

# Riassunto della lezione precedente

- Algebra di Dirac sul Light-Cone (LC);  
spinore di Dirac: componenti “good” e “bad”;  
elicità, chiralità, polarizzazione trasversa
- OPE per DIS inclusivo non polarizzato; diagramma dominante e operatore nonlocale  $\Phi$  di correlazione quark-quark
- contenuto al leading twist di  $\Phi$ ; definizione operatoriale delle densità partoniche; risultato del Modello a partoni per campi liberi
- risultato generale al leading twist per reazione anche polarizzata; tre strutture indipendenti: Parton Distribution Functions (PDF); interpretazione probabilistica

# Decomposizione di $\Phi$ al leading twist

Base di matrici di Dirac  $\{\mathbf{1}, \gamma^\mu, \gamma^\mu \gamma_5, i\gamma_5, i\sigma^{\mu\nu} \gamma_5\}$

$$\Phi(p, P, S) = \frac{1}{2} [S \mathbf{1} + V_\mu \gamma^\mu + A_\mu \gamma^\mu \gamma_5 + iP \gamma_5 + iT_{\mu\nu} \sigma^{\mu\nu} \gamma_5]$$

$$S = \frac{1}{2} \text{Tr}(\Phi) = C_1(p^2, p \cdot P)$$

$$V^\mu = \frac{1}{2} \text{Tr}(\gamma^\mu \Phi) = C_2 P^\mu + C_3 p^\mu$$

$$A^\mu = \frac{1}{2} \text{Tr}(\gamma^\mu \gamma_5 \Phi) = C_4 S^\mu + C_5 p \cdot S P^\mu + C_6 P \cdot S p^\mu$$

$$P_5 = \frac{1}{2i} \text{Tr}(\gamma_5 \Phi) = 0$$

$$T^{\mu\nu} = \frac{1}{2i} \text{Tr}(\sigma^{\mu\nu} \Phi) = C_7 P^{[\mu} S^{\nu]} + C_8 p^{[\mu} S^{\nu]} + C_9 p \cdot S P^{[\mu} p^{\nu]}$$



$$\text{Tr} [\gamma^+ \dots] \rightarrow q_f(x) = \Phi[\gamma^+] = \int \frac{d\xi^-}{2\pi} e^{-ixP^+\xi^-} \langle P | \bar{\psi}_f(\xi^-) \gamma^+ \psi_f(0) | P \rangle$$

$$\text{Tr} [\gamma^+ \gamma_5 \dots] \rightarrow \Delta q_f(x) = \Phi[\gamma^+ \gamma_5] = \int \frac{d\xi^-}{2\pi} e^{-ixP^+\xi^-} \langle P | \bar{\psi}_f(\xi^-) \gamma^+ \gamma_5 \psi_f(0) | P \rangle$$

$$\text{Tr} [\gamma^+ \gamma^i \gamma_5 \dots] \rightarrow \delta q_f(x) = \Phi[i\sigma^{i+} \gamma_5] = \int \frac{d\xi^-}{2\pi} e^{-ixP^+\xi^-} \langle P | \bar{\psi}_f(\xi^-) i\sigma^{i+} \gamma_5 \psi_f(0) | P \rangle$$

# Traccia di operatore bilocale → densità partoniche

$$\begin{aligned}\Phi^{[\gamma^+]}(x) &= \int dp^- d\mathbf{p}_\perp \text{Tr} [\Phi(p, P) \gamma^+] \Big|_{p^+=xP^+} \\ &= \sqrt{2} \sum_n |\langle n | \phi_f(0) | P \rangle|^2 \delta(P^+ - xP^+ - P_n^+) \equiv q_f(x)\end{aligned}$$



componenti light-cone “good”

densità di probabilità  
di annichilare in  $|P\rangle$   
un quark con momento  $xP^+$

similmente per l' antiquark

$$\begin{aligned}\Phi^{[\gamma^+]}(x) + \bar{\Phi}^{[\gamma^+]}(x) &= \int dp^- d\mathbf{p}_\perp \text{Tr} [\Phi(p, P, S) \gamma^+ - \bar{\Phi}(p, P, S) \gamma^+] \Big|_{p^+=xP^+} \\ &= q_f(x) + \bar{q}_f(x)\end{aligned}$$

= probabilità di trovare un (anti)quark con flavor f e frazione x del momento longitudinale (light-cone)  $P^+$  dell' adrone

In generale : 
$$\Phi^{[\Gamma]}(x, S) = \int dp^- d\mathbf{p}_\perp \text{Tr} [\Phi(p, P, S) \Gamma] \Big|_{p^+=xP^+}$$

Proiezioni al leading twist  
(coinvolgono le componenti  
“good”  $\phi$  )

$$\begin{aligned} \Phi^{[\gamma^+]}(x, S) &= q(x) \\ \Phi^{[\gamma^+ \gamma_5]}(x, S) &= \lambda \Delta q(x) \\ \Phi^{[i\sigma^{i+} \gamma_5]}(x, S) &= S_T^i \delta q(x) \end{aligned}$$

