

CAPÍTULO I. Fundamentos de física atómica y nuclear.

En este capítulo se hace una recopilación de conceptos de física atómica y nuclear que facilitarán el entendimiento y desarrollo del tema de esta tesis.

a. Conceptos básicos¹

Este primer capítulo es una introducción a la física atómica y nuclear, describiendo la estructura fundamental de la materia, características de las partículas subatómicas e interacciones entre ellas, así como, reacciones nucleares y principales procesos relacionados con la energía nuclear.

Electrón

El electrón tiene una masa en reposo $m_e = 9.10954 \times 10^{-31}$ Kg. y una carga eléctrica de $e = 1.60219 \times 10^{-19}$ C. Existen dos tipos de electrones uno con carga negativa $-e$ y otro con carga positiva $+e$. Excepto por la diferencia en los signos de la carga, estas dos partículas son idénticas. Los electrones negativos o negatrones son los más comunes; los electrones positivos o positrones son relativamente raros. Cuando, bajo ciertas circunstancias, un positrón choca con un negatrón, los dos electrones desaparecen y son emitidos dos fotones.

Protón

Esta partícula tiene una masa en reposo $m_p = 1.67265 \times 10^{-27}$ Kg. y cuenta con una carga eléctrica positiva igual en magnitud a la carga del electrón.

Neutrón

La masa del neutrón es ligeramente más grande que la masa del protón $m_n = 1.67495 \times 10^{-27}$ Kg. y es eléctricamente neutro. El neutrón es una partícula inestable, excepto cuando se encuentra confinado dentro de un núcleo atómico. Un neutrón decae en protón con la emisión de un electrón (partícula β^-) y un antineutrino, proceso que toma en promedio 12 minutos.

Fotón

Partícula elemental responsable de las manifestaciones cuánticas del fenómeno electromagnético.

¹ John R. Lamarsh and Anthony J. Baratta. Introduction to Nuclear Engineering. 3rd edition, New Jersey, Prentice-Hall.

Es la partícula portadora de todas las formas de radiación electromagnética, incluyendo a los rayos gamma, los rayos X, la luz ultravioleta, la luz visible, la luz infrarroja, las microondas, y las ondas de radio. El fotón tiene una masa en reposo de cero y viaja en el vacío con una velocidad constante c ($c = 2.9979 \times 10^8$ m/s). Como todos los cuantos, el fotón presenta tanto propiedades corpusculares como ondulatorias ("dualidad onda-corpúsculo").

Se comporta como una onda en fenómenos como la refracción que tiene lugar en una lente, o en la cancelación por interferencia destructiva de ondas reflejadas; sin embargo, se comporta como una partícula cuando interacciona con la materia para transferir una cantidad fija de energía.

Masa atómica²

Por acuerdo internacional, la masa atómica es la masa de un átomo, en unidades de masa atómica (uma). Una unidad de masa atómica se define como una masa exactamente igual a un doceavo de la masa de un átomo de carbono 12, denotado ^{12}C . El ^{12}C es el isótopo del carbono que tiene seis protones y seis neutrones. Al fijar la masa del ^{12}C como 12 uma, se tiene el átomo que se utiliza como referencia para medir la masa atómica de los demás elementos. Por ejemplo, ciertos experimentos han demostrado que, en promedio, un átomo de hidrógeno tiene sólo 8.400% de la masa del átomo del ^{12}C . De modo que si la masa de un átomo de ^{12}C es exactamente 12 uma, la masa atómica del hidrógeno debe ser 0.084×12 uma, es decir, 1.008 uma.

Sin embargo, cuando se busca la masa atómica del carbono en una tabla periódica, se encontrará que su valor no es 12 uma, sino 12.01 uma. La razón de esta diferencia es que la mayor parte de los elementos de origen natural tienen más de un isótopo. Esto significa que al medir la masa atómica de un elemento, por lo general, se debe establecer la masa promedio de la mezcla natural de los isótopos, es decir, un promedio ponderado. Por ejemplo la abundancia natural del ^{12}C y del ^{13}C es de 98.90% y 1.10%, respectivamente. Se ha determinado que la masa atómica del ^{13}C es de 13.00335 uma, la masa atómica del carbono es de 12.01 uma, correspondiente al valor promedio ponderado por la abundancia de sus componentes.

Número de Avogadro y masa molar de un elemento³

En el Sistema Internacional, el mol es la cantidad de una sustancia que contiene tantas entidades elementales (átomos, moléculas u otras partículas) como átomos hay exactamente en 12 g del isótopo de ^{12}C . El número real de átomos en 12 g de ^{12}C se determina experimentalmente.

