

el aspecto **experimental** de la “LIBERTAD ASINTOTICA”

⇒ **Resultado experimental a obtener teóricamente:**

- “**Scaling**” (invariancia de escala)

⇒ *Confinamiento; Chorros*

⇒ **Predicción a confirmar experimentalmente:**

- **Violación logarítmica** de “Scaling”

- **Variación** de α_S

-

**la clave experimental de la
Libertad Asintótica:**

“SCALING”

**(propiedad que, ineludiblemente, ha de poseer cualquier
candidata a Teoría de las Interacciones Fuertes)**

Experimentación en Partículas; estado en \approx 1960

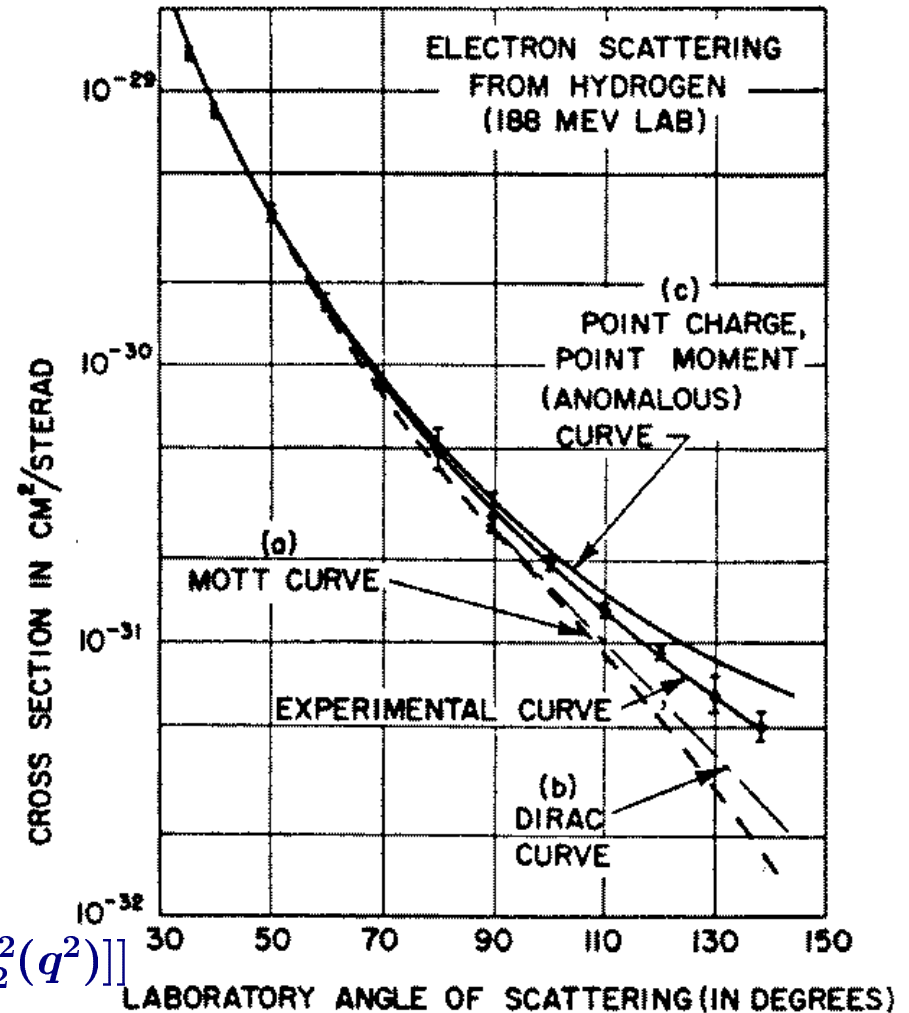
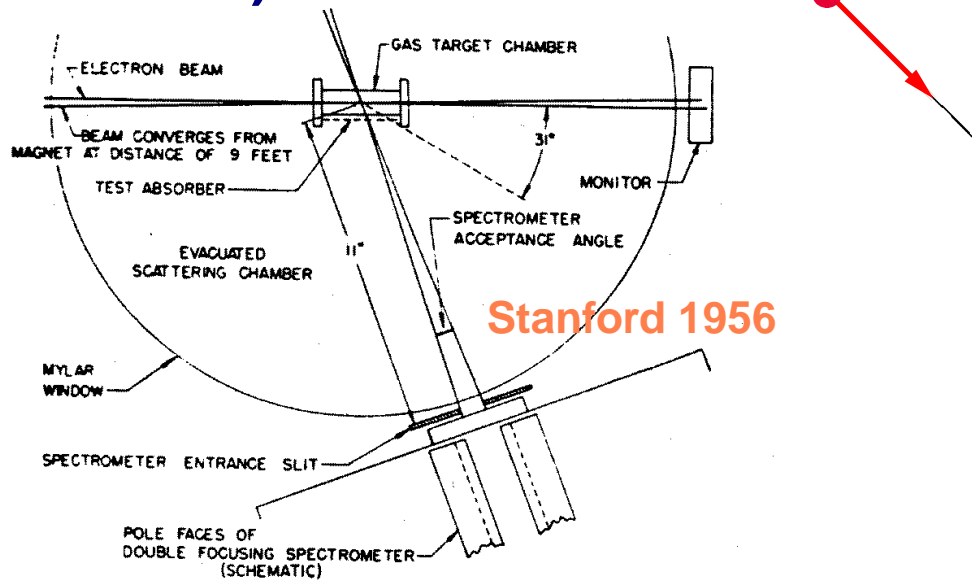
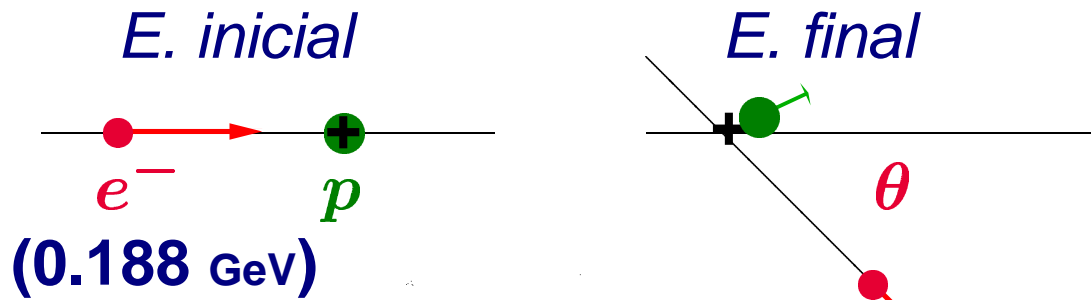
- **Aceleradores hadronicos (hadrón/nucleón-nucleón):**
Cosmotrón, Bevatrón
 - Resultado principal: “explosión de la población”
 - También: secciones eficaces a alta energía
- **Modelo de quarks Gell-Mann Zweig para explicar la explosión**
- **Sólo vemos hadrones ... ¿dónde están los quarks?**

Se empieza a entender con los experimentos **leptón-nucleón**

Experimentos leptón-nucleón: interacción elástica

Cinemática determinada por **UNA** única variable: p. ej. θ

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left. \frac{d\sigma}{d\Omega} \right|_{mott} \cdot S$$



Si p puntual:

$$S = \frac{E'}{E} \left[1 - \frac{q^2}{2m_p^2} tg^2 \frac{\theta}{2} \right]; q = k_i - k_f$$

Si p con extensión espacial:

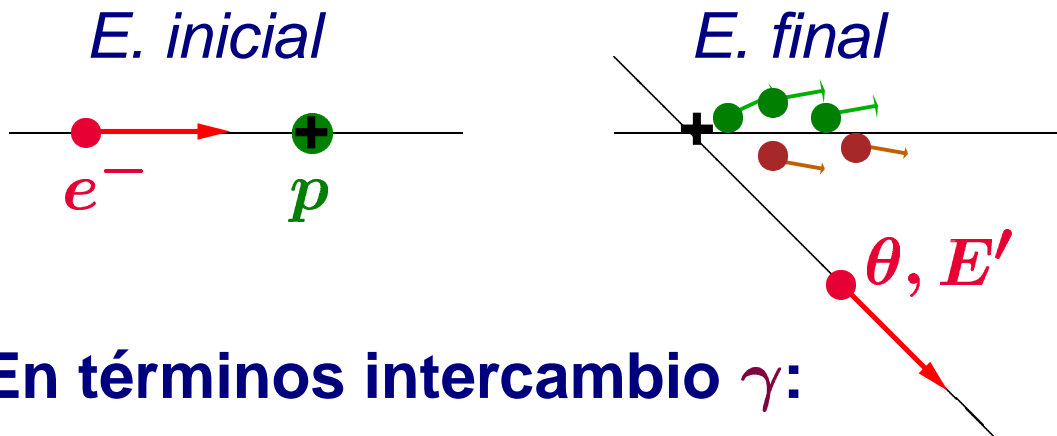
$$S = \frac{E'}{E} \left[(F_1^2(q^2) + \frac{q^2}{4m_p^2} [2(F_1^2(q^2) + \mu F_2^2(q^2))^2 tg^2 \frac{\theta}{2} + \mu F_2^2(q^2)]) \right]$$

