

# TALLER DE ANÁLISIS DE DATOS DE CMS

(versión SLTP julio 2018)

## INTRODUCCIÓN

Los componentes más fundamentales de la materia (las partículas subatómicas) y sus interacciones (el electromagnetismo, las fuerzas nucleares fuerte y débil) están descritos el Modelo Estándar de la Física de Partículas. Esta teoría basada en la mecánica cuántica y la relatividad especial explica con enorme precisión procesos de la naturaleza que van desde las colisiones entre partículas subatómicas hasta la fusión en las estrellas. Una explicación sencilla y elegante del Modelo Estándar aparece en este vídeo (en inglés con subtítulos en español) <https://youtu.be/l3jtzXr69GY>.

Los experimentos que realizamos en el CERN están destinados a estudiar con gran detalle el Modelo Estándar y, más importante, a descubrir nuevos fenómenos que no estén descritos por esta teoría. Estos descubrimientos nos ayudarán a aumentar nuestra comprensión del origen y evolución del universo. Para ello utilizamos el Gran Colisionador de Hadrones (LHC, *Large Hadron Collider*, <https://youtu.be/pQhbhpU9Wrg>), que acelera protones a energías muy próximas a la de la luz antes de hacerlos colisionar en los cuatro puntos de interacción que alojan a los detectores ALICE, ATLAS, LHCb y CMS. Estas colisiones protón-protón tienen lugar 40 millones de veces por segundo, cada una de ellas originando millares de partículas de alta energía que son registradas por los detectores de partículas. Cada una de estas colisiones se denomina *evento* o *suceso*. El análisis de miles de billones de eventos se realiza con complejos programas informáticos que procesan la información de los detectores e imponen criterios de calidad (cortes de selección) para clasificar los sucesos y medir sus propiedades. Estas medidas son contrastadas con las predicciones del Modelo Estándar, lo que nos permite adquirir conocimiento sobre el universo cuando contaba con  $10^{-10}$  segundos de vida tras el Big Bang.

El objeto de este taller práctico es familiarizarse con las técnicas de análisis de datos de los experimentos del CERN. En este ejercicio vamos a analizar datos de CMS (*Compact Muon Solenoid*), un detector electrónico enorme ( $15 \times 15 \times 21 \text{ m}^3$ ) dispuesto en capas concéntricas, cada una de ellas formada por una cantidad ingente de sensores, unos 80 millones en total. Podéis entender este detector como una cámara digital 3D que en vez de percibir la luz registra las señales de las partículas que lo atraviesan. El vídeo <https://youtu.be/S99d9BQmGB0> (en inglés con subtítulos en español) contiene una introducción al experimento CMS.

## EJERCICIO PRÁCTICO

En este ejercicio vamos a medir cantidades relacionadas con parámetros fundamentales del Modelo Estándar que pueden compararse con predicciones teóricas, como la universalidad leptónica, el cociente  $W^+/W^-$  y  $W/Z$  y la distribución de masa del bosón Z. Para ello vamos a visualizar unas pocas centenas de eventos reales del experimento CMS y clasificarlos como sucesos con bosones W, Z o H (el bosón de Higgs). A partir de esta clasificación realizaremos los cálculos que darán lugar a nuestras medidas.

Los objetivos de la práctica son:

1. determinar cuáles son los mejores candidatos a bosones W, Z y H,
2. distinguir los candidatos  $W^+$  de los  $W^-$  y determinar las fracciones  $W^+/W^-$  y  $W/Z$ ,
3. distinguir las desintegraciones en electrones (e) de aquellas en muones ( $\mu$ ),
4. determinar la fracción  $e/\mu$ ,
5. representar en una gráfica la masa de los candidatos a bosones Z y H.

El taller se realizará en parejas, cada una de las cuales tendrá asignado un número de 1 a 24. En la sesión del jueves por la tarde, Paco y Pablo discutirán los resultados obtenidos, comparando y combinando las medidas de todas las parejas (grupos de trabajo).

