



# Un Hadron: Structure, Origine du Spin, Masse du Proton

Raphaël Dupré

Unité mixte de recherche

**CNRS-IN2P3**  
Université Paris-Sud

91406 Orsay cedex  
Tél. : +33 1 69 15 73 40  
Fax : +33 1 69 15 64 70  
<http://ipnweb.in2p3.fr>

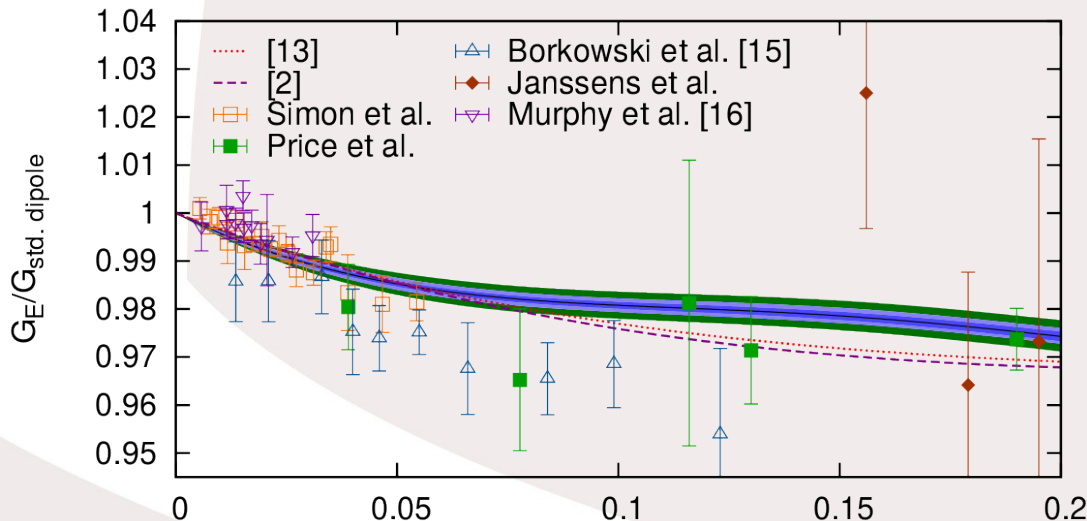
IPN Orsay  
CNRS-IN2P3  
Université Paris-Sud

- **1917 : Découverte du proton**
  - Par diffusion nucléaire (Rutherford)
- **1932 : Découverte du neutron**
  - Par diffusion nucléaire (Chadwick)
- **1955 : Facteur de forme (FF) et rayon de charge**
  - Par diffusion electron-noyau (Hofstadter)
  - Le rayon de charge du proton est néanmoins toujours sujet à controverse
- **1964 : Découverte des quarks**
  - Basée sur la multitude d'états hadroniques détectés expérimentalement dans les années 50 (Gell-Mann & Zweig)
- **1968 : Fonctions de structure (PDF)**
  - Offre une image nouvelle des quarks (Friedman, Kendall & Taylor)
  - Modèle des partons (Feynman, Bjorken & Paschos)
  - Deux domaines restent peu explorés : les grands et petits  $x$  (Fraction d'impulsion porté par le quark)
- **1987 : « Crise du spin »**
  - Le spin des quarks ne contribue que marginalement au spin du proton
  - Question du moment angulaire des quarks et du spin porté par les gluons
- **1996 : Base théorique des distributions généralisées de partons (GPD)**
  - D'abord établis pour mesurer le moment angulaire des quarks (Ji & Radyushkin)
  - Vers une description globale du nucléon

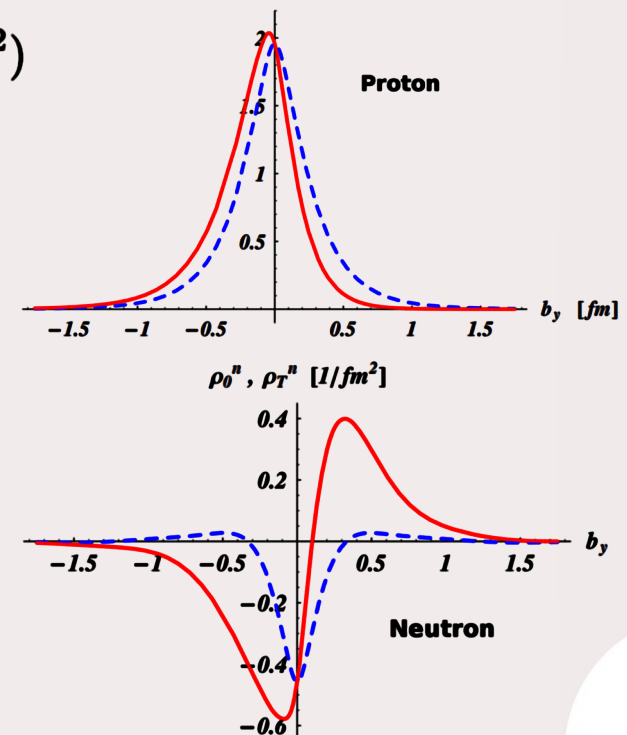
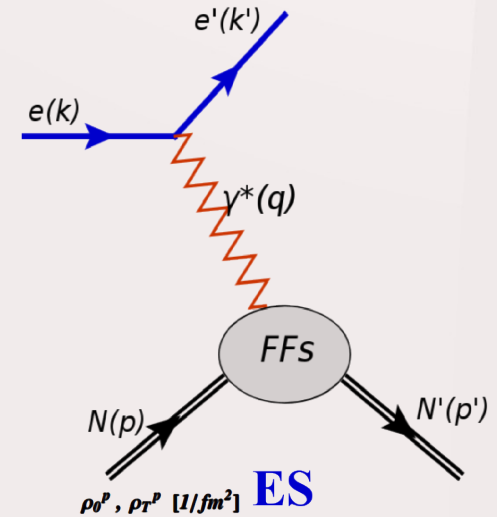
- **Diffusion Élastique**
  - Le processus le plus simple  $ep \rightarrow ep$
- **Donne accès à deux facteurs de forme**
  - Électrique et Magnétique ou Dirac et Pauli
  - Permet d'extraire la densité de charges

$$\rho_0^N(b) = \int_0^\infty \frac{dQ}{2\pi} Q J_0(bQ) F_1(Q^2),$$

$$\rho_T^N(\vec{b}) = \rho_0^N(b) - \sin(\phi_b - \phi_s) \int_0^\infty \frac{dQ}{2\pi} \frac{Q^2}{2M_N} J_1(bQ) F_2(Q^2)$$

