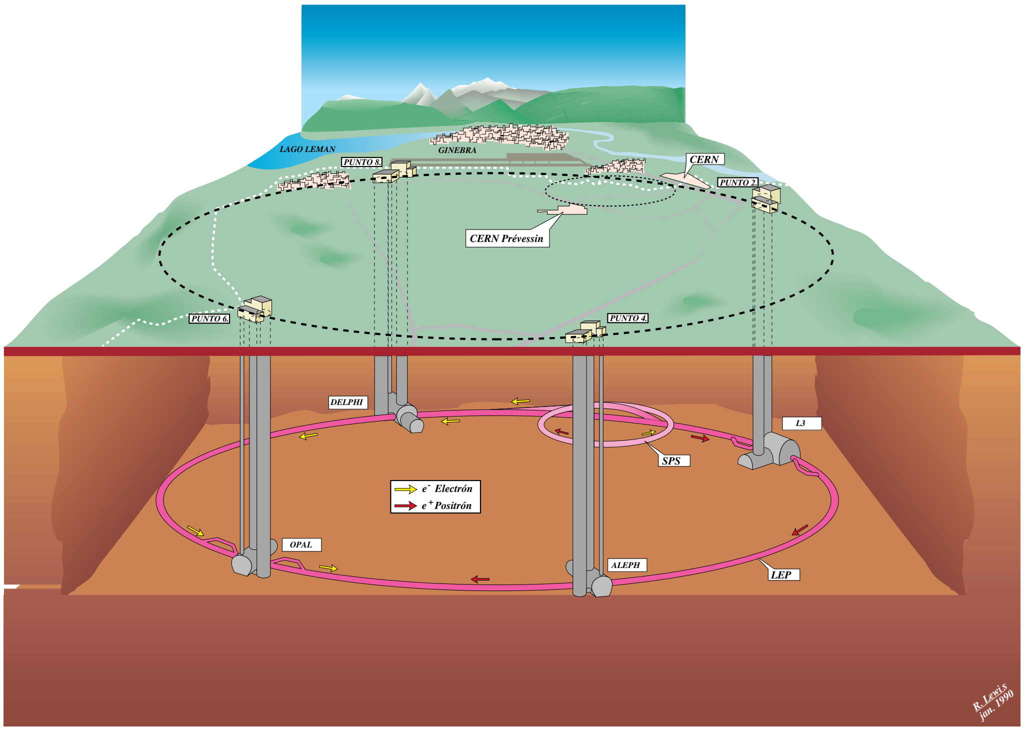
FACULTAD DE CIENCIAS
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID
MADRID 2001

Estudio del proceso $e^+e^- \to \gamma\gamma(\gamma)$ en LEP

Ángela Bajo Vaquero
CIEMAT, Madrid

ÍNDICE

El acelerador LEP



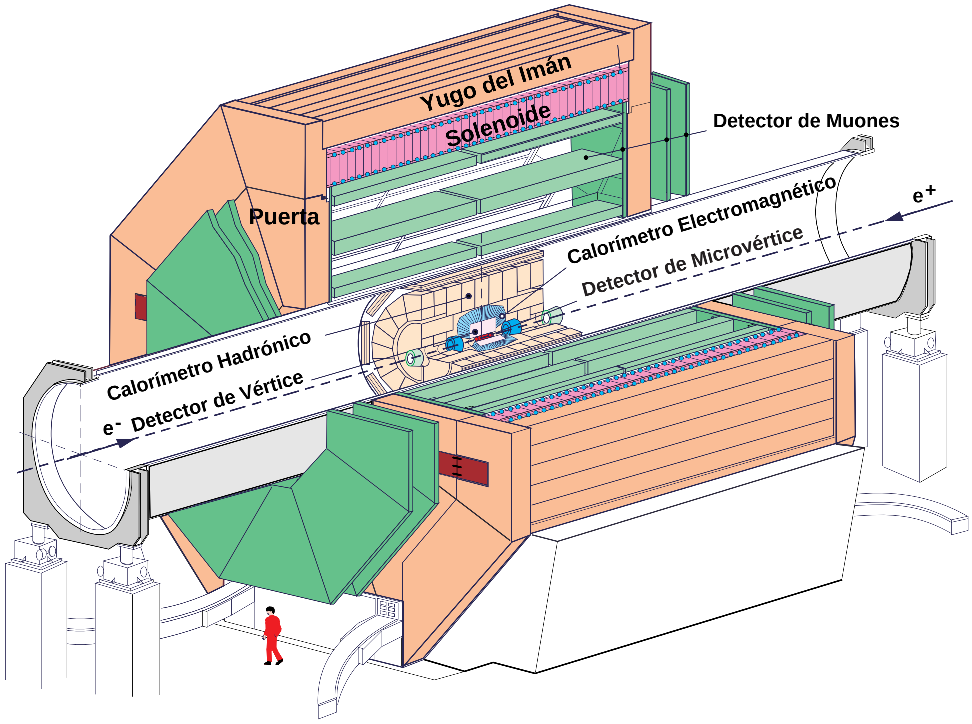
- 26.7 km de "circunferencia" (8 tramos rectos y 8 curvos)
- ALEPH, DELPHI, L3 y OPAL

$$L = \frac{n N_{e^-} N_{e^+} f}{4\pi\sigma_x\sigma_y} \qquad \sigma = \frac{N}{\mathcal{L}\cdot\epsilon}$$

Año	$\sqrt{s}$ (GeV)
1989-95	91.2
1995	130-140
1996	161-172
1997	183
1998	189
1999	192-202
2000	202-208

DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

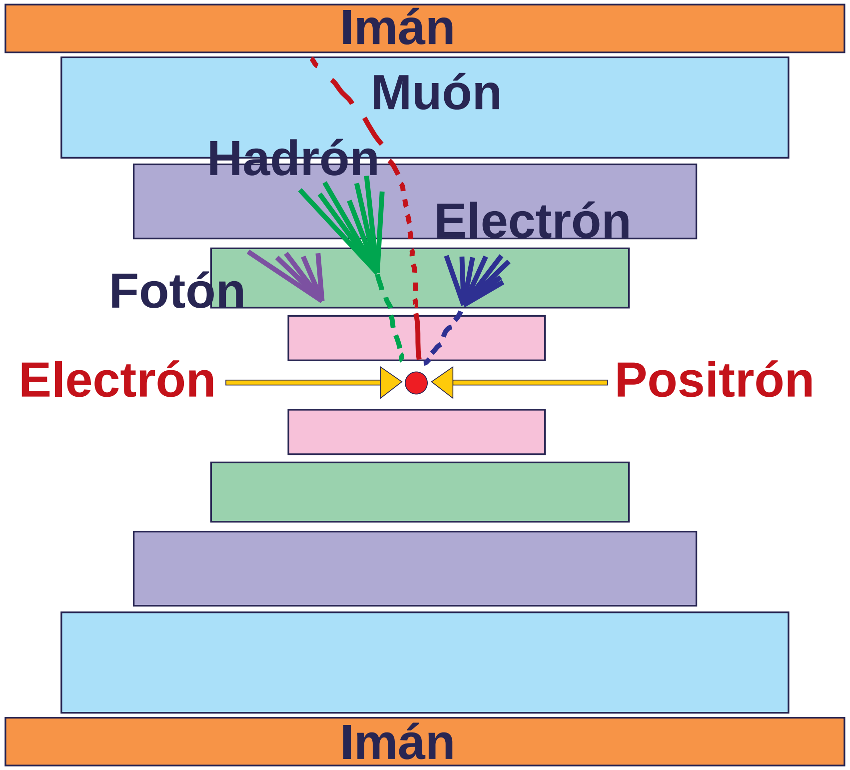
El detector L3



- 50 m de profundidad
- 16 m de diámetro y 14 m en la dirección del haz
- campo magnético de 0.5 T paralelo a la dirección del haz, que hace posible la determinación de la carga y el momento de las partículas.
- principales subdetectores

