

TRABAJO DE FIN DE GRADO DE FÍSICA  
UNIVERSIDAD DE OVIEDO

# **Producción electrodébil de WZ (VBS)** en el experimento CMS (LHC)

---

Mario González

Junio de 2019

*Tutores*

Carlos Francisco Erice Cid  
Isidro González Caballero

- 1** **Introducción**

---

  - El Modelo Estándar
  - El detector CMS. Sistema de coordenadas e identificación de partículas
  - Herramientas y datos experimentales
- 2** **Los procesos de señal: WZ y WZ VBS**

---

  - Descripción teórica
  - Motivación física
- 3** **La región de señal para WZ**

---
- 4** **Regiones de Control (CR)**

---

  - CR de producción ZZ
  - CR de producción de quarks top
  - CR de producción WZ
- 5** **Región de señal para WZ VBS**

---
- 6** **La Fuerza de señal**

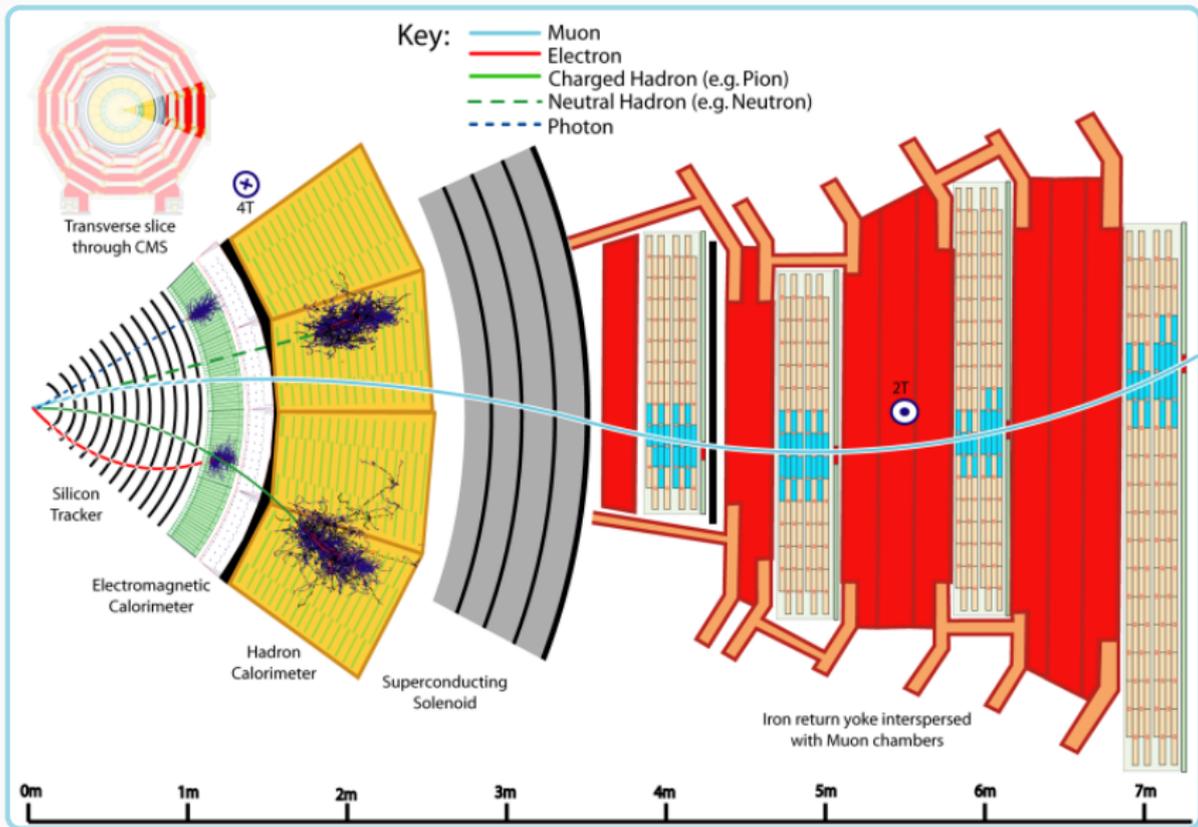
---

  - Definición
  - Cálculo para WZ
  - Cálculo para WZ VBS

	1ª gen	2ª gen	3ª gen		
QUARKS	<b>u</b> <i>up</i> $m \sim 2.2 \text{ MeV}$ $q = 2/3$ $\tau = \infty$	<b>c</b> <i>charm</i> $m = 1.275 \text{ GeV}$ $q = 2/3$ $\tau = 1.1 \cdot 10^{-12} \text{ s}$	<b>t</b> <i>top</i> $m = 173.0 \text{ GeV}$ $q = 2/3$ $\tau = 4.2 \cdot 10^{-25} \text{ s}$		
	<b>d</b> <i>down</i> $m \sim 4.7 \text{ MeV}$ $q = -1/3$ $\tau = \infty$	<b>s</b> <i>strange</i> $m = 95 \text{ MeV}$ $q = -1/3$ $\tau = 1.24 \cdot 10^{-8} \text{ s}$	<b>b</b> <i>bottom</i> $m = 4.18 \text{ GeV}$ $q = -1/3$ $\tau = 1.3 \cdot 10^{-12} \text{ s}$		
LEPTONES	<b>e</b> <i>electrón</i> $m = 0.511 \text{ MeV}$ $ q  = 1$ $\tau = \infty$	<b><math>\mu</math></b> <i>muón</i> $m = 105.7 \text{ MeV}$ $ q  = 1$ $\tau = 2.2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$	<b><math>\tau</math></b> <i>tau</i> $m = 1777 \text{ MeV}$ $ q  = 1$ $\tau = 2.9 \cdot 10^{-13} \text{ s}$		
	<b><math>\nu_e</math></b> <i>Neutrino del electrón</i> $m < 2 \text{ eV}$ $q = 0$	<b><math>\nu_\mu</math></b> <i>Neutrino del muón</i> $m < 0.19 \text{ MeV}$ $q = 0$	<b><math>\nu_\tau</math></b> <i>Neutrino del tau</i> $m < 18.2 \text{ MeV}$ $q = 0$		
BOSONES	<b>g</b> <i>gluón</i> $m = 0$ $q = 0$	<b><math>\gamma</math></b> <i>fotón</i> $m = 0$ $q = 0$	<b>W</b> $m = 80.4 \text{ GeV}$ $ q  = 1$	<b>Z</b> $m = 91.2 \text{ GeV}$ $q = 0$	<b>H</b> <i>higgs</i> $m = 125 \text{ GeV}$ $q = 0$



