Introdução à Física das Partículas Elementares

4300422

edisciplinas.if.usp.br

(buscar: física das partículas elementares)

Fernando S Navarra

navarra@if.usp.br

Guilherme Germano

guilherme.germano@usp.br

Plano do Curso

14/03	Cap. 1
16/03	Cap. 1
21/03	Cap. 2
23/03	Cap. 2
28/03	Cap. 3
30/03	Cap. 3
04/04	
06/04	
11/04	Cap. 4
13/04	Cap. 4
18/04	Cap. 4
20/04	P1

25/04	Cap. 4
27/04	Cap. 5
02/05	Cap. 6
04/05	Cap. 6
09/05	Cap. 7
11/05	Cap. 7
16/05	Cap. 8
18/05	Cap. 8 ⬅
23/05	P2

25/05	Cap. 9
30/05	Cap. 9
01/06	Cap. 9
06/06	
08/06	
13/06	Cap. 10
15/06	Cap. 10
20/06	Cap. 10
22/06	Cap. 11
27/06	Cap. 11
29/06	P3
04/07	Sub

2ª Lista de exercícios

Capítulo 4: 1, 3, 6, 7, 9

Capítulo 5: 2, 3

Capítulo 6: 1, 2, 3, 4

Capítulo 7: refazer as passagens da dedução da seção de choque apresentada nas aulas

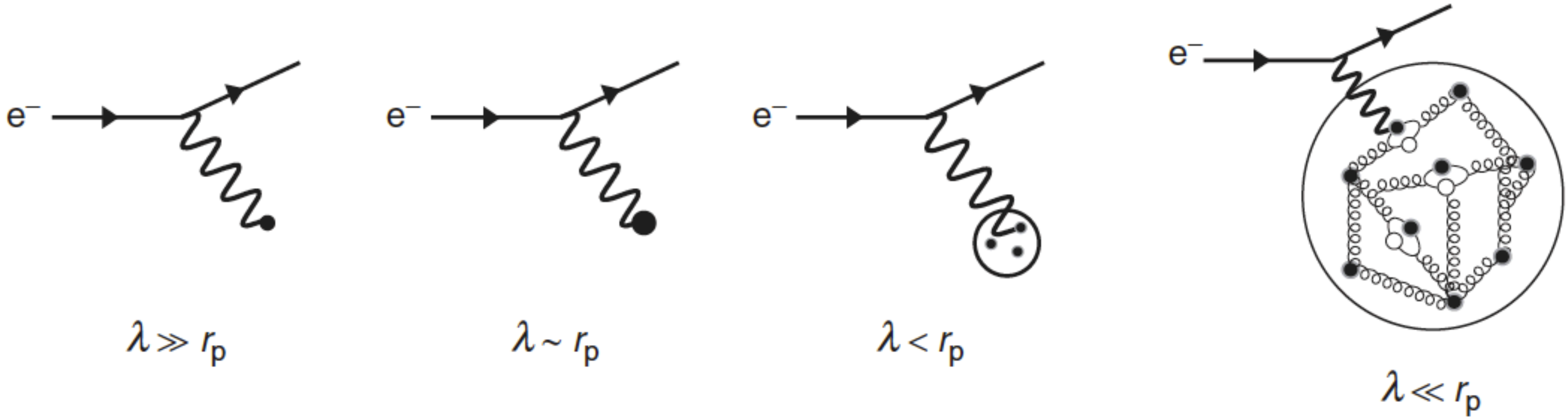
Aula 17

Capítulo 8

Espalhamento Inelástico Profundo

A descoberta dos quarks !!!

q^μ 4-momento do fóton → $\lambda \simeq \frac{1}{\sqrt{q^2}}$ comprimento de onda do fóton



Espalhamento elástico → Espalhamento inelástico

$$e + p \to e + p \qquad\qquad e + p \to e + X$$

O próton ganha energia
e "se quebra"

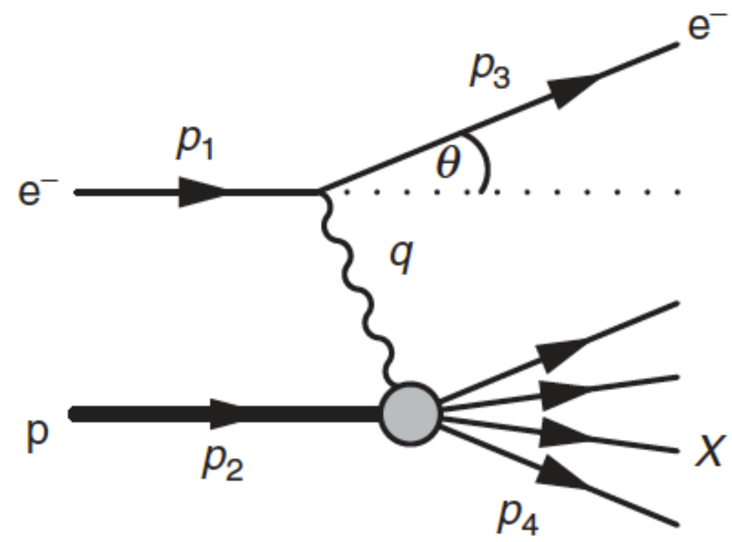
$$X = \begin{cases} n + \pi^+ \\ p + \pi^+ + \pi^- \\ p + \pi^+ + \pi^- + \pi^+ + \pi^- \\ \ldots \end{cases}$$

(profundamente inelástico)

Espalhamento inelástico elétron - próton

As variáveis :

$$Q^2 = -q^2$$



$$Q^2 \approx 2E_1E_3(1 - \cos\theta) = 4E_1E_3\sin^2\frac{\theta}{2}$$

$$x \equiv \frac{Q^2}{2p_2 \cdot q}$$ x de Bjorken !!!

W = massa do sistema X

$$W^2 \equiv p_4^2 = (q + p_2)^2 = q^2 + 2p_2 \cdot q + p_2^2$$

$$x = \frac{Q^2}{Q^2 + W^2 - m_p^2}$$

$$0 \le x \le 1$$ "elasticidade"

$W^2 = m_p^2$ $\quad x = 1$ elástico

$W^2 >> m_p^2$ $\quad x << 1$ inelástico

$$y \equiv \frac{p_2 \cdot q}{p_2 \cdot p_1} \qquad y = \frac{m_p(E_1 - E_3)}{m_p E_1} = 1 - \frac{E_3}{E_1} \qquad 0 \le y \le 1$$

inelasticidade: perda fracional de energia do elétron

$$\nu \equiv \frac{p_2 \cdot q}{m_p} \qquad \nu = \frac{m_p(E_1 - E_3)}{m_p} \qquad \nu = E_1 - E_3$$

energia perdida pelo elétron

$$x \equiv \frac{Q^2}{2 p_2 \cdot q} \qquad p_2 . q = y \, p_1 . p_2 \qquad x \, y = \frac{Q^2}{2 \, p_1 . p_2} \qquad s = 2 \, p_1 . p_2$$

