

GØ

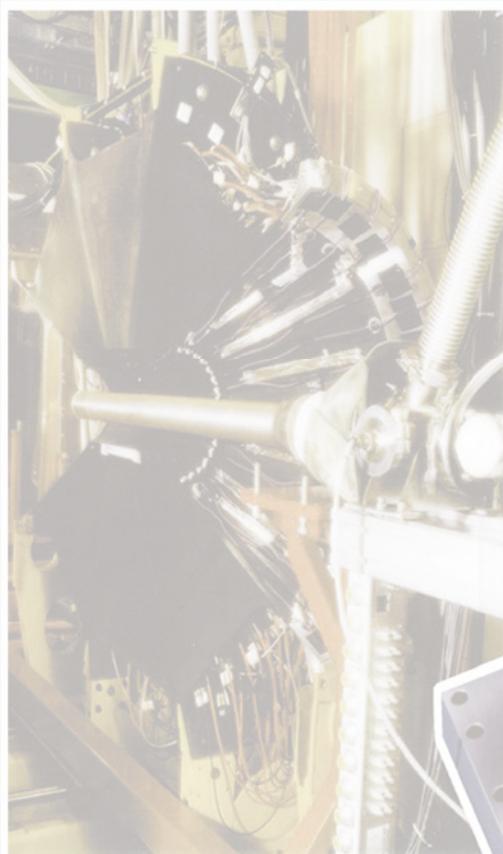
Hadrons et Noyaux

○ JLab

○ GRAAL

○ Spectroscopie

GRAAL



Structure nucléaire

Les hadrons sont des objets composites constitués de particules élémentaires, les quarks et les gluons. L'ensemble des hadrons inclut de nombreuses particules classées en baryons (proton et neutron entre autres) et mésons, les baryons étant composés de trois quarks et les mésons de paires quark-antiquark. Les interactions entre quarks et gluons au sein des hadrons sont décrites par la chromodynamique quantique (QCD) qui est la théorie de l'interaction forte.

Les propriétés des noyaux, constitués de protons et de neutrons, sont également régies par l'interaction forte. Cependant, il est difficile de décrire de tels systèmes complexes à partir des interactions entre les composants élémentaires des nucléons. Il est préférable de considérer des forces effectives pour prendre en compte l'influence du milieu nucléaire ambiant.

La physique hadronique

La physique hadronique a pour objectif la compréhension de la structure des nucléons et des noyaux légers en termes de quarks et gluons et l'étude de la nature du confinement de ces derniers au sein des hadrons.

Pour les études expérimentales, la diffusion d'électrons polarisés d'énergie supérieure au GeV est un outil privilégié car elle permet d'explorer la structure interne des nucléons et des noyaux légers avec des résolutions inférieures aux dimensions des nucléons. Un grand nombre d'observables, en particulier celles faisant intervenir la polarisation des particules impliquées, peut ainsi être mesuré en fonction de la valeur de la quadri-impulsion transférée, laquelle caractérise le pouvoir de résolution spatiale de la sonde.

Depuis près de 10 ans une équipe du LPSC travaille dans un programme de recherche en physique hadronique principalement auprès de l'accélérateur d'électrons du Thomas Jefferson National Laboratory en Virginie. Elle mesure des asymétries en diffusion élastique d'électrons polarisés sur des protons (Expériences SAMPLE et G0). Des mesures sur l'électrodésintégration de noyaux légers sont également menées dans le but d'étudier la structure nucléaire de ces systèmes et la dynamique des réactions ($e, e'p$).

Des faisceaux de photons polarisés sont également utilisés pour les études expérimentales de la structure interne du nucléon. L'ensemble expérimental GRAAL installé auprès de l'ESRF à Grenoble est destiné à l'étude des propriétés des états excités du nucléon (résonances baryoniques) par l'intermédiaire de la mesure d'observables associées à la photoproduction de mésons sur le nucléon. Des résultats nouveaux sur les sections efficaces et les observables de polarisation pour les réactions de photo-production π^0 , η , ω et K sur le proton ont été obtenus jusqu'à des énergies gamma de 1,5 GeV. Des résultats préliminaires ont aussi été obtenus pour la photoproduction de η sur le neutron.

