Ciemat

Estudio del Proceso $e^+e^- \to W^+W^- \to l\nu q\bar{q}'$ en LEP

M. Carmen Palomares Espiga

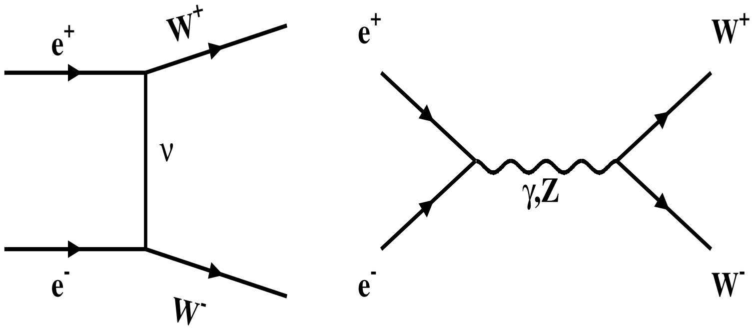
Enero 2000

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN

Producción de pares de bosones W

En el Modelo Estándar (a nivel árbol):



Se trata de un proceso de gran importancia en el estudio de la validez del Modelo Estándar:

1. Dos de los diagramas implican la existencia de acoplos entre tres bosones gauge $\longrightarrow$ Característicos de la Teoría Electrodébil.
2. Permite la medida directa de la masa del bosón W, que es uno de los parámetros clave del Modelo Estándar.

Este proceso ha sido observado experimentalmente por primera vez en la segunda etapa de LEP.

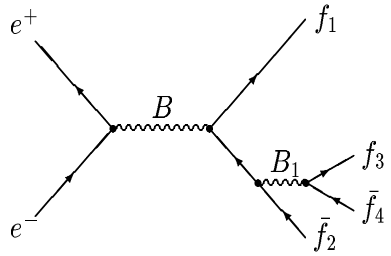
El proceso $\mathrm{e^+e^- \to W^+W^- \to q\bar{q}'l\nu}$

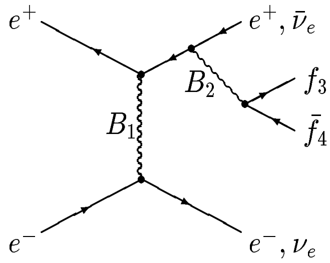
$*$ Desintegración del bosón W: $\mathrm{W \to f_1 f_2}$: $\quad \mathrm{q\bar{q}'} \; - \; \mathrm{l\nu}$

$$\mathrm{e^+e^- \to W^+W^- \to} \left\{ \begin{array}{c} \mathrm{q_1q_2q_3q_4} \\ \boxed{\mathrm{q_1q_2l\nu}} \\ \mathrm{l\nu l'\nu'} \end{array} \right.$$

$\longrightarrow$ 40% de los sucesos $\mathrm{W^+W^-}$
Claras ventajas experimentales

$*$ Hay contribuciones de otros diagramas con los mismos estados inicial y final pero diferentes estados intermedios:





Estados finales	N° de diagramas	σ (pb)	σ_{WW} (pb)
$\mathrm{q\bar{q}'e\nu_e}$	20	3.02	
$\mathrm{q\bar{q}'}\mu\nu_\mu$	10	2.42	2.42
$\mathrm{q\bar{q}'}\tau\nu_\tau$	10	2.42	

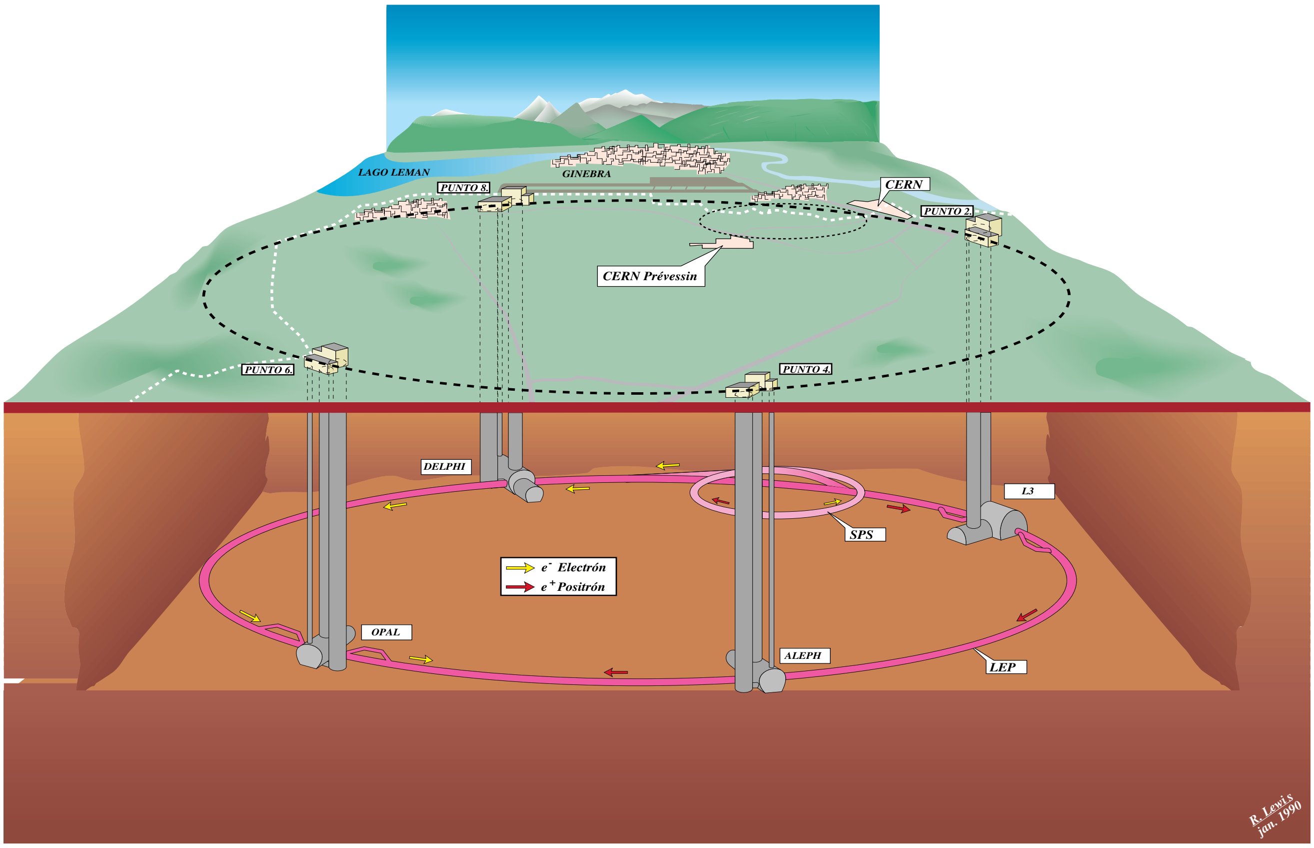
$*$ Sólo en el caso de la producción de pares de W, las masas invariantes de los sistemas $\mathrm{q\bar{q}'}$ y $\mathrm{l\nu}$ se distribuyen de acuerdo a una función Breit-Wigner de anchura Γ_{W} y centrada en $\mathrm{M_W}$:

$$\sigma(s) = \int_0^s ds_1\, \rho(s_1) \int_0^{(\sqrt{s}-\sqrt{s_1})^2} ds_2\, \rho(s_2)\, \sigma_0(s; s_1, s_2)$$

$$\rho(s) = \frac{1}{\pi} \frac{\sqrt{s}\,\Gamma_{\mathrm{W}}}{(s-M_{\mathrm{W}}^2)^2 + M_{\mathrm{W}}^2\Gamma_{\mathrm{W}}^2} \times Br_{f_1\bar{f}_2}$$

DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

El acelerador LEP



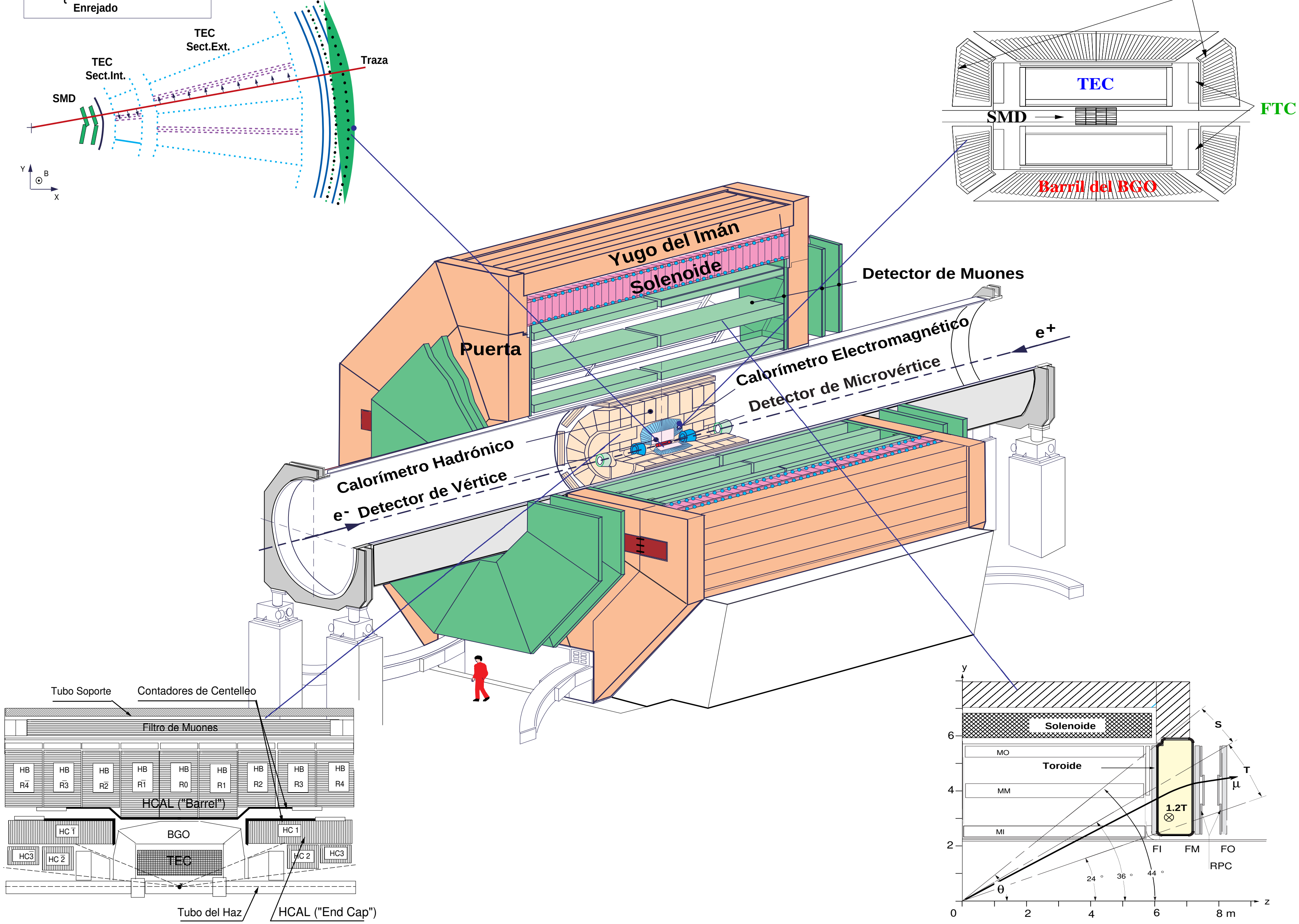
Energía centro de masas: $\sqrt{s} = 189$ GeV

Luminosidad integrada: $\mathcal{L} = 198\ \mathrm{pb}^{-1}$

Número de paquetes por haz: 4

Sistema de radiofrecuencia: 272 cavidades superconductoras
48 cavidades de cobre

El detector L3



El Proceso $e^+e^- \rightarrow W^+W^- \rightarrow l\nu q\bar{q}'$

Selección de la Muestra

$*$ Selección conjunta de los tres canales semileptónicos.

Ventajas:

- Menos contaminación.
- Mayor eficiencia (principalmente $q\bar{q}'\tau\nu$).

$*$ Datos recogidos durante el año 1998:

$$\begin{aligned} \sqrt{s} &= 189 \text{ GeV} \\ \mathcal{L} &= 176.4 \text{ pb}^{-1} \end{aligned}$$

$*$ Señal: Sección Eficaz (en el MS): 7.3 pb

$*$ Procesos Contaminantes:

$q\bar{q}(\gamma)$: $\sigma = 98.5$ pb

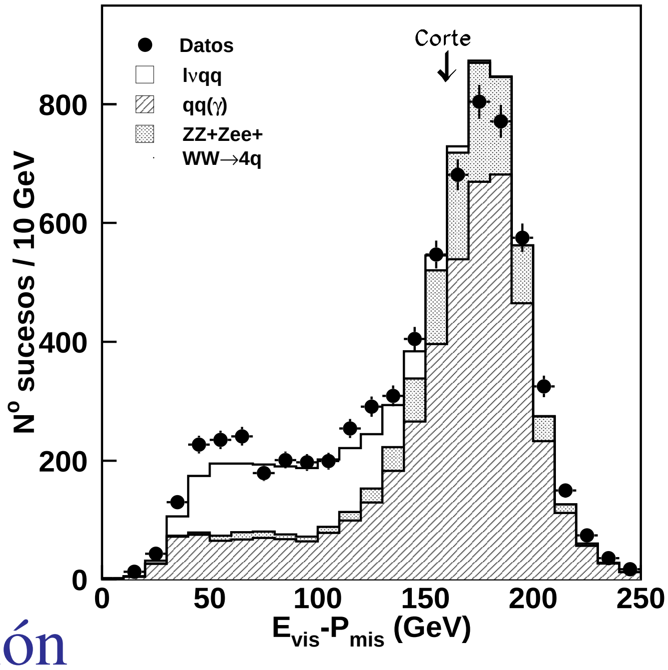
ZZ: $\sigma = 0.97$ pb

Zee: $\sigma = 3.35$ pb

Preselección

- $N_{clus} > 15$
- $30 \text{ GeV} < E_{vis} - P_{mis} < 165$ GeV
- $|\cos\theta_{mis}| < 0.95$

$\Longrightarrow$ 91% señal
11% $q\bar{q}'$



Selección

$*$ Leptón aislado + actividad hadrónica : $40 \text{ GeV} < M_{qq} < 120$ GeV.