² Raymond Chang Williams. Química. 9ª edición. México. Editorial Mc Graw Hill, 2007. ISBN -13 978-0-07-298060-8

³ Ibid.

Este número se denomina número de Avogadro (N_A), en honor del científico italiano Amedeo Avogadro.

El valor comúnmente aceptado es:

$$N_A = 6.0221367 \times 10^{23} \text{ átomos (o moléculas) / mol}$$

Un mol de átomos de ^{12}C tiene una masa exactamente de 12 g y contiene 6.022×10^{23} átomos. Esta cantidad de ^{12}C es su masa molar y se define como la masa (en gramos o kilogramos) de 1 mol de unidades (como átomos o moléculas) de una sustancia. Observe que la masa molar del ^{12}C (en gramos) es numéricamente igual a su masa atómica expresada en uma. De igual forma sucede con cualquier otro elemento. Si se conoce la masa atómica de un elemento, también se conoce su masa molar.

Una vez que se conocen la masa molar y el número de Avogadro, es posible calcular la masa, en gramos, de un solo átomo de ^{12}C . Por ejemplo, se sabe que la masa molar del ^{12}C es 12 g y que hay 6.022×10^{23} átomos de ^{12}C en 1 mol de sustancia; por tanto, la masa de un átomo de ^{12}C está dada por:

$$\frac{12.00 \text{ g / mol}}{6.022 \times 10^{23} \text{ átomos / mol}} = 1.993 \times 10^{-23} \text{ g / átomo}$$

Debido a que la masa de todo átomo de ^{12}C es exactamente 12 uma, el número de unidades de masa atómica equivalente a 1 gramo es:

$$\frac{\text{uma}}{\text{gramo}} = \frac{12 \text{ uma / átomo}}{1.993 \times 10^{-23} \text{ g / átomo}}$$

Por lo tanto:

$$1 \text{ g} = 6.022 \times 10^{23} \text{ uma}$$

$$1 \text{ uma} = 1.661 \times 10^{-24} \text{ g}$$

Masa molecular⁴

Es posible calcular la masa de las moléculas si se conocen las masas atómicas que las forman. La masa molecular es la suma de las masas atómicas (en uma) en una molécula.

Por ejemplo, la masa molecular del H₂O es

$$2 \text{ (masa atómica del H) + masa atómica del O}$$

o bien

$$2 (1.008 \text{ uma}) + 16.00 \text{ uma} = 18.02 \text{ uma}$$

Modelo nuclear⁵

La estructura atómica puede ser en realidad un tema muy complejo, sin embargo en la ingeniería nuclear el modelo utilizado es muy simple, se parte del modelo del átomo convencional, el cual consiste de un núcleo rodeado por una nube de electrones en órbita. El núcleo puede verse como un conjunto denso y fuertemente ligado a protones y neutrones; los protones tienen una carga eléctrica positiva igual en magnitud a la de un electrón. Los neutrones no tienen carga eléctrica. La masa del núcleo constituye la mayor parte de la masa total del átomo, pero el núcleo ocupa sólo $1/10^{13}$ del volumen total del átomo.

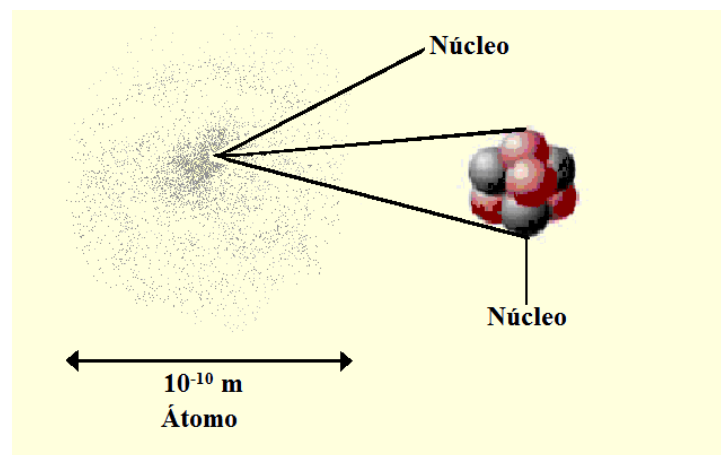


Figura 1. Modelo nuclear [1]

⁴ Ibid.

⁵ Ibid.

Al número de protones en el núcleo se le da el nombre de número atómico y se le designa con una Z. Al número de neutrones en el núcleo se le designa con una N. Una cantidad más es la suma, Z+N, la cual se designa con una A, y recibe el nombre de número de masa.

