



**Método para determinar la masa, sección eficaz
y anchura del bosón de Higgs del Modelo
Estándar en el canal de desintegración**
 $H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4\mu$
en el experimento CMS de LHC

María Aldaya

CIEMAT - Madrid

Diploma de Estudios Avanzados, U. Granada, 07-07-2006

- En el Modelo Estándar (SM), las partículas adquieren masa por la rotura espontánea de la simetría electrodébil (EWSB)
- Mecanismo de Higgs → partícula escalar: **bosón de Higgs, H**
- Tras el descubrimiento del bosón de Higgs en el colisionador LHC (si existe), será crucial medir con precisión sus propiedades: masa, sección eficaz de producción, anchura ...
- En LHC (2007), el proceso $H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4\mu$ es uno de los canales más limpios para medir sus parámetros en un amplio rango de masas

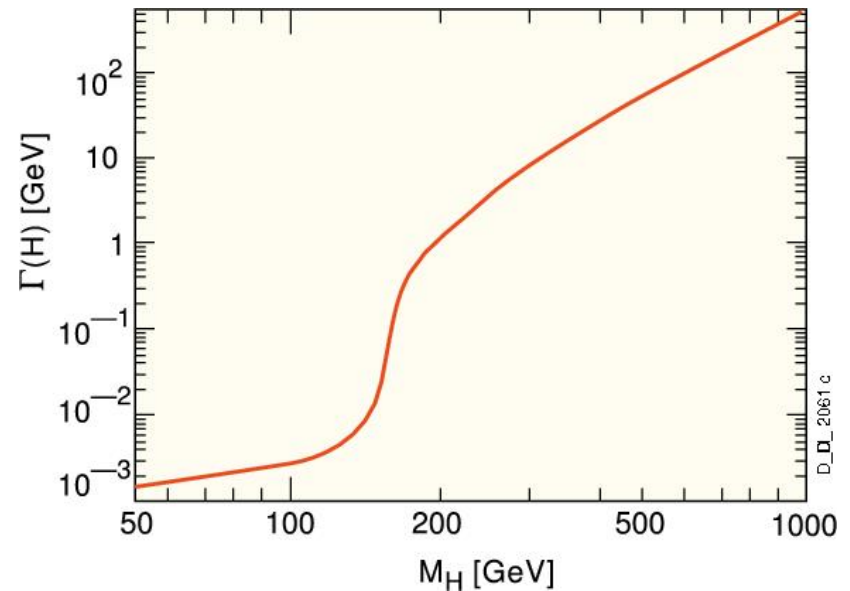
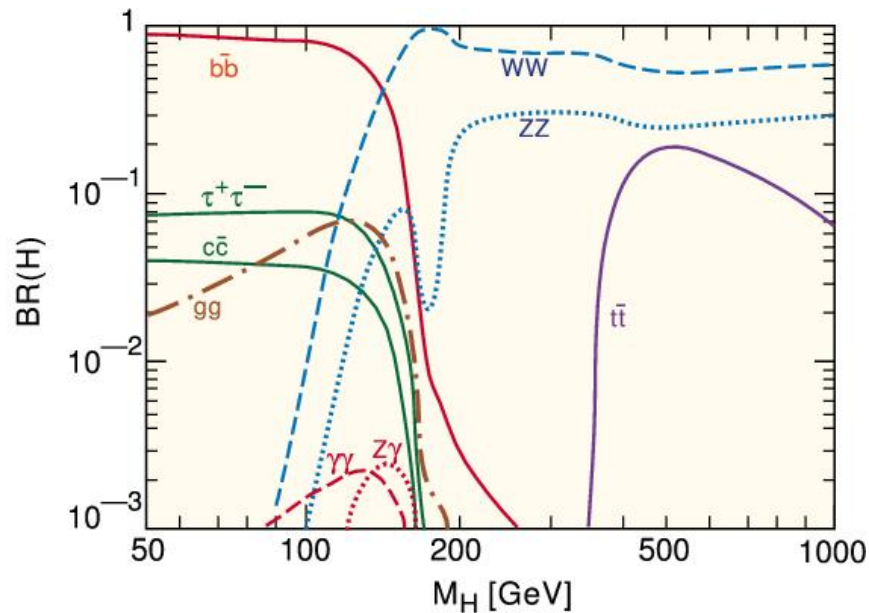
En este trabajo presento un método para determinar m_H , σ_H y Γ_H en el experimento CMS para $\mathcal{L} = 30 \text{ fb}^{-1}$, usando el canal $H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4\mu$:

Ajuste a la distribución de masa invariante de cuatro muones, obtenida a partir de sucesos simulados de señal y contaminación, incluyendo:

- Resolución finita del detector
- Radiación de bremsstrahlung en el estado final (QED)
- Contribución de la contaminación

Los resultados de este trabajo han sido incluidos en el *CMS Physics Technical Design Report vol.II (2006)*

- El mecanismo de Higgs predice la existencia de un escalar: el bosón de Higgs, H
- La dependencia de la anchura, Γ_H , y de las fracciones de desintegración, BR(H), con m_H es característica del H del SM



- Masa no predicha por la teoría: único parámetro libre en el mecanismo de Higgs
- Existen límites a la masa de H:
 - $m_H > 114.4 \text{ GeV}/c^2$ (LEP, búsqueda directa)
 - $m_H \lesssim 225 \text{ GeV}/c^2$ (95% CL) (medidas de precisión de LEP, SLD, Tevatron, ...)

- **Parámetros:**

Colisionador p-p

$$L = 2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$$

$$\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}$$

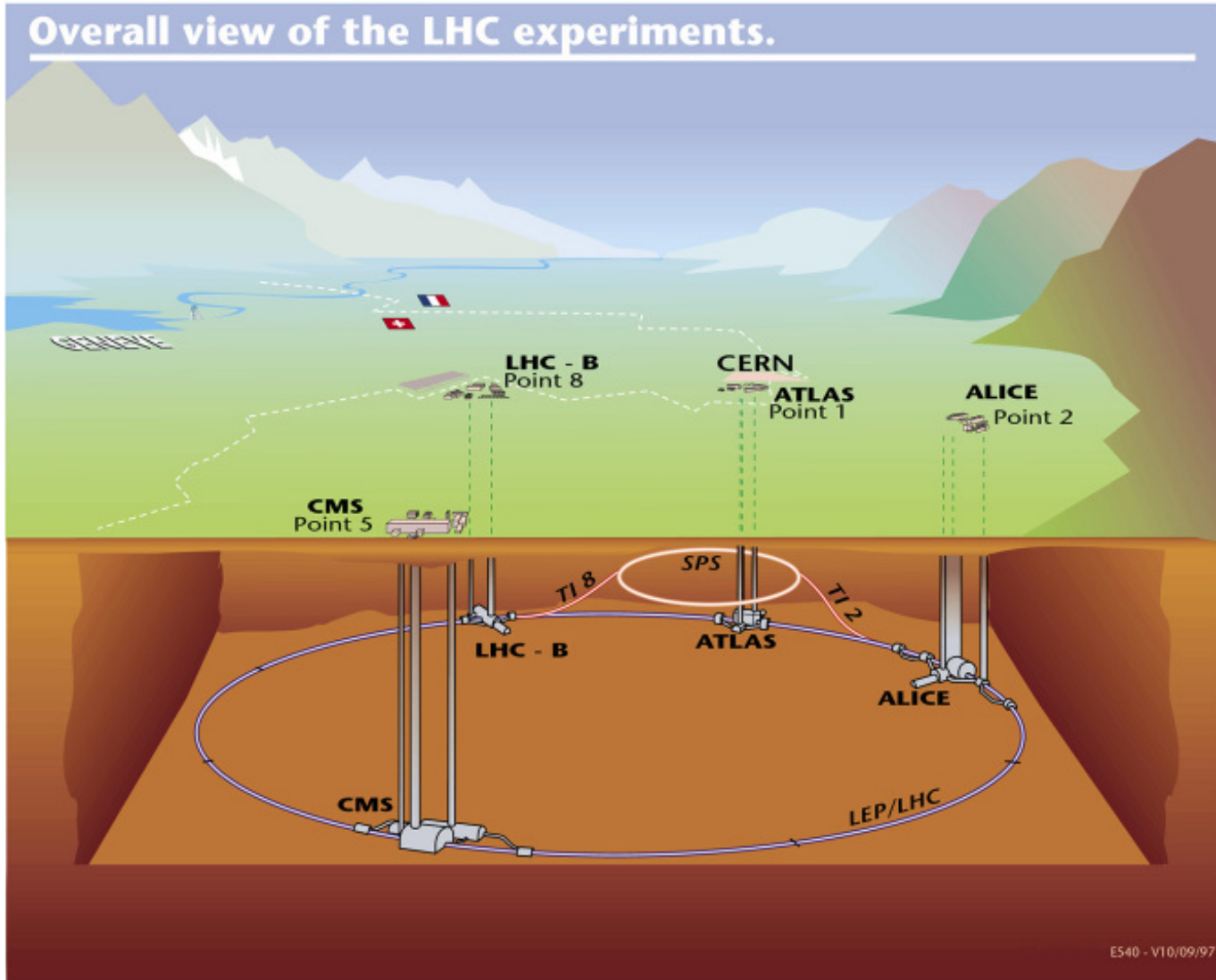
~2800 paquetes de 10^{11} protones, separados entre sí 25 ns

~ 20 interacc. p-p por cruce de haces

10^9 interacc. p-p por segundo

- **Detectores:**

CMS y **ATLAS** (de propósito general),
LHCb (física de b's),
ALICE (iones pesados)



A las energías de LHC:

$\sigma_{\text{total}} \sim \text{mb}$
 $\sigma_{\text{señal}} \sim \text{fb}$

$\sigma_{\text{señal}} \sim 12$ órdenes de magnitud menor que la contaminación !!!!

