

E. Pellereau, J. Taieb, A. Chatillon,
G. Bélier, G. Boutoux, A. Ebran,
T. Gorbinet, L. Grente, B. Laurent,
J.-F. Martin
CEA – DAM Île-de-France

En collaboration avec des chercheurs de l'université de Saint-Jacques-de-Compostelle et de l'université de Vigo (Espagne), de l'université technologique de Chalmers (Suède), du GSI de Darmstadt (Allemagne) et du CNRS (IPN Orsay, GANIL, CENBG).

MESURES DE HAUTE PRÉCISION DE RENDEMENTS DE FISSION NUCLÉAIRE

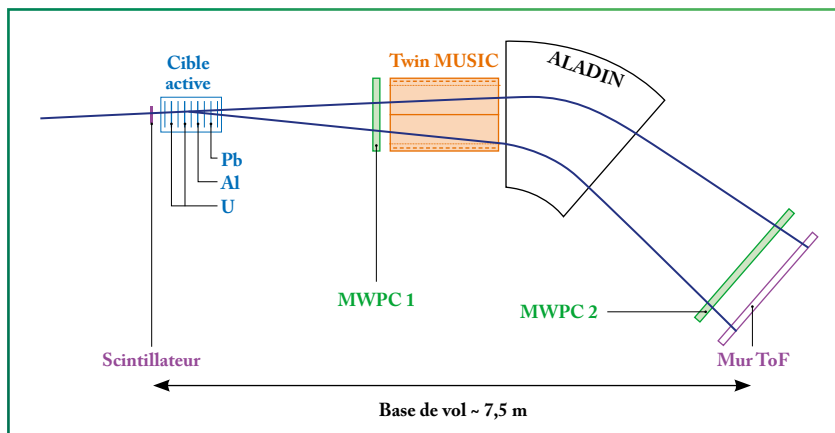
Le projet SOFIA a pour objectif de mesurer des données nucléaires d'importance pour améliorer la simulation de systèmes nucléaires comme les réacteurs de nouvelle génération, et donc pour améliorer leur sécurité. Ces données nucléaires sont complexes à mesurer et SOFIA, avec une importante collaboration internationale (France, Espagne, Allemagne, Suède) et des moyens expérimentaux modernes, a permis d'acquérir un grand volume de données de haute précision.

Le projet SOFIA, pour Studies On FISSION with Aladin, utilise un dispositif expérimental moderne, développé pour mesurer, en premier lieu, les rendements de fission, c'est-à-dire la proportion de chaque espèce de fragments produits par la réaction de fission. Dans ce contexte, un spectromètre a été spécialement conçu pour s'adapter aux faisceaux d'ions lourds relativistes produits sur la très grande installation du laboratoire GSI de Darmstadt en Allemagne. Dans cette approche expérimentale du phénomène, le noyau dont on souhaite étudier la fission est accéléré à des vitesses relativistes (environ 80% de la vitesse de la lumière) et envoyé sur une cible de plomb ou d'uranium. Le noyau incident acquiert de l'énergie d'excitation dans le champ coulombien du noyau cible, conduisant finalement à sa fis-

sion. Le dispositif permet de sélectionner ce mécanisme de réaction de fission induite par excitation coulombienne, qui présente deux avantages majeurs par rapport aux méthodes classiques : d'une part, la fission d'un grand nombre d'isotopes peut être étudiée, d'autre part la détermination des rendements de fission est très précise car une grande statistique peut être accumulée rapidement. De plus, cette méthode permet de s'affranchir de la difficulté, voire de l'impossibilité dans certains cas, de fabriquer des cibles sans lesquelles les méthodes classiques sont inopérantes.

Une cinquantaine de noyaux, du mercure au neptunium, ont été étudiés. Un effort particulier a été fourni pour obtenir des données de haute précision sur les isotopes de l'uranium. Le dispositif expérimental est schématisé sur la **figure 1**. Le

Figure 1
 ➤ Schéma de principe du dispositif expérimental utilisé pour l'identification en charge et en masse des deux fragments de fission. Le faisceau de noyaux dont on veut étudier la fission est conduit sur la cible active. La fission est induite dans la cible active et les deux fragments produits sont mesurés par la double chambre à ionisation Twin MUSIC, par des détecteurs de localisation MWPC avant et après déflexion par l'aimant de très grande taille ALADIN et par le dispositif de temps de vol constitué par le scintillateur devant la cible active et le mur ToF.



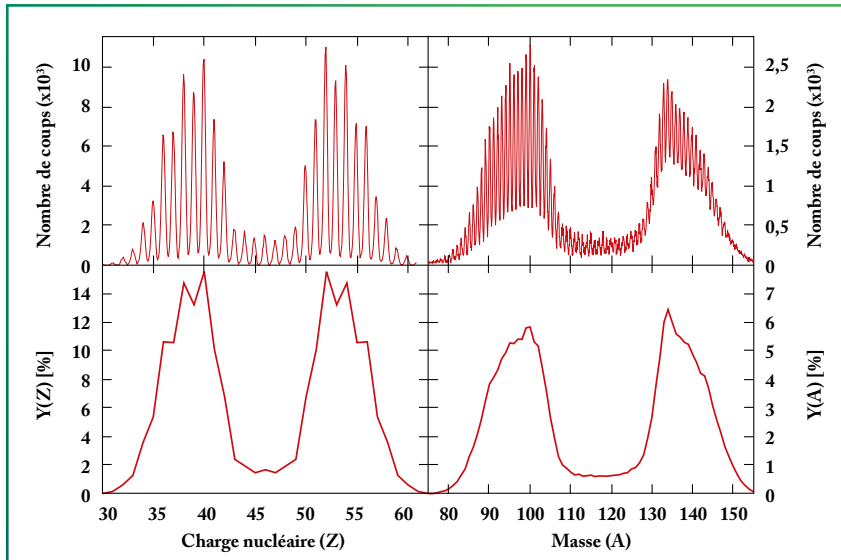


Figure 2

➡ Distributions (en haut) et rendements Y (en bas) en charge Z (à gauche) et en masse A (à droite), mesurés pour la fission de l'uranium 238. Cette technique permet d'identifier, de manière univoque et pour la première fois, la charge Z et la masse A de chaque fragment de fission, autrement dit le nombre de protons et le nombre de neutrons.

