



# Ricerca di nuova fisica in CMS

Mario Galanti  
Università e INFN - Catania

- Problematiche generali
- Trigger e strumenti
- Strategie di ricerca
  - mSUGRA
  - Modelli alternativi
  
- Non parlerò di
  - Ricerche esclusive (v. talk precedente)
  - Extra dimensions & Co. (v. talk successivi)

Problematiche generali

- Problema principale delle ricerche di nuova fisica:
  - Esistono molti modelli (sia supersimmetrici sia non) consistenti con i dati in nostro possesso
    - Esperimenti in acceleratori a "bassa" energia (LEP, Tevatron)
    - Vincoli cosmologici (WMAP, dark matter, ...)
  - Ciascun modello presenta parametri liberi
    - Per il MSSM  $N_{\text{pars}} \approx 100$
  - Ciascun modello (mSUGRA, GMSB, little Higgs, ecc.) prevede spettri di massa con caratteristiche molto diverse
- Nel seguito parlerò soprattutto di mSUGRA

- Ricerche inclusive:
  - Cercare un eccesso nel numero di eventi osservati rispetto al fondo SM previsto
- Ricerche esclusive:
  - Studiare dettagliatamente i singoli processi fisici e ricostruire le nuove particelle
    - Ricostruzione delle catene di decadimento
    - Misure dello spettro delle masse (v. il talk di Tommaso)

- **Strategia generale**
    - Riuscire ad osservare eccessi di eventi rispetto alle previsioni dello SM
  - **In fase di preparazione dell'esperimento:**
    - Analizzare i vari modelli disponibili
    - Trovare le signature migliori
    - Fare uno "scan" dello spazio dei parametri e trovare la significatività di  $S/B$  in ogni punto.
  - **In fase di analisi dei dati:**
    - Cercare differenze significative tra  $N_{ev}$  previsti e effettivamente osservati, per le varie signature studiate
- Coprire tutte le possibili topologie di evento  
 • Successivamente, cercare di distinguere tra i vari modelli  
 • Early discovery: rivelatore non calibrato e/o incompleto (v. dopo)



Tools e trigger

# Il trigger di CMS



- Riduzione del rate di eventi da  $O(100 \text{ MHz})$  a  $O(100 \text{ Hz})$
- Vari livelli di trigger
  - L1 implementato in hardware ( $100 \text{ MHz} \rightarrow 100 \text{ KHz}$ )
    - Prende informazioni dai calorimetri e dalle camere per muoni
    - Fornisce candidati per  $e$ ,  $\mu$ ,  $\tau$  e  $\gamma$ , jet, numero di jet,  $E_T$
  - HLT implementati in software ( $100 \text{ KHz} \rightarrow 100 \text{ Hz}$ )
    - Informazioni da tutto il rivelatore

# Trigger per SUSY: punti di benchmark

- 6 punti di benchmark scelti per testare il trigger di CMS
  - Rappresentano diversi scenari difficili per il trigger
- Solo dei "case studies", non test esaustivi per valori qualsiasi dei parametri

Punto	$m_0$ (GeV)	$m_{1/2}$ (GeV)	$\sigma$ (pb)
4	20	190	181
5	150	180	213
6	300	150	500
7	250	1050	0.017
8	900	930	0.022
9	1500	700	0.059

$$A_0 = 0, \tan\beta = 10, \mu > 0$$

Low Mass (LM):

- Bassa  $E_T^{\text{Miss}}$
- Particelle a basso  $P_T$

High Mass (HM):

- Sparticelle con alta massa
- $\sigma_{\text{prod}}$  molto basse

- 4, 5 e 6 esclusi dal LEP, ma utili lo stesso per testare le prestazioni del trigger
- Gli stessi punti studiati anche per il caso di parità R violata, con  $\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow jjj$

## Trigger studiati

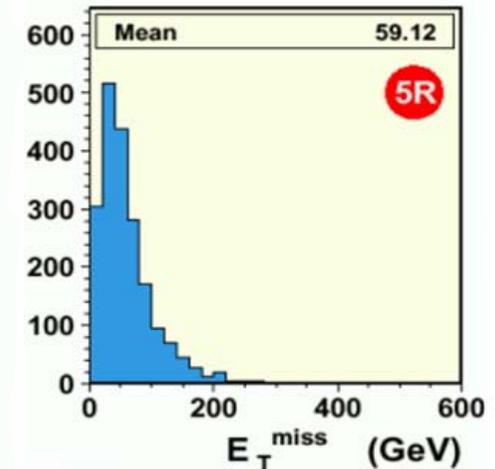
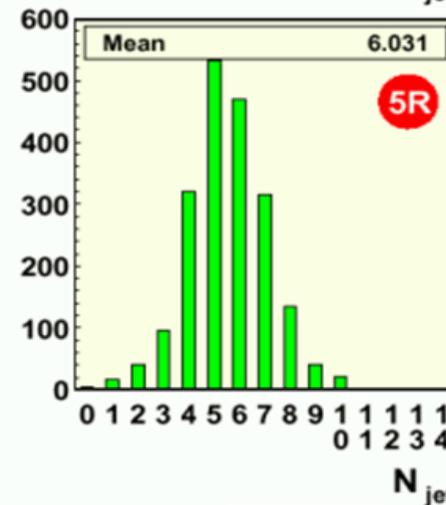
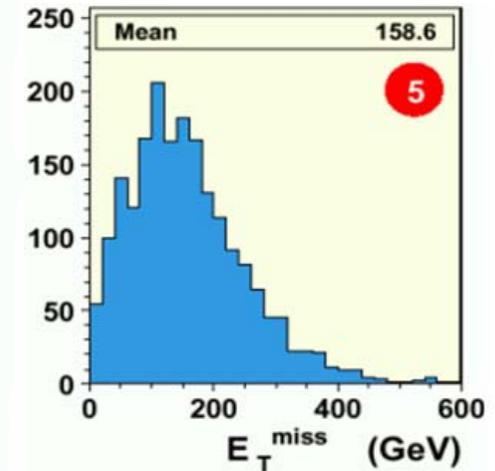
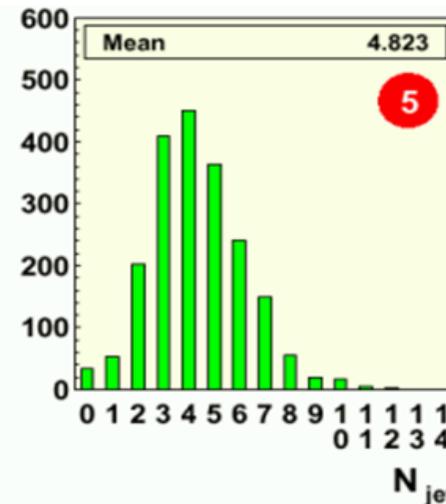
### ▪ Punti LM:

- Caso low-lum (se SUSY è qui, scoperta subito)
- Trigger L1:
  - 3 jet ( $E_T > 86 \text{ GeV}$ )
  - 1 jet ( $> 79 \text{ GeV}$ ) +  $E_T^{\text{Miss}} > 46 \text{ GeV}$
- HLT:
  - 1 jet ( $> 180 \text{ GeV}$ ) +  $E_T^{\text{Miss}} > 123 \text{ GeV}$
  - 4 jet ( $E_T > 113 \text{ GeV}$ )

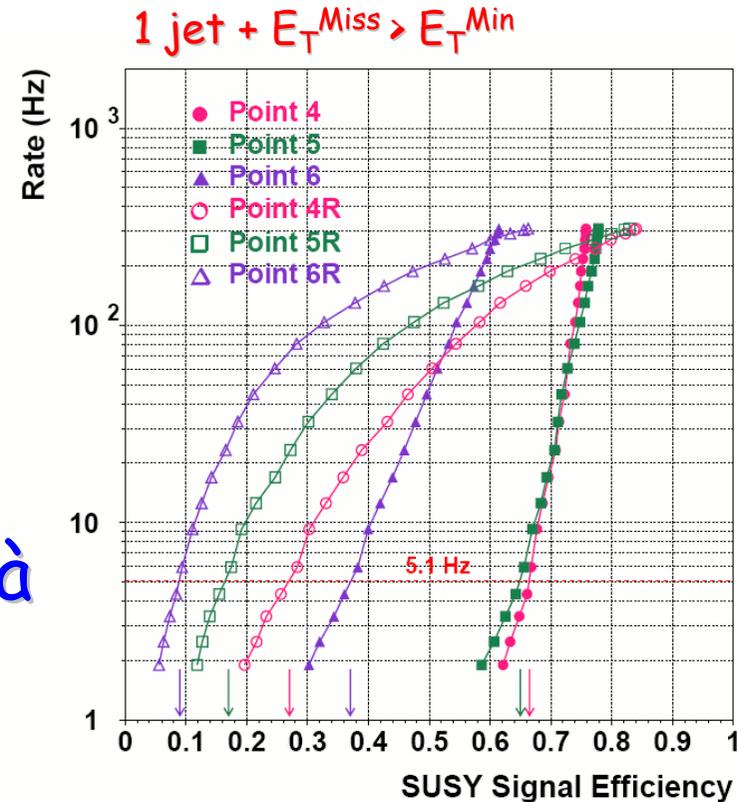
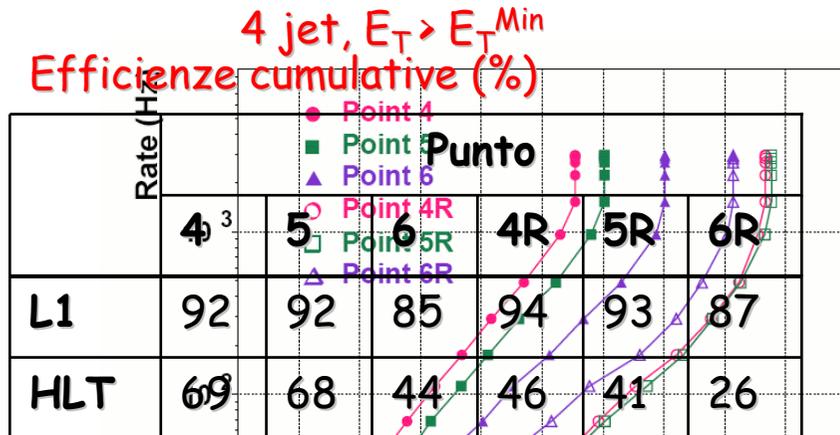
### ▪ Per i punti HM:

- Caso high-lum (punti a bassa  $\sigma$ , serve alta  $\int L$ )
- Trigger L1:
  - 3 jet ( $E_T > 111 \text{ GeV}$ )
  - 1 jet ( $> 113 \text{ GeV}$ ) +  $E_T^{\text{Miss}} > 70 \text{ GeV}$
- HLT:
  - $E_T^{\text{Miss}} > 239 \text{ GeV}$
  - 4 jet ( $E_T > 185 \text{ GeV}$ )

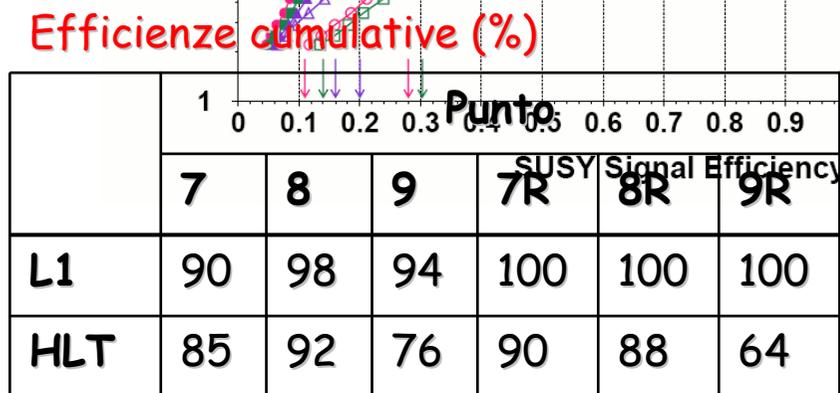
- La violazione della parità R comporta un maggiore  $N_{\text{jet}}$  e minore  $E_T^{\text{Miss}}$



