

AVANT-PROPOS É. BAUGE, A. NICOLAS, C. DE SAINT JEAN, T. DUGUET, A. LETOURNEAU

12 INTRODUCTION P. LANDAIS

04 LA PHYSIQUE NUCLÉAIRE DANS LES MISSIONS DU CEA

04. Les besoins du programme Simulation en physique nucléaire D. VANDERHAEGEN

06. Les activités de la Direction de la recherche fondamentale en physique nucléaire P. ROUSSEL-CHOMAZ

08. La physique nucléaire au service des missions de la Direction des énergies F. CARRÉ

10 QUI FAIT DE LA PHYSIQUE NUCLÉAIRE AU CEA ?

10. La physique nucléaire à la DAM É. BAUGE

12. La physique nucléaire au DPhN de la DRF F. SABATIÉ

14. Le GANIL, une installation pour étudier
 le cœur de la matière
 H. GOUTTE, N. ALAHARI

16. La physique nucléaire à la Direction des énergies
C. DE SAINT JEAN *et al.*

18 STRUCTURE NUCLÉAIRE

18. **Revue sur la théorie de la structure nucléaire** T. DUGUET, J.-P. ÉBRAN

20. **Zoom sur la spectroscopie gamma retardée des fragments de fission**

22. Revue sur les données de structure pour les réactions nucléaires s. Hilaire, c. de saint Jean

24. Zoom sur l'étude métrologique des transitions bêta pour les données nucléaires X. MOUGEOT, M. LOIDL, A. SINGH **26** RÉACTIONS NUCLÉAIRES

26. **Revue sur la description théorique** des réactions nucléaires M. DUPUIS, V. SOMÀ

28. Zoom sur les potentiels optiques microscopiques g. Blanchon, m. dupuis

30. **Zoom sur les observables des rayons** nucléaires par réactions directes v. LAPOUX, v. SOMÀ

32. Zoom sur les mesures de sections efficaces de réactions induites par neutrons à n_TOF F. GUNSING, É. BERTHOUMIEUX, É. DUPONT, T. PAPAEVANGELOU, M. DIAKAKI

34. **Revue sur les applications des réactions** c. de saint Jean, g. noguère, p. archier, p. tamagno, o. bouland

36. Zoom sur les actinides dans le domaine des résonances : prise en compte de l'effet Doppler à l'aide de calculs *ab initio* g. Noguère, C. de Saint Jean, A. Filhol, J. Ollivier, E. Farhi, Y. Calzavarra, P. Maldonado

38. Zoom sur la mesure de la section efficace ²³⁹Pu(n,2n)

B. LAURENT, V. MÉOT, P. MOREL, O. ROIG, G. BÉLIER

FISSION NUCLÉAIRE

TU

de fission

H. GOUTTE, É. BAUGE, A. NICOLAS, C. DE SAINT JEAN

42. Zoom sur la représentation microscopique de la transition dans les fermiums N. DUBRAY, D. RÉGNIER, N. SCHUNCK

40. Revue sur la modélisation de la dynamigue

44. Zoom sur les observables de fission dans FIFRELIN O. LITAIZE, O. SÉROT, A. CHEBBOUBI

46. **Revue des expériences sur la fission** o. sérot, A. letourneau, G. bélier

48. **Zoom sur l'expérience SOFIA** J. TAIEB

50. Zoom sur les mesures des produits de fission avec le spectromètre Lohengrin A. Chebboubi, O. Sérot, O. Litaize, D. Bernard

52. Revue sur les applications en lien avec la neutronique

D. BERNARD, C. DE SAINT JEAN, O. SÉROT, O. LITAIZE, O. BOULAND, G. NOGUÈRE, P. ARCHIER, P. TAMAGNO, M. DIAKAKI, P. LECONTE, A. CHEBBOUBI, V. VALLET, C. CARMOUZE

54. ALBUM PHOTO

Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives. Direction des applications militaires. Journées de la physique nucléaire au CEA

Image de couverture : Carte en 3D des isotopes liés des noyaux. Leur position dans le plan horizontal correspond au nombre de protons et de neutrons et leur position sur l'axe vertical correspond à leur énergie de liaison par nucléon (les noyaux les plus liés sont en fond de vallée). La couleur verte signale les isotopes stables, l'uranium 235 est coloré en jaune et les couleurs de rouge à bleu indiquent les formes des isotopes dans leur état fondamental (rouge pour une forme allongée comme un ballon de rugby, violet pour une forme sphérique et bleu pour une forme aplatie). Cette figure représente les énergies de liaison et les formes, calculées pour tous les isotopes liés à l'aide du formalisme de champ moyen Hartree-Fock-Bogoliubov et au moyen de l'interaction de Gogny DIM. Directeur de la publication : Laurence Bonnet. Coordinateur scientifique : Éric Bauge. Comité scientifique : Éric Bauge, Anne Nicolas, Cyrille De Saint Jean, Thomas Duguet, Alain Letourneau. Rédacteur en chef : Jean-Marc Laborie. Création, réalisation, impression : www.efil.fr. Conformité : Régine Regnault. Diffusion, abonnement : Régis Vizet.

CEA - DAM, Institut supérieur des études nucléaires de défense (ISENDé), Bruyères-le-Châtel, F-91297 Arpajon Cedex, France. Courriel : chocs@cea.fr. La revue est consultable à l'adresse www-dam.cea.fr.





a physique nucléaire est l'une des disciplines phares du CEA depuis sa création. Toutes les directions opérationnelles y contribuent : Recherche fondamentale (DRF), Applications militaires (DAM), Énergies (DES) et Recherche technologique (DRT). Au

total, ce sont plus de cent chercheurs permanents qui sont mobilisés pour des études allant de la théorie la plus fondamentale à l'exploitation des données au profit des programmes. Si des collaborations internes ont toujours existé entre les chercheurs, elles se sont renforcées et structurées depuis quelques années.

En 2018, cette communauté a souhaité mettre en place deux jours de réflexion, de discussions, de partage sur un large éventail d'activités. Organisées au CEA – DAM Île-de-France les 12 et 13 mars 2019, les « Folles Journées de la physique nucléaire au CEA » sont nées de cette volonté. Ouvertes par Patrick Landais, haut-commissaire à l'énergie atomique, ces journées ont permis d'exposer les besoins et de présenter les équipes, au-delà d'échanges techniques approfondis. Le découpage thématique s'est naturellement fait sur la structure nucléaire, sur la dynamique et les réactions, en terminant par un point spécifique sur la fission. Ce sont autant de rubriques qui structurent ce numéro de *Focus*. Chaque thème a été exploré en y associant une ou plusieurs revues, suivies de zooms sur des activités de recherche particulièrement intéressantes pour l'ensemble de la communauté.

Le numéro de *Focus* que vous tenez entre les mains présente l'essentiel de ces journées; les auteurs se sont attachés à synthétiser leurs exposés pour en faire ressortir les points clés et l'originalité.

Nous vous en souhaitons une bonne lecture.

ÉRIC BAUGE ANNE NICOLAS CYRILLE DE SAINT JEAN THOMAS DUGUET ALAIN LETOURNEAU

[SOMMAIRE]

CHOCS FOCUS Nº 7 - ACTUALITÉS SCIENTIFIQUES À LA DIRECTION DES APPLICATIONS MILITAIRES

INTRODUCTION

PATRICK LANDAIS Haut-Commissaire à l'énergie atomique

DISCOURS D'OUVERTURE DE MONSIEUR LE HAUT-COMMISSAIRE À L'ÉNERGIE ATOMIQUE

e voudrais d'abord remercier les organisateurs de ces journées qui, très peu de temps après ma prise de poste, m'ont très sympathiquement invité à y participer. Il m'a ainsi été donné une première occasion de découvrir le site de Bruyères-le-Châtel et d'interagir avec des ingénieurs et chercheurs du CEA. D'autres, sans doute très nombreuses, suivront, mais la prepière a évidemment un goût particulier

mière a évidemment un goût particulier.

« ... à l'heure où la réflexion sur l'interdisciplinarité irrigue tous les centres de décision internationaux, je suis convaincu que les compétences et les outils du CEA dans le domaine de la physique nucléaire, mais aussi la combinaison rare des compétences de chercheurs et d'ingénieurs, d'expérimentateurs et de modélisateurs doivent donner au CEA une visibilité et une capacité d'intervention encore renouvelées.» Pour tenter d'aborder le monde de la physique au CEA, je me suis plongé dans quelques documents plus ou moins récents, des CORS, des DOORS, des mailles, un COB, des RAE...

Je suppose que certains de ces termes peuvent vous paraître abscons ; ne vous méprenez pas, certains l'étaient aussi pour moi. Bref, ils m'ont ouvert un peu l'esprit, mais j'aurai besoin d'autres occasions comme celle-ci pour m'imprégner davantage des recherches et des applications de la discipline.

La folle journée, je l'imaginais jusqu'alors nantaise et dédiée à la musique classique. Sachez qu'en 2019, elle fut dédiée aux carnets de voyage de grands compositeurs et placée sous le règne de la démesure, de la passion et du voyage. Elle peut aussi être qualifiée de vague vertigineuse et de terrain d'innovation.

Vous avez fait mieux et créé les « Folles Journées de la physique nucléaire ». Mais finalement la démesure, le vertige, la passion et l'innovation sont bel et bien des moteurs de votre discipline. Elle donne une image forte des compétences historiques du CEA et constitue une des bases du socle des sciences fondamentales du CEA, mais elle irrigue aussi très largement les programmes du CEA.

En 2017 et en 2018, le conseil scientifique du CEA s'est, à la demande du haut-commissaire, penché sur la physique et la chimie fondamentales, non seulement pour évaluer la qualité de la recherche réalisée, mais aussi pour évaluer la manière dont elle était incarnée dans toutes les directions opérationnelles.

Le conseil avait constaté l'ampleur des moyens consacrés, le dynamisme de la recherche et son caractère indispensable. Il avait apprécié la diversité des applications et les interactions entre communautés scientifiques complémentaires appartenant à différentes directions. Il avait aussi recommandé de réfléchir à l'organisation thématique du domaine de la physique pour une stratégie scientifique plus lisible, appelé à une réflexion sur les interactions avec les communautés nationales et internationales, suggéré de poursuivre les coopérations existantes, et appelait les directions opérationnelles à mieux exprimer leurs besoins en matière de recherche amont afin de nourrir leur stratégie.

À l'approche du travail important que le CEA va lancer en amont de l'évaluation de l'établissement par l'HCERES, et même si les applications militaires sont vouées à être assez largement exclues du périmètre de l'évaluation, il est important que la réflexion autour de la physique constitue un élément structurant pour l'auto-évaluation que le CEA aura à construire. Au sens large, cela est d'autant plus important que pour le volet amont de la physique, la maille qui y est consacrée associe recherche et instrumentation, signifiant clairement que le développement du socle de connaissances est intimement lié à la pérennisation et au développement d'outils.

Ces outils subissent et vont encore subir des mutations dans les prochaines années. Parallèlement à la mise en service de nouveaux moyens, comme le Laser Mégajoule et PETAL, les contraintes scientifiques, économiques, politiques et parfois sociétales amènent à remplacer (au moins en partie) les approches expérimentales par la simulation numérique et bien sûr à redéfinir les programmes associés, à ajuster l'accès aux compétences et à fixer de nouveaux objectifs à moyen terme. Cela conduit forcément à se réinterroger sur la stratégie des disciplines concernées.

Ainsi, à la lecture de ce document « maille », j'ai parfois ressenti une difficulté à identifier les enjeux stratégiques ou les défis du futur, tant ils pourraient être exprimés dans d'autres « mailles », comme la microélectronique, les NTE ou, et c'est ici essentiel, le nucléaire de demain. Cela va dans le sens des conclusions du conseil scientifique qui appelait à une réflexion structurée sur la stratégie de la discipline au sein du CEA.

À l'heure où l'on prépare une « Journée mondiale de l'ingénierie pour l'avenir » au sein de laquelle la physique a une place de premier ordre, à l'heure où la réflexion sur l'interdisciplinarité irrigue tous les centres de décision internationaux, je suis convaincu que les compétences et les



Patrick Landais, Haut-Commissaire à l'énergie atomique.

outils du CEA dans le domaine de la physique nucléaire, mais aussi la combinaison rare des compétences de chercheurs et d'ingénieurs, d'expérimentateurs et de modélisateurs doivent donner au CEA une visibilité et une capacité d'intervention encore renouvelée. Je suis aussi convaincu que les initiatives comme celle à l'origine de ces premières folles journées sont autant de moments de partage essentiels au développement de nouveaux programmes et d'interfaces souples et fertiles. Je vous souhaite deux folles journées.

LA PHYSIQUE NUCLÉAIRE DANS LES MISSIONS DU CEA

LES BESOINS DU PROGRAMME SIMULATION EN PHYSIQUE NUCLÉAIRE

Directeur du programme Simulation du CEA - DAM

Après avoir défini le programme Simulation et ses objectifs, les besoins généraux en données nucléaires seront rappelés, en insistant sur la maîtrise de la précision des données. Les moyens mis en jeu par le CEA – DAM, directement ou à travers ses collaborations, seront rapidement évoqués en conclusion. ancé en 1995, le programme Simulation (figure 1) a pour objectif de pérenniser la dissuasion française après l'arrêt définitif des essais nucléaires. Le programme Simulation n'est autre que la démarche scientifique appliquée aux armes. Il s'articule autour de trois volets :

• la physique des armes, définissant la modélisation de tous les phénomènes physiques intervenant dans le fonctionnement au cours duquel la matière est portée dans des états extrêmes avec une dynamique très rapide ;

• la simulation numérique du fonctionnement, le système d'équations « approchées » étant résolu sur un supercalculateur;

• la validation expérimentale, de façon élémentaire, auprès de grands instruments de physique de la communauté académique, comme les synchrotrons ou les accélérateurs de particules, ou, plus globalement, grâce à deux grandes installations, d'une part AIRIX puis EPURE, installations de « radiographie » dédiées à la phase non nucléaire du fonctionnement de l'arme et, d'autre part, le LMJ (Laser Mégajoule) capable de reproduire à toute petite échelle les conditions physiques dans lesquelles se trouve la matière lors du fonctionnement nucléaire de l'arme.

Toute la physique est finalement « capitalisée » dans une chaîne de logiciels qui, avec leurs données d'entrée et leurs prescriptions d'emploi, constituent le « standard de garantie » des armes.

Les données d'entrée, comme les sections efficaces des réactions nucléaires au cœur de cet article, doivent être les plus précises possible. Les modèles phénoménologiques, classiquement ajustés sur des expériences, vont être remplacés progressivement par des données calculées à partir de codes de physique microscopique et validés par des expériences élémentaires.

Le programme Simulation, dans sa première phase, dite de construction, a permis la conception et la garantie des têtes nucléaires de renouvellement des composantes aéroportée (tête nucléaire aéroportée) et océanique (tête nucléaire océanique), tout en assurant la formation des experts physiciens des armes. La deuxième phase, dite d'extension et d'exploitation, permet de maintenir une dissuasion crédible et de répondre aux demandes de la défense.



FIGURE 1

Frise temporelle du programme Simulation au CEA - DAM.

DE NOMBREUX BESOINS EN DONNÉES NUCLÉAIRES

La description précise du fonctionnement de la charge thermonucléaire nécessite évidemment de disposer de données nucléaires détaillées pour les matériaux fissiles : section efficace de fission, multiplicité neutronique, spectres des neutrons prompts émis, rendements de fission, ainsi que des données pour les réactions concurrentes de la fission, capture radiative, réactions (n,xn), et diffusion élastique ou inélastique. Les besoins concernent également les matériaux non fissiles qui interviennent dans les bilans neutroniques à travers les absorptions et/ou diffusions générées. Compte tenu des fluences élevées, des états excités ou isomériques sont créés en grand nombre, avec des sections efficaces nucléaires éventuellement différentes des états fondamentaux. Les besoins du CEA-DAM sont certes assez proches de ceux du nucléaire civil, mais dans un domaine d'énergie différent s'étendant jusqu'à environ 20 MeV. Enfin, des phénomènes particuliers, n'apparaissant qu'en phase plasma, couplent transitions nucléaires dans le noyau et transitions électroniques dans l'atome, et doivent être pris en compte.

UNE EXIGENCE DE PRÉCISION ÉLEVÉE...

Le standard de calcul qui porte la garantie de fonctionnement de la charge nucléaire doit limiter au maximum les compensations d'erreurs. En l'absence parfois totale de mesures expérimentales pour certaines données, le CEA–DAM a choisi une approche dite tout modèle, assez originale, permettant d'assurer la cohérence de l'ensemble des données nucléaires évaluées. Le standard de calcul est assorti d'une estimation de l'incertitude de simulation. Une part de cette incertitude est due aux données d'entrée, nucléaires en particulier. Il est primordial d'évaluer ces incertitudes en tenant compte de l'ensemble des corrélations et de réévaluer les incertitudes expérimentales (à la fois pour les expériences différentielles ou intégrales) qui contraignent les évaluations.

... REPOSANT SUR DES MOYENS ET DES COMPÉTENCES VARIÉS

L'approche tout modèle s'appuie sur une stratégie multiéchelles qui exploite les ressources du calcul massivement parallèle pour alimenter les calculs des sections efficaces. De même, de nouveaux diagnostics et de nouvelles expériences plus contraignantes doivent être réalisés.

Pour mener à bien ses programmes ambitieux, le CEA–DAM s'appuie sur de nombreuses collaborations : dans le domaine des projets de recherche académiques internationaux comme l'expérience SOFIA à Darmstadt, ou dans le cadre d'une collaboration avec les laboratoires américains de la NNSA. Bien évidemment, la DAM entretient des relations étroites avec les autres directions du CEA : avec la DES à travers la collaboration CODONU et avec la DRF à travers les collaborations COPHYNU et l'ESNT (Espace de Structure Nucléaire Théorique).

LA PHYSIQUE NUCLÉAIRE DANS LES MISSIONS DU CEA

LES ACTIVITÉS DE LA DIRECTION DE LA RECHERCHE FONDAMENTALE EN PHYSIQUE NUCLÉAIRE

La physique nucléaire est un des piliers de la recherche fondamentale au CEA depuis sa création, en lien direct avec ses missions historiques aussi bien pour la défense que pour l'énergie. À l'heure actuelle, les grandes questions* qui mobilisent les physiciens nucléaires de la DRF, regroupés au sein de l'Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu), concernent la nature de l'interaction élémentaire qui agit entre les nucléons dans le noyau, la limite de stabilité des noyaux en termes de masse, d'énergie d'excitation, de forme et d'isospin, les liens entre la structure des noyaux et les principes fondamentaux, ou encore l'effet de la structure des noyaux sur les réactions telles que la fission.

P. ROUSSEL-CHOMAZ CEA - DRF Direction des programmes et des partenariats publics

our aborder ces différentes questions et espérer progresser dans la compréhension des forces nucléaires liant les noyaux, la méthode utilisée consiste à étudier le noyau dans des conditions extrêmes (voir <u>figure 1</u>) : extrêmes en énergie d'excitation avec les noyaux superdéformés, noyaux à hauts spins ; extrêmes en isospin avec les noyaux

riches en neutrons ou en protons; extrêmes en masse avec les noyaux superlourds.

Les études de mécanismes de réaction sont également importantes, car elles permettent d'accéder à des informations complémentaires. Par exemple, les réactions de capture de neutrons sur les noyaux légers permettent d'étudier le processus s (*slow neutron capture* en anglais), important pour l'astrophysique nucléaire et la nucléosynthèse des noyaux relativement légers. À l'autre bout de la carte de noyaux, la fission des noyaux lourds reste un mécanisme où de nombreuses observations ne sont pas comprises.

Les recherches qui sont conduites sur la partie théorique à la DRF, souvent en collaboration avec la DAM, en particulier à travers l'ESNT (Espace de Structure Nucléaire Théorique), ont permis ces dernières années des progrès remarquables dans les calculs *ab initio*. Il y a moins de dix ans, seuls les noyaux les plus légers étaient accessibles pour ces calculs. Maintenant, ce sont des chaînes entières d'isotopes de masse intermédiaire qui sont calculées : énergies de liaison et rayons des isotopes d'oxygène, rayons de charge des nickels, masses des isotopes de titane.



Comprendre l'interaction forte dans un système quantique complexe

06 LA PHYSIQUE NUCLÉAIRE DANS LES MISSIONS DU CEA

La description de la spectroscopie de noyaux complexes progresse également. L'objectif encore à atteindre est de pouvoir disposer d'un traitement unifié de la structure et des réactions nucléaires basé sur les premiers principes. Il reste toutefois plusieurs défis à relever avant d'y parvenir. En effet, d'une part les modèles utilisés à l'heure actuelle pour les mécanismes de réactions dépendent des régimes en énergie ou des observables considérées, et d'autre part le niveau de précision des modèles microscopiques pour la spectroscopie des noyaux n'est pas suffisant pour que leurs prédictions soient utilisées dans les simulations des mesures intégrales.

La stratégie proposée par un groupe de travail mis en place par le haut-commissaire à l'énergie atomique en 2016 est de développer une approche multiéchelles, c'est-à-dire « remplacer la panoplie de modèles et de mesures ad hoc par un ensemble rigoureux de modèles cohérents, s'appuyant sur la description la plus microscopique possible de la structure et des réactions nucléaires et sur des expériences de plus en plus discriminantes »[1]. Si on classe les différents modèles en quatre grandes familles, des plus microscopiques, modèles ab initio et microscopique effectif (modèles en couches, approches Energy Density Functional), aux plus intégraux en passant par les modèles considérant le noyau dans son ensemble (différentiel macroscopique), l'approche proposée a pour objectif d'améliorer chaque niveau de description théorique par des validations et des discriminations expérimentales, et d'enrichir chaque niveau de description par les apports des autres. L'analyse des forces en présence au CEA pour attaquer ce défi et progresser vers une articulation cohérente de théories effectives emboîtées les unes dans les autres montre que la couverture du spectre des différentes approches est complète, avec la DRF positionnée sur les approches les plus microscopiques, la DES sur les plus intégrales, et la DAM sur les approches de type microscopique effectif et macroscopique.

Les développements technologiques** nécessaires pour disposer d'une instrumentation permettant de réaliser des expériences au meilleur niveau international sont une des forces historiques du CEA en physique nucléaire comme dans les autres disciplines en lien avec ses missions. Ils constituent un savoir-faire clé pour le CEA, une source importante d'innovation, et permettent de connecter le CEA à la fois à la recherche académique et à l'industrie.