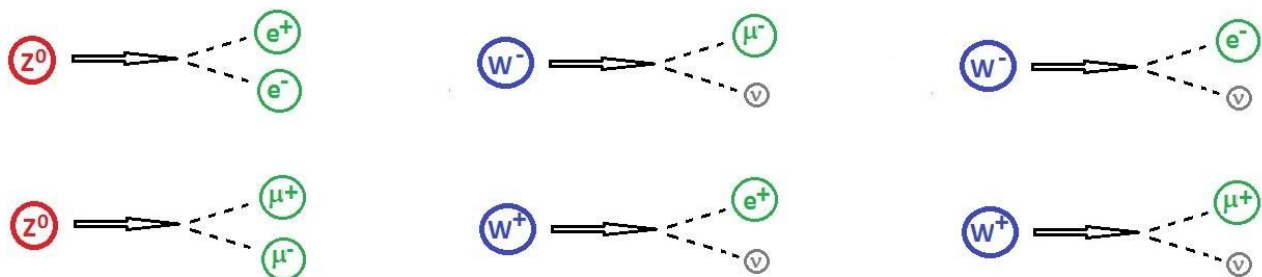
### IDENTIFICACIÓN DE SUCESOS CON UN BOSÓN Z (NP) O W

Los bosones W, Z y H son partículas pesadas que se desintegran casi instantáneamente, mucho antes de llegar al detector, de modo que este solo registra las señales de las partículas secundarias que proceden de su desintegración. Existe una elevada cantidad de posibles estados finales con gran variedad de partículas diferentes. Un análisis completo de todos ellos sería hartamente complejo y poco didáctico. Por tanto los eventos de CMS utilizados en este ejercicio han sido preseleccionados conteniendo electrones, muones ( $\mu$ ), fotones ( $\gamma$ ) y neutrinos ( $\nu$ ), todas ellas partículas “fáciles” de identificar.

Dado que el bosón Z no tiene carga eléctrica se debe desintegrar en dos leptones de carga opuesta (por ejemplo,  $e^+$  y  $e^-$ ) para que se conserve la carga. A lo largo del ejercicio descubriremos que el bosón Z no es la única partícula neutra (NP, *neutral particle* en inglés) que se desintegra en  $e^+e^-$  o  $\mu^+\mu^-$ .

Los bosones W tienen carga +1 o -1, por lo que pueden decaer en un electrón o muon y en un neutrino.

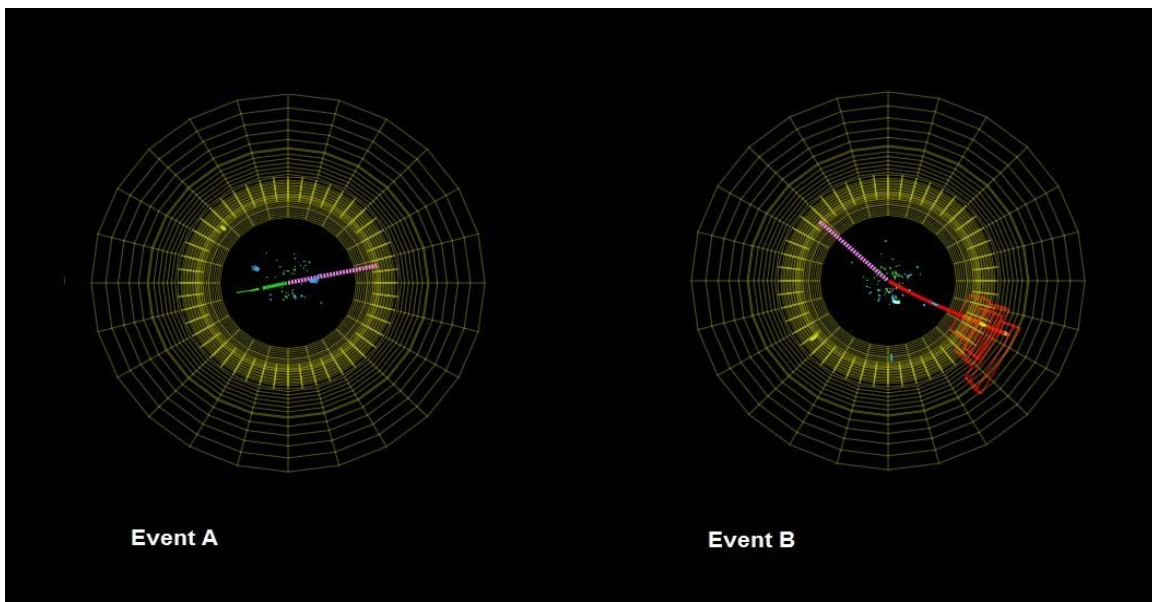
El siguiente esquema sirve de guía para identificar los sucesos:



Para comprender fácilmente cómo se identifican las diferentes partículas en el detector CMS conviene emplear esta sencilla aplicación web [https://www.i2u2.org/elab/cms/graphics/CMS\\_Slice\\_elab.swf](https://www.i2u2.org/elab/cms/graphics/CMS_Slice_elab.swf). Los electrones y los muones dejan señales en el detector de trazas (central). Además, los electrones dejan una señal en el calorímetro electromagnético (de color verde) y los muones una traza en las cámaras de

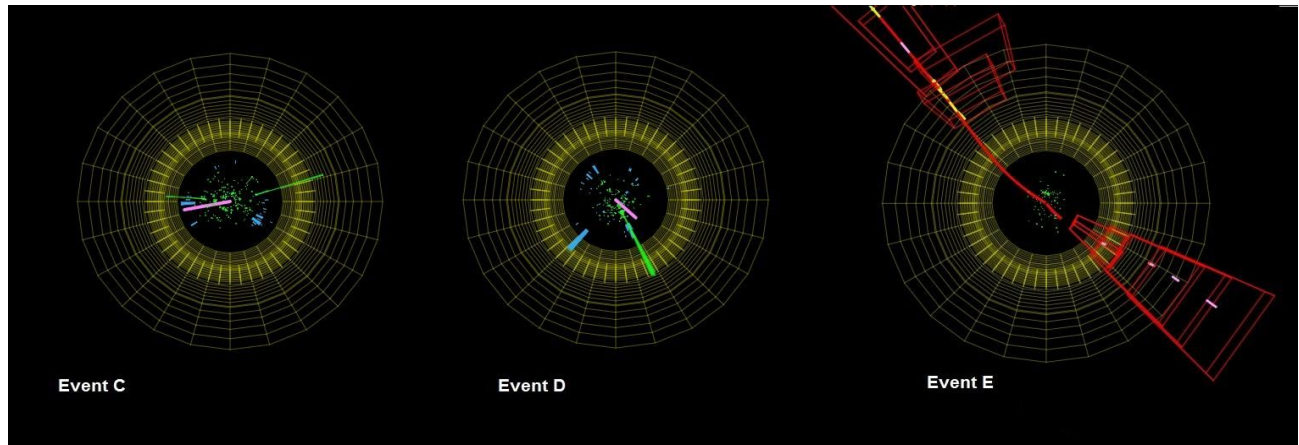
muones (de color rojo). Los neutrinos no dejan señales en el detector, pero su momento se puede determinar en el plano transversal (perpendicular al eje de los haces de protones) imponiendo la conservación de momento y energía en ese plano. Esta cantidad se denomina comúnmente **energía transversal faltante, missing  $E_T$  o simplemente MET**. Este método nos permite identificar la presencia de neutrinos en el detector a pesar de que no dejan señal.

En resumen, las desintegraciones de bosones  $W$  se observan en CMS como una traza de electrón o muon acompañada por un vector que indica un valor elevado de missing  $E_T$  (MET), asociado al neutrino, como se aprecia en la siguiente figura. En ella, la línea de puntos morada indica la MET, la línea verde es un electrón ( $W \rightarrow e\nu$ , Event A) y la roja un muon ( $W \rightarrow \mu\nu$ , Event B).



Hay que tener en cuenta que existe gran cantidad de eventos que tienen un aspecto parecido pero no contienen bosones  $W$ ,  $Z$  (NP) o  $H$ . **Llamamos a estos eventos contaminación**. Para que sean fiables las medidas que queremos llevar a cabo hay que minimizar la contaminación de este tipo de eventos. Para ello explotamos el hecho de que los bosones  $W$  y  $Z$  son partículas muy masivas, por lo que sus productos de desintegración tendrán mucha energía (y momento). En realidad, en el caso de los bosones  $Z$  y  $H$  no utilizamos esta información (ya veremos por qué). Pero para el  $W$  es muy importante asegurarse de que tanto el electrón o el muon como el neutrino son de alta energía. Por ello, solo consideraremos como candidatos a  $W$  aquellos eventos que, teniendo la topología descrita arriba, tienen un **valor de MET superior a 25 GeV** (ya veremos cómo se obtiene esta cantidad).