## ■ Risultati a bassa luminosità



## ■ Risultati ad alta luminosità



violazione della parità R

- I trigger di n jet compensano, soprattutto per i punti HM

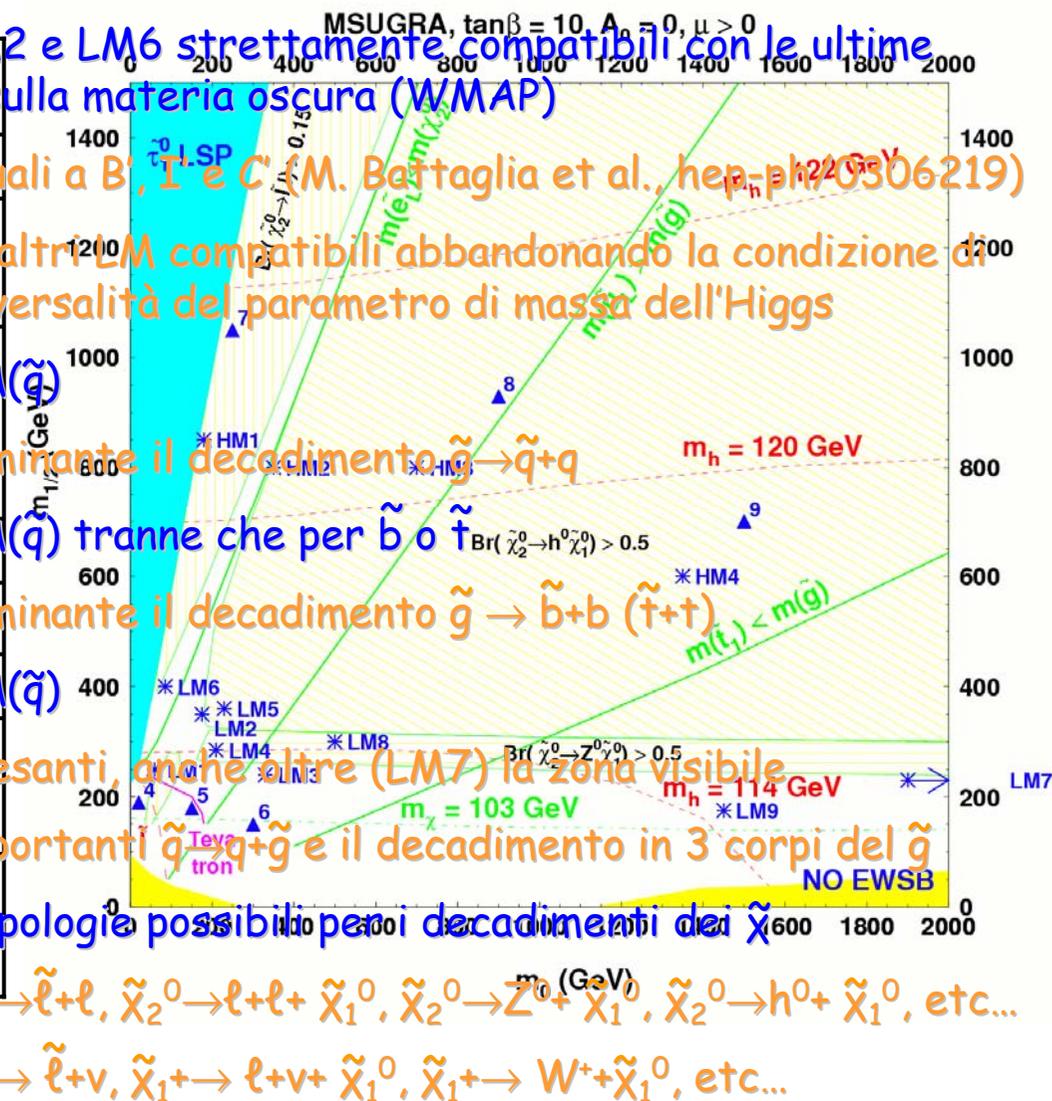
- Cambio di tutti i tool software (Fortran→C++)
  - OSCAR (simulazione)
  - ORCA (ricostruzione)
  - FAMOS (simulazione+ricostruzione veloci)
- Molta enfasi attualmente sullo sviluppo e sulla validazione di questi nuovi strumenti
  - Sviluppare e raffinare gli algoritmi di ricostruzione
  - (Relativamente) pochi canali di fisica studiati
    - Servono anche come banchi di prova per questi strumenti
- Successivamente:
  - Rifare le analisi eseguite con i vecchi tool
  - Studiare i canali attualmente scoperti

mSUGRA

- Riduzione del numero dei parametri rispetto a MSSM
  - Unificazione dei parametri alla scala GUT ( $\sim M_{\text{Planck}}$ )
- Parità R  $P_R = (-1)^{3(B-L)+2s}$ 
  - LSP stabile (neutralino)
- Parametri liberi:
  - $m_{1/2}, m_0, \tan\beta, \text{sign}(\mu)$  e  $A_0$
  - Risultati dati in funzione di  $(m_{1/2}, m_0)$ , per valori fissati degli altri tre parametri
  - Le RGE traducono i valori delle masse dalla scala GUT a quella EW
- Relazioni (approssimate) tra le masse:
  - $M(\tilde{g}) \approx 3M(\tilde{\chi}_1^\pm) \approx M(\tilde{\chi}_2^0) \approx 2M(\tilde{\chi}_1^0)$
  - $M(\tilde{g}) \approx M(\tilde{q}) > M(\tilde{\chi})$
- Resta una grossa indeterminazione nello spettro delle masse

# Punti di benchmark di mSUGRA

Point	$m_0$ (GeV)	$m_{1/2}$ (GeV)	$\tan(\beta)$	$\text{sign}(\mu)$	$\text{sign}(\mu)$
LM1	60	250	10	+	0.
LM2	175	350	35	+	0.
LM3	330	240	20	+	0.
LM4	210	285	10	+	0.
LM5	230	360	10	+	0.
LM6	85	400	10	+	0.
LM7	3000	230	10	+	0.
LM8	500	300	10	+	-300
LM9	1450	175	50	+	0.
HM1	180	850	10	+	0.
HM2	350	800	35	+	0.
HM3	700	800	10	+	0.
HM4	1350	600	10	+	0.



