

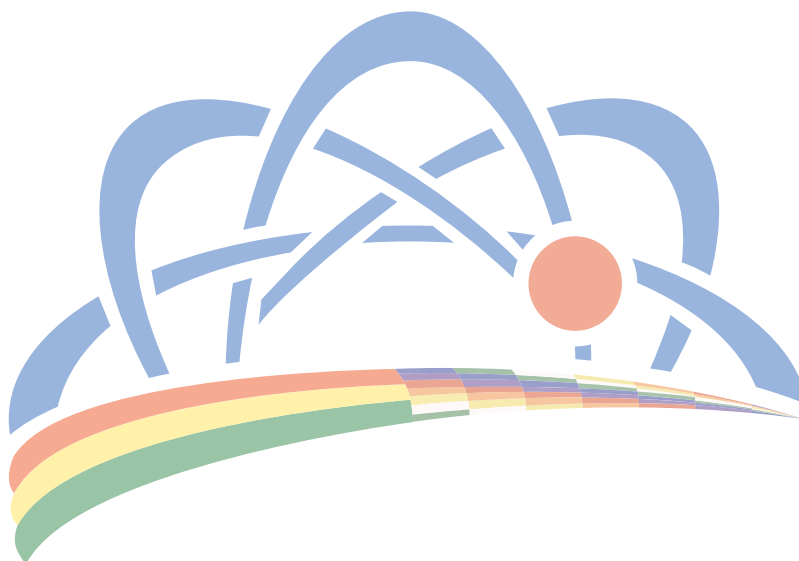


Agencia
Boliviana de
Energía
Nuclear



ESTADO PLURINACIONAL DE
BOLIVIA

MINISTERIO DE
HIDROCARBUROS Y ENERGÍAS



FUNDAMENTOS DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA NUCLEAR

TOMO 1



aplicaciones
en salud



aplicaciones
en la industria



aplicaciones
nucleares



ciclo del
combustible



centro de
investigaciones

Esta publicación fue elaborada por la Agencia Boliviana de Energía Nuclear – ABEN y se enmarca en la Constitución Política del Estado, en los 13 pilares de la Agenda Patriótica del Bicentenario 2025 y en el Programa Nuclear Boliviano – PNB.

Primera edición, julio 2022



©AGENCIA BOLIVIANA DE ENERGÍA NUCLEAR

DIRECCIÓN GENERAL

Ing. Hortensia Jiménez Rivera
Directora General Ejecutiva ABEN

ELABORACIÓN DE CONTENIDOS

Equipo técnico ABEN

REVISIÓN DE CONTENIDOS

Ing. Hortensia Jiménez Rivera

EDICIÓN DE TEXTOS

Ing. Sergio Fabian Fernandez Quiroga

DISEÑO, DIAGRAMACIÓN E IMPRESIÓN

Editorial del Estado Plurinacional de Bolivia

DEPÓSITO LEGAL: 4-1-325-2022 P.O.

PRIMERA EDICIÓN

LA PAZ - BOLIVIA

PRESENTACIÓN

“Las tecnologías nucleares son un conjunto de soluciones de ingeniería que permiten utilizar las reacciones nucleares y la radiación ionizante en diversos campos como medicina, industria, agricultura, geología, educación, entre otros, aportando al desarrollo de la economía nacional de los países que las usan con fines pacíficos”. El área más destacada de sus aplicaciones son la energía nuclear y la medicina nuclear.

Bolivia, establece ejes estratégicos, resultados y acciones en el Plan de Desarrollo Económico Social (PDES), articulado con la Agenda Patriótica 2025, siendo uno de sus ámbitos, lograr la soberanía científica tecnológica con identidad propia, que busca “promover e invertir responsablemente en la investigación y desarrollo de tecnología nuclear que nos permita vivir bien”.

En este sentido, el gobierno nacional de Luis Arce Catacora, está desarrollando políticas, programas y proyectos de aplicaciones de la tecnología nuclear que permitan fortalecer y ampliar nuestra base productiva, fomentando la formación y especialización de profesionales, desarrollando conocimiento y constante entrenamiento de los recursos humanos bolivianos.

En ese sentido, la Agencia Boliviana de Energía Nuclear (ABEN), a través de la implementación del Programa Nuclear Boliviano (PNB); presenta el texto “Fundamentos de Ciencia y Tecnología Nuclear” Tomo 1, teniendo como principal objetivo la introducción a los conceptos básicos de la física nuclear, la química nuclear y la interacción de la radiación con la materia. Esperamos que este texto ahonde en el conocimiento de las bases fundamentales de la ciencia y tecnología nuclear y sea de utilidad para los bolivianos y las bolivianas que aspiran construir una Bolivia tecnológicamente de avanzada en América Latina.

Ing. Hortensia Jiménez Rivera
DIRECTORA GENERAL EJECUTIVA
AGENCIA BOLIVIANA DE ENERGÍA NUCLEAR

Tabla de contenido

INTRODUCCIÓN A LA TECNOLOGÍA NUCLEAR.....	1
1. FÍSICA NUCLEAR.....	2
1.1 Historia de la física nuclear.....	2
1.1.1 Consideraciones del modelo atómico de Bohr.....	4
1.2 El núcleo atómico.....	7
1.2.1 Defecto de masa y energía de enlace.....	9
1.2.2 Clases de radiación.....	11
1.3 Ley de la desintegración radiactiva.....	14
1.4 Reacciones nucleares.....	16
1.4.1 Conservación de la energía en reacciones nucleares.....	16
1.4.2 Reacciones de fusión y fisión.....	18
2. QUÍMICA NUCLEAR.....	19
2.1 Historia de la química nuclear.....	19
2.2 Tabla periódica.....	19
2.3 Naturaleza atómica de la materia.....	21
2.4 Ecuaciones de balance.....	22
2.4.1 Desintegración Alfa (α).....	23
2.4.2 Desintegración Beta (β).....	23
2.4.3 Desintegración Gamma (γ).....	26
2.5 Estabilidad nuclear.....	25
2.6 Radiactividad natural.....	29
2.7 Transmutaciones nucleares (naturales y sintéticas).....	31
2.7.1 Aceleradores y uso de partículas con carga.....	32
2.7.2 Elementos transuránicos.....	32
2.7.3 Métodos de síntesis de transuránicos.....	33

3.	INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN CON LA MATERIA	34
3.1	Interacción de fotones con la materia	35
3.1.1	Atenuación	35
3.1.2	Procesos de interacción	35
3.2	Interacción de partículas cargadas con la materia	38
3.2.1	Colisión elástica	38
3.2.2	Colisión inelástica	39
3.2.3	Colisión radiactiva	39
3.3	Interacción de neutrones con la materia	39
3.3.1	Clasificación de los neutrones por energía	40
3.3.2	Dispersión	41
3.3.3	Absorción	42
3.4	Efectos de la radiación ionizante en la materia	43
3.4.1	Tasa de decaimiento radiactivo	44
3.4.2	Dosis absorbida	47
3.4.3	Dosis equivalente	48
3.4.4	Dosis efectiva	49
4.	IMPORTANCIA DEL CONOCIMIENTO DE LAS BASES FUNDAMENTALES DE LA CIENCIA Y TECNOLOGÍA NUCLEAR	52
4.1	Mitos desestimados sobre la tecnología nuclear	52
	CONCLUSIONES	55
	BIBLIOGRAFIA	56

INTRODUCCIÓN A LA TECNOLOGÍA NUCLEAR

La tecnología nuclear, es aquella que utiliza las diferentes reacciones que se dan en los núcleos de ciertos elementos (Uranio, Torio, Carbono, Hidrógeno, entre otros) desarrollando múltiples aplicaciones que brindan beneficios cada vez mayores a la humanidad. Estas aplicaciones son usadas principalmente, en la medicina, la agricultura, la producción de energía limpia (sin gases de efecto invernadero), entre otros.

La tecnología nuclear tiene base en las ciencias puras naturales como: la física nuclear, la química nuclear y la interacción de las diferentes radiaciones con la materia. Es por eso que para entender todo el contexto, se requiere de conocimientos básicos y fundamentales en las áreas mencionadas previamente, y así estudiarla de mejor manera.

Una vez que se entienden los conceptos básicos de las diferentes áreas relacionadas a la ciencia nuclear, es posible estudiarla en profundidad y valorar lo beneficioso que resulta este conocimiento, motivo por el cual, Bolivia se encuentra implementando esta ciencia en el país.

La ciencia y tecnología se ha vuelto internacionalmente uno de los campos más importantes de investigación, esto se debe a muchas razones como: la generación de talento humano especializado y el conocimiento aplicativo, entre otras, sin embargo, la principal razón de potenciar el desarrollo tecnológico es “su influencia directa en el desarrollo y crecimiento de un país”.

Debido a ello, la Agencia Boliviana de Energía Nuclear (ABEN) busca implementar los usos pacíficos de la tecnología nuclear, generando grandes beneficios para el país; a su vez, pretende cumplir con la Agenda Patriótica 2025, en su cuarto pilar “Soberanía Científica y Tecnológica con Identidad Propia” para el Vivir Bien de las y los bolivianos.

Fundamentos de Ciencia y Tecnología en su tomo 1 propone brindar las herramientas necesarias para ampliar el conocimiento sobre ciencias básicas del lector, detallando en los siguientes capítulos aspectos esenciales y elementales para la comprensión de la tecnología nuclear; en ese sentido el alcance que propone el autor será comprender los avances tecnológicos de esta ciencia, su importancia en la investigación y en el desarrollo sostenible en sus múltiples aplicaciones.

1. FÍSICA NUCLEAR

1.1 Historia de la física nuclear

El interés por conocer las bases fundamentales de las que está hecha la materia que rodea al ser humano, se remonta a más de 2.400 años en el pasado. Fue Demócrito, un filósofo griego, quien propuso la extraordinaria idea de que la materia no podía ser dividida indefinidamente, es decir que, si se corta en trozos cualquier material, por ejemplo una roca, en algún momento llegaremos a un punto en el que ya no podrá ser divisible. A esos pequeños elementos que ya no se pueden dividir los llamó “átomos”. Sin embargo, como todos los pensadores e intelectuales antes de Galileo, Demócrito no demostró su propuesta experimentalmente, la hizo a través de razonamientos lógicos, pasaron 2.000 años para que científicos probaran la idea de Demócrito experimentalmente; fueron hechos que revolucionaron la forma que teníamos de entender la naturaleza.

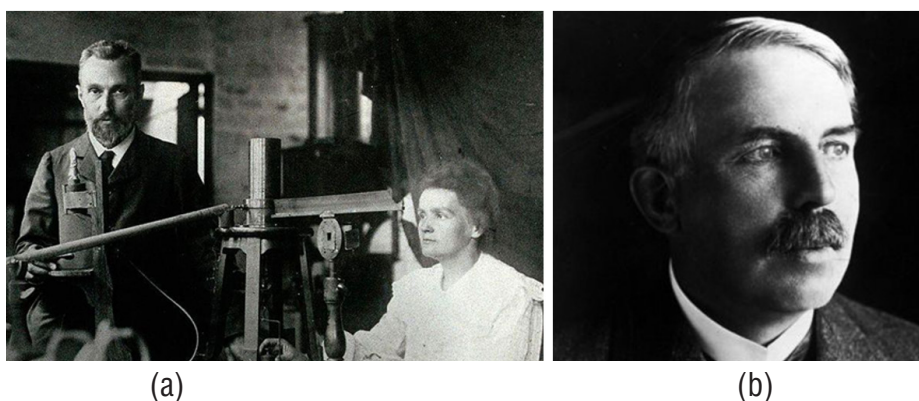
En el año 1896, Henri Becquerel descubre que las sales de Uranio emiten partículas, fenómeno que hoy se conoce como radiactividad. No obstante, el primer indicio de que los átomos poseen una estructura interna (y no son solamente esferas sólidas y neutras) se conoció al año siguiente del descubrimiento de Becquerel, con el descubrimiento del electrón por J. J. Thomson. Esta partícula era una partícula diminuta comparada con el tamaño de un átomo y que además tenía carga. Este descubrimiento llevó a J. J. Thomson a plantear un modelo atómico conocido como el modelo de budín de pasas.

La Figura 1 muestra una representación de dicho modelo, donde las pasas son semejantes a los electrones. Ellos podían estar en cualquier lugar del átomo, siempre y cuando tuvieran suficiente carga como para compensar a la del átomo y así éste quede neutro. Para cuando J. J. Thomson propuso su modelo, el valor de la carga del electrón aún era desconocido, y ésta no se llegó a saber sino hasta varios años después, gracias al experimento de la gota de aceite de Robert Millikan en el año 1911.



Figura 1. Modelo atómico de J. J. Thomson [1]

Esta nueva área de la ciencia despertó el interés de muchos científicos, entre ellos el del matrimonio Curie (Figura 2 (a)) y el de Ernest Rutherford (Figura 2 (b)). Marie y Pierre Curie descubrieron en el año 1898 que el Polonio y el Radio son elementos de la naturaleza que emiten partículas mucho más grandes y de carga opuesta al electrón, llamadas partículas alfa¹. Rutherford y sus colaboradores encontraron que las partículas alfa son idénticas a los núcleos de Helio, en el año 1908.



(a)

(b)

Figura 2. (a) Marie y Pierre Curie [2] (b) Ernest Rutherford [3]

Posteriormente, en el año 1911, Rutherford puso a prueba el modelo atómico propuesto por Thomson, incidiendo partículas alfa sobre una lámina de oro, él encontró que muchas partículas atravesaban la lámina, siendo este resultado contradictorio con lo esperado, ya que, si el modelo de Thomson fuese correcto, las partículas alfa no podrían atravesar el átomo fácilmente y, como consecuencia, la mayoría de las partículas deberían rebotar de la lámina. Un esquema del montaje experimental usado por Rutherford es mostrado en la Figura 3.

¹ Las partículas alfa (α) son núcleos de Helio, es decir sin su envoltura de electrones, estos núcleos están formados por 2 protones y 2 neutrones.

En base a los resultados del experimento previamente mencionado, Rutherford propone un nuevo modelo atómico en 1911. Éste proponía una estructura con un núcleo positivo y electrones orbitando a su alrededor, con una carga neta balanceada. Los cálculos mostraban que el tamaño del núcleo debía ser tan pequeño como una pelota de fútbol en el medio de un estadio. El modelo de Rutherford fue mejorado con la incorporación de partículas neutras, llamadas neutrones, sin embargo, ellos no serían medidos experimentalmente sino hasta 1932. Esto permitía una mejor descripción de la estabilidad del átomo, planteándolo como un análogo al sistema planetario. Sin embargo, en 1913, Niels Bohr mejoró el modelo del átomo incluyendo por primera vez la teoría cuántica en su descripción.

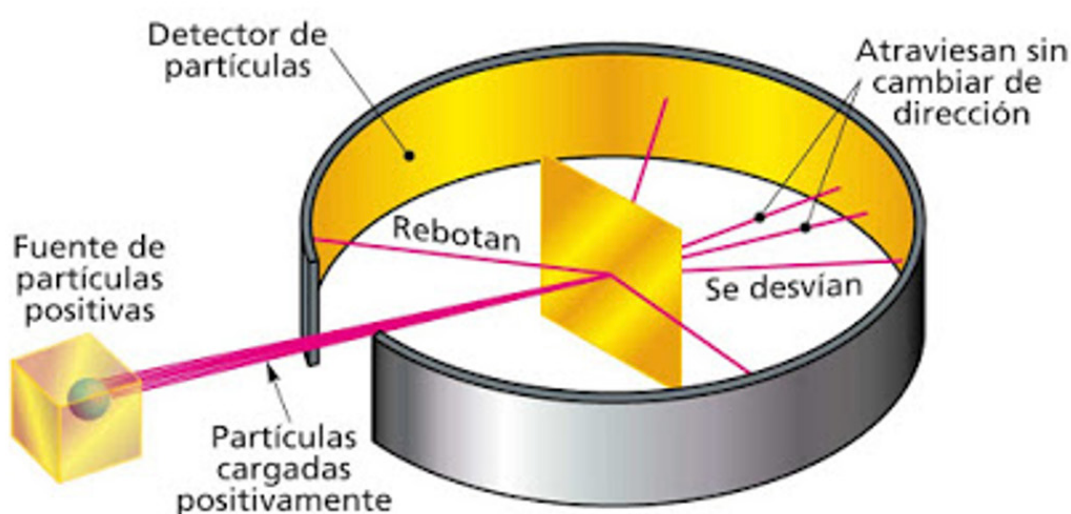


Figura 3. Esquema del experimento de Rutherford [4]

1.1.1 Consideraciones del modelo atómico de Bohr

El modelo atómico de Bohr es un modelo clásico del átomo, pero fue el primer modelo del átomo que introduce la teoría de la cuantización² del momento angular a partir de ciertos postulados. El modelo fue propuesto en 1913 por el físico danés Niels Bohr, para explicar cómo los electrones pueden tener órbitas estables alrededor del núcleo y porqué los átomos presentaban espectros de emisión característicos (dos problemas que eran ignorados en el modelo previo de Rutherford). Los tres postulados en los que Bohr basó su modelo atómico son los siguientes

1. Los electrones giran en órbitas permitidas sin emitir radiación (al contrario de lo que propone el electromagnetismo clásico) y, por lo tanto, no pierden energía. Los electrones no pueden girar en órbitas intermedias.

² Una cuantización es un procedimiento matemático para construir un modelo cuántico para un sistema físico a partir de su descripción clásica.

2. Las órbitas permitidas para el electrón están a distancias específicas, donde el momento angular toma valores discretos, dados por:

$$L = n\hbar \quad (1)$$

donde n es el “número cuántico³” principal y solo puede adoptar valores enteros (1, 2, 3,...), $\hbar = h/2\pi$ es la constante de Planck reducida y h es la constante de Planck, cuyo valor es igual $6,63 \times 10^{-34}$ J.s. El término discreto, o cuantizado, proviene del hecho de que n solamente puede adoptar números enteros.