La carga del  $W$  se infiere por la carga del electrón o del muon. Esta es positiva si en su propagación la partícula se desvía de una línea recta en sentido horario (vista desde el eje  $z+$ , el de los haces de protones) y negativa si lo hace en sentido anti-horario. Esta convención es válida dentro de la cámara de vértice, región en la que el campo magnético de CMS apunta en el sentido  $z+$ . En la parte exterior del detector (cámaras de muones) el campo magnético se invierte y la convención cambia de signo.



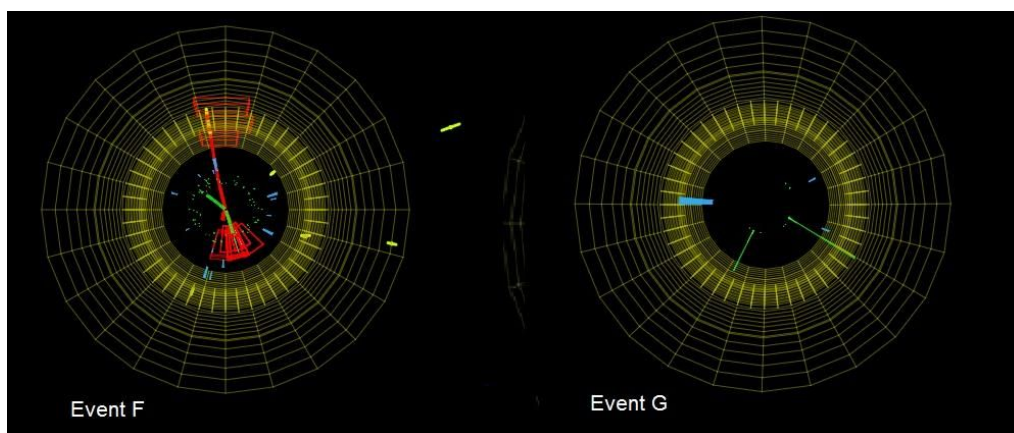
En la figura anterior los eventos C y E son desintegraciones  $Z \rightarrow e^+e^-$  y  $Z \rightarrow \mu^+\mu^-$ , respectivamente, mientras que D es un candidato a  $W \rightarrow e\nu$ .

### IDENTIFICACIÓN DE SUCESOS CON UN BOSÓN DE HIGGS

De las muchas formas que tiene de desintegrarse el bosón de Higgs, los eventos preseleccionados contienen desintegraciones en 2 bosones Z, por un lado, y en 2 fotones ( $\gamma\gamma$ ), por otro.

Los estados finales de eventos  $H \rightarrow ZZ$  en esta muestra pueden ser  $e^+e^-e^+e^-$ ,  $e^+e^-\mu^+\mu^-$  y  $\mu^+\mu^-\mu^+\mu^-$ . Una vez que sabemos identificar un Z es fácil identificar  $H \rightarrow ZZ$ , ya que su topología es compatible con la desintegración de 2 bosones Z. La suma de las cargas de las 4 partículas debe ser cero (Event F en la siguiente figura).

Los eventos  $H \rightarrow \gamma\gamma$  se identifican como dos fotones de alta energía. La señal que estos dejan en el calorímetro electromagnético es similar a la de los electrones (de color verde), pero al ser neutros no dejan rastro en el detector de trazas (Event G en la figura).



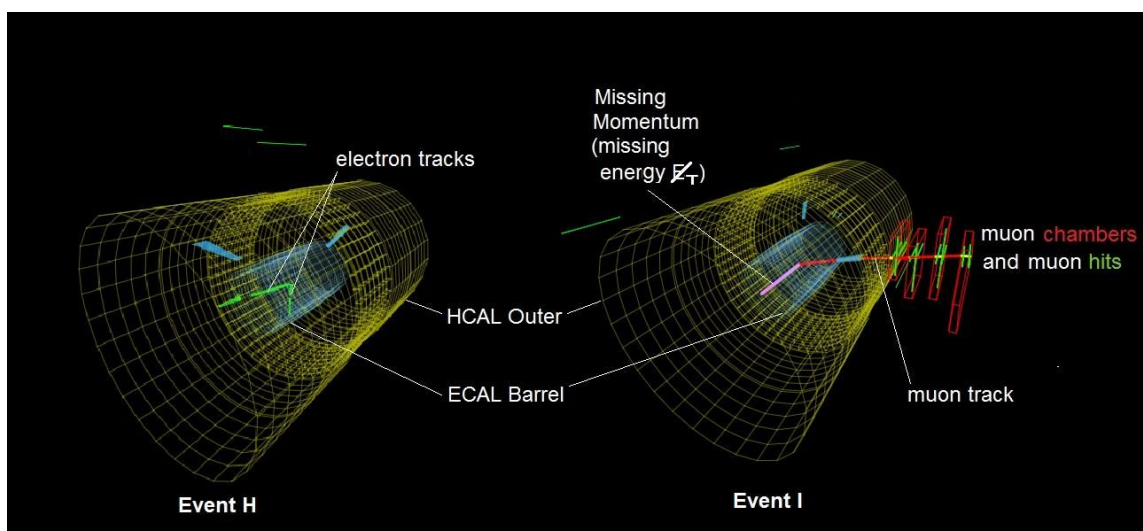
Es importante saber que la probabilidad de que se produzca un bosón de Higgs es ínfima en comparación con la de obtener bosones W o Z. Por esta razón los pocos eventos de H (reales) que se pueden observar se han incluido *a mano* en la muestra de datos con fines didácticos. Es decir, la proporción de sucesos con bosones de Higgs respecto a bosones W o Z no se corresponde con la realidad.



