Test de la estructura gauge

de QCD

a las energías de LEP

Jorge Casaus Armentano
Madrid 1998

Índice

- Introducción
- Fundamentos teóricos
- Dispositivo experimental
- Calibración de la energía en los sucesos hadrónicos
- Medida de los factores de color de QCD
- Conclusiones

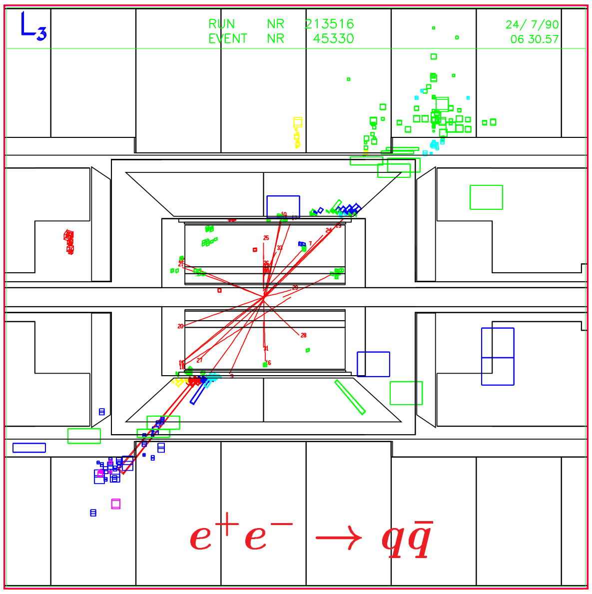
Introducción

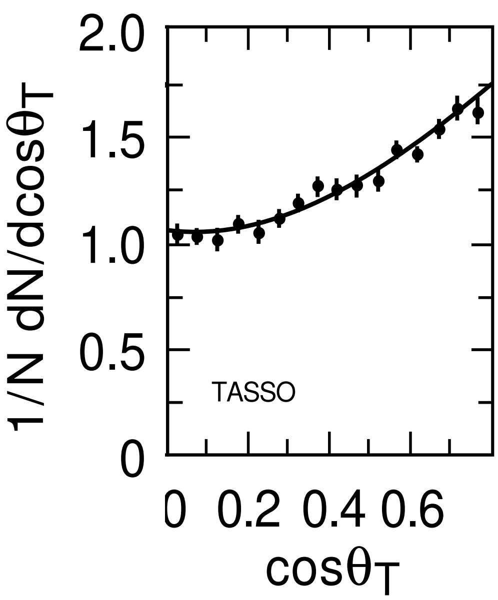
- Las colisiones e^+e^- proporcionan un campo excelente para el estudio de la física de hadrones

- QCD describe las interacciones entre los constituyentes de los hadrones (quarks y gluones)

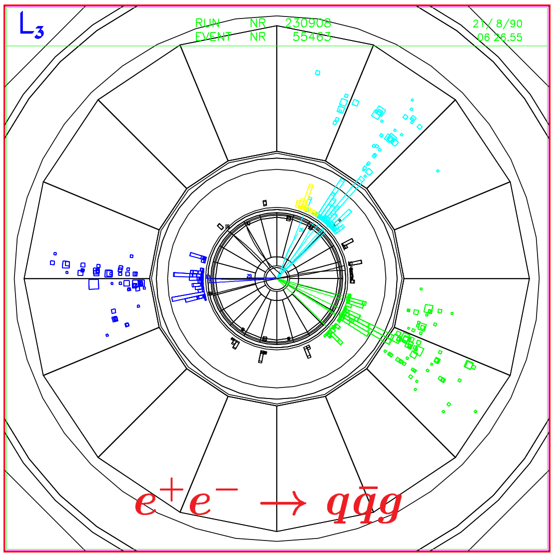
- El estudio del proceso $e^+e^- \rightarrow$ hadrones permite verificar las propiedades fundamentales de QCD como teoría de campos

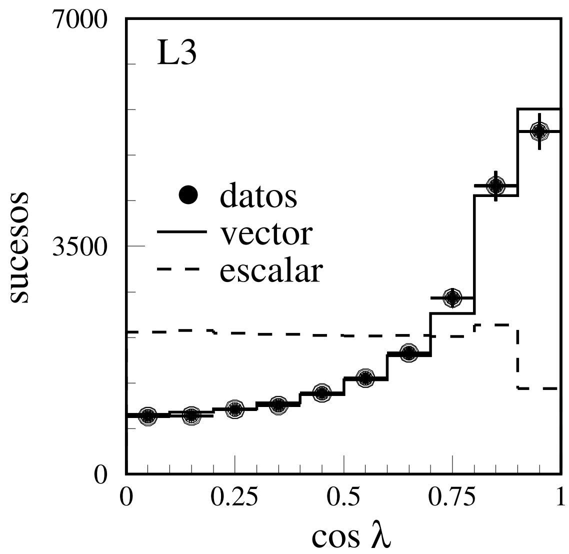
1. Los quarks son partículas de spin 1/2



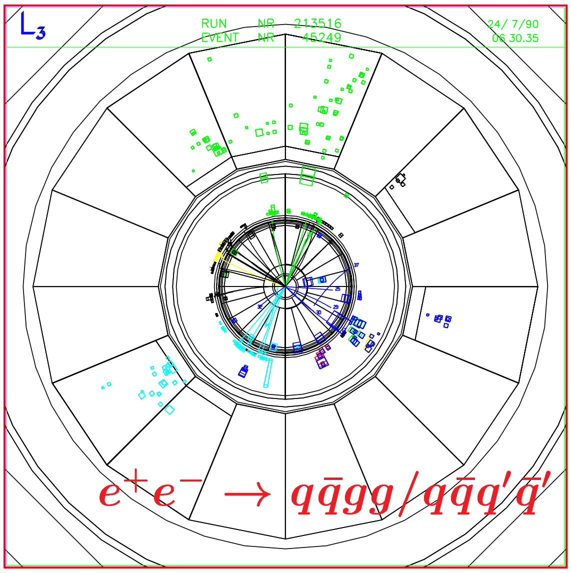


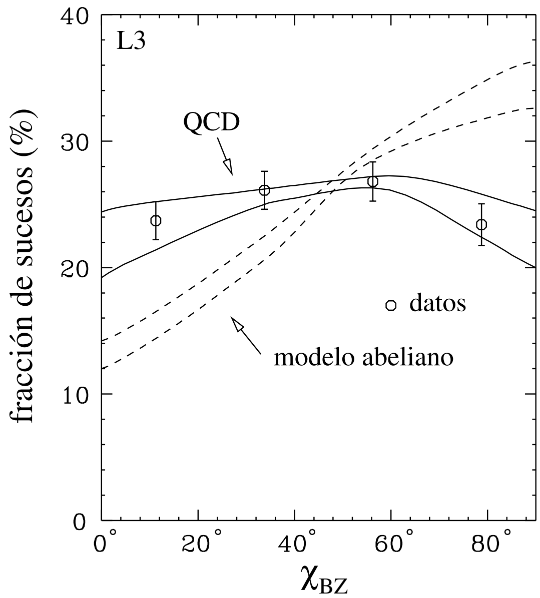
2. Los gluones son partículas de spin 1





3. Existe el acoplo entre gluones





- Confrontación con un modelo abeliano
- Medida de los acoplos entre quarks y gluones

Fundamentos teóricos

- Las interacciones entre partículas elementales se describen mediante teorías cuánticas de campos
- El Modelo Standard:

  Descripción conjunta de las interacciones electromagnética, débil y fuerte

  - $SU(2)_L \otimes U(1)_Y$: interacciones electrodébiles
  - $SU(3)_C$: interacciones fuertes (QCD)

$\Rightarrow$ Materia (fermiones)

familia	1	2	3
leptones	$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}_L$
	e_R	μ_R	τ_R
quarks	$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix}_L$
	u_R	c_R	t_R
	d'_R	s'_R	b'_R

$\Rightarrow$ Fuerzas (bosones)

interacción	simetría	bosones	spin
electrodébil	$SU(2)_L \otimes U(1)_Y$	γ, Z, W^+, W^-	1
	ruptura de simetría	H	0
fuerte	$SU(3)_C$	8 gluones	1

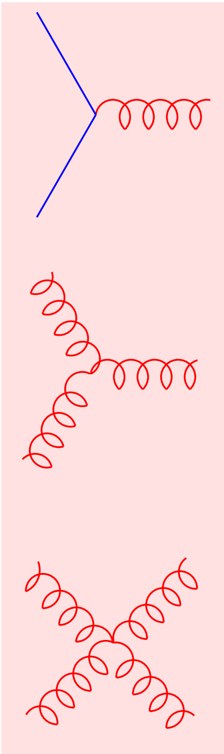
- QCD es la teoría de las interacciones fuertes

$$\mathcal{L}_{\mathrm{QCD}} = \underbrace{\bar{\psi}(i\gamma^\mu\partial_\mu - m)\psi}_{\text{quarks}} \underbrace{-\frac{1}{2}g\sum_a(\bar{\psi}\gamma^\mu\lambda_a\psi)G^a_\mu}_{\text{interacción quark-gluon}} \underbrace{-\frac{1}{4}\sum_a G^a_{\mu\nu}G^{\mu\nu}_a}_{\text{gluones}}$$

$$G^a_{\mu\nu} \equiv \partial_\mu G^a_\nu - \partial_\nu G^a_\mu - g\sum_{b,c} f_{abc}G^b_\mu G^c_\nu$$

