

Oltre il Modello Standard : Aspettative a LHC

Barbara Mele



Sezione di Roma

Large Hadron Collider :

collisioni $p p$ con

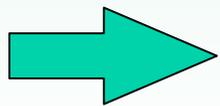
$$\sqrt{S} = 14 \text{ TeV}$$

$$\int L dt \approx 100 \text{ fb}^{-1}$$

- ➔ ◆ sonda scale di energia $\sim 1 \text{ TeV}$ e di lunghezza $\sim 10^{17} \text{ cm}$
 $\sim 1/10$ di quelle esplorate finora :
➔ *cosa ci aspettiamo di imparare ?*
- ◆ macchina estremamente complicata e costosa ➔ si vorrebbe avere una sorta di *“garanzia teorica”* del suo *potenziale di scoperta*
- ➔ ◆ probabile *rivoluzione* nella nostra comprensione della fisica delle interazioni fondamentali !

Confrontiamo il quadro delle **aspettative** di oggi con quello del precedente Collider adronico del CERN (CERN ppbar, 25 anni fa) ...

- ◆ col supporto di una grossa mole di dati sperimentali a più bassa energia era stato elaborato il **MODELLO STANDARD** delle interazioni fondamentali.
- ◆ $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ \longrightarrow **predizione univoca** di nuove scoperte
W, Z, H, top,
libertà asintotica delle int. forti ...



Test di un modello teorico solidamente costruito e strettamente predittivo !!! \longrightarrow

Aspettative nel 1981 (parte il collider p - $pbar$ del CERN)

- 1966/67 descrizione unificata delle int. deboli ed e.m. con teoria di gauge $SU(2) \times U(1)$ (Weinberg, Salam)
- 1971 rinormalizzabilità della teoria (t'Hooft, Veltman)
- 1973 scoperta correnti neutre al CERN
- 1979 premio Nobel a Weinberg, Salam e Glashow



Teoria solida e affidabile, che descrive interazioni *osservate!*

nuove p.lle aspettate: W, Z, H, quark top

- negli anni '70 si sviluppa anche la teoria della QCD per descrivere le int. forti

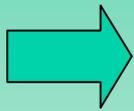


libertà asintotica  *fisica dei jet*

le aspettative di fisica al collider p - $pbar$ erano relativamente *ben definite...*

Aspettative **OGGI** (a più di 3 anni dalla partenza di LHC)

- il Modello Standard esce incredibilmente rafforzato da 25 anni di test sempre più accurati (*LEP, TeVatron, esperimenti a media e bassa energia...*)



$SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ è la teoria delle int. fondamentali a scale di energie $E \sim 100 \text{ GeV}$ ($l \sim 10^{-16} \text{ cm}$)

- bosone di Higgs : **non ancora osservato !**

limite diretto :

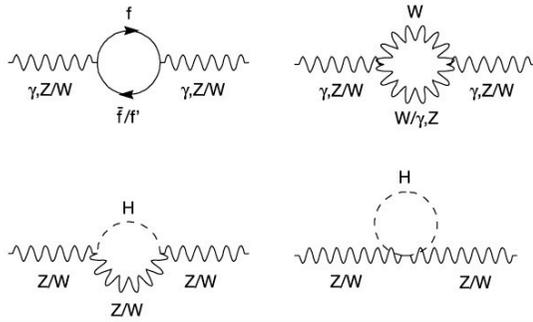
$$m_H > 114.4 \text{ GeV} \quad 95\%CL$$

LEP

+

misure di precisione :

$$m_H \in (100 \div 200) \text{ GeV}$$



$\square \log m_H$

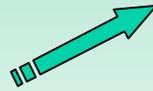
limite *indiretto* :

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

$$m_H \square 219 \text{ GeV} \quad (95\% \text{Cl})$$

problemi con $A_{fb}^{0,b}$???

problemi con NuTeV ?



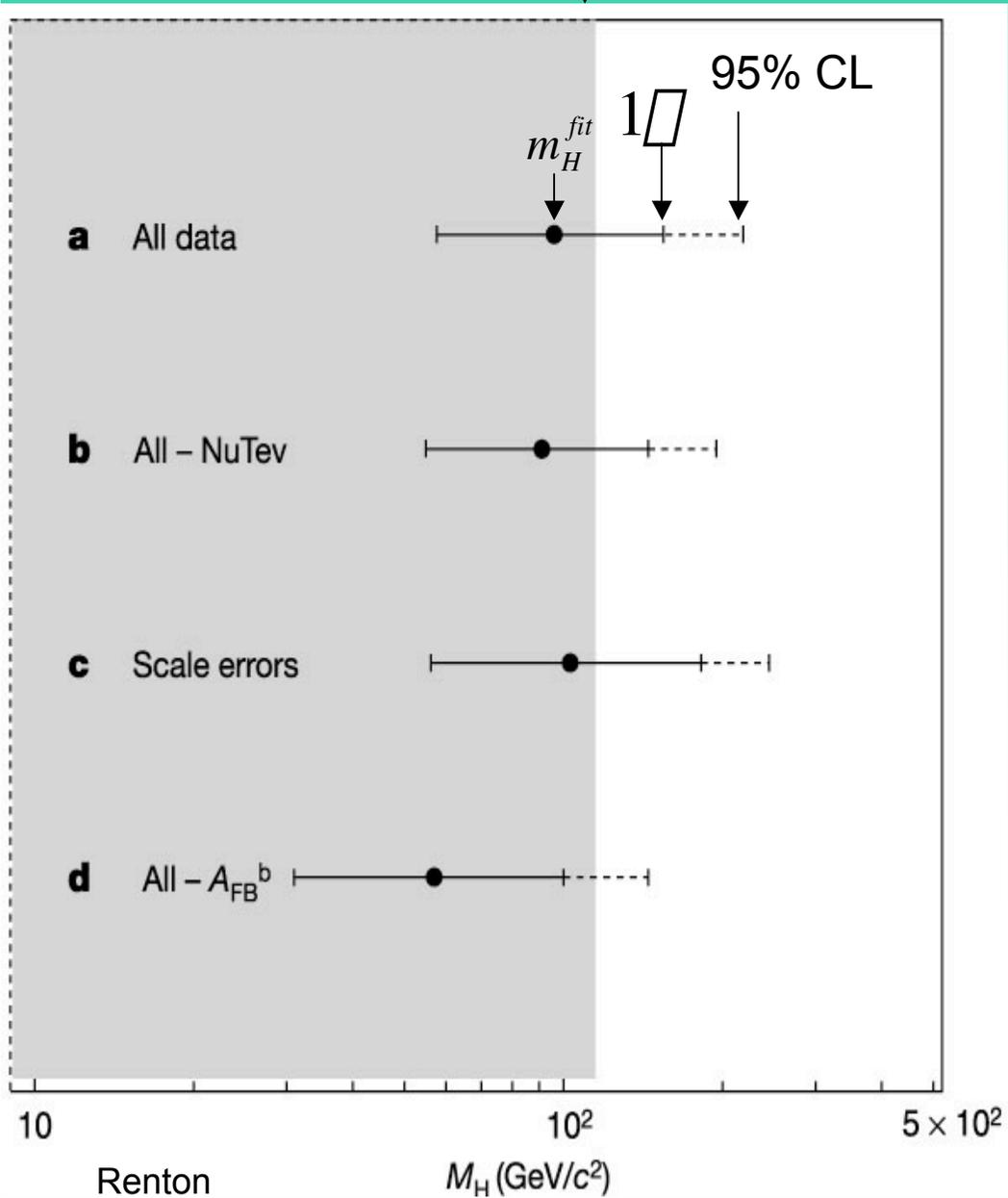
Summer 2003

	Measurement	Fit	$\frac{O^{\text{meas}} - O^{\text{fit}}}{\sigma^{\text{meas}}}$
$\Delta\alpha_{\text{had}}^{(5)}(m_Z)$	0.02761 ± 0.00036	0.02767	0.1
m_Z [GeV]	91.1875 ± 0.0021	91.1875	0.0
Γ_Z [GeV]	2.4952 ± 0.0023	2.4960	0.3
σ_{had}^0 [nb]	41.540 ± 0.037	41.478	1.7
R_l	20.767 ± 0.025	20.742	1.0
$A_{fb}^{0,l}$	0.01714 ± 0.00095	0.01636	0.8
$A_l(P_\tau)$	0.1465 ± 0.0032	0.1477	0.3
R_b	0.21638 ± 0.00066	0.21579	0.9
R_c	0.1720 ± 0.0030	0.1723	0.1
$A_{fb}^{0,b}$	0.0997 ± 0.0016	0.1036	2.4
$A_{fb}^{0,c}$	0.0706 ± 0.0035	0.0740	1.0
A_b	0.925 ± 0.020	0.935	0.5
A_c	0.670 ± 0.026	0.668	0.1
$A_l(\text{SLD})$	0.1513 ± 0.0021	0.1477	1.7
$\sin^2\theta_{\text{eff}}^{\text{lept}}(Q_{fb})$	0.2324 ± 0.0012	0.2314	0.8
m_W [GeV]	80.426 ± 0.034	80.385	1.2
Γ_W [GeV]	2.139 ± 0.069	2.093	0.8
m_t [GeV]	174.3 ± 5.1	174.3	0.0
$\sin^2\theta_W(\nu N)$	0.2277 ± 0.0016	0.2229	2.9
$Q_W(\text{Cs})$	-72.84 ± 0.46	-72.90	0.1

(fit su 20 misure)

