

Riassunto della lezione precedente

- interazione debole distingue stati di parità diversa:
 - ⇒ nuova struttura antisimmetrica in tensori leptónico e adronico
 - ⇒ in regime DIS nuova funzione di struttura F_3 (flavor non-singlet), mixing di flavor diversi (angolo di Cabibbo)
- verifica sperimentale di QPM in reazioni elettrodeboli:
 1. DIS con (anti)neutrini su nuclei isoscalari
 - sez. d'urto di neutrino domina quella per antineutrino
 - antipartoni soppressi in mezzo nucleare
 2. rapporto di carica su nuclei isoscalari per DIS con elettroni e (anti)neutrini

Regole di somma

normalizzazioni :

$$\int_0^1 dx u(x) - \bar{u}(x) = n_u \quad \begin{matrix} \swarrow & 2 & p \\ \searrow & 1 & n \end{matrix}$$

$$\int_0^1 dx d(x) - \bar{d}(x) = n_d \quad \begin{matrix} \swarrow & 1 & p \\ \searrow & 2 & n \end{matrix}$$

$$\int_0^1 dx s(x) - \bar{s}(x) = 0$$

Adler

$$\int_0^1 \frac{dx}{2x} \left(F_2^{\bar{\nu}p} - F_2^{\nu p} \right) = n_u - n_d + n_c - n_s = 1$$



dato exp. 1.01 ± 0.20 Allasia *et al.*, P.L. **B135** 231 (84)
Z. Phys. **C28** 321 (85)

unpolarized Bjorken

$$\int_0^1 dx \left(F_1^{\bar{\nu}p} - F_1^{\nu p} \right) = n_u - n_d + n_c - n_s = 1$$

Regole di somma (continua)



Gross-Lewellin Smith $\int_0^1 \frac{dx}{2} \left(F_3^{\bar{\nu}p} + F_3^{\nu p} \right) = n_u + n_d + n_c + n_s = 3$

⇔ eccesso di 3 quarks su antiquarks nel p
(supponendo nessun eccesso per s e c)

Mishra, Proc. of SLAC Summer Institute
(SLAC, Stanford, 1991) p. 407 dato exp. 2.50 ± 0.08

correzioni pQCD evidenti!

Gottfried $\int_0^1 \frac{dx}{x} \left(F_2^{e^-p} - F_2^{e^-n} \right) = \frac{1}{3} \int_0^1 dx (u^v - d^v) + \frac{1}{3} \int_0^1 dx (U^{sea} - D^{sea})$
 $\sim \frac{1}{3}(n_u - n_d) = \frac{1}{3}$



$U^{sea} = D^{sea}$

NMC coll., P.R.L. **66** 2712 (91)
Arneodo, P.Rep. **240** 301 (94)

dato exp. 0.240 ± 0.016

correzioni QCD $\Rightarrow U^{sea} \neq D^{sea}$ $d\bar{d} > u\bar{u}$

Regole di somma (continua)

Momentum sum rule



$$\int_0^1 dx \left[9 \left(F_2^{e^-p} + F_2^{e^-n} \right) - 2 \left(F_2^{\nu p} + F_2^{\nu n} \right) \right] \underset{c, \bar{c} \sim 0}{\approx} \int_0^1 dx x [u + \bar{u} + d + \bar{d} - 2(s + \bar{s})] = 1 - \epsilon$$

dati $\rightarrow \epsilon \sim 0.5!$

ma



$$\frac{9(1 - 2\delta)}{5 + 2\delta} \int_0^1 dx \left(F_2^{e^-p} + F_2^{e^-n} \right) = \int_0^1 dx x [u + \bar{u} + d + \bar{d} - 2(s + \bar{s})] = 1 - \epsilon$$

dati per $F_2^{p/n}$
 simmetra $SU_f(3)$ per q^{sea}
 estrazione $u(x), d(x), s(x)$

$$\left. \begin{array}{l} \text{dati per } F_2^{p/n} \\ \text{simmetra } SU_f(3) \text{ per } q^{\text{sea}} \\ \text{estrazione } u(x), d(x), s(x) \end{array} \right\} \begin{array}{l} \epsilon \approx 0.54 \div 0.56 \pm 0.04 \\ \Rightarrow \delta \approx 0.06 \end{array}$$

$$\delta = \frac{\int_0^1 dx x (s + \bar{s})}{\int_0^1 dx x (u + \bar{u} + d + \bar{d})}$$

partoni senza carica (= gluoni) portano circa metà del momento del $N!$

Quark Parton Model

sezione d'urto per processo fondamentale

= sezione d'urto elastica su partoni puntiformi a spin $\frac{1}{2}$ \otimes probabilità di distribuzione dei partoni nell'adrone

- partoni prevalenti su antipartoni per $x_B > \sim 0.1$; viceversa a basso x_B
- partoni interagiscono come leptoni \rightarrow sez. d'urto calcolabile all'ordine voluto in QED
- sez. d'urto dipendente dal processo; cinematica **hard (high Q)**
- distribuzione partonica contiene effetti nonperturbativi per formare adroni da partoni; cinematica **soft (low p_T)**
- dipende dall'adrone ma non dal processo \rightarrow "universale"
- estraibile da confronto con dati dopo aver calcolato sez. d'urto elementare

Quark Parton Model (continua)

QPM

fenomeni ad alta energia =

{processi hard calcolabili in QED} \otimes {distribuzioni partoniche universali
estraibili da un set di dati}

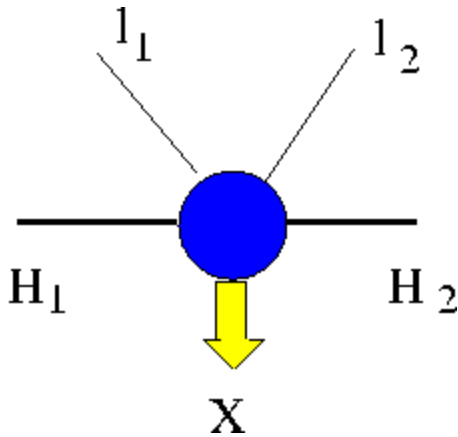
esplorare altri processi ad alta energia “riciclando” le distribuzioni
partoniche estratte da DIS

→ test della fattorizzazione

→ le distribuzioni partoniche sono davvero universali ?

Drell - Yan

[Drell & Yan, P.R.L. **25** (70) 316]



adroni $H_{1/2}$ in collisione con momento $P_{1/2}$
leptoni $l_{1/2}$ prodotti con momento $k_{1/2}$

energia disponibile nel c.m. degli adroni
 $s = (P_1 + P_2)^2$

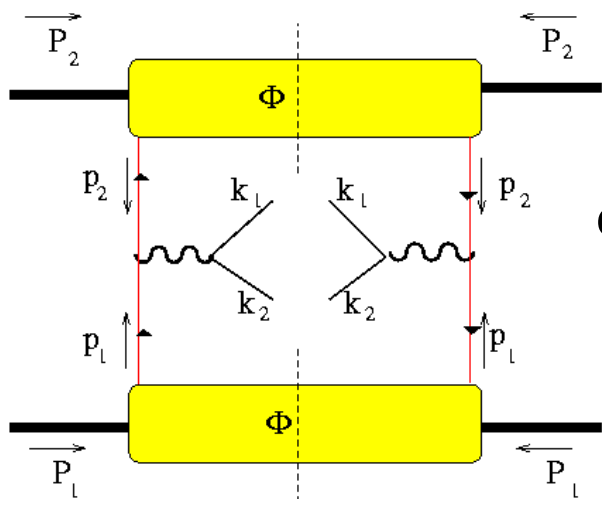
massa invariante della coppia di leptoni
 $M^2 \equiv q^2 = (k_1 + k_2)^2$

