Estudio del proceso
$e^+e^- \to \gamma\gamma(\gamma)$
a las energías de LEP

F^{co}. Javier Rodríguez Calonge

Introducción

Modelo Estándar ≡ Teoría Electrodébil + QCD

Teoría Electrodébil = Teoría de las interacciones débiles + QED

Experimentalmente satisfactorio (1 ‰)

Cuestiones pendientes

- ¿Por qué hay tres generaciones ?
- ¿Cual es el origen de la violación de CP ?
- ¿Quée explica el valor de las masas y las mezclas ?

. . .

TECHNICOLOR

SUPERSIMETRÍA

MODELOS CON SUBESTRUCTURA

Nuevas partículas

Nuevas fuerzas

DESVIACIONES DEL MODELO ESTÁNDAR

Introducción

Experimentalmente

Colisiones e^+e^- $\left\{ \begin{array}{l} \text{Contaminación controlable} \\ \text{Estados finales con poca multiplicidad} \end{array} \right.$

LEP

($\sqrt{s} \sim M_{Z,W}$)

hadrones

leptones

fotones

$e^+ e^- \longrightarrow \gamma\gamma(\gamma)$

Senales muy limpias

Descripcion mediante QED

(correcciones debiles $\lesssim$ 0.5 %)

Desintegracion $Z \longrightarrow \gamma\gamma$ prohibida

Proceso $Z \longrightarrow \gamma\gamma\gamma$ atenuado

Introducción

DESVIACIONES DEL MODELO ESTÁNDAR

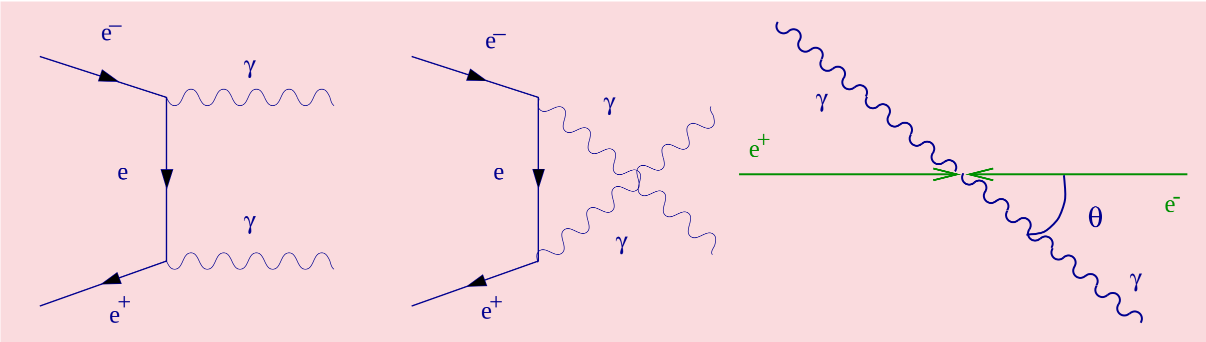
QED	Z	
$\gamma\gamma(\gamma)$	$\gamma\gamma\gamma$	γP
• Factores de forma • Términos de contacto • Electrón excitado (e^*)	• Subestructura del Z • Monopolos magnéticos	• $\left\{ \begin{array}{c} \pi^0\gamma \\ \gamma\gamma \end{array} \right.$ • $\eta\gamma\,,\,\eta'\gamma$

LAGRANGIANOS EFECTIVOS

FUNDAMENTOS TEÓRICOS
QED

$e^+e^- \to \gamma\gamma(\gamma)$

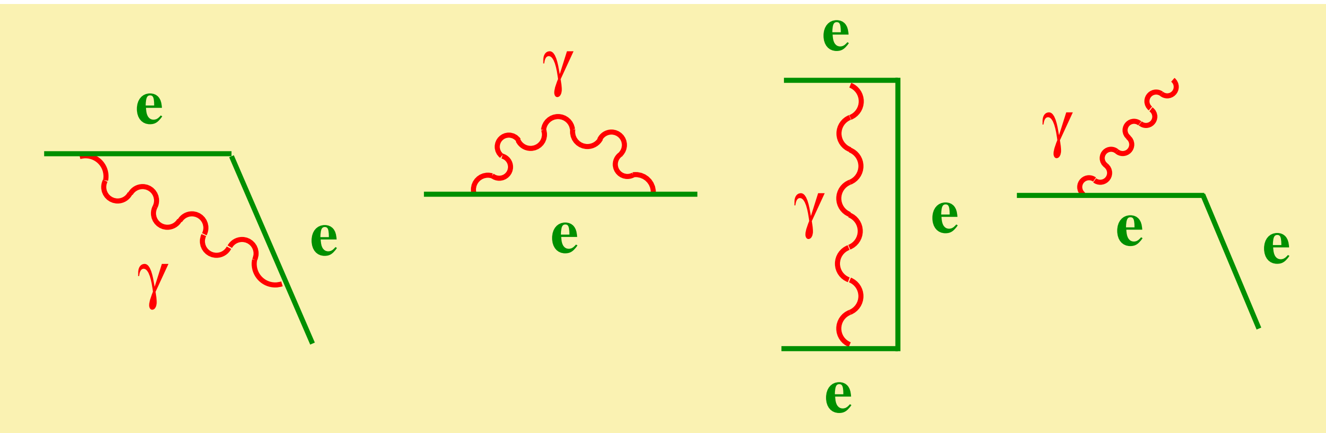
- Diagramas de Feynman en orden Born



- Sección eficaz diferencial orden Born

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)^0_{\text{QED}} = \frac{\alpha^2}{s} \cdot \frac{1+\cos^2\theta}{1-\beta_e^2\cos^2\theta}\,,\ \beta_e = \sqrt{1-\frac{4m_e^2}{s}}$$

- Correcciones radiativas QED

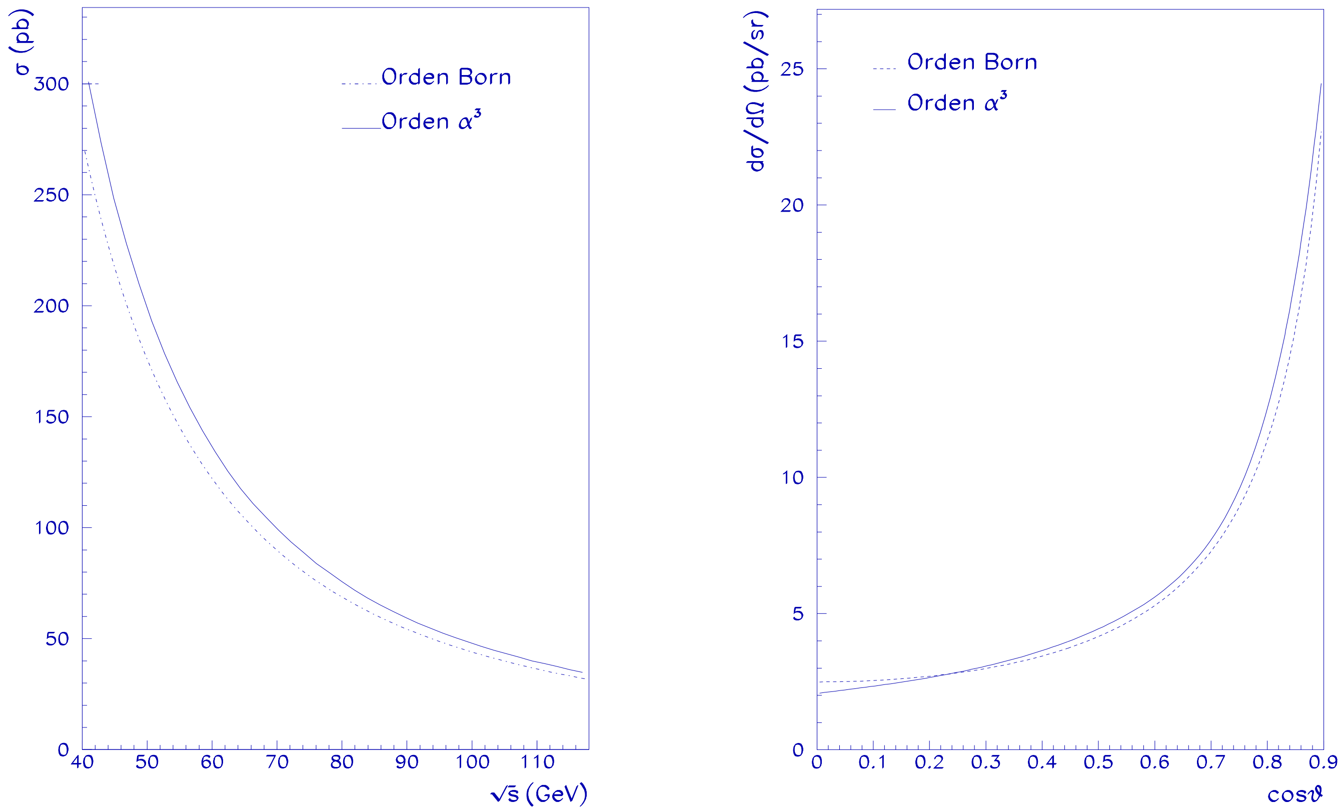


- $\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{QED}} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)^0_{\text{QED}} \cdot (1+\delta_{\text{QED}})$

$\delta_{\text{QED}} \approx 15$ % (ángulo solido completo, $\sqrt{s} \sim M_Z$)

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

QED



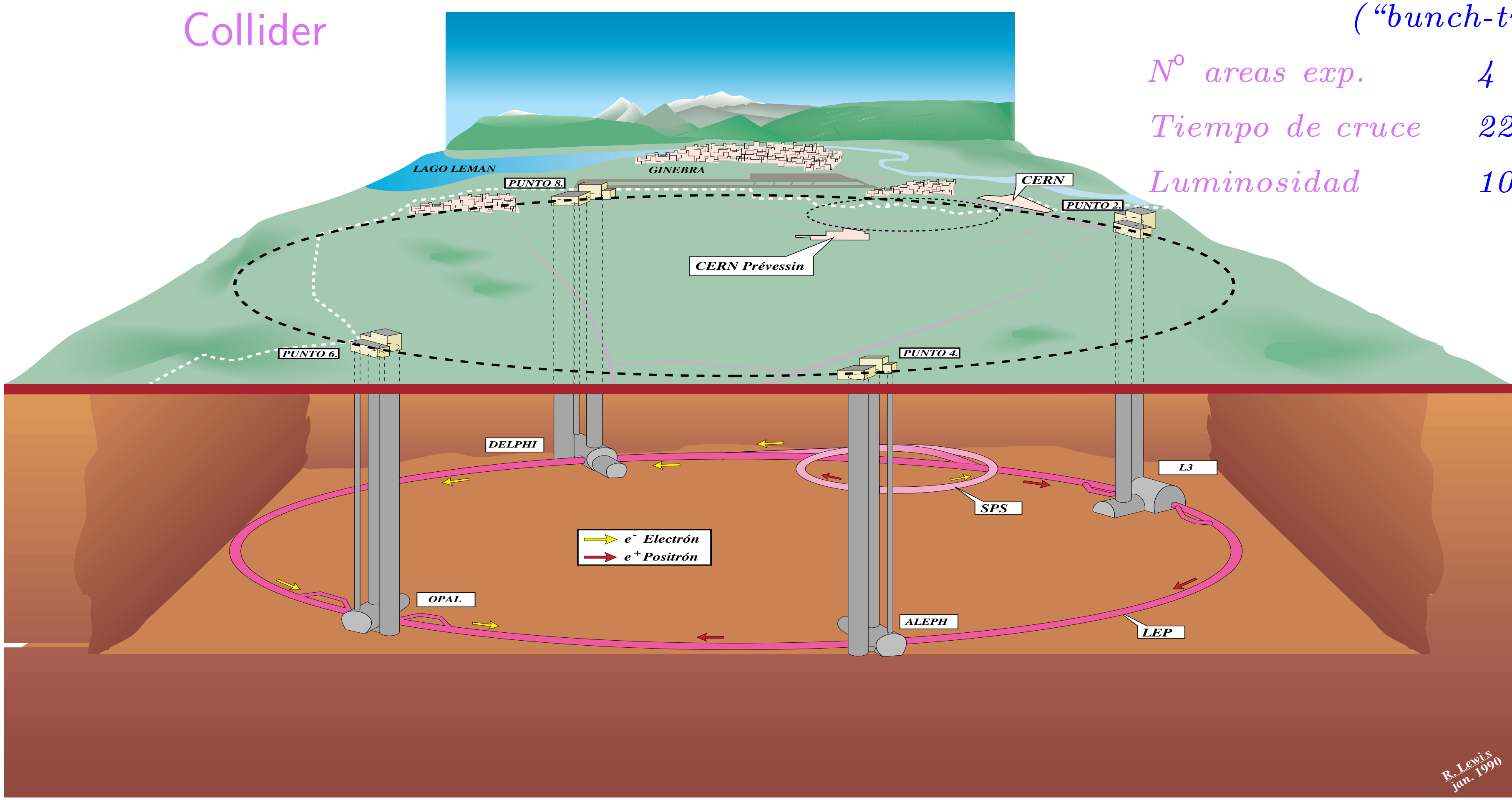
$$\delta_{QED} \text{ en } \begin{pmatrix} \phi \in [0, 2\pi] \\ \theta \in [10^o, 170^o] \end{pmatrix} \approx 8\%$$

DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

LEP

Large Electron-Positron Collider

Circunferencia	*26.66 Km*
Energía del haz	*~45.6 GeV*
	(~80.3 GeV)
N° paquetes	*4×4*
	("bunch-train", 8×8)
N° areas exp.	*4*
Tiempo de cruce	*22 μs*
Luminosidad	*10^{-31} cm^{-2} s^{-1}*



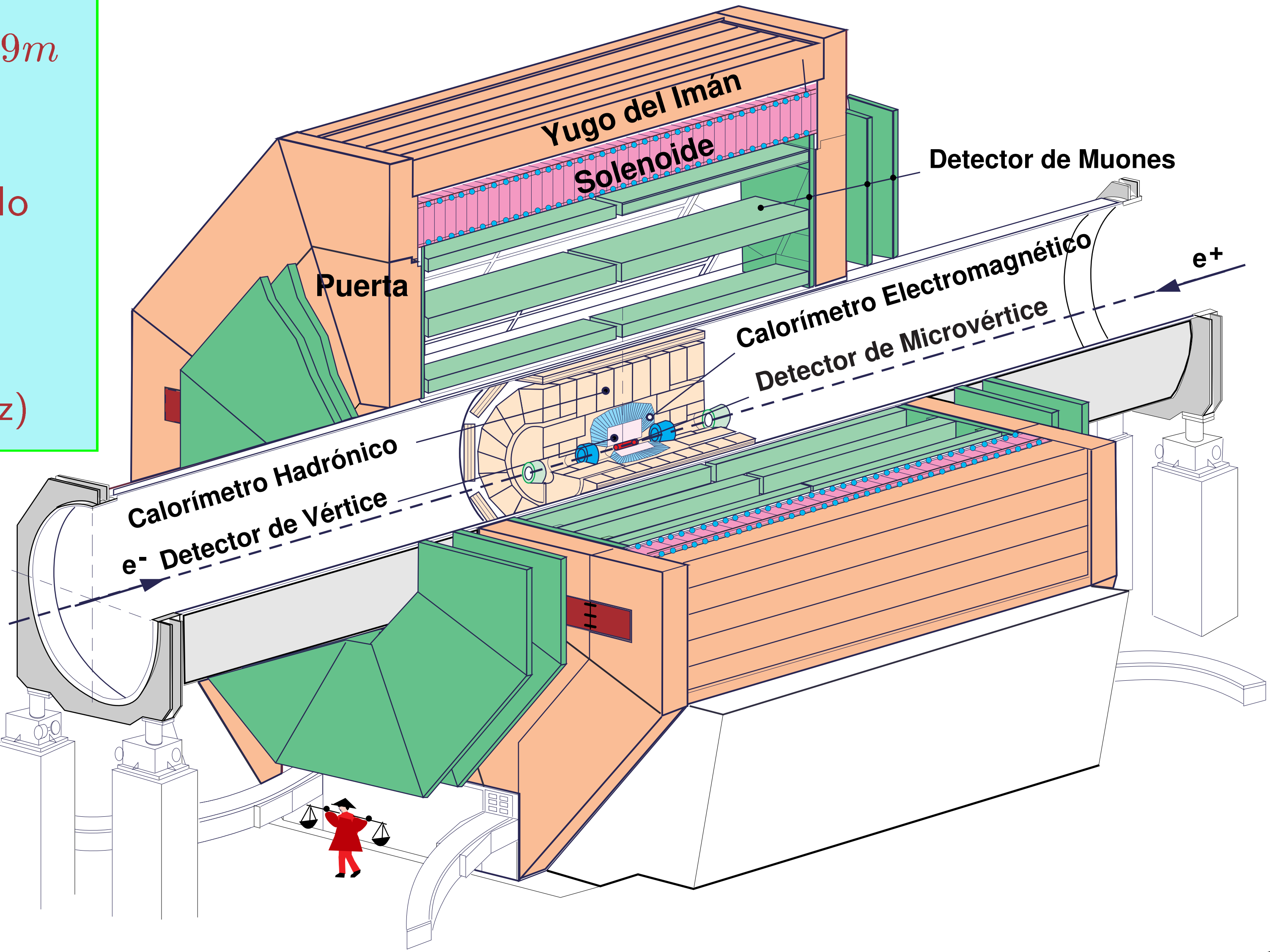
DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

L3

Dimensiones
$11.4m \times 11.4m \times 11.9m$

Recubrimiento
99% del ángulo solido

Campo Magnético
$0.5T$
(paralelo al eje del haz)

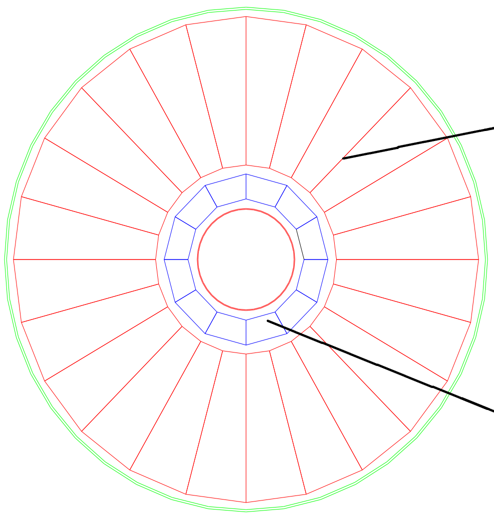


Medida precisa de
$\bullet \gamma, e$
$\bullet \mu$
•jets

DISPOSITIVO EXPERIMENTAL
Cámara de Vértice

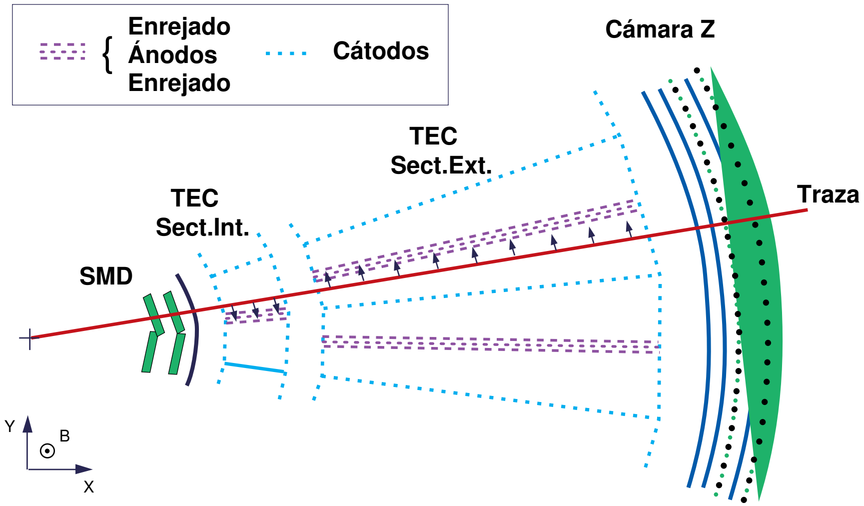
⊛ Determina la dirección y el momento de las partículas cargadas

- ▷ TEC (coordenada Rϕ), cámara Z (coordenada z)
- ▷ Funcionamiento modo expansión temporal
  (mezcla gaseosa CO_2, iC_4H_{10})
- ▷ Resolución: 50μm (Rϕ), 300μm (Z)
- ▷ "Hits"



{ Barril : 54 hilos
End cap : 1 - 48 hilos

{ Barril : 8 hilos
End cap : 1 - 8 hilos



DISPOSITIVO EXPERIMENTAL
Calorímetro Electromagnético

⊛ Determina la energía y posición de impacto de las partículas "electromagnéticas" (γ, e)

⇝ 11360 cristales de BGO $(Bi_4Ge_3 0_{12})$

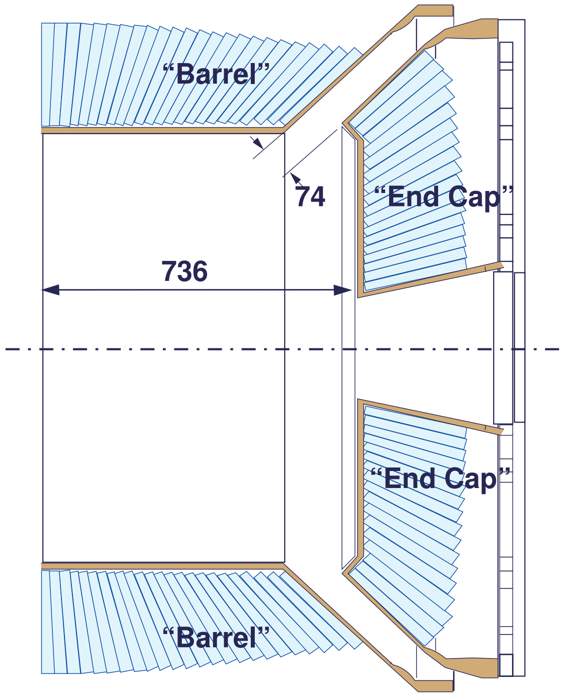
⇝ Barril $42^o - 138^o$

End caps $\left\{ \begin{array}{c} 10^o - 38^o \\ 142^o - 170^o \end{array} \right\}$

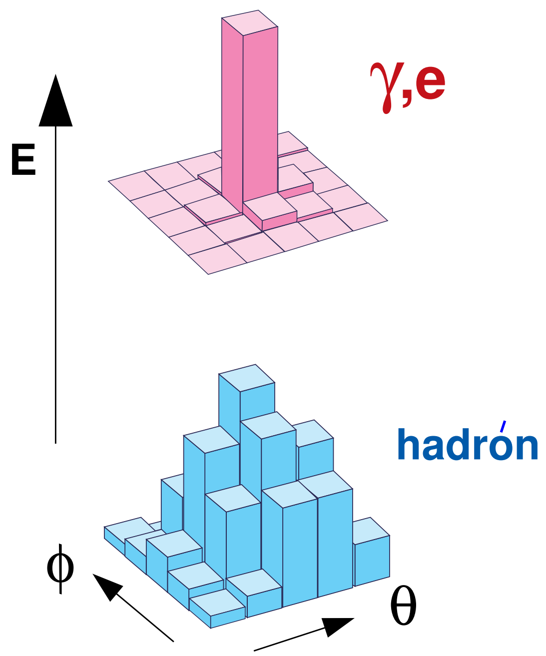
⇝ $\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{0.015}{\sqrt{E}} + \frac{0.004}{E} + 0.01$