# El detector CMS Identificación de Partículas

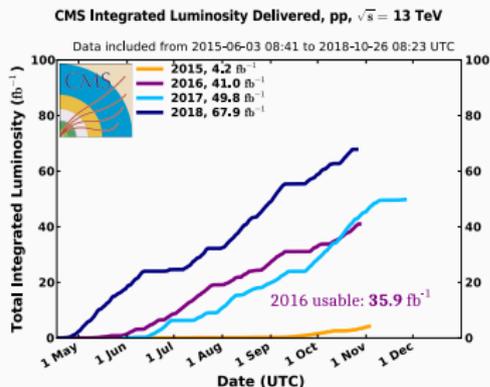


## Datos experimentales

- Datos recogidos en el experimento CMS durante 2016
  - $\mathcal{L} = 35.9 \text{ fb}^{-1}$
  - $E_{CM,pp} = 13 \text{ TeV}$

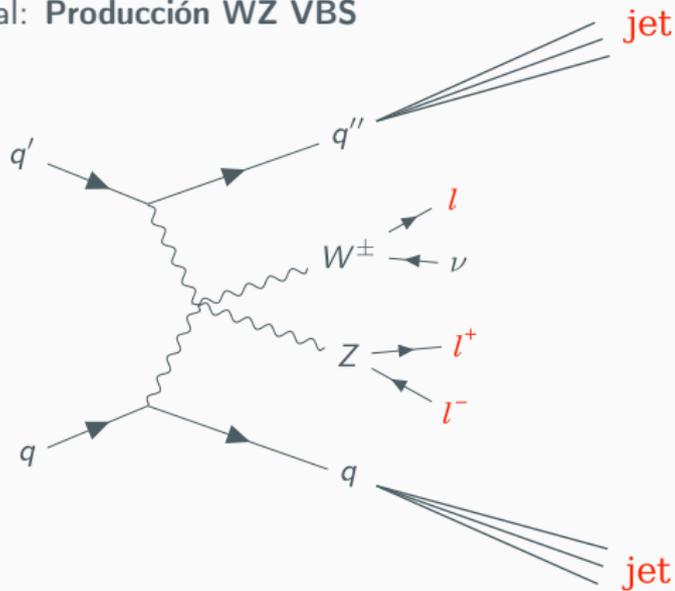
## Herramientas utilizadas en el análisis

- C++
- ROOT
- PAF (*PROOF Analysis Framework*)
- Bash, Git, Github



Este trabajo está relacionado con los contenidos de las asignaturas *Física Nuclear y de Partículas elementales* y *Física de Altas Energías y Aceleradores*

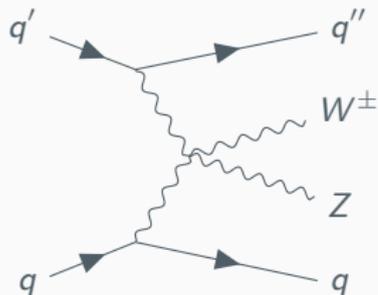
El proceso de señal: **Producción WZ VBS**



Seleccionamos los canales leptónicos tanto del W como del Z

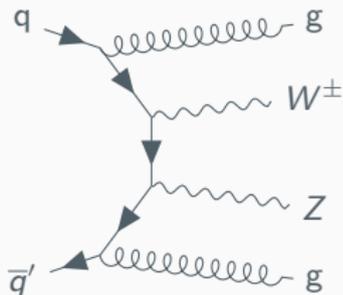
$$W \rightarrow l + \nu \quad Z \rightarrow l^+ + l^-$$

