

Supersymetria

Elementy fizyki cząstek elementarnych

Wykład X

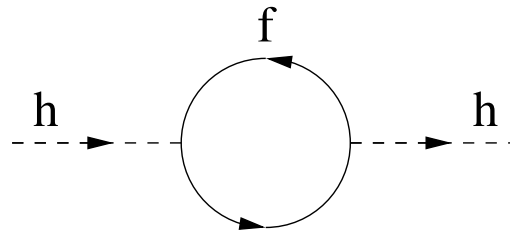
- Założenia
- Widmo cząstek
- Przewidywania
- Obecne wyniki
- Przyszłe poszukiwania

- Mały Higgs

Problem hierarchi

Czy Model Standardowy może pozostać słuszny aż do skali unifikacji $\Lambda \sim 10^{15}$ GeV?

“Problem hierarchi” - problem ze zdefiniowaniem masy Higgsa:



Poprawki związane z pętlami fermionowymi (dominuje kwark t) rosną jak Λ^2 ...

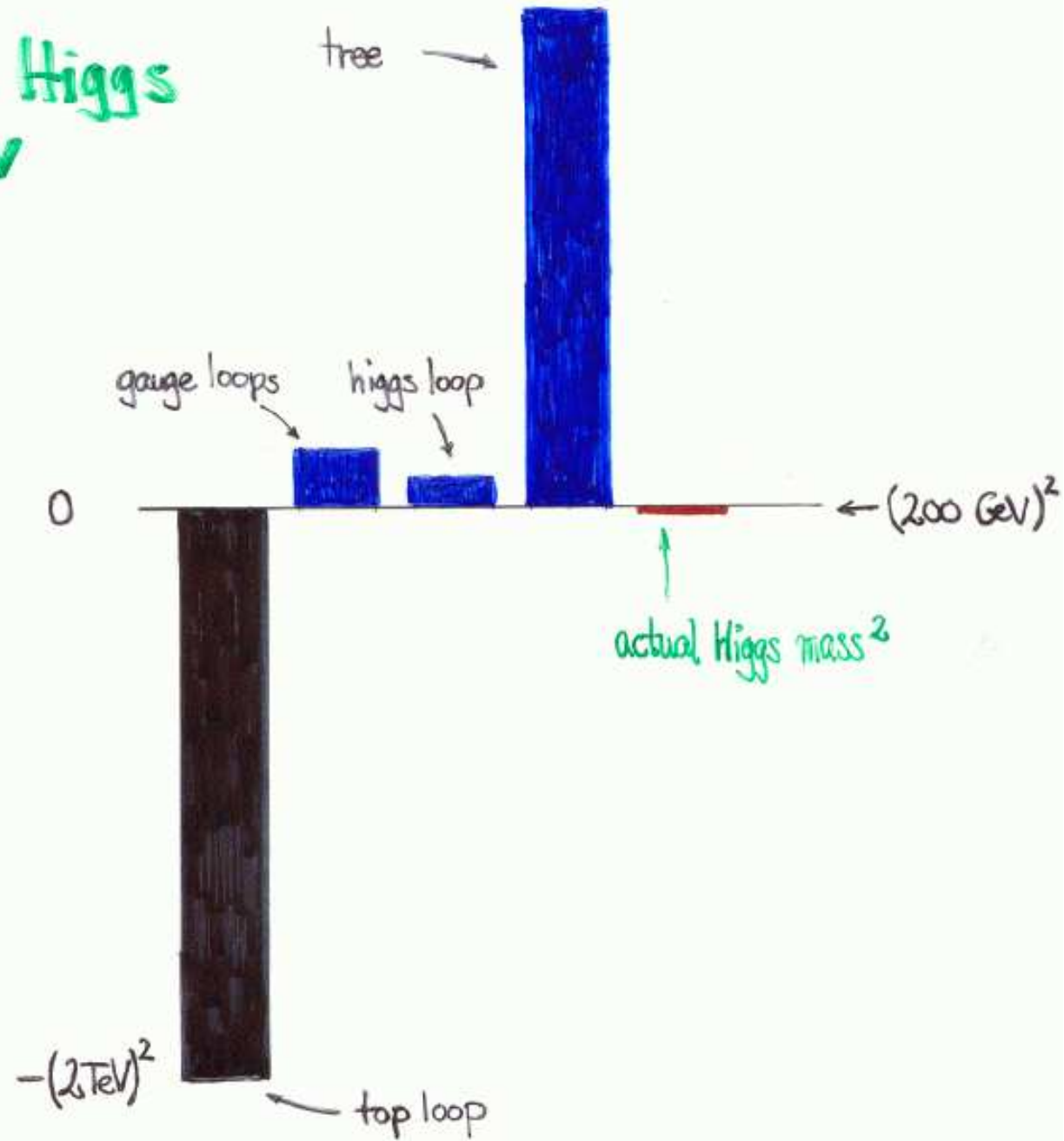
Aby uzyskać $m_h < 1$ TeV musimy niesłychanie precyzyjnie dobrać parametry modelu (na poziomie $\delta \sim 10^{-15}$), tak aby zapewnić kasowanie tych “poprawek”.

Model przestaje jednak być “naturalny”.

Prawdopodobieństwo, że przy losowym wyborze parametrów Modelu Standardowego dostaniemy “dobrą” masę bozonu Higgsa ~ 0 .

Fine tuning the Higgs

$\Delta = 10 \text{ TeV}$



Problem hierarchi

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. Ostatnio szeroko dyskutowana

“MAŁY HIGGS”

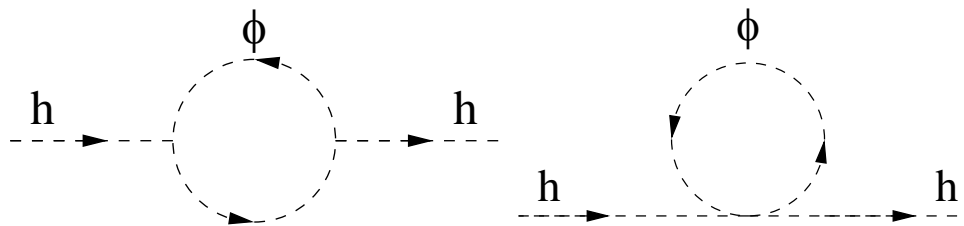
⇒ obniżyć skalę Λ do ~ 1 TeV

⇒ 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 ~ 1 **TeV**.

Supersymetria

Podstawy teorii

Zaproponowana ~ 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 $\frac{1}{2}$:

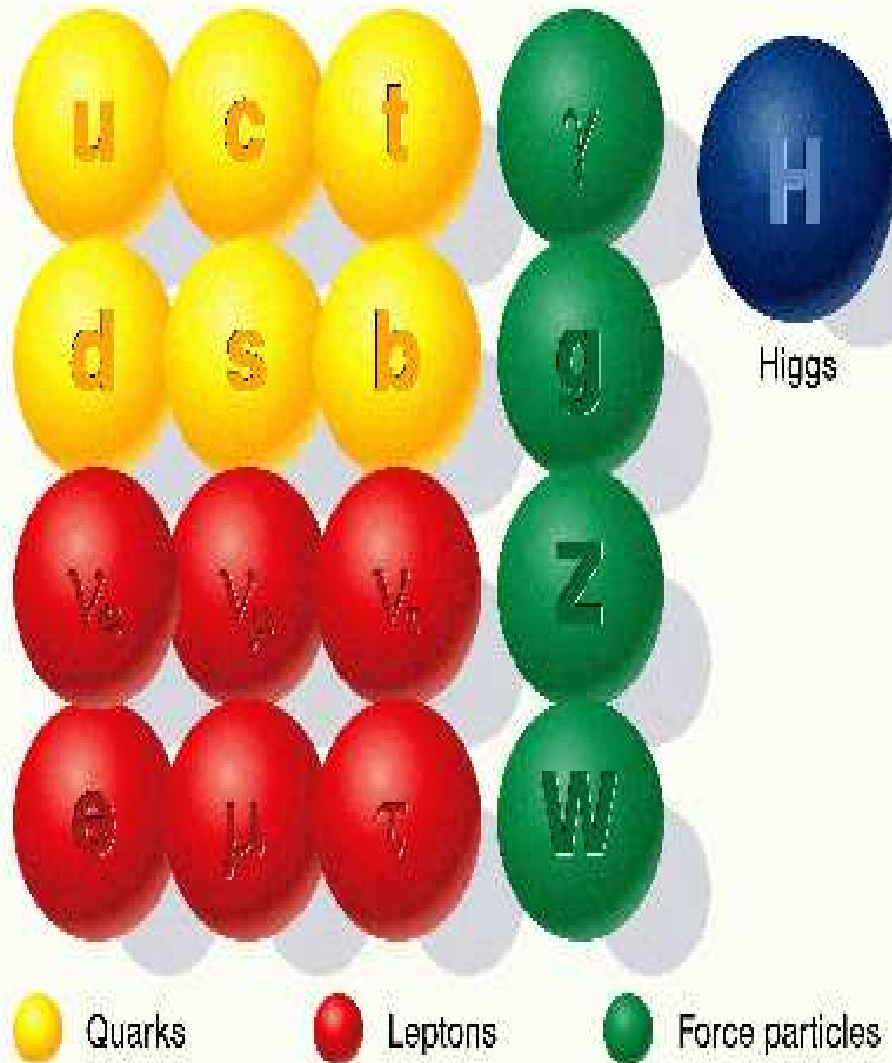
fermion ($s=\frac{1}{2}$) \rightarrow sfermion ($s=0$)

