Physique nucléaire fondamentale

Quelles missions ?

Quelles perspectives ?

Jérôme Margueron⁽¹⁾ (j.margueron@ipnl.in2p3.fr), Javier Castillo⁽²⁾, Amel Korichi⁽³⁾, Carlos Munoz Camacho⁽⁴⁾ et David Verney⁽⁴⁾

(1) Institut de physique nucléaire de Lyon (IPNL), UMR 5822 CNRS/Université de Lyon, 69622 Villeurbanne Cedex

(2) Service de physique nucléaire, Irfu/DSM, CEA/Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex

(3) CSNSM, UMR 8609 CNRS/Université Paris-Sud, 91405 Orsay Campus

(4) Institut de physique nucléaire d'Orsay (IPNO), UMR 8608 CNRS/Université Paris-Sud, 91406 Orsay Cedex

Compte-rendu des journées de la division Physique nucléaire de la Société Française de Physique, qui se sont tenues les 25 et 26 novembre 2015 à Paris. Ces journées ont été initiées suite aux discussions entre jeunes collègues qui s'interrogent sur l'avenir de la physique fondamentale et, en particulier, sur celui de la physique nucléaire.

La multiplication des appels à projets de physique appliquée, tant en France qu'en Europe, laisse présager une orientation de la recherche qui offrirait de moins en moins d'opportunités pour les investissements à long terme que nécessite la physique fondamentale.

Face à ce questionnement, il nous a semblé nécessaire de mettre en relation la communauté des physiciens nucléaires porteurs de nouveaux projets expérimentaux ambitieux, avec nos tutelles qui soutiennent ces projets et avec les représentants des agences de financement qui les sélectionnent.

Physique des noyaux exotiques : GANIL, SPIRAL2 et ALTO

La physique des noyaux exotiques concerne l'étude des noyaux atomiques et de leur comportement dans des conditions extrêmes de déformation, de *spin*, d'*isospin* et de température. Les noyaux dits « exotiques », car éloignés de la vallée de stabilité, et dont l'immense majorité n'existe pas sur Terre, manifestent de nouvelles propriétés (phénomène de halo^(a), peaux de neutrons, nouvelles formes) et nécessitent des instruments spécifiques pour être produits et étudiés sur des temps très courts. Le GANIL (Grand Accélérateur National d'Ions Lourds), à Caen, est le laboratoire qui a ouvert la voie dans ce domaine, il y a une vingtaine d'années. Jean-Charles Thomas (GANIL) nous a rappelé que des découvertes de tout premier plan y ont été faites comme, par exemple, la découverte de certains noyaux à halo, de systèmes nucléaires « furtifs » (noyaux non liés, mais possédant une résonance) et très riches en neutrons comme ^7H , d'un nouveau mode de radioactivité par émission de deux protons, etc.

Depuis 2013, l'installation ALTO (Accélérateur Linéaire auprès du Tandem d'Orsay) délivre ses premiers noyaux « exotiques », comme l'a rappelé Georgi Georgiev (CSNSM), coordinateur scienti-

fique d'ALTO. Cette installation (fig. 1) est actuellement la seule au monde équipée d'un dispositif basé sur la photofission pour la synthèse des noyaux radioactifs. ALTO dispose d'une palette de faisceaux unique en France, couvrant les noyaux de masses intermédiaires très riches en neutrons, ce qui lui permet d'offrir un programme scientifique de haute qualité pendant plusieurs années, dans la perspective de la réalisation de la phase 2 de SPIRAL2.

Avec le projet SPIRAL2, le GANIL va étendre significativement ses capacités de production de faisceaux. Hervé Savajols (GANIL), responsable scientifique du projet, a présenté ce nouvel équipement, qui sera réalisé en deux phases. La première phase, presque entièrement financée et en cours de construction, permettra d'accéder à un programme scientifique concernant l'étude des noyaux super-lourds, la spectroscopie des noyaux déficients en neutrons, l'étude des interactions fondamentales et l'astrophysique nucléaire ; elle proposera aussi des faisceaux intenses de neutrons, et devrait fonctionner à partir de 2018. La deuxième phase, dont la construction pourrait aboutir à l'horizon 2025, doit permettre la production « supplémentaire » de faisceaux radioactifs qui seront soit postaccélérés puis transportés vers des salles d'expériences actuelles du GANIL, soit directement conduits vers la future installation DESIR (faisceaux

1. L'usine à noyaux « exotiques » ALTO à Orsay. C'est la première installation au monde qui utilise la fission de l'uranium, induite par des photons de hautes énergies, pour la production de noyaux « exotiques ».

radioactifs de basse énergie). En raison du contexte budgétaire très tendu des organismes de recherche, la construction de cette deuxième phase est actuellement reportée. La communauté a donc engagé une réflexion sur des alternatives à court terme, ainsi que des améliorations à l'horizon 2025 [1].