$q^2 = Q^2 \geq 0$ time-like

regime DIS : $q^2, s \rightarrow \infty$ con $\tau = q^2 / s$ fissato $0 \leq \tau \leq 1$

la coppia di leptoni non interagisce con la coppia di adroni iniziali
→ è manifestazione del decadimento dei bosoni di gauge intermedi
prodotti dalla annichilazione adronica

bosoni di gauge a spin 1 con $Q^2 \geq 0$ → risonanze mesoniche vettoriali
→ decadimento → produzione di coppie leptoniche con p_T



$$p_1 = x_1 P_1 \quad \text{con} \quad x_1 = \frac{Q^2}{2P_1 \cdot q} \quad 1 \geq x_{1/2} \geq 0$$

$$p_2 = x_2 P_2 \quad x_2 = \frac{Q^2}{2P_2 \cdot q}$$

energia disponibile della reazione elementare :

$$(p_1 + p_2)^2 \sim 2 p_1 \cdot p_2 \sim x_1 x_2 (P_1 + P_2)^2 = x_1 x_2 s$$

$$\tau = \frac{q^2}{s} = \frac{M^2}{s} = x_1 x_2 \quad 1 \geq \tau \geq 0$$

$$x_F = x_1 - x_2 \quad 1 \geq x_F \geq -1$$

$$x_{1/2} = \frac{1}{2} \left(\pm x_F + \sqrt{x_F^2 + \frac{4M^2}{s}} \right)$$



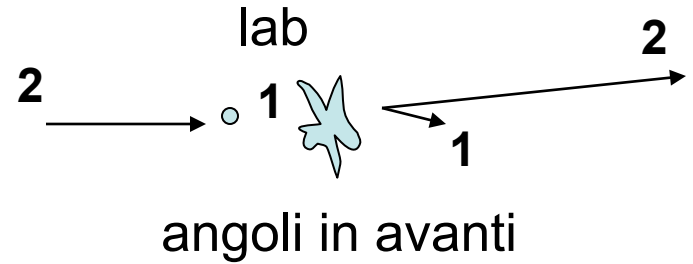
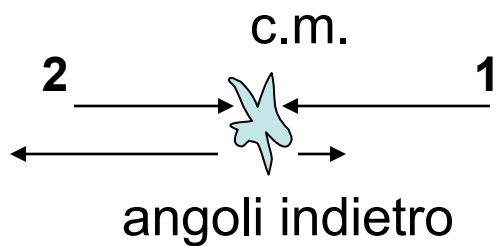
$x_{1/2}$ = frazione del momento longitudinale

x_F = momento longitudinale della coppia nel c.m. rispetto al momento longitudinale massimo possibile

supponiamo H_2 = fascio e H_1 = target

$$x_F \rightarrow -1 \Rightarrow x_2 \rightarrow 1$$

$$x_1 \rightarrow 0$$



$$x_F \rightarrow 1 \Rightarrow x_2 \rightarrow 0$$

$$x_1 \rightarrow 1$$

situazione rovesciata

“solite” formule, applicate al processo DY

$$d\sigma = \frac{1}{F} |\mathcal{M}|^2 dR$$



$$F = 4\sqrt{(P_1 \cdot P_2)^2 - M_1^2 M_2^2} \sim 2s$$

$$dR = (2\pi)^4 \delta(P_1 + P_2 - P_X - k_1 - k_2) \frac{d\mathbf{P}_X}{(2\pi)^3 2P_X^0} \frac{d\mathbf{k}_1}{(2\pi)^3 2E_1} \frac{d\mathbf{k}_2}{(2\pi)^3 2E_2}$$

$$|\mathcal{M}|^2 = \frac{e^4}{Q^4} L_{\mu\nu} H^{\mu\nu} \quad H^{\mu\nu} = \sum_X \langle P_1 S_1, P_2 S_2 | J^\mu | P_X \rangle \langle P_X | J^\nu | P_1 S_1, P_2 S_2 \rangle$$

$$(2\pi)^3 2E_1 (2\pi)^3 2E_2 \frac{d\sigma}{d\mathbf{k}_1 d\mathbf{k}_2} = 2 \frac{1}{2s} (2\pi)^4 \frac{e^4}{Q^4} L_{\mu\nu} \times \frac{1}{(2\pi)^4} \int \frac{d\mathbf{P}_X}{(2\pi)^3 2P_X^0} (2\pi)^4 \delta(P_1 + P_2 - P_X - q) H^{\mu\nu}$$

somma sugli stati
di polarizzazione dei
leptoni finali

$$= (2\pi)^4 32\pi^2 \frac{1}{2s} \frac{\alpha^2}{Q^4} L_{\mu\nu} W^{\mu\nu}$$

$$\frac{d\mathbf{k}_1}{(2\pi)^3 2E_1} \frac{d\mathbf{k}_2}{(2\pi)^3 2E_2}$$

$$\left[\Leftrightarrow d^4 k_1 d^4 k_2 = d^4 q d^4(k_1 - k_2) \right]$$

$$= \Big|_{\text{c.m.}} \frac{d^4 q d\Omega}{(2\pi)^4 32\pi^2}$$

$$\frac{d\sigma}{d^4 q d\Omega} = \frac{\alpha^2}{2s Q^4} L_{\mu\nu} W^{\mu\nu}$$

QPM picture

approssimazione: Q^2 non elevato \rightarrow bosone di gauge γ
 energia disponibile nel c.m. della reazione elementare:

$$(p_1 + p_2)^2 \sim 2 p_1 \cdot p_2 = x_1 x_2 2 P_1 \cdot P_2 \sim x_1 x_2 (P_1 + P_2)^2 = x_1 x_2 s$$

processo elementare: $(q\bar{q} \rightarrow l\bar{l}) \equiv (e^+e^- \rightarrow l\bar{l})$ elastico

esempio: produzione di $\mu^+\mu^-$ $\frac{d\sigma^{el}}{dQ^2} = \frac{4\pi\alpha^2}{3Q^2} e_f^2 \delta(x_1 x_2 s - Q^2)$

$$\frac{d\sigma}{dQ^2} = \left(\frac{1}{N_c} \sum_f \right) \int_0^1 dx_1 dx_2 \phi_f(x_1) \frac{d\sigma^{el}}{dQ^2} \phi_{\bar{f}}(x_2)$$

N_c modi di creare
 la coppia
 conservando il colore
 nel vertice;

ciascuna ϕ_f porta N_c
 $\rightarrow (N_c \times N_c) / N_c = N_c$
 \rightarrow test di SU_c (3)

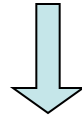
$$= \frac{4\pi\alpha^2}{9Q^4} \sum_f e_f^2 \int_0^1 dx_1 dx_2 \phi_f(x_1) \phi_{\bar{f}}(x_2) \delta\left(x_1 x_2 \frac{s}{Q^2} - 1\right)$$

$$\sum_f \dots \phi_f(x_1) \phi_{\bar{f}}(x_2) \equiv \sum_f \dots [\phi_f(x_1) \phi_{\bar{f}}(x_2) + \phi_{\bar{f}}(x_1) \phi_f(x_2)]$$

QPM: test sperimentali

a) scaling della sez. d'urto

$$Q^4 \frac{d\sigma}{dQ^2} = \frac{4\pi\alpha^2}{9} \overline{\sum}_f e_f^2 \int_0^1 dx_1 dx_2 \phi_f(x_1) \phi_{\bar{f}}(x_2) \delta\left(\frac{x_1 x_2}{\tau} - 1\right)$$



$$Q^3 \frac{d\sigma}{dQ dx_1 dx_2} = \frac{8\pi\alpha^2}{9} \overline{\sum}_f e_f^2 \phi_f(x_1) \phi_{\bar{f}}(x_2) \delta\left(\frac{x_1 x_2}{\tau} - 1\right)$$

oppure, con $\begin{cases} x_F = x_1 - x_2 \\ \tau = x_1 x_2 \end{cases}$ $J = \begin{vmatrix} \frac{\partial x_F}{\partial x_1} & \frac{\partial x_F}{\partial x_2} \\ \frac{\partial \tau}{\partial x_1} & \frac{\partial \tau}{\partial x_2} \end{vmatrix} = x_1 + x_2$

$$M^3 \frac{d\sigma}{dM dx_F} = \int d\tau \frac{d\sigma}{dM dx_F d\tau} = \frac{8\pi\alpha^2}{9} \frac{\tau}{\sqrt{x_F^2 + 4\tau}} \overline{\sum}_f e_f^2 \phi_f(x_1) \phi_{\bar{f}}(x_2)$$

$$x_{1/2} = \frac{1}{2} \left(\pm x_F + \sqrt{x_F^2 + 4\tau} \right)$$



scaling $\forall s \rightarrow$ interazione elementare puntiforme
universalità delle densità partoniche
(da DIS a DY)