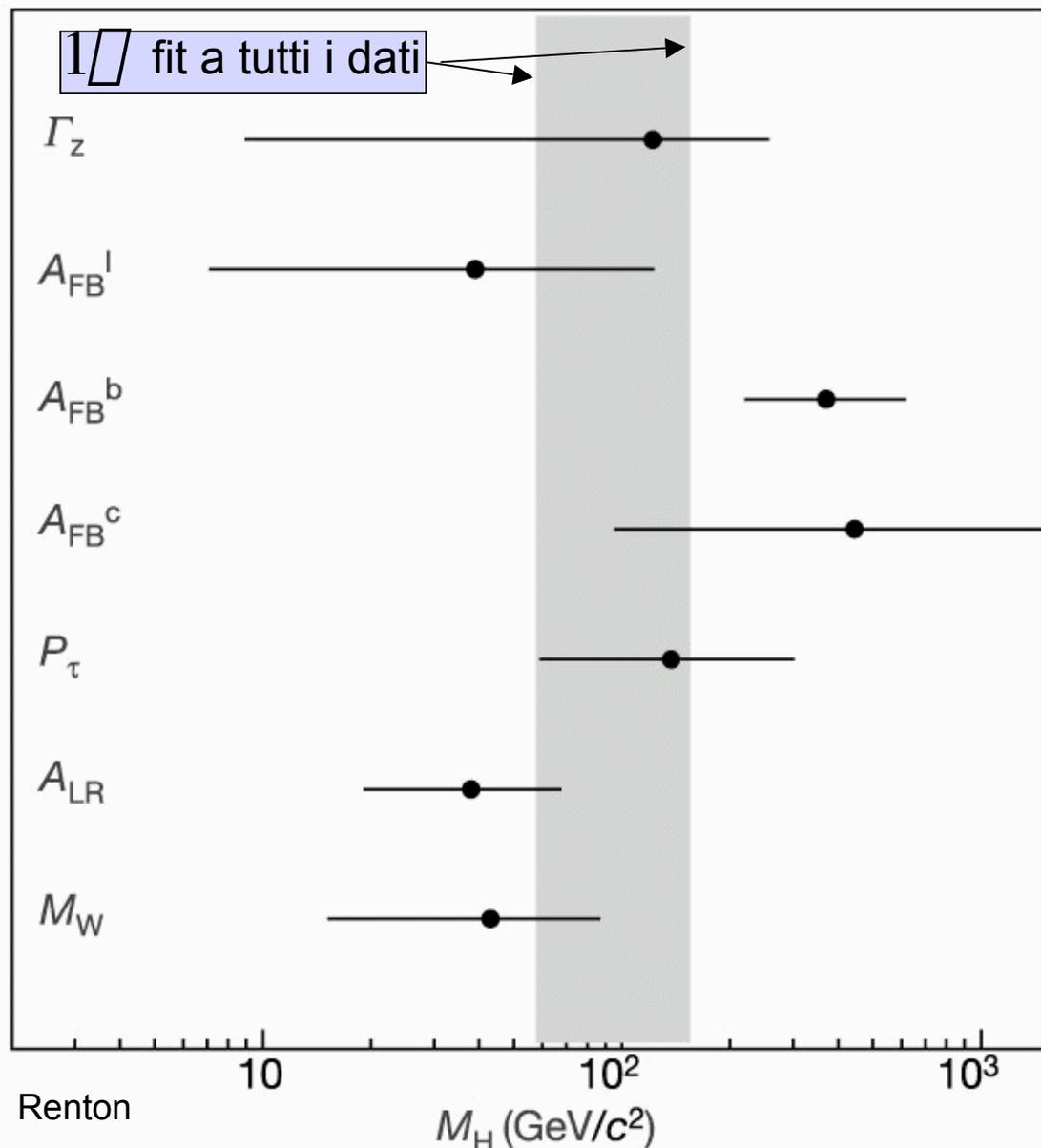
LIMITE DIRETTO

Qualità del fit non eccellente !



m_H^{fit}	m_H^{max} (95%CL)	Prob(fit)
96	219	5%
91	195	28%
57	143	17%
		
Prob($m_H > 114 GeV$) ~ 11%		

misure più sensibili a m_H :



- le asimmetrie *adroniche* preferiscono un *higgs pesante* !

($A_{fb}^{0,b}$ dominante !)

- le asimmetrie *leptoniche* preferiscono un *higgs più leggero del limite diretto* !

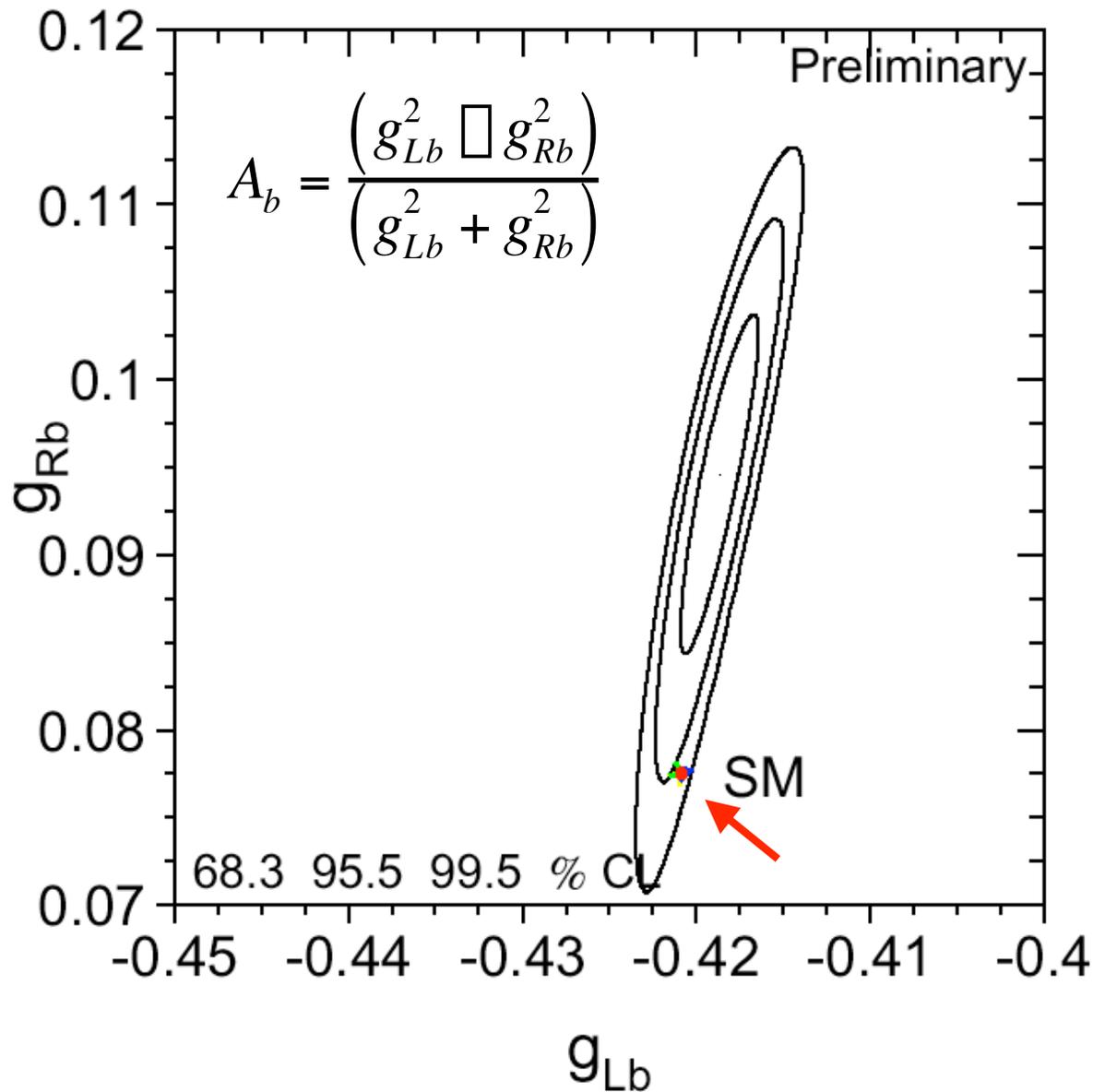
(anche M_W !)

- un fit *ristretto* a queste misure, che escluda $A_{fb}^{0,b}$, ha *Prob(fit) molto alta* ma è *incompatibile* col limite diretto !

NUOVA FISICA in $A_{fb}^{0,b} = \frac{3}{4} A_e A_b$?



deve produrre un eccesso in g_{Rb} del 25% !



(ma non in g_{Lb} !)

- richiede modelli *ad hoc* !

