

# Risultati recenti ad HERA



Andrea Parenti

Università di Padova

INFN Padova



## Argomenti presentati:

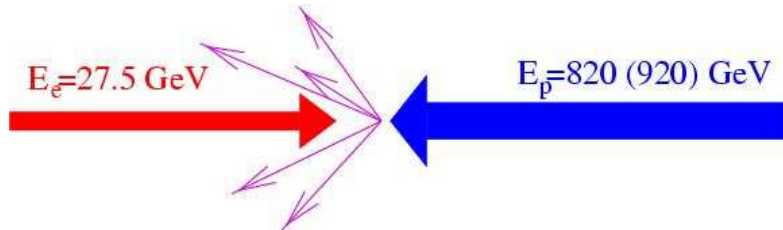
- Funzioni di struttura e PDFs
- Primi risultati con MVD di ZEUS
- Sezione d'urto con fasci polarizzati
- Leptoni isolati con  $P_T$  elevato
- Misura di  $\alpha_s$  ad HERA
- Pentaquark

# Disclaimer

- Gli argomenti presentati sono stati scelti in base alla "rilevanza" e alla attualità.
- La selezione è comunque frutto del gusto personale; molti altri risultati significativi o recenti sono stati tralasciati.

# Il collider HERA

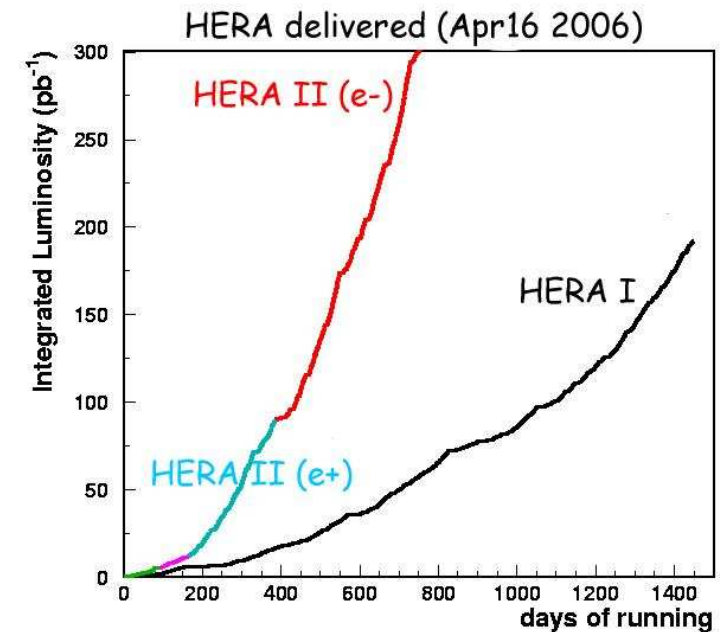
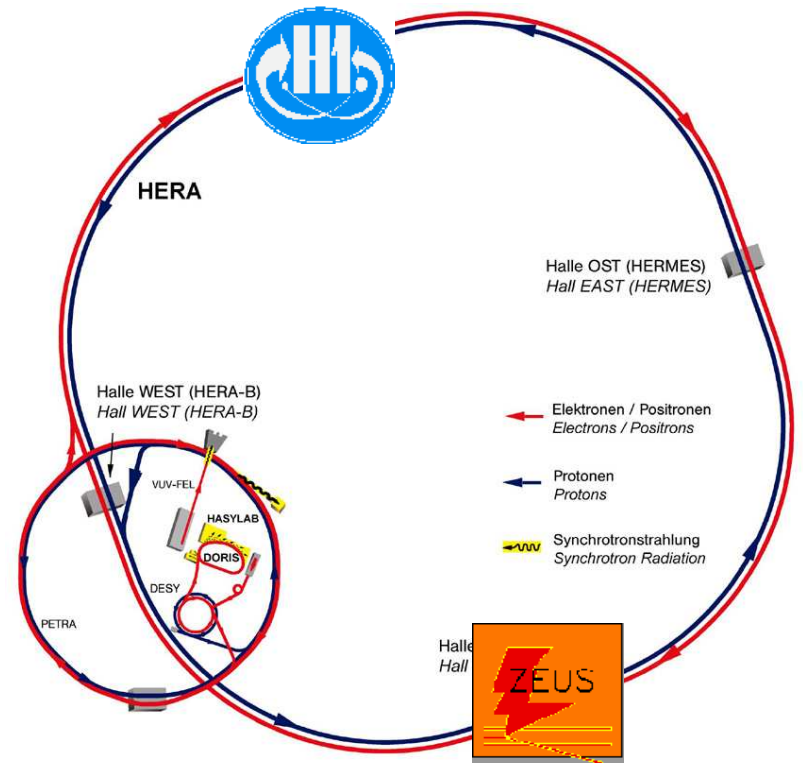
HERA è in funzione dal 1992;  
 è il primo e unico "collider"  $e^{\pm}p$ :



Lungo HERA sono installati gli esperimenti ZEUS e H1 (più HERMES a bersaglio fisso, HERA-B ormai rimosso).

Nello shut-down 2000-02 la luminosità istantanea è stata aumentata di 5 volte.

Dopo una partenza difficile, la presa dati finalmente procede bene ( $L_{max} \approx 5E+31 cm^{-2} s^{-1}$ ).



Periodo	Collisioni	$\sqrt{s}$ (GeV)	Lumi ( $cm^{-2} s^{-1}$ )	HERA del.
1994-97	e+p	300	1.60E+31	72 pb-1
1998-99	e-p	318	1.60E+31	25 pb-1
1999-00	e+p	318	1.60E+31	95 pb-1
2002-04	e+p	318	7.00E+31	90 pb-1
2004-06	e-p	318	7.00E+31	246 pb-1

# La diffusione elettrone-protone

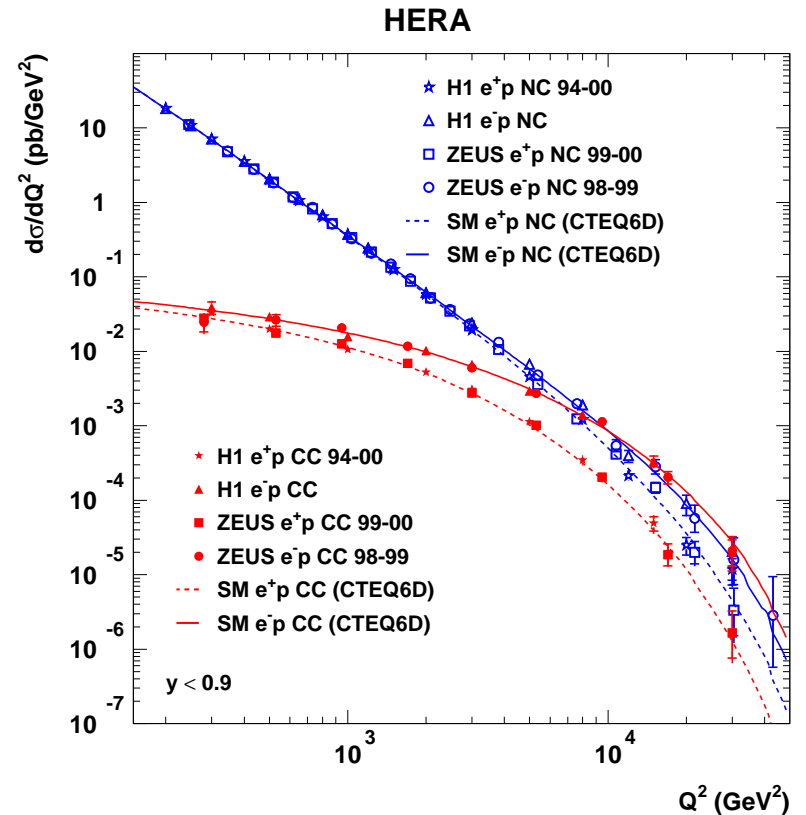
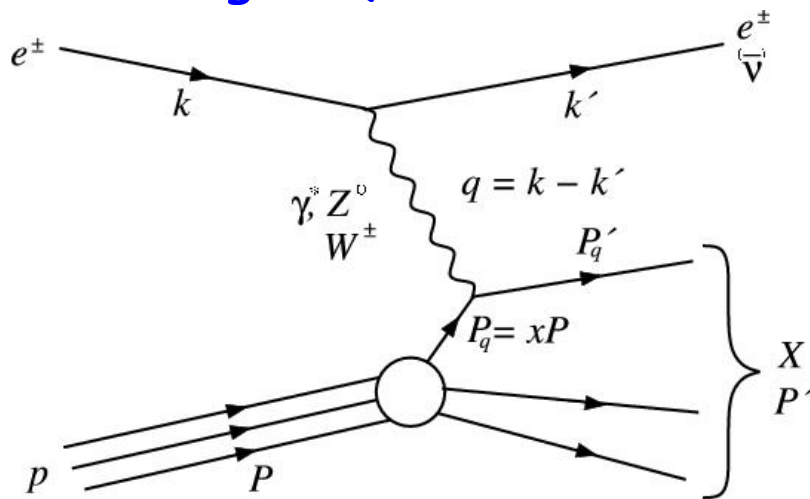
$$\frac{d^2\sigma_{e^\mp p}^{NC}}{dx dQ^2} = \frac{2\pi\alpha^2}{xQ^4} [Y_+ F_2^{NC}(x, Q^2) - y^2 F_L^{NC}(x, Q^2) \pm Y_- x F_3^{NC}(x, Q^2)]$$

$$\frac{d^2\sigma_{e^\mp p}^{CC}}{dx dQ^2} = \frac{G_F^2}{4\pi x} \left[ \frac{M_W^2}{M_W^2 + Q^2} \right]^2 [Y_+ W_2^\mp(x, Q^2) - y^2 W_L^\mp(x, Q^2) \pm Y_- x W_3^\mp(x, Q^2)]$$

La sezione d'urto dipende dalle funzioni di struttura  $F_2$ ,  $F_L$  e  $F_3$ .

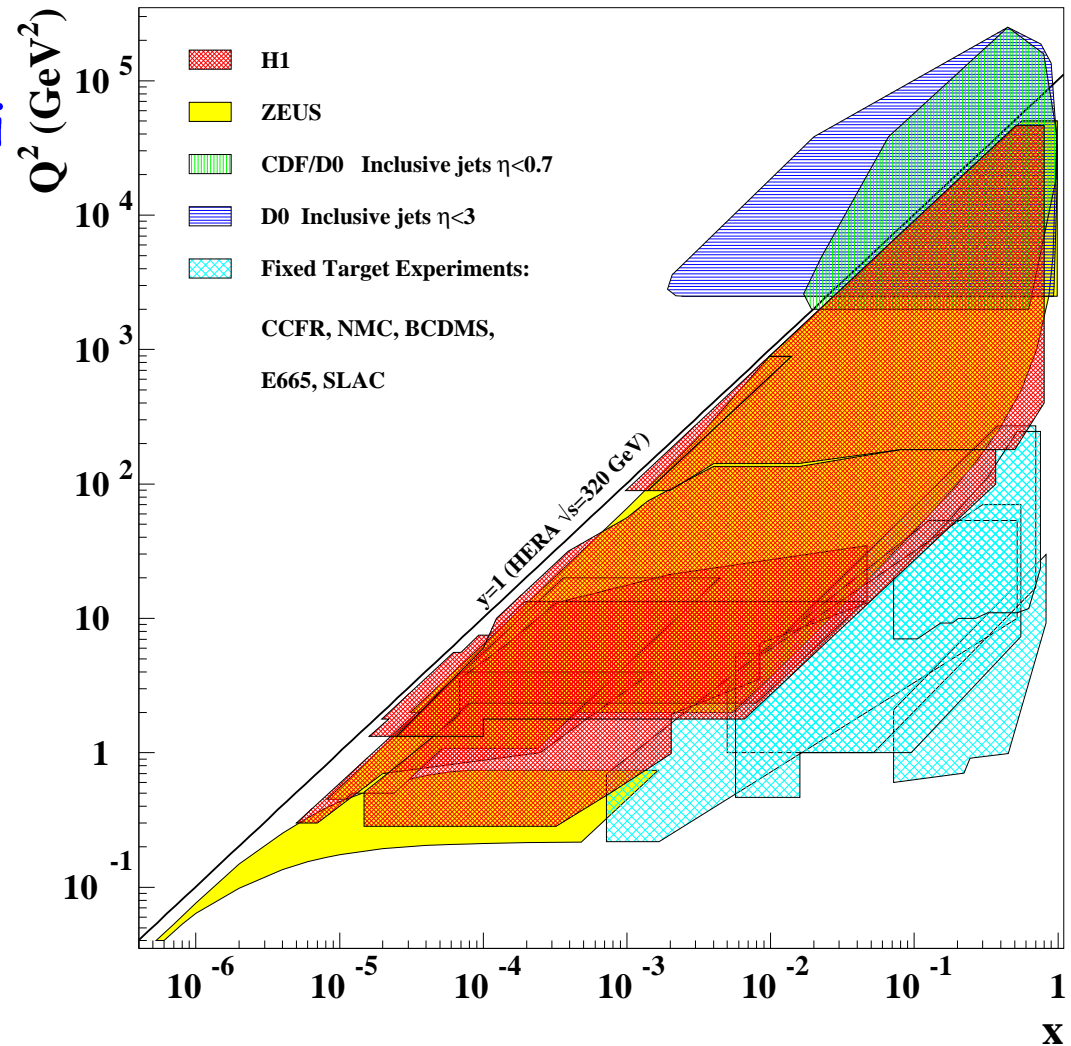
Il termine  $x F_3$  ha segno opposto per  $e^+$  ed  $e^-$ .