El proceso de señal  
Producción WZ VBS

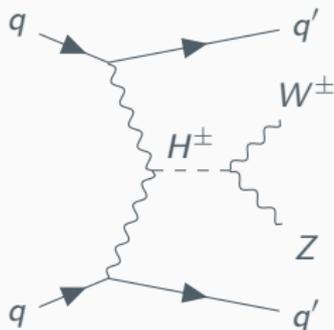


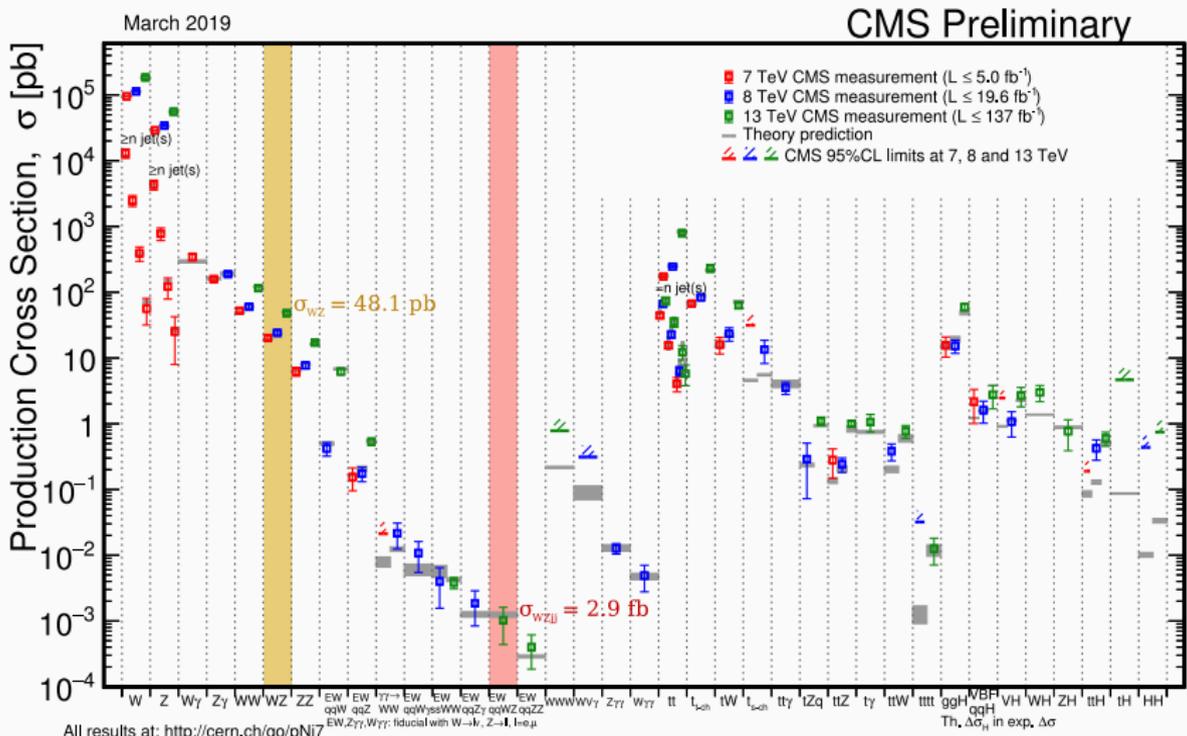
$$\frac{N_{QCD}}{N_{VBS}} \sim \frac{\alpha_s^2 \alpha_{ew}^2}{\alpha_{ew}^4} = \frac{\alpha_s^2}{\alpha_{ew}^2}$$

Su principal fondo  
Producción WZ QCD



Más allá del SM  
Producción de Higgs cargados



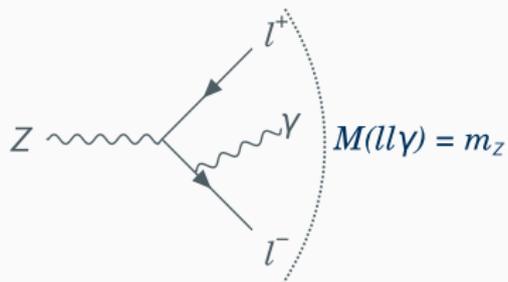
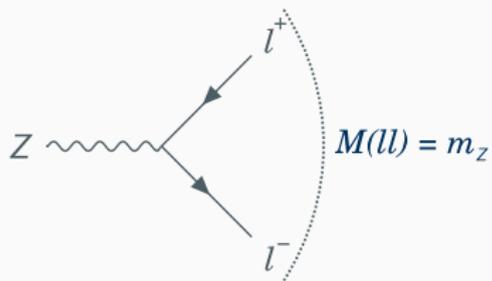


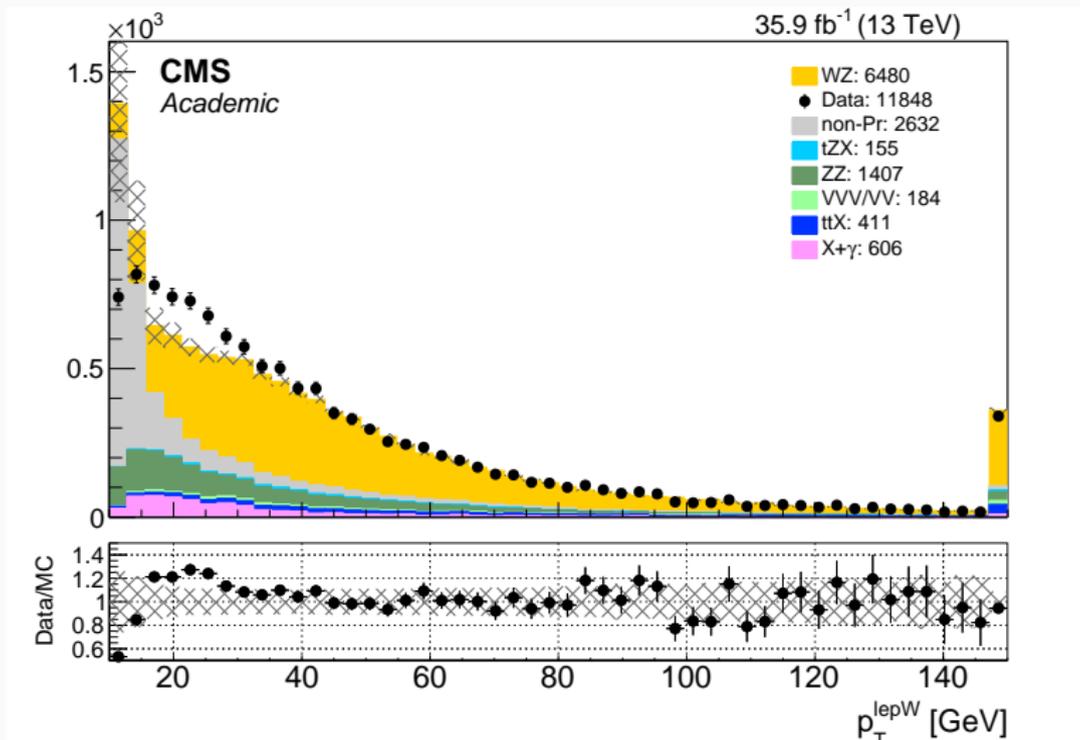
$$M^2 = \left( \sum_i \mathbf{P}_i \right)^2$$

