

# *La fisica dello spin a COMPASS*

Federica Sozzi  
INFN Sezione di Trieste

*Incontri di fisica delle alte energie*

Perugia 27-29 aprile 2011



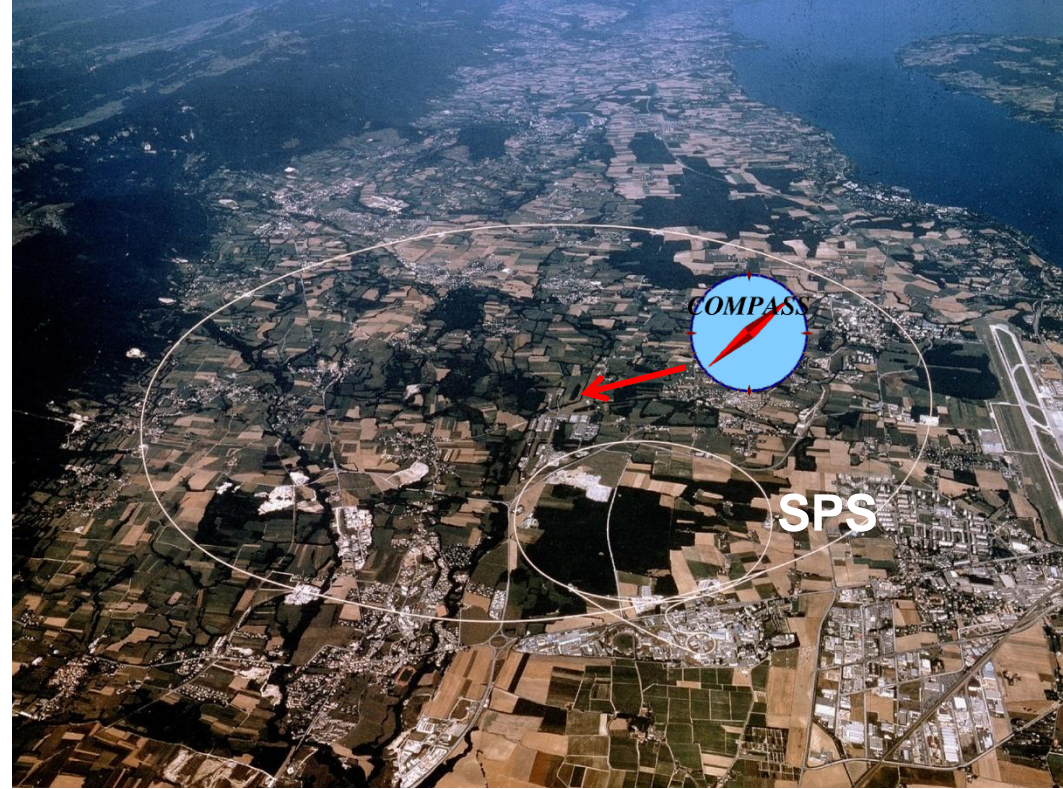
# COMmon Muon and Proton Apparatus for Structure and Spectroscopy

Esperimento a bersaglio fisso  
al SPS del CERN

In presa dati dal 2002:

**Fisica dello spin** → fasci di muoni  
su bersagli polarizzati:  
deuterio ( ${}^6\text{LiD}$ ) 2002-2004, 2006  
protone ( $\text{NH}_3$ ) 2007, 2010 - 2011

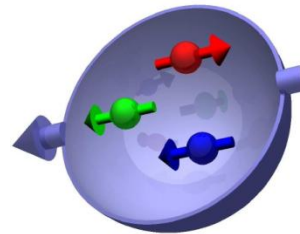
**Spettroscopia adronica:**  
fascio di adroni 2008 - 2009



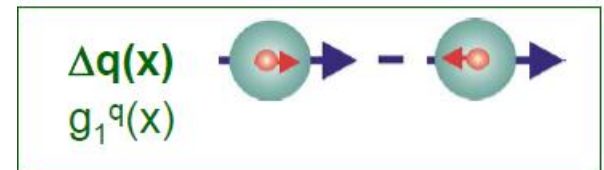
# Lo struttura di spin del nucleone

Com'è distribuito lo spin del nucleone tra i suoi costituenti?  
Idea iniziale, nel contesto del modello a partoni:  
lo spin del nucleone è la somma del contributo dei quark leggeri

$$\frac{1}{2} = \frac{1}{2} \Delta\Sigma$$



$$\Delta\Sigma = (\Delta u + \Delta \bar{u}) + (\Delta d + \Delta \bar{d}) + (\Delta s + \Delta \bar{s})$$



# Lo struttura di spin del nucleone

La prima misura di  $\Delta\Sigma$  :

EMC al CERN: esperimento DIS con fascio e bersaglio polarizzati longitudinalmente

Osservabili: asimmetrie ottenute confrontando sezione d'urto con polarizzazioni del fascio e bersaglio parallele e antiparallele da cui si accede alla funzione di struttura di spin  $g_1$  del nucleone.

$$A_{\parallel} = \frac{d\sigma^{\rightarrow} - d\sigma^{\leftarrow}}{d\sigma^{\rightarrow} + d\sigma^{\leftarrow}} \sim D(1+\gamma^2) \frac{g_1}{F_1}$$

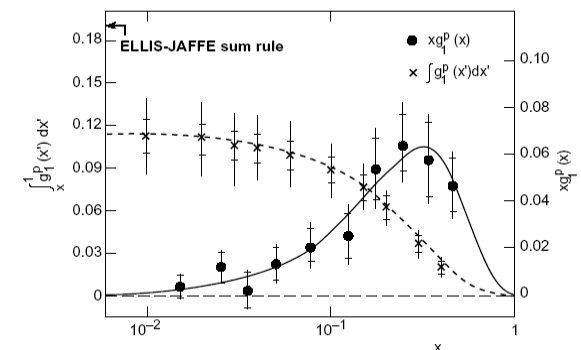
$$g_1(x) = \frac{1}{2} \sum_q e_q^2 (\Delta q(x) + \Delta \bar{q}(x))$$

Risultato ottenuto:

$$\Delta\Sigma = 0.12 \pm 0.17 \text{ (EMC, 1988)}$$

→ contributo dei quark non basta a spiegare lo spin del nucleone:

