



1 Cartilla de Formación Continua:

ENERGÍA NUCLEAR Y UNIVERSO

Itinerarios Formativos para Maestras y Maestros



Agencia
Boliviana de
Energía
Nuclear

UNEFCO
Unidad Especializada de Formación Continua
MINISTERIO DE EDUCACIÓN

Ciclo: “La Tecnología Nuclear en Procesos Educativos”

Cartilla “Energía Nuclear y Universo”

Coordinación:

Agencia Boliviana de Energía Nuclear - ABEN

Dirección General de Formación de Maestros

Unidad Especializada de Formación Continua – UNEFCO

Equipo de Redacción y Dirección:

Agencia Boliviana de Energía Nuclear - ABEN

Pacheco Teresa

Pabon Vivian

Apoyo Técnico y Revisión:

Zuleida Laime Mamani Directora de Planificación de la Investigación y
Desarrollo Tecnológico - ABEN

Luis Fernando Cáceres Director de Aplicaciones de la Tecnología Nuclear -
ABEN

Unidad Especializada de Formación Continua – UNEFCO

Ilustración y Diagramación:

Agencia Boliviana de Energía Nuclear - ABEN

Cómo citar este documento:

Ministerio de Educación (2021). “La Tecnología Nuclear en Procesos Educativos”
Cuaderno de Formación Continua. ABEN - UNEFCO.

La venta de este documento está prohibida. Denuncie al vendedor a la
Dirección General de Formación de Maestros, Tel. 2442144 o a la Unidad
Especializada de Formación Continua: unefco@unefco.edu.bo

www.minedu.gob.bo

<http://unefco.minedu.gob.bo/>

<https://unefco.edu.bo/>

www.aben.gob.bo

Bolivia, Septiembre de 2021

Cartilla de Formación Continua:

ENERGÍA NUCLEAR Y UNIVERSO





CONTENIDO

PRESENTACIÓN.....	7
DATOS GENERALES DE LA GUÍA DE ESTUDIO.....	9
OBJETIVO HOLÍSTICO DEL CICLO.....	9
OBJETIVO HOLÍSTICO DEL CURSO.....	9
CAPÍTULO 1: ENERGÍA Y MATERIA EN EL UNIVERSO.....	11
ACTIVIDADES DE INICIO.....	11
1.1. UN UNIVERSO HECHO DE ENERGÍA.....	12
1.1.1. EL ORIGEN DE LOS ELEMENTOS QUÍMICOS DEL UNIVERSO.....	13
1.2. MATERIA.....	14
1.2.1. ANTECEDENTES.....	15
1.3. EVOLUCIÓN DE LOS MODELOS ATÓMICOS.....	16
1.3.1. TEORÍA ATÓMICA DE DALTON.....	16
1.3.2. MODELO ATÓMICO DE J.J. THOMSON.....	16
1.3.3. MODELO ATÓMICO DE RUTHERFORD.....	17
1.3.4. MODELO ATÓMICO DE SCHRÖDINGER.....	17
1.4. ELEMENTOS FUNDAMENTALES DE LA MATERIA.....	18
1.5. ENERGÍA NUCLEAR.....	20
1.6. LA LUZ COMO FOTÓN.....	21
1.7. ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO.....	22
1.7.1. RADIACIONES IONIZANTES.....	23
1.7.2. RADIACIONES NO IONIZANTES.....	23
ACTIVIDAD SUGERIDA.....	25
CAPÍTULO 2: FUNDAMENTOS DE CIENCIA NUCLEAR.....	26
ACTIVIDADES DE INICIO.....	26
2.1. ENERGÍA DE ENLACE.....	27
2.2. DEFECTO DE MASA.....	27
2.3. REACCIONES NUCLEARES.....	29
2.3.1. FUSIÓN NUCLEAR.....	30
2.3.2. FISIÓN NUCLEAR.....	31
2.3.2.1. REACCIÓN NUCLEAR EN CADENA.....	32
ACTIVIDAD SUGERIDA.....	33
CAPÍTULO 3: ENERGÍA NUCLEAR Y SU PRESENCIA PRÁCTICA EN EL MUNDO.....	34
ACTIVIDADES DE INICIO.....	34
3.1. LAS RADIACIONES EN LA VIDA COTIDIANA.....	35
3.1.1. ISÓTOPOS.....	36
3.1.2. TABLA DE NUCLEIDOS.....	37
3.1.3. ISÓTOPOS ESTABLES.....	38
3.1.4. ISÓTOPOS INESTABLES O RADIOISÓTOPOS.....	38
3.2. RADIATIVIDAD.....	40
3.2.1. ANTECEDENTES.....	41
3.3. INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN CON LA MATERIA.....	41
3.3.1. INTERACCIÓN DE PARTÍCULAS CON LA MATERIA.....	42
3.3.2. INTERACCIÓN DE FOTONES CON LA MATERIA.....	44
3.4. DOSIS DE RADIACIÓN.....	45
ACTIVIDAD SUGERIDA.....	46
BIBLIOGRAFÍA.....	47

Presentación

Con la Agenda Patriótica 2025 se llegará al Bicentenario del Estado Plurinacional de Bolivia con un país transformado y listo para avanzar en el siglo XXI como uno de los más grandes del continente. En ese sentido el Programa Nuclear Boliviano (PNB), llevado a cabo por la Agencia Boliviana de Energía Nuclear (ABEN) se hace presente en el proceso docente educativo de todo el país, sobre la base de un modelo profesional enseñanza - aprendizaje enfocado en la curricula educativa de los maestros y futuros maestros, quienes además tendran la tarea de transmitir los conocimientos adquiridos en el área nuclear a los estudiantes de todos los colegios de nuestro país; maestros capacitados con el empleo de cartillas impresas y digitales y recursos audiovisuales e informáticos modernos.

El PNB es el instrumento y mecanismo mediante el cual se desarrolla el cuarto pilar de la Agenda Patriótica del Bicentenario 2025 “Soberanía científica y tecnológica con identidad propia”.

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

Uno de los factores más importantes para la calidad educativa es el trabajo de las maestras y maestros, asumido con compromiso, profesionalidad y dedicación.

En el **“2021 AÑO POR LA RECUPERACIÓN DEL DERECHO A LA EDUCACIÓN”**, el Ministerio de Educación de acuerdo a lo establecido en la Constitución Política del Estado (Arts. 78, I, II y III; 96, II) y en el marco del Sistema Plurinacional de Formación de Maestros (D.S. N° 156/2009) viene implementando una estrategia sistemática y sostenible de Formación Continua para garantizar que maestras y maestros de todo el país tengan posibilidades de fortalecer sus cualidades, habilidades y actualizarse en forma permanente.

Los Itinerarios Formativos para Maestros son una modalidad formativa desarrollada por el Ministerio de Educación, a través de la UNEFCO enfocada en la práctica educativa, y la mejora de los procesos, con el objeto de fortalecer la implementación de la Ley de Educación N° 070/ “Avelino Siñani – Elizardo Pérez” y el Modelo Educativo, según los niveles, especialidades y pertinencia tanto cultural como lingüística.

Lic. Rosa Amanda Calisaya Flores
COORDINADORA NACIONAL UNEFCO

Los Cuadernos del Ciclo Formativo “La Tecnología Nuclear en Procesos Educativos”, en el campo de las aplicaciones pacíficas de la energía nuclear, constituyen importantes materiales de apoyo para el desarrollo de los procesos formativos, estos materiales desarrollan aspectos teórico – prácticos para la mejora de la práctica educativa, a partir de los lineamientos establecidos por el actual Modelo Educativo.

Sobre la base de estos Documentos de Trabajo, facilitadoras, facilitadores y participantes en general, podrán adecuar contenidos, o estrategias formativas de acuerdo a la realidad de cada contexto.

Datos generales de la guía de estudio

CICLO		CURSO
“La Tecnología Nuclear en Procesos Educativos ”	CURSO 1	Energía Nuclear y Universo
	CURSO 2	Aplicaciones de la Ciencia y Tecnología Nuclear
	CURSO 3	Aplicaciones de la Ciencia y Tecnología Nuclear en Bolivia

Objetivo Holístico del Ciclo

Promovemos la valoración y concientización sobre nuevas tecnologías científicas, comprendiendo los alcances de las aplicaciones de la tecnología nuclear con fines pacíficos, mediante el análisis y desarrollo de prácticas educativas para fortalecer la seguridad y cultura nuclear, que aporte a la soberanía científica y tecnológica del Estado Plurinacional.

Objetivo Holístico del Curso

Desarrollamos una actitud responsable y consciente, conociendo las bases físicas y químicas de las ciencias nucleares y su presencia en el mundo que nos rodea, a través de leyes fundamentales, explicaciones comparativas y desarrollo de ejercicios, valorizando la importancia del conocimiento científico en el desarrollo de aplicaciones nucleares que contribuyen a la soberanía científica y tecnológica del país.

Capítulo 1

ENERGÍA Y MATERIA EN EL UNIVERSO

ACTIVIDADES DE INICIO

1. ¿Cuáles son los estados de agregación de la materia?

2. Mencione los beneficios de la tecnología nuclear.

3. Mencione tipos de radiación que conozca.



1.1. UN UNIVERSO HECHO DE ENERGÍA

Una de las preguntas más planteadas por los científicos en toda la historia es, ¿Qué es el universo?, y actualmente todos entendemos el concepto principal del universo, como “todo lo existente”, sin ninguna excepción. Podemos englobar en el universo a la materia, la energía, el espacio y tiempo. [1]

El universo tiene una materia y es definida como un conjunto de átomos, partículas y moléculas que constituyen desde el polvo hasta gas cósmico que conforman las estrellas.

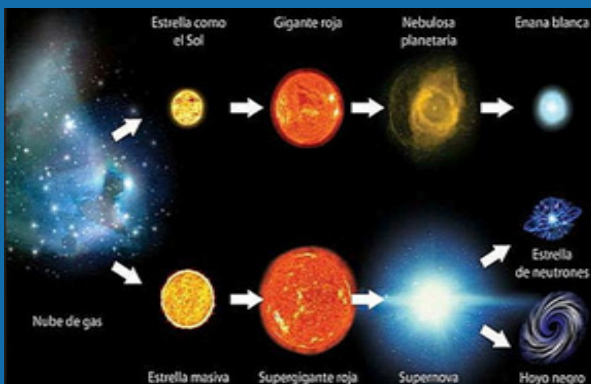
Las estrellas del universo, se unen conformando diferentes galaxias y tienen con ellas muchas dimensiones, temperaturas y colores, es posible que existan alrededor de 10 mil millones de galaxias distribuidas en todo el universo. [2]



Figura 1. El universo [2]

Luego de conocer el concepto principal, pocas veces nos hacemos las preguntas: ¿Cómo funcionan las estrellas? Para que las estrellas funcionen, ¿Cuál es la fuente de energía de las estrellas y del universo?, la respuesta es “reacciones nucleares”, sí, en las estrellas se lleva a cabo este tipo de reacciones donde se combinan o fragmentan y modifican los núcleos de los átomos liberando partículas y energía. Es decir, la ciencia nuclear está presente en el universo, miles de reacciones nucleares se dan lugar mientras nosotros realizamos nuestras actividades día a día.

CICLO DE UNA ESTRELLA [41]



Comienza a partir de una nube de gas que se contrae elevando su temperatura, causando que la estrella alcance $1.000.000^{\circ}\text{C}$, dando lugar a las reacciones nucleares que generan que los átomos de Hidrógeno se combinen con los de Deuterio y se forme Núcleos de Helio, la reacción libera grandes cantidades de energía, provocando que la estrella se contraiga, originando una reacción con metales ligeros que contiene el cuerpo de la estrella, hasta alcanzar la etapa final de desarrollo donde el Hidrógeno se transforma en Helio, esta reacción termonuclear es el resultado de las secuencias de las estrellas y se realiza hasta que se consume todo el Hidrogeno que posee, la estrella se transforma en una gigante roja, su núcleo alcanza altas temperaturas para crear fusión nuclear de los núcleos de helio, hasta que la estrella se vuelva pequeña y densa. [41]



1.1.1. EL ORIGEN DE LOS ELEMENTOS QUÍMICOS DEL UNIVERSO

Las carreras relacionadas a la química, tienen buen conocimiento sobre la materia, y su empleo en las formas infinitas de combinarla para transformarla y aprovecharla. Empero, la mayoría de los casos se presta poca atención a la historia de la ciencia dedicada al origen de los elementos y sus mecanismos de nucleosíntesis.

El origen de los elementos químicos está indisolublemente relacionado con el origen del Universo, actualmente, la teoría más aceptada sobre el origen y evolución del Universo propone que este empezó con el evento llamado la “Gran Explosión”, el Big Bang.

➔ Segundos después de la gran explosión, la temperatura del Universo fue de 10^{10} K, en estas condiciones ya se encontraba los fotones (γ), positrones (e^+), neutrinos (ν), antineutrinos ($\bar{\nu}$), protones (p^+), neutrones (n) y electrones (e^-), muchas de las partículas mencionadas se encontraban en equilibrio, reconvirtiéndose unas en otras, con los siguientes procesos:

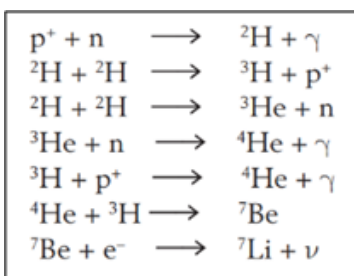
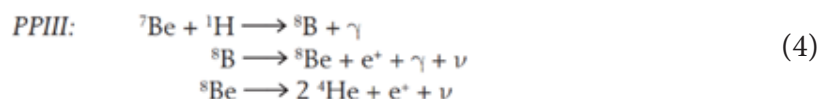
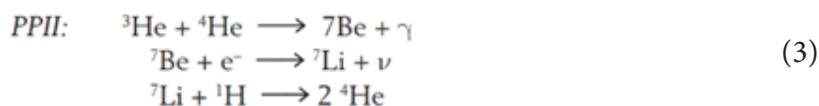
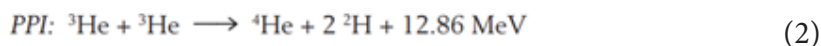


Figura 2. Reacciones de fusión en el Universo [53]

- ➔ Cuando la temperatura descendió a 10^9 K, los neutrones y protones empezaron a fusionarse para dar origen a los primeros núcleos de deuterio (${}^2\text{H}$).
- ➔ El Universo continuó enfriándose, temperaturas entre $4 \cdot 10^8$ y 10^9 K, favoreciendo la fusión de núcleos ligeros, los procesos se muestran en la figura 2.
- ➔ El hidrogeno (${}^1\text{H}$) y el helio (${}^4\text{He}$) conformaron casi el 100% de los núcleos formados, las trazan fueron: ${}^2\text{H}$, ${}^3\text{He}$, ${}^7\text{Li}$ y muy poco de ${}^7\text{Be}$, la materia permaneció en estado de plasma.
- ➔ El mecanismo de formación de helio ${}^4\text{He}$ en las estrellas, se presenta 3 propuestas: PPI, PPII y PPIII, que involucran la formación y destrucción de varios isótopos de litio y berilio.