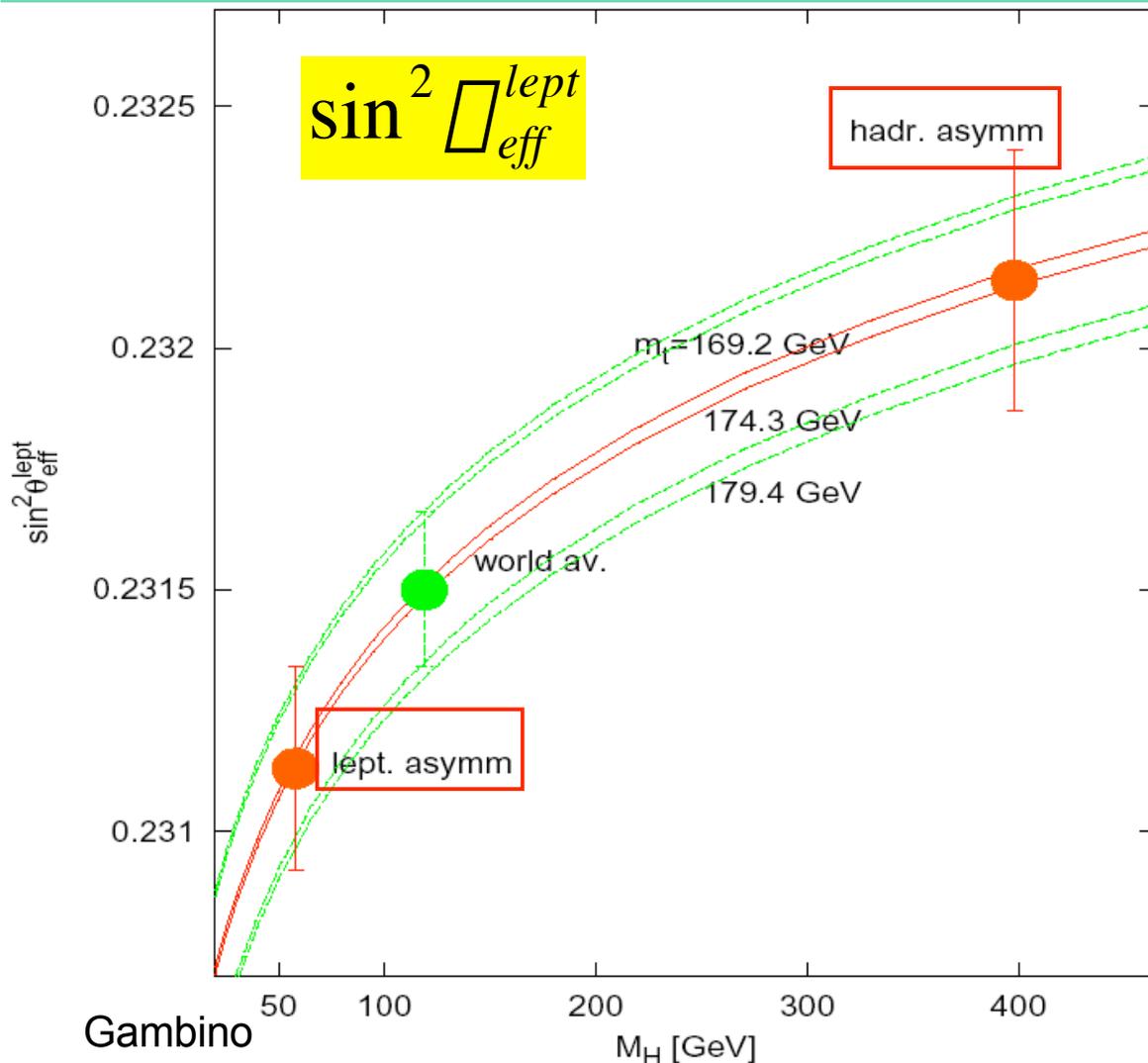
→ richiesta inevitabile di nuova fisica ?

(Chanowitz)

solo 2 possibilità : $\Delta A_{fb}^{0,b}$ è dovuto a

nuova fisica !

flutt. stat. o sistematiche sottostimate



fit "ristretto" che esclude $A_{fb}^{0,b}$
 descrive i dati con ottima Prob(fit)
 ma produce il limite :

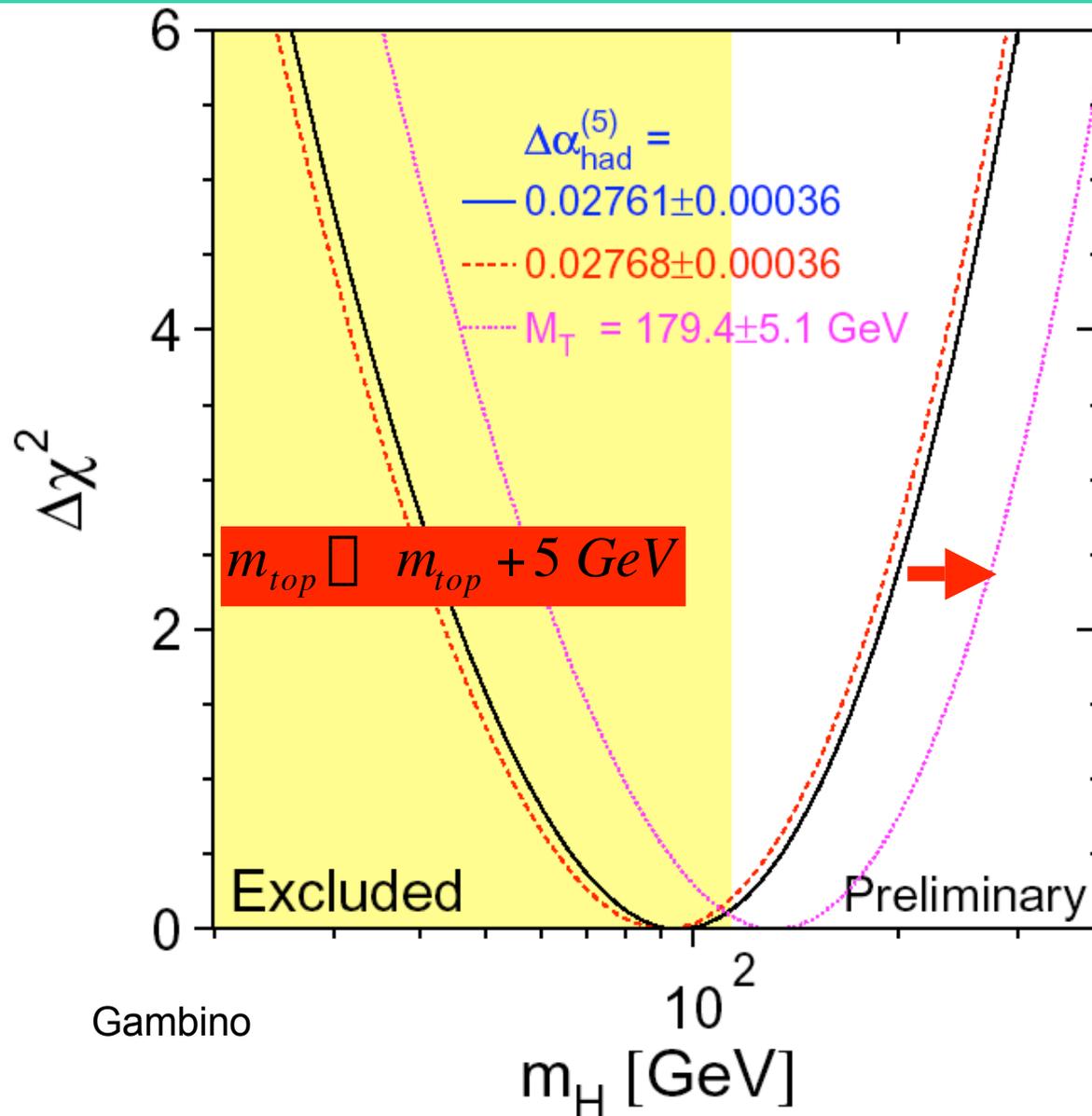
$$m_H < 120 \text{ GeV} \quad (95\%CL)$$

cf. limite diretto :

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

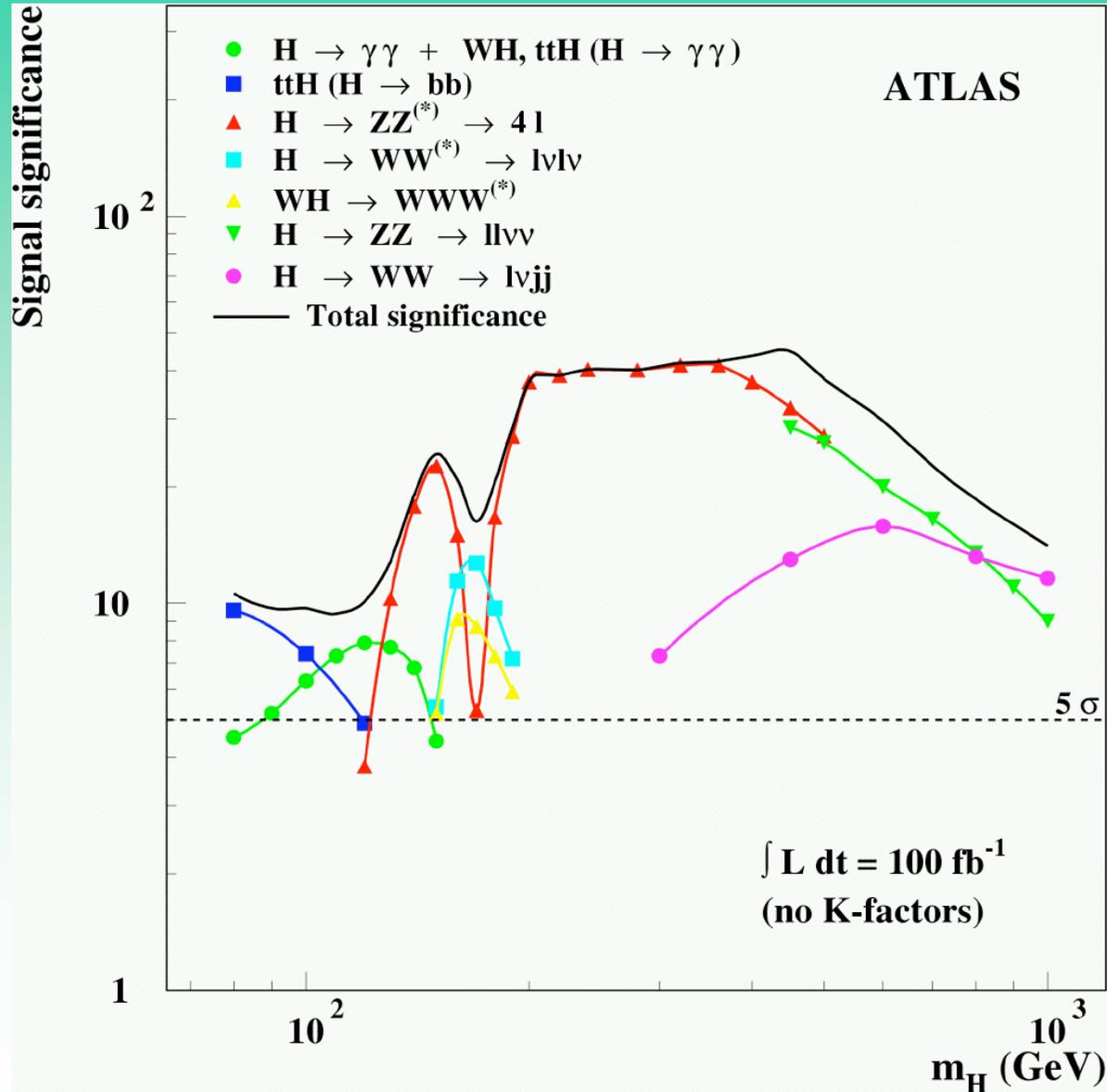
↓
 nuova fisica !

la “sofferenza” del fit complessivo si riduce al crescere di m_{top} !



