

---

# Estudios de fondos de electrones reconstruidos como fotones en búsquedas de Supersimetría con el detector ATLAS

---

Facultad de Ciencias Exactas, UNLP  
Tesis de Licenciatura en Física

Orellana, Gonzalo E.

Director  
Wahlberg, Hernán P.

Agradecimiento especial a Francisco Alonso

# Tabla de contenidos

Marco Teórico

Modelo Estándar

SUSY

Experimento

LHC

ATLAS

Estrategia general del análisis

Fondo de electrones mal reconstruidos

Conclusiones

# Partículas del Modelo Estándar

	Partículas			Espín	Carga eléctrica
Fermiones	$(u, d)_L$	$(c, s)_L$	$(t, b)_L$	$(\frac{1}{2}, \frac{1}{2})$	$(\frac{2}{3}, -\frac{1}{3})$
	$u_R$	$c_R$	$t_R$	$\frac{1}{2}$	$\frac{2}{3}$
	$d_R$	$s_R$	$b_R$	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{3}$
Leptones	$(\nu_e, e^-)_L$	$(\nu_\mu, \mu^-)_L$	$(\nu_\tau, \tau^-)_L$	$(\frac{1}{2}, \frac{1}{2})$	$(0, -1)$
	$e_R^-$	$\mu_R^-$	$\tau_R^-$	$\frac{1}{2}$	$-1$
Bosones de Gauge	$g$			1	0
	$W^\pm, Z$			1	$\pm 1, 0$
	$\gamma$			1	0
Bosones escalares	$H$			0	0

Interacciones asociadas a bosones de gauge:

Electromagnética  $\leftrightarrow$  Fotón

Débil  $\leftrightarrow W^\pm, Z$

Fuerte  $\leftrightarrow$  Gluones

Gravitatoria  $\leftrightarrow$  Gravitón (?)

# Problemáticas del Modelo Estándar

## Teóricos

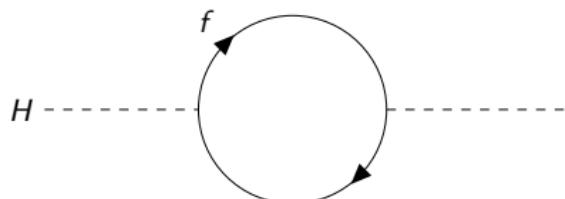
- Problema de jerarquía ( $M_W/M_P \simeq 10^{-17} \text{ GeV}$ )
- Problema de naturalidad
- Integración de la fuerza gravitatoria
- Gran cantidad de parámetros libres (19), por qué los fermiones izquierdos se agrupan en dobletes y los derechos en singletes, por qué hay tres cargas de color, cuántas generaciones hay, etc.

## Experimentales

- Materia oscura
- Neutrinos masivos

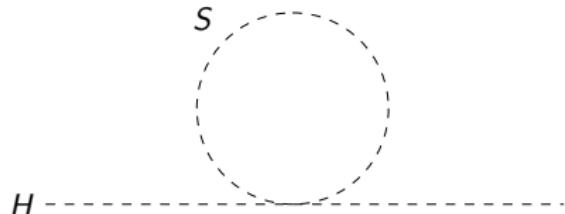
# Divergencias cuadráticas

Correcciones cuánticas a un *loop* al parámetro de masa del Higgs  $m_H^2$  debido a la masa de un fermión de Dirac  $f$  (izquierda) y debido a la masa de un campo escalar  $S$  (derecha).



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

Si  $\Lambda_{UV} \sim M_P$  → la corrección es 30 órdenes de magnitud más grande de lo esperado

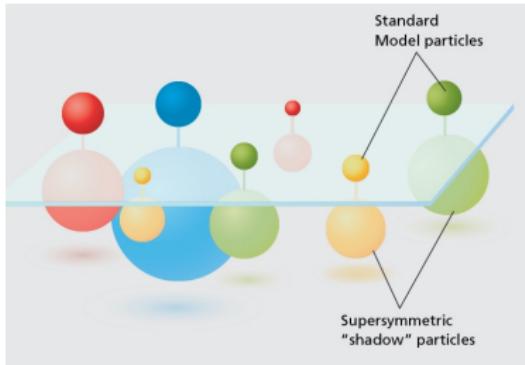


$$\Delta m_H^2 = \frac{\lambda_S}{16\pi^2} \Lambda_{UV}^2 + \dots$$

Supersimetría como extensión del SM

# Supersimetría (SUSY)

Existencia de fermiones (bosones) no predichos por el SM, relacionados con los bosones (fermiones) del SM mediante una supersimetría



Operador que genera la transformación:

$$Q| \text{bosón} \rangle = | \text{fermión} \rangle$$

$$Q| \text{fermión} \rangle = | \text{bosón} \rangle$$

- Supermultiplete con ambos estados bosón y fermión
- Misma carga eléctrica, carga de color e isospín.
- Misma masa...