L'instrument MINOS, financé par une bourse ERC et actuellement installé au RIKEN, est un des instruments emblématiques construits par l'Irfu dans les dernières années. MINOS est une cible d'hydrogène liquide relativement épaisse, entourée d'une chambre à projection temporelle (TPC en anglais), équipée de plans de détection à base de détecteurs Micromegas pour mesurer les traces des protons de recul et la position du vertex de la réaction. Son intérêt est de pouvoir augmenter, grâce à l'épaisseur de sa cible, la sensibilité des expériences d'un facteur 5 à 50 par rapport aux équipements standards sans dégrader la résolution en énergie. Un autre exemple du positionnement au meilleur niveau des équipes de la DRF est le multidétecteur γ AGATA, construit dans le cadre d'une collaboration européenne, et pour lequel l'Irfu, en charge d'un des laboratoires de tests des modules, participe au travail en cours pour *upgrader* le détecteur et joue un rôle important dans le développement des techniques d'analyse des données. Des développements importants sont également réalisés en électronique, avec l'exemple de l'ASIC GET (*General Electronics for TPC*), développé par les ingénieurs électroniciens de l'Irfu, initialement pour le projet de cible active ACTAR, et qui a trouvé de nombreuses applications avec MINOS, mais aussi au Cern pour l'expérience n_TOF, au GANIL pour les détecteurs du futur spectromètre S3, et pour de nombreux autres types de détecteurs, avec environ 150 000 voies construites à ce jour et utilisées dans les laboratoires du monde entier.

Certaines équipes de la DRF utilisent des outils ou des méthodes expérimentales développés au profit de la physique nucléaire fondamentale pour diverses applications, les plus importantes étant l'énergie nucléaire et la biologie. Les études en lien avec l'énergie nucléaire visent à contribuer à l'amélioration de la sûreté des installations et au rendement économique de la filière, avec deux aspects : la diminution des incertitudes sur les données nucléaires grâce à des mesures de sections efficaces d'intérêt réalisées à n TOF au Cern depuis de nombreuses années, ou qui pourront l'être avec l'installation NFS de SPIRAL2, et les études des phénomènes de vieillissement des matériaux sous irradiation grâce à l'utilisation des faisceaux d'ions lourds du GANIL au CIMAP, service de l'Iramis. Les applications en biologie portent d'une part sur la hadronthérapie, dont l'intérêt est lié au pic de Bragg des ions tels que le carbone, qui permet de concentrer le dépôt d'énergie sur la tumeur en minimisant les dégâts sur les tissus sains situés avant et après, et d'autre part sur le spatial pour les vols habités, thématique moins importante que la précédente pour la DRF à l'heure actuelle.

Enfin, la DRF est cotutelle avec le CNRS/IN2P3 de la très grande infrastructure nationale de recherche GANIL implantée à Caen, qui délivre une large gamme de faisceaux stables depuis le carbone jusqu'à l'uranium, ainsi que des faisceaux radioactifs relativement légers grâce à l'installation SPIRAL1. Le projet SPIRAL2 Phase 1 permettra de fournir des faisceaux d'ions très légers et jusqu'au Ni avec des intensités beaucoup plus fortes que l'installation existante dans trois nouvelles salles d'expériences : NFS (*Neutrons for Science*), S3 (*Super Separator Spectrometer*) et DESIR (Désintégration, Excitation et Stockage d'Ions Radioactifs). L'avenir du GANIL au-delà de la phase 1 de SPIRAL2 fera l'objet d'une réflexion pilotée par un comité international dans les mois à venir.

^{*} Seules les thématiques qui avaient les liens les plus forts avec les activités de la DES et de la DAM ont été présentées. Les aspects liés à la structure du nucléon, au plasma de quarks et de gluons ou à la physique des neutrinos qui sont également traités à la DRF n'ont pas pu être abordés dans la présentation. **Là aussi, la présentation n'a pas pu aborder tous les développements

^{**}Là aussi, la présentation n'a pas pu aborder tous les développements technologiques réalisés à la DRF pour la physique nucléaire. En particulier ceux liés aux accélérateurs et aux grands aimants n'ont pas été traités.

REFERENCES [1] H. GOUTTE, É. BAUGE, C. DE SAINT JEAN, A. NICOLAS, «Physique nucléaire au CEA, prospectives à 10 ans», *Rapport interne rédigé en 2016 à la demande du haut-commissaire* à l'énergie atomique.

LA PHYSIQUE NUCLÉAIRE DANS LES MISSIONS DU CEA

LA PHYSIQUE NUCLÉAIRE AU SERVICE DES MISSIONS DE LA DIRECTION DES ÉNERGIES

La DES a pour mission essentielle le soutien par la recherche des usages civils de l'énergie nucléaire. De ce fait, elle contribue au développement des outils de conception et de démonstration de sûreté de l'ensemble de la filière nucléaire: réacteurs, usines du cycle et stockage des déchets radioactifs. Les données nucléaires sont présentes dans la totalité des calculs de neutronique et de radioprotection: calcul des cœurs, évaluation de la fluence reçue par la cuve, radioprotection, calculs de criticité pour le transport, les réacteurs et les usines du cycle, évaluation de la puissance résiduelle des cœurs, calculs d'activation des structures, etc. Le défi essentiel posé à la DES réside dans la nécessité de prendre en compte des échelles de calcul extrêmement étendues, tant en espace (du noyau atomique au réacteur) qu'en temps (de la nanoseconde au million d'années) et qu'en énergie (de 0 à 20 MeV).



ès l'aube de l'ère du nucléaire, le grand physicien Emilio Segrè disait : « ... the difference between ideas, hopes, suggestions and theoretical calculations, and solid numbers based on measurement, is paramount. » Il s'agit donc de déployer de concert une approche théorique solide, de disposer de mesures d'observables de physique

à travers des expériences microscopiques et de proposer des expériences intégrales pour parfaire la validation et l'évaluation des incertitudes.

Cette approche, partagée entre les trois directions du CEA, est appliquée de manière cohérente et concertée, avec pour la DES un travail particulier dans le domaine différentiel et intégral, quand la DAM se consacre davantage au microscopique effectif et la DRF à l'*ab initio*.

LES ENJEUX DE LA QUALITÉ DES DONNÉES NUCLÉAIRES

Le besoin en données nucléaires de qualité est capital pour la capacité prédictive de la simulation numérique, dont l'objectif est de fournir des codes de calcul validés, interopérables, partageant des bases informatiques, visant à fournir des calculs de référence au plus près de la physique dans toutes les grandes disciplines : neutronique, mécanique des fluides, thermomécanique des structures, science des matériaux, chimie.

Trois grands enjeux gouvernent les exigences en données de qualité :

• gérer l'exploitation, l'évolution et les aléas du parc nucléaire et des usines du cycle pour décider des actions les mieux adaptées. C'est à cet effet que la DES et ses partenaires EDF et Framatome travaillent sur les thématiques du fonctionnement des réacteurs et de leur sûreté, du contrôle des effluents (pour lesquels les données nucléaires pour le tritium et le carbone 14 sont essentielles), la durée de vie des éléments (en particulier l'évaluation de la fluence reçue par la cuve). Une manœuvrabilité accrue pour les réacteurs est une demande de plus en plus forte et, par conséquent, il est essentiel d'améliorer encore le pouvoir prédictif de la simulation, caractéristique fort exigeante pour les données nucléaires ;

• réduire les incertitudes afin de mieux justifier les marges pour la sûreté exige des progrès importants en simulation (multiphysique en particulier) et requiert d'être en capacité de proposer des analyses de situations accidentelles au mieux des connaissances des modèles et de la capacité de la simulation numérique;

• concevoir de nouveaux réacteurs utilisant des données nucléaires dans des domaines différents, en particulier en énergie, est également un enjeu fort pour l'évaluation des données.



Les équations de Boltzmann et Bateman, qui gouvernent l'évolution de la population de neutrons dans un système nucléaire et l'évolution isotopique des divers constituants, ont pour coefficients les données nucléaires. Compte tenu de la précision atteinte à ce jour dans la résolution de ces équations et de la possibilité d'obtenir une solution de l'équation de Boltzmann par l'emploi de la méthode de Monte-Carlo (considérée comme une référence, sans biais de modèle ni de discrétisation), on peut désormais considérer que les données nucléaires sont la source d'incertitudes résiduelles dans les calculs de neutronique de référence.

On comprend donc que dans l'ensemble des travaux que mène la DES, ceux visant à fournir des valeurs d'incertitudes dans les évaluations de données soient essentiels. C'est le code CONRAD qui est l'outil clé développé pour ce faire, associé à FIFRELIN pour l'estimation des observables de fission et à GALILÉE pour le traitement de ces données, afin de les rendre utilisables par les codes de calcul de neutronique. La DES est donc étroitement associée à la DAM pour produire la bibliothèque de données européenne JEFF, contenant l'ensemble des grandeurs nécessaires aux calculs des systèmes nucléaires.

DES BESOINS SPÉCIFIQUES SELON LES APPLICATIONS

Quelques exemples choisis dans de récents travaux de la DES permettent d'illustrer la variété des besoins.

Au premier chef, le calcul de cœurs de taille de plus en plus grande a conduit à questionner la source principale des incertitudes. La connaissance des données de diffusion inélastique est insuffisante, en particulier pour l'isotope ²³⁸U. Les incertitudes élevées entachent les calculs de paramètres fondamentaux (nappe de puissance, réactivité, etc.). Pour améliorer ces sections efficaces, un travail collectif a été mené avec la DAM et le CNRS/IN2P3 sur des installations de physique fondamentale (GELINA) et intégrales (CALIBAN). La connaissance de la fluence reçue par la cuve des réacteurs est essentielle pour prédire son état au cours du temps. C'est à cet effet que le code FIFRELIN, qui calcule le spectre des gamma prompts issus de la fission, trouve tout son intérêt, en association avec le code CONRAD qui fournit les matrices de corrélation et les incertitudes sur ces spectres. Ces travaux ont permis d'améliorer notablement les incertitudes de calcul de la fluence.

Enfin, il est important de connaître avec une bonne précision la quantité d'hélium et de tritium produits dans les réacteurs au sein du combustible ; en effet, l'Autorité de sûreté nucléaire exige de rester en deçà d'une limite réglementaire. Pour améliorer notablement les calculs, il faut tenir compte de l'isotope ⁶He produit par fission ternaire (entre deux et quatre fois pour 1000 fissions), élément qui produira ensuite du tritium. Une mesure des rendements de l'isotope ⁶He ternaire issu de la fission induite par neutrons thermiques du ²⁴¹Pu a été réalisée *via* le programme européen ERINDA sur un réacteur hongrois, grâce à des cibles fabriquées par le JRC-Geel. Ces travaux ont là encore conduit à une amélioration sensible de la connaissance de la quantité de tritium produit dans le combustible.

En conclusion, la qualité des données nucléaires est l'un des piliers de la capacité prédictive des outils et des études menées par la DES et ses partenaires EDF et Framatome. La physique nucléaire est un cadre de collaboration intense avec les académiques, tant sur un plan national qu'international, et la DES travaille de longue date avec le CNRS, l'IRMM, le Cern, l'IAEA, la NEA, les grands laboratoires américains, diverses universités européennes.

Toutefois, les collaborations efficaces menées au sein du CEA, avec la DAM par le biais de l'accord CODONU et avec la DRF par de nombreuses thèses partagées, sont absolument essentielles pour permettre à la DES de mener au mieux ses recherches en associant l'ensemble des forces du CEA au service de sa mission.

QUI FAIT DE LA PHYSIQUE NUCLÉAIRE AU CEA ?

LA PHYSIQUE NUCLÉAIRE À LA DAM

La physique nucléaire constitue un pan de connaissance primordial pour les programmes de la DAM. Il s'agit tout d'abord de fournir toutes les données et tous les modèles nucléaires qu'ils nécessitent. Mais, en même temps, il s'agit aussi de mener des recherches au meilleur niveau afin :

d'être en position de répondre aux futures demandes des programmes de la DAM;
d'attirer des collaborations, des doctorants, des postdocs pour démultiplier nos forces;
de démontrer l'excellence des travaux menés à la DAM et ainsi contribuer à la crédibilité de la dissuasion.

Pour cela, cinq grandes thématiques, balayant un large spectre, de l'expérience à la théorie, font l'objet d'études au CEA – DAM Île-de-France (<u>figure 1</u>). Elles sont successivement détaillées dans cet article.

LA THÉORIE DU PROBLÈME À N-CORPS NUCLÉAIRE

Cette thématique vise à décrire microscopiquement, c'està-dire en ce qui concerne les degrés de liberté de protons et neutrons en interaction, à la fois la structure et les réactions nucléaires. Pour cela, nous avons recours à des formalismes basés sur la théorie du champ moyen [1] qui permettent de décrire la plus grande partie de la carte des noyaux et, en particulier, les les noyaux lourds, importants pour la fission. Nous travaillons aussi à établir des ponts avec les théories ab initio, notamment en collaboration avec nos collègues de la DRF [1]. Nous nous attachons, de plus, à traiter structure et réactions sur un pied d'égalité, comme l'illustrent nos travaux sur le potentiel optique microscopique [2]. Enfin, nous exploitons, autant que possible, tout cet arsenal théorique au profit des applications [3]. Toutes ces études peuvent s'appuyer sur les considérables ressources de calcul haute performance disponibles à la DAM, qui rendent possible l'exploitation systématique des modèles théoriques les plus sophistiqués.

É. BAUGE

CFA - DAM Île-de-France

LA FISSION

Le processus de fission, au cours duquel un noyau lourd se casse en deux fragments en libérant de l'énergie et des neutrons, est intéressant à plus d'un titre. C'est, bien sûr, ce processus qui est au cœur de la libération d'énergie dans les applications, mais c'est aussi un processus qui place les noyaux dans des condi-





tions extrêmes de déformation et d'excitation, poussant ainsi notre connaissance de la structure et des réactions nucléaires dans ses derniers retranchements. Cette thématique est abordée à la fois par la théorie et par l'expérience.

Côté théorique, le défi consiste à décrire microscopiquement la large gamme d'observables (sections efficaces, rendements de production de produits de fission, multiplicités et spectres de neutrons et gamma de fission), sur les échelles d'énergie et de temps très étendues qui caractérisent ce processus. Un exemple de modélisation dynamique de la fission, s'appuyant sur des formalismes développés dans le cadre des études sur la théorie du problème à N corps, est montré dans la référence [4].

Côté expérimental, l'objectif des études est double : il s'agit de réaliser à la fois des mesures de très grande précision afin de contraindre les paramètres des modèles, et des mesures qui mettent en évidence des phénomènes encore jamais observés, et par là de faire progresser notre connaissance de la fission. Un exemple d'expérience satisfaisant simultanément ces deux critères est l'expérience SOFIA [5] qui mesure les rendements de fission avec une précision telle qu'elle permet une discrimination des modèles de fission.

LA PHYSIQUE DES ISOMÈRES

Les isomères sont des états excités du noyau de longue durée de vie. Cette longue durée de vie ouvre des possibilités expérimentales inaccessibles pour la spectroscopie nucléaire des états non isomériques. En cela, l'étude des isomères est un outil particulièrement puissant pour scruter finement la spectroscopie des noyaux, et ainsi mettre à l'épreuve les descriptions théoriques de la structure nucléaire. L'étude de la spectroscopie des fragments de fission [6] illustre parfaitement ce point, et met aussi en exergue le recouvrement qui peut exister entre nos cinq thématiques d'études (dans ce cas : isomères, fission et N corps).

L'existence d'isomères de basse énergie constitue aussi un moyen d'éloigner le signal nucléaire retardé du bruit atomique prompt, dans le cadre d'expériences laser visant à mettre en évidence les processus de couplage entre états nucléaires et atomiques.

LES INSTALLATIONS EXPÉRIMENTALES

Les études expérimentales ne peuvent être menées à bien sans installation appropriée. À cette fin, le centre DAM Île-de-France dispose de deux accélérateurs électrostatiques, le Van de Graaff 4 MV et le tandem 7 MV NENUPHAR (figure 2). Ces deux machines, principalement dédiées à la production de neutrons, permettent à la fois la réalisation d'expérimentations



FIGURE2 L'accélérateur électrostatique NENUPHAR du CEA - DAM Île-de-France.

localement (telles que [7]) et le développement de diagnostics qui seront ensuite déployés sur des installations distantes. Les deux accélérateurs sont de plus exploités au profit d'autres programmes de la DAM.

LES DONNÉES NUCLÉAIRES

La majeure partie de l'apport de la physique nucléaire aux programmes de la DAM consiste en la fourniture de données nucléaires évaluées, qui seront exploitées comme des constantes dans les codes de simulation. Ces données nucléaires doivent représenter la meilleure connaissance du moment et permettre aux utilisateurs de simuler leurs applications avec précision. Le processus de construction de ces données nucléaires, l'évaluation, consiste en une synthèse de la connaissance expérimentale et théorique. Pour cela, on utilise des codes qui implémentent des modèles de réactions nucléaires dont les paramètres sont finement ajustés afin de reproduire l'ensemble des données expérimentales disponibles. Quelquefois, les données expérimentales existantes ne sont pas satisfaisantes et il faut réaliser de nouvelles mesures. Un exemple emblématique est la mesure de la section efficace du ²³⁹Pu(n,2n) décrite dans la référence [7].

Finalement, c'est l'ensemble des quatre autres thématiques déjà évoquées (fission, théorie du problème à N corps, isomères et installations expérimentales) qui alimentent la thématique données nucléaires en ingrédients, théoriques ou expérimentaux, contribuant ainsi à la qualité des fichiers de données évaluées. Ces données nucléaires évaluées et les incertitudes associées peuvent ensuite être fournies directement aux utilisateurs de la DAM ; elles alimentent aussi, en étroite collaboration avec nos collègues de la DES, la bibliothèque internationale JEFF.

RÉFÉRENCES [1] T. DUGUET, J.-P. ÉBRAN *et al.*, «Revue sur la théorie de la structure nucléaire», dans ce numéro. [2] G. BLANCHON, M. DUPUIS, «Zoom sur les potentiels optiques microscopiques», dans ce numéro. [3] S. HILAIRE, C. DE SAINT JEAN, «Revue sur les données de structure pour les réactions nucléaires», dans ce numéro. [4] N. DUBRAY *et al.*, «Zoom sur la représentation microscopique de la transition dans les fermiums», dans ce numéro. [5] J. TAIEB, «Zoom sur l'expérience SOFIA», dans ce numéro. [6] L. GAUDEFROY, «Zoom sur la spectroscopie gamma retardée des fragments de fission», dans ce numéro. [7] B. LAURENT *et al.*, «Zoom sur la mesure de la section efficace ²³⁸Pu(n,2n)», dans ce numéro.

QUI FAIT DE LA PHYSIQUE NUCLÉAIRE AU CEA ?

LA PHYSIQUE NUCLÉAIRE AU DPhN DE LA DRF

Le Département de physique nucléaire (DPhN) de l'Irfu, au CEA – Saclay, effectue des recherches expérimentales et théoriques afin d'approfondir nos connaissances sur la structure des noyaux atomiques et les réactions associées, de comprendre la formation des éléments dans notre Univers ainsi que l'origine et la dynamique du confinement, et d'explorer la matière dans des états extrêmes. Il faut y ajouter nos contributions aux applications émergentes, que ce soit dans le domaine de l'énergie, des sciences du vivant ou des technologies, qui sont déployées dans des programmes expérimentaux ambitieux.





Nos recherches portent sur quatre axes, que nous détaillons par la suite :

• l'étude de la structure du noyau atomique;

• l'étude des réactions nucléaires, en particulier celles induites par neutrons;

• l'étude du plasma de quarks et gluons;

· l'étude de la structure du proton.

ÉTUDE DE LA STRUCTURE DES NOYAUX ATOMIQUES

Que ce soit en vue d'applications civiles ou militaires, ou pour des recherches plus académiques telles que la prévision de l'abondance des éléments dans l'Univers, la compréhension de la structure des noyaux atomiques et de leur spectroscopie est absolument indispensable. Ces recherches s'effectuent par une approche amplifiant les phénomènes d'intérêt pour mieux les mesurer, l'étude des phénomènes extrêmes dans les noyaux : extrêmes en masse, en déséquilibre neutrons/protons ou isospin, en déformation. La démarche du DPhN dans ce domaine est donc duale. Elle consiste à :

• développer, d'une part, des théories nucléaires, dites ab initio (c'est-à-dire à partir de principes premiers), qui visent à décrire la dynamique complète des neutrons et protons engendrée par leurs interactions élémentaires. Cela est effectué en partenariat étroit avec la DAM dans le cadre de l'Espace de structure nucléaire théorique (ESNT), un laboratoire virtuel DRF-DAM qui accueille une centaine de visiteurs par an et finance en moyenne deux chercheurs postdoctoraux chaque année. Récemment, des progrès particulièrement significatifs ont permis de prédire la structure de noyaux jusqu'à une centaine de nucléons, via des techniques d'approximation originales développées au DPhN permettant de limiter le coût des calculs tout en gardant la précision nécessaire. Il est désormais raisonnable de penser que de tels calculs seront possibles à terme pour des noyaux plus lourds tels que les actinides, qui intéressent particulièrement nos partenaires DES et DAM;

• aller sonder, d'autre part, les comportements extrêmes du noyau. En effet, les modèles développés nécessitent une assise expérimentale solide. De ce fait, ces régions extrêmes en masse, isospin et déformation sont étudiées par nos équipes dans les meilleurs laboratoires du monde : RIKEN au Japon, TRIUMF au Canada, ISOLDE au Cern ou encore GSI/FAIR en Allemagne, FRIB aux États-Unis, RAON en Corée, sans oublier l'accélérateur national GANIL en France.

À noter que les physiciens du DPhN mènent dès à présent un programme expérimental ambitieux au GANIL et ont largement participé à la fois à la définition du programme de physique avec SPIRAL2, mais aussi à la construction de deux aires expérimentales de ce projet d'envergure : NFS (*Neutron for Science*) et S3 (*Super Separator Spectrometer*).

ÉTUDE DES RÉACTIONS NUCLÉAIRES

Les physiciens du DPhN étudient les processus et les mécanismes à l'œuvre dans les réactions nucléaires, et apportent leur expertise pour répondre à des problématiques liées aux missions du CEA sur l'énergie et la défense ou encore à des enjeux sociétaux tels que la santé. Nous cherchons à décrire et à prédire la séquence des réactions nucléaires élémentaires induites par protons, neutrons, ou encore photons, voire neutrinos, et à développer les outils expérimentaux et de modélisation nécessaires à ces travaux.

Nos activités expérimentales se déclinent donc sous les trois thématiques suivantes : la caractérisation des réactions induites par neutrons, avec en particulier l'étude du processus de fission ; la radioactivité bêta et l'étude des neutrinos de réacteur ; et enfin une activité transverse de modélisation en support aux activités expérimentales avec un développement particulier du traitement des réactions de spallation. Nos projets nécessitent l'utilisation de sources intenses de neutrons (et neutrinos) en Europe couvrant une grande gamme en énergie. De ce fait, ces activités s'effectuent sur le site de l'Institut Laue-Langevin (ILL) à Grenoble et bientôt à NFS au GANIL/SPIRAL2 pour ce qui est de l'étude de la fission, à l'ILL pour l'étude des neutrinos de réacteur, et auprès de n_TOF au Cern et GELINA à Geel pour l'étude des réactions induites par neutrons dans une large gamme d'énergie.

