

Ruptura de parejas y efectos coulombianos en la fisión fría de las reacciones

$^{233}\text{U}(n_{\text{th}}, f)$, $^{235}\text{U}(n_{\text{th}}, f)$ y $^{239}\text{Pu}(n_{\text{th}}, f)$

Modesto Montoya*

Instituto Peruano de Energía Nuclear, Canadá 1470, San Borja, Lima, Perú
Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Ingeniería, Av. Túpac Amaru 210, Rímac, Lima, Perú

Resumen

Se muestra las consecuencias erosivas de la emisión de neutrones sobre la distribución de número de masa (A) y energía cinética (E) de los fragmentos de fisión inducida por neutrones térmicos de ^{233}U y ^{235}U , respectivamente. Además se muestra los efectos de la ruptura de parejas de nucleones, y de la interacción electrostática entre fragmentos en el punto de escisión, sobre la distribución de masa y energía cinética en la región fría de la fisión inducida por neutrones térmicos de ^{233}U , ^{235}U y ^{239}Pu , respectivamente. La emisión de neutrones erosiona los efectos par-impar sobre la distribución de número de neutrones (N) de los fragmentos, definido como la diferencia de los rendimientos relativos de los fragmentos con número par (N_p) y número impar (N_i) de neutrones, respectivamente. Para evitar los efectos de la emisión de neutrones, se estudia la fisión fría, i.e. eventos de fisión sin emisión de neutrones. Para el estudio, se selecciona ventanas de energía cinética total (TE) cercanas al valor máximo de la energía disponible de la reacción, las que corresponden a bajos valores de energía de excitación total. Contrario a lo que se esperaba, en estas ventanas de elevada energía cinética se observa un débil efecto par-impar sobre la distribución de masa de fragmentos. Sin embargo, este resultado es compatible con un alto efecto par-impar sobre la distribución de cargas o sobre la distribución del número de neutrones. Por otro lado, en la fisión fría se observa que el valor mínimo de la energía de excitación total (X) que alcanzan los fragmentos, en función de la masa, está correlacionada con el “exceso de energía electrostática” definido como la diferencia entre la energía de interacción electrostática entre los fragmentos complementarios (asumidos esféricos) en el punto de escisión y el valor máximo de la energía disponible (Q). Esta correlación da cuenta de las fluctuaciones de la energía cinética máxima en función de la masa. Este efecto crece con la asimetría de las fragmentaciones de carga. En suma, los datos experimentales sobre la fisión fría sugieren que las configuraciones de escisión exploran todas las posibilidades que permite la energía disponible para la fisión.

Descriptor: Uranio-233, Uranio-235, Plutonio-239, Fisión fría

Pair breaking and coulomb effects in cold fission reactions from

$^{233}\text{U}(n_{\text{th}}, f)$, $^{235}\text{U}(n_{\text{th}}, f)$ y $^{239}\text{Pu}(n_{\text{th}}, f)$

Abstract

This paper shows the erosive consequences of neutron emission on the mass and kinetic energy distribution associated to fragments from neutron thermal induced fission of ^{233}U , ^{235}U . In addition, it is shown the effects of pair breaking and Coulomb interaction between fragments at scission on the distribution of mass and kinetic energy in the cold region of the thermal induced fission of ^{233}U , ^{235}U and ^{239}Pu , respectively. The fission process ends at the scission point, when the complementary fragments 1 and 2, having mass numbers A_1 and A_2 , respectively, are formed. Those fragments go away from each other and they acquire kinetic energies E_1 and E_2 , respectively. However, before they reach detectors, the fragments emit n_1 and n_2 neutrons. Thus, the final detected fragments have mass numbers $m_1 (= A_1 - n_1)$ and $m_2 (= A_2 - n_2)$ and kinetic energies $\epsilon_1 (= E_1 [1 - n_1/A_1])$ and $\epsilon_2 (= E_2 [1 - n_2/A_2])$, respectively (In the case that only one fragment is detected, the subscripts are omitted). As a result, in regions where the average of E , as a function of A , varies abruptly, the distribution of ϵ , will be wider than it was for the distribution of E as a function of A . Furthermore, the emission of neutrons erodes odd-even effects on the distribution of neutron number (N), defined as the difference between relative yields associated to fragments with even neutron number (N_p) and odd neutron number (N_o), respectively. Neutron emission, consequently,

* Correspondencia autor: mmontoya@ipen.gob.pe

also erodes the odd-even effect on the mass number distribution (σ_A) associated to fission fragments. In order to avoid these neutron emission effects, cold fission, i.e. fission with no neutron emission, is studied. For such study one selects windows of total kinetic energy (TE) near the maximum available energy (Q), corresponding to the minimal total excitation energy (X). Contrary to expected, in that low excitation energy region, a weak even-odd effect on mass number distribution is observed. This result is compatible with a strong odd-even effect on proton or neutron number distributions. Moreover, in cold fission, X as a function of A is correlated with the "Coulomb energy excess", which is defined as the difference between the electrostatic energy interaction in the scission point and the reaction Q -value. This effect is responsible of the fluctuations in the maximum kinetic energy as a function of the mass number. The Coulomb effects increase with the asymmetry of the charge fragmentations. In sum, the experimental data on cold fission suggest that scission configurations explore all the possibilities permitted by the available energy for fission.

