

Émission γ dans les réactions nucléaires : des progrès décisifs

D. DENIS-PETIT - O. ROIG - V. MÉOT - S. PÉRU - S. HILAIRE / CEA – DAM Île-de-France

M. VERSTEEGEN / Centre d'études nucléaires de Bordeaux-Gradignan, UMR 5797 CNRS – Université de Bordeaux, Gradignan

M. JANDEL / Los Alamos National Laboratory, États-Unis

I. DELONCLE / Centre de sciences nucléaires et de sciences de la matière (CSNSM), UMR 8609 CNRS – Université Paris-Sud, Orsay

M. MARTINI / Espace de structure nucléaire théorique, CEA – Saclay

S. GORIELY / Institut d'astronomie et d'astrophysique, Université libre de Bruxelles

De nouvelles mesures de sections efficaces de capture radiative de neutrons associées à l'arrivée à maturité de théories de structure nucléaire exploitables grâce à la puissance du calcul à haute performance (HPC) ont permis des progrès décisifs dans la modélisation de réactions nucléaires.

Les réactions de capture radiative jouent un rôle essentiel dans la maîtrise du fonctionnement neutronique de systèmes macroscopiques, en contribuant à la disparition des neutrons. Dans ces réactions (n,γ) , le neutron est capturé par le noyau cible pour former un noyau composé, qui se désexcite par émission de photons γ . Dans le cadre du programme Simulation, une bonne connaissance de ces réactions est indispensable pour l'interprétation des tirs passés. Cependant, leurs taux de réaction sont difficiles à prédire car ils varient fortement d'un isotope à l'autre.

Les sections efficaces (n,γ) , généralement évaluées au moyen de modèles statistiques, dépendent fortement d'une quantité appelée fonction de force γ qui décrit la distribution en énergie des photons émis par les états excités nucléaires. Pour que les modèles reproduisent les mesures des sections efficaces de façon satisfaisante, la fonction de force γ est normalisée sur des données expérimentales : cette limitation des modèles rend les mesures indispensables et

restreint considérablement la fiabilité des prédictions dans des régions éloignées de celles connues expérimentalement.

Afin de valider des évaluations réalisées au CEA – DAM Île-de-France, une mesure de la section efficace de la réaction $^{176}\text{Lu}(n,\gamma)$ a été réalisée à l'aide du détecteur DANCE au Los Alamos Neutron Science Center, aux États-Unis, dans le cadre de la collaboration DAM/NNSA Basic Science. La section efficace a été extraite sur une large gamme d'énergie neutron allant de l'énergie des résonances résolues à la région du continuum [1]. La **figure 1** montre la section efficace de capture radiative mesurée pour le ^{176}Lu dans la région des résonances (à gauche) et dans la région du continuum (à droite). L'analyse des données a permis la détermination des valeurs moyennes des paramètres des résonances qui relient les évaluations effectuées dans les régions de basse et haute énergie. Dans cette dernière, les mesures sont comparées à l'évaluation BRC du CEA – DAM. Au prix d'une normalisation arbitraire de la fonction de force γ , un