$$[\lambda_a, \lambda_b] = 2if_{abc}\lambda_c$$

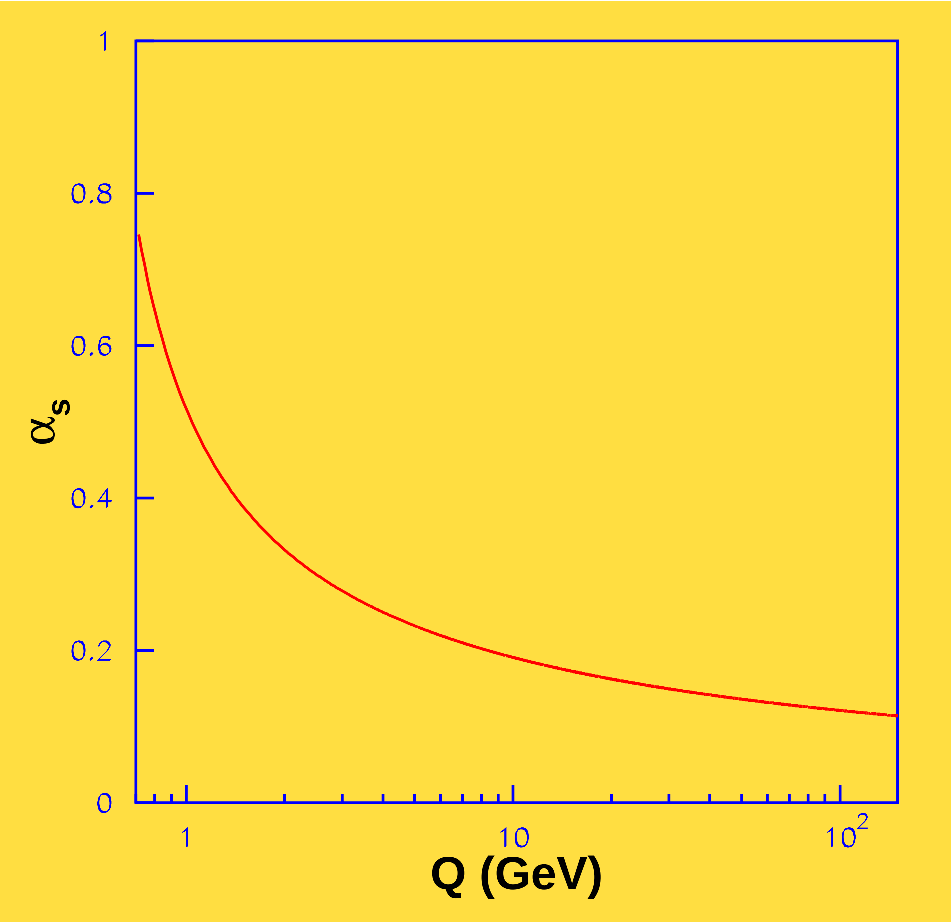
- Vértices Fundamentales



- Constante de acoplo de QCD $\alpha_s \equiv \frac{g^2}{4\pi}$
- Renormalización $\Rightarrow$ $\mu^2 \frac{\partial \alpha_s}{\partial \mu^2} = -\alpha_s^2 \sum_{i=0} \beta_i \alpha_s^i$.

  En particular, $\beta_\circ = \frac{33-2n_f}{12\pi} > 0 \Rightarrow$ libertad asintótica de QCD
- A segundo orden

$$\alpha_s(Q^2) = \frac{1}{\beta_\circ \ln(Q^2/\Lambda^2)} \left[1 - \frac{\beta_1 \ln(\ln(Q^2/\Lambda^2))}{\beta_\circ^2 \ln(Q^2/\Lambda^2)} \right]$$



- Predicciones de QCD para el proceso $e^+e^- \to$ hadrones

Generadores de sucesos Monte Carlo

  - QCD perturbativa ($Q \gg 1\text{GeV}$)

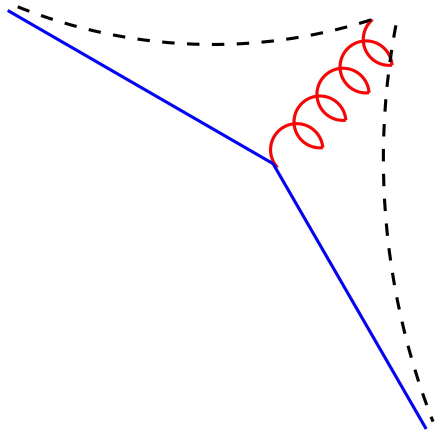
    Cálculos perturbativos

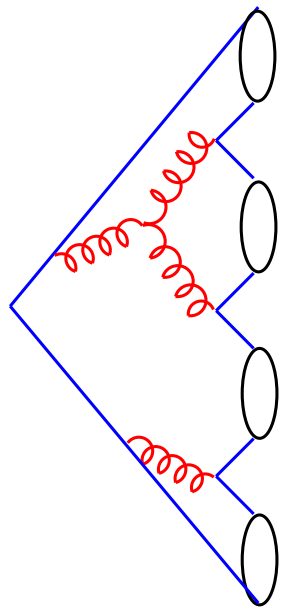
    * Cálculo del elemento de matriz exacto ($O(\alpha_s^2)$)
    * Descripción aproximada mediante emisiones sucesivas de partones (*parton shower*)

  - QCD no perturbativa ($Q \lesssim 1\text{GeV}$)

    Modelos fenomenológicos

    * Fragmentación por cuerdas (JETSET)
    * Fragmentación mediante *clusters* (HERWIG)





- El proceso $e^+e^- \to 4$ jets

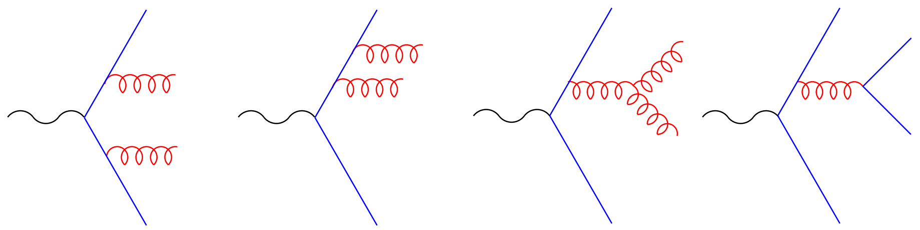
$$\boxed{e^+e^- \to q\bar{q}gg/q\bar{q}q'\bar{q}' \to 4 \text{ jets}}$$

$\Rightarrow q\bar{q}gg$:

$$d^5\sigma \sim \alpha_s^2 {C_F}^2 \left[W_A + \left(1 - \frac{1}{2}\frac{C_A}{C_F}\right) W_B + \frac{C_A}{C_F} W_C\right]$$

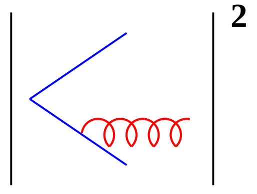
$\Rightarrow q\bar{q}q'\bar{q}'$:

$$d^5\sigma \sim \alpha_s^2 {C_F}^2 \left[n_f \frac{T_F}{C_F} W_D + \left(1 - \frac{1}{2}\frac{C_A}{C_F}\right) W_E\right]$$

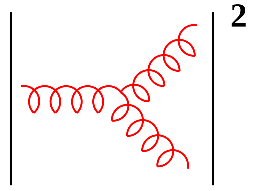


- Factores de color

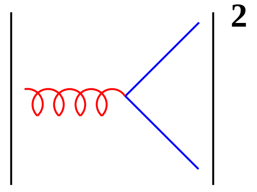
$$t^a_{ij} t^a_{jk} \quad = \quad \delta_{ik} C_F \quad \sim$$



$$f^{abc} f^{abd} \quad = \quad \delta^{cd} C_A \quad \sim$$



$$t^a_{ij} t^b_{ji} \quad = \quad \delta^{ab} T_F \quad \sim$$



- Los factores de color identifican el grupo de invariancia gauge

$$C_F^{\rm QCD} = \frac{4}{3}$$

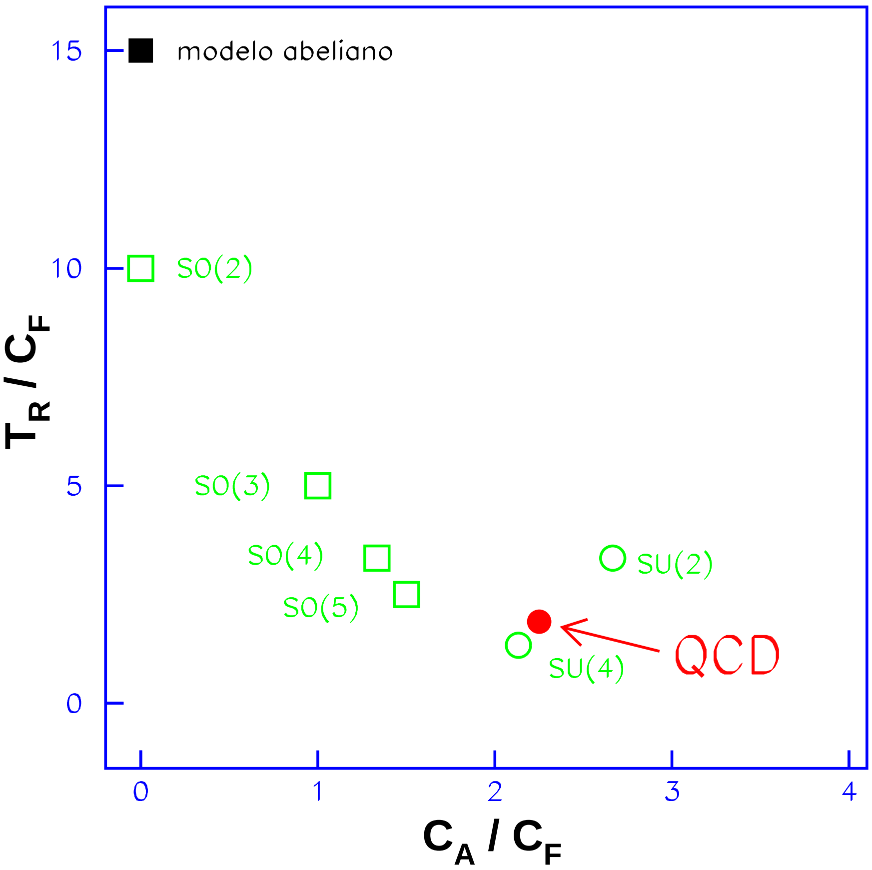
$$C_A^{\rm QCD} = 3$$

$$T_R^{\rm QCD} = n_f \cdot T_F^{\rm QCD} = 5 \cdot \frac{1}{2}$$

- Experimentalmente

$$C_1 = \frac{C_A}{C_F} \quad (C_1^{\rm QCD} = 9/4)$$

$$C_2 = \frac{T_R}{C_F} \quad (C_2^{\rm QCD} = 15/8)$$



- Los modelos supersimétricos predicen la existencia del gluino, $\tilde{g}$
- Un gluino ligero ($m_{\tilde{g}} \lesssim 4$ GeV) no está experimentalmente excluido
- Los gluinos se producen fundamentamente a través del vértice $g\tilde{g}\bar{\tilde{g}}$
- Debido al caracter fermiónico del gluino

$$d\sigma(e^+e^- \to q\bar{q}\tilde{g}\bar{\tilde{g}}) \sim d\sigma(e^+e^- \to q\bar{q}q'\bar{q}')$$