bozon

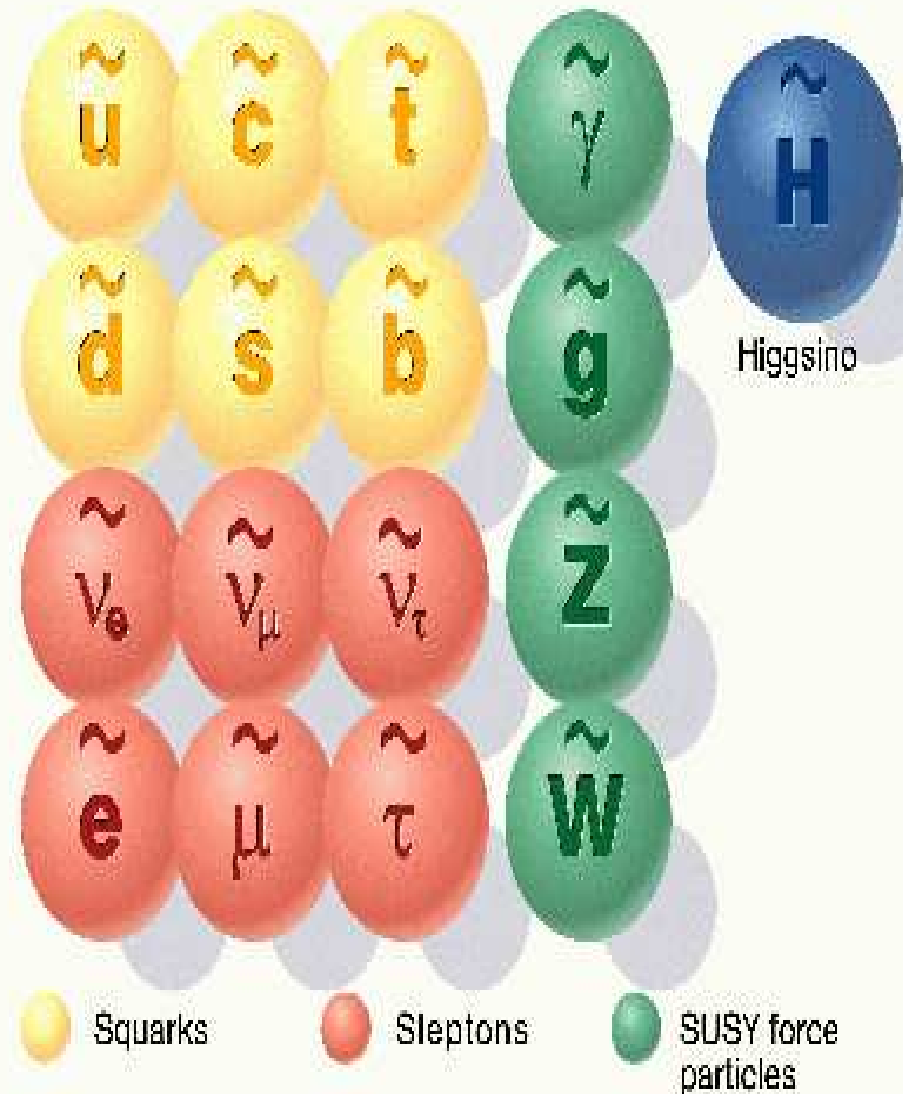
cechowania ($s=1$) \rightarrow gaugino ($s=\frac{1}{2}$)

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 γ Z° 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° lekki Higgs skalarny
 H° ciężki Higgs skalarny
 A° 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° mieszają się dając γ i bozon Z° .
- ⇒ 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 ~ 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”**

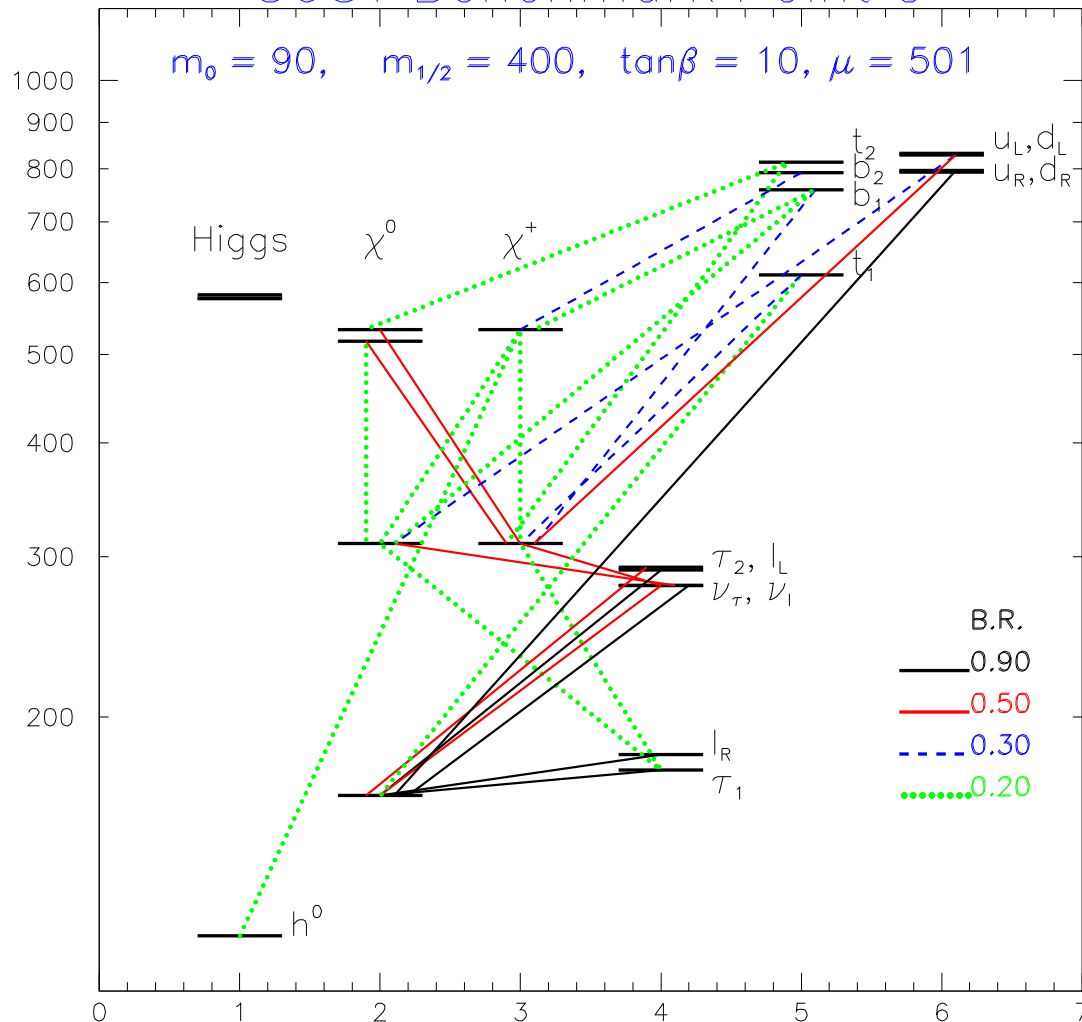
Sami nie wiemy co nas czeka...



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

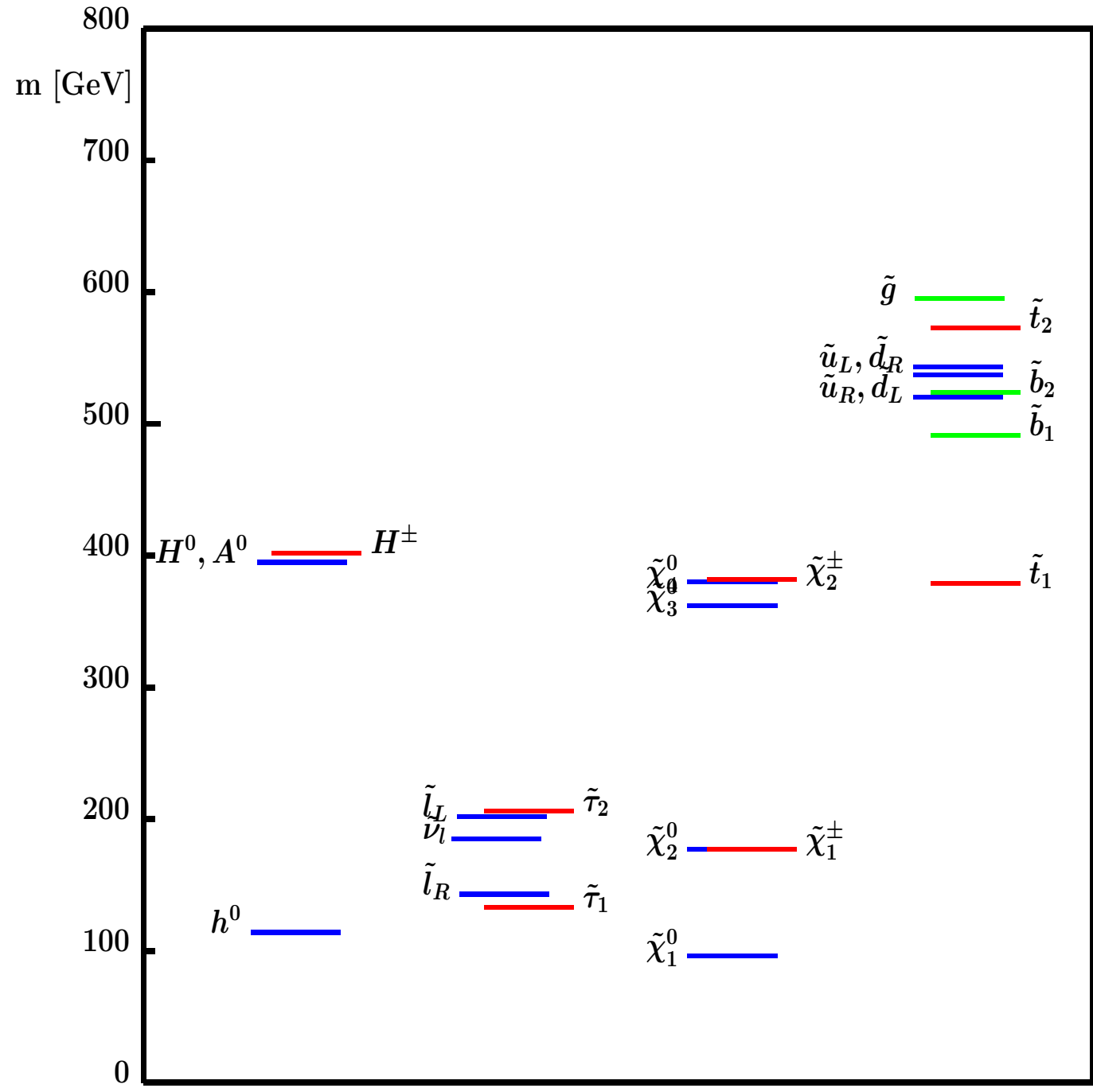
$\tan\beta$ - podstawowy parametr opisujący cząstki Higgsa - stosunek wartości próżniowych (pozycji minimum potencjału) dla dwóch dubletów Higgsa.

