

# Structure des Nucléons et des Noyaux Légers

*S. Kox, C. Dammame (th), C. Furget, G. Guillard (th), B. Guillon (th), M. Mazouz (th), J. Mougey, E. Penel-Nottaris (th), G. Quémener, J.-S. Réal, M. Versteegen (th), E. Voutier.*

*Since 1995, our group has been working in hadronic physics using electron scattering reactions which probe nuclear target via the electromagnetic and weak forces. The group is presently involved in the two phases of a parity violation experiment,  $G\theta$ , which measures Parity Violation asymmetries in polarized elastic electron proton scattering. These asymmetries are sensitive to the strange quark content of the nucleon. We have also developed an experimental program about electrodisintegration of few body systems to study the nuclear structure and the dynamics of  $(e,e'p)$  reaction. The results of these experiments are the basis of our experimental program about color transparency that probes the quark structure of the nucleons. This physics problem is further developed in a coming deep virtual Compton scattering experiment looking for quark correlations in the nucleon.*

## ◇ Contenu étrange du Nucléon

### $G\theta$

*LPSC Grenoble, Caltech, Carnegie-Mellon University, College of William and Mary, Hampton University, IPN Orsay, New Mexico State University, Jlab, TRIUMF, Universities of Connecticut, Illinois, Kentucky, Manitoba, Maryland, Massachusetts, Northern British Columbia, and Virginia Tech, Yerevan Physics Institute.*

Dans les années 70, des expériences de diffusion d'électrons ont montré que le proton était formé de 3 quarks de valence (u, u, d). Toutefois, la structure interne des nucléons reste encore mal connue du fait de l'aspect non perturbatif de QCD dans le régime des basses énergies, conséquence des propriétés de l'interaction forte aux grandes distances entre quarks. Les hadrons sont constitués de quarks de valence - trois quarks de saveurs u et d pour les nucléons - mais aussi de paires quark-antiquark générées par les gluons, médiateurs échangés lors de l'interaction forte. Cet ensemble de gluons et de quarks virtuels forment une mer qui influe sur les propriétés globales des hadrons. Cette mer est indifféremment formée de quarks de saveurs u, d, s (étrange), c, b, t. Le quark étrange joue un rôle particulier puisque c'est le quark le plus léger de la mer, avec une masse proche de l'échelle d'énergie de QCD, qui ne possède pas de contribution de valence. Des expériences ont ainsi mis en évidence que les quarks étranges (s) de la mer contribuent à la structure - spin, masse... - du nucléon, mais avec de fortes incertitudes expérimentales ou théoriques. L'expérience  $G\theta$  se propose de quantifier la contribution des quarks étranges aux distributions de charge et de magnétisation (courant/spin) du nucléon, avec un minimum d'hypothèses physiques. Elle se situe dans un vaste programme international, conduit depuis une dizaine d'années dans différents laboratoires.

Pour déterminer expérimentalement cette contribution, les facteurs de forme faibles du proton sont mesurés en diffusion élastique d'électrons polarisés longitudinalement sur des cibles cryogéniques d'hydrogène et de deutérium liquides. Dans ce processus, deux types d'interaction interviennent. L'interaction électromagnétique (échange de photons virtuels) qui domine dans notre domaine d'énergie, mais aussi l'interaction faible neutre (échange de bosons Z). La propriété de non-conservation de la parité de cette dernière induit une asymétrie de taux de comptage en fonction de la polarisation des électrons incidents. L'asymétrie est toutefois très petite ( $A \sim 2-50 \cdot 10^{-6}$ ), et l'expérience demande un contrôle soigneux des biais expérimentaux car une précision absolue meilleure que  $10^{-6}$  sera requise. Une série de mesures d'asymétrie, à différents angles de diffusion (cinématiques avant et arrière) et pour différentes cibles (hydrogène et deutérium) permet d'accéder aux distributions spatiales de charge et de magnétisation *faibles* dans le proton. En combinant les mesures des facteurs de forme EM sur le proton et le neutron, et des facteurs de forme faibles mesurés sur le proton, il est possible d'isoler la contribution individuelle de chacune des saveurs de quarks (pour cela il faut faire l'hypothèse de la symétrie d'isospin, et négliger les saveurs des trois quarks les plus lourds). Les facteurs de forme faibles et EM procurent en effet chacun des combinaisons différentes (en étant sensibles à leur charge faible ou à leur charge électrique) des mêmes distributions spatiales des quarks dans le nucléon.