• **selección on-line (trigger):**

40 MHz \rightarrow 150 Hz

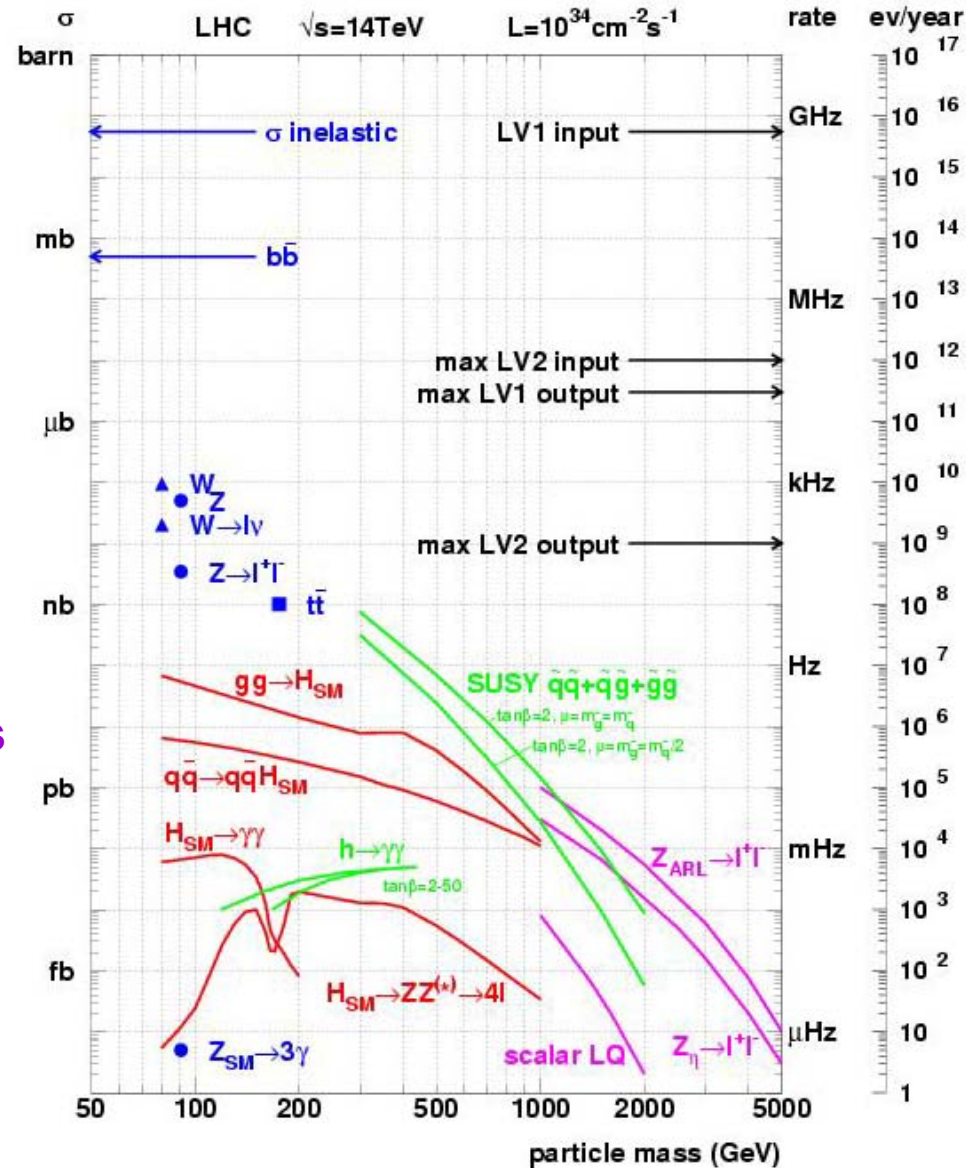
• **selección off-line:** selección de la señal, reduciendo la contaminación

En 1 año de toma de datos (10^7 s):

1.5 x 10⁹ sucesos \rightarrow O(10-100) sucesos

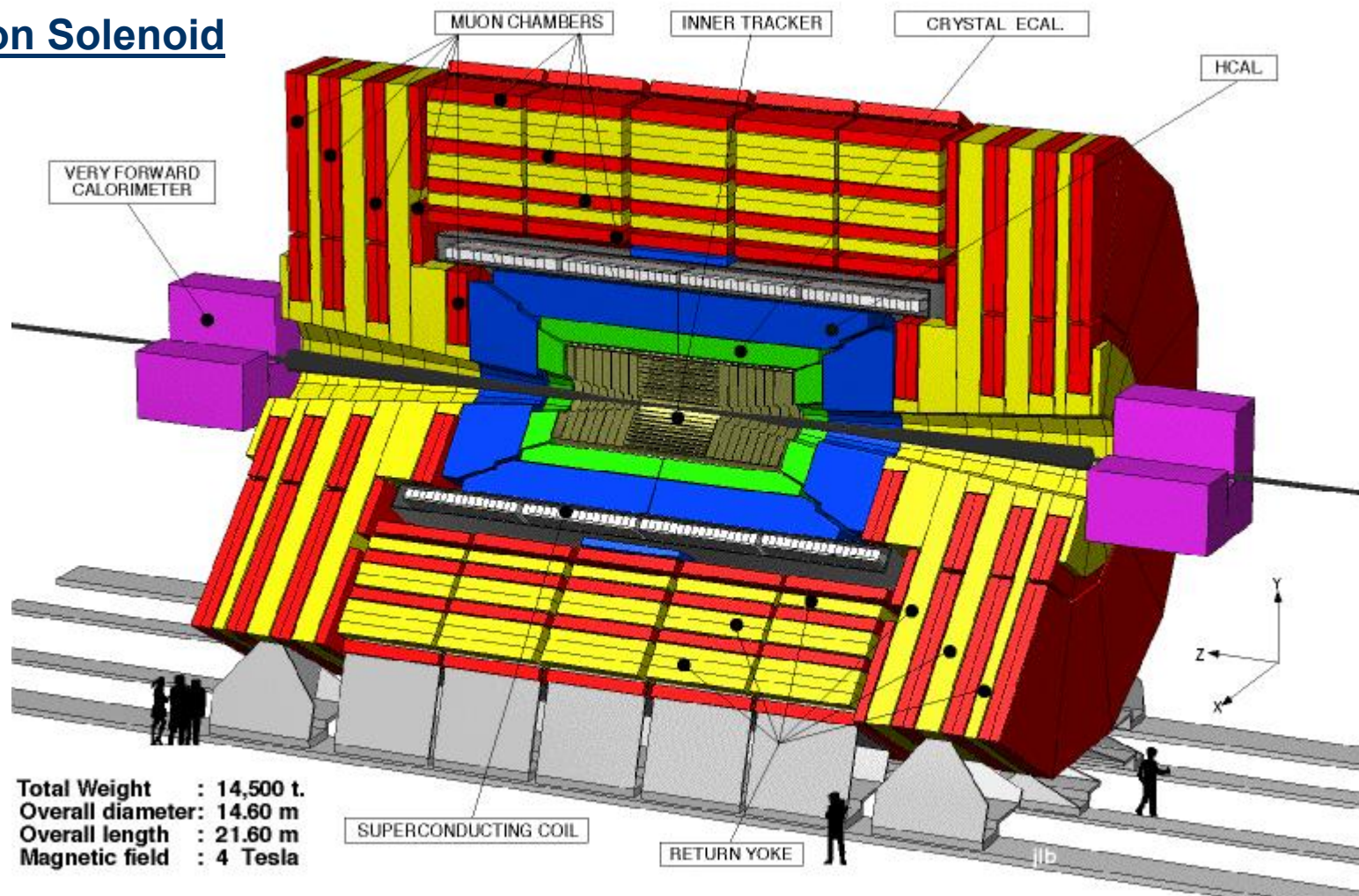
• 1 suceso \sim 1.5 MB \rightarrow 2 x 10⁶ GB / año
 (varias decenas de miles de PCs actuales necesarios para el procesamiento)

• **Reto tecnológico sin precedentes** que ha llevado a la creación de la infraestructura **Grid**