con  $\mathbf{P}$  el *cuadrimomento* de cada partícula de un estado:

$$\mathbf{P} = (E, \vec{p}) = (E, p_x, p_y, p_x)$$

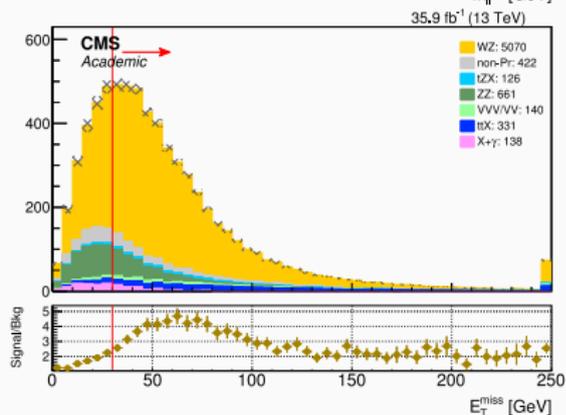
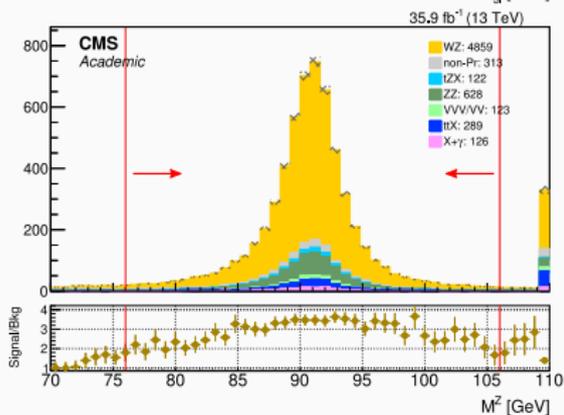
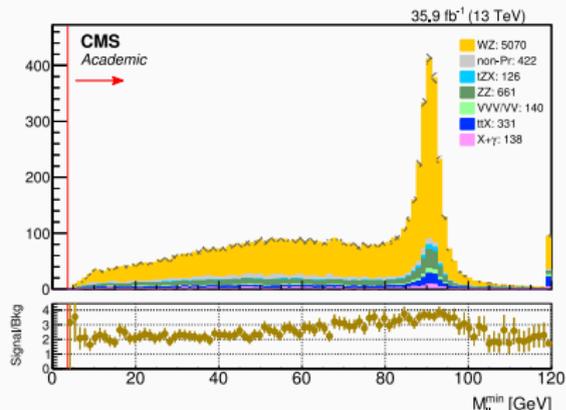
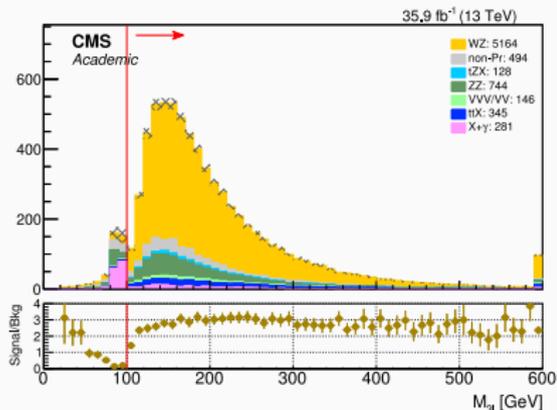
- Para una partícula,  $M^2 = \mathbf{P}^2 = m^2$ .
- La masa invariante *se conserva* en los estados inicial y final.

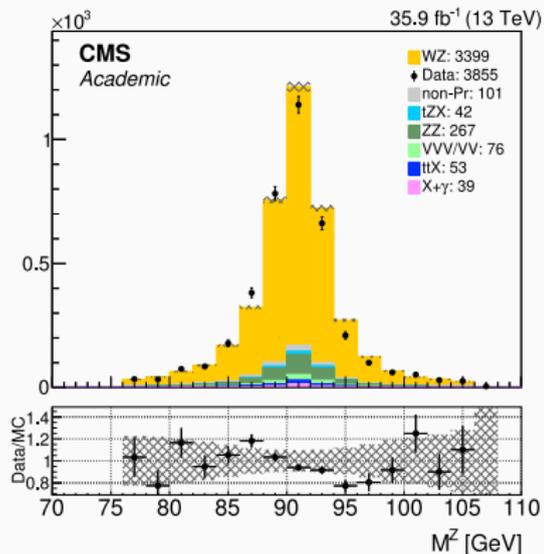




$$p_T\{l_{Z_1}, l_{Z_2}, l_{Z_W}\} > \{25, 10, 25\} \text{ GeV.}$$

# Región de señal para WZ Selección de sucesos





→ La proporción señal / total ha ascendido desde el 45% hasta el 82%

→ Reducción del fondo: 90%

→ Reducción de la señal: 48%

Fondos predominantes:

- La producción ZZ
- La producción de quarks top

Los datos aparecen ligeramente por debajo de las predicciones.

$$N = 3855 \quad N_{pred} = 3977$$

Averiguamos si la discrepancia se debe a la señal o al fondo:

→ Estudiamos los principales fondos de la señal: ZZ y la producción de tops

Motivación:

Verificar la modelización de los procesos de fondo *en la región de señal*

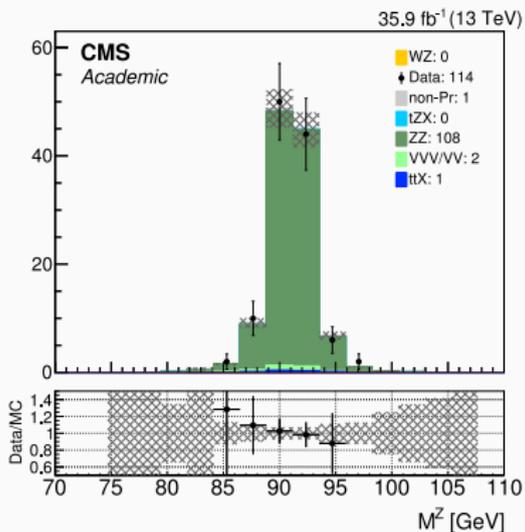
Proceso de señal:  $WZ \rightarrow l^+l^- + l' \nu$

