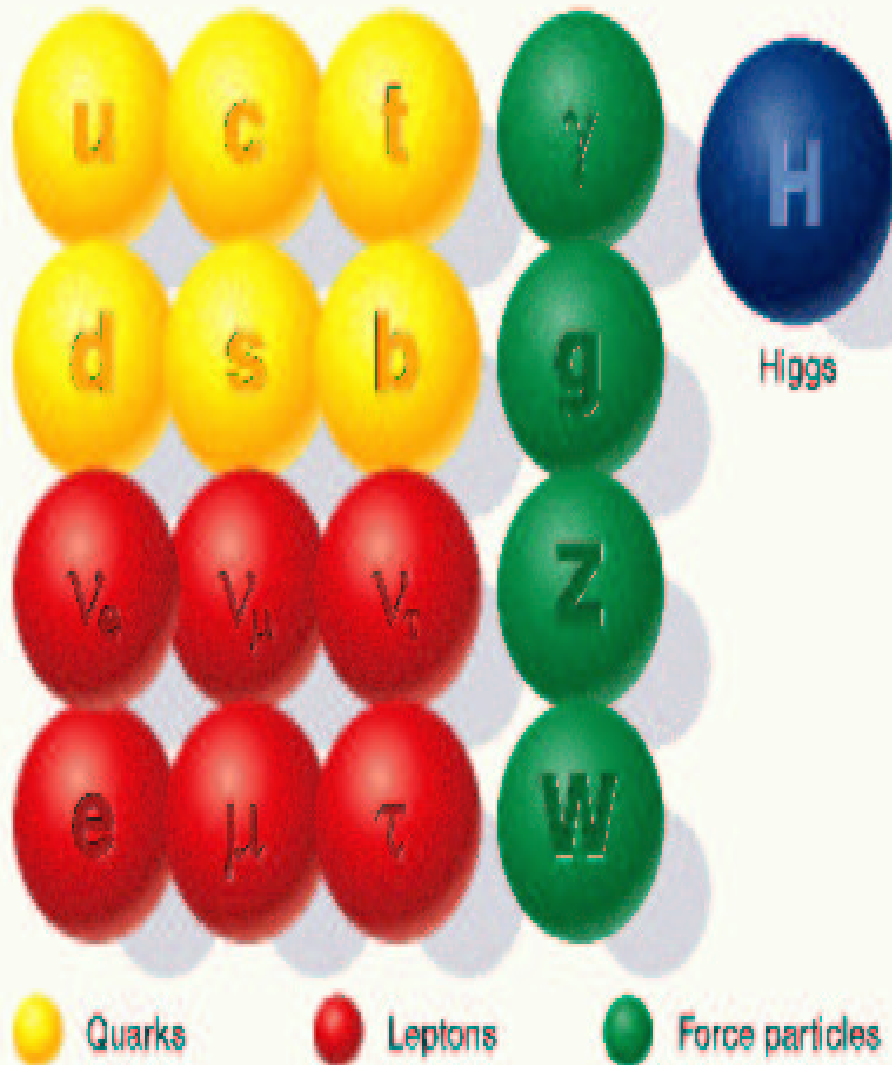
bozon

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

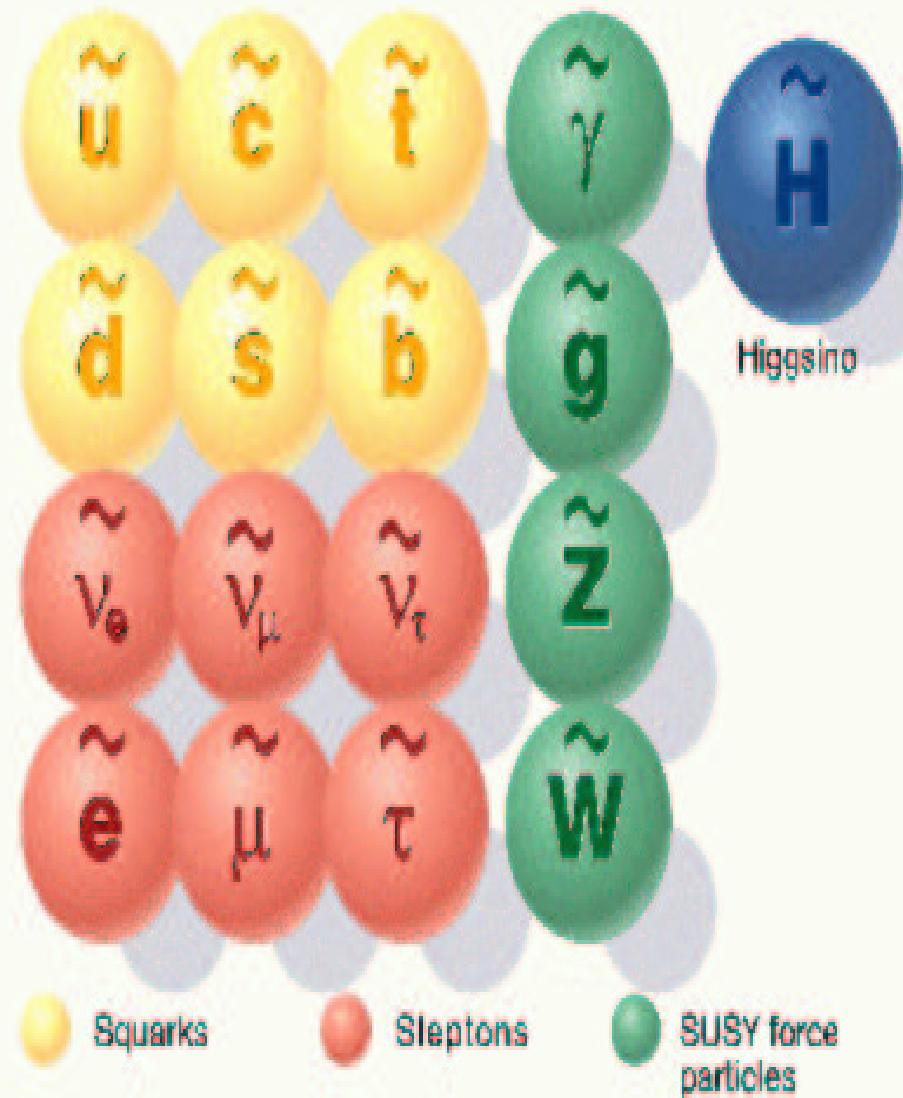
Higgs ( $s=0$ )  $\rightarrow$  higgsina ( $s=\frac{1}{2}$ )



## 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 higgosina 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:

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

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:

ogólny 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**...

