

Structure des Nucléons et des Noyaux Légers

S. Kox, G. Batigne, C. Furget, B. Guillon, M. Mazouz, J. Mougey, P. Moussiég, E. Penel-Nottaris, G. Quéméner, J.-S. Réal, R. Tieulent, E. Voutier

Since 1995, our group has been working in hadronic physics using electron scattering which provides electromagnetic and weak probes. The group is involved in two parity violation experiments, G0 and SAMPLE, which measure 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 electrodissintegration 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 which 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.

Depuis près de 10 ans, notre groupe travaille dans un programme de recherche en physique hadronique à l'aide des sondes électromagnétique et faible, mené principalement au Jefferson Laboratory. Nous sommes impliqués depuis 1998 dans deux expériences de violation de parité, G0 (en cours) et SAMPLE (MIT, terminée), qui mesurent des asymétries en diffusion élastique d'électrons polarisés sur des protons. Ces asymétries sont sensibles au contenu en quarks étranges du nucléon. Nous développons également un programme expérimental consacré à l'électrodésintégration des noyaux légers dans le but d'étudier la structure nucléaire de ces systèmes et la dynamique des réactions (e,e'p). Les résultats de ces dernières études sont à la base de notre programme expérimental sur la transparence de couleur qui sonde la structure en quarks des nucléons. Nous poursuivons cette problématique dans une expérience de diffusion Compton profondément inélastique permettant l'accès aux corrélations entre quarks à l'intérieur du nucléon.

► Contenu Étrange du Nucléon

Dans les années 70, des expériences de diffusion d'électrons ont montré que le proton est formé de 3 quarks de valence (u, u, d). Toutefois, la structure des hadrons est beaucoup plus complexe, avec notamment l'existence d'une mer de paires quark-antiquark de différentes saveurs (u, d, s, c...). D'autres expériences ont ainsi mis en évidence que les quarks étranges (s) issus de la mer contribuent aussi à la structure (spin, masse...) du nucléon. Un programme international dont le but est de quantifier la contribution de ces quarks aux distributions de charge et de courant/spin du proton est actuellement conduit dans différents laboratoires.

Pour déterminer expérimentalement cette contribution on réalise la diffusion élastique d'électrons polarisés longitudinalement sur des cibles d'hydrogène et de deutérium liquide. Dans ce processus interviennent deux types d'interaction : l'interaction électromagnétique (échange de photons virtuels) qui domine dans notre domaine d'énergie, et l'interaction faible (échange de bosons Z) dont la propriété de non conservation de la parité induit une asymétrie de taux de comptage en fonction de la polarisation des électrons incidents. Cette asymétrie dépend des facteurs de forme électromagnétique et faible qui décrivent les distributions spatiales de charge et de courant à l'intérieur du proton (donc des quarks). Une série de mesures d'asymétrie à différents angles de diffusion (avant/arrière) et pour différentes cibles (hydrogène/deutérium) permet d'accéder aux distributions spatiales de charge et de courant **faibles** dans le proton. La connaissance de ces distributions et des

facteurs de forme électromagnétique mesurés dans d'autres expériences permet alors, en supposant la symétrie d'isospin et en négligeant les contributions des quarks plus lourds de la mer (c, b, t), de déterminer la contribution des quarks s aux distributions de charge et de courant dans le nucléon. Le nucléon n'ayant aucune étrangeté intrinsèque, ces mesures permettent d'accéder à la dynamique des quarks de la mer dans le nucléon.

La difficulté majeure de ces expériences de violation de parité est qu'elles nécessitent la maîtrise des erreurs systématiques et d'enregistrer de fortes statistiques du fait de la faible asymétrie escomptée (de l'ordre de 10^{-6} - 10^{-5} selon l'impulsion transférée).

Notre groupe est impliqué dans l'expérience SAMPLE qui s'est déroulée au MIT-Bates (Boston, Etats-Unis) et dans l'expérience G0 qui est en cours dans le Hall C au Jefferson Laboratory (Jlab, Newport News, Etats-Unis).