- è *cruciale* una misura più precisa di m_{top} al Tevatron !

→ *LHC scopre il bosone di Higgs* (se esiste !)



cosa altro ?

ABBIAMO INDICAZIONI **DIRETTE** DI NUOVI FENOMENI
ALLA SCALA DEL **TEV** ???

NO !

MA SIAMO CONVINTI DI ESSERE ALLA **SOGLIA** DI UNA
RIVOLUZIONE NELLA NOSTRA CONOSCENZA DELLA
FISICA DELLE INT. FONDAMENTALI !!!



(*RAGIONI CONCETTUALI*)

sappiamo che il MS non è la teoria finale :

- masse dei *neutrini* non incluse
- non include *gravità*
- problemi di *gerarchia*
- *materia oscura*

- *unificazione* degli accoppiamenti
- *bariogenesi*
- valore *costante cosmologica*

- origine dei *parametri* fondamentali del modello
-



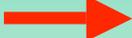
gerarchie di massa ?
struttura degli angoli di mixing ?

$$\frac{m_t}{m_u} \sim 10^5, \quad \frac{m_\tau}{m_e} \sim 10^3, \quad \frac{m_e}{m_\nu} \gtrsim 10^6$$

$$\mathcal{M}_{\text{CKM}} = \begin{pmatrix} 0.9745 - 0.9760 & 0.217 - 0.224 & 0.0018 - 0.0045 \\ 0.217 - 0.224 & 0.9737 - 0.9753 & 0.036 - 0.042 \\ 0.004 - 0.013 & 0.035 - 0.042 & 0.9991 - 0.9994 \end{pmatrix}$$

$$\mathcal{M}_{\text{MNS}} = \begin{pmatrix} 0.73 - 0.89 & 0.45 - 0.66 & < 0.24 \\ 0.23 - 0.66 & 0.24 - 0.75 & 0.52 - 0.87 \\ 0.06 - 0.57 & 0.40 - 0.82 & 0.48 - 0.85 \end{pmatrix}$$

sappiamo che il MS non è la teoria finale :

- masse dei neutrini non incluse
- non include gravità
- *problemi di gerarchia* 
- *materia oscura* 
- unificazioni degli accoppiamenti
- bariogenesi
- valore costante cosmologica

- origine dei parametri fondamentali del modello
- . . .

Nuova Fisica a LHC !

“ “ ?

PROBLEMA DELLA GERARCHIA

◆ instabilità dei campi scalari (cf. bosone di Higgs) nel MS !

→ divergenze quadratiche nel *cut-off* della teoria :

$$\begin{aligned}\delta m_H^2 &= \frac{3G_F}{4\sqrt{2}\pi^2} (2m_W^2 + m_Z^2 + m_H^2 - 4m_t^2) \Lambda_{SM}^2 \\ &= - \left(200 \text{ GeV} \frac{\Lambda_{SM}}{0.7 \text{ TeV}} \right)^2 \quad \uparrow\end{aligned}$$

◆ estendere la validità del MS fino a scale $\Lambda_{SM} \sim M_{Pl}$ implica una cancellazione **fortemente innaturale** tra valori a *tree-level* e correzioni radiative !

◆ *teoria naturale* implica **Nuova Fisica** a scale

$$\Lambda_{SM} \sim 1 \text{ TeV}$$

25 anni di intensa *attività teorica* per cercare di
“*parametrizzare*” $\square_{SM} \sim 1 \text{ TeV}$ in termini di un modello teorico
più *consistente* e *predittivo* possibile

PRINCIPALI STRATEGIE :

- ◆ *nuove simmetrie*
- ◆ *nuove interazioni*
- ◆ *nuove dimensioni spaziali*
(o combinazioni)

LEP pone *vincoli importanti* alla struttura del modello teorico !!!

misure di precisione limitano fortemente *perfino* il contributo di operatori di dim. 6 che *non violano le simmetrie del MS* !

$$\Delta L = \pm \frac{1}{\Lambda^2} \Delta_6$$

Giudice

Δ_6

Δ_6

$$\Lambda_6 < 5 - 10 \text{ TeV}$$



Nuova Fisica al TeV deve :

- interagire *“debolmente”*
- contribuire *poco* al *tree level*

(nuove *INT.FORTI* permesse solo a scale > 5-10 TeV !!!)

	Δ_6	-	+
LEP1	$H^\dagger \tau^a H W_{\mu\nu}^a B^{\mu\nu}$	10	9.7
	$ H^\dagger D_\mu H ^2$	5.6	4.6
	$iH^\dagger D_\mu H \bar{L} \gamma^\mu L$	9.2	7.3
LEP2	$\bar{e} \gamma_\mu e \bar{\ell} \gamma^\mu \ell$	6.1	4.5
	$\bar{e} \gamma_\mu \gamma_5 e \bar{b} \gamma^\mu \gamma_5 b$	4.3	3.2
MFV	$\frac{1}{2} (\bar{q}_L \lambda_u \lambda_u^\dagger \gamma_\mu q)^2$	6.4	5.0
	$H^\dagger \bar{d}_R \lambda_d \lambda_u \lambda_u^\dagger \sigma_{\mu\nu} q_L F^{\mu\nu}$	9.3	12.4

SOLUZIONI PROPOSTE AL PROBLEMA DELLA GERARCHIA

- ◆ *SUPERSIMMETRIA*
- ◆ *TECHNICOLOR*
- ◆ *GRANDI DIMENSIONI EXTRA (compattificate)*
- ◆ *“LITTLE HIGGS”*
- ◆ *...*
- ◆ *non esclusi nuovi modelli prima della partenza di LHC !*

SUSY E' ATTUALMENTE IL MIGLIOR CANDIDATO !

◆ E' IN GRADO DI RISOLVERE *TUTTI I PROBLEMI* CONNESSI ALLA FISICA ALLA *SCALA DEL TEV!*

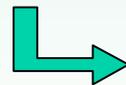
◆ TEORIA "ACCOPPIATA DEBOLMENTE"
 → PERMETTE *PREDIZIONI TEORICHE ACCURATE* E CONSISTENTI ANCHE A SCALE DI ENERGIA \gg *TEV!*



- ◆ gerarchia $M_W \ll M_{Pl}$
- ◆ origine EWSB (associata al grande Y_{top})
- ◆ GUT consistente
- ◆ Higgs leggero
- ◆ impatto delicato nelle misure di prec. EW
- ◆ impatto delicato su FCNC
- ◆ origine materia oscura
- ◆ ...

◆ può essere estesa fino a M_{Pl} !

(*DESERTO ?*)



effetti virtuali susy soppressi da loop

→ $\square_6 \square_4 \square_{SM}$

GUT



EVIDENZA FENOMENOLOGICA PIU' DIRETTA PER SUSY

valori misurati per $\sin^2 \theta_w$ e $\alpha_s(M_Z)$

GUT

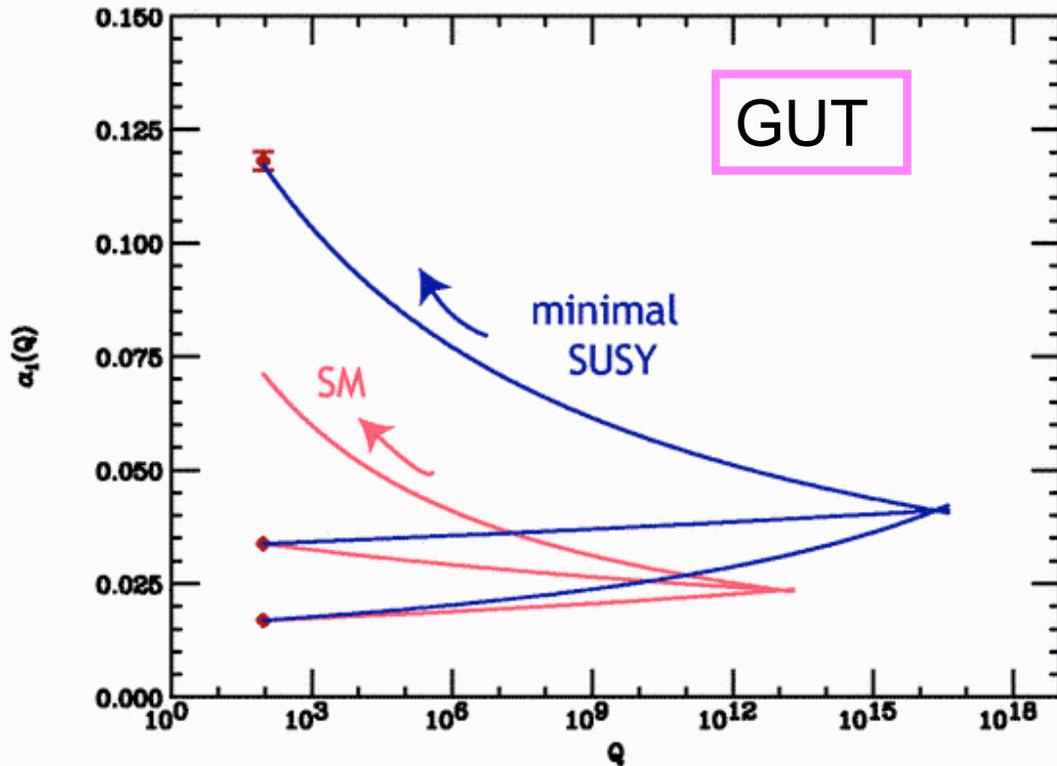


$$\begin{cases} \alpha_s(M_Z) = 0.073 \pm 0.002 & \text{(MSM)} \\ \alpha_s(M_Z) = 0.129 \pm 0.010 & \text{(MSSM)} \end{cases}$$