Continuando con este razonamiento, Bohr calculó la energía cuantizada para la n -ésima órbita:

$$E_n = -\frac{Z(k_e e^2)^2 m_e}{2\hbar^2 n^2} \quad (2)$$

$$E_n = \frac{-13,6 Z^2}{n^2} [eV] \quad (3)$$

donde Z es número atómico del elemento y la energía está dada en electrónvolts eV.

Sin embargo, este postulado es incompatible con la mecánica cuántica moderna porque: presupone el momento cinético; atribuyéndole al primer nivel un no valor nulo.

3. Los electrones solo pueden ganar y perder energía absorbiendo o emitiendo radiación electromagnética con una frecuencia ν , determinada por la diferencia de energía entre niveles de acuerdo a la relación de Planck: $\Delta E = E_2 - E_1 = h\nu$. La ganancia o pérdida de esa energía hace que los electrones se muevan de un nivel energético a otro.

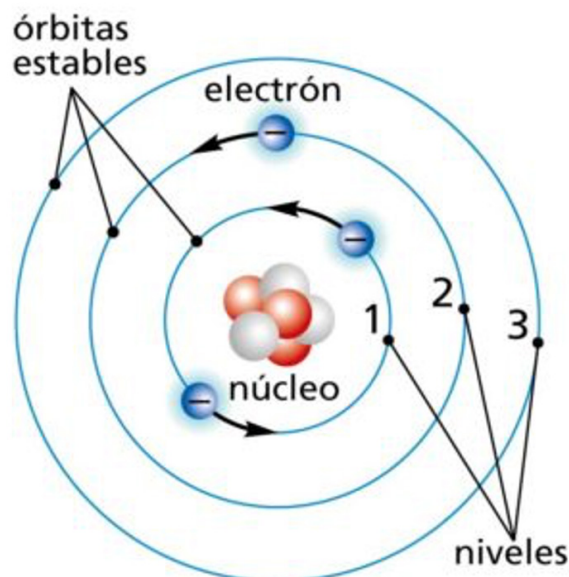


Figura 4. Esquema del modelo atómico de Bohr [5]

3 Los números cuánticos son los valores numéricos que indican las características de los electrones del átomo.

Con estos postulados, el modelo de Bohr fue capaz de predecir algunos resultados simples del átomo de hidrógeno, como ser: la energía de ionización y la órbita con el radio más pequeño. También se explicaron las líneas de emisión y absorción.

Algunas dificultades para explicar detalles más finos del átomo de hidrógeno, acompañado de la incapacidad de predecir espectros de emisión y absorción de átomos más complejos, forzaron a los científicos a mejorar el modelo de Bohr. Además, experimentos posteriores mostraron que el movimiento de los electrones es tridimensional, y no plano, como el modelo de Bohr sugiere.

Las limitaciones del modelo de Bohr, llevaron a Louis de Broglie a plantear la idea de que las partículas, entre ellas los electrones, tuvieran un comportamiento dual onda-partícula, con una longitud de onda dada por $\lambda = h/p$, donde p es la cantidad de movimiento de la partícula. Esta revolucionaria teoría, permitió explicar de manera natural la cuantización del momento angular y la energía, mismo que Bohr había impuesto en sus postulados de manera arbitraria.

Finalmente, en 1925, Erwin Schrödinger, e independientemente Werner Heisenberg, realizaron la descripción del modelo atómico que conocemos hoy. Apoyado en una mecánica cuántica⁴ mucho más estructurada, Schrödinger llega a la ecuación de onda, también llamada ecuación de Schrödinger. Ella proporciona la probabilidad de encontrar a una partícula en cierta posición de los orbitales, ya no en órbitas.

Estos orbitales tridimensionales poseen formas que obedecen a los números cuánticos que se obtienen de la solución de la ecuación de Schrödinger. Estos tres números cuánticos para el átomo de hidrogeno son n número cuántico principal, l número cuántico angular y m_l número cuántico magnético y determinan el tipo de orbital. Para otros átomos con más de un electrón se añade el número cuántico de espín m_s . La Figura 5 muestra algunas de las formas de las distribuciones de probabilidad (orbitales) formados para el átomo de hidrógeno, para diferentes combinaciones de los números cuánticos.

⁴ La mecánica cuántica es la ciencia que se ocupa en estudiar el comportamiento de la materia y la luz a escala atómica y subatómica. Intenta describir y explicar las propiedades de las moléculas y los átomos y sus constituyentes: electrones, protones, neutrones y otras partículas más como quarks y gluones.

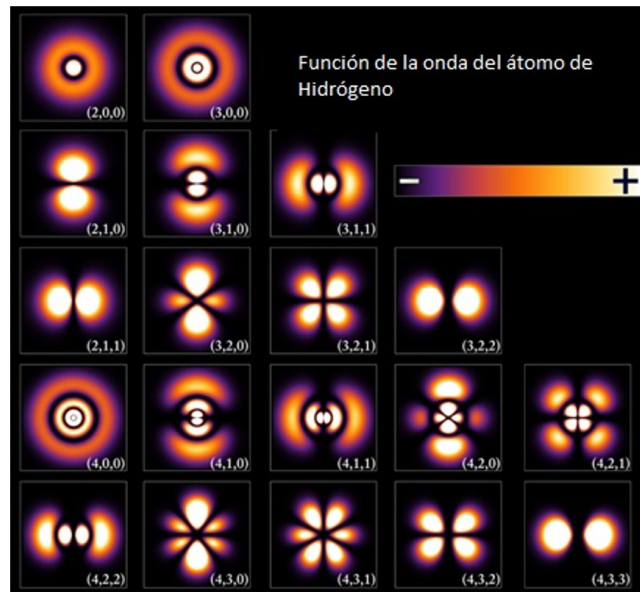


Figura 5. Distribuciones de probabilidad de la función de onda para el átomo del hidrógeno para diferentes combinaciones de los números cuánticos (n, l, m) [6]

1.2 El núcleo atómico

Actualmente, la mayoría de las personas tiene una idea, aunque sea vaga, de lo que es el átomo y cómo ellos son los ladrillos fundamentales de la naturaleza. Sin embargo, incluso las partículas como el protón y neutrón están compuestas por otras partículas mucho más elementales y pequeños llamados quarks.

Para poder entender el tamaño que un átomo posee, se puede imaginar un pomelo compuesto solo por átomos de nitrógeno, ¿cuántos átomos de nitrógeno será que completan el pomelo? Para que se pueda tener una idea de cuántos son, se supone que cada átomo de nitrógeno tiene el tamaño de una uva. Entonces, ¿de qué tamaño será ahora el pomelo? Aunque sea difícil de creer, ¡el pomelo deberá ser del tamaño del planeta Tierra! Esos son muchos, pero muchos átomos de nitrógeno en un simple pomelo.

Por otro lado, ¿de qué tamaño es el núcleo atómico? Regresando a la comparación, no bastaría agrandar al átomo hasta el tamaño de una uva para poder ver el núcleo. Sería necesario agrandar hasta el tamaño de un estadio, ¡inclusive así el núcleo tendría el tamaño tan sólo de una canica! En ese pequeño espacio está concentrada casi toda la masa del átomo, ya que los electrones están orbitando en los bordes del átomo. Además, es necesario preguntarse: ¿qué hay entre el núcleo y los electrones? Sorprendentemente, la respuesta es **ESPACIO VACÍO**. Es por eso que cuando Rutherford y su equipo bombardearon las láminas de oro con partículas alfa, éstas, en su mayoría, atravesaban directamente las láminas (Figura 3).

Para designar un átomo se utilizan los números: **atómico Z**, que representa el número de protones; **neutrónico N**, que representa el número de neutrones en el núcleo; y el másico A, que es la suma de los dos anteriores. Por lo que se tiene la siguiente ecuación.

$$A=Z+N.$$

(4)

Por lo tanto, un elemento X tendrá la notación A_ZX . Cuando los protones y neutrones son tratados colectivamente como parte del núcleo, son llamados nucleones.

Existen cuatro categorías de nucleones [7]:

- Aquellos que poseen el mismo número de protones, pero que pueden tener diferente número de neutrones, se llaman isótopos. Curiosamente, los isótopos tienen las mismas propiedades químicas, pero sus propiedades nucleares son diferentes. Como ejemplos de isótopos tenemos a los del ${}^1\text{H}$ (Hidrógeno): el ${}^2\text{D}$ (Deuterio) y el ${}^3\text{T}$ (Tritio).
- Los que poseen el mismo número másico, pero diferente número atómico y neutrónico, por lo que son diferentes elementos químicos, son llamados isóbaros. Al tratarse de diferentes elementos, sus propiedades químicas son diferentes. Ejemplos de isóbaros son el ${}^{40}_{20}\text{Ca}$ (Calcio-40) ($Z=20$ y $N=20$, pero $A=40$) y el ${}^{40}_{19}\text{K}$ (Potasio-40) ($Z=19$ y $N=21$, pero $A=40$).
- Los nucleones que tienen diferente número atómico y másico, pero igual número neutrónico, son llamados isótonos. Por ejemplo al ${}^{13}_6\text{C}$ (Carbono-13) ($Z=6$ y $A=13$, pero $N=7$) y al ${}^{14}_7\text{N}$ (Nitrógeno-14) ($Z=7$ y $A=14$, pero $N=7$).
- Por último, aquellos núcleos que se encuentran en estado excitado, pero su vida media es prolongada, también llamado estado metaestable, se llaman isómeros nucleares. Estos se representan por la letra m, colocado a continuación del número másico. Por ejemplo, el ${}^{137m}_{56}\text{Ba}$ (Bario-137m) es un isómero del ${}^{137}_{56}\text{Ba}$.

La naturaleza física de los átomos siempre intenta alcanzar el estado de mínima energía, llegando a un estado estable, y los neutrones juegan un rol importante en este aspecto.

Existen algunas reglas sobre el número atómico y su relación con el número neutrónico, como las que se ve a continuación [8]:

- Todo núcleo con 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126, neutrones o protones, son estables. También se los conoce como números mágicos, que corresponden a capas nucleares completas.
- Todo núcleo con Z menor o igual a 20, que tiene una relación neutrón, protón (N/Z) igual a 1 es estable.
- Todo núcleo con Z mayor que 20, menor a 84, que tiene una relación neutrón, protón (N/Z)

entre 1 y 1.5 es estable.

Los núcleos con Z menor a 83 son más estables que los que tienen Z mayor a 83.

Todos los núcleos con números de nucleones pares son más estables que los impares.

1.2.1 Defecto de masa y energía de enlace

A diferencia de los conceptos clásicos sobre las leyes de conservación de la masa o la energía, en física nuclear se tiene una sola ley de conservación para ambas cantidades, es decir, la suma de la masa y la energía se conservan. Como resultado de una disminución de masa se tendrá el aumento de energía y viceversa. Curiosamente, la masa de un núcleo siempre es menor a la suma de sus constituyentes sumados separadamente. A esta diferencia se llama defecto de masa, Δm , es decir, la diferencia entre su masa medida experimentalmente y la indicada por su número másico.

$$M(A,Z) = \text{Masa Experimental} + \text{Defecto de Masa} \quad (5)$$

La energía que resulta de ese defecto de masa se llama energía de enlace, E_b .

Para calcular la energía de enlace es necesario conocer la masa de los átomos y sus constituyentes por separado, para ello, generalmente, se expresa las masas en unidades de masa atómica una $[u]$, un sistema en el cual la masa de un átomo de ^{12}C es definido exactamente como $12 u$ ($1 u = 1,66 \times 10^{-24} \text{ g}$). El siguiente ejemplo muestra la relación que existe entre el defecto de masa y la energía de enlace.

Ejemplo 1.

¿Cuál será el defecto de masa de un átomo de ^4He (Helio-4)? y ¿Cuál será la energía necesaria para separar los 2 p^+ y 2 n^0 del núcleo de un átomo de He?

Si la masa de un núcleo de ^4He es de $4,00150608 u$, la de un protón es de $1,00727647 u$ y la de un neutrón es de $1,00866490 u$.

Se analizará lo que ocurre al formarse un átomo de ^4He .

El núcleo de Helio está formado por 2 protones y dos neutrones, cuya masa es:

$$p^+: 1,00727647 u \times 2 = 2,0145529 u$$

$$n: 1,00866490 u \times 2 = 2,0173298 u$$

Si se suman las masas de los cuatro nucleones y, a continuación, restamos la masa medida de un núcleo de ^4He , obtenemos el defecto de masa:

$$2p^+ + 2n = 4,03188274 u$$

$$m_{\text{He}} = 4,00150608 u$$

$$\text{Defecto de masa} = 2p^+ + 2n - m_{\text{He}} = 0,0303766 u$$

El defecto de masa indica que, al formarse el núcleo de ^4He , no toda la masa de los componentes pasa a formar parte del núcleo, en lugar de ello se transforma en energía.

Usando la famosa ecuación de Einstein, $E = mc^2$, se puede saber qué cantidad de energía se libera al formarse un núcleo de ${}^4\text{He}$. Para ello, primero se necesita convertir las unidades del defecto de masa a kilogramos usando la equivalencia $1 \text{ u} = 1,66054 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$. Entonces, $0,03037666 \text{ u} = 5,04417 \cdot 10^{-29} \text{ kg}$, que es la masa perdida cuando se formó el núcleo.

Ahora, se calcula la equivalencia energética que resulta del defecto de masa:

$$E_b = \Delta mc^2$$

$$= (5,04417 \cdot 10^{-29} \text{ Kg}) * (2,99792 \cdot 10^8 \frac{m}{s})^2 \quad (7)$$

$$E_b = 4,53346 \cdot 10^{-12} \text{ J}$$

que expresado en electronvoltios, es:

$$E_b = 28,296 \cdot 10^6 \text{ eV} = 28,296 \text{ MeV}$$

Esta es la energía de enlace que se libera al formar el núcleo, pero también es la **energía necesaria para separar los 2 p^+ y 2 n^0 del núcleo de un átomo de ${}^4\text{He}$.**

Ejemplo 2.

¿Cuál será la energía de enlace del ${}^4\text{He}$ por nucleón?

Como resultado de las anteriores definiciones surge una nueva, la energía de enlace por nucleón ΔE , que es la razón entre la energía de enlace y el número másico:

$$\Delta E = \frac{E_b}{A} \quad (8)$$

Esta energía de enlace por nucleón es la energía media necesaria para separar un núcleo en sus constituyentes. A partir de ella obtenemos una medida cuantitativa de la estabilidad del núcleo.

Aplicando la ecuación 8 para el caso del ${}^4\text{He}$, tenemos:

$$\Delta E = \frac{28,296 \text{ MeV}}{4}$$

$$\Delta E = 7,074 \text{ MeV}$$

Que es la energía de enlace por nucleón del ${}^4\text{He}$, que corresponde al valor de la Figura 6.

En la Figura 6 se observan los valores de la energía de enlace por nucleón, en MeV, en función del número másico A. La siguiente figura nos indica que la mayor ΔE es para el núcleo de ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ (Hierro), lo que significa que es el elemento más estable en la naturaleza

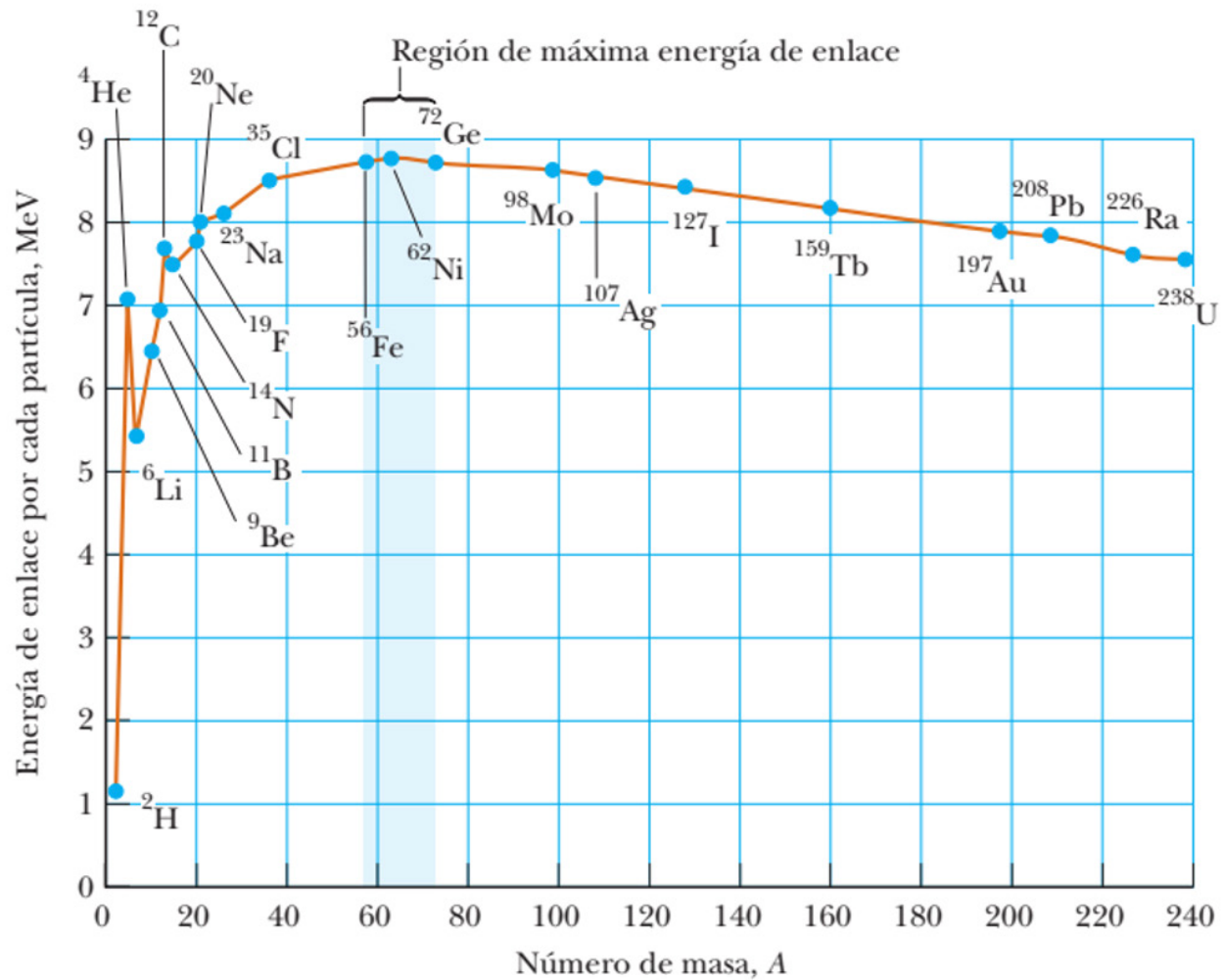


Figura 6. Variación de la energía de enlace por nucleón en función del número másico A [9]

La energía de enlace por nucleón comienza con un valor bajo para el núcleo de deuterio (el primer punto) y luego aumenta rápidamente. El hecho de que algunos núcleos tengan valores excepcionalmente altos en comparación con sus vecinos indica que se tendría que suministrar más energía para eliminar un nucleón de uno de estos núcleos, que de uno de sus vecinos (por ejemplo, el ^4He y ^{12}C , según la Figura 6).