Ad alto  $Q^2$  le sezioni d'urto di NC e CC diventano uguali ("electroweak unification").



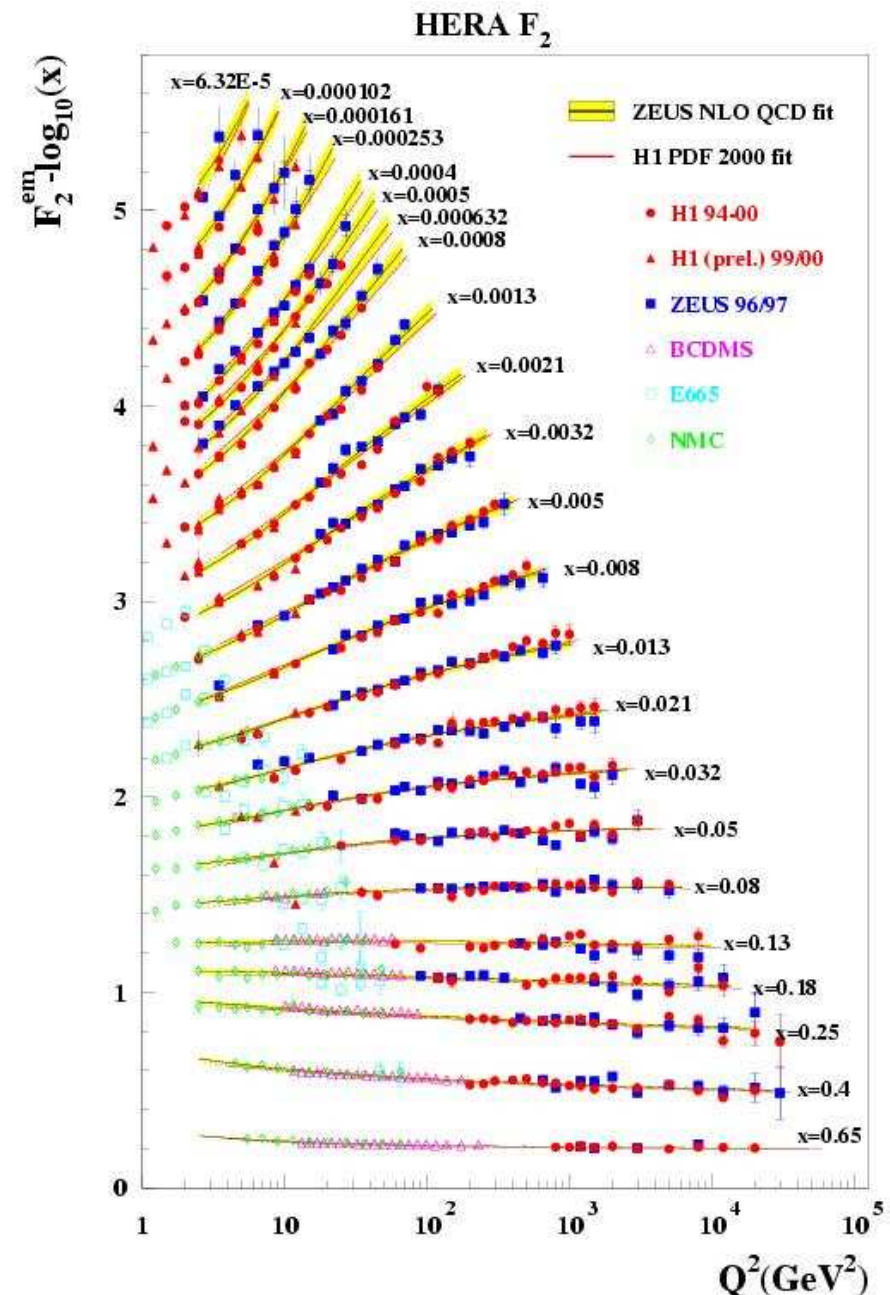
# Misura di $F_2$

- HERA è la macchina ideale per la misura delle funzioni di struttura.
- HERA allarga in modo spettacolare la regione cinematica accessibile.



# Misura di $F_2$

- HERA è la macchina ideale per la misura delle funzioni di struttura.
- HERA allarga in modo spettacolare la regione cinematica accessibile.
- Ad HERA si misura  $F_2$  nella regione  $6.32E-5 < x < 0.65$  e  $1 < Q^2 < 30000 \text{ GeV}^2$ , con una precisione del 2-3%



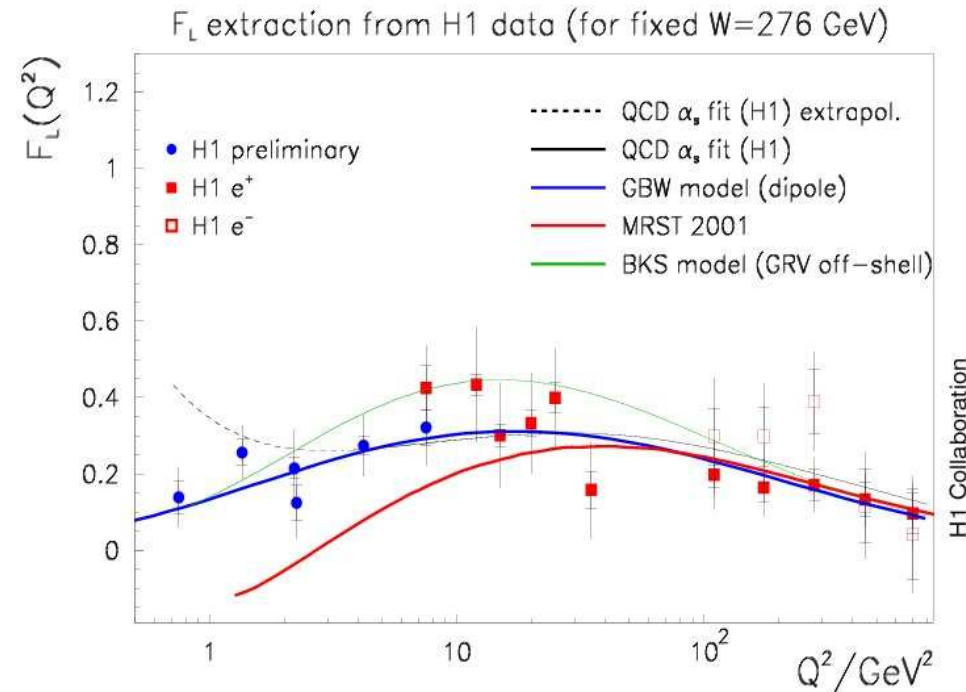
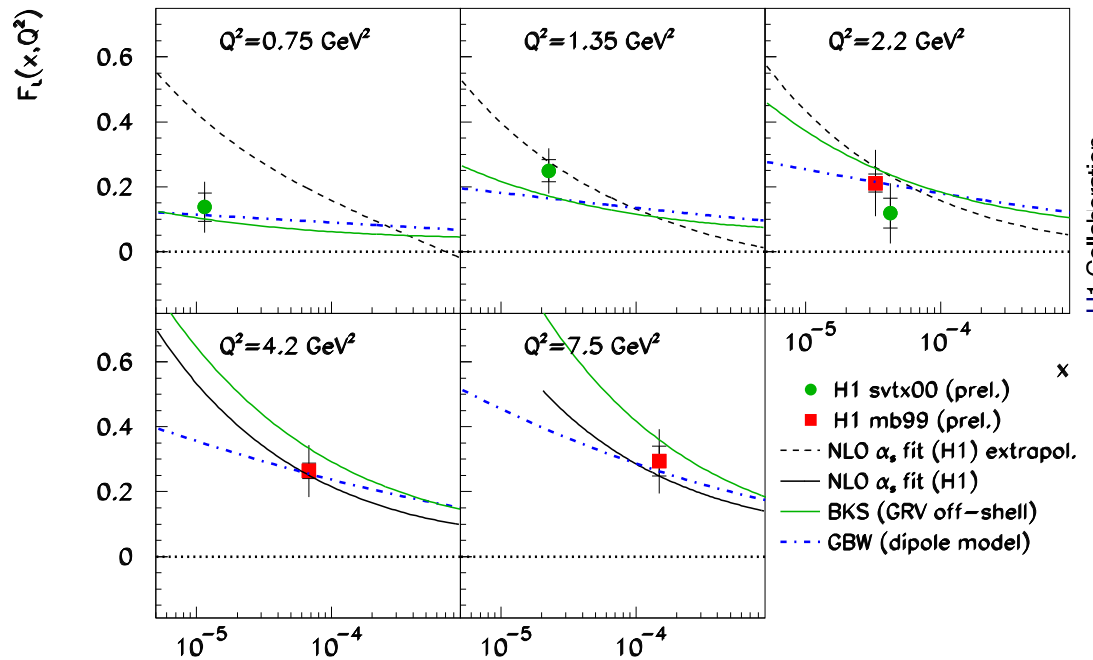
# Misura di $F_L$

"Shape method" di H1:

- si estrae la sezione d'urto ridotta ( $\sigma_r$ )
- si esegue un FIT dei parametri  $c, \lambda, F_L$
- run dedicati a  $F_L$  nel 1999-2000

$$\sigma_r = F_2 - \frac{y^2}{Y_+} F_L$$

$$\sigma_{\text{FIT}} = c x^{-\lambda} - \frac{y^2}{1 + (1-y)^2} F_L$$



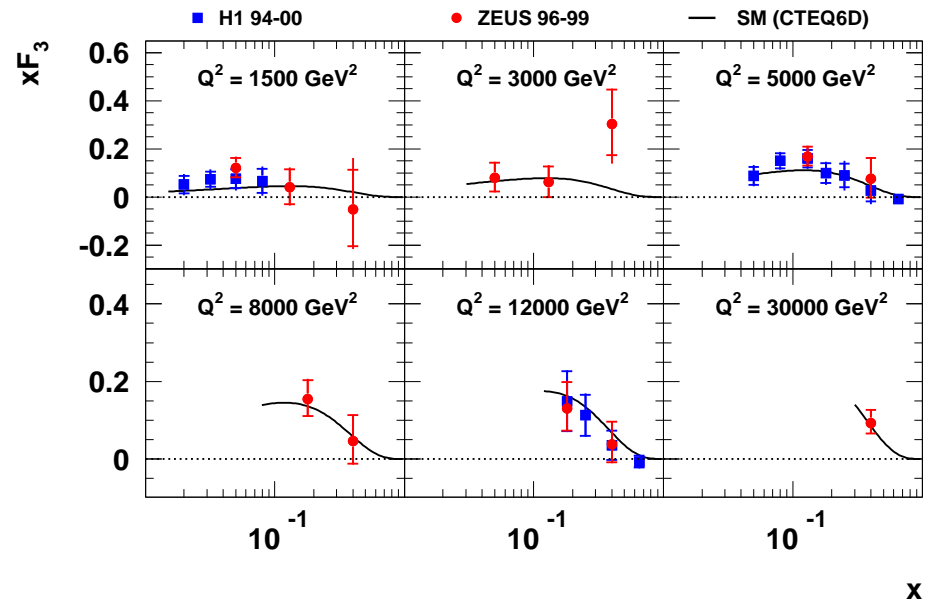
# Misura di $xF_3$

$xF_3$  misurabile come differenza tra sezione d'urto di  $e^-$  ed  $e^+$ :

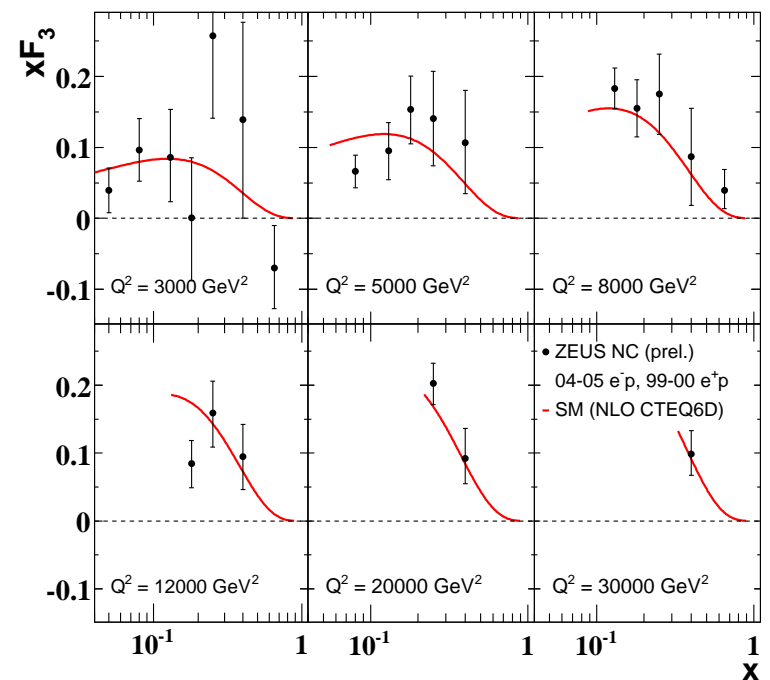
$$xF_3 = \frac{xQ^4}{4\pi\alpha^2 Y_-} \left[ \frac{d^2\sigma_{e^-p}^{NC}}{dx dQ^2} - \frac{d^2\sigma_{e^+p}^{NC}}{dx dQ^2} \right]$$

In HERA-I la statistica è limitata per gli elettroni ( $16.7 \text{ pb}^{-1}$  a ZEUS); i dati di HERA-II possono migliorare molto la precisione su  $xF_3$ .