supporto QUANTITATIVO dall'unificaz. dei coupling

VS

$$\alpha_s^{\text{exp}}(M_Z) = 0.119 \pm 0.003$$



Langacker, Polonsky

$M_{GUT}(MSSM) > M_{GUT}(MSM)$ rallenta il decad. del protone !

NOTEVOLE *ARBITRARIETA'* NEI MODELLI DI ROTTURA DI SUSY !

[ma problema della gerarchia richiede : $\square m \sim (0.1 \div 1) TeV !$]

rottura spontanea di SuSy
parametrizzata da operatori
soffici



108 nuovi parametri !

$$-\mathcal{L}_f = Y_{\alpha\beta\gamma} \Phi^\alpha \tilde{\Phi}^\beta \tilde{\Phi}^\gamma + \mu \tilde{H}_u \tilde{H}_d + h.c.$$

$$-\mathcal{L}_{soft} = m_\alpha^2 \Phi^{*\bar{\alpha}} \Phi^\alpha$$

$$+ M_a \lambda^a \lambda^a + A_{\alpha\beta\gamma} Y_{\alpha\beta\gamma} \Phi^\alpha \Phi^\beta \Phi^\gamma + B \mu H_u H_d + h.c.$$

$$\Phi^\alpha = Q_L, u_L^c, d_L^c, L_L, e_L^c, H_u H_d$$

in generale :

$$m_f^2 \sim c_f \frac{\langle F \rangle^2}{\mathcal{M}^2}, \quad M_a \sim d_a \frac{\langle F \rangle}{\mathcal{M}}$$

scala rottura SuSy

scala Messaggeri ($\sim 30 TeV \div M_{pl}$)

\uparrow
MSSM

- evoluzione dei parametri dalla scala \mathcal{M} alla scala del TeV con equaz. RG
- compito degli esperimenti sarà quello di determinare \mathcal{M} e la struttura dei coefficienti c_f e d_a , *dopo la scoperta di un segnale SuSy !*

FCNC implicano che *squark e sleptoni* con stessi numeri quantici siano o *quasi degeneri* in massa o *quasi allineati* nelle matrici di Yukawa !

schemi differenti in cui questo si realizza *naturalmente* :

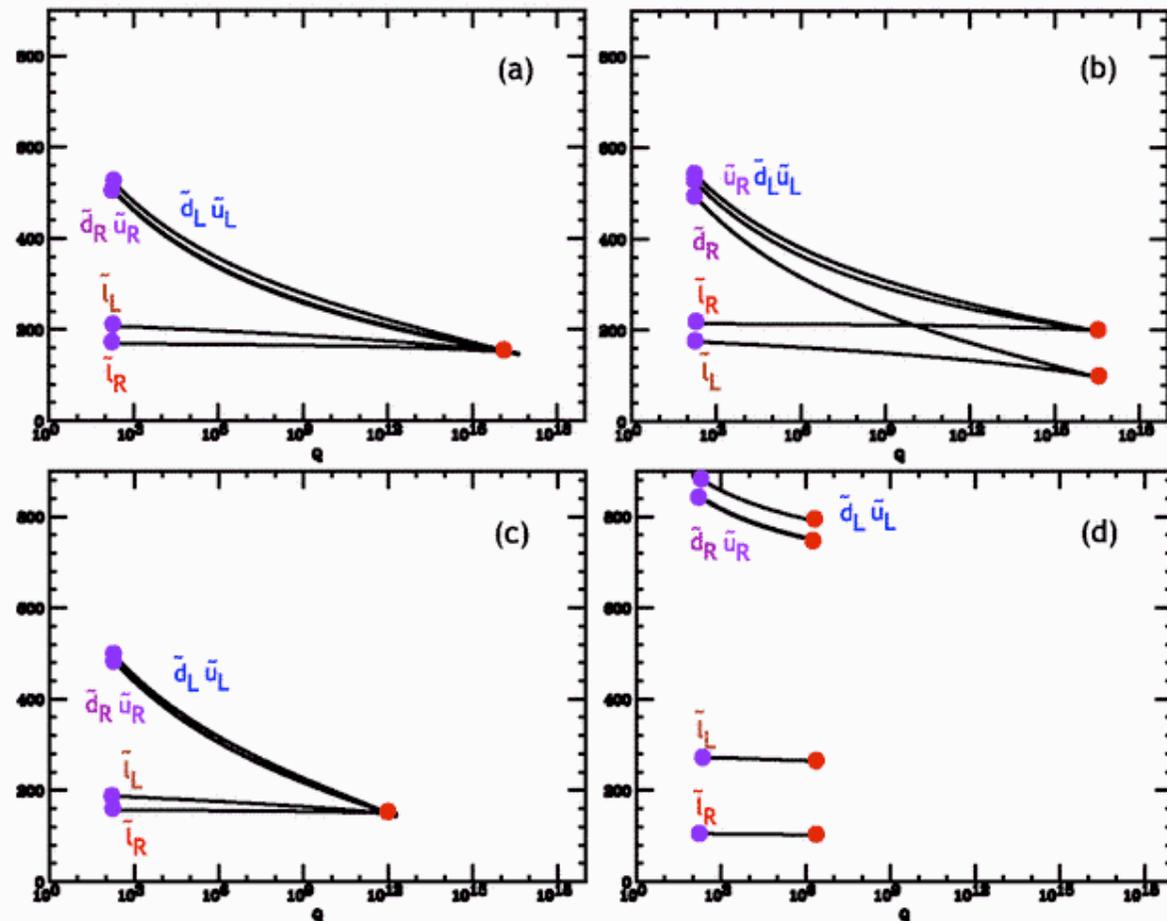
- *gauge mediation* (bassa M)

(GMSB)

- *anomaly mediation*

(AMSB)

- *gaugino mediation*



la maggior parte degli studi fenomenologici sono stati fatti nel **cMSSM** (m **SUGRA**)

c_f e d_a **universali**, parametrizzati da m_0 e $m_{1/2}$ + **EWSB radiativo**

limiti attuali sulle masse dell' **Higgs** e del **chargino** implicano un *fine-tuning* dell'ordine del % nel MSSM !!!

condizione di minimizz. del potenziale

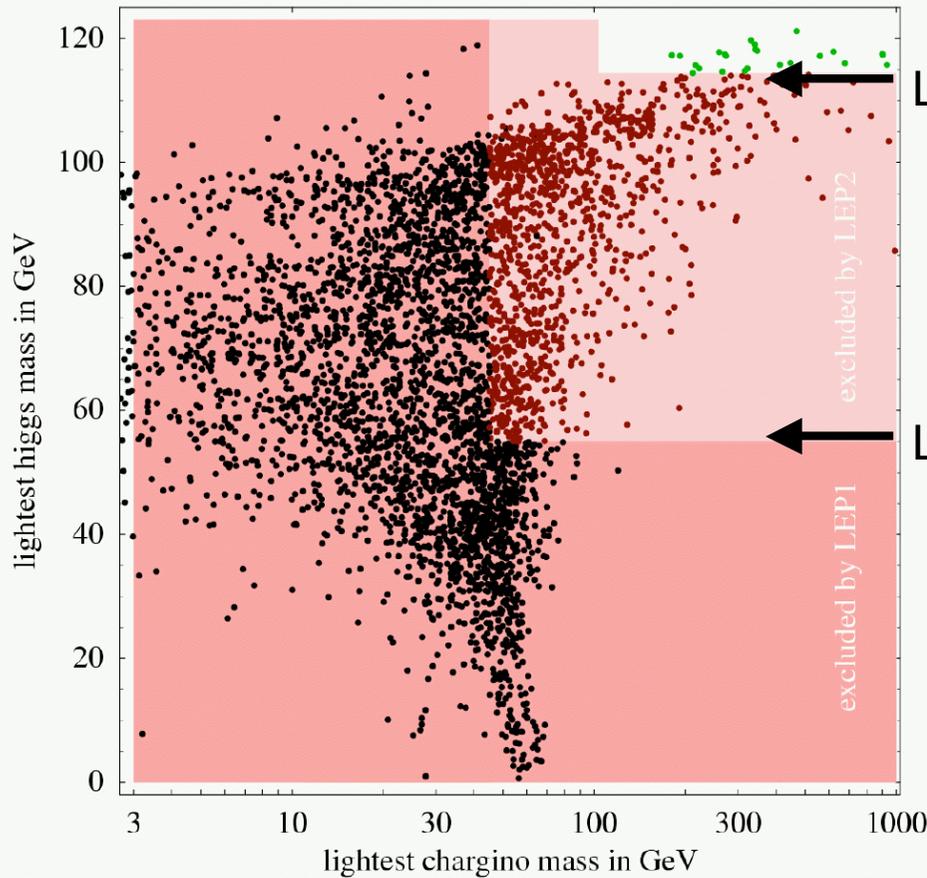
$$\tilde{m}^2 \ll m_{H_u}^2 \ll \frac{1}{2} M_Z^2$$

