

# Recent COMPASS results on TMD PDFs

Giulio Sbrizzai Trieste INFN



**COMmmon  
Muon and  
Proton  
Apparatus for  
Structure and  
Spectroscopy**

Collaborazione  
~ 250 fisici  
28 istituti  
12 paesi





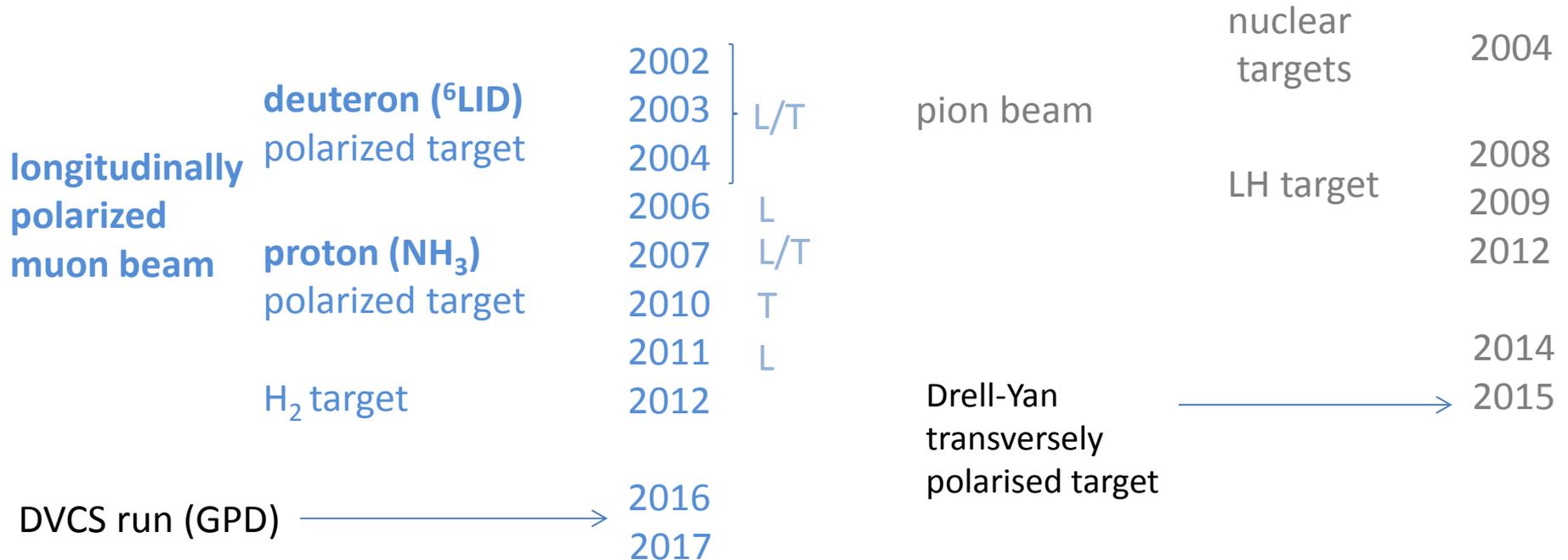
presa dati dal 2002...

ricco programma di fisica diversificato:  
 spettroscopia adronica (pioni 190 GeV)  
 struttura del nucleone con muoni 160 GeV  
 su bersaglio polarizzato L e T  
 - elicita`, trasversita`, GPD,...

**luminosity:**  $\sim 5 \cdot 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

**beam intensity:**  $2 \cdot 10^8 \mu^+/\text{spill}$  (4.8s/16.2s)

**beam momentum:** 160 GeV/c

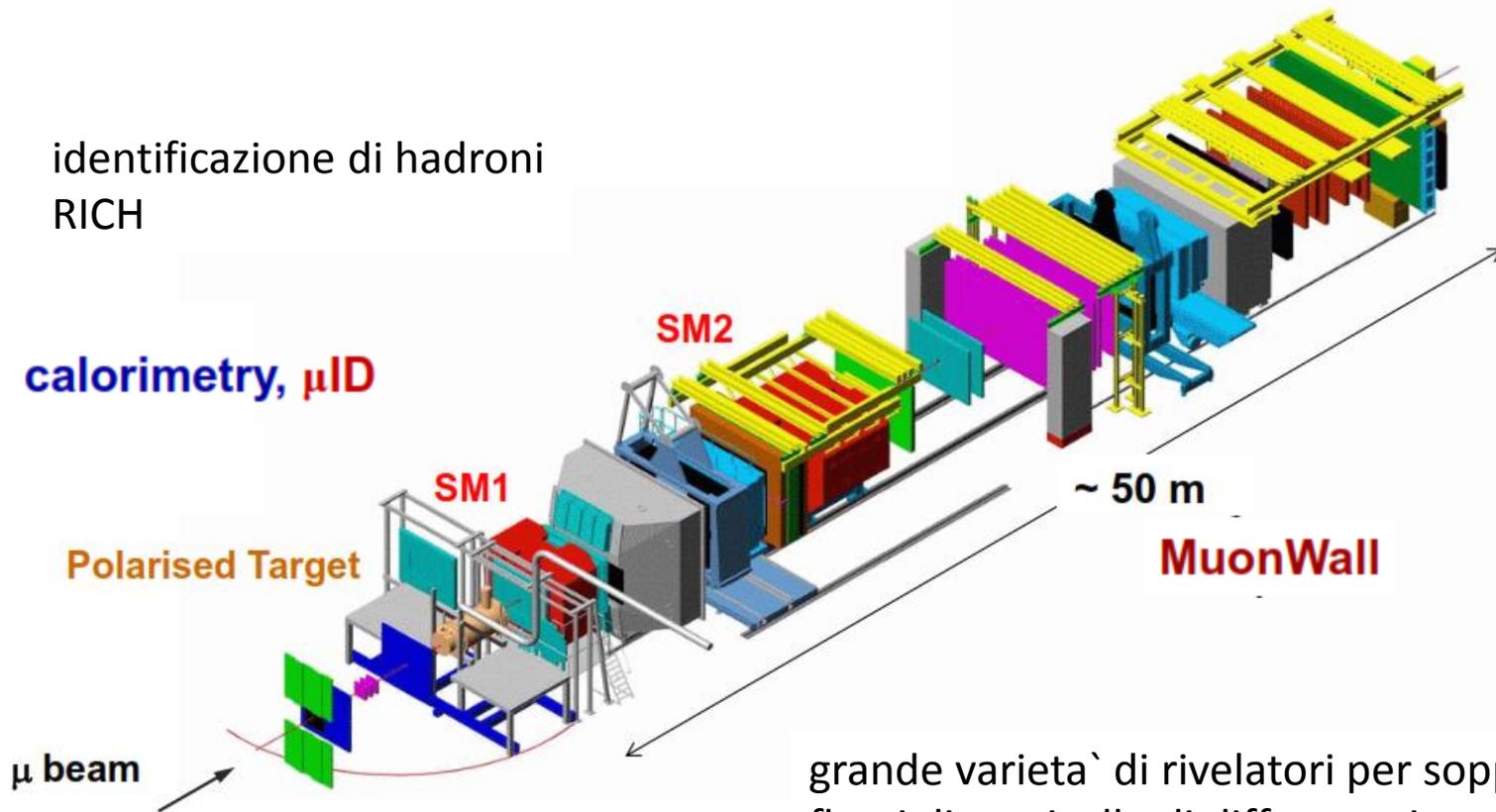


# Lo spettrometro COMPASS

- grande accettazione angolare
- grandi regioni cinematiche esplorate

I rivelatori si dispongono intorno a due magneti deflettori

- SM1 spettrometro a grandi angoli
- SM2 spettrometro a piccoli angoli



grande varietà di rivelatori per sopportare flussi di particelle di differente intensità con angoli da 0 a 200 mRad

# SIDIS: un processo chiave per lo studio della struttura del nucleone

il muone interagisce con un **singolo costituente** del nucleone ( $Q^2 > 1 \text{ GeV}^2/c^2$ )