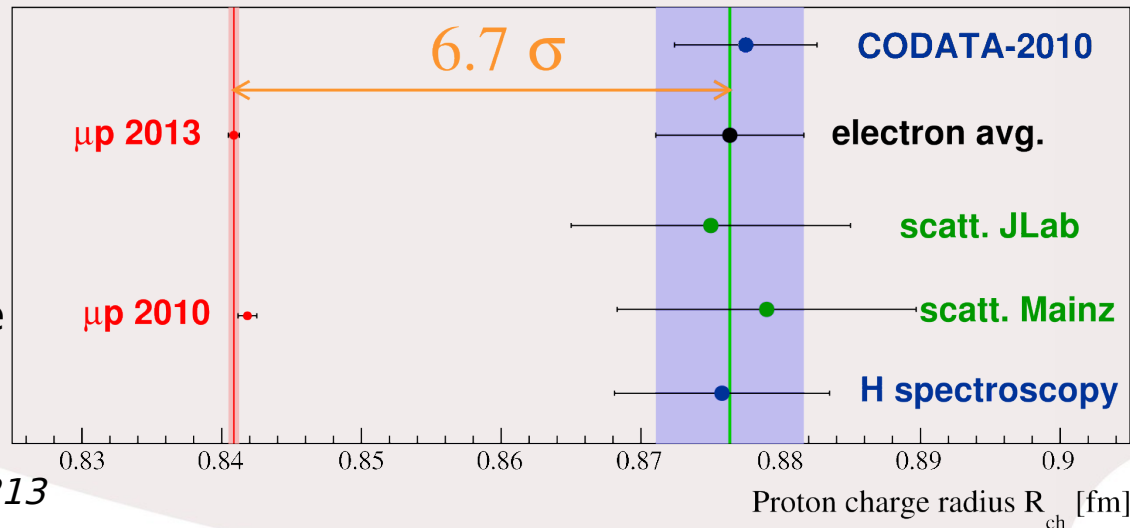
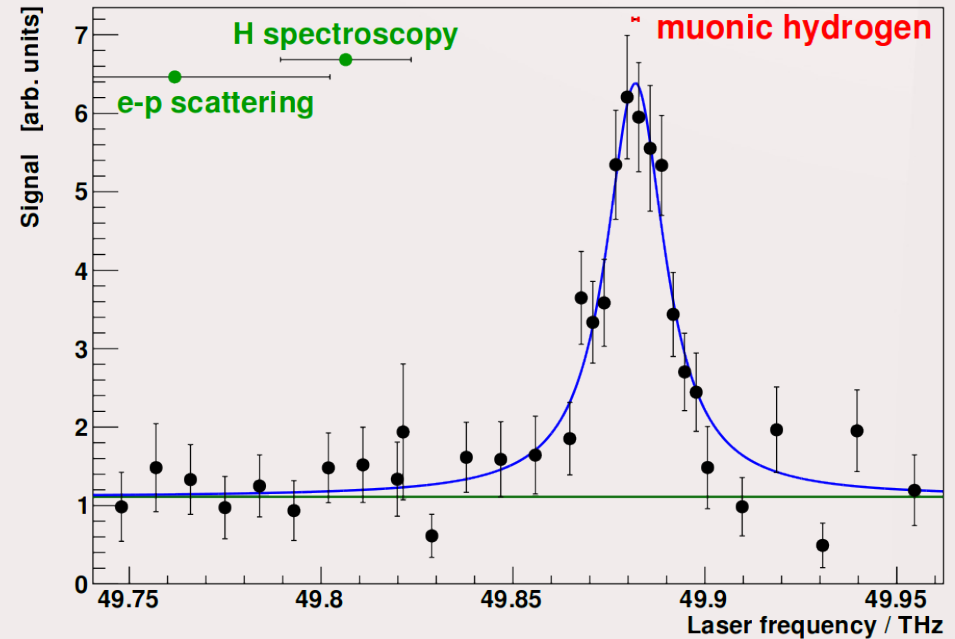


C. Carlson et M. Vanderhaeghen *Phys.Rev.Lett.* 100 (2008) 032004  
J.C. Bernauer et al. *Phys.Rev.Lett.* 105 (2010) 242001