- **Tagli di preselezione:** (Abdullin-Charles, 1999)
  - $E_T^{\text{Miss}} > 200 \text{ GeV}$
  - $\geq 2 \text{ jets con } P_T > 40 \text{ GeV}$
- **Fondi considerati:**  $tt$ ,  $Zj$ ,  $Wj$ ,  $QCD(\text{incl. } b\bar{b})$
- **Scan del piano**  $(m_0, m_{1/2})$  con tagli aggiuntivi
- **Eventi classificati in base a  $N_{\text{jet}}$ :**
  - Distribuzioni dei leptoni simili tra sig e bkg
  - Utili, ulteriori tagli  $2 E_T^{\text{Miss}}, 3 E_T^{\text{Miss}}$  e  $E_T^{\text{jet}}$

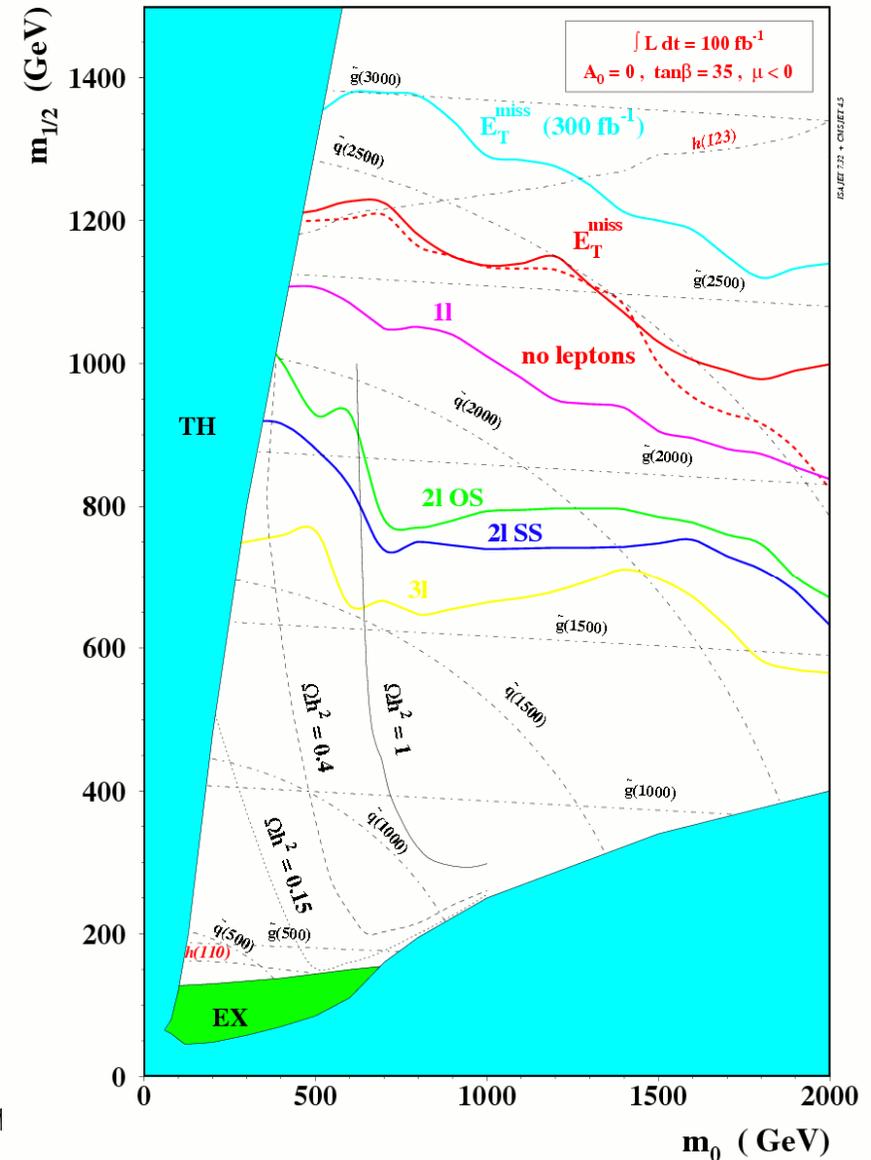
Segnatura	Punti di mSUGRA		Valori dei tagli						$s/\sqrt{S+B}$
	$m_0$ (GeV)	$m_{1/2}$ (GeV)	$N_{\text{jet}}$	$E_T^{\text{Miss}}$ (GeV)	$E_T^{\text{jet1}}$ (GeV)	$E_T^{\text{jet2}}$ (GeV)	$\Delta\phi(P_T^{\text{lep}}, E_T^{\text{Miss}})$	$\mu$ isol.	
$E_T^{\text{Miss}}$	500	1200	2	1200	900	600	0	Off	5.77
	1600	1000	7	600	600	300	0	Off	4.2
$1\ell$	400	1100	2	900	600	300	20	On	4.66
	1000	1000	4	800	500	300	20	Off	4.68
$3\ell$	400	700	2	300	150	80	0	On	6.37
	1400	700	2	300	300	200	0	off	4.72

- Limiti di scoperta di CMS
  - $S/\sqrt{S+B} > 5\sigma$

$$\int L \int \mathcal{L}(3000) \text{ fb}^{-1}$$

$$A_0 = 0, \tan(\beta) = 35, \mu < 0$$

- $E_T^{\text{Miss}} + 2 \text{ jet}$  inclusiva:
  - Segnatura migliore
  - Importante soprattutto al limite per alta  $\int L$
- Segnatura  $n(\geq 1) \ell$ :
  - Limiti di scoperta più stretti
  - Possono comunque essere utili per basse  $\int L$

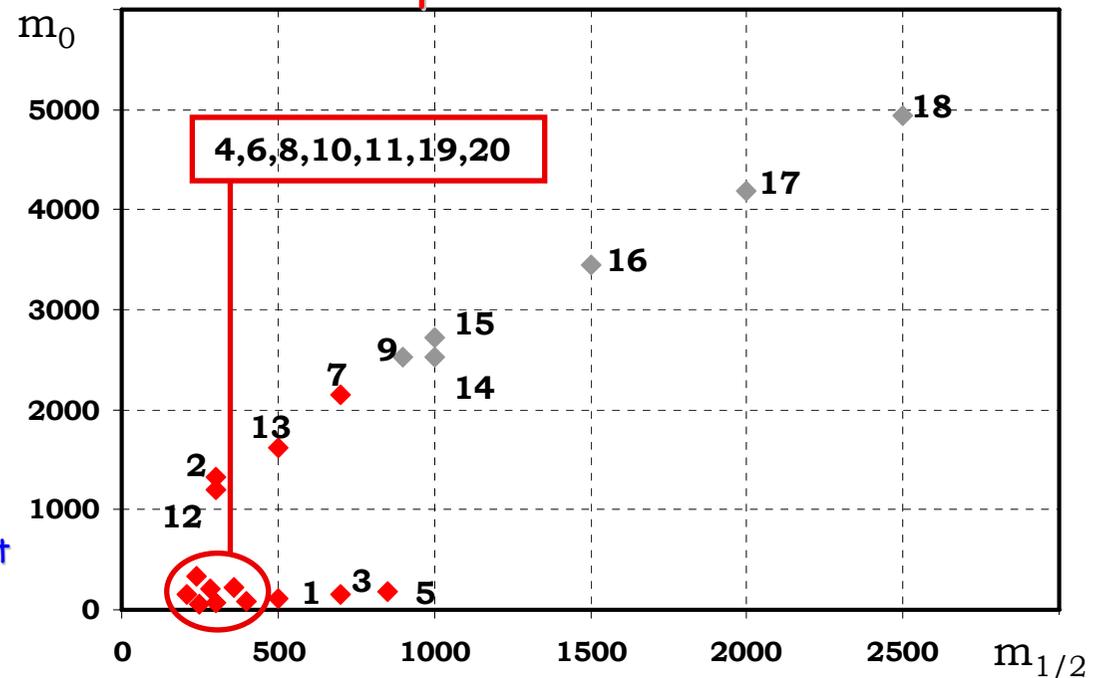


Canale favorevole:

(Drozdetski, 2004)

- Alta efficienza di trigger per i  $\mu$
  - Segnale molto pulito e facile da individuare (anche con un rivelatore non calibrato)
  - Contaminazione da parte del fondo minore rispetto a  $E_T^{Miss} + N \text{ jets}$
- Tagli di preselezione:
    - $2 \mu SS$  con  $P_T > 10 \text{ GeV}$
  - Muoni ricostruiti da informazioni di tracciatore e rivelatore per muoni
  - Jet con algoritmo IterativeCone ( $R=0.5$ )
  - $E_T^{Miss}$  con correzioni di  $E_T^{jet}$

Punti scelti per l'analisi



## Fondi SM principali

	$tb$	$tqb$	$\bar{t}b$	$\bar{t}qb$	$ZZ$	$ZW$	$WW$		$Zb\bar{b}$	$All$
$\sigma, pb$	0.212*	5.17*	0.129*	3.03*	18(NLO)	26.2	70.2		232(NLO)*	
N1	2,120	51,700	1,290	30,300	180,000	262,000	702,000		2,320,000	
N2	112	1,798	71	1,067	256	727	39.7		12,924	160,000

## Altri fondi considerati

	$WWW$	$ZWW$	$ZZW$	$ZZZ$	$WWWW$	$ZWWW$	$ZZWW$	$ZZZW$	$ZZZZ$
$\sigma, pb$	0.129	0.0979	0.0305	0.00994	0.000574	0.000706	0.000442	0.000572	0.0000161
N1	1,290	979	305	99.4					
N2	<15	<10	<3	<1					

	$t\bar{t}W$	$t\bar{t}Z$	$t\bar{t}WW$	$t\bar{t}ZW$	$t\bar{t}ZZ$
$\sigma, pb$	0.556	0.65	neg.	neg.	neg.
N1	5,560	6,500			
N2	<200	<200			

 - contributo trascurabile

- N1: Numero totale di eventi attesi per  $\int L=10 \text{ fb}^{-1}$
- N2: Numero di eventi che passano i tagli di preselezione

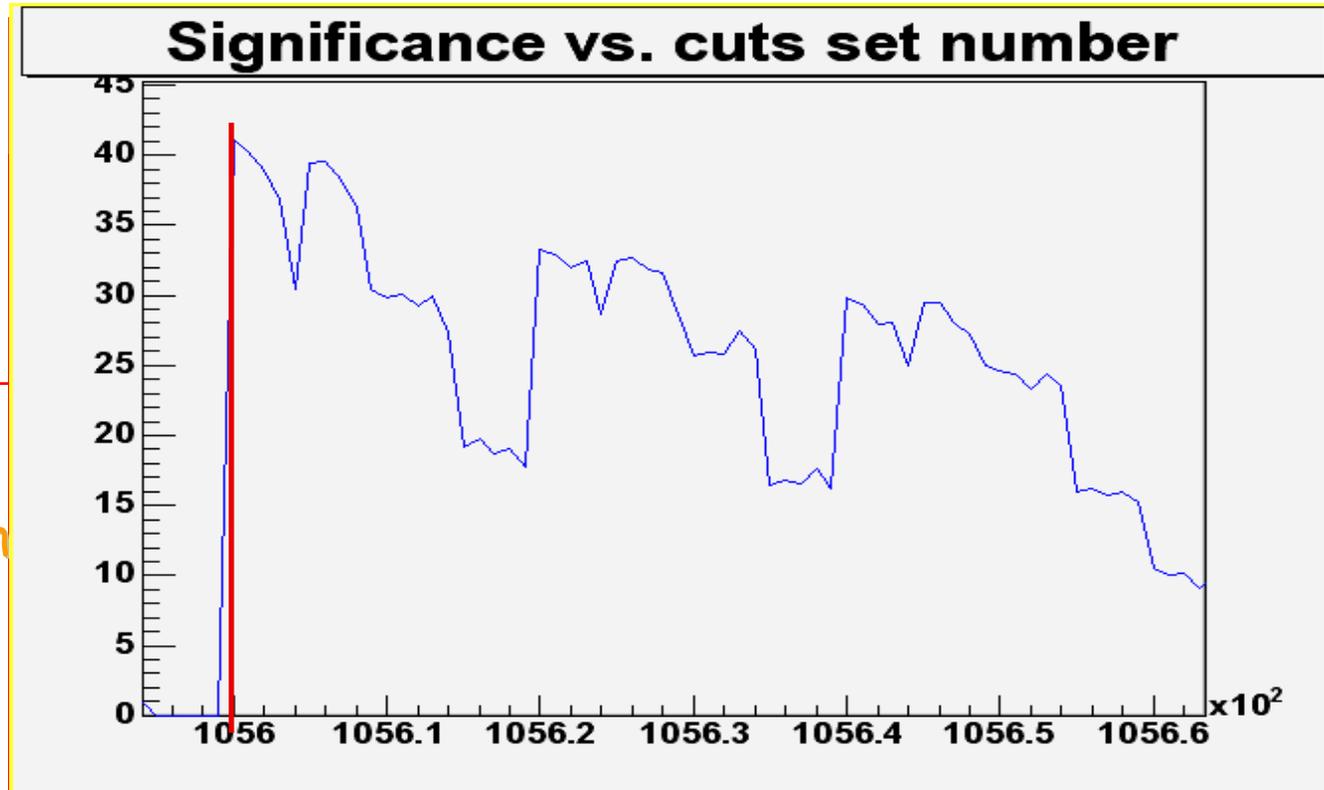
■ Considerate le distribuzioni di:

- $E_T^{\text{Miss}}$
- $E_T$  dei jet
- $P_T$  dei  $\mu$

**Esempio**

mSUGRA point

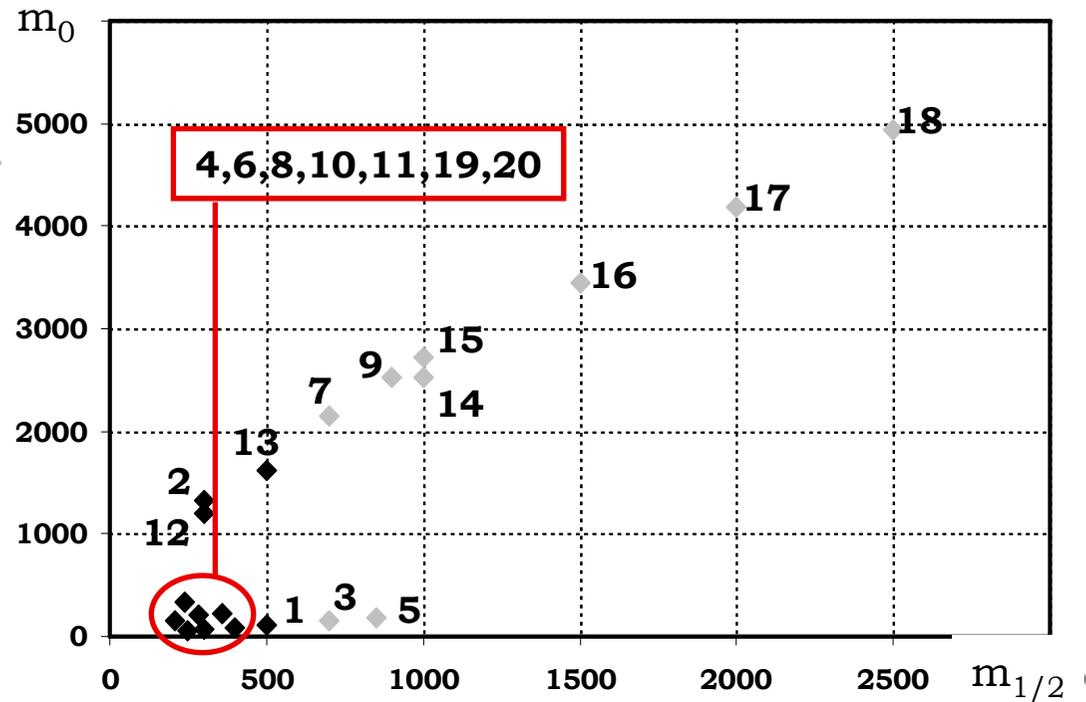
- $m_0 = 149 \text{ GeV}$
- $m_{1/2} = 700 \text{ GeV}$
- $\tan(\beta) = 10$
- $A_0 = 0$
- $\text{sign}(\mu) > 0$



- $E_T^{\text{jet}_1} > 100 \text{ GeV}$
- $E_T^{\text{jet}_3} > 100 \text{ GeV}$
- Scan dello spazio dei tagli per determinare i set che danno i valori migliori di  $S/\sqrt{S+B}$ ,  $S/B$  e  $N_{ev}$

In nero i punti per cui la significatività è  $> 5\sigma$  per  $\int L = 10 \text{ fb}^{-1}$

- Molti punti saranno visibili già con  $\int L \ll 10 \text{ fb}^{-1}$ 
  - Significatività per molti punti  $\gg 5$



- Studiata la stabilità dei risultati:
  - +30% eventi SM e -30% eventi SUSY contemporaneamente
  - Solo uno dei punti di scoperta (#13) va fuori dalla zona visibile

# Modelli alternativi

- Relazioni (approssimate) in mSUGRA tra le masse delle particelle alla scala EW:
  - Legate all'ipotesi di universalità dei termini di rottura soft della supersimmetria alla scala GUT
- Modelli alternativi abbandonano l'ipotesi di universalità:
  - Maggiore libertà nello spettro delle masse
    - Possibile inversione della gerarchia delle masse
    - Particelle SM leggere  $\leftrightarrow$  partner pesanti
  - Spiegherebbero meglio il disaccoppiamento degli effetti supersimmetrici dalla scala EW
    - Scalari di 1<sup>a</sup> e 2<sup>a</sup> generazione pesanti ( $\sim 5-20$  TeV)
    - Scalari di 3<sup>a</sup> generazione leggeri ( $< 1$  TeV) per conservare la naturalezza
- Scenari particolarmente difficili dal punto di vista sperimentale: solo poche particelle entro il reach di LHC

- Studiata una segnatura "classica":

- $(n \geq 2,3,4)$  jets

Risultati:  $(m \geq 0)$  leptoni

- $E_T^{Miss}$
- Limiti di scoperta dipendenti dalla relazione tra  $M(\tilde{\chi}_1^0)$  e  $\min[M(\tilde{g}), M(\tilde{q})]$

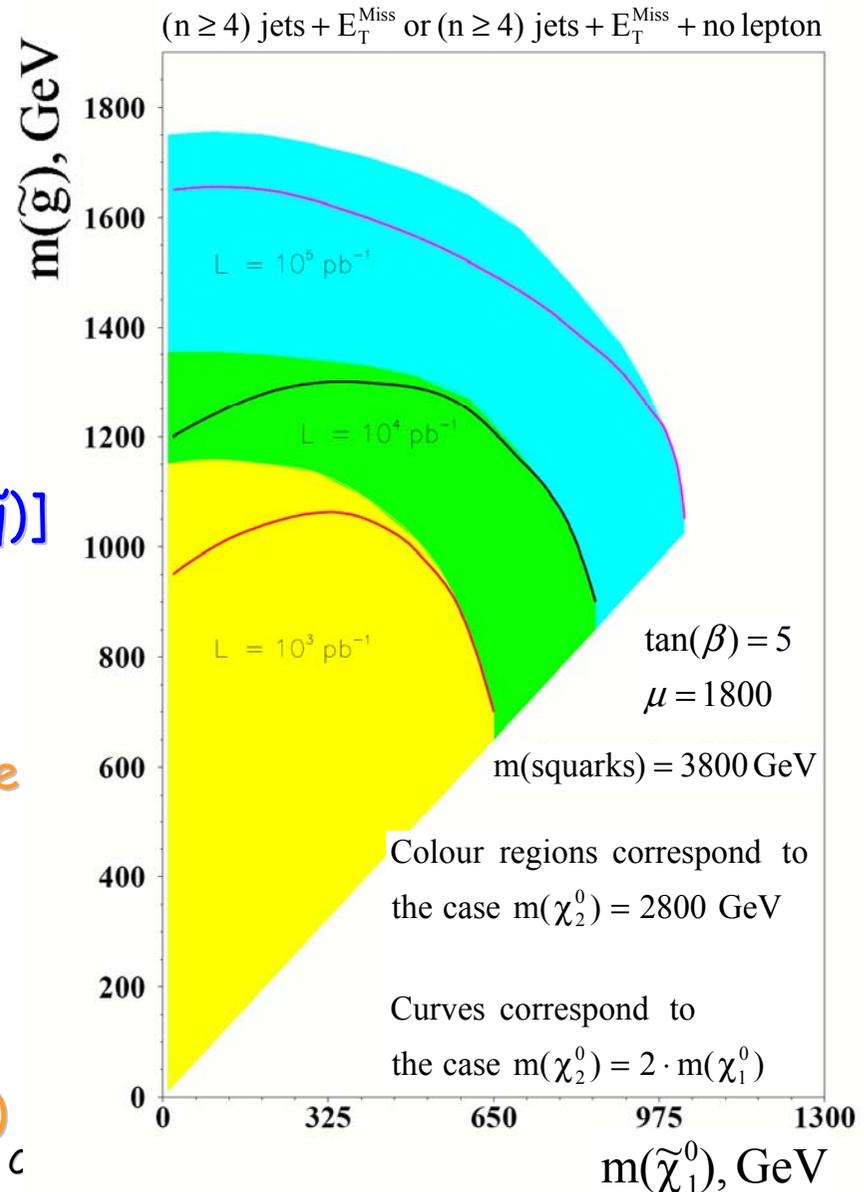
- Scoperta più difficile al crescere di  $M_{LSP}$  (i jet prodotti hanno minore energia)