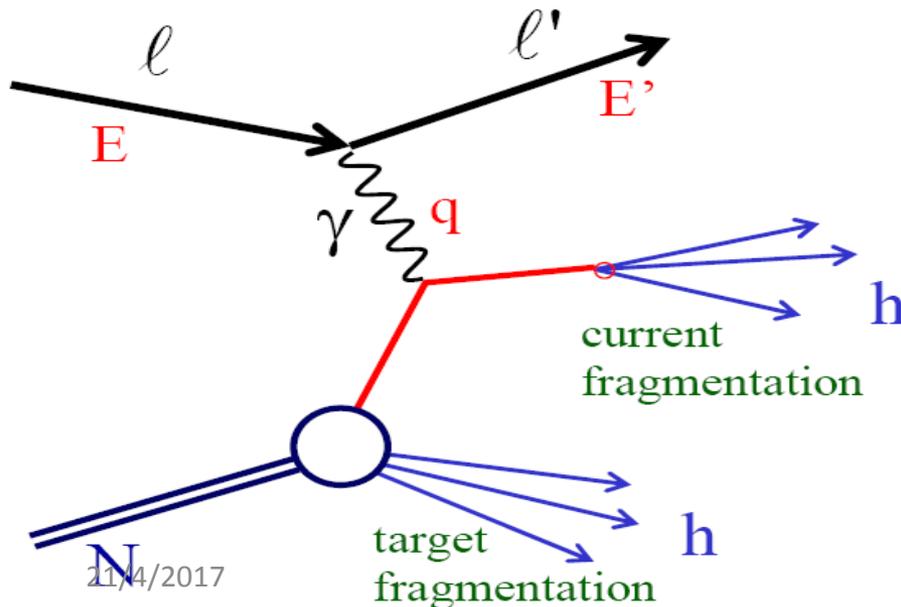
$$q = \ell - \ell'$$

$$Q^2 = -q^2 \quad W^2 = (P + q)^2$$

$$x = \frac{Q^2}{2P \cdot q} \quad \text{Bjorken scaling variable}$$

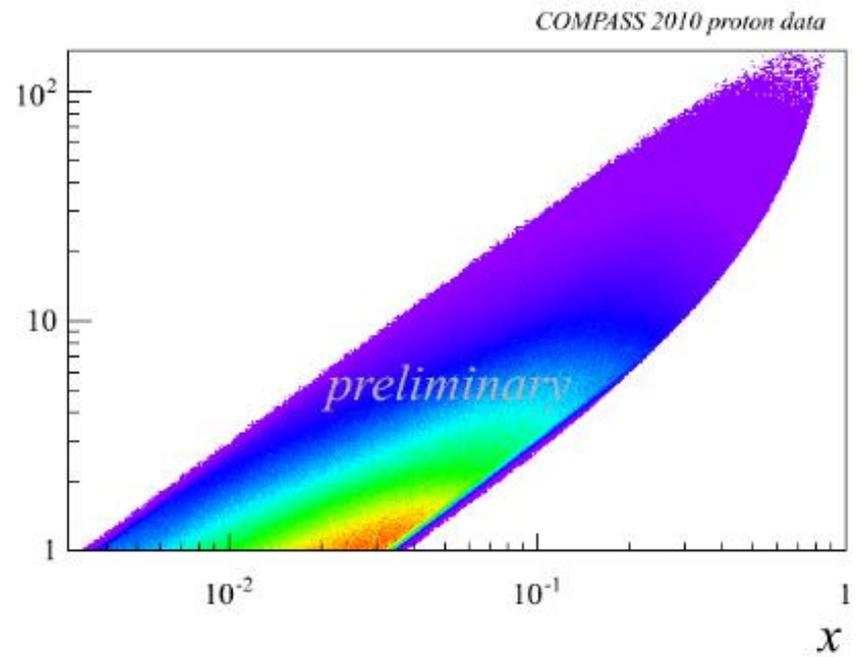
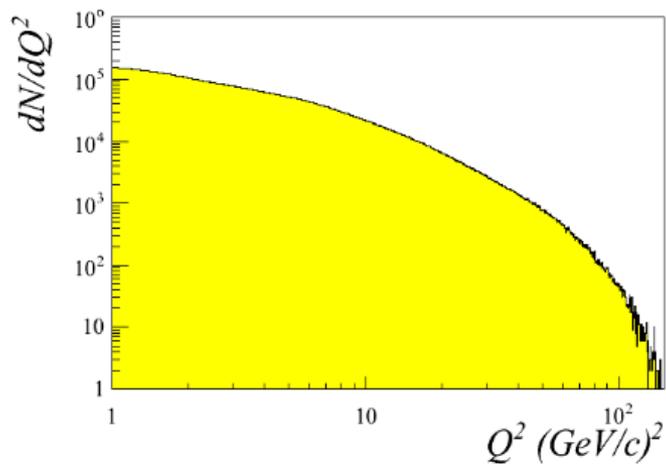
$$y = \frac{P \cdot q}{P \cdot \ell} =_{LAB} \frac{E - E'}{E}$$

$$z = \frac{P \cdot P_h}{P \cdot q} =_{LAB} \frac{E_h}{E - E'}$$

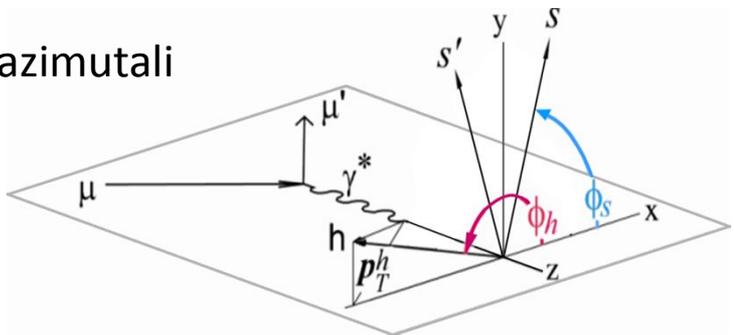


almeno un adrone viene rivelato  
(informazione sul **quark che ha interagito**)

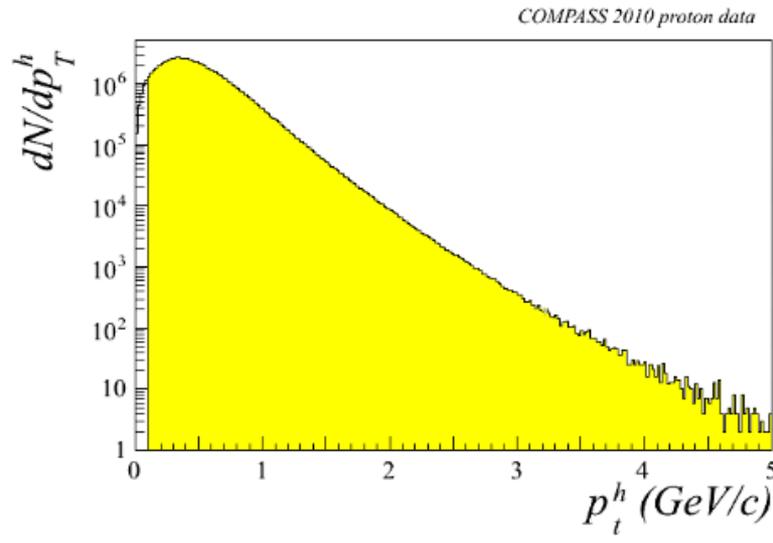
# regione cinematica SIDIS esplorata da COMPASS



definisco gli angoli azimutali  
dello spin  $\varphi_s$   
e dell'adrone  $\varphi_h$   
attorno alla direzione  
del fotone virtuale