SAMPLE

LPSC Grenoble, Argonne, Caltech, Jefferson Lab, College of William and Mary, University of Illinois, University of Kentucky, Louisiana Tech, University of Maryland, MIT-Bates, SLAC, Virginia Tech

Cette expérience effectue des mesures d'asymétrie aux angles arrière de l'électron diffusé et est sensible aux parties axiale et magnétique du courant d'échange. La séparation des facteurs de forme magnétique étrange et axiale du nucléon est assurée par des mesures combinées sur une cible d'hydrogène et de deutérium.

L'électron diffusé est détecté par un compteur Čerenkov à air de grand angle solide (environ 1,5 sr). Ce détecteur est constitué de 10 miroirs qui focalisent la lumière Čerenkov créée par les électrons sur 10 photomultiplicateurs.

Deux séries de mesures ont permis d'obtenir la séparation des facteurs de forme magnétique étrange et axial du nucléon à un quadrimoment transféré $Q^2 = 0,1$ (GeV/c)². Ces résultats ont indiqué un désaccord avec les prédictions théoriques avec une contribution des corrections radiatives au facteur de forme axial plus importante que prévu. Une nouvelle mesure ($Q^2 = 0,03$ (GeV/c)²), à laquelle notre groupe a participé, a été programmée fin 2001 avec un faisceau de 120 MeV et une cible de deutérium liquide afin de préciser

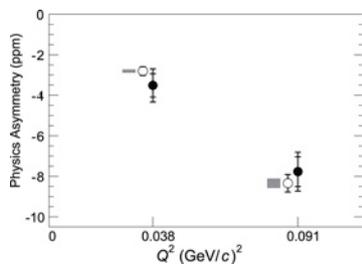


Figure 1 : Asymétries physiques.

la contribution du facteur de forme axial. Entre temps les données à $Q^2 = 0,1$ (GeV/c)² ont été réanalysées en améliorant la modélisation des détecteurs et des corrections radiatives. La figure 1 montre la comparaison des asymétries physiques sur une cible de deutérium à 0,03 et 0,1 (GeV/c)² entre les données expérimentales (cercles pleins) et les valeurs théoriques (cercles ouverts). Ces résultats indiquent une bonne maîtrise des calculs théoriques du facteur de forme axial avec une contribution faible des quarks étranges au facteur de forme magnétique ($G_E^s = 0,15$ n.m.).

G0

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

L'expérience G0 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 de quadri-moments transférés (Q^2) compris entre 0,1 et 1 (GeV/c)². Cette séparation, rendue possible par la combinaison de plusieurs mesures, se déroulera en deux étapes. Dans une première phase on détectera les protons aux angles avant et dans une seconde phase, les électrons diffusés aux angles arrière sur des cibles d'hydrogène et de deutérium.

Pour la détection des protons, le dispositif expérimental est constitué d'un aimant supra-

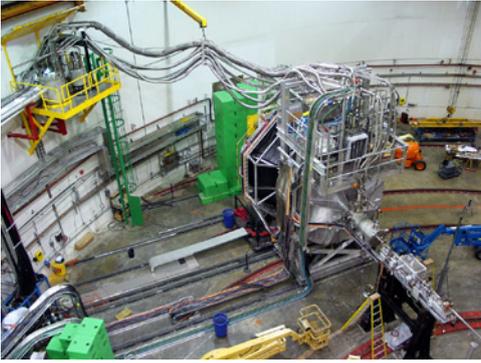


Figure 2 :
Détecteur G0.

conducteur à symétrie toroïdale, d'une cible d'hydrogène liquide et d'un ensemble de 128 scintillateurs plastiques répartis sur huit secteurs et couplés à des photomultiplicateurs par des guides de lumière (Figure 2). Le LPSC et l'IPN Orsay ont collaboré pour la construction de quatre des huit secteurs de détection ainsi que l'électronique associée. La figure 2 montre l'ensemble du dispositif expérimental, qui a été installé fin 2001 au Jefferson Laboratory.

