

# Etude de la structure en spin du nucléon à Jefferson Lab

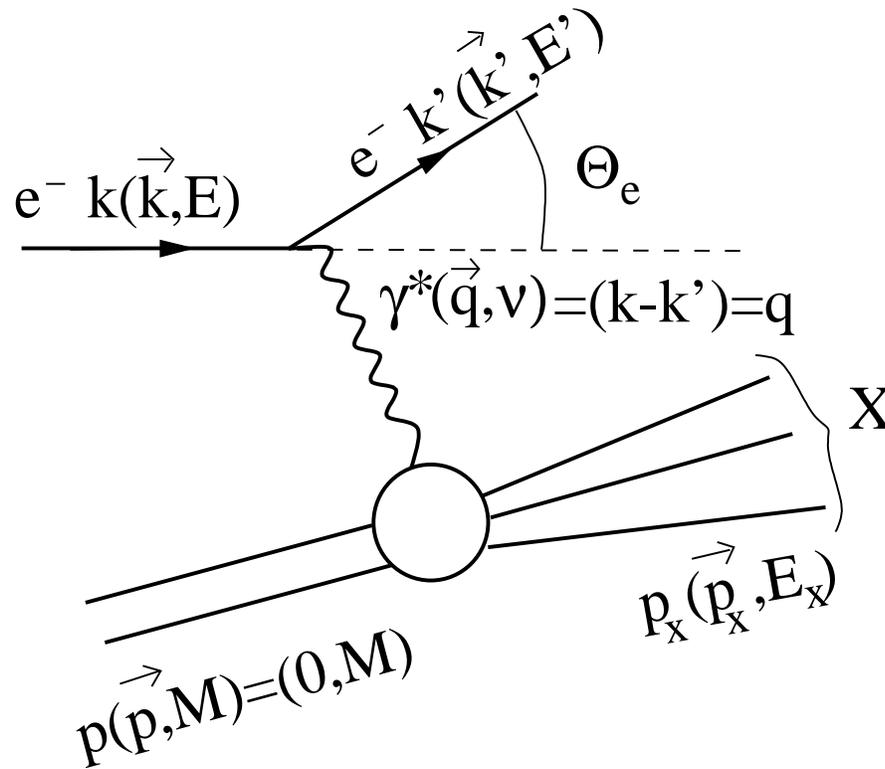
Alexandre Deur  
Université de Virginie

## Plan de l'exposé:

- Vue imagée de la structure du nucléon
- La règle de somme de Gerasimov–Drell–Hearn
- La règle de somme de GDH généralisée
- Résultats des Hall A & B
- Perspectives d'études sur GDH
- Autres études sur la structure en spin du nucléon / expérience  $A_1^n$
- Résumé/conclusion

# Cinématique

Diffusion inclusive d'électrons:



$\nu$ : Energie du photon virtuel

$Q^2 = -q^2$  : quadrimoment de transfert

$W^2 = M^2 + 2p \cdot q - Q^2$  : (masse invariante)<sup>2</sup>

$x = Q^2 / (2p \cdot q)$  : variable d'échelle (Moment relatif du quark dans le modèle des partons)

$\sigma = \sigma_{\text{Mott}} (\alpha F_1 + \beta F_2 + \gamma g_1 + \overline{\omega} g_2)$  : section efficace polarisée

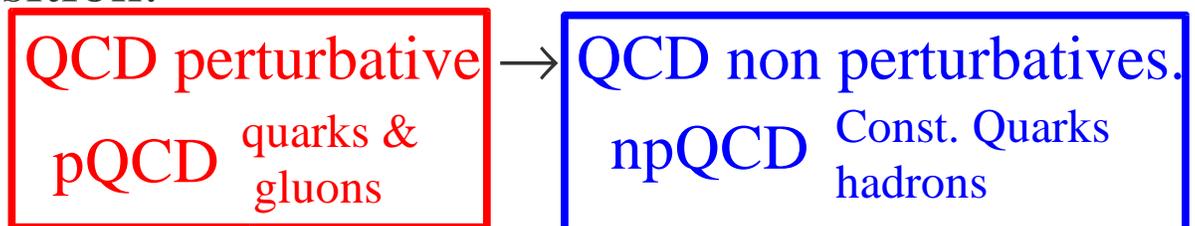
## Fin 70: Cibles et faisceaux polarisés.

- ■ Nouveaux tests de QCD perturbative.
- Structure en spin du nucléon.

SLAC, CERN, DESY

Un problème non résolu:

Transition:



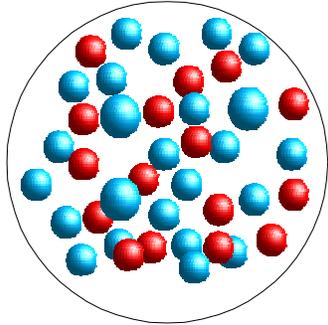
Jefferson Lab:

Fourchette en  $Q^2$  : petit à intermédiaire.

→ Etudes précises de pQCD → npQCD

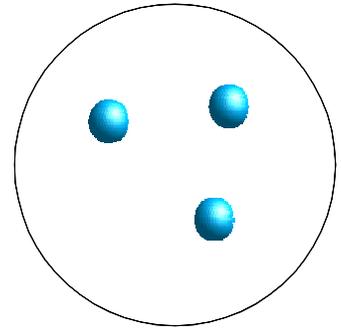
# Vue naïve de la structure du nucléon

$\infty$   
 $Q^2$



Quarks quasi-libres  
Liberté asymptotique

3 quarks de valence  
+ mer de Dirac + gluons..

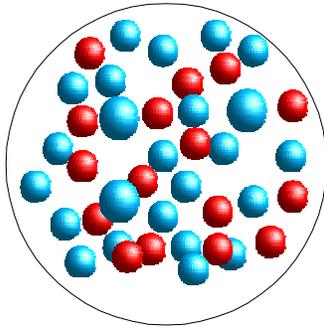


3 quarks de valence

1  
x

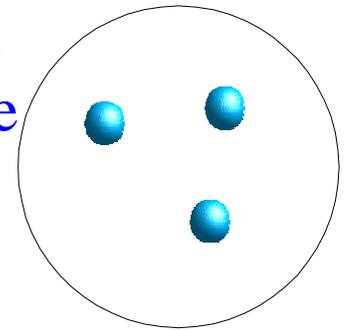
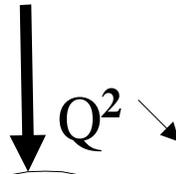
# Vue naïve de la structure du nucléon

$\infty$   
 $Q^2$

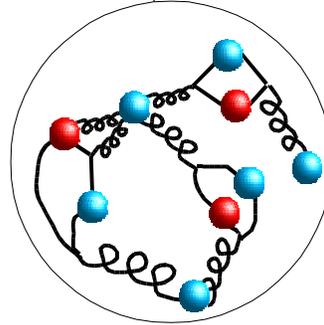


3 quarks de valence  
+ mer + gluons

Quarks quasi-libres  
Liberté asymptotique



3 quarks de valence

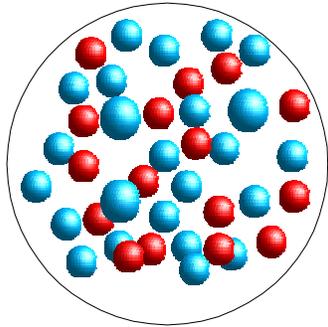


Twists d'ordres supérieurs  
correlations q-g, q-q

1  
x

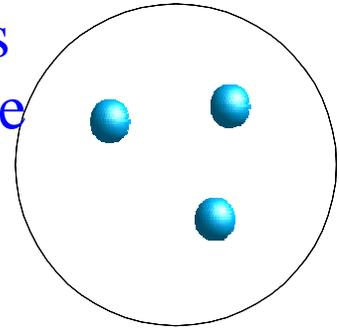
# Vue naïve de la structure du nucléon

$\infty$   
 $Q^2$

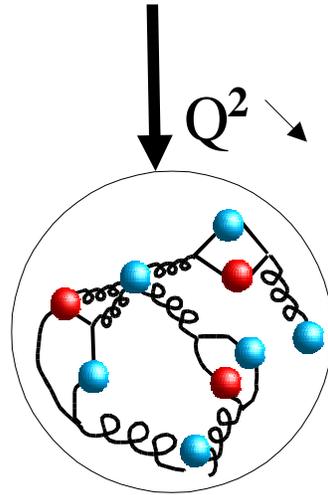


3 quarks de valence  
+ mer + gluons

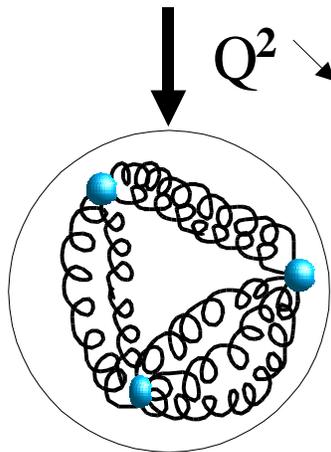
Quarks quasi-libres  
Liberté asymptotique



3 quarks de valence



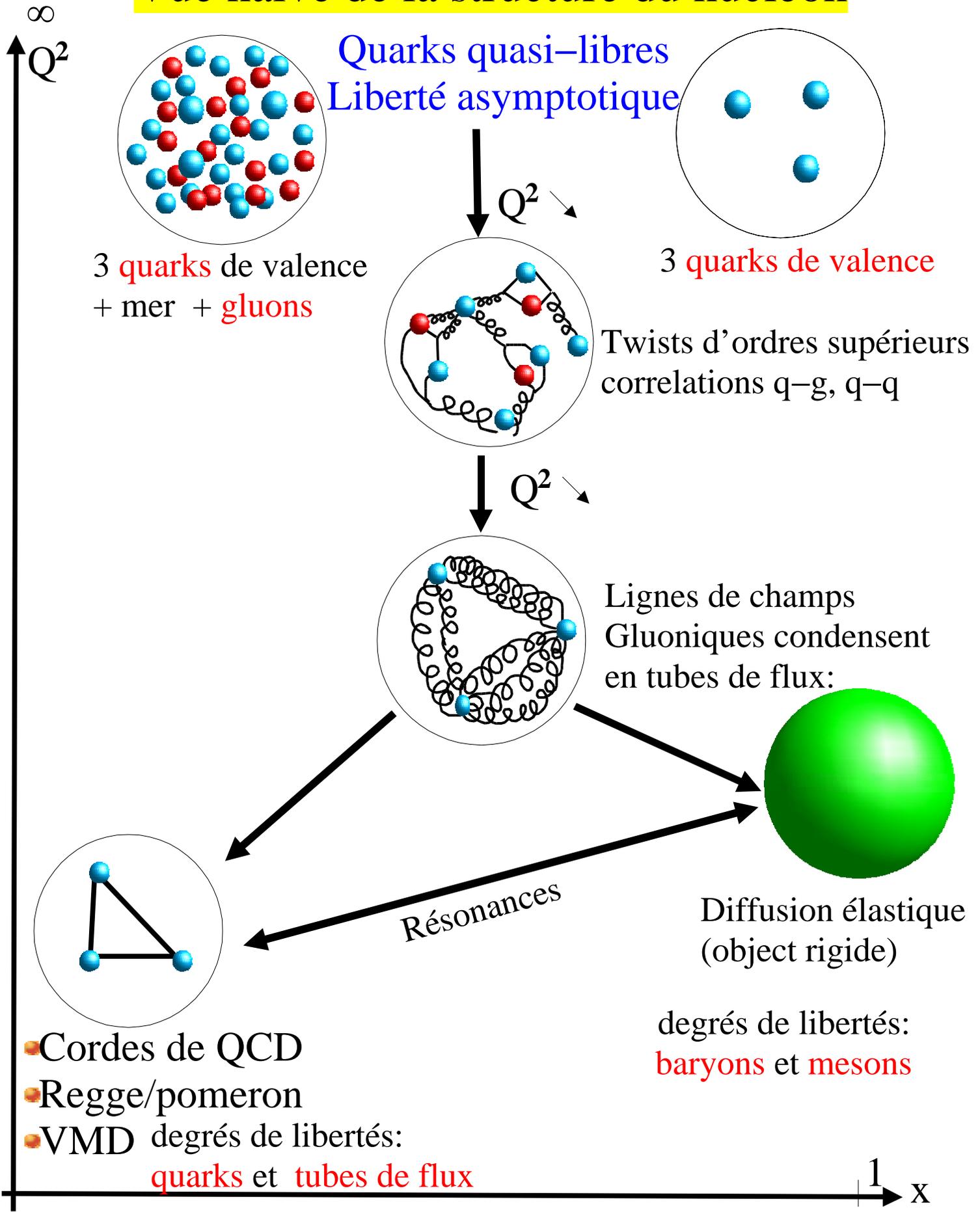
Twists d'ordres supérieurs  
correlations q-g, q-q