- En el límite $m_{\tilde{g}} \to 0$,

$$T_R = (n_f + 3) \cdot T_F = T_R^{QCD} + 3/2$$

$$\begin{aligned} \tilde{C}_1 &= C_1^{\mathrm{QCD}} &&= 9/4 \\ \tilde{C}_2 &= C_2^{\mathrm{QCD}} + 3 \cdot T_F/C_F &&= 3 \end{aligned}$$

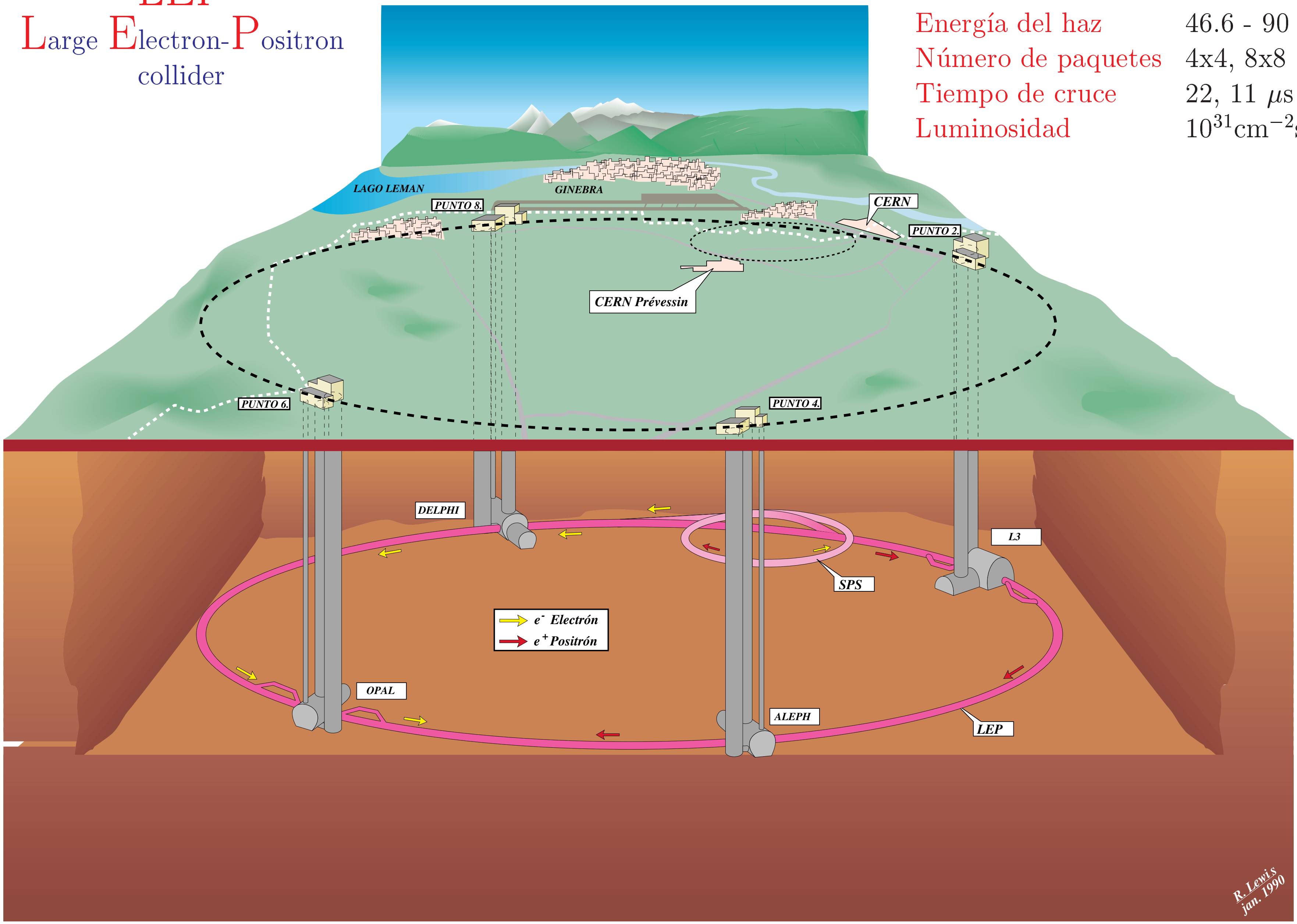
$$\Downarrow$$

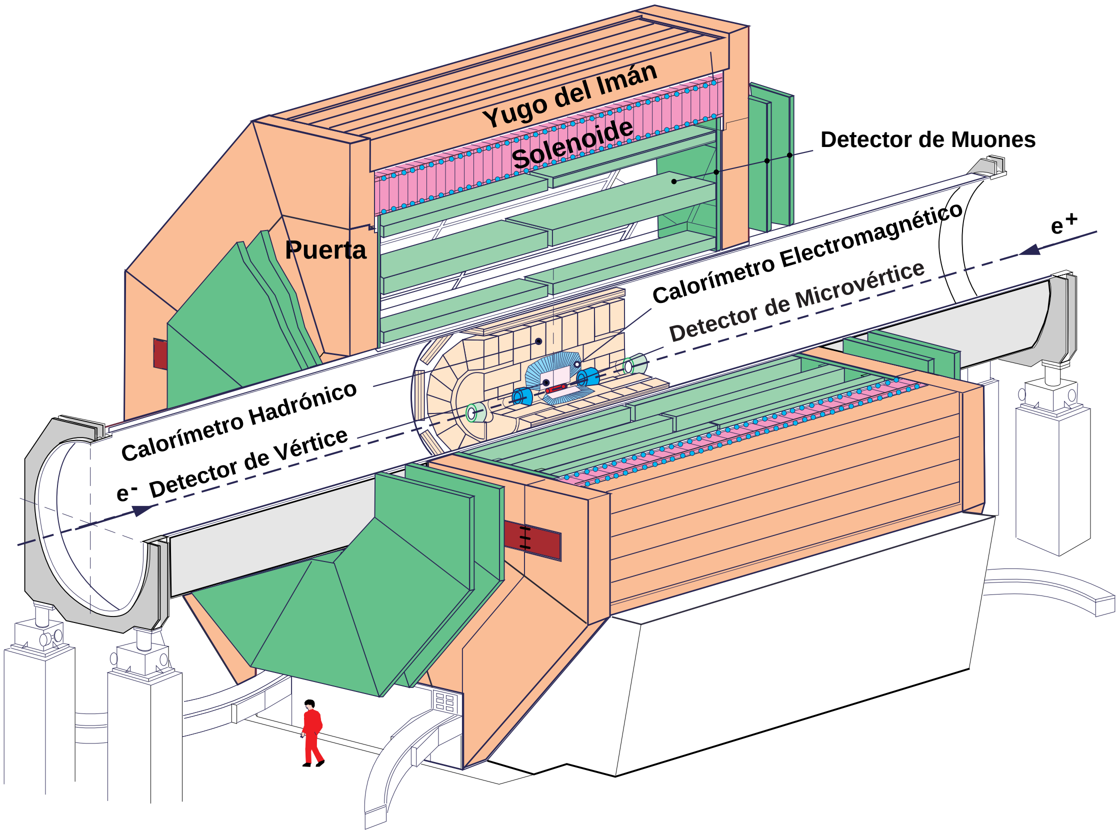
La medida precisa de los factores de color permite investigar la existencia de un gluino ligero

