

# Stability of Transfermium Elements at High Spin: Measuring the Fission Barrier of $^{254}\text{No}$ by Greg Henning

*Thesis defense on Sept. 20<sup>th</sup>, 2012, 10.00am,  
Salle des conseils, IPNO.*

## Abstract

Super heavy nuclei provide opportunities to study nuclear structure near three simultaneous limits: in charge  $Z$ , spin  $I$  and excitation energy  $E^*$ . These nuclei exist only because of a fission barrier, created by shell effects. It is therefore important to determine the fission barrier and its spin dependence  $B_f(I)$ , which gives information on the shell energy  $E_{\text{shell}}(I)$ . Theoretical calculations predict different fission barrier heights from  $B_f(I = 0) = 6.8$  MeV for a macro-microscopic model [1,2] to 8.7 MeV for Density Functional Theory calculations using the Gogny or Skyrme interactions [3–5]. Hence, a measurement of  $B_f$  provides a test for theories.

To investigate the fission barrier, an established method is to measure the rise of fission with excitation energy, characterized by the ratio of decay widths  $\Gamma_{\text{fission}}/\Gamma_{\text{total}}$ , using transfer reactions [6, 7]. However, for heavy elements such as  $^{254}\text{No}$ , there is no suitable target for a transfer reaction. We therefore rely on the complementary decay widths ratio  $\Gamma_{\gamma}/\Gamma_{\text{fission}}$  and its spin dependence, deduced from the entry distribution  $(I, E^*)$ .

Measurements of the gamma-ray multiplicity and total energy for  $^{254}\text{No}$  have been performed with beam energies of 219 and 223 MeV in the reaction  $^{208}\text{Pb}(^{48}\text{Ca}, 2n)$  at ATLAS (Argonne Tandem Linac Accelerator System). The  $^{254}\text{No}$  gamma rays were detected using the Gammasphere array as a calorimeter – as well as the usual high-resolution  $\gamma$ -ray detector. Coincidences with evaporation residues at the Fragment Mass Analyzer focal plane separated  $^{254}\text{No}$  gamma rays from those from fission fragments, which are  $> 10^6$  more intense. From this measurement, the entry distribution – i.e. the initial distribution of  $I$  and  $E^*$  – is constructed. Each point  $(I, E^*)$  of the entry distribution is a point where gamma decay wins over fission and, therefore, gives information on the fission barrier.

The measured entry distributions show an increase in the maximum spin and excitation energy from 219 to 223 MeV of beam energy. The distributions show a saturation of  $E^*$  for high spins. The saturation is attributed to the fact that, as  $E^*$  increases above the saddle,  $\Gamma_{\text{fission}}$  rapidly dominates. The resulting truncation of the entry distribution at high  $E^*$  allows a determination of the fission barrier height.

The experimental entry distributions are also compared with entry distributions calculated with decay cascade codes which take into account the full nucleus formation process, including the capture process and the subsequent survival probability as a function of  $E^*$  and  $I$ . We used the KEWPIE2 [8] and NRV [9] codes to simulate the entry distribution.

Stabilité des Éléments Trans-fermium à Haut Spin :  
Mesure de la Barrière de Fission de  $^{254}\text{No}$   
par **Greg Henning**

*Soutenance de thèse le 20 Sept. 2012, 10h00  
Salle des conseils, IPNO.*

Les noyaux super lourds offrent la possibilité d'étudier la structure nucléaire à trois limites simultanément: en charge  $Z$ , spin  $I$  et énergie d'excitation  $E^*$ . Ces noyaux existent seulement grâce à une barrière de fission créée par les effets de couche. Il est donc important de déterminer cette barrière de fission et sa dépendance en spin  $B_f(I)$ , qui nous renseigne sur l'énergie de couche  $E_{\text{shell}}(I)$ . Les théories prédisent des valeurs différentes pour la hauteur de la barrière de fission, allant de  $B_f(I = 0) = 6.8$  MeV dans un modèle macro-microscopique [1, 2] à 8.7 MeV pour des calculs de la théorie de la fonctionnelle de la densité utilisant l'interaction Gogny ou Skyrme [3–5]. Une mesure de  $B_f$  fournit donc un test des théories.

Pour étudier la barrière de fission, la méthode établie est de mesurer, par réaction de transfert, l'augmentation de la fission avec l'énergie d'excitation, caractérisée par le rapport des largeurs de décroissance  $\Gamma_{\text{fission}}/\Gamma_{\text{total}}$ , [6, 7]. Cependant, pour les éléments lourds comme  $^{254}\text{No}$ , il n'existe pas de cible appropriée pour une réaction de transfert. Il faut s'en remettre à un rapport de largeur de décroissance complémentaire:  $\Gamma_{\gamma}/\Gamma_{\text{fission}}$  et sa dépendance en spin, déduite de la distribution d'entrée  $(I, E^*)$ .