$\sigma(45GeV) \approx 500MeV$

$\sigma(3GeV) \approx 70MeV$



Cascadas en el BGO

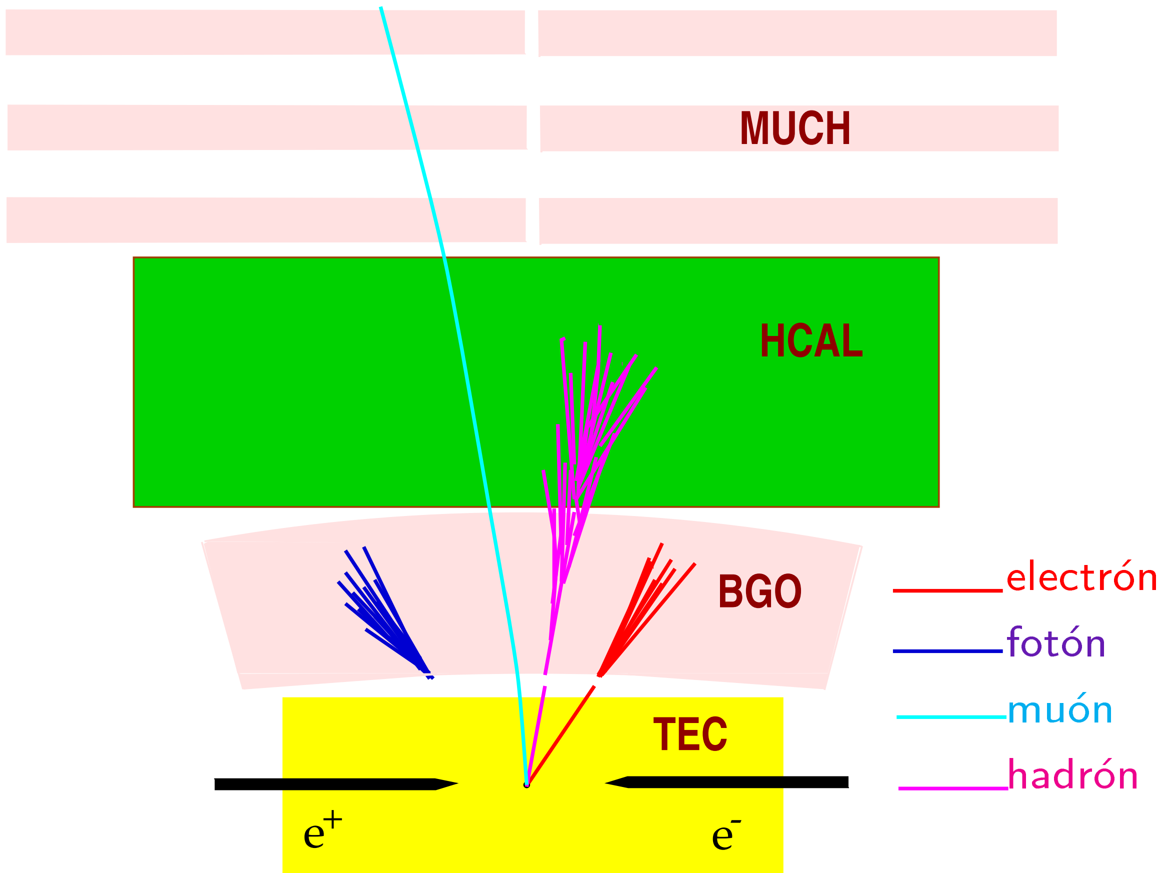


⇝ "bumps" agrupación de depositos de energía

⇝ Partículas "electromagnéticas"

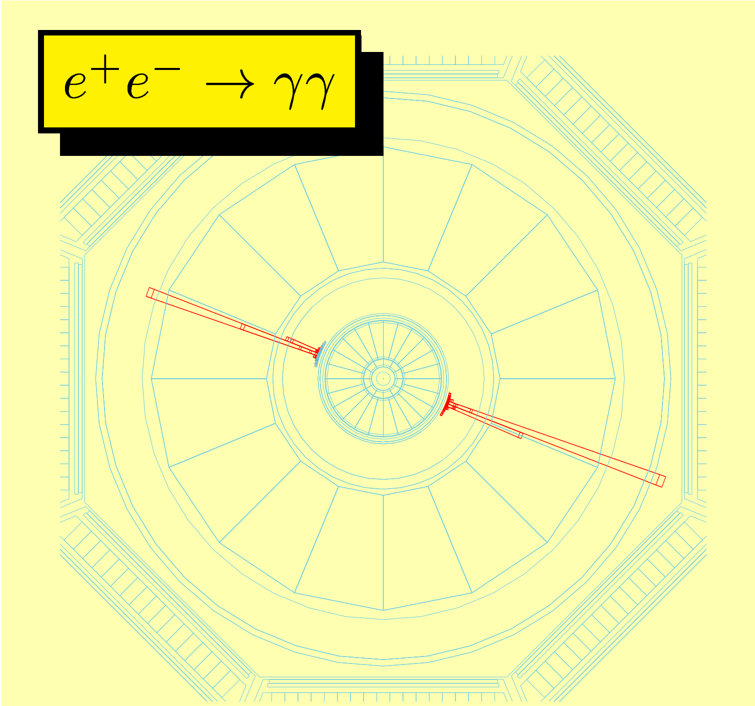
$\left\{ \begin{array}{l} \frac{E_1}{E_9} > 75\% \\ \frac{E_9}{E_{25}} > 95\% \end{array} \right.$

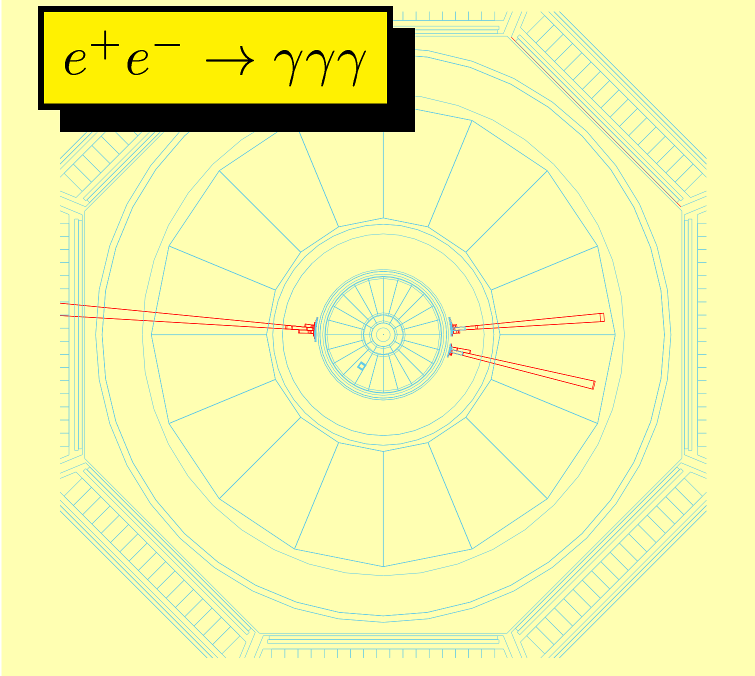
DISPOSITIVO EXPERIMENTAL
Reconstruccion y Adquisición de datos



- "Trigger" $\Longrightarrow$ Discriminación entre señal y contaminación
  - $\rightarrow$ Tres niveles
  - $\rightarrow$ Sucesos $\gamma\gamma(\gamma)$ $\Rightarrow$ "trigger calorimétrico"
    Eficiencia mayor del 99.9%

ANALISIS 2 FOTONES
Características de la señal

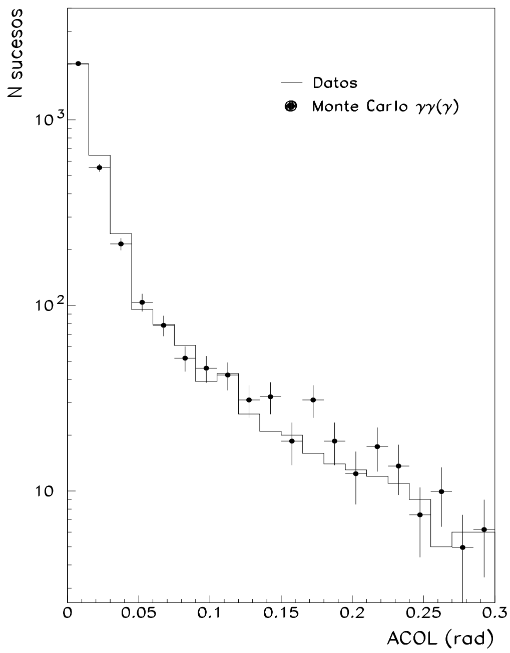




$\Rightarrow$ Características calorimétricas

- •Estado final electromagnetico
- •Baja multiplicidad

$\Rightarrow$ Ninguna partícula cargada



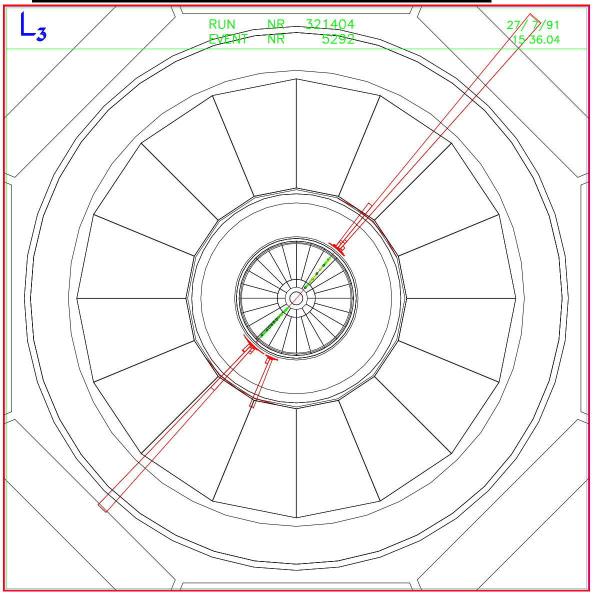
$\Rightarrow$ACOL $= \pi - \psi_{12}$

Contaminantes

- ▶ Bhabhas $e^+e^- \rightarrow e^+e^-(\gamma)$
- ▶ Taus $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$
- ▶ $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}\gamma\gamma$

ANALISIS 2 FOTONES
Procesos contaminantes

$e^+e^- \rightarrow e^+e^-(\gamma)$

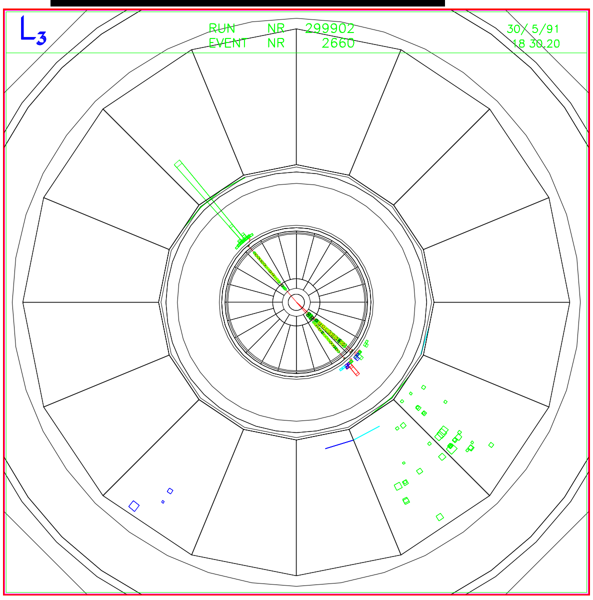


- $\rightarrowtail$ Baja multiplicidad
- $\rightarrowtail$ Estado final electromagnético
- $\rightarrowtail$ Partículas con carga

