

---

# Búsqueda de Supersimetría con producción de Higgs en el detector ATLAS (CERN-LHC)

Defensa de Tesis Doctoral

---

G. E. Orellana

Director: H. Wahlberg

Codirector: F. Monticelli

Mayo 2022



# Sumario

- Introducción teórica
  - Modelo Estándar
  - Supersimetría
- Arreglo experimental
  - Gran Colisionador de Hadrones
  - Detector ATLAS
  - Objetos físicos en ATLAS
- Eficiencia del trigger de fotones
- Estrategia y modelo estadístico para la búsqueda de SUSY
- Búsqueda de SUSY con fotones y Higgs en el estado final con producción fuerte
  - Resultados empleando los datos del Run 2 del LHC
- Búsqueda de SUSY con producción electrodébil en estados finales con fotones, bosones Z y Higgs
  - Resultados preliminares empleando los datos del Run 2 del LHC
- Conclusiones

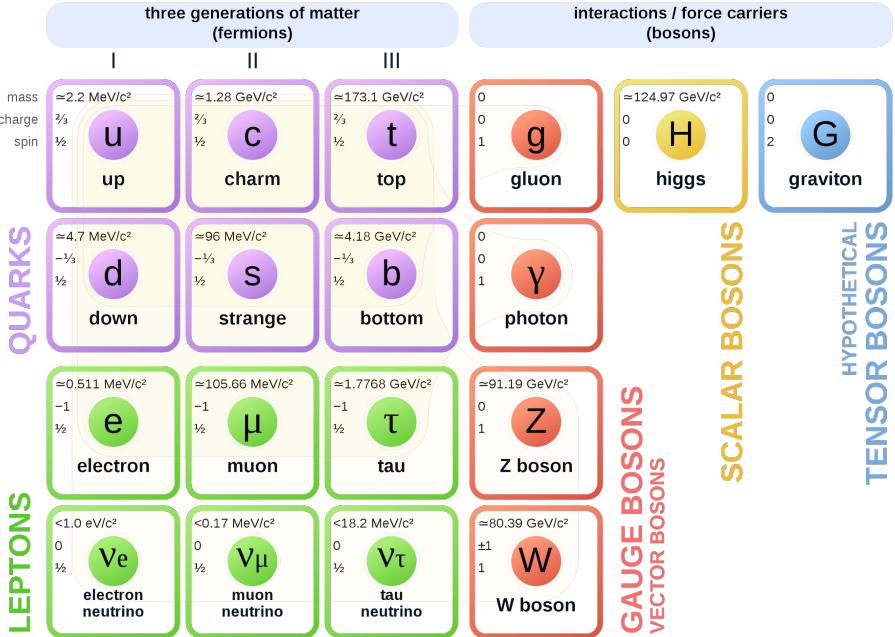
# INTRODUCCIÓN TEÓRICA

# Modelo Estándar

Modelo Estándar de la física de partículas (SM): teoría que describe y clasifica a las partículas elementales de la naturaleza, junto con tres de las cuatro interacciones fundamentales conocidas hasta el momento.

- Leptones + Quarks
- Bosones de gauge
- Bosón de Higgs

## Standard Model of Elementary Particles and Gravity



Grupo de simetría + Mecanismo de Higgs

$$SU(3)_C \otimes SU(2)_L \otimes U(1)_Y \rightarrow SU(3)_C \otimes U(1)_Q$$

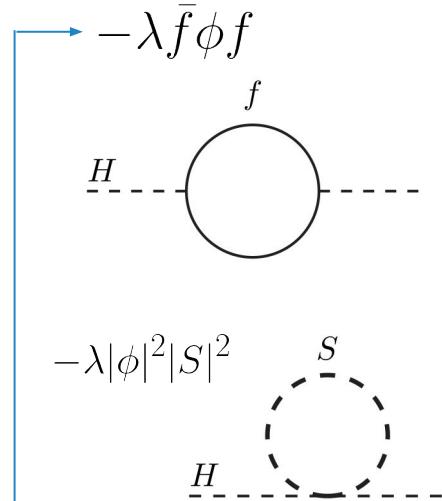
# Limitaciones del SM

Grandes predicciones! (dentro del rango de validez)

- No incluye gravedad
- No incluye materia oscura
- No considera la asimetría bariónica
- Neutrinos no masivos
- Desviaciones en medidas de precisión
- Problemas de jerarquía

$$M_P/M_W \sim 10^{17}$$

El término de masa del Higgs recibe correcciones virtuales de cada partícula que se acople al campo de Higgs



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

$$\Lambda_{UV} \sim M_P$$

Correcciones con 30 órdenes de magnitud mayor al valor medido

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

En caso de existir dos escalares complejos la cancelación es directa

SUPERSIMETRÍA

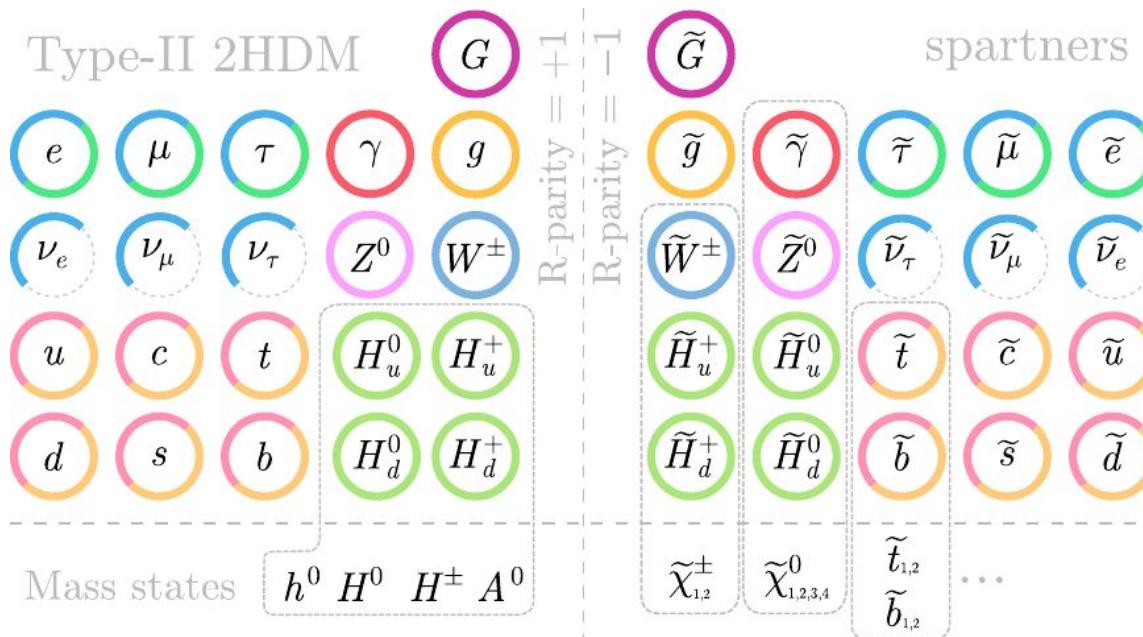
# Supersimetría: Modelo Estándar Supersimétrico Mínimo

$$Q|\text{Bosón}\rangle = |\text{Fermión}\rangle$$

$$Q|\text{Fermión}\rangle = |\text{Bosón}\rangle$$

Cada fermión debe tener asociado un bosón y viceversa...

- Estabilidad en la masa del Higgs
- Candidatos a materia oscura
- Escenario para la inclusión de la gravedad



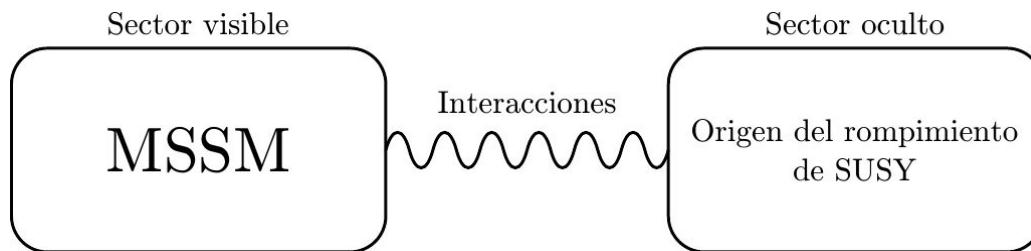
El Modelo Estándar Supersimétrico Mínimo (MSSM) es la extensión del SM que requiere incluir la mínima cantidad de partículas para completar los supermultipletes.

Supermultipletes: contiene ambos estados bosónico y fermiónico, los cuales tienen misma carga eléctrica, isospin débil, carga de color y **masa**...

↓  
Simetría débilmente rotada

# Ruptura de SUSY

$$\mathcal{L}_{\text{MSSM}} = \mathcal{L}_{\text{SUSY}} + \mathcal{L}_{\text{soft}} \longrightarrow \text{Masas} \sim \text{TeV}$$



- Sector oculto de partículas sin acoplamientos directos con los supermultipletes quirales del sector visible del MSSM
- Interacciones que median el rompimiento de SUSY desde el sector oculto al observable

Gauge Mediated Supersymmetry Breaking (GMSB)  $\longrightarrow$  General Gauge Mediation (GGM)



Partícula Supersimétrica Más Liviana (LSP): **gravitino**

Siguiente Partícula Supersimétrica Más Liviana (NLSP): **neutralino**

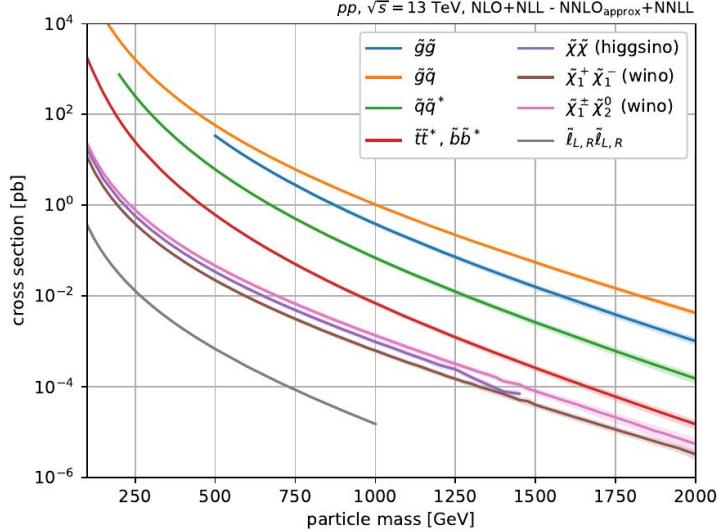
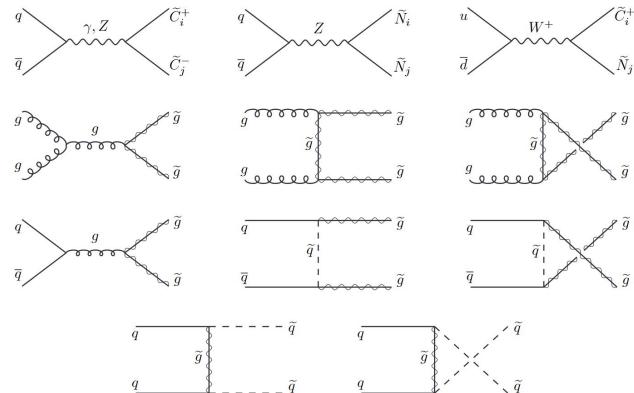
# Adicional de SUSY

Secciones eficaces relativamente más bajas

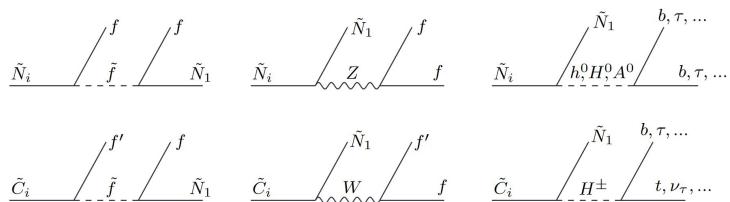
## Paridad R

- LSP estable
- Si es neutra: candidata a DM
- sparticles decaen número impar de sparticles
- Experimentos de colisión: sparticles se producen en número par (dos en general)

## Modos de producción



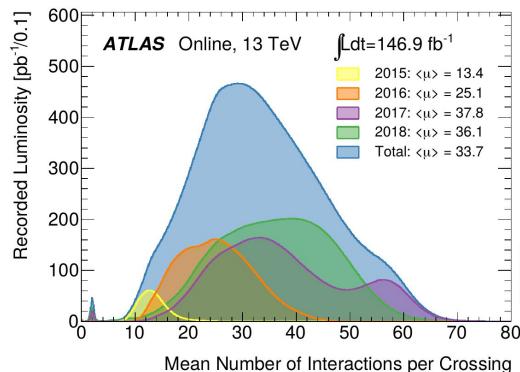
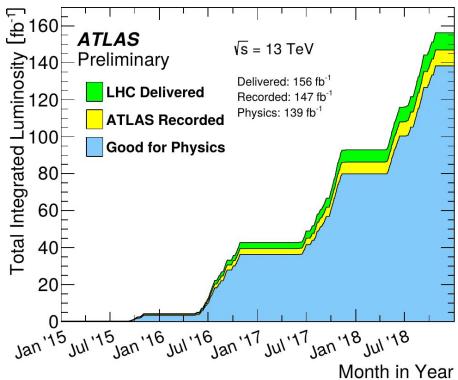
## Posibles decaimientos de los gauginos (no GGM)



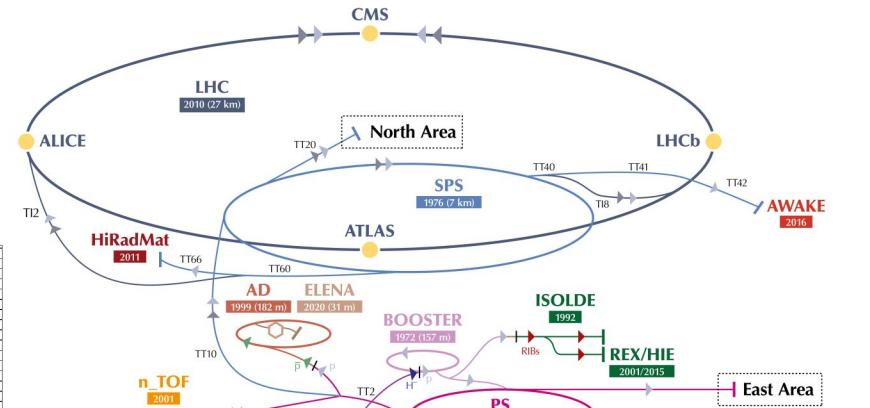
# ARREGLO EXPERIMENTAL

# Gran Colisionador de Hadrones

- Complejo de aceleradores que incrementan la energía de los protones en etapas hasta llegar al LHC
- LHC: acelerador de 27 km de diámetro
- Detectores principales
  - ATLAS
  - CMS
  - LHCb
  - ALICE



- Run 2 (2015-2018):
- 13 TeV
  - 139 ifb
  - $\langle \mu \rangle \sim 33.7$
  - $\mu_{\text{Max}} \sim 70$