La región de control:

- Ha de parecerse a la de señal
- Ha de ser *ortogonal* a la de señal
- Debe contener pocos sucesos de señal

Región	$N_{leps}$	$N_{OSSF}$	MET [GeV]	b Tags	$ M(l_{z_1} l_{z_2}) - m_Z $ [GeV]	$p_T\{l_{z_1}, l_{z_2}, l_W, -\}$ [GeV]	$\min(M(l'l'))$ [GeV]	$M(l_{z_1} l_{z_2} l_W)$ [GeV]
SR WZ	= 3	$\geq 1$	> 30	= 0	< 15	> {25, 10, 25}	> 4	> 100
CR tops	= 3	$\geq 1$	> 30	> 0	> 15	> {25, 10, 25}	> 4	> 100
CR ZZ	= 4	$\geq 1$	> 30	= 0	< 15	> {25, 10, 25, 10}	> 4	> 100

$$ZZ \rightarrow l^+l^- + l'^+l'^-$$



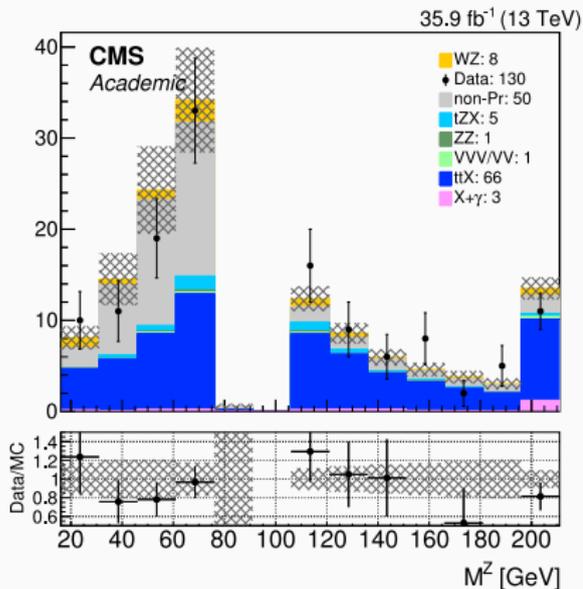
→  $N_{\text{leps}} = 4$ , al menos un par de igual sabor o distinto signo

→  $p_T \{l_{Z_1}, l_{Z_2}, l_{Z'_1}, l_{Z'_2}\} > \{25, 10, 25, 10\}$   
GeV

$$N = 114$$

$$N_{\text{MC}} = 112$$

$$N_{\text{ZZ}} = 96\% N_{\text{MC}}$$



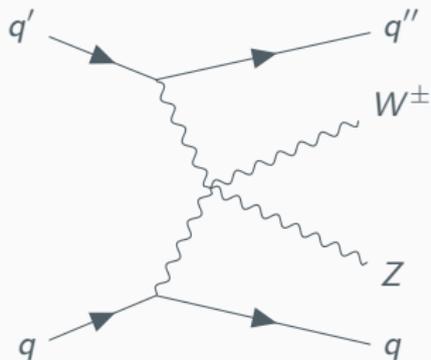
$$\rightarrow |M(l_{Z_1} l_{Z_2}) - m_Z| > 15 \text{ GeV}$$

$$\rightarrow b \text{ Tags} > 0$$

$$N = 130$$

$$N_{MC} = 133$$

$$N_{\text{top}} = 85\% N_{MC - \text{Non Prompt}}$$



Hacemos las dos regiones ortogonales

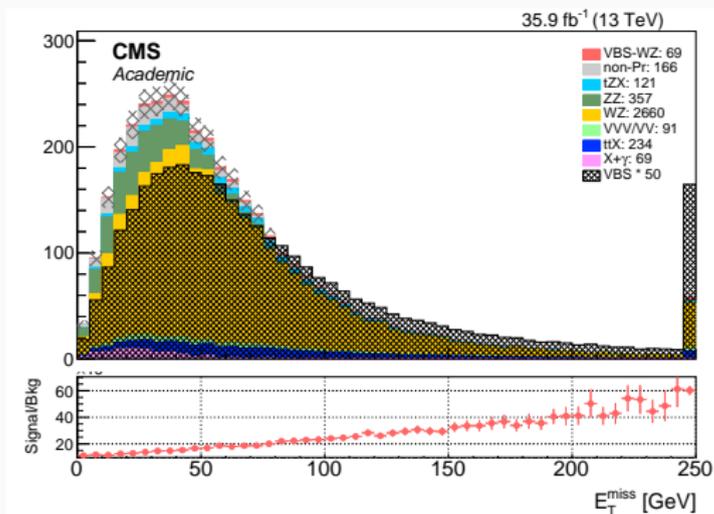
$$\rightarrow N_{\text{jets}} \leq 1$$

Nuevo factor de normalización:

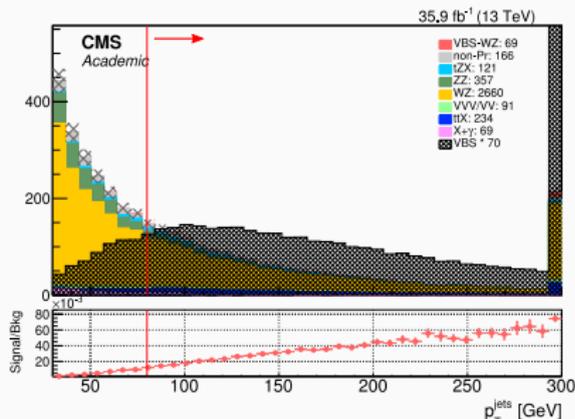
$$k_{WZ} = \frac{N - B}{S} = 0.966$$

- $M_{3l} > 100 \text{ GeV}$
- $|M(l_{Z_1} l_{Z_2}) - m_Z| < 15$
- $M_{ll}^{\min} > 4 \text{ GeV}$
- 3 o más leptones en el estado final, si el cuarto tiene  $p_T < 10 \text{ GeV}$
- $p_T\{l_{Z_1}, l_{Z_2}, l_W\} > \{25, 10, 20\} \text{ GeV}$