**MSSM** - Minimal Supersymmetric Standard Model

Supersymetria: **“Puszka Pandory”**

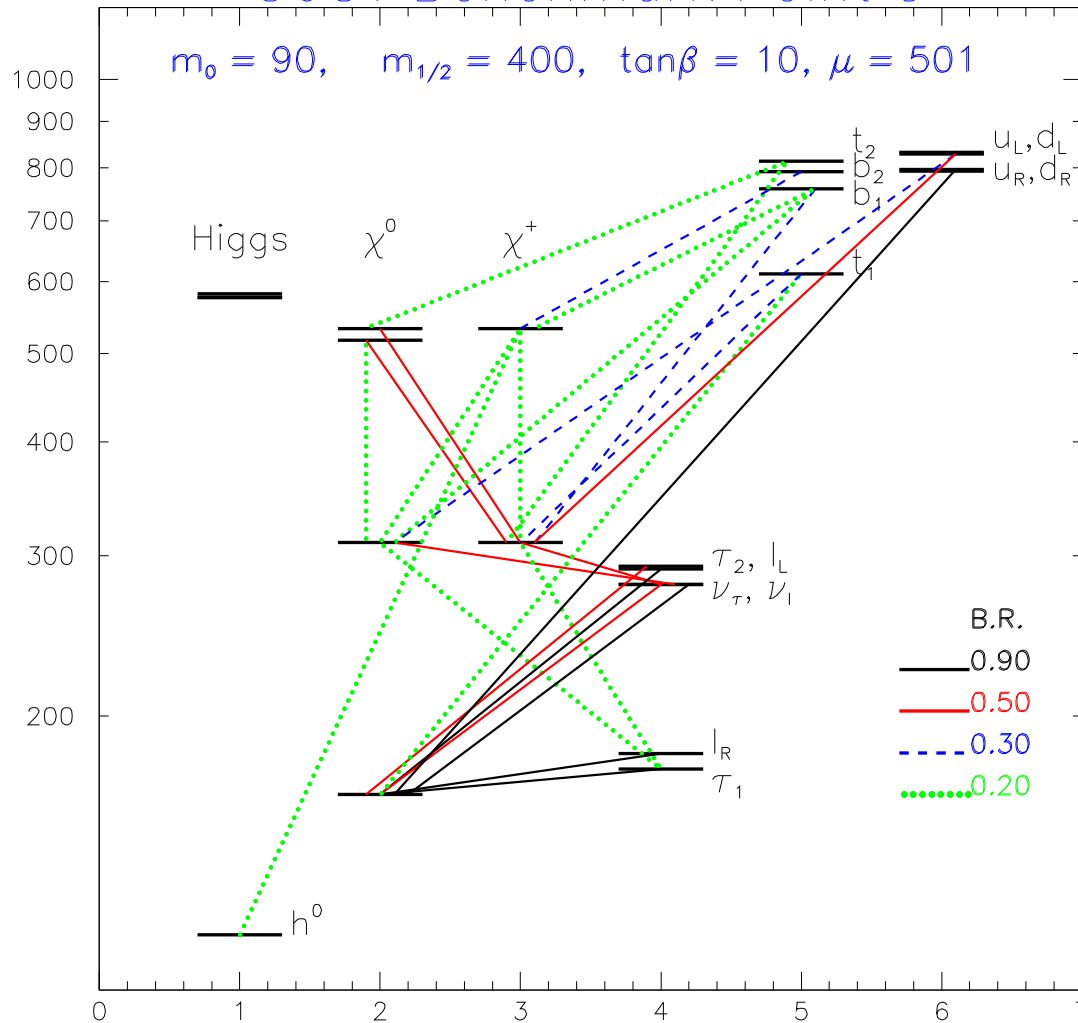
Sami nie wiemy co nas czeka...



# 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

# Supersymetria

## Przewidywania

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

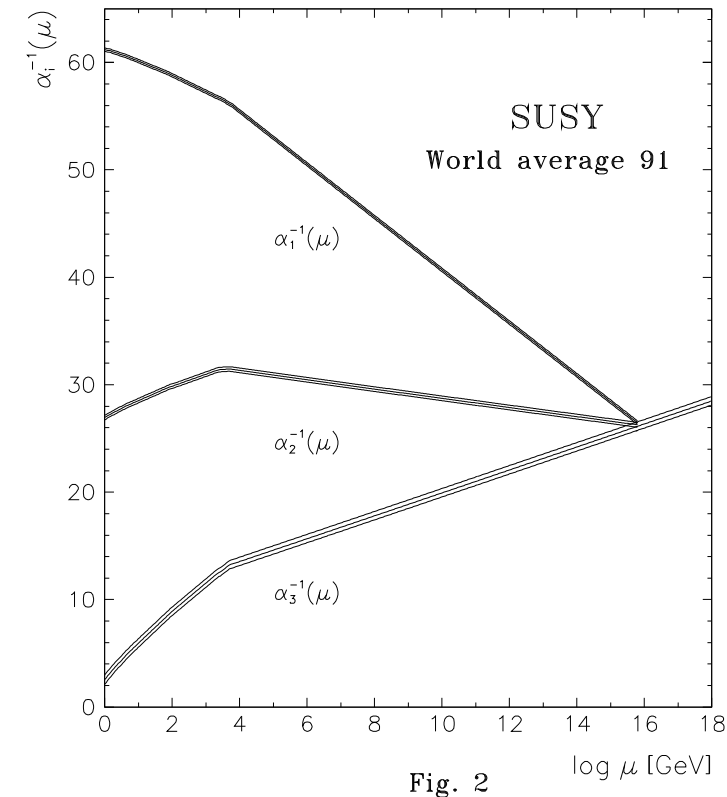
$$m_t \sim 175 \text{ GeV}$$

$\Rightarrow$  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





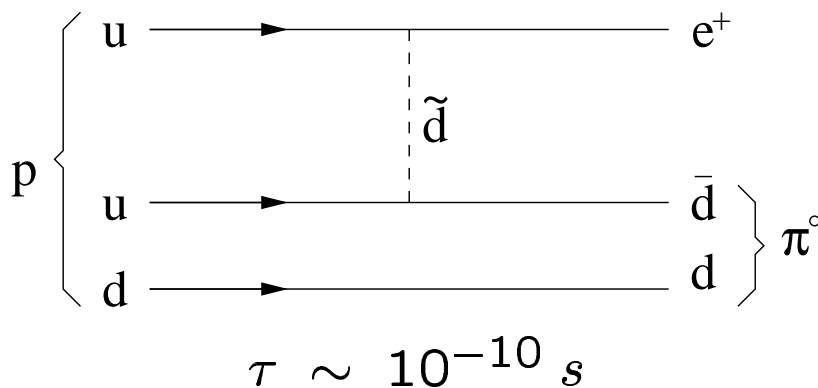
# Supersymetria

## Parzystość R

W ogólnym przypadku supersymetria dopuszcza

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

W szczególności możliwy jest **rozpad protonu**:



Naogół 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:

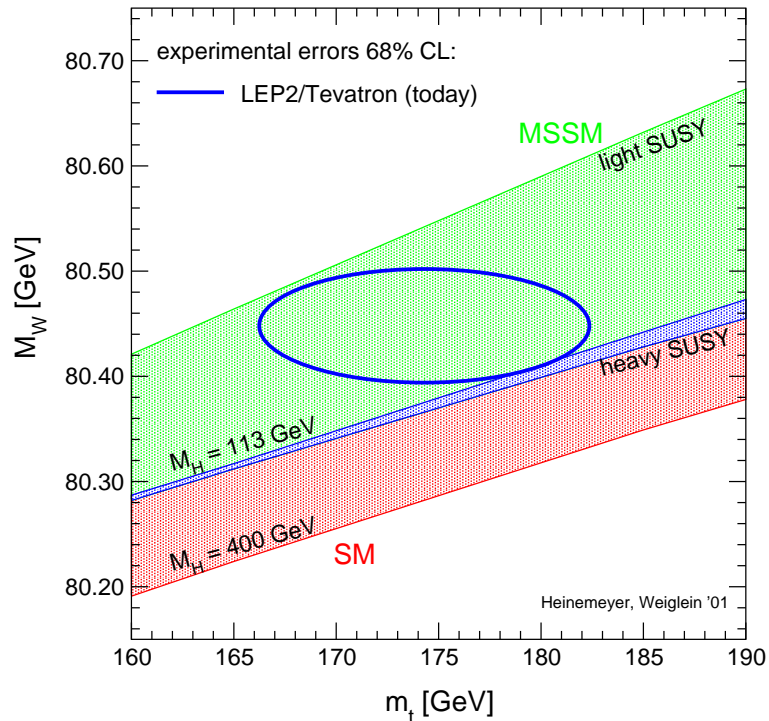
- proton **stabilny**
- cząstki SUSY zawsze **produkowane w parach**
- rozpadają się na nieparzystą liczbę cząstek SUSY
- **najżejsza** cząstka supersymetryczna (LSP) **stabilna**  
 $\Rightarrow$  zachowuje się jak ciężkie neutrino (nie oddziałuje)

# Poszukiwanie SUSY

## Pierwsze ślady ?

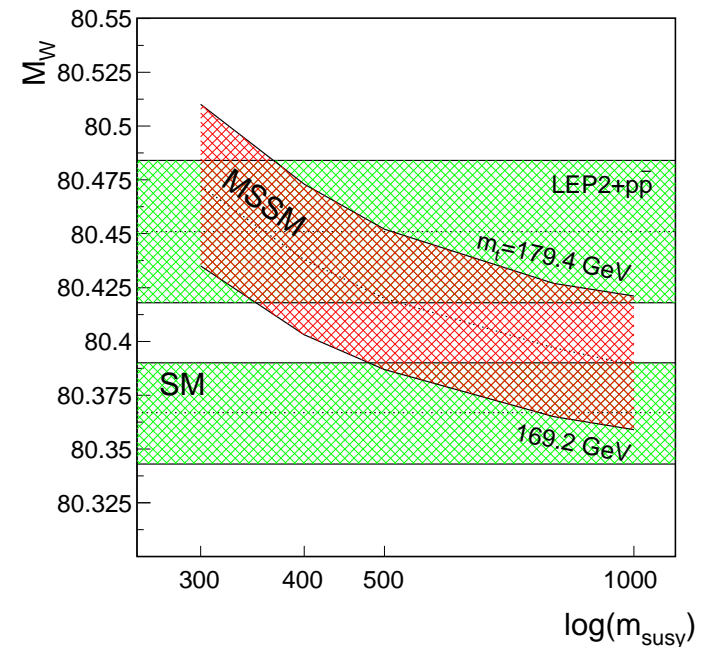
SUSY tłumaczy rozbieżności między pomiarami masy  $W^\pm$  a wynikami dopasowań SM:

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

# Poszukiwanie SUSY

## Sleptony

Mogłyby być produkowane w LEP:

$$e^+e^- \rightarrow \tilde{e}^+\tilde{e}^-$$

rozpad:  $\tilde{e}^\pm \rightarrow e^\pm \tilde{\chi}_1^0$

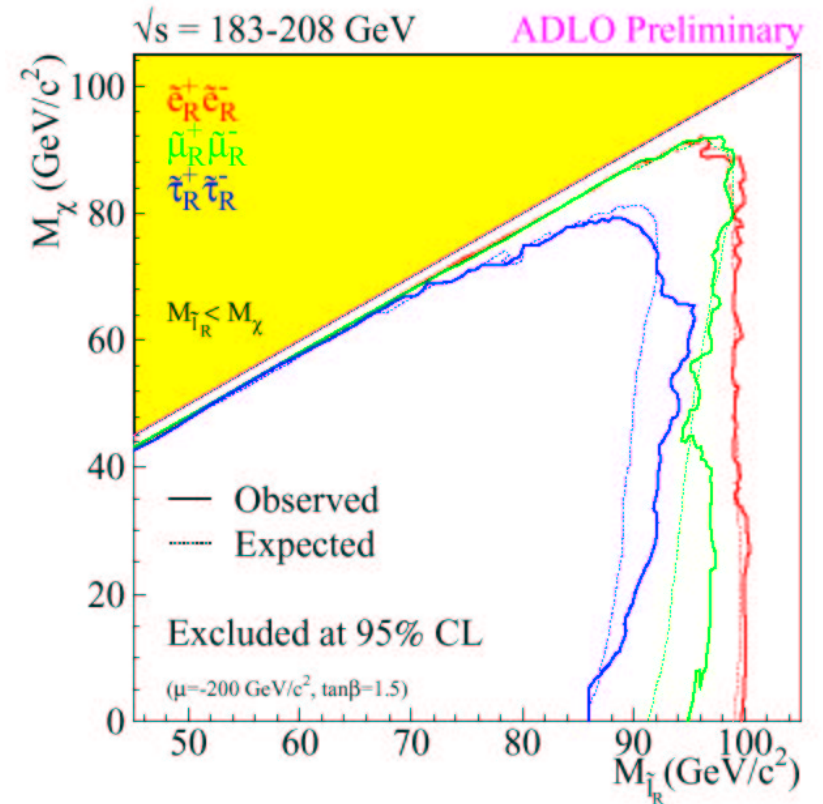
Gdzie neutralino  $\tilde{\chi}_1^0$  jest najlżejszą cząstką supersymetryczną (LSP)

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

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

$$e^+e^- \rightarrow l^+ l^- + \cancel{p_T}$$

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:

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

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

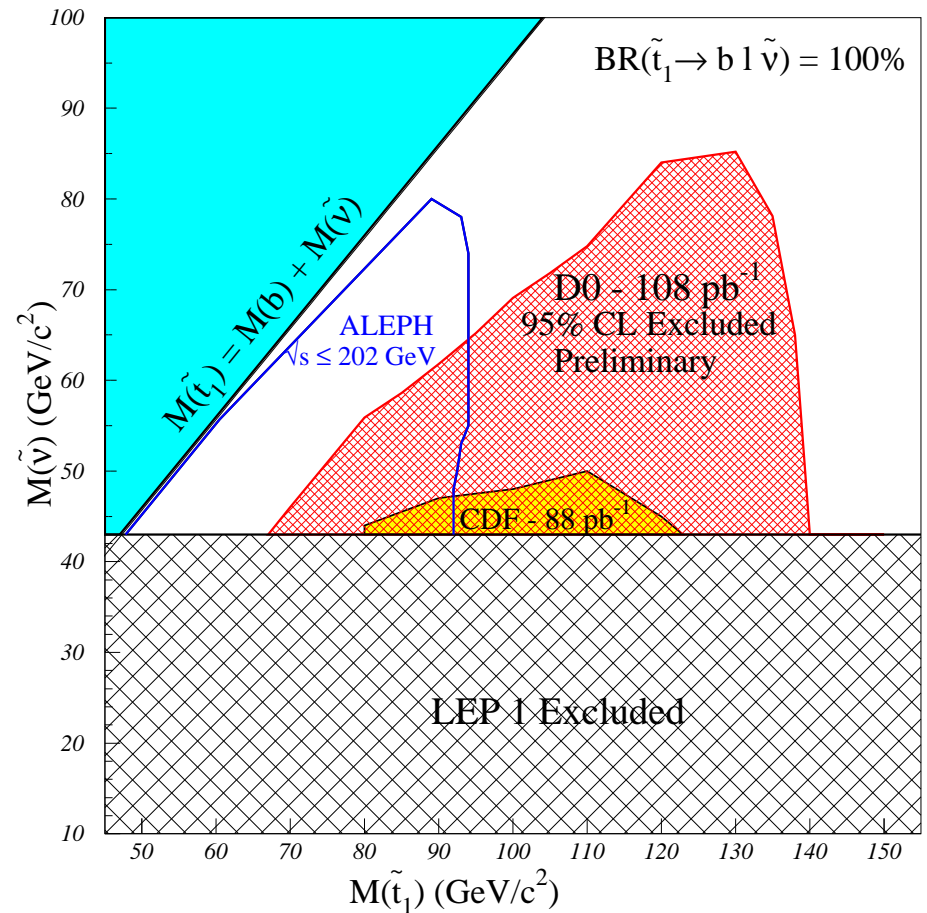
Jeśli  $\tilde{\nu}$  jest LSP to dominują rozpady:

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

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

⇒ 2 leptony + 2 jety +  $\cancel{RT}$

Porównanie wyników z LEP i Tevatronu:

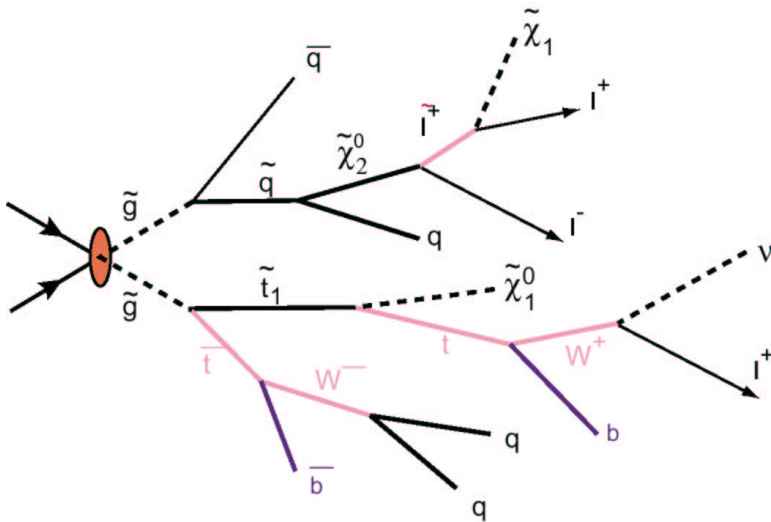


Dolne ograniczenie na masę  $\tilde{\nu}$ : z szerokości  $Z^0$  w LEP I

# Poszukiwanie SUSY

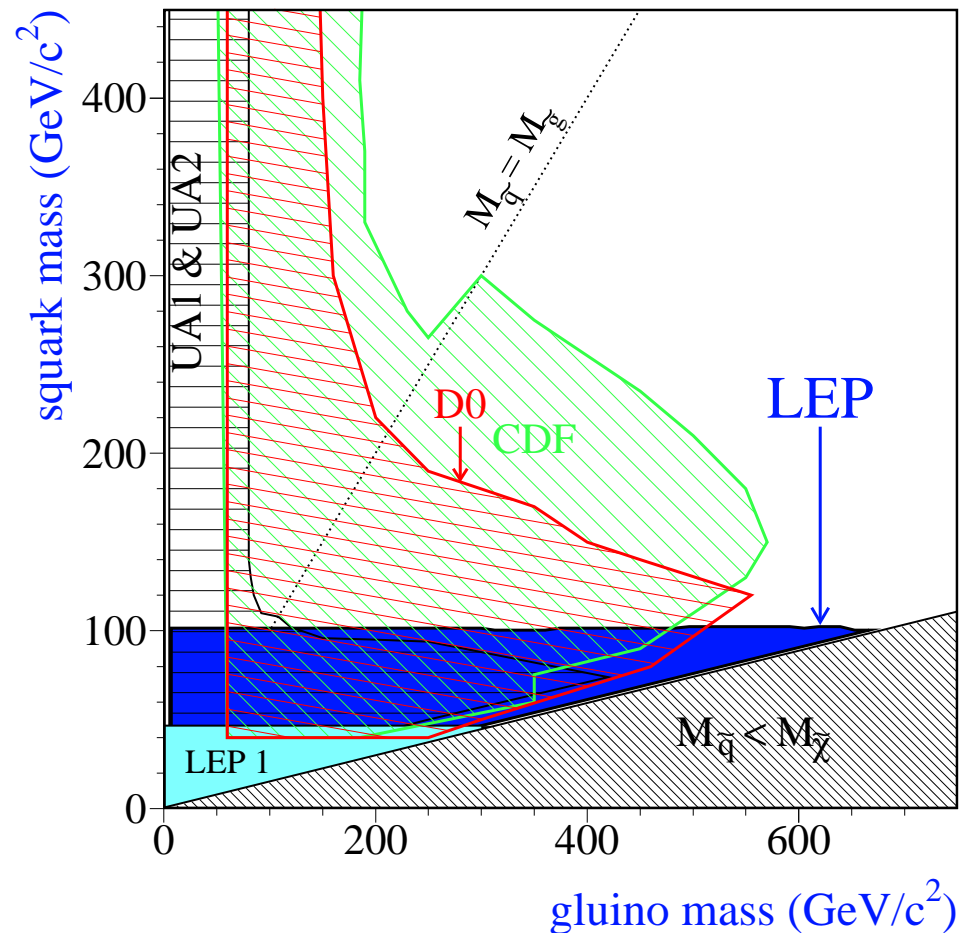
## Skwarki i gluina

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



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

Nie obserwujemy nadmiaru tego typu przypadków ⇒ limity:

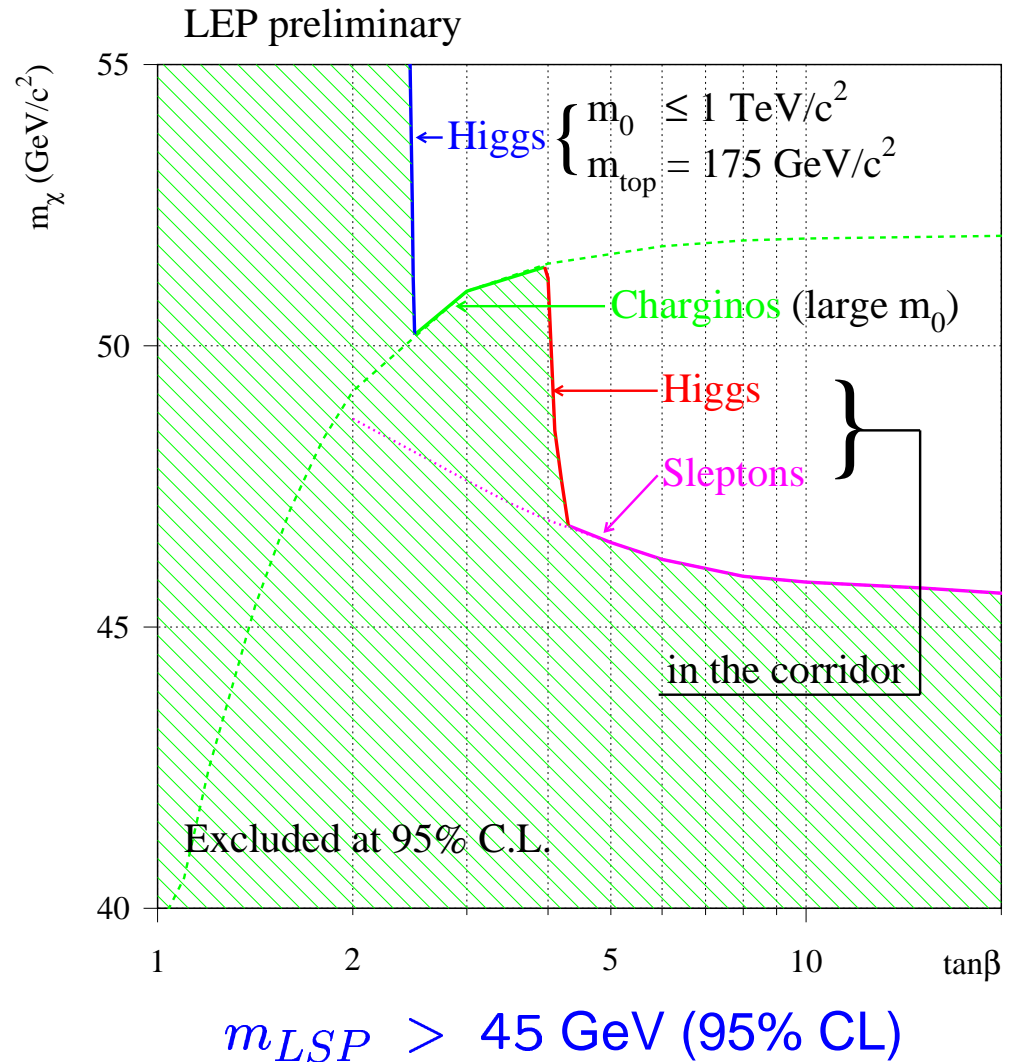


# Poszukiwanie SUSY

## 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

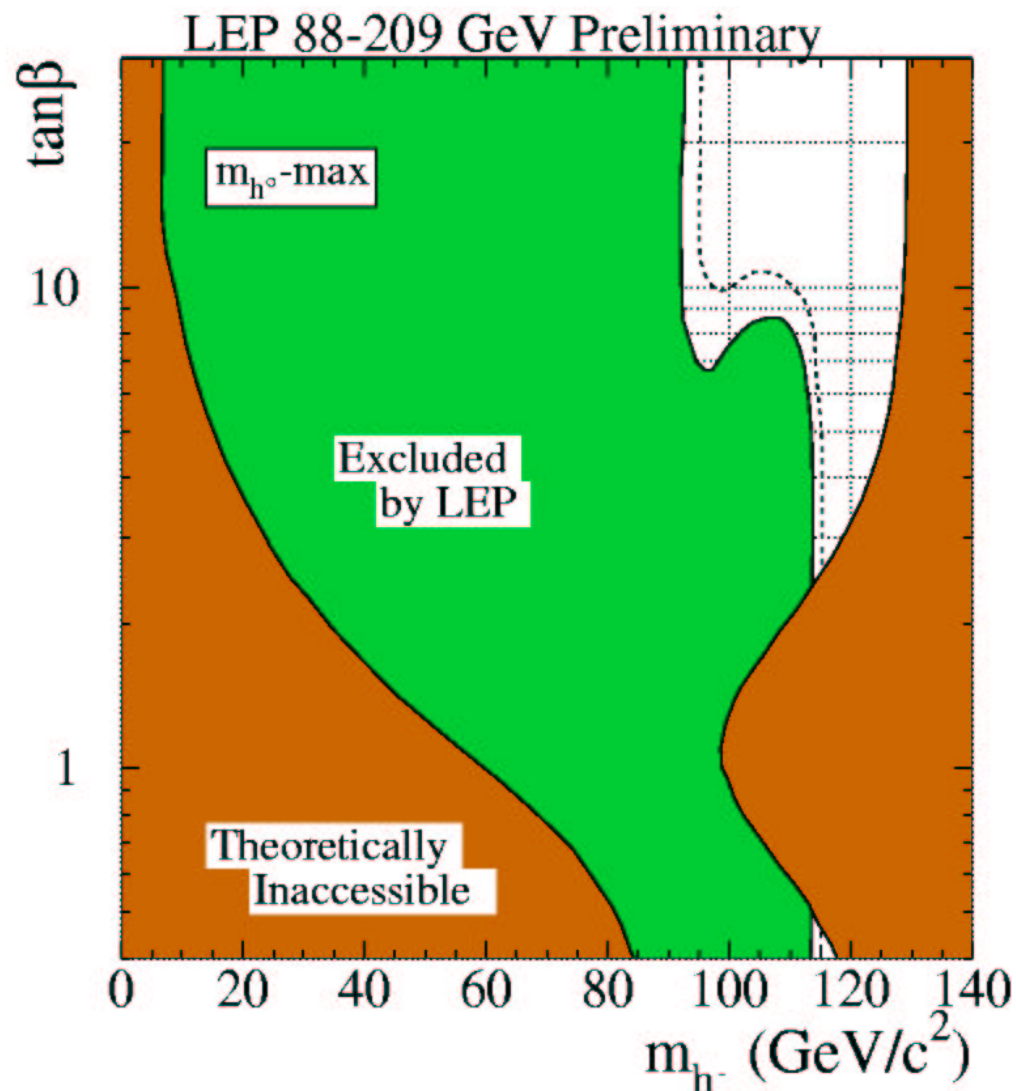
## Higgs

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 ?!...