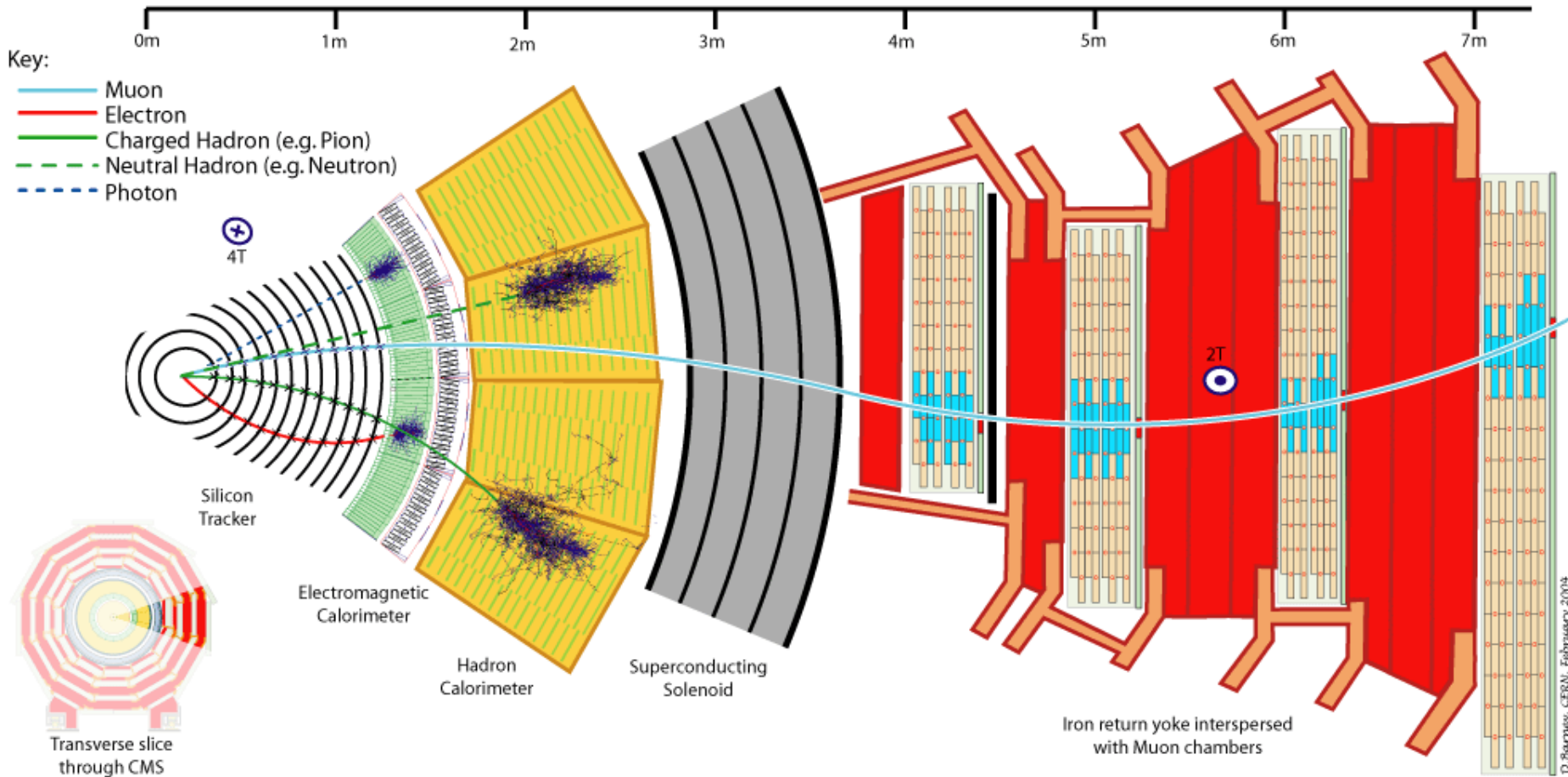
Compact Muon Solenoid

- Compacto
- alto **B** (4 T)
- alta resolución:
 p_T de leptones
energía de γ 's
energía de jets
- Sistema de muones: μ ID y trigger
- CIEMAT responsable de la construcción y de la electrónica de 70 cámaras de muones (>30% total)



Amplia cobertura angular: $|\eta| < 2.4, 0 < \varphi < 2\pi$

pseudorapidez $\eta = -\ln\left(\tan\frac{\theta}{2}\right)$



Fotones: ECAL + no tracker

Electrones: ECAL + tracker

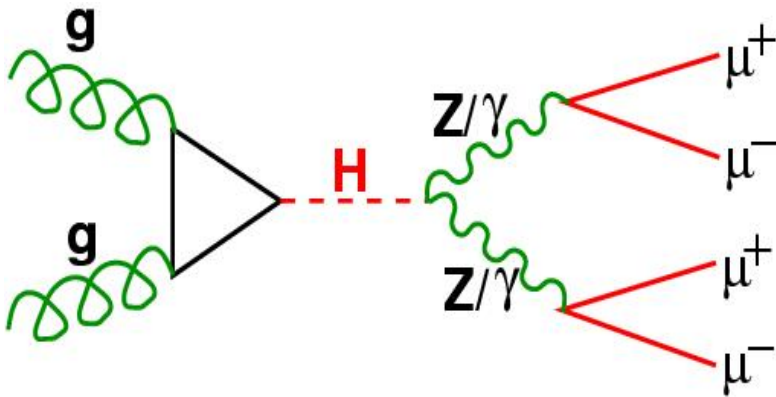
Muones: cámaras de muones + tracker

Hadrones cargados: HCAL + tracker

Hadrones neutros: HCAL + no tracker

- $H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4\mu$: canal muy limpio, bueno para descubrimiento: resonante en $m_{4\mu} \sim m_H$ (señal muy característica, a pesar de que $BR(H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4\mu) \sim 10^{-5}$)
- **'Golden channel' en un amplio rango de m_H : $< 160 \text{ GeV}/c^2$ y $180 - 500 \text{ GeV}/c^2$**

Topología:



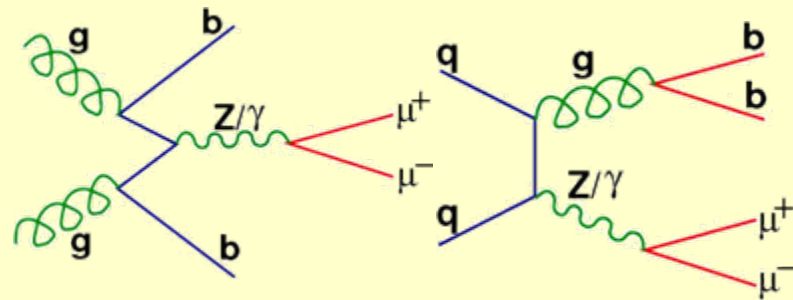
- 4 muones (dos positivos y dos negativos):
 - Aislados
 - Alto p_T
 - Apuntando al vértice primario
- Masa invariante de los pares de muones compatible con m_Z
- Masa invariante de los 4 muones es la del bosón de Higgs (dentro de la resolución del detector)

Signatura similar a la de la señal: 4 muones en el estado final

• $pp \rightarrow (Z^{(*)}/\gamma^{*})bb$:

- Producción a partir de gluones o quarks en el estado inicial
- 1 par $\mu^+\mu^-$ dentro de b-jets, p_T relativamente bajo
- Generado a LO y normalizado a NLO:

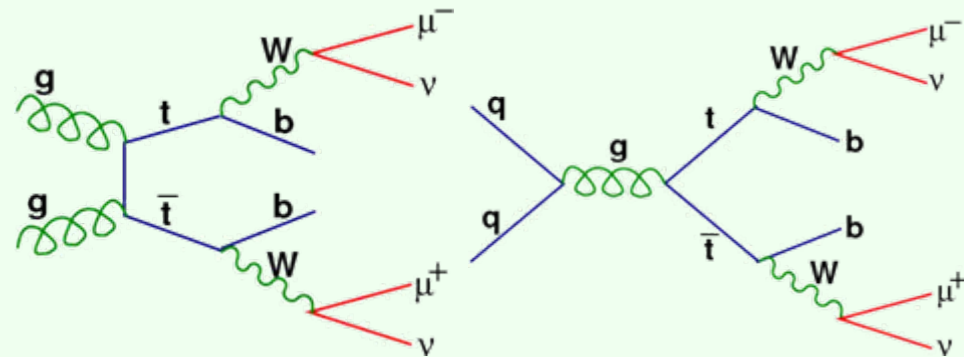
$$\sigma_{\text{NLO}} = 278.4 \text{ pb}$$



• $pp \rightarrow tt$:

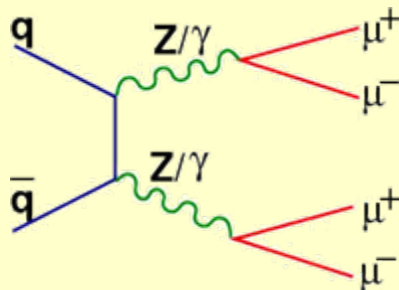
- Producción mediante fusión de gluones y aniquilación quark-antiquark.
- 1 par $\mu^+\mu^-$ dentro de b-jets, p_T relativamente bajo; ningún Z en el suceso
- Generado a LO y normalizado a NLO:

$$\sigma_{\text{NLO}} = 840 \text{ pb}$$



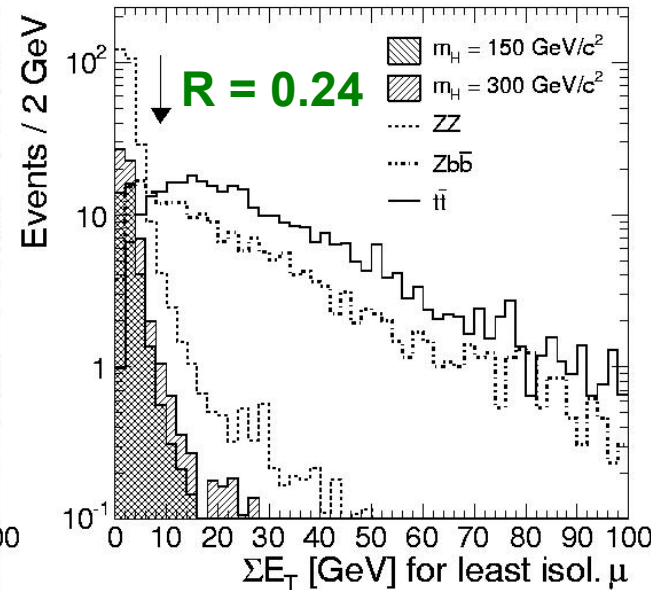
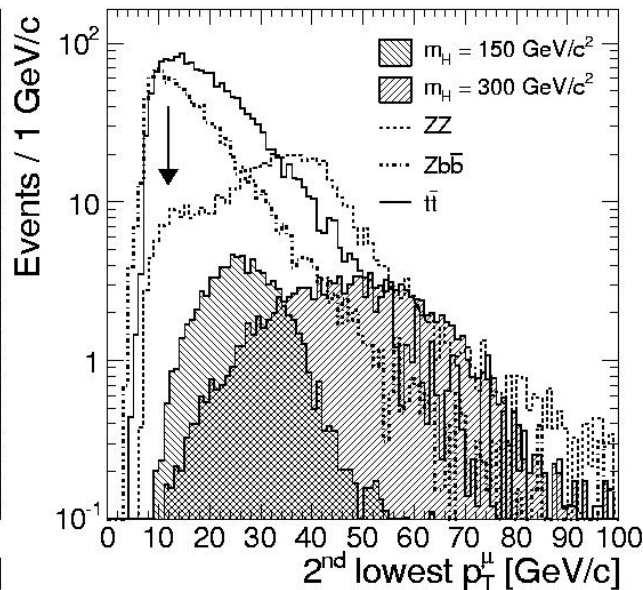
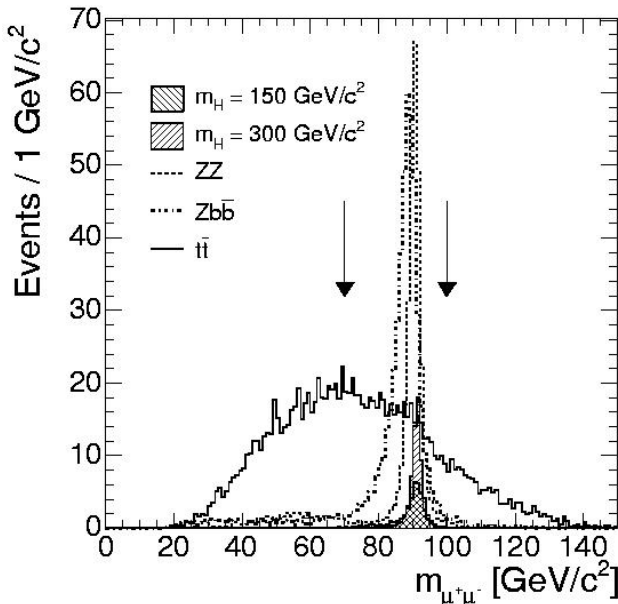
• $pp \rightarrow (Z^{(*)}/\gamma^{*}) (Z^{(*)}/\gamma^{*})$:

- Generado (LO) sólo a partir de aniquilación quark-antiquark (gg no incluido en el generador)
- Topología similar a la de la señal, pero no resonante
- Normalizado a NLO: $\sigma_{\text{NLO}} = 152.6 \text{ pb}$



Sucesos con 2 pares $\mu^+\mu^-$ reconstruidos dentro del detector ($|\eta| < 2.5$ y $p_T > 3$ GeV/c):

- **Masa del par de muones más cercano a m_Z :** $70 \text{ GeV}/c^2 < m_{\mu^+\mu^-} < 100 \text{ GeV}/c^2$
- $p_{T1} > 15$ GeV/c, 15 GeV/c, 12 GeV/c, 8 GeV/c (del muón de mayor p_T al de menor)
- **Aislamiento:** cantidad de energía (momento) en el calorímetro (tracker) en un cono $R^2 \equiv \Delta\eta^2 + \Delta\phi^2$. Del μ más aislado al menos aislado:
 - **Calorímetro:** $R = 0.24$ rad, $E_{\text{max}} = 3.5$ GeV, 5 GeV, 5 GeV, 9 GeV
 - **Tracker:** $R = 0.20$ rad, $p_{T\text{max}} = 2$ GeV/c, 2.5 GeV/c, 2.5 GeV/c, 4 GeV/c

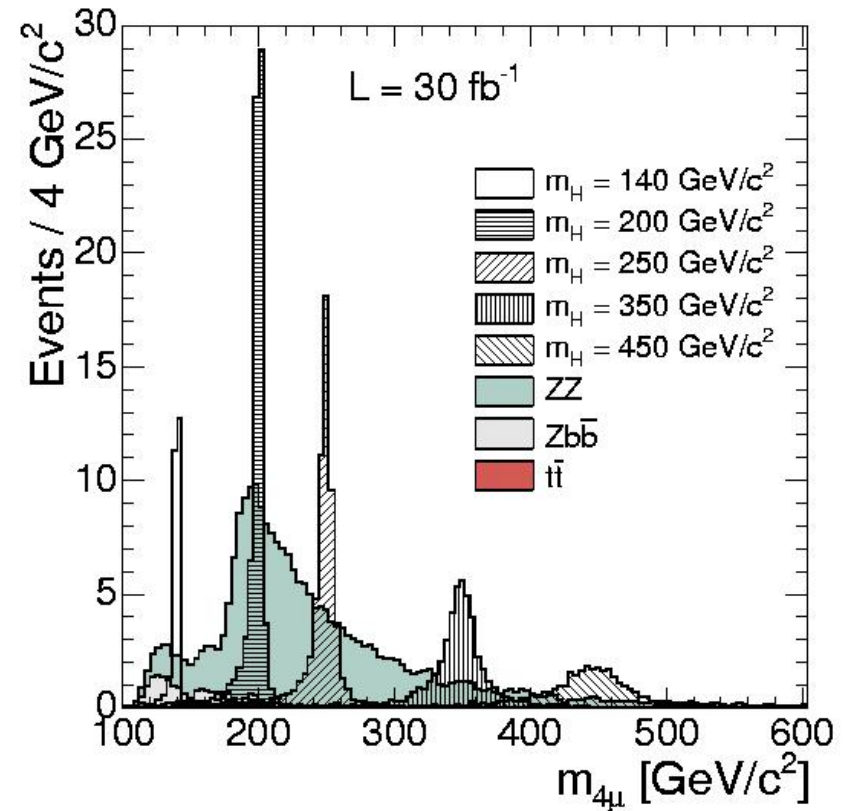
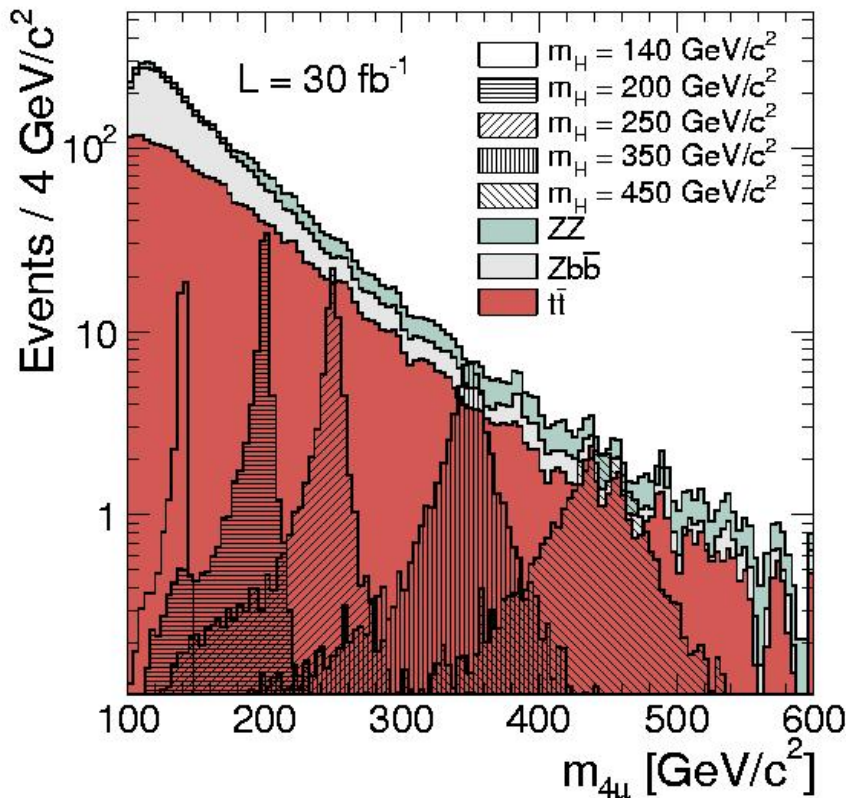


Eficiencia de selección de la señal: ~ 0.5

Eficiencia de selección de la contaminación: $ZZ \sim 5 \times 10^{-2}$, $Zbb \sim 10^{-6}$, $tt \sim 10^{-6}$