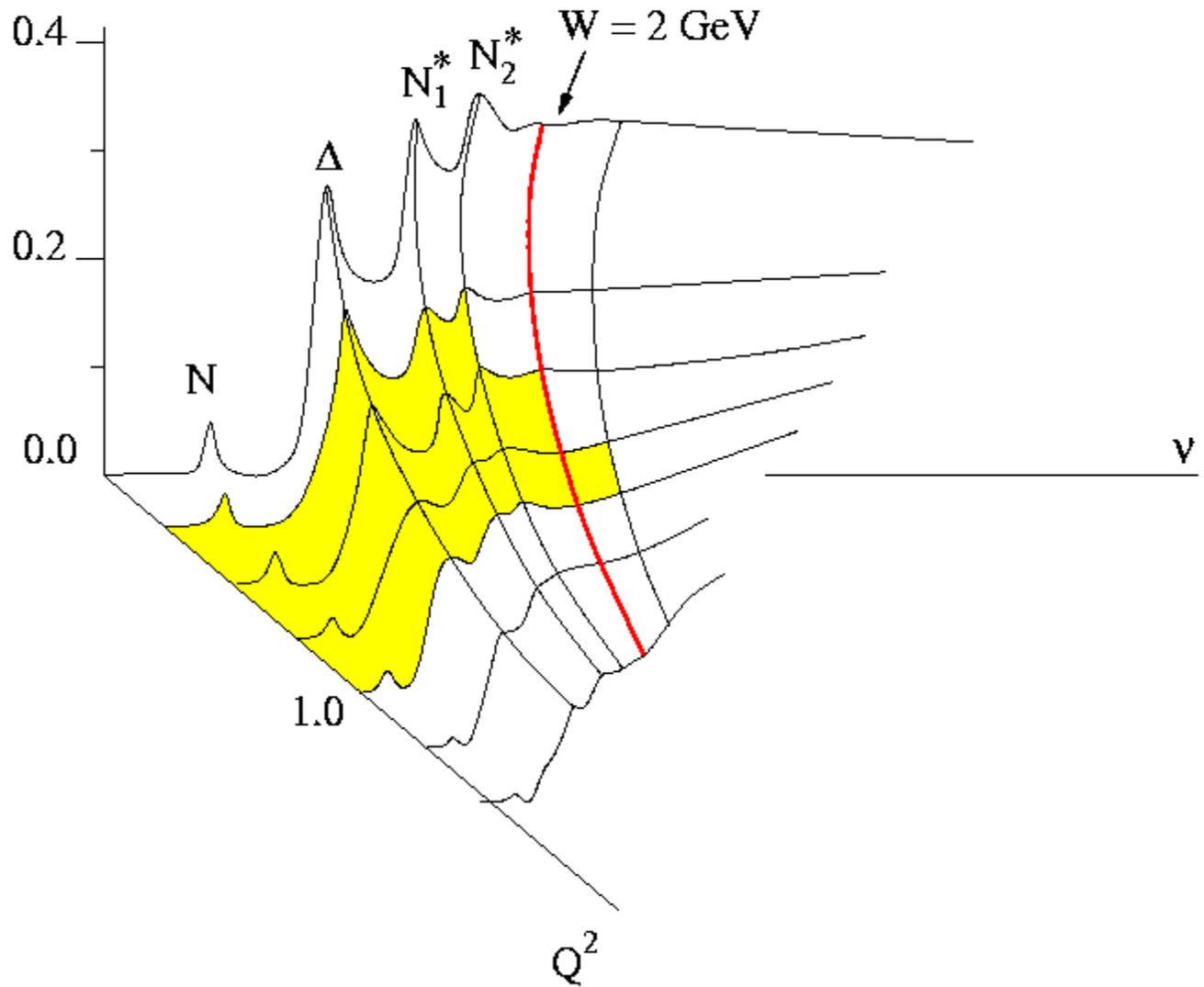
Lignes de champs  
Gluoniques condensent  
en tubes de flux:

1  
x

# Vue naïve de la structure du nucléon



# Réponse du nucléon à la sonde électromagnétique



Expérience E94-010: mesure de l'évolution en  $Q^2$  de la règle de somme généralisée de GDH

Etude de la transition **parton**  $\rightarrow$  **hadron**

## Règle de somme de GDH: $Q^2=0$

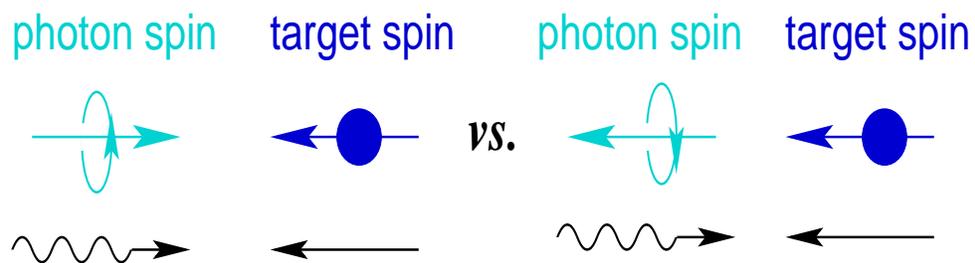
- Prendre une relation de dispersion de Kramer–Kroenig (**causalité**)
- Appliquer l'unitarité (**théorème optique**)
- Appliquer l'invariance de jauge (**théorème de basse énergie**)

On obtient GDH:

$$\int_{\nu_0}^{\infty} (\sigma_{1/2} - \sigma_{3/2}) \frac{d\nu}{\nu} = -2\pi\alpha \frac{\kappa^2}{M^2}$$

$\kappa$ : moment magnétique anomal

$\sigma_{1/2}$  &  $\sigma_{3/2}$ : sections efficaces de photoproduction



⇒ **Repose sur de solides hypothèses (les mêmes que la règle de somme de Bjorken)**

Seule hypothèse raisonnablement questionnable:

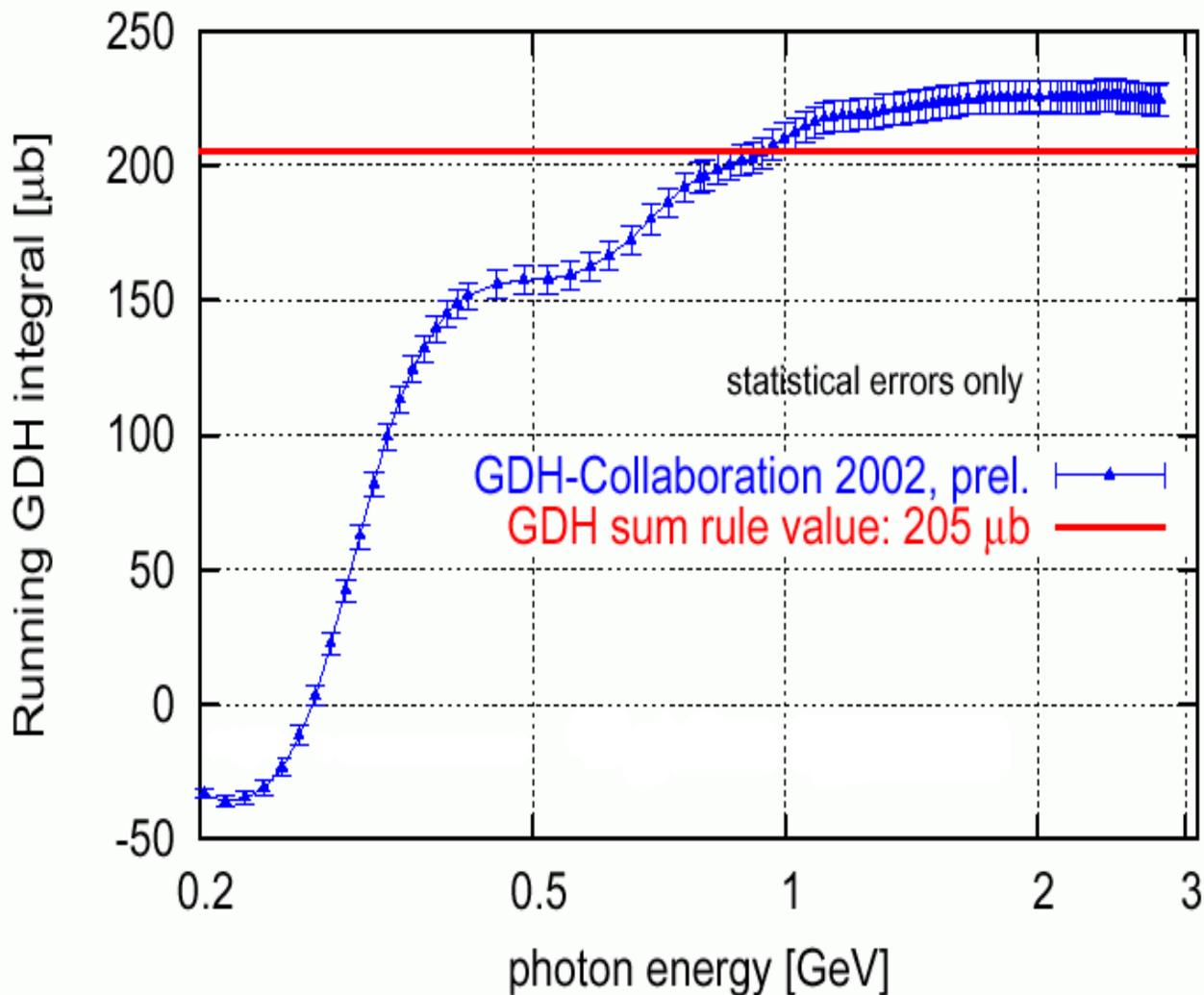
Validité de "**l'hypothèse de non-soustraction**"  
(Intégration de Cauchy)

# GDH: Quantité fondamentale, jamais vérifiée

- Convergence
- Hypothèse de non-soustraction
- Estimations basées sur la photoproduction de pions violent GDH.

Vérification sur le proton à:

MAMI:  $0.2 < \nu < 0.8$  GeV    Ahrens *et al*  
prl 87, 22003 (2001)  
ELSA :  $0.7 < \nu < 3$  GeV



→ Test de la convergence (**SLAC**, JLAB)  
Neutron: Pas de données disponibles.

# Règle de somme de GDH généralisée

"Généralisée": photoproduction  $\rightarrow$  électroproduction

$$Q^2=0$$

$$Q^2>0$$

Amplitudes de diffusion  
Compton vers l'avant

Ji & Osborne:

$$\int_{\nu_0}^{\infty} G_{1(2)} \frac{d\nu'}{\nu'} \propto S_{1(2)}$$

Fonctions de structure  
en spin du nucléon

- Généralise la **règle** de somme
- Connecte GDH à la règle de somme de Bjorken

$S_{1(2)}$ : Calculable sur tout le spectre d'excitation du nucléon  
( $\chi$ pT, QCD sur réseau, développement en termes de twist supérieurs).