# Przyszłe eksperymenty

## Tevatron II

Uruchomiony w 2002 po gruntownej modernizacji:

- energia  $\sqrt{s} = 1.96 \text{ TeV}$  (było 1.8 TeV)
- świetlność  $2 - 5 \cdot 10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ,  
choć na razie  $\sim 3 \cdot 10^{31} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ...  
(było  $1.6 \cdot 10^{30} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )
- planowane  $\sim 2 \text{ fb}^{-1}$  do 2005 (Run IIa)  
 $\sim 20 \text{ fb}^{-1}$  w latach następnych (Run IIb)  
(1995-2000  $\sim 0.13 \text{ fb}^{-1}$   
2002-2003  $\sim 0.1 \text{ fb}^{-1}$ )
- modernizacja i rozbudowa obu eksperymentów (D0 i CDF)



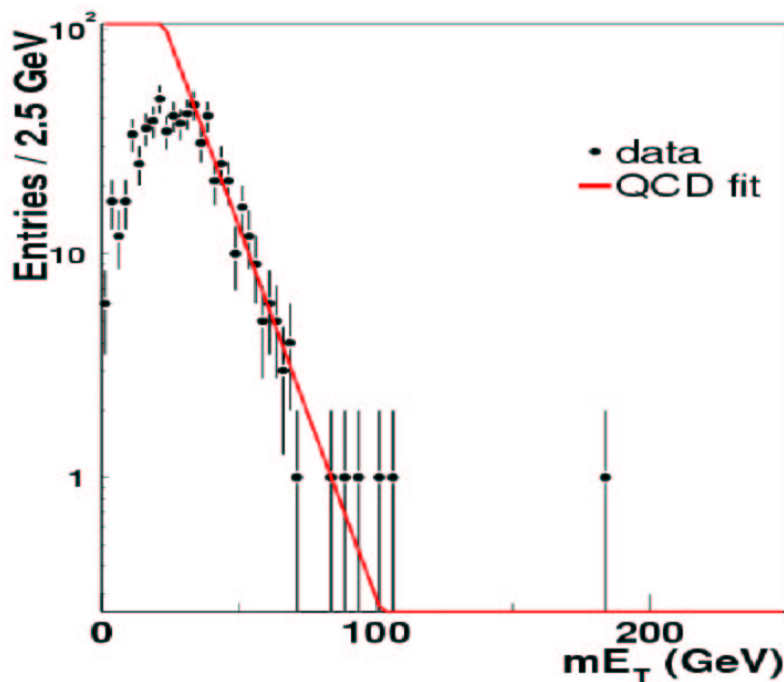


# Przyszłe eksperymenty

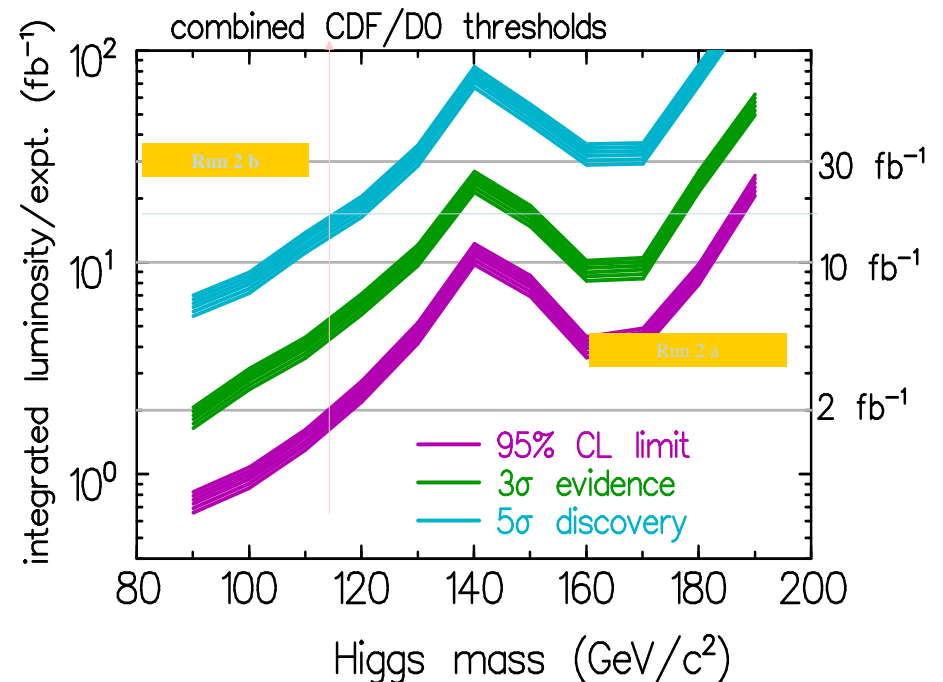
## Tevatron II

Pierwsze wyniki Run II (D0)

Poszukiwanie przypadków z produkcją dwóch jetów i dużą brakującą energią poprzeczną (uciekające LSP):



Perspektywy odkrycia Higgsa:



Jesli Higgs ma masę  $m_h \sim 120$  GeV (jak sugeruje LEP) Tevatron II “odkryje” go po zebraniu ok.  $5 \text{fb}^{-1}$  (3  $\sigma$ ).

Brak sygnału po  $10 \text{fb}^{-1} \Rightarrow$  koniec SUSY...

