

LES COCKTAILS COMPLEXES DE L'INTERACTION FORTE

DES PONTS ET DES ILES. L'étude de l'interaction forte et des objets qui la ressentent est un travail d'explorateur et de bâtisseur. L'explorateur a déjà abordé quatre îles, quatre cocktails complexes de constituants liés par une force que l'on s'attache à formuler dans sa diversité. La première est celle des briques fondamentales : les quarks et les gluons. D'où viennent-ils ? Cela reste un grand mystère et le bâtisseur cherche le pont qui liera l'Avant, pure énergie dans le néant, et l'émergence de la matière qui apparaît sous forme de quarks et de gluons. Pour cela, il poursuit des études auprès du LHC. Ces premières briques ont permis la formation des protons et des neutrons, seconde île que l'on explore à JLab et au Cern, sans que nous sachions relier ces deux rivages : la description du nucléon sur la base des briques élémentaires n'en est qu'à ses débuts. Les protons et les neutrons s'assemblent ensuite dans les sites stellaires pour former les noyaux des atomes grâce à des réactions nucléaires mais comment décrire les spécificités d'un noyau selon ses composants ? Nouveaux chantiers, nouveaux ponts à construire, étudiés auprès d'installations comme le Ganil. Ce numéro de *Scintillations* est entièrement consacré aux travaux abordant la diversité de l'interaction forte car l'Irfu en étudie toutes les facettes.

Jean-Luc Sida



Quarks et gluons

Protons et neutrons

Noyaux

Réactions

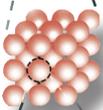
- ◀ Dénouer l'interaction forte p. 2
- ◀ L'alchimiste p. 4
- ◀ Noyau, d'où vient ta force ? p. 6
- ◀ L'archipel de l'interaction forte p. 8
- ◀ Bouillonnant nucléon p. 10
- ◀ Vers l'intimité 3D du nucléon p. 12
- ◀ Alice fée des merveilles p. 14
- ◀ De l'essence de toute chose p. 16



Le physicien travaille à connaître la structure de la matière. Dans d'éléments chimiques. Les différences entre ces éléments tiennent en fonction du nombre de neutrons qui s'y ajoutent. Nous entrons Lorsque le physicien décortique le noyau, il découvre le monde l'interaction forte. Ainsi, quarks, gluons, nucléons et noyaux sont les nous entoure et l'histoire de l'Univers.

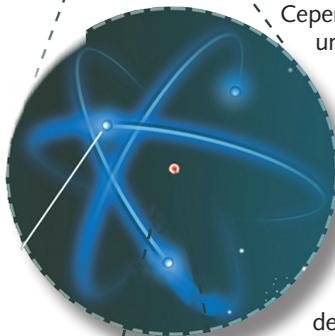


Le noyau, constitué de protons et de neutrons, cent mille fois plus petit que l'atome, concentre pourtant la quasi-totalité de sa masse. Il régit la formation du cortège électronique et conditionne l'organisation de toutes les échelles supérieures de la matière. L'interaction forte qui permet sa cohésion malgré la répulsion électrique entre les protons a une portée tellement faible que son effet ne dépasse pas les limites du noyau.



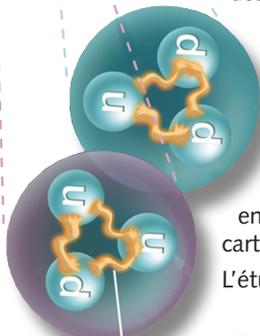
Les applications de la physique du noyau sont nombreuses : dans le secteur énergétique bien sûr (trois quart de l'électricité française fournie par les réacteurs nucléaires), dans le secteur médical avec l'imagerie et les radiothérapies, pour le traitement de matériaux...

Pendant, à chaque fois que nous en demandons un peu plus au noyau, pour le traitement et l'analyse des déchets nucléaires, pour la lutte contre la prolifération, pour l'estimation précise des dommages aux tissus biologiques en hadronthérapie¹ ou encore pour de nouvelles filières nucléaires, il faut faire des recherches fondamentales spécifiques : la précision de nos prédictions et notre connaissance du noyau restent insuffisantes. L'étendue des phénomènes nucléaires dépasse les capacités descriptives des modèles théoriques actuels.

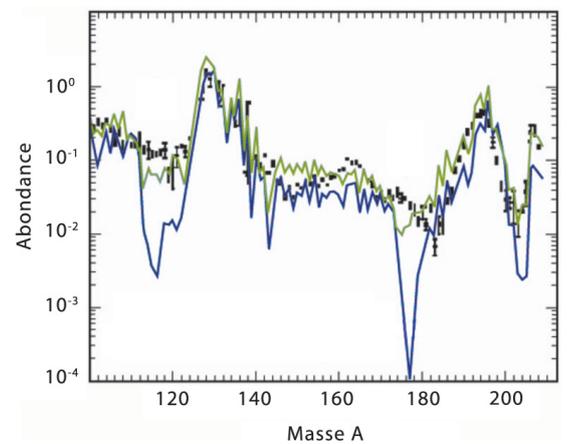


Les premières fenêtres ouvertes sur le noyau sont ses modes de réaction avec des particules ou d'autres noyaux (pages 4-5). Absorption, fusion, émission ou transfert de nucléons², déformation du noyau, fission, tous ces processus déterminent l'abondance des éléments dans l'Univers car ils gouvernent leur fabrication dans les différents chaudrons stellaires (étoiles, supernovas). Les réactions révèlent la complexité des interactions entre nucléons au sein du noyau. Elles sont aussi une clé pour l'observation de nouveaux noyaux produits grâce aux accélérateurs qui permettent d'explorer des régions encore inconnues de la carte nucléaire.

(1) La hadronthérapie consiste à détruire les tumeurs cancéreuses grâce à un faisceau d'ions lourds.

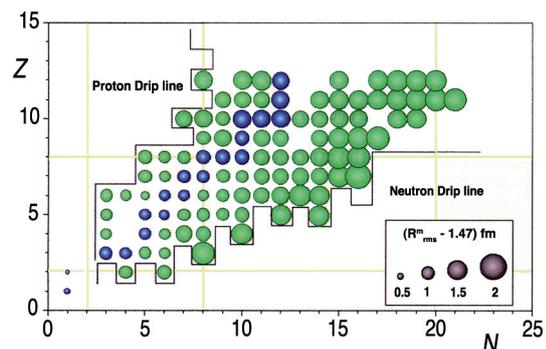


L'étude expérimentale de



Masses des éléments produits lors de l'explosion d'une supernovae (points noirs) comparés à des calculs utilisant différentes interactions nucléon-nucléon. Le premier, en bleu, tient compte d'une interaction adaptée à la description des noyaux stables. Le second, en vert, permettant de décrire les caractéristiques de certains noyaux exotiques, reproduit mieux les données. Comment faire évoluer l'interaction pour qu'elle décrive l'ensemble des phénomènes nucléaires ?
CR Physique 4 (2003) 424 ; B. Pfeiffer, Z. Phys. A 357 (1997)

ces noyaux « exotiques » fait apparaître des comportements surprenants (pages 6-7). En effet, dans le noyau, les nucléons s'auto-organisent en obéissant à la mécanique quantique. Ils subissent simultanément trois des quatre interactions de la nature : l'interaction électromagnétique répulsive entre protons qui va fixer une limite à la taille des édifices nucléaires, l'interaction faible qui va déterminer leur éventuelle décroissance radioactive et l'interaction forte qui permettra sa co-



Taille du noyau en fonction de son nombre de protons et de neutrons. On observe une augmentation inattendue des tailles des noyaux lorsque l'on s'éloigne de la ligne de plus grande stabilité ($N=Z$).

I. Tanihata and R. Kanungo, CR Physique 4 (2003) 437.

l'interaction forte

Par David Lhuillier et Antoine Drouart

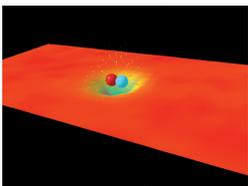
Après avoir dénoué quelques écheveaux étranges, David Lhuillier oscille entre neutrinos et réacteurs. Antoine Drouart, physicien expérimentateur, cherche à comprendre la formation et la structure des noyaux super lourds.



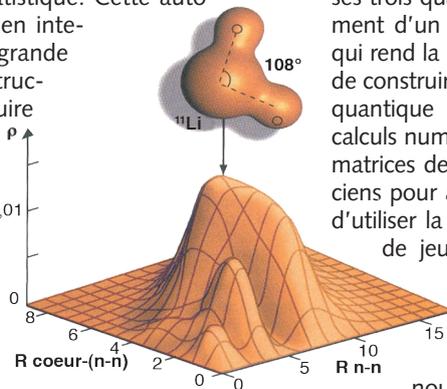
l'incroyable diversité des objets qui nous entourent, il existe seulement une centaine au nombre de protons présents au sein de leur noyau. Ils se déclinent en isotopes dans le royaume de l'interaction forte qui assure la cohésion du cœur de l'atome. complexe du nucléon construit de quarks et de gluons, briques fondamentales de pièces imbriquées d'un casse-tête où se joue la compréhension de la matière qui

hésion. Il s'agit d'un problème à N corps : les nucléons sont trop nombreux pour être traités individuellement de façon exacte mais pas assez pour que nous puissions utiliser une description statistique. Cette auto-organisation des nucléons en interaction rend possible une grande variété de formes et de structures. Il faut même introduire des agrégats nucléaires (groupement de nucléons au sein du noyau), pour rendre compte de certaines observations.

En fait, l'interaction entre nucléons n'est pas l'interaction forte la plus fondamentale, mais un résidu de celle-ci (page 8). L'interaction forte « fondamentale », décrite par la chromodynamique quantique (pages 8-9), agit entre les quarks par l'intermédiaire des gluons, tout comme l'interaction électromagnétique agit entre des particules chargées par l'intermédiaire du photon. A la différence près que le gluon est lui-même sensible à l'interaction forte alors que le photon, n'étant pas chargé, ne ressent pas les forces électromagnétiques. Une différence capitale qui va entraîner toute la complexité des hadrons³.



