

Una introducción a la Química Nuclear

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA.
COMISIÓN SECTORIAL DE ENSEÑANZA

Victoria Calzada
Hugo Cerecetto



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



comisión sectorial
de enseñanza



Victoria Calzada · Hugo Cerecetto

Una introducción a la Química Nuclear



Calzada, Victoria

Una introducción a la Química Nuclear / Victoria Calzada , Hugo Cerecetto. --
Montevideo : Universidad de la República. Comisión Sectorial de Enseñanza, 2019.

1115 p. – (Manuales didácticos / Comisión sectorial de Enseñanza)

ISBN: 978-9974-0-1643-9

1. Química nuclear 2. Radiactividad I. Cerecetto, Hugo

CDD: 544

La publicación de este libro fue realizada con el apoyo de la Comisión Sectorial de Enseñanza (CSE) de la Universidad de la República.



Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 3.0, *Victoria Calzada, Hugo Cerecetto, 2018*
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/es/>

Publicaciones-Comisión Sectorial de Enseñanza, Universidad de la República
José Enrique Rodó 1854 C.P. 11200
Montevideo, Uruguay
Tel.: (+598) 24080912
www.cse.udelar.edu.uy
comunicacion@cse.udelar.edu.uy

Coordinación editorial: Beatriz Diconca
Diseño de tapa: Gabriela Pérez Caviglia
Diagramación: Levy Apolinar

Prefacio

El presente manual pretende ser un material didáctico que aborde el tema radiactividad en castellano, para estudiantes de los primeros años de carreras universitarias científicas, y que se ajuste a los distintos programas de diferentes carreras. Por ello, este manual es un enfoque general del tema radiactividad y núcleo, base para estudios superiores.

Contenido

1. GENERALIDADES DEL ÁTOMO	11
1.1. Génesis de los elementos	11
1.2. El átomo	11
1.3. Ejercicios	14
2. NÚCLEO ATÓMICO.....	15
2.1. Modelos nucleares	15
2.1.1. Modelo de la gota líquida.....	16
2.1.2. Modelo de capas	16
2.1.3. Modelo estándar	17
2.2. Ejercicios	19
3. INESTABILIDAD NUCLEAR	21
3.1. Relación N/Z.....	21
3.2. Energía de enlace.....	23
3.3. Ejercicios	25
4. MODOS DE DECAIMIENTO	27
4.1. Decaimiento α	27
4.2. Decaimiento β	28
4.3. Emisión de positrones.....	30
4.4. Captura electrónica.....	30
4.5. Emisión gamma	30
4.5.1. Transición isomérica.....	30
4.5.2. Conversión interna.....	31
4.6. Radiactividad natural	31
4.7. Energía y modo de decaimiento.....	32
4.8. Ejercicios	32
5. CINÉTICA DE DECAIMIENTO	35
5.1. Ejercicios	37
6. TABLA DE RADIONUCLEIDOS.....	39
6.1. Tipos de desintegración: colores y símbolos	39
6.2. Otras especificaciones.....	41
6.3. Esquema de decaimiento.....	42
6.4. ¿A jugar!.....	43
6.5. Ejercicios	43

7. Equilibrio radiactivo	45
7.1. Equilibrio secular.....	45
7.2. Equilibrio transitorio.....	46
7.3. No equilibrio.....	46
7.4. Generadores.....	47
7.5. Ejercicios.....	49
8. REACCIONES NUCLEARES	51
8.1. Fusión y fisión nuclear	
8.2. Reacciones nucleares en cadena.....	52
8.2.1. Reactores nucleares.....	53
8.2.1.1. Tipos de reactores nucleares.....	53
8.3. Ciclotrones.....	55
8.4. Producción de radionucleidos.....	55
8.5. Ejercicios.....	56
9. INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN CON LA MATERIA	59
9.1. Interacción alfa.....	59
9.2. Interacción beta.....	59
9.3. Interacción γ y X.....	60
9.3.1. Espectrometría gamma.....	64
9.4. Interacción neutrónica.....	66
9.5. Ley de absorción Bouguer-Lambert-Beer.....	66
9.6. Ejercicios.....	66
10. EFECTOS BIOLÓGICOS DE LA RADIACIÓN	69
10.1. Daño celular.....	70
10.1.1. Efectos directos.....	70
10.1.2. Efectos indirectos.....	70
10.2. Órganos.....	72
10.3. Efectos dependientes de la dosis.....	73
10.3.1. Altas dosis.....	74
10.3.2. Bajas dosis.....	74
10.3.3. Dosimetría ocupacional.....	74
10.4. Ejercicios.....	75
11. PROTECCIÓN RADIOLÓGICA	77
11.1. Exposición.....	77
11.2. Buenas prácticas.....	78
11.3. Ejercicios.....	81

12. RADIATIVIDAD Y LA TECNOLOGÍA NUCLEAR EN EL URUGUAY.....	83
12.1. Generalidades y estructuras.....	83
12.2. Control, regulación y calidad.....	85
12.3 Análisis de energía nucleoelectrica.....	86
12.4. Investigación y docencia.....	86
12.4.1. Instituto de Investigaciones Biológicas Clemente Estable (IIBCE).....	86
12.4.2. Facultad de Ciencias.....	86
12.4.2.1. Centro de Investigaciones Nucleares (CIN).....	86
12.4.2.2. Departamento de Física Teórica.....	87
12.4.2.3. Instituto de Ecología y Ciencias Ambientales.....	87
12.4.3. Facultad de Ingeniería: IFFI, IIE.....	87
12.4.4. Facultad de Medicina.....	87
12.4.4.1. Laboratorio de Radiobiología.....	87
12.4.4.2. Escuela Universitaria de Tecnología Médica.....	88
12.4.4.3. Hospital de Clínicas y Escuela de Graduados.....	88
12.4.5. Facultad de Química.....	88
12.4.6. Facultad de Veterinaria.....	89
12.5. Aplicaciones clínicas.....	89
12.5.1. Medicina Nuclear.....	89
12.5.1.1. Actividades de diagnóstico.....	89
12.5.1.2. Actividades terapéuticas.....	89
12.5.2. Radioterapia.....	88
12.6. Tecnogestión, aplicaciones industriales y suministros.....	90
12.6.1. El Laboratorio de Tecnogestión.....	91
12.6.2. Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU).....	91
12.7. Ejercicios.....	92
ANEXOS.....	95
Anexo I - Resumen de unidades, ecuaciones y símbolos.....	95
Anexo II - Resolución de ejercicios.....	96
Apartado 1.....	96
Apartado 2.....	96
Apartado 3.....	97
Apartado 4.....	99
Apartado 5.....	100
Apartado 6.....	104
Apartado 7.....	105
Apartado 8.....	110
Apartado 9.....	111
Apartado 10.....	112

Apartado 11 112

Apartado 12 112

BIBLIOGRAFÍA 113

1. Generalidades del átomo

Pablo Cabral

1.1. Génesis de los elementos

La teoría del Big Bang es la teoría más aceptada para la génesis de los elementos. Un segundo después del Big Bang, el universo tenía una temperatura aproximadamente de 10 mil millones de grados y estaba inmerso en un mar de neutrones, protones, electrones, antielectrones (positrones), fotones y neutrinos. A medida que el universo se enfrió, los neutrones decayeron en protones y electrones o se combinaron con los protones para formar deuterio (${}^2_1\text{H}$, un isótopo del hidrógeno). Durante los tres primeros minutos del universo, la mayor parte del deuterio se combinó para formar helio (${}^4_2\text{He}$). También se produjeron pequeñas cantidades de litio (${}^6_3\text{Li}$). Este proceso de formación de los elementos livianos en el universo primitivo se llamó Nucleosíntesis del Big Bang (BBN).

Los elementos más pesados que el litio se sintetizaron en las estrellas. Durante las últimas etapas de la evolución estelar, enormes estrellas transformaron el helio en carbono (C), oxígeno (O), silicio (Si), azufre (S) y hierro (Fe). Los elementos más pesados que el hierro se produjeron de dos formas: en los bordes exteriores de las estrellas supergigantes y en la explosión de una supernova. Toda la vida basada en el carbono de la Tierra se compone literalmente de polvo de estrellas.

1.2. El átomo

A principios del siglo XX, hubo pruebas convincentes de que la materia podría ser descrita por una teoría atómica. Es decir, que la materia está compuesta de unos pocos elementos básicos a los que nos referimos como átomos. Esta teoría proporcionó una imagen coherente y unificada para todos los procesos químicos conocidos en ese momento. Sin embargo, algunos misterios no pudieron ser explicados por esta teoría atómica.

En 1897, J.J. Thomson demostró que los electrones tienen carga eléctrica negativa. En la materia para ser eléctricamente neutra también debe haber cargas positivas. ¿Dónde están y qué lleva a estas cargas positivas? El modelo de Thomson propuso que los electrones cargados negativamente, las ciruelas, se mezclaron con cargas positivas incrustadas en la esfera pudín. Este modelo explica la neutralidad de la materia. Sin embargo, todavía restaban evidencias sin resolver (figura 1).

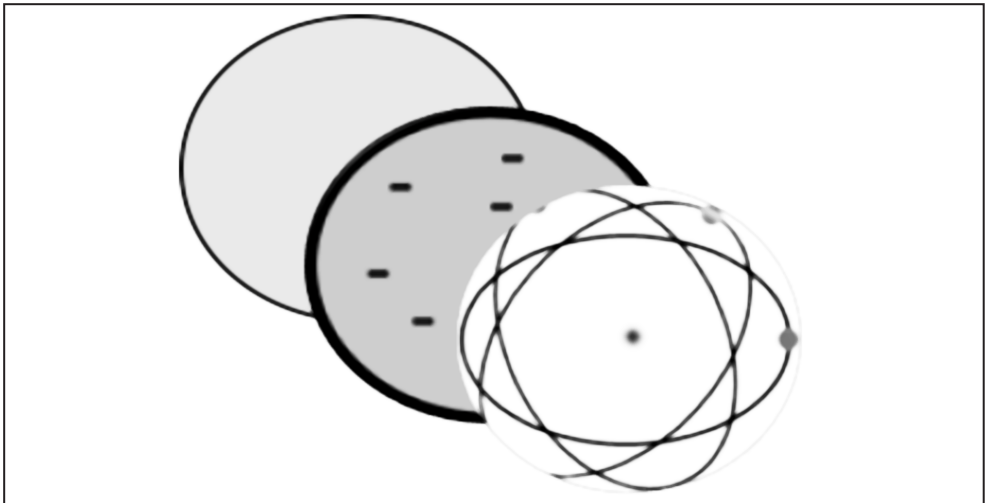


Figura 1. Inicialmente se muestra el modelo del átomo indivisible, luego el modelo de Thomson y luego el de Rutherford

Un gran avance llegó en 1911 cuando Ernest Rutherford llevó a cabo un experimento destinado a determinar los ángulos a través de los cuales un haz de partículas alfa (núcleos de helio) se dispersaba después de pasar a través de una lámina delgada de oro (figura 2).

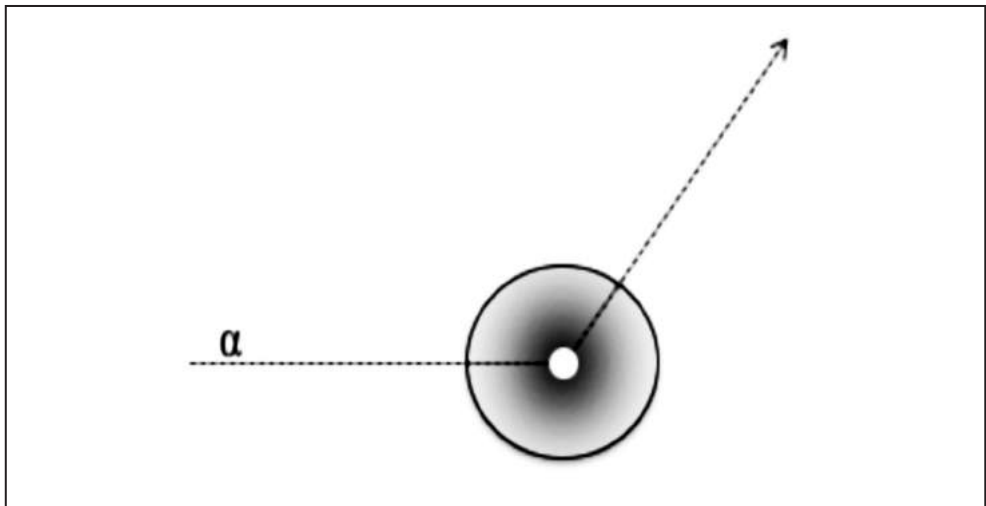


Figura 2. Esquema de experimento de Rutherford. Dispersión de las partículas alfa causada por una lámina de oro. La mayoría de las partículas alfa atraviesan la lámina de oro con poca o ninguna desviación. Algunas se desvían con un ángulo grande y ocasionalmente alguna partícula invierte su trayectoria

Si se analizara los resultados del experimento de Rutherford con base en el modelo de Thomson, sería muy poco probable la dispersión de una partícula alfa con un ángulo apreciable.

Los resultados del experimento de Rutherford fueron asombrosos. La gran mayoría de las partículas alfa se comportaron como se esperaba, pero había partículas alfa que

se dispersaban a través de ángulos mayores de 90 grados. La evidencia de este tipo de experimentos llevó al modelo del átomo que presenta un núcleo. El único modelo del átomo consistente con este experimento de Rutherford es uno con un pequeño núcleo central (el núcleo) con carga positiva y con la mayor parte de la masa del átomo, mientras que la mayoría del volumen restante del átomo contiene electrones discretos que orbitan alrededor del núcleo central.

Según la teoría electromagnética clásica, una carga que se mueve en una trayectoria circular pierde energía. En el modelo de Rutherford, los electrones giran alrededor del núcleo similar a la órbita de planetas alrededor del sol. Sin embargo, en este modelo no hay nada para evitar que los electrones pierdan energía y caigan en el núcleo bajo la influencia de la atracción de Coulomb. Este problema de estabilidad fue resuelto por Niels Böhr en 1913 con un nuevo modelo, donde hay órbitas particulares en las que los electrones no pierden energía y por lo tanto hacen un movimiento en espiral hacia el núcleo. Este modelo fue el principio de la mecánica cuántica que explica con éxito muchas de las propiedades de los átomos.

El modelo estándar, aceptado actualmente, establece que el material del universo se compone de dos tipos de partículas elementales, los quarks y los leptones, junto con su correspondiente antipartícula. Los leptones son neutros (neutrinos) o con una unidad de carga, electrón, muón y tau. Los quarks tienen carga de $-1/3$ ó $2/3$.

El concepto de quark fue propuesto independientemente en 1963 por los físicos estadounidenses Murray Gell-Mann y George Zweig. Al principio se pensó que existían tres tipos de quark: up (u, arriba), down (d, abajo) y strange (s, extraño). En 1974 fue confirmada experimentalmente la existencia de un cuarto quark, denominado charm (c, encanto). Posteriormente se planteó la hipótesis de un quinto y un sexto quark, llamados respectivamente bottom (b, fondo) y top (t, cima), por razones teóricas de simetría.

En 1977 se obtuvieron pruebas experimentales de la existencia del quark bottom, pero el quark top no fue hallado por los investigadores hasta 1995, cuando los físicos del Fermi National Accelerator Laboratory (Fermilab), en Estados Unidos, anunciaron que habían encontrado pruebas experimentales de su existencia. Los quarks tienen espín $1/2$ y por lo tanto son fermiones como los electrones (tabla 1).

Las partículas subatómicas se pueden organizar en tres familias. Los quarks up y down junto con el electrón y el neutrino forman la familia que compone la materia ordinaria. Las otras familias producen partículas que son de vida muy corta en forma aislada. No obstante, es un hecho significativo que da indicios de la importancia de las interacciones a nivel subatómico.

	Spin	Símbolo	Nombre	Masa(GeV/c ²)	Carga
Quarks	1/2	u	Up	0.003	2/3
		d	Down	0.006	-1/3
		c	Charm	1.3	2/3
		s	Strange	0.1	-1/3
		t	Top	175	2/3
		b	Bottom	4.3	-1/3
Leptones	1/2	ν	Neutrino electrónico	<0.000003	0
		e	Electrón	0.000511	-1
		ν_{μ}	Neutrino muónico	<0.0002	0
		μ	Muón	0.106	-1
		$\nu\tau$	Neutrino tauónico	<0.02	0
		τ	Tau	1.777	-1

Tabla 1. Propiedades de algunas partículas subatómicas

1.3. Ejercicios

- Indique cuál de los siguientes científicos describió la carga del electrón:
 - J.J. Thomson;
 - H. Bequerel;
 - E. Rutherford;
 - N. Böhr.
- Identifique cuál/es son las partículas elementales que componen la materia:
 - protones y electrones;
 - protones, neutrones y electrones;
 - quarks;
 - quarks, leptones;
 - leptones.
- Indique el espín de un quark, carga y tipos.
- Indique qué tipo de quarks son los que componen la materia:
 - up;
 - down;
 - charm;
 - strange;
 - top;
 - bottom.

2. Núcleo atómico

Pablo Cabral

2.1. Modelos nucleares

El modelo nuclear formado por protones y neutrones fue propuesto por W. Heisenberg en 1932. La representación de un nucleido queda definida por lo que se simboliza en forma general como:



lo cual contiene toda la información necesaria para conocer el número de electrones de la periferia atómica y el número de protones y neutrones del núcleo.

El número atómico (Z) es el número de protones que tiene el núcleo de un átomo, definiendo entonces al elemento. Sin embargo, para definir un nucleido como tal es necesario especificar el número másico (A), que corresponde a la suma del número de protones y de neutrones que tiene el núcleo de un átomo.

$N = A - Z$, es el número de neutrones que tiene el núcleo de un átomo.

La masa de los núcleos se expresa en unidades de masa atómica (u). Su equivalencia con la unidad del sistema internacional (SI) es $1 u = 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}$.

El tamaño del núcleo puede medirse mediante su radio, ya que los núcleos en su estado fundamental se suponen esféricos. Las dimensiones del núcleo dependen del número másico, según la ecuación:

$$r = r_0 \sqrt[3]{A} = \pi \cdot r^2 \quad \text{con} \quad r_0 = (1.1-1.6) \times 10^{-15} \text{ m}$$

Si bien los números másicos ascienden a 250, el tamaño de los núcleos más grandes es igualmente muy pequeño comparado con el tamaño de los átomos, que es del orden del angström (\AA), siendo $1 \text{\AA} = 10^{-10} \text{ m}$.

En tan reducidas dimensiones se concentra prácticamente toda la masa del átomo y por lo tanto las densidades de los núcleos son muy elevadas, del orden de $3 \times 10^{17} \text{ kg/m}^3$. ¿Cómo hace entonces el núcleo para mantener sus nucleones unidos?

A pesar de que el estudio del átomo es completo en lo que se refiere a su corteza, no se puede decir lo mismo acerca del núcleo. Existen diversas teorías sobre la estructura interna del núcleo, aunque no se dispone de datos definitivos como para establecer un modelo totalmente satisfactorio.

Desde que fue descubierto el neutrón se desarrolló el primer modelo nuclear por Ivanenko y Heisenberg de manera independiente, en el que los constituyentes fundamentales eran protones y neutrones. En él se estableció que ambas partículas tienen espín $1/2$ y que el núcleo contiene Z protones y $A - Z$ neutrones. Además, se postuló la existencia de unas fuerzas nucleares lo bastante intensas como para superar la enorme repulsión eléctrica entre los protones, confinados en tan pequeñas dimensiones. Estas fuerzas debían ser de corto alcance e independientes de la carga y actuar entre protones y neutrones sin distinción.

A partir de entonces se han propuesto distintos modelos nucleares, cada uno de los cuales proporciona una explicación más o menos parcial de ciertos aspectos y fenómenos observables en el núcleo, si bien no existe una teoría global que explique la totalidad de las propiedades nucleares.

2.1.1. Modelo de la gota líquida

Fue propuesto por Böhr y Gamow en 1937 para explicar las reacciones nucleares en las que se origina un núcleo compuesto y también para interpretar la fisión nuclear, considerando al núcleo como un objeto hidrodinámico.

Este modelo compara el núcleo atómico con una gota líquida, que posee una tensión superficial definida, en la que los nucleones son retenidos de la misma manera que una gota retiene a las partículas de líquido, conservando una forma esférica, asimilando, de alguna forma, las fuerzas nucleares a las intermoleculares. En este caso, la inestabilidad nuclear se entendería como un proceso análogo al de la evaporación de moléculas en la superficie de un líquido, comparando el aumento de temperatura con el aumento en los movimientos de las partículas dentro del núcleo, lo que produce una mayor probabilidad de desintegración.

Los cálculos basados en la energía debida a: i) la energía volumétrica del contacto entre los nucleones y su acomodamiento; ii) la energía superficial, que es negativa ya que un nucleón situado en la superficie interacciona con menos nucleones que si se halla en el interior; iii) la energía de repulsión coulombiana entre los protones; iv) y otros dos términos como son la energía de asimetría y la energía de paridad; permiten obtener valores muy ajustados a los experimentales, aunque fallan para predecir la estabilidad de ciertos elementos como C, O, Ca y He, entre otros.

2.1.2. Modelo de capas

Este modelo surge al estudiar los valores de los números atómicos y másicos de los núcleos estables, comprobándose que casi todos poseen Z par y A par, de manera que existen solo ocho núcleos con Z y A impares. Estas observaciones sugieren algún tipo de unión por separado entre protones y neutrones que afecta a la estabilidad nuclear. Hay un efecto aún más específico, pues existe un conjunto de núcleos particularmente estables y abundantes en la naturaleza que poseen los siguientes números *mágicos* de protones y neutrones: 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126. Estos datos precisaron en un modelo de capas del núcleo, es decir, un esquema de niveles de energía según el cual los nucleones se hallan distribuidos en orbitales, de modo semejante a como se hallan los electrones en la periferia. Hay ciertas diferencias con el modelo mecanocuántico de los electrones. Por ejemplo, los nucleones tendrán un número cuántico adicional, el isoespín, cuya proyección distinguirá entre protones y neutrones. Además, solo se considera la interacción entre dos nucleones, pues la probabilidad de que lo hagan tres es muy baja.

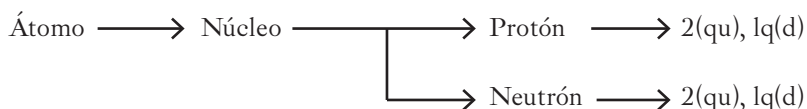
Determinadas propiedades como el valor de los espines nucleares, la elevada diferencia entre los períodos de semidesintegración de los núcleos emisores de partículas alfa y la emisión de rayos gamma se pueden justificar adecuadamente por este modelo. Otras, como los valores de los momentos magnéticos predichos por la teoría no se corresponden con los datos experimentales.

2.1.3. Modelo estándar

Con el desarrollo de aceleradores de partículas, los físicos han descubierto experimentalmente que los nucleones (protones y neutrones) no son partículas fundamentales. Uno de los acontecimientos más importantes de la física moderna fue el desarrollo del modelo estándar de las interacciones fundamentales.

Este modelo describe las partículas que componen la materia y las interacciones fundamentales que las rigen. Surge de la teoría cuántica de los campos desarrollada entre 1970 y 1973 consistente con la mecánica cuántica y la relatividad especial. Asimismo, aunó los conceptos de ambos modelos nucleares para adaptarlos a la nueva concepción de las partículas elementales.

De esta manera quedó determinado que el protón está formado por dos quarks up y un quark down y el neutrón por un quark up y dos del tipo down, los cuales se mantienen unidos por otro tipo de partículas elementales llamadas gluones, responsables de la interacción fuerte (ver tabla 2).



Se podría entonces tratar de comprender la estructura de los protones y neutrones en términos de las partículas fundamentales descritas en el modelo estándar. Debido a que los protones y los neutrones se ven afectados por la interacción fuerte (es decir, la interacción que une a los quarks y que en última instancia mantiene la estructura del núcleo), caen en la categoría de las partículas compuestas llamadas hadrones.

Interacción	Intensidad	Partícula Mediadora
Fuerte	1	Gluón de espín 1
Electromagnética	01/37	Fotón de espín 1
Débil	10^{-9}	Bosones W_{\pm}, Z_0 espín 1
Gravitacional	10^{-38}	Gravitón de espín 2

Tabla 2. Interacciones fundamentales descritas por el modelo estándar

Los hadrones pertenecen a la subcategoría conocida como bariones debido a que están formados por tres quarks.

También hay hadrones llamados mesones, que están formados por quarks y antiquarks pares, un ejemplo de los cuales es el pión. Debido a que los bariones y mesones presentan quarks en su estructura interna se pueden presentar estados excitados, igual que ocurre en los electrones dentro de los átomos.

Este modelo propone otro tipo de bosones para transmitir la interacción débil, responsable de la desintegración beta y otros fenómenos similares: los bosones W_+ , W_- y Z . El modelo se completa al comprobar la existencia del boson de Higgs, el último de los cuales fue detectado en el CERN (Organización Europea para la Investigación Nuclear) en 2012.

Además de tamaño, masa y carga eléctrica, el núcleo posee, entre otras, las siguientes propiedades que juegan un papel importante en cualquier teoría o modelo que se propone sobre la constitución del núcleo:

- **Momento angular** (que origina un momento magnético nuclear)
- **Momento eléctrico** (debido a la distribución no simétrica de su carga)

Al igual que los electrones, también los protones y neutrones poseen espín de 1/2 y generan un momento angular (S) bien definido.

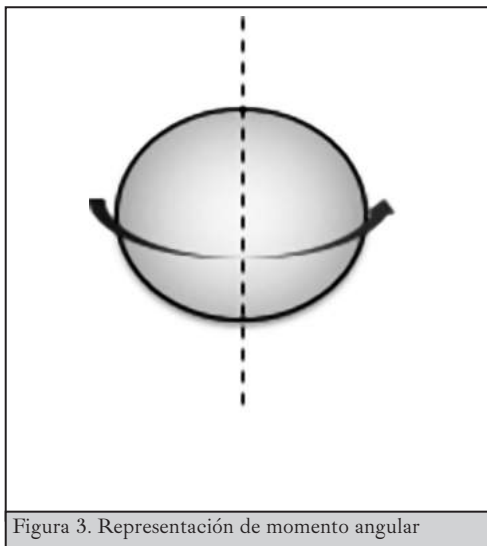


Figura 3. Representación de momento angular

El momento angular total J de un núcleo es la suma de los momentos angulares orbitales y por espín:

$$J = [j(j+1)]^{1/2} h$$

$J_z = m_j h$, $m_j = -j, -j+1, \dots, j-1$, donde j es entero cuando A es par y semientero cuando A es impar.

El movimiento de los nucleones y la cantidad de estos va a condicionar la forma y estabilidad del núcleo (figura 4).

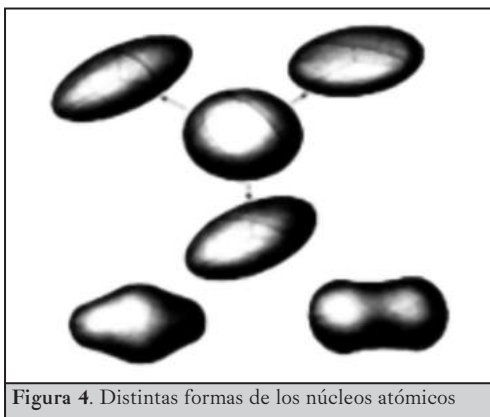


Figura 4. Distintas formas de los núcleos atómicos

2.2. Ejercicios

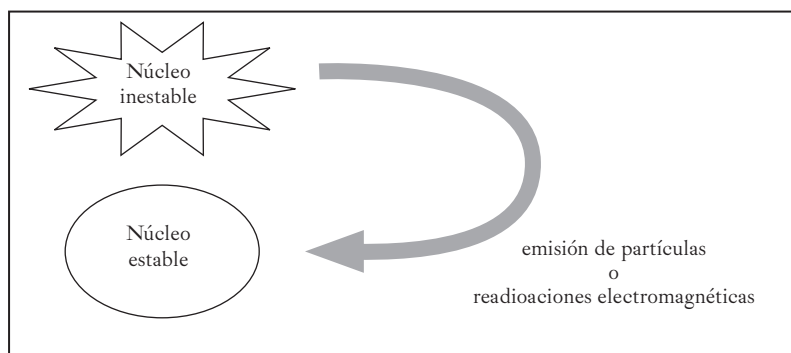
1. Indique cuál de los siguientes son considerados hadrones:
 - a) neutrones;
 - b) protones;
 - c) electrones;
 - d) quarks.
2. Indique cómo está conformado un neutrón.
3. Indique cómo está conformado un protón.
4. Indique cuál es la fuerza que mantiene unidos los nucleones.
5. Calcular los radios del ^{16}O y ^{208}Pb .

3. Inestabilidad nuclear

Pablo Cabral

Habiendo visto aspectos más detallados de la constitución del núcleo atómico, se estudiará en mayor profundidad la inestabilidad que se produce en algunas ocasiones. Fue precisamente a través de los fenómenos de inestabilidad que se tuvo la primera evidencia experimental de la existencia de la estructura subatómica. Es así que llevó muchos años establecer una teoría precisa que explicara con ciertos detalles los mecanismos involucrados en contrarrestar esta inestabilidad.

En general, se puede decir que un núcleo que se encuentra en un estado energéticamente inestable pierde energía, ya sea a través de la emisión de partículas o de radiación electromagnética (*decaimiento*).