piccole deviazioni perche`
pQCD $\rightarrow \phi_f(x, \log Q^2)$

exp. E605 - Fermilab
Phys. Rev. D**43** (91) 2815

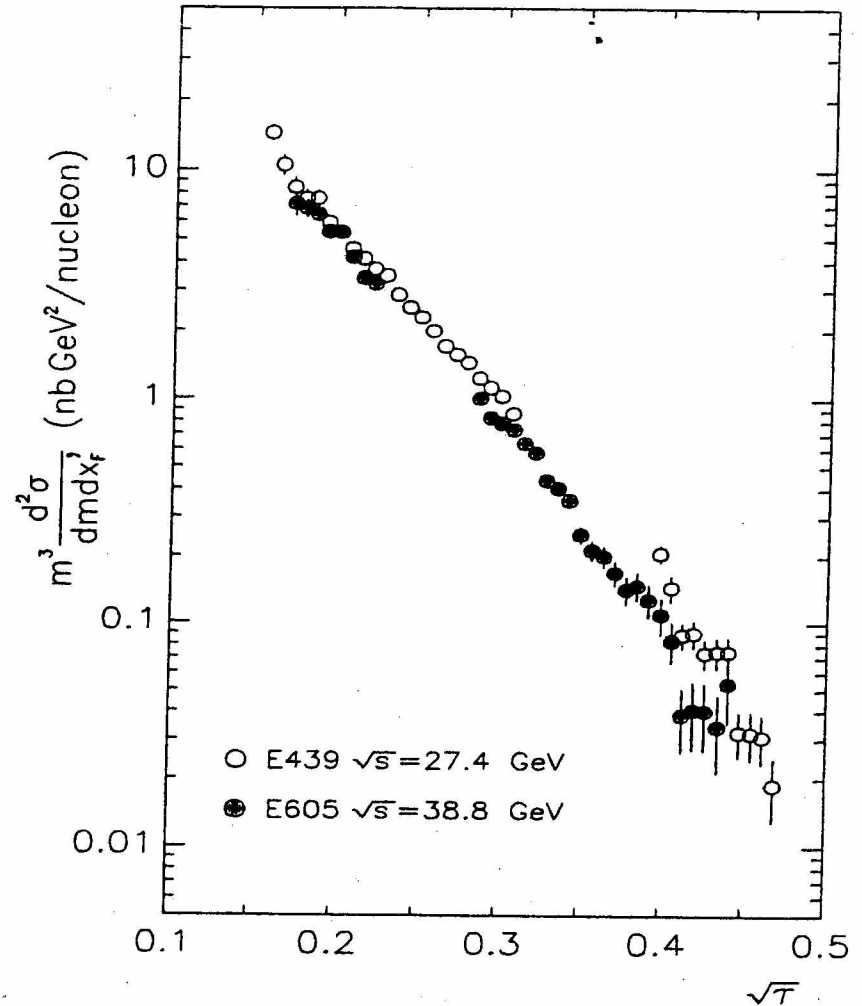
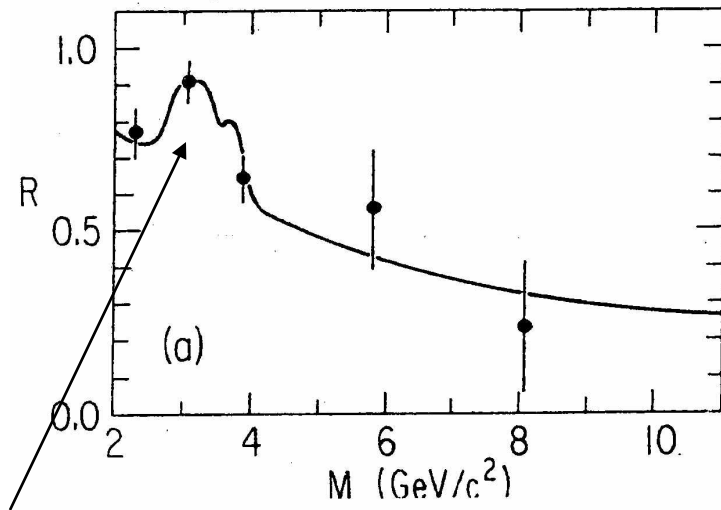


FIG. 12. Scaling form of the dimuon yield versus \sqrt{T} comparing this experiment with experiment E439 (Smith *et al.*, Ref. 31, $\sqrt{s} = 27.4$ GeV) for the interval $0 < x'_F < .2$.

b) rapporto di carica di DY su nuclei isoscalari



$M \sim J/\psi \rightarrow$ meccanismo differente

Fermilab
Phys. Rev. Lett. **42** (79) 948

nuclei isoscalari $\rightarrow n_u = n_d$ (ex. ^{12}C)

$$1 \quad \left\langle \begin{array}{l} \tau \rightarrow 0 \\ \tau \rightarrow 1 \end{array} \right. \frac{\pi^+ {}^{12}\text{C} \rightarrow \mu^+ \mu^- X}{\pi^- {}^{12}\text{C} \rightarrow \mu^+ \mu^- X} \quad \left. \begin{array}{l} \tau \rightarrow 1 \\ \tau \rightarrow 0 \end{array} \right\} \quad \frac{1}{4}$$

perché?

$\tau = x_1 x_2 \rightarrow 1$ valence area

$$\frac{\pi^+ (u\bar{d}) C(u_1 \dots u_n d_1 \dots d_m)}{\pi^- (d\bar{u}) C(u_1 \dots u_n d_1 \dots d_m)}$$

$$\sim \frac{e_d^2}{e_u^2} = \frac{1}{4}$$

$\tau = x_1 x_2 \rightarrow 0$ sea area

$$\frac{\pi^+ C(\text{..sea quarks..})}{\pi^- C(\text{..sea quarks..})}$$

~ 1

meccanismo elementare

$$\boxed{q\bar{q} \rightarrow l\bar{l}}$$

c) rapporto DY tra π e N

N non ha antiquark di valenza
per annichilazione

$$1 \leftarrow \frac{\pi^- N \rightarrow \mu^+ \mu^- X}{NN \rightarrow \mu^+ \mu^- X} \rightarrow$$

$$\sqrt{\tau} \rightarrow 0 \qquad \qquad \qquad \sqrt{\tau} \rightarrow 1$$

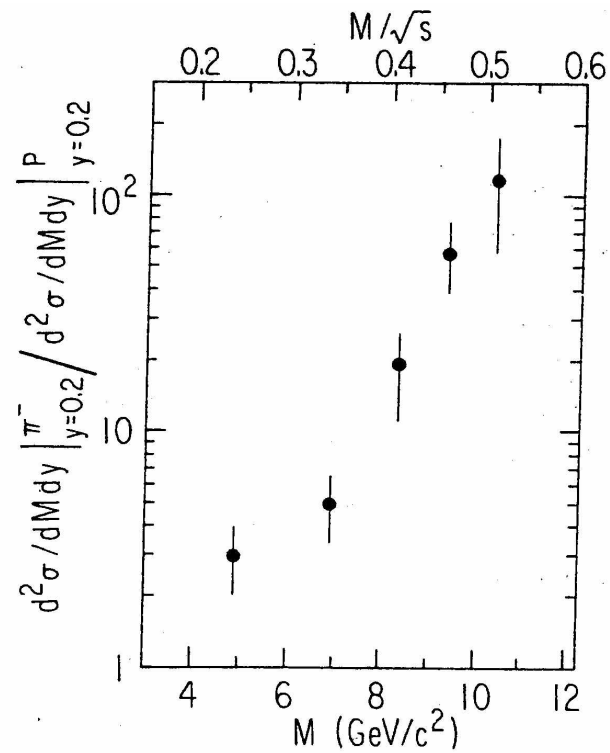


FIG. 1. The ratio of π^- -induced to proton-induced μ -pair cross section at $y_{c.m.} = 0.2$ as a function of mass. Proton data at 225 GeV/c has been calculated from the scaling observed in 200-, 300-, and 400-GeV/c data of Ref. 4.

Fermilab
Phys. Rev. Lett. **42** (79) 948

ipotesi QPM : discrepanze

$$\gamma^* \rightarrow \mu^+ \mu^- X$$

al crescere di $Q^2 \equiv M^2$ si eccitano
altre risonanze mesoniche vettoriali:

$$M \sim 3 \text{ GeV} \quad J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^- X$$

$$M \sim 9 \div 10.5 \text{ GeV} \quad Y \rightarrow \mu^+ \mu^- X$$

....

$$M \sim 70 \text{ GeV} \quad Z^0, W^\pm$$

meccanismo elementare
diverso da QPM picture (QED)

$$\text{Inoltre} \quad \frac{d\sigma(\text{exp.})}{d\sigma(\text{th.})} \sim K \sim 2 \div 3 !$$

con anche
dipendenza
anche da x_F

K factor = misura delle
correzioni pQCD
oltre il QPM

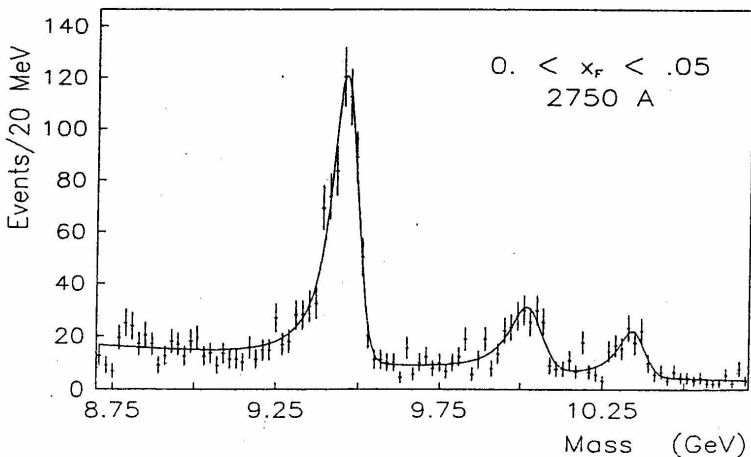
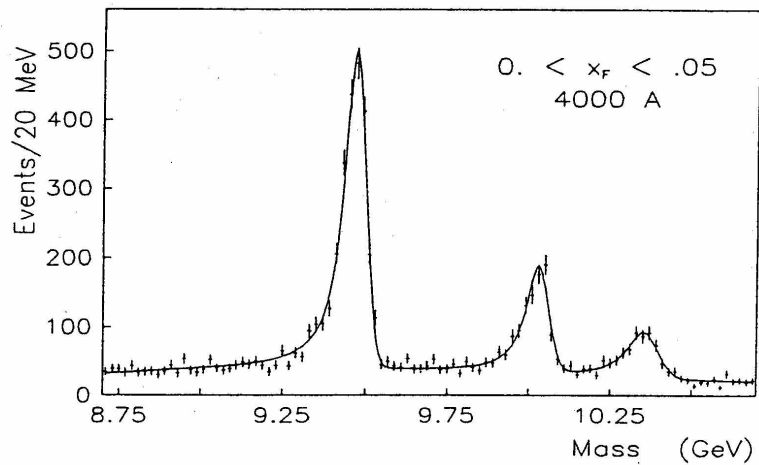