L'expérience  $G\theta$  permettra pour la première fois la séparation des facteurs de forme étrange électrique et magnétique et du facteur de forme axial du proton sur une gamme étendue de quadri-moments transférés ( $Q^2$ ). Cette séparation se déroulera en deux étapes. Dans une première phase, le choix a été fait de détecter les protons de recul aux angles avant lors de la diffusion sur une cible d'hydrogène, et dans la seconde phase les électrons diffusés aux angles arrière sur des cibles d'hydrogène et de deutérium.

Le dispositif expérimental utilisé est constitué d'un aimant supraconducteur à symétrie toroïdale et d'une cible cryogénique. Aux angles avant, la détection des protons était faite par un ensemble de 128 scintillateurs plastiques répartis sur huit secteurs et couplés à des photomultiplicateurs par des guides de lumière. Le LPSC et l'IPN Orsay ont collaboré depuis 1998 pour la construction de quatre des huit secteurs de détection ainsi que de l'électronique associée. Aux angles arrière, par contre, ce sont les électrons diffusés qui sont détectés.

## Phase I

Une période de prises de données a été réalisée de septembre 2002 à janvier 2003 afin de valider le fonctionnement des différents dispositifs mis en oeuvre, pour le contrôle du faisceau (charge, position, etc.) et la maîtrise du système de détection et de l'électronique associée. La phase de prises de données physique s'est ensuite déroulée sur près de 9 mois entre octobre 2003 et juin 2004. Elle nous a permis d'atteindre la statistique requise pour la mesure aux angles avant. L'analyse s'est déroulée durant 1 année avec une forte implication de notre groupe, et elle a fait l'objet d'une partie de la thèse de B. Guillon. Les résultats des angles avant ont été publiés dans PRL, et ont été accompagnés par un article exceptionnel (Focus de PRL et par plusieurs communiqués de presse (CNRS, JLab...)) Au niveau de la physique, ces données accréditent une contribution non nulle des quarks étranges à 90% CL. Une étude plus spéculative indiquerait que la variation en fonction du quadri-moment transféré  $Q^2$  observée sur la figure 1 pourrait être associée à la somme de deux facteurs de forme d'amplitude significative (une contribution de 10% des quarks étranges aux distributions de charge du neutron et de magnétisation du proton) et de signe opposé.

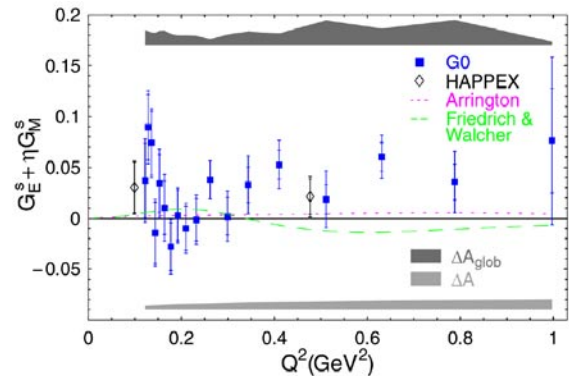


Figure 1 : Somme des deux contributions étranges.

## Phase II

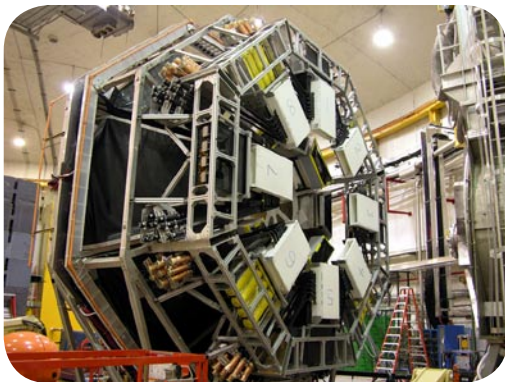


Figure 2 : Dispositif expérimental G0, en cours de mise en place pour les angles arrière.