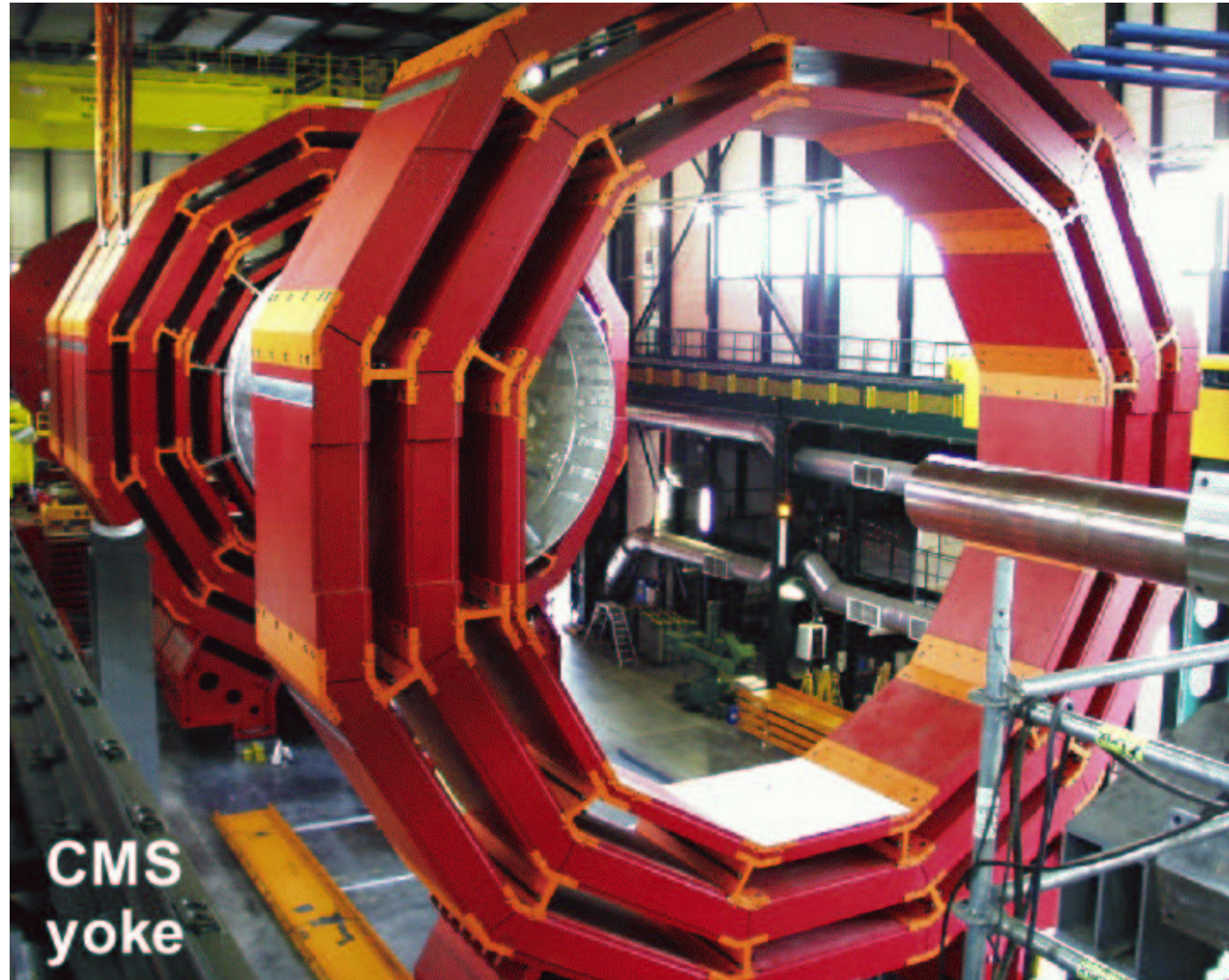
# Przyszłe eksperymenty

## LHC

“Fabryka” supersymetrii,  
w budowie.

Montarz jaźma magnesu  
detektora **CMS** ⇒

Uruchomienie: 2007 (?)