1.2.2 Clases de radiación

La radiación es un tipo de energía que proviene de una fuente y viaja a través del espacio a la

velocidad determinada (por ejemplo, la de la luz). Esta energía tiene asociado un campo eléctrico y magnético, y posee propiedades ondulatorias. La radiación se puede explicar mucho mejor mediante el estudio del Espectro Electromagnético (EM), ya que existe un rango amplio de la radiación EM en la naturaleza. Este concepto se detallará en el capítulo 3. Por el momento, se explicará brevemente qué son las radiaciones ionizantes.

Muchos de los núcleos son inestables y para llegar a ser estables emiten el exceso de energía en forma de radiactividad, razón por la cual son llamados núcleos radiactivos. Cada uno de esos núcleos emite partículas o fotones de manera aleatoria a través de tres maneras: decaimientos alfa, beta y gamma.

- Decaimiento *alfa* α . Es un tipo de decaimiento radiactivo donde un núcleo atómico emite una partícula alfa (núcleo de Helio), que consiste en dos protones unidos a dos neutrones (iguales a núcleos de Helio). Se producen cuando los núcleos poseen un número atómico mayor a 150 y dejan de ser estables. Este tipo de radiación es poco penetrante, pero con un alto poder ionizante⁵ [10].
- Decaimiento *beta* β . Ocurre cuando un núcleo tiene un protón o un neutrón que causa un desequilibrio. Este decaimiento puede ser positivo (cuando un protón se transforma en un neutrón, emitiendo un positrón) o negativo (cuando un neutrón se transforma protón, emitiendo un electrón). Los electrones o positrones emitidos son más penetrantes que las partículas alfa, pero tienen menor poder de ionización que éstas.
- 1. Radiación *gamma* γ . La radiación gamma es un tipo de radiación electromagnética, y por tanto constituido por fotones. Puede producirse por el decaimiento radiactivo de un núcleo atómico, por procesos subatómicos como la aniquilación de un par positrón – electrón, o se genera en fenómenos astrofísicos muy violentos. Los rayos gamma poseen energía muy elevada en comparación a los otros tipos de radiación, por lo que son capaces de penetrar en la materia más profundamente (ver Figura 7)

Es normal qué después de pasar por un decaimiento alfa o beta, el núcleo recién transformado desprenda radiación gamma, para pasar de un estado de alta energía a uno de baja energía, con lo que alcanza la estabilidad. Por ejemplo, el ⁹⁹Tc (Tecnecio-99) metaestable, que es usado en aplicaciones médicas, es un emisor de rayos gamma. En este proceso el núcleo no cambia de número de neutrones o protones, por lo que el tipo de elemento se mantiene después de la emisión de la radiación.

⁵ Tipo de radiación que tiene suficiente energía como para eliminar un electrón (partícula negativa) de un átomo y causar su ionización (dejando el átomo cargado).

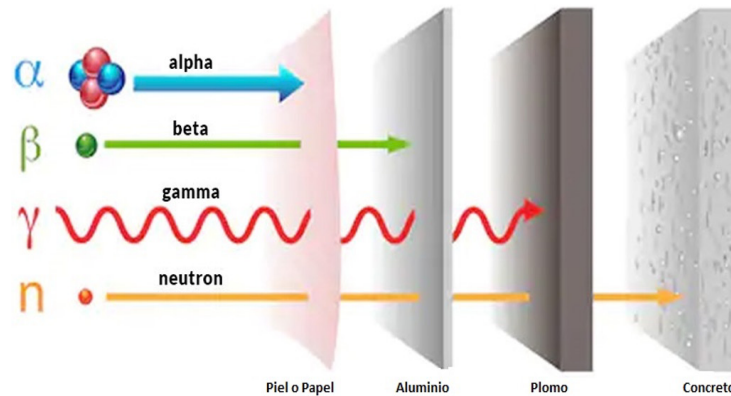


Figura 7. Clases de radiación ionizante y cómo detenerla [11].

La Figura 7 ofrece una idea de la capacidad de penetración que poseen los distintos tipos de radiación emitidos por los núcleos inestables. Las partículas alfa pueden ser detenidas con una hoja de papel, los electrones o positrones emitidos por la desintegración beta pueden ser frenados por una hoja de aluminio. En cambio, la radiación gamma es capaz de atravesar una o varias capas de plomo, dependiendo de la energía que posea. Por último los neutrones son los más difíciles de detener, y solo se los detiene con un bloque de concreto o con agua (el volumen dependerá de la energía del neutrón). En la Tabla 1 se resumen algunas características de los procesos de radiación.

Tabla 1. Capacidad de penetración por tipo de radiación

Radiación	Capacidad de penetración	Poder ionizante lones/cm [12]	Distancia recorrida en el aire [13]
Alfa α	Absorbida por una hoja de papel	$\sim 10^5$	1-2 cm**
Beta β	Absorbida por una hoja de aluminio	$\sim 10^3$	1-2 m**
Gamma γ	Absorbida por un bloque de plomo	~ 10	100 - 200 m**
Neutrón n	Absorbido por un bloque de concreto, o agua*	-	100 – 1000 m**

Fuente: Elaboración propia

*= dependiente de la energía del neutrón

**= medida aproximada, sin embargo esta distancia es dependiente de la energía.

1.3 Ley de la desintegración radiactiva

En 1902 Ernest Rutherford y Frederick Soddy, propusieron que el ritmo con que una sustancia emitía partículas radiactivas disminuía exponencialmente con el tiempo, estas desintegraciones que sufren los átomos son aleatorios, espontáneos e impredecibles. Sin embargo, en un conjunto de N átomos, suficientemente grande, cierto número de átomos decaerá con el tiempo a una tasa proporcional a N . Expresando esa idea en forma de ecuación matemática, podemos escribir:

$$\frac{-dN}{dt} = \lambda N \quad (9)$$

donde λ es la constante de decaimiento y se mide en s^{-1} , cuyo valor es diferente para cada núcleo atómico.

Resolviendo la ecuación 5 puede escribirse como (también se la puede usar para calcular la actividad en el tiempo:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (10)$$

donde N_0 es la cantidad de núcleos radiactivos en el instante inicial $t = 0$ y N es la cantidad de núcleos en un tiempo t posterior. El significado de la ecuación 10, es justamente lo que Rutherford y Soddy propusieron, esto es, que la radiactividad disminuye con el tiempo siguiendo una ley exponencial.

Un parámetro muy útil es el tiempo de vida media ($T_{1/2}$), el cual es diferente para cada elemento y está relacionado con el constante decaimiento mediante la siguiente ecuación:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \quad (11)$$

Esta característica es bastante útil para datar objetos antiguos. La Tabla 2 muestra ejemplos de tiempos de vida media para algunos isótopos. Como se ve, éstos varían de gran manera.

Por ejemplo, si tuviéramos una barra de 10 g de ^{14}C , que decae en ^{14}Ni por decaimiento beta, después de 5740 años, tendríamos 5 g convertidos en ^{14}Ni , luego de otros 5740 años tendríamos convertidos 2,5 g más, después de otros 5740 años, 1,25 g serán convertidos, y así sucesivamente.

Tabla 2. Tiempo de vida media de algunos isótopos

Isótopo	Tiempo de vida media
^{40}K	$1,28 \times 10^9$ años
^{41}Ca	$1,03 \times 10^5$ años
^{14}C	5 740 años
^{60}Co	1925 días
^{222}Rn	3,82 días
^{131}I	8,02 días
^{18}F	109.7 min
^{11}C	20.24 min

Fuente: Elaboración propia

Ejemplo 3.

¿Cuál será la masa actual de 1 kg de ^{18}F (Fluor-18) que fue fabricado hace 5 horas?

Usando la ecuación 11 se obtiene lo siguiente:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{109,7 \text{ s}} = 0,0063 \text{ min}^{-1}$$

Usando la ecuación 10 y conociendo que $N = \frac{m}{N_A}$ donde N_A = Número de Avogadro y m es la masa, se tiene lo siguiente:

$$m(t) = m_0 e^{-\lambda t}$$

$$m = 1 * e^{-0,0063 * 300}$$

$$m = 0,15 \text{ kg}$$

Después de 5 horas solo tendríamos 0,15 kg de ^{18}F .

1.4 Reacciones nucleares

Una reacción nuclear es un proceso en el cual dos núcleos, o un núcleo más una partícula externa subatómica, colisionan formando nuevos nucleídos.

Así, las reacciones nucleares son procesos de combinación y transformación de átomos. Si un

núcleo interactúa con otro núcleo o partícula y luego se separan sin cambiar la naturaleza de ninguno de los nucleídos, el proceso se conoce simplemente como un tipo de dispersión nuclear, en lugar de una reacción nuclear.

Como se ha mencionado una reacción puede involucrar más de dos partículas, pero a causa de que la probabilidad de tres o más nucleídos colisionen al mismo tiempo en el mismo lugar es mucho menor que dos nucleídos lo hagan. El término “reacción nuclear” puede referirse a un cambio en un nucleido inducido por colisión con otra partícula, o a un cambio espontáneo de un nucleido sin colisión.

Además, también pueden ocurrir las reacciones nucleares naturales, tal como en la interacción entre los rayos cósmicos y la materia, y las reacciones nucleares pueden ser empleadas artificialmente para obtener energía nuclear, a una velocidad ajustable, bajo demanda. Quizás las reacciones nucleares más notables son las reacciones nucleares en cadena, usando materiales fisionables que producen fisión nuclear inducida, y las diversas reacciones de fusión nuclear de elementos ligeros que impulsan la producción de energía tal como ocurre en el Sol y las estrellas.

1.4.1 Conservación de la energía en reacciones nucleares

Al analizar las reacciones nucleares, tenemos que aplicar la ley general de conservación de la masa-energía. Según esta ley, la masa y la energía son equivalentes y convertibles una en la otra. Es uno de los resultados sorprendentes de la teoría de la relatividad de Einstein. Esta equivalencia de la masa y la energía es descrita por la famosa fórmula de Einstein (Ecuación 7)

Generalmente, tanto en reacciones químicas como nucleares, ocurre alguna conversión entre masa en reposo y energía, de modo que los productos generalmente tienen una masa menor o mayor que los reactivos. En general, la energía total debe conservarse. Por lo tanto, la masa de reposo “faltante” debe reaparecer como energía cinética liberada en la reacción. La diferencia es una medida de la energía nuclear de enlace que mantiene unido al núcleo.

1.4.2 Reacciones de fusión y fisión

Los procesos de decaimiento alfa, beta y emisión gamma son considerados como reacciones nucleares. No obstante, existen los procesos nucleares de fusión y fisión. Ambos muy importantes, tal es el caso que sin uno de ellos no existiría la vida como la conocemos.

1.4.2.1 Fusión nuclear

La Fusión nuclear es un proceso en el cual dos núcleos se combinan para resultar en un núcleo

más ligero que la suma de los núcleos progenitores. Toda la masa restante de dicha combinación se transforma en energía. La figura 8 muestra un esquema de reacción de fusión nuclear de dos isótopos del Hidrógeno, ^2D y ^3T , que resulta en la creación de un núcleo de ^4He y un neutrón. Ambos con energía cinética igual a la energía de la transformación de la masa faltante, como se observa en la Figura 8.

Todo tipo de radiación, desde la luz visible, ultravioleta y otras, que provienen del Sol son generadas en su núcleo por fusiones nucleares, donde cientos de millones de toneladas de ^1H son convertidos en ^4He a cada segundo. Sin embargo, todos esos fotones producidos tardan alrededor de un millón de años en atravesar las capas del Sol y llegar a su superficie, desde donde tardan ocho minutos en alcanzar al planeta Tierra.

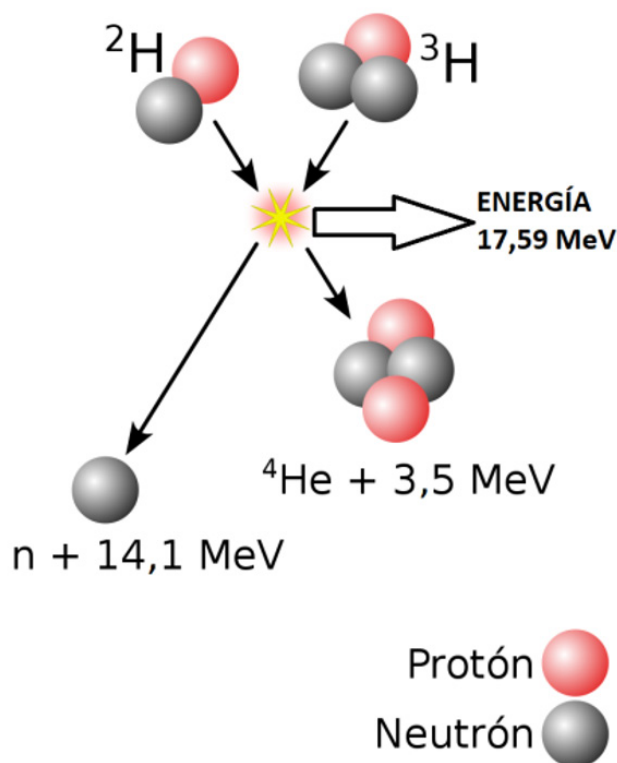


Figura 8. Esquema de una reacción de fusión con Deuterio y Tritio [14]

Replicar esta forma de reacción nuclear es uno de los grandes desafíos que la humanidad tiene actualmente. Conseguirla significaría contar con una fuente de energía limpia, es decir, sin producción de gases de efecto invernadero, segura y prácticamente infinita.

1.4.2.2 Fisión nuclear

La fisión nuclear es el proceso contrario al de la fusión nuclear, es decir, es la separación de un átomo para conseguir otros más ligeros. Nuevamente, la masa faltante de la reacción es convertida en energía.

Generalmente, para lograr la fisión nuclear se bombardean núcleos atómicos con neutrones, ya que estos, al no tener carga eléctrica consiguen impactar en el núcleo sin ser desviados por campo el eléctrico del núcleo. Como producto de esta reacción, además de la energía, se generan dos átomos más ligeros y otras partículas como la alfa, beta y neutrones libres. Estos nuevos neutrones pueden reaccionar con otros núcleos y de esta forma crear nuevas partículas alfa, beta y neutrones, y así sucesivamente. En el caso de tener átomos de Uranio, por ejemplo, este proceso de producción descontrolada se llama reacción en cadena (ver Figura 9).

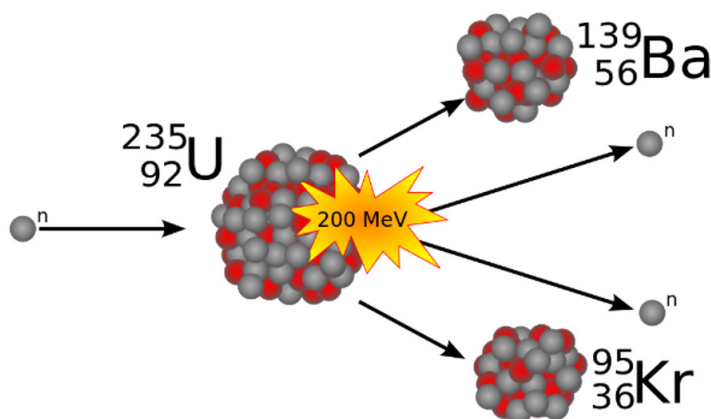


Figura 9. Esquema de una reacción de fisión producida por el bombardeo de un átomo de ^{235}U con un neutrón [15]

Para aprovechar esas reacciones y transformar los fotones producidos en energía útil, energía eléctrica, por ejemplo, se utilizan sustancias moderadoras que permiten controlar la población de neutrones producidos en un medio (como el núcleo de un reactor nuclear) absorbiéndolos y así evitando que continúe el proceso de fisión. Así, se logra mantener el número de neutrones aproximadamente constante, entonces se ha logrado controlar las reacciones, y la energía producida también es constante y recuperable. Ése es justamente el principio fundamental en el que están basados los reactores nucleares.