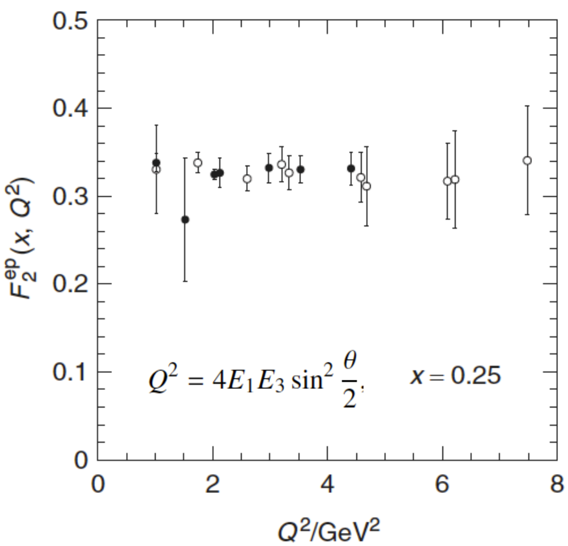
$$x \, y \, s = Q^2$$

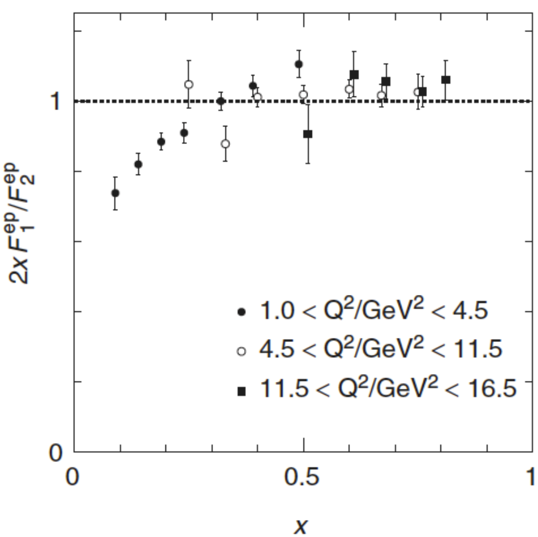
Espalhamento inelástico $e + p \to e + X$

$$\frac{d^2\sigma}{dx\,dQ^2} \approx \frac{4\pi\alpha^2}{Q^4}\left[(1-y)\frac{F_2(x,Q^2)}{x} + y^2 F_1(x,Q^2)\right]$$

$$\begin{cases} F_1(x,Q^2) \\ F_2(x,Q^2) \end{cases}$$

Funções de Estrutura





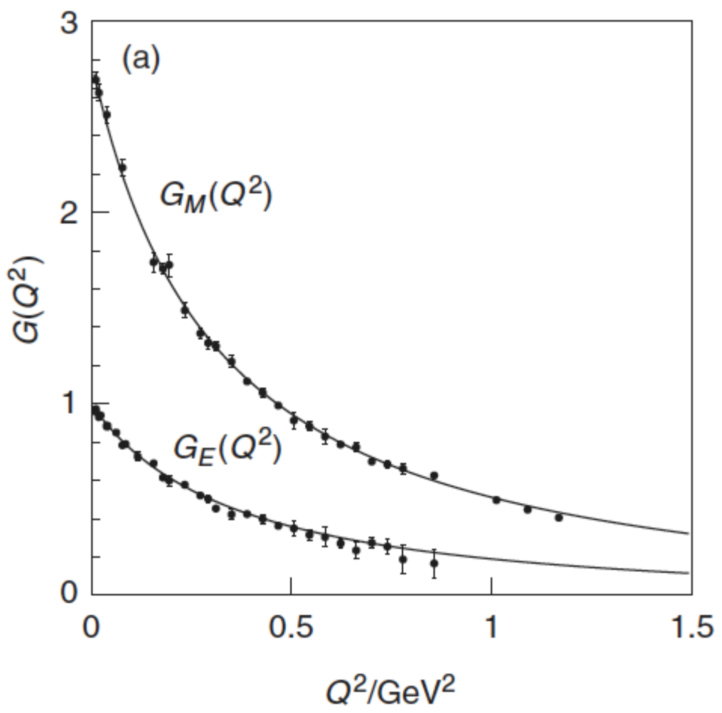
$$F_2(x,Q^2) \to F_2(x)$$

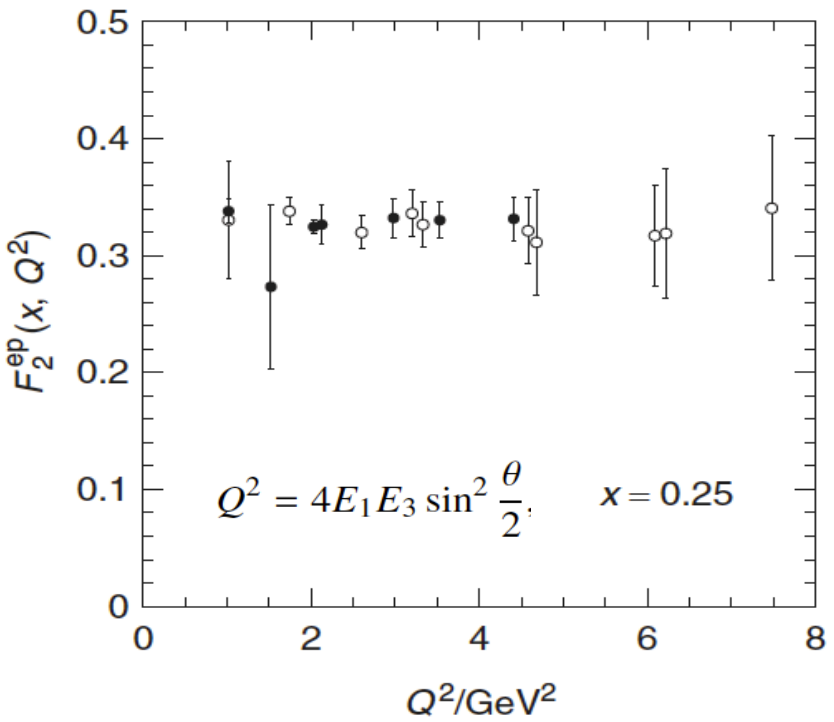
$$F_2(x) = 2xF_1(x).$$

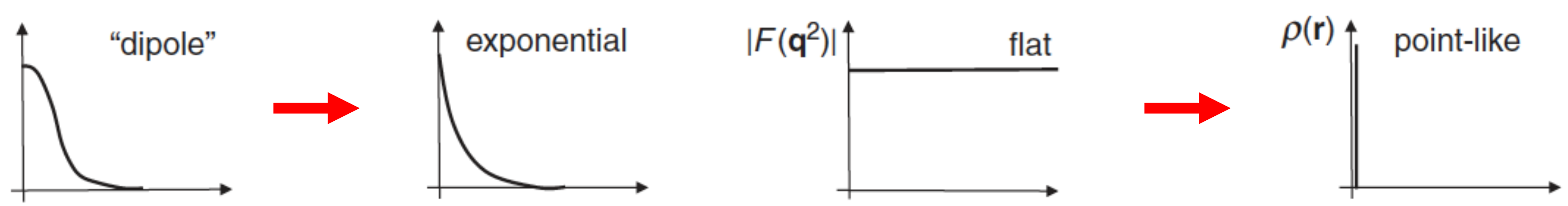
"Bjorken scaling"

Relação de Callan - Gross

Vamos lembrar do caso elástico

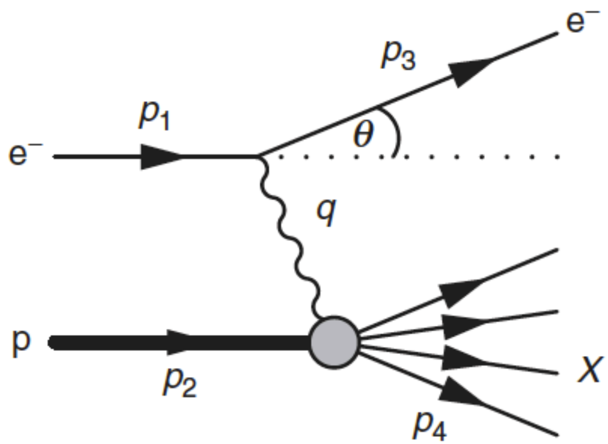




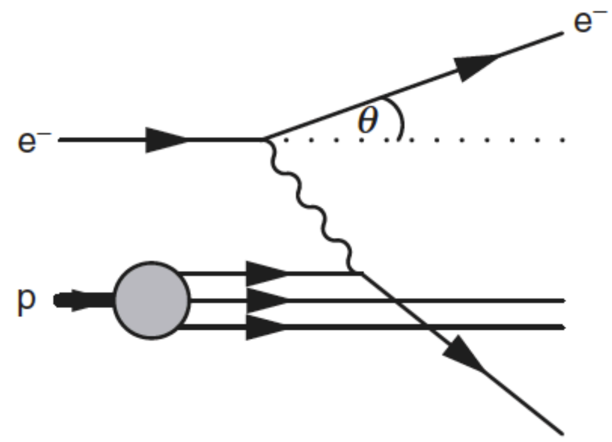


O elétron bateu em alguma coisa puntiforme !

