

FÍSICA EXPERIMENTAL DE PARTÍCULAS



JESÚS PUERTA PELAYO

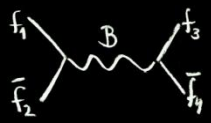
PROGRAMA CERN PARA PROFESORXS ESPAÑOLXS – JULIO 2021



MINISTERIO
DE CIENCIA
E INNOVACIÓN

Ciemat Centro de Investigaciones
Energéticas, Medioambientales
y Tecnológicas

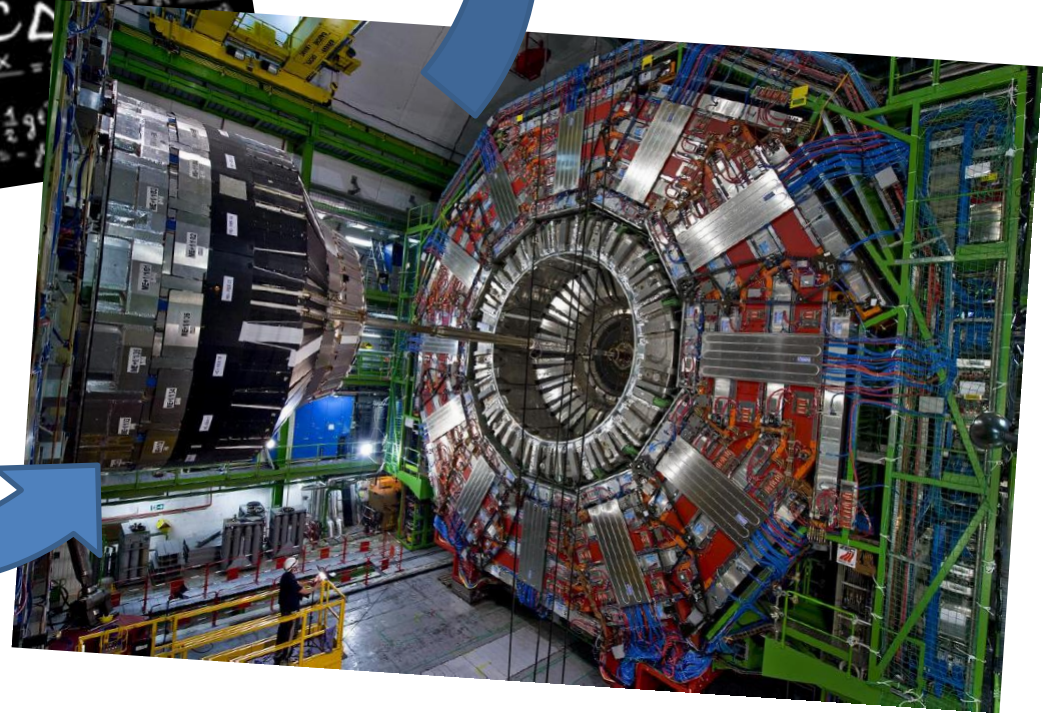
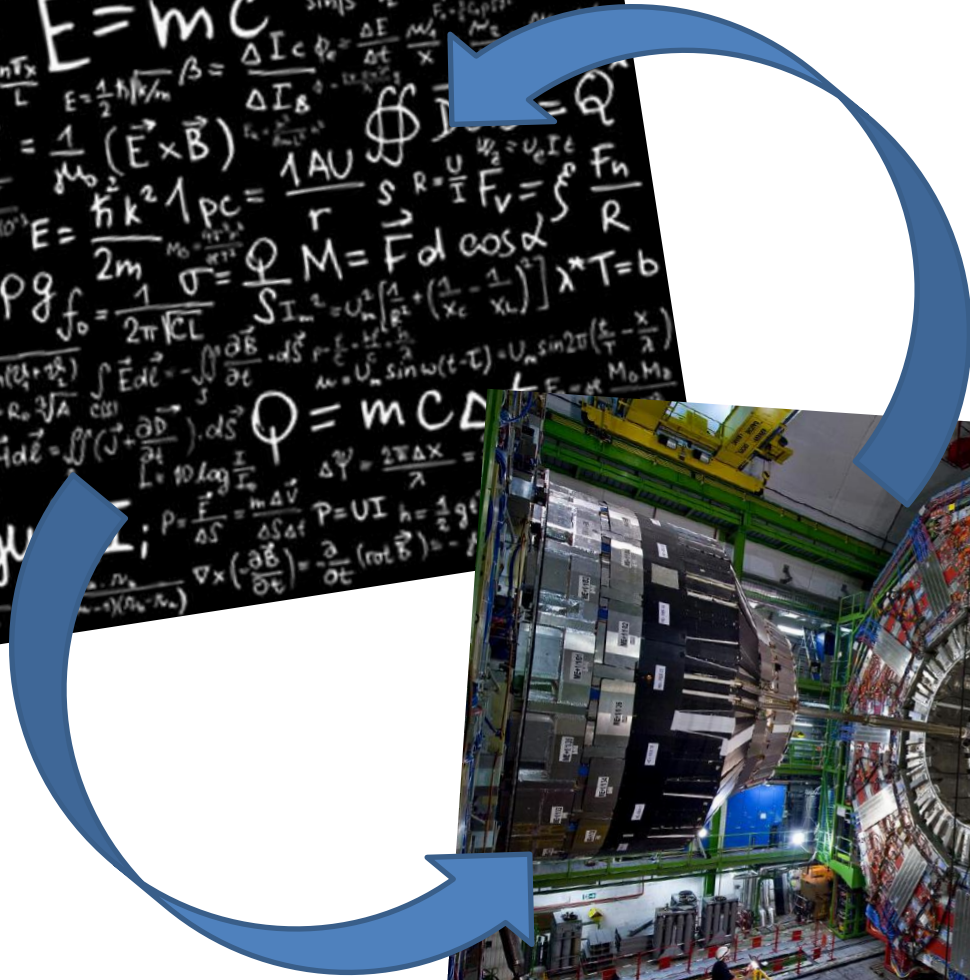


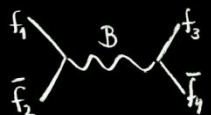


¿FÍSICA EXPERIMENTAL DE PARTÍCULAS?

Handwritten physics equations on a blackboard background:

- $\lambda = \frac{h}{Na}$
- $\lambda = \frac{h}{m v}$
- $E = mc^2$
- $\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} (\vec{E} \times \vec{B})$
- $\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \int \vec{J} \cdot d\vec{S}$
- $\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi}{dt}$
- $\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$
- $\vec{E} = -\nabla\phi - \dot{\vec{A}}$
- $\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$
- $\vec{A}(\vec{r}, t) = \frac{\mu_0}{4\pi r} \int \vec{J}(\vec{r}', t') dV'$
- $\phi(\vec{r}, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\rho(\vec{r}', t')}{r} dV'$
- $\vec{E} = -\nabla\phi - \dot{\vec{A}}$
- $\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$
- $\vec{A}(\vec{r}, t) = \frac{\mu_0}{4\pi r} \int \vec{J}(\vec{r}', t') dV'$
- $\phi(\vec{r}, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\rho(\vec{r}', t')}{r} dV'$
- $\vec{E} = -\nabla\phi - \dot{\vec{A}}$
- $\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$
- $\vec{A}(\vec{r}, t) = \frac{\mu_0}{4\pi r} \int \vec{J}(\vec{r}', t') dV'$
- $\phi(\vec{r}, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\rho(\vec{r}', t')}{r} dV'$

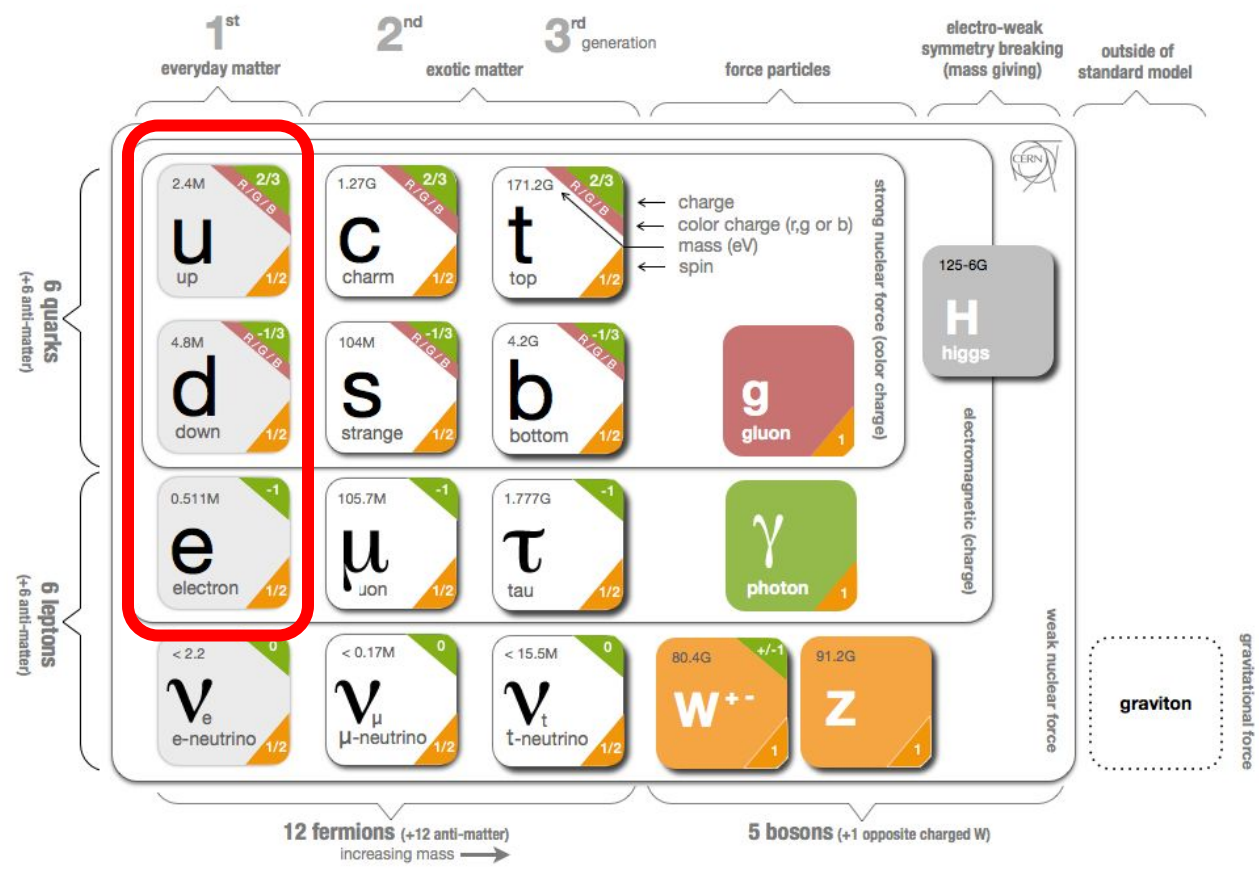




EL MODELO ESTÁNDAR (ME)

Gran logro de la Física Experimental / Teórica del SXX(XXI)

Elegante, basado en las simetrías observadas en la naturaleza. Comprobado experimentalmente en base a predicciones muy precisas de fenómenos naturales. Gran capacidad predictiva.



+ antipartículas

Sólo un puñado de estas partículas son estables (presentes en la naturaleza).

Para estudiar el resto hay que generarlas -> **ACELERADORES**

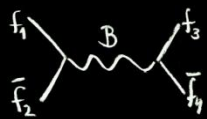
Es la teoría más completa que tenemos para explicar el mundo subatómico... y aún así, sabemos que es incompleta



¿Qué estamos haciendo para rellenar los huecos de lo desconocido?

¿Cómo se miden las partículas y sus propiedades?

¿De dónde ha salido este modelo?



¿Qué hace un físico experimental (analizador de datos en un experimento de LHC) ?

Medir, medir, medir...

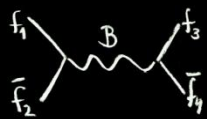


Fundamentalmente:

- ME a las energías de LHC (nunca hecho antes con aceleradores).
- ME tiene carencias. Buscamos desviaciones y partículas/procesos nuevos.

Nuestra fuente de información **principal** (no la única) proviene de los aceleradores.

Única forma **controlada** de producir estados/partículas no presentes en la Naturaleza (la mayoría en el ME) y estudiarlos en laboratorio.



ACELERADORES PARA INVESTIGAR ALTAS ENERGÍAS



Wavelength of probe radiation should be smaller than the object to be resolved

$$\lambda \ll \frac{h}{p} = \frac{hc}{E}$$

Object	Size	Energy of Radiation
Atom	10 ⁻¹⁰ m	0.00001 GeV (electrons)
Nucleus	10 ⁻¹⁴ m	0.01 GeV (alphas)
Nucleon	10 ⁻¹⁵ m	0.1 GeV (electrons)
Quarks	?	> 1 GeV (electrons)

Radioactive sources give energies in the range of MeV

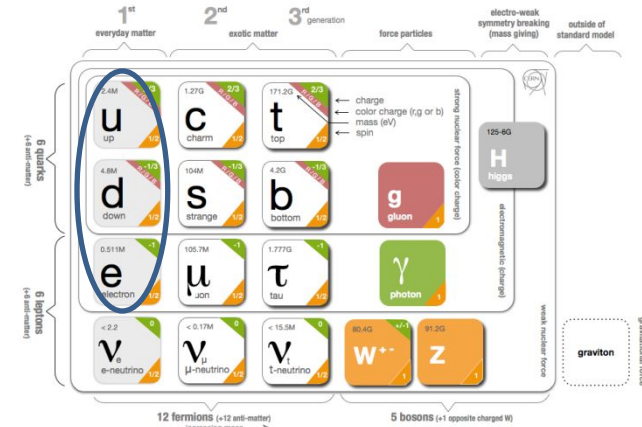
Los colisionadores permiten diseñar experimentos específico de determinadas partículas:

Eligiendo el tipo y sabor de las partículas en juego (proyectil / blanco)

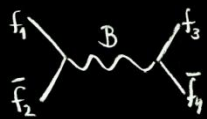
e^- , e^+ , γ , p , anti- p , iones.

- Para estudiar escalas de tamaño subatómicas necesitamos utilizar energías cada vez más altas

Las únicas estables. Para estudiar el resto hay que crearlas



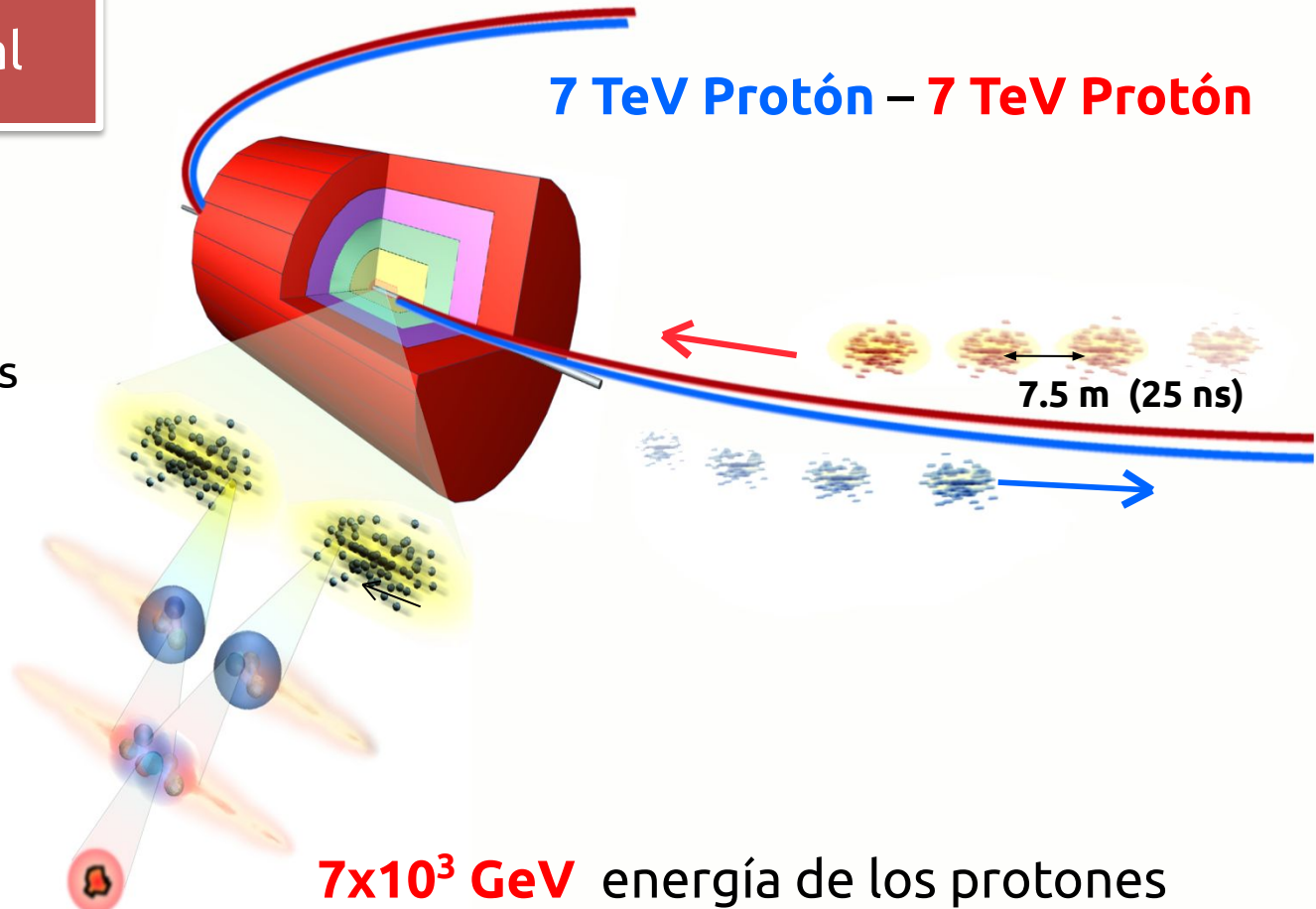
- El descubrimiento de nuevas partículas pasa por la capacidad de contar con energía suficiente para poder **crearlas**.
 - Diversas teorías más allá del Modelo Estándar (como la SUSY), predicen un "zoo" de partículas en el rango de masa entre pocos cientos de GeV y algunos TeV. Es ése el rango a estudiar...
 - Por supuesto, es posible que nos encontremos con algunas sorpresas.



LARGE HADRON COLLIDER

LHC es nuestra máquina principal

Buscamos procesos muy raros: cuanto menos frecuente sea un proceso, más veces tendremos que repetir el experimento para observarlo(= más colisiones, más *luminosidad*).



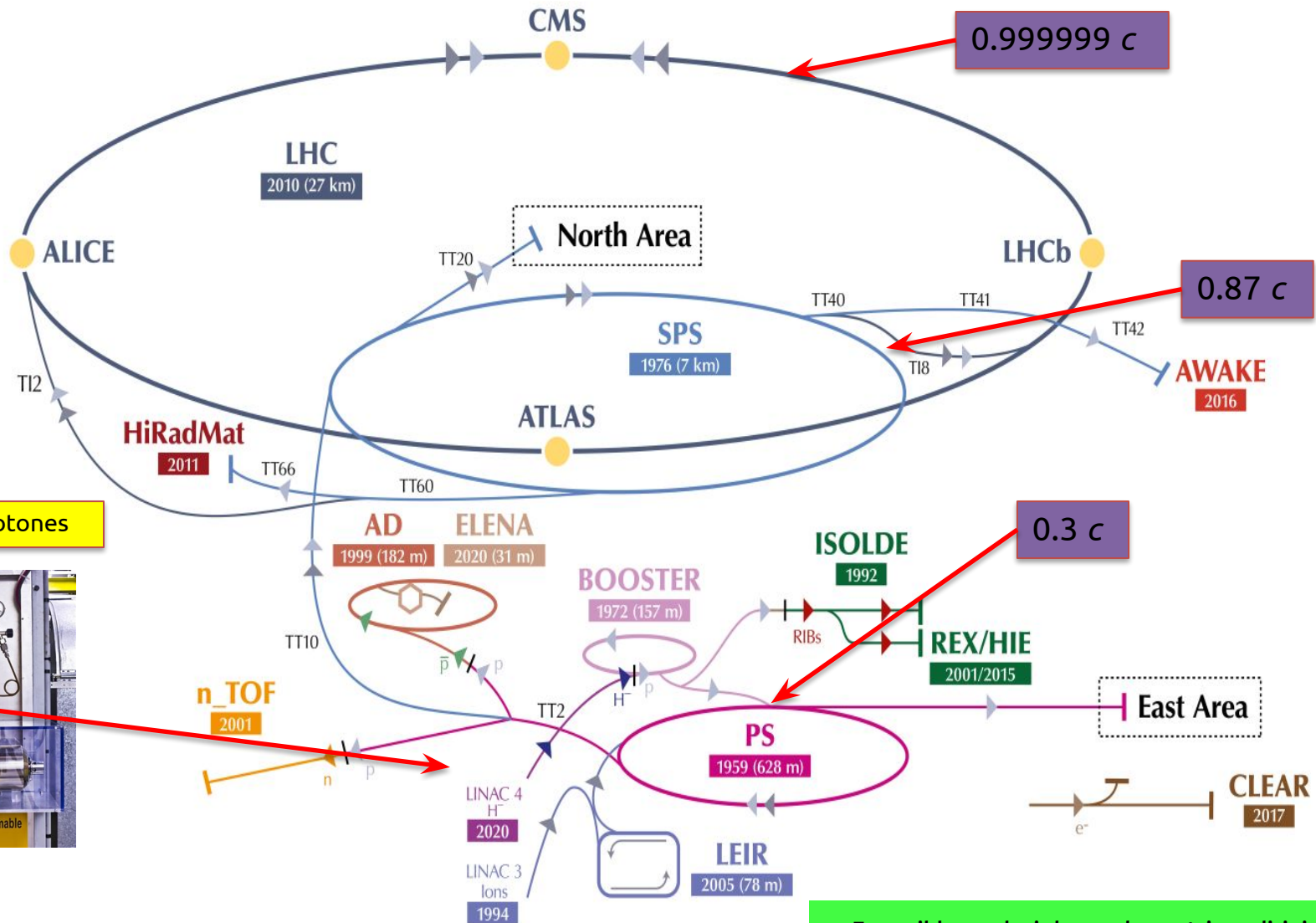
7 TeV Protón – 7 TeV Protón

7.5 m (25 ns)

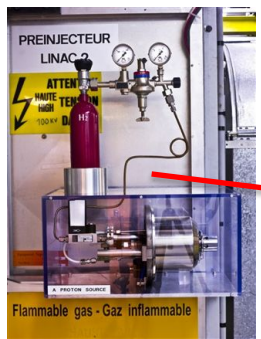
- 7×10^3 GeV** energía de los protones
- 10^{11}** protones en cada paquete
- 2832** paquetes
- 40M** cruces de haces por segundo

The CERN accelerator complex

Complexe des accélérateurs du CERN



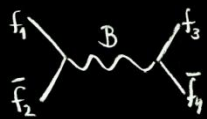
Fuente de protones



→ Es posible producir haces de neutrinos dirigidos →

A large, complex industrial structure, likely a particle accelerator component, is shown in a dimly lit, industrial setting. The structure is composed of numerous metal plates and components, arranged in a circular or cylindrical pattern. A person is standing on a platform in the lower left, providing a sense of scale. The overall color scheme is a warm, reddish-brown hue. The text is overlaid on a semi-transparent dark band across the center of the image.

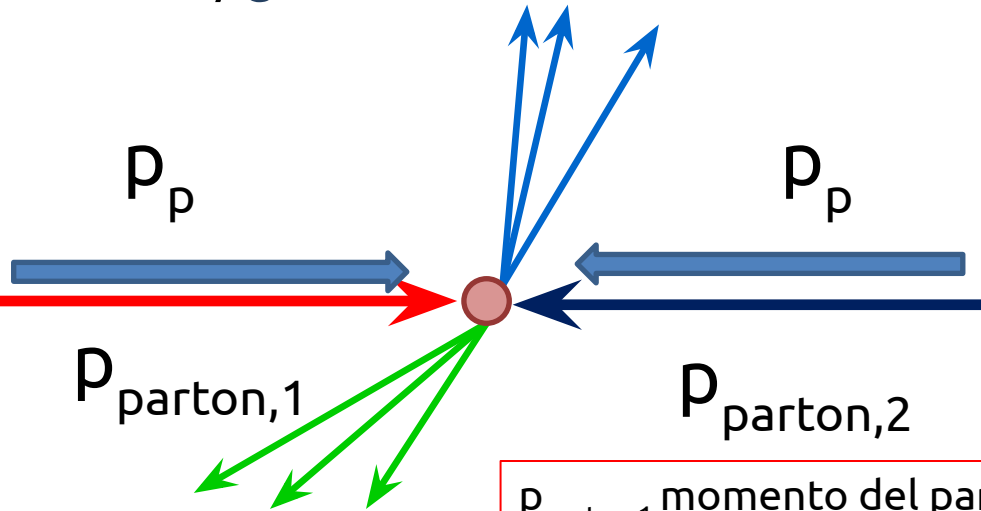
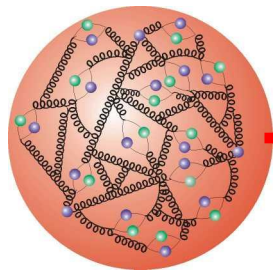
¿QUÉ ES UNA COLISIÓN?
¿QUÉ SUCEDE REALMENTE?