A los neutrones y protones, constituyentes del núcleo, se les llama nucleones.

$$A = Z + N$$

en donde:

A = Número de masa = Número de nucleones

Z = Número atómico = Número de protones

N = Número de neutrones

En un átomo neutro, el número de electrones que giran alrededor del núcleo es igual al número de protones del mismo, lo que hace al átomo eléctricamente neutro.

El número atómico, Z, determina las características químicas de un material; todos los átomos con un valor dado de Z pertenecen al mismo elemento químico. La forma aceptada para representar el número atómico y el número de masa de un elemento X es como sigue:



No todos los átomos de un elemento determinado tienen la misma masa. La mayoría de los elementos tienen dos o más isótopos, átomos que tienen el mismo número atómico pero diferente número de masa. Por ejemplo, existen tres isótopos del hidrógeno. Uno de ellos, que se conoce como hidrógeno o protio, tiene un protón y no tiene neutrones. El isótopo llamado deuterio contiene un protón y un neutrón, y el tritio tiene un protón y dos neutrones.



Protio



Deuterio



Tritio

Otro ejemplo son dos isótopos comunes de uranio:



Las propiedades químicas de un elemento están determinadas, principalmente, por los protones y electrones de sus átomos; los neutrones no participan en los cambios químicos en condiciones normales. En consecuencia, los isótopos del mismo elemento tienen un comportamiento químico semejante.

Energía de enlace

La energía de enlace se define como la diferencia de energía entre el núcleo dado y los nucleones, cuando éstos se encuentran en estado libre.

La fórmula para la energía de enlace por nucleón del núcleo ${}^A_Z X$ se obtiene así:

$$\text{Energía de enlace} = \frac{NM_n + ZM_H - M_X}{A}$$

Donde M_n es la masa del neutrón, M_H es la masa del átomo de hidrógeno y M_X es la masa del núcleo ${}^A_Z X$. Por lo general se mide en MeV.

En la Figura 2 se muestra una gráfica de la energía de enlace por nucleón en función del número de masa para todos los núcleos. Con la excepción de los importantes zig-zags en el extremo izquierdo, la energía de enlace aumenta con el número de masa, pasa por un máximo y luego disminuye. En el centro tiene la mayor energía de enlace, es decir, es más estable.

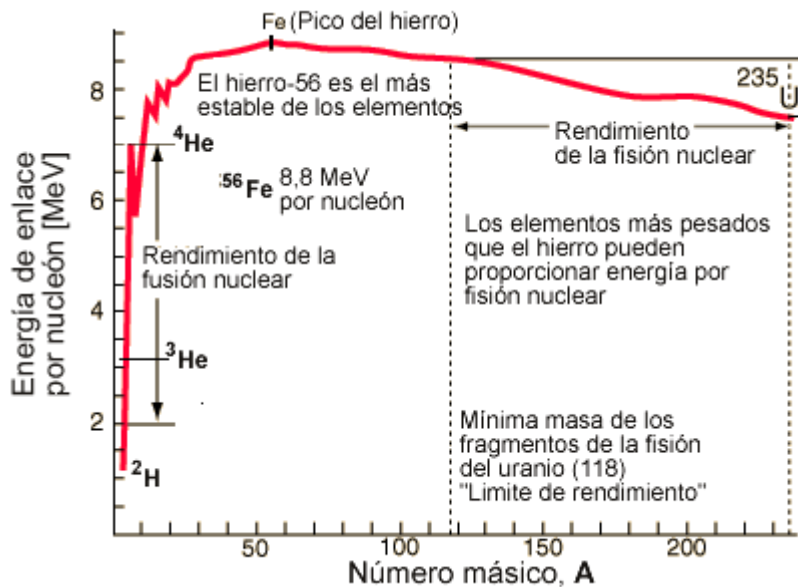
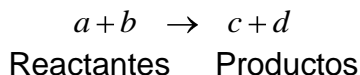


Figura 2. La energía de enlace promedio por nucleón en función del número de masa [2]

Nomenclatura de las reacciones nucleares

En la mayoría de las reacciones nucleares se tienen dos partículas o núcleos que interactúan para formar dos núcleos diferentes. Así



Cualquier reacción debe satisfacer el requisito de que la suma de los números atómicos y los números de masa de los reactantes y los productos deben balancearse. En otras palabras:

$$Z_a + Z_b = Z_c + Z_d$$
$$A_a + A_b = A_c + A_d$$

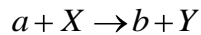
Sin embargo, la masa sí cambia.

Aunque no hay limitaciones teóricas sobre lo que pueden ser los nuclidos a, b, c y d, prácticamente a menudo sucede que ambos lados de la ecuación incluyen un nuclido muy ligero o un electrón, a éstos se les llama “partículas”. Las más comunes de éstas se dan en la Tabla 1.