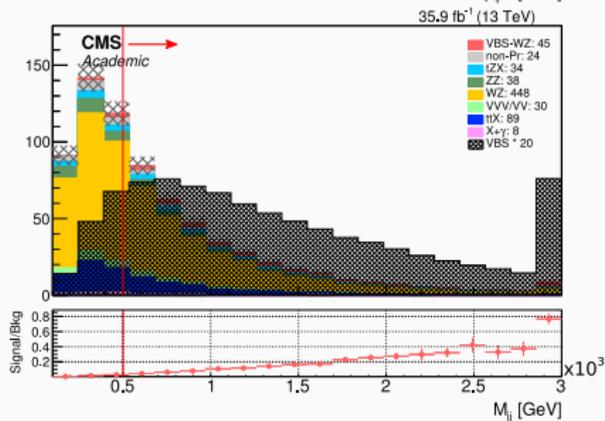
- No restringimos los valores de la MET:

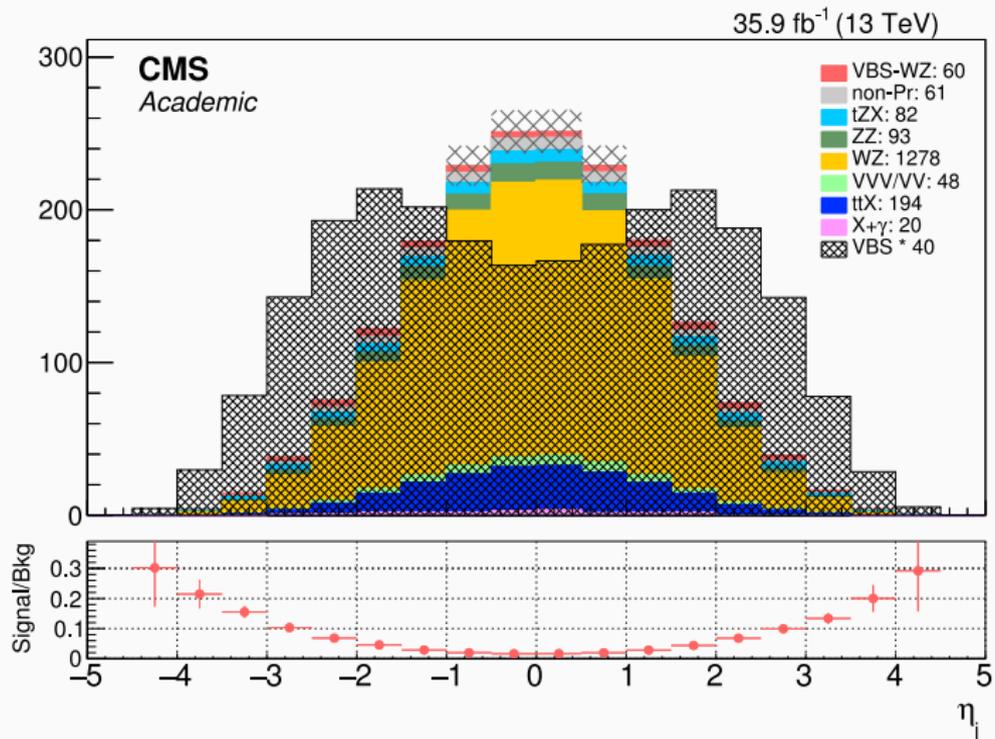


El momento de los jets

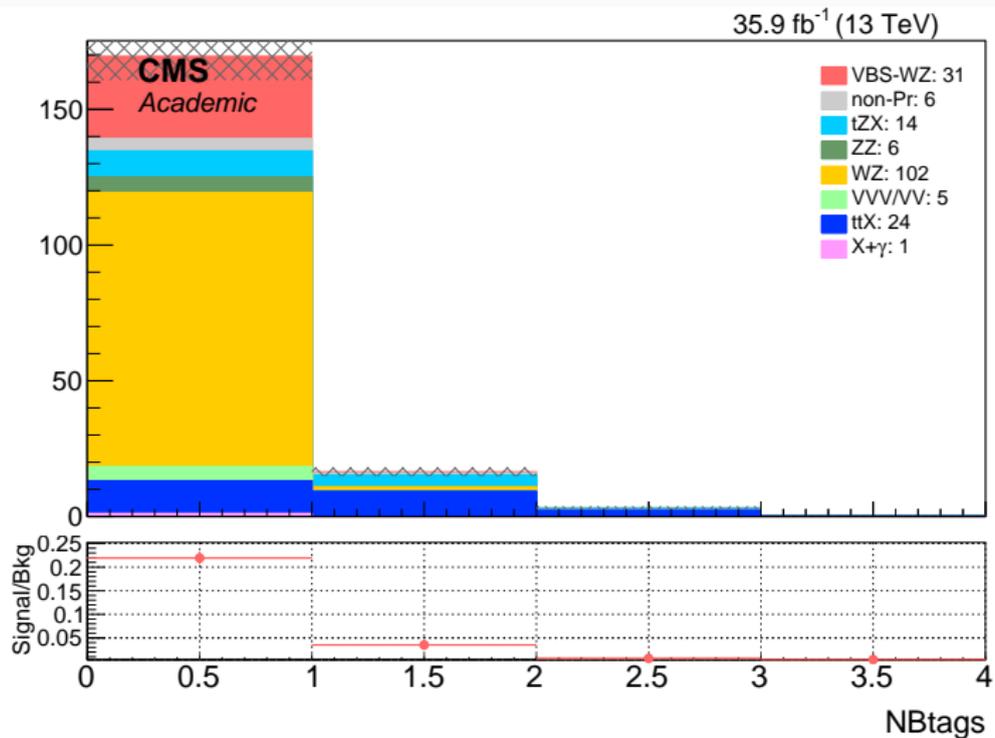


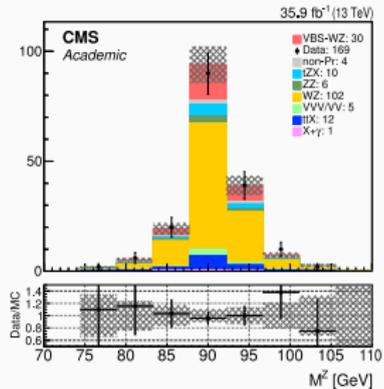
La masa invariante de los jets





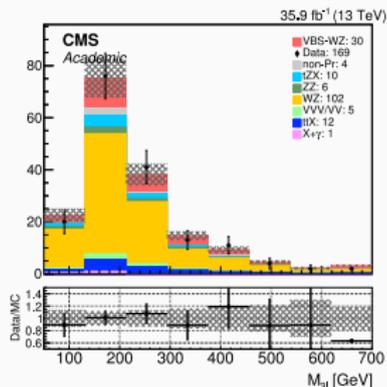
Pedimos  $\Delta|\eta_{jj}| > 2.5$





La contribución de WZ VBS ha aumentado desde el 0.7% hasta el 18%

Los procesos con quarks top representan el 15% del total de los fondos



Se ha perdido el 65% de sucesos de WZ VBS

Se ha perdido el 99% de los sucesos de fondos

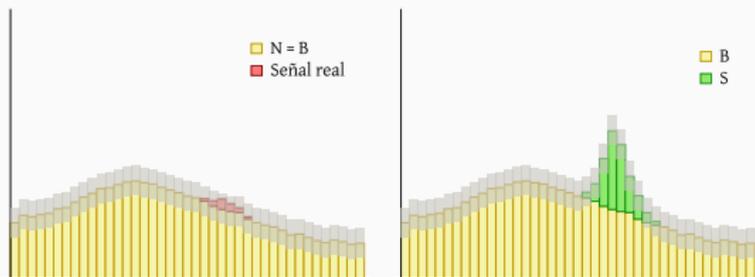
Mide la relación entre el número de eventos de señal observado y predicho.

$$\mu = \frac{N - B}{S}$$

- VBS-WZ: 30
- ◆ Data: 169
- non-Pr: 4
- tZX: 10
- ZZ: 6
- WZ: 102
- VVV/VV: 5
- ttX: 12
- X+γ: 1

Además del valor central, se calculan dos valores “ciegos” definiendo las siguientes hipótesis

- Hay señal:  
 $N = B + S \rightarrow \mu = 1$
- No hay señal:  
 $N = B \rightarrow \mu = 0$



La fuerza de señal en los datos confirmará una, otra o ninguna en base a su valor central y a su **incertidumbre**.

$\mu_{WZ} = 0.964 \pm$	Leptones	Muones	0.014
		Electrones	0.015
	Pile Up	Pile Up	0.014
	Jets	JEC	0.013
		b tagging	0.0035
	Incertidumbres de normalización	Non Prompt	0.0087
		X+ $\gamma$	0.0022
		ttX	0.0015
		tZX	0.0018
		VVV/VV	0.011
		ZZ	0.0053
	Estadísticos	Datos	0.018
		Monte Carlos	0.0084
	Otros	Trigger eff	0.018
		Luminosidad	0.029

Valores ciegos

$$N = B + S : \quad \mu = 1 \pm 0.05$$