momento trasverso  
dell'adrone  $\mathbf{p}_T^h$



## La sezione d'urto azimutale del SIDIS polarizzato

$$\begin{aligned}
 \frac{d\sigma}{dx dy d\psi dz d\phi_h dP_{h\perp}^2} = & \frac{\alpha^2}{xyQ^2} \frac{y^2}{2(1-\varepsilon)} \left(1 + \frac{\gamma^2}{2x}\right) \left\{ F_{UU,T} + \varepsilon F_{UU,L} + \sqrt{2\varepsilon(1+\varepsilon)} \cos\phi_h F_{UU}^{\cos\phi_h} \right. \\
 & + \varepsilon \cos(2\phi_h) F_{UU}^{\cos 2\phi_h} + \lambda_e \sqrt{2\varepsilon(1-\varepsilon)} \sin\phi_h F_{LU}^{\sin\phi_h} \\
 & + S_{\parallel} \left[ \sqrt{2\varepsilon(1+\varepsilon)} \sin\phi_h F_{UL}^{\sin\phi_h} + \varepsilon \sin(2\phi_h) F_{UL}^{\sin 2\phi_h} \right] + S_{\parallel} \lambda_e \left[ \sqrt{1-\varepsilon^2} F_{LL} + \sqrt{2\varepsilon(1-\varepsilon)} \cos\phi_h F_{LL}^{\cos\phi_h} \right] \\
 & + |S_{\perp}| \left[ \sin(\phi_h - \phi_S) \left( F_{UT,T}^{\sin(\phi_h - \phi_S)} + \varepsilon F_{UT,L}^{\sin(\phi_h - \phi_S)} \right) \right. \\
 & + \varepsilon \sin(\phi_h + \phi_S) F_{UT}^{\sin(\phi_h + \phi_S)} + \varepsilon \sin(3\phi_h - \phi_S) F_{UT}^{\sin(3\phi_h - \phi_S)} \\
 & + \sqrt{2\varepsilon(1+\varepsilon)} \sin\phi_S F_{UT}^{\sin\phi_S} + \sqrt{2\varepsilon(1+\varepsilon)} \sin(2\phi_h - \phi_S) F_{UT}^{\sin(2\phi_h - \phi_S)} \\
 & + |S_{\perp}| \lambda_e \left[ \sqrt{1-\varepsilon^2} \cos(\phi_h - \phi_S) F_{LT}^{\cos(\phi_h - \phi_S)} + \sqrt{2\varepsilon(1-\varepsilon)} \cos\phi_S F_{LT}^{\cos\phi_S} \right. \\
 & \left. \left. + \sqrt{2\varepsilon(1-\varepsilon)} \cos(2\phi_h - \phi_S) F_{LT}^{\cos(2\phi_h - \phi_S)} \right] \right\},
 \end{aligned}$$

a ciascuna ampiezza  
di una modulazione azimutale  
e' associata  
un Funzione di Struttura

**tutte misurate in COMPASS  
sia su deuterio che protone  
polarizzati**

Ciascuna funzione di struttura F e' data dalla **convoluzione** sui **momento trasversi**

$$F = \sum_q PDF_q(x, k_{\perp}) \otimes FF_q^h(z, p_{\perp})$$

$k_{\perp}$  momento trasverso intrinseco del quark nel nucleone

$p_{\perp}$  momento trasverso del quark nella frammentazione

di una **funzione di distribuzione partonica** (TMD PDF)

e di una **funzione di frammentazione** (che da la probabilita' che un quark q frammenti in un adrone h)

polarizzazione del nucleone

	U	L	T
U	$f_1$ number density $q$		$f_{1T}^{\perp}$ <b>Sivers</b>
L		$g_1$ helicity $\Delta q$	$g_{1T}$
T	$h_1^{\perp}$ <b>Boer-Mulders</b>	$h_{1L}^{\perp}$	$h_1$ <b>transversity</b> $h_{1T}^{\perp}$

effetti di spin e momento trasverso

presenti anche alle

energie di COMPASS

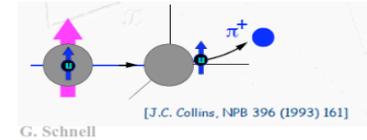
$Q^2 \sim 10$

**attuali e di grande interesse per comprendere la struttura del nucleone e la QCD!**

# Misure asimmetrie di Collins

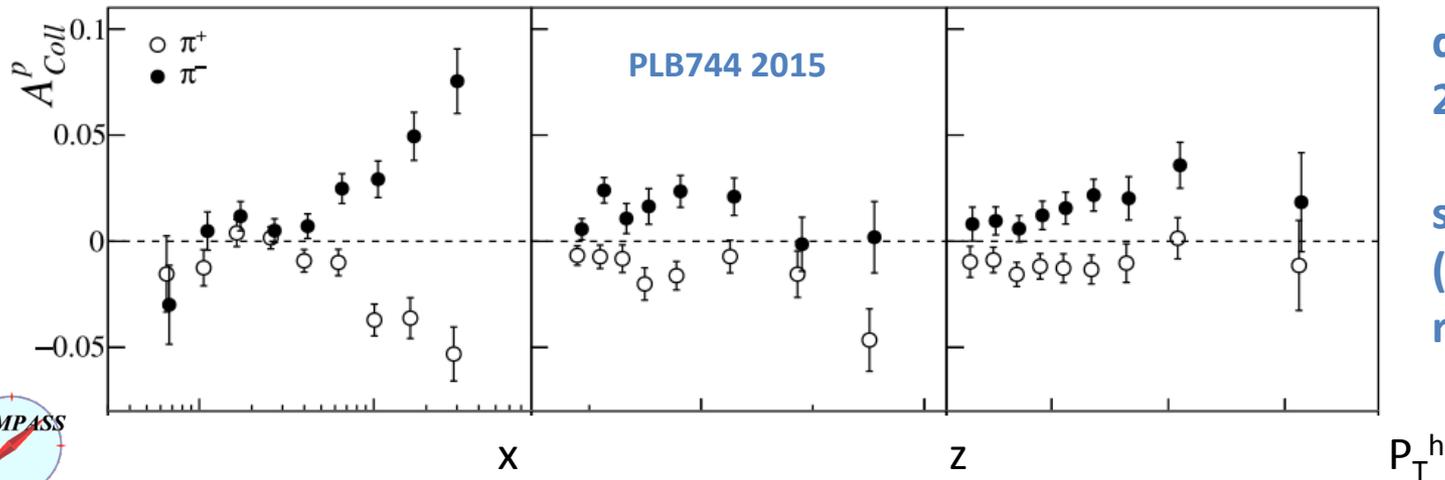
$$A_{Coll} = \frac{\sum_q e_q^2 \cdot h_1^q(k_\perp^2, x) \otimes H_{1q}^{\perp h}(p_\perp^2, z)}{\sum_q e_q^2 \cdot f_1^q(k_\perp^2, x) \otimes D_{1q}^h(p_\perp^2, z)}$$

descrive la correlazione tra lo spin trasverso del quark che frammenta ed il momento trasverso



convoluzione della **Trasversita`** con la **funzione di frammentazione (FF) di Collins**

*risultati su deuterio polarizzato (presa dati 2002-2004) compatibili con zero interpretati come cancellazione della trasversita` dei quark u e d*



**dati protone 2007 e 2010**

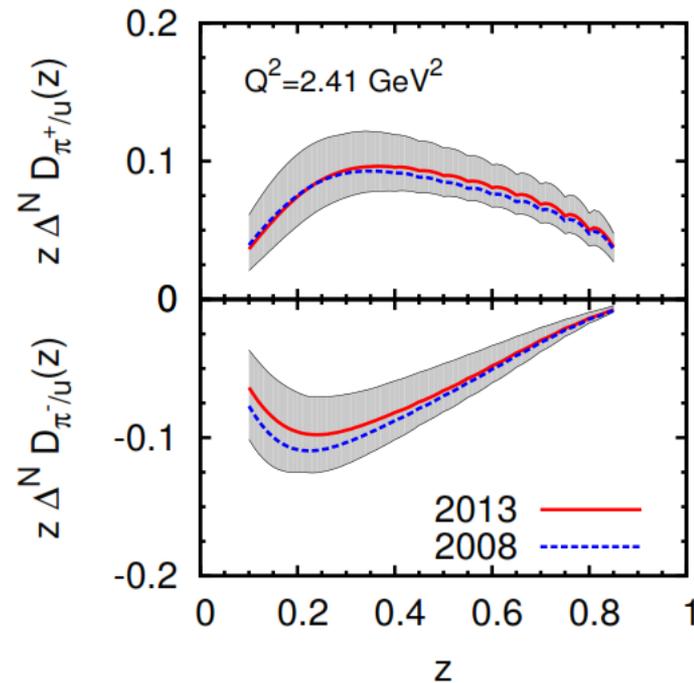
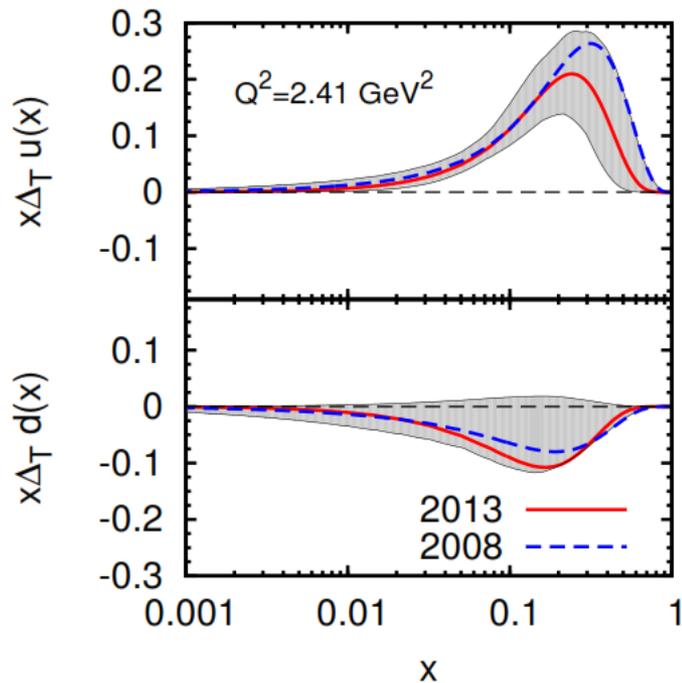
**segnale chiaro (conferma risultati di HERMES)**