(Rosenbluth PR 1950)

⇒ Evidencia de extensión espacial del p

(Hofstadter, Nobel 1961)

Experimentos leptón-nucleón: interacción Inelástica



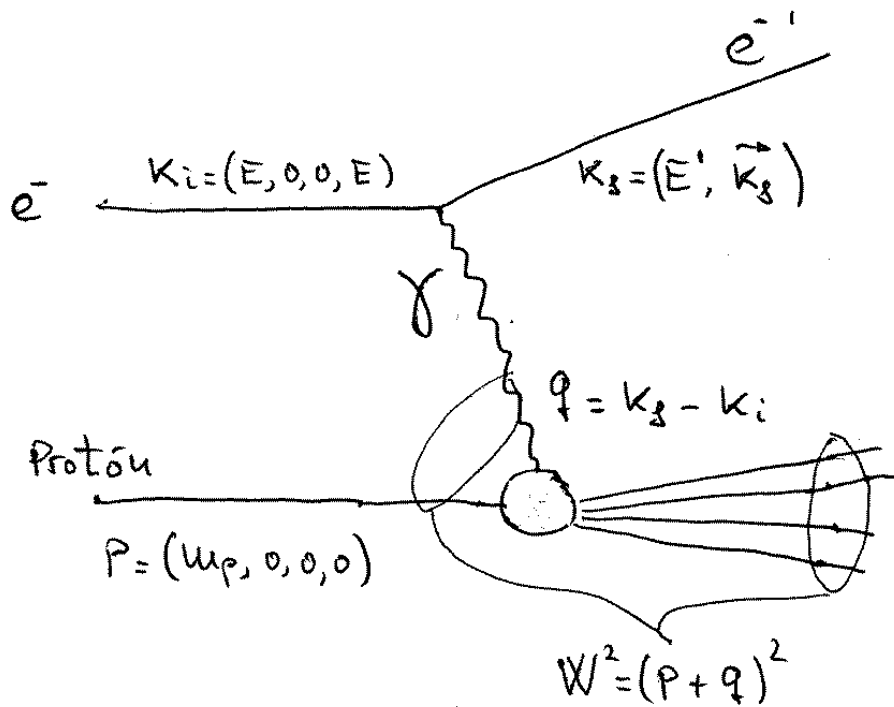
La partícula blanco pierde su identidad \Rightarrow

Cinemática determinada por **DOS** variables: p.ej. θ, E'

Otra elección: θ, W

Otra: ν, Q^2 ; ($\nu = E - E'$)

En términos intercambio γ :



(la que ha prevalecido es Q^2, x_{bj})

$$\frac{d^2\sigma}{d\Omega dE'} = \frac{d^2\sigma}{d\Omega dE'} \Big|_{mott} \cdot [W_2(\nu, Q^2) + 2W_1(\nu, Q^2) \tan^2 \frac{\theta}{2}]$$

(von Gehlen, Bjorken, Gourdin 1960/1)

Experimento de SLAC-MIT

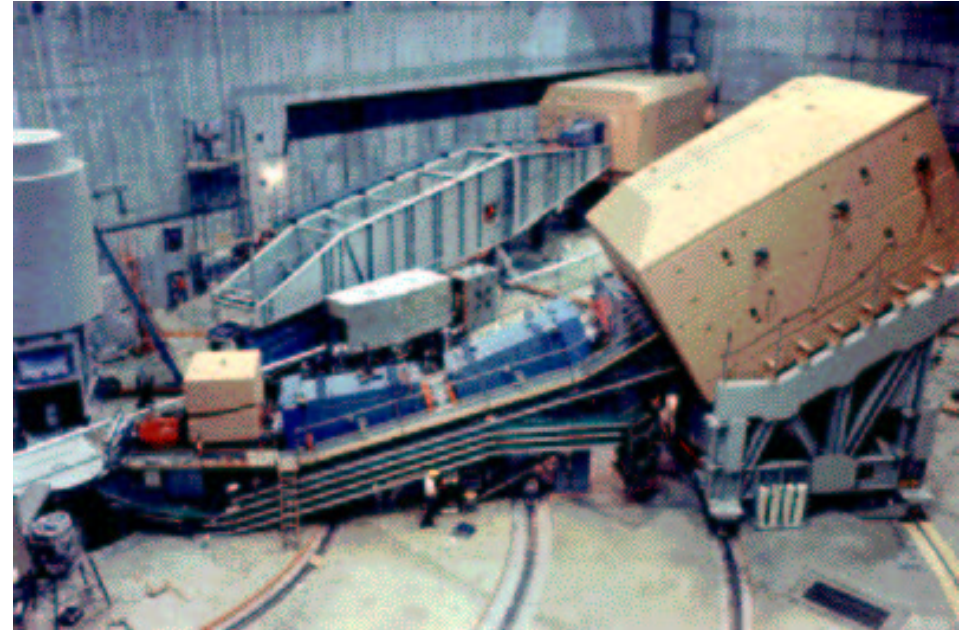
El “linac” de 2 millas



slac 1967

Stanford → SLAC
(Panofsky, \approx 1960)

estudio dispersión inelástica



ángulos medidos:

