Supersymetria

Elementy fizyki cząstek elementarnych
Wykład XI

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

Model Standardowy

Przypomnienie

Cząstki materii ⇒ **fermiony**
Lewoskrętne (słabe) dublety i prawoskrętne singlety.
Pierwsza generacja:

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

kwarki $\times$3 (kolor)
$\times$3 generacje
$\times$2 (antycząstki)

Odziaływania ⇒ **bozony** cechowania
Grupa cechowania U(1)$\times$SU(2)$\times$SU(3):

oddziaływanie	*symetria*	*nośniki*
elektro –	U(1)	γ
– słabe	SU(2)	W^+, W^-, Z°
silne	SU(3)	8 gluonów

Spontaniczne łamanie symetrii
⇒ **masy** bozonów cechowania, cząstka Higgsa

Oddziaływanie z cząstką Higgsa ⇒ **masy** fernmionów

Model Standardowy

Wszystkie obecnie dostępne dane zgodne są z Modelem Standardowym.

ale...

Pytania i problemy

- 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,
  które trzeba "ręcznie" dopasowywać...
- ogromne różnice mas
  $\Rightarrow$ "problem hierarchii"

Model Standardowy

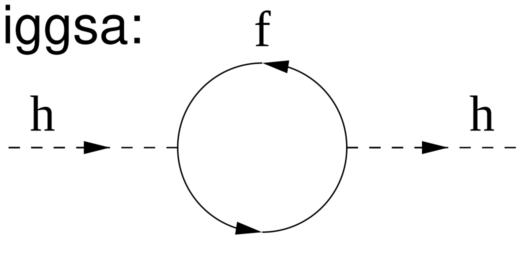
Skale masowe

neutrina	$\sim 10^{-11}$ GeV
elektron	$\sim 10^{-3}$ GeV
$W^{\pm}$, Z°, 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 Λ^2.

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

Supersymetria

Problem hierarchii

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

$\Rightarrow$ dodać nowe oddziaływania i nową skale $\Lambda' \ll \Lambda$
$\rightarrow$ czekamy na przesładnki doświadczalne...

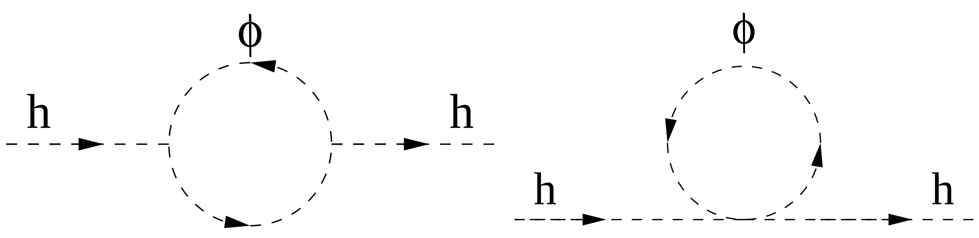
$\Rightarrow$ obniżyć skalę Λ do ~ 1 TeV
$\rightarrow$ dodatkowe wymiary (za tydzień)

$\Rightarrow$ doprowadzić do kasowania się poprawek

$\rightarrow$ 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.

$\Rightarrow$ aby "uratować" m_h potrzebujemy nowych cząstek (bozonów) przy skalach ~ 1 TeV.

Supersymetria

Zaproponowana ∼1970 na podstawie
czysto teoretycznych spekulacji...

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

Podstawy teorii

⇒ Zachowujemy grupę cechowania U(1)×SU(2)×SU(3)

⇒ Dla każdej cząstki Modelu Stnadardowego dodajemy jej "super-partnera" o spinie różnym o $\frac{1}{2}$:

fermion (s=$\frac{1}{2}$)	→	**s**fermion (s=0)
bozon cechowania (s=1)	→	gaugino (s=$\frac{1}{2}$)
Higgs (s=0)	→	higgsina (s=$\frac{1}{2}$)

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

Taki scenariusz jest wykluczony, bo nie istnieją lekkie cząstki supersymetryczne (o masach ∼ 1 GeV)

⇒ Supersymetria musi być "złamana"

Ale jeśli łamanie jest spontaniczne, to nie możemy uzyskać różne masy nie psując (zbytnio) teorii...

Supersymetria

Widmo cząstek

	spin 0	spin $\frac{1}{2}$	spin 1
(s)leptony	$\begin{pmatrix} \tilde{e}_L \\ \tilde{\nu}_e \end{pmatrix}$ $\tilde{e}_R$	$\begin{pmatrix} e_L \\ \nu_{e_L} \end{pmatrix}$ e_R	
(s)kwarki	$\begin{pmatrix} \tilde{u}_L \\ \tilde{d}_L \end{pmatrix}$ $\tilde{u}_R$ $\tilde{d}_R$	$\begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix}$ u_R d_R	
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°, H°, A° $H^{\pm}$	$\tilde{H}_1^{\circ}$, $\tilde{H}_2^{\circ}$ $\tilde{H}^{\pm}$	

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 $\Rightarrow$ dwie różne cząstki !!!
  (choć mogą mieć tą samą masę i inne właściwości)

- Aby nadać masy większej liczbie cząstek musimy
  "rozszerzyć" sektor Higgsa
  Dwa dublety Higgsa w Modelu Standardowym
  (możliwe także bez wprowadzania SUSY)
  $\Rightarrow$ 8 - 3 = 5 cząstek:

h°	lekki Higgs skalarny
H°	ciężki Higgs skalarny
A°	Higgs pseudoskalarny
$H^\pm$	naładowane Higgsy

$\Rightarrow$ 4 higgsina 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°.

$\Rightarrow$ w ogólności mieszanie pól w SUSY może być inne, w mieszanie włączone są także “nowe” pola Higgsa

$\tilde{\gamma}, \tilde{Z}, \tilde{H}^\circ_1, \tilde{H}^\circ_2$	$\Rightarrow$	$\tilde{\chi}^\circ_1, \tilde{\chi}^\circ_2, \tilde{\chi}^\circ_3, \tilde{\chi}^\circ_4$	neutralina
$\tilde{W}^\pm, \tilde{H}^\pm$	$\Rightarrow$	$\tilde{\chi}^\pm_1, \tilde{\chi}^\pm_2$	chargina

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
$\Rightarrow$ możemy “zejść” do (nowych) 4 parametrów...

