

## Demostración analítica de influencia de la emisión de neutrones en la distribución de carga en función la energía cinética de fragmentos finales en la fisión nuclear de actínidos

### Analytical demonstration of influence of neutron emission on the charge distribution as a function of kinetic energy of final fragments in the nuclear fission of actinides

Modesto Montoya<sup>1</sup>

#### RESUMEN

En este trabajo se muestra analíticamente que la pendiente de la curva carga promedio ( $\bar{z}$ ) en función de la energía ( $e$ ) de fragmentos finales, para valores de masa ( $m$ ) en la fisión de actínidos, es debida a la emisión de neutrones. Para demostrar esta tesis, se usa las siguientes hipótesis: i) el promedio de cargas es igual para todos los valores de energía cinética; ii) no hay emisión de partículas cargadas, por lo que la carga de un fragmento final es igual a la de un fragmento primario ( $\bar{z} = \bar{Z}$ ); iii) el número de neutrones ( $n$ ) emitidos disminuye con el aumento de la energía cinética de los fragmentos. El rendimiento de la masa final  $m$  recibe la contribución de los fragmentos primarios con masa  $A$  que hayan emitido  $n$  neutrones, de modo que ( $m = A - n$ ). Para menores valores de energía cinética, que corresponden a elevados valores de energía de excitación i.e. menores valores de energía cinética, se tendrá mayor número de neutrones, lo que significa para el rendimiento de la masa final  $m$  contribuirán fragmentos con altos valores de  $A$ , lo que implica altos valores de carga  $Z$ . En consecuencia, para valores menores de energía, se tendrá mayores valores promedio de  $Z$ .

**Palabra clave:** Fusión nuclear, emisión de neutrones, fragmentos, carga, masa, energía cinética

#### ABSTRACT

In this work we analytically show that the slope of the average charge curve ( $\bar{z}$ ) as a function of the energy ( $e$ ) of final fragments, for mass values ( $m$ ) in the fission of actinides, is due to neutron emission. In order to demonstrate this thesis, the following hypotheses are used: i) the average of charge is the same for all values of kinetic energy ; ii) there is no emission of charged particles, so the charge of a final and primary fragments is the same ( $\bar{z} = \bar{Z}$ ); iii) the number of neutrons ( $n$ ) emitted decreases with increasing kinetic energy of the fragments. The yield of the final mass  $m$  receives the contribution of the primary fragments with mass  $A$  that have emitted  $n$  neutrons, so that ( $m = A - n$ ). For lower kinetic energy values, which correspond to high excitation energy values i.e. lower values of kinetic energy, we will have higher number of neutrons, which means for yield of the final mass  $m$  contribute fragments with high values of  $A$  which implies high charges. Consequently, for lower values of kinetic energy, will have higher average values of  $Z$ .

**Keywords:** nuclear fission, neutron emission, fragments, charge, kinetic energy

1. PhD. Universidad Nacional de Ingeniería, Av. Túpac Amaru 210. Lima, Perú.

## INTRODUCCIÓN

El proceso de fisión nuclear de un actínido empieza entre el punto de ensilladura y termina en la escisión. El punto de ensilladura corresponde al estado deformado del núcleo físil, a partir del cual la fisión se inicia irreversiblemente.

El punto de escisión es aquel en el que la interacción nuclear se desvanece y sólo queda la interacción coulombiana. La energía potencial coulombiana se convierte en energía cinética total de los fragmentos.

Para estudiar el proceso de fisión entre los puntos de ensilladura y de escisión, respectivamente, sería necesario medir la distribución de masa ( $A$ ), carga ( $Z$ ) y energía cinética ( $E$ ) de los fragmentos primarios (tal cuales salieron del proceso de fisión). Sin embargo, cualquiera que sea el método, solo se tiene alcance a los valores finales de masa ( $m$ ), carga ( $z$ ) y energía cinética ( $e$ ), después que los fragmentos emiten radiación, principalmente neutrones (1-6).

Una de las formas de medir la distribución arriba mencionada es midiendo la distribución de carga para ventanas de energía cinética de los fragmentos finales.

En la región de fisión fría, en la que no hay emisión de neutrones, se observa que, entre dos fragmentaciones isobáricas con valores similares de energía disponible ( $Q$ ), las particiones más asimétricas de carga alcanzan el mayor valor máximo de energía cinética total. En esta región, los valores finales de ( $z$ ,  $m$ ,  $e$ ) son iguales a los primarios iguales a los primarios ( $Z$ ,  $A$ ,  $E$ ). Con la disminución de la energía cinética se observa un incremento en la carga promedio de los fragmentos.

En este trabajo vamos a mostrar que la pendiente negativa de la curva de carga promedio en función de la energía final de fragmentos, con un valor determinado de masa, se debe a la emisión de neutrones por parte de los fragmentos de fisión.