# Modelo Estándar Supersimétrico Mínimo (MSSM)

Supermultiplete	Bosón	Fermión
gluón, gluino	$g$	$\tilde{g}$
$W$ , wino	$W^\pm, W^0$	$\widetilde{W}^\pm, \widetilde{W}^0$
$B$ , bino	$B$	$\widetilde{B}$
sleptón, leptón *	$(\tilde{\nu}, \tilde{e})_L$ $\tilde{e}_R$	$(\nu, e)_L$ $e_R$
squark, quark *	$(\tilde{u}_L, \tilde{d}_L)$ $\tilde{u}_R$ $\tilde{d}_R$	$(u_L, d_L)$ $u_R$ $d_R$
Higgs, higgsinos	$(H_d^0, H_d^-)$ $(H_u^+, H_u^0)$	$(\tilde{H}_d^0, \tilde{H}_d^-)$ $(\tilde{H}_u^+, \tilde{H}_u^0)$

\* Junto con las otras dos generaciones

Los supercompañeros tienen la misma masa y por ende deberían haber sido observados...

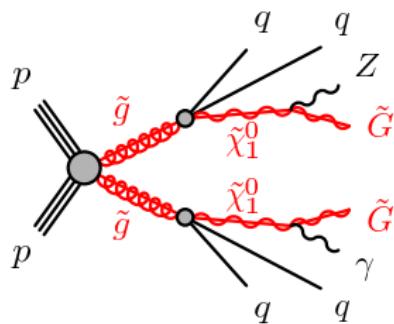
# Estados de masa

SUSY  $\longrightarrow$  simetría rota

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\text{SUSY}} + \mathcal{L}_{\text{soft}}$$

Ejemplo de modelo de ruptura: “Generalised Model of Gauge-Mediated Supersymmetry Breaking” (GGMSB) ( $\tilde{G}$ =LSP,  $\chi_1^0$ =NLSP)

- Sector de Higgs:  $H^\pm$ ,  $A^0$ ,  $H^0$  y  $h^0$
- Neutralinos y charginos:  $\tilde{\chi}_1^0$ ,  $\tilde{\chi}_2^0$ ,  $\tilde{\chi}_3^0$ ,  $\tilde{\chi}_4^0$  y  $\tilde{\chi}_1^\pm$ ,  $\tilde{\chi}_2^\pm$
- Gluino
- Squarks y sleptones



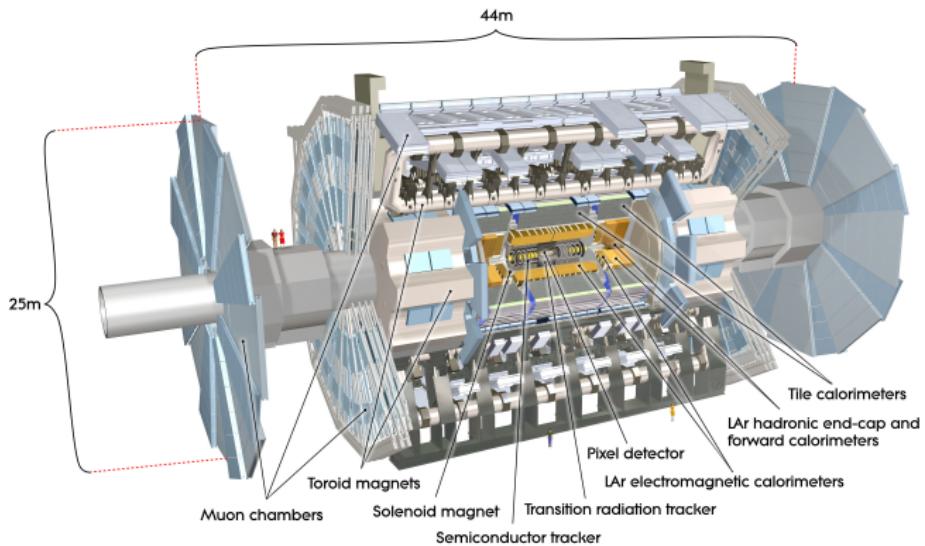
# Gran Colisionador de Hadrones (LHC)



Acelera protones (iones) en un anillo subterráneo de 27 km de longitud y los hace colisionar en 4 puntos distintos, donde se encuentran diferentes tipos de detectores

Run 2  
 $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$   
 $\mathcal{L} = 1,4 \cdot 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