Physique hadronique et plasma de quarks et de gluons

L'objectif de la physique hadronique est de comprendre les propriétés fondamentales de l'interaction forte, émergeant de la théorie chromodynamique quantique (QCD) et de la phénoménologie associée, comme par exemple la formation des mésons et des baryons. L'interaction forte, bien formalisée théoriquement, présente toute sa complexité à basse énergie dans un régime dit non perturbatif. Étudier la structure interne des hadrons avec une sonde électromagnétique est une méthode expérimentale privilégiée, comme l'a montré Fabienne Kunne (Irfu/SPhN, CEA/Saclay). Une grande partie de la communauté française s'y implique sur deux sites expérimentaux : l'expérience COMPASS au CERN [2] et le Jefferson Lab (JLab) aux États-Unis (fig. 2). À plus haute énergie, et à travers des collisions d'ions lourds ultra-relativistes, Yves Schutz (SUBATECH, Nantes) a décrit le nouvel état de la matière prédit par la QCD :

le plasma de quarks et de gluons (QGP). L'étude de ses propriétés fait l'objet de l'expérience ALICE au CERN [3] (fig. 3), avec une forte contribution française.

À plus long terme, un nouveau collisionneur électron-ion (EIC) serait la machine la plus adaptée pour accéder à une physique

encore mal connue, où les interactions sont dominées par les gluons. Franck Sabatié (Irfu/SPhN) propose que cette nouvelle machine, qui démarrerait aux États-Unis à l'horizon 2025, rassemble les équipes françaises travaillant en ce moment à COMPASS et au JLab. D'autres projets

>>>

2. Illustration schématique de l'accélérateur d'électrons CEBAF du Jefferson Lab (Virginie, États-Unis), montrant les composants reliés à la montée en énergie du faisceau à 12 GeV [4].

3. Exemple de collision frontale Pb+Pb pour une énergie de 5,02 TeV dans le centre de masse, mesurée par le détecteur ALICE au CERN. À gauche, une représentation à trois dimensions. À droite, deux projections : en haut, la vue arrière et en bas, la vue de dessous. Les lignes colorées représentent les trajectoires des milliers de particules émises lors de la collision. Par exemple, les trajectoires vertes qu'on retrouve isolées vers l'avant du détecteur sont des muons ; ce sont les seules particules pouvant traverser le spectromètre de part en part, toutes les autres particules étant arrêtées par un absorbeur (indiqué en gris) situé entre l'avant et la partie centrale du détecteur.

>>>

ont aussi été évoqués pendant les discussions, comme par exemple PANDA à FAIR^(b), le projet AFTER de cible fixe au LHC et le projet à long terme FCC d'anneau de 100 km au CERN. De nombreuses voies existent donc pour l'avenir.

Discussions avec les tutelles, le ministère et l'Agence nationale de la recherche (ANR)

La physique nucléaire bénéficie d'un très grand potentiel de découvertes, et de nombreux pays investissent dans ce domaine. Au niveau national, les différentes thématiques de recherche et les moyens humains et financiers qui leur sont attribués ont été présentés par Dominique Guillemaud-Mueller (IN2P3) et Patricia Roussel-Chomaz (CEA/DSM). Le rôle du ministère dans l'élaboration de sa stratégie scientifique pour les très grandes infrastructures de recherche (TGIR) a été présenté par Christian Chardonnet (MENESR). Enfin, la table ronde animée par Navin Alahari (GANIL) et Michel Garçon (Irfu/SPhN) a donné lieu à des échanges plus approfondis. Il en ressort que les communautés liées à la physique

du plasma de quarks et de gluons et à la physique hadronique sont bien structurées, et que les finances de ces thématiques ne présentent pas de problèmes insurmontables dans un avenir proche. Cependant, dans les prochaines années un positionnement clair de la France sur les différents projets (EIC, PANDA et AFTER) sera nécessaire pour permettre une implication française de premier plan.

