

Introducción a la Protección Radiológica

**Martín Pomares Calero
Fernando López González**

Primera Edición, 2006 ©

Esta obra goza de todos los derechos de autor de acuerdo a las leyes de la república de Nicaragua.

Todas las figuras y fotografías, excepto las que tienen referencias de los sitios o libros de los cuales fueron tomados, reproducidos o modificados, son propiedad intelectual de Martín Pomares.

Ultima revisión 2 de Agosto de 2006.

Contenido

Dedicatoria	v
Prólogo	vii
CAPITULO I: INTRODUCCION A LA FISICA DE LAS RADIACIONES IONIZANTES	1
Bloques elementales y el maravilloso mundo subatómico	5
Otras características del mundo subatómico	19
Dualismo onda-partícula	19
Ondas de D'Broglie y el campo de materia	20
Un poco más de nucleónica básica	23
La fuerza nuclear	23
Reacciones nucleares	24
La energía de reacción nuclear (Q)	26
Niveles de energía del núcleo	27
Radiactividad	28
Decaimiento gamma	30
Decaimiento alfa	30
Decaimiento beta	31
Conversión interna	32
Reacción de neutrones	33
Sección transversal eficaz	35
Las radiaciones ionizantes y su naturaleza	37
Un poco más acerca de ...Interacción de la radiación con la materia	41

El efecto fotoeléctrico	42
El efecto Compton	43
Producción de pares	44
El coeficiente de atenuación lineal	45
Detectores de Radiación	48
Mecanismo de Producción de rayos X	52
En honor a Wilhem Conrad Röntgen, el hombre que hizo traslucido el cuerpo humano y la materia	55
Magnitudes físicas y unidades usadas en protección radiológica	57
Magnitudes de dosis equivalentes (Dose-Equivalent Quantities)	61
Magnitudes operacionales para medir la radiación proveniente de fuentes externas	63
Las leyes físicas que rigen las radiaciones ionizantes	67
Reducción de la intensidad de la radiación por medio de la ley del inverso del cuadrado de la distancia	67
Reducción de la intensidad de la radiación por medio de la ley de atenuación exponencial	68
Radiación Cósmica y Ambiental	69
Fechado radiactivo y la datación del carbono-14	73
Efecto de las radiaciones ionizantes sobre la salud	79
Control de calidad en radiodiagnóstico	82
Preguntas de Control	93
Ejercicios	95
CAPITULO II: ASPECTOS BASICOS DE PROTECCION RADIOLOGICA	99
Aspectos básicos de protección radiológica. Generalidades	101

técnicas	103
La dosimetría personal	105
Control de calidad en radiodiagnóstico	106
Gestión de desechos radiactivos	110
La protección radiológica en el contexto de Nicaragua	113
Preguntas de Control	115
CAPITULO III: CONSIDERACIONES FINALES	117
Conclusión	118
Sitios Web interesantes para revisar	119
APENDICE: Algunos conceptos fundamentales de la física	123
Referencias bibliográficas	

Dedicatoria

**A Jehová,
y por el Reino de Dios y su justicia,
a nuestros padres,
esposas e hijos**

¡Que el honor y la gloria sean sólo para Dios!

Prologo

El presente texto fue diseñado con el propósito de divulgar en forma accesible el conocimiento referente el tema de las radiaciones ionizantes, sus aplicaciones en el radiodiagnóstico médico. Sin embargo, es nuestra formal opinión que el conocimiento que hemos brindado no puede ser desligado de la física de radiaciones, por lo cual hemos tratado de abordarla extensamente, pero de una forma concisa para el lector. El texto fue escrito en la forma más sencilla posible tratando que se un ejemplar formidable dentro de la divulgación científica, siendo uno de los primeros textos en esa área en Nicaragua. Este texto a todo el que esté interesado en conocer los conocimientos mínimos de protección Radiológica, pero principalmente fue escrito para el personal de técnicos en radiodiagnóstico médico los que en su gran mayoría se han formado de manera empírica o bien durante la práctica, lo cual hace que este texto les sirva de apoyo para refrescar el conocimiento en protección radiológica y la física de radiaciones.

Por otro lado, como libro de divulgación científica no pretende ser un curso de protección radiológica pero si una buena introducción para esta área. Por consiguiente, hemos tratado de ser humildes al titular este libro como *Introducción a la Protección Radiológica*, aunque dentro del marco de divulgación científica un buen título pudo haber sido: *Una Breve Introducción a la Protección Radiológica*. Más sin embargo, con el tiempo esperamos mejorarlo con una mejor didáctica para que se gane el galardón de ser un buen curso introductorio en protección radiológica para técnicos en radiodiagnóstico.

Para conseguir tal fin nos esmeramos en diseñar el libro de tal manera que en el primer capítulo se pueda estudiar la física de radiaciones a manera introductoria tratando de evitar el aparataje matemático de la física. El segundo capítulo aborda los conceptos principales de la protección radiológica los cuales no pueden ser entendidos a cabalidad sin el estudio exhaustiva del primer capítulo. Y como parte

final una conclusión desde la perspectiva de los autores. Así que esperamos que el presente material no sea simplemente divulgativo, sino sea formativo de tal manera que la física de radiaciones y la protección radiológica sean disciplinas más al alcance del conocimiento de nuestros lectores. Si hemos alcanzado esos objetivos, nuestras metas han sido cumplidas.

Los autores.

Capítulo I: Una breve introducción a la Física de las Radiaciones Ionizantes



Foto de la Galaxia M31 de Andr3meda. Una de las galaxias con igual formaci3n estelar a la nuestra. Toda galaxia es el conglomerado de fuentes de radiaciones de todo g3nero.
Reproducida del sitio: <http://www.xtec.es/~rmolins1/univers/es/gal00.htm>

Bloques elementales y el maravilloso mundo subatómico

Nuestra naturaleza esta construida básicamente de materia y energía, obedeciendo primordialmente cuatro tipo de interacciones fundamentales tales como la gravitación, la interacción³ electromagnética, la interacción nuclear fuerte y la interacción nuclear débil. La primera de estas cuatro fuerzas tiene mayor importancia para interacción entre cuerpos a escala del universo, mientras que las tres ultimas son la base de la estructuración de la materia y actúan escalas bastantes mínimas del orden de 1Å (1 ángstrom = 10^{-10} m). *Materia* y *Energía* son dos conceptos fundamentales los cuales muchas veces es difícil de definir sin la ayuda de otros conceptos matemáticos. Por ejemplo, el concepto de materia posee un significado bien abstracto, pues para la definición común expresada por la real academia de la lengua española, la materia corresponde a la realidad primaria de la que están hechas las cosas, y que es perceptible por los sentidos, que, con la energía, constituye el mundo físico. Además, otra definición para la misma es: Principio puramente potencial y pasivo que en unión con la forma sustancial constituye

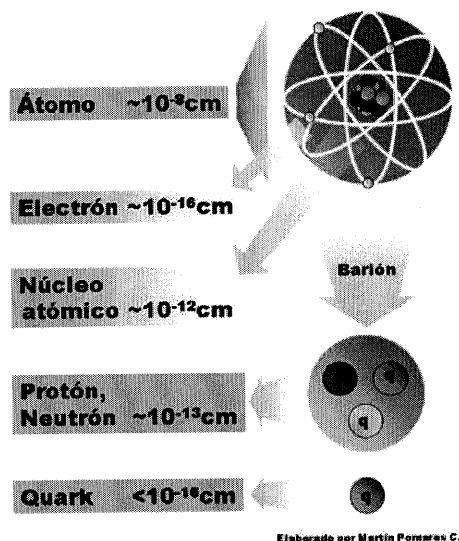


Fig. 1. Escalas del mundo subatómico y las dimensiones de diversas partículas.

³ Entiéndase por interacción al tipo de fuerza con que la materia intercambia energía propia a su naturaleza, o con la cual la materia interacciona.

la esencia de todo cuerpo, y en las transmutaciones sustanciales permanece bajo cada una de las formas que se suceden.

Pero en si, ¿Qué es la materia? ¿De que está constituida? Los mismos cuestionamientos fueron hechos desde la antigüedad a lo cual Demócrito (460-370 a.C.) planteó que la materia esta formada por pequeñas partículas indivisibles e indestructibles denominadas *átomos*. El desarrollo actual en la ciencia y la tecnología nos ha permitido descubrir que los átomos no son las partículas más pequeñas, y que estos están formados

por tres tipos de partículas aún más pequeñas que un átomo: Electrones, protones y neutrones. Sin embargo, estas tres partículas no son toda la historia de cómo la materia esta constituida porque existe toda una familia de partículas que obedecen a la clasificación del *modelo estándar de partículas elementales (MEPE)*, el cual describe a dichas partículas como los bloques elementales del universo. Por eso de ahí el nombre de "partículas elementales". El MEPE solamente abarca las interacciones del micromundo y que participan plenamente en la constitución de la materia tales como las interacciones electromagnéticas, fuertes y débiles. Según el MEPE, el universo esta compuesto de

Partículas Elementales

Quarks	u up	c charm	t top	g gluón	Portadores
	d down	s strange	b bottom	γ fotón	
Leptones	ν_e e neutrino	ν_μ μ neutrino	ν_τ τ neutrino	W W bosón	Portadores
	e electrón	μ muón	τ tau	Z Z bosón	
	I	II	III	← Generaciones	

Fig. 2. Breve descripción de las partículas elementales del modelo estándar. Reproducido del libro *Facts and Mysteries in Elementary Particle Physics*. 2003.

tres tipos de partículas: Los quarks, los leptones y los gluones. Los quarks y los leptones son partículas con dimensión, es decir poseen masa en reposo, mientras que los gluones son partículas virtuales denominadas portadoras porque sirven de intermediarias para las interacciones. En el caso de la interacción gravitatoria el portador se llama *gravitón*, pero esta partícula junto a la interacción gravitatoria queda excluida del modelo estándar; mientras que para las interacciones electromagnéticas, fuertes y débiles los portadores son los *gluones*. En el caso de la interacción electromagnética, el gluón que participa en la interacción se conoce comúnmente como *fotón* o cuanto de luz. El gluón hace que los quarks y los leptones se peguen. Hay seis tipos de quarks, cuyos nombres son *Up (arriba)*, *down (abajo)*, *top (superior)*, *bottom (inferior)*, *strange (extraño)*, *charm (Karma)* tal y como se describe en la figura 2. El leptón cargado más estable es el electrón. La combinación de tres quarks bajo reglas permitidas forma otras partículas denominadas **bariones** dentro de las cuales están los protones y neutrones que forman los átomos (ver figura 1). En otros casos los quarks se aglomeran en un sistema de varios gluones formando partículas denominadas **hadrones**. En la naturaleza la materia presenta simetría en sus constituyentes y propiedades básicas tales como la carga eléctrica y tal es el caso de que se presenta en el universo, pues existen partículas que poseen cargas opuestas a las que describe el MEPE, por ejemplo para el quark existe el anti-quark con las mismas características pero con cargas opuestas a la del quark, para el electrón existe el anti-electrón que se llama **positrón** y posee la misma masa del electrón pero carga opuesta, etc. La combinación de un quark y un anti-quark como un sistema de dos partículas se denomina **mesón**. El conjunto de las anti partículas se les denomina **anti-materia**.

Retornado a la estructura atómica, en el átomo los electrones giran alrededor de un núcleo el cual está formado por protones y neutrones. Las orbitas de los electrones reciben el nombre de *orbitales*. A cada partícula dentro del núcleo se le denomina *nucleón*. Los protones y electrones son partículas con carga eléctrica de la misma magnitud pero a los protones se les asigna una carga positiva y al electrón una carga negativa (véase la tabla 1). Los neutrones como su palabra lo dice son eléctricamente neutros. En consecuencia entre el núcleo y cada electrón se establece una fuerza electrostática (fuerza de Coulumb) atractiva, pero la naturaleza ha hecho que la fuerza centrífuga debido al movimiento de los electrones al rededor del núcleo se equilibra con la fuerza electrostática de tal manera que el electrón se mantenga a una distancia

fija. Una característica interesante es de que en los átomos el número de protones Z es igual al número de electrones, a Z se le denomina *número atómico* y caracteriza a cada átomo.

Tabla 1. Descripción de magnitudes importantes de las partículas elementales constituyentes del núcleo atómico.

Partícula	Masa [Kg]	Masa [uma] ⁴	MeV/c ²	Carga eléctrica [C]
Electrón	9.109×10^{-31}	5.486×10^{-4}	0.511	1.6×10^{-19}
Protón	1.6726×10^{-27}	1.007276	938.28	1.6×10^{-19}
Neutrón	1.6750×10^{-27}	1.008665	939.57	Sin carga

Como la masa del protón es 1836.15152 veces mayor a la masa del electrón y además un átomo puede ganar o perder electrones de valencia y siempre será el mismo elemento, tan sólo ionizado. Por tal razón cuando se desea describir un átomo de una forma más específica se hace mediante la masa del núcleo o "*número másico*"

$$A = Z + N, \quad (1)$$

en algunos libros al número másico se le llama peso atómico, luego el término que se utiliza para describir a un núcleo atómico es *nuclido*. Ahora bien, el símbolo que se utiliza para describir a un elemento X o un nuclido es ${}^A_Z X_N$, además aquí se expresa que el elemento es neutro. Por ejemplo, el Cobalto-60 con 27 protones y 33 neutrones se puede representar como ${}^{60m}\text{Co}$, y si está con mayor energía, como ${}^{60m}\text{Co}$ o Co-60m .

El modelo atómico ha sido revolucionado con el avance de la física de la teoría cuántica. Inicialmente el modelo que mejor describía al átomo de hidrogeno es el modelo atómico de Bohr. El modelo atómico de Bohr explica que los electrones se mueven alrededor del núcleo en orbitas con valores de energía que están cuantizadas

⁴ "uma" son las siglas de "Unidad de Masa Atómica" la cual es la doceava parte de la masa de un átomo de carbono-12.

y cuyas orbitas son circulares con el núcleo del átomo en el centro, algo parecido al modelo de Copérnico de los planetas (Fig. 3). Para cada orbita del electrón hay una energía permitida⁵ la cual está cuantizada por el número cuántico principal "n" el cual indica los niveles de energía tal y como se muestran en la figura 4.

$$E = -\frac{m_e e^4 Z^2}{8a_0 \hbar^2 n^2} \quad (2)$$

donde m_e es la masa y e es la carga del electrón, a_0 es el radio de Bohr, Z es el número de protones (o electrones) y n el número cuántico principal que va desde 1 hasta infinito. En el dibujo de la figura 1, F_e es la fuerza eléctrica de Coulomb que ejerce el núcleo de carga Ze sobre el electrón de carga e .

En 1916, Sommerfeld observa que el modelo de Bohr solo trabajaba muy bien para el átomo de hidrogeno pero no para átomos multielectrónicos. Encontró que los electrones de un mismo nivel energético tenían distinta energía, deduciendo luego que dentro de un mismo nivel energético existían varios subniveles de energía. En el modelo de Sommerfeld los electrones no solo podían girar en orbitas circulares, sino que también en orbitas elípticas. Esto permitió el surgimiento de un nuevo **número cuántico azimutal "l"** que determina la

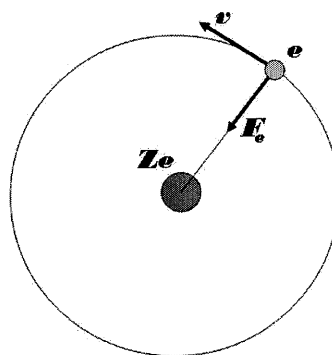


Fig. 3. Modelo atómico de Bohr.

⁵ El término de *energía permitida* en el modelo de Bohr se introduce para que dicho modelo sea consistente con la naturaleza. Esto es porque, de acuerdo a la electrodinámica clásica, toda partícula cargada que se acelere en un campo electromagnético debe irradiar energía en forma de fotones o de luz. En el modelo de Bohr los electrones giran en torno al núcleo el cual genera un campo eléctrico en trono a él, por lo tanto los electrones deberían irradiar energía pero no lo hacen. Por esa razón, si los electrones giran entorno al núcleo a cierta distancia permisible entonces significa que la energía que corresponde a ese orbital específico también se considera que ha sido permisible por la naturaleza y viola lo estipulado por la electrodinámica clásica.

forma de los orbitales y toma valores desde 0 hasta $n-1$. Todavía Chadwick no había descubierto los neutrones por lo cual el núcleo atómico se representa por una sola masa de carga Ze que corresponde al número de protones.

Con el avance de la mecánica cuántica hecha por Schrödinger y Heisenberg se introduce la denominada *función de onda* la cual permite estimar la probabilidad de encontrar a un electrón en una posición dada. D'Broglie propuso en 1923 que los electrones poseen propiedades duales, es decir de ondas y de partículas. Por otra parte de acuerdo al **principio de incertidumbre de Heisenberg** no es posible medir con exactitud la posición y la velocidad de una partícula cuántica como lo es el electrón. Y si se mide una de esas magnitudes, no se puede medir con gran exactitud la otra. Esto propone que la mecánica cuántica sea una teoría probabilística para el micromundo y de ahí del porque de la función de onda. Por ende, la mecánica cuántica propone que los orbitales corresponden a nubes electrónicas las que son regiones del espacio en los que la probabilidad de encontrar a un electrón es la máxima posible. En este caso se introducen nuevos números cuánticos para expresar la posición de un electrón en cada orbital, estos son el **número cuántico del espín "s"**, determina el sentido de giro del electrón sobre su eje, éste toma valores según el sentido de giro tales como $+\frac{1}{2}$ o $-\frac{1}{2}$; y el **número cuántico magnético del orbital "m"**, determina la orientación de la orbita que describe el electrón. m toma valores que van desde $-l, 0, +l$.

Tabla 2. Subniveles de los orbitales

Valor	Subnivel	Significado
0	s	sharp
1	p	principal
2	d	diffuse
3	f	fundamental

Uno de los procesos más importantes en los átomos es de generar corpúsculos de luz (o cuantos de radiación electromagnética) o cuantos de energía luminosa denominados "*fotones*". Cuando el átomo se excita debido a energía externa lo que sucede es que los electrones ocupan niveles de energía más altos (*orbitas de radio mayor*, si se les considera desde el punto de vista del modelo de Bohr). Luego

espontáneamente, un electrón en el nivel de energía más alto pasa al nivel de energía más baja o bien a su estado base (energía mínima posible o inicial), y en ese salto se libera un fotón cuya energía corresponde a la diferencia de energía entre los niveles energéticos, según la expresión:

$$\Delta E = E_2 - E_1 = nh\nu \quad (3)$$

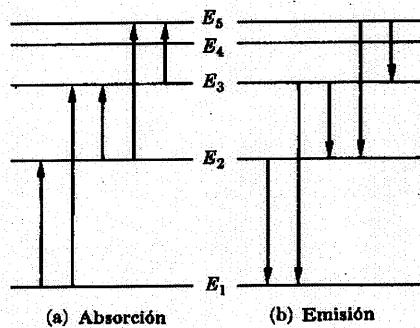


Fig. 4. Niveles de Energía para los espectros de emisión y absorción.