Dispositivo experimental

LEP
Large Electron-Positron collider

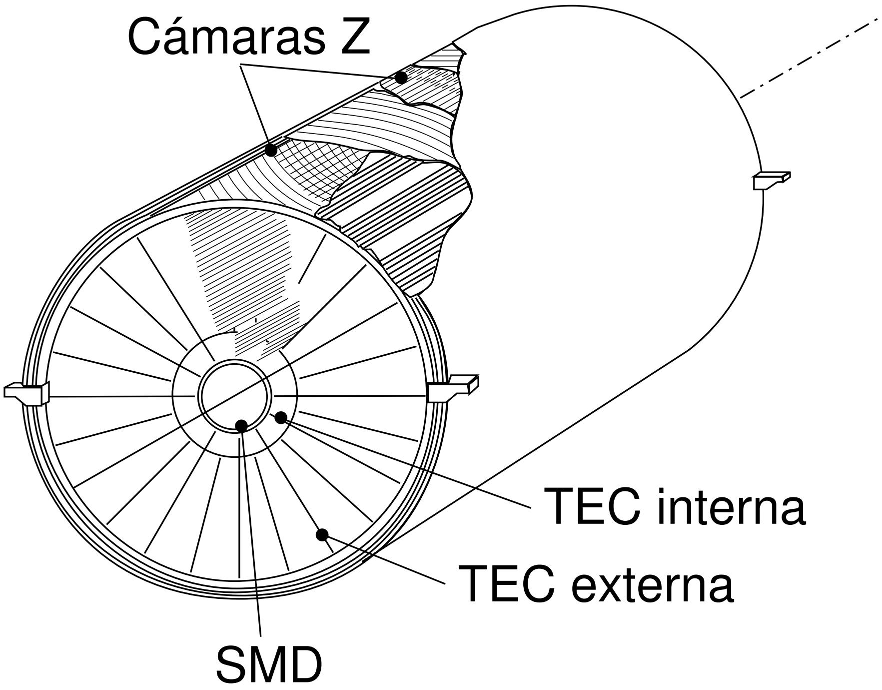
Circunferencia	26.7 Km
Energía del haz	46.6 - 90 GeV
Número de paquetes	4x4, 8x8
Tiempo de cruce	22, 11 μs
Luminosidad	10^{31}cm^{-2}s^{-1}



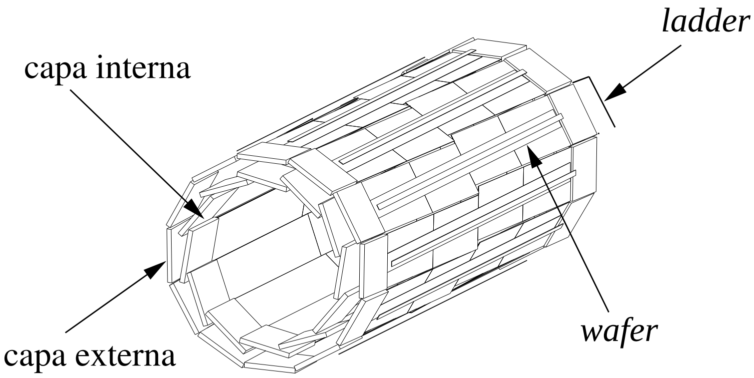


- Detector central
- Calorímetro electromagnético
- Monitor de luminosidad
- Contadores de centelleo
- Calorímetro hadrónico
- Espectrómetro de muones
- imán

- Detector central

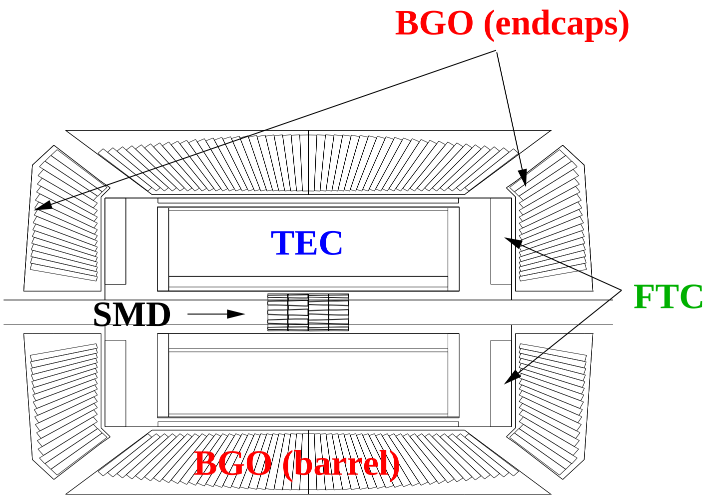


– **TEC** (*Time Expansion Chamber*)
– **Cámaras Z**
– **SMD** (*Silicon Microvertex Detector*)



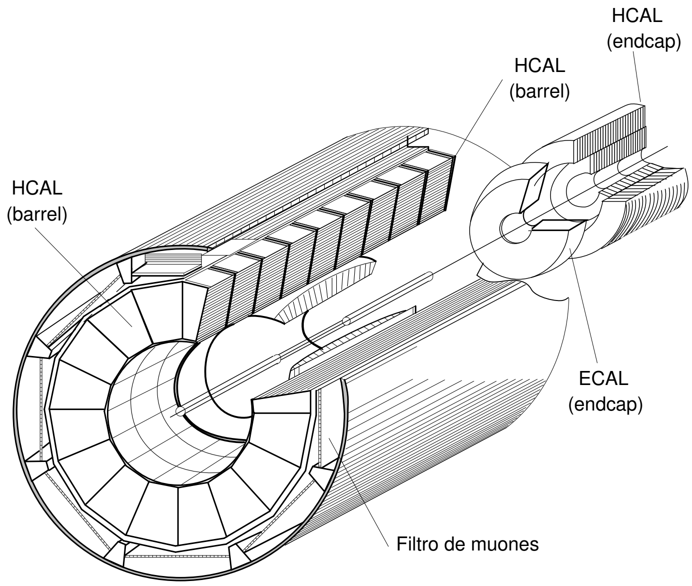
$$\sigma(1/p_\perp) = 0.01\ (\mathrm{GeV/c})^{-1}$$

- Calorímetro electromagnético (BGO)



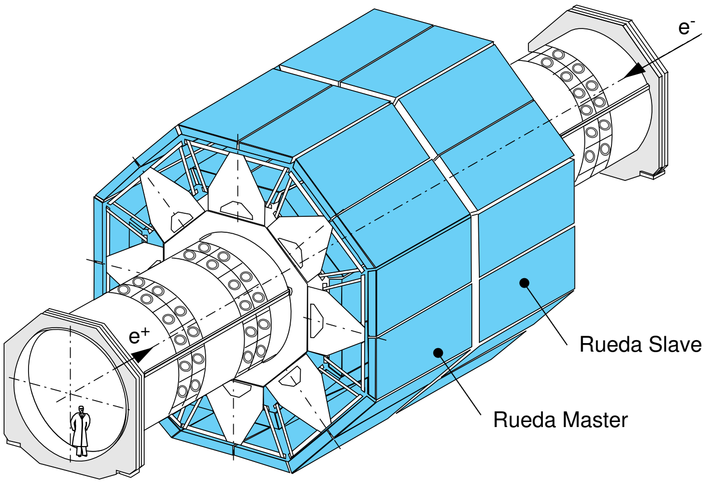
$$\frac{\sigma_{\mathrm{E}}}{E} = \left(\frac{1.5}{\sqrt{\mathrm{E}}} + \frac{0.4}{\mathrm{E}} + 1\right) \% \qquad \mathrm{E\ en\ GeV}$$

- Calorímetro hadrónico



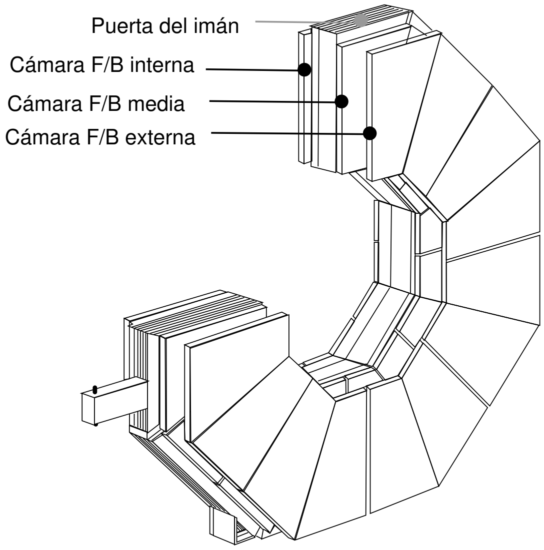
$$\frac{\sigma_{\mathrm{E}}}{E} = \left(\frac{55}{\sqrt{\mathrm{E}}} + 5\right) \% \qquad \mathrm{E\ en\ GeV}$$

