

PRÁCTICA DE ANALISIS DE DATOS DE CMS

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/I3jtzXr69GY>.

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 esta práctica 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.

Una vez terminado el ejercicio es importante preparar una breve presentación con los resultados y discutirlos en público en la sesión del Jueves por la tarde. Paco y Pablo guiarán la discusión, comparando y combinando los resultados de los diferentes grupos de trabajo.

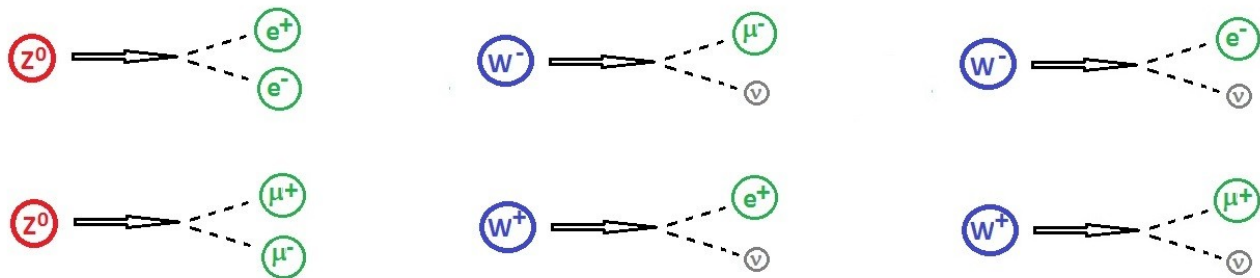
Los objetivos de la práctica son:

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 (μ),
4. determinar la fracción e/μ ,
5. representar en una gráfica la masa de los candidatos a bosones Z y H.

IDENTIFICACIÓN DE SUCESOS CON UN BOSÓN Z O W

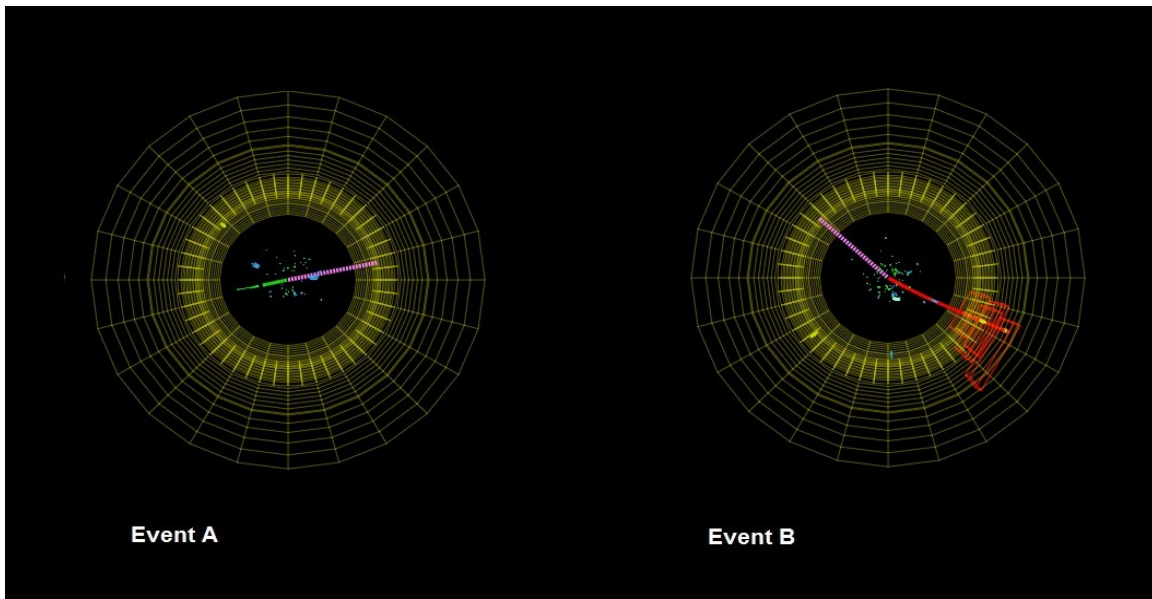
Los bosones W, Z y H son partículas pesadas que se desintegran casi instantáneamente, mucho antes de llegar al detector, de modo que este solo registra las señales de las partículas secundarias que proceden de su desintegración. Existe una elevada cantidad de posibles estados finales con gran variedad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