Expériences: Hall A JLAB: neutron ( $^3\text{He}$ )  
Hall B JLAB: proton, deuteron  
HERMES: neutron ( $^3\text{He}$ ), proton

# Experience E94-010

Z.-E. Meziani, G. Cates,  
J.-P. Chen

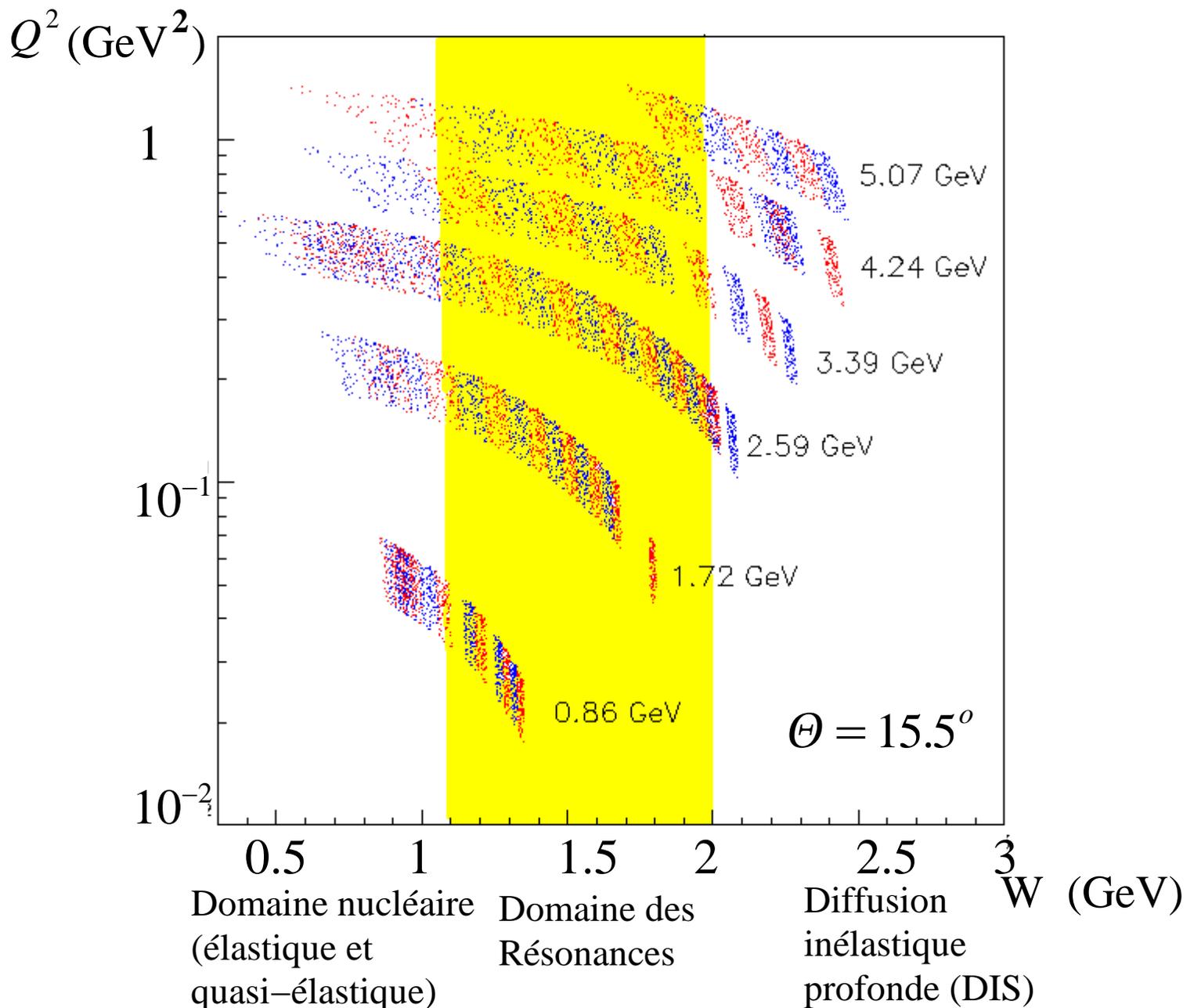
Diffusion inclusive  ${}^3\text{He}(\vec{e} \rightarrow e')X$

mesure:  $\sigma^{\uparrow\uparrow}, \sigma^{\uparrow\downarrow}, \sigma^{\Rightarrow\uparrow}, \sigma^{\Rightarrow\downarrow}$

$\uparrow\uparrow$  : Spin de la cible

$\uparrow$  : spin de l'électron

Combinaisons linéaires: Intégrant de GDH généralisée

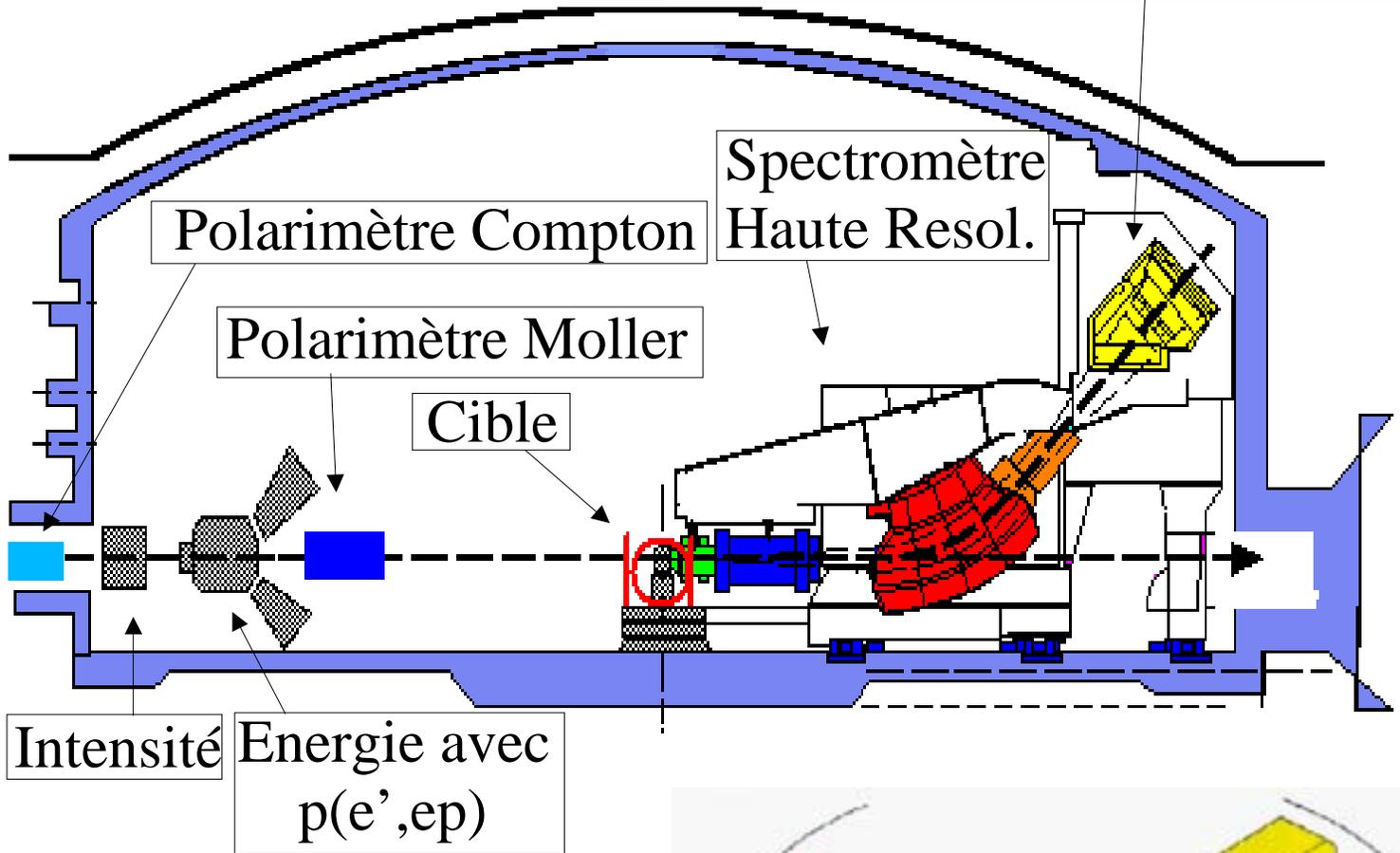


Equipement standard du Hall A + **cible d'  ${}^3\text{He}$  polarisée**

# Jefferson Lab Hall A.

Mesure énergie avec position faisceau +  $\int B dl$

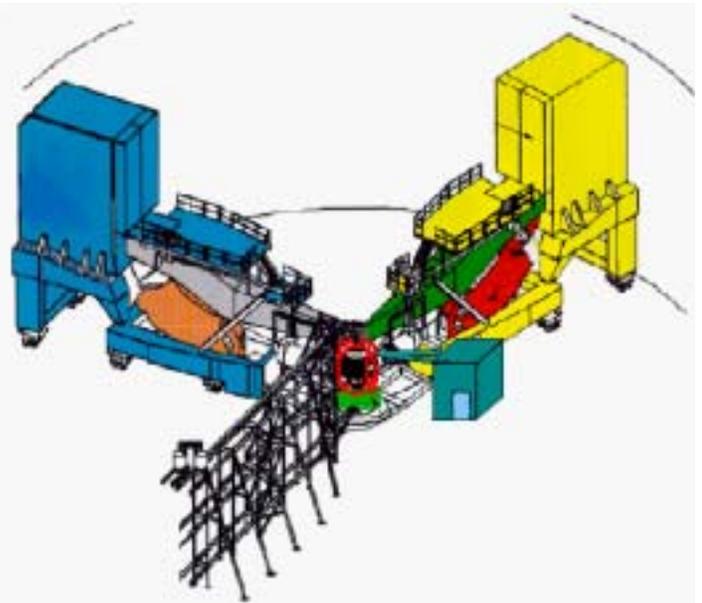
Détecteurs: chambres à fils, scintillateurs, preshower, shower, Cherenkov



## Caractéristiques faisceau:

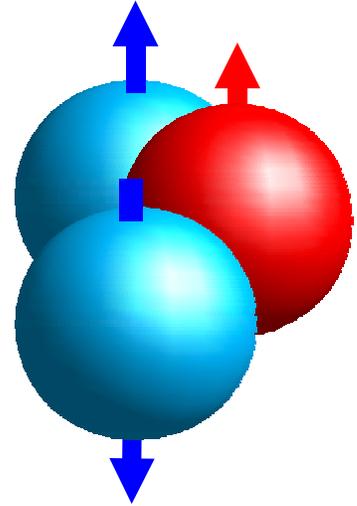
- 1–15  $\mu A$
- 0.8–5 GeV
- 70–80% pol.