O espalhamento elétron-próton inelástico é na verdade a soma de espalhamentos elásticos do elétron com partículas puntiformes de spin 1/2

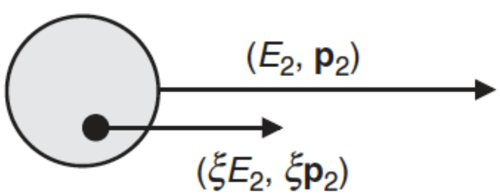


$$p_2 = (E_2, 0, 0, E_2)$$

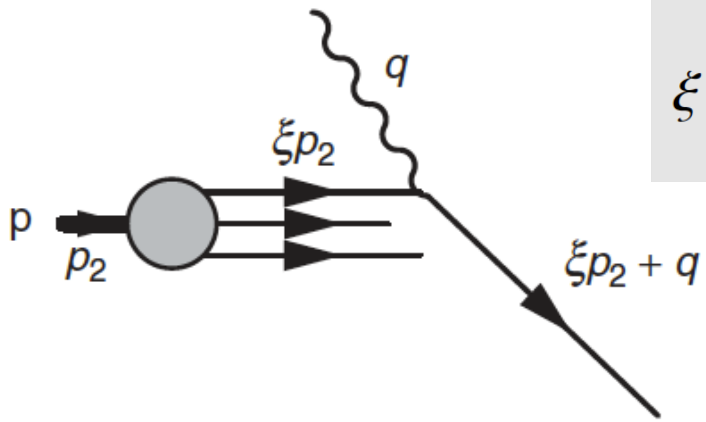


$$p_q = \xi p_2 = (\xi E_2, 0, 0, \xi E_2)$$

ξ é a fração do 4-momento do próton carregada pelo quark !



$$0 \leq \xi \leq 1$$



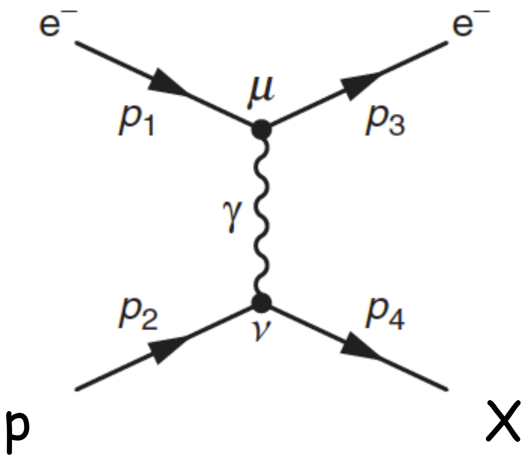
$$\xi = \frac{-q^2}{2p_2 \cdot q} = \frac{Q^2}{2p_2 \cdot q} \equiv x$$

Espalhamento elétron-quark

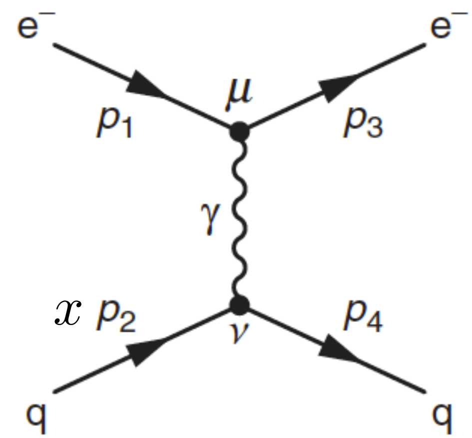
$s = p_1 + p_2$

$t = p_1 - p_3$

$u = p_1 - p_4$



elétron-próton



elétron-quark

$s_q = xs,$

$y_q = y$

$x_q = 1$

$$\frac{d\sigma}{dq^2} = \frac{2\pi\alpha^2 Q_q^2}{q^4}\left[1 + \left(1 + \frac{q^2}{s}\right)^2\right] \longrightarrow \frac{d\sigma}{dq^2} = \frac{2\pi\alpha^2 Q_q^2}{q^4}\left[1 + \left(1 + \frac{q^2}{s_q}\right)^2\right]$$

$$Q^2 = x\,y\,s \longrightarrow q^2 = -Q^2 = -x\,s\,y = -s_q\,y$$

$$\frac{q^2}{s_q} = -y$$

$$\frac{d\sigma}{dQ^2} = \frac{4\pi\alpha^2 Q_q^2}{Q^4}\left[(1 - y) + \frac{y^2}{2}\right]$$

A soma de N espalhamentos elétron-quark

Funções de Distribuição de Partons (PDF)

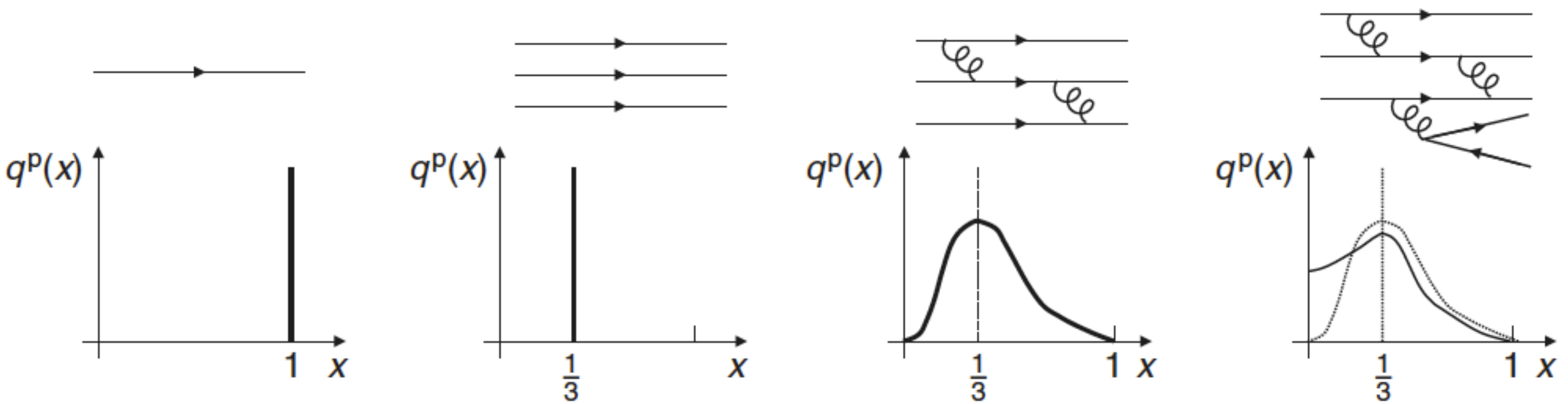
Quarks dentro do próton não têm momento fracional x fixo !

O momento obedece uma distribuição q(x).

Por exemplo, o quark u tem distribuição dada pela função $u^{p}(x)$

$u^{p}(x)\,\delta x$ = número de quarks u dentro do próton

com momento entre x e $x+\delta x$



só um quark | 3 quarks com momentos iguais | 3 quarks trocando momento | 3 quarks com produção de pares

Esp. inelástico elétron - próton = Soma de esps. elásticos elétron – quark

$$\frac{d\sigma}{dQ^2} = \frac{4\pi\alpha^2 Q_q^2}{Q^4}\left[(1-y) + \frac{y^2}{2}\right]$$

elétron-quark

$$\frac{d^2\sigma}{dQ^2} = \frac{4\pi\alpha^2}{Q^4}\left[(1-y) + \frac{y^2}{2}\right] \times Q_i^2 q_i^p(x)\,\delta x$$

elétron - N quarks

$$\frac{d^2\sigma^{ep}}{dx\,dQ^2} = \frac{4\pi\alpha^2}{Q^4}\left[(1-y) + \frac{y^2}{2}\right]\sum_i Q_i^2 q_i^p(x)$$

soma sobre os tipos de quark

Comparamos com a expressão geral do espalhamento inelástico e - p

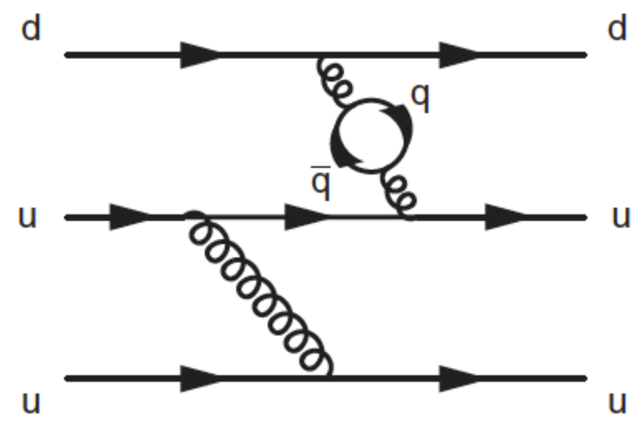
$$\frac{d^2\sigma}{dx\,dQ^2} \approx \frac{4\pi\alpha^2}{Q^4}\left[(1-y)\frac{F_2(x,Q^2)}{x} + y^2 F_1(x,Q^2)\right]$$