## VISUALIZACIÓN DE SUCESOS

Vamos a analizar los sucesos de CMS con un programa de visualización *en línea* que se encuentra en esta web <https://www.i2u2.org/elab/cms/ispay-webgl/>. Los navegadores de Internet recomendados son Firefox, Chrome y Safari (no funciona en Internet Explorer). Al pinchar en este enlace observamos que la pantalla tiene 2 partes principales: a la izquierda la lista de detectores y objetos reconstruidos que se pueden visualizar, a la derecha la imagen 3D del detector.

Para abrir la muestra de datos debemos pinchar en la *carpeta de arriba* a la izquierda. En la ventana que aparece pinchamos en *Open file(s) from the Web* y a continuación en uno de los conjuntos de datos *masterclass\_26.ig*, *masterclass\_27.ig*, etc. Cada pareja debe analizar el conjunto de datos que le corresponde: por ejemplo, **la pareja 38 analizará los datos *masterclass\_38.ig***. Cada grupo de datos difiere de los demás, ya que al final vamos a combinar los resultados obtenidos al analizar sucesos diferentes. Por último, pinchamos en el primer evento de la lista, *Events/Run\_38/Event\_1*, por ejemplo, y hacemos click en *Load*, lo que hará que aparezca el primer evento en la parte derecha de la pantalla, que debe tener un aspecto similar a la siguiente figura.



Para facilitar la visualización os recomendamos marcar las siguientes casillas en el panel izquierdo del navegador. En *Detector Model* dejad solo *HCAL Outer*. En *Tracking* quitad *Tracks*. En *ECAL* dejad *Barrel* y *Endcap Rec. Hits*. En *HCAL* dejad solo *Barrel Rec. Hits*. En *Muon* dejad *Matching muon chambers*. En *Physics* marcad *Global Muons (Reco)*, *Electron Tracks (GSF)* y *Photons (Reco)*. Es importante que marquéis *Missing Et (PF)*, que aparece como una línea morada discontinua.

Para conocer el valor preciso de la *missing Et* pinchad con el ratón en el texto *Missing Et (PF)*, tras lo que aparecerá una ventana de texto en la parte inferior del visualizador. El valor de la MET es el correspondiente a  $p_T$  en la tabla que se abre. **Hay que repetir esta operación para cada nuevo evento.**

Para medir la masa de las partículas neutras (que dan lugar a 2 partículas cargadas) mantenemos pulsada la tecla *Mayúscula* (ojo, no la de bloquear mayúsculas) y pinchamos

primero en una traza (por ejemplo,  $\mu^+$ ) y luego en la otra ( $\mu^-$ ). Aparecerá una ventana con el texto *Invariant mass* y el valor de la masa en GeV. Escribimos ese valor en un papel para utilizarlo más tarde. La masa de los bosones de Higgs no se puede obtener con el visualizador sino con la utilidad de análisis *CIMA* descrita más abajo.

**No podemos medir la masa de bosones W, ya que al no detectar el neutrino (MET) carecemos de la información necesaria para hacerlo.**

Aunque podéis mover el detector en 3D pinchando con el ratón sobre él y moviendo el puntero, es recomendable utilizar las vistas XY, XZ e YZ para analizar el suceso. En la parte superior de la pantalla hay 3 iconos correspondientes a estas vistas. La vista XY es particularmente útil para determinar la carga de las partículas.