$\tan\beta \sim 1 \Rightarrow$ 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

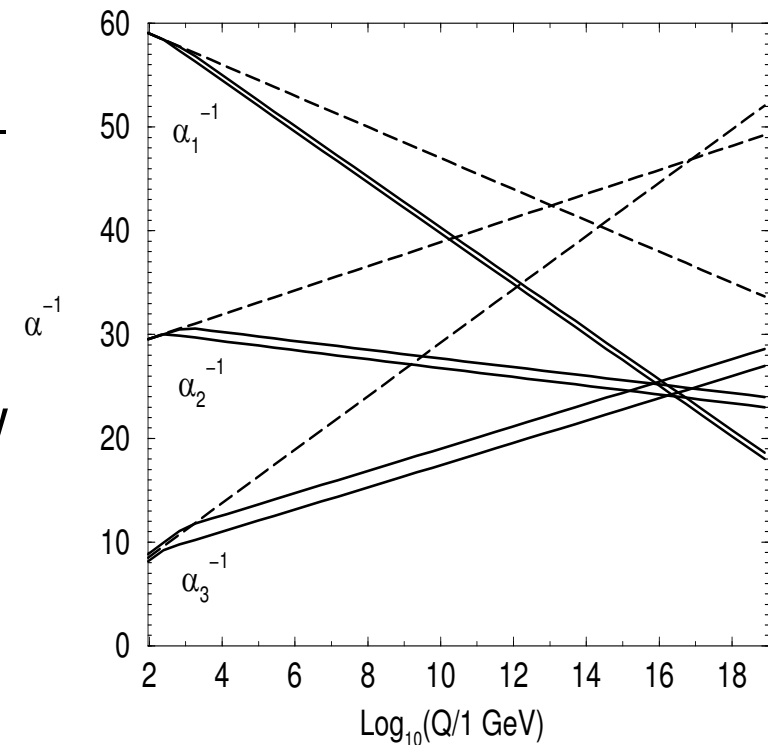
$$m_t \sim 175 \text{ GeV}$$

\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...

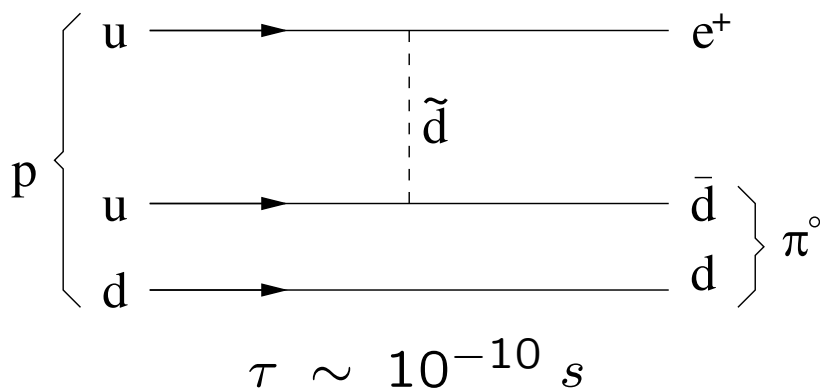
Supersymetria

Parzystość R

W ogólnym przypadku supersymetria dopuszcza

łamanie liczby leptonowej L i barionowej B .

W szczególności możliwy jest **rozpad protonu**:



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)

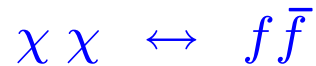
Supersymetria

Ciemna materia

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

WIMP - Weakly Interacting Massive Particle

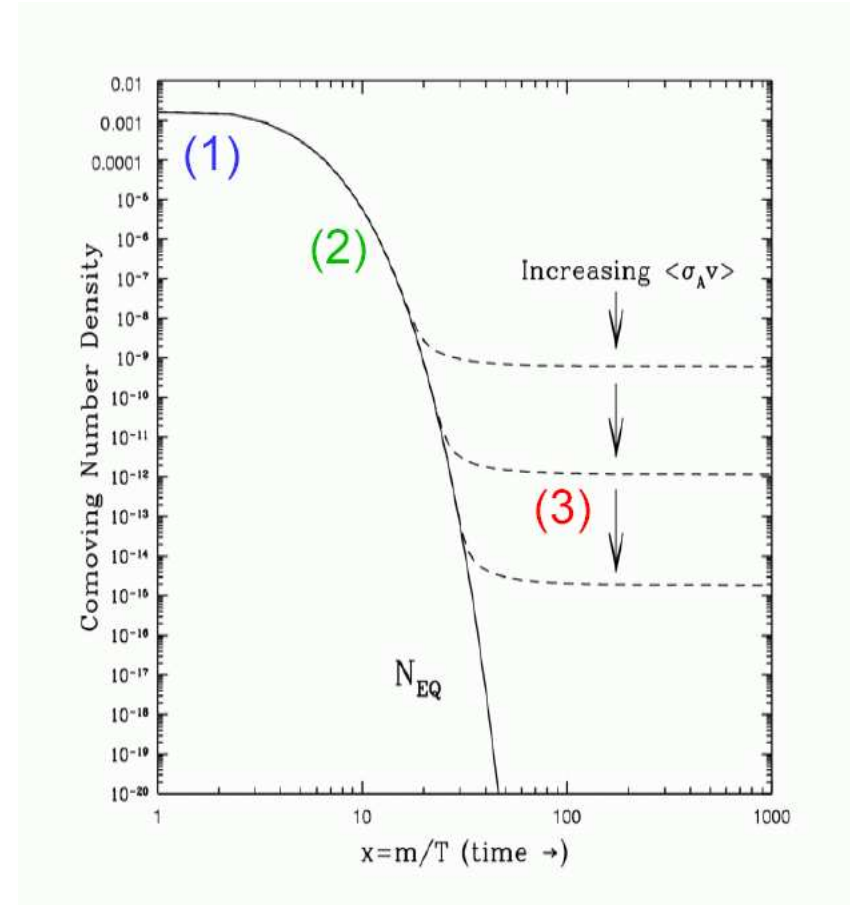
(1) Zaraz po Wielkim Wybuchu ciężkie LSP jest w równowadze termodynamicznej z innymi cząstkami:



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

(3) W pewnym momencie gęstość LSP staje się na tyle mała, że anihilacja przestaje efektywnie zachodzić: “wymrożenie”

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

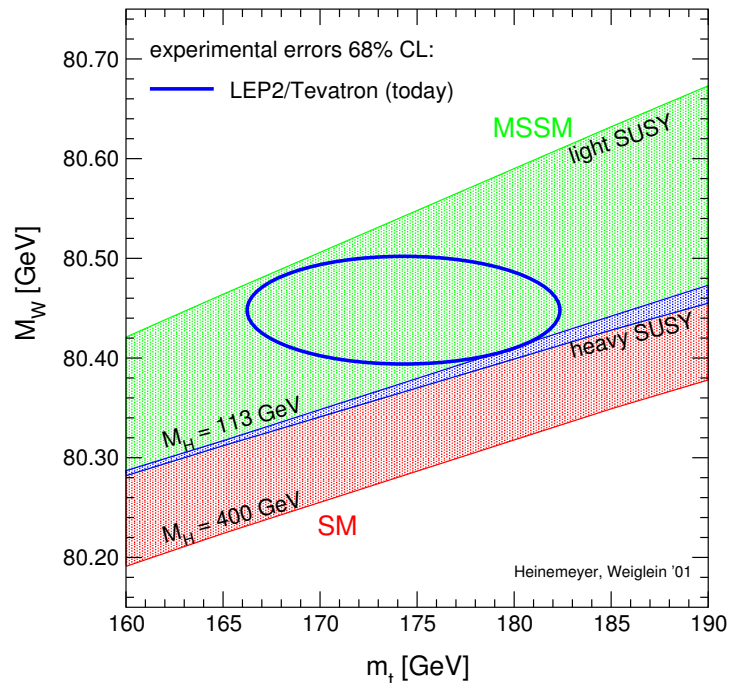


Poszukiwanie SUSY

Pierwsze ślady ?

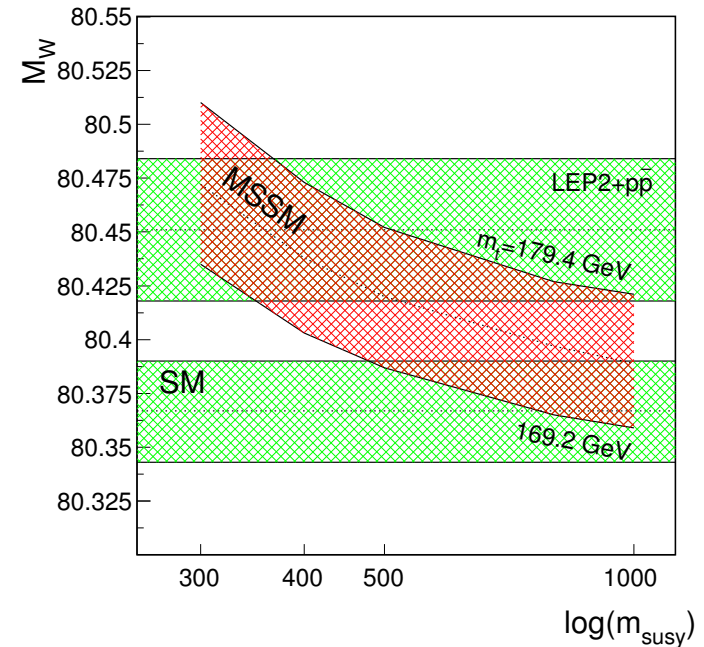
SUSY tłumaczy “rozbieżności” między pomiarami M_W i M_t a wynikami dopasowań SM:

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:

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

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

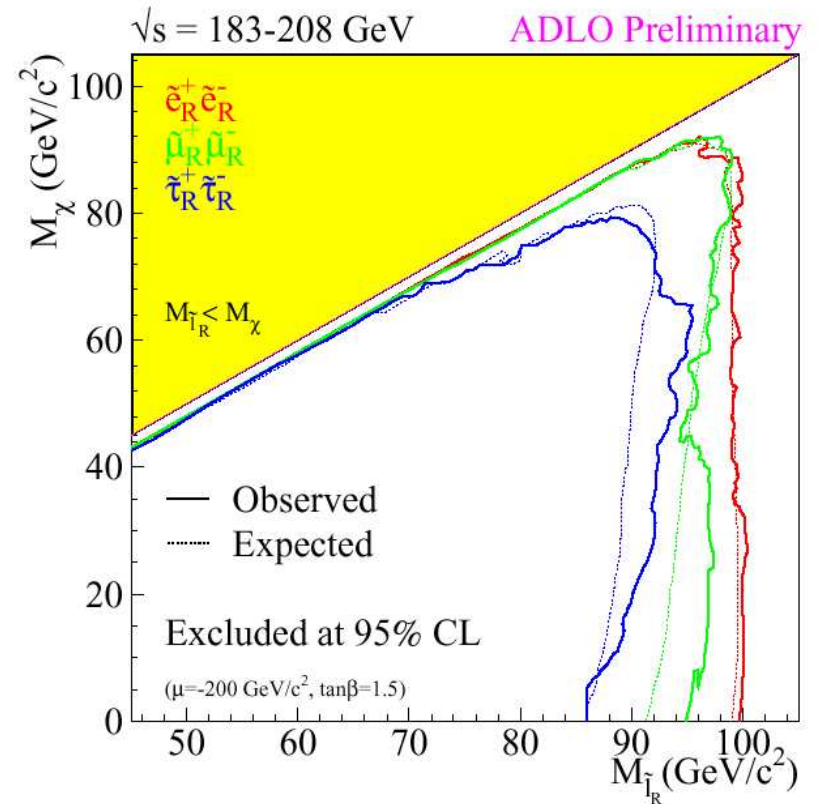
Gdzie neutralino $\tilde{\chi}_1^0$ jest najlżejszą cząstką supersymetryczną (LSP)

⇒ 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{t}
o masach poniżej 85-100 GeV

Poszukiwanie SUSY

Stop

Odwrotnie niż w SM, **stop** powinien być **najlżejszym** skwarkiem

⇒ najłatwiejszy do wyprodukowania:

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

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

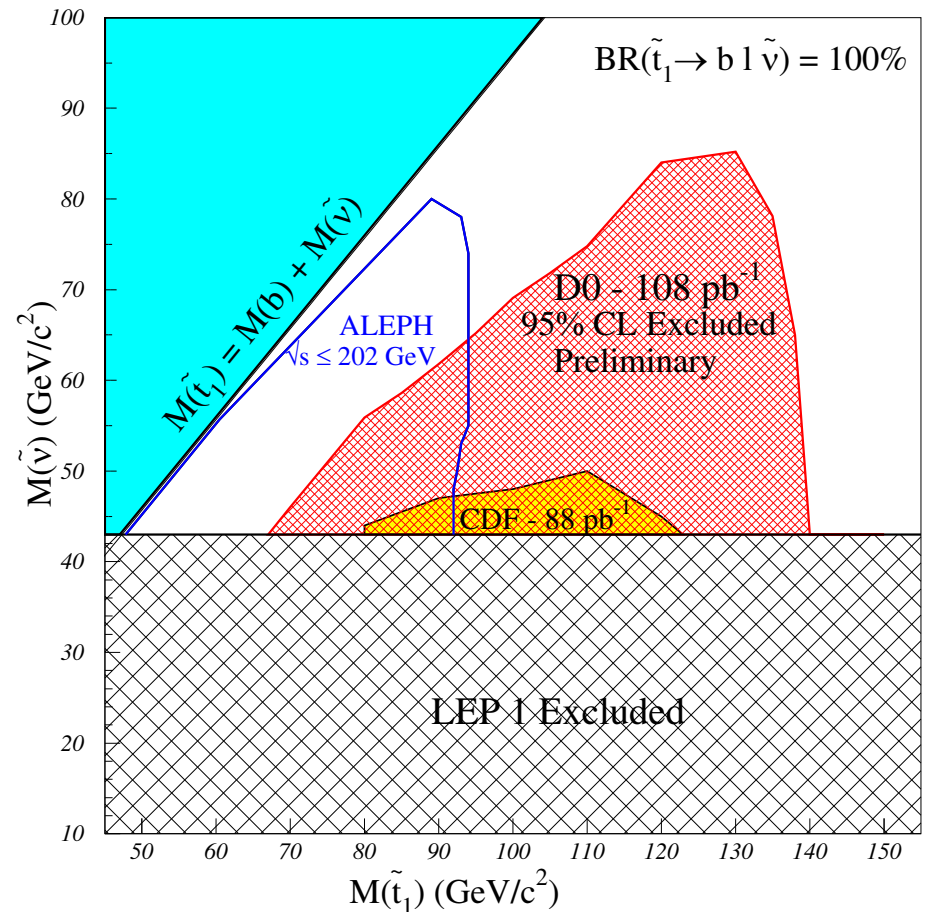
Jeśli $\tilde{\nu}$ jest **LSP** to dominują rozpady:

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

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

⇒ 2 leptony + 2 jety + \cancel{RT}

Porównanie wyników z LEP i Tevatronu:

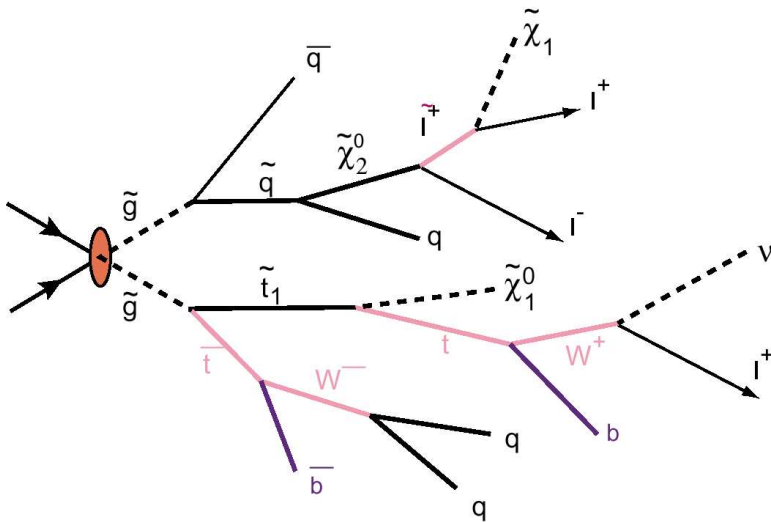


Dolne ograniczenie na masę $\tilde{\nu}$: z szerokości Z^0 w LEP I

Poszukiwanie SUSY

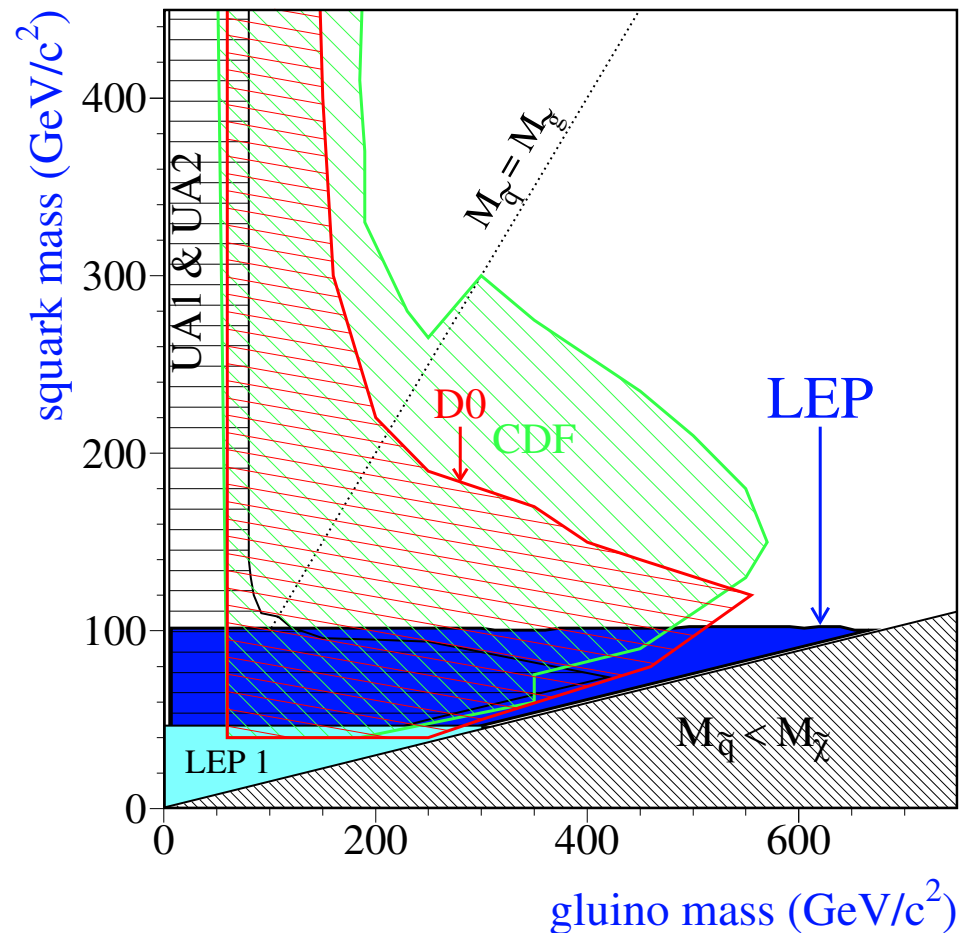
Skwarki i gluina

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}

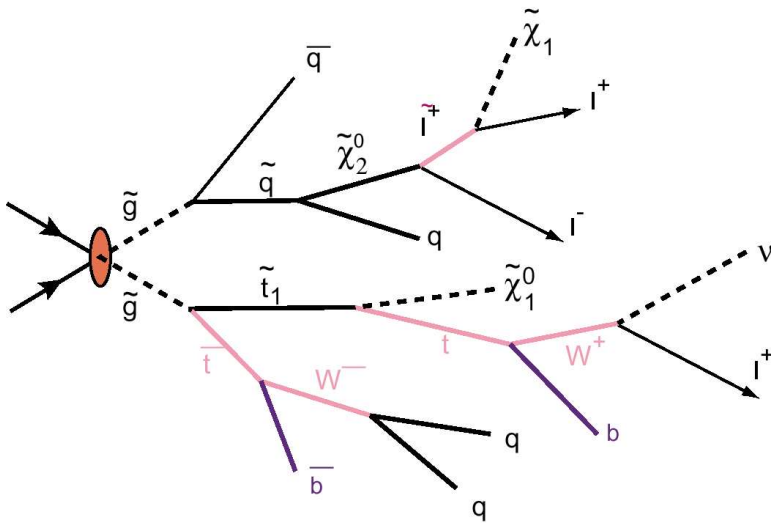
Nie obserwujemy nadmiaru tego typu przypadków ⇒ limity:



Poszukiwanie SUSY

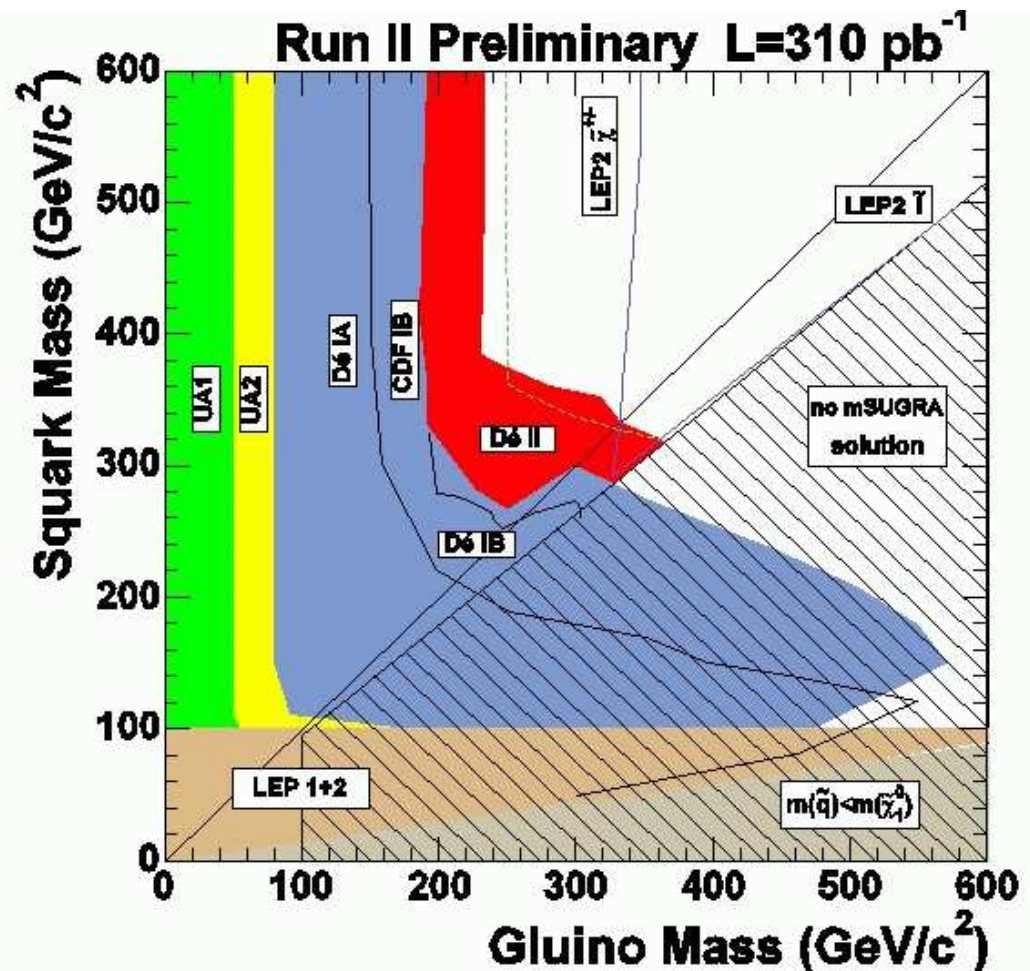
Skwarki i gluina

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 (2005):