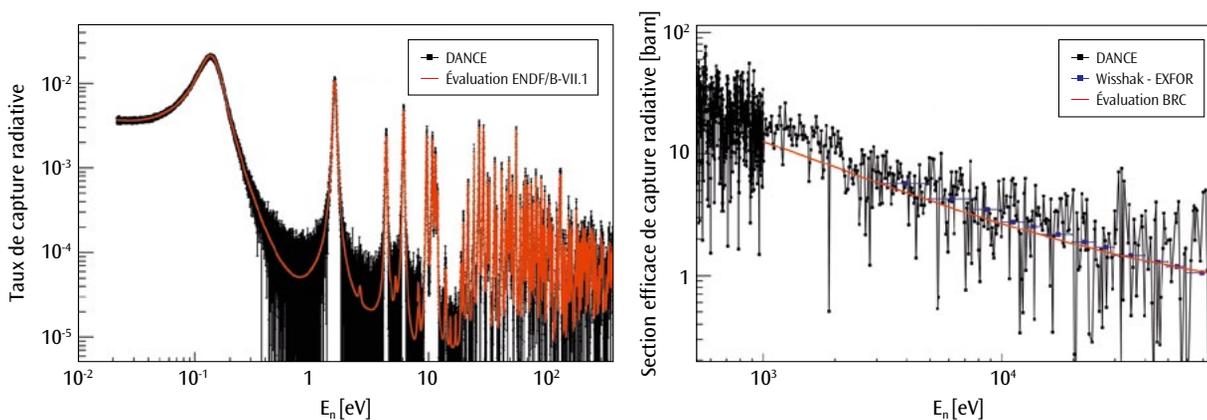


Figure 1. Section efficace de la réaction $^{176}\text{Lu}(n,\gamma)$ mesurée à DANCE au Los Alamos Neutron Science Center : à gauche, dans la région des résonances où elle est comparée à l'évaluation américaine ENDF (en rouge) ; à droite, dans la région du continuum où elle est comparée à l'évaluation BRC du CEA – DAM (en rouge) et aux données expérimentales disponibles dans la bibliothèque de données EXFOR (en bleu). L'excellent accord entre les mesures et les évaluations est ici obtenu au prix d'une normalisation arbitraire de la fonction de force γ .

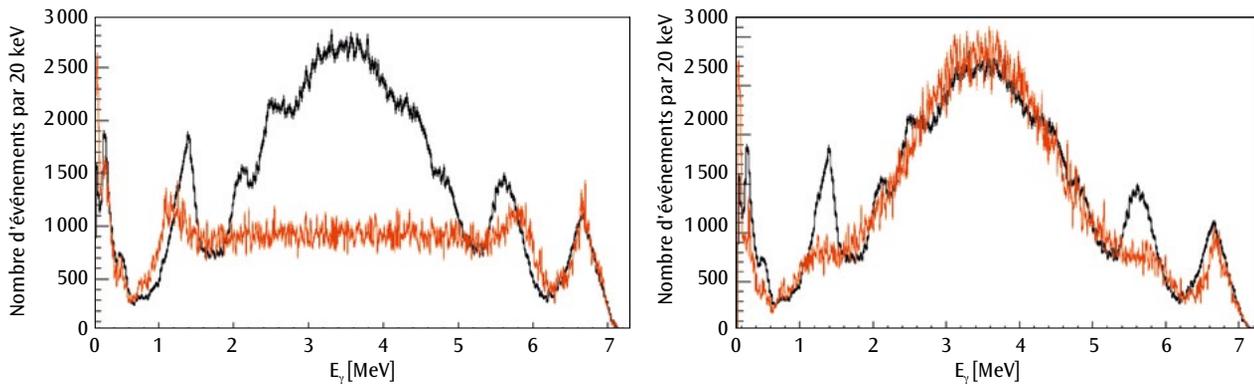


Figure 2. En noir, spectre mesuré pour des cascades γ qui suivent la capture de neutrons de 0,14 eV sur le ^{176}Lu . En rouge : à gauche, spectre évalué sans l'ajout d'une résonance dans la fonction de force γ ; à droite, spectre évalué avec l'introduction d'une résonance de type M1, autour de 4 MeV, qui permet de reproduire la forme du spectre mesuré. L'introduction de cette résonance permet aussi de reproduire la section efficace mesurée et, donc, de s'affranchir d'une normalisation arbitraire de la fonction de force γ .

excellent accord entre les sections efficaces mesurées et les données évaluées est observé.

Si cette normalisation permet de bien reproduire les sections efficaces, une incohérence subsiste lorsque l'on analyse les spectres en énergie des cascades γ . En effet, comme l'illustre la **figure 2**, seul l'ajout d'une nouvelle résonance autour de 4 MeV, dans la fonction de force γ [2], permet de bien reproduire le spectre des cascades γ . De plus, cet ajout permet de s'affranchir du problème de la normalisation, nécessaire pour obtenir un accord avec la section efficace de capture mesurée.

Une telle description cohérente des données de haute et basse énergie constitue une avancée majeure dans la résolution d'un problème vieux de plusieurs décennies. La nature de cette résonance introduite dans la fonction de force γ reste cependant ambiguë dans la mesure où l'on ne peut pas expérimentalement trancher entre un caractère magnétique ou électrique et où elle ne correspond pas aux formes théoriques habituelles.