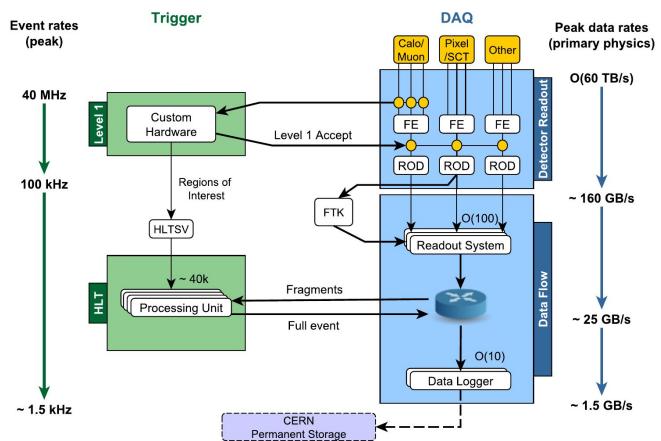
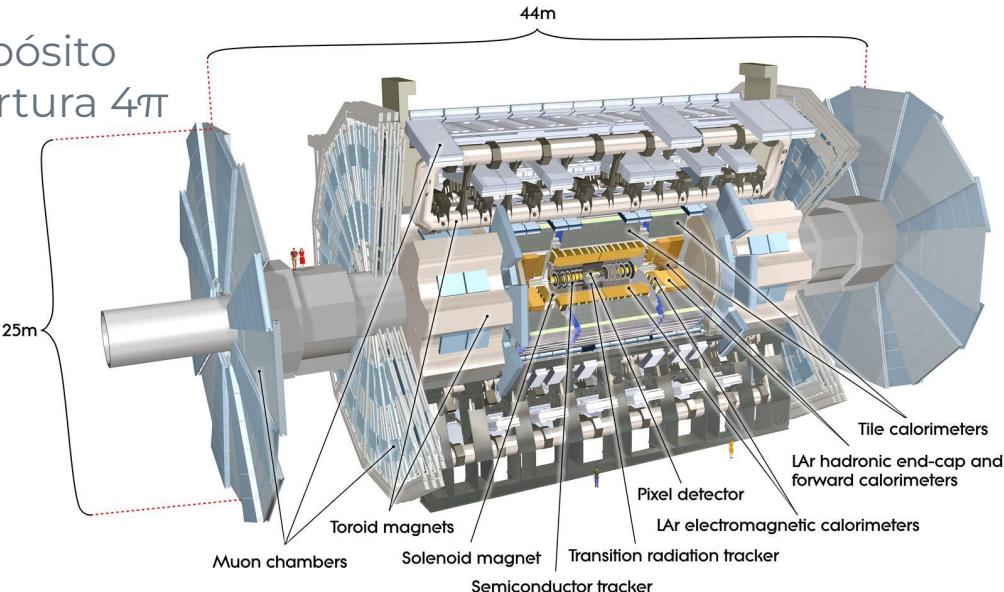


# Detector ATLAS

Subdetectores:

- Detector Interno
- Calorímetros
  - ECAL
  - HCAL
- Espectrómetro de muones
- Sistema de imanes
- Sistema de trigger

Detector multipropósito con cobertura  $4\pi$



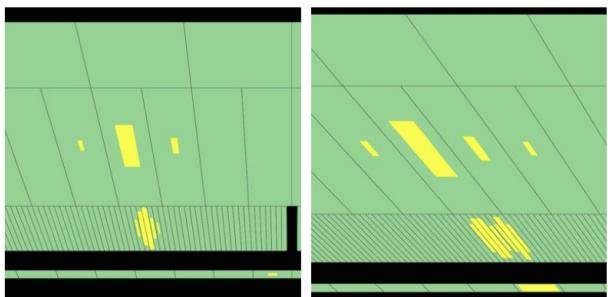
LHC: altísima frecuencia de cruce de paquetes 40 MHz

Sistema de trigger para seleccionar los eventos de interés

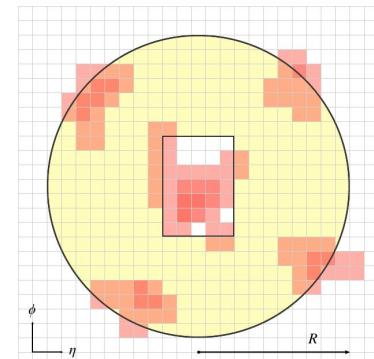
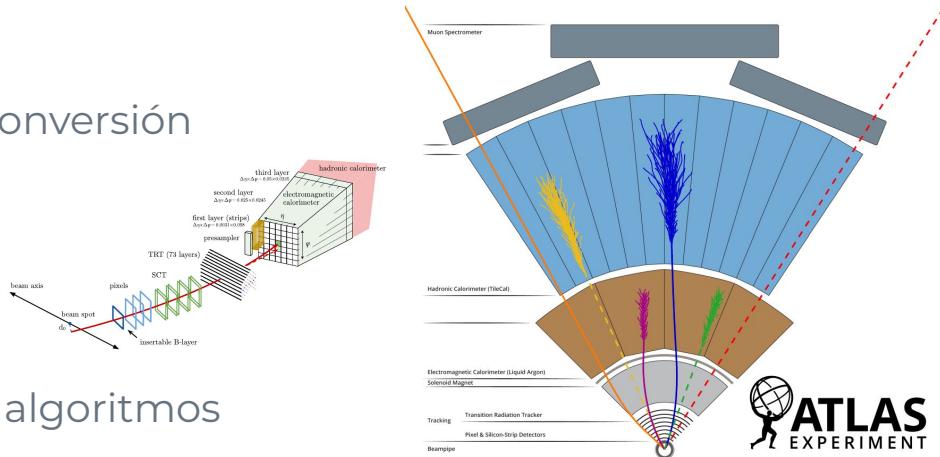
- L1: reducir los 40 MHz del LHC a 100 kHz
- HLT: reducir a 1.5 kHz

# Reconstrucción e identificación de objetos

- Fotones:
  - EM clusters sin traza asociada
  - EM clusters asociados a vértices de conversión
- Electrones
  - EM clusters asociados a trazas
- Muones
  - Principalmente trazas en el MS+ID
- Jets
  - EMTopo: clusters combinados con el algoritmos anti-kt
  - PFlow: clusters + trazas
- Energía transversa faltante



- Criterios de identificación: cortes *shower shapes*
- Criterios de aislamiento: calorimétrico y de trazas



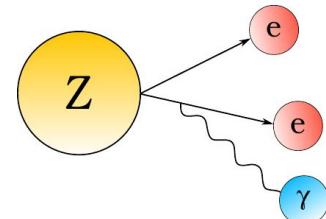
# EFICIENCIA DEL TRIGGER DE FOTONES

# Eficiencia del trigger de fotones

Umbral del trigger

> 60 GeV → Método *bootstrap*

< 60 GeV → Método del bosón Z radiativo

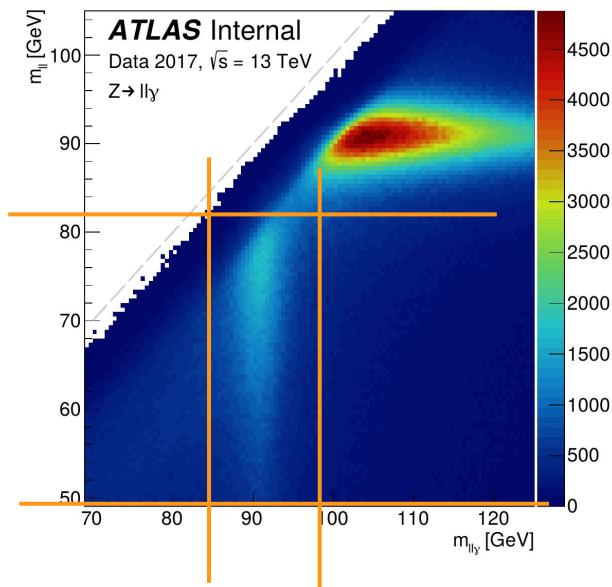


Decaimiento radiativo del bosón Z: producto del decaimiento leptónico irradia un fotón

- Fotón de alta pureza
- Baja estadística de la muestra

Selección de eventos de datos

- Triggers primarios de leptones
- EGAM3/EGAM4
- Fotón Tight + 2 leptones Medium
- $86 \text{ GeV} < m_{\gamma\gamma} < 96 \text{ GeV}$
- $40 \text{ GeV} < m_{ll} < 83 \text{ GeV}$

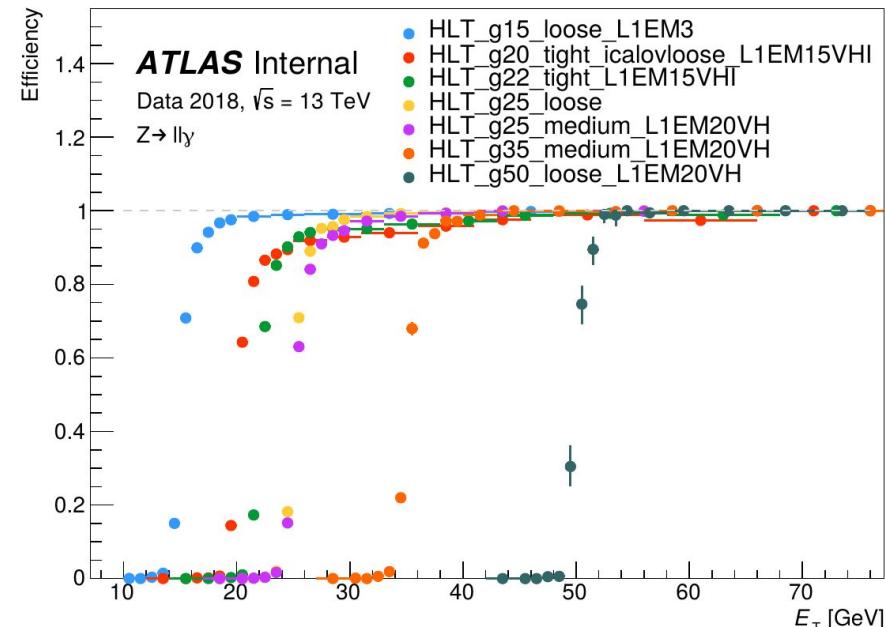


Eficiencia:  $\epsilon = \frac{N_{\text{trig}}}{N_{\text{total}}} \quad \begin{array}{l} \# \text{ de eventos que pasaron el trigger} \\ \# \text{ de eventos total de la muestra} \end{array}$

# Eficiencia del trigger de fotones

- Triggers primarios
- Segmentos de triggers dobles
- Triggers específicos de análisis

Trigger	2015	2016	2017	2018
HLT_g15_loose	✓	✓		
HLT_g15_loose_L1EM3			✓	✓
HLT_g20_loose	✓	✓		
HLT_g20_tight	✓	✓		
HLT_g20_tight_icalovloose_L1EM15VHI			✓	✓
HLT_g22_tight		✓		
HLT_g22_tight_L1EM15VHI		✓	✓	✓
HLT_g25_loose	✓	✓	✓	✓
HLT_g25_loose_L1EM15	✓	✓	✓	✓
HLT_g25_medium_L1EM20VH			✓	✓
HLT_g35_loose	✓	✓		
HLT_g35_medium_L1EM20VH			✓	✓
HLT_g35_loose_L1EM15	✓		✓	✓
HLT_g50_loose_L1EM20VH			✓	✓

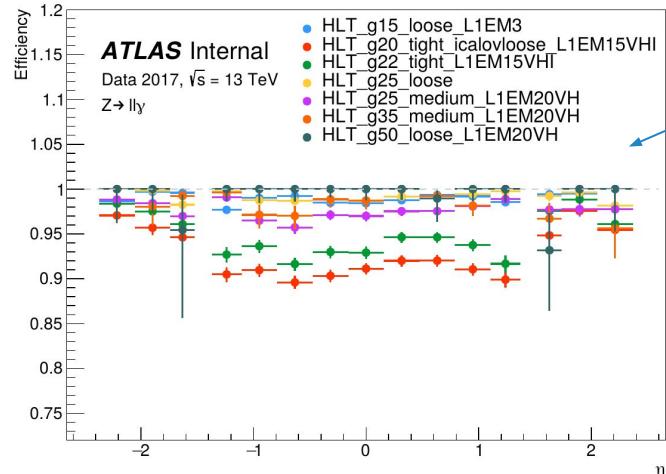


Incertezas  $\sim 10\%$

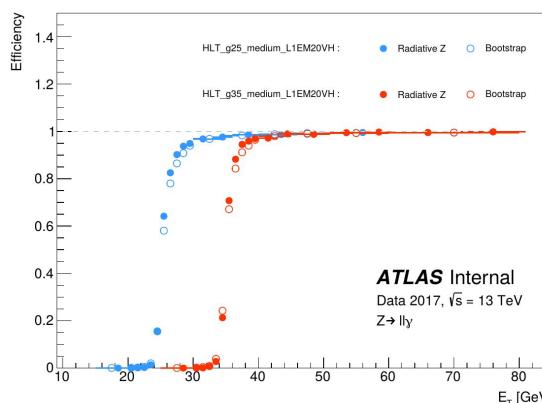
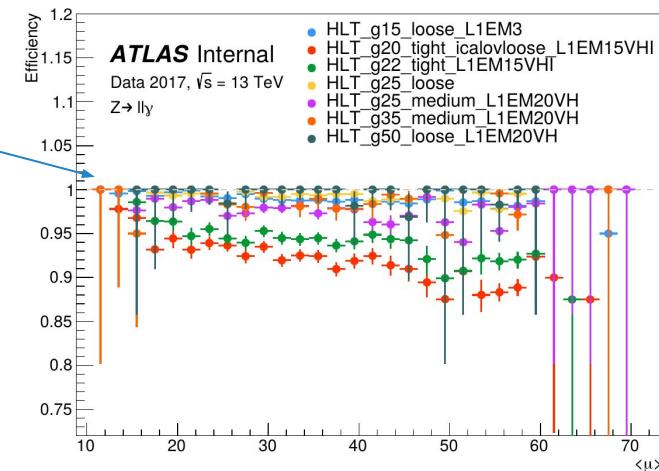
- Ventana de selección
- Criterios de identificación de leptones

- Curvas *turn-on*
- Completamente eficiente en  $\sim 5 \text{ GeV}$  arriba del umbral

# Eficiencia del trigger de fotones



Prácticamente  
sin dependencia  
en  $\eta$  y  $\langle\mu\rangle$



Pequeña mejora en la  
medida de la eficiencia  
con respecto al método  
*bootstrap*

# Factores de escala para triggers de fotones

Las simulaciones de Monte Carlo no logran reproducir correctamente imperfecciones relacionadas con la interacción de las partículas con el material del detector

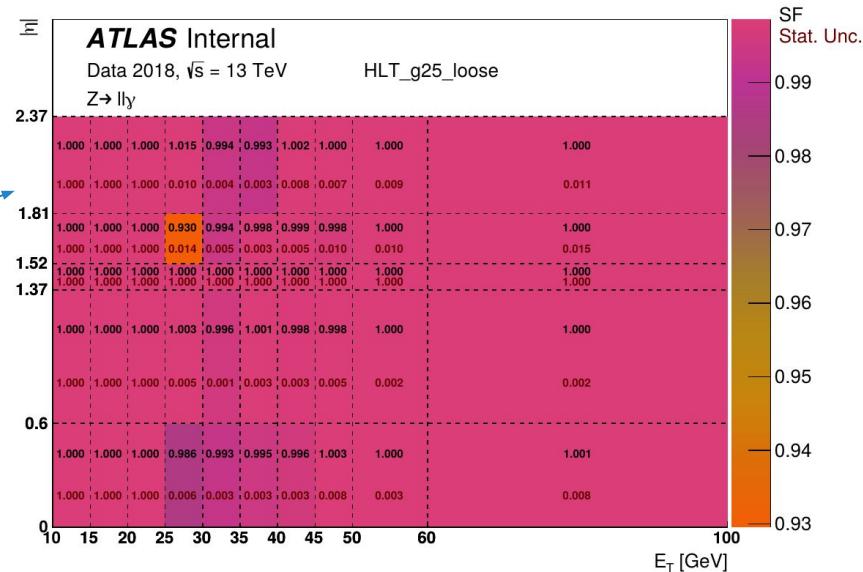
Factores de escala que corrigen las simulaciones para que se equiparen a los datos

$$SF(p_T, \eta) = \frac{\epsilon^{(\text{datos})}(p_T, \eta)}{\epsilon^{(\text{MC})}(p_T, \eta)}$$

Valores cercanos a 1

Tanto las eficiencias como los factores de escala son empleados en todos los análisis de la colaboración ATLAS que seleccionen eventos con trigger de fotones

Diferencias entre las eficiencias de datos y MC



# ESTRATEGIA Y MODELO ESTADÍSTICO PARA LA BÚSQUEDA DE SUSY

# Estrategia general para una búsqueda de nueva física

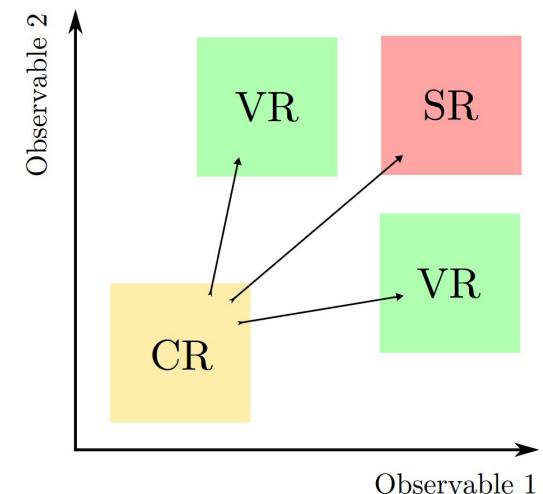
Experimento de conteo de eventos con características asociadas al modelo de estudio, y su comparación con las predicciones que el Modelo Estándar hace de eventos con las mismas características