Probabilité de présence des quarks au sein d'un neutron polarisé. La région claire correspond à la plus haute densité. Carlson et Vanderhaeghen, PRL (2004)



Le ¹¹Li est un noyau à halo pour lequel il faut introduire des corrélations à plusieurs nucléons voire des agrégats. La seule interaction entre deux nucléons ne permet pas de décrire ces noyaux. Ph. Chomaz, La Recherche, octobre 2000.

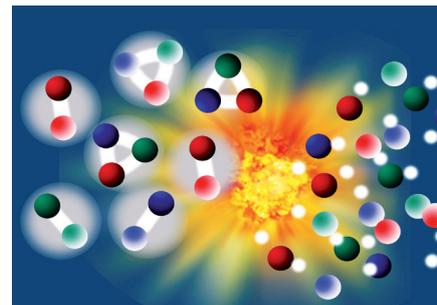
L'interaction forte entre quarks a un comportement singulier par rapport aux autres forces présentes dans la nature. A très courte distance, les quarks ne ressentent pas d'interaction, ils sont quasi-libres. A l'opposé, quand ils s'éloignent l'un de l'autre, la force qui les lie devient colossale ce qui confine les quarks et les gluons dans les

hadrons. Des expériences au Jefferson laboratory (JLab) et au Cern utilisent des collisions à haute énergie entre leptons⁴ et nucléons. Autour des fondations du nucléon, ses trois quarks dits de valence, on observe un foisonnement d'un nombre variable de particules (page 10), ce qui rend la modélisation extrêmement complexe. L'espoir de construire un nucléon à partir de la chromodynamique quantique repose actuellement sur des méthodes de calculs numériques dites « sur réseau », grosses consommatrices de temps de calcul. La dernière idée des physiciens pour atteindre cette puissance à moindre coût est d'utiliser la puissance des cartes graphiques de consoles de jeu (page 11)! Parallèlement, les expérimentateurs s'attèlent à fournir une description de plus en plus complète du nucléon, la quête de la tomographie du proton est en marche (pages 12-13). Peut-être pourrions-nous même rejouer la naissance des nucléons, comme aux premiers instants de l'Univers! Avant qu'ils ne se regroupent en nucléons (ou plus généralement, en hadrons), nous pensons que la densité et la température de l'Univers était

tellement élevée que les quarks et les gluons étaient « déconfinés », à l'état de plasma (page 14). Le détecteur Alice, au Cern, consacre ses études à cet état de la matière (page 15) que les faisceaux d'ions lourds du LHC pourront recréer pendant... quelques 10⁻²⁴ s !

L'interaction forte se fait sentir à toutes les échelles de notre Univers, poupées gigognes allant des quarks et gluons composant les nucléons qui eux même forment les noyaux. Aujourd'hui, il est impossible de modéliser correctement toutes ces échelles uniquement à partir des lois fondamentales de la chromodynamique quantique.

L'Irfu vous invite aux cocktails de l'interaction forte et vous fait partager les grandes questions de la physique nucléaire au cœur de tant d'efforts et de passions scientifiques.



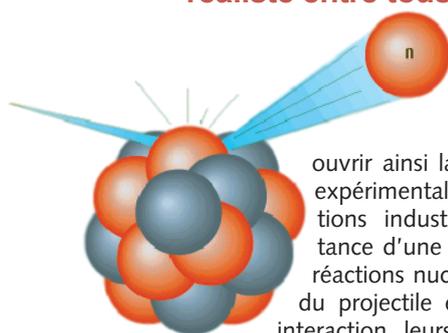
Ce que l'on sonde de la matière nucléaire dépend de la violence de la collision. A très haute énergie, grâce aux faisceaux d'ions lourds du LHC, on pourra atteindre la formation d'un plasma de quarks et de gluons.

(2) Le terme nucléon désigne de façon générique un constituant du noyau, proton ou neutron. Le nombre de nucléons d'un atome ou nombre de masse est généralement noté A.

(3) Hadron est un terme générique utilisé pour désigner les particules composites régies par l'interaction forte.

(4) Lepton est un terme générique utilisé pour désigner les particules fondamentales de spin 1/2 qui ne sont pas sensibles à l'interaction forte comme l'électron, le muon ou le neutrino.

Les réactions nucléaires transforment le noyau de l'atome. Elles sont provoquées par Leur rôle dans la nature est crucial puisqu'elles ont construit depuis le big bang tous continuent le processus de nucléosynthèse et font briller notre soleil. La modélisation réaliste entre tous les nucléons du problème.



Le physicien ne dispose que des réactions nucléaires pour avoir une action sur les noyaux et ouvrir ainsi la voie à la physique nucléaire expérimentale. Si l'on ajoute leurs utilisations industrielles et médicales, l'importance d'une connaissance approfondie des réactions nucléaires est évidente. La nature du projectile et du noyau-cible entrant en interaction, leurs énergies et la distance minimale entre leurs trajectoires, appelée paramètre d'impact, caractérisent le champ des possibles. La nature et l'énergie des particules et des noyaux sortants après l'interaction définissent totalement la réaction. On peut mesurer la probabilité d'une réaction et comment elle évolue en fonction de l'énergie et de la nature des noyaux. On peut aussi mesurer la distribution en énergie et en angle des particules et noyaux produits. A paramètre d'impact nul, c'est un choc bille en tête et la conversion de l'énergie cinétique en excitation du (ou des) noyau(x) est maximale. Si l'énergie est assez faible (quelques MeV par nucléon), les noyaux peuvent fusionner en un seul gros « noyau composé » généralement instable mais d'une durée de vie appréciable. Il

trouvera une configuration stable par fission ou par l'émission de quelques particules de faible énergie (on parle d'évaporation de nucléons, de deutons etc.) et par une chaîne de désintégrations radioactives. Lorsque l'énergie cinétique augmente, un nombre de plus en plus élevé de nucléons ou de grumeaux préexistants dans les noyaux (noyaux d'hélium en particulier) sont immédiatement éjectés avec de grandes énergies, laissant un noyau de plus en plus perturbé qui devra revenir par les mêmes processus vers une configuration stable. A plus grande énergie encore, d'autres particules, en premier lieu des pions composés d'un quark et d'un antiquark, peuvent être produits et éjectés.

A l'autre extrême, pour les grands paramètres d'impact, les noyaux s'effleurent : ils sont peu perturbés. La réaction la plus délicate est la diffusion élastique (les noyaux restent identiques comme dans un choc au billard) ou inélastique (le noyau est excité vers ses premiers niveaux d'énergie). C'est un processus cohérent qui s'apparente à la diffraction d'une onde particulièrement sensible à la densité de surface du noyau. Les noyaux peuvent encore s'échanger un ou quelques nucléons dont on peut ainsi connaître la distribution dans le noyau initial.

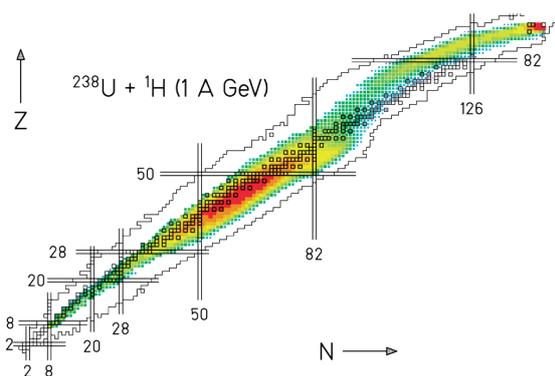
La répulsion coulombienne entre les noyaux impose une énergie minimale pour que l'interaction forte puisse agir. Cependant la perturbation due au champ coulombien peut être suffisante, en particulier dans les collisions entre ions lourds, pour induire une excitation collective du noyau dont la décroissance nous renseignera sur la structure du noyau excité.

Les collisions entre ions lourds mettent aussi en jeu les aspects macroscopiques tels que la compression de la matière nucléaire et les excitations collectives du noyau (rotations, vibrations, résonances géantes).

Une mention particulière pour le neutron, projectile insensible à la répulsion coulombienne, car il est capable d'induire des réactions avec une énergie presque nulle tant pour étudier les noyaux que pour les applications industrielles de la physique nucléaire.

Au-delà des désintégrations radioactives, les réactions nucléaires sont le seul moyen que nous ayons pour changer la nature de la matière, pour l'approprier, l'observer, la connaître à l'échelle du noyau. L'Irfu est ainsi le détenteur de l'une des missions du CEA : comprendre la physique du noyau.

Alain Boudard



Étude de la spallation à GSI

Carte des isotopes produits par la collision à grande vitesse ($v/c = 0,9$) d'ions uranium sur une cible d'hydrogène. Les couleurs symbolisent les probabilités de production de chaque isotope, du rouge pour les noyaux les plus produits au vert pour les noyaux peu produits.

On observe deux processus de réaction. En haut, la formation de noyaux au voisinage du noyau d'uranium correspond à l'évaporation de nucléons pendant la réaction. Au milieu, le noyau d'uranium a fissionné pour donner naissance à des noyaux de masse intermédiaire.

P. Armbruster et al. PRL 2004

Alain Boudard et Cédric Simenel poursuivent des travaux sur les réactions nucléaires, tant d'un point de vue théorique qu'expérimental.



le choc avec une particule (nucléon, méson, électron, photon) ou avec un autre noyau. les noyaux présents dans l'Univers. Toujours à l'œuvre dans les étoiles, elles des réactions commence seulement à se traiter à partir de l'interaction

Fusion gastronomique

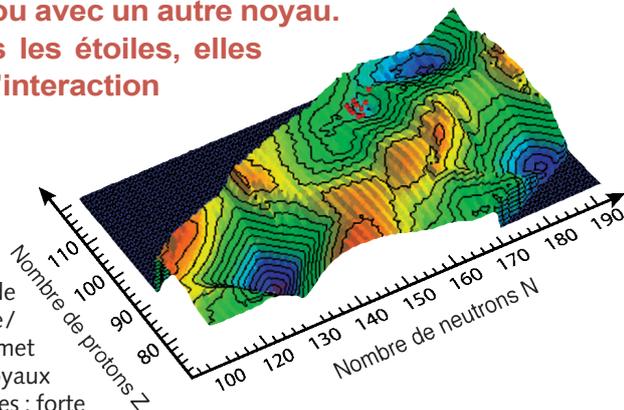
Tout bon cuisinier vous le dira, en mélangeant deux ingrédients vous pouvez obtenir une saveur nouvelle, souvent surprenante. C'est ce qui arriva à Irène et Frédéric Joliot-Curie lors de leur découverte de la radioactivité artificielle. Bombardant une feuille d'aluminium avec des noyaux d'hélium, ils formaient un nouveau corps, issu de la fusion des deux noyaux : un isotope¹ radioactif de phosphore.