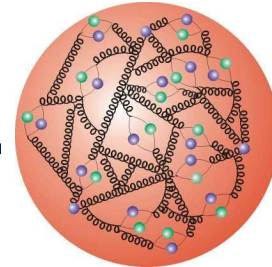
INTERACCIONES P-P EN LHC

El protón es un objeto complejo, constituido por “partones”: *quarks de valencia* / *quarks del mar* / *gluones*

protón 1



protón 2



$p_{parton,1}$ momento del partón 1 ($= x_1 \times p_p$)
 $p_{parton,2}$ momento del partón 2 ($= x_2 \times p_p$)

$s = (\text{energía en el sistema CM de la interacción})^2$
 $\sqrt{s} = 7 / 8 \text{ TeV (run I) o } 13 \text{ TeV (run II) de LHC.}$

$\hat{s} = (\text{energía en el sistema CM de la interacción elemental})^2$

pp: interacciones entre partones \square

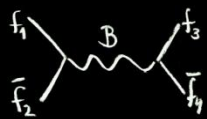
$\hat{s} = x_1 \times x_2 \times s \square \sqrt{\hat{s}} < \sqrt{s} (\sqrt{\hat{s}} \approx 1, 2 \text{ TeV})$

No sabemos qué partones interaccionan

$\sqrt{\hat{s}}$ no toma un valor fijo (0., \sqrt{s})

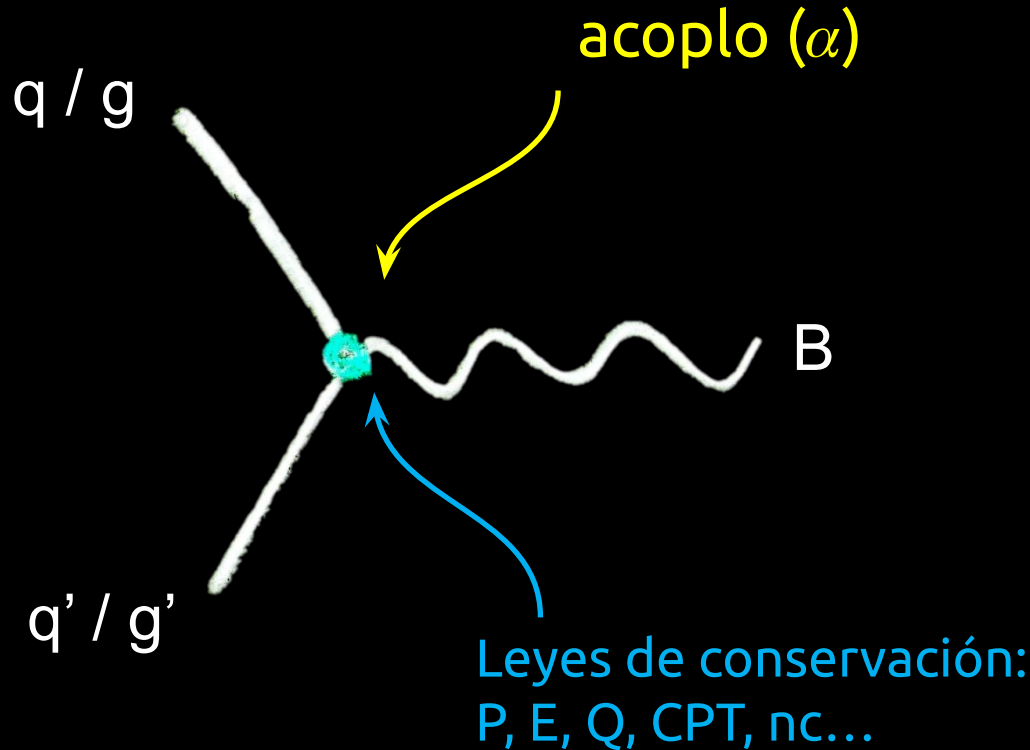
Sistema laboratorio != sistema CM

Fracción del momento de los protones incidentes



INTERACCIONES P-P EN LHC

El proceso básico de aniquilación/creación de partículas:



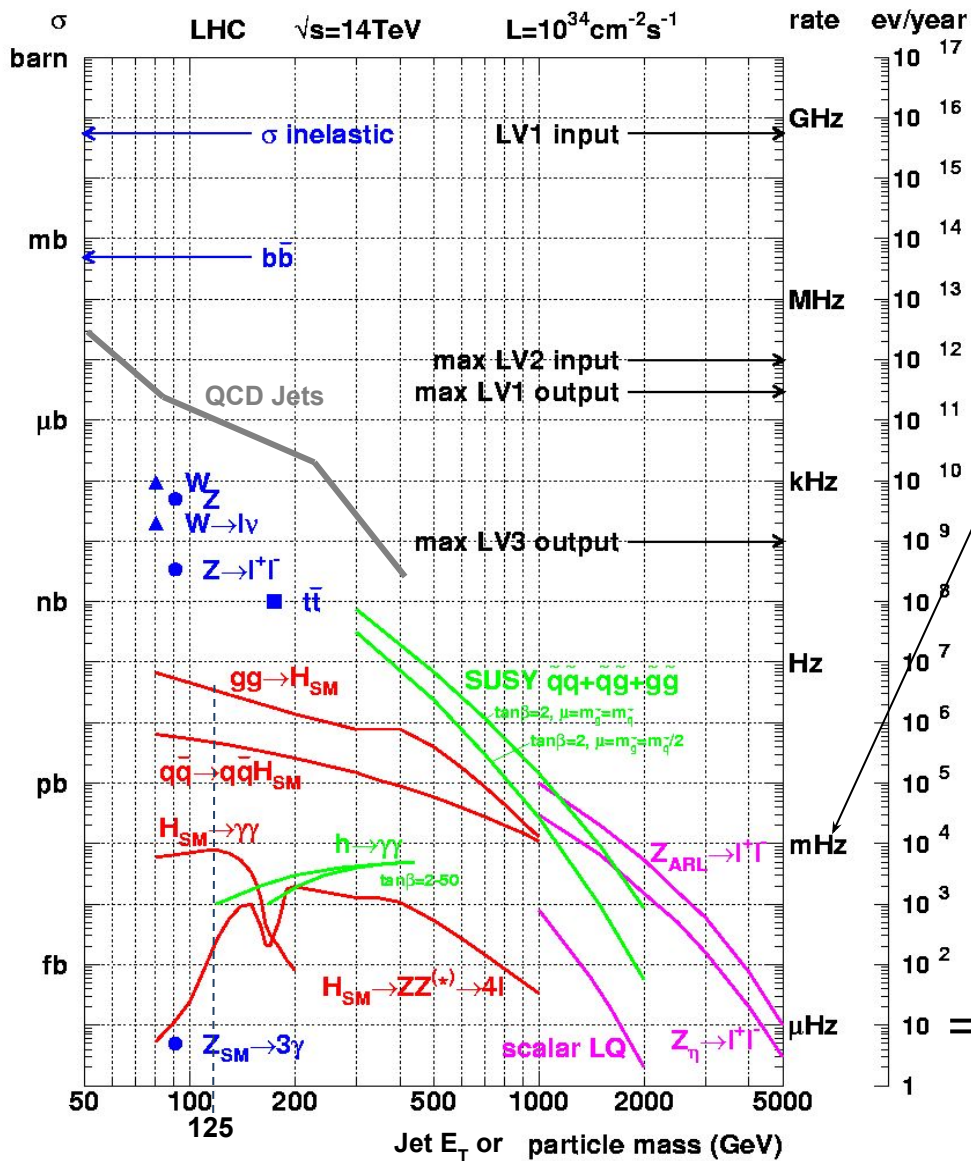
La energía disponible para crear nuevas partículas (B) es la suma de las energías de los partones participantes

acoplo \rightarrow probabilidad (sección eficaz)
n^{os} cuánticos conservados

SECCIONES EFICACES DE PRODUCCIÓN

12 órdenes de magnitud

Total
HF
SM
Higgs



La sección eficaz es la probabilidad de producir un cierto proceso dadas determinadas condiciones iniciales

Buscamos producir procesos muy raros y poco frecuentes

$$R = \mathcal{L}\sigma$$

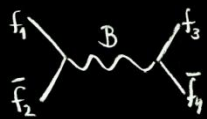
$$\mathcal{L} = f \frac{n_1 n_2}{A}$$

Protones por haz

Frecuencia de colisiones

Sección hábil de colisión

Se busca la máxima LUMINOSIDAD (\mathcal{L}) posible

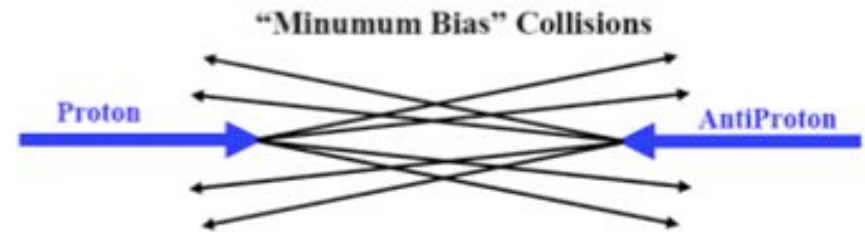


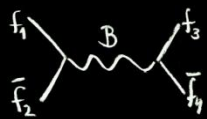
¿QUÉ SUCEDE REALMENTE EN LAS COLISIONES?

La mayoría de interacciones p-p no son interesantes (colisiones periféricas con múltiples partículas de bajo momento transversal en el estado final); son los llamados sucesos de *minimum bias* (“bajo sesgo”)

Colisiones inelásticas con bajo p_T : la transferencia de momento es pequeña
-> las partículas en el estado final tienen **mucho momento longitudinal** y **poco momento transversal**

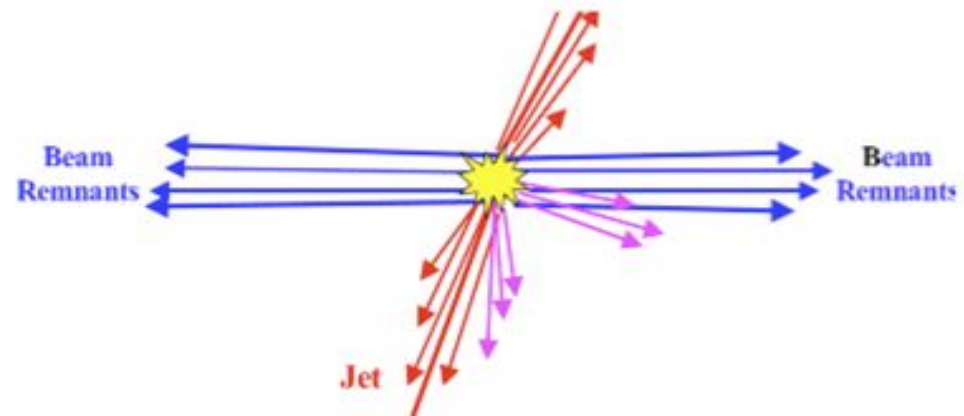
Sus características no pueden ser descritas por QCD -> **descripción fenomenológica**. Las modelizaciones existentes no son capaces de reproducir las distribuciones experimentales. Se ajustan a datos (PDF)

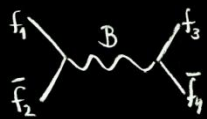




¿QUÉ SUCEDE REALMENTE EN LAS COLISIONES?

En muy pocos casos, lo que se obtiene es una colisión “dura”, en la que 2 partones colisionan, produciendo sucesos de alta energía, y partículas de alto p_t en el estado final.



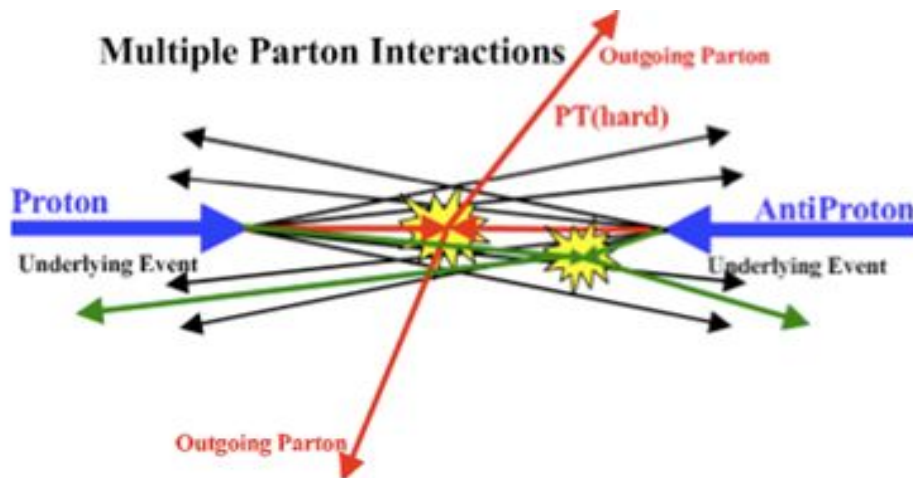
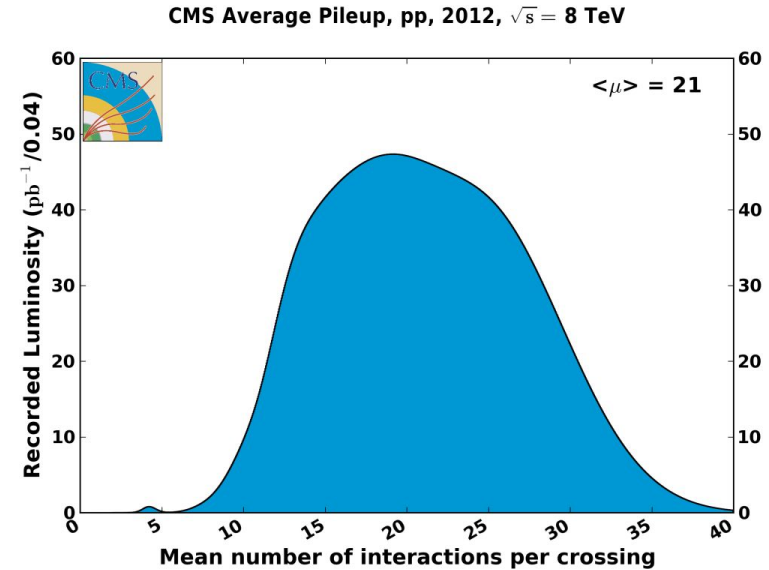


¿QUÉ SUCEDE REALMENTE EN LAS COLISIONES?

Las agujas no vienen solas en el pajar:
Unas **20 interacciones pp simultáneas por cruce (PILEUP)**. Es decir, la interacción dura vendrá acompañada de muchas otras.

Las colisiones adicionales provocan un aumento de la energía depositada en el detector

Aumento del tiempo de procesamiento
Confusión



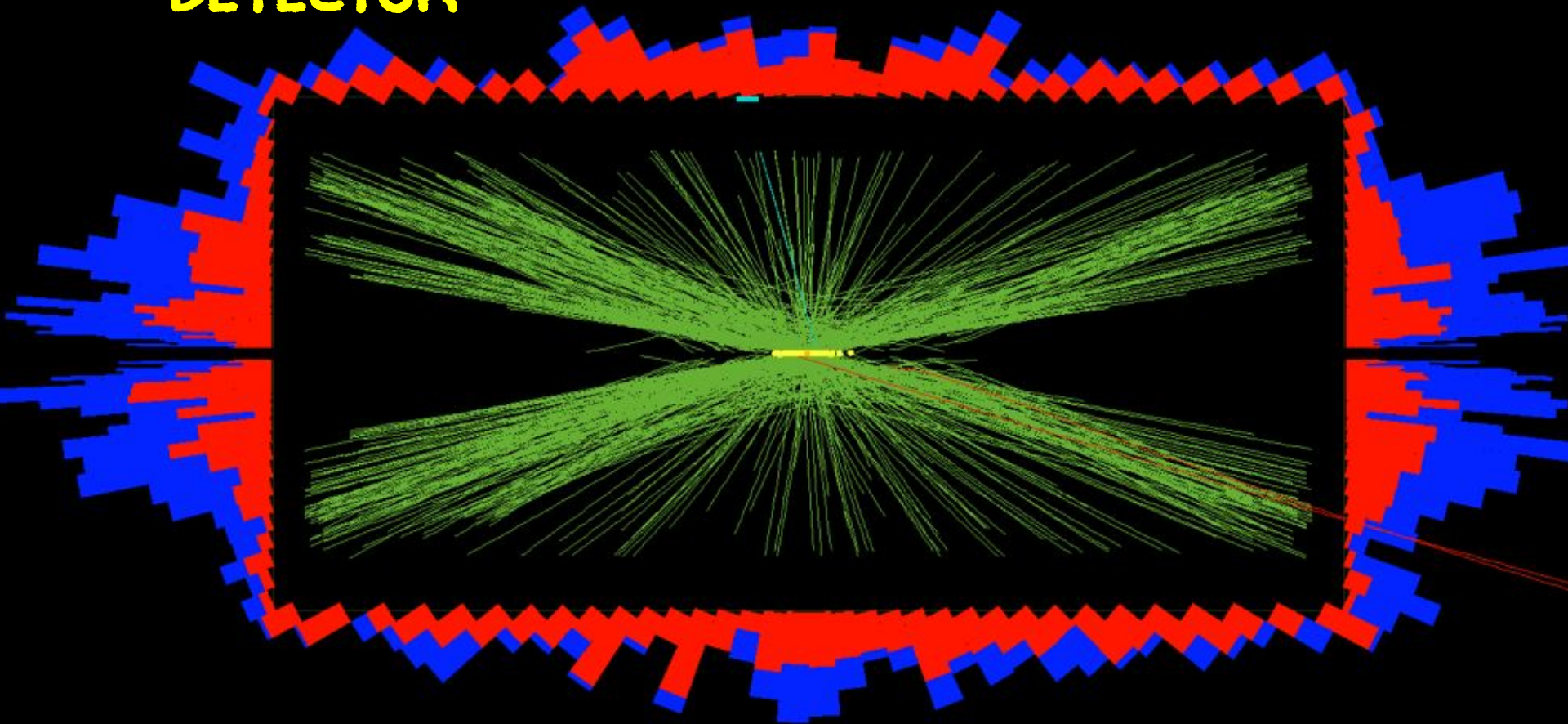
Los procesos interesantes (p.ej. Higgs) y de nueva física son extremadamente poco frecuentes.

Esta es la razón por la que la tasa de colisiones se mantiene lo más alta posible \rightarrow alta luminosidad

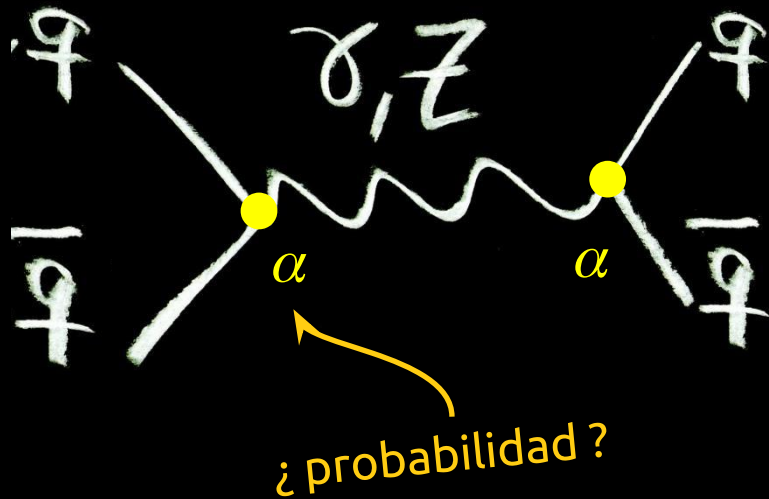
ALTA LUMINOSIDAD
68 VÉRTICES RECONSTRUIDOS



ALTA OCUPACIÓN EN TODO EL DETECTOR



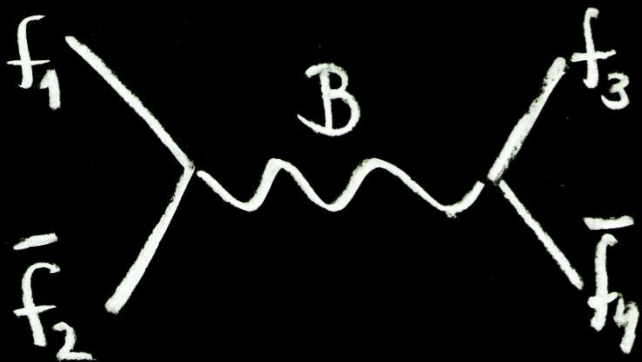
CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA: $E = MC^2$



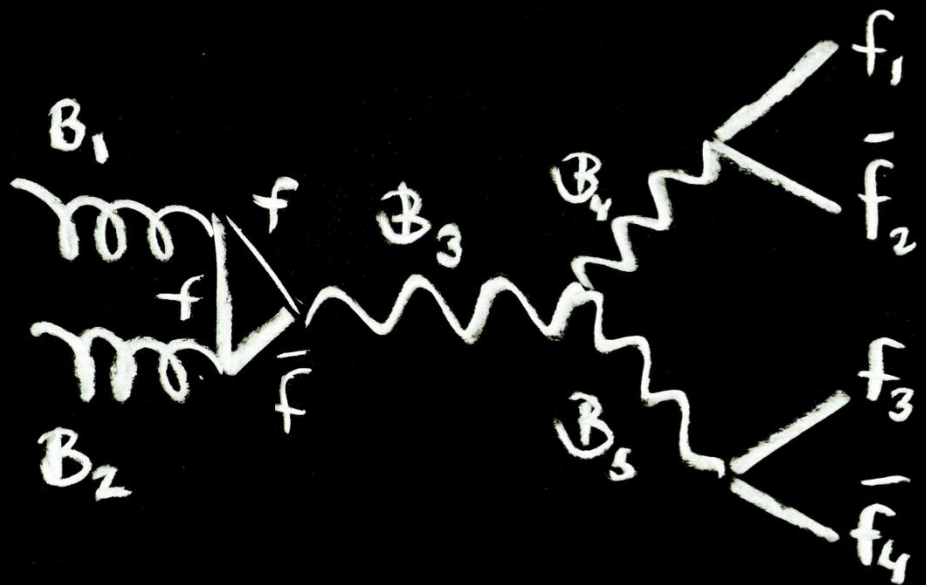
$$E(Z) \approx m_Z \ll 2m_t \Rightarrow q \neq t$$

por tanto $Z \rightarrow t\bar{t}$

→ procesos simples

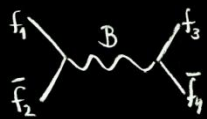


procesos complejos →





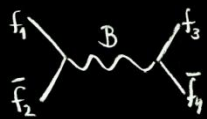
¿CÓMO MEDIMOS LO QUE SALE DE LAS COLISIONES?



COLISIONES... ¿Y AHORA QUÉ?

- Identificar el proceso físico subyacente es fundamental.
- **Problema:** las partículas pesadas/interesantes/nuevas son inestables. Se desintegran nada más producirse.
- Identificación a través de las partículas estables en las que se desintegran (estado final en nuestra jerga)
- **Procedimiento:**
 - Identificar las partículas finales
 - Medir las **PROPIEDADES** asociadas a cada objeto
 - ... y con esta información, reconstruir el proceso original

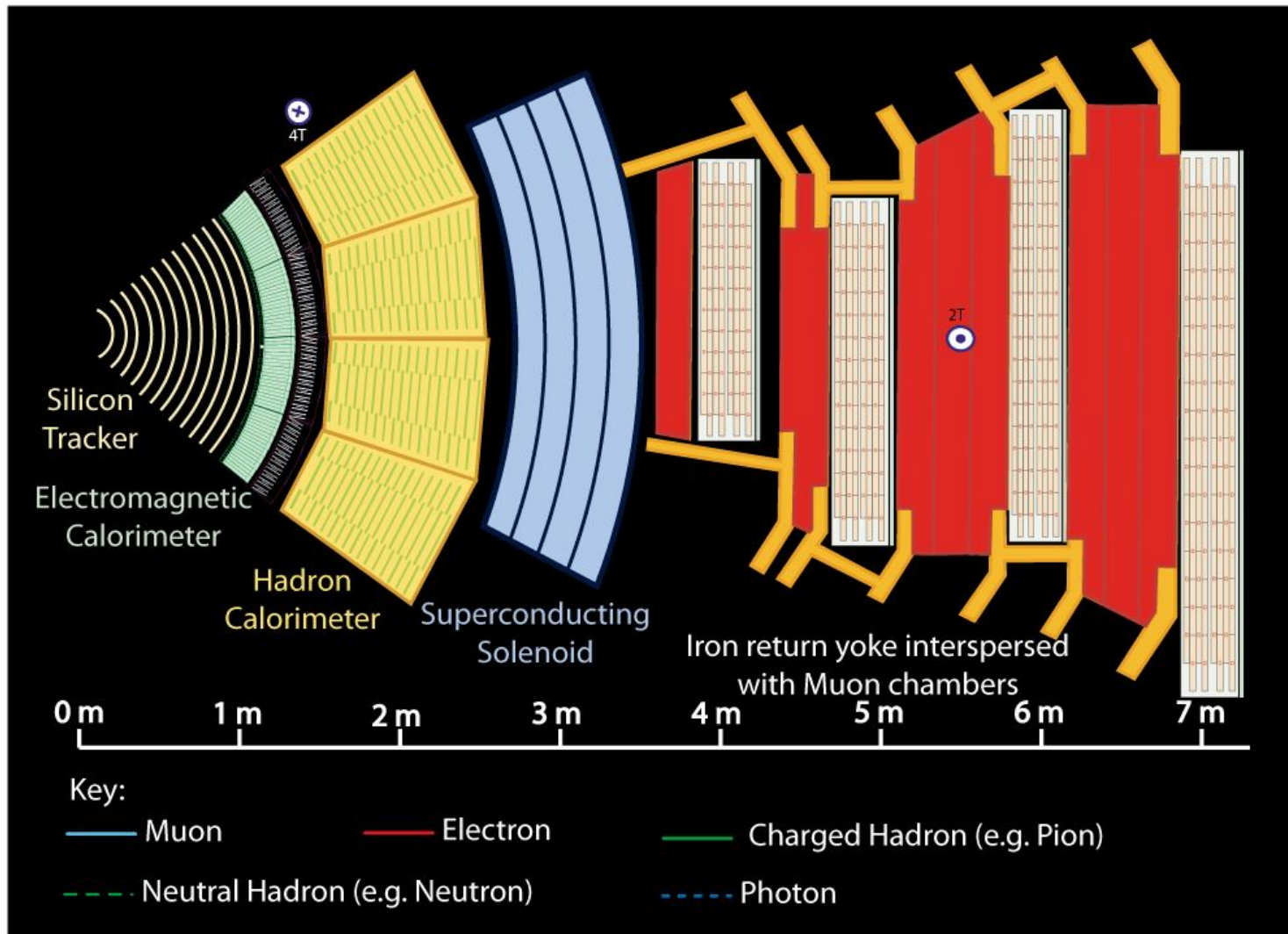


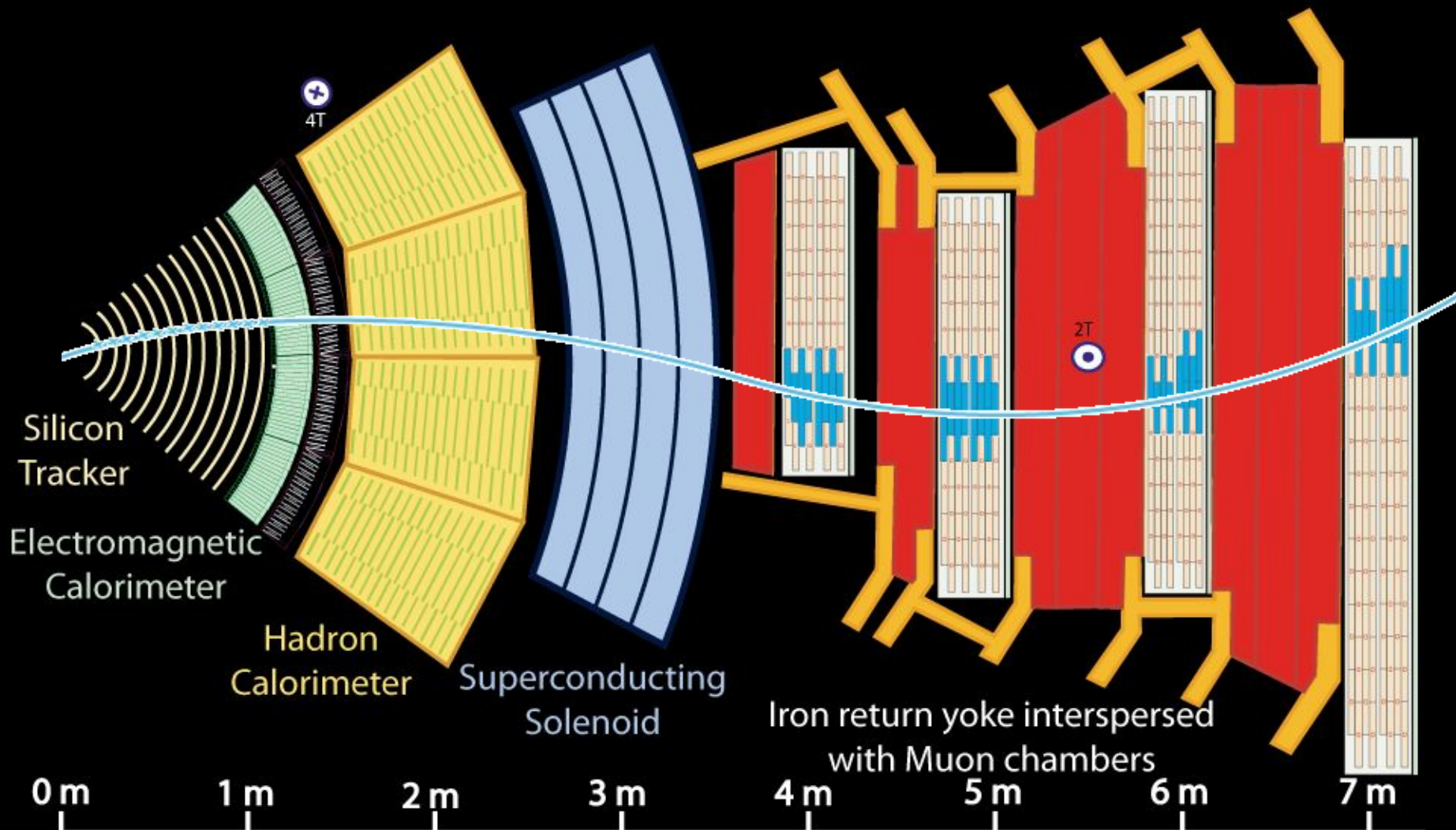


IDENTIFICACIÓN DE PARTÍCULAS

Cada tipo de partícula tiene una signatura experimental definida (Dependiendo de las señales que deja en los detectores).