Regiones en el espacio de observables:

- Regiones de Señal (SR): ricas en eventos de señal, donde se espera observar el exceso
- Regiones de Control (CR): ricas en eventos de un fondo particular, empleadas para corregir los mismos con los datos
- Regiones de Validación (VR): empleadas para la validar la estimación de los fondos

CRs y VRs ortogonales a las SRs → *blinded*



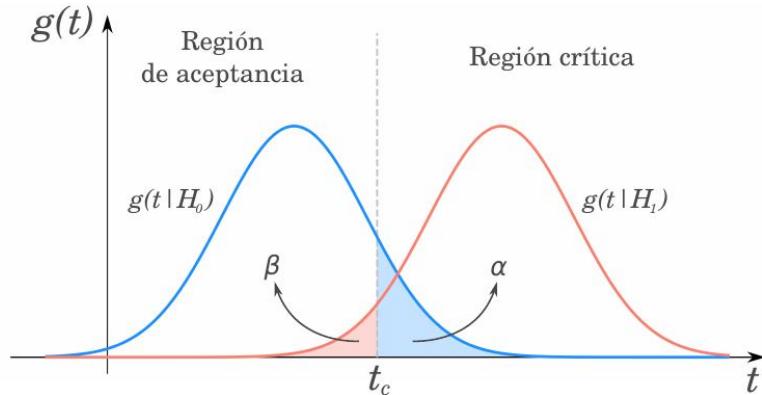
# Elementos estadísticos

Experimento de conteo: modelo de Poisson

$$\text{Pois}(N|\mu) = \frac{\mu^N e^{-\mu}}{N!}$$

Contrastación de hipótesis:

$$p_H = \int_{t_{H,obs}}^{\infty} g(t|H)dt \longrightarrow Z = \Phi^{-1}(1-p) > 5\sigma \longrightarrow \text{Descubrimiento!}$$



Test estadístico: cociente de *likelihoods*

$$\lambda(\mu) = \frac{\mathcal{L}(\mu, \hat{\theta})}{\mathcal{L}(\hat{\mu}, \hat{\theta})}$$

$$\tilde{t}_\mu = -2 \ln \tilde{\lambda}(\mu)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(\mathbf{n}|\mu_{\text{sig}}, \boldsymbol{\mu}_{\text{bkg}}, \mathbf{s}, \mathbf{b}, \boldsymbol{\theta}) &= P_{\text{SR}} \times P_{\text{CR}} \times C_{\text{syst}}(\boldsymbol{\theta}^0, \boldsymbol{\theta}) \\ &= \prod_{i \in \text{SR}} \frac{(\mu_{\text{sig}} s_i + \boldsymbol{\mu}_{\text{bkg}} \cdot \mathbf{b}_i)^{n_i}}{n_i!} \prod_{j \in \text{CR}} \frac{(\mu_{\text{sig}} s_j + \boldsymbol{\mu}_{\text{bkg}} \cdot \mathbf{b}_j)^{n_j}}{n_j!} \prod_{k \in S} G(\theta_k^0 - \theta_k) \end{aligned}$$

# ESTIMACIÓN DE FONDOS PARA LA BÚSQUEDA DE SUSY CON FOTONES, JETS Y MET EN EL ESTADO FINAL

# Estimación de fondos

Fondo: procesos del SM que emulan el mismo estado final buscado, **fotones + jets + MET**

	<b>Real <math>E_T^{\text{miss}}</math></b>	<b>Instrumental <math>E_T^{\text{miss}}</math></b>
<b>Fotón Real</b>	$Z(\nu\nu)\gamma, W\gamma$ $Z(\nu\nu)\gamma\gamma, t\bar{t}\gamma, Z(\nu\nu)\gamma\gamma, W\gamma\gamma$	$\gamma + \text{jets}, \gamma\gamma,$ $Z(l\bar{l})\gamma, Z(l\bar{l}) + \gamma\gamma$ .
<b>Fotón Falso</b>	$W + \text{jets}, Z(\nu\nu) + \text{jets},$ $t\bar{t}, W + \text{jets}.$	QCD multijets, $Z(l\bar{l}) + \text{jets}.$

Simulaciones de MC. Los principales son normalizados en regiones de control dedicadas

CRQ:  $\gamma + \text{jets}$

CRW:  $W\gamma$

CRT:  $t\bar{t}\gamma$

Dificultad para modelar la reconstrucción errónea de mediante simulaciones:

- electrones falseando fotones: método Tag & Probe
- jets falseando fotones: método ABCD

# Jets reconstruidos como fotones

Procesos con  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$  muy colimados  
pueden ser reconstruidos como jets

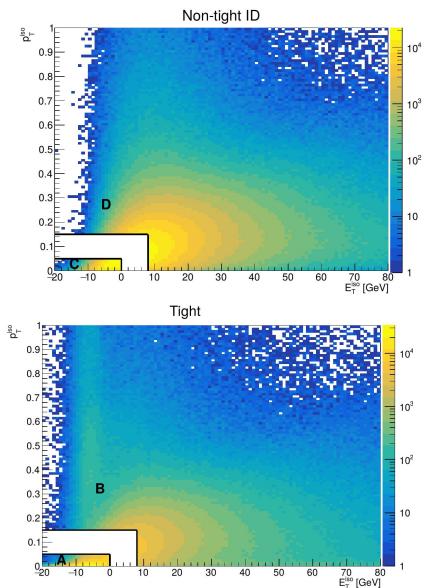
Método ABCD para estimar la fracción de eventos con jets  
reconstruidos erróneamente como fotones → **Fake Factors**

- Región A: fotones Tight y aislados
- Región B: fotones Tight y no aislados
- Región C: fotones Non-Tight y aislados
- Región D: fotones Non-Tight y no aislados

$$\text{FF}_{\text{iso}} = \frac{N_C}{N_D}$$

$$\text{FF}_{\text{ID}} = \frac{N_B}{N_D}$$

$$N_A^b = \text{FF}_{\text{iso}} \times N_B = \text{FF}_{\text{ID}} \times N_C$$



$ \eta $	$p_T$ [GeV]	$E_T^{\text{miss}}$ [GeV]		
		[50 – 100]	[100 – 200]	> 200
Barrel	[145 – 200]	$0.055 \pm 0.008$	$0.042 \pm 0.005$	$0.07 \pm 0.02$
	[200 – 250]	$0.044 \pm 0.005$	$0.027 \pm 0.003$	$0.06 \pm 0.02$
	[250 – 300]	$0.041 \pm 0.003$	$0.022 \pm 0.005$	$0.06 \pm 0.01$
	[300 – 350]	$0.037 \pm 0.004$	$0.019 \pm 0.003$	$0.05 \pm 0.01$
	[350 – 400]	$0.036 \pm 0.003$	$0.019 \pm 0.004$	$0.06 \pm 0.01$
	> 400	$0.038 \pm 0.005$	$0.013 \pm 0.002$	$0.05 \pm 0.01$
End-cap	[145 – 200]	$0.05 \pm 0.02$	$0.05 \pm 0.01$	$0.2 \pm 0.1$
	[200 – 250]	$0.05 \pm 0.01$	$0.04 \pm 0.01$	$0.2 \pm 0.1$
	[250 – 300]	$0.050 \pm 0.008$	$0.04 \pm 0.01$	$0.14 \pm 0.04$
	[300 – 350]	$0.052 \pm 0.009$	$0.030 \pm 0.006$	$0.08 \pm 0.05$
	[350 – 400]	$0.058 \pm 0.007$	$0.043 \pm 0.008$	$0.2 \pm 0.1$
	> 400	$0.07 \pm 0.01$	$0.047 \pm 0.008$	$0.14 \pm 0.05$

# Electrones reconstruidos como fotones

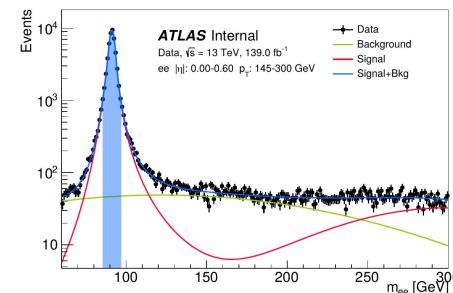
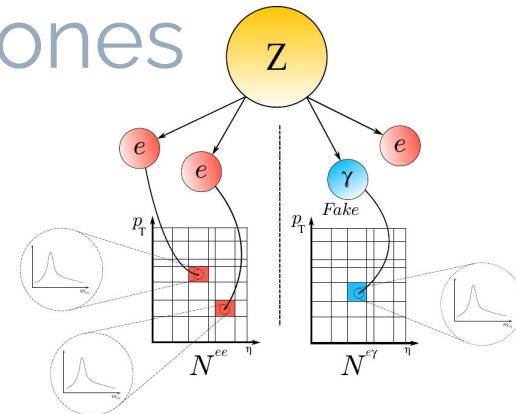
Electrones y fotones dejan deposiciones similares en el ECAL que solo son discriminadas a partir de las trazas重建idas

Método Tag&Probe para estimar la fracción de eventos con electrones reconstruidos erróneamente como fotones → **Fake Factors**

Selección de eventos:

- 2 electrones
- 1 electrón + 1 fotón
- masa invariante cercana al  $Z$

$$F_{e \rightarrow \gamma}(|\eta|) = \frac{N_{e\gamma}(|\eta^\gamma|)}{N_{ee}(|\eta^e|)}$$



Ajuste señal  
+ fondo

$ \eta $	Fake factor	incertezza estadística.	incertezza sistemática			incertezza Total
			V. integración	Sin sustracción	Sesgo energía	
0.00-0.60	0.019	0.0001	0.0001	0.0006	0.001	0.001
0.60-1.37	0.024	0.0001	0.0003	0.001	0.0001	0.001
1.52-1.82	0.050	0.0001	0.0000	0.0009	0.003	0.003
1.82-2.37	0.086	0.0001	0.0007	0.002	0.005	0.005

BÚSQUEDA DE SUSY CON  
PRODUCCIÓN FUERTE, CON FOTONES  
Y HIGGS EN EL ESTADO FINAL

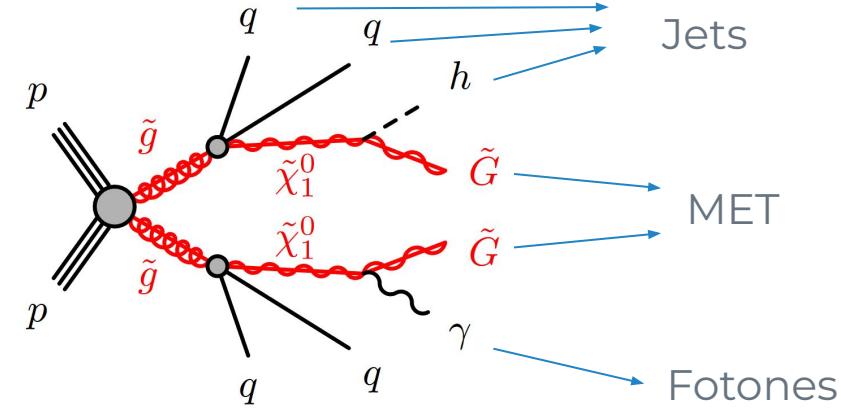
# Búsqueda de SUSY con producción fuerte, con fotones y Higgs en el estado final

- Estado final: **fotones + jets + MET**
- Modelo teórico: SUSY GGM con producción de gluinos
- LSP: gravitino
- NLSP: neutralino como mezcla de bino-higgsino
- Búsqueda guiada por el modelo, que ajusta los parámetros del mismo para aumentar la sensibilidad

$$\left. \begin{array}{l} \mu < 0 \\ M_1 \sim |\mu| \end{array} \right\}$$

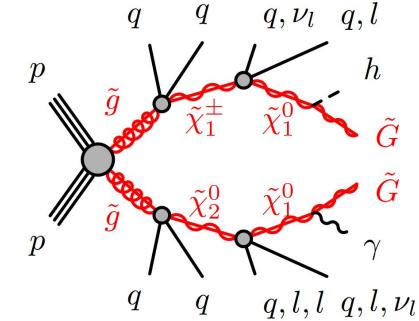
Decaimientos del  $\tilde{\chi}_1^0$

$$BR(\gamma + \tilde{G}) \sim 50\%$$
$$BR(h + \tilde{G}) \sim 50\%$$
$$BR(Z + \tilde{G}) \sim 0\%$$



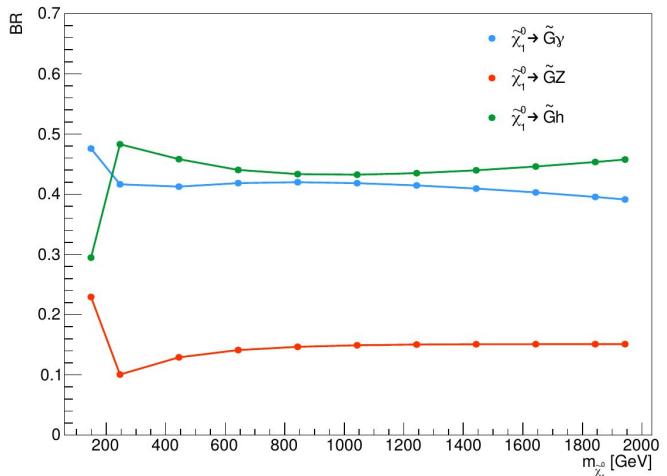
Dos parámetros libres:

$$m_{\tilde{g}} = M_3$$
$$m_{\tilde{\chi}_1^0} \sim |\mu|$$



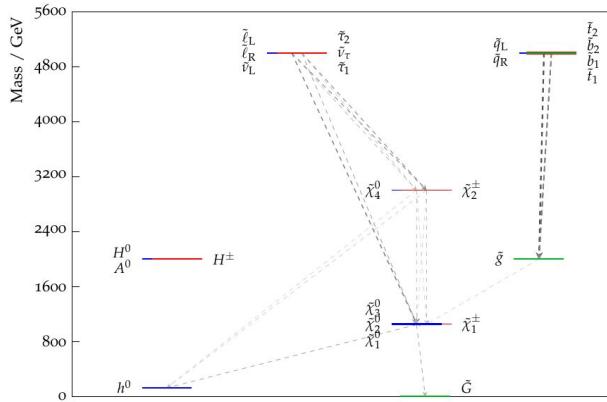
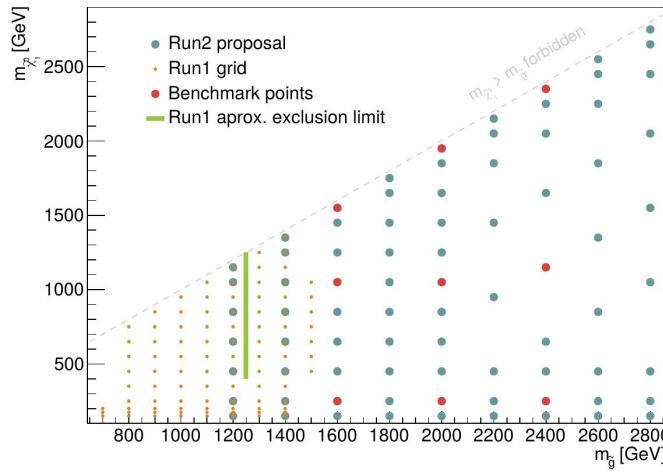
# Muestras de señal

Simulación de 80 muestras de señal en función de la masa del neutralino y gluino

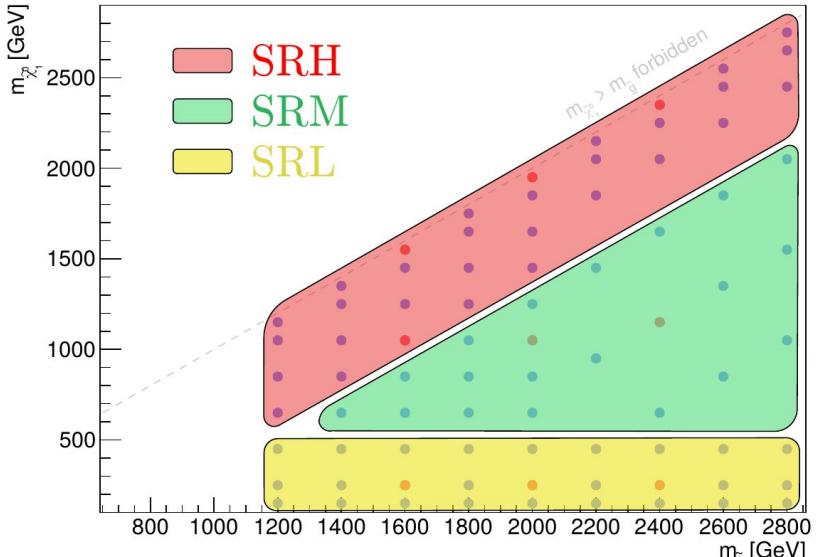


- Fracciones de decaimiento del neutralino cercanas al 50%
- Decaimiento remanente al Z de casi un 10%