Durant le second semestre 2005, l'ensemble expérimental (aimant, détecteurs) a été tourné de 180 degrés par rapport au faisceau afin de réaliser les mesures d'asymétries aux angles arrière de détections de l'électron. Pour séparer la diffusion élastique des autres processus inélastiques, le système de détection a été complété par huit plans de neuf scintillateurs et huit compteurs Cherenkov à aérogel. La figure 2 montre l'ensemble du dispositif expérimental, qui a été retourné fin 2005 dans le hall C du Jefferson Laboratory. Le LPSC a pris en charge la conception et la construction de quatre de ces détecteurs Cherenkov ainsi que de plusieurs cartes d'électronique pour le Cherenkov et les coïncidences entre

les deux plans de détection. La figure 3 montre le compteur Cherenkov lors de tests réalisés sous champ magnétique au LCMI début 2004. Ces mesures ont permis de valider le blindage des photomultiplicateurs qui seront mis dans le champ de fuite de l'aimant G0. Ils ont été installés dans le hall expérimental avec les scintillateurs additionnels en septembre 2005. Quatre séries de mesure sont prévues en 2006, deux énergies faisceaux avec à chaque fois deux cibles, pour un total de neuf mois d'expérience. Ces nouvelles mesures permettront de séparer les deux facteurs de forme dont la combinaison est représentée figure 1, et cela à deux cinématiques ( $Q^2 = 0,6$  et  $Q^2 = 0,25$ ). Elles permettront de connaître précisément la contribution du quark étrange dans le nucléon et sans doute de confirmer l'ordre de grandeur de 10% observé avec les mesures aux angles avant.



Figure 3 : Cherenkov.

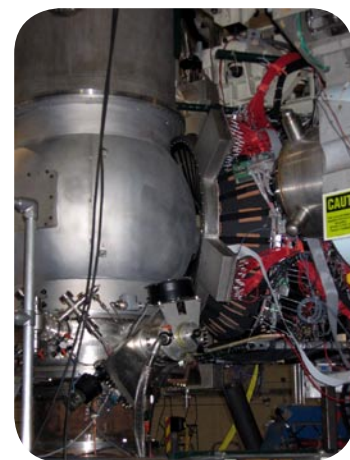
## ◆ Diffusion Compton sur les quarks

*LPSC Grenoble, LPC Clermont-Ferrand, IPN Orsay, DAPNIA/SPhN, Old Dominion University, Rutgers University et la Collaboration du Hall A du Jefferson Laboratory.*

La diffusion Compton est l'un des processus les plus élémentaires de la physique dans lequel une lumière diffuse sur un matériau pour en révéler sa structure : la caractérisation du spectre de la lumière diffusée permet de déterminer, entre autres, la forme, la structure et la distribution des constituants internes. À l'échelle sub-nucléonique, la diffusion Compton d'un photon sur un quark du nucléon permet d'étudier la distribution spatiale des quarks, réalisant une femto-photographie du nucléon.

