

La collaboration franco-roumaine dans la physique nucléaire utilisant de faisceaux radioactifs

Florin Negoită
Departamentul de Fizică Nucleară
Institutul Național de Fizică și Inginerie
Nucleară – “Horia Hulubei”
077125 Măgurele, Romania
negoita@nipne.ro

Mihai Stănoiu
Departamentul de Fizică Nucleară
Institutul Național de Fizică și Inginerie
Nucleară – “Horia Hulubei”
077125 Măgurele, Romania
mihai.stanoiu@nipne.ro

Cătălin Borcea
Departamentul de Fizică Nucleară
Institutul Național de Fizică și Inginerie
Nucleară – “Horia Hulubei”
077125 Măgurele, Romania
borcea@nipne.ro

Ruxandra Borcea
Departamentul de Fizică Nucleară
Institutul Național de Fizică și Inginerie
Nucleară – “Horia Hulubei”
077125 Măgurele, Romania
ruxandra.borcea@nipne.ro

Marek Lewitowicz
Grand Accélérateur National d'Ions
Lourds
14075 Caen Cedex 5, France
Marek.Lewitowicz@ganil.fr

Francois de Oliveira
Grand Accélérateur National d'Ions
Lourds
14075 Caen Cedex 5, France
francois.oliveira@ganil.fr

Résumé — Dans ce document on a essayé de décrire quelques passages d'histoire de la collaboration entre notre groupe dans IFIN-HH et le laboratoire GANIL et des activités connexes. On commence par l'activité des chercheurs roumains en France dans le temps de pionnerat de la Physique Nucléaire comme Horia Hulubei qui a donné le nom de l'institut roumain, on donne plusieurs exemples de résultats remarquables obtenus pendant les derniers 30 années et on finit par les nouvelles opportunités de collaboration ouvertes par le projet SPIRAL2 au GANIL et le projet futur RIF@IFIN-HH. Ces collaborations ont permis aux chercheurs roumains de d'avoir accès à des laboratoires de haut niveau et de pouvoir contribuer à des sujets d'actualité dans le domaine de la Physique Nucléaire.

Mot-clés — CNRS, IN2P3, GANIL-SPIRAL2, IFIN-HH, Physique Nucléaire, faisceau radioactifs

I. INTRODUCTION

Cette contribution propose de présenter les résultats et les perspectives de la collaboration franco-roumaine dans un domaine très dynamique et productif: l'étude des phénomènes nucléaires utilisant des faisceaux d'ions radioactifs, composés de noyaux ayant un temps de vie trop courts pour exister naturellement et qui sont produits par réactions nucléaires en laboratoire. L'accent sera mis sur la collaboration entre IFIN-HH (Institutul Național de Fizică și Inginerie Nucleară – “Horia Hulubei”) [1] de Măgurele, Roumanie, qui continue l'activité de l'IFA (Institutul de Fizică Atomică) avec le GANIL (Grand Accélérateur National d'Ions Lourds) [2] situé à Caen, France, mais aussi avec autres laboratoires dans le cadre l'IN2P3 (Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules) [3].

II. LE DEBUT ET LE CONTEXTE DE LA COLLABORATION IFIN-IN2P3

Les résultats que l'on présente ici ont été obtenus dans le cadre d'un accord de collaboration entre IFIN et IN2P3 qui a débuté dans les années 70, mais les bases de cette collaboration ont été posées bien plus tôt :

Horia Hulubei, un jeune physicien Roumain de talent, travaille à Paris dans les années 1930 avec Jean Perrin et Marie Curie et achève une excellente thèse de doctorat qu'il soutient à Paris. Revenu en

Roumanie, il fonde la division de spécialiste à l'Université de Bucarest. 10 ans après la guerre, quand la Roumanie était en train de se remettre après l'époque difficile, l'Institut de Physique Atomique est fondé à Măgurele par Horia Hulubei. Măgurele était alors un village à la périphérie de Bucarest. Le centre possède un cyclotron et un réacteur de recherche de provenance soviétique. En même temps, une division de Physique Atomique et Nucléaire est constituée à l'Université de Bucarest. L'institut se développe progressivement et en début des années 70 il obtient un Accélérateur Tandem de 9MV en provenance des Etats-Unis.