A lato:  $121 \text{ pb}^{-1}$  di collisioni  $e^-p$  raccolte nel 2004-05 



ZEUS



ZEUS preliminary



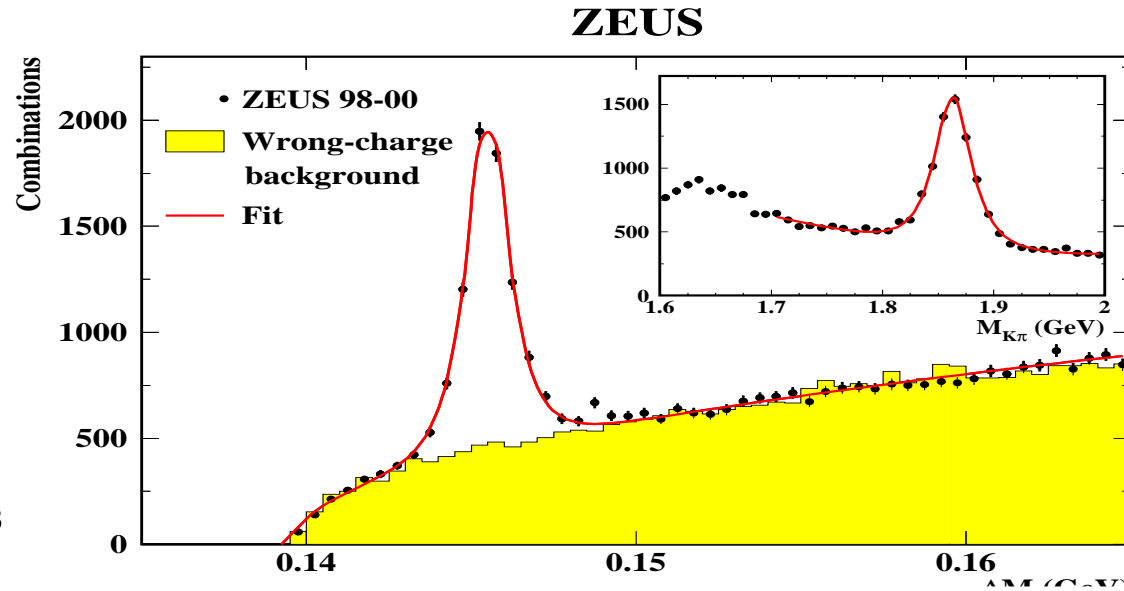
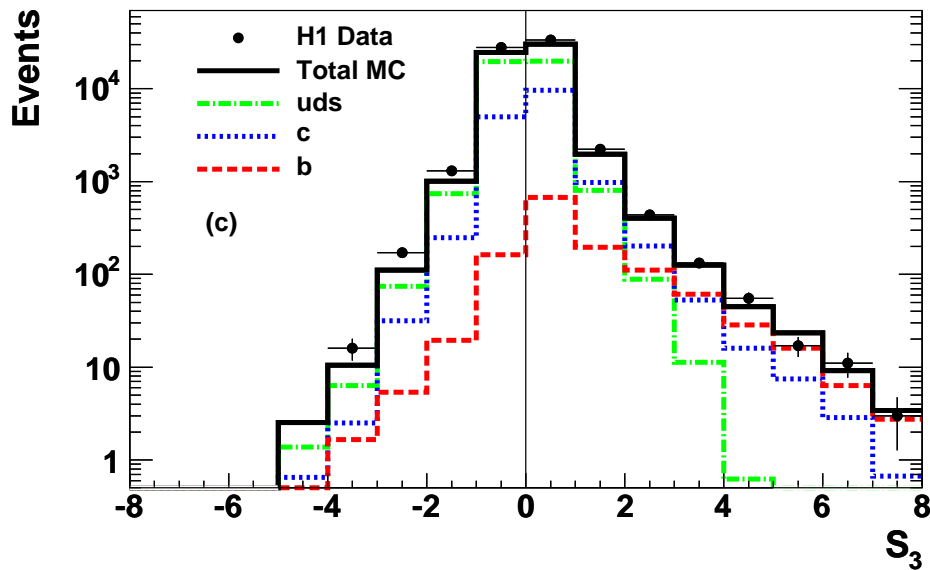
# Misura di $F_2^{cc}$ e $F_2^{bb}$

## H1 - significanza parametro d'impatto:

- Collisioni  $e^+p$ , 1999-00,  $L=57\text{pb}^{-1}$
- Fit di  $S_1, S_2, S_3$  (dove  $S=\delta/\sigma(\delta)$ ) per stimare la frazione di b e c nei dati.
- Calcola la sezioni d'urto  $\sigma(cc)$  e  $\sigma(bb)$ .
- Dalla  $\sigma$  si estrae  $F_2$ , sottraendo  $F_L$  valutato dalla QCD

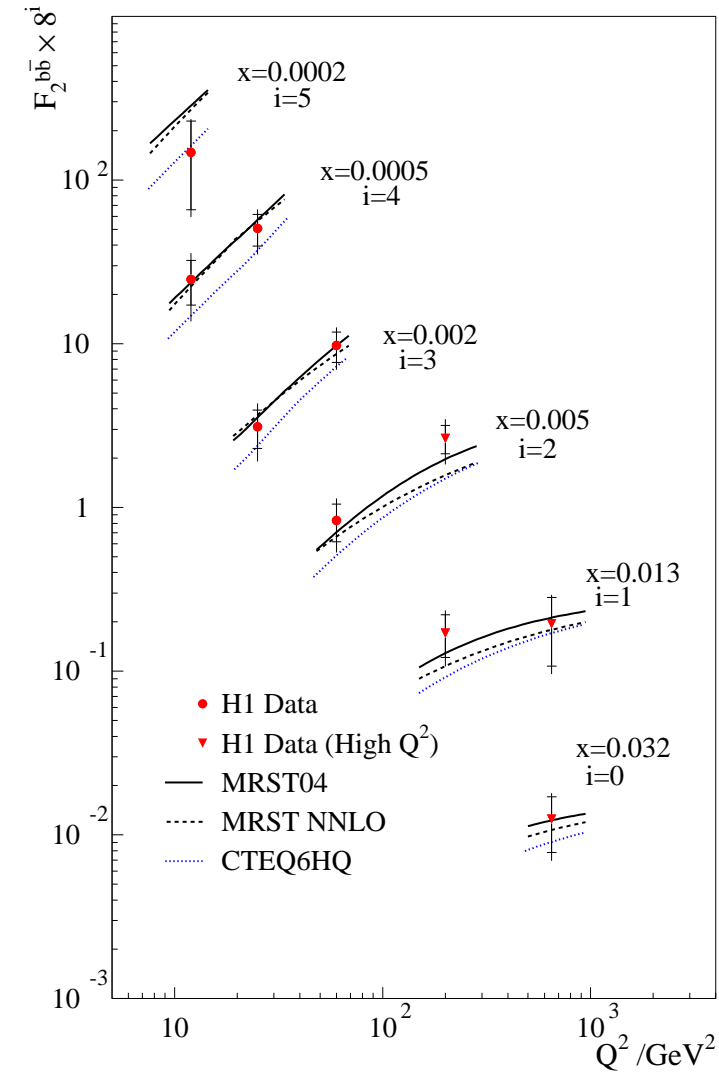
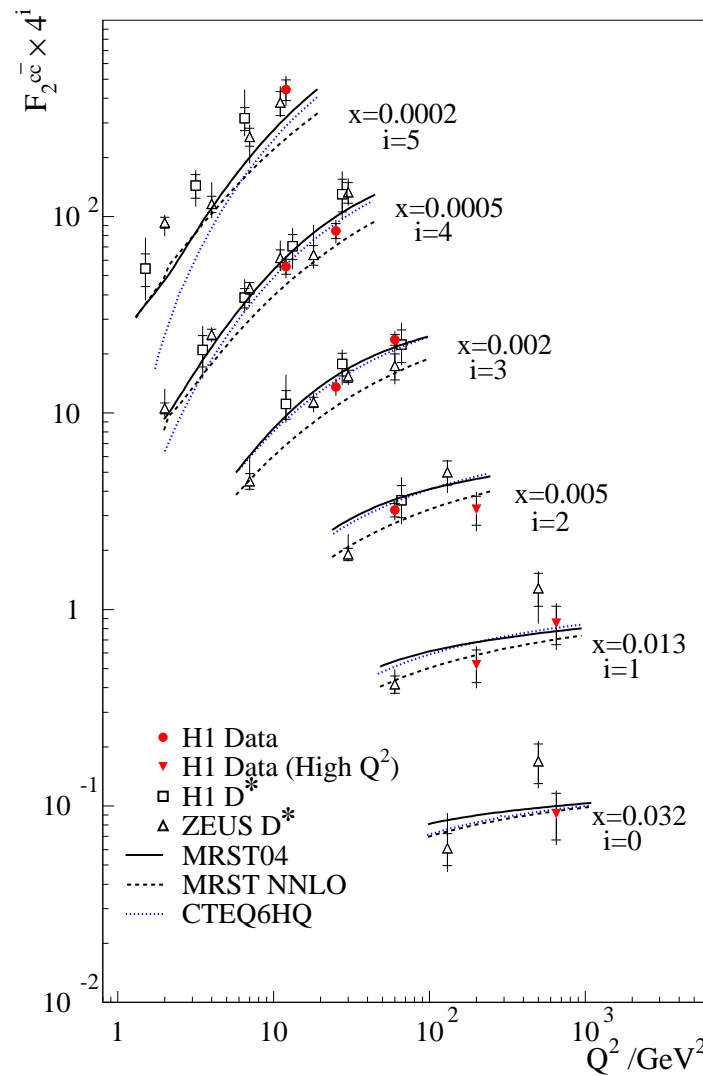
## ZEUS - ricostruzione della $D^*$ :

- Collisioni  $e^+p$ , 1998-00,  $L=82\text{pb}^{-1}$
- ZEUS non aveva rivelatore di vertice in HERA-I
- Il charm è identificato dai decadimenti  $D^* \rightarrow D^0\pi_s, D^0 \rightarrow K\pi$
- $F_2^{bb}$  non è ancora misurata da ZEUS



# Misura di $F_2^{cc}$ e $F_2^{bb}$

- Le misure dei due esperimenti sono in accordo, e sono descritte dalla pQCD.
- Questa è la prima misura di  $F_2^{bb}$ .
- In HERA-II anche ZEUS ha il rivelatore di vertice: potrà misurare  $F_2^{bb}$ .