Spectro: •  $\Delta\Omega = 6$  msr  
•  $\Delta P/P = 10^{-4}$



# La cible d' $^3\text{He}$ polarisée

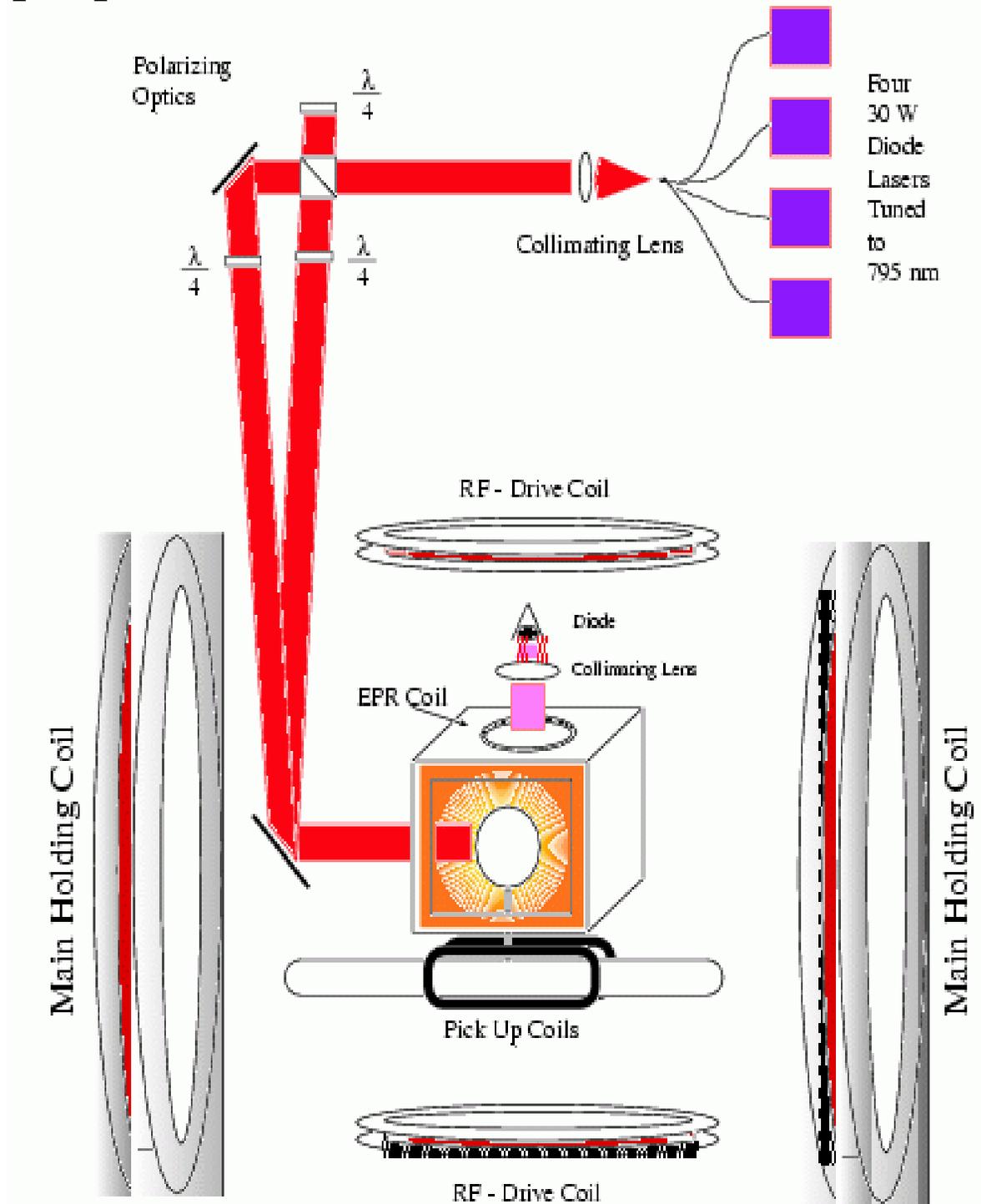
$^3\text{He}$  au 1<sup>er</sup> ordre:  $\vec{n}$  dilué par 2 p.



- Cible gazeuse
  - Polarisation=35–40% (en conditions de run)
  - 12 atmosphères
  - Longueur: 25 à 40 cm
- Luminosité  $10^{36} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  (pour  $15 \mu\text{A}$ , 40 cm).

# Principe de fonctionnement

Principe de base: Pompage optique de Rb, puis échange de spin par collisions Rb-<sup>3</sup>He.



Collaboration: CalTech, Clermont-Ferrand, JLAB, Kentucky, MIT Princeton, Temple, U.Va, William & Mary.

# De l' $^3\text{He}$ au Neutron

degli Atti et al  
Phy Rev C48 968 (1993)  
Phys Let B404 223 (1997)

$^3\text{He}$ : Pas dans une pure onde S.  $\rightarrow$  le spin des protons contribue au spin du noyau.

Calculs Fadeev pour 3 corps:

$$g^{^3\text{He}} = 2P_p g^p + P_n g^n \quad \text{Avec: } P_p = -0.028$$
$$P_n = 0.86$$

Effets nucléaires supplémentaires (mouvement de Fermi et énergie de liaison) sont pris en compte par un modèle de convolution.

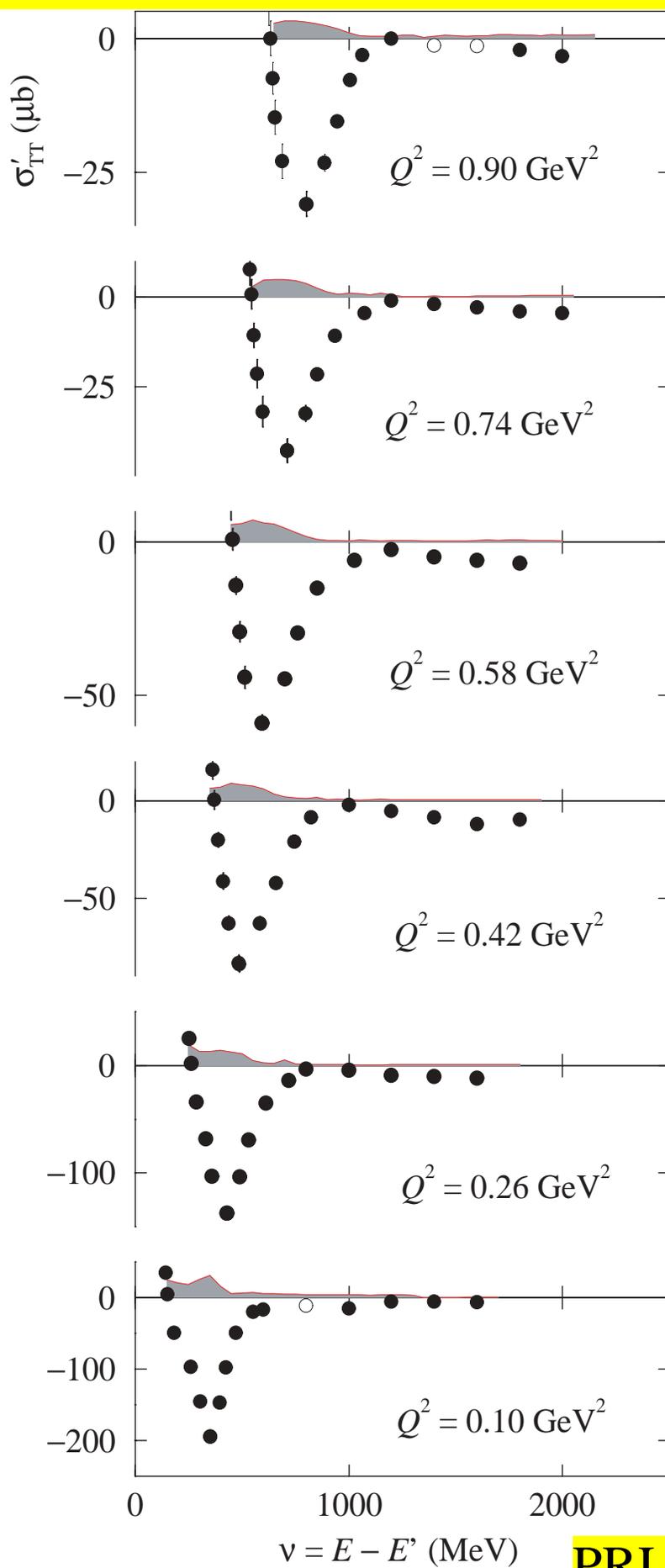
Cette méthode s'est montrée fiable pour:

- La diffusion inélastique profonde (DIS).
- Les régimes des résonances et DIS (quantités intégrées).

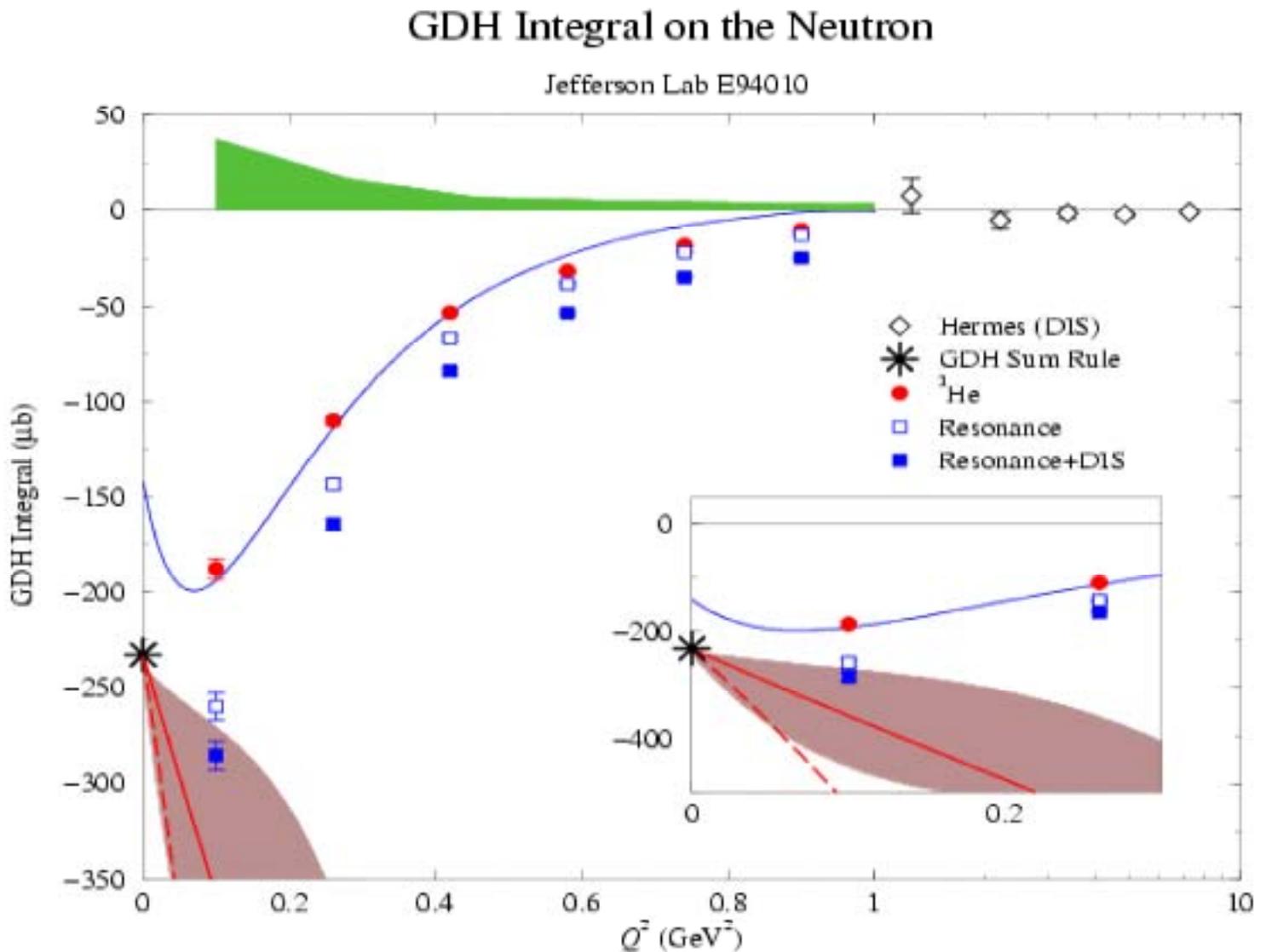
Nos expériences: Quantités intégrées ou DIS

$\rightarrow$  L'extraction du neutron fiable.