Concluimos

$$F_2^{ep}(x,Q^2) = 2xF_1^{ep}(x,Q^2) = x\sum_i Q_i^2 q_i^p(x).$$

Medimos a seção de choque e descobrimos F_2

Além dos quarks temos os quarks e antiquarks que vêm dos gluons :



$$F_2^{ep}(x) = x \sum_i Q_i^2 q_i^p(x)$$

$$F_2^{ep}(x) = x \sum_i Q_i^2 q_i^p(x) \approx x\left(\frac{4}{9}u^p(x) + \frac{1}{9}d^p(x) + \frac{4}{9}\overline{u}^p(x) + \frac{1}{9}\overline{d}^p(x)\right)$$

$$F_2^{en}(x) = x \sum_i Q_i^2 q_i^n(x) \approx x\left(\frac{4}{9}u^n(x) + \frac{1}{9}d^n(x) + \frac{4}{9}\overline{u}^n(x) + \frac{1}{9}\overline{d}^n(x)\right)$$

próton = u + u + d

neutron = d + d + u

u no próton é equivalente ao d no neutron

d no próton é equivalente ao u no neutron

Simetria de Isospin

Hipótese: $d^{\mathrm{n}}(x) = u^{\mathrm{p}}(x)$ $u^{\mathrm{n}}(x) = d^{\mathrm{p}}(x)$

Simplificamos a notação : $d^{\mathrm{n}}(x) = u^{\mathrm{p}}(x) \equiv u(x)$ $u^{\mathrm{n}}(x) = d^{\mathrm{p}}(x) \equiv d(x)$

Para antiquarks : $\overline{d}^{\mathrm{n}}(x) = \overline{u}^{\mathrm{p}}(x) \equiv \overline{u}(x)$ $\overline{u}^{\mathrm{n}}(x) = \overline{d}^{\mathrm{p}}(x) \equiv \overline{d}(x)$

Substituindo nas funções de estrutura :

$$F_2^{\mathrm{ep}}(x) = 2xF_1^{\mathrm{ep}}(x) = x\left(\frac{4}{9}u(x) + \frac{1}{9}d(x) + \frac{4}{9}\overline{u}(x) + \frac{1}{9}\overline{d}(x)\right)$$

$$F_2^{\mathrm{en}}(x) = x\sum_i Q_i^2 q_i^{\mathrm{n}}(x) \approx x\left(\frac{4}{9}u^{\mathrm{n}}(x) + \frac{1}{9}d^{\mathrm{n}}(x) + \frac{4}{9}\overline{u}^{\mathrm{n}}(x) + \frac{1}{9}\overline{d}^{\mathrm{n}}(x)\right)$$

$\Downarrow$

$$F_2^{\mathrm{en}}(x) = 2xF_1^{\mathrm{en}}(x) = x\left(\frac{4}{9}d(x) + \frac{1}{9}u(x) + \frac{4}{9}\overline{d}(x) + \frac{1}{9}\overline{u}(x)\right)$$

Quantidades integradas

$$\int_0^1 q_i(x)\,dx = N_i$$ = número de quarks do tipo i

Regras de Soma

$$\int_0^1 x\,q_i(x)\,dx = f_i$$ = momento médio carregado pelos quarks de tipo i

$$F_2^{ep}(x) = 2xF_1^{ep}(x) = x\left(\frac{4}{9}u(x) + \frac{1}{9}d(x) + \frac{4}{9}\overline{u}(x) + \frac{1}{9}\overline{d}(x)\right)$$

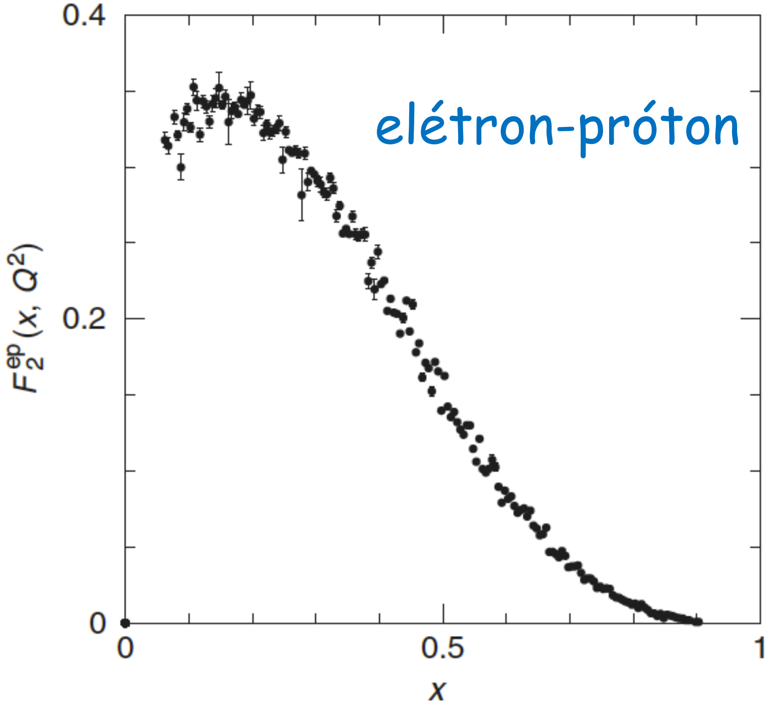
$$\int_0^1 F_2^{ep}(x)\,\mathrm{d}x = \frac{4}{9}f_u + \frac{1}{9}f_d$$

$$\int_0^1 F_2^{en}(x)\,\mathrm{d}x = \frac{4}{9}f_d + \frac{1}{9}f_u$$

$$f_u = \int_0^1 [xu(x) + x\overline{u}(x)]\,\mathrm{d}x$$

$$f_d = \int_0^1 [xd(x) + x\overline{d}(x)]\,\mathrm{d}x$$

Estas frações podem ser obtidas com as informações experimentais !



elétron-próton

$$\int F_2^{ep}(x)\,dx \approx 0.18$$

elétron-neutron

$$\int F_2^{en}(x)\,dx \approx 0.12$$

$$\begin{cases} \int_0^1 F_2^{ep}(x)\,dx = \frac{4}{9} f_u + \frac{1}{9} f_d \\ \int_0^1 F_2^{en}(x)\,dx = \frac{4}{9} f_d + \frac{1}{9} f_u \end{cases}$$