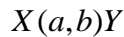
Tabla 1. Propiedades de las partículas comunes en las reacciones nucleares [2]

Nombre	Representación formal	Representación Común	Masa en reposo	Carga
Electrón	${}^0_{-1}e$	e^- ó β^-	0.0005486	-1
Positrón	${}^0_{+1}e$	e^+ ó β^+	0.0005486	+1
Neutrón	1_0n	n	1.008665	0
Protón	---	p	1.007277	+1
Protio	1_1H	H	1.007825	+1
Deuterio	2_1H	D	2.014127	+1
Tritio	3_1H	T	3.016049	+1
Alfa	4_2He	α	4.002603	+2

Si se designa a la partícula con letra minúscula, se puede escribir una reacción nuclear en la forma,



En una notación abreviada común



La radiación⁶

La radiación siempre ha existido sobre la Tierra y a través del cosmos. Es energía transmitida a distancia a través de ondas o partículas. El término de radiación incluye tanto a la luz como a las ondas de radio, pero usualmente se refiere a radiación ionizante. Su nombre se refiere a su habilidad para ionizar (cargar eléctricamente) átomos estables, lo cual puede alterar la composición química de cualquier sustancia incluyendo tejido vivo. La radiación ionizante no se puede detectar con ninguno de nuestros cinco sentidos. La radiación ionizante puede consistir en partículas energizadas o en ondas de energía pura.

Algunos elementos presentes en la naturaleza, tales como el uranio, el radio, el torio, son inestables y emiten radiación ionizante cuando se transforman en átomos más estables. Se dice que estos átomos son radiactivos. Otros elementos creados artificialmente por el hombre como el plutonio y el curio también son radiactivos.

Fuentes de radiación⁷

Todos los seres vivos reciben radiación tanto de fuentes naturales como de fuentes creadas por el hombre. La altitud y la composición del suelo influyen en la cantidad de radiación que recibimos, la frecuencia de viajes aéreos, de radiografías y tratamientos de medicina nuclear también influyen.

Son fuentes de radiación natural:

- La radiación natural de fondo, proveniente por ejemplo del radón, el cual es un gas radiactivo emitido por el decaimiento natural de elementos radiactivos contenidos en la corteza terrestre.
- La radiación de los rayos cósmicos procedentes del espacio exterior.

⁶ Dra. Cecilia Martín del Campo Márquez. "Curso Principios Básicos de la Energía Nuclear". Sociedad de Energía y Medio Ambiente de la Facultad de Ingeniería, UNAM. Material inédito. México, D.F. Enero 2009.

⁷ Ibid.

- Los materiales de construcción de casas, calles y edificios son también ligeramente radiactivos a causa de los minerales que contienen.
- Fuentes de radiación natural se encuentran también en cuerpos de plantas, animales y humanos, por ejemplo en el cuerpo humano los tejidos contienen carbón radiactivo.

Son fuentes de radiación creadas por el hombre:

- Rayos-X, diagnósticos y tratamientos de medicina nuclear.
- Detectores de humo, televisores, computadoras.
- Centrales nucleoelectricas.
- Centrales carboelectricas.

En los reactores nucleares el combustible de uranio se convierte en material altamente radiactivo mientras se produce el calor aprovechado para generar energía eléctrica. Sin embargo la cantidad de radiación liberada durante la operación normal de una central nuclear es muy pequeña comparada con la cantidad de radiación de origen natural y la creada por el hombre en otras fuentes. Un estudio de la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos de América (EUA), estima que una persona viviendo en EUA recibe en promedio menos de 1 %, del total de su exposición a la radiación, de las *operaciones industriales de la energía nuclear*.

Existen principalmente tres tipos de radiación en el decaimiento radiactivo (ver Figura 3):

Alfa. Partícula pesada (núcleo de helio) y carga eléctrica positiva, no necesita ningún blindaje, basta para detenerla unos centímetros de aire o algunas centésimas de milímetro de agua, una bata de tela o una hoja de papel.

Beta. Partícula ligera con la masa y la carga eléctrica del electrón pero puede ser negativa (β^-) o positiva (β^+), se detiene con algunos metros de aire, unos milímetros de agua, o un sólido delgado (hoja de aluminio).

