

AU CŒUR DES ACTINIDES

H. Goutte
CEA - DAM - Île-de-France

Les processus nucléaires comme la fusion ou la fission génèrent un dégagement d'énergie important. Pour la fission, cette énergie dépend des propriétés du noyau qui va se casser. Seuls les noyaux lourds favorisent ce mode de décroissance car ils ont un nombre important de protons et, de ce fait, la forte répulsion électrostatique interne génère la déformation puis la scission du noyau en deux noyaux plus petits. Pour comprendre en détail ce phénomène, il est nécessaire de prédire la structure des noyaux lourds et de suivre théoriquement leur évolution depuis leur état fondamental jusqu'aux déformations extrêmes précédant la rupture.

Dernièrement, les théoriciens en physique nucléaire du CEA - DAM - Île-de-France ont obtenu deux succès importants [1] [2] dans le cadre de théories microscopiques appliquées à des noyaux de la famille des actinides (éléments ayant plus de 90 protons).

Le premier article présente une étude exhaustive des caractéristiques de 55 actinides pair-pair [1]. Le deuxième étudie l'évolution de l'isotope 238 de l'uranium depuis son état fondamental jusqu'à la fission [2]. Dans ces théories, les seuls ingrédients sont la force que ressentent deux nucléons au sein du noyau, et les lois de la mécanique quantique. Une des seules expressions de cette force est la force dite "de Gogny" développée au CEA - DAM, il y a maintenant trente ans.



La fission est un processus intervenant dans de nombreuses applications tant militaires que civiles, telles que la production d'énergie ou le retraitement des déchets du cycle électronucléaire. Les caractéristiques de la fission rentrent directement dans les programmes de simulation, en particulier la probabilité qu'elle ait lieu (*section efficace*), ou les propriétés des fragments, responsables, entre autres, du nombre de neutrons émis. Pour cela, les mesures expérimentales sont indispensables mais elles ne couvrent pas le champ complet des données nécessaires. Une modélisation reste incontournable.

D'un point de vue théorique, la fission apparaît comme un processus complexe qui met en jeu de nombreuses propriétés nucléaires. D'une part, il s'agit d'un mouvement de grande amplitude avec un réarrangement complet de la structure interne du noyau. D'autre part, plusieurs types de déformations sont à prendre en compte simultanément : la déformation axiale, pour rendre compte de l'élongation du système ; l'asymétrie de masse qui seule explique la cassure privilégiée en un petit et un gros fragment ; et la striction (*formation d'un col*), qui permet au noyau père de se scinder en deux noyaux fils. Les effets dynamiques et quantiques régissent l'évolution du système tout au long du processus. Cette complexité a empêché l'aboutissement d'un modèle standard de la fission, malgré soixante-dix ans de travaux sur le sujet.

La complexité de la fission a empêché l'aboutissement d'un modèle standard, malgré plus de soixante-dix ans de travaux sur le sujet

Parmi les différentes approches tentant de décrire le processus de fission, les méthodes dites "microscopiques" sont les plus à même de faire des prévisions. Elles sont essentielles pour les noyaux pour lesquels il n'existe pas de données expérimentales, et pour réduire la phénoménologie introduite dans les programmes de simulation. Des avancées significatives ont été réalisées ces dernières années, en particulier au CEA - DAM - Île-de-France, où les théoriciens ont décrit la structure de nombreux actinides, ainsi que les distributions en masse des fragments issus de la fission d'un isotope de l'uranium, en utilisant comme seul ingrédient l'interaction entre les nucléons.

Structure des noyaux pères

Dans un premier travail portant sur 55 actinides pairs-pairs, des prévisions ont été faites, notamment sur les isomères de forme et sur leur temps de vie. Les énergies d'excitation des isomères sont montrées sur la figure 1. Un bon accord entre les prédictions (symboles bleus) et les données expérimentales (symboles rouges) existe pour les isotopes de thorium, uranium, plutonium et curium.