Supersymetria

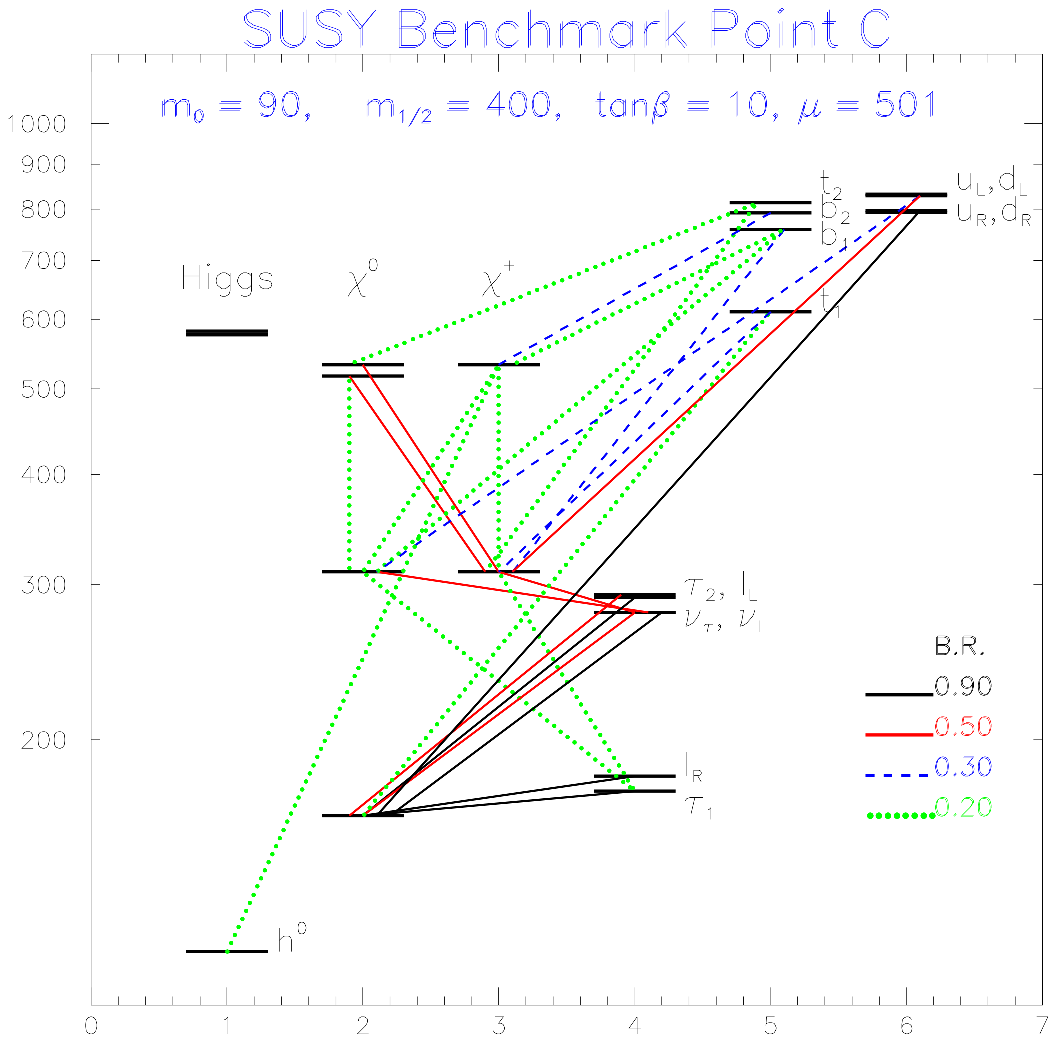
Puszka Pandory

Sami nie wiemy co nas czeka...

Supersymetria

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 dwuch dubletów Higgsa.

$\tan\beta \sim 1 \Rightarrow$ sprzężenia jak w Modelu Standardowym

Supersymetria

Przewidywania

• Pełna unifikacja oddziaływań
elektrosłabych i silnych
(przy odpowiednim doborze mas)

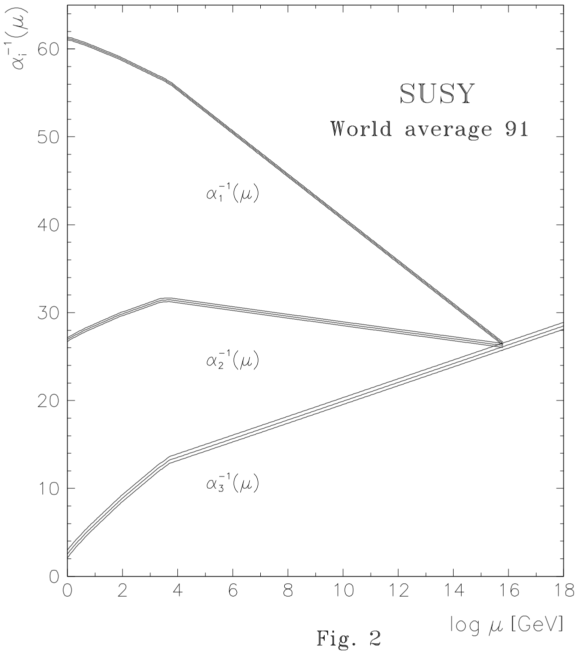


Fig. 2

• $\sin^2\theta_W \approx 0.23$

• Spontaniczne łamanie symetrii elektrosłabej
pojawia się "naturalnie" jesli

$$m_t \sim 175\,GeV$$

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

• najlżejszy bozon Higgsa

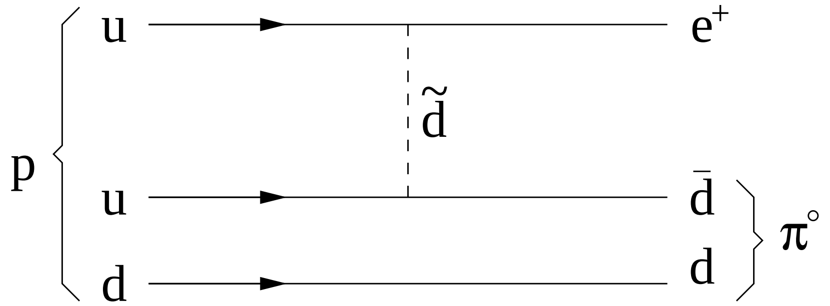
$$m_h \leq 135\,GeV$$

$\Rightarrow$ 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:



$$\tau \sim 10^{-10}\ s$$

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

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

$$\begin{array}{rll} R = & +1 & \text{dla cząstek ``standardowych''} \\ R = & -1 & \text{dla cząstek supersymetrycznych} \end{array}$$