Naturellement, nous apportons également notre expertise au développement de nouvelles installations telles que les sources compactes de neutrons basées sur des accélérateurs de protons de haute intensité couplés à des ensembles convertisseur-modérateur que nous cherchons à optimiser.

Nous mettons également à la disposition d'autres communautés d'utilisateurs nos données expérimentales *via* les bases de données nucléaires et des modèles que nous développons en les intégrant dans les codes de transport les plus largement utilisés dans le monde. L'ensemble de ces activités contribue à améliorer la précision des simulations de systèmes complexes demandée par les applications civiles comme militaires, dans le cadre des missions du CEA.

ÉTUDE DU PLASMA DE QUARKS ET GLUONS

Dans un milieu ultrachaud ou dense, le modèle standard prédit que la matière nucléaire ordinaire deviendrait un plasma de quarks et de gluons, de manière similaire au plasma habituel séparant les électrons des atomes. Cet état extrême aurait existé environ un millionième de seconde après le Big Bang, où la température de l'Univers était environ 100 000 fois supérieure à celle régnant au centre du Soleil. Depuis, l'Univers s'est refroidi et le plasma a donné naissance aux hadrons, puis aux éléments que l'on observe aujourd'hui.

Les physiciens du DPhN cherchent donc à recréer en laboratoire les conditions des premiers instants de l'Univers. En particulier, nous participons à l'expérience Alice auprès du Large Hadron Collider (LHC) au Cern où des noyaux d'atomes lourds tels que le plomb sont accélérés à une vitesse proche de celle de la lumière, suffisante pour créer, lors de leur collision, ce fameux plasma. Le DPhN s'intéresse plus particulièrement à l'étude des quarkonia, des particules rares et lourdes constituées d'un quark et de son antiquark charme pour le J/ψ et beauté pour le Y. Ces quarkonia traversent le plasma créé lors des collisions et permettent ainsi de le caractériser finement. Nos équipes sont actuellement à l'œuvre pour procéder à la jouvence des détecteurs d'Alice au Cern, qui permettront à terme de rentrer dans une ère de précision en ce qui concerne la compréhension du plasma de quarks et de gluons.

ÉTUDE DE LA STRUCTURE DU PROTON

L'Irfu est fortement engagé dans l'étude de la structure en quarks et gluons des protons, et plus généralement des nucléons, qui composent les noyaux des atomes et donc l'essentiel de l'Univers visible. Ces nucléons sont un cas singulier en physique, car environ 90% de leur masse est due non à la masse de leurs constituants, mais à l'interaction forte à laquelle ils sont soumis. Les nucléons sont ainsi un véritable laboratoire pour étudier le mécanisme de confinement de l'interaction forte qui, bien que le modèle standard soit fermement établi, reste une des questions les plus brûlantes de la physique moderne.

Nos activités sur ce thème sont effectuées dans une logique similaire à celle de l'étude de la structure des noyaux décrite plus haut : nous développons à la fois des modèles théoriques *ab initio* du proton, mais aussi d'autres, plus phénoménologiques, avec des paramètres issus des données expérimentales.

Nous participons à deux expériences menant ce type de recherche au meilleur niveau international : COMPASS au Cern qui arrive désormais en fin de cycle et CLAS12 à Jefferson Lab, aux États-Unis, qui vient de démarrer ses prises de données. À l'horizon 2030, le projet américain et potentiellement international de collisionneur électrons-ions (EIC) mobilisera l'essentiel de cette communauté et permettra d'étudier le mécanisme de génération de la masse des nucléons et du confinement. Nos chercheurs sont d'ores et déjà engagés dans la définition de ce projet, ainsi que dans la R&D nécessaire pour effectuer les expériences associées.

QUI FAIT DE LA PHYSIQUE NUCLÉAIRE AU CEA ?

LE GANIL, UNE INSTALLATION POUR ÉTUDIER LE CŒUR DE LA MATIÈRE

Le GANIL, Grand accélérateur national d'ions lourds, est une très grande infrastructure pour la recherche avec des faisceaux d'ions. Dès le début de son exploitation en 1983, le GANIL a été pionnier dans l'étude des noyaux radioactifs pour en déduire leurs propriétés et mieux comprendre les forces nucléaires à l'origine de la cohésion de la matière et la dynamique nucléaire. La combinaison de faisceaux uniques et d'instruments performants a permis de nombreuses découvertes en physique nucléaire, physique atomique et sciences des matériaux. Une extension majeure de l'installation, SPIRAL2, est en cours de mise en service sur le site et offrira de nouvelles possibilités à la communauté scientifique.

H. GOUTTE CEA - DRF, GANIL N. ALAHARI GANIL

e GANIL, créé en 1976 par le CEA et le CNRS à Caen, est une installation unique de production et d'exploitation de faisceaux d'ions lourds pour des recherches fondamentales en physique nucléaire, sciences des matériaux et radiobiologie.

Depuis sa création, la mission principale du GANIL est de réaliser un programme de recherche scientifique en physique nucléaire au plus haut niveau international. Dans ce domaine, les travaux de recherche expérimentaux et théoriques portent sur quatre thèmes majeurs :

• structure nucléaire : étude de l'évolution de la structure du noyau atomique, depuis la vallée de la stabilité jusqu'aux limites d'existence de la matière, et ses manifestations en matière de durée de vie, de forme, de masse, de modes de décroissance du noyau et d'organisation de ses nucléons;

• dynamique nucléaire : étude des mécanismes de réactions nucléaires et des caractéristiques de la matière nucléaire dans différentes gammes de température et de densité ;

• astrophysique nucléaire : étude des mécanismes explosifs de nucléosynthèse à l'œuvre dans différents types d'objets stellaires ;





SOURCE D'IONS

Vue schématique et photos de l'installation SPIRAL2. © Photos: CEA/P. Stroppa.

· interactions fondamentales : mesures de grande précision de la désintégration bêta de certains noyaux radioactifs, dans le but de tester la robustesse du modèle standard sur lequel s'appuie notre compréhension de l'Univers.

Le GANIL fédère une communauté scientifique internationale qu'il accueille chaque année sur son site pour mener des expériences dans ces thématiques et participer à des conférences organisées par le laboratoire.

Pour les expériences fondamentales et appliquées en physique atomique, sciences des matériaux et radiobiologie, les chercheurs sont accueillis au GANIL par les équipes du laboratoire CIMAP, sur des lignes dédiées aux niveaux d'énergie de faisceaux requis.

Le GANIL est une installation unique, capable de délivrer des faisceaux d'ions lourds, du carbone 12 à l'uranium 238, avec des énergies comprises entre quelques keV et 95 MeV/u, et des faisceaux radioactifs produits soit en vol avec l'installation LISE, soit par la méthode ISOL (Isotope Separation OnLine) auprès de l'installation SPIRAL1. Avec l'accélérateur linéaire de l'installation SPIRAL2, en cours de mise en service au GANIL, des faisceaux allant des protons aux ions lourds seront disponibles, avec des énergies jusqu'à 33 MeV protons, 40 MeV deutons et environ 10 MeV/u pour des ions plus lourds et avec une intensité jusqu'à 5 mA. Le GANIL produira ainsi plusieurs faisceaux stables et radioactifs uniques quant aux espèces et à l'intensité qui renforceront le programme de recherche scientifique existant. Élément déterminant de la stratégie européenne pour la recherche en physique nucléaire, SPIRAL2 a été retenu dès 2006 par l'European Strategy Forum on Research Infrastructures (ESFRI), qui définit la stratégie européenne pour la construction des futures infrastructures de recherche et est devenu un landmark d'ESFRI en 2016.

Les salles d'expériences couplées aux cyclotrons sont équipées d'une large gamme de systèmes de détection, et d'équipements polyvalents et à la pointe de la technologie (figure 1). Entre autres, depuis 2014, le GANIL héberge le détecteur européen AGATA, un spectromètre de rayons gamma utilisant des détecteurs germanium segmentés de très haute pureté. Depuis six ans, des campagnes expérimentales de tout premier ordre sont réalisées au GANIL avec ce détecteur, couplé à d'autres détecteurs de neutrons et particules chargées tels que VAMOS, NEDA, DIAMANT et MUGAST.

Les salles d'expériences de l'accélérateur SPIRAL2 permettent d'augmenter les capacités expérimentales de l'installation (figure 2). Ainsi, la première salle à être mise en service, Neutrons For Science (NFS), délivrera à la communauté des faisceaux de neutrons d'énergies comprises entre 1 et 40 MeV produits à des flux très importants. Ces faisceaux seront exploités pour des expériences de physique nucléaire et des recherches plus appliquées.

Les expériences menées dans la seconde salle de SPIRAL2, le Super Separator Spectrometer (S3), permettront de tester les limites d'existence du noyau en créant des isotopes très lourds, n'existant pas naturellement sur Terre, et des noyaux avec un nombre de neutrons égal au nombre de protons, aussi appelés novaux N = Z.

Cette évolution est complétée par la construction de l'installation DESIR (Décroissance, excitation et stockage d'ions radioactifs) dédiée aux faisceaux d'ions radioactifs de basse énergie, qui donnera accès aux propriétés statiques des noyaux, telles que leur masse ou leur déformation, et à leur décroissance bêta.

Des expériences inédites seront prochainement réalisées avec l'installation SPIRAL2. Sur le plus long terme, afin de repousser encore les limites de notre connaissance des propriétés des noyaux atomiques, des études sont en cours pour un nouvel injecteur et une réflexion a été reprise sur la phase 2 du projet.

REMERCIEMENTS

Nous remercions les personnes ayant collaboré à la rédaction de cet article.

QUI FAIT DE LA PHYSIQUE NUCLÉAIRE AU CEA ?

LA PHYSIQUE NUCLÉAIRE À LA DIRECTION DES ÉNERGIES

Les activités de physique nucléaire à la DES ont pour objectifs principaux de fournir aux outils de calcul scientifique des données d'entrée fiables pour les simulations. Les données nucléaires jouent un rôle essentiel, au même titre que les méthodes numériques et les schémas associés, dans les calculs de conception de réacteurs, les calculs des paramètres de fonctionnement des cœurs de réacteurs, les calculs de gestion du cycle du combustible et dans les calculs de sûreté-criticité. En raison de l'utilisation intensive des méthodes de Monte-Carlo et de la réduction des biais numériques, la précision finale des calculs neutroniques dépend de plus en plus de la qualité des données nucléaires utilisées. Celles-ci couvrent un large spectre de données de base, nécessaires à la simulation de phénomènes physiques relevant de plusieurs disciplines: physique nucléaire, physique neutronique, physique du cycle et du combustible, etc. C'est pourquoi cette activité scientifique, avec des applications importantes, nécessite la mise en place d'une recherche forte et pluridisciplinaire qui s'appuie sur des experts du monde entier et dont les échelles de temps sont celles d'une activité de recherche fondamentale.

C. DE SAINT JEAN D. BERNARD O. SÉROT O. LITAIZE O. BOULAND G. NOGUÈRE P. ARCHIER P. TAMAGNO M. DIAKAKI P. LECONTE A. CHEBBOUBI V. VALLET C. CARMOUZE CEA - DES Cadarache

évaluation des données nucléaires à la DES conjugue le développement d'approches théoriques, la mesure d'observables physiques fondamentales par le biais d'expériences microscopiques, ainsi que la mise en place d'expériences intégrales permettant une validation plus macroscopique de la qualité de ces données.

LES SECTIONS EFFICACES DE RÉACTION

La DES a développé un outil d'analyse et de modélisation des sections efficaces de réaction nommé CONRAD. Cet outil a changé de nature au cours de son développement, partant d'un code de modèles de réactions nucléaires, dont les paramètres doivent être ajustés pour reproduire les mesures, pour arriver à une **plateforme logicielle**. Le code CONRAD comporte donc des modèles théoriques de réactions nucléaires pour le domaine des résonances résolues, non résolues et le *continuum*. Par ailleurs, dans sa logique de plateforme, les modèles suivants ont été implémentés : des modèles de calcul des spectres et multiplicités de neutrons prompts de fission, des modèles de rendements de fission. Enfin, des méthodes génériques d'inférence bayésienne ont été par ailleurs implémentées dans l'outil.

La DES n'a plus d'installations pour réaliser des mesures différentielles (sur ligne de temps de vol). C'est pourquoi, par le biais de collaborations internes CEA (avec la DRF), ou avec les organismes nationaux (CNRS-IN2P3), ainsi que par des collaborations internationales, les équipes de la JRC/Geel DES mettent en place des mesures d'intérêt pour ses applications sous la forme de détachement (un à trois ans), d'un doctorant financé ou cofinancé par la DES ou par des visites plus limitées pour y réaliser les mesures en soutien aux expérimentateurs. Enfin, la DES participe à la mesure et l'évaluation des données thermiques par le biais d'une collaboration avec l'IRSN et l'Institut Laue-Langevin (ILL).

Par ailleurs, les physiciens de la DES ont conçu (dans les réacteurs expérimentaux du CEA et dans d'autres installations européennes comme celle de JRC-Geel) et continuent à concevoir des mesures intégrales dédiées aux données nucléaires. L'ensemble des campagnes de mesure proposées dans le réacteur MINERVE en est une illustration emblématique (figure 1).

¹ H			F	Produit de 1	fission	n	nstrument	ation		Actinide							² He
³ Li	⁴ Be			Modérateu Mat. struct	r ure	A R	bsorbant éférence					⁵ B	⁶ C	7 N	⁸ 0	9 F	¹⁰ Ne
" Na	¹² Mg											¹³ AI	¹⁴ Si	¹⁵ P	¹⁶ S	¹⁷ CI	¹⁸ Ar
¹⁹ K	²⁰ Ca	²¹ Sc	²² Ti	²³ V	²⁴ Cr	²⁵ Mn	²⁶ Fe	²⁷ Co	²⁸ Ni	²⁹ Cu	³⁰ Zn	³¹ Ga	³² Ge	³³ As	³⁴ Se	³⁵ Br	³⁶ Kr
³⁷ Rb	³⁸ Sr	³⁹ Y	⁴⁰ Zr	⁴¹ Nb	⁴² Mo	⁴³ Tc	⁴⁴ Ru	⁴⁵ Rh	⁴⁶ Pd	⁴⁷ Ag	⁴⁸ Cd	⁴⁹ In	⁵⁰ Sn	51 Sb	⁵² Te	⁵³	⁵⁴ Xe
⁵⁵ Cs	⁵⁶ Ba	57 La	⁷² Hf	⁷³ Ta	⁷⁴ W	⁷⁵ Re	⁷⁶ Os	⁷⁷ Ir	⁷⁸ Pt	⁷⁹ Au	⁸⁰ Hg	⁸¹ TI	⁸² Pb	⁸³ Bi	⁸⁴ Po	⁸⁵ At	⁸⁶ Rn
⁸⁷ Fr	⁸⁸ Ra	⁸⁹ Ac	¹⁰⁴ Rf	105 Db	¹⁰⁶ Sg	¹⁰⁷ Bh	¹⁰⁸ Hs	¹⁰⁹ Mt	110 Ds	^{III} Rg	¹¹² Cn	¹¹³ Nh	¹¹⁴ Fl	¹¹⁵ Mc	¹¹⁶ Lv	¹¹⁷ Ts	¹¹⁸ Og
¹¹⁹ Uue			58 Ce	⁵⁹ Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Fu	64 Gd	⁶⁵ Th	66 D v	67 Ho	68 Fr	69 Tm	70 Yh	71 111	
	Ĩ		90 Th	91 Pa	92 U	⁹³ Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr	

FIGURE 1

Catalogue des mesures d'oscillation d'échantillon dans le réacteur MINERVE.

LES PRODUITS DE LA RÉACTION DE FISSION

Spectres et multiplicités des neutrons et gamma prompts et retardés. Le code Monte-Carlo de données nucléaires FIFRE-LIN, développé à la DES, simule la désexcitation des fragments de fission (FF) pour estimer les observables promptes de fission telles que spectres et multiplicités des neutrons, rayonnements gamma et électrons de conversion. Les calculs de désexcitation sont utiles, notamment pour les expérimentateurs qui souhaitent comparer leurs mesures de spectres de gamma de fission. Récemment, des mesures plus fines ont vu le jour comme :

les spectres par zones de masses des FF;

• les multiplicités moyennes de neutrons de fission en fonction de l'énergie cinétique des FF pour une fragmentation donnée;

• les rapports isomériques de certains produits de fission.

Le code FIFRELIN permet d'estimer toutes ces observables de fission, dont les résultats sont régulièrement communiqués et débattus avec les collaborateurs du Département d'études des réacteurs.

Un couplage entre le code de transport TRIPOLI-4 et FIFRE-LIN est également à l'étude, afin de simuler au plus juste les phénomènes de transport de particules dans la matière.

Concernant la problématique des **neutrons retardés**, la DES a démarré une série de mesures en collaboration avec le CEA–DRF et l'ILL sur la décroissance temporelle des précurseurs de neutrons retardés pour plusieurs isotopes fissionnant dans le domaine thermique (expérience ALDEN).

L'objectif sera à terme d'améliorer les évaluations pour la future bibliothèque JEFF4.

Rendements de fission. La DES a mis en place depuis 2009 une collaboration avec l'ILL, le CNRS-IN2P3 et le CEA – DRF qui porte sur la mesure (et depuis 2018 sur l'évaluation) des rendements de fission. Cette activité s'est traduite par de nombreuses campagnes expérimentales accompagnées de nombreuses thèses. En parallèle, une évaluation récente des incertitudes sur ces données nucléaires a été menée et sera, dans le futur, l'objet d'une collaboration encore renforcée avec le CNRS-IN2P3.

UN PÔLE DE COMPÉTENCE ET D'EXPERTISE

De manière récurrente, dans le cadre de nombreux projets du CEA, les physiciens nucléaires de la DES sont consultés pour contribuer de manière ponctuelle par leur expertise à l'avancée de certaines actions applicatives, mais peuvent aussi être sollicités pour réaliser des actions de fond (rejet de tritium, interrogation neutronique et photonique des colis de déchets, etc.).

CONCLUSIONS

La physique nucléaire à la DES se décline en activités expérimentales (motiver les mesures d'intérêt auprès de nos collègues expérimentateurs hors DES) et théoriques (les codes CONRAD et FIFRELIN notamment). La capitalisation de ces connaissances se fait par l'intermédiaire d'une activité nommée évaluation des données nucléaires et se traduit par la participation des équipes au projet JEFF de la NEA à l'OCDE. Afin de remplir ses missions, la DES s'appuie, par le biais de collaborations, sur les compétences des équipes du CEA (DRF, DAM), ainsi que sur celles des laboratoires du CNRS-IN2P3. Au-delà des compétences clés à maintenir et développer (des expérimentateurs, des théoriciens ou évaluateurs et des neutroniciens pour la validation des données nucléaires), les équipes de la DES se tournent résolument vers des défis enthousiasmants à la fois d'un point de vue expérimental (mesures microscopiques et intégrales innovantes : multiobservables + réduction des incertitudes systématiques), théorique (prise en compte des contraintes microscopiques, description de la fission) et pour l'évaluation (incertitudes).

STRUCTURE NUCLÉAIRE

REVUE SUR LA THÉORIE DE LA STRUCTURE NUCLÉAIRE



CEA - DAM Île-de-France

La complexité des systèmes nucléaires impose aux théoriciens du noyau de redoubler d'efforts et d'imagination afin d'en proposer un cadre descriptif cohérent. Comme la DAM privilégie la description des données nucléaires et la capacité à décrire les noyaux lourds susceptibles de fissionner quitte à perdre en pouvoir prédictif, elle engagera ses forces dans le développement des approches de type fonctionnelle de la densité d'énergie (sigle EDF en anglais). La DRF est soucieuse de comprendre intimement comment les corrélations entre les nucléons influent sur le comportement du noyau au prix d'une restriction de son champ applicatif, elle promouvra donc les approches ab initio. C'est en hybridant les points de vue soustendant l'une et l'autre de ces approches que les équipes de la DAM et de la DRF cherchent à améliorer la fiabilité de la méthode EDF et la portée du traitement ab initio de la problématique nucléaire à N corps.

uperfluide, déformé, à halo, agrégé, en rotation, vibrant, décroissant par émission de photons, de leptons, de sous-systèmes légers ou encore par fission, le noyau de l'atome exhibe une phénoménologie extrêmement variée, reflet de son caractère complexe. Être capable d'en fournir une description cohérente, quel que soit le nombre

de nucléons impliqués, représente le défi que se lancent les théoriciens de la structure nucléaire. Pourquoi cela ? Car toute activité en physique nucléaire – qu'elle s'inscrive dans une perspective purement académique ou bien qu'elle vise une application précise (d'ordre médical, énergétique, militaire, etc.) – est ultimement subordonnée à la question : comment un nombre arbitraire de protons et neutrons s'auto-organise-t-il ? Dans cette optique, les « structuriens » du noyau cherchent à élaborer un langage théorique capable de dire la diversité des phénomènes nucléaires et répondant à certains critères, dont :

• le pouvoir prédictif, gage de fiabilité lors de tout calcul associé à des situations (nombre de nucléons, configurations énergétiques, conditions de température et de densité, etc.) s'éloignant de celles dans lesquelles a été formulée ou ajustée l'approche;

• la globalité, autrement dit la capacité à décrire le plus grand nombre de propriétés de noyaux répartis sur la plus grande partie possible de la carte des noyaux ;

• la précision du calcul des observables nucléaires accompagné d'une estimation de l'erreur théorique commise.

À l'heure actuelle, aucune construction théorique en physique nucléaire ne répond simultanément à ces critères de manière satisfaisante, et ce essentiellement pour deux raisons. La première est liée à la description des interactions entre les nucléons du noyau, réminiscence des interactions fortes s'établissant entre les quarks et gluons les composant (de même que les interactions interatomiques sont le résidu des interactions coulombiennes entre les électrons et noyaux les constituant). L'approche actuellement acceptée comme théorie fondamentale des interactions fortes - la chromodynamique quantique (QCD) - révèle en effet une propriété mathématique (la liberté asymptotique) la rendant non perturbative dans son régime de basse énergie, qui est précisément celui de la physique nucléaire. D'où l'extrême difficulté à dériver directement les propriétés de l'interaction entre nucléons à partir de la dynamique de leurs degrés de liberté sous-jacents, gouvernée par QCD. La seconde difficulté trouve sa source dans certaines particularités du problème à N corps nucléaire :

• un comportement non perturbatif de la totalité des systèmes nucléaires à courte distance ; • la nature non perturbative à grande distance des noyaux à couche(s) ouverte(s), responsable de comportements coopératifs des nucléons tels que la superfluidité et la déformation nucléaire;

• la taille mésoscopique des systèmes nucléaires rendant importants les effets de taille finie et de fluctuations quantiques;

• la nature de liquide de Fermi impliquant quatre espèces de fermions (proton et neutron pouvant chacun porter un spin +1/2 ou -1/2) et donc une richesse de phases possibles (appariements, quartetting, etc.).

