

# Prospettive future, oltre il modello standard?

La scoperta del bosone di Higgs chiave di volta per la consistenza del modello standard:

- a) Generazione della massa dei mediatori e dei fermioni;
- b) Regolarizzazione della crescita con  $s$  dello scattering WW.

La massa del Higgs  $< 1$  TeV perché la teoria rimanga perturbativa!!!

Tuttavia anche se lo Higgs fosse trovato rimangono ancora condizioni insoddisfacenti:

- 1) L'introduzione "ad hoc" del nuovo bosone H;
- 2) il valore negativo della costante  $\mu^2$  nel potenziale di Higgs;
- 3) la separazione tra interazioni elettrodeboli, forti (e gravitazionali);
- 4) mancanza di quantizzazione della carica;
- 5) nessuna relazione tra le masse dei quark e dei leptoni
- 6) giustificazione del numero di famiglie?
- 7)...

Il modello standard come teoria effettiva (a bassa energia) di una teoria più generale?  
Indizi sperimentali dell'esistenza di una tale teoria: **massa non nulla dei neutrini.**

**A quale tipo di simmetria tale teoria dovrebbe obbedire ?**

## Prescrizioni generali

- 1) Scelta del gruppo di gauge (simmetria);
- 2) Scelta delle rappresentazioni fondamentali (i campi, le particelle);
- 3) Scelta di quale meccanismo di Higgs sia attivo per generare le masse.

Ipotesi: **esiste un semplice gruppo  $G$  che contiene il gruppo  $G'$  del modello standard:**

$$G \supset G' \equiv SU_L(2) \times U(1) \times SU_C(3) \text{ (grande unificazione GUT)}$$

I quark e i leptoni appartengono allo stesso multipletto ed esiste una sola costante di accoppiamento all'energia della unificazione. A più bassa energia ( $\sim M_W$ ) rottura della simmetria. Esistono mediatori con massa  $M_X \gg M_W$  che rendono possibile la trasformazione di quark in leptoni (violazione del numero barionico e leptonico).

Il rango di  $G$  è  $>4$ , candidati possibili:  $SU(5)$ ,  $SO(10)$ , ...

$SU(5)$ : gruppo delle rotazioni di un vettore a 5 dimensioni a det unitario;

$SO(10)$ : gruppo delle rotazioni in 10 dimensioni in uno spazio con rappresentazione spinoriale.

Le 3 costanti di accoppiamento, molto diverse alle energie presenti, hanno una evoluzione regolata dall'equazione del gruppo di rinormalizzazione e devono tendere allo stesso valore alla scala di unificazione  $M_X$ .

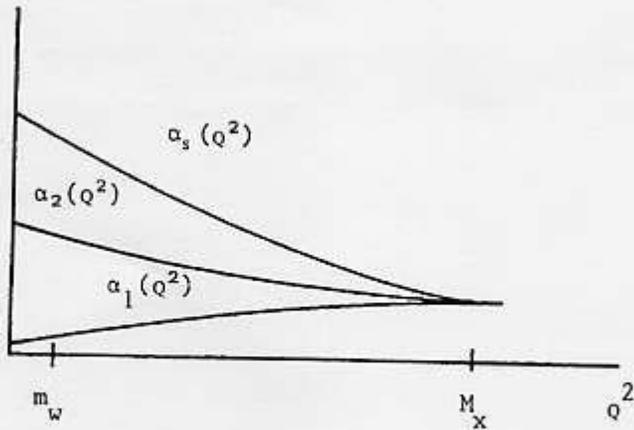


Figure 1 Behavior of  $\alpha_s(Q^2)$ ,  $\alpha_2(Q^2)$  and  $\alpha_1(Q^2)$  versus  $Q^2$ .

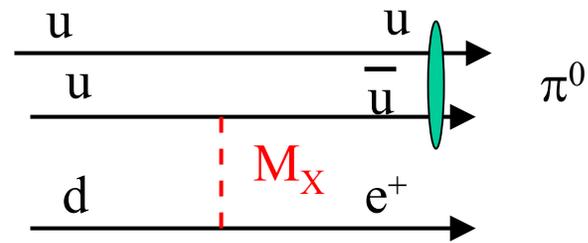
$$M_X \sim 10^{14}-10^{15} \text{ GeV}$$

La conseguenza piu' interessante: **il protone e' instabile**: la sua larghezza:

$$\Gamma_P \approx \alpha \frac{m_P^5}{M_X^4} \approx 10^{-60} \text{ GeV} \Rightarrow \tau_P \approx 10^{39} \text{ s} \approx 10^{32} \text{ anni}$$

Il limite sperimentale dipende dal tipo di decadimento cercato ex:

$$\tau(p \rightarrow e^+ \pi^0) \geq 5 \times 10^{32} \text{ anni}$$



Il modello GUT ha tuttavia problemi nella evoluzione delle costanti di accoppiamento:

**non convergono su un unico punto!**

**Indizio di nuova fisica nel deserto tra  $M_W$  e  $M_X$ ?**

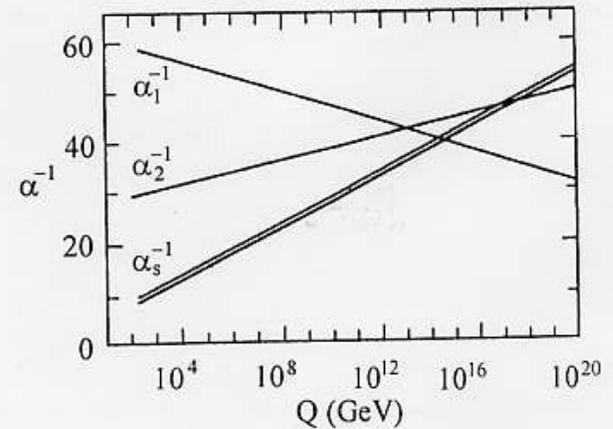


Figure 2 Running of the three gauge couplings in minimal  $SU(5)$  GUT showing disagreement with a single unification point. [ref. 5]

Una soluzione e' la supersimmetria che ha anche il vantaggio di essere inglobata nella teoria delle corde (string) che dovrebbe unificare anche la gravita'.

Rappresenta una estensione del gruppo di Poincare' e una delle conseguenze e' che le particelle bosoniche sono accoppiate in modo naturale a quelle fermioniche

Particella	Spin	Partner supersimmetrico	Spin
quark, $q$	1/2	squark, $\tilde{q}$	0
leptone, $l$	1/2	sleptone, $\tilde{l}$	0
fotone, $\gamma$	1	fotino, $\tilde{\gamma}$	1/2
bosone, $W$	1	wino, $\tilde{W}$	1/2
bosone, $Z$	1	zino, $\tilde{Z}$	1/2
Higgs, $H$	0	higgsino, $\tilde{H}$	1/2
gluone, $g$	1	gluino, $\tilde{g}$	1/2

Un vantaggio della supersimmetria e' che le correzioni radiative dovute ad es. a loop che coinvolgono l'Higgs scalare sono cancellate dal contributo del higgsino. Queste correzioni si applicano anche alla massa del Higgs che tenderebbe a essere rinormalizzato a valori della massa di grande unificazione.

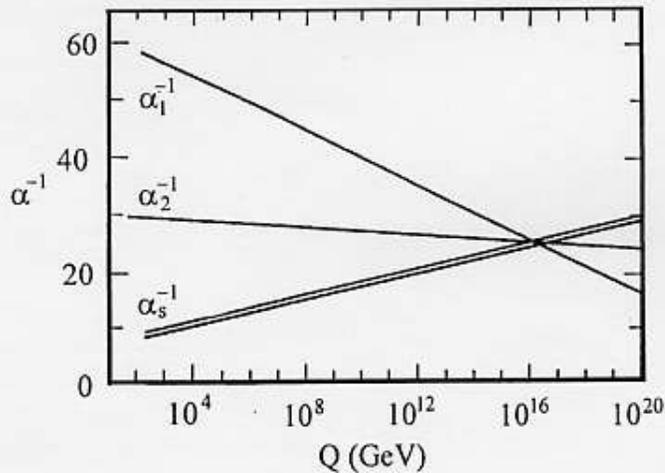
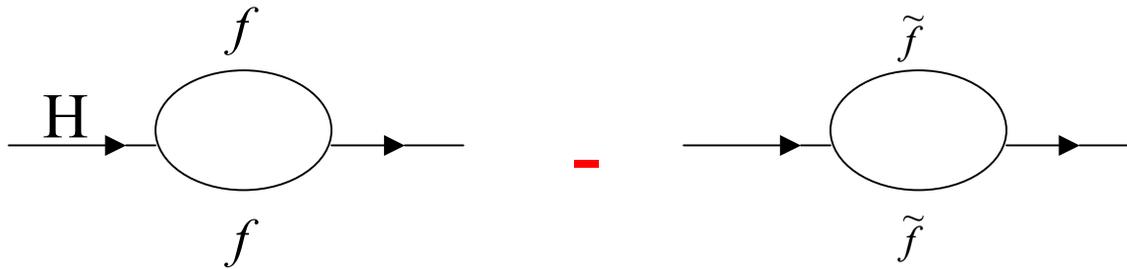


Figure 3 Running of the three gauge couplings in minimal supersymmetric extension of the standard model. [ref. 5]

Un altro vantaggio della supersimmetria e' la prevista convergenza delle tre costanti di accoppiamento alla scala della grande unificazione

