

## SVILUPPI NELLA RICERCA DI SUPERSIMMETRIA DI TERZA GENERAZIONE CON IL RIVELATORE ATLAS

Gabriele D'Amen



Università di Bologna

5 Aprile 2018 - IFAE XVII 2018

# MOTIVAZIONI

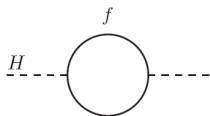
## LA NATURALITÀ NEL MODELLO STANDARD

o Il partner supersimmetrico del quark top (*stop*) potrebbe essere responsabile della cancellazione della divergenza quadratica della massa dell'Higgs<sup>1</sup>

$$m_H^2 = m_{H_0}^2 + \delta_{MS} m_H^2 + \delta_{BSM} m_H^2$$

Correzioni fermioniche (MS)

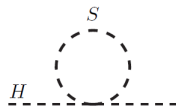
$$\delta_{MS} m_H^2 = - \frac{|\lambda_f|^2}{8\pi^2} \Lambda_{MS}^2 + \dots$$



(a)

Correzioni scalari (SUSY)

$$\delta_{BSM} m_H^2 = \frac{\lambda_S}{16\pi^2} \Lambda^2 + \dots$$



(b)

o Il contributo maggiore nel MS viene dato dal quark *top* ( $|\lambda_f| \approx 1$ )

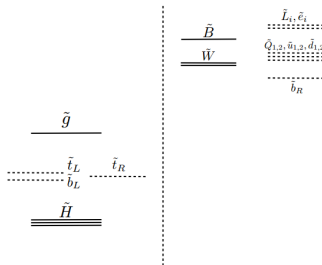
<sup>1</sup>vedi l'interessantissimo talk ("*Testing Naturalness*") presentato dal **Prof. Ian Low** (Argonne) a *Les Rencontres de Physique de la Vallée d'Aoste, LaThuile 2018*

## MOTIVAZIONI

### LA SUPERSIMMETRIA NATURALE

- Per mantenere le correzioni **naturali** è necessario che gli squark stop siano "leggeri" ( $\mathcal{O}(\text{TeV})$ )
- Altri stati supersimmetrici possono avere masse molto **al di sopra** della portata di LHC,  $M \gg 1 \text{ TeV}$
- Gli squark  $\tilde{b}_{L,R}$  e  $\tilde{t}_{L,R}$  (superpartner di  $b_{L,R}$  e  $t_{L,R}$ ) si mescolano e formano autostati di massa  $\tilde{b}_{1,2}$  e  $\tilde{t}_{1,2}$
- $\tilde{b}_1$  e  $\tilde{t}_1$  definiti più leggeri per convenzione
- Nella maggior parte dei MSSM, almeno uno squark sbottom è atteso essere più leggero dello stop pesante  $\tilde{t}_2$

### Esempio di spettro di masse MSSM



*M. Papucci et al., Natural SUSY Endures* [LINK]

# MOTIVAZIONI

## CINEMATICA DELLA TERZA GENERAZIONE

**I.** Gli attuali limiti posti da ATLAS sulla massa del gluino ( $m_{\tilde{g}} > 1800$  GeV) escludono il decadimento in gluino  $\tilde{g}$  (Vertice QCD) favorendo:

$$\tilde{t}_1 \rightarrow t + \tilde{\chi}_1^0 / \tilde{b}_1 \rightarrow b + \tilde{\chi}_1^0$$

**II.** lo squark stop più leggero può anche decadere in:

$$\tilde{t}_1 \rightarrow b + W + \tilde{\chi}_1^0, \quad (\text{tre corpi})$$

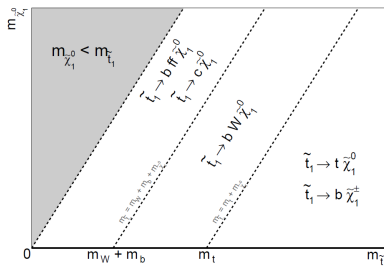
$$\tilde{t}_1 \rightarrow c + \tilde{\chi}_1^0, \quad (\text{soppresso per sapore})$$

$$\tilde{t}_1 \rightarrow b + f + f' + W + \tilde{\chi}_1^0, \quad (\text{quattro corpi})$$