→

$f_u \approx 0.36$ $f_d \approx 0.18$

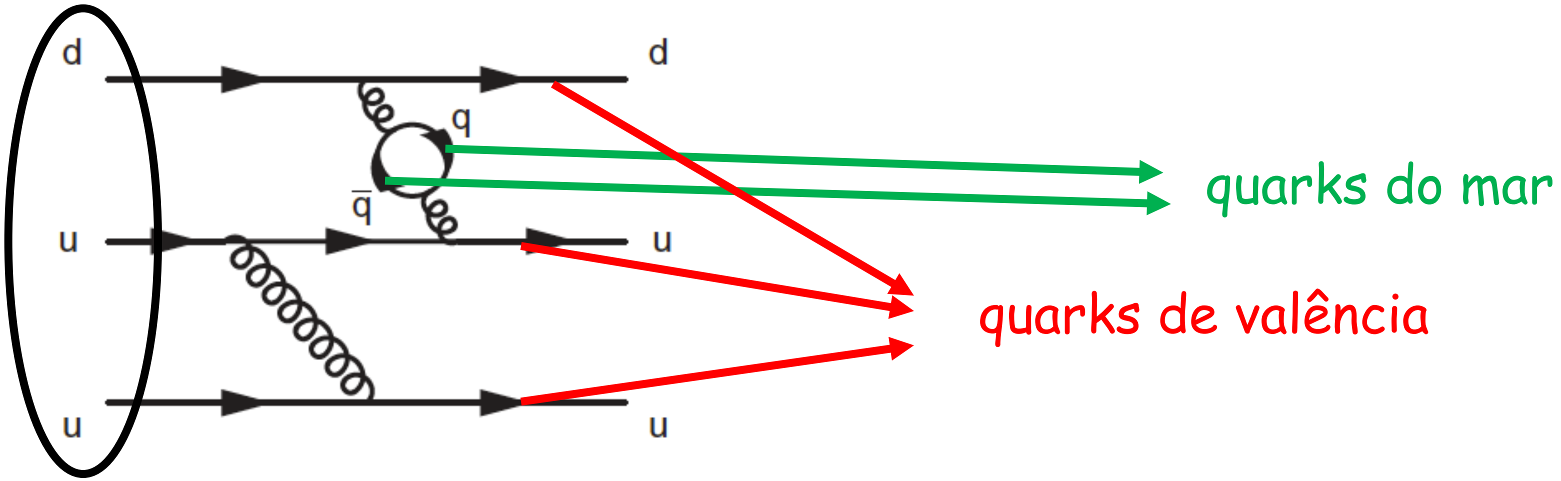
dois quarks carregam duas vezes mais momento do que um quark !

Fração total do momento do próton carregada por todos os quarks :

$$f_u + f_d = 0.36 + 0.18 = 0.54$$

E o resto ? GLUONS !!!

Quarks de valência (V) e quarks do mar (S)



$$u(x) = u_V(x) + u_S(x)$$

$$\bar{u}(x) \equiv \bar{u}_S(x)$$

$$d(x) = d_V(x) + d_S(x)$$

$$\bar{d}(x) \equiv \bar{d}_S(x)$$

Próton $\left\{ \int_0^1 u_V(x)\,dx = 2 \qquad \int_0^1 d_V(x)\,dx = 1 \right.$

Hipótese: "democracia do mar"

$$u_S(x) = \bar{u}_S(x) \approx d_S(x) = \bar{d}_S(x) \approx S(x)$$

Funções de estrutura

$$F_2^{ep}(x) = 2xF_1^{ep}(x) = x\left(\frac{4}{9}u(x) + \frac{1}{9}d(x) + \frac{4}{9}\overline{u}(x) + \frac{1}{9}\overline{d}(x)\right)$$

$$F_2^{en}(x) = 2xF_1^{en}(x) = x\left(\frac{4}{9}d(x) + \frac{1}{9}u(x) + \frac{4}{9}\overline{d}(x) + \frac{1}{9}\overline{u}(x)\right)$$

Vamos reescrever em termos das distribuições de valência e do mar :

$$F_2^{ep}(x) = x\left(\frac{4}{9}u_V(x) + \frac{1}{9}d_V(x) + \frac{10}{9}S(x)\right)$$

$$F_2^{en}(x) = x\left(\frac{4}{9}d_V(x) + \frac{1}{9}u_V(x) + \frac{10}{9}S(x)\right)$$

$$\rightarrow \quad \frac{F_2^{en}(x)}{F_2^{ep}(x)} = \frac{4d_V(x) + u_V(x) + 10S(x)}{4u_V(x) + d_V(x) + 10S(x)}.$$

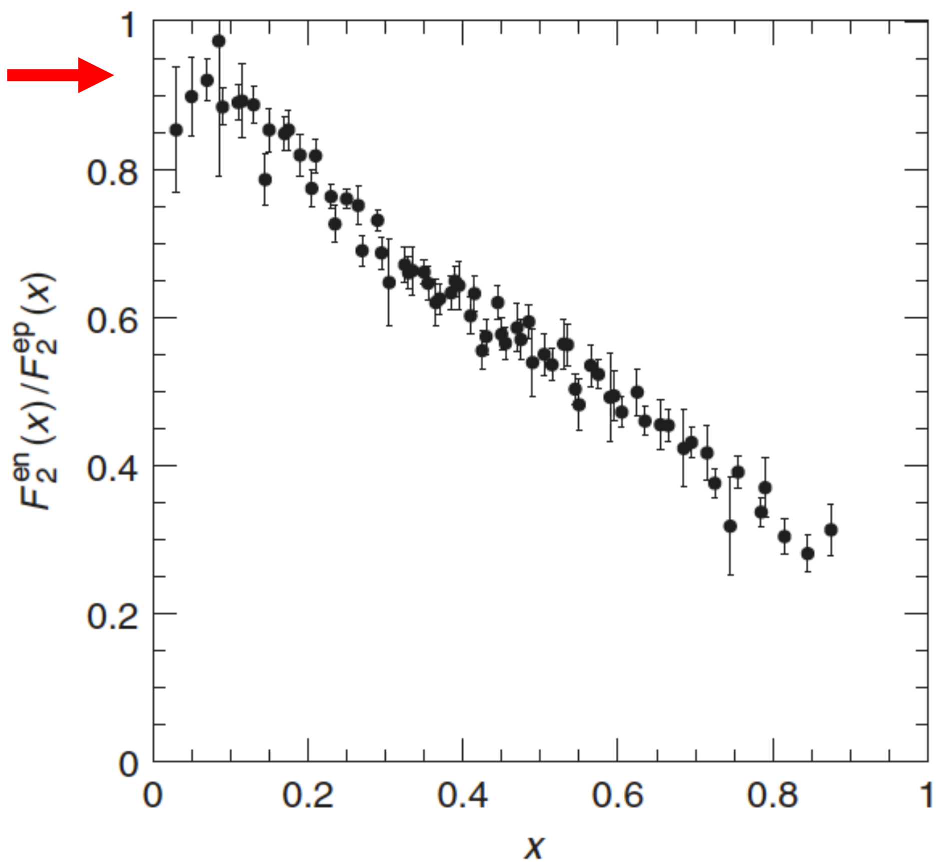
Para pequenos momentos x , a controbuição do mar S(x) é dominante :

$$x \rightarrow 0 \qquad \frac{F_2^{en}(x)}{F_2^{ep}(x)} \rightarrow 1$$

?

