Medida de $R_b^0 \equiv \Gamma(Z \to b\bar{b})/\Gamma(Z \to \mathrm{had})$ en L3

María Chamizo
CIEMAT - Madrid

Indice

e	μ	τ		γ
ν_e	ν_μ	ν_τ	**Modelo Standard**	**W$^+$ Z W$^-$**
u	c	t	$SU(3) \otimes SU(2) \otimes U(1)$	**g**
d	s	b		**¿H?**

⋮

Supersimetría

⋮

⋮

Teorías de Gran Unificación

⋮

Teoría

$\Downarrow$

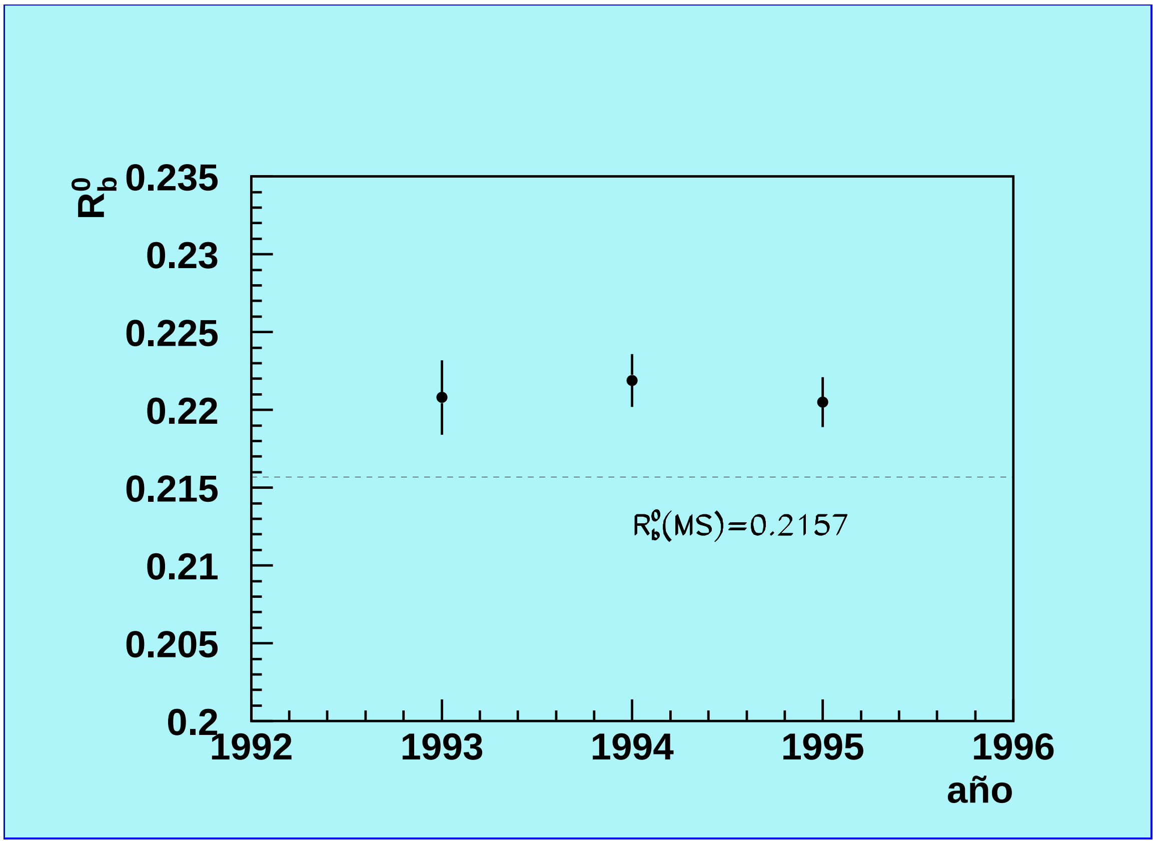
Observables (A_{FB}, σ, Γ...)

$\Uparrow$

Experimento

Observable

$$R_b^0 = \frac{\Gamma(Z \to b\bar{b})}{\Gamma(Z \to q\bar{q})}$$



¿Nueva Física?

¿Algo mal en la medida?

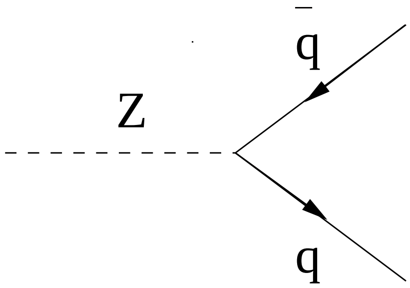
$$\Downarrow$$

Necesarias nuevas medidas de R_b^0

$\Gamma(Z \to \mathsf{b}\overline{\mathsf{b}})$

Anchura parcial de desintegración $Z \to \mathsf{q}\overline{\mathsf{q}}$:

$$\boldsymbol{\Gamma}(\mathbf{Z} \to \mathsf{q}\overline{\mathsf{q}}) \;\equiv\; \boldsymbol{\Gamma}_{\mathsf{q}\overline{\mathsf{q}}}$$



$$\Gamma^0_{\mathsf{q}\overline{\mathsf{q}}} = \Gamma^0_v + \Gamma^0_a \quad \begin{cases} \Gamma^0_a = \beta^3 \frac{G_\mu M_Z^3}{2\pi\sqrt{2}} (g_a^{\mathsf{q}})^2 \\ \Gamma^0_v = \beta \frac{3-\beta^2}{2} \frac{G_\mu M_Z^3}{2\pi\sqrt{2}} (g_v^{\mathsf{q}})^2 \end{cases}$$

$$g_v^{\mathsf{q}} = T_3^{\mathsf{q}} - 2Q_{\mathsf{q}}\mathrm{sen}^2\theta_w$$
$$g_a^{\mathsf{q}} = T_3^{\mathsf{q}}$$

Medidas experimentales de $\Gamma\mathsf{q}\overline{\mathsf{q}}$ son muy precisas

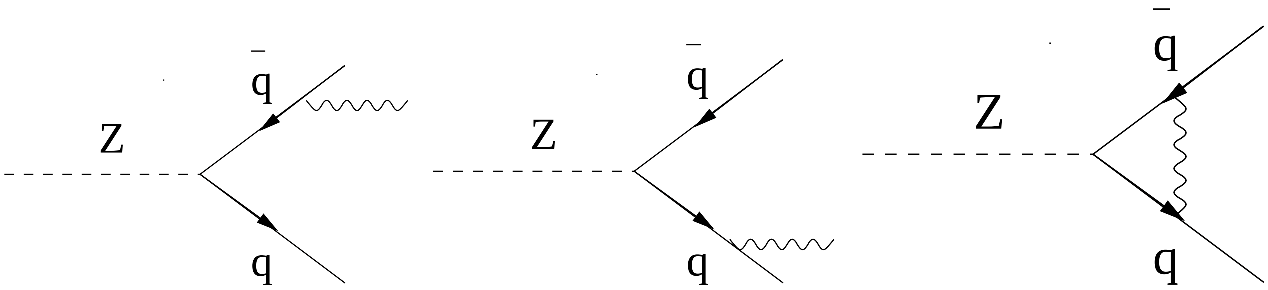
$\Downarrow$

Necesario considerar correcciones radiativas a $\Gamma^0_{\mathsf{q}\overline{\mathsf{q}}}$ $\Rightarrow$

Correcciones
Fotónicas
QCD
Débiles

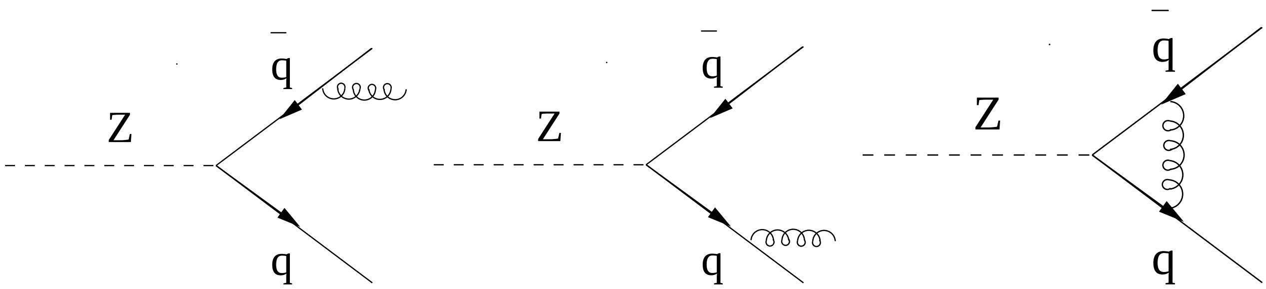
$\Gamma(Z \rightarrow \mathsf{b}\bar{\mathsf{b}})$

1) Correcciones fotónicas



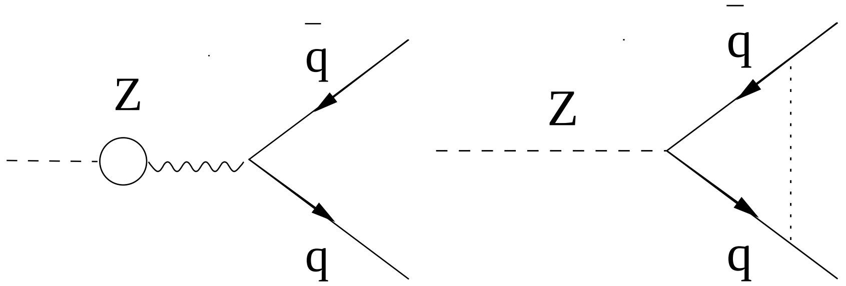
$$\Gamma^{QED}_{\mathsf{q}\bar{\mathsf{q}}} = \Gamma^0_{\mathsf{q}\bar{\mathsf{q}}} R^{QED} \quad ; R^{QED} = 1 + \frac{3}{4}\frac{\alpha}{\pi} Q^2_{\mathsf{q}}$$

2) Correcciones de QCD



$$\Gamma^{QCD}_{\mathsf{q}\bar{\mathsf{q}}} = \Gamma^0_v R^{QCD}_v + \Gamma^0_a R^{QCD}_a$$

3) Correcciones débiles



$$
\begin{aligned}
g_v^{\mathsf{q}} &\to \bar{g}_v^{\mathsf{q}} = \sqrt{\rho_{\mathsf{q}}}(T_3^{\mathsf{q}} - 2Q_{\mathsf{q}}\mathrm{sen}^2\theta_{w\mathsf{q}}) \\
g_a^{q} &\to \bar{g}_a^{\mathsf{q}} = \sqrt{\rho_{\mathsf{q}}}T_3^{\mathsf{q}}
\end{aligned}
$$

$$\rho_{\mathsf{q}} = \rho(1 + \Delta\rho^{\mathsf{q}})$$

$$\mathrm{sen}^2\theta_{w\mathsf{q}} = \mathrm{sen}^2\bar{\theta}_w(1 + \Delta\kappa^{\mathsf{q}})$$

Universal

$\rho = \frac{1}{1-\Delta\rho}$

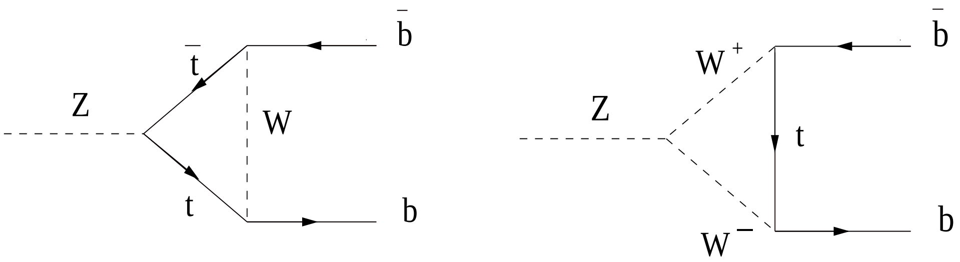
$\mathrm{sen}^2\bar{\theta}_w = \mathrm{sen}^2\theta_w + \cos^2\theta_w\Delta\rho$

$\Delta\rho = 3\frac{G_\mu m_{\mathsf{t}}^2}{8\pi^2\sqrt{2}}$

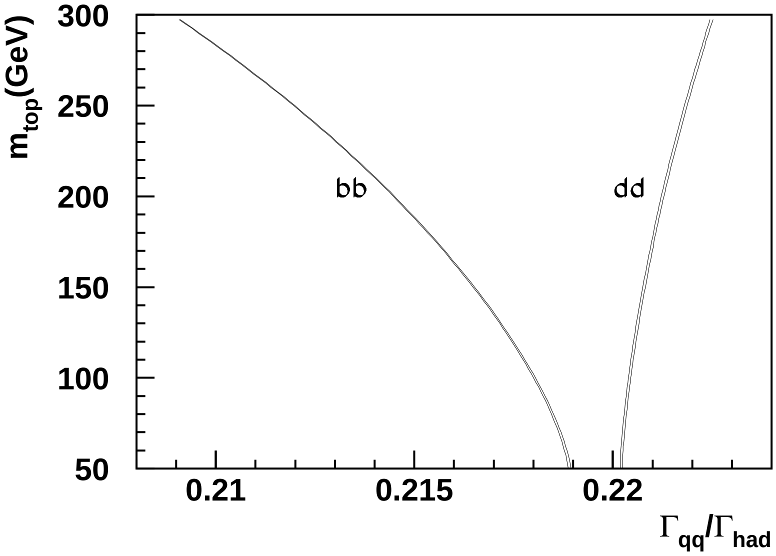
No Universal

$$\Delta\rho^{\mathsf{q}} \simeq \begin{cases} 0 & \mathsf{udsc} \\ -4\frac{G_\mu m_{\mathsf{t}}^2}{8\pi^2\sqrt{2}} & \mathsf{b} \end{cases}$$