**“crisi dello spin” nel modello a partoni**



# Lo struttura di spin del nucleone

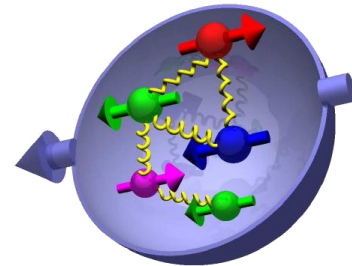
Grande sviluppo teorico/fenomenologico per capire e interpretare il risultato

Decomposizione dello spin in cui tutti i termini hanno un'interpretazione probabilistica:

$$\frac{1}{2} = \frac{1}{2} \Delta\Sigma + \Delta\mathbf{G} + \mathbf{L}$$

**Contributo dello spin del gluone  $\Delta\mathbf{G}$  :**

$\Delta\mathbf{G}$  contribuisce a  $g_1$  tramite "splitting"  $g \rightarrow q\bar{q}$  (equazioni DGLAP );  
interpretazione di  $g_1$  e' piu' complicata  $\rightarrow$  fit globali per estrazione  
di  $\Delta q$  e  $\Delta\mathbf{G}$



Necessita` di misure dirette di  $\Delta\mathbf{G}$ :

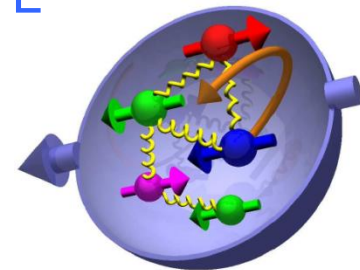
$\rightarrow$  Proposte di esperimenti a SLAC, CERN (**COMPASS**), DESY

**Contributo del momento angolare orbitale di quark e gluoni  $\mathbf{L}$**

Non accessibile sperimentalmente;

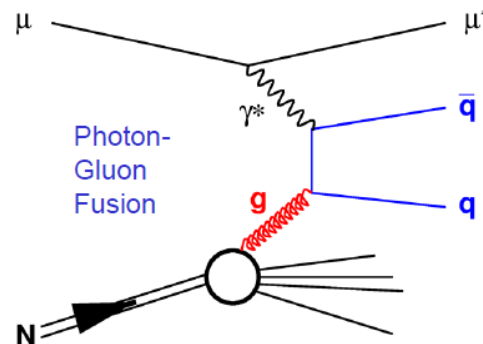
Recente interesse in misure di GPDs,

che danno accesso al momento angolare totale di  $q$  e  $g$



# Misura diretta di $\Delta G$ : da DIS a SIDIS

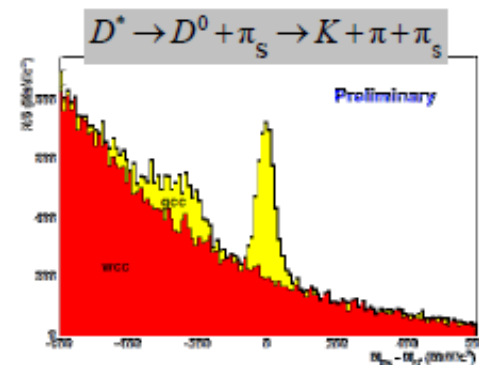
Misura diretta tramite processi  
“Photon Gluon Fusion”:  
produzione di coppie quark-antiquark,  
che frammentano in due getti  
di adroni nello stato finale



$$\gamma g \rightarrow q \bar{q}$$

## Due canali studiati a COMPASS

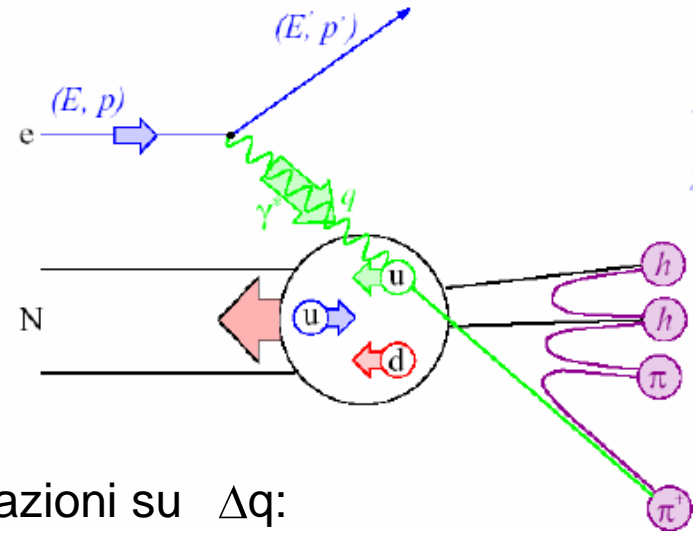
- stato finale con produzione di charm ( $q=c$ ):  
 $D^0 \rightarrow K\pi$  e  $D^* \rightarrow D^0 \pi$   
Statistica limitata, interpretazione teorica facile
- stato finale con uno o due adroni con alto  $p_T$  :  
Interpretazione difficile (MC necessario per stimare l'apporto di fondo)



# Misure SIDIS per accedere a $\Delta q$ e $\Delta\Sigma$

Maggiori informazioni sulle distribuzioni di elicità  
tramite DIS semi-inclusivo:  
un adrone e' rivelato in coincidenza con il leptone  
diffuso

Correlazione tra l'identita' dell'adrone  
e il sapore del quark colpito,  
descritta dalle funzioni di frammentazione



Dalla misura di asimmetrie di spin ottengo informazioni su  $\Delta q$ :

$$\text{A LO: } A_1^h = \frac{\sum_q e_q^2 \cdot \Delta q \cdot D_q^h}{\sum_q e_q^2 \cdot q \cdot D_q^h}$$

- PDF per diversi quark e antiquark accessibili (al contrario del DIS)
- separazione in sapore  $\rightarrow$  risoluzione di un sistema di equazioni (asimmetrie su diversi bersagli e per diversi tipi di adroni) in cui appaiono PDF e FF