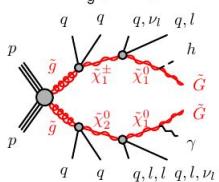
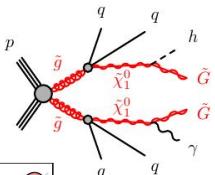
Espectro de masas



# Regiones de señal



Combinación de cortes  
que maximicen la  
significancia esperada



Regiones de señal dedicadas a distintas combinaciones de masa del neutralino y gluino

	SRL	SRM	SRH
$N_{\text{fotones}}$	$\geq 1$	$\geq 1$	$\geq 1$
$p_{\text{T}}^{\text{leading } \gamma}$	$> 145 \text{ GeV}$	$> 300 \text{ GeV}$	$> 400 \text{ GeV}$
$N_{\text{leptones}}$	0	0	0
$N_{\text{jets}}$	$\geq 5$	$\geq 5$	$\geq 3$
$\Delta\phi(\text{jet}, E_{\text{T}}^{\text{miss}})$	$> 0.4$	$> 0.4$	$> 0.4$
$\Delta\phi(\gamma, E_{\text{T}}^{\text{miss}})$	$> 0.4$	$> 0.4$	$> 0.4$
$E_{\text{T}}^{\text{miss}}$	$> 250 \text{ GeV}$	$> 300 \text{ GeV}$	$> 600 \text{ GeV}$
$H_{\text{T}}$	$> 2000 \text{ GeV}$	$> 1600 \text{ GeV}$	$> 1600 \text{ GeV}$
$R_{\text{T}}^4$	$< 0.90$	$< 0.90$	-

$$H_{\text{T}} = p_{\text{T}}^{\text{leading } \gamma} + \sum_{i \in \text{jets}} p_{\text{T}}^{(i)}$$

$$R_{\text{T}}^N = \frac{\sum_{i=1}^N p_{\text{T}}^{(\text{jet } i)}}{\sum_{i \in \text{jets}} p_{\text{T}}^{(i)}}$$

# Regiones de control y validación

Regiones de control  
dedicadas a los fondos  
principales

$\gamma + \text{jets}$

$W\gamma$

$t\bar{t}\gamma$

	CRQ	CRW	CRT
$N_{\text{fotones leading } \gamma}$	$\geq 1$	$\geq 1$	$\geq 1$
$p_T$	$> 145 \text{ GeV}$	$> 145 \text{ GeV}$	$> 145 \text{ GeV}$
$N_{\text{leptones}}$	0	$\geq 1$	$\geq 1$
$N_{\text{jets}}$	$\geq 3$	$\geq 1$	$\geq 2$
$N_{b-\text{jets}}$	-	0	$\geq 2$
$\Delta\phi(\text{jet}, E_T^{\text{miss}})$	$< 0.4$	$> 0.4$	$> 0.4$
$\Delta\phi(\gamma, E_T^{\text{miss}})$	$> 0.4$	-	-
$E_T^{\text{miss}}$	$> 100 \text{ GeV}$	$[100, 200] \text{ GeV}$	$[50, 200] \text{ GeV}$
$H_T$	$> 1600 \text{ GeV}$	$> 400 \text{ GeV}$	$> 400 \text{ GeV}$

Regiones para validar la  
extrapolación de los fondos  
a las regiones de señal

	VRE
$N_{\text{fotones leading } \gamma}$	$\geq 1$
$p_T$	$145 \text{ GeV}$
$N_{\text{leptones}}$	-
$N_{\text{jets}}$	$\geq 1$
$N_{b-\text{jets}}$	$\geq 1$
$\Delta\phi(\text{jet}, E_T^{\text{miss}})$	$> 0.4$
$\Delta\phi(\gamma, E_T^{\text{miss}})$	$< 0.4$
$E_T^{\text{miss}}$	$> 200 \text{ GeV}$
$H_T$	$[100, 1600] \text{ GeV}$

	VRQ	VRM1L	VRM2L	VRM1H	VRM2H
$N_{\text{fotones leading } \gamma}$	$\geq 1$				
$p_T$	$> 145 \text{ GeV}$	$> 145 \text{ GeV}$	$> 145 \text{ GeV}$	$> 300 \text{ GeV}$	$> 300 \text{ GeV}$
$N_{\text{leptones}}$	0	0	0	0	0
$N_{\text{jets}}$	$\geq 3$	$\geq 5$	$\geq 5$	$\geq 3$	$\geq 3$
$\Delta\phi(\text{jet}, E_T^{\text{miss}})$	$> 0.4$	$> 0.4$	$> 0.4$	$> 0.4$	$> 0.4$
$\Delta\phi(\gamma, E_T^{\text{miss}})$	$> 0.4$	$> 0.4$	$> 0.4$	$> 0.4$	$> 0.4$
$E_T^{\text{miss}}$	$[100, 200]$	$[100, 200]$	$[150, 200]$	$[100, 200]$	$[150, 200]$
$H_T$	$> 1600$	$> 1600$	$> 1600$	$> 1600$	$> 1600$
$R_T^4$	-	$< 0.90$	$< 0.90$	-	-

	VRL1	VRL2	VRL3	VRL4
$N_{\text{fotones leading } \gamma}$	$\geq 1$	$\geq 1$	$\geq 1$	$\geq 1$
$p_T$	$> 145 \text{ GeV}$	$> 145 \text{ GeV}$	$> 145 \text{ GeV}$	$> 145 \text{ GeV}$
$N_{\text{leptones}}$	$\geq 1$	$\geq 1$	$\geq 1$	$\geq 1$
$N_{\text{jets}}$	$\geq 2$	$\geq 2$	$\geq 2$	$\geq 2$
$\Delta\phi(\text{jet}, E_T^{\text{miss}})$	$> 0.4$	$> 0.4$	$> 0.4$	$< 0.4$
$E_T^{\text{miss}}$	$[50, 200] \text{ GeV}$	$[50, 200] \text{ GeV}$	$> 200 \text{ GeV}$	$> 200 \text{ GeV}$
$H_T$	$> 800 \text{ GeV}$	$> 1300 \text{ GeV}$	$[600, 1600] \text{ GeV}$	$> 1100 \text{ GeV}$

# Incertezas sistemáticas

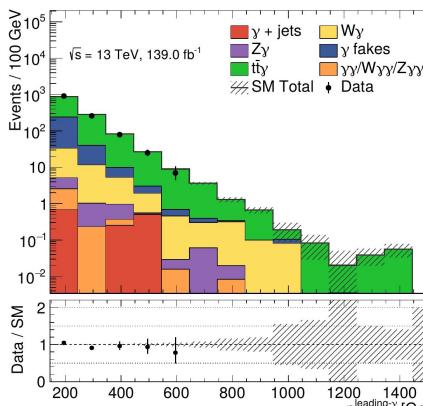
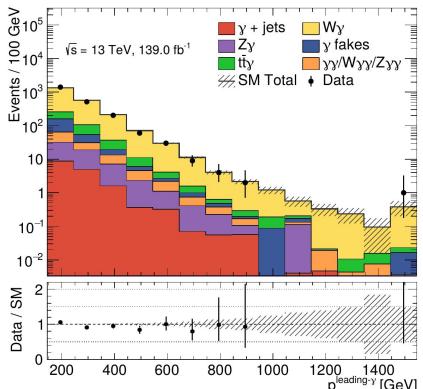
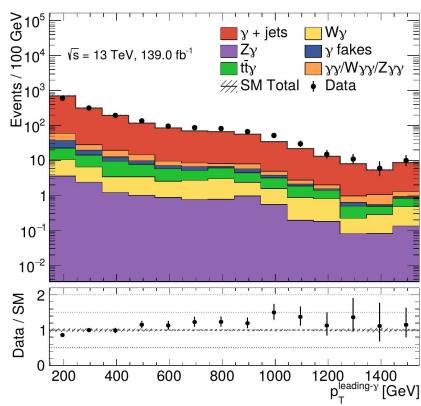
- Experimentales
  - Luminosidad
  - Fotones, electrones y muones
  - Jets
  - MET
  - Pile-up
- Data driven
  - efakes/jfakes
- Teóricas

	SRL [%]	SRM [%]	SRH [%]
Incerteza total (estad. + sist.)	28	25	17
Incerteza estadística	20	15	12
Escala de energía y resolución de los jets	18	19	4.1
Calibración del $b$ -tagging	3.2	4.3	3.6
<i>Jfakes</i>	2.1	2.5	2.3
Incertezas teóricas	3.6	3.1	10
<i>Efakes</i>	1.4	1.9	< 1
Escala de energía y resolución de los electrones/fotones	5.5	1.1	4.1
Reconstrucción e identificación de muones	2.6	1.8	< 1
Identificación y aislamiento de fotones	2.6	2.1	1.1
Corrección por pile-up	< 1	1.2	1.0
Escala y resolución del término soft de $E_T^{\text{miss}}$	< 1	< 1	< 1
Luminosidad	< 1	< 1	< 1

# Resultados en las CRs

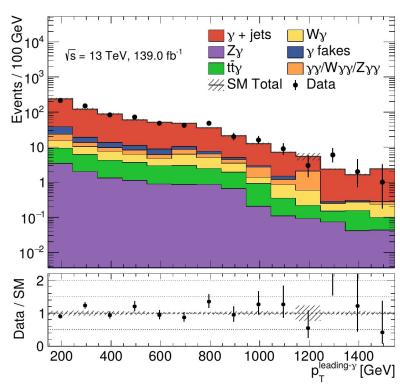
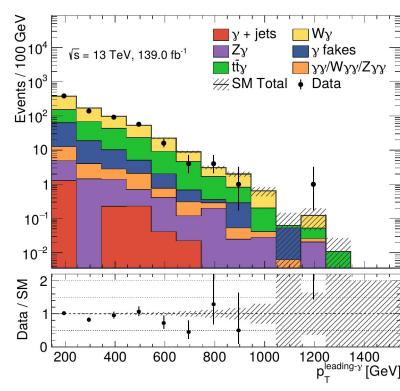
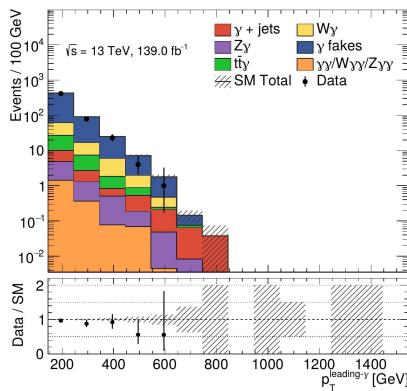
Control Regions	CRQ	CRW	CRT
Observed events	1708	2231	1282
Expected SM events	$1708.16 \pm 48.84$	$2231.00 \pm 47.47$	$1281.94 \pm 35.57$
$\gamma + \text{jets}$	$1539.27 \pm 49.72$	$16.26 \pm 5.69$	$1.45^{+2.11}_{-1.45}$
$W\gamma$	$25.95 \pm 2.07$	$1811.83 \pm 51.79$	$45.56 \pm 5.27$
$Z(\rightarrow \ell\ell)\gamma$	$2.55 \pm 0.83$	$46.09 \pm 10.24$	$4.11 \pm 1.18$
$Z(\rightarrow \nu\nu)\gamma$	$10.25 \pm 2.88$	$0.14 \pm 0.04$	$0.00^{+0.00}_{-0.00}$
$t\bar{t}\gamma$	$45.39 \pm 3.97$	$175.53 \pm 16.94$	$986.66 \pm 38.81$
$\gamma\gamma/W\gamma\gamma/Z\gamma\gamma$	$53.28 \pm 4.75$	$54.40 \pm 1.98$	$2.30 \pm 0.38$
$e \rightarrow \gamma$ fakes	$11.90 \pm 0.92$	$91.05 \pm 5.79$	$218.34 \pm 13.57$
$j \rightarrow \gamma$ fakes	$19.59 \pm 4.29$	$35.69 \pm 5.92$	$23.52 \pm 3.94$
Before fit SM events	$3026.78 \pm 961.54$	$2244.88 \pm 429.19$	$1022.60 \pm 99.03$
Before fit $\gamma + \text{jets}$	$2869.26 \pm 959.61$	$30.30 \pm 15.00$	$2.70^{+4.26}_{-2.70}$
Before fit $W\gamma$	$26.61 \pm 7.07$	$1858.24 \pm 427.00$	$46.74 \pm 13.76$
Before fit $Z(\rightarrow \ell\ell)\gamma$	$2.55 \pm 0.84$	$46.09 \pm 10.31$	$4.11 \pm 1.18$
Before fit $Z(\rightarrow \nu\nu)\gamma$	$10.25 \pm 2.90$	$0.14 \pm 0.05$	$0.00^{+0.00}_{-0.00}$
Before fit $t\bar{t}\gamma$	$33.35 \pm 4.89$	$128.96 \pm 17.65$	$724.89 \pm 96.36$
Before fit $\gamma\gamma/W\gamma\gamma/Z\gamma\gamma$	$53.28 \pm 4.77$	$54.40 \pm 1.99$	$2.30 \pm 0.38$
Before fit $e \rightarrow \gamma$ fakes	$11.90 \pm 0.93$	$91.05 \pm 5.83$	$218.34 \pm 13.66$
Before fit $j \rightarrow \gamma$ fakes	$19.59 \pm 4.32$	$35.69 \pm 5.96$	$23.52 \pm 3.97$
Background purity	95 %	83 %	71 %
Normalization factor ( $\mu$ )	$0.54 \pm 0.19$	$0.98 \pm 0.23$	$1.36 \pm 0.19$

Normalización uniforme a lo largo de las distintas variables que definen las regiones



# Resultados en las VRs

VRM	VRQ	VRM1L	VRM2L	VRM1H	VRM2H
Observed events	714	127	22	419	51
Expected SM events	$694.72 \pm 65.58$	$134.08 \pm 15.99$	$20.18 \pm 5.01$	$385.06 \pm 37.21$	$50.36 \pm 6.53$
$e \rightarrow \gamma$ fakes	$15.97 \pm 1.17$	$3.74 \pm 0.38$	$1.30 \pm 0.19$	$5.21 \pm 0.48$	$1.37 \pm 0.20$
$j \rightarrow \gamma$ fakes	$18.04 \pm 3.08$	$3.59 \pm 0.69$	$0.35 \pm 0.11$	$10.38 \pm 1.77$	$1.28 \pm 0.26$
$\gamma +$ jets	$573.52 \pm 64.46$	$109.86 \pm 15.13$	$14.12 \pm 4.26$	$313.65 \pm 36.88$	$31.34 \pm 6.10$
$W\gamma$	$26.99 \pm 1.95$	$3.67 \pm 0.44$	$1.11 \pm 0.35$	$18.59 \pm 1.24$	$6.79 \pm 0.86$
$Z(\rightarrow \ell\ell)\gamma$	$2.09 \pm 0.60$	$0.29 \pm 0.11$	$0.14 \pm 0.07$	$1.09 \pm 0.35$	$0.28 \pm 0.17$
$Z(\rightarrow \nu\nu)\gamma$	$9.65 \pm 2.67$	$0.89 \pm 0.26$	$0.45 \pm 0.16$	$5.94 \pm 1.64$	$2.63 \pm 0.75$
$t\bar{t}\gamma$	$23.91 \pm 1.80$	$9.80 \pm 1.02$	$2.34 \pm 0.57$	$15.70 \pm 1.17$	$4.39 \pm 0.51$
$\gamma\gamma/W\gamma\gamma/Z\gamma\gamma$	$24.55 \pm 1.97$	$2.23 \pm 0.77$	$0.37 \pm 0.12$	$14.50 \pm 1.32$	$2.29 \pm 0.42$