Les édifices théoriques développés jusqu'alors sont donc le fruit de compromis. La DAM a choisi de favoriser la description des observables nucléaires, la précision de ces données à proximité des régions expérimentalement connues de la carte des noyaux, ainsi que la portée de l'approche au détriment du pouvoir prédictif à travers l'introduction d'ingrédients phénoménologiques - les approches de type EDF sont à l'honneur. L'approche EDF se distingue par sa méthode d'intégration des corrélations nucléoniques dans son traitement du problème à N corps : elle procède à un découpage hiérarchisé de ces dernières, guidé par la connaissance empirique de ces systèmes accumulée depuis plus d'un siècle, et les incorpore par étapes successives. En résulte une évolution favorable de son coût numérique avec la taille des noyaux lui permettant de décrire a priori n'importe quelle observable, c'est-à-dire masse, rayon, propriétés spectroscopiques, observables de fission, ingrédients intermédiaires utiles à la modélisation des réactions nucléaires, et ce pour n'importe quel système nucléaire. La DRF, quant à elle, met l'accent sur la maîtrise de chaque étape du traitement de la problématique nucléaire à N corps, donc sur la fiabilité de l'approche, quitte à être limitée en matière de précision ou de régions accessibles du paysage nucléaire – une stratégie *ab initio*. Des progrès prodigieux effectués dans les quinze dernières années, aussi bien au niveau de la description des interactions entre nucléons dans le langage des théories effectives des champs que dans les techniques de résolution du problème à N corps, ont permis aux approches *ab initio* d'étendre considérablement le territoire de la carte des noyaux (jusqu'à la masse 100 à ce jour) et les observables accessibles pour lesquelles elles sont pertinentes.

Si les choix de départ de la DAM et de la DRF diffèrent, elles ont en revanche vocation à se retrouver au terme de leurs chemins, marqués par la formulation d'une approche conjuguant simultanément portée et fiabilité (figure 1). Pour y parvenir, la DRF s'inspire de la manière dont les approches de type EDF incorporent les corrélations nucléoniques à l'origine des comportements collectifs du noyau pour élargir leur domaine d'applicabilité [1]. La DAM, de son côté, voit dans les approches *ab initio* un guide selon lequel élaborer une nouvelle génération de fonctionnelles plus prédictives [2]. Une telle hybridation des philosophies sous-jacentes aux approches EDF et *ab initio* profite d'une proche collaboration entre la DRF et la DAM, notamment sous la forme de co-encadrement de plusieurs thèses récentes ou en cours.



FIGURE 1

Choix initial du langage théorique pour décrire les propriétés des noyaux à la DRF (approche *ab initio*) et à la DAM (approche EDF) et perspectives associées : respectivement accroître son domaine d'applicabilité et améliorer son pouvoir prédictif. Deux stratégies différentes avec un point de rencontre correspondant à un langage théorique conjuguant simultanément portée et fiabilité.

RÉFÉRENCES [1] T. DUGUET et al., « Ab initio calculation of the potential bubble nucleus ³⁴Si», *Phys. Rev. C*, **95**, 034319 (2017); **A. TICHAI** et al., « Bogoliubov many-body perturbation theory for open-shell nuclei», *Phys. Lett. B*, **786**, p. 195 (2018). [2] T. DUGUET et al., « Ab initio-driven nuclear energy density functional method. A proposal for safe/correlated/improvable parameterizations of the off-diagonal EDF kernels», *Eur. Phys. J. A*, **51**, p.162 (2015).

STRUCTURE NUCLÉAIRE



ZOOM SUR LA SPECTROSCOPIE GAMMA RETARDÉE DES FRAGMENTS DE FISSION

Les modèles décrivant le noyau atomique sont principalement construits à partir des informations connues sur les quelque trois cents noyaux stables constituant le monde qui nous entoure. Ces modèles sont ensuite utilisés pour décrire les propriétés des noyaux radioactifs, produits par le biais de réactions nucléaires. La réaction de fission est dans ce cadre un excellent sujet d'étude, car elle permet de produire, en une seule réaction, un large panel de noyaux radioactifs. La mesure des propriétés de ces derniers permet alors de tester les modèles de physique nucléaire développés au CEA. Dans ce cadre, un projet expérimental se déroule au CEA – DAM Île-de-France afin d'obtenir des données de spectroscopie gamma retardée sur les novaux radioactifs produits lors de la fission spontanée du noyau de californium 252 (²⁵²Cf).

e ²⁵²Cf fissionne spontanément, sans qu'il soit nécessaire de l'exciter par le biais d'une interaction avec un faisceau. Deux noyaux instables sont produits lors de chaque fission, mais la nature de ces fragments (leur nombre de protons et de neutrons) varie d'un événement de fission à l'autre. Ces noyaux n'existent pas à l'état naturel sur Terre

du fait de leur temps de vie qui varie de quelques secondes à quelques minutes. Ainsi, la fission du ²⁵²Cf permet de produire simplement et d'étudier environ deux centaines de noyaux radioactifs. Les fragments de fission naissent avec une énergie d'excitation élevée qu'ils évacuent en émettant des neutrons et des rayonnements gamma. Ces derniers reflètent la structure des fragments et leur détection constitue une donnée importante pour les modèles de physique nucléaire. La description d'une partie de ces données a, par exemple, nécessité des développements de modèles ayant des conséquences qui dépassent le cadre de la structure nucléaire et affectent aussi la description des sections efficaces de capture neutronique.

Dans ces études de spectroscopie gamma, la difficulté majeure est de faire le lien entre un fragment et les rayonnements gamma qu'il a émis. En d'autres termes, il s'agit de répondre à la question : quel fragment, parmi les deux cents produits, émet tels gamma particuliers parmi la multitude des gamma émis par une source de fission ? Au CEA – DAM Îlede-France, deux dispositifs expérimentaux complémentaires ont été développés autour de cette question et sont discutés ici. On se restreint dans ces projets à l'étude des rayonnements retardés émis par les fragments de quelques nanosecondes à plusieurs microsecondes après l'instant de fission. Dans le premier dispositif [1], une source intense de 6 MBq de ²⁵²Cf est placée dans une chambre à vide entourée d'un massif de plomb. Ce dernier permet d'arrêter les rayonnements gamma prompts. Lorsqu'une fission se produit, l'un des fragments sort de la source et, après un temps de vol d'environ 5 nanosecondes, entre dans une chambre à fission. Ce détecteur gazeux détecte l'arrivée d'un fragment et, surtout, démarre une mesure de temps qui est stoppée lorsqu'un rayonnement gamma est détecté dans l'une des huit diodes germanium entourant la chambre à fission. Ces derniers détecteurs permettent de connaître l'énergie des gamma émis par les fragments et de mesurer le temps écoulé entre la fission et la détection du gamma. Une prise de données de plusieurs



FIGURE 1

(a) Énergie cinétique du fragment 1 en fonction de l'énergie cinétique du fragment 2 (en canal). Les deux fragments sont détectés en coïncidence dans la double chambre d'ionisation utilisée dans la seconde expérience. On observe une structure à deux bosses, caractéristique de la fission asymétrique (un fragment lourd et un léger) du ²⁵²Cf. (b) Zoom de la figure (a) pour les énergies cinétiques extrêmes du fragment léger. On observe des structures caractéristiques des événements de fission sans émission de neutron. Chaque ligne correspond à une fragmentation en masse particulière, telle que KE₁/KE₂ = m₂/m₁, avec KE₁ et m₁ l'énergie cinétique et la masse du fragment i. La masse du fragment lourd est indiquée en fin de ligne.

mois permet de réaliser des coïncidences triples, c'est-à-dire des événements pour lesquels sont détectés un fragment de fission et deux gamma provenant de la désexcitation du fragment. On peut alors construire les schémas de décroissance des états peuplés dans les fragments. Cependant, cette expérience, de par son principe, ne permet pas d'identifier les fragments et donc de savoir dans quels noyaux se trouvent les états observés.

La seconde expérience du projet répond à cette question. Cette phase utilise du ²⁵²Cf déposé sur un support de carbone de seulement 50 nm d'épaisseur. Extrêmement mince, cette source est placée au centre d'une double chambre d'ionisation qui permet de mesurer, avec une résolution de l'ordre de quelques pour mille, l'énergie cinétique des deux fragments de fission [2]. Cette mesure précise donne accès à la masse des fragments produits avec une résolution de 0,54 unité de masse pour des événements de fission sans émission de neutron et de 4 unités autrement (figure 1). Le détecteur est entouré d'un ensemble de dix diodes germanium pour la détection des raies gamma émises par les fragments de fission. Dans ces mesures, la faible activité de la source de ²⁵²Cf utilisée ne permet pas, statistiquement, de réaliser des mesures de coïncidence gamma-gamma. Ainsi, une seule raie gamma est détectée pour chaque événement de fission. Les données obtenues dans cette expérience sont ensuite rattachées à celles de la première par comparaison des énergies des transitions gamma détectées dans les deux phases du projet. Une masse de noyau émetteur peut alors être attribuée aux schémas de décroissance qui ont été déterminés dans la première partie du projet.

La combinaison de ces deux expériences a permis de mettre en évidence une soixantaine d'états émetteurs de rayonnements retardés dans les fragments produits lors de la fission du 252 Cf. Environ la moitié n'était pas connue avant la réalisation de ces mesures. La reproduction théorique d'une partie de ces données a déjà conduit à des améliorations des modèles développés au CEA-DAM Île-de-France [1]. La description de la décroissance gamma des noyaux atomiques est maintenant plus riche qu'auparavant. Ces mêmes modèles fournissent aussi des ingrédients utiles pour prédire les sections efficaces de capture neutronique. En particulier, la description de la voie de sortie de cette réaction nécessite de modéliser la décroissance gamma du noyau étudié. De manière indirecte et inattendue, les développements théoriques réalisés pour décrire les données de spectroscopie gamma retardée dans les fragments de fission conduisent donc à mieux modéliser les sections efficaces de capture neutronique.

RÉFERENCES [1] L. GAUDEFROY *et al.*, «Impact of Coriolis mixing on a two-quasi-neutron isomer in ¹⁶⁴Gd and other N=100 isotones», *Phys. Rev. C*, 97, 064317 (2018). [2] L. GAUDEFROY *et al.*, «A twin Frisch-grid ionization chamber as a selective detector for the delayed gamma-spectroscopy of fission fragments», *Nucl. Instr. Meth. A*, 855, p.133 (2017).

STRUCTURE NUCLÉAIRE

REVUE SUR LES DONNÉES DE STRUCTURE POUR LES RÉACTIONS NUCLÉAIRES

S. HILAIRE CEA - DAM Île-de-France C. DE SAINT JEAN CEA - DES Cadarache

Les modèles utilisés pour prédire l'issue d'une réaction nucléaire reposent sur la connaissance de multiples informations qui relèvent du domaine de la structure nucléaire. Ces données ainsi que l'état de l'art des approches théoriques qui permettent de les obtenir sont passés en revue.

a description d'une réaction nucléaire repose sur l'enchaînement de trois modèles : le modèle optique, le modèle de pré-équilibre et le modèle du noyau composé. Ce découpage correspond aux trois composantes observées dans les spectres d'émission de particules (figure 1). Aux énergies d'émission proches de l'énergie de la particule incidente,

l'observation de structures résonantes est associée à des processus de diffusion élastique et inélastique directs décrits par le modèle optique. Aux basses énergies d'émission, on observe plutôt une structure de forme maxwellienne, signe d'un phénomène d'évaporation, caractéristique de la décroissance d'un noyau composé ayant perdu la mémoire de la voie d'entrée. Entre ces deux extrêmes se trouve une zone intermédiaire, correspondant aux émissions dites de pré-équilibre, processus durant lequel la particule incidente est absorbée par la cible pour former un système dit composite qui se désexcite avant d'avoir atteint la situation d'équilibre que décrit le modèle du noyau composé. Chacun de ces modèles requiert, pour sa mise en œuvre, un ensemble de données associées à la structure de la



Énergie d'émission



Différences entre les énergies de liaison théoriques et expérimentales en fonction du nombre de neutrons pour les noyaux pairs-pairs connus avec l'interaction effective DIM [1]. Les lignes joignent les chaînes isotopiques.

cible, du noyau composé formé par le système cible + projectile et de l'ensemble des noyaux résiduels susceptibles d'être créés après la réaction.

Les données les plus fondamentales sont les masses nucléaires et, par extension, la spectroscopie des niveaux nucléaires de basse énergie. Ces informations permettent en effet de savoir si une réaction est possible, en fonction de l'énergie de la particule incidente. En outre, l'analyse des niveaux excités de basse énergie de la cible permet de choisir le potentiel optique adapté à la situation, plusieurs options étant possibles selon que l'on a affaire à une cible sphérique ou déformée. Le potentiel optique étant choisi, il fournit des jeux de coefficients de transmission qui permettent de déterminer la probabilité d'émission pour une particule légère donnée. Pour l'émission de photons et la fission, deux modèles spécifiques doivent être utilisés pour déterminer l'analogue des coefficients de transmission que le modèle optique fournit pour les particules. On parle dans le premier cas d'un modèle de fonction de force gamma et, dans le second cas, d'un modèle de pénétrabilité de barrières de fission.

Au-delà d'une certaine énergie, les niveaux nucléaires excités deviennent si proches les uns des autres qu'il devient impossible de les distinguer. On est alors amené à introduire une notion de densité de niveaux. C'est, en effet, le produit de la densité de niveaux par les coefficients de transmission qui détermine la probabilité d'émettre une particule, un photon ou de fissionner si le processus de fission est énergétiquement possible, cette dernière condition étant déterminée par l'écart entre la hauteur de la (ou des) barrière(s) de fission et l'énergie d'excitation du noyau composé.

Masses nucléaires, spectroscopie des niveaux discrets, déformation nucléaire, densités de niveaux, fonction de force

gamma, caractéristiques des barrières de fission constituent ainsi l'ensemble des données nécessaires pour qu'un code de réaction nucléaire puisse prétendre fournir des prédictions.

Ces données ne sont pas toutes des observables. S'il est possible de mesurer la masse des noyaux et de disposer de données spectroscopiques, il n'en est pas de même pour les autres informations. On dispose, en revanche, de quelques mesures permettant de les connaître partiellement. On ne peut, par conséquent, accéder à ces informations que par le biais d'approches théoriques fondées sur des bases plus ou moins microscopiques. Toutes s'appuient sur les données expérimentales disponibles afin d'ajuster les paramètres libres qu'elles contiennent. À la DAM, le choix s'est porté sur les approches dites du champ moyen et au-delà, qui combinent une interaction nucléon-nucléon effective et des formalismes théoriques permettant de déterminer l'ensemble des données nécessaires. Ce sont, à ce jour, les seules approches en mesure de fournir des prédictions d'une qualité constante pour l'ensemble des noyaux connus. La confrontation, très favorable, des prédictions théoriques aux données expérimentales, en commençant par les masses (figure 2), a encouragé l'application de ces approches aux données qui ne peuvent être mesurées. Grâce aux moyens de calcul considérables disponibles aujourd'hui, nous avons ainsi construit des bases de données pour les masses nucléaires [1], les densités de niveaux [2], les fonctions de force gamma [3] et les chemins de fission [4]. Ces bases de données offrent aujourd'hui des alternatives crédibles aux formes analytiques traditionnellement utilisées pour modéliser les réactions nucléaires, au prix toutefois d'ajustements qui, s'ils sont globaux, n'en restent pas moins la preuve que des progrès restent encore à accomplir dans la description théorique de la structure nucléaire.

RÉFÉRENCES [1] S. GORIELY et al., «First Gogny-Hartree-Fock-Bogoliubov nuclear mass model», Phys. Rev. Lett., 102, 242501 (2009). [2] S. HILAIRE et al., «Temperature-dependent combinatorial level densities with the DIM Gogny force», Phys. Rev. C, 86, 064317 (2012). [3] S. GORIELY et al., «Gogny-HFB+QRPA dipole strength function and its application to radiative nucleon capture cross section», Phys. Rev. C, 98, 014327 (2018). [4] J.-F. LEMAÎTRE et al., «Microscopic description of the fission path with the Gogny interaction», Phys. Rev. C, 98, 024623 (2018).

STRUCTURE NUCLÉAIRE

ZOOM SUR L'ÉTUDE MÉTROLOGIQUE DES TRANSITIONS BÊTA POUR LES DONNÉES NUCLÉAIRES

X. MOUGEOT M. LOIDL A. SINGH CEA - DRT Saclay, LIST, Laboratoire national Henri-Becquerel

La désintégration d'un radionucléide par interaction faible est un défi théorique très complet, car la probabilité de transition dépend à la fois des interactions faible, forte et électromagnétique. Pour atteindre une précision de l'ordre du pour cent, il est nécessaire de prendre en compte la structure nucléaire des états en jeu, des effets atomiques tels que l'écrantage et l'échange, et des corrections radiatives issues de l'électrodynamique quantique. En tant que laboratoire de métrologie, le Laboratoire national Henri-Becquerel (LNHB) s'est engagé dans une étude à la fois expérimentale et théorique des transitions bêta. Les résultats déjà obtenus améliorent les données nucléaires utilisées par de nombreuses communautés scientifiques.



finaux. La connaissance des spectres bêta est indispensable en métrologie des rayonnements ionisants, en médecine nucléaire pour la radiothérapie interne et pour l'énergie nucléaire avec les calculs de puissance résiduelle ou la gestion du combustible après irradiation. La mesure des spectres d'antineutrinos issus des réacteurs permettrait une surveillance en temps réel des installations nucléaires et pourrait mettre en évidence une nouvelle physique en recherche fondamentale [1]. Fortement impliqué dans les évaluations de données atomiques et nucléaires, le LNHB se positionne à mi-chemin de ces différentes communautés. La question de la qualité et de la précision de ces données se fait de plus en plus prégnante et des améliorations sont indispensables tant à basse énergie qu'à haute énergie.



FIGURE 1

Schéma de principe d'un calorimètre métallique magnétique fonctionnant à une température de 15 mK. L'énergie déposée par la particule induit une élévation de température de l'absorbeur qui est convertie en variation de flux magnétique, puis en signal électrique par un capteur de type SQUID.

Les calorimètres métalliques magnétiques sont des détecteurs cryogéniques fonctionnant à très basse température. Leur excellente linéarité et leur seuil en énergie très bas sont des caractéristiques essentielles pour la spectrométrie bêta de haute précision à basse énergie, permettant d'étudier la région des spectres où les effets atomiques sont très importants. Le radionucléide est incorporé dans un absorbeur en or et chaque particule bêta émise lors d'une désintégration y dépose toute son énergie. L'élévation de température induite est transformée en variation d'aimantation par un thermomètre paramagnétique en argent-erbium exposé à un champ magnétique, puis en signal électrique par un dispositif supraconducteur à interférence quantique (SQUID) (figure 1). Grâce à cette technique, le LNHB a effectué la mesure la plus précise au monde du spectre bêta du ⁶³Ni, avec un seuil de détection de 300 eV et une résolution en énergie de 30 eV. Alors que cette transition permise était supposée bien connue, l'analyse a mis en évidence une forte déformation à basse énergie. Le LNHB a démontré que cette déformation est due à l'effet d'échange [2] dans lequel la particule bêta est émise directement dans une orbitale atomique, éjectant l'électron s'y trouvant avec une énergie plus faible. Des calculs théoriques incluant cet effet permettent de reproduire très précisément le spectre mesuré (figure 2).

Certaines transitions bêta sont particulièrement sensibles à la structure nucléaire, les effets étant plus importants aux hautes énergies. Le code de calcul BetaShape développé par le LNHB [3] améliore les prédictions des transitions permises et interdites uniques et inclut plusieurs corrections non nucléaires très précises. En parallèle, une étude est en cours afin de calculer les spectres bêta en couplant de manière cohérente les fonctions d'onde des nucléons et des leptons dans un formalisme relativiste de la désintégration par interaction faible. Cependant, de nouvelles mesures de grande précision sont nécessaires pour tester et contraindre les modèles théoriques. Les calorimètres n'étant pas adaptés à ces énergies, le LNHB a choisi une approche conventionnelle utilisant des détecteurs silicium en coïncidence en configuration 4π . Une technique de préparation de sources radioactives ultrafines a été établie afin de limiter la perte d'énergie des particules bêta. Des simulations Monte-Carlo très précises ont été validées sur d'anciennes mesures et ont servi au développement d'un processus de déconvolution spectrale. Les résultats préliminaires pour le 14C et le 99Tc sont

cohérents avec les mesures existantes dans la littérature [4] et devraient améliorer les incertitudes.

La comparaison de mesures et de prédictions théoriques de grande précision permettra d'explorer la structure nucléaire et notre connaissance de l'interaction faible dans le cadre du modèle standard. Des développements expérimentaux sont encore nécessaires et une collaboration avec des théoriciens sera indispensable pour inclure la structure des noyaux dans toute sa complexité.



FIGURE 2

Mesure et zoom à basse énergie du spectre bêta du ⁶³Ni par un calorimètre métallique magnétique (noir), comparée à un calcul standard (vert) et à un calcul précis tenant compte de l'effet atomique d'échange (rouge).

RÉFÉRENCES [1] L. HAYEN *et al.*, «High precision analytical description of the allowed β spectrum shape», *Rev. Mod. Phys.*, 90, 015008 (2018). [2] X. MOUGEOT *et al.*, «Consistent calculation of the screening and exchange effects in allowed β⁻ transitions», *Phys. Rev. A*, 90, 012501 (2014). [3] X. MOUGEOT *et al.*, «Reliability of usual assumptions in the calculation of β and ν spectra», *Phys. Rev. C*, 91, 055504 (2015). [4] M. LOIDL *et al.*, «Beta spectrometry with metallic magnetic calorimeters in the framework of the European EMPIR project MetroBeta», *Appl. Rad. and Isot.*, 153, 108830 (2019).

DYNAMIQUE ET RÉACTIONS NUCLÉAIRES

REVUE SUR LA DESCRIPTION THÉORIQUE DES RÉACTIONS NUCLÉAIRES

Depuis le début de la physique nucléaire, les réactions impliquant des noyaux ont été l'outil privilégié pour étudier les propriétés des systèmes nucléaires. Parallèlement à la recherche fondamentale, les premières découvertes ont conduit à d'importantes applications qui ont eu un impact considérable sur notre société. De nos jours, la théorie des réactions nucléaires vise à décrire, de manière cohérente et éventuellement unifiée, le large éventail des réactions nucléaires intéressant les scientifiques, des études les plus fondamentales aux applications les plus diverses.