Sur le plan théorique, la fonction de force γ est traditionnellement modélisée, de façon empirique, par une, voire deux fonctions lorentziennes. Une alternative à de telles formes empiriques est offerte par l'utilisation de modèles microscopiques. Récemment, à partir de l'approche QRPA (Quasi-particle Random Phase Approximation) un ensemble de fonctions de force γ dipolaire électrique (E1) a été évalué pour un très grand nombre d'isotopes [3] grâce à l'allocation de 25 millions d'heures de calcul sur le supercalculateur CURIE, dans le cadre d'un projet européen PRACE. Une description qualitative satisfaisante des résonances géantes, telles que la résonance géante dipolaire électrique qui contribue majoritairement aux sections efficaces d'émission γ , a été obtenue.

La bonne qualité de l'approche QRPA a également été prouvée récemment pour les excitations de type dipolaire magnétique (M1) pour de nombreux noyaux sphériques ou déformés riches en neutrons [4]. La réponse dipolaire magnétique inclut deux composantes majeures : (i) une composante, typiquement autour de quelques MeV, qui dans les noyaux déformés est appelée mode ciseau, et (ii) une composante dite de spin-flip, localisée à plus haute énergie, qui comprend la plus grande fraction de la force M1. Dans

ce contexte, la résonance introduite pour reproduire la réaction $^{176}\text{Lu}(n,\gamma)$ peut alors s'interpréter comme un mode ciseau. Une application de la QRPA à un noyau sphérique, le ^{115}In , a montré que l'origine de l'augmentation de la fonction de force γ observée dans la réaction de photoexcitation $^{115}\text{In}(\gamma,\gamma')^{115\text{m}}\text{In}$, réalisée sur l'installation ELSA du CEA – DAM Île-de-France [5], pouvait s'interpréter comme provenant de la composante soit dipolaire magnétique de spin-flip, soit dipolaire électrique. Les résultats de ces études montrent que la contribution M1 à la section efficace de capture radiative de neutrons peut être importante, particulièrement dans les noyaux légers et déformés.

L'ensemble de ces études illustre l'interaction féconde qui existe entre l'expérience et la théorie. Elles confirment que l'approche QRPA est une méthode pertinente pour calculer les fonctions de force γ . Son utilisation ouvre des perspectives prometteuses pour l'étude des noyaux éloignés de la vallée de stabilité pour lesquels il est impossible, faute de données expérimentales, de normaliser les formes empiriques des fonctions de force utilisées usuellement.

Références

- [1] O. ROIG, M. JANDEL, V. MÉOT *et al.*, "Radiative neutron capture cross sections on Lu 176 at DANCE", *Phys. Rev. C*, **93**, 034602 (2016).
- [2] D. DENIS-PETIT, O. ROIG, V. MÉOT, B. MORILLON, P. ROMAIN *et al.*, "Isomeric ratio measurements for the radiative neutron capture $^{176}\text{Lu}(n,\gamma)$ at the LANL DANCE facility", *Phys. Rev. C*, **94**, 054612 (2016).
- [3] M. MARTINI, S. PÉRU, S. HILAIRE, S. GORIELY, F. LECHAFTOIS, "Large-scale deformed quasiparticle random-phase approximation calculations of the γ -ray strength function using the Gogny force", *Phys. Rev. C*, **94**, 014304 (2016).
- [4] S. GORIELY, S. HILAIRE, S. PÉRU, M. MARTINI, I. DELONCLE, F. LECHAFTOIS, "Gogny-Hartree-Fock-Bogolyubov plus quasiparticle random-phase approximation predictions of the M1 strength function and its impact on radiative neutron capture cross section", *Phys. Rev. C*, **94**, 044306 (2016).
- [5] M. VERSTEEGEN, D. DENIS-PETIT, V. MÉOT, T. BONNET, M. COMET, F. GOBET, F. HANNACHI, M. TARISIEN, P. MOREL, M. MARTINI, S. PÉRU, "Low-energy modification of the γ strength function of the odd-even nucleus ^{115}In ", *Phys. Rev. C*, **94**, 044325 (2016).