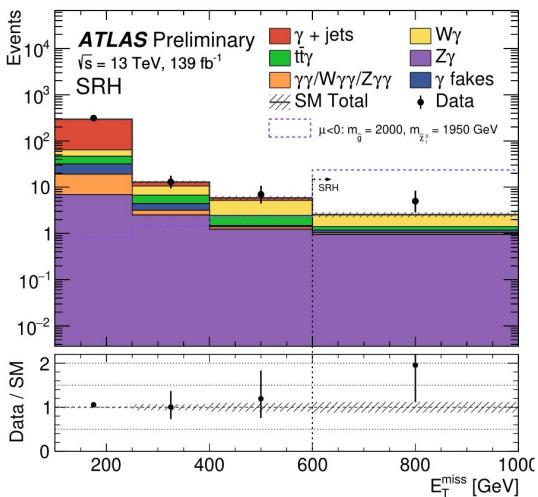
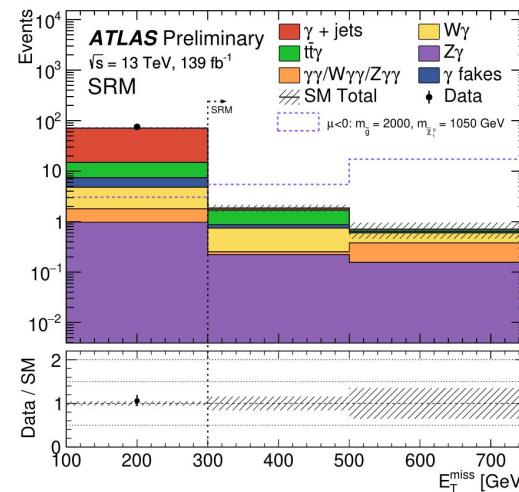
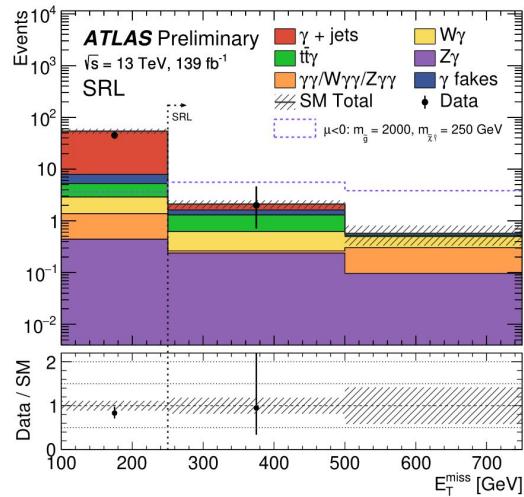
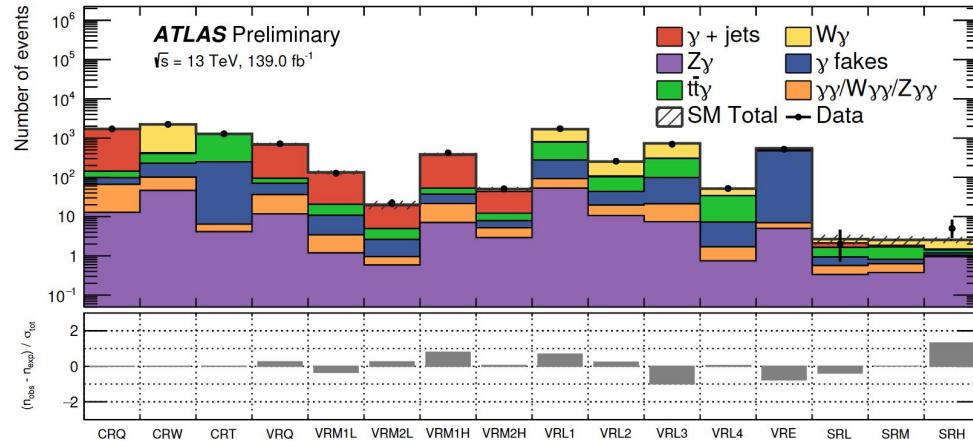
Adeuada validación en las regiones y distribuciones

# Resultados en las SRs

Signal Regions	SRL	SRM	SRH
Observed events	???	???	???
Expected SM events	$2.67 \pm 0.75$	$2.55 \pm 0.64$	$2.55 \pm 0.44$
$e \rightarrow \gamma$ fakes	$0.22 \pm 0.08$	$0.04 \pm 0.03$	$0.06 \pm 0.04$
$j \rightarrow \gamma$ fakes	$0.15 \pm 0.09$	$0.14 \pm 0.09$	$0.09 \pm 0.07$
$\gamma + \text{jets}$	$0.49 \pm 0.29$	$0.17 \pm 0.10$	$0.07 \pm 0.01$
$W\gamma$	$0.55 \pm 0.37$	$0.70 \pm 0.42$	$1.08 \pm 0.21$
$Z(\rightarrow \ell\ell)\gamma$	$0.03^{+0.03}_{-0.03}$	$0.03 \pm 0.01$	$0.00 \pm 0.00$
$Z(\rightarrow \nu\nu)\gamma$	$0.31 \pm 0.11$	$0.35 \pm 0.12$	$0.94 \pm 0.28$
$t\bar{t}\gamma$	$0.70 \pm 0.18$	$0.87 \pm 0.18$	$0.22 \pm 0.05$
$\gamma\gamma/W\gamma\gamma/Z\gamma\gamma$	$0.23 \pm 0.11$	$0.25 \pm 0.10$	$0.08 \pm 0.01$

# Resultados en las SRs

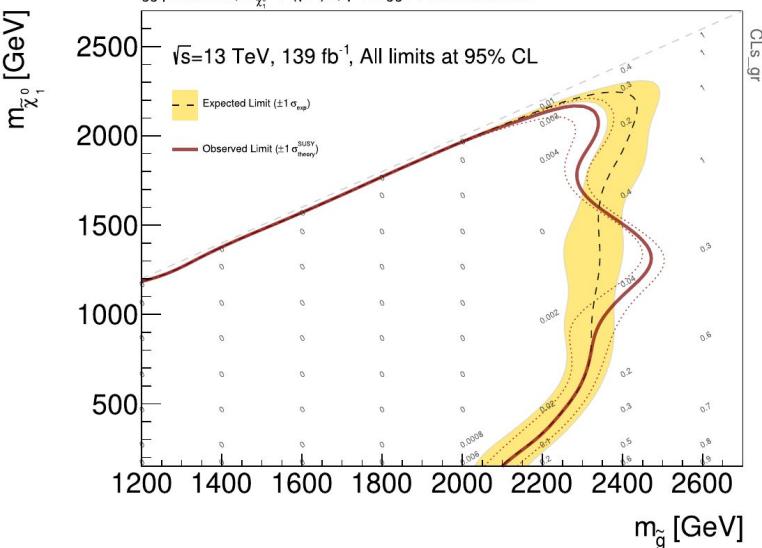
Signal Regions	SRL	SRM	SRH
Observed events	2	0	5
Expected SM events	$2.67 \pm 0.75$	$2.55 \pm 0.64$	$2.55 \pm 0.44$
$e \rightarrow \gamma$ fakes	$0.22 \pm 0.08$	$0.04 \pm 0.03$	$0.06 \pm 0.04$
$j \rightarrow \gamma$ fakes	$0.15 \pm 0.09$	$0.14 \pm 0.09$	$0.09 \pm 0.07$
$\gamma + \text{jets}$	$0.49 \pm 0.29$	$0.17 \pm 0.10$	$0.07 \pm 0.01$
$W\gamma$	$0.55 \pm 0.37$	$0.70 \pm 0.42$	$1.08 \pm 0.21$
$Z(\rightarrow \ell\ell)\gamma$	$0.03^{+0.03}_{-0.03}$	$0.03 \pm 0.01$	$0.00 \pm 0.00$
$Z(\rightarrow \nu\nu)\gamma$	$0.31 \pm 0.11$	$0.35 \pm 0.12$	$0.94 \pm 0.28$
$t\bar{t}\gamma$	$0.70 \pm 0.18$	$0.87 \pm 0.18$	$0.22 \pm 0.05$
$\gamma\gamma/W\gamma\gamma/Z\gamma\gamma$	$0.23 \pm 0.11$	$0.25 \pm 0.10$	$0.08 \pm 0.01$



# Límites de exclusión

Límites independientes del modelo: número de eventos / sección eficaz

Signal Region	$S_{\text{obs}}^{95}$	$S_{\text{exp}}^{95}$	$\langle \epsilon \sigma \rangle_{\text{obs}}^{95} [\text{fb}]$	$\langle \epsilon \sigma \rangle_{\text{exp}}^{95} [\text{fb}]$	$p_0 (Z)$
SRL	4.73	$4.7^{+2.2}_{-1.2}$	0.034	$0.034^{+0.016}_{-0.009}$	0.50 (0.00)
SRM	3	$4.6^{+1.8}_{-1.1}$	0.022	$0.033^{+0.013}_{-0.008}$	0.50 (0.00)
SRH	7.55	$4.8^{+1.9}_{-1.4}$	0.054	$0.035^{+0.014}_{-0.010}$	0.09 (1.32)



Límites dependientes del modelo para las masas de neutralinos y gluinos

Límite en la masa del gluino  $\sim 2300 \text{ GeV}$

Uno de los más fuertes dentro de la colaboración

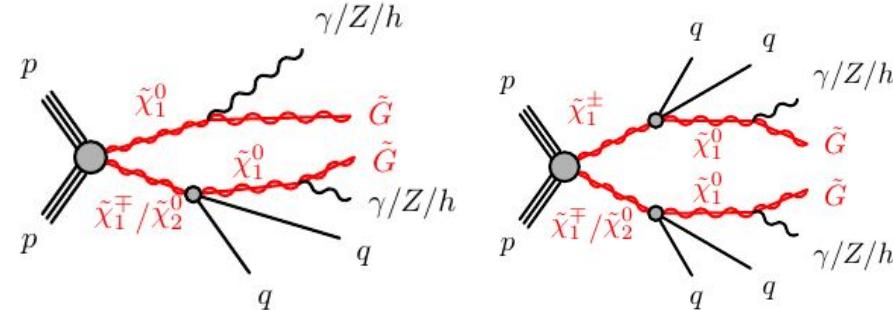
# BÚSQUEDA DE SUSY CON PRODUCCIÓN ELECTRODÉBIL, CON FOTONES, BOSONES Z Y HIGGS EN EL ESTADO FINAL

# Búsqueda de SUSY con producción electrodébil en estados finales con fotones, bosones Z y Higgs

- Estado final: **fotones + jets + MET**
- Modelo teórico: SUSY GGM con producción de gauginos, complementario al análisis de producción fuerte
- Búsqueda simplificada guiada por el modelo

$$\left. \begin{array}{l} BR(\gamma + \tilde{G}) \sim 33\% \\ BR(h + \tilde{G}) \sim 33\% \\ BR(Z + \tilde{G}) \sim 33\% \end{array} \right\}$$

Eventos repesados para favorecer o desfavorecer un dado decaimiento



- Sensibilidad a distintos modelos
- Límites en función del BR

Masa del neutralino = 150 GeV, 250 GeV, 350 GeV, 450 GeV, 650 GeV, 750 GeV, 850 GeV, 950 GeV, 1050 GeV, 1250 GeV y 1450 GeV

# Regiones de señal

Regiones de señal para descubrimiento, simplificadas y bineadas en MET

	SRd_200	SRd_300	SRd_400	SRd_500
$N_{\text{fotones}}$		$\geq 1$		
$N_{\text{leptones}}$		0		
$N_{\text{jets}}$		$\geq 1$		
$p_T^{\text{leading } \gamma} [\text{GeV}]$		$> 145$		
$E_T^{\text{miss}} / m_{\text{eff}}$		$> 0.5$		
$\mathcal{S}$		$> 21$		
$\Delta\phi(\text{jet}, E_T^{\text{miss}})$		$> 0.4$		
$\Delta\phi(\gamma, E_T^{\text{miss}})$		$> 0.4$		
$m_{\gamma\gamma} [\text{GeV}]$		$< 120, > 130$		
$E_T^{\text{miss}} [\text{GeV}]$	$> 200$	$> 300$	$> 400$	$> 500$

Variable importante para aumentar sensibilidad

$$\frac{E_T^{\text{miss}}}{m_{\text{eff}}} = \frac{E_T^{\text{miss}}}{H_T + E_T^{\text{miss}}}$$

$$\mathcal{S} = E_T^{\text{miss}} \text{ Significance}$$

Regiones de señal para exclusión

	SRe_200	SRe_300	SRe_400	SRe_500
Trigger		$\text{g140.loose}$		
$N_{\text{fotones}}$		$\geq 1$		
$N_{\text{leptones}}$		0		
$N_{\text{jets}}$		$\geq 1$		
$p_T^{\text{leading } \gamma} [\text{GeV}]$		$> 145$		
$\mathcal{S}$		$> 21$		
$\Delta\phi(\text{jet}, E_T^{\text{miss}})$		$> 0.4$		
$\Delta\phi(\gamma, E_T^{\text{miss}})$		$> 0.4$		
$E_T^{\text{miss}} [\text{GeV}]$	$[200 - 300]$	$[300 - 400]$	$[400 - 500]$	$> 500$

Mejores límites con regiones ortogonales

# Regiones de control y validación

Regiones de control dedicadas  
a los procesos principales:

- CRW:  $W\gamma$
- CRT:  $t\bar{t}\gamma / tth$
- CRZ:  $Z\gamma$

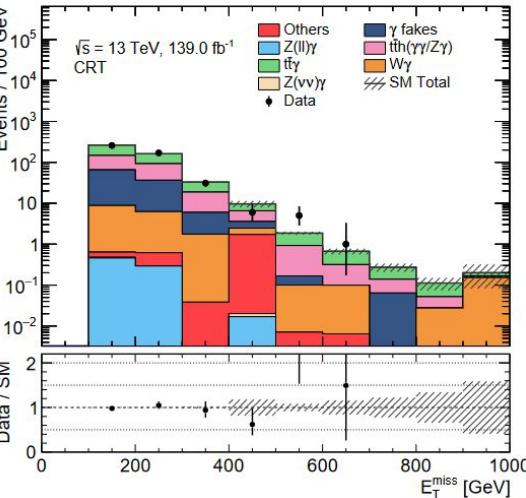
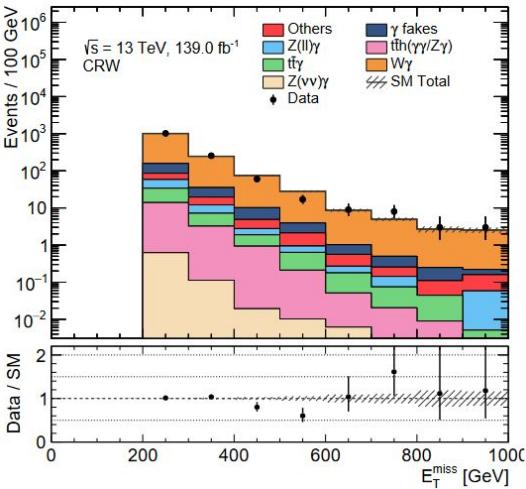
Regiones de validación  
intermediarias entre SRs y CRs

	CRW	CRT	CRZ_el	CRZ_mu
$N_{\text{fotones}}$			$\geq 1$	
$p_T^{\text{leading } \gamma} [\text{GeV}]$			$> 145$	
$N_{\text{jets}}$			$\geq 1$	
$N_{b\text{-jets}}$	0	$\geq 2$	-	-
$N_{\text{leptones}}$	1	$\geq 1$	2 (el)	2 (mu)
$\Delta\phi(\text{jet}, E_T^{\text{miss}})$	$> 0.4$	$> 0.4$	$> 0.4 (*)$	$> 0.4 (*)$
$\Delta\phi(\gamma, E_T^{\text{miss}})$	$> 0.4$	$> 0.4$	$> 0.4 (*)$	$> 0.4 (*)$
$E_T^{\text{miss}} [\text{GeV}]$	$> 200$	$> 150$	$< 50$	$< 50$
$E_T^{\text{miss} (*)} [\text{GeV}]$	-	-	$> 100$	$> 100$
$m_T^{\text{leptón}, E_T^{\text{miss}}} [\text{GeV}]$	$< 100$	-	-	-