# Lo spettrometro COMPASS

Identificazione muone diffuso

Rivelazione e identificazione di adroni per misure SIDIS

Due spettrometri per coprire ampio intervallo cinematico

180 mrad accettazione

separazione  $\pi$ , K, p

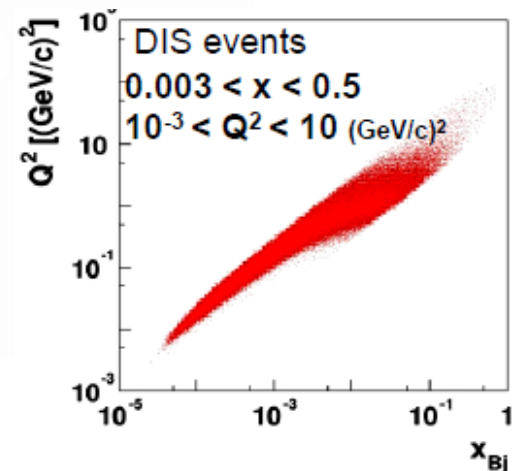
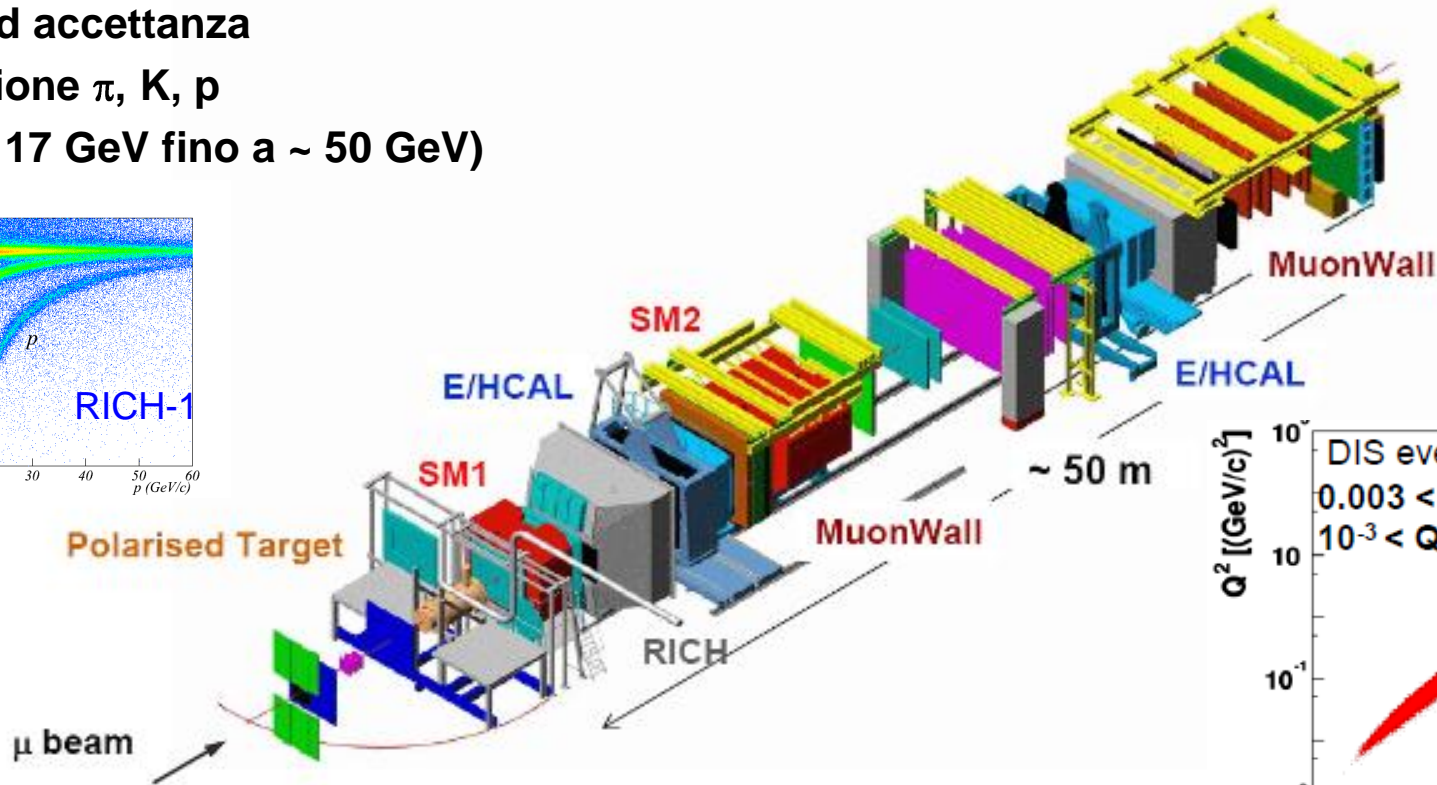
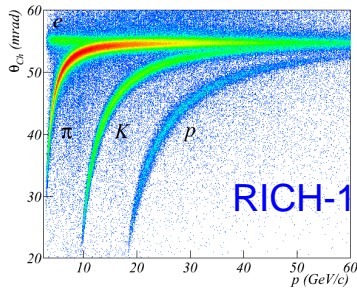
(da 2, 9, 17 GeV fino a ~ 50 GeV)