Gama. Radiación electromagnética de naturaleza similar a la de la luz, es muy penetrante y para protegerse de ella, son necesarios blindajes de un material pesado, como pueden ser el plomo o el hormigón, de gran espesor

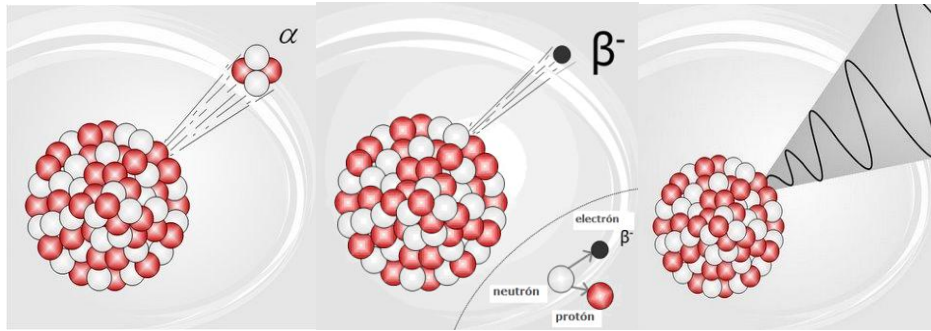


Figura 3. Tipo de radiación por decaimiento radiactivo[2]

Otro tipo de radiación son los neutrones que se producen en las reacciones de fisión dentro de los reactores nucleares. Éstos son también muy penetrantes.

La rapidez del decaimiento radioactivo⁸

La desintegración de un cuerpo radiactivo es un proceso aleatorio; ello quiere decir que si consideramos un determinado átomo radiactivo no podemos conocer en qué momento tendrá lugar su desintegración, pero si tomamos un número muy grande de átomos de un mismo nuclido, podemos conocer la ley que, como promedio, sigue el conjunto en su desintegración.

La actividad se puede expresar en decaimientos o desintegraciones sobre segundo o sobre minuto. Sin embargo casi siempre la actividad se expresa en curies, Ci. $1 \text{ [Ci]} = 3.7 \times 10^{10} \text{ [desintegraciones/segundo]}$ (ver Figura 4).

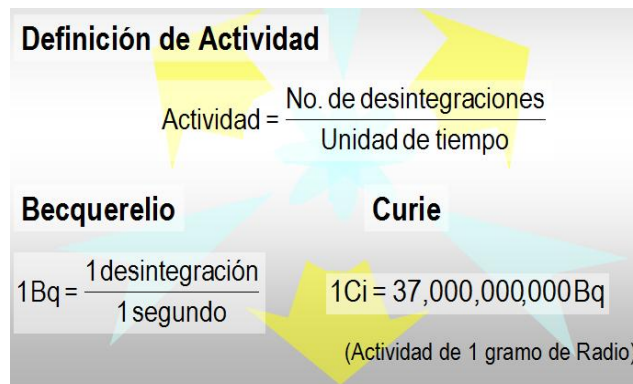


Figura 4. Unidades de medida de la actividad [2]

⁸ Ibid.

Se demuestra que la probabilidad de que se desintegre un átomo radiactivo permanece constante a lo largo del tiempo. Ello se traduce en que al desintegrarse una sustancia radiactiva la cantidad de ella que no se ha desintegrado disminuye exponencialmente con el tiempo.

Aunque la Constante del Decaimiento λ da una descripción adecuada de la rapidez del decaimiento de un determinado isótopo, no es tan utilizada como la vida media (periodo de semidesintegración), $T_{1/2}$, que se calcula de la siguiente manera:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

Se llama Tiempo de Vida Media, $T_{1/2}$, al tiempo que ha de transcurrir para que la cantidad de sustancia radiactiva se haya reducido a la mitad (ver Figura 5). El valor de $T_{1/2}$ puede variar entre fracciones muy pequeñas de segundo (isótopos de vida corta) a millones de años (isótopos de vida larga).

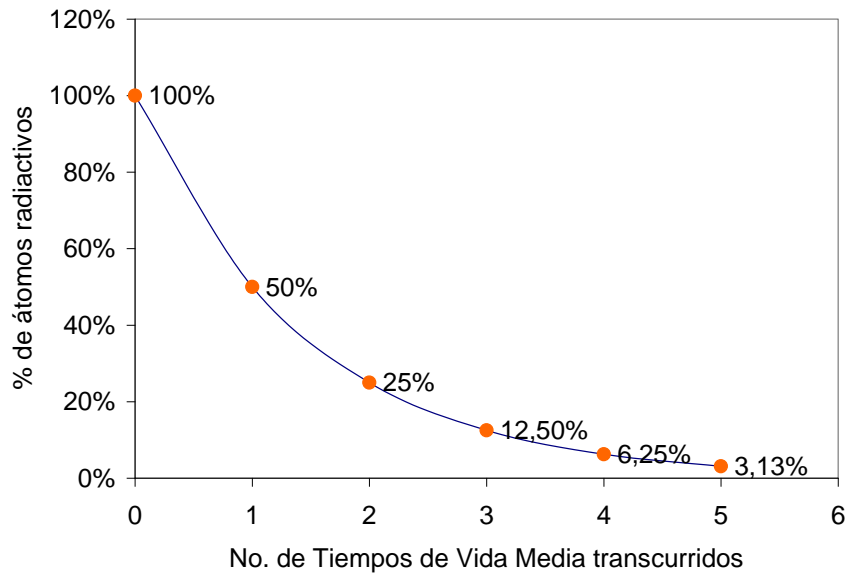


Figura 5. Función de decaimiento radiactivo [2]