$$\theta = 6^\circ, 10^\circ$$

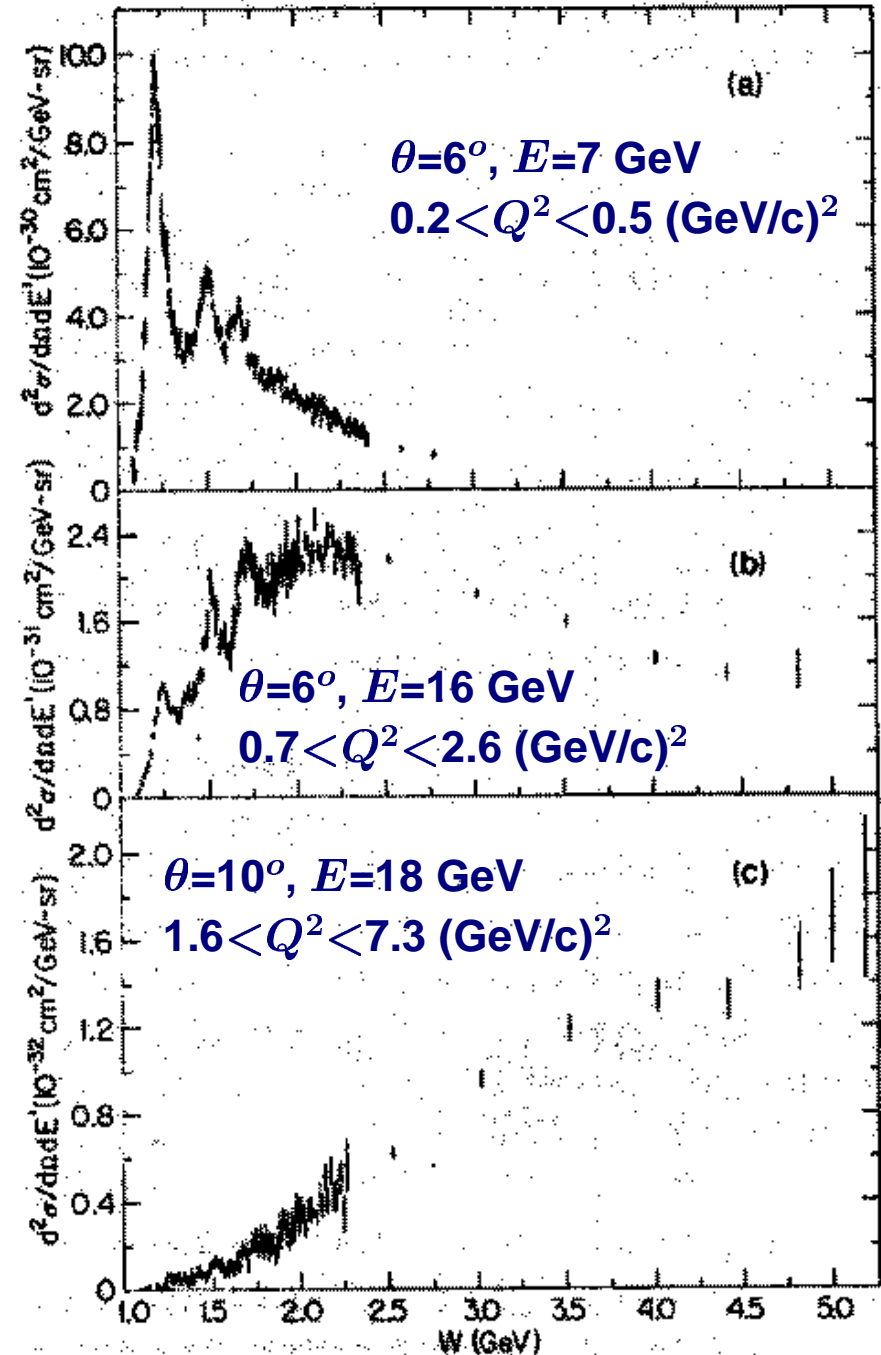
$$E_e = 7 - 18 \text{ GeV}$$

2 x PRL oct. 1969

(Friedman, Kendall, Taylor, Nobel 1990)

- zona W pequeña:
 - producción resonancias
 - σ decrece con θ (o Q^2)
(similar a dispersion elástica)
- zona W grande:
 - σ grande y continua
 - σ suave con θ (o Q^2)
 - ⇒ similar a experimento Rutherford!

Panofsky; conf. Viena 1968



Experimento de SLAC-MIT: el descubrimiento

Concentrándonos en W grande:

- $\sigma_{inelastica}$ órdenes de magnitud

mayor que $\sigma_{elastica}$

⇒ el p no es nube difusa, en ese caso esperaríamos peq. desviaciones

frente a $\sigma_{elastica}$

¿ el p esta formado por sub-partículas ?

- conforme W aumenta

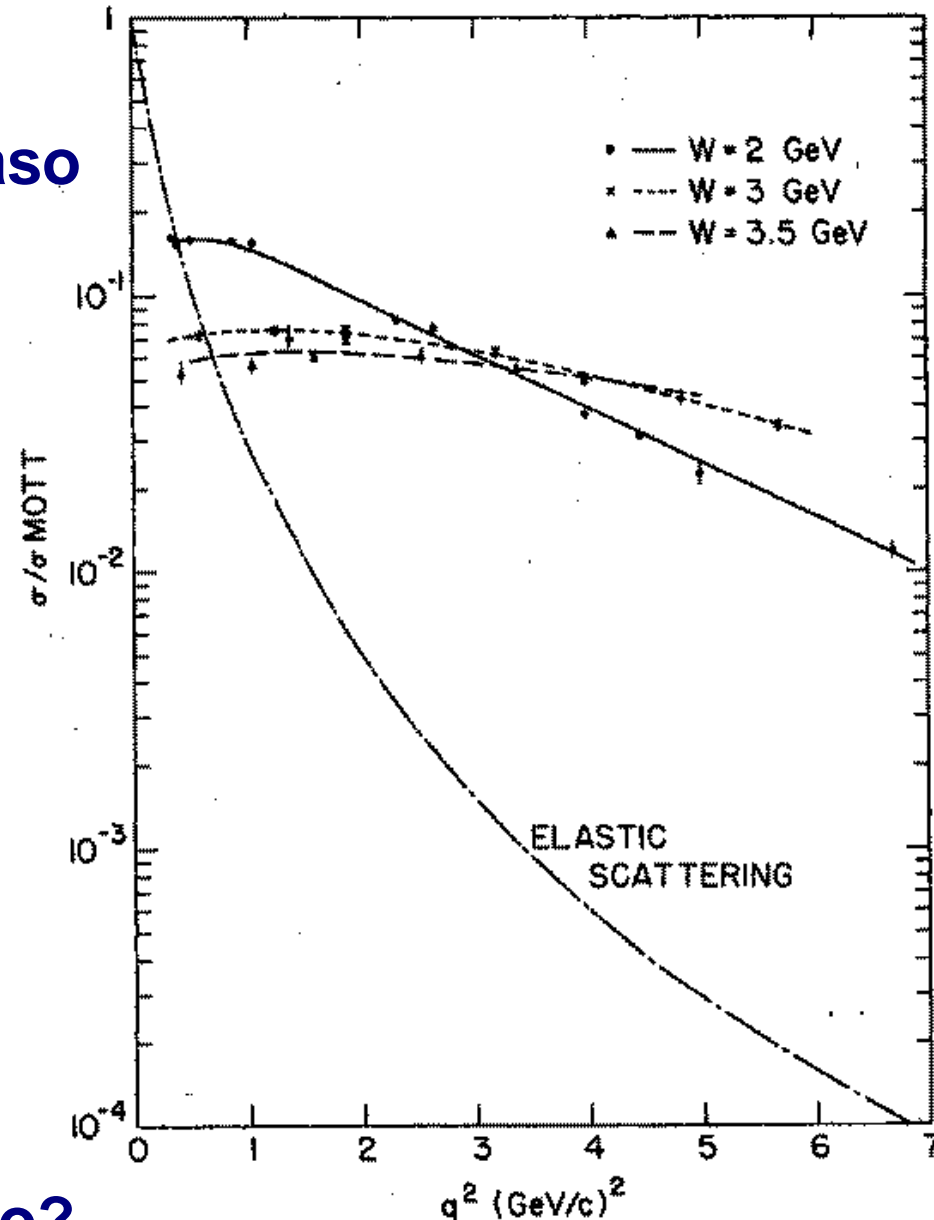
- $\sigma_{inelastica}/\sigma_{elastica} \rightarrow$ constante e independiente de Q^2

- como si

$$\sigma_{inelastica} = \sum_i \sigma_{elastica}^i$$

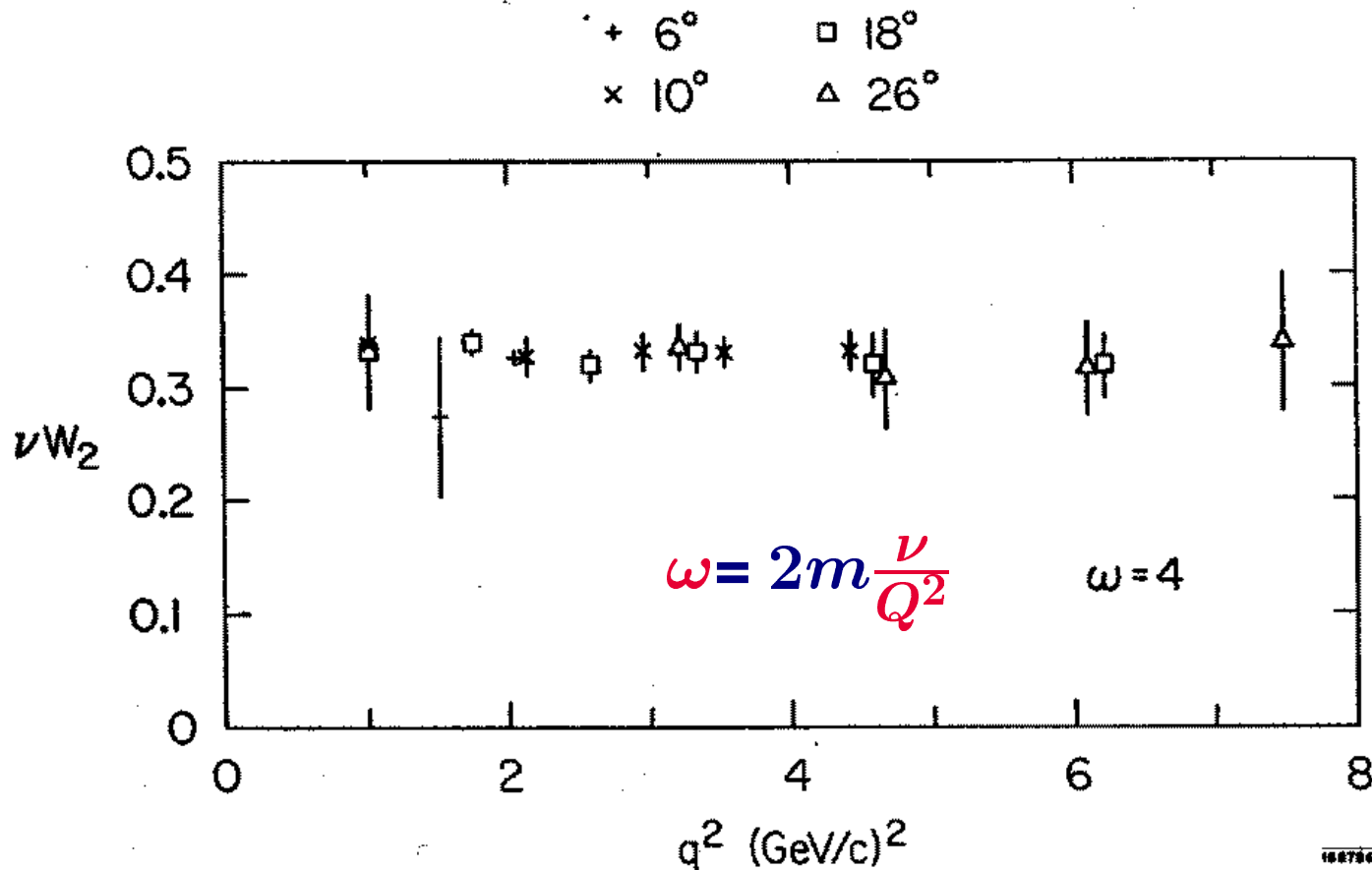
(i = sub-partículas del p)