- Espectrómetro de muones
  - *barrel*



$$\sigma(1/p_\perp) = 0.0004\ (\mathrm{GeV/c})^{-1}$$

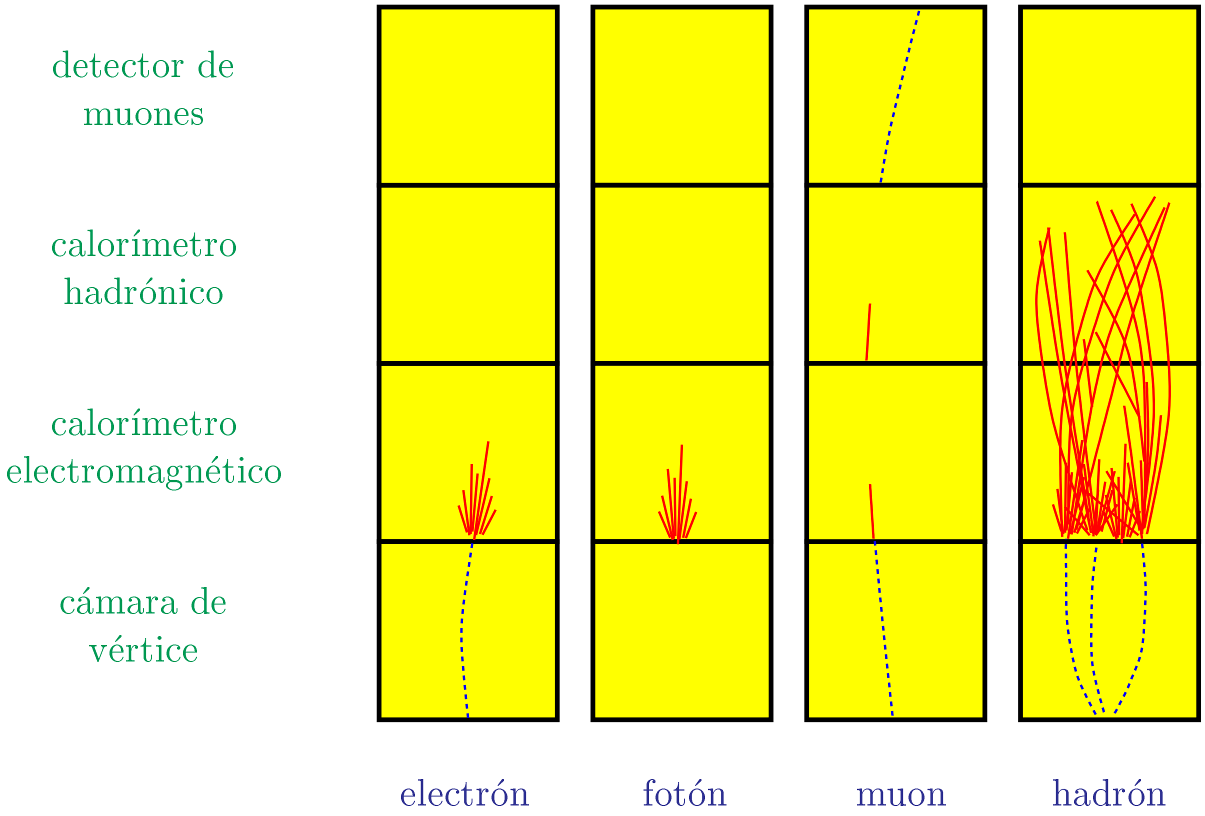
  - cámaras *forward-backward*



$$\sigma(1/p_\perp) = 0.001 - .004\ (\mathrm{GeV/c})^{-1}$$

Calibración de la energía en sucesos hadrónicos

- Paso de las partículas a través del detector



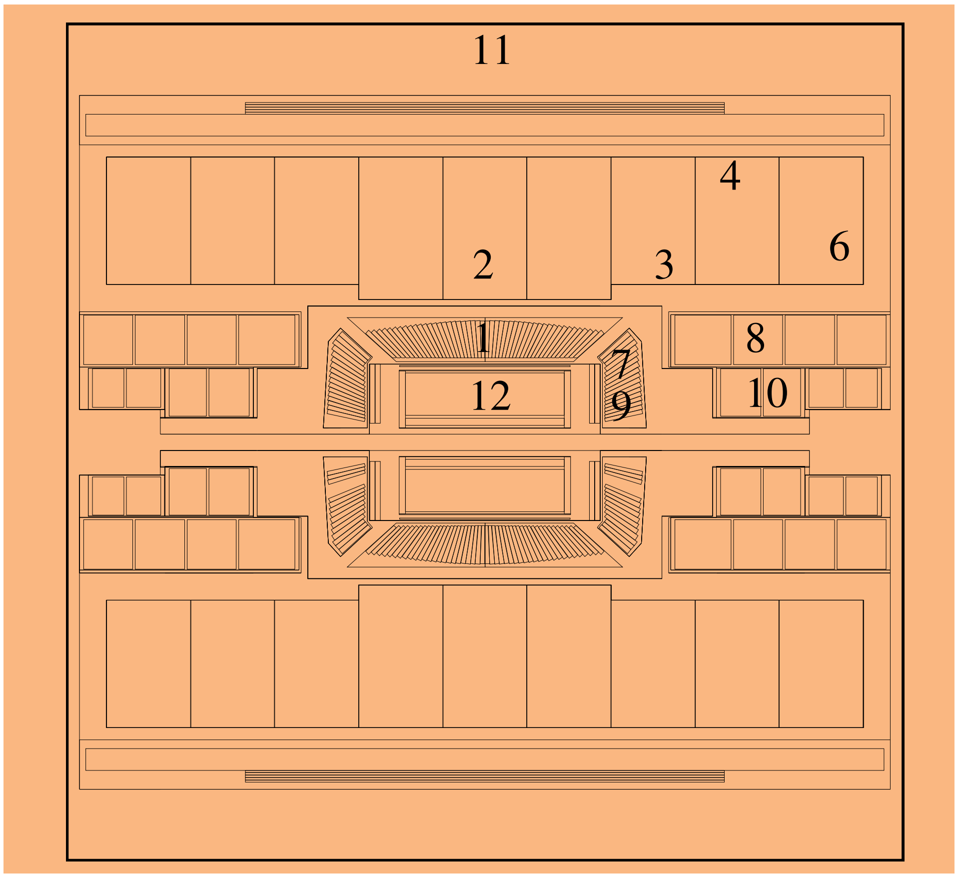
- Energía de un hadrón que atraviesa un sistema calorimétrico

$$E = f(E_{\mathrm{ecal}}, E_{\mathrm{hcal}})$$

- En el proceso $e^+e^- \rightarrow$ hadrones

$$E_{\mathrm{vis}} \simeq \sqrt{s}$$

- Regiones geométricas de L3



- Información calorimétrica

$$E_{\rm tot} = \sum_i G_i \cdot E_i$$

⇒ ASRC: Asociación de deposiciones de energía en los calorímetros

- Información calorimétrica + trazas

$$E_{\rm tot} = \sum_i G_i \cdot E_i + \sum_{i<j} A_{ij} \cdot C(E_i, E_j)$$

⇒ ECLU: Asociación de deposiciones de energía en los calorímetros + trazas

❖ ASRC:

1. Asociar trazas con deposiciones de energía en el calorímetro electromagnético
2. Asociar deposiciones en el calorímetro electromagnético con deposiciones en el calorímetro hadrónico
3. Asociar trazas de muones con deposiciones de energía en los calorímetros

$$\boxed{E^c = \sum_i G_i \cdot E_i^c}$$

❖ ECLU:

⇒ Constituyente: deposición de energía en los calorímetros, traza reconstruida en la cámara de vértice cámaras de muones

1. Asociar pares de constituyentes en *semillas*
2. Asociar a cada *semilla* todos los constituyentes angularmente compatibles → ECLU
3. Asignar cada constituyente al ECLU más cercano

$$\boxed{E^c = \sum_i \widetilde{G}_i \cdot E_i^c + \sum_{i<j} \widetilde{A}_{ij} \cdot \widetilde{C}(E_i^c, E_j^c)}$$

Cálculo de los factores G

- Selección de sucesos hadrónicos a $\sqrt{s} \simeq M_Z$
  - Alta multiplicidad
  - Energía depositada en el detector cercana a $\sqrt{s}$
  - Sucesos compensados

1. $N_{clus} > 12$
2. $0.6 < E_{\mathrm{vis}}/\sqrt{s} < 1.4$
3. $\mid E_{\parallel} \mid / E_{\mathrm{vis}} < 0.4$
4. $E_{\perp}/E_{\mathrm{vis}} < 0.4$

$\Rightarrow$ Eficiencia: 98.5%

$\Rightarrow$ Pureza: 99.8%

- Método de determinación de los factores G
  - ❖ Optimizar de la resolución en la energía visible
  - ❖ Fijar el valor medio de la energía visible a $\sqrt{s}$

$\Rightarrow$ Se minimiza la expresión:

$$f(G_i, A_{ij}) = \frac{\sigma_E^2}{\overline{E}^2} + \lambda \cdot \left(\frac{\overline{E}}{\sqrt{s}} - 1 \right)^2$$

donde

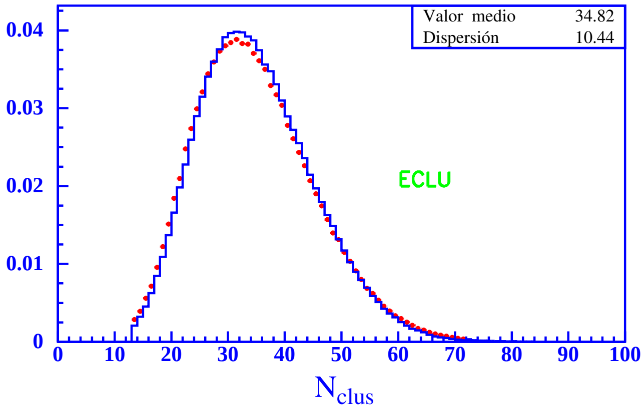
$\overline{E} = (1/N) \sum E$ valor medio de la energía visible

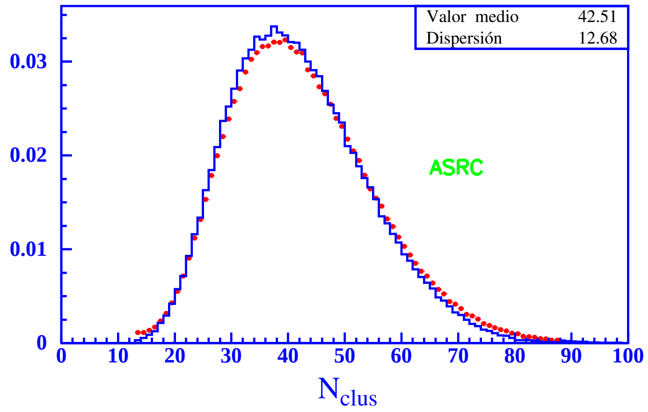
$\sigma_E^2 = \overline{(E - \overline{E})^2}$ resolución en la energía visible

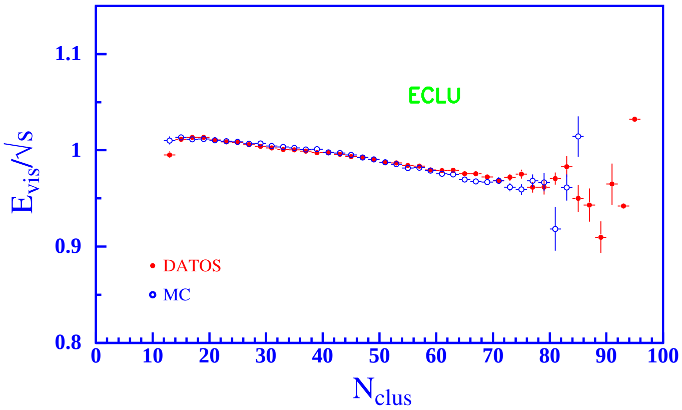
λ factor de penalización $\Rightarrow \overline{E} = \sqrt{s}$