Proiezioni al twist 3  
(coinvolgono le componenti  
“good”  $\phi$  e “bad”  $\chi$ )

$$\begin{aligned} \Phi^{[\mathbf{1}]}(x, S) &= \frac{M}{P^+} e(x) \\ \Phi^{[\gamma^i \gamma_5]}(x, S) &= \frac{M}{P^+} S_T^i g_T(x) \\ \Phi^{[i\sigma^{+-} \gamma_5]}(x, S) &= \frac{M}{P^+} \lambda h_L(x) \end{aligned}$$

Esempio: 
$$\int dp^- d\mathbf{p}_\perp \text{Tr} [\Phi(p, P, S) \mathbf{1}] \Big|_{p^+=xP^+} = \frac{M}{P^+} \int \frac{d\xi^-}{2\pi} e^{-ixP^+\xi^-} \langle P | \underbrace{\bar{\psi}(\xi^-) \psi(0)} | P \rangle$$

$$\psi^\dagger \gamma^0 \psi = \overline{\begin{pmatrix} \phi \\ \chi \end{pmatrix}} \begin{pmatrix} 0 & \sigma_3 \\ \sigma_3 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phi \\ \chi \end{pmatrix} \sim \phi^\dagger \sigma_3 \chi \rightarrow \phi^\dagger \sigma_3 (i \not{D} + m) \phi$$

**correlatore quark-gluone  
soppresso**

# Interpretazione probabilistica al leading twist

proiettori di elicità (chiralità)  $P_{R/L} = \frac{1 \pm \gamma_5}{2}$   $[P_{R/L}, P_{\pm}] = 0$

$$\begin{aligned} \Phi[\gamma^+] &\rightarrow \bar{\psi} \gamma^+ \psi \rightarrow \psi^\dagger P_+ \psi \rightarrow \phi^\dagger \phi = \phi^\dagger (P_R + P_L)^\dagger (P_R + P_L) \phi \\ &= \phi^\dagger (P_R^\dagger P_R + P_L^\dagger P_L) \phi = \bar{R}R + \bar{L}L \end{aligned}$$



distribuzione di momento

$$\begin{aligned} \Phi[\gamma^+ \gamma_5] &\rightarrow \bar{\psi} \gamma^+ \gamma_5 \psi \rightarrow \psi^\dagger P_+ \gamma_5 P_+ \psi \rightarrow \phi^\dagger (P_R - P_L) \phi \\ &= \phi^\dagger (P_R^\dagger P_R - P_L^\dagger P_L) \phi = \bar{R}R - \bar{L}L \end{aligned} \quad [P_{\pm}, \gamma_5] = 0$$

distribuzione di elicità

$$\Phi[i\sigma^{i+} \gamma_5] \rightarrow \bar{\psi} i\sigma^{i+} \gamma_5 \psi \dots \rightarrow \phi^\dagger (P_L^\dagger \gamma^i P_R - P_R^\dagger \gamma^i P_L) \phi \quad ?$$

(continua)

proiettori di polarizzazione trasversa  $P_{\uparrow/\downarrow} = \frac{1 \pm \gamma^i \gamma_5}{2}$  (da base di elicità a base di trasversità)

$$\Phi [i\sigma^{i+}\gamma_5] \rightarrow \bar{\psi} i\sigma^{i+}\gamma_5 \psi \dots \rightarrow \phi^\dagger (P_\uparrow P_\uparrow - P_\downarrow P_\downarrow) \phi$$



→  $\delta q$  è distribuzione “netta” di polarizz. trasversa !

notazioni più usuali e “comode”

$$\Phi [\gamma^+] (x, S) = q(x) \longrightarrow f_1^q(x) \quad f_1 = \text{diagram}$$

quark non polariz.  $q$  leading twist

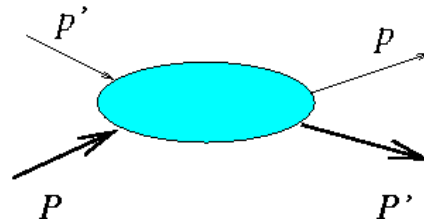
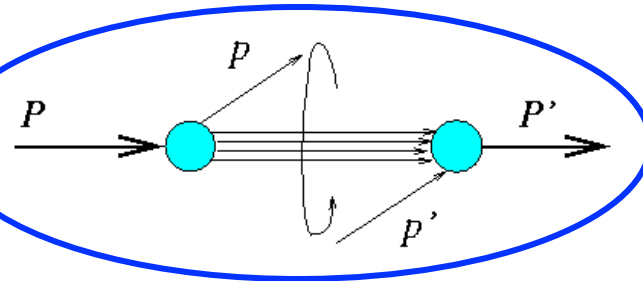
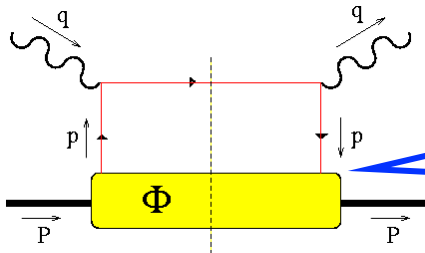
$$\Phi [\gamma^+ \gamma_5] (x, S) = \lambda \Delta q(x) \longrightarrow \lambda g_1^q(x) \quad g_1 = \text{diagram}$$

quark long. polariz.  $\vec{q}$

$$\Phi [i\sigma^{i+}\gamma_5] (x, S) = S_T^i \delta q(x) \longrightarrow S_T^i h_1^q(x) \quad h_1 = \text{diagram}$$

$q^\uparrow$  quark trasv. polariz.