1. ELECTRÓN $\longrightarrow$ SI
$\downarrow$ NO $\downarrow$

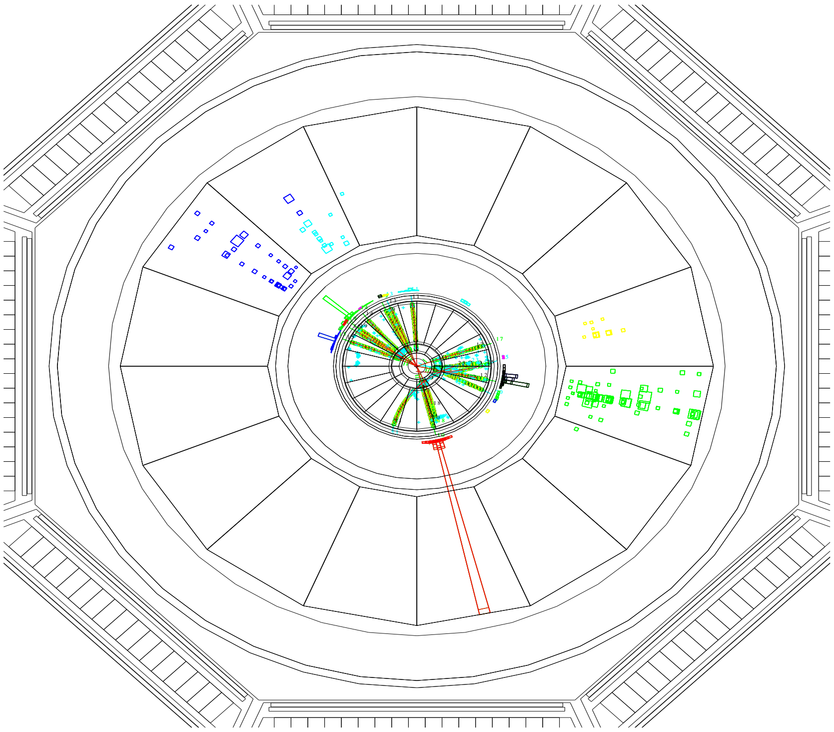
2. MUÓN $\longrightarrow$ SI
$\downarrow$ NO $\downarrow$

3. TAU $\to$ hadrón $\longrightarrow$ SI
$\downarrow$ NO $\downarrow$

No Seleccionado Seleccionado

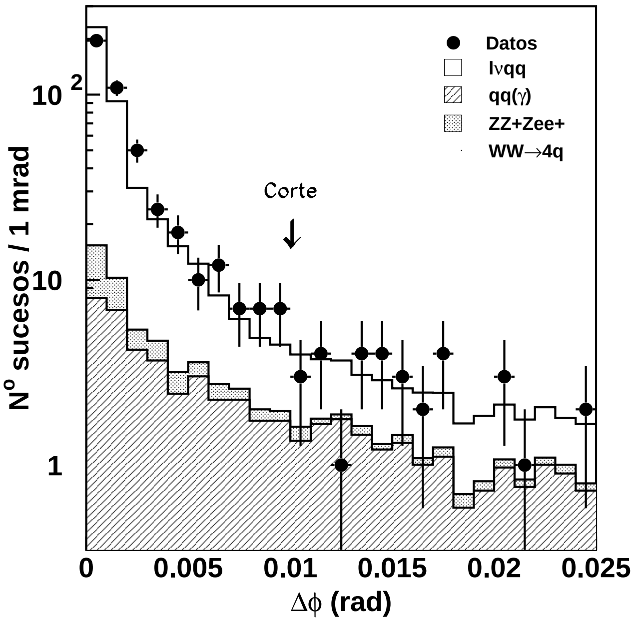
$e\nu_e q\bar{q}', \ \tau(\to e\nu_e\nu_\tau)\nu_\tau q\bar{q}'$

Run # 696408 Event # 1935 Total Energy : 135.50 GeV



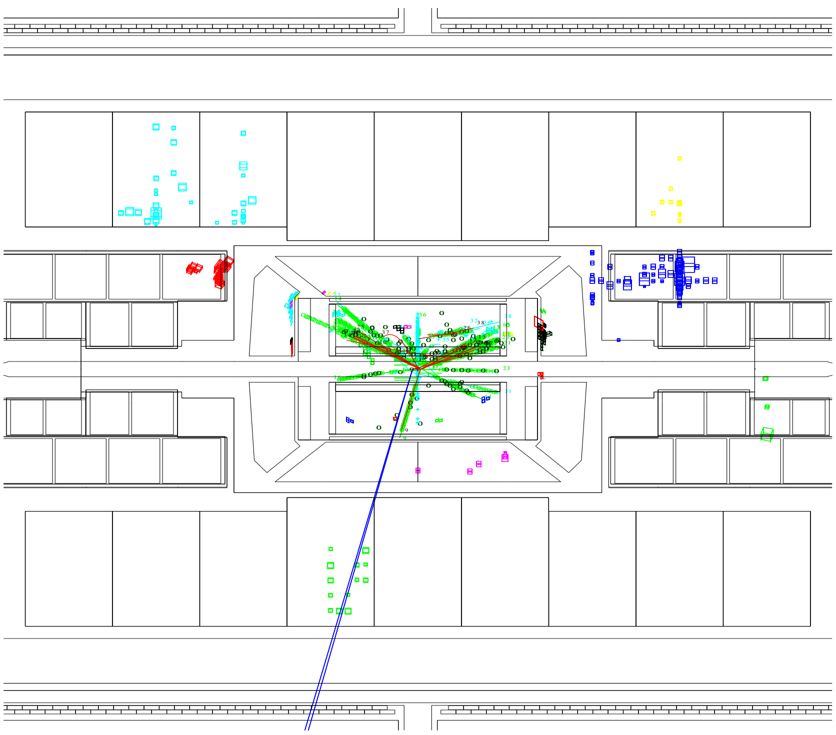
Transverse Imbalance :	.3345	Longitudinal Imbalance :	-.0108
Thrust : .7612	Major : .5762	Minor : .0500	
Event DAQ Time :	980605 175138		

- Energía ECAL > 5 GeV
- Traza TEC $\Delta\phi < 10$ mrad
- Aislamiento 15° si $E_e < 20$ GeV
- Actividad hadrónica: $40 \text{ GeV} < M_{qq} < 120$ GeV.



$\mu\nu_\mu q\bar{q}', \ \tau(\to \mu\nu_\mu\nu_\tau)\nu_\tau q\bar{q}'$

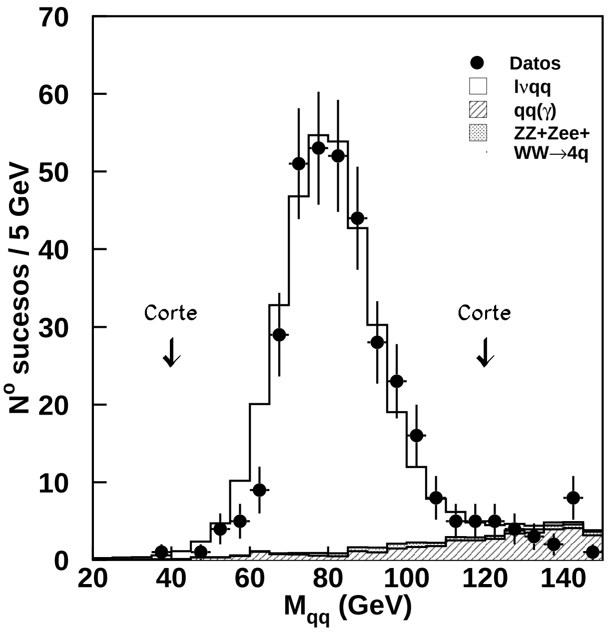
Run # 696821 Event # 3188 Total Energy : 155.50 GeV



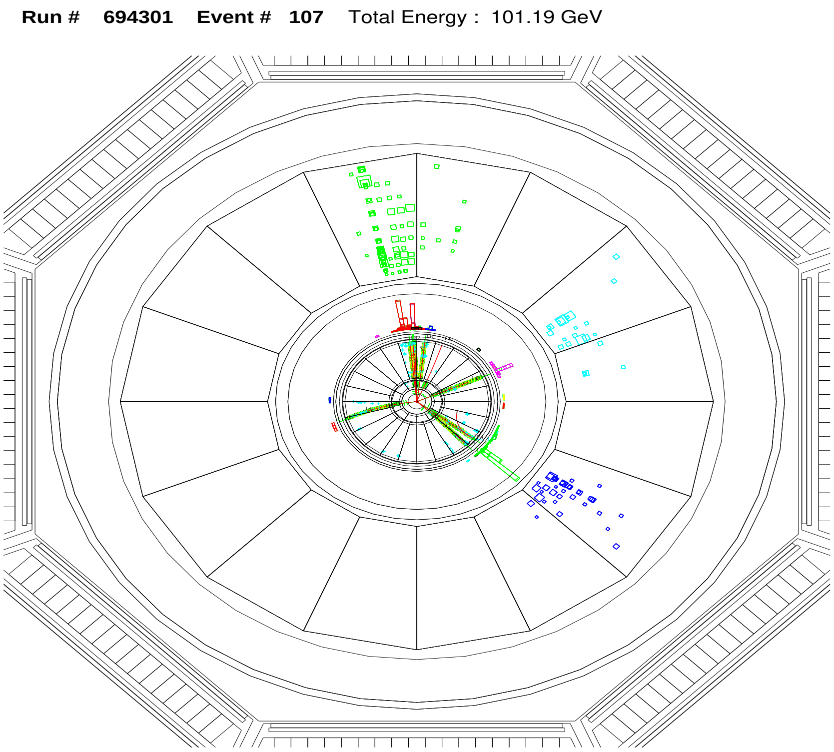
Transverse Imbalance :	.2202	Longitudinal Imbalance :	.1023

Thrust : .7007	Major : .4954	Minor : .1971
Event DAQ Time : 980608 13955		

- Señal cámaras de muones $P_\mu > 5$ GeV.
- Traza TEC
- Aislamiento 15° si $P_\mu < 20$ GeV
- Actividad hadrónica:
  $40\text{ GeV} < M_{qq} < 120$ GeV.



$\tau(\to \text{hadrón}\,\nu_\tau)\nu_\tau q\bar{q}'$



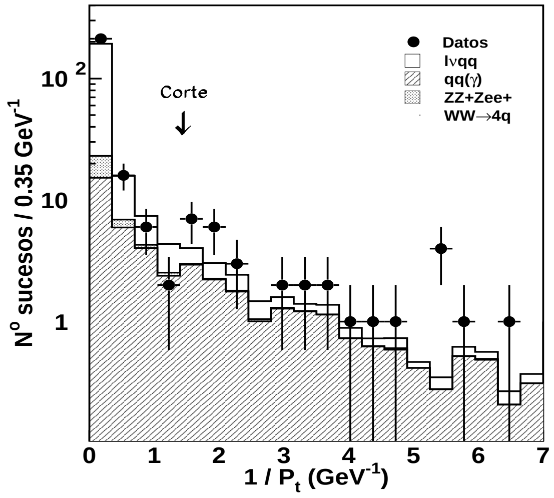
Transverse Imbalance :	.4917		Longitudinal Imbalance :	.1687	
Thrust :	.7666	Major :	.3735	Minor :	.2908
Event DAQ Time :	980528 203342				

$*$ $N_{jets} \geq 3$.

$*$ **Tau:** $E_{jet} > 8$ **GeV**, $P_{tr} > 700$ **MeV**, $N_{clus/jet} < 10$. Se tomará el que satisfaga el mayor número de las siguientes condiciones y al menos dos de ellas:

- $N_{tr/jet} < 4$
- $N_{clus/jet} < 5$
- $E(\text{cono } 5°)/E_{jet} > 70\%$
- $M_{jet} < 2$ GeV.

