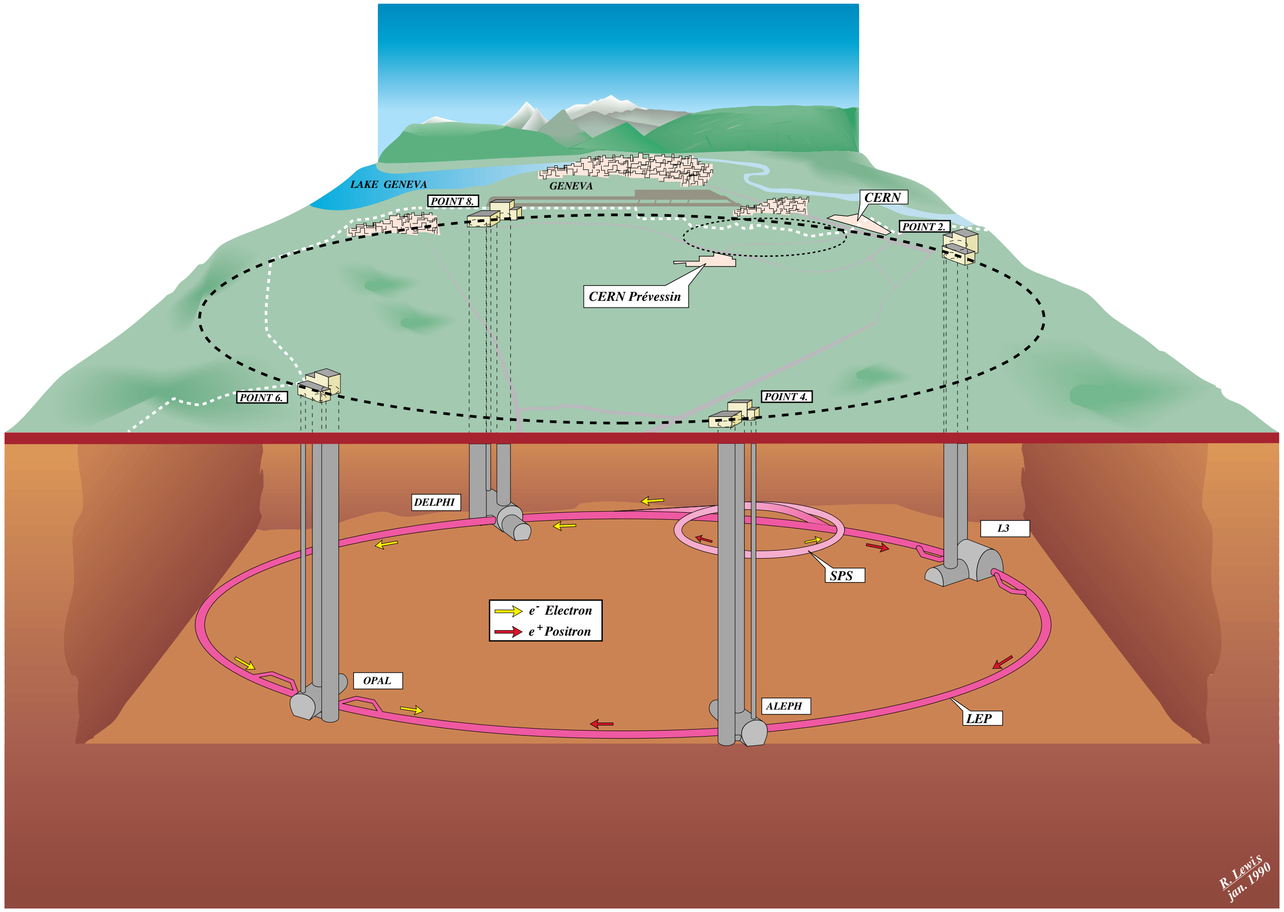
Resultados de LEP y perspectivas para el LHC

M. Cerrada
CIEMAT Madrid

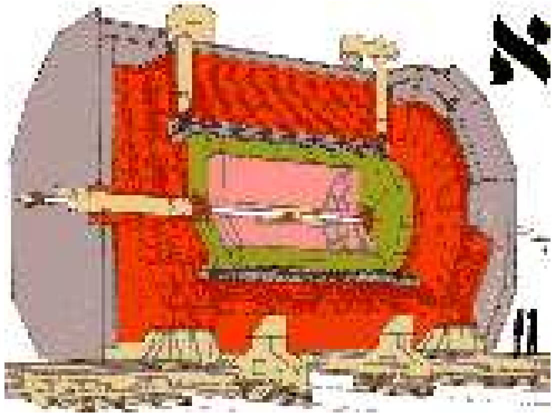
Enero 26, 2000
Seminario Univ. Complutense, Madrid

- 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

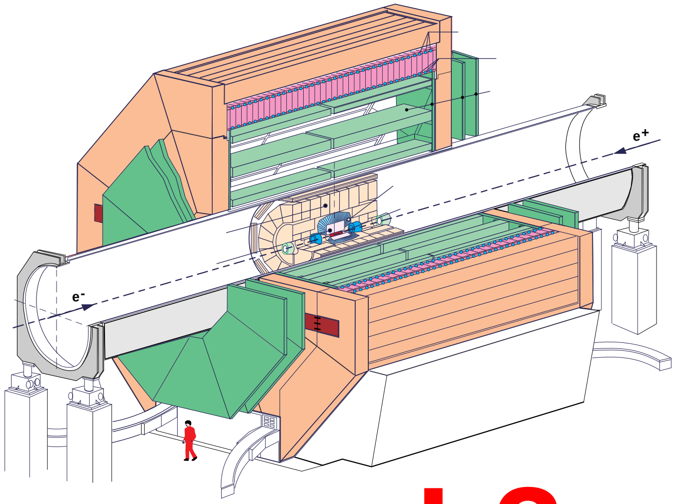
LEP



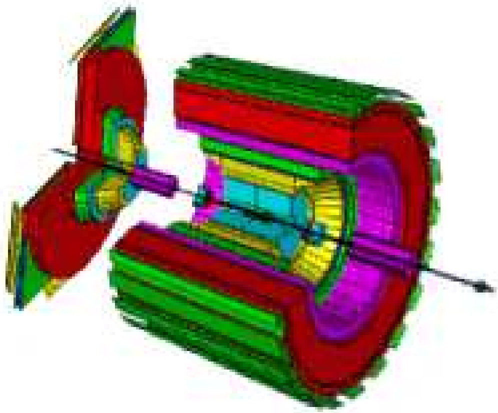
- 27 Km de circunferencia
- Paquetes con 10^{11} - 10^{12} electrones y positrones
- Cruces cada $22.5\ \mu s$, luminosidad nominal $10^{31} s^{-1} cm^{-2}$
- 4 experimentos : ATLAS, DELPHI, L3 y OPAL



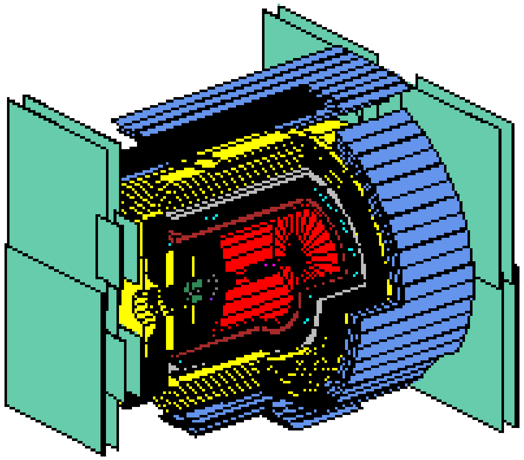
ALEPH



L3



DELPHI

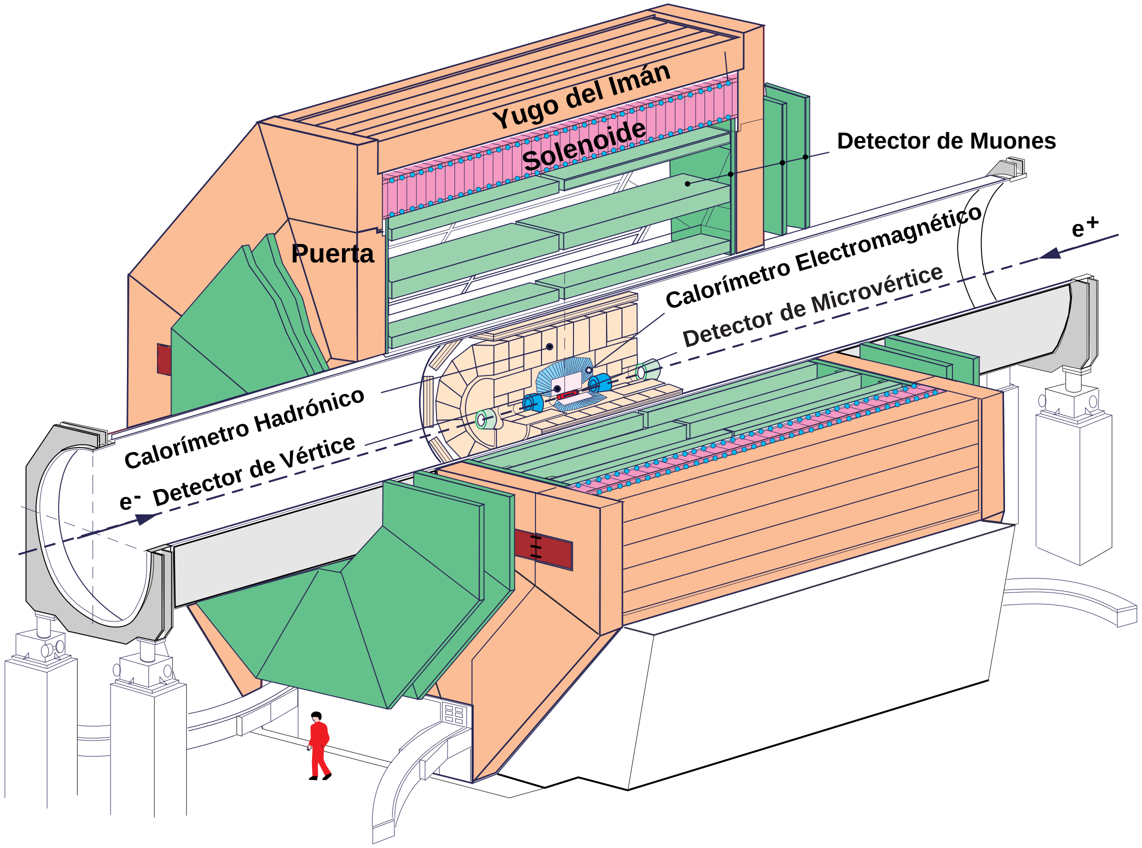


OPAL

PROGRAMA LEP: colisiones e^+e^-

Periodo	$\sqrt{s}$ [GeV]	Luminosidad [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	???	???

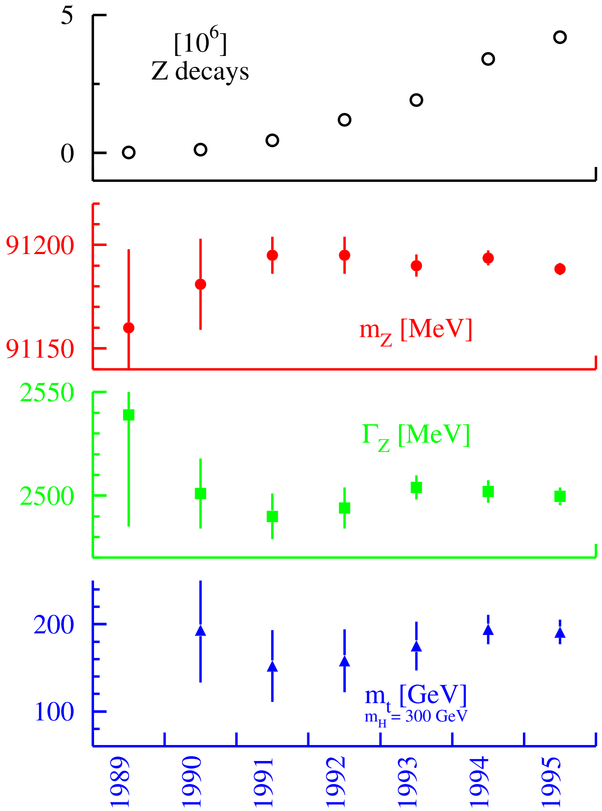
El detector L3

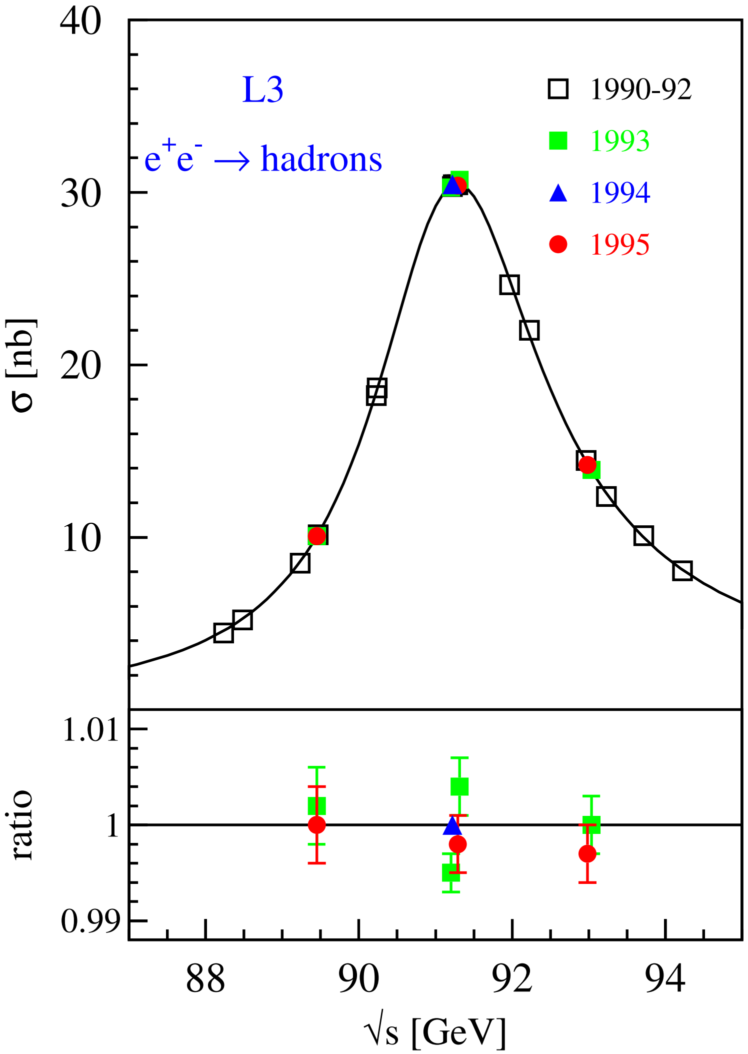


El grupo del CIEMAT contribuyó a la construcción del detector de muones

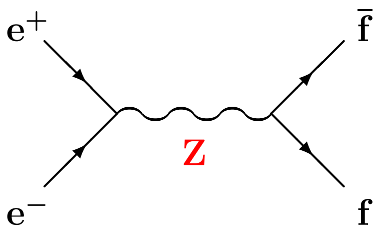
- Construcción de 96 cámaras de deriva
- Octantes, instalación en el CERN, alineamiento, monitoring
- En funcionamiento estable durante más de 10 años !!