→ La fusión de hidrógeno produce más helio que se fusionan para formar ^{12}C y núcleos de ^{16}O , ver figura 3.

→ En la figura 4, se ilustran algunas de las reacciones de síntesis de núcleos más pesados que se dan a temperaturas entre $5 \cdot 10^8$ K y $2 \cdot 10^9$ K. En esta etapa el hidrógeno se agotó, se llevan a cabo reacciones de fusión en las que se producen muchos otros núcleos atómicos, los núcleos de carbono pueden fusionarse para originar varios elementos más pesados.

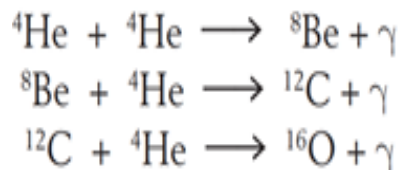


Figura 3. Reacciones para la formación de ^{12}C . [53]

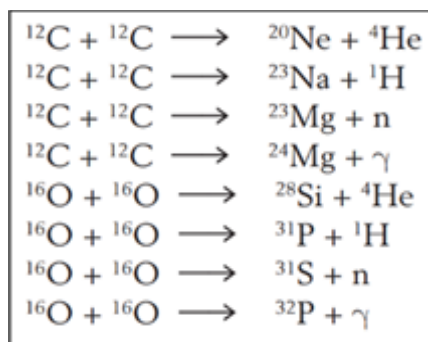


Figura 4. Síntesis de núcleos pesados a partir de núcleos de Carbono y Oxígeno. [53]

→ El ^{24}Mg y ^{28}Si , se fusionan con partículas alfa sintetizando ^{36}Ar , ^{40}Ca , ^{44}Sc , ^{48}Ti , ^{52}Cr , principalmente ^{56}Ni , el cual decae a ^{56}Fe .

→ Para comprender al cosmos, fue buena idea investigar, determinar cómo nacen y se forman los elementos. Empero, podemos decir que el 5% de la masa observable del universo está hecho de elementos de la tabla periódica.

→ De esta manera, hasta hoy se conocen 126 elementos químicos que completará la tabla periódica, los 92 primeros se dan en la naturaleza y los demás se obtienen en el laboratorio, pero si intentáramos determinar la fuente de todos ellos, veríamos que cada uno proviene de tres grandes proyectores: la Gran Explosión, estrellas con baja masa y aquellas con alta masa; que son posibles a partir de reacciones nucleares.

Decimos dulce, decimos amargo, decimos caliente, decimos frío, decimos calor, pero en realidad no hay más que átomos y vacío.

DEMÓCRITO

Como introducción a los temas fundamentales de la ciencia nuclear, se estudiará los conceptos y principios básicos de la fenomenología de la ciencia nuclear, modelo atómico estudiado desde los griegos (406–306 a.C.) hasta la actualidad; entre otros temas.

1.2. MATERIA

La materia está conformada por compuestos, los compuestos están constituidos por elementos químicos y cada elemento químico está formado por átomos¹.

¹ Átomo, del griego “indivisible”



1.2.1. ANTECEDENTES

→ El legado intelectual y cultural de los griegos es indiscutible, la sociedad griega (492–432 a.C.) argumentó que toda materia compone de cuatro elementos: fuego, aire, agua y tierra. La proporción de estos cuatro elementos afecta las propiedades de la materia.

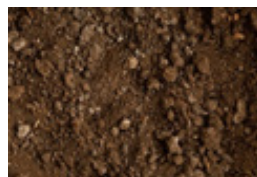
t → Las ideas atomistas en la humanidad inician en Grecia, Demócrito (406–306 a.C.) fue quien por primera vez introdujo el concepto “fenómeno” planteando que la materia está compuesta por partículas indivisibles que siempre han existido, independientes e invisibles, llamados **átomos**. [3] Sin embargo, no demostró su propuesta experimentalmente.



Aire



Fuego



Tierra



Agua

Figura 5. Cuatro elementos básicos de la materia según Empédocles. Elaboración Propia.

→ Empero, las reflexiones de Platón recuperaron la idea de los “cuatro elementos” y rechazaron la teoría de Demócrito.

→ En los siglos XVII y XVIII DC, varios eventos revivieron el surgimiento de las investigaciones que darían lugar a la nueva ciencia. La antigua concepción de que el universo se compone de agua, tierra, fuego y aire se desmorona, al reconocerse que la materia es única y que en realidad los 4 elementos son manifestaciones físicas. [4]

→ Mediante la **química**, uno de los pilares fundamentales de la ciencia moderna, se dio lugar a laboriosos trabajos, el químico John Dalton (en 1803) concluyó que la materia está constituida por pequeños corpúsculos independientes entre sí e imposibles de dividir, basado en las concepciones de Demócrito dos mil años después y rebautizó como átomos.

→ En resumen, los filósofos griegos creían que la materia estaba formada por partículas indivisibles llamados átomos, tiempo después resurgió el término y se establecieron las teorías y modelos atómicos explicando el concepto del átomo y sus características que se detallarán en el siguiente punto.



El metal fue considerado el quinto elemento, con el pasar el tiempo las técnicas metalúrgicas fueron mejorando con un amplio conocimiento, los metales utilizados en las primeras épocas fueron: oro, plata, cobre, estaño, plomo, hierro y mercurio.



1.3. EVOLUCIÓN DE LOS MODELOS ATÓMICOS

En este punto se explica en resumen la evolución de los modelos sobre la estructura atómica, porque juega un papel importante en la educación científica, no solo por su carácter fundamental, sino porque permite explicar las propiedades de la materia.

1.3.1. TEORÍA ATÓMICA DE DALTON

En el año de 1803, Dalton propuso que los átomos de un mismo elemento son idénticos entre sí, pero los átomos de un elemento diferente a los átomos de otro elemento. Basado en este modelo, se llegó a determinar los pesos atómicos de algunas sustancias. [3]



Figura 6. Teoría atómica de Dalton [3]

Por ejemplo, un átomo de carbono con uno de oxígeno forma monóxido de carbono (CO), mientras que dos átomos de oxígeno con uno de carbono, forman dióxido de carbono (CO₂).

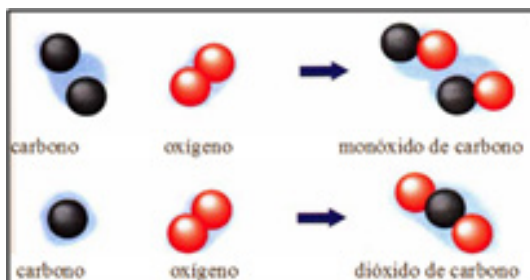


Figura 7. Formación de CO, CO₂. [56]

1.3.2. MODELO ATÓMICO DE J.J. THOMSON

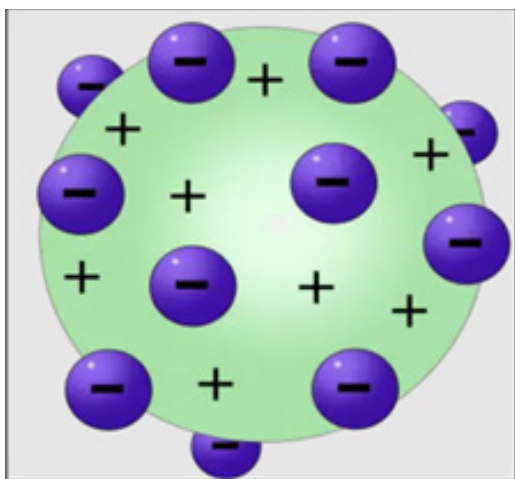


Figura 8. Modelo atómico de Thomson [5]

Fue propuesto en el año 1904 por Joseph Thomson, fue una evolución del modelo atómico de Dalton, la principal contribución fue el descubrimiento del electrón.

En esta nueva teoría, el átomo está compuesto por electrones de carga negativa en un átomo positivo, incrustados al igual que las pasas de un pudín, en resumen explica dos propiedades de los átomos: [5]

- Los electrones son partículas cargadas negativamente.
- Los átomos no tienen carga eléctrica neutra.

También conocido como el modelo de budín de pasas, considerado el átomo como una esfera conformado por un volumen de carga positiva rodeado por electrones, ver figura 8.



1.3.3. MODELO ATÓMICO DE RUTHERFORD

Fue presentado en 1911, a través del experimento “Hoja de Oro”, donde se obtuvieron los siguientes resultados: el átomo tenía un centro con una fuerte carga positiva, también se concluyó que la mayor parte del espacio de un átomo está vacío y el centro está rodeado por electrones (esferas amarillas de la figura 9).

Es decir, la principal contribución de Rutherford en este modelo fue establecer que los electrones orbitan en trayectorias predecibles y configuradas alrededor de una carga positiva que se encuentra concentrada en la parte central del átomo en el núcleo.



Figura 9. Modelo atómico de Rutherford [42]

1.3.4. MODELO ATÓMICO DE SCHRÖDINGER

En 1926, fue presentada esta propuesta que describe el comportamiento ondulatorio del electrón que corresponde a la **dualidad onda-partícula**, la aportación más importante de Schrödinger a la física fue el desarrollo de una rigurosa descripción matemática de las ondas estacionarias discretas que describen la distribución de los electrones dentro del átomo, las características del modelo atómico son:

- El movimiento de los electrones es como ondas estacionarias.
- Los electrones se mueven constantemente.
- El modelo no predice la ubicación del electrón, ni describe la ruta que realiza dentro del átomo. Solo se predice la zona de probabilidad para ubicar al electrón.
- Las zonas de probabilidad se denominan **orbitales atómicos**, que describen un movimiento de traslación alrededor del núcleo del átomo.
- Los orbitales atómicos tienen diferentes niveles y sub-niveles de energía, designados por las letras; s, p, d, f.

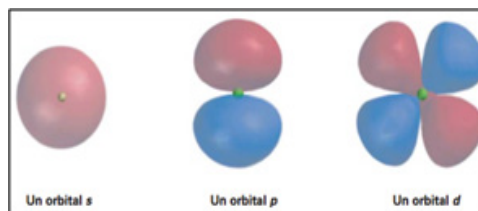


Figura 10. Ejemplos esquemáticos de los orbitales atómicos s, p, d. [43]

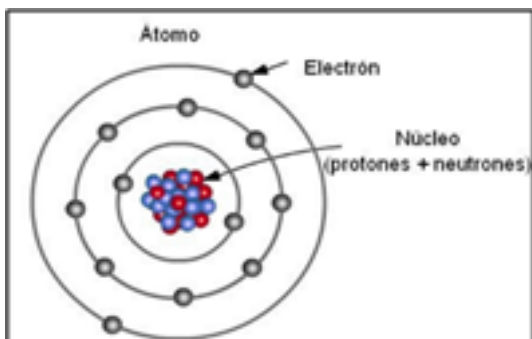


Figura 11. Partes del Átomo del Magnesio [6]

A medida que las investigaciones fueron desarrollándose, se concluye que el átomo es la cantidad mínima de un elemento químico que mantiene sus propiedades, su núcleo está compuesto con protones, neutrones y electrones orbitales en un número característico para cada elemento. Los protones tienen carga eléctrica positiva y los electrones tienen carga eléctrica negativa. Su atracción mantiene ligado el átomo. [6]



1.4. ELEMENTOS FUNDAMENTALES DE LA MATERIA

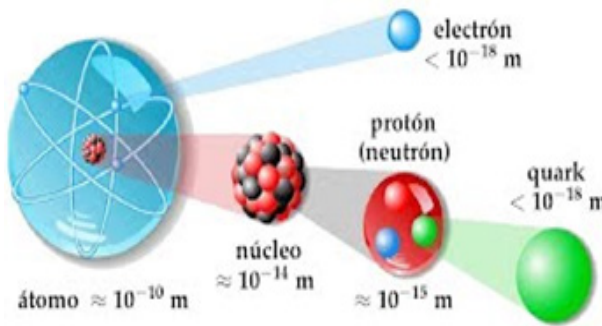


Figura 12. Nivel atómico y subatómico [9]

La física nuclear nos permite saber la conformación de la materia, conocer cómo ha evolucionado el Universo, también el desarrollo de aplicaciones que van desde las terapias y diagnóstico médicos mediante técnicas como la tomografía por emisión de positrones (PET), hasta la generación de energía nuclear. [7]

Entrando al tema de la conformación de la materia, como se ve en la figura 12, se ve el átomo conformado por el núcleo y electrones, el núcleo está formado por protones y neutrones, pero ¿De qué está formado los protones, electrones y neutrones?