↙ RGE

$$M_Z^2 \sim \frac{1}{2} \tilde{m}^2 + 3.6 m_{1/2}^2 + \dots$$

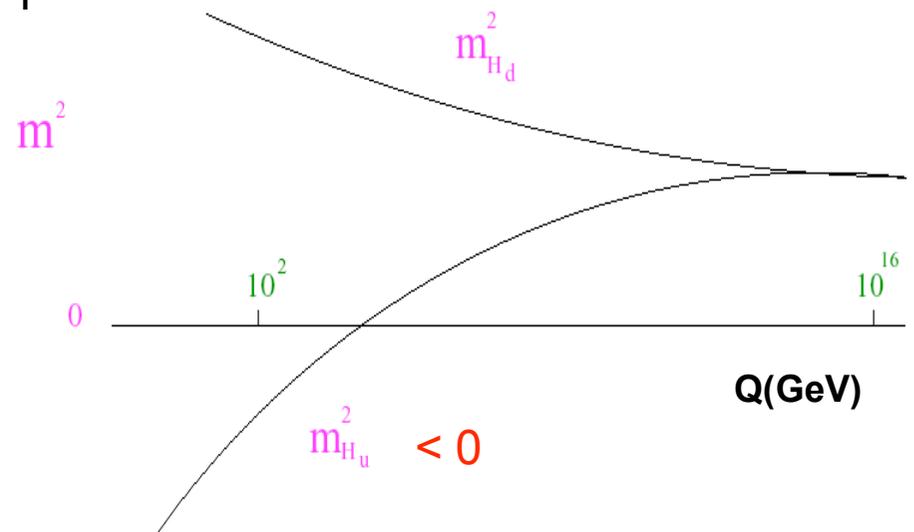
↪ $m(\tilde{\chi}^+) > 103 \text{ GeV}$ ($\tan\beta$ grande)

implica notevole fine-tuning !
(con **unific. gaugini**)



Giusti, Romanino, Strumia

Barbara Mele - INFN, Roma



Il limite diretto su m_h restringe notevolmente lo spazio dei parametri nel MSSM !

$$[m_h(MSSM) \leq 130 \text{ GeV}]$$

$$m_h^2 = M_Z^2 \cos^2 \beta + \underbrace{\frac{3 \sin^2 \beta m_t^4}{2 M_W^2 \sin^2 \beta}}_{\substack{\uparrow \\ \text{grossa correzione!}}} \log \frac{\tilde{M}_t^2}{m_t^2}$$

$$m_h^{\text{exp}} > 115 \text{ GeV} \quad \text{implica grossa correzione!} \quad \Rightarrow \quad \tilde{M}_t \geq 3.8 m_t$$

→ richiede *partner SuSy pesanti* e *grande mixing* nello s-top !

POSSIBILE ALLEVIARE QUESTE "SOFFERENZE" DEL MSSM :

• aggiungendo *singoletti* al MSSM →

$$m_h(NMSSM) \leq 150 \text{ GeV}$$

• modelli con *rottura di SuSy a scale del TeV* superano problemi di *fine-tuning* (e rilassano il limite superiore su m_h).

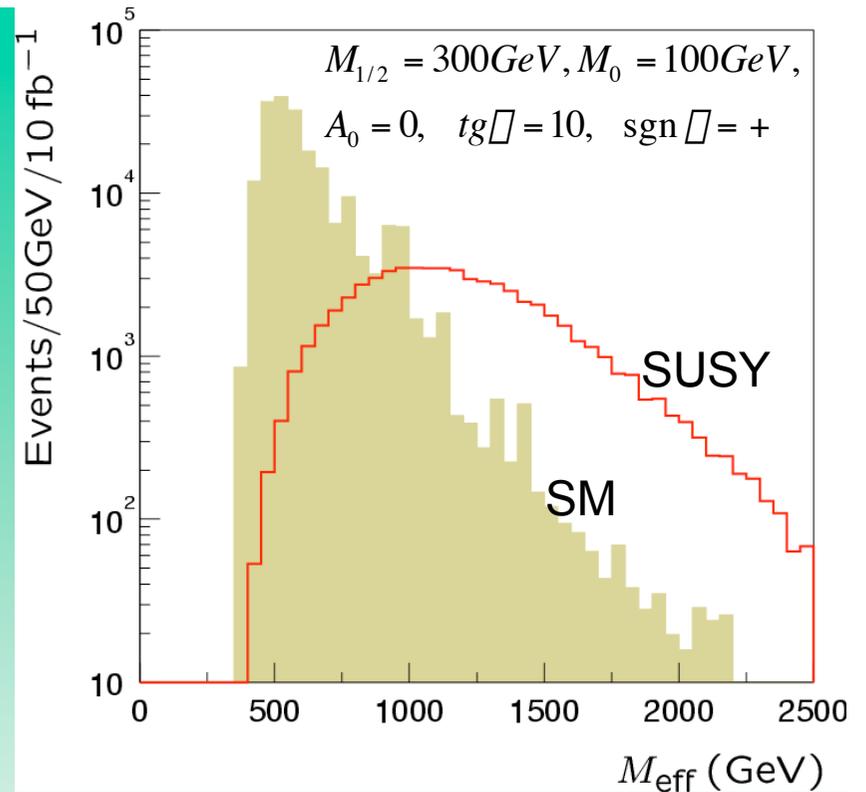
Casas, Espinosa, Hidalgo

SEGNATURE TIPICHE A LHC

(caratteristiche della produzione e del decad. di p.lle molto massive → squark, gluini)

- *grandi masse efficaci* (molteplicità alta di jet con alto pt)
- *eccesso* di E_T^{miss} (> 100 GeV)

$$M_{eff} = E_T^{miss} + \sum_j E_{T,j}$$



SEGNATURA ROBUSTA!

possibilità di :