Del orden de 4×10^6 sucesos en la región del Z^0





A orden más bajo los procesos más importantes son



$$
\begin{aligned}
\mathrm{e^+e^-} \;\longrightarrow\; \mathrm{Z} \;&\longrightarrow \textbf{hadrons}\\
&\longrightarrow \mathrm{e^+e^-}\\
&\longrightarrow \mu^+\mu^-\\
&\longrightarrow \tau^+\tau^-
\end{aligned}
$$

$$\sigma_{\mathrm{Z}}^{f}(s) \;=\; \frac{12\pi}{m_{\mathrm{Z}}^2}\,\frac{s\Gamma_{\mathrm{e}}\Gamma_{\mathrm{f}}}{(s-m_{\mathrm{Z}}^2)^2 + s^2\Gamma_{\mathrm{Z}}^2/m_{\mathrm{Z}}^2}$$

$$\Gamma_{\mathrm{f}} \propto [(\bar{g}_{\mathrm{V}}^{\mathrm{f}})^2 + (\bar{g}_{\mathrm{A}}^{\mathrm{f}})^2]$$

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.

Resultados de LEP1

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 τ, 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:

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

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

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

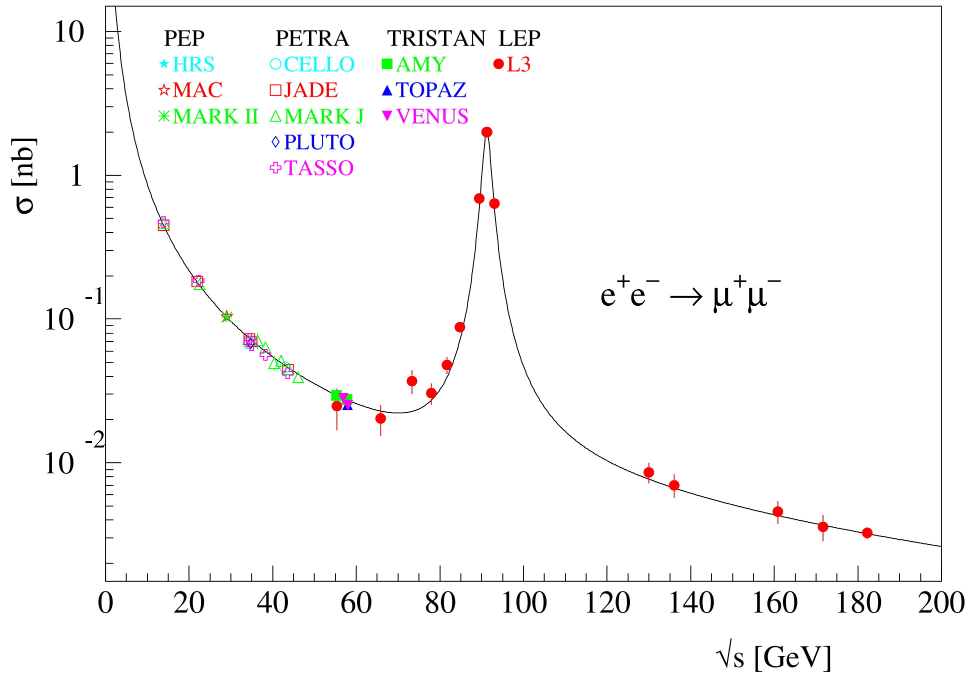
El Modelo Standard tiene "demasiados" parámetros, pero tiene también un enorme poder predictivo y, hasta la fecha, todos los resultados experimentales están en perfecto acuerdo con las predicciones

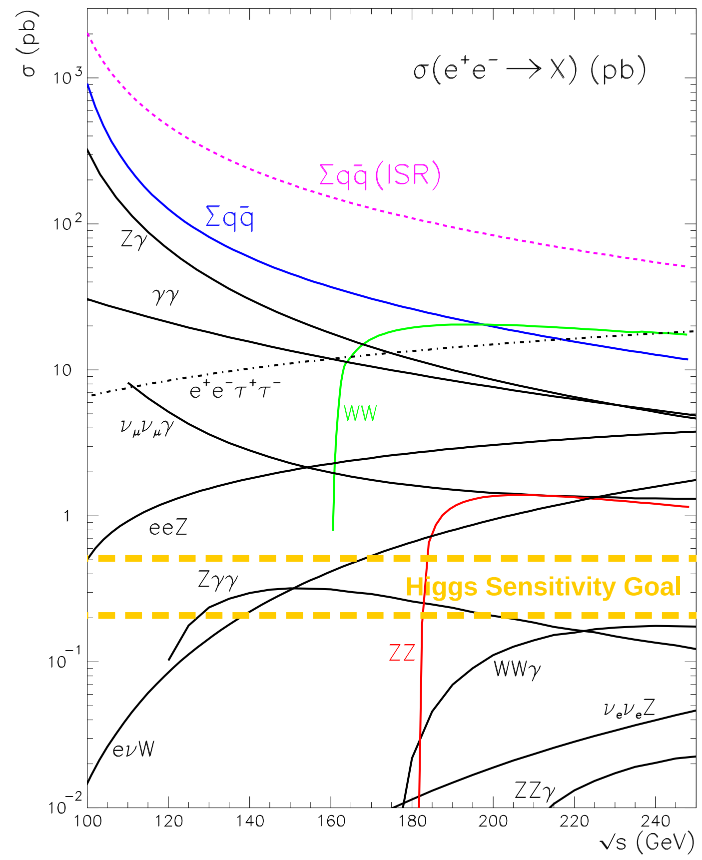
Ejemplos significativos son:

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

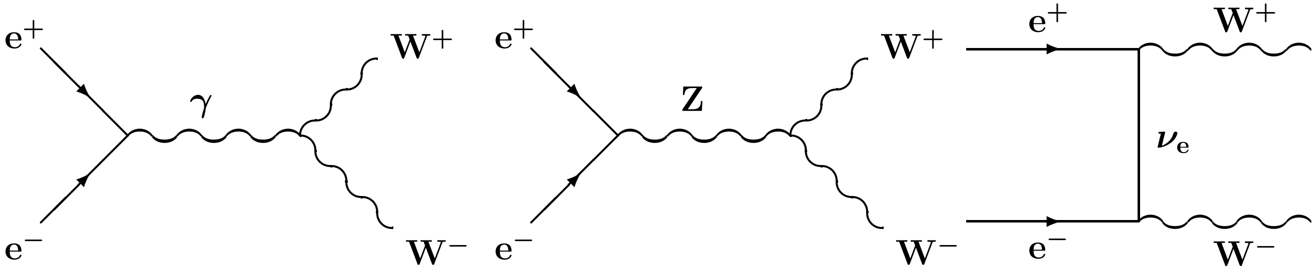
Hay también predicciones sobre la masa del Higgs

Escenario en LEP2



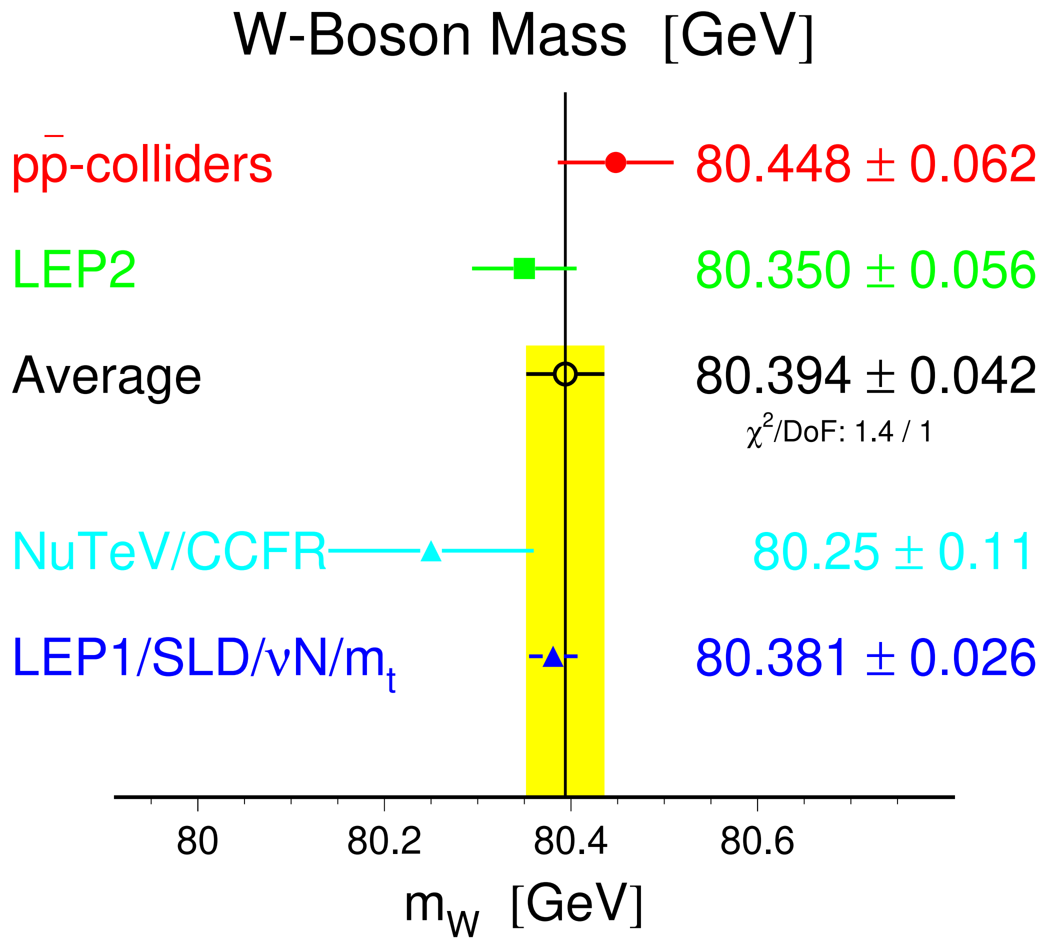


Producción de W's en LEP2

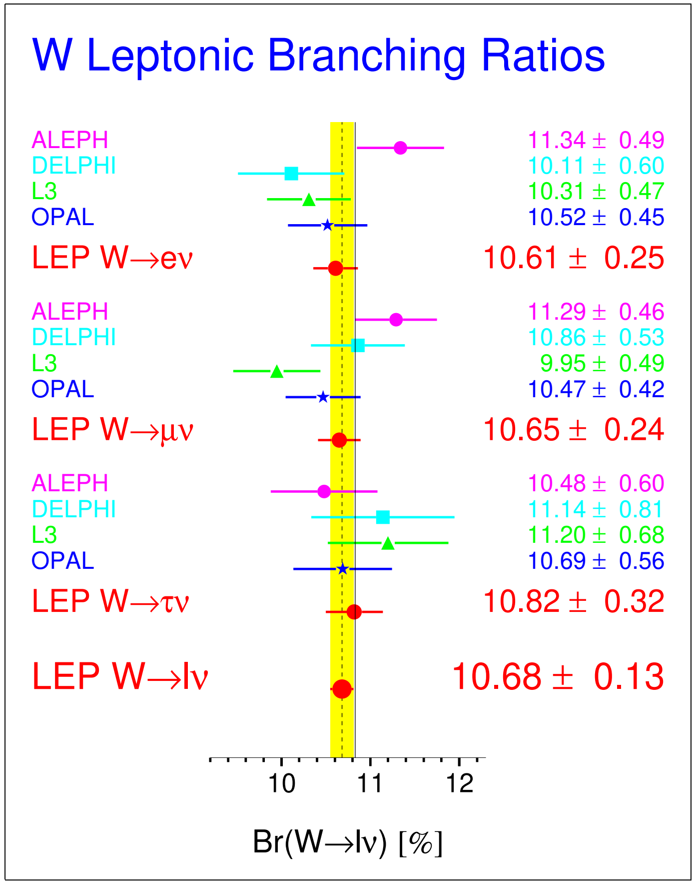


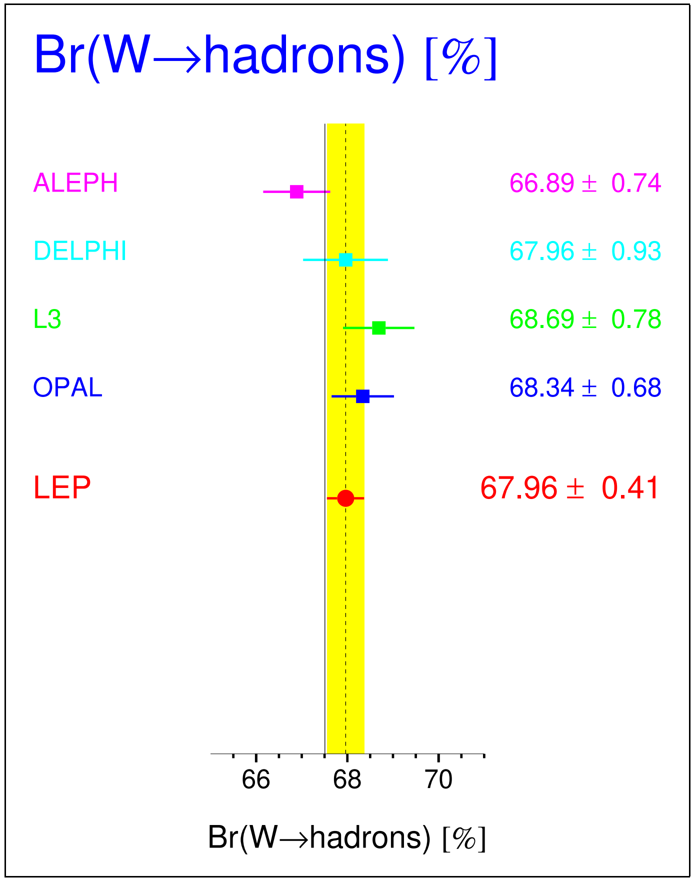
Varias posibles topologías:

- $W^+W^- \rightarrow l^+\nu\ l^-\nu$ (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


W-Boson Mass [GeV]
pp̄-colliders
80.448 ± 0.062
LEP2
80.350 ± 0.056
Average
80.394 ± 0.042
χ²/DoF: 1.4 / 1
NuTeV/CCFR
80.25 ± 0.11
LEP1/SLD/νN/mt
80.381 ± 0.026
80
80.2
80.4
80.6
mW [GeV]

Branching ratios del W



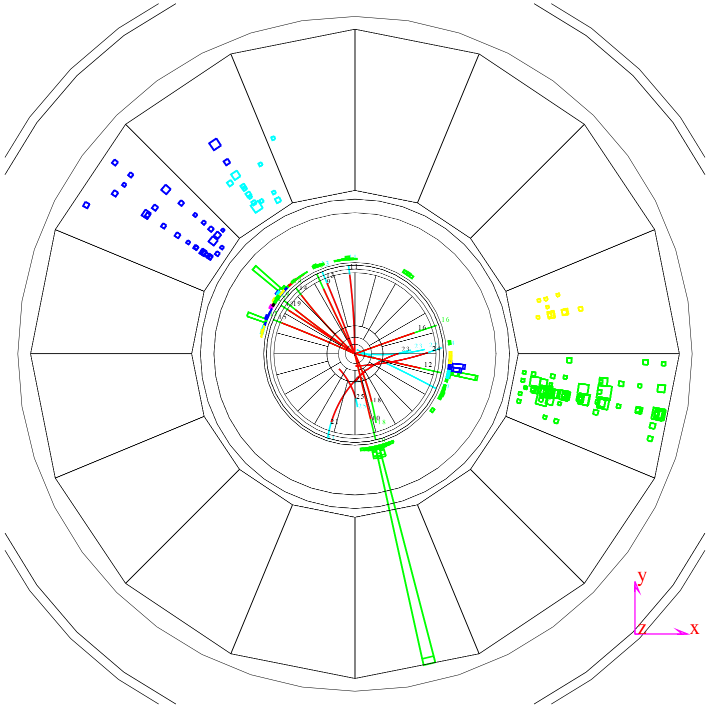


Predicción del Modelo Standard
$10.8\ \%$

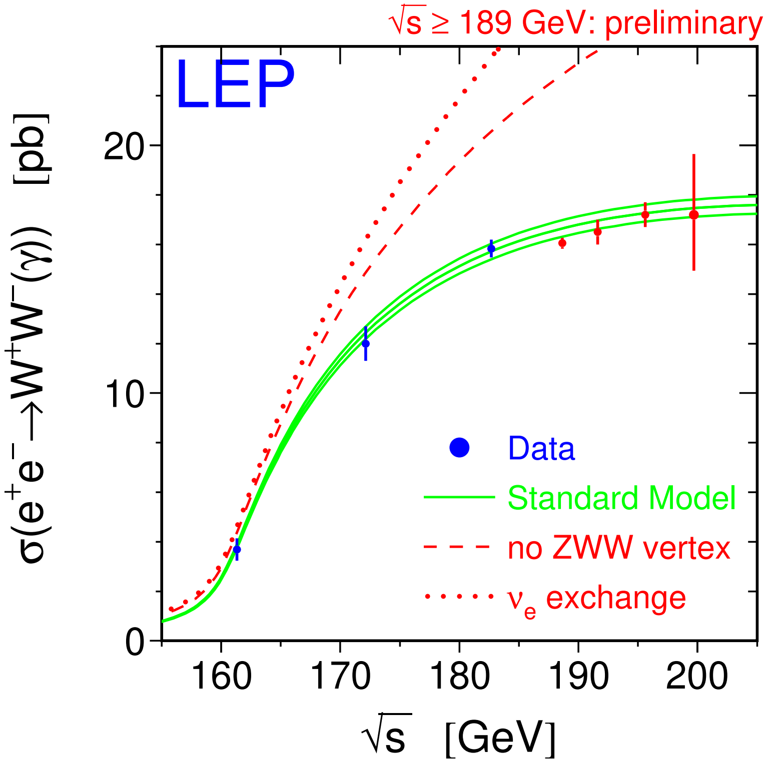
Predicción del Modelo Standard
$67.6\ \%$

Producción de W's en LEP2

$e^+e^- \longrightarrow q\bar{q}e\nu$



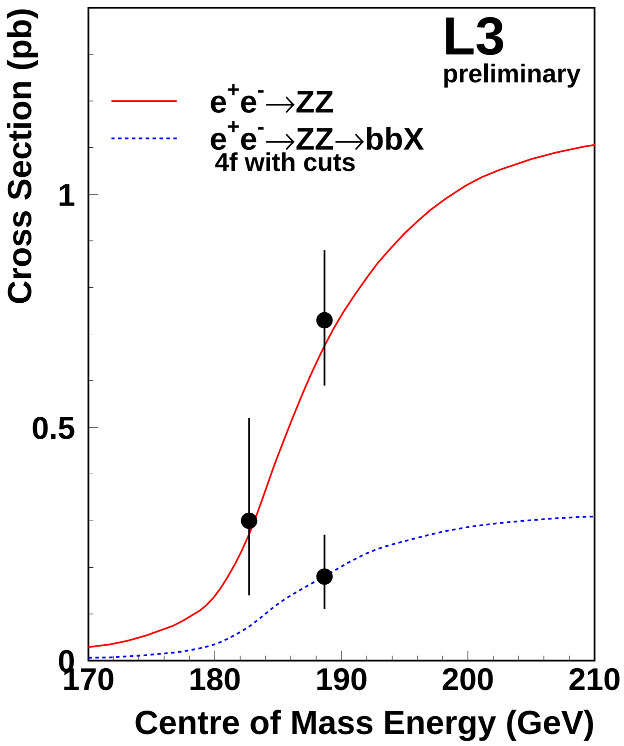
L3

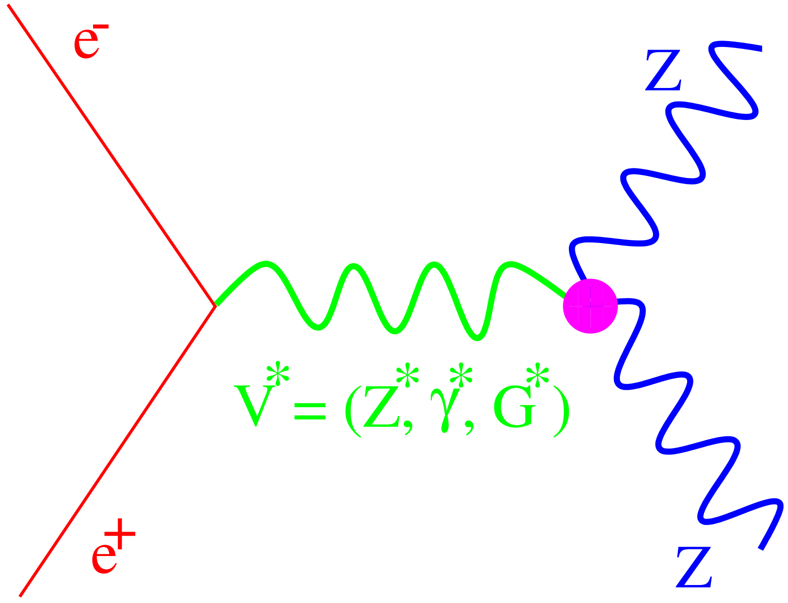


Buen acuerdo con el Modelo Standard

El vértice ZWW existe

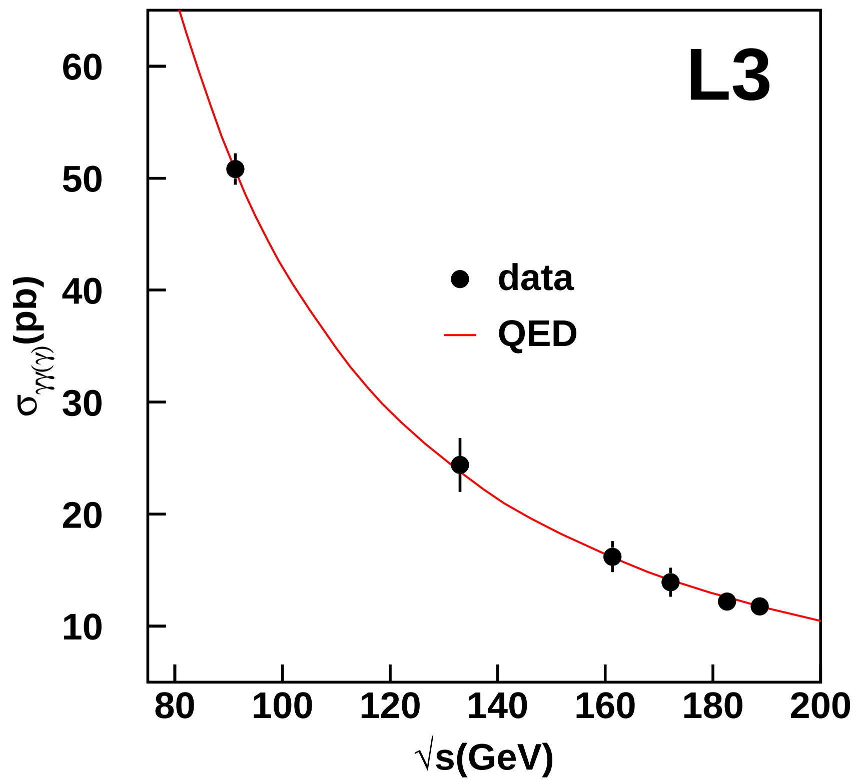
LEP2 El canal $e^+e^- \to ZZ$

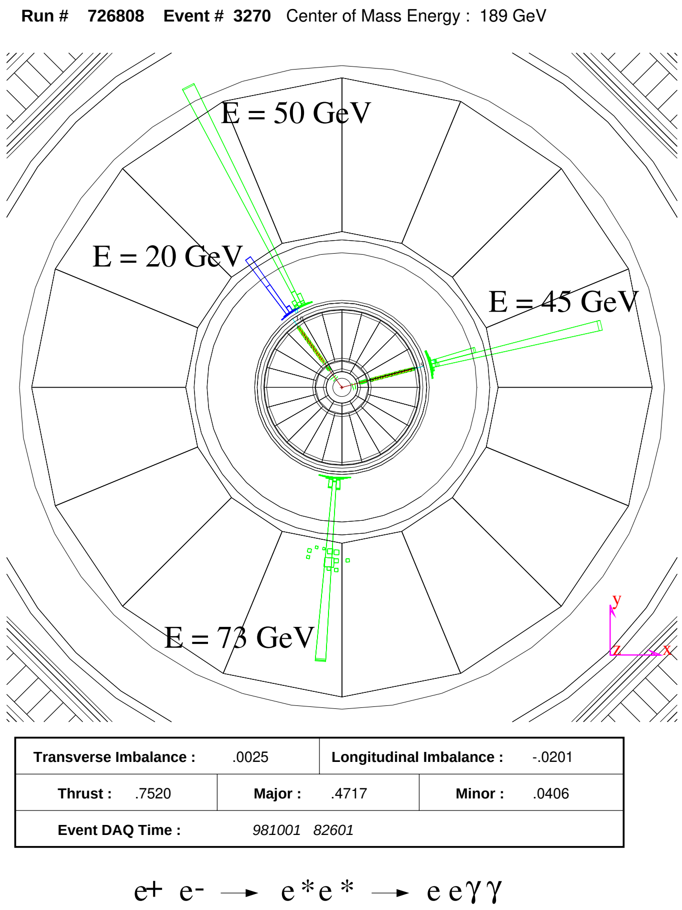




- Los primeros resultados de este canal publicados en LEP fueron los de L3
- Se estŕtrabajando en el estudio de posibles acoplamientos anómalos ZZV

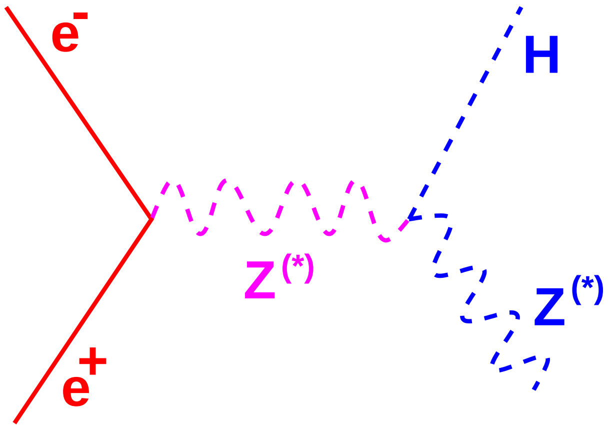
LEP2: QED y búsquedas de leptones excitados

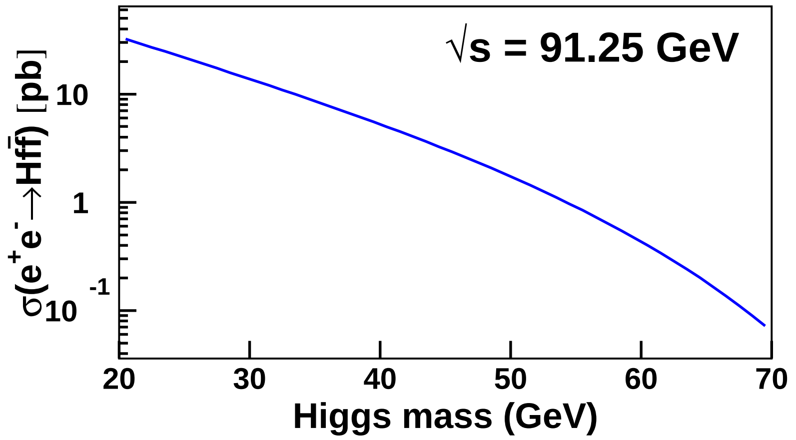


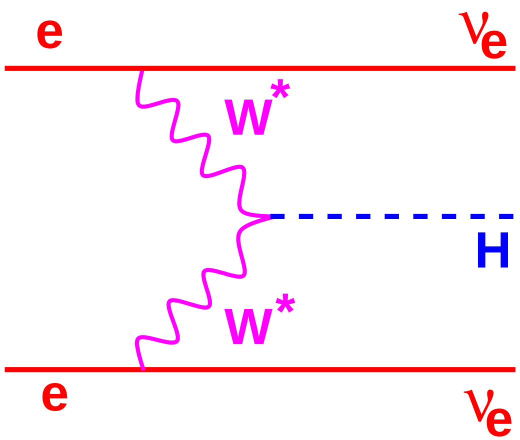


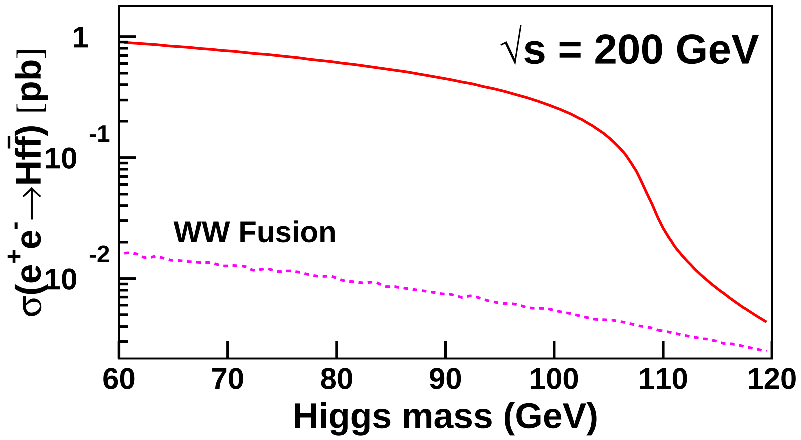
- El canal con únicamente fotones en el estado final permite realizar tests de QED
- La búsqueda de leptones excitados es otro de los análisis que estamos realizando en nuestro grupo