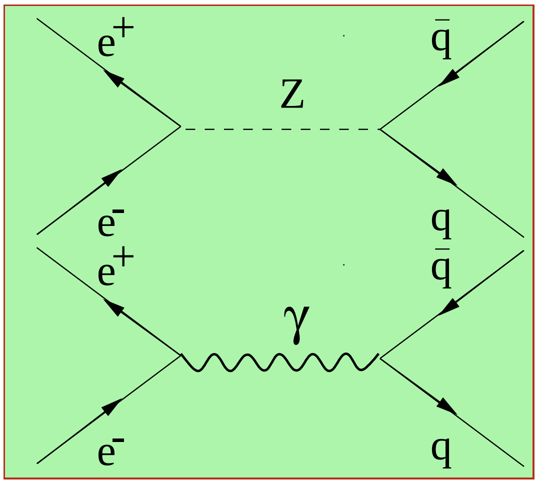
$$\Delta\kappa^{\mathsf{b}} \simeq \begin{cases} 0 & \mathsf{udsc} \\ -\frac{1}{2}\Delta\rho^{\mathsf{b}} & \mathsf{b} \end{cases}$$



$$R_b^0 = \frac{\Gamma(Z \to b\bar{b})}{\Gamma(Z \to q\bar{q})} \qquad q = u, d, s, c, b$$



$$R_b = \frac{\sigma(e^+e^- \to b\bar{b})}{\sigma(e^+e^- \to \mathrm{had})}$$



$$R_b^0 = R_b + 0.0003$$

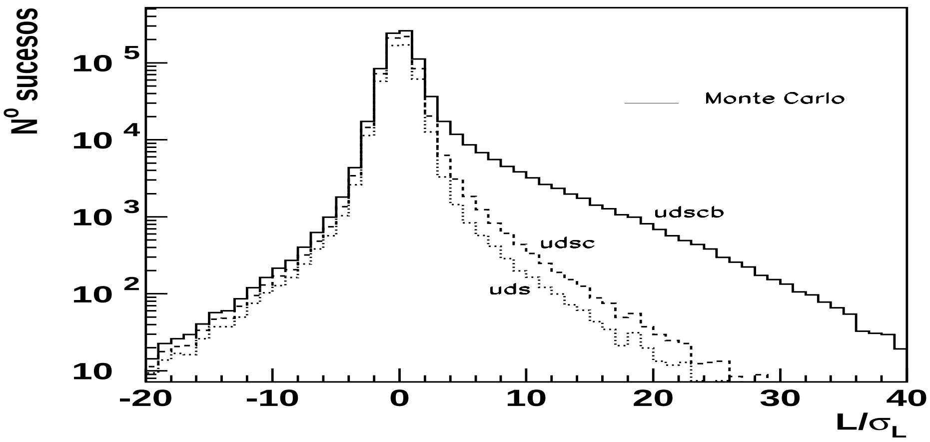
$$\sqrt{s} \sim M_Z$$

quarks b:

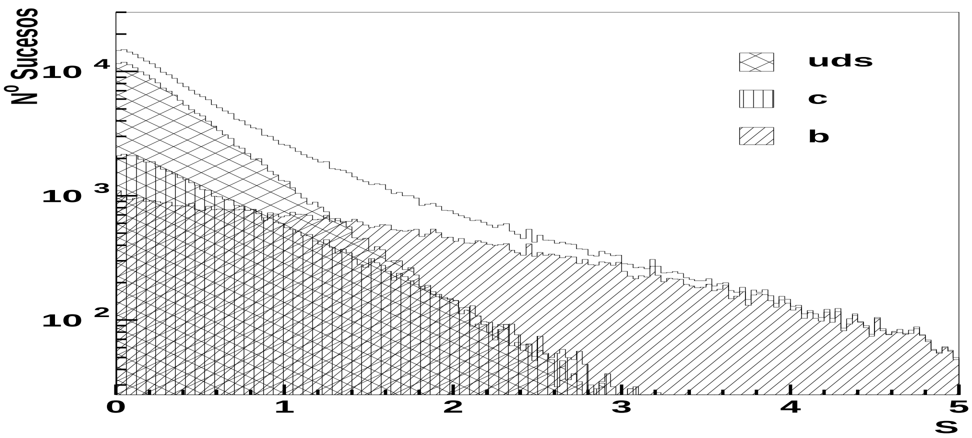
- **Vida media alta:** $\tau \sim 1.5\,\mathrm{ps} \Rightarrow l \sim 3\,\mathrm{mm}$ para $\sqrt{s} \sim M_Z$
- **Alta masa y fragmentación dura**

Tag de vértice

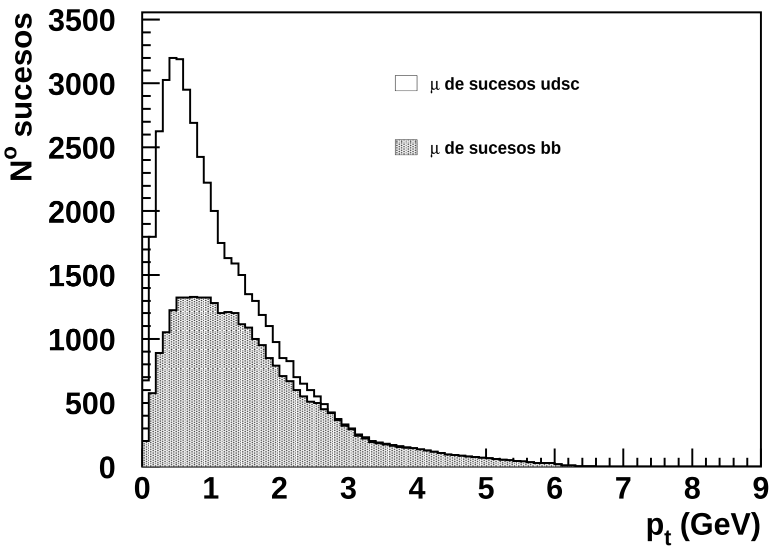
Longitud de desintegración



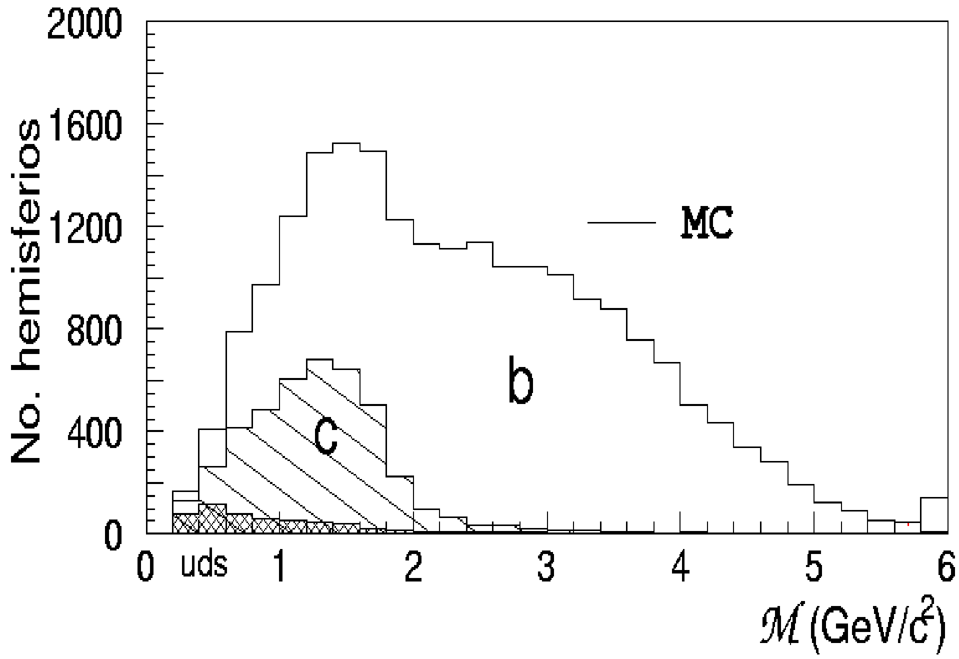
Parámetro de impacto

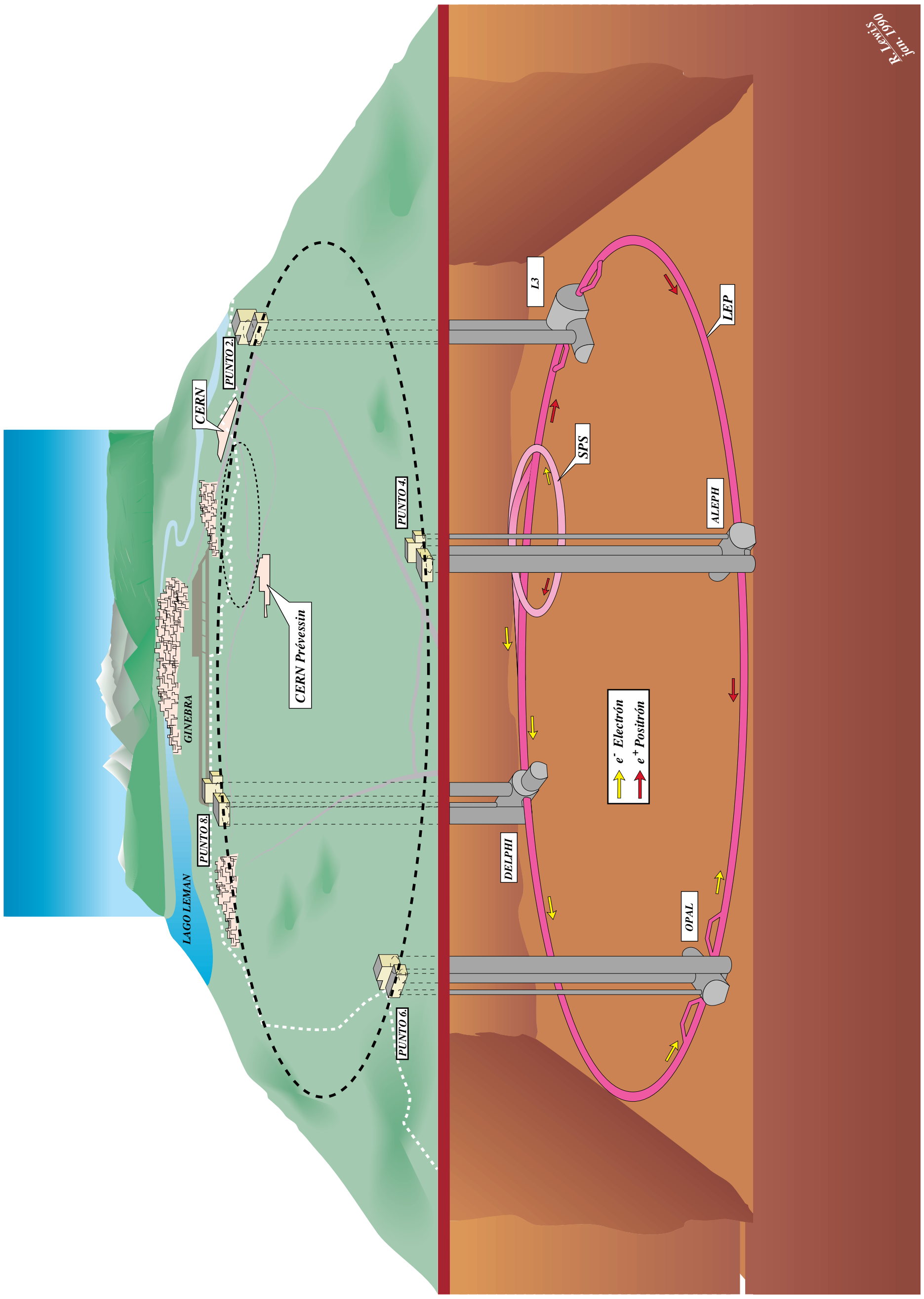


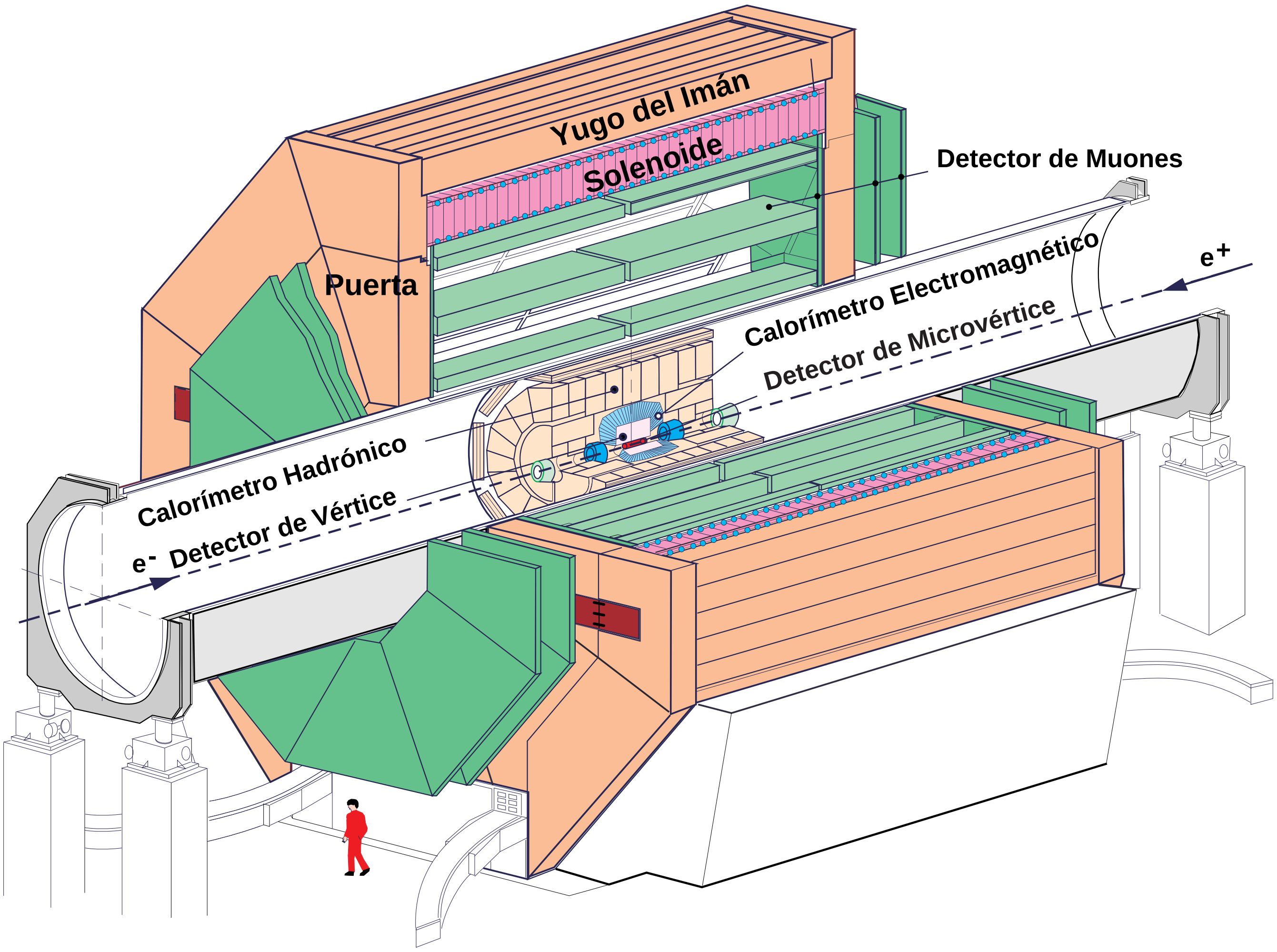
➡ *Tag* leptónico y topológico

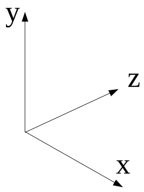


➡ *Tag* de masa




CERN
PUNTO 2
PUNTO 4
PUNTO 6
PUNTO 8
CERN Prévessin
GINEBRA
LAGO LEMAN
L3
LEP
SPS
ALEPH
DELPHI
OPAL
e^- Electrón
e^+ Positrón
R. Lewis
Jun. 1990