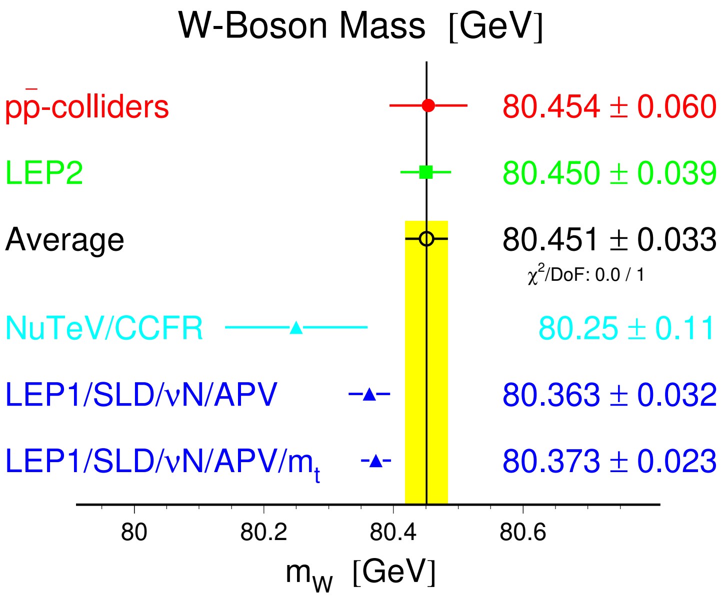
Postulat zachowania parzystości R ma daleko idące konsekwencje:

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

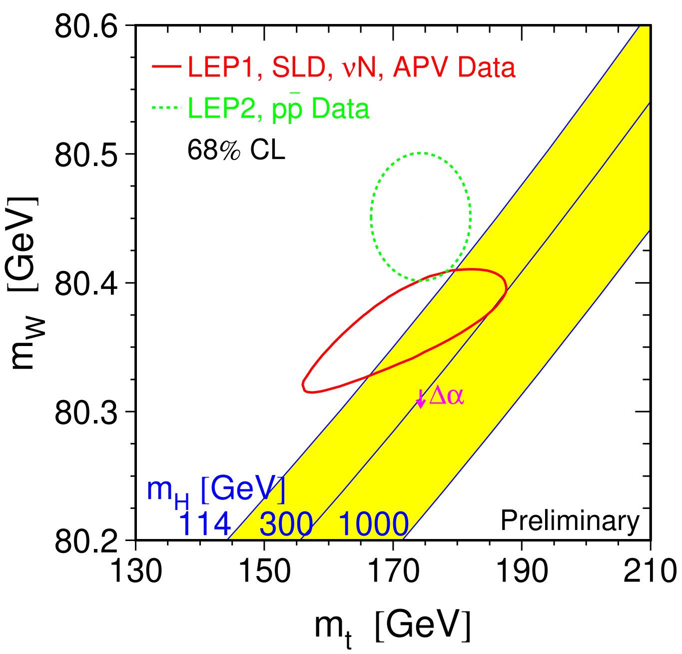
Poszukiwanie SUSY

Pierwsze ślady ?

Choć Model Standardowy bardzo dobrze opisuje dane, są pewne pojedyńcze pomiary, które wskazują na możliwe rozbieżności:



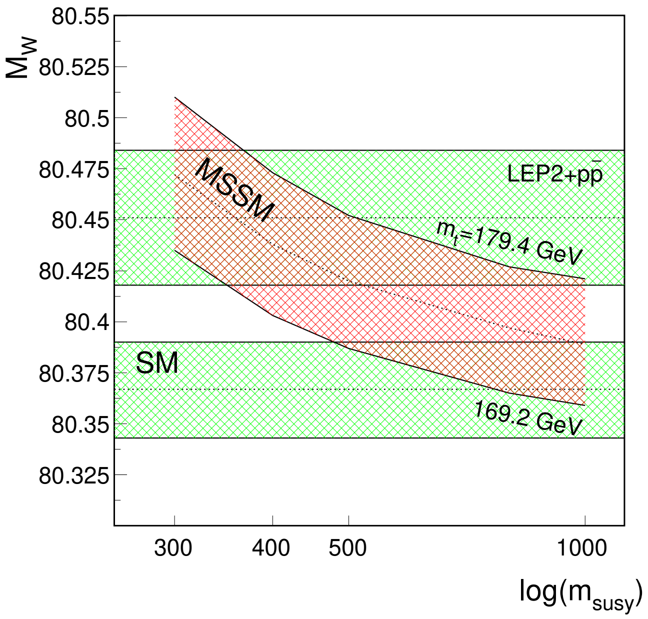
Wyniki pomiaru "wprost" (produkcja $W^{\pm}$) różnią się systematycznie od wyników pośrednich (z dopasowania SM).



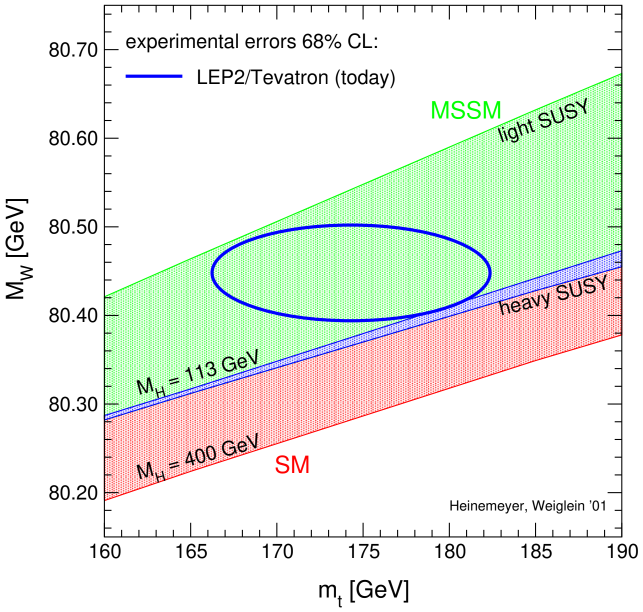
Poszukiwanie SUSY

Pierwsze ślady ?

SUSY tłumaczy rozbieżności w pomiarach masy $W^{\pm}$, jeśli cząstki supersymetryczne mają masy $\sim 300 - 500$ GeV:



Otrzymujemy bardzo dobrą zgodność z pomiarami m_t i M_W:



Poszukiwanie SUSY

Sleptony

Mogłyby być produkowane w LEP:

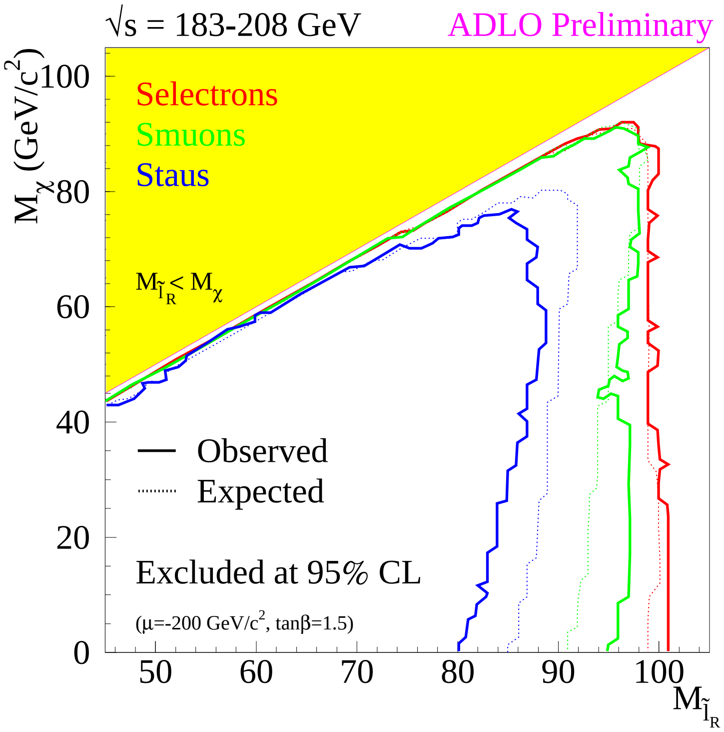
$$\begin{aligned} e^+e^- &\rightarrow \tilde{e}^+\tilde{e}^- \\ \text{rozpad:}\quad \tilde{e}^\pm &\rightarrow e^\pm\,\tilde{\chi}^\circ_1 \end{aligned}$$