La physique nucléaire

L'objectif de la physique nucléaire est la compréhension de la structure des noyaux à partir des interactions entre les nucléons. La thématique actuelle de la physique nucléaire est l'exploration d'états extrêmes du noyau que ce soit en asymétrie neutrons/protons (noyaux exotiques), en charge (noyaux super lourds), en vitesse de rotation (noyaux super déformés) ou en énergie d'excitation (noyaux chauds).

Pour explorer ces différents phénomènes nucléaires il faut disposer soit d'accélérateurs d'ions lourds, qui produisent des faisceaux d'énergie pouvant aller de quelques MeV à

quelques centaines de MeV par nucléon, de faisceaux de protons accélérés à des énergies de l'ordre du GeV ou de faisceaux de neutrons thermiques produits par réacteur. Les stations expérimentales sont composées de systèmes de détection de particules et/ou de rayonnements gamma très performants et/ou, plus rarement, d'électrons de conversion, les produits de réaction pouvant être sélectionnés avant détection à l'aide d'un spectromètre de masse ou d'un séparateur d'isotopes.

Une équipe du LPSC travaille sur l'étude des noyaux exotiques riches en neutrons proches du noyau doublement magique ^{132}Sn . De nouveaux isomères de durée de vie de l'ordre de la microseconde, ont été identifiés. Ces isomères ont été produits par fission induite par les neutrons thermiques du réacteur à haut flux de l'ILL de Grenoble. D'autres mesures à EUROGAM2 concernent les noyaux de la région de masse $A \sim 100$ où des coexistences de forme ont été observées. Par ailleurs dans le cadre de l'expérience COMPLIS à ISOLDE une méthode de séparation isomérique a été développée et appliquée aux noyaux d'étain riches en neutrons.

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 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 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

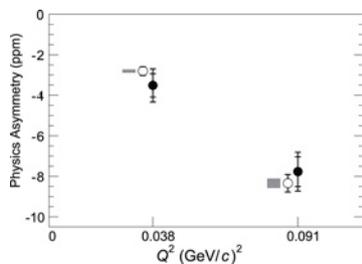


Figure 1 : Asymétries physiques.

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-

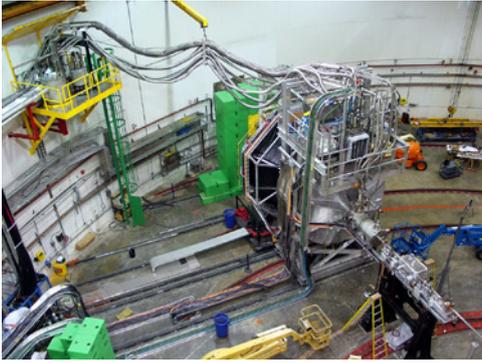


Figure 2 :
Détecteur G0.

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.

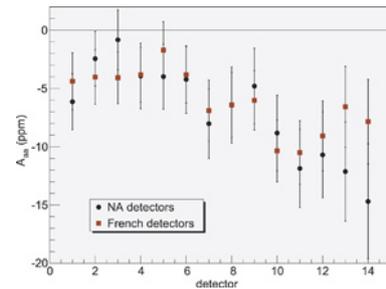


Figure 3 : Asymétrie expérimentale.



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

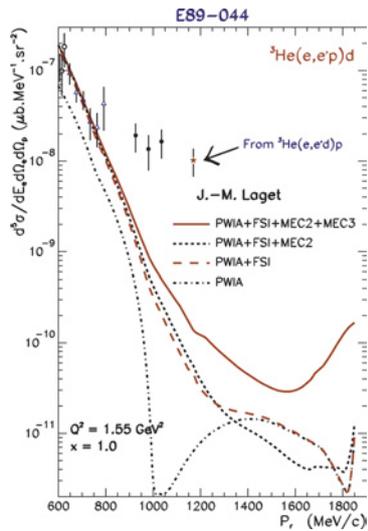


Figure 5

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.