- sistema central de trazas
- calorímetro electromagnético y hadrónico
- espectrómetro de muones

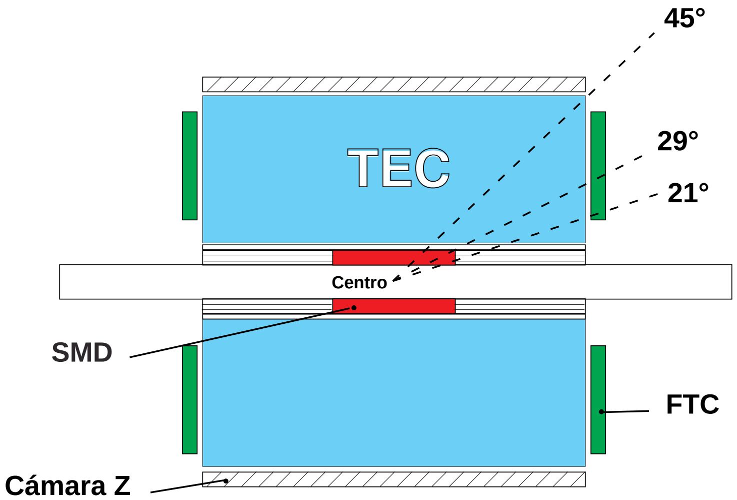
Identificación de partículas en el detector

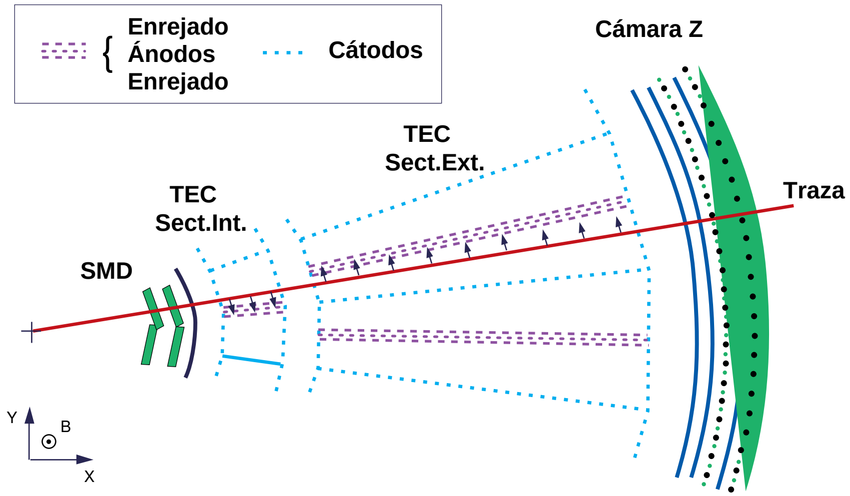


- fotones y electrones: Deposiciones energéticas aisladas en el BGO. Electrones con traza asociada en la cámara central de trazas
- hadrones: Cascadas en el calorímetro electromagnético y hadrónico, y trazas en la cámara central si son cargados
- muones: traza en la cámara central, señal en los calorímetros y traza en la cámara de muones apuntando al vértice de interacción
- neutrino: no son visibles en el detector. Su cuadrimomento se obtiene a partir del momento perdido en el suceso

El detector central de trazas

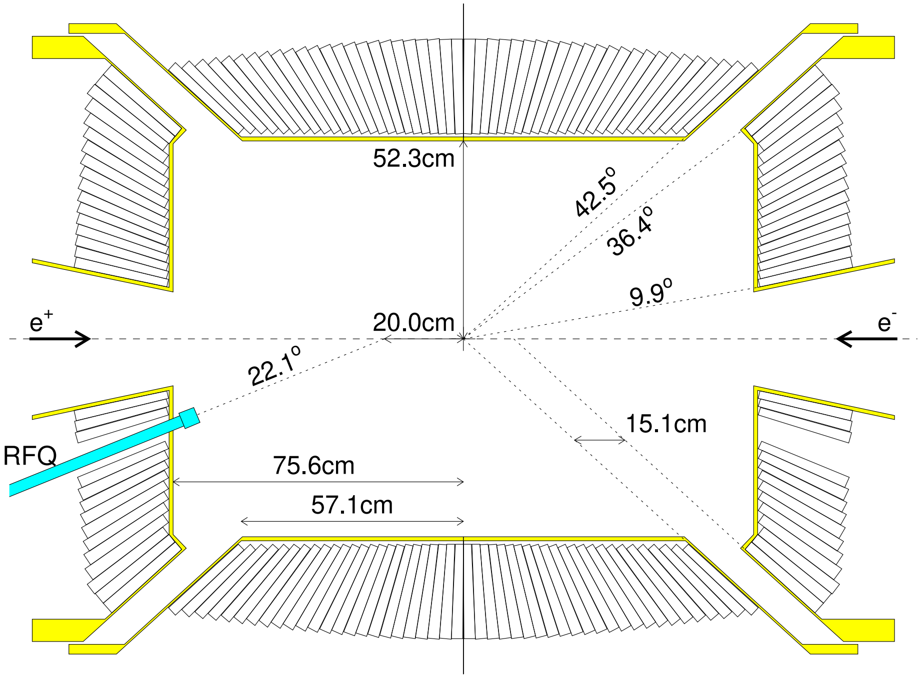
- Detección de partículas cargadas, determinación de su trayectoria y momento
- Determinación del vértice primario y secundarios para partículas con vida media superior a 10^{-12}s
- SMD + TEC





$$\sigma(1/p_t) = 0.01\ \mathrm{GeV}^{-1}$$

El calorímetro electromagnético

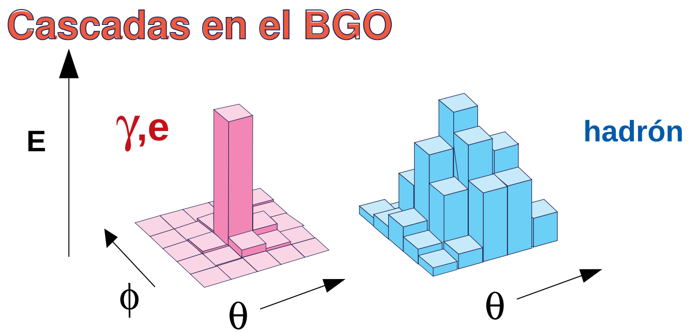


- 11000 cristales de germanato de bismuto ($Bi_4Ge_3O_{12}$) que apuntan al vértice de interacción (longitud de los cristales $\sim$ 24 cm)

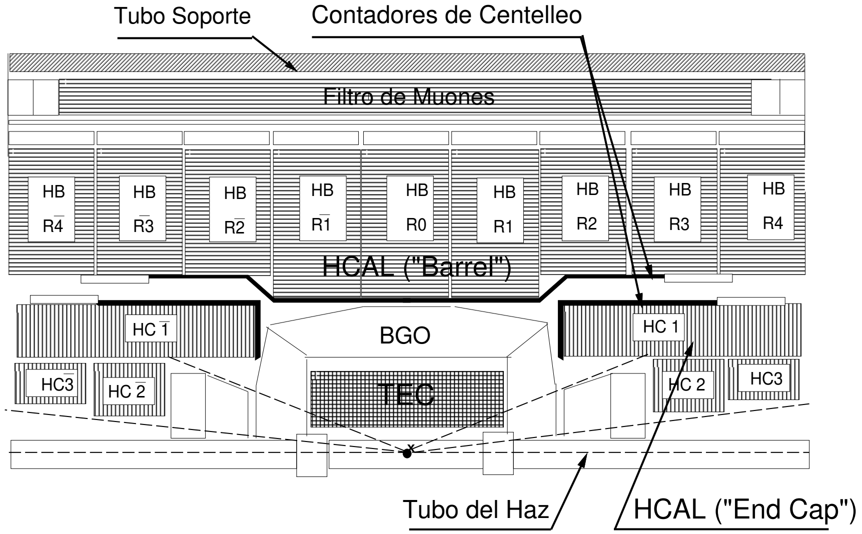
$$\frac{\sigma(E)}{E} = \left[\frac{1.6\pm0.1}{\sqrt{E}} + (0.35\pm0.05)\right]\%$$