Fascio:  $\mu^+$  160 GeV/c polarizzati longitudinalmente

Bersaglio a stato solido

${}^6\text{LiD}$   $p_T \sim 50\%$  ;  $f \sim 0.38$

$\text{NH}_3$   $p_T \sim 90\%$  ;  $f \sim 0.15$

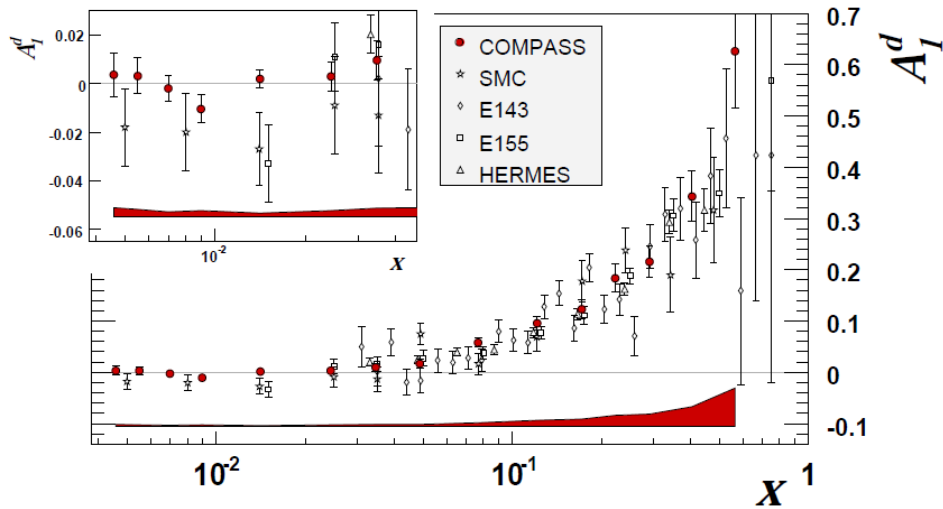




# Asimmetrie inclusive

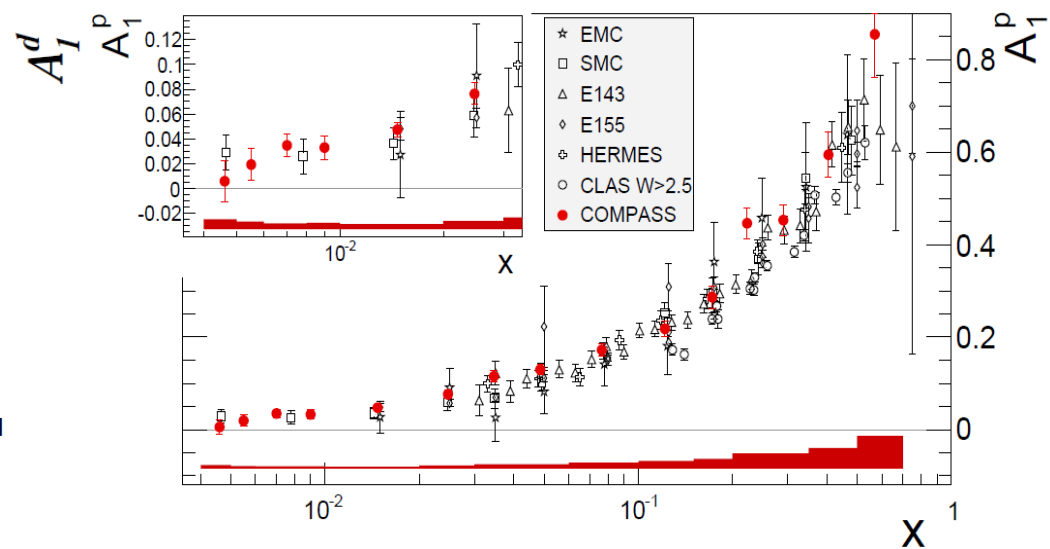
## Asimmetrie su deuterio (2002-2006)

COMPASS, PLB 647 (2007) 8-17



## Asimmetrie su protone (2007)

COMPASS, PLB 690 (2010) 466-472

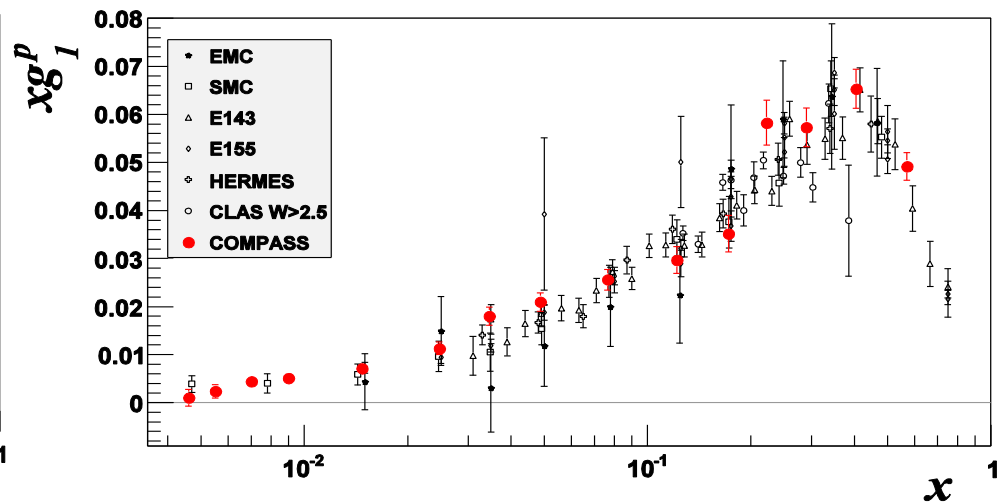
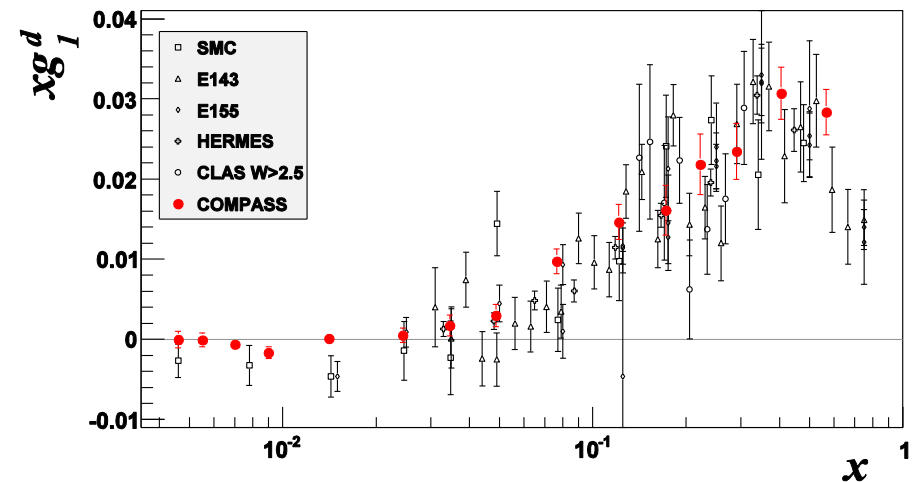


Esperimenti con diverso intervallo cinematico coperto  
→ importante contributo di COMPASS a piccolo x

A parità di valore in x, il valore di  $Q^2$  è molto diverso per gli esperimenti  
(energia del fascio diversa) → dipendenza debole da  $Q^2$

# Misura di $g_1$

Dai valori delle asimmetrie  $\rightarrow$  misura di  $g_1$



Dal primo momento di  $g_1^d(x)$ :