¿Son las dos observaciones consecuencia de un mismo fenómeno?



- Bjorken (P.R. mar. 1969): algebra de corrientes, sis. ref. $P \rightarrow \infty$
Cuando ν y q^2 grandes \rightarrow **SCALING**

$$\nu W_2(\nu, Q^2) \rightarrow F_2(2m \frac{\nu}{Q^2}); \quad W_1(\nu, Q^2) \rightarrow F_1(2m \frac{\nu}{Q^2})$$



\Rightarrow Evidencia inequívoca de **Scaling**

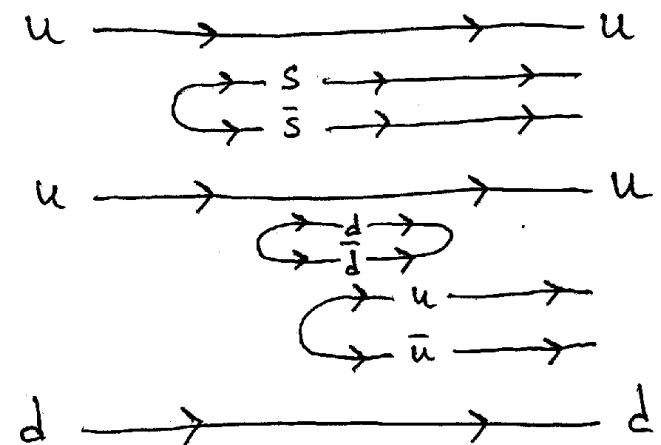
Lo que parece que los datos nos estan diciendo:

- σ_{inel} grande \rightarrow “constituyentes” dentro del **p**
- **Scaling** \rightarrow constituyentes “libres”

Una aproximación “más física” al scaling de Bjorken:

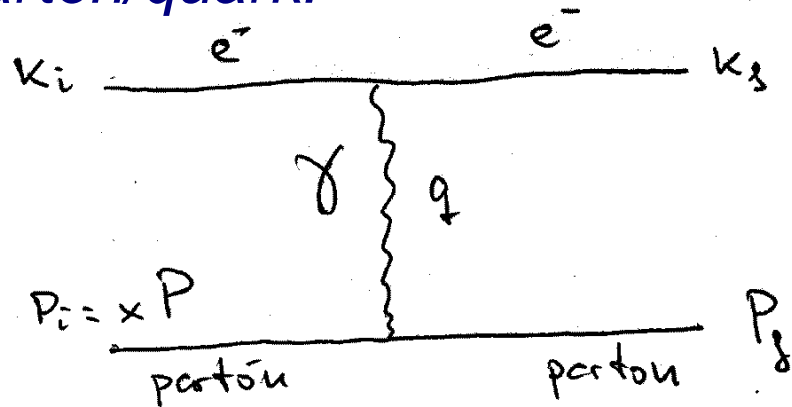
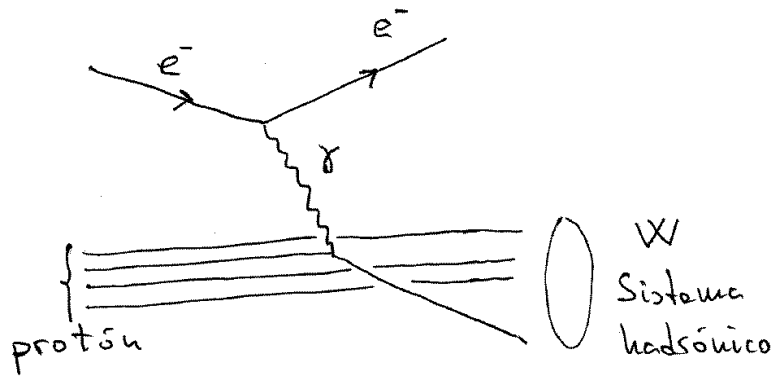
● Bjorken, Paschos (P.R. **sep. 1969**), Feynman: partones/quarks

- a alta energía hadrones compuestos de “partones” **NO interactuantes**
 \Rightarrow **Libertad Asintótica**
- candidatos a partones: los quarks
- p.ej. el **protón**: u,u,d + quarks del “mar”
- comparten el momento total del **p** portando una fracción **x** de él
- $P[xP_{proton} < P_{parton} < (x + dx)P_{proton}] = f(x)dx$
- **f(x)** independiente de proceso y energía



Modelo de partones/quarks

Interacción inelástica en el modelo parton/quark:



- de cinemática relativista básica:

$$x \approx \frac{1}{2m_p} \frac{Q^2}{\nu} = \frac{1}{\omega} \quad \text{y en el límite de alta energía:} \quad x = \frac{1}{\omega}$$

- ⇒ La variable ω^{-1} de scaling de Bjorken (ω) coincide con el momento fraccional del protón que porta el partón (x , desde entonces x_{bj})
- ⇒ Scaling es una predicción exacta del modelo de partones

- un cálculo sencillo nos lleva a:

$$\left. \frac{d\sigma}{dx dQ^2} \right|_{ep_{inelastico}} = \sum_{partons} \left. \frac{d\sigma}{dQ^2} \right|_{eparton(xP)_{elastico}}$$

y las funciones de estructura:

$$\nu W_2 = F_2(x) = \frac{1}{2} \left[\frac{4}{9} u(x) + \frac{1}{9} d(x) + \frac{4}{9} \bar{u}(x) + \dots \right] = 2x F_1(x) = 2x (m_p W_1)$$

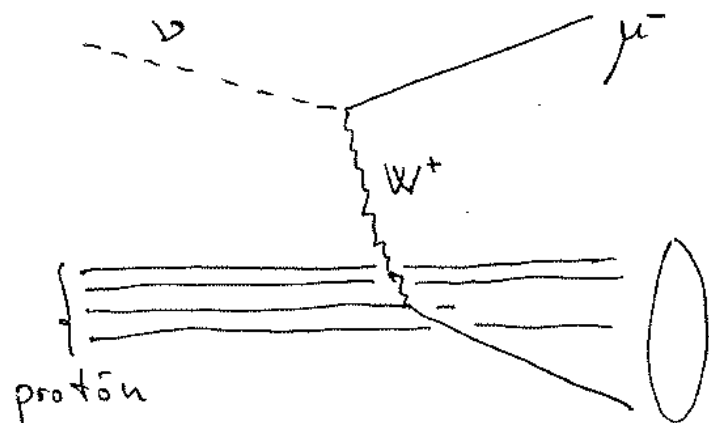
- ⇒ interacción fuerte en $u(x)$, $d(x)$

- Predicciones inequívocas en ep , en

$$\frac{1}{4} < \frac{F_2^{en}(x)}{F_2^{ep}(x)} < 4; \quad \frac{F_2^{en}(x)}{F_2^{ep}(x)} \xrightarrow{x \rightarrow 0} 1$$

Confirmadas en programa experimental SLAC 1969-1972

- Predicciones inequívocas en νp (¡ interacción débil !)