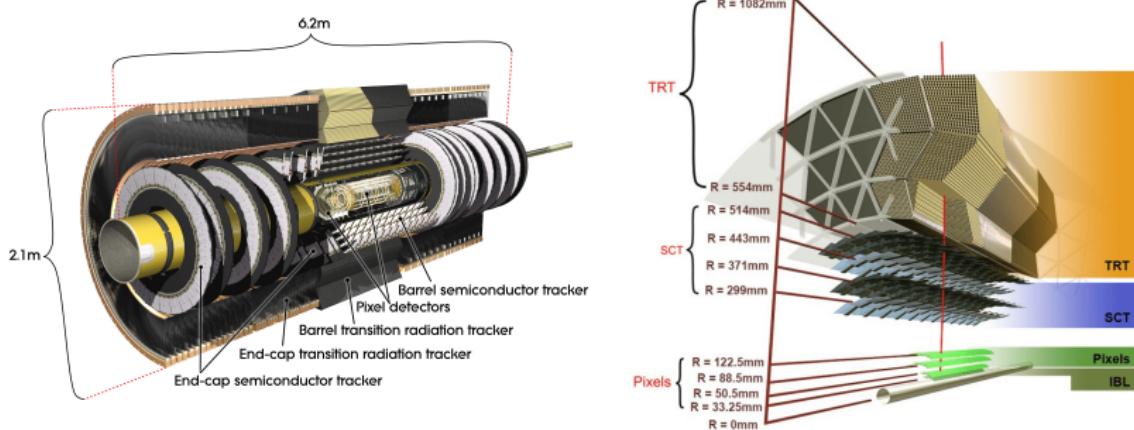
# Detector ATLAS



## Subdetectores:

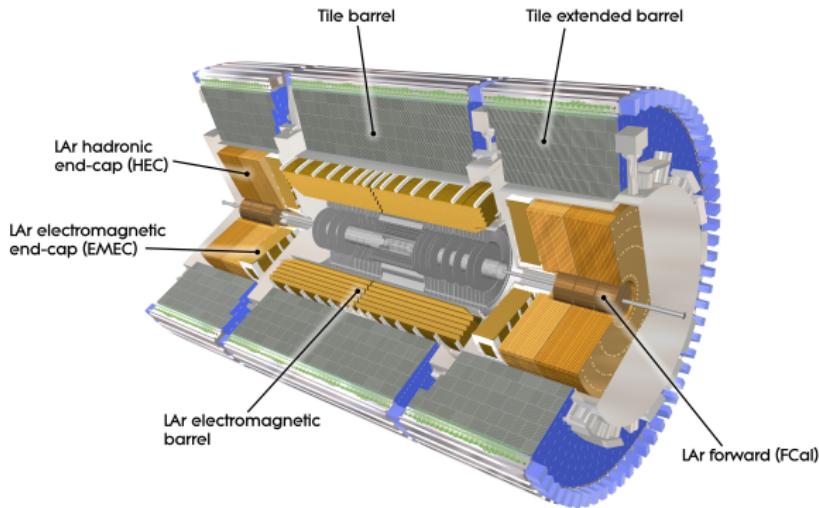
- Detector Interno: IBL, Píxel, SCT, TRT
- Calorímetros: ECAL, HCAL
- Espectrómetro de muones

# Detector interno



- Insertable B-Layer: chips + sensores de silicio. Resolución de  $8 \mu\text{m}$  ( $R - \phi$ ) y  $40 \mu\text{m}$  ( $z$ )
- Detector de Píxeles: sensores de silicio. Resolución de  $10 \mu\text{m}$  ( $R - \phi$ ) y  $115 \mu\text{m}$  ( $z$ )
- Detector Semiconducto de Trazas (SCT): sensores de silicio en microbandas. Resolución de  $17 \mu\text{m}$  ( $R - \phi$ ) y  $580 \mu\text{m}$  ( $z$ )
- Detector de Radiación de Transición (TRT): tubos con gas ionizable. Resolución de  $0,17 \text{ mm}$ . Diferencia entre partículas pesadas y livianas.

# Sistema de calorímetros

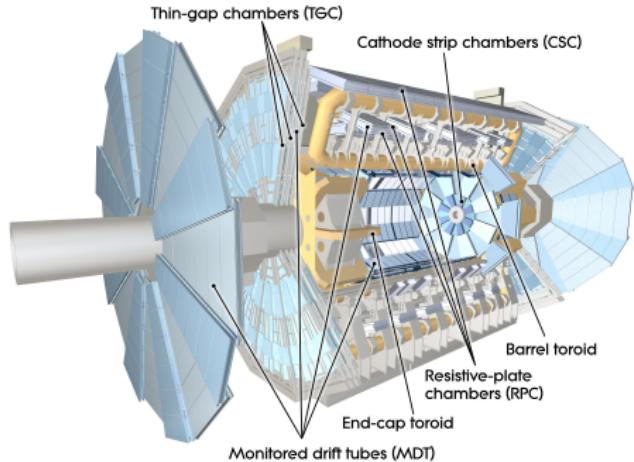


## Calorímetros de muestreo

Material absorbente + medio activo

- Electromagnético (ECAL): plomo + LAr
- Hadrónico (HCAL): acero + tejas centelladoras plásticas / cobre + LAr

# Espectrómetro de muones



Cámaras de detección:

- *Monitored Drift Tubes* (MDTs)
- *Cathode Strip Chambers* (CSCs)
- *Resistive Plate Chamber* (RPCs)
- *Thin Gap Chambers* (TGCs)

# Sistema de *trigger*, adquisición y distribución de datos

## Interacción *pp*

Frecuencia de cruce de haces 40 MHz y alrededor de 23 interacciones por cruce  
 $\rightarrow \sim 1 \text{ GHz} \xrightarrow{\text{reducir}} \sim 1,5 \text{ kHz}$

## Trigger

- Level 1 (L1): basado en hardware (ECAL, HCAL y MS),  $2,5 \mu\text{s}$ ,  $\sim 100 \text{ kHz}$
- *High Level Trigger* (HLT): basado en algoritmos, 0,2 s,  $\sim 1,5 \text{ kHz}$

## Distribución y procesamiento de datos adquiridos

- tecnología GRID para distribución y procesamiento de datos
- HLT  $\rightarrow$  *Raw Data Objects* (RDOs)  $\rightarrow$  ESD (*Event Summary Data*)/AOD (*Analysis Object Data*)  $\rightarrow$  xAOD
- Entorno de ROOT

## Derivaciones

EGAM1: eventos optimizados para estudios del bosón  $Z$ , base de electrones y fotones con  $p_T > 7 \text{ GeV}$  y masa invariante de los distintos tipos de pares mayor a  $50 \text{ GeV}$ ...