$*$ 50 GeV $< M_{qq} < 110$ **GeV.**



	Generado como:				
	$qql\nu$	$qqe\nu$	$qq\mu\nu$	$qq\tau\nu$	$qqqq$
Eficiencia(%) WW	70.6 ± 0.13	80.8 ± 0.19	75.7 ± 0.21	55.2 ± 0.24	0.45 ± 0.02
Eficiencia(%) Todos Diagr.	-	65.7 ± 0.17	75.6 ± 0.15	-	-

Proceso	Sección eficaz aceptada (pb)
$W^+W^- \to q\bar{q}q\bar{q}$	0.034 ± 0.001
$e^+e^- \to q\bar{q}(\gamma)$	0.429 ± 0.009
$e^+e^- \to ZZ$	0.068 ± 0.001
$e^+e^- \to Ze^+e^-$	0.070 ± 0.001
Total	0.601 ± 0.009

Número de sucesos seleccionados = 1016

Medida de la Sección Eficaz

$$\sigma_{l\nu\mathrm{q\bar{q}'}} = \sigma^{\mathrm{CC20}}_{\mathrm{e}\nu\mathrm{q\bar{q}'}} + \sigma^{\mathrm{CC10}}_{\mu\nu\mathrm{q\bar{q}'}} + \sigma^{\mathrm{CC10}}_{\tau\nu\mathrm{q\bar{q}'}}$$

$\Downarrow$ $(\sigma^{\mathrm{CC10}}_{\mu\nu\mathrm{q\bar{q}'}} / \sigma^{\mathrm{CC03}}_{\mu\nu\mathrm{q\bar{q}'}} \cong 1)$

Universalidad leptónica

$$\sigma^{\mathrm{sele}}_{l\nu\mathrm{q\bar{q}'}} = \sigma^{\mathrm{CC03}}_{l\nu\mathrm{q\bar{q}'}} \, (f \, \mathcal{E}^{\mathrm{CC20}}_{\mathrm{e}\nu\mathrm{q\bar{q}'}} + \mathcal{E}^{\mathrm{CC03}}_{\mu\nu\mathrm{q\bar{q}'}} + \mathcal{E}^{\mathrm{CC03}}_{\tau\nu\mathrm{q\bar{q}'}})/3$$

donde $f = \sigma^{\mathrm{CC20}}_{\mathrm{e}\nu\mathrm{q\bar{q}'}} / \sigma^{\mathrm{CC03}}_{\mathrm{e}\nu\mathrm{q\bar{q}'}}$

$$\Longrightarrow \quad \boxed{\sigma^{\mathrm{CC03}}_{l\nu\mathrm{q\bar{q}'}} = \frac{\frac{N_{\mathrm{d}}}{\mathcal{L}} - \sigma^{\mathrm{sele}}_{\mathrm{fondo}}}{f \, \mathcal{E}^{\mathrm{CC20}}_{\mathrm{e}\nu\mathrm{q\bar{q}'}} + \mathcal{E}^{\mathrm{CC03}}_{\mu\nu\mathrm{q\bar{q}'}} + \mathcal{E}^{\mathrm{CC03}}_{\tau\nu\mathrm{q\bar{q}'}}}}$$

$$\boxed{\sigma^{\mathrm{CC03}}_{l\nu\mathrm{q\bar{q}'}} = 7.27 \;\pm 0.25 \;\pm 0.11 \text{ pb}}$$

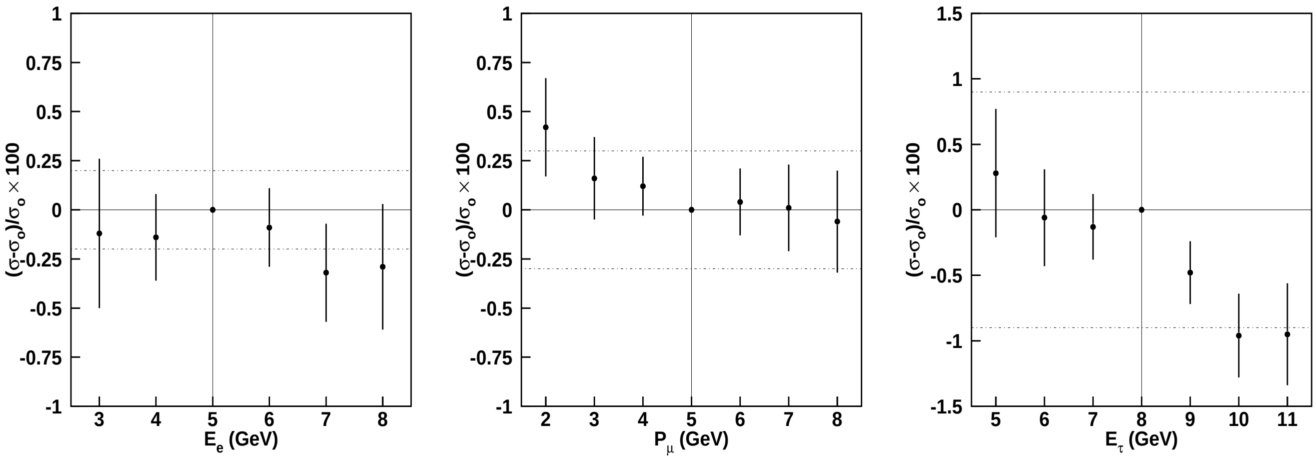
Errores Sistemáticos

Fuente	Error sistemático (%)
Selección	1.3
ISR	-
FSR	0.4
Masa del W ($\pm$0.25)	0.1
Anchura del W ($\pm$0.5)	0.3
Estadística del Monte Carlo	0.2
Estadística de la contaminación	0.2
Monte Carlo de contaminación	0.2
Modelo de fragmentación	0.4
Total	1.5

1) Selección:

a) Procedimiento: Variación de los cortes de selección.

b) Resultado: 0.09 pb



2) Radiación de estado final

a) Procedimiento: Muestra de sucesos sin FSR. Se considera como error la mitad de la diferencia entre las secciones eficaces medidas.

b) Resultado: 0.03 pb

3) Modelo de fragmentación de los jets

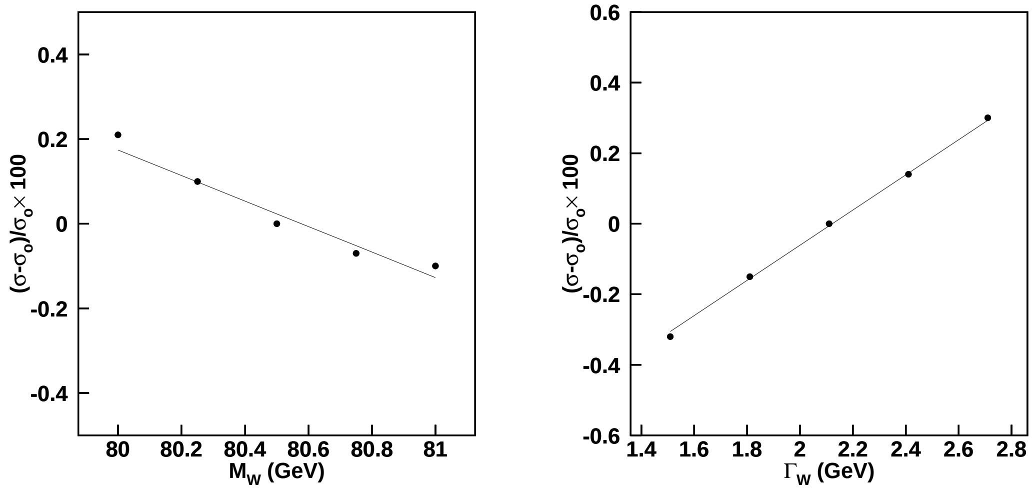
a) Procedimiento: Se usan dos modelos diferentes, JETSET Y HERWIG.

b) Resultado: 0.03 pb.

4) Masa y anchura del W

a) Procedimiento: Se calculan las eficiencias de la selección con muestras correspondientes a diferentes valores de los parámetros M_W y Γ_W.

b) Resultado: 0.02 pb



Medida de la Masa del W

Introducción

La medida de M_W es muy importante por ser uno de los parámetros clave del Modelo Estándar.

∗ Las masas de los bosones W y Z, M_W y M_Z, están relacionadas con las masas del quark top y del bosón de Higgs a través de la constante de Fermi.

⇒ Medidas precisas de las masas de los bosones W y Z y del quark top proporcionarán información acerca de la masa del Higgs.

∗ Ajustando los datos de alta precisión de LEP1 y SLD al Modelo Estándar, se ha obtenido una medida indirecta de M_W:

$$M_W = 80.332 \pm 0.037 \text{ GeV}$$

⇒ Una medida de M_W suficientemente precisa, proporcionaría una comprobación directa de la validez del Modelo Estándar.

LEP1	$\longrightarrow$	$M_Z = 91.1867 \pm 0.0021$ GeV
Tevatron	$\longrightarrow$	$m_{top} = 173.8 \pm 5.0$ GeV
UA2 + Tevatron	$\longrightarrow$	$\Delta M_W = \pm 60$ MeV
LEP2	$\longrightarrow$	$\Delta M_W = \pm 100$ MeV

Metodología

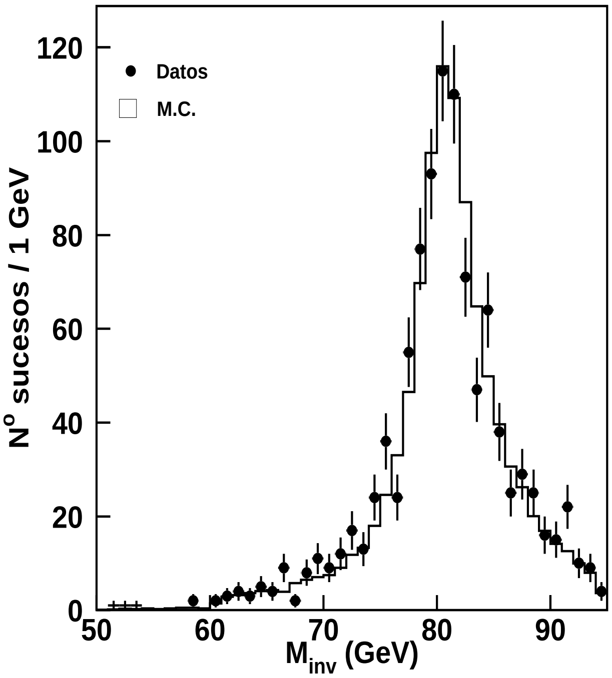
Los métodos que extraen del proceso $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$ una medida más precisa de M_W son:

1. Medida de la sección eficaz en el umbral de producción de dos W,s.($\sqrt{s} = 161$ GeV).

2. Reconstrucción de las masas invariantes de los W,s.
$\frac{d\sigma}{dm}$ depende de M_W a través de una función Breit-Wigner:

$$\rho(m, M_W) = \frac{1}{\pi} \frac{\sqrt{s}\,\Gamma_W}{(m^2 - M_W^2)^2 + M_W^2 \Gamma_W^2}$$

Esta distribución se encuentra deformada por efecto de la resolución, ISR, etc ...



Existen distintas estrategias para extraer M_W de esta distribución:

–Calibración del Monte Carlo.

–Convolución.

–Repesado.

Reconstrucción de la masa invariante

La masa invariante de cada W se obtiene a partir de sus productos de desintegración.

$\longrightarrow$ Los momentos del electrón y el muón son medidos con muy buena precisión ($< 3\%$).

$\longrightarrow$ Se desconoce la energía del tau.

$\longrightarrow$ Las energías y direcciones de los jets no son medidas con buena resolución.

$\Longrightarrow$ Solución:

1. Se fuerza la reconstrucción de dos jets que se corresponderían con los quarks iniciales.
2. Ajuste cinemático que mejora sustancialmente las resoluciones en energía y proporciona los momentos del tau y del neutrino.

Reconstrucción de dos jets

Todas las asociaciones calorimétricas básicas que no formen parte del leptón son forzadas a formar parte de dos jets. Para ello se usa el Algoritmo de Durham:

$$y_{ij} \equiv \frac{2\mathrm{Min}(E_i^2, E_j^2)(1 - \cos\theta_{ij})}{E_{\mathrm{had}}^2}$$

Partiendo de jets formados por pequeñas asociaciones energéticas, se combina el par con menor y_{ij} para dar lugar a un nuevo jet. Posteriormente, los y_{ij} se recalculan repitiendose el proceso hasta que queden únicamente dos jets.