# Le Rayon du Proton

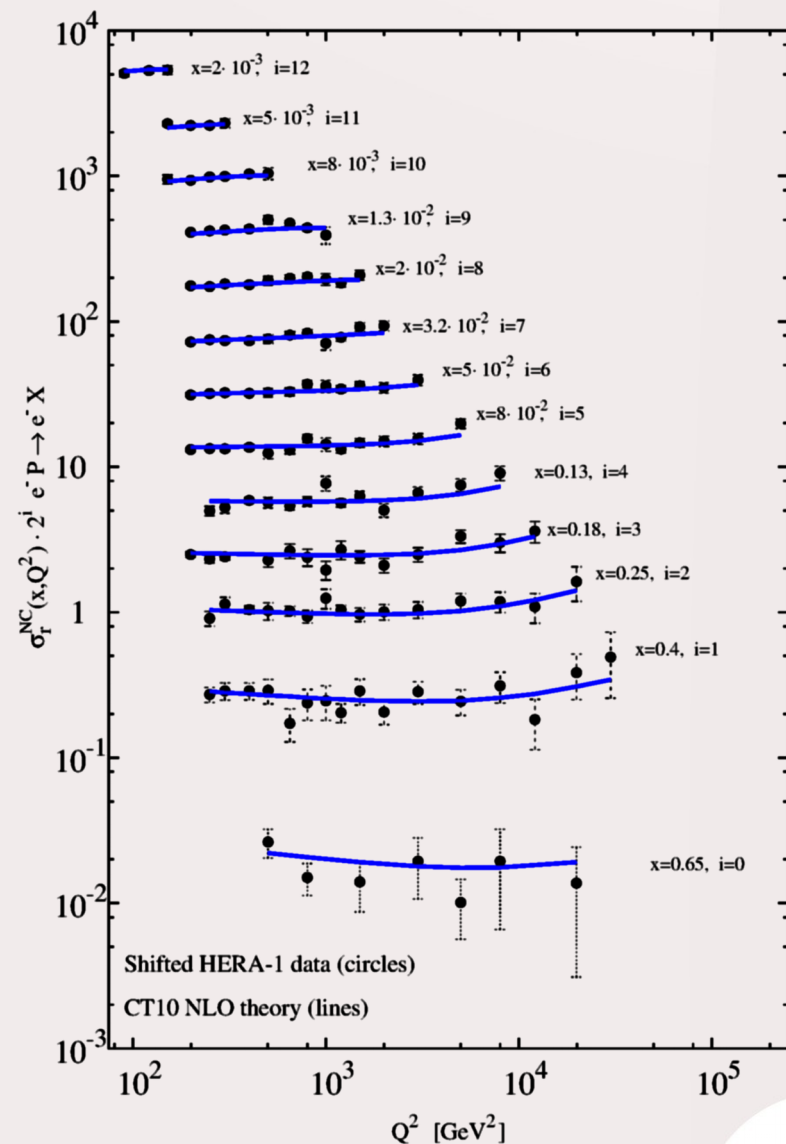
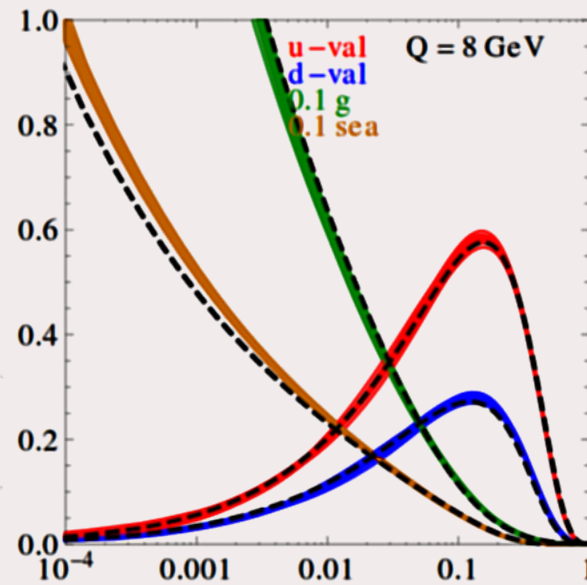
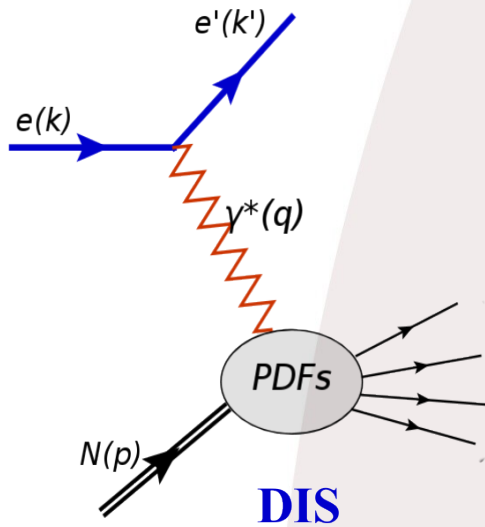
- **Récentes mesures incompatibles**
  - Spectroscopie de l'hydrogène muonique
- **Nouvelles mesures programmées**
  - e-p,  $\mu$ -p, H spectroscopie, ...
- **Explications possibles**
  - Physique hadronique
    - Rayon différent pour proton offshell
  - Physique au delà du modèle standard ?
    - Différence fondamentale entre l'e et le  $\mu$  ?



R. Pohl et al. Nature 466 (2010) 213

A. Antognini et al. Science 339 (2013) 417

# Les Distributions de Partons



- **Diffusion Inélastique**

- Processus inclusif  $ep \rightarrow eX$
- Sonde les quarks de la cible
- Avec différents faisceaux et cibles permet une séparation par saveur

- **Quarks de valence et de la mer**

- Quarks de valence  $\leftrightarrow$  constituants
- La mer produite dynamiquement
- Évolution DGLAP

- **Domination de la mer**

- À l'origine de la masse du nucléon

# La Masse et le Spin

TABLE II: First moments  $\Delta f_j^{1,[x_{\min}^{-1}]}$  at  $Q^2 = 10 \text{ GeV}^2$ .

	$x_{\min} = 0$	$x_{\min} = 0.001$	
	best fit	$\Delta\chi^2 = 1$	$\Delta\chi^2/\chi^2 = 2\%$
$\Delta u + \Delta\bar{u}$	0.813	0.793 <sup>+0.011</sup> <sub>-0.012</sub>	0.793 <sup>+0.028</sup> <sub>-0.034</sub>
$\Delta d + \Delta\bar{d}$	-0.458	-0.416 <sup>+0.011</sup> <sub>-0.009</sub>	-0.416 <sup>+0.035</sup> <sub>-0.025</sub>
$\Delta\bar{u}$	0.036	0.028 <sup>+0.021</sup> <sub>-0.020</sub>	0.028 <sup>+0.059</sup> <sub>-0.059</sub>
$\Delta\bar{d}$	-0.115	-0.089 <sup>+0.029</sup> <sub>-0.029</sub>	-0.089 <sup>+0.090</sup> <sub>-0.080</sub>
$\Delta\bar{s}$	-0.057	-0.006 <sup>+0.010</sup> <sub>-0.012</sub>	-0.006 <sup>+0.028</sup> <sub>-0.031</sub>
$\Delta g$	-0.084	0.013 <sup>+0.106</sup> <sub>-0.120</sub>	0.013 <sup>+0.702</sup> <sub>-0.314</sub>
$\Delta\Sigma$	0.242	0.366 <sup>+0.015</sup> <sub>-0.018</sub>	0.366 <sup>+0.042</sup> <sub>-0.062</sub>

