

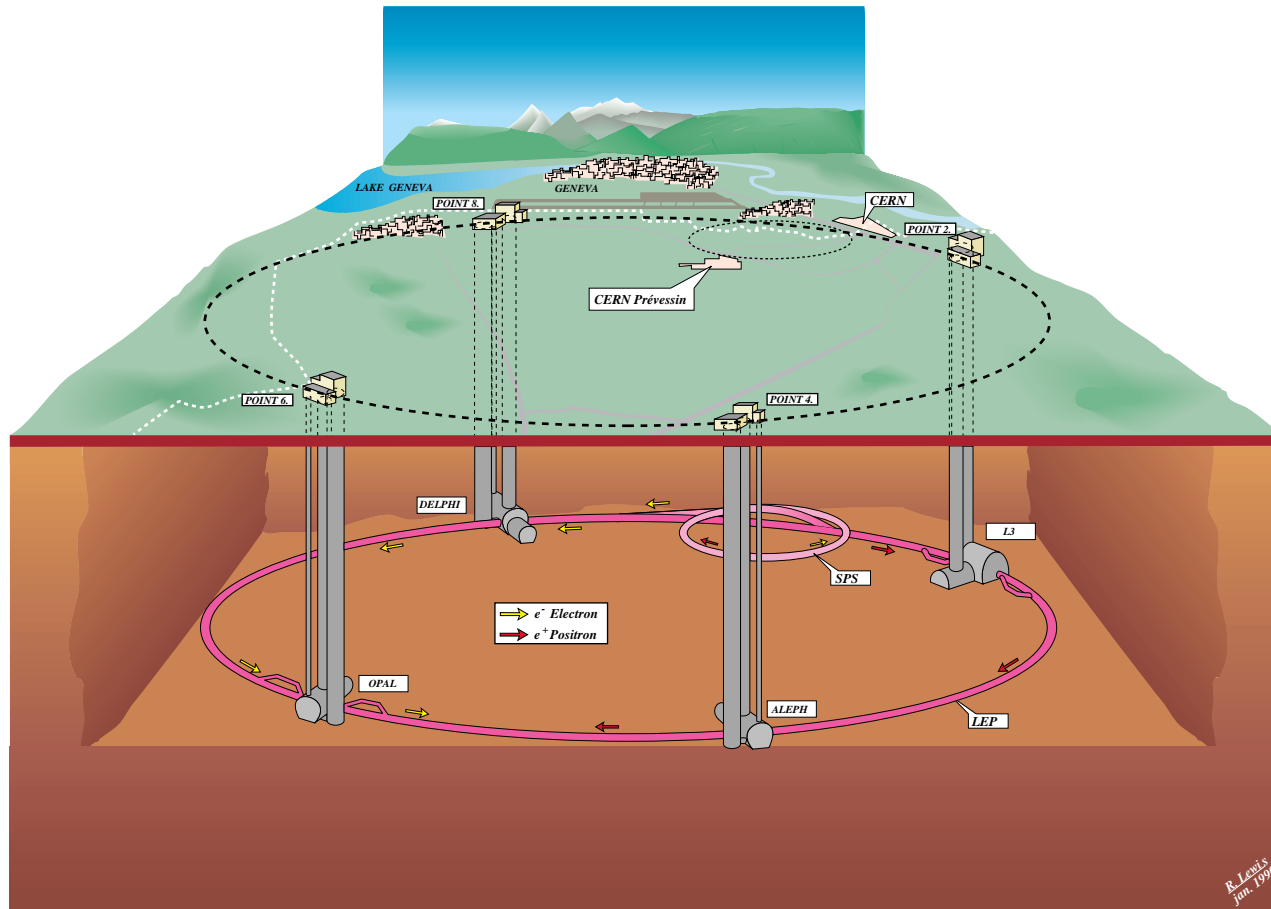


# Resultados de LEP y perspectivas para el LHC

**M. Cerrada**  
CIEMAT Madrid

**Enero 26, 2000**  
Seminario Univ. Complutense, Madrid

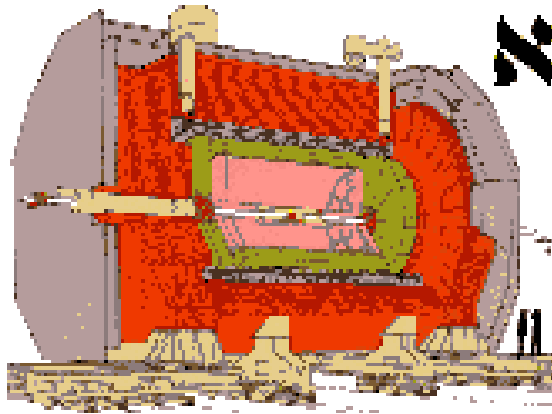
- ❖ LEP y el experimento L3
- ❖ Resumen de resultados más importantes
  - LEP operando en la región del  $Z^0$
  - LEP 200: W's, búsqueda del Higgs y nuevas partículas
- ❖ El LHC. Objetivos y desafíos experimentales.
- ❖ El experimento CMS



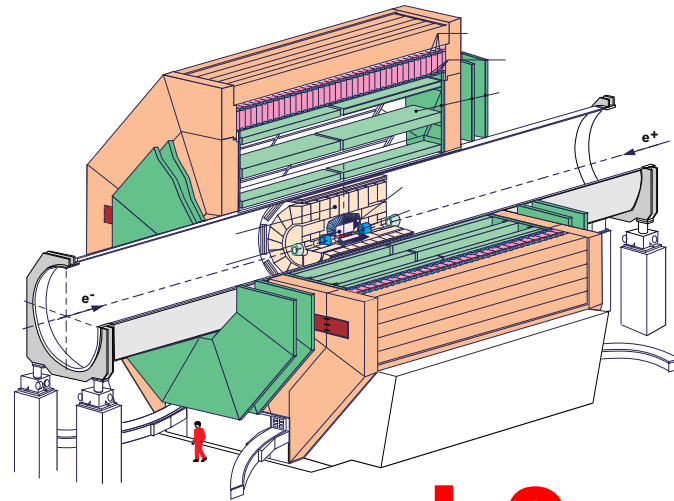
R. L. 2003 S  
Jan. 1990

- ❖ 27 Km de circunferencia
- ❖ Paquetes con  $10^{11} - 10^{12}$  electrones y positrones
- ❖ Cruces cada  $22.5 \mu s$ , luminosidad nominal  $10^{31} s^{-1} cm^{-2}$
- ❖ 4 experimentos : ATLAS, DELPHI, L3 y OPAL

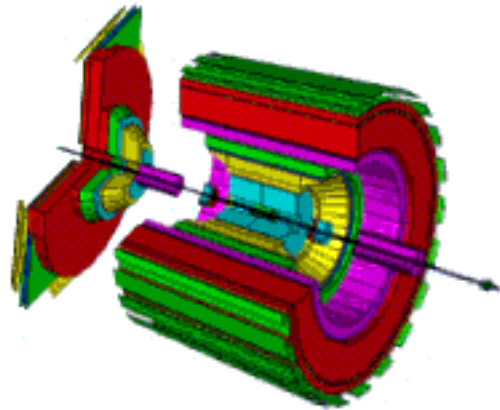




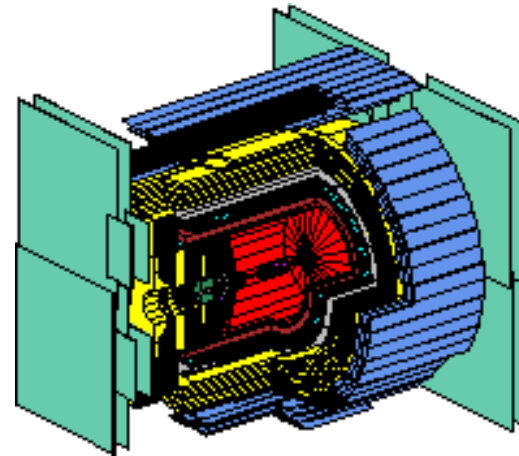
**ALEPH**



**L3**



**DELPHI**

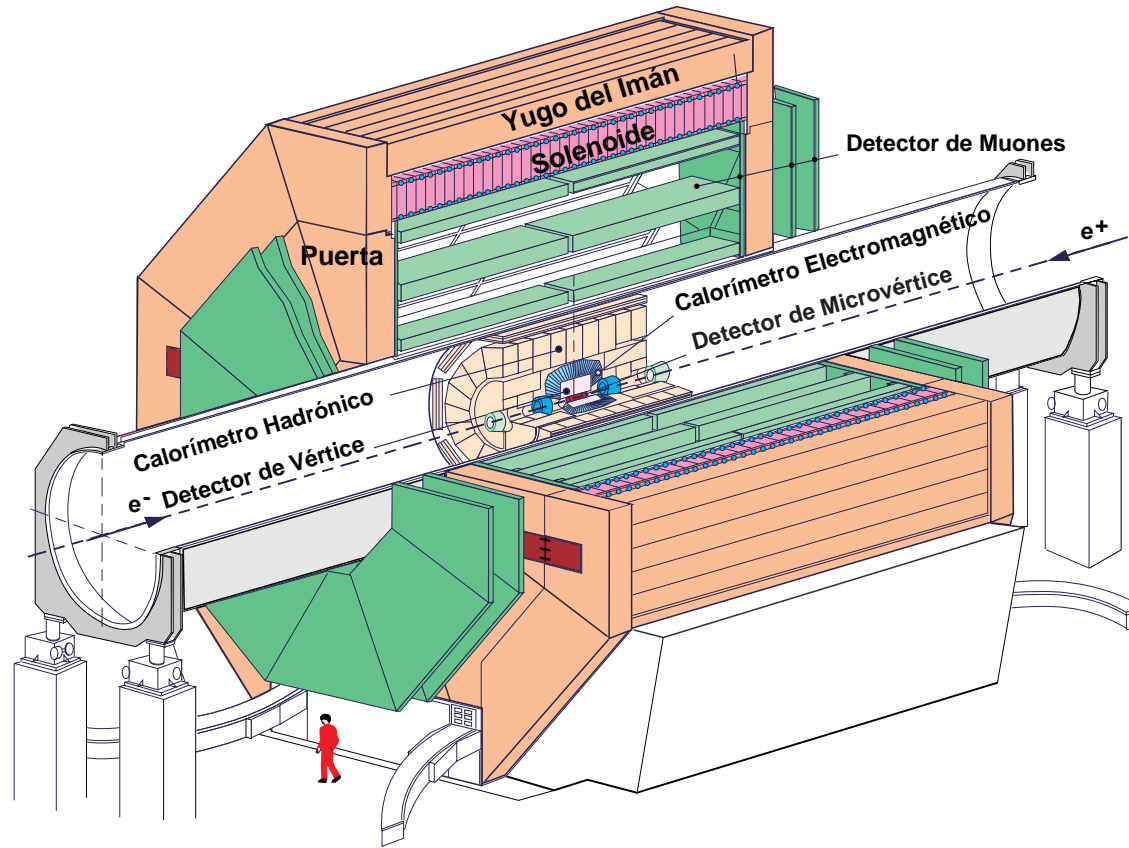


**OPAL**

PROGRAMA LEP: colisiones  $e^+e^-$ 

Periodo	$\sqrt{s}$ [GeV]	Luminosidad [ $\text{pb}^{-1}$ /experimento]
1989 – 1995	88 – 94	150
1995	130 – 140	5
1996	161	10
	170 – 172	10
1997	183	55
1998	189	175
1999	192	30
	196	80
	200	80
	202	40
	204	0.01
2000	???	???

## El detector L3

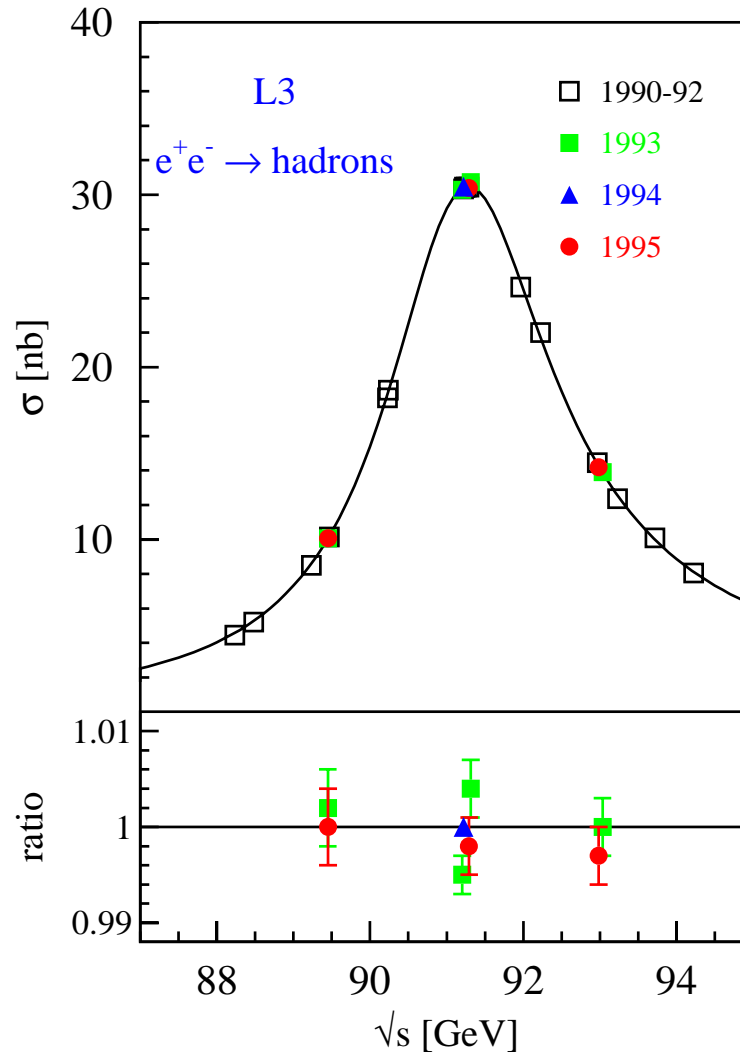
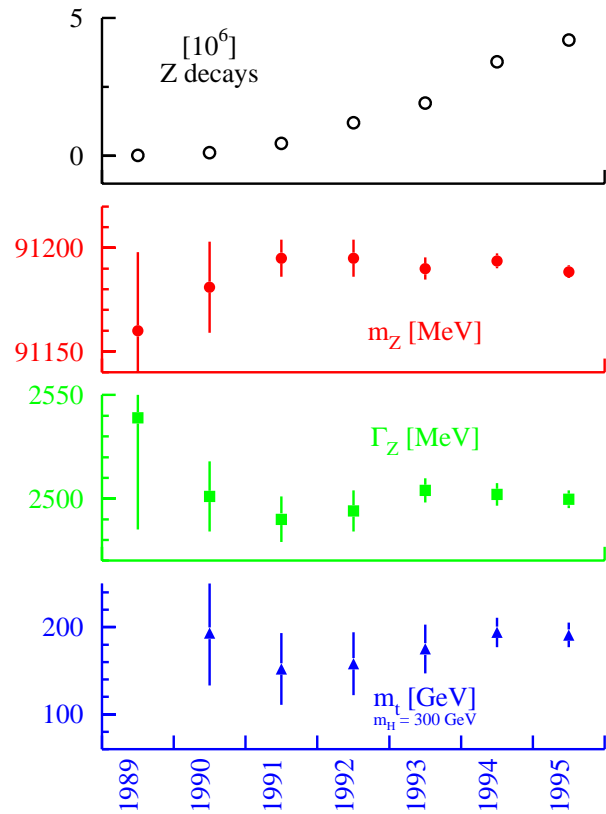


El grupo del CIEMAT contribuyó a la construcción del detector de muones

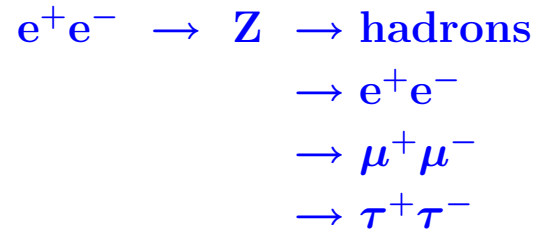
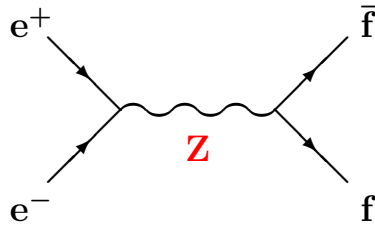
- ❖ Construcción de 96 cámaras de deriva
- ❖ Octantes, instalación en el CERN, alineamiento, monitoring
- ❖ En funcionamiento estable durante más de 10 años !!