2. QUÍMICA NUCLEAR

2.1 Historia de la química nuclear

Todo comienza con el entendimiento de lo que significa una reacción química ordinaria, la cual es el resultado de la intervención de los electrones de los átomos, al no existir influencia sobre los núcleos, mantienen sus propiedades químicas y sólo son importantes en la medida en que influyan sobre los electrones determinando propiedades tales como las afinidades electrónicas, energía de ionización, etc.

El estudio del núcleo es un tema importante para físicos y químicos en forma general, porque la materia también sufre transformaciones en las cuales intervienen directamente los núcleos, y porque el estudio de dichas transformaciones ha ampliado considerablemente el conocimiento acerca de la naturaleza de la materia y del universo en el que vivimos.

El descubrimiento de los rayos X por parte de William Conrad Roentgen en noviembre de 1895 despertó el interés de una generación de científicos que se apresuró a investigar el fenómeno. Ese mismo año, Henri Becquerel descubrió que el Uranio metálico y sus sales emitían un nuevo tipo de radiación que podía atravesar los sólidos. Marie Curie descubrió que los compuestos de Torio también eran “radiactivos” en 1898, tras un gran esfuerzo, consiguió aislar otros dos elementos radiactivos, el polonio y el radio, a partir de muestras minerales que contenían Uranio.

Cuando Ernest Rutherford investigó la absorción de la radiactividad por finas láminas de metal en 1899, descubrió que había al menos dos tipos diferentes de radiactividad, alfa y beta. Las partículas alfa, eran absorbidas por unas centésimas de lámina metálica de un centímetro de grosor. En cambio, las partículas beta podían atravesar una lámina metálica 100 veces más gruesa antes de ser absorbidas. Poco después se descubrieron los rayos gamma, un tercer tipo de radiación, capaz de penetrar hasta varios centímetros de plomo (Como se pudo ver en el capítulo 1 clases de radiación).

2.2 Tabla periódica

La tabla periódica está basada en la Ley Periódica, esta ley fue desarrollada en 1869 por Dimitri Ivanovich Mendeleiev, quien es considerado padre de la tabla periódica. Dicha ley indica que los elementos tienen propiedades químicas y físicas que se repiten de manera ordenada a medida que se incrementa el número atómico. Por lo tanto, la tabla periódica es una especie de esquema que se encarga de ordenar estos elementos químicos de acuerdo al orden creciente de los números

atómicos, configuración de electrones y propiedades físicas y químicas. En éste sentido la tabla muestra tendencias periódicas, por ejemplo, elementos con propiedades químicas similares a otros de la misma columna.

La tabla periódica “Es el corazón de la química”, comparable a las leyes de Newton para la física y la teoría de Charles Darwin en la biología. La Tabla periódica moderna (Figura 10), consta de 18 columnas. Las filas de la tabla se denominan periodos y las columnas grupos. Los grupos del 3 al 10 no tienen nombres comunes y se denominan simplemente mediante sus números de grupo o por el nombre del primer elemento del grupo, por ejemplo, para el grupo 3 su nombre es “el grupo de escandio”.

TABLA PERIÓDICA DE LOS ELEMENTOS

The table is organized into periods (rows) and groups (columns). The first two groups are labeled IA and IIA. Groups 3 through 10 are labeled with their respective group numbers. Groups 11 through 18 are labeled IIIA through VIIIA. The lanthanide and actinide series are shown separately at the bottom.

Legend:

- Metals:** Blue background
- Semimetals:** Red background
- No metals:** Green background
- Metals alcalinos:** Yellow background
- Metals alcalinotermos:** Light blue background
- Elementos de transición:** Dark blue background
- Lantánidos:** Light purple background
- Actínidos:** Dark purple background

ESTADO DE AGREGACIÓN (25 °C):

- Ne:** gaseoso
- Fe:** sólido
- Hg:** líquido
- Td:** sintético

Source: www.periodni.com

Figura 10. Tabla periódica de los elementos [16]

Se han descubierto o sintetizado elementos de número atómico del 1 (Hidrógeno) al 118 (Oganesón); la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC) confirmó los elementos 113, 115, 117 y 118 el 30 de diciembre de 2015, y sus nombres y símbolos oficiales se hicieron públicos el 28 de noviembre de 2016. Los primeros 94 existen naturalmente, aunque algunos solo se han encontrado en cantidades pequeñas y fueron

sintetizados en laboratorio antes de ser encontrados en la naturaleza. Los elementos con números atómicos del 95 al 118 solo han sido sintetizados en laboratorios. Los elementos del 95 a 100 existieron en la naturaleza en tiempos pasados, sin embargo actualmente no [17].

La razón contemporánea de la ordenación de la tabla periódica es que los elementos de un grupo tienen estructuras eléctricas comparables y tienen la misma valencia, que se define como el número de electrones en la última capa. Las propiedades químicas están fuertemente influenciadas por las interacciones de los electrones en los niveles más externos, de ahí que los elementos que pertenecen al mismo grupo tengan características químicas comparables y muestren una tendencia distinta en sus propiedades a medida que aumenta el número atómico [18].

Por ejemplo, los elementos en el grupo 1 tienen una configuración electrónica ns^1 y una valencia de 1, es decir un electrón externo, y todos tienden a perder ese electrón al enlazarse como iones positivos de +1. Los elementos en el último grupo de la derecha son los gases nobles, los cuales tienen lleno su último nivel de energía, es decir que cumplen con la regla del octeto y, por tanto, son realmente estables y prácticamente no reactivos, por esto se los denomina también “gases inertes” [18].

2.3 Naturaleza atómica de la materia

A excepción del 1_1H que en su estructura química no contiene neutrones, todos los núcleos contienen dos tipos de partículas, llamadas protones y neutrones. Algunos núcleos son inestables; emiten partículas y/o radiación electromagnética espontáneamente. El nombre para este fenómeno es radiactividad. Todos los elementos que tienen un número atómico mayor que 83 son radiactivos. Por ejemplo, el isótopo de $^{210}_{84}Po$ (Polonio-210) decae espontáneamente a $^{206}_{82}Pb$ (Plomo-26) mediante la emisión de una partícula α .

Otro tipo de radioactividad, conocida como transmutación nuclear, resulta del bombardeo de núcleos por neutrones, protones u otros núcleos. Un ejemplo de una transmutación nuclear es la conversión atmosférica de $^{14}_7N$ a $^{14}_6C$ y H , que se produce cuando el isótopo de nitrógeno captura un neutrón (de origen solar). En algunos casos, los elementos más pesados se sintetizan a partir de elementos más ligeros. Este tipo de transmutación ocurre naturalmente en el espacio exterior, pero también se puede lograr artificialmente.

La desintegración radiactiva y la transmutación nuclear son reacciones nucleares, que difieren significativamente de las reacciones químicas ordinarias. La Tabla 3 resume las mencionadas diferencias.

Tabla 3. Comparación de reacciones químicas y reacciones nucleares.

Reacciones Químicas	Reacciones Nucleares
1. Los átomos se reorganizan por ruptura y forman enlaces químicos.	1. Los elementos (o isótopos de los mismos elementos) se convierten de uno a otro.
2. Solo los electrones en el átomo u orbitales moleculares están involucrados en la ruptura y formación de enlaces.	2. Los protones, neutrones, electrones y otras partículas elementales pueden estar involucrados.
3. Las reacciones van acompañadas de absorción o liberación de cantidades relativamente pequeñas de energía.	3. Las reacciones van acompañadas de absorción o liberación de enormes cantidades de energía.
4. Las velocidades de reacción están influenciadas por la temperatura, presión, concentración y catálisis.	4. Las velocidades de reacción normalmente no se ven afectadas por la temperatura, la presión y los catalizadores.

Fuente: Elaboración propia

2.4 Ecuaciones de balance

Para discutir las reacciones nucleares se debe entender cómo escribir y equilibrar las ecuaciones. Escribir una ecuación nuclear difiere algo de escribir ecuaciones para reacciones químicas. Además de escribir los símbolos para varios elementos químicos, también se debe indicar explícitamente protones, neutrones y electrones, generalmente se muestra el número de protones y neutrones presentes en cada especie en dicha ecuación. La Tabla 5 muestra la forma de escritura de las partículas elementales.

Tabla 4. Símbolos para partículas elementales

Protón	Neutrón	Electrón	Positrón	Partícula α
p o 1_1H	1_0n	${}^0_{-1}e$ o ${}^0_{-1}\beta$	${}^0_{+1}e$ o ${}^0_{+1}\beta$	α o 4_2He

Fuente: Elaboración propia

En la notación utilizada en Tabla 5, el superíndice en cada caso denota el número de masa (el número total de neutrones y protones presentes) y el subíndice es el número atómico (el número de protones). Por lo tanto, el “número atómico” de un protón es 1, porque hay un protón presente, y el “número de masa” también es 1, porque hay un protón, pero no hay neutrones presentes.

Por otro lado, el “número de masa” de un neutrón es 1, pero su “número atómico” es cero, porque no hay protones presentes. Para el electrón, el “número de masa” es cero (no hay protones ni neutrones presentes), pero el “número atómico” es 1, porque el electrón posee una carga negativa unitaria.

2.4.1 Desintegración Alfa (α)

Núcleos de gran masa ($Z \geq 83$): En este caso, el núcleo padre alcanza la estabilidad emitiendo partículas alfa (${}^4_2\text{He}$), transformándose en un núcleo hijo de menor masa, con un valor de Z menor en dos unidades y un valor de A menor en cuatro unidades. La ecuación nuclear general de desintegración es:



2.4.2 Desintegración Beta (β)

Núcleos con exceso de neutrones: Cuando un núcleo tiene un exceso de neutrones se estabiliza aumentando la cantidad de protones. Para ello, sustituye neutrones por protones emitiendo radiación beta negativa (${}^0_{-1}e$). Según lo expuesto, el valor de Z del núcleo hijo es una unidad mayor que el del padre y el valor de A no cambia.



Núcleos con exceso de protones: Cuando un núcleo tiene un exceso de protones, se estabiliza aumentando los neutrones. Esto lo logra emitiendo positrones (${}^0_{+1}e$), lo que corresponde a un haz de radiación beta positiva $\beta+$. En la desintegración de $\beta+$, el valor de Z del núcleo hijo es menor en una unidad, pero el valor A no varía. El proceso se puede expresar:



Donde X representa al núcleo padre y Y representa al núcleo hijo.

2.4.3 Desintegración Gamma (γ)



La desintegración gamma o rayos gamma (γ) es un tipo de radiación electromagnética, y por tanto constituida por fotones, producida generalmente por elementos radiactivos o por procesos subatómicos como la aniquilación de un par positrón-electrón.

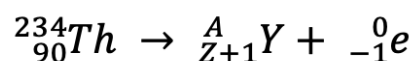
Cuando se escribe una reacción nuclear se debe verificar si está balanceada, para ello se debe cumplir que:

- La masa debe ser la misma al inicio y término de la desintegración, por lo que el número total de protones y neutrones en los reactantes y productos debe ser igual.
- Para conservar el número atómico (Z), el número total de cargas nucleares en los productos y reactantes debe ser el mismo.

Ejemplo 4.

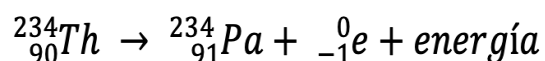
¿Cuál será la ecuación de desintegración del ${}^{234}\text{Th}$ (Torio-234)?

Usando la ecuación 14, se puede estudiar la desintegración nuclear del ${}^{234}\text{Th}$ emisor de partículas beta negativo β^- es:



Luego, se calcula el valor de Z y A del núcleo hijo $Z = 90 + 1 = 91$. Así $Z = 91$ corresponde al elemento ${}^{91}\text{Pa}$ (Protactinio-91). El valor de A no varía.

Finalmente, la ecuación de desintegración es:



Como se observa, la ecuación cumple con las dos condiciones (conservación de masa, energía y el número total de cargas) que debe cumplir una ecuación balanceada.

2.5 Estabilidad nuclear

El núcleo ocupa una muy pequeña parte del volumen del átomo, pero en el núcleo se encuentra la mayor parte de la masa del átomo, porque está constituido por protones y neutrones, lo cual sugiere importante información sobre su densidad, y de cómo las partículas están empaquetadas. La densidad es la relación entre la masa y el volumen, y su unidad en el sistema internacional puede ser kg/m^3 o g/cm^3 .

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (16)$$

Puesto que el núcleo es tan pequeño concentra casi toda la masa del átomo en un volumen diminuto, tiene una muy alta densidad, del orden de 10^{13} a 10^{14} g/cm^3 .

Ejemplo 5.

¿Cuál será el peso de una caja de fósforos que tiene 54 mm de largo, 35 mm de ancho y 14 mm de alto, llena de nucleos?

Primero se calculará el volumen de la caja de fósforos.

$$V_{\text{caja de fósforo}} = 54 * 35 * 14 = 26460 \text{ mm}^3 = 26,46 \text{ cm}^3$$

Usando la ecuación 16 se puede calcular la masa de la caja de fósforos llena de nucleos:

$$m = 1013 \text{ g/cm}^3 * 26,46 \text{ cm}^3 = 264,6 \text{ millones de toneladas}$$

¡El peso total de esa caja sería de más de 260 millones de toneladas!

La alta densidad del núcleo conlleva a cuestionar, ¿cuál es la fuerza que permite a estas partículas estar juntas? De las Leyes de Coulomb se conoce qué partículas de igual carga se repelen y de carga diferente se atraen. Por lo expuesto se entiende que dos protones se repelen, pero en adición a la repulsión existe un rango corto de atracción entre:

- protón y protón,
- protón y neutrón,
- neutrón y neutrón.

La estabilidad de cualquier núcleo está determinada por la diferencia de la repulsión de Coulomb y la fuerza nuclear fuerte.

Si la repulsión sobrepasa la atracción el núcleo se desintegra emitiendo partículas o radiación; si

la fuerza atractiva prevalece el núcleo es estable. El factor principal que determina si el núcleo es estable, es la relación neutrón-protón ($n=p$):

- Átomos de elementos estables tienen bajo número atómico donde el valor $n=p$.
- A medida que el número atómico incrementa el valor de $n=p > 1$; esta desviación se observa en átomos de alto número atómico, porque a mayor cantidad de neutrones se necesita contrastar la fuerza fuerte de repulsión sobre los protones, para así estabilizar el núcleo.

Las siguientes estructuras ayudan a inferir la estabilidad nuclear [19]:

1. La estabilidad Nuclear se puede interrelacionar con el número de Protones y Neutrones, los núcleos que contienen 2, 8, 20, 50, 82 o 126 protones o neutrones suelen ser más estables que los que no los poseen. Los números mencionados previamente se llaman números mágicos.
2. El significado de estos números para la estabilidad nuclear es similar a la del número de electrones asociados con los gases nobles estables (esto es, 2, 10, 18, 36, 54 y 86 electrones).
3. Los núcleos con números pares de protones y neutrones son, por lo general, más estables que los que tienen números impares de estas partículas (Tabla 6).
4. Todos los isótopos de los elementos que tienen número atómico mayor de 83 son radiactivos. Todos los isótopos del Tecnecio (Tc, $Z = 43$) y del Prometio (Pm, $Z = 61$) son radiactivos.

Tabla 5. Relación de isótopos [20]

Protones	Neutrones	Número de isótopos estables
Impar	Impar	4
Impar	Par	50
Par	Impar	53
Par	Par	164

Fuente: Elaboración propia

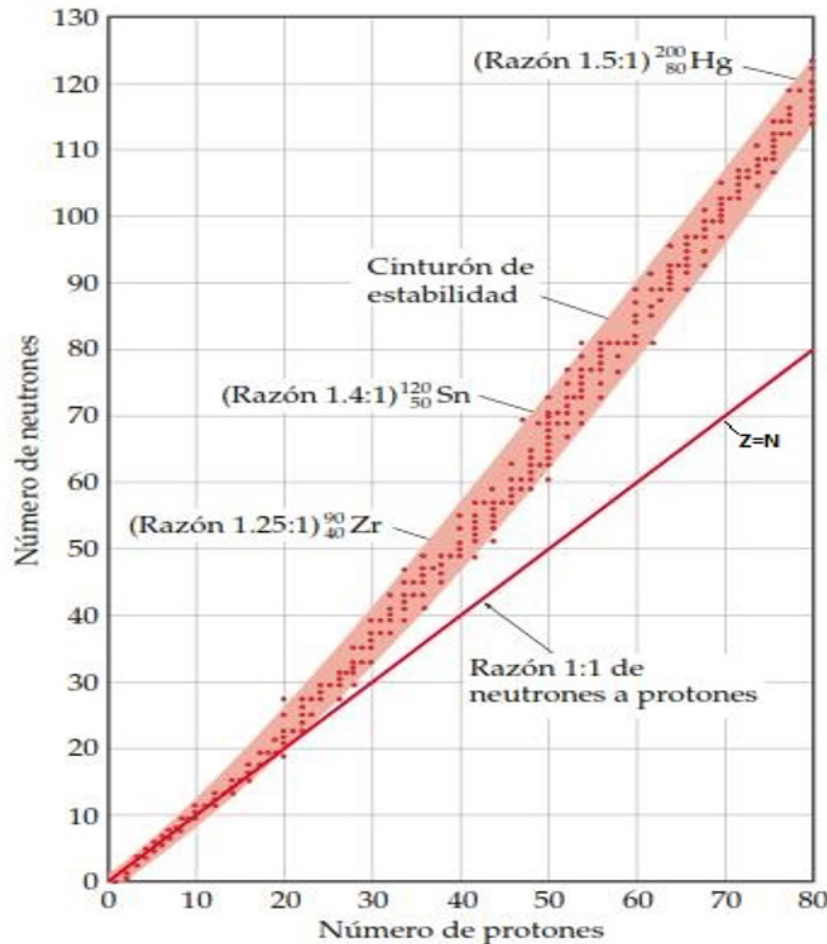


Figura 11. Relación entre neutrones y protones, los diferentes isótopos representados por puntos* [21].