# L'intégrant de GDH\* : $(\sigma_{1/2} - \sigma_{3/2})/2$



# Evolution de l'intégrale de GDH\*( $Q^2$ ) (neutron)

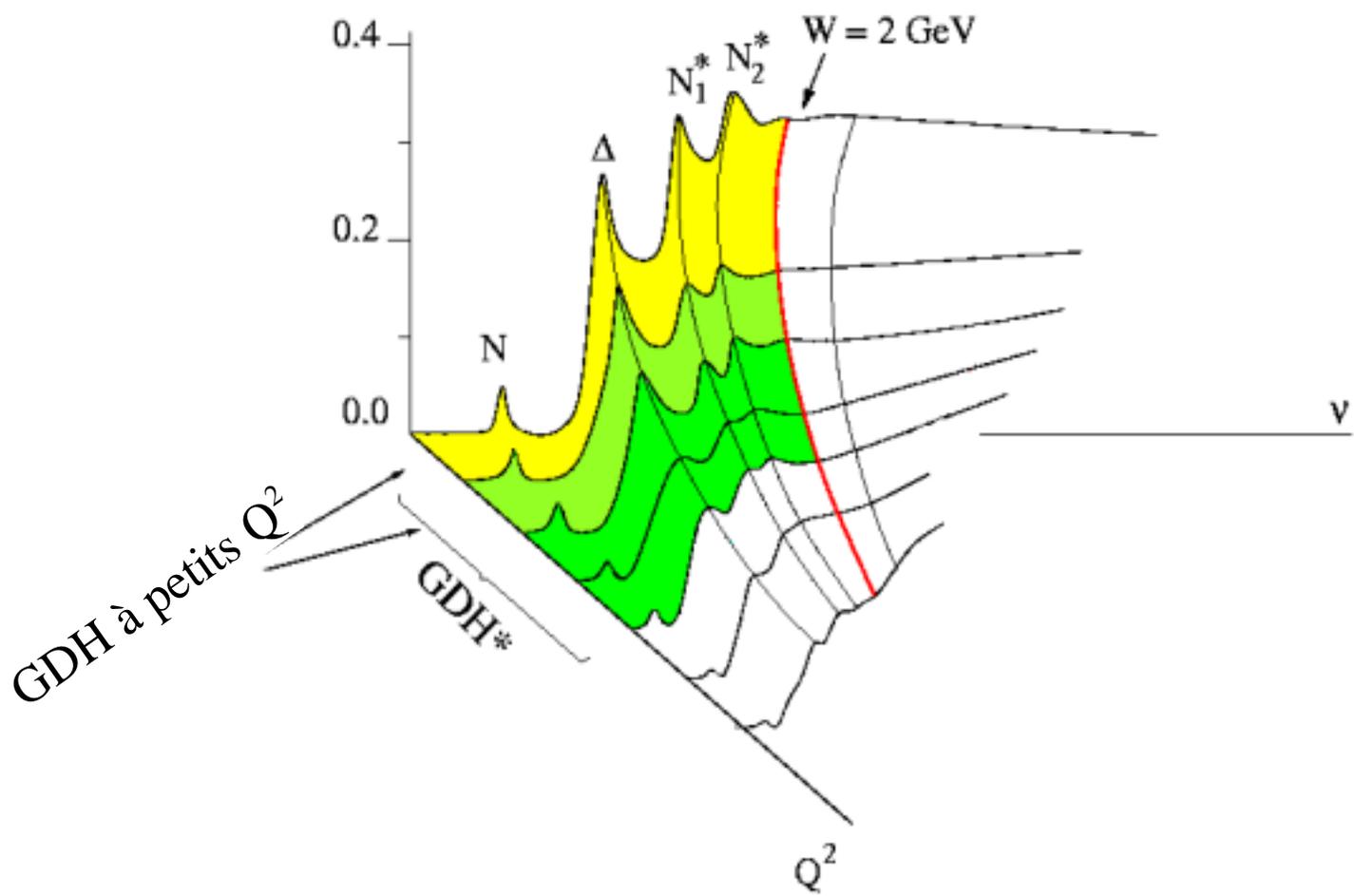


**PRL 89, 242301 (2002)**

Corrections nucléaires: degli Atti et al, *Phy Rev C* **48** 968 (1993)  
*Phys Let B* **404** 223 (1997)

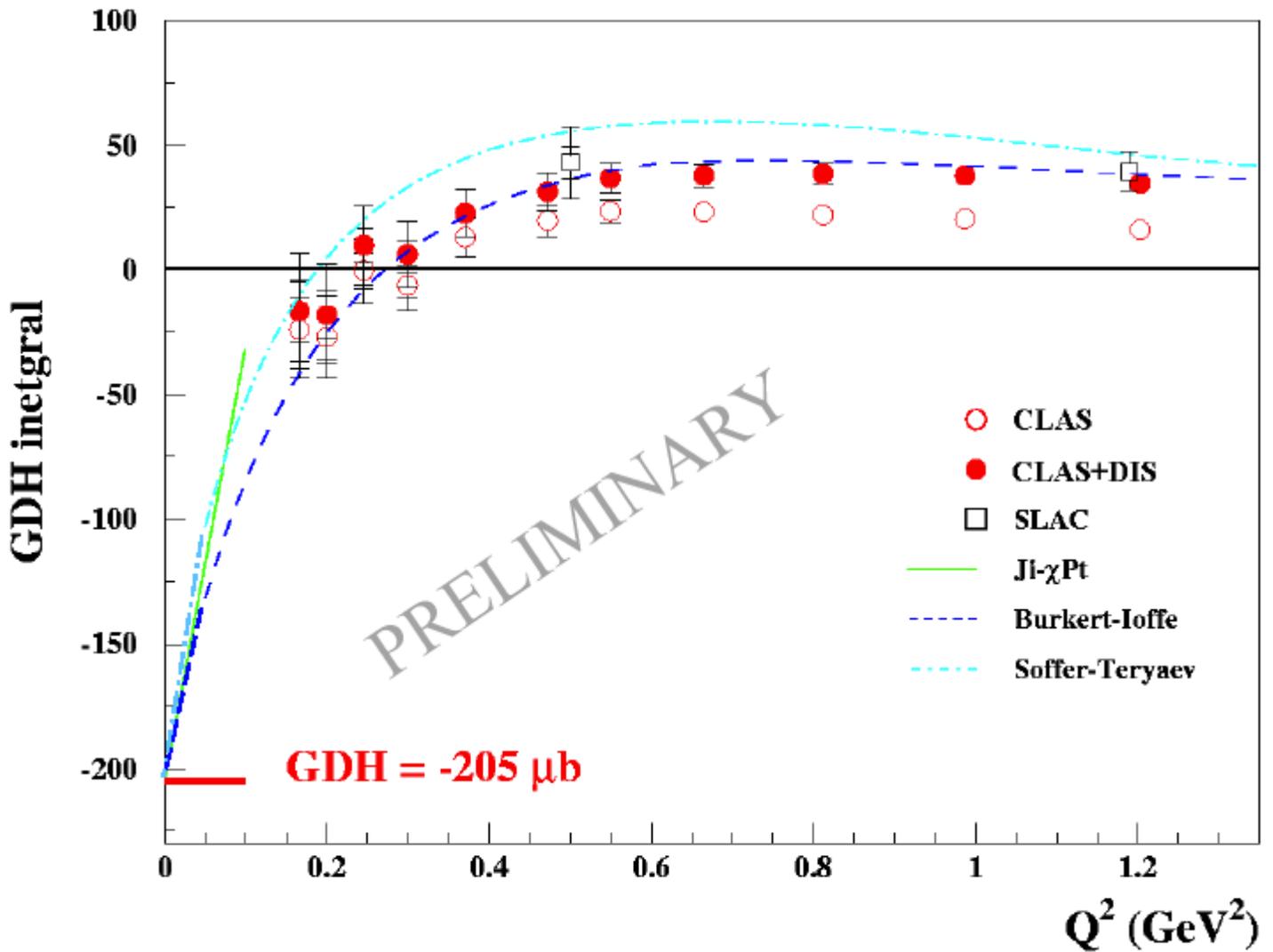
Contribution DIS: N. Bianchi & E. Thomas,  
*Phys. Lett B* **450** 439 (1999)