Ajuste Cinemático

$\ast$ Se minimiza la función χ^2:

$$\chi^2 = \frac{(E_{j1}^{med} - E_{j1}^{rec})^2}{\sigma(E_{jet})^2} + \frac{(E_{j2}^{med} - E_{j2}^{rec})^2}{\sigma(E_{jet})^2} + \frac{(E_{l}^{med} - E_{l}^{rec})^2}{\sigma(E_{l})^2} + (\mathrm{L1} + \mathrm{L2})$$

$\ast$ 5 ligaduras:

4 $\longrightarrow$ Conservación de energía y momento:

$$\begin{aligned} \vec{p}_l + \vec{p}_{j_1} + \vec{p}_{j_2} + \vec{p}_\nu &= 0 \\ E_l + E_{j_1} + E_{j_2} + E_\nu &= \sqrt{s} \end{aligned}$$

1 $\longrightarrow$ Igualdad de las masas invariantes de los bosones W:

$$\mathrm{L1} \equiv m_{l\nu} - m_{j_1 j_2} = 0 + \mathcal{O}(\Gamma_W)$$

a) $\mathrm{q\bar{q}'e}\nu$ y $\mathrm{q\bar{q}'}\mu\nu$ 3 variables desconocidas E_ν, θ_ν y ϕ_ν:

$(5-3) = 2$ LIGADURAS $\rightarrow$ Ajuste 2C.

$$|\vec{p}_\nu| = E_\nu \quad \Rightarrow \quad \mathrm{L2} \equiv |\vec{p}_l + \vec{p}_{j_1} + \vec{p}_{j_2}| = \sqrt{s} - (E_l + E_{j_1} + E_{j_2})$$

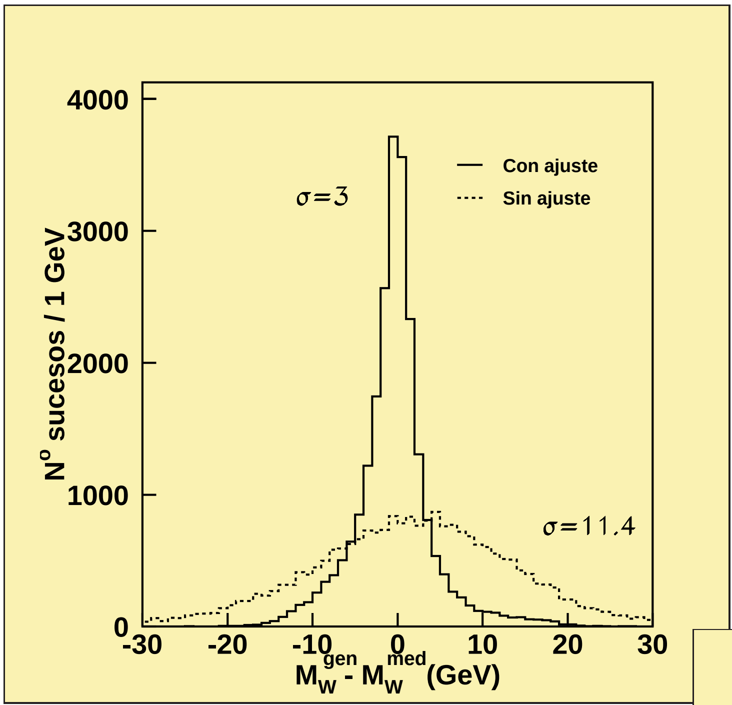
b) $\mathrm{q\bar{q}'}\tau\nu$ 4 variables desconocidas E_ν, θ_ν, ϕ_ν y E_τ:

$(5-4) = 1$ LIGADURA $\rightarrow$ Ajuste 1C.

En la muestra seleccionada

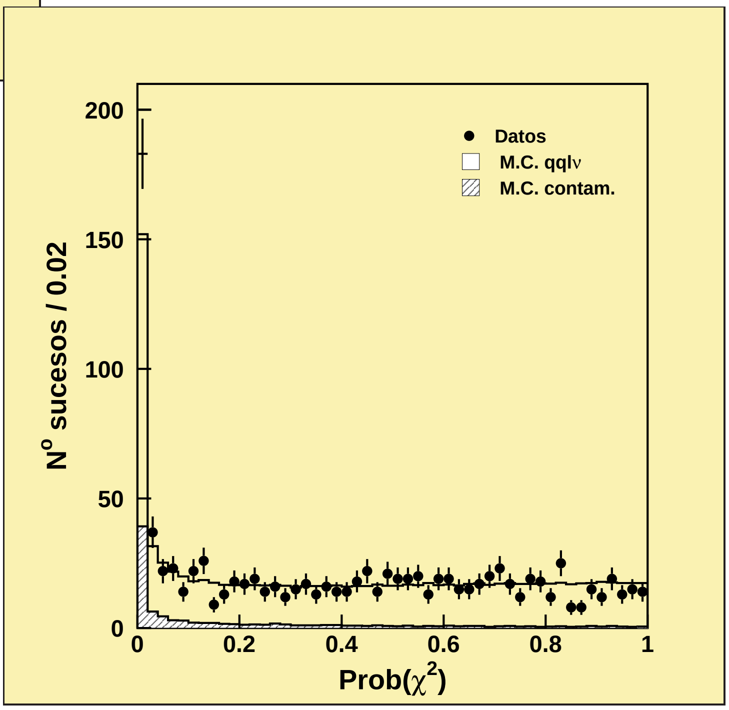
$*$ Si el leptón es $e^{\pm}$ o $\mu^{\pm}$ $\longrightarrow$ 2C.
(Si el χ^2 no es bueno $\longrightarrow$ 1C)

$*$ Si el leptón es un tau hadrónico $\longrightarrow$ 1C.



Gran mejora en la resolución de la masa invariante.

Los sucesos mal reconstruidos, así como el fondo, tienen Prob (χ^2) pequeño.
Para la medida de M_W se requiere: Prob(χ^2)$>$ 1%



Método de Repesado

Ajuste de la distribución MC a los datos: Función de máxima verosimilitud:

$$\mathcal{L}(\bar{m}, \mathrm{M_W}) = \prod_i^{\mathrm{N_d}} p_i(\bar{m}_i, \mathrm{M_W})$$

$\bar{m} = (m_{\mathrm{l}\nu} + m_{\mathrm{j_1j_2}})/2.$

$\mathrm{N_d}$: número de sucesos seleccionados en datos.

$p_i(\bar{m}_i, \mathrm{M_W}) = \frac{1}{\sigma^{\mathrm{WW}}(\mathrm{M_W})+\sigma^{\mathrm{Fd}}} \left[\frac{d\sigma^{\mathrm{WW}}(\mathrm{M_W})}{d\bar{m}_i} + \frac{d\sigma^{\mathrm{Fd}}}{d\bar{m}_i}\right].$

$* \quad \sigma^{\mathrm{WW}}(\mathrm{M_W}) = \frac{\sigma^{\mathrm{gen}}}{\mathrm{N^{gen}}} \mathrm{N_T^{MC}}(\mathrm{M_W})$

$* \quad \frac{d\sigma^{\mathrm{WW}}(\mathrm{M_W})}{d\bar{m}_i} = \frac{\sigma^{\mathrm{gen}}}{\mathrm{N^{gen}}} \frac{\mathrm{N}_i^{\mathrm{MC}}}{\Delta_i}$

- Δ_i Anchura del intervalo en torno al suceso *i* de datos.
- N_i^{MC} Número de sucesos MC en el intervalo *i*.
- Se usan intervalos de anchura variable manteniendo constante $\mathrm{N}_i^{\mathrm{MC}}$.

* Repesado:

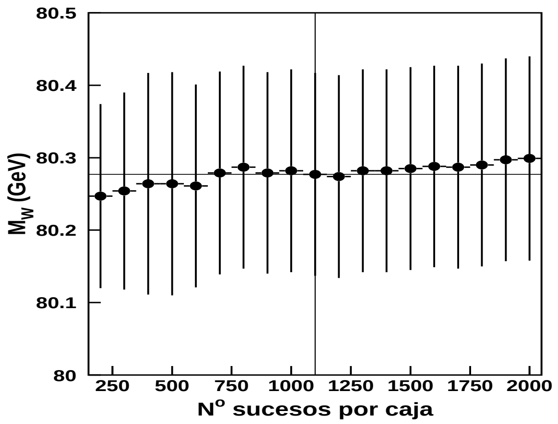
Para obtener el valor de $p_i(\bar{m}_i, \mathrm{M_W})$ para diferentes valores de $\mathrm{M_W}$ se utiliza una técnica de repesado.

Cada suceso MC es repesado por un factor $w_j(\mathrm{M_W^{gen}}, \mathrm{M_W^{new}})$:

$$w_j = \frac{\rho(\mathrm{M_W^{new}}; m^j_{\mathrm{l}\nu})\ \rho(\mathrm{M_W^{new}}; m^j_{\mathrm{jj}})}{\rho(\mathrm{M_W^{gen}}; m^j_{\mathrm{l}\nu})\ \rho(\mathrm{M_W^{gen}}; m^j_{\mathrm{jj}})}$$

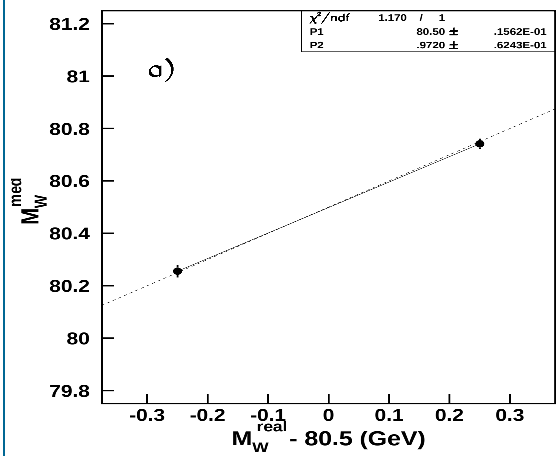
Comprobación del Método

1) Estabilidad: Dependencia del número de sucesos MC por caja.

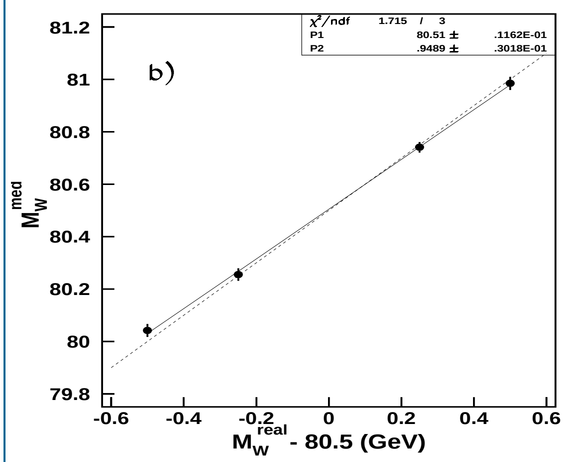


$-750 <$ N° < 1500 resultado estable,
no depende del tamaño de las cajas.
$-$Cajas de 1100 sucesos $\Rightarrow \Delta \sim 30$ MeV.

2) Linealidad:

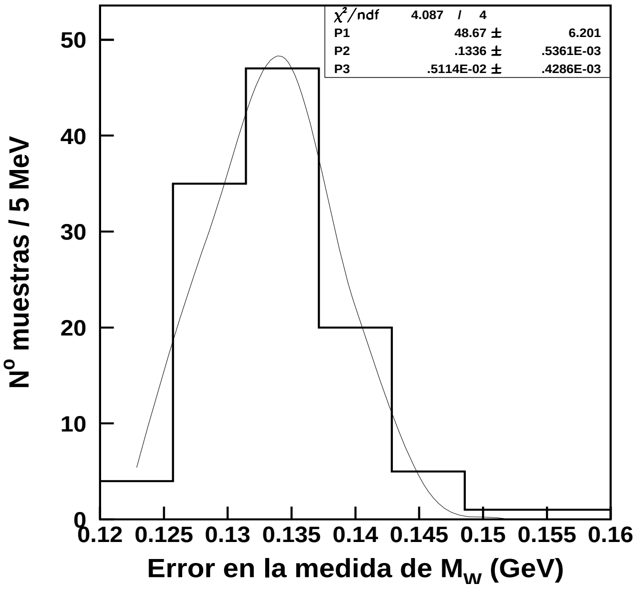


La medida reproduce los valores
con que ha sido generada la muestra.



Comportamiento no lineal
(Estadística limitada del MC)

3) Error Esperado: Indica la potencia del método y la fiabilidad de los errores obtenidos en el ajuste.