$$N = B : \quad \mu = 0 \pm 0.01$$

Valor real

$$\begin{aligned} \mu_{WZ} &= 0.96 \pm 0.02 \text{ (stat)} \pm 0.04 \text{ (syst)} \pm 0.03 \text{ (lumi)} \\ &= \mathbf{0.96 \pm 0.05 \text{ (tot)}} \end{aligned}$$

$\mu_{VBS} = 0.981 \pm$	Leptones	Muones	0.072
		Electrones	0.072
	Pile Up	Pile Up	0.06
	Jets	JEC	0.46
		b tagging	0.097
	Incertidumbres de normalización	WZ	0.17
		Non Prompt	0.042
		X+ $\gamma$	0.0073
		ttX	0.039
		tZX	0.047
		VVV/VV	0.083
		ZZ	0.013
	Estadísticos	Datos	0.43
		Monte Carlos	0.18
	Otros	Trigger eff	0.089
		Luminosidad	0.14

Valores ciegos

$$N = B + S : \quad \mu = 1 \pm 0.7$$

$$N = B : \quad \mu = 0 \pm 0.6$$

Valor real

$$\begin{aligned} \mu_{VBS} &= 0.98 \pm 0.46 \text{ (stat)} \pm 0.55 \text{ (syst)} \pm 0.14 \text{ (lumi)} \\ &= \mathbf{0.98 \pm 0.73} \text{ (tot)} \end{aligned}$$

que representa una medida con una significancia de 1.6 sigmas, calculada según

$$Z = \frac{N - B}{\delta B}$$

- Tanto la normalización como la incertidumbre asociadas a los principales fondos de las dos señales ha sido validada, tras certificarse la compatibilidad con los datos observados en sus respectivas regiones de control.
- Se ha definido una tercera región de control para la producción WZ como fondo para VBS. Tras observar una ligera discrepancia entre datos y predicciones, se ha corregido el Monte Carlo que lo modela por un factor de escala
- El resultado en la región de señal de WZ,  $\mu_{WZ} = 0.96 \pm 0.05$ , representa una medida competitiva con los últimos resultados de CMS publicados en JHEP 04 (2019) 122.