- e^+, e^-, γ: bremmstrahlung, creación de pares (X_0) $\to$ cascadas electromagnéticas

- hadrones: ionización, interacción fuerte con los núcleos del medio (λ_I) $\to$ cascadas hadrónicas



El calorímetro hadrónico y filtro de muones



- cámaras proporcionales y capas de uranio

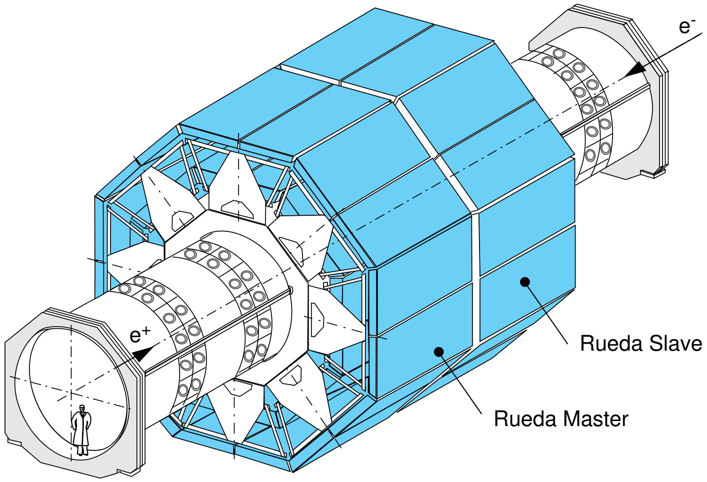
$$\frac{\sigma(E)}{E} = \left(\frac{55}{\sqrt{E(\mathrm{GeV})}} + 5\right)\%$$

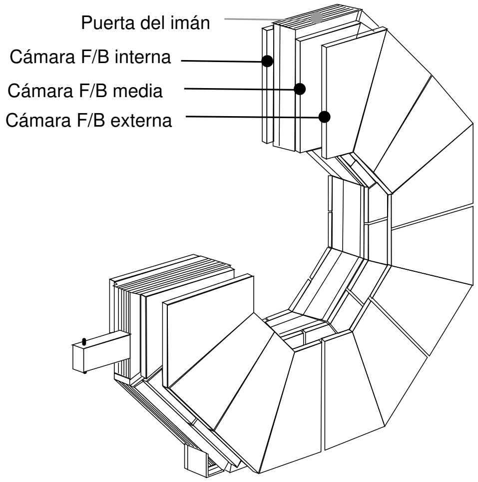
- $X_0 << \lambda_I$, los hadrones alcanzan el calorímetro hadrónico
- Se combina con el calorímetro electromagnético en la medida de la energía y posición de los hadrones

Filtro de muones

- capas de latón y cámaras proporcionales

El espectrómetro de muones



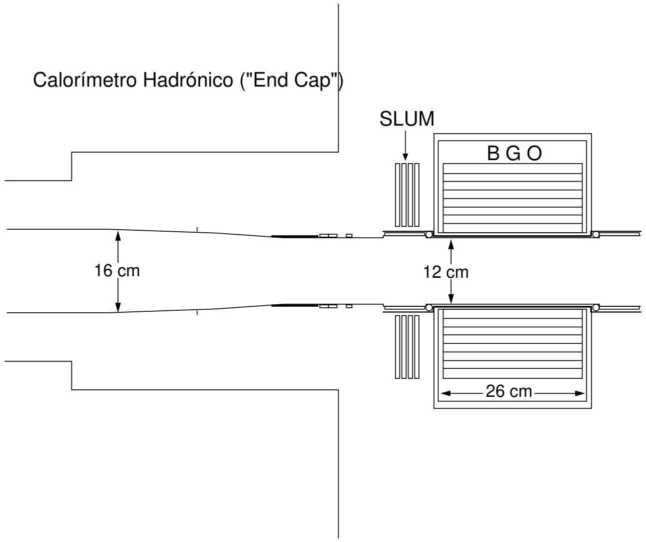


$$\frac{\sigma(p_T)}{p_T} = 2\%$$

$$\frac{\sigma(p_T)}{p_T} = 30\%$$

- Identificación y medida del momento de los muones
- $E_{\rm brems} \propto 1/{\rm m}^2 \qquad E_{\rm brems}(e^-) \sim 40000 E_{\rm brems}(\mu)$
- Ionización. No producción de cascadas

Monitor de luminosidad



- detector de trazas + calorímetro con cristales BGO
- Identificación de sucesos $e^+e^- \to e^+e^-$ a bajo ángulo
- Determinación de la luminosidad

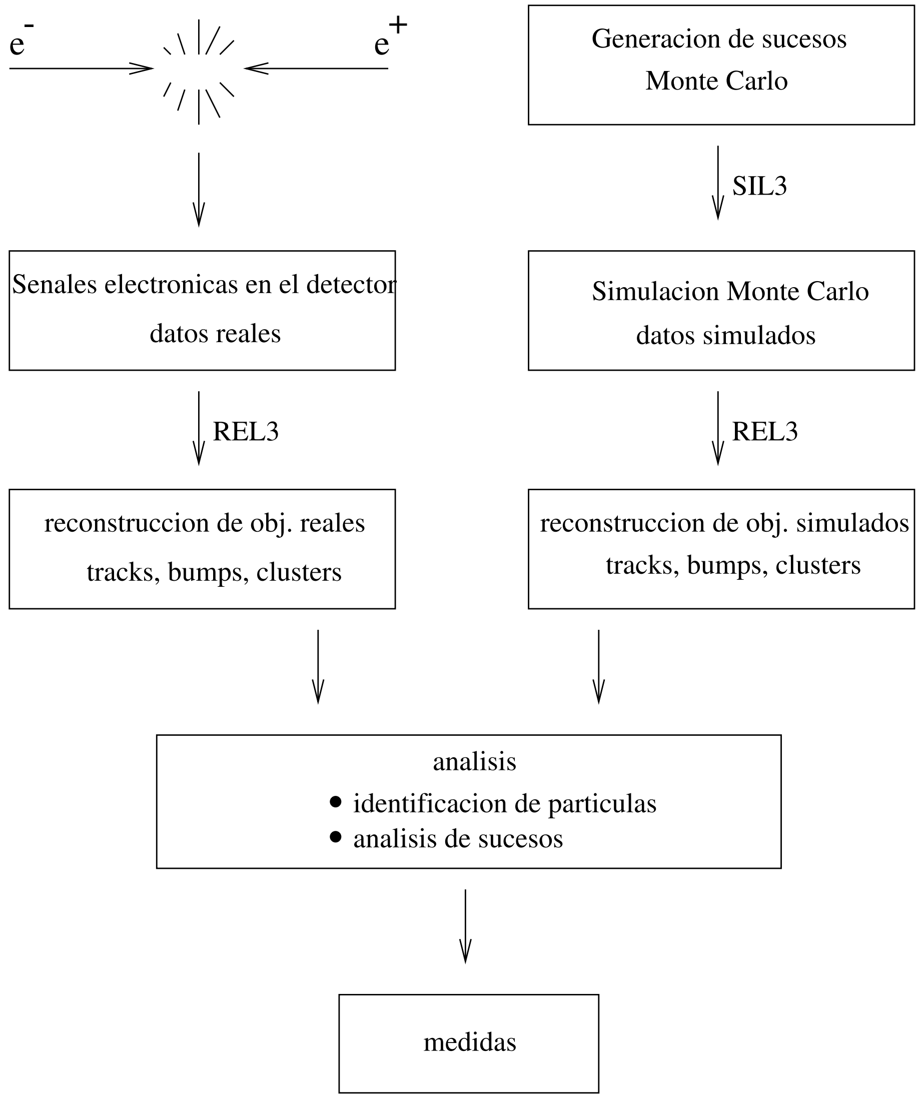
Sistema de centelleadores

- Sistema de plásticos centelleadores entre el calorímetro electromagnético y el hadrónico
- Diferenciación de muones que provienen de una colisión e^+e^- (señales coincidentes) de muones cósmicos (diferencia de tiempos 5.8 ns)