Gdzie neutralino $\tilde{\chi}^\circ_1$ jest najlżejszą cząstką SUSY (LSP)
$\Rightarrow$ nie oddziałuje, nie podlega detekcji (ucieka jak neutrino)

Szukamy więc przypadków produkcji par leptonów z dużym brakującym pędem poprzecznym (unoszonym przez $\tilde{\chi}^\circ_1$):

$$e^+e^- \rightarrow l^+\ l^- + \not{p}_T$$

Nie obserwujemy takich przypadków:



$\Rightarrow$ wykluczamy istnienie $\tilde{l}$ o masach poniżej 80-100 GeV

Poszukiwanie SUSY

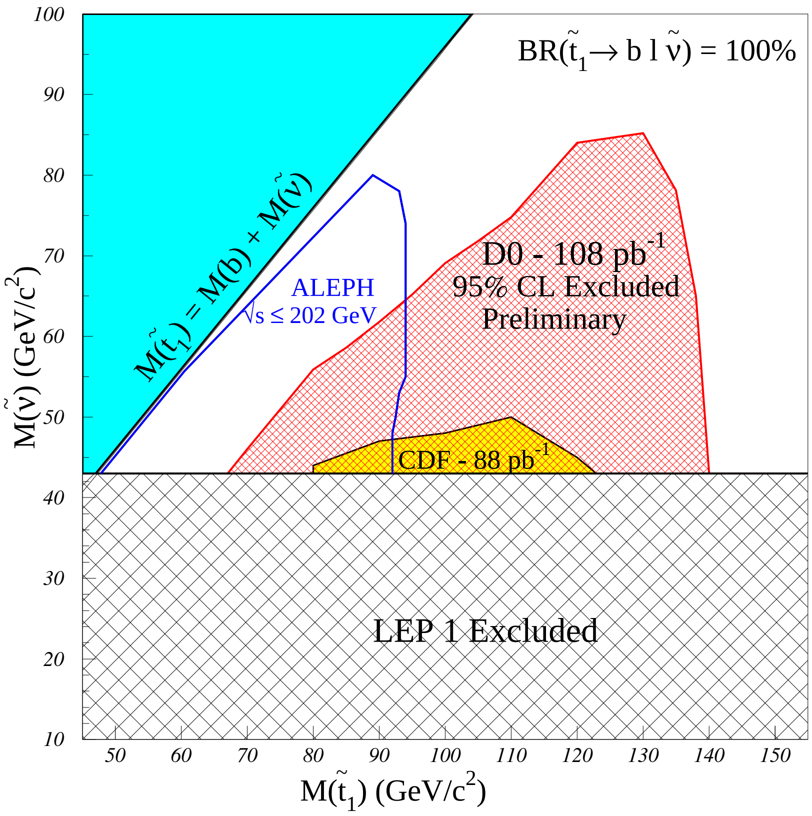
Stop

Stop powinien być najlżejszym skwarkiem
$\Rightarrow$ najłatwiejszy do wyprodukowania:

$$\begin{array}{lrcl} \text{LEP:} & e^+e^- & \to & \tilde{t}\,\bar{\tilde{t}} \\ \text{Tevatron:} & p\bar{p} & \to & \tilde{t}\,\bar{\tilde{t}}\,X \end{array}$$

Jeśli $\tilde{\nu}$ jest LSP to dominuje rozpad: $\tilde{t} \;\to\; b\; l\; \tilde{\nu}$
$\Rightarrow$ 2 leptony + 2 jety + $\not{p}_T$

Porównanie wyników z LEP i Tevatronu:

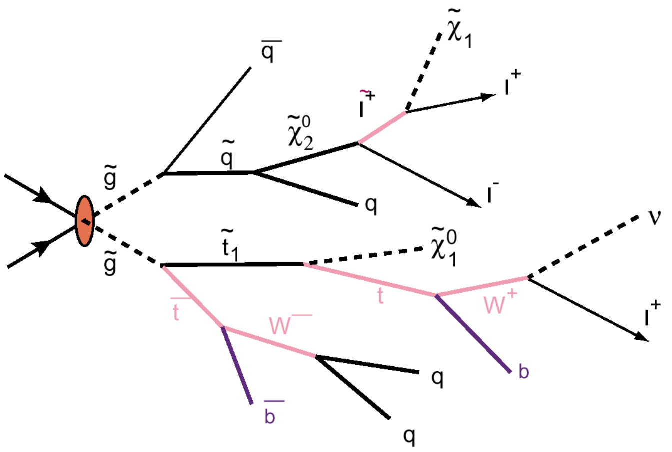


Dolne ograniczenie na masę $\tilde{\nu}$: z szerokości Z° w LEP I.

Poszukiwanie SUSY

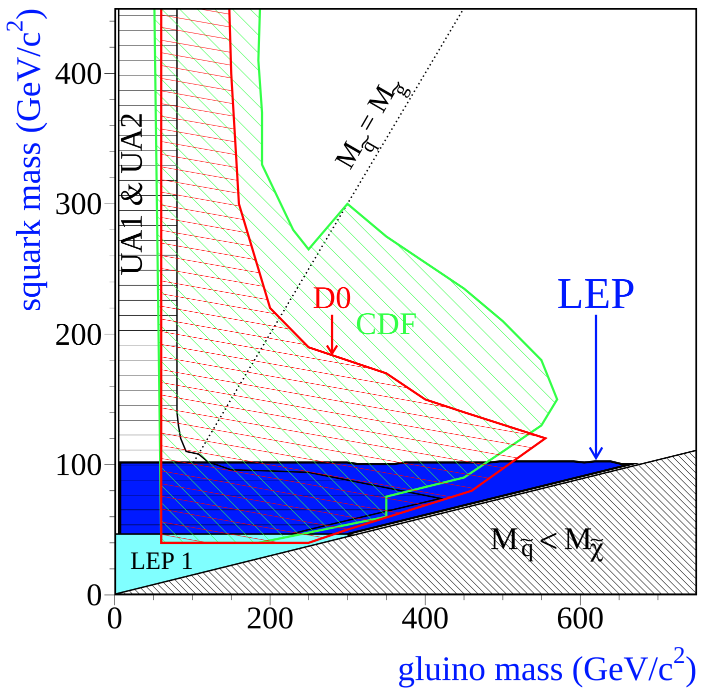
Skwarki i gluina

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



$\Rightarrow$ wiele jetów (+ leptony) + $\not{p}_T$

Nie obserwujemy nadmiaru tego typu przypadków $\Rightarrow$ limity:

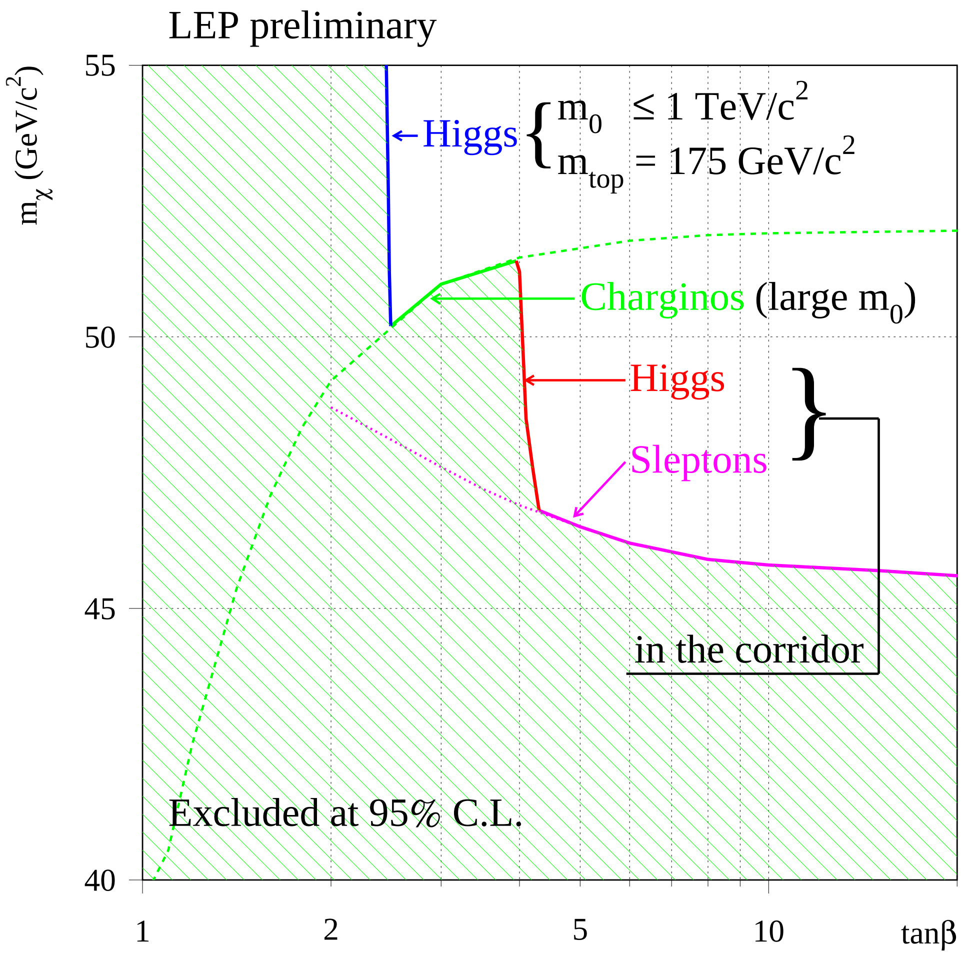


Poszukiwanie SUSY

LSP

Masa najlżejszej cząstki supersymetrycznej (najczęściej przyjmujemy, że jest nią $\tilde{\chi}^\circ_1$) decyduje o przebiegu wszystkich rozważanych procesów.

Przy dodatkowych założeniach (unifikacja mas sfermionów i gaugin przy skali GUT) można próbować wyznaczyć ograniczenia na masę $\tilde{\chi}^\circ_1$ nie zależne od mas innych cząstek:

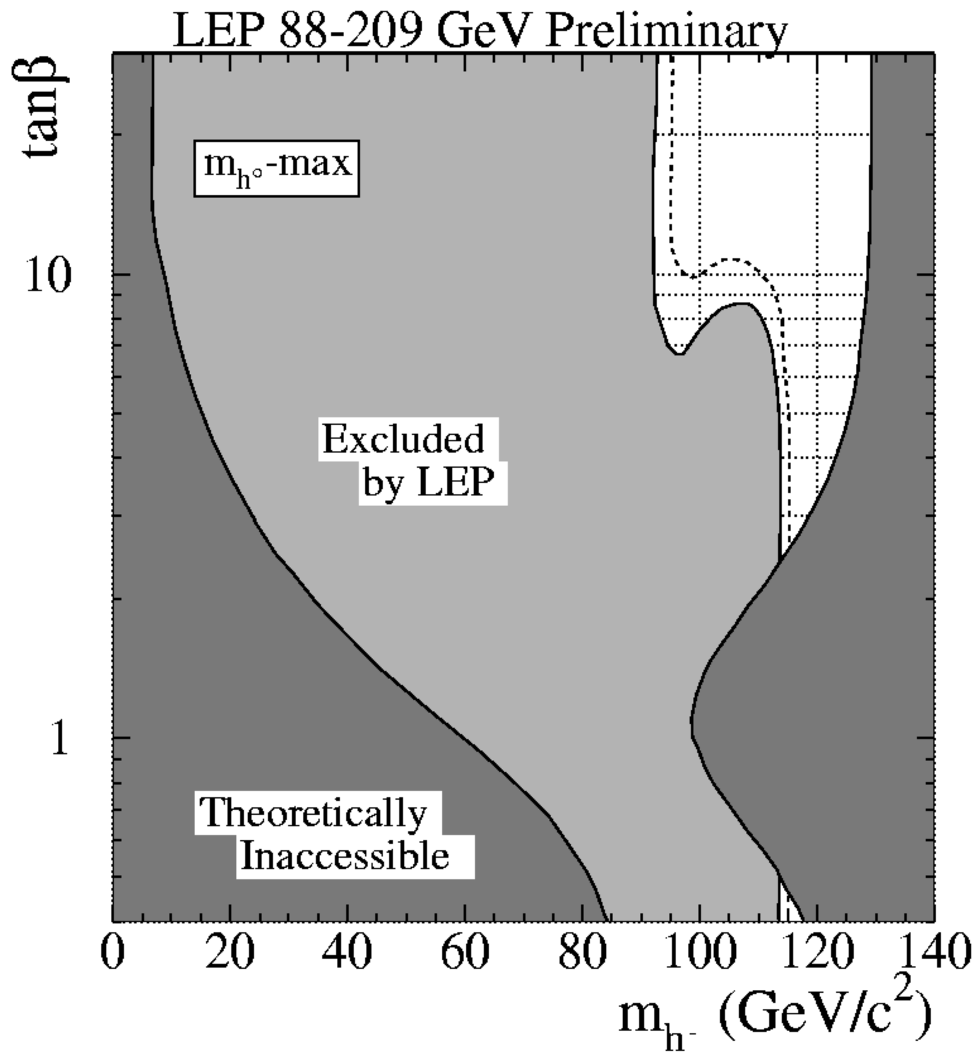


$$m_{LSP} > 45 \text{ GeV (95\% CL)}$$

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 !...