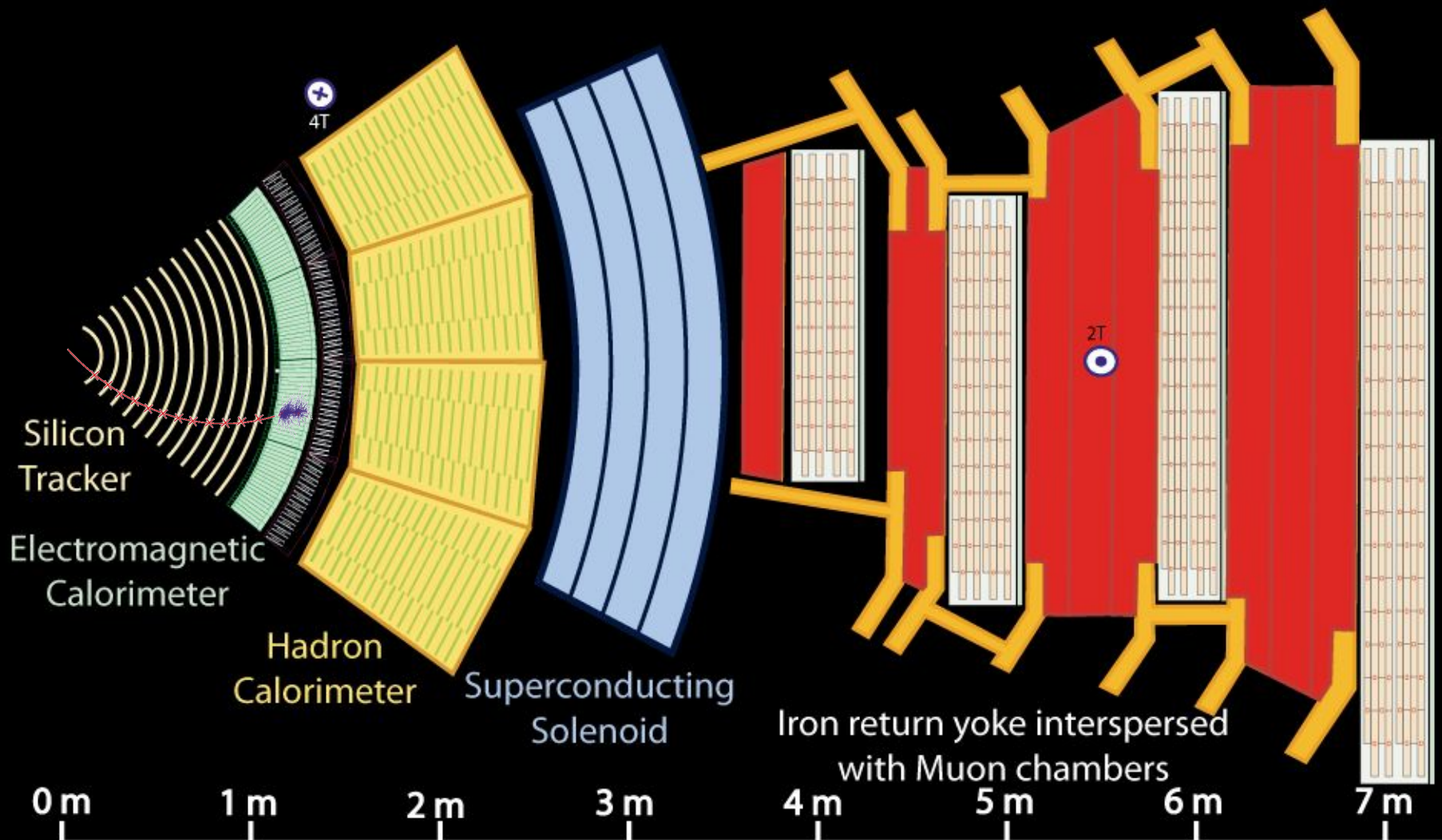
Objetos (jets, muones, electrones, fotones)





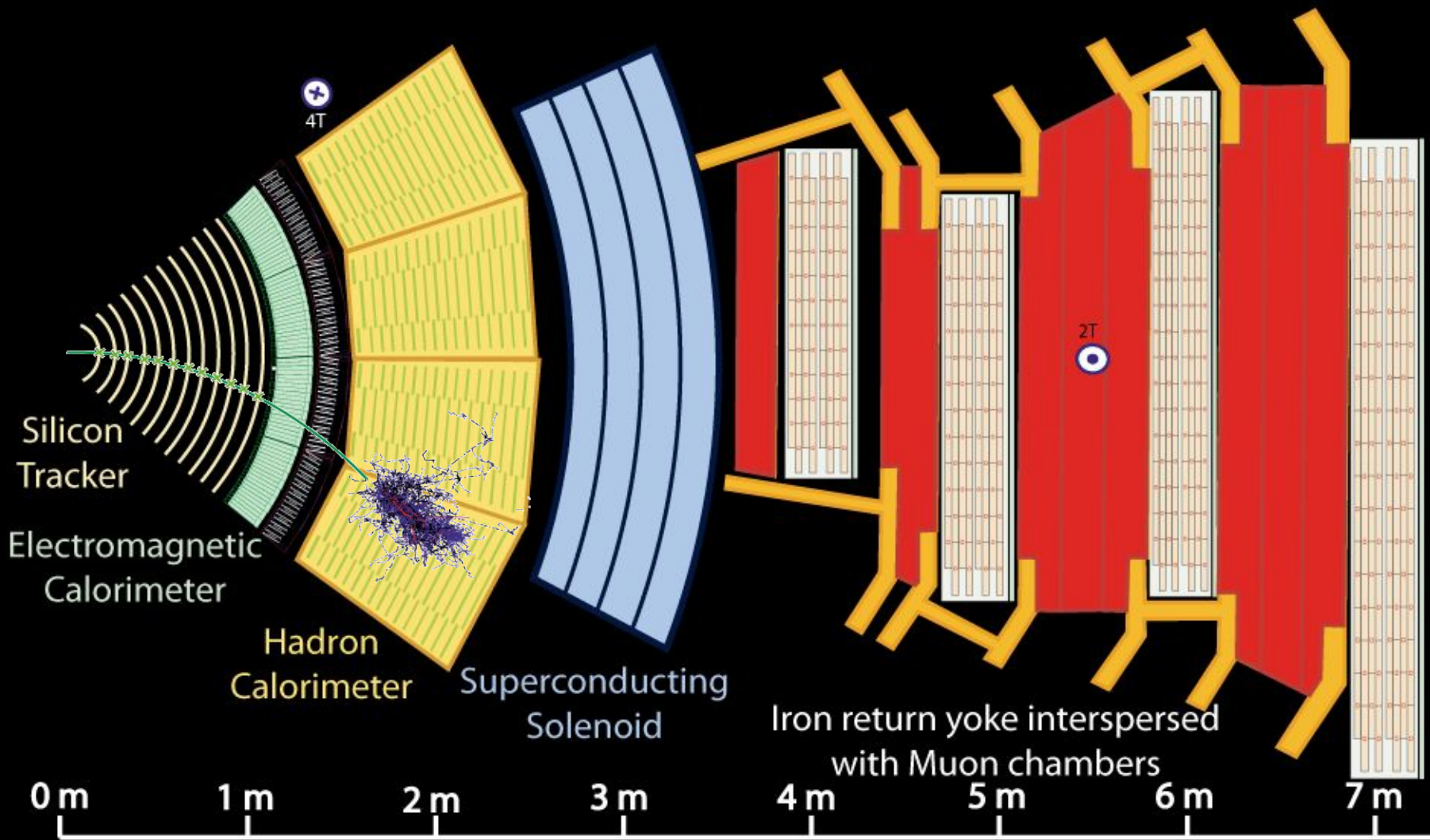
Key:

- Muon
- Electron
- Charged Hadron (e.g. Pion)
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
- - - Photon



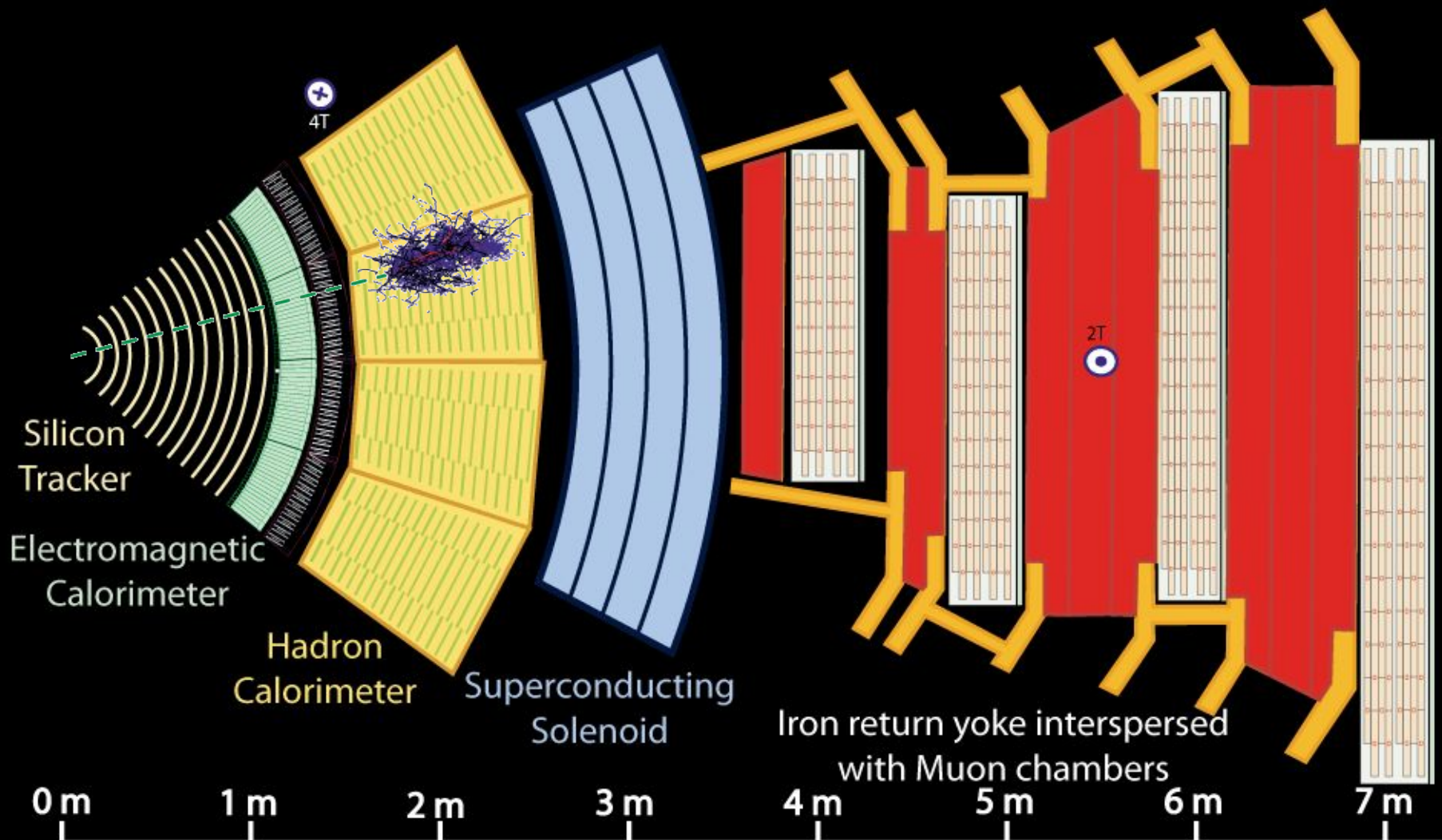
Key:

- Muon
- Electron
- Charged Hadron (e.g. Pion)
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
- - - Photon



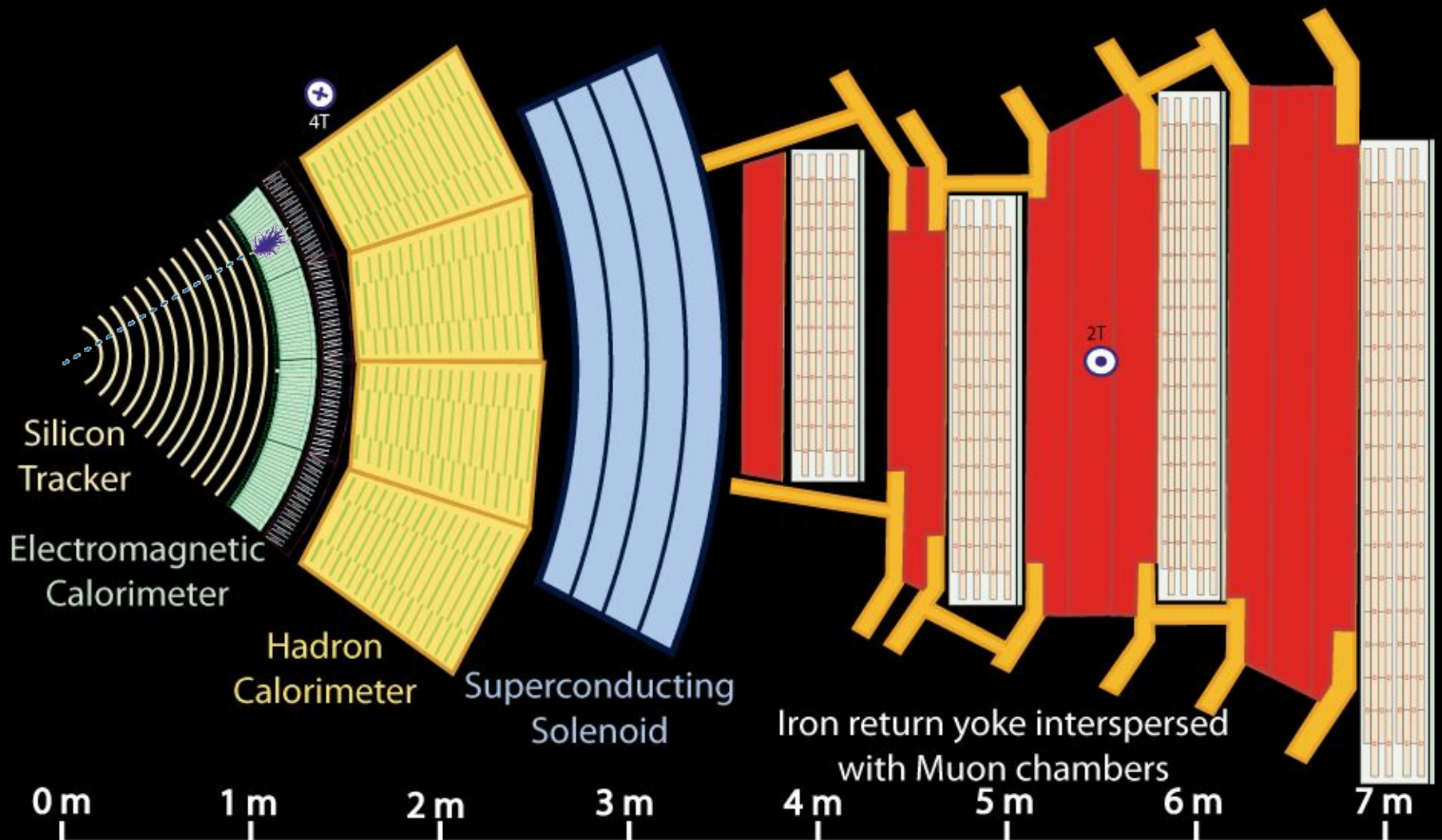
Key:

- Muon
- Electron
- Charged Hadron (e.g. Pion)
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
- - - Photon



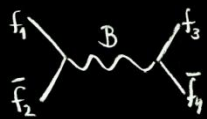
Key:

- Muon
- Electron
- Charged Hadron (e.g. Pion)
- Photon
- Neutral Hadron (e.g. Neutron)



Key:

- Muon
- Electron
- Charged Hadron (e.g. Pion)
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
- - - Photon



ENERGÍA TRANSVERSA FALTANTE

(MISSING TRANSVERSE ENERGY (MET))

Una vez reconstruidos todos los objetos que forman parte de un evento, se impone por conservación de energía que haya balance en el plano transversal (productos de colisión en reposo en este plano)

Los neutrinos (y otras posibles partículas invisibles) no pueden ser medidas directamente. Por ello, necesitamos inferir su presencia imponiendo conservación de energía en el **balance global**.

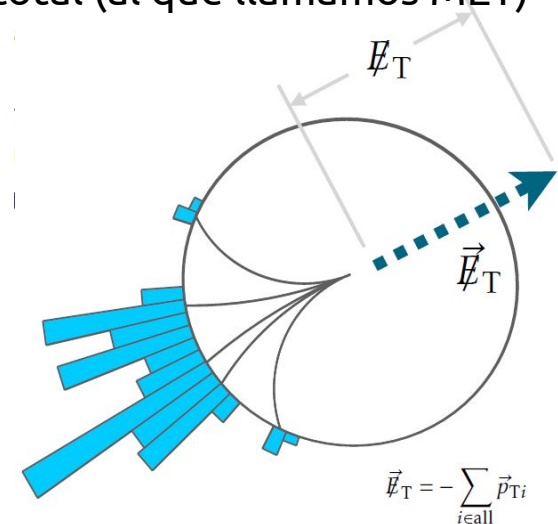
No existe un detector perfecto y hermético. No podemos imponer el balance de energía en el eje polar (parte de la energía puede escapar junto al tubo del haz sin ser medida)

Por el contrario, **la componente transversa de la energía puede ser medida**. Gracias a ello, la presencia de un desequilibrio en la energía transversa total (al que llamamos MET) se interpreta como la presencia de un neutrino.

Presente en bosones W, quarks top, taus, así como en múltiples modelos de nueva física que predicen sucesos con elevada MET (SUSY, materia oscura, dimensiones extra...)

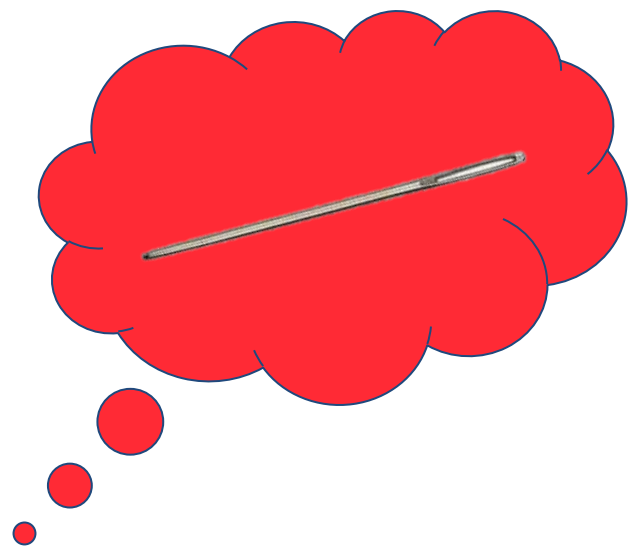
• Reconstrucción MET

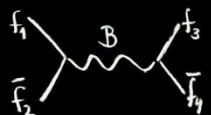
- Requiere un detector hermético
- Implica la reconstrucción de todas las partículas con interacciones EM y fuertes.
- Sensible a múltiples imperfecciones del detector (celdas defectuosas de los calorímetros, ruido, partículas del halo, etc.)





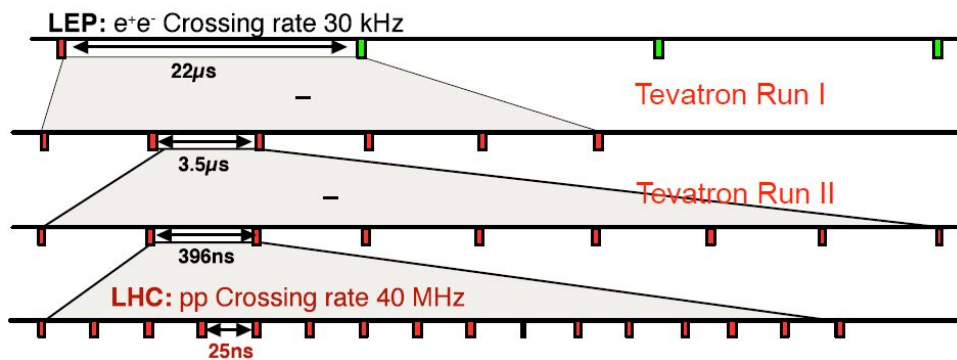
¿CÓMO SELECCIONAR PROCESOS INTERESANTES?





EL SISTEMA DE TRIGGER: BUSCANDO LA AGUJA

$N = \sigma L$, LHC $L_{inst} \sim 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, $\sigma_{inel}^{pp 7 \text{ TeV}} \sim 100 \text{ mb}$
 Frecuencia cruces: 40 MHz (25 ns espaciado entre paquetes)
 Tasa de colisiones LHC: 1 GHz (25 cols./cruce)
 Tasa de nueva física: ~mHz



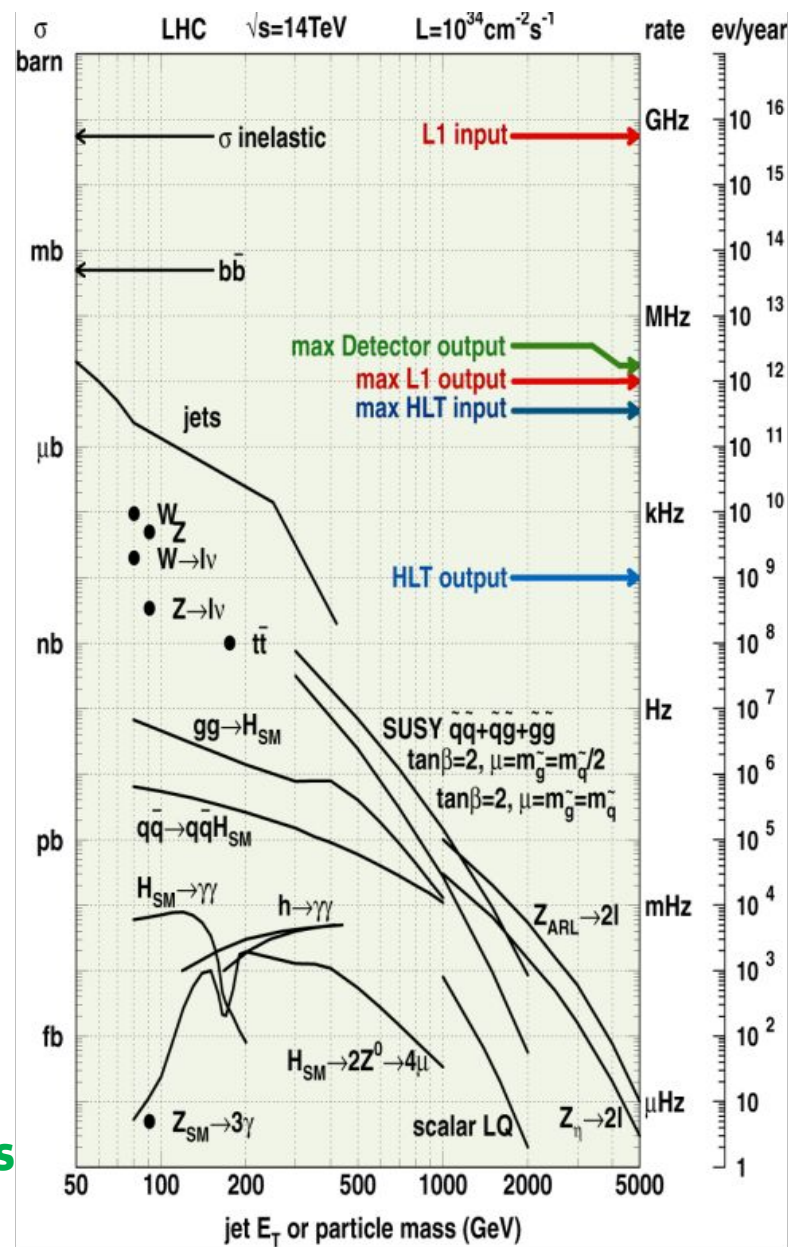
Almacenar todos los datos es inviable

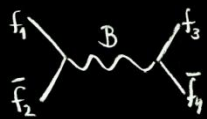
Tamaño medio de suceso ~ 1 Mbyte
~ 1MB/suceso x 40 x 10⁶ = 40 TB/s

Es necesario filtrar 1 de cada 1.000.000.000.000 de sucesos

¿Cómo pasar de 1GHz a 100Hz?

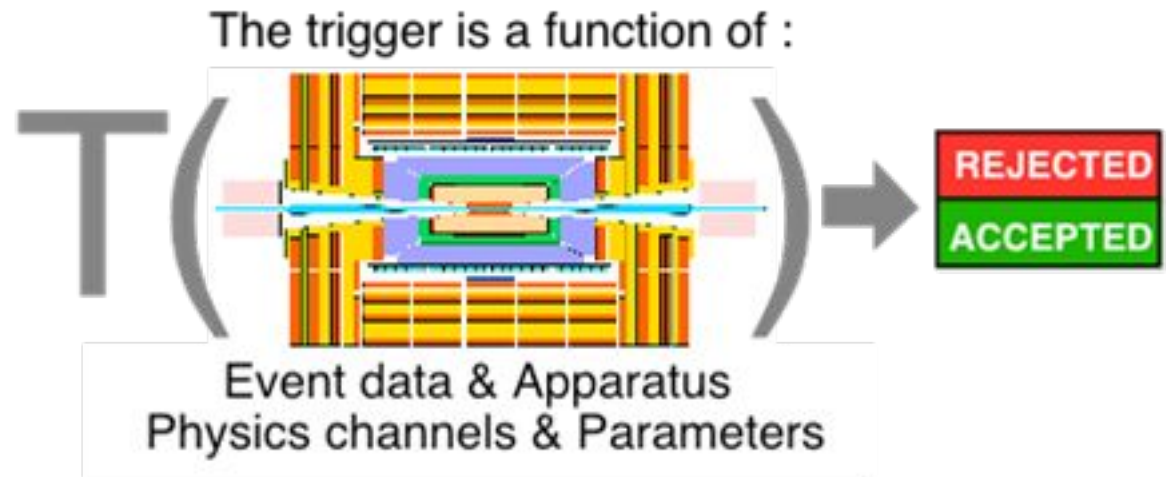
Sistema de discriminación de datos (TRIGGER)



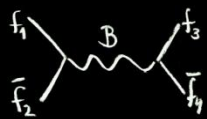


EL RETO DEL SISTEMA DE TRIGGER

Mirar a todos los sucesos en todos los cruces de haces, seleccionar los potencialmente interesantes y almacenarlos para análisis

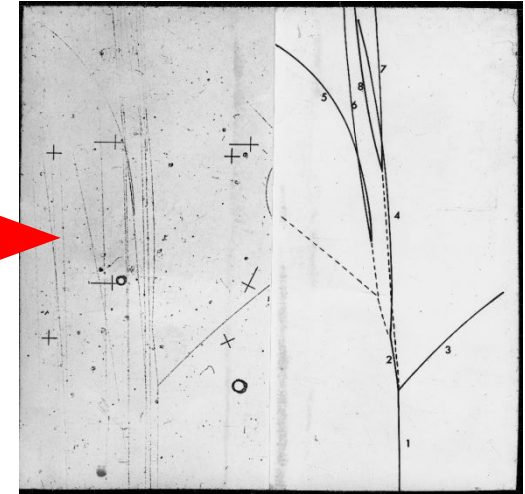


- Filtrado de sucesos de interés en un tiempo relativamente corto
- Complejos algoritmos para descartar procesos de fondo conservando la señal
- No toda la información de los detectores está disponible en un primer momento. La decisión ha de ser tomada en sucesivas etapas o NIVELES
- Flujo de salida del trigger global $O(100 \text{ Hz})$.
- La selección final se lleva a cabo via software. Antes de ello, un primer nivel reduce la tasa de datos de antemano. De otro modo, el sistema de lectura sería inviable.
- Volumen datos anual: $1 \text{ MB/suceso} \times 100 \text{ sucesos/s} \times 10^7 \text{ s/año} = 1 \text{ PByte}$

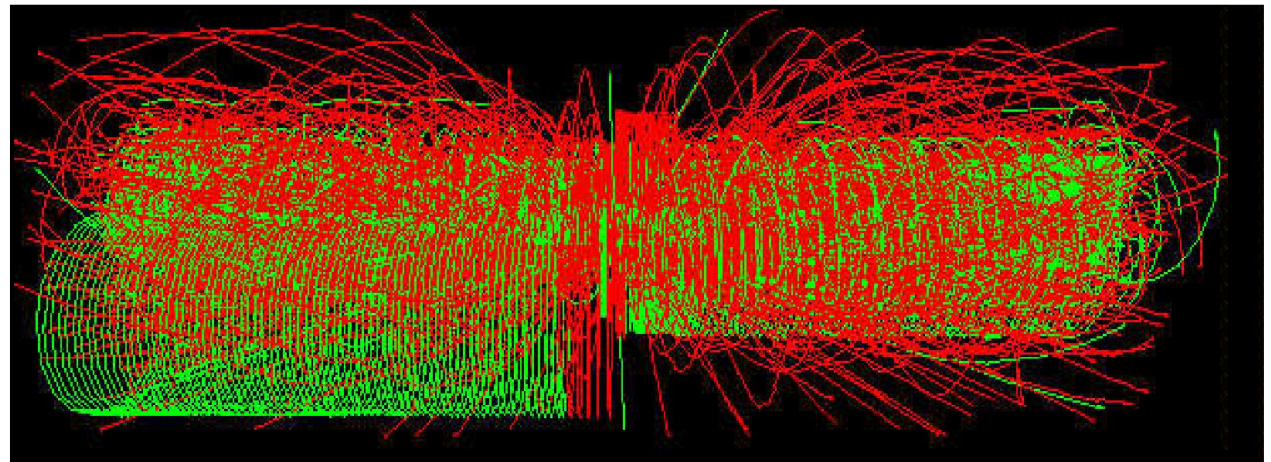


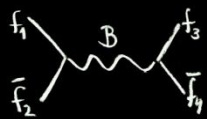
LOS TIEMPOS CAMBIAN...

