

## **Avis de Soutenance**

**Madame Zoé FAVIER**

### **structure et réactions nucléaires**

**Soutiendra publiquement ses travaux de thèse intitulés**

*Vers la synthèse et la spectroscopie des éléments superlourds : proposition et analyse de réactions de Transfert MultiNucléons (136Xe+238U) et caractérisation du nouveau détecteur à implantation SIRIUS*

**dirigés par Madame Barbara SULIGNANO**

**Soutenance prévue le *mardi 30 novembre 2021* à 14h00**

**Lieu : CEA Paris-Saclay - Orme des Merisiers Jardin des Merisiers, 91191 Gif-sur-Yvette**

**Salle : Bâtiment 713, Salle de séminaires Galilée**

#### **Composition du jury proposé**

<b>Mme Barbara SULIGNANO</b>	<b>Université Paris-Saclay, GS Physique, CEA-Saclay</b>	<b>Directrice de thèse</b>
<b>M. Dieter ACKERMANN</b>	<b>GANIL, Université de Caen-Normandie</b>	<b>Rapporteur</b>
<b>M. Olivier STÉZOWSKI</b>	<b>Université Claude Bernard de Lyon (IP2I)</b>	<b>Rapporteur</b>
<b>Mme Amel KORICHI</b>	<b>Université Paris-Saclay (IJCLab)</b>	<b>Examinatrice</b>
<b>M. Dariusz SEWERYNIAK</b>	<b>Argonne National Laboratory</b>	<b>Examineur</b>
<b>M. Gheorghe Iulian STEFAN</b>	<b>Université Paris-Saclay (IJCLab)</b>	<b>Examineur</b>

**Titre:** Vers la synthèse et la spectroscopie des éléments superlourds : proposition et analyse de réactions de Transfert Multi-Nucléons ( $^{136}\text{Xe}+^{238}\text{U}$ ) et caractérisation du nouveau détecteur à implantation SIRIUS

**Mots clés:** Éléments (super)lourds, Structure nucléaire, Spectroscopie gamma, Transfert Multi-Nucléons, Détecteurs Silicium/Germanium, SIRIUS

**Résumé:** La recherche d'éléments super lourds est l'un des sujets les plus passionnants et les plus actifs de ces dernières années et a déjà produit de nouveaux éléments tels que les 113, 115, 117 et 118 aux limites du tableau périodique de Mendeleïev. Jusqu'à présent, les éléments superlourds étaient synthétisés en laboratoire par des réactions de fusion-évaporation, mais ces études sont limitées par des taux de production extrêmement faibles. Les faisceaux stables de haute intensité de l'accélérateur linéaire de SPIRAL2 au GANIL, couplés au Super Séparateur Spectromètre (S3) et au spectromètre au plan focal de haute performance (SIRIUS), ouvriront de nouveaux horizons pour la recherche dans les domaines de ces noyaux rares et de ces phénomènes à la limite de la stabilité nucléaire. Au cours de ma thèse, j'ai participé à l'assemblage complet du détecteur plan focal, plus particulièrement au test et à la caractérisation du détecteur à pixels de silicium (DSSD) et de l'électronique frontale associée (FPCSA).

Par ailleurs, l'élément le plus lourd qui ait été trouvé dans la nature est l'uranium avec 92 protons. Tous les éléments transuraniens sont radioactifs et leur taux de production diminue avec l'augmentation du nombre de protons. Un "îlot de stabilité", où les noyaux ont des demi-vies relativement longues, est prévu autour de 182 neutrons et, selon le modèle théorique, autour de 114, 120 ou 126 protons. Les techniques expérimentales actuelles ne permettent pas d'aller aussi loin du côté riche en neutrons. L'observation d'ondes gravitationnelles ainsi que d'ondes électromagnétiques provenant d'une fusion d'étoiles à neutrons a été publiée en 2017 et constitue une première preuve de la nucléosynthèse d'éléments lourds dans le processus-r. La question de savoir si les éléments superlourds se sont formés dans notre univers reste de mise. Pour y répondre, nous avons besoin de connaître les propriétés nucléaires des éléments les plus lourds et de savoir comment ces propriétés évoluent lorsque

l'on se déplace vers le côté riche en neutrons de la chartre des noyaux.