La línea recta identifica los isótopos cuya proporción $n=p=1$. El área sombreada simboliza la banda de estabilidad.

La relación entre el número de neutrones frente al número de protones es mostrada en la Figura 11. Note que los núcleos más estables se encuentran en una zona denominada cinturón o banda de estabilidad. La mayoría de los núcleos radiactivos se encuentran fuera de este cinturón. En la parte superior de la Figura 11 se puede identificar los núcleos

con mayor proporción de neutrón/protón que los presentes dentro de la banda. Para equilibrar esta proporción estos núcleos experimentan el proceso denominado emisión de partículas β , según la reacción nuclear mostrada en la ecuación 17.



La emisión de partículas β conlleva el incremento del número de protones en el núcleo, a través de la reducción el número de neutrones.

Debajo del cinturón de estabilidad, los núcleos tienen una proporción n/p menor que aquellos que están en la banda. Para acercarse a la banda de estabilidad, estos núcleos (inestables) emiten un positrón o capturan un electrón. La ecuación 19 ejemplifica el proceso de emisión de un positrón.

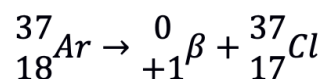


La captura de un electrón es el proceso por el cual un electrón, es atraído hacia el núcleo, combinándose con un protón para formar un neutrón. De esta manera, el número atómico disminuye en una unidad, pero el número de masa no cambia. Este proceso tiene el mismo efecto neto que la emisión de un positrón:

Ejemplo 6.

Escriba la ecuación correctamente balanceada de la emisión de un positrón por parte del ${}^{37}\text{Ar}$ (Argon-37) y ¿En cuál elemento éste se transformaría?

Empleando la ecuación 19, obtenemos lo siguiente:



Después de la emisión de un positrón se obtiene al ${}^{37}\text{Cl}$ (Cloro-37).

2.6 Radiactividad natural

Cuando se habla de radiactividad se tiene un concepto de elementos peligrosos que emiten mucha energía que puede ser dañina, sin embargo, está presente en el diario vivir, ni siquiera se sospecha de su presencia y se encuentra constantemente: incluso los humanos son radiactivos, debido a la presencia de ciertos elementos radiactivos en el cuerpo, como el Potasio; la radioactividad se utiliza ampliamente en el diario vivir, por ejemplo todos están expuestos a ella, cuando se realiza exámenes radiológicos. Por otro lado, la radiactividad no es del todo mala, de hecho, sin ella no habría vida, debido a muchas razones. Por ejemplo, el sol obtiene energía gracias a la reacción de fusión entre dos protones para transformarse en un núcleo de deuterio, elemento formado por un protón y un neutrón (Figura 12). Este tipo de transformación es similar a una reacción radiactiva,

ya que dicha reacción emite un electrón positivo y un neutrino. Este proceso hace posible la generación de neutrones para formar núcleos más pesados, que son parte importante para la constitución del universo. Gracias al calor de la Tierra, que es producido por las desintegraciones radiactivas, ha sido posible que las condiciones ambientales se hayan mantenido desde la formación del planeta. La vida como tal se ha dado gracias a la cantidad constante de radiaciones, llevando a una diversificación y evolución de cada una de las especies vivas que existen actualmente [22].

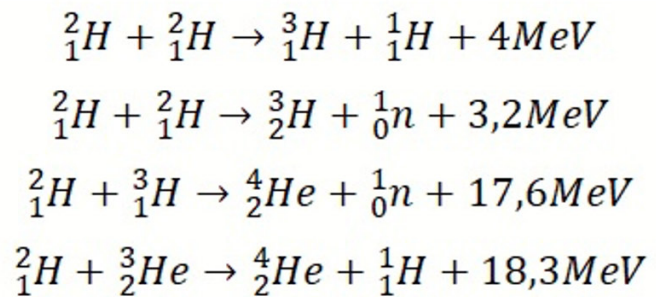
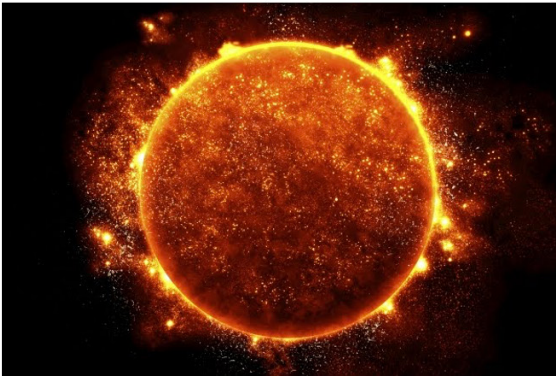


Figura 12. Reacciones nucleares de fusión, llevadas a cabo en el Sol [23] [24]

En la naturaleza existe un gran número de radioisótopos, un determinado número de ellos tiene una vida media muy prolongada, tanto o más longevo como la vida de la Tierra. Como también se encuentran radioisótopos de vida media muy corta. Por otra parte, algunos de los radioisótopos son consecuencia de la radiación cósmica de fondo del universo.

En la Figura 12 se muestra la serie de desintegración de ${}^{238}\text{U}$, el cual es uno de los tres tipos de radiactividad natural de fondo presente en el planeta Tierra.

Dicha clasificación muestra tres categorías.

- i. Formada por los radioisótopos primarios de vida media muy larga, denominados así por existir desde que se formó la Tierra, hace aproximadamente cinco mil millones de años [25]
 - Uno de los elementos más importantes de la radioactividad natural es el K (Potasio) el cual presenta un isótopo radiactivo de vida media muy larga;
 - Otros isótopos naturales de menor escala son el Rb (Rubidio), el Sm (Samario) y el Lu (Lutecio).
 - Dos familias importantes son Th y el U que se encuentran en cantidades variables tanto en el suelo como en las rocas. Este es el motivo por el cual cerca de los yacimientos de uranio y torio, el flujo de radiactividad es proporcional a las concentraciones Torio y/o Uranio presente en el suelo.

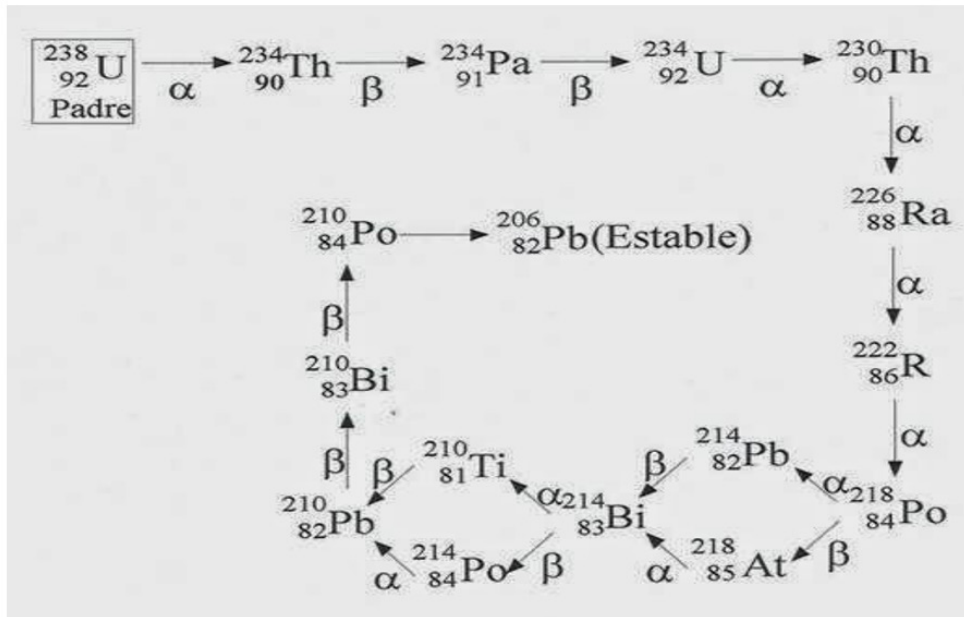


Figura 13. Cadena radiactiva del ^{238}U proveniente de la familia radiactiva del radio [26]

La mayoría de los radioisótopos primarios provienen del ^{238}U , el ^{232}Th y, finalmente, el ^{235}U [25].

- i. La segunda categoría; está constituida por los radioisótopos secundarios los cuales se van formando por el decaimiento de otros isótopos radiactivos, los cuales tienen vidas medias muy cortas comparadas con la edad de la Tierra, una característica importante es que se están formando continuamente por desintegración de los isótopos primarios.
- ii. Existen cadenas isótopos emparentadas entre diversos cuerpos radiactivos, cuando un átomo muere da lugar al nacimiento de uno o varios átomos de especies diferentes.
- iii. La tercera categoría de radioisótopos está constituida por los radioisótopos inducidos. Éstos son producidos continuamente en la naturaleza por medio de reacciones nucleares por el efecto de la radiación cósmica sobre los elementos en la Tierra. Entre los isótopos radiactivos formados por la interacción de los rayos cósmicos con diversos elementos se encuentra el ^{14}C [25].

El esquema de decaimiento del ^{238}U , tiene un proceso de desintegración, dividido en 14 etapas. Las vidas medias de todos los productos intermedios son variables según el isótopo generado.

Es importante poder balancear la reacción nuclear para cada una de las etapas de una serie de desintegración radiactiva. Por ejemplo, de la Figura 13, el primer decaimiento en la serie de desintegración corresponde a la transición del ^{238}U a ^{234}Th , con la emisión de una partícula α ,

como se puede ver:



La ecuación (22) muestra el siguiente paso en la desintegración. El isótopo radiactivo inicial en la serie de desintegración radiactiva se denomina padre, y el producto se conoce como hijo.

2.7 Transmutaciones nucleares (naturales y sintéticas)

Como se describió en las secciones anteriores, existen reacciones nucleares en las cuales el núcleo se desintegra espontáneamente. También está el caso cuando la identidad de un núcleo cambia cuando éste es golpeado por un neutrón o por otro núcleo, éstas son las denominadas reacciones nucleares inducidas o conocidas como transmutaciones nucleares.

Históricamente Ernest Rutherford (1919) llevó a cabo la primera transmutación nuclear. Consiguió transformar ${}^{14}_7\text{N}$ en ${}^{17}_8\text{O}$, más un protón, utilizando ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ el cual emite partículas α de alta velocidad. La reacción es:



Las reacciones como las mostradas en la ecuación (23), han permitido sintetizar cientos de radioisótopos en laboratorio.

Representación: Las transmutaciones nucleares son representadas ocasionalmente enumerando, en orden, el núcleo objetivo, la partícula que bombardea, la partícula expulsada y el núcleo producto [27].

Escrita de esta forma, la ecuación (23) es representada como: ${}^{14}_7\text{N}(\alpha, p) {}^{17}_8\text{O}$. La partícula alfa, el protón y el neutrón son representados como $\{\alpha, p, n\}$ respectivamente [27].

2.7.1 Aceleradores y uso de partículas con carga

Para generar transmutaciones nucleares sintéticas, las partículas cargadas como las partículas alfa, se deben mover a gran velocidad para vencer la repulsión electrostática que existe entre ellas

y el núcleo objetivo, generalmente aplicando intensos campos magnéticos y electrostáticos.

Un tipo de aceleradores son los ciclotrones. Estos utilizan campos magnéticos y eléctricos perpendiculares entre sí para aumentar la energía de las partículas cargadas. En los ciclotrones las partículas siguen una trayectoria en espiral, desde dentro hacia afuera del ciclotrón, debido a un campo magnético estático y son acelerados por un campo eléctrico que varía rápidamente. Una vez las partículas llegan a la energía deseada, estas son extraídas del ciclotrón para que impacten sobre un objetivo. El recorrido de las partículas se realiza en alto vacío para evitar pérdida de partículas cargadas por interacciones no deseadas [27].



Figura 14. Esquema de un ciclotrón [27].

2.7.2 Elementos transuránicos

Los elementos transuránicos son producidos a través de transmutaciones artificiales, son elementos químicos con número atómico mayor que 92 (número atómico del Uranio) en consecuencia ocupan posiciones que siguen inmediatamente a éste elemento en la tabla periódica. El nombre de transuránicos significa “más allá del Uranio”.

Por transmutación nuclear se han obtenido los elementos transuránicos, todos ellos son artificiales.

Tabla 6. Reacciones nucleares de síntesis de elementos transuránicos [28]

Z	Nombre	Símbolo	Reacción Nuclear de Síntesis
93	Neptunio	Np	${}^{238}_{92}\text{U} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{239}_{93}\text{Np} + {}^0_{-1}\beta$
94	Plutonio	Pu	${}^{239}_{93}\text{Np} \rightarrow {}^{239}_{94}\text{Pu} + {}^0_{-1}\beta$
95	Americio	Am	${}^{239}_{94}\text{Pu} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{240}_{95}\text{Am} + {}^0_{-1}\beta$
96	Curio	Cm	${}^{239}_{94}\text{Pu} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{242}_{96}\text{Cm} + {}^1_0\text{n}$
97	Berquelio	Bk	${}^{242}_{95}\text{Am} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{245}_{97}\text{Bk} + {}^1_0\text{n}$
98	Californio	Cf	${}^{242}_{96}\text{Cm} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{245}_{98}\text{Cf} + {}^1_0\text{n}$
99	Einsteinio	Es	${}^{238}_{92}\text{U} + 15 {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{253}_{99}\text{Es} + 7 {}^0_{-1}\beta$
100	Fermio	Fm	${}^{238}_{92}\text{U} + 17 {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{255}_{100}\text{Fm} + 8 {}^0_{-1}\beta$
101	Mendelevio	Md	${}^{253}_{99}\text{Es} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{256}_{101}\text{Md} + {}^1_0\text{n}$
102	Nobelio	No	${}^{246}_{96}\text{Cm} + {}^{12}_6\text{C} \rightarrow {}^{254}_{102}\text{No} + 4 {}^1_0\text{n}$
103	Laurencio	Lr	${}^{252}_{98}\text{Cf} + {}^{10}_5\text{B} \rightarrow {}^{257}_{103}\text{Lr} + 5 {}^1_0\text{n}$
104	Rutherfordio	Rf	${}^{249}_{98}\text{Cf} + {}^{12}_6\text{C} \rightarrow {}^{257}_{104}\text{Rf} + 4 {}^1_0\text{n}$
105	Hahnio	Ha	${}^{249}_{98}\text{Cf} + {}^{15}_7\text{N} \rightarrow {}^{260}_{105}\text{Ha} + 4 {}^1_0\text{n}$

Fuente: Elaboración propia

2.7.3 Métodos de síntesis de transuránicos

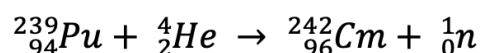
2.7.3.1 Aceleradores de partículas

Estos dispositivos utilizan la energía electromagnética para acelerar partículas cargadas como los protones a velocidades altas, de esa manera éstos logran penetrar el núcleo de un átomo.

Ejemplo 7.

¿Qué elemento se puede obtener acelerando una partícula alfa, y disparándola contra un átomo de Pu?

Según la siguiente reacción:



Disparando una partícula alfa al Plutonio, se puede sintetizar el elemento Curio.

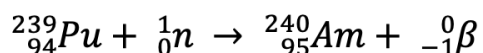
2.7.3.2 Reactores nucleares

En los reactores nucleares se da la reacción de fisión nuclear, la cual desprende neutrones de diferentes energías, los cuales pueden colisionar con átomos de diferentes elementos para lograr sintetizar nuevos elementos, como el Americio, según la siguiente reacción:

Ejemplo 8.

¿Qué elemento se puede obtener disparando un neutrón contra un átomo de Pu?

Según la siguiente reacción:



Disparando un neutrón al Pu, se puede sintetizar el elemento Am

3. INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN CON LA MATERIA

Los efectos de la radiación en la materia son principalmente determinados por la energía de la radiación incidente. Existe básicamente una clasificación que separa los tipos de radiaciones según el tipo de interacción: Radiaciones ionizantes y no ionizantes. En la Figura 15 es posible observar la diferencia de las radiaciones electromagnéticas según su frecuencia, acompañada de algunos ejemplos de fuentes.

Gran parte de la tecnología empleada funciona con radiaciones no ionizantes. Cuando ésta interacciona con la materia no llega a modificarla física o químicamente, debido a que relativamente posee baja energía. Sin embargo, como producto de esa interacción se produce movimiento (traslación, rotación o vibración), que finalmente se traduce como calor. En cambio, las radiaciones ionizantes alteran la estructura atómica de la materia, por lo que son peligrosas para elementos biológicos tales como las células.

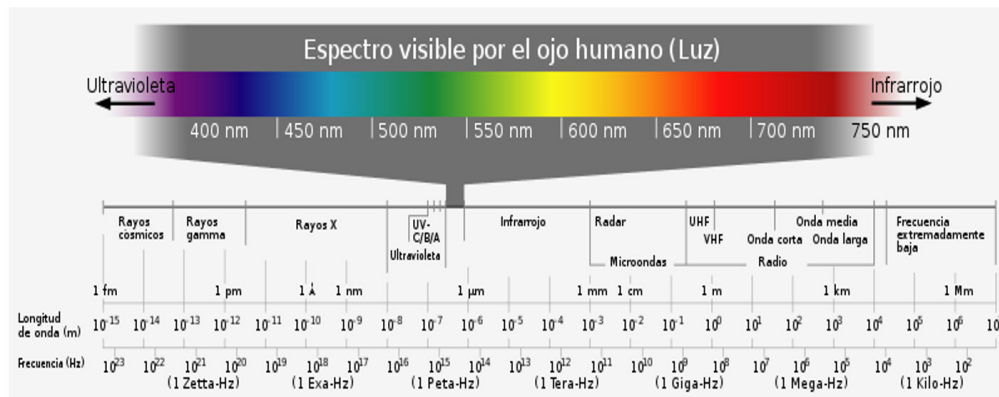


Figura 15. Tipos de radiaciones según su capacidad de producir ionización. [29]

Los efectos que sufre la materia al ser irradiada pueden ser estudiados desde diferentes puntos de vista. Una de las opciones, que se adoptará, es la de analizar inicialmente el tipo de radiación y los procesos físicos que producen a su paso por la materia, comenzando por la radiación electromagnética, luego la corpuscular y finalmente la neutrónica.