**III.** gli accoppiamenti possono però favorire il decadimento in chargini o neutralini pesanti:

$$\tilde{t}_1 \rightarrow t + \tilde{\chi}_2^0 / \tilde{b}_1 \rightarrow b + \tilde{\chi}_2^0$$

$$\tilde{t}_1 \rightarrow b + \tilde{\chi}_1^\pm / \tilde{b}_1 \rightarrow t + \tilde{\chi}_1^\pm$$



*M. Papucci et al., Natural SUSY  
Endures [LINK]*

# MOTIVAZIONI

## STATO ATTUALE

### Stato attuale delle ricerche di produzione di coppie $\tilde{t}_1$ :

o Limiti di esclusione combinati su decadimento diretto di  $\tilde{t}_1$  in  $\tilde{\chi}_1^0$ ;

o Canali osservati:

$$\tilde{t}_1 \rightarrow t + \tilde{\chi}_1^0 / \tilde{t}_1 \rightarrow W + b + \tilde{\chi}_1^0 \quad (0l)$$

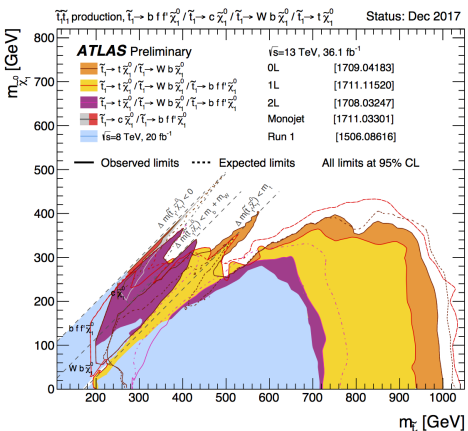
$$\tilde{t}_1 \rightarrow t + \tilde{\chi}_1^0 / \tilde{t}_1 \rightarrow W + f + f' + \tilde{\chi}_1^0 \quad (1l)$$

$$\tilde{t}_1 \rightarrow t + \tilde{\chi}_1^0 / \tilde{t}_1 \rightarrow W + f + f' + \tilde{\chi}_1^0 \quad (2l)$$

$$\tilde{t}_1 \rightarrow c + \tilde{\chi}_1^0 / \tilde{t}_1 \rightarrow b + f + f' + \tilde{\chi}_1^0 \quad (1j)$$

o Sostanziale miglioramento nell'esclusione rispetto ai precedenti risultati di ATLAS;

o Esclusione della massa del  $\tilde{t}_1$  vicina al TeV;



Modelli esclusi nello spazio  $\tilde{t}_1 - \tilde{\chi}_1^0$  (Dic.2017)  
 [LINK]

## RICERCA DI SQUARK DI TERZA GENERAZIONE

## OSSERVABILI

**Momento trasverso mancante:**

- I protoni hanno la componente trasversa (rispetto all'asse del fascio) del momento nulla
- Le particelle prodotte hanno componenti parallele e trasverse del momento non nulle
- Se  $E_T^{miss} \neq 0$  (particelle invisibili), questo "sbilanciamento" è

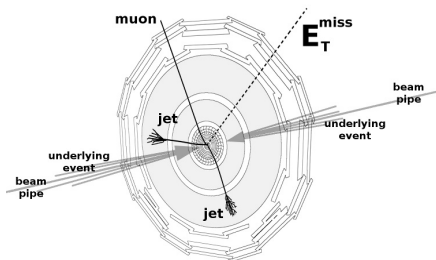
**Momento mancante**  $E_T^{miss}$

- A causa dei neutralini, i segnali SUSY hanno alto  $E_T^{miss}$

**Attività adronica:**

- Somma scalare del  $p_T$  di tutti i getti al di sopra di 30 GeV
- Sensibile ad elevate attività adroniche attese in questo tipo di segnali

$$H_T \equiv \sum ||p_{T_i}||$$



*Momento Trasverso Mancante* [LINK]

$$E_T^{miss} = - \sum_i p_T(i)$$

## RICERCA DI SBOTTOM

Produzione di coppie di **Sbottom**

# PRODUZIONE DI COPPIE DI SBOTTOM

## MODELLI PROPOSTI

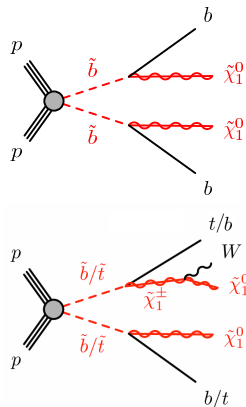
Ricerca di produzione diretta di  $\tilde{b}_1^2$ . Risultati basati su  $36.1 \text{ fb}^{-1}$  di dati in collisioni  $pp$  a  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ . Due modelli semplificati proposti:

**I. Canale a zero leptoni:** lo sbottom leggero  $\tilde{b}_1$  può esclusivamente decadere in:

$$\tilde{b}_1 \rightarrow b + \tilde{\chi}_1^0$$

**II. Canale con leptone carico ( $e, \mu$ ):** lo sbottom leggero  $\tilde{b}_1$  e lo stop leggero  $\tilde{t}_1$  hanno due decadimenti permessi:

$$\begin{aligned} \tilde{b}_1 &\rightarrow b + \tilde{\chi}_1^0 / \tilde{t}_1 \rightarrow t + \tilde{\chi}_1^0 \\ \tilde{b}_1 &\rightarrow t + \tilde{\chi}_1^\pm / \tilde{t}_1 \rightarrow b + \tilde{\chi}_1^\pm \end{aligned}$$



arXiv:1708.09266 [LINK]

con  $\tilde{\chi}_1^\pm$  quasi degenerate al  $\tilde{\chi}_1^0$ :  $m_{\tilde{\chi}_1^\pm} - m_{\tilde{\chi}_1^0} = 1 \text{ GeV}$

<sup>2</sup>arXiv:1708.09266, 30 agosto 2017, JHEP 11 (2017) 195 [LINK]

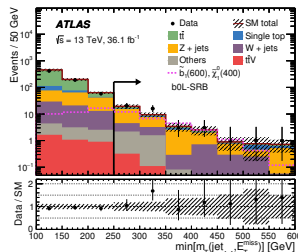


# PRODUZIONE DI COPPIE DI SBOTTOM

## SELEZIONI CINEMATICHE

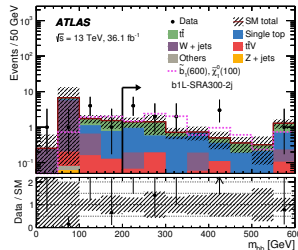
### Canale a zero leptoni:

- Nessun leptone ( $e, \mu$ ) con  $p_T > 10$  GeV
- Almeno due getti identificati come  $b$   
 $E_T^{miss} > 200$  GeV
- Tre regioni di segnale ottimizzate per diverse differenze di massa tra  $\tilde{b}_1$  e  $\tilde{\chi}_1^0$
- Fondo MS ad alta molteplicità di getto tagliato con richieste sulla direzionalità del  $E_T^{miss}$



### Canale ad un leptone ( $e, \mu$ ):

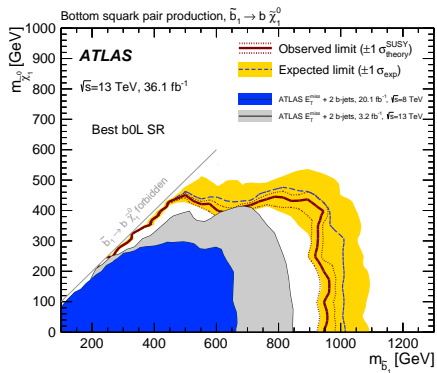
- Esattamente un leptone ( $e, \mu$ ) passante tagli di qualità
- Almeno due getti identificati come  $b$   
 $E_T^{miss} > 250/500$  GeV
- Tre regioni di segnale ottimizzate per diverse differenze di massa tra  $\tilde{b}_1/\tilde{t}_1$  e  $\tilde{\chi}_1^\pm \approx \tilde{\chi}_1^0$



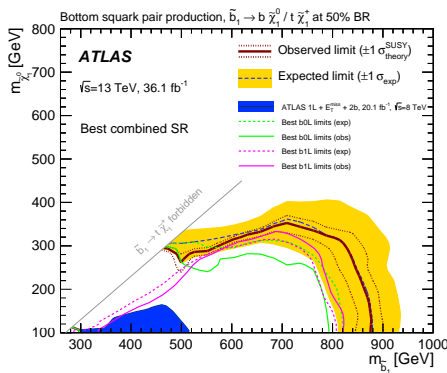
# PRODUZIONE DI COPPIE DI SBOTTOM

## RISULTATI - ESCLUSIONE

### Canale a zero leptoni:



### Canale ad un leptone ( $e, \mu$ ):



Modelli esclusi nello spazio  $\tilde{b}_1 - \tilde{\chi}_1^0$  [LINK]