- Cancellazione parziale dell'  $E_T^{Miss}$  delle due LSP

- Limiti (asintotici) di scoperta per  $M(\tilde{\chi}_1^0) \approx \min[M(\tilde{g}), M(\tilde{q})]$ :

- $\min[M(\tilde{g}), M(\tilde{q})] \leq (1.2 \div 1.5) \text{ TeV}$

- $M(\tilde{q}_3) \leq 800 \text{ GeV}$  (se è  $M(\tilde{q}_{1,2}) \gg M(\tilde{q}_3)$ )

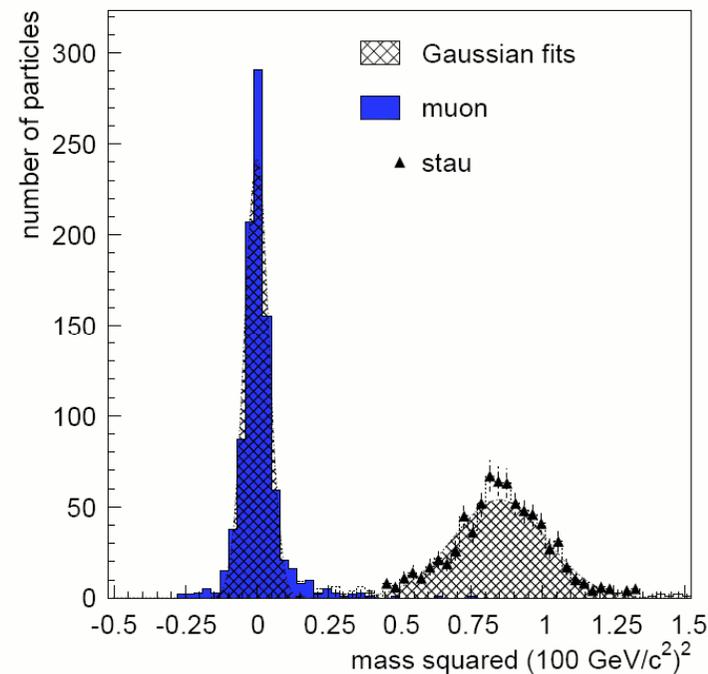
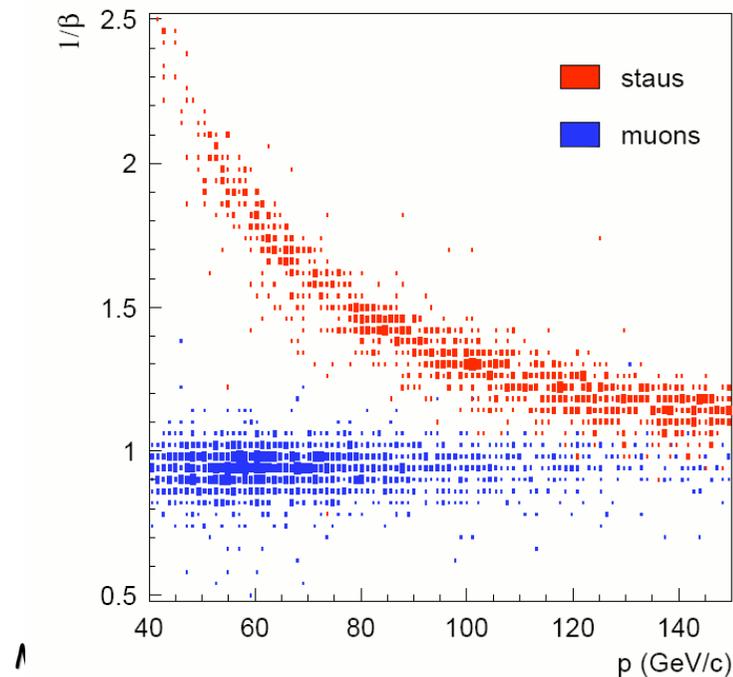


- MSSM non definisce l'origine dei parametri di rottura della SUSY
  - Settore nascosto che non "sente" le interazioni SM e in cui la SUSY è rotta spontaneamente
- Gli effetti sono trasportati al settore visibile con una interazione indipendente dal sapore
  - Gravità  $\rightarrow$  mSUGRA
  - Settore messaggero  $\rightarrow$  GMSB
    - La rottura è trasmessa al settore messaggero da una nuova interazione, e da questo al settore visibile dalle interazioni di gauge
- Caratteristiche fenomenologiche:
  - La LSP è il gravitino  $\tilde{G}$
  - Modelli classificati in base alla NLSP:
    - Stau  $\tilde{\tau}_1$
    - Neutralino  $\tilde{N}_1$
  - Decadimento NLSP  $\rightarrow$  LSP
    - Grossa libertà nei valori di  $\tau$