## Masse du nucleon

- D'origine dynamique
- La QCD sur réseau progresse dans ce domaine →  $M_p - M_n$  calculable

*S. Borsanyi et al. Science 347 (2015) 1452*

## $\frac{1}{2} = \frac{1}{2}\Delta\Sigma + \Delta g + Lq + Lg$

- La décomposition est controversée, pour des questions d'invariance de jauge

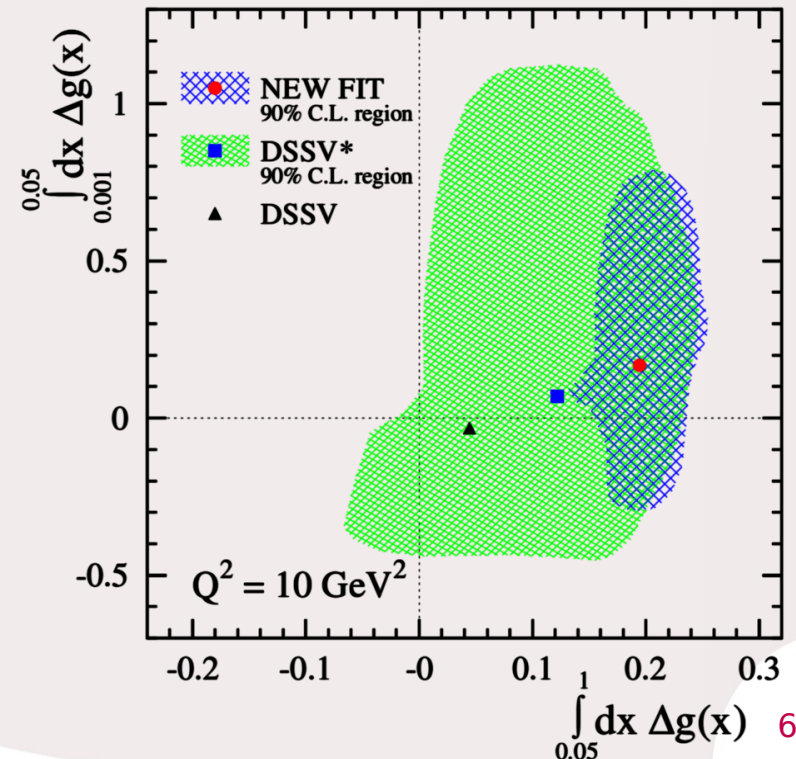
*E. Leader et C. Lorcé, Phys.Rept. 541 (2014) 163-248*

## La « crise du spin »

- Quarks : 30-35 %
- $\Delta g$  : ~30 %
- $Lq$  : Règle de somme de  $J_i \rightarrow$  GPD  $H$  et  $E$
- $Lg$  : Accessible avec un collisionneur electron proton ?

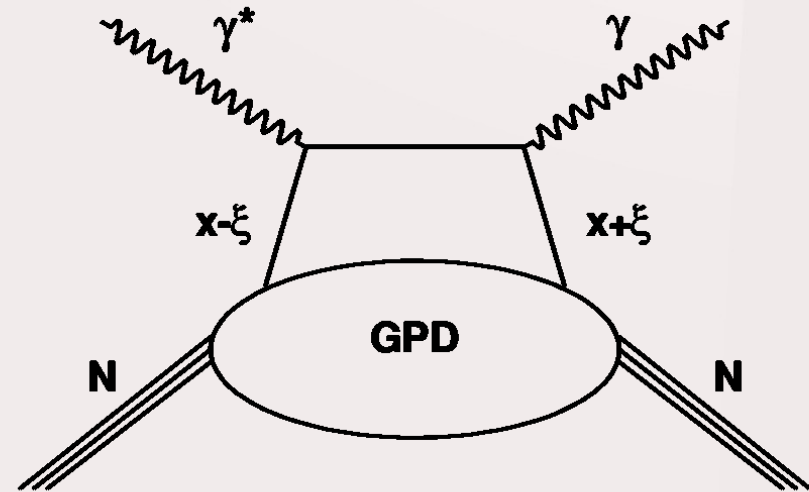
*D. de Florian et al. Phys.Rev.Lett. 101 (2008) 072001*

*D. de Florian et al. Phys.Rev.Lett. 113 (2014) 012001*



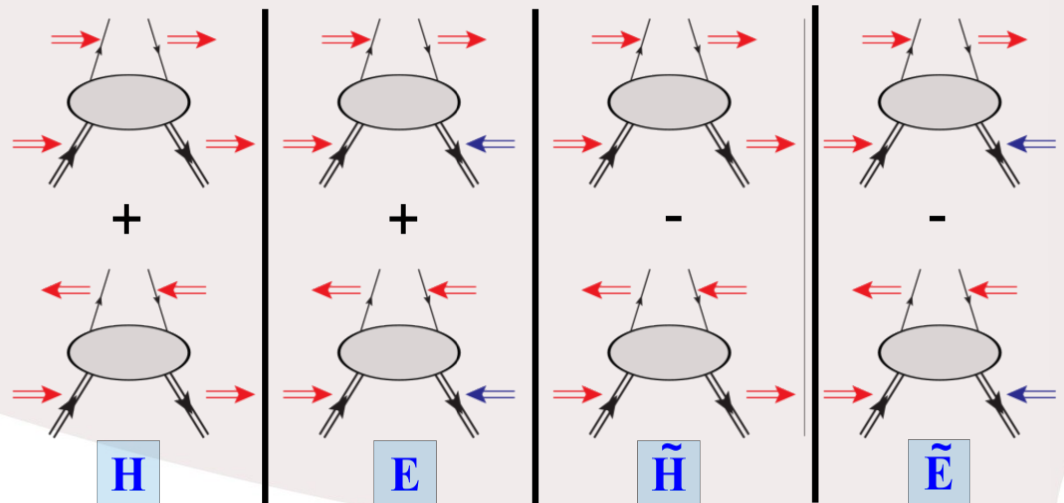
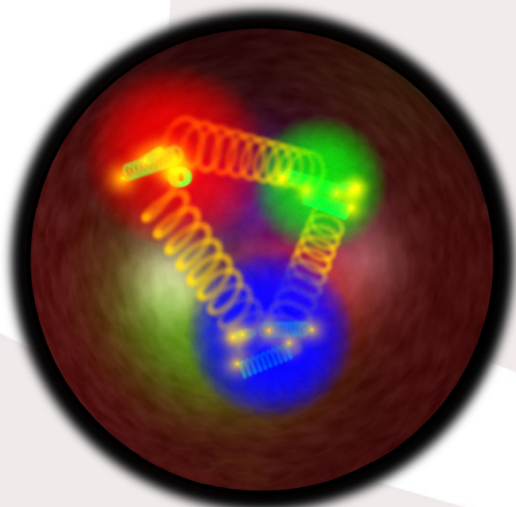
- **Généraliser les distributions de partons**
  - Un nouveau point de vue sur le nucléon
  - Accessible par différent processus exclusifs (DVCS, DVMP...)
  - Spin-1/2 → 4 GPDs → 8 Facteurs de forme Compton
- **Diffusion Compton profondément inélastique (DVCS)**
  - L'électroproduction exclusive d'un photon
  - Propriétés de factorisation donne accès aux GPD
  - $x$  n'est pas une observable du DVCS → Compton Form Factors (CFF) → mesure d'autres canaux