$m_{4\mu}$ antes de cortes de selección

$m_{4\mu}$ después de cortes de selección



A partir de la distribución de $m_{4\mu}$ para los sucesos seleccionados se obtienen los parámetros del bosón de Higgs

- Contribución de señal (**s**) y de contaminación (**b**)
 - La altura de **s** depende de la sección eficaz
 - La posición del pico proporciona el valor de m_H
 - La anchura depende de Γ_H y de la resolución del detector

- **Ajuste discreto de máxima verosimilitud** a la distribución de $m_{4\mu}$ para la señal y la contaminación:

$$f_{sb}(m_{4\mu}; m_{fit}, \Gamma_{fit}, N_s, N_b) = N_s \cdot p_s(m_{4\mu}; m_{fit}, \Gamma_{fit}) + N_b \cdot p_b(m_{4\mu})$$

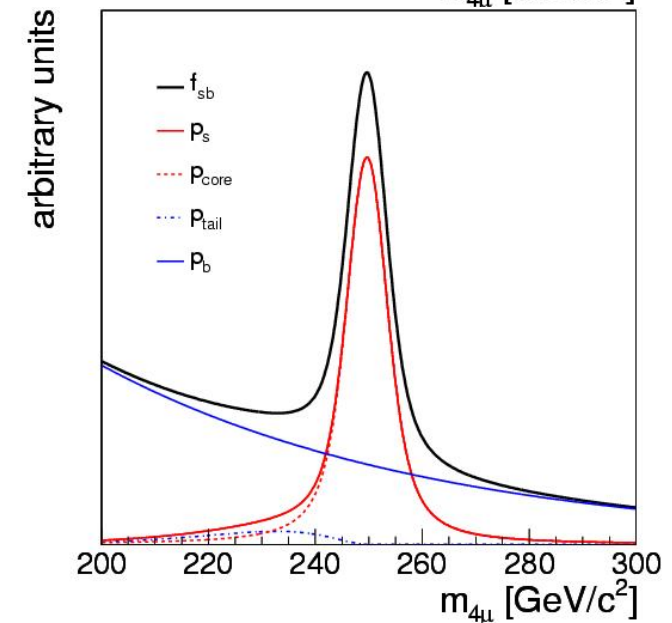
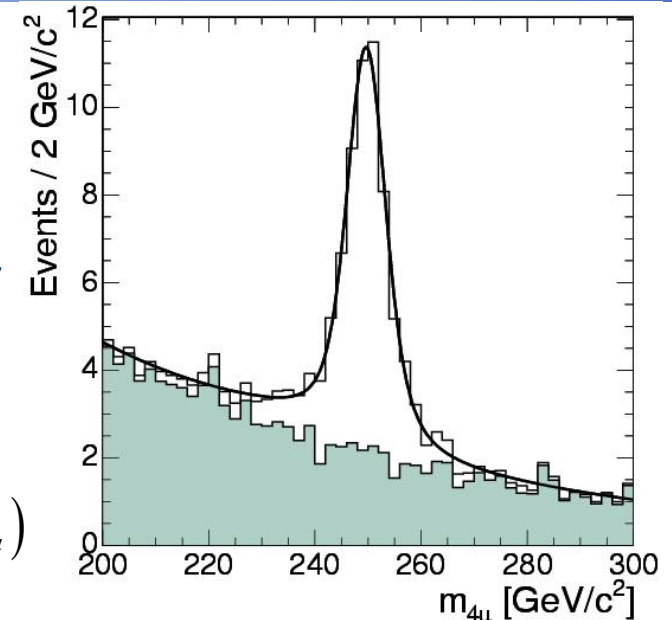
- p_s y p_b son las pdf (normalizadas) para **señal** y **contaminación**

$N_s + N_b$ = número de sucesos 'observados'

m_{fit} = posición del pico de la **masa**

Γ_{fit} = **anchura** del bosón de Higgs

- La descripción precisa del espectro de $m_{4\mu}$ debe tener en cuenta la **resolución experimental** y la **radiación** debida al bremsstrahlung (QED) en el estado final



Señal

$$p_s = \beta \cdot p_{core} \left(m_{4\mu}; m_{fit}, \Gamma_{fit}, \sigma_{reso} \right) + (1 - \beta) \cdot p_{tail} \left(m_{4\mu}; m_{fit}, \tau \right)$$

- p_{core} es la convolución de una distribución de Breit-Wigner con una distribución gaussiana que da cuenta de la resolución finita del detector
 - Para $m_H < 190 \text{ GeV}/c^2$, $\Gamma_H \ll \text{resolución exp.}$ → $p_{core} \sim \text{gaussiana}$
 - Para $m_H > 400 \text{ GeV}/c^2$, $\Gamma_H \gg \text{resolución exp.}$ → $p_{core} \sim \text{Breit-Wigner}$

$(1-\beta)$ = fracción de sucesos en la cola radiativa. La forma de la cola se parametriza *ad hoc*

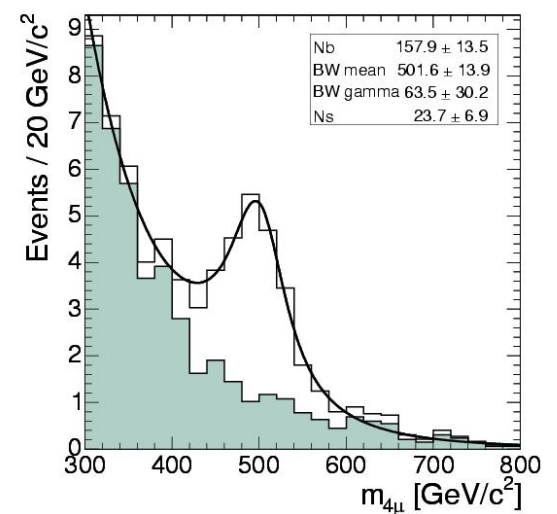
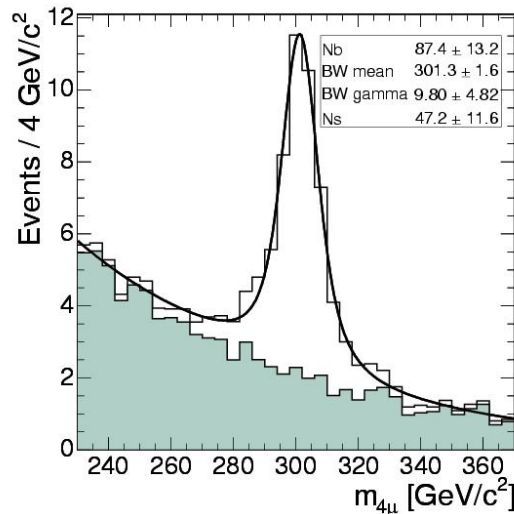
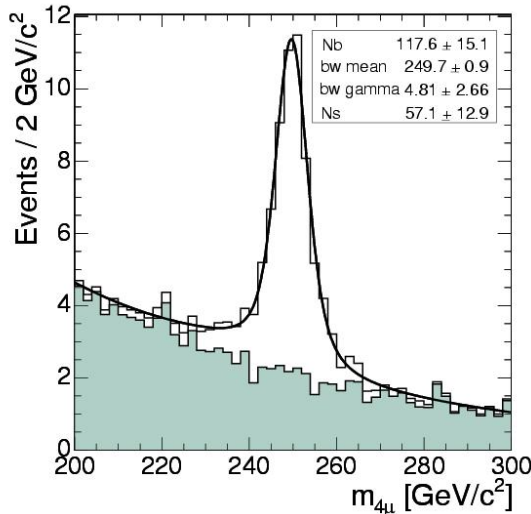
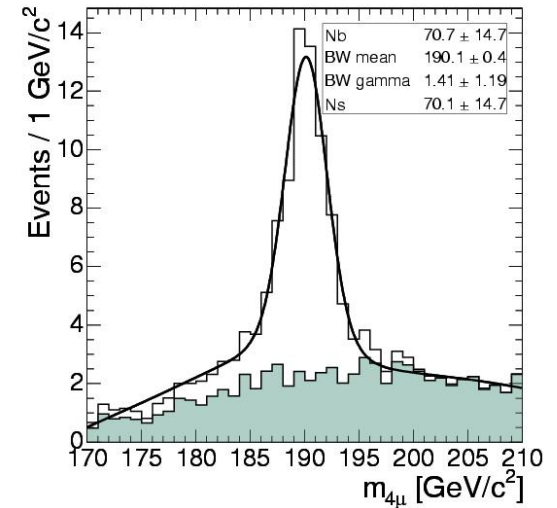
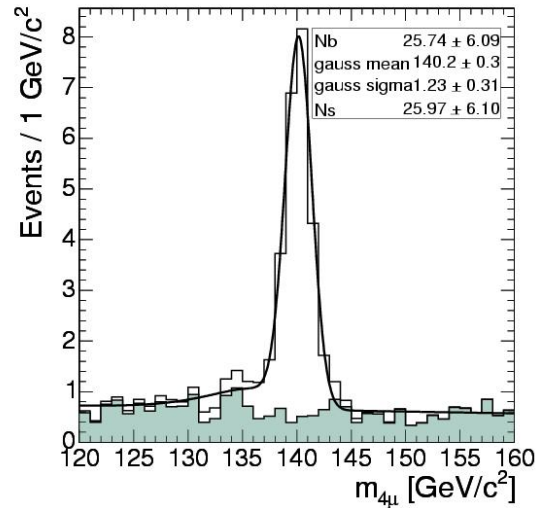
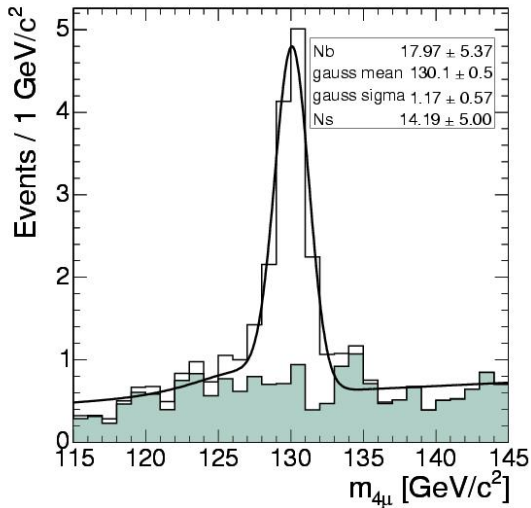
como:

$$p_{tail} = \frac{(m_{4\mu} - m_{fit})^2}{2\tau^3} \exp\left(-\frac{m_{4\mu} - m_{fit}}{\tau}\right) \text{ si } m_{4\mu} < m_{fit} \text{ y } 0 \text{ en cualquier otro caso}$$

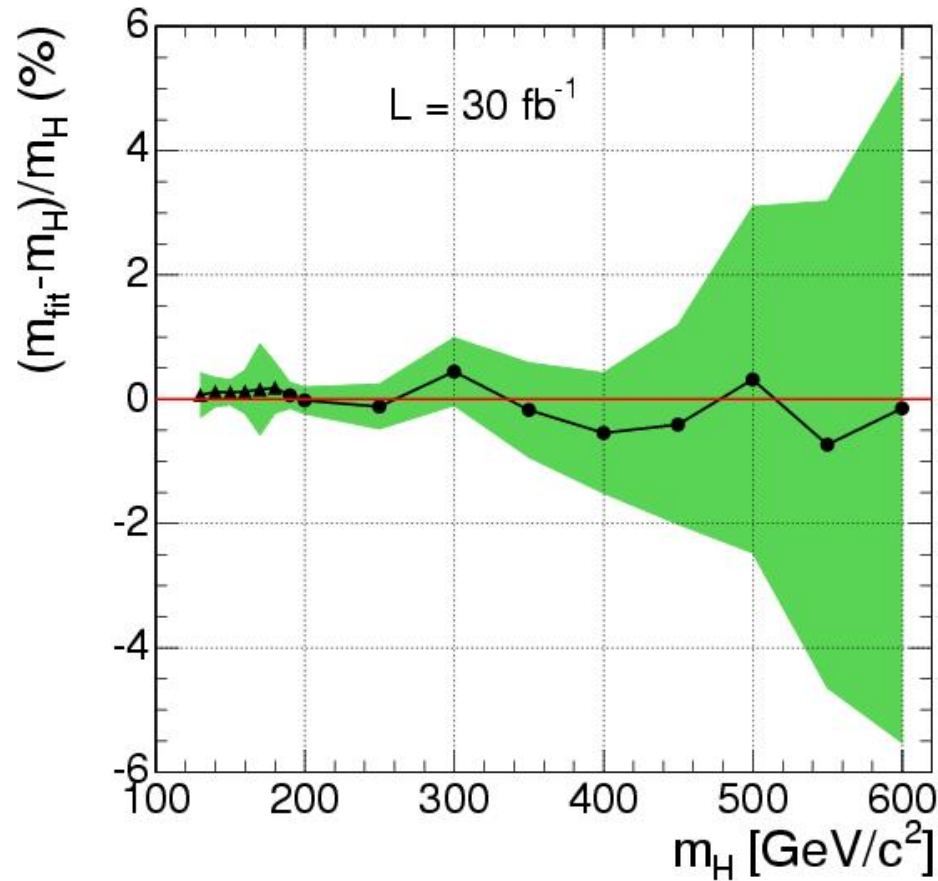
- Para $m_{4\mu} < 190 \text{ GeV}/c^2$ se ajusta una gaussiana con anchura (σ_{reso}) libre
- Para masas mayores, la anchura de la gaussiana (σ_{reso}) se fija en el ajuste, mientras que la anchura de la Breit-Wigner es un parámetro libre

Contaminación

- p_b se parametriza de diferentes formas (polinómica o exponencial) dependiendo de la región de masa considerada
 - Los parámetros que describen la forma están fijos en el ajuste global
 - La normalización es un parámetro libre en el ajuste global

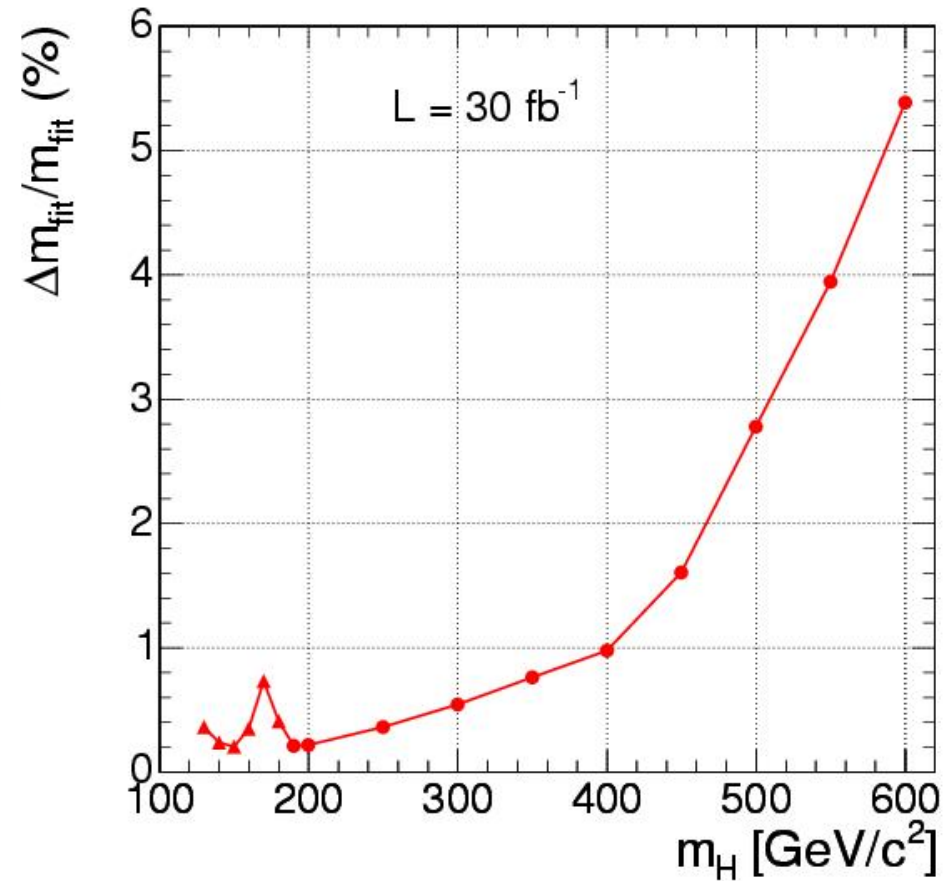


A partir de los ajustes a estas distribuciones se obtiene la precisión en la determinación de m_H , σ_H y Γ_H



Desplazamiento relativo del valor ajustado respecto al real con su error (banda verde)

círculos: ajuste con la convolución ; triángulos: ajuste gaussiano



Error relativo en la determinación de la masa

El valor de la masa del bosón de Higgs se recupera con exactitud (sin sesgo)