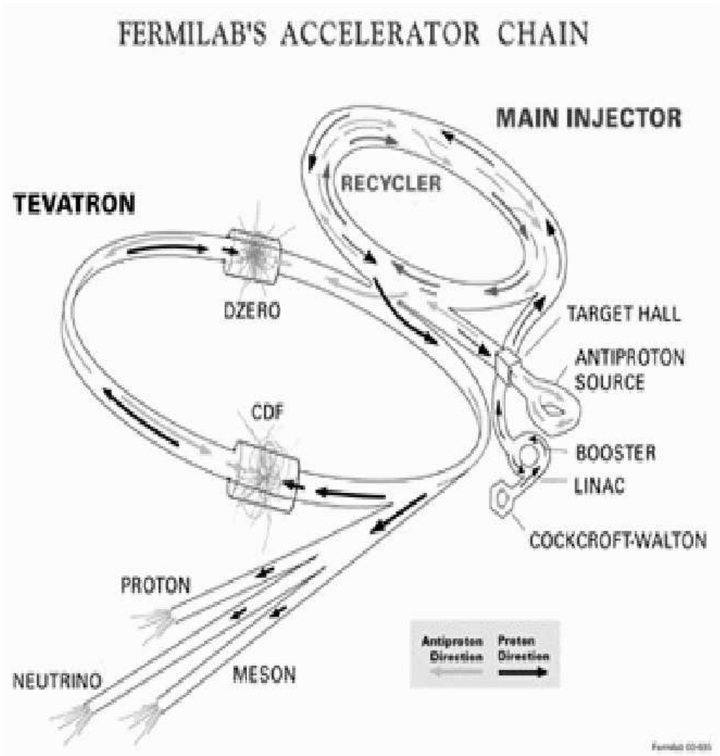
Higgs musi mieć masę $m_h \leq 135$ GeV
$\Rightarrow$ albo go znajdziemy, albo SUSY jest wykluczone !...

Przyszłe eksperymenty

Tevatron II

Uruchomiony niedawno po gruntownej modernizacji:

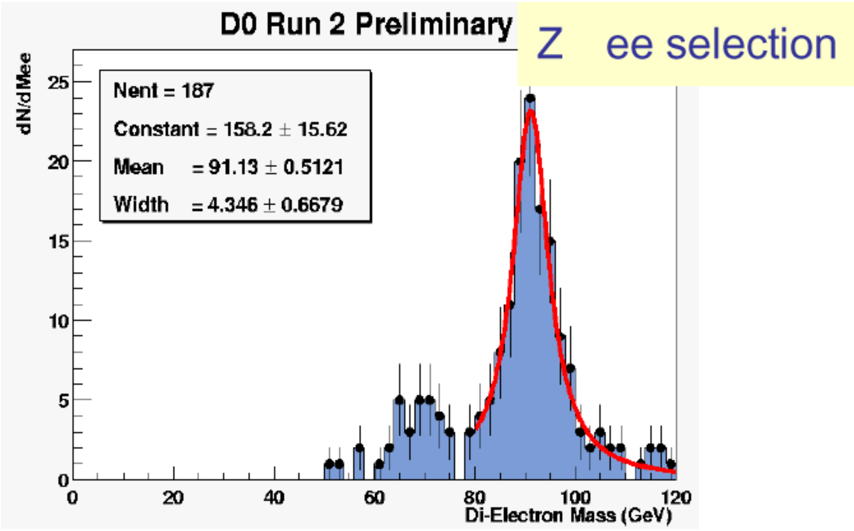
- dostępna energia $\sqrt{s} = 1.96$ TeV (było 1.8 TeV)
- świetlność $2 \cdot 10^{32}\ cm^{-2}s^{-1}$ (było $1.6 \cdot 10^{30}$),
  docelowo $5 \cdot 10^{32}\ cm^{-2}s^{-1}$.
  (choć chwilowo wciąż tylko $\sim 10^{31}\ cm^{-2}s^{-1}$ ...)
- planowane zebranie $\sim 2fb^{-1}$ do 2005 (Run IIa)
  i kolejnych $\sim 20fb^{-1}$ w latach następnych (Run IIb)
  (dotychczasowe dane $\sim 0.13fb^{-1}$)
- modernizacja i rozbudowa obu eksperymentów



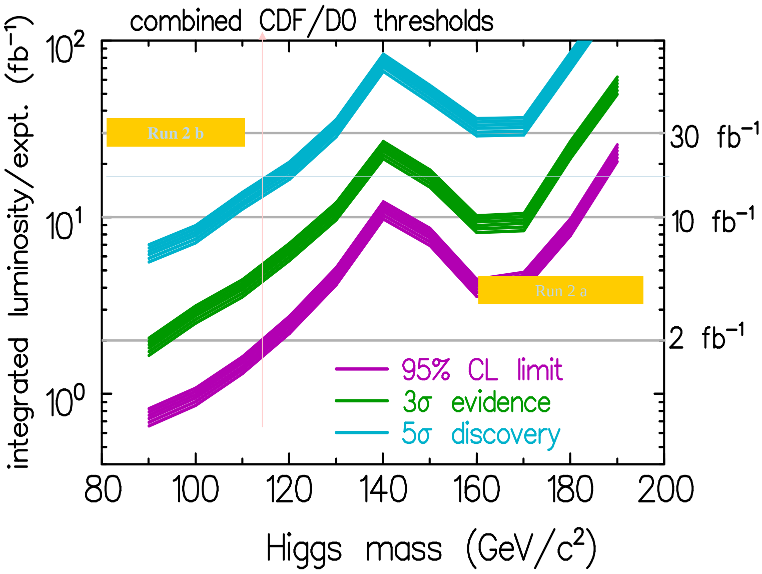
Przyszłe eksperymenty

Tevatron II

Pierwsze wyniki:



Perspektywy odkrycia Higgsa:



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

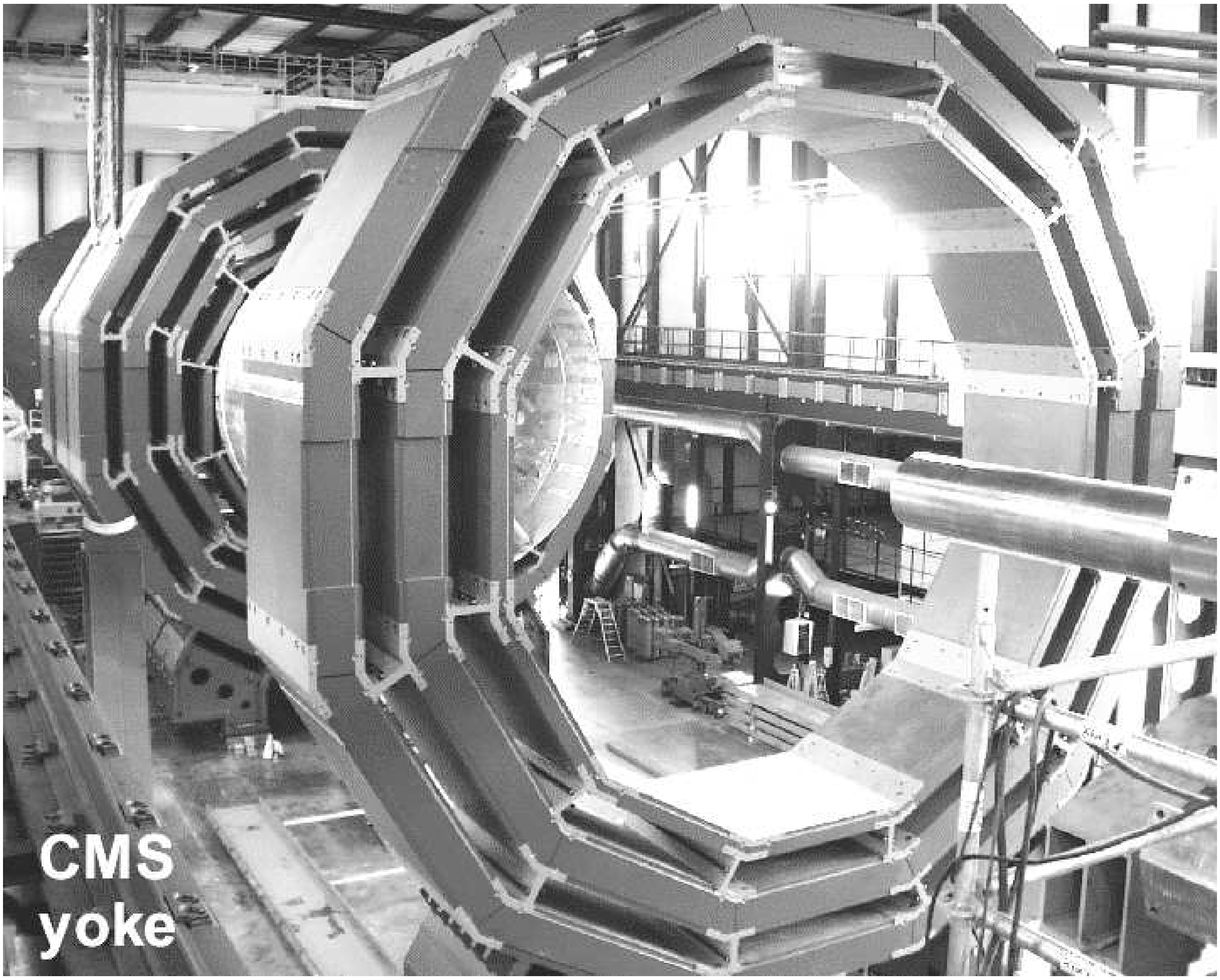
Brak sygnału $\Rightarrow$ koniec supersymetrii...

Przyszłe eksperymenty

LHC

“Fabryka” supersymetrii, w budowie.

Montarz jażma magnesu detektora CMS:

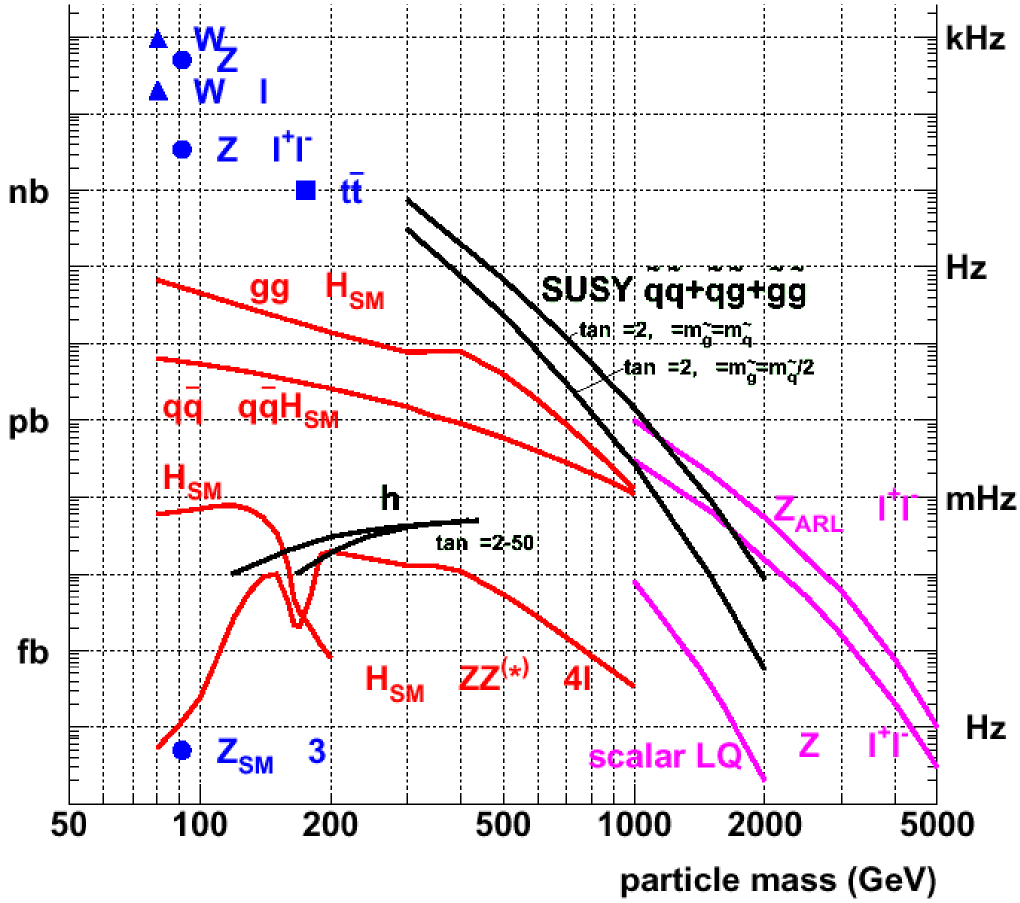


Uruchomienie LHC: 2007.