# Necessità di 3 PDF al leading twist



bersaglio con elicità  $P$   
 emette  
 partone con elicità  $p$   
 hard scattering  
 partone con elicità  $p'$   
 riassorbito in  
 adrone con elicità  $P'$

discontinuità nel canale  $u$  della  
 ampiezza di scattering forward  
 partone-adrone

$$\rightarrow A_{Pp,P'p'}$$

al leading twist solo componenti “good”  
 il processo è collineare modulo  $o(1/Q)$   
 $\Rightarrow$  conservazione dell' elicità  $P+p' = p+P'$

$$|\psi\rangle \sim \begin{vmatrix} \phi_+ \\ \phi_- \\ o(1/Q) \\ o(1/Q) \end{vmatrix}$$

(continua)

invarianza per trasformazioni di parità  $\rightarrow A_{Pp,P'p'} = A_{-P-p,-P'-p'}$

invarianza per time-reversal  $\rightarrow A_{Pp,P'p'} = A_{P'p',Pp}$

	P	p	$\rightarrow$	P'	p'
1)	+	+		+	+
2)	+	-		+	-
3)	+	+		-	-

con questi vincoli  $\rightarrow 3 A_{Pp,P'p'}$  indipendenti

$$\left\{ \begin{array}{l} (+,+) \rightarrow (+,+) + (+,-) \rightarrow (+,-) \equiv f_1 \bar{R}R + \bar{L}L \\ (+,+) \rightarrow (+,+) - (+,-) \rightarrow (+,-) \equiv g_1 \bar{R}R - \bar{L}L \\ (+,+) \rightarrow (-,-) \equiv h_1 \bar{L}R \end{array} \right.$$



- relazioni tra PDF

$$(+, +) \rightarrow (+, +) + (+, -) \rightarrow (+, -) \equiv f_1$$

$$(+, +) \rightarrow (+, +) - (+, -) \rightarrow (+, -) \equiv g_1$$

$$(+, +) \rightarrow (-, -) \equiv h_1$$

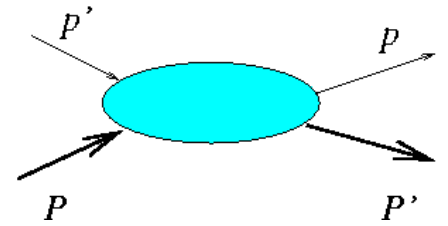
per definizione  $\rightarrow f_1 \geq |g_1|, |h_1|$  ,  $f_1 \geq 0$

$$|(+, +) \pm (-, -)|^2 = A_{++,++} + A_{--,--} \pm (A_{+,-} + A_{-,+}) \geq 0$$

invarianza per trasformazioni di parità  $\rightarrow A_{Pp,P'p'} = A_{-P-p,-P'-p'}$

$$A_{++,++} = \frac{1}{2} (f_1 + g_1) \geq |A_{+,-}| = |h_1| \rightarrow \text{diseguaglianza di Soffer valida per ogni } x \text{ e } Q^2 \text{ (almeno fino NLO)}$$

$A_{Pp,P'p'}$



## Base di elicità

$$h_1 \sim \phi^\dagger P_L^\dagger \gamma_i P_R \phi$$

## Base di trasversità

$$h_1 \sim \phi^\dagger (P_\uparrow^\dagger P_\uparrow - P_\downarrow^\dagger P_\downarrow) \phi$$

$$\langle \uparrow | \dots | \uparrow \rangle - \langle \downarrow | \dots | \downarrow \rangle \propto \langle + | \dots | - \rangle + \langle - | \dots | + \rangle$$

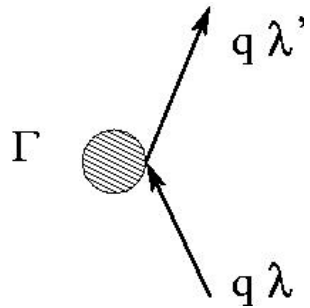
$$\begin{cases} |\uparrow\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|+\rangle + |-\rangle) \\ |\downarrow\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|+\rangle - |-\rangle) \end{cases}$$



per componenti “good”  
 ( $\Leftrightarrow$  twist 2) elicità = chiralità  
 quindi  $h_1$  non conserva  
 chiralità (chiral odd)