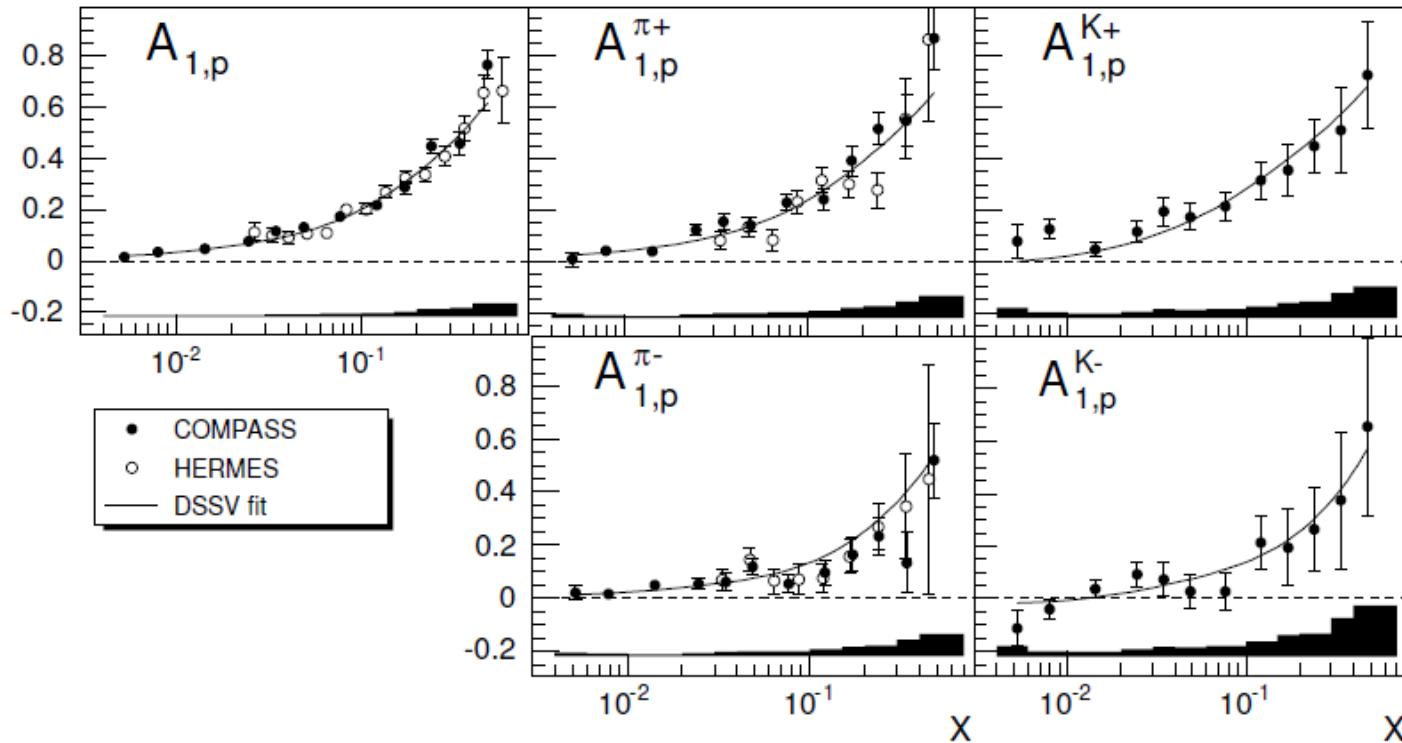
$$\Delta\Sigma = 0.33 \pm 0.03 \pm 0.05 \quad (Q^2 = 3 \text{ GeV}/c^2)$$

$$\Delta s + \Delta \bar{s} = -0.08 \pm 0.01 \pm 0.02$$

# Misure semi-inclusive

Asimmetrie inclusive e semi-inclusive su protone da COMPASS;  
dati simili per deuterio