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 œuvre, pour le contrôle du faisceau (charge, position, etc.) et la maîtrise du système de détection et l'électronique associée. En particulier, ces mesures ont permis de mettre en évidence des conditions de bruit inattendues, auxquelles il a fallu remédier à l'aide d'un blindage additionnel et une réduction de l'épaisseur des fenêtres de la cible cryogénique. La figure 3 montre les premières mesures d'asymétries à des précisions de quelques ppm (10^{-6}), qui ont pu être obtenues.

Une seconde phase de prises de données a débuté en octobre 2003 et doit se poursuivre jusqu'en mai 2004, ce qui nous permettra d'atteindre la statistique demandée pour la mesure aux angles avant.

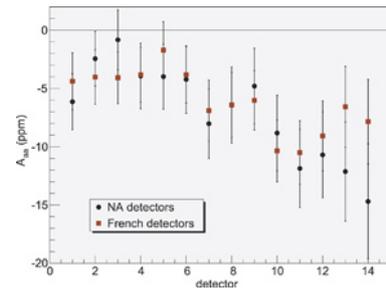


Figure 3 : Asymétrie expérimentale.



Figure 4 :
Détecteur
Čerenkov
pour les
mesures
aux angles
arrières.

À partir du second semestre 2004, l'ensemble aimant-détecteurs sera 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 sera complété par huit plans de scintillateurs et huit compteurs Čerenkov à aérogel. Le LPSC a pris en charge la construction de quatre de ces détecteurs Čerenkov ainsi qu'une carte d'électronique traitant les matrices de coïncidence entre les deux plans de détection. La figure 4 montre le compteur Čerenkov lors de tests réalisés sous champ magnétique au LCMI (voir figure 4).

► Diffusion Compton Profondément Inélastique

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

La diffusion Compton est l'un des processus élémentaires de la physique dans lequel de la lumière diffuse sur de la matière. L'étude des distributions angulaires et en longueur d'onde de la lumière diffusée permet de remonter aux distributions des constituants élémentaires de la matière ainsi éclairée. Les expériences de diffusion Compton profondément inélastique (DVCS) au Jefferson Laboratory proposent d'étudier cette réaction à l'échelle sub-nucléonique et de mesurer ainsi la distribution spatiale des quarks à l'intérieur des nucléons.

De récents développements théoriques ont montré qu'à suffisamment grande énergie transférée, l'amplitude de réaction du processus DVCS se factorise en une partie décrite par la chromodynamique quantique (QCD) et représentant la diffusion *dure* du photon et une partie *molle* décrivant la structure non-perturbative du nucléon. Cette dernière est alors paramétrée sous forme de quatre fonctions universelles, les distributions généralisées de partons (GPD), 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 directement reliées aux distributions usuelles de partons et aux facteurs de forme élastique et permettent de remonter jusqu'au

moment cinétique total porté par les quarks.

Les expériences E00-110 et E03-106 dans le Hall A de JLab proposent de déterminer les GPD H et E à partir de la mesure de la différence entre les sections efficaces de diffusion Compton virtuelle pour deux états de polarisation opposée du faisceau d'électrons. La GPD E, la plus mal connue à ce jour, est extraite de la diffusion sur le neutron. Le LPSC développe et construit pour cette expérience un détecteur d'étiquetage qui complète un détecteur préexistant pour permettre de différencier les particules chargées des particules neutres. Ces expériences prendront leurs données dans le courant de l'automne 2004.

► Dynamique de la Réaction (e,e'p) et Structure Nucléaire

Les systèmes à petit nombre de nucléons sont les laboratoires privilégiés de l'étude de l'interaction forte dans un environnement impliquant toute la complexité de la structure nucléaire. Le petit nombre de corps en présence autorise une approche microscopique du problème à N corps et permet une description détaillée des différents mécanismes de réaction. Dans ce contexte, les expériences de diffusion d'électrons apportent l'avantage supplémentaire d'une sonde à l'interaction parfaitement connue, réduisant ainsi les inconnues aux ingrédients fondamentaux de la structure nucléaire. Un programme expérimental de diffusion (e,e'p) a été développé dans le Hall A de JLab dans le but de déterminer l'origine et l'importance des composantes de grande impulsion dans la fonction d'onde des noyaux légers, d'identifier les mécanismes dominant la réaction (e,e'p) à une échelle sub-nucléonique et d'explorer les éventuelles manifestations de la structure interne des nucléons.