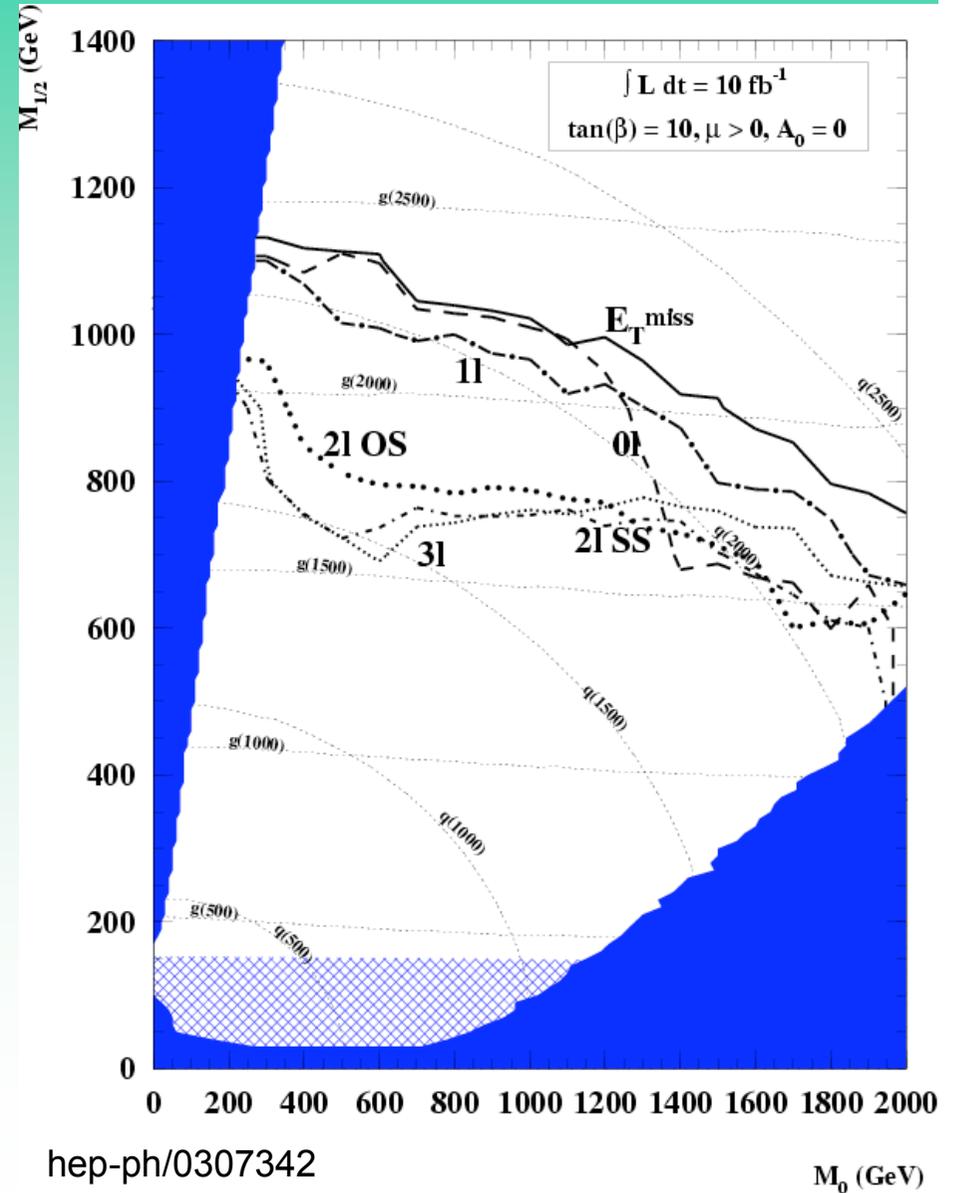
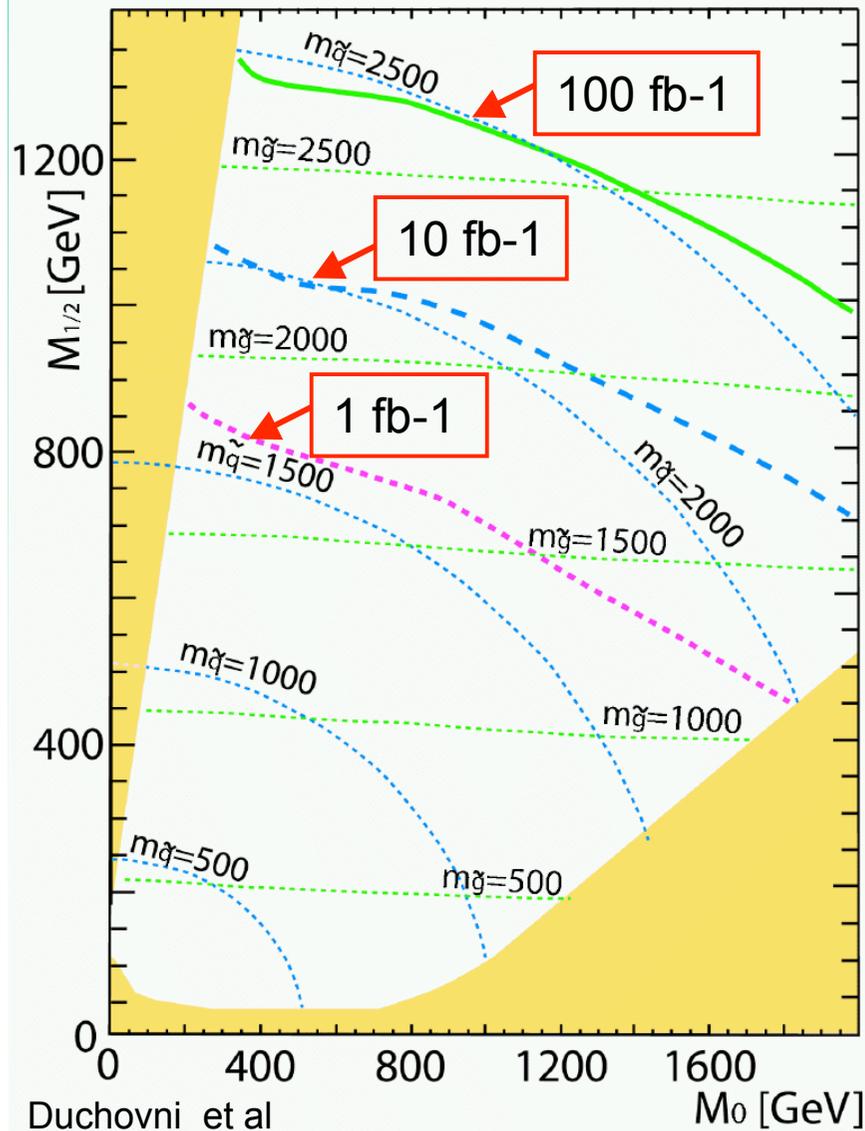
- molti leptoni isolati (diretti o da W e Z)
- fotoni isolati (→ $GMSB$)
- p.lle *cariche "stabili"* pesanti (come "*muone pesante*")

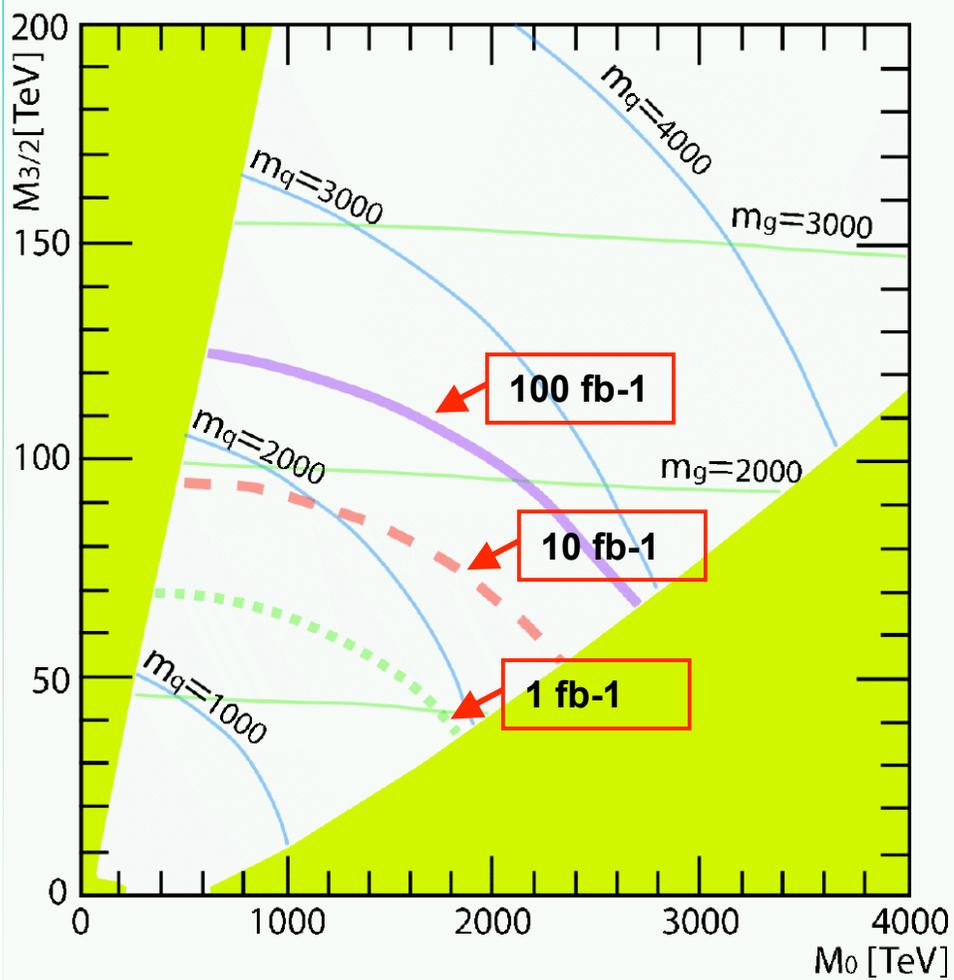
MSSM

1 mese di run "a 10^{33} " ($\rightarrow 1 \text{ fb}^{-1}$) è sufficiente per la scoperta di squark e gluini con masse fino a 1.5 TeV !