El proceso continúa hasta que se llega a un núcleo final en su estado estable. El tipo de emisión está determinado por la energética de los distintos procesos posibles y por la estructura de los estados iniciales y finales. Usualmente, si la emisión de partículas es energéticamente posible este es el proceso que ocurre con mayor probabilidad, seguido luego por la emisión de radiación electromagnética.

Este fenómeno, espontáneo, por el cual los núcleos de algunos elementos emiten radiaciones, ya sea en forma de partículas o de ondas electromagnéticas, es llamado radiactividad. Su unidad de medida en el sistema internacional es el becquerel (Bq) gracias a H. Becquerel quien en 1896 descubrió dicho fenómeno.

Asimismo, la radiación ionizante queda definida como aquella que tiene la capacidad de ionizar la materia (ver sección 10).

3.1. Relación N/Z

Puesto que las cargas iguales se repelen mutuamente, puede parecer sorprendente que en el reducido volumen del núcleo pueda residir un gran número de protones (entidades con cargas positivas). A distancias cortas, sin embargo, existe una intensa fuerza de atracción entre los nucleones llamada interacción nuclear fuerte. Los neutrones participan

íntimamente en esta fuerza atractiva. Todos los núcleos con dos o más protones contienen neutrones. Cuanto más protones hay en el núcleo, más neutrones se necesitan para mantenerlos unidos. Los núcleos estables de número atómico bajo (hasta alrededor de 20) tienen aproximadamente números iguales de protones y neutrones.

En el caso de los núcleos de número atómico mayor, el número de neutrones necesarios para crear un núcleo estable aumenta con más rapidez que el número de protones, como se muestra en la figura 5. Por tanto, la proporción de neutrones a protones de los núcleos estables aumenta con el número atómico.

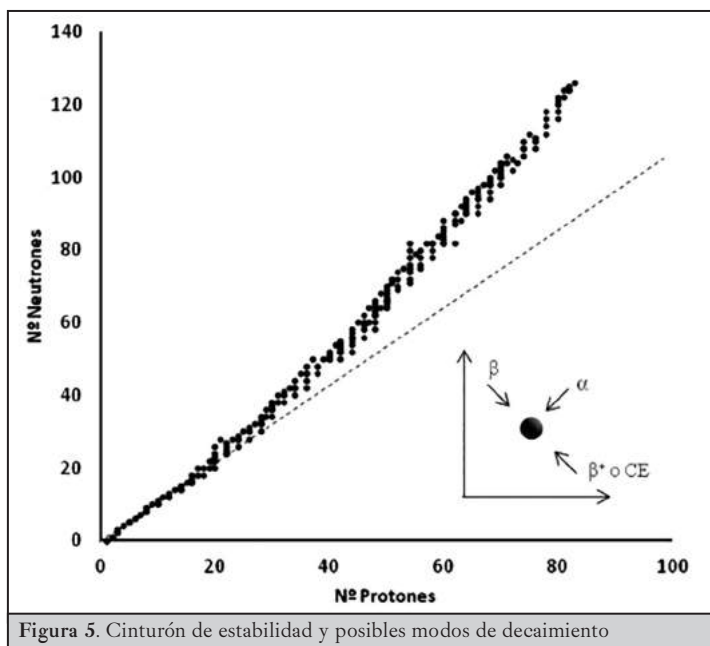


Figura 5. Cinturón de estabilidad y posibles modos de decaimiento

La zona de puntos de la figura anterior es el área dentro de la cual se encuentran todos los núcleos estables y se conoce como cinturón de estabilidad. El cinturón de estabilidad termina en el elemento 83 (bismuto, Bi). Todos los núcleos con 84 protones o más (número atómico ≥ 84) son radiactivos (o sea que para alcanzar su estabilidad emiten partículas o radiaciones electromagnéticas, las que serán discutidas más adelante en este mismo apartado). Por ejemplo, todos los isótopos de uranio, de número atómico 92, son radiactivos.

El tipo de desintegración radiactiva que sufre un radionucleido en particular depende en gran medida de su proporción de neutrones a protones en comparación con la de los núcleos cercanos a él dentro del cinturón de estabilidad. Así, pueden ser visualizadas tres situaciones generales:

- Núcleos por arriba del cinturón de estabilidad (alta proporción de neutrones a protones): estos núcleos ricos en neutrones pueden reducir su proporción y avanzar hacia el cinturón de estabilidad emitiendo una partícula beta. La emisión beta reduce el número de neutrones y aumenta el número de protones en un núcleo.
- Núcleos por debajo del cinturón de estabilidad (baja proporción de neutrones a protones): estos núcleos ricos en protones pueden aumentar su proporción ya sea por

emisión de positrones o por captura de electrones. Ambos tipos de desintegraciones aumentan el número de neutrones y reducen el de protones. La emisión de positrones es más común que la captura de electrones entre los núcleos más ligeros; en cambio, la captura de electrones se hace cada vez más común al aumentar la carga nuclear.

- Núcleos con número atómico ≥ 84 : estos núcleos pesados, que están más allá del borde superior derecho de la banda de estabilidad, tienden a sufrir emisión alfa. La emisión de una partícula alfa disminuye tanto el número de neutrones como el de protones en 2 unidades, lo que desplaza al núcleo en diagonal hacia el cinturón de estabilidad.

Adicionalmente, se ha observado que los núcleos con 2, 8, 20, 28, 50 u 82 protones o 2, 8, 20, 28, 50, 82 o 126 neutrones son por lo general más estables que los núcleos que no contienen estos números de nucleones. Como se mencionó en el apartado anterior, estos números de protones y neutrones se llaman números *mágicos*.

Los núcleos con números pares tanto de protones como de neutrones son en general más estables que los que contienen números impares de nucleones, como se resume en la tabla 3.

Número de isótopos estables	Protones	Neutrones
157	Par	Par
53	Par	Impar
50	Impar	Par
5	Impar	Impar

Tabla 3. Número de isótopos estables con números pares e impares de protones y neutrones

Como se mencionó en el apartado anterior, estas observaciones se pueden entender en términos del *modelo de capas* del núcleo; de acuerdo con esta descripción, los nucleones residen en capas análogas a la estructura en capas de los electrones de los átomos. Así como ciertos números de electrones (2, 8, 18, 36, 54 y 86) corresponden a configuraciones electrónicas estables de capas completas, también los números mágicos de nucleones representan capas completas en los núcleos. Como ejemplo de la estabilidad de los núcleos que tienen números mágicos de nucleones, se puede observar que el ^{238}U decae por una serie de etapas al núcleo estable ^{206}Pb , el cual tiene un número mágico de protones (ver apartado 4).

También hay evidencias que sugieren que los pares de protones y los pares de neutrones tienen una estabilidad especial, análoga a los pares de electrones de las moléculas. Así pues, los núcleos estables con un número par de protones y un número par de neutrones son mucho más numerosos que los que tienen números impares.

3.2. Energía de enlace

Cuando los neutrones y protones se combinan para formar un núcleo existe una liberación de energía, producida por una ligera pérdida de masa que se llama *energía de enlace nuclear* (*energía de ligadura*). Así pues, el núcleo es más estable, es decir menos energético, que el conjunto de sus nucleones aislados, ya que al formarse se libera energía.

En efecto, podría pensarse que la masa de un núcleo se obtiene sumando Z veces la masa del protón y N veces la masa del neutrón. Sin embargo, la masa total de un átomo

es siempre inferior a la suma de las masas de sus constituyentes aislados. En general, el defecto de masa (Δm) de un átomo de masa atómica A , de número atómico Z y de masa m se calcula mediante la ecuación:

$$\Delta m = m_{\text{inicial}} - m_{\text{final}}$$

$$\Delta m = (Z_{\text{mp}} - N_{\text{mn}} - Z_{\text{me}}) - M_{\text{at}}$$

siendo m_p , m_n y m_e las masas en reposo del protón, neutrón y electrón, respectivamente. Para entender el significado de dicho defecto de masa se debe recordar la equivalencia entre la masa y la energía según la mecánica relativista.

Aplicando el principio de conservación de la cantidad de movimiento, Einstein dedujo que la masa de una partícula en movimiento depende de su velocidad de acuerdo con la expresión:

$$m = m_0 \cdot \gamma$$

donde m_0 es la masa de la partícula en reposo y γ es el factor que aparece en las transformaciones de Lorentz y cuyo valor es siempre mayor o igual a 1. Según la fórmula anterior de m , cuando una partícula gana velocidad, aumenta su masa. Lo que sucede, como puede derivarse de dicha fórmula y de la expresión clásica de la energía cinética, es que el incremento de masa que experimenta la partícula se acumula en forma de energía cinética relativista, cuya expresión es:

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

siendo Δm el aumento de masa y c la velocidad de la luz.

Esa fórmula relaciona la masa y la energía cinética de una partícula relativista. Y de ella se puede derivar otra relación similar entre la energía total de dicha partícula y su masa, siendo la relación entre la unidad de masa atómica y la energía, en eV, la siguiente: 1 u equivale a 931.5 MeV. Es la consecuencia más conocida de la teoría de Einstein, la equivalencia masa-energía.

En definitiva, el defecto de masa del átomo será equivalente a la energía de ligadura. Según aquella relación de Einstein, la energía de ligadura es igual a la pérdida de masa multiplicada por el cuadrado de la velocidad de la luz.

Por un cálculo sencillo se obtiene que la energía equivalente a una unidad de masa atómica es de 931.5 MeV.

La energía de enlace es una forma de energía potencial. Puede ser asociada, por tanto, a un campo conservativo: el campo nuclear fuerte, al cual, como ya se ha señalado, le corresponde una fuerza atractiva muy intensa cuando la distancia entre nucleones es pequeña, del orden de magnitud nuclear. Ello explica la estabilidad del núcleo a pesar de la fuerte repulsión electrostática que existe entre los protones.

Los átomos más estables son los que tienen una mayor energía de ligadura promedio por nucleón, calculada al dividir la energía de ligadura por el número másico. Si se analiza la dependencia entre la energía media de enlace por nucleón frente al número másico se

observa un crecimiento rápido hasta un máximo en el hierro y un decrecimiento gradual hacia los elementos más pesados, tales como el uranio. Los valores experimentales de esta magnitud, exceptuando los isótopos del hidrógeno, varían entre unos 6 y 8 MeV. Comparativamente, las energías de enlace químicas son mucho más pequeñas. En igualdad de masa, las reacciones nucleares producen energía del orden de varios millones de veces superior a la producida en las reacciones químicas, y en ello reside el interés de la energía nuclear como fuente de energía muy aprovechable dada la enorme demanda que existe en la sociedad actual. La estabilidad de un núcleo en particular depende de diversos factores y no hay una regla única que permita predecir si un núcleo específico es radiactivo y cómo se podría desintegrar. Sin embargo, hay varias observaciones empíricas que son de utilidad para hacer predicciones.

3.3. Ejercicios

1. Prediga, haciendo uso de los números *mágicos* de nucleones, la estabilidad de los siguientes nucleidos:
2. Calcule la energía de ligadura por nucleón para el ^{37}Cl . Datos: $M A^{37}\text{Cl} = 36.965899 \text{ u}$.
3. Calcule la energía de enlace y la energía de enlace por nucleón para ^{126}Te , ^{39}K , ^{98}Mo y ^{12}C .
4. Calcule la energía necesaria para extraer el neutrón más débilmente ligado en el ^{40}Ca .
5. Calcule la energía necesaria para extraer el protón más débilmente ligado en el ^{40}Ca .
6. Compare las energías mínimas necesarias para extraer un neutrón del ^{41}Ca , ^{42}Ca y ^{43}Ca siendo estas 8.36 MeV, 11.47 MeV y 7.93 MeV respectivamente.
7. Encuentre los núcleos más estables para $A = 25$, $A = 43$, $A = 57$, $A = 73$ y $A = 77$.

4. Modos de decaimiento

Pablo Cabral

Como se indicó en el apartado anterior, cuando un núcleo se encuentra en un estado energéticamente inestable perderá energía, ya sea a través de la emisión de partículas o de radiación electromagnética, a través de un proceso conocido como *decaimiento*. Algunas de las leyes que regulan estos decaimientos fueron establecidas rápidamente después del descubrimiento de los rayos α , β y γ , hacia fines del siglo XIX. Otras fueron establecidas bastante más tarde, al igual que la existencia de otros tipos de decaimientos (fisión, etc.).

Como ya se ha mencionado, la historia de los decaimientos nucleares comienza con el descubrimiento de la radiactividad natural por Becquerel. La naturaleza de los rayos α fue determinada por Rutherford en los primeros años del siglo XX. Sin embargo, solo hacia fines de los años 20, Gamow y Condon lograron desarrollar una teoría cuántica que explicara dichos decaimientos. La idea de utilizar las partículas α como proyectil fue muy fructífera ya que dio lugar a diversos descubrimientos; por ejemplo, el ya mencionado descubrimiento del neutrón en 1932 y el de la radiactividad artificial, es decir la producción de nuevas sustancias radiactivas a partir de reacciones nucleares, por F. Joliot e I. Curie en 1934. Esto último fue muy importante ya que, no solo dio lugar a nuevos experimentos que permitieron producir diversas sustancias radiactivas, sino que también llevó al descubrimiento de un nuevo tipo de decaimiento β , el llamado decaimiento β^+ . Este decaimiento corresponde a la emisión por parte de una sustancia radiactiva de un positrón o la captura de un electrón atómico (del orbital K) por el núcleo. Estos mecanismos siempre están en competencia y hacen que el isótopo radiactivo se transforme en un isótopo de igual masa y una unidad de carga menos. Por otra parte, en 1940 G. N. Flerov y J. Petrjak descubrieron que el uranio natural (abundancias isotópicas de 99.27% para ^{238}U , de 0.72% para ^{235}U y de 0.0055% para ^{234}U) se fisiona espontáneamente, es decir se separa en dos fragmentos aproximadamente iguales. Esta forma de decaimiento solo ocurre para núcleos muy pesados.

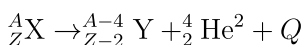
El estudio sistemático de las sustancias radiactivas naturales ha demostrado que se trata, en general, de isótopos de elementos pesados y que forman parte de unas pocas llamadas series radiactivas. Cada una de estas series se origina en un isótopo cuyo tiempo de decaimiento es lento comparado con la edad de la Tierra. Existen, sin embargo, algunos isótopos radiactivos livianos.

En lo que sigue de este apartado se desarrollarán principalmente los decaimientos α , β y γ , aunque existen otros decaimientos más exóticos, tales como la emisión simultánea de tres partículas α , el decaimiento doble β (por ej. $82\text{Se} \rightarrow 82\text{Kr}$), etc.

A continuación, en el planteo de los siguientes decaimientos radiactivos se hará referencia al nucleido que decaerá como "padre" y al producto como "hijo".

4.1. Decaimiento α

Como ya se ha mencionado anteriormente, el decaimiento α consiste en la emisión por parte de un núcleo padre (caracterizado por un A y un Z) de un núcleo de (^4_2He) transformándose así en un núcleo hijo con A-4 y Z-2. Es decir:



Con frecuencia el núcleo hijo se produce en el estado fundamental. En este caso la fuente radiactiva solo emite una partícula α de energía bien definida. Sin embargo, también se puede producir en estados excitados que luego se decaen emitiendo rayos γ . Vale aclarar que el núcleo de Helio emitido se recombina inmediatamente con dos electrones para formar un átomo neutro.

4.2. Decaimiento β^-

Ya en los primeros estudios detallados de los decaimientos β^- se observó que estos correspondían a la emisión de un electrón por un núcleo padre (con A y Z característicos) que se transforma en núcleo hijo (con A y $Z+1$). Sin embargo, contrariamente a lo que ocurre en los decaimientos α donde las partículas emitidas tienen energías bien definidas, los electrones emitidos en un decaimiento β^- tienen un espectro continuo. Por lo tanto, para que la energía y momento lineal se conserven en este tipo de proceso, es necesario que otra partícula sea emitida junto con el electrón. La máxima energía en el espectro del electrón, llamada punto final del espectro β^- , es la que uno espera para un decaimiento en el cual solo se producen el electrón y el núcleo hijo. A la vez, tal como se puede observar en la siguiente figura, la probabilidad de dicho evento es infinitesimalmente pequeña.

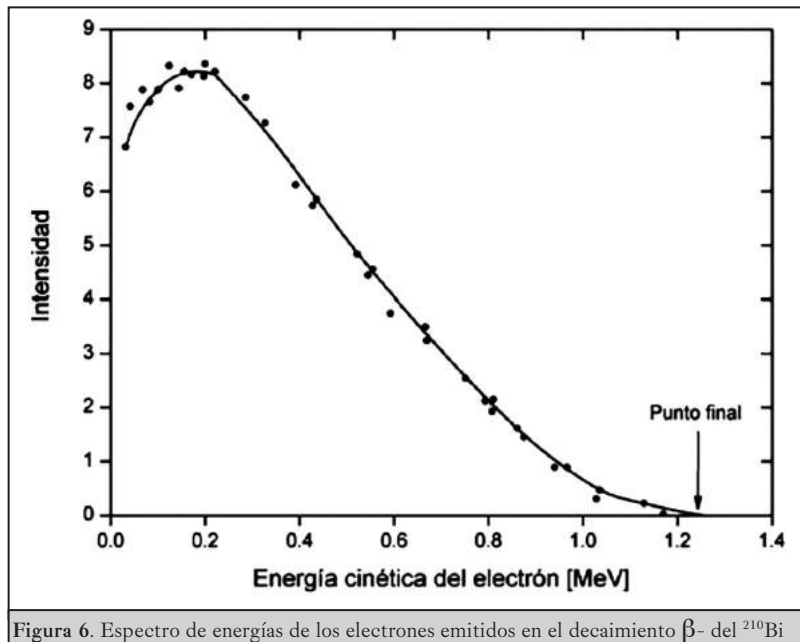
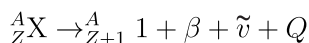


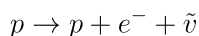
Figura 6. Espectro de energías de los electrones emitidos en el decaimiento β^- del ^{210}Bi

En un principio se creyó que el compañero del electrón podía ser un rayo γ . De hecho, en algunos casos, dichos rayos γ existen. Sin embargo, dado que el correspondiente espectro es discreto la presencia de estos rayos no brinda una explicación del espectro continuo de los electrones. También se pensó en distintos mecanismos de pérdida de energía del electrón una vez emitido. Sin embargo, ninguno de estos mecanismos fue capaz de explicar el espectro observado. A partir del descubrimiento del espín del electrón quedó claro que el decaimiento mediante la sola emisión de un electrón viola la conservación del impulso

angular. Finalmente, en 1931 el problema fue resuelto por medio de una sugerencia hecha por W. Pauli, quien propuso que junto con el electrón debía emitirse una partícula cuya interacción con la materia fuera muy pequeña y que tuviera espín 1/2 y una masa prácticamente nula. Dicha partícula recibió el nombre de neutrino y debieron pasar 25 años para que fuera encontrada empíricamente mediante experimentos con reactores nucleares. Poco después, en 1934, E. Fermi propuso la primera teoría exitosa del decaimiento β basada en la existencia del neutrino. Con el tiempo se descubrió que existen tres clases de neutrinos, con sus correspondientes antineutrinos. El que se emite junto con el electrón es el antineutrino de electrón, por lo tanto, un decaimiento β^- en el que el núcleo hijo se forma en el estado fundamental se puede indicar como:



A nivel nuclear lo que ocurre es el decaimiento β^- :



Este decaimiento también ocurre para neutrones libres y tiene una vida media de 887 s. A un nivel aún más fundamental este proceso ocurre debido al decaimiento del quark d en un quark u más un electrón más un $\bar{\nu}_e$. La existencia de este tipo de proceso requiere de la introducción de un nuevo tipo de interacción fundamental, la llamada interacción débil, ya que no puede ser descrito por ninguna de las interacciones estudiadas hasta aquí, es decir la interacción fuerte, electromagnética o gravitatoria. En algunos decaimientos β^- , además de los electrones que forman el espectro continuo, se observan electrones con energías discretas. Esto ocurre cuando el núcleo hijo se forma en un estado excitado que, en lugar de decaer emitiendo rayos γ , transfiere toda su energía a un electrón del átomo. Este es emitido con una energía discreta igual a la diferencia entre la energía de excitación del hijo y la suma de la energía de ligadura del electrón y la de retroceso del átomo.

En general, las energías observadas corresponden a la emisión de electrones que ocupaban el orbital K del átomo, aunque también hay casos que corresponden a electrones del orbital L. Estos electrones se denominan electrones de conversión y hay que tener en cuenta que su origen es atómico y que, por lo tanto, no deben ser confundidos con los que provienen directamente del decaimiento β^- .

Por supuesto, también puede ocurrir que el estado excitado del núcleo hijo decaiga emitiendo rayos γ . Un ejemplo del correspondiente esquema completo de decaimientos se muestra a continuación (figura 7).

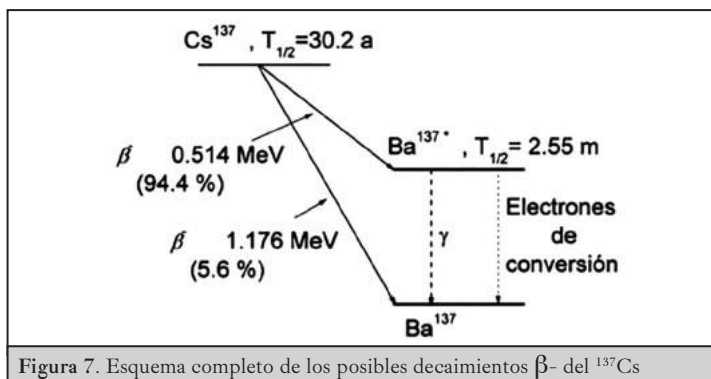
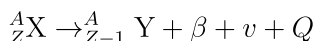


Figura 7. Esquema completo de los posibles decaimientos β^- del ^{137}Cs

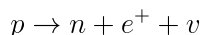
Los decaimientos β^- son característicos de núcleos ricos en neutrones, es decir núcleos pesados radiactivos y núcleos producidos en fisión.

4.3. Emisión de positrones

Por otra parte, en muchas reacciones nucleares se producen núcleos ricos en protones. Estos decaen usualmente por medio del llamado decaimiento β^+ . Este decaimiento consiste en la emisión de un positrón y un neutrino de electrón, es decir:



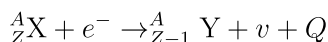
Aquí el positrón es la partícula de antimateria correspondiente al electrón, es decir que tiene su misma masa pero carga de signo contrario. La existencia de la antimateria fue predicha en forma teórica en 1928 por P. Dirac al formular una teoría que tiene en cuenta tanto la mecánica cuántica como la relatividad. El positrón fue encontrado experimentalmente poco después. A nivel más fundamental el decaimiento β^+ corresponde al proceso:



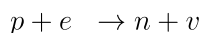
4.4. Captura electrónica

Contrariamente a lo que ocurre con el neutrón, un protón libre no puede decaer a un neutrón ya que tiene una masa menor. Por supuesto sí lo puede hacer cuando forma parte de un núcleo atómico.

En competencia con el decaimiento β^+ está el llamado proceso de captura electrónica (CE ó ϵ). En este caso lo que ocurre es que uno de los electrones del átomo es capturado por el núcleo produciéndose el proceso débil:



Puesto que el electrón se consume en lugar de formarse en el proceso, se muestra en el lado de los reactivos de la ecuación. La captura de electrones, como la emisión de positrones, tiene el efecto de convertir un protón en un neutrón:



4.5. Emisión gamma

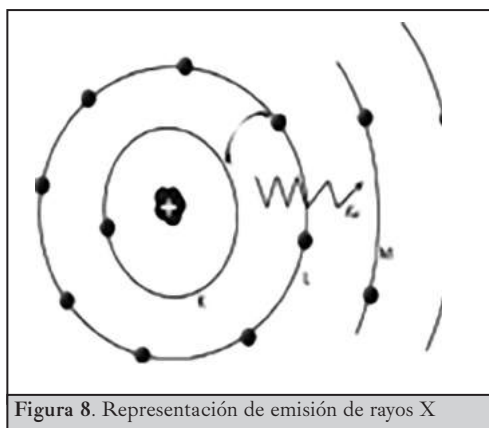
4.5.1. Transición isomérica

En contraste con los decaimientos α y β , el decaimiento gamma (γ) no es particular a la física nuclear ya que, por ejemplo, tiene su contraparte en la física atómica. Un rayo γ es una onda electromagnética similar a la luz o a las ondas de radio, es decir se trata de campos eléctricos y magnéticos oscilantes, aunque su energía asociada es mayor (generalmente se considera radiación γ cuando $E > 0.1$ MeV). Dado que el núcleo contiene cargas en movimiento es evidente que puede emitir este tipo de radiación.

Cuando la emisión gamma se produce a partir de un estado excitado nuclear, estado metaestable, el proceso de decaimiento radiactivo lleva el nombre de transición isomérica. De esta forma se libera radiación gamma y el núcleo vuelve a un estado estacionario.

4.5.2. Conversión interna

Si bien la conversión interna no es un proceso nuclear, es un mecanismo alternativo de la desexcitación nuclear por emisión de radiación gamma. La vacante electrónica se llena con un electrón de una capa externa; como consecuencia, se emiten rayos X. La energía disponible para la desexcitación se transfiere a un electrón de una capa interna, que es eyectado. La energía cinética del electrón es igual a la de la energía de la transición menos su energía de unión.



4.6. Radiactividad natural

Ciertos núcleos, como el ^{238}U , no pueden adquirir estabilidad por un decaimiento en un solo paso. En consecuencia, se produce una serie de emisiones sucesivas. Como se mostró en el apartado anterior el ^{238}U se desintegra a ^{234}Th , el cual es radiactivo y se desintegra a ^{234}Pa . Este núcleo también es inestable y se desintegra posteriormente. Este tipo de reacciones sucesivas continúa hasta que se forma un núcleo estable, el ^{206}Pb .

Una serie de reacciones nucleares que comienza con un núcleo inestable y termina con uno estable se conoce como serie radiactiva o serie de desintegración nuclear. Hay tres de estas series en la naturaleza, si bien hubo cuatro en la existencia de la Tierra. Además de la serie que se inicia con el ^{238}U y concluye con el ^{206}Pb , hay una que comienza con el ^{235}U y termina con el ^{207}Pb . La tercera comienza con ^{232}Th y acaba con ^{208}Pb (tabla 4).

En consecuencia, se puede encontrar algunos de estos radionucleidos en altas concentraciones de forma natural como el ^{222}Rn .

Serie	Radionucleido	t1/2	Fin de serie	A
Torio	^{232}Th	$13.9 \times 10^9 \text{ a}$	^{208}Pb	$4n$
Actino	^{235}U	$7 \times 10^8 \text{ a}$	^{207}Pb	$4n + 1$
Uranio-radio	^{238}U	$4.5 \times 10^9 \text{ a}$	^{206}Pb	$4n + 2$
Neptunio	^{241}Pu	$2.2 \times 10^6 \text{ a}$	^{209}Bi	$4n + 3$

Tabla 4. Series radiactivas naturales

4.7. Energía y modo de decaimiento

Como se indicó en el apartado anterior, la existencia según la mecánica relativista de una equivalencia entre masa y energía permite determinar si un proceso de decaimiento propuesto es energéticamente favorable, utilizando el simple cálculo del defecto másico (Δm) del proceso:

$$\Delta m = m_{\text{inicial}} - m_{\text{final}}$$

$$\Delta m = (Z_{\text{mp}} - N_{\text{mn}} - Z_{\text{me}}) - M_{\text{at}}$$

Así, dado que por convención se utiliza la diferencia del estado inicial y el estado final (lo cual es lo contrario en otros estudios energéticos), si $\Delta m > 0$ el proceso será espontáneo para el decaimiento propuesto.

4.8. Ejercicios

- Complete las siguientes ecuaciones nucleares, reemplazando las X por los símbolos o números correspondientes (nota: X toma diferentes números y símbolos en cada una de las situaciones):
 - $^{X}_{88}\text{Ra} \rightarrow ^{222}_{X}\text{X} + ^4_{X}\text{X}$
 - $^{73}_{X}\text{As} + ^0_{-1}\text{e} \rightarrow ^X_{32}\text{X}$
- Escriba las ecuaciones correspondientes a cada uno de los siguientes procesos nucleares:
 - emisión de un positrón del ^{18}F ;
 - emisión de una partícula β^- por el ^{35}S ;
 - captura electrónica por el ^7Be ;
 - emisión de radiación γ (gamma) por el $^{99\text{m}}\text{Tc}$.
- Demuestre que el ^{22}Na es alfa estable y que es inestable con respecto a la captura electrónica y la emisión de positrones.
 Datos: $MA\ ^{22}\text{Na} = 21.994437 \text{ u}$; $MA\ ^4\text{He} = 4.002603 \text{ u}$; $MA\ ^{22}\text{Ne} = 21.991385 \text{ u}$; $MA\ ^{18}\text{F} = 18.000937 \text{ u}$; masa electrón = 0.000549 u .
- Los isótopos estables del cromo tienen números de masa iguales a 50, 52, 53 y 54. En función de la relación N/Z , el ^{51}Cr puede solamente decaer por:
 - β^- , pero no por β^+ ni CE;
 - β^+ , pero no por β^- ni CE;
 - β^+ o CE, pero no β^- ;
 - β^+ o β^- o CE.