FIG. 16. The fit function used to extract Υ cross sections superimposed on the raw mass spectrum of the two data sets.

exp. E605 - Fermilab
 Phys. Rev. D**43** (91) 2815

21-Nov-13

spettro della famiglia Υ ($b\bar{b}$)

differente distribuzione in q_T della coppia di leptoni \rightarrow nuovo meccanismo ?

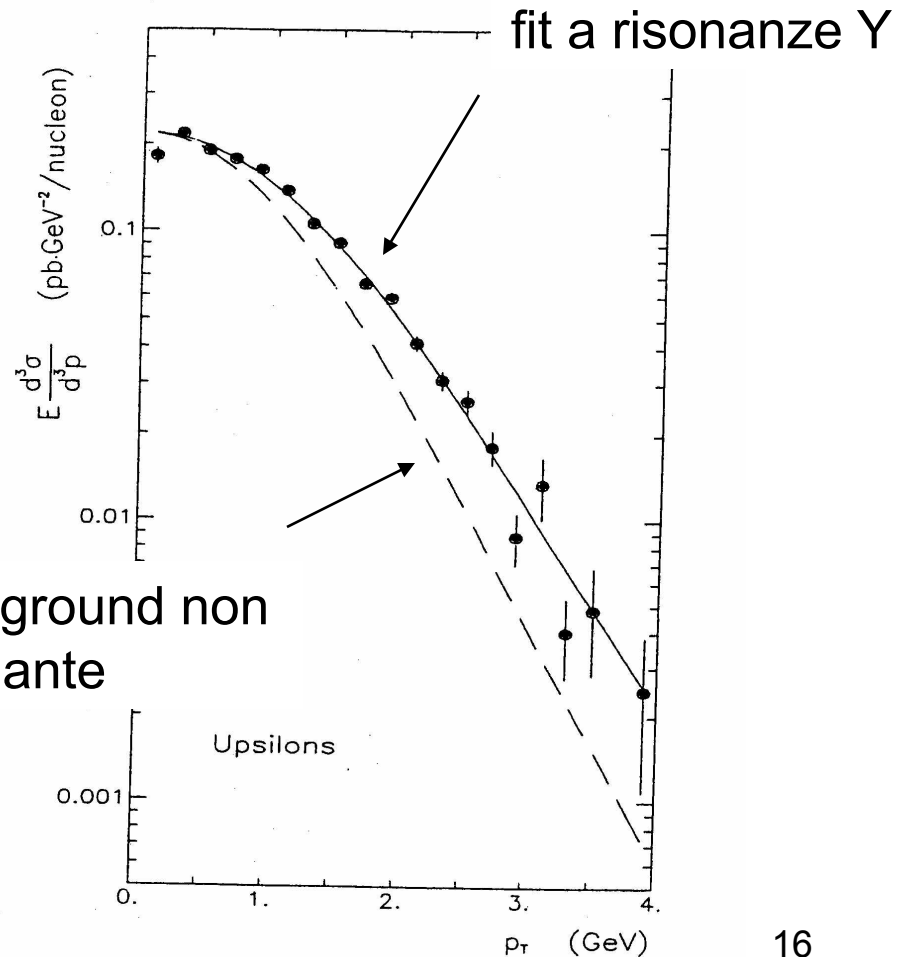
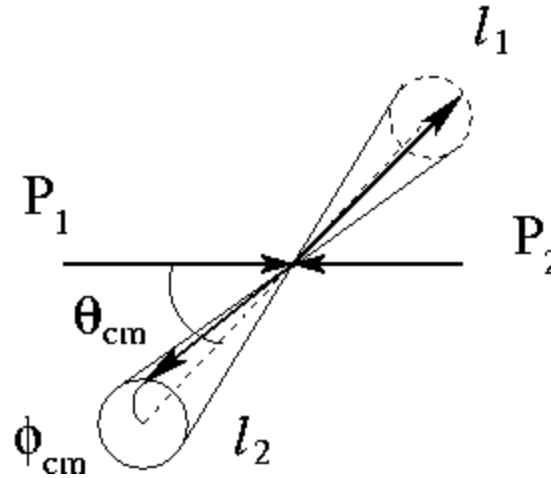


FIG. 19. p_T distribution for the sum of the three Υ 's. The solid curve is a fit to the data, the dashed curve gives the

Distribuzione angolare della coppia leptonica

c.m. degli adroni



$$\begin{aligned}
 \frac{d\sigma}{d\Omega} &= \frac{1}{N_c} \sum_f \int_0^1 dx_1 dx_2 \phi_f(x_1) \frac{d\sigma^{el}(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)}{d\Omega} e_f^2 \phi_{\bar{f}}(x_2) \delta(x_1 x_2 s - Q^2) \\
 &= \frac{\alpha^2}{12Q^4} \underline{(1 + \cos^2 \theta)} \sum_f e_f^2 \int_0^1 dx_1 dx_2 \phi_f(x_1) \phi_{\bar{f}}(x_2) \delta\left(x_1 x_2 \frac{s}{Q^2} - 1\right)
 \end{aligned}$$

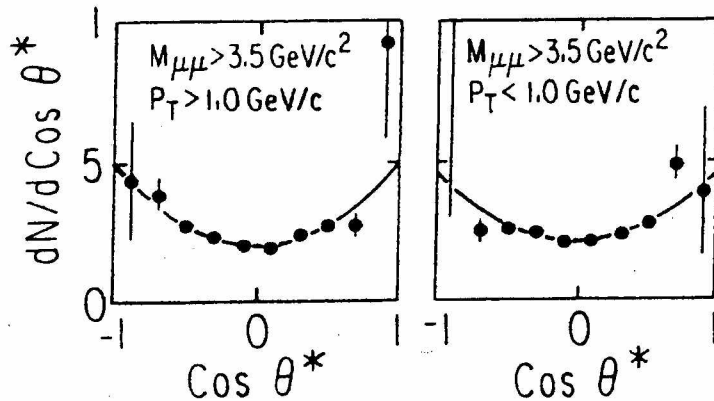
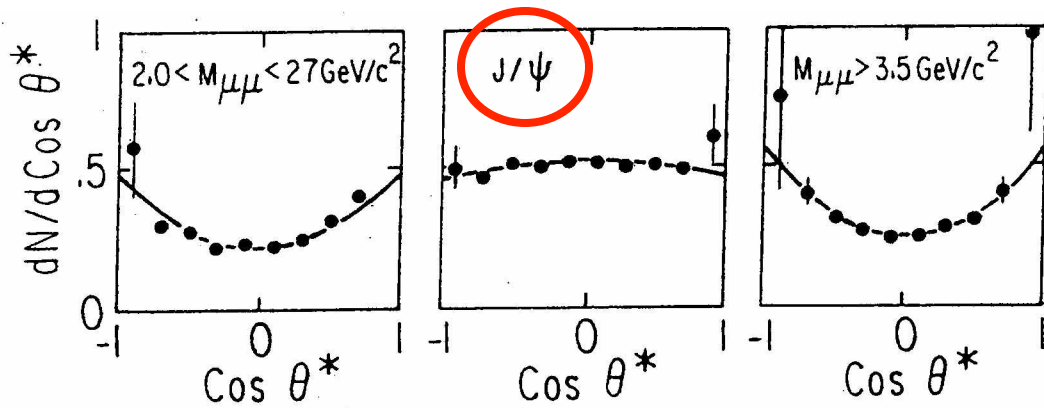


FIG. 3. Helicity angular distributions in three different mass intervals. The $M > 3.5 \text{ GeV}/c^2$ interval is also shown divided in two p_T intervals. The Collins-Soper angle (θ^*) is defined in the text.

distribuzione angolare
 $\sim (1 + \cos^2 \theta)$
 data dal processo elementare
 $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$

però sulla **risonanza J/ψ**
 distribuzione piatta
 \rightarrow meccanismo diverso
 da $\gamma^* \rightarrow \mu^+\mu^-$
 $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$?