Dado que el bosón Z tiene carga eléctrica cero se debe desintegrar en dos leptones de carga opuesta (por ejemplo, e^+ y e^-) para que se conserve la carga. Los bosones W tienen carga +1 o -1, por lo que pueden decaer en un electrón o muon y en un neutrino:



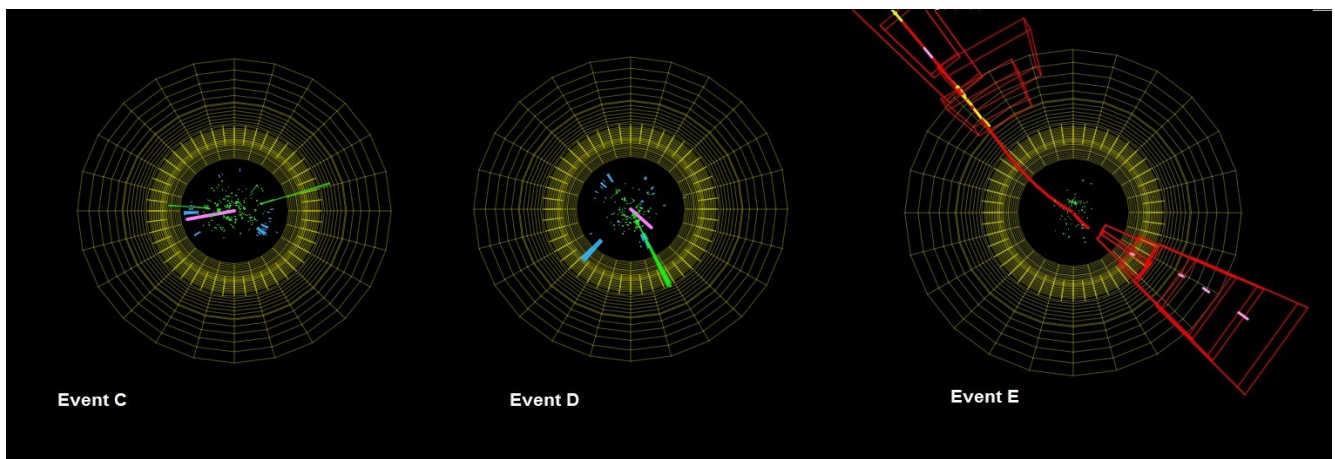
Para comprender fácilmente cómo se identifican las diferentes partículas en el detector CMS conviene emplear esta sencilla aplicación web https://www.i2u2.org/elab/cms/graphics/CMS_Slice_elab.swf. Los electrones y los muones dejan señales en el detector de trazas (central). Además, los electrones dejan 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.



Hay que tener en cuenta que existe gran cantidad de eventos que tienen un aspecto parecido pero no contienen bosones W o Z. Llamamos a estos eventos *contaminación*. Para que sean fiables las medidas que queremos llevara 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 del bosón Z 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.



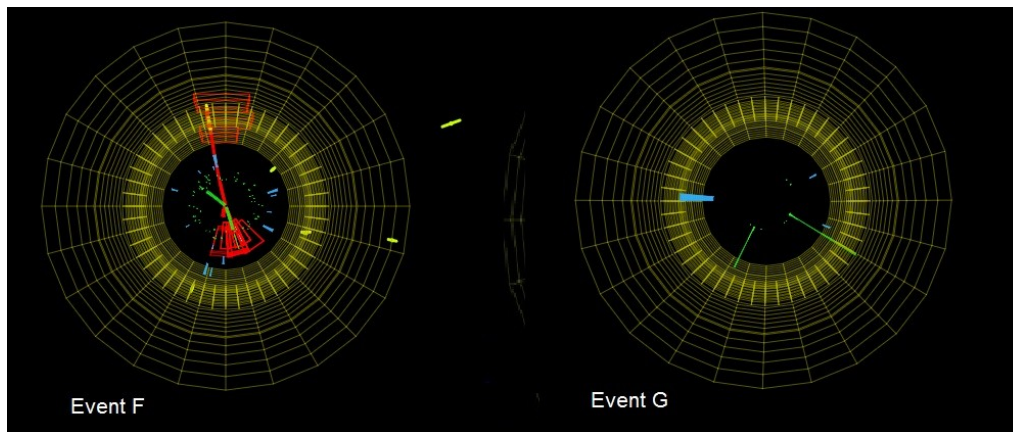
Los bosones Z se observan como 2 trazas o bien de un par electrón-positrón o bien de un par $\mu^+\mu^-$, de modo que la suma de las cargas es cero. En la siguiente figura los eventos C y E son desintegraciones del bosón Z en e^+e^- y $\mu^+\mu^-$, respectivamente, mientras que D es un candidato a W.