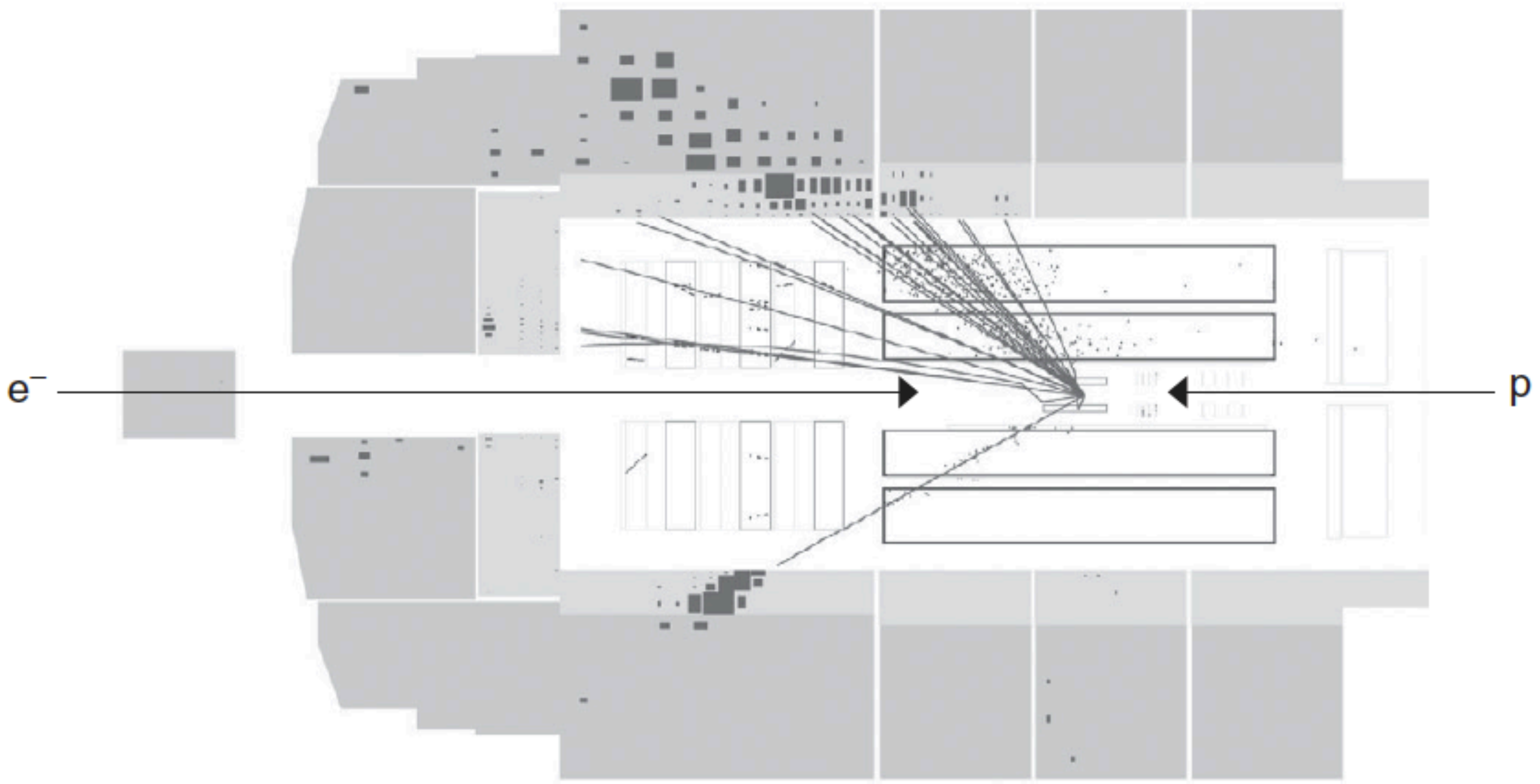
Teste das previsões do modelo quarks/partons