*X. Ji Phys.Rev.Lett. 78 (1997) 610*  
*A.V. Radyushkin Phys.Lett. B380 (1996) 417-425*  
*M. Guidal et al. Rept.Prog.Phys. 76 (2013) 066202*



$$F_{Re}(\xi, t) = \mathcal{P} \int_{-1}^1 dx \left[ \frac{1}{x - \xi} \mp \frac{1}{x + \xi} \right] F(x, \xi, t),$$

$$F_{Im}(\xi, t) = F(\xi, \xi, t) \mp F(-\xi, \xi, t).$$



- **La production exclusive de photons provient largement de l'électron**

- La contribution principale vient du processus Bethe-Heitler qui dépend fortement de  $\phi$ 
  - Entraîne une importante interférence

$$d\sigma \propto |\tau_{\text{BH}}|^2 + \underbrace{(\tau_{\text{DVCS}}^* \tau_{\text{BH}} + \tau_{\text{BH}}^* \tau_{\text{DVCS}})}_{\mathcal{I}} + |\tau_{\text{DVCS}}|^2$$

- **L'interprétation 3D des GPD**

- Une transformation de Fourier à  $\xi=0$  donne une densité de probabilité en fonction de  $x$  et du paramètre d'impact

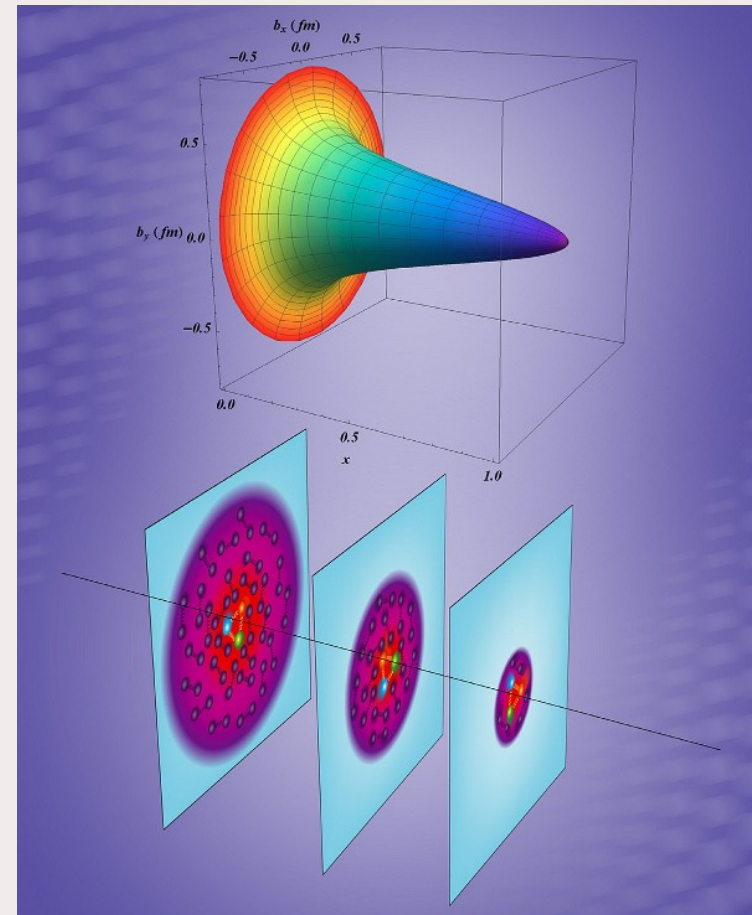
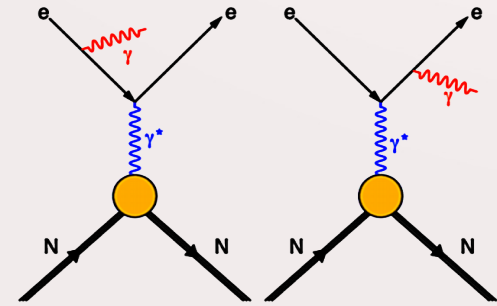
*M. Burkardt Int.J.Mod.Phys. A18 (2003) 173-208*

- Les GPD polarisées donnent accès aux corrélations entre la position et le spin

- **Ajustement aux données**

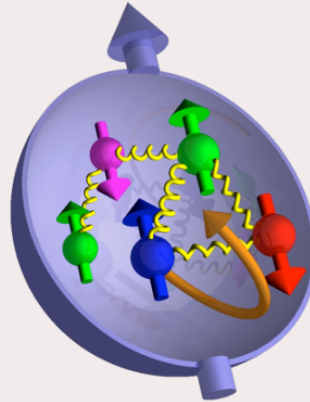
- Utilisation ensemble des sections efficaces et des asymétries de spin
- L'analyse globale des données mondiales sur le proton donnent une cartographie