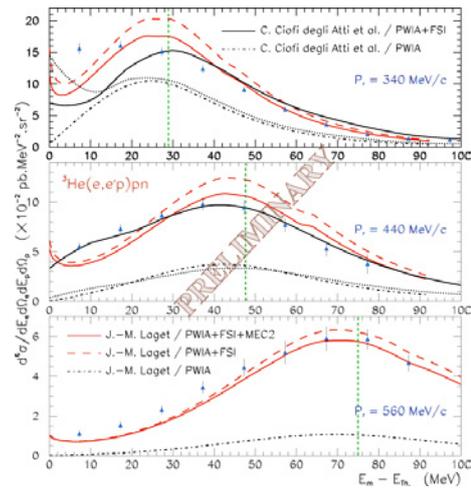


Figure 6

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.in2p3.fr/hadrons/hadrons.html>

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

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

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

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

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

Spectroscopie Baryonique à GRAAL

*D. Rebreyend, J.-P. Bocquet, A. Lleres, L. Nicoletti (doctorant), V. Kouznetsov (visiteur)
Collaborations : LPSC Grenoble, IPN Orsay, INFN Italie, INR Moscou, KIAE Moscou*

The activity of the GRAAL group has been mainly devoted to the analysis of photo production reactions on the proton. Beam asymmetries and differential cross sections were extracted up to 1.5 GeV gamma-rays energy for π^0 , η , ω , Λ and Σ . Preliminary results were also obtained for the η channels on the neutron. The $\gamma d \rightarrow K\Lambda n$ reaction was also studied in order to search for the exotic baryon θ^+ state with quantum numbers of a pentaquark.

L'ensemble expérimental GRAAL, installé auprès de l'ESRF à Grenoble, est constitué d'un faisceau de photons polarisés linéairement et d'énergie maximale 1,5 GeV associé à un dispositif de détection 4π de particules chargées et neutres. Cet appareillage est dédié à la mesure d'observables liées à la photo production de mésons (π , η , ω , K) sur le proton et le neutron. Le but de ces mesures est l'étude des propriétés des états excités (résonances baryoniques) du nucléon.

Après avoir largement contribué à la construction et à la mise en œuvre de l'expérience (1992-1996), le groupe GRAAL du LPSC a pris en charge la maintenance et l'amélioration d'une grande partie de l'expérience ainsi que l'analyse de plusieurs canaux. Les améliorations apportées au dispositif expérimental ont, en particulier, consisté dans le développement d'un nouveau système de régulation automatique du faisceau et d'un polarimètre permettant de mesurer en ligne les degrés de polarisation linéaire et circulaire du faisceau. Par ailleurs, nous avons obtenu pour la première fois une mesure très précise de l'énergie des électrons de la machine par la méthode de dépolarisation résonnante.

► Photo production sur le proton

Les asymétries faisceau Σ associées à la photo production de mésons π^0 , η , ω et K ont été mesurées jusqu'à 1,5 GeV [1-3]. Les sections efficaces différentielles et totales ont également été extraites pour les canaux π^0 , η et ω .

Pour le η , les asymétries et sections efficaces différentielles extraites jusqu'à 1,1 GeV ont été publiées. L'analyse théorique des données a suggéré la possible existence d'une troisième résonance S11 [2]. L'extension jusqu'à 1,5 GeV est en cours de finalisation et sera prochainement publiée. Pour le canal $K\Lambda$, l'extraction d'autres observables (asymétrie de recul P et observables de double polarisation) est actuellement en cours d'étude.

D'autres canaux sont analysés par les autres groupes de la collaboration GRAAL. Les asymétries et sections efficaces mesurées pour la photo production de π^+ et de deux π^0 ont été récemment publiées [4-5].