A este proceso se le denomina **emisión**; sin embargo, si el electrón recibe energía de parte de un fotón, el electrón pasa a un nivel de energía mayor. A este estado se le denomina estado excitado. Y al proceso se le denomina **absorción** (Véase la figura 4 y 5). La figura 6 muestra la relación entre las líneas espectrales, los niveles energéticos que se describen también por la ecuación (3) y la relación con el número cuántico principal n .

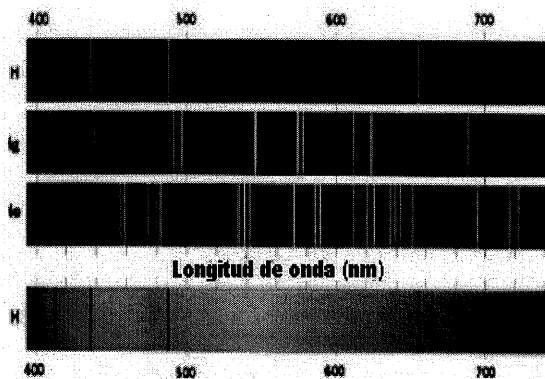


Fig. 5. Espectros atómicos para tres diferentes elementos: Hidrógeno, Neón y Mercurio. Los tres espectros superiores son de emisión y el inferior es de absorción. Tomado del sitio: http://www.astrocosmo.cl/anexos/m-ato_bohr.htm

Ahora pasemos a otro aspecto maravilloso entre la familia de los átomos de un mismo elemento como es el de los isótopos, isótonos e isobaros respectivamente. Cuando varios núclidos poseen igual número atómico (de protones) y diferente número de neutrones, se llaman *Isótopos*. Por ejemplo, el Magnesio (Mg) es un elemento que puede encontrarse como Mg-24 con $Z=12$ y $N=12$; Mg-25 con $Z=12$ y $N=13$; Mg-26 con $Z=12$ y $N=14$. En realidad en la naturaleza los elementos químicos existen en una combinación de isótopos (ver figura 7). Hay nucleidos que poseen diferente número atómico (de protones) y el mismo número de neutrones, se les denomina *Isótonos*. Por ejemplo, el Mg-26. $Z=12$ y $N=14$; y el Al-27 con $Z=13$ y $N=14$. Cuando los núclidos poseen igual número másico se les denomina *Isóbaros*, por ejemplo, el Ar-36 y el Cl-36. Si tenemos los mismos nucleidos con diferentes nivel de energía se les denomina *Isómeros*. Por ejemplo, en el caso del Iridio, podemos tener: Ir-192m1 y el Ir-192m2; aquí m1 corresponde al nivel energético 1 y m2 al nivel energético 2.

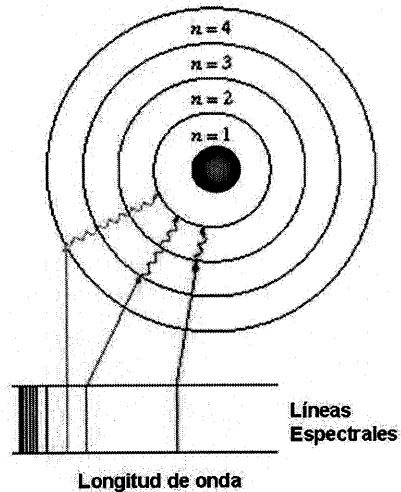


Fig. 6. Relación entre los orbitales, el número cuántico principal y las líneas espectrales.

Número de masa (Z+N) protones	$\begin{matrix} A & X \\ Z & N \end{matrix}$	Diagrama	Electrones	Neutrones	Protones
HIDROGENO	$\begin{matrix} 1 & H \\ 1 & 0 \end{matrix}$		○	ninguno	●
DEUTERIO	$\begin{matrix} 2 & H \\ 1 & 1 \end{matrix}$		○	●	●
TRITIO	$\begin{matrix} 3 & H \\ 1 & 2 \end{matrix}$		○	● ●	●
HELIO	$\begin{matrix} 4 & He \\ 2 & 2 \end{matrix}$		○ ○	● ●	● ●

Químicamente idénticos

Fig. 7. Representación de algunos isótopos

Mucho escuchamos hablar de la energía del átomo (y generalmente de la energía nuclear). Pero bien, volvamos un poco al concepto que la física establece para la "Energía". La energía es una magnitud física escalar (numérica) que mide la capacidad de que un cuerpo realice un trabajo (es decir, un movimiento debido a la acción de una fuerza). Además, la energía no se crea ni se destruye sino que se transforma de una forma de energía a otra, y que la energía neta de un sistema aislado es constante, la cual corresponde a la suma de la energía cinética y la energía potencial del sistema en cuestión. Esto último es el principio de conservación de la energía. La energía cinética describe el estado de movimiento de un sistema y la energía potencial describe la energía almacenada capaz para realizar un trabajo mecánico con respecto a un punto de referencia. El trabajo y la energía son funciones que dependen de los estados iniciales y finales del sistema. En alguna forma esto se representa en caricatura siguiente.

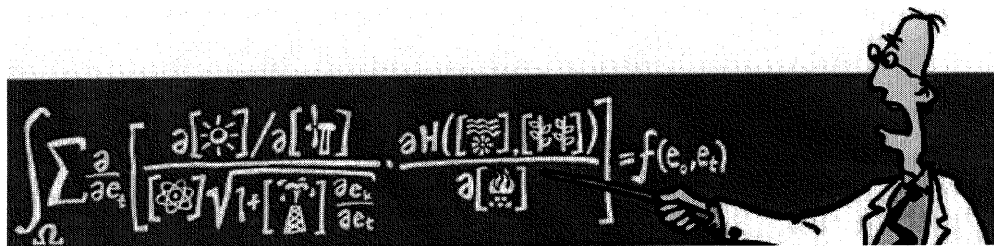


Illustration: Magnus Hoake

Fig. 8. La ecuación general de la energía (Reproducido de la revista LTH-nytt 1/March 2004, p 8; Falköping 2004; ISSN 1400-5867, de la Universidad de Lund, Suecia).

En el sistema internacional de unidades SI, la unidad de energía es el joule (J), donde 1 joule es igual a 1 N·m. En el caso atómico se utiliza el *electrón-volt* (eV), donde 1 eV es la energía necesaria para mover un electrón entre una diferencia de potencial de 1 volt, igual a 1.6×10^{-19} J. En la cuarta columna de la tabla 1, se presenta la masa de las partículas elementales como la razón de la energía en electrón-volt y la velocidad de la luz al cuadrado según la ecuación (4).

Las propiedades de la materia depende de los cinco estados fundamentales de agregación en que esta se encuentra (sólido, líquido, gaseoso, plasma, condensado) que a su vez dependen de la energía con que las moléculas o átomos interactúan.

Por otra parte, es importante aclarar que en la naturaleza existen varias formas de energía: Química, calórica, mecánica, eléctrica, nuclear, etc. El tipo de energía depende del tipo de interacción a que este sometida la materia.

Las *interacciones gravitatorias* generalmente se consideran a macro escala o a escala del universo pues a esta obedecen las leyes de Kepler. Las *interacciones electromagnéticas* obedecen a la interacción entre partículas cargadas y los fotones que de manera generalizada obedecen a la fuerza de Lorentz que es la suma de la fuerza eléctrica y la fuerza magnética. En el caso más simple la fuerza eléctrica corresponde a la fuerza de Coulomb. Las *interacciones nucleares fuertes* son propias de partículas pesadas y son de corto alcance, del orden de 10^{-15} m, es decir de las dimensiones del radio nuclear. Por lo cual una partícula sub atómica experimentará gran atracción dentro de la zona del radio nuclear pero una vez fuera del borde del núcleo experimentara la interacción causada por la fuerza de Coulomb dependiendo

del tipo de partícula. Las *interacciones débiles* no son tan débiles pero se les denomina de esa manera porque se desarrollan a distancias más cortas que las nucleares y participan en la desintegración de partículas beta.

Entenderemos por *energía atómica* como la energía que se libera de un átomo ya sea por reacciones nucleares, o bien por la interacción de partículas subatómicas con la nube electrónica o como reacciones entre ellas mismas. Un proceso típico que se presenta en las reacciones nucleares es la desintegración atómica o de partículas subatómicas. Por ejemplo, un neutrón se **desintegra** (es decir se transforma) en un protón (p) más un electrón (e) y un antineutrino del electrón ($\bar{\nu}$); el electrón sale disparado, luego debido a la fuerza eléctrica entre éste y el núcleo y la misma nube de electrones que rodea al núcleo, el electrón es frenado y pierde su energía cinética en energía radiante o electromagnética de alta energía como los rayos X.



Las reacciones nucleares liberan energía de acuerdo a la ecuación relativista de Einstein*

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

donde E es la energía que involucra la reacción y m es el defecto de masa que es igual a la diferencia entre la masa de los elementos reaccionantes y la masa de los elementos resultantes. Hay dos tipos de reacciones nucleares: fisión y fusión nuclear. La reacción por **fisión nuclear** consiste en la fragmentación del núcleo de un átomo pesado producto del bombardeo de neutrones. Tal es el caso del uranio-235 el cual al ser bombardeado por



Fig. 9. El Hongo Nuclear de una detonación atómica.
Foto reproducida del sitio:
<http://www.arrakis.es/~lallave/nuclear/>

*Si transformamos masa en energía y viceversa es necesario tomar en cuenta la relación siguiente: 1 uma = 931 MeV.

neutrones es dividido en núcleos más ligeros. Reacciones nucleares de fisión han sido los procedimientos convencionales de las armas nucleares. En la figura 9 se observa la detonación de una bomba nuclear por fisión nuclear. La reacción por **fusión nuclear** consiste en la unión de dos núcleos ligeros, por ejemplo Litio y Deuterio, los cuales se transforman luego en un núcleo más pesado como el Helio. La energía liberada en esta reacción es del orden de 4 veces más la energía de fisión. En la naturaleza hay enormes cantidades de reactores naturales de fusión nuclear; estos son las estrellas, y en nuestro sistema solar, el Sol (fig. 10). Actualmente, la física basada en experimentos describe que la materia es una forma de energía cuya aseveración parte básicamente de la famosa ecuación (5). Esta aseveración conlleva a muchos cuestionamientos filosóficos al respecto.

Toda desintegración nuclear es espontánea y va acompañada de liberación de energía. Por eso cuando en un isótopo inestable se desintegra un neutrón o una partícula elemental, entonces se dice que el isótopo **decae** y la energía liberada se denomina **radiación**. Hay dos tipos de radiación: **Radiaciones ionizantes y no ionizantes**, las primeras reciben ese nombre por su capacidad de ionizar átomos y moléculas que corresponden a radiaciones de energías mayores al espectro de la luz y cuyas longitudes de onda son bastante cortas. Y radiaciones no ionizantes las que a como su nombre lo indican no pueden ionizar átomos o moléculas por ser de poca energía y se propagan con gran longitud de onda; tal es el caso de las ondas de radio o TV.

Toda sustancia que espontáneamente emite radiación es capaz de atravesar la materia e impresionar placas fotográficas, o producir ionización en los átomos o

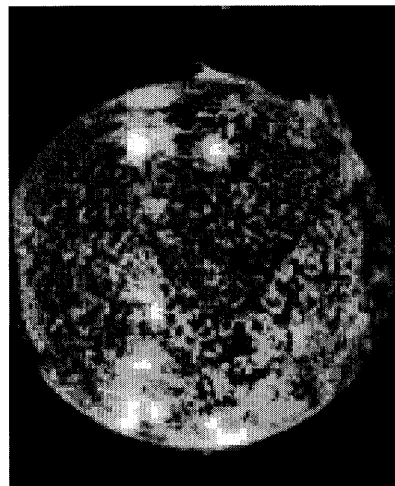


Fig.10. El Sol, la principal fuente de energía para la vida en el planeta Tierra.

Foto reproducida del sitio:
<http://www.arrakis.es/~lallave/nuclear/>

fluorescencia. A los isótopos que radían energía debido a reacciones nucleares o desintegración se les denomina **radiactivos** y los isótopos de esa forma **radioisótopos**. El descubrimiento de la radioactividad se debe al físico francés Henri Becquerel, que en 1896 comprobó casualmente cómo quedaba impresa una placa fotográfica sin la intervención de luz solar, sobre la cual se habían colocado cristales de uranio y potasio.

En el decaimiento de un elemento, el isótopo inestable pasa a ser un isótopo más estable, y como todo proceso en la naturaleza obedece a una ley. En este caso una ley exponencial del tipo

$$N_t = N_0 e^{-t/\tau}, \quad (6)$$

Aquí a N_t es el número de partículas que hay en un tiempo t , N_0 , es el número de partículas que hay inicialmente para el tiempo $t=0$, y a τ se le llama "tiempo de vida media" o simplemente *vida media*. Para

determinar la ecuación (6) es necesario definir la magnitud física que especifica el número de partículas que se desintegran por unidad de tiempo y se le denomina **Actividad (A)**. Matemáticamente se expresa como

$$A = \frac{dN}{dt}, \quad \left[\frac{\text{Desintegraciones}}{\text{segundo}} \right] \quad (7)$$

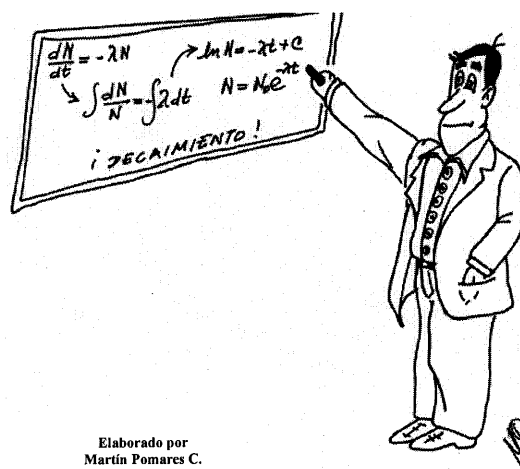


Fig. 11. La ecuación del decaimiento radiactivo.

En el sistema internacional de unidades SI, la actividad tiene por unidad el becquerel (Bq), donde 1 Bq es igual a 1 s^{-1} (¡Cuidado!, no hay que confundir esta unidad con la frecuencia). Pero una unidad especial de actividad es el curie (Ci), donde $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$ (exactamente).

Una naturaleza de todos los elementos es que transmutan a otros, y esto se da de los elementos más pesados (mayor número másico) a los menos pesados (de menor número másico) y más estables. Esa transición no es instantánea sino que demora dependiendo del tiempo de vida media del elemento. Por ejemplo, el Uranio-238 tiene un tiempo de vida media de 4.51×10^9 años, y por decaimiento alfa (al liberar una partícula alfa) pasa a Torio-234, éste por decaimiento beta (al liberar una partícula beta) pasa a Protactinio-234. Del Protactinio pasa por decaimiento alfa a Uranio-234, y por los mismos decaimientos alfa pasa a Torio-230, Radio-226, Radón-222, Polonio-218, Plomo-214, este por decaimiento beta pasa a Bismuto-214, de este por decaimiento beta a Polonio-214, luego por decaimiento beta a Bismuto-210, por decaimiento alfa a Talio-206, y finalmente por decaimiento beta a Plomo-206 el cual es estable. A toda esta cadena de transiciones se le denomina "Serie" y en el caso de este ejemplo es la *Serie del Uranio* (Fig. 12). Para que el Uranio-238 se transforme en Torio-234, es necesario de que al menos pasen muchas vidas medias, en otras palabras se necesitan varios siglos para que se transmute en Plomo-206. Esto es algo que ha permitido calcular en buena

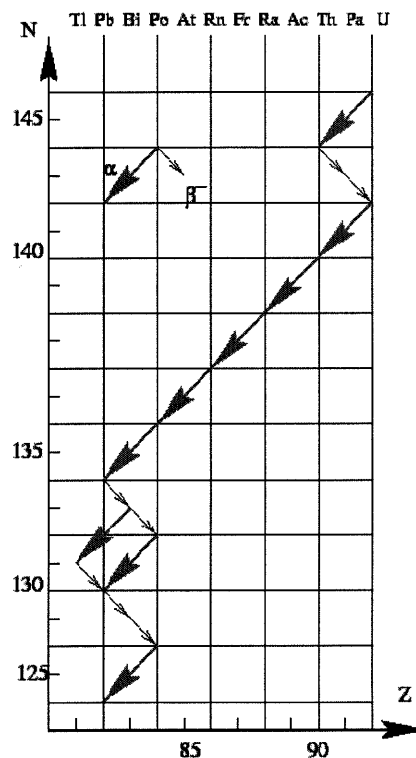


Fig. 12. Serie radiactiva del uranio.

Tomada de :
<http://www.ele.uva.es/~imartin/libro/node23.html>

aproximación la edad de la tierra. Otro método para determinar la antigüedad de los fósiles de dinosaurios es determinando la cantidad de Carbono-14, para esto se mide la actividad presente en el hueso fósil y con la ecuación (6) calcular el tiempo al tomar en cuenta la vida media. De esto hablaremos más adelante en un acápite especial a datación por medio de carbono-14.

Otras características del mundo subatómico

El mundo subatómico es también denominado mundo cuántico a consecuencia de que la energía de los fotones puede ser cuantizada de acuerdo a la ecuación (3) previamente descrita.

Sin embargo, debido a que los fotones se comportan como ondas y algunas veces como partículas de lo cual se dice que poseen una naturaleza dual de lo cual hablaremos a continuación.

Dualismo Onda-Partícula

A partir del efecto fotoeléctrico y el efecto Compton se ha deducido que la luz posee una naturaleza corpuscular en donde a cada cuanto de luz se le denomina fotón y posee una energía y una cantidad de movimiento que le caracterizan. Pero, ¿Cómo es que la luz puede presentarse como partícula si muestra propiedades ondulatorias en los experimentos de interferencia y difracción? ¿Cuál modelo es correcto? ¿Es la luz una onda o una partícula? La respuesta depende del fenómeno que se está estudiando, puesto que algunos sólo pueden explicarse como ondas mientras que otros como partículas. La teoría del fotón y la teoría ondulatoria se complementan entre si. Ahora, ¿si el fotón es una partícula cuál es el significado de la frecuencia y de la longitud de onda, qué determina su energía y cantidad de movimiento?