*M. Guidal et al. Rept.Prog.Phys. 76 (2013) 066202*





N/q	U	L	T
U	$f_1$		$h_1^\perp$
L		$g_1$	$h_{1L}^\perp$
T	$f_{1T}^\perp$	$g_{1T}^\perp$	$h_1$ $h_{1T}^\perp$



- Distributions de partons tenant compte de l'impulsion transverse**

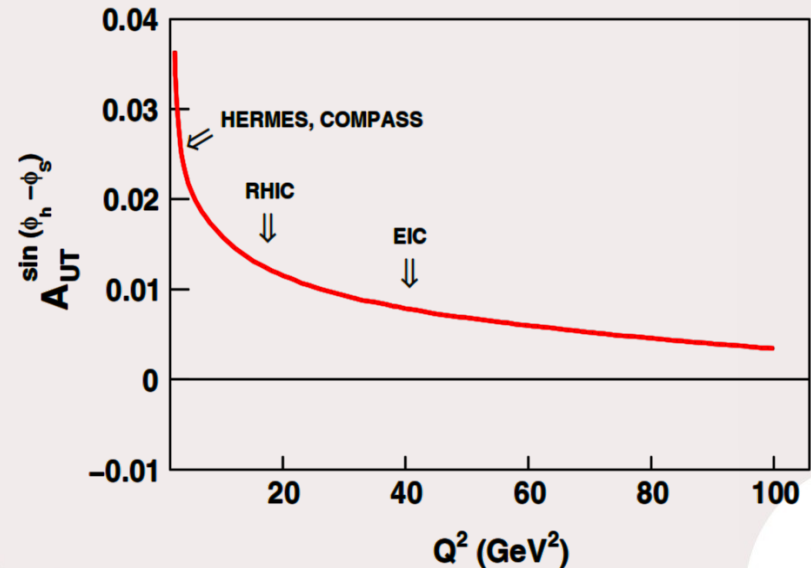
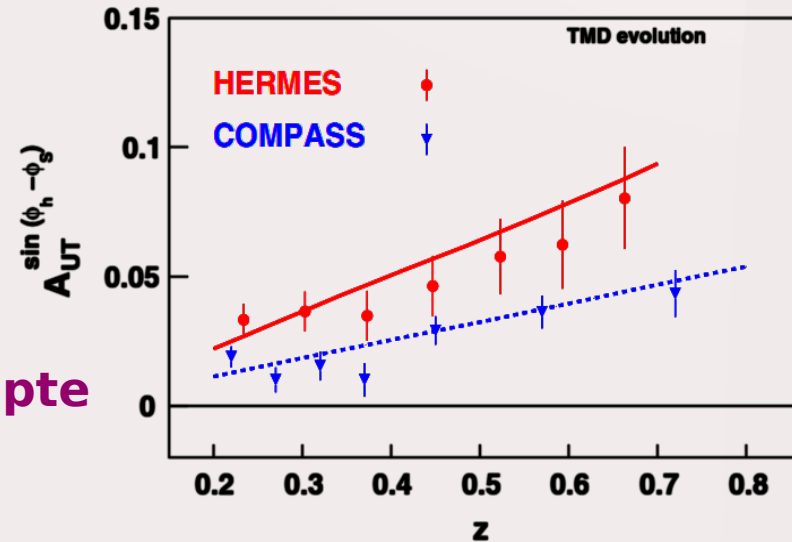
- Dispose de 8 fonctions indépendantes
- Progrès théoriques lents (1980-...)

- Mesures expérimentales**

- HERMES, COMPASS, JLab
- Assymetries significatives
  - En particulier l'effet Sivers = corrélation spin-impulsion

- Maintenant un sujet mûr:**

- Factorisation prouvée
- Évolution comprise



## • Unification

- Liens entre GPDs, PDFs bien établis
- Concept des distributions de Wigner

*C. Lorcé & B. Pasquini Phys.Rev. D84 (2011) 014015*

## • Le spin du proton

- Règle de somme de Ji

$$J_{q,g} = \frac{1}{2} \int_{-1}^{+1} dx x [H_{q,g}(x, \xi, t=0) + E_{q,g}(x, \xi, t=0)]$$

- Mesure des GPDs du neutron permettront de comprendre la GPD  $E$  et la séparation  $u/d$

Une expérience est programmée à JLab

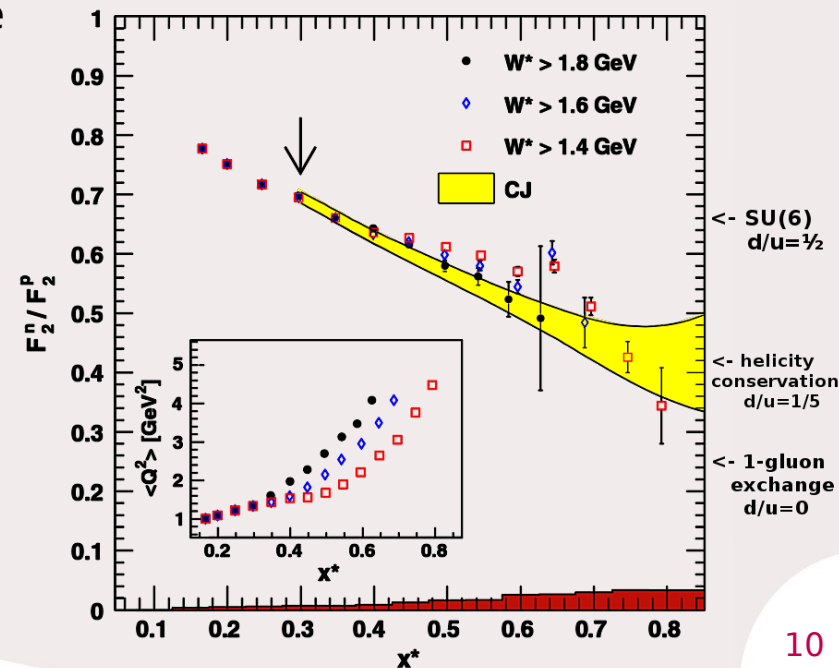
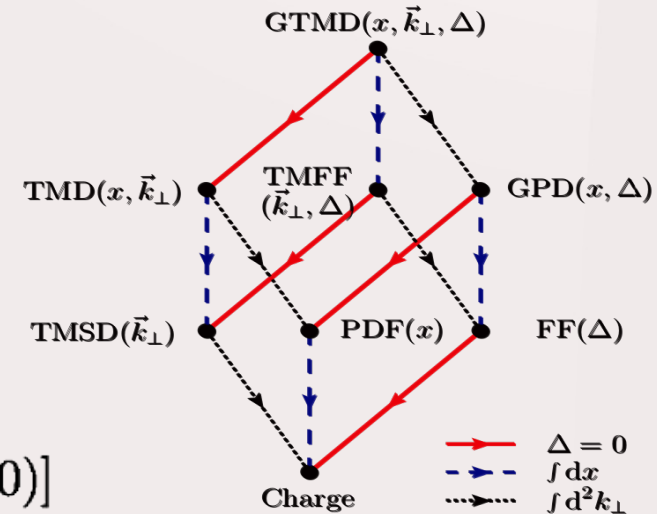
- D'autres processus sont aussi à l'étude
  - Avec extension aux gluons possible