► Photo production sur le neutron

Les prises de données de l'année 2002 ont principalement été effectuées en utilisant une cible de deutérium. Des résultats préliminaires ont ainsi été obtenus par V. Kouznetsov pour la photo production de η sur le neutron [6].

En particulier, les rapports de sections efficaces différentielles $\sigma(\gamma n \rightarrow \eta n)/\sigma(\gamma p \rightarrow \eta p)$ ont été extraits à différents angles centre de masse du η et jusqu'à une énergie gamma de 1,1 GeV. Dans la région où la résonance S11(1535) domine, ce rapport est à peu près constant et en accord avec les données existantes. Au-dessus de 1 GeV, une augmentation forte

de la valeur du rapport est observée, indiquant que des résonances de plus grande énergie sont plus fortement couplées au neutron qu'au proton. Des analyses sont actuellement en cours afin d'étendre les données jusqu'à 1,5 GeV ; elles pourront ensuite être comparées à des prédictions théoriques.

► Recherche d'états exotiques

Plusieurs expériences récentes ont observé une résonance baryonique étroite, attribuée au θ^+ (1540), état ayant les nombres quantiques d'un pentaquark, dans des réactions de photo production sur le proton et le deuton [7-11]. À GRAAL, la photo production directe du θ^+ ($\gamma p \rightarrow \theta^+ K^0$ ou $\gamma n \rightarrow \theta^+ K^-$) n'est pas possible car son seuil de production est trop élevé (1,74 GeV). Il est cependant possible de le produire indirectement par la réaction $\gamma d \rightarrow \theta^+ \Lambda$ (le seuil de production est alors de 0,94 GeV). Nous avons analysé les données obtenues avec la cible de deutérium en considérant la décroissance neutre du Λ ($n\pi^0$) et la décroissance du θ^+ en (nK^+). Aucun pic correspondant au θ^+ n'a été observé et les résultats sont très bien reproduits par la simulation de la réaction $\gamma d \rightarrow nK^+ \Lambda$ où le neutron de la cible est spectateur. D'autres voies de désexcitation du Λ : ($p\pi^-$) et du θ^+ (pK^0_S) sont en cours d'analyse.

► Perspectives

Sur le plan expérimental, l'année 2003 a été consacrée à l'installation à l'ESRF de la cible polarisée HD (HYDILE) développée par l'IPN d'Orsay. L'installation de la cible est maintenant terminée et les tests de fonctionnement sont en cours. Des prises de données, principalement dédiées à la mesure de la règle de somme Gerasimov-Drell-Hearn (GDH), sont prévues courant 2004.

- [1] L. Nicoletti, Thèse de l'Université Joseph Fourier de Grenoble (2002)
- [2] F. Renard et al., Phys. Lett. B528 (2002) 215
- [3] D. Rebreyend, Proceedings of the Workshop on the Physics of Excited Nucleons (Pittsburg, 2002) 1
- [4] Y. Assafiri et al., Phys. Rev. Lett. 90 (2003) 222001
- [5] O. Bartalini et al., Phys. Lett. B544 (2002) 113
- [6] V. Kouznetsov et al., Proceedings of the Workshop on the Physics of Excited Nucleons (Pittsburg, 2002) 267
- [7] T. Nakano et al., Phys. Rev. Lett. 91 (2003) 012002
- [8] DIANA collaboration, hep-ex/0304040
- [9] CLAS collaboration, hep-ex/0307018
- [10] CLAS collaboration, hep-ex/0307088
- [11] SAPHIR collaboration, hep-ex/0307083

Spectroscopie nucléaire de noyaux très riches en neutrons

► Isomères μs dans les noyaux ^{129}In et ^{129}Sb

J.-A. Pinston, J. Genevey

Collaborations : ILL, Université de Naples, Université de Varsovie

The decay schemes of the new isomer $23/2^+$ in ^{129}Sb and $17/2^-$ in ^{129}In are reported. These nuclei are produced by thermal-neutron induced fission on ^{241}Pu . A shell-model study of these two nuclei is also performed using a realistic interaction derived from the CD-Bonn free nucleon-nucleon potential. The calculations show that the energy levels and electromagnetic transitions are in good agreement with experiment.