Producción del Higgs en LEP según el Modelo Standard



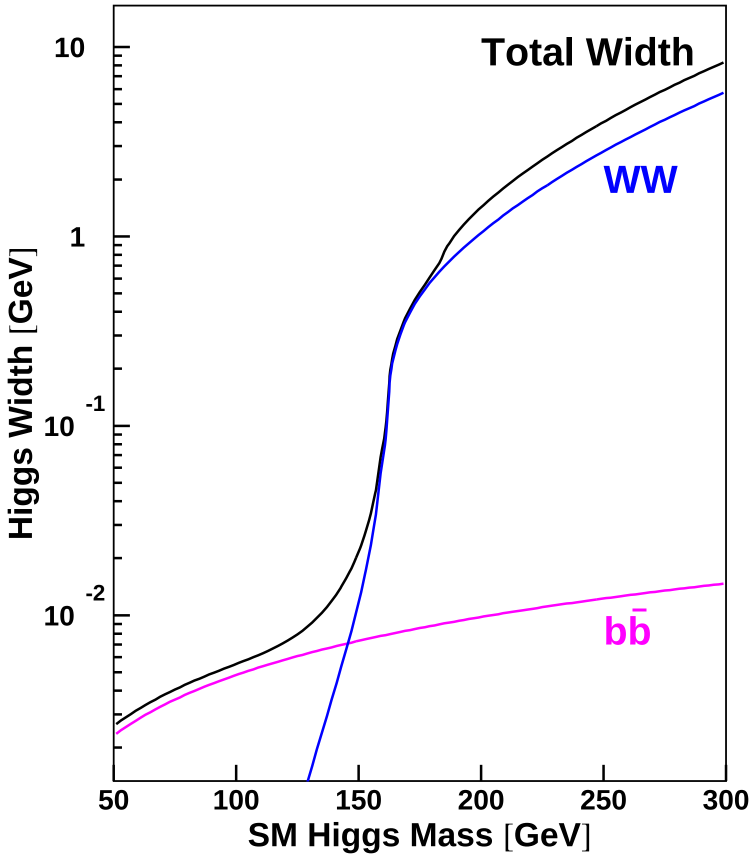


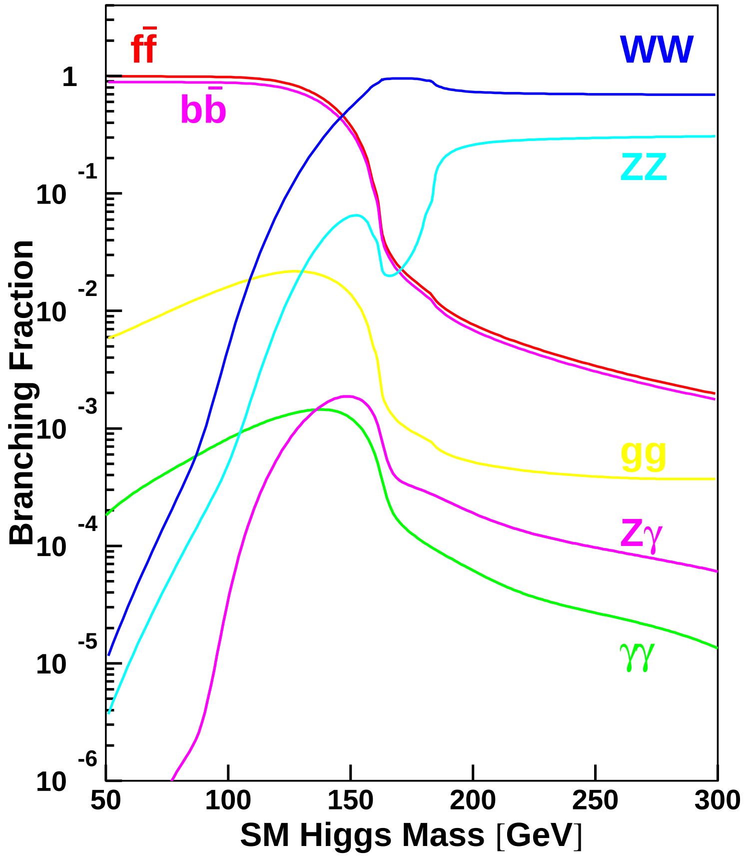




- El Higgs-strahlung domina a todas las energías de LEP
- El límite cinemático en LEP2: $m_{\rm H} + m_{\rm Z} \lesssim \sqrt{s}$
- LEP2 podría detectar el Higgs si $m_{\rm H} \lesssim 110$ GeV !!

El Higgs del Modelo Standard en LEP





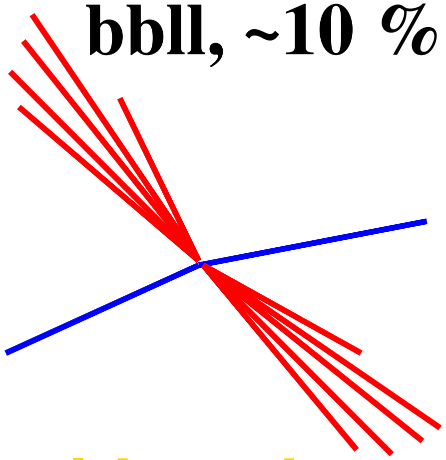
En LEP:

La anchura del Higgs es muy pequeña

El canal de desintegración a buscar: $\mathrm{H} \to \mathrm{b}\bar{\mathrm{b}}$

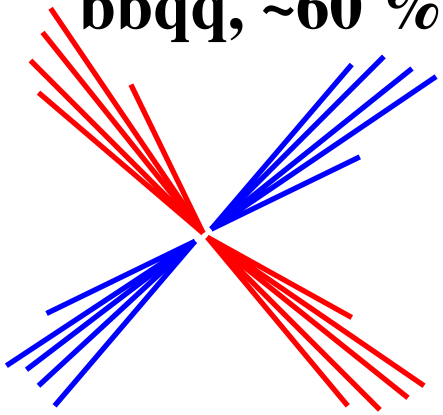
Signatura Experimental del Higgs del Modelo Standard

bbll, ~10 %



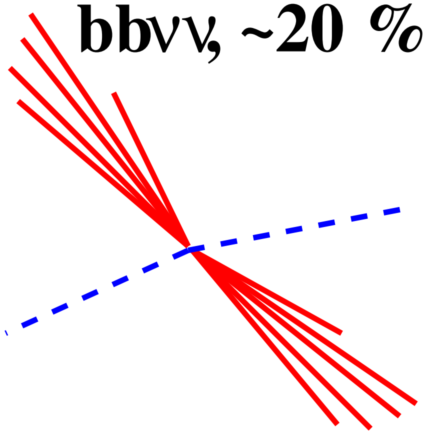
Golden channel

bbqq, ~60 %



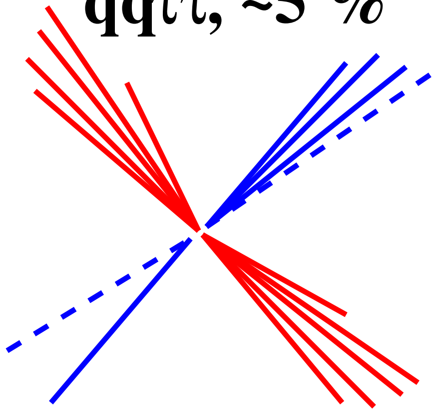
Most relevant at LEP2

bb$\nu\nu$, ~20 %



Most relevant at LEP1

qq$\tau\tau$, ~5 %



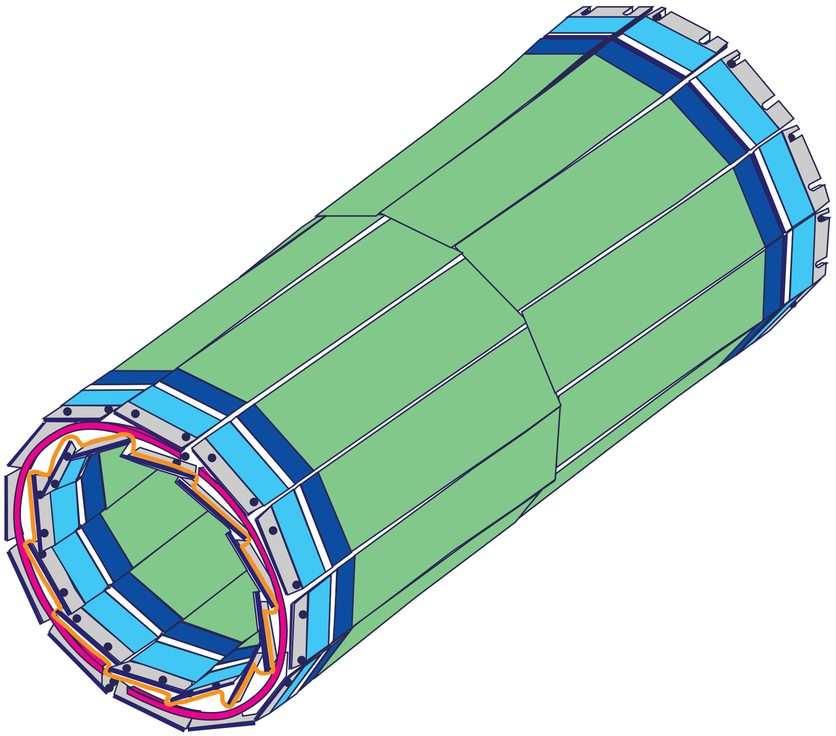
Interesting

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

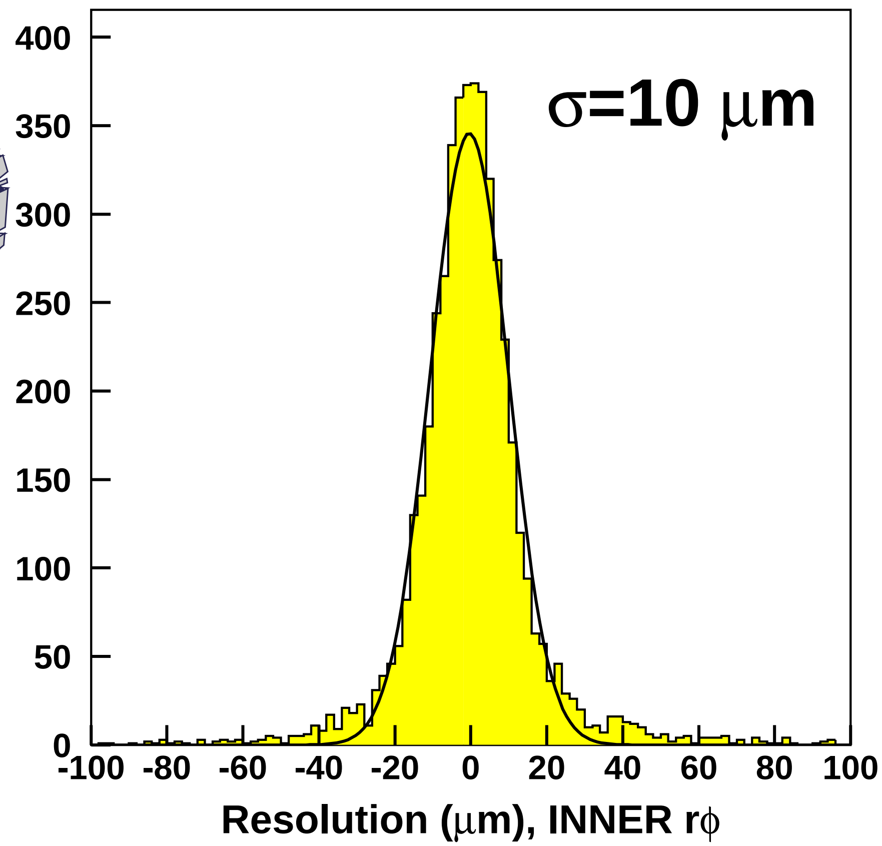
- Distancia apreciable entre vértice principal y vértices secundarios
  La vida media, τ_b, es 1.55 ps, lo que corresponde a a una distancia promedio de aproximadamente 3 mm
- En el caso de desintegraciones semileptónicas, los leptones tienen mayor p, p_t con respecto a la dirección del jet
- Mayor masa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