La physique de basse énergie avec le projet SPIRAL2 fait en revanche face à de graves difficultés. En effet, si ce projet est considéré comme la priorité nationale au sein des tutelles, le financement de la phase 2 fait défaut. Dans ce contexte incertain, la participation de partenaires européens et internationaux au financement du projet pourrait contribuer à emporter la décision.

Nous avons aussi discuté avec Patrick Monfray (ANR) du rôle de l'ANR dans le financement de la recherche. Le problème principal réside dans le nombre très faible de projets retenus, environ 1/3 de pré-projets et 1/4 en sélection finale, ce qui fait environ 1/12 à l'arrivée. Ce taux est paradoxalement plus faible que celui des

projets retenus par l'ERC au niveau européen. Il résulte d'une forte réduction du budget de l'ANR, 0,5 milliard d'euros cette année (alors qu'il était prévu initialement une augmentation jusqu'à 1,5 milliard d'euros), et de ce que le nombre de projets soumis est en nette croissance depuis une décennie. Tous les « défis » de l'ANR sont affectés de la même façon, et on peut déjà faire le constat d'un énorme gâchis pour l'ensemble de la communauté quant au temps de travail nécessaire pour soumettre des projets à l'ANR. En outre, encourager à déposer le plus grand nombre de projets illustre une fuite en avant qui ne sert pas les intérêts de la recherche.

Projets européens et internationaux : ENSAR2, EURISOL-DF et HPH

La communauté française est fortement impliquée sur d'autres installations européennes et internationales de faisceaux de noyaux exotiques en fonctionnement, comme ISOLDE (CERN), RIBF (RIKEN, Japon) et ISAC (TRIUMF, Vancouver, Canada). Selon Yorick Blumenfeld (IPNO), cette implication internationale est guidée

par l'émergence de nouvelles installations qui sont dans certains domaines de recherches plus performantes que celles dont nous disposons en France. Elle ne remet pas en cause les machines nationales, d'ailleurs exploitées par de nombreux chercheurs étrangers. La contribution française à la recherche internationale s'accompagne aussi d'investissements instrumentaux sur ces installations. Dans la période actuelle, la contribution française à l'international a tendance à augmenter, du fait de la réduction du nombre d'heures de faisceaux disponible au GANIL et du retard de SPIRAL2.

Au niveau européen, Marek Lewitowicz (directeur adjoint du GANIL) a présenté l'activité intégrée ENSAR2 ("European Nuclear Science and Application Research - 2"), qui fait suite à ENSAR (FP7) et est financée dans le cadre du nouveau programme-cadre Horizon 2020 (H2020) à hauteur de 10 M€. Ce projet concerne la physique et l'utilisation des noyaux exotiques. Il est coordonné par le GANIL, et a démarré en mars 2016 pour une durée de 4 ans. Un des objectifs principaux est l'accès des chercheurs aux infrastructures, en organisant la communauté des utilisateurs autour des dix sites retenus comme Transnational Access facilities (TNA), dont font partie SPIRAL2 et ALTO.

En synergie avec ENSAR2, le projet EURISOL-DF (DF pour "distributed facility") consiste à rassembler plusieurs installations européennes au sein d'une coordination unique, ainsi qu'à définir la machine ISOL ("isotope separation on line") de génération ultime en Europe. Ce projet rassemble déjà SPIRAL2/GANIL en France, HIE ISOLDE au CERN, SPES/INFN en Italie, BEC en Belgique et COPIN en Pologne.

Le projet HPH ("Hadron Physics Horizon") est l'analogue d'ENSAR2 pour la physique hadronique. Il n'a pas été retenu lors du dernier appel H2020, mais est autorisé à répondre au nouvel appel en cours. Barbara Erazmus (SUBATECH) a présenté les modifications proposées, qui portent principalement sur la cohérence globale du projet et envisage, par exemple, une réduction de la part prise par l'installation FAIR. Le nouveau projet pourrait aussi s'ouvrir davantage sur le LHC et JLab.