QCD conserva l'elicità al leading twist

**massless** quark spinors  $\lambda = \pm 1$



$$M \sim \bar{u}_{\lambda'} \Gamma u_\lambda$$

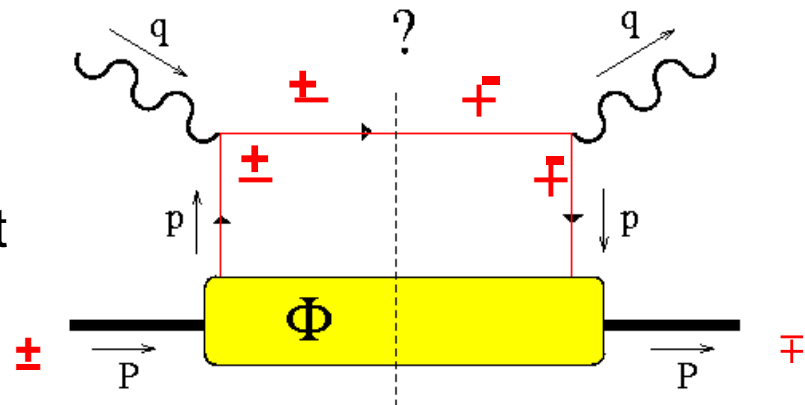
$$\sim \bar{u}_{\lambda'} (1 - \lambda' \gamma_5) (1 - \lambda \gamma_5) \Gamma u_\lambda$$

$$\sim \delta_{\lambda\lambda'} \bar{u}_{\lambda'} \Gamma u_\lambda + o\left(\frac{m_q}{E_q}\right)$$

$$\frac{1 + \lambda \gamma_5}{2} u_\lambda = u_\lambda$$

$$\bar{u}_\lambda \frac{1 - \lambda \gamma_5}{2} = \bar{u}_\lambda$$

QCD conserva l'elicità al leading twist  
 $\rightarrow h_1$  soppressa in DIS inclusivo



## Differenti proprietà tra $f_1$ , $g_1$ e $h_1$

per DIS inclusivo nel QPM c'è parallelo tra PDF e funzioni di struttura

$$f_1(x) \rightarrow F_1(x_B) = \frac{1}{2} \sum_f e_f^2 [f_1^f(x_B) + \bar{f}_1^f(x_B)] \longrightarrow \frac{1}{2} \sum_{f\bar{f}} e_f^2 [q_f^\uparrow(x_B) + q_f^\downarrow(x_B)]$$

$$g_1(x) \rightarrow G_1(x_B) = \frac{1}{2} \sum_f e_f^2 [g_1^f(x_B) + \bar{g}_1^f(x_B)] \longrightarrow \frac{1}{2} \sum_{f\bar{f}} e_f^2 [q_f^\uparrow(x_B) - q_f^\downarrow(x_B)]$$

ma  $h_1$  non ha controparte a livello di funzioni di struttura, perchè per DIS inclusivo polarizzato, in  $W_A^{\mu\nu}$  **il contributo di  $G_2$  è soppresso rispetto a quello di  $G_1$**  : appare al twist 3

$$W_A^{\mu\nu} = i\epsilon^{\mu\nu\rho\sigma} q_\rho S_\sigma \left[ MG_1(\nu, Q^2) + \frac{P \cdot q}{M} G_2(\nu, Q^2) \right] - i\epsilon^{\mu\nu\rho\sigma} q_\rho P_\sigma \frac{S \cdot q}{M} G_2(\nu, Q^2)$$

per tanti anni  $h_1$  è stata ignorata e si è pensato che la polarizzazione trasversa generasse effetti solo al twist 3, confondendo  $h_1$  con  $g_T$  ( $\leftrightarrow G_2$ )

$$\Phi^{[\gamma^i \gamma^5]}(x, S) = \frac{M}{P^+} S_T^i g_T(x) \longrightarrow g_1(x) + g_2(x) = \sum_f \frac{e_f^2 m_f}{2Mx} [q_f^\rightarrow(x) - q_f^\leftarrow(x)]$$

In realtà, la distribuzione di polarizzazione trasversa dei partoni in adroni polarizzati trasversalmente può apparire anche al twist 2:

	$\Phi^{[\Gamma]}$	N pol. / q pol.		$\Phi^{[\Gamma]}$	N pol. / q pol.	
twist 2	$\gamma^+ \gamma_5$	$\rightarrow / \rightarrow$	$g_1$	$i \sigma^{i+} \gamma_5$	$\uparrow / \uparrow$	$h_1$
twist 3	$i \sigma^{+-} \gamma_5$	$\rightarrow / \uparrow$	$h_L$	$\gamma^i \gamma_5$	$\uparrow / \rightarrow$	$g_T$

perfetto parallelo  
“incrociato” tra t=2 e t=3  
sia per elicità che  
polarizzazione trasversa



inoltre  $h_1$  ha stessa importanza di  $f_1$  e  $g_1$  al twist 2. Infatti se sulla base di elicità  $f_1$  e  $g_1$  sono diagonali mentre  $h_1$  no,

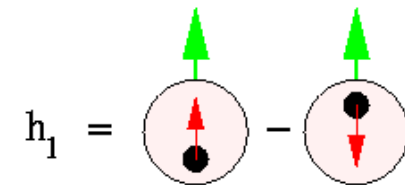
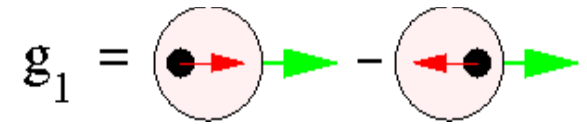
$$f_1 \sim \phi^\dagger (P_R^\dagger P_R + P_L^\dagger P_L) \phi \quad g_1 \sim \phi^\dagger (P_R^\dagger P_R - P_L^\dagger P_L) \phi \quad h_1 \sim \phi^\dagger P_L^\dagger P_R \phi$$

sulla base di trasversità la situazione è opposta:

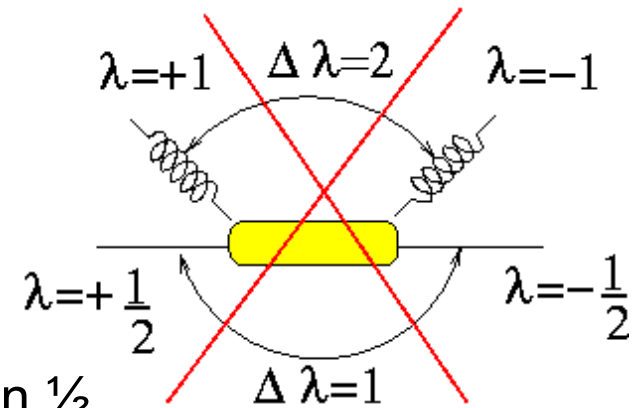
$$f_1 \sim \phi^\dagger (P_\uparrow^\dagger P_\uparrow + P_\downarrow^\dagger P_\downarrow) \phi \quad g_1 \sim \phi^\dagger P_\downarrow^\dagger P_\uparrow \phi \quad h_1 \sim \phi^\dagger (P_\uparrow^\dagger P_\uparrow - P_\downarrow^\dagger P_\downarrow) \phi$$

## Chiral-odd $h_1 \rightarrow$ interessanti proprietà rispetto alle altre distribuzioni

- $g_1$  e  $h_1$  (e tutte le PDF) sono definite nell' IFM  
cioè boost  $Q \rightarrow \infty$  lungo l' asse  $z$   
ma boost e rotazioni di Galileo commutano in  
teoria nonrelativistica  $\rightarrow g_1 = h_1$   
ogni differenza è data da effetti relativistici  
 $\rightarrow$  info su dinamica relativistica dei quarks



- per gluone si definiscono  
 $G(x)$  = la distribuzione di momento  
 $\Delta G(x)$  = la distribuzione di elicità  
però non esiste la “trasversità” in adrone a spin  $\frac{1}{2}$   
 $\rightarrow$  evoluzione di  $h_1^q$  disaccoppiata da gluoni !





$$\langle PS | \bar{q}^f \gamma^\mu \gamma_5 q^f | PS \rangle \Big|_{Q^2} = 2\lambda P^\mu \int dx \left[ g_1^f(x, Q^2) \oplus \bar{g}_1^f(x, Q^2) \right] = 2\lambda P^\mu g_A$$

carica assiale

$$\langle PS | \bar{q}^f i\sigma^{\mu\nu} \gamma_5 q^f | PS \rangle \Big|_{Q^2} = 2S^{[\mu} P^{\nu]} \int dx \left[ h_1^f(x, Q^2) \ominus \bar{h}_1^f(x, Q^2) \right] = 2S^{[\mu} P^{\nu]} g_T(Q^2)$$

carica tensoriale  
(non conservata)

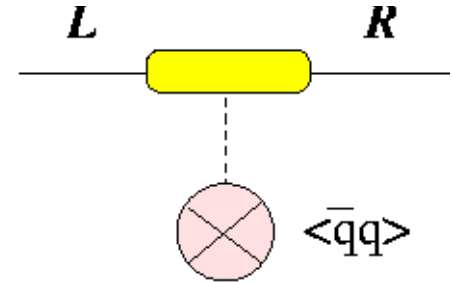
- carica assiale da operatore C(harge)-even  
carica tensoriale C-odd → non prende contributi  
da coppie quark-antiquark del mare di Dirac

**riassumendo:** l'evoluzione di  $h_1^q(x, Q^2)$  è molto diversa dalle altre PDF perchè non prende contributi dai gluoni → evoluzione tipica di non-singoletto  
Inoltre carica tensoriale è struttura di non-singoletto, C-odd e non è conservata  
→  $h_1$  quantità più adatta per studiare contributo di valenza allo spin

(continua)

$h_1$  non conserva chiralità (chiral odd)

$h_1$  può quindi essere determinata da processi soft legati alla rottura della simmetria chirale della QCD (ruolo del vuoto nonperturbativo di QCD?)



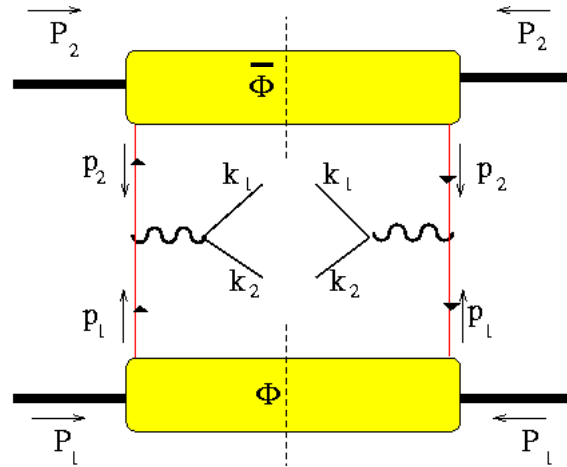
in **base di elicità** la sezione d'urto deve essere chiral-even quindi per estrarre  $h_1$  bisogna trovare un processo elementare in cui appaia insieme ad un partner chiral-odd, in modo da “annullare l'effetto”; il vincolo ulteriore è che tale contributo appaia al leading twist.