L'étude des noyaux proches de ^{132}Sn , doublement magique, offrent la possibilité de tester le modèle en couches très loin de la ligne de stabilité. Dans ce travail les schémas de désintégration d'isomères μs de $^{129}_{49}\text{In}$ et $^{129}_{51}\text{Sb}$ ont été étudiés expérimentalement et comparés à un calcul théorique. Pour ces deux noyaux l'interaction neutron-proton est très différente, car suivant le cas, on a une interaction trou-trou ou particule-trou et les orbites de protons, qui sont dans la couche $N = 3$ ou $N = 4$, sont aussi différentes.

Ces deux noyaux ont été produits à l'ILL par fission avec des neutrons thermiques sur une cible de ^{241}Pu . La technique expérimentale utilisée consiste à mesurer des isomères ayant des périodes dans le domaine de temps 0,5-50 μs . Leur détection est basée sur la corrélation en temps entre les produits de fission qui sont détectés dans le plan focal du spectromètre LOHENGRIN et les γ ou les électrons de conversion retardés qui désexcitent ces isomères. Le dispositif expérimental est présenté en détail en [1].

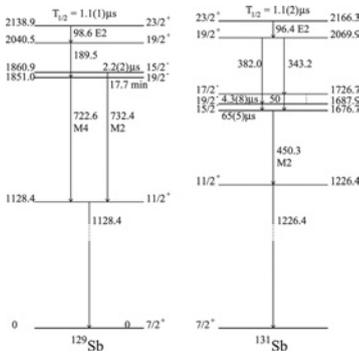


Figure 1 : Schémas de désintégration des isomères de ^{129}Sb et ^{131}Sb .

La figure 1 montre le schéma de niveaux de l'isomère ^{129}Sb mesuré au cours de ce travail [2], ainsi que celui de ^{131}Sb [1] que nous avons précédemment mesuré. Les moments angulaires de ces isomères sont élevés, $23/2^+$ pour les Sb et $17/2^-$ pour ^{129}In . Ils se désexcitent sur des niveaux de la ligne yrast ou dans leur proche voisinage.

La figure 2 montre une comparaison de ces trois noyaux avec un calcul de modèle en couches réalisé par les théoriciens de l'université de Naples. Les interactions résiduelles utilisées dans ce travail sont dérivées du potentiel nucléon-nucléon libre CD-Bonn. Les

niveaux d'énergie et les probabilités de transition sont bien reproduites par le modèle. Le seul niveau mal reproduit dans les trois noyaux est l'état $11/2^+$. Une analyse plus détaillée montre que cet effet est une manifestation faible de la couche $N = 5$, 82-126, située au-delà du gap de neutrons et donc non prise en compte dans les calculs.

[1] J. Genevey et al., Eur. Phys. J. A9, 191 (2000)

[2] J. Genevey et al., Phys. Rev. C67, 054312 (2003)

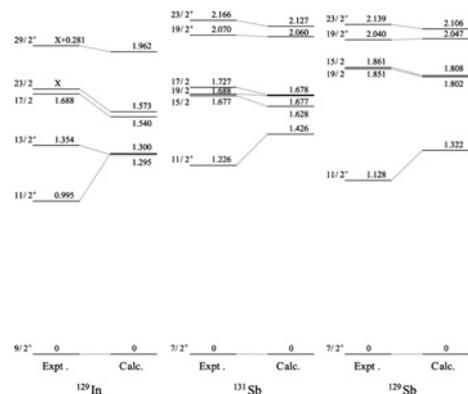


Figure 2 : Comparaisons des énergies expérimentales et théoriques de ^{129}In et $^{129,131}\text{Sb}$.