Detector de Microvértice (SMD) de L3

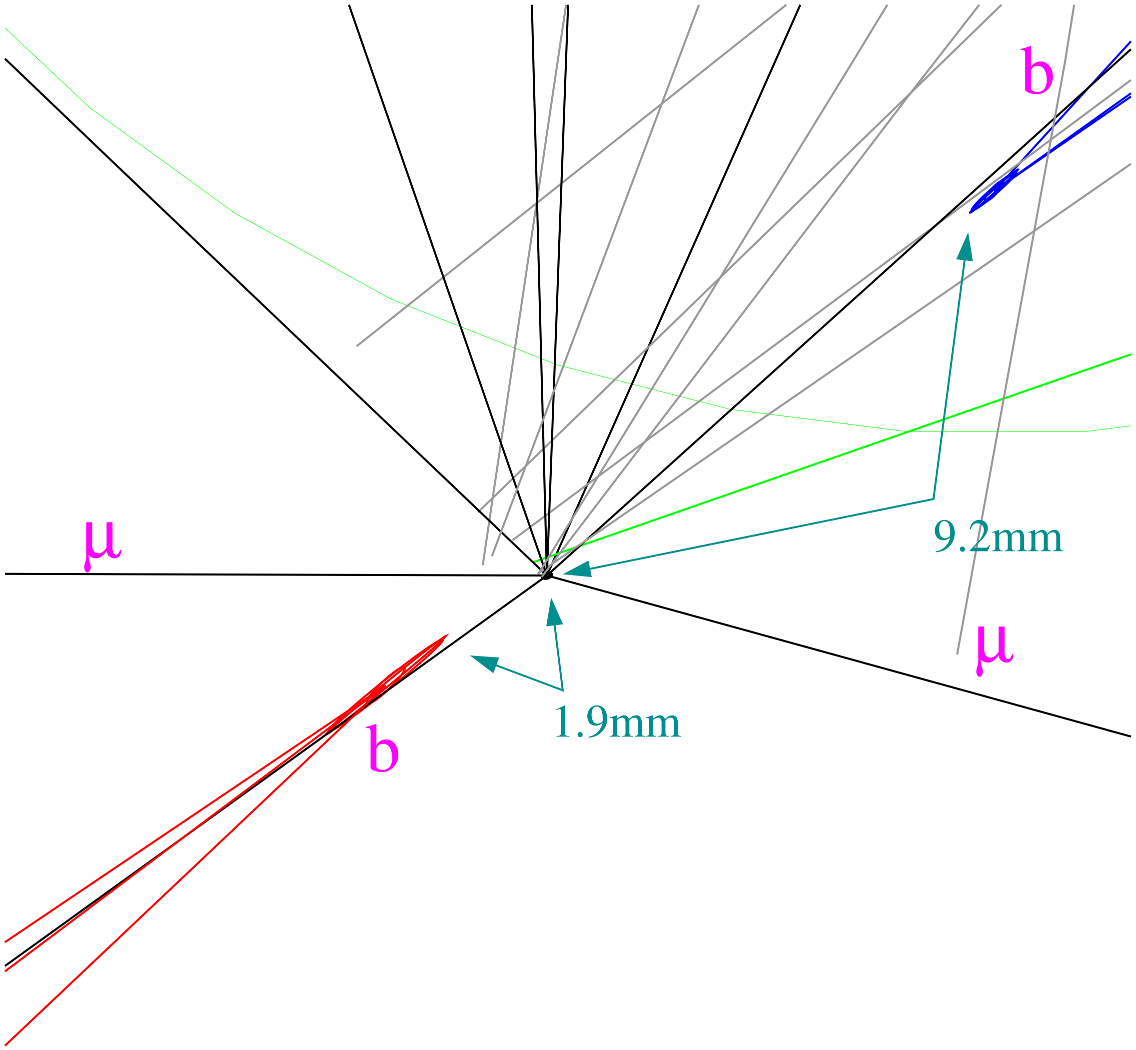
$$\Delta\text{vertex} \simeq 30\ \mu\text{m}$$
$$\Delta L \lesssim 400\ \mu\text{m}$$



99 SMD Performance



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



Límites actuales	Límites al final de LEP
$m_{\mathrm{H}} \gtrsim$ **106 GeV** (Modelo Standard)	$m_{\mathrm{H}} \lesssim$ **113 GeV** (Modelo Standard)
$m_{\mathrm{h}}, m_{\mathrm{A}} \gtrsim$ **88 GeV** en el MSSM	$m_{\mathrm{h}}, m_{\mathrm{A}} \lesssim m_{\mathrm{Z}}$ en el MSSM
$1 \lesssim \tan\beta \lesssim 2.2$ en el MSSM	$1 \lesssim \tan\beta \lesssim 3$ en el MSSM
$m_{\mathrm{H}^\pm} > 77$ **GeV**	$m_{\mathrm{H}^\pm} < m_{\mathrm{W}}$
$m_{\mathrm{H}} \gtrsim$ **100 GeV**, Higgs invisible	$m_{\mathrm{H}} \lesssim$ **110 GeV**, Higgs invisible
$m_{\mathrm{H}} \gtrsim$ **96 GeV**, Higgs fermiofóbico	$m_{\mathrm{H}} \lesssim$ **110 GeV**, Higgs fermiofóbico

Después de 10 años de operación

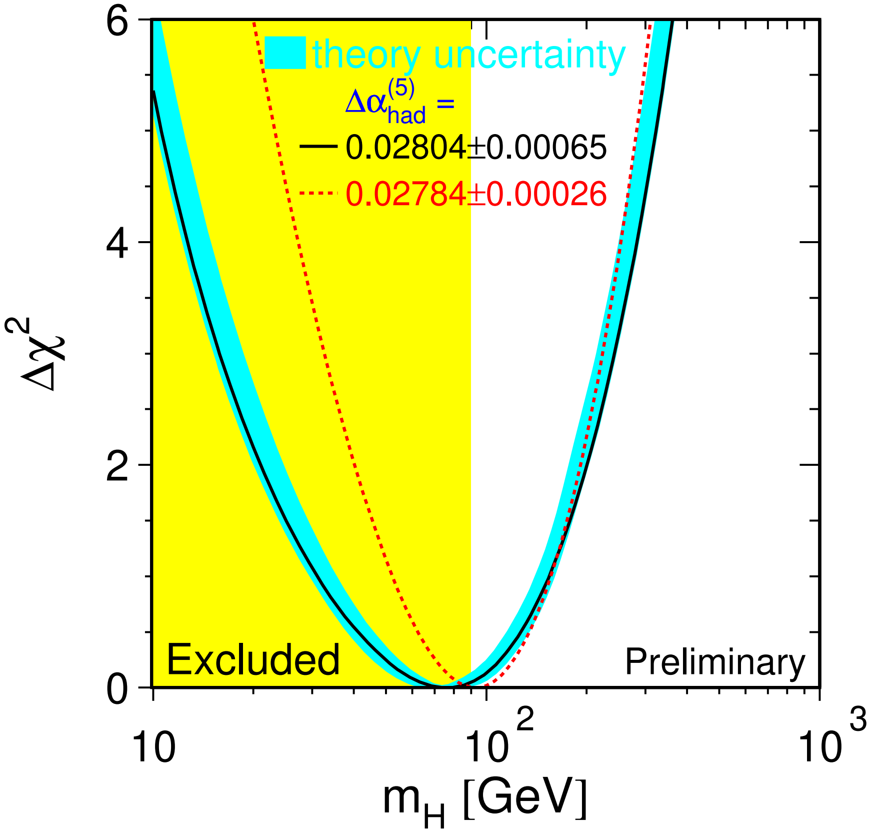
LEP bien merece un poco de suerte y

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

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



$m_{\mathrm{H}} < 215$ GeV at 95% CL

Previsiones de LEP para el año 2000

Energía y luminosidad integrada:

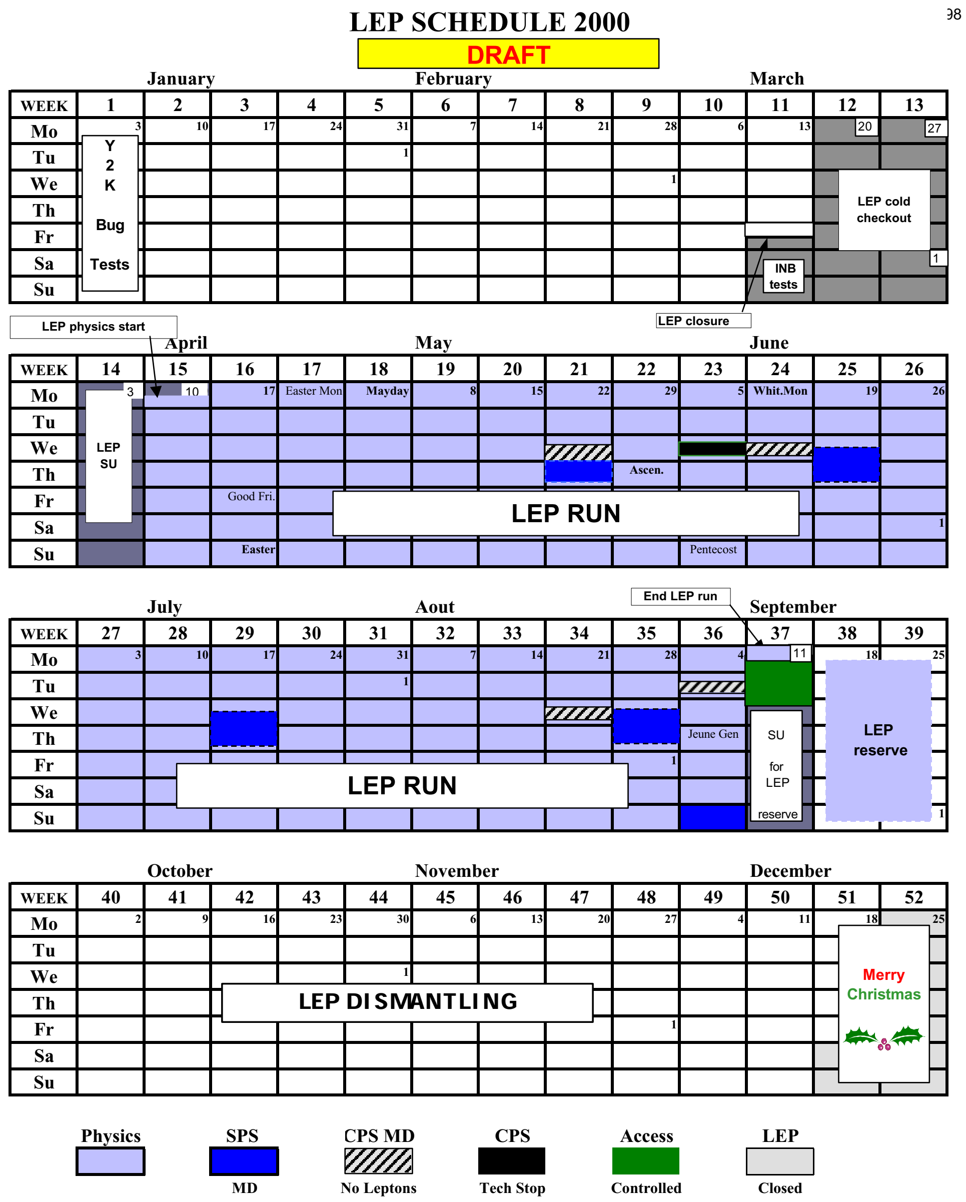
- $200\ \mathrm{pb}^{-1}$ a $\sqrt{s} = 202$ GeV
- Al menos otros $40\ \mathrm{pb}^{-1}$ a la máxima energía alcanzable (la esperanza es llegar a $\sqrt{s} = 206$ GeV)

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



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).

LHC

- 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 $10^{34}\ cm^{-2}\ s^{-1}$).

  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 cruźandose 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

LHC

- 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

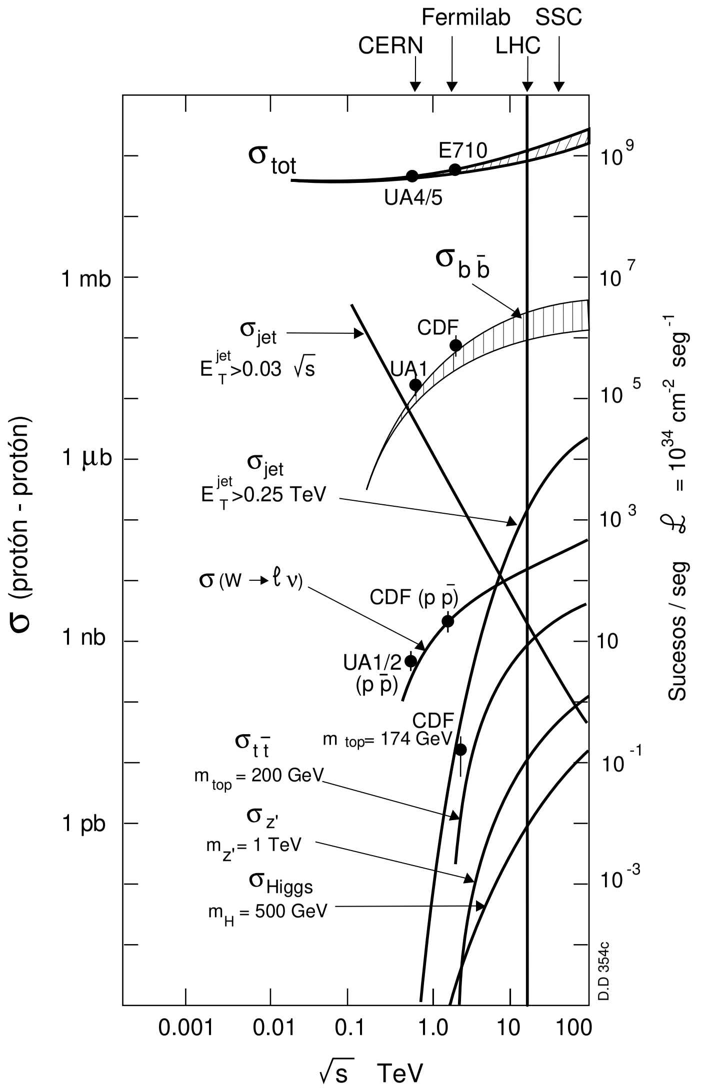
- Requerimientos específicos del LHC en los detectores a instalar

  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

LHC. Objetivos.

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 $H \to \gamma\gamma$

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

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

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

LHC. Objetivos. El Higgs

- 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: $H^0 \to WW$, $H^0 \to hh$ y $A^0 \to Zh$. 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 entusiasma a muchos físicos teóricos

quarks	squarks	(u, d, etc)
leptones	sleptones	(e, μ, etc)
W's	winos	(χ^+, χ^-)
H^+H^-	higgsinos cargados	"charginos"
γ	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)

LHC. Objetivos.

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 transverso y medir también la energía total hadrónica con capacidad de detectar sucesos con alta energía transversa no balanceada.