El sitema de trigger

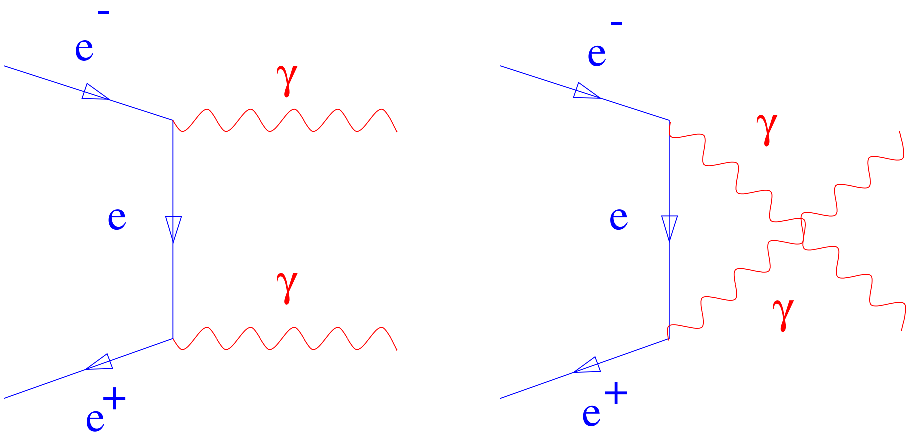
- Es el sistema que decide si el suceso que se acaba de producir es de interés físico (colisión e^+e^-) o no (interacción con las pareces del tubo, ruido electrónico)
- trigger → sistema de adquisición de datos → reconstrucción → análisis

Reconstrucción y simulación



En el orden más bajo...

- Diagramas de Feynman



- Sección eficaz diferencial

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_0 = \frac{\alpha^2}{s}\frac{1+\cos^2\theta}{1-\cos^2\theta}$$

- Sección eficaz total

$$\sigma_0 = \frac{2\pi\alpha^2}{s}\left(\ln\frac{1+\cos\theta_{min}}{1-\cos\theta_{min}} - \cos\theta_{min}\right)$$

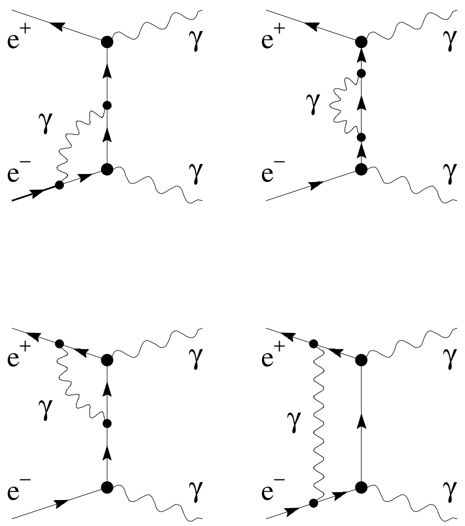
θ_{min} ángulo polar mínimo que cubre el detector

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

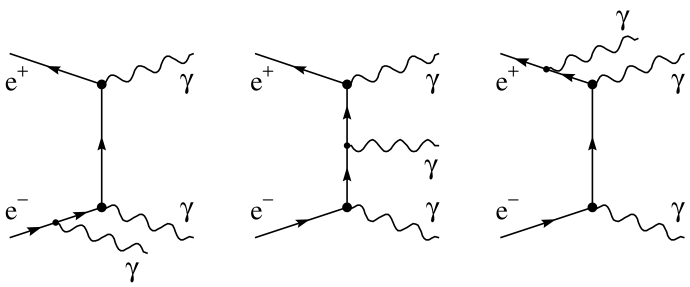
Incluyendo las primeras correcciones radiativas

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{QED} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_0 (1 + \delta_{CORR})$$

- Correcciones debidas al intercambio de fotones virtuales



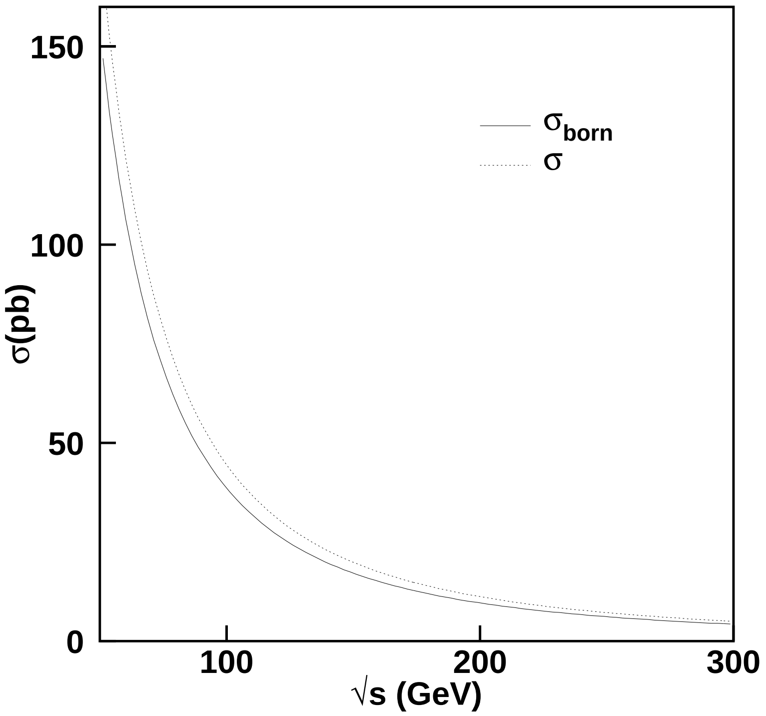
- Correcciones debidas a la emisión de fotones de bremsstrahlung