Tiempo atrás, el proceso de discriminación era una operación manual / visual



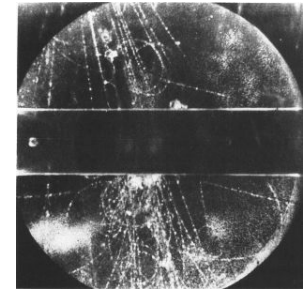
- En LHC hay que identificar sucesos como este (1 in 10^{12})
- ... escondidos entre unos 25 sucesos de min bias simultáneos
- ... y esto, cada 25 ns...



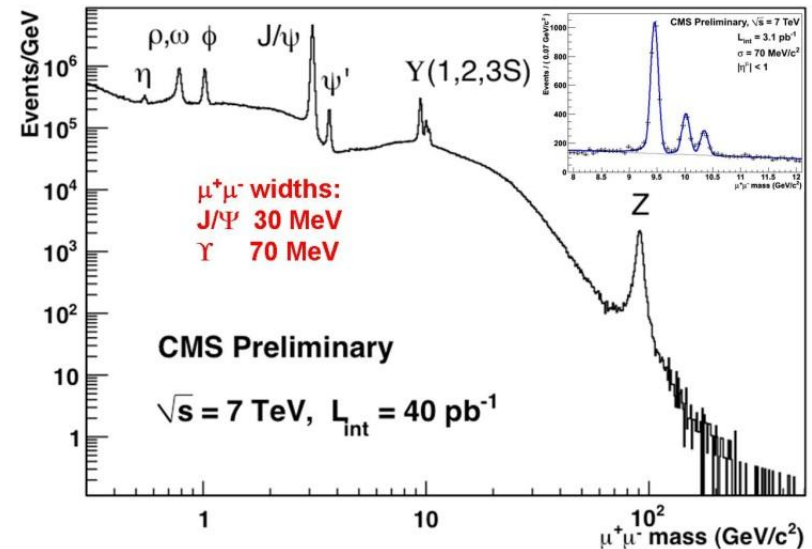


ENTONCES... IMPORTANTE:

- Alta luminosidad
- Un buen detector
- Un sistema de trigger preciso
- Algoritmos de reconstrucción



Con eso...
 Colisiones producen estados inestables
 La búsqueda/estudio de partículas no consiste en buscar eventos individuales en imágenes.
 Análisis estadístico y comparación con simulaciones



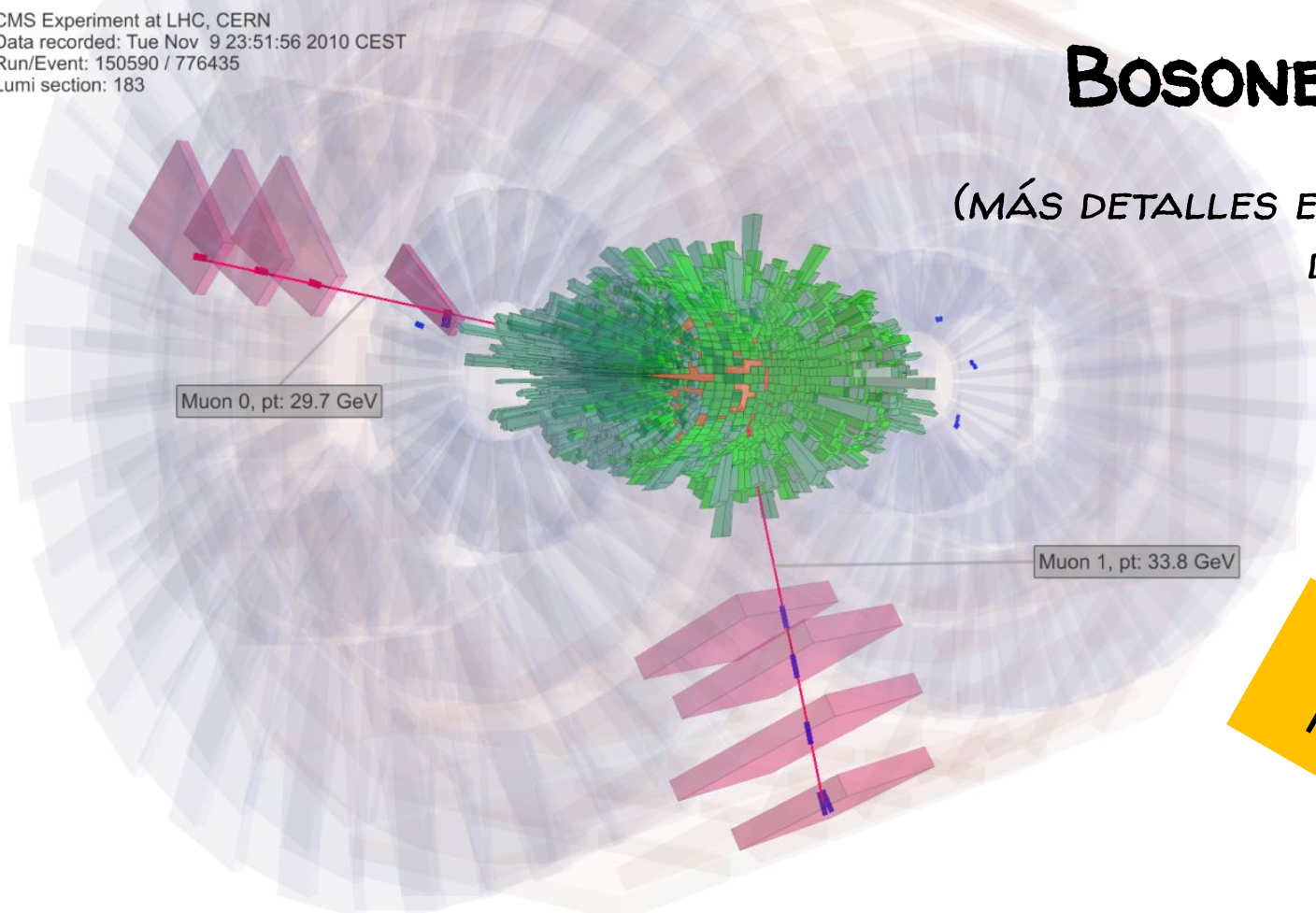


¿CÓMO RECONOCER EL PROCESO?

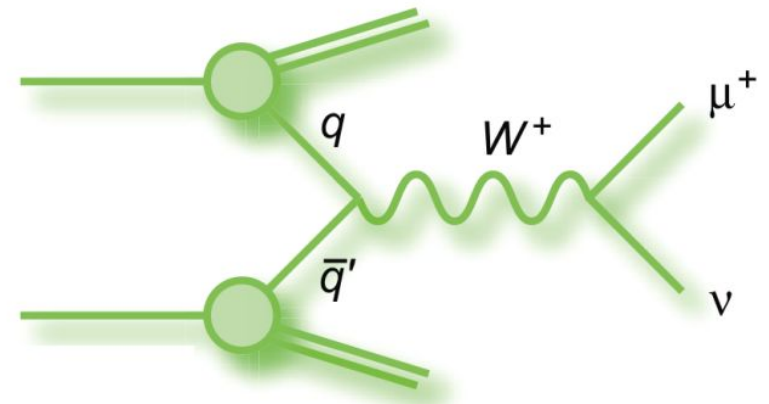
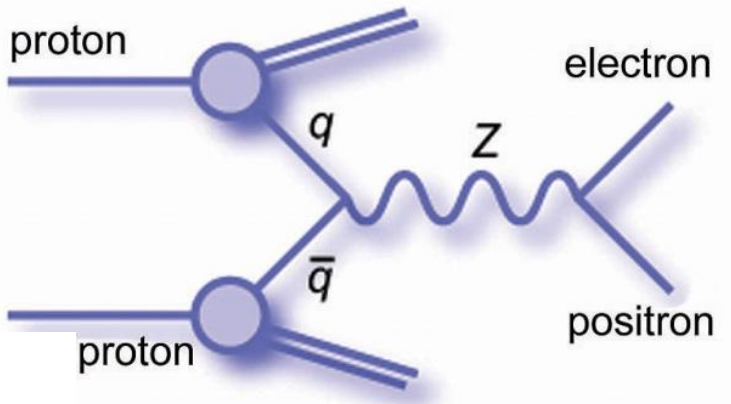


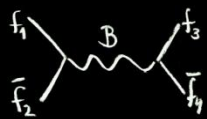
BOSONES W Y Z

(MÁS DETALLES EN EXPLICACIÓN DEL EJERCICIO)



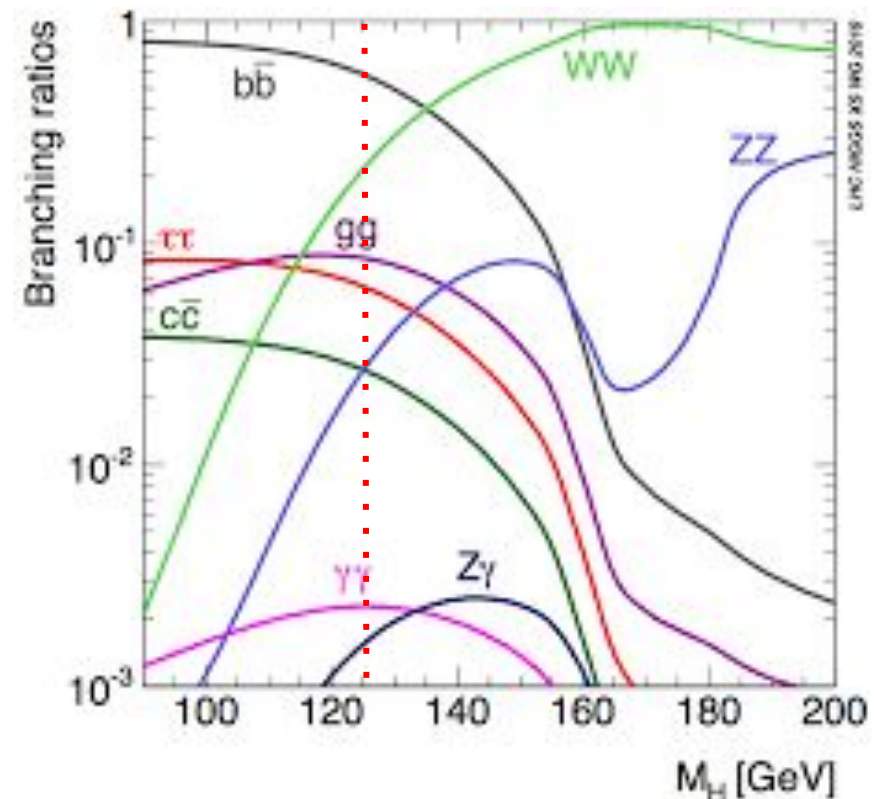
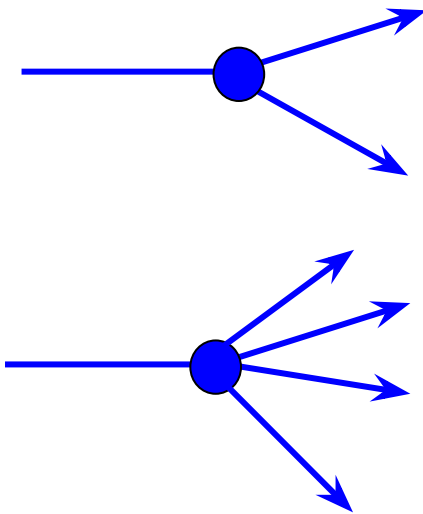
ESTADOS FINALES





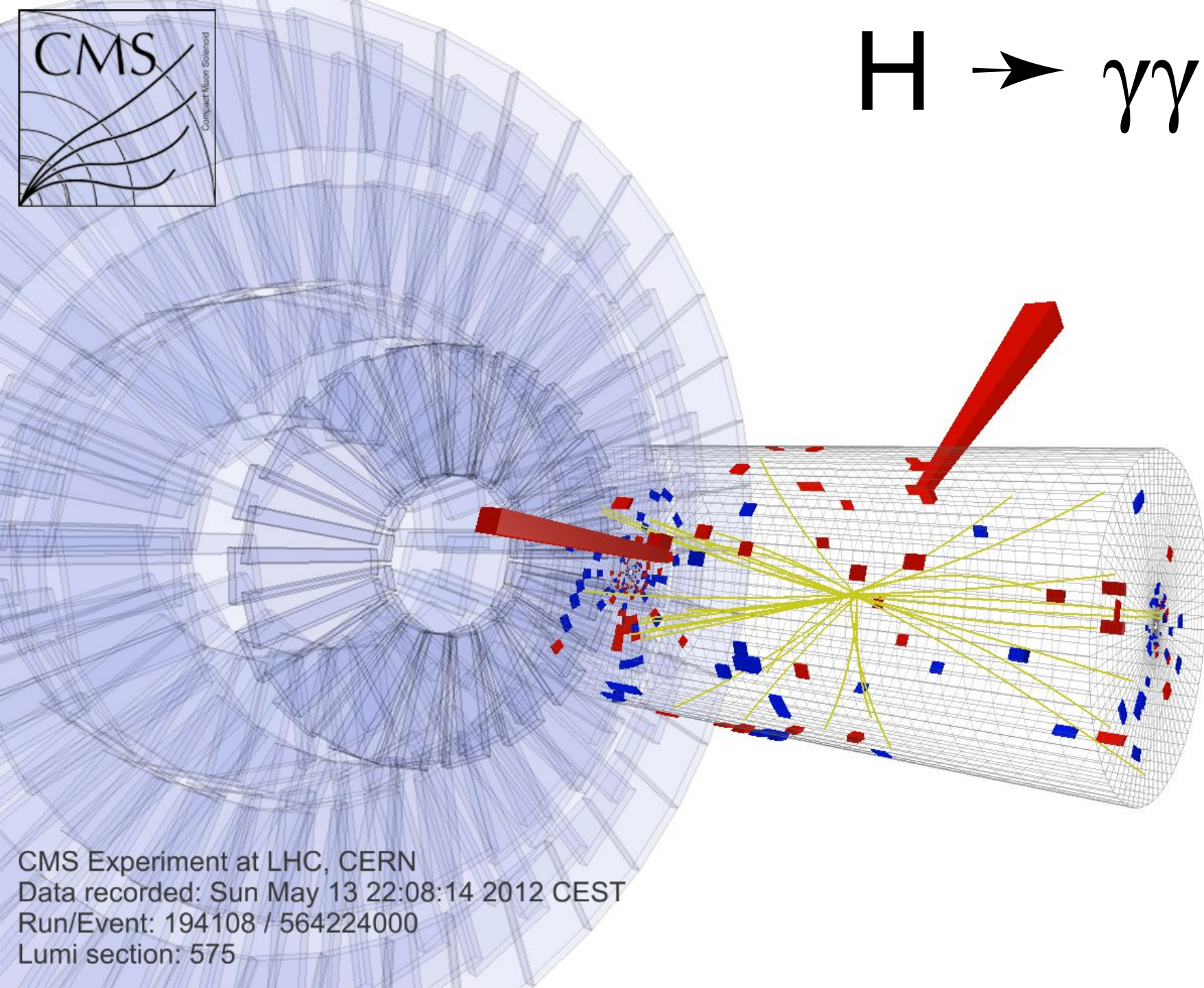
EJEMPLO: DESINTEGRACIÓN DEL BOSÓN DE HIGGS

- **El Higgs no es una partícula estable;** inmediatamente se desintegra en partículas más ligeras.
- Hay muchos posibles modos de desintegración (i.e. estados finales)
 - $H \rightarrow 2$ fotones ($H \rightarrow \gamma\gamma$)
 - $H \rightarrow 2$ Bosones Z, cada uno de ellos a 2 leptones ($H \rightarrow 4l$)
 - ...

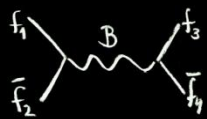




$$H \rightarrow \gamma\gamma$$



CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Sun May 13 22:08:14 2012 CEST
Run/Event: 194108 / 564224000
Lumi section: 575

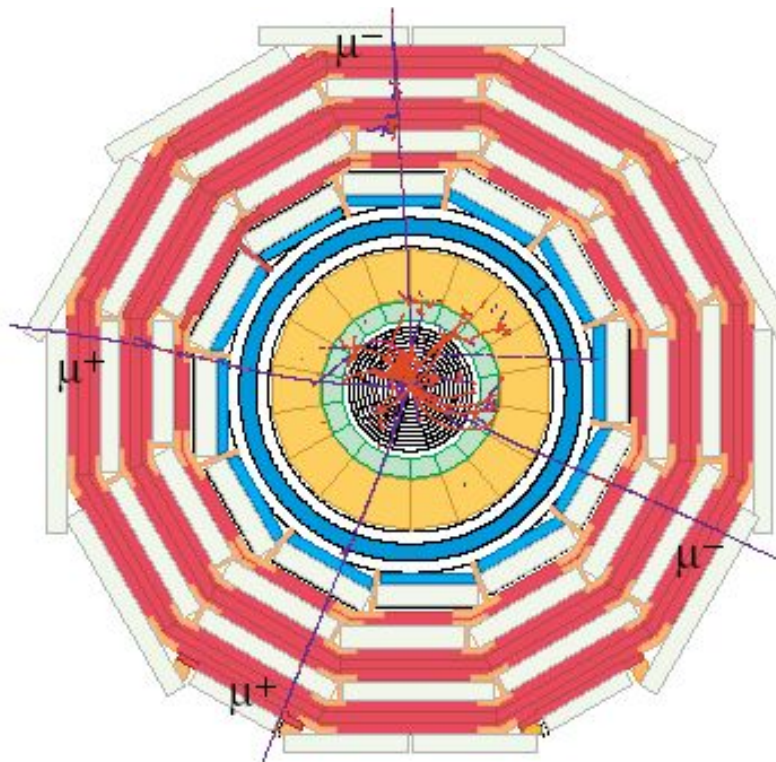


HIGGS → 4 LEPTONES

Otro modo de desintegración del Higgs es su decaimiento en 2 bosones Z que a su vez se desintegran en pares de leptones.

Seleccionando sucesos con al menos 4 muones de alto momento se reconstruye la masa de la posible partícula que se desintegró en esos 4 cuerpos

$$M_H^2 = (p_1 + p_2 + p_3 + p_4)^2$$

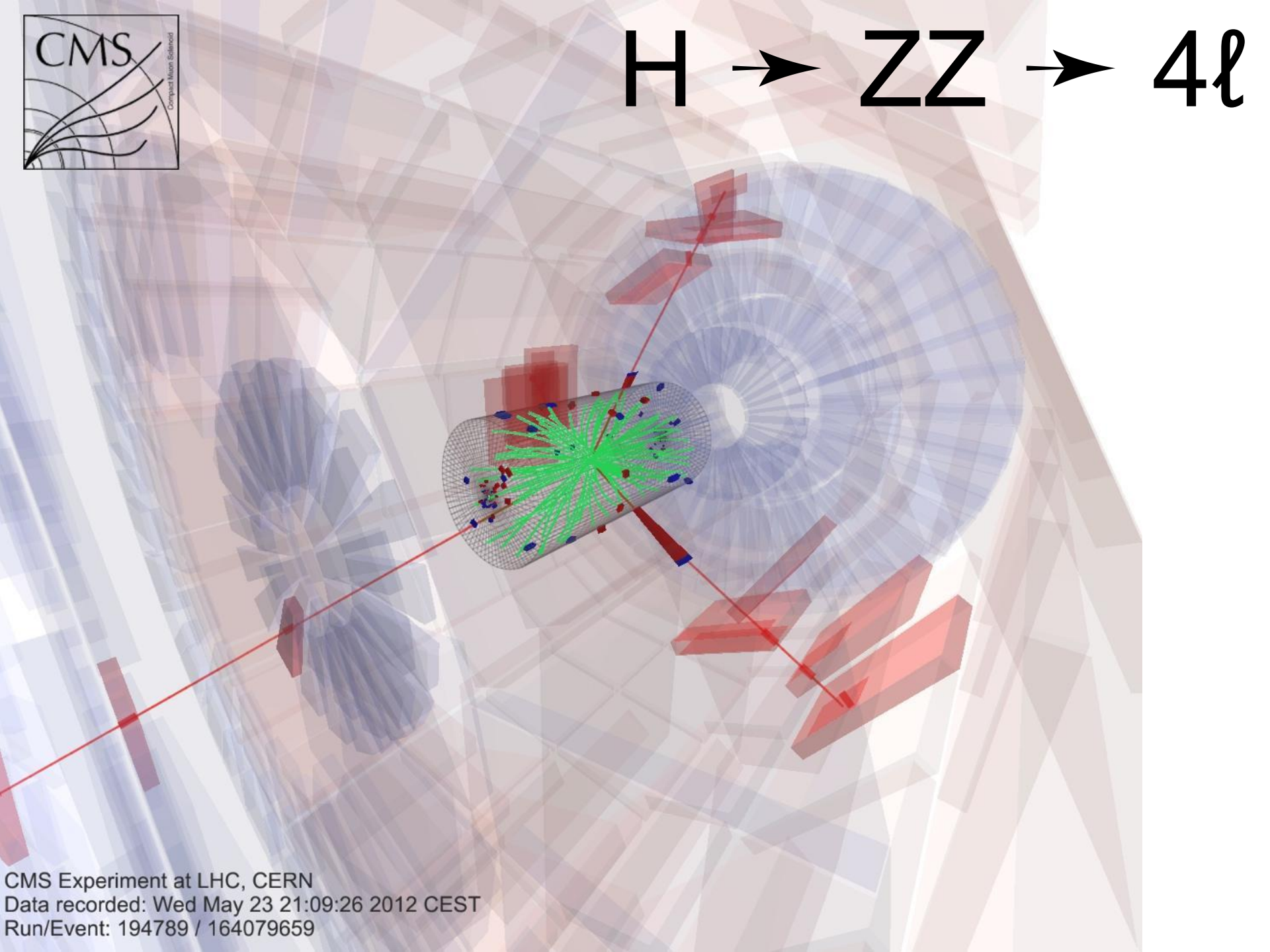


Al ser $M(H)$ alta (125 GeV), los momentos de las partículas hijas serán altos

- Trayectorias “casi” rectas
 $p = 0.3 \cdot B \cdot R$



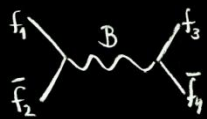
$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\ell$



CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Wed May 23 21:09:26 2012 CEST
Run/Event: 194789 / 164079659

A large industrial facility, likely a particle accelerator, with a massive circular structure and a person on a walkway for scale. The scene is filled with complex machinery, pipes, and structural elements. A person is visible on a walkway in the lower left, providing a sense of scale to the enormous size of the equipment. The overall atmosphere is one of a highly technical and complex environment.

¿SEGURO?



LA MASA

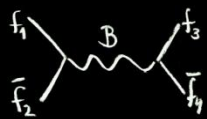
- Una vez medidas las partículas individuales y conocidas sus propiedades, sabemos que en muchos casos varias de esas partículas proceden de la desintegración de una partícula original más pesada
- ¿Cómo saberlo? **Reconstruimos la masa de un estado final para saber la masa de la partícula original**
- El momento y la energía de una partícula que se mueve a velocidades relativistas vienen expresadas por:

$$\vec{p} = m\vec{v} \quad E = mc^2$$

Cuando trabajamos con objetos relativistas, la masa a la que nos referimos es la MASA en REPOSO (Energía cuando a $v \rightarrow 0$ dividida por c^2).

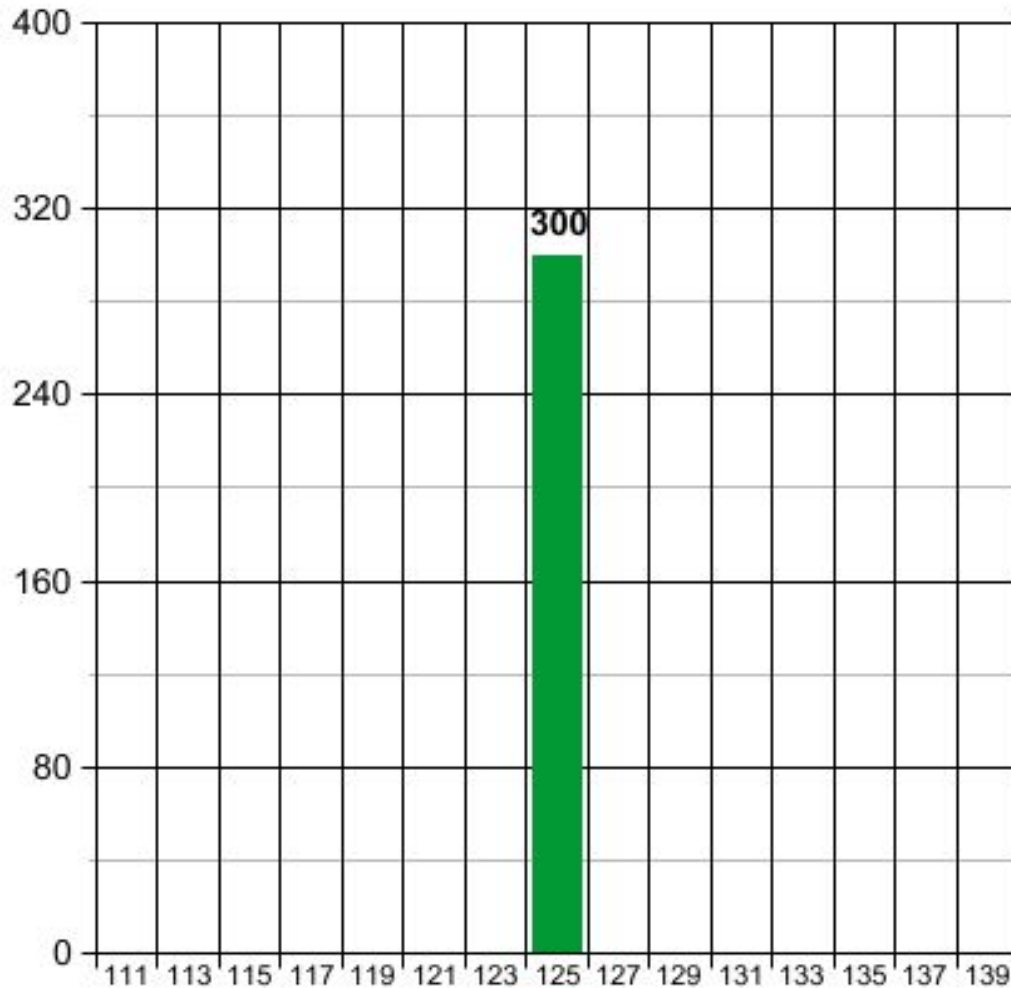
CARACTERÍSTICA DE UNA PARTÍCULA

$$E^2 = m^2 \cdot c^4 + \vec{p}^2 c^2 \Rightarrow m = \frac{\sqrt{E^2 - \vec{p}^2 c^2}}{c^2}$$



300 HIGGS

Histograma de masas

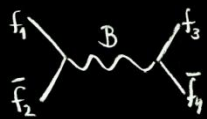


(Simulación)

$$M_H^2 = (p_1 + p_2)^2$$

Masa invariante gamma-gamma (GeV)

$$M_X^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2\bar{E}_1\bar{E}_2 - p_1^2 - p_2^2 - 2p_1p_2 \cos \theta :$$



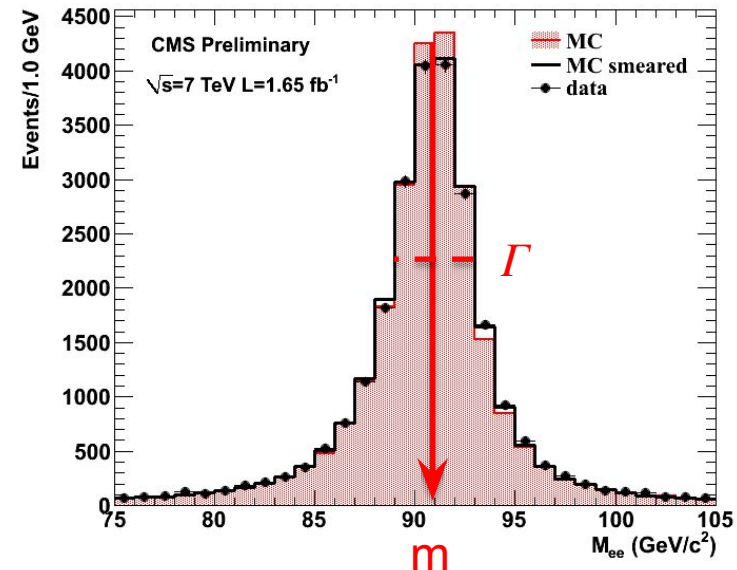
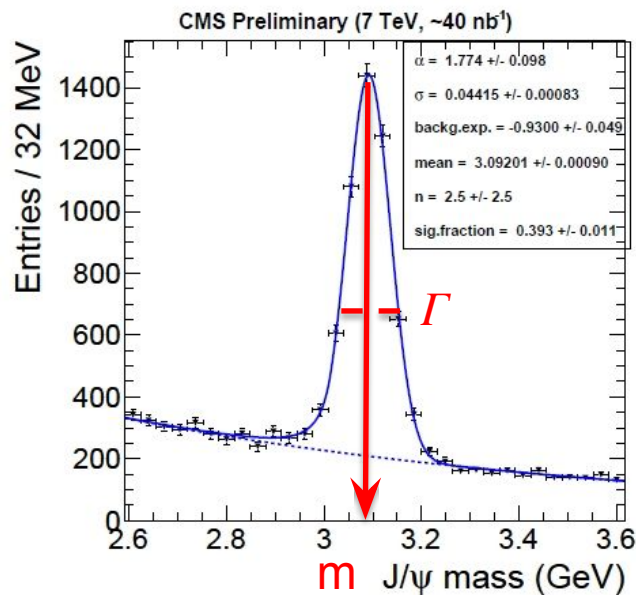
MASA Y VIRTUALIDAD

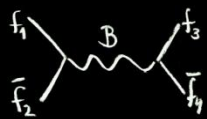
Masa \neq valor fijo $\Rightarrow \Delta E \Delta t \approx \hbar \Rightarrow \Delta M \Delta t \approx \hbar$

$$\Delta M \approx \Rightarrow \frac{\hbar}{\Delta t} \text{ anchura natural de la partícula } (\Gamma)$$

La masa tiene una distribución de probabilidad (**resonancia**) con anchura $\Gamma = \hbar/\tau$ y valor medio m .