	VRW	VRT	VRZee	VRZmm	VRE
Trigger			$g140\_loose$		
$N_{\text{fotones}}$			$\geq 1$		
$p_T^{\text{leading } \gamma} [\text{GeV}]$			$> 145$		
$N_{\text{jets}}$			$\geq 1$		
$N_{\text{leptones}}$	1	$\geq 1$	2 (el)	2 (mu)	-
$\Delta\phi(\text{jet}, E_T^{\text{miss}})$	$> 0.4$	$> 0.4$	$> 0.4 (*)$	$> 0.4 (*)$	$> 0.4$
$\Delta\phi(\gamma, E_T^{\text{miss}})$	$> 0.4$	$> 0.4$	$> 0.4 (*)$	$> 0.4 (*)$	$< 0.4$
$E_T^{\text{miss}} [\text{GeV}]$	$> 200$	$> 200$	$< 50$	$< 50$	$> 200$
$E_T^{\text{miss}}/m_{\text{eff}}$	$> 0.25$	$> 0.2$	$> 0.25$	$> 0.25$	$> 0.25$
$\mathcal{S}$	$> 10$	$> 8$	$> 10$	$> 10$	$> 10$
$E_T^{\text{miss} (*)} [\text{GeV}]$	-	-	$> 200$	$> 200$	-

# Resultados preliminares

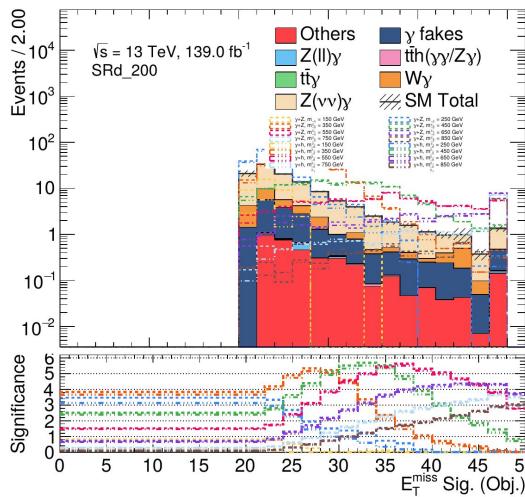
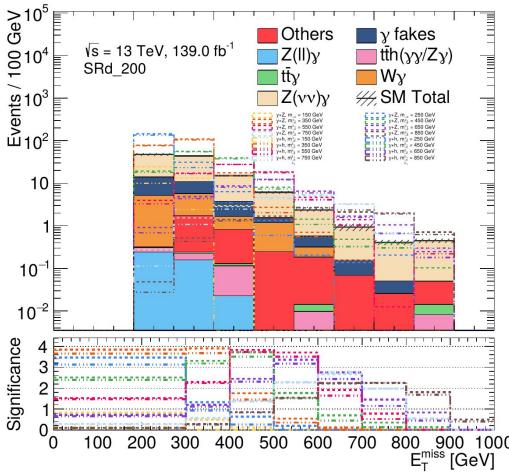
Control Regions	CRW	CRT	CRZ_mu	CRZ_el
Observed events	1378	471	1032	776
Expected SM events	$1377.95 \pm 37.11$	$471.08 \pm 21.70$	$1043.39 \pm 24.58$	$764.37 \pm 17.93$
$Z(\nu\nu)\gamma$	$0.76 \pm 0.21$	$0.02 \pm 0.01$	$0.00 \pm 0.00$	$0.00 \pm 0.00$
$t\bar{t}\gamma$	$25.54 \pm 3.74$	$204.19 \pm 29.90$	$8.34 \pm 1.22$	$5.92 \pm 0.87$
$t\bar{t}h(\gamma\gamma/Z\gamma)$	$17.60 \pm 3.17$	$154.78 \pm 27.85$	$6.03 \pm 1.09$	$5.13 \pm 0.92$
$W\gamma$	$1169.32 \pm 43.98$	$16.61 \pm 0.62$	$0.49 \pm 0.02$	$0.88 \pm 0.03$
$Z(ll)\gamma$	$30.17 \pm 0.78$	$0.76 \pm 0.02$	$989.95 \pm 24.48$	$722.36 \pm 18.59$
$\gamma$ fakes	$95.70 \pm 24.83$	$92.48 \pm 20.71$	$0.00 \pm 0.00$	$5.85 \pm 1.34$
Others	$38.87 \pm 7.30$	$2.24 \pm 0.41$	$38.58 \pm 7.40$	$24.24 \pm 4.81$
Before fit SM events	$1479.29 \pm 253.42$	$560.43 \pm 67.25$	$1063.29 \pm 201.41$	$779.07 \pm 146.96$
Before fit $Z(\nu\nu)\gamma$	$0.77 \pm 0.15$	$0.02 \pm 0.00$	$0.00 \pm 0.00$	$0.00 \pm 0.00$
Before fit $t\bar{t}\gamma$	$31.80 \pm 6.36$	$254.28 \pm 50.86$	$10.39 \pm 2.08$	$7.37 \pm 1.47$
Before fit $t\bar{t}h(\gamma\gamma/Z\gamma)$	$21.91 \pm 4.38$	$192.74 \pm 38.5$	$7.51 \pm 1.50$	$6.39 \pm 1.28$
Before fit $W\gamma$	$1259.56 \pm 251.91$	$17.89 \pm 3.58$	$0.52 \pm 0.10$	$0.95 \pm 0.19$
Before fit $Z(ll)\gamma$	$30.67 \pm 6.13$	$0.77 \pm 0.15$	$1006.29 \pm 201.26$	$734.28 \pm 146.86$
Before fit $\gamma$ fakes	$95.70 \pm 25.05$	$92.48 \pm 20.91$	$0.00 \pm 0.00$	$5.85 \pm 1.35$
Before fit Others	$38.87 \pm 7.32$	$2.24 \pm 0.51$	$38.58 \pm 7.41$	$24.24 \pm 4.85$
Background purity	85 %	80 %	95 %	94 %
Normalization factor ( $\mu$ )	$0.93 \pm 0.03$	$0.80 \pm 0.05$	$0.98 \pm 0.02$	$0.98 \pm 0.02$



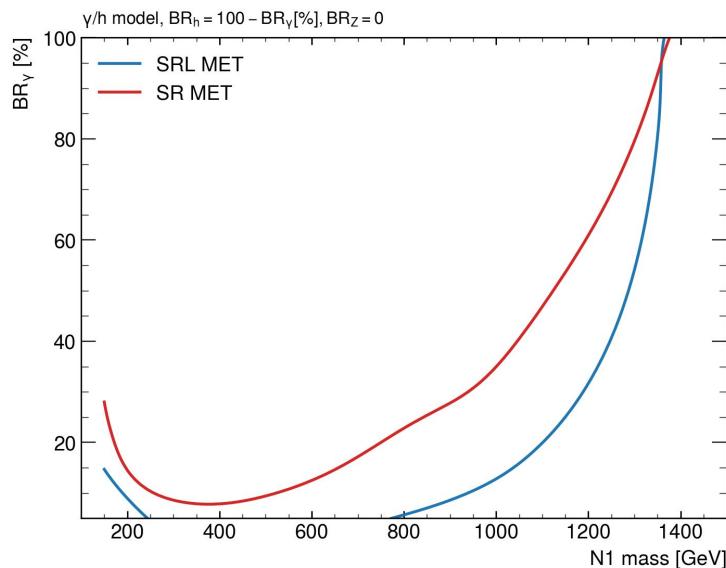
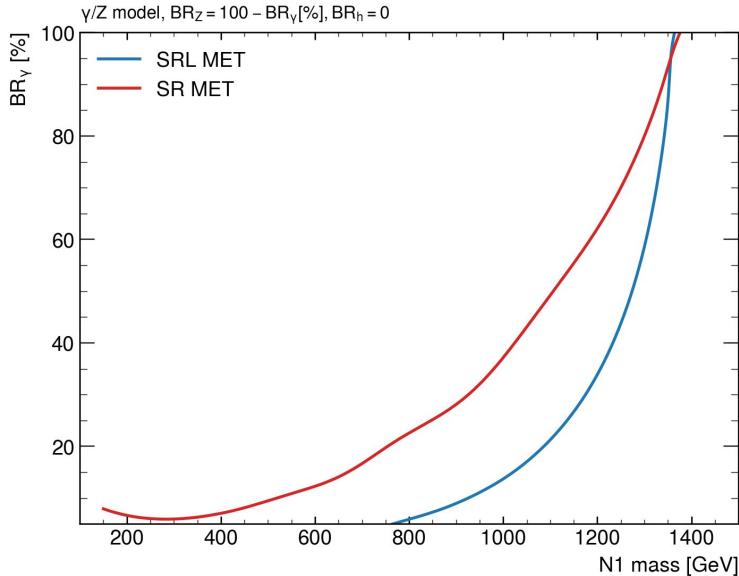
# Resultados preliminares

Signal Regions	SRd_200	SRd_300	SRd_400	SRd_500
Observed events	-	-	-	-
Expected SM events	$115.31 \pm 4.03$	$68.37 \pm 1.74$	$25.08 \pm 0.88$	$10.18 \pm 0.57$
$Z(\nu\nu)\gamma$	$84.16 \pm 3.60$	$51.26 \pm 1.62$	$18.89 \pm 0.79$	$7.79 \pm 0.48$
$t\bar{t}\gamma$	$0.05 \pm 0.01$	$0.05 \pm 0.01$	$0.03 \pm 0.00$	$0.01 \pm 0.00$
$tth(\gamma\gamma/Z\gamma)$	$0.25 \pm 0.02$	$0.18 \pm 0.01$	$0.11 \pm 0.01$	$0.02 \pm 0.00$
$W\gamma$	$12.06 \pm 0.57$	$5.79 \pm 0.22$	$1.80 \pm 0.08$	$0.97 \pm 0.06$
$Z(ll)\gamma$	$0.40 \pm 0.02$	$0.16 \pm 0.01$	$0.01 \pm 0.00$	$0.02^{+0.00}_{-0.02}$
$\gamma$ fakes	$17.05 \pm 2.31$	$8.14 \pm 1.30$	$2.97 \pm 0.21$	$0.84 \pm 0.09$
Others	$1.35 \pm 0.05$	$2.79 \pm 0.05$	$1.26 \pm 0.04$	$0.56 \pm 0.03$
$\gamma + Z, m_{\tilde{\chi}_1^0} = 150\text{GeV}$	$40.57 \pm 7.68(Z = 0.83)$	$16.12 \pm 5.02(Z = 0.49)$	$2.99 \pm 2.12(Z = 0.12)$	$0.00 \pm 0.00(Z = 0.00)$
$\gamma + Z, m_{\tilde{\chi}_1^0} = 250\text{GeV}$	$185.18 \pm 6.60(Z = 3.50)$	$39.06 \pm 3.16(Z = 1.34)$	$8.24 \pm 1.52(Z = 0.65)$	$1.88 \pm 0.80(Z = 0.20)$
$\gamma + Z, m_{\tilde{\chi}_1^0} = 350\text{GeV}$	$210.15 \pm 3.90(Z = 3.87)$	$131.28 \pm 3.11(Z = 3.94)$	$21.31 \pm 1.27(Z = 1.78)$	$3.56 \pm 0.53(Z = 0.55)$
$\gamma + Z, m_{\tilde{\chi}_1^0} = 450\text{GeV}$	$125.96 \pm 3.61(Z = 2.53)$	$106.62 \pm 3.33(Z = 3.34)$	$50.31 \pm 2.31(Z = 3.74)$	$10.51 \pm 1.07(Z = 1.77)$
$\gamma + Z, m_{\tilde{\chi}_1^0} = 550\text{GeV}$	$73.50 \pm 2.76(Z = 1.54)$	$69.51 \pm 2.69(Z = 2.32)$	$52.35 \pm 2.35(Z = 3.86)$	$24.79 \pm 1.63(Z = 3.73)$
$\gamma + Z, m_{\tilde{\chi}_1^0} = 650\text{GeV}$	$36.42 \pm 1.74(Z = 0.73)$	$35.51 \pm 1.72(Z = 1.22)$	$30.67 \pm 1.61(Z = 2.47)$	$21.94 \pm 1.35(Z = 3.38)$
$\gamma + Z, m_{\tilde{\chi}_1^0} = 750\text{GeV}$	$18.52 \pm 1.02(Z = 0.29)$	$18.25 \pm 1.01(Z = 0.58)$	$16.72 \pm 0.97(Z = 1.40)$	$13.90 \pm 0.88(Z = 2.29)$
$\gamma + h, m_{\tilde{\chi}_1^0} = 150\text{GeV}$	$12.34 \pm 4.15(Z = 0.13)$	$2.41 \pm 1.72(Z = 0.00)$	$0.00 \pm 0.00(Z = 0.00)$	$0.00 \pm 0.00(Z = 0.00)$
$\gamma + h, m_{\tilde{\chi}_1^0} = 250\text{GeV}$	$163.46 \pm 6.19(Z = 3.16)$	$27.75 \pm 2.66(Z = 0.94)$	$4.33 \pm 1.14(Z = 0.26)$	$0.80 \pm 0.63(Z = 0.00)$
$\gamma + h, m_{\tilde{\chi}_1^0} = 350\text{GeV}$	$197.81 \pm 3.79(Z = 3.69)$	$121.60 \pm 2.99(Z = 3.71)$	$17.52 \pm 1.15(Z = 1.47)$	$2.60 \pm 0.45(Z = 0.35)$
$\gamma + h, m_{\tilde{\chi}_1^0} = 450\text{GeV}$	$119.65 \pm 3.52(Z = 2.42)$	$101.79 \pm 3.26(Z = 3.21)$	$46.93 \pm 2.24(Z = 3.54)$	$9.07 \pm 1.00(Z = 1.54)$
$\gamma + h, m_{\tilde{\chi}_1^0} = 550\text{GeV}$	$70.84 \pm 2.70(Z = 1.49)$	$67.56 \pm 2.64(Z = 2.26)$	$50.70 \pm 2.30(Z = 3.76)$	$23.19 \pm 1.57(Z = 3.54)$
$\gamma + h, m_{\tilde{\chi}_1^0} = 650\text{GeV}$	$33.64 \pm 1.67(Z = 0.67)$	$32.96 \pm 1.66(Z = 1.13)$	$28.64 \pm 1.55(Z = 2.33)$	$20.49 \pm 1.31(Z = 3.20)$
$\gamma + h, m_{\tilde{\chi}_1^0} = 750\text{GeV}$	$17.63 \pm 1.00(Z = 0.27)$	$17.51 \pm 0.99(Z = 0.55)$	$16.45 \pm 0.96(Z = 1.38)$	$13.98 \pm 0.89(Z = 2.31)$

Sensibilidad hasta masas de neutralinos  
de 750 GeV



# Límites preliminares



Límites en la masa del neutralino  
cercano a los 1200 GeV

# CONCLUSIONES

# Conclusiones

- El funcionamiento de ATLAS a lo largo del Run 2 ha sido altamente eficaz
- Las eficiencias de los triggers de fotones, las cuales superan el 90% y son prácticamente independientes de la región del detector y del pile-up
- Resultados de la búsqueda de Supersimetría con producción fuerte, con Higgs y fotones en el estado final: compatibilidad entre los datos observados y los esperados de fondo
  - Límites a la masa del gluino cercanas a los 2.3 TeV
- Resultados preliminares para la búsqueda de Supersimetría con producción electrodébil, con bosones Z, Higgs y fotones en el estado final:
  - Sensibilidad para masas de neutralino cercanas a los 750 GeV
  - Posibles límites de exclusión de masas de neutralino cercanas a los 1.2 TeV

MUCHAS GRACIAS

# Backup

# Límites actuales de SUSY en ATLAS

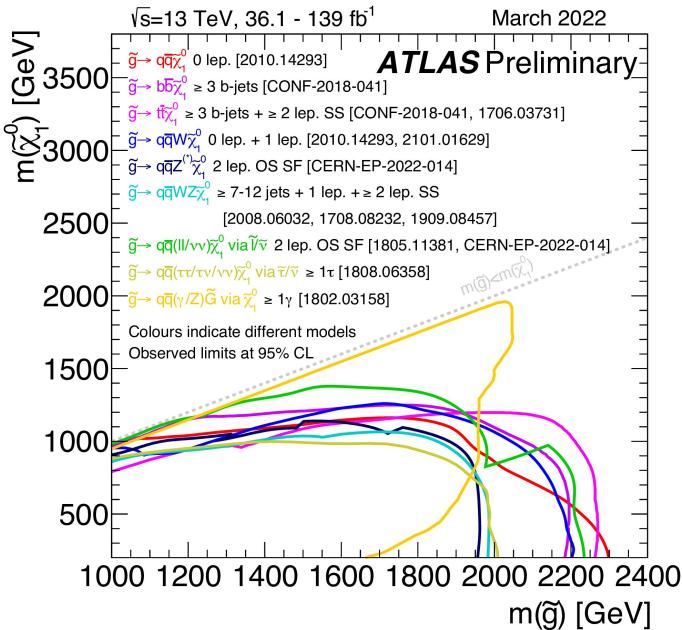
## ATLAS SUSY Searches\* - 95% CL Lower Limits