5. El ^{134}Cs emite una partícula beta negativa, seguida de 2 rayos gamma. El nucleido resultante generado cumple que:
- $A = 134$;
 - es un isótopo del Cs;
 - $Z = 54$;
 - $Z = 57$;
 - ninguna de las anteriores es correcta.
6. Teniendo en cuenta que el único isótopo estable del I es el ^{127}I :
Indique los modos de decaimiento más probables del ^{125}I .
7. ¿Cuáles de los modos de decaimiento hallados en a) son posibles energéticamente para ^{125}I ?
Datos: $MA^{125}\text{I} = 124.904578 \text{ u}$; $MA^{125}\text{Te} = 124.904418 \text{ u}$; $MA^{125}\text{Xe} = 124.906620 \text{ u}$.
8. Para la reacción de combustión del metano:
 $\text{CH}_4(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow \text{CO}_2(\text{g}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{g}) \quad \Delta H = -118 \text{ kcal/mol}$
9. ¿Cuántos moles de metano producen la misma energía que 1 mol de ^{14}C en su emisión β^- ?
Datos: $MA_{^{14}\text{C}} = 14.003242 \text{ u}$; $MA_{^{14}\text{N}} = 14.003074 \text{ u}$

5. Cinética de decaimiento

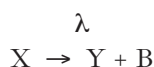
Pablo Cabral

¿Por qué ciertos radioisótopos, como el ^{238}U , existen en la naturaleza, en tanto que otros no y es necesario sintetizarlos?

La respuesta a esta pregunta está en darse cuenta de que los distintos núcleos sufren desintegración radiactiva a diferentes velocidades. Muchos radioisótopos se desintegran prácticamente por completo en cuestión de segundos o menos; es obvio que estos núcleos no se encuentran en la naturaleza. En cambio, el ^{238}U se desintegra con gran lentitud y más allá de su inestabilidad puede ser encontrado en la naturaleza. Una característica importante de un radionucleido es su velocidad de desintegración radiactiva.

La desintegración radiactiva es un proceso de primer orden. Las reacciones de primer orden son aquellas cuyas velocidades son directamente proporcionales a la concentración de un solo reactivo.

Para un proceso general de desintegración del radionucleido X con una velocidad de decaimiento definida por la constante cinética λ :



La variación de átomos de A con el tiempo estará dada por:

$$\frac{-dN_A}{dt} = \lambda N_A \quad (\text{ecuación 1})$$

integrando:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (\text{ecuación 2})$$

Si la variación de átomos de X con el tiempo se expresa como radiactividad (actividad, A) la primera igualdad será:

$$\frac{-dN_A}{dt} = A \quad (\text{ecuación 3})$$

Igualando ecuación 1 y **ecuación 3** resulta que:

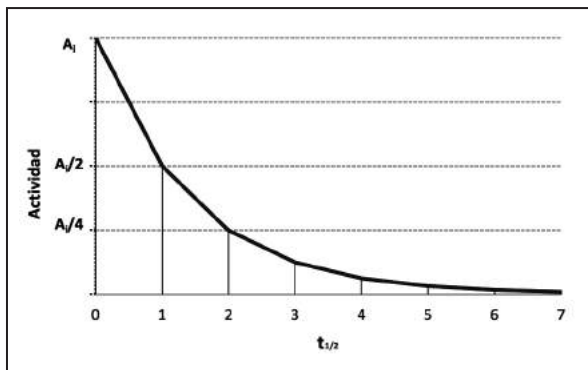
$$\lambda N_A = A$$

así que, multiplicando la **ecuación 2** por λ resulta la igualdad:

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (\text{ecuación 4})$$

Entonces la actividad (A) de una muestra se define como la cantidad de átomos desintegrados por unidad de tiempo. Esta es una medida de la cantidad de sustancia en cada instante y tradicionalmente se midió en desintegraciones por segundo (dps) o becquerel (Bq), pero actualmente el sistema métrico internacional propone el uso del curie (Ci), siendo 1 Ci equivalente a 3.7×10^{10} Bq.

Gráficamente esto se puede visualizar, en su forma normal o logarítmica, de la siguiente forma:



De la ecuación 4 pueden ser definidas dos constantes propias de cada radionucleido:

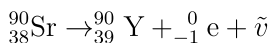
- Por un lado, la constante de decaimiento, λ : puede ser definida como la probabilidad de que un átomo se desintegre por unidad de tiempo. Esta constante se mide en unidades de inversa de tiempo, s^{-1} , h^{-1} , d^{-1} , a^{-1} .

- Por otro lado, el período de semidesintegración o vida media, $t_{1/2}$: es el tiempo en el cual la actividad de la muestra o el número de átomos de esta disminuye a la mitad. Las unidades del período de semidesintegración son unidades de tiempo, s, h, d, a.

Trabajando con la ecuación 4 se puede deducir que:

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

Cada radionucleido posee su propio período de semidesintegración que lo caracteriza. Por ejemplo, el $t_{1/2}$ del ^{90}Sr es de 29 años desintegrándose a ^{90}Y , como se muestra a continuación:



Se observan $t_{1/2}$ muy cortos, de millonésimas de segundo, y otros muy largos, del orden de miles de millones de años. En la tabla 5 se indican los $t_{1/2}$ de algunos radionucleidos.

	Isótopo	Vida media (años)	Emisión
Radionucleidos naturales	^{238}U	4.5×10^9	α
	^{235}U	7.1×10^8	α
	^{232}Th	1.4×10^{10}	α
	^{40}K	1.3×10^9	
	^{14}C	5730	β^-
Radionucleidos sintéticos	^{239}Pu	24000	α
	^{137}Cs	30	β^-
	^{90}Sr	28.8	β^-
	^{131}I	0.022	β^-

Tabla 5. Vida media y tipo de desintegración de varios radioisótopos

Una característica importante de los $t_{1/2}$ de desintegración nuclear es que no son afectadas por condiciones externas como temperatura, presión o especie química. Por consiguiente, y a diferencia de las sustancias químicas tóxicas, los átomos radiactivos no se pueden hacer inocuos a través de reacciones químicas o de cualquier otro tratamiento práctico. En este punto, no se puede hacer otra cosa que dejar que estos núcleos pierdan radiactividad al ritmo característico de cada uno. Mientras tanto, por supuesto, se deben tomar precauciones para aislar los radionucleidos por el daño que puede causar la radiación.

5.1. Ejercicios

- Un volumen de 1 mL que contiene $^{99\text{m}}\text{Tc}$ presenta una actividad de 1×10^8 Bq a las 10 h del día de hoy. ¿Qué actividad presentará dicha disolución luego de 2 horas? Expréselo en Bq y mCi. Dato: $t_{1/2}$, $^{99\text{m}}\text{Tc} = 6$ horas.
- La actividad de un radionucleido se reduce al cabo de 12 h al 25% de su valor inicial. ¿Cuál es el valor de su período de semidesintegración ($t_{1/2}$)?
- El cuerpo humano contiene 18% de carbono del cual el $1.58 \times 10^{-10}\%$ es ^{14}C
 - ¿Qué masa de ^{14}C existe en una persona que pesa 88 kg?
 - ¿Cuál es la actividad (en dpm) que produce el ^{14}C contenido en esa persona?
Datos: $t_{1/2, ^{14}\text{C}} = 5568$ años, $MA ^{14}\text{C} = 14.003242$ u
- ¿Cuántas partículas alfa emite en un segundo 1 miligramo de californio 252 (^{252}Cf) cuyo $t_{1/2}$ es 2645 años?
- Una muestra de ^{230}Th de 0.1 mg tiene 4.3×10^6 dpm.
 - ¿Cuál es el $t_{1/2}$?
 - El ^{230}Th se produce por decaimiento alfa a partir del ^{234}U . ¿Cuántos Ci de ^{234}U se necesitan para producir 0.1 mg de ^{230}Th ?
Dato: $(t_{1/2, ^{234}\text{U}}) = 2.45 \times 10^5$ años

6. Tabla de radionucleidos

Mirel Cabrera

La tabla de radionucleidos propuesta inicialmente por E. Segré representa todos los nucleidos naturales y radiactivos, naturales y artificiales, ordenados en un plano (x,y) por número atómico Z en las ordenadas y por número de neutrones N en las abscisas. En la tabla están representados todos los nucleidos conocidos experimentalmente en un cuadro que contiene:

1. El símbolo del elemento y el número másico A.
2. El período de semidesintegración, cuando corresponde. En los nucleidos estables no hay indicación del período, tampoco en los inestables que no son conocidos, solo postulados como producto de una reacción o con período muy corto.
3. Las principales emisiones producidas por desintegración, en caso de ser inestable.
4. Los estados metaestables, solamente de las transiciones isoméricas, o sea los estados metaestables que se desintegran al estado fundamental del mismo nucleido y los que se desintegran por emisión α o β con períodos mayores de 1 segundo. Este ordenamiento significa que:
 - Los nucleidos de igual número atómico (isótopos del mismo elemento) se ordenan en la misma horizontal. De ellos los más livianos (menor número de neutrones) están más cerca del origen y los más pesados se van ubicando hacia la derecha.
 - Los nucleidos que tengan el mismo número de nucleones (isóbaros) $[N+Z]$ están ordenados en una diagonal. Ej.: ${}_{26}^{58}\text{Fe}$, ${}_{28}^{58}\text{Ni}$
 - Los nucleidos que tengan el mismo número de neutrones (isótonos) se orientan en una vertical. Ej.: ${}_{7}^{14}\text{N}$, ${}_{6}^{13}\text{C}$

6.1. Tipos de desintegración: colores y símbolos

Los tamaños de las áreas coloreadas representan las probabilidades de los diferentes tipos de desintegración y los símbolos de los distintos modos de decaimiento son anotados en probabilidad decreciente.

En primer lugar se anotan las partículas emitidas en orden de probabilidad decreciente, seguido por los fotones y los electrones de conversión. Las transiciones isoméricas se anotan en orden de probabilidad relativa. La emisión de partículas β y la fisión retardada a la emisión β sigue a la emisión de fotones según su abundancia relativa.

Para cada tipo de radiación las energías de sus emisiones están dadas en orden decreciente de probabilidad relativa de emisión. Los puntos suspensivos indican otras transiciones con poca energía o con poca probabilidad.

Las energías de los fotones están dadas en keV y la de las partículas en MeV. Un símbolo de radiación sin valor de energía corresponde a una transición comprobada, pero no determinada cuantitativamente.

El código de colores aquí descrito es tomado con base en tablas de radionucleidos usuales (tabla 6 y 7). Se recomienda consultar el cuadro de referencias proporcionado por la tabla que usted utilice.

Color	Significado
Negro	Nucleido estable
Celeste	Emisión β
Naranja o rosado	Emisión β^+ o CE
Amarillo	Emisión α
Verde	Fisión espontánea
Blanco	Emisión $\gamma^{(a)}$

Tabla 6. Colores utilizados más comúnmente en una tabla de radionucleidos. ^(a) Aquí aparece inserto un pequeño cuadro donde se indica «I γ » que es la energía γ de la transición isomérica

Símbolo	Significado
t	Emisión de fotones
e-	Proceso de conversión
p	Emisión de protones
2p	Emisión simultánea de dos protones
n	Emisión de neutrones
2 α	Emisión de dos partículas α simultáneamente
$\beta_p; \beta_n$	Desintegración β seguida por una emisión de partículas especificadas o seguida de fisión espontánea
2 β	Emisión simultánea de dos partículas β
ϵ	Emisión por captura electrónica(a)

Tabla 7. (a) Se indica solamente cuando la probabilidad es superior a la de emisión de positrones

6.2. Otras especificaciones

Algunas tablas pueden contener información detallada respecto a los tipos de decaimiento y reacciones nucleares, como se detalla en la tabla 8.

Información	Significado
β^- 2.7... β^- 1.2; 1.9...	Para las transiciones β se informa el valor de máxima energía de la transición más probable. Si hubiera otras con energías más altas se pondrán a continuación como segundo dato.
β^- ...	Puntos suspensivos a continuación del símbolo de radiación indican que se trata de transiciones conocidas o identificadas, pero cuyas intensidades totales son inferiores al 1%.
α 3.75; 4.4... p 1.56 β p 4.5	Energía de las partículas; se indican en orden de probabilidad de emisión decreciente, incluso cuando su probabilidad de emisión sea inferior a 1%.
τ 815; 1711 τ (867)	Energía de los fotones; se indican en orden decreciente de probabilidad de emisión. Para intensidades menores al 1% las energías se ponen entre paréntesis.
τ 985-1325	Emisión de varios fotones de energías comprendidas entre 985 y 1325 KeV cuyas probabilidades de emisión se desconocen. Para intensidades menores al 1% las energías se ponen entre paréntesis.
e-	Electrones de conversión; se indican solamente cuando son más frecuentes que la emisión de fotones. No se indican energías.
p; 2p; n; 2 α	Para la emisión directa de partículas no se indican energías.

Tabla 8. Algunos símbolos que se pueden encontrar en las tablas de radionucleidos

Todas las secciones eficaces están expresadas en barn (10^{-24} cm²) y se refiere a reacciones con neutrones térmicos (0.0253 eV); ver apartado 8.

- σ Sección eficaz de la reacción (n, τ). Cuando se indican dos valores, el primero se refiere al estado metaestable y el segundo al fundamental.
- σ_f Sección eficaz de fisión.
- $\sigma_{n,p}$ Sección eficaz de la reacción (n,p).
- $\sigma_{n,\alpha}$ Sección eficaz de la reacción (n, α).
- σ_{Abs} Sección eficaz de la absorción.

Otras consideraciones son:

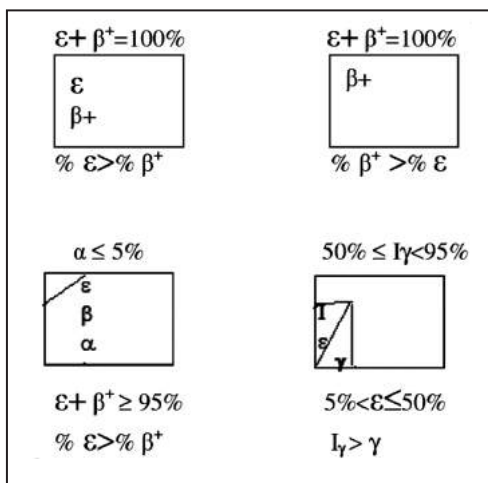
Generalmente, los nucleidos con capas completas de neutrones o protones están recuadrados con trazo más pronunciado.

Las letras «m» y/o «g» indican que se forma el estado metaestable y/o fundamental del radionucleido hijo. Los símbolos se dan en orden de probabilidad decreciente. Probabilidades inferiores al 5% no se indican.

Las unidades de tiempo se simbolizan: ns (nanosegundo), μ s (microsegundo), ms (milisegundo), s (segundo), m (minuto), h (hora), d (día), a (año).

La probabilidad de decaimiento por diferentes tipos de desintegración está indicada por los tamaños de las áreas coloreadas.

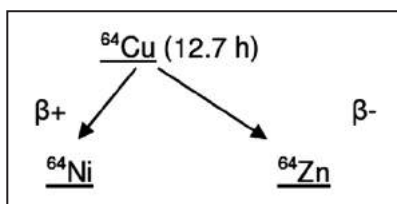
Los símbolos de las partículas emitidas son anotados siguiendo un orden de probabilidad decreciente.



6.3. Esquema de decaimiento

Es la representación de la desintegración de un radionucleido en un sistema de coordenadas. En el eje de abscisas se indica el número atómico, en forma creciente desde izquierda a derecha. En el eje de ordenadas se representa la energía del proceso, la cual aumenta en dirección ascendente.

Las flechas indican el tipo de emisión (tipo de partícula emitida). En el caso de que se trate de un decaimiento gamma las flechas son verticales indicando la energía de los fotones. Las desintegraciones beta y captura electrónica se indican con una flecha oblicua en dirección al núcleo hijo, siendo la energía correspondiente a la energía máxima de las partículas. Como la energía se conserva, y las partículas emitidas poseen energía, los núcleos hijos deben dibujarse en un nivel energético inferior al radionucleido padre, por tanto el esquema se dibuja en dirección descendente. Ejemplo:



6.4. ¡A jugar!

Te invitamos a que participes en el juego *Nucleogénesis!*¹. Solo se necesitan dos participantes, conocer sobre la tabla de radionucleidos y ¡espíritu competitivo!

6.5. Ejercicios

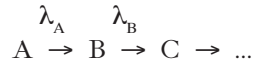
1. Determine el Z y el A de cada uno de los eslabones de la serie siguiente: ^{232}Th , sabiendo que las partículas emitidas en su orden respectivo son: α , β^- , β^- , α , α , α , β^- , α , β^- , α . Reconocer en la tabla los radionucleidos correspondientes.
2. Mirando una tabla de radionucleidos:
 - a. Indique la energía máxima de emisión del decaimiento de ^{32}P a ^{32}S .
 - b. Indique la energía de los antineutrinos correspondientes a la emisión β^- de máxima probabilidad.
3. ¿Cuáles son los procesos de desintegración de ^{40}K que conducen a la formación de ^{40}Ca y ^{40}Ar ?
4. Teniendo en cuenta que asociado a la formación del ^{40}Ar a partir de ^{40}K existe un rayo γ de 1.46 MeV, mientras que no aparece ninguno en la formación del ^{40}Ca , construya un esquema de decaimiento donde se indiquen las relaciones entre los tres nucleidos y los niveles excitados de energía que pueden existir.

1 <http://people.brandeis.edu/~herzfeld/games/Nucleo_sp.html>

7. Equilibrio radiactivo

Pablo Cabral-Victoria Calzada

Si el producto de un decaimiento radiactivo es, a su vez, otra especie radiactiva, ¿cómo evolucionaría a lo largo del tiempo el número de núcleos hijos? ¿Y su actividad? En otras palabras, si tenemos la cadena o serie radiactiva siguiente:



El núcleo progenitor decae de acuerdo con las ecuaciones de desintegración radiactiva:

$$A = -\frac{dN_1}{dt} = \lambda_A N_1$$

$$N_1 = N_1^0 e^{-\lambda_A t} \rightarrow A_1 = \lambda_A N_1^0 e^{-\lambda_A t}$$

La cantidad de núcleos hijos se determina mediante dos procesos: (i) la desintegración radiactiva y (ii) la acumulación radiactiva por la desintegración del núcleo progenitor, respectivamente.

Por otro lado, la actividad del nucleido hijo estará dada por la ecuación:

$$\frac{dN_2}{dt} = -\lambda_B N_2 + \lambda_A N_1$$

Resolviendo la ecuación y aplicando la condición inicial de que la actividad es cero en el tiempo inicial ($N_{2,0} = 0$):

$$A_2 = \lambda_B N_2 = \frac{\lambda_B}{\lambda_B - \lambda_A} A_1^0 (e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t})$$

(ecuación 5)

El último término representa la desintegración del total de núcleos hijos presentes en el tiempo $t = 0$. De aquí se deduce que el cociente entre λ_A y λ_B es el factor dominante que determina la evolución de la actividad del núcleo hijo en función del tiempo. A continuación se mencionan brevemente los tres casos posibles de este cociente.

7.1. Equilibrio secular

Este tipo de relación entre la actividad del núcleo progenitor y del hijo tiene lugar cuando el período de semidesintegración del núcleo progenitor es infinitamente más grande que el del núcleo hijo. Tal ejemplo sucede con las relaciones entre los isótopos de largo período del uranio y el torio, ^{238}U , ^{235}U y ^{232}Th , y sus productos de desintegración²:

2 Recordar que la constante de decaimiento, λ , tiene como unidades la inversa de tiempo (s⁻¹, h⁻¹, d⁻¹, a⁻¹), así que a mayor período de semidesintegración menor λ .

$$\lambda_A \ll \lambda_B$$

Tomando esta aproximación la ecuación 5 se puede escribir como:

$$A_2 = A_1^0(1 - e^{-\lambda_B t})$$

Esta ecuación describe el incremento de la actividad del núcleo padre en función del tiempo, considerando que inicialmente $A_2 = 0$. Finalmente (para $t \rightarrow \infty$ con $\lambda, t \rightarrow \infty$) la actividad del núcleo hijo alcanza el valor $A_2 = A_1^0$

Prácticamente, existe la situación en que a partir de una muestra que contiene un radionucleido de período largo, aumenta la actividad de un núcleo hijo con un período corto y esta propiedad es la que se utiliza para medir la presencia del progenitor. Este sería el caso de la determinación de la actividad del ^{32}Si con período de semidesintegración de 140 años, el cual genera mediante una desintegración β^- de baja energía un núcleo de ^{32}P con un período de 14.3 días; es este último el que se determina.

7.2. Equilibrio transitorio

En este caso, el período del núcleo progenitor continúa siendo más grande que el del hijo aunque no infinitamente mayor:

$$\lambda_A < \lambda_B$$

Si se considera la condición de que la actividad del nucleido hijo es cero en el tiempo cero, el aumento del núcleo hijo en un tiempo suficiente como para que la actividad del núcleo descendiente sea mayor que la del precursor se llegará, como era de esperar, a un estado estacionario. Así, la actividad se puede expresar:

$$A_2 = \frac{\lambda_B}{\lambda_B - \lambda_A} A_1^0 e^{-\lambda_A t} = \frac{\lambda_B}{\lambda_B - \lambda_A} A_1$$

7.3. No equilibrio

En este caso el período radiactivo del núcleo hijo es mayor que el del padre:

$$\lambda_A > \lambda_B$$

Por lo que, después de un intervalo de tiempo suficientemente grande, solo quedará la actividad del núcleo hijo, ya que la actividad del progenitor desaparece a una velocidad superior:

$$A_2 = \frac{\lambda_B}{\lambda_B - \lambda_A} A_1^0 e^{-\lambda_B t}$$

Después de un período t_{\max} la actividad del núcleo hijo alcanza un valor máximo para³:

$$\frac{dA_2}{dt} = 0 = \frac{-\lambda_A \lambda_B}{\lambda_B - \lambda_A} A_1^0 e^{-\lambda_A t_{\max}} + \frac{\lambda_B^2}{\lambda_B - \lambda_A} A_1^0 e^{-\lambda_B t_{\max}}$$

o

$$\lambda_A e^{-\lambda_A t_{\max}} = \lambda_B e^{-\lambda_B t_{\max}}$$

Por lo tanto, la actividad máxima del núcleo hijo se alcanza para el tiempo:

$$t_{\max} = \frac{1}{\lambda_B - \lambda_A} \ln \frac{\lambda_B}{\lambda_A}$$

7.4. Generadores

Debido a la gran necesidad del uso de radionucleidos de corto período de semidesintegración, especialmente en la Medicina Nuclear, se han buscado numerosas alternativas para adquirirlos en tiempo y forma. El traslado desde el centro de producción hasta la clínica es un factor limitante cuando trabajamos con este tipo de radionucleidos. En este sentido se han diseñado numerosas estrategias. Una de ellas se basa en la relación entre pares de radionucleidos que cumplen con ciertas características.

Un generador es un dispositivo que permite la separación de dos radionucleidos en equilibrio radiactivo. El radionucleido «padre» debe decaer al radionucleido «hijo» de manera que este último sea separado de todo el sistema en un tiempo breve y preferiblemente puro. Esta separación debe darse de forma simple y efectiva.

El generador de tipo cromatográfico es el más utilizado actualmente, sistema en el cual se adsorbe sobre un lecho un radionucleido de $t_{1/2}$ largo (padre) y por decaimiento genera otro radionucleido de período de semidesintegración menor (hijo), el cual puede separarse de su padre por diferencia de afinidad al adsorbente, frente a una disolución eluyente adecuada.

Las propiedades químicas del padre deben ser diferentes de las del hijo de modo que puedan ser separados fácilmente.

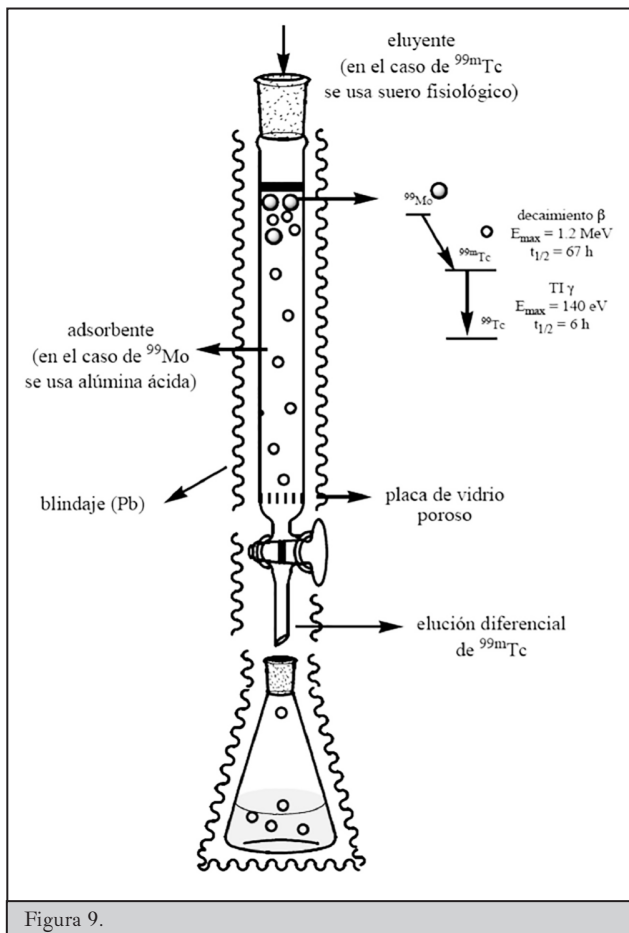
Están diseñados con columnas de vidrio o plástico, con una placa porosa o filtro en su base para retener el lecho de la columna, la cual puede estar rellena de diferentes materiales, en el cual el radionucleido padre es adsorbido diferencialmente. El generador debe ser estéril y apirógeno cuando se quiera utilizar el eluido con fines biomédicos. Por ese motivo se debe poder esterilizar por autoclave la columna, o prepararlo a partir de materiales estériles en condiciones asépticas. A veces se le agregan materiales bacteriostáticos, o se pone un filtro esterilizante a la salida de la columna.

Debe estar correctamente blindado para evitar la exposición a las radiaciones durante el transporte y manipulación; debe ser simple y rápido de usar para minimizar la exposición del operador. Tiene que poseer un alto rendimiento de elución que permita una buena separación química del par padre-hijo. El eluato debe estar libre del padre.

El radionucleido padre debe poseer baja radiotoxicidad por ser un posible radiocontaminante. El radionucleido hijo debe poseer corto período de semidesintegración y emisión gamma pura de energía adecuada si se utilizará en Medicina Nuclear.

3 Resultado de derivar la ecuación 5.

En la tabla periódica existen unos sesenta y cinco pares de radionucleidos en equilibrio radiactivo, de los cuales veintiséis pueden considerarse como transitorios. Solo unos pocos son de interés potencial en Medicina Nuclear.



Par	t1/2 padre	t1/2 hijo	Tipo de decaimiento (hijo)
$^{99}\text{Mo} - ^{99m}\text{Tc}$	66 h	6 h	TI
$^{188}\text{W} - ^{188}\text{Re}$	69.4 d	17.0 h	β^- , TI (15%)
$^{90}\text{Sr} - ^{90}\text{Y}$	29 a	64 h	β^-
$^{68}\text{Ge} - ^{68}\text{Ga}$	271 d	68 min	β^+

Tabla 9. Pares de radionucleidos utilizados para generadores.

Actualmente uno de los usos más extendido es el par $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$. El mayor evento en la Medicina Nuclear fue la introducción del $^{99\text{m}}\text{Tc}$, el cual permitió no solo visualizar estructuras anatómicas internas, sino también realizar estudios dinámicos. Por ese motivo, el poder disponer de un generador de $^{99\text{m}}\text{Tc}$ en clínica fue sin duda un hito importante en la historia de esta disciplina.

7.5. Ejercicios

1. Calcule el número de átomos de ^{68}Ga generados a partir de 100 mCi de ^{68}Ge en un período de 2 h. Datos: $t_{1/2, 68\text{Ge}} = 270.82$ d; tener en cuenta que el ^{68}Ga decae a ^{68}Zn con un $t_{1/2, 68\text{Ga}} = 67.63$ min.
2. Calcule la actividad de $^{113\text{m}}\text{In}$ en equilibrio con 100 μCi de ^{113}Sn . Datos: $t_{1/2, 113\text{Sn}} = 115.1$ d; tener en cuenta que el $^{113\text{m}}\text{In}$ decae a ^{113}In con un $t_{1/2, 113\text{mIn}} = 99.49$ min.
3. Calcule la actividad de $^{99\text{m}}\text{Tc}$ en equilibrio con 100 μCi de ^{99}Mo . Datos: $t_{1/2, 99\text{Mo}} = 66$ h; tener en cuenta que el $^{99\text{m}}\text{Tc}$ decae a ^{99}Tc con un $t_{1/2, 99\text{mTc}} = 6$ h.
4. Calcule la actividad de $^{99\text{m}}\text{Tc}$ generada por 100 mCi de ^{99}Mo , cuando han transcurrido 5 períodos de semidesintegración del hijo.
5. Calcule la actividad de ^{188}Re generada por 100 mCi de ^{188}W para el tiempo igual al período de semidesintegración del hijo. Datos: $t_{1/2, 188\text{W}} = 69$ h; tener en cuenta que el ^{188}Re decae a ^{188}Os con un $t_{1/2, 188\text{Re}} = 16.98$ h.
6. Calcule el tiempo en el cual se obtendrá la máxima actividad de $^{99\text{m}}\text{Tc}$ a partir de ^{99}Mo .
7. Partiendo del par $^{87}\text{Y}/^{87\text{m}}\text{Sr}$:
 - a. Calcular la actividad del $^{87\text{m}}\text{Sr}$ generada sabiendo que la actividad del ^{87}Y era de 65 mCi 3 días atrás, a la hora 12:00 a.m., y que en el día de hoy, a la hora 7:00 a.m., se separan estando en equilibrio, y a la hora 12:00 a.m. se vuelve a eluir. Datos: $t_{1/2, 87\text{Y}} = 80.3$ h; tener en cuenta que el $^{87\text{m}}\text{Sr}$ decae a ^{87}Sr con un $t_{1/2, 87\text{mSr}} = 2.8$ h.
 - b. Indique a qué hora después de la segunda elución se obtendrá la actividad máxima de $^{87\text{m}}\text{Sr}$.
8. ¿Cuántos mCi de $^{99\text{m}}\text{Tc}$ se espera eluir de un generador a la hora 12:00 a.m. del viernes, si se hizo una elución previa el miércoles a la hora 8:00 a.m. con un rendimiento del 100%? Dato: La actividad del ^{99}Mo era de 200 mCi, el viernes a la hora 16:00 p.m. ($fd^4 = 0.875$).
9. Se tiene un generador de $^{111}\text{Ag}/^{111\text{m}}\text{Cd}$ calibrado en 15 mCi de ^{111}Ag , el 20 de marzo a la hora 8:00 a.m. Ese mismo día se eluye el generador 2 veces, primero a la hora 20:00 y después a la hora 21:00. De la primera elución se obtienen 300 μCi de $^{111\text{m}}\text{Cd}$. En la segunda elución se obtuvo un volumen de 5 mL. El rendimiento de ambas eluciones es el mismo. Datos: $t_{1/2, 111\text{Ag}} = 745$ d; tener en cuenta que el $^{111\text{m}}\text{Cd}$ decae a ^{111}Cd con un $t_{1/2, 111\text{mCd}} = 49$ min. $fd = 0.07$.
 - a. Calcule el rendimiento de la elución.
 - b. Calcule la concentración de actividad de $^{111\text{m}}\text{Cd}$ obtenida de la segunda elución.