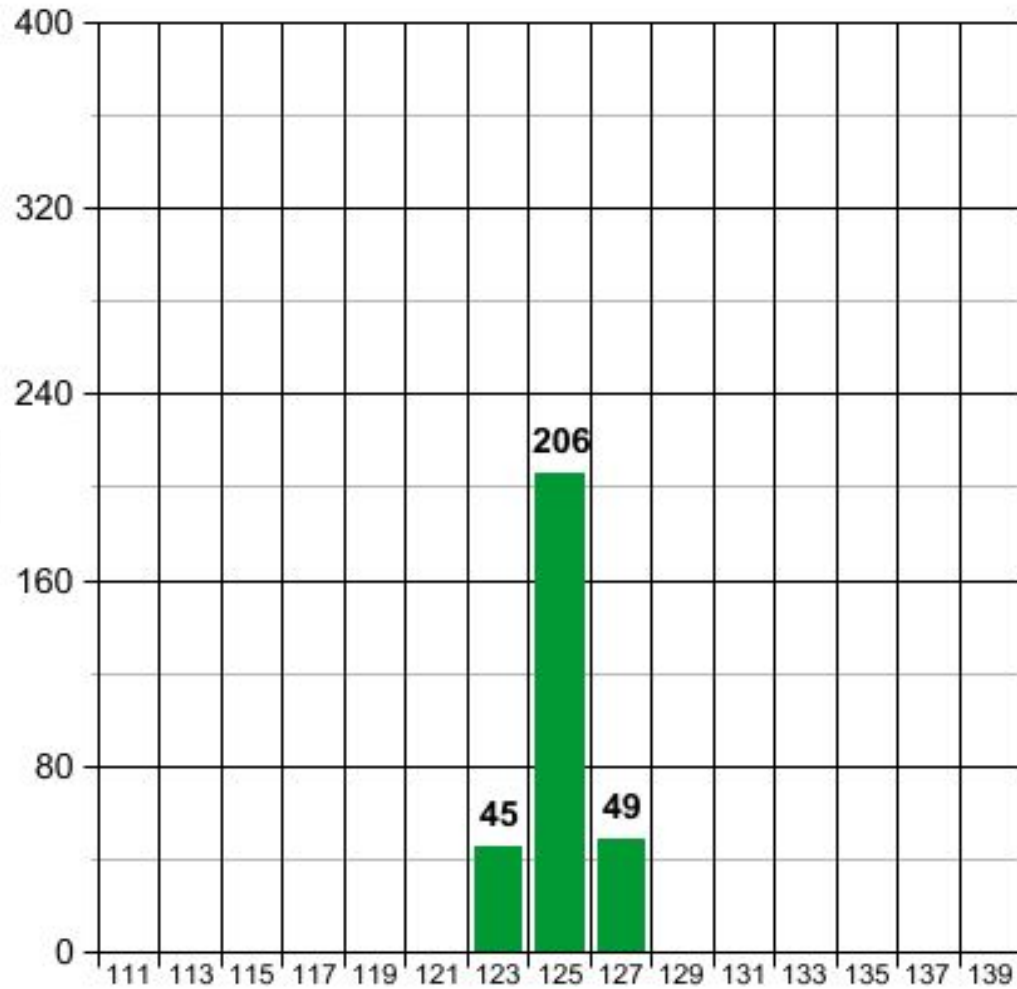
Las partículas tienen una masa $\neq m$ y solo vive un tiempo Δt .





300 HIGGS

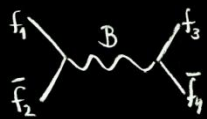
Histograma de masas



(Simulación)

$$M_H^2 = (p_1 + p_2)^2$$

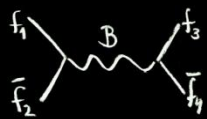
Masa invariante gamma-gamma (GeV)



PROCESOS DE FONDO

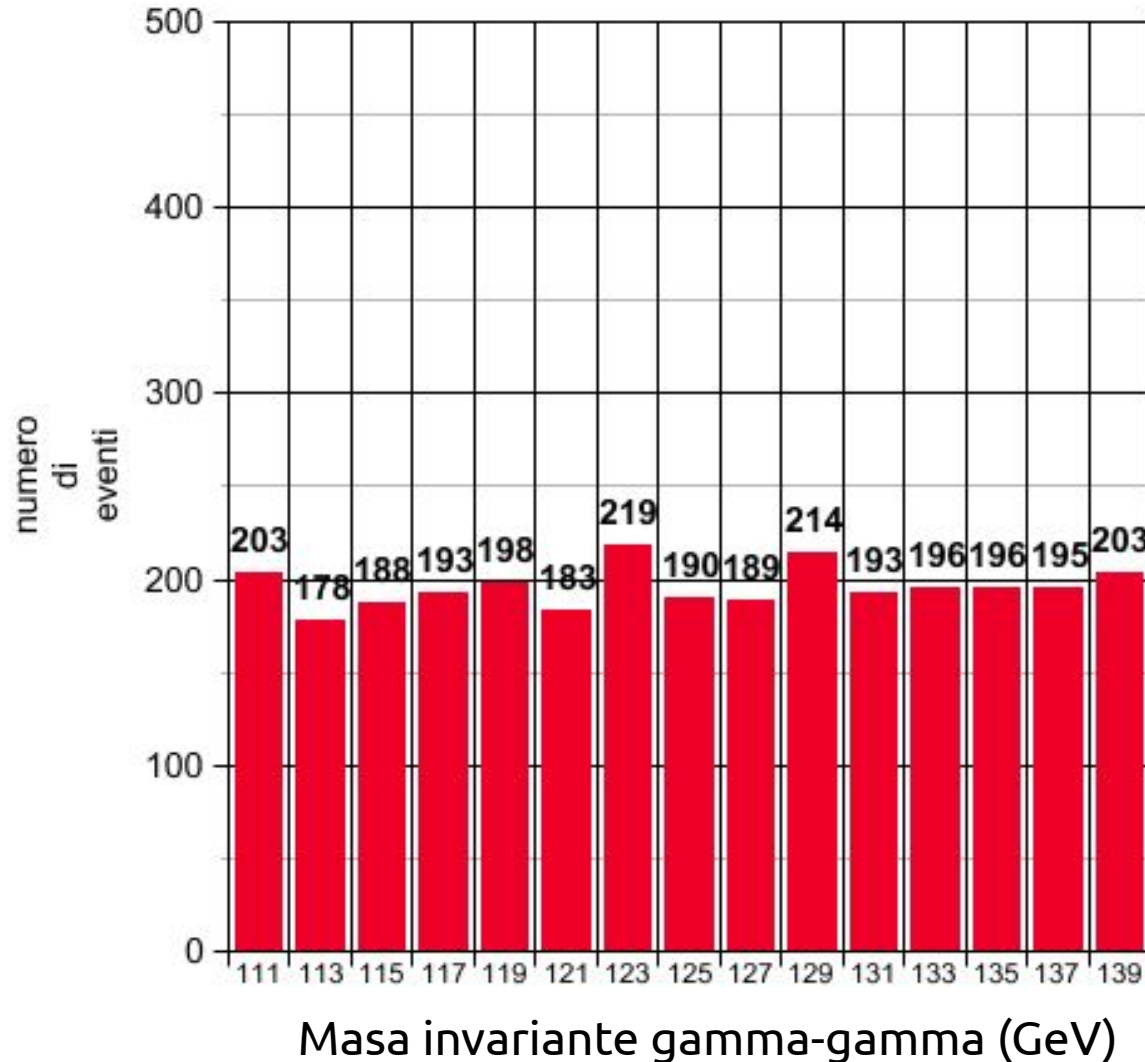
En una situación real: una vez reconstruido el evento y medidas las propiedades de los componentes,
¿cómo estamos seguros de que el evento es lo que decimos que es?

- ☹️ **NO podemos estar seguros. Sólo vemos el estado final**
- En general muchos procesos primarios distintos pueden generar el mismo estado final.
 - Hay que comparar con simulaciones estadísticas (Montecarlo)
 - Técnicas de análisis avanzadas explotan la cinemática de los sucesos para aumentar señal sobre fondo (S/B).
¡Tarea harto difícil !



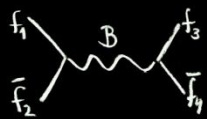
EL FONDO

Masa reconstruida con 2 fotones no asociados al decaimiento de una partícula



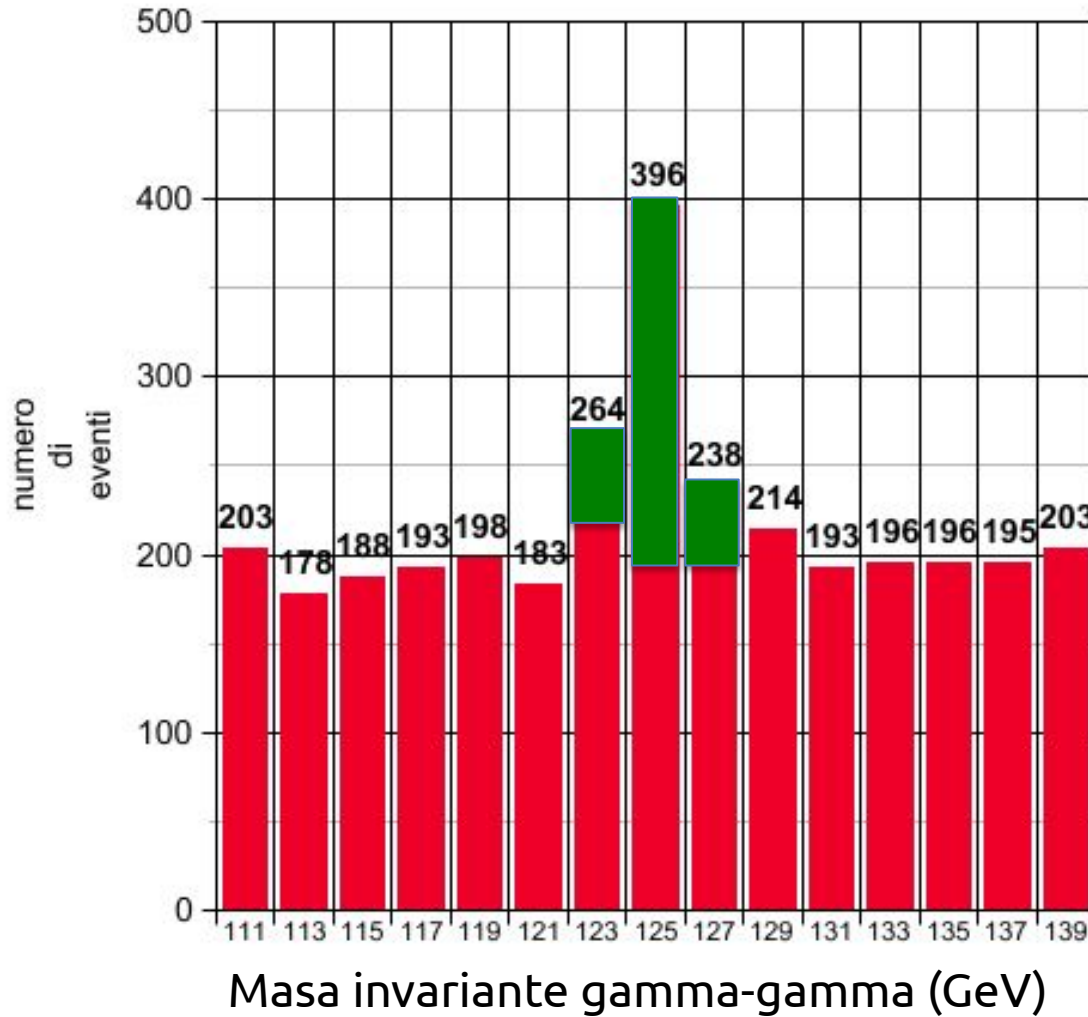
(Simulación)

$$M_H^2 = (p_1 + p_2)^2$$



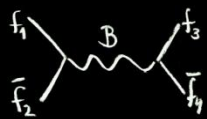
FONDO + SEÑAL

Histograma de masas



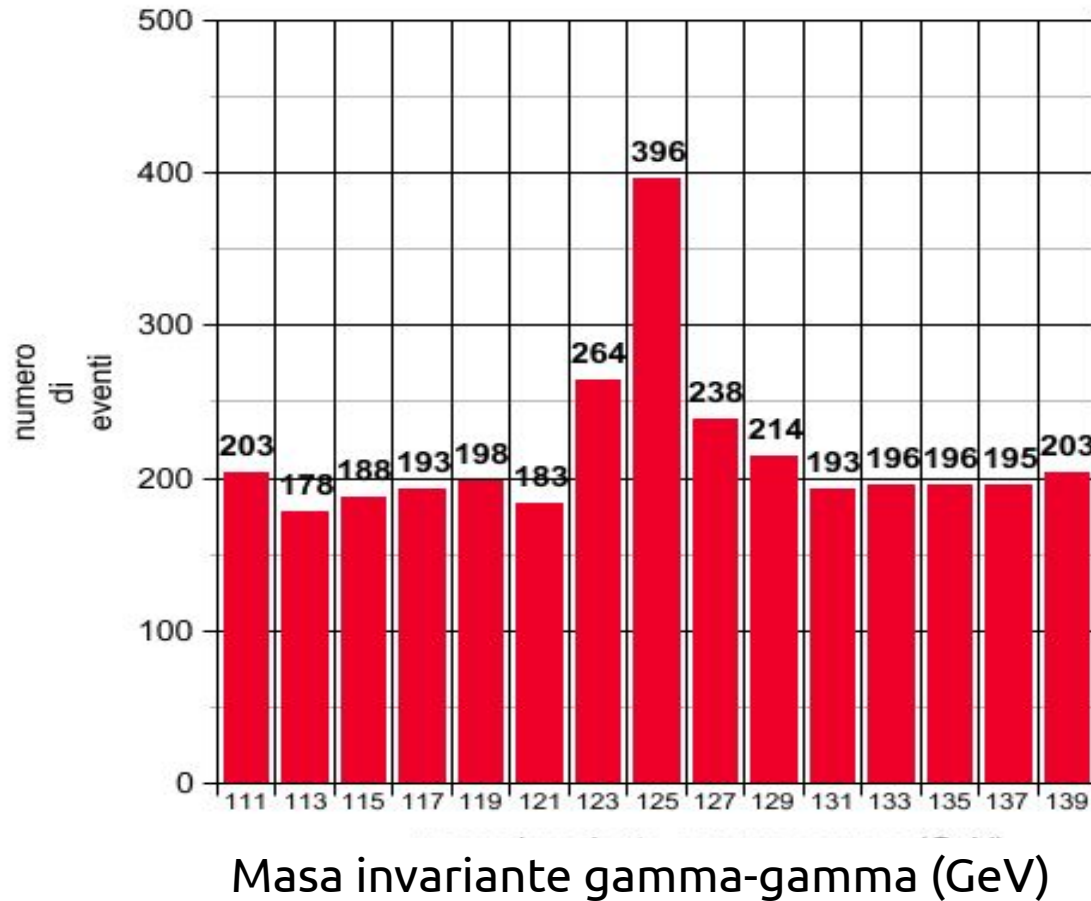
(Simulación)

$$M_H^2 = (p_1 + p_2)^2$$



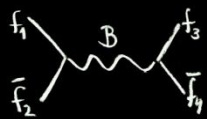
"DATOS"

Histograma de masas



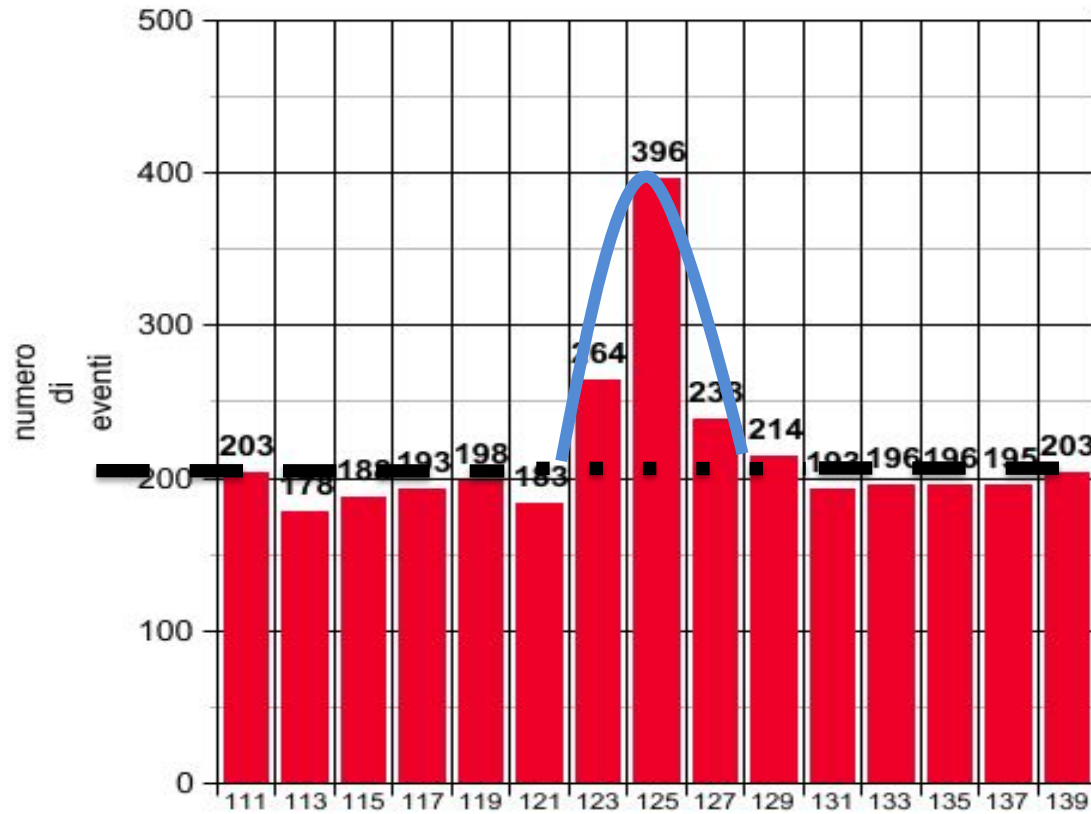
(Simulación)

$$M_H^2 = (p_1 + p_2)^2$$



EL FONDO

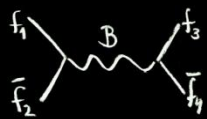
Histograma de masas



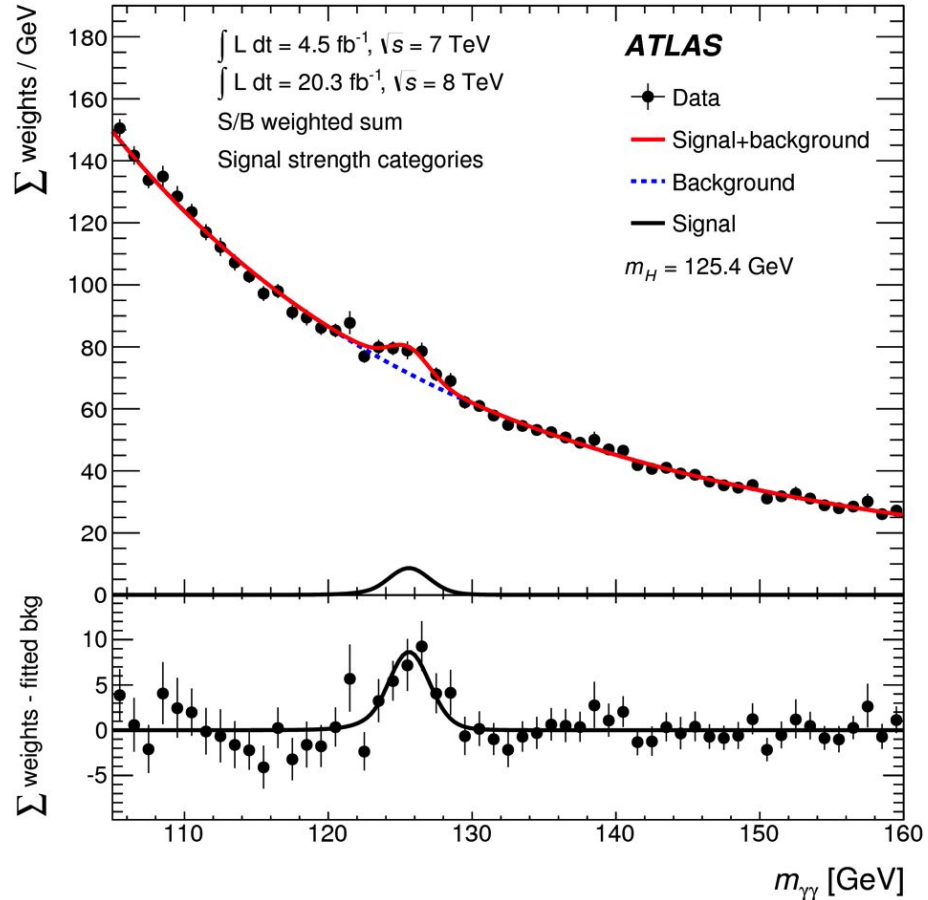
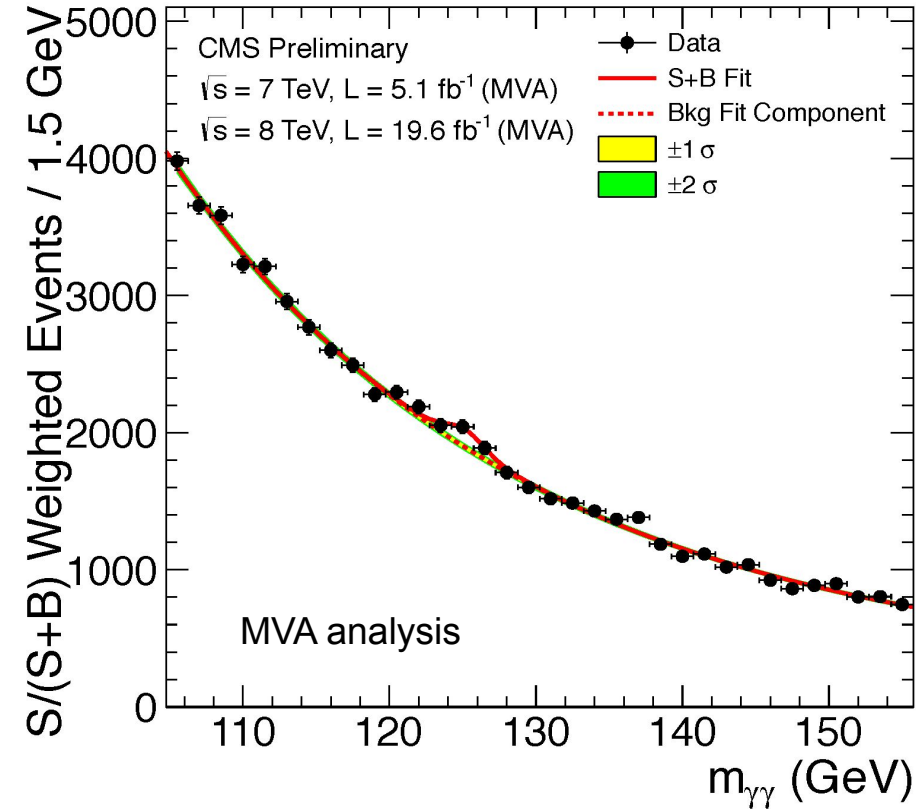
(Simulación)

$$M_H^2 = (p_1 + p_2)^2$$

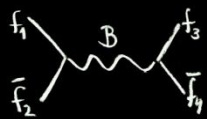
Masa invariante gamma-gamma (GeV)



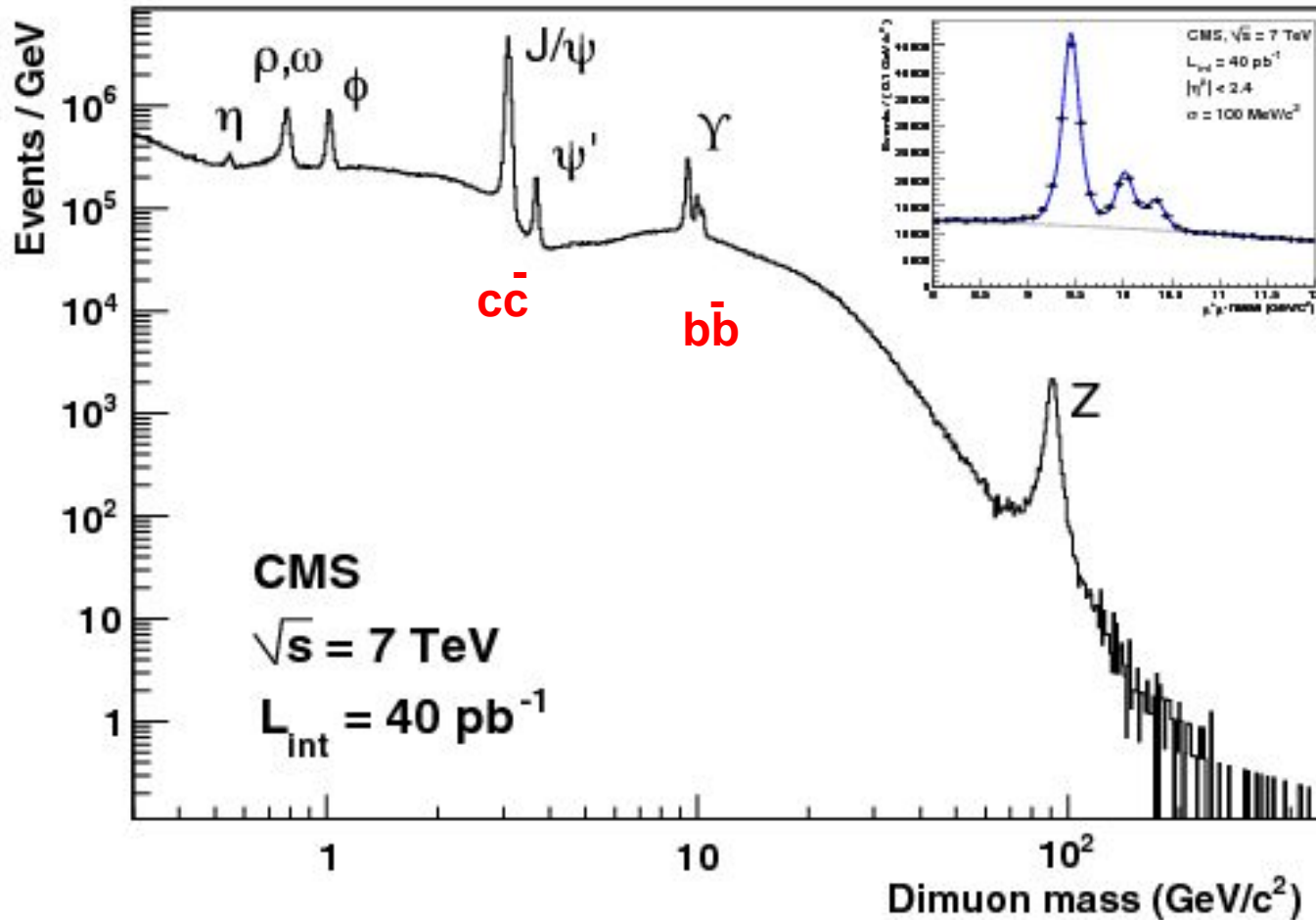
DISTRIBUCIONES DE MASA: $H \rightarrow \gamma\gamma$



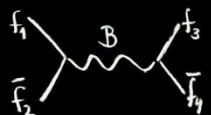
La señal destaca sobre un fondo ingente de sucesos de QCD (e, γ).