March 2022

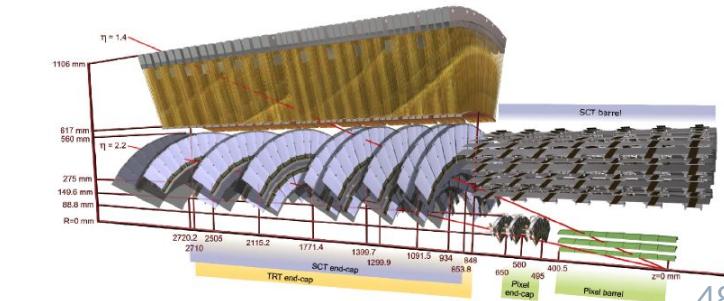
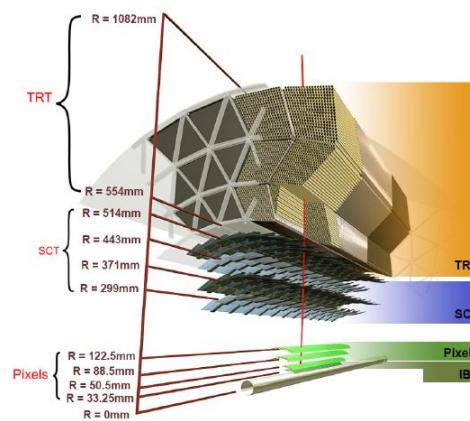
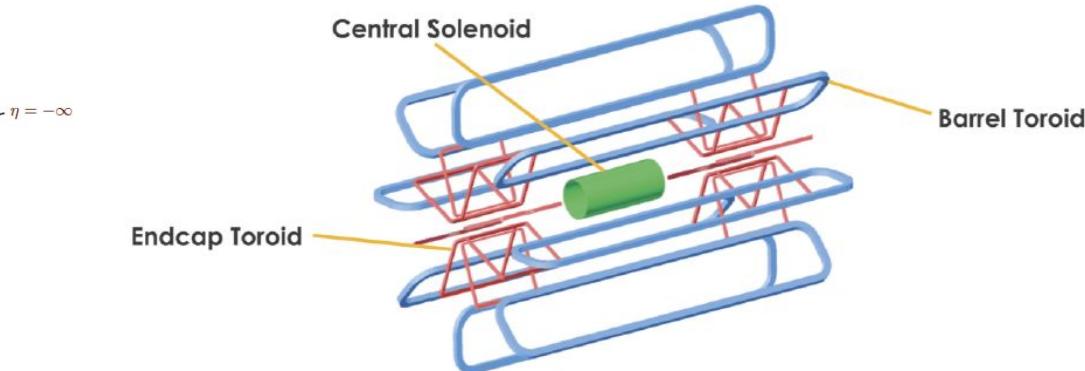
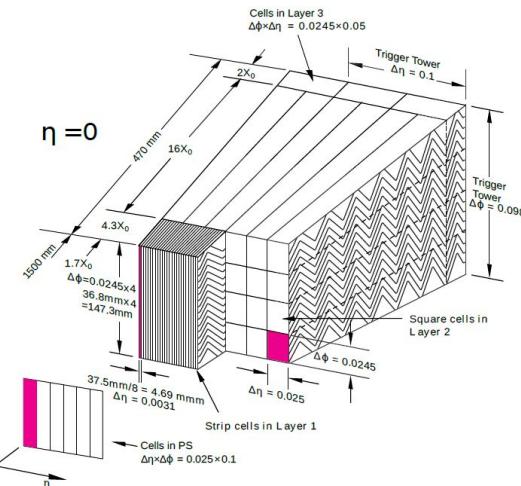
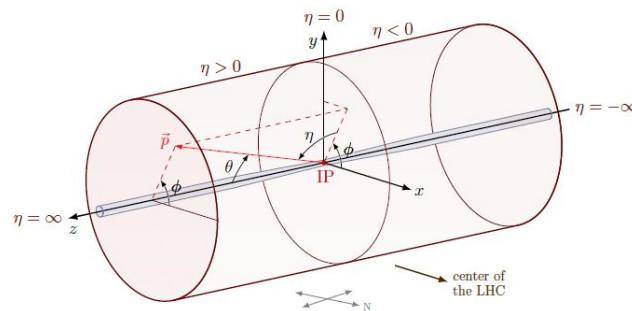
Model	Signature	$\int \mathcal{L} dt [fb^{-1}]$	Mass limit	Reference
Inclusive Searches Inclusive Searches	$\bar{q}q, \bar{q}-q\bar{q}\chi_1^0$	0 e, $\mu$ 2-6 jets	$E_T^{\text{miss}}$ 139	$\bar{q}$ [1e, 8x Degen.] 1.0 1.85 $m(\chi_1^0) < 400$ GeV $m(q)-m(\chi_1^0) < 5$ GeV
	mono-jet	1-3 jets	$E_T^{\text{miss}}$ 139	$\bar{q}$ [8x Degen.] 0.9 1.85 $m(\chi_1^0) < 1000$ GeV
	$\bar{g}g, \bar{g}-q\bar{q}\chi_1^0$	0 e, $\mu$ 2-6 jets	$E_T^{\text{miss}}$ 139	$\bar{g}$ Forbidden 1.15-1.95 2.3 $m(\chi_1^0) < 100$ GeV
				$m(\chi_1^0) < 600$ GeV
	$\bar{g}g, \bar{g}-q\bar{q}W\chi_1^0$	1 e, $\mu$ 2-6 jets	$E_T^{\text{miss}}$ 139	$\bar{g}$ 2.2 $m(\chi_1^0) < 700$ GeV
	$\bar{g}g, \bar{g}-q\bar{q}(t\bar{t})\chi_1^0$	ee, $\mu\mu$ 2 jets	$E_T^{\text{miss}}$ 139	$\bar{g}$ 2.2 $m(\chi_1^0) < 200$ GeV
	$\bar{g}g, \bar{g}-q\bar{q}WZ\chi_1^0$	0 e, $\mu$ 7-11 jets	$E_T^{\text{miss}}$ 139	$\bar{g}$ 1.97 $m(\chi_1^0) < 600$ GeV
	SS ee, $\mu\mu$ 6 jets			$m(g)-m(\chi_1^0) < 200$ GeV
	$\bar{g}g, \bar{g}-q\bar{q}H\chi_1^0$	0-1 e, $\mu$ 3 jets	$E_T^{\text{miss}}$ 79.8	$\bar{g}$ 2.25 $m(\chi_1^0) < 200$ GeV
	SS ee, $\mu\mu$ 6 jets			$m(g)-m(\chi_1^0) < 300$ GeV
3 <sup>rd</sup> gen. squarks 3 <sup>rd</sup> gen. squarks	$\tilde{b}_1\tilde{b}_1$	0 e, $\mu$ 2 b	$E_T^{\text{miss}}$ 139	$\tilde{b}_1$ 1.255 $m(\tilde{b}_1) < 400$ GeV
	$\tilde{b}_1\tilde{b}_1, \tilde{b}_1\rightarrow b\tilde{b}_1$	0 e, $\mu$ 6 b	$E_T^{\text{miss}}$ 139	$\tilde{b}_1$ 0.68 $10 \text{ GeV} \cdot \Delta m(\tilde{b}_1, \tilde{b}_1) < 20$ GeV
	$\tilde{b}_1\tilde{b}_1, \tilde{b}_1\rightarrow t\tilde{b}_1$	2 $\tau$ 2 b	$E_T^{\text{miss}}$ 139	$\tilde{b}_1$ 0.23-1.35 $\Delta m(\tilde{b}_1, \tilde{b}_1) < 100$ GeV $\Delta m(\tilde{b}_1, \tilde{b}_1) < 130 \text{ GeV}$
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1\rightarrow t\tilde{t}^0$	0-1 e, $\mu$ $\geq 1$ jet	$E_T^{\text{miss}}$ 139	$\tilde{t}_1$ 1.25 $m(\tilde{t}_1) < 1$ GeV
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1\rightarrow W\tilde{b}_1$	1 e, $\mu$ 3 jets/1 b	$E_T^{\text{miss}}$ 139	$\tilde{t}_1$ 0.13-0.85 $m(\tilde{t}_1) < 500$ GeV
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1\rightarrow t\tilde{b}_1, \tilde{t}_1\rightarrow t\tilde{t}^0$	1-2 $\tau$ 2 jets/1 b	$E_T^{\text{miss}}$ 139	$\tilde{t}_1$ 0.65 $m(t) < 800$ GeV
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1\rightarrow t\tilde{t}^0 / \tilde{c}_1, \tilde{c}_1\rightarrow c\tilde{c}^0$	0 e, $\mu$ 2 c	$E_T^{\text{miss}}$ 36.1	$\tilde{c}_1$ 0.85 $m(\tilde{t}_1, \tilde{c}_1) < 0$ GeV
		0 e, $\mu$ mono-jet	$E_T^{\text{miss}}$ 139	$\tilde{t}_1$ 0.55 $m(\tilde{t}_1, \tilde{c}_1) < 10$ GeV
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1\rightarrow t\tilde{t}^0, \tilde{t}^0\rightarrow Z/\tilde{\chi}_1^0$	1-2 e, $\mu$ 1-4 b	$E_T^{\text{miss}}$ 139	$\tilde{t}_1$ 0.067-1.18 $m(\tilde{t}_1) < 500$ GeV
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_2, \tilde{t}_1\rightarrow t\tilde{t}^0, \tilde{t}_2\rightarrow Z$	3 e, $\mu$ 1 b	$E_T^{\text{miss}}$ 139	$\tilde{t}_2$ 0.86 $m(\tilde{t}_1) < 40$ GeV
EW direct EW direct	$\tilde{\chi}_1^{\pm}\tilde{\chi}_2^0$ via $WW$	Multiple $\ell/\text{jets}$	$E_T^{\text{miss}}$ 139	$\tilde{\chi}_1^{\pm}\tilde{\chi}_2^0$ 0.96 $m(\tilde{\chi}_1^{\pm}) < 10$ GeV, wino-bino
	$\tilde{\chi}_1^{\pm}\tilde{\chi}_2^0$ via $WW$	ee, $\mu\mu$ $\geq 1$ jet	$E_T^{\text{miss}}$ 139	$\tilde{\chi}_1^{\pm}\tilde{\chi}_2^0$ 0.205 $m(\tilde{\chi}_1^{\pm}) = m(\tilde{\chi}_2^0) = 5$ GeV, wino-bino
	$\tilde{\chi}_1^{\pm}\tilde{\chi}_2^0$ via $W\tilde{h}$	2 e, $\mu$	$E_T^{\text{miss}}$ 139	$\tilde{\chi}_1^{\pm}$ 0.42 $m(\tilde{\chi}_1^{\pm}) = 0$ , wino-bino
	$\tilde{\chi}_1^{\pm}\tilde{\chi}_2^0$ via $W\tilde{h}$	2 e, $\mu$ Multiple $\ell/\text{jets}$	$E_T^{\text{miss}}$ 139	$\tilde{\chi}_1^{\pm}\tilde{\chi}_2^0$ 1.06 $m(\tilde{\chi}_1^{\pm}) = 70$ GeV, wino-bino
	$\tilde{\chi}_1^{\pm}\tilde{\chi}_2^0$ via $t\tilde{t}/\tilde{b}_1/\tilde{b}_2$	2 $\tau$	$E_T^{\text{miss}}$ 139	$\tilde{\chi}_1^{\pm}\tilde{\chi}_2^0$ 1.0 $m(\tilde{\chi}_1^{\pm}) = 0.5(m(\tilde{\chi}_1^{\pm}), m(\tilde{\chi}_2^0))$
	$\tilde{t}\tilde{t}, \tilde{t}\rightarrow t\tilde{t}^0$	2 e, $\mu$ 0 jets	$E_T^{\text{miss}}$ 139	$\tilde{t}$ 0.16-0.3 $m(\tilde{t}_1, \tilde{t}_2) < 10$ GeV
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1\rightarrow t\tilde{t}^0, \tilde{t}_1\rightarrow t\tilde{t}^0$	2 e, $\mu$ $\geq 1$ jet	$E_T^{\text{miss}}$ 139	$\tilde{t}_1$ 0.256 $m(\tilde{t}_1) = 0$
	$\tilde{H}\tilde{H}, \tilde{H}\rightarrow h\tilde{G}/Z\tilde{G}$	0 e, $\mu$ $\geq 3$ b	$E_T^{\text{miss}}$ 36.1	$\tilde{H}$ 0.13-0.23 $BR(\tilde{H}\rightarrow h\tilde{G}) = 1$
		4 e, $\mu$ 0 jets	$E_T^{\text{miss}}$ 139	$\tilde{H}$ 0.55 $BR(\tilde{H}\rightarrow Z\tilde{G}) = 1$
		0 e, $\mu$ $\geq 2$ large jets	$E_T^{\text{miss}}$ 139	$\tilde{H}$ 0.45-0.93 $BR(\tilde{H}\rightarrow Z\tilde{G}) = 1$
Long-lived particles Long-lived particles	Direct $\tilde{\chi}_1^{\pm}\tilde{\chi}_1^{\pm}$ prod., long-lived $\tilde{\chi}_1^{\pm}$	Disapp. trk 1 jet	$E_T^{\text{miss}}$ 139	$\tilde{\chi}_1^{\pm}$ 0.66 Pure Wino
	Stable $\tilde{g}$ R-hadron	pixel dE/dx	$E_T^{\text{miss}}$ 139	$\tilde{g}$ 0.21 Pure higgsino
	Metastable $\tilde{g}$ R-hadron, $\tilde{g}-q\bar{q}\chi_1^0$	pixel dE/dx	$E_T^{\text{miss}}$ 139	$\tilde{g}$ [g] 2.05 CERN-EP-2028-029
	$\tilde{t}, \tilde{t}\rightarrow t\tilde{t}^0$	Displ. lep	$E_T^{\text{miss}}$ 139	$\tilde{t}, \tilde{t}$ 2.2 CERN-EP-2028-029
		pixel dE/dx	$E_T^{\text{miss}}$ 139	$\tilde{t}, \tilde{t}$ 0.7 201.07812
		pixel dE/dx	$E_T^{\text{miss}}$ 139	$\tilde{t}, \tilde{t}$ 0.34 201.07812
		pixel dE/dx	$E_T^{\text{miss}}$ 139	$\tilde{t}, \tilde{t}$ 0.36 201.07812
				Pure Wino
				Pure higgsino
				220.02472
RPV RPV	$\tilde{\chi}_1^{\pm}\tilde{\chi}_2^0/\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_1^0\rightarrow Z\tilde{t}\rightarrow \ell\ell\ell\ell$	3 e, $\mu$	$E_T^{\text{miss}}$ 139	$\tilde{\chi}_1^{\pm}\tilde{\chi}_2^0$ [BR(Z $\rightarrow$ 1, BR(Z $\rightarrow$ 1))=1] 0.625 1.05 Pure Wino
		4 e, $\mu$ 0 jets	$E_T^{\text{miss}}$ 139	$\tilde{\chi}_1^{\pm}\tilde{\chi}_2^0$ [BR(Z $\rightarrow$ 1, BR(Z $\rightarrow$ 1))=0] 0.95 1.55 Large $\tilde{\chi}_1^0$
	$\tilde{g}g, \tilde{g}\rightarrow WZ\tilde{Z}\ell\ell\ell\ell$	4-5 large jets	$E_T^{\text{miss}}$ 36.1	$\tilde{g}g$ [m( $\tilde{g}$ )=200 GeV, 1100 GeV] 1.3 1.9 Large $\tilde{\chi}_1^0$
	$\tilde{g}g, \tilde{g}\rightarrow q\bar{q}q\bar{q}$	Multiple	$E_T^{\text{miss}}$ 36.1	$\tilde{g}g$ [m( $\tilde{g}$ )=200 GeV, 1100 GeV] 0.55 1.05 ATLAS-CONF-2018-003
	$\tilde{t}, \tilde{t}\rightarrow t\tilde{t}^0, \tilde{t}^0\rightarrow tb\bar{s}$	$\tilde{t}, \tilde{t}$ 4 b	$E_T^{\text{miss}}$ 36.7	$\tilde{t}, \tilde{t}$ 0.95 $m(\tilde{t}_1) < 500$ GeV
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1\rightarrow tb\bar{s}$	2 jets + 2 b	$E_T^{\text{miss}}$ 36.7	$\tilde{t}_1, \tilde{t}_1$ 0.42-0.61 $BR(\tilde{t}_1\rightarrow tb\bar{s}) = 20\%$
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1\rightarrow q\bar{q}$	2 e, $\mu$ DV	$E_T^{\text{miss}}$ 136	$\tilde{t}_1, \tilde{t}_1$ 1.0 1.6 $BR(\tilde{t}_1\rightarrow q\bar{q}) = 100\%, \cos\theta = 1$
	$\tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_2^0/\tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_1^0\rightarrow tb\bar{s}, \tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_1^0\rightarrow bbs$	1-2 e, $\mu$ $\geq 6$ jets	$E_T^{\text{miss}}$ 139	$\tilde{\chi}_1^0$ 0.2-0.32 Pure higgsino
				210.02472
				210.110543