Après ces premiers travaux réalisés avec une source radioactive et afin de former toujours de nouveaux noyaux, les études sur la fusion furent menées auprès d'accélérateurs de particules de plus en plus puissants, permettant de vaincre la répulsion coulombienne entre les noyaux². La fusion a ainsi permis de former de nouveaux éléments comportant jusqu'à 118 protons alors que l'élément naturel le plus lourd est l'uranium avec 92 protons. Dans ces noyaux appelés superlourds, la répulsion coulombienne est tellement forte qu'ils ne demandent qu'à se casser. Ils ne sont liés par l'interaction forte que grâce à des effets quantiques. Leur degré de stabilité permet de sonder des caractéristiques fondamentales de l'interaction nucléaire agissant entre les nucléons.

Au-delà du travail de physicien nucléaire/cuisinier, la fusion permet de former des noyaux dans des états extrêmes : forte déformation, rotation rapide, haute température, vibration de large amplitude, ouvrant la voie à ces champs d'étude de la physique du noyau.

Le spectromètre S³ couplé à l'utilisation des faisceaux stables très intenses de Spiral2 (démarrage prévu en 2013) permettra d'étudier ces phénomènes, en particulier les noyaux superlourds, avec une acuité jusqu'à mille fois supérieure aux dispositifs actuels. La probabilité de fusion décroît cependant très vite avec le nombre de protons à cause de la répulsion coulombienne et ces expériences peuvent durer plusieurs mois pour former moins d'une dizaine de noyaux ! La gastronomie nucléaire et la découverte de nouvelles saveurs deviennent de plus en plus difficiles.

Cedric Simenel



Énergie d'origine microscopique stabilisant les noyaux pour les noyaux au-delà du plomb. On observe des effets stabilisateurs très importants pour le plomb et ses deux nombres magiques (un nombre de nucléons est dit magique quand il entraîne une surstabilisation du noyau et sa sphéricité), $Z=82$ et $N=126$. Suivant ce modèle, il existe une autre zone stabilisée pour $Z \sim 114$, $N \sim 184$ que les physiciens cherchent à étudier. P. Moller et al., Finite range droplet model 1994

(1) Deux isotopes d'un même élément se différencient par leur nombre de neutrons alors que leur nombre de protons est identique.

(2) La répulsion coulombienne est proportionnelle au produit des nombres de protons des deux noyaux.

(3) La quantité de mouvement d'une particule caractérise son déplacement. Elle donne la direction et, quand la masse est connue, sa vitesse

Le Super Séparateur Spectromètre S³

Le Super Séparateur Spectromètre S³ (prononcer S cube) va utiliser les faisceaux très intenses d'ions lourds stables produits par Spiral2 au Ganil pour étudier la fusion et la spectroscopie de noyaux rares, comme les noyaux superlourds.

S³ doit combiner une grande transmission et une excellente sélectivité. En effet, les noyaux d'intérêt ont de très larges distributions en angle, en quantité de mouvement³ et en états de charge. Ils sont aussi masqués par une majorité de noyaux « parasites », jusqu'à un milliard de milliards de fois plus présents.

Le spectromètre est constitué de deux étages de séparation. Le premier utilise deux dipôles magnétiques pour rejeter la plupart des noyaux parasites, à commencer par le faisceau primaire, et pour focaliser les noyaux d'intérêt en un point indépendamment de leur quantité de mouvement. Les spécialistes en magnétisme de l'Irfu ont étudié un nouveau concept d'aimants ouverts permettant l'évacuation et l'arrêt du faisceau primaire. Le deuxième étage est un séparateur en masse, combinant un dipôle électrique et un dipôle magnétique, pour l'identification des noyaux. L'optique du spectromètre est réalisée avec des triplets de quadripôles supraconducteurs. Les simulations, réalisées en collaboration avec le Ganil et le laboratoire d'Argonne (USA), montrent que la correction des aberrations est possible avec des hexapôles et octupôles superposés aux quadripôles. La mise en service de S³ est prévue en 2013 dès les premiers faisceaux de Spiral2.

Jacques Payet

Les noyaux sont des systèmes quantiques constitués de nucléons liés entre eux par comment la déterminer ? Quelle est l'importance des corrélations entre les nucléons l'interaction, certains étant très sensibles à la différence entre le nombre de neutrons

Comme les électrons des atomes soumis à la mécanique quantique, les nucléons se répartissent sur des couches. Quand une couche est pleine, le noyau acquiert un surcroît de stabilité car on y respecte une symétrie. Le nombre de nucléons correspond alors à un « nombre magique ». Ces nombres sont des pierres incontournables pour reproduire et comprendre la structure des noyaux. En étudiant certains noyaux instables dits « exotiques », on a montré que ces nombres magiques n'ont pas un caractère aussi universel que ce que l'on pensait. D'autre part, contrairement aux électrons de l'atome, les nucléons ne sont pas plongés dans un champ attracteur. Ils doivent s'organiser seuls pour définir la structure qui correspondra à la configuration du noyau la plus stable. Les noyaux peuvent donc avoir une multitude de formes. L'étude des noyaux exotiques vient enrichir et souvent bouleverser le savoir acquis sur la base des noyaux stables. Elle permet de mieux définir l'interaction entre nucléons et le formalisme de description des noyaux.

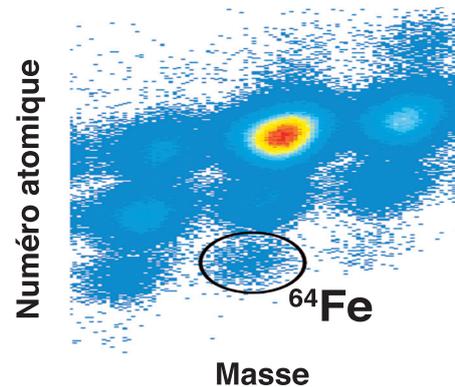
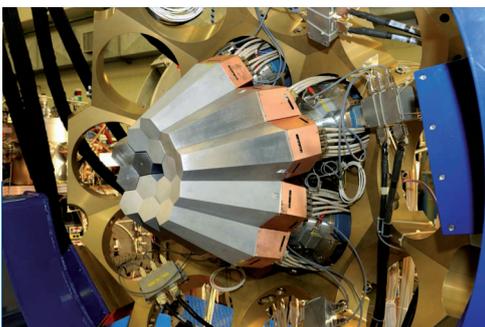
Afin de mieux comprendre ces effets, des machines produisant des noyaux exotiques telles que Spiral2 et Fair en Europe sont en cours de construction. Au Japon, la nouvelle installation RIBF est déjà en fonctionnement (lire l'interview de Valérie Lapoux à droite). La conception de nouveaux systèmes de détection est indispensable pour tirer le meilleur parti de ces installations comme le projet Minos (*magic numbers off stability*), couplé au détecteur

de photons de nouvelle génération Agata, qui partira à la recherche de nouveaux nombres magiques ou la futur cible Chymène (voir encadrés). En dehors de la structure des noyaux exotiques, la surstabilisation des noyaux due à des effets quantiques est déterminante pour la stabilité des noyaux les plus lourds. Ils ne sont liés par l'interaction forte que grâce à des effets de couches fins. Ces effets vont aussi influencer sur la forme des noyaux. Avec Spiral2, le phénomène quantique de coexistence de formes, où un état du noyau correspond simultanément à deux formes différentes pour celui-ci, pourra être étudié avec précision. D'autre part, les théories nucléaires prédisent que certains noyaux peuvent avoir une forme inhabituellement allongée, appelée hyperdéformation, lorsqu'ils sont en rotation. En approximant le noyau à un ellipsoïde,

Spiral2 : Deuxième Système de Production d'Ions Radioactifs Accélérés en Ligne. Il est en cours d'installation auprès du Grand Accélérateur national d'ions lourds (Ganil, Caen). (Echéance 2012 pour la partie faisceaux stables de haute intensité).

Fair : Facility for anti-proton and ion research est un projet allemand qui sera installé au GSI. (Echéance 2016)

RIBF : Situé auprès de Riken (Japon), le Rare ion beam factory est une installation de nouvelle génération produisant des noyaux exotiques.



Identification au Ganil du noyau exotique de ^{64}Fe . On peut mesurer les états excités et le temps de vie des noyaux exotiques pour caractériser leur structure. J. Ljungvall.

Agata, un bijou européen voit la lumière

L'émission de rayonnements gamma est un mode de désexcitation privilégié des noyaux chauds ou excités. Ces rayonnements sont des signatures de la structure du noyau : agencement des nucléons, forme, rotation... Un bond spectaculaire en qualité de détection est obtenu grâce au nouveau dispositif Agata (*Advanced gamma-ray tracking array*), basé sur le concept de la « traque » des photons. Les photons diffusent dans la

matière en déposant une partie de leur énergie à chaque étape : avec Agata, on reconstruit chaque étape de cette piste pour reconstruire l'énergie totale du photon. Agata est basé sur de nouvelles technologies : cristaux de germanium segmentés, algorithmes d'analyse des signaux numérisés et de reconstruction des trajectoires.

Un premier sous-ensemble de 15 cristaux installé à Legnaro (Italie) a permis de valider le concept. La première expérience fut réalisée en juin afin d'étudier des noyaux exotiques de zinc. Les résultats étant conformes aux attentes, la boule de 180 cristaux va être complétée grâce à des fonds européens. Détecteur itinérant, Agata sera installé au Ganil (Caen) pour bénéficier des premiers faisceaux de Spiral2. L'Irfu, de par la complémentarité de ces compétences, s'est beaucoup impliqué dans le développement de ce détecteur de haute technologie avec ses spécialistes de la détection pour la validation et l'intégration des cristaux, ses ingénieurs pour l'alimentation des détecteurs et leur asservissement, ses cryogénistes pour développer des méthodes innovantes de refroidissement des cristaux.

Christophe Theisen

vient ta force ?