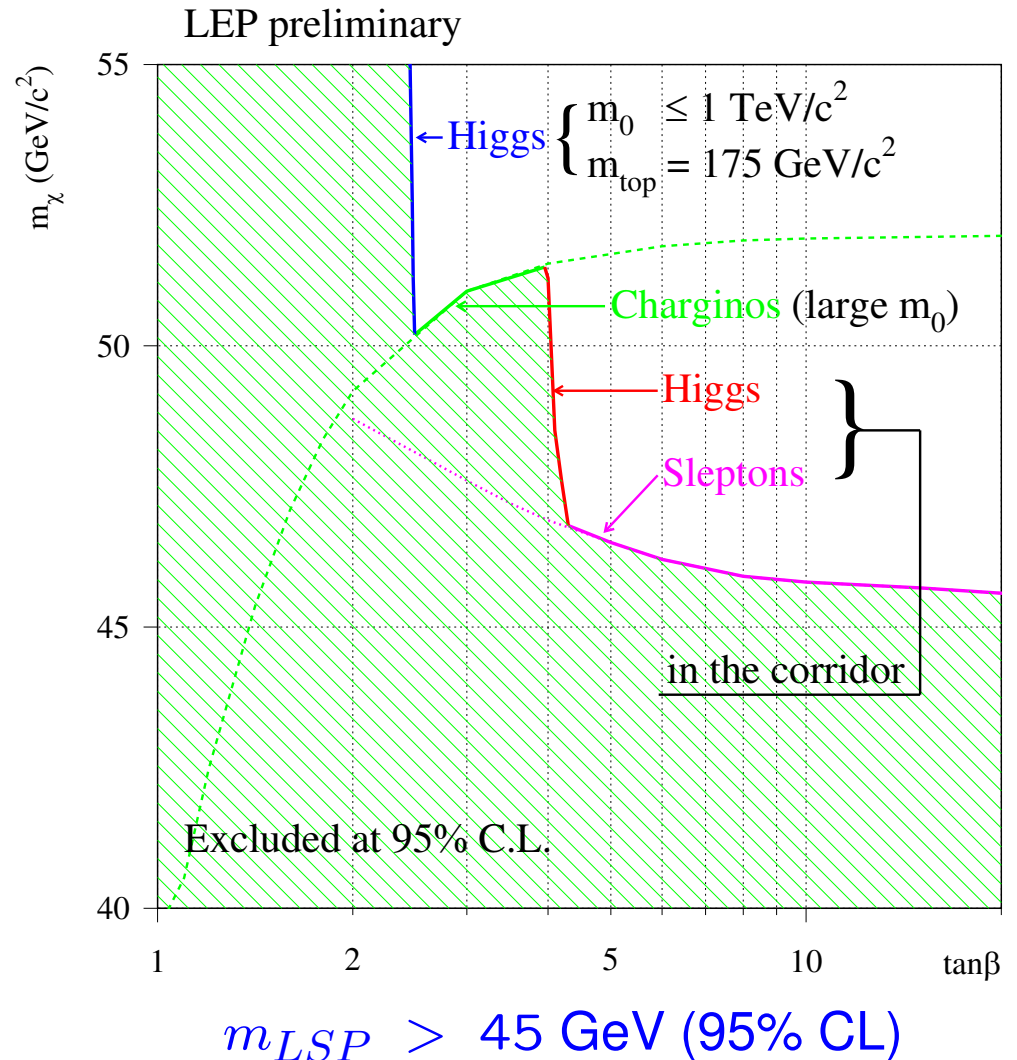


Poszukiwanie SUSY

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

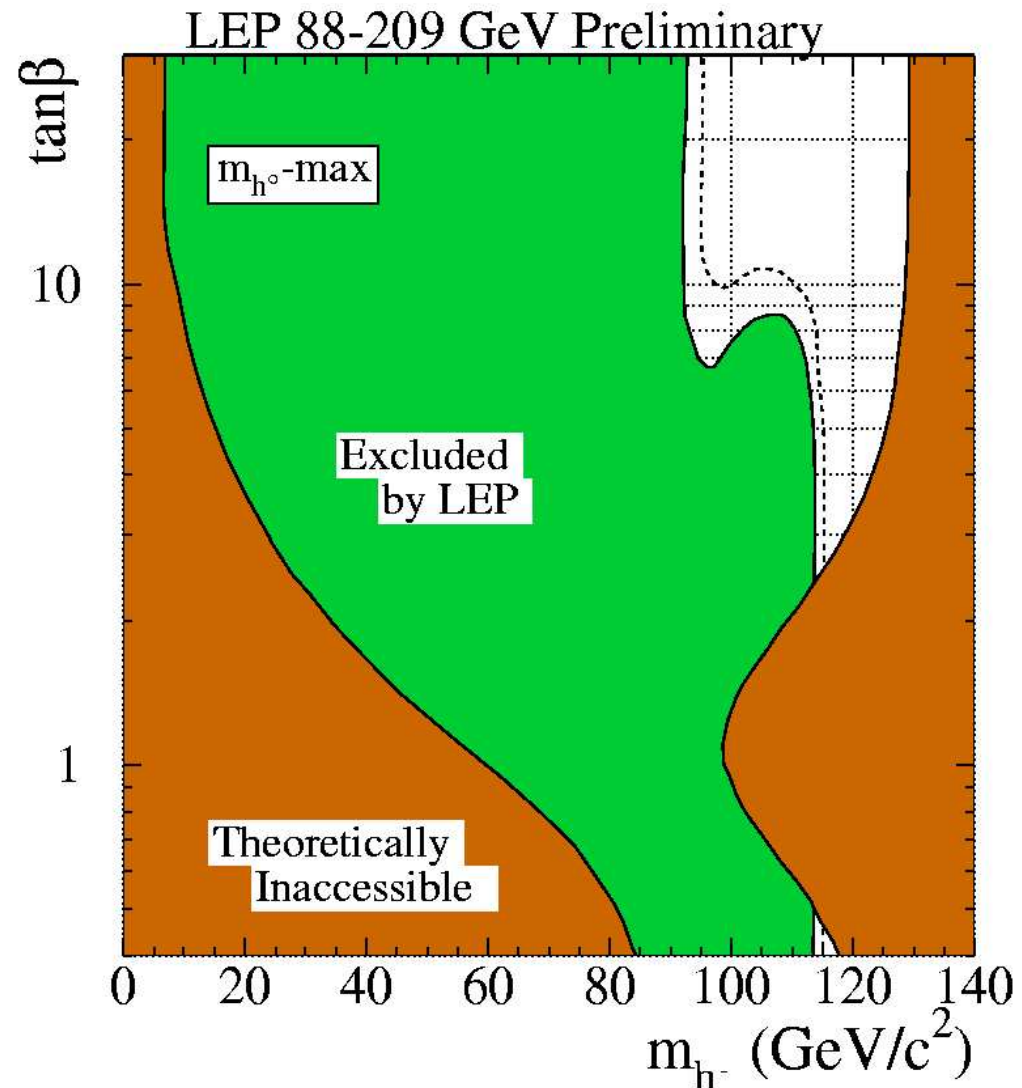
Higgs

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** ⇒

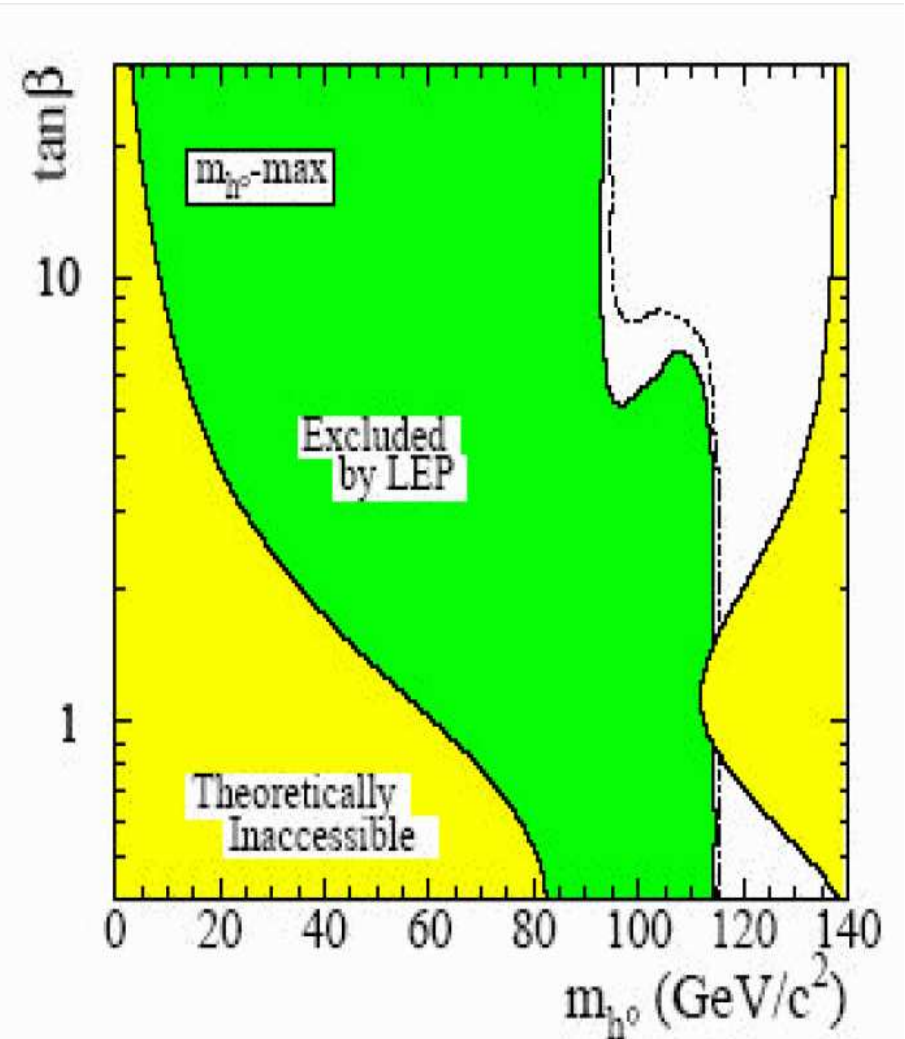
“Korytarz”, w którym SUSY jest **spójną** teorią zaczyna się **zamykać** !...

Higgs musi mieć masę $m_h \leq 140$ GeV

⇒ albo go znajdziemy,
albo **SUSY** jest **wykluczone** ?!...

Górna granica przesunęła się lekko ze zmianą mierzonej wartości M_t .

2004



Przyszłe eksperymenty

LHC

“Fabryka” supersymetrii,
w budowie.

Montarz jaźma magnesu
detektora **CMS** ⇒

Uruchomienie: 2007 (?)



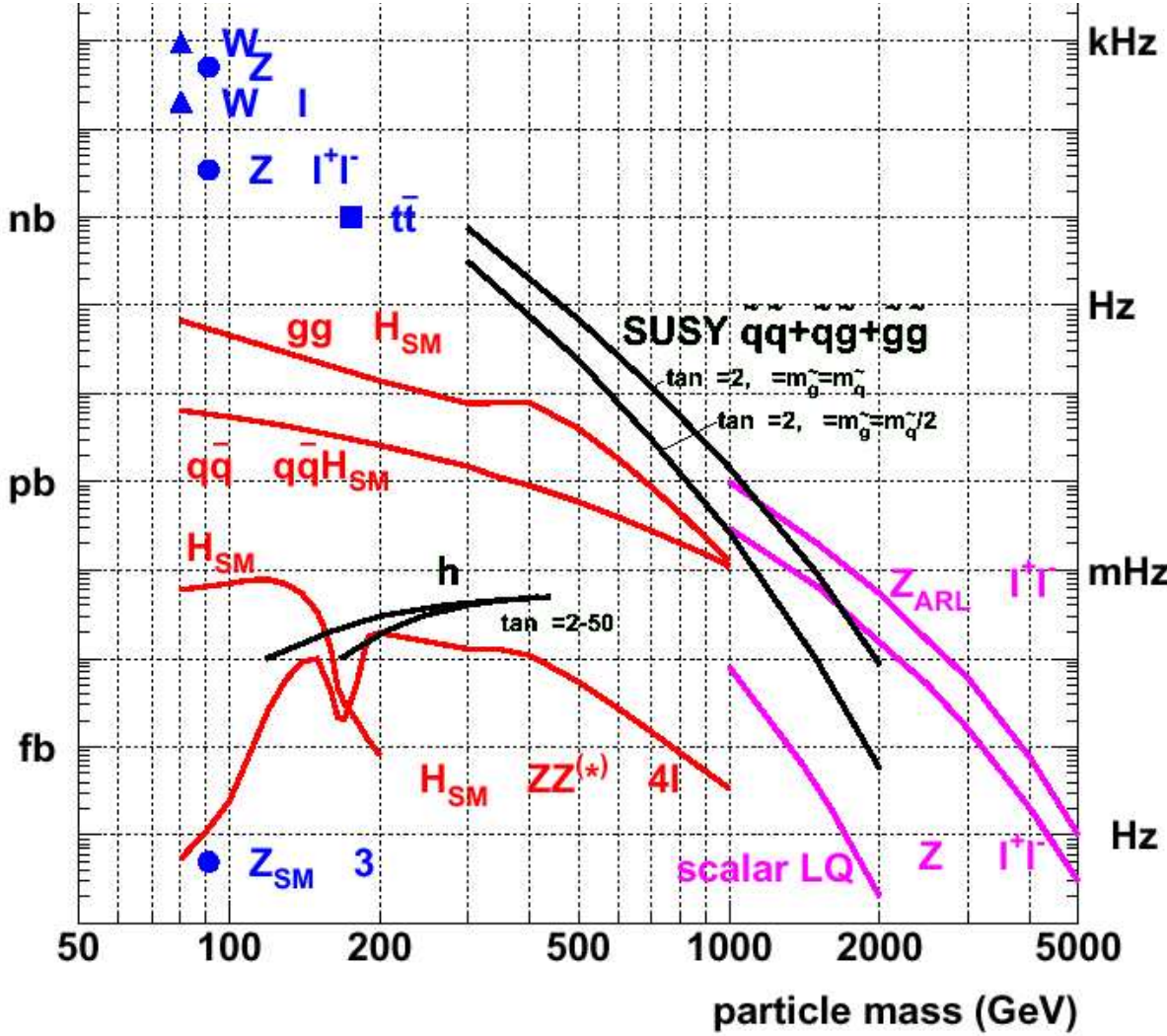
Przyszłe eksperymenty

LHC

Jeśli SUSY istnieje, LHC “musi” ją zobaczyć.