V. SOMÀ CEA - DRF Saclay, Irfu/DPhN



omme toutes les particules subatomiques trop petites pour être vues au microscope, les noyaux atomiques sont préférentiellement étudiés *via* des réactions. Elles impliquent généralement des noyaux, des nucléons et/ou des sondes électromagnétiques et peuvent se dérouler dans des domaines énergétiques assez différents, de

fractions à des millions d'électronvolts. En étudiant une réaction nucléaire, un premier objectif est de mieux comprendre comment les protons et les neutrons interagissent, se lient et donnent lieu à la très riche phénoménologie nucléaire, allant de systèmes stables bien connus à des isotopes instables et exotiques. Un deuxième objectif est de rassembler des connaissances détaillées sur certains processus de réaction au bénéfice d'applications au cœur de notre société. Alors que le premier but concerne la totalité de la carte nucléaire, le second se concentre sur un ensemble de cas pertinents.

De 1936 au début des années 1950, de nombreuses observations et considérations physiques ont mis en évidence les principaux mécanismes de réaction à l'œuvre lors de la collision de deux noyaux. À des énergies moyennes, les trois principaux mécanismes sont :

• les réactions directes, rapides, sensibles aux détails de la structure des noyaux en interaction;

• la formation d'un noyau composé de vie longue après la collision, puis sa décroissance par émission de particules;





FIGURE 2

Facteur astrophysique S pour la fusion D-T en fonction de l'énergie dans le centre de masse. Deux calculs *ab initio*, avec et sans correction phénoménologique, sont comparés aux données expérimentales [2].

• l'émission de pré-équilibre, un mécanisme intermédiaire, de durée légèrement plus longue que celle des réactions directes. Pour une collision entre un nucléon et un noyau, il peut être vu comme une série d'interactions entre le projectile et les nucléons de la cible avant l'émission de particules.

Différents types d'approches théoriques ont été conçus et adaptés à ces processus [1]. Aujourd'hui, les modèles peuvent être divisés en trois catégories principales (figure 1). Les méthodes ab initio ont l'ambition de résoudre l'équation de Schrödinger à plusieurs corps à partir des interactions de base entre protons et neutrons. Cela permet une connaissance approfondie de la dynamique nucléaire et un pouvoir prédictif élevé. En revanche, malgré des progrès considérables, ces méthodes restent limitées en matière d'isotopes, d'énergies et de types de réactions. Les approches effectives sont également microscopiques mais, contrairement aux méthodes ab initio, elles incluent les corrélations nucléaires de manière effective, en utilisant les données expérimentales existantes et en perdant un lien direct avec les interactions nucléoniques. L'avantage est une complexité réduite et une gamme d'applications plus étendue. Ces techniques sont largement utilisées en recherche fondamentale, mais permettent aussi de faire le lien avec des domaines plus appliqués et les approches phénoménologiques. Ces dernières s'appuient fortement sur les données expérimentales disponibles et visent principalement une modélisation complète et précise des observables de réaction. Elles sont systématiquement utilisées dans les applications nucléaires et constamment évaluées afin d'améliorer leur fiabilité et leur applicabilité.

Un exemple de calcul *ab initio* pour la fusion deutérium-tritium (D-T) est présenté sur la **figure 2**. Tant que la résolution complète de l'équation de Schrödinger dépendante du temps avec des interactions réalistes reste hors de portée, les approches *ab initio* décomposent le problème en termes de clusters à travers lesquels, pour un état initial donné, tous les canaux de réaction possibles sont représentés. Bien que prometteur, ce résultat montre que même les calculs les plus avancés ne peuvent pas reproduire les données avec précision sans ajustements phénoménologiques.

Historiquement, l'interprétation de mesures expérimentales via des approches phénoménologiques et effectives a permis de comprendre les mécanismes de réaction et de révéler les propriétés des noyaux intervenant dans leur description. À quelques exceptions près, ces mécanismes sont décrits aujourd'hui avec des modèles issus d'approches effectives et phénoménologiques, modèles sans cesse raffinés et étendus. Un bon exemple est la méthode CDCC (*Continuum Discretized Coupled Channel*) décrivant les réactions directes se produisant à la suite d'une collision deuton-noyau. Cette approche décrit notamment la diffusion élastique directe en tenant compte de la possibilité de casser le deuton. Ce dernier processus joue sensiblement sur la diffusion élastique, comme illustré sur la **figure 3**.

Les grandes idées intervenant dans la description des réactions nucléaires donnent toutes lieu à de nombreux développements. Les trois approches décrites sur la <u>figure 1</u> ont toujours été complémentaires : des calculs précis du type *ab initio* contraignent les approches effectives et phénoménologiques et, inversement, certains aspects des réactions révélés grâce aux modèles phénoménologiques et effectifs balisent le déploiement des méthodes *ab initio*. Ces trois approches se distinguent souvent difficilement. Une certitude est que notre progression vers une description précise et globale des réactions nucléaires est à l'intersection des avancées réalisées suivant chacune d'elles.



FIGURE 3

Section efficace de la diffusion élastique d'un deuton sur un noyau de magnésium. Les calculs avec (ligne) et sans (tirets) prise en compte du *break-up* sont comparés 3.

RÉFÉRENCES [1] C. A. BERTULANI, P. DANIELEWICZ, Introduction to nuclear reactions, IOP Publishing, London (2004). [2] G. HUPIN, S. QUAGLIONI, P. NAVRÁTIL, «Ab initio predictions for polarized deuterium-tritium thermonuclear fusion», Nature Communications, 10, p. 351 (2019). [3] P. CHAU HUU-TAI, «A panorama of CDCC calculations for deuteron-induced reactions: from elastic cross sections to inelastic and transfer ones», J. Phys.: Conf. Ser., 312, 082018 (2011).

DYNAMIQUE ET RÉACTIONS NUCLÉAIRES

ZOOM SUR LES POTENTIELS OPTIQUES MICROSCOPIQUES

La production de données nucléaires pour les applications repose principalement sur un dialogue entre les modèles théoriques de réactions nucléaires et les résultats provenant de l'expérience. Ces modèles nécessitent des ingrédients, le plus souvent phénoménologiques, c'est-à-dire paramétrés afin de reproduire les données expérimentales le plus finement possible. Le potentiel optique nucléon-noyau, caractérisant l'interaction d'un nucléon avec un noyau cible lors du processus de diffusion est l'un de ces ingrédients. Si les potentiels phénoménologiques ont permis de nombreux succès dans le domaine de l'évaluation de données nucléaires, leur capacité prédictive dans des domaines encore inexplorés expérimentalement reste discutable. La stratégie adoptée pour pallier ce manque de données est de faire appel à des modèles plus microscopiques. Le pari de la microscopie est le suivant : ajouter de la physique dans la détermination des ingrédients des modèles de réaction afin de gagner en capacité prédictive.

G. BLANCHON M. DUPUIS CEA - DAM Île-de-France

ors des processus de diffusion de basse énergie, le nucléon incident est particulièrement sensible à la structure du noyau cible et à son spectre d'excitation. Il est ainsi possible de déterminer le potentiel nucléon-noyau en se basant sur les résultats des études de structure nucléaire théorique. Pour cela, nous tirons profit de l'expérience accumulée au

CEA-DAM dans la description de la structure des noyaux à l'aide de l'interaction effective nucléon-nucléon dite de Gogny. Couplés aux progrès des calculateurs modernes, ces modèles ont permis l'étude de la structure d'une grande quantité de noyaux. Ils permettent ainsi des prédictions sur l'état fondamental et les états excités de ces noyaux qui sont ensuite utilisées pour construire le potentiel nucléon-noyau microscopique.

Deux axes de recherche sont déployés au CEA–DAM pour déterminer ces potentiels microscopiques. Le premier utilise un formalisme élaboré et prépare les modèles de réactions nucléaires de haute précision qui seront utilisés dans le futur pour répondre aux besoins des applications. Le second implique un formalisme plus simple et contient une part de phénoménologie. Il est destiné à répondre dès aujourd'hui à certaines questions posées par les expérimentateurs et les utilisateurs de données nucléaires.



FIGURE 1

Diffusion élastique de proton sur le noyau cible de calcium 40. Comparaison entre le calcul de la section efficace de réaction avec l'interaction de Gogny (ligne rouge), un modèle phénoménologique paramétré sur l'expérience (ligne rose) et les données expérimentales (en noir).



FIGURE 2

Émission d'un neutron et d'un gamma suite à l'excitation d'un noyau d'uranium 238 par une collision avec un neutron. Le calcul est fait avec le code TAIYS, à partir des paramètres de l'évaluation réalisée au CEA – DAM Île-de-France et de notre modèle de pré-équilibre microscopique. Les symboles représentent les données expérimentales.

La première approche permet de déterminer le potentiel nucléon-noyau uniquement à partir de l'interaction effective entre les nucléons, celle de Gogny, la même que celle utilisée pour la structure. Ce modèle a récemment été appliqué aux noyaux cibles sphériques tels que le calcium 40 [1]. Les sections efficaces de diffusion élastique de neutron et de proton présentent un accord très encourageant avec l'expérience pour des énergies incidentes inférieures à 30 MeV (voir figure 1). L'utilisation des ressources informatiques du CEA-DAM a permis d'étendre ces études à des noyaux cibles plus lourds tels que le plomb 208. En effet, lorsque la masse du noyau cible augmente, on observe une rapide explosion du nombre d'états excités à prendre en compte dans le calcul du potentiel. Les développements actuels se concentrent sur l'extension de ces modèles au cas des noyaux cibles appariés. Cette généralisation du modèle représente un défi, aussi bien sur le plan du formalisme que sur celui des besoins informatiques. Elle représente également un premier pas nécessaire avant la prise en compte de la déformation du noyau cible.

La seconde approche mêle les aspects microscopiques et phénoménologiques. Elle se base sur une force effective complexe, distincte de celle utilisée dans le calcul de structure. Cette interaction est combinée avec les densités de matière issues des calculs de structure afin de déterminer les potentiels microscopiques. Cette méthode permet d'étudier différents types de réactions : diffusions élastique, inélastique et émission de pré-équilibre [2]. Rappelons qu'après un transfert d'énergie à la cible, le noyau excité se relaxe en émettant une ou plusieurs particules, notamment des neutrons et du rayonnement gamma. Un calcul précis des probabilités d'émission de neutrons et de gamma est crucial pour nombre d'applications. Un exemple est donné sur la **figure 2**, sur laquelle la mesure de la détection en coïncidence d'un neutron et d'une particule gamma est comparée à notre calcul. Ce type d'observable demande une modélisation précise de tous les mécanismes de réaction : la contribution directe, le pré-équilibre et le noyau composé. Dans cet exemple, l'émission de pré-équilibre est calculée grâce à nos potentiels microscopiques qui permettent de prédire correctement la magnitude de la section efficace (n,n' γ).

Les deux axes de recherche décrits ci-dessus impliquent le développement d'outils numériques performants afin de raffiner et d'étendre le champ d'application des modèles physiques développés. Deux codes de calcul ont récemment été développés dans le but de définir et de résoudre un système d'équations couplées dans un cadre général [3]. Ces équations décrivent les diffusions élastiques et inélastiques de nucléons en tenant compte des couplages possibles, lors de cette réaction, entre les états de la cible.

En conclusion, les potentiels microscopiques font l'objet de développements intensifs afin de répondre aux besoins actuels et futurs. Ces recherches concernent à la fois le développement de nouveaux modèles décrivant simultanément la structure et les réactions, le déploiement de méthodes connues pour étudier une large gamme de réactions et la forge d'outils numériques adaptés aux calculateurs d'aujourd'hui et à venir. Les efforts déployés suivant ces trois axes permettront de répondre aux exigences sans cesse croissantes des utilisateurs de données nucléaires.

RÉFÉRENCES [1] G. BLANCHON, M. DUPUIS, H. F. ARELLANO, N. VINH MAU, «Microscopic positive-energy potential based on Gogny interaction», *Phys. Rev. C*, 91, 014612 (2015). [2] M. DUPUIS, É. BAUGE, S. HILAIRE *et al.*, «Progress in microscopic direct reaction modeling of nucleon induced reactions», *Eur. Phys. J. A*, 51, p. 168 (2015). [3] A. NASRI, «Microscopic nonlocal potentials for the study of scattering observables of nucleons within the coupled channel framework», thèse de l'université Paris-Saclay soutenue le 14 septembre 2018.

DYNAMIQUE ET RÉACTIONS NUCLÉAIRES





La description universelle des propriétés des noyaux est l'une des questions essentielles de la physique nucléaire : expérimentalement, il s'agit déjà de connaître les masses et la limite possible de liaison des chaînes isotopiques, puis de déterminer leurs propriétés de structure. Ainsi, les propriétés des noyaux exotiques peuvent aussi être étudiées et comparées aux calculs théoriques afin de connaître l'évolution des forces nucléaires en fonction de l'asymétrie en neutrons. Cet article résume les études récentes menées pour extraire les rayons des isotopes d'hélium et d'oxygène. Les rayons nucléaires figurent parmi les observables clés que l'on peut mesurer pour examiner la validité des modèles microscopiques de structure et de réactions sur les systèmes les plus simples de noyaux diffusés sur protons.

un des défis de la physique nucléaire est d'établir le lien théorique entre une description universelle des noyaux atomiques et les interactions élémentaires entre leurs constituants, protons et neutrons. Ce lien fournirait une compréhension approfondie des noyaux connus, à la fois les stables, existant naturellement sur Terre, et les

instables, créés dans les laboratoires du monde entier. Il serait alors possible de prédire sur des bases fiables les caractéristiques des milliers de noyaux qui n'ont pas encore été observés. La plupart de noyaux inconnus ne seront pas, dans un avenir prévisible, atteints expérimentalement. Cependant, ils sont cruciaux pour interpréter le processus de la nucléosynthèse des éléments lourds, par exemple.

Nous disposons de modèles microscopiques fiables en structure et en réactions, capables de prédire les phénomènes observés sur une large gamme d'isotopes. Mais les différentes approches ne sont pas en mesure de déterminer de manière certaine les *driplines* (limites de liaison au sens de l'interaction forte) et les propriétés des noyaux loin de la vallée de stabilité. Les théories sont remises en question pour des noyaux faible-



FIGURE 1

Distributions angulaires des sections efficaces élastiques de l'⁸He sur proton à 15,4 A·MeV mesurées dans deux expériences (points rouges et croix noires) comparées au calcul en voies de réactions couplées (ligne noire). ment liés, dits exotiques lorsqu'ils présentent des propriétés inhabituelles, comme un halo (cas de l'⁶He) ou une peau de neutrons (cas de l'⁸He). À ce jour, au-delà du choix des interactions nucléaires employées pour les calculs, le lien entre structure et réactions pose des problèmes conceptuels relatifs au traitement de phénomènes tels que le transfert vers les états du continuum et les voies de réactions couplées.

Les théories ab initio, fondées sur les interactions à plusieurs corps entre les premiers constituants des noyaux, protons et neutrons, pourraient conduire à terme à une description globale de la structure et de la dynamique des noyaux. Les premières étapes consistent à examiner la validité du cadre théorique général fondé sur le principe ab initio, pour accroître la fiabilité des calculs des observables de l'état fondamental, comme les masses (énergies de liaison) et les rayons, le long de chaînes isotopiques étendues. Comme dans le cas des isotopes de l'hélium ^{6,8}He [1], les valeurs expérimentales des rayons de matière peuvent être extraites à partir des données qui dépendent de la taille du noyau : les sections efficaces de diffusion élastique sur proton. Aux énergies jusqu'à 200 MeV, les calculs de diffusion élastique peuvent être effectués à partir du modèle optique avec le potentiel microscopique noyau-proton JLM (Jeukenne-Lejeune-Mahaux), dont les paramètres sont l'énergie incidente et les densités de protons et de neutrons du noyau. L'accord entre l'expérience et les calculs (figure 1) est obtenu pour des densités nucléaires de l'8He dont le rayon quadratique est 2,5 (1) fm. Des mesures de l'ensemble des principales voies de réaction de l'8He sur cible de proton sont requises : élastique (p,p), transfert d'un et de deux neutrons de façon à contrôler l'ensemble des couplages de ces voies de réaction avant de tester les modèles proposés pour les densités de matière de l'8He.

Dans les isotopes d'oxygène, le succès des calculs *ab initio* a été la compréhension de l'évolution des masses et la limite de liaison à N = 16 avec le ²⁴O, dernier isotope lié connu expérimentalement. Ces travaux ont montré le rôle des contributions des interactions à trois corps pour reproduire les masses. Une question restait ouverte sur la description des rayons nucléaires par ces calculs. Une étude systématique [2] a donc été menée sur les rayons des isotopes d'oxygène de nombre de nucléons pairs. L'objectif était de mener une analyse approfondie des informations expérimentales disponibles sur les rayons de charge et de matière par rapport à l'état de l'art des calculs *ab initio*. Pour la première fois, la validité de ces calculs a été testée à grand isospin sur l'observable du rayon de matière. Les rayons ont été évalués à partir des sections efficaces élastiques des faisceaux d'oxygène ^{18,20,22}O sur proton, mesurées au GANIL avec



Comparaison entre les rayons de matière déduits de l'expérience (carrés noirs et ronds rouges) et ceux obtenus par les calculs *ab initio*.

le détecteur de particules légères chargées MUST (références dans [2]). Les rayons expérimentaux sont comparés aux calculs *ab initio* (figure 2), qui donnent deux séries distinctes, selon l'interaction.

Les bandes, jaune pour l'interaction standard, bleue pour la nouvelle (NNLO_{sat}), représentent la dispersion des calculs obtenus avec différentes techniques de traitement des corrélations nucléaires. Pour une même interaction les résultats sont cohérents. Les calculs avec l'interaction standard sous-estiment systématiquement les rayons. La reproduction des données est meilleure avec NNLO_{sat}, mais les rayons des noyaux exotiques restent sous-estimés.

Des projets de collisionneurs électrons-ions radioactifs sont envisagés en Europe pour fournir les densités de charge de noyaux instables. Des programmes complémentaires seraient essentiels pour effectuer des mesures systématiques des diffusions sur proton avec des faisceaux de noyaux très riches en neutrons. Si l'on vise un développement d'approches microscopiques et quantitatives des réactions, comme les amplitudes et les interactions entre les noyaux évoluant en fonction de la taille, une reproduction simultanée des masses et des rayons est indispensable pour envisager un traitement unifié de la structure et des réactions pour tous les noyaux, stables et instables.

RÉFÉRENCES [1] V. LAPOUX, N. ALAMANOS, «Weakly-bound Borromean structures of the exotic ^{6,8}He nuclei through direct reactions on proton», Eur. Phys. J. A, 51, p. 91 (2015). [2] V. LAPOUX, V. SOMÀ, C. BARBIERI, H. HERGERT, J. D. HOLT, S. R. STROBERG, «Radii and binding energies in oxygen isotopes: a puzzle for nuclear forces», Phys. Rev. Lett., 117, 052501 (2016).

DYNAMIQUE ET RÉACTIONS NUCLÉAIRES

ZOOM SUR LES MESURES DE SECTIONS EFFICACES DE RÉACTIONS INDUITES PAR NEUTRONS À n_TOF

F. GUNSING É. BERTHOUMIEUX É. DUPONT T. PAPAEVANGELOU CEA - DRF Saclay, Irfu/DPhN M. DIAKAKI

CEA - DES Cadarache

L'installation n_TOF au Cern fournit des faisceaux pulsés de neutrons à deux lignes de temps de vol permettant d'étudier des réactions induites par neutrons sur une très large gamme en énergie. Des réactions de fission et de capture y sont notamment mesurées pour mieux comprendre la nucléosynthèse stellaire et répondre aux besoins des applications de la physique nucléaire.



Haut : sections efficaces typiques des réactions induites par neutrons. Bas : exemples de flux neutroniques les plus courants sur la même échelle en énergie [2]. es taux de réactions induites par neutrons, ou sections efficaces, sont des données nucléaires d'une grande importance pour la technologie nucléaire ainsi que pour la formation des éléments dans les étoiles, la nucléosynthèse stellaire. Les calculs et simulations nécessaires sont basés sur des données évaluées. Une évaluation de données nucléaires est

le résultat d'un processus complexe impliquant une analyse minutieuse des jeux de données expérimentaux existants, parfois incohérents, combinés avec des modèles théoriques optimaux, permettant à la fois de décrire les données mesurées et de fournir des prédictions sur les données manquantes. Le résultat de ce processus est un ensemble de données recommandé et intentionnellement complet : l'évaluation. Les données expérimentales des réactions induites par neutrons sont un ingrédient indispensable aux évaluations de données nucléaires. Sur la **figure 1**, différentes sections efficaces sont fournies sur une grande plage d'énergie (partie haute) ainsi que quelques flux neutroniques illustratifs (partie basse) **[1**].

L'installation n_TOF au Cern est basée sur un faisceau de protons de 20 GeV/c, pulsé avec un taux de répétition de 0,8 Hz et une durée de pulse de 6 ns, provenant du *Proton Synchrotron*. Chaque impulsion de 7×10^{12} protons est envoyée sur un massif en plomb d'environ 40 cm × 60 cm, produisant essentiellement par spallation de l'ordre de 300 neutrons par proton incident. Une couche d'eau entourant la cible de spallation ralentit les neutrons initiaux en un spectre blanc couvrant toute la gamme des énergies comprises entre le meV et le GeV. Deux bases de temps de vol, une horizontale de 185 m et, depuis 2014, une verticale de 20 m, permettent d'installer des échantillons à étudier au moyen de détecteurs. Un schéma de l'ensemble du dispositif de temps de vol est donné dans la **figure 2**.

L'énergie des neutrons est déterminée par la technique du temps de vol. Les neutrons, créés à un instant t_o , sont guidés dans des tubes sous vide vers la zone expérimentale à une distance L où ils génèrent des réactions qui sont facilement détectables. Le temps de vol mesuré du neutron et la distance de vol déterminent l'énergie cinétique du neutron. La fonction de résolution donnant la distribution en énergie des neutrons incidents mesurés à un temps de vol donné est une caractéristique essentielle des bases de temps de vol. L'acquisition des données est basée sur l'échantillonnage des signaux des détecteurs. Cela engendre une grande quantité de données stockées pour un



FIGURE2 Illustration du dispositif n_TOF montrant la cible de spallation d'où partent deux lignes de temps de vol, une horizontale et une verticale.

traitement hors ligne afin de déterminer pour chaque détecteur le temps de vol, l'énergie déposée et parfois le type de signal.

La large plage d'énergies pouvant être mesurées simultanément est une caractéristique clé de l'installation. Un autre atout important de n_TOF est le nombre très élevé de neutrons par impulsion de protons, également appelé flux neutronique instantané. Dans le cas d'échantillons radioactifs placés dans le faisceau de neutrons, il en résulte un rapport très favorable entre les signaux dus à des réactions induites par neutrons et ceux dus à des événements de désintégration radioactive qui contribuent au bruit de fond.