Keywords: Uranium-233, Uranium-235, Plutonium-239, Cold fission

1. Introducción

Entre las propiedades más estudiadas de la fisión nuclear está la distribución de masa, carga y energía cinética de los fragmentos. Sin embargo R. Brissot *et al.*[1] mostraron que la emisión de neutrones por los fragmentos, antes de llegar a los detectores genera una estructura en la distribución de energía cinética y de masa de los fragmentos finales, inexistente en la distribución correspondiente a los fragmentos primarios. La emisión de neutrones también erosiona los efectos par-impar sobre la distribución del número de neutrones y, en consecuencia, sobre la distribución de masa de los fragmentos. Por estas razones se empezó a estudiar la fisión fría, correspondiente a regiones de elevada energía cinética en las que los fragmentos no emiten neutrones. En este trabajo se interpreta los resultados sobre distribuciones de masa y energía cinética, así como los efectos par-impar en las distribuciones de masa y carga en regiones de fisión fría en las reacciones $^{233}\text{U}(n_{th}, f)$, $^{235}\text{U}(n_{th}, f)$ Y $^{239}\text{Pu}(n_{th}, f)$, respectivamente.

1.1. Efectos de la emisión de neutrones en la medición de distribuciones de masa y energía

Supongamos que los fragmentos primarios complementarios de fisión tienen las masas A_1 y A_2 , las cargas Z_1 y Z_2 y los valores de energía cinética E_1 y E_2 , respectivamente. Debido a la conservación de cantidad de movimiento lineal, entre estos valores existe la siguiente relación:

$$A_1 E_1 = A_2 E_2,$$

Luego de la emisión de neutrones, los

fragmentos complementarios 1 y 2 terminarán con los números másicos

$$m_1 = A_1 - n_1$$

y

$$m_2 = A_2 - n_2,$$

Donde n_1 y n_2 son los números de neutrones emitidos por los fragmentos 1 y 2, respectivamente. Los correspondientes valores de la energía cinética final de los fragmentos serán:

$$e_1 = E_1 \left(1 - \frac{n_1}{A_1}\right),$$

y

$$e_2 = E_2 \left(1 - \frac{n_2}{A_2}\right).$$

Cuando solo se detecta uno de los fragmentos, que es lo que ocurre en el espectrómetro Lohengrin del ILL de Grenoble[1], se obvia el uso de subíndices. Para un determinado valor de la masa primaria (A) de los fragmentos, se tiene una distribución de energía cinética (E), caracterizada por un valor promedio $\bar{E}(A)$ y una desviación estándar $\sigma_E(A)$. En forma similar, la distribución de los valores de energía cinética en función de la masa de los fragmentos, después de la emisión de neutrones, es definida por el valor promedio $\bar{E}(m)$ y la desviación estándar $\sigma_E(m)$.

R. Brissot *et al.* midieron los valores de $\bar{E}(m)$ y $\sigma_E(m)$ para $^{235}\text{U}(n_{th}, f)$. Ellos usaron el espectrómetro Lohengrin en el reactor de alto flujo HFR del Instituto Laue Langevin (ILL) de Grenoble. La curva $\sigma_E(m)$ presentó un ensanchamiento para la masa alrededor de

$m = 110$, tal como había resultado en una simulación Monte Carlo realizada antes de que se llevara a cabo el experimento. En esta simulación se mostró que el ensanchamiento en la distribución de energía cinética es efecto de la emisión de neutrones. Para cada valor de m , la distribución de ϵ es resultado de la super-posición de distribuciones de energía cinética correspondientes a fragmentos con varios valores de A , mayores o iguales que m [1].

En la región de m entre 106 y 112, el valor de $\bar{\epsilon}$ cae abruptamente con el aumento m , alrededor de 4 MeV por unidad atómica de masa. Supongamos que el comportamiento para \bar{E} es similar al de $\bar{\epsilon}$ y que $\sigma_E(A)$ es 5 MeV para valores de A entre 106 y 112. Entonces, la energía cinética de los fragmentos con $A = 112$ es, en promedio, 8 MeV menor que la energía cinética de los fragmentos con $A = 110$. Por otro lado, los fragmentos con $A = 110$ que no emiten neutrones tienen valores altos de \bar{E} en su distribución primaria; y los fragmentos con $A = 112$ que emiten 2 neutrones tienen valores bajos de \bar{E} en su distribución primaria, cuyo promedio ya es 8 MeV menor que el promedio de \bar{E} para los fragmentos con $A = 110$. Ambos conjuntos de fragmentos, con masas iniciales 110 y 112, respectivamente, con valores de \bar{E} con diferencia en promedio de por lo menos 8 MeV, llegan con $m = 110$. La superposición de estos valores \bar{E} en la distribución para $m = 110$ contribuye con el ensanchamiento de $\sigma_\epsilon(m)$ para $m = 110$.

D. Belhafaf *et al.* [2], repitiendo el experimento sobre la reacción $^{235}\text{U}(n_{\text{th}}, f)$ de R. Brissot *et al.* [1], encontraron un ensanchamiento de la distribución de ϵ en torno $m = 126$. Para la reacción $^{233}\text{U}(n_{\text{th}}, f)$, estos autores encontraron un ensanchamiento de la distribución de ϵ en torno a $m = 124$. Las simulaciones que hicieron no reprodujeron esos resultados experimentales [2]. Por otro lado, H. Faust *et al.*[3], usando modelos teóricos para la dinámica de la fisión, calcularon la distribución de \bar{E} en función de A para la fisión del ^{233}U , pero no lo hicieron en torno a $A = 124$. Así, los

resultados experimentales de Belhafaf *et al.* No fueron confrontados con los cálculos teóricos de esos autores.

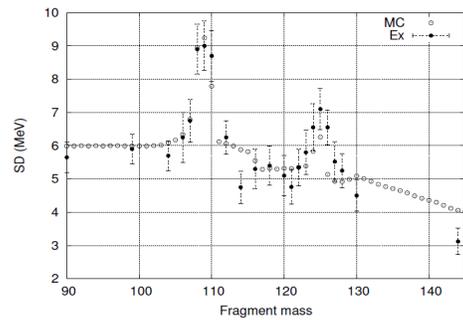


Figura 1. Resultados experimentales de Brissot *et al.* [1] y de simulación Monte Carlo [4 y 5] sobre desviación estándar de la distribución de energía cinética en función de la masa de los fragmentos de la reacción $^{235}\text{U}(n_{\text{th}}, f)$. Ver texto.