Częstość produkcji cząstek supersymetrycznych:

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



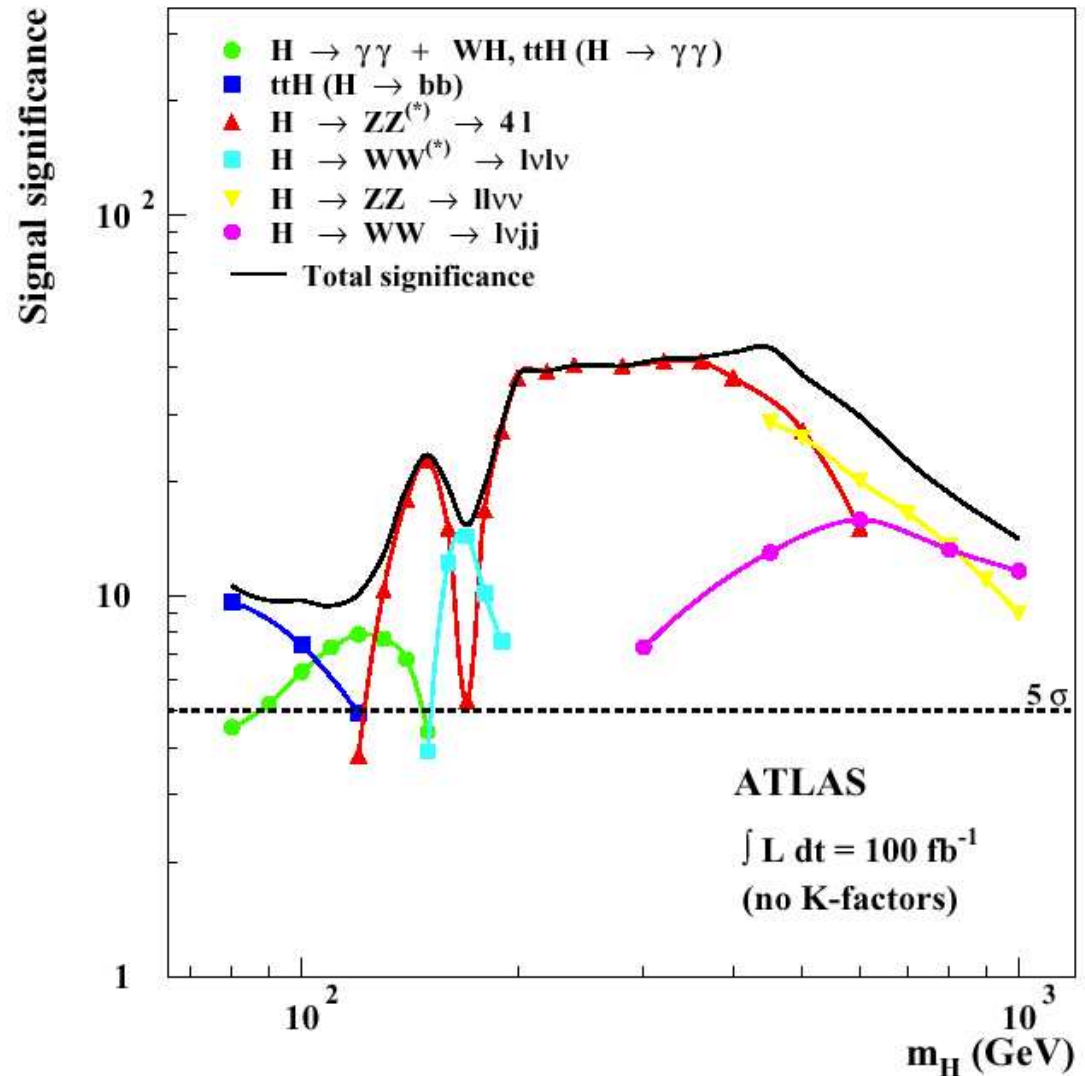
Przyszłe eksperymenty

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**



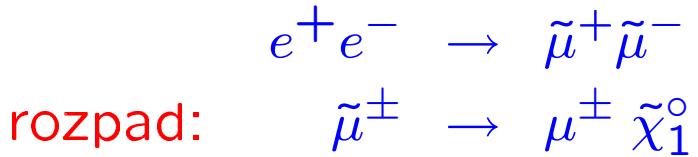
Przy “niefortunnych” wartościach parametrów SUSY możliwe, że LHC zobaczy tylko (jednego) Higgsa...

Przyszłe eksperymenty

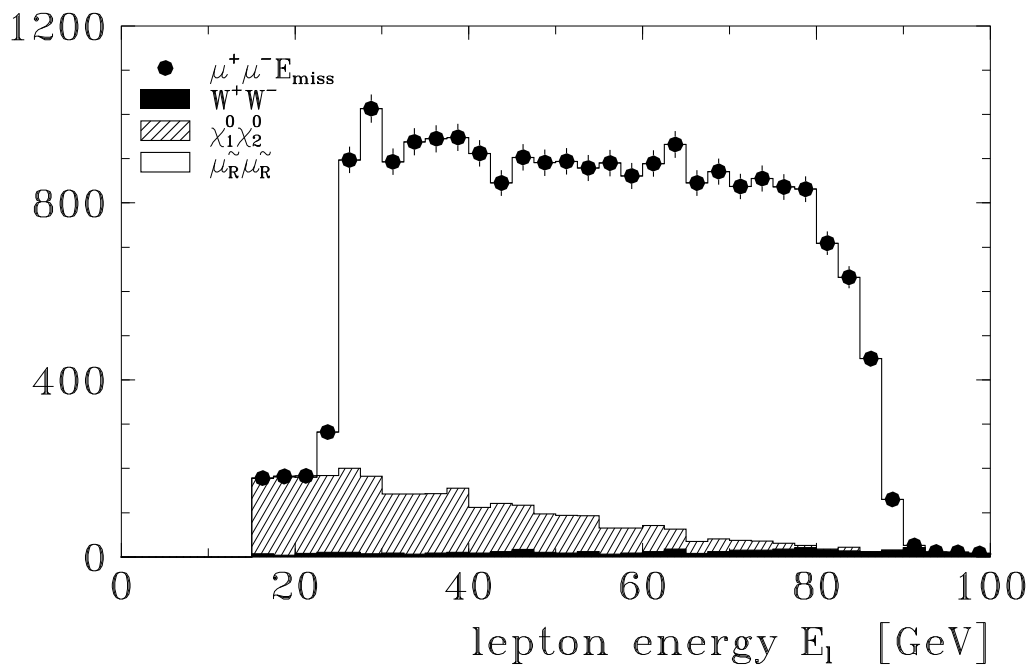
ILC

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

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 hierarchi musimy wprowadzić “nową fizykę” przy skalach ~ 1 TeV.

To jednak nie musi być supersymetria.

W ostatnich 2-3 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

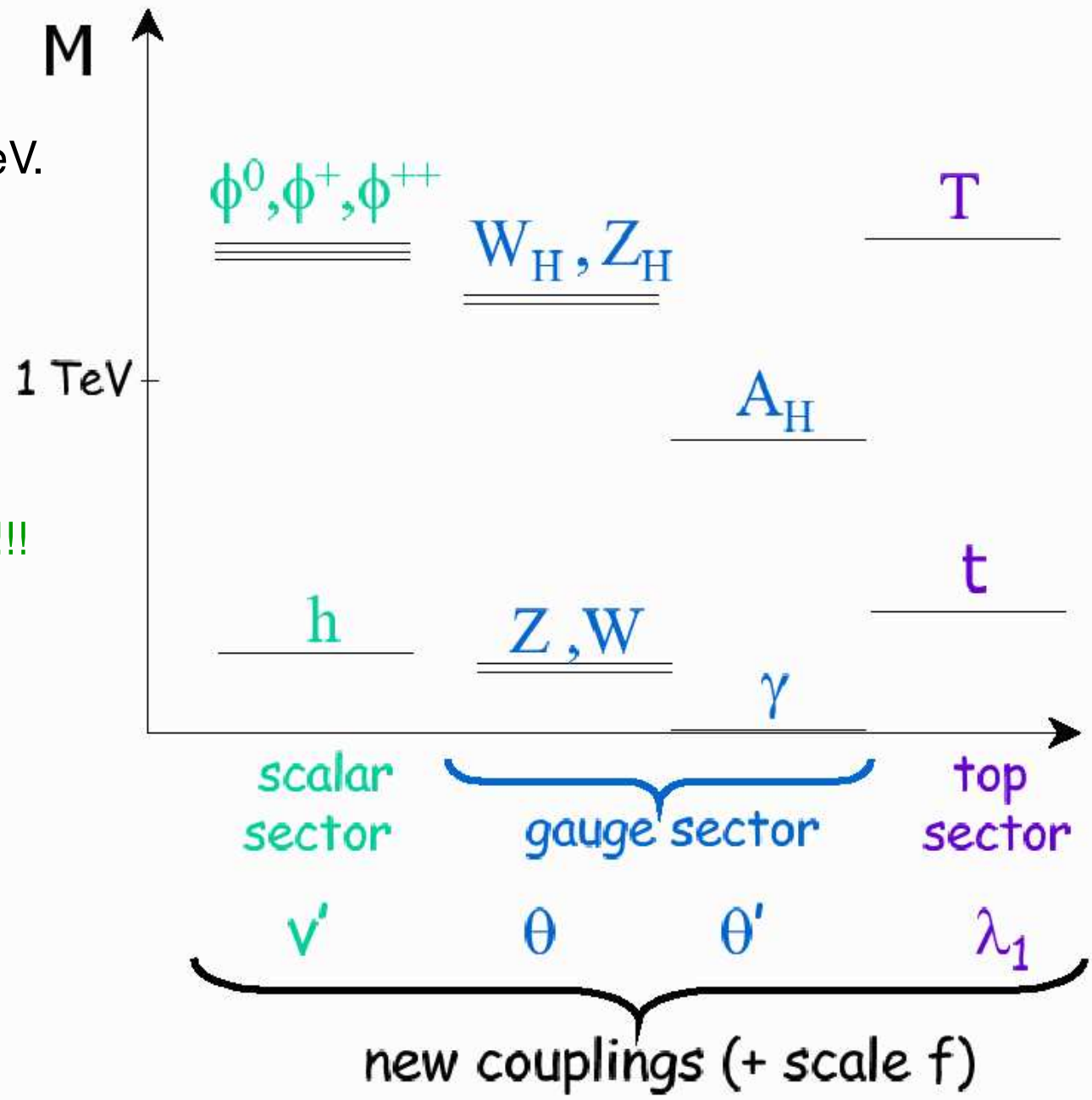
Kasowanie uzyskujemy poprzez odpowiedni wybór sprzężeń nowych cząstek.

Nie rozwiązujemy problemu hierarchi do skali GUT, ale odsuwamy go do skali ~ 10 TeV...