Fermilab
 Phys. Rev. Lett. **42** (79) 948

Distribuzione angolare e discrepanze da QPM

$$\frac{d\sigma}{d^4q d\Omega} = \frac{\alpha^2}{2sQ^4} L_{\mu\nu} W^{\mu\nu}$$

- $W^{\mu\nu}$:
- 3 vettori indipendenti P_1, P_2, q
 - conservazione parità, no polarizzazione → struttura simmetrica
 - base tensoriale: $b_1 = g^{\mu\nu}$, $b_2 = q^\mu q^\nu$, $b_3 = P_1^\mu P_1^\nu$,
 $b_4 = (P_1^\mu q^\nu + P_1^\nu q^\mu)$, $b_5 = (P_2^\mu q^\nu + P_2^\nu q^\mu)$,
 $b_6 = (P_1^\mu P_2^\nu + P_1^\nu P_2^\mu)$, $b_7 = P_2^\mu P_2^\nu$
 - tensore adronico $W^{\mu\nu} = \sum_i c_i (q^2, P_1 \cdot q, P_2 \cdot q, P_1 \cdot P_2) b_i$
 - conservazione della corrente $q_\mu W^{\mu\nu} = W^{\mu\nu} q_\nu = 0$
 → **3 relazioni**
 - gauge-invarianza QED → termini lineari in $q^\mu = 0$

$$W^{\mu\nu} = -W_1 g^{\mu\nu} + W_2 \frac{P_1^\mu P_1^\nu}{M^2} + \frac{W_3}{2M^2} (P_1^\mu P_2^\nu + P_1^\nu P_2^\mu) + W_4 \frac{P_2^\mu P_2^\nu}{M^2}$$

Distribuzione angolare (continua)

$$\frac{d\sigma}{d^4 d\Omega} \propto \left[W_T (1 + \cos^2 \theta_{cm}) + W_L (1 - \cos^2 \theta_{cm}) \right]$$

polarizz. del γ^*

trasversa

longitudinale

$$+ W_{\uparrow} \sin^2 \theta_{cm} \cos \phi_{cm} + W_{\uparrow\uparrow} \sin^2 \theta_{cm} \cos 2\phi_{cm}$$

1 spin flip

2 spin flip

elementi non diagonali
della matrice densità
di elicità della coppia $H_1 H_2$

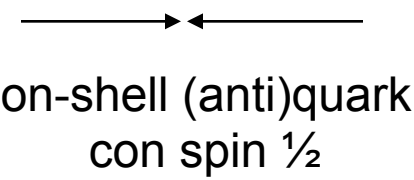


$$\begin{aligned} \frac{d\sigma}{d^4 d\Omega} \left[\frac{d\sigma}{d^4 q} \right]^{-1} &= \frac{3}{8\pi} \frac{W_T + W_L}{2W_T + W_L} \\ &\times \left[1 + \frac{W_T - W_L}{W_T + W_L} \cos^2 \theta_{cm} + \frac{W_{\uparrow}}{W_T + W_L} \sin^2 \theta_{cm} \cos \phi_{cm} + \frac{W_{\uparrow\uparrow}}{W_T + W_L} \sin^2 \theta_{cm} \cos 2\phi_{cm} \right] \\ &= \frac{3}{4\pi} \frac{1}{3 + \lambda} \left[1 + \lambda \cos^2 \theta_{cm} + \mu \sin^2 \theta_{cm} \cos \phi_{cm} + \frac{\nu}{2} \sin^2 \theta_{cm} \cos 2\phi_{cm} \right] \end{aligned}$$

$$\lambda = \frac{W_T - W_L}{W_T + W_L}, \quad \mu = \frac{W_{\uparrow}}{W_T + W_L}, \quad \nu = \frac{2 W_{\uparrow\uparrow}}{W_T + W_L}$$

Distribuzione angolare (continua)

QPM : annichilazione quark-antiquark on-shell (particelle libere) e collineare



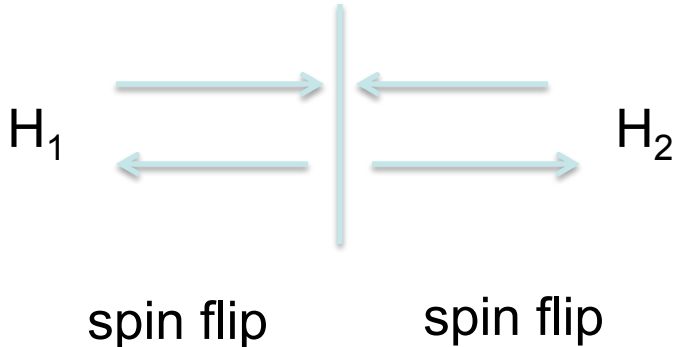
non c'è nessun motivo per cui ci sia una dipendenza azimutale $\varphi_{cm} \Rightarrow \mu=\nu=0, \lambda=1$
solo dipendenza da angolo θ_{cm} tra direzione di annichilazione e di produzione dei leptoni finali

In generale, in QCD perturbativa vale la relazione Lam-Tung $\lambda + 2\nu = 1$

Lam & Tung, P.R. D21 (80) 2712

cioè $W_L = 2W_{\uparrow\uparrow}$

conservazione del momento angolare lungo asse di collisione \Rightarrow eccitazione solo di polarizzazione L di γ^*



relazione Lam-Tung \Leftrightarrow relazione di Callan-Gross

correzioni radiative pQCD → annichilazione non proprio collineare
→ dipendenza da q_T

$$\rightarrow \lambda(q_T) \lesssim 1$$
$$\mu, \nu \sim 0$$

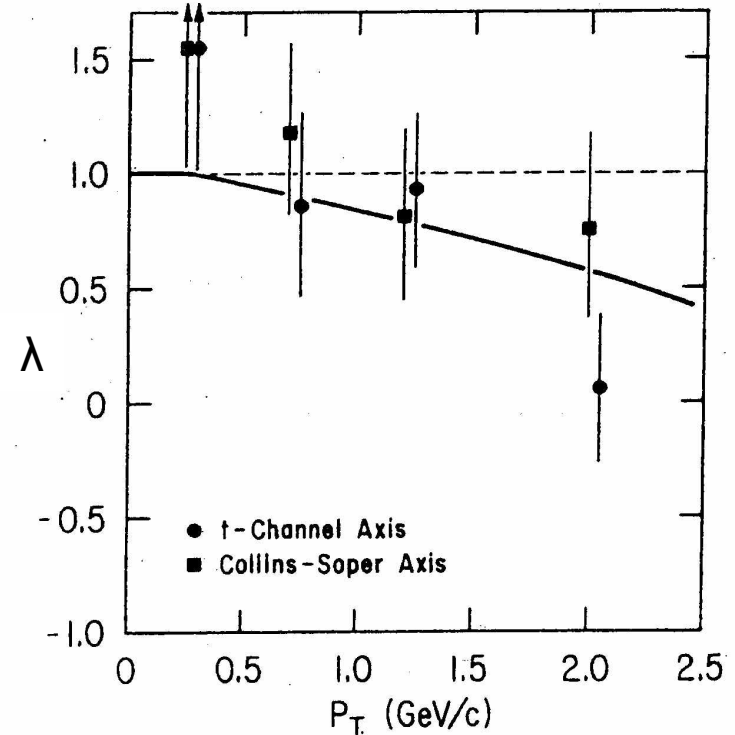
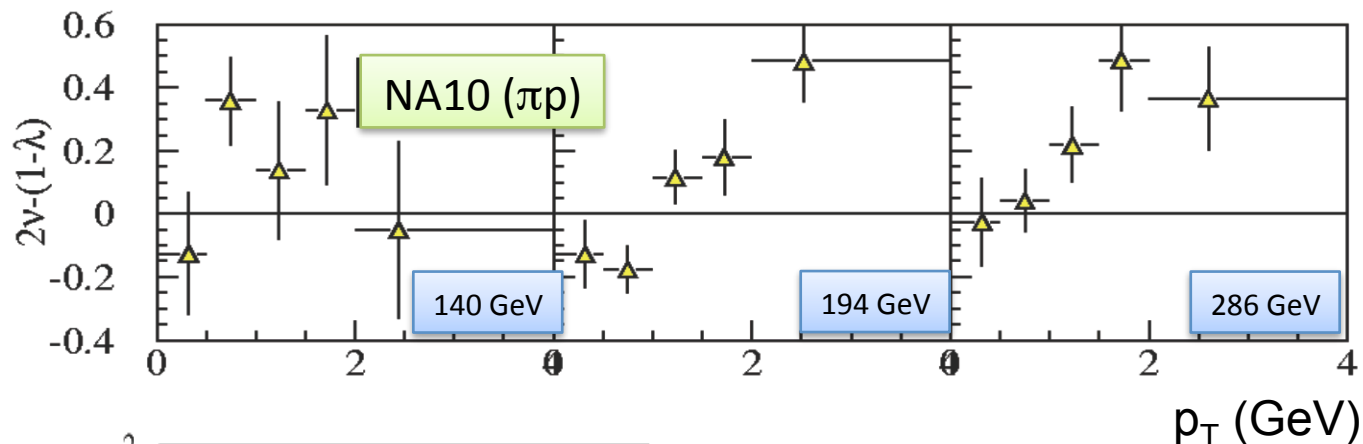