faisceau interagit avec une cible; lorsqu'une réaction de fission se produit, les deux fragments sont émis vers l'avant grâce à la très grande énergie cinétique incidente. L'ensemble des détecteurs est dimensionné pour collecter la quasi-totalité des fragments de fission, ce qui explique la grande statistique qui peut être accumulée en quelques heures. Ce dispositif permet de mesurer, pour chacun des deux fragments, trois observables: la perte d'énergie, le temps de vol et la trajectoire dans un champ magnétique. Ces informations suffisent à obtenir, pour un noyau fissionnant, l'identification isotopique des deux fragments, c'est-à-dire la charge nucléaire Z et la masse A de chaque fragment, autrement dit son nombre de protons (Z) et de neutrons ($N = A - Z$).

Les distributions et rendements en charge $Y(Z)$ et en masse $Y(A)$ obtenus pour la fission de l'isotope 238 de l'uranium **1** sont représentés sur la **figure 2**. Pour la première fois, une séparation a été obtenue entre les différentes charges nucléaires Z et entre les différentes masses A . De ce fait, les rendements ont pu être obtenus avec de faibles incertitudes (inférieures à l'épaisseur du trait sur la **figure 2**). Les rendements isotopiques $Y(Z,N)$ ont également été obtenus pour tous les fragments de fission ayant une charge nucléaire comprise entre $Z = 30$ et $Z = 59$; ces rendements isotopiques donnent la probabilité pour qu'un isotope particulier soit produit.

Obtenir cet ensemble de résultats avec une telle précision a un impact significatif pour les applications. En particulier, la connaissance des rendements de production permet une amélioration de la prédiction de l'accumulation des produits de fission

de vie longue, du flux de neutrons ou de la chaleur résiduelle suite à l'arrêt d'un réacteur nucléaire. Un exemple est donné sur la **figure 3** pour les isotopes d'indium ($Z = 49$) et d'étain ($Z = 50$).

Cette **figure 3** montre également qu'avec ces mesures une compréhension plus profonde du phénomène de fission peut également être atteinte. En effet, pour les fragments qui ne sont pourtant pas majoritairement produits, la décomposition en différents modes de fission peut être quantifiée. La fission est dite symétrique lorsque les deux fragments sont produits avec une masse ou une charge voisine, elle est dite asymétrique dans le cas contraire. La tran-

sition entre deux modes très différents de fission, symétrique et asymétrique, est nettement mise en évidence entre $Z = 49$ et $Z = 50$.

La fission d'autres noyaux a été étudiée avec une forte statistique, notamment celle des isotopes 234, 235 et 236 de l'uranium. L'ensemble des résultats obtenus avec l'expérience SOFIA donnera l'évolution des rendements avec la masse du noyau fissionnant. De plus, en comparant les résultats avec les mesures classiques de fission induite par des neutrons de différentes énergies, lorsqu'elles existent, une interprétation plus fine de l'effet de l'énergie d'excitation sur la fission est accessible, du fait de la haute précision des données.

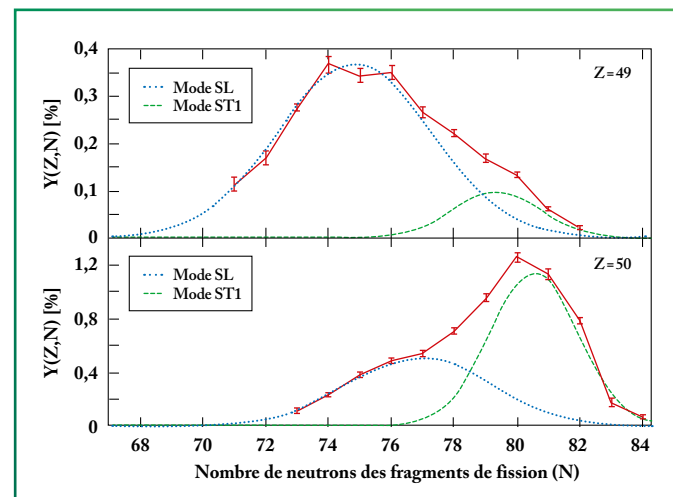


Figure 3

➡ Rendement isotopique $Y(Z,N)$ en fonction du nombre N de neutrons ($N = A - Z$) pour les fragments de charge $Z = 49$ (indium) et $Z = 50$ (zinc). La précision des rendements isotopiques (rouge) permet de distinguer les différents modes de fission: la queue du mode dit symétrique en bleu, et le mode dit asymétrique en vert, modes dont le poids respectif change drastiquement au passage de $Z = 49$ à $Z = 50$.

RÉFÉRENCES

1 E. PELLEREAU *et al.*, "Accurate isotopic fission yields of electromagnetically induced fission of ^{238}U measured in inverse kinematics at relativistic energies", *Phys. Rev. C*, **95**, 054603 (2017).