## RICERCA DI STOP

Produzione di coppie di **Stop**

## RICERCA DI STOP

## MODELLI PROPOSTI

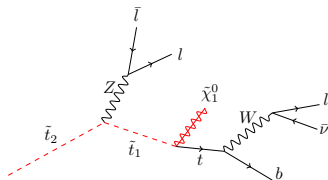
Ricerca di produzione diretta di  $\tilde{t}_2^3$ . Risultati basati su  $36.1 \text{ fb}^{-1}$  di dati in collisioni  $pp$  a  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ . Due modelli semplificati proposti:

## I. Canale con decadimento mediato da Z

(**stopZ**): lo stop pesante  $\tilde{t}_2$  può esclusivamente decadere in:

$$\tilde{t}_2 \rightarrow \tilde{t}_1 + Z \rightarrow t + \tilde{\chi}_1^0 + l\bar{l}$$

nella regione cinematica  $m_{\tilde{t}_1} = m_{\tilde{\chi}_1^0} + m_t$

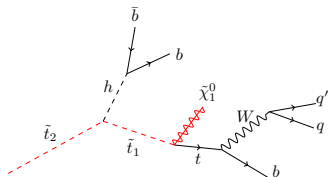


## II. Canale con decadimento mediato da H

(**stopH**): lo stop pesante  $\tilde{t}_2$  può esclusivamente decadere in:

$$\tilde{t}_2 \rightarrow \tilde{t}_1 + h \rightarrow t + \tilde{\chi}_1^0 + b\bar{b}$$

nella regione cinematica  $m_{\tilde{t}_1} = m_{\tilde{\chi}_1^0} + m_t$



arXiv:1706.03986 [LINK]

<sup>3</sup>arXiv:1706.03986, 13 Giugno 2017, JHEP 08 (2017) 006 [LINK]

## RICERCA DI STOP

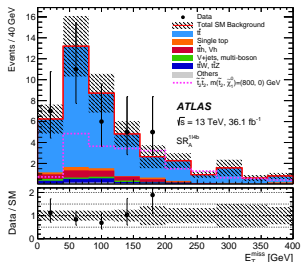
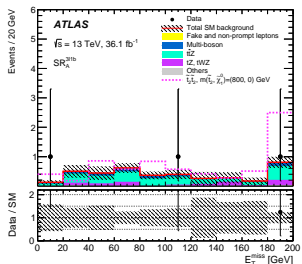
## SELEZIONI CINEMATICHE

## Canale stopZ:

- Almeno tre leptoni ( $e, \mu$ ) passanti tagli di qualità
- Almeno un getto identificato come  $b$   
 $E_T^{miss} > 100, 140$  o  $180$  GeV
- Tre regioni di segnale ottimizzate per diverse separazioni di massa tra  $\tilde{t}_2$  e  $\tilde{t}_1$
- Elevato impatto di leptoni erroneamente identificati, stimato con metodi matriciali basati sui dati

## Canale stopH:

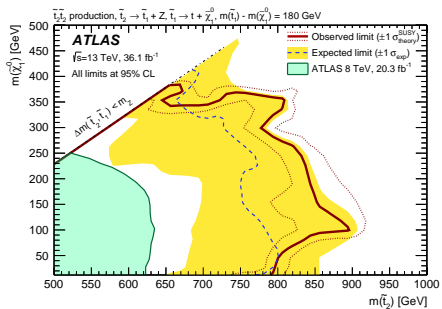
- Esattamente uno o due leptoni ( $e, \mu$ ) passanti tagli di qualità
- Almeno tre getti identificati come  $b$   
 $E_T^{miss} > 120/150$  GeV
- Tre regioni di segnale ottimizzate per diverse separazioni di massa tra  $\tilde{t}_2$  e  $\tilde{t}_1$



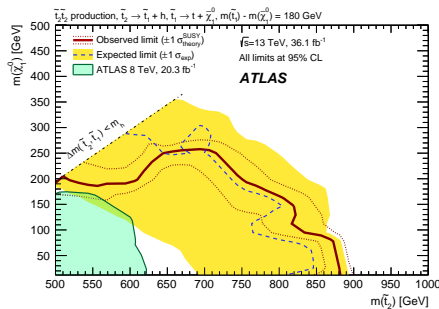
## RICERCA DI STOP

## RISULTATI - ESCLUSIONE

Canale stopZ:



Canale stopH:



Modelli esclusi nello spazio  $\tilde{t}_2 - \tilde{\chi}_1^0$  [LINK]

## STATO E RISULTATI

### CONCLUSIONI

- Numerose analisi presentate da ATLAS hanno cercato (e cercano tutt'ora) possibili **segnali di produzione di coppie** di squark di terza generazione in collisioni  $pp$  ad LHC
- Non sono finora state osservate **deviazioni significative** dalle previsioni del MS per nessuno dei canali presi in esame
- Questi ultimi risultati restringono le **masse possibili** per gli squark leggeri di terza generazione  $\tilde{t}_1, \tilde{t}_2$  e  $\tilde{b}_1$ , che sono attesi essere non molto più pesanti del  $\mathcal{O}(\text{TeV})$
- L'osservazione (o l'esclusione) di squark di terza generazione a masse "naturali" sarà di **fondamentale importanza** per i futuri sviluppi della fisica delle alte energie



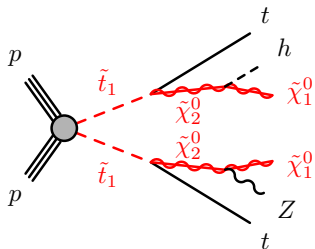


# BACKUP

## REINTERPRETAZIONE STOP1 - MOTIVAZIONI

I risultati sono stati **reinterpretati** in una ricerca per produzione di coppie di  $\tilde{t}_1$ :

$$\tilde{t}_1 \rightarrow \tilde{\chi}_2^0 + t$$



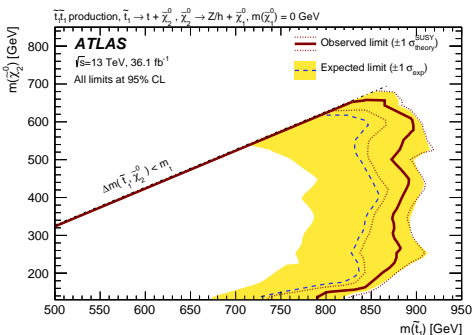
### Modello di segnale:

- $m_{\tilde{\chi}_1^0} = 0.5 \text{ GeV}$  (tipo GMSB)
- $\mathcal{B}(\tilde{t}_1 \rightarrow \tilde{\chi}_2^0 + t) = 100\%$
- $\mathcal{B}(\tilde{\chi}_2^0 \rightarrow \tilde{\chi}_1^0 + Z/h) = 50\%$  per ogni canale di decadimento
- $\Delta(m_{\tilde{\chi}_2^0}, m_{\tilde{\chi}_1^0}) \geq 130 \text{ GeV}$

## BACKUP

## REINTERPRETAZIONE STOP1 - LIMITI DI ESCLUSIONE

- Per questa reinterpretazione, non è stata applicata alcuna specifica strategia di analisi
- Le due regioni di segnale con la sensibilità più elevate delle selezioni stopZ e stopH sono state **combinare statisticamente** per derivare questo limite



Modelli esclusi nello spazio  $\tilde{t}_1 - \tilde{\chi}_2^0$

# BACKUP

## CINEMATICA DEGLI SQUARK

**I.** se cinematicamente permesso, a causa del vertice QCD domina il decadimento:

$$\tilde{q} \rightarrow q + \tilde{g}$$

**II.** gli attuali limiti posti da ATLAS sulla massa del gluino ( $m_{\tilde{g}} \gtrsim 1800$  GeV) portano a considerare:

$$\tilde{q} \rightarrow q + \tilde{\chi}_i^0$$

$$\tilde{q} \rightarrow q' + \tilde{\chi}_i^\pm$$

**III.** il decadimento diretto alla particella supersimmetrica più leggera è sempre cinematicamente favorito

$$\tilde{q} \rightarrow q + \tilde{\chi}_1^0$$

**IV.** gli accoppiamenti possono però favorire il decadimento in chargini o neutralini pesanti:

$$\tilde{q} \rightarrow q + \tilde{\chi}_2^0$$

$$\tilde{q} \rightarrow q' + \tilde{\chi}_1^\pm$$