El detector central de trazas (Tracker) de CMS

- 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

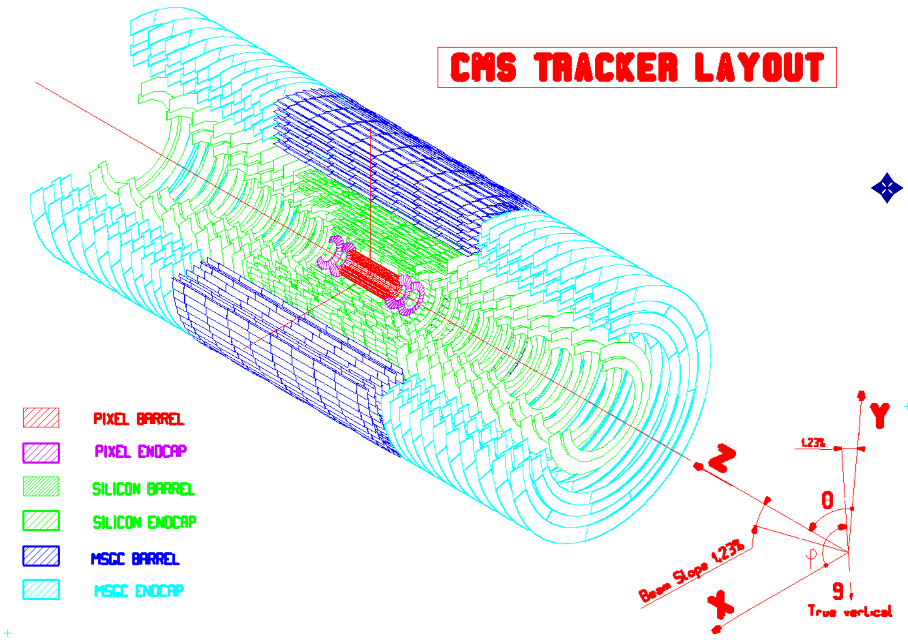
- La medida del momento de hadrones cargados es también muy útil:

  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 τs

El Tracker de CMS

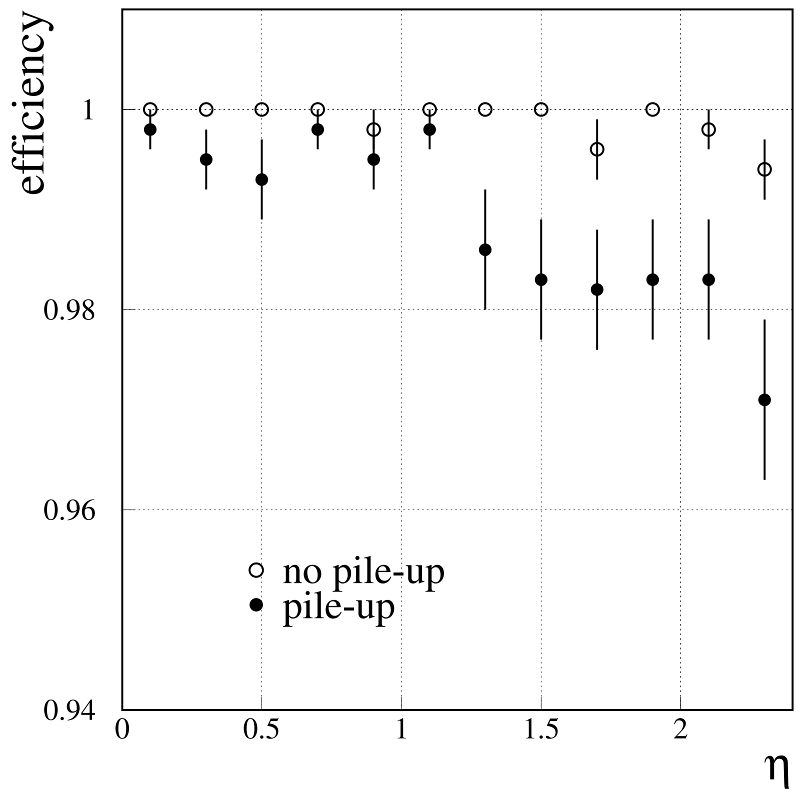


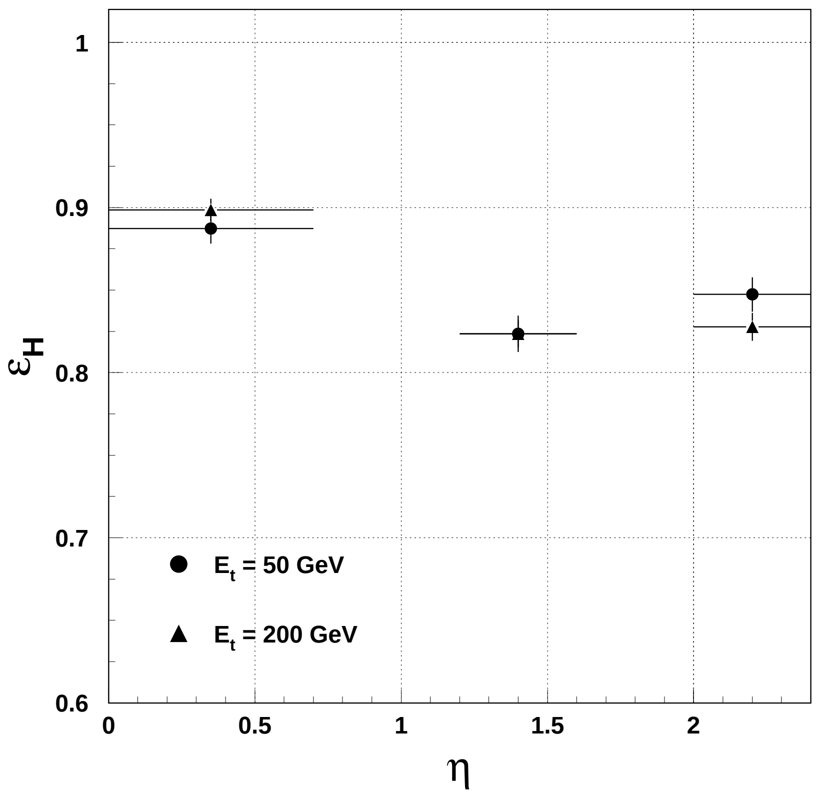
- Dimensiones: radio 115 cm, longitud 540 cm

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

- Número de canales electrónicos: 40×10^6

Eficiencia de reconstrucción de trazas

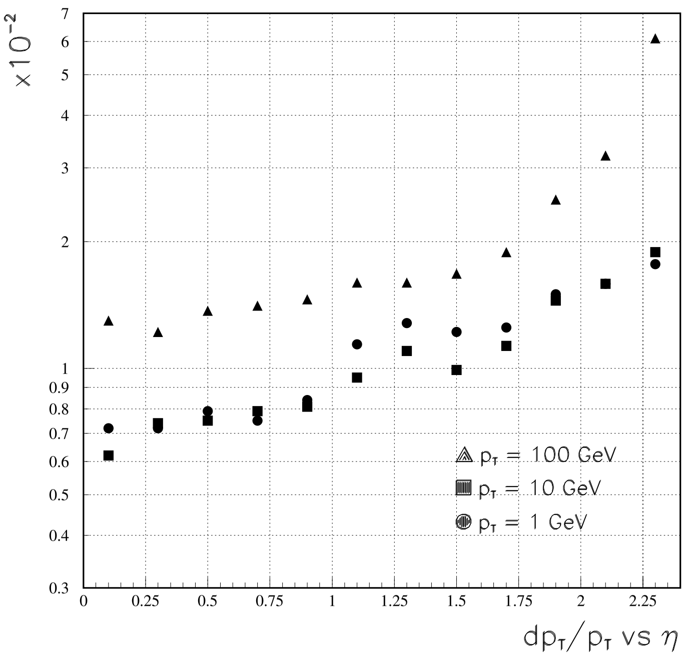


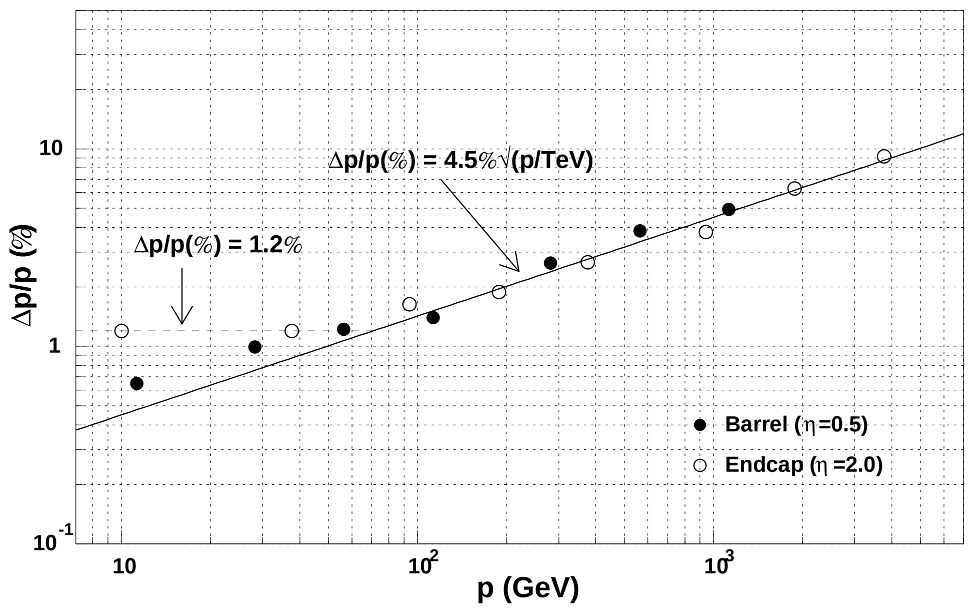


Eficiencia para muones superior al 98 %

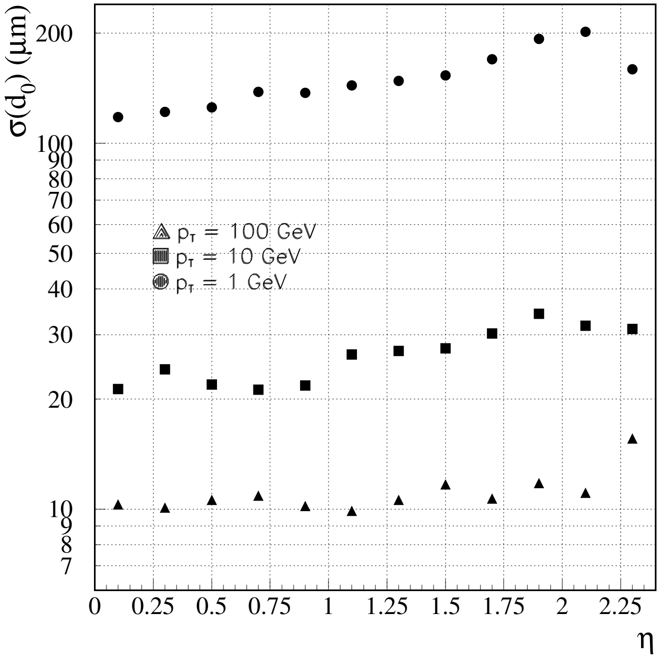
La eficiencia para hadrones cargados, dentro de un jet, está en torno al 85-90 %