A través de investigaciones (1932 - 2012), se descubrió la existencia de partículas subatómicas llamadas **partículas fundamentales o elementales**, que no se pueden dividir en subestructuras más pequeñas, en otras palabras, son las estructuras fundamentales de la materia. Con los experimentos, se han descrito dos grandes tipos de partículas elementales: **fermiones y bosones**. [8] [9]

Los **fermiones** son partículas con masa y se consideran las partículas elementales de la materia, los **bosones** son partículas sin masa que portan las fuerzas elementales: gravedad, fuerza electromagnética y las fuerzas nucleares fuerte y débil.

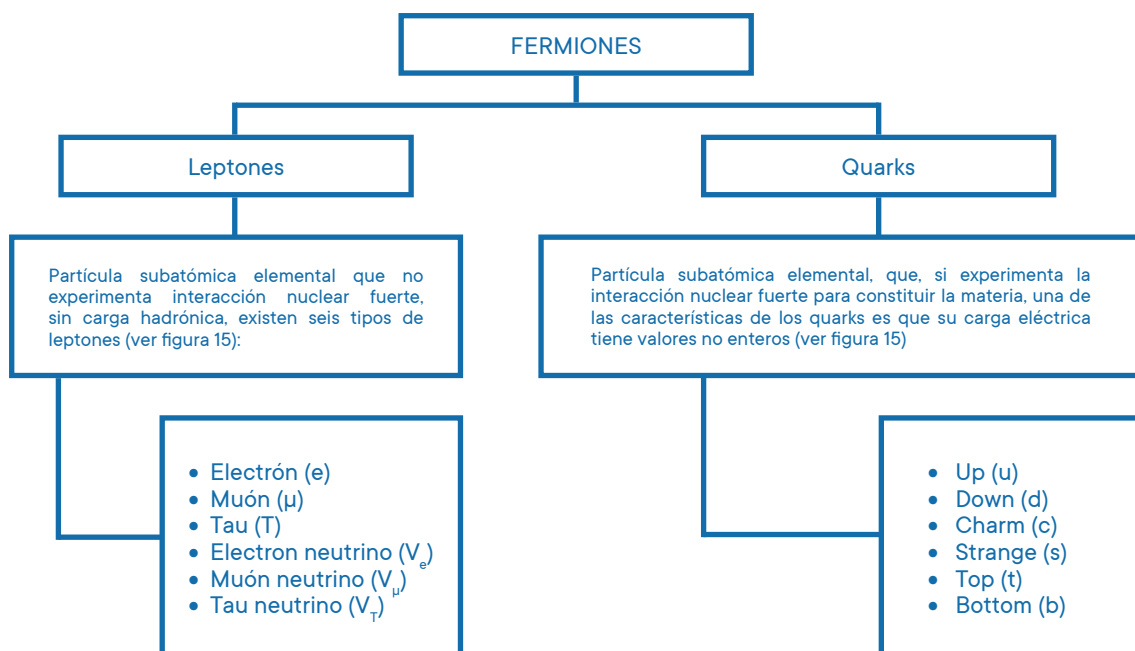


Figura 13. Clasificación de fermiones. Elaboración propia.

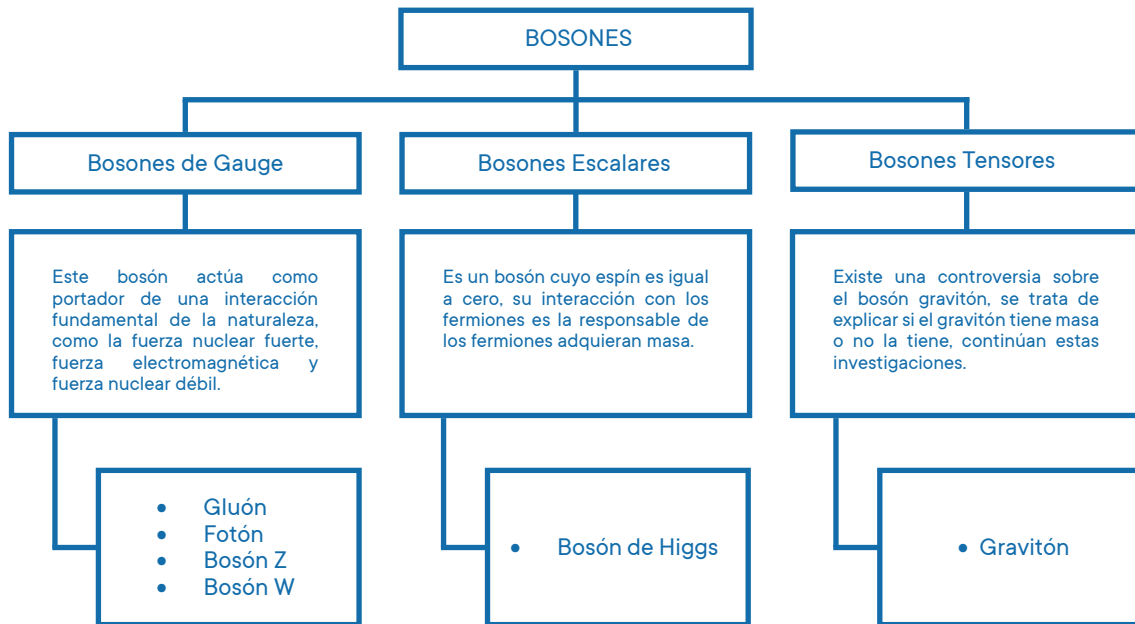


Figura 14. Clasificación de bosones. Elaboración propia.

El átomo está formado por fermiones, que es la familia de partículas elementales cuya combinación da lugar a la materia ordinaria, en resumen, un átomo estaría formado por dos subtipos de fermiones: leptones y quarks.

- Electrones: Es una partícula fundamental de tipo leptón.
- Neutrón: formado por la combinación de tres quarks: 2 quarks down (d) y 1 quark up (u).
- Protón: formado por la combinación de tres quarks: 2 quarks up (u) y 1 quark down (d).

Las tres generaciones de la Materia (Fermiones)				
	I	II	III	
masa→	3 MeV	1.24 GeV	172.5 GeV	0
carga→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
nombre→	u up	c charm	t top	Y photon
Quarks	6 MeV $-\frac{1}{3}$	95 MeV $-\frac{1}{3}$	4.2 GeV $-\frac{1}{3}$	0
	d down	s strange	b bottom	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Leptones	<2 eV 0	<0.19 MeV 0	<18.2 MeV 0	90.2 GeV 0
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z fuerza débil
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Bosons (Fuerzas)	0.511 MeV -1	106 MeV -1	1.78 GeV -1	80.4 GeV ± 1
	e electron	μ muon	τ tau	W fuerza débil
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1

Figura 15. Modelo estándar de partículas elementales y gravedad. [8]

La figura 15, es el modelo estándar que explica toda la materia ordinaria del Universo.

Faltaría por descubrir el **gravitón**, la partícula hipotética que portaría la gravedad. De descubrirse, las partículas elementales conocidas sumarían un total de 18, incluyendo los fermiones y bosones

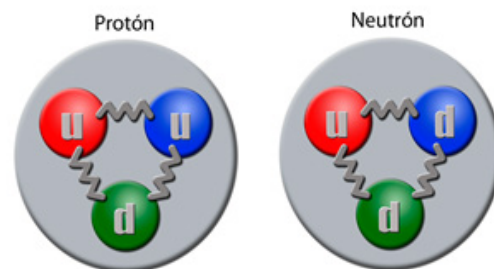


Figura 16. Quarks de un protón y de un neutrón. [9]



Durante décadas se supuso que los protones, neutrones y electrones eran las partículas fundamentales de la materia, es decir, que nada podía existir más pequeños que ellas.

En 1964, Murray Gell-Mann y George Zweig, observaron la necesidad de que los quarks existieran por la naturaleza de la interacción fuerte entre partículas del núcleo atómico. Se propuso la existencia de tres partículas pequeñas llamados quarks (posteriormente quarks) [54]

Esta hipótesis se comprobó experimentalmente en SLAC (Stanford Linear Accelerator Center), el experimento señaló que no eran tres sino seis las partículas que podían componer a los protones y neutrones. Ver la figura 17.

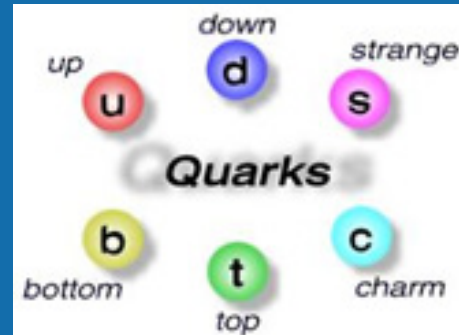


Figura 17. Seis tipos de quarks. [54]

1.5. ENERGÍA NUCLEAR

Ahora que conocemos a profundidad la estructura del átomo, desarrollaremos sobre las siguientes preguntas ¿Qué es la energía nuclear? ¿Cómo se puede liberar la energía del núcleo de un átomo?

La energía nuclear es la energía contenida en el núcleo (protones y neutrones) de un átomo, este tipo de energía puede ser aprovechada para producir electricidad, pero debe ser liberada, ¿Cómo obtenerla? Existen dos formas de obtener esta energía y son las reacciones: Fisión nuclear y fusión nuclear que serán explicados en el tema "2". [10]

Cuando se produce una de las reacciones mencionadas, los átomos experimentan una ligera pérdida de masa. Esta masa que se pierde se convierte en una gran cantidad de energía calorífica y de radiación, [10] como lo estableció Albert Einstein con su famosa ecuación:

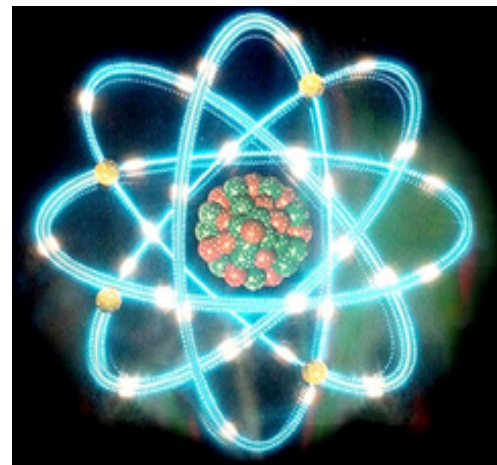


Figura 18. Átomo [45]

$$E=m \cdot c^2 \quad (5)$$

Dónde:

E = energía de un cuerpo en reposo,

m = la masa,

c = constante de velocidad de la luz ($3 \cdot 10^8$ m/s).



1.6. LA LUZ COMO FOTÓN

Los fotones se explican con mecánica cuántica, sin embargo, presentan dualidad **onda-partícula**, es decir, presentan propiedades de ondas y de partículas.

El concepto moderno de fotón fue desarrollado de forma gradual por A. Einstein a principios del siglo XX, con el fin de explicar que las investigaciones experimentales no concordaban con el modelo clásico de la luz como onda electromagnética. [11]

El modelo desarrollado del fotón cuadraba con el hecho de que la energía de la luz dependiera de su **frecuencia**, explicando la capacidad de la materia y la radiación electromagnética de estar en equilibrio térmico. [12]

→ Max Planck, en 1900 formuló que la energía se radia en unidades pequeñas separadas, denominadas Quantum, en el desarrollo de esta teoría, descubrió una constante de naturaleza universal que se conoce como la constante de Planck. La ley de Planck establece que la energía de cada Quantum es igual a la frecuencia de la radiación multiplicada por la constante universal.

→ A. Einstein, propuso que toda radiación electromagnética está cuantizada, esta noción fue adoptada a partir de la teoría de Planck, estableciendo que la relación entre la cantidad de energía (E) transportada por el fotón y su frecuencia (ν), está determinada por la siguiente ecuación:

$$E = h \cdot \nu \quad (6)$$

Dónde:

h = constante de proporcionalidad de Planck, $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ (J*s)

La ecuación (6) puede expresarse de diferentes formas, utilizando la relación entre la frecuencia (ν) y la longitud de onda (λ):

$$c = \lambda \cdot \nu \quad (7)$$

Dónde: c – constante de velocidad de la luz ($3 \cdot 10^8$ m/s)

Tenemos que:

$$E = h \cdot c / \lambda \quad (8)$$

Esta fórmula muestra que la energía de cada fotón es inversamente proporcional a su longitud de onda, esto significa que cada fotón de longitud de onda más corta (como la luz ultravioleta) transporta más energía que un fotón de longitud de onda más larga (como la luz roja). [12]

Debido que h y c son constantes universales, entonces cada longitud de onda o frecuencia es suficiente para describir completamente a un fotón.

El **fotón** es un tipo de partícula elemental, es el quantum de energía en forma de radiación electromagnética. Es la partícula portadora de todas las formas de radiación electromagnética, incluyendo:

- Los rayos gamma
- Los rayos X
- La luz ultra violeta
- La luz visible
- La luz infrarroja
- Las microondas
- Las ondas de radio

1.7. ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

Para la relación entre la temática nuclear y la ecuación (3), es necesario conocer los siguientes conceptos:

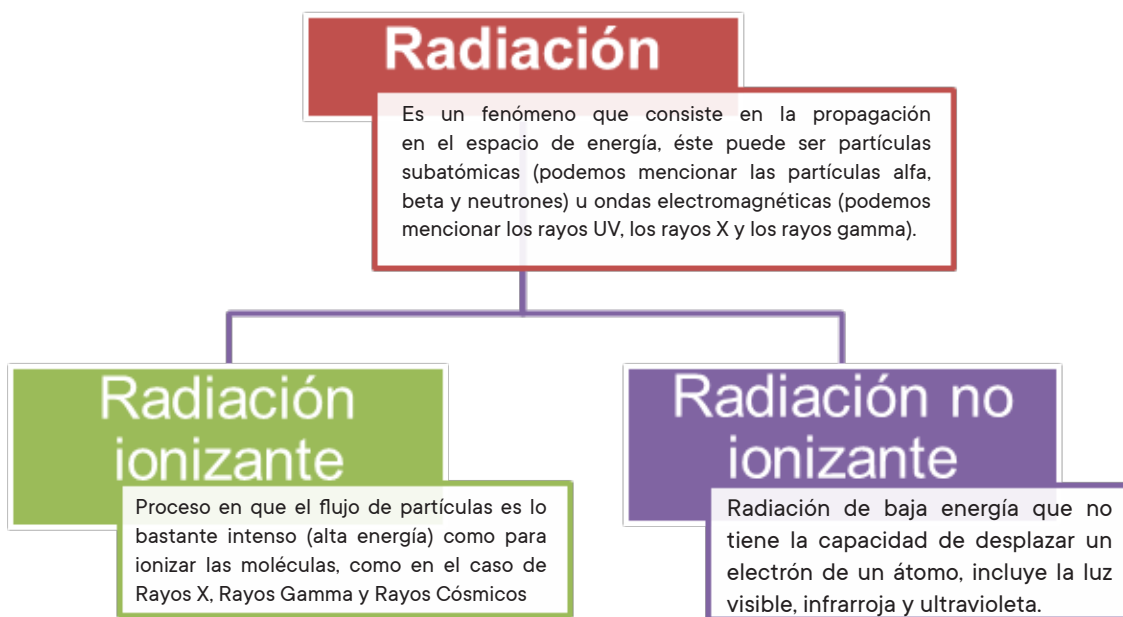


Figura 19. Concepto de Radiación y tipos de radiación. Elaboración propia.