Incluyendo las primeras correcciones radiativas

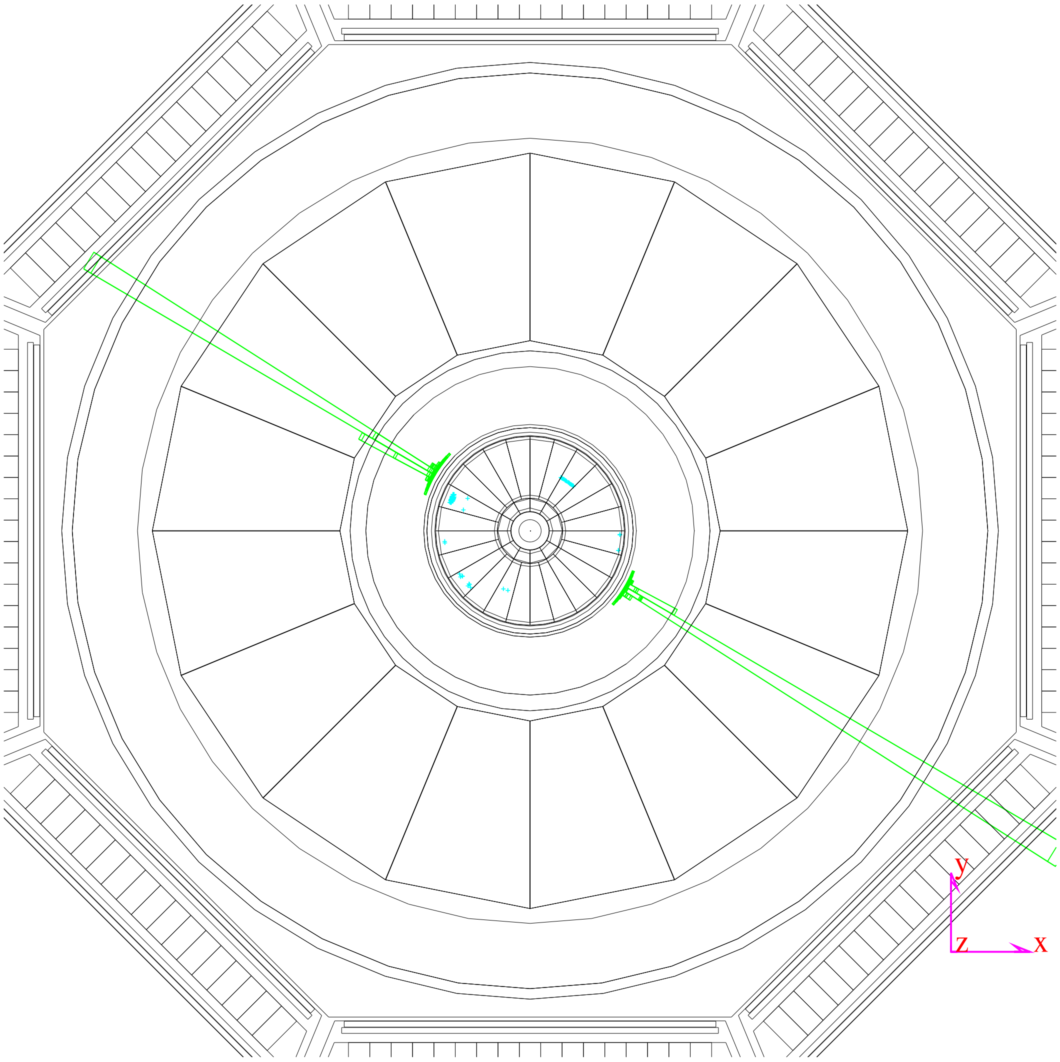
$$\sigma = \sigma_{2\gamma} + \sigma_{3\gamma} = \sigma_0 \left\{ 1 + \frac{\alpha}{\pi} \frac{1}{2v-1} \left(\frac{4}{3} v^3 - v^2 + \left(\frac{2\pi^2}{3} - 2 \right) v + 2 - \frac{\pi^2}{12} \right) \right\}$$

$$v = 1/2 \, \ln(s/m_e^2)$$



Correcciones débiles y fuertes despreciables →TEST QED

Características de los sucesos $e^+e^- \to \gamma\gamma(\gamma)$



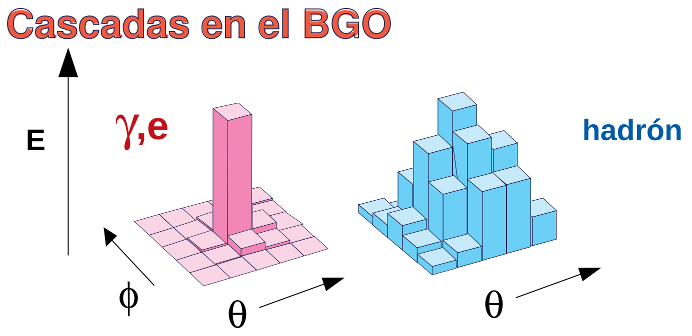
- 2 o más deposiciones de alta energía en el calorímetro electromagnético
- ninguna traza reconstruida en la TEC

SELECCIÓN DE LA MUESTRA

Cortes de selección

1. $2 \leq \mathrm{NSRCS} \leq 10$
2. Identificación de al menos dos fotones:
   - $|\cos\theta| < 16^o$
   - Energía mínima: $E > 5$ GeV
   - Perfil electromagnético

$$E_{925} = \frac{E_9}{E_{25}} > 0.9$$



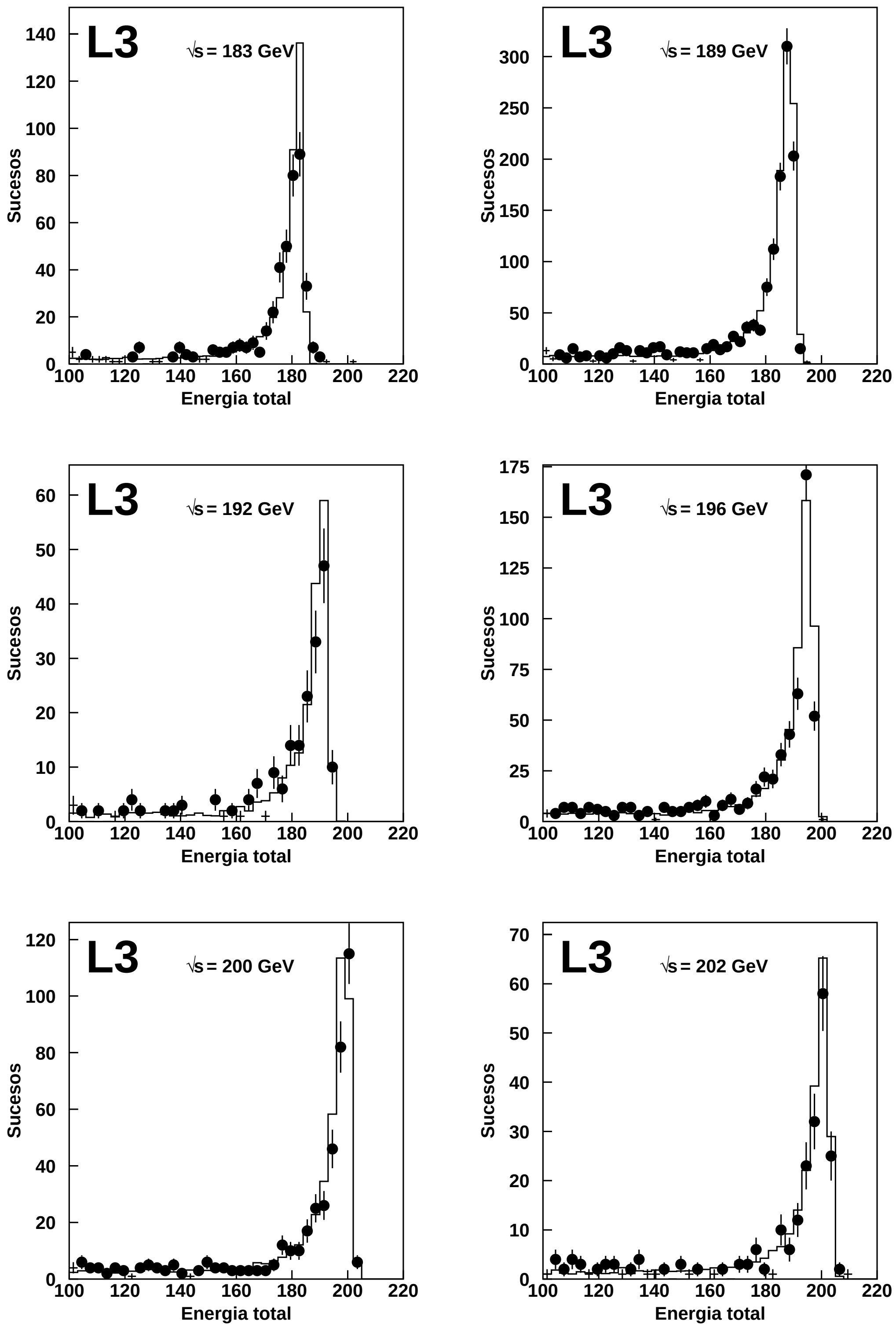
   - No asociadas a una traza en la TEC
     - $N_{us} < 40\% N_{es}$
     - $\mathrm{p} < 0.1$ GeV
3. Ángulo entre los dos fotones más energéticos $\alpha_{12} > 15^o$
4. $E_{tot} > 0.5 \cdot \sqrt{s}$
5. Al menos un par de centelleadores opuestos con una diferencia de tiempos < 5 ns