Resolución en la medida del momento



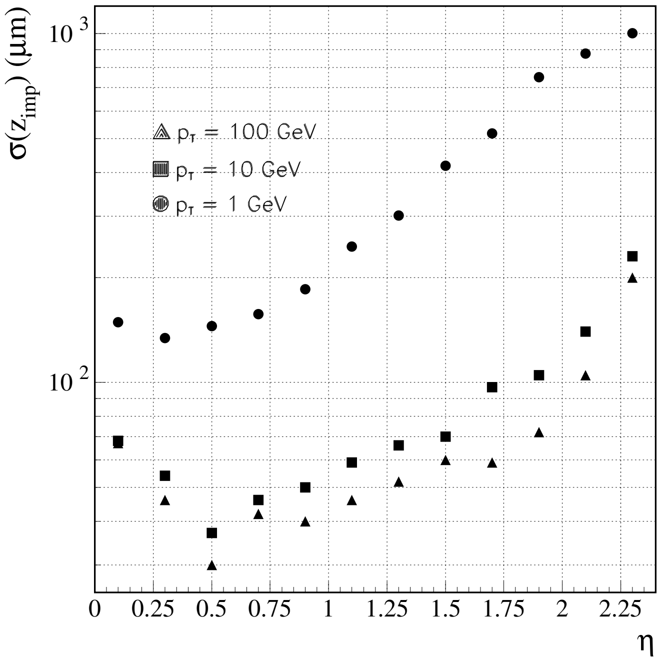


Resolución en la dirección transversa



Mejor que 35 μ para p_T mayor que 10 GeV

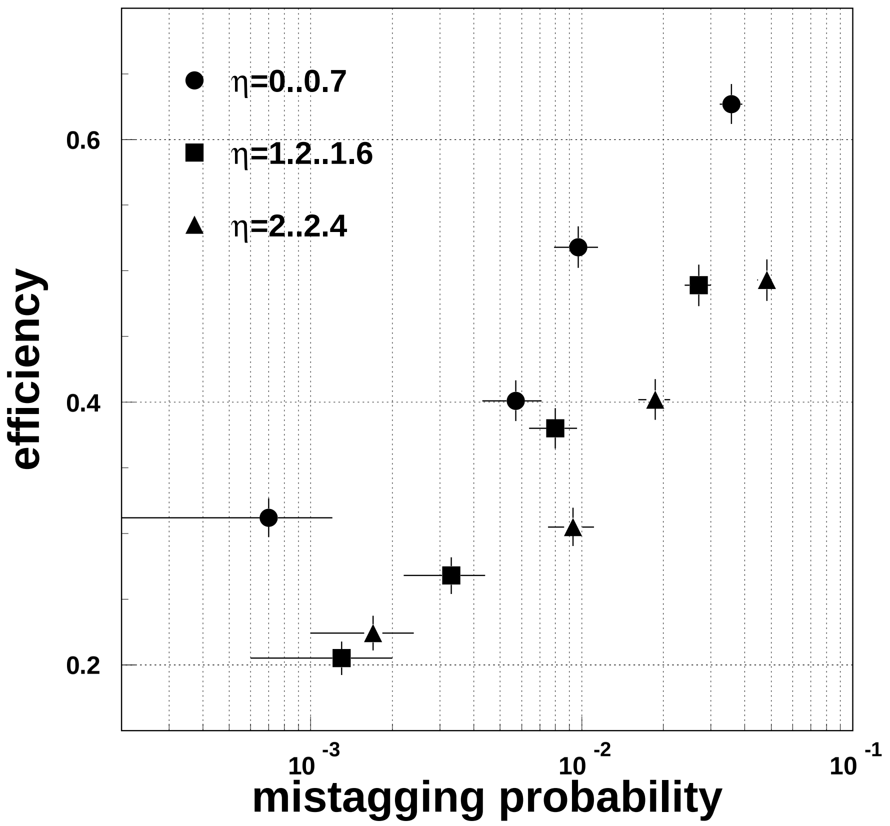
Resolución en la dirección longitudinal



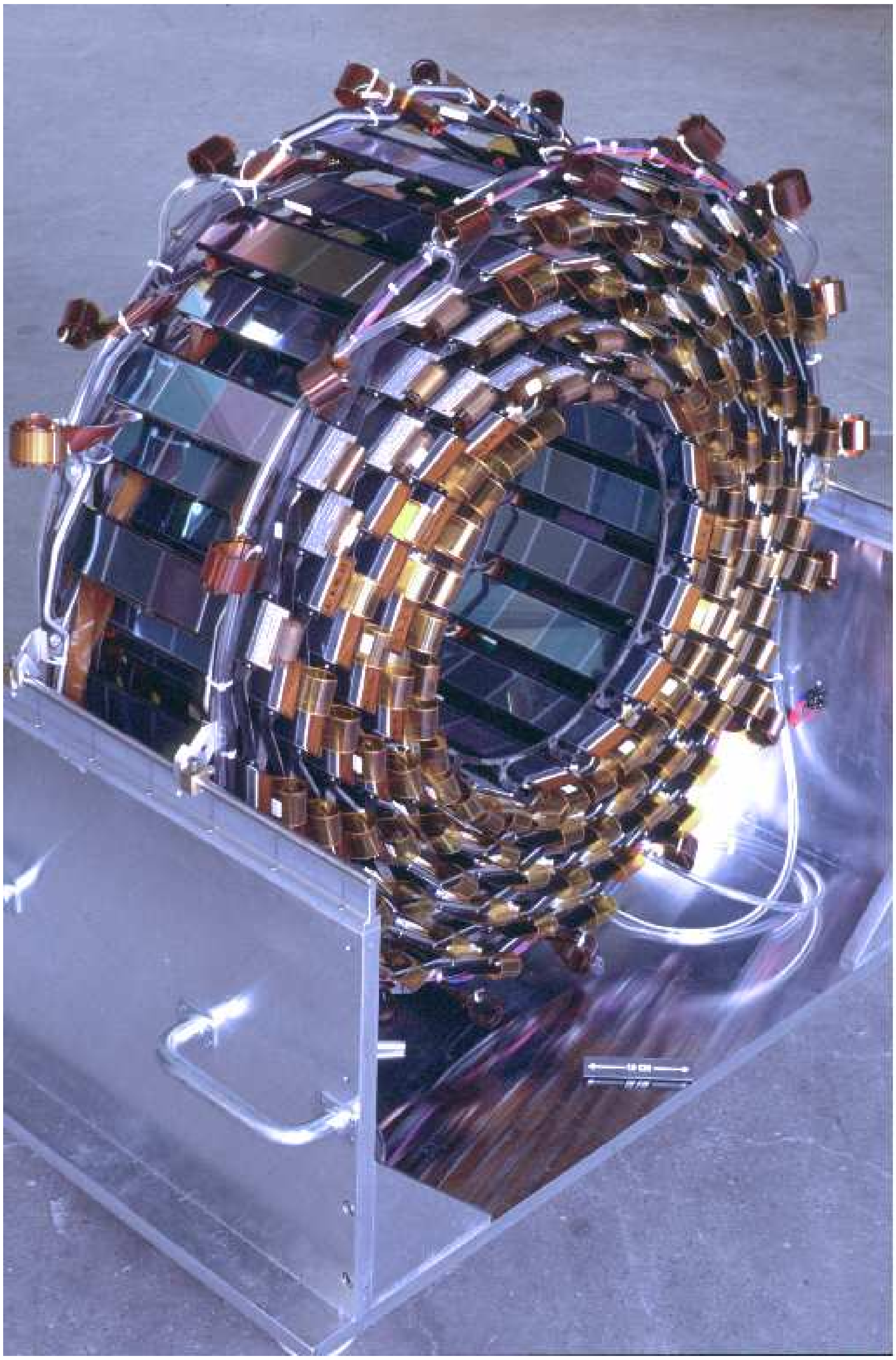
Mejor que 100 μ para p_T mayor que 10 GeV

Eficiencia de b-tagging

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 %



CMS Tracker: Silicon Microstrips Barrel Wheel



El calorímetro electromagnético (ECAL) de CMS

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

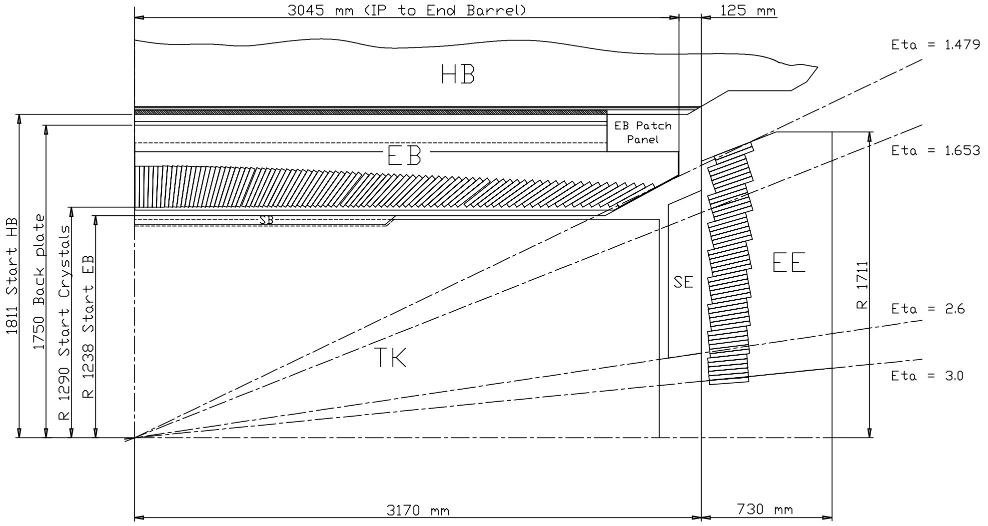
- Separar electrones y fotones del resto de las partículas

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

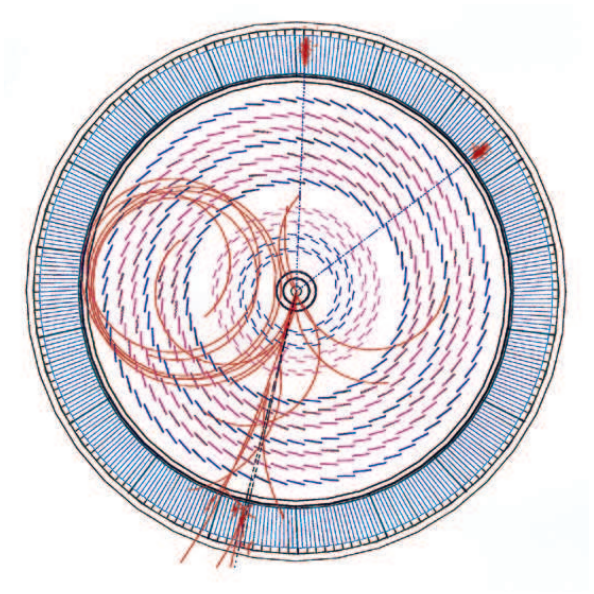
- Contribuir a la medida de energía de los jets

Uno de los objetivos más importantes de este calorímetro es descubrir el Higgs en el canal $H^0 \to \gamma\gamma$ 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 $\gamma\gamma$.

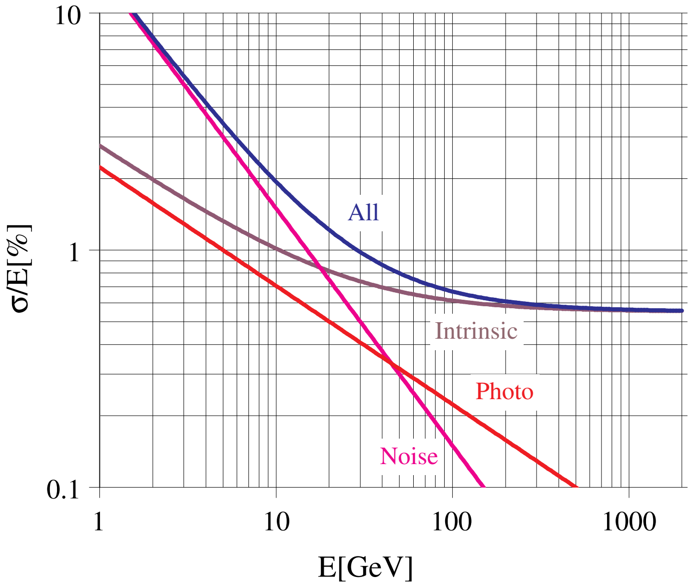
El ECAL de CMS



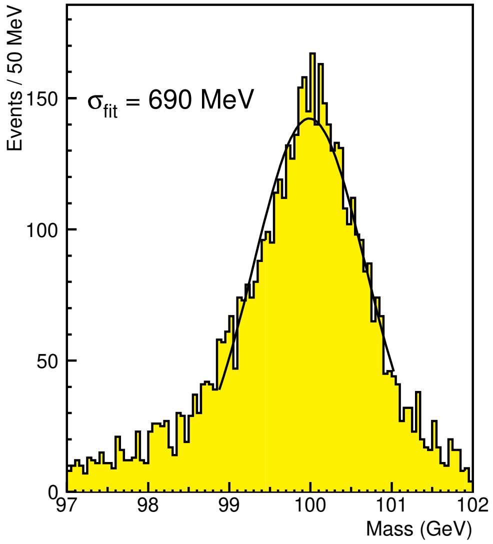
- 83.000 cristales de $Pb\,WO_4$, de dimensiones $22 \times 22\ mm^2$ de sección y 230 mm de longitud, equipados con APD's (Avalanche photodiodes)
- Resistente a la radiación, con tiempo de respuesta inferior a 10 ns. Debe funcionar con temperatura estable (variaciones inferiores a 0.1 grados)
- Número de canales electrónicos: 240000



El ECAL



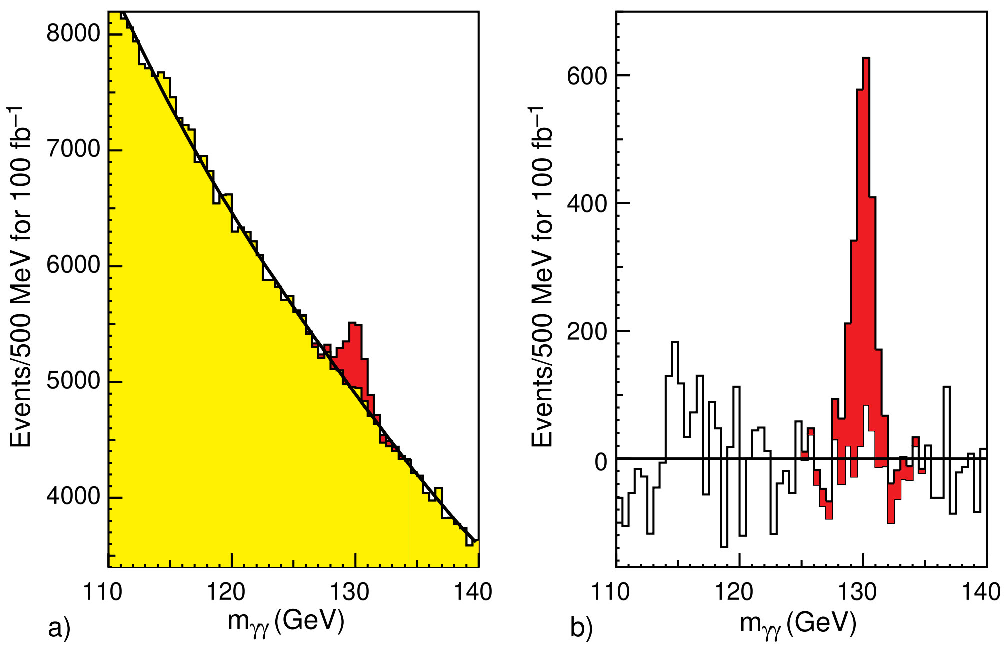
La resolución en la medida de la energía es mejor que el 1% por encima de 30 GeV



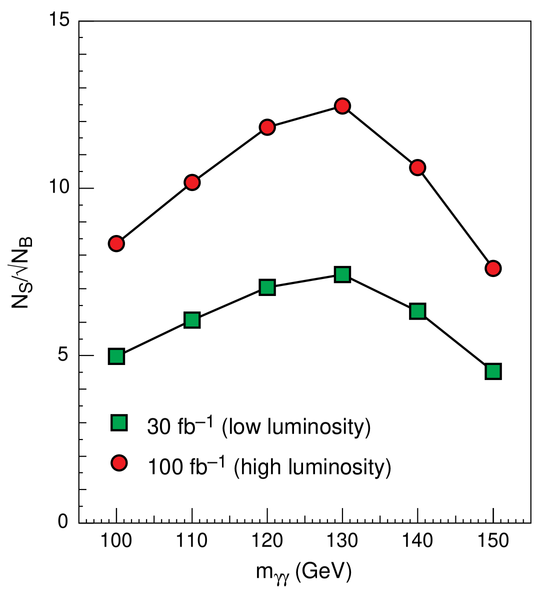
La resolución en la masa invariante de dos fotones es del orden de 0.7 GeV