4 fd : factor de decaimiento, se corresponde al % de un tipo de decaimiento.

8. Reacciones nucleares

Victoria Calzada

Una reacción nuclear consiste en una colisión entre dos núcleos atómicos, el cual producirá un cambio en la composición nuclear y en el estado energético de al menos uno de ellos. Asimismo, la colisión puede darse entre un núcleo y una partícula subatómica.

Teniendo en cuenta que las reacciones nucleares implican un cambio extrínseco, este término no es utilizado cuando nos referimos al decaimiento radiactivo y solamente se utiliza en reacciones inducidas externamente.

Una reacción nuclear puede representarse a través de la siguiente ecuación:



donde el proyectil puede ser, como se mencionó anteriormente, otro nucleido o una partícula subatómica. Esto mismo es comúnmente abreviado de la siguiente manera:

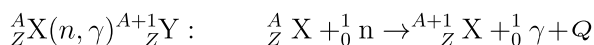


Si bien una reacción nuclear puede causar la transformación de un nucleido en otro, no necesariamente siempre ocurre. Ello depende de varios factores entre los cuales se encuentran la energía del proyectil, el flujo de partículas y la sección eficaz, definidas más adelante.

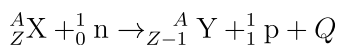
En todos los casos, para que una reacción nuclear sea posible los reactantes deben aproximarse lo suficiente para vencer las interacciones fuertes de corto rango y la repulsión electrostática. Por ello, en muchos casos las partículas deben ser aceleradas a altas energías. Los neutrones, al ser partículas sin carga, son muy buenos candidatos para iniciar reacciones nucleares a bajas energías.

En términos energéticos una reacción nuclear puede ser exotérmica o endotérmica. En esta última, el proyectil deberá ser acelerado en el curso de la reacción. Por convención Q es positivo para reacciones exotérmicas y negativo en el caso contrario. La energía remanente en una reacción nuclear puede liberarse como energía cinética de las partículas resultantes o emisión de rayos gamma. Incluso en algunos casos pueden emitirse rayos X.

Las reacciones nucleares más comunes son del tipo (n,γ) . Estas utilizan neutrones de baja energía (térmicos) obteniéndose nucleidos del mismo elemento blanco (X) con $A+1$ respecto al inicial:



Para lograr una mejor separación de especies luego de la reacción, se utilizan también reacciones nucleares de tipo (n,p) , las cuales requieren de neutrones del orden de 2.5 MeV obteniéndose isóbaros (Y) del elemento blanco:



Tipo de reacción	Aplicación
(n,γ)	Mayormente utilizado en producción de radionucleidos
(n,p)	Producción de radionucleidos
(n,α)	Producción de radionucleidos
(p,p')	Estudios de física de partículas
(α,α')	Estudio de la estructura nuclear
(e,e')	Estudio de la estructura nuclear
(α,n)	Estudio de la estructura nuclear

Tabla 10. Algunos ejemplos de reacciones nucleares

Las reacciones nucleares pueden darse naturalmente y también son utilizadas artificialmente en los reactores nucleares y aceleradores de partículas, con diferentes fines. En la tabla 11 se muestran algunas de estas aplicaciones.

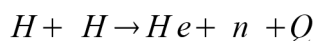
Área	Aplicación	Usos más frecuentes
Industria	Producción de energía eléctrica	El calentamiento del agua produce el funcionamiento de las turbinas de una central nuclear
Ingeniería	Propulsión nuclear	Propulsión de satélites artificiales, marítima, etc.
	Producción de hidrógeno	Producido por electrólisis a alta temperatura
	Producción de plutonio	Utilizado para la fabricación de combustible de otros reactores o de armamento nuclear
Medicina	Producción de radionucleidos	Producción de radioisótopos utilizados en Medicina Nuclear
Aplicaciones medioambientales	Análisis radioquímico	Determinación de contaminantes y datación
Aplicaciones agroalimentarias	Esterilización	Producción de nuevas especies, conservación de alimentos Eliminación de plagas de insectos
Investigación	Análisis radioquímicos	Análisis mediante activación neutrónica
	Astrofísica y cosmoquímica	Simulación de eventos cósmicos
Tecnología	Generación de radionucleidos artificiales	Producción de americio utilizado en detectores de humo

Tabla 11. Aplicaciones más comunes que implican el uso de reacciones nucleares

8.1 Fusión y fisión nuclear

Tanto la fisión como la fusión nuclear constituyen reacciones en donde la composición de los núcleos es alterada. Son procesos opuestos y muy diferentes.

La fusión nuclear, básicamente es la combinación de dos átomos de baja masa para formar uno de masa mayor. El caso más conocido de fusión nuclear se da en el sol, donde se liberan enormes cantidades de energía. Un ejemplo de una fusión entre deuterio (${}^2_1\text{H}$) y tritio ${}^3_1\text{H}$:



La fisión nuclear, por el contrario, consiste en la división de un núcleo en dos. Generalmente, tiene lugar cuando un isótopo pesado, es bombardeado por partículas de alta velocidad, generando los respectivos nucleidos, gran liberación de energía y la emisión de dos o tres neutrones.

8.2. Reacciones nucleares en cadena

Cuando hablamos de una reacción nuclear en cadena esto hace referencia a una reacción nuclear que es mantenida en el tiempo. Este concepto fue usado inicialmente en 1933 por Leó Szilárd. Si este tipo de reacciones no son controladas, el combustible nuclear es consumido en muy poco tiempo, provocando una explosión nuclear. Los reactores nucleares están diseñados con una infraestructura que hace a las reacciones nucleares autosostenibles de manera controlada.

8.2.1. Reactores nucleares

Un reactor nuclear es la instalación en donde se produce una reacción nuclear en cadena. Allí mismo se inicia, controla y mantiene dicha reacción con un fin particular. En 1942 Enrico Fermi diseñó el primer reactor nuclear.

A modo general, un reactor nuclear consta de los siguientes componentes (nos referiremos exclusivamente a reacciones de fisión nuclear):

Combustible. El combustible nuclear es un material con capacidad de fisionarse lo suficiente como para llegar a la masa crítica. La masa crítica corresponde a la cantidad necesaria de combustible como para mantener la reacción nuclear en cadena.

Las barras de combustible, situado en el núcleo del reactor, es el lugar donde está confinado el combustible. Consisten en rejillas soporte que se mantienen a la misma distancia las unas de las otras mediante tubos guía. De esta forma es posible la circulación del refrigerante. Generalmente este núcleo está ubicado dentro de una piscina con agua, a 10 metros de profundidad aproximadamente.

Lo más usual es la utilización de combustible sólido y depende del tipo de reactor, pero generalmente se utilizan derivados del uranio. El uranio es un elemento que se encuentra naturalmente bajo la forma de un mineral. El proceso de extracción buscará aumentar los contenidos de uranio, por lo que se somete a sucesivos tratamientos en disoluciones y precipitaciones hasta obtener hexafluoruro de uranio lo suficientemente puro. Sin embargo, la composición isotópica del uranio presente en la naturaleza es de 99.2% de ^{238}U , 0.7% de ^{235}U y 0.006% de ^{234}U . El proceso de enriquecimiento, utilizado en muchos casos, consiste en aumentar las cantidades relativas de ^{235}U por lo que se procede a realizar una separación isotópica, siendo este último un combustible mucho más efectivo. Finalmente, el combustible se somete a presión y altas temperaturas para transformarlo en pequeños cuerpos cerámicos de dióxido de uranio.

Elementos de control. En la mayoría de los reactores se usan haces de barras de control como medio rápido para controlar la reacción en cadena. Las barras de control están hechas de materiales absorbentes de neutrones (carburo de boro o aleaciones de plata, indio y cadmio) lo cual permite detener las fisiones nucleares en cadena. Subiendo o bajando los haces de barras de control aumenta o disminuye la reactividad del núcleo.

Normalmente, un reactor nuclear posee los haces de barras de control total o parcialmente extraídas del núcleo y pueden sumergirse en pocos segundos en el núcleo para frenar la reacción en cadena.

Moderador. Tras una reacción de fisión se obtienen neutrones con gran energía cinética. Para mantener la reacción en cadena se intenta reducir su velocidad utilizando un moderador. Los moderadores más utilizados son el agua ligera, agua pesada o grafito. En función de ello es que se diferencian los reactores térmicos de los rápidos. Los reactores térmicos funcionan retrasando o moderando los neutrones (neutrones lentos).

Refrigerante. La función del refrigerante es absorber el calor desprendido de las reacciones nucleares y transportarlo fuera del núcleo del reactor. Debe tener una gran capacidad calorífica, no debe absorber neutrones y debe ser anticorrosivo. En general se usan gases como el dióxido de carbono y helio, o líquidos como agua ligera o agua pesada. Algunos reactores pueden disipar el calor producido de las fisiones, otros en cambio lo utilizan para producción de energía eléctrica.

Reflector. Para evitar el escape de neutrones y por lo tanto lograr la eficiencia de una reacción nuclear en cadena se hace uso de un medio reflector. Este está dispuesto alrededor del núcleo del reactor y debe tener una baja sección eficaz de captura para no reducir el número de neutrones y que se refleje el mayor número posible de ellos. El tipo de reflector varía según el tipo de reactor siendo muchas veces moderador como agua, agua pesada o grafito.

Sistemas de seguridad y contención. Los reactores nucleares constan de múltiples sistemas de seguridad y contención, y están diseñados para prevenir posibles fugas de materiales radiactivos al exterior así como el escape de radiación, resistir fuertes impactos internos o externos y soportar grandes variaciones de presión y temperatura.

Una serie de múltiples barreras lo constituyen los elementos que portan el combustible, las barras de combustible, la estructura del núcleo del reactor y el edificio de contención el cual está hecho de hormigón de alta densidad con al menos 90 cm de espesor en sus paredes.

Igualmente los reactores nucleares deben estar situados en zonas cercanas al agua, para refrigerar el circuito.

Radionucleido	Uso	Reacción nuclear
^{60}Co	Es utilizado como fuente de radioterapia para el tratamiento de cáncer. También es usado en radiografía industrial y para esterilización.	$^{59}\text{Co} (n, \gamma)^{60}\text{Co}$
^{99}Mo	Permite obtener $^{99\text{m}}\text{Tc}$ a través de un generador $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ el cual es usado para diagnóstico por gammagrafía.	$^{98}\text{Mo}(n, \gamma)^{99}\text{Mo}$
^{177}Lu	Actualmente utilizado para terapia de cáncer.	$^{176}\text{Lu}(n, \gamma)^{177}\text{Lu}$
^{125}I	Utilizado para radioinmunoanálisis y braquiterapia, entre otros.	$^{124}\text{Xe}(n, \gamma)^{125\text{m}}\text{Xe} \rightarrow ^{125}\text{I}$
^{239}Pu	Usado como combustible nuclear.	$^{238}\text{U}(n, \gamma)^{239}\text{U} \rightarrow ^{239}\text{Np} \rightarrow ^{239}\text{Pu}$

Tabla 12. Nucleidos radiactivos artificiales más utilizados, producidos mediante reactor nuclear

8.2.1.1. Tipos de reactores nucleares

Los reactores nucleares pueden clasificarse con base en diferentes criterios más allá de su aplicación. Pueden distinguirse según el tipo de reacción nuclear ya sea fisión o fusión, aunque actualmente los reactores de fusión son experimentales.

Asimismo, los reactores nucleares se clasifican según el tipo de combustible utilizado o según la velocidad de los neutrones producidos. En cuanto al combustible se distinguen los reactores que utilizan uranio natural y los reactores nucleares de uranio enriquecido en donde la proporción de uranio-235 es superior a la encontrada en la naturaleza. Los reactores rápidos y los reactores térmicos se diferencian según la velocidad de los neutrones producidos en las reacciones nucleares, neutrones rápidos o térmicos respectivamente.

Según su funcionamiento, los reactores nucleares más comunes son el reactor de agua en ebullición (BWR) y el reactor de agua a presión (PWR).

Finalmente, según sus aplicaciones, los reactores nucleares se diferencian entre reactores nucleares de investigación y los reactores de potencia. Estos últimos aprovechan el calor generado en la fisión para producir energía.

8.3. Ciclotrones

Si bien existen varios tipos de aceleradores de partículas el ciclotrón es uno de los más utilizados. Corresponde a los llamados aceleradores circulares los cuales fueron desarrollados en 1930 por Lawrence y Livingston luego de los aceleradores lineales.

Básicamente un ciclotrón consiste en la acción de campos eléctricos y magnéticos sobre partículas cargadas que incidirán sobre un blanco particular.

Su estructura principal es la cámara de aceleración que alberga dos electrodos huecos semicirculares llamados des a alto vacío. La fuente de iones se sitúa en la parte central de las des emitiendo un haz de partículas. Estas describen trayectorias en forma de espiral producidas por el efecto combinado de un sistema de radiofrecuencia que genera un campo eléctrico alternante entre las des que las acelera y un campo magnético perpendicular que delimita su trayectoria.

Las partículas aceleradas se hacen chocar con los blancos, en los que tienen lugar reacciones nucleares.

Radionucleido	Emisión	t1/2	Principales aplicaciones clínicas
¹⁵ O	β+	122.2 s	H ₂ ¹⁵ O: Diagnóstico de patologías cardíacas
¹⁸ F	β+	109.8 m	¹⁸ FDG: Diagnóstico de cáncer
¹¹ C	β+	20.3 m	L-[methyl- ¹¹ C]metionina: Diagnóstico de cáncer
¹²³ I	β+	13.2 h	¹²³ I-MIBG: Diagnóstico de patologías cardíacas

Tabla 13. Algunos radionucleidos producidos por ciclotrón

8.4. Producción de radionucleidos

Tanto los reactores nucleares como los ciclotrones permiten la producción de radionucleidos a gran escala.

Parte de los requerimientos fundamentales en la producción se basan en la demanda total. Sin embargo, la actividad específica (S) del producto es el paso limitante en la

mayoría de los casos. Esta se define como la actividad por unidad de masa de una muestra de radionucleido.

A veces hay que recurrir a algunos métodos para la obtención de actividades específicas mayores y depende de varios factores:

$$S = \frac{0.602 \cdot \theta \cdot \sigma \cdot \phi}{3.7 \times 10^7} (1 - e^{-\lambda t})$$

La sección eficaz (σ) se define como la medida de la probabilidad de que ocurra un evento de interacción entre el proyectil y el blanco y se mide en barns (b). La actividad específica también depende de la energía del proyectil (θ), así como del flujo de partículas (Φ).

A su vez, la elección del blanco restringe enormemente la producción. En su elección se trata de utilizar materiales blancos de fácil obtención y preferentemente en estado metálico o elemental, óxidos o carbonatos especialmente alcalinos o alcalinotérreos, o halógenos en forma de sal de potasio.

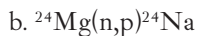
Asimismo los compuestos deben ser térmicamente estables y resistentes a los procesos de radiólisis y deben ser puros.

El material debe estar encapsulado o cubierto de algún modo que facilite su manipulación, disposición final, etc. En algunos casos los blancos deben ser enriquecidos con el nucleido de interés, lo cual eleva los costos.

Finalmente, los métodos de separación del radionucleido de interés y los controles de calidad deben estar adecuadamente diseñados y deben ser lo suficientemente rápidos y accesibles según su finalidad.

8.5. Ejercicios

1. Completar:
 - a. $^{18}\text{O}(\text{d},\text{p})$ _____;
 - b. _____ $(\text{p},\gamma)^{87}\text{Y}$;
 - c. $^{19}\text{F}(\text{___},\text{p})^{22}\text{Ne}$;
 - d. $^{122}\text{Te}(\text{___},\text{d})^{124}\text{I}$;
 - e. $^{23}\text{Na}(\text{n},\text{___})^{24}\text{Na}$.
2. Dados los siguientes radionucleidos, deduzca los pares (a,b) involucrados en las reacciones nucleares correspondientes:
 - a. $^{50}\text{Cr}(\text{a},\text{b})^{53}\text{Fe}$;
 - b. $^{58}\text{Ni}(\text{a},\text{b})^{57}\text{Co}$;
 - c. $^{70}\text{Ge}(\text{a},\text{b})^{69}\text{Ge}$;
 - d. $^{80}\text{Se}(\text{a},\text{b})^{78}\text{As}$;
 - e. $^{14}\text{N}(\text{a},\text{b})^{17}\text{O}$.
3. Si mediante una reacción del tipo (α,n) se obtiene el nucleido ^{63}Zn , el nucleido blanco es:
 - a. ^{63}Cu ;
 - b. ^{66}Ge ;
 - c. ^{60}Ni .
4. Se dispone de las facilidades para producir ^{24}Na :
 - a. $^{23}\text{Na}(\text{n},\gamma) \text{ } ^{24}\text{Na}$



Con base en los criterios de producción ¿cuál de ellas elegiría y por qué?

5. Mediante el método de reacciones nucleares con neutrones medios (n,p), el radionucleido producido es:
 - a. isóbaro del blanco;
 - b. isótopo del blanco;
 - c. isótono del blanco.
6. Mediante el método de reacciones nucleares con neutrones lentos (n,γ), el radionucleido producido es:
 - a. isóbaro del blanco;
 - b. isótopo del blanco;
 - c. isótono del blanco.
7. Para diseñar una irradiación, la fijación del tiempo de irradiación depende:
 - a. del valor del flujo de partículas de irradiación;
 - b. del valor de la sección eficaz;
 - c. del valor del período del radionucleido producido.

9. Interacción de la radiación con la materia

Marcos Tassano

La detección, caracterización y efectos de la radiación dependen casi en su totalidad de su interacción con la materia.

Desde el punto de vista de la ionización existen, a grandes rasgos, dos tipos de radiación ionizante: radiaciones de ionización directa y de ionización indirecta.

Los flujos de partículas cargadas como las partículas alfa, partículas beta, electrones son fenómenos de radiación ionizante directa. Las radiaciones ionizantes indirectas (neutrones, rayos gamma) son radiaciones de partículas o fotones que no tienen carga y durante la interacción con la materia puede transferir energía a las partículas cargadas, núcleos atómicos y electrones debido a la interacción electromagnética o nuclear.

9.1. Interacción alfa

Debido a que las partículas alfa son comparativamente pesadas y tienen carga, estas reaccionan fuertemente con la materia produciendo un gran número de iones por unidad de longitud en su camino. Como resultado de ello no son muy penetrantes. Por ejemplo, las partículas alfa de 5 MeV de energía solo se desplazarán en el aire 3.6 cm y no penetrarán una hoja de papel.

Las partículas alfa pueden interactuar tanto con el núcleo como con los electrones de los orbitales en cualquier medio absorbente tal como el aire, el agua, un tejido o un metal.

Una partícula alfa que pasa por las proximidades del núcleo puede ser desviada con ningún cambio de energía (dispersión de Rutherford), desviada con un pequeño cambio en la energía o absorbida por el núcleo, causando la transformación nuclear (este tipo de proceso es poco probable para partículas alfa).

Los procesos más probables que participan en la absorción de los núcleos de helio son: ionización y excitación de los electrones orbitales.

La ionización se produce siempre que la partícula alfa (cargada positivamente) esté lo suficientemente cerca de los electrones (cargados negativamente) para sacarlos de su órbita, debido a la interacción de cargas (ley de Coulomb). Cada vez que esto ocurre, la partícula alfa pierde energía cinética y por lo tanto reduce su velocidad.

Las partículas alfa también pierden energía cinética por excitación de electrones con interacciones que son insuficientes para causar la ionización. Como las partículas alfa se van frenando tienen tendencia a causar ionización a un ritmo creciente.

A medida que el núcleo de helio se acerca al final de su trayectoria, el pico de ionización llega a su máximo y se detiene, incorporando dos electrones y convirtiéndose en un átomo de helio.

9.2. Interacción beta

Las partículas beta pueden interactuar tanto con los electrones como con los núcleos en el medio a través del cual están viajando. Las partículas beta que pasan cerca del núcleo

serán desviadas por las fuerzas de Coulomb, produciéndose cambios en su energía cinética o ningún cambio (dispersión de Rutherford). Las interacciones de las partículas beta con electrones orbitales son las más importantes y con frecuencia dan lugar a la ionización.

En el proceso de ionización, las partículas beta pierden una cantidad de energía igual a la energía cinética de los electrones más la energía utilizada para liberarlos del átomo.

Una partícula beta puede producir de 50 a 150 pares de iones por centímetro de aire antes de que su energía cinética se disipe completamente. Se emiten rayos X característicos cuando las órbitas de los electrones internos vacantes se rellenan con otros electrones.

Las partículas beta también causan excitación de los electrones de los orbitales externos, que a su vez conducen a la emisión de fotones de rayos ultravioletas.

El destino final de una partícula beta depende de su carga. Una partícula beta con carga negativa, después de que su energía cinética se ha disipado, puede tanto combinarse con un ion de carga positiva como convertirse en un *electrón libre*.

Los positrones, sin embargo, tienen un destino diferente. A pesar del hecho de que disipan su energía cinética al igual que las partículas beta a través de ionización y excitación, no pueden existir en reposo en la vecindad con otros electrones. Cuando un positrón ha reducido su energía cinética lo suficiente, será atraído por la carga opuesta de un electrón. Cuando el electrón y el positrón colisionan, ambos son aniquilados y una cantidad de energía igual a la suma de las masas de las partículas se libera en forma de dos fotones. Estos fotones se conocen como *radiación de aniquilación*. Ambos fotones de aniquilación transportan energía de 0.512 MeV, que es equivalente a la masa en reposo del electrón o el positrón. Debido a este fenómeno, los fotones de 0.512 MeV proporcionan un medio conveniente para la medición de los radionucleidos emisores de positrones.

Al igual que las partículas alfa, las partículas beta tienen una distancia de viaje característica a través de la materia que depende de su energía cinética inicial. Por ejemplo, partículas beta de 2 MeV de energía viajarán hasta 9 m en el aire y aproximadamente 10 mm en agua.

9.3. Interacción γ y X

La interacción de los fotones con la materia implica varios procesos distintos. La importancia relativa y la eficiencia de cada proceso es fuertemente dependiente de la energía de los fotones y de la densidad y el número atómico del medio absorbente. Se considerará en general los casos de atenuación de fotones y se discutirán algunos de los procesos importantes por separado.

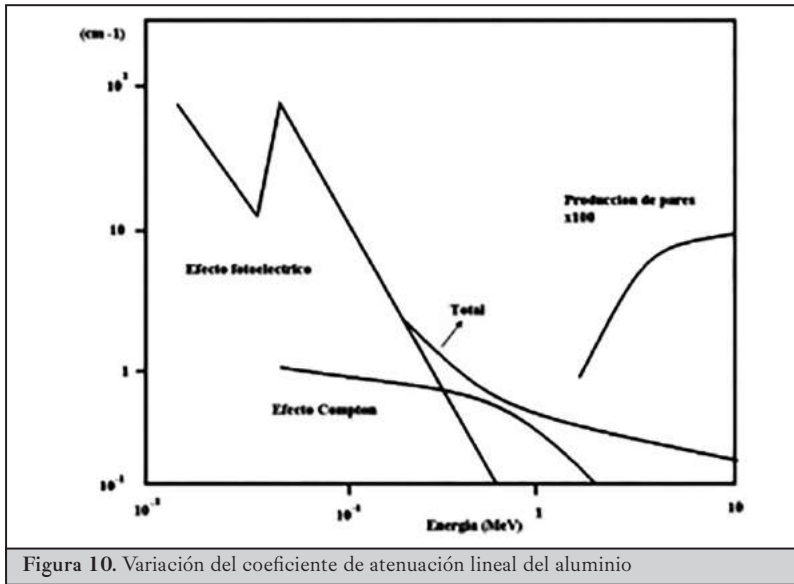


Figura 10. Variación del coeficiente de atenuación lineal del aluminio

Dispersión de Rayleigh. Cuando un fotón interactúa con un átomo puede o no puede impartirle energía. El fotón puede ser desviado sin transferencia de energía. Este proceso se conoce como dispersión de Rayleigh y es muy probable para fotones de muy baja energía.

Efecto fotoeléctrico. El destino más probable de un fotón que tiene la energía ligeramente más alta que la energía de enlace de los electrones atómicos es la absorción fotoeléctrica. En este proceso el fotón transfiere la totalidad de su energía a los electrones y su propia existencia termina. El electrón escapará de su órbita con una energía cinética igual a la diferencia entre la energía del fotón y su propia energía de enlace.

La absorción fotoeléctrica es muy probable para los fotones por debajo de 0.1 MeV si el medio de absorción es agua o tejido biológico. Sin embargo, en materiales de alto Z (número de masa atómica), como el plomo, este proceso es relativamente importante para los fotones de hasta aproximadamente 1 MeV.

Al igual que la ionización producida por cualquier proceso, se genera radiación secundaria, en este caso, por los fotoelectrones que pueden tener energía suficiente para producir adicionales ionizaciones y excitaciones de electrones orbitales. Además, el llenado de los orbitales vacantes resulta en rayos X característicos.

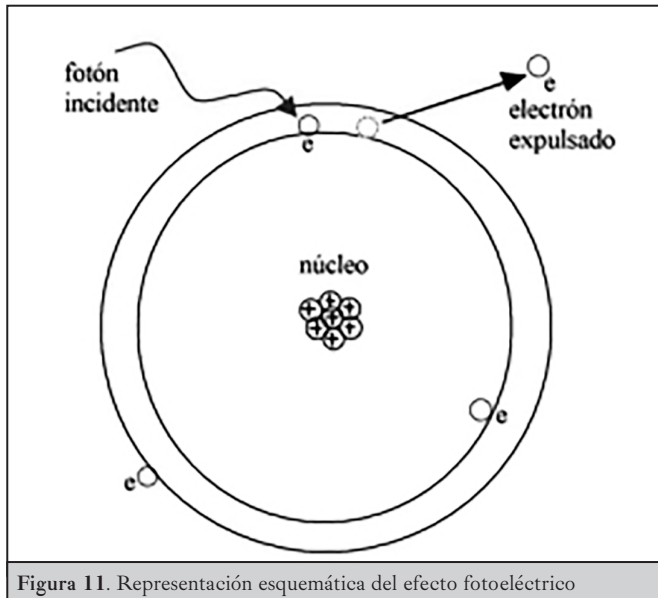


Figura 11. Representación esquemática del efecto fotoeléctrico

En este proceso el fotón incidente es absorbido por el átomo con el que interacciona. Su energía, $E = h f = h \nu$, es transferida a un electrón cortical (fotoelectrón), que escapa con una energía dada por:

$$E_{e^-} = h \nu - E_{\text{enlace}}$$

Efecto Compton. El efecto Compton es por lo general el tipo predominante de interacción de los fotones de energía media (0.3 a 3 MeV). En este proceso el fotón interactúa con un electrón atómico suficientemente como para expulsarlo de su órbita, el fotón conserva una parte de su energía original y continúa moviéndose en una nueva dirección. Por lo tanto, el efecto Compton tiene un componente de absorción y otro de dispersión. La cantidad de energía perdida por el fotón puede estar relacionada con el ángulo en el que el fotón dispersado se desplaza con respecto a la dirección original del viaje.

El fotón dispersado interactúa nuevamente, pero ya que su energía se ha reducido es más probable que lo haga en forma de interacción fotoeléctrica o Rayleigh. El electrón libre producido por el proceso de Compton puede ser muy energético y se comporta como una partícula beta de energía similar, la cual produce ionización y excitación secundaria antes de llegar al reposo.