# Evolution de l'intégrale de GDH( $Q^2$ ) pour le Proton

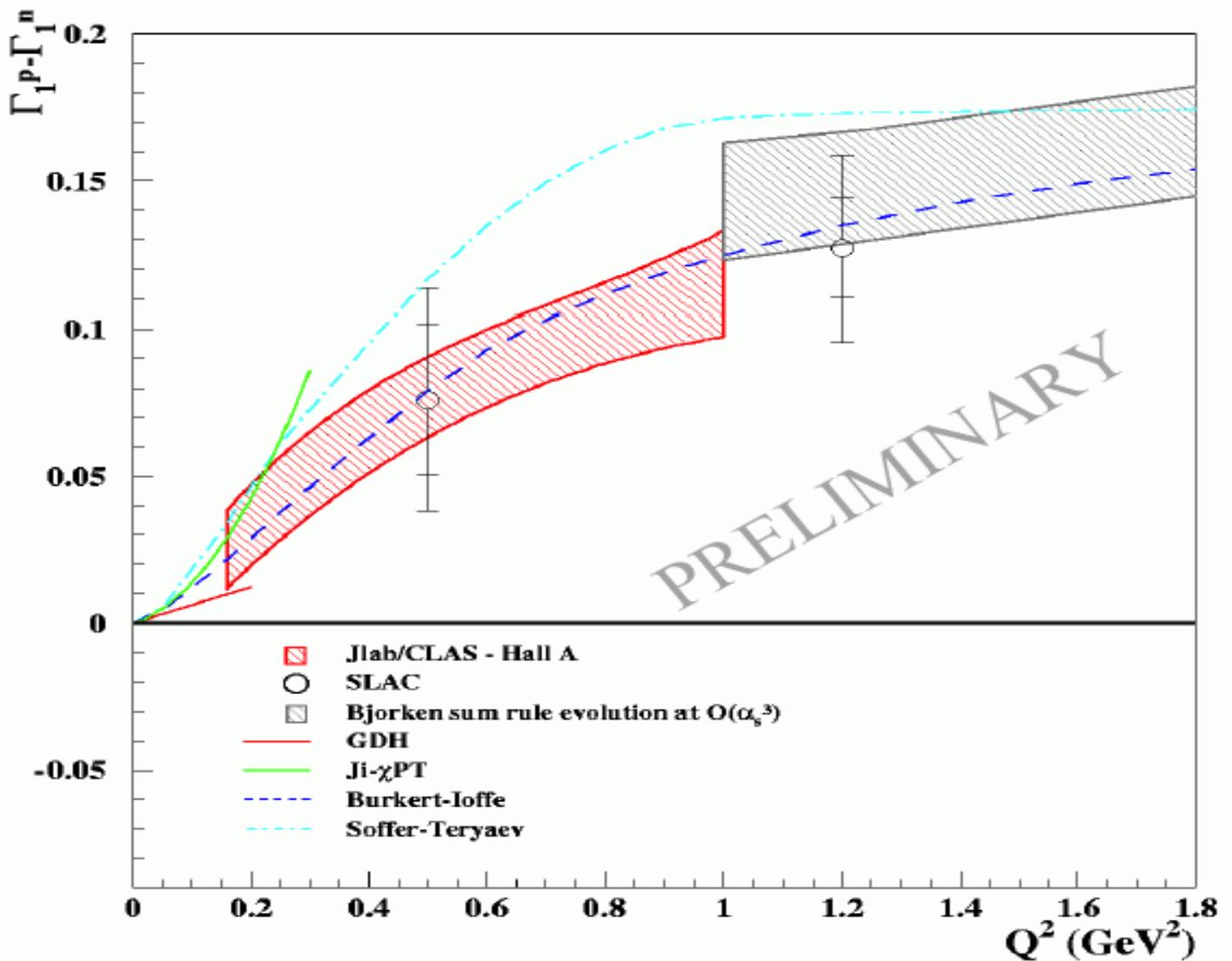
Données préliminaires du Hall B



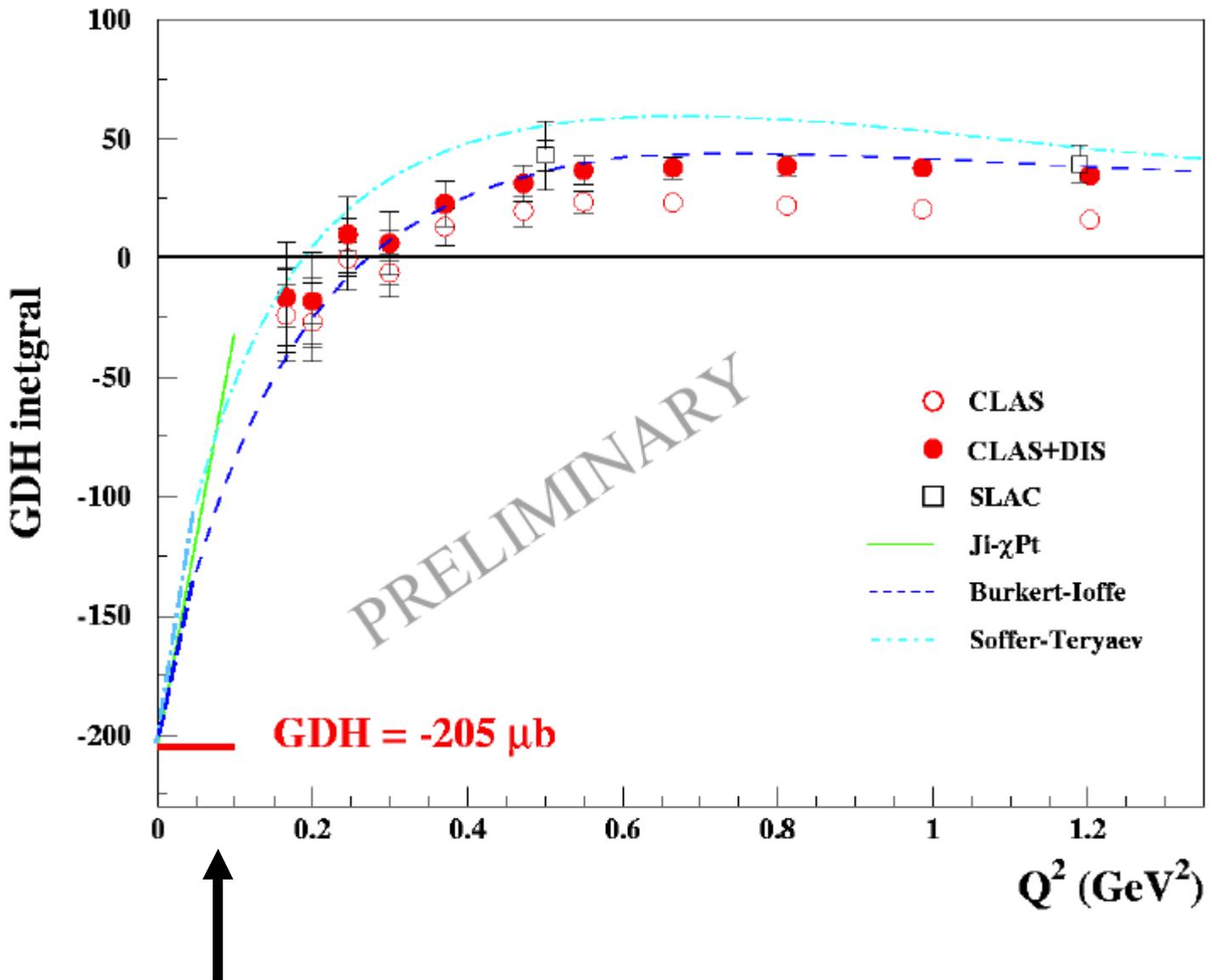
# Evolution à bas $Q^2$ de l'intégrale de Bjorken

Intégrale de Bjorken  $\propto \text{GDH}^{\text{proton}} - \text{GDH}^{\text{neutron}}$

Hall A (neutron) & Hall B (proton)

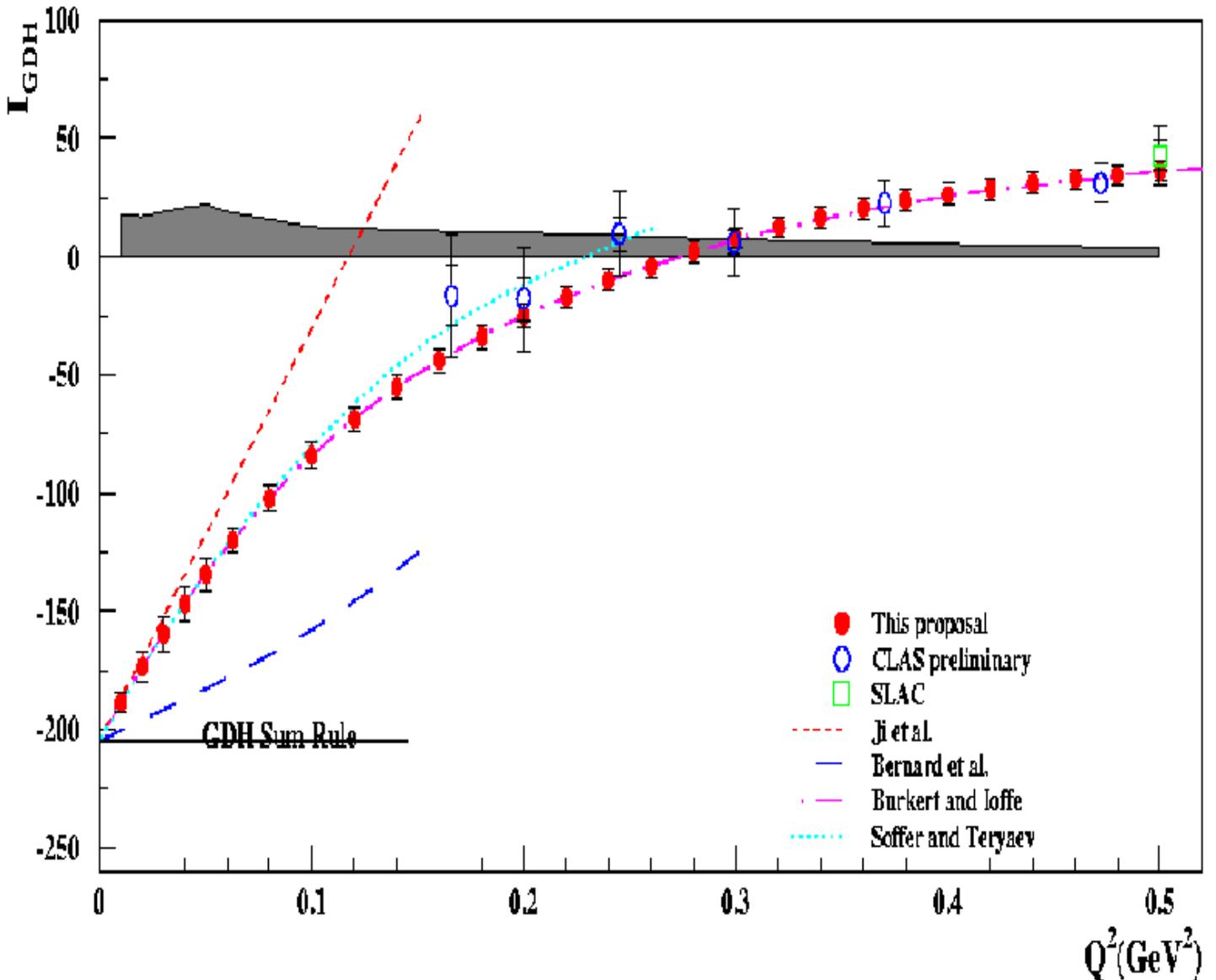


# Evolution de l'intégrale de GDH( $Q^2$ ) pour le Proton



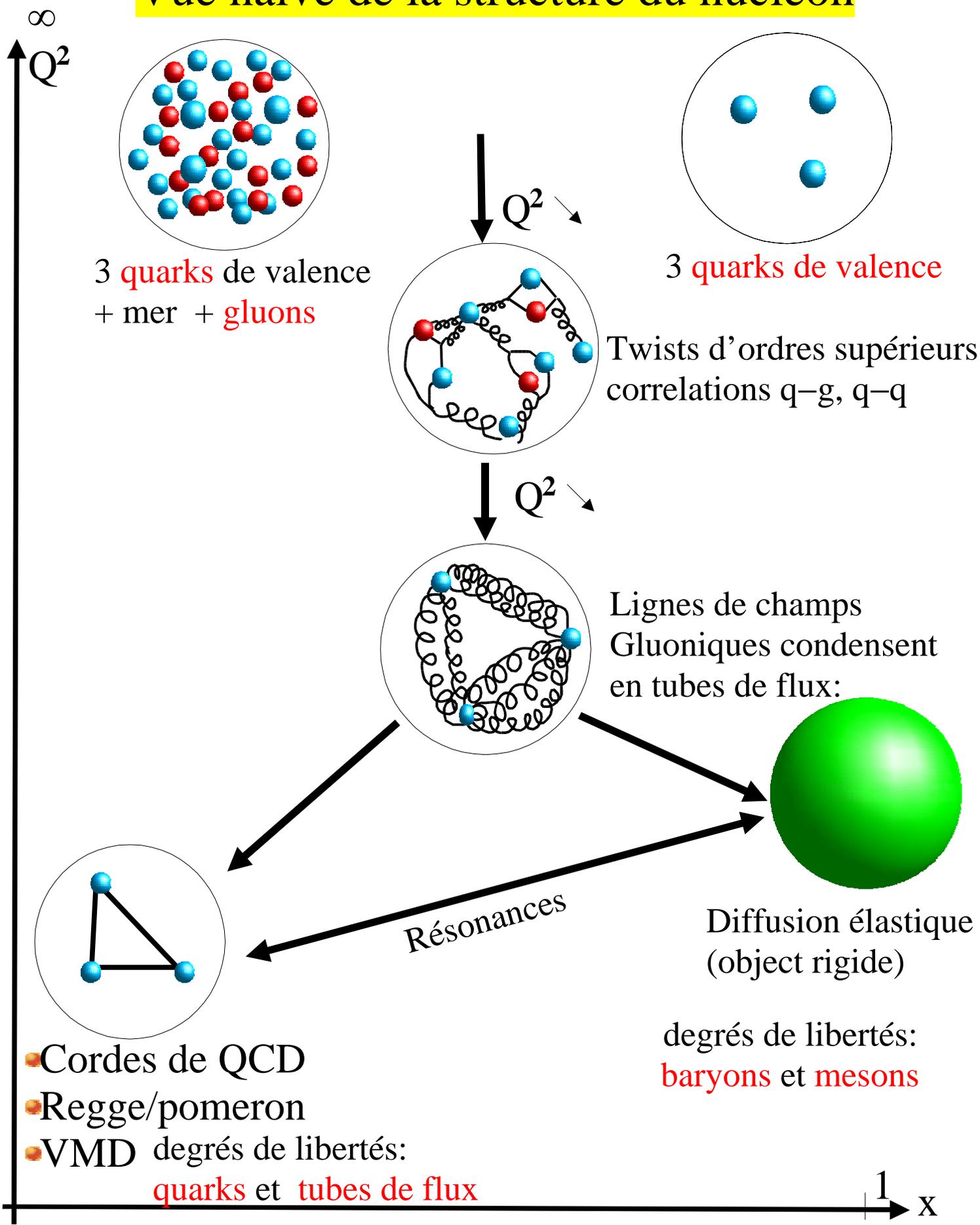
# Nouvelle expérience GDH

M. Battaglieri A. Deur,  
Mesure de GDH à bas  $Q^2$  sur le **proton**. R. DeVita, M. Ripani  
Dans le Hall B. Approuvé par PAC23 (A)