Los mencionados resultados experimentales D. Belhafaf fueron reproducidos por la simulación Monte Carlo de M. Montoya *et al.* [4,5], quienes mostraron que los mencionados ensanchamientos en la distribución de ϵ son generados por la superposición de distribuciones de los valores de \bar{E} de fragmentos con valores de A igual o mayores que m . Por ejemplo, en el caso de $^{235}\text{U}(n_{\text{th}}, f)$, el valor de $\bar{\epsilon}$ decrece de 88 MeV para $m = 125$, a 84 MeV para $m = 126$, cuando la tendencia en esta región es de crecimiento de $\bar{\epsilon}$ en función de m [2]. Ver Figura 1. En otras palabras, entre las masas finales 125 y 126, hay una variación abrupta de $\bar{\epsilon}$, en sentido contrario a la tendencia en el entorno de esas masas. Es razonable suponer que hay también una variación similar de \bar{E} en un intervalo en torno a la masa primaria A en la región de masas vecinas mayores que 126. La superposición de distribuciones de \bar{E} correspondientes a masas primarias igual o mayores que 126, con significativamente diferentes promedios, contribuye con el ensanchamiento de la distribución de ϵ para $m = 126$.

1.2. Emisión de neutrones y efectos par-impar en la fisión fría

El efecto par-impar en la distribución de masas de los fragmentos (σ_A) está definido por la siguiente relación:

$$\delta A = \frac{Y_{A_p} - Y_{A_i}}{Y_{A_p} + Y_{A_i}}$$

Donde Y_{A_p} e Y_{A_i} son los rendimientos fragmentos con masas par e impar, respectivamente.

En forma similar, se define el efecto par-impar en la distribución del número de neutrones (δN) y en la de protones (δZ), respectivamente.

Entre otras consecuencias, la emisión de neutrones erosiona el efecto par-impar sobre la distribución del número de neutrones y, por lo tanto, erosiona también el efecto par-impar sobre la distribución de masa de los fragmentos de fisión.

Los efectos par-impar en la distribución de carga de los fragmentos de la fisión a baja energía, previamente encontrados por A.L. Wahl *et al.* [6] y G. Mariolopoulos *et al.* [7], sugerían que, para los ventanas de valores altos de energía cinética, donde no hay emisión de neutrones, se tendría efectos par-impar más evidentes en la distribución de masa de los fragmentos.

Para estudiar las distribuciones de masa no perturbadas por la emisión de neutrones, C. Signarbieux *et al.* escogieron ventanas de alto valor de energía cinética de los fragmentos, en las reacciones $^{233}\text{U}(n_{th}, f)$, $^{235}\text{U}(n_{th}, f)$ y $^{239}\text{Pu}(n_{th}, f)$. El número de eventos analizados fueron 1.5×10^6 , 3×10^6 y 3.2×10^6 , respectivamente. Estos autores usaron el método de la diferencia de tiempo de vuelo de los fragmentos para llegar a detectores sólidos, con los que se mide la energía cinética. La separación de masas con el método de tiempo de vuelo de los fragmentos fue la prueba de que no hubo emisión de neutrones. El experimento se realizó en el reactor HFR del ILL de Grenoble [8,9].

En esta región de fisión fría no se encontraron efectos par-impar tan evidentes como se esperaba en la distribución de masa para ventanas de altos valores de energía cinética de los fragmentos, salvo para valores cercanos al valor máximo de la energía cinética en función de la masa de los fragmentos.

Vamos a mostrar que la ruptura de parejas de nucleones no implica ausencia de efectos par-impar en la distribución de protones o de neutrones. Para cada masa A , definamos como Z_0 , la carga correspondiente a las fragmentaciones con el mayor valor de energía disponible (Q). Supongamos que se produce ruptura de parejas de nucleones, pero que los fragmentos que alcanzan los valores máximos de energía cinética son los que tienen las cargas Z_0 .

Para la reacción $^{233}\text{U}(n_{th}, f)$, en la ventana de energía cinética de fragmento liviano E entre 113.5 y 114.5 MeV, se tiene la distribución de masa mostrada en la Figura 2 [9], de la que se calcula $\delta A = 32.18\%$, mientras que Clerc *et al.*[10], para $E = 114.1$ MeV, obtuvieron la distribución de masa mostrada en la Figura 3, de la que se calcula $\delta A = 30.14\%$. Si asumimos que las cargas corresponden a Z_0 , entonces se tendrá $\delta Z = 66.6\%$ y $\delta N = 33.3\%$. Este resultado es coherente con la proyección de los valores obtenidos por U. Quade *et al.*[11] para ventanas de menor energía cinética, tal como se muestran en las Figuras 4 y 5.

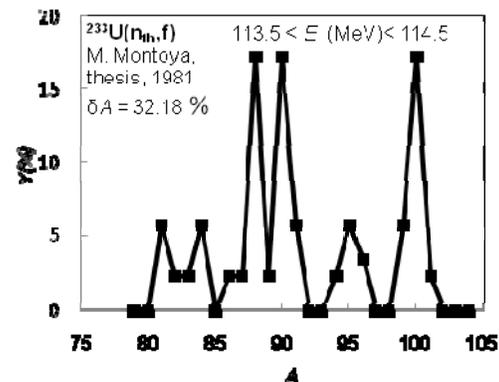


Figura 2. Distribución de masa en la ventana $113.5 < E < 114.5$ MeV en la reacción $^{233}\text{U}(n_{th}, f)$. Tomada de la Ref. 9. Ver texto. De esta figura calculamos $\delta A = 32.18\%$. Ver texto.