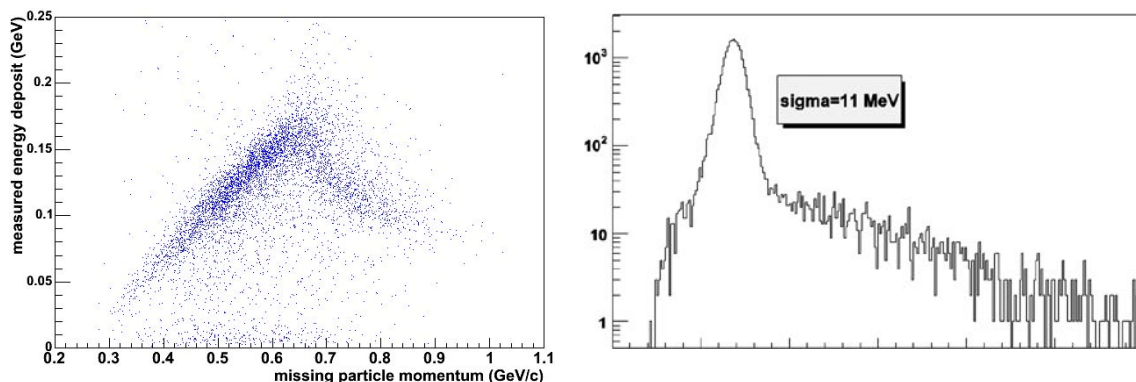
À suffisamment grande énergie, la section efficace de diffusion Compton virtuelle (DVCS), ou réaction  $ep \rightarrow epy$ , se factorise en une partie représentant l'absorption et l'émission d'un photon par un quark, et une partie décrivant la structure QCD non-perturbative du nucléon. Celle-ci est paramétrée par l'intermédiaire de quatre fonctions universelles, les Distributions Généralisées de Partons (GPDs), représentant l'interférence entre les amplitudes de probabilité de retirer d'un nucléon un parton d'une certaine impulsion et de le réintégrer avec une impulsion différente. Ces distributions élémentaires sont une généralisation des distributions usuelles de partons et permettent pour la première fois de relier dans un même formalisme les expériences de diffusion inclusive et exclusive. D'un attrait particulier, les GPDs H et E sont reliées par une règle de somme au moment cinétique total du nucléon.

Notre implication dans le programme expérimental DVCS du Jefferson Laboratory a débuté dès 2003 avec la conception puis la construction d'un détecteur d'étiquetage de particules chargées (voir contribution du SDI). Dans les expériences E00-110 et E03-106 du Hall A, l'électron diffusé est mesuré dans un spectromètre de grande résolution, le photon dans un calorimètre constitué de 132 blocs de  $PbF_2$  et le nucléon dans un ensemble de lattes et blocs de scintillateurs (Figure 4). Cet ensemble de détection, placé à 1 m en vue directe de la cible, a fonctionné parfaitement (Figure 5) dans les conditions exceptionnellement difficiles d'un environnement électromagnétique (luminosité de  $4.10^{37} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) grâce à une électronique de lecture originale à base d'ARS (Analog Ring Sampler) développée au LPC de Clermont-Ferrand et suivie d'une analyse numérique de la forme du signal.



*Figure 4 : Dispositif expérimental des expériences DVCS du Hall A au cours des prises de données.*

Les prises de données ont été réalisées durant l'automne 2004 sur une cible d'hydrogène puis de deutérium, cette dernière servant de cible de neutrons. Ces mesures permettront d'extraire pour la toute première fois les GPDs H et E. Les analyses en cours sont prometteuses et semblent d'ores et déjà supporter l'hypothèse de factorisation de la section efficace, nécessaire à l'étude exhaustive des GPDs.



*Figure 5 : Performances des calorimètres hadronique et électromagnétique des expériences DVCS.*

## ◆ Facteurs de forme électromagnétique des nucléons liés

LPSC Grenoble, JLab, California State University, MIT, Rutgers University et la Collaboration du Hall A du Jefferson Laboratory.

L'existence d'une éventuelle modification des propriétés électromagnétiques des nucléons à l'intérieur du milieu nucléaire a été suggérée dans le contexte de la réduction de la réponse longitudinale mesurée en diffusion inclusive et exclusive d'électrons. Il y a en effet plusieurs raisons de s'interroger au sujet des propriétés électromagnétiques des nucléons liés : les spineurs de Dirac des nucléons liés diffèrent de ceux des nucléons libres, l'origine des effets relativistes observés en diffusion (e,e'p) sur l'oxygène étant l'accroissement de l'importance des composantes d'énergie négative ; la non équivalence des différentes prescriptions du courant électromagnétique pour un nucléon hors couche de masse conduit strictement à douze facteurs de forme au lieu de deux dans le cas d'un nucléon libre... Cependant, le fait que ces modifications ne puissent être atteintes que dans le cadre d'un modèle, combiné avec le nombre limité d'expériences dédiées a suscité beaucoup de controverses.