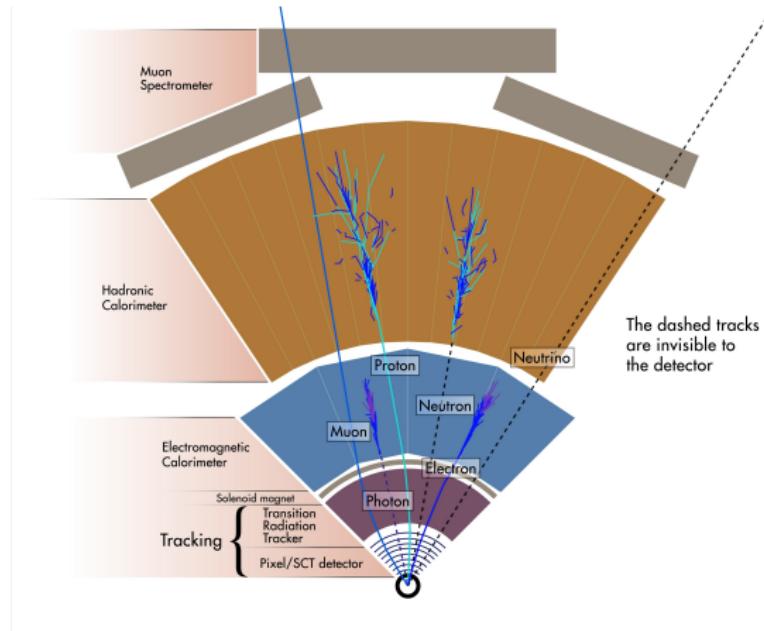
# Reconstrucción e identificación de electrones/fotones

## Reconstrucción:

- Algoritmo de clusterización
- Asociación *cluster* con las trazas en el ID

## Identificación:

- Fotones: *loose* y *tight*, cortes rectangulares
- Electrones: *loose*, *medium* y *tight*, método de *likelihood*



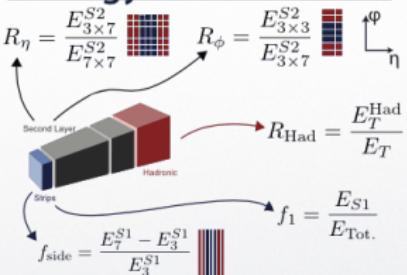
# Variables de identificación

Categoría	Nombre	L	$\gamma$	T	e
Aceptancia	-	×	✓		✗
Fuga hadrónica	$R_{\text{had}_1}$	✓	✓	✓	✓
	$R_{\text{had}}$	✓	✓	✓	✓
ECAL (3 <sup>ra</sup> capa)	$f_3$	×	✗		✓
ECAL (2 <sup>da</sup> capa)	$w_{\eta_2}$	✓	✓	✓	✓
	$R_\eta$	✓	✓	✓	✓
	$R_\phi$	✗	✓	✓	✓
ECAL (1 <sup>ra</sup> capa)	$w_{s,3}$	✗	✓	✓	✗
	$w_{s,\text{tot}}$	✗	✓	✓	✓
	$F_{\text{side}}$	✗	✓	✓	✗
	$\Delta E$	✗	✓	✓	✗
		✗	✓	✓	
ID	$f_1$	✗	✗	✗	✓
	$d_0$	✗	✗	✗	✓
	$\Delta p/p$	✗	✗	✗	✓
TRT	eProbabilityHT	✗	✗	✗	✓
ECAL+ID	$\Delta\eta_1$	✗	✗	✗	✓

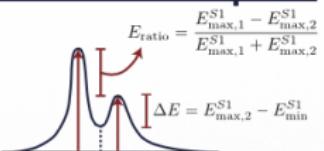
## Variables and Position

	Strips	2nd	Had.
Ratios	$f_1, f_{\text{side}}$	$R_\eta^*, R_\phi$	$R_{\text{Had}}^*$
Widths	$w_{s,3}, w_{s,\text{tot}}$	$w_{\eta,2}^*$	-
Shapes	$\Delta E, E_{\text{ratio}}$		* Used in PhotonLoose.