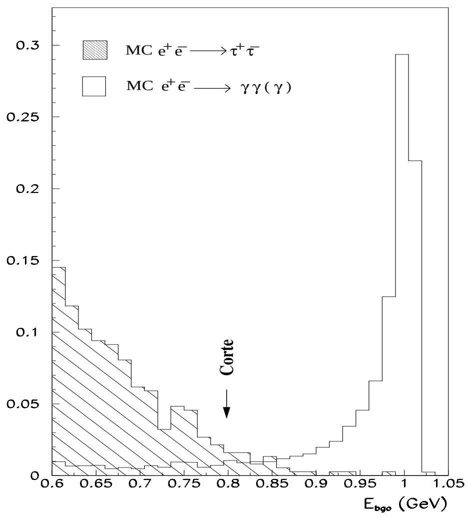
$\Downarrow$

Indistinguibles de la señal sin información de la TEC

$e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$



- Carga en el estado final $\longleftarrow$
- Baja multiplicidad $\longleftarrow$
- Presencia de neutrinos $\longleftarrow$
- Estados finales con hadrones $\longleftarrow$



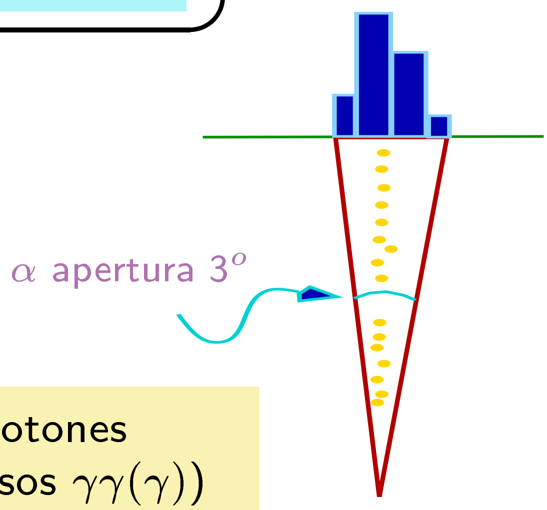
ANALISIS 2 FOTONES

Definicion de trazas

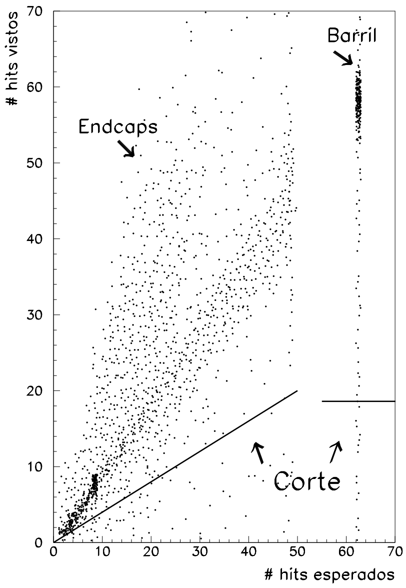
Definición de traza asociada a un "bump"

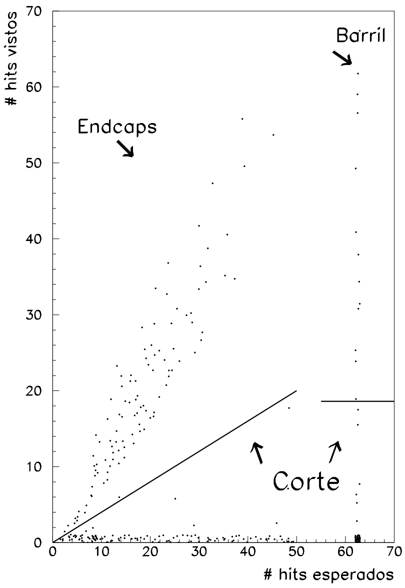
$$\text{Ocupancia} \equiv \mathcal{O} = \frac{\text{Número de "hits" recogidos}}{\text{Número de "hits" esperados}}$$

Idealmente $\mathcal{O}$ es cero para fotones
y 1 para partículas cargadas



Electrones (sucesos bhabhas)	Fotones (sucesos $\gamma\gamma(\gamma)$)





Definición de traza

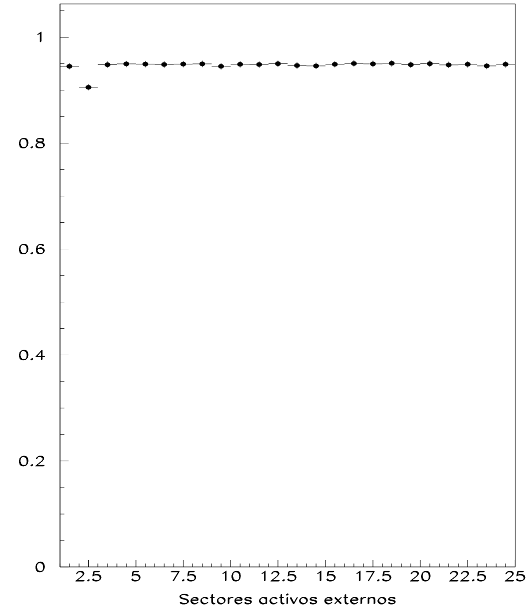
Barril, $|\cos\theta| \leq 0.7$, $\mathcal{O}_{\text{corte}} \geq 0.3$

"End caps", $|\cos\theta| \in [0.8, 0.96]$, $\mathcal{O}_{\text{corte}} \geq 0.4$

Corte general, $\text{N}^o_{\text{trazas reconstruidas}} = 0$

ANALISIS 2 FOTONES
Comportamiento de la TEC

- No se recoge señal en la TEC ¿ Estado final sin carga?



Ineficiencias temporales
Ineficiencias espaciales
Corrección de la simulación Monte Carlo

Ineficiencias temporales

⊛ Periodos de tiempo en los que la TEC no recoge señal

- ⊡ Base de datos de L3
- ⊡ Ficheros de n-minutos (típicamente 2 ó 4)

• Sucesos hadrónicos (homogeneidad en ϕ,alta estadística)
• Número de trazas recogidas por sector durante un periodo de n-minutos
• Periodo desechado si un sector esta inactivo
• Corrección de la luminosidad

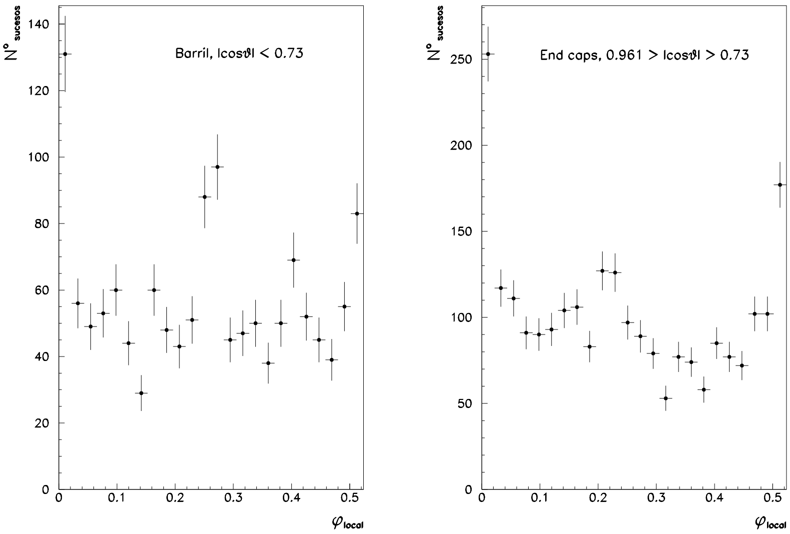
Luminosidad (pb^{-1})

	Total	
$\sqrt{s}$	$\mathcal{L}_{rec.}$	$\mathcal{L}_{corr.}$
88.4	0.78	0.49
89.4	9.46	9.04
90.2	0.79	0.67
91.2	95.46	91.76
92.0	0.73	0.67
93.0	9.60	9.46
93.7	0.82	0.67
Total	117.64	112.76

ANALISIS 2 FOTONES

Ineficiencias espaciales y corrección del Monte Carlo

Ineficiencias espaciales



- Estudio mediante "golden" bhabhas seleccionados en datos
- Eliminación zona cátodos-ánodos
- $\Delta_\phi \geq 0.025$ rad

Corrección del Monte Carlo

Comparación entre datos y Monte Carlo

- Se utiliza una muestra de bhabhas radiativos
- Discrepancia entre datos y Monte Carlo
- Causa $\Rightarrow$ "Multihits" no simulados en el Monte Carlo
- Factores de corrección para la eficiencia $\approx$ 92%

ANALISIS DOS FOTONES
Sección eficaz en la resonancia del Z

CALORIMÉTRICOS

$E_{\text{BGO}}/\sqrt{s} \geq 0.8$

$N_{\text{bumps}} \in [2,8]$

Región de detección $[16^o, 164^o]$

TEC

$N_{\text{trazas reconstruidas}}$ 0

Definición de traza

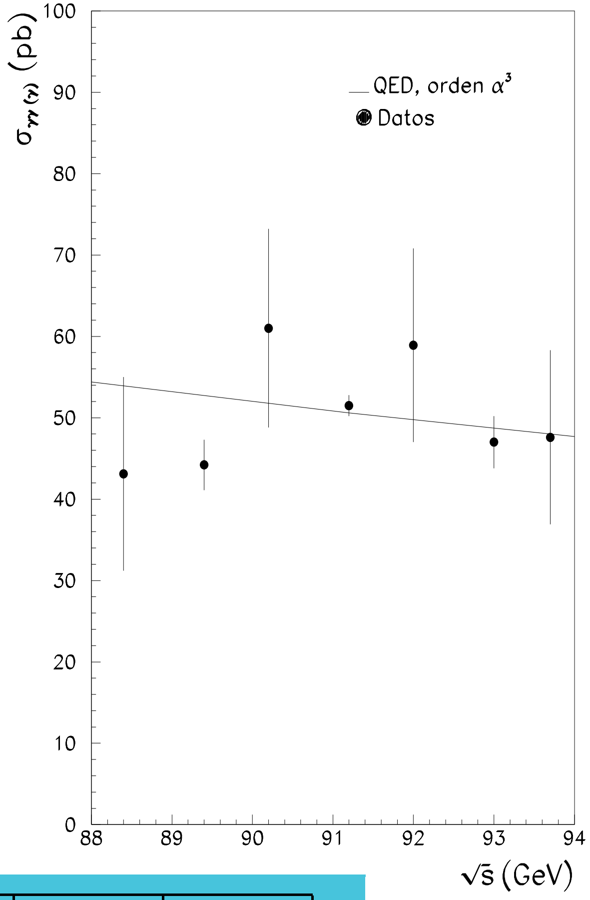
Distancia a las zonas

catódicas/anódicas

$\Delta_\phi \geq 0.025$ rad

Año	ϵ	$\Delta(\epsilon)$
91	0.650	0.026
92	0.644	0.019
93	0.590	0.017
94	0.577	0.015

$\sqrt{s}$ (GeV)	Señal	Contam.
88.4	14	0.25
89.4	241	0.9
90.2	27	0.41
91.2	2853	14.5
91.9	26	0.35
93.0	265	0.6
93.7	21	0.23



$\sqrt{s}$ (GeV)	88.4	89.4	90.2	91.2	91.9	93.0	93.7
$\sigma_{\gamma\gamma(\gamma)}$ (pb)	43.1	44.2	61.0	51.5	58.9	47.0	47.6
$\Delta(\sigma_{\gamma\gamma(\gamma)})$ (pb)	11.9	3.1	12.2	1.3	11.9	3.2	10.7

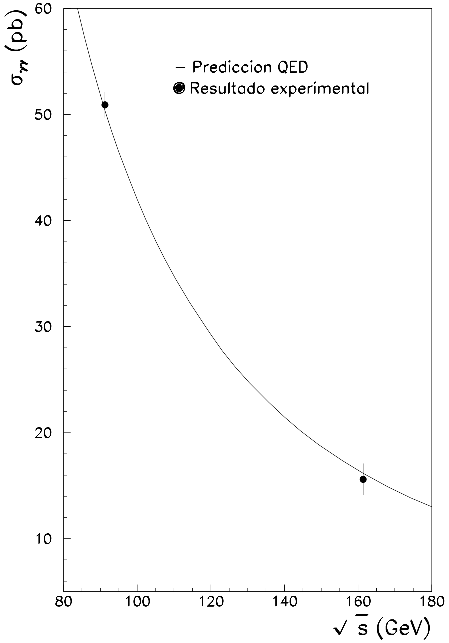
ANALISIS DOS FOTONES
Sección Eficaz 161 GeV

