

Accès aux distributions généralisées de partons via de nouvelles observables



Samuel Wallon



Laboratoire de Physique des 2 Infinis Irène Joliot-Curie
IJCLab

CNRS / Université Paris Saclay

Orsay

et

Sorbonne Université

Café Théorie

19 juin 2020

IJCLab

en collaboration avec:

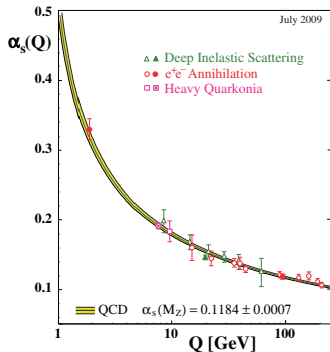
B. Pire (CPHT, Palaiseau), R. Boussarie (BNL, Brookhaven),

L. Szymanowski (NCBJ, Warsaw), G. Duplancić, K. Passek-Kumerički (IRB, Zagreb)

L'interaction forte

La liberté asymptotique

Liberté asymptotique et confinement



$$\alpha_s = \frac{g^2}{4\pi}$$

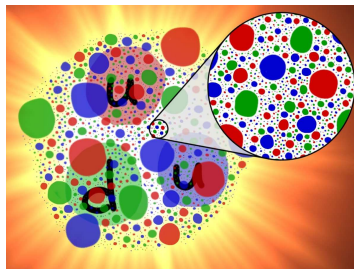
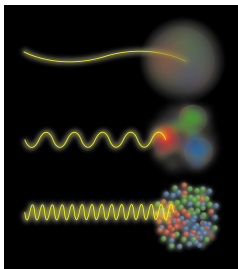
couplage $\alpha_s(Q) \ll 1$ (Q = énergie typique)

pour $Q \gg \Lambda_{QCD} \simeq 200 \text{ MeV}$ soit distance $\sim 1/Q \ll 1 \text{ fm}$

Contenu partonique: quarks, gluons

Sondes électromagnétiques

Voir l'intérieur d'un proton avec une sonde électromagnétique

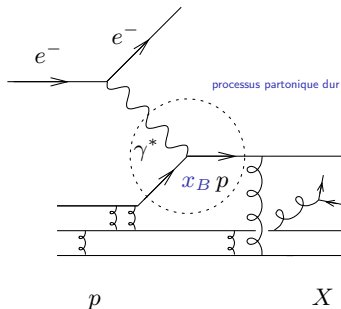


les détails visibles sont directement reliés à la longueur d'onde de la sonde utilisée

Le contenu en quark et gluon du proton

Retour sur l'expérience historique: DIS

La diffusion profondément inélastique



$$s_{\gamma^* p} = (q_\gamma^* + p_p)^2 = 4 E_{\text{c.m.}}^2$$

$$Q^2 \equiv -q_{\gamma^*}^2 > 0$$

$$x_B = \frac{Q^2}{2 p_p \cdot q_\gamma^*} \simeq \frac{Q^2}{s_{\gamma^* p}}$$

modèle de Bjorken-Feynman 1969

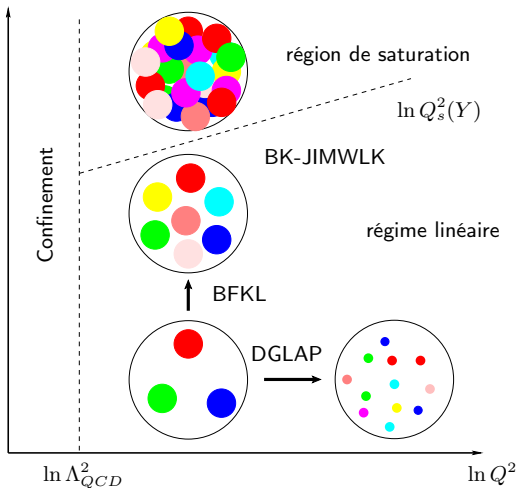
- x_B = fraction de l'énergie-impulsion du proton transportée par le quark
- $1/Q$ = résolution transverse de la sonde électromagnétique $\ll 1/\Lambda_{QCD}$