# Resultados de LEP1

Del orden de  $4 \times 10^6$  sucesos en la región del  $Z^0$



A orden más bajo los procesos más importantes son



$$\sigma_Z^f(s) = \frac{12\pi}{m_Z^2} \frac{s\Gamma_e\Gamma_f}{(s - m_Z^2)^2 + s^2\Gamma_Z^2/m_Z^2}$$

$$\Gamma_f \propto [(\bar{g}_V^f)^2 + (\bar{g}_A^f)^2]$$

En el detector los hadrones se observan formando "jets"

Hay que tener en cuenta a la hora de interpretar los datos todos los posible efectos del detector: eficiencias, aceptancias, resolución experimental, errores sistemáticos, etc.

Hay que tener en cuenta efectos de radiación de estados iniciales y finales, y correcciones diversas a órdenes superiores.

Con los datos de los diferentes canales, tras un proceso de selección de la muestra adecuada a cada caso, se pueden medir las secciones eficaces hadrónicas y leptónicas, las asimetrías forward-backward leptónicas, las asimetrías de polarización del  $\tau$ , y las anchuras parciales de quarks b y c.

Combinando los resultados de todos los experimentos de LEP se obtiene la máxima precisión en los valores de los parámetros:

- ❖  $M_Z = 91.1867 \pm 0.0021 \text{ GeV}$
- ❖  $\Gamma_Z = 2.4939 \pm 0.0013 \text{ GeV}$
- ❖  $\sigma_h^0 = 41.491 \text{ nb}$
- ❖  $R_l = \Gamma_l / \Gamma_{had} = 20.765 \pm 0.026$
- ❖  $A_{FB}^{0,l} = 0.01683 \pm 0.0060$
- ❖  $A_l(\tau \text{ pol}) = 0.1452 \pm 0.0034$
- ❖  $R_b = \Gamma_b / \Gamma_{had} = 0.21664 \pm 0.00076$
- ❖  $R_c = \Gamma_c / \Gamma_{had} = 0.1724 \pm 0.0048$
- ❖  $A_{FB}^{0,b} = 0.0991 \pm 0.0021$
- ❖  $A_{FB}^{0,c} = 0.0712 \pm 0.0045$



### A partir de estas medidas

❖ Número de familias de neutrinos =  $2.994 \pm 0.011$

❖ Constantes de acoplamiento efectivas

$$g_{Vl} = -0.03703 \pm 0.00068$$

$$g_{Al} = -0.50105 \pm 0.00030$$

❖ Angulo de mezcla electrodébil

$$\sin^2(\theta_W^{eff}) = 0.23189 \pm 0.00024$$

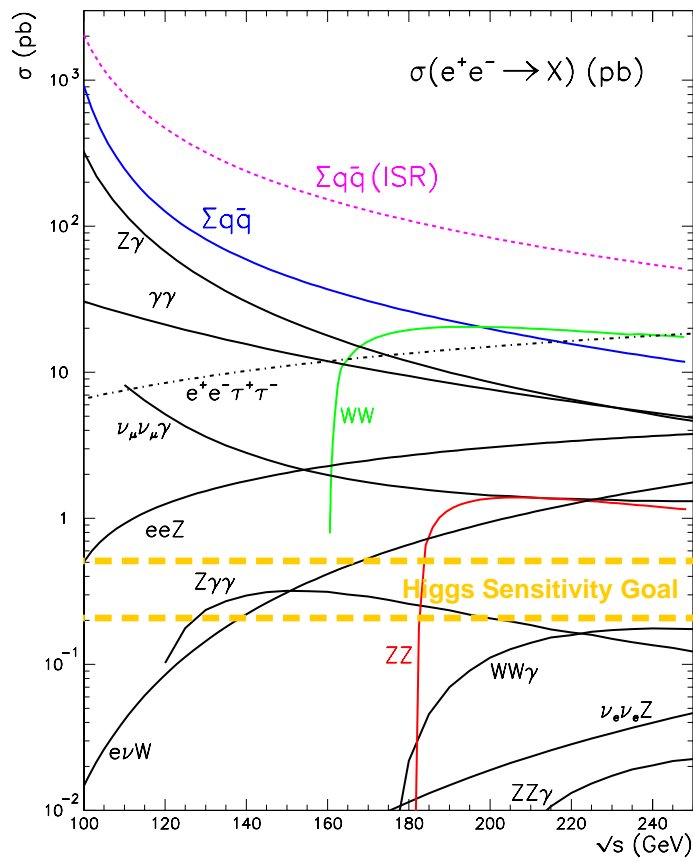
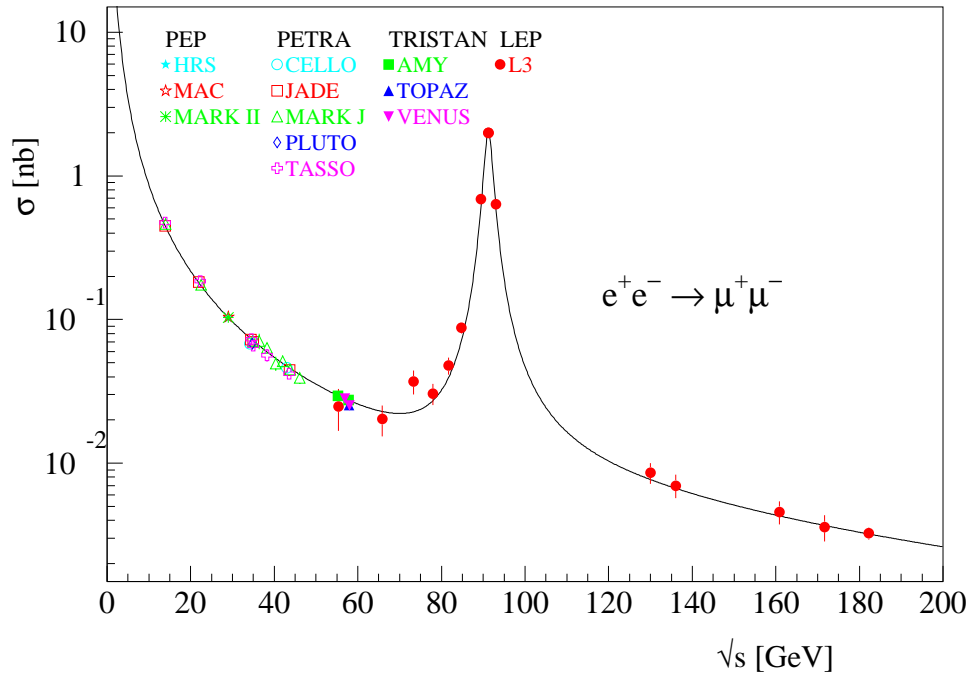
El Modelo Standard tiene "demasiados" parámetros, pero tiene también un enorme poder predictivo y, hasta la fecha, todos los resultados experimentales están en perfecto acuerdo con las predicciones

Ejemplos significativos son:

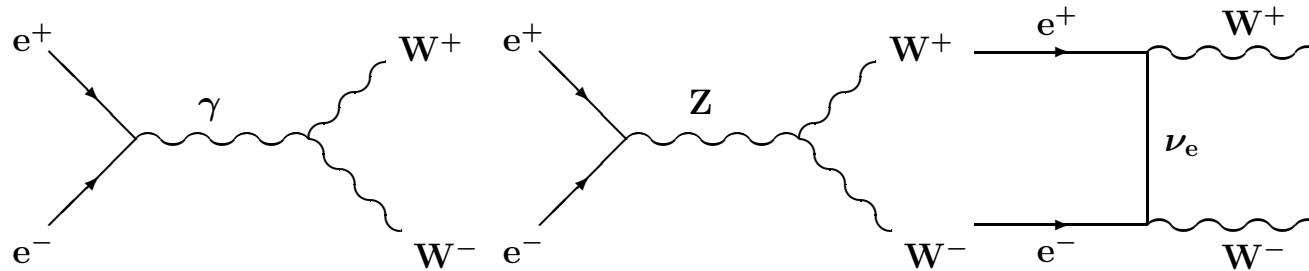
❖ La masa del top

❖ La masa del W, su sección eficaz de producción (acoplamientos  $WWZ$  y  $WW\gamma$ ), y relaciones de desintegración

Hay también predicciones sobre la masa del Higgs

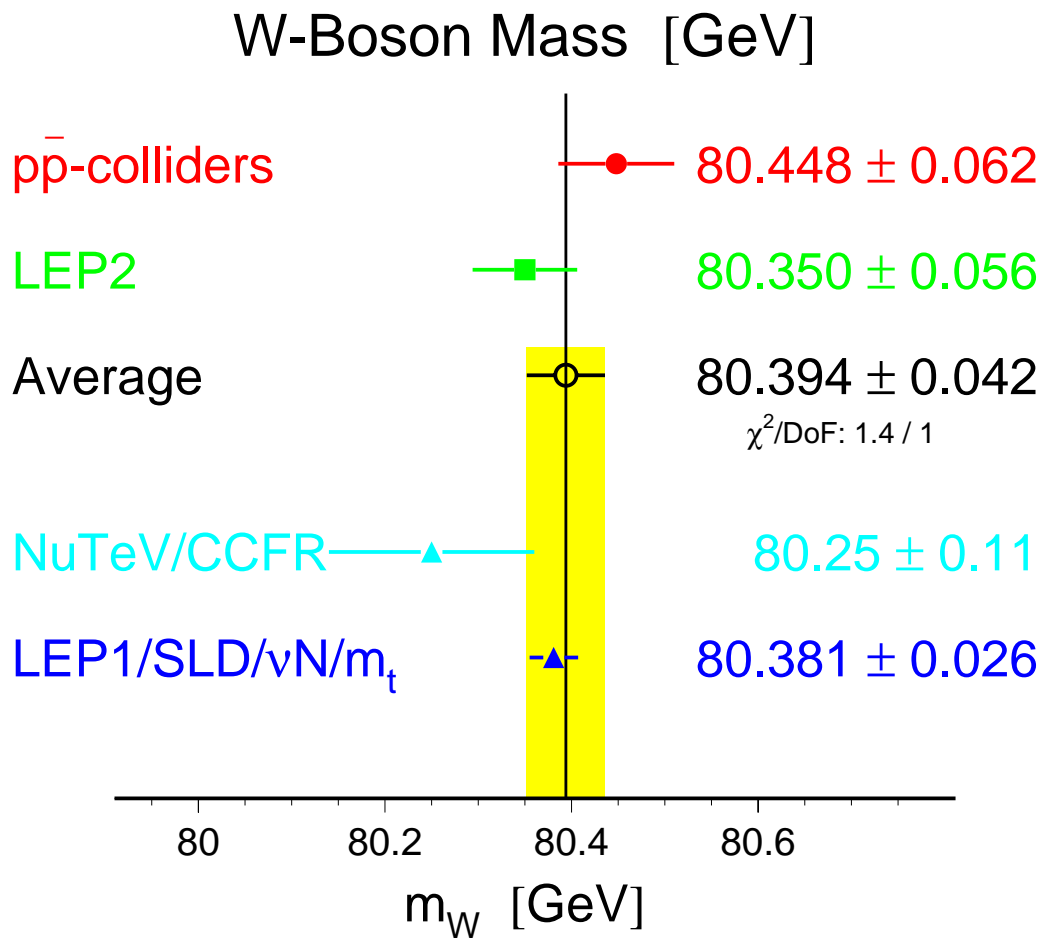


## Producción de W's en LEP2

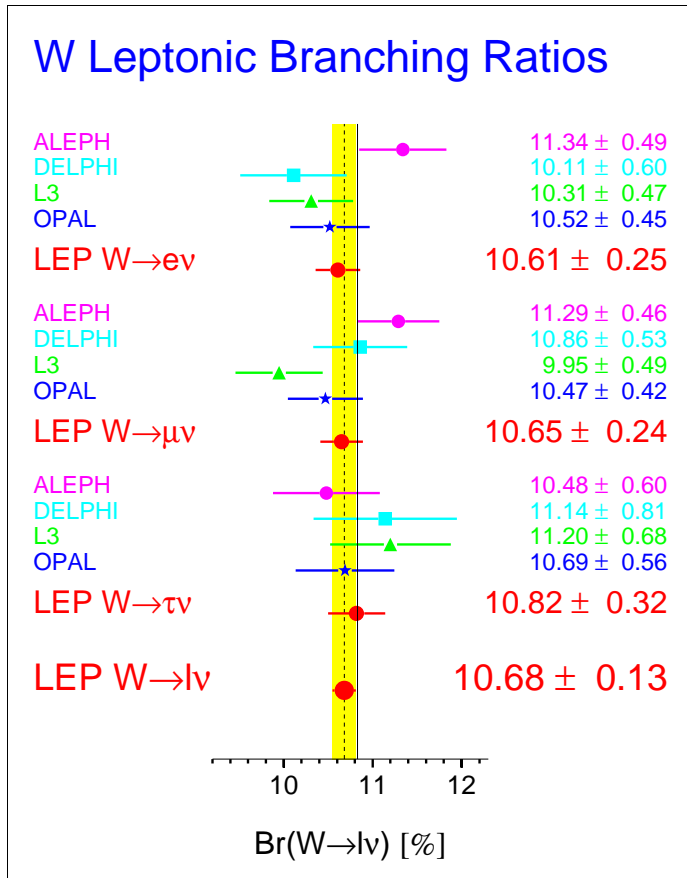


Varias posibles topologías:

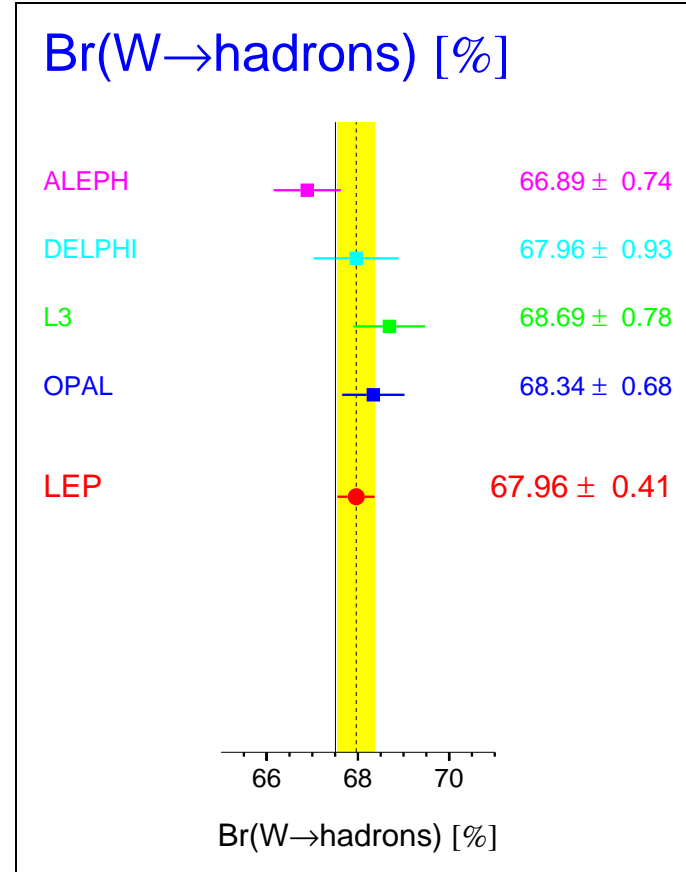
- ❖  $W^+W^- \rightarrow l^+\nu l^-\nu$  (10 % de los sucesos)  
dos leptones energéticos y acoplanares
- ❖  $W^+W^- \rightarrow q\bar{q} l\nu$  (44 % de los sucesos)  
dos jets más un leptón energético aislado
- ❖  $W^+W^- \rightarrow q\bar{q} q\bar{q}$  (46 % de los sucesos)  
cuatro jets con energías parecidas  
mucho ruido de fondo



# Branching ratios del W

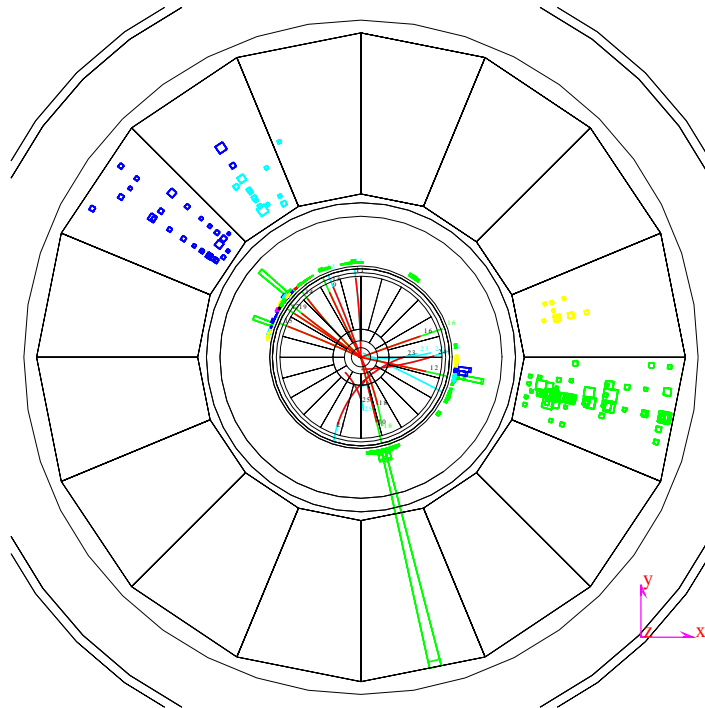
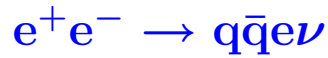


Predicción del Modelo Standard  
**10.8 %**

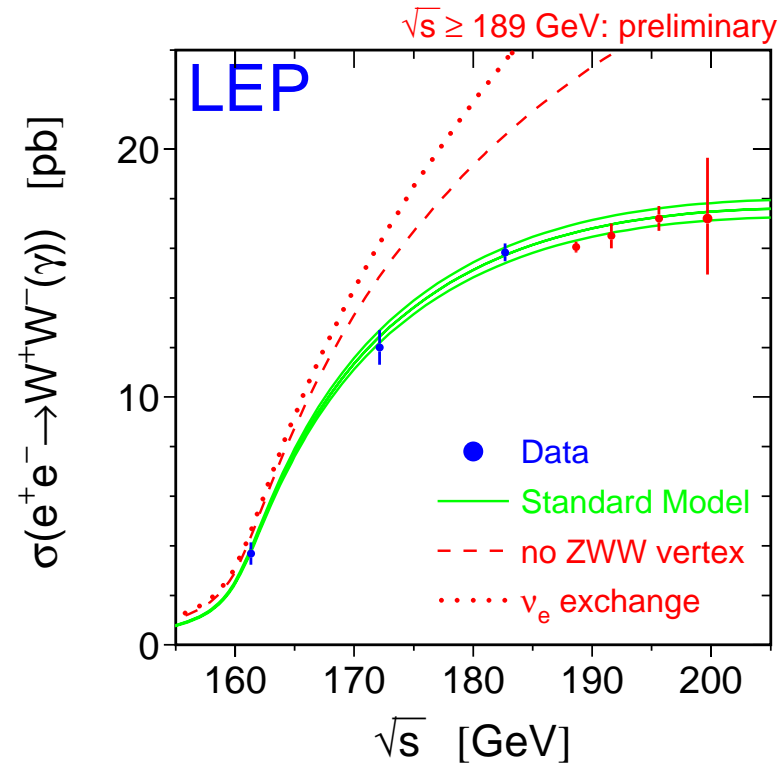


Predicción del Modelo Standard  
**67.6 %**

# Producción de W's en LEP2

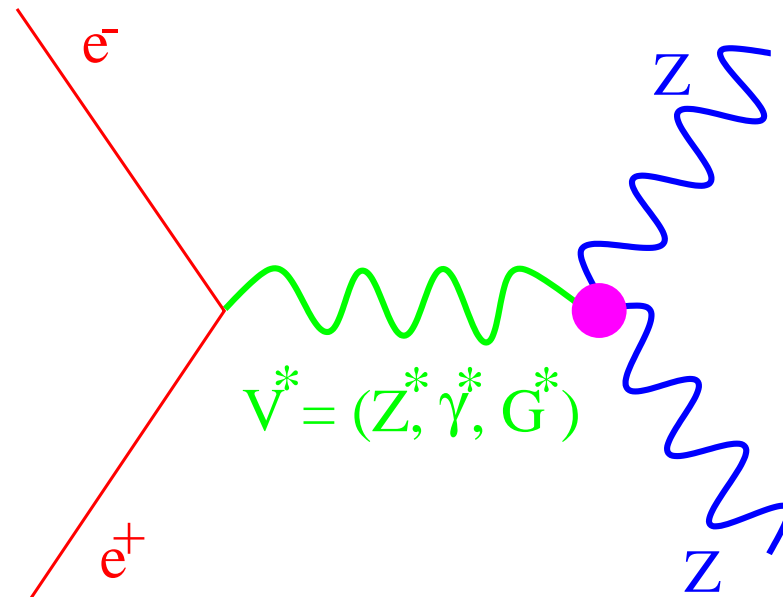
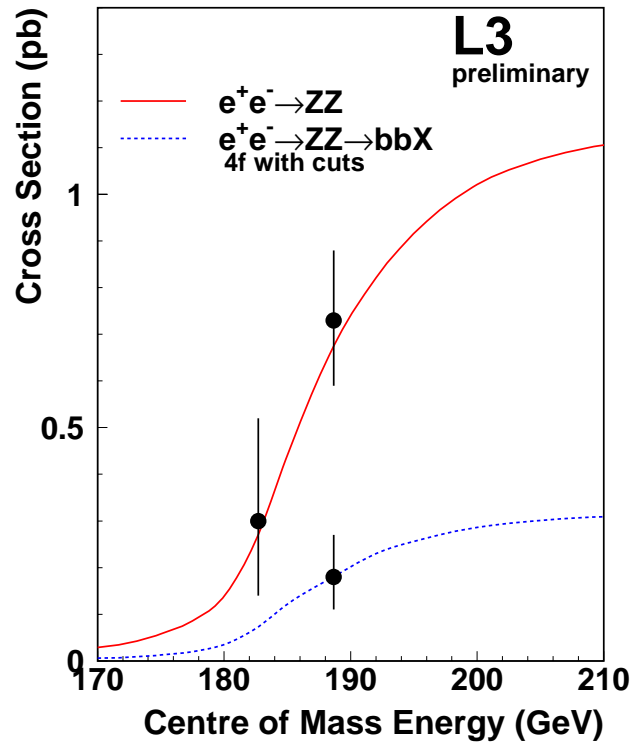


**L3**



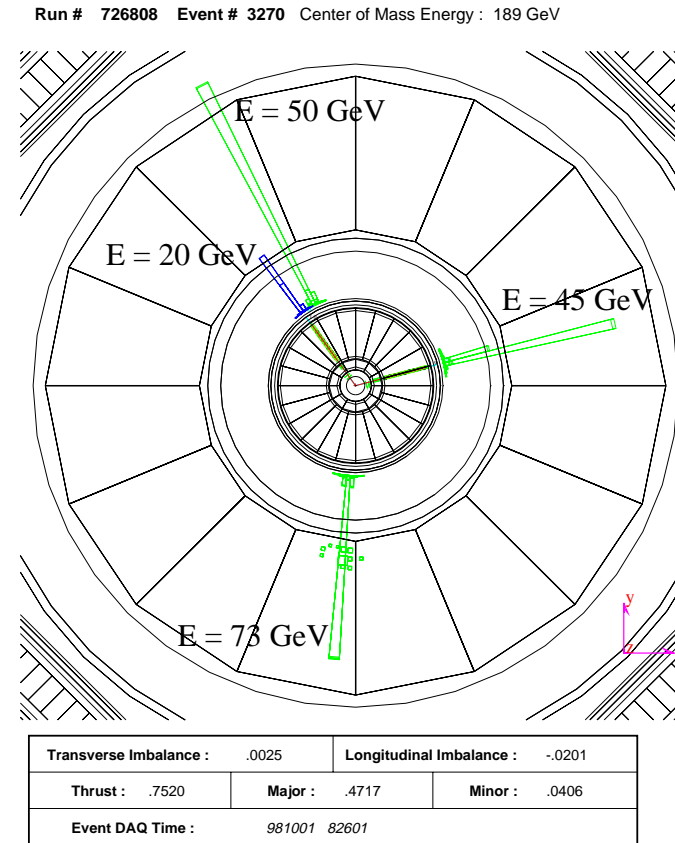
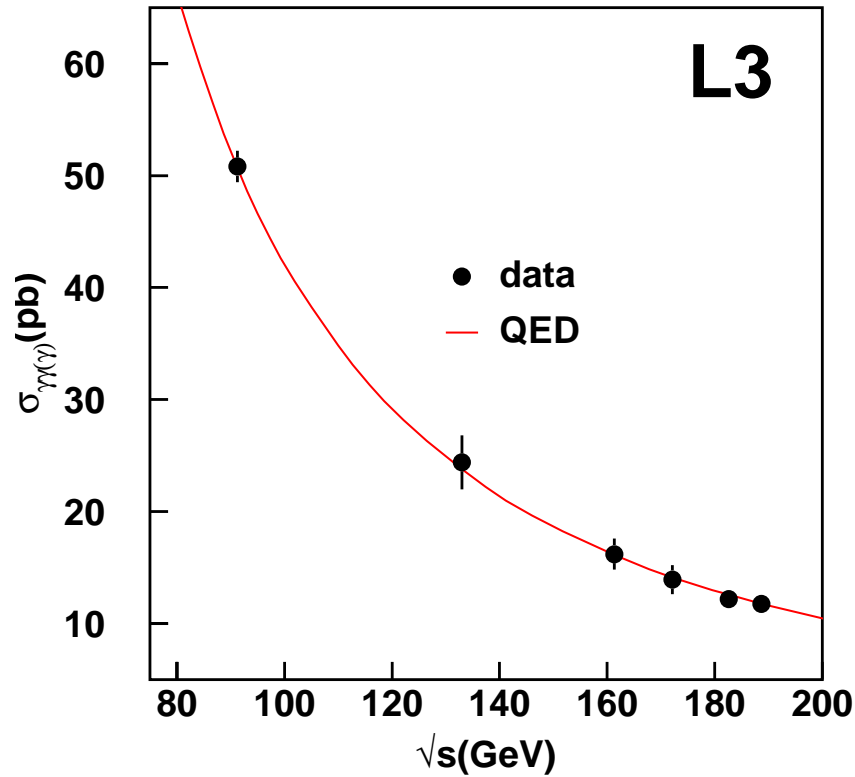
Buen acuerdo con el Modelo Standard  
El vértice ZWW existe

# LEP2 El canal $e^+e^- \rightarrow ZZ$



- ❖ Los primeros resultados de este canal publicados en LEP fueron los de L3
- ❖ Se está trabajando en el estudio de posibles acoplamientos anómalos ZZV

# LEP2: QED y búsquedas de leptones excitados

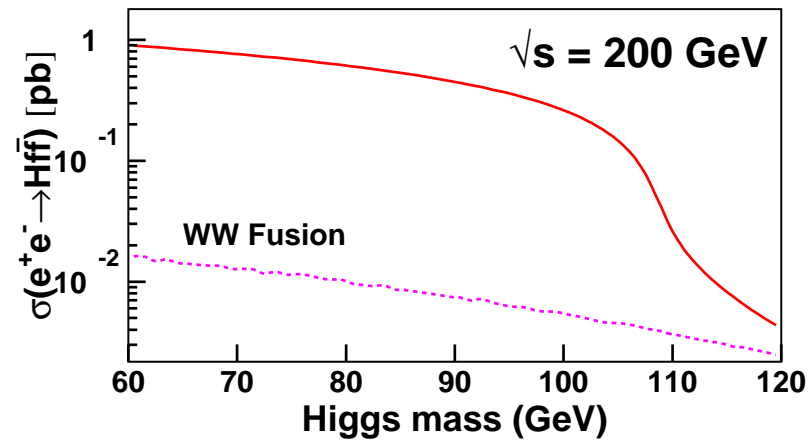
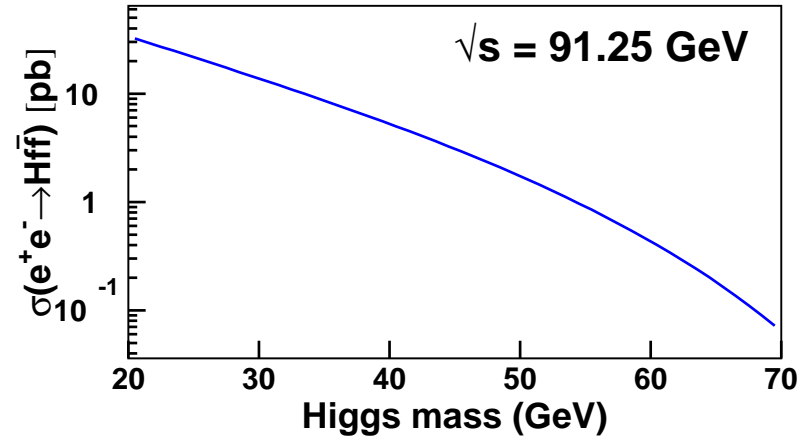
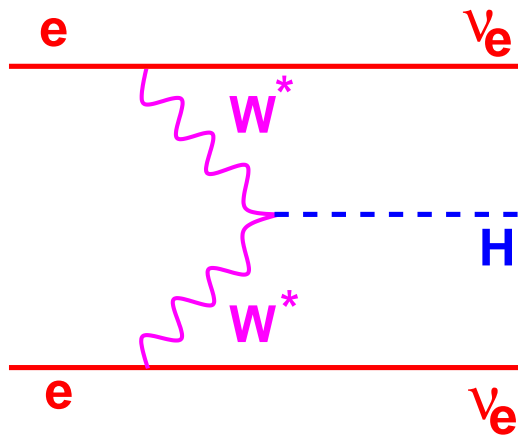
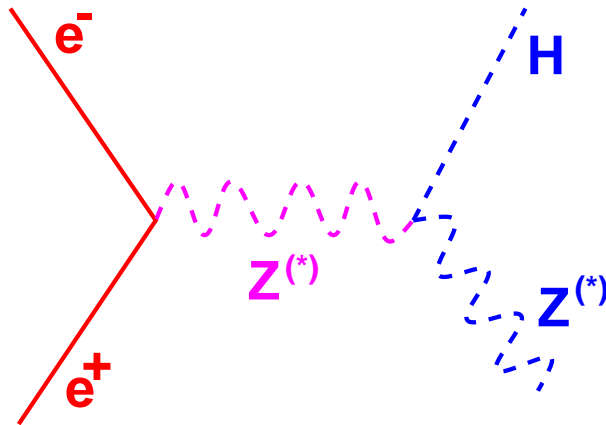