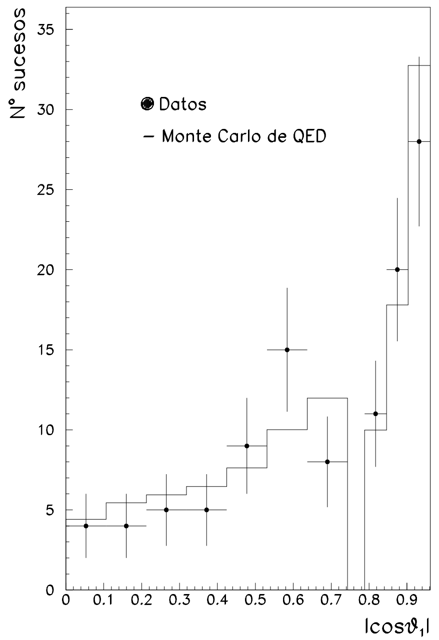
Cortes de selección
$\Rightarrow$ Iguales que en
la resonancia del Z

Eficiencia
$\Rightarrow 0.61 \pm 0.06$

Luminosidad recogida
$\Rightarrow$ 10.71 pb^{-1}

$\sqrt{s}$=161.3	
$N_{sucesos}$ seleccionados	110
$N_{sucesos}$ contaminación	0.8
$\sigma_{\gamma\gamma(\gamma)}$	16.8 pb
$\Delta(\sigma_{\gamma\gamma(\gamma)})$	2.5 pb



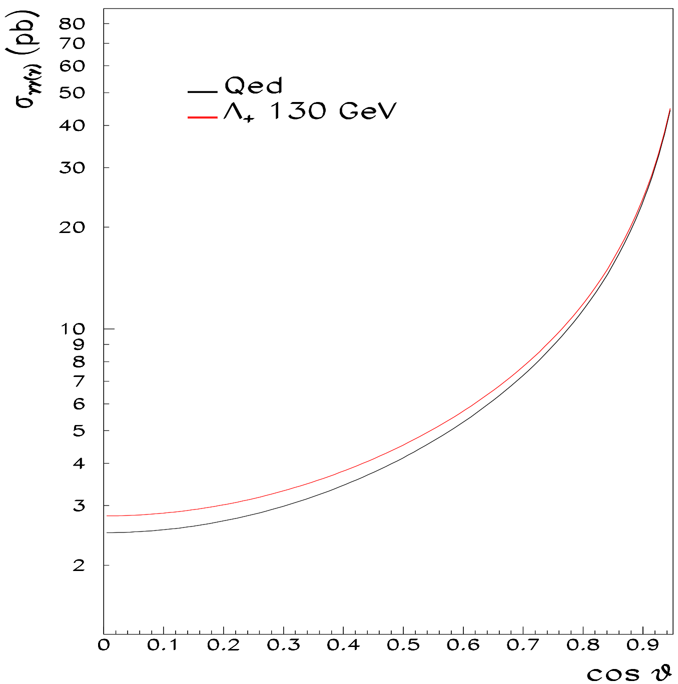


Factor de forma

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right) = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{QED}} \left(1 \pm \frac{s^2}{2\Lambda_{\pm}^4} \text{sen}^2\theta\right)$$

$\Uparrow$

Parámetros de cut-off



FUNDAMENTOS TEÓRICOS
Términos de contacto

- Lagrangianos efectivos con términos $ee\gamma\gamma$
- Simetrías especiales
- $\Lambda \Rightarrow$ escala de energía efectiva

$$\mathcal{L}_1 = \frac{2ie^2}{\Lambda^4} F^{\mu\sigma} F^{\nu}_{\sigma} \cdot (\eta_L \bar{\psi}_L \gamma_\mu \partial_\nu \psi_L + \eta_R \bar{\psi}_R \gamma_\mu \partial_\nu \psi_R)$$

$$\frac{1}{2}\left[\left(1+\frac{\eta_L s^2}{4\Lambda^4}\mathrm{sen}^2\theta\right)^2 + \left(1+\frac{\eta_R s^2}{4\Lambda^4}\mathrm{sen}^2\theta\right)^2\right]$$

$$\mathcal{L}_2 = i g_6 \bar{\psi}\gamma_\mu (\overleftrightarrow{D}_\nu \psi)(F^{\mu\nu} + \tilde{F}^{\mu\nu})$$

$$1 + \frac{s^2}{\alpha\Lambda^4}(1-\cos^2\theta)$$

$$g_6 = \sqrt{4\pi}/\Lambda^2$$

$$\mathcal{L}_3 = \frac{1}{4} g_7 \bar{\psi}(F^{\mu\nu} + i\gamma_5 \tilde{F}^{\mu\nu})\psi F_{\mu\nu}$$

$$1 + \frac{s^3}{64\pi\alpha^2\Lambda_6^6}\left(\frac{1+\cos^2\theta}{1-\cos^2\theta}\right)$$

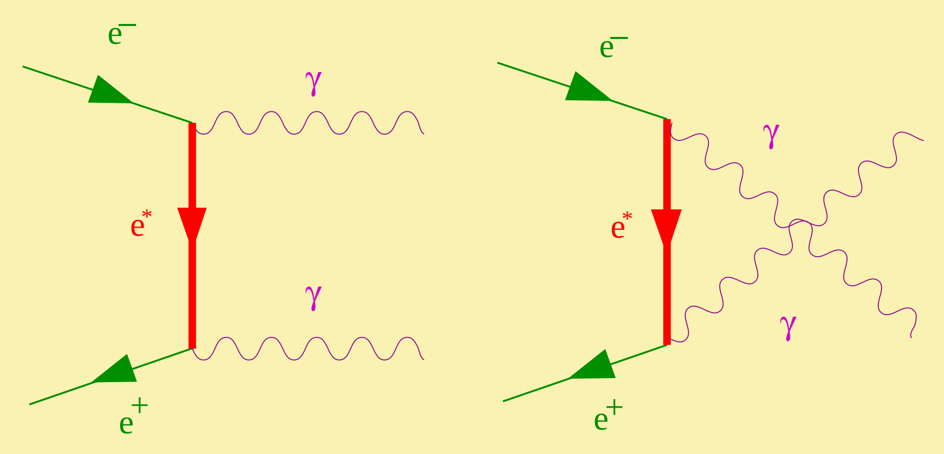
$$g_7 = \sqrt{4\pi}/\Lambda_6^3$$

FUNDAMENTOS TEÓRICOS
Electrón excitado

$$\mathcal{L}_{e^* e\gamma} = \frac{e\lambda}{2\Lambda_{e^*}}\bar{\psi}_{e^*}\sigma^{\mu\nu}(c - d\gamma^5)\psi_e F_{\mu\nu} + h.c.$$

- e^* → mismas cargas electrodébiles del e
- Transición de tipo magnético e invariante gauge
- Conserva helicidad, $c^2=d^2=1$

Diagramas orden Born



Sección eficaz

$$\frac{\alpha^2}{4s}\left\{\frac{(1+\cos\theta)^2}{\text{sen}^2\theta}\left[\left(1+\frac{\lambda^2 s^2 \text{sen}^2\theta}{4\Lambda_{e^*}^2(M_{e^*}^2-u)}\right)^2+1\right] + \frac{(1-\cos\theta)^2}{\text{sen}^2\theta}\left[\left(1+\frac{\lambda^2 s^2 \text{sen}^2\theta}{4\Lambda_{e^*}^2(M_{e^*}^2-t)}\right)^2+1\right]\right\}$$

Lagrangiano de Low

$$\mathcal{L}_{e^* e\gamma} = \frac{e\lambda}{2\Lambda_{e^*}}\bar{\psi}_{e^*}\sigma^{\mu\nu}\psi_e F_{\mu\nu}$$

- Relacionado con el lagrangiano general cuando $d = 0$, $c^2 = 1$

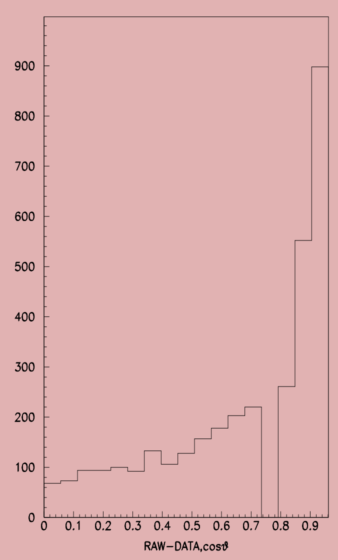
RESULTADOS
Cálculo de las cotas

- Utilizacion de la muestra de $\gamma\gamma(\gamma)$
- Distribución en la variable $\cos\theta$

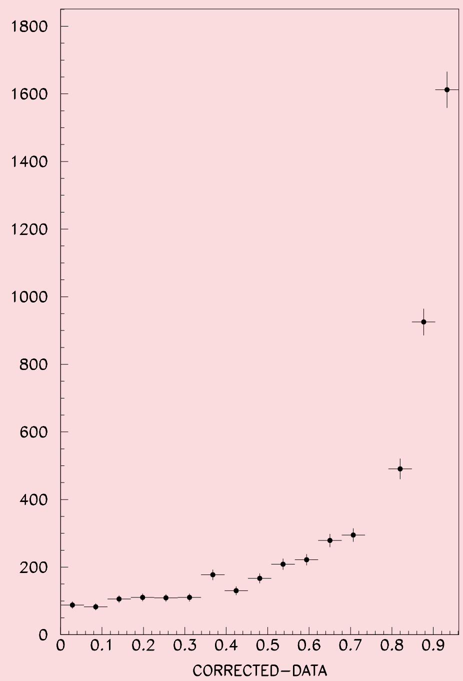
- Efectos del detector

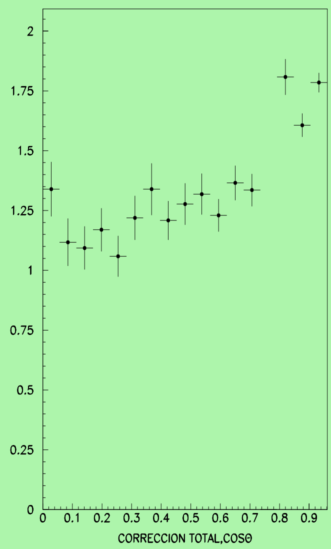
$\Downarrow$

Eficiencias



Función de distribución



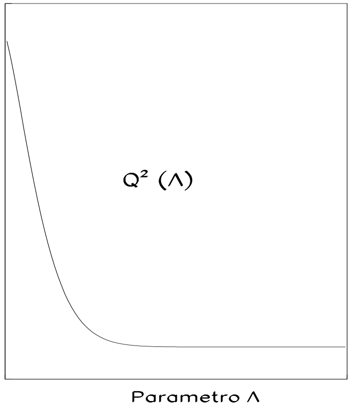


Métodos

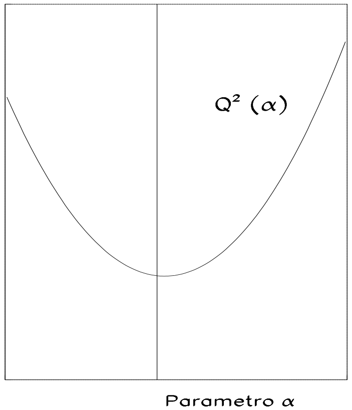
$$\mathcal{L}(\Lambda) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(N^{\text{corr.}}_{\text{datos}} - N_{\text{teoría}}(\Lambda))^2}{2\sigma^2}} \prod_{i=1}^{N} \rho(\theta_i, \Lambda)$$

$$Q^2(\Lambda) = \sum_{i=1}^{N} (N^{\text{corr.}}_{i,\text{datos}} - N_{i,\text{teoría}}(\Lambda))^2 \cdot w_i$$