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 fotones ($\gamma\gamma$), por un lado, y en 2 bosones Z, por otro.

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 siguiente figura).

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 es compatible con la desintegración de 2 bosones Z. La suma de las cargas de las 4 partículas debe ser cero (Event F).



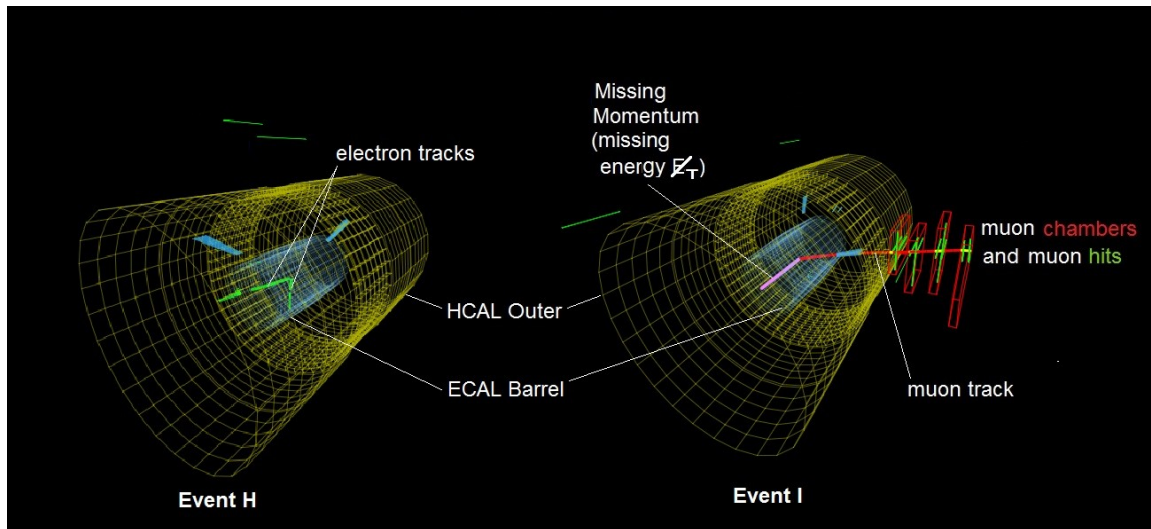
Es importante notar que la probabilidad de que se produzca un bosón de Higgs es ínfima en comparación con la de obtener W o Z. Por esta razón los pocos eventos de H (reales) que se pueden observar se han incluido *a mano* en la muestra de datos con fines didácticos. Es decir, la proporción de sucesos 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/event-display/>. 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 amarilla* arriba a la izquierda. En la ventana que aparece pinchamos en *masterclass-2015* y a continuación en uno de los conjuntos de datos *masterclass_1.ig*, *masterclass_2.ig*, etc. Cada persona o grupo de personas debe analizar un conjunto de datos diferente 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, *Event/Run_1/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 la parte izquierda de la pantalla. En *Detector Model* dejad solo *ECAL barrel*. En *Tracking* quitad todo (incluido *Tracks*). En *ECAL* dejad *Barrel* y *Endcap Rec. Hits*. En *HCAL* dejad solo *Barrel Rec. Hits*. En *Muon* dejad *DT Rec. Segments* y *CSC Segment*. En *Physics Objects* dejad todo excepto *Calorimeter Energy Towers* y *Jets*. Es importante que marquéis *Missing Et (Reco)*, que aparece a la derecha como una flecha amarilla.

Para conocer el valor preciso de la *missing Et* pinchad con el ratón en la flecha que hay a la derecha de *Missing Et (Reco)*. El valor de la MET es el correspondiente a *High cut* en la ventana que se abre. **Hay que cerrar esta venta una vez conozcamos el valor de MET, ya que si pasamos al siguiente evento este valor no se actualiza.**