$$e^+ e^- \rightarrow e^* e^* \rightarrow e e \gamma \gamma$$

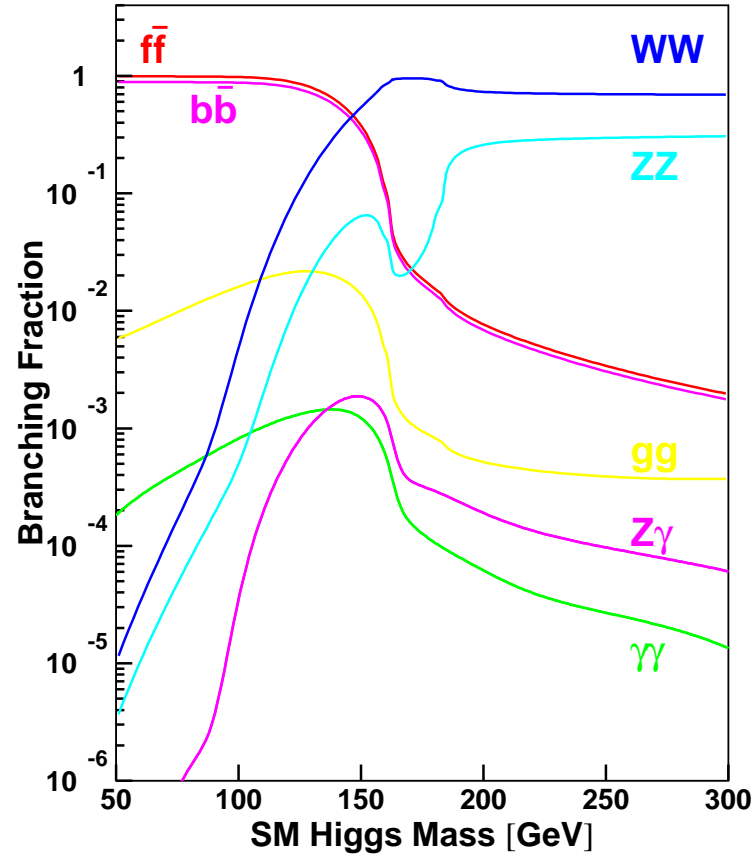
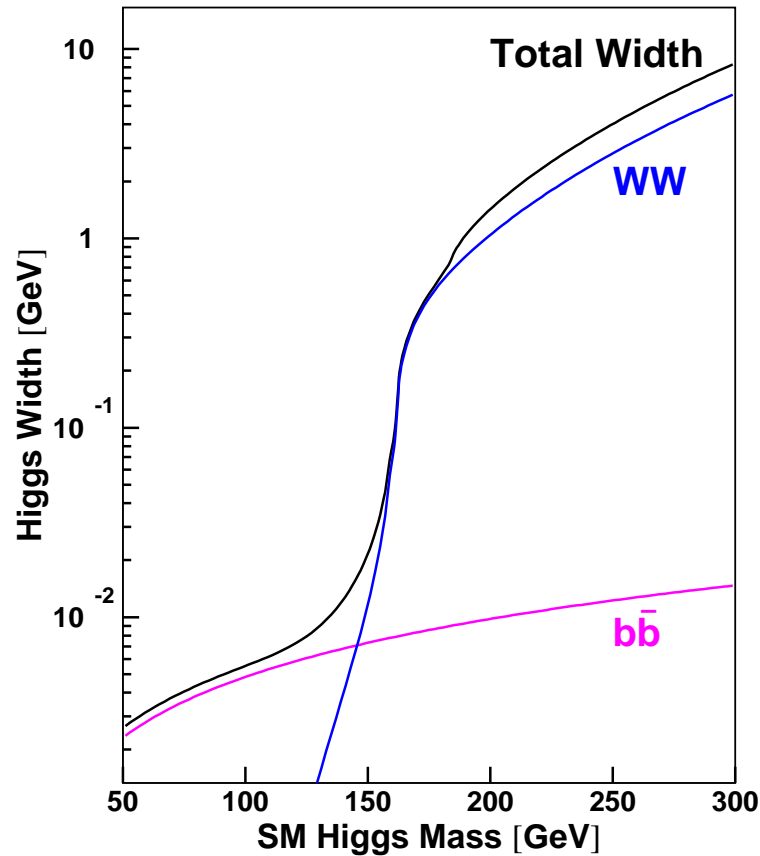
- ❖ El canal con únicamente fotones en el estado final permite realizar tests de QED
- ❖ La búsqueda de leptones excitados es otro de los análisis que estamos realizando en nuestro grupo



# Producción del Higgs en LEP según el Modelo Standard

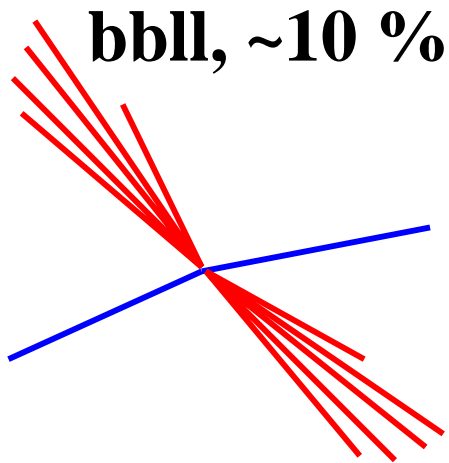


- ❖ El Higgs-strahlung domina a todas las energías de LEP
- ❖ El límite cinemático en LEP2:  $m_H + m_Z \lesssim \sqrt{s}$
- ❖ LEP2 podría detectar el Higgs si  $m_H \lesssim 110$  GeV !!

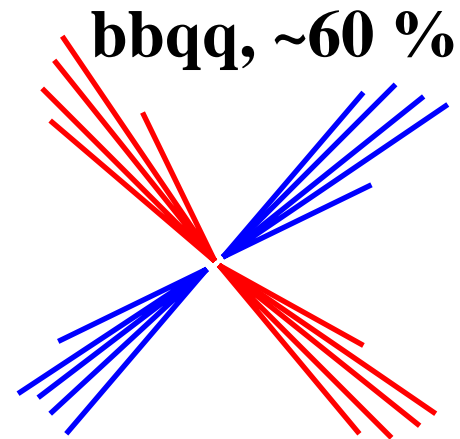


**En LEP:**  
 La anchura del Higgs es muy pequeña  
 El canal de desintegración a buscar:  $H \rightarrow b\bar{b}$

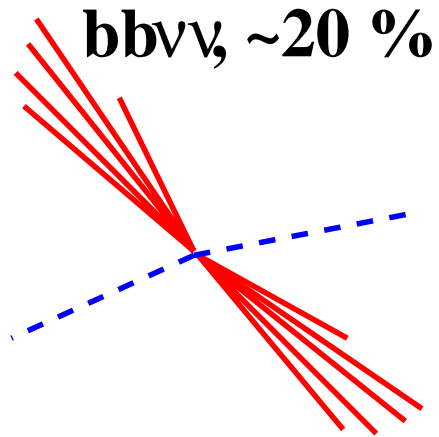
# Signatura Experimental del Higgs del Modelo Standard



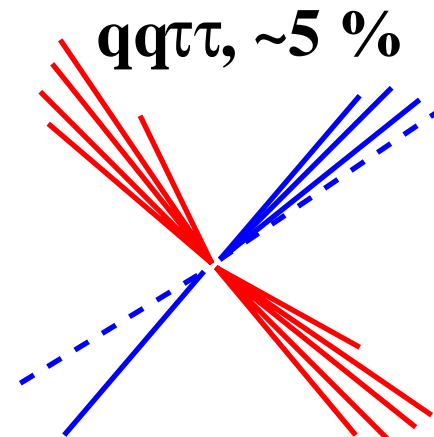
**Golden channel**



**Most relevant at LEP2**



**Most relevant at LEP1**



**Interesting**

## Diferencias entre jets procedentes de quarks *b* y jets procedentes de quarks ligeros

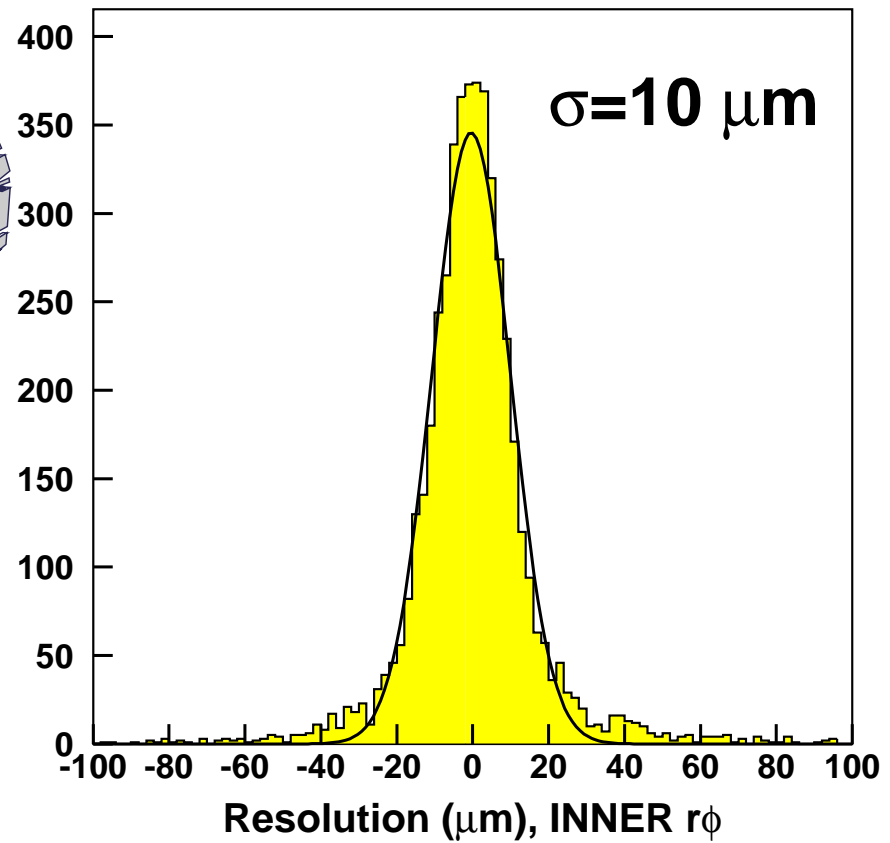
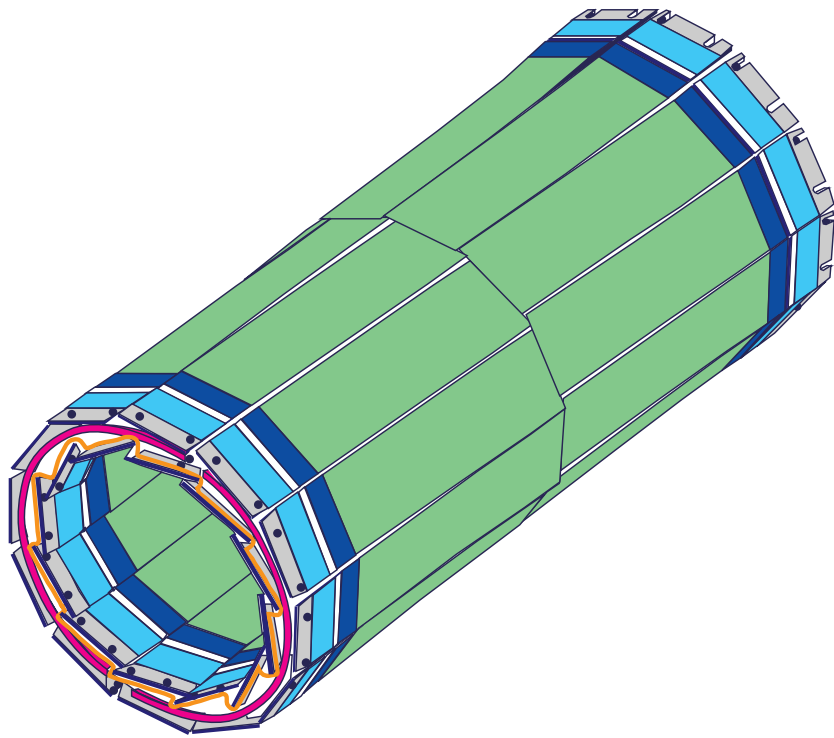
- ❖ Distancia apreciable entre vértice principal y vértices secundarios  
La vida media,  $\tau_b$ , es 1.55 ps, lo que corresponde a una distancia promedio de aproximadamente 3 mm
- ❖ En el caso de desintegraciones semileptónicas, los leptones tienen mayor  $p, p_t$  con respecto a la dirección del jet
- ❖ Mayor masa invariante en vértices secundarios
- ❖ Mayor multiplicidad en vértices secundarios
- ❖ Jets más anchos