Todas las formas de radiación electromagnética se pueden describir desde dos puntos de vista. En un extremo, las ondas electromagnéticas describen todo el patrón de interferencia formado por un gran número de fotones. En el otro extremo, la descripción del fotón es natural cuando se trabaja con fotones altamente energéticos

de longitudes de onda cortas. En consecuencia la luz tiene naturaleza dual: **presenta características tanto de onda como de partícula.**

Ondas de D'Broglie y el campo de materia

Además de la luz, los electrones al propagarse presentan también una naturaleza dual (es decir de onda y de partícula). Por esta razón Louis Victor de Broglie postuló en 1923: *Debido a que los fotones tienen características de onda y de partícula, tal vez todas las formas de la materia tienen propiedades tanto de onda como de partícula.* Por consiguiente, a cada electrón hay una onda asociada que guía o dirige a los electrones en el espacio. De Broglie explicó la fuente de su aseveración en el discurso de aceptación del premio Nobel en 1929:

Por una parte, la teoría cuántica de la luz no se puede considerar como satisfactoria ya que esta define la energía de un corpúsculo de luz con la ecuación $E = h \cdot \nu$ que contiene la frecuencia ν . Ahora, una teoría puramente corpuscular no contiene aquello que nos permita definir una frecuencia; por tanto, por sólo esta razón, se está obligado, en el caso de la luz, a introducir la idea de corpúsculo y la de periodicidad simultáneamente. Por otra parte, la determinación del movimiento estable de los electrones en el átomo introduce números enteros, y hasta este momento los únicos fenómenos que requieren números enteros en la Física son los de interferencia y el de los modos normales de vibración. Este hecho me sugiere la idea de que los electrones no pueden ser considerados como simples partículas, sino que también se les debe de asignar una periodicidad.

Luego, para un fotón la cantidad de movimiento es

$$p = \frac{E}{c} = \frac{hc}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad (8)$$

De aquí la longitud de onda del fotón puede escribirse en función de la cantidad de movimiento como

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (9)$$

De Broglie sugirió que:

Las partículas materiales de cantidad de movimiento p deben tener también propiedades de onda y su correspondiente longitud de onda.

Como la cantidad de movimiento de una partícula de masa m y velocidad v es $p = mv$, la longitud de onda de De Broglie de una partícula es

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \quad (10)$$

De Broglie postula que las frecuencias de ondas de materia (es decir de las ondas asociadas a las partículas) obedecen a la relación de Einstein $E = h\nu$, expresándose como

$$\nu = \frac{E}{h} \quad (11)$$

El hecho de que estas relaciones se establecen experimentalmente para los fotones, hace que la hipótesis de De Broglie sea más fácil de aceptar. En consecuencia podemos ver que *los modelos ondulatorios y de partículas ya sea de la materia o de radiación se complementan entre sí*. A esta aseveración se le conoce como **principio de complementariedad** establecido por Niels Bohr con el cual ni uno ni otro modelo se pueden utilizar con exclusividad para describir en forma adecuada la materia o la radiación.

En la teoría de De Broglie se ha considerado que cada partícula posee una onda de materia (es decir una onda asociada a la partícula), pero esta onda de materia es percibida al propagarse la partícula o bien la radiación. En el caso de electrones la onda asociada es un campo electromagnético, pues de la electrodinámica clásica sabemos

que cargas aceleradas generan "campos" electromagnéticos. Por consiguiente será conveniente también introducir ahora el concepto de **campo de materia** el cual es el conjunto de puntos del espacio en el cual podemos medir el comportamiento de la onda de materia o bien su intensidad. Esta definición es a priori pero es lo más adecuada hasta el momento. En el caso de electrones que van de un nivel de energía superior a uno inferior sabemos se genera un fotón, pero también se genera si hay interacción entre dos electrones. En consecuencia podemos considerar a un fotón (denominado fotón virtual) es la partícula de intercambio responsable como campo de materia para establecer la interacción a distancia entre estas dos electrones. Este tipo de interacciones suele dibujarse en forma de diagramas de Feynman como el de la Figura 13 los

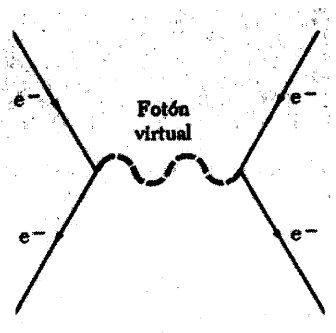


Fig. 13. Diagrama de Feynman de la interacción entre dos electrones.

cuales representan ecuaciones matemáticas que describen tales interacciones. Para interacciones más complejas, estos diagramas se vuelven un poco exóticos. Para el caso de la masa gravitatoria el campo asociado es el campo gravitatorio es el gravitón encargado del intercambio o de las interacciones gravitatorias entre masas. Para la medición o cuantificación del campo de materia es interesante la amplitud del mismo expresada comúnmente por Ψ (psi mayúscula) y que más adelante le denominaremos **función de onda**.

Un poco más de nucleónica básica

El núcleo de un átomo es demasiado pequeño, por lo cual aún hasta la fecha mediante una fórmula empírica la cual se basa en el factor de dispersión elástica entre el electrón y el núcleo. La cual se expresa en función del número másico tal como

$$R = r_0 A^{1/3}, \quad (12)$$

donde r_0 es igual a 1.12 fm (Fermi). En el caso de distancias nucleares el Fermi es la unidad por excelencia. 1 Fermi (fm) es igual a 10^{-13} cm que es prácticamente igual a 1 femtometro (10^{-15} m). De la fórmula empírica (12) se ha estimado que la densidad nuclear es más o menos constante para todos los núcleos de 1.72×10^{38} nucleones/fm³.

La fuerza nuclear

Los protones y los neutrones están ligados en el núcleo por la así denominada fuerza nuclear, a pesar de la repulsión de Coulomb entre los protones. Por lo consiguiente, la fuerza nuclear debe ser mucho mayor que la fuerza de Coulomb para mantener ligados a neutrones y protones en el núcleo. Sin embargo, para que se de esa ligadura y además el núcleo sea estable, es decir no pierda neutrones o protones por el desequilibrio en las fuerzas de ligadura dentro del núcleo, es necesario que el número de protones sea prácticamente igual al número de neutrones. Sin embargo en el caso de núcleos pesados el número de neutrones debe ser ligeramente mayor al número de protones. Dentro de los cuatro tipos de interacción de la naturaleza, a la fuerza nuclear se le denomina *interacción fuerte*. Dentro de las propiedades más notables de la fuerza nuclear tenemos que:

1. La fuerza nuclear es mucho más fuerte que la fuerza electromagnético o de Coulomb.

2. La fuerza nuclear es una fuerza atractiva, de lo contrario los nucleones no podrían ligarse.
3. Es una fuerza de corto alcance y que actúa dentro del rango que va entre 1 a 2 fm.

Reacciones nucleares

Las reacciones nucleares se basan en la desintegración del núcleo. Por lo tanto, para desintegrar un núcleo se requiere cierto trabajo que se debe comunicar a los nucleones para poderlos separar. Este trabajo se debe comunicar sin la adición de energía cinética a los nucleones. Si aplicamos la ley de conservación de la energía nos damos cuenta que si queremos formar nuevamente el núcleo hay que gastar la misma cantidad de energía que se ha usado para desintegrarlo. La energía de enlace nuclear será entonces la diferencia de energía para los nucleones libres y sus energías cuando han constituido el núcleo. Sin embargo, al formarse el núcleo disminuye la masa del mismo, la cual es menor que la suma de la masa de los nucleones que lo forman. Esta disminución en la masa se explica por el desprendimiento de energía de enlace (ΔW_{ent}). La masa correspondiente a esta energía se le denomina *defecto de masa* la cual se expresa como

$$\Delta m = \frac{\Delta W_{ent}}{c^2} \quad (13)$$

Del defecto de masa podemos expresar a la energía de enlace para un núcleo ${}^A_Z X$ como

$$\text{Energía de enlace bruta} = [N(m - A)_n + Z(m - A)_H - (m - A)_X] \cdot c^2 \quad (14)$$

donde $(m - A)_n$ y $(m - A)_H$ son los excesos de masas del neutrón y del átomo de hidrógeno, respectivamente. Por lo general la energía es el Mega electrón-Volt (MeV).

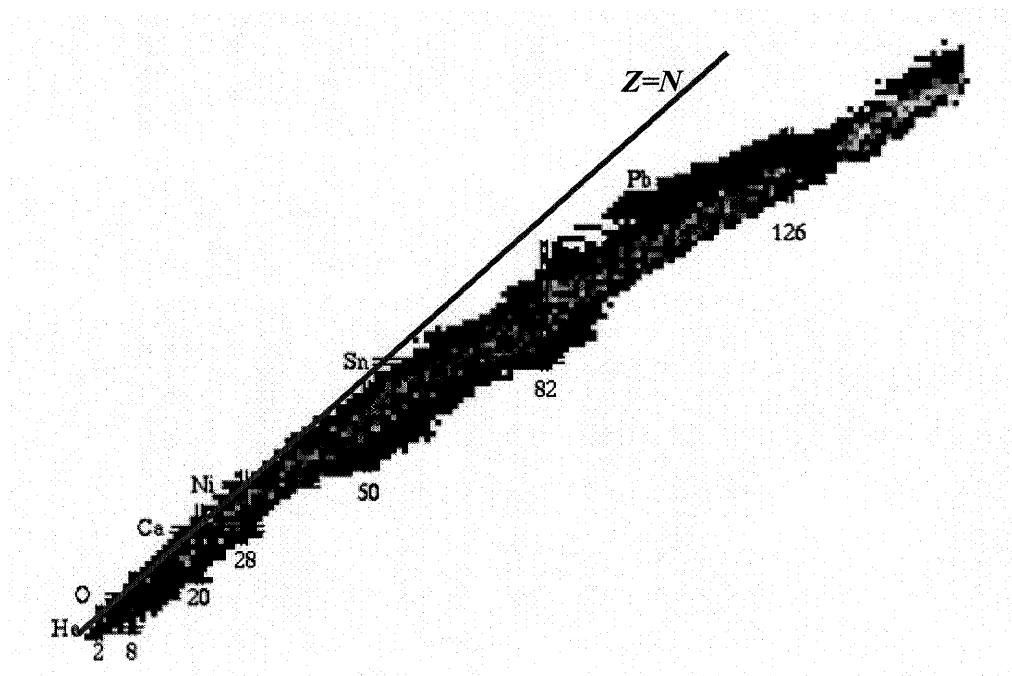


Figura 14. Tabla de isótopos nucleares, tomado de <http://www2.bnl.gov/CoN/>. El eje horizontal corresponde al número de neutrones N , mientras que el eje vertical corresponde al número de protones (por ejemplo: el número atómico) Z . Los cuadros de color negro representan los isótopos estables mientras que los otros representan los decaimientos α y β hacia un núcleo más estable. Las dobles líneas son para los números mágicos. La línea azul representa todos los nucleidos con $Z=N$.



Toda reacción debe satisfacer la condición de que la suma de los números atómicos y los números de masa de los reactantes y de los productos deben balancearse. Es decir,

$$Z_a + Z_b = Z_c + Z_d \quad (16)$$

$$A_a + A_b = A_c + A_d \quad (17)$$

Generalmente cuando se escriben las ecuaciones de reacción, se utilizan letras minúsculas para designar a las partículas elementales que entran en juego en la reacción y con mayúsculas a los núcleos, tal y como sigue



Sin embargo, una notación abreviada es



A manera de ejemplo, para la reacción nuclear ${}_0^1n + {}_5^{10}B \rightarrow {}_2^4He + {}_3^7Li$, la notación simplificada sería ${}^{10}B(n, \alpha){}^7Li$. Es importante tomar en cuenta que una partícula alfa es prácticamente un núcleo de helio.

La energía de reacción nuclear (Q)

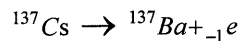
En toda reacción nuclear se libera o absorbe energía la cual es caracterizada por el valor Q y el cual es igual a la diferencia entre las energías de los reactantes y los productos. Si Q es positiva la reacción es exotérmica, y si es negativa la reacción es endotérmica. Y sus unidad es el MeV.

$$Q = \left[\sum m_{\text{Reactantes}} - \sum m_{\text{productos}} \right] \cdot c^2 \quad (20)$$

O bien

$$Q = [m_a + m_x - m_b - m_y] \cdot c^2 \quad (21)$$

Veamos ahora un ejemplo sencillo: Calculemos el valor Q para la reacción de desintegración radiactiva



Solución:

Para el ${}^{137}\text{Cs}$ la energía es de -86.9 MeV, y para el ${}^{137}\text{Ba}$ la energía es de -88.0 MeV. Así que el valor de Q se calcula a como sigue:

$$Q = -86.9 - (-88.0) = 1.1 \text{ MeV}.$$

Y en vista de que el defecto de masa es positivo, este es una reacción exotérmica, es decir que libera calor.

Niveles de energía del núcleo

Todos los núcleos poseen diversos estados de energía de características a los niveles energéticos de los electrones. Estos niveles de energía nuclear se representan por un diagrama de barras de energía tal y como es presentado en la figura 15. Donde el eje horizontal representa el número de protones, y el eje vertical representa la energía o bien la masa en forma de energía sobre c^2 . Este tipo de esquemas son de gran utilidad para estudiar las reacciones nucleares o desintegración radiactiva como es el caso de la figura 16, que representa la desintegración del cobalto-60.

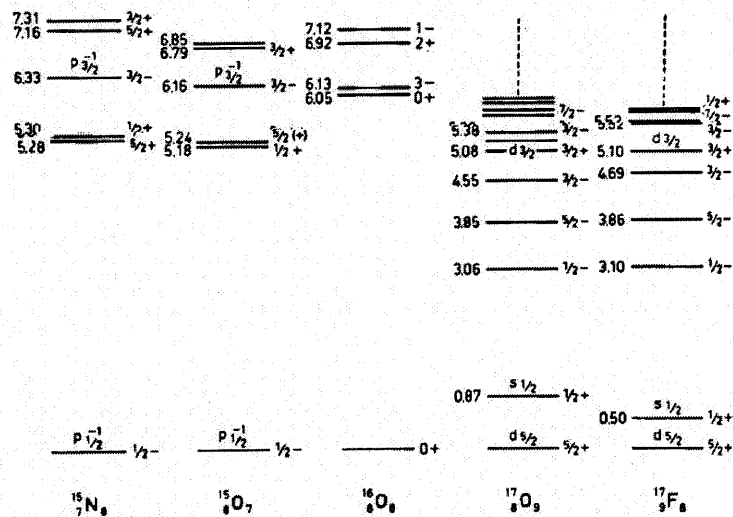


Fig. 15. Niveles de energía para diversos isótopos. Tomado de: <http://www.tandar.cnea.gov.ar/~soccoccola/teaching/nuclear/tr5>

Radioactividad

Aunque en la primera sección de este capítulo hemos hablado acerca de lo que significa radiactividad, en este acápite discutiremos con mayor detalle este concepto y su relación con los diversos tipos de desintegración radiactiva que existen. Como ya mencionamos, el término de radiactividad se le asigna a aquellas sustancias que de manera espontánea se desintegran pasando de un isótopo menos estable a uno más estable. Dicha desintegración va acompañada de liberación de energía y radiación en forma de rayos gamma, X, partículas alfa, beta, neutrones, neutrinos, entre los más importantes. Se dice que estas sustancias decaen de un tipo de nucleido a otro de

acuerdo a la ley de decaimiento exponencial de la ecuación (6) y que es también mostrada en la caricatura de la figura 11, y además la manera en como decaen se debe a la naturaleza de las partículas que emiten. De ahí que hay cinco tipo de decaimientos importantes: Decaimiento gamma, alfa, beta (que se subdivide en beta "+", en beta "-", Y captura electrónica), y conversión interna.

Otras magnitudes de mucha importancia para estudiar el decaimiento radiactivo de una sustancia (o bien de los núcleos encerrados en un determinado volumen) son:

Tiempo de vida media (τ) de una sustancia radiactiva es el inverso de la constante de decaimiento lambda (λ) que se presenta en la ecuación (9). De lo cual,

$$\tau = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} \lambda \cdot N t dt = \lambda \int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (22)$$

Período de semidesintegración también conocido como *semiperíodo* o *período medio* $T_{1/2}$, el cual es el tiempo en que tarda en desintegrarse la mitad de los núcleos o sustancia en estudio. Entre λ y $T_{1/2}$ existe la relación

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} = 0.693 \cdot \tau \quad (23)$$

La figura 14 es una tabla de isótopos la que presenta a los isótopos estables con un cuadro de color negro para los cuales corresponden a la línea de estabilidad $Z=N$ para Z pequeño. Los nucleidos que se desintegran por decaimiento alfa y beta son representados por otros colores tal como se describe en la figura. Los nucleidos con un orden de Z mayor a 92 son producidos artificialmente.

Hay dos tipos de radioactividad: Radioactividad natural y artificial. La primera se observa en los isótopos inestables que hay en la naturaleza, y la segunda se debe a los isótopos radiactivos obtenidos en reactores nucleares. La radioactividad natural se observa en los núcleos de los átomos de los elementos químicos que siguen al plomo en la tabla periódica de Mendeléiev.

Decaimiento Gamma

Cuando tenemos una reacción del tipo $a+X \rightarrow b+Y^*$, Y^* representa a un núcleo en estado excitado, es decir con energía mayor a la energía base⁶, tal como se presenta en la Fig. 16 para el cobalto-60, donde al decaer por la vía del decaimiento beta “-”, el cobalto-60 se transmuta en níquel-60 con un estado excitado de 2.158 MeV. Este estado (a 2.158 MeV) luego pasa a un estado estable mediante la liberación de radiación gamma con tal energía. Por lo cual es de esperar que dicho núcleo pase a un estado no excitado mediante el decaimiento gamma, es decir mediante la liberación de radiación electromagnética proveniente del núcleo. En ese caso la reacción puede escribirse como



Los rayos gamma es aquella radiación electromagnética liberada por el núcleo con energía comprendida entre el intervalo de 0.01 a 10 MeV. Son fotones altamente energéticos. Este tipo de energía, en su valor mínimo se traslapa con los denominados rayos X que discutiremos más adelante. Como los rayos X y gamma son ambos radiación electromagnética, no existe forma de diferenciarlas cuando estas se miden en el umbral en que ambas coinciden en energía, la única manera de distinguir las es por la naturaleza de generación de las mismas.

Decaimiento alfa (α)

En el decaimiento alfa el núcleo que se desintegra emite un núcleo de Helio, que es a lo que se le denomina partícula alfa (α). Por lo consiguiente la reacción puede ser expresada como



⁶ Energía base o de estado fundamental es la energía mínima para que el núcleo este en un estado estable.

La desintegración alfa es una propiedad de los núcleos pesados con número másico $A > 200$ y cargas nucleares $Ze > 82$.

Decaimiento beta (β)

Hay tres tipos de decaimiento beta: beta "+" (β^+), beta "-" (β^-) y captura electrónica (captura e o K). En las dos primeras reacciones se emiten positrones⁷ y electrones respectivamente. Por lo tanto, las reacciones pueden describirse respectivamente como



donde ν y $\bar{\nu}$ son respectivamente un neutrino y un antineutrino de lo cual hemos hablado anteriormente. La desintegración β^- se produce tanto en núcleos naturalmente radiactivos como en los artificiales, mientras que la radiación β^+ caracteriza únicamente a la radiactividad artificial.