En las diversas fuentes de datos siempre se informa de la vida media, por ejemplo en la Figura 6 se muestran algunas propiedades de los isótopos ^{238}U y ^{239}U tomadas de la tabla de nuclidos. De la tabla se sabe que el ^{238}U tiene una vida media de 4.468×10^9 años y que decae emitiendo partículas alfa. Por su parte el isótopo de ^{239}U , tiene una vida media de 23.45 minutos y decae emitiendo partículas beta.

En la Figura 7 se muestra una gráfica de la vida media de los diferentes isótopos conocidos en función de su número de protones (Z) y su n número de neutrones (N).

<p style="text-align: center; font-size: 24px; margin: 0;">U238</p> <p style="text-align: center; font-size: 18px; margin: 0;">4.468E+9 y</p> <p style="text-align: center; font-size: 24px; margin: 0;">0+</p> <p style="text-align: center; font-size: 18px; margin: 0;">$\alpha, \beta, \beta^-, sf, \dots$</p> <p style="text-align: center; font-size: 24px; margin: 0;">99.2745</p>	<p style="text-align: center; font-size: 24px; margin: 0;">U239</p> <p style="text-align: center; font-size: 18px; margin: 0;">23.45 m</p> <p style="text-align: center; font-size: 24px; margin: 0;">5/2+</p> <p style="text-align: center; font-size: 18px; margin: 0;">β^-</p>
---	---

Figura 6. Isótopos ^{238}U y ^{239}U obtenido de la tabla de nuclidos [3]

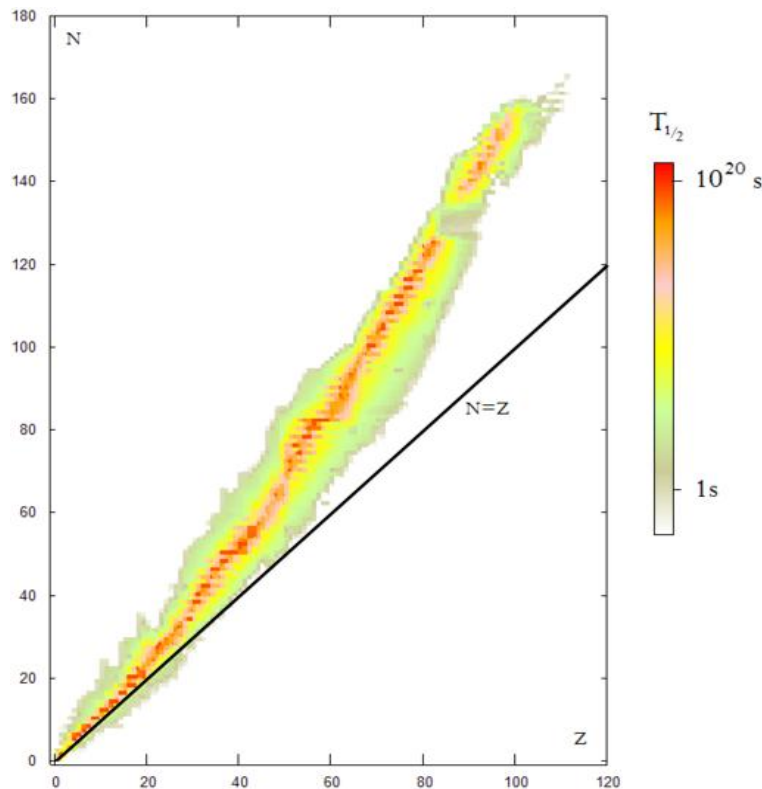


Figura 7. Vida media de los isótopos radiactivos conocidos [4]

En resumen los núcleos radiactivos pierden con el tiempo su actividad. La radiación es absorbida por la materia, incluso por el aire, y disminuye según la distancia que nos alejamos de las fuentes. La radiación se puede eliminar o atenuar empleando blindajes adecuados que las absorben.

b. Materiales fisionables, materiales fítiles y materiales fértiles⁹

El isótopo fisionable se define como aquel en el cual la reacción de fisión puede ser causada por neutrones. El isótopo fítil es aquel en el cual la fisión puede ser causada por neutrones de baja energía, no se requiere que haya un mínimo en la energía del neutrón, los isótopos fítiles son una subclase de los isótopos fisionables.