Nous prévoyons, de plus, une décroissance globale des énergies des isomères quand la masse du noyau fissionnant augmente. Les états superdéformés sont même trouvés plus bas en énergie que les états normalement déformés dans les noyaux $^{242,244}\text{Fm}$ et ^{250}No .

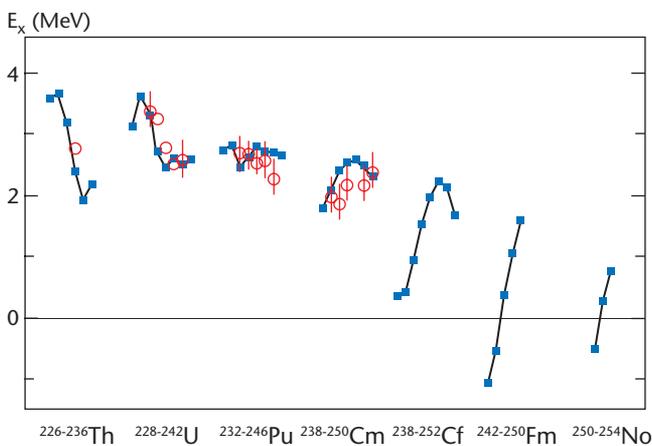


Figure 1 Énergie d'excitation des isomères de forme par rapport à l'énergie de l'état normalement déformé.

Toutefois, comme ces états sont situés seulement quelques centaines de keV sous la barrière octupolaire (associée à une asymétrie non nulle) ils ne doivent probablement pas survivre comme états liés.

Les temps de vie de décroissance de ces isomères par "gamma back decay" (retour dans le premier puits, suivi par l'émission d'un gamma), et par fission ont été déterminés : les isomères de forme dans les isotopes de thorium et d'uranium décroissent par émission gamma, alors que la fission et le "gamma back decay" sont en compétition dans les noyaux de plutonium et de curium. Par contre, ses isomères décroissent par fission pour les californium, curium et nobelium. Ces prédictions mettent en évidence des effets de structure importants entre actinides voisins, et prouvent l'importance des calculs microscopiques dans cette région de masse.

Fission en deux noyaux fils

Dans une autre étude nous avons décrit les distributions des noyaux produits par fission en prenant en compte toute la dynamique du processus dans une approche cohérente, microscopique, et dépendante du temps. Nous employons un formalisme à deux étapes : les propriétés statiques du système fissionnant (énergie potentielle et inerties collectives) sont déterminées, avant de servir de base pour l'étude de la dynamique du processus.

La surface d'énergie potentielle obtenue dans le noyau ^{238}U est montrée sur la figure 2 en fonction de l'élongation et de l'asymétrie. Nous notons que les premier et second puits sont associés à des formes symétriques, tandis que le degré de liberté d'asymétrie est important à plus grande élongation, puisque la vallée asymétrique se trouve à une énergie plus basse que la vallée symétrique.

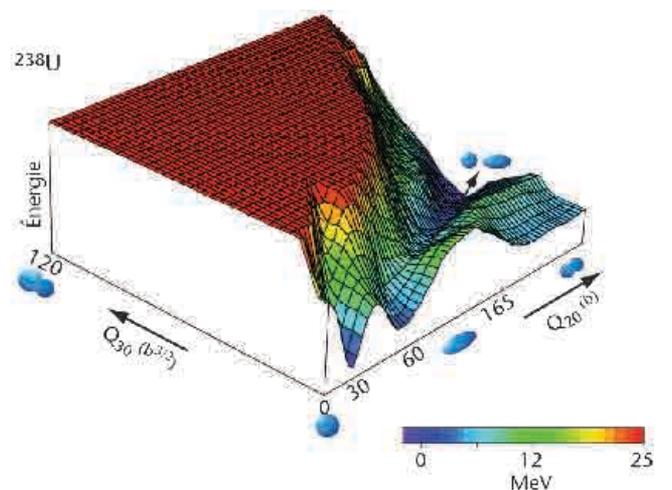


Figure 2 Surface d'énergie potentielle de ^{238}U en fonction des variables collectives d'élongation (Q_{20}) et d'asymétrie (Q_{30}), depuis l'état fondamental jusqu'à la scission.