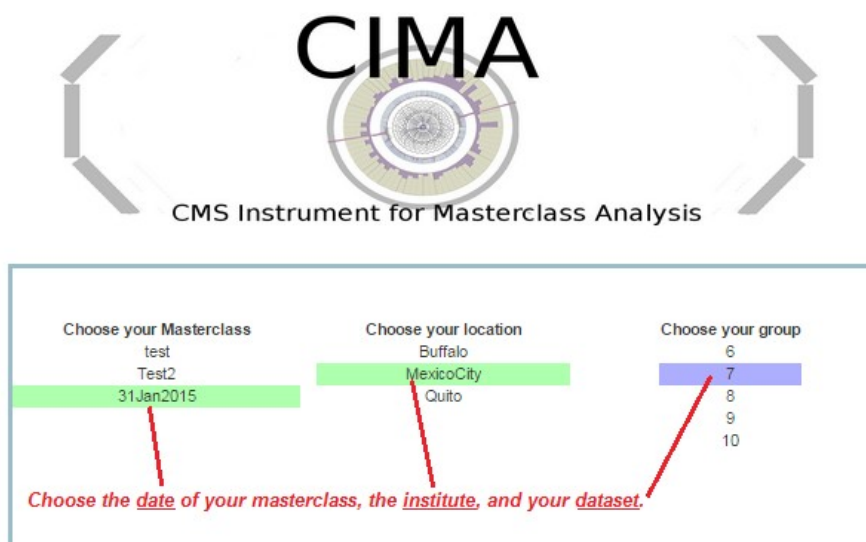
Aunque podéis mover el detector en 3D pinchando con el ratón sobre él y moviendo el puntero, es recomendable utilizar las vistas XY, XZ e YZ para analizar el suceso. En la parte superior de la pantalla hay 3 iconos correspondientes a estas vistas. La vista XY es particularmente útil para determinar la 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. **Una pareja tendría que ser capaz de clasificar entre 50 y 100 en menos de 2 horas.**

Tened en cuenta que algunos sucesos son extraños y es difícil saber qué partículas los han producido. Dado que tenéis al alcance de la mano 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. 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 debéis seleccionar **CERN-21Jun2016** en la columna **Choose your Masterclass** y a continuación **SLTP2016-1** o **SLTP2016-2** en **Choose you location**, dependiendo de cuál sea vuestro equipo de trabajo. Cada equipo tiene 5 *grupos de datos* (columna **Choose your group**) con 100 eventos cada uno, donde el *grupo* corresponde al “*número de Run*” del visualizador de eventos. Cada equipo debe repartirse los grupos de datos entre las personas que lo componen con el fin de analizar un elevado número de eventos. Sugerimos que trabajéis en subgrupos de 2 o 3 personas.



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 tendrían sentido).

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 el bosón es W o Z y se desintegra a electrón/positrón o muones) y “primary” (qué bosón ha dado lugar al evento). 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 Z o Higgs aparecerá a la derecha el valor de la masa de la partícula. Para introducir este valor 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 62,05 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.

Back Events Table (Group 22) Mass Histogram (Madrid2016) Results (Madrid2016)

Masterclass: CERN-01Mar2016
 location: Madrid2016
 Group: 22

Instructions (also available as [screencast](#)):
 For each event, choose primary and final state. For Higgs or Zoo candidate, no final state is chosen. If you cannot decide between W^+ and W^- , choose W instead. If you have selected everything, click "Submit". If a mass shows up (for Z or Higgs), enter it by hand in the mass histogram after you clicked "Submit". In the case of an error, double clicking the data line will reload it; you can then try it again.

Event index: Event number: 22-1

final state: Electron Muon

primary: W^- Z W^+ W

special: Higgs Zoo

Mass: 62.05197149GeV

Please enter into mass histogram after clicking "Submit".

Event index	Event number	Chosen Values	Mass
1	22-1	Electron, Muon, Z	62.05197149GeV

Os recomendamos abrir la tabla de eventos en una pesataña 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 los 2 grupos de trabajo, *SLTP-1* y *SLTP-2*.

En base a estos números debéis contestar las siguientes preguntas:

- ¿Cuál es el valor de la fracciones e/μ , 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/μ 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

La descripción detallada del ejercicio se encuentra en <http://cms.physicsmasterclasses.org/cmssp.html>, que contiene una introducción general al ejercicio de CMS, con vídeos sobre LHC, CMS y la Masterclass. El contenido específico de este ejercicio (WZH), está en la página web <http://cms.physicsmasterclasses.org/pages/cmswzsp.html>. En ella se explica cuáles son las desintegraciones de los bosones W, Z y H y cómo se observan en el detector CMS.

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.

A modo de *divertimento*, te proponemos hacer el Quiz de la Masterclass. El archivo PPT animado es autoexplicativo, http://ippog.web.cern.ch/sites/ippog.web.cern.ch/files/Quiz_esp_animated_2014.ppt. Este archivo http://ippog.web.cern.ch/sites/ippog.web.cern.ch/files/answer_sheet_coloured.pdf es la hoja de respuestas del Quiz.