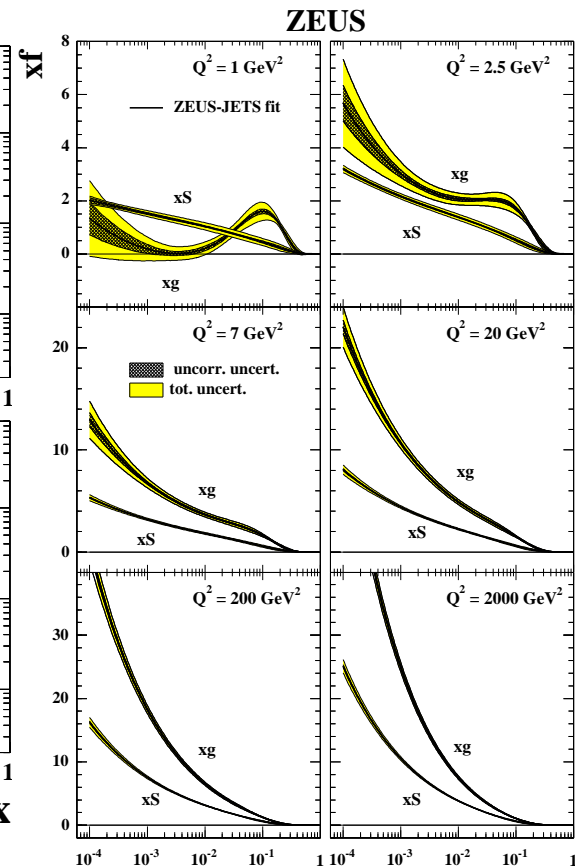
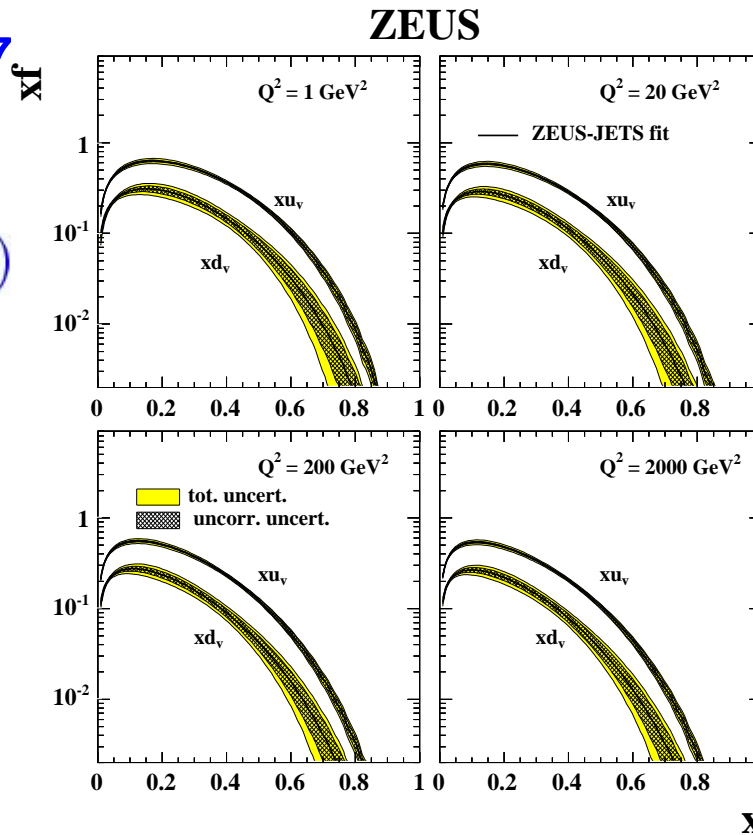
# PDF del protone

- Le funzioni di struttura contengono al loro interno le PDF del protone  $\Rightarrow$  dai dati si estrapolano le PDF
- ZEUS ha estratto le PDF dalle sezioni d'urto di NC, CC, produzione di jet in collisioni  $e^+p$ , prod. di dijet in collisioni  $yp$  (dati di HERA I), coi soli dati di ZEUS
- Le PDF di  $xu_v, xd_v, xS, xg$

sono parametrizzate a  $Q^2_0 = 7 \text{ GeV}^2$  da:

$$xf(x) = p_1 x^{p_2} (1-x)^{p_3} (1+p_4 x)$$

- L'evoluz. in  $Q^2$  è fatta nel formalismo DGLAP al NLO



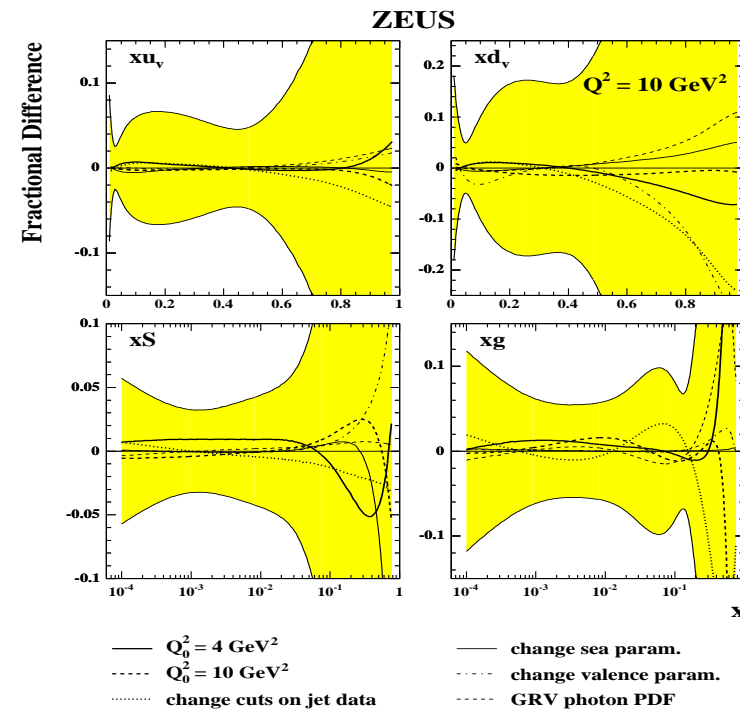
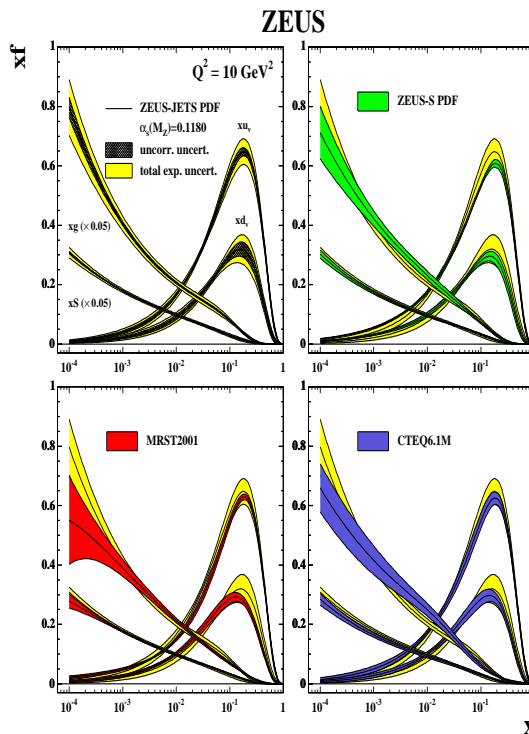
# PDF del protone

- Le funzioni di struttura contengono al loro interno le PDF del protone  $\Rightarrow$  dai dati si estrapolano le PDF
- ZEUS ha estratto le PDF dalle sezioni d'urto di NC, CC, produzioni di jet in collisioni  $e^+p$ , prod. di dijet in collisioni  $yp$  (dati di HERA I), coi soli dati di ZEUS

Le PDF di  $xu_v$ ,  $xd_v$ ,  $xS$ ,  $xg$  sono parametrizzate a  $Q_0^2 = 7 \text{ GeV}^2$  da:

$$xf(x) = p_1 x^{p_2} (1-x)^{p_3} (1+p_4 x)$$

- L'evoluz. in  $Q^2$  è fatta nel formalismo DGLAP al NLO
- I risultati sono già competitivi con MRST/CTEQ
- ZEUS: precisione dominata dalla statistica. Nei fit globali dominano le sistem.

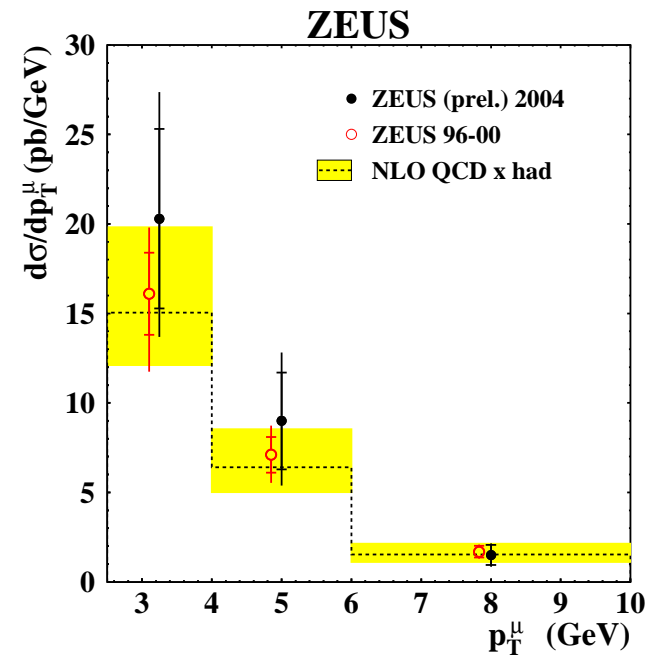
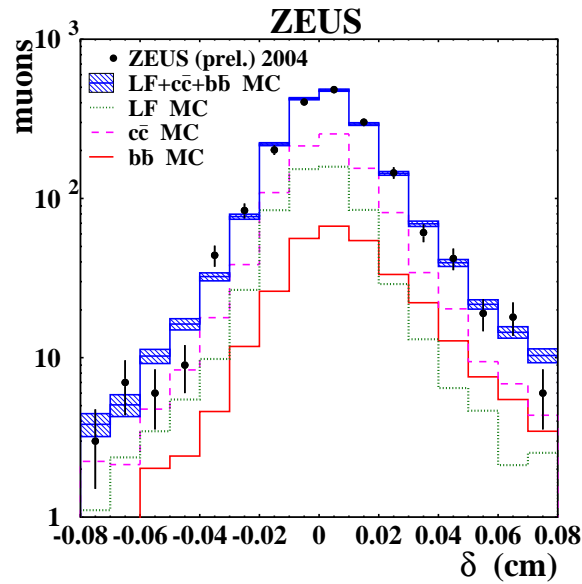
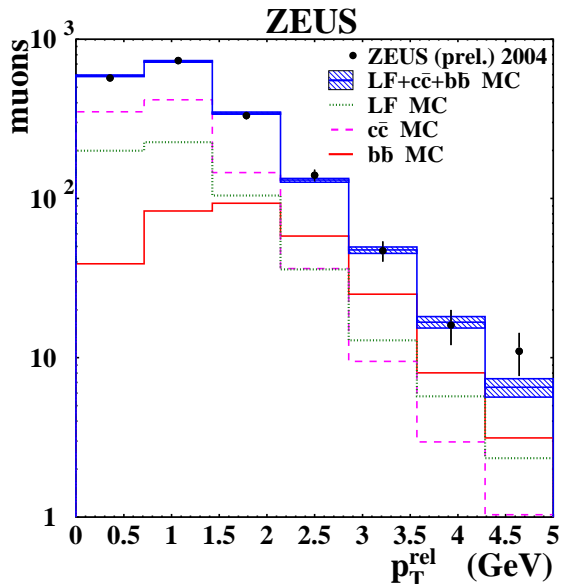


# Fotoproduzione di beauty a HERA II

Nello shut-down del 2000 ZEUS ha installato un nuovo rivelatore di vertice (MVD).

E' la prima misura con l'MVD di ZEUS.

- Selezione: 2 jet e 1 muone.
- In HERA-I ( $L=110\text{pb}^{-1}$ ): fraz. di beauty dal fit del  $p_T^{\text{rel}}$  del  $\mu$ .
- In HERA-II ( $e^+p$ ,  $L=33\text{pb}^{-1}$ ): frazione di beauty dal fit simultaneo di  $\delta$  e  $p_T^{\text{rel}}$  del  $\mu$ .



$$p_T^{\text{rel}} = \frac{|\mathbf{p}^\mu \times (\mathbf{p}^{\text{jet}} - \mathbf{p}^\mu)|}{|\mathbf{p}^{\text{jet}} - \mathbf{p}^\mu|}$$

$\delta$  = parametro d'impatto con segno

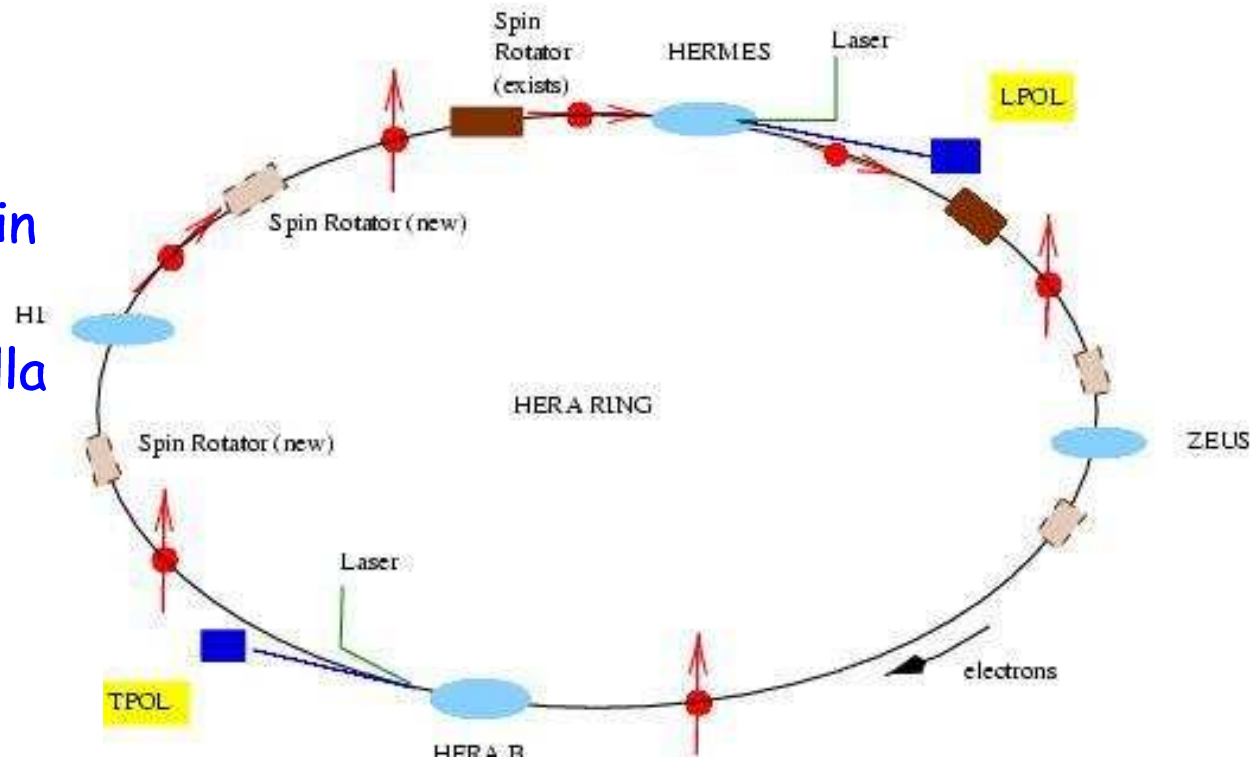
# Sezione d'urto con $e^\pm$ polarizzati