Le contenu en quark et gluon du proton

DIS

Les différents régimes gouvernant le contenu perturbatif du proton

$$Y = \ln \frac{1}{x_{Bj}}$$

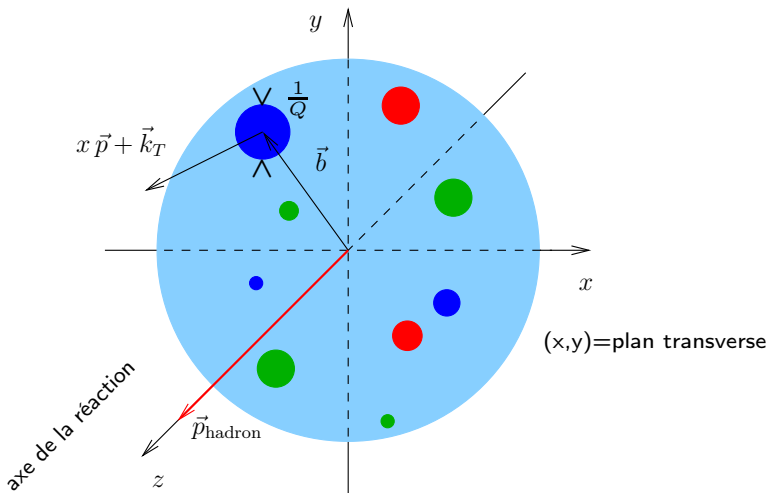


Le contenu en quark et gluon du proton

Au-delà de DIS

Accéder aux distributions multidimensionnelles en quark et gluons pour les hadrons?

Information 5-dimensionnelle



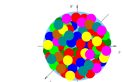
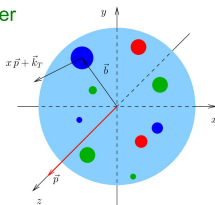
Le contenu en quark et gluon du proton

Le tableau ultime

5D

distributions de Wigner
pour les hadrons

$$W(x, \vec{b}_T, k_T)$$

Expérimentalement
inaccessible directement

3D

limite de Regge
perturbative

uPDFs (gluons)

distributions de partons
non intégrées

$$\int d^3 \vec{b}$$

TMDs

$$f(x, k_T)$$

distributions en moment
transverse

$$\int d^2 k_T \int d b_T$$

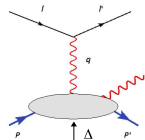
$$f(x, b_T) \longleftrightarrow H(x, 0, t)$$

distributions en
paramètre d'impact

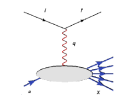
$$b_T \leftrightarrow \Delta$$

$$\int d^2 k_T \int \text{Fourier}(\vec{b})$$

$$H(x, \xi, t)$$

distributions de partons
généraliséesprocessus
exclusifs

1D

processus inclusifs et
semi-inclusifs

PDFs

$$f(x)$$

distribution de
partons

$$\int d^2 k_T$$

$$\int d^2 b_T$$

$$t=0$$



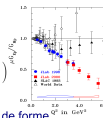
diffusion élastique

FFs

$$G_{E,M}(t)$$

facteurs de forme

$$\int dx$$



$$\int dx x^{n-1}$$

GFFs

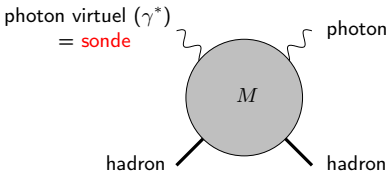
Facteurs de forme
généralisés
réseaux

Les outils théoriques

Factorisation courte distance/longue distance

Que faire avec QCD?

exemple: diffusion Compton

source de γ^* = faisceau d' e^\pm , de μ^- 

- Objectif: décrire M (amplitude de diffusion) en séparant:
 - des quantités non-calculables perturbativement $\alpha_s \sim 1$
 - discrétisation de QCD sur un réseau 4-d: simulations numériques
 - correspondance AdS/QCD
 - des quantités calculables perturbativement $\alpha_s \ll 1$

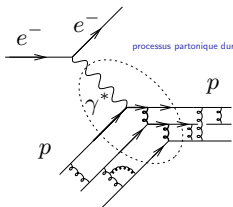
Les outils théoriques

Factorisation courte distance/longue distance

Factorisation

- Objectif: réduire le processus à l'interaction d'un petit nombre de *partons* (quarks, gluons), malgré le confinement
- Ceci est possible si le processus est gouverné par des phénomènes à courte distance ($d \ll 1 \text{ fm}$)
 $\implies \alpha_s \ll 1$: **méthodes perturbatives**
- Il faut pour cela heurter un hadron suffisamment violemment