COMPASS, PLB 693 (2010) 227-235

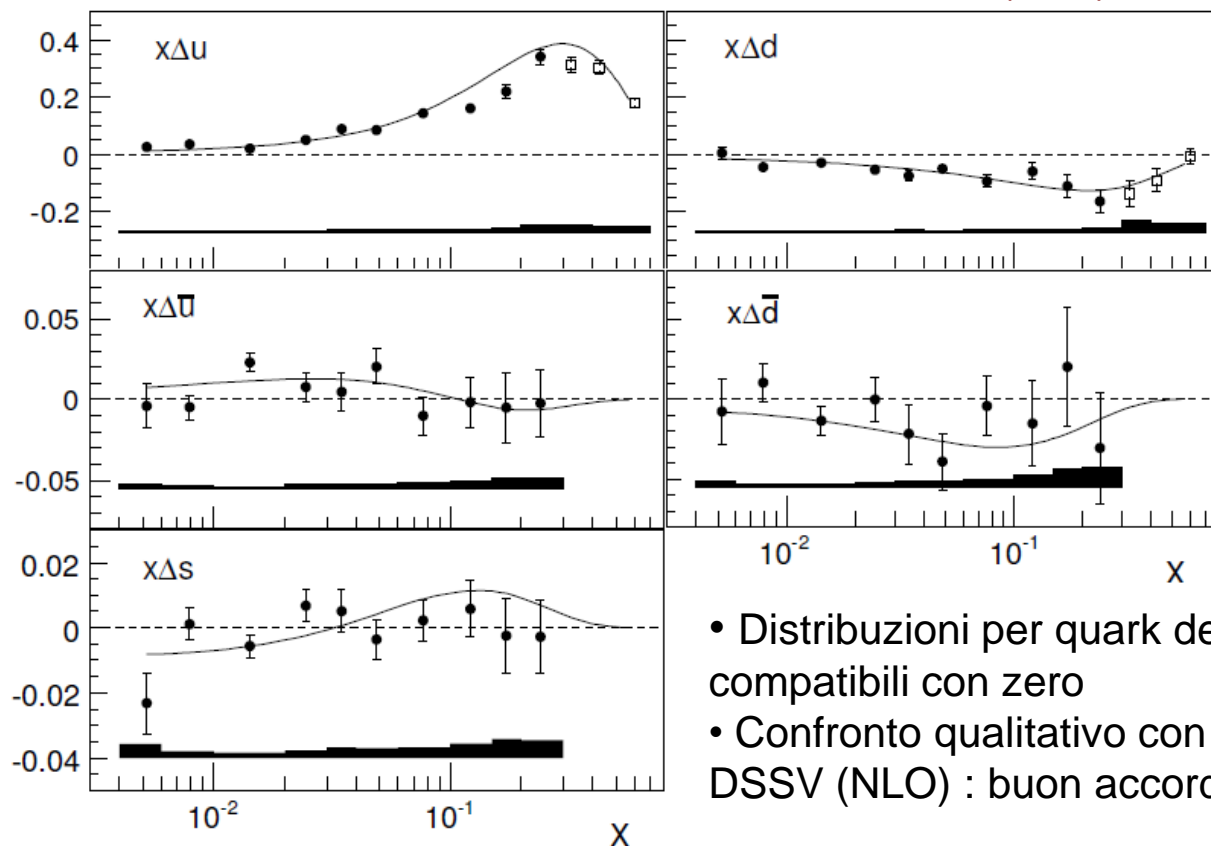


- l'intervallo coperto fino a  $x \sim 0.003$
- prime asimmetrie per K su p
- buon accordo con asimmetrie su  $\pi$  da HERMES nell'intervallo comune, nonostante diversa cinematica  $\rightarrow$  piccola dipendenza da  $Q^2$  a  $x$  fisso
- buon accordo con predizioni da fit globale DSSV

# Estrazione delle funzioni di elicitazione per diversi sapori

Dalle asimmetrie SIDIS e DIS su p e n misurate da COMPASS → estrazione delle distribuzioni di elicitazione a LO

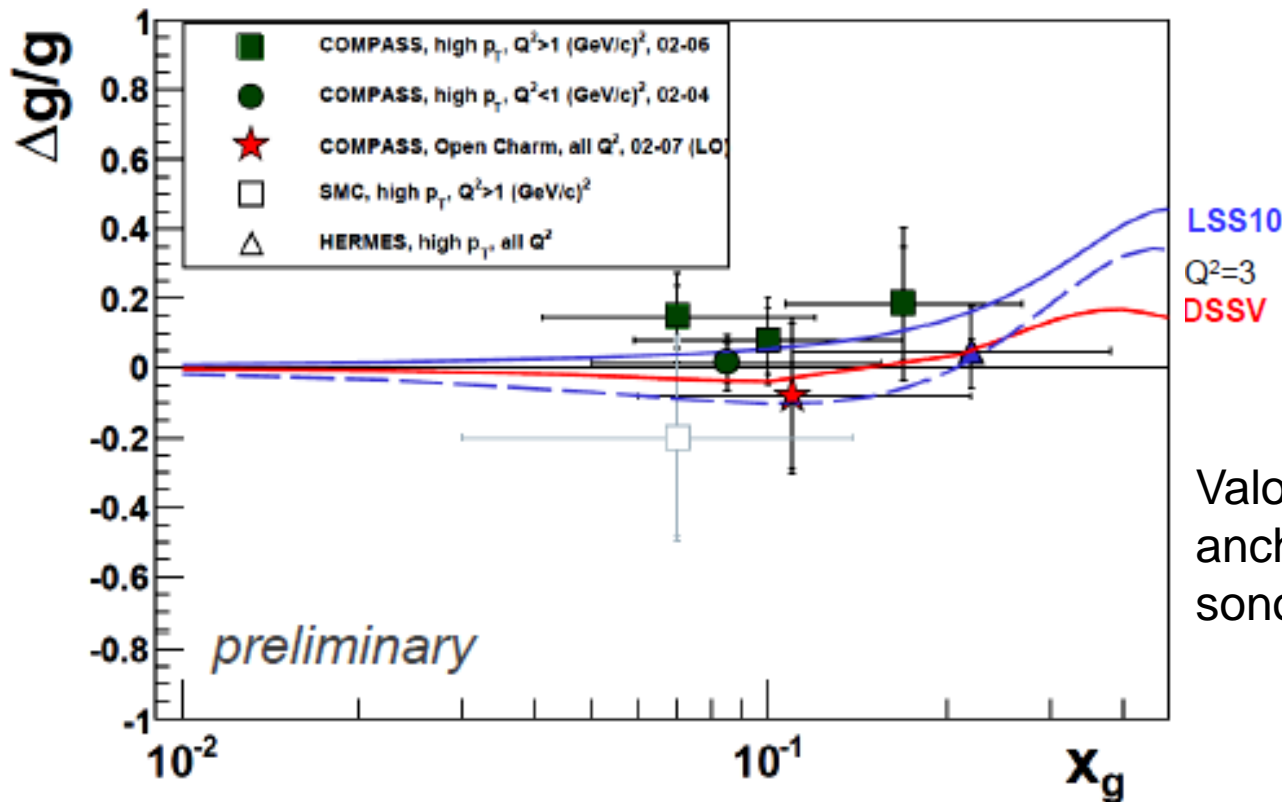
COMPASS, PLB 693 (2010) 227-235



- Distribuzioni per quark del mare compatibili con zero
- Confronto qualitativo con fit globale DSSV (NLO) : buon accordo

- $\Delta s$  compatibile con zero nell'intervallo misurato, dipendenza da FF:  
 $\Delta s = -0.01 \pm 0.01(\text{stat}) \pm 0.01(\text{syst}) @ 0.004 < x < 0.3$
- $\Delta \Sigma$  in accordo con la misura inclusiva ( $\sim 0.30$ )

# Misura di $\Delta G$



LSS10,  $\Delta G \sim +0.32$  at  $Q^2 = 4$

LSS10,  $\Delta G \sim -0.33$  (node)

DSSV,  $\Delta G = 0.02$  at  $Q^2 = 3$

Valori non inclusi nei fit globali, anche se le asimmetrie di spin sono disponibili per alcuni canali.