Come estrarre la trasversità dai dati ?

# Come estrarre la trasversità dai dati ?

scelta più ovvia: Drell-Yan polarizzato

$$p^\uparrow p^\uparrow \rightarrow l^+ l^- X$$



$$\bar{\Phi}(x, S) = \int dp^- d\mathbf{p}_T \bar{\Phi}(p, P, S) \Big|_{p^+ = xP^+} \longrightarrow [f_1(x) + \lambda \bar{g}_1(x) \gamma_5 + \bar{h}_1(x) \gamma_5 S_T] \not{P}$$



$$\Phi(x, S) = \int dp^- d\mathbf{p}_T \Phi(p, P, S) \Big|_{p^+ = xP^+} \longrightarrow [f_1(x) + \lambda g_1(x) \gamma_5 + h_1(x) \gamma_5 S_T] \not{P}$$





# Single-Spin Asymmetry (SSA)

$$\frac{d\sigma^{p_1^\uparrow p_2^\uparrow}}{d^4q d\Omega} \propto \left\{ (1 + \cos^2 \theta) \quad W_T \quad \longrightarrow \sum_{f, \bar{f}} e_f^2 f_1^f(x_1) f_1^{\bar{f}}(x_2) \right. \\ \left. + \sin^2 \theta \cos(2\phi - \phi_{S_1} - \phi_{S_2}) \quad W_{\uparrow\uparrow} \right\} \longrightarrow |S_{T_1}| |S_{T_2}| \sum_{f, \bar{f}} e_f^2 h_1^f(x_1) h_1^{\bar{f}}(x_2)$$

$$A_{TT} = \frac{d\sigma(p^\uparrow p^\uparrow) - d\sigma(p^\uparrow p^\downarrow)}{d\sigma(p^\uparrow p^\uparrow) + d\sigma(p^\uparrow p^\downarrow)} \\ = |S_{T_1}| |S_{T_2}| \frac{\sin^2 \theta \cos 2\phi}{1 + \cos^2 \theta} \frac{\sum_{f, \bar{f}} e_f^2 h_1^f(x_1) h_1^{\bar{f}}(x_2)}{\sum_{f, \bar{f}} e_f^2 f_1^f(x_1) f_1^{\bar{f}}(x_2)}$$

Ma = distribuzione di spin trasverso per antiquark in protone polarizzato  
 → antiquark del mare di Dirac è soppresso

Inoltre simulazioni indicano che disuguaglianza di Soffer, imposta ad ogni  $Q^2$  nell'evoluzione, vincola  $A_{TT}$  a numeri troppo piccoli ( $\sim 1\%$ )

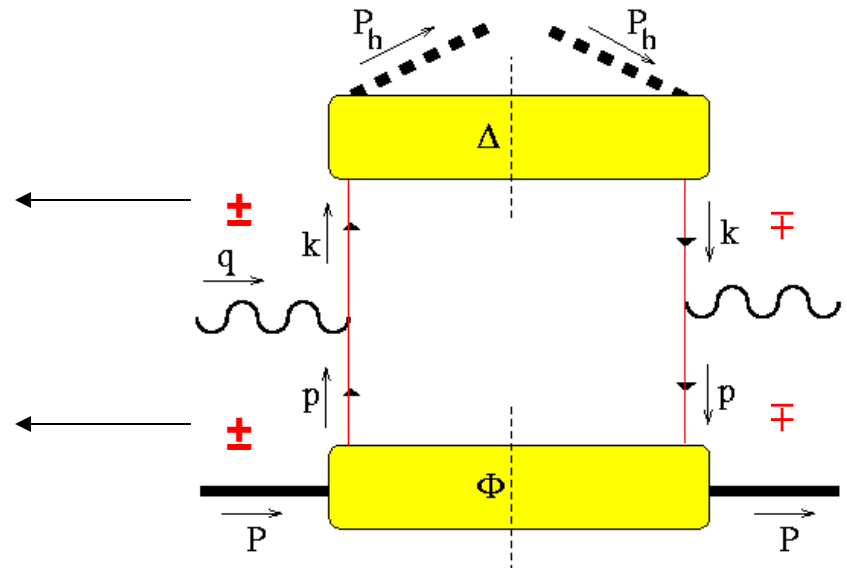
Meglio considerare  $p^\uparrow \bar{p}^\uparrow \rightarrow l^+ l^- X$  ma tecnologia ancora da sviluppare