Par Alexandre Obertelli



Alexandre Obertelli cherche à comprendre le noyau. L'Union européenne vient de lui attribuer une ERC pour développer un programme original d'étude des noyaux les plus exotiques.

L'interaction forte. Quelle est la forme exacte de la force agissant au sein du noyau et ? Pour répondre à ces questions, il faut rechercher l'influence des ingrédients clés de et de protons du noyau.

l'hyperdéformation équivaldrait à un rapport d'axes principaux de 3:1. De telles amplitudes de déformation n'ont pas encore été observées expérimentalement. Le détecteur de photons Agata couplé à l'utilisation de faisceaux de noyaux exotiques intenses produits à Spiral2 offrira la possibilité d'étudier ces phénomènes avec une efficacité jusqu'alors inégalée. Ces recherches sur les différentes facettes des noyaux exotiques, à la pointe de l'innovation technologique en détection de radiations, nourrissent de repères expérimentaux les théoriciens qui, à leur tour, alimentent de prédictions l'analyse de nos résultats. A la limite des connaissances actuelles, elles attirent des jeunes de valeur, dont le dynamisme et les efforts sont nécessaires la découverte de nouveaux phénomènes et à la pérennité de notre savoir-faire.



Une physicienne nucléaire Irfu au Japon...

Scintillations : Bonjour Valérie. Pourrais-tu nous expliquer pourquoi tu as passé quatre mois au Japon cette année ?

Valérie Lapoux : J'ai proposé une expérience en 2008 au comité d'expériences de Riken pour étudier la structure et la spectroscopie du noyau instable d'oxygène 24, qui a deux fois plus de neutrons que de protons. La très grande intensité de faisceau du Radioactive Isotope Beam Factory (RIBF) permet d'étudier la diffusion de ce noyau sur une cible de protons et donc d'extraire sa densité ainsi que ses états d'excitation. Après deux ans de préparation, toutes les conditions étaient enfin réunies pour réaliser l'expérience : faisceau disponible et détecteurs opérationnels.

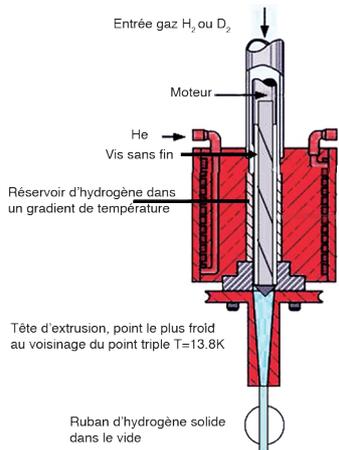
S : Quel était le but de cette expérience ?

VL : L'oxygène 24, un candidat doublement magique, est le dernier isotope d'oxygène qui soit lié par l'interaction forte. Un neutron de plus et on ne peut plus constituer un noyau lié. Ses caractéristiques sont très sensibles aux corrélations entre nucléons qui produisent un nouvel effet de couches pour les noyaux exotiques comportant 16 neutrons. Il s'agit donc d'un excellent test pour les modèles nucléaires.

S : En quoi, cela représentait une opportunité de faire cette expérience au Japon ?

VL : RIBF est la seule machine au monde qui pouvait nous fournir un faisceau d'oxygène 24 assez intense pour réaliser les mesures de diffusions sur cibles de protons, dans la dynamique en énergie couverte par notre détecteur Must2, conçu pour les identifications et les mesures de particules légères. Must2, construit par trois laboratoires français, l'Irfu, l'IPNO et le Ganil, est le meilleur détecteur actuel pour ces études. Un accord de collaboration franco-japonaise a donc été établi pour installer le détecteur à Riken et mener une campagne de mesures. Nous avons ainsi réalisé une expérience vraiment unique.

Vue de l'ensemble des huit détecteurs Must2 avec les responsables de l'expérience, Valérie Lapoux et Hideaki Otsu.



Principe de l'extrusion avec vis sans fin appliqué à la fabrication d'un film d'hydrogène.

Chymene, cible d'hydrogène mince pour l'étude des noyaux exotiques

Pour les études des noyaux exotiques, des feuilles de polypropylène CH₂ sont habituellement utilisées en tant que cible de protons car l'hydrogène est un gaz à température ambiante. Ces feuilles présentent de nombreux inconvénients dont la présence de carbone. Dans le cadre du projet Spiral2, nous réalisons une cible cryogénique pure d'hydrogène H₂ (ou de deutérium D₂) solide, sans fenêtre, pour accroître la pureté et la luminosité des expériences.

La cible se présente sous la forme d'un ruban d'hydrogène solide qui s'écoule en continu par une technique d'extrusion, comme un rideau de glace dans le vide d'une chambre à réaction.

Des tests préliminaires avec une cible de 100 μm en laboratoire et sous faisceau ont apporté une première validation de la méthode. La collaboration rassemble des équipes CEA de l'Irfu, de l'Institut nanosciences et cryogénie (Inac) et du CEA-DAM. Dans le futur, Chymene sera utilisée pour étudier la structure des noyaux exotiques auprès de Spiral2 en association avec des détecteurs comme Gaspard (détection des photons et des particules)

Alain Gillibert

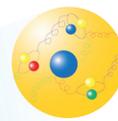
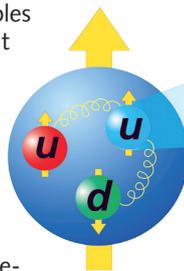


Nous sommes au milieu du voyage. A partir des transformations nucléaires révélées les constituants du noyau (les nucléons) et une interaction qui les lie. Cette double en interaction forte.

Les physiciens ont pris conscience de cette force en 1932 avec la découverte du années 1970. Cette théorie s'appelle la chromodynamique quantique, elle est désignée théorie est comparable à la mécanique de Newton ou à la relativité d'Einstein. Elles à partir d'un nombre restreint de principes et de paramètres physiques bien définis. la compréhension définitive de QCD manque encore. Aujourd'hui les objets soumis doit découvrir. L'une s'appelle « physique du noyau » et montre noyaux, protons et nomme « physique hadronique » et révèle hadrons, quarks et gluons.

L'Irfu explore l'ensemble de cet archipel

Les hadrons, particules sensibles à l'interaction forte, sont des assemblages de quarks s'échangeant des gluons. Six saveurs de quarks ont été identifiées appelées : *up* (u), *down* (d), *strange*, *charm*, *bottom* et *top*, la découverte de cette dernière datant de 1995. L'interaction forte construit subtilement de nombreux édifices très différents à partir des mêmes briques. Par exemple le proton et la particule Δ^+ sont succinctement décrits comme composés de trois quarks u, u, d. Or la particule Δ^+ se désintègre au bout de 5 milliardièmes de milliardième de seconde alors que le proton a une durée de vie bien supérieure à l'âge de l'Univers ! Cette différence reflète la complexité de l'agencement intime des quarks et gluons au sein des hadrons. La compréhension complète de cette structure demeure un enjeu théorique et expérimental majeur. La propriété remarquable du confinement fait de la QCD une théorie sans équivalent. Elle justifie le fait expérimental suivant : aucun quark ou gluon n'est observable isolément.



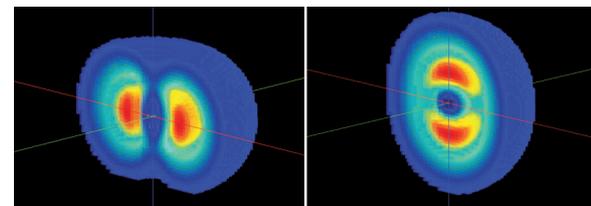
Eloigner des quarks requiert une énergie toujours plus grande. Cette interprétation est confortée par QCD sur réseau, technique de simulation numérique intensive de l'interaction forte. Des mécanismes théoriques ont été proposés pour expliquer ces observations mais encore aucun n'a été validé expérimentalement. C'est l'une des questions ouvertes les plus profondes et les plus brûlantes de la physique moderne.

A l'inverse, l'interaction mutuelle entre deux quarks se rapprochant s'atténue jusqu'à devenir négligeable. Nommé liberté asymptotique, cet aspect peu intuitif de l'interaction forte est parfaitement compris théoriquement et vérifié expérimentalement. Son rôle est déterminant dans l'interprétation phénoménologique des expériences.

Enfin, de manière imagée, l'interaction forte fait la différence entre la gauche et la droite. Les physiciens parlent de « brisure de la symétrie chirale ». Ses conséquences sont au cœur des efforts actuels visant à relier la physique hadronique et la physique nucléaire.

Hervé Moutarde

Deux quarks dans leur méson représenté sur une surface correspondant à l'intensité de la force attractive entre les deux. Quand les deux quarks sont proches, l'interaction forte est presque nulle (rouge). Plus on les éloigne l'un de l'autre plus ils s'attirent (bleu) générant leur confinement au sein de particules.



Le deuton : chaînon manquant entre quarks, nucléons et noyaux ?

Le deuton, composé d'un proton et d'un neutron est le plus petit noyau composite qui puisse exister. Il est l'un des maillons essentiel dans la formation des éléments et toute la matière de l'Univers est passée par ce noyau, soit suite à l'explosion originelle soit lors des cycles de fusion de l'hydrogène dans les étoiles. On aimerait pouvoir le construire théoriquement à partir de concepts premiers ce que nous ne savons pas encore faire. D'un point de vue expérimental, même en le sondant à haute énergie, on n'a pas pu voir d'effets de sa structure en quarks sous-jacente ce qui aurait permis de faire un pont observationnel entre tous les objets soumis à l'interaction forte, quarks, nucléons et noyaux.

Deux états magnétiques du deuton pour lesquels on observe des densités très différentes (calculs).

M. Garçon and J.W. Van Orden, *Advances in Nuclear Physics*, Vol. 26.

L'interaction forte

Par Thomas Duguet et Hervé Moutarde



Thomas Duguet développe des approximations du problème à N corps quantique permettant de rendre compte des propriétés des noyaux en partant d'interactions nucléon-nucléon fondées sur QCD.