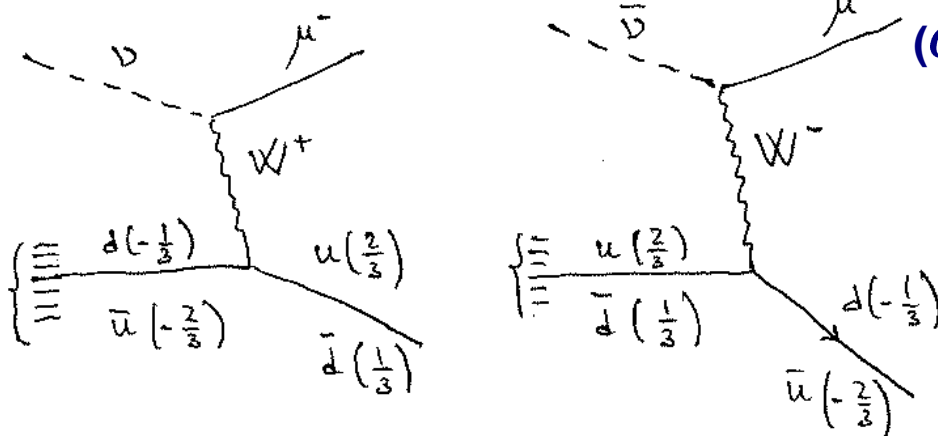


Bjorken (1969) ...

$$\frac{\sigma^{\nu}}{E} = 1.56 [Q + \frac{1}{3}\bar{Q}] 10^{-38} \text{ cm}^2/\text{GeV}$$

$$\frac{\sigma^{\bar{\nu}}}{E} = 1.56 [\bar{Q} + \frac{1}{3}Q] 10^{-38} \text{ cm}^2/\text{GeV}$$

(Q: momento fraccional total quarks valencia)



$$\frac{\sigma^{\bar{\nu}}}{\sigma^{\nu}} \approx \frac{1}{3}$$

Modelo de partones/quarks

(L.A. 1973)

Dispersión Inelástica νp

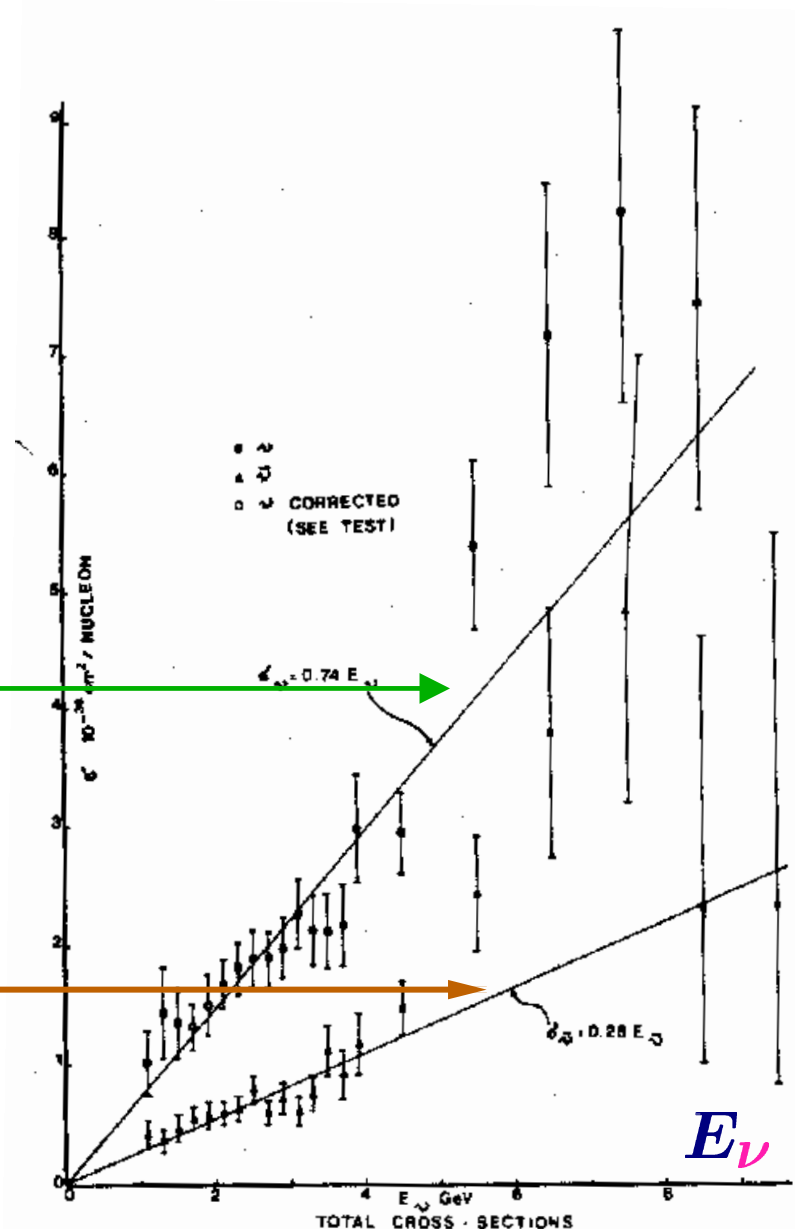
(P.L. sept. 1973)

- Cámara burbujas Gargamelle
- Haz de $\nu, \bar{\nu}$ del CERN-PS
(p.ej. $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu, \pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu$)

$$\frac{\sigma_{\bar{\nu}}}{\sigma_{\nu}} = 0.38 \approx \frac{1}{3}$$

$$\sigma_{\nu} = 0.74 E_{\nu}$$

$$\sigma_{\bar{\nu}} = 0.28 E_{\nu}$$



⇒ Modelo de partones \approx correcto

⇒ Cualquier teoría de las interacciones fuertes tiene que aproximar se a modelo de partones, tiene que contener scaling

¿ dónde estan los quarks ?, ¿ cómo se forman los hadrones ?

Libertad Asintótica

2 x PRL jun. 1973 (Gross, Wilczek, Politzer, Nobel 2004)

● Simplificación:

$$\alpha_s(E) = \frac{12\pi}{(33-2n_q)\log(E/\Lambda)^2}$$

Λ a medir; $\Lambda \sim 0.2 \text{ GeV}$

⇒ Predice Libertad Asintótica

⇒ Además predice (a confirmar por experimento):