# Fenomenologia della supersimmetria

E' assegnato alle particelle un numero quantico moltiplicativo:

$$\text{R-parity} \quad R_p = \begin{cases} -1 & \text{particelle supersimmetriche} \\ +1 & \text{particelle del modello standard} \end{cases}$$

Quantita' conservata in molti modelli

Conseguenze:

- Le particelle supersimmetriche sono prodotte in coppia
- **La particella piu' leggera (LSP) e' stabile**  
(LSP interagisce debolmente ed e' candidata anche per **la materia oscura**)

→ LSP si comporta come un  $\nu$  → non e' rivelato

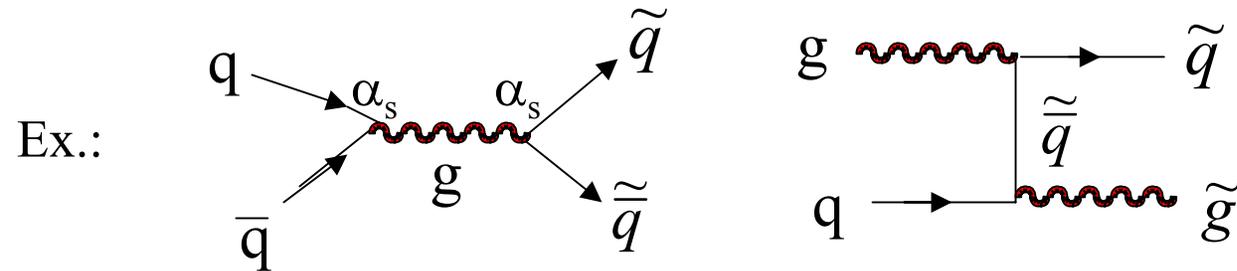
→  $E_T^{\text{miss}}$  (segnatura tipica di SUSY)

In molti modelli :  $LSP \equiv \chi^0_1$ , 4 particelle neutre : fotino, zino e i due higgsini neutri piu' leggeri

I due **chargini**  $\chi^\pm_1$ ,  $\chi^\pm_2$  sono associati ai  $W^+, W^-$ , e ai due higgsini carichi  $H^+, H^-$

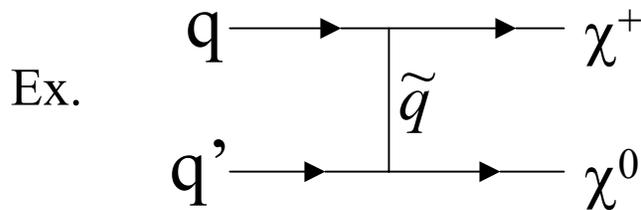
# Produzione di particelle supersimmetriche a LHC

- Squark e gluini prodotti via **interazioni forti**  
→ **grandi sezioni d'urto**



$m_{\tilde{q}, \tilde{g}} \sim 1 \text{ TeV}$      $\sigma \sim 1 \text{ pb} \rightarrow 10^4$  eventi per anno a bassa luminosita'

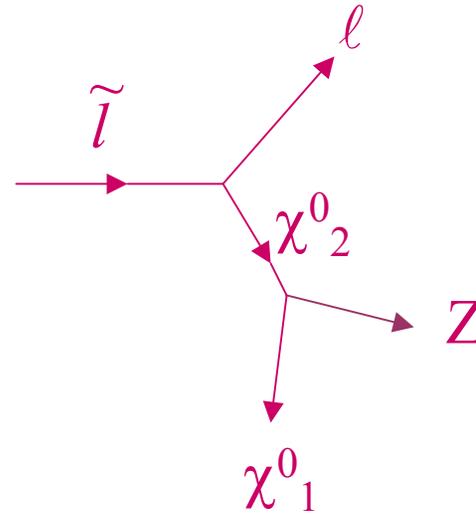
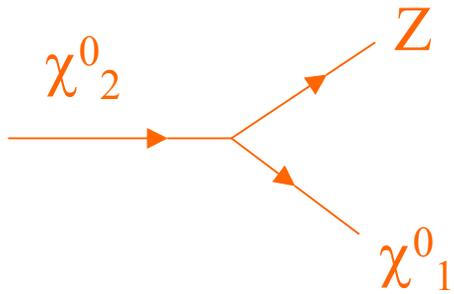
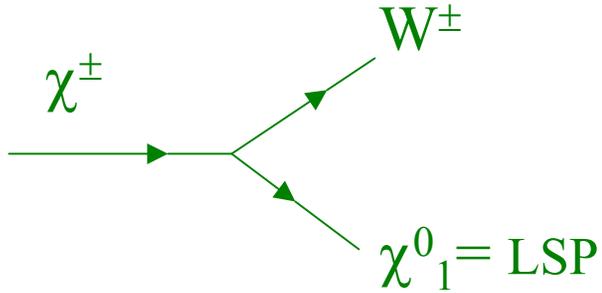
- **Chargini, neutralini, sleptoni** prodotti con processi elettrodeboli, piu' rari