3.1 Interacción de fotones con la materia

El electromagnetismo afirma que la radiación electromagnética es una combinación de campos eléctricos y magnéticos de frecuencia alternada, esa radiación, portadora de energía, es representada por una onda sinusoidal con parámetros definidos, como la longitud de onda y velocidad de propagación. Sin embargo, en 1905, para explicar uno de los fenómenos de la interacción de la luz con la materia, Albert Einstein propuso la idea de la cuantización de la luz, lo que hoy se conoce como fotones. Estudios posteriores realizados por Robert Millikan [30], demostraron la validez de la teoría de Einstein. Por tales trabajos, ambos fueron distinguidos con Premios Nobel.

Un aspecto importante de la absorción y emisión de fotones por la materia es que ésta ocurre en los átomos del cuerpo. Algunos materiales son mejores emisores que otros, por ejemplo, una lámpara emite mejor de lo que absorbe, en cambio unas gafas oscuras absorben mejor de lo que emiten.

3.1.1 Atenuación

La interacción entre fotones y la materia, se da a través de colisiones aisladas, sin que interaccionen dos colisiones. Debido a esto los fotones no cuentan con un alcance definido al atravesar la materia, sino que tienen una cierta probabilidad de atenuación por unidad de longitud, que se denomina coeficiente de atenuación lineal, que es independiente del recorrido

3.1.2 Procesos de interacción

Los procesos en los que los fotones pueden transferir energía a la materia, produciendo ionización, son: el efecto fotoeléctrico, efecto Compton y la creación de pares [31].

3.1.2.1 Efecto fotoeléctrico

Al iluminar la superficie de un material con radiación ionizante, es posible expulsar electrones de las capas más profundas del átomo. Este fenómeno es conocido como efecto fotoeléctrico, el cual tiene muchas aplicaciones prácticas de uso cotidiano, como el de la producción de energía solar fotovoltaica [31].

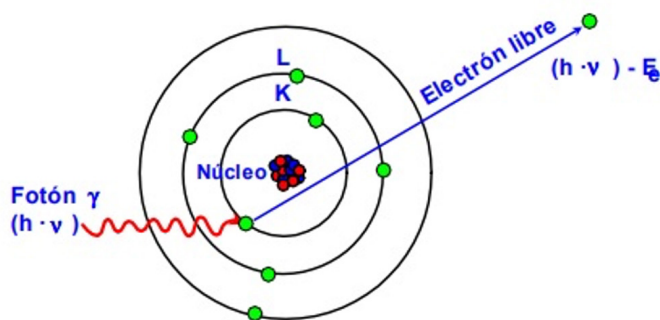


Figura 16. Efecto fotoeléctrico [32]

Para lograr arrancar un electrón, el fotón debe ser absorbido en su totalidad. Una parte de la energía del fotón es empleada en liberar al electrón y el resto para proporcionarle movimiento, es decir, energía cinética.

Si la energía del fotón incidente es menor a la de enlace, ningún electrón será liberado, por lo

que el fenómeno depende de frecuencia de la luz incidente, no así de su intensidad. Una mayor intensidad, en una luz con frecuencia capaz de producir el efecto, incrementará el número de electrones liberados [31]. La Figura 17 resume estos criterios.

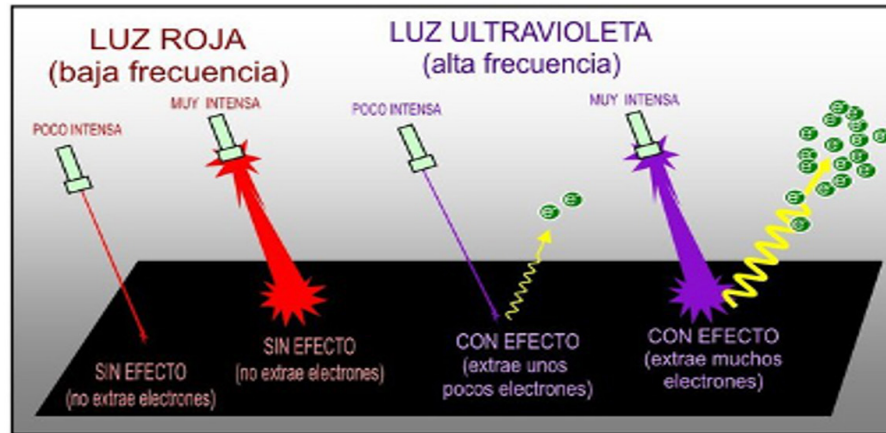


Figura 17. Esquema de la liberación de electrones por efecto fotoeléctrico [33]

3.1.2.2 Efecto Compton

En el caso del efecto Compton, o dispersión Compton, la interacción de un fotón con un electrón débilmente ligado produce la liberación del electrón y un cambio en la longitud de onda del fotón (Figura 18). En este caso, los electrones afectados son aquellos de las capas superficiales del material, produciendo así un átomo residual ionizado y de emitirse radiación electromagnética de des excitación será de baja energía [34].

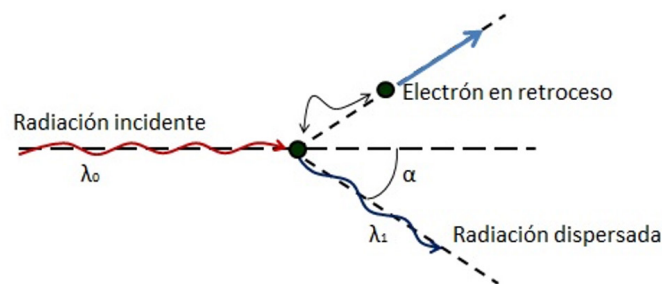


Figura 18. Esquema del efecto Compton [35]

3.1.2.3 Creación de pares

La tercera forma en la que los fotones de alta energía transfieren la misma a la materia es a través de la creación de pares y el proceso inverso, la aniquilación de pares.

El proceso de creación de pares es la materialización de la energía de acuerdo a la ecuación $E=mc^2$ y la conservación de la carga eléctrica, donde la totalidad de la energía del fotón es absorbida por un núcleo. Como resultado se crea un par electrón positrón, que además tienen energía cinética [34].

El positrón es una partícula idéntica al electrón en todas sus propiedades, excepto que tiene la carga opuesta (al igual que su momento magnético), razón por la cual se denomina como la antipartícula del electrón. De hecho, está comprobado que todas las partículas tienen sus correspondientes antipartículas.

Para la producción de pares, la energía mínima que debe poseer un fotón es igual a $2m_e c^2$, cuyo valor es de 1,022 MeV. Sin embargo, el fotón solo no es suficiente para crear el par, es necesaria la interacción con un núcleo atómico que sea capaz de absorber la cantidad de movimiento sin afectar sensiblemente el balance de energía.

La creación de pares puede observarse de manera natural y artificial. En la naturaleza ocurre en las interacciones de los rayos cósmicos o por emisión de rayos gamma provenientes de sustancias radiactivas. En cambio, artificialmente puede ser observado en aceleradores de partículas, ya que los rayos gamma que son emitidos por procesos de frenado alcanzan las energías necesarias [34].

El umbral de energía mínima hace referencia a la creación de un par electrón-positrón, ya que la masa en reposo del electrón es la menor entre las partículas posibles. No obstante, eso no impide que el fotón (si tiene mayor energía), pueda crear pares de otras partículas, como protón-antiprotón.

Por ejemplo, el proceso inverso un par de partículas (es decir, partícula y antipartícula), interactúan para aniquilarse, se crea energía a partir de materia, para ello es suficiente que las partículas estén incluso en reposo, pero próximas una de la otra, por lo que la cantidad de movimiento del conjunto es nula, o casi nula. Para conservar esta cantidad de movimiento, el proceso crea entre dos y, poco probablemente, tres o más fotones. Crear un solo fotón violaría las leyes de conservación.

En la Figura 19, se muestran los procesos de producción de pares a partir de la interacción de un fotón de 1,022 MeV con un núcleo atómico, seguida de la aniquilación de un par electrón-positrón para formar dos fotones.

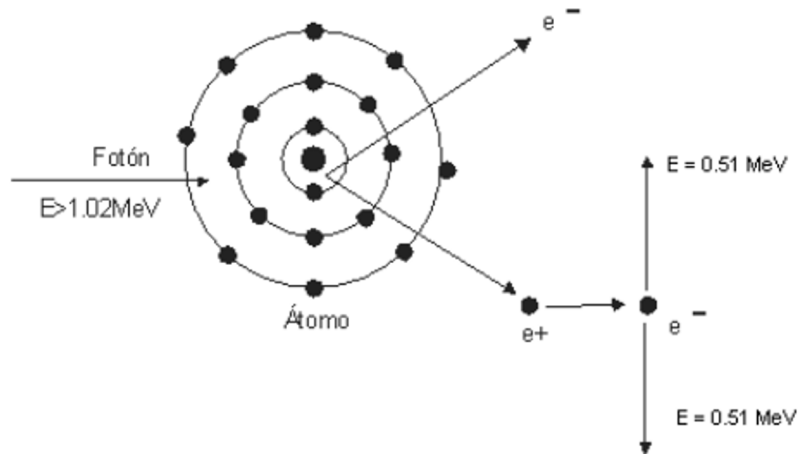


Figura 19. Esquemmatización del proceso de creación y aniquilación de pares [36].

3.2 Interacción de partículas cargadas con la materia

La interacción que experimentan las partículas cargadas a su paso por la materia es principalmente coulombiana. Mediante este proceso las partículas van perdiendo energía cinética de forma gradual, hasta que se detienen [34].

Los tipos de procesos que contribuyen a la pérdida de energía de una partícula cargada con un medio material son [34]:

3.2.1 Colisión elástica

En este tipo de interacción la partícula desvía su trayectoria, cediendo su energía cinética a su paso. No obstante, los átomos no sufren cambios. Las cantidades físicas que se conservan son la energía cinética y momento lineal.

3.2.2 Colisión inelástica

En una colisión inelástica, la partícula sede parte de su energía cinética para excitar, ionizar o disociar electrones de los átomos del material. El momento lineal se conserva en el proceso.

3.2.3 Colisión radiactiva

En una colisión radiactiva, la partícula cargada interactúa con el campo electromagnético de los átomos y produce radiación electromagnética por procesos de frenado. La mayor probabilidad de ocurrencia de esta interacción se da en las proximidades del núcleo, en cambio, es muy poco probable que exista una colisión directa con el núcleo.

3.3 Interacción de neutrones con la materia

Los neutrones son partículas eléctricamente neutras, los cuales no son afectados por electrones, protones, positrones, etc., estas partículas son denominadas “partículas cargadas”. Los neutrones sólo interactúan con el núcleo, actuando sobre las secciones eficaces, las cuales son extremadamente pequeñas si se compara, por ejemplo, con las interacciones de las secciones eficaces de un protón con la misma masa nucleónica, en consecuencia, la interacción de los neutrones con la materia es penetrante [34].

Los neutrones a nivel nucleónico no son partículas directamente ionizantes, pero tras la interacción con la materia producen de manera espontánea decaimientos secundarios que emiten partículas que por su naturaleza energética y carga son consideradas partículas directamente ionizantes, en consecuencia, los neutrones, así como los fotones son partículas indirectamente ionizantes.

En muchas aplicaciones médicas e industriales los neutrones tienen el mismo formalismo analítico y matemático que los fotones, sin embargo, a diferencia de los fotones se observa que:

- El neutrón tiene un componente dipolar magnético negativo,
- Su impulso es sensible a campos magnéticos intensos.

Al considerar las interacciones de los neutrones con la materia, es importante distinguir las reacciones reales de la dispersión potencial.

En la dispersión potencial, no hay contacto real entre el neutrón y el núcleo objetivo (es decir, las fuerzas nucleares no se ponen en acción); la onda asociada con el neutrón es dispersada por el campo nuclear. Este proceso es similar a la colisión elástica entre dos bolas de billar, con la conservación del momento lineal y la energía cinética [34].

En una reacción “real”, por otra parte, el neutrón penetra en el núcleo. En el rango de energía la reacción se puede describir mediante el modelo de núcleo compuesto.

3.3.1 Clasificación de los neutrones por energía

Desde el descubrimiento del neutrón, numerosos experimentos en física de partículas han clasificado los neutrones en 6 bandas energéticas, como se puede ver a continuación [37]:

1. Neutrones de alta energía: $E > 20 \text{ MeV}$.
2. Neutrones rápidos: $10 \text{ keV} < E < 1 \text{ MeV}$.
3. Neutrones epitermales: $1 \text{ eV} < E < 10 \text{ keV}$.

4. Neutrones lentos: $0,025 \text{ eV} < E < 1 \text{ eV}$.
5. Neutrones térmicos $E \approx 0,025 \text{ eV}$ (energía más probable a una temperatura de 290 K después de la moderación).
6. Neutrones fríos: $E < 0,025 \text{ eV}$.

Para neutrones de alta energía es necesario considerar individualmente las colisiones con los nucleones. En este sentido el nucleón resultante es medido (cuantitativamente) en función de las fuerzas débiles de las secciones transversales: nucleón-nucleón.

En interacciones de alta energía neutrónica, se observan interferencias en las secciones transversales de los nucleones, estas interferencias afectan las interacciones nucleón-nucleón, lo cual obliga a trabajar en correcciones necesarias sobre las secciones eficaces de interacción.

El neutrón incidente al generar momento lineal adicional pone en movimiento un nucleón dentro el núcleo, este nucleón interactúa con otro nucleón y así sucesivamente se genera un efecto cascada intranuclear, el modelo físico-matemático es altamente complejo.

Los neutrones rápidos son producidos con un rango energético $\geq 1 \text{ MeV}$, utilizado de manera general en reacciones de fisión nuclear.

Los neutrones epitermales están dentro un rango de $1 \text{ eV} < E < 10 \text{ keV}$, las secciones transversales de interacción varían muy rápidamente y con frecuencia muestran resonancias.

Los neutrones térmicos con un rango de energía de $\approx 0,025 \text{ eV}$ (independientemente de su origen) disminuyen su velocidad en la materia, a éste fenómeno se denomina “*termalización*”, los neutrones térmicos están en equilibrio térmico con su fondo a $\approx 20^\circ \text{ C}$, cuya energía media cercana a $0,025 \text{ eV}$ ($E = kT$ con k la constante de Boltzmann), como es el caso de la captura del neutrón térmico y sus efectos de resonancia.

En la Figura 20 se puede apreciar un diagrama de los modos principales de interacción de los neutrones con la materia.

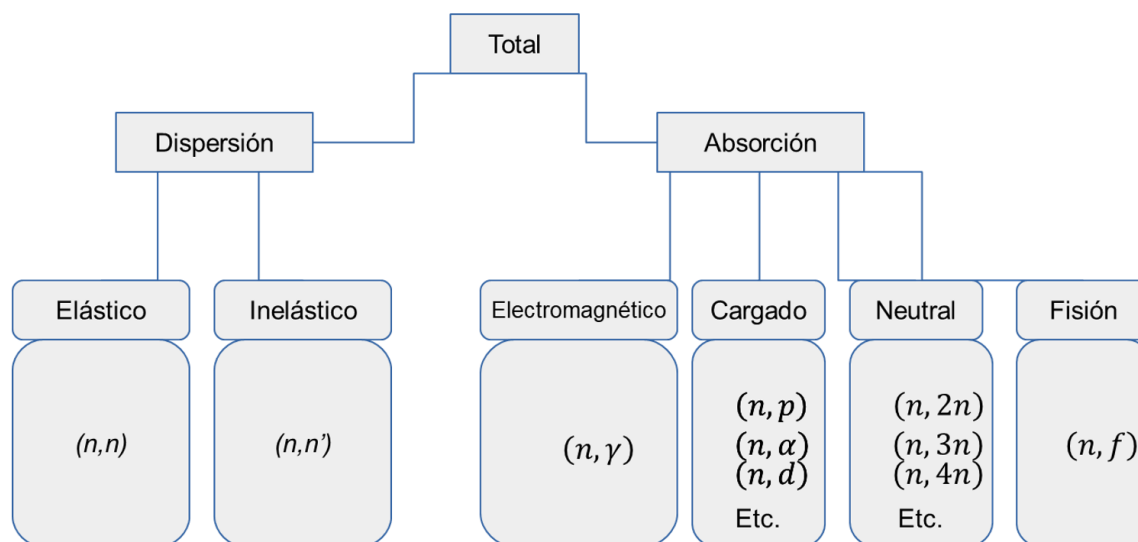


Figura 20. Modos principales de interacción de los neutrones con la materia. [38]

Fuente: Elaboración propia

Los principales modos de interacción son [39]:

Dispersión (scattering): modificación de la energía y de la trayectoria del neutrón, el núcleo mantiene un número igual de protones y neutrones.

Absorción: Modificación del núcleo genera emisión de radiación.

3.3.2 Dispersión

A continuación, se presenta un análisis sobre las características más generales de los dos diferentes tipos de colisión neutrónica dispersiva [39].

3.3.2.2 Dispersión Inelástica (n,n')

Este proceso es idéntico a la dispersión elástica, salvo que el núcleo queda en un estado excitado. Como la energía es retenida por el núcleo se trata claramente de una interacción endotérmica. El núcleo excitado decae, por la emisión de rayos γ . En este caso, como estos rayos γ se originan en la dispersión inelástica se denominan rayos γ inelásticos [39].