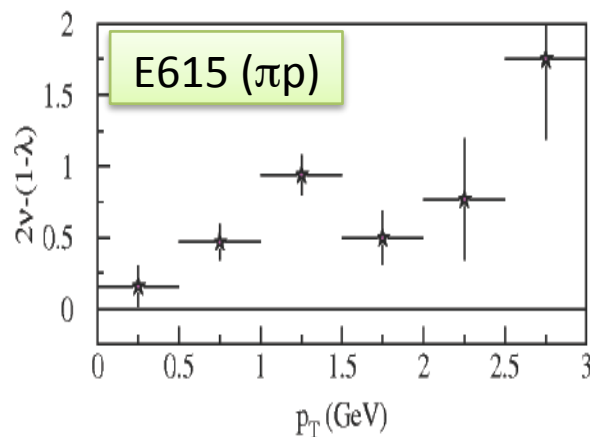
FIG. 3. The dependence of α on P_T for data with $M > 4$ GeV. The smooth curve is the QCD prediction from Kajantie *et al.* (Ref. 7). These authors consider only $x_F = 0$ while the data are integrated over x_F .

Fermilab
Phys. Rev. Lett. **43** (79) 1219

NA10 Collab.,
Z.Phys. **C37** (88)



E615 Collab.,
P.R. **D39** (89)



**relazione Lam-Tung pesantemente violata dai dati
annichilazione elementare non è collineare**

**pQCD non riproduce i dati
quindi i **momenti trasversi** in gioco
non sono generati **radiativamente**, ma sono **intrinseci****

$$p p \rightarrow \mu^+ \mu^- X$$

$M > 4 \text{ GeV}$ (no J/ψ)

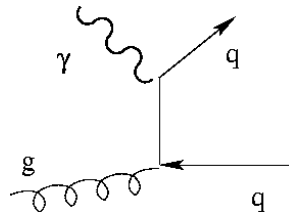
$$d\sigma \sim 1 + \alpha \cos^2 \theta_{cm}$$

$$\alpha = \frac{W_T - W_L}{W_T + W_L}$$

Ma sulla **risonanza J/ψ** meccanismo può essere diverso.

DY appartiene a classe più generale di processi $A+B \rightarrow C+X$ dove meccanismo elementare può essere più complicato:

Ex: $\gamma - g$ fusion
in canale s



Fermilab
Phys. Rev. Lett.
43 (79) 1219

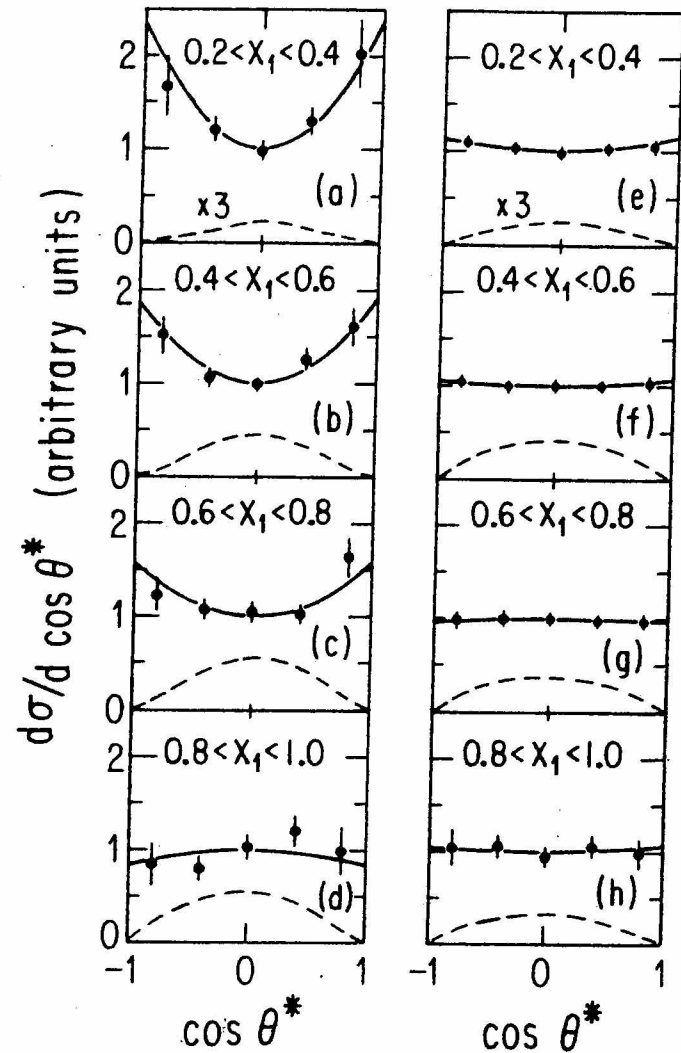
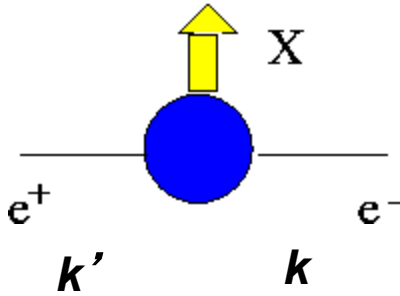


FIG. 1. $d\sigma/d \cos \theta^*$ in the t -channel helicity frame for various x_1 intervals. (a)–(d) Results for the mass continuum with $M > 4 \text{ GeV}$; (e)–(h) results for the J/ψ resonance in the same x_1 intervals. Data are integrated over P_T . The dashed curve shows the variation of detection efficiency with $\cos \theta^*$. The same arbitrary efficiency

e^+e^- inclusivo (adronico)



$$q = k+k' \quad \text{time-like} \quad q^2 \equiv Q^2 = s \geq 0$$

$$d\sigma = \frac{1}{\mathcal{F}} |\mathcal{M}|^2 dR$$

$$\mathcal{F} = 4\sqrt{(k \cdot k')^2 - k^2 k'^2} \stackrel{\text{TRF}}{=} 2Q^2 \equiv 2s$$

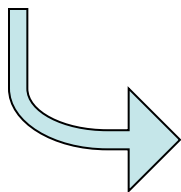
$$\mathcal{M} = \bar{v}(k') \gamma_\mu u(k) \frac{e^2}{Q^2} \langle P_X | J^\mu(0) | 0 \rangle \quad dR = (2\pi)^4 \delta(k + k' - P_X) \frac{d\mathbf{P}_X}{(2\pi)^3 2P_X^0}$$

$$|\mathcal{M}|^2 = \frac{e^4}{Q^4} L_{\mu\nu} H^{\mu\nu} \begin{cases} L_{\mu\nu} = 2(k_\mu k'_\nu + k'_\mu k_\nu - k \cdot k' g_{\mu\nu}) \\ H^{\mu\nu} = \sum_{S_X} \langle 0 | J^\mu | P_X \rangle \langle P_X | J^\nu | 0 \rangle \end{cases}$$

$$\sigma = \frac{1}{2} \frac{1}{2Q^2} \frac{e^4}{Q^4} L_{\mu\nu} \int \frac{d\mathbf{P}_X}{(2\pi)^3 2P_X^0} (2\pi)^4 \delta(q - P_X) H^{\mu\nu} = \frac{4\pi^2 \alpha^2}{Q^6} L_{\mu\nu} W^{\mu\nu}$$

↖ media su polarizzazioni iniziali

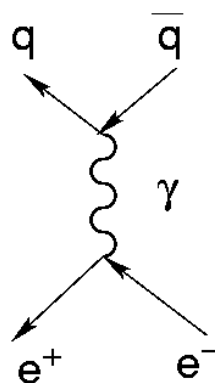
QPM picture



no adroni in stato iniziale e finale

σ in QPM $\equiv \sigma$ elementare $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$

solo N_c modi di creare la coppia conservando il colore nel vertice



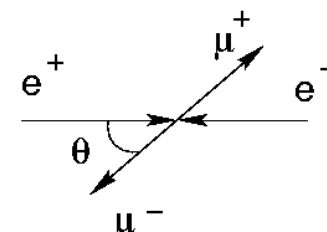
$Q^2 = s$ tale da avere solo produzione di γ

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow q\bar{q}) \equiv \sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)$$