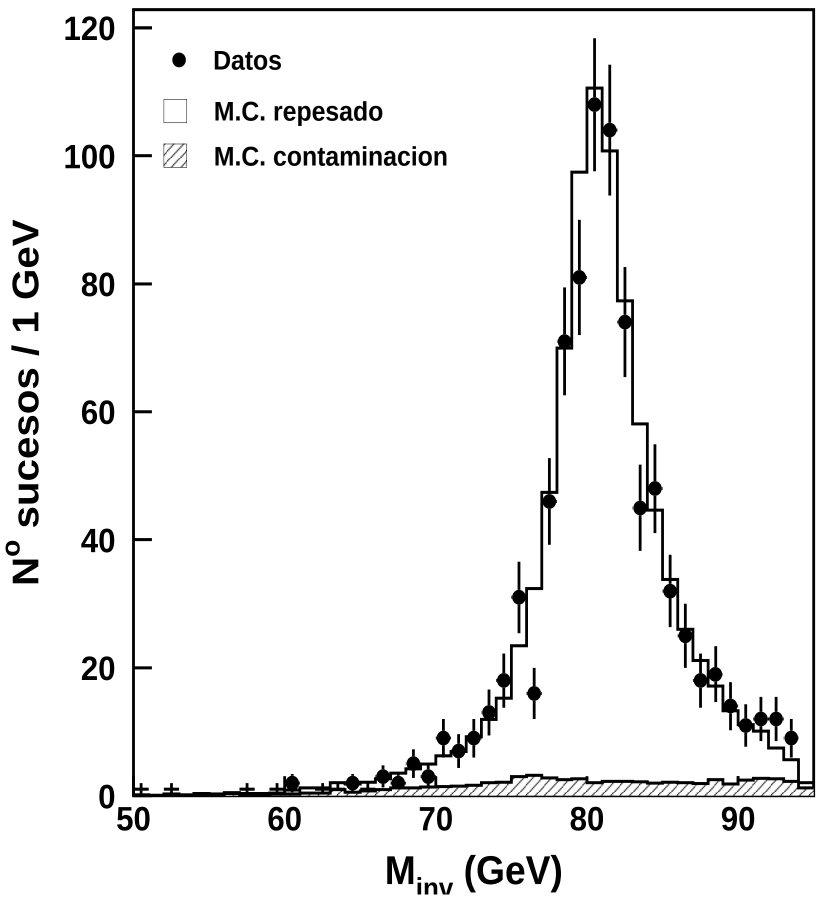


Se utilizan 112 muestras del tamaño de los datos

$$\boxed{\text{Error esperado} = 134\ \text{MeV}}$$

Resultados

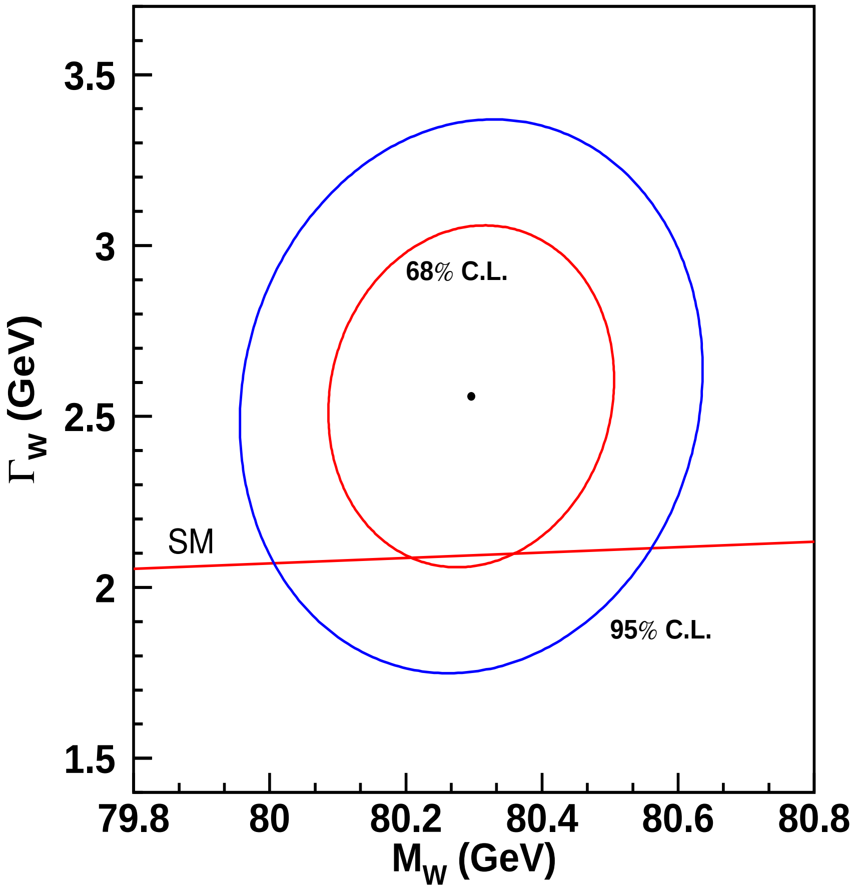
Medida de la masa del W



$$M_W = (80.31 \pm 0.14(\text{estad.}) \pm 0.07(\text{sist.}))\ \textbf{GeV}$$

Medida de la masa y la anchura del W

$$\begin{aligned} M_W &= 80.30 \pm 0.14 \text{ GeV} \\ \Gamma_W &= 2.56 \pm 0.33 \text{ GeV} \end{aligned}$$



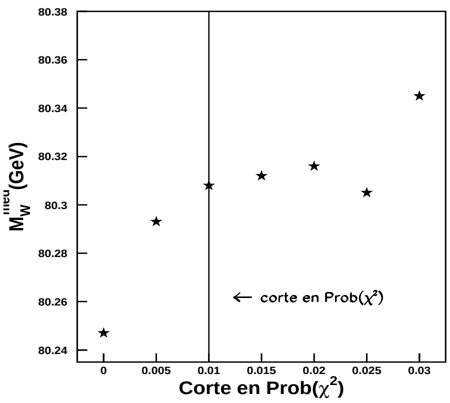
Errores Sistemáticos

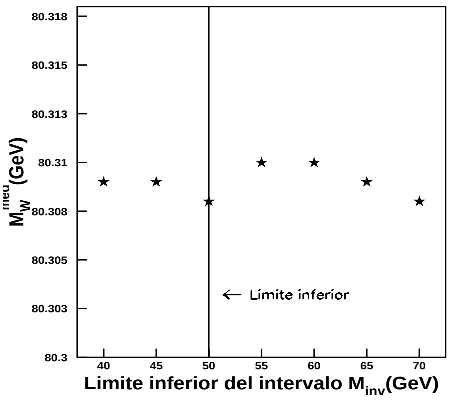
Fuente	ΔM_{W} (MeV)
Energía de LEP	17
ISR	10
FSR	20
Fragmentación	20
Energía de los jets	10
Estadística M. C.	20
Selección	60
Contaminación	5
Factor repesado	10
Anchura W	5
Linealidad	6
Total	70

1) Selección:

a) Procedimiento: Variación del corte en la probabilidad del ajuste cinemático y del intervalo de masa invariante utilizado en la medida de $\mathrm{M_W}$.

b) Resultado: 60 MeV.





2) Estadística límitada de la muestra M.C.:

a) Procedimiento: Se divide la muestra en N partes de igual tamaño y se ajusta cada muestra a los datos. El error es la desviación cuadrática media de los resultados dividida por la raíz cuadrada de N.

b) Resultado:20 MeV

3) Energía de LEP:

a) Procedimiento: La incertidumbre en la energía del haz introduce un error sistemático en la medida de $\mathrm{M_W} \rightarrow \Delta\mathrm{M_W}/\mathrm{M_W} \approx \Delta\mathrm{E_{haz}}/\mathrm{E_{haz}}$

b) Resultado: 17 MeV

4) Factor de repesado:

a) Procedimiento: Se calcula de nuevo $\mathrm{M_W}$ utilizando como factor de repesado:

$$\omega_i = \frac{|\mathcal{M}(\mathbf{p_i}, \mathrm{M_W^{new}}, \Gamma_\mathrm{W}^\mathrm{new})|^2}{|\mathcal{M}(\mathbf{p_i}, \mathrm{M_W^{gen}}, \Gamma_\mathrm{W}^\mathrm{gen})|^2}$$

el elemento de matriz se calcula con el programa EXCALIBUR.

b) Resultado: 10 MeV

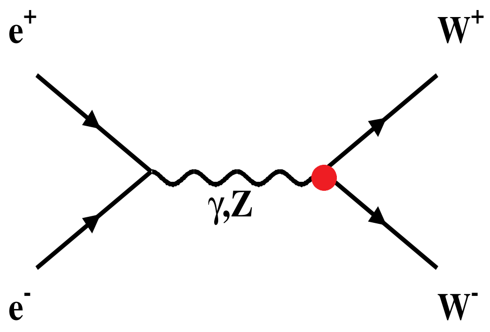
5) Linealidad:

a) Procedimiento: $\mathrm{M_W^{med}} = 80.50 + 0.972 \cdot (\mathrm{M_W^{real}} - 80.50)$

b) Resultado: 6 MeV

Medida de los acoplos WWZ y WWγ

Introducción



La medida de estos acoplos sirve para:
$\rightarrow$ comprobar la teoría electrodébil $SU(2)_L \times U(1)_Y$.
$\rightarrow$ buscar nueva física.

El Lagrangiano efectivo más general que describe estos acoplos contiene 14 términos independientes.

$*$ Imponiendo: Invariancia gauge electromagnética y Conservación C y P $\Longrightarrow$ $g_1^z, \kappa_z, \kappa_\gamma$ $\lambda_z,\ \lambda_\gamma$

En el Modelo Estándar: $g_1^z = \kappa_z = \kappa_\gamma = 1$
$\lambda_z = \lambda_\gamma = 0$

$\Downarrow$

Se consideran sus desviaciones del Modelo Estándar:

$\Delta g_1^z,\ \Delta\kappa_z,\ \Delta\kappa_\gamma,\ \lambda_z,\ \lambda_\gamma$ $\longleftarrow$ ACOPLOS ANÓMALOS

$*$ Se impone invariancia gauge $SU(2)_L \times U(1)_Y$:

$$\begin{aligned} \Delta\kappa_z &= -\Delta\kappa_\gamma \tan^2\theta_w + \Delta g_1^z \\ \lambda_z &= \lambda_\gamma \end{aligned}$$

$\Rightarrow$ 3 parámetros independientes
$\Delta\kappa_\gamma,\ \Delta g_1^z,\ \lambda_\gamma$

Efectos de los Acoplos Anómalos

1) Aumento de la sección eficaz total.

2) Cambio de la contribución relativa de cada estado de helicidad.

$\Downarrow$

La estructura de helicidad se extrae de las siguientes distribuciones angulares:

El ángulo polar de producción del W^-: θ_W

Los ángulos polar y azimutal del fermión de la desintegración del W^- en el sistema en reposo del W^-: θ_1^*, ϕ_1^*

Los ángulo análogos para el antifermión proveniente del W^+: θ_2^*, ϕ_2^*

$*$ Para calcular estas variables es necesario conocer la carga de los W,s y la energía y la carga de las partículas del estado final.

$\Rightarrow$ $q\bar{q}l\nu$ es el canal que proporciona mayor información sobre la helicidad de los bosones $\longrightarrow$ Más sensible a los acoplos anómalos.

Observables Óptimos

Para facilitar la medida de los acoplos, manteniendo la máxima sensibilidad:

$$\vec{\Omega} = (\theta_W, \theta_1^*, \phi_1^*, \theta_2^*, \phi_2^*) \longrightarrow \text{Observables Óptimos.}$$

La sección eficaz diferencial es función de los acoplos anómalos, Ψ :

$$\frac{d\sigma}{d\vec{\Omega}} = c_0(\vec{\Omega}) + c_1(\vec{\Omega}) \cdot \Psi + c_2(\vec{\Omega}) \cdot \Psi^2$$

$*$ Observables Óptimos :

$$\mathcal{O}_1 \equiv \frac{c_1(\vec{\Omega})}{c_0(\vec{\Omega})}$$

$$\mathcal{O}_2 \equiv \frac{c_2(\vec{\Omega})}{c_0(\vec{\Omega})}$$

poseen toda la información sobre Ψ que lleva $\frac{d\sigma}{d\vec{\Omega}}$

$*$ En la práctica y para simplificar el análisis:

1. No se considera el observable $\mathcal{O}_2$

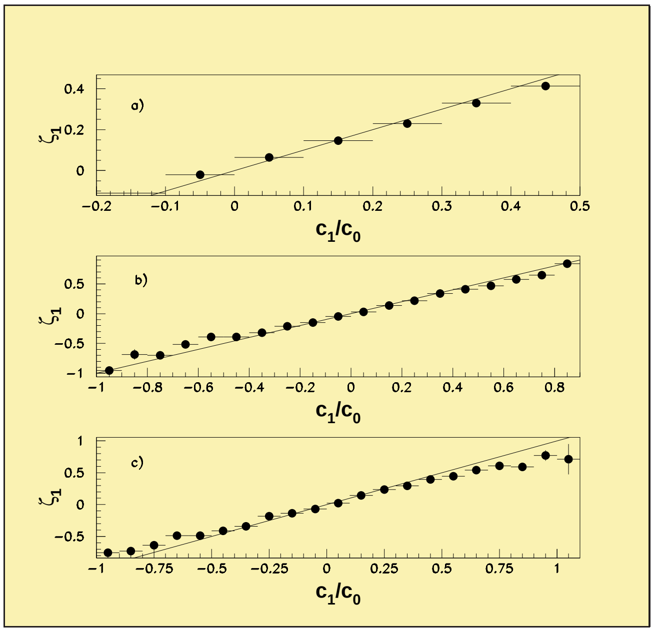
   $\Psi \sim 0 \implies \frac{c_2}{c_0} \cdot \Psi^2$ suprimido.