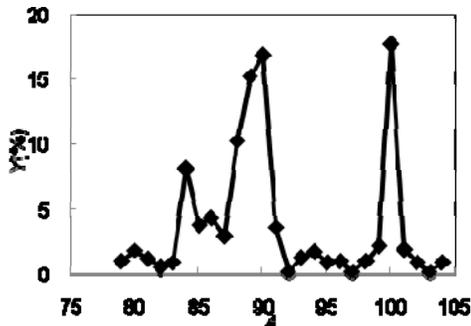


Figura 3. Distribución de masa en la ventana $E = 114.1$ MeV para la fisión fría en la reacción $^{233}\text{U}(n_{th}, f)$. Tomada de la Ref. 10. De esta figura calculamos $\delta A = 30.14\%$. Ver texto.

Si tomamos los fragmentos correspondientes a valores de energía cinética total (TE) mayores que 204 MeV, solo sobrevive el ^{104}Mo ($Z = 42$, $N = 62$) [9]; en cuyo caso $\delta A = 1$.

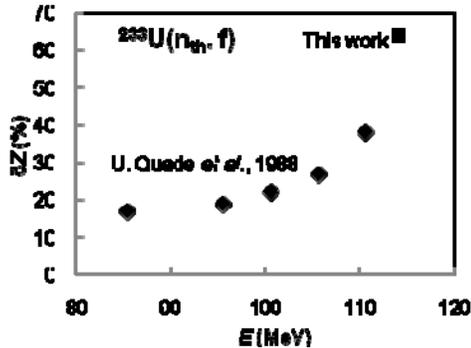


Figura 4. Efectos par-impar en la distribución de protones en la reacción $^{233}\text{U}(n_{th}, f)$ en función de la energía cinética E . Los valores son tomados de la Ref. 11, excepto el más elevado que corresponde a este trabajo. Ver texto.

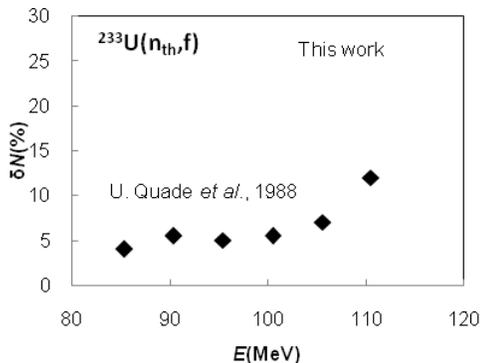


Figura 5. Efectos par-impar en la distribución de neutrones en la reacción $^{233}\text{U}(n_{th}, f)$ en función de la energía cinética E . Los valores son tomados de la Ref. 11, excepto el más elevado que corresponde a este trabajo. Ver texto.

Para la reacción $^{235}\text{U}(n_{th}, f)$, en la ventana E

entre 114.5 y 113.5 MeV, se tiene la distribución de masas mostrada en la Figura 6, de la que se calcula $\delta A = 15.3\%$. Para $E = 113.7$ MeV, W. Lang *et al.* obtuvieron la distribución de masas mostrada en la Figura 7, de la que se calcula $\delta A = 23.82\%$. Para $E = 108$ MeV, W. Langet *et al.* Obtienen $\delta A = 0$, $\delta Z = 35\%$ y $\delta N = 8\%$ [12]. Si asumimos que las cargas corresponden a Z_0 , entonces se tendrá $\delta Z = 66.6\%$ y $\delta N = 33.3\%$, valores coherentes con la proyección de los valores obtenidos por W. Lang *et al.* para ventanas de menores valores de energía cinética. Ver Figuras 8 y 9.

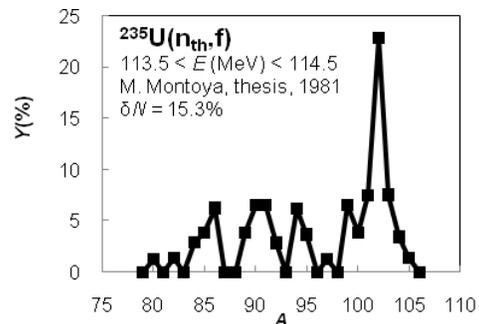


Figura 6. Distribución de masa en la ventana $113.5 < E < 114.5$ MeV en la reacción $^{235}\text{U}(n_{th}, f)$. Tomada de la Ref. 9. De esta figura calculamos $\delta A = 15.3\%$. Ver texto.

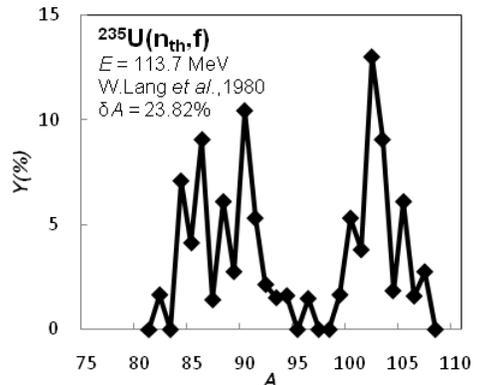


Figura 7. Distribución de masa para $E = 113.7$ MeV en la reacción $^{235}\text{U}(n_{th}, f)$. Tomada de la Ref. 12. De esta figura calculamos $\delta A = 23.82\%$. Ver texto.