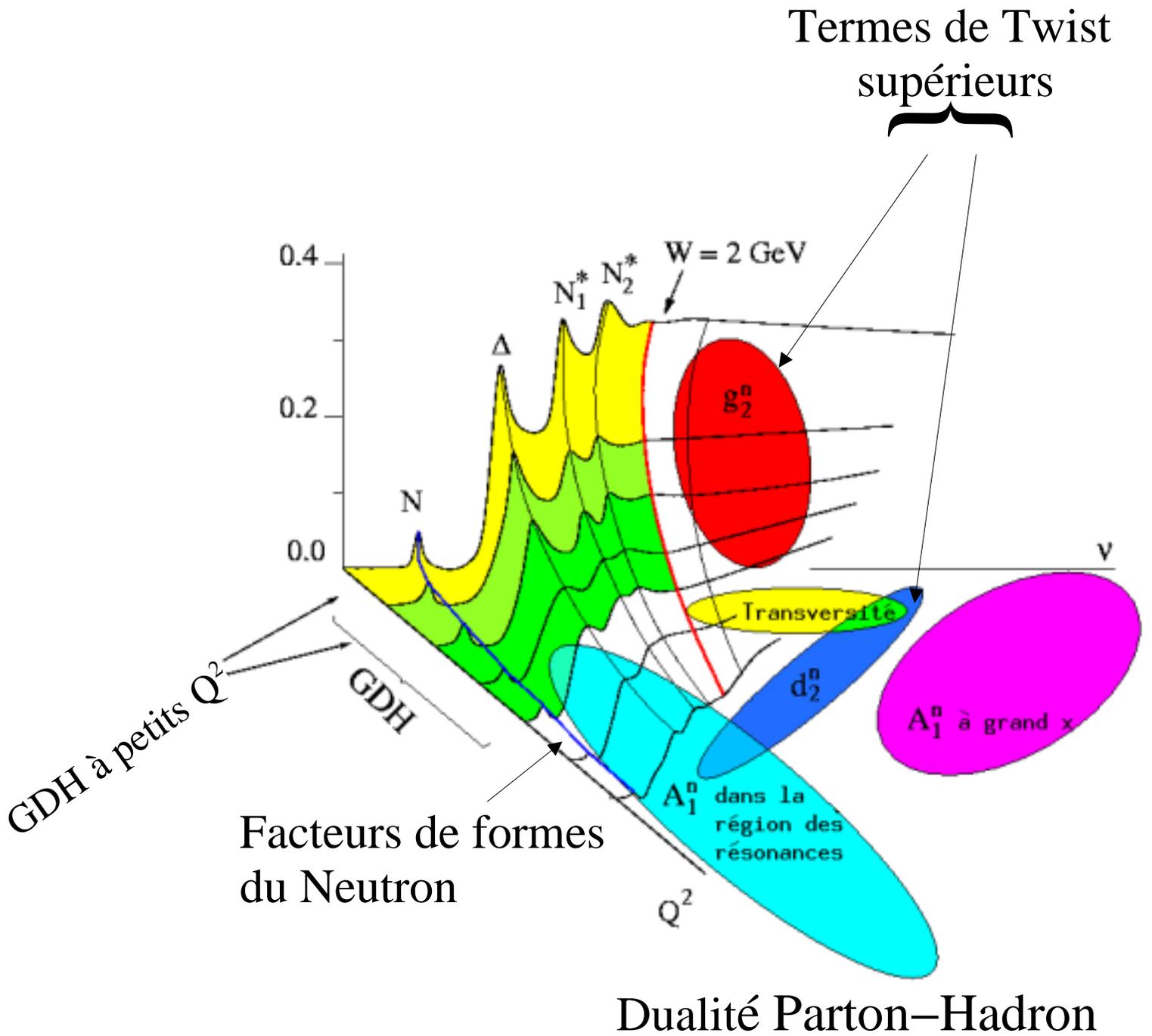
- Complète les données mondiales sur GDH généralisée
- Comparaison avec  $\chi_{pt}$ : Pas de corrections nucléaires
- GDH sur le proton au point du photon réel
- Proton – neutron

# Vue naïve de la structure du nucléon



- Cordes de QCD
- Regge/pomeron
- VMD degrés de liberté:  
quarks et tubes de flux

# Le programme d' $\vec{3}\text{He}$ du Hall A



- Programme cohérent d'expériences inclusives
- Développement d'un programme semi-inclusif

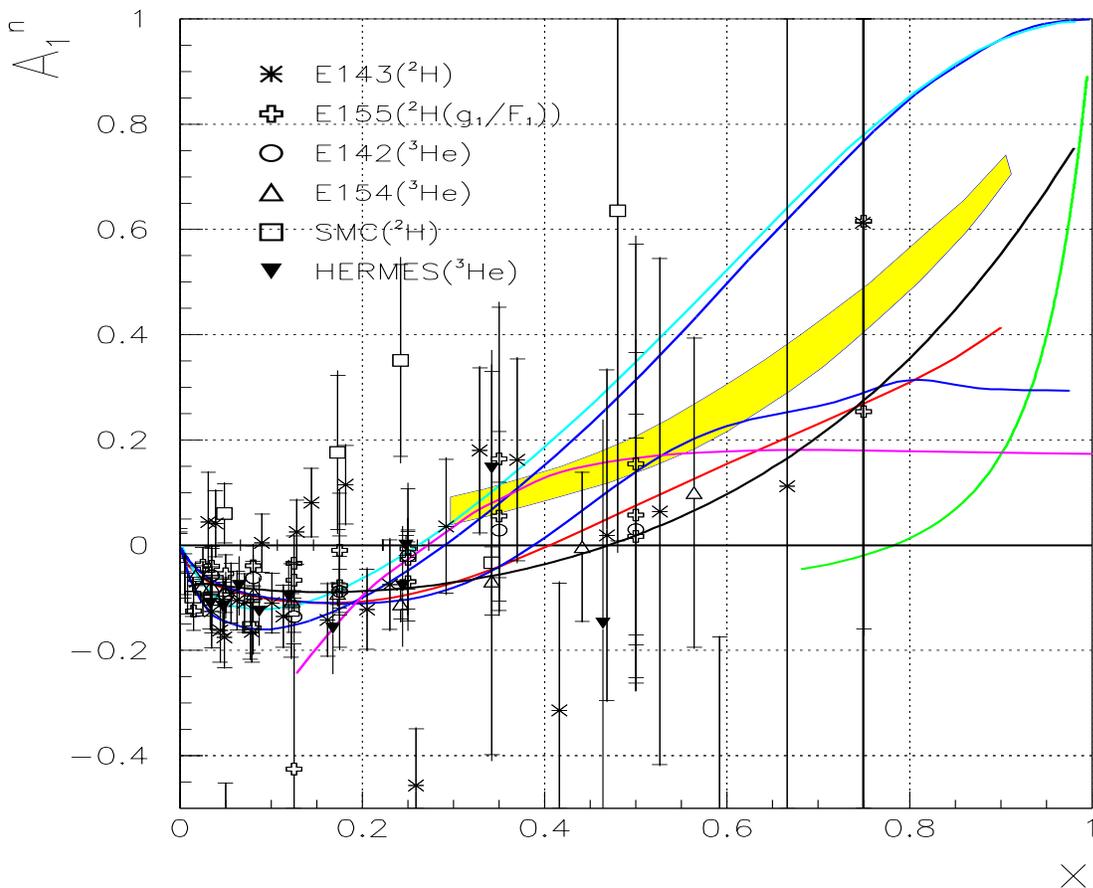
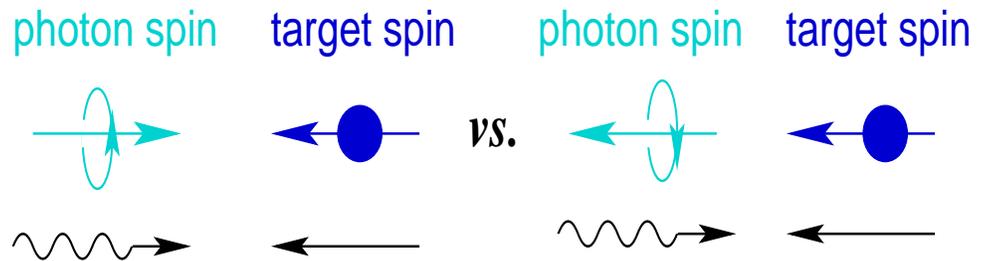
# Structure en spin dans la région de valence

DIS à grand x : Région de valence.

\*Pas de mer de Dirac. Simplification des calculs  
 ⇒ QCD peut faire des prédictions absolue ( $A_1$ )

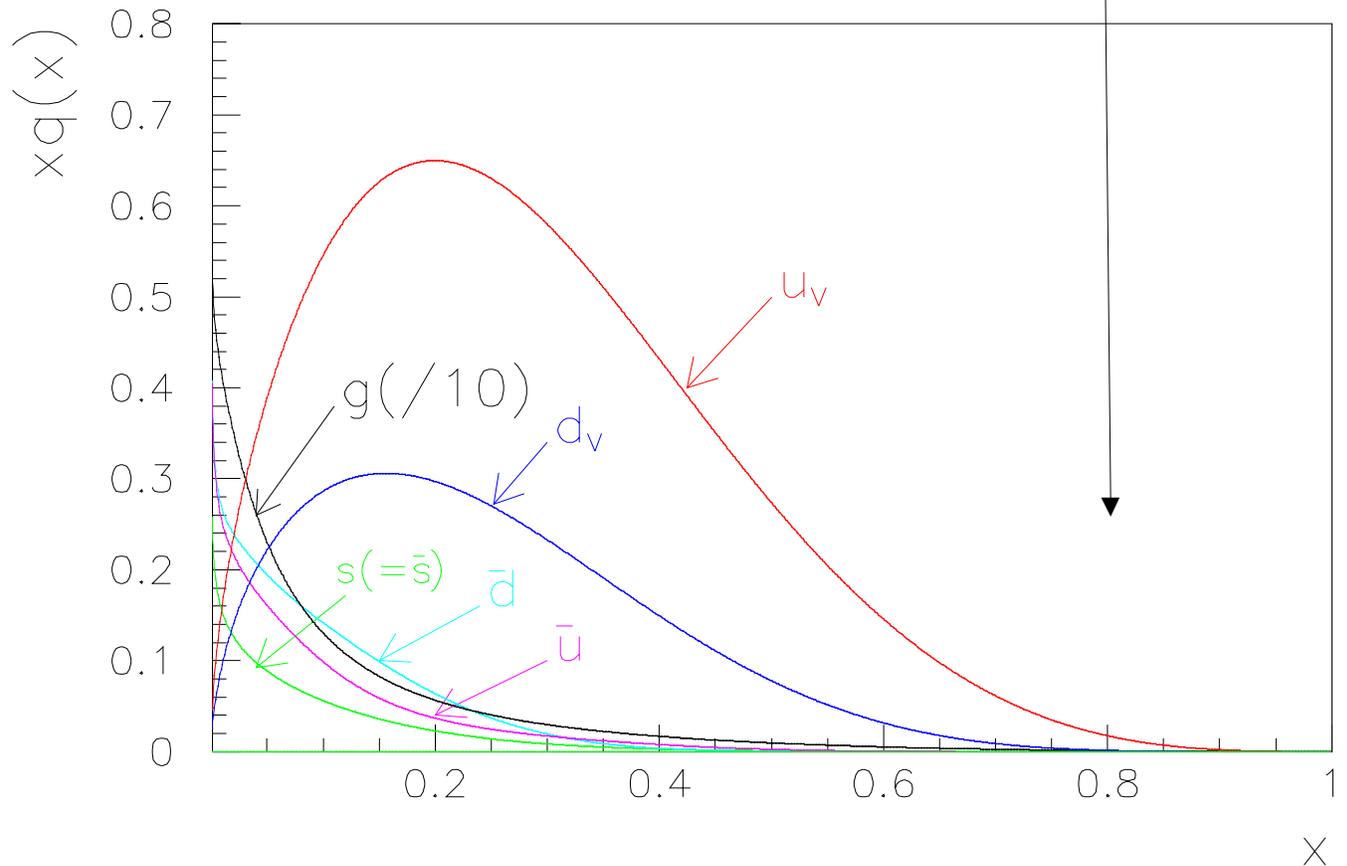
\*Zone de validité des modèles de quarks constituants

$$A_1 = \frac{\sigma_{1/2} - \sigma_{3/2}}{\sigma_{1/2} + \sigma_{3/2}}$$



## Problèmes:

- ★ Petite probabilité de trouver un parton à grand  $x$
- ★ Petite section efficace de Mott
- ★ Pas de cible de neutron