Hervé Moutarde explore la structure tridimensionnelle du nucléon en mettant la chromodynamique quantique à l'épreuve de l'expérience.

par les réactions et l'étude de noyaux de plus en plus instables, nous avons découvert page présente les concepts, les regards théoriques complémentaires sur les objets

neutron. Ils en ont achevé la description, au niveau le plus fondamental, pendant les par le sigle QCD. Quelles sont ses promesses ? Au sein de l'histoire des sciences cette ont en commun la capacité de prédire une quantité inouïe de phénomènes naturels Pourquoi parler de promesses ? En dépit des progrès accomplis jusqu'à présent, à l'interaction forte apparaissent comme les îles d'un archipel que l'explorateur neutrons. Une autre, objet de la deuxième partie de ce numéro de *Scintillations*, se

et bâtit les ponts qui relieront ces îles.

Au même titre que deux atomes électriquement neutres peuvent interagir via le « résidu » des interactions entre leurs électrons respectifs pour former une molécule, l'interaction entre nucléons résulte des interactions entre les quarks et les gluons qui constituent. Cette interaction est nulle au premier ordre car, en moyenne, les quarks d'un nucléon ne sont pas sensibles aux quarks de l'autre nucléon. Pour le physicien « nucléaire », les protons et les neutrons jouent donc le rôle de constituants élémentaires du noyau. En conséquence, la structure interne des nucléons peut (doit) être largement « oubliée » dans le cadre de la structure nucléaire de basse énergie. La modélisation de l'interaction forte se fonde aujourd'hui sur les théories dites effectives ne conservant de la théorie QCD que ce qui se révèle strictement nécessaire. La caractéristique essentielle de QCD à basse énergie réside dans le mécanisme de brisure spontanée de la symétrie chirale qui implique¹ l'existence d'un méson anormalement léger, le pion, vecteur principal de l'interaction entre les nucléons.

L'information relative à cette interaction « résiduelle » de la QCD est difficile à extraire en pratique car elle avance masquée au sein du noyau, et cela pour trois raisons différentes. Tout d'abord la structure mathématique de l'interaction « élémentaire » entre deux ou trois nucléons est extrêmement complexe et reste encore à

comprendre et à caractériser. Ensuite, cette interaction est significativement modifiée au sein du noyau du fait de la présence des autres nucléons. Enfin, il est difficile d'extraire à partir des comportements collectifs du noyau, tel que sa manière de vibrer ou de tourner, les signatures spécifiques de l'interaction élémentaire entre les nucléons.

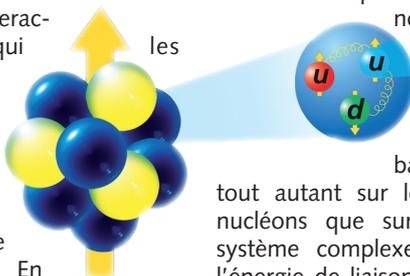
La structure du noyau atomique à basse énergie nous renseigne donc tout autant sur les propriétés de l'interaction entre nucléons que sur l'émergence des propriétés d'un système complexe en interaction. Ainsi, l'étude de l'énergie de liaison du noyau, de ses différents modes d'excitation et de désexcitation, des limites d'existence vis à vis de sa masse, de son moment angulaire ou de l'excès de son nombre de neutrons relativement à son nombre de protons sont des sources indirectes mais néanmoins précieuses d'informations sur les propriétés de l'interaction forte.

Ce travail difficile mais pour le moins exaltant auquel les physiciens de l'Irfu s'attèlent nécessite la conjonction de travaux expérimentaux consistant à synthétiser et à étudier des noyaux produits artificiellement sur Terre et de travaux théoriques consistant à formuler des modèles quantiques réalistes de l'interaction entre les nucléons et à prédire les propriétés du noyau qui en résultent.

Thomas Duguet

(1) *Quel est le lien entre une symétrie brisée et un boson, vecteur d'une interaction ?*

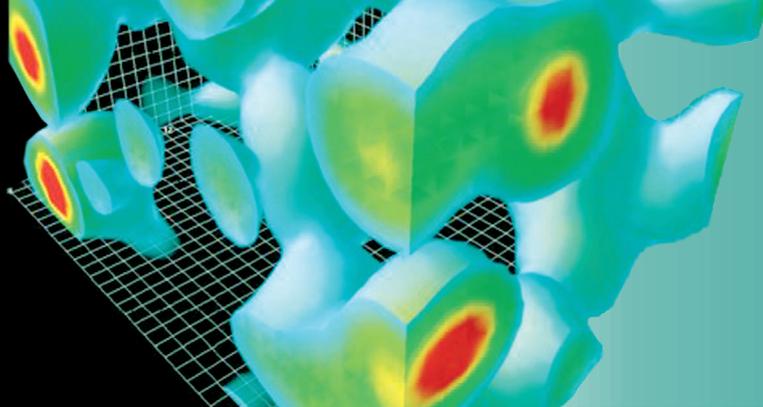
Dans le cadre de la théorie des champs, il apparaît un boson dit de Nambu-Golstone, de masse très légère, quand la théorie brise spontanément l'une de ses symétries. Ce phénomène a été découvert en supraconductivité et appliqué à la physique subatomique. Le boson de Higgs tant attendu est ainsi l'émanation de la brisure de l'interaction électrofaible. Le pion, vecteur de l'interaction forte, est la conséquence de la brisure spontanée de la symétrie chirale de QCD.



Espace de structure nucléaire théorique

En 2004, la DSM et la DAM ont souhaité renforcer les relations entre les théoriciens de structure nucléaire des laboratoires CEA ainsi que les relations théoriciens-expérimentateurs en créant L'Espace de structure nucléaire théorique localisé à l'Irfu. Un financement annuel par les deux directions permet d'organiser des rencontres entre chercheurs, des ateliers de travail, et d'embaucher un post-doctorant. Toutes les activités revêtent un caractère international et sont en fort couplage avec les expérimentateurs. Après quelques années d'existence, l'ESNT est aujourd'hui reconnu et apprécié en France et au-delà. En particulier, le format très souple des ateliers et des présentations associé au temps libre dégagé pour les discussions informelles enrichit très significativement les échanges et favorise la création de nouvelles collaborations au plan régional, national et international.

Françoise Auger



Le proton a été identifié en 1919 et ses caractéristiques sont depuis étudiées sans n'ont plus aucun doute sur leurs caractéristiques. A l'instar du jeu de lego où de caractéristiques du proton à partir de celles de ses constituants élémentaires ?

(*) Dans les articles qui suivent, le rôle de l'électron peut être pris par d'autres leptons comme le muon.

(1) La quantité de mouvement d'une particule caractérise son déplacement. Elle donne la direction et, quand la masse est connue, sa vitesse.

(2) Le spin est un concept quantique dont l'image intuitive, bien qu'impropre, est celle d'un mode de rotation d'une particule envisagée comme une toupie.

Une technique extrêmement fructueuse pour étudier le proton consiste à produire des collisions entre électrons* et protons. Un proton a d'autant plus de chances de se fragmenter lors d'un choc avec un électron que l'énergie est élevée. L'étude de ces collisions permet de caractériser la structure du proton. Si les particules après collision restent un électron et un proton, nous mesurons la répartition des charges électriques dans le proton, portées exclusivement par les quarks. A l'opposé, si le proton est brisé lors de la collision, sans identifier le détail des fragments, nous accédons à la façon dont la quantité de mouvement¹ et le spin² du proton se distribuent entre les quarks et les gluons. Ces mesures remarquables montrent explicitement que le nombre de constituants à l'intérieur du proton est variable. Le proton paraît être un chaudron en bouillonnement constant : autour de trois quarks qui constituent son squelette, des gluons et des paires de quark-antiquark se créent ou s'annihilent sans cesse. En sélectionnant des quantités de mouvement de plus en plus faibles, les physiciens mettent en évidence un nombre croissant de particules et la structure du proton est alors dominée par cette mer de matière, d'antimatière et de gluons issue des remous de l'interaction forte. La masse des quarks et gluons étant négligeable, la masse du nucléon, qui représente l'essentiel de la masse de la matière visible



Construction, à l'Irfu, des chambres à dérive pour l'expérience Compass. Ces détecteurs de très grande dimension permettent de tenir le flux de 1 MHz par fil et ont une résolution en position de 150 microns.

qui nous entoure, résulte ainsi de l'énergie de tous ses constituants en interaction (la conversion d'énergie en masse est une prédiction de la relativité d'Einstein). Où en sommes-nous dans notre jeu de lego ? L'étude de la répartition des charges montre un proton sphérique avec un rayon environ 0,9 fm, soit 100 000 fois plus petit qu'un atome. Depuis les années 1980 les physiciens de l'Irfu utilisent la fragmentation du proton pour comprendre comment se construit son spin. La combinaison de plusieurs expériences prouve que le spin du nucléon ne se réduit pas au spin des quarks seuls. Les récents résultats de l'expérience Compass au Cern, sur le spin porté par les gluons, suggèrent qu'ils ne sont pas responsables de toute la partie manquante. L'essentiel du spin du proton pourrait ainsi provenir du mouvement orbital des quarks ou des gluons au sein du proton.

De nombreuses équipes de physiciens collaborent actuellement de par le monde au test expérimental de cette idée.

La structure du proton est une fenêtre ouverte sur la complexité de l'interaction forte. Ce thème, déjà riche d'enseignements physiques, promet encore bien des progrès.

Hervé Moutarde

Compass

Depuis 2002, la collaboration Compass s'est lancée dans la mesure difficile de la fraction de spin portée par les gluons. L'Irfu a apporté des contributions majeures à différents secteurs clés de cette expérience : aimant supraconducteur permettant d'orienter le spin des protons cible, électronique à bas bruit et grandes chambres à dérive du spectromètre. L'appareillage inclut également les premiers détecteurs Micromegas utilisés dans une expérience de physique, permettant la détection de haut flux de particules et couvrant une grande surface.

L'ensemble des mesures directes conduit à une polarisation des gluons proche de zéro. Bien que ne couvrant pas toute la plage cinématique ceci contraint la valeur maximale du spin porté par les gluons entre 60% et -60% du spin total du nucléon. C'est un premier résultat important qui permet d'exclure des valeurs beaucoup plus élevées proposées par les théoriciens avant la mesure. On peut alors envisager plusieurs scénarios pour la répartition du spin du nucléon sur ses constituants, suivant la contribution des gluons (voir figure à droite). En conséquence, la contribution du moment orbital, encore inconnue, peut être quasi nulle aussi bien que supérieure à 100% du spin total.