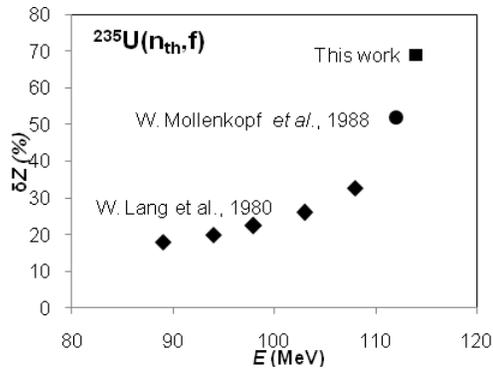


Figura 8. Efectos par-impar en la distribución protones en la reacción $^{235}\text{U}(n_{th}, f)$. Tomada de la Ref. 12 y 13, excepto el más elevado que corresponde a este trabajo. Ver texto.

Si tomamos las fragmentaciones correspondientes a $E = 203$ MeV, encontramos las masas entre 104 y 106, con 16 fragmentaciones con masa par 8 con masa impar [9], de lo que calcula $\delta A = 30\%$. Para $E = 200$ MeV, J. Trochon *et al.*[14] obtuvieron distribuciones de masa y carga de las que se obtiene, aproximadamente, $\delta A \approx 0.2$; $\delta Z \approx 0.6$ y $\delta N \approx 0.6$.

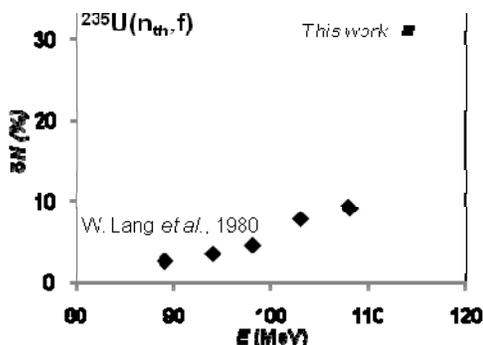


Figura 9. Efectos par-impar en la distribución neutrones en la reacción $^{235}\text{U}(n_{th}, f)$. Tomada de la Ref. 12. Los valores son tomados de la Ref. 11, excepto el más elevado que corresponde a este trabajo. Ver texto.

Para la reacción $^{239}\text{Pu}(n_{th}, f)$, para $E = 112$ MeV, C. Schmitt *et al.* obtienen la distribución mostrada en la Figura 10, de la que se calcula $\delta A \approx 3.7\%$. Para esa energía obtienen también $\delta Z \approx 15\%$ and $\delta N \approx 10\%$ [15]. Para $E > 119$ MeV, se obtiene la distribución de masa mostrada en la Figura 11, de la que se calcula $\delta A = 7.6\%$. Las masas que sobresalen en rendimiento son 84, 89, 96, 100 y 106. Si asumimos que para $E > 119$ MeV, las cargas corresponden a Z_0 ,

entonces se tendrá $\delta Z = 66.6\%$ y $\delta N = 33.3\%$, que es la proyección de los valores obtenidos por C. Schmitt *et al.* para ventanas más bajas de energía cinética. Ver Figura 12 y 13.

Para $E > 210$ MeV, se tiene masas entre 104 y 107, con el mayor rendimiento para la masa 106.

Para ventanas de menores valores de energía cinética, $\delta A = 0$. Este resultado no implica que δZ y δN sean nulos. Si se asume, por ejemplo, que siempre hay la ruptura de una pareja de nucleones, y no más que una (la que puede ser de protones o de neutrones) se deduce la relación:

$$1 + \delta A = \delta N + \delta Z.$$

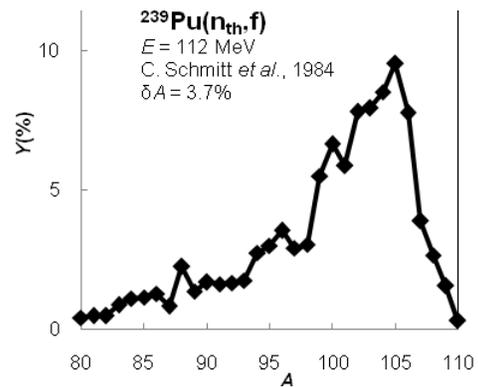


Figura 10. Distribución de masa para $E = 112$ MeV en la reacción $^{239}\text{Pu}(n_{th}, f)$. Tomada de la Ref. 15. De esta figura calculamos $\delta A = 3.7\%$. Ver texto.

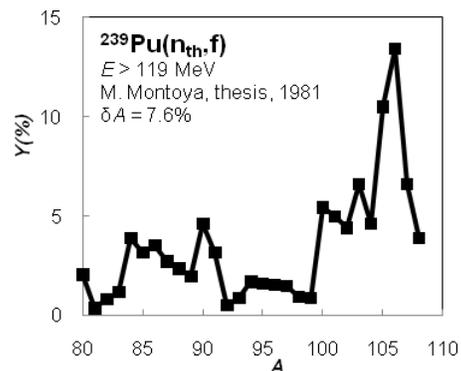


Figura 11. Distribución de masa para $E > 119$ MeV en la reacción $^{239}\text{Pu}(n_{th}, f)$. Tomada de la Ref. 9. De esta figura calculamos $\delta A = 7.6\%$. Ver texto.

Esta relación fue obtenida de un análisis combinatorio de ruptura de parejas de

nucleones [9]. H. Nifenecker [16] desarrolló otro modelo combinatorio que también llega a ese resultado.

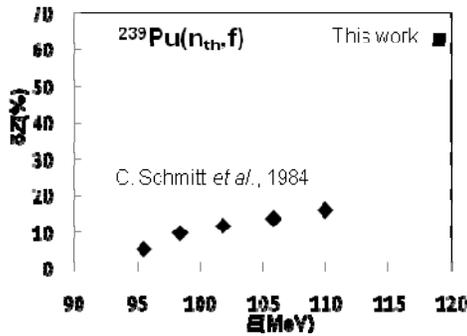


Figura 12. Efectos par-impar en la distribución protones en la reacción $^{239}\text{Pu}(n_{\text{th}}, f)$. Tomada de la Ref. 15, excepto el más elevado que corresponde a este trabajo. Ver texto.