Corrélations nucléon-nucléon et phénomènes de rediffusion

LPSC Grenoble, California State University, CEA/DAPNIA/SPhN Saclay, Jefferson Laboratory, MIT Bates, Rutgers University et la Collaboration du Hall A

L'étude de la structure nucléaire par diffusion quasi-élastique d'électrons (e,e'p) est une méthode particulièrement puissante qui a permis, entre autres, la détermination des distributions d'impulsion du nucléon dans le milieu nucléaire. En effet, dans l'image simple de nucléons indépendants mus par le champ des autres nucléons, la section efficace de diffusion quasi-élastique se factorise exactement en un terme représentant la probabilité d'interaction électron-nucléon et un autre représentant la probabilité de trouver ce même nucléon dans le noyau avec une impulsion initiale P_m et une énergie de liaison E_m . Les derniers résultats de l'expérience ${}^3\text{He}(e,e'p)$ ou E89-044 réalisée dans cette optique au Jefferson Laboratory de décembre 1999 à avril 2000 ont été obtenus au cours des deux dernières années d'analyse :

- dans le canal ${}^3\text{He}(e,e'p)d$, les analyses ont montré que le schéma naïf de la factorisation est obsolète à grande impulsion de recul. Dans ce domaine, la section efficace est dominée par les processus de rediffusion où le nucléon éjecté par l'électron interagit avec les nucléons environnants. L'information nucléaire structurelle est alors perdue au profit d'une dynamique de diffusion nucléon-nucléon élémentaire.
- à très grande impulsion de recul ($\sim 1 \text{ GeV}/c$), l'existence d'un désaccord théorie/expérience a été confirmé par la déduction de la section efficace ${}^3\text{He}(e,e'p)d$ à partir d'une mesure de la section efficace ${}^3\text{He}(e,e'd)p$ à partir des données de l'expérience E89-044 (Figure 5). De récentes comparaisons avec le deutérium indiquent que ce désaccord pourrait provenir d'une approche inexacte de l'antisymétrisation.
- les analyses dans le canal ${}^3\text{He}(e,e'p)pn$ ont permis de quantifier l'importance des forces à 2-corps. En effet, à grande impulsion de recul, la cassure en 2-corps du noyau d'hélium devient de moins en moins probable et laisse place à la cassure complète du noyau en trois nucléons. Des expériences antérieures ont montré que les grandes impulsions provenaient préférentiellement de paires au repos de nucléons corrélés plutôt que du système nucléaire complet. Cette préférence se traduit par un maximum dans

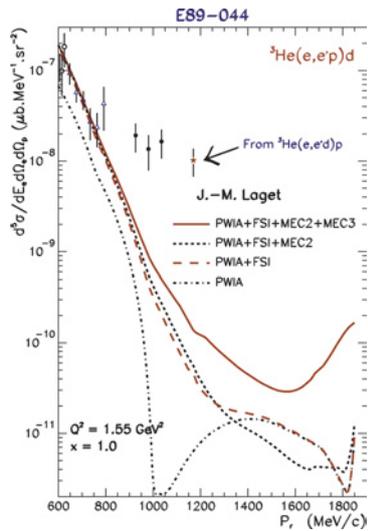


Figure 5

la distribution en E_m dont la position est cinématiquement corrélée à P_m (lignes vertes sur la figure 2). Un échantillon des résultats expérimentaux de l'expérience E89-044 est comparé sur la figure 6 à différents calculs théoriques. Si la position du maximum reste cohérente avec les observations antérieures, la section efficace est cependant dominée par les effets de rediffusion du nucléon éjecté. En accord avec les observations de la cassure à 2-corps, ces effets sont d'autant plus importants que l'impulsion de recul est grande.