## Detector de Microvértice (SMD) de L3

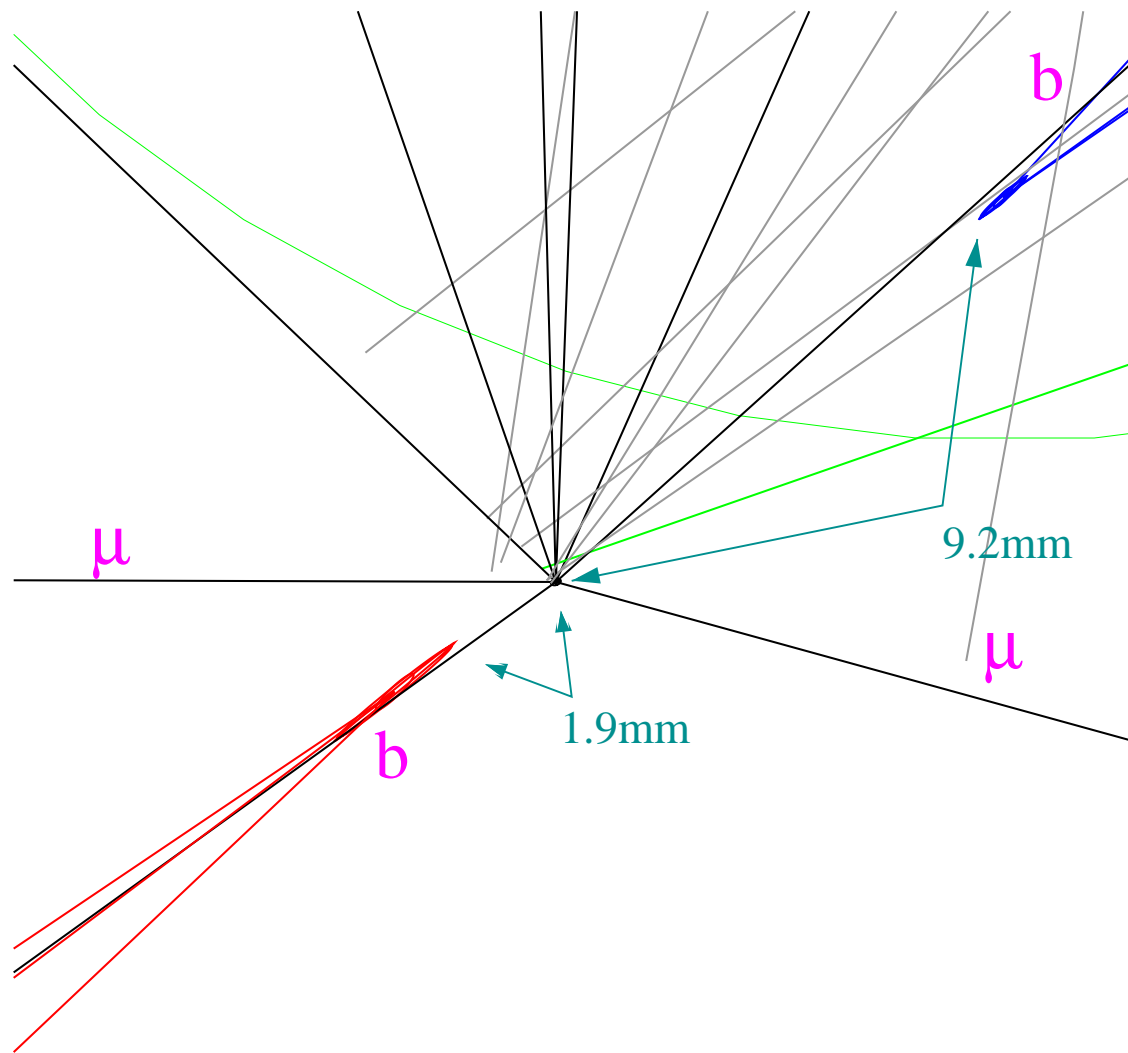
$$\Delta_{\text{vertex}} \simeq 30 \mu\text{m}$$

$$\Delta L \lesssim 400 \mu\text{m}$$

### 99 SMD Performance



Punto de interacción de un probable suceso  $b\bar{b}\mu^+\mu^-$



### Límites actuales

- ❖  $m_H \gtrsim 106 \text{ GeV}$  (Modelo Standard)
- ❖  $m_h, m_A \gtrsim 88 \text{ GeV}$  en el MSSM
- ❖  $1 \lesssim \tan \beta \lesssim 2.2$  en el MSSM
- ❖  $m_{H^\pm} > 77 \text{ GeV}$
- ❖  $m_H \gtrsim 100 \text{ GeV}$ , Higgs invisible
- ❖  $m_H \gtrsim 96 \text{ GeV}$ , Higgs fermiofóbico

### Límites al final de LEP

- ❖  $m_H \lesssim 113 \text{ GeV}$  (Modelo Standard)
- ❖  $m_h, m_A \lesssim m_Z$  en el MSSM
- ❖  $1 \lesssim \tan \beta \lesssim 3$  en el MSSM
- ❖  $m_{H^\pm} < m_W$
- ❖  $m_H \lesssim 110 \text{ GeV}$ , Higgs invisible
- ❖  $m_H \lesssim 110 \text{ GeV}$ , Higgs fermiofóbico

Después de 10 años de operación

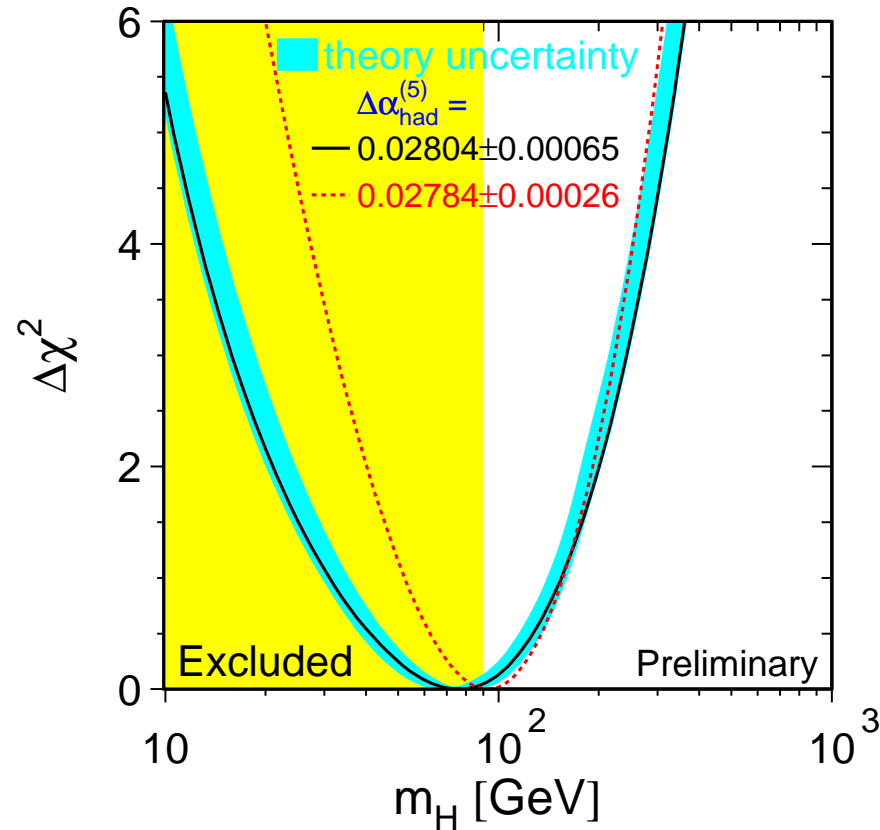
LEP bien merece un poco de suerte y

descubrir el Higgs en el 2000 !!

# La masa del Higgs en el marco del Modelo Standard

La predicción actual del Modelo Standard, incluyendo las medidas de la masa del top y la masa del W

$$M_{Higgs} = 77^{+69}_{-39} \text{ GeV}$$



$m_H < 215 \text{ GeV}$  at 95% CL



# Previsiones de LEP para el año 2000

Energía y luminosidad integrada:

- ❖ 200 pb<sup>-1</sup> a  $\sqrt{s} = 202$  GeV
- ❖ Al menos otros 40 pb<sup>-1</sup> a la máxima energía alcanzable (la esperanza es llegar a  $\sqrt{s} = 206$  GeV)

Combinación de los resultados preliminares disponibles en el mes de julio:

- ❖ Decisión sobre si se prorroga o no la toma de datos

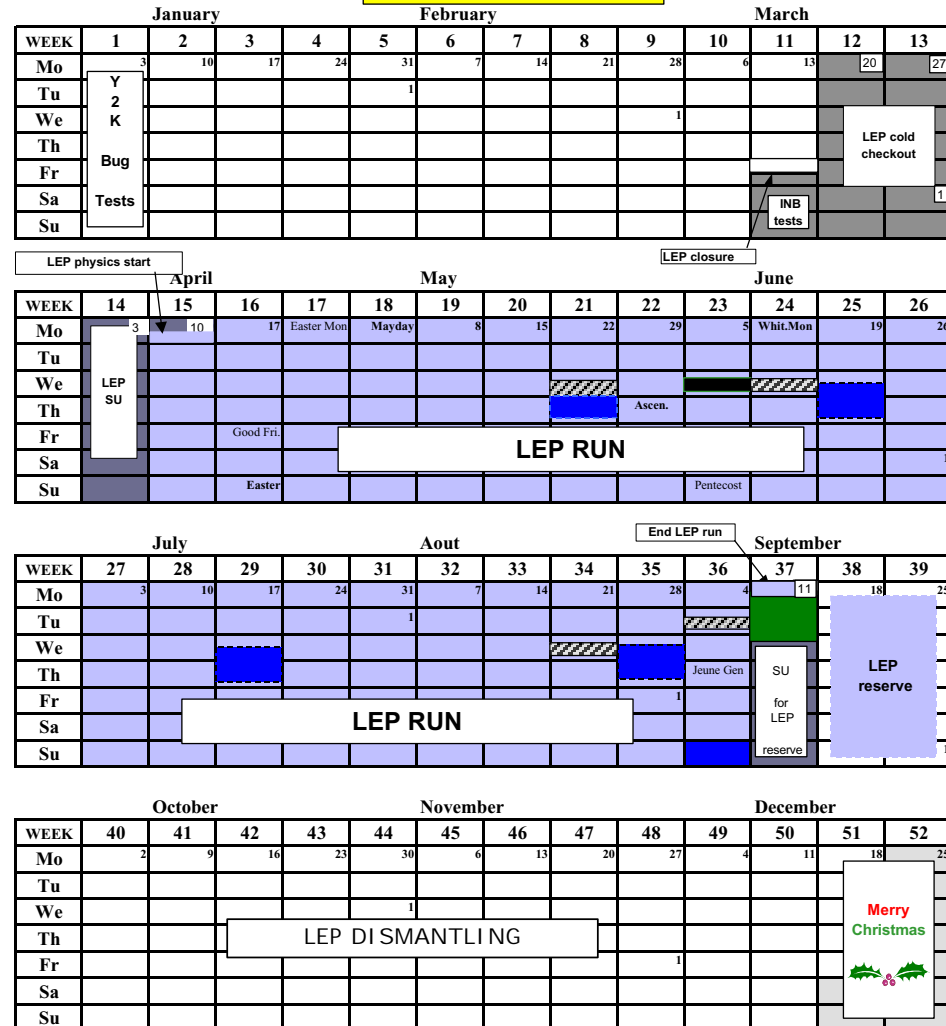
Caso de no encontrar nada nuevo:

- ❖ A finales de Septiembre se acaba LEP

## LEP SCHEDULE 2000

**DRAFT**

38



## Conclusiones de LEP

- ❖ La operación de LEP, y de todos los detectores, ha sido excelente.
- ❖ En 1999, se ha mejorado sustancialmente la precisión en la medida de la masa del W. En el 2000 se espera alcanzar una precisión de 30 MeV. Se espera también medir los acoplamientos  $WW\gamma$  y  $WWZ$  con precisión de unos pocos por ciento.
- ❖ El Modelo Standard ha sido exhaustivamente sometido a verificación experimental. Sus predicciones concuerdan con los datos a niveles de precisión en muchos casos mejor que el 1 %.
- ❖ El único ingrediente aún pendiente de verificación experimental es el Higgs. Su existencia es fundamental para entender el mecanismo de la rotura espontánea de la simetría electrodébil y el origen de la masa de todas las partículas.
- ❖ Los resultados de LEP apuntan a que, si existe, su masa no debe estar lejos de los límites de exclusión actuales, y por tanto aún es posible que aparezca este año (si no, habrá que esperar al LHC para o bien descubrirlo, o bien descartar completamente su existencia).

- ❖ Proyecto de construcción aprobado a finales de 1994
- ❖ En 1996, se aprobaron los dos experimentos más importantes: ATLAS y CMS
- ❖ El LHC se instalará en el túnel de LEP
- ❖ Se trata de un colisionador protón protón con energías en el centro de masas del orden de 14 TeV (a nivel de constituyentes del orden de 1 o 2 TeV).

Esto requiere un campo magnético mucho más intenso que el de LEP, para lo cuál se necesitarán imanes superconductores (8.4 Teslas) funcionando a una temperatura de 1.9 grados K (tecnología de helio superfluido)

- ❖ Se requiere muy alta luminosidad (del orden de  $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ).

debido a que las secciones eficaces de los procesos de interés es muy pequeña

2835 paquetes, cada uno con  $10^{11}$  protones, separados 7.5 metros y cruzándose cada 25 ns. En cada cruce habrá en promedio 20 a 30 interacciones. En cada interacción, se producen del orden de 80 partículas cargadas.

- ❖ Principio de operación previsto para el año 2005

- ❖ Las partículas cargadas de los sucesos no interesantes tienen un valor promedio de  $p_T$  del orden de 500 MeV

Aplicar un corte en  $p_T$ , exigiendo por ejemplo trazas con  $p_T$  mayor que 10 GeV

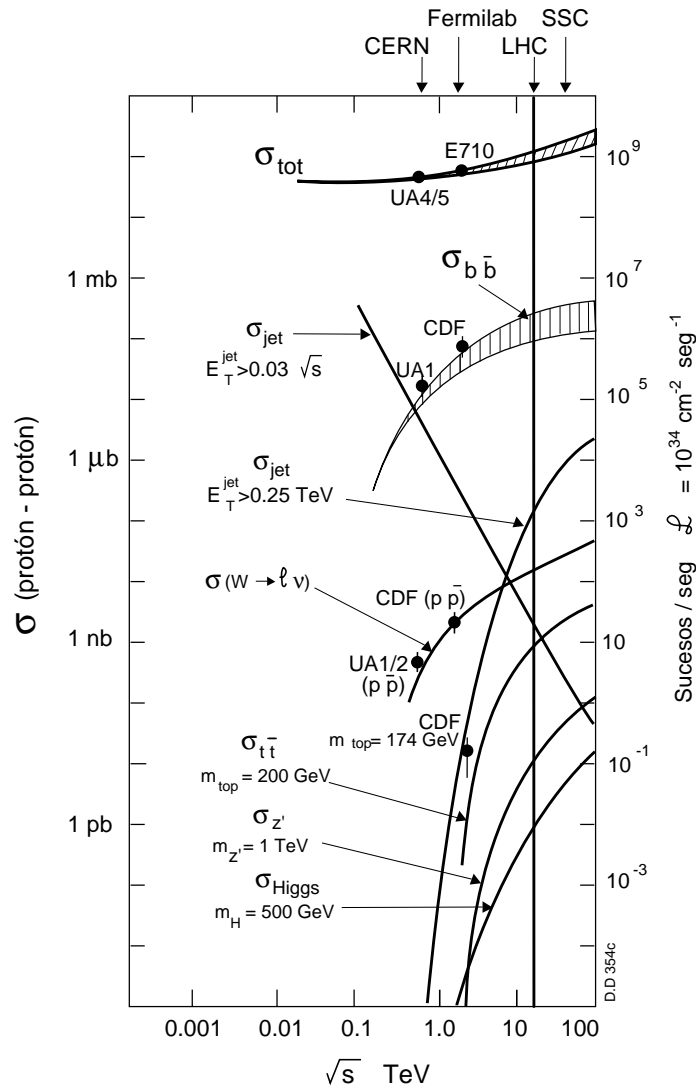
- ❖ Requerimientos específicos del LHC en los detectores a instalar

Rápida respuesta

Alta granularidad

Resistencia a la radiación

Sistemas de trigger y adquisición de datos diferentes a los actuales



- ❖ La sección eficaz total es del orden de 100 mb
- ❖ Del orden de  $10^{11}$   $b\bar{b}$  por año a una luminosidad de  $10^{32}$
- ❖ Del orden de  $10^6$   $t\bar{t}$  por año a una luminosidad de  $10^{32}$
- ❖ Del orden de  $10^3$  sucesos/segundo con jets de  $E_T$  mayor que 250 GeV
- ❖ Producción de Z's y W's 20 veces superior a los mayores colisionadores actuales
- ❖ La sección eficaz de producción del Higgs dependerá del valor de su masa