Con los cortes aplicados:

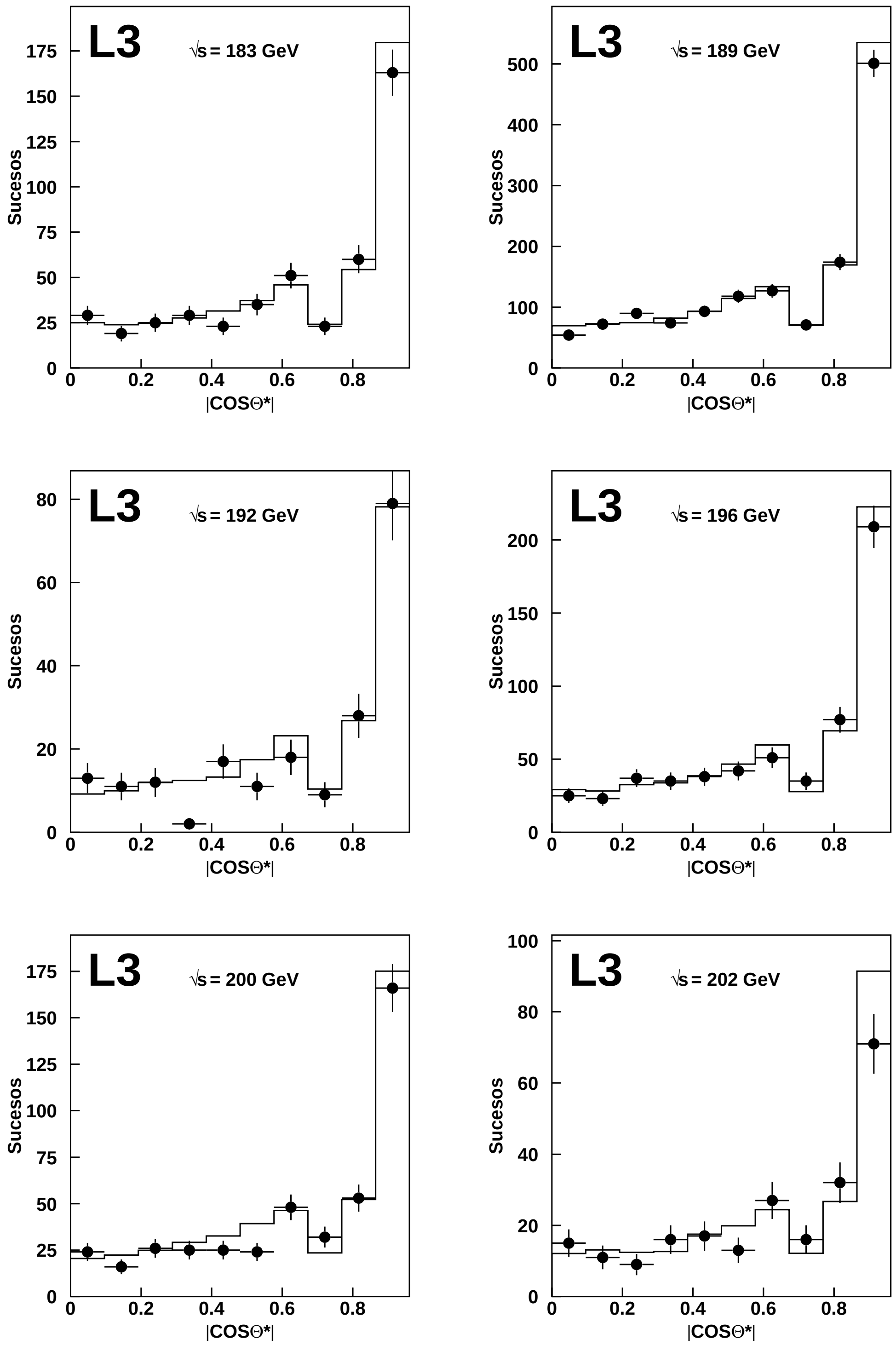
$\sqrt{s}$ (GeV)	$\mathcal{L}_{\rm tot}$ (pb^{-1})	N_{sel}	N_{esp}	$\epsilon(\%)$
183	54.80	460	477 ± 22	68.0 ± 0.2
189	175.27	1374	1415 ± 37	68.8 ± 0.2
192	28.77	200	212 ± 14	64.2 ± 0.5
196	82.40	572	591 ± 24	64.8 ± 0.2
200	67.51	439	466 ± 24	64.7 ± 0.2
202	35.95	227	242 ± 24	64.3 ± 0.5