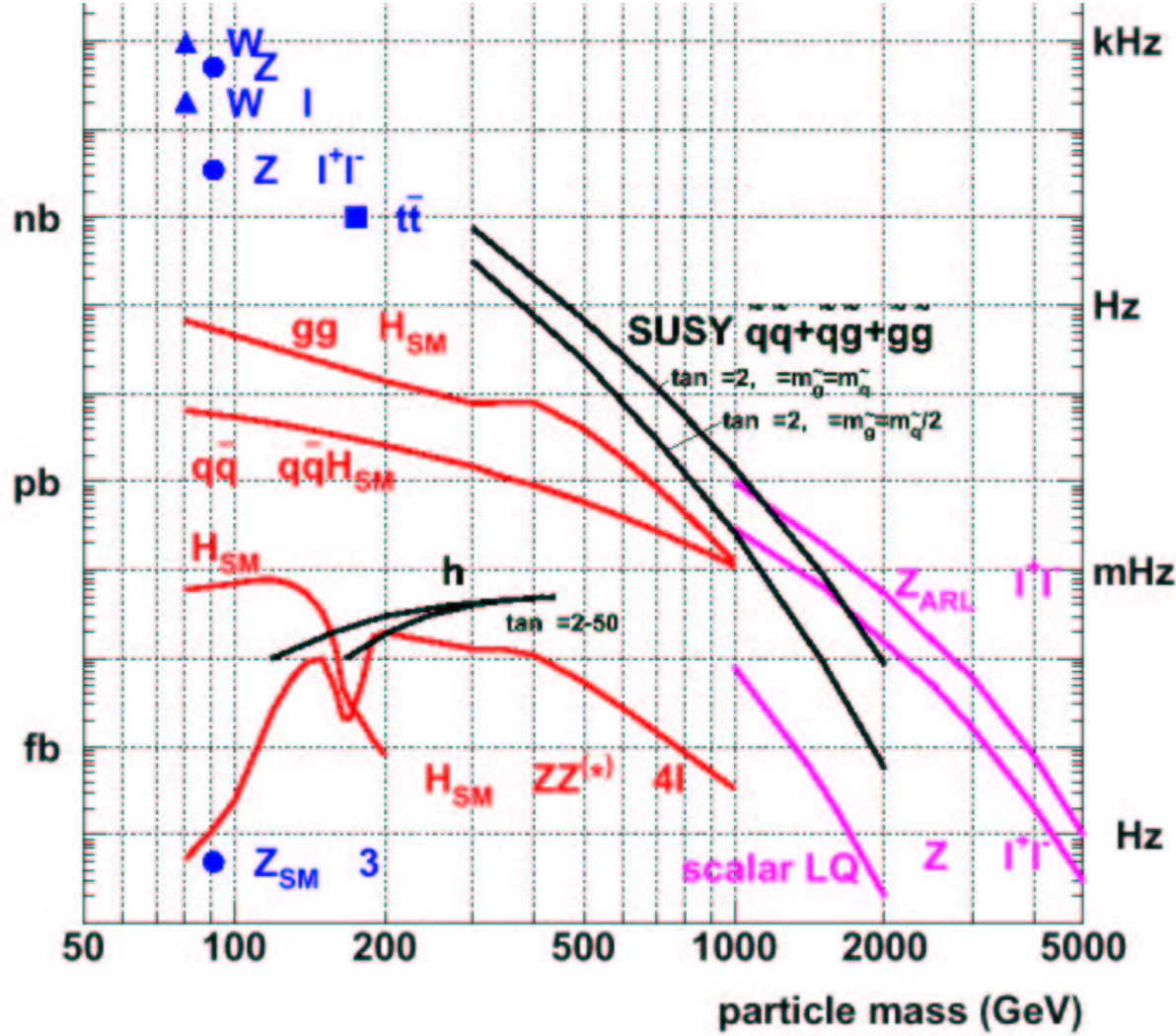
# Przyszłe eksperymenty

## 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



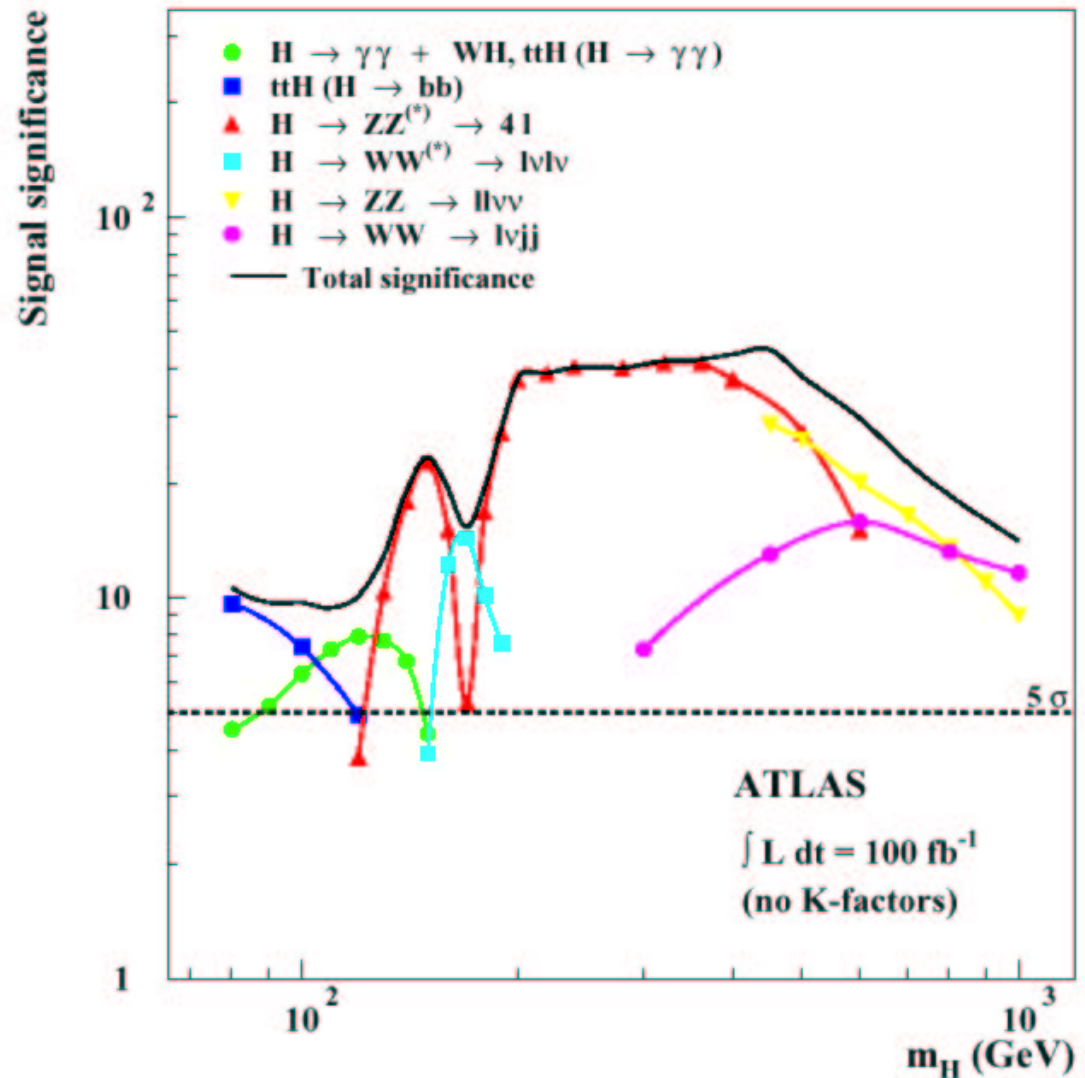
# Przyszłe eksperymenty

## 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**



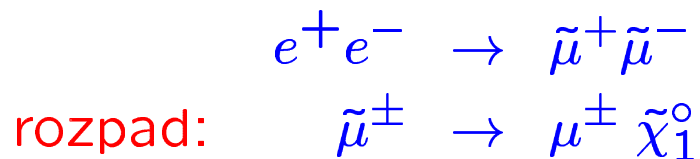
Przy “niefortunnych” wartościach parametrów SUSY możliwe, że LHC zobaczy tylko (jednego) Higgsa...

# Przyszłe eksperymenty

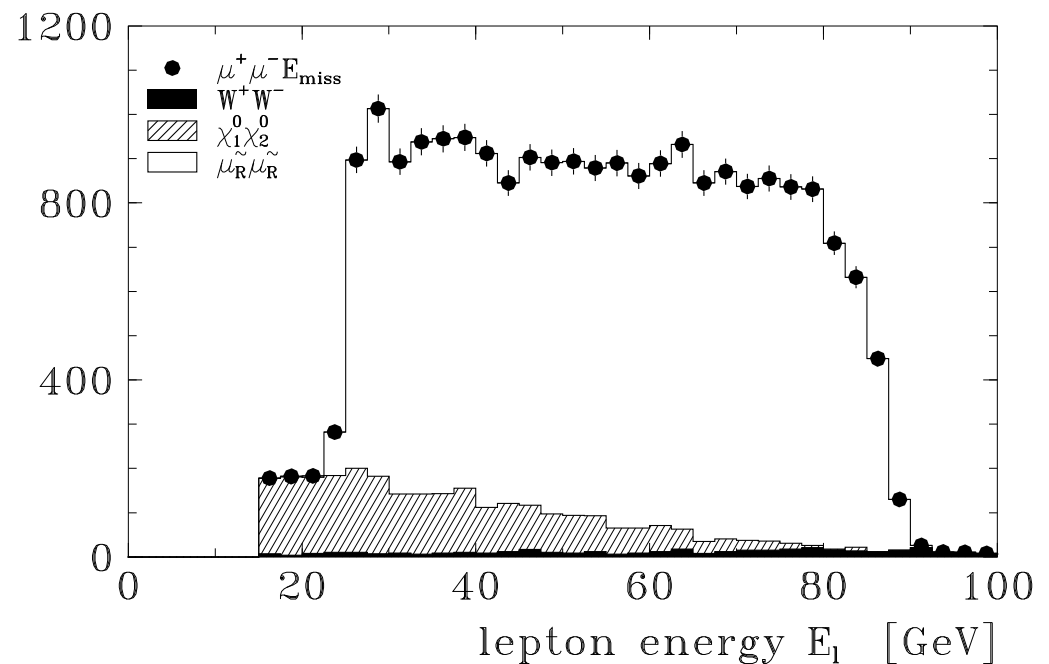
## Tesla

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

Przykład: produkcja smionów



Rozkład energii mionów z rozpadu smionów:



Kształt widma  $\iff$  spin (płaski  $\leftrightarrow$  0)

granice widma  $\iff$   $m_{\tilde{\chi}}$  i  $m_{\tilde{\mu}}$