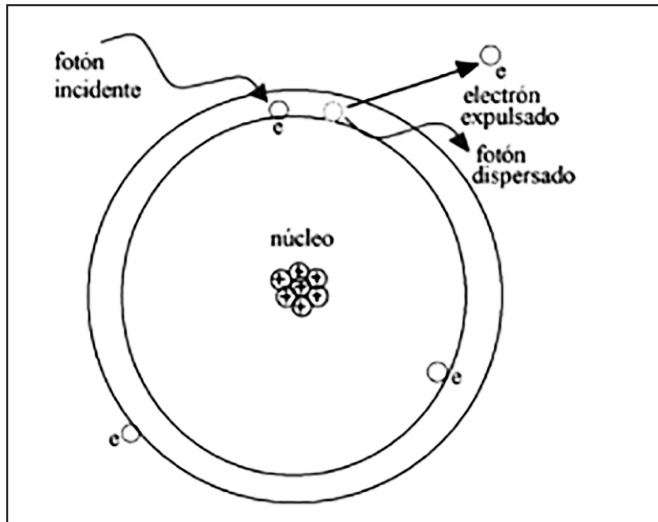


Figura 12. Representación esquemática del efecto Compton

Producción de pares. Los fotones con energía superior a 1.024 MeV, bajo la influencia del campo electromagnético de un núcleo, pueden ser convertidos en electrones y positrones. Al menos 1.024 MeV de energía son necesarios para la producción de pares, ya que la energía equivalente a la masa en reposo del electrón y el positrón es de 0.51 MeV cada uno.

La producción de pares no es muy probable, sin embargo, se convierte en probable a partir de 5 MeV de energía del fotón. La energía cinética disponible para ser compartida por el electrón y el positrón es la energía del fotón menos 1.02 MeV, o la energía necesaria para crear el par. El destino tanto del electrón como del positrón producidos es el mismo que para el caso de las partículas beta descrito anteriormente. La probabilidad de producción de pares aumenta con Z del material y con la energía del fotón.

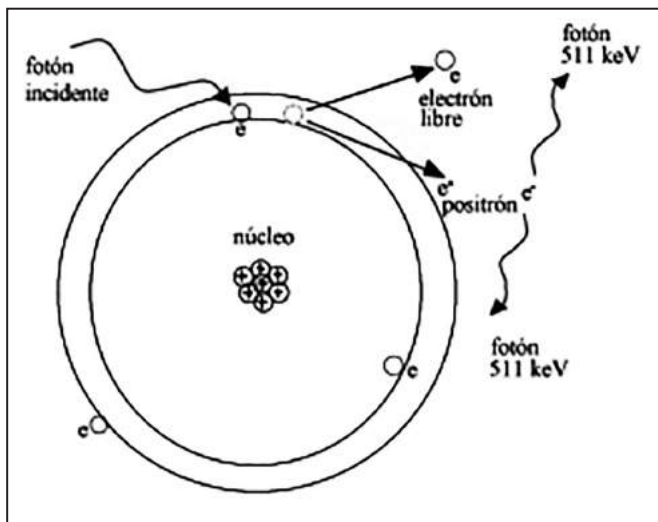


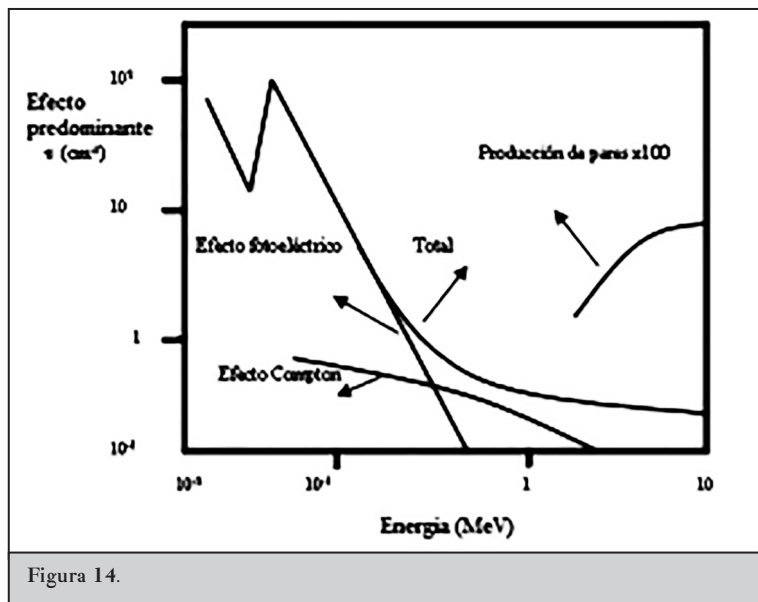
Figura 13. Representación esquemática de producción de pares

9.3.1. Espectrometría gamma

La espectrometría gamma consiste en la obtención del espectro de las radiaciones gamma emitidas por los radionucleidos. Es un estudio cuantitativo del espectro de energías de una fuente de rayos gamma. Un análisis detallado de este espectro se utiliza típicamente para determinar la identidad y la cantidad de los emisores gamma en una muestra.

Se basa en que la respuesta del detector es proporcional a la energía del rayo gamma detectado, lo que permite obtener su espectro de energías.

La detección utiliza los efectos de interacción de los rayos gamma con la materia, donde cada efecto es predominante a diferentes energías.



Detectores de NaI (TI). Hay tres tipos de detectores que se utilizan para el análisis de rayos gamma. El de cristal de yoduro de sodio dopado con talio es en realidad un detector de centelleo. El rayo gamma transfiere su energía al cristal a través de la excitación de electrones K (efecto fotoeléctrico). Estos electrones migran al estado fundamental del cristal emitiendo fotones en el rango de ultravioleta a energías de luz visible.

El cristal de yoduro de sodio se acopla ópticamente a un tubo fotomultiplicador. Los fotones de la desexcitación del cristal se convierten en un pulso electrónico en el tubo fotomultiplicador. El pulso resultante es proporcional a la energía inicial del rayo gamma.

Los detectores de yoduro de sodio funcionan a temperatura ambiente, son muy robustos, relativamente baratos, fáciles de operar y no se ven afectados de manera significativa por la temperatura o la humedad. Sin embargo, poseen una capacidad limitada para distinguir entre picos de rayos gamma que se encuentren cercanos entre sí (separados por menos de 80 keV).

Detectores HPGe (germanio de alta pureza). Hay dos tipos de detectores de germanio. La versión antigua consistía en litio con cristales de germanio purificado. Comenzó a ser eliminado en la década de 1980 cuando la producción de cristales de germanio de alta pureza se convirtió en una práctica habitual.

Los detectores de germanio también detectan los rayos gamma a través del efecto fotoeléctrico, pero estos cristales se enfrían a temperaturas de nitrógeno líquido y tienen voltajes aplicados a los cristales (pueden llegar a 5000 voltios). En los detectores de germanio el fotoelectrón es acelerado por el campo eléctrico aplicado al cristal y, en última instancia, produce un impulso en los detectores del preamplificador que es proporcional a la energía del rayo gamma original.

Hoy en día la mayoría de los laboratorios utilizan el detector de germanio de alta pureza donde los cristales pueden calentarse a temperatura ambiente y luego ser enfriados nuevamente y operar con normalidad. Sin embargo, cada componente electrónico del sistema HPGe tiene una fuente de alimentación separada necesaria para que se puedan alcanzar los exigentes requisitos para el análisis de rayos gamma de alta resolución.

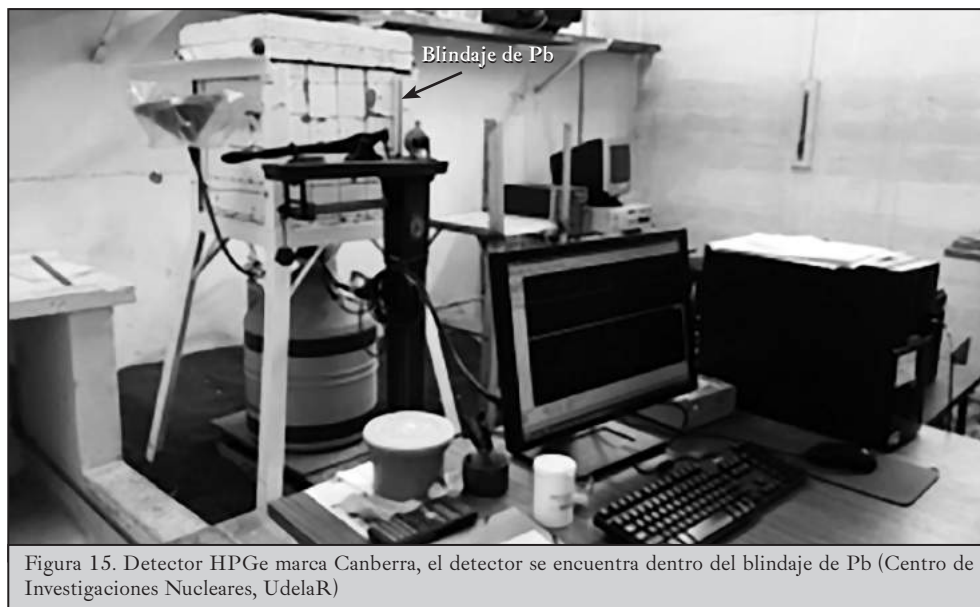


Figura 15. Detector HPGe marca Canberra, el detector se encuentra dentro del blindaje de Pb (Centro de Investigaciones Nucleares, UdelaR)

En comparación con un detector de yoduro de sodio los detectores HPGe más recientes son relativamente más costosos, más difíciles de operar, requieren condiciones de nitrógeno líquido constante y son sensibles a las condiciones ambientales del laboratorio. Sin embargo, la gran ventaja de los HPGe es que pueden resolver dos rayos gamma que están separados por 0.8 keV el uno del otro. Esta es una ventaja significativa ya que las muestras naturales originan productos de desintegración del uranio y el torio que tienen múltiples rayos gamma.

Finalmente, otra ventaja significativa de la utilización de un HPGe es que la muestra puede ser analizada directamente para radionucleidos emisores gamma, consiguiendo límites de detección tan bajos como 1.0 pCi/L en muestras acuosas.

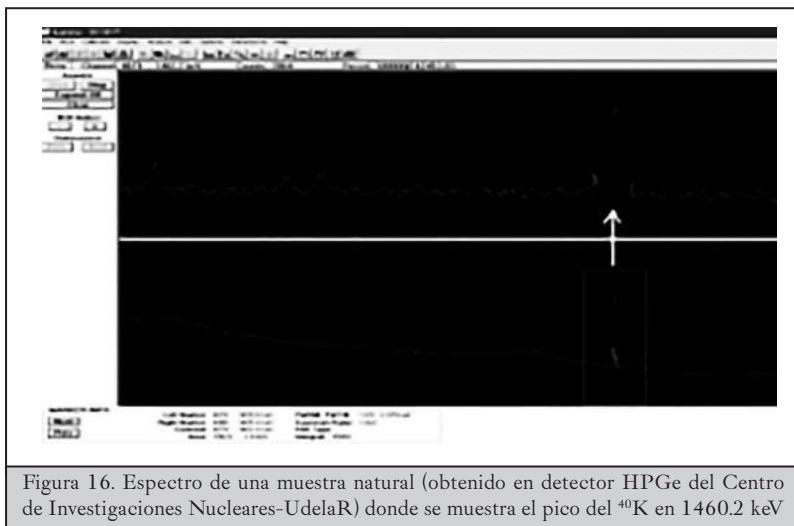


Figura 16. Espectro de una muestra natural (obtenido en detector HPGe del Centro de Investigaciones Nucleares-UdelaR) donde se muestra el pico del ^{40}K en 1460.2 keV

9.4. Interacción neutrónica

Los neutrones tienen carga eléctrica cero y no pueden causar ionización directa. Los neutrones de alta energía tienen probabilidad de colisionar con protones de un material biológico con fuerza suficiente para desalojar el protón de la molécula. El protón, llamado *protón de retroceso*, puede entonces tener energía suficiente para viajar a cierta distancia en el tejido causando daño secundario a través de ionización y excitación de las moléculas a lo largo de su trayectoria.

9.5. Ley de absorción Bouguer-Lambert-Beer

Esta ley de absorción indica que la intensidad (I) de la radiación electromagnética debe disminuir de manera exponencial con la distancia (d) al entrar en un medio absorbente, es decir:

$$I = I_0 e^{-\mu d}$$

Donde I_0 es la intensidad de la radiación incidente y μ es el coeficiente de absorción lineal (o atenuación) que depende de la energía del fotón y el número atómico del material. Puede expresarse en forma lineal inversa (cm^{-1}) o en forma másica (cm^2/g).

9.6. Ejercicios

1. El ^{137}Cs tiene una emisión gamma de energía 661.65 keV. Explique los fenómenos por los cuales el rayo gamma interactúa con la materia.
2. Calcule el porcentaje transmitido de ^{137}Cs (661.65 keV) luego de atravesar una pared de plomo de 0.5 cm ($\mu_{\text{pb}} = 4.4 \text{ cm}^{-1}$).

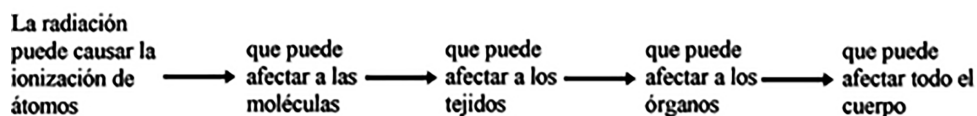
3. Se dispone de una cámara de ionización de aire con paredes de acero de 0.5 cm de espesor. Radiación gamma de ^{135}I (1.6 MeV) incide en las paredes de la cámara para ionizar el aire y ser detectadas. Datos: $d_{\text{aire}} = 0.00122 \text{ g/cc}$, $d_{\text{acero}} = 7.8 \text{ g/cc}$, $\mu_{\text{m acero}} = 0.05 \text{ cm}^2/\text{g}$, $\mu_{\text{m aire}} = 0.025 \text{ cm}^2/\text{g}$.
- a) Calcule la fracción de radiación gamma que atraviesa el espesor de la pared de acero.
- b) Considerando un recorrido en aire de 10 cm calcule la fracción de radiación gamma que es absorbida por el aire.
4. Debe medirse la actividad de ^{99}Mo en presencia de su hijo $^{99\text{m}}\text{Tc}$ de mayor intensidad. Para mejorar la medida se interpone entre la muestra y el detector una lámina de plomo de 6 mm de espesor. ¿Cuál es el porcentaje de radiación correspondiente al $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (140 keV) absorbida por el filtro? Datos: $\mu_{\text{L}}(140 \text{ keV}) = 30 \text{ cm}^{-1}$, $\mu_{\text{L}}(740 \text{ keV}) = 1.1 \text{ cm}^{-1}$.

10. Efectos biológicos de la radiación

Marcos Tassano-Victoria Calzada

Aunque se tiende a pensar en los efectos biológicos en términos del efecto de la radiación en las células vivas, en realidad, la radiación ionizante, por definición, solo interactúa con átomos por un proceso llamado ionización.

Por lo tanto, todos los efectos biológicos comienzan como consecuencia de interacciones de la radiación con los átomos que forman las células.



La radiación ionizante es energía transmitida a través de los rayos X, rayos gamma, partículas beta (electrones de alta velocidad), partículas alfa (núcleo del átomo de helio), neutrones, protones y otros iones pesados, tales como los núcleos de argón, nitrógeno, carbono y otros elementos. La luz ultravioleta (UV) es una radiación de energía intermedia que puede dañar las células, pero la luz UV se diferencia de las formas de radiación electromagnética (rayos X y gamma) en que no causa ionización (pérdida de un electrón) en átomos o moléculas, pero sí excitación (cambio en el nivel de energía de un electrón). Las otras formas de radiación en base a partículas son o bien cargas negativas (electrones), o cargas positivas (protones, partículas alfa, y otros iones pesados), o especies eléctricamente neutras (neutrones).

Las radiaciones beta son electrones de alta velocidad que pierden energía a medida que pasan a través de las células e interactúan con las moléculas. La energía transferida es suficientemente alta como para romper los enlaces químicos, lo que resulta en la formación de radicales o ionización. Esta ionización difiere de la formación de iones que se produce en los procesos químicos ordinarios. Así, la transformación que tiene lugar cuando se disuelve la sal (cloruro de sodio, NaCl) en agua es un buen ejemplo de un proceso ordinario. En este tipo de procesos químicos, tales como la unión de catión Na a anión Cl en la formación de la sal NaCl, los electrones que se han perdido o ganado son siempre los de la órbita más externa. Cuando se disuelve NaCl en agua, los dos iones se separarán donde el cloruro mantendrá el electrón exterior y, por lo tanto, el sodio tendrá una carga neta positiva (Na⁺) y el cloruro tiene una carga neta negativa (Cl⁻), pero la carga (equilibrio entre positivo y negativo) se mantiene neutra. Estos átomos cargados se llaman iones, y son estables en agua, por interacciones de baja energía (solvatación), a pesar de sus cargas eléctricas. En contraste, cuando un electrón pasa a través de una célula, libera su energía a lo largo de su trayectoria mediante la interacción con los electrones de las moléculas cercanas. La energía liberada es absorbida por átomos cercanos a la trayectoria, resultando tanto en excitación (un cambio en la órbita de un electrón a un nivel de energía más alto) o ionización (liberación de un electrón del átomo). Lo que difiere de un proceso químico normal es que cuando la radiación dona energía a los átomos o moléculas, los electrones

en los orbitales internos pueden también ser liberados produciendo, así, inestabilidad en el átomo o molécula. Tales especies inestables, con electrones desapareados, se denominan radicales y son químicamente muy reactivos. Algunos radicales son tan reactivos que existen sólo durante microsegundos.

Las partículas cargadas positivamente transfieren su energía a las moléculas en las células esencialmente por los mismos mecanismos.

Los neutrones son algo diferentes, ya que no están cargados eléctricamente, y su efecto principal es el impacto de los núcleos de los átomos de hidrógeno, es decir, protones. Dado que la masa de un neutrón y un protón son similares, los resultados de impacto resultan en un proceso de dispersión elástica. Los protones expulsados se comportan como partículas cargadas.

Las ionizaciones inducidas por la radiación pueden actuar directamente sobre las moléculas de los componentes celulares o indirectamente sobre las moléculas de agua del medio biológico, que causan los radicales derivados del agua. Los radicales reaccionan con moléculas cercanas en un tiempo muy corto, lo que resulta en la rotura de los enlaces químicos u oxidación (pérdida de electrones, visualizado en algunos casos por la adición de átomos de oxígeno) de las moléculas afectadas.

10.1. Daño celular

A pesar de que todos los subsiguientes efectos biológicos se remontan a la interacción de la radiación con los átomos, hay dos mecanismos por los que la radiación afecta en última instancia a las células. Estos dos mecanismos comúnmente se denominan efectos directos e indirectos.

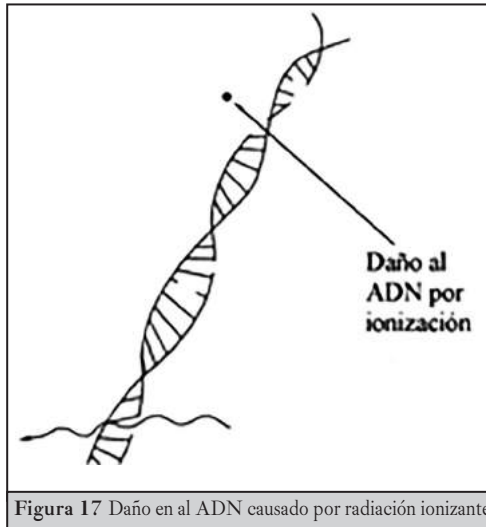
10.1.1. Efectos directos

Si la radiación interactúa con los átomos de la molécula de ADN, o algún otro componente celular crítico para la supervivencia de la célula, se denomina como un efecto directo. Tal interacción puede afectar la capacidad de reproducción de las células y, por lo tanto, la supervivencia. Si existen suficientes átomos afectados de tal manera que los cromosomas no se replican correctamente, o si hay una alteración significativa en la información transportada por la molécula de ADN, la célula puede ser destruida por injerencia directa a través de su sistema de muerte celular programada.

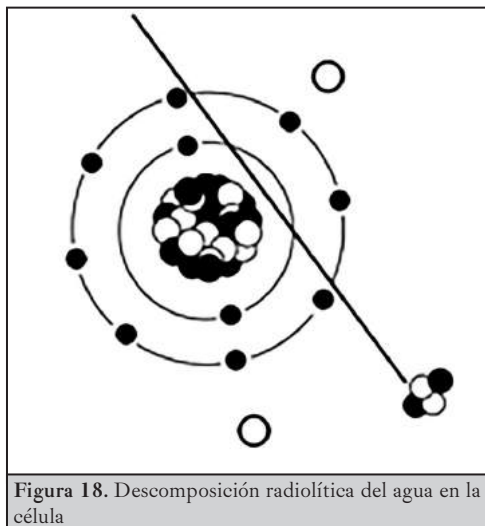
10.1.2. Efectos indirectos

Si una célula está expuesta a la radiación, la probabilidad de que la radiación interactúe con la molécula de ADN es muy pequeña, ya que estos componentes críticos constituyen una pequeña parte de esta. Sin embargo, cada célula es principalmente agua. Por lo tanto, existe una probabilidad mucho mayor de que la radiación interactúe con el agua, que constituye la mayor parte del volumen de la célula.

Cuando la radiación interactúa con el agua, se podrían romper los enlaces de la molécula de agua y producir iones como H^+ e hidroxilos OH^- . Estos iones pueden recombinar o pueden interactuar con otros iones para formar compuestos, tales como el agua, que no perjudican a la célula.



Sin embargo, se podrían combinar para formar sustancias tóxicas tales como peróxido de hidrógeno (H_2O_2), el cual puede contribuir a la destrucción de la célula.



Por otro lado, no todas las células vivas son igualmente sensibles a la radiación. Las células que se están reproduciendo activamente son más sensibles. Esto se debe a que las células en división requieren información correcta de ADN a fin de que la descendencia de la célula pueda sobrevivir. Una interacción directa de la radiación con una célula activa podría resultar en la muerte o mutación de la célula, mientras que una interacción directa con el ADN de una célula latente tendría un efecto menor.

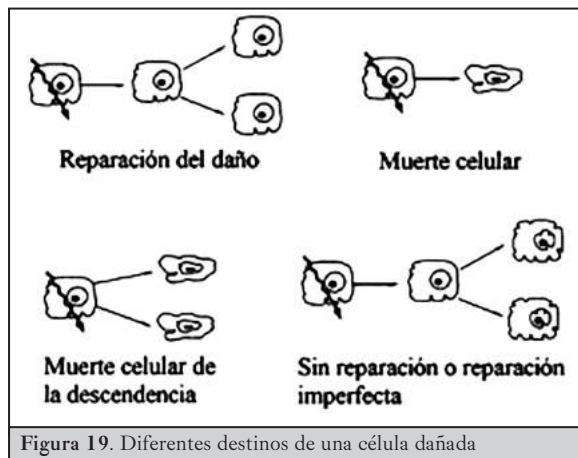
Como resultado las células vivas se pueden clasificar en función de su tasa de reproducción, lo que a su vez indica su sensibilidad relativa a la radiación. Esto significa que los sistemas celulares diferentes tienen diferentes sensibilidades.

Los linfocitos (células blancas de la sangre) y las células que producen la sangre están en constante regeneración y son por lo tanto las más sensibles. Las células reproductivas y gastrointestinales no se están regenerando tan rápidamente y son menos sensibles. Las células musculares y nerviosas son las de más lenta regeneración y son, por lo tanto, las menos sensibles a la radiación.

Las células tienen una enorme capacidad para reparar los daños. Como resultado no toda la radiación afecta irreversiblemente a las células (figura 19). En muchos casos, las células son capaces de reparar cualquier daño y funcionar normalmente.

Si el daño es lo suficientemente grave, la célula afectada muere. En algunos casos, la célula puede estar dañada pero es todavía capaz de reproducirse. Las células hijas, sin embargo, pueden carecer de algún componente vital y mueren.

La otra consecuencia posible de la exposición a la radiación es que la célula puede mutar pero no muere. La célula mutada se reproduce y perpetúa la mutación, lo cual puede ser el comienzo de tejidos malignos como el cáncer.



10.2. Órganos

La sensibilidad de los diferentes órganos del cuerpo se correlaciona con la sensibilidad relativa de las células que lo componen. Por ejemplo, puesto que las células formadoras de la sangre son las células más sensibles debido a su rápida tasa de regeneración, los órganos formadores de sangre son uno de los más sensibles a la radiación.

Las células musculares y nerviosas son relativamente insensibles a la radiación y, por lo tanto, también lo son los músculos y el cerebro.

La tasa de reproducción de las células que forman un órgano no es el único criterio determinante de sensibilidad global. La importancia vital relativa del órgano también lo es.

Un ejemplo de un sistema de células muy sensible es un tumor maligno. La capa externa de las células se reproduce rápidamente y también tiene un buen suministro de sangre y oxígeno. Las células son más sensibles cuando están en etapa de reproducción y la presencia de oxígeno aumenta la sensibilidad a la radiación. Las células hipóxicas (con insuficiencia de oxígeno), tales como las células situadas en el interior de un tumor, tienden a ser inactivas.

A medida que el tumor es expuesto a la radiación la capa exterior de las células que se dividen rápidamente se destruye, haciendo que se logre un encogimiento del tamaño. Si se suministra una dosis alta de radiación para destruir por completo el tumor, el paciente podría verse afectado gravemente. En su lugar se suministra una pequeña dosis cada día, lo que favorece la recuperación del tejido sano de cualquier daño mientras se produce la reducción gradual del tumor altamente sensible.

Otro sistema celular compuesto de células que se dividen rápidamente con un buen suministro de sangre y oxígeno es el embrión en desarrollo. Por lo tanto, la sensibilidad del embrión en desarrollo a la radiación es muy alta.

10.3. Efectos dependientes de la dosis

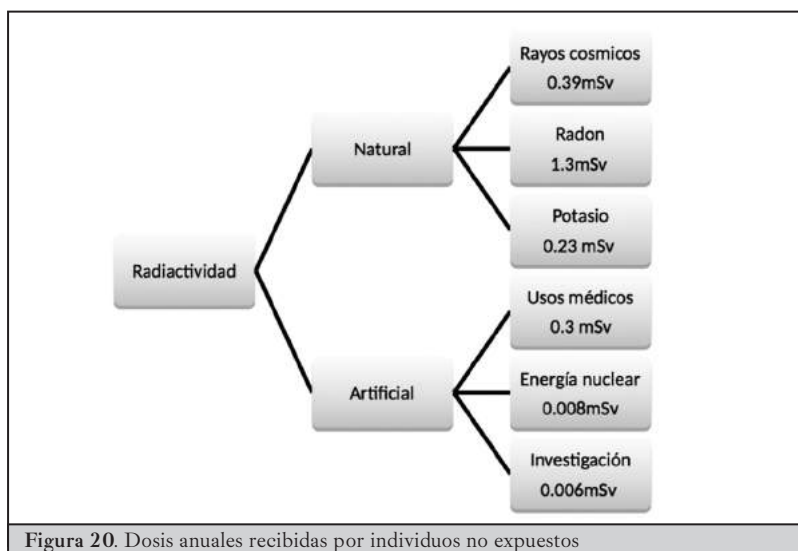
La dosis absorbida de cualquier radiación ionizante corresponde a la energía depositada en la materia por unidad de masa de material irradiado. Su unidad más utilizada es el rad, equivalente al depósito de 100 erg por gramo de material. Actualmente se utiliza también el Gy, que es equivalente a un J de energía depositada por kg de material. Por lo tanto, 1 Gy es lo mismo que 100 rad.

Cuando se habla en términos de intensidad de exposición o intensidad de dosis, se refiere a la dosis por unidad de tiempo.

La dosis equivalente es un concepto que distingue el grado de efecto biológico asociado a un tipo de radiación en particular. Para determinarla se utiliza un factor que afecta el valor y se expresa en rem o Sieverts (Sv).

Existen valores tabulados de dosis máximas permisibles a las cuales el público en general y los trabajadores ocupacionalmente expuestos no deben superar. Estos varían según el país y el organismo regulador que se tome de referencia, pero se encuentran muy por debajo de cualquier dosis que pueda producir efectos.

Las fuentes naturales aportan una dosis anual de aproximadamente 2.40 mSv correspondiente a un 87 % del total de dosis recibida por todas las fuentes. La más importante de ellas es el ^{222}Rn . En la figura 20 se muestran los valores promedios de la dosis anual recibida por un individuo estándar.



Los efectos biológicos de la radiación suelen dividirse en dos categorías según la dosis. La primera categoría está compuesta por la exposición a altas dosis de radiación durante períodos cortos de tiempo, que produce efectos agudos a corto plazo. La segunda categoría representa la exposición a dosis bajas de radiación durante un período prolongado de tiempo, que produce efectos crónicos a largo plazo.

Las dosis elevadas tienden a destruir las células, mientras que las dosis bajas tienden a dañarlas o cambiarlas. Las dosis altas pueden matar tantas células que los tejidos y órganos fallan. Esto a su vez puede causar una respuesta rápida en todo el cuerpo llamado el síndrome de irradiación aguda (ARS).

Bajas dosis repartidas durante largos períodos de tiempo no causan un problema inmediato a cualquier órgano del cuerpo. Los efectos de las dosis bajas de radiación se producen en la célula y los resultados pueden no ser observados durante muchos años.

10.3.1. Altas dosis

Las razones principales de los efectos de altas dosis tienen que ver con la salud de los individuos en el momento de la exposición y su capacidad para combatir los efectos incidentales de la exposición a la radiación, tales como el aumento de la susceptibilidad a las infecciones.

Las primeras señales y síntomas del síndrome de radiación aguda son: náuseas, vómitos, fatiga y pérdida del apetito. Por debajo de 150 rad estos síntomas, que no son diferentes de los producidos por una infección viral común, pueden ser la única indicación externa de la exposición a la radiación.

En resumen, la radiación puede afectar a las células. Las dosis altas de radiación afectan a muchas células, lo cual puede resultar en daño al tejido/órgano, que en última instancia produce uno de los síndromes de radiación aguda.