- Misure compatibili con zero
- Intervallo coperto  $0.05 < x_g < 0.3$
- Risultati escludono valori di  $\Delta G$  maggiori di  $\sim 0.3$

Conclusioni confermate anche dalle misure a RHIC

# Trasversita`

A causa della natura relativistica del moto dei quark leggeri, esiste una terza PDF indipendente con interpretazione probabilistica:



Evoluzione in  $Q^2$  diversa, non dipende da  $\Delta G$

Non misurabile in DIS, ma solo in SIDIS tramite “effetto Collins”:  
 asimmetria destra/sinistra nella distribuzione di un adrone prodotto dalla frammentazione di un quark polarizzato trasversalmente  
 → asimmetria azimutale, difficile da misurare

$$A_{\text{Coll}} = \frac{\sum_q e_q^2 \cdot \Delta_T q \cdot \Delta_T^0 D_q^h}{\sum_q e_q^2 \cdot q \cdot D_q^h}$$

Funzione di Frammentazione di Collins:

Descrive la correlazione tra lo spin del quark che frammenta e il momento dell'adrone prodotto

Accessibile anche in reazioni  $e^+e^- \rightarrow h$  Belle, Babar

# Asimmetrie di Collins

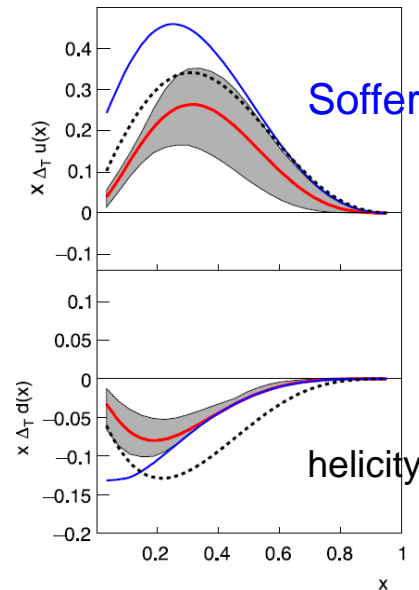
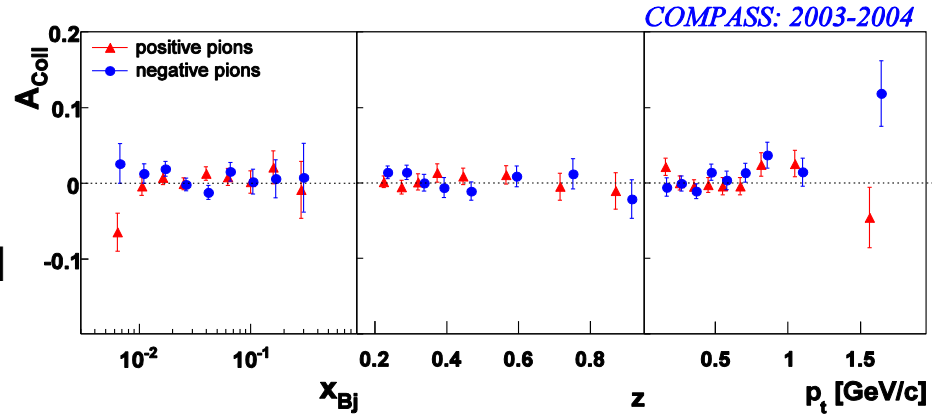
2005 Prime informazioni



Asimmetrie su bersaglio di protoni diverse da zero  
 → trasversita' e FF di Collins entrambe diverse da zero



Asimmetrie su deuterio compatibili con zero  
 → cancellazione tra contributo di u e d



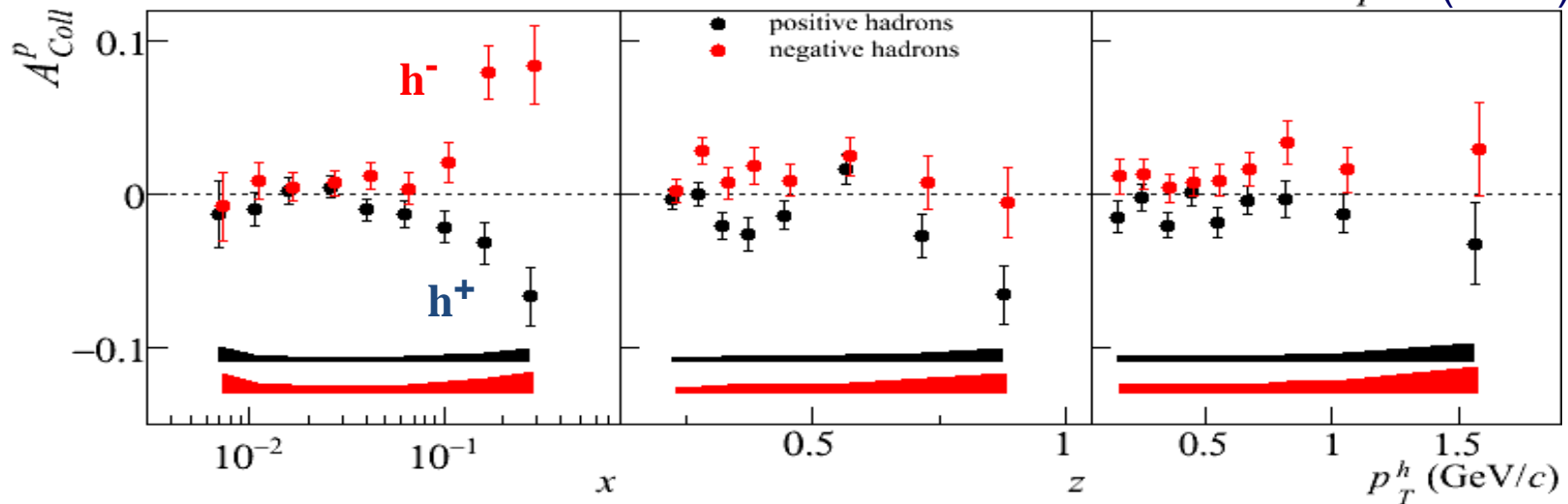
**M. Anselmino et al.,**  
 Nucl.Phys.Proc.Suppl.  
 191 (2009) 98

Questi dati, assieme ai dati  $e^+e^-$  da Belle, sono ben descritti in fit globali → prime informazioni su  $\Delta_T q$ , ancora lontani dal livello di conoscenza che si ha per  $\Delta q$

# Asimmetrie di Collins

Misure di COMPASS su p, dati 2007

PLB 692 (2010) 240



- A piccolo  $x$  (intervallo non coperto da Hermes) asimmetrie compatibili con zero
- Nella zona di valenza segnale diverso da zero, di segno opposto per adroni positivi e negativi, in accordo con la misura di Hermes
  - risultato non scontato, visto il diverso intervallo cinematico coperto dai due esperimenti; dipendenza da  $Q^2$  trascurabile per l'effetto Collins



# Conclusioni

Negli ultimi 10 anni un grande sforzo sperimentale ha permesso di ottenere informazioni sulla struttura dello spin del nucleone.