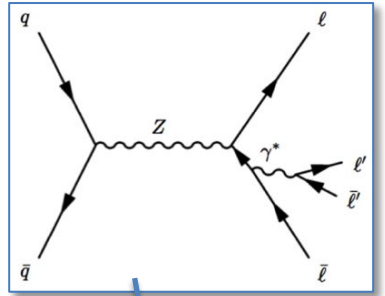
EJEMPLO: ESPECTRO DE MASA DE $\mu^+\mu^-$



A partir de la masa distinguimos partículas.
 También usamos el p_T de las partículas hijas, su distancia al vértice de interacción, E_T^{mis} , ...

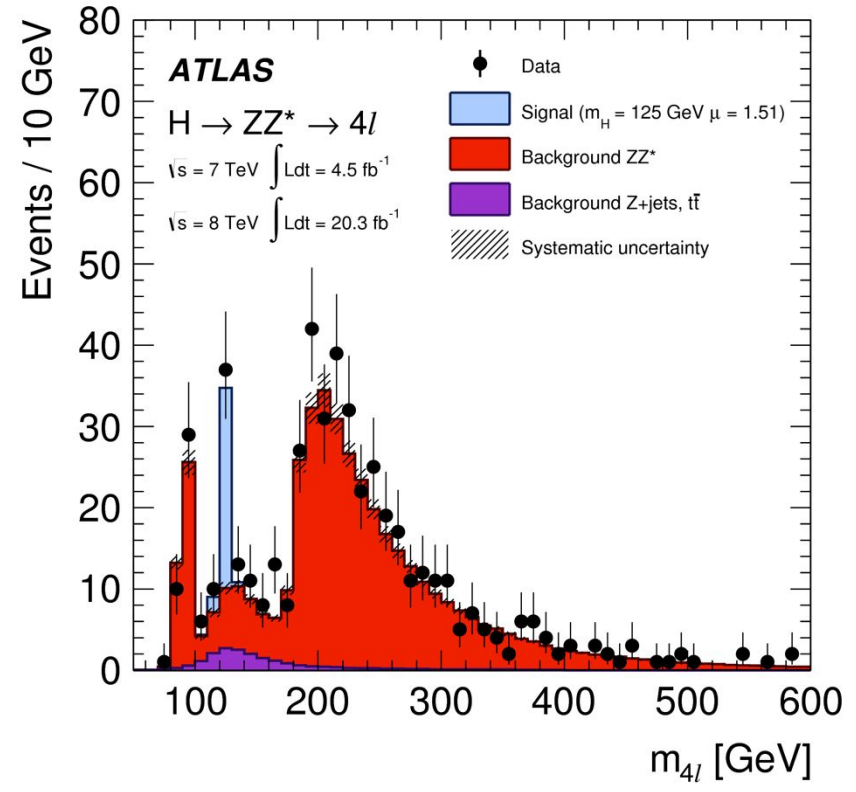
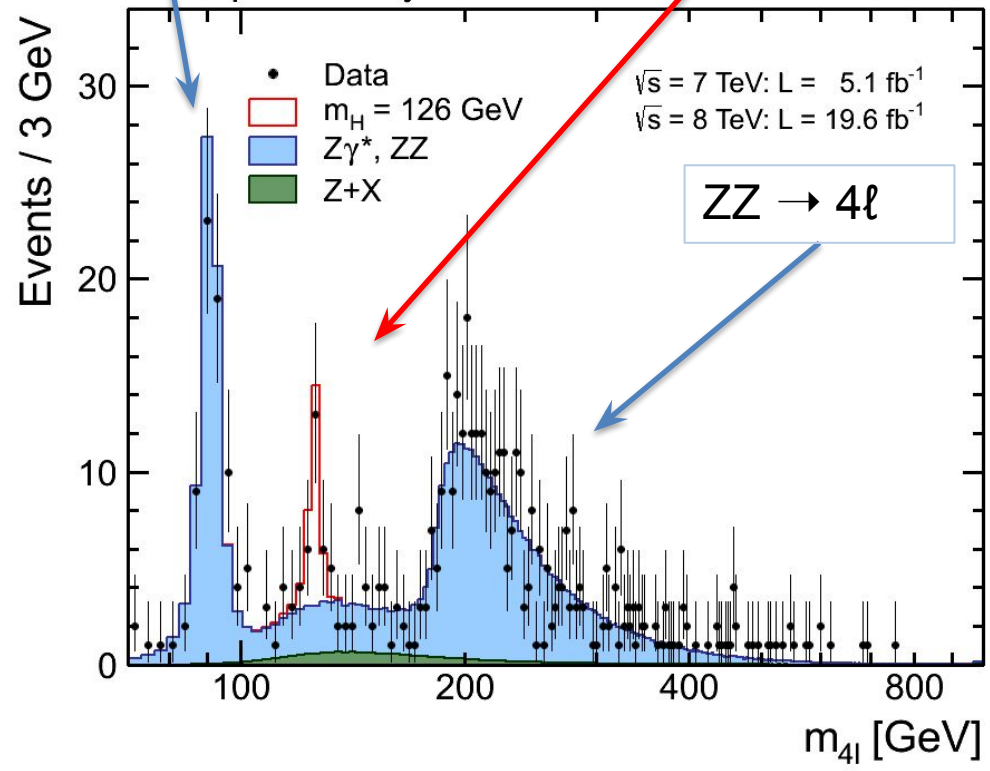


DISTRIBUCIONES DE MASA: $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$

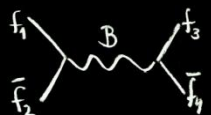


$$X \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$$

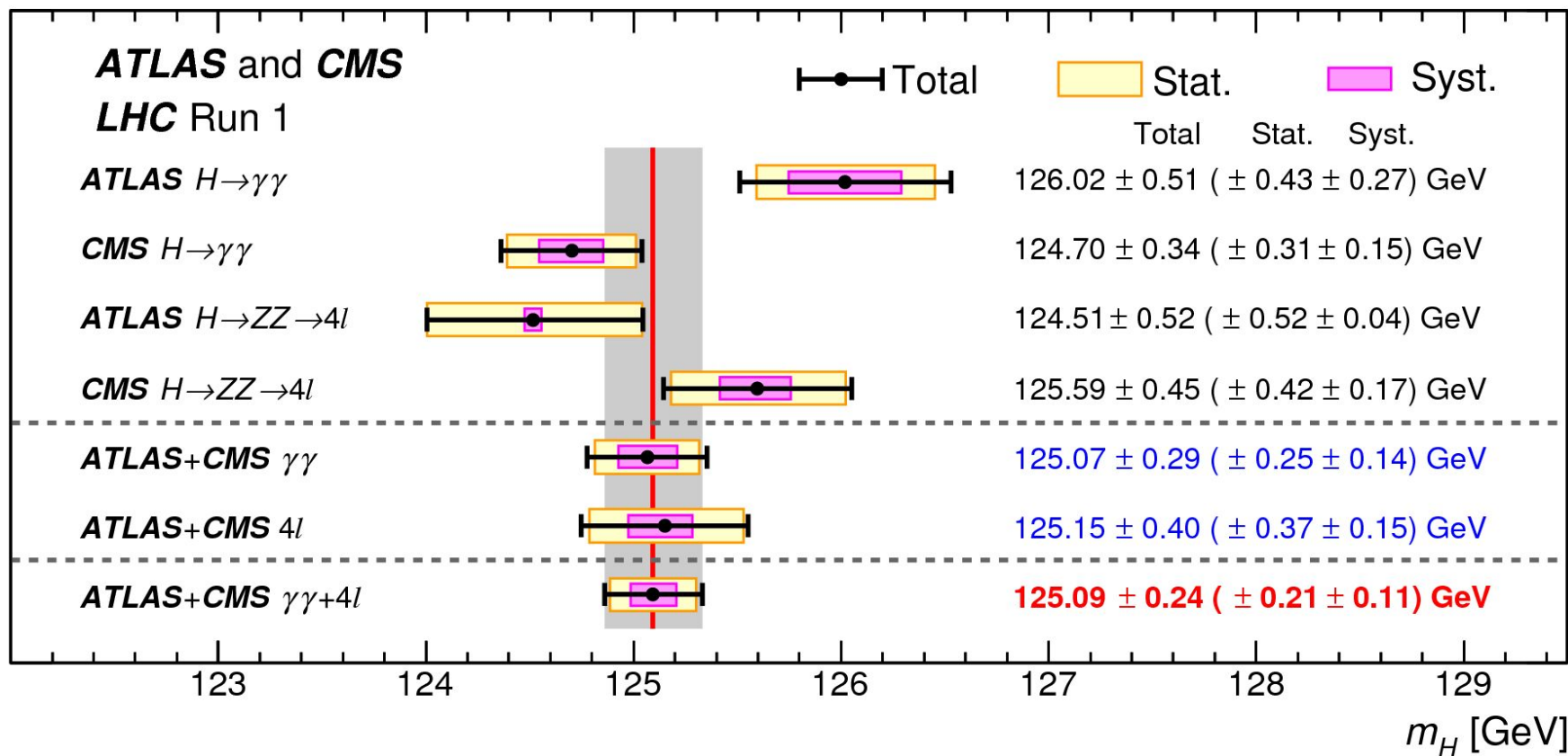
CMS preliminary



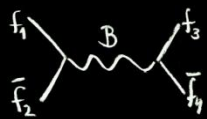
Masa reconstruida de los 4 leptones para la suma de los canales $4e$, 4μ y $2e2\mu$.



MASA DEL BOSÓN DE HIGGS: ATLAS+CMS

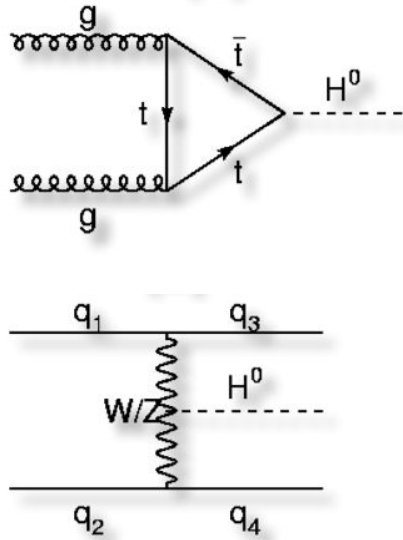


Los valores de m_H medidos por ATLAS y CMS son compatibles entre sí, así como los valores para 4ℓ y $\gamma\gamma$.

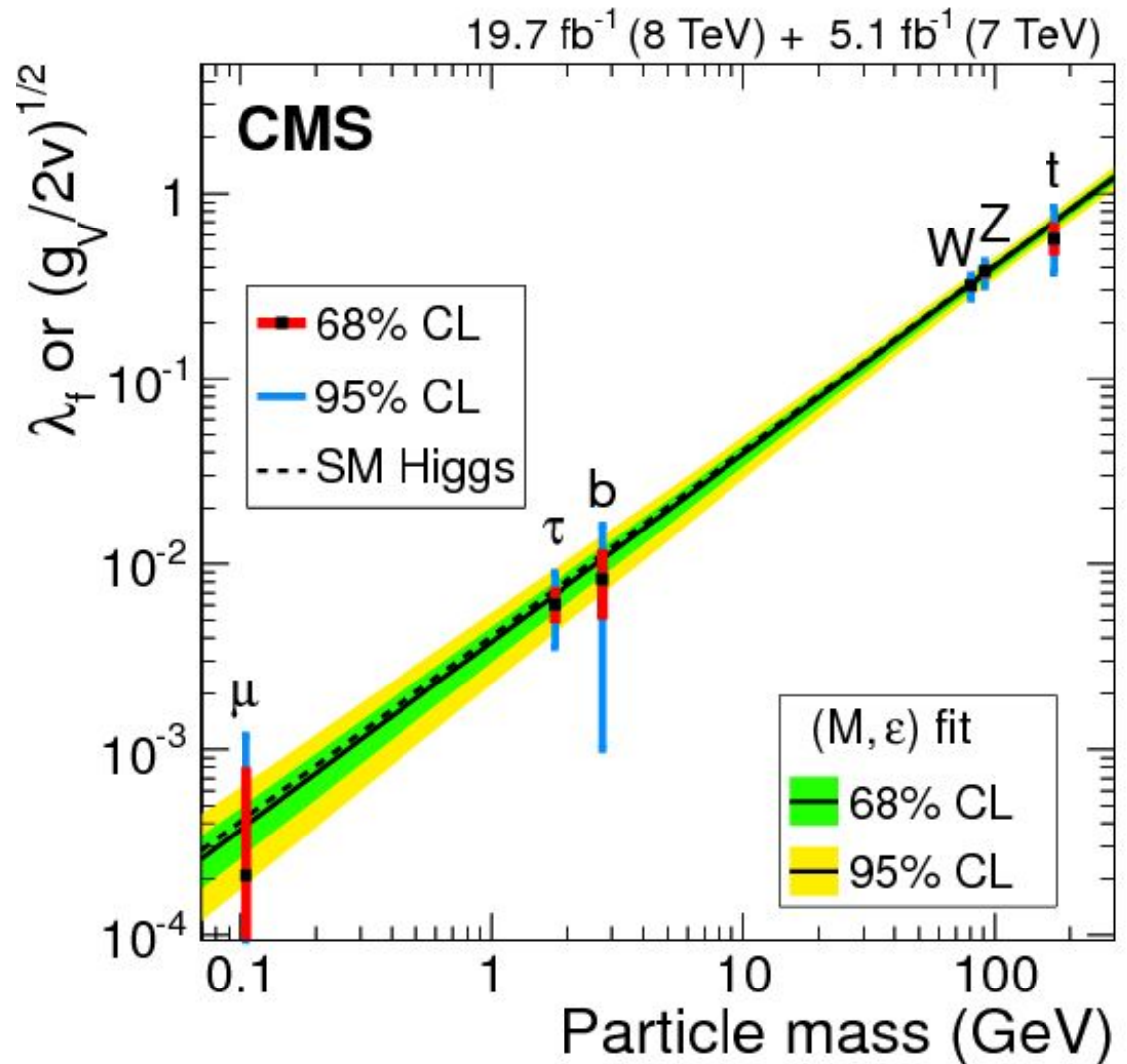


ACOPLOS DEL HIGGS

Identificando los mecanismos de producción del **bosón de Higgs** y sus canales de desintegración, medimos su acoplo a fermiones y bosones.

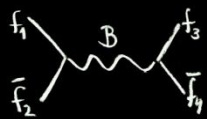


La masa de las partículas elementales es proporcional a su acoplo con el campo de Higgs.



The image shows the interior of the Large Hadron Collider (LHC) tunnel. The scene is dominated by the massive, complex structure of the superconducting magnets, which are arranged in a circular pattern. The lighting is a warm, reddish-orange, highlighting the metallic surfaces and the intricate wiring. In the lower-left foreground, a person wearing a white hard hat and dark clothing is visible, providing a sense of scale to the enormous machinery. The text "MÁS ALLÁ DEL HIGGS..." is overlaid in the center in a white, sans-serif font.

MÁS ALLÁ DEL HIGGS...



EL QUARK TOP

La partícula elemental más masiva

Es muy inestable: a diferencia del resto de quarks no llega a hadronizar

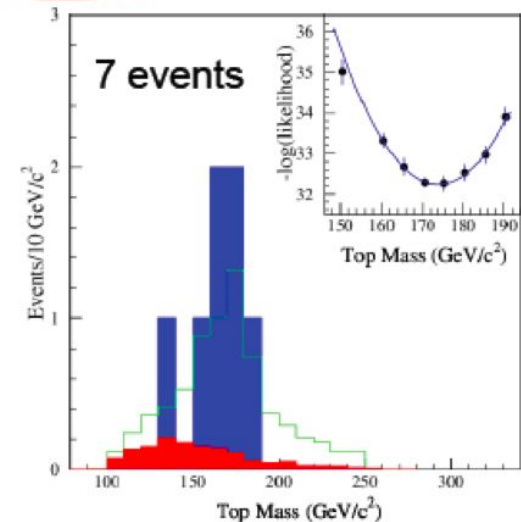
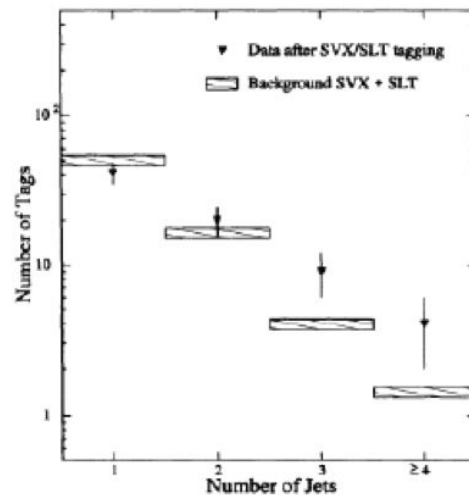
VOLUME 73, NUMBER 2

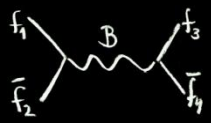
PHYSICAL REVIEW LETTERS

11 JULY 1994

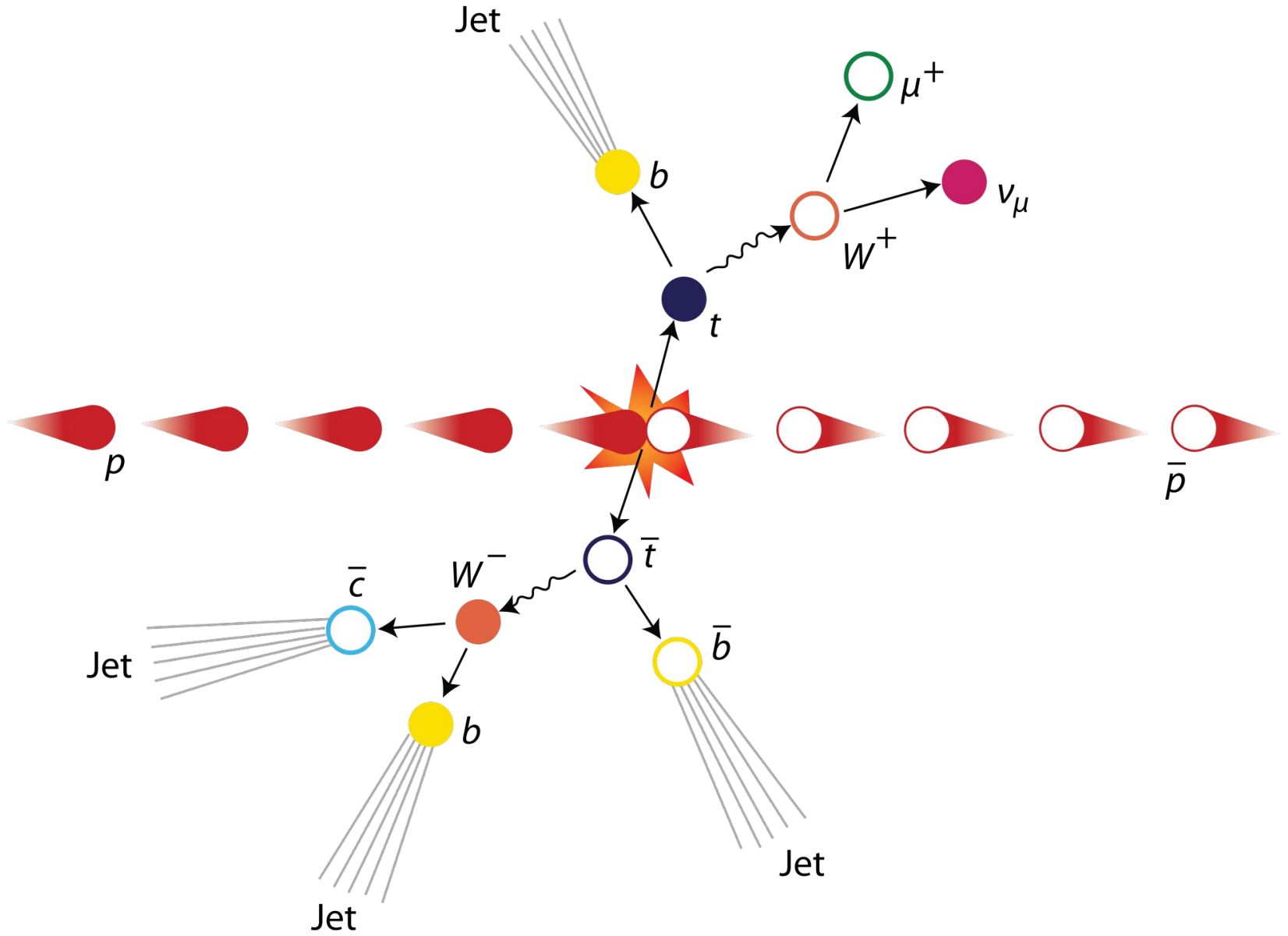
Evidence for Top Quark Production in $\bar{p}p$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV

We summarize a search for the top quark with the Collider Detector at Fermilab (CDF) in a sample of $\bar{p}p$ collisions at $\sqrt{s} = 1.8$ TeV with an integrated luminosity of 19.3 pb^{-1} . We find **12 events** consistent with either two W bosons, or a W boson and at least one b jet. The probability that the measured yield is consistent with the background is 0.26%. Though the statistics are too limited to establish firmly the existence of the top quark, a natural interpretation of the excess is that it is due to $t\bar{t}$ production. Under this assumption, constrained fits to individual events yield a top quark mass of $174 \pm 10 \pm 13 \text{ GeV}/c^2$. The $t\bar{t}$ production cross section is measured to be $13.9^{+6.1}_{-4.8} \text{ pb}$.



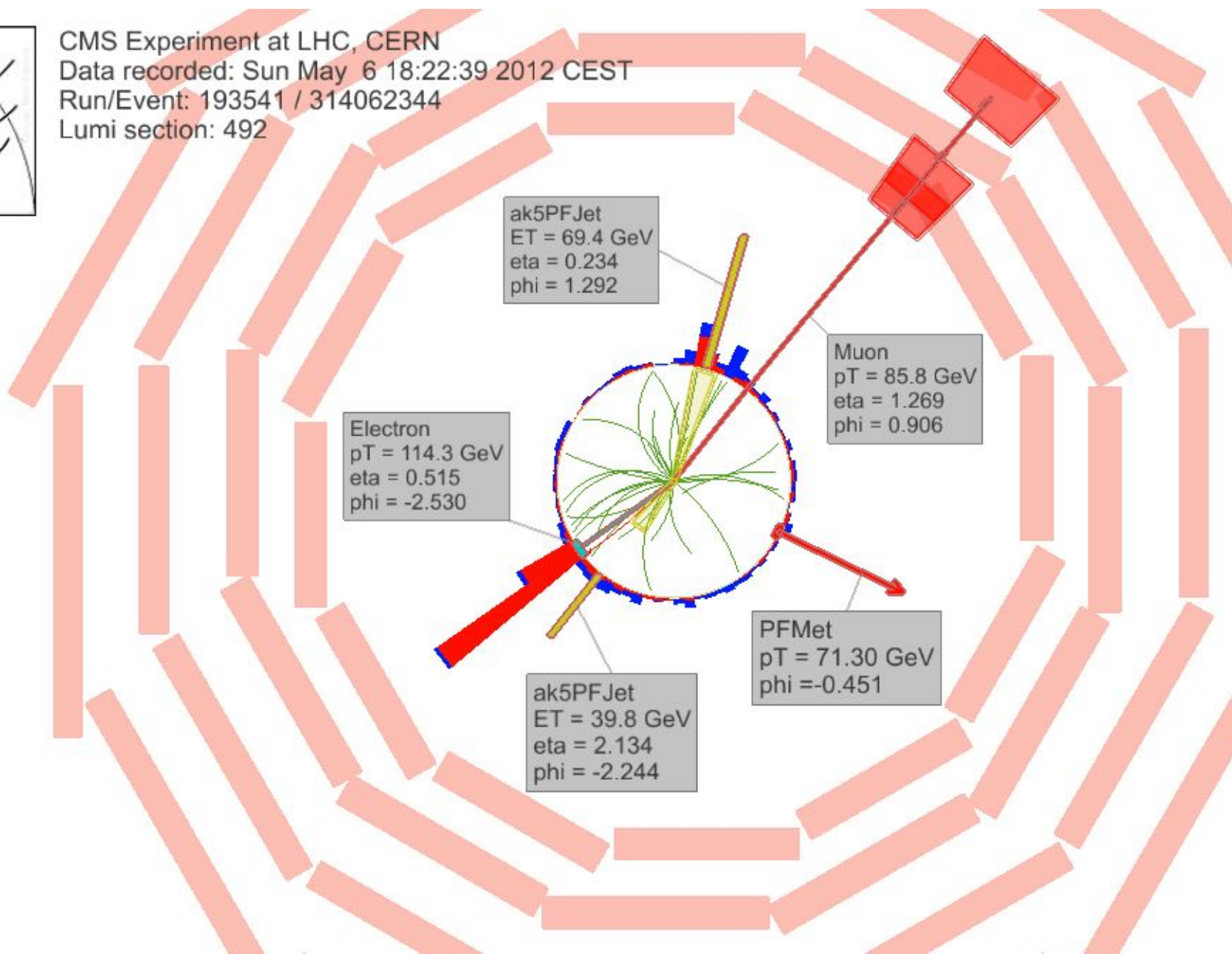


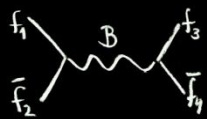
PRODUCCIÓN DE PARES DE QUARKS TOP





CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Sun May 6 18:22:39 2012 CEST
Run/Event: 193541 / 314062344
Lumi section: 492