ANÁLISIS

Energía total

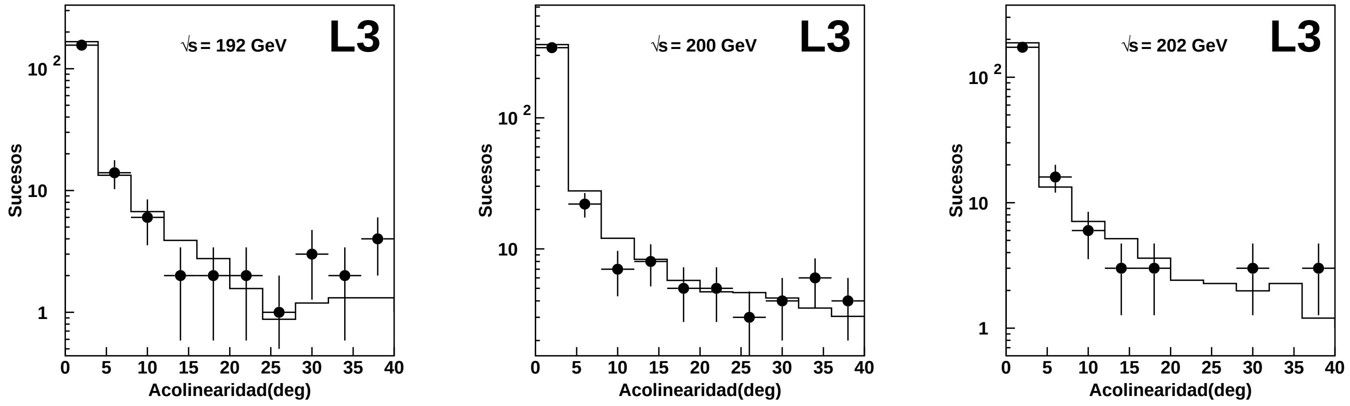


Distribución angular



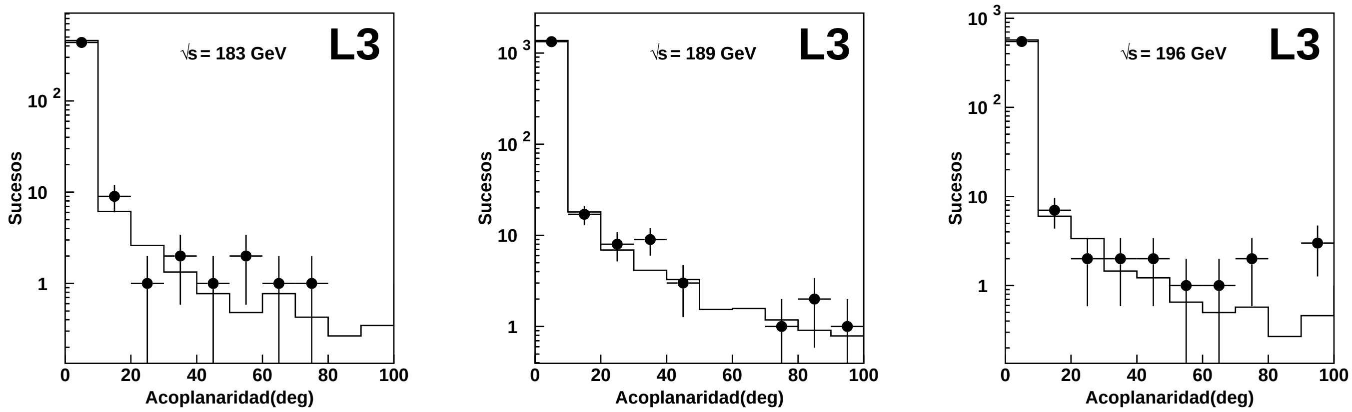
Acolinealidad

$$\mathrm{ACOL} \; = \; 180^o - \alpha_{12}$$



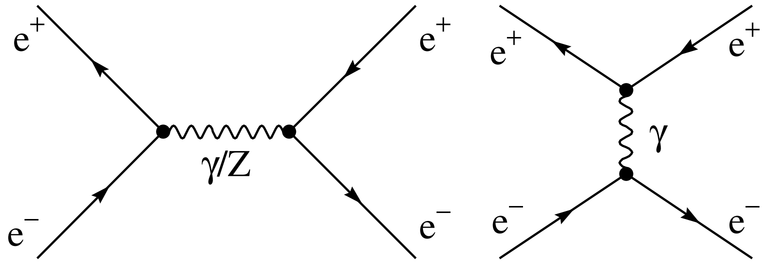
Acoplanaridad

$$\mathrm{ACOPL} \; = \; 180^o - \phi_{12} \qquad \phi_{12} = \phi_1 - \phi_2$$

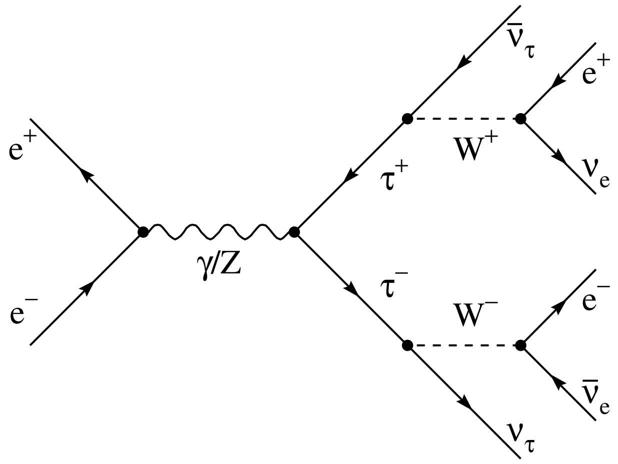


Procesos contaminantes

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



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



$$N_{cont} = \mathcal{L} \cdot \sigma_{cont} \cdot \frac{N_{sel}^{cont}}{N_{gen}^{cont}}$$

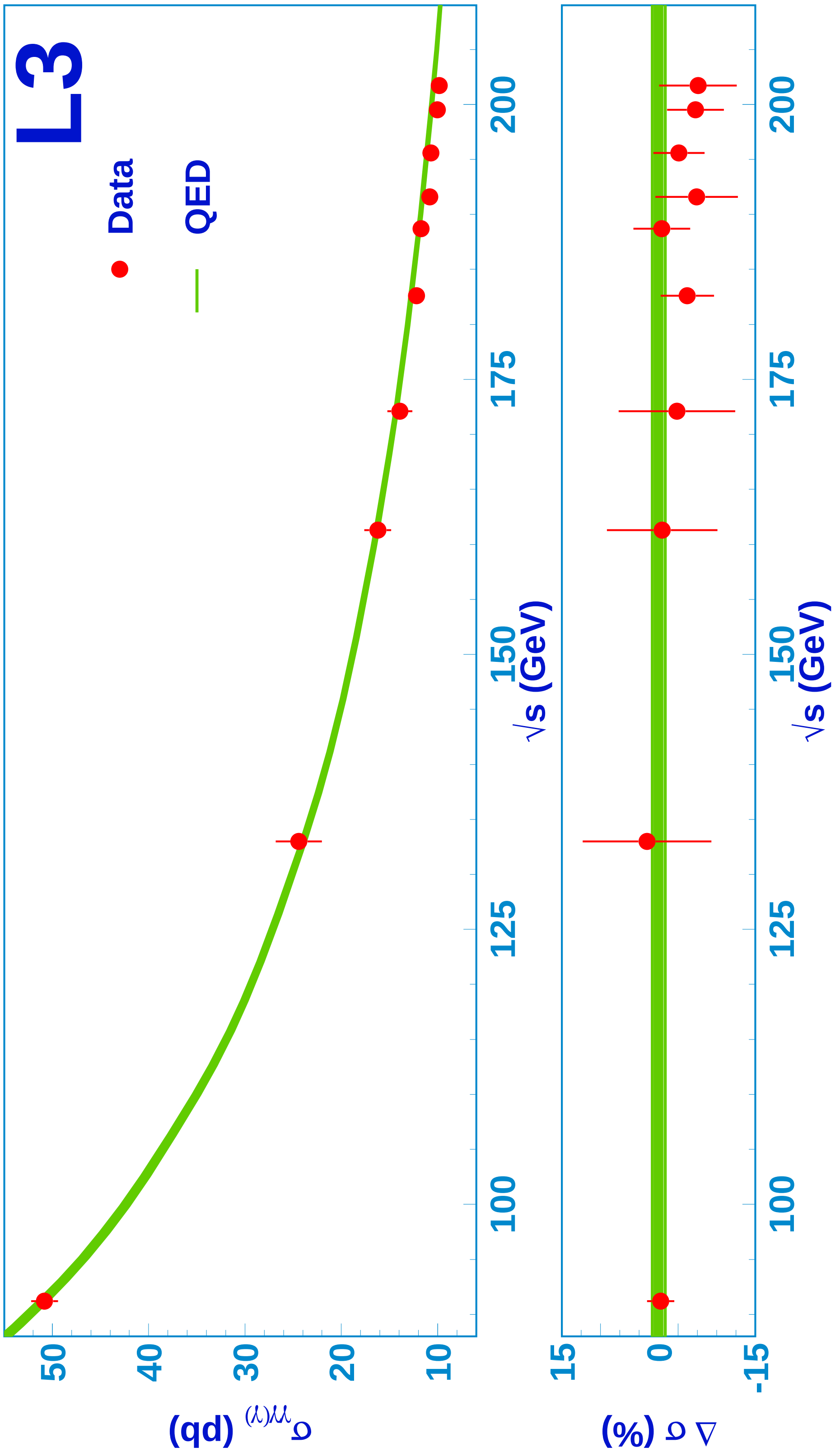
$$\mathrm{N_{cont}} < 1\,\%\ \mathrm{N_{sel}}$$

Cálculo de la sección eficaz Total

$$\sigma = \frac{N_{sel} - N_{cont}}{\epsilon \cdot \mathcal{L}}$$

$\sqrt{s}$ (GeV)	σ_{obs}(pb)	σ_{esp}(pb)	$\sigma_{obs}/\sigma_{esp}$
183	$12.17 \pm 0.55 \pm 0.14$	12.65	0.96 ± 0.04
189	$11.54 \pm 0.30 \pm 0.14$	11.78	0.98 ± 0.03
192	$10.83 \pm 0.74 \pm 0.22$	11.51	0.94 ± 0.06
196	$10.71 \pm 0.44 \pm 0.29$	11.06	0.97 ± 0.04
200	$10.05 \pm 0.47 \pm 0.26$	10.66	0.94 ± 0.04
202	$9.82 \pm 0.63 \pm 0.45$	10.46	0.94 ± 0.06