Des mesures de la multiplicité et l'énergie totale des rayons  $\gamma$  de  $^{254}\text{No}$  ont été faites aux énergies de faisceau 219 et 223 MeV pour la réaction  $^{208}\text{Pb} (^{48}\text{Ca}, 2n)$  à ATLAS (Argonne Tandem Linac Accelerator System). Les rayons  $\gamma$  du  $^{254}\text{No}$  ont été détectés par le multi-détecteur Gammasphere utilisé comme calorimètre – et aussi comme détecteur de rayons  $\gamma$  de haute résolution. Les coïncidences avec les résidus d'évaporation au plan focal du Fragment Mass Analyzer ont permis de séparer les rayons  $\gamma$  du  $^{254}\text{No}$  de ceux issus de la fission, qui sont  $> 10^6$  fois plus intenses. De ces mesures, la distribution d'entrée – c'est-à-dire la distribution initiale en  $I$  et  $E^*$  – est reconstruite. Chaque point  $(I, E^*)$  de la distribution d'entrée est un point où la décroissance  $\gamma$  l'a emporté sur la fission, et ainsi, contient une information sur la barrière de fission.

La distribution d'entrée mesurée montre une augmentation du spin maximal et de l'énergie d'excitation entre les énergies de faisceau 219 et 223 MeV. La distribution présente une saturation de  $E^*$  à hauts spins. Cette saturation est attribuée au fait que, lorsque  $E^*$  augmente au-dessus de la barrière,  $\Gamma_{\text{fission}}$  domine rapidement. Il en résulte une troncation de la distribution d'entrée à haute énergie qui permet la détermination de la hauteur de la barrière de fission.

La mesure expérimentale de la distribution d'entrée est également comparée avec des distributions d'entrée calculées par des simulations de cascades de décroissance qui prennent en compte le processus de formation du noyau, incluant la capture et la survie, en fonction de  $E^*$  et  $I$ . Dans ce travail, nous avons utilisé les codes KEWPIE2 [8] et NRV [9] pour simuler les distributions d'entrée.

# Bibliography

- [1] P. Möller, A. J. Sierk, T. Ichikawa, A. Iwamoto, R. Bengtsson, H. Uhrenholt, and S. Åberg, “Heavy-element fission barriers,” *Phys. Rev. C*, vol. 79, p. 064304, Jun 2009.
- [2] M. Kowal, P. Jachimowicz, and A. Sobiczewski, “Fission barriers for even-even superheavy nuclei,” *Phys. Rev. C*, vol. 82, p. 014303, Jul 2010.
- [3] J. L. Egido and L. M. Robledo, “Fission barriers at high angular momentum and the ground state rotational band of the nucleus  $^{254}\text{No}$ ,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 85, pp. 1198–1201, Aug 2000.
- [4] L. Bonneau, P. Quentin, and D. Samsøen, “Fission barriers of heavy nuclei within a microscopic approach,” *The European Physical Journal A - Hadrons and Nuclei*, vol. 21, pp. 391–406, 2004. 10.1140/epja/i2003-10224-x.
- [5] T. Duguet, P. Bonche, and P.-H. Heenen, “Rotational properties of  $^{252,253,254}\text{No}$ : influence of pairing correlations,” *Nuclear Physics A*, vol. 679, no. 3–4, pp. 427 – 440, 2001.
- [6] B. B. Back, H. C. Britt, O. Hansen, B. Leroux, and J. D. Garrett, “Fission of odd-A and doubly odd actinide nuclei induced by direct reactions,” *Phys. Rev. C*, vol. 10, pp. 1948–1965, Nov 1974.
- [7] B. B. Back, O. Hansen, H. C. Britt, and J. D. Garrett, “Fission of doubly even actinide nuclei induced by direct reactions,” *Phys. Rev. C*, vol. 9, pp. 1924–1947, May 1974.
- [8] A. Marchix, *Etude de l’influence de l’énergie de correction de couches sur les réactions nucléaires menant à la région des noyaux superlourds*. PhD thesis, UNIVERSITÉ de CAEN/BASSE-NORMANDIE, 2007.
- [9] V. I. Zagrebaev, “Nrv code: <http://nrv.jinr.ru/nrv/>.”