Estudio general de las interacciones a escalas de energía del orden del TeV

- ❖ Búsqueda del Higgs o de mecanismos alternativos
- ❖ Para masas inferiores a 150 GeV, el canal más interesante es  $H \rightarrow \gamma\gamma$

La probabilidad de desintegración en dos fotones del Higgs es solamente del 3 por mil, pero esta señal es la más limpia

El canal  $H \rightarrow b\bar{b}$  tiene una enorme contaminación

- ❖ Para masas superiores a 150 GeV, el canal más interesante es  $H \rightarrow ZZ$  o  $H \rightarrow WW$  donde los Z's y W's se desintegran leptónicamente

- ❖ Búsqueda del Higgs del MSSM
- ❖  $h^0$  debe ser ligero (masa no superior a 130 GeV). Probablemente el canal  $\gamma\gamma$  será de nuevo el más favorable
- ❖ La búsqueda de  $H^0$  y  $A^0$  dependerá del valor de  $tg(\beta)$ . Posibles canales:  $H^0 \rightarrow WW$ ,  $H^0 \rightarrow hh$  y  $A^0 \rightarrow Zh$ . Si  $tg(\beta)$  es grande, los canales  $b\bar{b}$ ,  $\tau\tau$ , o incluso  $\mu\mu$ , pueden ser más favorables
- ❖ En el caso de los  $H^+H^-$ , los canales más prometedores son  $\tau\nu$  o  $t\bar{b}$  si la masa del H lo permite
- ❖ Todos los estudios realizados indican que si el Higgs existe se encontrará en el LHC. Si no, algún mecanismo alternativo debe manifestarse a esta escala de energías

## SUSY entusiasmo a muchos físicos teóricos

quarks .....	squarks	( $u, d$ , etc)
leptones .....	sleptones	( $e, \mu$ , etc)
W's .....	winos	( $\chi^+, \chi^-$ )
$H^+ H^-$ ....	higgsinos cargados	"charginos"
$\gamma$ .....	photino	
$Z^0$ .....	zino	$\chi^0$
$H^0, h^0$ .....	higgsinos neutros	neutralinos
$g$ .....	gluinos	( $g$ )

Generalmente se asume que las partículas supersimétricas se producen a pares y que la que tiene menos masa es estable (LSP)

La signatura experimental más importante para buscar evidencia de la existencia de estas partículas es la "energía transversa no balanceada" (transverse missing energy)



Búsqueda de nuevos bosones:  $W'$ ,  $Z'$

Búsqueda de nuevas partículas

Medida de la masa y propiedades del top

Física de B's (Estudios de violación de CP)

Medida de secciones eficaces diversas: producción de  $W$ 's,  $Z$ 's, fotones muy energéticos, jets, ...

Estudio de interacciones Pb - Pb (plasma de quarks y gluones)

Desde el punto de vista experimental, todos estos objetivos requieren poner a punto detectores especialmente diseñados para identificar y medir con precisión leptones o fotones aislados de alto momento transversal y medir también la energía total hadrónica con capacidad de detectar sucesos con alta energía transversal no balanceada.

- ❖ Permite medir el momento de las partículas cargadas
- ❖ El objetivo fundamental es medir con la máxima precisión leptones muy energéticos

En el caso de electrones la información del tracker complementa la del calorímetro electromagnético

En el caso de muones, el Tracker necesita al detector de muones para identificar la partícula

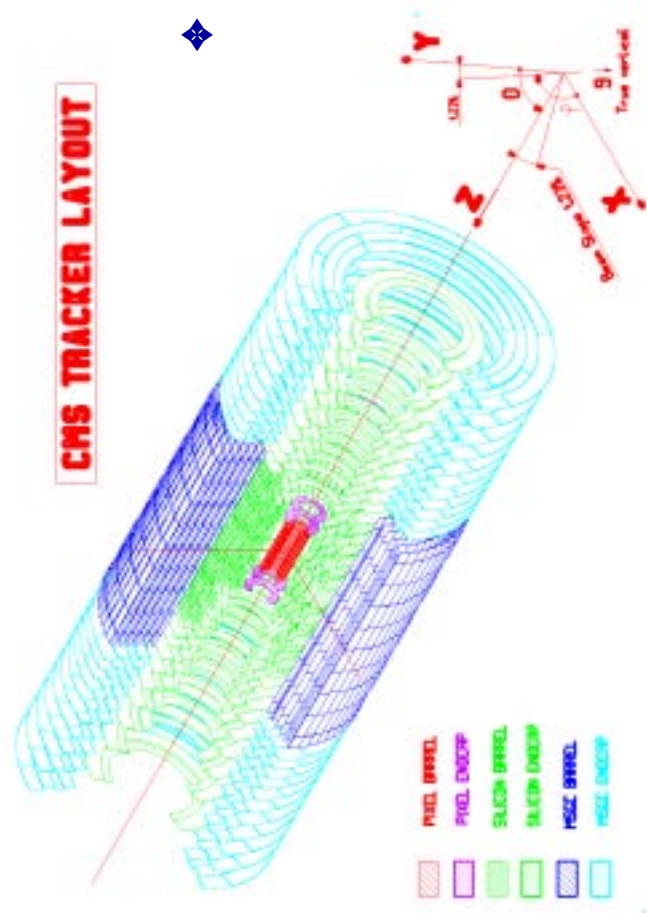
- ❖ La medida del momento de hadrones cargados es también muy útil:

ayuda a la reconstrucción de jets y es importante para entender si los leptones están aislados o forman parte de algún jet

- ❖ Permite reconstruir vértices y distinguir entre vértices primarios y secundarios

fundamental para identificación de  $b$ 's y también útil para identificar  $\tau$ s

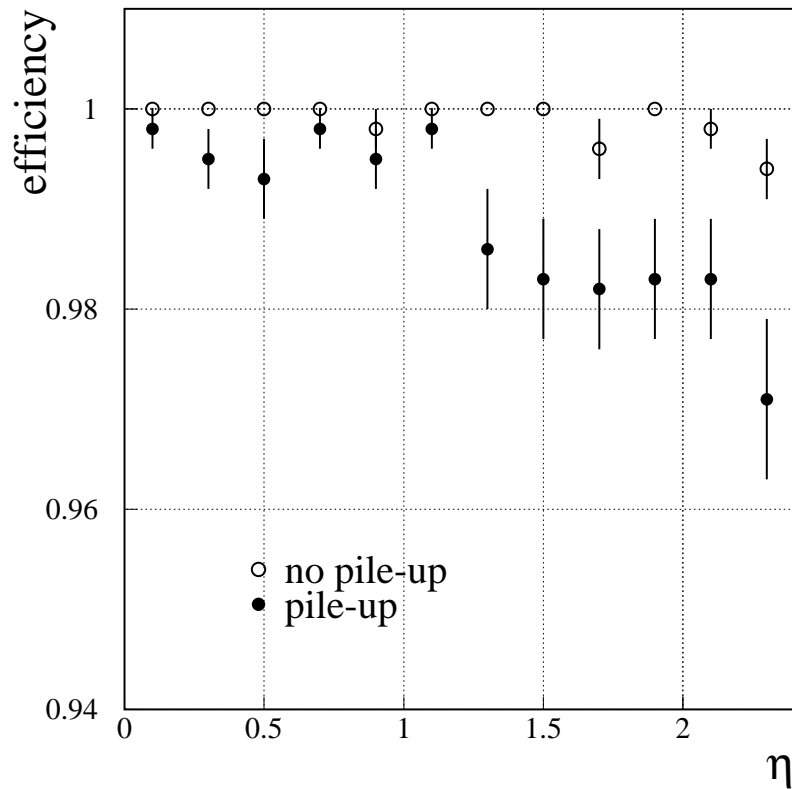
- ◆ Dimensiones: radio 115 cm, longitud 540 cm



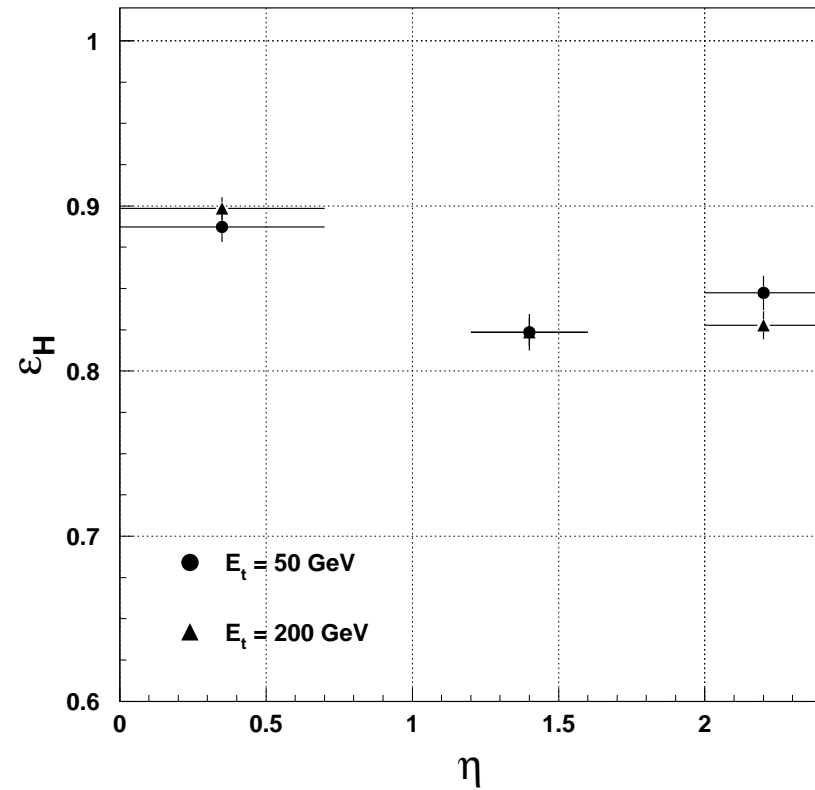
- ◆ Tecnología: detectores de silicio, pixels en el interior ( $15\mu$  de resolución) y "microstrips" en la parte externa ( $40\mu$  de resolución). En total una superficie activa de  $300m^2$  y 13 capas de detección

- ◆ Número de canales electrónicos:  $40 \times 10^6$

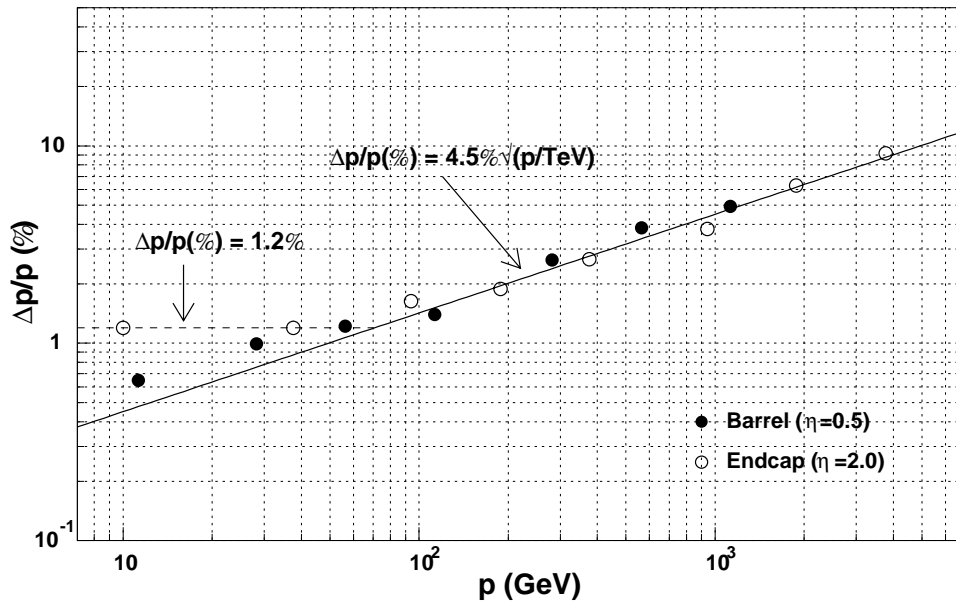
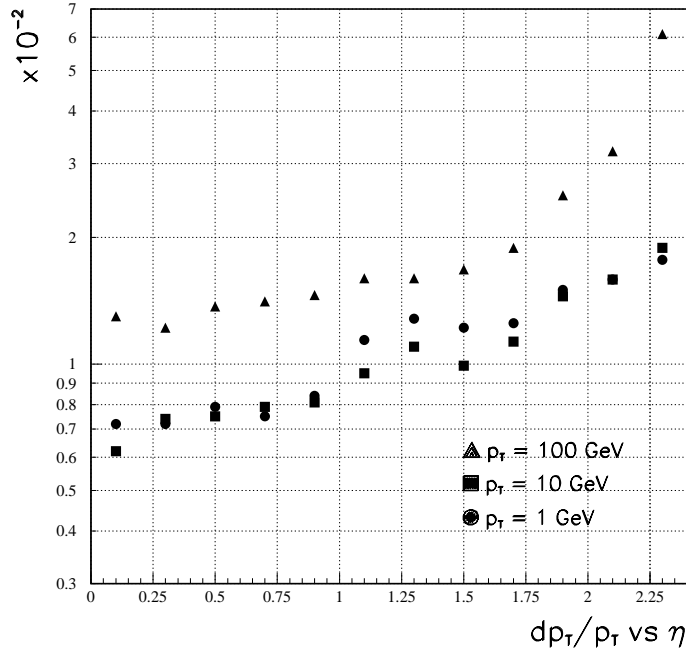
# Eficiencia de reconstrucción de trazas