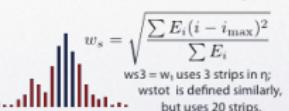
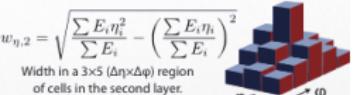
## Energy Ratios



## Shower Shapes



## Widths

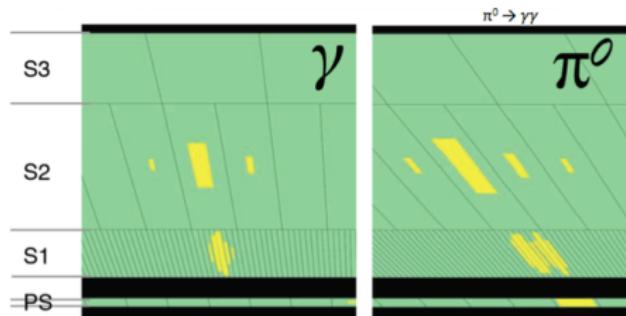
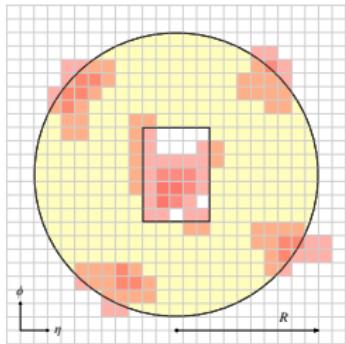


# Aislamiento

Diferenciar electrones y fotones directos, de los no directos y de los mal reconstruidos

Cono de radio  $R = \sqrt{\Delta\eta^2 + \Delta\phi^2}$ , centrado en el baricentro del cluster:

- Aislamiento de trazas
- Aislamiento calorimétrico



## Clasificación de electrones y fotones

- Fotones: aislados,  $E_T^{\text{iso}} < 2,45\text{GeV} + 0,022 \times p_T$
- Electrones: *Gradient Loose*

# Variables globales de selección de eventos

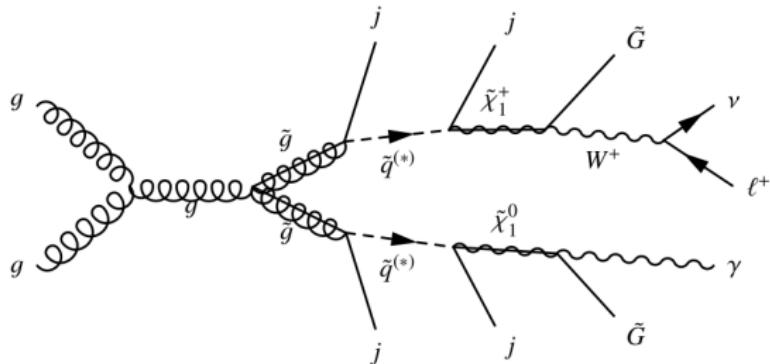
$$p_T^{\text{miss}} = \left(p_T^{\text{miss}}\right)^e + \left(p_T^{\text{miss}}\right)^\gamma + \left(p_T^{\text{miss}}\right)^{\text{jet}} + \left(p_T^{\text{miss}}\right)^\mu + \left(p_T^{\text{miss}}\right)^{\text{soft}}$$

$$E_T^{\text{miss}} = |p_T^{\text{miss}}|$$

$$H_T = |p_T^\gamma| + \sum_{\text{jets}} |p_T^{\text{jet}}|$$

$m_{\text{eff}}$ : suma escalar de  $H_T$  y  $E_T^{\text{miss}}$

---



# Estrategia general del análisis de búsqueda de SUSY

- Conteo del número de eventos observado en exceso sobre el SM en una cierta región del espacio de observables rica en eventos de la señal considerada.
- Búsqueda de Supersimetría en eventos con al menos un fotón aislado muy energético, jets y gran cantidad de energía faltante en estado final.

	$E_T^{\text{miss}}$ real	$E_T^{\text{miss}}$ instrumental
Fotones reales	$Z(\rightarrow \nu\nu)\gamma, Z\gamma\gamma, W\gamma, W\gamma\gamma$ $t\bar{t}\gamma$	$\gamma+\text{jets}, \gamma\gamma$
e/jet falsos	$W+\text{jets}, Z(\rightarrow \nu\nu)+\text{jets}$ $t\bar{t}$ , dibosons	Multijet, $Z(\rightarrow ll)+\text{jets}$

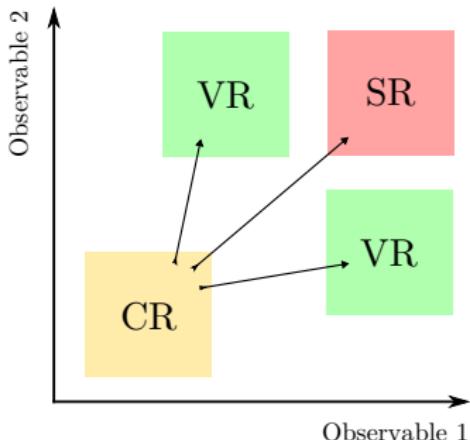
## Fondos obtenidos mediante MC:

- $Z(\rightarrow \nu\nu) + \gamma$
- $W(\rightarrow l\nu) + \gamma$
- $t\bar{t} + \gamma$
- $\gamma + \text{jets}$