Volumen

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

Campo Magnético

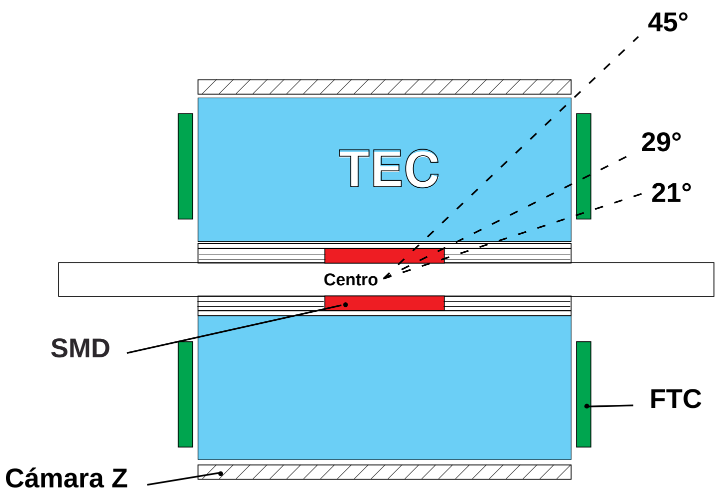
0.5 T

Medida precisa de

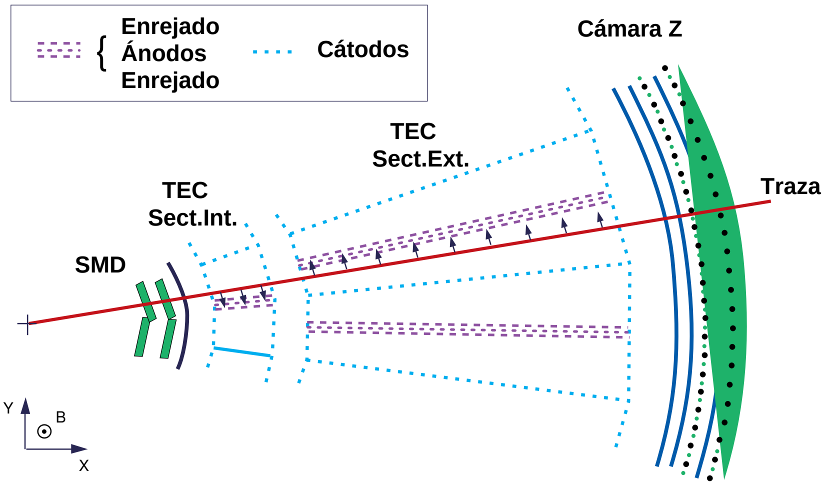
γ, e , μ

y jets.

El detector central

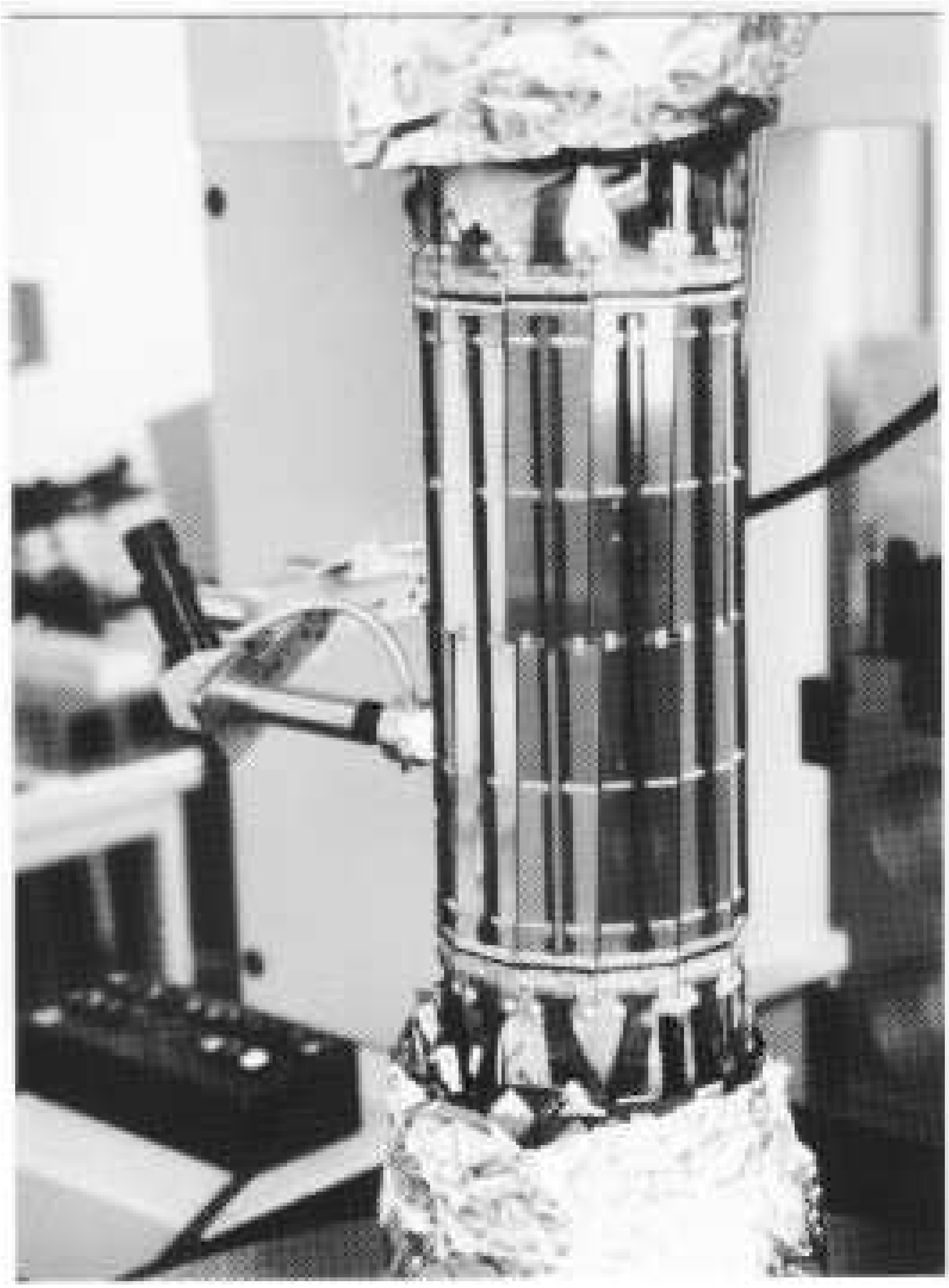


La TEC (*Time Expansion Chamber*)



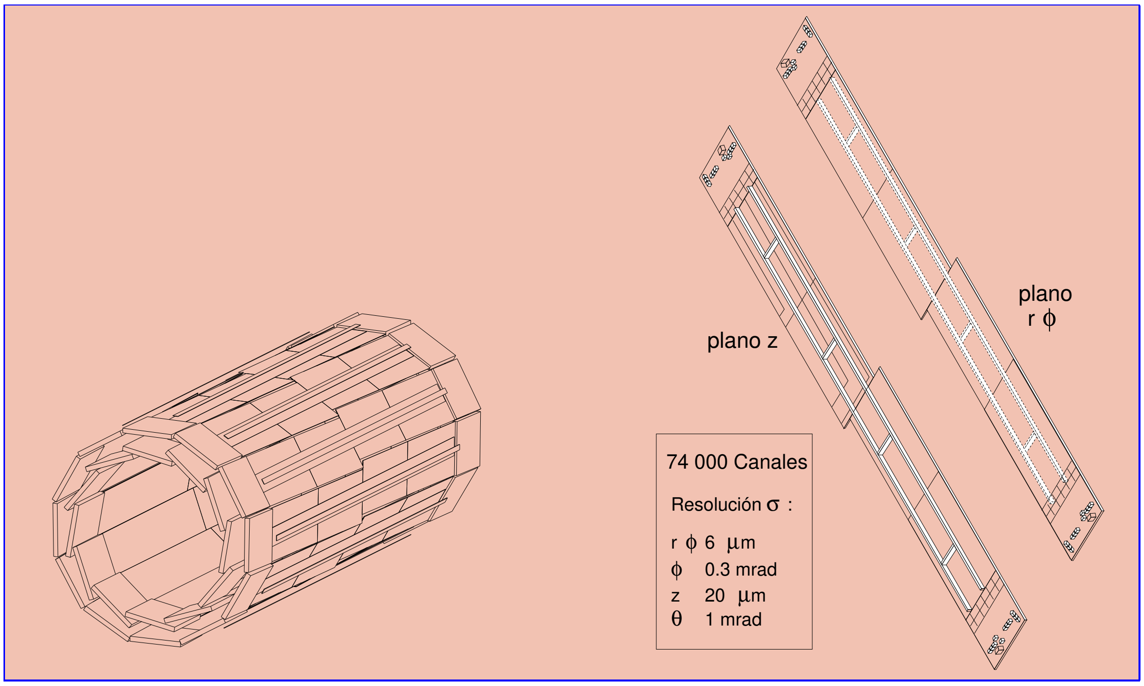
Resolución $r\varphi \sim 50\,\mu$m

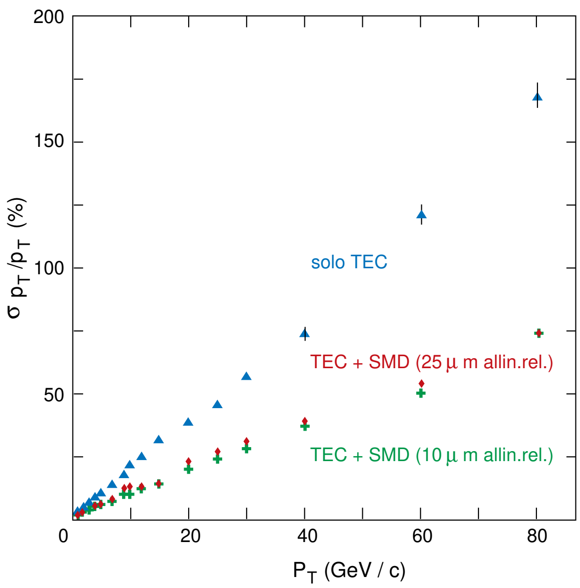
Las cámaras Z**: Resolución** $z \sim 300\,\mu$m

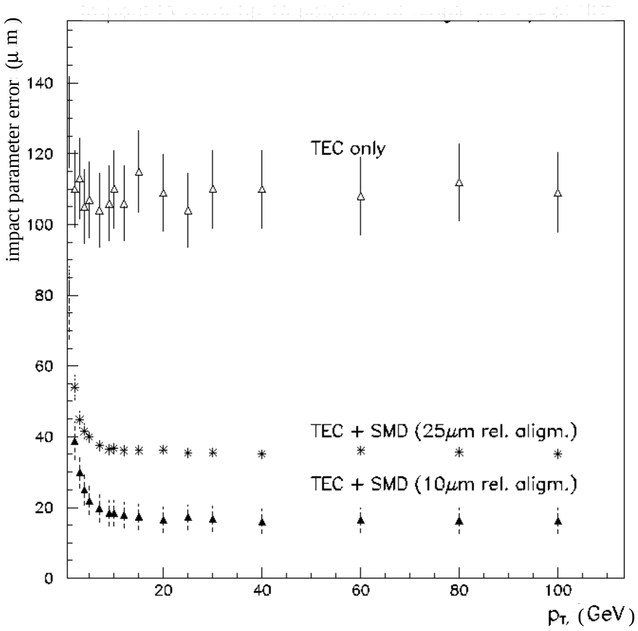


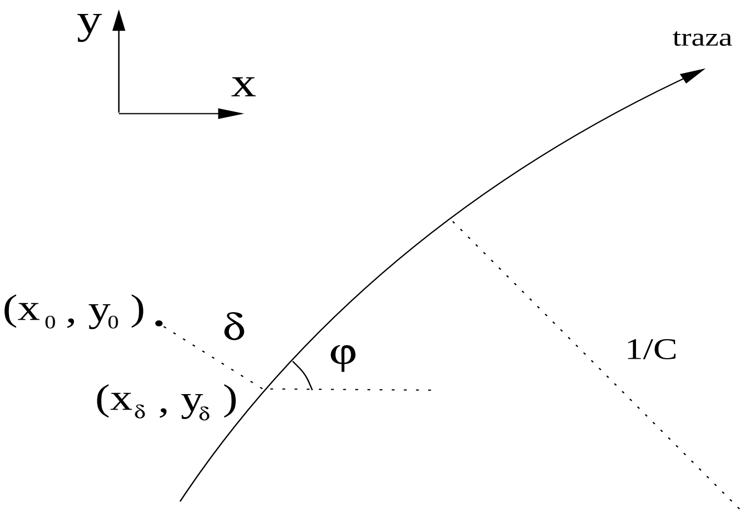
El detector central

El SMD (*Silicon Microstrip Detector*)









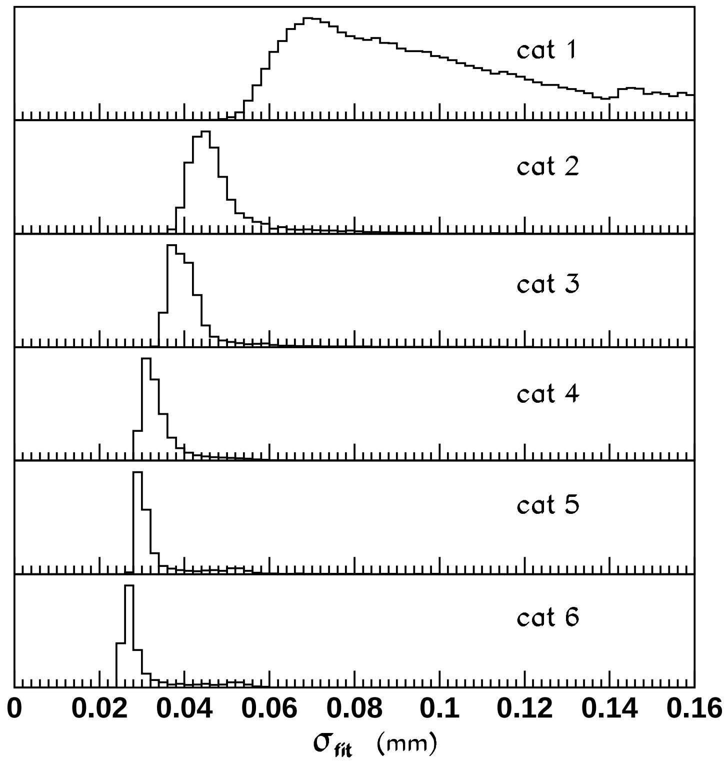
Parámetros de la traza en el plano $r\varphi$:

$C, \ \ \varphi, \ \ \delta, \sigma_C, \sigma_\varphi, \sigma_{fit}$

subcapa 1 del SMD	$\equiv$	cara interna de la capa	1 (z)
2	$\equiv$	externa	1 ($r\varphi$)
3	$\equiv$	interna	2 (z)
4	$\equiv$	externa	2 ($r\varphi$)

cat.	Nº *hits* $r\varphi$ subcapa 2	Nº *hits* z subcapa 3	Nº *hits* $r\varphi$ subcapa 4
1	0	-	0
2	0	1	1
3	1	0	1/0
4	1	1	1
5	2	0	1/0
6	2	1	1

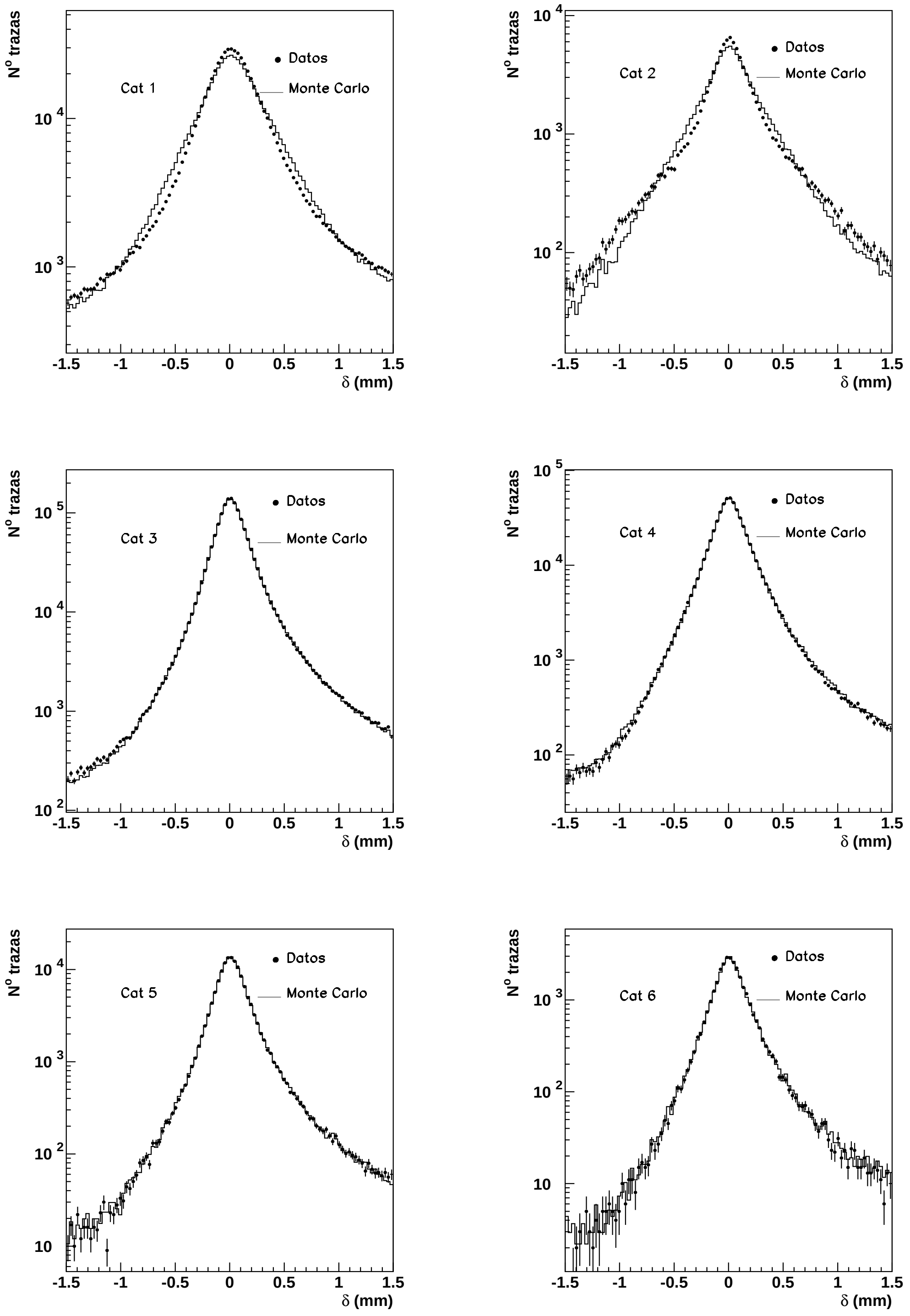
Reconstrucción de trazas



- $N_{hits} \geq 30$
- $Span \geq 40$
- $|p_t| \geq$ 0.2 **GeV**
- $\Delta\varphi \geq$**11 mrad**
- $\sigma_{fit} < \sigma_{cut}$

cat.	% de trazas (datos)	% de trazas (MC)
1	21.25	20.3
2	3.55	3.85
3	50.86	51.80
4	18.60	18.33
5	4.74	4.76
6	1.00	0.96

Distancia de máximo acercamiento: δ



Error en δ: σ_δ

$$\sigma_\delta^2 = \sigma_{ms}^2 + \sigma_{rp}^2 + \sigma_{fit}^2$$

- $\sigma_{ms} = \dfrac{k_i}{p_t\sqrt{\mathrm{sen}\theta_{tk}}}$

cat.	k_i(dat)	k_i(MC)
1	0.220	0.212
2	0.142	0.138
3	0.114	0.100
4	0.115	0.103
5	0.119	0.102
6	0.116	0.103

- $\sigma_{rp}^2 = [\mathrm{sen}\varphi\ \sigma_{xrp}]^2 + [\cos\varphi\ \sigma_{yrp}]^2$

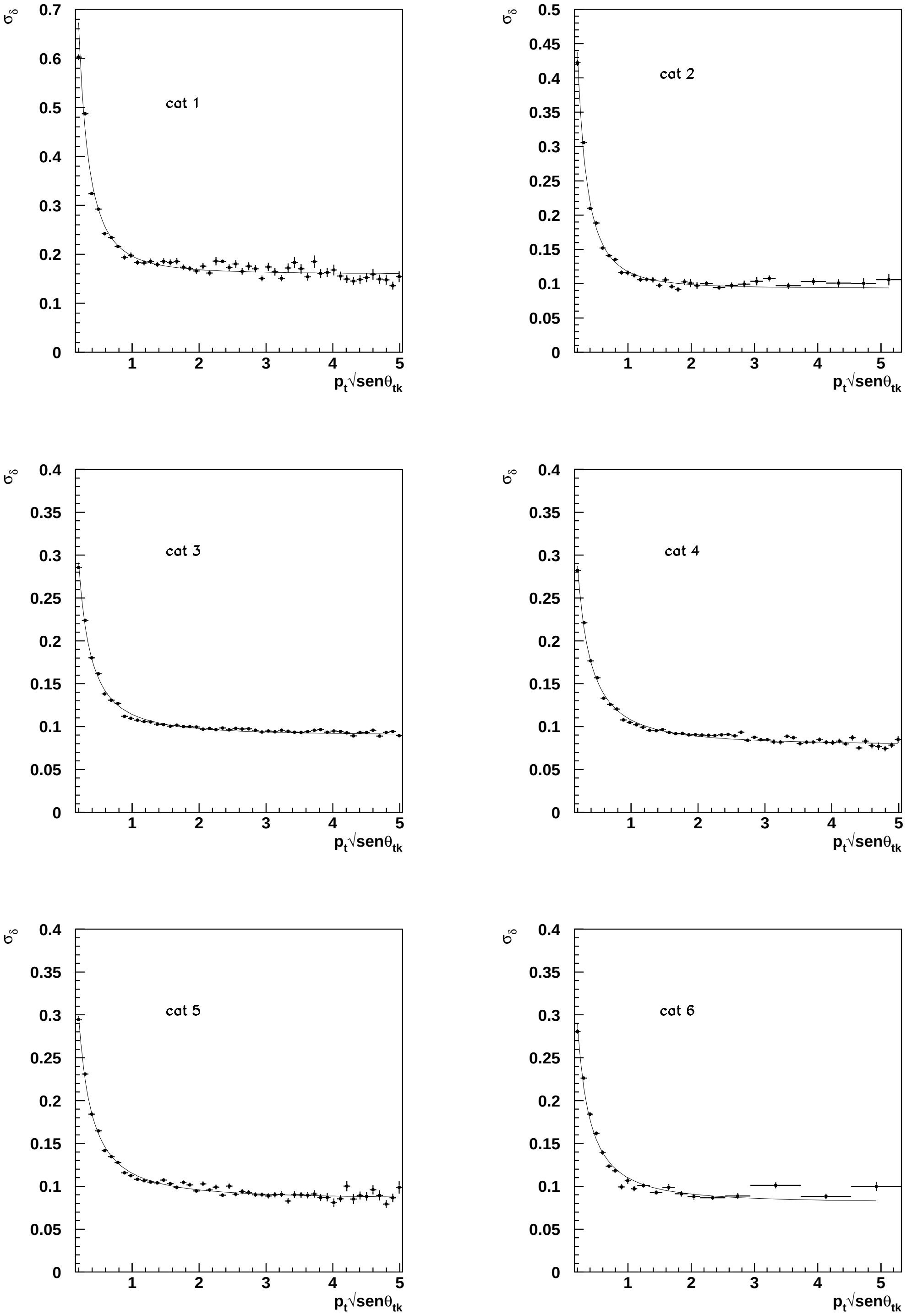
	σ_{xrp}(mm)	σ_{yrp}(mm)
Datos	0.110	0.021
Monte Carlo	0.120	0.020

- $\sigma_{fit} \;\Rightarrow\; \delta/\sqrt{\sigma_{fit}^2 + \sigma_{rp}^2} \sim N(0,1)$

cat.	f(dat)	f(MC)
1	1.8	1.6
2	1.0	1.0
3	0.94	0.92
4	0.93	0.93
5	0.96	0.92
6	0.91	0.93

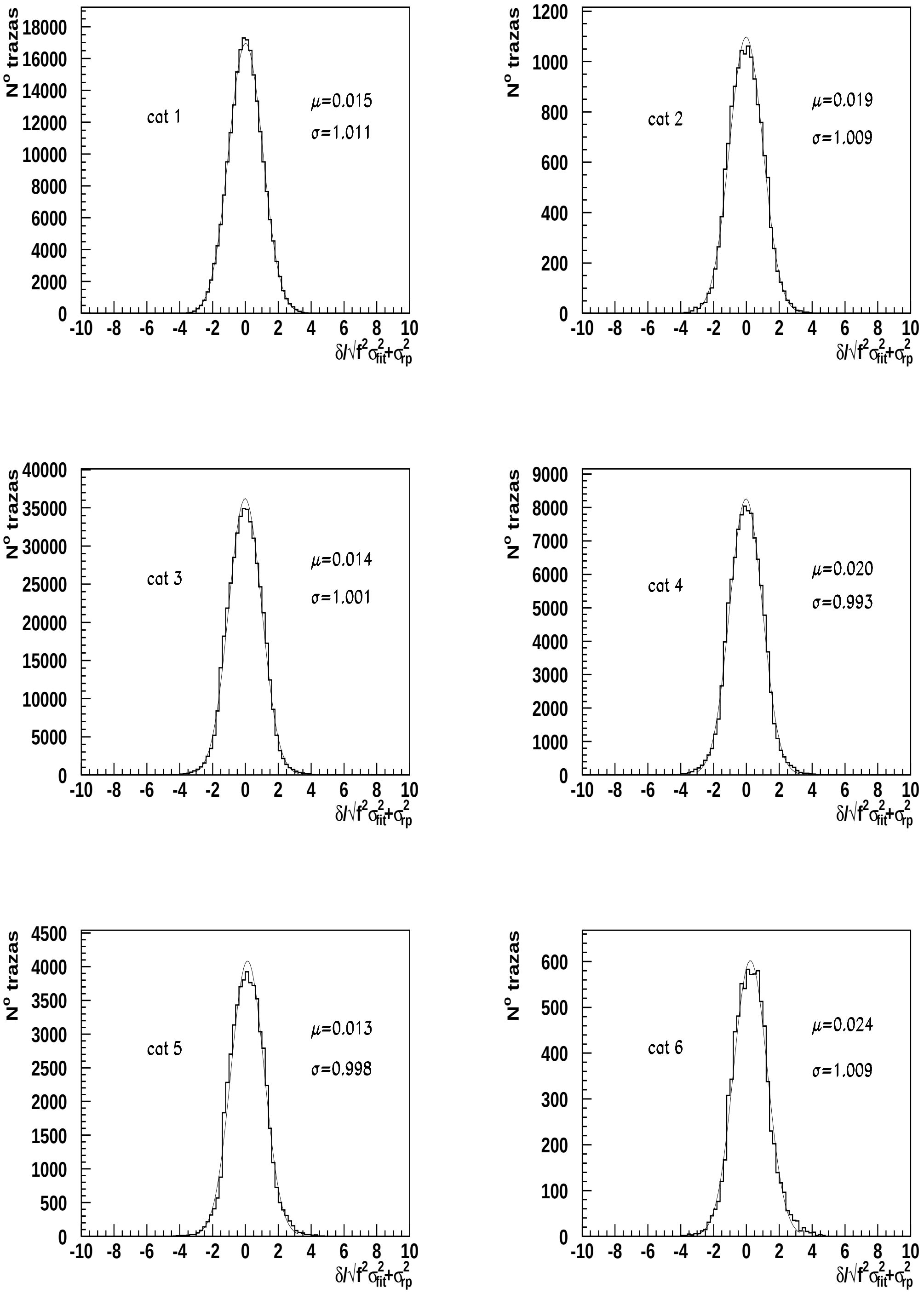
Reconstrucción de trazas

σ_δ vs $p_t\sqrt{\mathrm{sen}\theta_{tk}}$



Reconstrucción de trazas

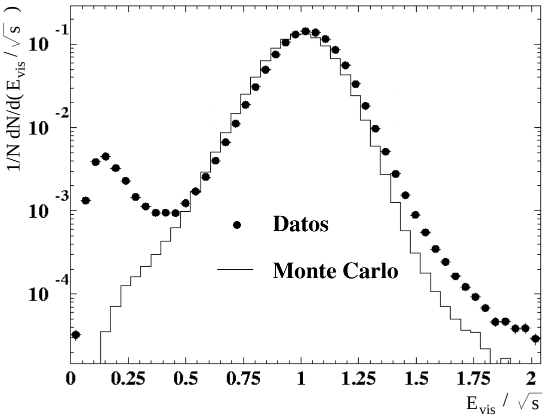
$$\delta/\sqrt{f^2\sigma_{fit}^2+\sigma_{rp}^2}$$