En el caso de captura e, se da la transformación del protón en neutrón de acuerdo a la reacción



En donde uno de los electrones de la capa K más próximo al núcleo del átomo desaparece, y el protón se transforma en un neutrón al capturar al electrón antes mencionado. Como consecuencia el núcleo emite un neutrino, y a diferencia de la desintegración beta "+", la captura e va acompañada de radiación característica perteneciente al nivel K del elemento y de la cual hablaremos más adelante.

⁷ El positrón es un anti-electrón, es decir un electrón pero de carga negativa con las mismas propiedades del electrón.

A manera de ejemplo, el cobalto-60 se desintegra mediante el decaimiento beta “-”, pasando a diversos estados excitados de níquel-60.

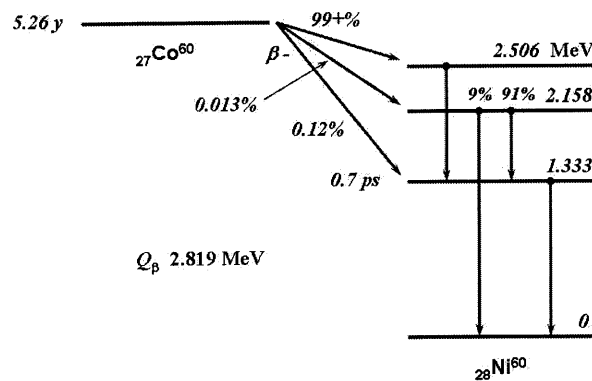


Fig. 16. Diagrama de decaimiento para el cobalto-60. Tomado de "Fundamentos de Ingeniería Nuclear", Thomas J. Connolly. Editorial Limusa 1983.

Conversión interna (IC)

Otra forma de decaimiento es sin emisión de partículas entregando energía. Esta energía (energía de excitación en forma de radiación gamma) es entregada a los electrones de las capa K o L, dándose algo similar al efecto fotoeléctrico. Y como resultado, se da la pérdida de electrones de las capas internas del átomo y emisión de rayos X característicos. Tanto en este tipo de decaimiento como en el decaimiento gamma el elemento no sufre ningún cambio en sus valores A , Z o N . El núcleo madre solo pierde energía de excitación y cambia por este el defecto de masa. Los electrones que participan en la transferencia núcleo-capas se les denomina de conversión y sus energías corresponden a la diferencia de energía del electrón que viene del núcleo y la energía de ligadura de la capa, descrita tal como

$$E_e = E_\gamma - E_{Ligadura} \quad (29)$$

Reacciones de neutrones

Como anteriormente se expuso, los neutrones ${}_0^1n$ son partículas neutras, pesadas en comparación al electrón (véase Tabla 1). Estos han sido usados en la producción de isótopos radiactivos. Los neutrones se clasifican en rápidos y lentos en dependencia de su energía cinética. Los neutrones rápidos son aquellos cuya velocidad v es tan grande que la longitud de onda de De Broglie ($\lambda = h/mv$) correspondiente a dicho neutrón es menor que el radio R del núcleo, es decir $h/mv < R$. La energía de los neutrones rápidos esta comprendida entre los límites de 0.1 MeV y 50 MeV. Si $\lambda > R$, los neutrones se llaman lentos, cuyas energías no sobrepasan los 100 keV. Los neutrones lentos cuyas energías varían entre los 0.005 eV y los 0.5 eV, se les denomina neutrones térmicos.

En los procesos de interacción con la materia, las partículas deben de realizar un recorrido en un medio el cual puede ser el aire, o bien en un tejido. En ambos casos el recorrido viene a ser aleatorio, por lo cual es necesario hablar de probabilidad de que el neutrón interactúe a la distancia s de la cual partió. Por esa razón es necesario introducir el concepto de probabilidad de ocurrencia del evento o de que se de reacción expresada como

$$P_R(\delta s) = \Sigma \cdot \delta s \quad (30)$$

Y de manera análoga, la probabilidad de que no se haya dado una reacción la expresaremos como

$$P_{NR}(\delta s) = 1 - \Sigma \cdot \delta s \quad (31)$$

De lo cual tenemos solo dos posibilidades: Reacción o no reacción. Los eventos son independientes. Por lo cual la probabilidad de no reacción a la distancia $s + \delta s$ será el

producto de las probabilidades de no reacción a la distancia s y a la distancia δs , es decir

$$P_{NR}(s + \delta s) = P_{NR}(s) \cdot P_{NR}(\delta s) = P_{NR}(s) \cdot [1 - \Sigma \cdot \delta s] \quad (32)$$

La expresión (30) puede reorganizarse matemáticamente para obtener una ecuación diferencial del problema en cuestión, escribiéndose como

$$\frac{P_{NR}(s + \delta s) - P_{NR}(s)}{\delta s} = -\Sigma \cdot P_{NR}(s) \quad (33)$$

En el límite cuando $s \rightarrow 0$, obtenemos la ecuación diferencial

$$\frac{dP_{NR}}{ds} = -\Sigma \cdot P_{NR} \quad (34)$$

Integrando la ecuación (32) obtenemos que

$$P_{NR}(s) = e^{-\Sigma s} \quad (35)$$

y

$$P_R(s) = 1 - e^{-\Sigma s} \quad (36)$$

A la constante Σ se le llama **sección eficaz macroscópica**; en el caso de los rayos gamma a este constante se le denomina *coeficiente de atenuación lineal* y se le representa por μ . La unidad de esta cantidad es el centímetro recíproco, es decir cm^{-1} . Sin embargo hablaremos de este coeficiente nuevamente más adelante. Por el momento explicaremos a continuación con mayor detalle el concepto de sección eficaz mejormente definido como **sección transversal eficaz**.

Sección transversal eficaz

El rendimiento de una reacción nuclear se mide por la magnitud de la *sección transversal eficaz* σ (sección de reacción) de la reacción. σ es el área de las partículas que son borbandeadas y que permiten la reacción. La unidad empleada es el barn, donde $1 \text{ barn} = 1 \text{ b} = 10^{-28} \text{ m}^2$, y $1 \text{ milibarn} = 1 \text{ mb} = 10^{-31} \text{ m}^2$.

Para entender un poco mejor lo antes descrito veamos a manera de ejemplo el volumen que se presenta en la figura 17, en la cual se considera un volumen de forma regular (paralelepípedo) con área A y espesor d . Dicho volumen contiene partículas consideradas como el blanco de borbando, de lo cual el área a de esas partículas sumadas sobre todo el espacio dentro del volumen son las que nos interesan para la reacción. El número de partículas blanco puede determinarse como el producto del área macroscópica multiplicada por el espesor d del volumen dentro del cual las partículas están distribuidas y luego por la densidad de las partículas n_0 .

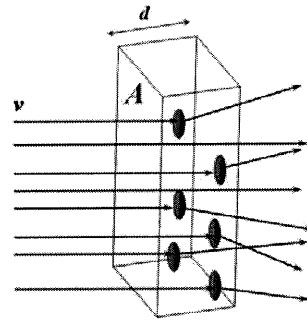


Fig. 17. A es al área del volumen en el cual son borbandeadas las partículas blanco, y a es el área de la partícula blanco.

$$\text{Número de partículas blanco } (N_0) = n_0 \cdot A \cdot d \quad (37)$$

Utilizaremos un nuevo concepto denominado flujo de partículas Φ , el cual consiste en el producto entre la densidad de partículas que atraviesan el área A del volumen y que chocarán con el blanco y la velocidad v de las mismas. Esta densidad de partículas se considera igual a la densidad de partículas dentro del blanco, por lo cual

$$\Phi = n_0 \cdot v \quad (38)$$

Por otra parte, si consideramos la tasa de reacción dentro del volumen, tenemos que esta es igual al producto entre el flujo, el número de partículas blanco, y una constante de proporcionalidad a la que denominaremos como σ , y que es la sección transversal eficaz de la reacción la cual se expresa como

$$\sigma = \frac{\text{número de reacciones por unidad de tiempo}}{\text{flujo de partículas incidentes por unidad de tiempo por área} \times \text{partículas blanco}} \quad (39)$$

En forma matemática, tenemos

$$\sigma = \frac{dN/dt}{\Phi \cdot N_0} \quad (40)$$

En algunos casos como en la interacción Compton de la cual hablaremos más adelante, es necesario discutir la interacción entre partículas mediante la denominada sección eficaz diferencial. Pero, en vista de la complejidad matemática de este concepto no profundizaremos en el tema, sin embargo solo consideraremos que como magnitud expresa el área en la que se hace efectiva la interacción.

Las Radiaciones Ionizantes y su naturaleza

En sí, toda radiación es similar a la luz, pues son ondas electromagnéticas que se propagan a la velocidad de la luz (de 3×10^8 m/s), con determinada energía⁸ y longitud de onda. La luz visible es apenas una pequeña porción del espectro electromagnético y cuyo rango es de 400nm a 800nm (véase Fig.18).

La energía con que se propaga cualquier onda electromagnética fue determinada por Albert Einstein como

$$E = h\nu, \quad (41)$$

Donde h es la constante de Planck con el valor de 6.6262×10^{-34} J-s, y ν es la frecuencia (en segundos) de la radiación que está relacionada con la longitud de onda por la velocidad de propagación como

$$c = \nu\lambda \quad (42)$$

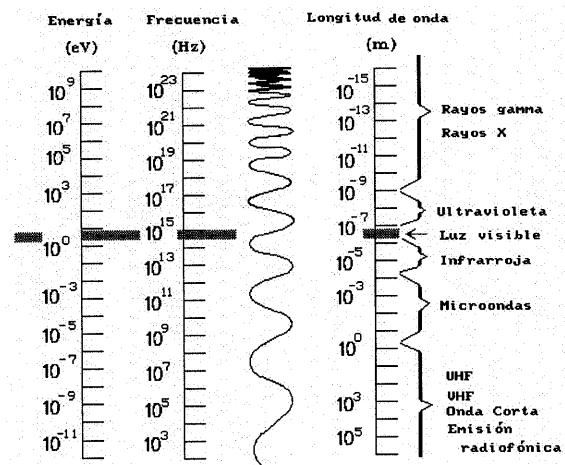


Fig. 18. Espectro Electromagnético.
Elaborado por Martín Pomares C.

⁸ La Energía es una magnitud física escalar que por definición es la capacidad de realizar un trabajo, el que a su vez se define como el producto escalar entre la fuerza que realiza el trabajo y el vector desplazamiento, y cuyo valor total se conserva. La energía total mecánica es igual a la suma de la *energía cinética* (energía que describe el movimiento) y la *energía potencial* (energía almacenada para realizar un trabajo con respecto de un punto de referencia).

Cuando la frecuencia de radiación es bastante grande, la energía también lo es. En consecuencia la radiación puede romper enlaces moleculares o bien ionizar átomos lo que hace que este tipo de radiación que interacciona con la materia se les denomine ionizante. A esta clasificación pertenecen los rayos alfa, beta, neutrónicos, gamma y los rayos X. Los dos últimos tipos de radiaciones son altamente penetrantes. Todas las radiaciones ionizantes son producto de interacciones nucleares. Los rayos alfa son átomos de helio doblemente ionizados (He_2^{++}), o bien son núcleos de helio en consecuencia poseen carga eléctrica positiva, y por ser partículas pesadas no pueden penetrar a más de un milímetro en la materia.

Los rayos beta son electrones, en consecuencia poseen masa y carga eléctrica negativa. Aunque los rayos beta son electrones se les nombra "beta" ya que se producen en el núcleo de un átomo debido a reacciones nucleares y así diferenciar únicamente su naturaleza de origen. Pueden atravesar el cuerpo humano o bien láminas delgadas de material de mayor densidad como metales (véase Fig. 19).

Los rayos gamma y los rayos X son radiación electromagnética con la capacidad de penetrar y atravesar la

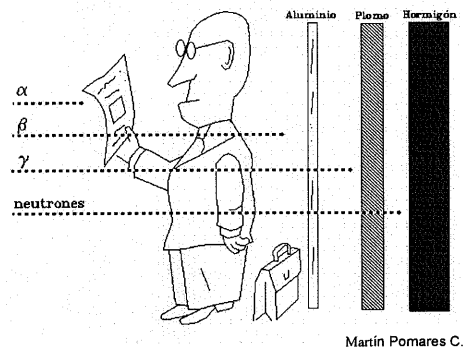


Fig. 19. Tipos de radiación y barreras de protección

materia, pero los primeros son producidos en el núcleo debido a reacciones nucleares, mientras que los rayos X se producen en la nube electrónica de un átomo pesado cuando un electrón pierde su energía cinética al desacelerar debido a las fuerzas de Coulomb de tal forma que radia energía fotónica denominada **Bremsstrahlung** (que traducido del alemán significa **radiación de frenado**). Otra forma de producción es cuando un electrón con alta energía impacta con otro electrón de las capas K, L o M, de tal manera que electrones de las capas superiores ocupan la vacante y en esa transición se libera un cuanto. Claro que a cada cuanto se le denomina K, L o M según de que nivel de energía haya sido ocupado por el electrón de la capa superior. A esta radiación se le conoce como **radiación característica**.

Tanto los rayos X como los rayos gamma deben de estar comprendidos en un rango cuya longitud de onda sea menor a los 10nm.

Ahora es fácil comprender que todo el espectro electromagnético que no posee la propiedad de ionizar la materia es denominada **radiación no ionizante**.

Bien, ahora ya sabemos qué son las radiaciones ionizantes, pero ¿para qué sirven? Estas pueden ser usadas tanto en beneficio como en perjuicio

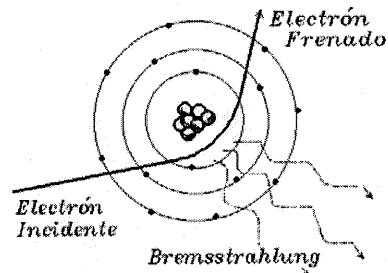


Fig. 20. Generación de radiación de frenado.

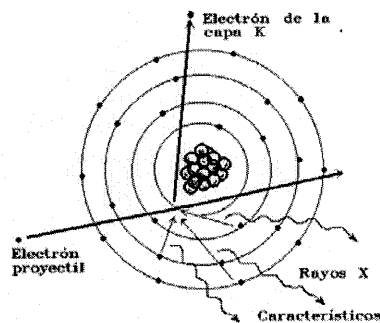


Fig. 21. Generación de radiación Característica.

dependiendo de los fines de utilidad y de la cantidad de radiación con la que se trabaje. La propiedad de ionizar la materia consiste en que dichas radiaciones destruyen los enlaces entre las moléculas o átomos, en consecuencia si actúan sobre nuestro cuerpo o sobre un organismo viviente pueden provocar alteraciones genéticas tales como el cáncer en los seres humanos cuando éstas actúan sin control o medida, pero también aunque parezca contradictorio pueden curar el cáncer cuando las radiaciones se hacen incidir en tumores, pues destruyen el código genético del tumor permitiendo que las células se desarrollen normalmente.

Otras buenas propiedades de las radiaciones ionizantes es, que permiten diagnosticar, tal es el caso de los rayos X pues se pueden usar en medicina para ver si hay alteraciones en un órgano o bien si hay un hueso roto (véase Fig. 22), pero también las radiaciones ionizantes pueden usarse en las construcciones para ver si estructuras de concreto o vigas están en condiciones adecuadas, para revisar soldaduras de alta precisión en tanques de alta presión, en sistemas de monitoreo de peso de tabaco en tabacaleras, para destruir bacterias en alimentos y preservarlos por largos períodos sin necesidad de refrigeración, para estudiar la hidrología subterránea de un terreno, etc. En fin las utilidades son muchas y por eso el cuidado o la seguridad en la manipulación de fuentes de radiación es muy importante para evitar perjuicios.

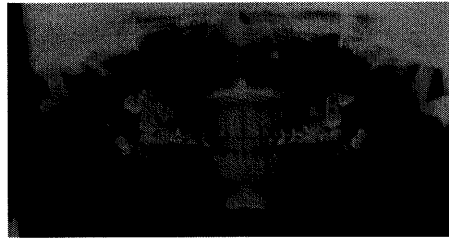


Fig. 22. Radiografía odontológica panorámica.

Cortesía del Hospital Vélez Paiz

Un poco más acerca de ...

Interacción de la radiación con la materia

Hay tres formas mediante las cuales la radiación electromagnética interacciona con la materia: el efecto Compton, el efecto fotoeléctrico, y la producción de pares. Estas tres formas de interacción dependen de la energía de la radiación. La figura 23 muestra estos tres tipos de interacción, y la dependencia entre el número de protones de un absorbedor⁹ versus la energía de los fotones. Para energías entre los 0.01 MeV a los

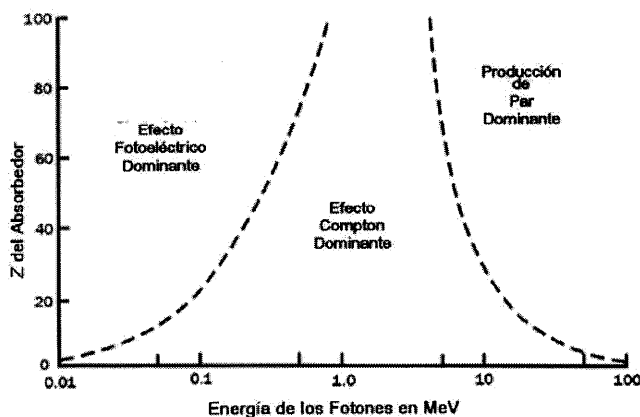


Fig. 23. Importancia relativa de los tres procesos en función de la energía y el material absorbente. Tomado de <http://epswww.unm.edu/xrd/xrdclass/02-Rad-Safety.pdf> (Material original de James R. Connolly2005©).

⁹ Entenderemos por absorbedor a cualquier tipo de material que es considerado como blanco para los fotones a interactuar.

El efecto fotoeléctrico

En algunas sustancias, cuando la luz incide sobre cierta superficie metálica se emiten electrones desde la superficie. Experimentalmente se encontró que el número de electrones salientes es proporcional a la intensidad de la luz, su energía cinética, sin embargo es proporcional a la frecuencia de la luz incidente e independiente de la intensidad de ésta. A este fenómeno se le llamó efecto fotoeléctrico.

En el efecto fotoeléctrico se supone que la luz o cualquier onda electromagnética de frecuencia ν en una fuente de radiación puede tener solamente los valores $0, h\nu, 2h\nu, \dots, nh\nu$, lo que implica que al pasar del estado de energía $nh\nu$ al $(n-1)h\nu$ la fuente emite un paquete de energía electromagnética con un contenido energético $h\nu$.

De los experimentos se tiene que en el efecto fotoeléctrico se absorbe completamente un cuanto de luz por algún electrón lo cual se puede expresar como (véase Fig. 24)

$$h\nu = E_c + \Delta E \quad (43)$$

donde ΔE es la suma de energía necesaria para llegar a la superficie (del electrón) más

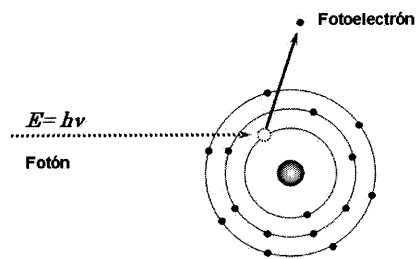


Fig.24. Efecto fotoeléctrico.