L'installation n_TOF est exploitée par une collaboration d'environ cent vingt membres provenant d'environ quarante instituts à laquelle le CEA–DRF participe depuis le démarrage en 2000. La figure 3 montre un résumé des expériences menées pour améliorer les données nucléaires. Une description plus exhaustive du dispositif, avec les détecteurs utilisés et les données nucléaires publiées, est disponible dans la référence [2]. Une liste à jour des données mesurées est maintenue sur un site publiquement accessible [3]. La plupart des expériences concernent des réactions de capture et de fission. Les détecteurs pour la capture neutronique sont essentiellement des détecteurs à base du scintillateur liquide C_6D_6 et un calorimètre 4π constitué de 40 cristaux de BaF₂ ayant une efficacité de détection proche de 100 % pour des gamma jusqu'à 10 MeV. Pour les mesures de fission, plusieurs types de détecteurs sont utilisés, comme les détecteurs gazeux tels que PPAC (*Parallel Plate Avalanche Counter*), des chambres à ionisation ou bien encore des Micromegas ou des détecteurs solides de type DSSSD (*Double-Sided Silicon Strip Detector*).

Avec le développement de nouveaux détecteurs, les sections efficaces des réactions émettant des particules chargées légères sont également étudiées. La mesure des réactions de capture des actinides fissiles, techniquement très complexe, utilise un calorimètre pour la détection des gamma dans lequel est insérée une chambre à fission compacte pour identifier les réactions de fission. La DRF échange et collabore avec des équipes de la DES et de la DAM à l'occasion de certaines expériences [4,5]. Les détecteurs Micromegas, développés à la DRF et régulièrement améliorés, sont utilisés grâce à leur versatilité en tant que moniteurs de flux, détecteurs de particules légères ou de fragments de fission, ou encore comme profileurs de faisceau de neutrons [6].

Une nouvelle cible de spallation est en cours de conception au Cern. La nouvelle cible sera géométriquement mieux adaptée à l'utilisation simultanée des deux bases de vol et sera opérationnelle au redémarrage du Cern en 2021.



RÉFÉRENCES [1] N. COLONNA *et al.*, «Neutron physics with accelerators», *Progr. Part. Nucl. Phys.*, 101, p. 177 (2018). [2] F. GUNSING *et al.*, «Nuclear data activities at the n_TOF facility at CERN», *Eur. Phys. J. Plus*, 131, p. 371 (2016). [3] http://twiki.cern.ch/NTOFPublic/DataDissemination. [4] M. BACAK *et al.*, «Preliminary results on the ²³³U capture cross section and alpha ratio measured at n_ TOF (CERN) with the fission tagging technique», *Proc. Conf.* WONDER, Aix-en-Provence, 8-12 octobre 2018, *EPJ Web of conferences*, 211, 03007 (2019). [5] J. MORENO-SOTO *et al.*, «Study of the photon strength functions and level density in the gamma decay of the n + ²³⁴U reaction», *Proc. Conf.* WONDER, Aix-en-Provence, 8-12 octobre 2018, *EPJ Web of conferences*, 211, 02002 (2019). [6] M. DIAKAKI *et al.*, «Development of a novel segmented mesh MicroMegas detector for neutron beam profiling», *Nucl. Instr. Meth. A*, 903, p. 46 (2018).

DYNAMIQUE ET RÉACTIONS NUCLÉAIRES

REVUE SUR LES APPLICATIONS DES RÉACTIONS

C. DE SAINT JEAN G. NOGUÈRE P. ARCHIER P. TAMAGNO O. BOULAND CEA - DES Cadarache

Évaluer des données nucléaires et notamment des sections efficaces de réactions à la DES, c'est faire des choix sur les expériences intégrales et/ou microscopiques, sur les modèles de réactions nucléaires et sur la connaissance préalable (*a priori*).

CONNAISSANCE FONDAMENTALE ET AMÉLIORATION DE LA CONNAISSANCE ACTUELLE

L'évaluation des sections efficaces aux énergies d'intérêt pour la DES se base sur des modèles de réactions nucléaires dont les paramètres ne sont pas (ou peu ou avec une précision faible) calculés par des théories microscopiques. Il en résulte que ces paramètres sont ajustés sur des mesures. En matière de connaissance fondamentale, cela soulève plusieurs problèmes de nature différente : l'utilisation des expériences microscopiques et intégrales ne permet pas toujours d'éliminer toutes les compensations entre réactions/ données, et les théories employées sont de type phénoménologique et, par là même, sujettes à des approximations, voire à des biais ou des erreurs. Ce dernier point pose la question de l'interprétation physique des paramètres et cela peut nécessiter d'éliminer certains paramètres libres de la théorie.

La <u>figure 1</u> illustre la problématique de l'évaluation des sections efficaces pour la DES : un domaine en énergie très large, plusieurs modèles théoriques et une zone intermé-



FIGURE 1

Section efficace de capture radiative de l^{/238}U en fonction de l'énergie du neutron incident, comparée aux spectres représentatifs d'un réacteur à neutrons rapides (en rouge) et d'un réacteur à eau légère (en bleu).



FIGURE

Multiplicité moyenne de neutrons prompts pour la fission induite par neutrons sur le ²³⁹Pu. Les symboles représentent les données expérimentales et les courbes rouge et bleue représentent, respectivement, les calculs prenant en compte la contribution du processus (n, γ f) et ceux qui ne la prennent pas en compte.

diaire (particulièrement importante pour les réacteurs à neutrons rapides). Le domaine des résonances est modélisé par la théorie de la matrice R, le domaine à plus haute énergie est, quant à lui, modélisé par des calculs de modèle optique et de modèle statistique. La région intermédiaire est modélisable par les deux théories.

AVANCÉES À PRÉVOIR : QUELQUES CONSIDÉRATIONS THÉORIQUES

La théorie de la matrice R utilisée dans le domaine des résonances est un franc succès dans sa capacité à reproduire des mesures très fines. Cependant, cette théorie utilise des paramètres libres (rayon de voies...) et comporte des approximations, notamment lorsqu'il s'agit de faire correspondre les paramètres physiques (largeur de voies de réactions qui sont en lien avec la durée de vie du noyau composé par le neutron et la cible) avec les paramètres qui structurent la théorie. Notamment, la modélisation de la fission et de la capture radiative reste simplifiée.

Concernant les méthodes d'évaluation, le physicien utilise bien souvent le référentiel restreint constitué du neutron incident et du noyau cible. Une solution innovante serait de remplacer ce référentiel par celui, plus général, du noyau composé qui peut être formé par de multiples voies (photon, particules chargées). Cela permettrait de bénéficier notamment des mesures de type substitution.

Les voies d'amélioration théorique portent alors sur un meilleur calcul des barrières de fission avec des modèles plus élaborés, la prise en compte de certains phénomènes de fission à deux étapes (le processus n γ f, voir <u>figure 2</u>), une meilleure représentation quantique des voies de fission (prise en compte de l'axe de fission). Les modèles employés pour décrire la fission s'orientent vers des représentations plus microscopiques afin de mieux comprendre la physique et d'inférer des premiers biais de simulation.

Enfin, la connexion entre le domaine des résonances (basé sur la matrice R) et celui de haute énergie (basé sur le modèle optique et les modèles statistiques) demande des avancées théoriques pour mieux comprendre le changement de régime sur les sections efficaces et assurer par ailleurs une meilleure continuité entre ces domaines en énergie.

AVANCÉES À PRÉVOIR : QUELQUES EXEMPLES EXPÉRIMENTAUX

Les avancées théoriques doivent s'accompagner d'avancées expérimentales afin de réduire les compensations entre les sections partielles et les paramètres afférents. Pour cela, il serait nécessaire d'accéder à des expériences plus discriminantes (distribution angulaire, par J π et amélioration de la résolution en énergie), à différentes températures (mesures à froid à quelques kelvins et à chaud à un millier de kelvins), sur une large gamme en énergie (O eV \rightarrow 100 MeV) et enfin multiobservables (sections/ spectres/multiplicités/intensité). Comme évoqué précédemment, un travail est à mener sur les systématiques afin de les réduire, mais aussi pour obtenir des mesures indépendantes des standards internationaux, à la fois directement (calibration) et indirectement.

Concernant la physique associée à l'évaluation, la finesse des mesures devrait permettre de donner plus de sens physique à certains paramètres (largeurs de voies), assurer par ailleurs une meilleure continuité théorique entre les différents modèles lorsque les mesures couvrent une large gamme en énergie et, enfin, servir de guide pour les modèles théoriques (jusqu'à la disqualification de certains).

De nombreux besoins expérimentaux concernent des améliorations quantitatives sur des isotopes déjà bien mesurés. Les améliorations attendues concernent les mesures de capture/ fission : la connaissance des sections efficaces dans les domaines d'énergie intermédiaires (1 keV-10 MeV) pour les actinides et les produits de fission, certaines sections en spectre thermique (capture des fissiles), la connaissance des données thermiques : mesures avec une température variable (0 K jusqu'à 2000 K), la réduction des incertitudes de mesures (notamment les incertitudes systématiques). Enfin, les sections élastiques et inélastiques (doublement différentielles) doivent encore faire l'objet d'avancées afin de mieux connaître notamment les distributions angulaires des noyaux diffusants.

CONCLUSION

Les avancées concernant les réactions nucléaires s'accompagnent de progrès sur les modèles théoriques, mais nécessitent des sauts qualitatifs importants dans les mesures afin de pouvoir mieux contraindre ces modèles.

DYNAMIQUE ET RÉACTIONS NUCLÉAIRES

ZOOM SUR LES ACTINIDES DANS LE DOMAINE DES RÉSONANCES : PRISE EN COMPTE DE L'EFFET DOPPLER À L'AIDE DE CALCULS AB INITIO



La probabilité d'interaction (section efficace de réaction) d'un neutron d'énergie inférieure à quelques keV avec un actinide présente des fluctuations, appelées résonances. Les paramètres de ces résonances (énergies et largeurs partielles de réaction) ne peuvent pas être prédits par la théorie. Ils sont obtenus à partir de mesures par temps de vol réalisées auprès de sources pulsées de neutrons. L'analyse de ces mesures nécessite des codes, prenant en compte plusieurs corrections expérimentales, telles que l'effet Doppler lié à la température de l'échantillon. Cet effet Doppler est modélisé à l'aide de spectres de phonons issus de calculs ab initio.

es paramètres des résonances observées dans les sections efficaces de réactions peuvent être étudiés grâce à deux sources pulsées de neutrons. La plus ancienne (GELINA) se trouve au Centre commun de recherche européen de Geel (JRC-Geel, Belgique). La seconde (n_TOF) utilise le faisceau pulsé du synchrotron à protons du Cern. Les vibrations de la

molécule d'UO $_{\scriptscriptstyle 2}$ ont été étudiées au JRC-Geel à la fin des années 1990 grâce à des mesures de transmission neutronique à 23,7 K et 293,7 K [1]. Lorsque la température augmente, l'agitation thermique dans l'échantillon d'UO₂ a pour conséquence d'élargir les résonances et d'atténuer leur amplitude. Ce phénomène est appelé effet Doppler. Il est pris en compte dans les codes d'analyse de matrice R grâce au spectre de phonons de la molécule considérée. Les mesures de transmission réalisées au JRC-Geel ont été analysées avec un spectre de phonons de l'uranium dans UO₂ calculé avec le code VASP [2]. La figure 1 montre le bon accord obtenu à 293,7 K entre la mesure et les calculs réalisés avec le code CONRAD, développé au CEA - DES Cadarache. En revanche, les calculs CONRAD ne permettent pas de reproduire précisément la forme asymétrique de la résonance observée à basse température (T = 23,7 K). À cette température, l'UO, possède des propriétés magnétiques qui ne sont pas prises en compte, ni dans le calcul VASP, ni dans le modèle cristallin du code CONRAD.

Dans l'objectif de mieux comprendre le spectre de phonons de l'UO₂, une première campagne de mesures a été menée à l'Institut Laue-Langevin (ILL) de Grenoble jusqu'à 600 K et 900 K. Ces deux températures correspondent aux températures du combustible UOX dans un réacteur à eau pressurisée, à puissance nulle et à pleine puissance. Le principe expérimental consiste à mesurer, dans le spectromètre IN6, le temps mis par les neutrons monoénergétiques ($E_0 = 3 \text{ meV}$) pour traverser l'échantillon d'UO₂ et atteindre les détecteurs à ³He. Ces derniers sont situés à 2,48 m de l'échantillon et couvrent un angle



Mesures de transmission de la première résonance de l'²³⁸U comparées aux calculs CONRAD qui prennent en compte l'effet Doppler avec un spectre de phonons calculé par des simulations *ab initio*.

de diffusion variant de 10° à 114°. La figure 2 montre que le spectre de phonons expérimental, déduit des mesures réalisées à 300 K, est dominé par les modes de vibration optique de l'oxygène (¹⁶O). Les deux modes acoustiques de l'uranium (²³⁸U) sont visibles à basse énergie de transfert. L'expérience a été simulée avec le code Monte-Carlo TRIPOLI4®, développé au CEA–DES de Saclay, en utilisant des données thermiques générées à partir de spectres de phonons calculés avec le code VASP [3]. Le spectre de phonons de l'UO₂ a été optimisé à l'aide du code CONRAD afin d'obtenir un meilleur accord avec les mesures. Les différences entre la courbe bleue et la courbe rouge proviennent essentiellement du spectre de phonons de l'oxygène dans UO₂, notamment autour de 30 meV. Ces différences sont attribuées aux vibrations anharmoniques de la molécule d'UO₂. Ce travail expérimental doit se poursuivre afin de disposer de données de quelques kelvins jusqu'à 1600 K, pour couvrir tout le domaine énergétique utile aux applications.



Spectre de phonons de l'UO₂, mesuré à 300 K et comparé aux simulations TRIPOLI4® avant et après optimisation du spectre de phonons de O dans UO₂ et U dans UO₂.

RÉFÉRENCES [1] A. MEISTER et al., «Experimental study of the Doppler broadening of neutron resonances at GELINA», dans Proc. of the Int. Conf. on Nuclear Data for Basic and Applied Science, Santa Fe (1985), Gordon and Breach Science Publishers, p. 1561 (1986). [2] G. NOGUÈRE, P. MALDONADON, C. DE SAINT JEAN, «Doppler broadening of neutron-induced resonances using ab initio phonon spectrum», Eur. Phys. J. Plus, 133, p. 177 (2018). [3] D. A. BROWN et al., «ENDF/B-VIII.0: The 8th major release of the nuclear reaction data library with CIELO-project cross sections, new standards and thermal scattering data», Nucl. Data Sheets, 148, p. 1 (2018).

FIGURE 2

DYNAMIQUE ET RÉACTIONS NUCLÉAIRES

ZOOM SUR LA MESURE DE LA SECTION EFFICACE ²³⁹Pu(n,2n)

B. LAURENT V. MÉOT P. MOREL O. ROIG G. BÉLIER CEA - DAM Île-de-France

Nous présentons ici pour la première fois une mesure relative de la section efficace ²³⁹Pu(n,2n) à 6,9 MeV utilisant une nouvelle méthode dite de recul, qui consiste à collecter durant une irradiation la quantité de ²³⁸Pu produite. L'efficacité de collecte est déterminée à 9 MeV. Les mesures, encore préliminaires, montrent un désaccord important avec l'évaluation JEFF3.3. Un second point réalisé à 7,5 MeV complétera cette étude.



Section efficace ²³⁹Pu(n,2n)²³⁸Pu. Les symboles représentent les données expérimentales et les courbes les données issues des bibliothèques de données nucléaires évaluées. D

ans le cadre du programme Simulation du CEA–DAM, la connaissance précise des sections efficaces des réactions nucléaires est indispensable pour l'interprétation des expérimentations nucléaires. Dans ce contexte, la réaction ²³⁹Pu(n,2n)²³⁸Pu présente un intérêt particulier. En effet, si la section efficace est relativement

bien connue entre 8 et 12 MeV, plusieurs modèles s'opposent au seuil de la réaction, entre 6 et 8 MeV, et au-delà de 12 MeV. La figure 1 présente trois jeux de données expérimentales. Le plus précis est une mesure d'activation réalisée à 14 MeV dans les années 1970 par Lougheed, mais publiée trente ans plus tard [1]. L'irradiation à très haut flux d'un échantillon de 239Pu ultrapur $(^{238}Pu/^{239}Pu \approx 10^{-11})$ a permis de produire sensiblement plus de 238Pu qu'il n'en existait initialement dans l'échantillon. Le deuxième jeu de données a été réalisé par J. Fréhaut [2] en 1985 à l'aide d'un compteur à neutrons. Le principal inconvénient de cette mesure est le très faible rapport signal à bruit, car la fission, qui émet en moyenne deux fois plus de neutrons, est 10 à 100 fois plus intense que la réaction (n,2n). Le troisième type de mesures consiste à extraire la section efficace à partir de la réaction 239 Pu(n,2n γ) 238 Pu [3]. Pour remonter à la section efficace, il faut alors connaître l'alimentation de chaque niveau excité du 238 Pu par la réaction d'intérêt, ce qui nécessite l'emploi de modèles et en limite la portée.

Récemment, nous avons proposé de fournir de nouvelles données par activation afin de discriminer les différents modèles et, si cela s'avère nécessaire, de fournir un jeu de données afin de réaliser une nouvelle évaluation. Bien que la mesure par activation soit la méthode la plus simple, elle nécessite un échantillon extrêmement pur en ²³⁸Pu. Aujourd'hui, les échantillons de ²³⁹Pu accessibles ont un ratio 238/239 au mieux de 2 × 10⁻⁵. Il a donc fallu avoir recours à une méthode qui permet de s'affranchir du ²³⁸Pu natif.

Face à l'impossibilité d'obtenir un échantillon suffisamment pur en ²³⁹Pu, le dispositif expérimental repose sur l'utilisation de dix cibles minces (4 µg/cm²) afin que les ²³⁸Pu produits par (n,2n) puissent s'en extraire et s'implanter dans un collecteur placé à 500 µm en vue directe du dépôt. Après irradiation, les collecteurs sont présentés devant un compteur α pour la mesure de l'activité du ²³⁸Pu. Cette technique suppose, par ailleurs, une bonne connaissance des efficacités de collecte des ²³⁸Pu produits lors de la réaction. Des mesures réalisées à l'aide de la réaction ²³⁸U(n,2n)²³⁷U à 7 MeV, 8 MeV et 15 MeV ont montré que celle-ci est d'environ 50 %, quelle

DYNAMIQUE ET RÉACTIONS NUCLÉAIRES



FIGURE 2 Schéma de principe de l'expérience n,2n sur NENUPHAR.

que soit l'énergie du neutron incident, et qu'elle est beaucoup plus faible qu'attendu. Cela nous oblige à déterminer l'efficacité de collecte pour la réaction ²³⁹Pu(n,2n)²³⁸Pu à l'énergie de 9 MeV pour laquelle les évaluations et les données sont toutes en accord. Afin d'obtenir un taux de réaction suffisant, une cible gazeuse de deutérium a été développée permettant de produire sur les échantillons, à l'aide de la réaction D+D, un flux de neutrons de quelque 10⁸ n/cm²/s. La figure 2 donne le schéma de principe de cette expérience réalisée sur l'accélérateur NENUPHAR du CEA-DAM Île-de-France. La durée des irradiations varie entre 200 et 400 heures. L'activité des collecteurs en 238 Pu ($t_{1/2}$ = 87 ans), de l'ordre de 10⁻⁵ Bq, est mesurée pendant plusieurs mois. La majeure partie (≈ 80 %) provient de la pulvérisation de la cible qui contient 1,3 × 10^{-5 238}Pu par atome de plutonium. Ainsi, par pulvérisation, une partie des ²³⁸Pu préexistants dans le dépôt peut être transférée vers le collecteur. La quantité de ²³⁸Pu pulvérisée est alors déterminée à partir des rapports isotopiques (238/239) et soustraite.

Deux campagnes d'irradiation réalisées à 9 MeV ont permis de vérifier la reproductibilité de la méthode et d'extraire l'efficacité de collecte pour chacun des 10 dépôts (figure 3, à gauche). L'efficacité de collecte mesurée dans la réaction ²³⁸U(n,2n) pour deux différents dépôts (figure 3, à droite) est assez similaire. Une seconde irradiation réalisée à 6,88 MeV neutron et utilisant les efficacités de collecte obtenues à 9 MeV a permis d'extraire la section efficace moyennée sur les dix échantillons ²³⁹Pu(n,2n)²³⁸Pu (figure 1). Le résultat encore préliminaire montre cependant que l'évaluation JEFF3.3 n'est pas compatible avec nos points de mesure. Une nouvelle campagne de mesure réalisée à 7,5 MeV fournira un nouveau point en énergie et permettra de vérifier la cohérence de nos mesures.

En conclusion, une nouvelle méthode a été développée et utilisée pour extraire la section efficace ²³⁹Pu(n,2n)²³⁸Pu à une énergie de 6,88 MeV. Bien que relatives, ces mesures confirment le désaccord entre l'évaluation JEFF3.3 et les précédentes données. Une nouvelle mesure réalisée à 7,5 MeV permettra de corroborer cette conclusion. Cette méthode ne peut cependant pas être appliquée au-delà de 12 MeV, le faisceau de neutrons n'étant plus monocinétique, et il faut alors avoir recours à des méthodes du type compteur à neutrons. Installé auprès de NFS à GANIL [4], le détecteur SCONE [5], en cours d'étude, associé à une chambre à fission, devrait permettre de réaliser ces mesures en améliorant sensiblement le rapport signal à bruit par rapport aux mesures de Fréhaut *et al.*



Efficacités de collecte (à gauche) dans la réaction ²³⁹Pu(n,2n) pour les dix dépôts, (à droite) dans la réaction ²³⁸U(n,2n) pour trois énergies neutrons et deux dépôts différents.

RÉFÉRENCES [1] **R. W. LOUGHEED** *et al.*, «²³⁹Pu and ²⁴¹Am(n,2n) cross-section measurements near E_n = 14 MeV», *Radiochim. Acta*, **90**, p. 833 (2002). [2] **J. FÉHAUT** *et al.*, *Proc. Conf. Santa Fe 1985*, edited by P. Young *et al.*, Gordon and Breach Science Publishers, p. 1561 (1985). [3] **I. A. BERNSTEIN** *et al.*, «²³⁹Pu(n,2n)²³⁹Pu cross section deduced using a combination of experiment and theory», *Physical Review C*, **65**, 021601(R) (2002). [4] X. LEDOUX, Colloque Ganil 2017 <u>https://ganilcolloque.sciencesconf.org/data/X. Ledoux.pdf</u>. [5] **G. BÉLIER**, «Direct measurement of (n,xn) reaction cross section on ²³⁹Pu», *Letter of Intent #20 on SPIRAL2*.