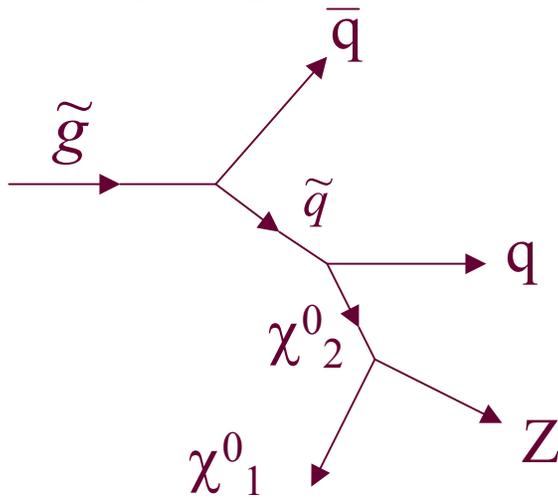
$\sigma \approx \text{pb}$      $m_\chi \approx 150 \text{ GeV}$

$\tilde{q}\tilde{q}, \tilde{q}\tilde{g}, \tilde{g}\tilde{g}$  sono dominanti a LHC se accessibili cinematicamente

# Esempi di decadimenti di particelle supersimmetriche



$\tilde{q}$ ,  $\tilde{g}$  sono piu' pesanti  $\rightarrow$  catene di decadimento piu' complicate



## Decadimenti a cascata:

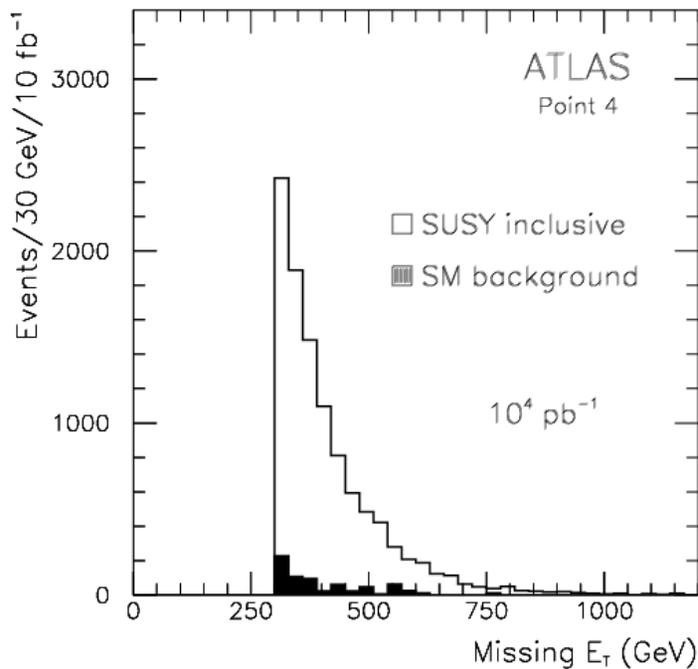
Molti leptoni e/o jets piu'  
Energia mancante da LSP

Ex.

In ogni modello la massa degli squark e gluini  $e' > 250$  GeV, ad es. se:

$$\begin{aligned} m_{\tilde{q}} &\approx 900 \text{ GeV} & m_{\chi^\pm} &\approx 150 \text{ GeV} \\ m_{\tilde{g}} &\approx 600 \text{ GeV} & m_{\chi^0} &\approx 80 \text{ GeV} \end{aligned}$$

Richiedendo :  $E_T^{\text{miss}} > 300$  GeV e 5 jets  $p_T > 150, 150, 100, 100, 90$  GeV



In un anno a LHC ATLAS a bassa Luminosita'

$$N_S = 11600 \text{ events}$$

$$N_B = 560 \text{ events} \Rightarrow S/\sqrt{B} \sim 500 !!$$

Massima massa scopribile 1.5-2 TeV

Abbiamo acquisito nel giro di una generazione una notevole comprensione dei fenomeni della fisica fondamentale, ma ancora rimangono parecchi punti oscuri.

I prossimi anni saranno cruciali per chiarire alcuni aspetti della fisica delle particelle.

Tuttavia puo' ben darsi che alcune chiavi interpretative che ci siamo date: il bosone di Higgs, la Supersimmetria non siano reali. Altri fenomeni, inattesi, potrebbero manifestarsi: dobbiamo essere pronti a coglierli.

La parola finale sara' (come sempre) agli esperimenti sia agli acceleratori che di astroparticelle:

**Buon divertimento!**