W la energía para superar las fuerzas atractivas de la superficie.

Si $\Delta E = W$ entonces,

$$E_{c_{\max}} = h\nu - W \quad (44)$$

Estos resultados concuerdan con las observaciones experimentales.

El efecto Compton

En el efecto Compton se produce una dispersión que se debe a las colisiones entre los cuantos y los electrones individuales que se encuentran libres e inicialmente en reposo (véase Fig. 25). Si consideramos al electrón como libre y en reposo (una buena aproximación dado que la energía del fotón es normalmente mucho mayor que las bajas energías de ligadura de los electrones de las capas externas), entonces la conservación del momento lineal y la energía (usando dinámica relativista) nos permite calcular la energía del fotón dispersado, la cual se expresa como

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \left(\frac{E_\gamma}{mc^2}\right) \cdot (1 - \cos\theta)} \quad (45)$$

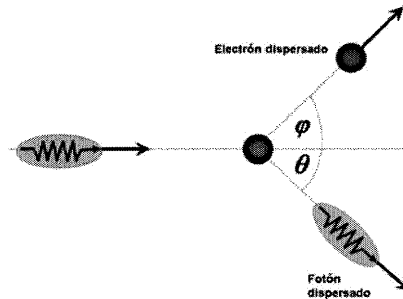


Fig. 25. El efecto Compton

Los fotones dispersados varían en su energía dependiendo del ángulo θ de dispersión desde el caso $\theta \sim 0$, $E'_\gamma \gg E_\gamma$ hasta $\theta \sim \pi$, $E'_\gamma \gg 1/2 \cdot mc^2 \gg 0.25 \text{ MeV}$. La probabilidad para la dispersión Compton para un ángulo θ puede obtenerse empleando la mecánica cuántica. El resultado es la fórmula de Klein-Nishina para la sección eficaz diferencial para el electrón:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = r_0^2 \cdot \left[\frac{1}{1 + \alpha \cdot (1 - \cos\theta)} \right]^3 \cdot \left[\frac{1 + \cos\theta}{2} \right] \cdot \left[1 + \frac{\alpha^2 \cdot (1 - \cos\theta)^2}{(1 + \cos^2\theta) \cdot [1 + \alpha(1 - \cos\theta)]} \right] \quad (46)$$

donde $\alpha \equiv \frac{E_\gamma}{mc^2}$, y $r_0 = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 mc^2} = 2.81 \text{ fm}$

donde α es la energía del fotón en unidades de la energía en reposo del electrón y r_0 es el radio clásico del electrón (que se utiliza como parámetro, pero que no tiene que ver con el tamaño de los electrones).

Producción de pares

El tercer proceso de interacción de un fotón energético con la materia es el de producción de pares, en el que un fotón en presencia de un átomo puede desaparecer

creando un par electrón-positrón: $\gamma \rightarrow e^- + e^+$

El balance energético viene dado por:

$$E_\gamma = T_{e^-} + m_{e^-} \cdot c^2 + T_{e^+} + m_{e^+} \cdot c^2 \quad (47)$$

donde $m_{e^-} = m_{e^+} = 0.511 \text{ MeV}$. Existe, por tanto, una energía umbral por debajo de la cual no puede darse este proceso: $E_{min} = 2mc^2 = 1.022 \text{ MeV}$. Como en el caso de la absorción fotoeléctrica, este proceso requiere para la conservación del momento la presencia cercana de un átomo masivo, pero la energía de retroceso dada al átomo es despreciable comparada con los términos de la ecuación. La producción de pares llega a ser dominante únicamente para energías superiores a 5 MeV.

El coeficiente de atenuación lineal μ

Consideremos un haz altamente colimado de fotones monoenergéticos (de igual energía) que parten de una fuente e inciden sobre un bloque de material de espesor x . Los fotones pueden sufrir absorción fotoeléctrica o producción de pares y desaparecer, o bien dispersión Compton y ser desviados. Por tanto, tan solo llegan al detector aquellos fotones que no han interactuado. Como consecuencia de las posibilidades de interacción, hablaremos de probabilidades. Por lo cual, la probabilidad total por unidad de longitud de que un fotón no alcance al detector a la que denominaremos μ , se le conoce como el **coeficiente de atenuación lineal total** y es simplemente la suma de las probabilidades de cada uno de los procesos la cual se describe como

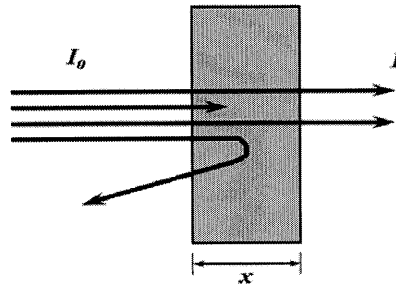


Fig. 26. Atenuador de espesor "x"

$$\mu = \tau + \sigma + \kappa \quad (48)$$

donde τ es la probabilidad de absorción fotoeléctrica, σ es la probabilidad de dispersión Compton y κ es la probabilidad de producción de pares electrón-positrón. Todas estas cantidades tienen dimensiones de $[\text{Longitud}]^{-1}$ y generalmente se expresan en unidades de cm^{-1} . En muchas ocasiones se trabaja con el coeficiente de atenuación másico, que viene dado por el cociente entre el coeficiente de atenuación lineal μ y la densidad ρ del material y que se expresa en la forma de μ/ρ .

La disminución relativa de intensidad del haz de fotones al atravesar un espesor dx del material se expresa como

$$\frac{dI}{I} = -\mu \cdot dx \quad (49)$$

De la cual, por integración obtenemos la **ley exponencial de atenuación lineal** expresada como

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x} \quad (50)$$

Se puede definir el recorrido libre medio como la distancia media entre dos interacciones. En este caso, tenemos que:

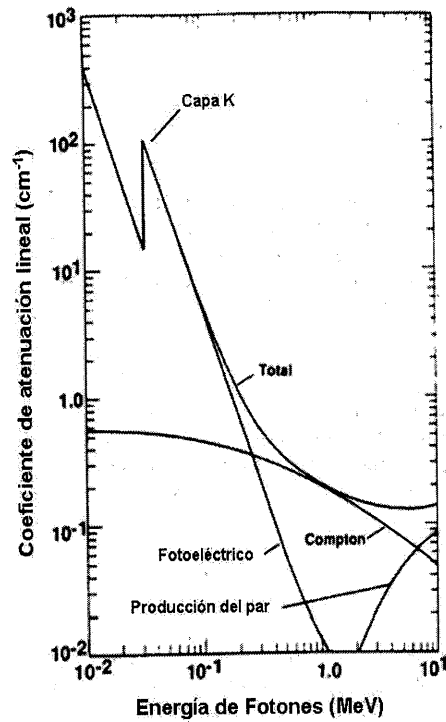


Fig.27. Coeficiente de atenuación lineal para el NaI mostrando las contribuciones de la absorción del efecto fotoeléctrico, dispersión Compton, y la producción del par.

Tomado de G. Nelson y D. Reilly. Disponible en el sitio:

<http://www.fas.org/sgp/othergov/doe/lanl/lib-www/la-pubs/00326397.pdf>

$$\lambda = \frac{\int_0^{\infty} x \cdot e^{-\mu \cdot x}}{\int_0^{\infty} e^{-\mu \cdot x}} = \frac{1}{\mu} \quad (51)$$

La figura 27 presenta la dependencia del coeficiente de atenuación másico versus la energía de los fotones para el plomo. Se presentan las tres formas de interacción (Compton, fotoeléctrico, producción del par), así también como la contribución de todos los efectos presentados como "Total". Esta misma línea presenta que para energías entre 0.01 MeV y 0.1 MeV se da la emisión de rayos X característicos para la capa K.

Detectores de radiación

Las radiaciones ionizantes no son perceptibles por los sentidos, por esa razón es necesario de valerse de instrumentos denominados detectores. Hay diversos tipos de detectores los cuales vienen a ser útiles dependiendo de la energía, intensidad o alguna otra propiedad.

Los detectores se basan en el principio de que la radiación es capaz de interactuar con la materia, ionizar gases o algunos materiales de estado sólidos tales como la sal de Ioduro de Sodio (NaI). Dichos iones poseen carga eléctrica que puede ser medida en forma de corriente eléctrica. También las radiaciones pueden depositar energía en la materia excitando átomos o moléculas las que luego liberan fotones que pueden ser contados. Dentro de estos efectos tenemos la termoluminiscencia que consiste en que ciertos materiales al recibir radiación excitan sus electrones a niveles energéticos denominados trampas, de los cuales sólo es posible des-excitar dichos electrones mediante calor. En ese proceso de des-excitación los electrones liberan fotones que pueden ser contados. De lo cual hay una relación entre la dosis y el número de fotones emitidos o contados.

También, procesos fotoquímicos y de incremento de temperatura son otros fenómenos útiles en la detección de radiaciones ionizantes. Tal es el caso de que las radiaciones ionizantes son capaces de estimular placas fotográficas.

Todas estas propiedades de la interacción de la radiación con la materia han sido tomadas en cuenta en el diseño de los detectores, y muy especialmente en pequeños detectores personales denominados **dosímetros** diseñados con el propósito del monitoreo personal.

Un esquema muy general para un detector de gas es presentado en la figura #, en el cual cierta cantidad de radiación al interactuar con el gas del detector ioniza dicho gas haciendo que las cargas negativas vayan hacia un electrodo central que es polarizado con alto voltaje el cual colecta dichas cargas que luego viajan en forma de corriente eléctrica de pulsos de corta duración los cuales para poder ser leídos son amplificados. La corriente es proporcional a la dosis acumulada en el detector. El esquema de la figura 28 representa muy bien al tipo de detectores Geiger-Müller. Generalmente se puede usar cualquier gas como aire, pero normalmente se usa una

mezcla de gases inertes (ej. Argón) con un gas orgánico. El primero ayuda a impedir la degradación y el segunda ayuda a ceder electrones para restablecer las condiciones iniciales de la mezcla de gases para otra ionización. La geometría más común es cilíndrica donde un cilindro metálico hace de ánodo y el electrodo interno funciona como cátodo. Entonces los iones positivos se dirigen al cilindro (ánodo) y los negativos al cátodo para luego circular en el circuito a consecuencia del potencial aplicado en el ánodo y el cátodo.

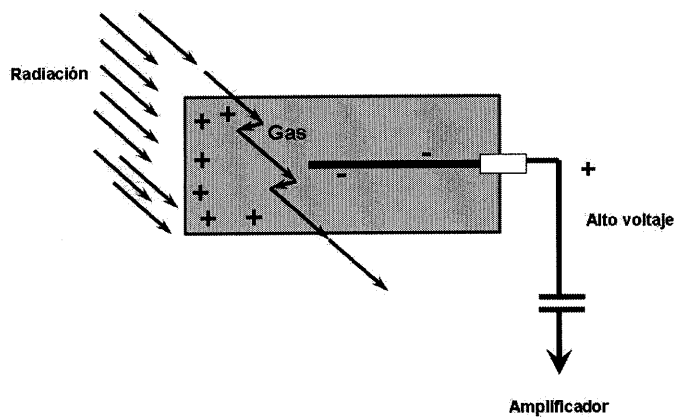


Fig. 28. Esquema descriptivo de un detector gaseoso del tipo Geiger-Müller.

Si el voltaje no es el adecuado, el detector puede dar lecturas erróneas. Pues además, en el trayecto entre el punto de ionización y los electrodos los iones pueden recombinarse y volver a ionizar a otras moléculas, lo cual dependerá del tamaño del detector, el tipo de gas y del voltaje aplicado. Los detectores gaseosos operan dependiendo del voltaje aplicado al detector. La figura 29 presenta dicho rango de operaciones para diversos detectores gaseosos de los cuales no hablaremos con detalle en este texto.

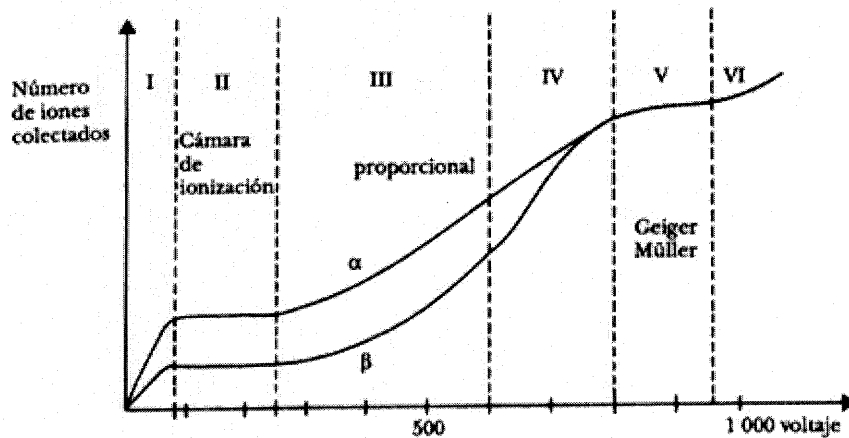


Fig. 29. Regiones de operación de un detector gaseoso.
Tomado de Connolly, T. J., *Fundamentos de ingeniería nuclear*, 1983.

Dentro de los detectores utilizados en dosimetría personal, los más comunes son: De cámara de ionización, de película y TLD del cual ya hemos hablado un poco en la sección de dosimetría personal. Los dosímetros de película tal como el que se describe en la figura 30.a. aprovechan el la propiedad de que las radiaciones velan películas fotográficas como se da con las radiografías. La emulsión fotográfica contiene granos de bromuro de plata (AgBr) los cuales al interactuar con la radiación en la placa fotográfica quedan iones de bromo y de plata suspendidos en la emulsión, como imagen latente. Cuando se revela la película aparecen los granos de plata metálica. El oscurecimiento se mide después con un densitómetro óptico, que mide la transmisión de luz, y de allí se deduce la dosis recibida.

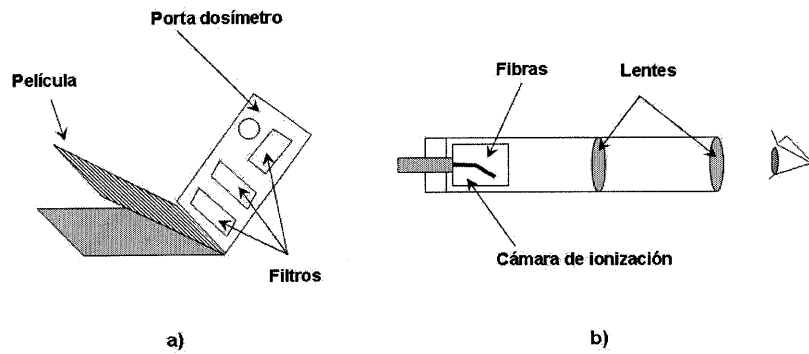


Fig. 30. Dos tipos de dosímetros: (a) de película, (b) de cámara de ionización

Otro tipo de dosímetro típico es el de cámara de ionización (Fig. 30.b), el cual posee un electrómetro de fibra cuyo ángulo de inclinación depende de la carga eléctrica acumulada en dicha fibra. El ángulo de inclinación es proporcional a la dosis la cual puede ser leída mediante una escala óptica. A este tipo de dosímetro se les denomina dosímetro de lapicero pues es similar al diseño de un bolígrafo, incluso en el tamaño.

Mecanismo de producción de los rayos X

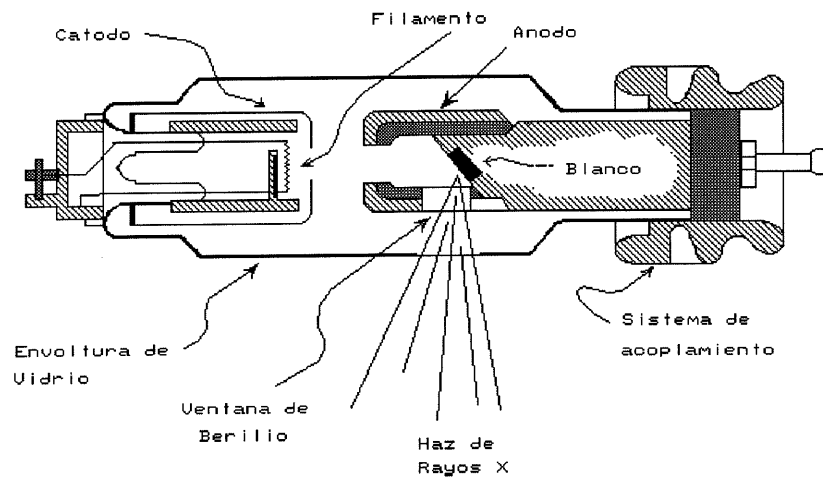
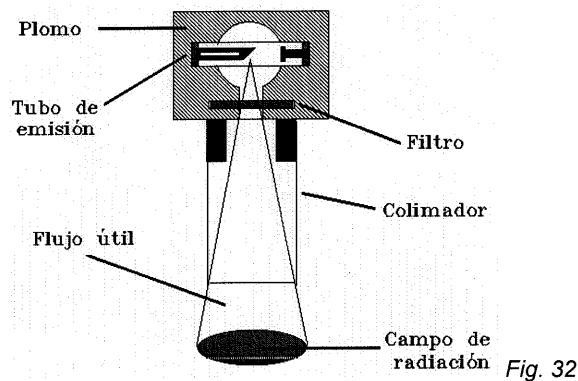


Fig. 31. Diagrama de un tubo de rayos X

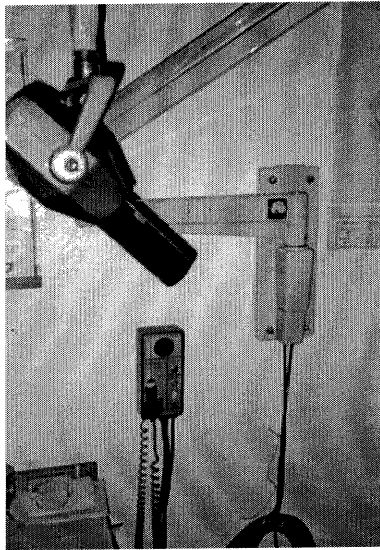
Los rayos X se generan en un tubo Röntgen, el cual es un tubo al vacío tal como el de la figura 31. Entre el cátodo y el ánodo se establece una diferencia de potencial de decenas de kilovolt. Adicionalmente en un filamento situado en el cátodo se establece otra diferencia de potencial y como consecuencia los electrones que hay en éste son emitidos a gran velocidad hasta chocar con un blanco de Tungsteno en el cátodo. Como consecuencia del impacto se generan dos procesos: Producción de fotones (rayos X), lo que corresponde al 1% por impacto; y el otro 99% se convierte en calor. Como los rayos X producidos se dispersan en todas las direcciones es necesario colocar el tubo dentro de una caja protectora revestida de plomo, la cual limita el flujo de electrones que salen a través de una ventana, para luego ser filtrada de tal manera

que el haz de radiación sea monocromático. El haz colimado se denomina **radiación primaria** (o bien flujo útil, véase figura 32) y cuando esta interacciona con el paciente y otros medios se dispersa, siendo esta última **radiación secundaria**.