► Origine de la déformation et coexistence de formes dans les noyaux de masse $A \sim 100$

J.-A. Pinston, J. Genevey

Collaborations : Université de Varsovie, ILL, Université de Manchester, Argonne National Laboratory, IRES Strasbourg

The 9/2[404] strongly deformed band in the odd Sr and Zr nuclei of the $A \sim 100$ region was observed for the first time. The properties of this neutron orbital and its influence on the onset of deformation in the neutron rich $A \sim 100$ region are discussed.

Les noyaux riches en neutrons, proches de $A = 100$, présentent plusieurs comportements intéressants et uniques : apparition brutale de la déformation dans l'état fondamental des Sr et Zr et coexistence de formes. C'est la raison pour laquelle ils ont été intensivement étudiés dans le passé. Cependant, malgré ces efforts, la bande de rotation bâtie sur le niveau $\nu 9/2[404]$ n'avait encore jamais été observée. En fait, elle est très certainement inaccessible par désintégration bêta et difficile à atteindre dans les réactions en ligne, parce que ses niveaux sont au dessus de la ligne yrast. Récemment, nous avons réussi à observer cette bande dans ^{99}Zr pour la première fois, à partir de données obtenues avec le détecteur γ EUROGAM2, en étudiant les γ prompts émis dans la fission spontanée de ^{248}Cm [1]. Depuis, cette bande a été aussi peuplée dans ^{97}Sr [2] et ^{101}Zr [3]. Ces trois bandes sont reportées dans la figure 1 où l'on peut observer que les énergies d'excitation sont très voisines dans ces trois noyaux. Un moment quadripolaire $Q_0 \sim 4$ b a été déduit du rapport de branchement de l'état $13/2^+$, dans ces trois bandes, ce qui correspond à une déformation importante $\beta_2 \sim 0,42$. Cette valeur est remarquable puisqu'elle correspond au maximum de déformation observé dans cette région.

Ces nouveaux résultats permettent de clarifier l'origine de l'apparition de la déformation et des coexistences de formes observées dans cette région. En fait, les orbites $9/2[404]$ favorisant une forme sphérique du cœur, et $3/2[541]$ et $5/2[532]$ favorisant une forme déformée du cœur, jouent un rôle prépondérant. Dans les bandes considérées, à une énergie d'excitation de ~ 1 MeV, la paire de neutrons dans l'orbite $9/2[404]$ est brisée et un neutron occupe un niveau $3/2[541]$ ou $5/2[532]$ pour former une nouvelle paire dans le cœur, avec ces orbites. Ce mécanisme favorise donc fortement les grandes déformations dans cette région. Avec la découverte de la bande $9/2[404]$, trois déformations différentes ont été mises en évidence dans les noyaux de Sr et Zr avec 59 neutrons, ce qui est très certainement une situation unique dans la carte des isotopes.

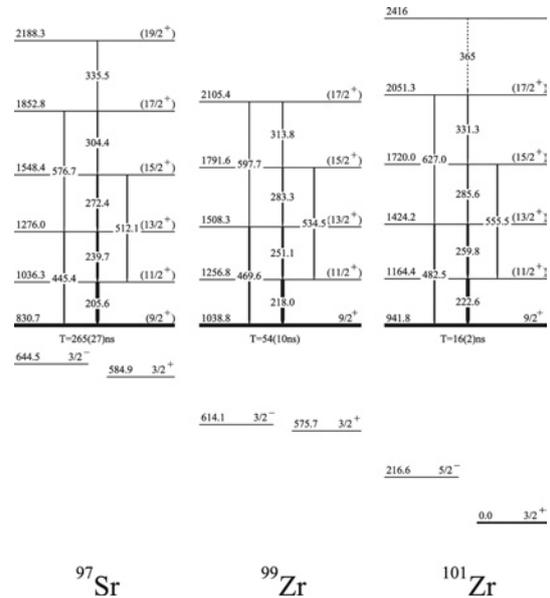


Figure 3 : Bandes $9/2[404]$ dans ^{97}Sr et $^{99,101}\text{Zr}$.