Au cours de ma thèse, j'ai entrepris de découvrir des noyaux lourds riches en neutrons en utilisant des réactions de Transfert de Multi-Nucléons (MNT). J'ai proposé et réalisé une première expérience préliminaire au Laboratoire National d'Argonne (Chicago, USA) pour étudier les mécanismes de réactions inélastiques profondes dans la région des éléments lourds. Dans ce travail, des noyaux lourds ont été synthétisés par la réaction de MNT en utilisant un faisceau intense de Xénon136 fourni par l'accélérateur ATLAS d'Argonne avec une énergie d'environ 705 MeV sur une cible d'Uranium238. Les résidus d'évaporation ont été séparés du faisceau et des autres produits de réaction à l'aide du séparateur à gaz AGFA, transmis à travers une chambre à avalanche (PPAC) et implantés dans la station de désintégration comprenant des détecteurs silicium (DSSD et tunnels). J'ai combiné les techniques de spectroscopie gamma prompte en observant le rayonnement émis dans la sphère  $4\pi$  de germanium Gammasphere autour de la cible, et de spectroscopie retardée en utilisant les détecteurs trèfles en germanium XArray au niveau du plan focal. Les corrélations en temps et en position ont permis d'observer les noyaux produits dans la station d'implantation-décroissance et de les distinguer du faisceau et des éléments plus légers. Cette expérience a été proposée suite à des simulations cinétiques et Monte-Carlo pour établir quels noyaux seraient produits et transmis au plan focal. Pour la première fois, nous avons réalisé une réaction de MNT à  $0^\circ$ , en utilisant AGFA, pour produire des noyaux lourds proches de l'Uranium. Les premiers résultats sont très encourageants. La séparation avec le faisceau de Xénon a été un grand succès et nous avons vu les premiers échanges de nucléons dans ce processus : c'est une nouvelle voie qui s'ouvre vers la synthèse de nouveaux isotopes super lourds riches en neutrons !

**Title:** Towards the synthesis and spectroscopy of superheavy elements: proposal and analysis of the Multi-Nucleon Transfer reactions ( $^{136}\text{Xe}+^{238}\text{U}$ ) and characterization of the new SIRIUS implantation detector

**Keywords:** (Super) Heavy Elements, Nuclear structure, Gamma spectroscopy, Multi-Nucleon Transfer, Silicon/Germanium detectors, SIRIUS

**Abstract:** The search for Super Heavy Elements (SHE) is one of the most exciting and active topics in recent years and has already produced new ones such as 113, 115, 117 and 118 at the limits of the periodic table of Mendeleev. For now, the SHE were synthesized in laboratory via fusion-evaporation reactions but these studies are severely hampered by the extremely low production rates and experimental information in this field is very scarce. The stable high intensity beams of the superconducting linear accelerator of the SPIRAL2 facility at GANIL, coupled with the Super Separator Spectrometer ( $S^3$ ) and the high-performance focal plane spectrometer (SIRIUS), will open new horizons for research in the fields of these rare nuclei and low cross section phenomena at the limit of nuclear stability. During my thesis, I took part in the complete focal plane detector assembly, more specifically on the testing and characterization of the double-sided silicon strip detector (DSSD) and the associated front-end electronics (FPCSA).

Besides, the heaviest element which has been found in nature is uranium with 92 protons. All transuranium elements are radioactive and their production rates decrease with increasing number of protons. An "Island of Stability", where the nuclei have relatively long half-lives, is predicted at the neutron number 182 and, depending on the theoretical model, at the proton number 114, 120 or 126. Current experimental techniques do not allow to go so far to the neutron-rich side close to the Island of Stability. The observation of gravitational waves as well as electromagnetic waves originating from a neutron star merger has been published in 2017 and is a first proof of the nucleosynthesis of heavy elements in the r-process. It still remains an open question if SHE have been formed in our universe. To answer these questions, we need insight into the nuclear properties of the heaviest elements and how these properties evolve when one moves

toward to the neutron-rich side on the nuclear chart.

During my thesis, I set out to discover neutron-rich heavy nuclei using Multi-Nucleon Transfer (MNT) reactions. These studies will help to better understand the evolution of nuclear shells in the heavy element region. I have proposed and carried out a first preliminary experiment at Argonne National Laboratory (Chicago, USA) to investigate deep-inelastic reactions mechanisms in the heavy elements region. In this work, heavy nuclei were synthesized by the MNT reaction using an intense  $^{136}\text{Xe}$  beam provided by the ATLAS accelerator at Argonne National Laboratory (Chicago) with energy about 705 MeV on a  $^{238}\text{U}$  target. The evaporation residues were separated from the beam and from the background of other reaction products using the AGFA gas separator, transmitted through a Parallel Plate Avalanche Chamber (PPAC) and implanted into the decay station comprising silicon detectors (DSSD and tunnels). I combined the techniques of prompt gamma-ray spectroscopy by looking at the gamma radiation emitted in the Gammasphere  $4\pi$  germanium-array around the target chamber, and delayed spectroscopy using the germanium clover detectors XArray at the focal plane. Correlations in time and position allowed to observe the recoil nuclei in the implantation-decay station and to distinguish them from the beam and from lighter elements. This experiment was proposed following kinetic and Monte-Carlo simulations to establish which nuclei would be produced and transmitted to the focal plane by the AGFA separator. For the first time, we performed a MNT reaction at  $0^\circ$ , using AGFA, to produce heavy Uranium-like nuclei. The first results are very encouraging. The separation with the beam Xenon-like nuclei was a great success and we saw the first nucleon exchanges in this process: this is a new pathway towards the synthesis of new super heavy neutron-rich isotopes!