10.3.2. Bajas dosis

Todo el mundo está expuesto continuamente a la radiación. La dosis media de radiación recibida por la población en los Estados Unidos figura en la tabla 10.

El principal efecto de las bajas dosis de radiación (por debajo de aproximadamente 10 rad) durante períodos prolongados de tiempo son mutaciones no letales, aunque estas pueden ser originarias del cáncer.

10.3.3. Dosimetría ocupacional

Es conveniente que el personal expuesto a las radiaciones ionizantes sea controlado en la dosis recibida en un período de tiempo determinado. Así, se definen diferentes parámetros a tener en cuenta:

- Dosimetría personal externa: el control de radiación recibida en dosímetros personales de trabajadores ocupacionalmente expuestos (TOE) es realizado, en nuestro país, por ARNR⁵, por el Centro de Investigaciones Nucleares de la Facultad de Ciencias (CIN) para los trabajadores de la UdelaR y por particulares.

- Dosimetría personal interna: la dosimetría interna realizada a trabajadores ocupacionalmente expuestos que trabajan con fuentes abiertas de radiación ionizante es realizada, en nuestro país, por la Cátedra de Radioquímica de la Facultad de Química

5 ARNR: Autoridad Reguladora Nacional en Radioprotección, Ministerio de Industria, Energía y Minería (<http://www.arnr.gub.uy/>). Ver apartado 12.

conjuntamente con el Centro de Medicina Nuclear del Hospital de Clínicas. Tiene licencia de ARNR.

- Dosimetría biológica: evaluación de la dosis de exposición en casos de sobreexposición o accidentes. En nuestro país se encuentra a cargo del Instituto de Investigaciones Biológicas Clemente Estable (IIBCE).

- Dosimetría ambiental: es nuestro país es realizada por el Laboratorio de Tecnogestión del Ministerio de Industria, Energía y Minería, y por el CIN-UdelaR.

Fuente de exposición		Promedio anual de dosis equivalente efectiva (milirems)
Natural:	Radón	200
	Otro	100
Productos de consumo:	Tabaco	(*)
	Otros	5 - 13
Ocupacional		0.9
Fuentes ambientales		0.06
Fuentes médicas	Rayos X	39
	Medicina nuclear	14
Total aproximado		360

(*) La dosis equivalente de cuerpo entero de los productos del tabaco es difícil de determinar. Sin embargo, la dosis de los pulmones se estima en 16000 milirems/año

Tabla 14. NCRP⁶ Report No. 93, *Ionizing Radiation Exposure of the Population of the United States, 1987*

10.4. Ejercicios

1. ¿Qué molécula de las células se ve afectada directamente por las radiaciones ionizantes? ¿Qué implicancias acarrea para la supervivencia de la célula?
2. Describa brevemente el efecto indirecto de las radiaciones ionizantes sobre las células.
3. ¿Qué tipo de células del organismo son las más susceptibles a las radiaciones ionizantes? Por lo tanto, ¿qué órganos son los más afectados?
4. La exposición a bajas dosis produce efectos estocásticos sobre el ADN. ¿Qué tipo de efectos se producen sobre el ADN al recibir bajas dosis por largo tiempo? ¿Qué implicancias tienen estos efectos sobre la salud humana?

6 NCRP: National Council on Radiation Protection & Measurements (<http://www.ncrponline.org/>).

11. Protección radiológica

Victoria Calzada

Es bien conocido que la exposición a dosis altas de radiación puede causar daño en los tejidos corporales. Por este motivo es esencial que las actividades que involucren materiales radiactivos estén sujetas a ciertas normas de control, con el fin de proteger la exposición.

En principio, el manejo de fuentes y técnicas nucleares para tratamiento y diagnóstico de enfermedades, así como para la generación energética, entre otras, hacen necesario conocer los riesgos asociados.



Los estándares internacionales de protección radiológica son estudiados por la International Commission on Radiological Protection (ICRP) y por el United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Este último, parte de las Naciones Unidas, compila, ensaya y difunde información acerca de los efectos de la radiación en la salud y los niveles de exposición según los diferentes usos. Por otro lado el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) promueve y regula el uso de las tecnologías nucleares con fines pacíficos y en condiciones de seguridad física y tecnológica.

11.1. Exposición

La radiactividad es un fenómeno que no se puede ver ni tocar. Sin embargo, continuamente estamos expuestos a radiación proveniente de diversas fuentes.

Existen dos tipos principales de exposición: la exposición pública o normal, en donde los individuos están expuestos a niveles basales de radiación, ya sea esta natural o consecuencia de procedimientos médicos, y la exposición ocupacional que es la que se produce al trabajar con fuentes radiactivas. Ambos tipos de exposiciones no deben superar niveles regulados por organismos internacionales.

Hay dos formas básicas de estar expuesto a la radiación. La exposición externa puede darse si existe una fuente cercana de radiación. Por otro lado, la exposición interna se da si el material radiactivo ingresa al organismo ya sea por ingestión, inhalación o contacto.

Las radiaciones ionizantes pueden provocar efectos nocivos en la salud. Sin embargo, el peligro varía dependiendo de varios factores como la capacidad ionizante de la radiación, el tiempo y la forma de exposición, entre otros.

Tipo de radiación ionizante	Alcance	Penetración en el organismo	Blindaje
Alfa	Corto	Casi nula	Papel
Beta	Medio-alto	Muy débil	Acrílico, aluminio
Gamma y RX	Alto	Muy fuerte	Plomo, hormigón
Neutrones	Variable	Fuerte	Cadmio, boro

Tabla 15. Tipos de radiación ionizante y características principales

La exposición ocupacional de cualquier trabajador debe controlarse de tal forma que los límites siguientes no sean excedidos:

- A) Una dosis efectiva de 20 mSv por año, promediado en un período consecutivo de 5 años (100 mSv en 5 años).
- B) Una dosis efectiva de 50 mSv en un solo año.
- C) Una dosis equivalente para el cristalino de 20 mSv en un año.
- D) Una dosis equivalente para las extremidades (manos y pies) o piel de 500 mSv en un año.

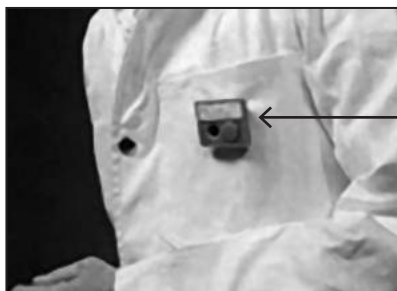
11.2. Buenas prácticas

En la exposición pública o normal, los individuos están expuestos a niveles basales de radiación, ya sea esta natural o consecuencia de procedimientos médicos. Por otro lado, la exposición ocupacional es la que se produce al trabajar con fuentes radiactivas. Ambos niveles de exposición son diferentes, y no deben superar niveles regulados por organismos internacionales.

Las buenas prácticas en donde se trabaja con fuentes radiactivas incluyen el control del personal tanto como de las instalaciones y protocolos. El monitoreo de la exposición personal, así como el monitoreo ambiental, normas y cartelería deben ser acordes a los tipos de prácticas que se lleven a cabo.

Las medidas fundamentales en el trabajo de laboratorio que incluye el manejo de fuentes radiactivas consisten en la instrucción adecuada del personal, bajo el principio ALARA (As Low As Reasonably Achievable, tan bajo como sea posible), asegurando que se tomen todas las medidas para que el personal se exponga lo mínimo necesario.

Para ello, el tiempo y la distancia a la fuente de exposición son las variables fundamentales que puede controlar una persona.



Dosímetro

Figura 21. Ejemplo de dosímetro tipo solapero

Existen áreas delimitadas para el trabajo de fuentes radiactivas, las cuales poseen la característica de poder contener cualquier fuga o contaminación y esta debe estar delimitada con el blindaje y cartelería adecuados. El blindaje dependerá fundamentalmente del tipo de radiación con la cual se trabaja, por ejemplo el trabajo con altas concentraciones de emisores beta (figura 22).



Figura 22. Celda de producción de radiofármacos terapéuticos, Centro de Investigaciones Nucleares, Facultad de Ciencias, Udelar

Las fuentes radiactivas deben estar debidamente identificadas. Asimismo, todo laboratorio donde se trabaje con fuentes radiactivas debe estar debidamente identificado al igual que las áreas donde están contenidas las fuentes (figura 23), utilizando por ejemplo la señal internacional de radiación (figura 24).



Figura 23. Laboratorio de marcación con emisores gamma. Centro de Investigaciones Nucleares, Facultad de Ciencias, UdelaR



Figura 24. Señal internacional de radiación (ícono en negro con fondo amarillo)

Las áreas de trabajo deben contar con equipamiento adecuado para el monitoreo ambiental del nivel de dosis y para poder detectar cualquier fuga o contaminación que pudiese existir. Debido a que la radiación puede atravesar materiales y causar ionización es fácilmente medible a través de equipos de monitoreo ambiental.

Los protocolos para la descontaminación de superficies y disposición de desechos radiactivos son estrictos y para estos deben ser tenidos en cuenta varios factores como el tipo de radiación, período de semidesintegración, otro tipo de peligros (contaminación química y biológica o ambas), áreas y demás.

Requerimientos administrativos en nuestro país: todas las instalaciones que trabajan con algún tipo de fuente radiactiva deben estar registradas, así como el personal, fuentes radiactivas, etc. Las autorizaciones, por parte de la Autoridad Reguladora Nacional en

Radioprotección (ARNR), se dan con base en la práctica que se lleva a cabo, tipo de radionucleidos a utilizarse y dosis a emplearse. También, existen guías que regulan los diferentes tipos de exposiciones.

11.3. Ejercicios

1. Indique cuál/es son las medidas fundamentales que un trabajador puede tomar para minimizar su exposición a las radiaciones ionizantes:
 - a. distancia;
 - b. tiempo;
 - c. blindaje;
 - d. edad;
 - e. dosímetro.
2. El laboratorio va a recibir un generador de $^{68}\text{Ge}/^{68}\text{Ga}$, indique algunas de las medidas principales de trabajo que se deben tomar de protección radiológica.
3. En el laboratorio se va a trabajar con ^{188}Re , indique el tipo de blindaje que debería utilizar.
4. Indique las características de la zona de trabajo donde se manipulará con ^{131}I . Indique blindaje, indumentaria y demás medidas a tener en cuenta.
5. Al trabajar con 20 mCi de $^{99\text{m}}\text{Tc}$ usted debe conocer las medidas de disposición final de los desechos. Indique cómo procedería.
6. ¿Cuál/es son los principales peligros que existen en un laboratorio en donde se trabaja con nucleidos radiactivos?
 - a. irradiación;
 - b. contaminación;
 - c. explosiones.
7. En el laboratorio se trabajará con ^{32}P . Indique cuáles son las medidas que debe tomar.
8. Indique cuál/es son las principales indumentarias que un investigador debe poseer al trabajar con ^{90}Y :
 - a. guantes;
 - b. lentes;
 - c. túnica;
 - d. delantal de plomo.
9. Los residuos de los hospitales se manipulan y procesan según un protocolo que evita la posible contaminación química y biológica, o ambas, a través de sus desechos. ¿Qué consideraciones agregaría usted para la disposición de la orina de los pacientes sometidos a técnicas de análisis nucleares? Justifique su propuesta.

12. Radiactividad y la tecnología nuclear en el Uruguay

Estela Falcón-Viviane Mikeliunas

12.1. Generalidades y estructuras

Esta sección está destinada a contextualizar la temática que se viene trabajando dentro del panorama uruguayo. Se plantea una breve descripción de las actividades relacionadas a la radiactividad y a la tecnología nuclear en nuestro país.

El relevamiento realizado puede ser visto de acuerdo al sitio de trabajo o al tipo de actividad realizada, figuras 25 y 26 respectivamente.

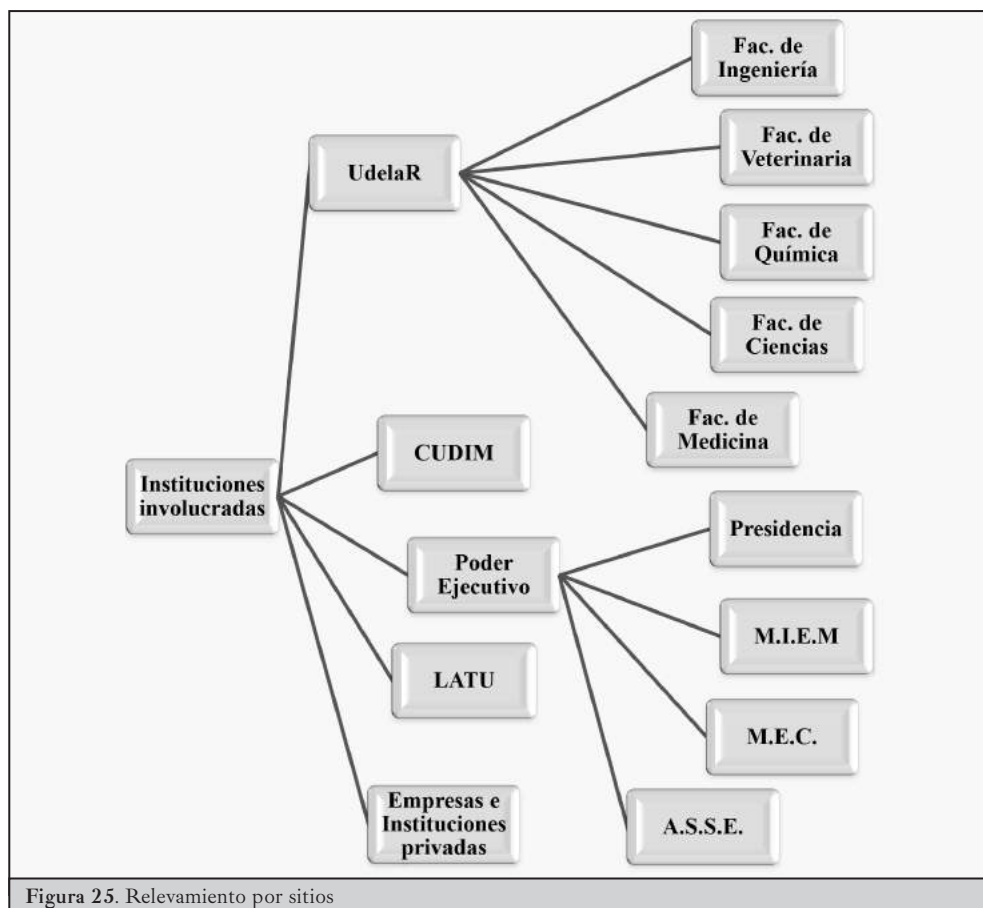


Figura 25. Relevamiento por sitios

Carreras/cursos/pasantías:

- Cátedra de Radioquímica, Facultad de Química
- Centro de Investigaciones Nucleares, Facultad de Ciencias
- Centro de Medicina Nuclear. Facultad de Medicina
- Centro Uruguayo de Imagenología Molecular, CUDIM
- Escuela de Graduados, Facultad de Medicina
- Escuela Universitaria de Tecnología Médica Facultad de Medicina.
- Instituto de Investigaciones Biológicas Clemente Estable. MEC
- Instituto de Física. Facultad de Ingeniería.
- Instituto de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería.
- Instituto de Física. Facultad de Ciencias
- Laboratorio de Tecnogestión, MIEM.

Datación:

- Facultad de Química MEC
- IECA, Facultad de Ciencias-
- Instituto de Ciencias Geológicas. Facultad de Ciencias.
- Diseño de radiofármacos:
- Cátedra de Radioquímica. Facultad de Química.
- Centro de Investigaciones Nucleares. Facultad de Ciencias.
- Centro Uruguayo de Imagenología Molecular.

Disponibilidad de desechos radioactivos:

- Centro de Investigaciones Nucleares, Facultad de Ciencias.

Dosimetría ambiental:

- Centro de Investigaciones Nucleares, Facultad de Ciencias
- Laboratorio de Tecnogestión, Ministerio de Industria, Energía y Minería

Dosimetría externa:

- Autoridad Reguladora Nacional de Radioprotección.
- Centro de Investigaciones Nucleares, Facultad de Ciencias
- Empresa privada.

Dosimetría Interna:

- Facultad de Química/Facultad de Medicina.

Dosimetría biológica:

- Instituto de Investigaciones Biológicas Clemente Estable
- Ministerio de Educación y Cultura

Investigación:

- Centro de Investigaciones Nucleares, Facultad de Ciencias.
- Centro Uruguayo de Imagenología Molecular (CUDIM)
- Instituto de Física, Facultad de Ciencias.
- Instituto de Ecología y Ciencias Ambientales, Facultad de Ciencias.
- Instituto de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias.
- Centro de Medicina Nuclear, Facultad de Medicina.
- Servicio de Oncología Radioterapia, Facultad de Medicina
- Departamento de Biofísica, Facultad de Medicina.
- Cátedra de Radioquímica, Facultad de Química.
- Laboratorio de Técnicas Nucleares, Facultad de Veterinaria.
- Laboratorio de Tecnogestión, Ministerio de Industria, Energía y Minería
- Laboratorio de Epigenética e Inestabilidad Genómica, IIBCE,
- Ministerio de Educación y Cultura
- Instituto de Física, Facultad de Ingeniería.
- Instituto de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería.

Irradiación Gamma Industrial:

- Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU)
- Laboratorio de Tecnogestión (MIEM)
- Empresas privadas

uiouiuouo

jiouio

Empresas privadas.

Medicina Nuclear:

- Hospital de Clínicas, Facultad de Medicina
- Hospital Pasteur, ASSE
- Centro Uruguayo de Imagenología Molecular (CUDIM)
- Centros privados de Montevideo e Interior.

Radioterapia:

- Hospital de Clínicas, Facultad de Medicina.
- Centro Hospitalario Pereira Rossell, ASSE.
- Instituto Nacional del Cáncer, ASSE.
- Hospital Regional de Tacuarembó, ASSE.
- Instituciones privadas de Montevideo y el Interior.

Regulación:

- Autoridad Reguladora Nacional de Radioprotección, ARNR.

Figura 26. Relevamiento por actividades

12.2. Control, regulación y calidad

En nuestro país es la Autoridad Reguladora Nacional de Radioprotección (ARNR), perteneciente al Ministerio de Industria, Energía y Minería (MIEM), quien regula todas las actividades relacionadas con las radiaciones, tanto a nivel público como privado.

Las actividades realizadas en las diferentes secciones de la ARNR son:

A) Regulación y licenciamientos

1- Generación de un marco legal y normativo.

2- Autorizaciones y licenciamientos a personas o entidades cuyas actividades impliquen el uso de equipos generadores de radiaciones ionizantes y fuentes radiactivas, tanto en el área industrial como en la relacionada con servicios de salud.

Al respecto, existen convenios con otras instituciones públicas:

- Departamento de Tecnología Médica del Ministerio de Salud Pública (MSP), para coordinar la evaluación de las solicitudes de instituciones de salud pública y cooperación con instituciones, convenios nacionales e internacionales.

- Dirección Nacional de Aduanas (DNA), para la autorización de importación, exportación y tránsito de material radiactivo.

- Centro de Investigaciones Nucleares (CIN) para cooperar técnica y financieramente en la gestión de desechos radiactivos.

B) Fiscalización y control

1- Inspecciones planificadas (también a requerimiento de usuarios) donde estén implicados equipos generadores de radiación o fuentes radiactivas: radioterapia, medicina nuclear, radiodiagnóstico médico y odontológico, radiografía industrial, irradiación industrial, fuentes para investigación o enseñanza.

2- Servicio de dosimetría personal (control de radiación recibida en los dosímetros personales de trabajadores ocupacionalmente expuestos) y biológica (en colaboración con el Instituto de Investigaciones Biológicas Clemente Estable).

C) Difusión del buen uso de las técnicas nucleares, para garantizar la seguridad de usuarios, trabajadores ocupacionalmente expuestos, bienes y medio ambiente.

D) Plan de Respuesta de Emergencia Nacional para casos de Accidentes Radiológicos (plan RAD). El Sistema Nacional de Emergencias (SINAE-Presidencia) es un sistema permanente para la protección de personas, bienes significativos y medio ambiente frente a situaciones, eventuales o reales, de desastre.

E) Enlace con el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) en la gestión de la cooperación técnica de dicho organismo en proyectos en áreas de desarrollo que impliquen tecnología nuclear, protección radiológica y capacitación técnica.

F) Coordinación nacional con el Acuerdo Regional de Cooperación para Promoción de la Ciencia y Tecnología Nucleares para América Latina y el Caribe (ARCAL).

12.3 Análisis de energía nucleoelectrónica

La Dirección Nacional de Energía (DNE), perteneciente al Ministerio de Industria, Energía y Minería, tiene como cometidos destacados: la planificación, conducción y evaluación de políticas de desarrollo del sector energético teniendo en cuenta las fuentes de suministro, identificación, cuantificación y evaluación de las fuentes de energía a nivel nacional y regional.

En relación con la energía nuclear y sus posibilidades como fuente de energía eléctrica en el país se creó en 2008 una comisión de expertos en el tema; su cometido era comenzar a evaluar la generación de energía nucleoelectrónica como alternativa energética teniendo en cuenta las necesidades a las que el país se enfrentará a corto y mediano plazo.

12.4. Investigación y docencia

Muchas de las instituciones dedicadas a la investigación y la docencia coordinan entre sí dichas tareas y brindan además otro tipo de servicios a la sociedad.

12.4.1. Instituto de Investigaciones Biológicas Clemente Estable (IIBCE)

El Instituto está organizado en tres divisiones (Neurociencias, Ciencias Microbiológicas, Genética y Biología Molecular) que, a su vez, se componen de varios departamentos y laboratorios; su cometido es la investigación sistemática, promoción y aplicaciones tecnológicas de las Ciencias Biológicas.

En él se encuentra el Servicio de Dosimetría Biológica perteneciente al Laboratorio de Epigenética e Inestabilidad Genómica, que ha recibido la misión establecida en el plan RAD de ser referente nacional en la evaluación de dosis de exposición mediante dosimetría biológica.

12.4.2. Facultad de Ciencias

12.4.2.1. Centro de Investigaciones Nucleares (CIN)

Se creó en 1966 como resultado de un convenio entre la Universidad de la República y la entonces Comisión Nacional de Energía Atómica. En 1990 cuando se crea la Facultad de Ciencias, el CIN pasa a ser Instituto de ella. Concebido desde sus inicios para trabajar exclusivamente en el área de la radiactividad, cuenta actualmente con otras áreas.

Las principales líneas de investigación vinculadas a la radiactividad que se desarrollan actualmente en el Instituto incluyen el desarrollo de radiofármacos marcados con ^{177}Lu , $^{99\text{m}}\text{Tc}$ y otros, para terapia y diagnóstico de enfermedades tales como cáncer de mama, melanomas, linfoma no-Hodgkin, infecciones; se trabaja, además, en los efectos de la actividad forestal en suelos y aguas.

En cuanto a capacitación y docencia el Instituto está a cargo de cursos de grado y de posgrado, así como de la formación de posgrados en el área.

Distintos sectores del Instituto son responsables de cursos como radiactividad aplicada y el curso básico de metodología de radioisótopos.

Parte de los servicios que brinda el Instituto consiste en el asesoramiento, gestión y depósito de fuentes radiactivas en desuso, dosimetría personal en servicios universitarios y particulares.

Cabe señalar que, además, la Unidad de Radioquímica del CIN proporciona los análisis de certificación «libre de contaminación radiactiva» para la exportación de productos comercializables.

12.4.2.2. Departamento de Física Teórica

El Departamento de Física Teórica del Instituto de Física de la Facultad de Ciencias (IFFC) es responsable de varios grupos de investigación y docencia, entre los cuales se destaca:

- Física de altas energías. Se investiga sobre radioprotección, fenomenología de partículas elementales, radioterapia con iones pesados, física de taus, modelo estándar y sus extensiones.

- Física médica. Desde 2012 el Instituto es responsable de la Licenciatura en Física Médica, junto con la Facultad de Medicina. El perfil del egresado, nuevo en Uruguay, será el de un profesional capacitado en métodos y técnicas de la Física para su aplicación en el campo de la Medicina, como por ejemplo en el área de la Medicina Nuclear.

12.4.2.3. Instituto de Ecología y Ciencias Ambientales

El Instituto de Ecología y Ciencias Ambientales (IECA) desarrolla actividades de investigación y datación en su Laboratorio de termoluminiscencia y optoluminiscencia.

12.4.3. Facultad de Ingeniería: IFFI, IIE

El Instituto de Física de la Facultad de Ingeniería (IFFI) desarrolla actividades asociadas al Instituto de Física de la Facultad de Ciencias. En él se realizan tareas de investigación vinculadas a los procesos de colisión nucleares. En el programa de cursos de dicho Instituto aparece, como optativo, el de Física Nuclear.

En el Instituto de Ingeniería Eléctrica (IIE) funciona el Núcleo de Ingeniería Biomédica, asociado a la Facultad de Medicina. Se dictan cursos tales como:

- Imágenes médicas: adquisición, instrumentación y gestión
- Informática y manejo de imágenes médicas
- Ingeniería Biomédica

12.4.4. Facultad de Medicina

12.4.4.1. Laboratorio de Radiobiología

En el Laboratorio de Radiobiología del Departamento de Biofísica se desarrollan diversas líneas de investigación, entre las que se destaca el estudio del daño y la reparación de lesiones generadas por radiaciones ionizantes, ultravioletas y drogas genotóxicas en el ADN.

12.4.4.2. Escuela Universitaria de Tecnología Médica

La Escuela Universitaria de Tecnología Médica (EUTM) cuenta con una sede en Montevideo y otra en Paysandú. Tres de los títulos que otorga corresponden al área que compete a este manual:

- Técnico en Radioisótopos
- Tecnólogo en Radioterapia
- Licenciado en Imagenología

12.4.4.3. Hospital de Clínicas y Escuela de Graduados

En el Hospital de Clínicas se encuentran el Centro de Medicina Nuclear y el Servicio de Radioterapia. En cualquiera de ellos, las actividades más relevantes se refieren a los servicios de salud brindados a la población. Sin embargo, en ambos lugares se desarrollan también actividades de docencia y de investigación. En el primero, se realizan prácticas de estudiantes de posgrado de Medicina y de la carrera de Técnico en Radioisótopos de EUTM, se desarrollan proyectos de investigación, en coordinación y cooperación con otras instituciones relacionadas a la temática.

En el Servicio de Radioterapia, la Cátedra de Oncología Radioterápica dicta cursos de pregrado de la carrera de Medicina y cursos de posgrado de la especialidad que lleva el mismo nombre. A nivel de investigación, se concentran especialmente en temas de medicina basada en evidencia: estudio de trabajos científicos y estadísticos que se consideran luego en la toma de decisiones terapéuticas.

En la Escuela de Graduados de la Facultad de Medicina existen tres especialidades vinculadas a la Tecnología Nuclear: Medicina Nuclear, Oncología Radioterápica e Imagenología.

12.4.5. Facultad de Química

La Cátedra de Radioquímica es responsable de actividades de:

- Docencia. Se dictan cursos optativos de segundo y tercer nivel en Ciencias Químicas de las diferentes carreras de la Facultad: Química Nuclear, Radiofarmacia, Radioquímica, Química de los Radiofármacos, Radiotrazadores en Ciencias Biológicas, Tópicos Avanzados en Radioquímica. También se desarrollan tesis de maestría y doctorado, pasantías para PEDECIBA y ANII, cursos y talleres para docentes de Química de Educación Secundaria, y presentaciones informativas a grupos de estudiantes liceales.

- Investigación científica. Se desarrollan líneas de trabajo en diversas temáticas tales como dosimetría, detección, datación con ^{14}C , diseño, síntesis y optimización de radiofármacos para diagnóstico y terapia (incluidos los nuevos radiofármacos empleados en la tecnología PET-TC).

- Asesoramiento a empresas y usuarios de radiaciones. Allí se realiza el servicio de dosimetría interna, que se ocupa principalmente de trabajadores ocupacionalmente expuestos, por ejemplo a ^{131}I .

El Laboratorio de Datación con ^{14}C es competencia de la Facultad de Química y el Ministerio de Educación y Cultura, funcionando en el local de la primera.

12.4.6. Facultad de Veterinaria

El Laboratorio de Técnicas Nucleares se especializa en técnicas de radioinmunoanálisis (RIA), aplicadas a endocrinología animal. Trabaja en coordinación con otras organizaciones públicas y privadas, nacionales e internacionales, como la Facultad de Agronomía, el Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), el Instituto Pasteur, etc.; se ejerce docencia participando de diferentes cursos de grado, de posgrado y pasantías y se realiza investigación en el área que le compete.

12.5. Aplicaciones clínicas

Existen dos grandes tipos de aplicaciones clínicas: las correspondientes a la llamada Medicina Nuclear, que trabajan con fuentes abiertas, y las correspondientes a la Radioterapia, que trabajan con fuentes cerradas.

12.5.1. Medicina Nuclear

En nuestro país se desarrollan actividades de diagnóstico y tratamiento de patologías que involucran el uso de nucleidos radiactivos.

En el Centro de Medicina Nuclear del Hospital de Clínicas se realizan actividades terapéuticas y (mayoritariamente) de diagnóstico de algunas enfermedades.

12.5.1.1. Actividades de diagnóstico

- Centellogramas. A través de gammacámaras, previa administración al paciente de un radiofármaco (la mayoría de los utilizados son marcados con ^{99m}Tc), se obtienen imágenes que permiten diagnosticar enfermedades tales como: enfermedad coronaria, lesiones óseas, embolia pulmonar, insuficiencias renales, alteraciones metabólicas del sistema nervioso, etc. Asimismo, se pueden utilizar para realizar el seguimiento y evaluación de algunas terapias.