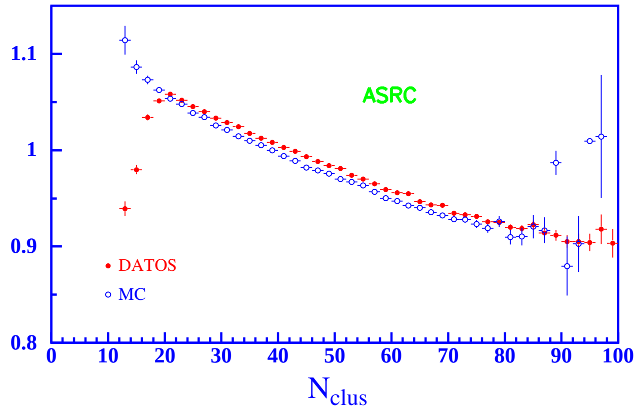
- Resultados

  – Buen acuerdo entre datos y simulación Monte Carlo

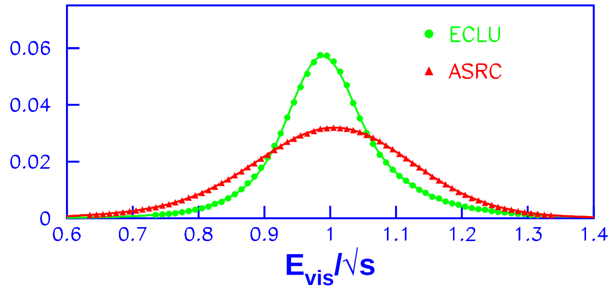




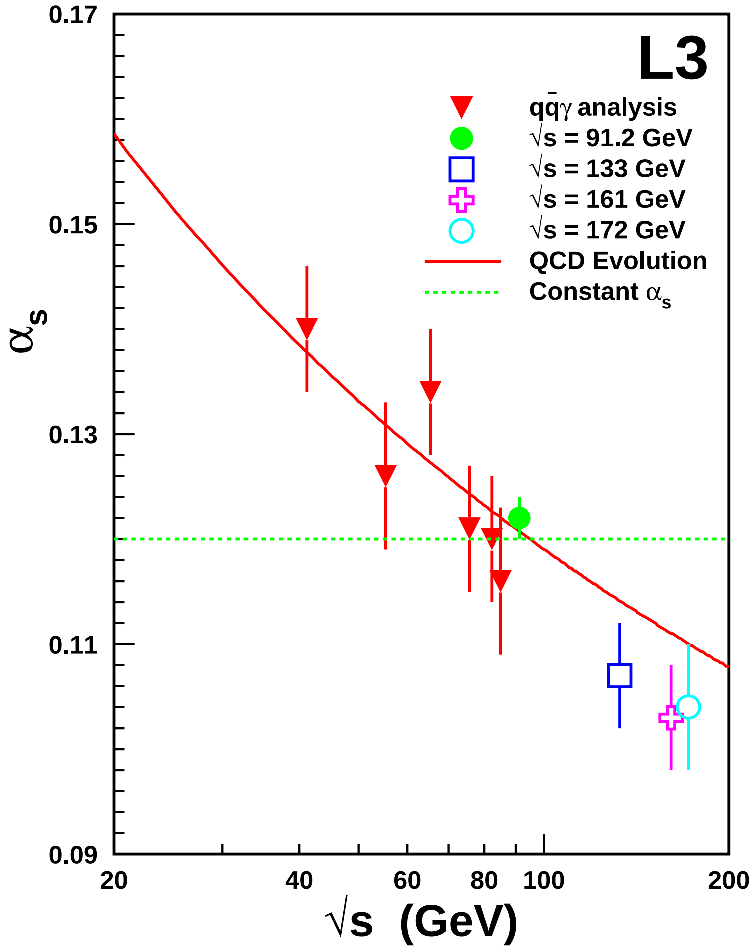




  – La inclusión de las trazas mejora la resolución en la energía visible



- Los factores G obtenidos son de amplia utilización en la colaboración L3



- El análisis presentado en esta memoria hace uso de los dos tipos de cantidades reconstruidas

Medida de los factores de color de QCD

- Selección de la muestra

  – Selección de sucesos hadrónicos

    1. $N_{clus} > 12$
    2. $0.6 < E_{\mathrm{vis}}/\sqrt{s} < 1.4$
    3. $\mid E_{\parallel} \mid / E_{\mathrm{vis}} < 0.4$
    4. $E_{\perp}/E_{\mathrm{vis}} < 0.4$

$\Rightarrow$ Años 1991-1995

$\Rightarrow$ $\sqrt{s} = 91.25 \pm 0.50$ GeV

$\Rightarrow$ Exclusión de malos periodos ($< 8\%$)

3.1 millones de sucesos hadrónicos ($\mathcal{L} = 105\mathrm{pb}^{-1}$)

Año	1991	1992	1993	1994	1995
Luminosidad integrada (en pb^{-1})	8.1	21.5	15.4	46.6	13.2
Sucesos seleccionados (en miles)	241	640	460	1389	393

– Selección de sucesos de 4 jets

Algoritmo de reconstrucción de jets (JADE)

$$y_{ij} = 2E_iE_j(1 - \cos\theta_{ij})/E_{\mathrm{vis}}^2$$

1. Combinar el par de partículas más cercano (menor y_{ij}) en una pseudo-partícula

$$E = E_i + E_j$$

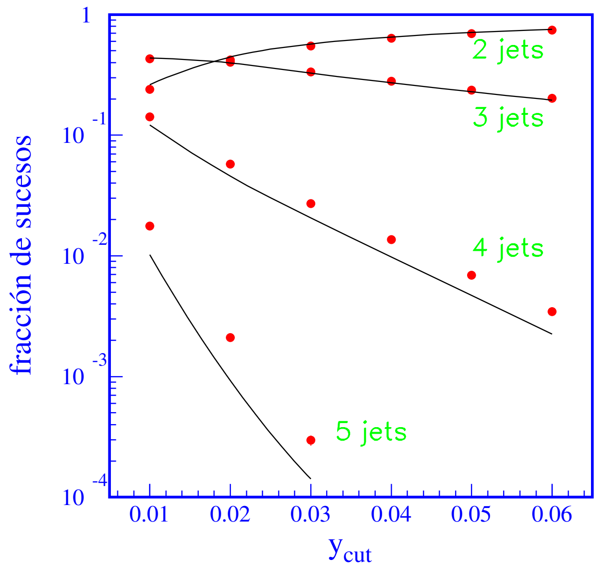
$$\vec{p} = \vec{p}_i + \vec{p}_j$$

2. Repetir el procedimiento hasta que todas las distancias entre partículas sean mayores que un cierto parámetro de resolución y_{cut}

3. Las N pseudo-partículas no recombinadas se denominan jets y el suceso se clasifica como N jets

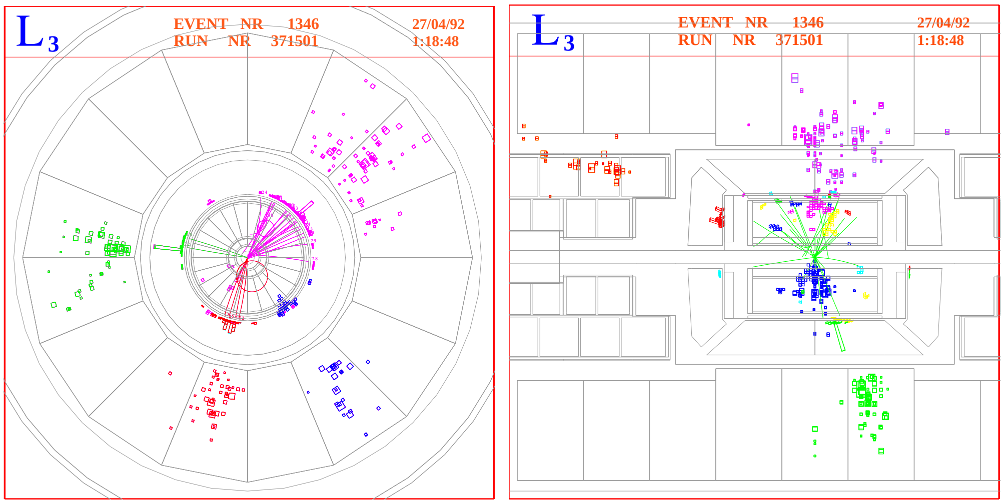
$\Rightarrow$ la multiplicidad en jets depende del valor de y_{cut}

- Multiplicidad en jets en función de y_{cut}



- $y_{cut} = 0.03$

58119 sucesos de 4 jets seleccionados

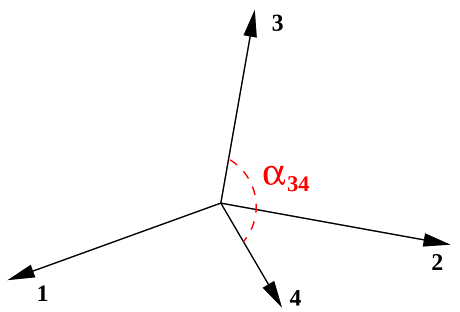


Año	1991	1992	1993	1994	1995
Sucesos seleccionados	4091	11055	8620	26742	7611

Determinación de los cocientes C_1 y C_2

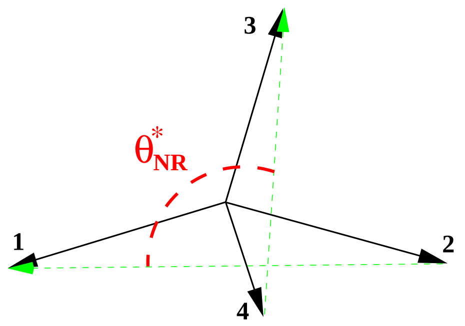
$$e^+e^- \to q\bar{q}gg/q\bar{q}q'\bar{q}' \to 4 \text{ jets}$$