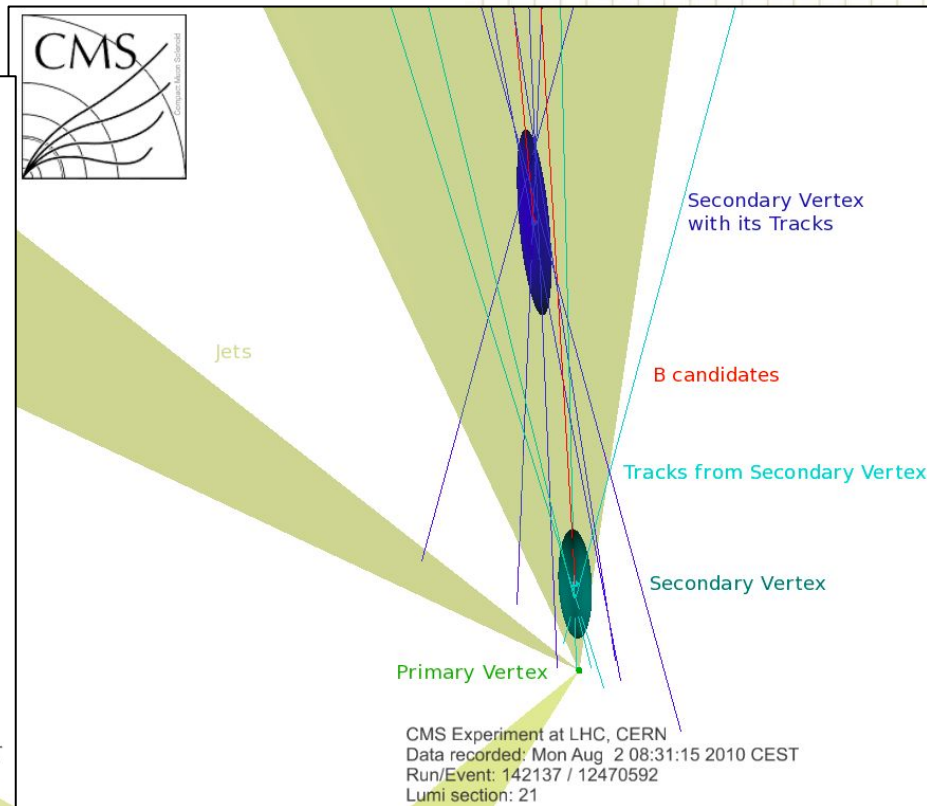
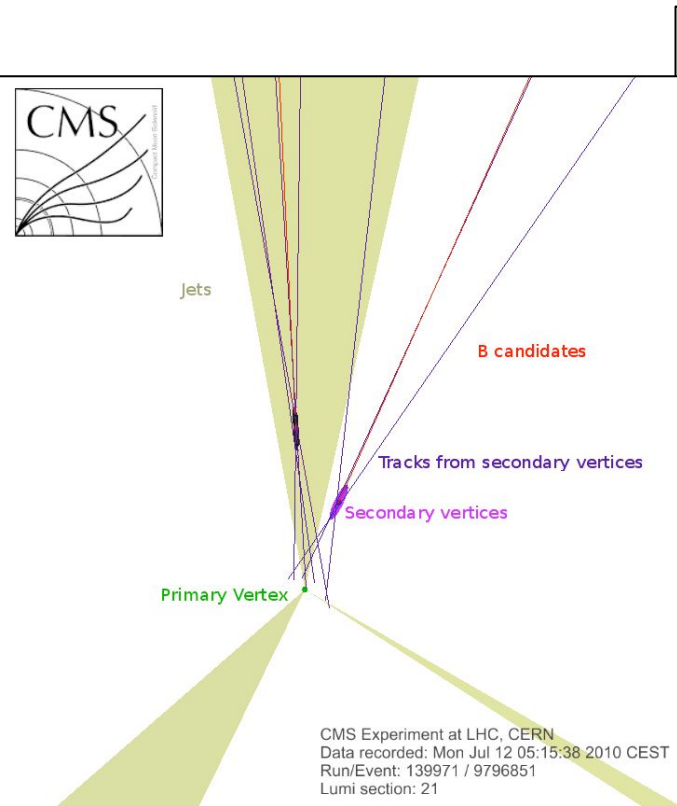
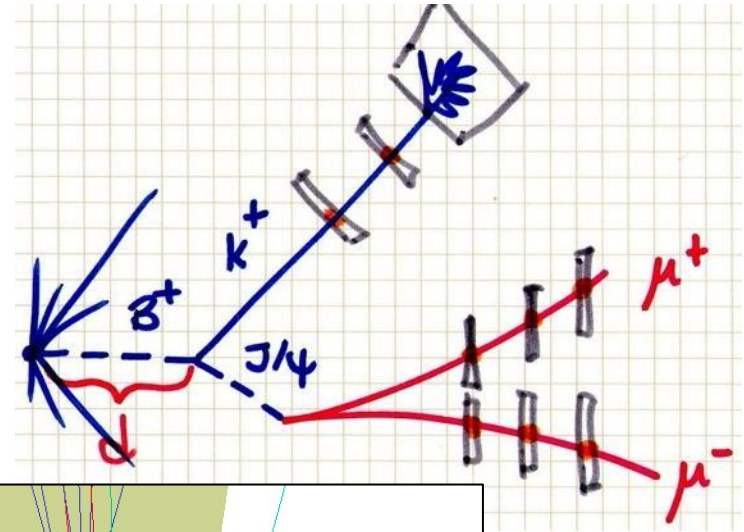


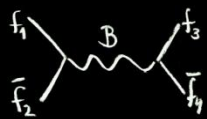


VÉRTICES SECUNDARIOS

La vida media del quark b es 10^{-12} s, es decir, $ct \approx 0.03$ cm

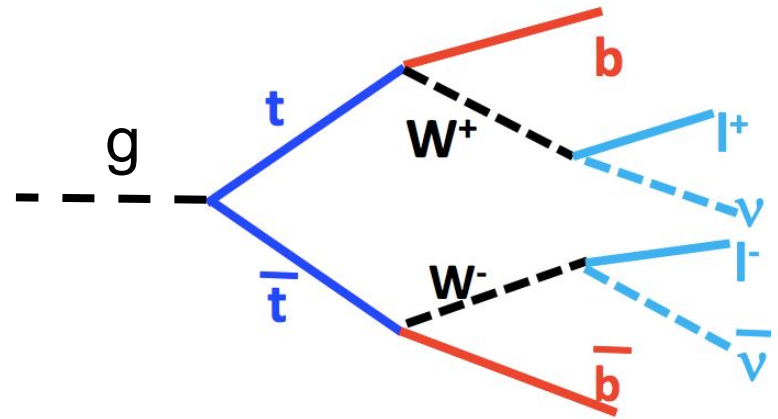
Esto permite identificar desintegraciones de hadrones B gracias al b-tagging



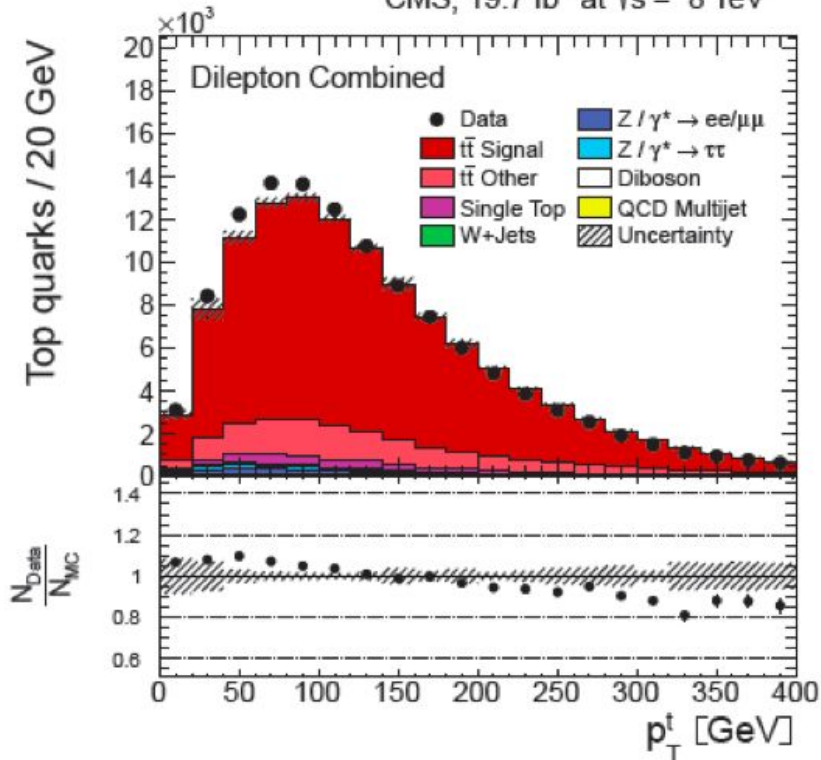


EVENTOS DILEPTÓNICOS

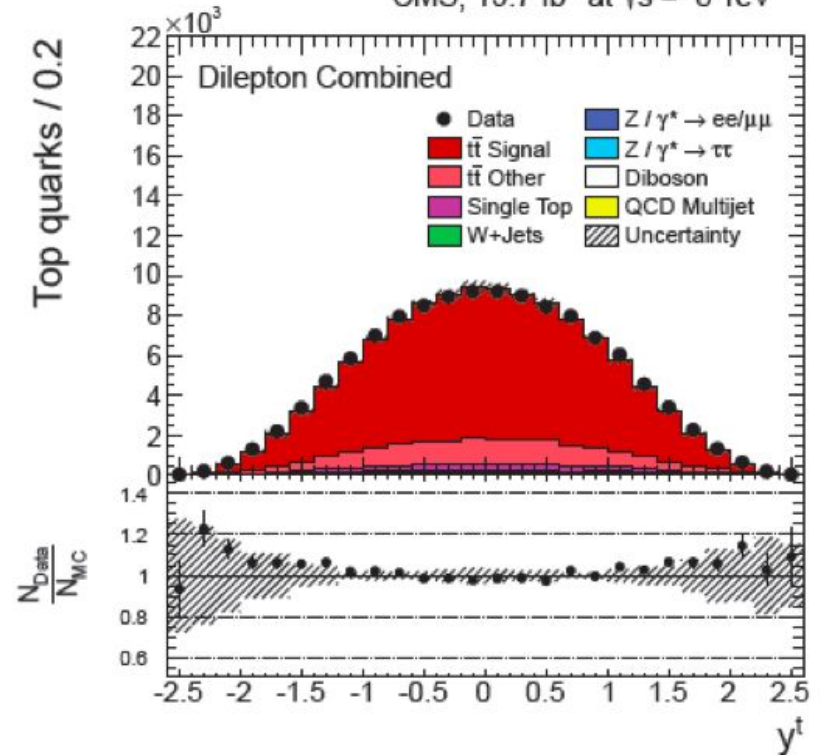
$$t\bar{t} \rightarrow \ell^+ \nu \ell^- \bar{\nu} b\bar{b}$$

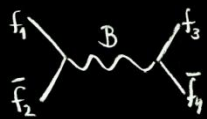


CMS, 19.7 fb⁻¹ at $\sqrt{s} = 8$ TeV



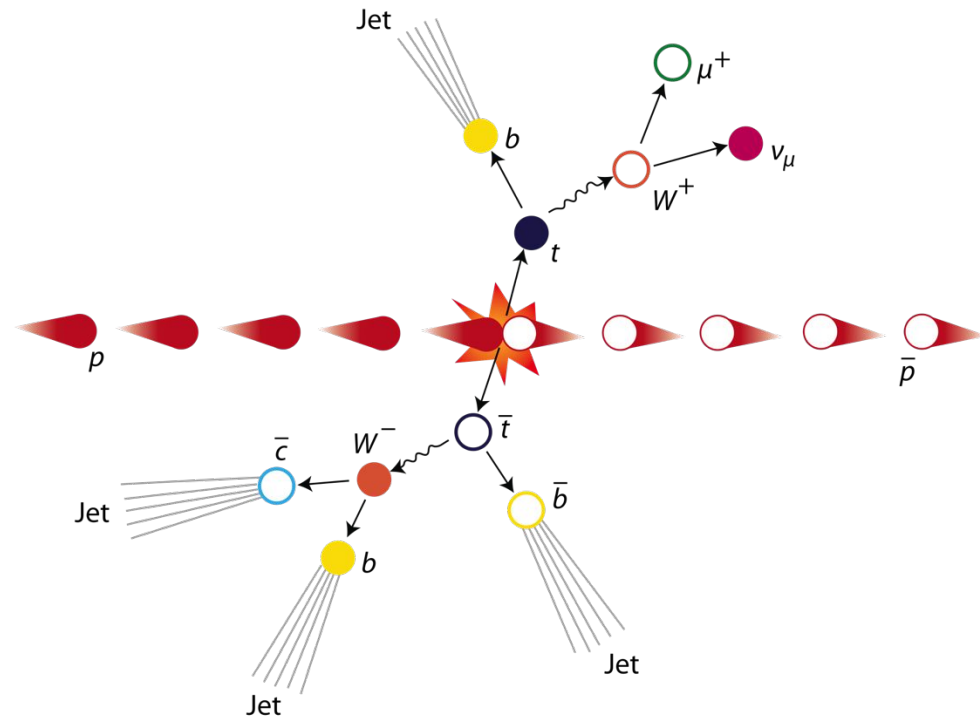
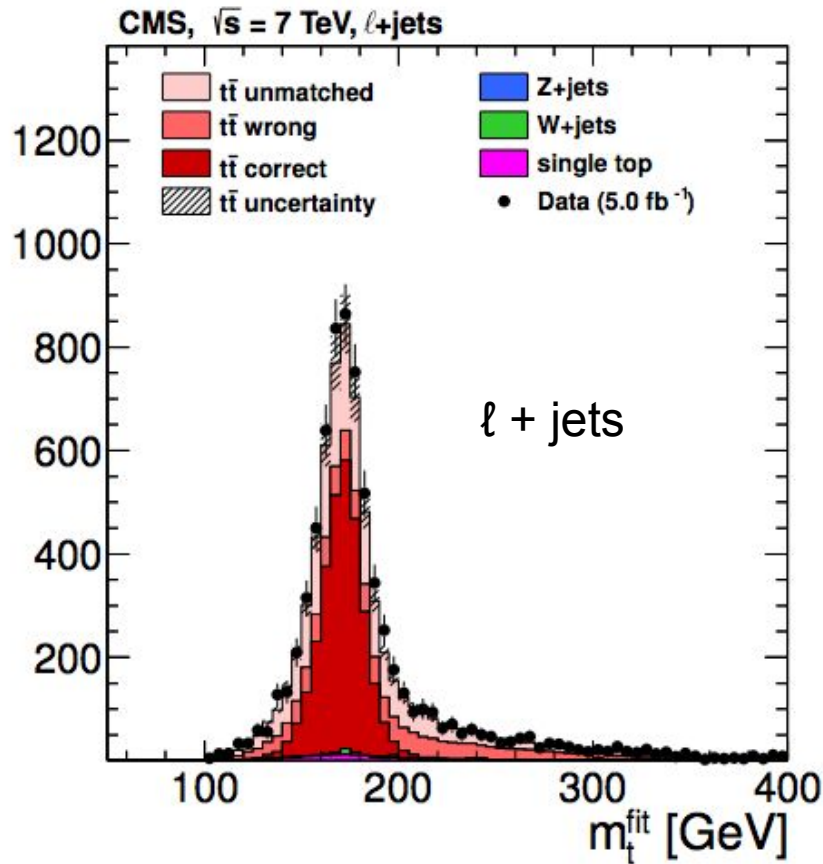
CMS, 19.7 fb⁻¹ at $\sqrt{s} = 8$ TeV



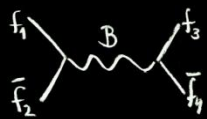


MASA DEL QUARK TOP

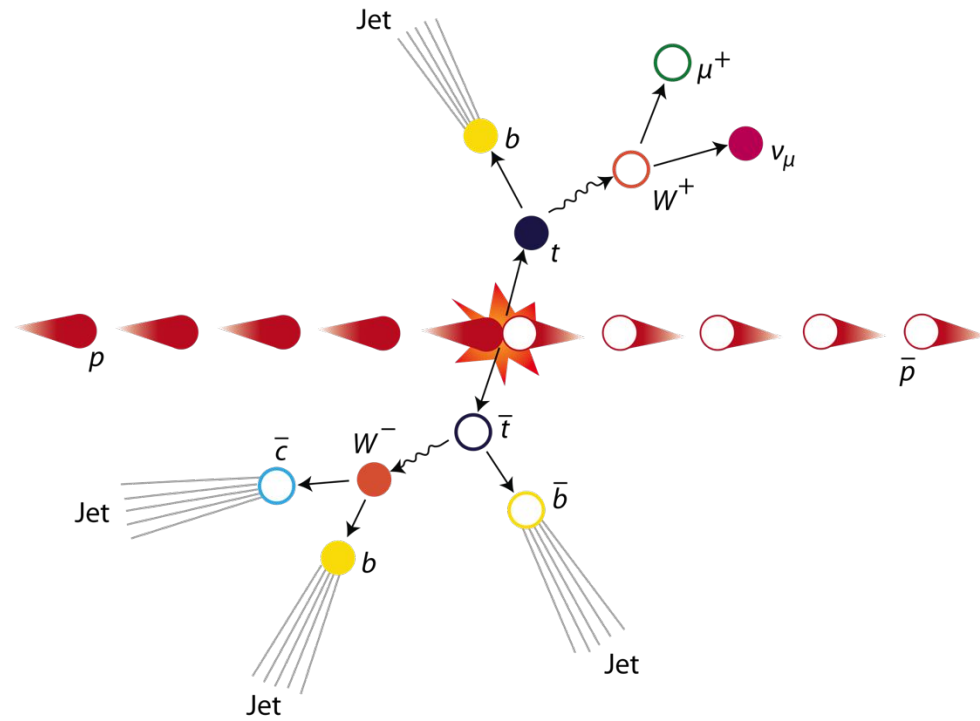
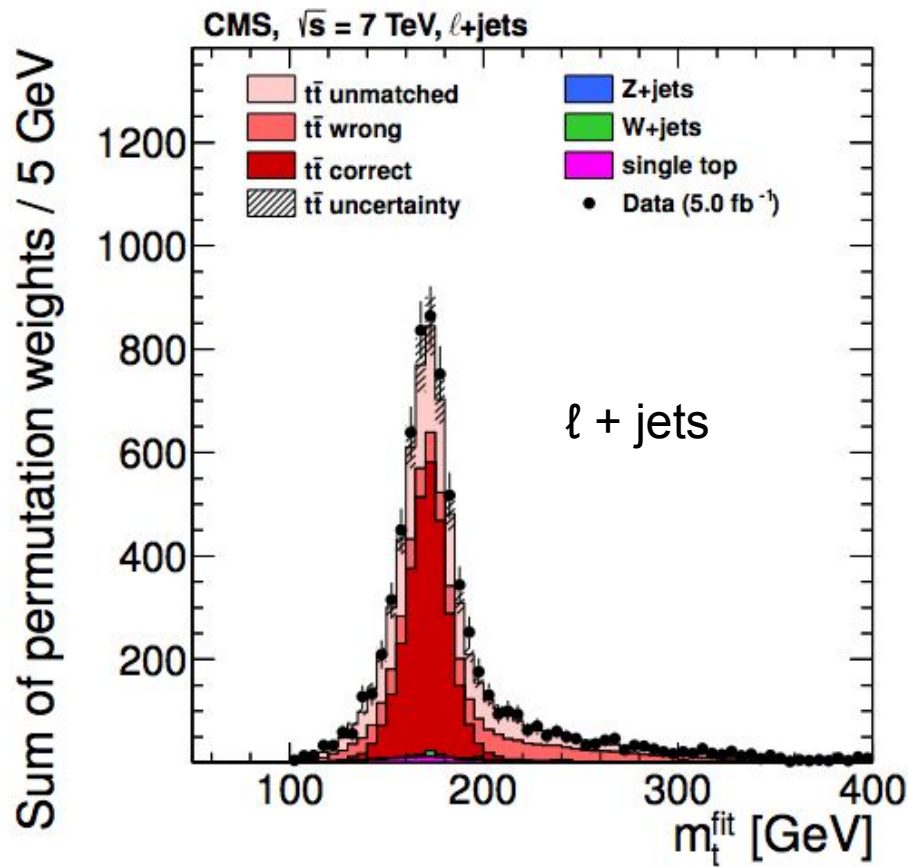
Sum of permutation weights / 5 GeV



Ajuste cinemático: momento de leptones y jets, E_T^{mis} , masa del W, neutrinos *colineales*...



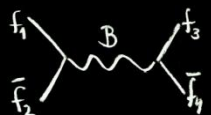
MASA DEL QUARK TOP



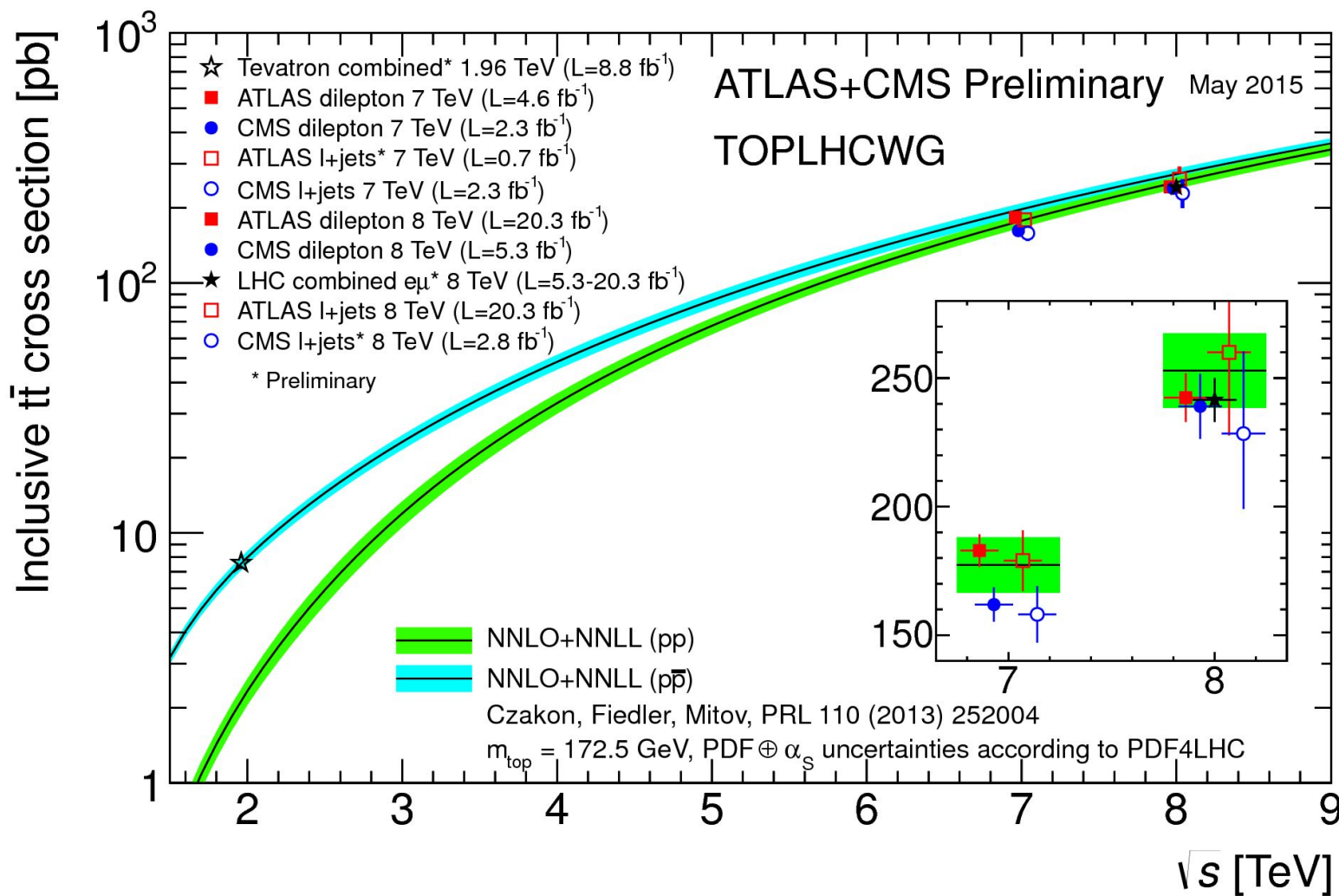
Medida con mucha precisión en Tevatron y LHC en todos los canales:

$$173.34 \pm 0.76 (0.27 \pm 0.24 \pm 0.67) \text{ GeV}/c^2$$

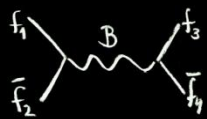
ii $m_{\text{top}} \approx 185 m_{\text{protón}} !!$



SECCIÓN EFICAZ TOTAL DE $t\bar{t}$



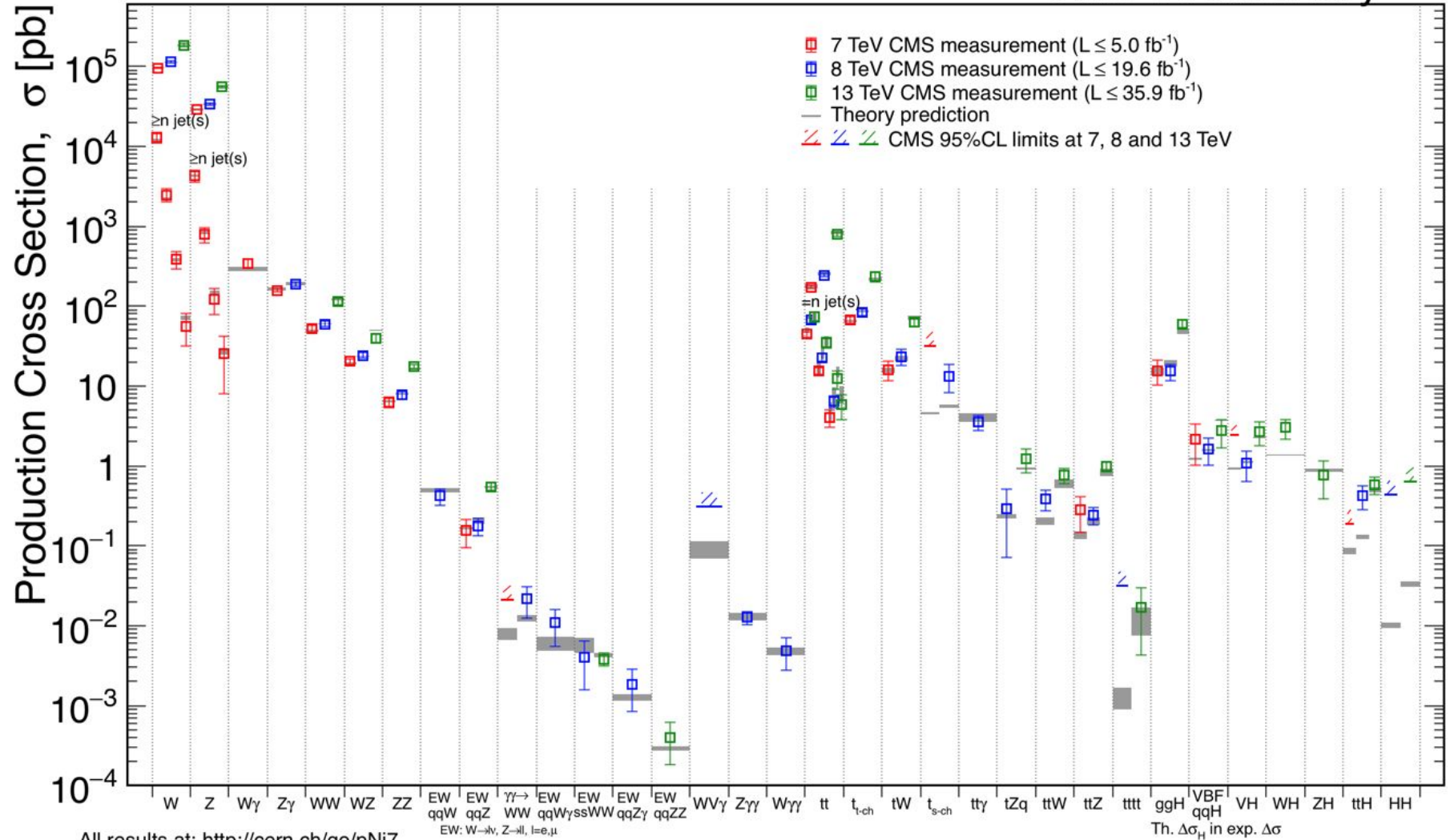
Medida con mucha precisión en todos los canales: muy buen acuerdo con las predicciones del Modelo Estándar.