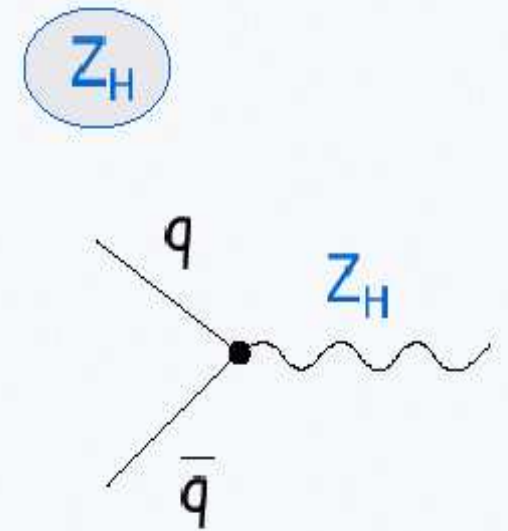
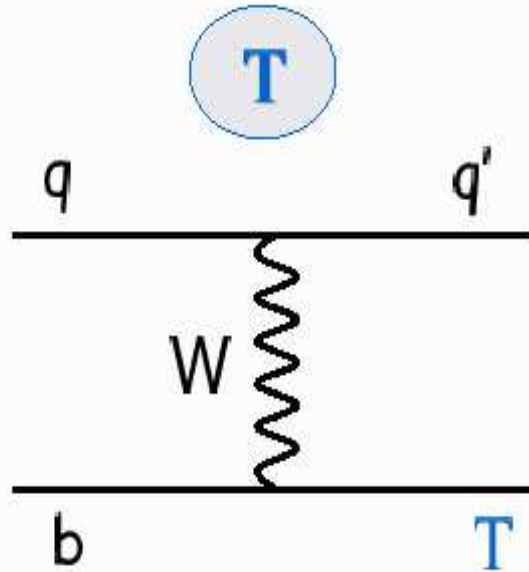
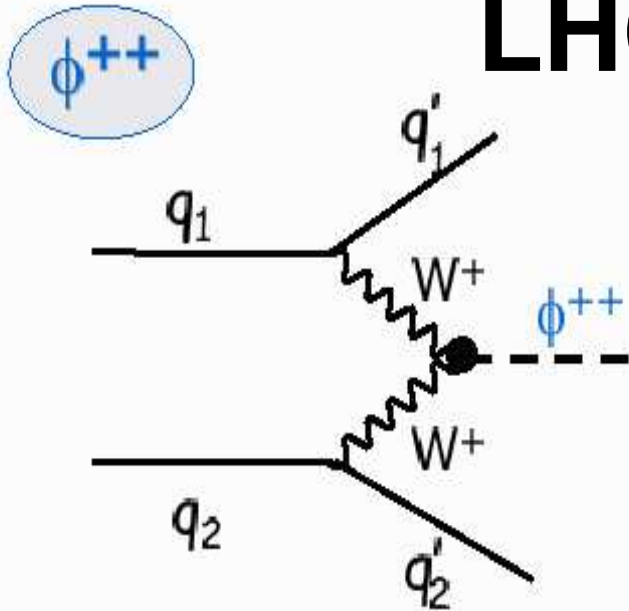
Wszystkie nowe cząstki
powinny mieć masy rzędu 1 TeV.

⇒ 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.

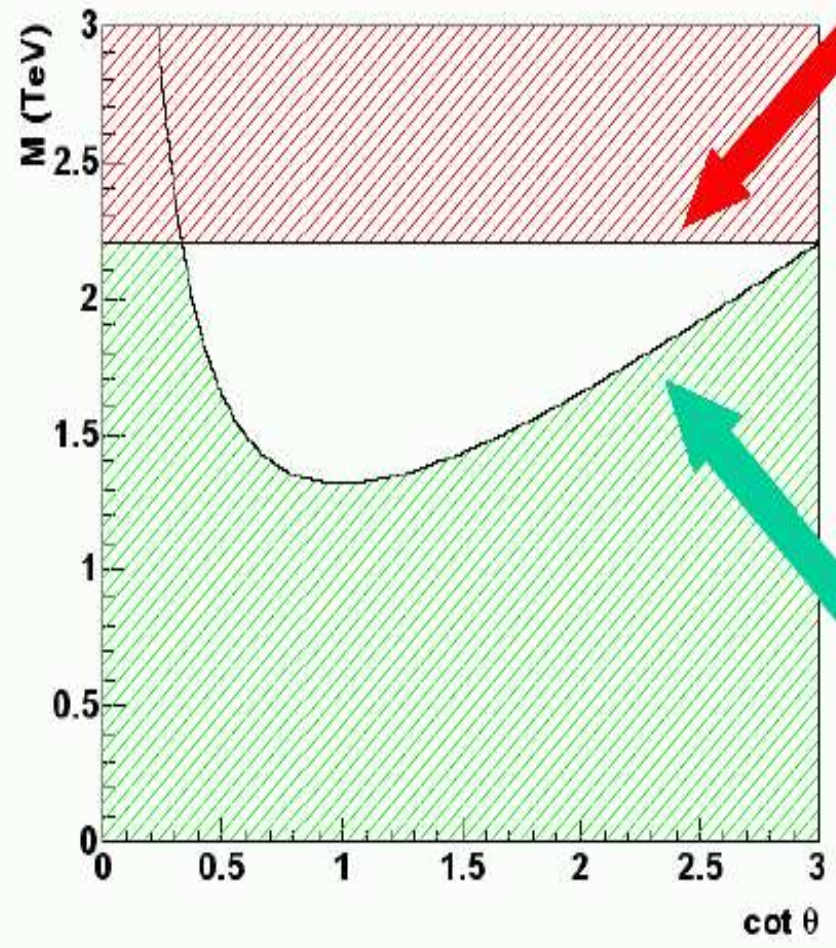
$$Z_H \rightarrow \underbrace{e^+e^-}_{\text{clear signal}}$$

$$M(Z_H) \approx m_W (f/v) [\cot \theta + 1/\cot \theta]$$

f = scale for new physics
 v = Fermi scale (244 GeV)

Istnienie nowych cząstek przy masie 1–2 TeV
 wciąż nie jest wykluczone przez
 precyzyjne pomiary.

Avoid fine tuning $\Rightarrow M < 2.2$ TeV
 (assuming $m_h = 120$ GeV)



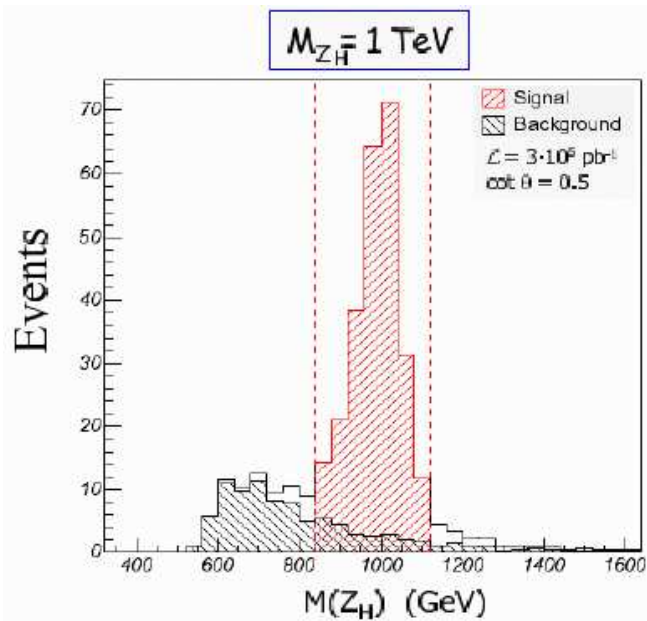
M expected in 1-2 TeV
 region with wide range
 of $\cot \theta$ parameter.

Agree with EW data $\Rightarrow f > 2$ TeV

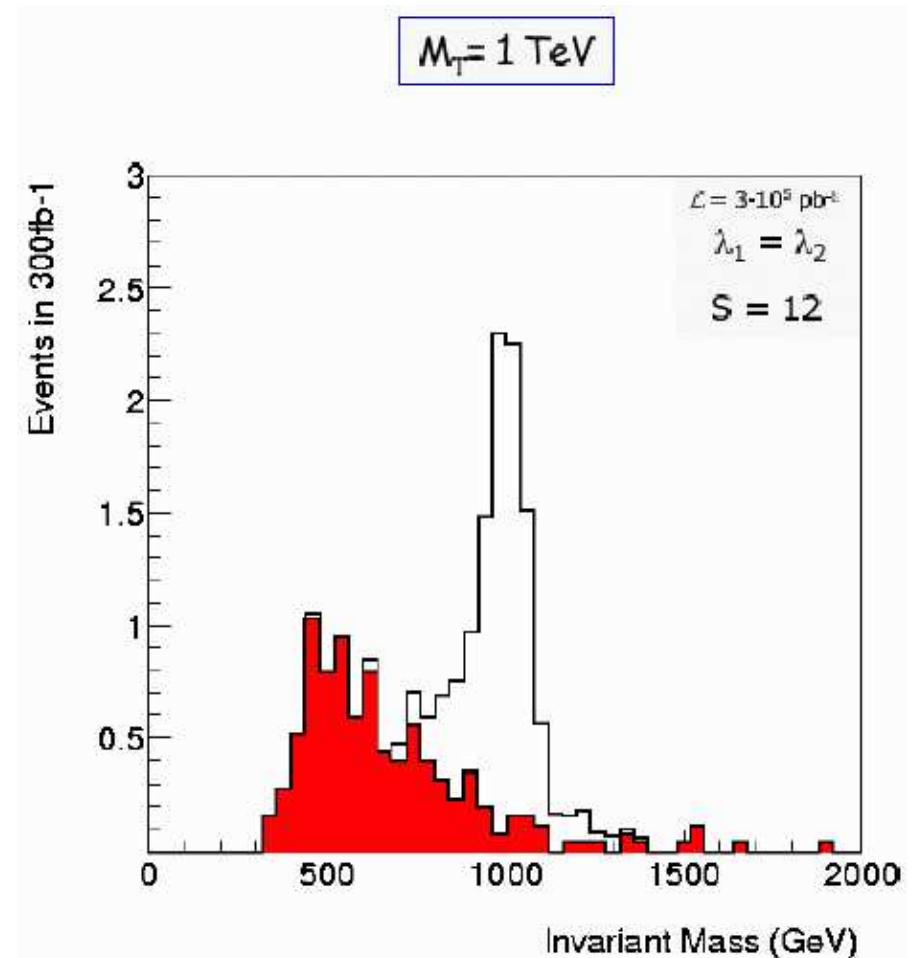
Mały Higgs

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 hierarchi...

Należy spodziewać się, że w następnych latach pojawią się kolejne modele...