Expérimentalement, ces modifications sont déduites de la séparation des réponses longitudinale et transverse de la section efficace de diffusion quasi-élastique (e,e'p) mesurée dans des conditions où le proton éjecté est parallèle au photon virtuel. Dans ce contexte, seul le proton éjecté participe à la réaction alors que le système résiduel reste spectateur, autorisant la factorisation de la section efficace en une partie purement nucléaire et une partie directement liée aux propriétés électromagnétiques du nucléon. La séparation des différentes composantes de la section efficace est alors déduite d'au moins deux mesures pour différentes polarisations du photon virtuel et un même transfert d'énergie au proton.

Le LPSC est impliqué depuis 1999 dans le programme de diffusion (e,e'p) à JLab. La dernière phase de l'analyse de l'expérience E89-044 sur l'hélium est consacrée à l'extraction des sections efficaces en cinématique parallèle. Les résultats, reportés sur la figure 6, montrent un désaccord grandissant avec  $Q^2$  entre les données et différentes approches théoriques. Celui-ci est attribué à une réduction de la réponse longitudinale, confirmée par une séparation des réponses à  $1,5 \text{ GeV}^2$  qui montre une déviation par rapport au nucléon libre. Ce programme devrait s'achever en 2006.

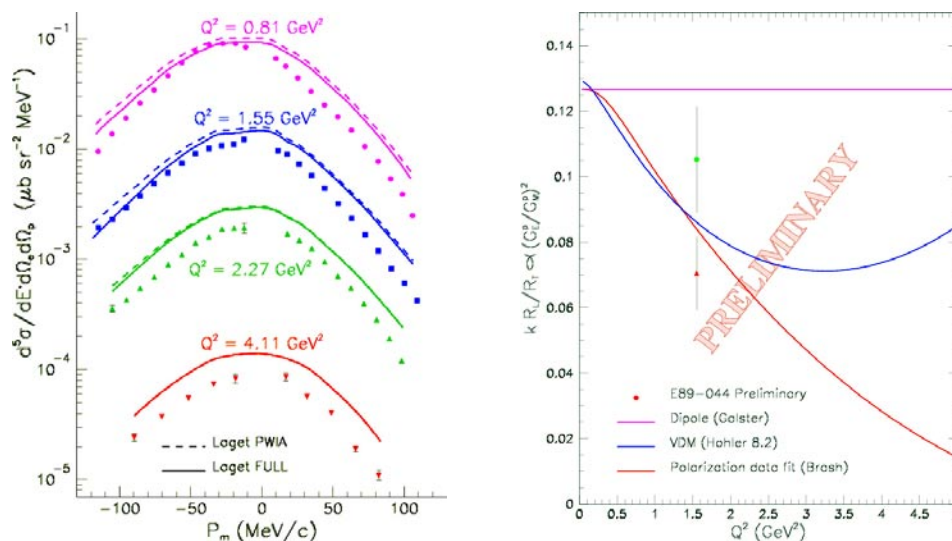


Figure 6 : Section efficace  $^3\text{He}(e,e'p)$  mesurée en cinématique parallèle et rapport des réponses longitudinale et transverse extrait par séparation de Rosenbluth.

### Pour en savoir plus

D.H. Beck et B.R. Holstein, Nucleon structure and parity-violating electron scattering, Int. Jo. Mod. Phys. E10 (2001) 1-41.  
 K.S. Kumar et P.A. Souder, Strange quarks and parity violation, Progress in Particle and Nuclear Physics 45 (2000) 333.  
 J.J. Kelly, Adv. Nucl. Phys. 23 (1996) 75.

<http://www.jlab.org/>

<http://lpscwww.in2p3.fr/hadrons/hadrons.html>

<http://www.npl.uiuc.edu/exp/G0/G0Main.html>

<http://www.jlab.org/~sabatie/dvcs>

<http://hallaweb.jlab.org/physics/experiments/E89-044/index.html>