Con los conceptos mencionados, se puede explicar la funcionalidad de las tecnologías en base a su tipo de radiación, mediante el espectro electromagnético.

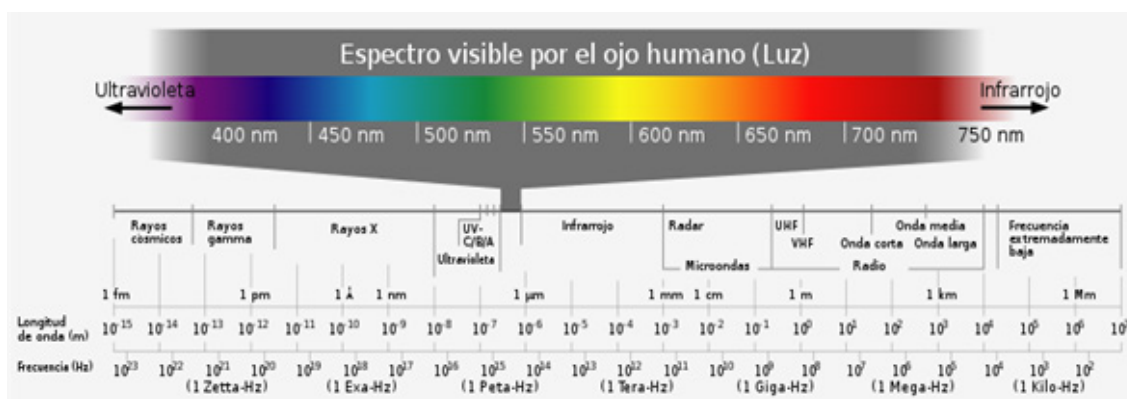


Figura 20. Espectro electromagnético. [55]

La figura 20, describe el conjunto de longitudes de onda para cada tipo de radiación.



1.7.1. RADIACIONES IONIZANTES

- **Rayos Gamma:** Tienen las longitudes de onda más cortas y las frecuencias más altas, son ondas de alta energía capaces de viajar largas distancias a través del aire y son los más penetrantes.
- **Rayos X:** Tienen longitudes de onda más largas que los rayos gamma, consisten en una forma de radiación ionizante, pueden ser peligrosos, son emitidos por electrones del exterior del núcleo, mientras que los rayos gamma son emitidos por el núcleo, se utiliza para diversas aplicaciones científicas e industriales, principalmente en la medicina como la radiografía.
- **Rayos Cósmicos:** Son partículas que llegan desde el espacio y bombardean constantemente la Tierra desde todas direcciones, son más energéticas que cualquier otra partícula observada en la naturaleza, los rayos cósmicos ultraenergéticos viajan a una velocidad cercana a la de la luz y tienen cientos de millones de veces más energía que las partículas producidas en el acelerador más potente construido por el ser humano. [13]

1.7.2. RADIACIONES NO IONIZANTES

- **Radiación Ultravioleta (UV):** Es una forma de radiación emitida por el sol y fuentes artificiales, que permiten crear dispositivos de iluminación, también permiten esterilizar productos.
 - **ULTRAVIOLETA A (UVA):** No es absorbida por la capa de ozono, casi toda la radiación ultravioleta que se recibe en la Tierra es UVA, su longitud de onda esta entre 315–399 nm.
 - **ULTRAVIOLETA B (UVB):** Mayormente absorbida por la capa de ozono, pero alguna cantidad llega a la superficie de la Tierra, este tipo de radiación afecta puede afectar a la salud, su longitud de onda esta entre 280–314 nm.
 - **ULTRAVIOLETA C (UVC):** Es completamente absorbida por la capa de ozono y la atmósfera por lo que no presenta riesgo, su longitud de onda esta entre 100–279 nm. [14]

Es decir, la energía de la radiación ultravioleta C es mayor de la radiación ultravioleta B y este último es mayor de la radiación ultravioleta A.

$$UVC > UVB > UVA$$

- **Radiación infrarroja (IR):** Es conocido también como radiación térmica, la fuente natural más importante de radiación infrarroja es el Sol. Es la sensación de la gente del calor cuando está expuesta al sol, la piel irradia naturalmente radiación infrarroja cada día, la radiación infrarroja se extiende desde el borde nominal rojo del espectro visible a 700 nanómetros (nm) hasta 1 milímetro (mm), ver figura 20.
- **Microondas:** Liberan cierta radiación electromagnética, que no afecta a los humanos, es una predicción del modelo del Big Bang. Su longitud de onda oscila entre 10^{-1} m a 10^{-4} m.





Ejercicio

Utilizando la ecuación (8), calcular la energía de un fotón de rayos gamma y de un fotón de radiación microondas.

- $E = h \cdot c / \lambda$ necesitamos el dato de la longitud de onda para rayos gamma, el mismo es obtenido a partir de la figura 20.
- La longitud de onda para rayos gamma es: $\lambda = 10^{-12} \text{ m}$
- La longitud de onda para radiación microondas es: $\lambda = 10^{-2} \text{ m}$
- Con todos los datos, procedemos al reemplazo y cálculo de la energía.

Para rayos Gamma:

$$E_{\text{rayos Gamma}} = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ (J*s)} * \frac{3 \cdot 10^8 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)}{10^{-12} \text{ m}}$$
$$E_{\text{rayos Gamma}} = 1,99 \cdot 10^{-13} \text{ J}$$

Para radiación microondas:

$$E_{\text{rayos Gamma}} = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ (J*s)} * \frac{3 \cdot 10^8 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)}{10^{-2} \text{ m}}$$
$$E_{\text{rayos Gamma}} = 1,99 \cdot 10^{-23} \text{ J}$$

Por lo tanto, se establece que la energía de un fotón de rayos gamma es mayor que la de un fotón de radiación microondas.

Es decir, a mayor longitud de onda (por ejemplo. Radiación microondas) menor energía y a menor longitud de onda (por ejemplo. Rayos gamma) mayor energía.

$\uparrow \lambda \downarrow E$
 $\downarrow \lambda \uparrow E$



ACTIVIDAD SUGERIDA

1. Describa otros modelos atómicos como Pierre Gassendi, Niels Bohr.

.....

.....

.....

.....

2. En la siguiente página web encontrarás una lectura adicional sobre el experimento de Hoja de Oro de Rutherford: <http://www.cienciorama.unam.mx/#!titulo/389/?el-experimento-de-la-hoja-de-oro>

3. En la siguiente página web encontrarás una lectura adicional sobre el experimento mental o paradoja “Gato de Schrödinger” <https://www.muyinteresante.es/ciencia/video/la-ciencia-en-big-bang-que-es-la-paradoja-de-schroedinger>

- a. Describe la paradoja

.....

.....

.....

.....

2. Calcular la energía del fotón de rayos cósmicos, rayos X y luz infrarroja utilizando la ecuación (8) y los datos de la figura 20.

.....

.....

.....

.....

.....

.....



Capítulo 2

FUNDAMENTOS DE CIENCIA NUCLEAR

ACTIVIDADES DE INICIO

1. Defina el concepto de reacción química.

.....

.....

.....

.....

2. ¿Qué es un Isótopo?

.....

.....

.....

.....

3. De los siguientes elementos, determine el número másico (A), el número atómico (Z), el número de protones (p) y el número de neutrones (n):



Mencione cuáles son pares de isótopos.

.....

.....

.....

.....

.....

.....



2.1. ENERGÍA DE ENLACE

En los enlaces químicos de una molécula, las fuerzas eléctricas atractivas son las que hacen que existan los estados de ligamientos. Es decir, los átomos de la molécula no pueden escapar de ella sin un aporte de energía externa [15].

La energía de enlace es la energía necesaria para vencer las fuerzas de repulsión y mantener tan “juntos” a los nucleones en un volumen tan pequeño como sea posible, o la energía necesaria para separar los nucleones (protones y neutrones).

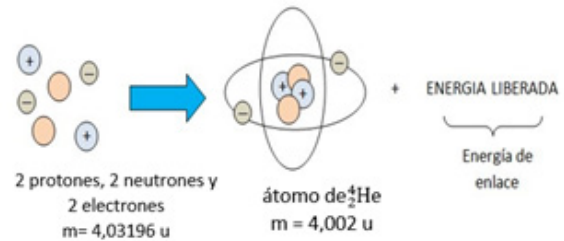


Figura 21. Energía de enlace [50].

Como se observa en la figura 21, la masa del átomo de ${}^4_2\text{He}$ es menor que la suma de las masas de sus partículas subatómicas aisladas; la diferencia de masas se llama “defecto de masa”, que equivale a una cierta energía según Einstein, y ésta se llama energía de enlace. [8]

2.2. DEFECTO DE MASA

Una de las consecuencias de la teoría de la relatividad es que la masa de un cuerpo puede transformarse íntegramente en energía, y viceversa.

$$E = mc^2$$

(9)

La masa de cualquier núcleo siempre es inferior a la suma de las masas de los nucleones que lo forman. El defecto de masa es la diferencia entre la masa de un núcleo y la suma de las masas de cada uno de los nucleones que lo forman (masa teórica).

$$\Delta m = m_{\text{real}} - m_{\text{teórica}}$$

(10)

$$\Delta m = m_{\text{real}} - \sum m_i = m_{\text{real}} - [Z m_p + (A - Z) m_n]$$

(11)

Donde:

Z = Número atómico.

A = Número másico (protones + neutrones).

m_p = Masa del protón.

m_n = Masa del neutrón.

Un núcleo es estable si su energía es menor que la energía de las partículas por separado, es decir, si al formarse ha desprendido energía. Para romper el núcleo será necesaria dicha energía.

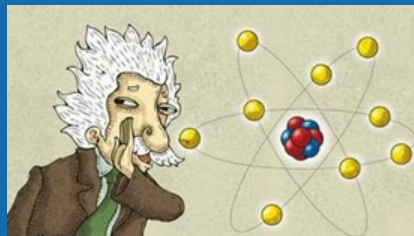


Para calcular la energía de enlace es necesario conocer la masa de los átomos y sus constituyentes por separado, para ello, generalmente, se expresa las masas en unidades de masa atómica [u], un sistema en el cual la masa de un átomo de ^{12}C es definido exactamente como 12 u. El siguiente ejemplo muestra la relación que existe entre el defecto de masa y la energía de enlace.

Aplicando la relación masa – energía de Albert Einstein:

$$\Delta E = \Delta m c^2$$

En base a la figura 21 veamos un ejemplo ilustrativo, para ello comparemos la masa de partículas aisladas con la masa atómica del ^4_2He , evaluada experimentalmente.



En la actualidad hay dos procesos que tienen gran importancia práctica de acuerdo con la ecuación de Einstein, porque proporcionan una forma de aprovechar las cantidades enormes de energía contenida en el núcleo atómico. Las cuales son:

La fisión nuclear y la fusión nuclear.

En ambos casos la masa de las partículas reactantes es mayor que la masa de los productos y la diferencia de masa aparece como energía. [52]

Evaluamos primero la masa total de los nucleones aislados:

$$\text{masa de } (2p^+ + 2n^0) = 2 \times 1,00732 \text{ u} + 2 \times 1,00866 \text{ u} = 4,03196 \text{ u} \text{ (mayor masa)}$$

La masa atómica experimental del isótopo $^4_2\text{He}^2 = 4,002 \text{ u}$ (menor masa)

Evaluamos ahora la diferencia de masas:

$$\Delta m = 4,03196 - 4,002 = 0,03 \text{ u} \text{ (se llama defecto de masa)}$$

Aplicando la ecuación de Einstein evaluamos la Energía de Enlace

$$\Delta E = 0,03 \times 1,66 \times 10^{-24} \text{ g} \times (3 \times 10^{10} \text{ cm/s})^2 = 4,47 \times 10^{-5} \text{ ergios}$$

También podemos evaluar esta energía en otras unidades de energía como Megaelectronvoltio (MeV), mediante la siguiente equivalencia: $1 \text{ MeV} = 1,602 \times 10^{-6} \text{ ergios}$.

$$\Delta E = 4,47 \times 10^{-5} \text{ ergios} \times (1 \text{ MeV} / 1,602 \times 10^{-6} \text{ ergios}) = 28,86 \text{ MeV.}$$

Si se divide la energía de enlace de un núcleo por el número de nucleones que lo forman, se obtiene la energía de enlace por nucleón. Para el ^4_2He sería:

$$\frac{E}{\text{nucleón}} = \frac{(28,86 \text{ MeV})}{4} = 7,22 \text{ MeV/nucleón}$$

Cuando la energía de enlace por nucleón es muy grande, el núcleo atómico es muy estable. Esta es una de las condiciones que debe cumplir un isótopo estable.