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow X) = N_c \sum_f e_f^2 \sigma(e^+e^- \rightarrow q\bar{q})$$

$$= N_c \sum_f e_f^2 \int d\Omega \frac{d\sigma}{d\Omega}(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)$$

$$= N_c \sum_f e_f^2 \int d\Omega \frac{\alpha^2}{4Q^2} (1 + \cos^2 \theta) = N_c \sum_f e_f^2 \frac{4\pi\alpha^2}{3Q^2}$$



Quindi

$$R = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{hadrons})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)} = N_c \sum_f e_f^2$$

evidenza di N_c
 test di strutture
 $SU_c(3)$ e $SU_f(3)$

sotto soglia del c

$$R = 3 \left(\frac{4}{9} + \frac{2}{9} \right) = 2$$

vicino soglia

risonanze $J/\psi, \psi'$

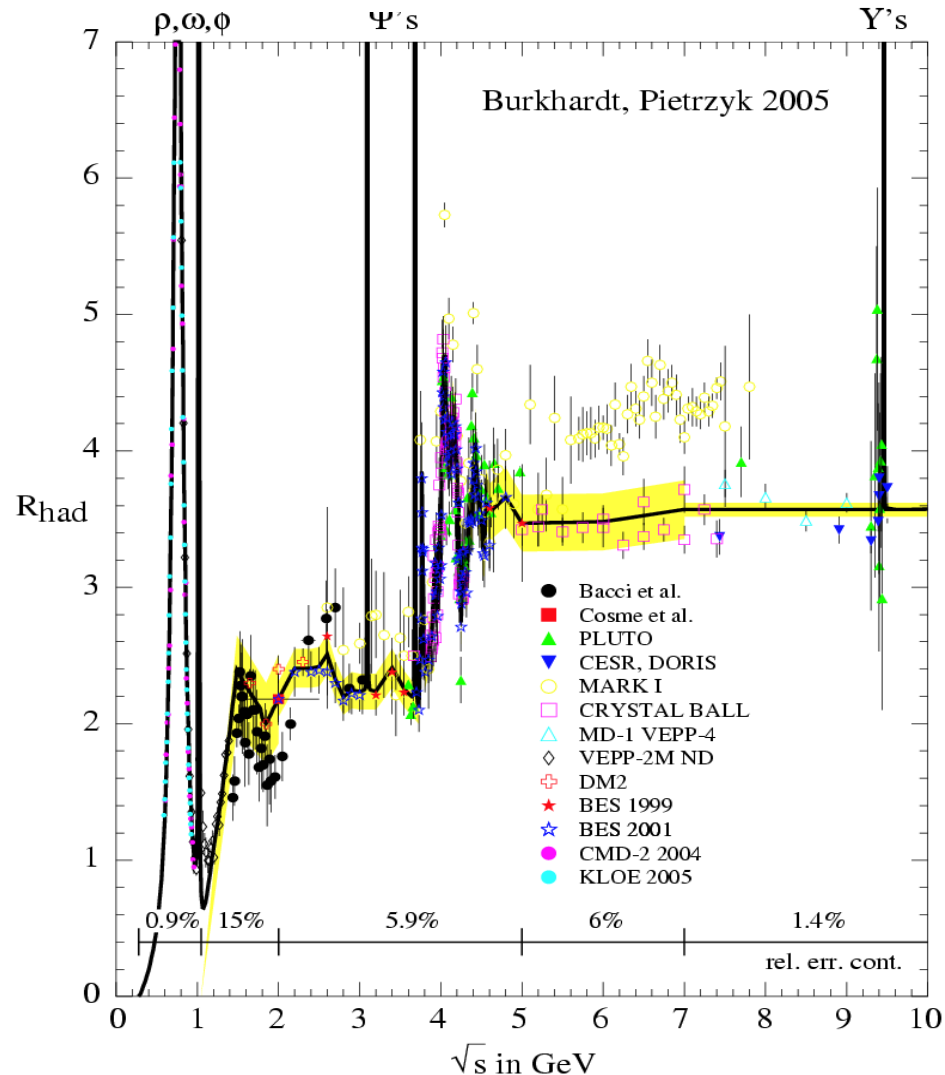
sopra soglia del c

$$R = 2 + 3 \frac{4}{9} = 3 + \frac{1}{3}$$

.....

oppure in

Wu, Phys.Rep. **C107** 59 (84)



e^+e^- semi-inclusivo adronico

crossing con DIS inclusivo

particelle ultrarelativistiche

$$k^\pm{}^\mu = (E, 0, 0, -/+ E)$$

$$q^\mu = (2E, \mathbf{0})$$

$$P_h^\mu = (E_h, E_h \sin \theta, 0, E_h \cos \theta)$$

invarianti

$$z = \frac{2P_h \cdot q}{q^2} \sim \frac{4EE_h}{4E^2} = \frac{E_h}{E}$$

\sim “ x_B^{-1} ”, misura elasticità

$$E_h \sim 0 \quad z \rightarrow 0$$

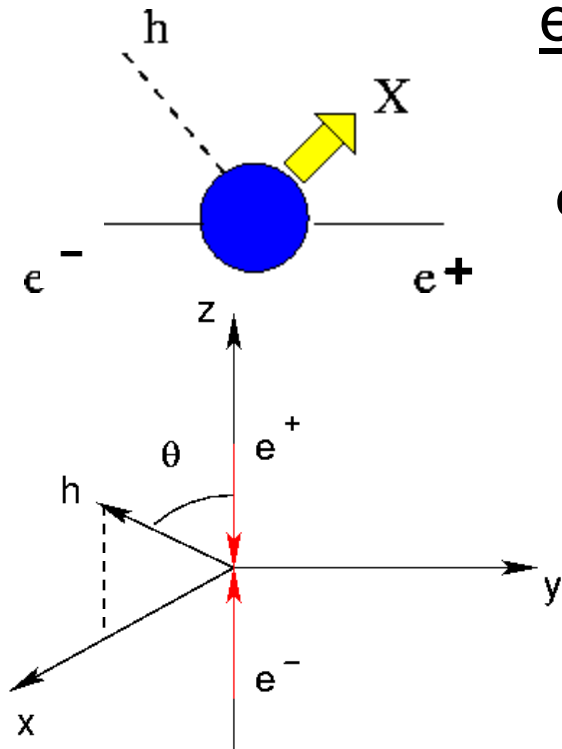
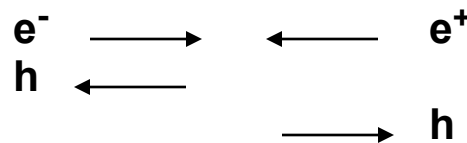
$$E_h \sim E \quad z \rightarrow 1$$

processo
elastico

$$y = \frac{P_h \cdot k'}{P_h \cdot q} \sim \frac{EE_h}{2EE_h} (1 + \cos \theta) = \frac{1}{2} (1 + \cos \theta) \sim \text{rapidity}$$

$$y = 0 \rightarrow \theta = \pi$$

$$y = 1 \rightarrow \theta = 0$$



e^+e^- semi-inclusivo adronico (continua)

$$d\sigma = \frac{1}{\mathcal{F}} |\mathcal{M}|^2 dR \quad \mathcal{F} = 4\sqrt{(k \cdot k')^2 - k^2 k'^2} \stackrel{\text{TRF}}{=} 2Q^2 \equiv 2s$$

$$dR = (2\pi)^4 \delta(q - P_X - P_h) \frac{d\mathbf{P}_X}{(2\pi)^3 2P_X^0} \frac{d\mathbf{P}_h}{(2\pi)^3 2E_h}$$

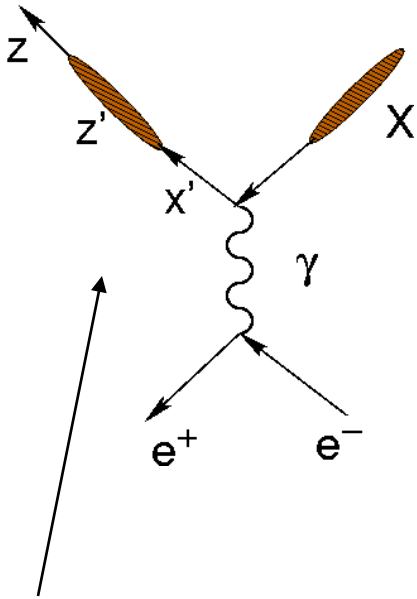
$$|\mathcal{M}|^2 = \frac{e^4}{Q^4} L_{\mu\nu} H_{1PI}^{\mu\nu}$$

$$\begin{aligned} 2E_h \frac{d\sigma}{d\mathbf{P}_h} &= \frac{1}{2} \frac{1}{2Q^2} \frac{1}{(2\pi)^2} \frac{e^4}{Q^4} L_{\mu\nu} \frac{1}{2\pi} \int \frac{d\mathbf{P}_X}{(2\pi)^3 2P_X^0} (2\pi)^4 \delta(q - P_X - P_h) H_{1PI}^{\mu\nu} \\ &= \frac{\alpha^2}{Q^6} L_{\mu\nu} W_{1PI}^{\mu\nu} \end{aligned}$$