Fabienne Kunne, devant un des détecteurs Micromegas de l'expérience.



Donnant nucléon

Par Hervé Moutarde et Pierre Guichon

Hervé Moutarde explore la structure tridimensionnelle du nucléon en mettant la chromodynamique quantique à l'épreuve de l'expérience.

Pierre Guichon, théoricien, cherche à décrire le nucléon depuis les aspects les plus fondamentaux de l'interaction forte, dans le cadre de la chromodynamique quantique.



relâche. Quarks et gluons ont été découverts à la fin des années 60 et les physiciens grandes maisons sont construites à partir de petites briques, comment retrouver les

Un réseau pour le nucléon

Quand on décrit le noyau, la structure en quarks et gluons des nucléons peut être le plus souvent ignorée. Cependant, lorsque le nucléon est soumis à un champ de force comme il en existe dans le noyau, il réagit en modifiant sa structure interne. Pour comprendre cette modification, il faut d'abord comprendre la structure d'un nucléon libre. C'est ce que nous faisons en calculant, à partir de QCD, les propriétés du nucléon et en les comparant aux résultats des expériences.

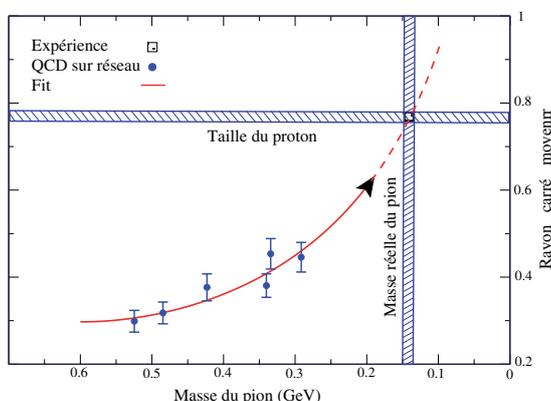
Même si l'interaction à courte distance entre les quarks et les gluons est faible, le problème est non trivial car le nucléon est un gros objet du point de vue de QCD. On utilise les calculs sur réseaux, suivant l'idée proposée en 1974 par K. Wilson. Ces calculs sont exacts au sens que leur précision peut être systématiquement améliorée au prix d'un accroissement du temps de calcul.

Le principe est de discrétiser le problème sur un réseau à quatre dimensions. Les quarks vivent sur les sites et les gluons sur les liens inter-sites. Une « configuration », l'état de tous les gluons à un moment donné, est la valeur de tous les liens du réseau. Quant aux quarks... les ordinateurs n'aiment pas ça ! Les objets mathématiques qui leur sont associés ne sont pas des nombres ordinaires. Les seules traces qu'ils laissent sont leurs propagateurs : de gigantesques matrices qui codent comment un quark se propage d'un point du réseau à un autre sous l'influence des gluons.

A une configuration donnée la théorie associe une certaine probabilité. Le calcul de cette probabilité est très lourd car il tient compte non seulement de la configuration des gluons mais aussi de la réaction des quarks sur cette configuration. Cette probabilité sert à calculer des valeurs moyennes des quantités comparables à l'expérience. Par exemple, en combinant trois propagateurs de quarks et en moyennant sur toutes les configurations, on peut déduire la masse du nucléon.

La tendance actuelle est d'effectuer le calcul des propagateurs avec des calculateurs hybrides utilisant les

cartes graphiques (GPU) qui animent nos écrans et nos jeux vidéo. Les GPU ont une puissance arithmétique énorme pour un prix modeste. Pour le calcul des propagateurs, les performances sont excellentes et l'Ifu s'est équipé d'un serveur de 16 cartes NVIDIA GTX480 dont la puissance soutenue devrait atteindre 4 teraflops



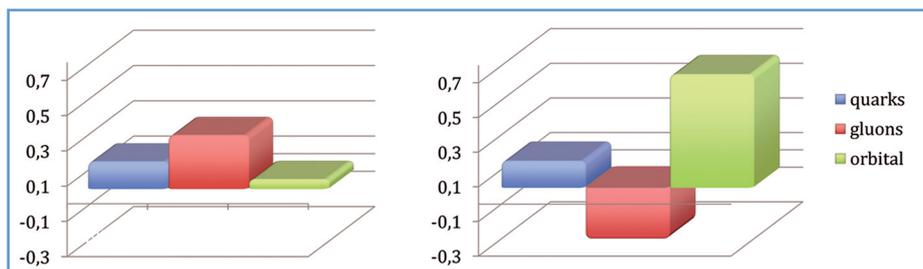
Calcul QCD sur réseau de la taille du proton.

Pour l'heure, il n'est pas possible d'effectuer les calculs sur réseaux avec des masses de quarks réalistes (et donc avec une masse réelle pour le pion de 0,14 GeV). Plus la masse est légère plus l'extension spatiale sera grande impliquant un réseau étendu. Pour contourner ce problème, on effectue plusieurs calculs avec des masses plus grandes (points bleus) que l'on extrapole (ligne rouge) jusqu'à la masse réelle du pion.

Dans ce calcul de la taille du proton, le résultat extrapolé est en bon accord avec les mesures. L'augmentation de la taille du réseau est le principal obstacle à des calculs entièrement réalistes. Il devrait être levé au cours de cette décennie.

(un téraflopp correspond à mille milliards d'opérations par seconde). Pour générer les configurations nous utilisons des super-calculateurs optimisés pour le calcul parallèle, essentiellement les IBM BlueGene-P de l'Idris (France) et de Julich (Allemagne). Cette génération, qui se fait par des méthodes Monte Carlo sophistiquées, est la partie la plus lourde d'un calcul sur réseau. Si on fait travailler 1000 processeurs en parallèle, il faut plusieurs heures pour ajouter une configuration à l'échantillon !

Pierre Guichon



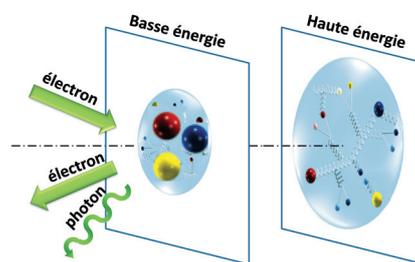
Le spin du nucléon vaut 1/2. Il se répartit en trois contributions : celle du spin des quarks (0,15), celle du spin des gluons et celle du mouvement orbital des quarks et des gluons. Selon les derniers résultats de Compass, la contribution des gluons peut varier de plus ou moins 0,3 ce qui engendre de grandes incertitudes sur la dernière composante provenant des mouvements orbitaux des quarks et des gluons, comprise entre 0,05 et 0,65.



Après avoir mesuré les caractéristiques globales du nucléon, les physiciens utilisent Ils tentent aujourd'hui d'en construire une carte tridimensionnelle, d'atteindre sa unifiant toutes les connaissances actuelles.

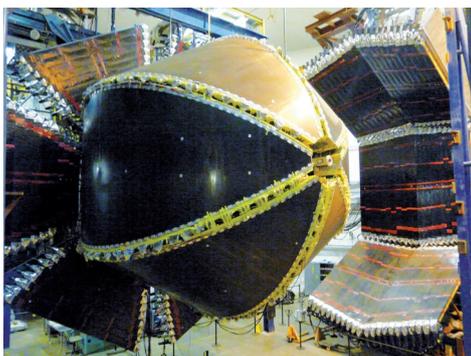
Dans les collisions électron-proton, si la collision est élastique comme celle de deux boules de billard, l'électron voit une «boule-proton» de taille finie dont on extrait la répartition des charges électriques portées par les quarks. Si la collision est inélastique, c'est-à-dire si le proton est brisé en mille morceaux, nous apparaît l'image d'un proton bouillonnant, formé d'un nombre fluctuant de quarks et de gluons en interaction. Les mesures de leurs contributions à la quantité de mouvement et au spin du proton sont des tests précieux des mécanismes de l'interaction forte à l'œuvre dans la construction d'un proton. Un nouveau programme de mesures se développe actuellement pour étudier un type de collisions électron-proton très particulier appelé diffusion Compton virtuelle. Cette réaction nous donne accès à des informations encore plus fines sur la structure du proton. Pour cela imaginons une chirurgie très méticuleuse : un faisceau d'électrons vient perturber le proton en entrant en collision avec un quark. Malgré la violence du choc, ce quark n'est pas éjecté du proton, il expulse un unique photon de grande énergie et reste confiné dans le proton qui survit à cette réaction. Entre le proton initial et final nous faisons cependant correspondre deux positions et deux mouvements de quark différents dans

le proton. Ceci nous donne accès à une description très complète de la structure du proton, combinant toutes les informations étudiées séparément jusqu'à présent à savoir la répartition des charges (ou des positions) et des quantités de mouvement. Si nous réalisons ces expériences à différentes énergies, nous pourrions accéder pour la première fois à une tomographie du nucléon : une image tridimensionnelle de sa structure. En particulier, grâce aux mesures des positions et des quantités de mouvement des constituants du proton, nous aurons accès au moment orbital généré par leur rotation autour du centre du nucléon. Cette information viendra compléter l'étude de la structure en spin du proton.



La diffusion Compton virtuelle nous permet de mesurer les positions et les quantités de mouvement des constituants du proton. On s'attend à observer que la taille du proton augmente quand l'énergie de la sonde augmente : on passe d'un cœur de trois quarks de valence à un nuage plus étalé avec les gluons et les paires de quark antiquark.

D'un point de vue expérimental, il s'agit d'un véritable défi. Il faut réaliser des expériences où toutes les particules sont détectées : l'électron diffusé, le proton bousculé qui recule hors de la cible et le photon expulsé. Constituer une image complète du proton demande également d'utiliser plusieurs accélérateurs couvrant une large gamme d'énergie. L'Irfu est engagé dans ces recherches par des travaux théoriques et par des expériences menées à Desy (H1), au laboratoire Thomas Jefferson (JLab) et



Le détecteur Clas à Jlab.

Entre le proton initial et final nous faisons cependant correspondre deux positions et deux mouvements de quark différents dans



Un futur trajectographe de Clas

Dans le cadre de la construction du futur spectromètre Clas12 (2014), JLab a récemment confié à l'Irfu la réalisation d'une partie du trajectographe central. Celui-ci sera équipé d'une nouvelle génération de détecteurs Micromegas souples, construits sur des planchers de 100 microns d'épaisseur seulement. Ces détecteurs, d'une surface totale de 4 m², seront placés à quelques dizaines de centimètres de la cible et couvriront une large acceptation angulaire, nécessaire à l'étude de réactions exclusives. Ils opéreront dans un champ magnétique intense, et devront supporter des flux de particules de quelques dizaines de MHz.