2. Resolución experimental:

$$\vec{\Omega} \longrightarrow \vec{\mathcal{R}}$$

$$\frac{c_1(\vec{\Omega})}{c_0(\vec{\Omega})} \longrightarrow \int \frac{c_1(\vec{\Omega})}{c_0(\vec{\Omega})} G(\vec{\Omega}, \vec{\mathcal{R}})\, d\vec{\Omega}$$

$$\boxed{\frac{c_1(\vec{\mathcal{R}})}{c_0(\vec{\mathcal{R}})}}$$



$\frac{c_1(\vec{\mathcal{R}})}{c_0(\vec{\mathcal{R}})}$ se calcula del siguiente modo:

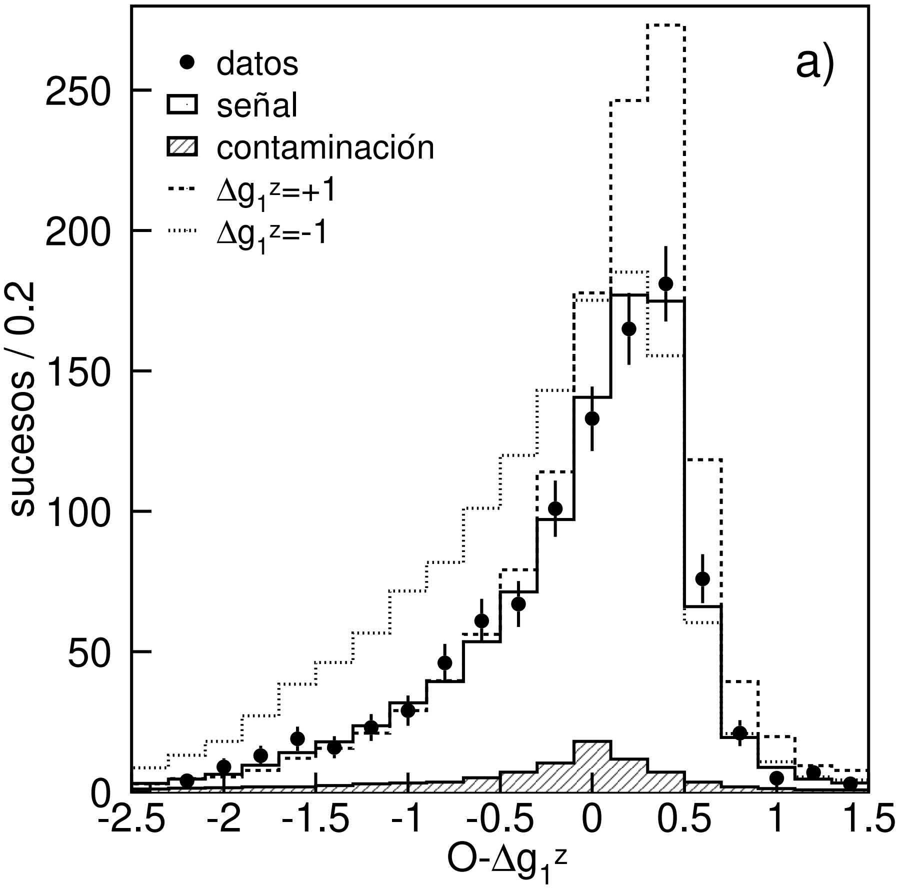
Teniendo en cuenta que:

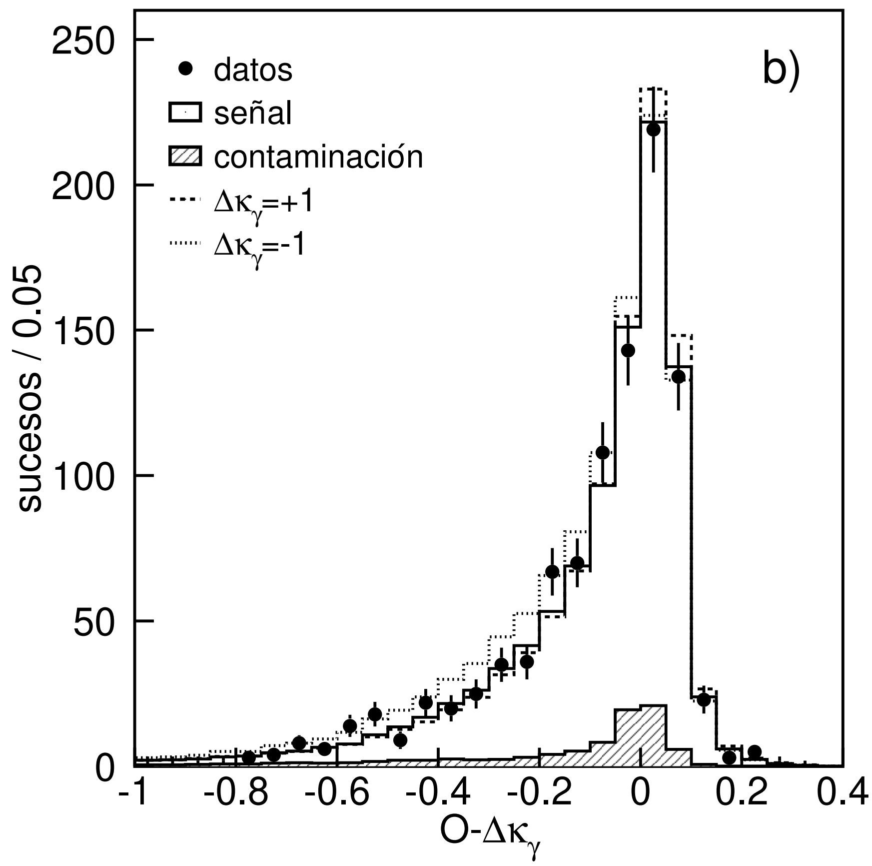
$$|M(\vec{\mathcal{R}}, \Psi)|^2 \propto c_0(\vec{\mathcal{R}}) + c_1(\vec{\mathcal{R}}) \cdot \Psi + c_2(\vec{\mathcal{R}}) \cdot \Psi^2$$

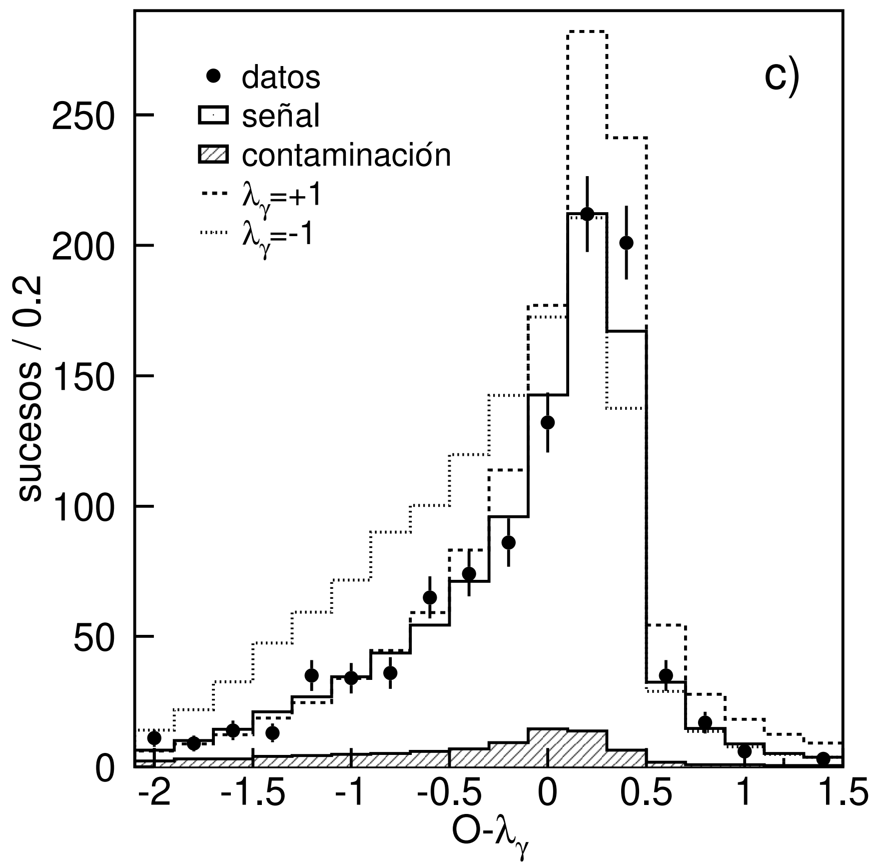
$$\mathcal{O}_\psi \equiv \frac{c_1}{c_0} = \frac{|M(\mathbf{p}_i,\Psi{=}{+}1)|^2 - |M(\mathbf{p}_i,\Psi{=}{-}1)|^2}{2 \cdot |M(\mathbf{p}_i,\Psi{=}0)|^2}$$

$\vec{\mathcal{R}} = \mathbf{p}$

$|M(\mathbf{p}_i, \Psi)|^2$ se calcula con EXCALIBUR.




datos
señal
contaminación
Δκγ=+1
Δκγ=-1
b)
sucesos / 0.05
O-Δκγ
0
50
100
150
200
250
-1
-0.8
-0.6
-0.4
-0.2
0
0.2
0.4


datos
señal
contaminación
λγ=+1
λγ=-1
c)
sucesos / 0.2
O-λγ
0
50
100
150
200
250
-2
-1.5
-1
-0.5
0
0.5
1
1.5

Método de Repesado

∗ Ajuste a una función de máxima verosimilitud:

$$\mathcal{L} = \frac{1}{\mathrm{N_d}!}\, \mathrm{N_e}(\Psi)^{\mathrm{N_d}}\, e^{-\mathrm{N_e}(\Psi)} \prod_i^{\mathrm{N_d}} \rho_i(\Psi)$$

$\mathrm{N_e}(\Psi) = \mathrm{N_{WW}}(\Psi) + \mathrm{N_{Fd}}$

$\rho_i(\Psi) \equiv$ densidad de probabilidad del suceso *i*.

Para calcular $\rho_i(\Psi)$ de cada suceso de datos se utiliza un método de cajas:

$$\rho_i(\Psi) = \frac{\frac{\sigma^{\mathrm{gen}}}{\mathrm{N^{gen}}}\frac{\mathrm{N}_i^{\mathrm{MC}}(\Psi)}{\Delta_i} + \frac{\sigma^{\mathrm{Fd}}}{\mathrm{N^{Fd}}}\frac{\mathrm{N}_i^{\mathrm{Fd}}}{\Delta_i}}{\frac{\sigma^{\mathrm{gen}}}{\mathrm{N^{gen}}}\mathrm{N_T^{MC}}(\Psi) + \frac{\sigma^{\mathrm{Fd}}}{\mathrm{N^{Fd}}}\mathrm{N_T^{Fd}}}$$

– Δ_i es el tamaño de la caja entorno al suceso de datos *i*

– $\mathrm{N}_i^{\mathrm{MC}}$ y $\mathrm{N}_i^{\mathrm{Fd}}$ son el número de sucesos MC para señal y fondo en la caja *i*.

∗ Repesado:

Para calcular $\rho_i(\Psi)$ para diferentes valores de $\Psi \neq 0$ se repesa cada suceso MC por el factor :

$$w(\vec{\Omega}, \Psi) \equiv 1 + \frac{c_1(\vec{\Omega})}{c_0(\vec{\Omega})} \cdot \Psi + \frac{c_2(\vec{\Omega})}{c_0(\vec{\Omega})} \cdot \Psi^2$$

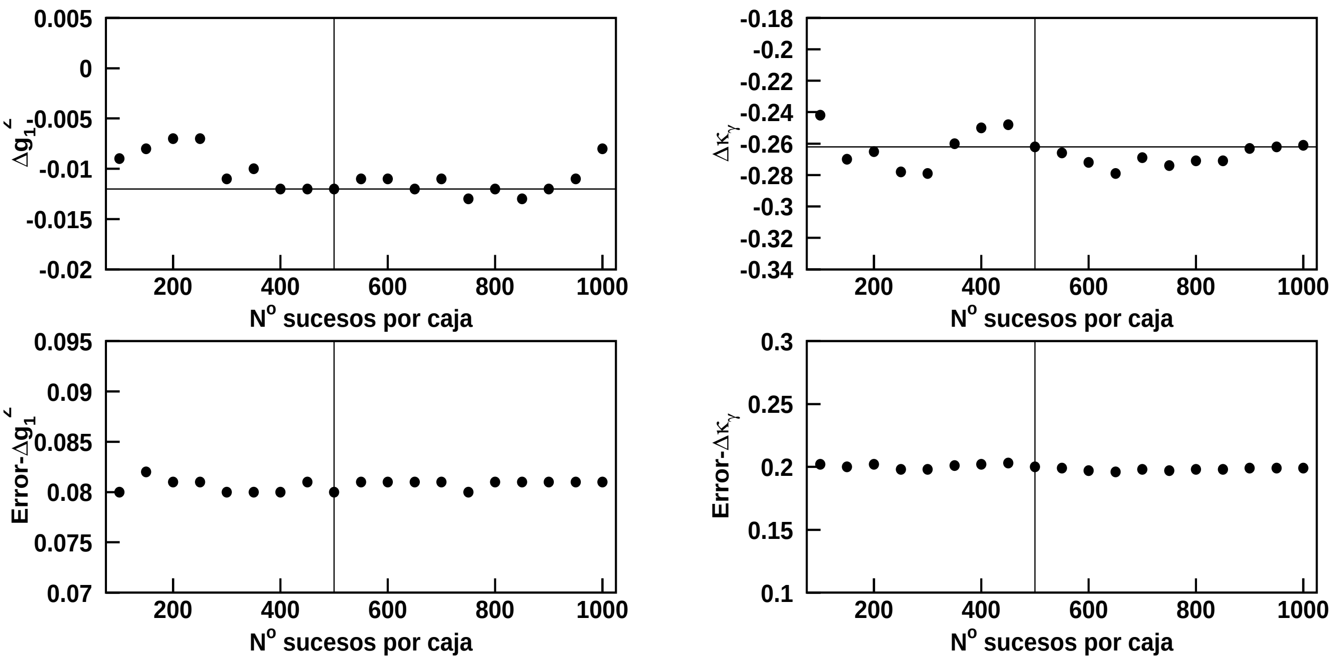
Para determinar conjuntamente dos de los acoplos, $\rho_i(\Psi_1, \Psi_2)$ se calcula en un espacio de dos dimensiones : $(\mathcal{O}_{\Psi_1}, \mathcal{O}_{\Psi_2})$.