Exemple: facteur de forme du proton (collision élastique $e^-p \rightarrow e^-p$)



τ interaction électromagnétique $\sim \tau$ temps de vie du parton après l'interaction
 $\ll \tau$ temps caractéristique de l'interaction forte

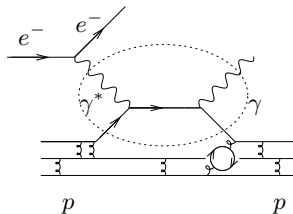
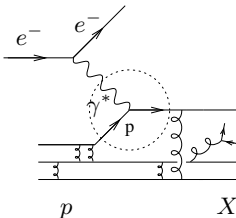
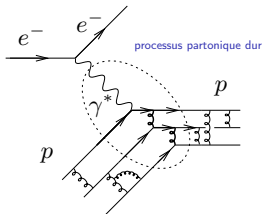
on parle alors de processus **dur**.

Les outils théoriques

Factorisation courte distance/longue distance

Factorisation

- Il faut pour cela une échelle dure:
 - **Virtualité de la sonde électromagnétique**
 - diffusion élastique $e^\pm p \rightarrow e^\pm p$
 - diffusion profondément inélastique (DIS) $e^\pm p \rightarrow e^\pm X$
 - diffusion Compton virtuelle (DVCS) $e^\pm p \rightarrow e^\pm p \gamma$
 - diffusion profondément inélastique semi-inclusive (SIDIS) $e^\pm p \rightarrow e^\pm \text{hadron } p X$
 - **Energie totale dans le centre de masse** en annihilation $e^+e^- \rightarrow X$
 - Production d'un méson lourd
- amplitude = convolution du contenu partonique du hadron avec une amplitude perturbative



Les outils théoriques

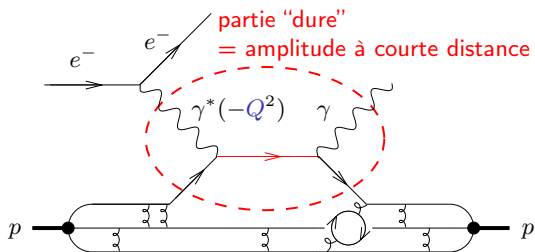
Factorisation courte distance/longue distance

factorisation "colinéaire" de l'amplitude de diffusion du processus DVCS

 $M =$ amplitude courte distance \otimes contenu non-perturbatif du hadron

convolution

Diffusion Compton profondément virtuelle:

photon virtuel $\gamma^* =$ sonde $1/Q =$ résolution spatiale
(inégalité d'Heisenberg)

$$M_{\gamma^* p \rightarrow \gamma p'}$$

corrections perturbatives
resummation ?

$$= (\# + \# \alpha_s + \dots)$$

$$+ \frac{1}{Q} (\# + \# \alpha_s + \dots)$$

 \nwarrow corrections en puissances

$$+ \dots$$

Distribution de Partons Généralisée (GPD)

HERA (H1, ZEUS, HERMES), JLab, COMPASS ... LHC ... EIC

Factorisation

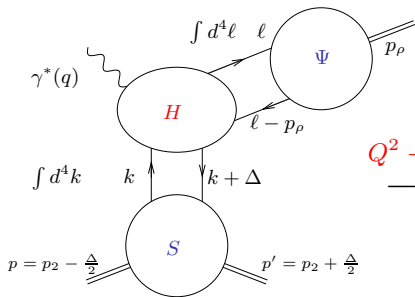
Factorisation colinéaire: exemple de l'électroproduction d'un méson