Utilizzando i dati di COMPASS (protone e deuterio) ed HERMES (protone, a piu` basse energie) e quelli di Belle e BaBar per la funzione di Collins



estrazione simultanea della Trasversita` e della FF di Collins



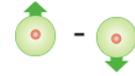
quark u

quark d

Anselmino  
et al.,  
PRD87 2013

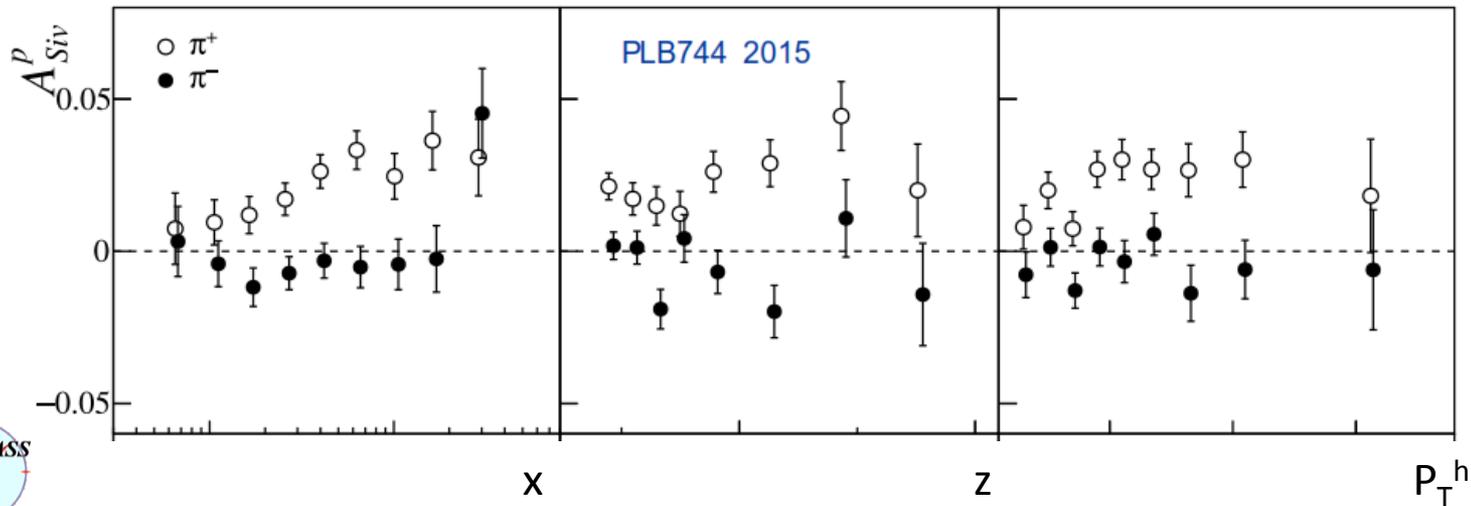
# Misure asimmetrie di Sivers

## Sivers TMD PDF



$$A_{Siv}^p = \frac{\sum_q e_q^2 \cdot f_{1T}^{\perp q}(k_{\perp}^2, x) \otimes D_{1q}^h(p_{\perp}^2, z)}{\sum_q e_q^2 \cdot f_1^q(k_{\perp}^2, x) \otimes D_{1q}^h(p_{\perp}^2, z)}$$

descrive la correlazione tra  $\mathbf{k}_{\perp}$  e la polarizzazione trasversa del nucleone



$\pi^+$  segnale presente fino a bassi x  
(regione inesplorata da altri esperimenti)

errori sistematici  $\sim 0.5$  statistici

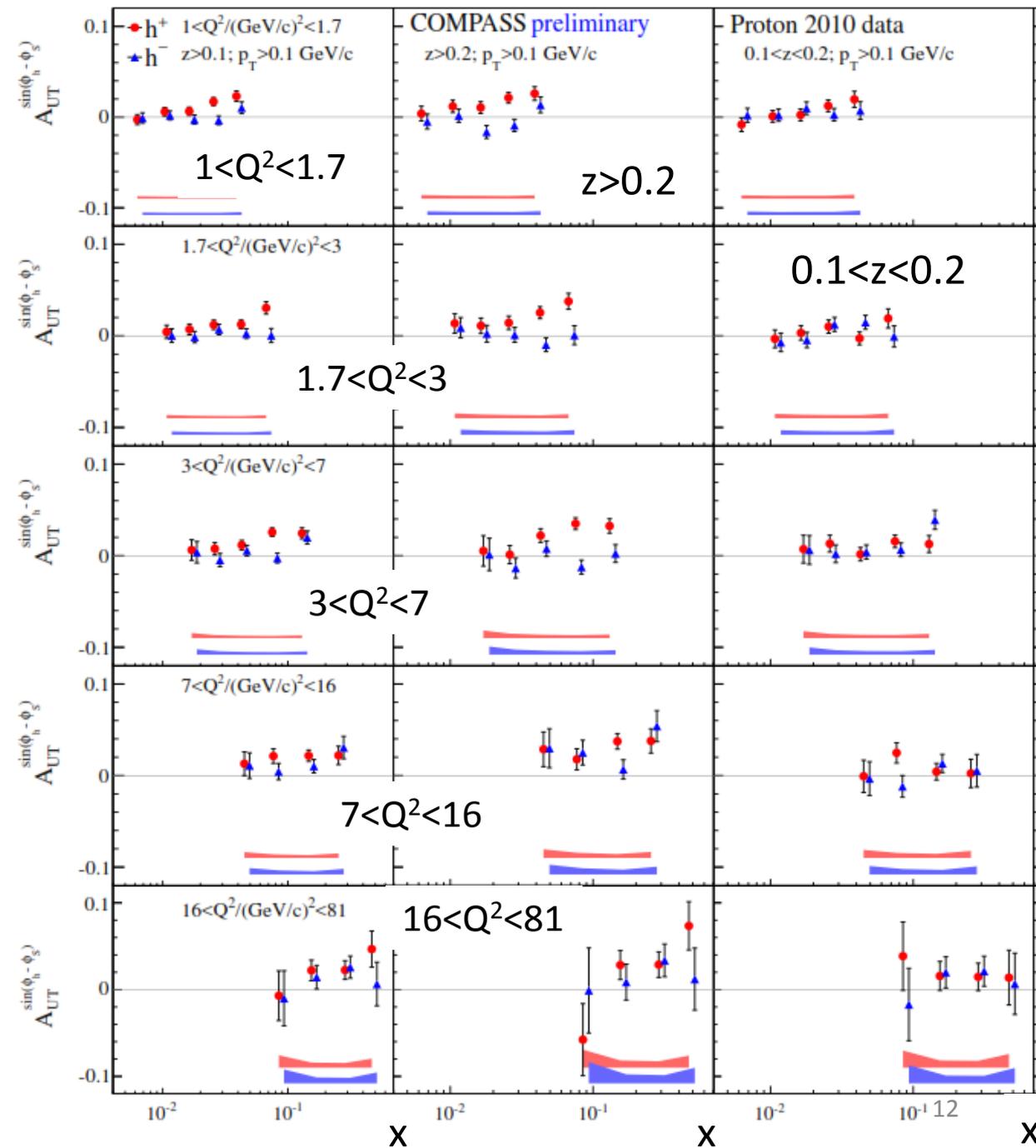
*risultati su deuterio polarizzato (presa dati 2002-2004) compatibili con zero*



analisi multidimensionale

fondamentale per studiare l'evoluzione in  $Q^2$  delle TMD

e capire le diverse dipendenze cinematiche



fondamentale predizione di QCD:

*Sivers PDF misurata nel Drell-Yan uguale ed opposta a quella misurata nel SIDIS*

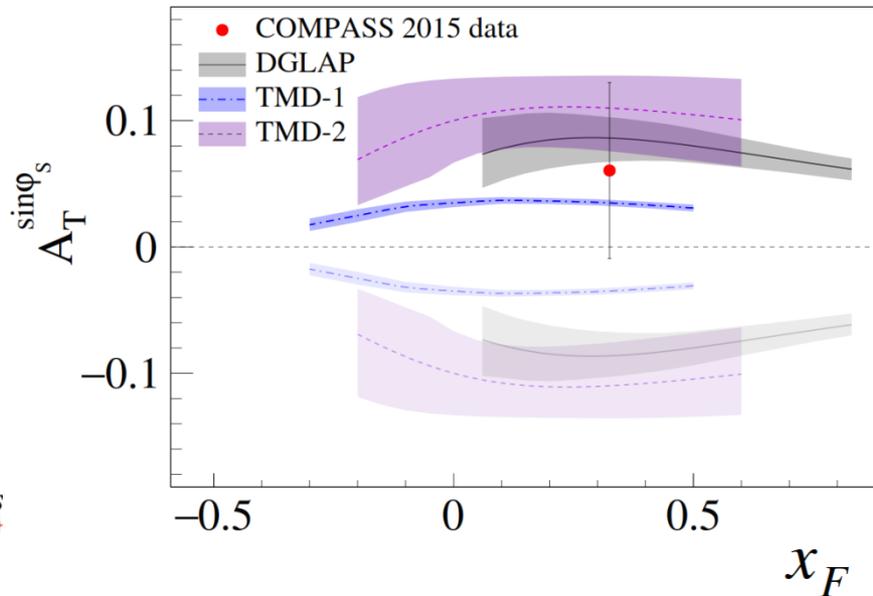
$$f_{1T}^{\perp \text{SIDIS}} = -f_{1T}^{\perp \text{DY}} \longrightarrow$$

presa dati 2015 COMPASS  
 DY su protone polarizzato trasversalmente  
 utilizzando fascio di pioni positivi 190GeV/c

in COMPASS unica possibilita`  
 possibilita` di confrontare i risultati SIDIS <-> DY  
 nella **stessa regione cinematica**

$$A_{UT}^{\sin(\phi_S)} \propto f_{1,\pi}^q \otimes f_{1T,p}^{\perp q}$$

unp. PDF      Sivers



confronto dati e  
 previsioni per COMPASS  
 con diversi schemi per  
 l'evoluzione TMD  
 assumendo il cambio di segno

*2018 un ulteriore anno di  
 presa dati per il DY polarizzato*



informazione sul momento trasverso  
da misure su bersaglio non polarizzato

- molteplicità in funzione di  $(P_T^h)^2$
- asimmetrie azimutali

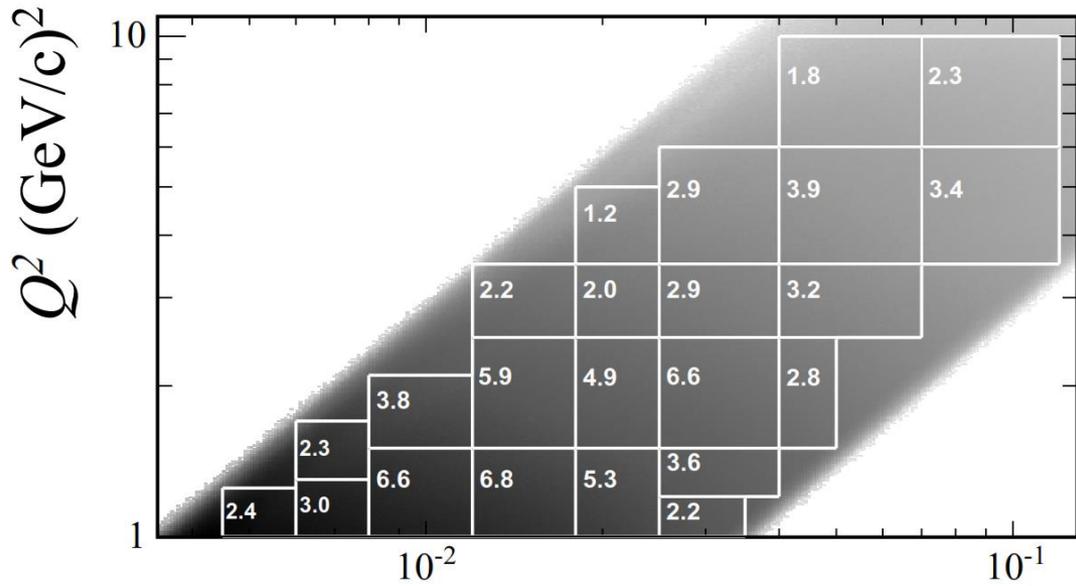
più difficili perché richiede di correggere i risultati per  
l'accettanza (calcolata con simulazioni MC)

ed anche per l'interpretazione (difficile distinguere effetti)

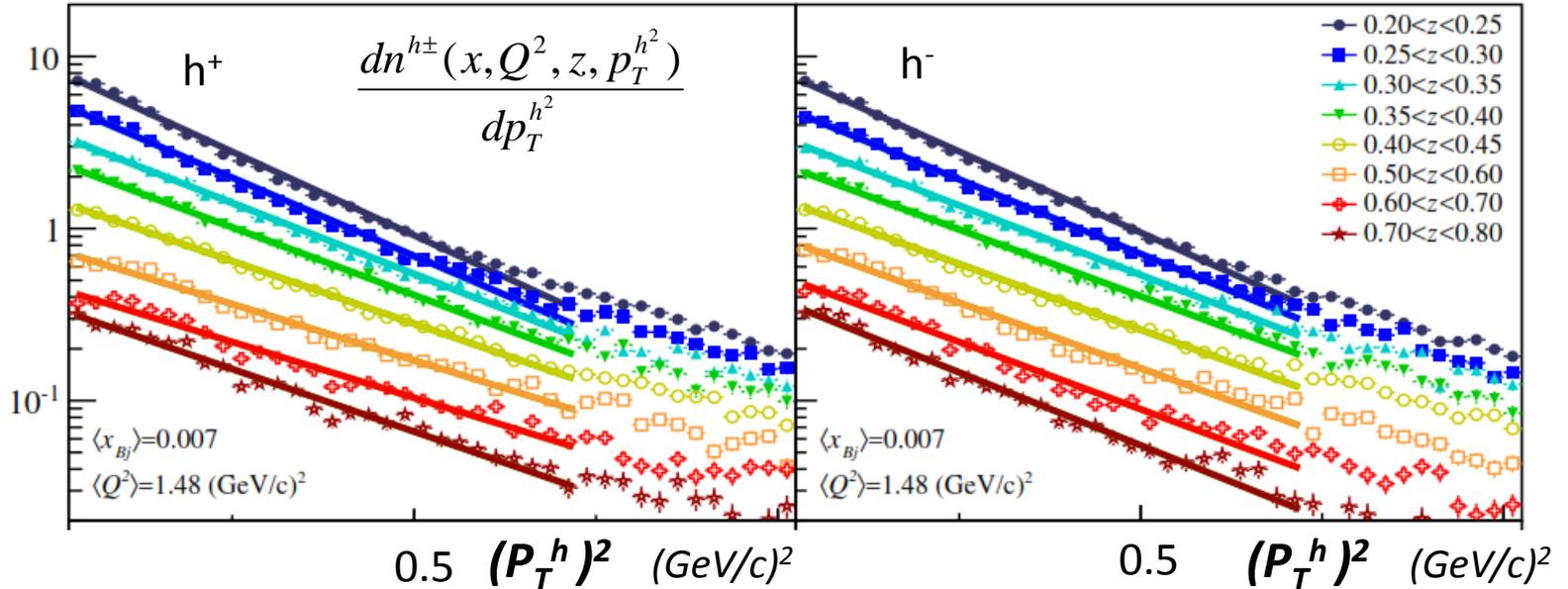
# Molteplicita` in funzione di $(P_T^h)^2$