Muy pocos isótopos son fítiles; los más importantes son el Uranio 233, el Uranio 235 y el Plutonio 239. De éstos sólo el Uranio 235 se encuentra en la naturaleza, como el 0.71% del uranio natural, el Uranio 238 forma el otro 99.3%, los otros dos isótopos son producto de reacciones con neutrones seguidas de decaimientos beta.

Existen ciertas reacciones de conversión que nos permiten obtener los isótopos ^{233}U y ^{239}Pu , estos dos isótopos se pueden producir de los isótopos ^{238}U y ^{232}Th ; a estos isótopos se les conoce, entonces, como materiales fértiles.

En cada una de las dos reacciones, la reacción (n, γ) original conduce a un isótopo con vida media corta (Ver Figura 8), que rápidamente decae al isótopo fítil.

Los isótopos ^{233}U y ^{239}Pu también son radiactivos, pero tienen vidas medias tan largas que no hay desaparición significativa por medio del decaimiento en tiempos que sean de interés.

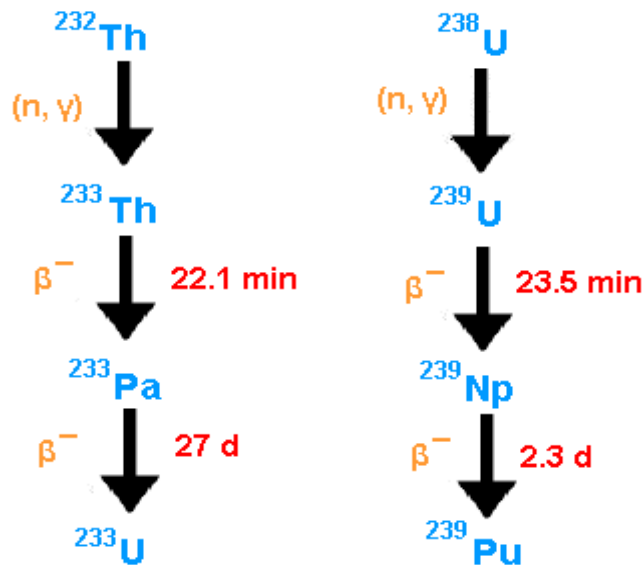


Figura 8. Reacciones de conversión del ^{232}Th y ^{238}U [2]

⁹ Thomas J. Connolly. "Fundamentos de ingeniería nuclear". Primera edición. México, 1983.

Puesto que el Uranio 238 forma el grueso del uranio natural y el Torio 232 es el único isótopo del torio natural, las cantidades potenciales de ^{233}U y ^{239}Pu exceden, con mucho a las de ^{235}U . La esperanza de que la energía de fisión sustituya a los combustibles fósiles depende en gran medida, de la conversión del ^{238}U y del ^{232}Th .

c. La física de la fisión¹⁰

Es posible expresar la reacción de fisión con palabras:

Neutrón + Núcleo \rightarrow (Núcleos producto de fisión) + (Neutrones + Radiación beta + Fotones gamma)

En la Figura 9 se expone esquemáticamente la reacción de fisión; el neutrón penetra en el núcleo (volviéndolo inestable) y por un momento, existe un núcleo compuesto. En esta etapa, es posible que dicho núcleo decaiga a su estado base con la emisión de radiación gamma.

Sin embargo, cuando se realiza la fisión, el núcleo compuesto se parte, usualmente en un par de núcleos. A estos núcleos se les llama productos de fisión, por lo general son radioactivos y decaen por emisión β^- .

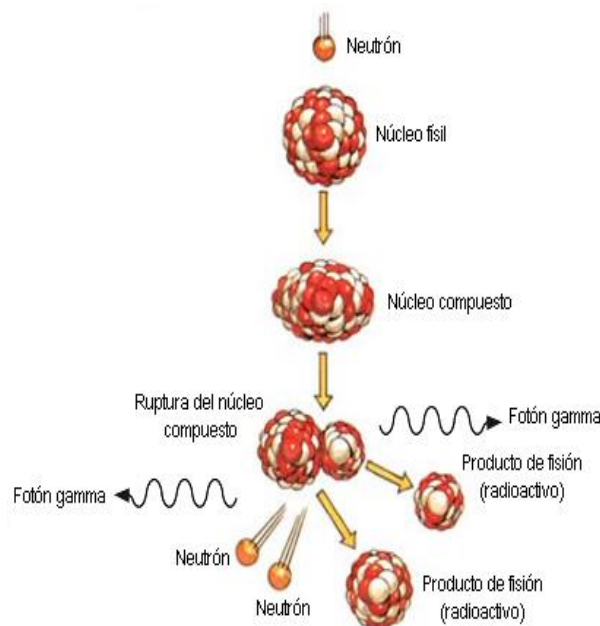


Figura 9. Representación esquemática de la reacción de fisión nuclear [2]