Eficiencia para muones superior al 98 %

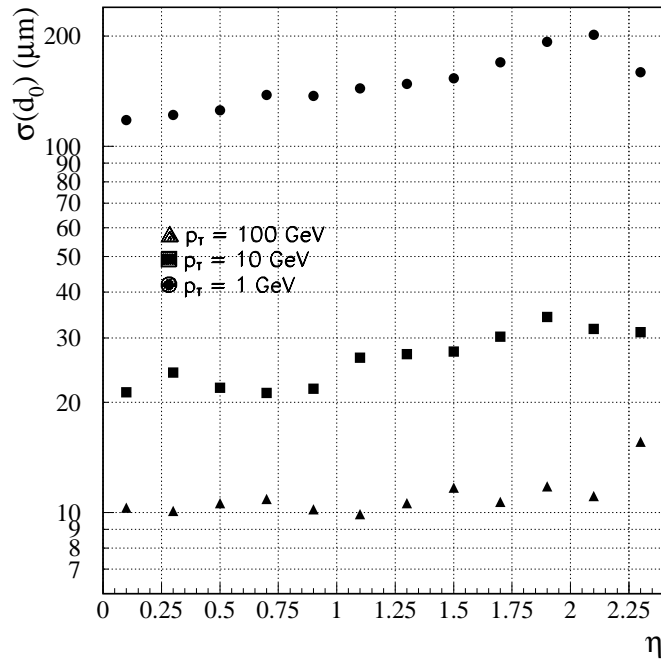


La eficiencia para hadrones cargados, dentro de un jet, está en torno al 85-90 %



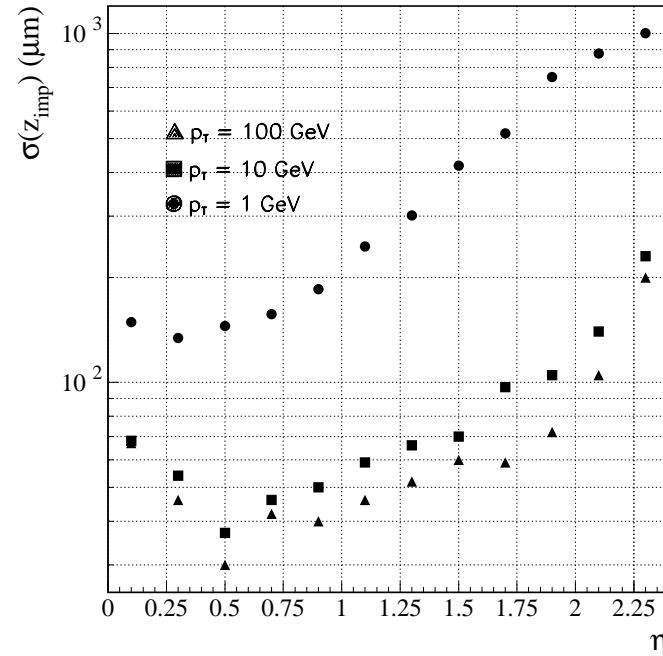
# Reconstrucción de vértices

## Resolución en la dirección transversa



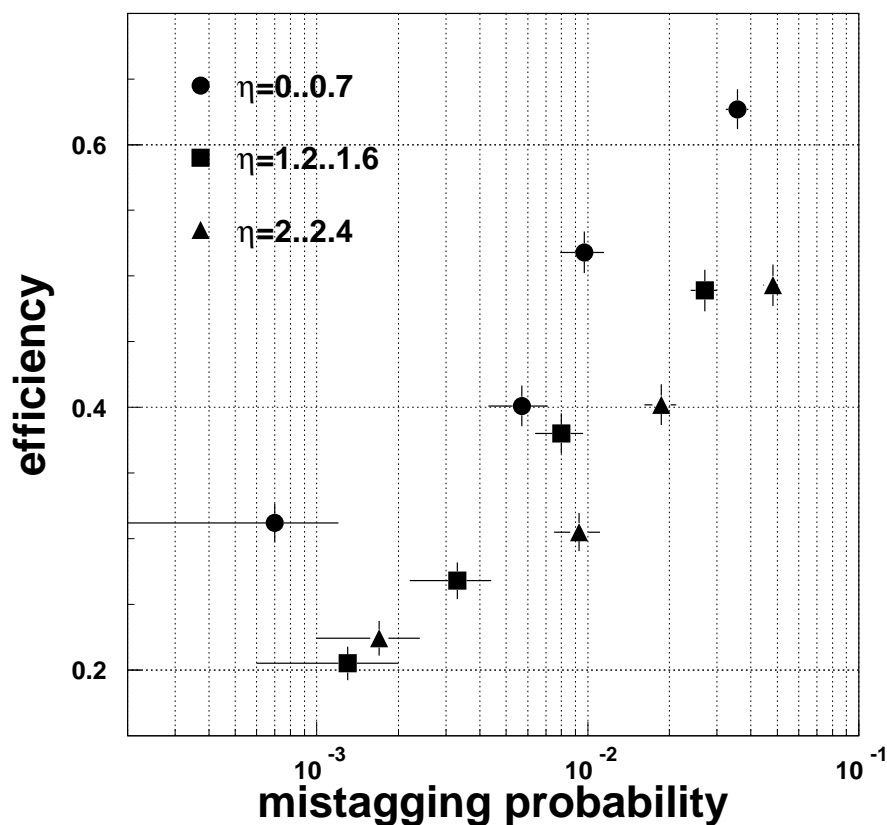
Mejor que 35  $\mu$  para  $p_T$  mayor que 10 GeV

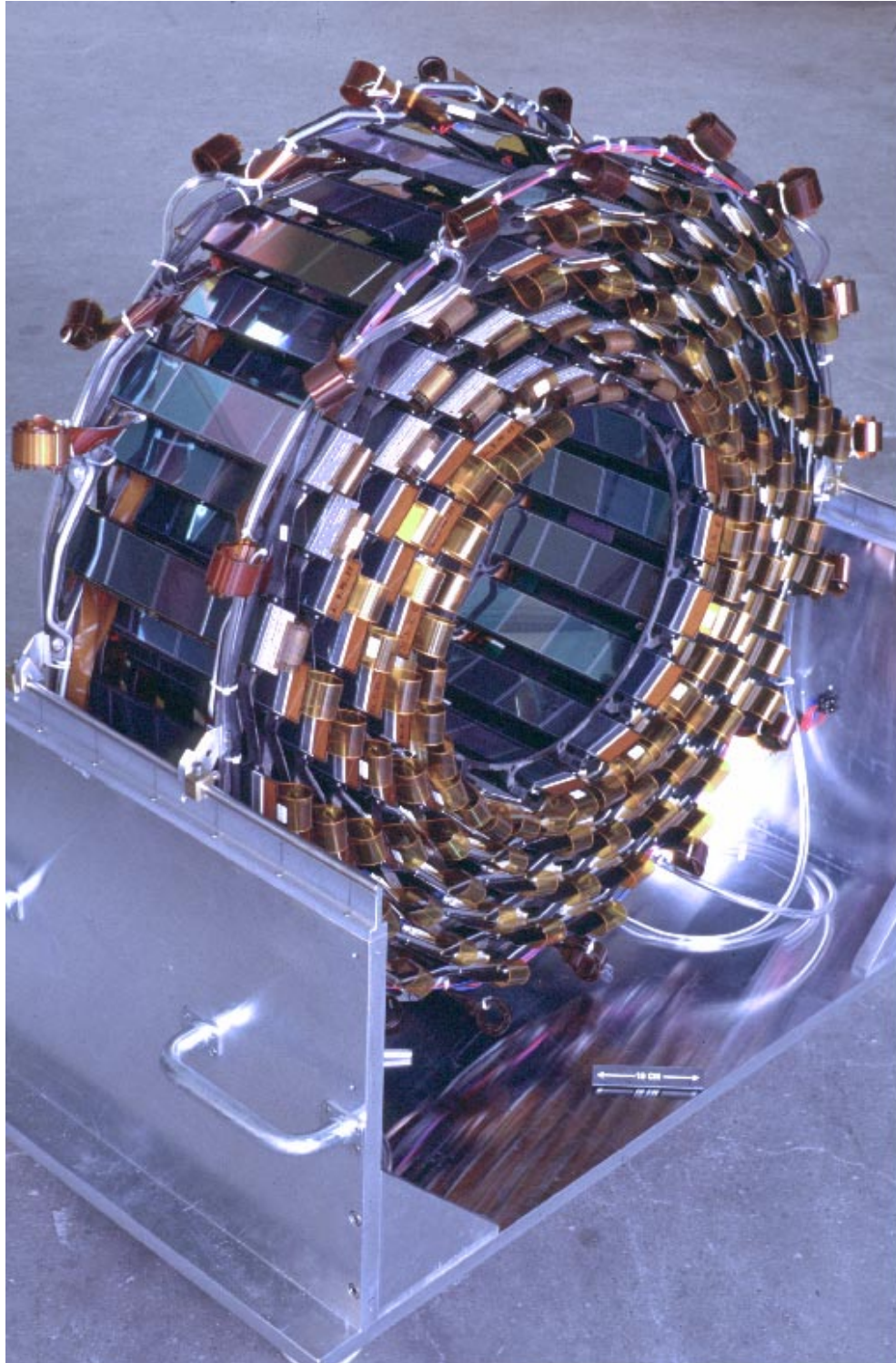
## Resolución en la dirección longitudinal



Mejor que 100  $\mu$  para  $p_T$  mayor que 10 GeV

Se han utilizado diferentes algoritmos con datos simulados por Montecarlo en las condiciones de máxima luminosidad del LHC y se ha demostrado que es posible conseguir eficiencias del orden del 50 % en la identificación de b jets con probabilidades de equivocación del orden del 1 %







Los electrones y fotones depositan toda su energía en este calorímetro

Sus funciones principales son:

- ❖ Medir con mucha precisión la energía de electrones y fotones

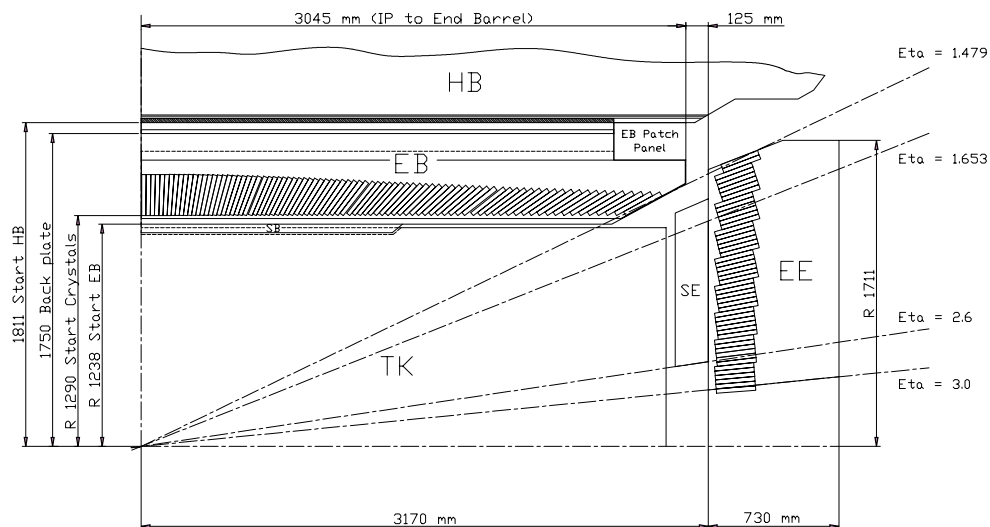
asumiendo que provienen del punto de interacción puede medir también su dirección gracias a su muy alta granularidad

- ❖ Separar electrones y fotones del resto de las partículas

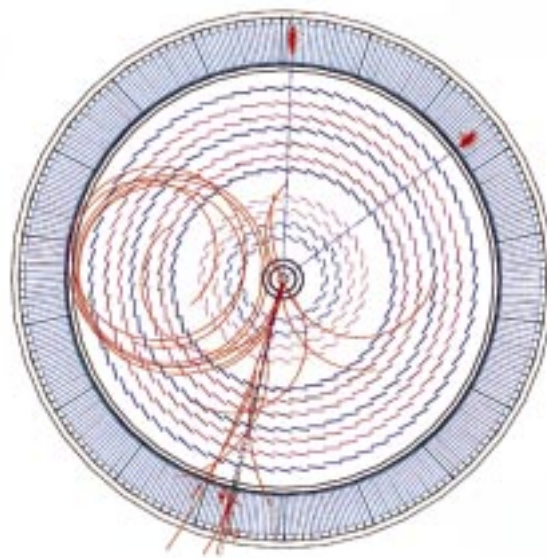
con la ayuda del "tracker" puede distinguir también entre electrones y fotones

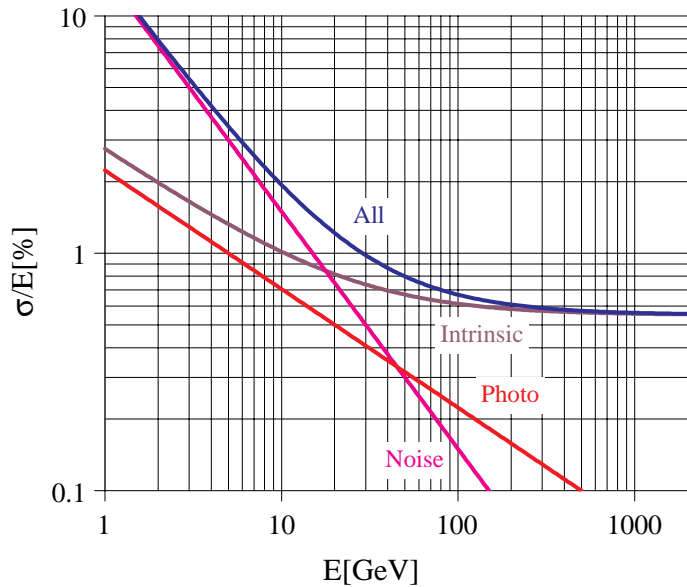
- ❖ Contribuir a la medida de energía de los jets

Uno de los objetivos más importantes de este calorímetro es descubrir el Higgs en el canal  $H^0 \rightarrow \gamma\gamma$  en el caso de que su masa sea inferior a 150 GeV. Para éllo es fundamental optimizar la resolución en la medida de la masa  $\gamma\gamma$ .

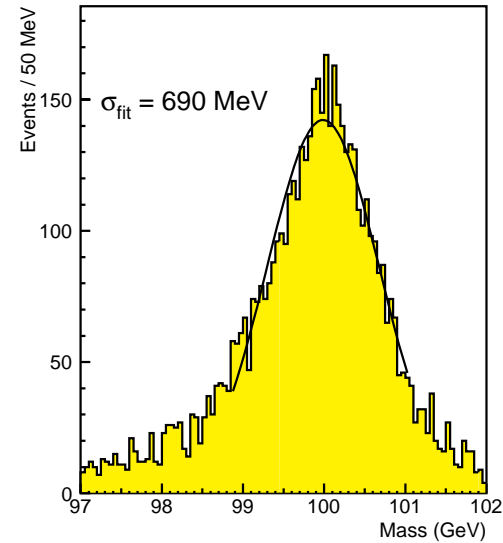


- ❖ 83.000 cristales de  $PbWO_4$ , de dimensiones  $22 \times 22 \text{ mm}^2$  de sección y 230 mm de longitud, equipados con APD's (Avalanche photodiodes)
- ❖ Resistente a la radiación, con tiempo de respuesta inferior a 10 ns. Debe funcionar con temperatura estable (variaciones inferiores a 0.1 grados)
- ❖ Número de canales electrónicos: 240000