# alternativa: DIS semi-inclusivo (SIDIS)

diagramma  
dominante  
al leading twist

partner  
chiral-odd

chiral-odd



## sistema IFM

$$P^\mu = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( A, \frac{M^2}{A}, \mathbf{0}_T \right) \rightarrow \left( P^+, \frac{M^2}{2P^+}, \mathbf{0}_T \right)$$

$$q^\mu = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( -x_N A, \frac{Q^2 - \mathbf{q}_T^2}{2x_N A}, \mathbf{q}_T \right) \sim \left( -x_B P^+, \frac{P_h^-}{z_h}, \mathbf{q}_T \right) \rightarrow (-Q, Q, \mathbf{q}_T)$$

$$P_h^\mu \rightarrow \left( \frac{M_h^2}{2z_h Q}, z_h Q, \mathbf{0}_T \right)$$

IFM per stato finale:  
direzione “-” dominante

$$x_B \sim x_N = -\frac{q^+}{P^+}$$

$$z_h = \frac{P_h^-}{q^-}$$

## partoni

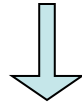
$$p^\mu = \left( xP^+, \frac{p^2 + \mathbf{p}_T^2}{2xP^+}, \mathbf{p}_T \right)$$

$$k^\mu = \left( \frac{z(k^2 + \mathbf{k}_T^2)}{2P_h^-}, \frac{P_h^-}{z}, \mathbf{k}_T \right)$$

z frazione light-cone  
del momento  
del quark frammentante

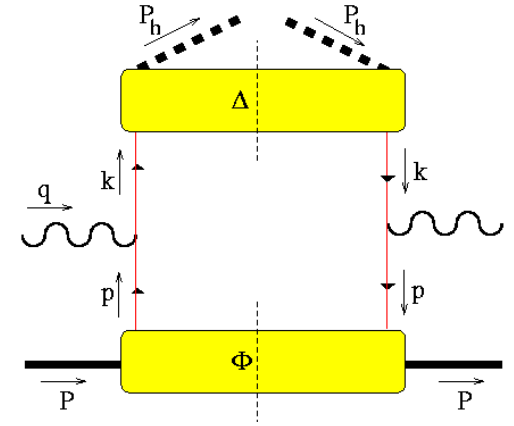
	+	-	
h → q	~ Q	~ 1/Q	∫ dp <sup>-</sup>
hard	~ Q	~ Q	
q → h	~ 1/Q	~ Q	∫ dp <sup>+</sup>

procedura simile a DIS inclusivo



$$2MW^{\mu\nu} = \sum_f e_f^2 \int d^4p d^4k \delta(p+q-k) \text{Tr} [\Phi(p, P, S) \gamma^\mu \Delta(k, P_h, S_h) \gamma^\nu] + \left( \begin{array}{l} \mu \leftrightarrow \nu \\ q \leftrightarrow -q \end{array} \right)$$

(antiquark)



quark “decade” in adrone non colorato  
confinamento → neutralizzazione del colore

$$Q^2 \rightarrow \infty \sum_f e_f^2 \int dp^- d\mathbf{p}_T dk^+ d\mathbf{k}_T \delta(\mathbf{p}_T + \mathbf{q}_T - \mathbf{k}_T) \text{Tr} [\Phi(p, P, S) \gamma^\mu \Delta(k, P_h, S_h) \gamma^\nu] \Big|_{\substack{p^+ = xP^+ \\ k^- = P_h^- / z}} + \left( \begin{array}{l} \mu \leftrightarrow \nu \\ q \leftrightarrow -q \end{array} \right)$$



$$\Phi(p, P, S) = \int \frac{d^4\xi}{(2\pi)^4} e^{-ip \cdot \xi} \langle P, S | \bar{\psi}(\xi) \psi(0) | P, S \rangle$$

$$\Delta(k, P_h, S_h) = \sum_X \int \frac{d^4\zeta}{(2\pi)^4} e^{ik \cdot \zeta} \langle 0 | \psi(\zeta) | P_h S_h, X \rangle \langle P_h S_h, X | \bar{\psi}(0) | 0 \rangle$$

similmente  
per antiquark

Se consideriamo SIDIS in cinematica collineare, cioè non consideriamo la dipendenza dai momenti trasversi,

$$\frac{d\sigma}{dx dy dz} = \frac{\pi\alpha^2}{Q^4} \frac{yz}{2} L_{\mu\nu} 2M \int d\mathbf{q}_T W^{\mu\nu} \quad \begin{array}{l} \text{(Lez.11 – slide 11)} \\ \text{con boost da} \\ \gamma^*N \text{ frame a hN frame} \\ \mathbf{P}_{h\perp} = -z \mathbf{q}_T \end{array}$$