## Hipótesis sobre distribuciones primarias

Para encontrar cómo la emisión de neutrones distorsiona la distribución de cargas en función de la masa y la energía vamos a asumir las siguientes hipótesis:

1) Para una masa primaria  $A$ , el valor promedio de carga para cualquier valor de energía  $E$  es:

$$\bar{Z}(E, A) = \bar{Z}(A),$$

Donde  $Z(A)$  es independiente de la energía cinética de fragmentos

2) No hay emisión de partículas cargadas, por lo que la carga del fragmento final y primario es la misma ( $z = Z$ ).

3) El número de neutrones ( $n$ ) emitidos disminuye con el aumento la energía cinética de los fragmentos.

4) Los mayores valores de  $A$  significan mayores valores promedio de carga  $Z$ . Lo dicho puede plasmarse en la expresión para cualquier valor de  $n$  mayor que cero.

$$\bar{Z}(A + n) > \bar{Z}(A),$$

## Distribución final de carga en función de la energía cinética

### Caso de valores similares de energía cinética promedio

Una de las formas de presentar la distribución de fragmentos es carga promedio  $z$  en función de la energía cinética final  $e$  para valores fijos de masa final  $m$  y el mismo valor del número de neutrones emitidos en función de la energía cinética de los fragmentos:

$$n = \text{techo}(\alpha - \beta E).$$

Supongamos que la distribución de energía cinética es la misma en una región de masas, como sucede en los casos de la fisión del  $^{233}\text{U}$  y el  $^{235}\text{U}$ , respectivamente. Por simplicidad, supongamos que:

$$\begin{aligned} \text{Si } E \leq \bar{E}, & \quad n = 1 \\ \text{Si } E > \bar{E}, & \quad n = 0. \end{aligned}$$

Asumamos, además, que la emisión de un neutrón no cambia la energía del fragmento. Entonces, para m entre 90 y 105 se tendrá:

$$\begin{aligned} \bar{z}(e, m) &= \bar{Z}(m), & \text{para } e > \bar{e}; \\ \bar{z}(e, m) &= \bar{Z}(m + 1), & \text{para } e \leq \bar{e}. \end{aligned}$$

En este caso simple, para un valor fijo de m, la función  $z(e)=z(e,m)$  es una función escalera con dos valores, de los cuales el mayor es el que corresponde a los valores de e. Esa función será una escalera más alta y tendrá un número de escalones que depende del número de neutrones emitidos en por los fragmentos primarios con masas

$$A = m, m + 1, \dots, m + n_{\max}$$

Donde  $n_{\max}$  es el número máximo de neutrones emitidos por los fragmentos que terminan con la masa final m.

### Caso de valores energía cinética promedio decreciente con la masa

Para este caso, un razonamiento similar nos lleva la conclusión que la carga promedio también será decreciente en función de la energía final de los fragmentos, con la diferencia que primer escalón empieza a un valor menor de energía cinética.

### Caso de valores energía cinética promedio creciente con la masa

Tomando el caso similar al primero, es decir que se emite cero o un neutrón, con la diferencia que los fragmentos con masa primaria  $A=m+1$  tiene un mucho mayor valor promedio de energía cinética:

$$\bar{E}(m + 1) = \bar{E}(m) + \Delta,$$

Entonces:

$$\begin{aligned} \bar{z}(e, m) &= \bar{Z}(m + 1), & \text{para } e > E_{\max}(m); \\ \bar{z}(e, m) &= \bar{Z}(m), & \text{para } e \leq E_{\min}(m + 1). \end{aligned}$$

Para valores de e tales que:

$$E_{\min}(m + 1) \leq e \leq E_{\max}(m)$$

Se tendrá valores intermedios entre:

$$\bar{Z}(m + 1)$$

En suma, en este caso se tendrá que la carga promedio es creciente en función de la energía cinética de los fragmentos.

Cuando el número de neutrones emitidos es mayor que uno, en forma similar que el primer caso, se puede demostrar que la carga promedio es creciente en función de la energía cinética de los fragmentos, pero con un mayor rango de carga promedio.

## CONCLUSIÓN

La emisión de neutrones por parte de los fragmentos de fisión distorsiona la distribución de carga, masa y energía, sobre la que se basa las investigaciones para comprender la dinámica de este proceso. Si no se toma en cuenta esta distorsión, los modelos que se propongan sobre esa dinámica estarían basados en resultados erróneos. Para corregir las distorsiones será necesario simulaciones por el método Monte Carlo.

Para estas simulaciones se requiere equipos interdisciplinarios de físicos, matemáticos y científicos e ingenieros de la computación.

## REFERENCIAS

- H.-G. Clerc H G et al.: Nuclear Physcis A452. 1986, 277-295.
- U. Quade et al.: A487 (1988) 1-36.
- E.-J. Hamsch et al.: Nuclear Physics A554. 1993, 209-222.
- W. Schwab et al.: Nucl. Phys. A577. 1994, 674-690.
- J.L. Sida et al. : Nucl. Phys. A502 (1989) 233-242.
- P. Grabitz et al.: Journal of Low Temperature Physics, 184 (2016) 944-951.