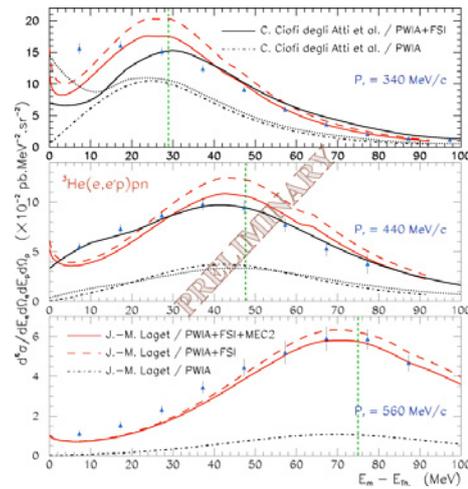


Figure 6

De manière générale, cette expérience a montré les limites de la diffusion quasi-élastique pour l'étude de la structure nucléaire : la prédominance des mécanismes de rediffusion brise la factorisation de la section efficace et interdit tout accès à la structure du noyau. La diffusion $(e,e'p)$ reste néanmoins le meilleur candidat pour cette étude, mais dans un régime très différent du quasi-élastique.

► Transparence de Couleur

LPSC Grenoble, CEA/DAPNIA/SPhN Saclay, Florida State University, Jefferson Laboratory, Old Dominion University et la Collaboration du Hall A

L'importance des mécanismes de rediffusion dans la dynamique de la réaction $(e,e'p)$, assimilée à un facteur de complication dans le contexte précédent, est à la base de l'étude de la Transparence de Couleur dans les noyaux légers. Ce phénomène est une conséquence directe de la QCD qui prédit l'existence, dans la fonction d'onde du nucléon, de configurations de petite extension spatiale où les quarks constituant le nucléon seraient très proches les uns des autres. Cet état particulier de la fonction d'onde ou *mini-hadron* possède la propriété d'être insensible à l'interaction forte de *couleur*. Un *mini-hadron* se propagerait ainsi dans un milieu nucléaire avec une interaction réduite. Le milieu se comporterait alors comme s'il était *transparent*. Une démarche expérimentale appropriée consiste en l'étude des effets de rediffusion du nucléon avec son milieu environnant en fonction de la distance entre les nucléons et de la taille du *mini-hadron*.

L'expérience $D(e,e'p)n$ ou E01-020 au Jefferson Laboratory a été élaborée en ce sens. Les données expérimentales ont été prises entre mai et novembre 2002 dans le Hall A, mesurant la section efficace d'électro-désintégration du deuteron à différents transferts d'impulsion et d'énergie et plusieurs impulsions de recul. La signature attendue de la Transparence de Couleur est une diminution des effets de rediffusion pour des transferts de plus en plus grands. Ce signal est plus particulièrement recherché dans le régime quasi-élastique de la diffusion $(e,e'p)$ où l'expérience E89-044 a montré l'effet de loupe sur les mécanismes de rediffusion. Les analyses en cours constituent la première étude systématique de la diffusion $(e,e'p)$ dans le plus simple système nucléaire, les résultats préliminaires apportant déjà quelques surprises.

► Pour en savoir plus

D.H. Beck et B.R. Holstein, Nucleon structure and parity-violating electron scattering, *Int. Jo. Mod. Phys. E*, 10 (2001) 1-41.
K.S. Kumar et P.A. Souder, Strange quarks and parity violation, *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 45 (2000) 333-395.

J.J. Kelly, Adv. Nucl. Phys. **23** (1996) 75.

R. Tieulent, Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier de Grenoble, ISN-0227 (2002).

G. Batigne, Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier de Grenoble, 2004.

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

<http://lpsc-www.in2p3.fr/hadrons/hadrons.html>

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

<http://locus.mit.edu/~sample/>

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

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

<http://wanda.fiu.edu/deuteron/E01020/E01020.html>