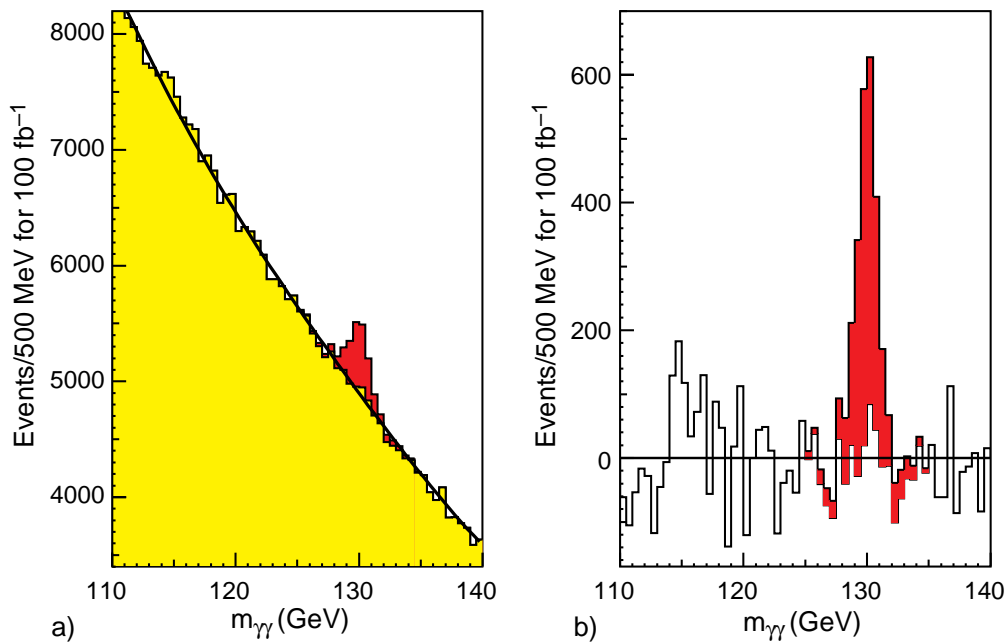


La resolución en la medida de la energía es mejor que el 1% por encima de 30 GeV

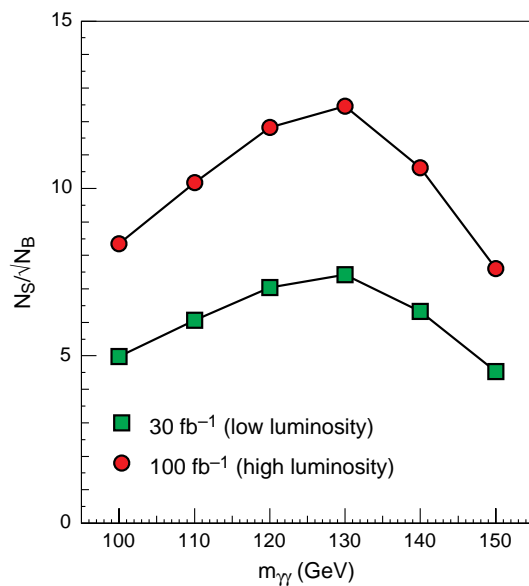


La resolución en la masa invariante de dos fotones es del orden de 0.7 GeV

La eficiencia en la reconstrucción de 1 fotón es aproximadamente 75 % y la aceptación del proceso  $H^0 \rightarrow \gamma\gamma$  es del 52 %



Análisis de sucesos simulados por Montecarlo, en condiciones del LHC, suponiendo que el Higgs tiene una masa de 130 GeV



Significación estadística de la señal en función de la masa del Higgs

## Cristales de $PbWO_4$



Permite medir la energía de todos los hadrones producidos (y la energía "missing")

A partir de su información se pueden reconstruir jets, sobre todo los que proceden de quarks o gluones de alto momento transversal

Su tecnología es bastante convencional

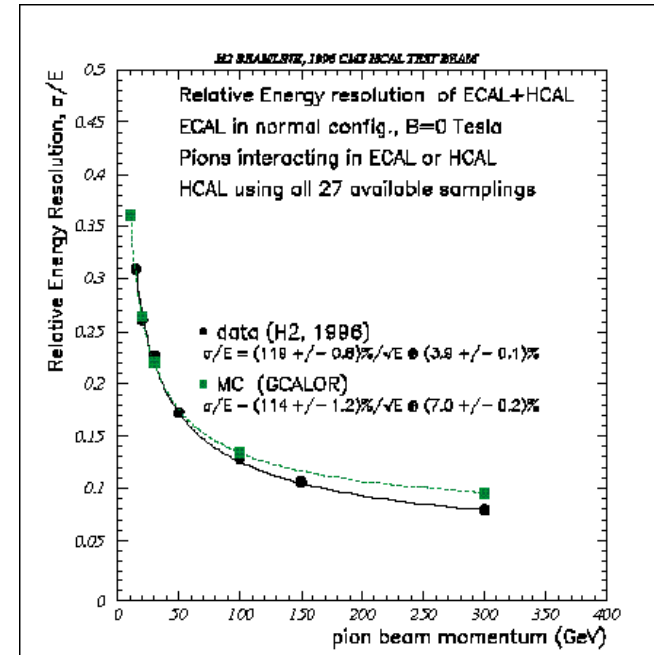
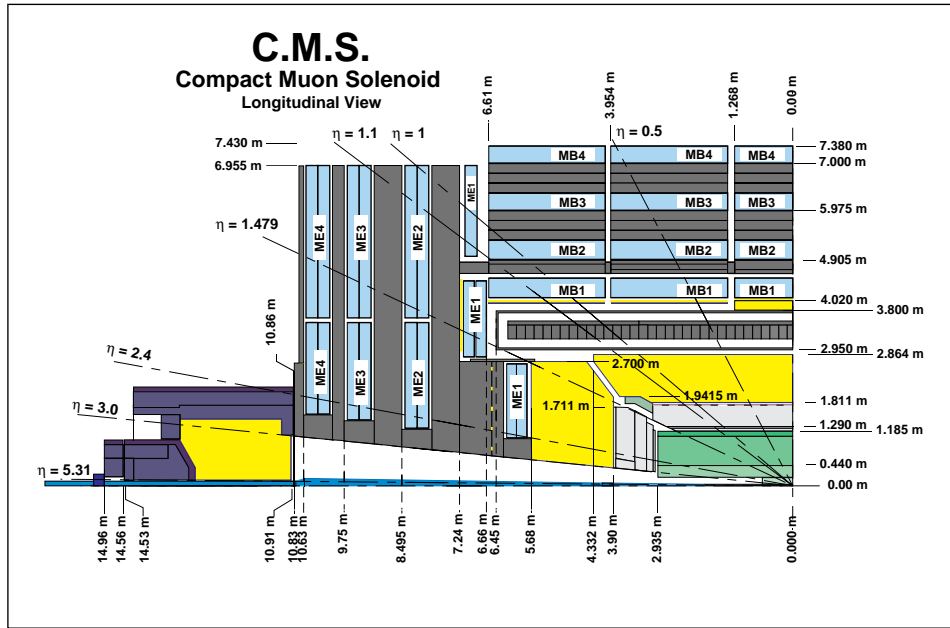
en la región central: capas alternadas de cobre y centelleador

en la región delantera y trasera: capas alternadas de cobre y fibra de cuarzo

Los requisitos fundamentales son:

- ❖ una elevada granularidad en el plano transversal para mejor identificación de jets
- ❖ una muy buena hermeticidad para medir la energía "missing"
- ❖ una razonable resolución en energía
- ❖ espesor suficiente para garantizar que los hadrones depositan íntegramente su energía

# El HCAL de CMS



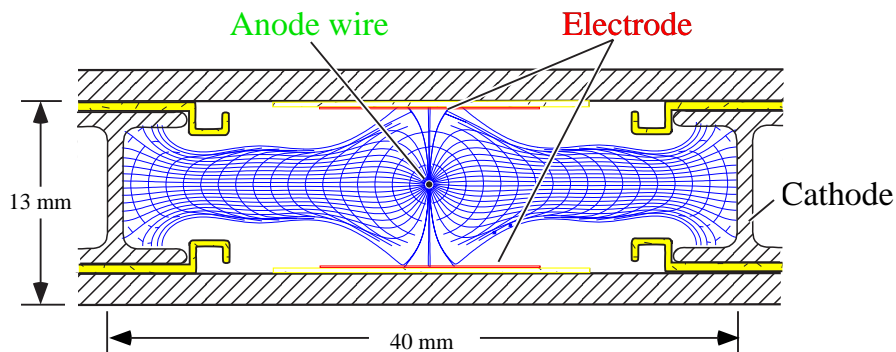
Resolución en energía para datos tomados en un test beam de piones del CERN comparada con la obtenida en simulaciones Montecarlo

## Objetivos fundamentales:

- ❖ Identificación de muones
  - 16  $\lambda$  de material delante
- ❖ Garantizar el trigger de sucesos con al menos un muon de alto  $p_T$ 
  - identificando el cruce sin ambigüedad
- ❖ Medir el momento de forma independiente
  - por si acaso no es posible encontrar en el tracker la traza correspondiente

## Tres tipos diferentes de detectores:

En la parte central cámaras multicapa de tubos de deriva

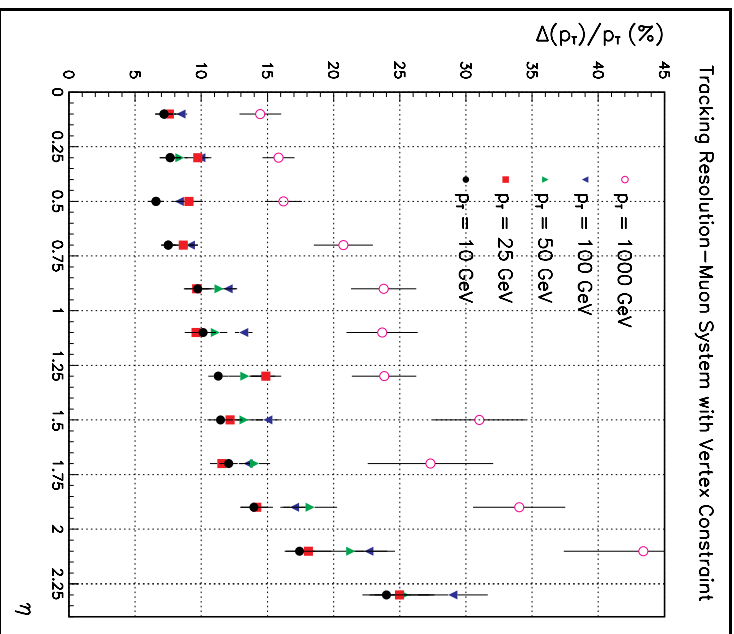


En la parte delantera cámaras de bandas catódicas (Cathode Strip Chambers, CSC's)

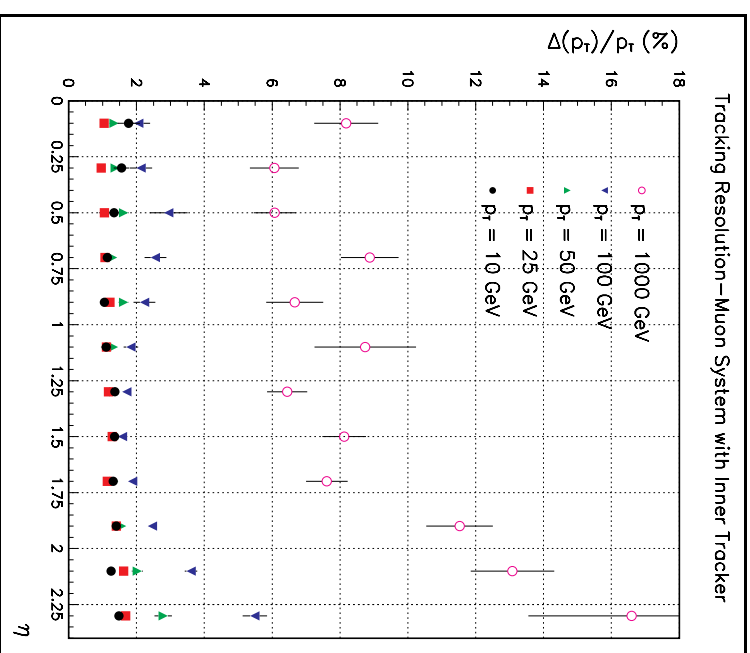
Cámaras de planos resistivos (RPC's) en todas las zonas para proporcionar un sistema de trigger independiente y redundante



# Precisión en la medida del momento de los muones

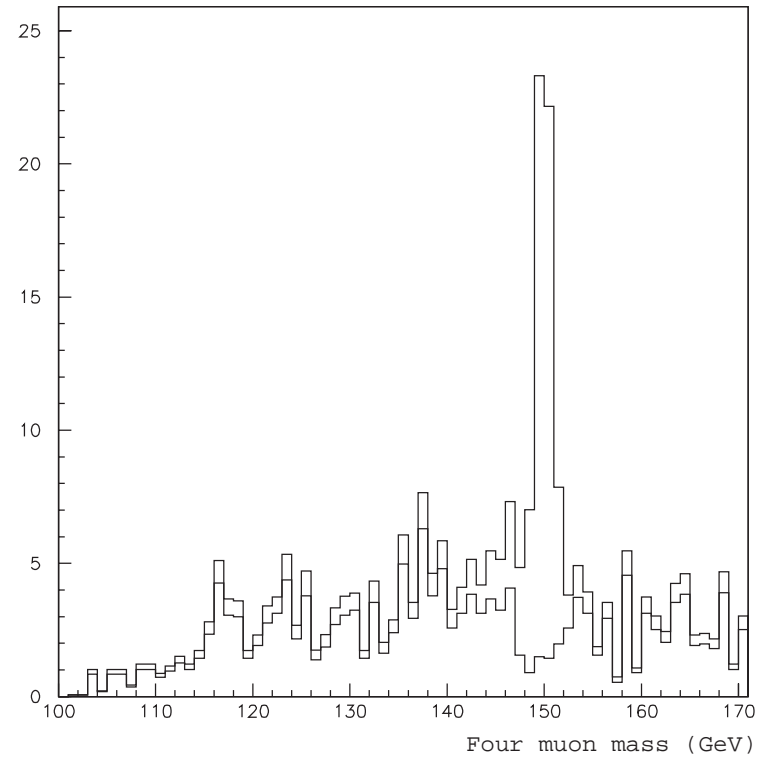
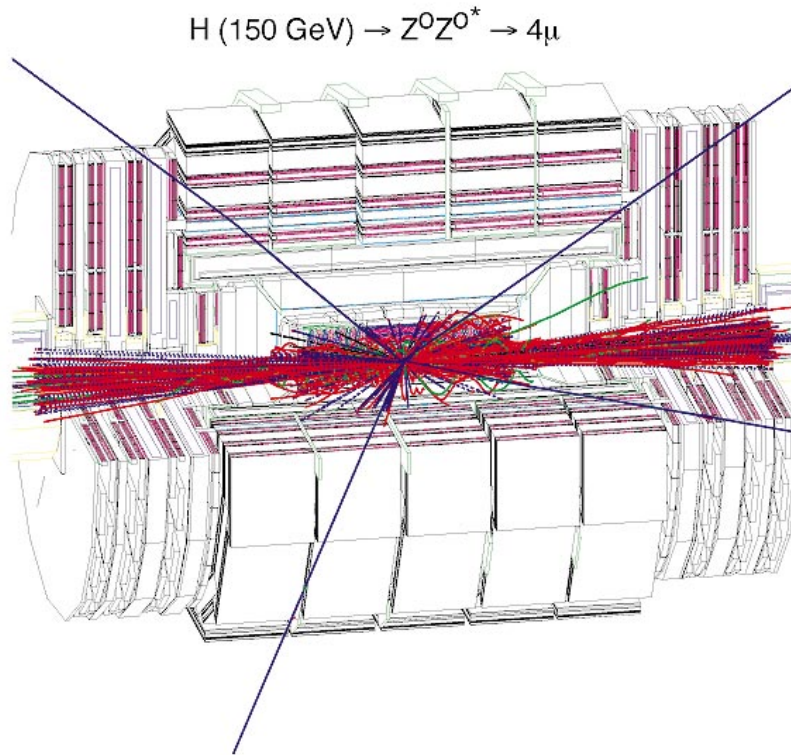


Resolución del detector de muones de forma independiente



Resolución cuando se utiliza también la información del tracker

# El Detector de muones de CMS



La señal del Higgs destaca claramente sobre un pequeño ruido de fondo



## LHC. Conclusiones

A pesar de las dificultades, solo esbozadas en mi charla, que nos esperan en el LHC, yo creo que habrá experimentos preparados para estudiar lo que la física nos depara a energías del orden de los TeV.

Y espero que estemos también preparados para todo tipo de sorpresas, y obtengamos las respuestas correctas, independientemente de que hayan sido o no predichas por nuestros amigos los físicos teóricos.