Dans ce contexte, la Convention de collaboration entre IFIN et IN2P3 a eu depuis le début l'objectif d'échanger des idées entre les communautés scientifiques des deux pays dans le domaine de la physique nucléaire et des particules. Les premiers bénéficiaires de cette collaboration ont été A. Sandulescu et D. Poenaru, des théoriciens Roumains qui ont prédit [4] l'émission des clusters (découverte expérimentale faite par Rose et Jones [5] dans les années 1980). Ils ont eu l'opportunité de travailler avec M. Hussonois de l'IPN-CSNSM-Orsay et de faire des expériences cherchant à confirmer ce nouveau type de radioactivité.

Les collaborations franco-roumaines ont eu un développement plus dynamique après la fin du régime communiste en Roumanie (décembre 1989). Claude Detraz, le Directeur du GANIL à l'époque, ayant une solide base scientifique et une large vision, a saisi l'opportunité offerte par la Convention de collaboration existante et a invité des chercheurs roumains à joindre l'équipe de GANIL et d'y apporter sa propre contribution. A ce moment, les premières expériences avec faisceaux radioactifs étaient réalisées au GANIL en utilisant le spectromètre LISE, ouvrant un vaste potentiel de découvertes scientifiques, des mesures permettant de développer les modèles théoriques mais aussi de nombreuses applications dans d'autres domaines. Cet échange des chercheurs a continué, et le nombre de personnes-heures attribué à la collaboration avec la Roumanie a augmenté. La coopération avec GANIL est la thématique majeure de la Collaboration, mais autres directions de recherche ont bénéficié de ce support : les données nucléaires en collaboration avec IReS Strasbourg, des expériences réalisées en collaboration avec le Centre

Européen de Recherche Geel (Belgique). La collaboration franco-roumaine couvre aussi le domaine des hautes énergies, et le partenariat de la Roumanie avec le CERN est dû aussi à la collaboration avec des chercheurs français dans ce domaine.

III. 30 ANS DE COLLABORATION AVEC LE GANIL

Le noyau atomique dans la nature est formé de protons et de neutrons en proportions bien établies. En laboratoire, utilisant les réactions nucléaires, on peut ajouter ou soustraire des nucléons pour obtenir des noyaux instables avec des temps de vie très différents (entre 10-24 et 1030s), qui présentent des propriétés nouvelles. Par l'étude de ces noyaux on peut connaître le comportement des nucléons et leur interaction dans le noyau, leur temps de vie, les nouveaux phénomènes qui peuvent apparaître et les expliquer en utilisant les modèles théoriques existants.

Durant la collaboration entre le GANIL et l'IFIN-HH plusieurs études ont été faites : noyaux à halo utilisant les réactions de break-up, l'évolution de la structure nucléaire des noyaux très éloignés de la stabilité par la spectroscopie gamma et particules chargées, l'isomérisme nucléaire, réactions d'intérêt astrophysique, la déformation des noyaux et leur forme, radioactivité nouvelle comme l'émission spontanée de deux protons.

Pour mener ces études, des dispositifs expérimentaux importants ont été réalisés, comme le Château de Cristal, TONNERRE, MISTRAL, un ensemble expérimental pour la détection des électrons de conversion et des rayonnements gamma. Les chercheurs Roumains ont participé activement aux expériences et ont proposé, avec les collègues Français, des expériences pour étudier les noyaux exotiques au GANIL : les noyaux à halo, des études des noyaux importants pour la nucléosynthèse, la production des noyaux légers loin de la ligne de stabilité (dont 24O), et auprès d'autres installation, par exemple les mesures de masses nucléaires, en particulier le 11Li, avec le spectromètre MISTRAL à ISOLDE-CERN. Ils ont été partenaires dans la découverte du noyau doublement magique 100Sn [6] et de la radioactivité de deux protons [7] en collaboration avec le groupe de Bertram Blank de CEN-Bordeaux Gradignan.