RESULTADOS
Método



≫ $\alpha = \frac{1}{\Lambda^n}$ ≪

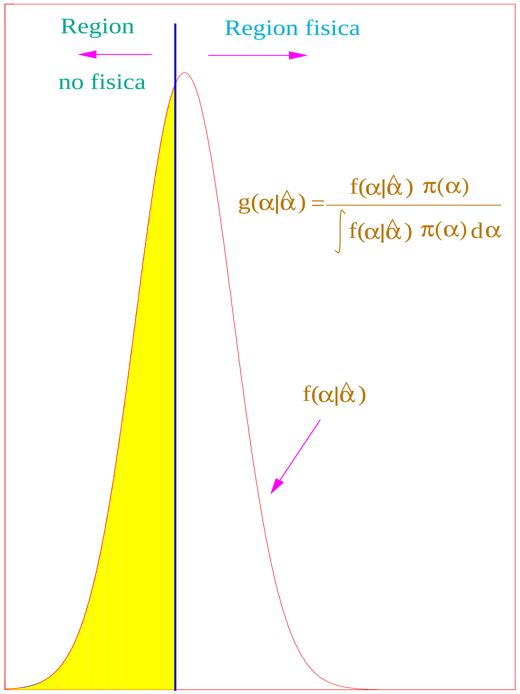


- Valor extremo de la función
- Cálculo de σ $\begin{cases} \ln \mathcal{L}(\alpha) = \ln \mathcal{L}(\alpha)_{max} - \frac{s^2}{2} \\ Q^2(\alpha) = Q^2(\alpha)_{min} + s^2 \end{cases}$
- Aproximación gaussiana

$$f(\alpha; \bar{\alpha}, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(\alpha-\bar{\alpha})^2}{2\sigma^2}}$$

Hipótesis Bayesiana

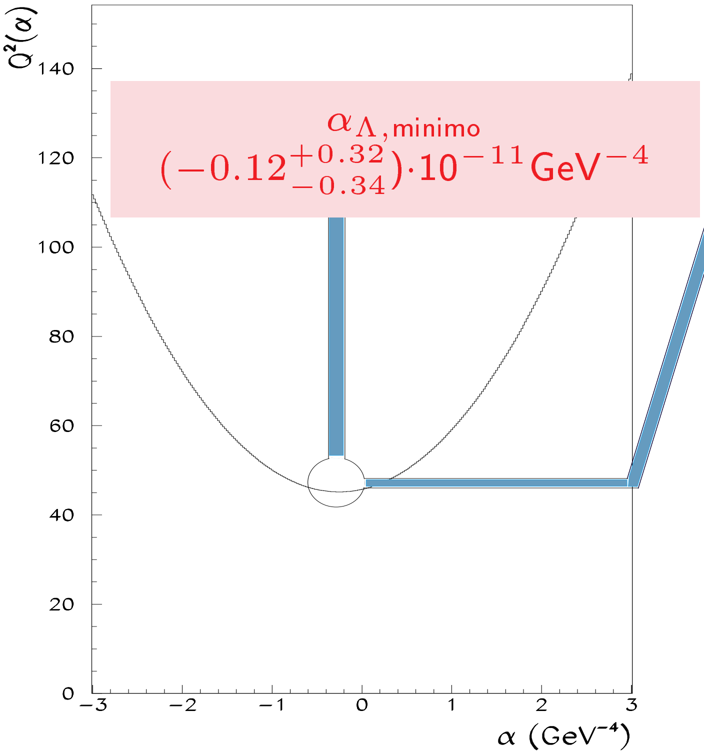
- Renormalización a la zona física
- Obtención del valor del parámetro al 95 % C.L.



Relación entre parámetros

$$\Lambda^4 = \frac{4}{\alpha}\Lambda^4_{L(R)} = \frac{2}{\alpha}\Lambda^4_{L+R} = \pm\frac{2}{\alpha}\Lambda^4_{\pm}$$

DESVIACIONES DE QED
Resultados en la resonancia del Z



$\Lambda > 665$ GeV, 95% C.L.

$\Lambda_{+} > 160$ GeV, 95% C.L.
$\Lambda_{-} > 150$ GeV, 95% C.L.
$\Lambda_{L(R)} > 135$ GeV, 95% C.L.

$\alpha_{\Lambda_6,\text{extremo}}$

$(-0.75^{+3.34}_{-3.33})\ 10^{-16}$ GeV^{-6}

$\Lambda_6 > 344$ GeV, 95% C.L.

$\alpha_{\Lambda_{L-R},\text{extremo}}$

$(-0.04 \pm 1.51)\ 10^{-16}$ GeV^{-8}

$\Lambda_{L-R} > 87$ GeV, 95% C.L.

DESVIACIONES DE QED
Resultados en la resonancia del Z

Electrón excitado (e^*)

Lagrangiano Generalizado

Asumiendo $\Lambda_{e^*} = M_{e^*}$
$\lambda = 1$

$\alpha_{M_{e^*},\text{estimado}}$
$(-0.09^{+0.24}_{-0.22}) \cdot 10^{-8}$ GeV^{-4}

Cota
$M_{e^*} > 128$ GeV
95% C.L.

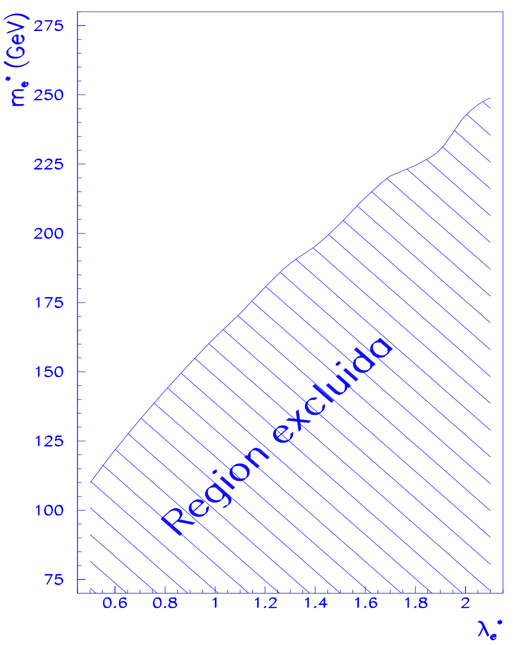
Lagrangiano de Low

Asumiendo $\lambda = 1$

$\alpha_{m_{e^*},\text{estimado}}$
$(-0.27 \pm 0.88) \cdot 10^{-9}$ GeV^{-4}

Cota
$m_{e^*} > 159$ GeV
95% C.L.

Dejando libre λ y m_{e^*}



Dejando libre Λ y M_{e^*}

DESVIACIONES DE QED
Resultados 161 GeV

Términos de contacto

$$\overbrace{\alpha_{\Lambda,\text{estimado}} = (-0.03^{+0.18}_{-0.16}) \cdot 10^{-11}\ \text{GeV}^{-4}}$$
$$\Lambda > 763\ \text{GeV, 95\% C.L.}$$

$$\Lambda_{+} > 182\ \text{GeV}$$
$$\Lambda_{-} > 176\ \text{GeV}$$
$$\Lambda_{L(R)} > 153\ \text{GeV, 95\% C.L.}$$

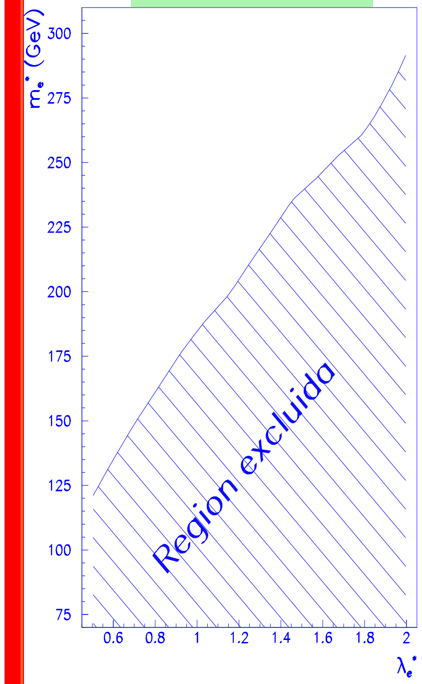
$$\alpha_{\Lambda_6,\text{estimado}} = (-0.15^{+0.52}_{-0.54}) \cdot 10^{-16}\ \text{GeV}^{-6}$$
$$\Lambda_6 > 467\ \text{GeV, 95\% C.L.}$$

$$\alpha_{\Lambda_{L-R},\text{estimado}} = (-0.03 \pm 0.06) \cdot 10^{-16}\ \text{GeV}^{-8}$$
$$\Lambda_{L-R} > 133\ \text{GeV, 95\% C.L.}$$

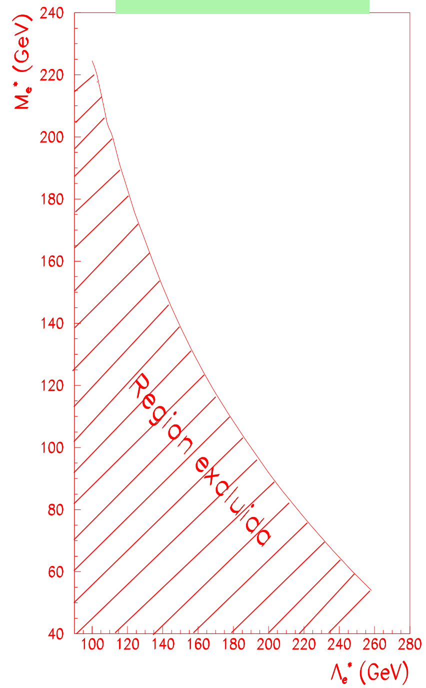
Electrón excitado

$$\alpha_{m_{e^*},\text{estimado}} = (-0.11^{+0.46}_{-0.44}) \cdot 10^{-8}\text{GeV}^{-4}$$
$$m_{e^*} > 188\ \text{GeV, 95\% C.L.}$$
$$\alpha_{M_{e^*}} = (-0.03 \pm 0.14) \cdot 10^{-8}\text{GeV}^{-4}$$
$$M_{e^*} > 141\ \text{GeV, 95\% C.L.}$$

λ.vs.m_{e^*}



Λ.vs.M_{e^*}



Ley de escala

límite $\propto s^{3/8}\mathcal{L}^{1/8}$

DESVIACIONES DE QED
Combinación de resultados

- Combinando los resultados en la resonancia del Z y a 161 GeV (al 95% C.L.)