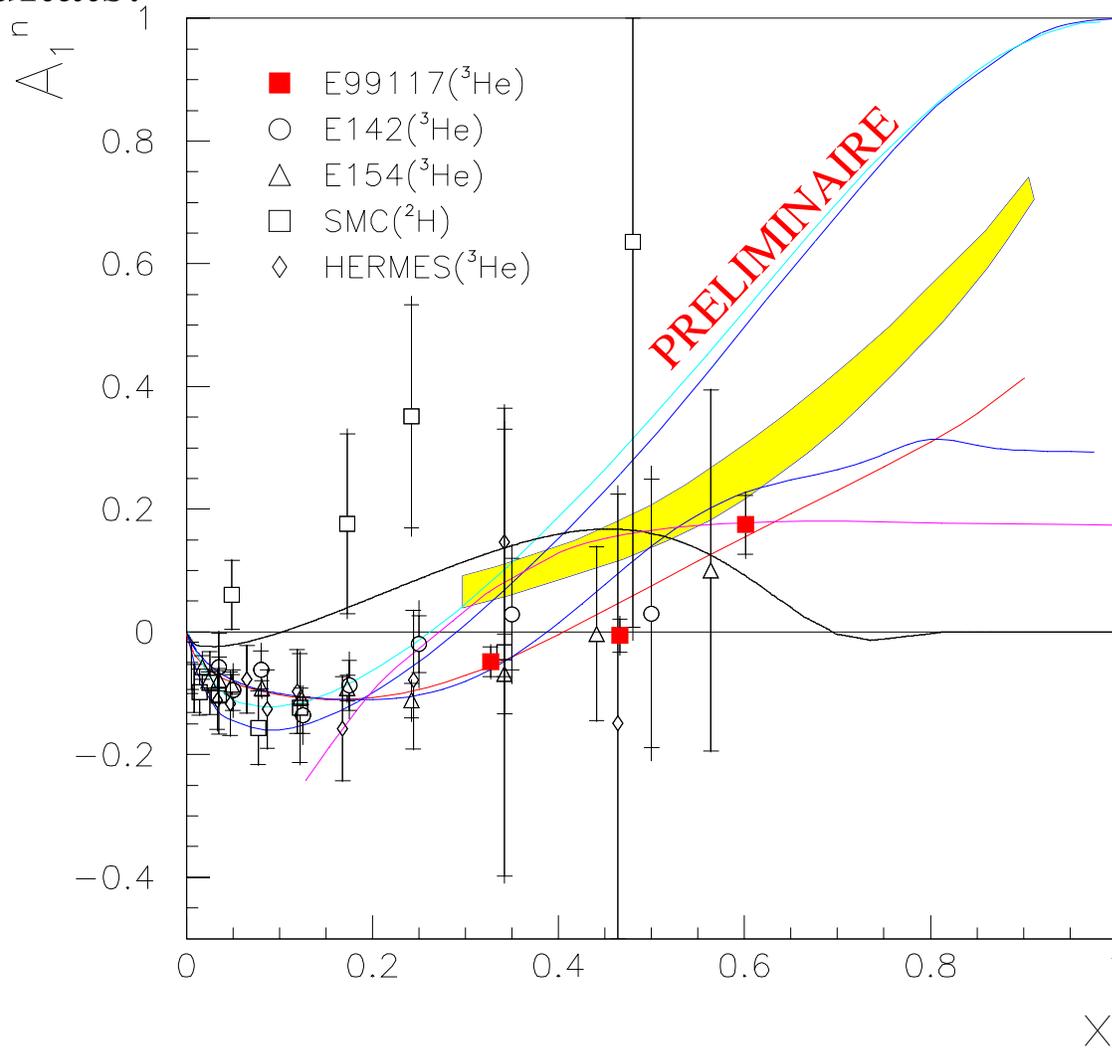
## Conséquence:

Pas de données polarisées précises à grand  $x$ , un domaine pourtant privilégié pour tester pQCD

## Solution:

Faisceau de haute intensité de JLAB & notre cible  $d$   $^3\vec{\text{He}}$  de haute densité

## Résultats:

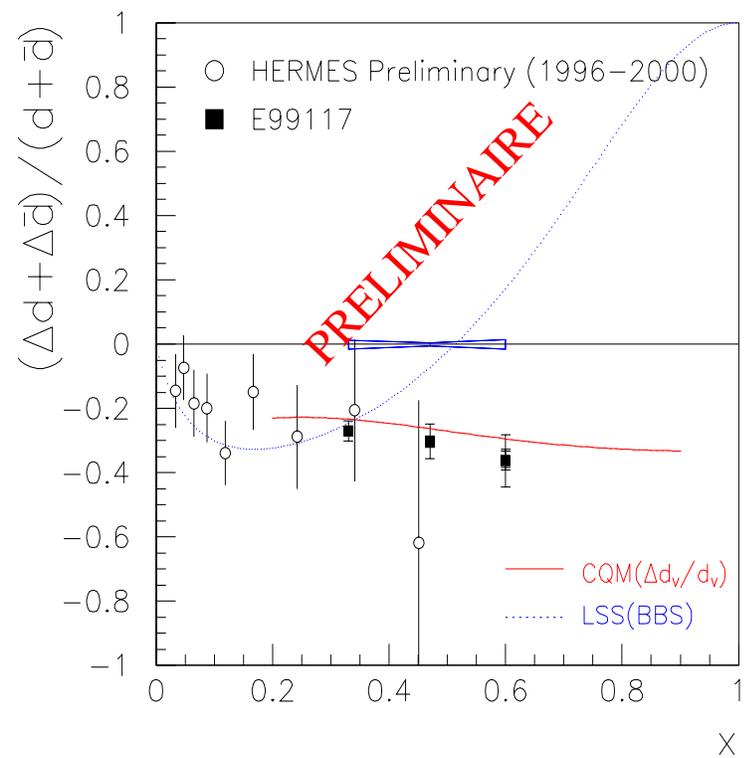
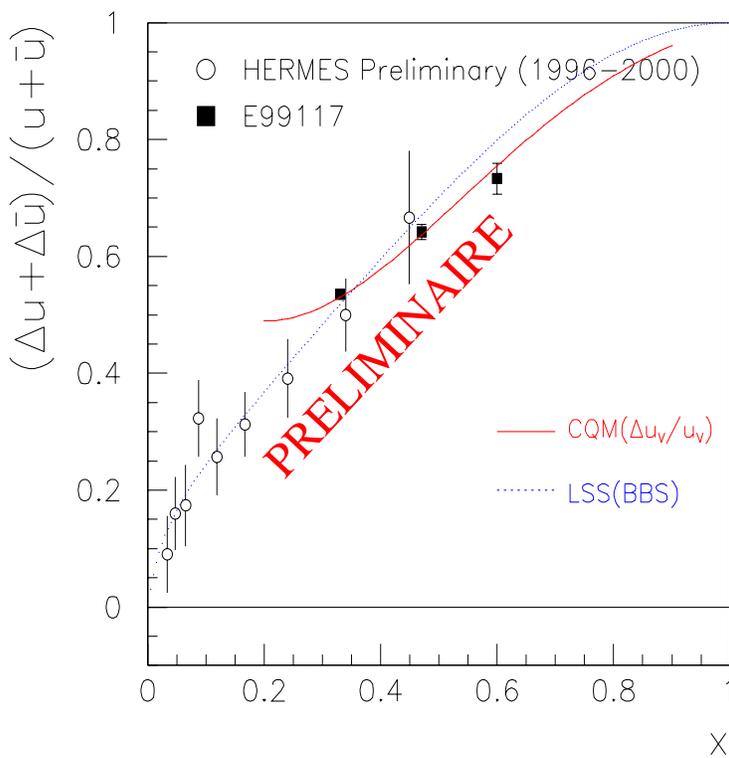


- Pour la première fois, claire tendance de  $A_1^n$  à devenir positif.
- Le modèle des quarks constituants reproduit la forme des données en étant systématiquement supérieur.
  - ⇒ La mer de Dirac joue encore un rôle
  - ⇒ Le concept de quark constituant est pertinent au-delà de son rôle en spectroscopie.
- Le calcul de pQCD supposant HHC ne suit pas les données ⇒ Rôle du moment orbital des quarks.

# Autres résultats de l'expérience: $\Delta u/u$ & $\Delta p/p$

$$A_1 \approx \frac{g_1}{F_1}$$

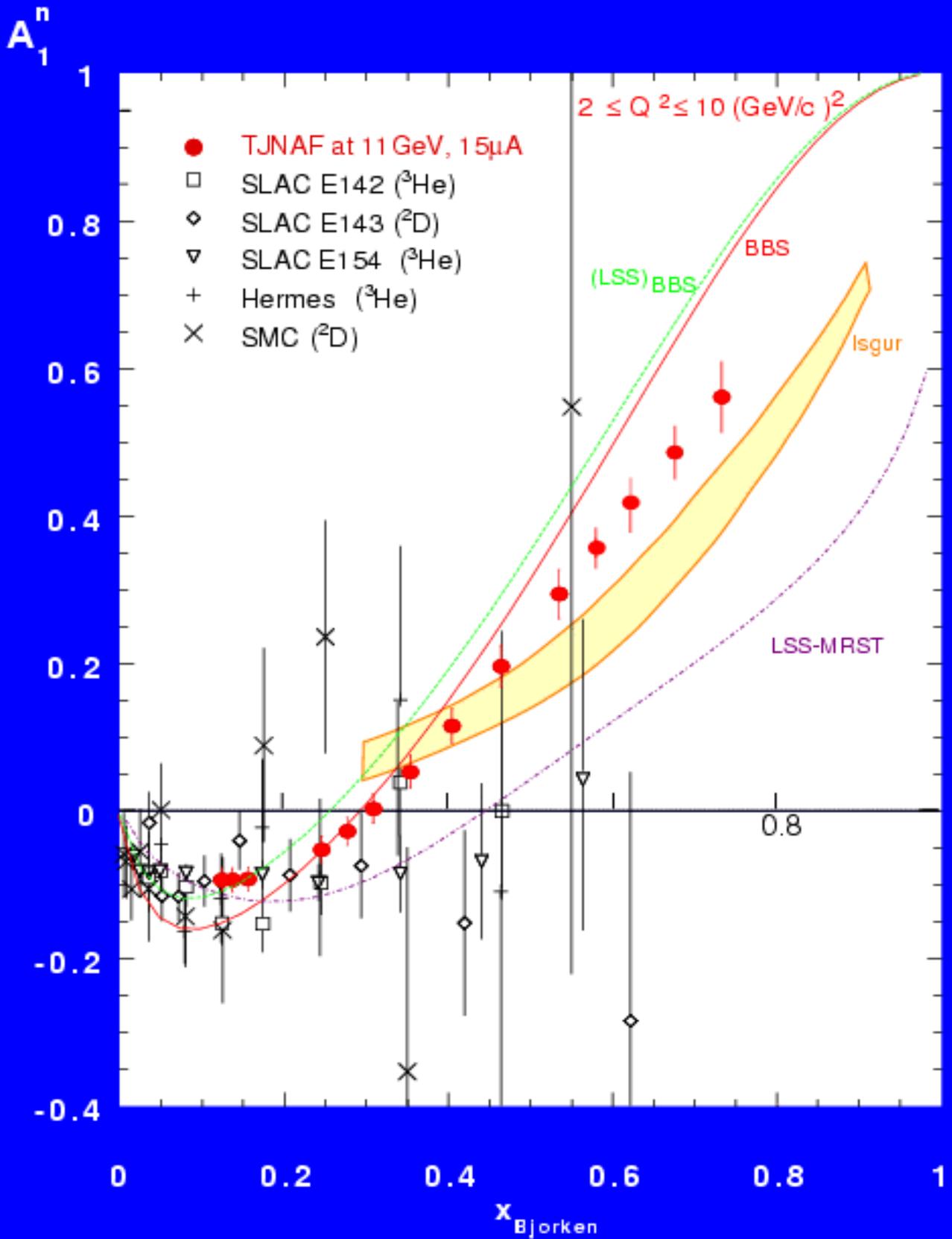
Dans le modèle des partons,  $g_1$  et  $F_1$  dépendent des distributions de partons. Supposant  $\Delta s=0$  et connaissant  $A_1^n$  &  $A_1^p$ , on peut former  $\Delta u/u$  &  $\Delta p/p$ .



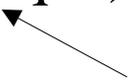
Le modèle des quarks constituants est clairement favorisé

⇒ Rôle du moment orbital des quarks.

# Futur



# Résumé & perspectives

- Programme cohérent d'étude de la structure en spin du nucléon dans les différents régimes de QCD
  - Règle de somme généralisée de GDH: Importante part de ce programme
    - GDH & Bjorken généralisées: Outils privilégiés pour l'étude de la transition partons–hadrons
    - Le programme sera (presque) achevé dans les quelques années à venir 
- Physique à bas x

Futur: [JLAB@12](#) GeV

Expériences semi–inclusive/exclusive

Physique à bas x

$A_1$  à grand x