Ahora ya estáis en posición de identificar los sucesos como  $W^+$ ,  $W^-$ , Z o H, siguiendo los criterios descritos más arriba. Recordad que las trazas de electrones y positrones son de color amarillo y las de muones rojo. **El objetivo de cada pareja es analizar y clasificar un mínimo de 20 eventos, lo que tiene que llevar unos 30 minutos. Es recomendable analizar 50 eventos.**

Tened en cuenta que algunos sucesos son extraños y es difícil saber qué partículas los han producido. Dado que disponéis de varias centenas de sucesos y poco tiempo os recomendamos que os concentréis en los sucesos que son claramente compatibles con W, Z o H, y que saltéis aquellos que os resulten muy exóticos. En esos casos, os sugerimos que apuntéis el número de Event/Run para que lo podamos discutir más despacio, pero **es importante que no estéis demasiado tiempo con un solo evento.**

## **TABLA DE RESULTADOS (CIMA)**

Para llevar un registro de los sucesos identificados utilizamos CIMA (*CMS Instrument for Masterclass Analysis*), <https://www.i2u2.org/elab/cms/cima/>. En esa página (imagen en la página siguiente) debéis seleccionar **CERN-31Jul2018** en la columna **Choose your Masterclass** y a continuación **EquipoW2018** en **Choose you location**. En la columna **Choose your group** pincha en el número correspondiente al número de tu equipo. Cada grupo tiene 100 eventos, donde el *grupo* corresponde al “*número de Run*” del visualizador de eventos.

Una vez seleccionéis vuestro grupo de datos y os aseguréis de que es el que estáis analizando en el visualizador podéis introducir los datos en CIMA. El número de Evento aparece a la izquierda (Event index). Tenéis que marcar las casillas **final state** (si las partículas del estado final son electrón/positrón o muones) y **primary state candidate** (qué bosón ha dado lugar al evento). Este último puede ser W, NP o Higgs. NP, *neutral particle*, se refiere al bosón Z o a cualquier otra partícula neutra que se pueda haber desintegrado en electrón/positrón o muones.



Choose your Masterclass	Choose your location	Choose your group
Karlsruhe-27Jun2018	EquipoW2018	26
SaltLakeCity-20Jun2018		27
CERN-26Jun2018		28
CERN-31Jul2018		29
Houston-26Jun2018		30
Sofia-04Jul2018		31
Windhoek-07Jul2018		32
		33
		34
		35

**IMPORTANTE:** aseguráos de que el número de Run y Evento en la pantalla del visualizador y en la página de CIMA coinciden (si no los resultados no tendrán sentido).

Es importante marcar W+ o W- cuando el evento procede de un W, donde la carga es la del leptón cargado que se observa. Seleccionad W (sin carga) cuando no podáis determinar su carga. Si el evento es compatible con un bosón de Higgs marcad la casilla especial *Higgs*. Seleccionad Zoo si no sois capaces de identificar el evento. Pinchad en **Submit** para guardar los datos, que aparecerán en la parte de abajo de la página. Podéis corregir la información introducida para un evento haciendo doble click en la línea correspondiente a ese evento en la tabla de eventos.

En el caso de que marquemos el evento como NP tendremos que escribir en la casilla de la derecha **NP mass** el valor de la masa de la partícula que apuntamos previamente en un papel. Si seleccionamos un evento como Higgs, el valor de la masa aparece automáticamente en la columna **Mass** al presionar en **Submit**.

Para introducir el valor de la masa en el **histograma de masa** pinchad en la etiqueta **Mass Histogram** (ver siguiente figura) y haced click con el ratón en el canal correspondiente, aumentando en una unidad la barra vertical azul para ese valor. En este ejemplo, en que la masa es 61,05 GeV, hay que pinchar en 61, que es el valor más cercano. Si os equivocáis, podéis borrar la entrada del histograma presionando la tecla *Control* y pinchando de nuevo en el canal erróneo, sustrayendo una unidad a la barra azul. Por favor, no juguéis con este histograma ya que falsearía los resultados del ejercicio.