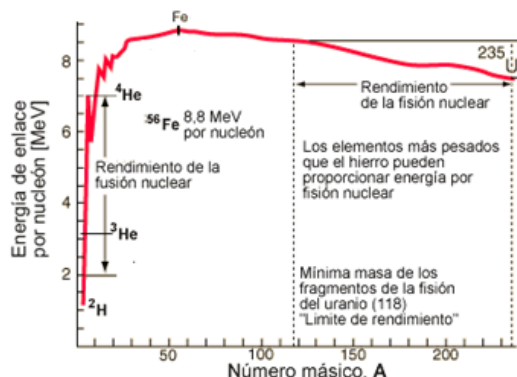


Figura 22. Variación de la energía de enlace por nucleón en función del número másico A. [16]

En la figura 22 se representa la energía de enlace por nucleón frente al número másico A. Como se observa el núcleo más estable en la naturaleza es el ^{56}Fe ya que su energía de enlace es mayor. Los núcleos más ligeros que el hierro tienden a la fusión nuclear y los más pesados a la fisión. [17]

2.3. REACCIONES NUCLEARES

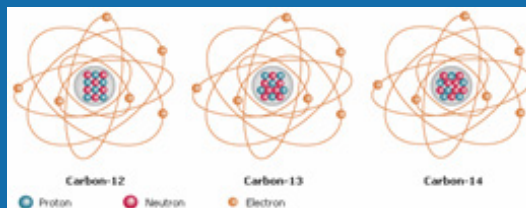
Una reacción nuclear es un procedimiento que lleva a combinar y modificar los núcleos de los átomos y las partículas subatómicas. A través de esta clase de procesos, los núcleos pueden combinarse o fragmentarse, absorbiendo o liberando partículas y energía de acuerdo a cada caso.

Estas reacciones nucleares pueden derivar en la formación de elementos diferentes y es aquí donde entra el concepto de lo que se conoce como fisión y fusión nuclear. [18] Siendo ambas de suma importancia, debido a que por ejemplo a través de la reacción de fusión nuclear de elementos ligeros se impulsa la producción de energía tal como ocurre en el Sol y las estrellas.

Nucleídos o Núclidos, recordemos cada uno de los tipos de núcleo: ^A_ZX

Isótopos	$=Z, \neq A$. Del mismo elemento con $\neq$ masa
Isóbaros	$\neq Z, =A$. Distinto elemento con $=$ masa
Isótonos	Igual número de neutrones
Isómeros	$=Z, =A$. Distinta distribución y por tanto $\neq$ energía

Ejemplo de isótopos del Carbono: [19]



2.3.1. FUSIÓN NUCLEAR

Si los núcleos se unen, se habla de **fusión nuclear**. La fusión nuclear es un proceso mediante el cual dos núcleos atómicos ligeros se unen para formar un núcleo más pesado, con la particularidad de que su masa es inferior a la suma de las masas de los dos núcleos iniciales. Es decir, el núcleo final es más estable que los núcleos iniciales. Esto se cumple sólo para núcleos muy pequeños. [19]

Como se describió en párrafos anteriores, según la ecuación que propuso Einstein, la energía y la masa son equivalentes: $E=mc^2$

Por tanto, si el núcleo final tiene menos masa que los dos núcleos iniciales, ese defecto de masa se ha transformado en energía liberada, energía que se puede aprovechar del mismo modo que con la combustión de combustibles fósiles.



"Somos polvo de estrellas" Carl Sagan

Después del big bang la única materia primigenia que existía eran los simples átomos de hidrógeno, materia que dio lugar a las estrellas.

Por ejemplo, la reacción que tiene lugar en un reactor de fusión se da entre dos isótopos del Hidrógeno: el Deuterio y el Tritio, del siguiente modo:

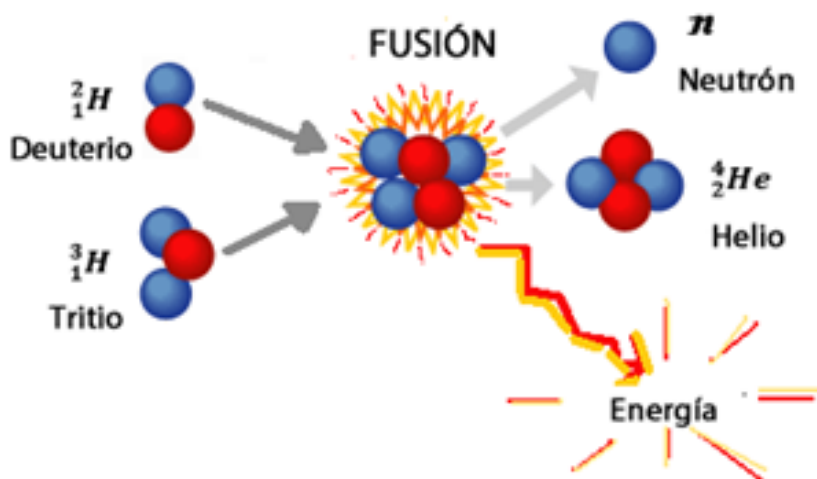


Figura 23. Esquema de la reacción de fusión del ^2H y ^3H . [20]

La fusión nuclear al igual que la fisión genera grandes cantidades de energía, pero tiene a su favor el hecho de que sus productos no son radiactivos. Estas reacciones de fusión nuclear son bastante comunes en la naturaleza, aunque no en la Tierra. Son la fuente de la energía generada por el Sol y los miles de millones de estrellas en todo el Universo. En cierto sentido se puede decir que la energía de fusión es la principal fuente de energía de la naturaleza. En las estrellas el confinamiento del plasma lo logra la atracción gravitacional. [21]



¿Qué reacción ocurre en el sol?

En el Sol, se unen dos núcleos de hidrógeno para formar un núcleo de helio. La fusión de los átomos de hidrógeno libera cuatro veces más energía por gramo que lo emitido en una reacción de fisión nuclear. Pero el proceso requiere también de temperaturas elevadas del orden de 10.000.000 grados Kelvin que ocurren en el núcleo del sol, condición necesaria para vencer las fuerzas de repulsión entre núcleos y lograr que se fusionen. [20]

A continuación, se expone la reacción de fusión que se genera en el núcleo del sol.

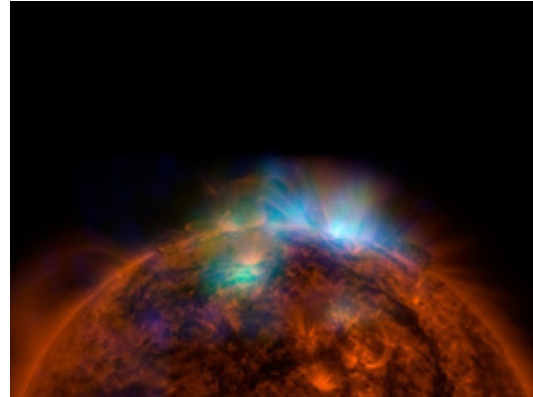


Figura 24. Fotografía del sol (NASA/JPL-Caltech/GSFC) [21]

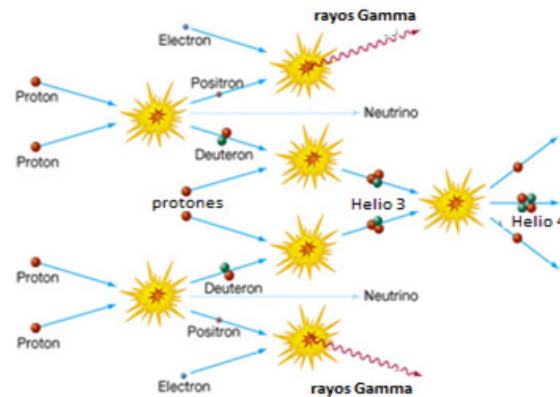


Figura 25. Reacción de fusión en el núcleo del sol. [22]

2.3.2. FISIÓN NUCLEAR

Cuando los núcleos se fragmentan, la reacción se conoce como fisión nuclear. La fisión nuclear es la reacción en la que el núcleo de un átomo pesado, al capturar un neutrón incidente, se divide en dos o más núcleos de átomos más ligeros, llamados productos de fisión, emitiendo en el proceso neutrones, rayos gamma y grandes cantidades de energía.

Aunque hay fisiones que se producen de forma espontánea, normalmente la forma en que se induce una reacción de fisión es la siguiente: se envía un neutrón con la velocidad (energía) adecuada contra un núcleo susceptible de ser fisionado, por ejemplo, el isótopo del uranio ^{235}U (figura 26), este isótopo captura al neutrón y se hace altamente inestable. Finalmente se divide en dos fragmentos emitiendo además varios neutrones, que poseen una energía muy alta (1 MeV).

No todos los núcleos pesados tienen la capacidad de ser fisionados por neutrones de cualquier energía, solamente algunos de ellos cumplen los requisitos necesarios. Ejemplos de estos núcleos son ^{233}U , ^{235}U o el ^{239}Pu . [23]



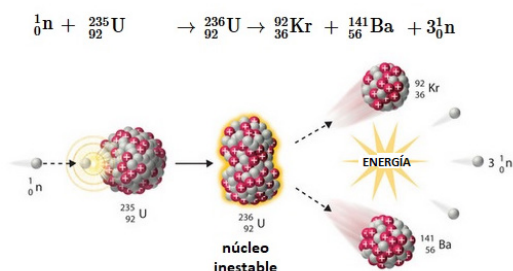


Figura 26. Esquema de la reacción de Fisión del ${}^{235}\text{U}$. [24]



“Meitner y Hahn”

Hahn Premio nobel por el descubrimiento de la fisión nuclear.

Lisa Meitner fue parte de todo el proceso de investigación, pero no tuvo reconocimiento.

2.3.2.1. REACCIÓN NUCLEAR EN CADENA

Por otra parte, la fisión de un núcleo de ${}^{235}\text{U}$ libera dos o tres neutrones que sirven para provocar la fisión de nuevos núcleos que, a su vez, liberan nuevos neutrones. Este proceso podría provocar una reacción en cadena que provocará la fisión de todos los núcleos de la muestra. Para que esto ocurra en la práctica es necesaria una cantidad mínima de ${}^{235}\text{U}$. Esto ocurre porque no todos los neutrones liberados provocan una fisión efectiva y otros escapan. A la cantidad mínima de ${}^{235}\text{U}$ que es capaz de mantener una reacción nuclear de fisión en cadena se le denomina masa crítica. Si la masa disponible es menor se le denominará subcrítica. [24]

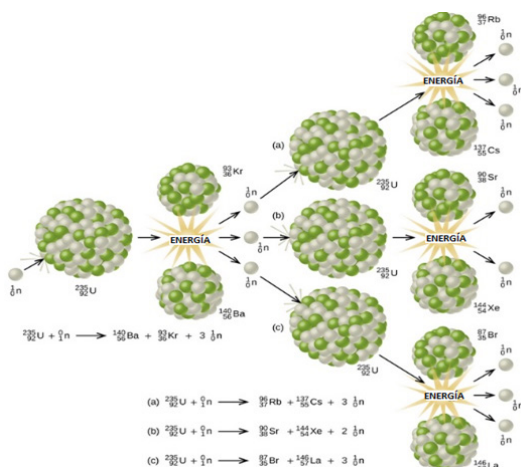


Figura 27. Esquema de la reacción en cadena del ${}^{235}\text{U}$. [24]

Como se observa en la figura 27, a partir de una reacción de fisión en cadena se genera bastante energía, la reacción en cadena es autosostenida durante mucho tiempo, y esta energía puede ser aprovechada convirtiéndola en energía eléctrica, empleando sustancias moderadoras que permitan controlar la cantidad de neutrones producidos en un medio absorbiéndolos y así evitando que continúe esta reacción en cadena, de hecho éste es el principio en el que están basados los reactores nucleares, ya que de esa manera se logra mantener el número de neutrones aproximadamente constante, y la energía producida es, también, constante y recuperable. [17]



ACTIVIDAD SUGERIDA

1. ¿Cuál es la diferencia entre reacciones químicas y reacciones nucleares?

.....

.....

.....

.....

2. En la siguiente página web de la Universidad de Colorado encontrarás simulaciones interactivas del sitio Phet: <https://phet.colorado.edu/es/simulation/legacy/nuclear-fission>

- a. Describe qué pasa si el generador de neutrones dispara a un núcleo de ^{235}U .

.....

.....

.....

.....

- b. En la pestaña “Reacción en cadena”, pruebe las siguientes proporciones de ^{235}U y ^{238}U : (50:50), (80:20), (20:80), y en cada caso dispare primero un neutrón al ^{235}U , luego reponga el núcleo y dispare un neutrón al ^{238}U ¿qué porcentaje de núcleos físi les han fisionado en cada caso? y por lo tanto produjeron energía. ¿Qué comentario le sugiere este comportamiento?

.....

.....

.....

.....

- c. Repetir la simulación del inciso (b.), agregando el recipiente de contención y comente cuál es el efecto sobre el porcentaje de núcleos de ^{235}U fisionados.

.....

.....

.....

.....



Capítulo 3

ENERGÍA NUCLEAR Y SU PRESENCIA PRÁCTICA EN EL MUNDO

ACTIVIDADES DE INICIO

1. Crees que todos los seres humanos estamos expuestos a Radiación, sí o no. ¿Por qué?

.....

.....

.....

.....

2. Investiga sobre los premios Nobel de la familia Curie, ¿a qué temas están relacionados?

.....

.....

.....

.....

.....

.....



3. Visita el simulador de isotopos en la siguiente dirección:

<https://phet.colorado.edu/sims/html/isotopes-and-atomic-mass/latest/isotopes-and-atomic-mass.es.html>

Menciona el porcentaje de abundancia en la naturaleza del ^{11}B , luego quítale un neutrón e indica ¿cuál es el Isótopo resultante? y ¿en qué porcentaje de abundancia en la naturaleza se encuentra?

.....

.....

.....

.....