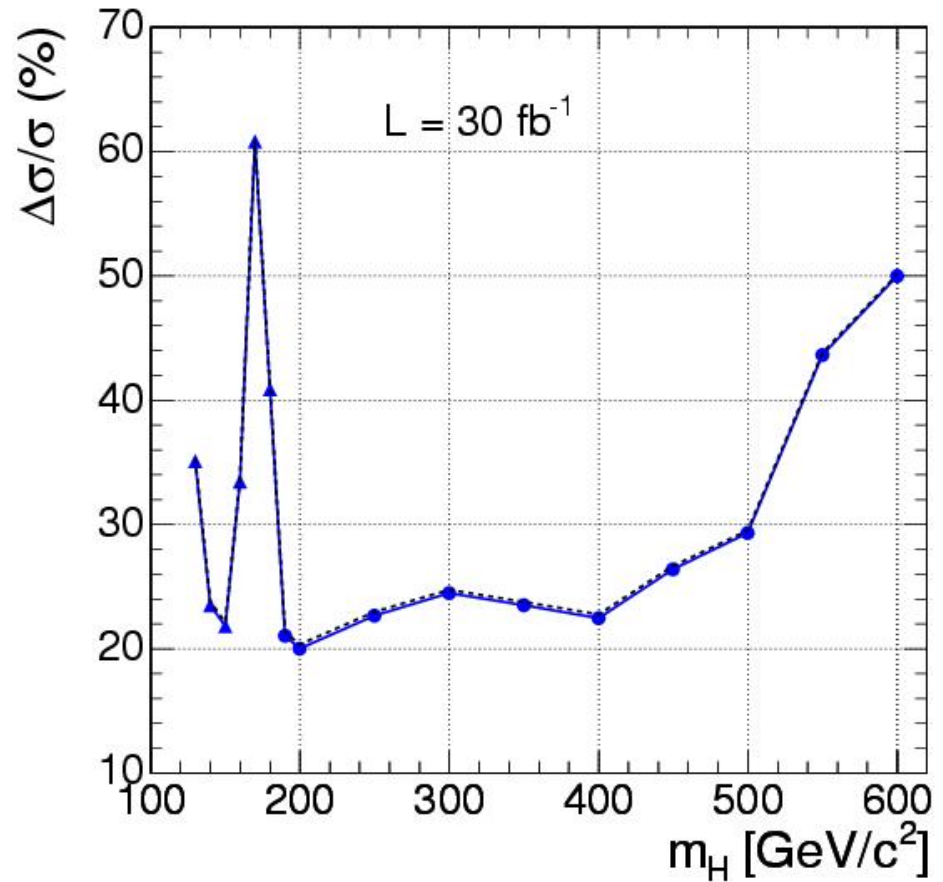
El **error estadístico** en N_s se obtiene del ajuste. El error relativo en la sección eficaz se calcula como $\Delta N_s / N_s$ (ya que $\sigma \sim \mathcal{L} / N_s$)

Errores sistemáticos:

- eficiencia en la reconstrucción = 2 %
- cortes de selección = 1 %
- determinación de la luminosidad = 3 %

Estos errores están esencialmente descorrelacionados

Los efectos sistemáticos son pequeños comparados con la precisión estadística

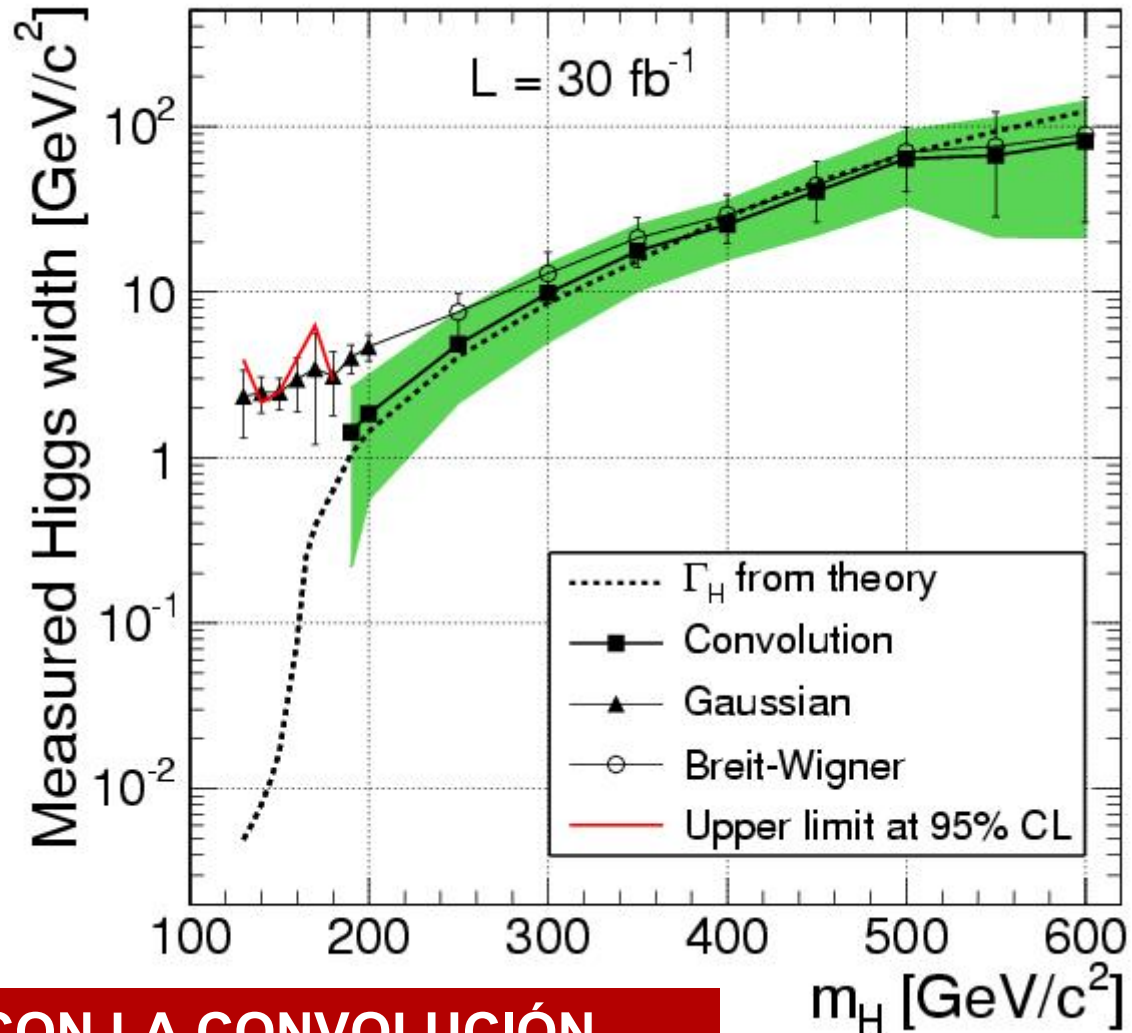


Los cuadrados muestran el resultado del ajuste; la banda muestra su error estadístico

Línea roja: límites superiores al 95% CL (no hay sensibilidad en esta región)

Los círculos y los triángulos muestran otros métodos:

- círculos: solamente Breit-Wigner
- triángulos: solamente gaussiana



SOLAMENTE EL AJUSTE CON LA CONVOLUCIÓN RECUPERA EL VALOR REAL DE LA ANCHURA

- En este estudio he puesto de manifiesto la capacidad del detector CMS para una determinación precisa de la masa, sección eficaz y anchura del bosón de Higgs del Modelo Estándar
- El canal de desintegración $H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4\mu$ proporciona una signatura clara y la posibilidad de mantener la contaminación en la muestra seleccionada en niveles manejables
- He desarrollado un método de medida robusto para determinar dichos parámetros utilizando un ajuste discreto de máxima verosimilitud a la distribución de $m_{4\mu}$
- **Los valores de los parámetros se recuperan con gran exactitud en todo el rango de masas**
- La masa se puede determinar con precisiones entre 0.1% y 5.4%
- La anchura intrínseca solamente se puede determinar cuando $m_H > 190 \text{ GeV}/c^2$, con una precisión en torno al 35%. La resolución experimental domina para masas menores
- La sección eficaz de producción se puede determinar con una precisión en torno al 30% para masas entre 130 y 150 GeV/c^2 ó superiores a 190 GeV/c^2
- Estos resultados han sido incluidos en el *CMS Physics Technical Design Report* vol.II

BACK-UP SLIDES

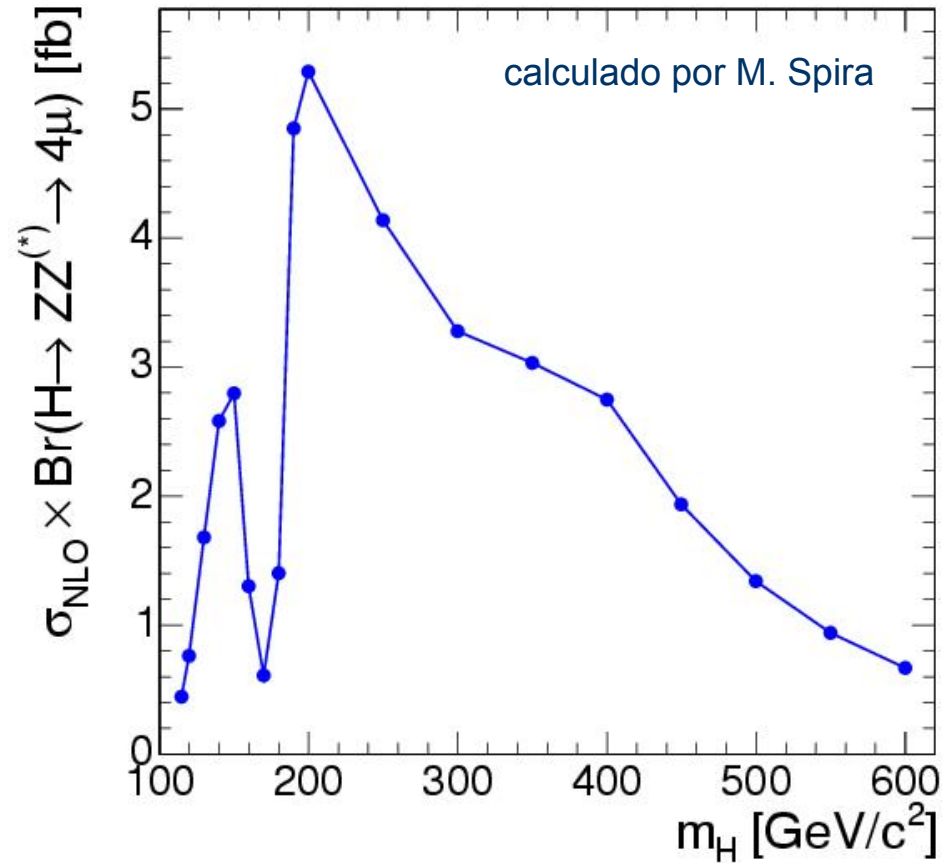
Los estudios de física se realizan a partir de sucesos simulados con diferentes programas (PYTHIA, CompHEP)