Measurements of the  $pp \rightarrow WZ$  inclusive and differential production cross section and constraints on charged anomalous triple gauge couplings at  $\sqrt{s} = 13$  TeV.

The CMS Collaboration

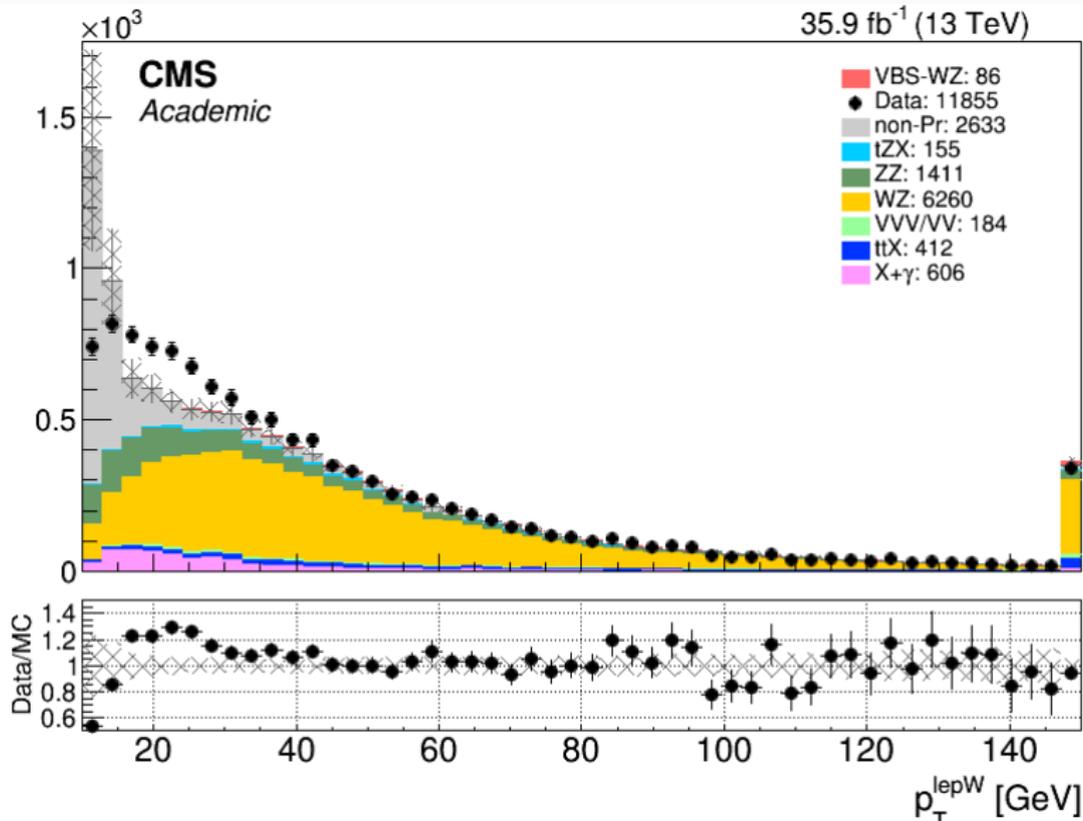
$$\mu_{VBS} = 0.98 \pm 0.73$$

- El resultado en la región de señal de WZ VBS (con una sección eficaz cuatro órdenes de magnitud inferior a la de producción WZ) es tiene una incertidumbre comparable al resultado más reciente de CMS (publicado en Phys. Lett. B ), con una incertidumbre del 63%, compatible con el 70% obtenido en este trabajo mediante un procedimiento más directo.

Measurement of electroweak WZ production and search for new physics in pp collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV

The CMS Collaboration





N = 169	PUSF	ElecSF	MuonSF	JEC	b Tag	Estadística	ev. totales
X+ $\gamma$	0.01	0.02	0.01	0	0	0.56	1.11
ttX	0.15	0.15	0.16	0.69	1.5	0.23	12.01
VVV/VV	0.04	0.07	0.07	0.54	0.05	0.33	5.07
WZ	1.1	1.4	1.4	10	0.45	3	101.53
ZZ	0.03	0.10	0.07	0.65	0.03	0.2	5.72
tZX	0.1	0.13	0.12	0.68	0.84	0.10	9.58
Non Pr	0	0	0	0	0	0.94	4.23
WZ VBS	0.4	0.39	0.41	1.1	0.08	0.14	30.3

Proceso	Error (%)
WZ	5
Non Pr	30
X + $\gamma$	20
ttX	10
tZX	15
VVV/VV	50
ZZ	7

Además,

- Luminosidad: 2.6%
- Eficiencia del trigger; 1.6%
- Estadística de los datos: 7.8% de  $N$

$N = 3855$	PUSF	ElecSF	MuonSF	JEC	b Tag	Estadística	ev. totales
$X+\gamma$	0.7	0.9	0.3	5	0	3	39
ttX	0.6	0.6	0.7	0.1	6	0.5	53
VVV/VV	0.7	1	1	0.8	0.4	1	76
ZZ	4	4	3	10	0.3	1	267
tZX	0.3	0.5	0.5	0.3	3	0.3	42
non-Pr	0	0	0	0	0	5	101
WZ	40	50	40	30	3	20	3400

Proceso	Error (%)
Non Pr	30
$X + \gamma$	20
ttX	10
tZX	15
VVV/VV	50
ZZ	7

Además,

- Luminosidad: 2.6%
- Eficiencia del trigger; 1.6%
- Estadística de los datos: 1.6% de  $N$

# Diferencia en la pseudorapidez de los jets VBS

35.9 fb<sup>-1</sup> (13 TeV)