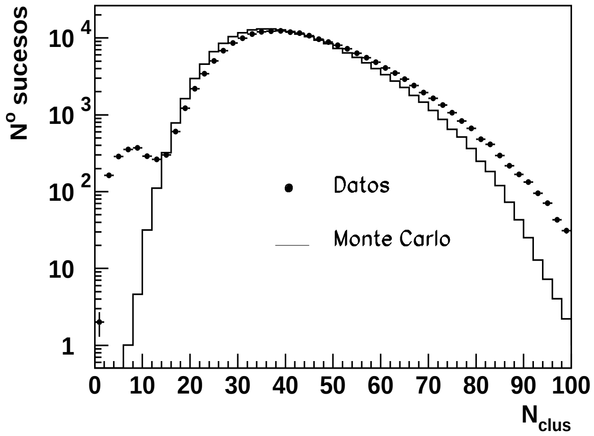


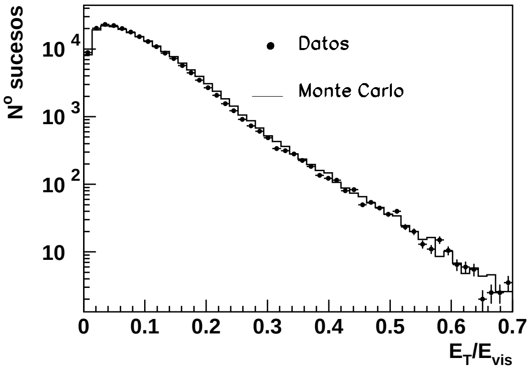
Selección hadrónica

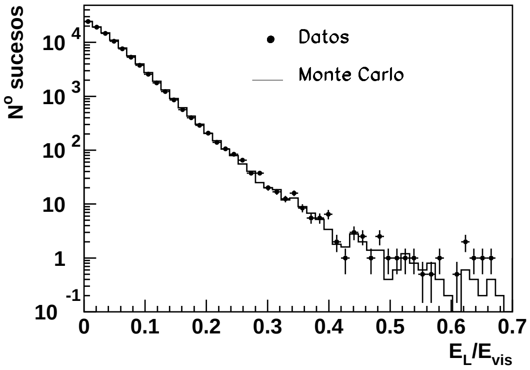
$|\cos\theta_{tr}| < 0.7$

- $0.5 \le \mathrm{E_{vis}}/\sqrt{s} \le 1.5$
- $\mathrm{N_{clus}} \ge 10$
- $\mathrm{E_T/E_{vis}} \le 0.5, \quad \mathrm{E_L/E_{vis}} \le 0.5$







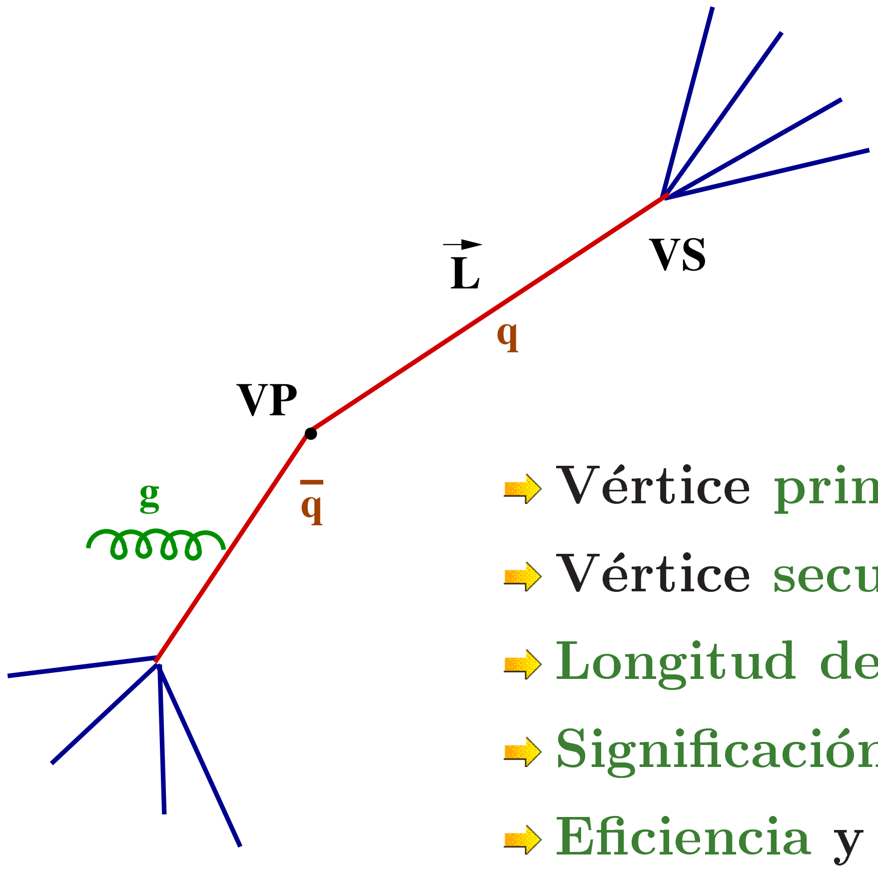


Sucesos hadrónicos seleccionados: 566282

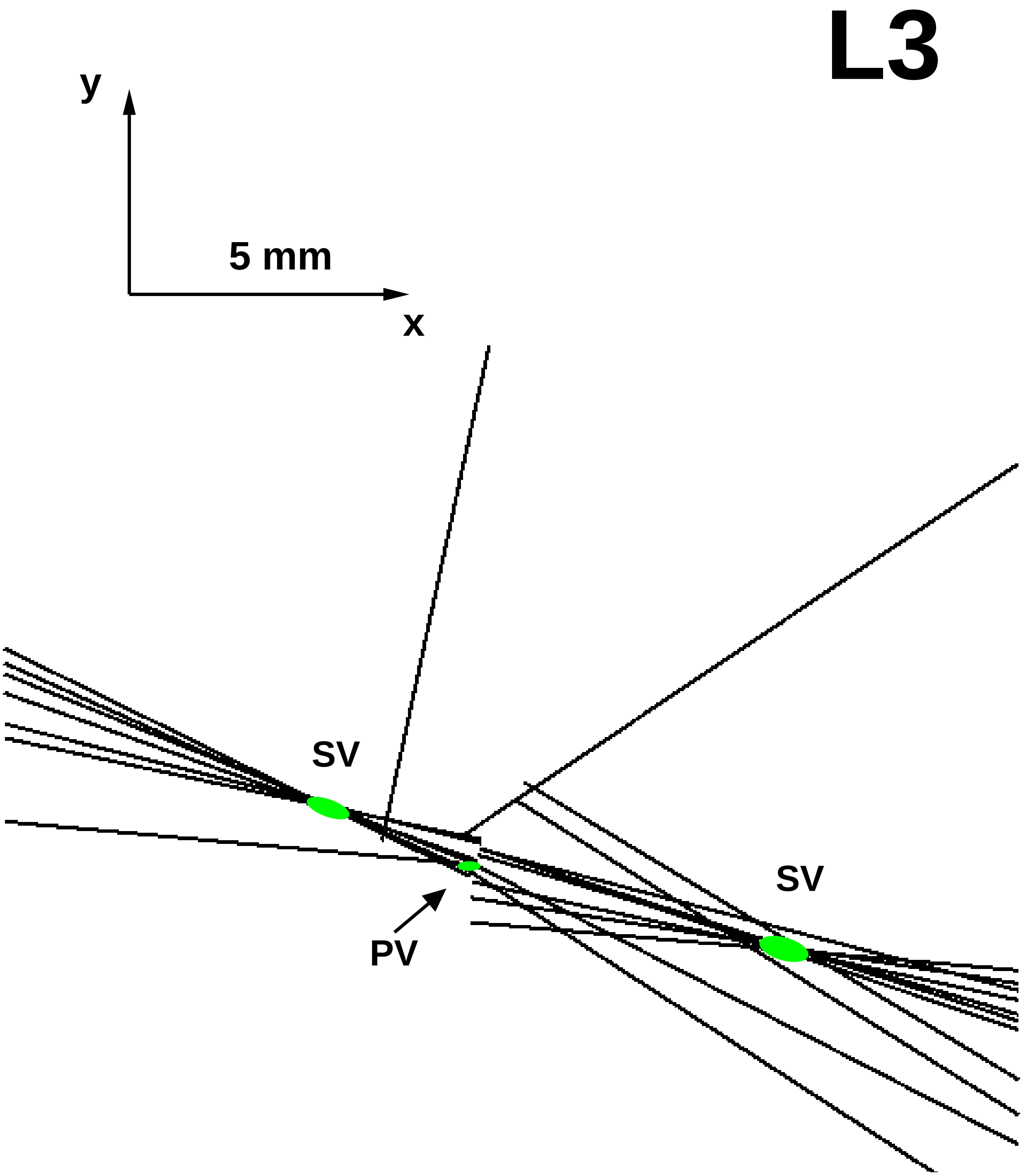
Contaminación: 0.15%

Eficiencia: 99%

Método de la Longitud de desintegración



- Vértice primario
- Vértice secundario
- Longitud desintegración
- Significación estadística
- Eficiencia y pureza


L3
y
5 mm
x
SV
SV
PV

Vértice Primario XY

- **Suceso a suceso**
- **Ligadura:**

  posición del haz en L3 cada 200 sucesos
- **Proceso Iterativo:**

  Trazas $\frac{\delta_{200ev}}{\sigma_\delta} \leq 5$

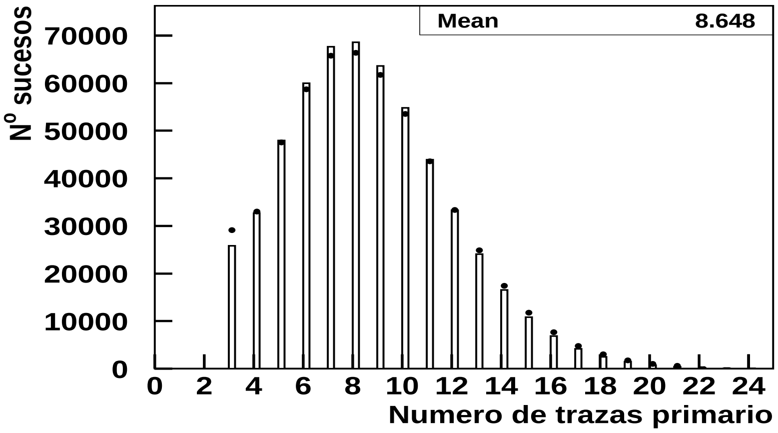
$$\mathbf{Q^2} = \sum_{\mathbf{i=1}}^{\mathbf{N}} \left(\frac{\delta_{\mathbf{i}}^{\prime}(\mathbf{x_p}, \mathbf{y_p})}{\sigma_{\mathbf{i}}} \right)^{\mathbf{2}} + \left(\frac{\mathbf{x_p} - \mathbf{x_{rp}}}{\sigma_{\mathbf{xrp}}} \right)^{\mathbf{2}} + \left(\frac{\mathbf{y_p} - \mathbf{y_{rp}}}{\sigma_{\mathbf{yrp}}} \right)^{\mathbf{2}}$$

  ➡ $P_{\chi^2}(Q^2 \leq Q^2_{min}) \geq 0.05$

  ➡ **3 trazas**
- **Eficiencia de reconstrucción:** $\geq 98\%$
- **Resolución** :$x \times y$

  $\approx$ **53×20** μm **para uds**

  $\approx$ **99×20** μm **para b**



Vértice Secundario XY

- **Para cada jet**
- **Proceso Iterativo:**

  Trazas $p_t > 0.5$ **GeV**

$$Q^2 = \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{\delta_i'(x_s, y_s)}{\sigma_i} \right)^2$$

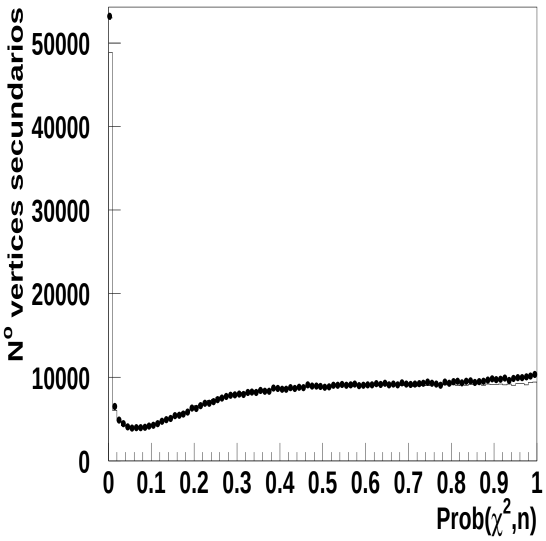
  ➡ $\frac{\delta}{\sigma_\delta} \leq 2$