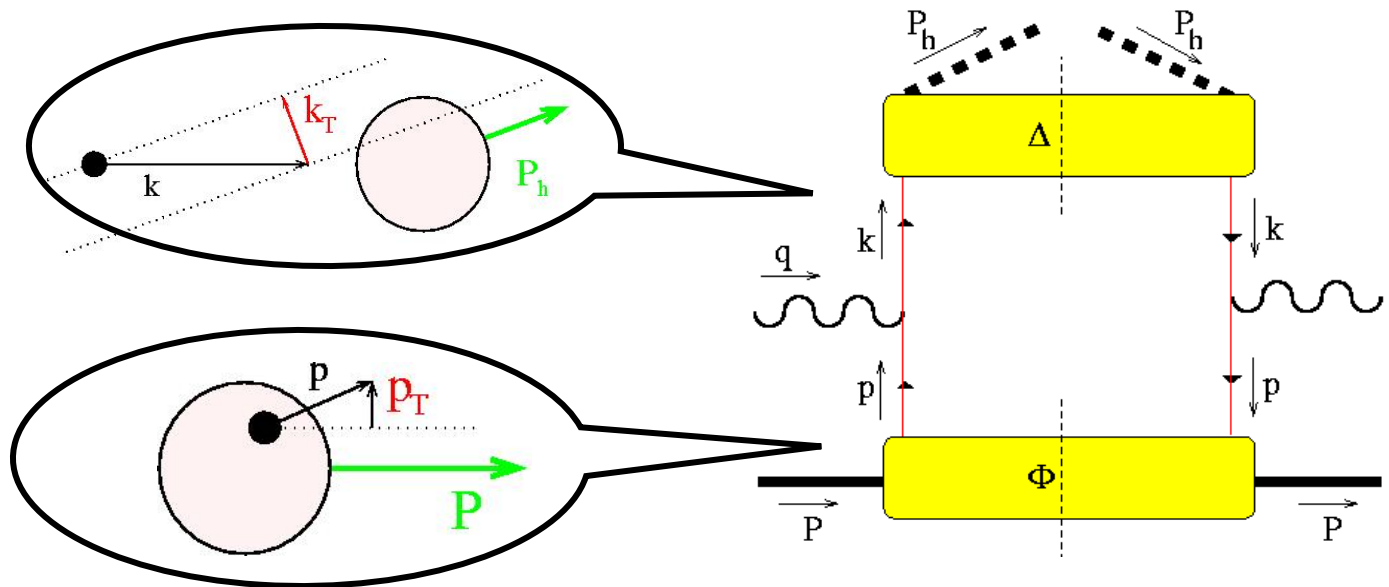
$$\begin{aligned} 2M \int d\mathbf{q}_T W^{\mu\nu} &= \int d\mathbf{q}_T \sum_f e_f^2 \int dp^- d\mathbf{p}_T dk^+ d\mathbf{k}_T \delta(\mathbf{p}_T + \mathbf{q}_T - \mathbf{k}_T) \\ &\quad \times \text{Tr} [\Phi(p, P, S) \gamma^\mu \Delta(k, P_h, S_h) \gamma^\nu] \Big|_{p^+ = xP^+}^{k^- = P_h^- / z} + \left( \begin{array}{l} \mu \leftrightarrow \nu \\ q \leftrightarrow -q \end{array} \right) \\ &= \sum_f e_f^2 \text{Tr} \left[ \int dp^- d\mathbf{p}_T \Phi(p, P, S) \Big|_{p^+ = xP^+} \gamma^\mu \right. \\ &\quad \left. \Phi(x, S) \times \int dk^+ d\mathbf{k}_T \Delta(k, P_h, S_h) \Big|_{k^- = P_h^- / z} \gamma^\nu \right] + \left( \begin{array}{l} \mu \leftrightarrow \nu \\ q \leftrightarrow -q \end{array} \right) \\ &\quad \Delta(z, S_h) \end{aligned}$$

se  $S_h=0$ , ad esempio  $p(e, e'\pi)X \rightarrow$  combinazione con  $h_1$  solo al twist 3

se  $S_{hT} \neq 0$ , ad esempio  $p(e, e'\Lambda^\uparrow)X \rightarrow$  c'è contributo a twist 2, ma

$q^\uparrow \rightarrow \Lambda^\uparrow (= \{u, d, s\}) ?$

- in SIDIS con misura di  $\mathbf{P}_{h\perp}$  → sensibilità a  $\mathbf{q}_T$   
 → sensibilità ai momenti trasversi dei partoni  
 → struttura più ricca di  $\Phi$  e  $\Delta$



inoltre presenza di interazioni residue  $P_h \leftrightarrow X$  in  $|P_h, X\rangle$  impedisce di

applicare T-rev. invariance:  $\Delta^*(k, P_h) = -i \gamma_1 \gamma_3 \Delta(\tilde{k}, \tilde{P}_h) i \gamma_1 \gamma_3$

e quindi anche a  
 → nuove strutture

$$\Phi^*(p, P, S) = -i \gamma_1 \gamma_3 \Phi(\tilde{p}, \tilde{P}, -\tilde{S}) i \gamma_1 \gamma_3$$

## Naive $T$ -reversal transformation

$|a\rangle =$   sistema con spin e momento

$|-a\rangle =$   rovesciamo spin e momento

$|i\rangle, |f\rangle$  stati iniziale e finale;  $\mathcal{T}_{if}$  matrice trans.;  $T$ -rev.  $\rightarrow$   $|\mathcal{T}_{if}|^2 = |\mathcal{T}_{f-i}|^2$

naive  $T$ -reversal transformation :  $\mathcal{T}_{i-f}$

$A = |\mathcal{T}_{if}|^2 - |\mathcal{T}_{i-f}|^2$

- $\rightarrow$  no FSI (Final State Interactions)  
 $\Rightarrow |i\rangle \leftrightarrow |f\rangle$  ;  $A = 0$  ;  $T$ -rev. = naive  $T$ -rev.
- $\rightarrow$  FSI  $\rightarrow |i\rangle \neq |f\rangle$  ;  $T$ -rev. OK  
 ma  $A \neq 0 \propto \Im m [ \text{Born} \times \text{rescatt.}^* ]$