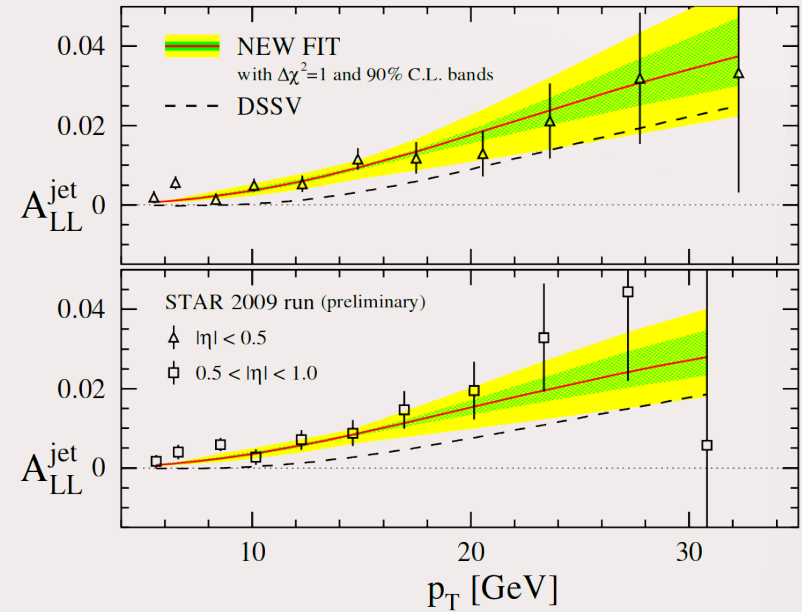
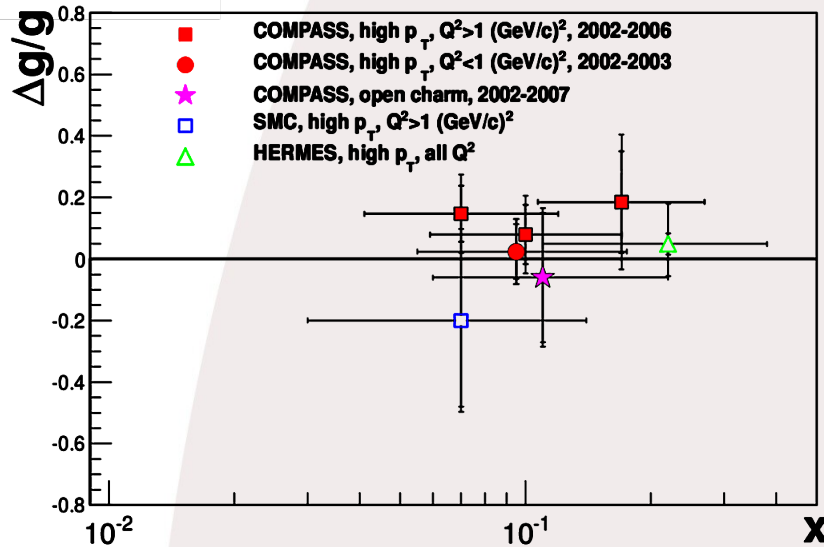
## • $d/u$ grand $x$

- Utilisation du deutéron
  - Entraîne de nombreuses corrections nucléaires
- Mesure de nucléon spectateur

*N. Baillie et al. PRL 108 (2012) 199902*

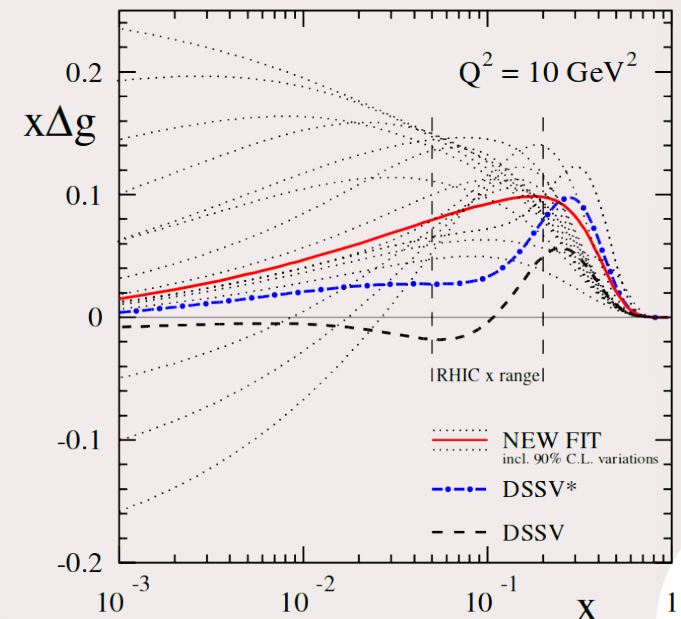
Une nouvelle expérience est programmée à JLab