Coordination européenne : NuPECC et H2020

NuPECC ("Nuclear Physics European Collaboration Committee") existe en Europe depuis plus de 25 ans et est financé par l'ESF ("European Science Foundation"). Sa mission consiste à suivre l'évolution de la physique nucléaire en Europe, à favoriser la synergie entre installations de recherche et à émettre des recommandations quant à la structuration de la recherche sur le long terme. Quelques critiques ont émergé durant ces journées quant à la capacité de NuPECC à effectuer des choix stratégiques en Europe, comme le fait NSAC aux États-Unis. Selon Nicolas Alamanos (Irfu), cette demande ne correspond pas à la mission de NuPECC. Le problème viendrait plutôt de la multiplication des agences de financement en Europe qui brouille la capacité de construire des projets cohérents, quand il n'en existe essentiellement que deux aux États-Unis. Par ailleurs, il a été annoncé que NuPECC élaborera en 2016 son nouveau rapport de perspectives à long terme.

Jean-Pierre Caminade (MENESR) nous a rappelé que l'Europe se mobilise depuis les années 1980 pour l'accès transnational aux infrastructures de recherche (IR). Ces infrastructures contribuent à l'excellence scientifique européenne et l'Europe veille, au fur et à mesure de ses programmes cadres, à l'augmentation du nombre de ces utilisateurs. Décidée en 2002, la feuille de route ESFRI des IR européennes pour le 21^e siècle illustre la stratégie des gouvernements européens en matière de grandes infrastructures. SPIRAL2, FAIR et ELI^(c) en ont fait partie dès la première édition de la liste en 2006. L'inscription à l'ESFRI n'implique aucun financement direct ou récurrent, mais il existe, avec H2020, des appels pour accompagner l'élaboration des projets à divers stades. Le programme H2020 cherche aussi à répondre aux questions portant sur le retour sur investissement des IR, ainsi que sur leur insertion dans une société de la connaissance à logique marchande. Cela appelle à la création de nouveaux emplois dans la recherche pour pouvoir évaluer l'impact socio-économique des IR, chercher de nouveaux vecteurs de financement, proposer des régimes d'exploitation adaptée, assurer la qualité des services rendus par l'IR, défendre la propriété intellectuelle, etc. Est-ce que la recherche

fondamentale pourra s'adapter à ce nouveau mode de fonctionnement, ou bien voit-on là les limites du nouveau modèle proposé par H2020 ? Il est encore trop tôt pour le savoir.

Conclusion

En conclusion, ces journées ont alimenté les réflexions de la communauté sur l'évolution de notre discipline et sa coordination autour des TGIR. Elles ont permis une meilleure compréhension des enjeux et des défis qui nous attendent, ainsi que des rôles structurants de la France et de l'Europe. Ces journées ont aussi montré la richesse et la cohésion de notre communauté, preuve de sa grande vitalité et de ses nombreuses perspectives. ■

L'ensemble des exposés est disponible sur le site de la SFP : www.sfpnet.fr/physique-nucleaire-fondamentale-queles-missions-queles-perspectives

(a) Noyaux à halo : type de noyaux atomiques aux limites de la stabilité nucléaire, pour lesquels certains nucléons connaissent une extension spatiale significative de leur fonction d'onde en raison de la faiblesse de leur énergie de liaison au noyau. On les observe surtout pour les neutrons (exemple typique : le lithium 11).

(b) FAIR : "Facility for Antiproton and Ion Research", est un ensemble d'accélérateurs d'antiprotons et d'ions, en construction au GSI à Darmstadt (Allemagne). PANDA, une des expériences de FAIR, est destinée à l'étude de l'interaction nucléaire forte par annihilation d'antiprotons avec des protons ou des ions.

(c) ELI : "Extreme Light Infrastructure". Le projet ELI est une infrastructure de recherche européenne, qui hébergera les lasers les plus intenses au monde. La composante ELI-NP (NP pour "nuclear physics"), en cours de construction à Măgurele, près de Bucarest en Roumanie, comprendra deux lasers pulsés de 10 PW et une source de rayons gamma de très haute intensité, et sera consacrée principalement à la physique nucléaire et à l'étude de l'interaction laser-matière.

Références

1. H. Savajols *et al.*, « SPIRAL2 », à paraître dans *Reflets de la physique*.
2. J.M. Le Goff et F. Kunne, « Proton : COMPASS à la recherche du *spin* manquant », *Reflets de la physique* **23** (2011) 14-18.
3. P. Crochet, « Collisions d'ions lourds avec ALICE au LHC : les trois premières années », *Reflets de la physique* **39** (2014) 4-9.
4. R.D. McKeown, "Overview of nuclear physics at Jefferson Lab", arXiv:1303.6622 [phys.acc-ph] (2013).