$$x \to 0 \qquad \frac{F_2^{\mathrm{en}}(x)}{F_2^{\mathrm{ep}}(x)} \to 1$$

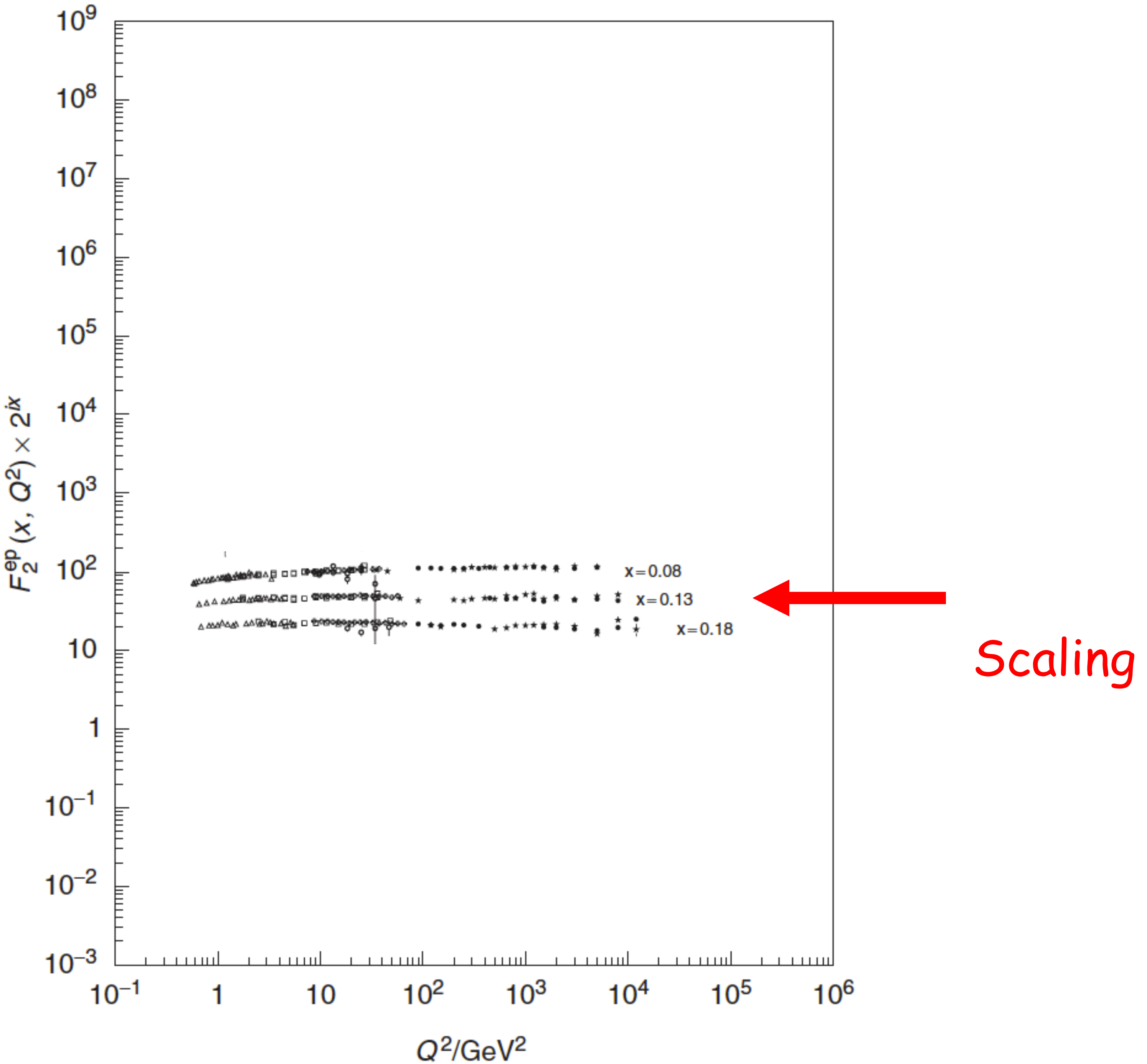


HERA : o maior colisor elétron-próton

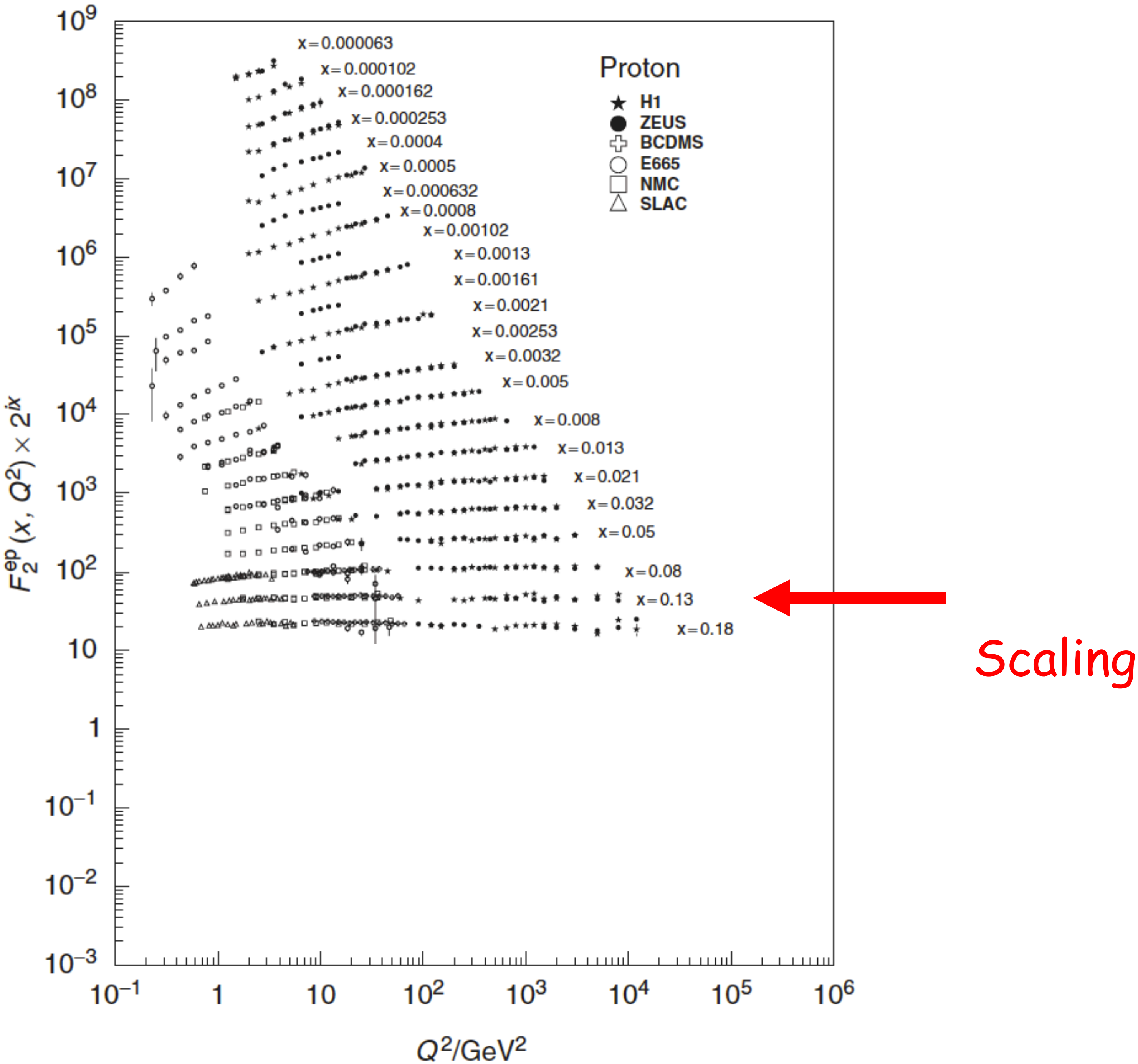
1991-2007 DESY, Hamburgo, Alemanha $\sqrt{s} \approx 300\,\mathrm{GeV}$



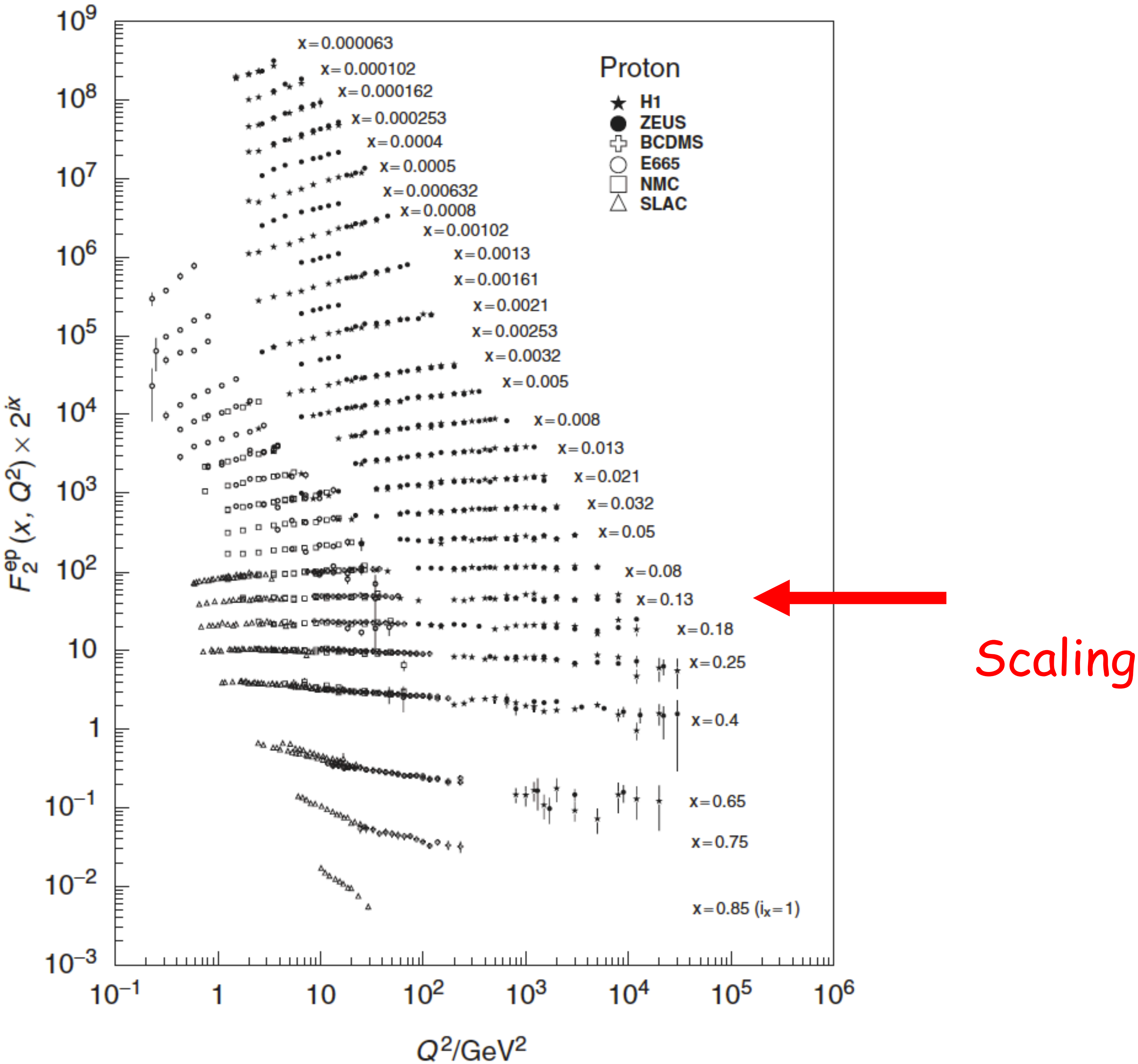
Violação do scaling de Bjorken a altas energias !!!



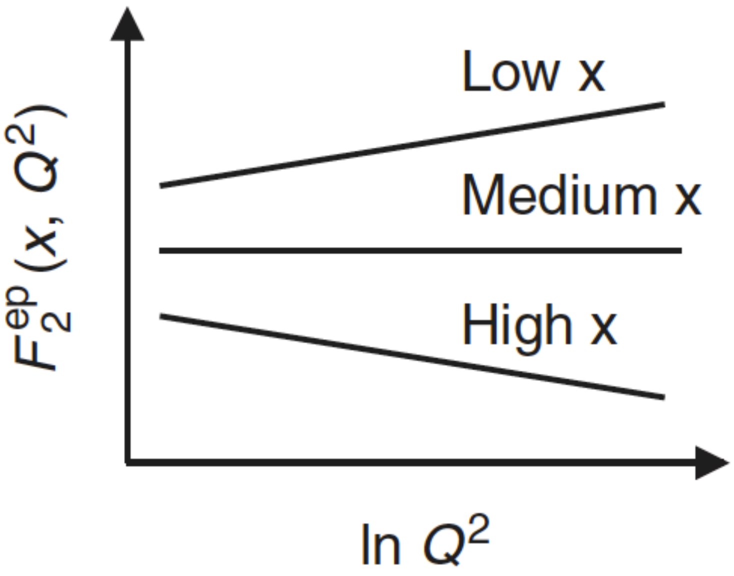
$F_2^{ep}(x, Q^2) \times 2^{ix}$
10^9
10^8
10^7
10^6
10^5
10^4
10^3
10^2
10
1
10^{-1}
10^{-2}
10^{-3}
10^{-1}
1
10
10^2
10^3
10^4
10^5
10^6
Q^2/GeV^2
x=0.08
x=0.13
x=0.18
Scaling