Nous avons ensuite propagé un état initial de fission induite par neutrons dans une telle surface. Les distributions en masse des fragments sont déterminées à partir du flux de la fonction d'onde le long de la ligne de scission, définie comme l'ensemble des points où, pour chaque fragmentation, le système se scinde en deux. Ces résultats (*en bleu*) sont comparés sur la figure 3 à des mesures (*en rouge*) et à des résultats que nous avons obtenus à partir de calculs purement statiques (*en noir*). Cette figure montre, notamment, que les maxima des distributions sont déterminés par les propriétés statiques dans la région de la scission, tandis que les effets dynamiques sont essentiels pour obtenir des largeurs en accord avec les données expérimentales.

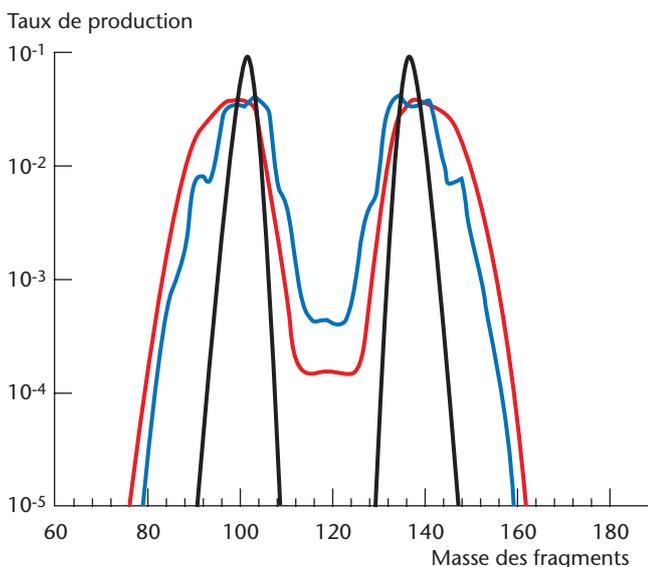


Figure 3
Distributions en masse des fragments issus de la fission de ^{238}U , obtenues par des calculs dynamiques (*en bleu*) et statiques (*en noir*), comparées aux données évaluées (*en rouge*).

Les résultats montrés ici représentent une première étape dans la description entièrement microscopique du processus de fission depuis les caractéristiques du père jusqu'aux propriétés des fils. Le bon accord obtenu avec les résultats expérimentaux nous encourage à continuer les développements théoriques. Nous projetons, dans un premier temps, de caractériser plus finement les fragments émis en définissant leur déformation et leur énergie d'excitation. Ces calculs n'auraient pas été possibles sans l'augmentation de la puissance des ordinateurs.

Ces études seront complétées par des travaux expérimentaux sur le complexe accélérateur du GANIL (*Caen*), en particulier avec l'arrivée de *Spiral 2* vers 2010, un accélérateur de produits de fission.

Ces travaux théoriques seront complétés par des expériences sur *Spiral 2* dans les années à venir

Malgré ces avancées importantes, saluées par la communauté internationale, ces calculs ne remplacent pas, pour le moment, les évaluations faites sur la base de modèles phénoménologiques. Cela reste un des défis majeurs pour la physique nucléaire dans la décennie à venir.

Références

- [1] J.-P. DELAROCHE, M. GIROD, H. GOUTTE, J. LIBERT, "Structure properties of even-even actinides at normal and super deformed shapes analysed using the Gogny force", *Nuc. Phys. A* **77**, **1**, p. 103-168 (2006).
- [2] H. GOUTTE, J.-F. BERGER, P. CASOLI, D. GOGNY, "Microscopic approach of fission dynamics applied to fragment kinetic energy and mass distributions in ^{238}U ", *Phys. Rev. C* **7**, **1**, p. 024316 (2005).