- Correlaciones angulares entre las direcciones de los jets



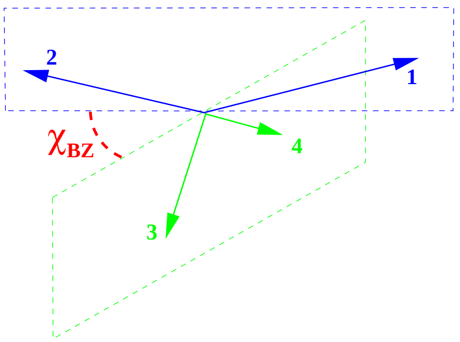
Ángulo entre los dos jets menos energéticos, α_{34}

$$\cos(\alpha_{34}) = \frac{\vec{p}_3 \cdot \vec{p}_4}{|\vec{p}_3|\,|\vec{p}_4|}$$



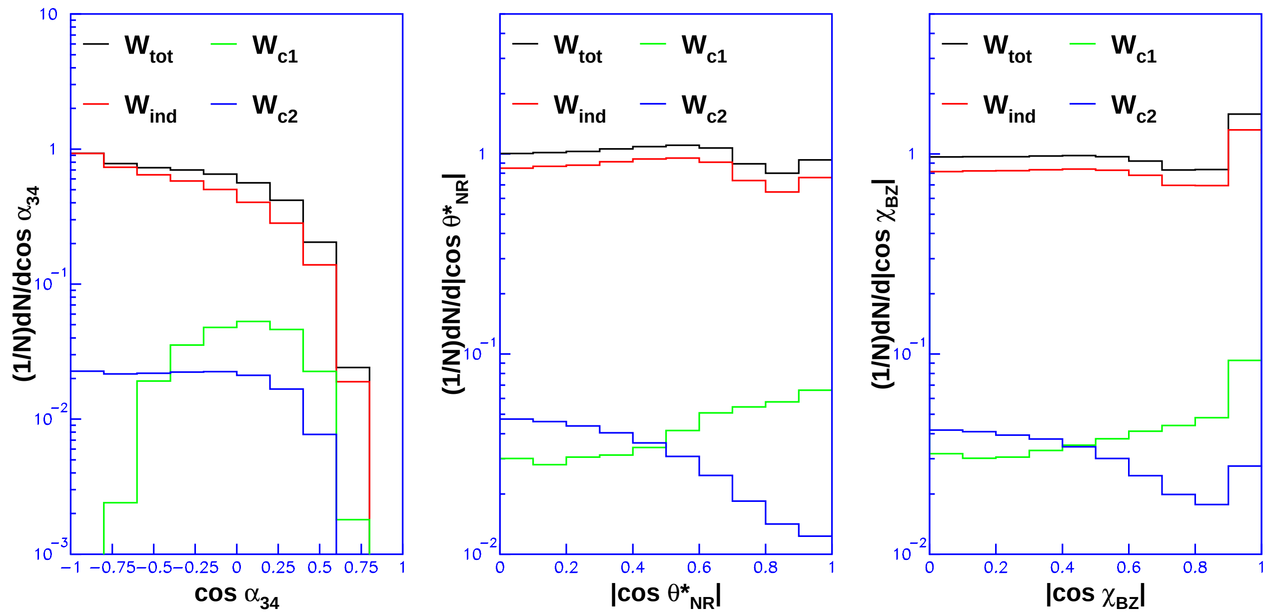
Ángulo modificado de Nachtmann-Reiter, $\theta^*_{\rm NR}$

$$\cos(\theta^*_{\rm NR}) = \frac{(\vec{p}_1 - \vec{p}_2)\cdot(\vec{p}_3 - \vec{p}_4)}{|\vec{p}_1 - \vec{p}_2| \quad |\vec{p}_3 - \vec{p}_4|}$$



Ángulo de Bengtsson-Zerwas, $\chi_{\rm BZ}$

$$\cos(\chi_{\rm BZ}) = \frac{(\vec{p}_1 \times \vec{p}_2)\times(\vec{p}_3 \times \vec{p}_4)}{|\vec{p}_1 \times \vec{p}_2| \quad |\vec{p}_3 \times \vec{p}_4|}$$



$$W_{\text{tot}} = W_{\text{ind}} + C_1 \cdot W_{C_1} + C_2 \cdot W_{C_2}$$

- Ajuste multidimensional a partir de la sección eficaz diferencial
  - Posee la máxima sensibilidad a C_1 y C_2
  - $W \equiv W(y_{ij})$, siendo $y_{ij} = m_{ij}^2/s$ variables cinemáticas intrínsecas

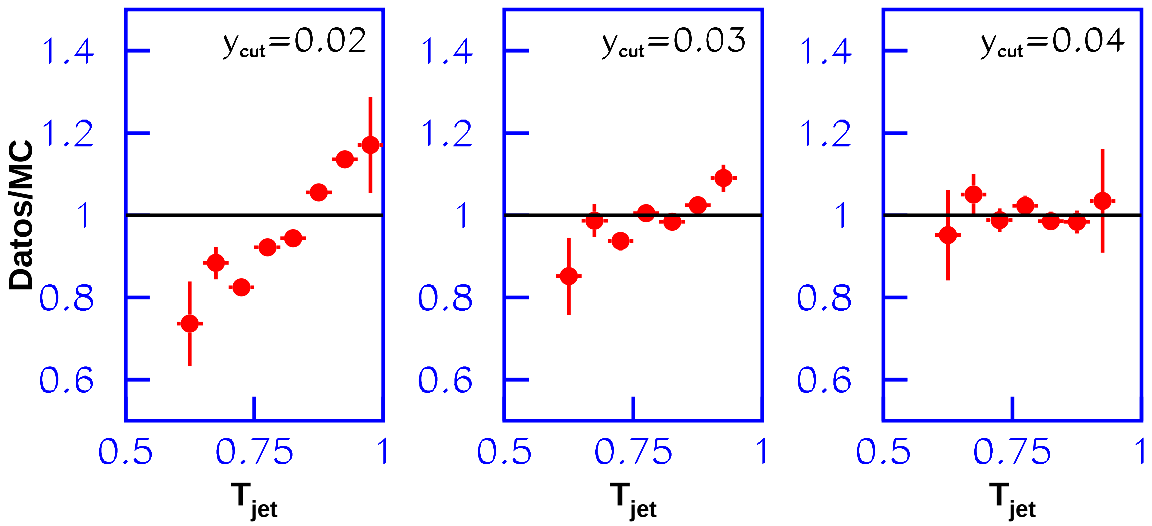
ajuste 5-dimensional

- Muestra Monte Carlo utilizada

  – JETSET 7.4 ME (elemento de matriz completo hasta $O(\alpha_s^2)$)

  – Parámetros de fragmentación ajustados sobre una muestra de sucesos hadrónicos

Función de fragmentación excesivamente suave



Corrección mediante repesado del Monte Carlo

- Método de ajuste de los cocientes C_1 y C_2

  – Ajuste por máxima verosimilitud

  $$\mathcal{L} = \prod_i f(\boldsymbol{C}; \boldsymbol{y}_i)$$

  donde

  $$f(\boldsymbol{C}; \boldsymbol{y}) = \frac{1}{\sigma(C_F, C_A, T_R; y_{cut})} \frac{d\sigma(C_F, C_A, T_R; \boldsymbol{y})}{d\boldsymbol{y}}$$

  y

  $$d^5\sigma(C_1, C_2; y_{ij}) = d^5\sigma_{q\bar{q}gg}(C_1; y_{ij}) + d^5\sigma_{q\bar{q}q'\bar{q}'}(C_1, C_2; y_{ij})$$

  – Efectos de hadronización, resolución del detector y cortes de selección estimados a través de su efecto sobre C_1 y C_2

  $$C_1^* = f_1(C_1, C_2)$$

  $$C_2^* = f_2(C_1, C_2)$$

  – f_1 y f_2 se parametrizan utilizando la simulación Monte Carlo

  – C_1 y C_2 se obtienen mediante inversión numérica

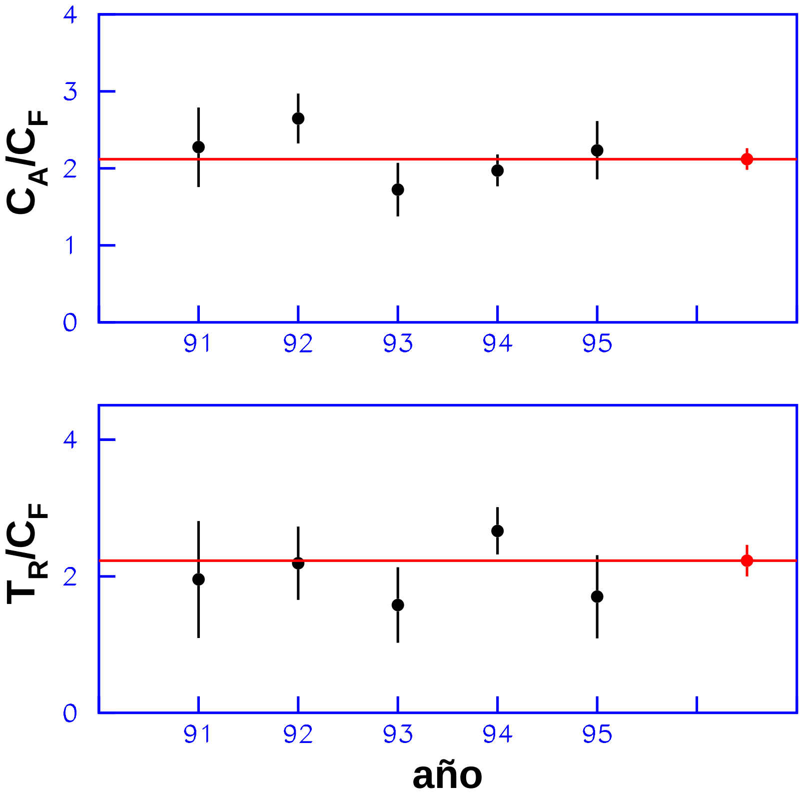
- Resultado del ajuste

sobre la muestra de 58119 sucesos de 4 jets

$$\begin{aligned} C_A/C_F &= 2.12 \pm 0.14 \\ T_R/C_F &= 2.23 \pm 0.23 \\ \rho_{(C_1,C_2)} &= -.11 \end{aligned}$$