- Gli elettroni quando emettono radiazione di sincrotrone si polarizzano trasversalmente.
- Dal 2003 "spin rotators" trasformano la polarizzazione in longitudinale.
- La sezione d'urto dipende dalla polarizzazione media ( $P_e$ ) del fascio.

$$P_e = \frac{N_R - N_L}{N_R + N_L}$$

$$\sigma_{e^\pm p}^{NC} = \sigma_{e^\pm p}^{NC, \text{ unpol}} + P_e \sigma_{e^\pm p}^{NC, \text{ pol}}$$

$$\sigma_{e^\pm p}^{CC} = (1 \pm P_e) \sigma_{e^\pm p, \text{ unpol}}^{CC}$$

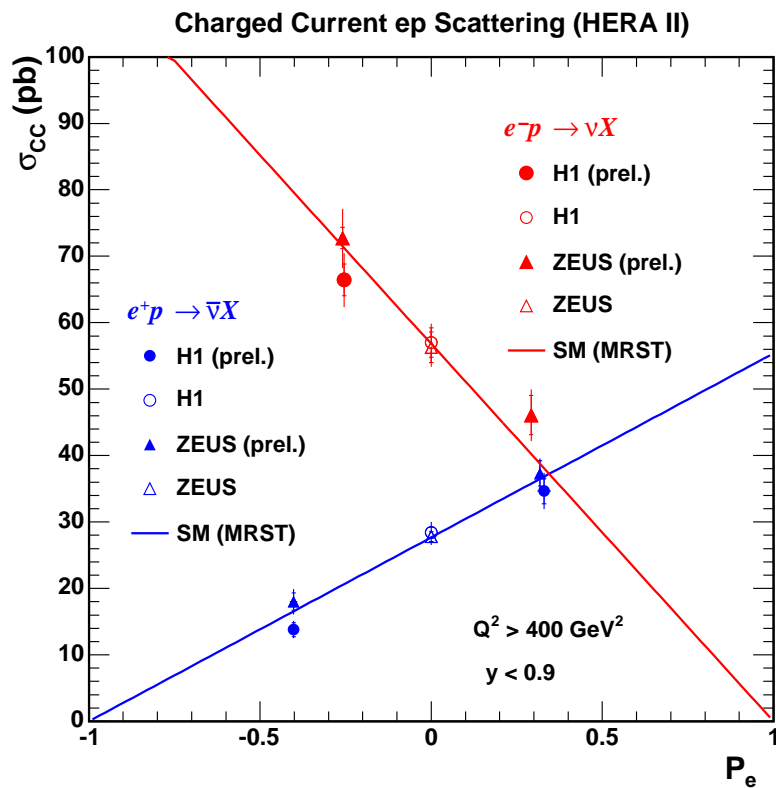


# Sezione d'urto con $e^\pm$ polarizzati

- ZEUS 2003-05,  $L=30.5\text{pb}^{-1}$  ( $e^+p$ ),  $41.7\text{pb}^{-1}$  ( $e^-p$ )
- H1 2003-04,  $L=47.6\text{pb}^{-1}$  ( $e^+p$ )

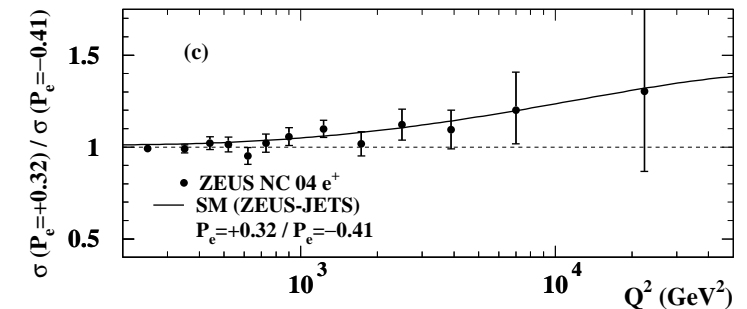
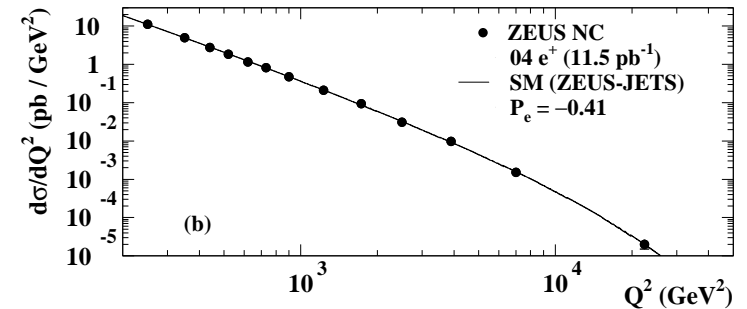
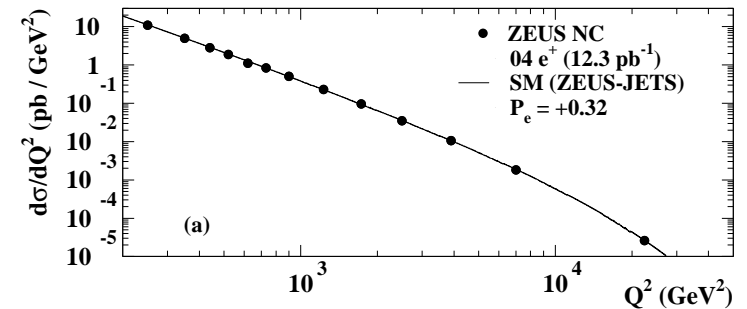
Sezione d'urto di corrente neutra ( $e^+p$ ):

Sezione d'urto di corrente carica:




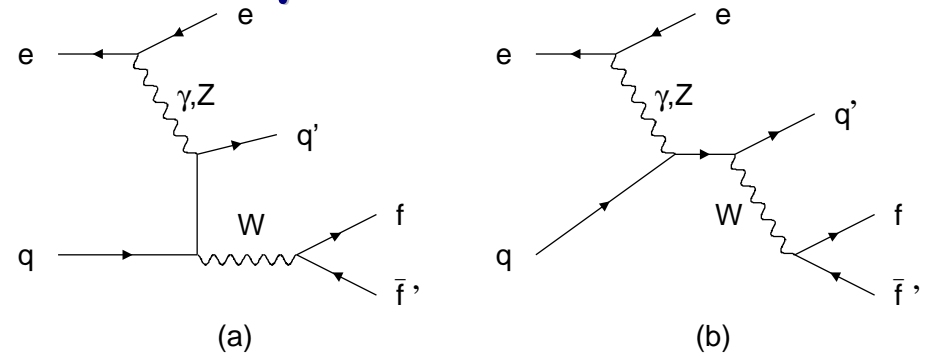
- Le misure sono in accordo con lo SM
- I due esperimenti sono in accordo per la CC (H1 non ha ancora misurato la NC)

ZEUS



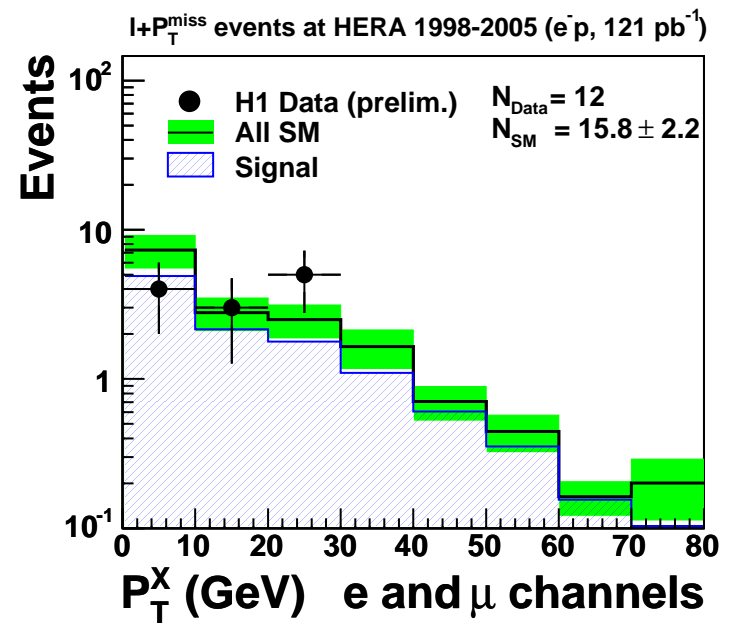
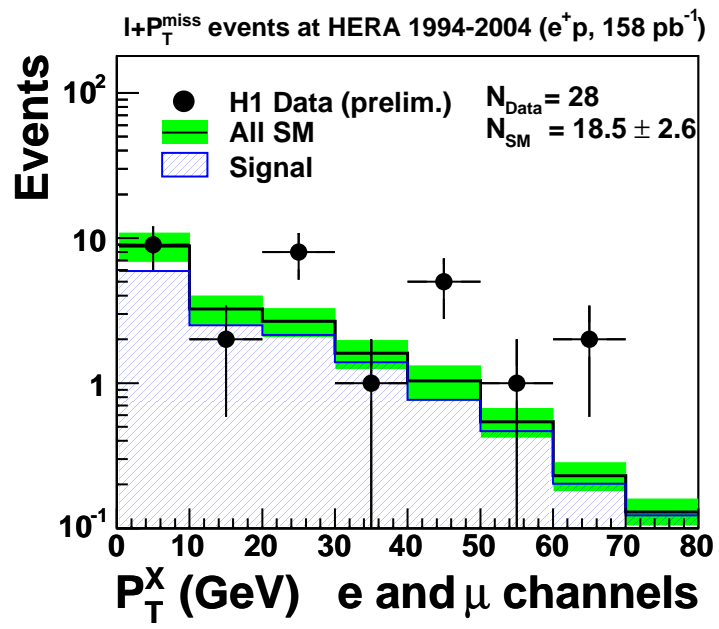
# Leptoni isolati con $P_T$ elevato

La produzione di  $e/\mu$  isolati ad alto  $P_T$ , con  $P_T$  adronico ( $P_T^X$ ) e  $P_T$  mancante è dominata dalla produzione di  $W$  singola 



- H1 1994-05,  $L=279\text{pb}^{-1}$
- ZEUS 1999-04,  $L=106\text{pb}^{-1}$

- **Eccesso per H1 nelle collisioni  $e^+p$  ma non nelle  $e^-p$ .**
- **ZEUS non conferma l'eccesso di H1.**
- **L'eccesso non è al momento compreso.**