## Fondos obtenidos mediante datos:

- $W(\rightarrow l\nu) + \text{jets}$
- $Z(\rightarrow \nu\nu) + \text{jets}$
- $t\bar{t}$
- $WW, ZZ, WZ$
- multijet, con alguno de los jets identificado como fotón
- $Z(\rightarrow ll) + \text{jets}$ , donde un leptón o un jet es identificado como un fotón

# Regiones utilizadas en el análisis

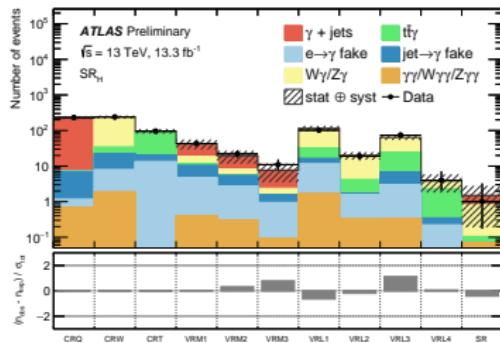
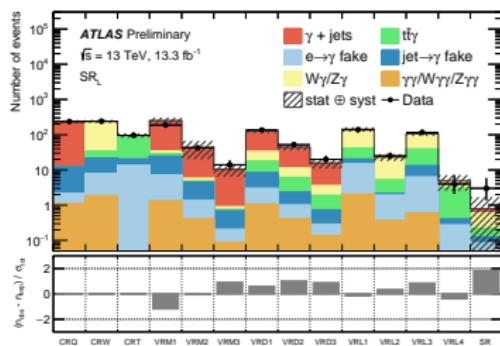


- Regiones de Señal (SR): exceso de señal por sobre el fondo predicho por el SM
- Regiones de Control (CR): normalización de los fondos estimados mediante MC. Cambiando los requisitos de las SRs
- Regiones de Validación (VR): validación de los fondos calculados. Similares a las SRs pero cambiando/invertiendo algún criterio

# Resultados típicos observados en búsqueda de SUSY

	SR <sub>L</sub>	SR <sub>H</sub>
$N_{\text{fotones}}$	> 0	> 0
$N_{\text{leptones}}$	= 0	= 0
$N_{\text{jets}}$	> 4	> 2
$p_T^{\text{leading } \gamma}$	> 145 GeV	> 400 GeV
$\Delta\phi(\text{jet}, E_T^{\text{miss}})$	> 0,4	> 0,4
$\Delta\phi(\gamma, E_T^{\text{miss}})$	> 0,4	> 0,4
$E_T^{\text{miss}}$	> 200 GeV	> 400 GeV
$m_{\text{eff}}$	> 2000 GeV	> 2000 GeV
$R_T^4$	< 0,9	-

SR	SR <sub>L</sub>	SR <sub>H</sub>
Eventos observados	3	1
Eventos del SM	$0,78 \pm 0,18$	$1,49 \pm 0,45$
$\gamma + \text{jets}$	$0,18 \pm 0,11$	$0,70 \pm 0,24$
$W\gamma$	$0,30 \pm 0,07$	$0,37 \pm 0,09$
$Z\gamma$	$0,08 \pm 0,08$	$0,32 \pm 0,32$
$t\bar{t}\gamma$	$0,10 \pm 0,04$	$0,03 \pm 0,01$
$e \rightarrow \gamma$ falsos	$0,07 \pm 0,03$	$0,00 \pm 0,00$
$j \rightarrow \gamma$ falsos	$0,04 \pm 0,01$	$0,00 \pm 0,00$
$\gamma\gamma/W\gamma\gamma/Z\gamma\gamma$	$0,01 \pm 0,00$	$0,07 \pm 0,01$



Search for Supersymmetry in events with photons, jets and missing transverse energy with the ATLAS detector in 13 TeV pp collisions.  
ATLAS-CONF-2016-066

# Fondo de electrones reconstruidos como fotones

## Idea general del método

- Muestra de eventos de  $Z \rightarrow ee/Z \rightarrow e\gamma_{\text{falsos}}$
- Factor de identificación espuria:

$$F_{e \rightarrow \gamma}[\eta, p_T] = \frac{N^{e\gamma}[\eta, p_T]}{N^{ee}[\eta, p_T]}$$

# Selección de objetos

## Fotones:

$p_T > 25\text{GeV}$ , *tight* y aislados

## Electrones:

$p_T > 25\text{GeV}$ , *tight/medium, gradient loose*

- Fuera de la región del *crack*
- $d_0$  con una significancia menor a 5,  $|\Delta z_0 \sin \theta| < 0,5 \text{ mm}$
- Si un electrón y un fotón son reconstruidos con  $\sqrt{\Delta\phi^2 + \Delta\eta^2} < 0,4$ , el fotón es descartado del evento
- Masa invariante entre 75 y 105GeV
- En caso de haber más de un par, se utiliza el que tenga la masa invariante más cercana a la del bosón  $Z$

# Descripción analítica del método

- Muestra de  $N$  pares de electrones y positrones reales
- $\epsilon_i$ : eficiencia de reconstruir un electrón, con un valor de  $\eta$  y  $p_T$  correspondientes al bin  $i$
- $f_{ij}$ : fracción de pares para los cuales el electrón *leading* (*sub-leading*) está dentro del bin  $i$  ( $j$ ).