Les études de structure nucléaire ont cherché notamment à mesurer et à expliquer les changements qui interviennent dans le modèle à couches loin de la stabilité, par l'étude des noyaux exotiques autour des nombres magiques : 20 [8-10], 28 [11-12], 40 [13]. Un autre sujet d'intérêt est l'étude de l'isomérisme [14-17] et son évolution dans les isotopes loin de la stabilité comme signature de la compétition et le mélange des différentes formes et configurations nucléaires.

Un effort important a été mis pour l'observation du phénomène d'émission des deux protons. Dans le cas des noyaux très déficitaires en neutrons, l'émission d'un ou de plusieurs protons se fait en mode séquentiel, mais il existe des noyaux pour lesquels ce processus est impossible énergétiquement. Plusieurs expériences ont été réalisées au GANIL pour observer la décroissance par deux protons [7, 18,19].

Un autre domaine d'intérêt est l'étude des phénomènes qui ont lieu dans les étoiles, pour expliquer la production des éléments chimiques. Un cas particulièrement

intéressant est l'émission des rayonnements gamma durant les premières heures après une explosion de type novae, caractérisées par l'émission des rayonnements gamma spécifiques des noyaux radioactifs produits, détectables dans l'espace par des télescopes embarqués sur des satellites.

Un article récent [20] décrit une expérience effectuée au GANIL, utilisant le spectromètre gamma AGATA et le spectromètre magnétique VAMOS++, qui cherche à expliquer l'explosion des étoiles de type novae, en mesurant les états excités du 23Mg et les probabilités de survie, noyaux qui sont produits dans ces étoiles par des réactions nucléaires – par l'absorption d'un proton par le noyau de 22Na. Ce noyau est intéressant car sa décroissance peut être détectée par les télescopes dans l'espace. Une autre méthode a été utilisée [21-22] pour étudier les probabilités de décroissance des états excités dans le noyau 19Ne, qui est à l'origine du 18F produit dans l'explosion des systèmes de type novae. Dans l'expérience décrite dans [21], le noyau d'intérêt, 19Ne, a été produit en utilisant un faisceau SPIRAL1 sur une cible avec une concentration élevée de protons.

L'étude des résonances nucléaires non-liées [23] dans le noyau de 16F essaie a pour objectif final d'expliquer les phénomènes appelés „X-ray bursts” qui ont lieu dans les systèmes d'étoiles binaires quand une accumulation de matière se produit sous l'action de la force d'attraction d'une étoile à neutrons. Alors que la pression est assez élevée pour transformer le noyau de 14N en 15O par capture d'un proton. La capture d'un autre proton crée le noyau non-lié 16F, l'étude duquel est important pour comprendre ce processus.

Dans tous ces résultats, le soutien apporté aux chercheurs roumains par la Convention de collaboration IFIN-IN2P3 a été essentiel, représentant l'élément nécessaire de continuité et de constance qui a permis un accès réussi à d'autres sources de financement et projets. Un exemple particulier est la Réseau de Formation-Recherche pour les Pays de l'Est coordonné par le GANIL, qui a permis dans les années 90 à des doctorants de plusieurs pays d'Europe de l'Est de travailler plusieurs mois par an dans ce laboratoire du plus haut niveau en Europe et de rédiger des thèses de doctorat sur des sujets d'actualité. Par la suite, ~10 autres doctorants de l'IFIN-HH ont obtenu leur doctorat sur la base des données accumulées dans les expériences au GANIL, la plupart d'entre eux étant actuellement des chercheurs à l'IFIN-HH, deux ayant des postes à l'IN2P3 et le reste étant employé dans des entreprises privées.