Masterclass: CERN-  
31Jul2018  
Location: EquipoW2018  
Group: 26

Instructions (also available as screencast):

1. For each event, identify the final state and select a primary state candidate.
  - For Higgs or Zoo candidate, no final state is chosen
  - If you cannot decide between  $W^-$  and  $W^+$ , choose  $W$  instead
2. If you think the final state is a neutral particle (like a  $Z$ ), but you don't know its exact type, select NP for "neutral particle." Find its mass from the Event Display and enter it.
3. Once you have selected everything, click "Submit".

In case of an error, double clicking the data line will reload it; you can then try it again.

<b>Select Event</b> Event index: <input type="text" value="1"/> Event number: 26-1	<b>final state</b> <input type="checkbox"/> Electron <input type="checkbox"/> Muon ( $\mu$ )	<b>primary state candidate</b> <input type="checkbox"/> $W^-$ <input type="checkbox"/> NP <input type="checkbox"/> $W^+$ <input type="checkbox"/> W	<input type="checkbox"/> Higgs <input type="checkbox"/> Zoo	NP Mass: <input type="text"/> GeV/c <sup>2</sup> <input type="button" value="Submit"/>
--	--	---	--	---

Event index	Event number	Chosen Values	Mass
-------------	--------------	---------------	------

Os recomendamos abrir la tabla de eventos en una pestaña del navegador y el histograma de masa en otra, para facilitar introducir los datos. Una vez hayáis identificado un evento y lo hayáis registrado en CIMA podéis pasar al siguiente suceso en la pantalla del visualizador pinchando en la **flecha derecha** que hay en la parte superior izquierda, en la línea de iconos (junto a la casita).

## RESULTADOS

Cuando hayáis terminado el análisis podréis ver un resumen de los resultados en la pestaña **Results** de CIMA. Los valores totales se encuentran en la parte inferior de la página. Estos números incluyen los resultados conjuntos de todos los grupos de trabajo.

En base a estos números debéis contestar las siguientes preguntas:

¿Cuál es el valor de las fracciones  $e/\mu$ ,  $W^+/W^-$  y  $W/Z$ ?

¿Son estos resultados compatibles con lo que se espera en el Modelo Estándar?

¿Cuántos bosones de Higgs habéis observado? ¿Cuál es su masa promedio?

¿Sois capaces de identificar la señal del bosón Z en el histograma de masa? ¿Cuál es su masa promedio?

Seguramente observaréis otras estructuras en el histograma de masa. ¿Sabéis a qué se deben: errores u otras partículas?

Para saber contestar estas preguntas debéis buscar información sobre lo que vais a medir para saber si el resultado tiene sentido. Por ejemplo, los cocientes  $W^+/W^-$  y  $W/Z$  se pueden obtener de los artículos de ATLAS y CMS. El cociente  $e/\mu$  tiene que ver con una simetría fundamental del Modelo Estándar.

En resumen, es crucial comparar los resultados con lo que uno se espera en el Modelo Estándar y discutirlo. Para ello, es importante estimar un error estadístico de lo que estáis midiendo. Os debéis preguntar, ¿son compatibles vuestras medidas con lo que esperáis? ¿Por qué?



## **ENLACES**

- Descripción detallada del ejercicio, que contiene una introducción general al ejercicio de CMS, con vídeos sobre LHC, CMS y la Masterclass:  
<http://cms.physicsmasterclasses.org/pages/cmsintrosp.html>.
- Contenido específico de este ejercicio (WZH) donde se explica cuáles son las desintegraciones de los bosones W, Z y H y cómo se observan en el detector CMS:  
<http://cms.physicsmasterclasses.org/pages/cmswzsp.html>.
- Si necesitas ayuda adicional puedes ver la 2ª parte de la grabación de la presentación sobre los talleres en el SLTP2015 <https://cds.cern.ch/record/2027536>. Las transparencias están en este enlace:  
[https://indico.cern.ch/event/346269/contributions/1749986/attachments/682735/937905/masterclass\\_2015-esp.pdf](https://indico.cern.ch/event/346269/contributions/1749986/attachments/682735/937905/masterclass_2015-esp.pdf).
- A modo de *divertimento*, te proponemos hacer el Quiz de la Masterclass. El archivo PPT animado es autoexplicativo:  
<https://indico.cern.ch/event/572737/contributions/2581218/attachments/1481658/2297872/quiz-2017-en.pptx>.
- La hoja de respuestas del Quiz está en este archivo:  
<https://indico.cern.ch/event/572737/contributions/2581218/attachments/1481658/2297871/answersheet-2017-en.pdf>.