Número de eventos en el bin  $i$  para los pares ee:

$$N_i^{ee} = \sum_j \epsilon_i \epsilon_j f_{ij} N + \sum_j \epsilon_j \epsilon_i f_{ji} N = \epsilon_i N \sum_j \epsilon_j (f_{ij} + f_{ji})$$

- $p_i$  es la proporción de electrones reconstruidos como fotones en el bin  $i$

Número de eventos en el bin  $i$  para los pares e $\gamma$ :

$$N_i^{e\gamma} = \sum_j p_i \epsilon_j f_{ij} N + \sum_j p_i \epsilon_j f_{ji} N = p_i N \sum_j \epsilon_j (f_{ij} + f_{ji})$$

$$F_{e \rightarrow \gamma}[\eta, p_T] \equiv \frac{N^{e\gamma}}{N^{ee}} = \frac{p_i}{\epsilon_i}$$

## Número de eventos correspondientes al fondo:

$$N_{e \rightarrow \gamma}(\eta, p_T, \dots) = F_{e \rightarrow \gamma}(\eta, p_T) \cdot N_e(\eta, p_T, \dots)$$

# Distinción entre señal y fondo en eventos $Z \rightarrow ee$

## Clasificación de eventos:

Según región de reconstrucción

- *endcap-endcap (EE)*
- *barrel-endcap (BE)*
- *barrel-barrel (BB)*

Según tipo

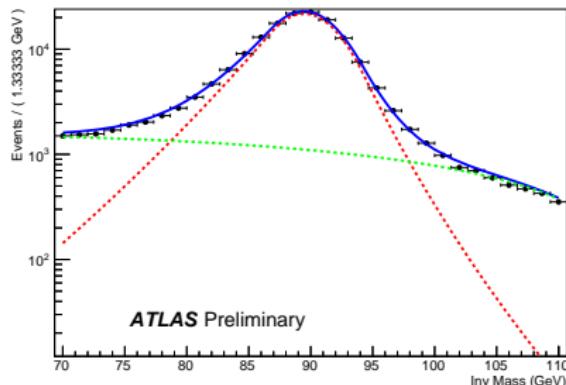
- $ee$
- $e\gamma$

## Funciones de ajuste:

- Señal (S): *double-sided Crystal-ball (DSCB)*
- Fondo (B): Polinomio de grado 2

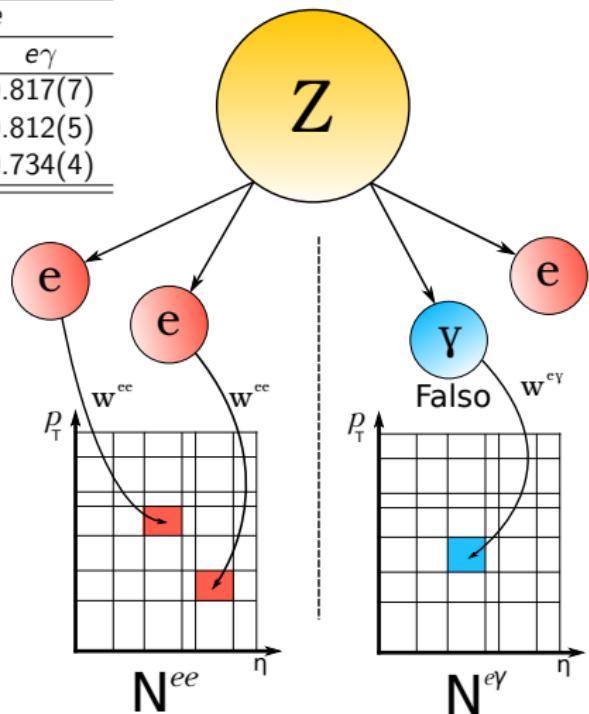
Se define una cantidad:

$$w = \frac{S}{S + B}$$



DSCB, Polinomio de grado 2,  
combinación de ambos

Región	<i>medium e</i>		<i>tight e</i>	
	<i>ee</i>	<i>eγ</i>	<i>ee</i>	<i>eγ</i>
EE	0.915(2)	0.810(7)	0.928(2)	0.817(7)
BE	0.937(1)	0.800(4)	0.934(1)	0.812(5)
BB	0.9175(7)	0.722(4)	0.9155(8)	0.734(4)



Para pares cuya masa invariante este dentro del rango [75 – 105]GeV:

$$F_{e \rightarrow \gamma}[\eta, p_T] = \frac{N_{\text{pesado}}^{e\gamma}}{N_{\text{pesado}}^{ee}}$$

## Incertezas sistemáticas

- Variando los rangos de masa de aceptación de pares: de  $[75 - 105]\text{GeV}$  a los rangos de  $[70 - 110]\text{GeV}$  y a  $[80 - 100]\text{GeV}$
- Sin la sustracción de fondo fijando el peso  $w = 1$