- [1] W. Urban et al., Eur. Phys. J. A16 11 (2003)
- [2] J.K. Hwang et al., Phys. Rev. C 67, 054304 (2003)
- [3] W. Urban et al., à paraître dans Eur. Phys. J.

► Séparation isomérique des noyaux d'étain riches en neutrons

J. Genevey, R. Guglielmini

Collaborations : IPNO (Orsay), Laboratoire Aimé Cotton (Orsay), CSNSM (Orsay), Université de Mc Gill (Canada), Université de Mayence (Allemagne), Institut de spectroscopie de Troitsk (Russie), CERN (Genève, Suisse).

The SIINODE project has been installed at the end of the emergent beam line of COMPLIS to study the purity of the secondary beam produced by resonant ionisation of laser desorbed atoms. Then, this setup has been used to prove the existence of a double line in the hyperfine spectrum obtained previously for ^{129}Sn , which confirmed the $3/2$ spin value for the ^{129}Sn ground state.

Pour estimer le degré de pureté des faisceaux d'ions radioactifs secondaires produits par le dispositif expérimental COMPLIS (COLlaboration for spectroscopy Measurements using a Pulsed Laser Ion Source) et pour résoudre, si possible, l'énigme posée par les spectres hyperfins des noyaux impairs d'étain ($A = 125$ à 131) [1], le projet SIINODE (Séparation Isobarique et Isomérique de NOyaux DEscendants) a été installé sur la ligne émergente de COMPLIS.

COMPLIS permet l'ionisation résonante en deux ou trois étapes d'atomes extraits par désorption laser. Un balayage en fréquence est réalisé sur le faisceau laser qui produit la première étape d'excitation. Chaque fois que la fréquence du laser correspond à une résonance, les atomes sont excités puis les autres faisceaux laser les ionisent. Les photo-ions ainsi produits sont alors détectés, identifiés en masse par leur temps de vol et comptés pour obtenir le spectre hyperfin des atomes étudiés.

Le projet SIINODE comprend :

- un détecteur de photo-ions escamotable ;
- un petit détecteur mobile en x et en y pour assurer un bon centrage du faisceau ;
- un dispositif permettant d'introduire, sans détériorer le vide, une bande de Mylar aluminisé à la place du détecteur pour collecter les photo-ions ;
- une station de spectrométrie γ comprenant un détecteur, l'électronique associée et un système d'acquisition ;
- un dérouleur pour le transport rapide et automatique de la source obtenue vers la station de détection γ .

Pour estimer la pureté du faisceau secondaire produit par COMPLIS, nous avons accordé le laser sur une fréquence de résonance, collecté les photo-ions sur la bande de Mylar et enregistré le spectre des rayonnements γ émis par la source obtenue.

L'expérience a été effectuée sur les noyaux d'étain auprès d'ISOLDE-BOOSTER. Le faisceau primaire était produit dans une cible de carbure d'uranium (bombardée par les protons de 1 GeV) associée à une source d'ions à plasma chaud. Après extraction, séparation en masse et ralentissement, il était arrêté dans le disque collecteur en graphite de COMPLIS d'où les atomes collectés étaient ensuite extraits par désorption par faisceau laser. Au voisinage de la masse 130, tous les éléments du Cd ($Z = 48$) au Ba ($Z = 56$) sont contenus dans le faisceau primaire, donc collectés dans le graphite et par conséquent, présents dans le nuage d'atomes créé par la désorption. La grande sélectivité de l'ionisation résonante permet d'ioniser seulement les atomes d'étain.

À partir de l'analyse des spectres de rayonnements γ enregistrés avec SIINODE, nous avons pu montrer que beaucoup des atomes contenus dans le disque collecteur en graphite étaient extraits par le laser de désorption sous la forme d'ions. Ceci permet d'expliquer pourquoi l'efficacité mesurée de COMPLIS a toujours été de 10 à 100 fois inférieure à celle que l'on peut estimer. Par ailleurs, il est clair que ce phénomène empêche d'obtenir des faisceaux secondaires intenses et de grande pureté par l'utilisation de la méthode COMPLIS telle quelle. Pour éliminer tous les ions d'étain créés par la désorption laser nous avons dû hacher la tension d'alimentation d'un des déflecteurs électrostatiques de

la ligne émergente de COMPLIS et introduire un écran pour limiter la taille du faisceau transmis. Cette purification du faisceau émergent effectuée, nous avons réalisé les mesures projetées pour clarifier les résultats précédemment obtenus sur les isotopes d'étain.