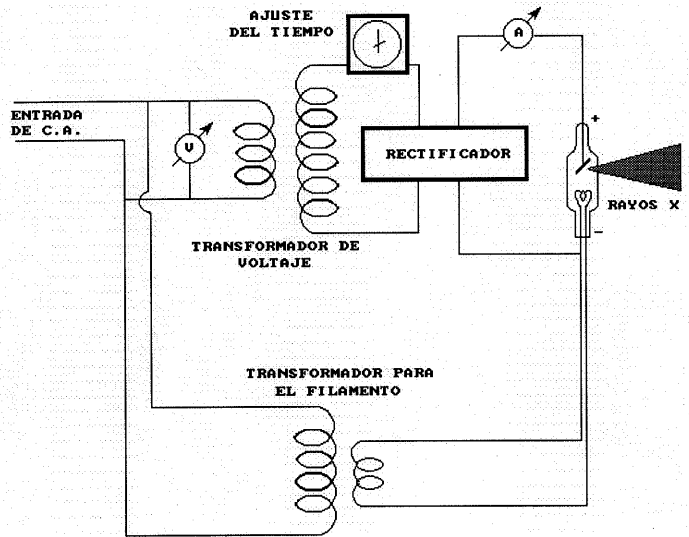
La electrónica de un equipo de rayos X no es tan compleja pero cuando tratamos con un equipo de rayos X convencional hay que variar la energía entre el cátodo y el ánodo lo que comúnmente los técnicos en rayos X les llaman "*kilovoltaje*" y con esto la corriente que debe de circular en el tubo en "*miliamper*" o simplemente mA, y con ellos el tiempo de exposición en segundos. A los tres parámetros se les denomina "*Técnica radiográfica*".



En el caso de los equipos de rayos X odontológicos son más simples en la electrónica (véase figura 33) puesto que operan a un kilovoltaje fijo, generalmente a 75 kV y 10 mA, con escalas de tiempo que van desde 0.1 segundo hasta 3 segundos o bien en pulsos de 60 ciclos por segundo cada uno. En la figura 30 presentamos un equipo de rayos X odontológico típico.



(a)



(b)

Fig. 33. (a) Un equipo de rayos X odontológico, (b) Diagrama electrónico de dicho equipo.
Foto tomada por Martín Pomares C.

En honor a Wilhelm Conrad Röntgen, el hombre que hizo traslúcido el cuerpo humano y la materia



*Fig. 34. Wilhelm Conrad Röntgen.
El descubridor de los rayos X.
Tomada del sitio:
[http://www.onmeda.de/lexika/persoentli
chkeiten/roentgen.html](http://www.onmeda.de/lexika/persoentli/chkeiten/roentgen.html)*

Wilhelm Conrad Röntgen nace el 27 de marzo de 1845 en Lennp (Renania). Cuando estudiante en la universidad obtuvo malas notas escolares justamente en las asignaturas de Física y Química, por falta de aplicación e interés. No obstante su genio creativo le llevó más lejos de lo que cualquier hombre en la ciencia pudo soñar. Ejerció de profesor en las universidades de Utrecht, Zürich, Würzburg, Estrasburgo, Hohenheim, Giessen, y nuevamente en Würzburg donde en 1888 obtuvo la cátedra titular de Física. Y fue en esa misma universidad, en el atardecer del 8 de noviembre de 1895 hizo un notable descubrimiento que revolucionaría la ciencia y que permitiría hacer traslúcida la sustancia, descubrió los ahora denominados "rayos X". El descubrimiento en sí fue accidental puesto que Röntgen llevaba experimentando varias semanas con rayos catódicos los que hacen fluorescer algunos elementos químicos de manera tenue. Para estudiar mejor este efecto, decidió observar qué sucedía a oscuras con las sustancias fluorescentes, envolviendo además el tubo de rayos catódicos con un cartón negro, oscurecido

con una mezcla de bario, platino y cianógeno. Cuando conectó el tubo, ¡qué sorpresa!, el cartón adquirió luminiscencia sin importar la distancia de este al tubo catódico, dudando de que los misteriosos rayos pudieran provenir de ahí. Hizo otros ensayos

con el papel previamente tratado, e incluso en la habitación contigua aparecía la fluorescencia, los cuales no pudieron ser detenidos por láminas de metales de baja densidad a excepción del plomo. Paulatinamente Röntgen comprendió que había realizado un nuevo descubrimiento. Tras semanas de intensa investigación el científico pudo comprobar que estos rayos traspasaban su mano y proyectaban sobre una pantalla luminiscente los contornos de los huesos. Al desconocer la naturaleza la naturaleza del origen de esta penetrante radiación les denominó "rayos X". De tal manera que el título del primer trabajo científico de Röntgen envió a sus colegas una vez impreso y tras semanas de minuciosos e intensivos experimentos lo tituló "*Sobre una nueva especie de rayos*" a inicios de 1896. El descubrimiento de Röntgen influyó de forma rápida y decisiva en la historia. En muy breve tiempo revolucionó campos tales como la física y la química causando una avalancha de nuevos descubrimientos y de la noche a la mañana los rayos X permitieron el despertar de la medicina moderna, pues con la ayuda de los rayos X se perfiló de mejor manera el diagnóstico médico. A pesar de lo grandioso de su descubrimiento fue un científico modesto y sencillo siendo laureado en 1901 con el Premio Nobel en Física, pero entregó la suma de dicho premio a la Universidad de Würzburg. Röntgen consideró como especialmente aborrecible la inmensa publicidad en torno a su descubrimiento. Su radical rechazo a todo género de culto en torno a su persona se evidenció en el hecho de que siempre habló de "rayos X" y jamás de "rayos Röntgen", de tal manera que Röntgen no buscó lucrarse de los derechos de propiedad intelectual; siempre defendió la opinión de que debía de ser de libre acceso y utilización para toda la sociedad. Cuando Röntgen hizo su descubrimiento no era del todo conocido. En 1895 había publicado ya docenas de trabajos científicos importantes.

Magnitudes Físicas y unidades usadas en Protección Radiológica

La base de las siguientes definiciones son las normas básicas de seguridad de la colección 115 publicada por el Organismo internacional de Energía Atómica. Sin embargo serán usadas definiciones de textos científicos reconocidos (ver referencia). La primera definición que debemos conocer es la de actividad que por decirlo así nos dice que tan peligrosa puede ser una fuente una vez que queda desprotegida. Hay otros factores que nos van a indicar el riesgo sin embargo esta es una magnitud que nos da una idea dado que nos indica la cantidad de desintegraciones radiactivas por unidad de tiempo y así podemos calcular la cantidad de sustancia presente en un tiempo dado.

Actividad (Activity)

Magnitud A correspondiente a una cantidad de radio nucleido en un estado determinado de energía, en un tiempo dado, definida por la expresión:

$$A = \frac{dN}{dt}, \quad (52)$$

Siendo dN el valor esperado de transformaciones nucleares espontáneas a partir de ese estado de energía, en el intervalo de tiempo dt . En el Sistema Internacional SI, la unidad de actividad es 1 dividido segundo (s^{-1}), que recibe el nombre de becquerel (Bq). Una unidad (fuera del SI) especial de actividad es el curie (Ci), donde $1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$. Podemos observar que la unidad de Bq es muy pequeña por eso aun se usa el Ci por tanto se puede usar pero por efecto de ley de metrología la cual establece el uso del Sistema Internacional (SI) debemos usar el Bq y en paréntesis la unidad en Ci. De otra manera: La actividad, es el número de partículas que se desintegran (o decaen) en unidad de tiempo.

Exposición (Exposure)

La exposición χ , es el cociente de dQ y dm , donde el valor de dQ es el valor absoluto de la carga total de iones de un signo producidos en el aire cuando todos los electrones y positrones liberados o creados por fotones en el aire de masa dm son completamente detenidos en aire [ICRU 60], así.

$$\chi = \frac{dQ}{dm} \quad (53)$$

En el sistema internacional de unidades SI la unidad de la exposición es el $C\ kg^{-1}$. La unidad especial de exposición es el röntgen (R), donde

$$1\ R = 2,58 \times 10^{-4}\ C\ kg^{-1}$$

En la figura 32 se presentará un esquema que muestra la relación entre las magnitudes de protección radiológica magnitudes físicas, magnitudes operacionales y las de monitoreo lo cual permitirá entender las diversas magnitudes que estudiaremos a continuación.

Lo más importante del cuadro de la figura 35 radica en el hecho de que si bien existen las magnitudes físicas que describen el mundo de las partículas cargadas y su interacción con la materia estas no bastan por si solas, la razón de ello es que, es de interés del ser humano saber como medir de alguna manera el efecto de la radiación y por tanto desarrollar la forma de protegernos de la radiación. Para protegernos debemos conocer si el campo de radiación es intenso o no y en dependencia de esto desarrollar equipos de medición que deberán ser calibrados para medir en determinadas condiciones. Por esta razón nacen las magnitudes de protección radiológicas con el objetivo de establecer la relación entre las magnitudes físicas y las magnitudes que representan su interacción con los tejidos humanos, pero el problema no termina allí, ¿por qué?, sencillamente no basta tener una magnitud que nos describa la interacción de la radiación con la materia viva (biológicamente hablando) sino que podamos medir estas magnitudes realmente y con una exactitud necesaria

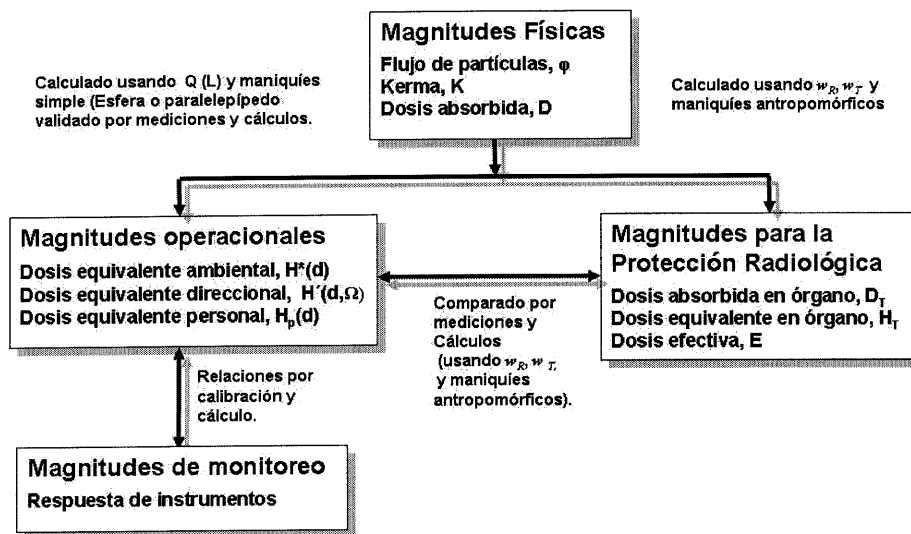


Fig.35. Relación entre las magnitudes de protección radiológica. Tomada del libro *Assessment of occupational exposure due to external sources of radiation. RS-G-1.3.*

para encontrar una relación entre la realidad y nuestra aproximación. Esto significa que si bien es cierto con las magnitudes de protección radiológicas medimos lo que pasa con la radiación en los tejidos, no podemos usar detectores dentro de un ser humano (vivo) para irradiarlo con propósitos de calibrar estos detectores, esto no es posible por ética humana. Dicha limitación debe ser subsanada por medio de la tecnología para esto se han creado maniqués antropomórficos y se han usado detectores pequeños para estudiar las magnitudes de protección radiológicas ayudados también por métodos numéricos para evaluar la interacción de la radiación con los tejidos humanos. Una vez que se ha medido esto no se termina el problema

ahora queda la situación de hallar la relación entre las magnitudes de protección radiológicas y las magnitudes que sirven para estimar dichas magnitudes. Estas nuevas magnitudes se llaman magnitudes operacionales y su fin es estimar en definitiva la dosis efectiva definida ya antes. Cuando definimos estas magnitudes por comparación podemos hallar una relación entre las magnitudes de protección radiológicas y las magnitudes operacionales (que son de mucha necesidad práctica) de esta forma dado que no es posible irradiar seres humanos podemos irradiar maniqués de plástico y así determinar las magnitudes operacionales. *Hecho esto y conociendo la relación entre las dos magnitudes hemos resuelto el problema podemos estimar la dosis efectiva con una exactitud adecuada sin irradiar seres humanos.* La explicación de este tema más a fondo está fuera del alcance de este texto pero era meritorio hacer una reseña del esquema mostrado anteriormente.

KERMA (KINETIC ENERGY RELEASED PER UNIT MASS)

La kerma K es el cociente de dE_{tr} por dm , donde dE_{tr} es la suma de la energía de todas las partículas cargadas liberadas por partículas no cargadas en una masa dm de material así

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm} \quad (54)$$

La unidad de esta magnitud es $J\ kg^{-1}$. El nombre especial de esta unidad es gray y su símbolo es Gy

Dosis absorbida (Absorbed dose)

La dosis absorbida, D , es el cociente de dE por dm , donde dE es la energía media impartida a la materia de masa dm , así

$$D = \frac{dE}{dm} \quad (55)$$

La unidad es J kg^{-1} . El nombre especial de la unidad es el Gray (Gy)

Magnitudes de dosis equivalentes (Dose-Equivalent Quantities)

Aquí es introducido el factor Q, dicho factor es llamado factor de calidad y su función es pesar estadísticamente la contribución de la radiación al tejido tomando en cuenta la radiación a la que está expuesto el ser humano. Este factor está vinculado con el uso de radiación a dosis baja las cuales se encuentran en condiciones de rutina en el trabajo con radiación.

En los casos que el tipo de energía y de radiación no aparezca en la tabla de arriba se deberá considerar que w_R es igual a \bar{Q} a 10 mm de profundidad de la esfera de la ICRU (Traducido es Comisión Internacional de Unidades y Medidas Radiológicas, CIUMR) y puede obtenerse por la fórmula siguiente:

$$\bar{Q} = \frac{1}{D} \int_0^{\infty} Q(L) D_L dL \quad (55)$$

en la que D es la dosis absorbida, Q(L) es el factor de calidad en función de la transferencia lineal de energía irrestricta, L, en agua, especificado en la Publicación 60 de la ICRP 60, y D_L es la distribución de D en L.

$$Q(L) = \frac{1}{300\sqrt{L}} - 2,2 \quad \begin{array}{l} \text{Para } L \leq 10 \\ \text{Para } 10 < L < 100 \\ \text{Para } L \geq 100 \end{array}$$

Tabla 3. Aproximación aceptable de los valores del factor de ponderación w_R .

Tipos e intervalos de energía de la radiación	Factor de ponderación de la radiación, w_R
Fotones de todas las energías	1
Electrones y muones de todas las energías *	1
Neutrones de energías < 10 keV	5
10 keV a 100 keV	10
>100 keV a 2MeV	20
> 2 Mev a 20 MeV	10
> 20 MeV	5
Protones, no de retroceso, de energía > 2 MeV	5
Partículas alfa, fragmentos de fisión, núcleos pesados	20

*Excluidos los electrones de Auger emitidos por los núcleos al ADN, en cuyo caso son necesarias consideraciones micro dosimétricas especiales.

Dosis equivalente (Equivalent dose)

Magnitud $H_{T,R}$ definida por la expresión:

$$H_{T,R} = D_{T,R} \cdot w_R \quad (56)$$

En la que $D_{T,R}$ es la dosis absorbida debida a la radiación tipo R promediada sobre un tejido u órgano T , y w_R es el factor de ponderación de la radiación correspondiente a la radiación tipo R .

Cuando el campo de radiación se compone de diferentes tipos de radiación con diferentes valores de w_R la dosis equivalente es:

Tabla 4. Factores de ponderación de tejido tomada de la ICRP – 60

Tejido u órgano	Factor de ponderación de tejido, w
Gónadas	0,20
Médula ósea (roja)	0,12
Colon ^a	0,12
Pulmón	0,12
Estómago	0,12
Vejiga	0,05
Mama	0,05
Hígado	0,05
Esófago	0,05
Tiroides	0,05
Piel	0,01
Superficies óseas	0,01
Restantes órganos o tejidos ^b	0,05

^a El factor de ponderación correspondiente al colon se aplica a la dosis equivalente promedio recibida en las paredes del intestino grueso superior e inferior.

^b A los efectos del cálculo, los órganos o tejidos restantes son los formados por las glándulas suprarrenales, el cerebro, la región extratorácica, el intestino delgado, el riñón, los músculos, el páncreas, el brazo, el timo y el útero. En los casos excepcionales en los que el tejido restante más expuesto reciba la dosis equivalente comprometida más elevada de todos los órganos, deberá aplicarse a ese tejido u órgano un factor de ponderación de 0,025, así como un factor de ponderación de 0,025 al promedio de las dosis recibidas por los demás órganos o tejidos restantes aquí indicados.

La determinación de H_E requiere el conocimiento de la distribución DL, de dosis absorbida, en L, así como las relaciones funcionales, QL. Para aplicaciones prácticas, las cantidades operacionales, dosis equivalente ambiental, dosis equivalente direccional y dosis equivalente personal han sido ideadas como cantidades medibles relacionadas a la dosis equivalente efectiva.

En 1991 la Comisión Internacional de Radioprotección (C.I..R.P), introdujo dos nuevas cantidades, basadas en los factores de ponderación de la radiación, reemplazando la dosis equivalente en órgano y la dosis equivalente efectiva. Estas cantidades son expresadas como dosis equivalente y dosis efectiva, respectivamente.

radiaciones también producen efectos no beneficiosos en el caso de exposiciones crónicas. De ahí nació la necesidad de establecer estas magnitudes aplicables tanto para la determinación de la dosis recibida por un individuo como la dosis medida en un lugar de trabajo donde estará un individuo recibiendo cierta dosis. Comenzaremos con las magnitudes correspondiente al monitoreo de área.

Dosis equivalente ambiental (Ambient Dose Equivalente)

La dosis equivalente ambiental, $H^*(d)$, a un punto en un campo de radiación, es la dosis equivalente que podría ser producida por el correspondiente campo expandido y alineado en la esfera ICRU a una profundidad d sobre el radio opuesto a la dirección del campo alineado. Unidad: $J \cdot kg^{-1}$. El nombre especial de esta unidad es el sievert (Sv).

Dosis equivalente direccional (Directional Dose Equivalent)

La dosis equivalente direccional $H^*(d, \Omega)$ a un punto en un campo de radiación, es la dosis equivalente que podría ser producida por el correspondiente campo expandido en la esfera ICRU a una profundidad " d " sobre un radio en una dirección específica (Ω). Unidad: $J \cdot kg^{-1}$. El nombre especial de la unidad dosis equivalente direccional es el sievert (Sv).