COMPASS ha contribuito in diversi canali:

Misure di  $\Delta\Sigma$  e  $\Delta G$ , che risultano “piccoli” →

interesse spostato sulla terza componente dello spin

Misure di DVCS: accesso a GPD e momento  
angolare totale dei partoni (COMPASS 2, JLab)

$$\frac{1}{2} = \frac{1}{2}\Delta\Sigma + \Delta G + L$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{2}0.3 + 0.35 + 0.0 \\ \frac{1}{2}0.3 + 0.0 + 0.35 \\ \frac{1}{2}0.3 - 0.35 + 0.7 \end{array} \right.$$

Misure delle funzioni di elicità per quark  $u, d, \bar{u}, \bar{d}, \bar{s}$

Prime informazioni sulla trasversità e “Transverse Momentum Dependent”  
PDFs, nuovo campo da esplorare

Nei prossimi mesi nuove misure COMPASS dalla presa dati su p del 2010;  
informazioni complementari da JLAB (6 + 12 GeV) ,p-p (RHIC) e Drell-Yan (COMPASS 2,  
RHIC, FNAL, PANDA....)
















backup

# TMD

L'effetto Collins non è l'unica sorgente di asimmetrie azimutali in SIDIS.

Tenendo conto della componente del momento dei partoni trasversa al momento dell'adrone,  $p_T$ , la descrizione della struttura adronica diviene più complessa e necessita di 8 "Transverse Momentum Dependent" PDF.

Queste TMDs descrivono la correlazione tra momento e spin del partone e/o dell'adrone, e danno origine a diverse modulazioni nella sezione d'urto SIDIS.

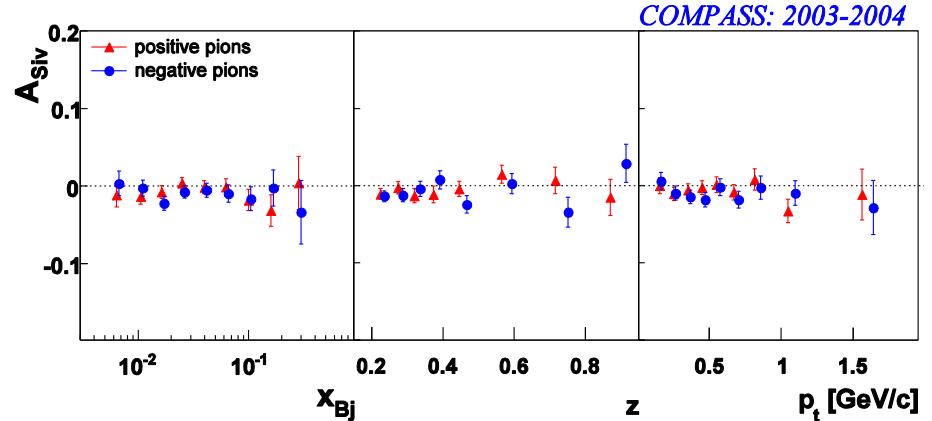
|                    |   | nucleon polarisation  |  |   |
|--------------------|---|---|--|---|
|                    |   | U   | L  | T   |
| quark polarisation | U | $f_1$ <br>number density $q$   |  | $f_{1T}^\perp$  -   |
|                    | L |   | $g_1$  - <br>helicity $\Delta q$ | $g_{1T}$  -   |
|                    | T | $h_1^\perp$  -  | $h_{1L}^\perp$  -            | $h_1$  - <br>transversity<br>$h_{1T}^\perp$  -  |

PDF di Sivers :  
correlazione tra  $p_T$   
del partone  
e spin del nucleone

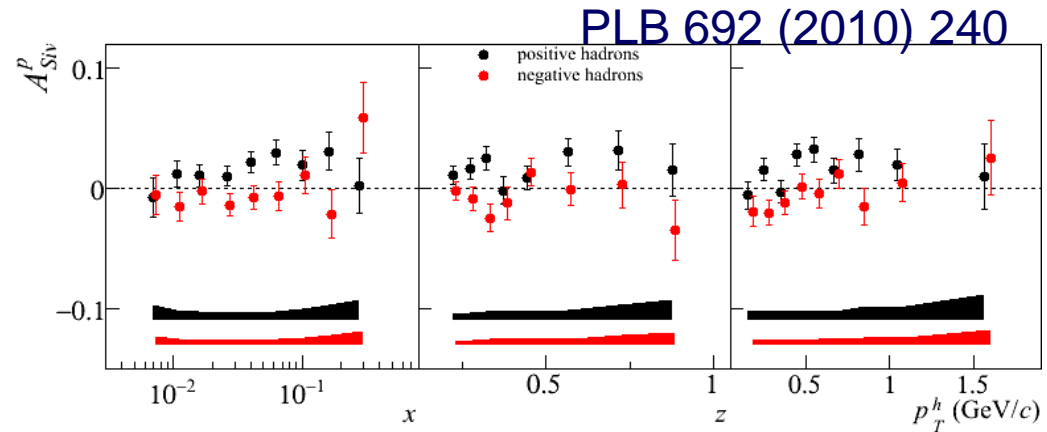
# Asimmetrie di Sivers

Da COMPASS, misure su:

deuterio:  
asimmetrie compatibili con zero  
su tutto l'intervallo in  $x$



protone:  
piccolo segnale visto solo in  $\pi^+$  su p,  
ampiezza leggermente  
diversa rispetto alle misure di  
HERMES

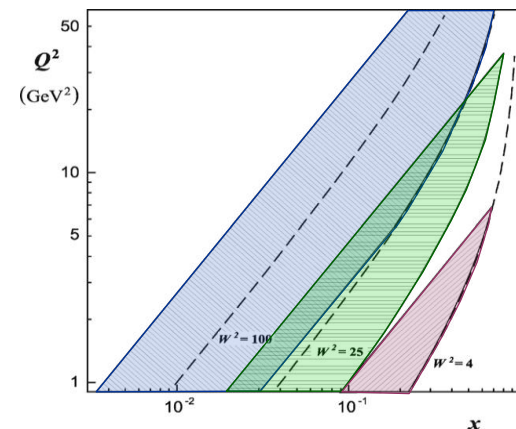


→ in questo caso diversi intervalli cinematici possono giocare un ruolo

# Laboratori



Intervallo in  $x$ - $Q^2$   
coperto  
con fasci di energia  
160, 27.5 e 6 GeV



JLab 6 GeV