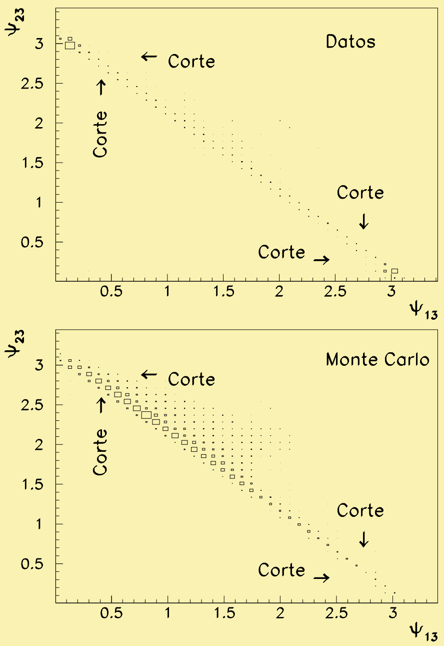
Parámetro	Cota	Parámetro	Cota
Λ	779 GeV	Λ_6	471 GeV
Λ_+	199 GeV	Λ_{L-R}	133 GeV
Λ_-	183 GeV	$m_{e^*}(\lambda = 1)$	197 GeV
$\Lambda_{L(R)}$	167 GeV	$M_{e^*}(\Lambda_{e^*} = M_{e^*})$	149 GeV

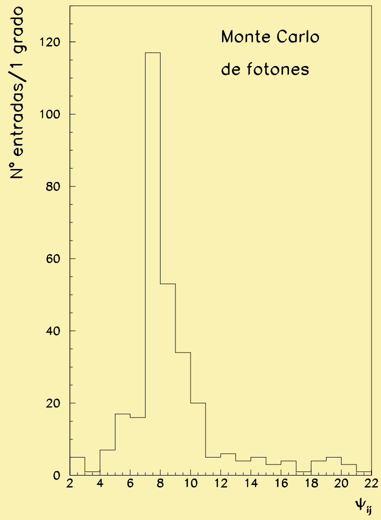
- Mejoran los límites publicados hasta el momento

ANALISIS 3 FOTONES
Criterios de selección

Identificación de un fotón menos energético

- Criterio de aislamiento entre "bumps"
- Energía mínima del fotón menos energético





- Ángulo entre "bumps", $\Psi_{ij} \geq 20^o$
- $E_{\text{fotón menos energético}} \geq 3$ GeV

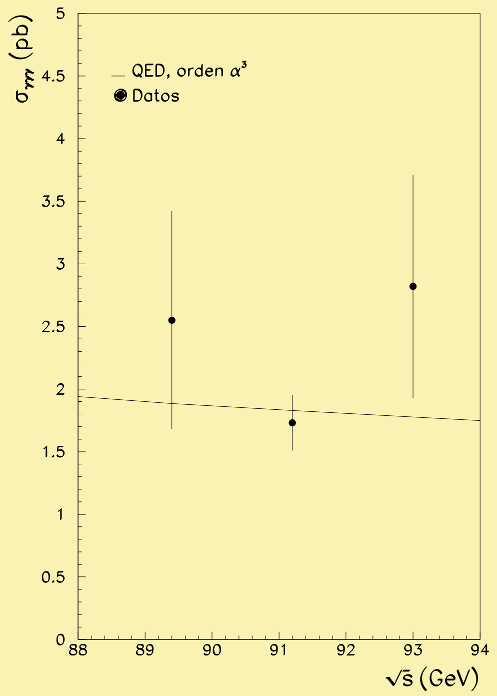
Eficiencia				
Año	91	92	93	94
ϵ	0.444	0.430	0.382	0.401
$\Delta(\epsilon)$	0.032	0.028	0.025	0.023

ANÁLISIS 3 FOTONES
Sección eficaz $\gamma\gamma\gamma$

Datos seleccionados

Año	91	92	93	94
$\mathrm{N}_{suc.}$	11	19	29	31

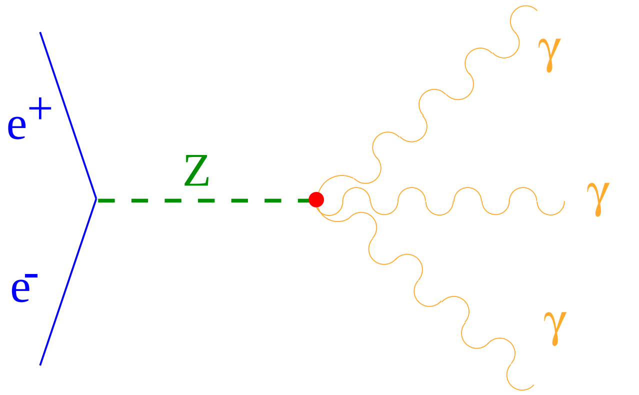
$\sqrt{s}$ (GeV)	89.4	91.2	93.0
$\mathrm{N}_{suc.}$ seleccionados	9	66	11
$\mathrm{N}_{suc.}$ contamin.	0.02	0.3	0.01
$\sigma_{\gamma\gamma\gamma}$ (pb)	2.55	1.73	2.82
$\Delta(\sigma_{\gamma\gamma\gamma})$ (pb)	0.87	0.22	0.89



FUNDAMENTOS TEÓRICOS
Z(compuesto) $\to \gamma\gamma\gamma$

$Z \to \gamma\gamma\gamma$
Modelo Estandar (muy suprimido)
Br($Z \to \gamma\gamma\gamma$)$\approx 5.4 \cdot 10^{-10}$
Subestructura del bosón Z
$\Rightarrow$ Aumento significativo

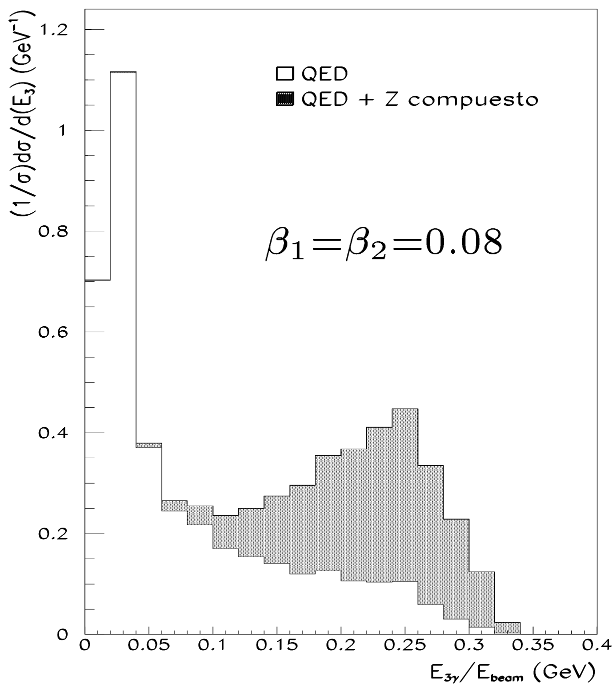
- Lagrangianos efectivos con acoplamientos anómalos $Z-3\gamma$



- $$\mathcal{L}_{Z3\gamma} = \frac{4\alpha^2}{M_Z^4}\left(\beta_1(F_{\mu\nu}F^{\mu\nu})(F_{\mu\nu}Z^{\mu\nu}) + \beta_2(Z_{\mu\nu}\tilde{F}^{\mu\nu})(F_{\mu\nu}\tilde{F}^{\mu\nu})\right)$$

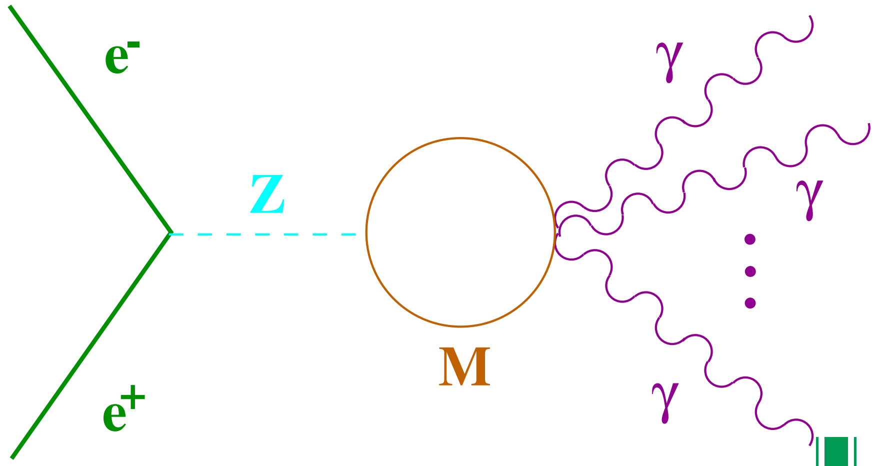
- Lagrangiano de dimensión 8

- Distribuciones dependientes de los parámetros β_1, β_2



FUNDAMENTOS TEÓRICOS
Z(monopolo) $\to \gamma\gamma\gamma$

- Posible existencia de monopolos por debajo de la escala de GUT



Numero de fotones impar

- Espín 1/2
- Acoplamientos duales del Modelo Estándar

Lagrangiano efectivo

$$\mathcal{L}_{\text{monop}} = \frac{\alpha_g^2}{360 m^4} \tan\theta_W \{4(F\cdot F)^2 + 7(F\cdot\tilde{F})^2\}$$

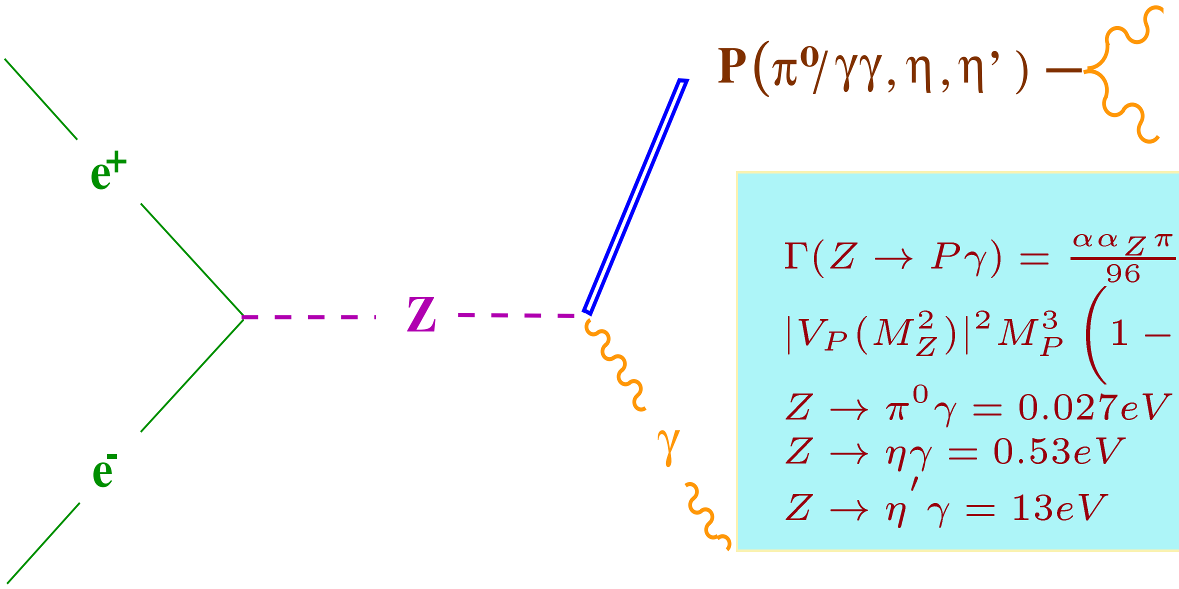
$$\begin{cases} \alpha_g = \frac{g^2}{4\pi}\,,\ eg = 2\pi n \\ m \to \text{masa del monopolo} \end{cases}$$

Anchura de desintegración

$$\Gamma(Z\to 3\gamma) = M_Z \frac{17\pi \tan^2\theta_W}{972000}[\frac{g^2}{4\pi^2}]^4(\frac{M_Z}{m})^8$$

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

$Z \to P\gamma$

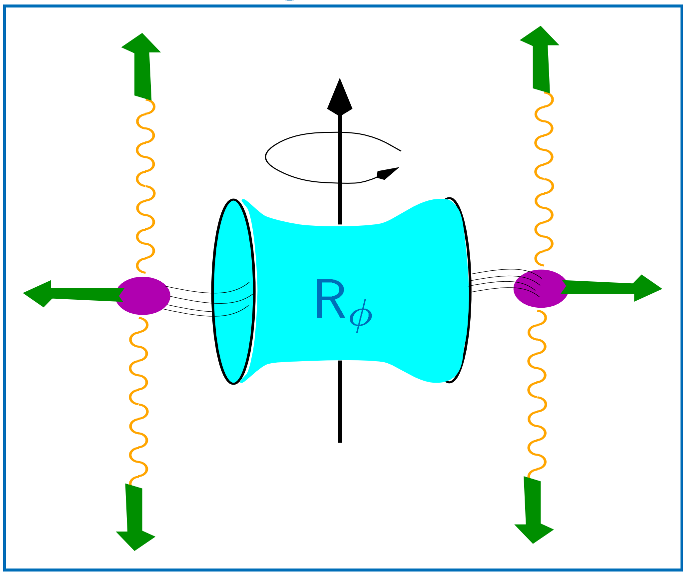


$$\Gamma(Z \to P\gamma) = \frac{\alpha \alpha_Z \pi}{96} |V_P(M_Z^2)|^2 M_P^3 \left(1 - \frac{M_P^2}{M_Z^2}\right)^3$$

$$Z \to \pi^0\gamma = 0.027eV$$
$$Z \to \eta\gamma = 0.53eV$$
$$Z \to \eta^{'}\gamma = 13eV$$