Electroproduction d'un méson

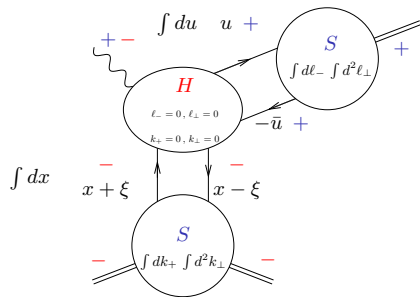
$$p_1^2 = p_2^2 = 0, \quad 2p_1 \cdot p_2 = s \sim \text{échelle dure}$$

$$\text{Sudakov: } k_i = \underbrace{\alpha_i}_{+} p_1 + \underbrace{\beta_i}_{-} p_2 + \underbrace{k_{\perp i}}_{\perp}$$

$$d^4 k_i = \frac{s}{2} d\alpha_i d\beta_i d^2 k_{\perp i}$$



$$Q^2 \rightarrow \infty$$



$$\int d^4 k d^4 \ell$$

$$S(k, k + \Delta)$$

$$H(q, k, k + \Delta)$$

$$\Psi(\ell, \ell - p_\rho)$$

$$= \int dk^- d\ell^+ \int dk^+ \int_{|k_\perp^2| < \mu_{F_2}^2} d^2 k_\perp S(k, k + \Delta) H(q; k^-, k^- + \Delta^-; \ell^+, \ell^+ - p_\rho^+) \int d\ell^- \int_{|\ell_\perp^2| < \mu_{F_1}^2} d^2 \ell_\perp \Psi(\ell, \ell - p_\rho)$$

$$\text{GPD } F(x, \xi, t, \mu_{F_2}^2)$$

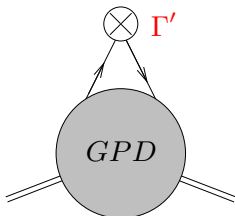
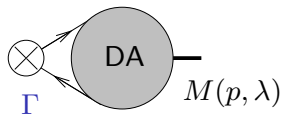
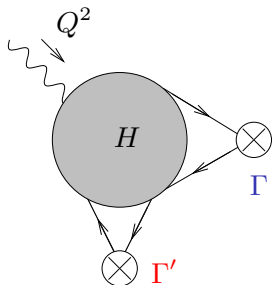
$$\text{partie dure } T(x/\xi, u, \mu_{F_1}^2, \mu_{F_2}^2, \mu_R^2)$$

$$\text{DA } \Phi(u, \mu_{F_1}^2)_{12/24}$$

Factorisation

Factorisation collinéaire: exemple de l'électroproduction d'un méson

Les blocs de base



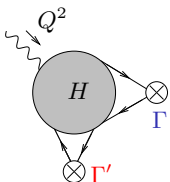
Γ, Γ' : matrices de Dirac compatibles
avec les nombres quantiques: C, P, T , chiralité

Structure similaire pour un échange gluonique

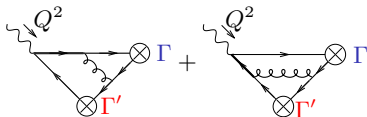
Factorisation

Factorisation collinéaire: exemple de l'électroproduction d'un méson

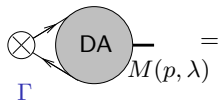
Les blocs de base



=



diagrammes du sac à main

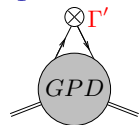


=

$$\langle M(p, \lambda) | \mathcal{O}(\Psi, \bar{\Psi} A) | 0 \rangle$$

éléments de matrice d'un

opérateur non-local sur le cône de lumière

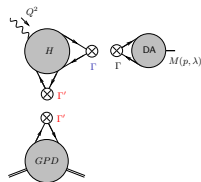


=

$$\langle N(p') | \mathcal{O}'(\Psi, \bar{\Psi} A) | N(p) \rangle$$

éléments de matrice d'un

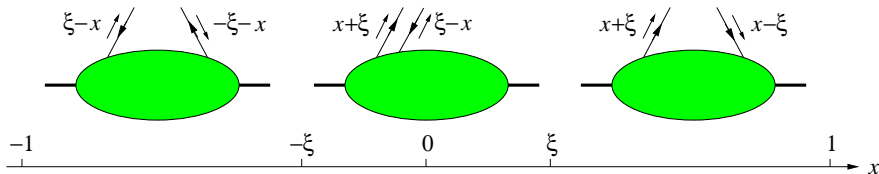
opérateur non-local sur le cône de lumière



Les GPD

Interprétation physique

Interprétation physique des GPD



Emission et réabsorption
d'un antiquark
~ PDFs pour des antiquarks
region DGLAP-II

Emission d'un quark et
émission d'un antiquark
~ échange d'un méson
région ERBL

Emission et réabsorption
d'un quark
~ PDFs d'un quarks
région DGLAP-I

Les GPD

les GPD de twist 2

Classification des GPD de twist 2 (quarks)