FISSION NUCLÉAIRE

REVUE SUR LA MODÉLISATION DE LA DYNAMIQUE DE FISSION

H. GOUTTE CEA - DRF. GANIL

> É. BAUGE CEA - DAM Île-de-France

A. NICOLAS CEA - DES Saclay

C. DE SAINT JEAN CEA - DES Cadarache

Processus complexe, à la croisée de nombreux domaines de recherche en physique nucléaire, la fission met en jeu à la fois des propriétés de structure des noyaux et des propriétés dynamiques. Afin de réaliser des prédictions d'une grande précision et de les fonder sur des modèles aussi fondamentaux que possible, un renouveau des études de fission a eu lieu ces dernières années. Un défi consiste à bâtir un formalisme unifié, cohérent pour traiter sur un pied d'égalité le système fissionnant, la dynamique de fission, les fragments émis et leurs modes de décroissance. Les équipes du CEA s'attachent à relever ce défi et font école, comme en témoignent les nombreuses études récentes réalisées dans la communauté.

ne approche globale de la fission est-elle possible ? Associée à de très nombreuses observables expérimentales, comme les distributions en masse, charge et énergie cinétique des fragments, les sections efficaces de fission, les émissions de gamma et neutrons prompts et retardés, etc., la fission est très difficile à

décrire dans son ensemble. Des avancées notables ont été réalisées ces dernières années sur des sous-ensembles du processus, avec notamment des travaux sur la dynamique de fission (DAM et DRF), les produits de fission (DAM et DRF) et la désexcitation des fragments (DES). Peut-on aller encore plus loin et relier ces modèles les uns aux autres dans un formalisme cohérent ? En d'autres mots, peut-on tendre vers une représentation multiéchelles rigoureuse de la fission pour décrire de façon cohérente, avec des incertitudes maîtrisées et propagées :

• la voie d'entrée, c'est-à-dire les conditions initiales dans lesquelles se trouve le noyau fissionnant ;

- la dynamique de fission ;
- la compétition avec les autres voies de désexcitation;

• les fragments de fission et leurs modes de décroissance. En pratique, cela soulève beaucoup de questions, mais des discussions ont lieu et des avancées significatives sont réalisées.

Dans cette optique, les approches microscopiques dynamiques fondées sur des hypothèses de champ moyen sont



Surface d'énergie potentielle pour la fission de l^{/238}U. Le code couleur représente l'énergie de liaison, calculée dans le formalisme Hartree-Fock-Bogoliubov avec l'interaction de Gogny DIS, pour des coordonnées collectives d'élongation et d'asymétrie.





Profils de densité pour différentes élongations au voisinage de la scission dans l'²³⁸U, calculés dans le formalisme Hartree-Fock-Bogoliubov avec l'interaction de Gogny DIS.

particulièrement adaptées. Elles permettent de traiter sur un pied d'égalité les propriétés de structure du noyau fissionnant, les fragments de fission et la dynamique du processus.

De très nombreuses études ont été réalisées dans ce domaine ces cinq dernières années (voir par exemple les références rassemblées dans les articles de revue [1] et [2]).

Parmi les approches microscopiques, il est important de mentionner la méthode de la coordonnée génératrice dépendante du temps à l'approximation gaussienne. Cette approche comporte deux étapes de calcul. La première consiste en la description d'une surface d'énergie potentielle multidimensionnelle depuis l'état fondamental jusqu'à la scission. La seconde porte sur l'évolution dynamique d'un paquet d'ondes initial dans cette surface, en supposant le mouvement adiabatique, c'est-à-dire sans couplage entre degrés de liberté collectifs et intrinsèques. Deux articles pionniers [3,4] présentent l'approche développée et initialement mise en œuvre au CEA-DAM, ainsi que les premières applications à la fission en 1991 et 2005 (figure 1 et 2). Depuis, le CEA-DAM poursuit et amplifie ses recherches (voir article de N. Dubray dans ce numéro). Il a, de plus, fait école, comme en témoignent les nombreuses publications de la communauté internationale issues de laboratoires des États-Unis, de Chine, Croatie, Pologne, etc. Cette approche est maintenant couramment utilisée pour connaître l'influence des forces effectives, de l'appariement ou des conditions initiales sur les distributions de fragments. À noter que ce même formalisme a été récemment utilisé avec des modèles de champ moyen relativiste pour étudier par exemple l'effet de la température sur les distributions en charge des fragments issus de la fission du ²²⁶Th [5].

Plusieurs pistes d'évolution de ces approches sont actuellement à l'étude. Des développements sont notamment en cours pour prendre en compte plus de degrés de liberté collectifs et effectuer la propagation dynamique dans des surfaces à 3, 4, voire 5 dimensions. Cela permettrait d'avoir accès à un ensemble plus grand de configurations de scission et ainsi de mieux reproduire les distributions multimodales observées expérimentalement dans certains actinides. D'autres pistes d'études portent sur une meilleure description de la scission ou sur le traitement de phénomènes diabatiques.

Parallèlement à ces développements, des avancées récentes ont été réalisées avec des approches de type *Time-Dependent Hartree-Fock* [6]. Complémentaires des approches décrites plus haut, ces théories ne font pas d'hypothèse adiabatique, ont une définition claire de la scission, mais sous-estiment complètement les fluctuations des degrés de liberté collectifs. Le défi actuel pour ces approches est la prise en compte des fluctuations quantiques et des brisures spontanées de symétrie.

En conclusion, la description de la fission à l'aide de théories microscopiques est en plein essor. Parallèlement à ces développements théoriques, des mesures simultanées de multiplicité de neutrons prompts et de distributions en masse, charge et énergie cinétique de fragments de fission, où chaque fragment est identifié en masse et charge, envisagées notamment auprès de NFS au GANIL, élargiraient considérablement notre connaissance du processus de la fission et constitueraient un banc de test particulièrement exigeant pour ces approches théoriques.

RÉFÉRENCES [1] N. SCHUNCK, L. M. ROBLEDO, «Microscopic theory of nuclear fission: a review», *Rep. Prog. Phys.*, 79, 116301 (2016). [2] K.-H. SCHMIDT *et al.*, «Review on the progress in nuclear fission-experimental methods and theoretical descriptions», *Rep. Prog. Phys.*, 81, 106301 (2018). [3] J.-F. BERGER, M. GIROD, D. GOGNY, «Microscopic analysis of collective dynamics in low energy fission», *Nucl. Phys. A*, 428, p. 23 (1984). [4] H. GOUTTE, J.-F. BERGER, P. CASOLI, D. GOGNY, «Microscopic approach of fission dynamics applied to fragment kinetic energy and mass distributions in ²³⁸U», *Phys. Rev. C*, 71, 024316 (2005). [5] H. TAO *et al.*, «Microscopic study of induced fission dynamics of ²²⁶Th with covariant energy density functionals», *Phys. Rev. C*, 96, 024319 (2017). [6] G. SCAMPS *et al.*, «Superfluid dynamics of ²³⁸Fm fission», *Phys. Rev. C*, 92, 011602(R) (2015).

FISSION NUCLÉAIRE

ZOOM SUR LA REPRÉSENTATION MICROSCOPIQUE DE LA TRANSITION DANS LES FERMIUMS



CEA - DAM Île-de-France

N. SCHUNCK

Lawrence Livermore National Laboratory, États-Unis

En physique nucléaire, une description est dite microscopique lorsqu'elle repose sur un formalisme de bas niveau, préférant quand cela est possible un traitement explicite plutôt que phénoménologique de certains phénomènes. En caricaturant légèrement, on prête aux méthodes microscopiques un bon pouvoir prédictif au détriment d'une précision moindre en comparaison des méthodes plus phénoménologiques. La description microscopique de la fission nucléaire de basse énergie repose sur des méthodes et des formalismes très complexes et coûteux, ce qui explique que la production par ces approches de données comparables aux données expérimentales a été très limitée lors des années ayant suivi leur formulation (1970). Toutefois, depuis les années 2000, des avancées théoriques couplées à l'utilisation croissante de supercalculateurs ont permis d'utiliser des méthodes microscopiques pour reproduire plusieurs caractéristiques de la fission nucléaire pour quelques systèmes composés. Parmi ces aspects caractéristiques, le changement drastique (transition) de type de fission entre certains isotopes proches est un bon test de validité pour les modèles théoriques visant à décrire la fission nucléaire. Dans l'étude présentée ici, la transition entre fission asymétrique et fission symétrique dans les isotopes du fermium (Z = 100) est reproduite par une méthode microscopique [1]. Ce travail a été mené dans le cadre de la collaboration DAM-NNSA «Basic science».

MESURE EXPÉRIMENTALE DE LA TRANSITION

Lors d'une réaction de fission nucléaire, la distribution en charge et en masse des fragments dépend principalement du système fissionnant et de son énergie d'excitation. Cette répartition est appelée fragmentation. À basse énergie d'excitation, la fragmentation la plus répandue parmi les noyaux est la fragmentation asymétrique, pour laquelle les fragments ayant la plus forte probabilité d'apparition sont de tailles très différentes





FIGURE 1

En haut : densité locale de probabilité obtenue par un calcul HFB pour un système fissionnant sous l'action de contraintes de déformation brisant la symétrie gauchedroite. En bas : surface d'énergie potentielle pour le système fissionnant ²⁵⁶Fm. L'échelle de couleur représente l'énergie totale de liaison en MeV, calculée par un solveur de type HFB. Les zones noires et blanches de la surface sont volontairement ignorées lors de la propagation dynamique. (un « gros » et un « petit » fragment). Pour une fragmentation symétrique, les fragments ayant la plus forte probabilité d'apparition sont de tailles similaires. De nombreuses mesures de fragmentation ont été réalisées dans les années 1970 pour plusieurs isotopes du fermium (Z = 100), mettant en évidence une transition centrée sur l'isotope ²⁵⁶Fm entre fragmentation asymétrique (²⁵⁴Fm) et fragmentation symétrique (²⁵⁸Fm).

DESCRIPTION THÉORIQUE DE LA TRANSITION

Sur le plan théorique, la fission nucléaire peut être vue comme la propagation dans un espace de déformation d'un paquet d'ondes représentant le système fissionnant, d'un état de déformation proche de l'état de repos à un état de déformation où le système est séparé en plusieurs fragments.

Pour décrire de façon microscopique cette propagation, nous utilisons un enchaînement de deux méthodes : dans un premier temps, des surfaces d'énergie potentielle (SEP) sont produites avec un solveur de type Hartree-Fock-Bogoliubov (HFB) utilisant une interaction effective nucléon-nucléon de type Gogny. Ensuite, ces surfaces d'énergie potentielle sont utilisées comme états de base d'une propagation dynamique de type *Time-Dependent Generator Coordinate Method* avec approximation des recouvrements gaussiens (TDGCM + GOA).

Production de surfaces d'énergie potentielle avec HFB

Une SEP est un ensemble de solutions HFB dont les contraintes en déformation balayent un espace de déformation prédéterminé. Pour la description des fragmentations associées à la fission nucléaire de basse énergie, l'espace de déformation doit au minimum inclure les déformations quadrupolaires (q_{2o}) et octupolaires (q_{3o}). Un exemple de résultat HFB est donné sur la figure 1 (en haut). Obtenir une surface suffisamment raffinée est très coûteux en ressources numériques, puisque chaque point de la surface demande une résolution complète HFB. Un exemple de SEP est donné sur la figure 1 (en bas). Plusieurs algorithmes sont utilisés conjointement lors de la génération d'une SEP afin de minimiser le temps total de calcul (environ 300 000 heures CPU), la présence indésirable de minima locaux ou encore les accidents de convergence HFB.

Propagation dynamique

Les solutions HFB constituant les SEP sont ensuite utilisées comme états de base pour une propagation de type TDGCM + GOA. Cette résolution s'apparente à la résolution d'une équation de Schrödinger dépendant du temps. Le solveur FELIX



FIGURE 2

Comparaison entre distributions en masse des fragments observées (symboles) et calculées (ligne rouge).

utilisé pour cette résolution emploie la méthode des éléments spectraux en dimension quelconque. Un état collectif initial est construit en fonction de l'énergie d'excitation du système fissionnant, puis le solveur calcule la propagation temporelle de cet état.

Extraction des fragmentations

En pondérant les propriétés statiques des configurations de sortie des SEP par les probabilités de sortie données par la propagation dynamique, on peut construire les distributions en charge ou en masse des fragments et les comparer aux distributions expérimentales (figure 2). La transition entre fission asymétrique et fission symétrique dans les isotopes du fermium est bien reproduite dans notre approche.

RÉFÉRENCES [1] D. RÉGNIER, N. DUBRAY, N. SCHUNCK, «From asymmetric to symmetric fission in the fermium isotopes within the time-dependent GCM formalism», Phys. Rev. C, 99, 024611 (2019).

FISSION NUCLÉAIRE

ZOOM SUR LES OBSERVABLES DE FISSION DANS FIFRELIN

Les principales observables de fission sont les rendements indépendants en masse, les spectres et les multiplicités des neutrons et des gamma prompts. Ces données nucléaires permettent l'estimation, par les codes de transport, de la fluence et des dommages cuve (problématiques d'intégrité et d'allongement de la durée de vie des cuves de réacteur), et de l'échauffement nucléaire (problématiques des réflecteurs lourds). Avec une granulométrie plus fine (par exemple la multiplicité neutron en fonction du nombre de masse des fragments ($\bar{v}(A)$), ces données permettent d'affiner notre connaissance du processus de fission. En effet, la forme de la distribution ($\overline{v}(A)$) est directement reliée à la déformation des fragments à la scission. Le calcul des observables de fission dans le code Monte-Carlo FIFRELIN repose sur la notion de réalisation nucléaire [1,2]. Une observable de fission cible est choisie pour ajuster les trois à quatre paramètres libres de la simulation, puis toutes les autres observables sont calculées.





l'heure actuelle, des données expérimentales sont utilisées pour estimer une partie des caractéristiques des fragments primaires (avant émission des neutrons prompts) : la masse A, la charge nucléaire Z et l'énergie cinétique E_k. Les autres caractéristiques, comme l'énergie d'excitation, le spin et la parité, sont estimées à

partir de modèles. La répartition de l'énergie d'excitation totale sur les deux fragments d'une fission binaire (E) ainsi que l'assignement de leur spin (J) et de leur parité (π) nécessitent trois à quatre paramètres ajustables. Ces paramètres gèrent la loi en rapport de température et la distribution des spins initiaux des fragments [3]. La désexcitation des fragments doit permettre, à partir de ces quelques paramètres, de reproduire une observable cible (par exemple la multiplicité neutron prompte \overline{v}). Une fois cette première étape franchie, les autres observables de fission peuvent être prédites. Pour ce faire, une fois les caractéristiques A, Z, E, J, π estimées, le code FIFRELIN simule un ensemble de réalisations nucléaires (schéma de niveaux + largeurs de transition partielles) basées sur un schéma de structure obtenu expérimentalement à basse énergie et complété à plus haute énergie par des modèles de densités de niveaux (phénomé-



FIGURE 1

Exemple de cascades neutron-gamma réalisées à partir de la connaissance du schéma de niveaux et des différentes largeurs de transition partielles d'un niveau initial vers un niveau final.



FIGURE 2

Multiplicité de neutrons prompts de fission du ²⁵²Cf(sf) en fonction de l'énergie cinétique totale TKE des fragments de fission pour deux masses complémentaires d'une fission binaire.

nologiques ou microscopiques), de fonctions forces gamma (également phénoménologiques ou microscopiques) et de coefficients de transmission neutrons (prétabulés à partir de calculs de modèles optiques). La <u>figure 1</u> représente un exemple de réalisation nucléaire faisant intervenir le schéma de niveaux d'un noyau excité et du noyau résiduel obtenu après l'émission d'un neutron.

Sans être représentative d'un cas réel, la <u>figure 1</u> montre deux cascades possibles à partir du même état initial : une émission gamma aboutissant au niveau fondamental du noyau de masse A et une émission neutron-gamma aboutissant au niveau fondamental du noyau A - 1.

Un exemple d'observable de fission complexe (complexe en ce sens qu'il ne s'agit pas d'une simple grandeur scalaire) est reporté sur la **figure 2**, où la multiplicité des neutrons est représentée en fonction de l'énergie cinétique totale (TKE) de deux fragments complémentaires de masses 102 et 150. La multiplicité calculée, comparée à l'expérience, est représentée pour chacune des masses et pour la somme des deux **[4]**. Les données expérimentales ont été mesurées au JRC (Joint Research Center) de Geel en Belgique.

Cette observable permet de savoir dans quelle plage d'énergie cinétique (et en première approximation quelle plage d'énergie d'excitation) le désaccord entre calcul et expérience intervient. Dans notre exemple, la multiplicité neutron du fragment lourd (A = 150) est surestimée aux basses valeurs de TKE, laissant supposer un biais potentiel dans le schéma de niveaux à haute énergie d'excitation. En effet, les fragments de faible énergie cinétique sont associés à des déformations importantes à la scission et donc à des énergies d'excitation importantes, favorisant ainsi l'émission neutron. Toutes les observables de fission ne sont pas reproduites par le code avec la même qualité et il existe toujours une difficulté à reproduire les observables neutron sans dégrader les observables gamma et vice versa. Les spectres de neutrons, par exemple, sont sujets encore de nos jours à de grandes disparités pour un même noyau fissionnant et le calcul des spectres gamma, quant à lui, dépend beaucoup des données de structure à basse énergie (positions des niveaux, spin, parité, temps de vie, intensités gamma, coefficients de conversion interne, etc.).

À moyen terme de nouvelles expériences, couplant par exemple des détecteurs neutron-gamma à une chambre à fission, permettront de mesurer les corrélations entre les observables de fission pour contraindre plus finement les modèles. De même, la structure nucléaire de nombreux noyaux a été améliorée depuis la dernière mise à jour de la base de données internationale RIPL-3, promettant une amélioration dans le calcul de la désexcitation.

RÉFÉRENCES [1] F. BECVAR, «Simulation of gamma cascades in complex nuclei with emphasis on assessment of uncertainties of cascade-related quantities», *Nucl. Instr. Meth. A*, 417, p. 434 (1998). [2] D. RÉGNIER *et al.*, «An improved numerical method to compute neutron/gamma deexcitation cascades starting from a high spin state», *Comput. Phys. Commun.*, 201, p. 19 (2016). [3] O. LITAIZE, O. SÉROT, «Investigation of phenomenological models for the Monte-Carlo simulation of the prompt fission neutron and γ emission», *Phys. Rev. C*, 82, 054616 (2010). [4] O. LITAIZE *et al.*, «Prompt particle emission in correlation with fission fragments», *EPI Web of Conf.*, 146, 04006 (2017).

FISSION NUCLÉAIRE

REVUE DES EXPÉRIENCES SUR LA FISSION

Cet article décrit succinctement quelques avancées récentes obtenues par les équipes de trois directions opérationnelles du CEA autour des mesures relatives aux observables de fission (rendements de fission, spectres et multiplicités des particules promptes). Ces mesures ont principalement deux objectifs: (1) répondre aux demandes spécifiques provenant des applications civiles ou militaires et (2) améliorer notre compréhension du processus de fission et de la dynamique nucléaire. En participant activement au développement de nouveaux instruments qui utilisent des techniques de mesure innovantes, le CEA montre son indéniable dynamisme autour de ces activités expérimentales.

FIGURE 1

Exemples de résultats obtenus sur LOHENGRIN. À gauche, mesure du rendement indépendant du ¹³⁴Xe $(^{239}Pu(n_{th}f))$, utilisé pour l'évaluation de la combustion du combustible MOx [1]. À droite, matrice de corrélations expérimentales des rendements en masse (241Pu(n_{th}f)) [2].



O. SÉROT E CEA - DES Cadarache

> **A. LETOURNEAU** CEA - DRF Saclay, lrfu/DPhN

G. BÉLIER CEA - DAM Île-de-France



epuis une grosse décennie, les activités expérimentales autour de la fission connaissent un regain d'intérêt spectaculaire auquel le CEA participe activement. Ces activités sont relatives aux mesures des principales observables de fission que sont les rendements de fission et les caractéristiques des particules promptes (neutrons,

gamma) émises. La recherche de corrélations pertinentes entre ces observables fait également l'objet de nombreuses études, car ces corrélations fournissent des informations précieuses pour améliorer notre compréhension du processus de fission.

RENDEMENTS DE FISSION

Nous ne disposons toujours pas à l'heure actuelle de modèles théoriques suffisamment précis pour évaluer l'ensemble des rendements de fission. C'est pourquoi la mesure de ces rendements reste incontournable. Plusieurs instruments sont exploités pour ces mesures qui reposent sur des techniques expérimentales très différentes. Par exemple, en utilisant la technique de la cinématique directe, le spectromètre de masse LOHENGRIN de l'Institut Laue-Langevin (ILL), à Grenoble, permet entre autres de répondre à certains besoins spécifiques (figure 1, à gauche) et de fournir les matrices de corrélations expérimentales associées aux rendements en masse (figure 1, à droite) utiles pour les futures évaluations des rendements de fission.

Le spectromètre VAMOS du GANIL utilise la technique de la cinématique inverse pour produire des noyaux fissionnants (soit par réactions de transfert, soit par fusion). Entre autres résultats, les expériences VAMOS [3] ont pu mettre en évidence deux composantes asymétriques contribuant aux rendements en masse. La première est centrée autour d'une charge nucléaire moyenne <Z> = 52 et la deuxième autour de <Z> = 55. Ces charges nucléaires moyennes restent inexpliquées d'un point de vue théorique. L'expérience SOFIA [4], réalisée au



85 93 98 102 105 108 113 122 125 128 131 134 137 140 143 146 149 152 155 158



À gauche, énergies moyennes (points noirs) et, à droite, multiplicité moyenne (points verts) des neutrons prompts émis lors de la réaction ²³⁹Pu(n,f) (collaboration DAM-NNSA «*Basic Science*»).

GSI (Allemagne), utilise la technique de la cinématique inverse avec des faisceaux relativistes. Le noyau fissionnant est formé avec une énergie d'excitation moyenne d'environ 12 MeV (voir article suivant). La masse et la charge nucléaire des produits de fission ont pu être déterminées avec une résolution inégalée jusqu'à présent.