Monitoreo individual: Dosis equivalente personal

La dosis equivalente personal, $H_p(d)$, es la dosis equivalente en tejido suave, a una apropiada profundidad, d , en un punto específico sobre el cuerpo. Su unidad es el $J \cdot kg^{-1}$. El nombre especial para la unidad de dosis equivalente personal es sievert (Sv). Cualquier informe de dosis equivalente personal debe incluir una especificación de la profundidad de referencia, d . Para simplificar la notación, d debe ser expresado en mm. Para radiación débilmente penetrante, una profundidad de 0,07mm para la piel y 3mm para el cristalino son empleadas.

La dosis equivalente personal para estas profundidades es denotada por $H_p(0,07)$ y $H_p(3)$, respectivamente. Para radiación fuertemente penetrante, una profundidad de 10mm es frecuentemente empleado, con una notación análoga. $H_p(d)$ puede ser medido con un detector el cual es portado en la superficie del cuerpo y cubierto el grosor apropiado de material tejido equivalente.

La calibración del dosímetro es generalmente realizada bajo condiciones simplificadas en un maniquí apropiado. El trabajo de calibrar los dosímetros, medir la dosis y reportarlas lo realiza un laboratorio de dosimetría personal el cual debe contar con físicos dedicados a esta área los cuales conocen las normas técnicas y tienen la experiencia para trabajar en este campo.

Resumiendo es importante conocer las magnitudes física y de protección radiológicas pero es mucho más importantes saber que magnitud es fácilmente medible y comparable con las de protección radiológica por que estas magnitudes son las que los técnicos observarán en los informes de evaluación de la dosis de tal forma que si un técnico observa un informe y lee que su dosis fue de $H_p(10) = 2,20$ mSv y el límite de dosis efectiva $E = 20$ mSv el debe de saber que comparando esta dosis es un poco más del 10% del límite permitido sin embargo es importante aclarar que $H_p(10)$ sobrestima a E por tanto la dosis dada de 2,20 mSv para dosis efectiva es menor que esta cantidad. Omitiremos la explicación por cuestiones didácticas.

Las leyes físicas que rigen las radiaciones ionizantes

Las radiaciones ionizantes afectan la salud de los seres vivos dependiendo de su naturaleza, su intensidad, y su energía. Algunas de las propiedades más importantes de las radiaciones ionizantes son que éstas pueden ionizar y atravesar cuerpos opacos tales como una lámina de papel, láminas metálicas, el cuerpo de una persona, paredes, etc. Sin embargo, es posible reducir o atenuar su efecto si conocemos las leyes físicas fundamentales que rigen su comportamiento. A continuación discutiremos dos leyes fundamentales mediante las cuales podemos atenuar el efecto de las radiaciones:

Reducción de la intensidad por medio de la ley del inverso del cuadrado de la distancia

La intensidad de la radiación depende proporcionalmente del inverso del cuadrado de la distancia que hay entre la fuente de la radiación y el detector de la misma. En la medida de que se aleja el detector de la fuente la intensidad es reducida; y la intensidad de la radiación se incrementa para el caso en que la distancia entre la fuente y el detector se reduce. Esta naturaleza de la radiación es conocida como la *ley del inverso del cuadrado* la cual matemáticamente se escribe como:

$$\dot{X} = \Gamma \frac{A}{d^2} \quad (60)$$

donde \dot{X} es la tasa de exposición, A es la actividad del radionucleido, Γ es una constante de proporcionalidad y d es la distancia entre la fuente y el detector. La intensidad de la radiación es directamente proporcional a la tasa de exposición. Para

el caso de un equipo generador de rayos X, la ley del inverso del cuadrado se expresa como

$$\dot{X} = \Gamma \frac{i \cdot t}{d^2} \quad (61)$$

donde i es la corriente del tubo Roentgen, t es el tiempo de exposición.

Reducción de la intensidad de la radiación por medio de la ley de atenuación exponencial

La intensidad de la radiación (y la tasa de dosis o exposición) puede atenuarse mediante el uso de barreras de protección tal como se mostró en la figura 19, tomando en cuenta que a mayor espesor de la barrera hay mayor atenuación pero en dependencia de la densidad del material en uso.

$$\dot{X} = \dot{X}_0 e^{-\mu \cdot x} \quad (62)$$

donde \dot{X}_0 es la intensidad inicial antes de que la radiación penetre el atenuador, μ es el coeficiente de atenuación lineal cuya unidad esta dada en cm^{-1} y x es el espesor del atenuador.

Radiación ambiental y cósmica

Nuestro medioambiente está inmerso en un océano de energía e interacciones. Parte de la energía que nos rodea se presenta en forma de radiación electromagnética la cual son ondas a nuestro alrededor que provienen de la radiación que emana nuestro Sol y otras estrellas. El Sol emite radiación electromagnética dentro de todos los rangos del espectro electromagnético. Dichas emisiones llegan a la tierra en ocho minutos la cual se presenta en diversas formas tales como luz, radiación X, gamma, radiación de ondas de radio, en fin en todas las formas del espectro electromagnético; además de una cantidad de partículas subatómicas de poca energía (~ 1 keV). Además de la radiación solar hay radiaciones y partículas que llegan del entorno de la galaxia denominada radiación galáctica. Esta radiación está compuesta por protones (87%), partículas alfa (11%), y pocos núcleos pesados ($\sim 1\%$) así como electrones ($\sim 1\%$) los cuales superan energías a los de los 10^{20} eV. La gran mayoría de las partículas que participan en la radiación galáctica se desplazan con energías entre los 10^8 eV y los 10^{11} eV. Sin embargo, se sabe que las partículas con altas energías ($\geq 10^{17}$ eV) son de origen extragaláctico. Tanto a la radiación galáctica como a la radiación emitida por el Sol se les denomina *radiación cósmica*. Otro tipo de partículas que participan en la radiación cósmica son los positrones (anti-electrones), y antipartículas tales como neutrinos, antineutrinos, muones, partículas alfa, positrones, electrones, etc.

A la radiación cósmica incidente a la atmósfera es denominada *radiación cósmica primaria*, la cual al interactuar con partículas subatómicas de la atmósfera genera otro tipo de radiación denominada *radiación cósmica secundaria* la cual junto a la radiación cósmica primaria van atenuándose al interactuar con la atmósfera. La atmósfera atenúa la radiación en medida de que el espesor de esta aumenta, lo que implica que a mayor cercanía de la superficie terrestre la radiación alcanza niveles aceptables para la vida. En la figura 36 se presenta de manera esquemática las dosis de radiación en dependencia de la altura.

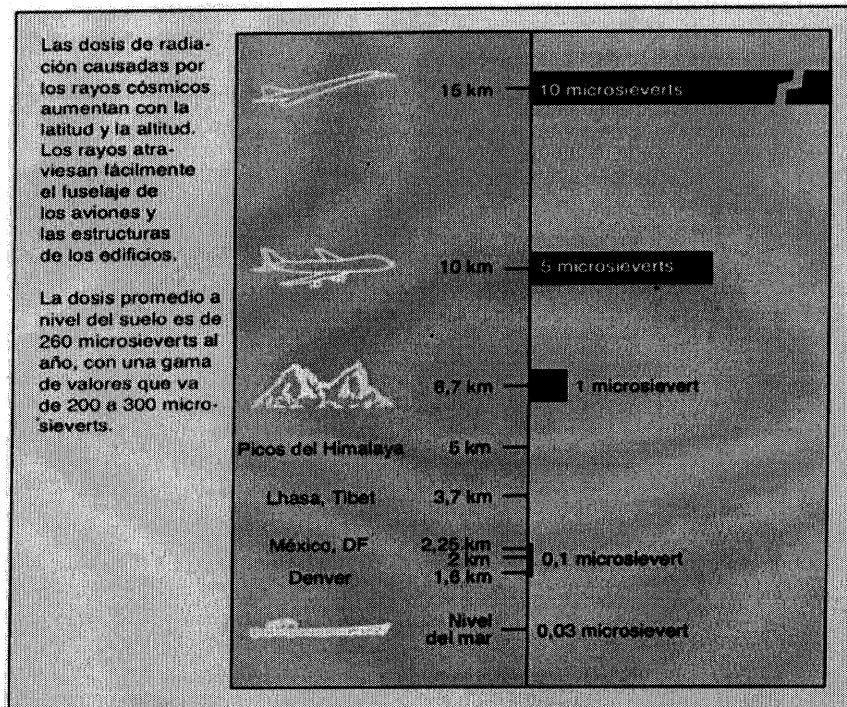


Fig. 36. Dependencia de la dosis de radiación en función de la altura o espesor de la atmósfera.

Sin embargo, los diversos procesos industriales y las emisiones de contaminantes como los aerosoles van destruyendo las capas mas altas de la atmósfera como es la capa de ozono haciendo que los rayos cósmicos no se atenúen adecuadamente lo que puede dañar la biosfera.

Sin embargo, la radiación cósmica no es la única fuente de radiación que afecta a los seres humanos; esta tan solo contribuye con un 14,5% del total de la radiación generada. Otros tipos de radiación natural son: La radiación interna producida por el

propio cuerpo humano (8.6%), radón (48.3%). Todas estas fuentes de radiación natural en conjunto con otras fuentes contribuyen con una radiación global anual de 2.7 mSv (Fig. 37). El conjunto de todas esas contribuciones de radiactividad al medio ambiente es denominado *radiación ambiental* o *radiación de fondo* y que es la radiación a la cual todos los seres humanos estamos expuestos, pero que varía de país a país debido a las proporciones de radiactividad artificial liberada al medioambiente.

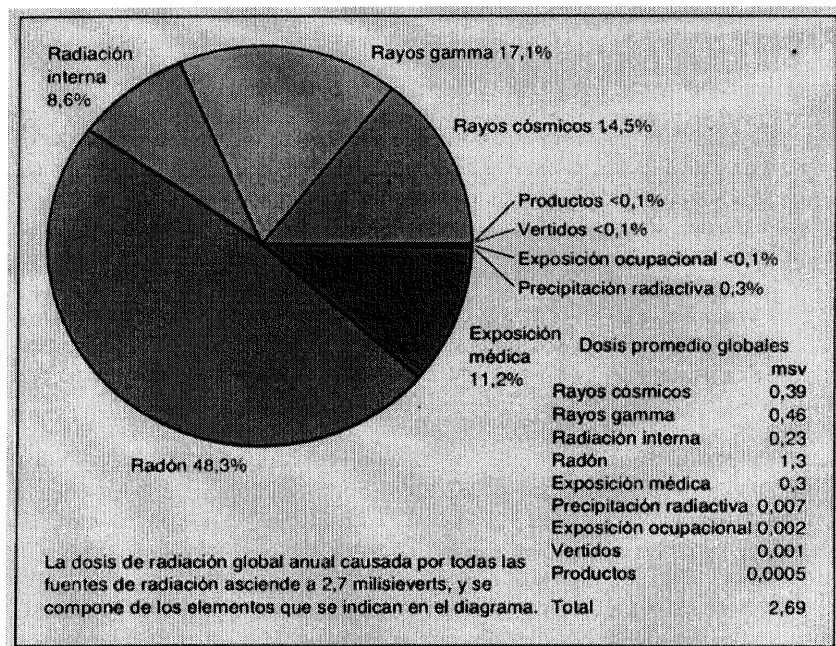


Fig. 37. Distribución en porcentaje de las fuentes radiactivas naturales y artificiales que afectan a los seres vivos. Tomado de UNCEAR.

Las actividades antrópicas, es decir actividades realizadas por el hombre, han contribuido grandemente con la generación de nuevas fuentes artificiales como es el caso de las lluvias radiactivas muy similares a las así llamadas lluvias ácidas. Cuando por detonación de bombas nucleares, o por otros medios de contaminación de la atmósfera con sustancias radiactivas, el material radiactivo algunas veces en forma gaseosa o en forma de material particulado es arrastrado por los vientos los cuales al interaccionar con las precipitaciones generan las así denominadas lluvias radiactivas. Algunos países realizan estudios de control ambiental radiactivo, como tal es el caso de España que ha seguido con cuidado el estudio de la contribución de las lluvias radioactivas. A manera de muestra de estos estudios, la figura 38 presenta datos de la dosis media recibida por la población los que han variado desde 0.08 hasta los 0.14 mSv entre las décadas de los 50 a los 70, y luego llegar a los valores actuales de 5 mSv. En la gráfica se presenta un salto en la radiación para 1986 lo cual se debe a la catástrofe de Chernobil. Monitoreos de tal tipo son de gran ayuda para planificar acciones de mitigación para la población. Nicaragua aún no cuenta con estudios de dosimetría ambiental de tal tipo.

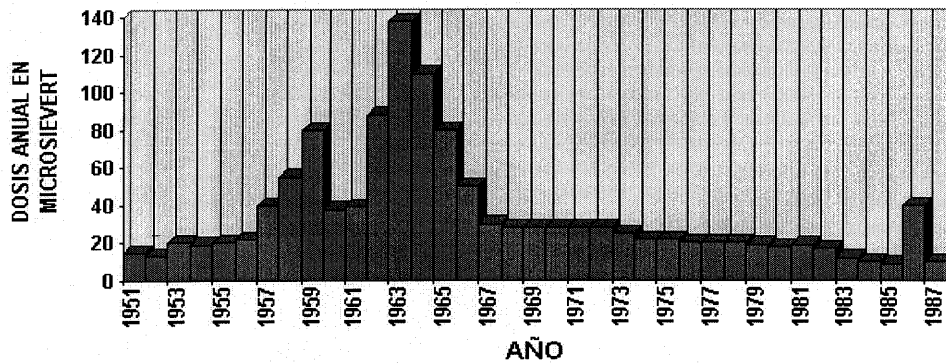


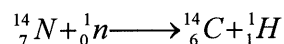
Fig. 38. Registros de dosis anual promedio debido a lluvia radiactiva en España.
Tomado del sitio: <http://www.arrakis.es/~lallave/nuclear/>

Fechado radiactivo y la datación del Carbono-14

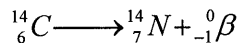
Tomando en cuenta que en las sustancias radiactivas se da una transmutación¹, es decir, de un isótopo se obtiene otro como consecuencia de un decaimiento radiactivo, y como estos procesos son espontáneos, ocurriendo en un período de tiempo que puede ir desde minutos a horas, o de días a años y en algunos hasta milenios, es por eso que dentro de las técnicas nucleares la más famosa es la del fechado radiactivo.

Fechado radiactivo

La antigüedad de los objetos puede determinarse mediante el **fechado con carbono-14**. A este procedimiento también se le conoce como datación. En sí el carbono-14 se produce de manera continua en las altas regiones de la atmósfera terrestre. Esto se da cuando los átomos de nitrógeno capturan neutrones de los rayos cósmicos, lo cual puede expresarse mediante la siguiente reacción nuclear



Los átomos de carbono-14 reaccionan con moléculas de oxígeno para formar ${}^{14}\text{CO}_2$. Este proceso proporciona de forma continua ${}^{14}\text{CO}_2$ radiactivo. La intensidad de la radiación cósmica está relacionada con la actividad solar, mientras esta permanezca constante, la cantidad de ${}^{14}\text{CO}_2$ de manera que determinada fracción de los átomos de carbono son de carbono-14. Éste se desintegra por decaimiento beta con una vida media de 5730 años.



¹ Transmutación: Convertir una cosa en otra. Proceso de cambio en el que una sustancia de un tipo pasa a ser una nueva sustancia.

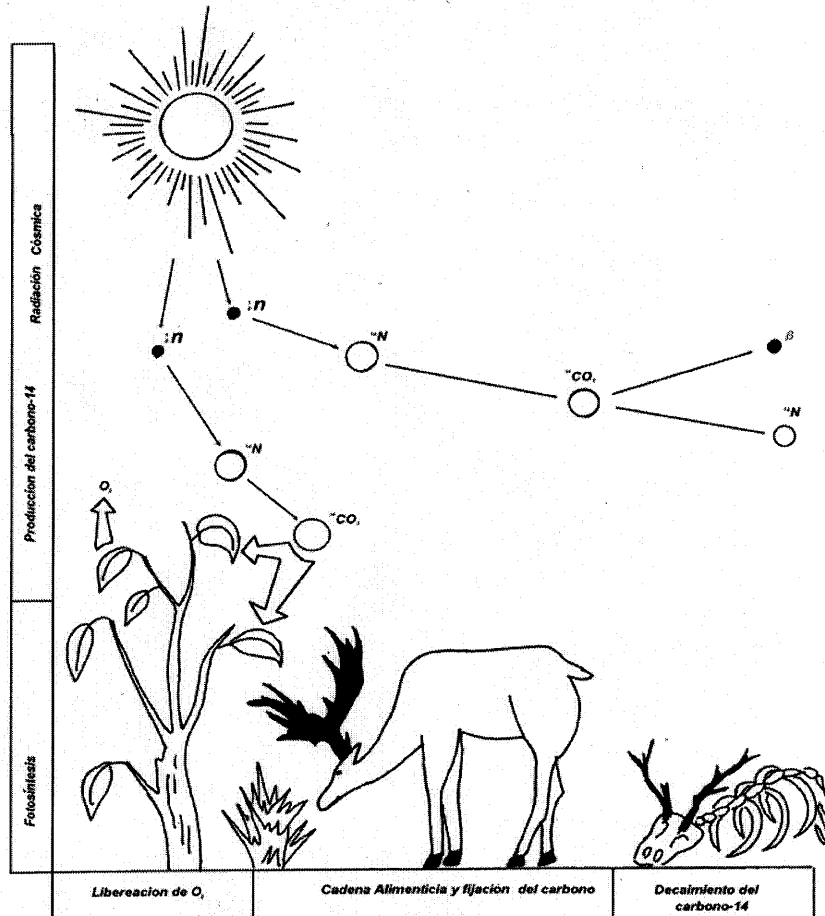
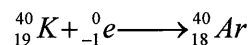


Fig. 39. Ciclo del carbono-14

Las moléculas de $^{14}\text{CO}_2$ son asimiladas por las plantas en la respiración vegetal mediante el proceso de fotosíntesis¹. Cuando las plantas mueren no efectúan la fotosíntesis y no siguen consumiendo $^{14}\text{CO}_2$.

Otros organismos consumen plantas como alimento y dejan de hacerlo al morir, de tal manera que las emisiones del carbono-14 disminuye con el paso del tiempo. La actividad por gramo de carbono permite medir cuánto tiempo ha pasado desde la muerte.

Además del fechado radiactivo del carbono-14 existen otros métodos tales como el del **potasio-argón** y del **uranio-plomo** los cuales se emplean para determinar la edad de objetos más antiguos. El potasio-40 se desintegra en argón-40 con una vida media de 1.3 miles de millones de años.



despreciar las cantidades de núcleos intermedios. Un meteorito de 4,6 miles de millones de años de antigüedad cayó en México en 1969. Los resultados de los estudios del uranio-plomo apoyan la teoría de la gran explosión que indica que el sistema solar se formó hace varios miles de millones de años.