- Estudios hematológicos. Se utilizan radiofármacos marcados con ^{59}Fe y ^{51}Cr .

12.5.1.2. Actividades terapéuticas

- Tratamientos de cáncer diferenciado de tiroides e hipertiroidismo, con ^{131}I .

- Terapia de dolor, para metástasis óseas, con ^{188}Re y ^{177}Lu .

- Tratamientos para pacientes hemofílicos, con ^{188}Re .

En el Laboratorio de Radiofarmacia del Centro se preparan los radiofármacos: se marca el fármaco con el radionucleido correspondiente y se preparan las dosis adecuadas, según cuáles sean las características del estudio y del paciente. Casi todos los servicios brindados son de carácter ambulatorio.

El Centro Uruguayo de Imagenología Molecular (CUDIM) es una organización de derecho público no estatal, sin fines de lucro, creada por ley 18172 del 31 de agosto de 2007. Su control administrativo lo ejerce el Ministerio de Salud Pública y se integra por un Director General y un Consejo Honorario de Administración y Coordinación, integrado por el Director General y representantes de: Ministerio de Salud Pública (MSP), Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII), Universidad de la República (UdelaR) y Universidad de Upsala (Suecia).

La dirección ejecutiva la integran investigadores y profesionales del área biomédica pertenecientes a Facultad de Ciencias, Facultad de Medicina y Facultad de Química.

El CUDIM cuenta con:

- Un ciclotrón; es un acelerador de iones que actúan como proyectiles sobre nucleidos estables, transformándolos en radionucleidos emisores de positrones como ^{18}F , ^{11}C y ^{15}O .
- Módulos de síntesis; se trata de sistemas automatizados para la preparación de radiofármacos.
- Tres tomógrafos PET/CT (dos para uso con pacientes y uno para investigación con animales); estos son dispositivos que permiten obtener imágenes tridimensionales de la distribución en el organismo de radiofármacos marcados con emisores de positrones.

Se realizan actividades de:

- Diagnóstico clínico, principalmente a nivel oncológico y neurológico, destinado a pacientes del área pública y privada.
- Investigación, en el área de desarrollo de tecnología ciclotrón-PET/CT y en la evaluación y desarrollo de radiofármacos.
- Capacitación, destinada a profesionales y técnicos vinculados al área.

El Hospital Pasteur, perteneciente a la Administración de los Servicios de Salud del Estado (ASSE), dispone de habitaciones e infraestructura adecuada para brindar atención a pacientes que realizan tratamientos de Medicina Nuclear; dicho servicio se realiza conjuntamente con una empresa privada.

12.5.2. Radioterapia

El Departamento de Oncología del Hospital de Clínicas tiene dos servicios bien diferenciados, que trabajan juntos en algunos tratamientos y actividades: la Cátedra de Oncología Radioterápica y la Cátedra de Oncología Médica.

El Servicio de Oncología Radioterápica cumple con actividades de asistencia, docencia e investigación.

Actividades de asistencia: se realizan tratamientos de radioterapia para enfermedades oncológicas y para enfermedades benignas como cicatriz queloide, obstrucción coronaria, tumores benignos del sistema nervioso central, espinas calcáneas. Los tratamientos de radioterapia pueden efectuarse a través de una fuente cerrada emisora de radiaciones colocada a distancia (teleterapia) o a través de una fuente cerrada emisora de radiaciones ubicada dentro o en inmediata proximidad con el paciente (braquiterapia). La teleterapia se realiza con radiación gamma proveniente de una fuente de ^{60}Co , o con rayos X provenientes de un acelerador lineal de electrones (LINAC). En la braquiterapia se pueden utilizar diferentes radionucleidos.

Son competencia de ASSE:

- El Instituto Nacional del Cáncer que cuenta, entre otros servicios, con las instalaciones e instrumental adecuados para realizar tratamientos de radioterapia.
- El Centro Hospitalario Pereira Rossell que, abocado a la atención de niños y mujeres, cuenta, entre sus múltiples servicios, con el Instituto de Radiología y Centro de Lucha Contra el Cáncer, en el que se realizan entre otros, tratamientos de radioterapia, tanto de teleterapia como de braquiterapia.
- El Hospital Regional de Tacuarembó que cuenta desde 2009 con el Centro Oncológico del Norte, primer instituto público de estas características en el norte del país. En él, hay instalaciones e instrumental adecuado para atender con tecnología moderna, a los habitantes de gran parte del país, evitando así su traslado a la capital. En 2010 se inauguró el Alojamiento Pablo Estramín, con habitaciones para quince pacientes del norte

del país, que requieran tratamientos con radioterapia. La radioterapia se realiza con un LINAC que se complementa con un tomógrafo para planificación.

Existen centros privados de salud que brindan tanto servicios de Medicina Nuclear como de Radioterapia; algunos de ellos netamente especializados.

12.6. Tecnogestión, aplicaciones industriales y suministros

12.6.1. El Laboratorio de Tecnogestión

Antes llamado «Laboratorios de la División Promoción y Desarrollo de la Tecnología Nuclear», el Laboratorio de Tecnogestión depende de la Dirección General de Secretaría del MIEM.

Las actividades desarrolladas por este grupo abarcan las áreas que relacionan a las radiaciones ionizantes con la salud, el ambiente, la industria, la minería, la geología y los alimentos. Se realiza prestación de servicios, ejecución de proyectos, capacitación y difusión.

Existe equipamiento adecuado para realizar estudios de contaminación en sedimentos, suelos, partículas del aire, biomonitores, aguas, vegetales, calidad de aire, utilización de trazadores colorantes y radiactivos, conductividad y temperatura en cursos de agua, análisis residual de radiactividad en diversas muestras (alimentos, minerales, aguas y muestras ambientales), análisis fisicoquímico de aguas, entre otras.

El Laboratorio es responsable de ejecutar el Plan de Vigilancia de Radiactividad Ambiental en nuestro país. Se analizan muestras de suelos, partículas del aire, aguas y alimentos de todos los departamentos del país.

Se trata del único laboratorio en el país que es patrón secundario de metrología de radiaciones ionizantes.

12.6.2. Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU)

Es una persona de derecho público no estatal, administrada por un directorio conformado por un representante del MIEM (que oficia de presidente), un representante de la Cámara de Industrias del Uruguay (CIU) y uno del Banco de la República (BROU).

Desde el año 2003 el LATU dispone de un equipo de irradiación a escala piloto con fines biotecnológicos para apoyar a varios sectores de la industria: alimentaria en general, médico-farmacéutica, cosmética, herbolaria naturista, posibilitando realizar pruebas que permitieran un incremento de la producción, elevar la calidad y bajar costos de producción.

El irradiador incluye como componente fundamental el módulo de irradiación, que posee una fuente de ^{60}Co de inicialmente 80.000 Ci. Las posibles aplicaciones biotecnológicas son:

- Inhibición de germinación de bulbos, tubérculos y raíces
- Control de plagas en frutas y granos
- Retraso de maduración en frutas para exportación
- Extensión de vida útil en carnes frescas envasadas y en frutas por eliminación de microorganismos que causan la descomposición
- Reducción o eliminación de agentes patógenos en alimentos que afectan a la salud humana
- Esterilización industrial

- Esterilización de material biomédico, productos farmacéuticos y cosméticos
- Producción de modificaciones que mejoran las características en determinados polímeros.

12.7. Ejercicios

1. Los desechos radiactivos procedentes de los distintos lugares del país se gestionan y depositan provisoriamente en:
 - a. el Centro de Investigaciones Nucleares;
 - b. la Facultad de Química;
 - c. el MIEM;
 - d. la Facultad de Ingeniería.
2. Las técnicas de Medicina Nuclear que implican el uso de fuentes abiertas de material radiactivo no son llevadas a cabo en:
 - a. el CUDIM;
 - b. el Hospital de Clínicas;
 - c. el Hospital Regional de Tacuarembó;
 - d. el Centro Hospitalario Pereira Rossell.
3. La ARNR es responsable de:
 - a. ser enlace con el OIEA;
 - b. activar el Plan de Respuesta de Emergencia Nacional para Accidentes Radiológicos;
 - c. actividades de investigación;
 - d. otorgar licencias para el uso de fuentes radiactivas.
4. La gestión de la Estación de Control de Radiactividad Ambiental en partículas del aire, sita en el departamento de Colonia, está a cargo de:
 - a. el Centro de Investigaciones Nucleares;
 - b. el Laboratorio de Tecnogestión;
 - c. el ARNR;
 - d. el Instituto de Investigaciones Biológicas Clemente Estable.
5. El CUDIM cuenta con:
 - a. un acelerador lineal de electrones;
 - b. tomógrafos PET/CT;
 - c. sistemas de preparación de radiofármacos;
 - d. un ciclotrón.
6. La Unidad de Irradiación del LATU utiliza, para realizar la irradiación de alimentos y otros usos, una fuente de:
 - a. ^{11}C ;
 - b. ^{60}Co ;
 - c. $^{99\text{m}}\text{Te}$;
 - d. ^{135}I .
7. El Servicio de Dosimetría Biológica, responsable de emplear biodosimetría en casos de sobreexposición a radiaciones ionizantes, a nivel individual o a gran escala, está a cargo de:
 - a. la Facultad de Medicina;
 - b. la Facultad de Química;

- c. el Instituto de Investigaciones Biológicas Clemente Estable;
 - d. el Centro de Investigaciones Nucleares.
8. En la Cátedra de Radioquímica de la Facultad de Química se lleva a cabo, entre otras actividades:
- a. dosimetría biológica;
 - b. dosimetría personal interna;
 - c. dosimetría personal externa;
 - d. dosimetría ambiental.

Anexos

Anexo I - Resumen de unidades, ecuaciones y símbolos

Tipo	Símbolo	ΔZ	ΔA
Alfa	$\alpha, {}^4_2\alpha, {}^4_2\text{He}$	2	4
Beta	$\beta, \beta^-, {}^0_{-1}e, {}^0_{-1}\beta$	1	0
Gamma	$\gamma, {}^0_0\gamma$	0	0
Positrón	$\beta^+, {}^0_{+1}e, {}^0_{+1}\beta$	1	0
Neutrón	$n, {}^1_0n$	0	1
Protón	$p, {}^1_1p, {}^1_1\text{H}^{1+}$	1	1
Deuterón	$d, {}^2_1d, {}^2_1\text{H}$	1	2
Tritio	$t, {}^3_1t, {}^3_1\text{H}^{1+}$	1	3

$$1 \text{ GeV}/c^2 = 1.783 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$1 \text{ u} = 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$1 \text{ u} = 931.5 \text{ MeV}$$

$$1 \text{ eV} = 1.6022 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ cal} = 4.184 \text{ J}$$

$$1 \text{ \AA} = \text{m}$$

$$1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$$

$$1 \text{ Ci (curie)} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq (becquerel)}$$

$$r = r_0 \sqrt[3]{A} = \pi \cdot r^2 \quad r_0 = (1, 1 - 16) \times 10^{-15} \text{ m}$$

$$S = [s(s+1)]^{1/2} h, \quad s = \frac{1}{2}$$

$$S_z = m_s h, \quad m_s = s, s-1$$

$$J = [j(j+1)]^{1/2} h$$

$$J_z = m_j h, \quad m_j = -j, -j+1, \dots, j-1$$

$$\Delta m = m_{\text{inicial}} - m_{\text{final}}$$

$$\Delta m = (Z_{\text{mp}} - N_{\text{mn}} - Z_{\text{mc}}) - M_{\text{at}}$$

$$m = m_0 \cdot \gamma$$

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

$$\frac{-dN_A}{dt} = \lambda N_A$$

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

$$\frac{-dN_A}{dt} = A$$

$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$

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

$$A_2 = \lambda_B N_2 = \frac{\lambda_B}{\lambda_B - \lambda_A} A_1^0 (e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t})$$

$$E_{e^-} = h\nu - E_{enlace}$$

Números *mágicos*:

2, 8, 20, 28, 50, 82, 126

Masa electrón = 0.000549 u

Masa protón = 1.007277 u

Masa neutrón = 1.008665 u

1 b (barns) = 10^{-28} m²

M (Mega) = 10^6

Anexo II - Resolución de ejercicios

Apartado 1

1. Opción correcta: a.
2. Los quarks, de espín 1/2, son: up, charm y top, todos de carga 2/3, down, strange y bottom, todos de carga -1/3.
3. Opción correcta: a y b.

Apartado 2

1. Opción correcta: a y b.
2. El neutrón está conformado por dos quarks down (d) y un quark up (u).
3. El protón está conformado por dos quarks up (u) y un quark down (d).
4. La fuerza que mantiene unidos los nucleones es la partícula elemental llamada gluón.
- 5.

Z = número de protones

A = número de nucleones (número másico)

N = número de neutrones

$A = Z + N$

Sabiendo que: $r = r_0 \sqrt[3]{A} = \pi \cdot r^2$ $r_0 = 1.1 - 1.6 \times 10^{-15} m = 1.1 fm$

O_8^{16}	$r = 1.1 \times \sqrt[3]{16} = 2.77 fm$
	$r = 1.6 \times \sqrt[3]{16} = 4.03 fm$
Pb_{82}^{208}	$r = 1.1 \times \sqrt[3]{208} = 6.51 fm$
	$r = 1.6 \times \sqrt[3]{208} = 9.47 fm$

Apartado 3

1. El siguiente nucleido sería estable:

${}_{50}^{120}Sn$, posee un número de protones de 50.

${}_{83}^{209}Bi$, posee un número de neutrones de 126.

Los siguientes nucleidos serían inestables:

${}_{49}^{115}In$, ${}_{83}^{207}Bi$, ${}_{83}^{208}Bi$, no poseen números mágicos ni en protones ni en neutrones.

2. La energía de enlace por nucleón es una medida de la estabilidad del núcleo. Para determinarla se debe conocer el defecto de masa, ya que a partir de este se puede conocer la energía que invierte el núcleo en mantener juntos a sus nucleones.

$$\Delta m = (np + mp) + (n^{\circ}e - me) + (n^{\circ}neutrones \cdot m_{neutron}) - m_{experimental} =$$

$$\Delta_{17}^{37}CI = (17 \cdot 1.007277u) + (17 \cdot 0.000549u) + (20 \cdot 1.008665u) - 36.965899u = 0.340443u$$

$$1u \rightarrow 931.5 Mev$$

$$0,340443 \rightarrow x = 317 Mev$$

Esta energía se denomina *energía de enlace* del núcleo y es la energía que se libera al formarse el núcleo a partir de sus nucleones constituyentes; coincide con la energía que hay que proporcionar al núcleo para separar los nucleones que lo forman.

Dividiendo la energía de enlace entre el número de nucleones que contiene el núcleo se obtiene la energía de enlace por nucleón. Cuanto mayor sea la energía de enlace por nucleón más estable será el núcleo.

Energía de enlace por nucleón = $317 \text{ MeV} / 37 \text{ nucleones} = \mathbf{8.57 \text{ MeV/nucleón}}$

3. Se va a representar para el ${}^{12}C$

$$\Delta m = 6 (m_p + m_n + m_e) - 12.000000 = 0.098946$$

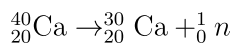
Recordar que $m_e = 0.000549 \text{ u}$, $m_n = 1.008665 \text{ u}$ y $m_p = 1.007277 \text{ u}$

La energía de ligadura (enlace) = $\mathbf{0.098946 \text{ u}}$ o sea $\mathbf{92.17 \text{ MeV}}$

Mientras que la energía de ligadura por nucleón = $92.17 / 12 = \mathbf{7.68 \text{ MeV}}$

Para los otros nucleidos se realiza el mismo procedimiento, tomando en cuenta el número de protones, neutrones y electrones correspondiente, así como la masa del nucleido en cuestión.

4. El proceso en cuestión será:



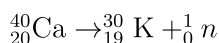
$$\Delta m = m_{\text{núcleo } {}_{20}^{40}\text{Ca}} - m_1n - m_{\text{núcleo } {}_{20}^{39}\text{Ca}}$$

$$\Delta m = MA_{20}^{40}\text{Ca} - 20m_{e^-} - m_1n - (MA_{20}^{39}\text{Ca} - 20m_{e^-})$$

$$\Delta m = MA_{20}^{40}\text{Ca} - m_1n - MA_{20}^{39}\text{Ca} = 0.016767u$$

$$E = \Delta m \times 931.5 = \mathbf{15.62\text{MeV}}$$

5. El proceso en cuestión será:



$$\Delta m = m_{\text{núcleo } {}_{20}^{40}\text{Ca}} - m_1p - m_{\text{núcleo } {}_{19}^{39}\text{K}}$$

$$\Delta m = MA_{20}^{40}\text{Ca} - 20m_{e^-} - m_1p - (MA_{19}^{39}\text{K} - 19m_{e^-})$$

$$\Delta m = MA_{20}^{40}\text{Ca} - m_{e^-} - MA_{19}^{39}\text{K} = 8.947 \times 10^{-3}u$$

$$E = \Delta m \times 931.5 = \mathbf{-8.33\text{MeV}}$$

6. Con base en los datos de la letra y del ejercicio 4 se sabe que la energía necesaria para extraer el neutrón más débilmente ligado al ${}^{40}\text{Ca}$ es de 15.62 MeV. Se puede notar que los núcleos con número par de nucleones tienen energías más altas; esto está en concordancia con el modelo de capas, donde en el caso de los pares tienen todos los nucleones apareados. En el caso del ${}^{40}\text{Ca}$ es aún más estable (mayor energía) que el nucleido ${}^{42}\text{Ca}$ dado que tiene el mismo número de neutrones y de protones.

La diferencia de energías entre ${}^{41}\text{Ca}$ y ${}^{43}\text{Ca}$ está dada por la proporción N/Z de los nucleidos correspondientes. Así dado que el ${}^{41}_{20}\text{Ca}$ posee 20 protones y 21 neutrones y que el ${}^{43}_{20}\text{Ca}$ posee 20 protones y 23 neutrones, en este último nucleido será más favorable (menor energía) extraer un neutrón desde el núcleo.

7. Para realizar este ejercicio se aplica la siguiente fórmula:

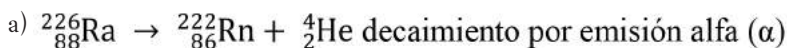
$$Z_A = \frac{A}{1.98 + 0.01493\sqrt[3]{A^2}}$$

de donde se encuentra el Z más adecuado (para dar un núcleo más estable) dado el número de nucleones.

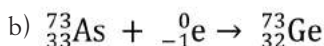
Apartado 4

1. Para la resolución de este ejercicio se debe recordar la notación utilizada:
-Donde X es el símbolo del elemento, A es el número másico y Z el número atómico

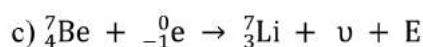
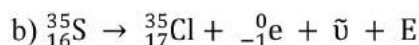
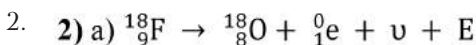
Además ${}_{-1}^0\text{e}$ es el electrón, ${}_{+1}^1\text{p}$ es el protón y ${}_{0}^1\text{n}$ es el neutrón, donde los subíndices indican la carga y los superíndices los números másico



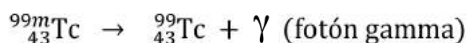
En el proceso ocurre una transformación de un nucleido de Ra. En dicho proceso se emite una partícula con 4 nucleones, característica de un decaimiento alfa (α) o ${}^4_2\text{He}$. Para deducir el resto de las partículas y nucleidos que forman parte de la reacción nuclear observe que el valor de A para el Ra es igual a la suma de los valores de A para el Rn y He. Note que el valor de Z para el Ra debe ser igual que la suma de los dos valores de Z para el Rn y He.



El proceso es una captura electrónica. Como el elemento queda definido por Z en el caso de As el $Z = 33$. En el caso de completar los símbolos del lado de los productos, observando la tabla periódica se sabe que un $Z = 32$ se corresponde a un núcleo de Ge y el valor de A para el Ge en este caso es igual a la suma de los valores de A en el lado de los reactivos.

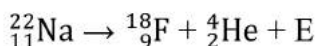


«m», metaestable, es un estado excitado del núcleo, que se desexcita para d.llegar a su nivel basal mediante la emisión de uno o más rayos gamma.



3. El ejercicio inicialmente plantea demostrar que el ${}^{22}\text{Na}$ es alfa estable, entonces se puede comprobar que el decaimiento no es favorable energéticamente a través del cálculo del Δm .

Primero, se debe plantear la reacción nuclear:



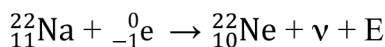
y luego calcular el Δm para este proceso:

$$\Delta m = m \text{ at. padre} - m \text{ at. hijo} - m \text{ partícula } \alpha = \\ \Delta m = 21.994437 \text{ u} - 18.000937 \text{ u} - 4.002603 \text{ u} = -0.009103$$

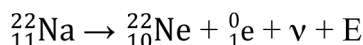
Una masa negativa, o sea una energía negativa, indica que dicho decaimiento no conduce a una situación favorable desde un punto de vista energético. Por ello se puede decir que el nucleido no va a decaer por emisión alfa.

Ahora se demostrará que es inestable con respecto a la captura electrónica, o sea que puede decaer por CE.

Se plantea la reacción nuclear y el Δm :

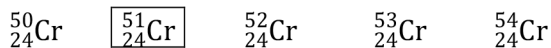


$\Delta m = m \text{ at. padre} - m \text{ at. hijo} = 21.994437 \text{ u} - 21.991385 \text{ u} = 0.003052 \text{ u}$
 $\Delta m > 0$, entonces el ${}_{11}^{22}\text{Na}$ puede decaer espontáneamente por captura electrónica. Por último, se analizará si ${}_{11}^{22}\text{Na}$ es inestable respecto a la emisión de positrones.



$\Delta m = m \text{ at. padre} - m \text{ at. hijo} - 2 m e^- =$
 $\Delta m = 21.994437 \text{ u} - 21.991385 \text{ u} - 2 \times 0.000549 \text{ u} = 0.001954 \text{ u}$
 $\Delta m > 0$, entonces el ${}_{11}^{22}\text{Na}$ puede decaer espontáneamente por emisión de positrones.

4.

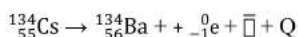


$$N=26 \quad N=27 \quad N=28 \quad N=29 \quad N=30$$

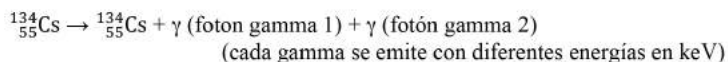
Si se analizan los posibles decaimientos del ${}_{24}^{51}\text{Cr}$ en función de la relación N/Z , se puede ver que dicho nucleido tiene un déficit de neutrones respecto del ${}_{24}^{52}\text{Cr}$, ${}_{24}^{53}\text{Cr}$ y ${}_{24}^{54}\text{Cr}$, por lo que podría decaer por captura de electrones (CE) o emisión β^+ . Si se comparan ahora ${}_{24}^{51}\text{Cr}$ respecto del ${}_{24}^{50}\text{Cr}$ se observa un exceso de neutrones, por lo que para acercarse a la estabilidad el ${}_{24}^{51}\text{Cr}$ podría emitir una partícula β^- , transformando un neutrón en un protón y liberando un electrón.

En este caso la relación N/Z no es suficiente para determinar el tipo de emisión del ${}_{24}^{51}\text{Cr}$, es decir que estudiando la relación N/Z se puede predecir el decaimiento por β^+ o β^- o CE; un estudio de la energía involucrada, defecto másico, en cada uno de los procesos permitiría predecirlo.

5. decaimiento β^-



decaimiento γ

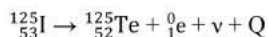


Luego del decaimiento del ${}^{134}\text{Cs}$ tanto por β^- y γ el nucleido resultante es el ${}^{134}_{56}\text{Ba}$, por lo que la respuesta correcta es a ($A = 134$).

f. El ${}^{125}\text{I}$ tiene, con respecto a su isótopo estable (${}^{127}\text{I}$), un déficit de neutrones (72 vs 74), por lo que sería de esperar que decayera por captura electrónica o emisión de positrones.

b. Para conocer los energéticamente posibles decaimientos se determinará Δm de cada proceso:

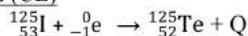
c. Decaimiento β^+



$$\Delta m = m_{\text{padre}} - m_{\text{hijo}} - 2m_{\text{e}^-} = 124.904578 - 124.904418 - (2 \times 0.000549) < 0$$

Es un proceso NO espontáneo

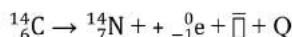
Decaimiento por captura electrónica (CE)



$$\Delta m = m_{\text{padre}} - m_{\text{hijo}} = 124.904578 - 124.904418 > 0$$

Es un proceso espontáneo, por lo tanto el proceso es energéticamente posible.

7. Primero se plantea el decaimiento del β^- del ${}^{14}\text{C}$:



Luego se procede a calcular la diferencia de masas (Δm)

$$\Delta m = m_{\text{padre}} - m_{\text{hijo}} = M_{A_{14}\text{C}} - M_{A_{14}\text{N}} = 0.000168 \text{ u}$$

$\Delta m > 0$ Inestable, por lo tanto es un proceso de emisión espontáneo.

$$1 \text{ u} \rightarrow 931.5 \text{ MeV}$$

$$\text{Por lo tanto: } 0.000168 \text{ u} \rightarrow X = 0.1565 \text{ MeV}$$

Entonces, por cada átomo de ${}^{14}\text{C}$ que decae por una emisión β^- se liberan 0.1565 MeV, así que la energía que libera un mol de átomos será:

$$\begin{aligned} 1 \text{ átomo de } {}^{14}\text{C} \text{ desintegrado} &\rightarrow 0.1565 \text{ MeV} \\ 6.022 \times 10^{23} \text{ átomos de } {}^{14}\text{C} \text{ desintegrado} &\rightarrow X \\ X &= 9.42 \times 10^{22} \text{ MeV (mol de } {}^{14}\text{C} \text{ desintegrado)}^{-1} \end{aligned}$$

Resta, ahora, determinar cuántos moles de metano deben quemarse (reacción de

combustión) para que se libere la misma energía. Para esto será necesario trabajar con las mismas unidades de energía, recordando que:

$$1.6022 \times 10^{-19} \text{ J} \rightarrow 1 \text{ eV} \quad \text{y} \quad 4.184 \text{ J} \rightarrow 1 \text{ caloría}$$

$$1.6022 \times 10^{-13} \text{ J} \rightarrow 1 \text{ MeV}$$

$$Y \rightarrow 9.42 \times 10^{22} \text{ MeV}$$

El X se corresponde a $Y = 1.51 \times 10^{10} \text{ J}$. (mol de ^{14}C desintegrado) $^{-1}$ y en calorías será:

$$4.184 \text{ J} \rightarrow 1 \text{ caloría}$$

$$1.51 \times 10^{10} \text{ J} \rightarrow Z = 3.61 \times 10^9 \text{ cal} \approx 3.61 \times 10^6 \text{ kcal}$$

(E liberada por un mol de ^{14}C desintegrado)

Ya que la ecuación termoquímica se presenta en kcal/mol,

$$118 \text{ kcal} \rightarrow 1 \text{ mol de } \text{CH}_4$$

$$3.61 \times 10^6 \text{ kcal} \rightarrow W = 30593 \text{ moles de } \text{CH}_4$$

Apartado 5

1. La actividad (A) de una sustancia representa el número de átomos que se desintegran por unidad de tiempo y puede ser expresado por:

$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$

siendo, además, la constante de decaimiento

$$\lambda = \ln 2/t_{1/2} \rightarrow \lambda = \ln 2 / 6 \text{ h} = 0.1155 \text{ h}^{-1}$$

$$A_{\text{hora } 12} = 1 \times 10^8 \text{ Bq} \times e^{-0.1155 \text{ h}^{-1} \times 2 \text{ h}} = 79373947 \text{ Bq} \approx 79.37 \text{ MBq}$$

$$1 \text{ Ci} \rightarrow 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$X = 2.14 \text{ mCi} \rightarrow 79373947 \text{ Bq}$$

2. Luego de 12 h la actividad se puede expresar en función de la actividad inicial como:

$$A = 0.25 A_0$$

aplicando

$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$

en este caso será

$$0.25 A_0 = A_0 e^{-\lambda t}$$

$$0.25 = e^{-\lambda t}$$

$$\ln(0.25) = \ln(e^{-\lambda t})$$

$$\ln(0.25) = -\lambda t$$

$$\lambda = -(\ln(0.25)/t) = -(\ln(0.25)/12 \text{ h}) = 0.1155 \text{ h}^{-1}$$

$$t_{1/2} = \ln 2 / \lambda = \ln 2 / 0.1155 \text{ h}^{-1} = 6 \text{ h}$$

3.

a) Primero se determinará cuánta masa corresponde a C:

$$88 \text{ Kg} \rightarrow 100\%$$

$$X \rightarrow 18\%$$

$$X = 15.84 \text{ Kg} \text{ corresponde a C}$$

$$100\% \text{ C} \rightarrow 15.84 \text{ Kg}$$

$$1.58 \times 10^{-100} \text{ }^{14}\text{C} \rightarrow X = 2.5 \times 10^{-11} \text{ Kg} \approx 2.5 \times 10^{-8} \text{ g de } ^{14}\text{C}$$

b) Sabiendo que $\lambda N_A = A$

$$A = (\ln 2 / t_{1/2}) \times N$$

Se desea calcular la actividad de átomos ^{14}C contenidos en 2.5×10^{-8} g.

$$14.003242 \text{ g} \rightarrow 6.022 \times 10^{23} \text{ átomos de } ^{14}\text{C}$$

$$2.5 \times 10^{-8} \text{ g} \rightarrow X = 1.075 \times 10^{15} \text{ átomos de } ^{14}\text{C}$$