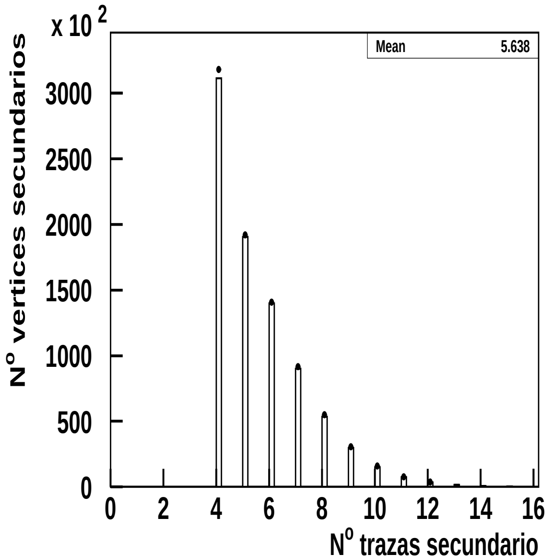
  ➡ **4 trazas**

- **Eficiencia de reconstrucción:** $\geq 93\%$

  $\approx 92\%$ **para uds**

  $\approx 96\%$ **para b**



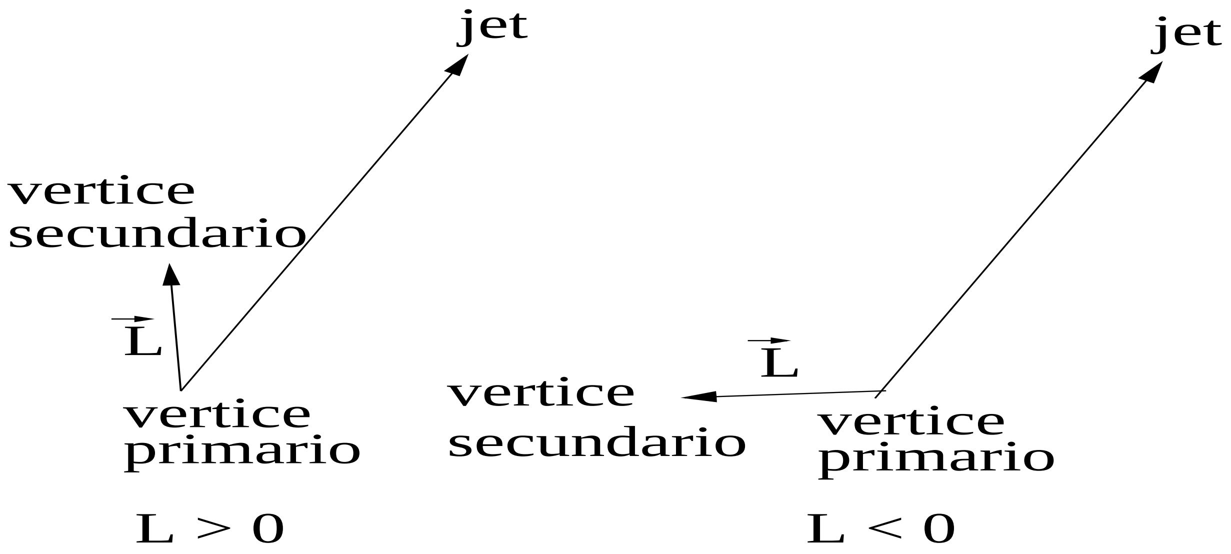


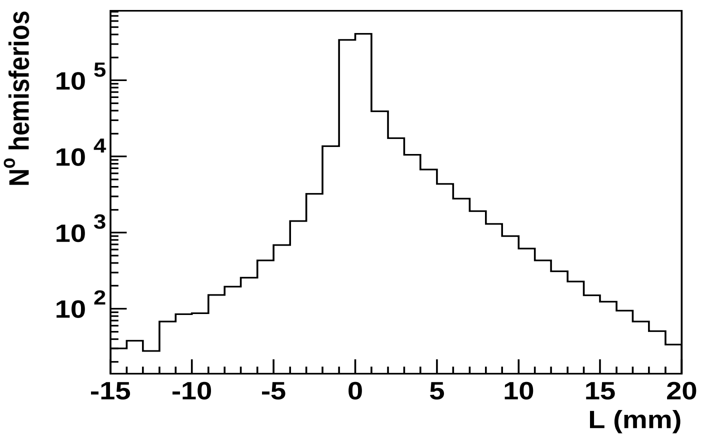
Longitud de desintegración

Longitud de desintegración≡ L

- distancia entre el vértice primario y el secundario
- Resolución detector ⇒ signo de L

$$\vec{L}.\vec{p}_{jet} > 0 \;\Rightarrow\; L > 0$$
$$\vec{L}.\vec{p}_{jet} < 0 \;\Rightarrow\; L < 0$$