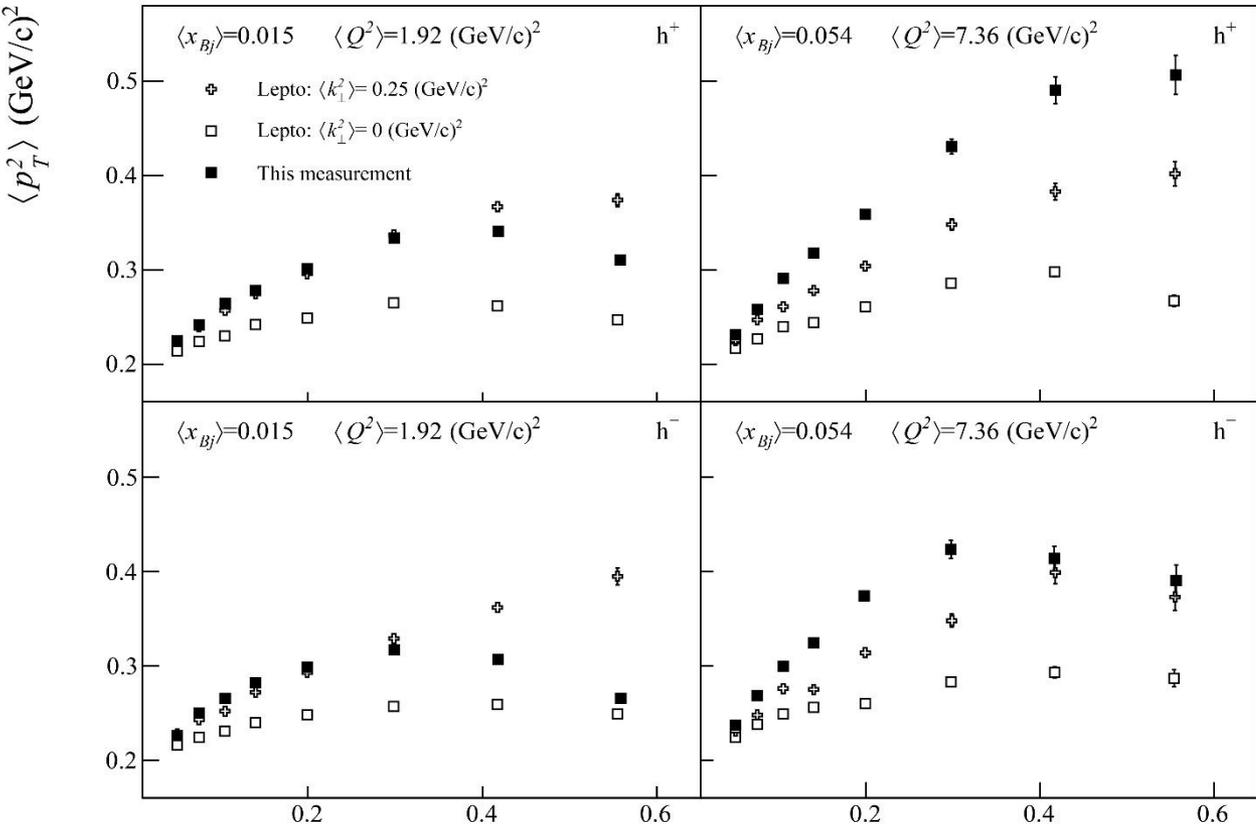
analisi multi dimensionale  
in diversi bin di  $x$ ,  $Q^2$

e per diversi intervalli di  $z$



EPJC 73 (2013) 2581





momento trasverso del quark nel nucleone

momento trasverso del quark nella frammentazione

facendo ragionevoli assunzioni si ha:  
(dipendenza Gaussiana dai momenti trasversi)

$$\langle P_T^2 \rangle = \langle P_{\perp}^2 \rangle + z^2 \langle k_{\perp}^2 \rangle$$

$P_T^h < 1 GeV/c$  contributo dalla radiazione di gluone trascurabile

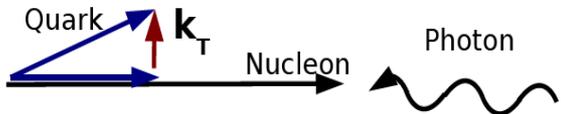
*misure difficili da riprodurre*  
*anche introducendo una dipendenza di  $p_{\perp}$  da  $z$  (generatore DIS Monte Carlo, Lepto)*  
in particolare non si possono distinguere i contributi  $k_{\perp}, p_{\perp}$

Ulteriori informazioni si possono ottenere dalle  
 asimmetrie azimutali degli adroni (bersaglio non polarizzato)

$p_T^{h} < 1 \text{ GeV}/c$  contributo dalla radiazione di gluone trascurabile

effetto **Cahn**: effetto cinematico proporzionale al **momento trasverso del quark**

$$A_{\cos \phi_h}^{UU} = \frac{F_{\cos \phi_h}^{UU}}{F^{UU}}$$



$$d\sigma^{lq \rightarrow lq} \propto \hat{s}^2 + \hat{u}^2 \propto \left( 1 + \epsilon_1 \frac{k_{\perp}}{Q} \cos \varphi \right)$$

$$A_{\cos 2\phi_h}^{UU} = \frac{F_{\cos 2\phi_h}^{UU}}{F^{UU}}$$

**Boer-Mulders** (*T-odd* !) **TMD PDF**,  
 convoluta con la **Collins FF**



e contributo dell'effetto Cahn di ordine superiore  $\propto \left( \frac{k_{\perp}}{Q} \right)^2$

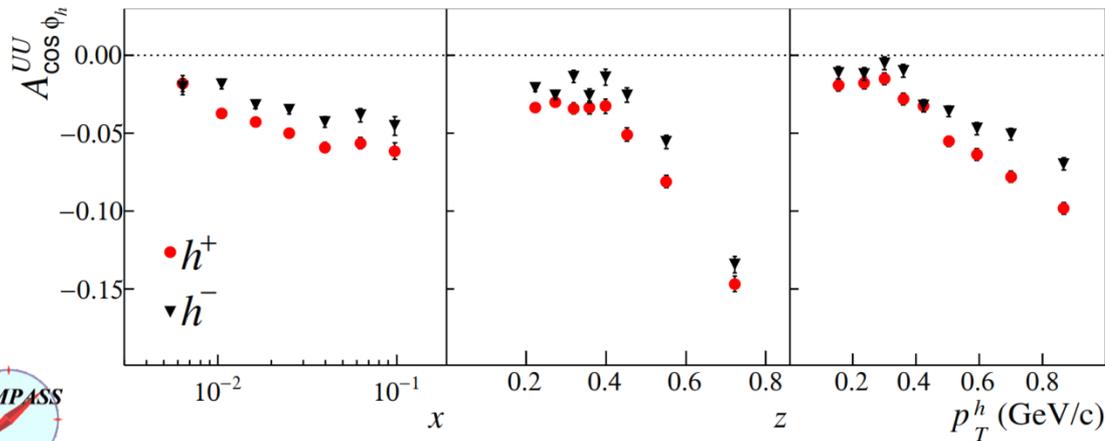
la **Boer-Mulders TMD PDF** correla  
 il **momento trasverso del quark**  
 ed il suo **spin**  
 in un **nucleon non polarizzato**

altri effetti, di ordine superiore in  $1/Q$  e non ancora del tutto capiti, possono contribuire...