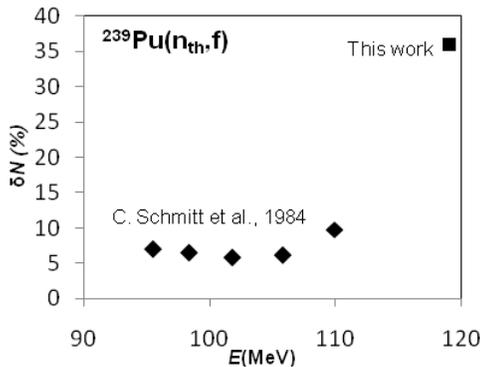


Figura 13. Efectos par-impar en la distribución neutrones en la reacción $^{239}\text{Pu}(n_{\text{th}}, f)$. Tomada de la Ref. 15, excepto el más elevado que corresponde a este trabajo. Ver texto.

1.3. Efectos de capas y efectos coulombianos en la fisión fría

En la distribución de masa y energía cinética de fragmentos de la región de fisión fría de las reacciones $^{233}\text{U}(n_{\text{th}}, f)$, $^{235}\text{U}(n_{\text{th}}, f)$ y $^{239}\text{Pu}(n_{\text{th}}, f)$ se observó efectos de capas y efectos llamados coulombianos, previa a cuya descripción definiremos algunas cantidades pertinentes.

Para analizar los mencionados efectos, definimos primero la función suavizada del valor máximo de Q (\bar{Q}), como una función lineal formada tomando la masa más liviana y la masa para la cual termina la tendencia lineal de Q. Luego se suaviza siguiendo la tendencia horizontal de Q para las masas transicionales.

Para cada pareja de fragmentos complementarios correspondientes las cargas Z_{Q} calculamos la energía de interacción electrostática (C) en una configuración de escisión, asumiéndolos esféricos con superficies separadas por 2 fm. El resultado es otra función escalera dependiente de masa.

De los datos experimentales, para cada valor de A , se calcula el valor máximo de la energía cinética total (K), definido como el umbral sobre el cual hay 10 eventos de fisión, en función de la masa del fragmento liviano.

Ahora definimos el exceso suavizado de energía electrostática mediante la relación siguiente:

$$\bar{C} = C - \bar{Q}$$

Y los valores suavizados de la energía de excitación mínima, en función de A , son definidos por la relación:

$$X = \bar{Q} - K$$

Para la reacción $^{233}\text{U}(n_{\text{th}}, f)$, los valores de C , K y \bar{Q} son graficados en la Figura 14.

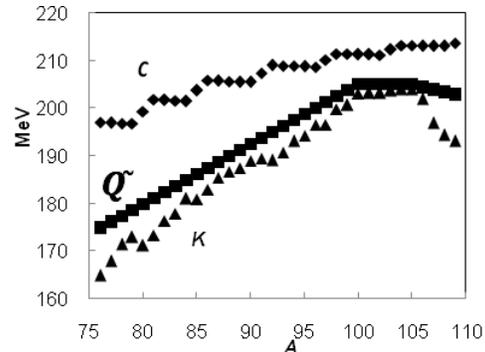


Figura 14. Energía de interacción electrostática entre fragmentos complementarios, considerados esféricos (C) separados por 2 fm, en el punto de escisión; curva suavizada de los valores máximos de la energía disponible (\bar{Q}); y valores máximos de la energía cinética total (K), para la reacción $^{233}\text{U}(n_{\text{th}}, f)$. Ver texto.

Las mediciones sobre las reacciones $^{233}\text{U}(n_{\text{th}}, f)$, $^{235}\text{U}(n_{\text{th}}, f)$ y $^{239}\text{Pu}(n_{\text{th}}, f)$ muestran resultados que son interpretados como efectos de la variación de la energía de interacción electrostática entre fragmentos al cambiar por una unidad la carga de uno de los fragmentos [17, 18].

Existe una correlación entre los valores suavizados del exceso de energía

electrostática (δC) y los valores suavizados de energía de excitación mínima X . Este resultado sugiere que, a mayor exceso de energía electrostática, mayor será la deformación de los fragmentos que deben tener los fragmentos en la escisión, lo que conllevará un mayor valor de X y, por lo tanto, un menor valor de K .

Para valores de A entre 78 y 100 en la reacción $^{233}\text{U}(n_{\text{th}}, f)$; entre 80 y 102, en la reacción $^{235}\text{U}(n_{\text{th}}, f)$, y entre 90 y 108 para la reacción $^{239}\text{Pu}(n_{\text{th}}, f)$, tanto δC como X son decrecientes en función de A .

Como se muestra en la Figura 14, en la reacción $^{233}\text{U}(n_{\text{th}}, f)$, los mayores valores de Q son aproximadamente 204 MeV y se producen en la región de masas $A = 100 - 106$, donde también se tiene los menores valores de δC . Ver Figura 15. Los valores de K alcanza el valor de Q para las masas correspondientes a los núcleos ($Z = 50, N = 80$) y ($Z = 42, N = 62$).