Longitud de desintegración

Disminuir efectos de resolución

$$\underbrace{\hspace{5cm}}$$

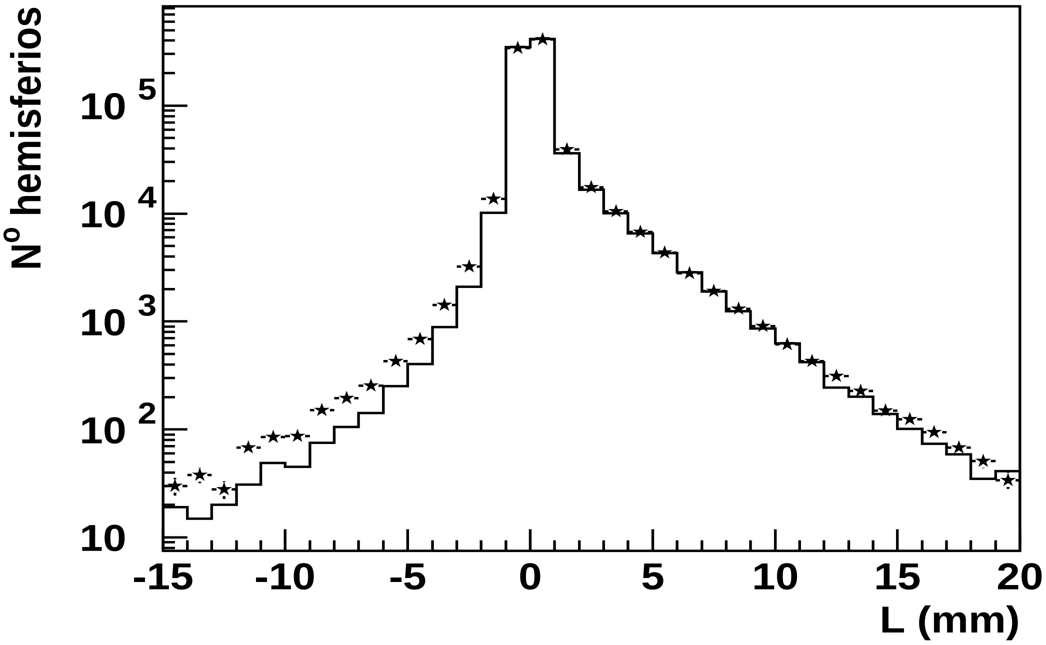
$$\Downarrow$$

Ligadura: $\vec{L}$ en la dirección del jet

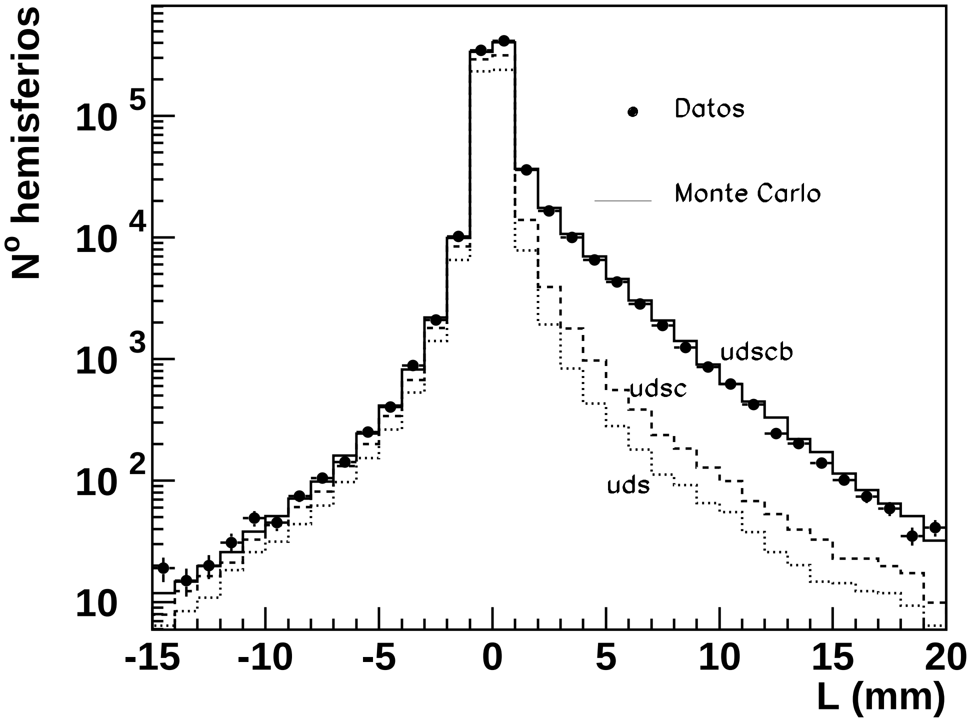
$$\underbrace{\hspace{5cm}}$$

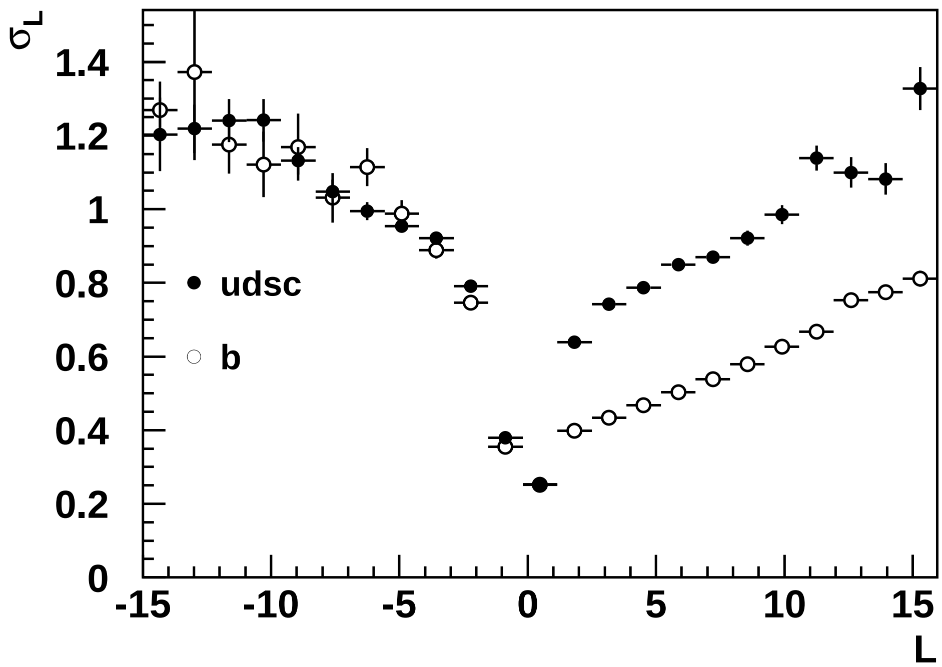
$$\Downarrow$$

Dirección del jet $\approx$ Dirección del quark



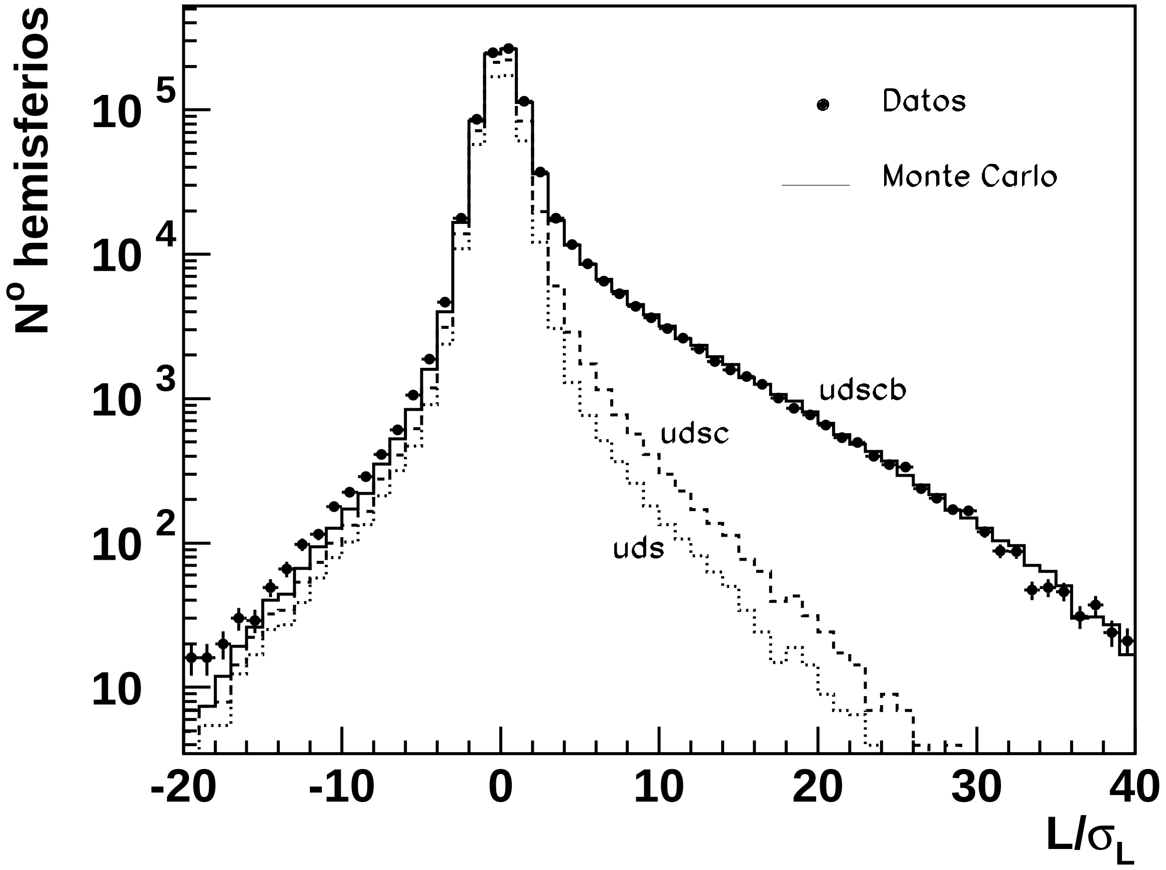
Longitud de desintegración





Significación estadística de la longitud de desintegración

$$S \equiv \frac{L}{\sigma_L}$$



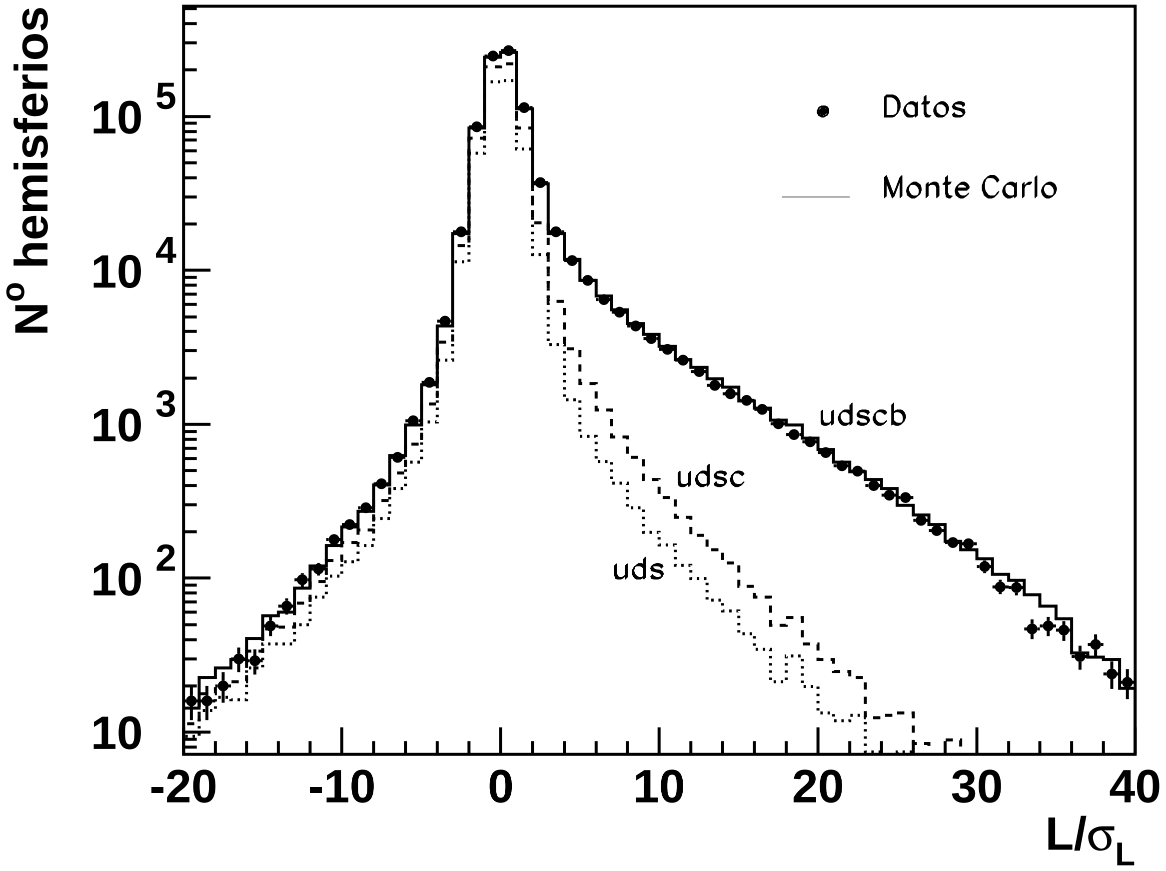
Efectos de resolución $\Rightarrow$ S$\neq$0 para quarks uds

Información vida media $\Rightarrow$ S>0 y grande

$\boxed{\textbf{Resolución diferente en datos y Monte Carlo}}$

Siginificación estadística

Mejorar acuerdo entre datos y Monte Carlo $\Rightarrow$ Distorsión del Monte Carlo



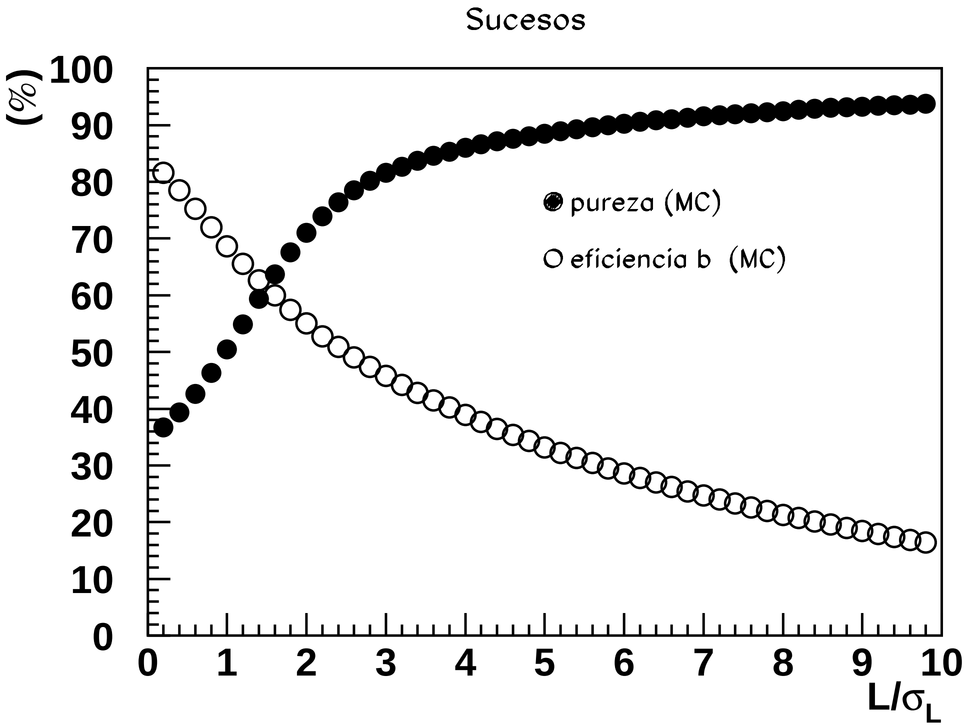
Resolución simulada $\approx$ Resolución real

Si $S > S_{cut}$ $\Rightarrow$ hemisferio seleccionado

Eficiencia y Pureza

$$\textbf{Eficiencia} = \frac{\text{N}^{\underline{\text{o}}}\ \text{sucesos}\ \mathsf{b\bar{b}}\ \text{seleccionados}}{\text{N}^{\underline{\text{o}}}\ \text{sucesos}\ \mathsf{b\bar{b}}}$$

$$\textbf{Pureza} = \frac{\text{N}^{\underline{\text{o}}}\ \text{sucesos}\ \mathsf{b\bar{b}}\ \text{seleccionados}}{\text{N}^{\underline{\text{o}}}\ \text{sucesos}\ \text{seleccionados}}$$



$$\mathbf{S_{cut}} = 4 \ \Rightarrow \quad \begin{array}{lcl} \epsilon^{\mathsf{b}}_{ev} & \sim & 40\% \\ P_b & \sim & 85\% \end{array}$$

Determinación de R_{b}

Minimiza la incertidumbre en la simulación de los parámetros del quark b

$$\mathrm{N}_t = 2\ \mathrm{N}_{had}\left[R_{\mathrm{b}}\epsilon^{\mathrm{b}} + R_{\mathrm{c}}\epsilon^{\mathrm{c}} + (1 - R_{\mathrm{b}} - R_{\mathrm{c}})\epsilon^{\mathrm{uds}}\right]$$

$$\mathrm{N}_{tt} = \mathrm{N}_{had}\left[R_b(\epsilon^{\mathrm{b}})^2 C_{\mathrm{b}} + R_{\mathrm{c}}(\epsilon^{\mathrm{c}})^2 + (1 - R_{\mathrm{b}} - R_{\mathrm{c}})(\epsilon^{\mathrm{uds}})^2\right]$$

- **Datos:**

  N_{had} = Nº de hadrones seleccionados

  N_t = Nº hemisferios seleccionados

  N_{tt} = Nº sucesos con los dos hemisferios seleccionados

- **Monte Carlo:**

  ϵ^{uds}, ϵ^{c} = probabilidad de seleccionar quarks uds, c en un hemisferio

  C_{b} = factor de corrección en sucesos $\mathrm{b\bar{b}}$

- **Modelo Standard:**

  R_{c}=0.172 para $m_t \sim 175$ GeV

$$\boxed{R_{\mathrm{b}},\ \epsilon^{\mathrm{b}} \text{ de los Datos}}$$

Factor de corrección

En una muestra de sucesos $\mathrm{b\bar{b}}$:

- Probabilidad de seleccionar **sólo un hemisferio:** ϵ^{b}
- Probabilidad de seleccionar los **dos hemisferios:** $\epsilon^{\mathrm{b}}_{dt}$

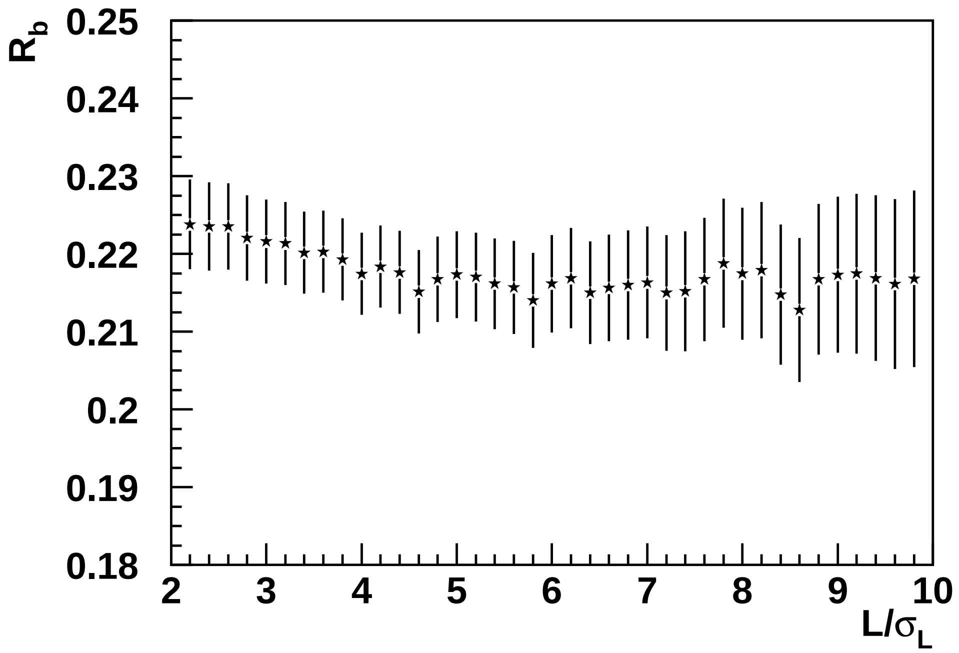
$$\epsilon^{\mathrm{b}}_{dt} = (C_{\mathrm{b}}\epsilon^{\mathrm{b}}) \cdot \epsilon^{\mathrm{b}} \implies C_{\mathrm{b}} = \frac{\epsilon^{\mathrm{b}}_{dt}}{(\epsilon^{\mathrm{b}})^2}$$

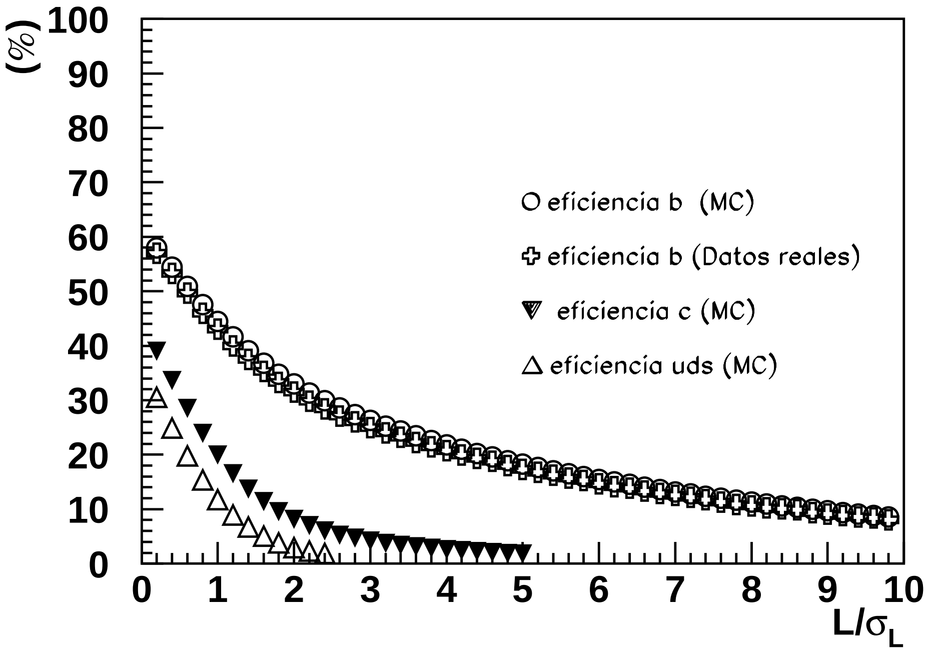
$$C_{\mathrm{b}} = 1 \Rightarrow \epsilon^{\mathrm{b}}_{dt} = (\epsilon^{\mathrm{b}})^2$$

Principales fuentes de correlación:

- Detector : inhomogeneidades del detector en θ y φ
- Vértice : desplazamiento en la reconstrucción del vértice primario
- Física : emisión de gluones

Utilizando *sólo* vértices con S > 0





Diferencia ϵ^b (datos) ϵ^b (MC) <5% relativo

Fuentes de error en la medida de R_b:

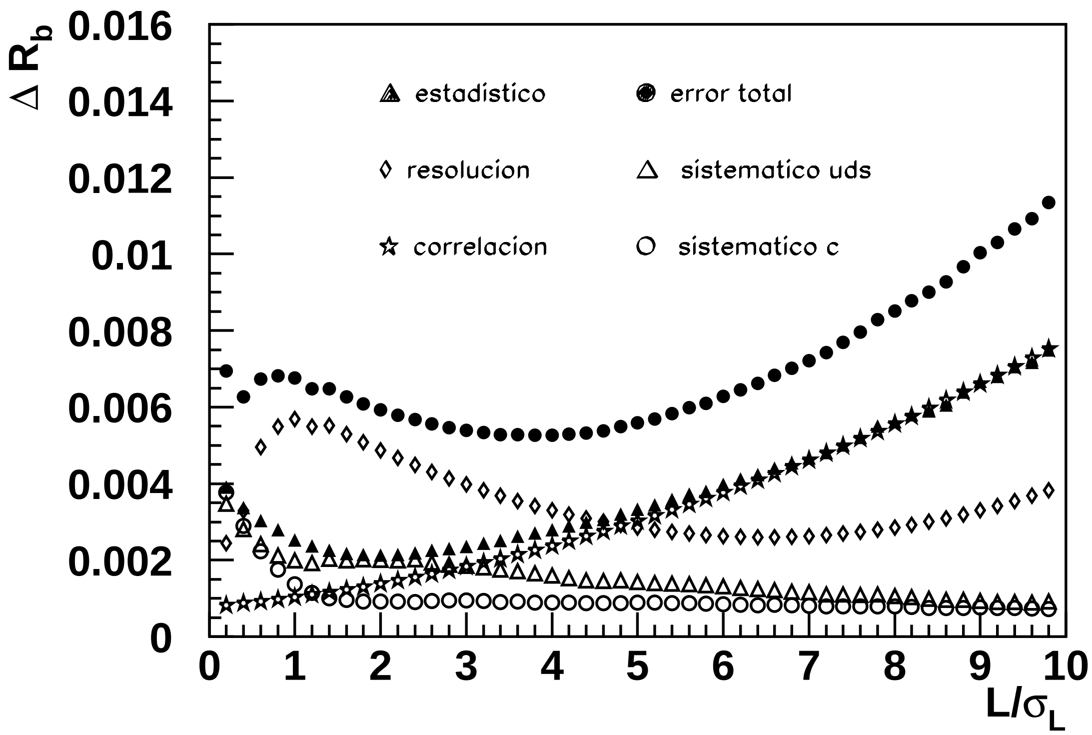
- Error estadístico: dominado por $\mathbf{N_{tt}}$
- Errores sistemáticos:
  - Eficiencia ϵ^c
    - Parámetros del quark c
      - Parámetro de fragmentación
      - Fracción de D^+, D_s y Λ_c
      - Multiplicidad del D
      - Vida media had. con encanto
      - Fracción de *gluon splitting* ($g \to \mathrm{c\bar{c}}$ y $g \to \mathrm{b\bar{b}}$)
  - Eficiencia ϵ^uds
    - Parámetros de los quarks uds
      - Fracción de K^0 y Λ
      - Fracción de *gluon splitting* ($g \to \mathrm{c\bar{c}}$ y $g \to \mathrm{b\bar{b}}$)

Errores en R_b

- **Factor corrección, C_b:**
  - **Inhomogeneidades del detector**
  - **Emisión de gluones**
  - **Reconstrucción vértice primario**
  - **Multiplicidad desintegración de hadrones B**
  - **Parámetro de fragmentación del quark b**
- **Resolución del detector en la reconstrucción de trazas.**
  - **variación de la resolución en** $\delta \sim 15\%$
- **Error debido a R_c**

$$\Delta R_\mathsf{b} = \left(\frac{\partial R_\mathsf{b}}{\partial R_\mathsf{c}}\right)(R_\mathsf{c} - 0.172)$$

Todos los parámetros del MC se han ajustado de acuerdo con las recomendaciones de LEP HF '96.