La energía perdida en una colisión inelástica es mayor que en una colisión elástica.

3.3.3 Absorción

Después de una absorción neutrónica, se emite energía en forma de radiación secundaria, esta radiación generalmente se puede detectar [39].

La radiación secundaria se manifiesta de la siguiente forma:

- Radiación gamma (γ) que es consecuencia de absorción electromagnética o radiactiva: proceso (n, γ) .
- Una partícula cargada: proceso $(p, \alpha) \rightarrow (n, p)$ o (n, α) .
- Emisión de neutrones: proceso $(n, 2n), (n, 3n), \dots$
- Productos de fisión: Proceso (n, f) .

3.3.3.1 Absorción Electromagnética

Cuando la reacción (n, γ) da como resultado la absorción del neutrón por el núcleo, se observa la formación de un núcleo excitado que emite uno (o más) γ .

3.3.3.2 Absorción que genera emisión de partículas cargadas

Este fenómeno es observado en neutrones rápidos porque son a menudo endoenergéticos⁶. La energía transferida al núcleo es lo suficientemente como para permitir el cruce del potencial de la pared del núcleo. Se observa principalmente en reacciones de los tipos (n, p) o (n, α) pueden suceder con neutrones térmicos, por ejemplo: ${}^3\text{He}(n, p) {}^3\text{H}$, ${}^6\text{Li}(n, \alpha) {}^3\text{H}$, ${}^{10}\text{B}(n, \alpha) {}^7\text{Li}$.

3.3.3.3 Absorción neutrónica y fisión

La reacción de fisión neutrónica ocurre en medios con átomos de Z grande, generando la división del núcleo, una consecuencia inmediata es la producción de fragmentos pesados y núcleos con gran energía cinética [39].

Por ejemplo: la fisión de ${}^{235}\text{U}$ genera la liberación de 200 MeV compartida entre los fragmentos de fisión, 2 o 3 neutrones, partículas β y fotones.

Otro ejemplo es la emisión de neutrones generada por reacciones de fisión en cadena en reactores nucleares de fisión.

Se debe tener en cuenta que una colisión es “elástica” cuando se conserva la energía cinética, de lo contrario se denomina “inelástica”, es decir, si parte de la energía se ha destinado a modificar el estado interno del “Núcleo objetivo”.

⁶ Endoenergético: [proceso, reacción] Que se produce con absorción de energía.

La dispersión es inelástica si el núcleo objetivo, inicialmente en su nivel de energía fundamental alcanza un estado excitado después de la interacción con el neutrón. Este núcleo decaerá más tarde por emisión de rayos gamma.

Es difícil determinar la distribución de probabilidad de la dispersión inelástica. Diversos experimentos y ciertas consideraciones teóricas indican que la dispersión se puede considerar como isotrópica en el centro del sistema de masas en equilibrio energético, al menos en el dominio epitermal, donde la mayoría de las resonancias más altas de los núcleos pesados se han encontrado, posiblemente no a muy alta energía.

Esta isotropía significa que, en este sistema, el conjunto de tensores que describen la disposición de neutrones después de la colisión tiene la misma probabilidad de apuntar en cualquier dirección del espacio.

Esta suposición es válida en particular para los materiales moderadores que se utilizan con mayor frecuencia en los reactores de neutrones térmicos.

3.4 Efectos de la radiación ionizante en la materia

Desde su creación, el mundo ha sido radiactivo, es decir, produce radiación ionizante, muestra de ello es la presencia de radionucleidos en la naturaleza con tiempo de vida media mayores a la existencia del propio planeta. Se han descubierto alrededor de 60 radionucleidos en el ambiente, pero no son los únicos, los seres humanos han aprendido a sintetizar muchos otros. Por ello, es posible clasificar el origen de los radionucleidos en tres tipos: terrestre, cosmológico y artificial. Como una muestra de la producción de radiación de origen cosmológico, la Figura 21 muestra el impacto de rayos cósmicos primarios, principalmente núcleos atómicos ligeros, con átomos de la atmósfera superior, que resultan en lluvias de partículas, que son conocidas como rayos cósmicos secundarios. En este torrente de interacciones, muchos átomos, que inicialmente no eran radiactivos, se convierten en radionucleidos.

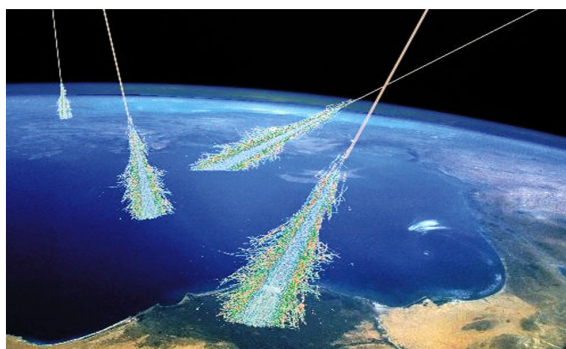


Figura 21. Simulación de rayos cósmicos que impactan con núcleos atmosféricos creando cascadas de partículas llamadas chubascos [40]

Los efectos de la radiación ionizante sobre la materia son diversos, pero dependen principalmente de cuatro factores:

1. Tipo de radiación, el cual establece cuan penetrante es la radiación.
2. La energía individual de los fotones o partículas.
3. El número de partículas o fotones que pueden impactar en una determinada área por unidad de tiempo.
4. La naturaleza del material expuesta a la radiación.

Existen varias aplicaciones de las radiaciones que son uso cotidiano, por ejemplo, los rayos X, que son utilizados para obtener imágenes internas del cuerpo u otras de utilidad industrial, por lo que el entendimiento y medición de la radiación es un tema de interés público.

Para fines prácticos, es necesario conocer cuatro parámetros o magnitudes físicas que describen los efectos de las radiaciones ionizantes:

3.4.1 Tasa de decaimiento radiactivo

También llamada simplemente como actividad, es la magnitud física que determina la cantidad de elementos radiactivos que decaen en un determinado tiempo. En otras palabras, es la velocidad con la que se producen las desintegraciones radiactivas [39].

La expresión matemática de la actividad resulta de una analogía de la ecuación 4, por lo que puede ser escrita como:

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (24)$$

donde, A y A_0 son las actividades final e inicial, λ , como ya se mencionó, es la constante de decaimiento, cuyo valor determina prácticamente la velocidad del decaimiento: valores grandes de λ significan que la actividad disminuye rápidamente y, por el contrario, valores pequeños significan que la actividad disminuye lentamente.

Las unidades empleadas para cuantificar la actividad son el Bequerel (Bq) en el Sistema Internacional, que equivale a una desintegración por segundo, y el Curio (Ci). Entre ambos existe la equivalencia

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

Ejemplo 9.

Se cuenta con una barra de ^{60}Co Cobalto-60, la cual fue fabricada hace 10 años con una actividad de 200 kCi y que actualmente tiene una actividad de 53 kCi, ¿Cuál era su verdadera actividad cuando fue fabricada?

$$T_{\frac{1}{2}} = 1,66 * 10^8 \text{segundos}$$

Sin embargo aun falta saber el valor de la constante de decaimiento (λ) que será encontrada empleando la ecuación 11:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{1,66 * 10^8 \text{segundos}} = 4,17 * 10^{-9} \text{s}^{-1}$$

Por lo tanto, ya se puede saber la actividad inicial de la barra de ^{60}Co cuando fue fabricada hace 10 años, mediante la ecuación 24

$$A_0 = \frac{A_{(t)}}{e^{-\lambda t}} = \frac{53 \text{kCi}}{e^{-4,17 * 10^{-9} \text{s}^{-1} * 3,15 * 10^8}}$$

$$A_0 = 197 \text{kCi}$$

La verdadera actividad de esta barra de ^{60}Co era de 197 kCi.

3.4.2 Esquema de decaimiento

Se trata de una representación en sistema de coordenadas de la desintegración de un radionúclido. El número atómico se representa en el eje de abscisas, ascendiendo de izquierda a derecha. La energía del proceso se muestra en el eje de ordenadas, que crece en sentido ascendente. Las flechas señalan los diferentes tipos de emisiones (tipo de partícula emitida). Las flechas son verticales en la desintegración gamma, mostrando la energía de los fotones. Una flecha oblicua que apunta en la dirección del núcleo hijo indica las desintegraciones beta y la captura electrónica. Cómo la energía se conserva, y las partículas emitidas poseen energía.

Este esquema debe dibujarse en un nivel de energía inferior al del radionúclido padre, por lo que el esquema se dibuja en dirección descendente, como se muestra a continuación:

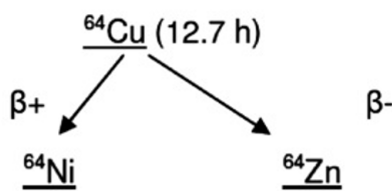


Figura 22. Esquema de decaimiento [41]

Ejemplo 10.

Analizar el siguiente esquema de decaimiento para el $^{60}_{27}\text{Co}$, y explicar su esquema.

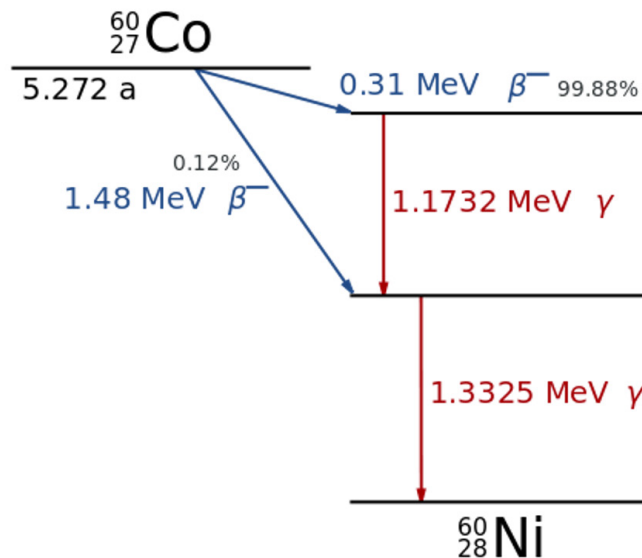


Figura 23. Esquema de decaimiento del ^{60}Co [42]

En el esquema del decaimiento del ^{60}Co se observa que en primer lugar tiene un decaimiento beta con distintas energías, la más probable, es el decaimiento beta con una energía de 0,31 MeV con una probabilidad del 99,88%, entonces decae en ^{60}Ni excitado, el cual tiene 2 decaimientos gamma de distintas energías, para terminar siendo ^{60}Ni estable.

3.4.2.1 Actividad en la vida diaria

La radiación se presenta en la vida diaria en objetos cotidianos, a modo de ejemplificar esta radiación, se muestra la Tabla 8. Es posible notar que incluso líquidos de consumo cotidiano presentan cierta actividad, aunque baja, pero actividad al final de cuentas.

Tabla 8. Ejemplos de actividad presente en alimentos de consumo humano [43]

Alimentos	Actividad
Bananas	$\approx 130 \text{ Bq/kg}$
Carne roja	$\approx 110 \text{ Bq/kg}$
Zanahorias	$\approx 125 \text{ Bq/kg}$
Cerveza	$\approx 15 \text{ Bq/L}$

Alimentos	Actividad
Nueces Brasileñas	$\approx 245 \text{ Bq/kg}$
Sal con bajo sodio	$\approx 110 \text{ Bq/kg}$

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 8 se observan que varios alimentos de la vida cotidiana contienen actividad radiactiva, sin embargo esto no es algo que temer. Ya que éstas dosis son extremadamente pequeñas como para significar en algún daño al cuerpo humano, considerando que al comer una banana se absorbe una dosis de 0,01 mrem o 0,00001 mSv aproximadamente, y una dosis letal para un hombre es de 4000 a 5000 mSv (ver Tabla 10).

3.4.3 Dosis absorbida

Es una medida de la cantidad de energía absorbida por unidad de masa, magnitud basada en la transferencia de energía típicamente usada en prácticas médicas e industriales.

$$D = \frac{\text{energía depositada}}{\text{unidad de masa}} = \frac{\Delta E}{\Delta M} \quad (25)$$

En el Sistema Internacional la unidad de medida es el gray (Gy), que tiene una equivalencia con una unidad más antigua, el rem (del inglés radiation absorbed dose, es decir, dosis de radiación absorbida). La definición y equivalencia de ambas es la siguiente:

$$1 \text{ Gy} = 1 \frac{\text{J}}{\text{kg}} = 1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$$

3.4.4 Dosis equivalente

La fuente de radiación juega un rol importante cuando se trata de tejido vivo. Sin importar que la dosis absorbida sea la misma, los efectos biológicos son diferentes. Para cuantificar esta diferencia se utiliza un factor numérico adimensional, llamado Factor de Ponderación RBE (del inglés relative biological effectiveness, es decir, eficiencia biológica relativa), que también es denominado W_R .

Tabla 9. Valores de factores de ponderación para diferentes tipos de radiación [44]

Tipo de radiación y rango de energías	W_R
Rayos X, Rayos γ , partículas β , muones, electrones	1
Fotones y pions cargados	2
Neutrones < 10 keV	5
Neutrones de 10 keV a 100 keV	10
Neutrones >100 keV a 2 MeV	20
Neutrones >20 MeV	50
Partículas alfa, productos de fisión nuclear, núcleos pesados	20

Fuente: Elaboración propia

El cálculo de la dosis equivalente se realiza considerando la suma ponderada de cada fuente de radiación multiplicada por la dosis absorbida:

$$H_T = \sum_R (D_{T,R} \times W_R) \quad (26)$$

donde H es la dosis equivalente, D es la dosis en grays (Gy). En el Sistema Internacional, las unidades de medida de la dosis equivalente es el sievert (Sv), que representa un joule de energía depositada en un kilogramo de tejido humano. La relación con las unidades de dosis absorbida es:

$$1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg} = 100 \text{ rem}$$

La Tabla 10 presenta, para ejemplificar la magnitud de radiación a la que se está expuestos cotidianamente frente a valores extremos que pueden ser letales.

Tabla 10. Ejemplos de valores de dosis equivalente para diferentes fuentes [44], [45].

Características de la dosis	Valor de la dosis equivalente (mSv)
Una banana	0,000098
Un conjunto de radiografías dentales	0,005 – 0,01
Dosis recibida en una radiografía de torax	0,1
Dosis anual para asistentes de vuelo	1,5 – 1,7
Dosis máxima estimada para los habitantes evacuados que vivían cerca del accidente de Fukushima	68

Características de la dosis	Valor de la dosis equivalente (mSv)
Seis meses de estadía en la Estación Espacial Internacional	80
Máxima dosis recibida por un trabajador que respondió a la emergencia de Fukushima	670
Enfermedad ligera por radiación	1000-1500
Enfermedad mediana por radiación	2000
Enfermedad severa por radiación	3000-4000
Dosis requerida para matar a un ser humano con un riesgo del 50% dentro de los 60 días, si la dosis se recibe en un período muy corto.	4000 - 5000

Fuente: Elaboración propia

3.4.5 Dosis efectiva

Una visión más refinada del efecto de la radiación sobre tejido vivo, da cuenta de la necesidad de considerar el tipo de tejido afectado. Para incluir esta consideración en los cálculos se añade el Factor de Ponderación del Tejido (W_T), un número también adimensional. Resultado de esta incorporación, se calcula la dosis efectiva (E) de manera similar al de la dosis equivalente:

$$E = \sum_T (H_T * W_T) \quad (27)$$

donde la sumatoria corresponde a ponderación de cada dosis por tipo de radiación y tipo de tejido afectado. Como era de esperarse, la unidad de la dosis efectiva sigue siendo el sievert (Sv).

Los factores de ponderación W_T tienen la ventaja de considerar la radiosensibilidad de cada órgano. Es así que, organismos internacionales dedicados a protección radiológica diferencian los factores de ponderación para 12 órganos. Gracias a la disponibilidad de mayores datos, los valores numéricos de dichos factores han sido modificados ligeramente a lo largo del tiempo, los considerados vigentes son mostrados en la Tabla 11.

Tabla 11. Valores de factores de ponderación de tejido [44]

Tejido	W_T
Gónadas	0,08
Médula ósea	0,12
Colon	0,12
Pulmones	0,12
Estómago	0,12
Mama	0,12
Vejiga	0,04
Hígado	0,04
Esófago	0,04
Tiroides	0,04
Superficie ósea	0,01
Piel	0,01
Glándulas salivales	0,01
Cerebro	0,01
Resto	0,12

Fuente: Elaboración propia

Ejemplo 11.

Un trabajador queda accidentalmente expuesto a 100 R de rayos X de 200 keV. Evaluar la dosis absorbida, equivalente, y la dosis equivalente efectiva en la glándula tiroides. Comparar el resultado si la dosis habría sido recibida en la piel.

Una exposición de 1 R (1 Roentgen) de rayos X o gamma produce en un tejido blando una dosis absorbida de 1 rad.

Entonces, 100 R da lugar a 100 rad de dosis absorbida.

Para la dosis equivalente el factor de la fuente de radiación de rayos X de 200 keV es 1.

Utilizando la ecuación 26, se obtiene lo siguiente:

$$H = D \cdot Q$$

Reemplazando

$$H = 100 \cdot 1$$

$$H = 100 \text{ rem} = 1 \text{ Sv}$$

Usando la Tabla 11 se obtiene el factor de ponderación de tejido para la glándula tiroides, por lo que se debe considerar un $W_t = 0,04$ y usando la ecuación 27 se tiene lo siguiente:

$$E = 1 \cdot 0,04 = 0,04 \text{ Sv} = 40 \text{ mSv}$$

Realizando los cálculos anteriores para la piel se obtiene lo siguiente:

$$E = 0,01 \text{ Sv} = 10 \text{ mSv}$$

Se puede observar que la glándula tiroides es más sensible a la radiación que la piel. También se observa que la dosis recibida en la glándula tiroides está muy por debajo de causar alguna enfermedad ligera según la Tabla 10.