El sistemático proveniente de  $w = 1$  es el que predomina siendo de un 20 %

# Resultados de factores

$\eta$	$p_T$ [GeV]	medium					tight				
		Fake factor	Estadístico	Sistématicos			Fake factor	Estadístico	Sistématicos		
				w = 1	Rango	Total			w = 1	Rango	Total
0 - 0.6	75 - 90	0.0149	0.0003	0.004	0.0004	0.004	0.0155	0.0004	0.004	0.001	0.004
0 - 0.6	90 - 145	0.0136	0.0004	0.004	0.0004	0.004	0.0141	0.0004	0.004	0.002	0.004
0 - 0.6	145 - 300	0.0113	0.0008	0.003	0.0003	0.003	0.0116	0.0008	0.002	0.001	0.003
0.6 - 1.37	75 - 90	0.0164	0.0003	0.004	0.0004	0.004	0.0173	0.0004	0.004	0.002	0.004
0.6 - 1.37	90 - 145	0.0157	0.0004	0.004	0.0003	0.004	0.0161	0.0004	0.004	0.002	0.004
0.6 - 1.37	145 - 300	0.0116	0.0007	0.003	0.0003	0.003	0.0121	0.0008	0.003	0.002	0.003
1.52 - 1.82	75 - 90	0.034	0.001	0.005	0.0005	0.005	0.036	0.001	0.005	0.002	0.005
1.52 - 1.82	90 - 145	0.030	0.001	0.005	0.001	0.005	0.033	0.001	0.004	0.003	0.005
1.52 - 1.82	145 - 300	0.023	0.002	0.003	0.0005	0.003	0.022	0.002	0.003	0.001	0.003
1.82 - 2.37	75 - 90	0.044	0.001	0.006	0.002	0.006	0.046	0.001	0.007	0.002	0.007
1.82 - 2.37	90 - 145	0.038	0.001	0.005	0.001	0.005	0.039	0.001	0.006	0.003	0.007
1.82 - 2.37	145 - 300	0.039	0.003	0.006	0.001	0.006	0.041	0.003	0.006	0.002	0.006

Electrones *tight*: mayor pureza

Electrones *medium*: mayor estadística

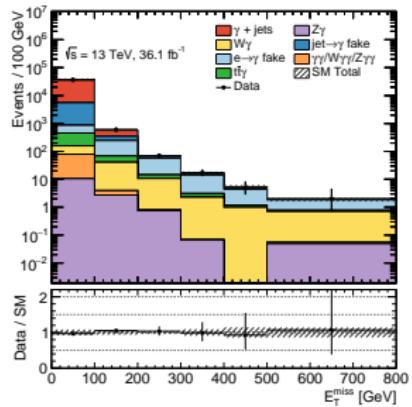
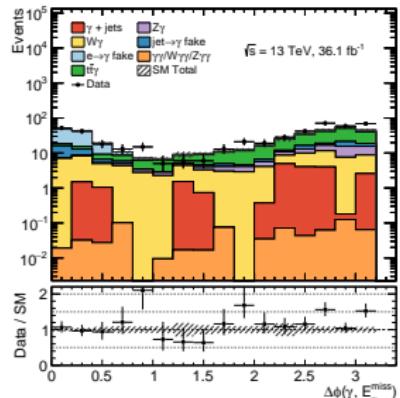
---

Sistématicos similares → se optó por utilizar electrones *medium*

# Validación de los resultados obtenidos

	VRE
$N_{\text{fotones}}$	$\geq 1$
$p_T^{\text{leading } \gamma} >$	145 GeV
$N_{\text{leptones}}$	-
$N_{\text{jets}}$	$\geq 1$
$N_{b-\text{jets}}$	$\geq 1$
$\Delta\phi(\text{jet}, E_T^{\text{miss}})$	$> 0,4$
$\Delta\phi(\gamma, E_T^{\text{miss}})$	$< 0,4$
$E_T^{\text{miss}}$	$> 200 \text{ GeV}$
$m_{\text{eff}}$	$[500, 2000] \text{ GeV}$

$e \rightarrow \gamma$ falsos VR	
Eventos observados	94
Eventos esperados por el SM	$92,18 \pm 12,58$
$\gamma + \text{jets}$	$1,46 \pm 0,16$
$W\gamma$	$13,73 \pm 1,26$
$Z\gamma$	$0,87 \pm 0,05$
$t\bar{t}\gamma$	$4,91 \pm 0,70$
$e \rightarrow \gamma$ falsos	$58,43 \pm 12,49$
$\text{jets} \rightarrow \gamma$ falsos	$12,73 \pm 2,14$
$\gamma\gamma/W\gamma\gamma/Z\gamma\gamma$	$0,05 \pm 0,00$



# Conclusiones

- Se implementó un método para poder estimar procesos donde un electrón del estado final es reconstruido como un fotón, con datos colectados por el detector ATLAS durante el Run 2 del LCH en los años 2015 y 2016.
- Verificados en una nueva región de validación
- Compatibles con predicciones en base a datos del 2015 y técnicas anteriores
- Estudios de criterios de identificación de los electrones tanto *medium* como *tight*, se optó por utilizar *medium*

¡Los resultados están siendo implementados actualmente por la colaboración ATLAS!