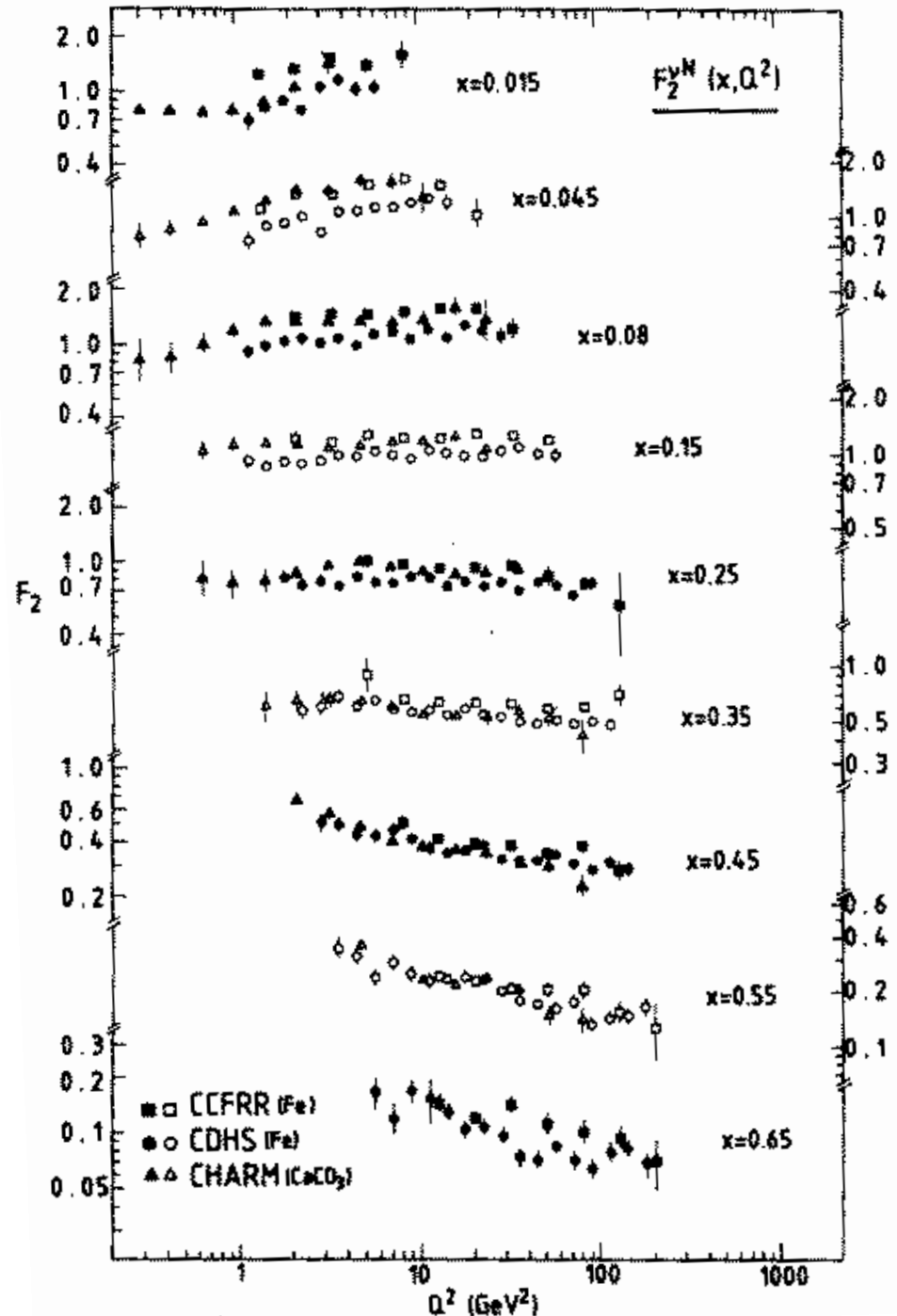
- desviación logarítmica a “Scaling”
- variación logarítmica de constante de acoplo fuerte

⇒ Puede contemplar confinamiento

Confirmación experimental de la desviación a "Scaling"

Resultados de varios experimentos de dispersión ν -nucleon
(~ 1985)

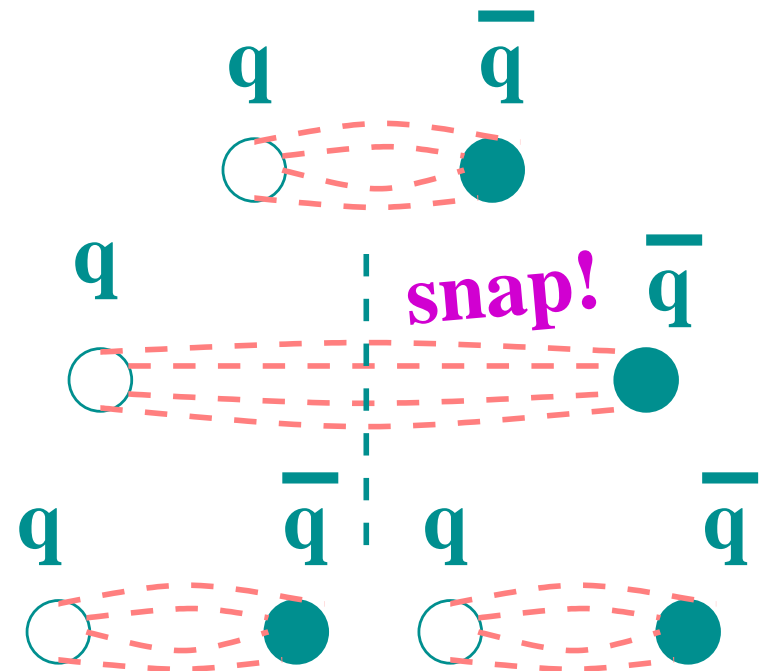
⇒ clara desviación
logarítmica



Un asunto no entendido totalmente

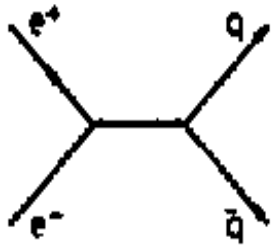
“Confinamiento”

- Cálculos en el Retículo han evidenciado la capacidad de QCD de formar hadrones a partir de los quarks ...
... ¿de cualquier energía ?
- La energía potencial para separar dos quarks aumenta linealmente con su distancia
 - más favorable energéticamente la creacción de un par $q \bar{q}$ del vacio
 - formación de nuevos hadrones
- ⇒ Un chorro (jet) de hadrones en la dirección del quark original ... en vez de este ...

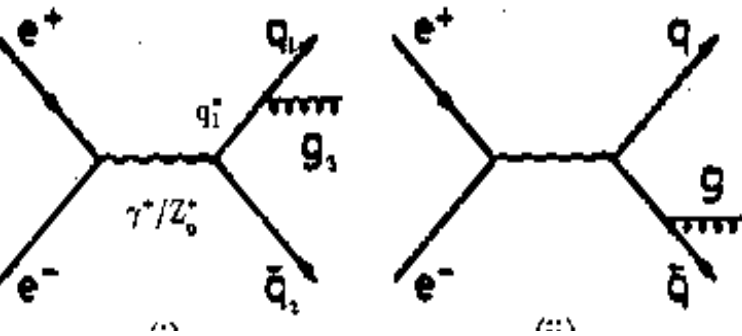


Producción de chorros en e^+e^-

TASSO en **PETRA** ($\sqrt{s} = 14 - 45$ GeV)



$O(g^0)$



$O(g)$

$O(g^2)$

$e^+e^- \rightarrow q\bar{q}gg$

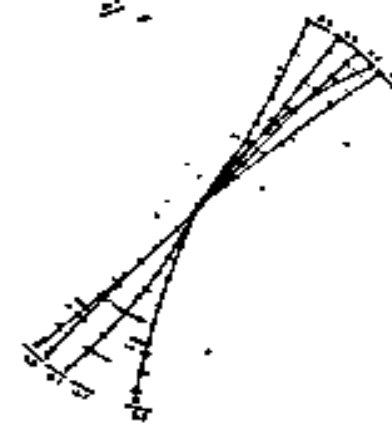
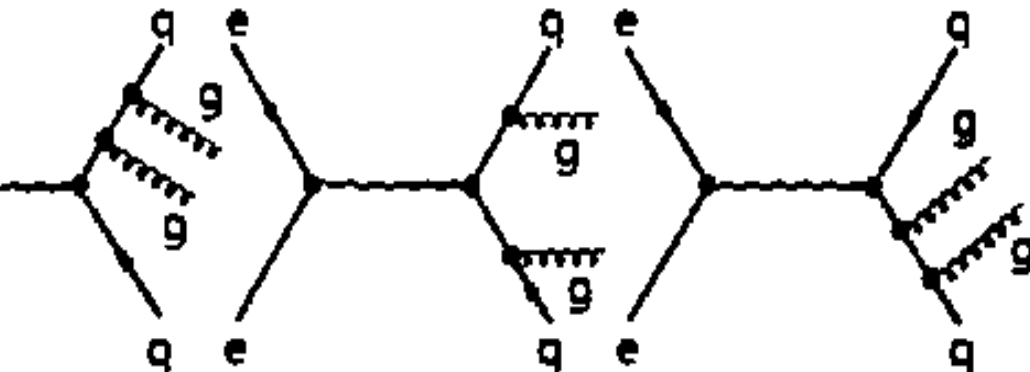