IV. LA NOUVELLE INSTALLATION SPIRAL2 ET LES PERSPECTIVES DE LA COLLABORATION

SPIRAL2 (The Système de Production d'Ions Radioactifs en Ligne de 2e génération) [24] – inclus dans la Feuille de Route ESFRI (European Strategy Forum for Research Infrastructures) en 2006 – et son implémentation, ont créé depuis le début de nouvelles opportunités de collaboration a niveau Européen. Basé sur un accélérateur linéaire équipé avec cavités supraconductrices capable de produire des faisceaux d'ions stables de haute intensité (milliampères), cette installation ouvre des possibilités nouvelles de produire des faisceaux radioactifs dans la

recherche fondamentale et appliquée. De plus, on peut gagner des connaissances dans les domaines de fusion et fission nucléaire, production des radioisotopes pour la médecine, radiobiologie et science des matériaux.

Dans la phase préparatoire du projet, financé par la Commission Européenne dans le programme FP7, l'IFIN-HH a été impliqué dans la conception et réalisation de prototypes des technologies-clés pour SPIRAL2. Dans la phase d'implémentation, l'IFIN-HH a construit, installé et mis en fonction le système de surveillance des pertes de faisceau pour l'accélérateur linéaire de SPIRAL2. Ce système est critique pour la protection du personnel, l'environnement et les équipements, prévenant l'émission des radiations et assurant le fonctionnement correct du système. Par cette contribution et en participant à la construction de certains des dispositifs expérimentaux développées par les collaborations autour de SPIRAL2, l'IFIN-HH a pour objective de rester un utilisateur régulier de l'installation GANIL-SPIRAL2 avec un apport enrichissant à son programme scientifique.

Le projet RIF@IFIN (Radioactive Ion Facility at IFIN-HH) proposé récemment est encore une autre opportunité pour la collaboration franco-roumaine dans le contexte Européen. En utilisant l'accélérateur linéaire d'électrons construit par le consortium EuroGammaS pour ELI-NP, le projet RIF@IFIN va produire des faisceaux radioactifs par photo fission et des radio-isotopes d'intérêt médical par des réactions photo-nucléaires.

L'unicité du projet RIF@IFIN consiste en la méthode de production des faisceaux radioactifs en utilisant une cible d'Uranium placée dans une cellule contenant un gaz ultra pur à température cryogénique suivi par l'extraction et la séparation rapide et efficace des produits de fission, créant ainsi l'accès aux isotopes riches en neutrons et notamment les éléments réfractaires difficile ou impossible de produire ailleurs. Ainsi, il y a beaucoup de synergies et aspects complémentaires avec les objectifs du SPIRAL2 et en particulier l'installation DESIR (Decay, Excitation and Storage of Radioactive Ions), l'implémentation de laquelle a reçu un support financier récemment de la part du Gouvernement Français et de la Région Normandie.

Le développement des méthodes de production de isotopes radioactifs avec un potentiel de théragnostique est aussi prévu dans le projet RIF@IFIN. La production des isotopes d'intérêt sera suivie de traitements biochimiques et de tests au Centre de Recherche dans le domaine des Radiopharmaceutiques (CCR) existant déjà à IFIN-HH. Cette direction a un impact socio-économique évident est aussi une potentielle collaboration avec SPIRAL2-GANIL. Le développement et l'utilisation de faisceau radioactifs dans l'analyse de nouveaux matériaux sera une autre direction de recherche à RIF@IFIN. Le développement de nouveaux radioisotopes pour les applications médicales (ex. isotopes émetteurs de particules alphas pour la thérapie de cancer) sont en même temps poursuivie à GANIL/SPIRAL2.

Cependant, en parlant des applications et du rôle de ces infrastructures de recherche dans la société, il est très important de souligner leur potentiel d'attirer, de former et maintenir des ressources humaines qualifiées dans les domaines de la physique et technologie nucléaire dans le contexte actuel, où l'utilisation de l'énergie nucléaire

s'impose comme une solution robuste de production d'énergie sans émission de gaz à effet de serre.

V. CONCLUSIONS

Comme on peut le constater, tant l'expérience du passé que les perspectives d'avenir sont très encourageantes pour la poursuite de la collaboration franco-roumaine dans le domaine de la physique nucléaire utilisant les faisceaux radioactifs.