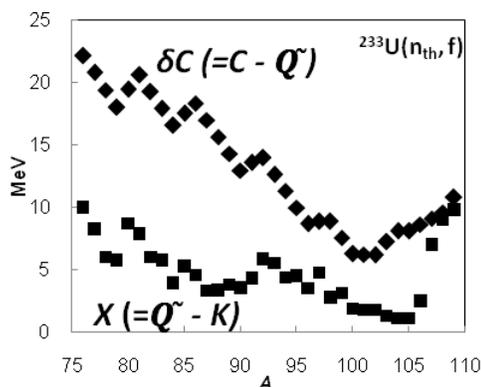


Figura 15. Curvas suavizadas del exceso colombiano $\delta C (= C - Q)$ de la configuración de escisión y de los valores mínimos de la energía de excitación $X (= Q - K)$ total en función de la masa de los fragmentos de la reacción $^{233}\text{U}(n_{\text{th}}, f)$. Ver texto.

Como se muestra en la Figura 16, para la reacción $^{235}\text{U}(n_{\text{th}}, f)$, tanto δC como X son aproximadamente nulos para A entre 100 y 106.

Como se muestra en la Figura 17, para la reacción $^{239}\text{Pu}(n_{\text{th}}, f)$, los menores valores de X ocurren para A entre 100 y 110.

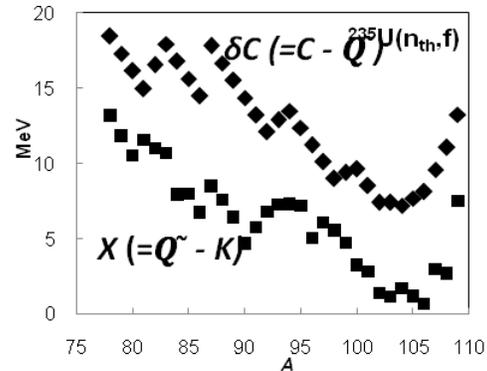


Figura 16. Curvas suavizadas del exceso colombiano $\delta C (= C - Q)$ de la configuración de escisión y de los valores mínimos de la energía de excitación $X (= Q - K)$ total en función de la masa de los fragmentos de la reacción $^{235}\text{U}(n_{\text{th}}, f)$. Ver texto.

Para las tres reacciones mencionadas, el valor de δC no es nulo. En la escisión, por lo menos uno de los fragmentos tiene que deformarse en forma prolata (alargada), en la dirección de la separación. Para deformarse, el fragmento gasta energía de deformación. Sin embargo, en los casos del molibdeno ($Z = 42$) con $N = 60, 62$ y 64 ; y el zirconio ($Z = 40$) con $N = 60, 62$ y 64 ; los núcleos son prolatos en sus estados fundamentales, además de ser transicionales y blandos [9]. En el punto de escisión, estos fragmentos están deformados sin gastar energía, y la energía electrostática es igual a la energía disponible.

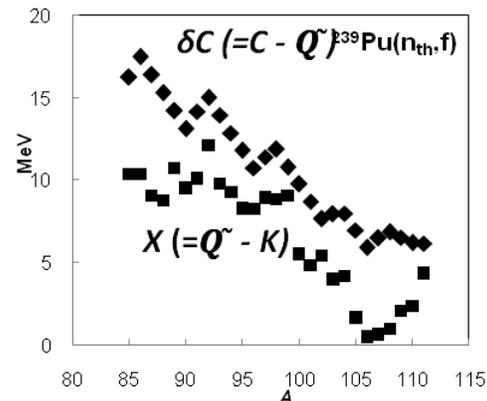


Figura 17. Curvas suavizadas del exceso colombiano $\delta C (= C - Q)$ de la configuración de escisión y de los valores mínimos de la energía de excitación $X (= Q - K)$ total en función de la masa de los fragmentos de la reacción $^{239}\text{Pu}(n_{\text{th}}, f)$. Ver texto.

Los resultados anteriores están relacionados con las estructuras en las curvas de rendimientos de masa. Para las reacciones $^{233}\text{U}(n_{\text{th}}, f)$, $^{235}\text{U}(n_{\text{th}}, f)$ y $^{239}\text{Pu}(n_{\text{th}}, f)$ [6, 7], las oscilaciones del rendimiento están en anticorrelación con las oscilaciones de βC .

Para la reacción $^{233}\text{U}(n_{\text{th}}, f)$, si tomamos la ventana de energía cinética de fragmento liviano E entre 113.5 y 114.5 MeV, las masas que sobresalen nítidamente son 90 y 100, los que corresponden a valores mínimos de βC [9,16].

Para la reacción $^{235}\text{U}(n_{\text{th}}, f)$, si tomamos la ventana E entre 114.5 y 113.5 MeV, las masas que sobresalen nítidamente son 90 y 102, los que corresponden a valores mínimos de βC .

Para la reacción $^{239}\text{Pu}(n_{\text{th}}, f)$, si tomamos $E > 118$ MeV, las masas que sobresalen son 84, 89, 96, 100 y 106, que corresponden a valores mínimos de βC .

Tanto en la reacción $^{233}\text{U}(n_{\text{th}}, f)$ como en $^{235}\text{U}(n_{\text{th}}, f)$, para $A > 100$, βC crece abruptamente con A ; en consecuencia, K decrece también abruptamente. Para la reacción $^{235}\text{U}(n_{\text{th}}, f)$, βC decrece para $A > 110$.

Las fluctuaciones de βC , que crecen con la asimetría de las fragmentaciones, están correlacionadas con fluctuaciones de X . Ello se debe a que las variaciones de la energía electrostática entre los fragmentos por cambio de una unidad de carga crecen con la asimetría como puede ser observada, por ejemplo, en la Figura 17, correspondiente a la reacción $^{233}\text{U}(n_{\text{th}}, f)$.