Przyszłe eksperymenty

LHC

Jeśli SUSY istnieje, LHC musi ją zobaczyć.



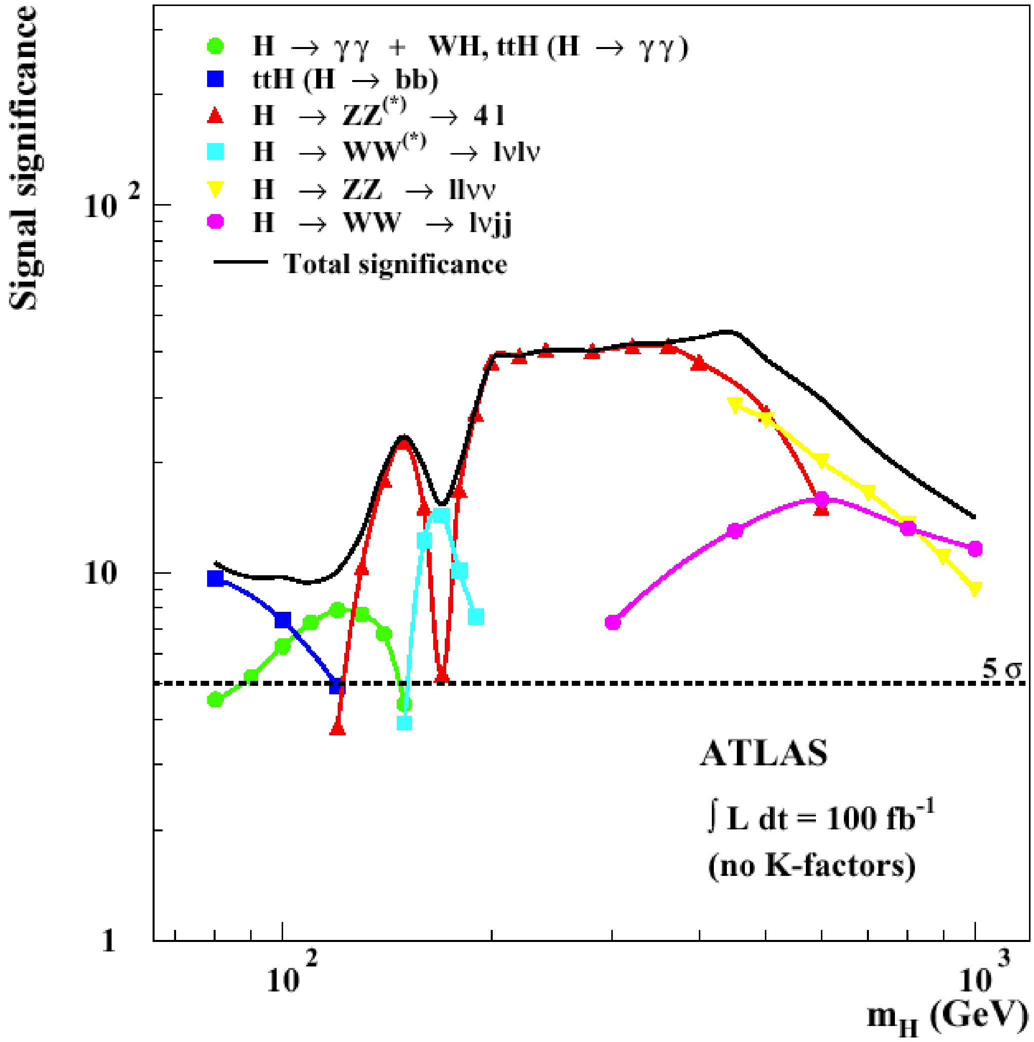
Częstość produkcji cząstek supersymetrycznych:

- od $\sim$ 3 Hz dla M_{SUSY} = 300 GeV
  $\Rightarrow > 10^7$ przypadków na rok
- do $\sim$ 0.0001 Hz dla M_{SUSY} = 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:



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

Powinno pomóc w poznaniu źródła łamania SUSY.

Przyszłe eksperymenty

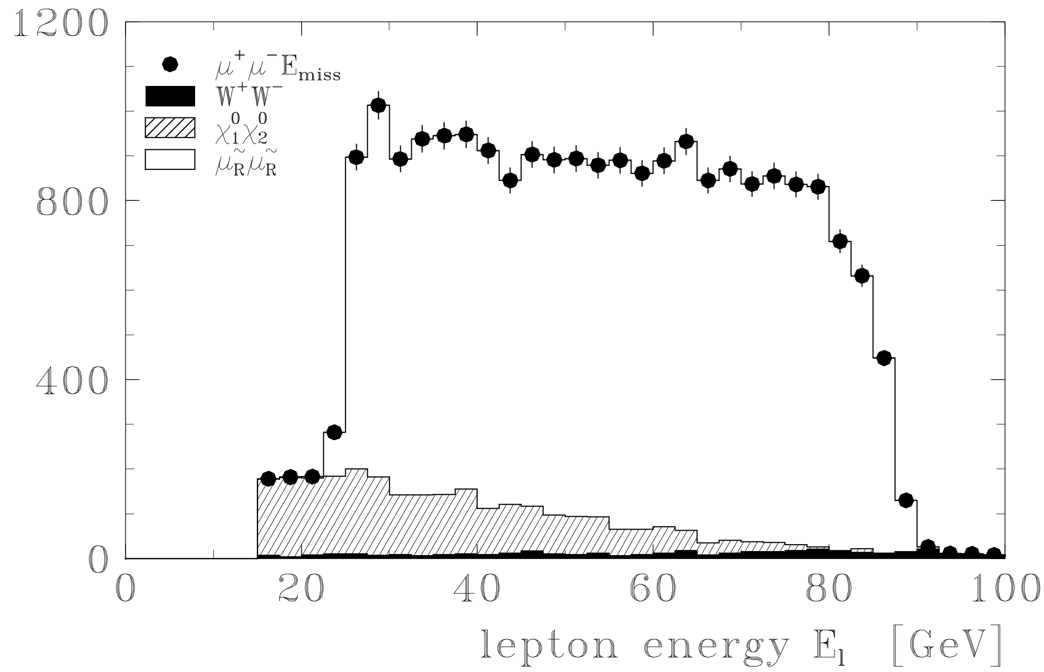
Tesla

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

Przykład: produkcja smionów

$$\begin{array}{rrcl} & e^+e^- & \rightarrow & \tilde{\mu}^+\tilde{\mu}^- \\ \text{rozpad:} & \tilde{\mu}^\pm & \rightarrow & \mu^\pm\, \tilde{\chi}_1^\circ \end{array}$$

Rozkład energii mionów z rozpadu smionów:



Kształt widma $\Longleftrightarrow$ spin (płaski $\rightarrow$ 0)

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