Figure 1.2a: A two jet event observed in the TASSO detector

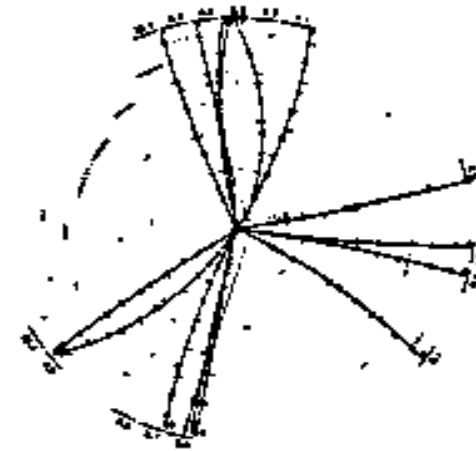


Figure 1.2b: A three jet event observed in the TASSO detector

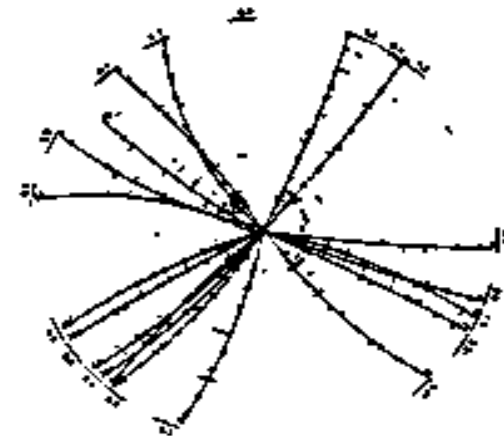
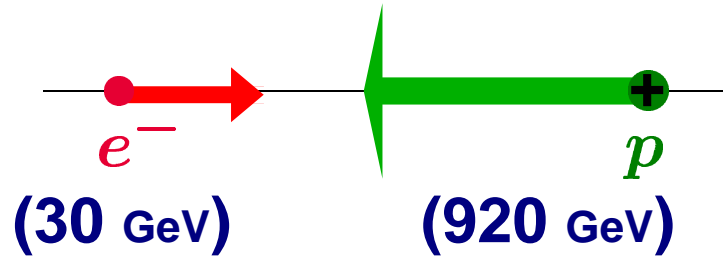


Figure 1.2c: A four jet event observed in the TASSO detector

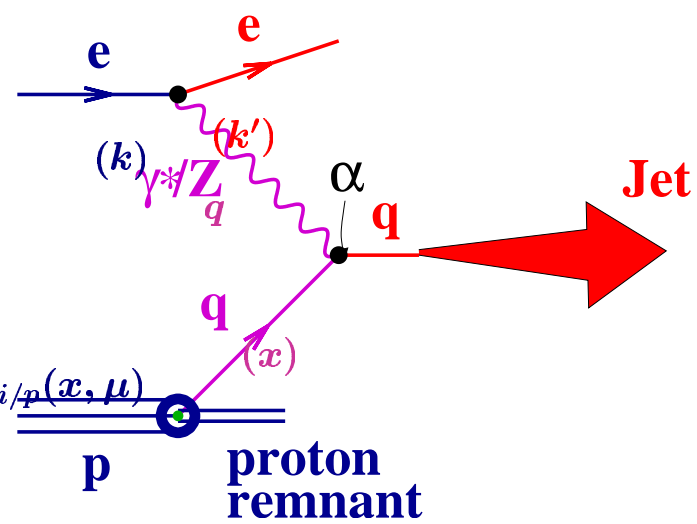
Resultados Experimentales Actuales

HERA

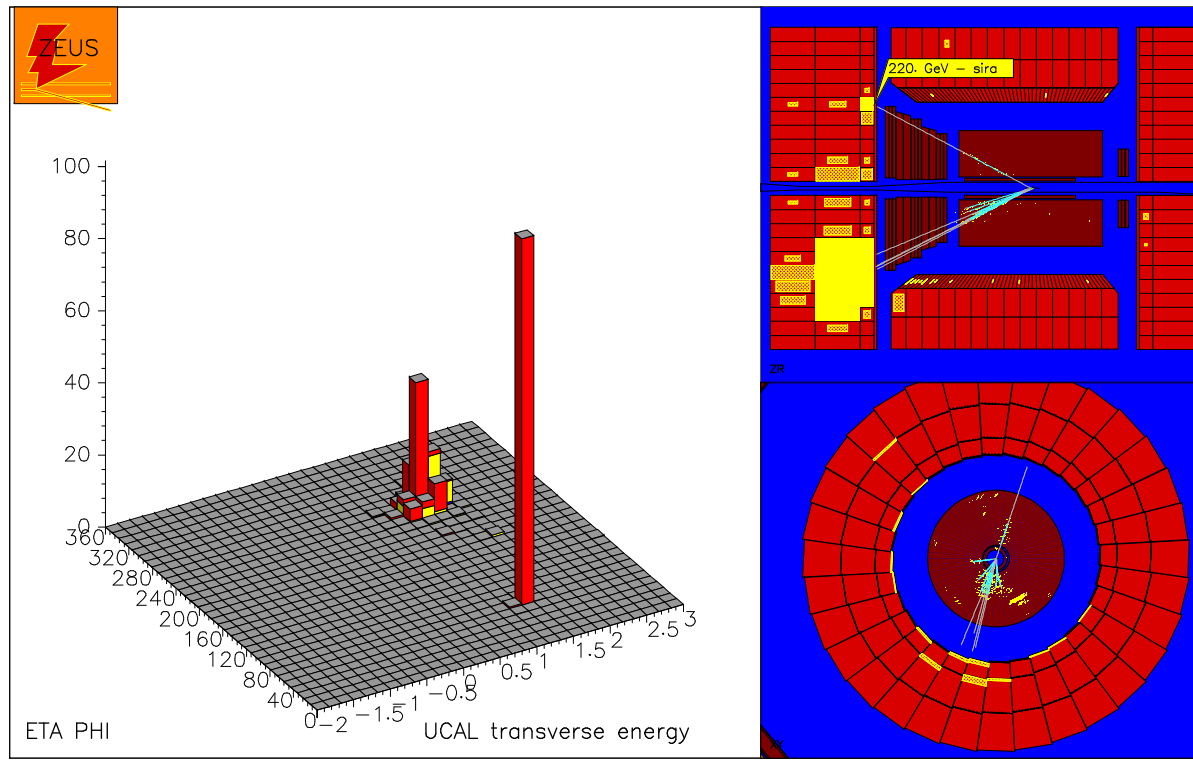
HERA:



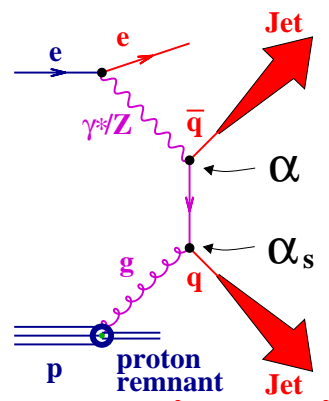
● orden 0 en QCD ($\mathcal{O}(\alpha^1\alpha_s^0)$):



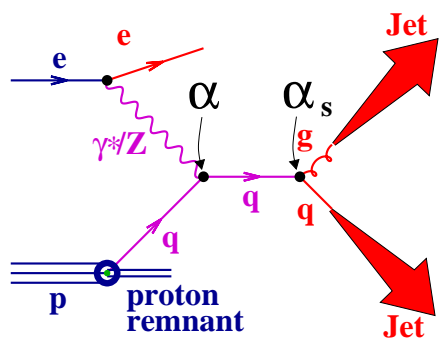
$ep \rightarrow e + \text{jet} + X$
(quark-parton model)



● First order in QCD ($\mathcal{O}(\alpha^1\alpha_s^1)$):



$ep \rightarrow e + \text{jet} + \text{jet} + X$



$ep \rightarrow e + \text{jet} + \text{jet} + X$

- Ajuste a:

- datos **ZEUS**

$$F_2^p(x, Q^2)_{\text{ZEUS}}$$

- $\mu p, \mu d$ data:

$$F_2^{p,d}(x, Q^2)_{\text{BCDMS, E665, NMC}}$$

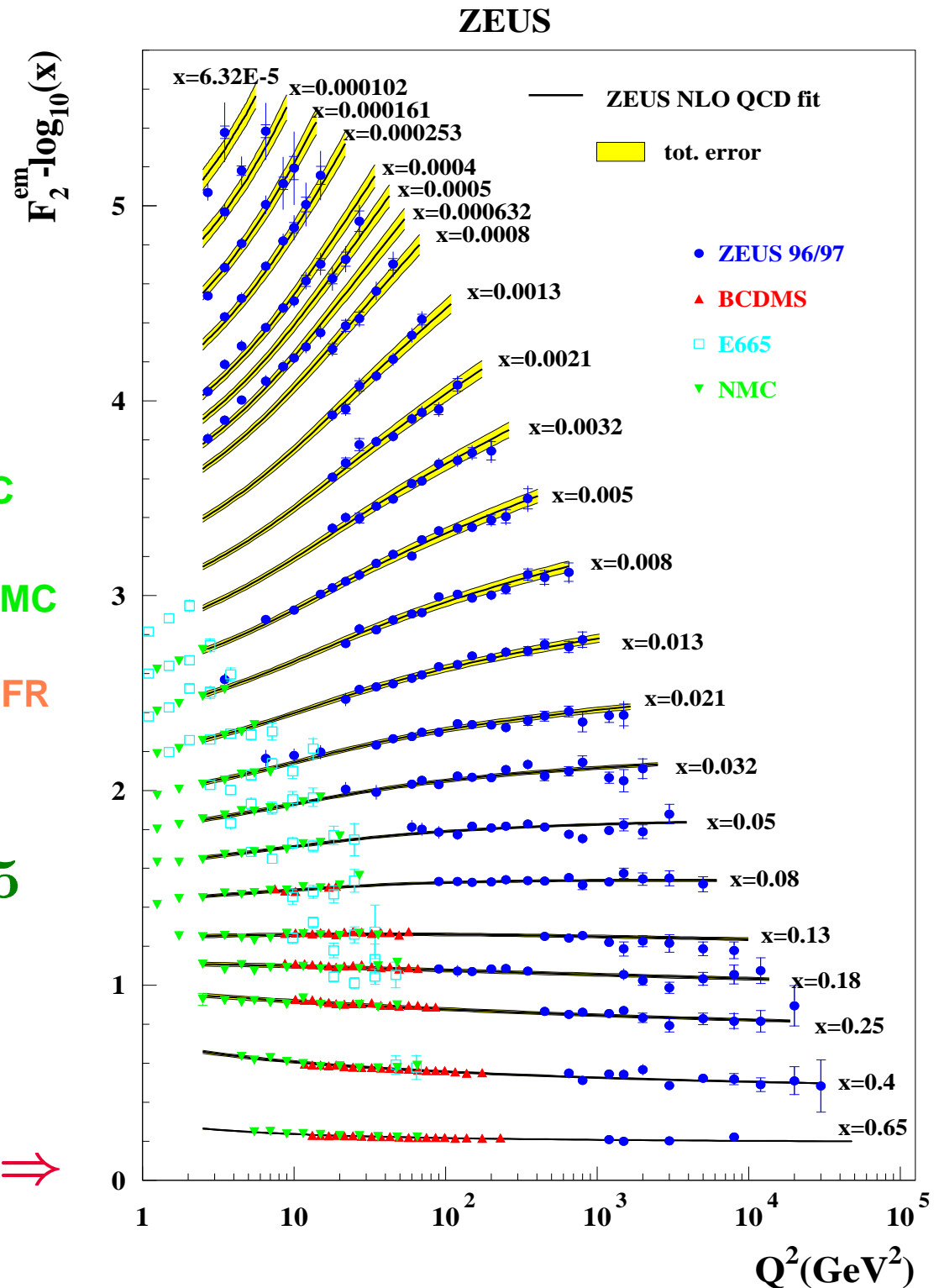
- $F_2^p(x, Q^2)/F_2^d(x, Q^2)$ **NMC**

- νFe data: $x F_3^p(x, Q^2)$ **CCFR**

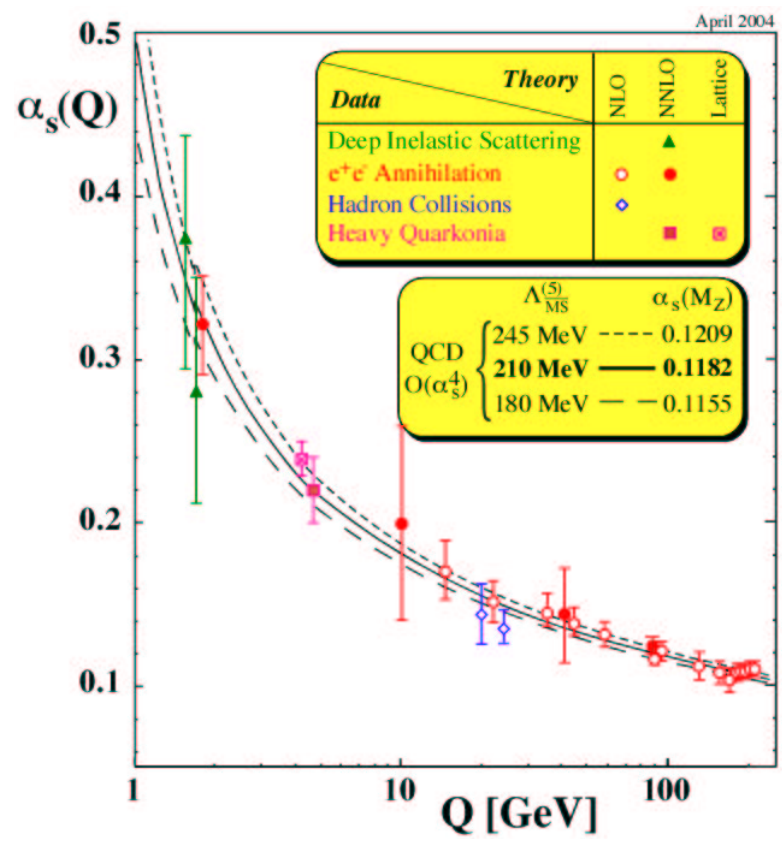
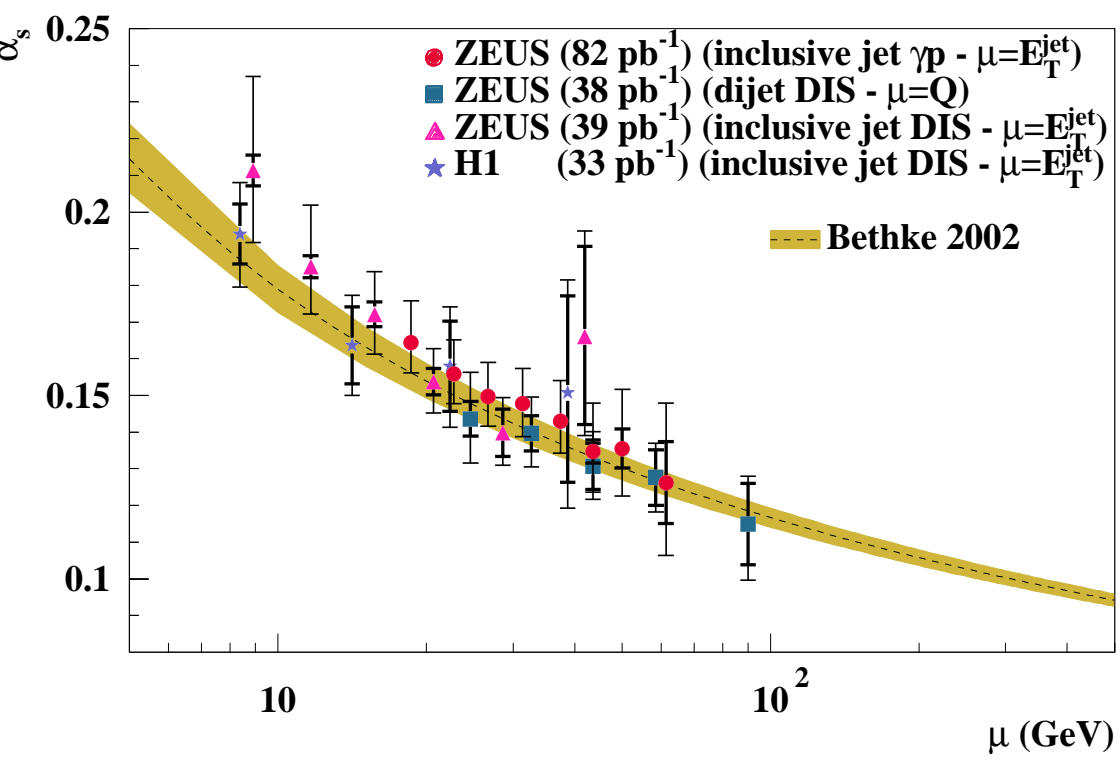
- En $2.5 < Q^2 < 30000 \text{ GEV}^2$,
 $6.3 \times 10^{-5} < x_{bj} < 0.65$

- Evolución **QCD**:

- DGLAP NLO con $Q_0^2 = 7 \text{ GEV}^2 \Rightarrow$



Medida directa de la variación de α_s con E



Medidas ZEUS realizadas por miembros del **Grupo Experimental de Altas Energías** del Dept. de Física Teórica (Terron, Glasman, Gonzalez, Tassi ...)

A ser presentado por Wilczek en ceremonia nobel