SPECTRES ET MULTIPLICITÉS DES NEUTRONS ET GAMMA PROMPTS DE FISSION

Le spectre des neutrons prompts issu de la réaction ²³⁹Pu(n,f) a été mesuré récemment (en 2017) entre un et plusieurs centaines de mégaélectronvolts à l'aide du dispositif Chi-Nu installé au Los Alamos Neutron Science Center, aux États-Unis. L'énergie moyenne du spectre et la multiplicité des neutrons prompts ont pu être déterminées (figure 2). La sensibilité obtenue (seuil en énergie des neutrons de fission) permet de mesurer la composante d'émission par le noyau composé avec une précision nettement améliorée. On peut noter également les mesures récentes des spectres de gamma prompts de fission (réaction ²³⁸U(n,f)), réalisées sur l'accélérateur Van de Graaff du CEA–DAM pour trois énergies du neutron incident (E_n = 1,6 ; 5,1 et 15,0 MeV). Ces mesures ont montré pour la première fois un durcissement du spectre avec l'énergie E_n . Ce résultat contredit l'hypothèse (retenue dans les évaluations) de l'invariance du spectre avec E_n .

CORRÉLATIONS ENTRE OBSERVABLES DE FISSION

Le nouvel instrument FIPPS installé à l'ILL devrait permettre d'étudier de telles corrélations. En utilisant une cible scintillante et en mesurant les raies gamma issues des produits de fission, le détecteur FIPPS permettra de connaître l'énergie d'excitation et le spin des fragments de fission et, donc, de mieux comprendre le partage de l'énergie d'excitation totale entre les deux fragments ainsi que le mécanisme générant le spin de ces fragments.

Mentionnons également un nouveau dispositif appelé FALSTAFF (figure 3, à droite) qui est en phase de développement [5,6]. FALSTAFF permettra de mesurer la vitesse et l'énergie cinétique des fragments de fission détectés en coïncidence (d'où la présence de deux bras, un par fragment). Il sera ainsi possible d'accéder aux masses avant et après l'émission des neutrons prompts et, donc, de déterminer la multiplicité des neutrons en fonction de la masse. Après la construction du deuxième bras, FALSTAFF devrait être utilisé auprès de l'installation NFS du GANIL (neutrons rapides).



FIGURE 3

À gauche, dispositif FIPPS (ILL) avec cible scintillante (collaboration DRF-DAM). À droite, dispositif FALSTAFF développé par la DRF.

RÉFÉRENCES [1] Y. K. GUPTA *et al.*, «Fission fragment yield distribution in the heavy-mass region from the ²³⁹Pu et du²⁴¹Pu, thèse de doctorat délivrée par l'université Grenoble-Alpes et soutenue le 5 octobre 2018. [3] D. RAMOS *et al.*, «Isotopic fission-fragment distributions of ²³⁸U, ²³⁰Np, ²⁴⁰Cm and ²⁵⁰Cf produced through inelastic scattering, transfer, and fusion reactions in inverse kinematics», *Phys. Rev. C*, 95, 054612 (2018). [4] É. PELLEREAU *et al.*, «Accurate isotopic fission yields of electromagnetically induced fission of ²³⁸U measured in inverse kinematics at relativistic energies», *Phys. Rev. C*, 95, 054603 (2017). [5] L. THULLIEZ, *Caractérisation des fragments de fission et développement du dispositif expérimental FALSTAFF*, thèse de doctorat délivrée par l'université Paris-Saclay et soutenue le 25 septembre 2017. [6] A. CHIETERA *et al.*, «Recent developments of the FALSTAFF experimental setup», *EPJ Web of Conference*, 193, 04003 (2018).

FISSION NUCLÉAIRE

ZOOM SUR L'EXPÉRIENCE SOFIA

Les expériences SOFIA [1,2,3], réalisées au GSI, visent à fournir des données de référence d'une précision inégalée afin de produire des contraintes expérimentales fortes pour la description du processus de fission. Le dispositif SOFIA exploite les faisceaux d'ions lourds relativistes produits par l'installation du GSI. Le noyau fissionnant est produit par fragmentation à une énergie proche de 700 MeV par nucléon et est envoyé sur une cible de noyaux lourds (plomb et uranium), où il subit une excitation coulombienne (absorption d'un photon) à l'issue de laquelle il se désexcite par fission. Cette approche expérimentale innovante permet pour la première fois l'identification de tous les fragments de fission avant leur décroissance radioactive. À ce jour, deux expériences ont eu lieu, en 2012 et 2014, permettant l'étude de la fission de divers actinides et préactinides. Dans l'ensemble des données SOFIA, le cas de l'uranium 236 est à part. La seconde expérience (2014) lui était entièrement dédiée et il constitue le noyau pour lequel les données sont les plus précises.





a fission de l'²³⁶U a été largement étudiée en cinématique directe, *via* la capture neutronique sur une cible d'uranium 235, et la comparaison de ces résultats montre l'influence de l'énergie d'excitation ajoutée dans le système. Aucune mesure exhaustive de rendements isotopiques n'existait à d'autres énergies qu'à l'énergie thermique. Nos données

procurent pour la première fois un jeu complet de rendements de fission à plus haute énergie d'excitation (8,2 MeV équivalent neutron sur l'uranium 235). En deux jours de prise de données, nous avons accumulé plus de deux millions d'événements de fission, permettant une précision statistique sans équivalent. La figure 1 reprend l'ensemble des rendements de fission mesurés sur un graphe bidimensionnel.

L'analyse a été menée dans sa totalité et les matrices de covariance associées au processus d'extraction des données expérimentales ont été produites. Les rendements isotopiques de ces fragments secondaires peuvent être sommés le long des chaînes isobariques afin d'en déduire des données plus intégrales, à savoir les rendements cumulés de certains produits de fission (PF). Ces résultats peuvent être comparés à des données issues de mesures d'activation (spectroscopie γ associée ou non à une séparation chimique) obtenues en fission induite par neutrons. La **figure 2** illustre la comparaison entre les données SOFIA et celles obtenues par activation. Les données SOFIA (en rouge) sont positionnées à 8,2 MeV équivalent neutron. Les données obtenues en fission induite par neutrons (ANL, Chapman, Laurec et TUNL) permettent d'étudier ces rendements en fonction de l'énergie du neutron incident.

Le graphe afférent aux mesures du baryum 140 est assez caractéristique des difficultés rencontrées par les mesures d'activation, avec des déviations systématiques entre mesures. La mesure SOFIA permet de trancher définitivement, car, outre la forte statistique obtenue, cette mesure ne dépend d'aucune donnée nucléaire et l'incertitude liée à l'efficacité de détection est parfaitement maîtrisée. Elle indique que la mesure la plus récente (TUNL) est correcte et que les données Argonne montrent une normalisation inexacte. Le zirconium 95 (en haut à droite **figure 2**) montre un comportement similaire. L'interpolation des données TUNL est parfaitement compatible avec la donnée SOFIA alors que les données ANL apparaissent en

FIGURE 1

Fission de l'uranium 236 telle qu'elle est mesurée par SOFIA. Plus de 300 fragments de fission sont identifiés et leur rendement est mesuré.



FIGURE 2

Rendements cumulés Y de différents produits de fission mesurés par activation, comparés aux données SOFIA (en rouge). Baryum 140 et zirconium 95 en haut, néodyme 147 et molybdène 99 en bas.

moyenne 8 % trop élevées. Le cas du néodyme 147 est assez similaire à celui du zirconium 95, mais avec une erreur de normalisation plus proche de 15 % dans les données ANL. Les données TUNL semblent à nouveau les mieux normalisées et les plus précises. On notera en outre qu'elles sont parfaitement compatibles avec les données de J. Laurec. À l'opposé, la situation du molybdène 99 (en bas à droite sur la **figure 2**) est très spécifique et problématique. La donnée TUNL montre une barre d'erreur faible, mais semble largement sous-évaluée (biais supérieur à 10 %), alors que les données Los Alamos sont ici parfaitement compatibles avec SOFIA. On notera aussi que l'interpolation des données de J. Laurec est aussi en accord total avec la mesure SOFIA. Notons que cet isotope est utilisé aux États-Unis comme normalisation et que beaucoup de rendements de produits de fission sont mesurés par rapport à celui-ci.

En outre, SOFIA permet de générer la totalité des rendements isobariques alors que les mesures radiochimiques voient leur complétude très limitée. La figure 3 reprend la totalité des rendements isobariques mesurés par SOFIA comparés aux rendements de TUNL pour des neutrons incidents de 8,9 MeV. Même si les données SOFIA ne produisent des rendements qu'à une unique énergie neutron moyenne, elles permettent de valider les jeux de données radiochimiques. Ainsi, les données les plus récentes obtenues à TUNL semblent globalement d'excellente facture et représenter un saut qualitatif très significatif par rapport aux mesures antérieures. Seule la mesure du molybdène 99 semble montrer une pathologie très significative. Les données de J. Laurec ne portent que sur deux énergies de neutron, mais elles apparaissent compatibles avec les données SOFIA et ne montrent pas l'anomalie de la mesure du molybdène 99 de TUNL. La régularité des données SOFIA sur l'ensemble de la gamme illustre leur précision et renforce leur statut de données de référence.



Rendements isobariques mesurés par SOFIA et comparés à 6 rendements cumulés (⁹⁵Zr et ⁹⁷Zr, ¹³²Te, ¹⁴⁰Ba, ¹⁴³Ce et ¹⁴⁷Nd) obtenus à TUNL.

RÉFÉRENCES [1] J.-F. MARTIN *et al.*, «Studies on fission with ALADIN: precise and simultaneous measurement of fission yields, total kinetic energy and total prompt neutron multiplicity at GSI», *Eur. Phys. J. A*, **51**, p. 174 (2015). [2] É. PELLEREAU *et al.*, «Accurate isotopic fission yields of electromagnetically induced fission of ²³⁸U measured in inverse kinematics at relativistic energies», *Phys. Rev. C*, **95**, 054603 (2017). [3] A. CHATILLON *et al.*, «Experimental study of nuclear fission along the thorium isotopic chain: from asymmetric to symmetric fission», *Phys. Rev. C*, **99**, 054603 (2017). [3] A. CHATILLON *et al.*, «Experimental study of nuclear fission along the thorium isotopic chain: from asymmetric to symmetric fission», *Phys. Rev. C*, **99**, 054603 (2017).

FISSION NUCLÉAIRE

ZOOM SUR LES MESURES DES PRODUITS DE FISSION AVEC LE SPECTROMÈTRE LOHENGRIN

A. CHEBBOUBI
 O. SÉROT
 O. LITAIZE
 D. BERNARD
 CEA - DES Cadarache

Une collaboration menée par le CEA-DES avec le Laboratoire de physique subatomique et de cosmologie (LPSC) et l'Institut Laue-Langevin (ILL) étudie le processus de fission à l'aide du spectromètre LOHENGRIN de l'ILL à Grenoble. De nouvelles méthodes ont été développées afin d'améliorer la qualité des mesures. Un programme mené sur des observables complémentaires aux rendements en masse et isotopique a récemment été mis en place afin de tester les hypothèses sous-jacentes des différentes théories modélisant ce processus nucléaire. es études sur les réacteurs nucléaires actuels et futurs reposent de plus en plus sur des outils numériques. Le développement des capacités de calcul a permis d'améliorer sensiblement la précision des codes de transport des neutrons. Les limites actuelles en matière de précision achoppent de plus en plus sur les données nucléaires. Ces dernières sont issues

d'un processus d'évaluation qui combine les connaissances expérimentales et théoriques. Afin d'augmenter la précision des données nucléaires évaluées, les efforts dans ces deux domaines doivent perdurer. Dans le cadre d'une collaboration avec le LPSC et l'ILL, le CEA s'est engagé depuis plus de dix ans dans l'étude des caractéristiques des produits de fission (PF) à l'aide du spectromètre LOHENGRIN de l'ILL.

Le spectromètre LOHENGRIN de l'ILL a été construit dans les années 1970. La **figure 1** présente un schéma simplifié de ce spectromètre. Une cible fissile est placée près du cœur du réacteur de l'ILL sous un flux de neutrons thermiques de l'ordre de 10¹⁴ n·cm⁻²·s⁻¹. Une infime partie des produits de fission créés dans la cible entre dans le spectromètre (angle solide inférieur à 10⁻⁵ sr), dans lequel ils sont déviés par un dipôle magnétique et un condensateur. La combinaison de ces deux éléments permet de sélectionner les PF selon le rapport de leur masse et de leur charge ionique A/q et le rapport de leur énergie cinétique et de leur charge ionique E_k/q. Un dernier dipôle magnétique permet d'augmenter la focalisation du faisceau de PF sélectionnés. Ainsi, deux points focaux sont accessibles selon l'utilisation de ce dernier aimant. Dans l'aire expérimentale, plusieurs



FIGURE 1 Schéma du spectromètre LOHENGRIN de l'ILL.





À gauche, photographie de l'aire expérimentale avec une chambre d'ionisation au niveau du point focal 1. À droite, spectre issu de la chambre d'ionisation pour un réglage donné du spectromètre LOHENGRIN.

détecteurs peuvent être disposés afin de mesurer différentes caractéristiques des PF telles que leurs masse, charge nucléaire, énergie cinétique, moment angulaire total, etc.

La première observable d'intérêt pour l'étude des PF est le rendement en masse. Cela correspond au taux de production par fission d'un PF ayant une masse A. Comme décrit précédemment, le spectromètre LOHENGRIN sélectionne des triplets (A,q,E_k) qui satisfont les rapports A/q et E_k/q dépendant eux-mêmes des champs magnétique et électrique appliqués. Pour lever cette dégénérescence, il suffit de mesurer E_k . Pour y parvenir, une chambre d'ionisation segmentée en deux parties est positionnée au niveau du point focal (figure 2, à gauche). La partie droite de la figure 2 montre le spectre issu du détecteur dans le cas où les rapports sélectionnés sont égaux chacun à 5. On note alors que chaque tache correspond à des PF de masse différente.

On notera que pour obtenir le taux de production total d'une masse, il faudrait mesurer l'ensemble des $\{q, E_k\}$ accessibles. Un tel exercice est foncièrement impossible. La principale limite est due à la combustion de la cible, qui n'est plus exploitable au-delà de quelques semaines. De plus, l'existence d'une corrélation entre q et E_k a été mise en évidence. Pour tenir compte de ces différents effets, une procédure de prise de données spécifique a été mise en œuvre. Au moins trois mesures (pour trois q différents) des distributions en E_k sont effectuées et une mesure (pour E_k fixe) de la distribution en q est faite. Ces quatre mesures permettent alors de déterminer le rendement d'une seule masse.

De nouvelles observables, telles que l'évolution des rapports isomériques en fonction de l'énergie cinétique IR(E_k) des PF, ont été mesurées [1]. Ces données sont particulièrement intéressantes pour tester la validité des modèles de désexcitation des PF tels que FIFRELIN [2,3]. La <u>figure 3</u> présente le cas du ¹³²Sn pour lequel une dépendance claire de cette observable (et du moment angulaire moyen associé) a été mise en évidence, ce qui interroge sur le mécanisme de génération du moment angulaire total des PF. L'étude des caractéristiques des produits de fission à l'aide du spectromètre Lohengrin se poursuit. Outre les rapport isomériques, un programme de mesures très précises des distributions en énergies cinétiques par masse a été initié afin de mieux comprendre la façon dont l'énergie d'excitation disponible à la scission se répartit entre les deux fragments. Enfin, le développement d'un nouveau dispositif expérimental permettra dans les prochaines années de sonder plus précisément la région de la fission symétrique pour laquelle on s'attend à observer de manière distincte la modalité de la fission.



FIGURE 3

En haut, rapport isomérique et, en bas, estimation du moment angulaire total moyen en fonction de l'énergie cinétique du ¹³²Sn. Une dépendance claire est observée, reposant la question de l'origine des moments angulaires dans les produits de fission.

RÉFÉRENCES [1] A. CHEBBOUBI *et al.*, «Kinetic energy dependence of fission fragment isomeric ratios for spherical nuclei ¹²²Sn», *Phys. Lett. B*, **775**, p. 190 (2017). [2] D. RÉGNIER *et al.*, «An improved numerical method to compute neutron/gamma deexcitation cascades starting from a high spin state», *Comput. Phys. Commun.*, **201**, p. 19 (2016). [3] O. LITAIZE, O. SÉROT, «Investigation of phenomenological models for the Monte-Carlo simulation of the prompt fission neutron and γ emission», *Phys. Rev. C*, **82**, 054616 (2010).

FISSION NUCLÉAIRE

REVUE SUR LES APPLICATIONS EN LIEN AVEC LA NEUTRONIQUE

D. BERNARD C. DE SAINT JEAN O. SÉROT O. LITAIZE O. BOULAND G. NOGUÈRE P. ARCHIER P. TAMAGNO M. DIAKAKI P. LECONTE A. CHEBBOUBI V. VALLET C. CARMOUZE CEA - DES Cadarache

Les exploitants d'installations nucléaires de base se doivent de respecter une réglementation bien spécifique, détaillée dans le guide ASN [1], notamment pour la démonstration de la sûreté nucléaire de la première barrière. Par ailleurs, pour des raisons de réduction des marges prévisionnelles et donc des coûts d'exploitation, l'utilisation des outils de calcul scientifique exige une précision accrue vis-à-vis de l'interprétation d'expériences. Le développement des outils de neutronique et celui des données nucléaires amont qui les alimentent ne font pas exception aux deux contraintes que sont la sûreté nucléaire et la réduction des coûts d'exploitation.

FIGURE 1

Expériences EXCALIBUR dédiées à la validation des données nucléaires de (²³⁸U+n).

Expérience sphère (janvier 2014)



es dernières années, les méthodes de résolution numérique de l'équation du transport des neutrons en milieu critique ont beaucoup progressé, levant ainsi d'anciennes compensations d'erreurs avec celles des données nucléaires. Une grande importance est donc accordée aux évaluations des données nucléaires nécessaires à la neutro-

nique, générant une concurrence entre les différentes bases de données (européenne JEFF *versus* américaine ENDF).

Un exemple d'application est l'amélioration des calculs du flux neutronique dans les grands cœurs de réacteurs industriels. Ces derniers sont sensibles à des données nucléaires bien spécifiques. La théorie des perturbations a pu notamment montrer la sensibilité du calcul des nappes de fission radiales (assemblage par assemblage) aux diffusions neutroniques inélastiques sur des noyaux lourds tels que l'238U, mais aussi aux spectres de neutrons prompts de fission pour les systèmes ²³⁸U et ²³⁵U induits, respectivement, par neutrons rapides (1-4 MeV) et épithermiques (30-300 meV). La grande taille (caractérisée neutroniquement par une faible séparation des deux premières valeurs propres de l'opérateur de transport Boltzmann) permet alors d'exciter des harmoniques (fonctions propres d'ordre supérieur au mode fondamental) et explique les sensibilités à ces données nucléaires. La grande taille permet aux neutrons de coupler ou découpler les nappes de puissance de proche

Expérience cylindre (octobre 2014)





Confrontation des données évaluées aux mesures des sections efficaces de (⁹⁰Zr+n). Les symboles et les courbes représentent respectivement les données expérimentales et les données évaluées.

en proche. On montre que les neutrons à grande longueur de migration (ceux dont l'énergie cinétique est comprise entre 500 keV et 1,2 MeV) contribuent majoritairement aux découplages radiaux. Ainsi apparaît la sensibilité aux sections de fission et de diffusion des noyaux lourds. La précision cible demandée, notamment pour les sections efficaces inélastiques, a nécessité la réalisation d'expériences de transmission de neutrons, à travers soit une sphère, soit deux cylindres d'uranium, auprès du réacteur CALIBAN du centre DAM de Valduc (figure 1). Leurs interprétations [2] ont mis en évidence une surestimation de ces sections efficaces de l'ordre de 10 ± 2% pour des neutrons incidents compris entre 2 et 5 MeV.

Une autre voie d'amélioration notable pour le calcul de la distribution de puissance dans les grands cœurs de réacteur est une meilleure connaissance des spectres énergétiques et angulaires des neutrons diffusés. En effet, on a pu observer que les calculs QRPA des réactions de pré-équilibre tendraient à renvoyer moins de neutrons dans la zone 0,5-1 MeV, rendant ainsi moins efficace le ralentissement par diffusion inélastique dans le continuum.

Les autres données nucléaires investiguées sont les sections efficaces de capture radiative du ⁵⁶Fe, notamment l'incapacité du modèle de la matrice R (dite de réaction nucléaire) à reproduire son domaine épithermique. La présence d'écran lourd dans les grands cœurs rend la puissance des assemblages périphériques sensible à quelques millibarns de réaction. Un autre isotope de structure (⁹⁰Zr) présente des améliorations potentielles, notamment les sections efficaces inélastiques pour les seuils discrets et dans le continuum, dans la zone rapide (2-10 MeV). Dans ce domaine de noyaux et d'énergies, des fluctuations sont souvent observées, mais rarement traduites dans les données nucléaires évaluées (figure 2). Au même titre que l'²³⁸U, cet isotope est responsable du ralentissement des neutrons rapides dans les réacteurs à eau.

Lorsque les expériences ne sont pas disponibles, la démarche de validation globale des outils de calcul scientifique ne peut pas être appliquée. On fait alors appel à la simulation et à l'estimation des incertitudes des données d'entrée. On peut citer trois exemples :

• l'estimation des rapports de branchement isomérique de ¹⁴⁷Pm(n, γ)^{148g+m}Pm dont la valeur influence le calcul de la perte de réactivité du réacteur au cours de sa combustion. On préconise alors la valeur d'un calcul FIFRELIN [3] de cascades de désexcitations électromagnétiques du noyau composé. Les incertitudes sont obtenues en faisant varier les différents ingrédients du calcul, à savoir les différents modèles de densités de niveaux nucléaires et de fonctions de force γ ;

• l'estimation des dommages dans les matériaux par le calcul du nombre de déplacements par atome dans les cuves de réacteurs. Ainsi, faisant appel au modèle optique, une matrice de covariance, dite de modèle, complète entre sections intégrées, simplement et doublement différentielles de l'isotope ⁵⁶Fe, a été créée avant d'être propagée ;

• l'estimation des données de désintégration du ¹³⁶Cs dont les incertitudes actuelles ne permettent pas d'atteindre l'incertitude cible des débits de dose intégrée par les appareils de radioprotection en centrale, en cas de situation dégradée. Un travail sur la structure nucléaire doit donc être réalisé.

RÉFÉRENCES 1 Guide ASN#28, https://www.asn.fr/. 2 P. LECONTE, D. BERNARD, «Benchmark and validation activities within the JEFF project», Eur. Phys. J. Web of Conferences, 146, 06017 (2017). 3 O. LITAIZE, O. SÉROT, L. BERGÉ, «Fission modeling with FIFRELIN», Eur. Phys. J. A, 51, p. 177 (2015).





[SOMMAIRE]



Les Folles Journées de la Physique Nucléaire

12-13 mars 2019 TGCC CEA DAM Ile-de-France

[SOMMAIRE]



JOURNÉES DE LA **PHYSIQUE NUCLÉAIRE** AU CEA

CEA/DAM Institut supérieur des études nucléaires de défense (ISENDé) Bruyères-le-Châtel, F-91297 Arpajon Cedex Courriel : chocs@cea.fr

Cette revue est consultable à l'adresse www-dam.cea.fr