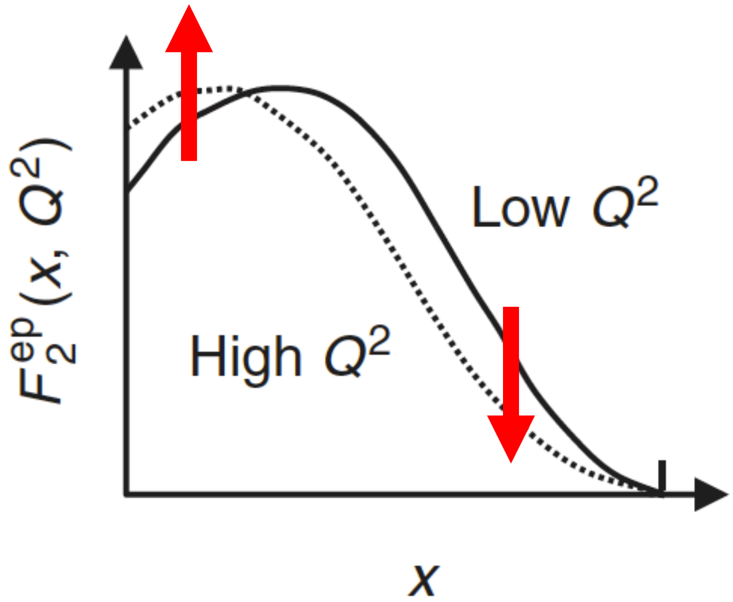


Proton
H1
ZEUS
BCDMS
E665
NMC
SLAC
x=0.000063
x=0.000102
x=0.000162
x=0.000253
x=0.0004
x=0.0005
x=0.000632
x=0.0008
x=0.00102
x=0.0013
x=0.00161
x=0.0021
x=0.00253
x=0.0032
x=0.005
x=0.008
x=0.013
x=0.021
x=0.032
x=0.05
x=0.08
x=0.13
x=0.18
$F_2^{ep}(x, Q^2) \times 2^{ix}$
Q^2/GeV^2
Scaling

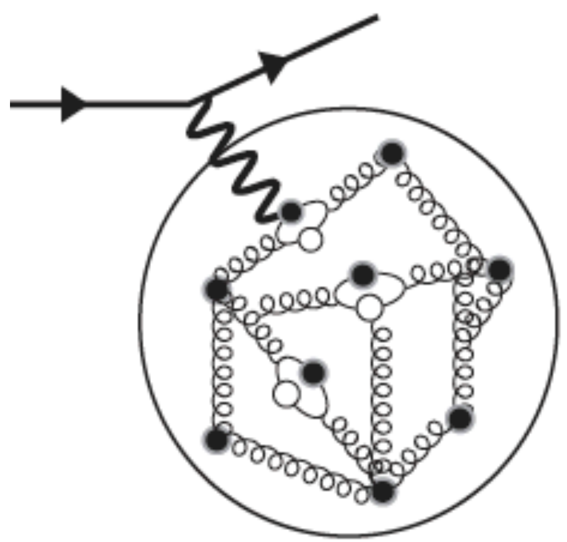

Proton
H1
ZEUS
BCDMS
E665
NMC
SLAC
x=0.000063
x=0.000102
x=0.000162
x=0.000253
x=0.0004
x=0.0005
x=0.000632
x=0.0008
x=0.00102
x=0.0013
x=0.00161
x=0.0021
x=0.00253
x=0.0032
x=0.005
x=0.008
x=0.013
x=0.021
x=0.032
x=0.05
x=0.08
x=0.13
x=0.18
x=0.25
x=0.4
x=0.65
x=0.75
x=0.85 (i_x=1)
$F_2^{ep}(x, Q^2) \times 2^{i_x}$
Q^2/GeV^2
Scaling

Violação de scaling e "evolução" da função de estrutura





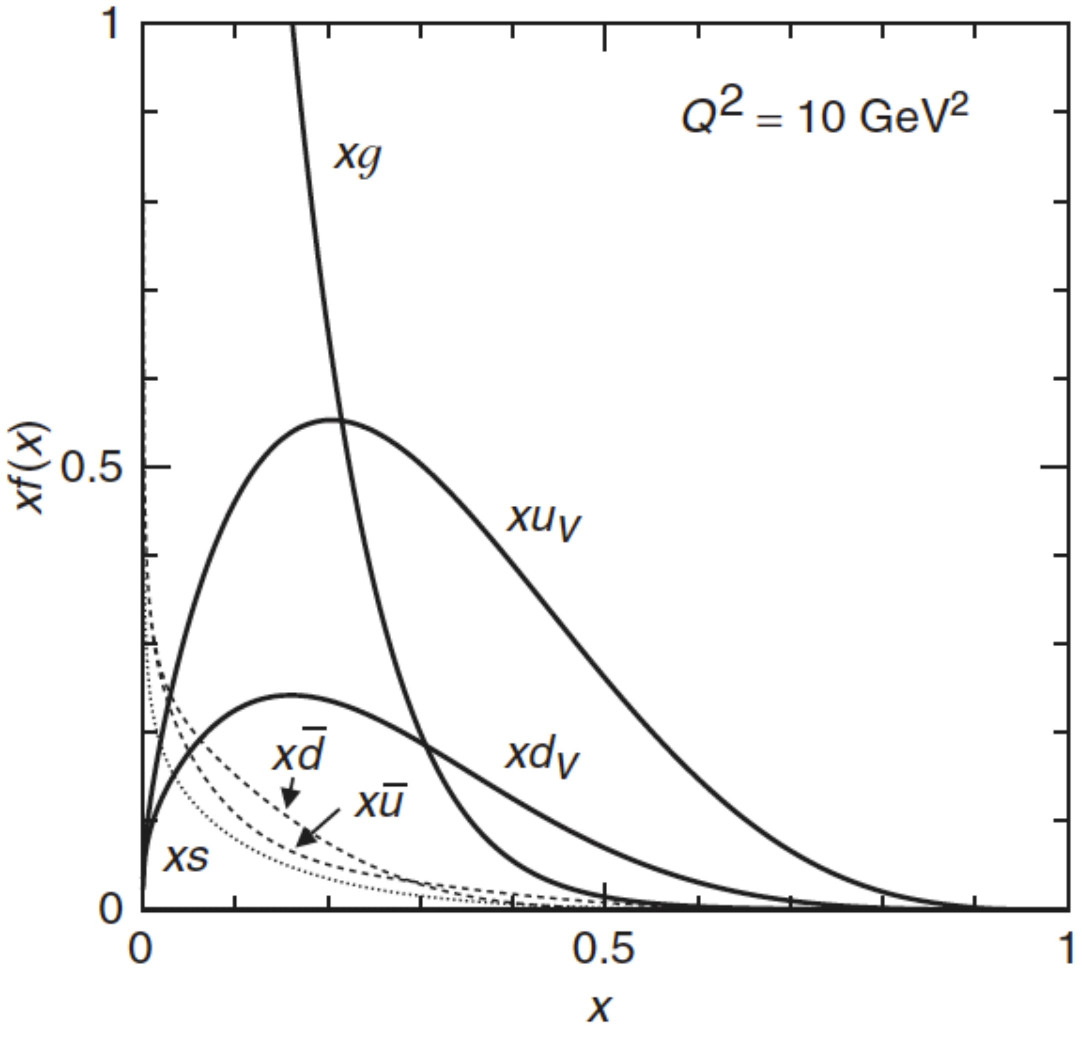
$$F_2^{ep}(x) = x \sum_i Q_i^2 q_i^p(x)$$



F_2 mede o número de partons !

Quanto maior Q^2 , mais partons com menor momento x !

Retrato das funções de distribuição de partons (PDFs) medidas no HERA



Temas para Seminário

1) Equação de Dirac
2) Técnica do Traço
3) Espalhamento ep elástico
4) Espalhamento ep inelástico
5) Espalhamento eletron-positron
6) Definição de Seção de Choque
7) Quarks e Partons
8) Regras de Feynman e diagramas de Feynman
9) Neutrinos
10) Simetrias