Plusieurs prototypes ont déjà été réalisés et testés avec succès. Ce nouveau type de détecteurs, robuste et bon marché, pourrait à terme être utilisé avantageusement dans les expériences à haute luminosité.

Sébastien Procureur, ci-dessus avec des détecteurs Micromegas testés au Cern

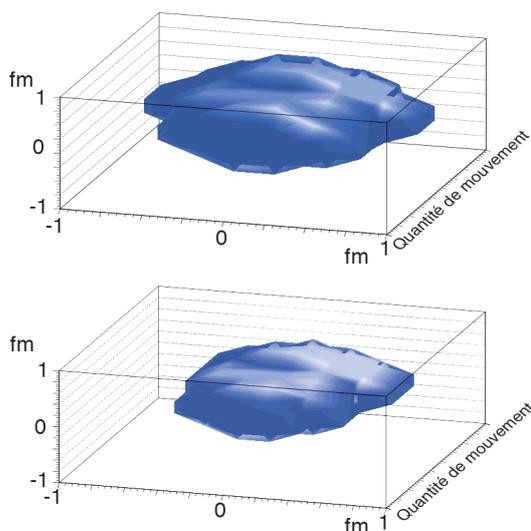
3D du proton

Par Nicole d'Hose



Nicole d'Hose conçoit des expériences avec le faisceau de muons de haute énergie du Cern pour comprendre la structure du nucléon à toutes ses échelles.

des faisceaux d'électrons ou de muons pour explorer sa structure interne. structure en quarks et en gluons afin d'obtenir une description complète



L'Irfu a développé les outils nécessaires aux analyses tridimensionnelles du nucléon. Ci-dessus la probabilité de présence d'un quark de saveur u dans un nucléon dans le cadre d'un modèle de quarks sans (haut) et avec (bas) polarisation.

bientôt au Cern, auprès de l'expérience Compass. La complémentarité en énergie de ces installations permet d'appréhender graduellement tous les aspects du proton bouillonnant, depuis la configuration la plus réduite de ses trois quarks de valence jusqu'au régime dominé par la mer composée de quarks, d'antiquarks et de gluons.

Le processus rare de diffusion Compton virtuelle nécessite des détecteurs extrêmement performants, capables de détecter toutes les particules pour sélectionner parfaitement la réaction. Le détecteur Clas à JLab permet de collecter les particules qui sont émises de manière presque isotrope. Pour s'adapter à la prochaine montée en énergie de l'accélérateur de JLab, l'Irfu s'implique dans la réalisation d'un trajectographe utilisant des détecteurs Micromegas cylindriques. Dans l'expérience Compass, la grande énergie du faisceau disponible permet de focaliser la plupart des particules à l'avant, dans un cône de moins de 10 degrés. Les trajectoires sont analysées avec précision dans le spectromètre Compass. Cependant lors de la diffusion Compton virtuelle, le proton cible recule avec un plus grand angle et doit être recueilli dans un détecteur approprié. L'Irfu a déjà réalisé et testé un premier détecteur de protons de recul de 1 m de long pour ce programme. Il est aussi le maître d'œuvre du futur grand détecteur de 4 m de long. Les expériences menées à H1 ont fourni une première

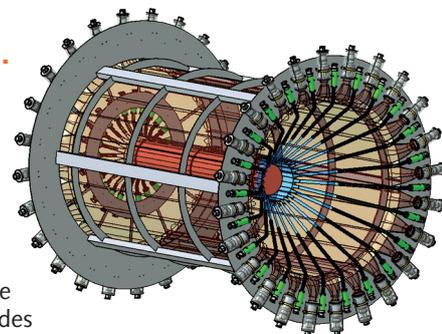
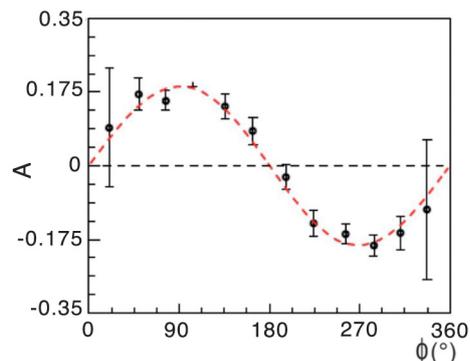


Image CAO du détecteur de proton de recul de 4 m de long pour Compass-II.

mesure du rayon du nuage de gluons en « regardant » les configurations du proton à haute énergie, celles dominées par les fluctuations de la mer. Cette mesure se trouve être très semblable au rayon de la distribution des quarks obtenu dans l'étude des collisions élastiques. Les modèles de l'interaction forte prédisent que lorsqu'on sélectionne des configurations avec de moins en moins de particules dans le proton, sa taille diminue pour passer de celle d'un nuage étalé contenant des gluons et des paires de quark-antiquark à celle d'un cœur où se concentrent les trois quarks de valence (image page de gauche). L'étude d'une telle transition est un test direct de la construction du nucléon par l'interaction forte et constitue un thème majeur du programme futur de Compass, appelé Compass-II.

Les expériences à JLab pourraient compléter cette image à plus basse énergie. Dans ce régime, la diffusion Compton virtuelle ne peut être isolée et interfère avec le processus de Bethe-Heitler, où le photon est rayonné par l'électron au lieu du quark. L'interférence de ces deux processus génère une manne extraordinaire pour

L'interférence entre les processus de diffusion Compton virtuelle et de Bethe-Heitler génère une oscillation qui a été mesurée à JLab en 2006. Cette interférence agit comme un amplificateur des phénomènes et permettra de bien caractériser la diffusion Compton virtuelle, notre meilleur moyen d'accéder à la répartition des quarks et des gluons au sein du nucléon.



accéder aux distributions de positions et de quantités de mouvement des constituants du proton. Les premières mesures d'interférence obtenues à JLab ont validé le domaine d'applicabilité de la théorie. De premiers tests d'observation de la diffusion Compton virtuelle, du Bethe-Heitler et de leur interférence ont également été réalisés à Compass.

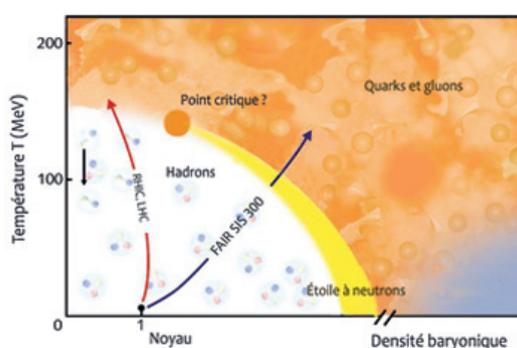
Aussi, tant à JLab qu'à Compass, les physiciens vont s'adonner dans les prochaines années à des mesures précises pour dévoiler la structure intime du proton.



Plusieurs zones d'ombre subsistent concernant l'interaction forte. Une partie du viennent toujours par paire ou par trio, dans des assemblages tels que le proton et ils entre expérience et description théorique, nécessaires pour répondre à cette ques- les calculs à visée prédictive s'avèrent ardu.

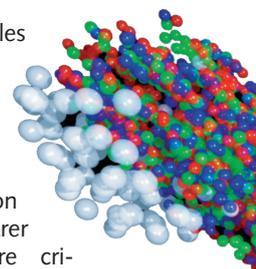
À l'instar de l'interaction électromagnétique qui opère entre particules porteuses de charges (positive ou négative), l'interaction forte affecte les porteurs de charge dits de «couleur» ; les quarks et gluons. L'analogie s'arrête là, car cette dernière est frappée d'une étonnante singularité : le vecteur de l'interaction forte (le gluon) est lui-même coloré. Il est donc sensible à la propre interaction qu'il véhicule, rendant les calculs de chromodynamique quantique (QCD) très délicats. Ceux-ci se simplifient dans certaines conditions, menant à des prédictions sur le comportement de la matière hadronique que nous pouvons confronter à l'expérience.

Ainsi, en soumettant la matière nucléaire «ordinaire» à des températures et densités extrêmes, une transition de phase devrait se produire vers un état où les nucléons seraient dissous. Leurs quarks et gluons constituants seraient libres, déconfinés, formant un plasma de quarks et de gluons (QGP). En vérité, cet état de la matière a déjà existé, il y a fort longtemps ! Tout l'Univers serait passé par cette phase quelques millièmes de seconde après le big bang. Plusieurs accélérateurs, jusqu'au plus puissant aujourd'hui, le LHC au Cern, ont été construits pour réunir *in vitro* des conditions

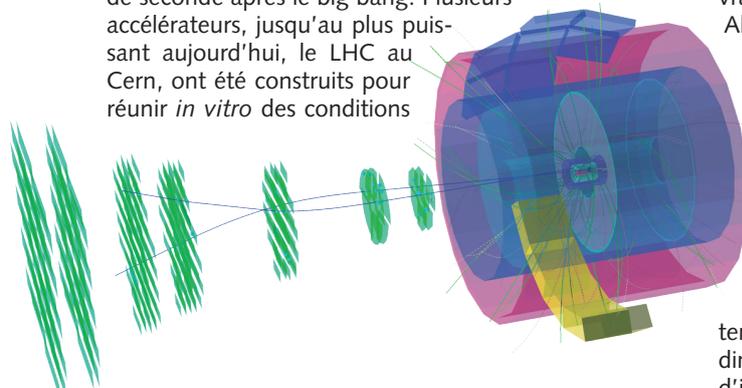


Dans ce diagramme, la matière nucléaire est représentée en fonction de sa densité et de sa température. La densité 1 correspond aux noyaux de la matière ordinaire. Le plasma de quarks et de gluons est accessible soit en augmentant la pression dans le noyau (augmentation de la densité) soit en augmentant la température. Dans les expériences auprès d'accélérateurs comme le LHC ou, dans le futur, avec Fair, on emprunte des chemins qui associent les deux.

proches de celles qui régnaient alors. Pour donner une idée du défi que cela représente, on peut comparer la température critique de la transition de phase entre la matière ordinaire et ce plasma originel (deux mille milliards de degrés) à l'objet le plus chaud à proximité de la Terre, le Soleil (quinze millions de degrés au centre), d'où le rôle crucial de la puissance de l'accélérateur afin de maximiser l'énergie par collision nucléon-nucléon.