Como se solicita la actividad en dpm (desintegraciones por minuto) se debe pasar el $t_{1/2}$ del ^{14}C de años (tal como aparece en el dato) a minutos:

$$5568 \times 365 \times 24 \times 60 = 2926540800 \text{ min}$$

$$A = (\ln 2 / 2926540800 \text{ min}) \times 1.075 \times 10^{15} \text{ átomos de } ^{14}\text{C} = \mathbf{254612 \text{ dpm}}$$

4. El proceso a estudiar es:



$$\lambda N_A = A$$

$$A = (\ln 2 / t_{1/2}) \times N$$

$$252 \text{ g de } ^{252}\text{Cf} \rightarrow 6.022 \times 10^{23} \text{ átomos de } ^{252}\text{Cf}$$

$$1 \times 10^{-3} \text{ g} \rightarrow X = 2.4 \times 10^{18} \text{ átomos de } ^{252}\text{Cf}$$

Se debe calcular las dps (desintegraciones por segundo), por lo tanto, se pasa el $t_{1/2}$ de años a segundos:

$$2645 \times 365 \times 24 \times 60 \times 60 = 83412720000 \text{ segundos}$$

$$A = (\ln 2 / 83412720000 \text{ segundos}) \times 2.4 \times 10^{18} \text{ átomos de } ^{252}\text{Cf} = 1.99 \times 10^7 \text{ dps}$$

Por lo tanto, 1.99×10^7 partículas α serán emitidas por segundo

5.

a) Para determinar el $t_{1/2}$ de ^{230}Th , se utilizan las siguientes dos ecuaciones:

$$t_{1/2} = \ln 2 / \lambda$$

$$y \rightarrow \lambda = A / N$$

agrupándolas y despejando $t_{1/2}$:

$$t_{1/2} = \ln 2 / (A / N)$$

Para resolverlo se debe calcular el valor de N, que es el dato que falta:

$$6.022 \times 10^{23} \text{ átomos de } ^{230}\text{Th} \rightarrow 230 \text{ g}$$

$$X \rightarrow 0.1 \times 10^{-3} \text{ g} \text{ así que } X = 2.618 \times 10^{17} \text{ átomos de } ^{230}\text{Th}$$

$$t_{1/2} = \ln 2 / (4.3 \times 10^6 \text{ dpm} / 2.618 \times 10^{17} \text{ átomos de } ^{230}\text{Th}) = \mathbf{4.22 \times 10^{10} \text{ min}}$$

b) Según la ecuación, a partir de un átomo de ^{234}U se produce 1 átomo de ^{230}Th . Por lo tanto, 2.618×10^{17} átomos de ^{230}Th se producirán a partir del decaimiento de 2.618×10^{17} átomos de ^{234}U .

$$A_{234\text{U}} = (\ln 2 / t_{1/2}) \times N$$

$$A = (\ln 2 / (2.45 \times 10^5 \text{ años} \times 365 \times 24 \times 60 \times 60 \text{ segundos})) \times 2.618 \times 10^{17} \text{ át de } {}_{234}\text{U}$$

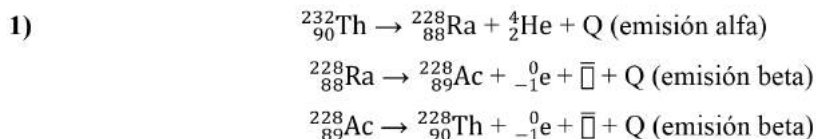
$$A = 23486.72 \text{ dps}$$

La relación entre desintegraciones por segundo y el Ci (curie) es:

$$3.7 \times 10^{10} \text{ dps} \rightarrow 1 \text{ Ci}$$

$$23486.72 \text{ dps} \rightarrow X = 6.35 \times 10^{-7} \text{ Ci de } {}_{234}\text{U}$$

Apartado 6



.....

al final de la cadena se llega a un radionucleido estable que es el ${}_{82}^{208}\text{Pb}$



$$\Delta m = \text{MAt padre} - \text{MAt hijo}$$

$$\Delta m = \text{MAt } {}_{15}^{32}\text{P} - \text{MAt } {}_{16}^{32}\text{S}$$

$$\Delta m = 32.93907 - 31.972070 = 1.834 \times 10^{-3} \text{ u}$$

$$E_{\text{máx}} = 1.834 \times 10^{-3} \times 931.5 = 1.71 \text{ MeV}$$

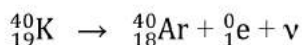
3.

$$\Delta m = \text{MAt padre} - \text{MAt hijo}$$

$$\Delta m = \text{MAt } \quad - \text{MAt } \quad$$

$$\Delta m = 39.963998 - 39.962591 = 1.411 \times 10^{-3} \text{ u} \rightarrow \text{Es espontánea}$$

$$E_{\text{máx}} = 1.411 \times 10^{-3} \times 931.5 = 1.31 \text{ MeV}$$

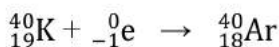


$$\Delta m = \text{MAt padre} - \text{MAt hijo} - 2m_e$$

$$\Delta m = \text{MAt } \quad - \text{MAt } \quad - 2m_e$$

$$\Delta m = 39.963998 - 39.962383 - 2(0.000549) = 5.18 \times 10^{-4} \text{ u} \rightarrow \text{Es espontánea}$$

$$E_{\text{máx}} = 5.18 \times 10^{-4} \times 931.5 = 1.50 \text{ MeV}$$

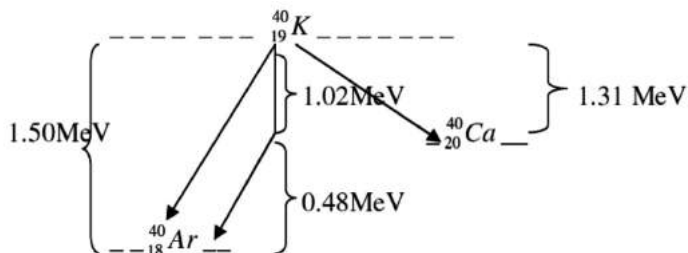


$$\Delta m = M_{\text{At padre}} - M_{\text{At hijo}}$$

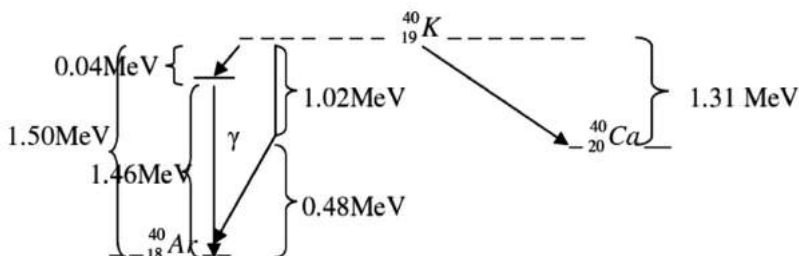
$$\Delta m = 39.963998 - 39.962383 = 1.616 \times 10^{-3} \text{ u} \rightarrow \text{Es espontánea}$$

$$E_{\text{máx}} = 1.50 \text{ MeV}$$

Para construir el esquema, se coloca el hijo de mayor Z a la derecha y el de menor Z a la izquierda.

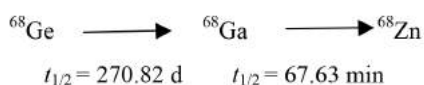


Como en el enunciado se indica que se produce un rayo gamma de 1.46 MeV, el esquema queda de la siguiente manera:



Apartado 7

1.



Se determina a qué tipo de equilibrio corresponde este proceso, para ello (dada la relación entre λ y $t_{1/2}$) se realiza el cociente entre los $t_{1/2}$ de cada uno de los procesos para verificar la relación entre los λ del proceso y se puede aplicar la relación general que permite definir el tipo de equilibrio, esta es:

Se puede considerar que un equilibrio es transitorio cuando: $t_A > 10 t_B$

Se puede considerar que un equilibrio es secular cuando: $t_A > 100 t_B$

$$\frac{t_A}{t_B} = \frac{270.82 \text{ d} \times 24 \text{ h/d} \times 60 \text{ min/h}}{67.63 \text{ min}} = 5766.4 \longrightarrow \text{Equilibrio secular}$$

$$A_B = \lambda_B N_2 = \frac{\lambda_B}{\lambda_B - \lambda_A} A_1^0 (e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t})$$

donde $\frac{\lambda_B}{\lambda_B - \lambda_A}$ tiende a 1, por tanto:

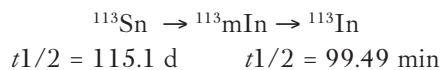
$$A_B = 100 \text{ mCi} \left(e^{-\frac{\ln 2 (2 \times 60)}{(270 \times 24 \times 60)}} - e^{-\frac{\ln 2 (2 \times 60)}{(67.63 \text{ min})}} \right) = 70.9 \text{ mCi}$$

$$\frac{1 \text{ Ci}}{70.9 \times 10^{-3}} = \frac{3.7 \times 10^{10} \text{ dps}}{x} \implies x = 2.62 \times 10^9 \text{ dps}$$

$$N_B = \frac{A_B}{\lambda_B}$$

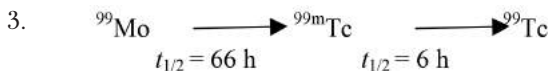
$$N_B = \frac{2.62 \times 10^9 \text{ dps}}{1.7 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}} = 1.54 \times 10^{12} \text{ átomos}$$

2.

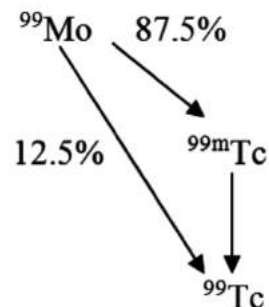


$\frac{t_A}{t_B} = \frac{115.1 \text{ d} \times 24 \text{ h/d} \times 60 \text{ min/h}}{99.49 \text{ min}} = 1664 \rightarrow$ Equilibrio secular,
por lo que la actividad en el tiempo infinito (equilibrio) será:

$$A_{^{113}\text{mIn}} = 100 \mu\text{Ci} \leftarrow A_A = A_B$$



$\frac{t_A}{t_B} = \frac{66 \text{ h}}{6 \text{ h}} = 11 \longrightarrow$ Equilibrio transitorio



$$A_2 = \frac{\lambda_B}{\lambda_B - \lambda_A} A_1^0 e^{-\lambda_A t} = \frac{\lambda_B}{\lambda_B - \lambda_A} A_1$$

Recordando que $t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$ $\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}}$

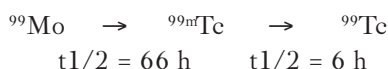
$$A_2 = \frac{1/t_{1/2B}}{1/t_{1/2B} - 1/t_{1/2A}} A_1$$

$$A_2 = \frac{1/6}{1/6 - 1/66} 100 \mu\text{Ci} = 110 \mu\text{Ci}$$

Esto es así, si el ^{99}Mo decayese en un 100 % a ^{99m}Tc , sin embargo ocurre sólo en un 87.5 % por lo tanto

$$A_{^{99m}\text{Tc}} = 96.25 \mu\text{Ci}$$

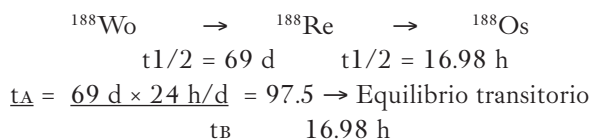
4.



$$5 \times 6 \text{ h} = 30 \text{ h}$$

Se requieren cinco t_B para alcanzar equilibrio transitorio, por lo tanto se encuentra en equilibrio:

5.

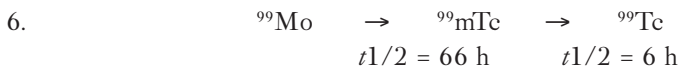


Con un t_B no se encuentra en equilibrio, pues se necesitan cinco t_B :

$$A_B = \frac{\lambda_B}{\lambda_B - \lambda_A} A_1^0 (e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t})$$

$$\lambda_A = \frac{\ln 2}{(69 \times 24)} = 4.18 \times 10^{-4} \text{ h}^{-1} \quad \lambda_B = \frac{\ln 2}{16.98} = 0.041 \text{ h}^{-1}$$

$$A_B = 29.98 \text{ mCi}$$



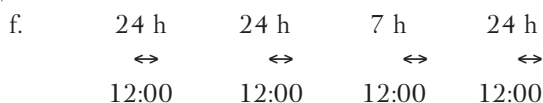
$$t_{\max} = \frac{1}{\lambda_B - \lambda_A} \ln \frac{\lambda_B}{\lambda_A}$$

$$\lambda_A = \ln 2 / 66 = 0.0105 \text{ h}^{-1}$$

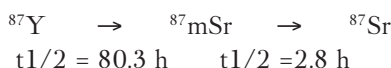
$$\lambda_B = \ln 2 / 6 = 0.1155 \text{ h}^{-1}$$

$$t_{\max} = \frac{1}{0.1155 - 0.0105} \cdot \ln (0.1155 / 0.0105) = \mathbf{22.83 \text{ h}}$$

7. a)



$$24 + 24 + 19 = 67 \text{ h}$$



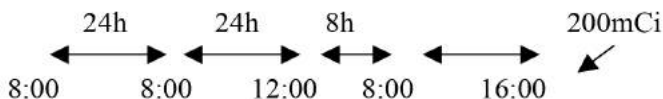
$t_A = 28.7 \rightarrow$ Equilibrio transitorio
 t_B

$5 \times 2.8 = 14 \text{ h}$, pasando 5_{tr} está en equilibrio, por lo tanto a las 67 h el sistema está en equilibrio, pero en 5 h más (en la nueva elución, de las 12:00 del día de hoy) ya no lo está, por lo tanto se aplica la ecuación siguiente con $t = 5 \text{ h}$:

$$A_B = \frac{\lambda_B}{\lambda_B - \lambda_A} A_1^0 (e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t}) = \mathbf{44.97 \text{ mCi}}$$

b) $t_{\max} = \frac{1}{0.2475 - 8.63 \times 10^{-3}} \cdot \ln \left(\frac{0.2475}{8.63 \times 10^{-3}} \right) = \mathbf{14.49 \text{ h}}$

8.



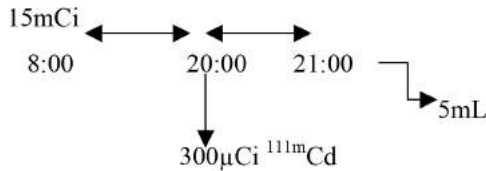
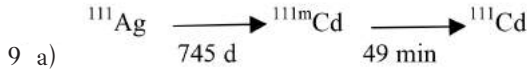
$16 + 24 = 40 \text{ h}$, a las 8:00 a.m. el sistema estará en equilibrio ($5 \times 6 \text{ h} = 30 \text{ h}$)
 Pero, ¿cuál es la actividad de Mo a esa hora? Para ello se necesita saber la situación del sistema 8 h después; estará fuera del equilibrio pues para alcanzarlo se necesitan 30 h. Entonces, para conocer la actividad del radionucleido padre a la hora de la

elución se utiliza la ecuación:

$$200 \text{ mCi} = A_A^0 \times (e^{-\frac{\ln 2(56)}{66}}) \times 0.875 \longrightarrow A_A^0 = 411 \text{ mCi}$$

Finalmente, para conocer la actividad que se eluyó de ^{99m}Tc a las 8:00 a.m. se aplica, por ser un equilibrio transitorio (ejercicio 3 de este apartado):

$$A_2 = \frac{\lambda_B}{\lambda_B - \lambda_A} A_1^0 e^{-\lambda_A t} = \frac{\lambda_B}{\lambda_B - \lambda_A} A_1 = \mathbf{452.1 \text{ mCi}}$$



$$\frac{t_A}{t_B} = \frac{745 \times 24 \times 60}{49 \text{ min}} = 21893.8 \longrightarrow \text{Equilibrio secular}$$

$7 \times 49 \text{ min} = 343 \text{ min} = 5.71 \text{ h}$ son necesarias para llegar al equilibrio

$$A_A = A_B \longrightarrow A_B = 15 \text{ mCi}$$

$$15 \text{ mCi} = 15000 \mu\text{Ci}$$

$$15000 \mu\text{Ci} \times 0.07 = 1050 \mu\text{Ci}$$

$$1050 \mu\text{Ci} \text{ _____ } 100\%$$

$$300 \mu\text{Ci} \text{ _____ } x = \mathbf{29\%}$$

b) En una hora se encuentra fuera del equilibrio, por lo tanto:

$$A_B = \frac{\lambda_B}{\lambda_B - \lambda_A} A_A^0 (e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t})$$

$$A_A^0 = 15 \times (e^{-(\ln 2 / 745 \times 24) \times 12}) = 14,993 \text{ mCi}$$

$$A_B = \mathbf{0.210 \text{ mCi}}$$

Apartado 8

1.
 - b. ^{19}O
 - c. ^{86}Sr
 - d. α
 - e. α
 - f. γ
2.
 - c. (α, n)
 - d. (n, d)
 - e. (p, d)
 - f. (d, α)
 - g. (α, p)
3. Opción correcta: b.
4. Para obtener una mejor separación isotópica se elegiría $^{24}\text{Mg}(n, p)^{24}\text{Na}$.
5. Opción correcta: a.
6. Opción correcta: b.
7. Opción correcta: c.

Apartado 9

1. Efecto fotoeléctrico: en este proceso, el fotón transfiere la totalidad de su energía a los electrones y su propia existencia termina. El electrón escapará de su órbita con una energía cinética igual a la diferencia entre la energía del fotón y su propia energía de enlace. La absorción fotoeléctrica es muy probable para los fotones por debajo de 0.1 MeV si el medio de absorción es agua o tejido biológico. Sin embargo en materiales de alto Z, como el plomo, este proceso es relativamente importante para los fotones de hasta aproximadamente 1 MeV.
Efecto Compton: es por lo general el tipo predominante de interacción de los fotones de energía media (0.3 a 3 MeV). En este proceso el fotón interactúa con un electrón atómico suficientemente como para expulsarlo de su órbita, el fotón conserva una parte de su energía original y continúa moviéndose en una nueva dirección. Por lo tanto, el efecto Compton tiene un componente de absorción y otro de dispersión.
Producción de pares: los fotones con energía superior a 1.024 MeV (no es el caso del ^{137}Cs), bajo la influencia del campo electromagnético de un núcleo, pueden ser convertidos en electrones y positrones. Al menos 1.024 MeV de energía son necesarios para la producción de pares, ya que la energía equivalente a la masa en reposo del electrón y el positrón es de 0.51 MeV cada uno. La probabilidad de producción de pares aumenta con Z del material y con la energía del fotón.

2. Se aplica la ley de Bouguer-Lambert:

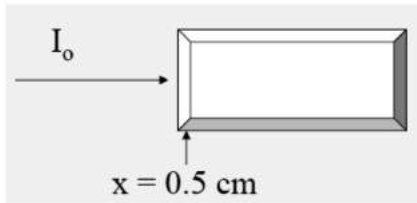
$$I = I_0 e^{-\mu d}$$

Se considera que la radiación inicial, antes de penetrar al plomo, es 100%:

$$I = 100 \% e^{-(4.4 \cdot \text{cm}^{-1} \cdot 0.5 \text{ cm})}$$

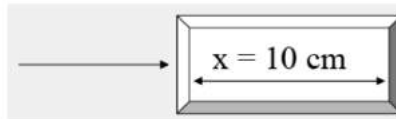
$$I = 11.1 \%$$

3. a)



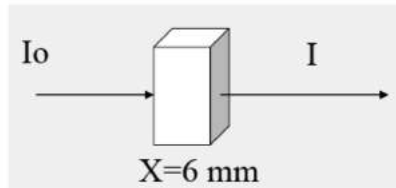
$$I / I_0 = e^{-(0.05 \times 7.8 \times 0.5)} = 0.82$$

- b)



$$I / I_0 = e^{-(0.025 \times 0.000122 \times 10)} = 0.9997$$

- 4.



$$I / I_0 = e^{-(30 \times 0.6)} = 1.5 \times 10^{-8}$$

$$((I_0 - I) / I_0) \approx 100\%$$

Apartado 10

1. El ADN puede verse afectado directamente por la acción de las radiaciones ionizantes, generándose en esta biomolécula roturas de doble o simple hebra. Dichas roturas alteran el ciclo de división del ADN lo que conlleva a la muerte o apoptosis celular.
2. Existe una probabilidad mucho mayor de que la radiación interactúe con el agua que constituye la mayor parte del volumen de la célula. Cuando la radiación interactúa con el agua, se podrían romper los enlaces de la molécula de agua y producir iones como H^+ e hidroxilos OH^\cdot . Estos iones pueden recombinar para formar sustancias tóxicas, tales como peróxido de hidrógeno (H_2O_2), el cual puede contribuir a la destrucción de la célula.

3. Las células que están en constante división celular son las más susceptibles a las radiaciones ionizantes. Los linfocitos (células blancas de la sangre) y las células que producen la sangre están en constante regeneración y son por lo tanto las más sensibles. Las células reproductivas y gastrointestinales no se están regenerando tan rápidamente y son menos sensibles. Las células musculares y nerviosas son las de más lenta regeneración y, por lo tanto, las menos sensibles a la radiación. Puesto que las células formadoras de la sangre son de las células más sensibles debido a su rápida tasa de regeneración, los órganos formadores de sangre son uno de los más sensibles. Las células musculares y nerviosas son relativamente insensibles a la radiación y, por lo tanto, también lo son los músculos y el cerebro.
4. Un efecto estocástico (probabilístico) de las bajas dosis pueden ser las mutaciones en el ADN. Dichas mutaciones pueden ser silenciosas (no generar efectos) o pueden alterar el funcionamiento celular, como por ejemplo desregular el ciclo celular acelerando la división celular. Una implicancia directa de la desregulación del ciclo celular es el cáncer.

Apartado 11

1. Opciones correctas: a y b.
2. El ^{68}Ga es un emisor de positrones, por lo tanto hay que tener en cuenta un blindaje acorde a emisión γ de 511 keV. El mejor blindaje sería plomo.
3. El ^{188}Re es un emisor β y γ por lo que el blindaje de plomo debe existir.
4. Además de un blindaje acorde con la emisión de este nucleido, se debe trabajar en un lugar adecuadamente ventilado ya que el yodo es volátil.
5. Para la correcta disposición de desechos radiactivos de $^{99\text{m}}\text{Tc}$ se debe esperar 42 horas aproximadamente ($7 \times t_{1/2}$).
6. Opciones correctas: a y b.
7. No es necesario usar plomo para blindar. Se debe tener especial cuidado debido a posibles contaminaciones.
8. Opciones: a, b y c.
9. Se deben considerar el tipo de emisión y $t_{1/2}$ de los radionucleidos utilizados, para esperar el tiempo suficiente a que decaigan los desechos y mientras tanto estén en un recinto con blindaje adecuado.

Apartado 12

1. Opción correcta: a.
2. Opción correcta: d.
3. Opciones correctas: a, b, c y d.
4. Opción correcta: b.
5. Opciones correctas: b, c y d.
6. Opción correcta: b.
7. Opción correcta: c.
8. Opción correcta: b.

Bibliografía

- ALONSO, M., E.J. FINN: *Física. Fundamentos cuánticos y estadísticos*. Vol. III, Barcelona: Editorial Fondo educativo interamericano, 1971.
- ASIMOV, I., D. F. BACH: *Atom - Journey Across the Subatomic Cosmos*, USA: Penguin, 1992.
- AUBRECHT, G. J., ET AL.: «The Nuclear Science Wall Chart», *The Physics Teacher*, 35 (1997), 544.
- BURGE, E. J.: *Atomic Nuclei and Their Particles*, Oxford: Clarendon Press, 1988.
- CARTMELL, E., G. FOWLES: *Valencia y Estructura Molecular*, Barcelona: Editorial Reverté, 1970.
- CLOSE, F.: *The Cosmic Onion*, College Park: The American Institute of Physics, 1986.
- DÍAZ PEÑA, M., A. ROIG MUNTANER: *Química Física*, Madrid: Editorial Alhambra, 1983.
- GORDON, K.: *The Particle Garden: Our Universe as Understood by Particle Physicists (Helix Books)*, Boulder, United States, Addison Wesley, 1996.
- Lawrence, E., M. Livingston: «The Production of High Speed Light Ions without the Use of High Voltages», *Physical Review*, 40 (1932), 19.
- MOREIRA, R.: *Principios y Elementos de un Ciclotrón*, XIV Seminario de Ingeniería Biomédica, Montevideo: Facultades de Medicina e Ingeniería-Universidad de la República, 2004.
- NEEMAN, Y., Y. Kirsh: *The Particle Hunters*, Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
- OLBRIS, D. J., J. Herzfeld: «Nucleogenesis! A Game with Natural Rules for Teaching Nuclear Synthesis and Decay», *Journal of Chemical Education* (en línea), 76 (1999), 349, <<http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ed076p349?prevSearch=%255BContrib%253A%2BHerzfeld%255D&searchHistoryKey=>>>. Último acceso: 25/11/2013.
- PATTERSON, A. J.: «Ushering in the Era of Nuclear Terrorism», *Critical Care Medicine*, 35 (2007), 953.
- SEELMANN-EGGEBERT, W., G. Pfennig, H. Münzel, H. Klewe-Nebenius: *Karlsruher Nuklidkarte*, Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Institut für Radiochemie, München: Gersbach, 1981.
- TREFIL, J., J. Peaboss: *From Atoms to Quarks: An Introduction to the Strange World of Particle Physics*, Nueva York: Anchor Books, 1994.
- WEINBERG, S.: *The Discovery of Subatomic Particles*, Nueva York: Scientific American Library, 1983.

Sitios en la red:

- DEPARTAMENTO DE SALUD OCUPACIONAL-FACULTAD DE MEDICINA (UDELAAR): *Programa de Vigilancia Epidemiológica de los Trabajadores Expuestos a las Radiaciones Ionizantes de la UdeLaR*. Disponible en: <<http://www.dso.fmed.edu.uy/programa-de-vigilancia-epidemiol%C3%B3gica-de-los-trabajadores-expuestos-las-radiaciones-ionizantes-de-la->>. Último acceso: 25/11/2013.
- FISICANET: Reactores nucleares. Disponible en: <http://www.fisicanet.com.ar/energias/nuclear/en04_energia_nuclear.php>. Último acceso: 25/11/2013.
- FORO NUCLEAR: Radiación. Disponible en: <<http://www.foronuclear.org/es/tags/radiaci%C3%B3n>>. Último acceso: 25/11/2013.
- HERZFELD, JUDITH: Nucleogenesis! Disponible en: <http://people.brandeis.edu/~herzfeld/games/Nucleo_sp.html>. Último acceso: 25/11/2013.
- INTERACTIVE CHART OF NUCLIDES: CHART OF NUCLIDES. Disponible en: <<http://www.nndc.bnl.gov/chart/reColor.jsp?newColor=dm>>. Último acceso: 25/11/2013.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (International Nuclear Safety Group (INSAG)): Safety for All: The New INSAG. Disponible en: <<http://www-ns.iaea.org/committees/insag.asp>>. Último acceso: 25/11/2013.
- INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. Disponible en: <<http://www.icrp.org>>. Último acceso: 25/11/2013.
- MINISTERIO DE INDUSTRIA, ENERGÍA Y MINERÍA (AUTORIDAD REGULADORA NACIONAL EN RADIOPROTECCIÓN). <<http://www.arnr.gub.uy>>. Último acceso: 25/11/2013.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY: Radiation Safety. Disponible en: <<http://www.iaea.org/Publications/Booklets/Radiation/radsafe.html#three>>. Último acceso: 25/11/2013.

THE PARTICLE ADVENTURE. Disponible en: <<http://www.particleadventure.org>>. Último acceso: 25/11/2013.

UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION: <<http://www.unscear.org>>. Último acceso: 25/11/2013.

WEBELEMENTS: <<http://www.webelements.com>>. Último acceso: 25/11/2013.

Contribuciones

Hugo Cerecetto

Dr. en Farmacia y Prof. Titular de Química, Centro de Investigaciones Nucleares, Facultad de Ciencias-UdelaR

Pablo Cabral

Dr. en Química y Prof. Adjunto del Área Radiofarmacia, Centro de Investigaciones Nucleares, Facultad de Ciencias-UdelaR

Victoria Calzada

Dra. en Química y Prof. Adjunta del Área Radiofarmacia, Centro de Investigaciones Nucleares, Facultad de Ciencias-UdelaR

Marcos Tassano

MSc. en Biología y Asistente del Área Radiofarmacia, Centro de Investigaciones Nucleares, Facultad de Ciencias-UdelaR

Mirel Cabrera

Dra. en Química y Asistente del Área Radiofarmacia, Centro de Investigaciones Nucleares, Facultad de Ciencias-UdelaR

Estela Falcón

Mag. en Educación Media y docente de Química, IPA

Viviane Mikeliunas

Docente de Química, IPA

Agradecemos a todos los autores por su dedicación y compromiso, a la Lic. Romina Castelli por la lectura general y sugerencias y a la Comisión Sectorial de Enseñanza por la financiación del proyecto que permitió hacer esto posible



Esta publicación cuenta con el apoyo de la Comisión Sectorial de Enseñanza de la Universidad de la República. Forma parte de la serie «Manuales de aprendizaje» que tiene como objetivo mejorar las condiciones de aprendizaje de los estudiantes y, al mismo tiempo, propiciar la autoformación docente mediante la reflexión sobre sus prácticas y sobre el estado del arte en su disciplina. Secundariamente, esta publicación pretende colaborar en la constitución de tradiciones disciplinares y culturas educativas nacionales.

ISBN: 978-9974-0-1643-9