\*Only a selection of the available mass limits on new states or

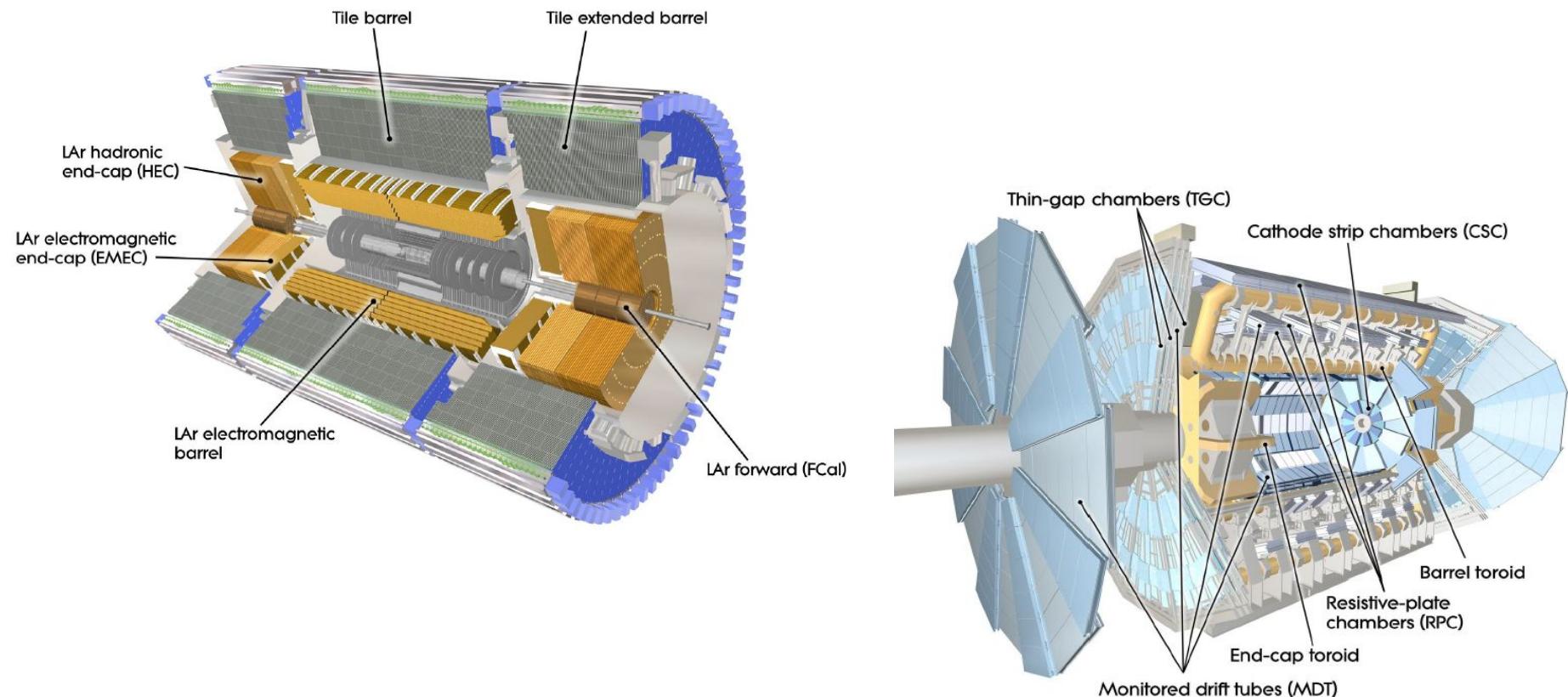
\*Only a selection of the available mass limits on new states or phenomena is shown. Many of the limits are based on simplified models, c.f. refs. for the assumptions made.



# ATLAS detector



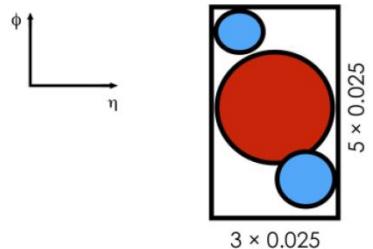
# ATLAS detector



# Superclusters

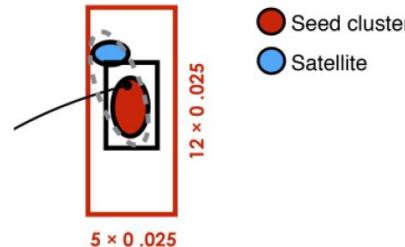
## All $e^\pm, \gamma$ :

Add all clusters within  $3 \times 5$  window around seed cluster.



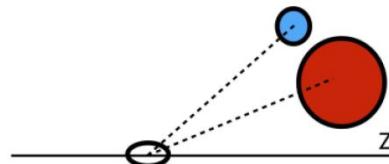
## Electrons only:

Seed, secondary cluster  
match the same track.

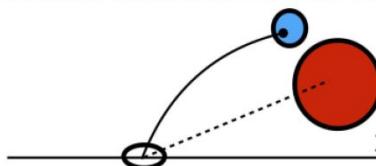


## Converted photons only:

Add topo-clusters that have the **same conversion vertex** matched as the seed cluster.



Add topo-clusters with a **track match** that is **part of the conversion vertex** matched to the seed cluster.



# Modelo estadístico

$$q_0 = \begin{cases} 0 & \hat{\mu} < 0 \\ -2 \ln \lambda(0) & \hat{\mu} \geq 0 \end{cases}$$

$$\text{CL}_s = \frac{p_\mu}{1 - p_b} \equiv \frac{\text{CL}_{s+b}}{\text{CL}_b}$$

$$p_\mu = \int_{q_{\mu,\text{obs}}}^{\infty} f(q_\mu|\mu) dq_\mu \equiv \text{CL}_{s+b}$$

$$1 - p_b = \int_{q_{\mu,\text{obs}}}^{\infty} f(q_\mu|0) dq_\mu \equiv \text{CL}_b$$

$$\tilde{t}_\mu = -2 \ln \tilde{\lambda}(\mu) = \begin{cases} -2 \ln \frac{\mathcal{L}(\mu, \hat{\theta}(\mu))}{\mathcal{L}(0, \hat{\theta}(0))} & \hat{\mu} < 0 \\ -2 \ln \frac{\mathcal{L}(\mu, \hat{\theta}(\mu))}{\mathcal{L}(\hat{\mu}, \hat{\theta})} & \hat{\mu} \geq 0 \end{cases}$$

ROOT.RooStats.NumberCountingUtils  
.BinomialExpZ

$$\text{med}[Z|s] = \frac{s}{\sqrt{b}}$$

$$\tilde{q}_\mu = \begin{cases} -2 \ln \tilde{\lambda}(\mu) & \hat{\mu} \leq \mu \\ 0 & \hat{\mu} > \mu \end{cases} = \begin{cases} -2 \ln \frac{\mathcal{L}(\mu, \hat{\theta}(\mu))}{\mathcal{L}(0, \hat{\theta}(0))} & \hat{\mu} < 0 \\ -2 \ln \frac{\mathcal{L}(\mu, \hat{\theta}(\mu))}{\mathcal{L}(\hat{\mu}, \hat{\theta})} & 0 \leq \hat{\mu} \leq \mu \\ 0 & \hat{\mu} > \mu \end{cases}$$

$$Z = \sqrt{2(s+b) \ln \left[ \frac{(s+b)(b+\sigma_b^2)}{b^2 + (s+b)\sigma_b^2} \right] - \frac{2b^2}{\sigma_b^2} \ln \left[ 1 + \frac{s\sigma_b^2}{b(b+\sigma_b^2)} \right]}$$

# Selección de objetos y eventos

## Conjunto de datos

- Run 2 del LHC (139 ifb)
- HLT\_g140\_loose

## Fotones

- Tight
- Baseline:  $E_T > 25 \text{ GeV}$
- $|\eta| < 2.37$
- Signal:  $E_T > 50 \text{ GeV}$
- Signal leading:  $E_T > 145 \text{ GeV}$
- Isolation: FixedCutTight

## Electrones

- Baseline: Loose
- Baseline:  $p_T > 10 \text{ GeV}$
- $|\eta| < 2.47$
- Signal:  $p_T > 25 \text{ GeV}$
- Signal: Tight
- Isolation: FCLoose/ FCHighPtCaloOnly

## Muon

- Medium
- $p_T > 10 \text{ GeV}$
- $|\eta| < 2.7$
- Signal:  $p_T > 25 \text{ GeV}$
- Isolation: FixedCutLoose

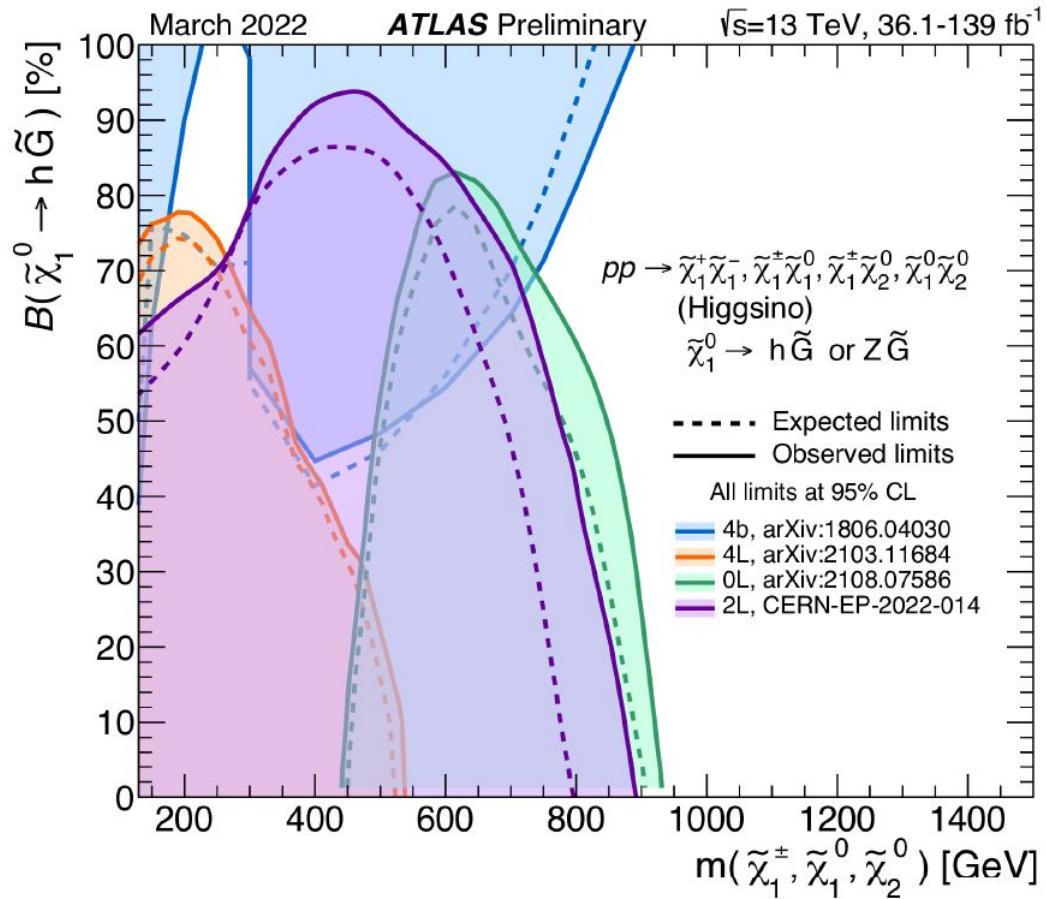
## Jets

- EMTopo
- Baseline:  $p_T > 30 \text{ GeV}$
- Baseline:  $|\eta| < 2.8$
- Signal:  $p_T > 30 \text{ GeV}$
- Signal:  $|\eta| < 2.5$
- $b$ -jets: MV2c10, 77%

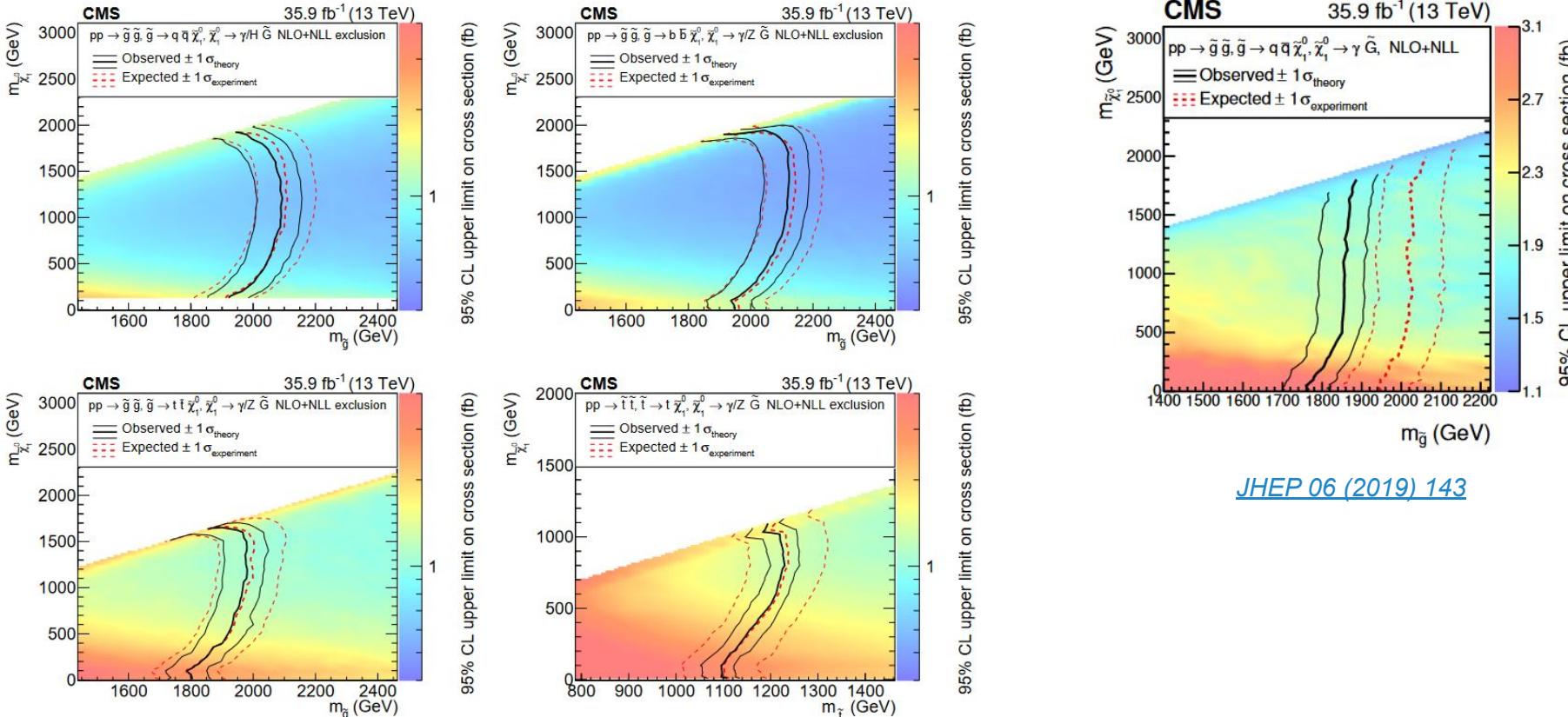
MET  $> 50 \text{ GeV}$

Overlap Removal  
entre los anteriores  
objetos

# Límites de SUSY EWK en ATLAS



# Limites de SUSY en CMS



[JHEP 06 \(2019\) 143](https://arxiv.org/abs/1901.06726)