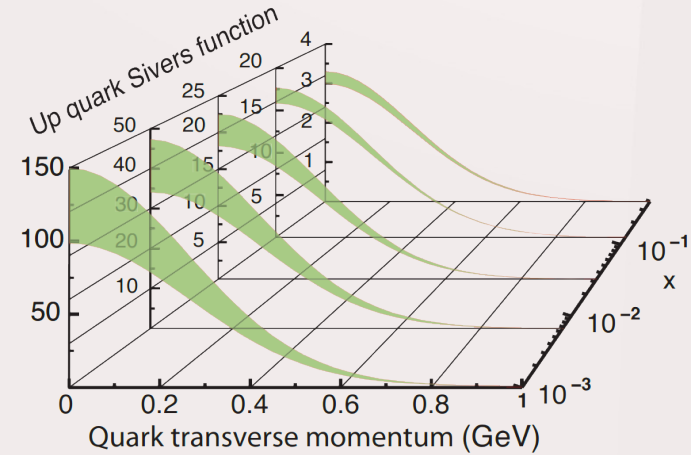
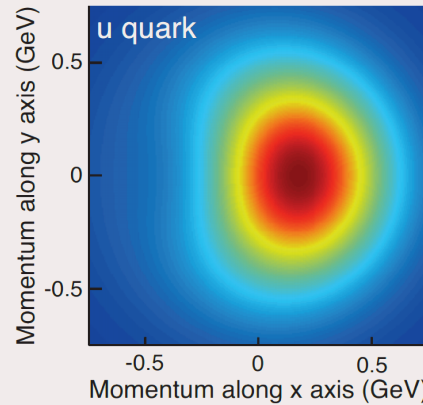
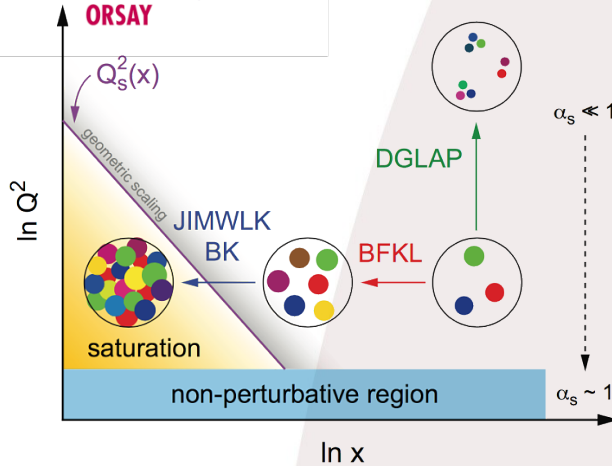


- **Une connaissance limitée**
  - Impact en physique de haute énergie (LHC)
    - Taux de production des W, Z, t, H...
  - Grande inconnue à très petit x. Où commence la saturation ?
- **Polarisation**
  - Mesures en lepto-production
    - COMPASS en particulier
  - Progrès récents grâce aux collisions pp polarisées
    - RHIC @ BNL

*D. de Florian et al. Phys.Rev.Lett. 113 (2014) no.1, 012001*



# Étudier la structure en Gluons



- **La prochaine grande étape**

- Construction d'un collisionneur électron-ion
- Forte luminosité et polarisation
- Mesures précises des GPDs et TMDs dans un domaine théoriquement mieux maîtrisé

- **Étude des très petits x**

- Compréhension du mécanisme de saturation

- **Décomposition complète du spin du proton**

- Mesure des GPD à petit x

- **Distributions de partons généralisées des gluons**

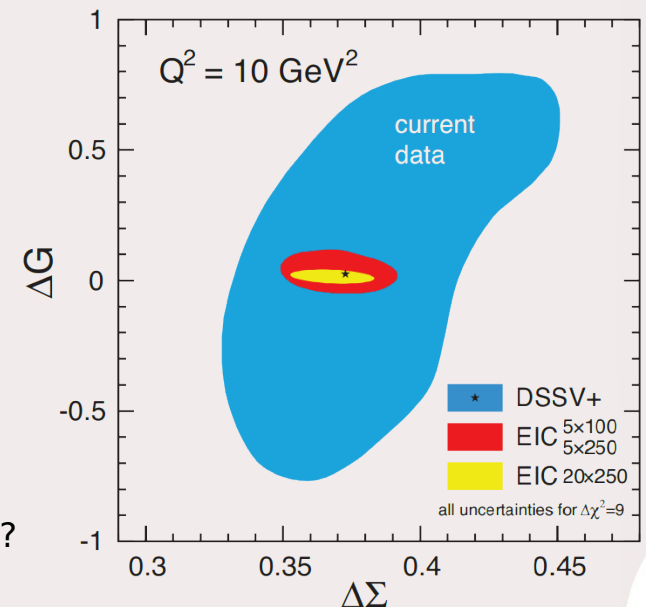
- Utilisation de la production cohérente de J/ψ
- Les gluons s'étendent-ils à un plus grand rayon ?

- **Implications pour les noyaux**

- Superposition des fonctions d'onde des nucléons dans le noyau ?
- Saturation à plus grande échelle

*D. Boer et al. INT report (2011)*

*A. Accardi et al. EIC White Paper (2012 & 2014)*



- **Un siècle de progrès depuis la découverte du proton**

- Nous sommes maintenant avancés dans l'étude de la structure du nucléon
  - Images 1D du nucléon en position transverse et en impulsion
  - Compréhension globale de l'origine de la masse et du spin
  - Première ébauche vers une tomographie 3D

- **Des grandes questions restent ouvertes :**

- Quel est le rayon du proton ?
  - Différence  $\mu\text{H}$  avec H
  - Nouvelles expériences ?
- Paramétriser la structure du proton
  - Comment décomposer le spin du proton ?
  - Peut on unifier toutes les fonctions de structure ?
- Mesurer la structure du proton
  - Séparer les saveurs de quarks
  - Utilisation de noyaux légers
  - Utilisation de nouvelles réactions
  - Comportement des gluons
- Quel comportement aux limites
  - Grands  $x$  → Quelle symétrie ?
  - JLab 12 GeV
  - Petits  $x$  → Saturation ? À quelle échelle ?
  - Collisionneur Electron-Ion