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

El ECAL

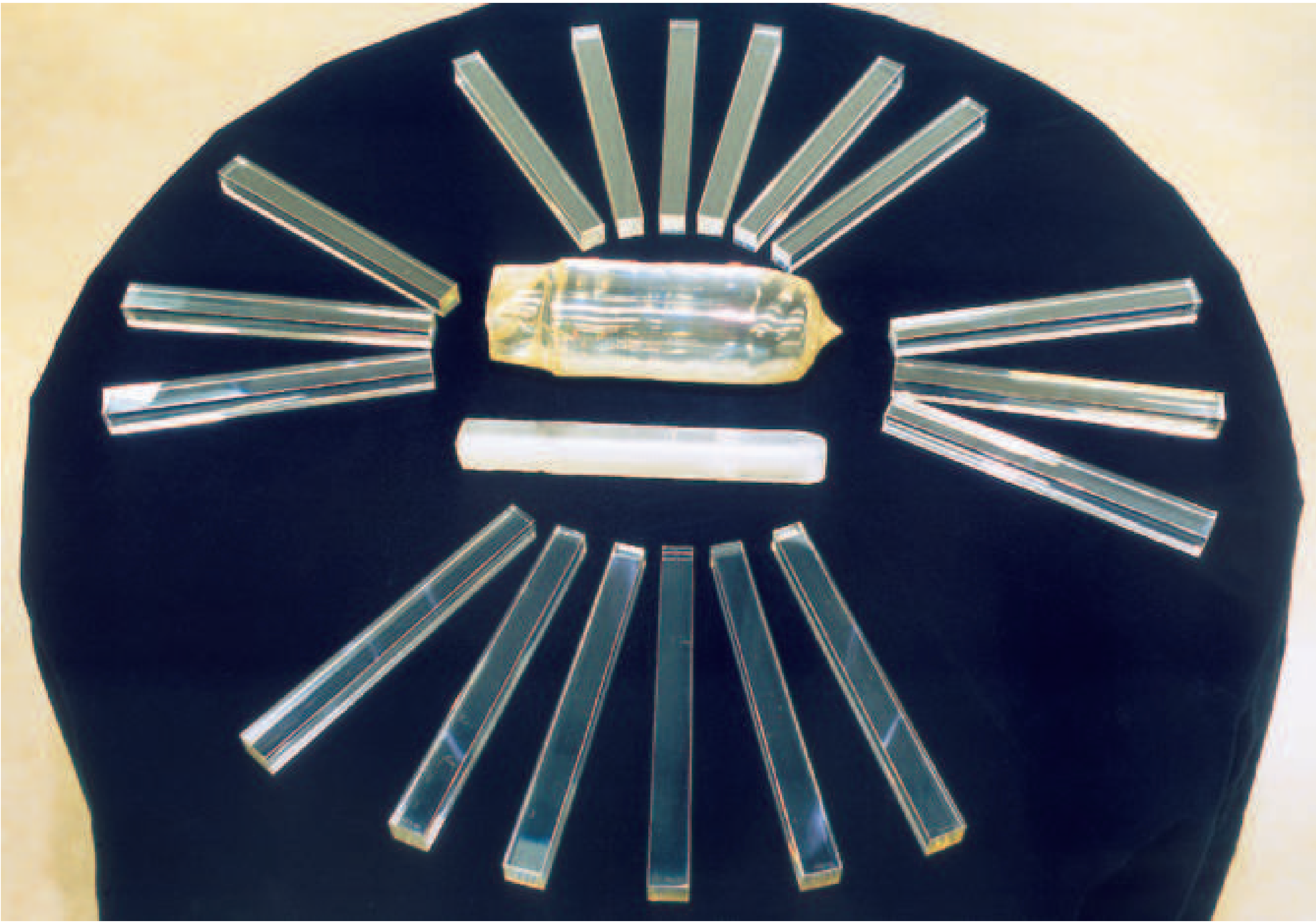


Análisis de sucesos simulados por Montecarlo, en condiciones del LHC, suponiendo que el Higgs tiene una masa de 130 GeV



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

Cristales de $Pb\,WO_4$



El calorímetro hadrónico (HCAL) de CMS

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 transverso

Su tecnología es bastante convencional

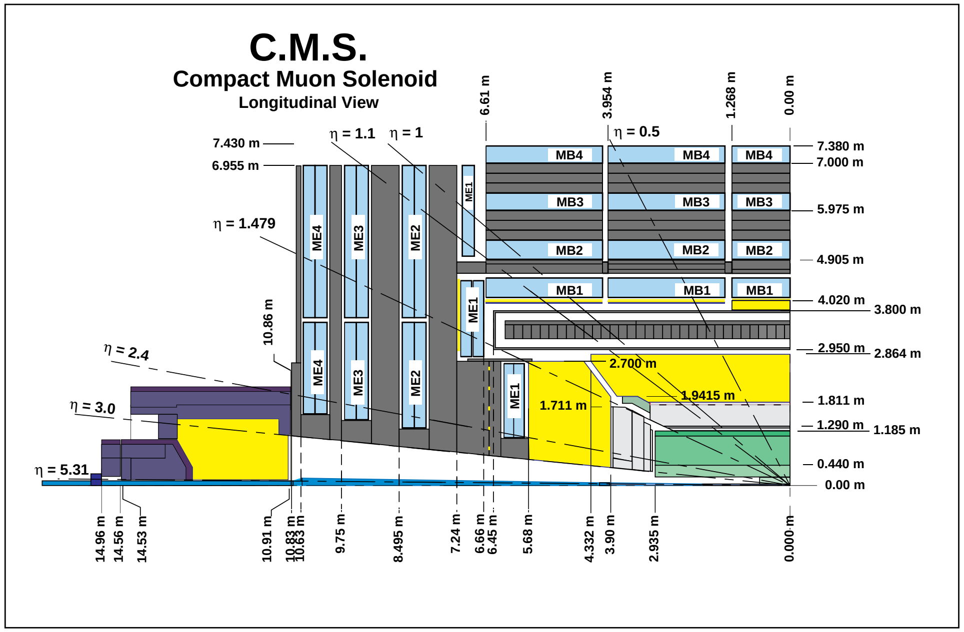
en la región central: capas alternadas de cobre y centelleador

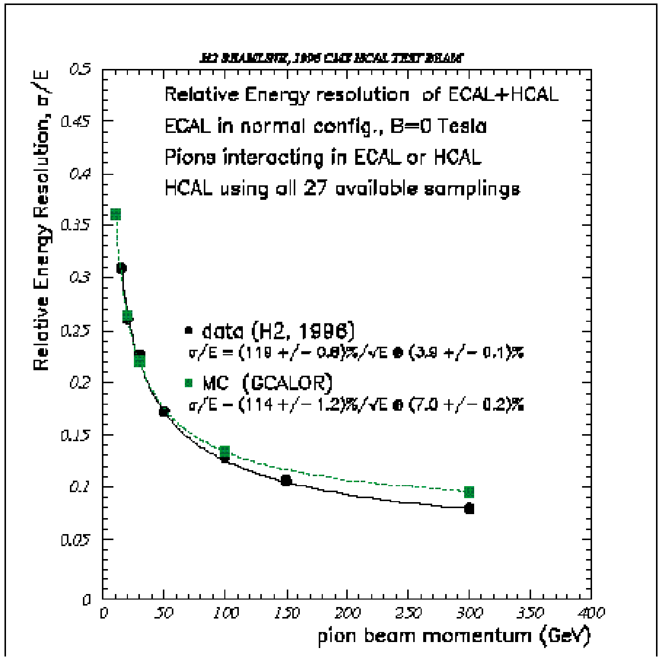
en la región delantera y trasera: capas alternadas de cobre y fibra de cuarzo

Los requisitos fundamentales son:

- una elevada granularidad en el plano transverso
  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 integramente 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

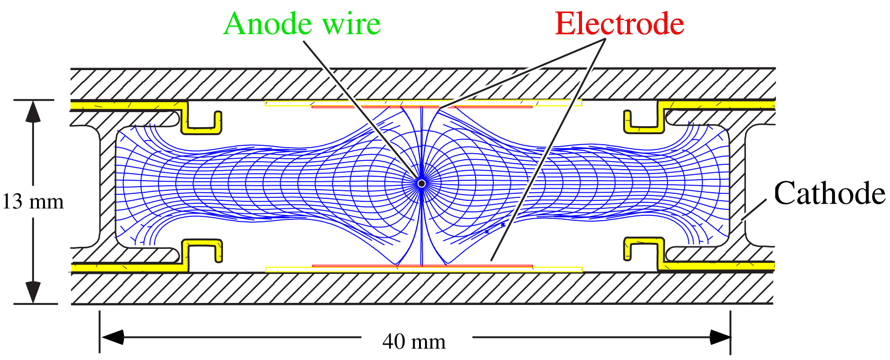
El detector de muones de CMS

Objetivos fundamentales:

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

Tres tipos diferentes de detectores:

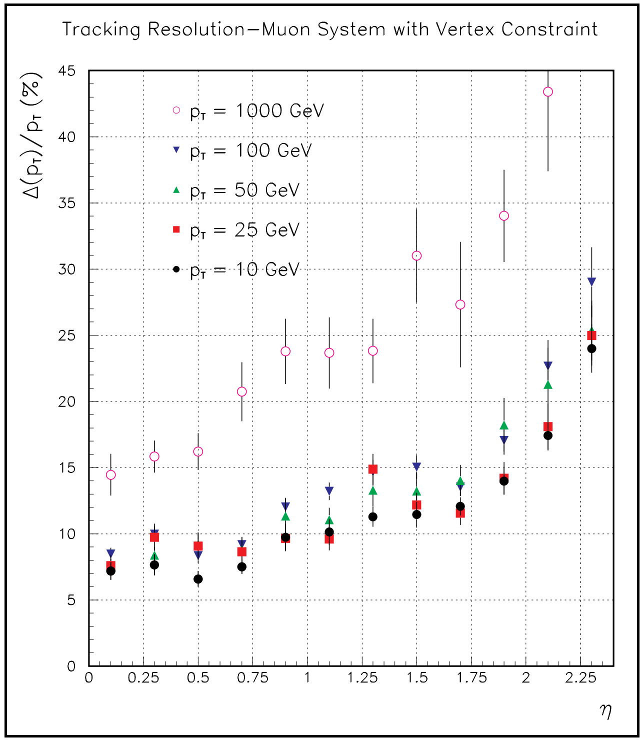
En la parte central cámaras multicapa de tubos de deriva



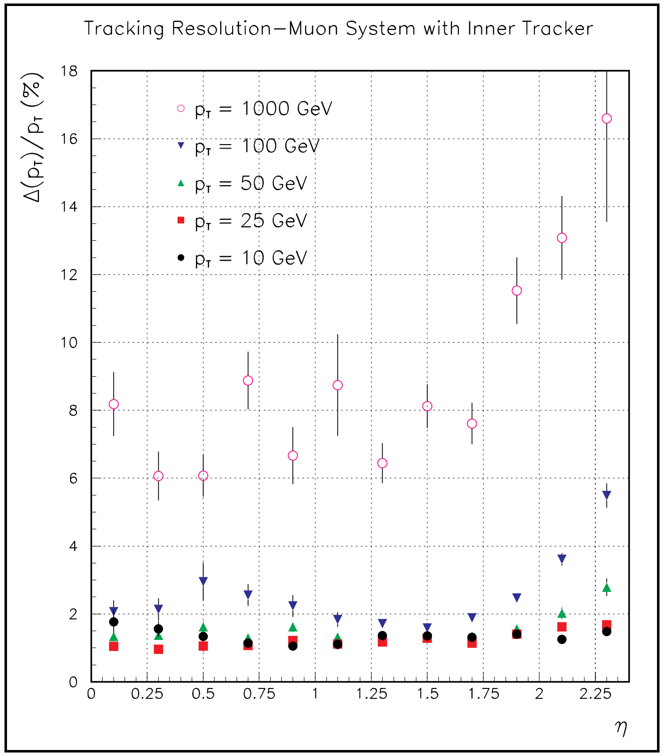
En la parte delantera cámaras de bandas catódicas (Cathode Strip Chambers, CSC's

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

Precisión en la medida del momento de los muones

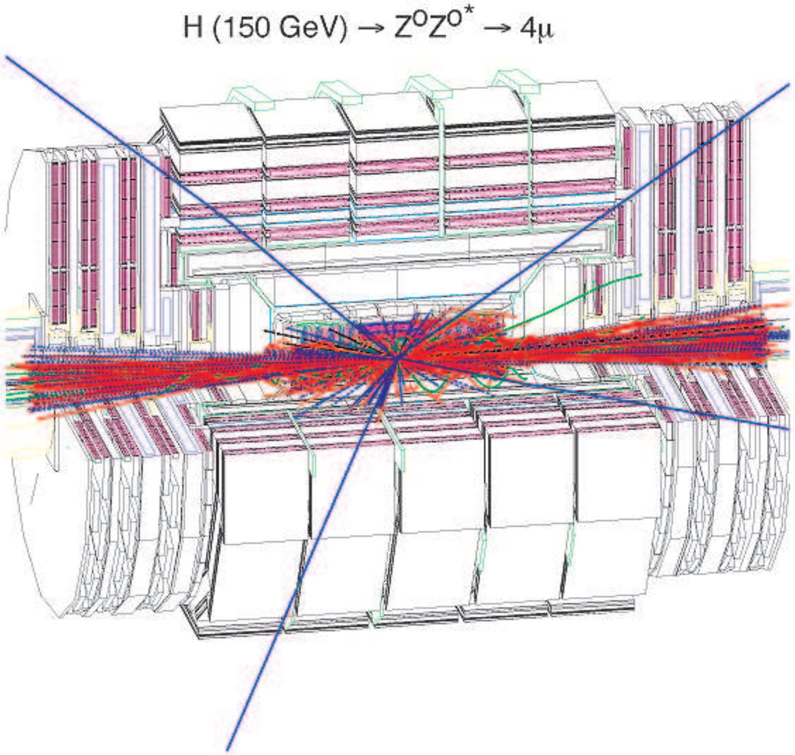


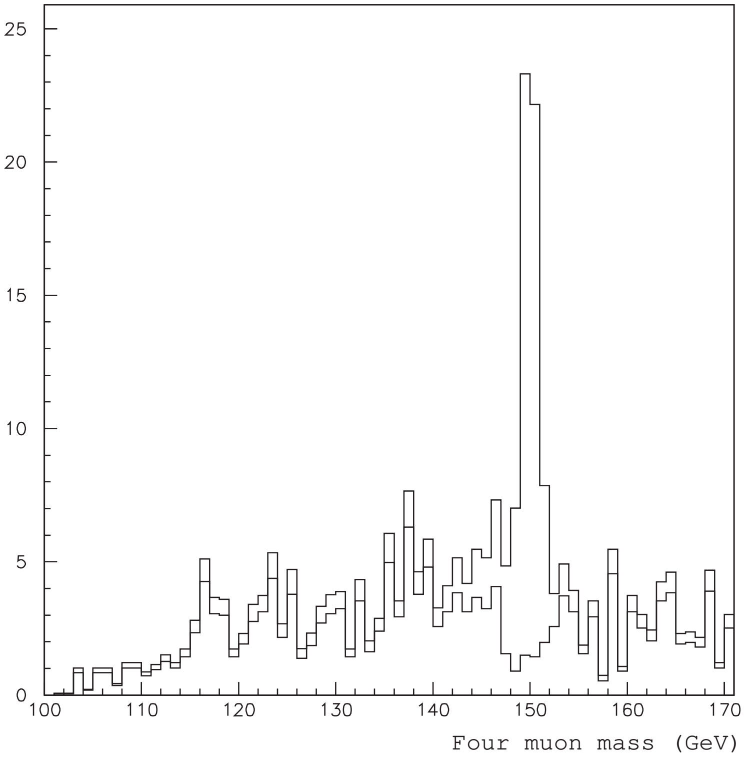
Resolución del detector de muones de forma independiente



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.