Error total mínimo ⇒ S=4

Pureza de sucesos $b\bar{b}$ $= 85\%$

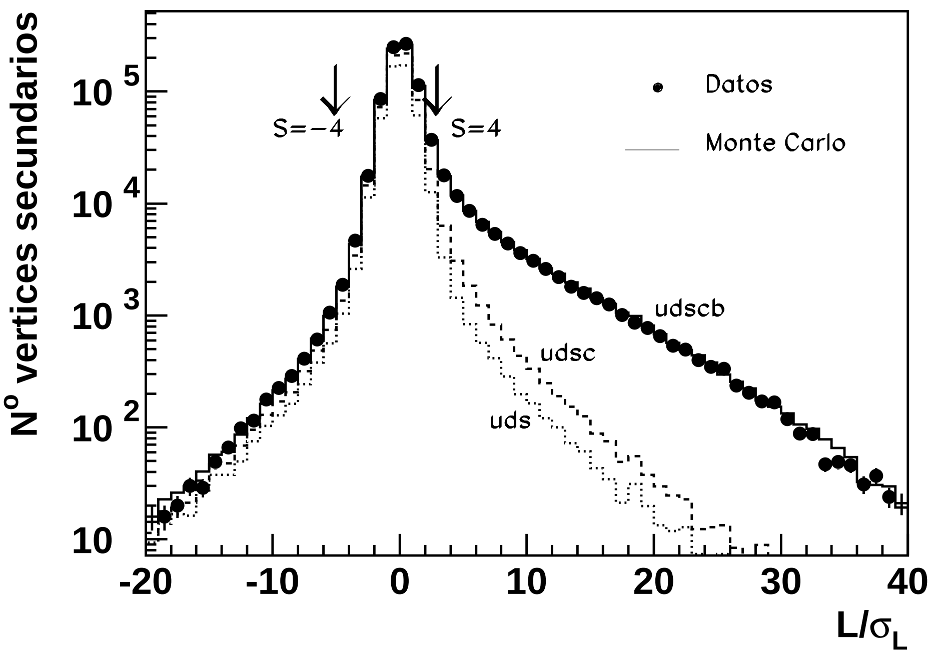
Fuente de error	ΔR_b
c	.09%
uds	.17%
Correlación	.22%
Resolución del detector	.34%
Error total	.45%

Problemas en la resolución del detector $\Rightarrow$ aumentan o disminuyen el número de hemisferios con S>0 y S<0 en la misma cantidad

$\Downarrow$

su diferencia es prácticamente insensible a estos efectos

Vértices con S<0 $\Rightarrow$ controlan la resolución



$\mathbf{N_v}$ =Nº hemisferios con $S > 0$; $S > S_{cut}$

$\mathbf{N_{\overline{v}}}$ =Nº hemisferios con $S < 0$; $|S| > S_{cut}$

$\mathbf{N_{vv}}$ =Nº sucesos / dos hemisferios $S > 0$; $S > S_{cut}$

$\mathbf{N_{\overline{vv}}}$ =Nº sucesos / dos hemisferios $S < 0$; $|S| > S_{cut}$

$\mathbf{N_{v\overline{v}}}$ =Nº sucesos / un hemisferio $S < 0$ el otro $S > 0$; $|S| > S_{cut}$

Sustituyendo:

$$\begin{aligned} \mathbf{N_t} &\rightarrow \mathbf{N_v} - \mathbf{N_{\overline{v}}} \\ \mathbf{N_{tt}} &\rightarrow \mathbf{N_{vv}} + \mathbf{N_{\overline{vv}}} - \mathbf{N_{v\overline{v}}} \\ \epsilon^{b} &\rightarrow \epsilon^{b}_{v} - \epsilon^{b}_{\overline{v}} \\ \epsilon^{c} &\rightarrow \epsilon^{c}_{v} - \epsilon^{c}_{\overline{v}} \\ \epsilon^{uds} &\rightarrow \epsilon^{uds}_{v} - \epsilon^{uds}_{\overline{v}} \end{aligned}$$

$$\mathbf{v} \Rightarrow \mathbf{S > 0}$$

$$\overline{\mathbf{v}} \Rightarrow \mathbf{S < 0}$$

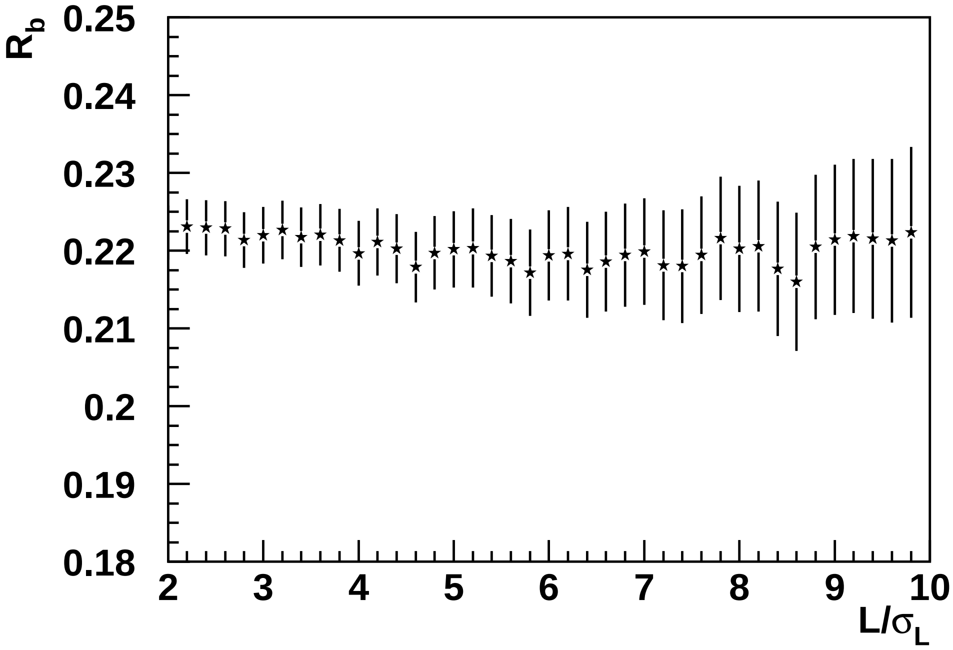
en las ec's del *Double Tag* $\Rightarrow$ ec's *Folded Double Tag*

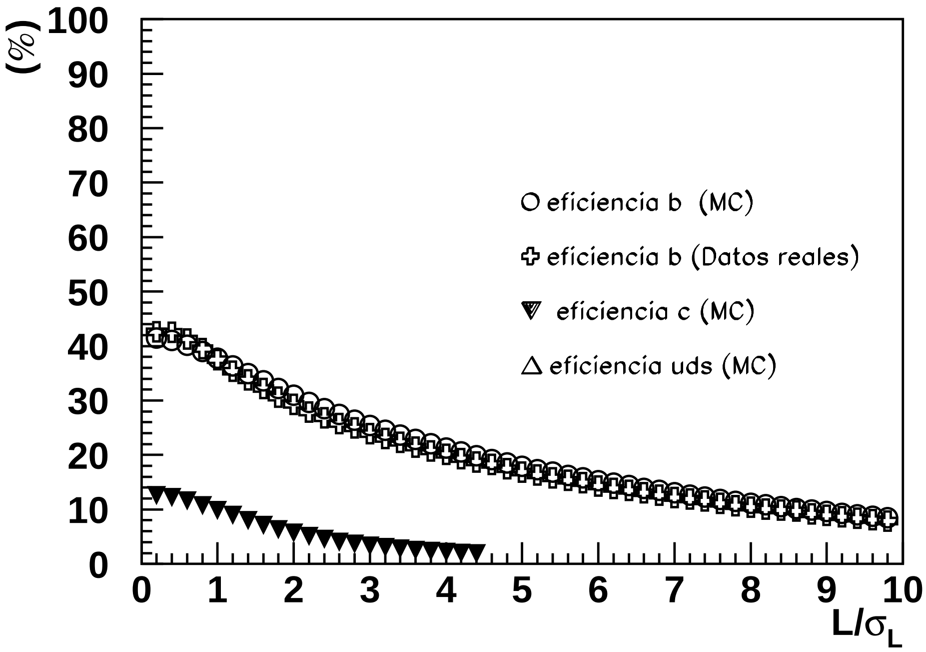
$$\Downarrow$$

$$\boxed{R_{b},\ \epsilon^{b}_{v} - \epsilon^{b}_{\overline{v}} \ \text{de los Datos}}$$

$$\epsilon^{b}_{v} \gg \epsilon^{b}_{\overline{v}} \quad \epsilon^{c}_{v} \approx \epsilon^{c}_{\overline{v}} \quad \epsilon^{uds}_{v} \approx \epsilon^{uds}_{\overline{v}}$$

Utilizando vértices con S > 0 y S < 0





Errores sistemáticos en R_b para $|S| > 4$:

Fuente de error	ΔR_b
c	.09%
uds	.12%
Correlación	.20%
Resolución del detector	.03%
Error total	.27%

Muestra utilizada: 566.282 sucesos hadrónicos recogidos en L3 durante 1994.

Folded Double Tag

$$R_b^0 = 0.2196 \pm 0.0029(stat) \pm 0.0027(sist)$$
$$\pm 0.0086 \times (R_c - 0.172)$$

$$\epsilon_v^b - \epsilon_{\overline{v}}^b = 20.10 \pm 0.26(stad) \pm 0.34(syst)\%$$

C_b	$\epsilon_v^c - \epsilon_{\overline{v}}^c$	$\epsilon_v^{uds} - \epsilon_{\overline{v}}^{uds}$
0.9896	2.15%	0.21%

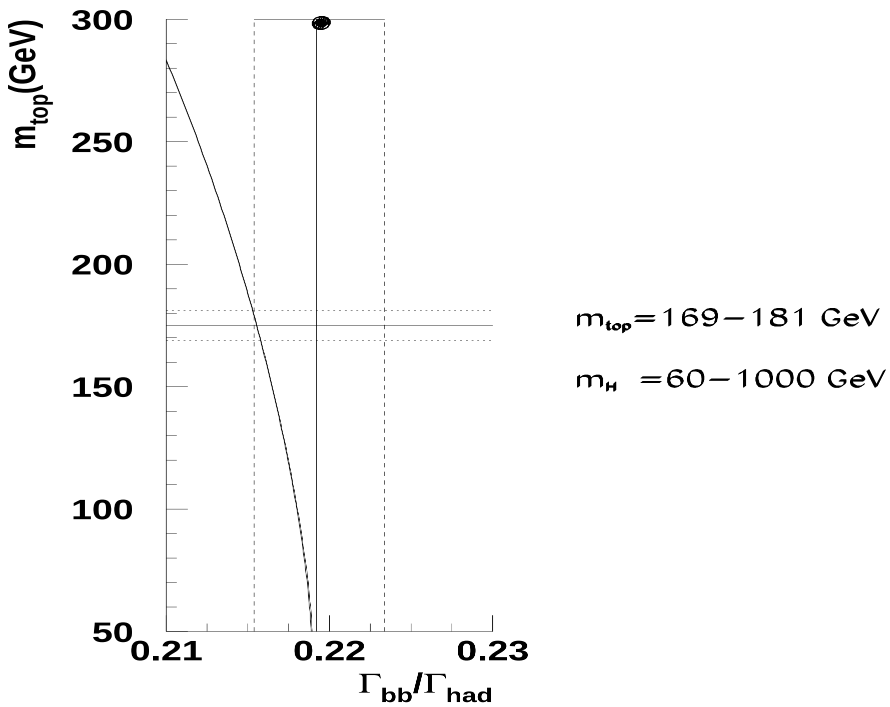
Conclusiones

- Utilizando vértices con S<0 se controlan efectos de resolución del detector.
- Primera medida de R_b en L3 utilizando el método de la longitud de desintegración:

Folded Double Tag

$$R_b^0 = 0.2196 \pm 0.0029(stat) \pm 0.0027(sist)$$
$$\pm 0.0086 \times (R_c - 0.172)$$

- Consistente con la predicción del Modelo Standard para el valor medido de m_t



Otras medidas de R_b^0

Experimento	Valor de R_b^0	Método
ALEPH	$\mathbf{0.2158 \pm 0.0009 \pm 0.0011}$	Multi. Tag
DELPHI	$\mathbf{0.2164 \pm 0.0008 \pm 0.0009}$	Multi. Tag
L3	$\mathbf{0.2176 \pm 0.0015 \pm 0.0026}$	Par. Imp. +Lepton Tag
OPAL	$\mathbf{0.2175 \pm 0.0014 \pm 0.0015}$	Multi. Tag
SLD	$\mathbf{0.2124 \pm 0.0024 \pm 0.0017}$	Multi Tag

Método Folded Double Tag

Experimento	Valor de R_b^0	Método
DELPHI	$\mathbf{0.2176 \pm 0.0028 \pm 0.0027}$	Long. Des.
OPAL	$\mathbf{0.2190 \pm 0.0014 \pm 0.0021}$	Long. Des.+Lepton Tag