¹⁰ Ibid.

d. Reacción en cadena¹¹

Para provocar el inicio de una reacción en la dirección del estado de menor energía; se debe emplear un poco de energía (energía de umbral) antes de poder obtenerla. En el caso de una reacción de fusión nuclear la reacción se sostendrá por sí sola si los neutrones lanzados a cierta velocidad por el proceso de la fisión, causan la fisión de otros núcleos del combustible.

Una reacción de fisión nuclear en cadena, es entonces, una reacción nuclear que se sostiene en el tiempo. La reacción en cadena de fisión ocurre como sigue: un acontecimiento de fisión ocurre y lanza 2 o más neutrones como subproductos. Estos neutrones se escapan en direcciones al azar y golpean otros núcleos, incitando a estos núcleos para experimentar la fisión. Puesto que cada acontecimiento de la fisión lanza 2 o más neutrones, y estos neutrones inducen otras fisiones, el proceso se construye rápidamente y causa la reacción en cadena (ver Figura 10).

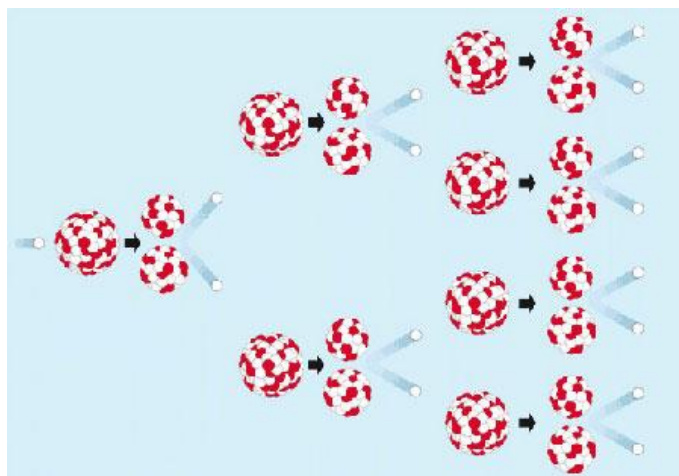


Figura 10. Reacción de fisión en cadena [2]

Debe mencionarse que para poder contar con una reacción en cadena, es necesario que, en promedio, un neutrón producido en cada fisión cause una fisión más.

¹¹ Dra. Cecilia Martín del Campo Márquez. "Curso Principios Básicos de la Energía Nuclear". Sociedad de Energía y Medio Ambiente de la Facultad de Ingeniería, UNAM. Material inédito. México, D.F. Enero 2009.

Por ejemplo, en la Figura 11 se ilustra el proceso de la reacción de fisión en cadena: 1) Un átomo de Uranio 235 absorbe un neutrón, y se divide en dos nuevos átomos (productos de fisión), dejando libres tres nuevos neutrones. 2) Uno de los neutrones es absorbido por un átomo de Uranio 238, y no continúa la reacción. Otro neutrón es simplemente perdido y no continúa la reacción. Sin embargo, un neutrón entra en colisión con un núcleo de ^{235}U , que se divide y libera dos neutrones. 3) Estos dos neutrones colisionan con dos átomos de ^{235}U , que se dividen y liberan tres y dos neutrones, que continuarán con la reacción.

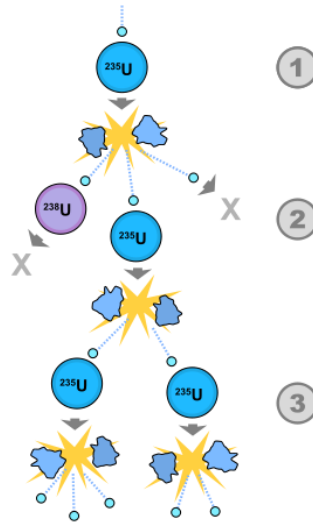


Figura 11. Ejemplo de una reacción de fisión en cadena [5]

Para lograr una reacción en cadena de manera controlada, es necesario emplear una estructura dentro de la cual se pueda conducir dicha reacción de fisión. Esta estructura es conocida comúnmente como reactor nuclear.