- Valores obtenidos sobre las muestras seleccionadas en cada uno de los diferentes años

año	C_A/C_F	T_R/C_F
1991	2.28 ± 0.52	1.95 ± 0.86
1992	2.65 ± 0.32	2.19 ± 0.54
1993	1.72 ± 0.35	1.58 ± 0.55
1994	1.97 ± 0.21	2.67 ± 0.35
1995	2.24 ± 0.38	1.70 ± 0.61



- Errores sistemáticos

  - Incertidumbres experimentales

    - Diferencia entre los resultados obtenidos partiendo de dos tipos de cantidades reconstruidas: ASRC y ECLU
    - $|\cos\theta_T| < 0.74$

$$\Rightarrow \Delta C_1 = 0.09 \qquad \Delta C_2 = 0.26$$

  - Método de análisis

    - Repetir el análisis utilizando la distribución bidimensional $\cos\alpha_{34} - |\cos\theta_{NR}|$

$$\Rightarrow \Delta C_1 = 0.19 \qquad \Delta C_2 = 0.12$$

  - Hadronización

    - Variación de los parámetros de fragmentación del Monte Carlo

$$\Rightarrow \Delta C_1 = 0.11 \qquad \Delta C_2 = 0.20$$

  - Estadística limitada Monte Carlo

    - Propagación del error estadístico de la muestra Monte Carlo

$$\Rightarrow \Delta C_1 = 0.25 \qquad \Delta C_2 = 0.41$$

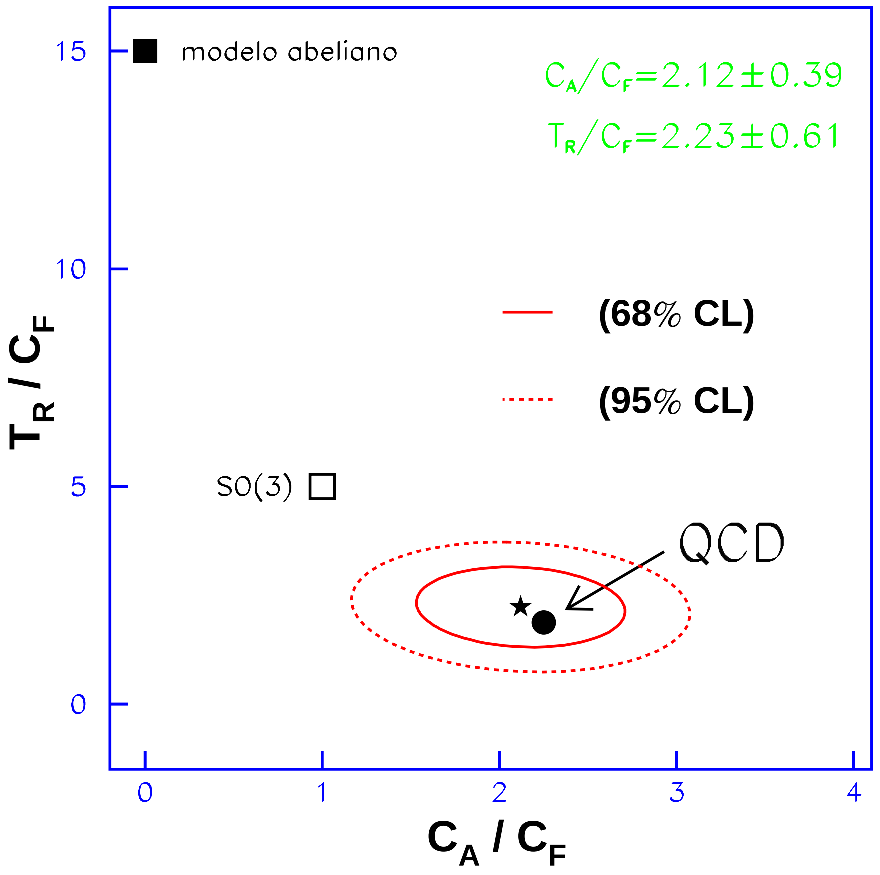
– Teórico

  * Términos adicionales del desarrollo perturbativo
    1. JETSET 7.4 PS para simular la contaminación de sucesos de 5 jets
    2. Generador $e^+e^- \to 5$ partones
  * Masa de los quarks
  * Repetir el análisis para $y_{cut} = 0.04$

$$\Rightarrow \Delta C_1 = 0.09 \qquad \Delta C_2 = 0.17$$

Sistemático total $\Rightarrow \Delta C_1 = 0.36 \qquad \Delta C_2 = 0.56$

• Resultado final



- Sensibilidad a la existencia de un gluino ligero
  - $T_R/C_F = n_f \cdot T_F/C_F$ sensible a la producción secundaria de fermiones ligeros
  - $(T_R/C_F)^{\text{medido}} \Rightarrow n_f = 5.9 \pm 1.6$
  - $n_f < 8.5$ con el 95% CL $\Rightarrow$ no se puede excluir la presencia de un gluino de masa nula ($\Rightarrow n_f = 8$)

❖ El límite depende críticamente del valor central obtenido en la medida

❖ El error dominante en la medida es de origen sistemático

❖ El desconocimiento de la hadronización y desintegración de los hadrones que contienen gluinos aumentaría la sistemática en el límite

La medida de los factores de color mediante sucesos de 4 jets no permite establecer límites superiores sólidos a la existencia de un gluino ligero

Conclusiones

CALIBRACIÓN DE LA ENERGÍA EN SUCESOS HADRÓNICOS

- Se han determinado los factores G para los sucesos hadrónicos recogidos por el detector L3
- Los resultados se aplican a los diversos análisis realizados sobre muestras de sucesos $e^+e^- \to$ hadrones

MEDIDA DE LOS FACTORES DE COLOR DE QCD

- Se ha realizado la medida de los cocientes de C_A/C_F y T_R/C_F sobre una muestra de 58119 sucesos de 4 jets seleccionada a partir de las desintegraciones hadrónicas del bosón Z recogidas en el detector L3 de LEP a $\sqrt{s} \simeq M_Z$
- La determinación de los cocientes C_A/C_F y T_R/C_F se ha realizado mediante un ajuste por máxima verosimilitud a los datos utilizando expresiones analíticas para la sección eficaz de los procesos $e^+e^- \to q\bar{q}gg$ y $e^+e^- \to q\bar{q}q'\bar{q}'$
- Los resultados obtenidos son

$$\begin{aligned} C_A/C_F &= 2.12 \pm 0.14\,(\text{est.}) \pm 0.36\,(\text{sis.}) \\ T_R/C_F &= 2.23 \pm 0.23\,(\text{est.}) \pm 0.56\,(\text{sis.}) \end{aligned}$$

- Los valores obtenidos están en buen acuerdo con la predicción de QCD

- Medidas similares a la presentada en este trabajo
  - DELPHI: $\alpha_{34} - \theta_{NR}$

$$\begin{aligned} C_A/C_F &= 2.12 \pm 0.29\,(\text{est.}) \pm 0.20\,(\text{sis.}) \\ T_R/C_F &= 2.31 \pm 0.66\,(\text{est.}) \pm 0.67\,(\text{sis.}) \end{aligned}$$

  - OPAL: $\alpha_{34} - \theta_{NR} - \chi_{\mathrm{BZ}}$

$$\begin{aligned} C_A/C_F &= 2.11 \pm 0.16\,(\text{est.}) \pm 0.28\,(\text{sis.}) \\ T_R/C_F &= 2.00 \pm 0.55\,(\text{est.}) \pm 0.70\,(\text{sis.}) \end{aligned}$$

  - ALEPH: $d^5\sigma(y_{ij})$

$$\begin{aligned} C_A/C_F &= 2.24 \pm 0.32\,(\text{est.}) \pm 0.24\,(\text{sis.}) \\ T_R/C_F &= 2.90 \pm 0.85\,(\text{est.}) \pm 1.15\,(\text{sis.}) \end{aligned}$$

- Otras medidas de los factores de color de QCD
  - DELPHI: Identificación de jets originados por quarks b o c

$$\begin{aligned} C_A/C_F &= 2.51 \pm 0.25\,(\text{est.}) \pm 0.16\,(\text{sis.}) \\ T_R/C_F &= 1.91 \pm 0.44\,(\text{est.}) \pm 0.26\,(\text{sis.}) \end{aligned}$$

  - ALEPH: Ajuste simultáneo de α_s y de los factores de color

$$\begin{aligned} C_A/C_F &= 2.20 \pm 0.09\,(\text{est.}) \pm 0.13\,(\text{sis.}) \\ T_R/C_F &= 1.45 \pm 0.25\,(\text{est.}) \pm 0.30\,(\text{sis.}) \end{aligned}$$