La densité critique requise est environ six fois supérieure à celle du noyau atomique, d'où l'exigence de recourir à des collisions d'ions lourds comme le plomb. En cas de réussite, cet état serait extrêmement fugace, aussi éphémère que le temps mis par la lumière pour parcourir une distance nucléaire, le refroidissement débouchant vite sur une transition de phase inverse, l'hadronisation. Ce sont les particules issues de l'hadronisation qui atteindront les détecteurs. Le croisement des informations recueillies devrait permettre d'inférer l'état de la matière en amont. Alice est le nom de code donné à un ensemble de systèmes de détection conçu pour pister les dizaines de milliers de particules produites lors de chaque collision d'ions lourds au LHC. Nous nous focaliserons ici sur une classe spéciale de particules, les quarkonia. Ils sont formés d'une paire de quark-antiquark lourds de même type, *i.e.* de charme pour la famille du J/ψ , de beauté pour celle de l' Υ . Elles naissent dans les premiers instants de la collision, avant même le QGP. Robustes, le J/ψ et l' Υ ne peuvent ensuite être dissociés que si l'on forme de la matière à des températures au-delà de la température critique. La diminution de leur taux de production dans les collisions d'ions lourds peut donc signer la formation du QGP. On compare la formation de ces quarkonia dans les collisions de noyaux lourds à celle des collisions proton-proton où le QGP ne peut être produit afin de mesurer le taux « normal » de formation de ces particules.



Un événement dans Alice lors des collisions proton-proton à 7 TeV au LHC. Deux candidats muon (en bleu) de charge opposée ont volé depuis le vertex de l'interaction jusque dans les chambres de trajectographie du spectromètre à muons (en vert) dans lequel l'Irfu est impliqué.

Alice : A large ion collider experiment

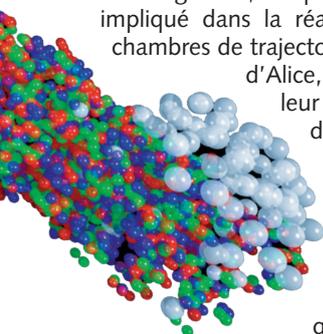
fée des merveilles

Par Andry Rakotozafindrabe

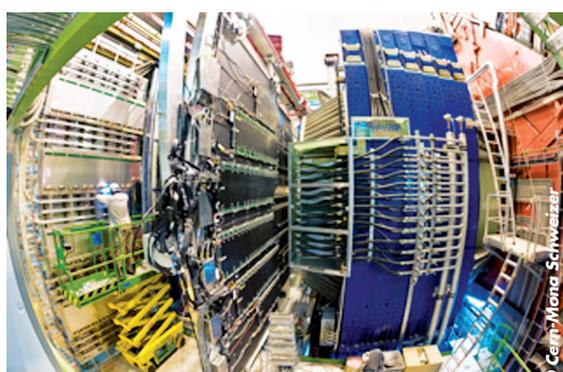
Andry Rakotozafindrabe travaille dans le groupe Alice à la mise en évidence et la caractérisation de la matière nucléaire dans sa phase primordiale : le plasma de quarks et de gluons.

mystère tient à ce qu'il n'est pas possible d'observer un seul et unique quark libre. Ils y restent confinés. Quelle est donc l'origine de ce confinement ? Les allers-retours, sont semés d'embûches : l'expérience nécessite des moyens considérables, et

Nous détectons les quarkonia *via* leurs reliquats de désintégration, en paires de muons $\mu^+\mu^-$. L'Irfu s'est impliqué dans la réalisation de six des dix plans de chambres de trajectographie du spectromètre à muons d'Alice, depuis leur conception jusqu'à leur exploitation. Elles sont constituées de détecteurs gazeux (Ar - CO₂) ionisés lors du passage des muons. Le signal est récupéré sur des lattes munies d'un nombre important de damiers gravés sur les cathodes (plus d'un million de voies électroniques). Les impacts qu'ils laissent ainsi sur les chambres sont autant de signaux électroniques numérisés, stockés, analysés afin de reconstruire leur trajectoire, puis d'en déduire leur charge et leur quantité de mouvement au vu de leur courbure dans le champ magnétique qui baigne les chambres. Il reste ensuite à associer par paire les muons de charge opposée pour évaluer la masse de la particule qui s'est désintégrée. Toutes les étapes intermédiaires de l'analyse des données sont délicates. Un exemple frappant est celui de la



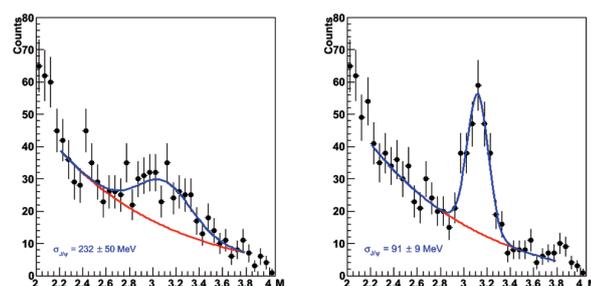
inaperçu (Encadré à gauche). À l'issue de la procédure d'alignement des chambres développée à l'Irfu, une nette amélioration de la résolution spatiale est obtenue. Cela se traduit par l'émergence incontestable du pic du J/ψ . Ces premiers résultats préliminaires sur la production du $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ dans les collisions proton-proton à 7 TeV, en cours au LHC, ont été rendus publics (conférence ICHEP, Juillet 2010, Paris). Ils couronnent plus d'une décennie d'efforts, en particulier à l'Irfu. Ils sont très encourageants pour les collisions plomb-plomb, qui sont prévues tambour battant en novembre prochain.



La dernière chambre de trajectographie du bras muon développé par l'Irfu et la première station du trigger muon d'Alice, avant l'arrivée des faisceaux.

connaissance des positions des éléments de détection constituant les chambres. Elle affecte la précision de la reconstruction de la trajectoire, notamment dans le plan de courbure, donc l'impulsion des muons. *In fine* cela dégrade l'évaluation de la masses des particules, reconstruites grâce à la mesure des paires $\mu^+\mu^-$. Ainsi au premier abord, le pic de résonance qui signe le J/ψ dans la distribution de masse est si large qu'il peut passer

Aligner ou ne pas aligner, telle est la question



Distribution des masses des particules se désintégrant en une paire de muons $\mu^+\mu^-$ détectés par le spectromètre d'Alice dans les collisions proton-proton dans la région de masse du J/ψ , avant et après alignement.

Initialement, la position de chacun des 156 éléments de détection du détecteur Alice est connue à quelques millimètres près. Pour mener à bien notre programme de physique, nous devons la connaître à quelques dizaines de microns près ! L'alignement est corrigé grâce aux trajectoires rectilignes des particules issues des collisions proton-proton lorsque le champ magnétique est nul. On minimise pour cela la distance entre le point d'impact mesuré et l'extrapolation de la trajectoire pour chacune des centaines de milliers de traces utilisées !

Javier Castillo

De l'essence de toute chose



Lecteur, tu l'auras compris, l'interaction forte a façonné les premières compositions de l'Univers, celle du nucléon à partir des quarks et des gluons, et celles des noyaux atomiques à partir des nucléons. On t'en a présenté ici les multiples facettes et les complexités. De ces différents « cocktails » dont te parlait notre rédacteur apparaît une vision unificatrice.

Si le pont entre le monde des quarks et celui des noyaux demeure un défi aux bâtisseurs, les fondations en sont de plus en plus fermement établies. Des techniques numériques sophistiquées permettent maintenant de résoudre, au prix d'approximations de mieux en mieux maîtrisées, les équations de QCD qui gouvernent les interactions entre quarks. Des expériences irréalisables il y a peu mesureront, à JLab et à Compass, de nouvelles observables auxquelles confronter ces calculs.

De la QCD à l'interaction entre deux nucléons, il n'y a plus qu'un pas qui sera franchi dans quelques années. Puis s'ouvre dans toute sa richesse le domaine des noyaux, dont on explorera à Spiral2 et auprès d'autres accélérateurs les versants exotiques jusqu'à présent inaccessibles. L'enjeu est là encore, fondamentalement, la compréhension unifiée des milliers d'assemblages de nucléons qu'on pourra produire en laboratoire et qui ont tous, à un moment ou un autre, contribué à la grande construction des éléments qui nous entourent et à qui nous devons la vie.

Pour boucler la boucle, ces mêmes noyaux, accélérés à des énergies extraordinaires au LHC, devraient nous faire observer la disparition des barrières du confinement et l'état de notre univers quelques microsecondes après le big bang fondateur, un plasma de quarks et gluons.

L'Irfu s'est résolument engagé dans ces aventures, prometteuses de découvertes et porteuses d'avancées conceptuelles aux retombées multiples.



Michel Garçon

Chef du Service de physique nucléaire de l'Irfu

Directeur de la publication : Philippe Chomaz

Rédacteurs invités : Antoine Drouart et David Lhuillier

Directeur scientifique : Vanina Ruhlmann-Kleider **Rédacteur en chef** : Jean-Luc Sida

Comité éditorial : Maryline Besson, Jean-Bernard Braud, Rémi Chipaux, Olivier Corpacci, Philippe Daniel -Thomas, Antoine Drouart, Christian Gouiffès, Florence Hubert-Delisle, Fabien Jeanneau, François Paul Juster, Sophie Kerhoas-Cavata, Emmanuelle de Laborde, David Lhuillier, Pierre Manil, Jacques Marroncle, Vanina Ruhlmann-Kleider, Yves Sacquin, Corinne Salmon, Didier Vilanova

Secrétariat : Maryline Besson

Mise en page : Christine Marteau **Impression** : diadeis graphotec

Crédits Photo : CEA - Cern - Deviantart - Imag'In Irfu (Alain Porcher)

<http://irfu.cea.fr>

Abonnement : Sophie Chastagner Tél : 01 69 08 75 57 ou sophie.chastagner@cea.fr

Dépôt légal : octobre 2010