Estas muestras están generadas a LO y normalizadas a la sección eficaz total NLO

Sólo se consideran sucesos con 2 pares $\mu^+\mu^-$, con $|\eta| < 2.4$ y $p_T > 3$ GeV/c

Los sucesos así generados se hacen pasar por el software de simulación del detector (GEANT4: geometría + interacción partículas-detector)

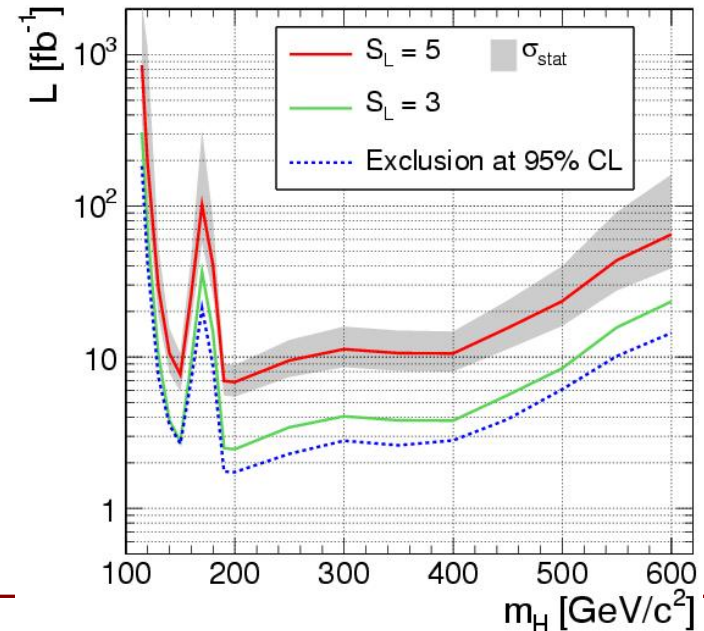
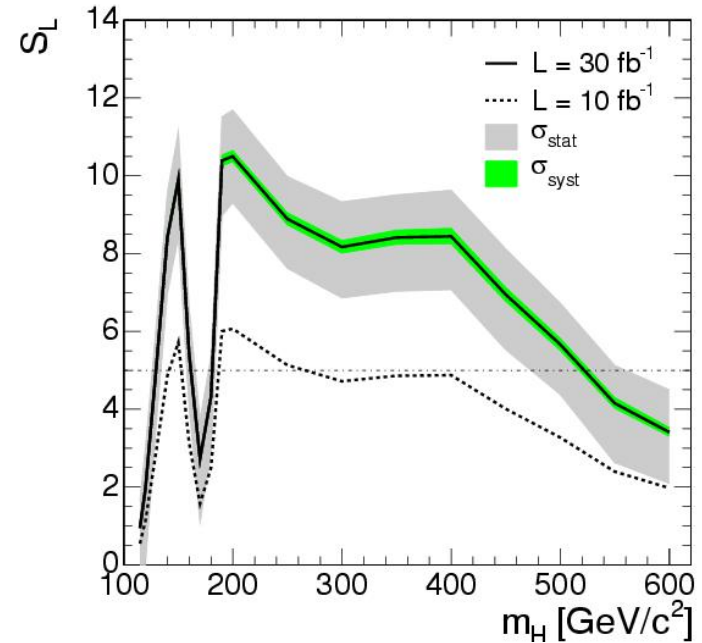
Las señales simuladas son reconstruidas del mismo modo que lo serán los datos (software oficial de reconstrucción de CMS)



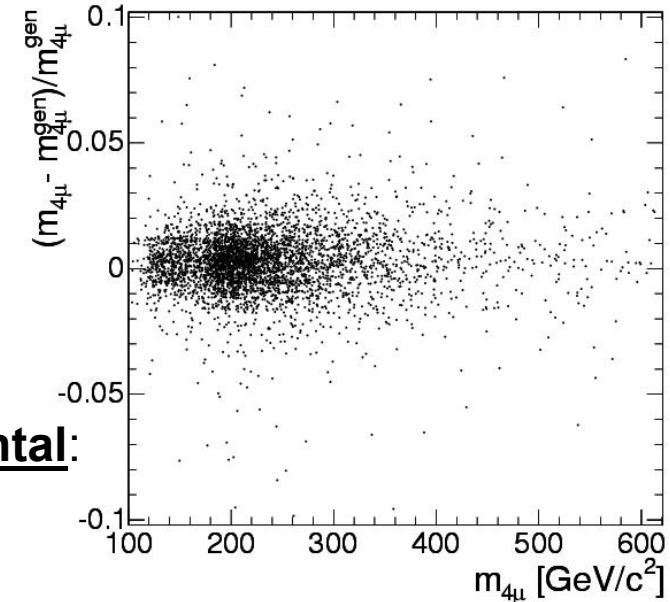
- The statistical significance of the signal in the presence of background is given by:

$$S_L = \sqrt{\langle 2 \ln Q \rangle}$$

- $H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4\mu$ channel has a large sensitivity in a wide range of masses even for low luminosity
- Systematic uncertainties on the normalization of S and B (**detailed studies by UF group**) taken into account: σ_{syst} band
 - Effect in S_L is well below statistical uncertainty (1.5 – 2.5 units of S_L , depending on the mass range)
- Significance is proportional to integrated luminosity

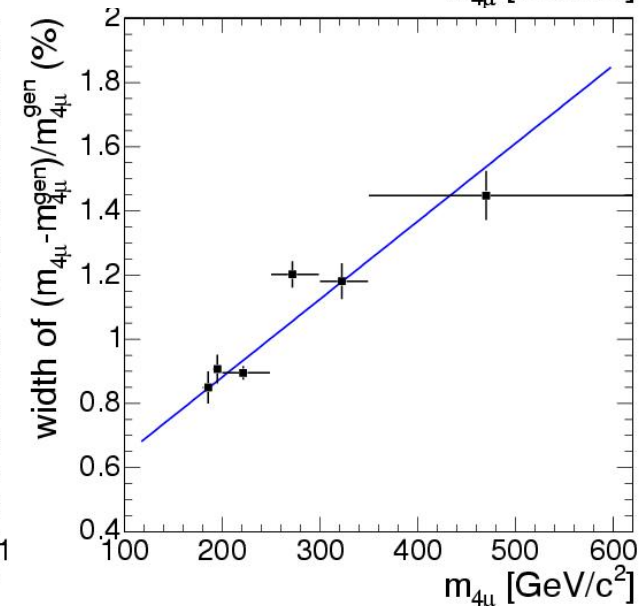
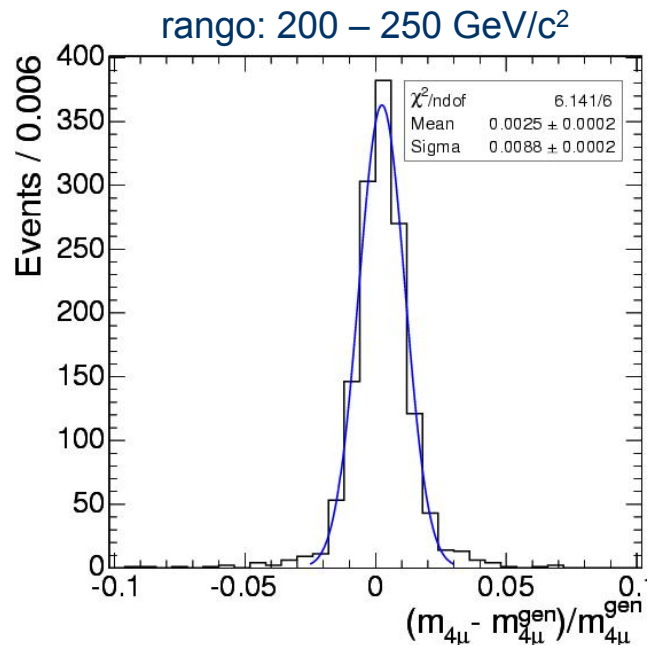


- Para $m_{4\mu} > 2m_Z$: resolución obtenida de sucesos ZZ
- Para $m_{4\mu} < 2m_Z$: resolución obtenida directamente de la distribución $m_{4\mu}$ ($\Gamma_H \ll \sigma_{reso}$)
- Ambas determinaciones son consistentes



Procedimiento para obtener la resolución experimental:

- Ajuste gaussiano a $(m_{4\mu} - m_{4\mu}^{gen}) / m_{4\mu}^{gen}$ en varios rangos de $m_{4\mu}$
- La evolución de la anchura de la gaussiana con $m_{4\mu}$ se parametriza con una recta
- Este parámetro se fija en los ajustes



Distribuciones esperadas para $m_H = 140, 170, 250, 450 \text{ GeV}/c^2$

Los resultados de los ajustes son perfectamente compatibles con los valores reales, dentro de su incertidumbre estadística