La relación física entre los cuatro parámetros puede ser confusa de visualizar; sin embargo, es posible pensar en los cuatro parámetros como si fueran los efectos de una tormenta con granizos que caen sobre una persona, esto ayuda a comprender el efecto completo de mejor manera. Para ello, se supone que la actividad representa la cantidad de granizos que cae, entonces la dosis absorbida sería el número de granizos que impactan en el cuerpo de la persona, pero como no todos los granizos causan el mismo daño, la dosis equivalente representa el daño que causan en función del tamaño y número de los que llegan a la persona. Pero no solo eso, dependiendo la parte del cuerpo a la que lleguen causarán un daño mayor o menor, para medir ese tipo de daño se utiliza la dosis efectiva. En la Figura 24 se muestra una representación de la idea de la tormenta de granizo.



Figura 24. Idea representativa de los parámetros físicos que engloban los efectos de la radiación ionizante en seres vivos [46]

4. IMPORTANCIA DEL CONOCIMIENTO DE LAS BASES FUNDAMENTALES DE LA CIENCIA Y TECNOLOGÍA NUCLEAR

El objetivo fundamental de la física y la química nuclear es entender el origen, la estructura y la dinámica del núcleo atómico. Varios miles de especies nucleares existen como combinación de hasta trescientos nucleones entre protones y neutrones.

Actualmente solo una cuarta parte de estos núcleos se han podido recrear en laboratorios. Su estudio permite descubrir una gran variedad de nuevos fenómenos, explorar las interacciones fundamentales responsables de su comportamiento, explicar sus propiedades colectivas a partir del comportamiento individual de sus nucleones y entender cómo funciona la producción de los distintos elementos en el universo.

La tecnología nuclear ofrece una gran riqueza de conocimiento y de tecnología avanzada que beneficia a la sociedad de una forma crucial. Desde su inicio hace más de cien años, la tecnología nuclear ha desarrollado instrumentos y métodos que pueden aplicarse en un amplio rango de otras áreas del saber, desde la generación de energía, la tecnología de semiconductores o las aplicaciones médicas de diagnóstico y terapia al estudio de la evolución y de la antropología humanas.

4.1 Mitos desestimados sobre la tecnología nuclear

Al poder comprender la tecnología nuclear (sus usos, y beneficios), se entenderá que gran parte de la opinión pública que no acepta la misma, se basa en mitos sobre ésta. Como por ejemplo [47] [48]:

Tabla 12. Mitos de la tecnología nuclear, desestimados con fundamentos científicos.

Mitos	Fundamentos científicos
La radiación está hecha por el hombre.	La radiación es energía en movimiento. Hay muchas fuentes naturales de radiación con las que convivimos a diario de forma segura, como la radiación cósmica del sol.
Los reactores nucleares pueden explotar como bombas.	El uranio que utilizan los reactores de investigación y reactores de potencia, cuentan con un enriquecimiento de Uranio-235 del 20% y 3-5% respectivamente. Las bombas necesitan un enriquecimiento de al menos 90% por lo tanto no podrían generar una explosión nuclear

Mitos	Fundamentos científicos
No es seguro vivir cerca de un centro nuclear.	Si una persona permaneciera en el límite del centro nuclear durante todo un año, recibiría menos de una cuarta parte de la radiación de una radiografía de tórax.
Las centrales nucleares arrojan sus desechos nucleares al océano.	Las centrales nucleares guardan los desechos radiactivos en depósitos temporales, los cuales cuentan con muchas medidas de seguridad.
La energía nuclear causa más muertes que el uso de cualquier otra energía	La energía nuclear es la fuente de energía más segura, y es la energía que causa menos muertes por unidad de energía producida.
El riesgo de cáncer aumenta en las áreas cercanas a una central nuclear.	El riesgo de cáncer aumenta en las áreas cercanas a una central nuclear. Varios estudios demostraron que no existe un incremento de casos de cáncer en las áreas cercanas a una central nuclear [49].
La energía nuclear es una excusa para crear bombas.	Realizando un análisis histórico, y gracias a los programas de energía nuclear y la no proliferación de armas, se determinó que la relación entre países con centrales eléctricas y países productores de armas es cada vez mayor, por lo que hoy en día pocos países crean armas nucleares [50].
Un accidente como Chernóbil podría suceder en cualquier central nuclear.	Un accidente como el de Chernóbil no podría ocurrir en las centrales nucleares actuales, pues éstas cuentan con muchos sistemas de seguridad con las que las antiguas centrales nucleares no contaban.
miles de muertes.	El accidente nuclear de Fukushima causó un gran daño económico, un daño ambiental en el área, sin embargo no existió ni una muerte por radiación en ese accidente [51].

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 12 se observa algunos mitos sobre la tecnología nuclear, los cuales son desestimados con fundamentos científicos; es importante informar a la población para que no incurra en engaños por personas que malintencionadamente divulgan mitos para crear miedo y desaprobación sobre el empleo de la tecnología nuclear.

Por otra parte, es también importante para la población en general tener conocimientos básicos de la física y química nuclear, así como de las interacciones de la radiación con la materia, para de esta manera, poder entender las posibles aplicaciones de ésta y los grandes beneficios que pueden brindar a nuestro país el uso pacífico de la tecnología nuclear.

CONCLUSIONES

Fundamentos de Ciencia y Tecnología, en su Tomo 1, reseña una revisión bibliográfica exhaustiva sobre los principios y conceptos básicos de la física nuclear, química nuclear, la interacción de la radiación con la materia, y la importancia del conocimiento de las bases fundamentales de la ciencia y tecnología nuclear; para poder entender cómo nace la tecnología nuclear y cómo ésta puede beneficiar al ser humano.

En el capítulo 1, se explicó brevemente sobre la historia de la física nuclear, se desarrolló los conceptos básicos sobre la física nuclear, cómo está constituido un átomo, sus propiedades, su inestabilidad, porqué emiten diferentes radiaciones y las 2 reacciones nucleares.

En el capítulo 2, se describió brevemente la historia de la química nuclear y los conceptos básicos necesarios para poder entender sus beneficios en diferentes ámbitos.

En el capítulo 3, se explicó cómo los diferentes tipos de radiación interactúan con la materia, las diferentes reacciones que se pueden producir, y se detalló cómo son las diferentes coaliciones que pueden existir a nivel atómico.

En el capítulo 4, se detalló la importancia de tener conocimientos básicos y fundamentales en estas ciencias, para así no creer en mitos acerca de la tecnología nuclear y poder aprovechar los beneficios que ésta puede brindar a Bolivia.

Este tomo reúne varios conceptos básicos de la física nuclear, química nuclear y la interacción de la radiación con la materia. Brinda el conocimiento básico necesario para entender de mejor manera los beneficios que se pueden obtener con la tecnología nuclear, ya que esta área relaciona y aplica todos los conceptos descritos.

El tomo 2 de Fundamentos de Ciencia y Tecnología tratará sobre los beneficios de la tecnología nuclear en diferentes ámbitos, desde la salud, la agronomía, hasta los usos industriales de ésta.

BIBLIOGRAFIA

1. Time toast, «Time toast,» [En línea]. Available: <https://www.timetoast.com/timelines/modelos-atomicos-917fa19f-b3c9-45cb-9950-42664b74ecca>. [Último acceso: 26 05 2021].
2. G.Gustavo, «Campus Almagro,» 2020 10 20. [En línea]. Available: <https://campus.almagro.ort.edu.ar/fisica/articulo/1454718/las-chicas-del-radio>. [Último acceso: 19 08 2021].
3. Biografia dee, «Biografia dee,» 10 06 2019. [En línea]. Available: <https://biografiadee.com/biografia-de-ernest-rutherford%E2%80%8B/>. [Último acceso: 19 08 2021].
4. Rolscience, «Rolscience,» [En línea]. Available: <https://www.rolscience.net/2016/08/experimento-de-rutherford.html>. [Último acceso: 26 05 2021].
5. Significados online, «Significados online,» [En línea]. Available: <https://significados.online/estudiar/modelo-bohr/>. [Último acceso: 26 05 2021].
6. Ciencia explicada, «Ciencia explicada,» 30 06 2011. [En línea]. Available: <https://www.ciencia-explicada.com/2011/06/experimento-casero-verifica-la-teoria.html>. [Último acceso: 26 05 2021].
7. F Ciencias UNAM, «F Ciencias UNAM,» [En línea]. Available: <http://sistemas.fciencias.unam.mx/~fam/Cursos/Cuantica/Clases/Isotopos.pdf>. [Último acceso: 22 06 2021].
8. N.Connor, «Radiation Dosimetry,» 06 03 2020. [En línea]. Available: <https://www.radiation-dosimetry.org/es/que-es-la-estabilidad-nuclear-definicion/>. [Último acceso: 22 06 2021].
9. J. J. R. Serway, «Estructura nuclear,» de Física para ciencias e ingeniería, pp. 1293-1300.
10. Instituto Nacional del Cancer, «Instituto Nacional del Cancer,» [En línea]. Available: <https://www.cancer.gov/espanol/publicaciones/diccionarios/diccionario-cancer/def/radiacion-ionizante>. [Último acceso: 08 09 2021].
11. R. P, «Mar Shield,» [En línea]. Available: <https://marshield.com/choosing-the-right-radiation-shielding-factors-considered-by-a-shielding-materials-expert/>. [Último acceso: 26 05 2021].
12. Cyberphysics, «Cyberphysics,» [En línea]. Available: <https://www.cyberphysics.co.uk/topics/radioact/Radio/Glossary.htm#ionpower>. [Último acceso: 10 09 2021].

13. Radiation answers, «Radiation answers,» [En línea]. Available: <https://www.radiationanswers.org/radiation-introduction/types-of-radiation/types-of-emissions.html>. [Último acceso: 17 08 2021].
14. Wikipedia, «Wikipedia,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Fusi%C3%B3n_nuclear. [Último acceso: 26 05 2021].
15. Fukushima accidente nuclear, «Fukushima accidente nuclear,» [En línea]. Available: <https://fukushima-1188.appspot.com/1/2>. [Último acceso: 26 05 2021].
16. peiodni, «peiodni,» 2016. [En línea]. Available: https://www.periodni.com/gallery/tabla_periodica_moderna.png. [Último acceso: 26 05 2021].
17. Europa press, «El mundo,» 04 01 2016. [En línea]. Available: <https://www.elmundo.es/ciencia/2016/01/04/568aa34b22601de5518b4607.html>. [Último acceso: 31 05 2021].
18. De quimica, «De quimica,» [En línea]. Available: <https://www.dequimica.com/teoria/tabla-periodica-de-elementos-quimicos>. [Último acceso: 31 05 2021].
19. [19] I doc pub, «I doc pub,» 10 2019. [En línea]. Available: <https://idoc.pub/documents/banda-de-estabilidad-jlk98mygrz45>. [Último acceso: 31 05 2021].
20. Docer, «Docer,» 05 07 2020. [En línea]. Available: <https://docer.com.ar/doc/1v118c>. [Último acceso: 31 05 2021].
21. Dokumen, «Dokumen,» [En línea]. Available: <https://dokumen.tips/documents/banda-de-estabilidad.html>. [Último acceso: 28 05 2021].
22. J. I. B. Lopez, «Revista Ciencia,» 06 2004. [En línea]. Available: https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/55_2/radiactividad_nuclear.pdf. [Último acceso: 31 05 2021].
23. Sites google, «Sites google,» [En línea]. Available: <https://sites.google.com/site/gab2894/fusion-nuclear-en-la-naturaleza>. [Último acceso: 31 05 2021].
24. Cultura cientifica, «Cultura cientifica,» 02 03 2021. [En línea]. Available: <https://culturacientifica.com/2021/03/02/fusion-nuclear/reaccion-de-fusion/>. [Último acceso: 31 05 2021].
25. Biblioteca digital, «Biblioteca digital,» [En línea]. Available: http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/42/htm/sec_8.html. [Último acceso: 31 05 2021].
26. Definiciones wordpress, «Definiciones wordpress,» [En línea]. Available: <https://definiciones.wordpress.com/2017/06/30/ciencias-ocultas-parte-i-bomba-atomica-y-el-dilema-del-hidrogeno/>. [Último acceso: 31 05 2021].

27. Med se todo, «Med se todo,» 29 01 2016. [En línea]. Available: <https://med.se-todo.com/himiya/21366/index.html?page=3>. [Último acceso: 31 05 2021].
28. Google site, «Google site,» [En línea]. Available: <https://b3cbdc01-a-62cb3a1a-s-sites.googlegroups.com/site/materiayatomo/06-sesion-quimica-nuclear/FISION.png?attachauth=ANoY7cpsyHz9PACzb-o1m3j-rzBt38sRYdstG-bY9TPrdHzTNUWLpSLyHagx8ZsAcVAAneLZyVGt64E8FM9I8tjZ-iM8oGTdGUIC96udsW8qpuWPC1NNmtPuSLyUQ7JlkmrRpy7>. [Último acceso: 31 05 2021].
29. Wikipedia, «Wikipedia,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Espectro_electromagn%C3%A9tico. [Último acceso: 31 08 2021].
30. BBVA open mind, «BBVA open mind,» 03 05 2017. [En línea]. Available: <https://www.bbvaopenmind.com/ciencia/fisica/millikan-el-fisico-que-llego-a-ver-el-electron/>. [Último acceso: 31 05 2021].
31. «Radiación, fotones y la constante de Planck,» de Introducción a la Mecánica Cuántica, pp. 20-30.
32. Ciemat, «Ciemat,» 2009. [En línea]. Available: https://csn.ciemat.es/MDCSN/recursos/ficheros_md/133100241_2411200913036.pdf. [Último acceso: 09 09 2021].
33. Física p 4, «Física p 4,» [En línea]. Available: <http://fisicap4.org/fisica/moderna/millikan.html>. [Último acceso: 01 06 2021].
34. CIEMAT, «CIEMAT,» [En línea]. Available: https://csn.ciemat.es/MDCSN/recursos/ficheros_md/764096047_1572009112411.pdf. [Último acceso: 24 08 2021].
35. Portafolio de Física Moderna, «Portafolio de Física Moderna,» 2009. [En línea]. Available: <https://ranivale.weebly.com/efecto-compton.html>. [Último acceso: 04 06 2021].
36. rx-roentgen, «rx-roentgen,» 15 08 2014. [En línea]. Available: <http://rx-roentgen.blogspot.com/2014/08/>. [Último acceso: 10 06 2021].
37. Nuclear Power, «Nuclear Power,» [En línea]. Available: <https://www.nuclear-power.com/nuclear-power/reactor-physics/atomic-nuclear-physics/fundamental-particles/neutron/neutron-energy/>. [Último acceso: 24 08 2021].
38. A. J. Lamarsh, «Interaction of Radiation with Matter,» de Introduction to Nuclear Engineering, New Jersey, Prentice Hall, pp. 53-72.
39. Lamarsh, «Interaction of Radiation with Matter,» de Introduction to Nuclear Engineering, New York, 2001, pp. 52-55.
40. K. Meza, «Tus buenas noticias,» 11 05 2017. [En línea]. Available: <https://>

- tusbuenasnoticias.com/artes-edu-y-cultura/deteccion-rayos-cosmicos-unam-nasa/. [Último acceso: 11 06 2021].
41. V. Calzada y H. Cerecetto, «Udelar,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.cse.udelar.edu.uy/wp-content/uploads/2019/05/Una-introduccion-a-la-Fisica-Nuclear.pdf>. [Último acceso: 09 09 2021].
42. Wikiwand, «Wikiwand,» [En línea]. Available: https://www.wikiwand.com/es/Esquema_de_desintegracion. [Último acceso: 25 08 2021].
43. United States Nuclear Regulatory Commission, «United States Nuclear Regulatory Commission,» 13 05 2021. [En línea]. Available: <https://www.nrc.gov/about-nrc/radiation/around-us/doses-daily-lives.html>. [Último acceso: 14 06 2021].
44. Organismo Internacional de Energía Atómica, «Definiciones,» de Protección radiológica y seguridad de las fuentes de radiación: Normas básicas internacionales de seguridad, Viena, 2016, p. 411.
45. N. Bolus, «Basic Review of Radiation Biology and Terminology,» Journal of Nuclear Medicine Technology, vol. 29, nº 2, p. 7, 2001.
46. Rincon Educativo, «Rincon Educativo,» [En línea]. Available: https://rinconeducativo.org/contenidoextra/radiacion/4deteccion_y_medida_de_las_radiaciones_ionizantes.html. [Último acceso: 14 06 2021].
47. Emirates Nuclear Energy Corporation, «Emirates Nuclear Energy Corporation,» [En línea]. Available: <https://www.enec.gov.ae/discover/fueling-the-barakah-plant/other-uses-of-nuclear-technology/>. [Último acceso: 30 06 2021].
48. Value walk, «Value walk,» 19 05 2019. [En línea]. Available: <https://www.valuwalk.com/2018/05/safest-source-energy-nuclear/>. [Último acceso: 05 07 2021].
49. Committee on Medical Aspects of Radiation in the Environment, «Further consideration of the incidence of childhood leukaemia around nuclear power plants in Great Britain,» 2010.
50. Dartmouth College, «Science Daily,» 06 11 2017. [En línea]. Available: <https://www.sciencedaily.com/releases/2017/11/171106112256.htm>. [Último acceso: 05 07 2021].
51. Def Online, «Def Online,» 23 03 2021. [En línea]. Available: <https://defonline.com.ar/fukushima-las-causas-del-accidente-nuclear/>. [Último acceso: 05 07 2021].



ESTADO PLURINACIONAL DE
BOLIVIA

MINISTERIO DE
HIDROCARBUROS Y ENERGÍAS



www.aben.gob.bo