segnatura E_T^{miss}

richiesta di leptoni carichi





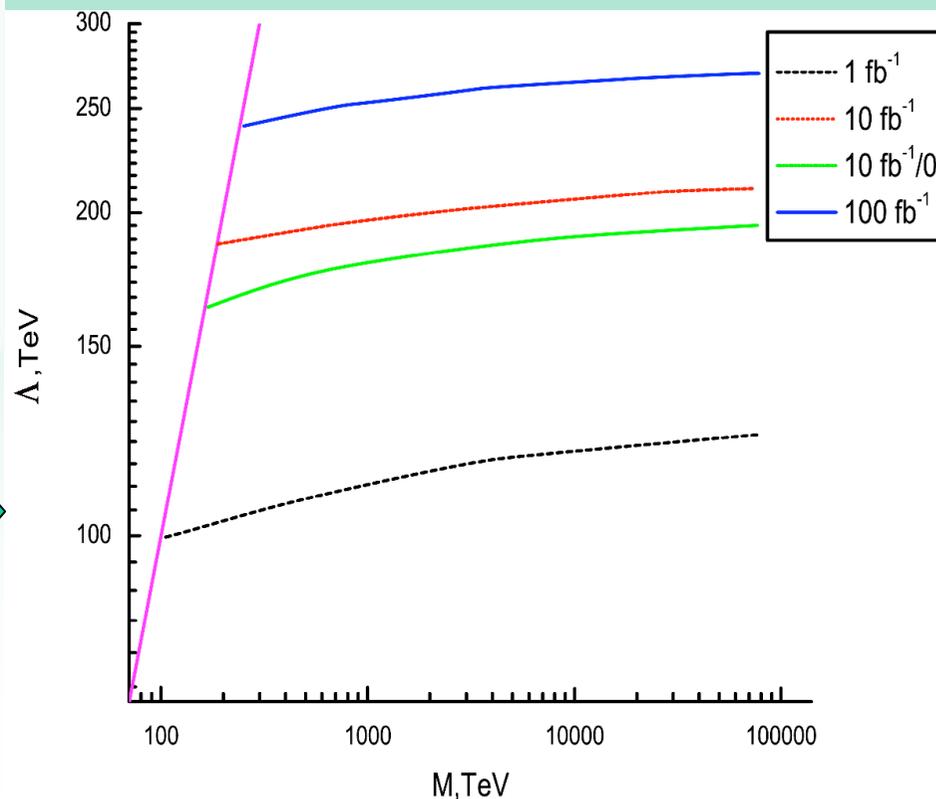
↑
AMSB

→
GMSB

Duchovni et al

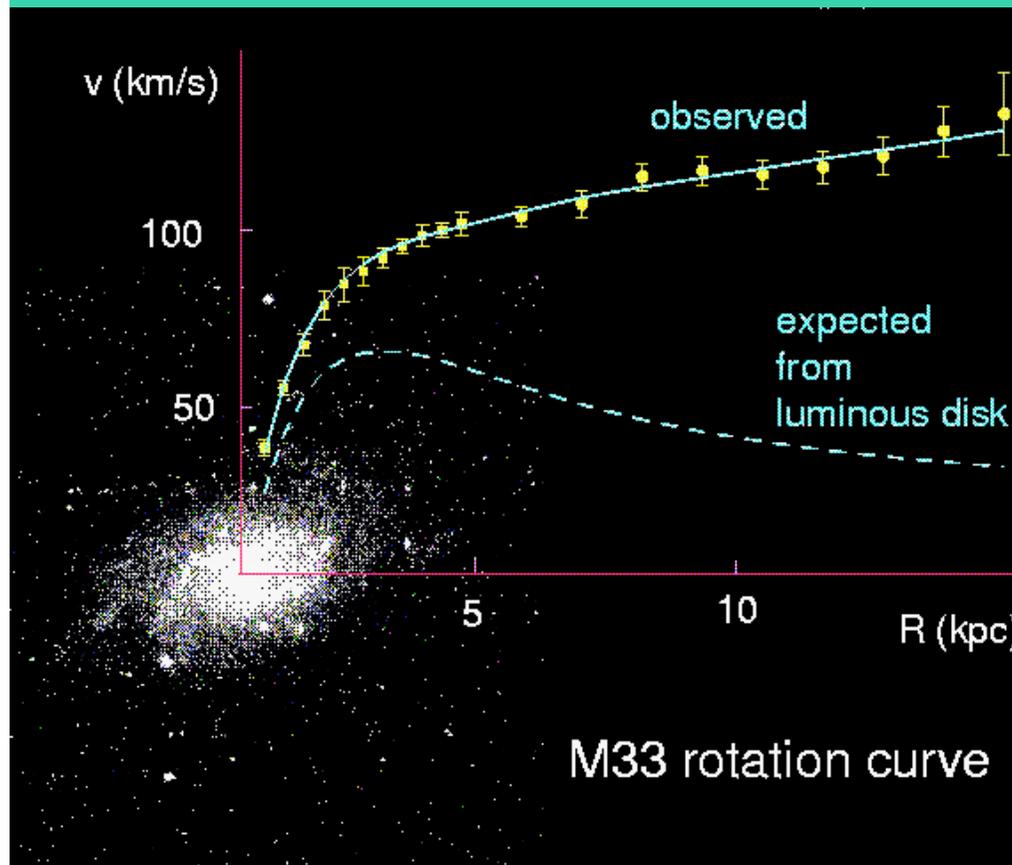
Barbara Mele - INFN, Roma

la *copertura dello spazio dei parametri* rilevante per il problema della gerarchia è in generale garantita a LHC *per ogni modello di rottura di SuSy* considerato !



PROBLEMA DELLA MATERIA OSCURA :

(Zwicky, 1933)



curva rotazionale delle galassie
(su ~ 1000 galassie a spirale)

3a legge di Keplero :

$$v(r) = \sqrt{\frac{GM}{r}} \sim \text{cost.} \quad \longrightarrow \quad M \sim r$$

la massa delle galassie continua a crescere anche a distanze in cui non si accresce la materia *luminosa* !

(ipotesi di modifiche della forza gravitazionale escluse recentemente)



$$M / M_{LUM} \sim 20$$

EVIDENZA **SOLIDA** , INDIPENDENTE DA IPOTESI COSMOLOGICHE !

ipotesi : MATERIA OSCURA E' "THERMAL RELIC"

- p.lla stabile, neutra
- in equilibrio termico nell'universo iniziale
- si disaccoppia a causa dell'espansione dell'universo (*freeze-out*)

relic density dipende dal momento del *freeze-out*

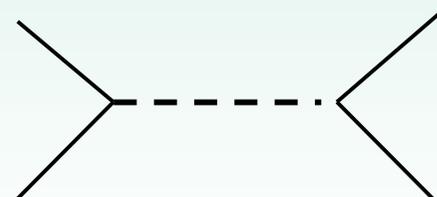
$$\Omega_{DM} \sim \frac{1}{\langle v \sigma_{ann} \rangle}$$

rate di annich. ~ rate di espans. dell'univ.

misura accurata da WMAP : $\Omega_{DM} h^2 = 0.113 \pm 0.009$

→ $\langle v \sigma_{ann} \rangle \sim 1 \text{ pb}$

rate tipica di interaz. elettrodeboli con masse ~ 100 GeV !!!



$$\sigma \sim \frac{\sigma^2}{m^2}$$



WIMP

Weakly Interacting Massive Particles naturalmente prodotte ad LHC !

assumendo in generale :

- $m = [100, 1000]$ GeV
- accoppiamento *debole* alle p.lle ordinarie

segnatura jets con alto E_T^{miss}
emerge chiaramente dal MS !

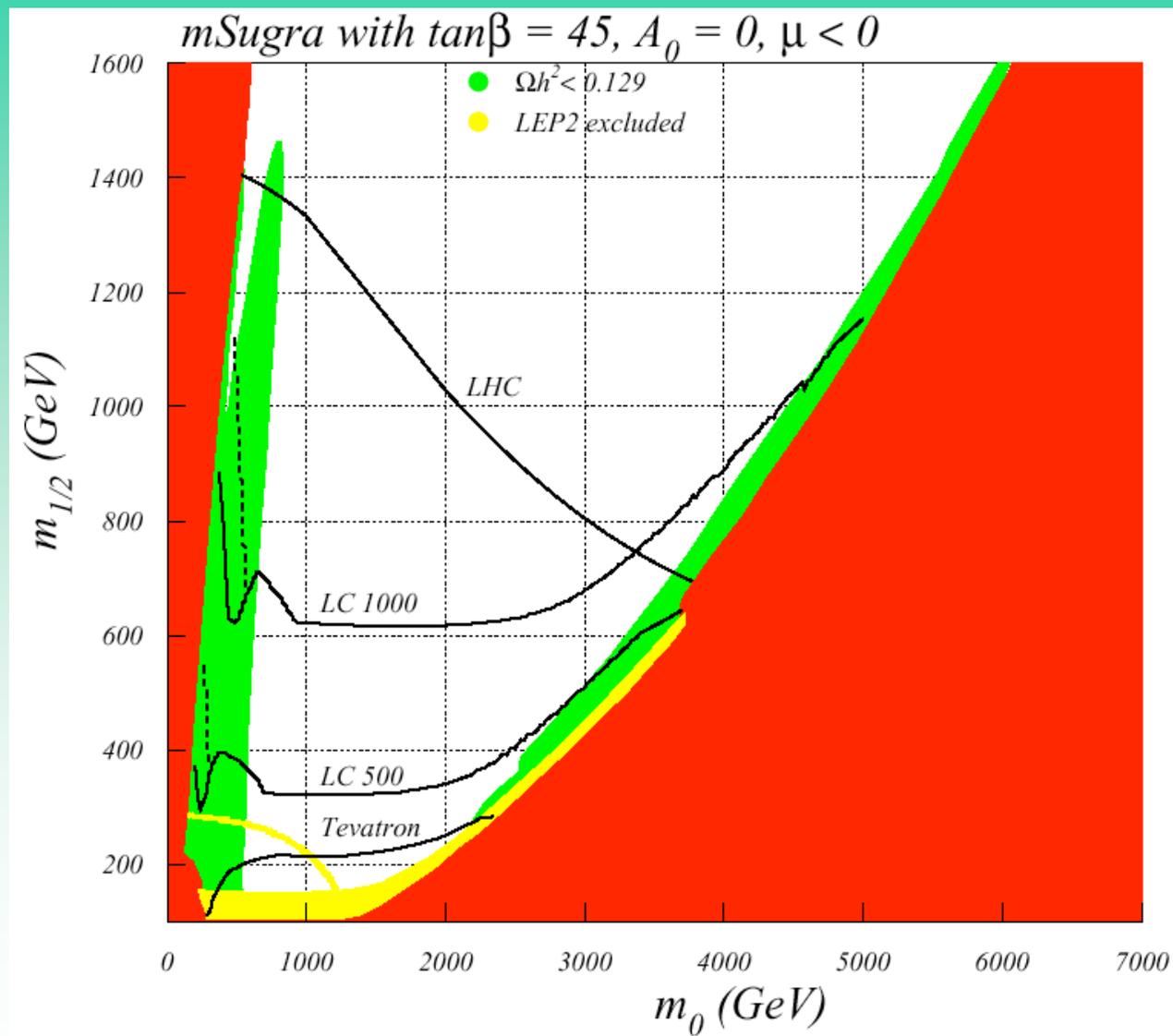
varietà di modelli per **EWSB** predicono **WIMP** :

- **SuSy**
- Universal Extra-Dimension
- Little Higgs
- ...

occorre in generale :

- **nuova** p.lla
- **simmetria** che renda la nuova p.lla **stabile**
- **aggiustamento** dei parametri del modello che dia p.lla stabile **neutra** e con *relic density giusta*

nel MSSM candidato naturale : **neutralino !**



PROSPETTIVE GENERALI A LHC :

◆ settore *EWSB* del MS richiede *NUOVA FISICA* alla scala del *TeV*,

sia che il bosone di Higgs

- sia leggero (< 200 GeV)
- sia pesante (> 200 GeV)
- non esista !

◆ *molti modelli teorici* in grado di risolvere (o *rimandare* !) il problema della gerarchia \longrightarrow *nessuno* di essi ha *evidenze dirette* !

◆ LHC sarà in grado di *discernere* tra di essi o di scoprire l' *inaspettato* !

◆ il *potenziale di scoperta* di LHC è *ENORME* !



◆ *RIVOLUZIONE* aspettata nella conoscenza delle *interazioni fondamentali* !