REFERENCES

- [1.] <https://www.nipne.ro/>
- [2.] <https://www.ganil-spiral2.eu/>
- [3.] <https://www.in2p3.cnrs.fr/fr>
- [4.] A. Sandulescu, D.N. Poenaru, W. Greiner, "New type of decay intermediate between fission and alpha-decay", *Sov. J. Part. Nucl.* 11, 528-541 (1980).
- [5.] H.J. Rose & G.A. Jones, "New type of natural radioactivity", *Nature* 307, 245-247 (1984).
- [6.] M. Lewitowicz et al., "Identification of the Doubly-Magic Nucleus ^{100}Sn in the Reaction $^{112}\text{Sn} + (\text{nat})\text{Ni}$ at 63 MeV/Nucleon", *Phys. Lett. B* 332B, 20 (1994).
- [7.] J. Giovinazzo et al., "Two-Proton Radioactivity of ^{45}Fe ", *Phys.Rev.Lett.* 89, 102501 (2002).
- [8.] M. Stanoiu et al., "N = 14 and 16 shell gaps in neutron-rich oxygen isotopes", *Phys.Rev. C* 69, 034312 (2004).
- [9.] M. Bellegruic et al., "Search for neutron excitations across the N = 20 shell gap in $^{25-29}\text{Ne}$ ", *Phys.Rev. C* 72, 054316 (2005).
- [10.] A. Buerger et al., "Spectroscopy Around ^{36}Ca ", *Acta Phys.Pol. B38, 1353*(2007) (2007).
- [11.] S. Grevy et al., "Beta-decay half-lives at the N=28 shell closure", *Phys.Lett. B* 594, 252 (2004).
- [12.] B. Bastin et al., "Collapse of the N = 28 Shell Closure in ^{42}Si ", *Phys.Rev.Lett.* 99, 022503 (2007).
- [13.] O. Sorlin et al., " $^{68}\text{Ni}40$: Magicity versus superfluidity", *Phys.Rev.Lett.* 88, 092501 (2002).
- [14.] F. Rotaru et al., "Unveiling the Intruder Deformed 02^+ State in ^{34}Si ", *Phys.Rev.Lett.* 109, 092503 (2012).
- [15.] H. Mach et al., "Coupling of valence particles/holes to 68, 70Ni studied via measurements of the B(E2) strength in 67, 69, 70Ni and 71Cu", *Nucl.Phys. A719, 213c* (2003).
- [16.] M. Sawicka et al., "Low energy levels in ^{72}Ni ", *Phys.Rev. C* 68, 044304 (2003).
- [17.] C. Petrone et al., "Nearly degenerate isomeric states of ^{75}Cu ", *Phys.Rev. C* 94, 024319 (2016).
- [18.] B. Blank et al., "First Observation of ^{54}Zn and its Decay by Two-Proton Emission", *Phys.Rev.Lett.* 94, 232501 (2005).
- [19.] P. Ascher et al., "Direct Observation of Two Protons in the Decay of ^{54}Zn ", *Phys.Rev.Lett.* 107, 102502 (2011).
- [20.] C. Fougères et al., "Search for ^{22}Na in novae supported by a novel method for measuring femtosecond nuclear lifetimes", *Nature Communications* 14, 1 (2023).
- [21.] F. Boulay, & et al., "Measurement of ^{19}Ne spectroscopic properties via a new method of inelastic scattering to study novae", *J. Phys.: Conf. Ser.* 940 012003 (2018).
- [22.] J. Dalouzy et al., "Discovery of a New Broad Resonance in ^{19}Ne : Implications for the Destruction", *Phys. Rev. Lett.* 102, 162503 (2009).
- [23.] I. Stefan et al., "Quasi-bound low energy tail of resonance", in *Proton Emitting Nuclei and Related Topics, Volume 961, Page 205* (2007).
- [24.] M. Lewitowicz, "The SPIRAL2 project", *Nucl. Phys. A805, 519c* (2008).