# Misura di $\alpha_s$ ad HERA

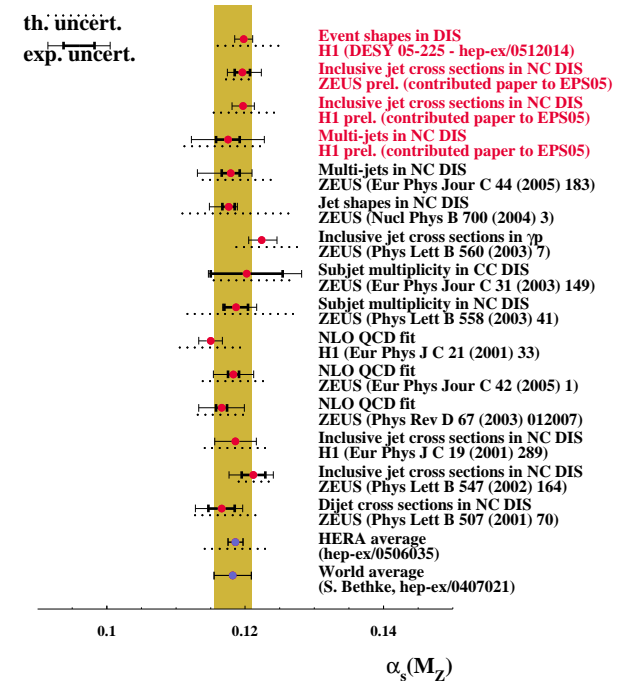
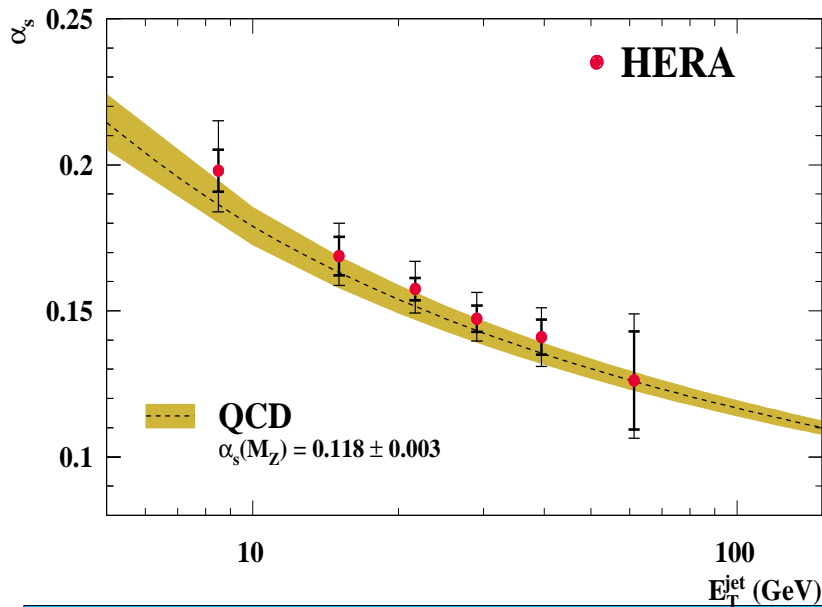
- Tutti i processi di QCD dipendono da  $\alpha_s \Rightarrow \alpha_s$  si può estrarre da molte osservabili (sezione d'urto con jet, "shape" degli eventi, molteplicità dei jet...).

- La migliore stima di HERA è:

$$\alpha_s(M_Z) = 0.1186 \pm 0.0011 \text{ (exp.)} \pm 0.0050 \text{ (th.)}$$

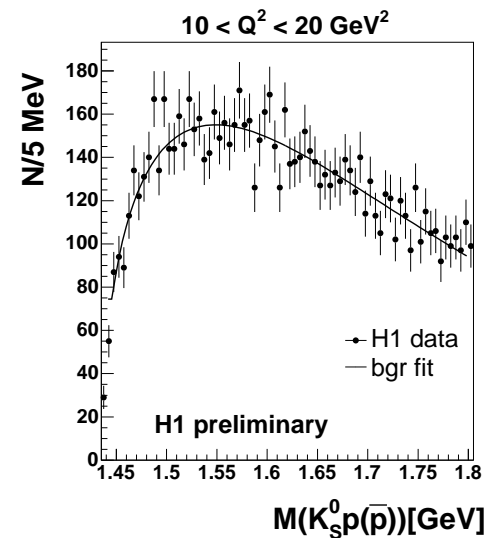
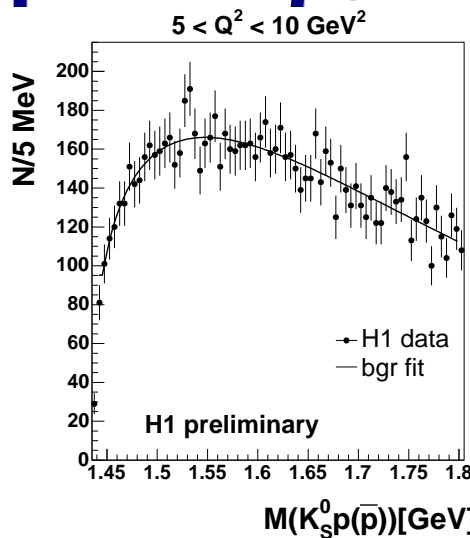
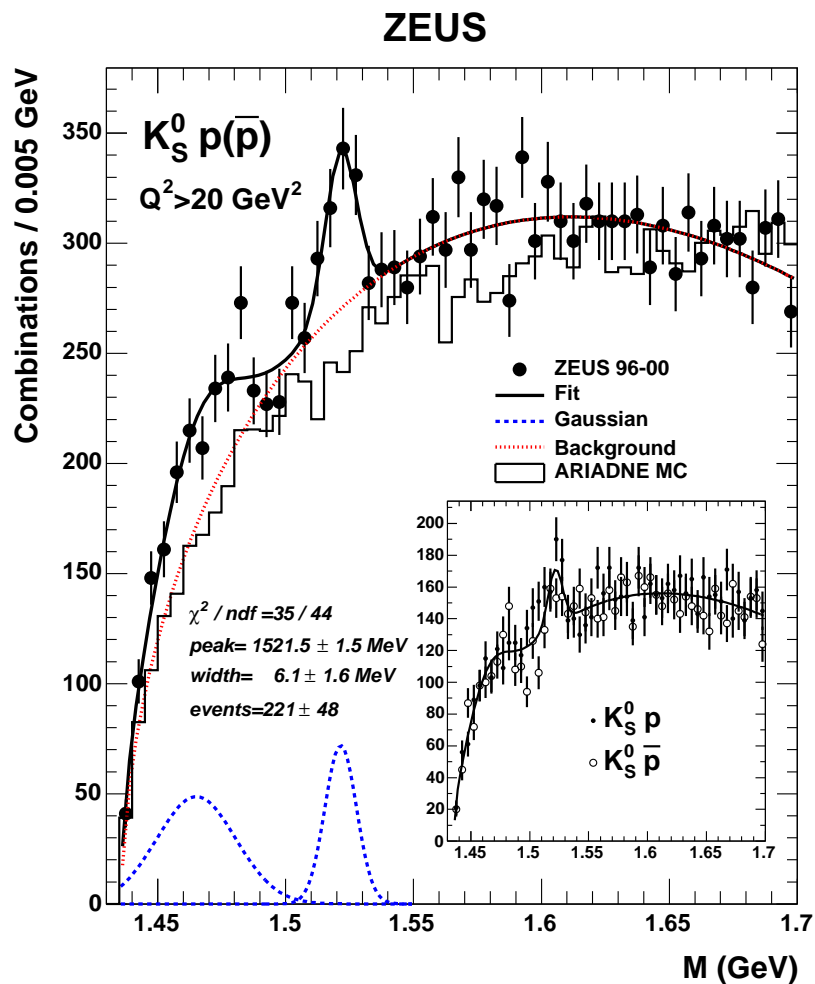
- E' attesa una riduzione delle incertezze quando NNLO sarà disponibile  $\Rightarrow$  HERA può diventare importante per la media mondiale:

$$\alpha_s(M_Z) = 0.1176 \pm 0.002 \text{ (Phys.Lett.B592:1,2004)}$$



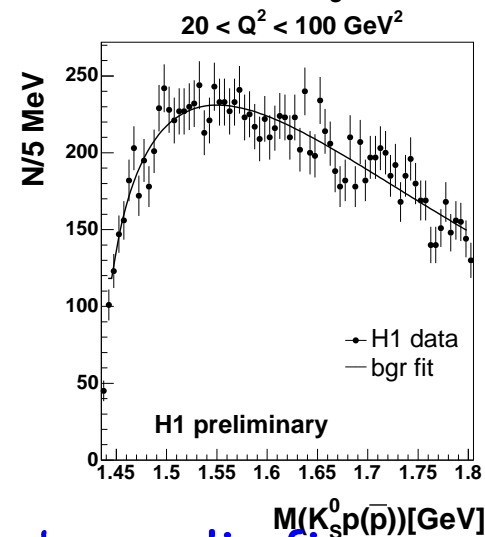
Ad HERA si è misurato  $\alpha_s(E_T^{\text{jet}})$  dalle sezioni d'urto a diversi  $E_T^{\text{jet}}$ ; l'andamento è in accordo con la pQCD.

# Strange pentaquark



ZEUS (96-00):  
 $L = 121 \text{ pb}^{-1}$

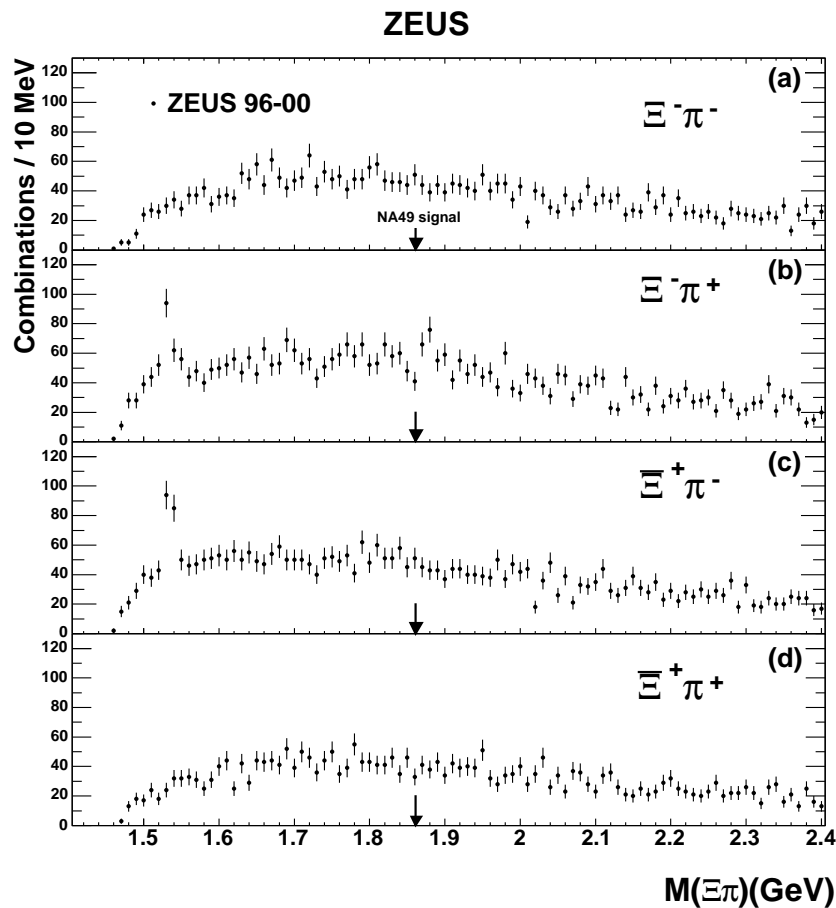
H1 (1996-00):  
 $L = 71 \text{ pb}^{-1}$



- Barioni con stranezza ( $\Theta^+ = uudd\bar{s}$ ?) osservati in esperimenti a bersaglio fisso
- ZEUS osserva un picco ( $N_s = 221 \pm 48$ ) a  $M(K_S^0 p) = 1522 \pm 6 \text{ MeV}$
- H1 non vede alcuna risonanza...