N.B. cross-check $\sigma = \int \frac{d\mathbf{P}_h}{2E_h} 2E_h \frac{d\sigma}{d\mathbf{P}_h} = \frac{4\pi^2 \alpha^2}{Q^6} L_{\mu\nu} W^{\mu\nu}$



QPM picture



regime DIS : $Q^2 \rightarrow \infty$ con $z = \frac{2P_h \cdot q}{Q^2}$ finito

$$\frac{d\sigma}{dydz} = N_c \sum_{f=q,\bar{q}} \int_0^1 dx' dz' \frac{d\sigma^{el}}{dx'dy} (e^+ e^- \rightarrow q\bar{q})$$

$$\times D_f(z') \delta(z'x' - z)$$

$$= N_c \sum_{f=q,\bar{q}} e_f^2 \int_0^1 dx' dz' \frac{d\sigma^{el}}{dy} (e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-)$$

$$\times \delta(1 - x') D_f(z') \delta(z'x' - z)$$

elastico

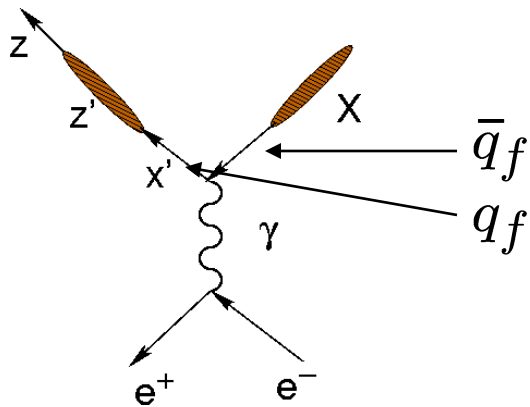


$$= N_c \frac{\pi\alpha^2}{Q^2} (1 + \cos^2 \theta) \sum_{f=q,\bar{q}} e_f^2 D_f(z)$$

probabilità di trovare adrone con frazione z' del momento x' del partone.
 somma su tutte le combinazioni $x' z' \rightarrow$ adrone con frazione z dell' energia disponibile

commenti





conservazione del sapore nel vertice
 → stesso f per (anti)quark \Leftarrow Born approx.

correzioni ad ordini superiori da, e.g., g che decade in coppie → f' di antiquark $\neq f$ di quark

$$\frac{d\sigma}{dydz} = N_c \frac{\pi\alpha^2}{Q^2} (1 + \cos^2 \theta) \sum_{f=q,\bar{q}} e_f^2 D_f(z)$$

evidenza del colore

nuova incognita
 fattorizzazione
 → estrarre info da
 confronto con i dati

distribuzione angolare
 dell'adrone è data da
 una sez. d'urto di QED
 ($e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$) !

Fenomenologia e^+e^- semi-inclusivo

$$\sigma_{incl} = \sigma(e^+e^- \rightarrow X) = N_c \frac{4\pi\alpha^2}{3Q^2} \sum_f e_f^2$$

$$\sigma_{\mu\mu} = \int_0^1 dy \frac{d\sigma}{dy}(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-) = \frac{\pi\alpha^2}{Q^2} \int_0^1 dy (1 + \cos^2 \theta) = \frac{4\pi\alpha^2}{3Q^2}$$

$$\frac{d\sigma}{dz} = \int_0^1 dy \frac{d\sigma}{dzdy}(e^+e^- \rightarrow hX) = N_c \frac{4\pi\alpha^2}{3Q^2} \sum_{f=q,\bar{q}} e_f^2 D_f(z)$$

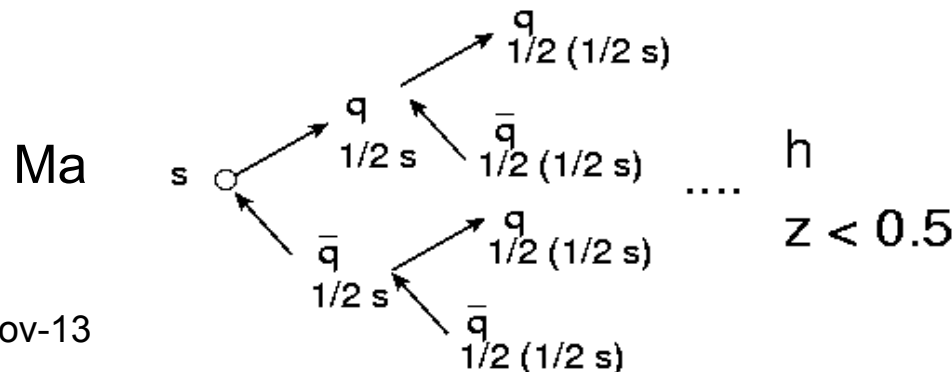


$$\frac{1}{\sigma_{\mu\mu}} \frac{d\sigma}{dz} = N_c \sum_f e_f^2 (D_f(z) + D_{\bar{f}}(z))$$

info su frammentazione

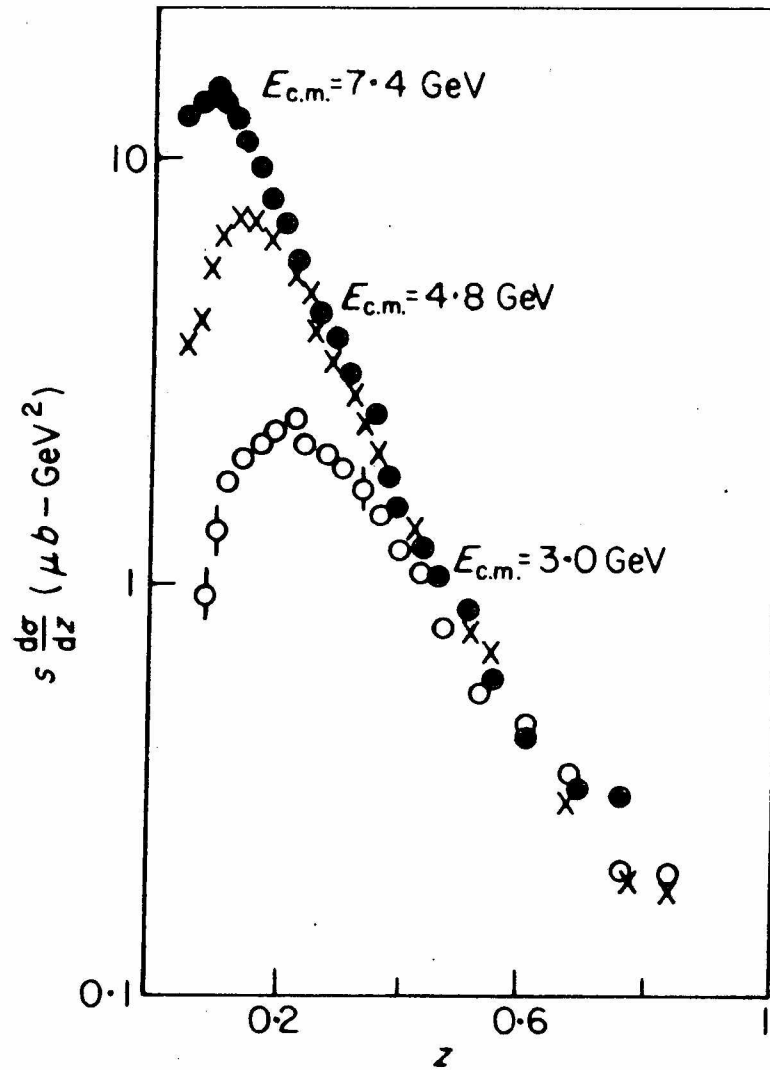
$$Q^2 \frac{d\sigma}{dz} = \frac{4\pi\alpha^2}{3} N_c \sum_f e_f^2 (D_f(z) + D_{\bar{f}}(z))$$

scaling in $z \forall Q^2 \equiv s$



violazione per $z \leq 0.5$

$$s \frac{d\sigma}{dz}(e^+e^- \rightarrow hX)$$



Schwitters *et al.*,
P.R.L. **35** 1320 (75)

FIG. 12.9. $s(d\sigma/dz)$ at 3, 4.8, and 7.4 GeV e^+e^- centre of mass energies.

e^+e^- semi-inclusivo \leftarrow fattorizzazione \rightarrow DIS ?

$$\frac{d\sigma}{dydz} = N_c \frac{\pi\alpha^2}{Q^2} (1 + \cos^2 \theta) \sum_f e_f^2 (D_f(z) + D_{\bar{f}}(z))$$



nuova incognita

fattorizzazione \rightarrow estrarre info da confronto con i
dati anche in altri processi

\Rightarrow DIS semi-inclusivo (SIDIS)