- Pour les quarks, il faut distinguer les échanges
 - sans flip d'hélicité (matrices Γ' chirales-paires) : 4 GPD chirales-paires:

$$H^q \xrightarrow{\xi=0, t=0} \text{PDF } q, E^q, \tilde{H}^q \xrightarrow{\xi=0, t=0} \text{PDF polarisées } \Delta q, \tilde{E}^q$$

$$\begin{aligned} F^q &= \frac{1}{2} \int \frac{dz^+}{2\pi} e^{ixP^- z^+} \langle p' | \bar{q}(-\frac{1}{2}z) \gamma^- q(\frac{1}{2}z) | p \rangle \Big|_{z^-=0, z_\perp=0} \\ &= \frac{1}{2P^-} \left[H^q(x, \xi, t) \bar{u}(p') \gamma^- u(p) + E^q(x, \xi, t) \bar{u}(p') \frac{i \sigma^{-\alpha} \Delta_\alpha}{2m} u(p) \right], \\ \tilde{F}^q &= \frac{1}{2} \int \frac{dz^+}{2\pi} e^{ixP^- z^+} \langle p' | \bar{q}(-\frac{1}{2}z) \gamma^- \gamma_5 q(\frac{1}{2}z) | p \rangle \Big|_{z^-=0, z_\perp=0} \\ &= \frac{1}{2P^-} \left[\tilde{H}^q(x, \xi, t) \bar{u}(p') \gamma^- \gamma_5 u(p) + \tilde{E}^q(x, \xi, t) \bar{u}(p') \frac{\gamma_5 \Delta^-}{2m} u(p) \right]. \end{aligned}$$

- avec flip d'hélicité (mat. Γ' chirales-impaires): 4 GPDs chirales-impaires:

$$H_T^q \xrightarrow{\xi=0, t=0} \text{PDF quark de transversité } \Delta_T q, E_T^q, \tilde{H}_T^q, \tilde{E}_T^q$$

$$\begin{aligned} &\frac{1}{2} \int \frac{dz^+}{2\pi} e^{ixP^- z^+} \langle p' | \bar{q}(-\frac{1}{2}z) i \sigma^{-i} q(\frac{1}{2}z) | p \rangle \Big|_{z^-=0, z_\perp=0} \\ &= \frac{1}{2P^-} \bar{u}(p') \left[H_T^q i \sigma^{-i} + \tilde{H}_T^q \frac{P^- \Delta^i - \Delta^- P^i}{m^2} + E_T^q \frac{\gamma^- \Delta^i - \Delta^- \gamma^i}{2m} + \tilde{E}_T^q \frac{\gamma^- P^i - P^- \gamma^i}{m} \right] \end{aligned}$$

Les GPD

les GPD de twist 2

Classification des GPD de twist 2 (gluons)

- de même, pour les gluons:
 - 4 GPD gloniques sans flip d'hélicité:

$$H^g \xrightarrow{\xi=0, t=0} \text{PDF } x g$$

$$E^g$$

$$\tilde{H}^g \xrightarrow{\xi=0, t=0} \text{PDF polarisée } x \Delta g$$

$$\tilde{E}^g$$

- 4 GPD gluoniques avec flip d'hélicité:

$$H_T^g$$

$$E_T^g$$

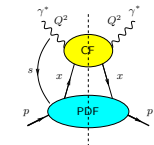
$$\tilde{H}_T^g$$

$$\tilde{E}_T^g$$

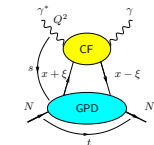
(pas de limite vers l'avant se réduisant aux PDF gluoniques ici: un changement d'hélicité de 2 unités ne peut être compensé par une cible de spin 1/2)

Le contenu en quark et gluon des nucléons... et des noyaux

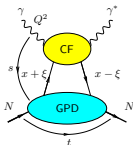
Des PDF aux GPD via les processus exclusifs



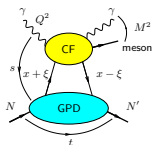
Diffusion profondément
profondément inélastique (DIS)



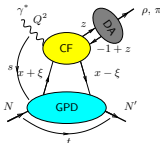
Diffusion Compton
profondément virtuelle (DVCS)



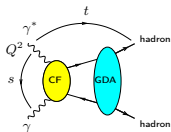
Diffusion Compton
de genre temps (TCS)