# $\bar{u}/\bar{d}$ pentaquark

ZEUS (96-00):  $L=121 \text{ pb}^{-1}$



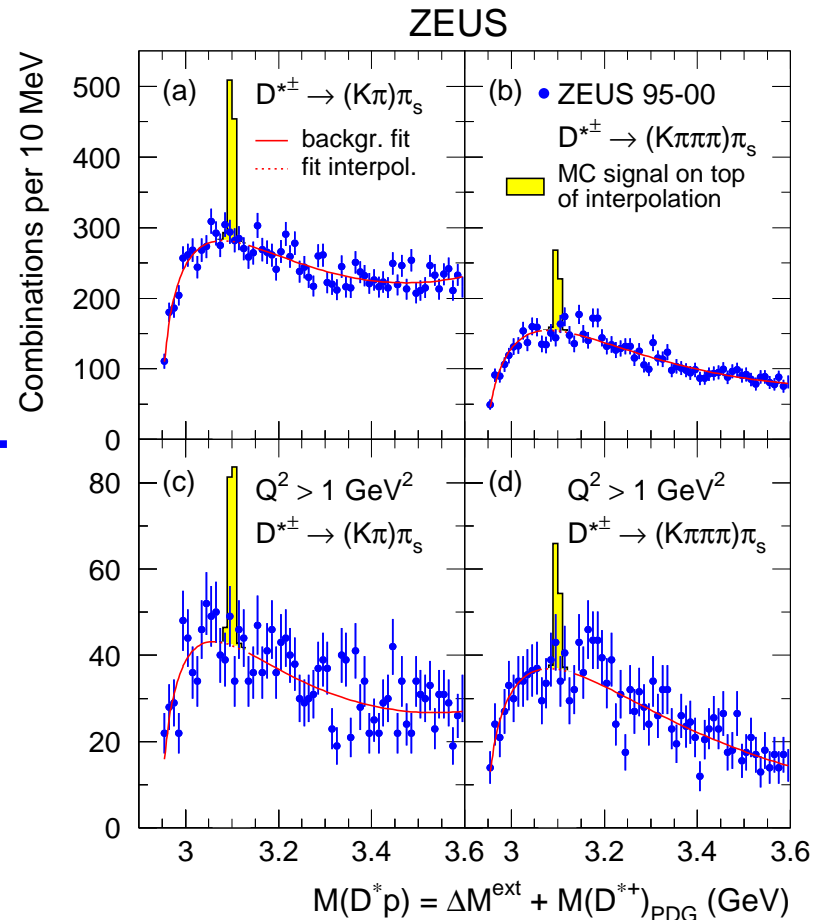
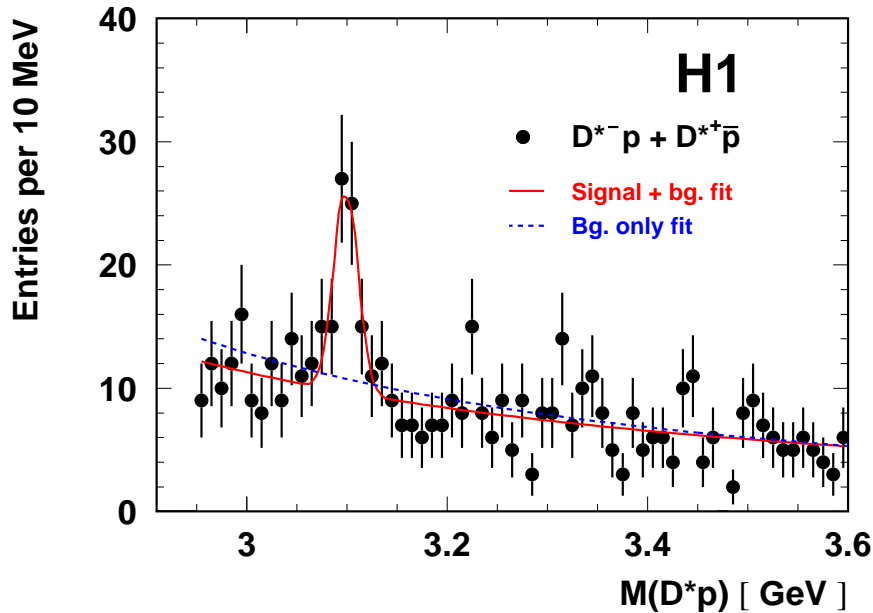
- $\Theta^+$  appartiene a ipotetico decupletto di pentaquark, con altri stati esotici:  
 $\Xi_{3/2}^- (ddss\bar{u})$ ,  $\Xi_{3/2}^+ (uusd)$
- NA49 al CERN ha osservato le  $\Xi_{3/2}^-$  e  $\Xi_{3/2}^+$  nei decadimenti  $\Xi\pi$ ,  $M(\Xi\pi)=1862\pm 18 \text{ MeV}$
- ZEUS non osserva alcun segnale.

# Charmed pentaquark

Lo stato  $\Theta^0$  ( $uudd\bar{c}$ ) decade in  $\Theta^+\pi^-$ ,  $D^-p$ ,  $D^{*-}p$  (a seconda della massa).

ZEUS (95-00):  $L=127 \text{ pb}^{-1}$ :

H1 (1996-00):  $L=75 \text{ pb}^{-1}$ :



- H1 osserva un picco ( $N_s=50.6\pm 11.2$ ) a  $M(D^*p)=3099\pm 3\pm 5 \text{ MeV}$
- ZEUS non vede alcuna risonanza...

# Conclusioni

- Funzioni di struttura / PDF del protone: HERA dà un contributo fondamentale alla loro misura.
- Primi risultati di ZEUS con MVD: beauty in PHP.
- Prime sezioni d'urto con elettroni polarizzati: accordo ZEUS-H1 con SM.
- Leptoni isolati a PT elevato: eccesso nelle collisioni  $e^+p$  in H1, accordo con SM altrimenti. Eccesso non compreso.
- Misura di  $\alpha_s$  ad HERA: incertezza dominata dalla teoria, attendiamo NNLO.
- Pentaquark: le risonanze osservate da un esperimento non sono confermate dall'altro.

# Trasparenze addizionali

# Referenze

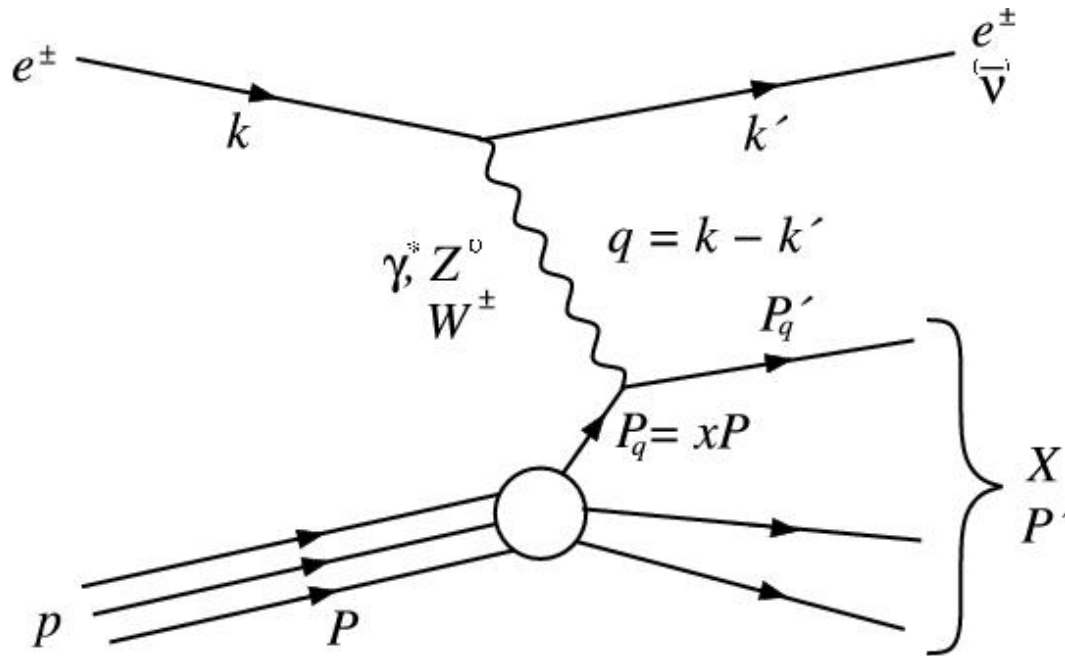
- Funzioni di struttura:
  - Moriond EW04: hep-ex/0406036
  - DIS03: hep-ph/0311180
- PDF del protone: Eur.Phys.J.C42:1-16,2005
- $F_2$  charm,  $F_2$  beauty:
  - Eur.Phys.J.C45:23-33,2006
  - Eur.Phys.J.C40:349-359,2005
  - Phys.Rev.D69:012004,2004
- Beauty a ZEUS con l'MVD: EPS05 abstract 359
- Sezione d'urto con  $e^\pm$  polarizzati
  - hep-ex/0602026

# Referenze

- Phys.Lett.B634:173-179,2006
- Leptoni isolati con  $P_T$  elevato:
  - EPS2005 abstract 637 e 327
  - H1prelim-05-164\_PRC\_Nov05
- $\alpha_s$  ad HERA: hep-ex/0506035
- Pentaquark:
  - Eur.Phys.J.C38:29-41,2004
  - Phys.Lett.B610:212-224,2005
  - Phys.Lett.B591:7-22,2004
  - EPS2005 abstract 400
  - Phys.Lett.B588:17,2004



# La cinematica di HERA



$$s = (P + k)^2$$

$$Q^2 = -q^2 = -(k - k')^2$$

$$x = \frac{Q^2}{2P \cdot q}$$

$$y = \frac{P \cdot q}{P \cdot k} \simeq \frac{Q^2}{sx}$$

$$W^2 = (P + q)^2 \simeq Q^2 \frac{1-x}{x}$$

$$Y_\pm = 1 \pm (1-y)^2$$

$$\frac{d^2\sigma_{e^\mp p}^{NC}}{dx dQ^2} = \frac{2\pi\alpha^2}{xQ^4} [Y_+ F_2^{NC}(x, Q^2) - y^2 F_L^{NC}(x, Q^2) \pm Y_- x F_3^{NC}(x, Q^2)]$$

$$\frac{d^2\sigma_{e^\mp p}^{CC}}{dx dQ^2} = \frac{G_F^2}{4\pi x} \left[ \frac{M_W^2}{M_W^2 + Q^2} \right]^2 [Y_+ W_2^\mp(x, Q^2) - y^2 W_L^\mp(x, Q^2) \pm Y_- x W_3^\mp(x, Q^2)]$$

# Le funzioni di struttura

$$F_2(x, Q^2) = \sum_i e_i^2 x q_i(x)$$

Corrente neutra:

$$F_1(x, Q^2) = \frac{1}{2x} F_2(x, Q^2)$$

} (No  $Z^0$ , no gluoni)

Corrente carica:

$$W_2^+(x, Q^2) = x (\bar{u}(x, Q^2) + \bar{c}(x, Q^2) + d(x, Q^2) + s(x, Q^2))$$

$$xW_3^+(x, Q^2) = x (-\bar{u}(x, Q^2) - \bar{c}(x, Q^2) + d(x, Q^2) + s(x, Q^2))$$

# Le funzioni di struttura

Corrente neutra:

$$F_1(x, Q^2) = \frac{1}{2x} F_2(x, Q^2)$$

$$F_2(x, Q^2) = \sum_i A_i^{L,R}(Q^2) [xq_i(x, Q^2) + x\bar{q}_i(x, Q^2)]$$

$$xF_3(x, Q^2) = \sum_i B_i^{L,R}(Q^2) [xq_i(x, Q^2) - x\bar{q}_i(x, Q^2)]$$

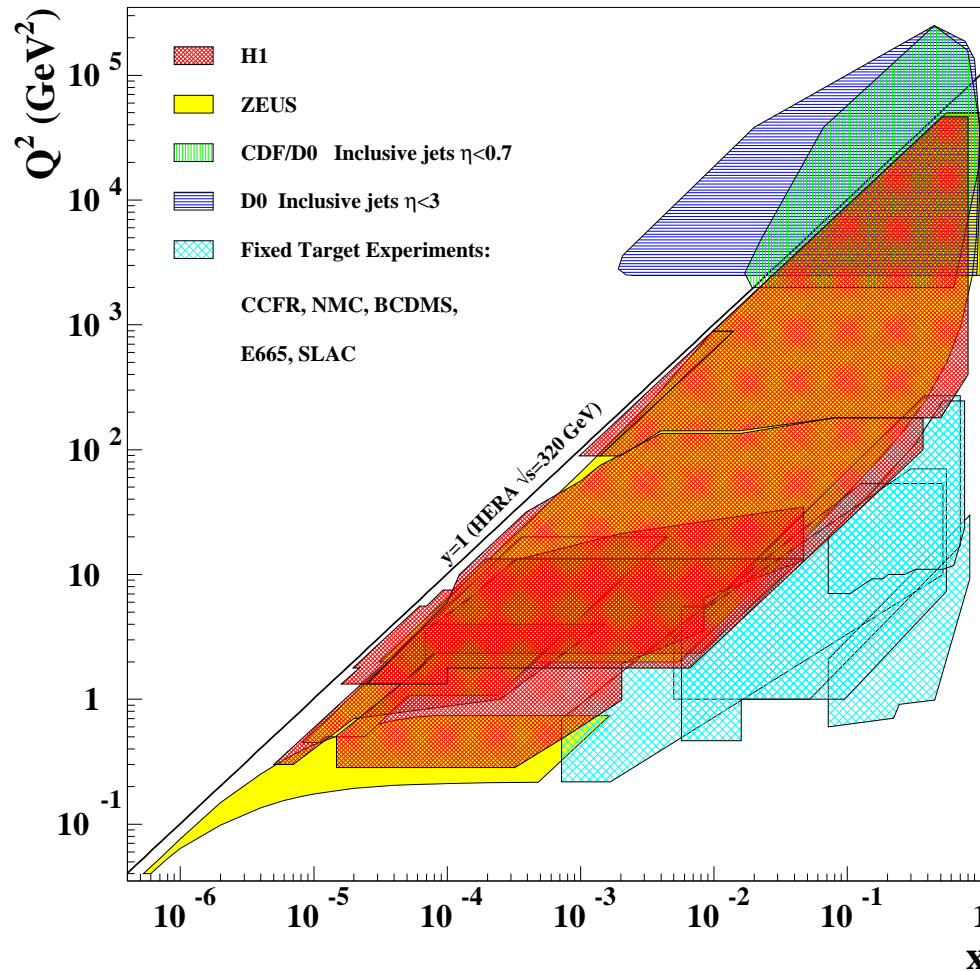
$$A_i^{L,R}(Q^2) = e_i^2 + 2e_i e_l (v_l \pm a_l) v_i P_Z + (v_l \pm a_l)^2 (v_i^2 + a_i^2) P_Z^2$$

$$B_i^{L,R}(Q^2) = \mp 2e_i e_l (v_l \pm a_l) a_i P_Z \pm 2(v_l \pm a_l)^2 v_i a_i P_Z^2$$