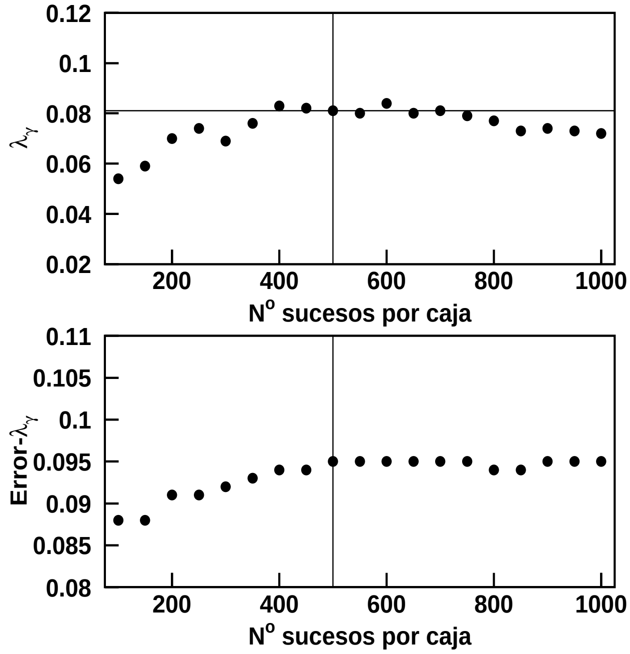
El factor de repesado incluye más términos:

$$w(\vec{\Omega}, \Psi_1, \Psi_2) \equiv 1 + \frac{c_{1,1}(\vec{\Omega})}{c_0(\vec{\Omega})} \cdot \Psi_1 + \frac{c_{1,2}(\vec{\Omega})}{c_0(\vec{\Omega})} \cdot \Psi_2 + \frac{c_{2,1}(\vec{\Omega})}{c_0(\vec{\Omega})} \cdot \Psi_1^2 + \frac{c_{2,2}(\vec{\Omega})}{c_0(\vec{\Omega})} \cdot \Psi_2^2 + \frac{c_{2,12}(\vec{\Omega})}{c_0(\vec{\Omega})} \cdot \Psi_1 \cdot \Psi_2$$

Comprobación del Método

1) Estabilidad: Dependencia del número de sucesos MC por caja.





400 < N° < 700 tanto el valor central como el error de la medida es estable.

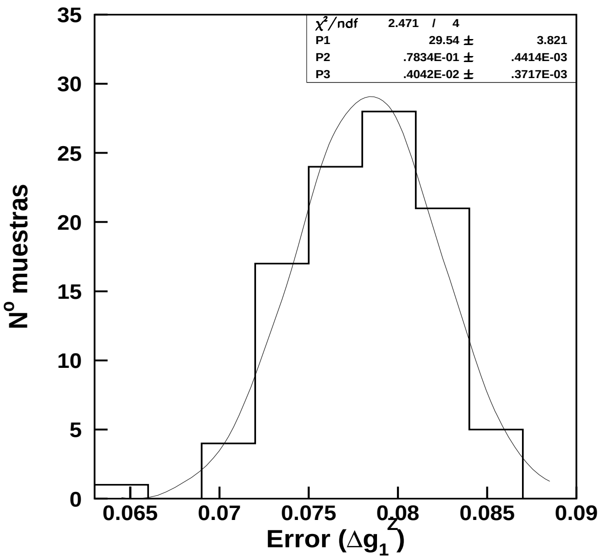
2) Fiabilidad:

$*$ Se han medido los acoplos anómalos para muestras MC generadas con valores no nulos de dichos acoplos.

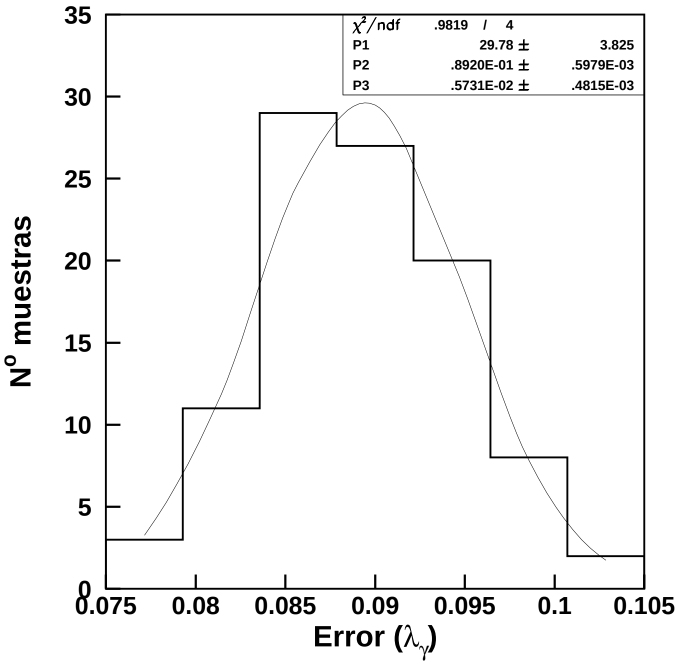
$\psi_{\text{genererado}}$	ψ_{medido}	$\psi_i\psi_j$	$\psi_i\psi_k$
$\Delta g_1^Z = +0.2$ ($\Delta\kappa_\gamma = \lambda_\gamma = 0$)	$\Delta g_1^Z = +0.24 \pm 0.03$	$\Delta g_1^Z = +0.22 \pm 0.05$ $\Delta\kappa_\gamma = +0.07 \pm 0.12$ $\rho = -0.06$	$\Delta g_1^Z = +0.16 \pm 0.06$ $\lambda_\gamma = +0.13 \pm 0.08$ $\rho = -0.64$
$\Delta g_1^Z = -0.2$ ($\Delta\kappa_\gamma = \lambda_\gamma = 0$)	$\Delta g_1^Z = -0.18 \pm 0.03$	$\Delta g_1^Z = -0.16 \pm 0.06$ $\Delta\kappa_\gamma = -0.00 \pm 0.24$ $\rho = -0.74$	$\Delta g_1^Z = -0.18 \pm 0.06$ $\lambda_\gamma = 0.04 \pm 0.08$ $\rho = -0.74$
$\lambda_\gamma = +0.2$ ($\Delta g_1^Z = \Delta\kappa_\gamma = 0$)	$\lambda_\gamma = +0.23 \pm 0.04$	$\lambda_\gamma = +0.13 \pm 0.08$ $\Delta g_1^Z = 0.10 \pm 0.07$ $\rho = -0.67$	$\lambda_\gamma = +0.21 \pm 0.06$ $\Delta\kappa_\gamma = 0.07 \pm 0.17$ $\rho = -0.30$
$\lambda_\gamma = -0.2$ ($\Delta g_1^Z = \Delta\kappa_\gamma = 0$)	$\lambda_\gamma = -0.19 \pm 0.03$	$\lambda_\gamma = -0.19 \pm 0.08$ $\Delta g_1^Z = 0.00 \pm 0.07$ $\rho = -0.77$	$\lambda_\gamma = -0.21 \pm 0.06$ $\Delta\kappa_\gamma = 0.13 \pm 0.21$ $\rho = -0.59$

Los resultados reproducen bien el valor de los acoplos con que fueron generados.

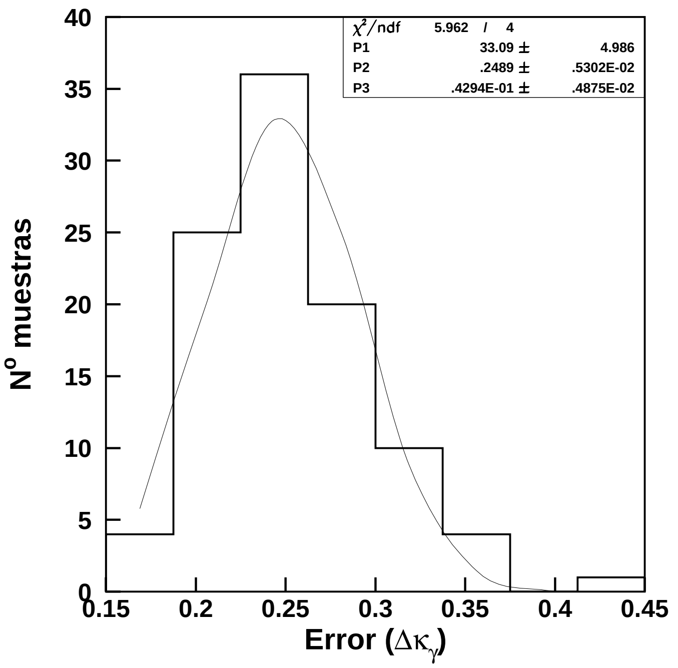
$*$ Se calcula el Error Esperado midiendo los acoplos anómalos para 100 submuestras MC del tamaño de los datos, generadas de acuerdo con el Modelo Estándar.



$$\text{Error Esperado}(\Delta g_1^Z) = 0.08$$



$$\text{Error Esperado}(\lambda_\gamma) = 0.09$$



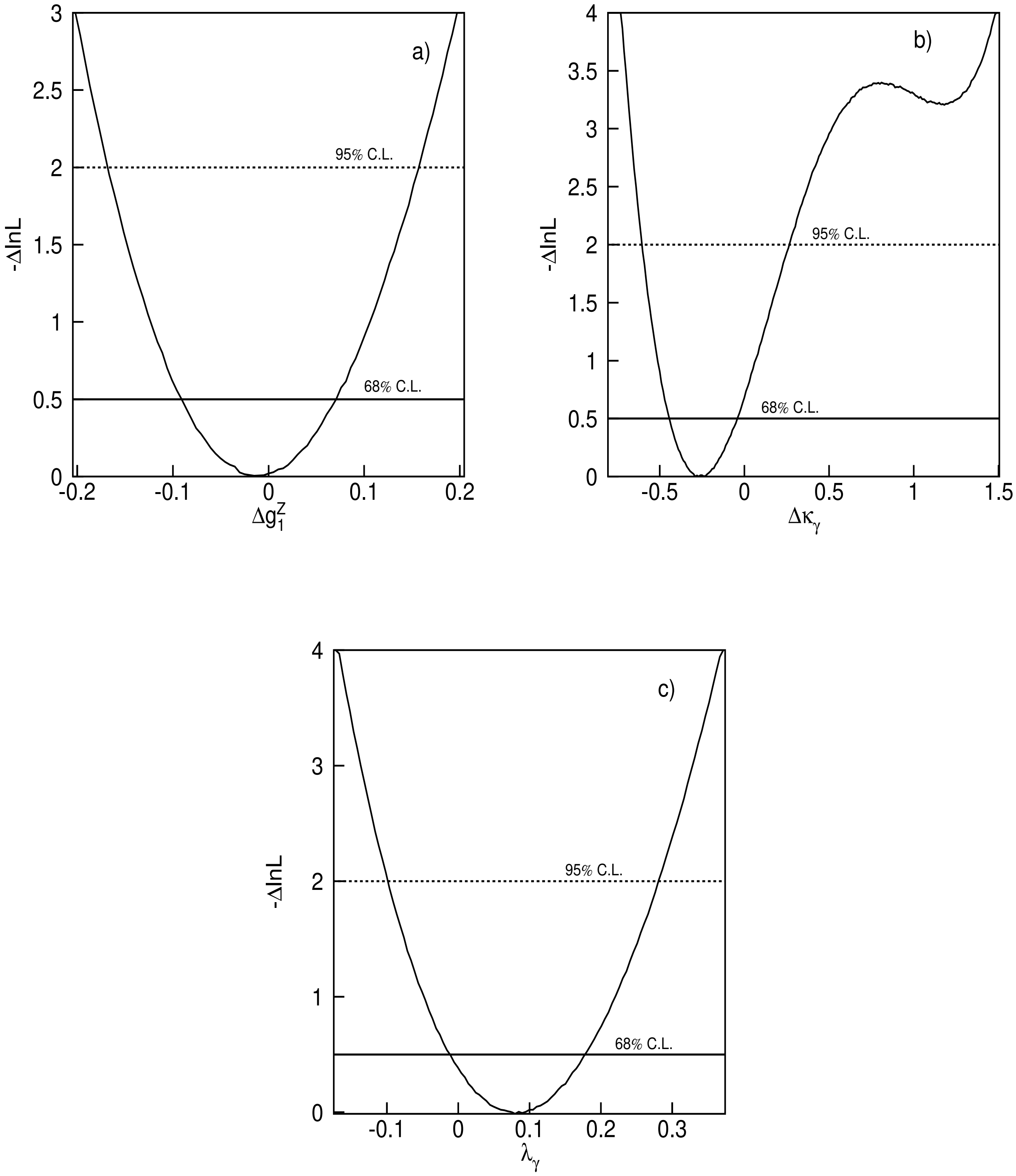
$$\text{Error Esperado}(\Delta\kappa_\gamma) = 0.25$$

Resultados

Medida de un parámetro

Acoplo Anómalo	1σ	Límites al 95% C.L.
$\Delta g_1^z \quad (\Delta\kappa_\gamma = \lambda_\gamma = 0)$	$-0.01^{+0.08}_{-0.08} \pm 0.04$	$-0.16 < \Delta g_1^z < 0.15$
$\Delta\kappa_\gamma \quad (\Delta g_1^z = \lambda_\gamma = 0)$	$-0.26^{+0.22}_{-0.18} \pm 0.16$	$-0.60 < \Delta\kappa_\gamma < 0.25$
$\lambda_\gamma \quad (\Delta g_1^z = \Delta\kappa_\gamma = 0)$	$+0.08^{+0.10}_{-0.09} \pm 0.08$	$-0.09 < \lambda_\gamma < 0.28$