# GMSB: aspetti sperimentali

	$\tilde{\tau}_1$ è la NLSP	$\tilde{N}_1$ è la NLSP
$c\tau \gg L$	Segnatura simile a un $\mu$ pesante	Fenomenologia simile a mSUGRA
$c\tau \sim L$	La NLSP decade dentro il rivelatore, possibili misure di vita media	
$c\tau \ll L$	Decadimento in $2\tau$	Decadimento in $2\gamma$

$L$ =dimensioni del rivelatore



- I campi di Higgs sono bosoni di Goldstone associati ad una rottura di simmetria globale ad una scala  $\Lambda \sim 10\text{-}30 \text{ TeV}$ 
  - Acquistano massa mediante una SSB alla scala elettrodebole
- Cancellazioni al primo ordine tra particelle della stessa statistica e la simmetria globale approssimata mantengono leggeri i campi di Higgs
  - Un nuovo quark simile al top di carica  $2/3$ :  $T$
  - Nuovi bosoni di gauge pesanti:  $W_{H^\pm}, Z_H, A_H$
  - Nuove particelle di Higgs che formano un tripletto  $SU(2)$ :  $\phi^0, \phi^+, \phi^{++}$

## Caratteristiche fenomenologiche:

### Vincoli sulle masse:

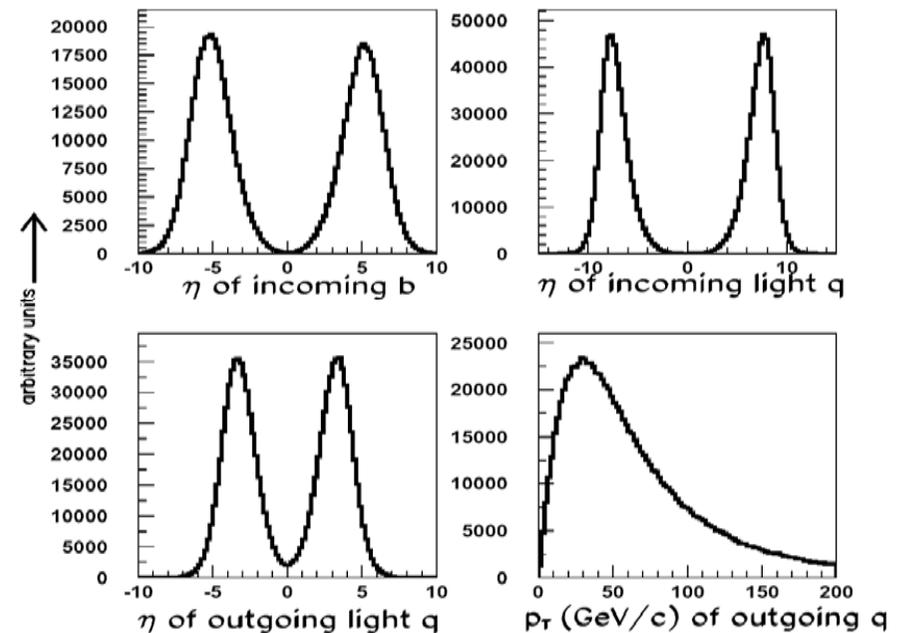
- $M_T < 2 \text{ TeV}/c^2$
- $M_W < 6 \text{ TeV}/c^2$
- $M_\phi < 10 \text{ TeV}/c^2$

### "Littlest Higgs"

### Meccanismi di produzione del $T$ :

- Produzione associata:  $gg \rightarrow T\bar{T}$  e  $q\bar{q} \rightarrow T\bar{T}$
- Produzione singola:  $qb \rightarrow q' T$ 
  - Model-dependent
- Canali più favorevoli:  $t\bar{t}$  e  $tZ$  (25% l'uno)
- $T \rightarrow bW$  (50%) sommerso dal fondo SM

kinematics of  $qb \rightarrow qT$



Canale	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>T \rightarrow ht, h \rightarrow bb</math></li> <li>• Decadimento leptonic del W dal top</li> <li>• <math>\sigma = 8.9 \text{ fb}</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>T \rightarrow Zt, Z \rightarrow \ell^+ \ell^-</math></li> <li>• Decadimento leptonic della Z</li> <li>• <math>\sigma = 0.92 \text{ fb}</math></li> </ul>
Topologia del segnale	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 3 b-jet</li> <li>▪ 1 <math>\ell</math> isolato (<math>\ell = e, \mu</math>)</li> <li>▪ <math>E_T^{\text{Miss}}</math></li> <li>▪ 1 jet leggero</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 1 b-jet</li> <li>▪ 3 <math>\ell</math> isolati (<math>\ell = e, \mu</math>)</li> <li>▪ <math>E_T^{\text{Miss}}</math></li> <li>▪ 1 jet leggero</li> </ul>
Fondi importanti	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>pp \rightarrow tt, t \rightarrow bW</math>, decadimenti semileptonici dei W (<math>\sigma = 886 \text{ pb}</math>)</li> <li>▪ <math>pp \rightarrow Wbbj</math> (<math>\sigma = 3.95 \text{ pb}</math>)</li> <li>▪ <math>pp \rightarrow W+4 \text{ jets}</math> (<math>\sigma = 146 \text{ pb}</math>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>WZ+\text{jets}</math>, con decadimenti leptonic di W e Z, e uno dei jet mistagged come b-jet</li> </ul>
Risultati preliminari	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Basso rapporto S/B</li> <li>▪ Con 3 b-jet si deteriora troppo l'efficienza</li> <li>▪ Si studiano strategie di selezione meno restrittive (2 b-jet, decadimento adronico del W)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Canale più promettente: scoperta possibile per alta <math>\int L</math></li> <li>▪ Fondo quasi del tutto soppresso dalla richiesta di 1 b-jet</li> </ul>

- Mostrate alcune delle analisi compiute (o in corso) in CMS riguardanti la ricerca di fisica oltre il Modello Standard
- Performance del trigger ottimizzate per far fronte a vari scenari (SUSY con sparticelle a bassa o alta massa, conservazione o meno della parità R)
- mSUGRA:
  - Scan del piano ( $m_0, m_{1/2}$ ) per determinare i limiti di scoperta di CMS; rivelatore sensibile a sparticelle con massa fino all'ordine di 2÷3 TeV
  - Alcune analisi più dettagliate per canali specifici ( $2\mu SS$ )
- Modelli alternativi
  - Modelli non universali: studi inclusivi mostrano che CMS sarà sensibile a sparticelle con masse almeno fino al TeV
  - GMSB: Studiate alcune signature particolari; buona sensibilità per NLSP con alta vita media
  - Little Higgs: analisi ancora all'inizio, si cercano le signature e le tecniche di analisi migliori