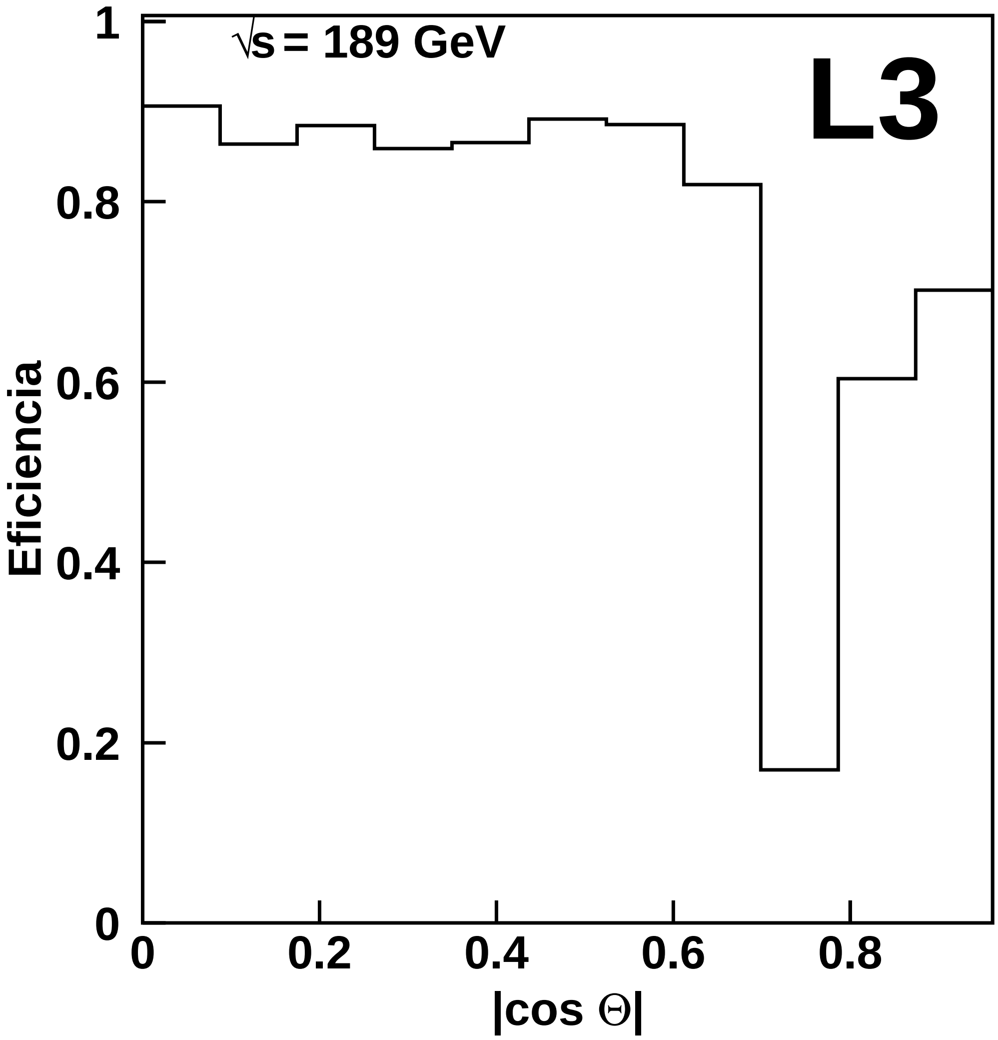
Cálculo de la sección eficaz Total



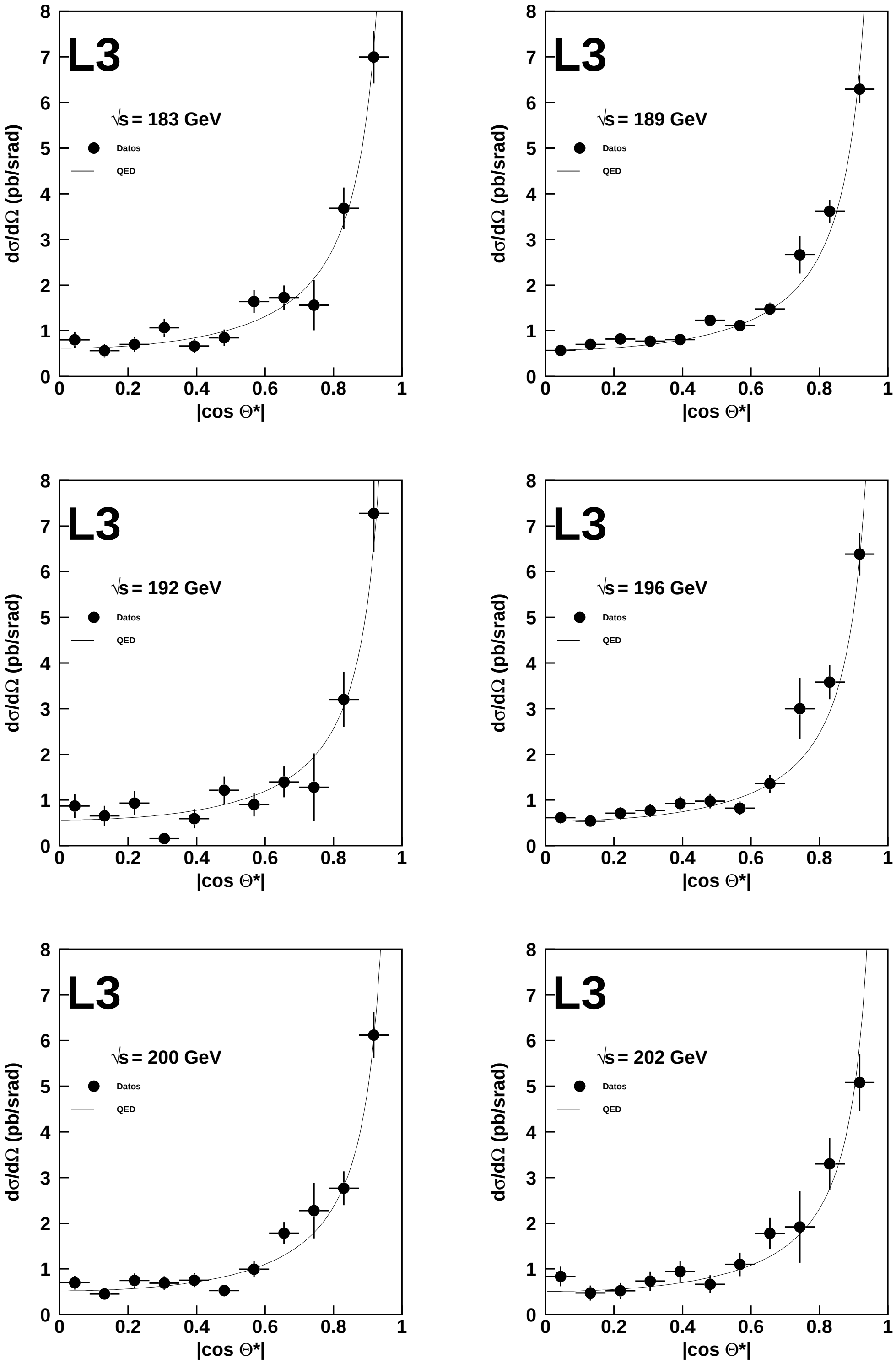
Cálculo de la sección eficaz diferencial

$$\frac{d\sigma_i}{d\Omega} = \frac{\sigma_i}{2\pi\Delta\cos\theta_i} = \frac{N_i}{2\pi\mathcal{L}\epsilon_i\Delta\cos\theta_i}$$

Eficiencia



Cálculo de la sección eficaz diferencial



CONCLUSIONES

- Se ha analizado el proceso $e^+e^- \to \gamma\gamma(\gamma)$ entre 183 y 202 GeV (1997, 1998 y 1999)
- Se han medido las secciones eficaces totales y diferenciales
- Los resultados obtenidos están en acuerdo con las predicciones de QED
- Límites a teorías que van más allá del Modelo Estándar: interacciones de contacto, parámetros de *cut-off*, existencia del electrón excitado, masa del gravitón, masa de leptones excitados con espín 3/2...