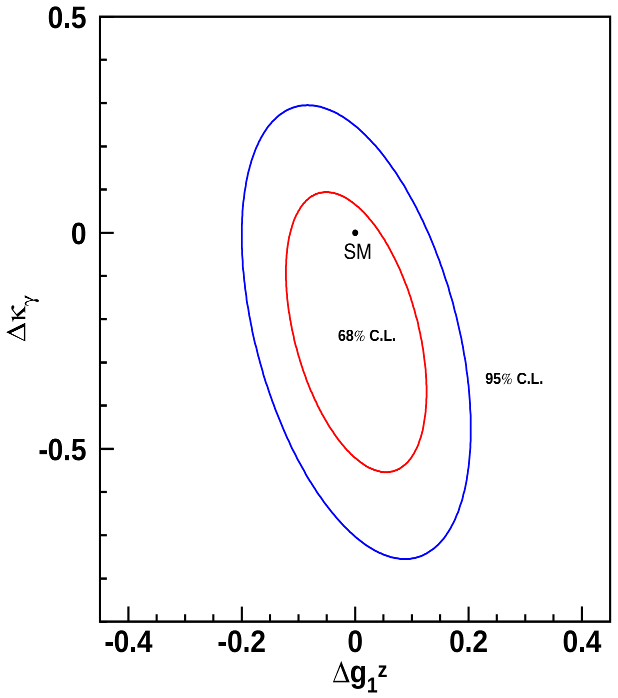
Funciones de Máxima Verosimilitud

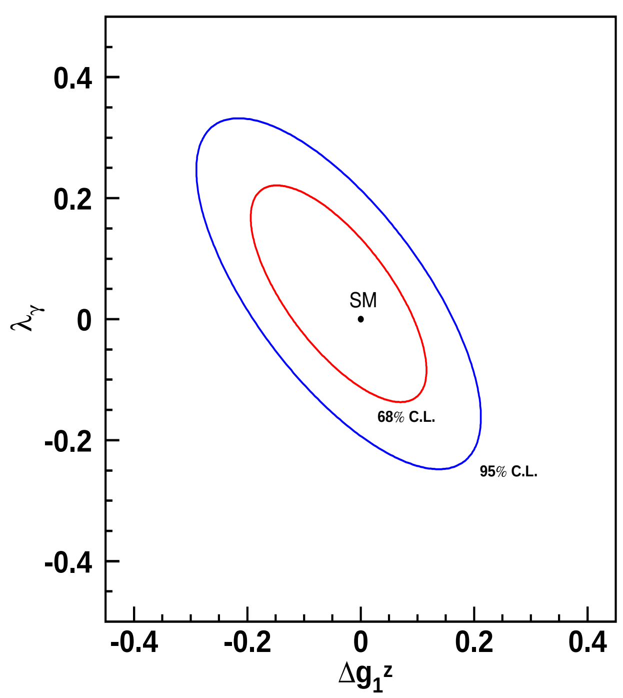


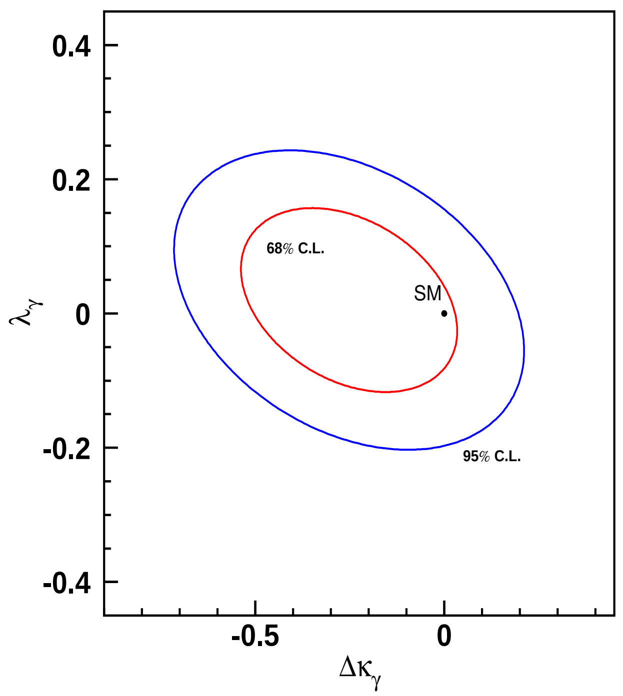
Medida de dos parámetros

Acoplos Anómalos	Limites 68% C.L.	Limites 95% C.L.
Δg_1^z $\Delta\kappa_\gamma$ $(\lambda_\gamma = 0)$	$-0.28 < \Delta g_1^z < 0.12$ $-0.50 < \Delta\kappa_\gamma < 1.12$ $\rho = -.425$	$-0.32 < \Delta g_1^z < 0.19$ $-0.64 < \Delta\kappa_\gamma < 1.28$
Δg_1^z λ_γ $(\Delta\kappa_\gamma = 0)$	$-0.19 < \Delta g_1^z < 0.12$ $-0.14 < \lambda_\gamma < 0.23$ $\rho = -.704$	$-0.28 < \Delta g_1^z < 0.22$ $-0.24 < \lambda_\gamma < 0.34$
$\Delta\kappa_\gamma$ λ_γ $(\Delta g_1^z = 0)$	$-0.51 < \Delta\kappa_\gamma < -0.10$ $-0.12 < \lambda_\gamma < 0.16$ $\rho = -.338$	$-0.65 < \Delta\kappa_\gamma < 0.54$ $-0.20 < \lambda_\gamma < 0.25$

Límites


0.5
0
-0.5
$\Delta\kappa_\gamma$
SM
68% C.L.
95% C.L.
-0.4 -0.2 0 0.2 0.4
Δg_1^z


0.4
0.2
0
-0.2
-0.4
λ_γ
SM
68% C.L.
95% C.L.
-0.4 -0.2 0 0.2 0.4
Δg_1^z


0.4
0.2
0
-0.2
-0.4
λ_γ
68% C.L.
SM
95% C.L.
-0.5 0
$\Delta\kappa_\gamma$

Errores Sistemáticos

Fuente	Δg_1^Z	$\Delta\kappa_\gamma$	λ_γ
Energía de LEP	0.003	0.004	0.004
ISR	0.03	0.03	0.01
FSR	0.01	0.1	0.01
Fragmentación	0.01	0.02	0.03
Energía de los jets	0.003	0.02	0.01
Estadística M.C.	0.01	0.03	0.01
Selección	0.01	0.11	0.07
Contaminación	0.001	0.01	0.002
Masa W	0.01	0.03	0.02
Total	0.04	0.16	0.08

CONCLUSIONES

$*$ Se ha utilizado la muestra de datos recogida por L3 durante el año 1998 para medir diferentes parámetros con el fin de comprobar el Modelo Estándar.

I. Se ha medido la sección eficaz del proceso $\mathrm{e^+e^-} \to \mathrm{W^+W^-} \to \mathrm{q\bar{q}'l}\nu$ a $\sqrt{s} = 189$ GeV.
El resultado obtenido es:

$$\boxed{\sigma^{\mathrm{CC03}}_{l\nu\mathrm{q\bar{q}'}} = 7.27 \ \pm 0.25 \ (\mathrm{estad.}) \ \pm 0.11 \ (\mathrm{sist.}) \ \mathrm{pb}}$$

a) Está de acuerdo con la predicción del Modelo Estándar.

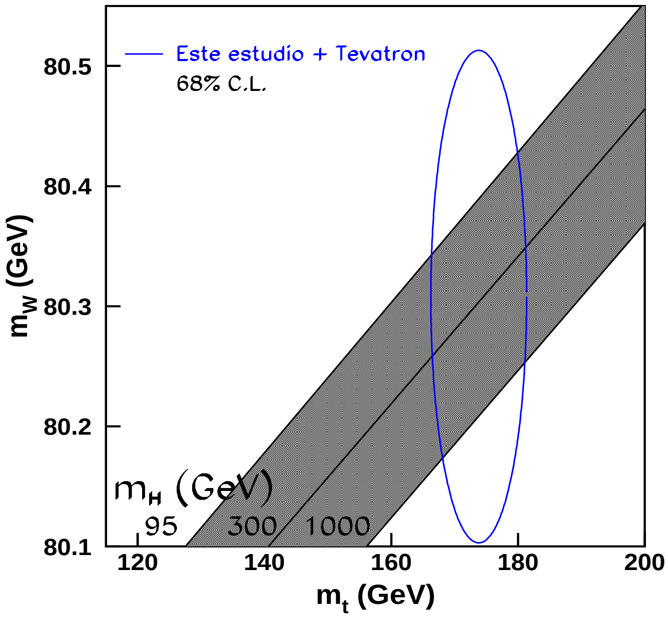
b) Descarta modelos que no incluyan los vértices WWZ y WWγ

II. La masa del W ha sido medida:

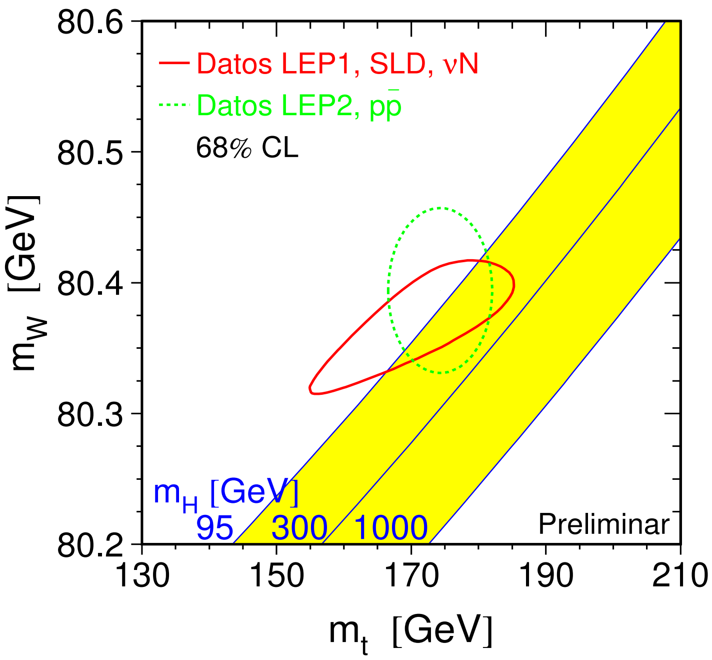
$$\boxed{\mathrm{M_W} = 80.31 \pm 0.14 \ (\mathrm{estad.}) \pm 0.07 \ (\mathrm{sist.}) \ \mathrm{GeV}}$$

a) Compatible con la medida indirecta ($\mathrm{M_W} = 80.332 \pm 0.037$ GeV) y, por tanto, con el Modelo Estándar.

b) No es lo suficientemente precisa como para ofrecer información acerca de la masa del Higgs.



Se han de combinar los resultados de LEP:



III. Finalmente, se han medido los acoplos WWZ y WWγ (Conservan C y P y SU(2)$_{\mathrm{L}}\times$ U(1)$_{\mathrm{Y}}$): Δg_1^{Z}, $\Delta\kappa_\gamma$ y λ_γ.

$$\begin{array}{rcl} \Delta g_1^{\mathrm{Z}} & = & -0.01^{+0.08}_{-0.08} \pm 0.04 \\ \Delta\kappa_\gamma & = & -0.26^{+0.22}_{-0.18} \pm 0.16 \\ \lambda_\gamma & = & +0.08^{+0.10}_{-0.09} \pm 0.08 \end{array}$$

a) Los resultados son compatibles con cero, es decir, están de acuerdo con el Modelo Estándar e implican la existencia de acoplos entre tres bosones gauge.

b) Las contribuciones de nueva física quedan limitadas a los siguientes intervalos (al 95% de N.C.):

$$\begin{array}{rcccl} -0.164 & < & \Delta g_1^{\mathrm{Z}} & < & 0.152 \\ -0.598 & < & \Delta\kappa_\gamma & < & 0.248 \\ -0.094 & < & \lambda_\gamma & < & 0.276 \end{array}$$

c) En concreto,

1. Excluyen totalmente la teoría de Kaluza-Klein.
2. Las medidas permiten estimar el valor del radio de un posible W compuesto , R$_{\mathrm{W}}$. La medida de R$_{\mathrm{W}}$ no muestra evidencia de que el W sea un objeto compuesto:

$$R_{\mathrm{W}} = (0.4 \pm 3.0) \cdot 10^{-16}\ \mathrm{cm}$$

d) Los límites obtenidos mejoran notablemente los obtenidos en Tevatron y en LEP a $\sqrt{s} < 189$ GeV.

$\sqrt{s} = 183$ GeV

Parámetro	ALEPH	DELPHI	L3	OPAL	DØ
Δg_1^Z		$0.04^{+0.14}_{-0.14}$	$-0.03^{+0.18}_{-0.16}$	$-0.02^{+0.12}_{-0.11}$	
$\Delta\kappa_\gamma$	$-0.02^{+0.28}_{-0.33}$	$0.34^{+0.26}_{-0.28}$	$0.16^{+0.40}_{-0.35}$	$0.19^{+0.47}_{-0.37}$	$-0.08^{+0.34}_{-0.34}$
λ_γ	$0.05^{+0.50}_{-0.51}$	$-0.07^{+0.19}_{-0.16}$	$0.01^{+0.19}_{-0.17}$	$-0.08^{+0.13}_{-0.12}$	$0.00^{+0.10}_{-0.10}$

y son competitivos con los obtenidos a $\sqrt{s} = 189$ GeV.