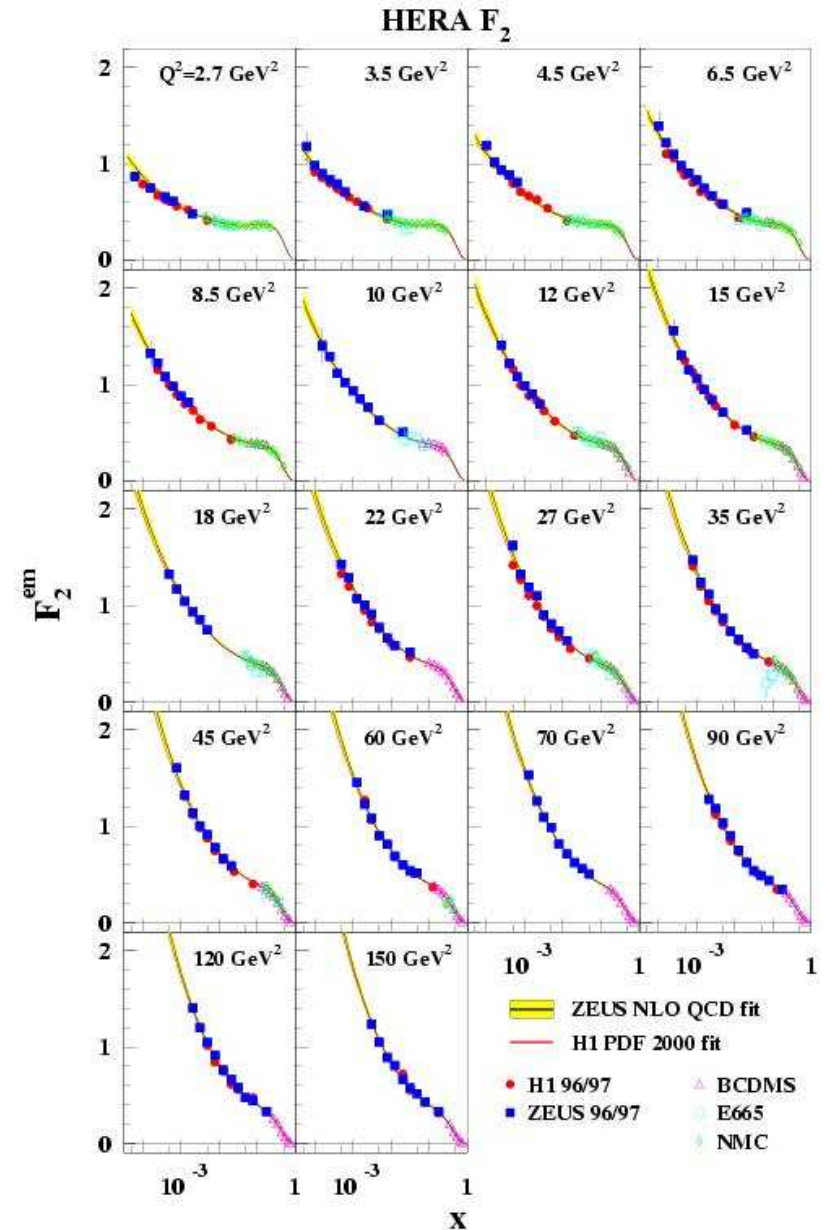
$$P_Z = \frac{Q^2}{Q^2 + M_Z^2} \frac{\sqrt{2} G_\mu M_Z^2}{4\pi\alpha}$$

# Misura di $F_2$

Regione cinematica coperta da HERA:



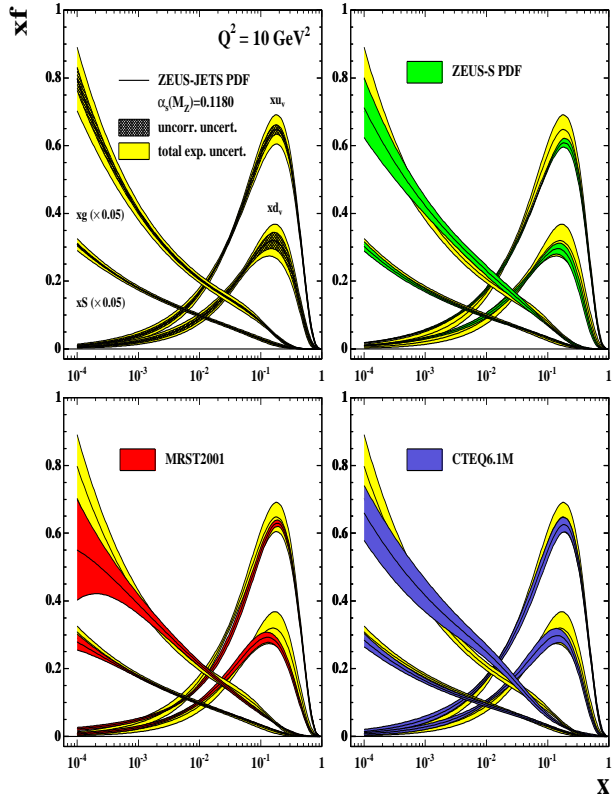
$F_2$  Vs.  $x$  ( $Q^2$  fissato):



# Confronto con MRST e CTEQ

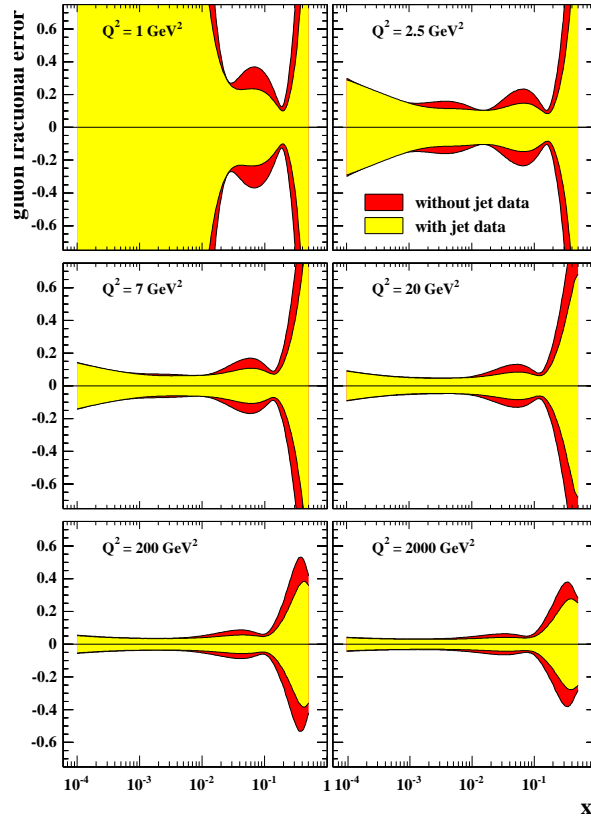
# PDF del protone

ZEUS



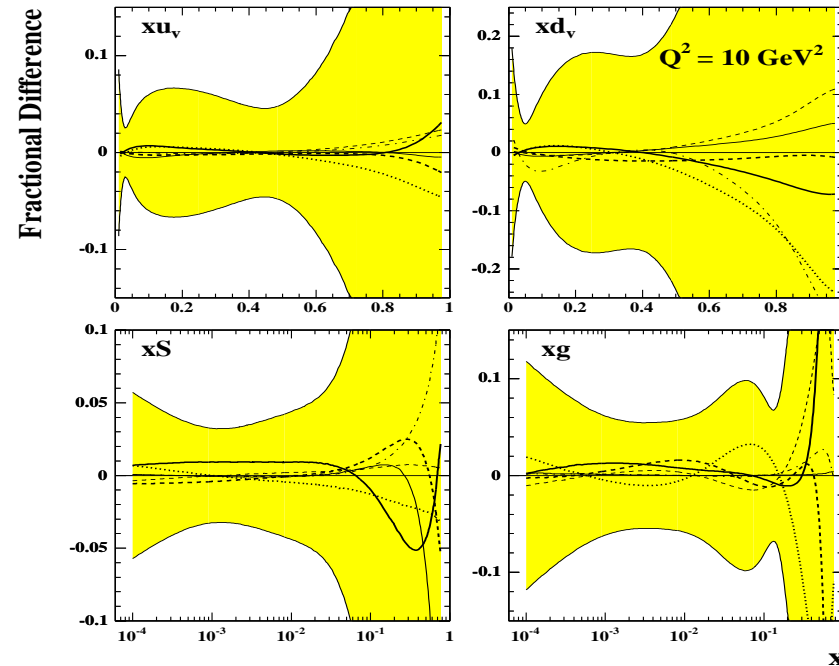
## Incertezza PDF gluone

ZEUS



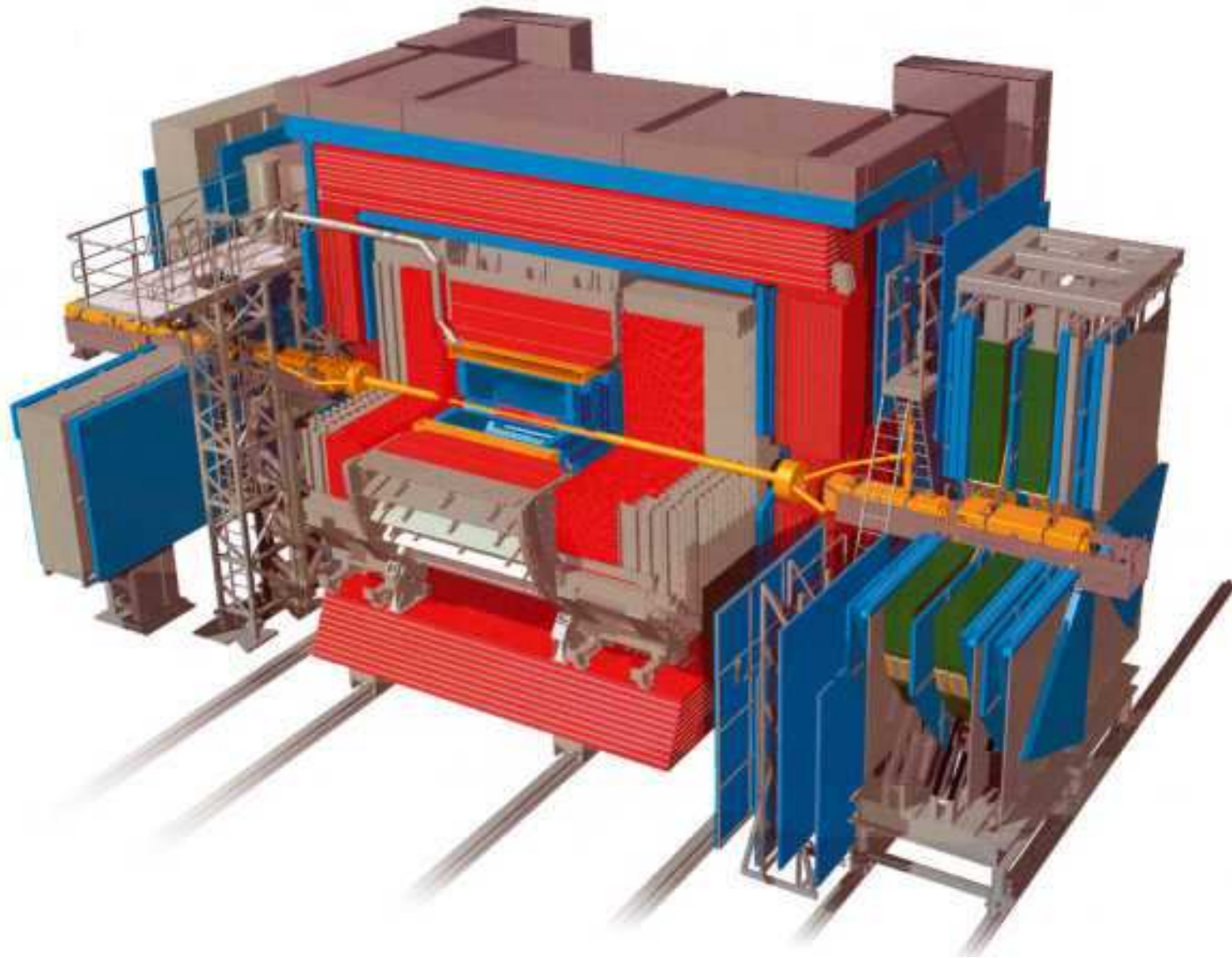
## Incertezza PDF: $Q^2=10\text{GeV}^2$

ZEUS



- $Q_0^2 = 4 \text{ GeV}^2$
- - -  $Q_0^2 = 10 \text{ GeV}^2$
- ⋯ change cuts on jet data
- change sea param.
- - - change valence param.
- ⋯ GRV photon PDF

# Il rivelatore ZEUS



# Il rivelatore H1