3.1. LAS RADIACIONES EN LA VIDA COTIDIANA

La vida tal como la conocemos, se desarrolló gracias a la adaptación en un medio constante de radiaciones. La reacción principal de donde el Sol obtiene energía es la reacción de fusión como mencionamos en el capítulo 2, esta transformación se parece a una reacción radiactiva, puesto que emite un electrón positivo y un neutrino (Figura 28).

El pasajero de un vuelo de Londres a Nueva York a 10 mil metros de altitud recibirá una dosis de 0.032 milisieverts, el cual es equivalente a una radiografía dental panorámica.

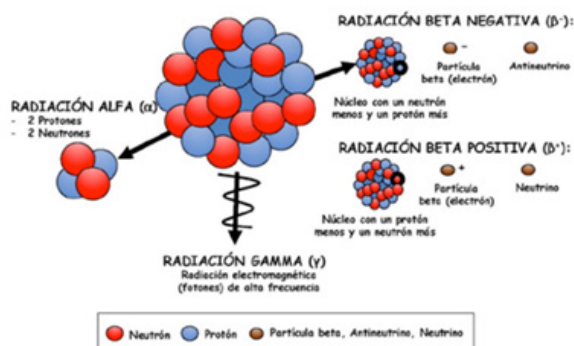


Figura 28. Desintegración radiactiva. [25]

Sin este proceso sería imposible generar neutrones para formar núcleos más pesados, que son de suma importancia en la constitución de nuestro universo. Gracias al calor de la Tierra, producido esencialmente por las desintegraciones radiactivas, ha sido posible que las condiciones ambientales se hayan mantenido desde la formación de nuestro planeta [26].

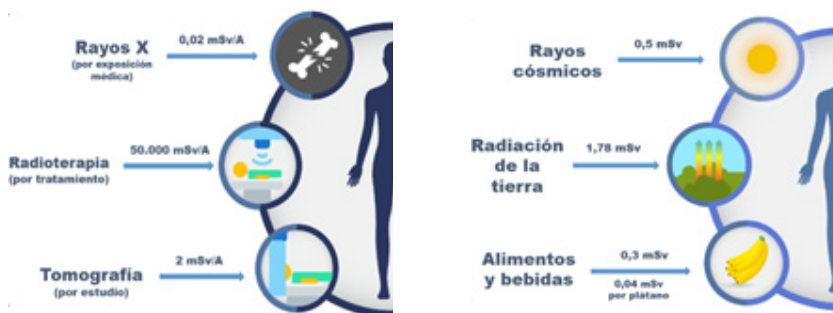


Figura 29. Dosis de radiación en la vida cotidiana por año (a) Radiación artificial (b) Radiación natural.



La radiactividad es omnipresente en nuestra vida cotidiana. No sospechamos su presencia, pero la encontramos en todos lados, incluso nosotros mismos somos radiactivos, debido a la presencia de ciertos elementos radiactivos en nuestro cuerpo, por ejemplo, el ^{40}K presente en algunos alimentos de consumo, las partículas de la radiación cósmica a las que estamos expuestos, entre otras. Además de estas exposiciones naturales, la radiactividad se utiliza ampliamente en nuestra vida cotidiana, por ejemplo, al realizarnos una radiografía [27]. Sin embargo, debemos de dejar de ver como mala la radiación, ya que actualmente las exposiciones a la radiactividad tanto natural como artificial son bajas y cada día son más controladas.

3.1.1. ISÓTOPOS

Recordemos que los isótopos de un elemento químico, son átomos que tienen el mismo número atómico Z (número de protones), pero distinto número másico A (distinto número de neutrones). La palabra isótopo se utiliza para indicar que todos los tipos de átomos de un elemento químico están ubicados en el mismo sitio de la tabla periódica [28].



Frederick Soddy. Elaboró la ley de los desplazamientos radiactivos que lleva su nombre junto a Kazimierz Fajans, y en 1921 obtuvo un premio nobel por sus estudios sobre la naturaleza de los isótopos.

Se pueden clasificar en:

Naturales: Son los que se encuentran en la naturaleza, por ejemplo: el hidrógeno tiene tres isótopos naturales (el protio que no tiene neutrones, el deuterio con un neutrón, y el tritio que contiene dos neutrones). Otro elemento que contiene isótopos muy importantes es el carbono, en el cual está el carbono 12, que es la base referencial del peso atómico de cualquier elemento, el carbono 13 que es el único carbono con propiedades magnéticas y el carbono 14 radiactivo, muy importante ya que su tiempo de vida media es de 5.730 años y es muy usado en la arqueología para determinar la edad de los fósiles orgánicos.

Artificiales: Son fabricados en laboratorios nucleares con bombardeo de partículas subatómicas, estos isótopos suelen tener una corta vida, en su mayoría por la inestabilidad y radioactividad que presentan, por ejemplo: Por ejemplo, el isótopo $^{99\text{m}}\text{Tc}$ puede usarse para identificar vasos sanguíneos bloqueados [29].



3.1.2. TABLA DE NUCLEIDOS

Así como se desarrolló la tabla periódica de los elementos, los científicos siempre en búsqueda de nuevos problemas y armados con otros dispositivos, como la cámara de niebla desarrollada por Charles Wilson y Arthur Compton, vieron que en el núcleo no solamente había protones, sino también otras partículas neutras: los neutrones, caracterizados por James Chadwick en 1932. Esto explicaba por qué los pesos atómicos registrados no eran siempre números enteros y había mezclas de varios isótopos de cada elemento, que diferían entre sí por el número de neutrones. Esto no altera su actividad química, pero sí, muy ligeramente, su comportamiento físico [30].

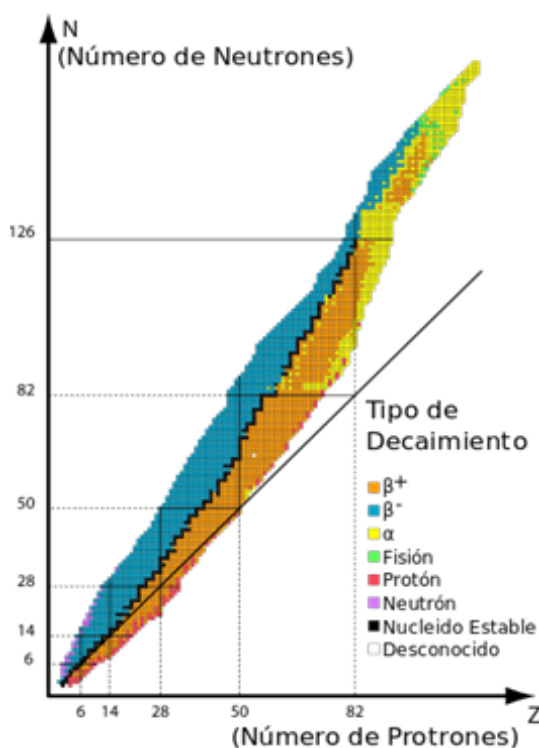


Figura 30. Tabla de nucleidos por tipo de decaimiento. [30]

En la figura 30 como se observa la tabla de nucleidos se encuentran ordenados los isótopos de todos los elementos conocidos. El eje vertical representa el número de protones que contiene un núcleo, mientras que el eje horizontal representa su número de neutrones y la línea recta es la línea de estabilidad donde la proporción de número de neutrones y protones es 1:1.

Los isótopos pueden ser estables e inestables (llamados también radioisótopos), teniendo los núcleos de éstos últimos la propiedad de emitir energía en forma de radiación ionizante a medida que buscan una configuración más estable [31].



3.1.3. ISÓTOPOS ESTABLES

¿Cómo es posible la existencia de núcleos estables? si hay muchos protones con cargas positivas en el núcleo, y cargas iguales se repelen, el detalle está en los neutrones: éstos y los protones comparten una fuerza atractiva, llamada simplemente fuerza fuerte, que no distingue entre los dos tipos de partícula, y que es suficiente para mantenerlos unidos a distancias muy cortas. Para mantener la estabilidad, cuando el número de protones es grande, el número de neutrones tiene que ser un poco mayor para contrarrestar la tendencia repulsiva entre las cargas positivas. [32]

3.1.4. ISÓTOPOS INESTABLES O RADIOISÓTOPOS

Un isótopo inestable generalmente es debido al núcleo grande. Si un núcleo se vuelve lo suficientemente grande a partir de la cantidad de neutrones será inestable e intentará expulsar sus neutrones y/o protones para lograr la estabilidad [28]. De esta manera emiten energía y partículas cuando cambia a una forma más estable. La emisión de neutrones / protones, así como la radiación gamma es la radioactividad que puede detectarse con un contador Geiger o con una película fotográfica. [31].

Cada radioisótopo tiene un periodo de desintegración o semivida características. La energía puede ser liberada, principalmente, en forma de rayos alfa (núcleos de helio), beta (electrones o positrones) o gamma (energía electromagnética) [31].

Cada tipo de emisión radiactiva tiene distinto poder de penetración en la materia y distinto poder de ionización (capacidad de arrancar electrones de los átomos o moléculas con las que colisiona). Pueden causar graves daños en los seres vivos y, por tanto, al utilizar sustancias radiactivas en el laboratorio hay que tomar un gran número de precauciones [33].

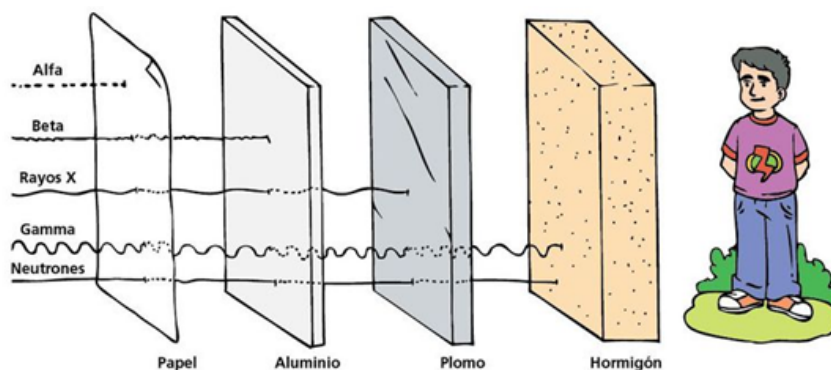


Figura 31. Capacidad atravesar el material de los diferentes tipos de radiación. De menor a mayor penetración, son alfa < beta < neutrón < gamma. [34]

Las partículas emitidas por los elementos radiactivos no son visibles a simple vista, ni siquiera con el uso de un microscopio, viajan a grandes velocidades y se liberan en todas las direcciones, como observamos en la figura 31, dependiendo de la energía que tengan pueden incluso penetrar materiales sólidos [34]. Veamos ahora cada uno de estos tipos de radiación.



PARTÍCULAS ALFA (α) El primer tipo de radiación, la radiación alfa, formada por dos protones y dos neutrones puede considerarse partícula pesada por lo que se frena en una simple hoja de papel y es desviada tanto por campos eléctricos como magnéticos y tiene una trayectoria corta y rectilínea que en aire puede variar entre 0,6 cm y 10 cm según su energía [25].

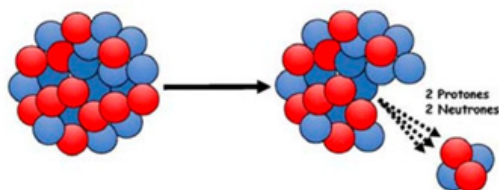


Figura 32. Partículas alfa (α). [34]

PARTÍCULAS BETA (β) Las partículas β son partículas con masa similar a los electrones. Necesitan un espesor unas mil veces superior que las partículas α de la misma energía para ser frenadas. Por la acción de campos magnéticos se desvían más intensamente que las partículas α [25].

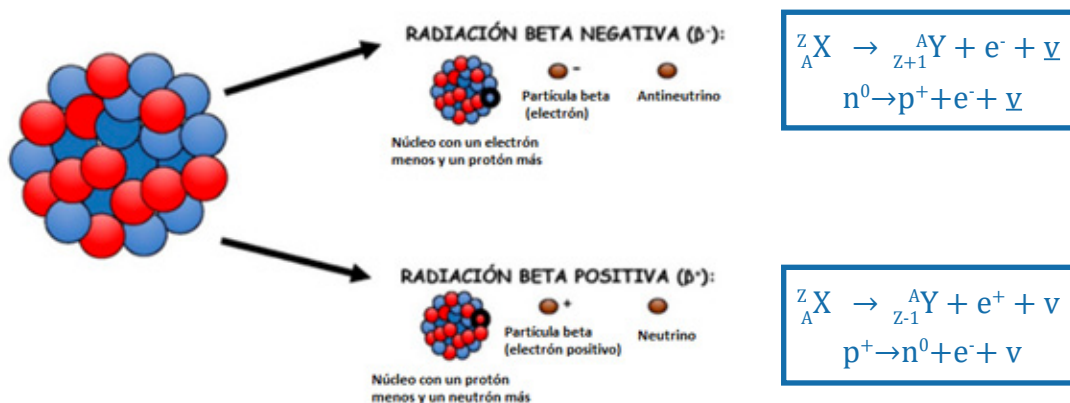


Figura 33. Partículas Beta (β). [34]

Partículas beta negativa (β^-): Formada por electrones que escapan del núcleo como consecuencia de la transformación de un neutrón en un protón, con velocidad próxima a la de la luz, ligera de peso con trayectoria no recta, mayor recorrido y penetración en aire y/o medio con el que interaccione.

Partículas beta positiva (β^+): Este tipo de partículas se denominan positrones y se forman en el núcleo como consecuencia de la transformación de un protón en un neutrón. Sus características son similares a la del electrón, pero con carga positiva.



RADIACIÓN GAMMA (γ): Es radiación electromagnética del mismo tipo que los rayos X, ondas de radio o la luz, pero de alta energía (muy corta longitud de onda).

Es una radiación de gran recorrido y poder de penetración: Los rayos solo se detienen al atravesar varios centímetros de plomo. Esta radiación no es desviada por los campos eléctricos ni magnéticos.