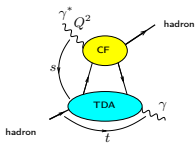
Diffusion Compton généralisée
avec production de paire



Production profondément
virtuelle de méson (DVMP)



Annihilation $\gamma^*\gamma$



Diffusion Compton
profondément virtuelle vers l'arrière

- **test de la factorisation** (et de l'universalité des distributions non perturbatives)
- **complémentarité des processus afin d'extraire les GPD**
- **nécessité de contrôler les corrections radiatives (NLO) et les corrections en puissance** (ex: DVMP en π^0)
- **le secteur de la transversité est particulièrement difficile d'accès**
- **l'extension aux noyaux est très prometteuse**
- **il est essentiel d'étendre le domaine cinématique: en ξ , en t , en Q^2 :**
JLab, COMPASS, ... LHC en UPC, EIC

Secteur de la transversité

Qu'es aquò?

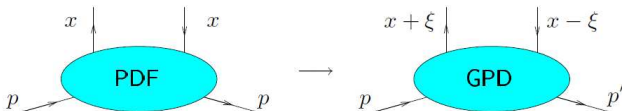
Qu'est-ce que la transversité?

- contenu en spin transverse du proton:

$$\begin{array}{l} |\uparrow\rangle(x) \\ |\downarrow\rangle(x) \end{array} \sim \begin{array}{l} |\rightarrow\rangle + |\leftarrow\rangle \\ |\rightarrow\rangle - |\leftarrow\rangle \end{array}$$

spin suivant x états d'hélicité

- Les observables sensibles au renversement d'hélicité donnent donc accès à la transversité $\Delta_T q(x)$. Très mal connu expérimentalement.
- Les GPDs de transversité sont quasi inconnues expérimentalement.



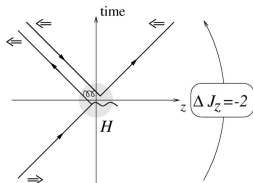
- Pour des (anti)particules sans masse, chiralité = (-)hélicité
- Donc **transversité = quantité chirale impaire**
- QCD et QED conservent (dans la limite de masse nulle) la chiralité ($\gamma^\mu, \gamma^\mu \gamma^5$).
Les quantités impaires sous la chiralité ($1, \gamma^5, [\gamma^\mu, \gamma^\nu]$) que l'on souhaite mesurer doivent donc apparaître par paires

Secteur de la transversité

Pourquoi est-ce difficile d'accès?

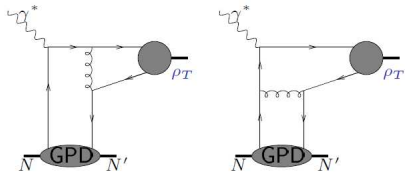
Comment accéder aux GPD de transversité?

- la DA dominante du ρ_T est de twist 2 et chiral impaire (couplage $[\gamma^\mu, \gamma^\nu]$)
- malheureusement $\gamma^* N \rightarrow \rho_T N' = 0$



- annulation valable à tous les ordres:
transfert impossible de 2 unités d'hélicité
de la part du photon.

- argument
diagrammatique à l'ordre
Born:

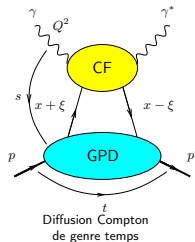
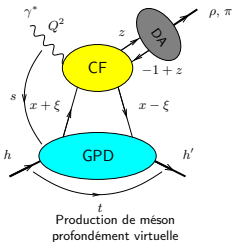
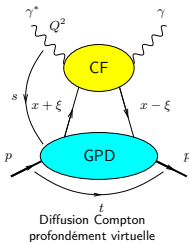


$$\gamma^\alpha [\gamma^\mu, \gamma^\nu] \gamma_\alpha \rightarrow 0$$

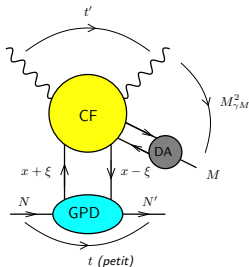
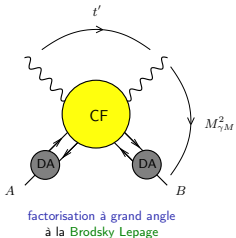
Une nouvelle classe de processus pour accéder aux GPDs