$Z \to \gamma\gamma$

- Teorema de Landau-Yang



- Si se viola la simetría Bose-Einstein

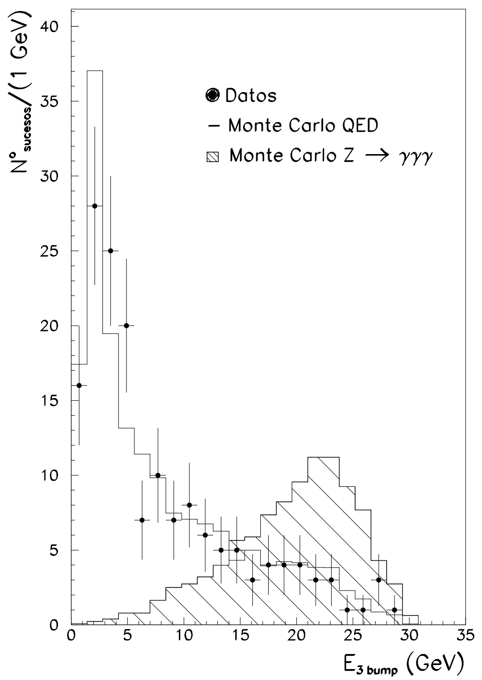
$$\boxed{\Gamma(Z \to \gamma\gamma) = \frac{g^2 M_Z}{16\pi}}$$

RESULTADOS
Z(compuesto) $\to \gamma\gamma\gamma$

Selección

Cortes de la selección $\gamma\gamma\gamma$

$E_{3^{er}\text{bump}}/\sqrt{s} \geq 0.125$



Resultados

$N_{\text{recogidos}}$	31

Hipótesis bayesiana

Distribución de Poisson

$$\begin{cases} \text{Señal} \Rightarrow Z \to \gamma\gamma\gamma \text{ media } \mu_0 \\ \text{Contaminación} \Rightarrow \text{QED media } \mu_b \end{cases}$$

Número de sucesos esperado QED

$$\mathcal{L} \cdot \epsilon \cdot \sigma_{\text{QED}} = 35.6$$

$$1 - \epsilon = 1 - \frac{e^{(-\mu_b+\mu_0)} \sum_{n=0}^{n_0} \frac{(\mu_b+\mu_0)^n}{n!}}{e^{-\mu_b} \sum_{n=0}^{n_0} \frac{\mu_b^n}{n!}}$$

Se extrae el valor de μ_0 al 95% C.L.

$$Br(Z \to \gamma\gamma\gamma) = \frac{Br(Z\to\text{hadrones})\mu_0}{\mathcal{L}\epsilon_{\text{señal}}\sigma(Z\to\text{hadrones})}$$

$Br(Z \to \gamma\gamma\gamma)$
$<$
$4.6 \cdot 10^{-6}$
95% C.L.

RESULTADOS

Estimación de las constantes de acoplamiento

- Familia de lagrangianos efectivos $\Rightarrow$ variación de las constantes de acoplamiento $\beta_{1,2}$
- Comparación entre la muestra de $\gamma\gamma\gamma$ seleccionada y muestras de Monte Carlo

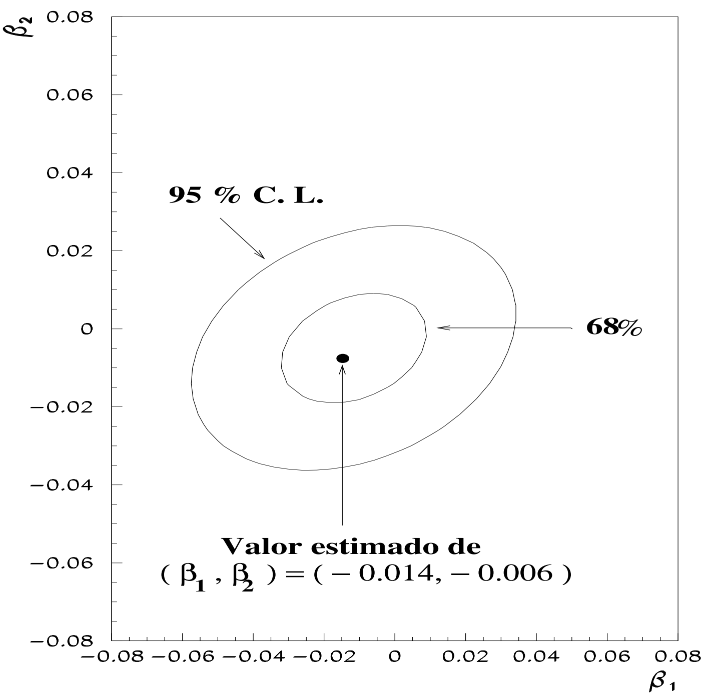
  - Elemento de matriz O(α^3) (incluyendo interferencia QED-Z)
  - Variable significativa (Energía del fotón menos energético)

Método

1. Para cada celdilla del plano (β_1, β_2) simulamos y reconstruimos una muestra de sucesos
2. Aplicamos la selección para los sucesos de Monte Carlo y los datos
3. Examinamos las diferencias entre ambas muestras en la distribución de la variable escogida (Energía del fotón menos energético)

Método

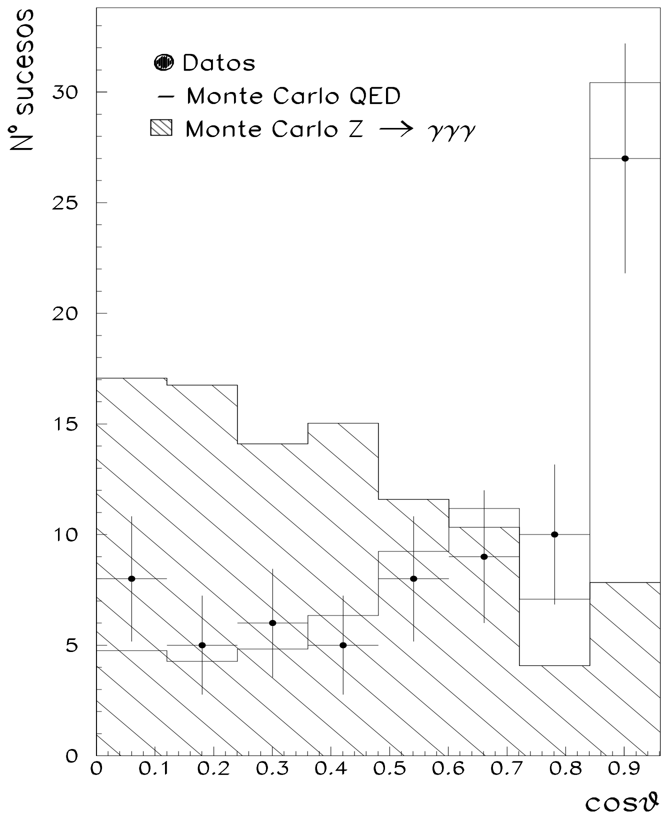
$$Q^2(\beta_1, \beta_2) = \sum_{i,j=1}^{N} (N_{i,\text{datos}} - N_{i,\text{teoría}}(\beta_1, \beta_2))^2 \cdot w_i$$



RESULTADOS
Z(Monopolo) $\rightarrow \gamma\gamma\gamma$

Selección

$$\begin{cases} E_{3^{er}\text{bump}}/\sqrt{s} \geq 0.125 \\ |\cos\theta| \leq 0.75 \end{cases}$$



Resultados

$N_{\text{recogidos}}$	11

Aplicando el método anteriormente expuesto $\Rightarrow$

$$\left[\begin{array}{c}\text{Número de sucesos esperado QED} \\ \mathcal{L}\cdot\epsilon\cdot\sigma_{\text{QED}} = 9.9\end{array}\right]$$

$$\Downarrow$$

$$\left[Br(Z \rightarrow \gamma\gamma\gamma) < 5.5\cdot\ 10^{-6}\ (95\%\ \text{C.L.})\right]$$

$$\parallel$$

Relación entre Γ y la masa del monopolo

$$\Downarrow$$

$$M_{\text{monopolo}}/n > 527\,\text{GeV}\ (95\%\ \text{C.L.})$$

RESULTADOS

Método y resultado $P\gamma$

Estados finales P($\rightarrow \gamma\gamma$) γ
Similares a los estados finales de QED
Muestra $\gamma\gamma(\gamma)$

Señal observada $=$ $\boxed{\text{QED}}$ $+$ $\boxed{Z \rightarrow P\gamma}$

$$\mathcal{L}(\sigma_{qed}\epsilon_{qed} + \sigma^{s}_{Z\rightarrow P\gamma}\epsilon_{Z\rightarrow P\gamma}(\Gamma_X))$$

$$\sigma^s = \frac{12\pi}{m_Z^2}\frac{\Gamma_{ee}\Gamma_P}{\Gamma_Z^2}\sigma_Z^{rad.}$$

Método

$$Q^2 = \sum_{i=1}^{7} \frac{(N^i_{tot,datos} - N^i_{tot,teoria})^2}{\sigma_i^2}$$

95% C.L	
Desintegración	Anchura (KeV).
$Z \rightarrow \pi^0\gamma$	$\Gamma <$ 89.9
$Z \rightarrow \eta\gamma$	$\Gamma <$ 131.2
$Z \rightarrow \eta'\gamma$	$\Gamma <$ 530.8

$Z \rightarrow \gamma\gamma$ misma signatura que $Z \rightarrow \pi^0\gamma$

$g \leq 7.0 \cdot 10^{-3}$, $95\% C.L.$

CONCLUSIONES

Usando los datos del periodo 91-94 ($\sqrt{s}\sim$ 91.2 GeV) y de Julio-Agosto 1996 ($\sqrt{s}\sim$ 161.3 GeV) se ha realizado:

- Estudio de la reaccion $e^+e^-\to\gamma\gamma(\gamma)$
- Obtencion de cotas para las desviaciones del comportamiento de QED y para las anchuras $Z\to P\gamma$

“Cut-offs”
$\Lambda_+\geq$ 199 GeV $\Lambda_-\geq$ 183 GeV
Terminos de contacto
$\Lambda\geq$ 779 GeV $\Lambda_{L(R)}\geq$ 167 GeV $\Lambda_6\geq$ 471 GeV $\Lambda_{L-R}\geq$ 133 GeV
Electron excitado
$m_{e^*}\geq$ 197 GeV $M_{e^*}\geq$ 149 GeV

$Z\to$ mesones pseudoescalares
$\Gamma(Z\to\pi\gamma)\leq$ 89.9 KeV $\Gamma(Z\to\gamma\gamma)\leq$ 89.9 KeV $\Gamma(Z\to\eta\gamma)\leq$ 131.8 KeV $\Gamma(Z\to\eta'\gamma)\leq$ 530.8 KeV
Estadistica Bose-Einstein $g\leq 7.0\cdot 10^{-3}$

- Desintegracion del Z en tres fotones mediante un monopolo magnetico $Br(Z\to\gamma\gamma\gamma)<5.6\cdot 10^{-6}$
- Desintegracion del Z en tres fotones debido a su caracter compuesto $Br(Z\to\gamma\gamma\gamma)<4.6\cdot 10^{-6}$
- Calculo de cotas para las constantes de acoplamiento, β_1 y β_2, del lagrangiano efectivo que da cuenta del caracter compuesto del Z