in particolare:

$$A_{\cos\phi_h}^{UU} \approx \frac{1}{Q} \text{Cahn} + \frac{1}{Q} \text{BM}$$

NPB 886 (2014) 1046

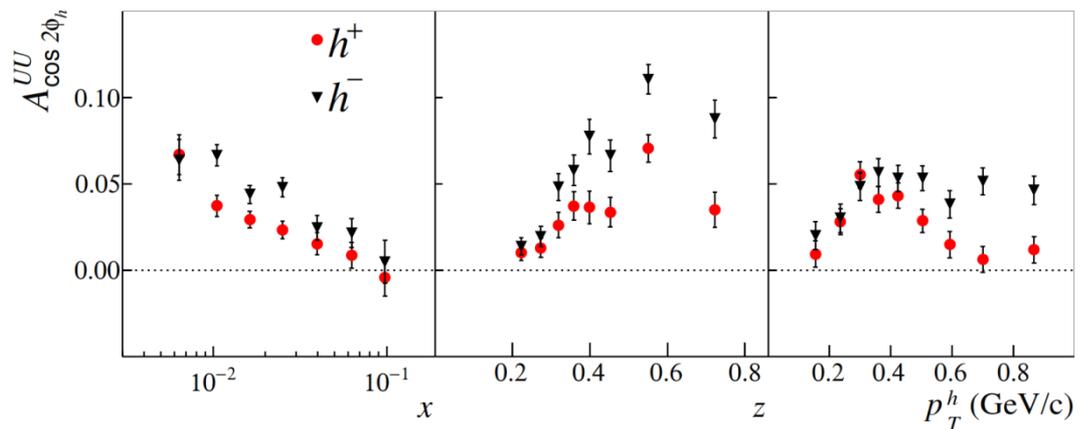


effetto Cahn:

- posso stimare  $k_{\perp}$
- lo stesso per adroni positivi e negativi

differenza per adroni positivi e negativi  $\rightarrow$  BM TMD

$$A_{\cos 2\phi_h}^{UU} \approx \frac{1}{Q^2} \text{Cahn} + \text{BM}$$



le forti dipendenze cinematiche trovate sono state approfondite nell'analisi multi dimensionale

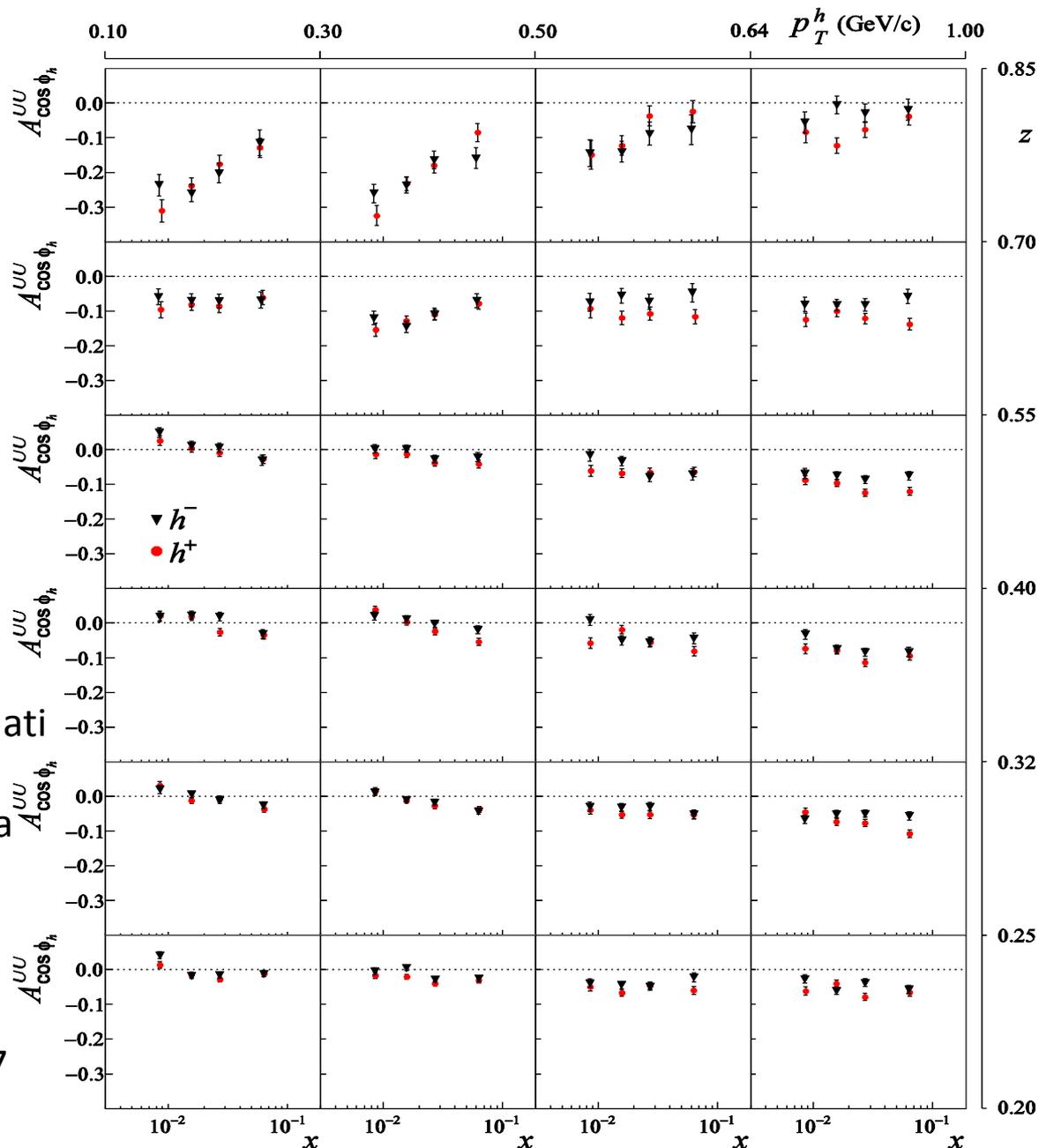
sia per le asimmetrie in  $\cos\phi$  che quelle in  $\cos 2\phi$



NPB 886 (2014) 1046

una descrizione soddisfacente dei dati non e` stata ancora raggiunta. La funzione BM non e` stata estratta (contrariamente a quelle di Sivers e Collins)

servono piu` dati!  
 → misura su idrogeno liquido in parallelo al DVCS nel 2016 e 2017



## Conclusioni

COMPASS ha prodotto molti risultati sullo spin trasverso e sugli effetti TMD (e non solo...)

→ trasversita'

*estratte dal SIDIS*

→ Sivers

prima misura di Sivers nel DY

ma ancora molto lavoro da fare

- forte impegno e sinergia teoria-fenomenologia-esperimento per spiegare risultati spesso sorprendenti e pianificare nuove misure
- futuro:
  - contributo di COMPASS:
    - nuovi dati sul SIDIS non polarizzato su LH2 in parallelo alla misura del DVCS (2016 -2017)
    - nuova misura di DY (2018)
    - identificazione di misure chiave per >2020

JLab12 e EIC

spares

## Studio della struttura del nucleone

risultati non previsti → asimmetrie azimutali nella produzione inclusiva di pioni su protone polarizzato (alte energie  $\sqrt{s}$  fino a 200 GeV)  
(fine anni 70)

crisi dello spin → contributo dei quark allo spin del protone decisamente inferiore rispetto alle previsioni  
(fine anni 80)

enorme lavoro da parte della teoria per spiegare questi risultati  
→ importanza degli effetti di momento trasverso per la descrizione completa del nucleone

appaiono importanti il ruolo dello spin e del momento trasverso intrinseco dei quark nella descrizione del nucleone

	U	L	T
U	$f_1$  <i>number density</i> $q$		
L		$g_1$  -  <i>helicity</i> $\Delta q$	
T			$h_1$  -  <i>transversity</i>

descrive la correlazione tra lo spin del quark e la polarizzazione trasversa del nucleone (interpretazione probabilistica differenza tra densita` numerica dei quark polarizzati parallelamente o anti-parallelamente rispetto alla polarizzazione del nucleone)