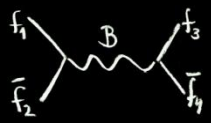
SECCIONES EFICACES EN CMS

May 2018

CMS Preliminary

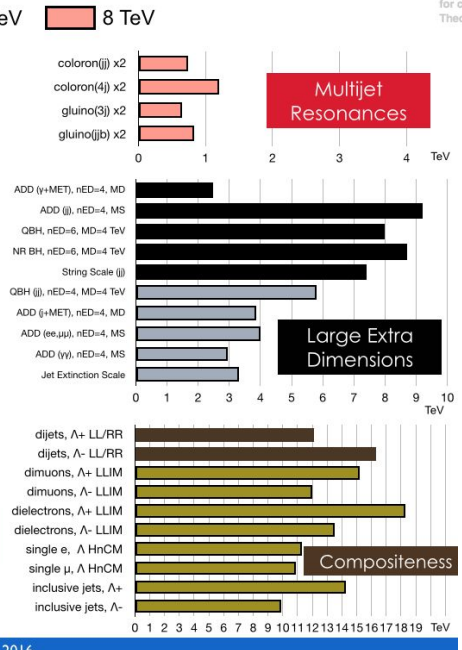
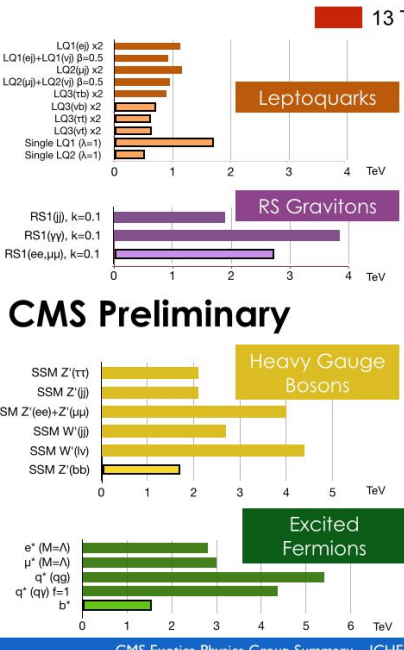


Estas medidas precisas son la llave para realizar descubrimientos de nueva física.

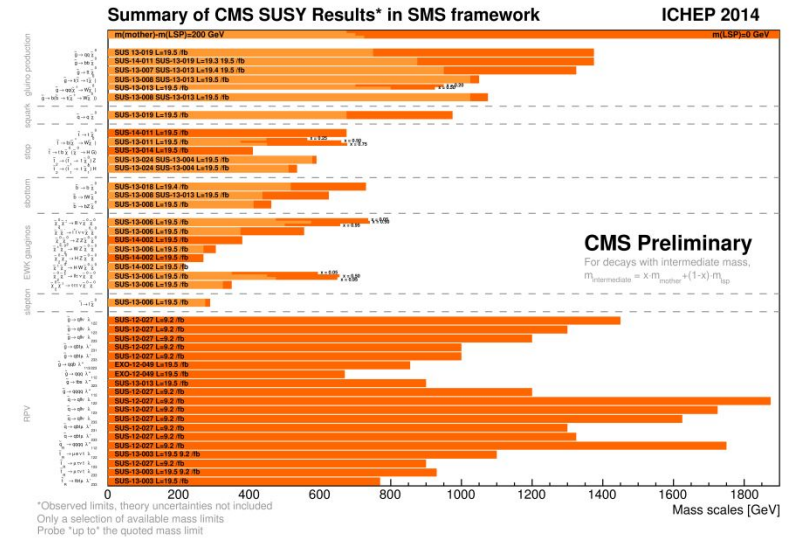
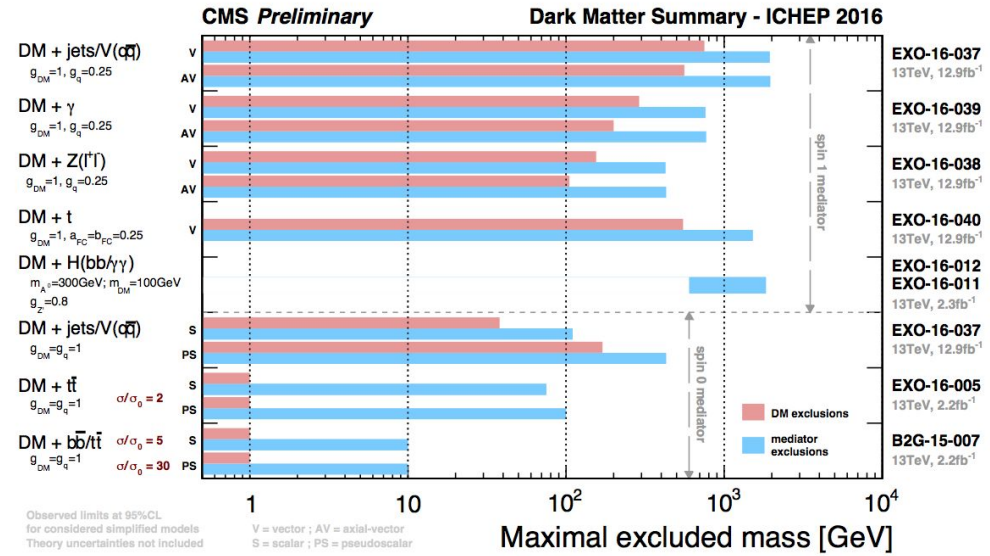


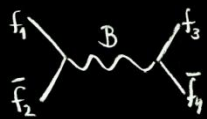
BÚSQUEDAS EN CMS

Por el momento no se han encontrado nuevas partículas más allá del ME



CMS Exotica Physics Group Summary – ICHP 2016





iii SEGUIMOS !!!

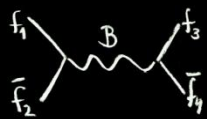
Los experimentos de LHC han desarrollado un ambicioso programa de física durante los **Runs I & II**, tanto en el Modelo Estándar como descubriendo el **bosón de Higgs**. Estas medidas incluyen física de precisión **electrodébil** y de los **quarks top** y **bottom**.

Hasta ahora no hay señales de nueva física... Seguiremos buscando (**Run III... HL-LHC...**)

Con el **Run III** comienza una nueva era de medidas de precisión en el sector de Higgs, investigación de nuevas firmas y **búsqueda de nueva física** más allá del Modelo Estándar.

<http://cms-results.web.cern.ch/cms-results/public-results/publications/>

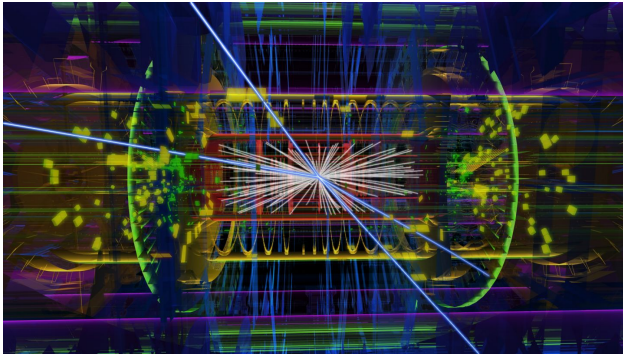
BACKUP



¿QUÉ ES UN ACELERADOR?

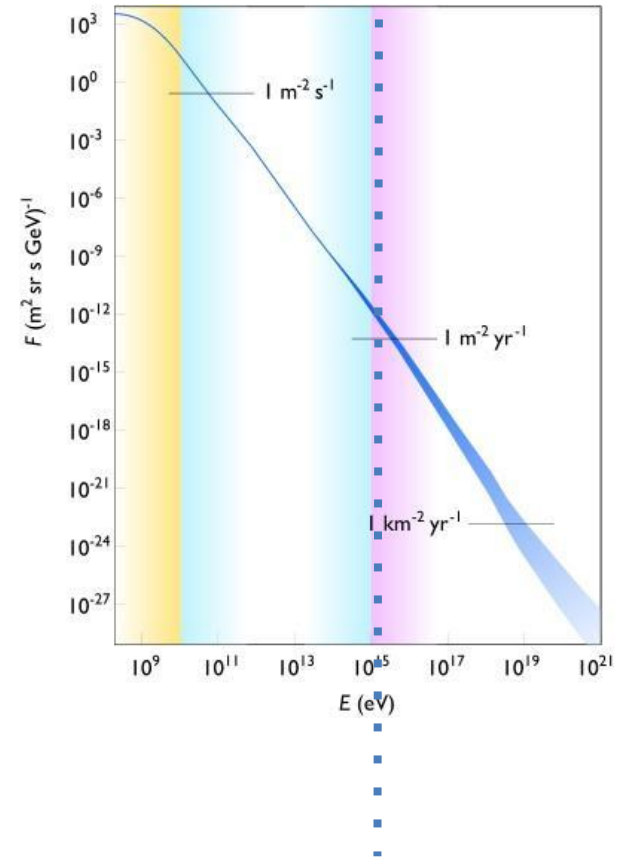
- Los aceleradores son una de las principales herramientas con las que contamos para experimentar en física de partículas.

Aceleradores: máquinas encargadas de *controlar y acelerar haces de partículas* por medio de campos E y B, para usar estas partículas como proyectiles.



La energía cinética de las partículas se utiliza para *explorar regímenes de alta energía*.

Energía máxima LHC



ALGUNOS ACELERADORES

2010-...

Iones pesados



SPS: 1981-1991
LEP: 1989-2000
LHC: 2008 - ...

Hadrónico (LHC/SPS)
Iones pesados (LHC)
Leptónico (LEP)



1989-1998

Leptónico



RHIC – Brookhaven (Nueva York, EEUU)

HERA – DESY (Hamburgo, Alemania)

SPS / LEP / LHC - CERN (Ginebra, Suiza)

Tevatron – Fermilab (Chicago, EEUU)

SLC - SLAC (California, EEUU)

(SUPER)/KEKB - KEK (Tsukuba, Japón)



1992-2007

Mixto (e-p)

1983-2011

Hadrónico

1998-2010-...

Leptónico
(Factoría Bs)



Ginebra

LHCb

CERN

ATLAS

CMS

ALICE

El Large Hadron Collider (LHC) es en la actualidad el acelerador de partículas de más alta energía.

Sincrotrón – Circular - Colisionador hadrónico (p-p) & iones (Pb - Pb)

Cavidades aceleradoras de RF & Imanes **SUPERCONDUCTORES**

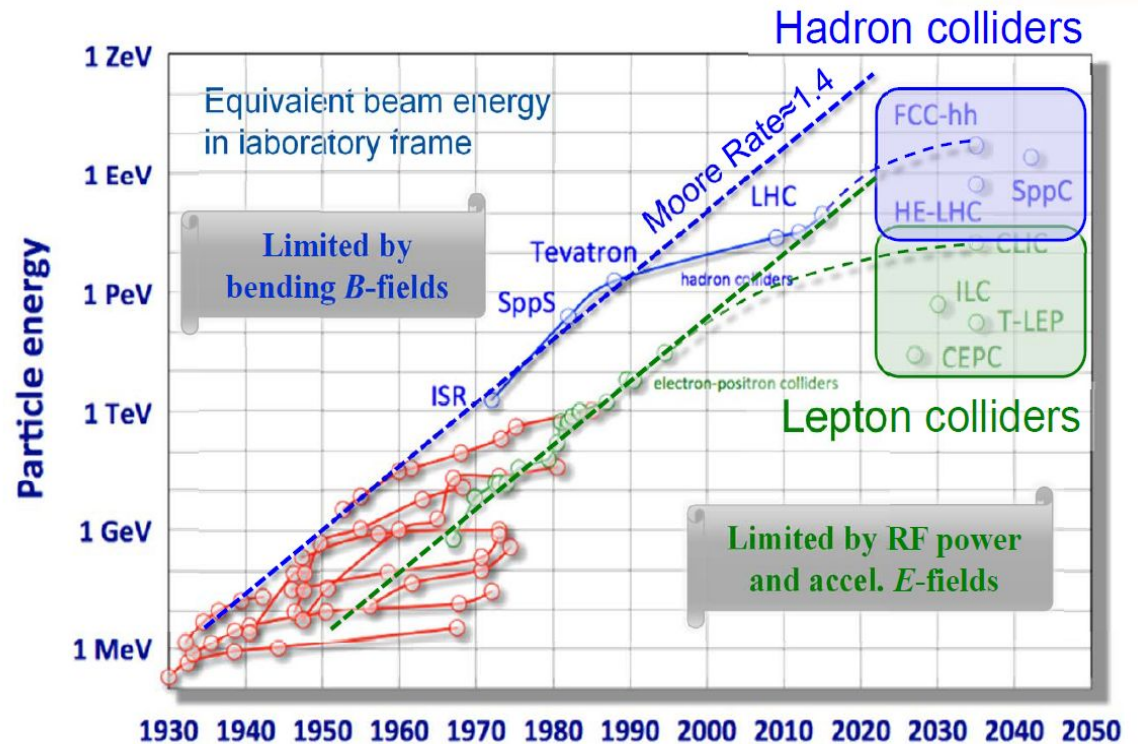
Instalado a 100m de profundidad en el túnel de 27km del antiguo acelerador LEP en el CERN

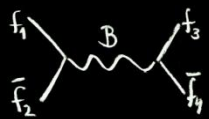
(LEP = Colisionador Large Electron Positron)

4 experimentos principales (puntos de cruce de haces)

LIVINGSTON PLOT

- ✗ A partir de los años 50, los primeros aceleradores permitieron “crear” y estudiar partículas en el laboratorio (hasta entonces, cósmicos).
- ✗ Impresionante avance en física experimental de partículas.
- ✗ Nueva pléyade de partículas (quarks, bosones EW, etc.).
 - La caracterización de las interacciones fundamentales ayudó a establecer el Modelo Estándar hasta la escala de 10^2 GeV.
 - Del mismo modo, se evidenciaron las debilidades del Modelo (violación de CP, oscilaciones y masas de neutrinos, ruptura de simetría...).





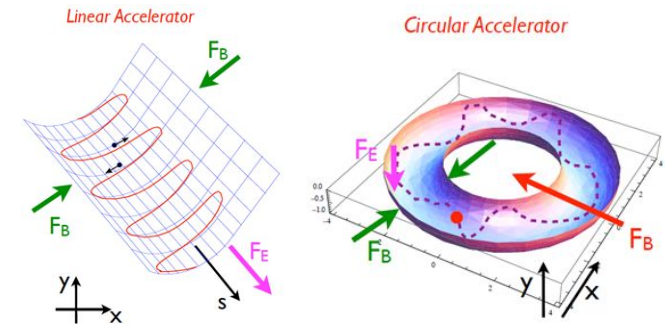
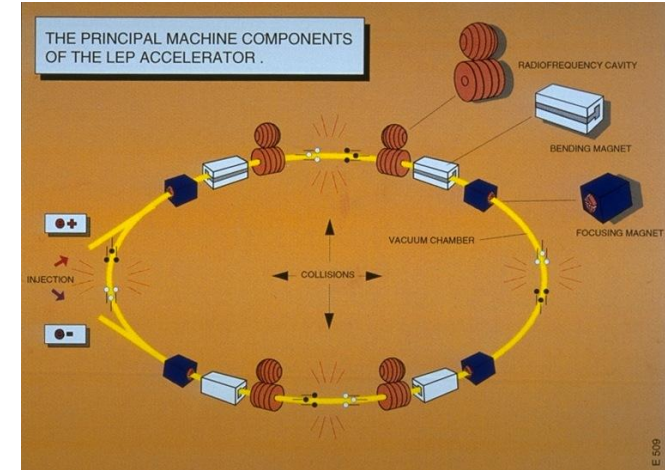
Las partículas cargadas son aceleradas, guiadas and confinadas por medio de campos electromagnéticos:

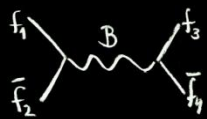
$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$$

Electric force
Magnetic force

Un **acelerador** está formado por una secuencia de:

- **Cavidades aceleradoras** (Campos eléctricos)
- **Imanes para guiar, focalizar y controlar los haces:**
 - **Curvatura:** Dipolos
 - **Focalización:** Cuadrupolos
 - **Aberración cromática:** Sextupolos

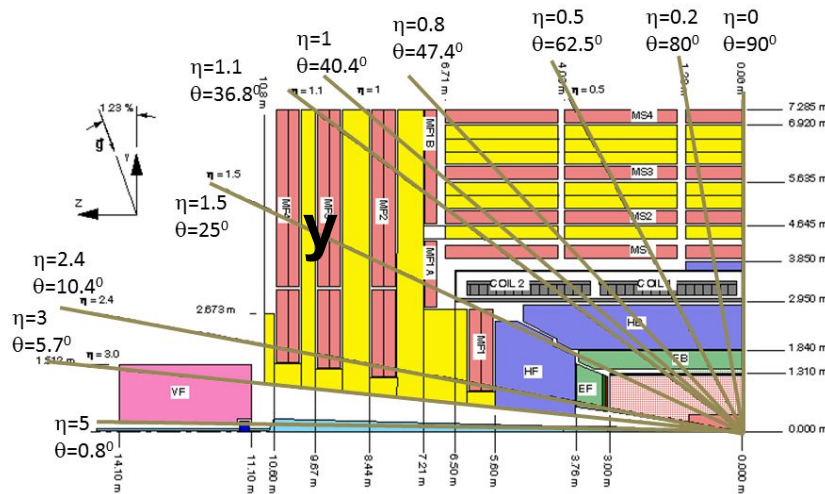
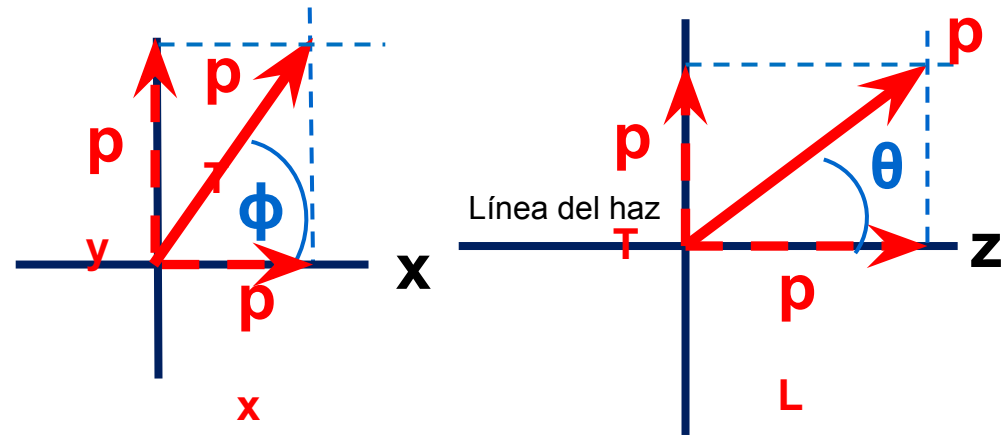




VARIABLES CINEMÁTICAS

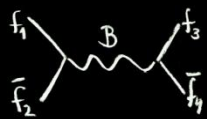
Además, para caracterizar cinemáticamente cada uno de los objetos resultantes, se definen:

- Ángulo azimutal ϕ
- Ángulo polar θ
- Pseudorapidez $\eta = -\ln[\tan(\theta/2)]$



Fundamental para cada partícula, determinar

- Energía/momento E/p (deposición en calorímetros / curvatura)
- Proyecciones del momento: p_L (momento longitudinal \parallel eje z) y p_T (momento transverso)

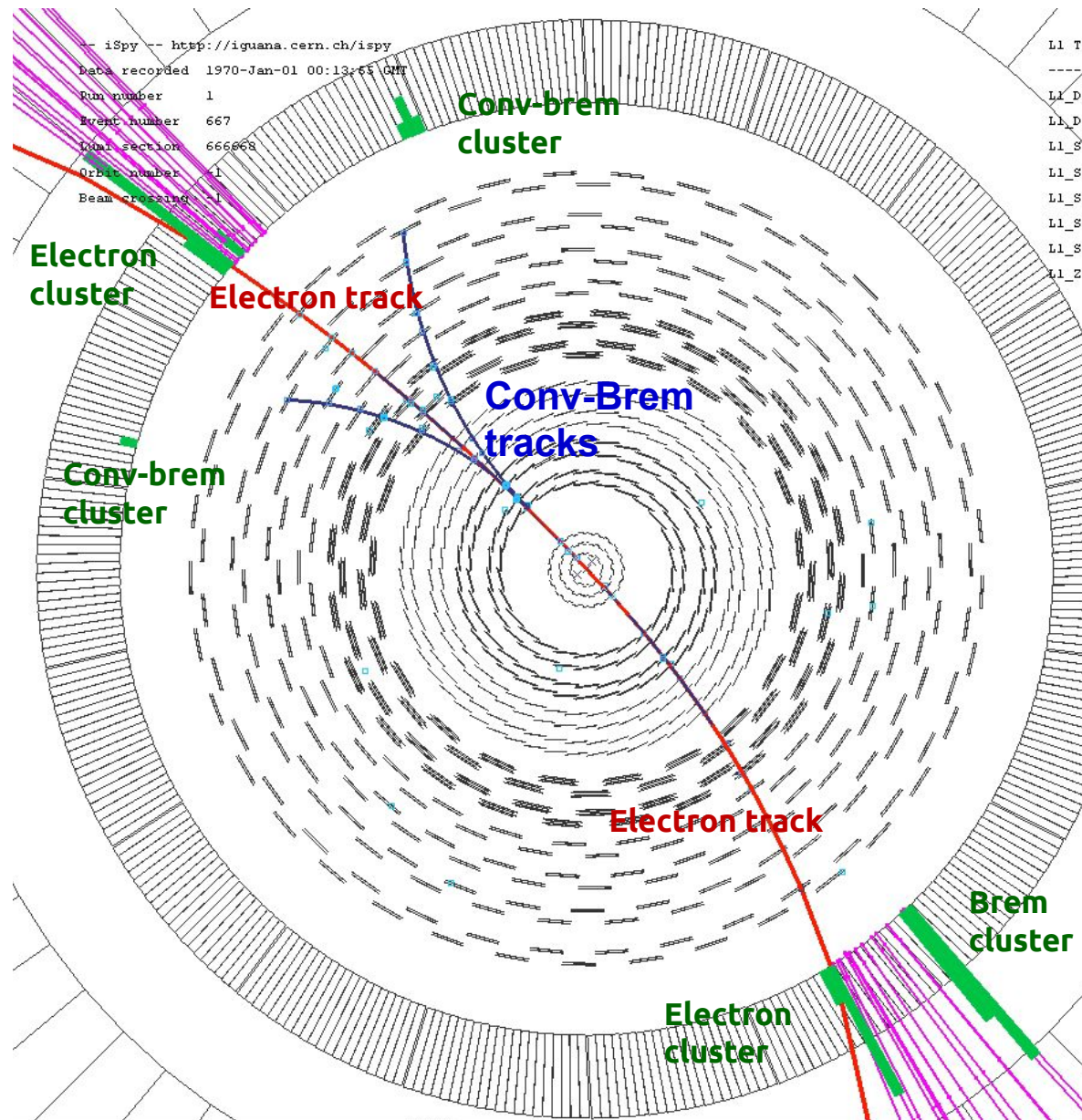


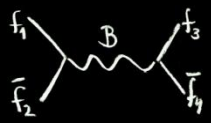
ALGORITMOS DE RECONSTRUCCIÓN

Los experimentos cuentan con sofisticados algoritmos para reconstruir los **objetos originales** presentes en el evento a partir de múltiples medidas individuales

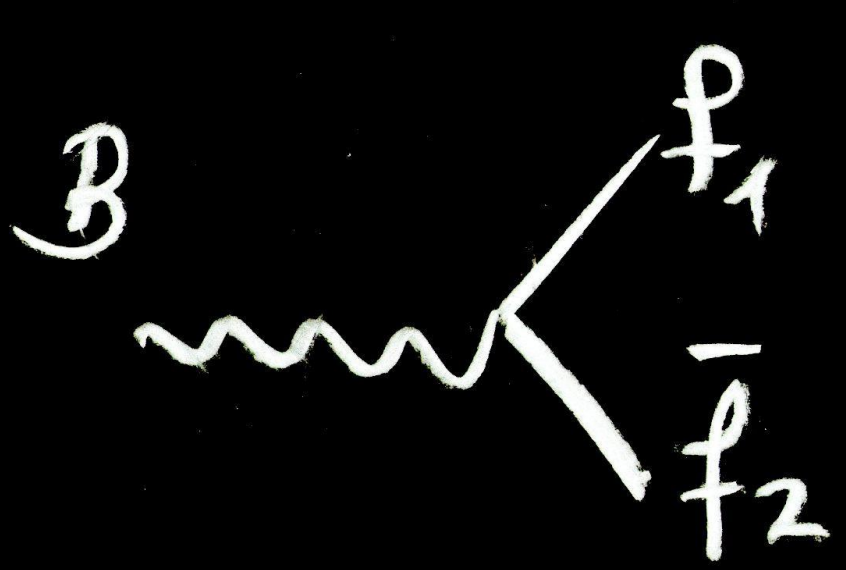
- Reconocimiento de patrones
- Ajuste de trazas
- Clusterización
- Asociación de información procedente de distintos detectores
- Discernir ambigüedades
- Estimación de cantidades físicas (masa, momento...)

Una vez reconstruidos los elementos individuales, se intenta "reconstruir" o interpretar el proceso completo original asociando entre sí los distintos elementos





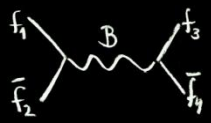
MASA INVARIANTE DE UNA PARTÍCULA INESTABLE



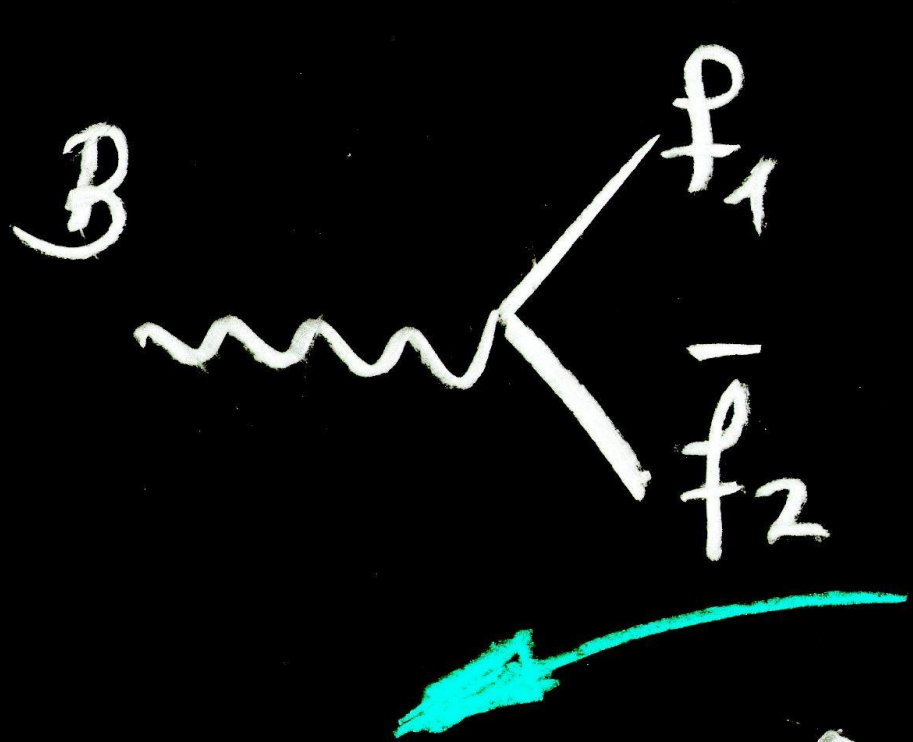
$$c = 1$$

$$E(B) = E(f_1, f_2)$$

$$E^2 = m^2 + p^2$$



MASA INVARIANTE DE UNA PARTÍCULA INESTABLE



$c = 1$

$E(B) \equiv E(f_1, f_2)$

$E^2 = m^2 + p^2$

$m_B^2 = (E_1 + E_2)^2 - |\vec{p}_1 + \vec{p}_2|^2$

Mide E y $p \Rightarrow$ calcula m_B