NEUTRONES (n): Son partículas eléctricamente neutras con una masa similar a la del protón. Debido a su ausencia de carga hace que su poder de penetración sea muy grande. El tipo de interacción depende de su energía. Podemos concluir, por lo tanto, que las partículas alfa serán especialmente dañinas cuando se encuentren dentro de nuestro organismo como veremos ocurrirá con el caso de nuestro gas radón y descendientes [25].

Varios isótopos radiactivos inestables y artificiales tienen usos en medicina. Por ejemplo, el empleo del ^{18}F , que se genera a partir de agua enriquecida con ^{18}O . [35]

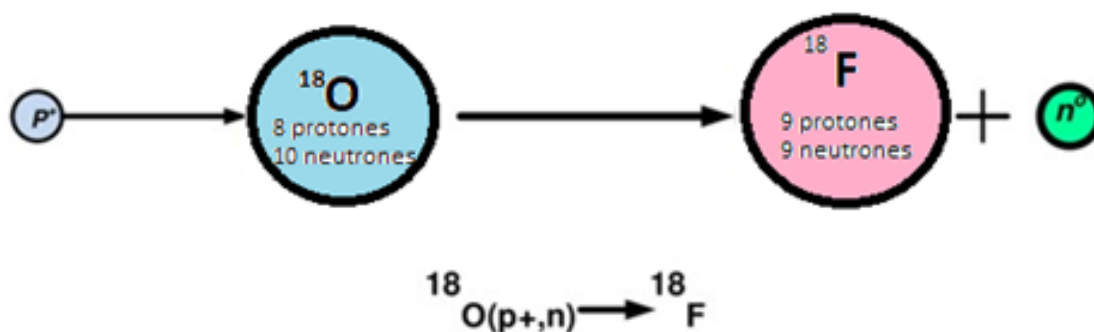


Figura 34. Reacción nuclear para la producción de ^{18}F . [35]

El ^{18}F es un radioisótopo emisor de positrones que tiene un periodo de semidesintegración de 109 minutos, es decir que en ese tiempo su actividad se reduce la mitad, el mismo es utilizado para producir el radiofármaco ^{18}F -FDG. Varios isótopos radiactivos naturales se usan para determinar cronologías, por ejemplo, arqueológicas (^{14}C).

Las radiaciones son partículas u ondas (electromagnéticas) provenientes de una fuente que se propagan a través del espacio.

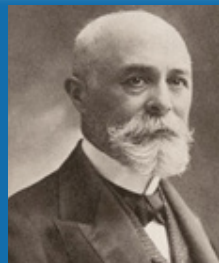
3.2. RADIATIVIDAD

La radiactividad es una reacción nuclear de “descomposición espontánea”, es decir, un nucleído inestable se descompone en otro más estable que él, a la vez emite una “radiación”. El nucleído hijo (el que resulta de la desintegración) puede no ser estable, y entonces se desintegra en un tercero, el cual puede continuar el proceso, hasta que finalmente se llega a un nucleído estable. Se dice que los sucesivos nucleídos de un conjunto de desintegraciones forman una serie radiactiva o familia radiactiva. [36] Para cada elemento radiactivo es característico el ritmo de emisión, el tipo de energía de radiaciones emitidas.



3.2.1. ANTECEDENTES

- Becquerel en 1899 demostró que algún tipo de radiación podía ser desviada por un campo magnético y esto podría deberse a algo formado por partículas cargadas en lugar de ser una radiación por rayos X.
- Becquerel descubrió que ciertos elementos tenían la propiedad de emitir radiaciones semejantes a los rayos X en forma espontánea, tal radiación era penetrante y provenía de diferentes materiales como el Uranio y el Torio.
- Los esposos Curie continuaron con los estudios de Becquerel. Marie propuso para su doctorado el análisis de la radiación que provenía del uranio, para su investigación utilizó el instrumento "electroscopio" (diseñado por su esposo Pierre), que le permitió medir corrientes eléctricas muy débiles, que se producían por la ionización del aire, debida a la radiación que emitía el uranio y ella llamó **radiactividad**. [37]
- Los esposos Curie trabajaron para identificar los elementos que contenía la pechblenda (mineral que contiene uranio), en 1898 informaron la presencia de dos elementos desconocidos que llamaron **polonio** y **radio**.



Henri Becquerel, fue físico francés, descubrió la radiactividad.

Becquerel observó que, al impactar con un haz de rayos catódicos en un tubo de vidrio, se tornaban fluorescentes, a raíz de esta observación, se propuso averiguar si existía una relación fundamental entre los rayos X y la radiación visible.

Resultado de estos experimentos, informó que las sales de uranio eran activas sin necesidad de ser expuestas a una fuente energética. [47]

- En la actualidad se conocen más de 40 elementos radiactivos naturales, que corresponden a los elementos más pesados.
- Todos los elementos químicos naturales con número atómico mayor a 83 son radiactivos.
- Todos los elementos químicos con número atómico mayor a 92 son artificiales y radiactivos.

Dato Curioso:

Para determinar la masa atómica del radio procesaron 10 ton de pechblenda durante 4 años y lograron obtener 0,3 gr de cloruro de radio.

3.3 Interacción de la radiación con la materia

En el siguiente cuadro se resumen y se explicará la interacción de las radiaciones con la materia:



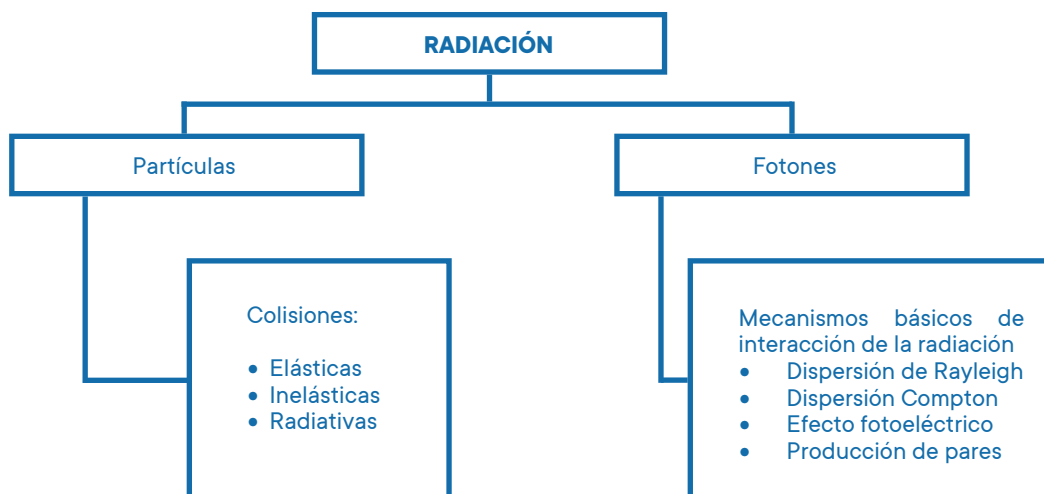


Figura 35. Cuadro resumen acerca de la interacción de radiación con la materia. Elaboración propia.

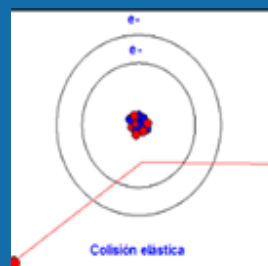
3.3. INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN CON LA MATERIA

Cuando las partículas interactúan con la materia producen una serie de efectos, que están en función de: el tipo de partícula, la energía y el medio de interacción.

3.3.1. INTERACCIÓN DE PARTÍCULAS CON LA MATERIA

Colisión Elástica

- La partícula cambia su trayectoria
- La energía cinética y la conservación de masa se conservan
- No se produce alteración atómica ni nuclear en el medio



Colisión Inelástica

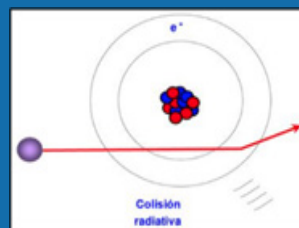
- La partícula interactúa con los electrones atómicos transfiriendo a estos energía, produciendo:





Colisión Radiactiva

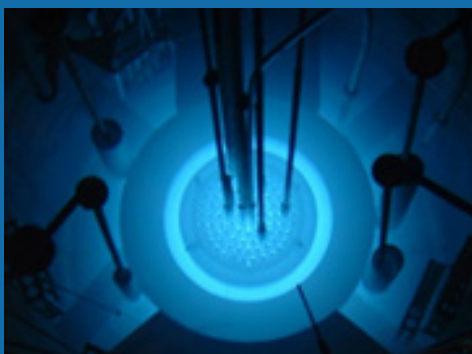
- La partícula cargada se frena o se desvía en su interacción con los átomos del medio y como resultado emite ondas electromagnéticas.



¿SABIAS QUÉ SE PUEDE SUPERAR LA VELOCIDAD DE LA LUZ?

La velocidad de la luz depende del medio, y alcanza su valor máximo en el vacío, pero si se puede superar en un medio; ¿Cómo? La radiación electromagnética producida por el paso de partículas cargadas eléctricamente en un determinado medio se propaga rápidamente superando la velocidad de la luz. [57]

Por ejemplo, el efecto de Cherenkov es un fenómeno que se origina cuando una partícula con carga eléctrica atraviesa un medio dieléctrico, fenómeno que ocurre por reacciones nucleares, aceleradores de partículas y por efectos de la radiación cósmica; origina el resplandor azul que se ve en el agua que rodea el núcleo de un reactor nuclear. [37]



Núcleo del Reactor Nuclear



3.3.2. INTERACCIÓN DE FOTONES CON LA MATERIA

Existen cuatro mecanismos principales por medio de los cuales la radiación electromagnética ionizante es absorbida por la materia.

Dispersión de Rayleigh

El fotón incide sobre un electrón en la capa más externa, excitando al átomo en su conjunto, donde chocan y le transfiere energía, no se produce ionización, ni pérdida de energía, el fotón es dispersado (re-emitido) en un rango de direcciones, próximas a la del fotón incidente. [38]

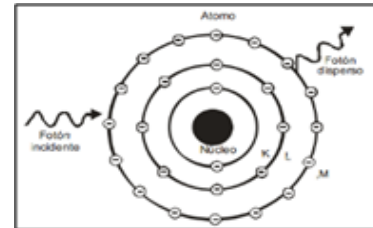


Figura 36. Dispersión de Rayleigh o coherentes. [38]

Dispersión Compton

El fotón energético incidente interacciona con un electrón ligado en los orbitales exteriores (energía de enlace menor), por lo que el fotón no puede absorberse totalmente, cediéndole parte de su energía, dando como resultado de la interacción un fotón dispersado de menor energía, y un electrón acelerado. [37]

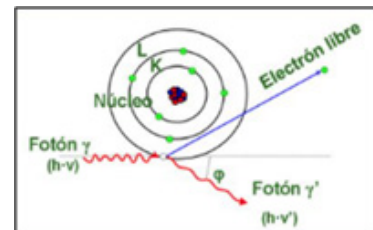


Figura 37. Dispersión Compton. [48]

Efecto Fotoeléctrico

El fotón interacciona con un electrón ligado a las capas internas, dando como resultado el ceder toda su energía, es decir, el fotón desaparece totalmente, el electrón invierte parte de la energía comunicada en romper la ligadura con el átomo y el resto como energía cinética.

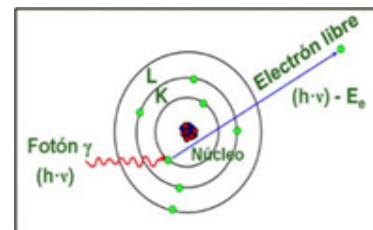


Figura 38. Efecto fotoeléctrico. [48]

Producción de pares

El fotón incidente pasa por las cercanías del núcleo generando una partícula que tiene masa de electrón y carga de protón se llama positrón, se atrae el positrón con el electrón se da un choque y se produce la aniquilación, resulta dos fotones en dirección opuesta. [38], [39].

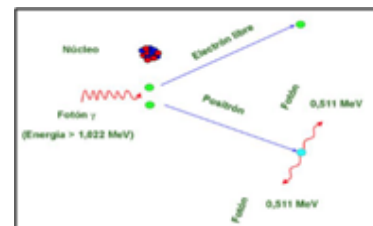


Figura 39. Producción de pares. [48]



3.4. DOSIS DE RADIACIÓN

Cuando se trata de dosis de radiación, existen diferentes tipos de radiación y de unidades de medición, es un tema con cierta complejidad.

Las dosis de radiación se pueden medir de varias formas:

- **Dosis absorbida:** es utilizado para la evaluación de las posibilidades de cambios bioquímicos en tejidos específicos.
- **Dosis equivalente:** es utilizado para evaluar cuánto daño biológico se espera de la dosis absorbida, diferentes tipos de radiación tienen diferentes propiedades dañinas.
- **Dosis efectiva:** es utilizado para la evaluación de la posibilidad de efectos a largo plazo que podrían ocurrir en el futuro. [40]

Dosis Absorbida

Es la concentración de energía depositada en el tejido humano como resultado de la exposición a la radiación ionizante. Por ejemplo, los rayos X pueden penetrar profundamente dentro del cuerpo y depositar energía en los órganos internos. La unidad de medida es miliGray (mGy). [40]

Dosis Equivalente

Es una cantidad que toma en cuenta las propiedades dañinas de los diferentes tipos de radiación. La dosis absorbida se refiere al impacto que este tipo de radiación tiene en este tejido. La unidad de medida es miliSievert (mSv).

Dosis Efectiva

Es la cantidad que nos ayuda a tener en cuenta la sensibilidad. Es decir, se refiere al riesgo general a largo plazo de una persona debido a un procedimiento y es útil para comparar los riesgos de diferentes procedimientos. Por ejemplo, diferentes partes del cuerpo tienen diferentes sensibilidades a la radiación, como la cabeza es menos sensible que el pecho. La unidad de medida es miliSievert (mSv). [40]

La radiación en una dosis de medicamento es una medición absoluta de la cantidad que usted toma, pero en la radiación no se mide por la cantidad que usted toma, es decir, este tipo de dosis de radiación nos dirá el efecto que la radiación tiene sobre el tejido. [49]



Por ejemplo, el nivel de exposición al sol, los amigos podrían decirte "tomaste un montón de sol" o "estas rojo; eso debe doler", ellos están estimando la cantidad de luz solar a la que usted estuvo expuesto.