En effet, les spectres hyperfins des isotopes impairs entre $A = 125$ et $A = 131$ présentent seulement cinq raies au lieu des six raies attendues : trois pour l'état fondamental $3/2$ et trois pour l'état isomérique $1\ 1/2$ du noyau. Soit le spin de l'état fondamental est $1/2$ et non $3/2$, soit une des raies observées est un doublet. L'identification des raies du spectre hyperfin de ^{129}Sn dans le cas de la deuxième hypothèse est montrée sur la figure 1a). Une valeur de spin $1/2$ conduirait à attribuer une déformation anormalement grande pour ces noyaux semi-magiques attendus sphériques. Pour confirmer ou infirmer l'existence de ce doublet

les mesures ont été effectuées pour la masse 129 car les rayonnements γ émis par l'état fondamental et l'état isomérique du noyau ^{129}Sn sont différents. Trois spectres γ ont été enregistrés avec SIINODE (Figure 1b) : le premier en noir correspond au bruit de fond, le second en rouge est obtenu lorsque la fréquence du laser d'excitation est fixée sur le pic rouge (Figure 1a) attribué à l'état isomérique et le troisième en violet lorsque la fréquence du laser est fixée sur le pic violet (Figure 1a) supposé double et attribué à la fois à l'état isomérique et à l'état fondamental. Sur le spectre rouge de la figure 1b, hormis les pics correspondant au bruit de fond, seulement les raies dues à la décroissance de ^{129m}Sn sont observées tandis que sur le spectre en violet apparaissent non seulement les raies dues à la décroissance de ^{129m}Sn mais aussi une raie due à celle de ^{129g}Sn (voir figure 1b). Ceci confirme l'existence du doublet et donc la valeur $3/2$ pour le spin de l'état fondamental. Ainsi, nous avons montré que SIINODE peut être utilisé pour identifier les raies hyperfines à condition d'éliminer soigneusement les ions créés directement par le laser de désorption.

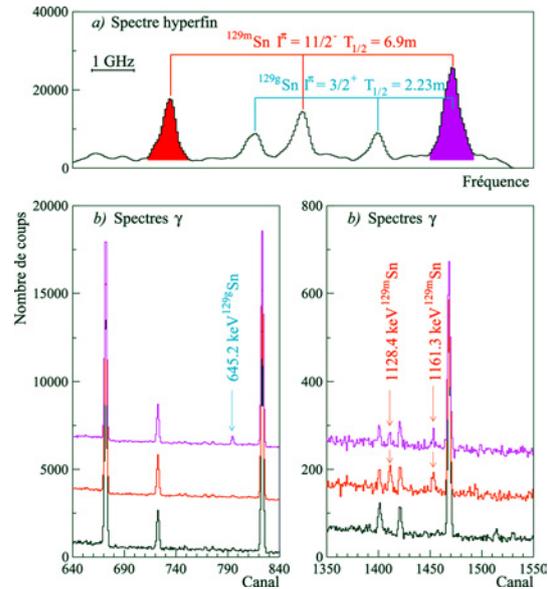


Figure 1 :

- Spectre hyperfin obtenu sur la masse 129.
- Spectres γ correspondant à différentes fenêtres en fréquence du spectre hyperfin. Les fenêtres en fréquence et les spectres γ associés sont définis par le même code de couleur (rouge et violet) et le bruit de fond est tracé en noir.

[1] B. Roussière et al., Proceedings of the V International Workshop « Prospects for the Development of Laser Methods in the Study of Nuclear Matter », Poznań, Poland, May 28-31, 2001