- differenti proprieta` rispetto all'elicitita`:
- non puo` essere misurata nel DIS (chiral-odd)
  - non puo` avere contributo dai gluoni
  - il primo momento e` la carica tensoriale

proposta originariamente da Ralston e Soper nel 77

→ idea per misurarla da Collins (nel SIDIS) nel 90

→ prime misure negli anni 2000 da HERMES e COMPASS su protone (diversa da zero!) e deuterio

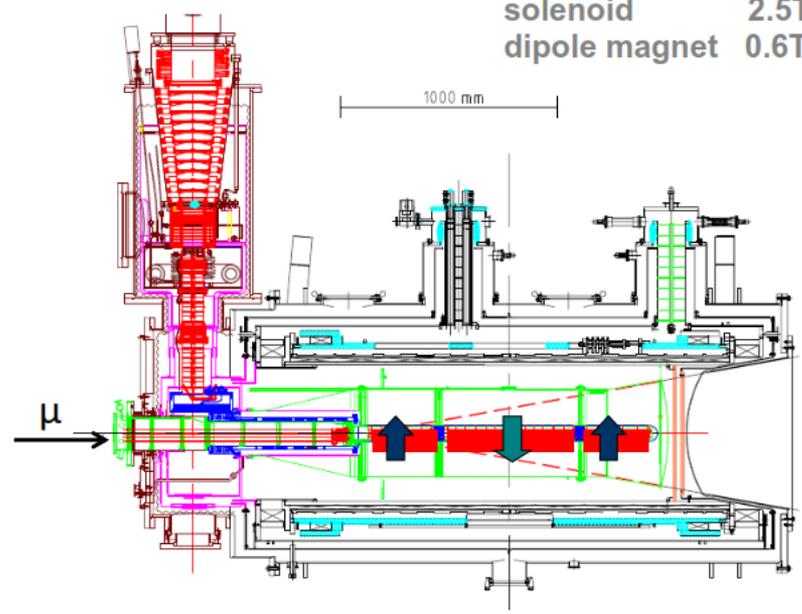
# polarized target system (>2005)

*solid state target operating in frozen spin mode*

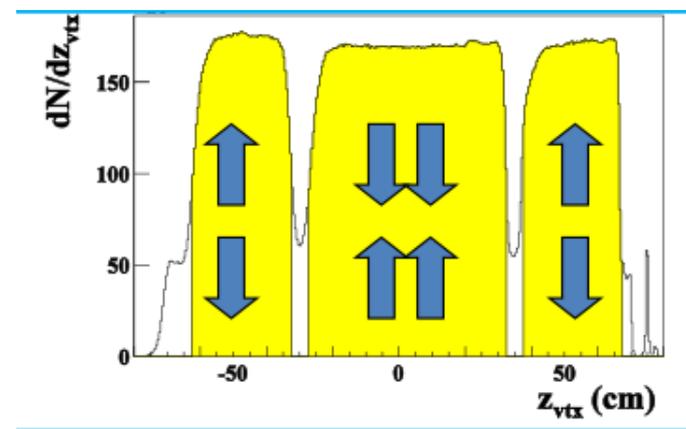
	<b>d (<sup>6</sup>LiD)</b>	<b>p (NH<sub>3</sub>)</b>
<b>polarization</b>	<b>50%</b>	<b>90%</b>
<b>dilution factor</b>	<b>40%</b>	<b>16%</b>

<sup>3</sup>He – <sup>4</sup>He dilution refrigerator (T~50mK)

solenoid 2.5T  
dipole magnet 0.6T



*3 cells target with opposite polarizations*



**2 configurations:  
polarisation reversed each week  
to minimize possible systematic errors**

Usando sia le molteplicita`  
che le asimmetrie azimutali



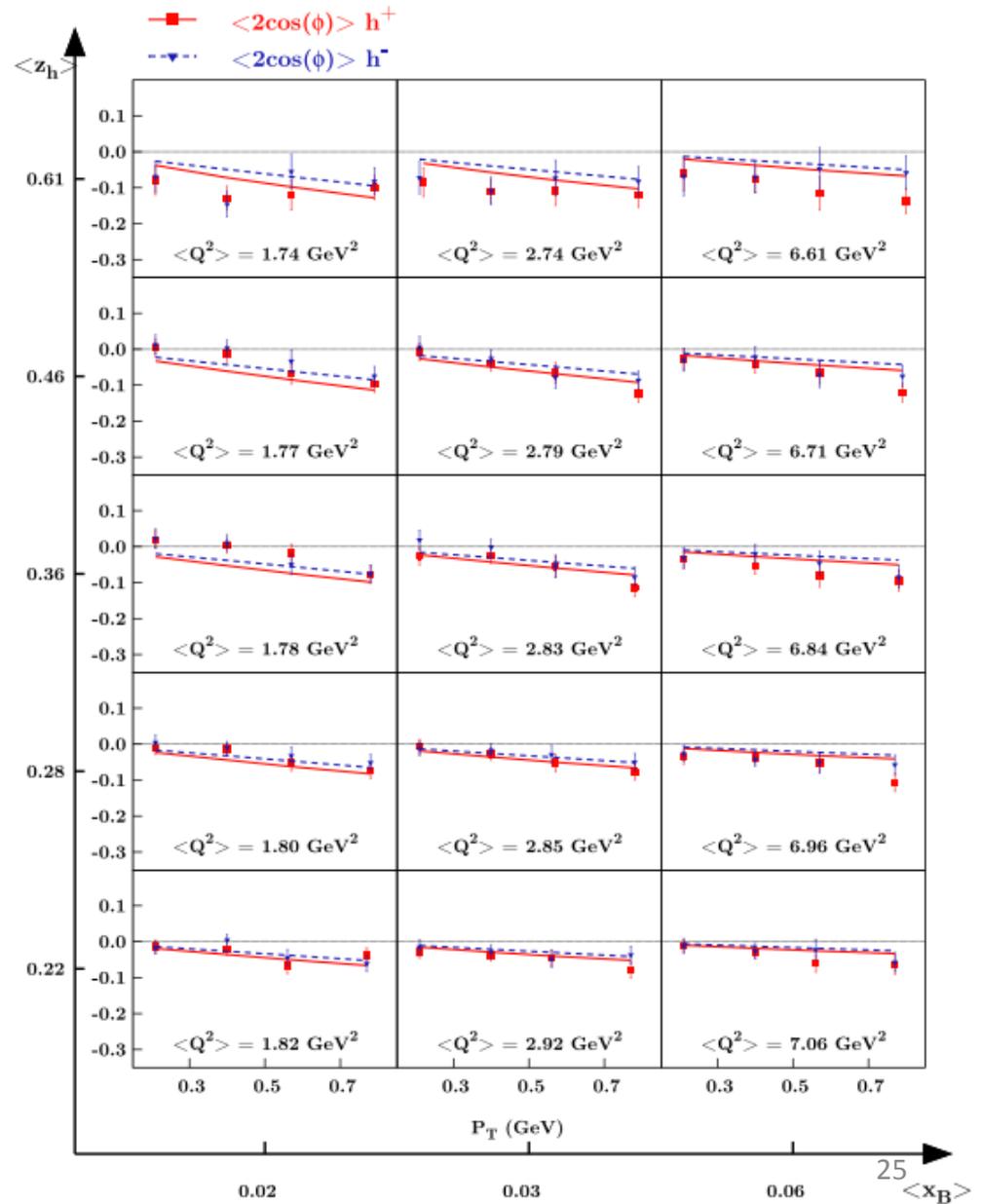
si possono distinguere  
i contributi a  $P_T^h$   
di  $k_{\perp}$  and  $p_{\perp}$

asimmetrie in  $\cos\phi$



contributo di  $k_{\perp}$

contributo principale  
effetto Cahn



Analisi globale delle molteplicita`  
e delle asimmetrie dai dati di COMPASS  
ed HERMES

si possono distinguere  
i contributi a  $P_T^h$   
di  $k_{\perp}$  and  $p_{\perp}$

asimmetrie  $\cos 2\phi$

Fondamentale avere dati a diverso  $Q^2$   
per distinguere i diversi effetti

PRD91 (2015) Barone et al

*dipendenze da  $P_T^h$   
nei diversi bin di  $z$  e  $x$*