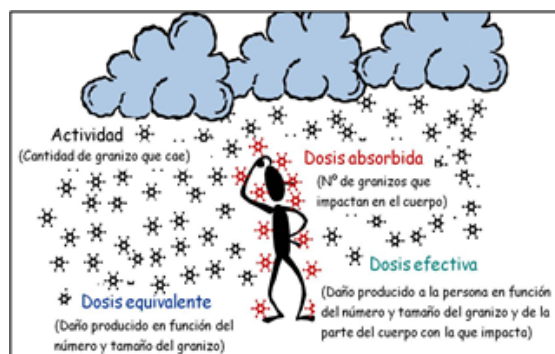


Figura 40. Mediciones en la radiación ionizante. [59]



ACTIVIDAD SUGERIDA

1. Observa el siguiente gráfico de dosis de radiación:
<https://www.cnea.gob.ar/portaleducativo/uploads/2018/08/gr%C3%A1fico-dosis-radiaci%C3%B3n-esp%C3%A1nol.png>

¿A cuántos scanner de Tórax tendría que estar expuesta una persona para llegar a tener un envenenamiento grave por radiación, que podría llegar a ser incluso letal?

2. ¿Cuál es el mayor peligro de los efectos biológicos de la radiación?
Lectura sugerida: https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-19202/Efectos%20de%20las%20RI_UCM_27%20nov%202014_A%20Real_pdf.pdf

3. Lectura sugerida sobre la dispersión Raman (interacción de fotones con la materia)
<https://www.inta.es/ExoMarsRaman/es/instrumento-rls/espectroscopia-raman/>



Bibliografía

- [1] C. d. Universo, «Meteorología,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.meteorologiaen-red.com/que-es-el-universo.html>.
- [2] C. d. Universo, «Definiciones,» Mariana Perez, Junio 2021. [En línea]. Available: <https://conceptodefinicion.de/universo/>.
- [3] U. d. Chile, «El átomo,» Santiago.
- [4] J. M. Pohlhammer, «Energía nuclear - fundamentos,» p. 10.
- [5] p. y. c. Modelo atómico de Thomson, «Energía Nuclear,» Mayo 2021. [En línea]. Available: <https://energia-nuclear.net/que-es-la-energia-nuclear/atomo/modelos-atomicos/mode-lo-atomico-de-thomson>.
- [6] R. M. Fernandez, «Instituto de estructura de la materia,» Consejo superior de investigaciones científicas, [En línea]. Available: <https://www.iem.csic.es/semanaciencia/semanaciencia15/semciencia15-molina.pdf>.
- [7] C. INGENIO, «¿Qué es la física nuclear?,» Centro Nacional de Física de partículas, [En línea]. Available: <https://www.i-cpan.es/es/content/%C2%BFqu%C3%A9-es-la-f%C3%AD-sica-nuclear>.
- [8] P. elementales, «Física de partículas,» Generaciones de fermiones, [En línea]. Available: https://ayudahispano-3000.blogspot.com/2014/10/fisica-de-particulas_58.html.
- [9] o. d. l. materia, «Partículas fundamentales,» Niveles de organización dde la materia, [En línea]. Available: <https://sites.google.com/site/trabajosubmodulo/home/actividades-de-aprendizaje>.
- [10] E. nuclear, «Consejo de seguridad nuclear,» [En línea]. Available: <https://www.csn.es/la-energia-nuclear>.
- [11] F. y. s. características, «Energía solar,» [En línea]. Available: <https://solar-energia.net/blog/foton>.
- [12] f. y. d. d. energía, «The laser adventure,» Universidad de Murcia, España, [En línea]. Available: <https://www.um.es/LEQ/laser/Ch-2/F2s2p1.htm>.
- [13] P. A. Observatory, «los rayos cósmicos,» [En línea].





- [14] C. N. d. S. Ambiental, «Radiación UV,» [En línea]. Available: <https://www.cdc.gov/spanish/nceh/especiales/radiacionuv/index.html>.
- [15] HyperPhysics, «physicsworld.com,» agosto 2000. [En línea]. Available: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/index.html>. [Último acceso: julio 2021].
- [16] L. w. d. F. vBulletin®, «La web de Física,» 2003. [En línea]. Available: <https://forum.laweb-defisica.com/forum/el-aula/teor%C3%ADa-cu%C3%A1ntica-de-campos-f%C3%ADsica-nuclear-y-de-part%C3%ADculas/18882-reacci%C3%B3n-de-fusi%C3%B3n-fisión-segun-la-energia-de-enlace-por-nucle%C3%B3n-hay-algo-que-no-comprendo-bien>. [Último acceso: junio 2021].
- [17] E. Oliva, Curso básico de fusión nuclear, Madrid, España: Sociedad Nuclear Española, 2017.
- [18] J.-L. R. J. S. M. Basdevant, Fundamentals in Nuclear Physics, France: Springer Science+ Business Media, Inc., 2005.
- [19] V. C. y. H. Cerecetto, Una introducción, Montevideo, Uruguay: Publicaciones-Comisión Sectorial de Enseñanza, Universidad de la República, 2018.
- [20] T.-L. Químico, «TP-Laboratorio Químico,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.tplaboratorioquimico.com/quimica-general/quimica-nuclear/la-fusion-nuclear.html>. [Último acceso: mayo 2021].
- [21] C. C. R.-N.-S. 4.0, «culturacientifica.com/,» 2011. [En línea]. Available: <https://culturacientifica.com/2021/03/09/fusion-nuclear-en-el-sol/>. [Último acceso: julio 2021].
- [22] Bienes Comunes A. C. ©, «energias como bienes comunes,» julio 2012. [En línea]. Available: <http://www.energias.bienescomunes.org/2012/07/12/que-es-la-fusion-nuclear/>. [Último acceso: agosto 2021].
- [23] F. Alvarez, Curso Básico de Ciencia y Tecnología Nuclear, Madrid, España: Jóvenes Nucleares Sociedad Nuclear Española, 2013.
- [24] L. AGB, «Liceo AGB,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.liceoagb.es/quimigen/nuc6.html>. [Último acceso: junio 2021].
- [25] L. S. Q. P. e. al, El gas Radón en el ámbito laboral, Madrid-España: Secretaría de Salud Laboral y Medio Ambiente UGT-CEC, 2019.
- [26] Bel Muñoz, «Radiactividad natural y artificial en nuestro entorno,» *Revista Ciencia*, vol. 1, pp. 6-16, 2004.



- [27] QuimiNet.com, «QuimiNet.com,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.quiminet.com/articulos/la-radiacion-en-la-vida-cotidiana-3570755.htm>. [Último acceso: mayo 2021].
- [28] energia-nuclear.net , « energia-nuclear.net,» 2013. [En línea]. Available: <https://energia-nuclear.net/que-es-la-energia-nuclear/atomo/isotopo>. [Último acceso: julio 2021].
- [29] Ricardo Guerrero y Mercedes Berlanga, «Isótopos estables: Fundamento y aplicaciones,» *Actualidad SEM*, vol. 1, pp. 17-23, 2018.
- [30] Copyright © INVDES. , «Invdes.com,» 2021. [En línea]. Available: <https://invdes.com.mx/los-investigadores/mas-alla-de-mendeleyev-la-tabla-de-nucleidos/>. [Último acceso: junio 2021].
- [31] ForoNuclear, «Foronuclear.org,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.foronuclear.org/descubre-la-energia-nuclear/preguntas-y-respuestas/sobre-fisica-nuclear/que-son-los-radioisotopos/>. [Último acceso: mayo 2021].
- [32] EBD-CSIC, «EBD-CSIC,» [En línea]. Available: <http://www.ebd.csic.es/laboratorio-de-isotopos-estables>. [Último acceso: julio 2021].
- [33] ehu.eus, «/www.ehu.eus,» 2021. [En línea]. Available: <http://www.ehu.eus/biomoleculas/isotopos/rad.htm>. [Último acceso: mayo 2021].
- [34] E. A. S.A., «www.abc.com.oy,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.abc.com.py/edicion-impresa/suplementos/escolar/la-radiactividad-633070.html>. [Último acceso: junio 2021].
- [35] Sergey Korenev, «Accelerators system for production of medical isotopes ^{18}F for PET,» *Proceeding of Science*, vol. 1, pp. 2-17, 2014.
- [36] ULPGC, «Universidad de Las Palmas de Gran Canaria,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.ulpgc.es/sprlyupr/que-es-radiactividad>.
- [37] L. Torres, «las radiaciones en la vida cotidiana,» Universidad Nacional de Cuyo, [En línea]. Available: http://ricabib.cab.cnea.gov.ar/793/1/1Las_radiaciones_en_la_vida_cotidiana_2019.pdf.
- [38] Grupo2rbp5, «efectos de la interacción de la radiación con la materia,» [En línea]. Available: <https://grupo2rbp5.wordpress.com/2012/06/22/efectos-de-la-interaccion-de-la-radiacion-con-la-materia-4/>.





- [39] Y. Ayyad, «Introducción al laboratorio de Física nuclear,» Departamento de física de partículas, [En línea]. Available: http://www.usc.es/genp/docencia/Inter_Rad_Mat_2011_Ayyad.pdf.
- [40] i. d. radiobiología, «¿cuales son las dosis de radiación?,» [En línea]. Available: https://www.radiologyinfo.org/es/info/safety-hiw_09.
- [41] E. d. l. estrellas, «sistema solar, constelaciones,» Octubre 2018. [En línea]. Available: <https://misistemasolar.com/evolucion-de-las-estrellas/#Clasificacion>.
- [42] G. Portillo, «Modelo atómico de Rutherford,» Meteorología en Red, [En línea]. Available: <https://www.meteorologiaenred.com/modelo-atómico-de-rutherford.html>.
- [43] L. o. atómicos, «Química,» 2015. [En línea]. Available: <https://labquimica.wordpress.com/2015/07/07/los-orbitales-atomicos/>.
- [44] E. d. E. vector, «Tema 40, investigación y ciencia,» [En línea]. Available: https://www.google.com/search?q=famosa+ecuacion+de+einstein&sxsrf=ALeKk03D-QX8nmXKtKv5921clA5zAzpK7lg:1629828135054&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwimhqP4nsryAhW_pZUCHcOYCKOQ_AUoAXoECAEQAw&biw=958&bih=959#imgsrc=gvdGRHt75tVYHM.
- [45] C. N. d. E. A. (CNEA), «energía atómica,» Estudio, desarrollo y aplicaciones en todos los aspectos pacíficos de la energía nuclear, [En línea]. Available: <http://u-238.com.ar/hoy-se-celebra-el-dia-nacional-de-la-energia-atmica/>.
- [46] e. electromagnetico. [En línea]. Available: https://cdn.educ.ar/dinamico/UnidadHtml_get_49690e2a-e366-41d2-834e-593e89deae06/rni.educ.ar/campos-electromagneticos/diferencia-campos-electromagneticos-no-ionizantes-radacion-ionizante.html.
- [47] F. y. T. Ruiza, «Enciclopedia biográfica en línea,» Barcelona, España, 2004. [En línea]. Available: <https://www.biografiasyvidas.com/biografia/b/becquerel.htm>.
- [48] J. G. Carrizo, «Interacción de la radiación con la materia,» [En línea]. Available: <https://slideplayer.es/slide/14167937/>.
- [49] Radiologyinfo, «dosis de radiación, safety,» [En línea]. Available: https://www.radiologyinfo.org/es/info/safety-hiw_09.
- [50] Q. J. Q. Inorganica, «fullquimica.com,» marzo 2013. [En línea]. Available: <https://www.fullquimica.com/2013/03/energia-de-enlace-energia-de-ligadura-o.html>. [Último acceso: julio 2021].



- [51] u. Gonzales, «ehu.eus,» [En línea]. Available: <http://www.ehu.eus/biomoleculas/isotopos/isotopos2.htm>. [Último acceso: julio 2022].
- [52] «inin.gob.mx,» julio 2013. [En línea]. Available: <http://www.inin.gob.mx/temasdeinteres/energianuclear.cfm>. [Último acceso: agosto 2021].
- [53] L. G. y. S. Escalante, «Ariculo Elemental,» Universidad Nacional Autónoma de México, [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/317435310_El_origen_de_los_elementos_y_los_diversos_mecanismos_de_nucleosintesis/fulltext/5b4b8fb1a6fdccadae-cef93e/El-origen-de-los-elementos-y-los-diversos-mecanismos-de-nucleosintesis.pdf.
- [54] P. y. M. G. Tipler, «Descripción de las partículas elementales,» Física para la ciencia y la tecnología. [En línea].
- [55] S. Pablo, «Espectro electromagnetico,» [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Espectro-electromagnetico-en-toda-su-amplitud_fig3_262935182.
- [56] R. QUIMICAS, «Pablo Turmero,» [En línea]. Available: <https://www.monografias.com/trabajos106/reacciones-quimicas-ii/reacciones-quimicas-ii.shtml>.
- [57] D. A. N. SSSR, «Radiación de Cherenkov,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Radiaci%C3%B3n_de_Cherenkov.
- [58] U. d. i. diagnósticas, «aplicaciones de los rayos X,» [En línea]. Available: <https://uidirapua-to.com/rayos-x/>.
- [59] D. y. m. d. l. r. ionizantes, «Foro nuclear de la industria nuclear española,» [En línea]. Available: https://rinconeducativo.org/contenidoextra/radiacio/4deteccin_y_medida_de_las_radiaciones_ionizantes.html.







ESTADO PLURINACIONAL DE
BOLIVIA

**2021 año por la Recuperación
del Derecho a la Educación**



<https://www.aben.gob.bo/>

<https://www.unecco.edu.bo/>