Passer de 2 à 3 particules dans l'état final pour accéder aux GPDs

- Processus actuellement utilisés pour accéder aux GPDs JLab@12GeV, COMPASS-II



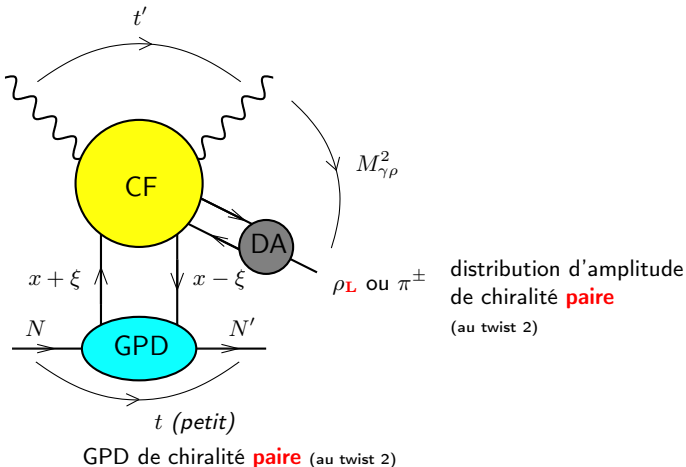
- Processus $\gamma N \rightarrow \gamma M N'$ à grand $M_{\gamma M}^2$: échelle dure ($M = \text{meson}$)



JHEP 1702 (2017) 054
JHEP 1811 (2018) 179

Une nouvelle classe de processus pour accéder aux GPDs de chiralité **paire**

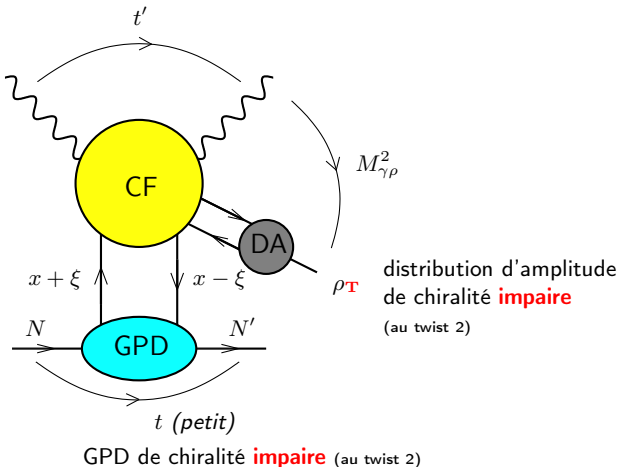
Processus avec **3 particules dans l'état final**: un accès aux GPD de chiralité **paire**



- Test d'universalité de la factorisation colinéaire
- Nouvelle ensemble d'observables pour extraire les GPD
- Très prometteur à JLab@12 GeV: $6 \cdot 10^4 \rho_L$ pour 100 jours ($\mathcal{L} = 100 \text{ nb}^{-1} \text{ s}^{-1}$)

Une nouvelle classe de processus pour accéder aux GPDs de chiralité **impaire**

Processus avec **3 particules dans l'état final**: un accès aux GPD de chiralité **impaire**



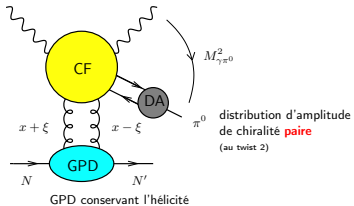
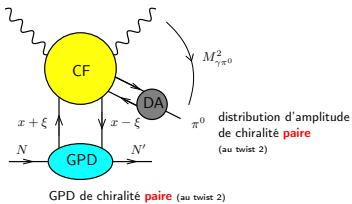
- Accès à la transversité de spin
- Très prometteur à JLab@12 GeV: $8 \cdot 10^3 \rho_{\mathbf{T}}$ pour 100 jours ($\mathcal{L} = 100 \text{ nb}^{-1} \text{ s}^{-1}$)

Une nouvelle classe de processus pour accéder aux GPDs

Futur

Processus avec 3 particules dans l'état final: projets

- asymétries de polarisation (γ initial et/ou cible)
- phénoménologie: JLab@12GeV, LHC en UPC et EIC
- contributions gluoniques



- corrections NLO
- corrections en twist