La energía de interacción electrostática entre dos fragmentos complementarios constituye una barrera para la fisión en el canal de carga y masa correspondiente. La probabilidad de ocurrencia de un par determinado de fragmentos será tanto mayor cuanto menor sea la diferencia entre esa barrera y la energía disponible. Así, para un mismo valor de Q y masas cercanas, los fragmentos con mayor asimetría en la fragmentación de cargas alcanzarán los mayores valores de energía cinética. Esto es equivalente a decir que para valores de TE cercanos al valor máximo de la distribución prevalecerán las fragmentaciones

más asimétricas de carga. Los efectos coulombianos en la fisión fría se manifiestan también en los rendimientos de cargas de fragmentos correspondientes a una misma masa impar. Con mayor asimetría de cargas se tiene mayor rendimiento, como lo demostraron W. Schwab *et al.* en el caso de la reacción $^{233}\text{U}(n_{\text{th}}, f)$ [19].

2. Conclusiones

En este trabajo se ha mostrado las consecuencias erosivas de la emisión de neutrones sobre la distribución de masa y energía cinética de los fragmentos de fisión de las reacciones $^{233}\text{U}(n_{\text{th}}, f)$, $^{235}\text{U}(n_{\text{th}}, f)$ y $^{239}\text{Pu}(n_{\text{th}}, f)$. Para evitar esas consecuencias, se ha estudiado la fisión fría, donde no se produce emisión de neutrones. Sin embargo, en la fisión fría también hay ruptura de parejas de neutrones; aunque en la región de energía cinética muy cercana al límite superior, superviven los fragmentos de masa par. Se ha mostrado un efecto para impar nulo en la distribución de masas, no es incompatible con efectos par-impar en la distribución de cargas y de neutrones. Por otro lado, se ha observado que, en la fisión fría, para fragmentaciones con la misma energía disponible hay mayor rendimiento de las fragmentaciones con mayor asimetría de cargas. Este efecto se manifiesta en fluctuaciones en el valor máximo de la energía cinética en función de la masa, las que son interpretadas como efecto coulombiano, debido a que aproximadamente cada cinco unidades de masa hay un cambio en las cargas que maximizan el valor de la energía disponible para la fisión, y por ende una fluctuación de la energía de interacción electrostática entre los fragmentos. También se manifiesta en las oscilaciones de rendimiento de masas para ventanas de altos valores de energía cinética de los fragmentos de fisión. Por las características de la interacción electrostática, este efecto es más notorio en regiones de mayor asimetría de masas. Los resultados de experimentos sobre fisión fría, obtenidos por diversos autores, sugieren que los fragmentos exploran todas las configuraciones de escisión que les permite la energía disponible.

3. Referencias

- [1] Brissot R, Bocquet JP, Ristori C, Crançon J, Guet CR, Nifenecker HA, Montoya M. Proceedings of a Symp. on Phys. and Chem. of Fission. Julich 14-18 may 1979. IAEA. Vienna, 1980.
- [2] Belhafaf D, Bocquet JP, Brissot R, Ristori C, Crançon J, Nifenecker H, Mougey J, Ramamurthy VS. Z. Physik A - Atoms and Nuclei. 1983; 309:253.
- [3] Faust HR, Bao Z. Nucl. Phys. A. 2004; 736(1-2):55-76.
- [4] Montoya M, Saettone E, Rojas J. Revista Mexicana de Física. 2007; 53:366-370.
- [5] Montoya M, Rojas J, Lobato I. Revista Mexicana de Física. 2008; 54:440-445.
- [6] Wahl AL, Norris AE, Williams RA. Proceedings of a Symp. on the Phys. and Chem. of Fission. IAEA. Vienna, (1969), p. 813.
- [7] Mariolopoulos G, Hamelin C, Blachot J, Bocquet JP, Brissot R, Crançon J, Nifenecker H, Ristori C. Nucl. Phys. A. 1981; 361(1):213-241.
- [8] Signarbieux C, Montoya M, Ribrag M, Mazur C, Guet C, Perrin P, Maurel M. J. Physique Lettres. 1981; 42: L-437.
- [9] Montoya M. Tesis Doctoratd'Etat, Universidad París XI, Orsay, 1981.
- [10] Clerc HG, Lang W, Mutterer M, Schmitt C, Theobald JP, Quade U, Rudolph K, Armbruster P, Gönnerwein F, Schrader H, Engelhardt D. Nucl. Phys. A. 1986; 452(2):277-295.
- [11] Quade U, Rudolph K, Skorka S, Armbruster P, Clerc HG, Lang W, Mutterer M, Schmitt C, Theobald JP, Gönnerwein F, Pannicke J, Schrader H, Siegert G, Engelhardt D. Nucl. Phys. A. 1988; 487(1):1-36.
- [12] Lang W, Clerc HG, Wohlfarth H, Schrader H, Schmidt KH. Nucl. Phys. A. 1980; 345(1):34-71.
- [13] Mollenkopf W, Kaufmann J, Gönnerwein F, Geltenbort P, Oed A. Journal Phys. G: Nucl. Part. Phys. 1992; 18(11): L203-L210
- [14] Trochon J, Simon G, Behrens JW, Brissard F, Signarbieux C. Radiation Effects. 1986; 92(1-4):327-332.
- [15] Schmitt C, Guessous A, Bocquet JP, Clerc HG, Brissot R, Engelhardt D, Faust HR, Gönnerwein F, *et al.* Nucl. Phys. A. 1984; 430(1):21-60.
- [16] Nifenecker H, Mariolopoulos G, Bocquet JP, Brissot R, Hamelin C, Crançon J, Ristori C. Z. Phys. A. - Atoms and Nuclei. 1982; 308:39-49.
- [17] Montoya M. Z. Phys. A - Atoms and Nuclei. 1984; 319:219-225.
- [18] Montoya M, Hasse RW, Koczon P. Z. Phys. A - Atoms and Nuclei. 1986; 325:357-362.
- [19] Schwab W, Clerc HG, Mutterer M, Theobald JP, Faust H. Nucl. Phys. A. 1994; 577(3-4):674-690.