Ahora analicemos un ejemplo de fechado radiactivo con el carbono-14:

Se encuentra que un pedazo de madera tomado de una caverna de Nuevo México tiene una actividad de carbono-14 (por gramo de carbono) de tan solo 0.636 veces la de la madera que se corta en la actualidad. Estime la antigüedad de la madera si la vida media del carbono-14 es de 5730 años.

Solución: Primero se encuentra la constante de decaimiento tomando en cuenta que

$$t_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda}$$

¹ Fotosíntesis, es el proceso biológico que las plantas utilizan para transformar la energía lumínica del sol en alimentos y como consecuencia se retiene carbono y otros alimentos liberándose el oxígeno. Este proceso se logra gracias a un pigmento denominado clorofila.

$$\lambda = \frac{0.693}{t_{1/2}} = \frac{0.693}{5730 \text{ años}} = 1.21 \times 10^{-4} \text{ año}^{-1}$$

La actividad actual del carbono-14, N (desintegraciones por unidad de tiempo) equivale a 0.636 veces la actividad original, N_0 :

$$N = 0.636 \cdot N_0$$

Substituyendo en la ecuación de desintegración de primer orden:

$$\ln\left(\frac{N_0}{N}\right) = \lambda \cdot t$$

$$\ln\left(\frac{N_0}{0.636 \cdot N_0}\right) = (1.21 \times 10^{-4} \text{ año}^{-1}) \cdot t$$

Simplificando N_0 y despejando t , se obtiene

$$\ln\left(\frac{1}{0.636}\right) = (1.21 \times 10^{-4} \text{ año}^{-1}) \cdot t$$

$$0.452 = (1.21 \times 10^{-4} \text{ año}^{-1}) \cdot t$$

$$t = 3.74 \times 10^3 \text{ años o } 3740 \text{ años.}$$

En Nicaragua, el *Centro para la Investigación en Recursos Acuáticos* (CIRA) de la UNAN-MANAGUA, dentro de sus numerosas áreas de investigación concibió la idea de realizar estudios en *Hidrología Isotópica*. De esta idea nace el deseo de determinar la antigüedad de los mantos de aguas subterráneas y otras, lo que para tal fin es necesaria la datación del carbono-14. En vista de que el trabajo que el CIRA realiza está en vistas a la protección del medio ambiente acuoso de Nicaragua se planteó el proyecto de datación del plomo-210, con el cual les sirve de monitoreo para evaluación del impacto ambiental en el lago Xolotlán de Managua. Este último es un proyecto que se encuentra en su etapa final y con el cual se ayuda a determinar metales pesados en el manto acuático del lago, tales como: Mercurio (Hg), plomo (Pb), cromo (Cr), zinc (Zc), y cobre (Cu).

En el caso de datación de aguas o de compuestos orgánicos se utiliza un procedimiento que se denomina "La Síntesis del Benceno" la cual aparece ilustrada en el flujograma de la figura 40.

Este procedimiento consiste en tomar de primero una muestra a evaluar, luego si es orgánica se hace combustionar con oxígeno y si es inorgánica se hace uso de una reacción ácida para que al final la muestra se transforme en una solución dicarbonatada a la que se le agregará una metal alcalino obteniendo así un carburo que al ser mezclado con agua se transforma en un producto acetilénico. Al final por catálisis¹ esta se transforma en benceno. Con esta última se realiza la medición de concentración de actividad en la muestra, para lo cual es necesario introducir la muestra de benceno en una solución de centelleo o multiplicadora de centelleo se duplica la cantidad de emisión beta que el carbono-14 débilmente emitirá y en equipo de alta tecnología con un detector de centelleo y luego en espectrómetro alfa se determina la actividad de la muestra, y luego por un algoritmo en Excel se calcula la edad.

En el caso de determinar la edad en sedimentos el procedimiento consiste en el análisis del plomo-210, este es más complejo puesto que es necesario tomar un perfil el cual consiste en barrenar el sedimento subacuático hasta una

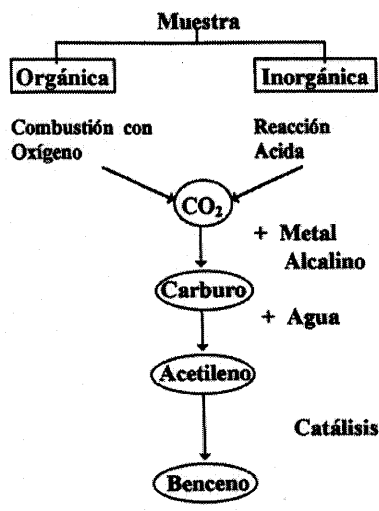


Fig. 40. Síntesis del Benceno para la datación del Carbono 14. Cortesía del CIRA

¹ Catálisis, es el proceso mediante el cual una reacción química cambia la velocidad de la reacción y las sustancias con las que se logra este proceso se les denomina **catalizadores**. Los catalizadores al introducirse en un sistema al que se desea cambiar su velocidad de reacción primeramente afectan la energía de activación del sistema y en algunos casos esta energía desciende, mientras que en otras hace que se eleve.

profundidad de 50 cm con una barrena hueca la que al final permite extraer un cilindro de sedimento. Este perfil se analiza tomando muestras con un espesor de un centímetro de alto del perfil obtenido. A cada muestra se le realiza el fechado radiactivo del plomo-210 y posteriormente se determina la concentración de metales pesados tomando en cuenta la relación de plomo-210 y metales pesados. El método en sí necesita de un modelo matemático denominado internacionalmente como el CRS que son las siglas de "*Constant Rate of Supply*".

Efectos de las radiaciones ionizantes sobre la salud

La interacción de la radiación ionizante con la materia o bien con células de tejido vivo es hecha de manera aleatoria, es decir existe una probabilidad de producir daños o bien de no producirlos; en consecuencia, la radiación genera cambios en las células que no son específicos ya que no se puede distinguir entre estos daños y los producidos por otros traumas. La radiación que es absorbida por células de tejido vivo se da en un tiempo de 10^{-7} s aproximadamente, y sin seleccionar la zona de la célula a interaccionar. Los cambios biológicos o alteraciones genéticas que causan las radiaciones ionizantes se producen después de transcurrido cierto tiempo el cual es denominado **período de latencia**, que puede variar desde minutos hasta años; dicho período depende de la cantidad de radiación inicial que fue absorbida (dosis inicial). Parte de estos trastornos genéticos es el cáncer. Como consecuencia de lo antes dicho, el exponerse a radiaciones ionizantes puede repercutir en graves efectos sobre la salud, pero contradictoriamente se da el hecho de que las radiaciones ionizantes también pueden curar aquellos tejidos cancerígenos. Esto es cuando la radiación destruye el código genético del material cancerígeno retornando los tumores en tejido sano. El estudio de estos fenómenos es realizado por el área de la ciencia denominada *radiobiología*, la cual permite determinar cantidades de radiaciones suministradas a un tejido vivo mediante el análisis y conteo de los cromosomas dañado por la radiación.

Los efectos de las radiaciones ionizantes sobre material biológico dependen de la cantidad de radiación que es absorbida por las células de tejido vivo. Estos efectos son clasificados como **deterministas** si sobrepasan un umbral de radiación, y **estocásticos** si están por debajo de dicho umbral (fig. 42). Los *efectos deterministas* son daños sobre el material biológico que ocurren con seguridad cuando se

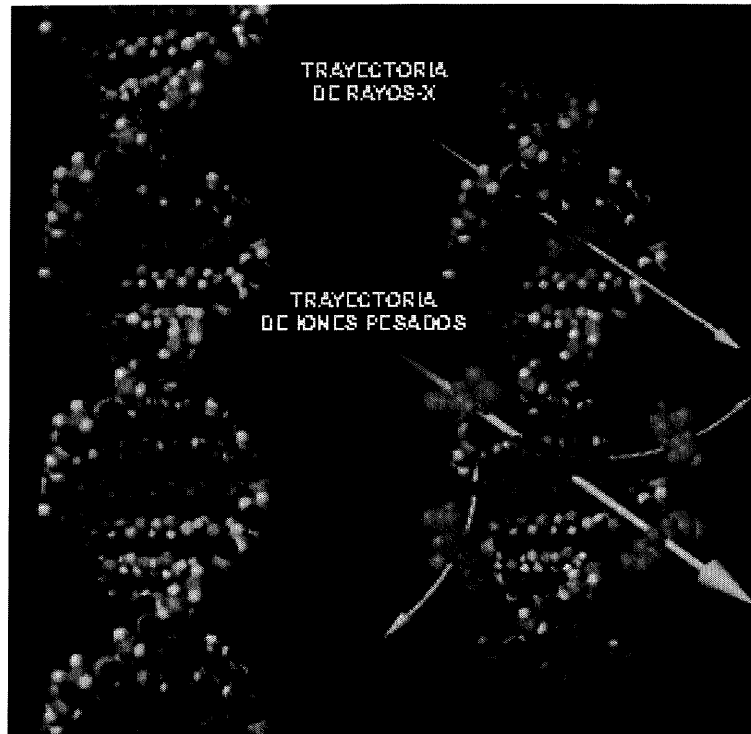


Fig. 41. Ruptura de cromosomas en el AND celular. Tomada del sitio:
http://ciencia.nasa.gov/headlines/y2002/15jan_nano.htm.

sobrepasa el nivel de umbral, para grandes dosis de radiación se presentan manifestaciones tales como náuseas, enrojecimiento de la piel, y en los casos severamente graves, síndromes agudos; las altas tasas de dosis crónicas también ocasionan efectos nocivos que se pueden detectar clínicamente. En los casos clínicos más severos la muerte puede ser el resultado final dependiendo la cantidad de radiación absorbida por el ser humano o material biológico. Sin embargo, dosis bajas

de radiación pueden tener consecuencias graves. Este es el caso de los *efectos estocásticos*, éstos ocurren con cierta probabilidad, por ejemplo, enfermedades malignas que se detectan estadísticamente sobre una población en estudio pero que no se pueden relacionar a un individuo específico sometido a una dosis baja de radiación. En adición a este tipo de efectos están los hereditarios detectados en mamíferos y que se supone también ocurran en seres humanos.

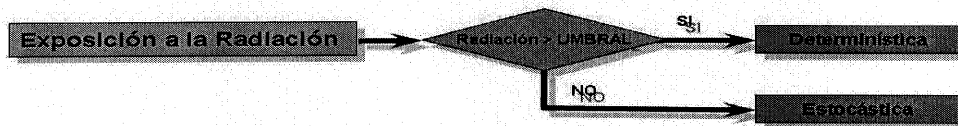


Fig. 42. Esquema de los efectos de las radiaciones ionizantes como consecuencia de la exposición a las radiaciones ionizantes.

Por otro lado, los efectos estocásticos se manifiestan después del periodo de latencia, tal es el caso de los niños expuestos en el útero durante el embarazo, estos presentan mayor probabilidad de leucemia o retraso mental grave.

Control de calidad en radiodiagnóstico

Antes de explicar en qué consiste el “Control de calidad en radiodiagnóstico”, es necesario aclarar algunos términos referente al *control de calidad*.

Control de Calidad¹, es la frase asignada a un proceso de **verificación**² de la **calidad**³ ya sea de un equipo, del producto generado por dicho equipo o bien del método empleado en la producción con el objetivo de eliminar resultados no satisfactorios. Pero dicha verificación debe estar respaldada bajo un marco legal, y además, el control solamente puede realizarse por un organismo que este autorizado por la ley.

En el caso de las radiaciones ionizantes la ley No. 156, faculta a la Comisión Nacional de Energía Atómica (CONEA) para que en base al *Reglamento técnico de protección radiológica contra las radiaciones ionizantes de la república de Nicaragua*, se realice la verificación *in situ* del estado de los equipos de rayos X. Hasta el momento la contraparte técnica de la CONEA (el Laboratorio de Física de Radiaciones y Metrología) realiza controles de calidad no invasivos a *equipos de rayos X para radiodiagnóstico*, tales como: convencionales, odontológicos, mamógrafos. En *equipos de radioterapia* realiza controles de calidad a equipos de ortovoltaje, unidades de cobalto y su unidad de simulación.

¹ Control de calidad: Técnicas y actividades de carácter operativo, utilizadas para satisfacer los requisitos para la calidad, los cuales fueron establecidos en términos cuantitativos o cualitativos, para la característica de una entidad.

² Verificación: Confirmación por examen y aporte de evidencias objetivas que los requisitos han sido satisfechos.

³ Calidad: La totalidad de las características de una entidad (aquello que puede ser descrito y considerado individualmente) que le confieren la aptitud para satisfacer las necesidades establecidas y las implícitas.

¿En qué consiste un control de calidad de equipos de rayos X?

Para entender el mecanismo de un control de calidad en un equipo de rayos X es necesario entender o al menos conocer unas características básicas del equipo que dependen de manera general del tubo del equipo.

En sí un tubo de rayos X es prácticamente una válvula electrónica, es decir, es un interruptor electrónico automático que para funcionar como tal necesita de un determinado voltaje para estar en un estado de "cerrado el circuito" o "abierto el circuito". En el caso del tubo de rayos X los estados son "disparo" o "no disparo". En la figura 33 se presenta la curva típica de una válvula electrónica y en nuestro caso de un tubo de rayos X. Hoy en día las válvulas electrónicas fueron reemplazadas por dispositivos semiconductores denominados "diodos" y hasta el momento los tubos de rayos X no pueden ser reemplazados por dispositivos semiconductores por el simple principio de la física de la producción de los rayos X.

Otra característica a analizar en el control de calidad es la comprobación de la ecuación

$$\dot{X} = \Gamma \frac{i \cdot t}{d^2}, \quad (63)$$

donde la exposición es directamente proporcional al producto de la corriente que circula en el tubo por el tiempo de exposición e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre el detector de radiación y el punto focal ubicado en el blanco de Tungsteno. La constante de proporcionalidad Γ (Gamma) puede conocerse de la gráfica presentada en la figura 43.

Como consecuencia, debe de analizarse la linealidad (proporcionalidad directa) de: la exposición con respecto de la corriente, la exposición con respecto del tiempo de exposición, la exposición con respecto del producto de la corriente y el tiempo. Estas tres pruebas se realizan a una distancia fija.

El último factor a tomar en cuenta es la atenuación de la radiación o "calidad del haz", la cual obedece a la ley exponencial de atenuación de la exposición:

$$\dot{X} = \dot{X}_0 e^{-\mu \cdot x}, \quad (64)$$

donde, μ es el "coeficiente de atenuación lineal" y su unidad es el cm^{-1} ; x , es el espesor de atenuador.

La experiencia consiste en medir la tasa de exposición como función del atenuador que es lo que expresa la ecuación (64) para lo cual en cada medición debe de agregarse sobre el detector un espesor de atenuador de aluminio del 99% de pureza. Los datos pueden registrarse como en la tabla 5.

Tabla 5. Tabla para la toma de datos para el control de calidad

Espesor [mm]	Tasa de Exposición [mR/min]	Logaritmo de la tasa de exposición [mR/min]
0		
0.5		
1.0		
1.5		
2.0		

Los datos tomados deben de graficarse en papel milimetrado de tal manera que el eje de ordenadas corresponda a la tasa de exposición y la abcisa a los espesores de atenuadores que se van incrementando. Los datos graficados deben de unirse con una curva suave que tendrá la forma de una curva exponencial decreciente. Cuando la tasa de exposición se reduce en un 50%, debe de interpolarse desde la tasa de exposición a la curva y de ese punto en la curva proyectarse a la abcisa, en la cual se podrá leer la denominada capa hemirreductora o "HVL" (Half Value Layer) que es el filtro que posee el equipo de rayos X para brindar haces de rayos X monoenergéticos. El método antes descrito puede comprenderse mejor si se linealiza la curva lo cual podemos lograr si aplicamos el logaritmo natural a toda la ecuación 64. Debe de tomarse en cuenta al factor de conversión de logaritmo natural a logaritmo base diez en vista de que ahora graficaremos los datos sobre un papel semilogaritmico, en la

cual el eje de ordenadas corresponde al logaritmo de la exposición y la abcisa corresponde al espesor de atenuador. Análogamente al caso anterior, del punto del 50% del logaritmo de la tasa de dosis inicial debe de interpolarse a la curva y proyectarse luego a la abcisa en la cual se podrá leer el valor del "HVL".

De aquí se puede estimar la *Filtración Total* que consiste en la suma de la filtración que ofrece la capa hemireductora y la filtración inherente, es decir la filtración de la cápsula de vidrio. La figura 44 muestra diferentes curvas que por interpolación se obtiene la filtración total a partir del espesor de la capa hemireductora. Este es uno de los procedimientos en el control de calidad de equipos de rayos X odontológicos.

Para equipos que operan a una tensión superior a los 70 kV, el espesor de la capa hemireductora es mayor de 2,5 mm para un filtro de aluminio para equipos de rayos X convencionales. Para equipos de rayos X odontológicos la capa hemireductora debe ser mayor o igual a 1.5 mm de espesor de aluminio para una tensión menor de 70 kV, mientras que para una tensión mayor o igual a 70 kV la capa hemireductora debe ser mayor o igual a 2.5 mm de aluminio.

Por otra parte, además del control al equipo de rayos X es indispensable que también se realice por parte del centro asistencial un control sensitométrico y densitométrico a la procesadora de revelado automático,

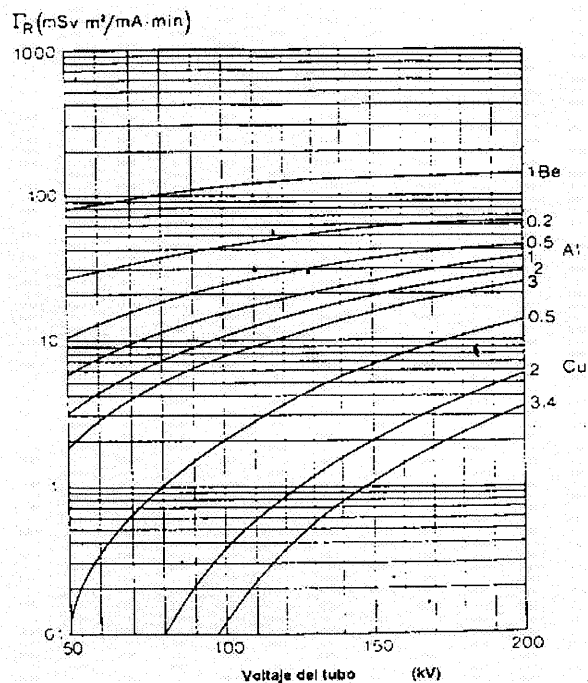


Fig. 43. Curva para la determinación de Γ_R en función del kilovoltaje del tubo.

o bien si el procesado es manual, entonces a todo el proceso de revelado. Si bien es cierto el proceso de revelado manual o automático no es parte del equipo pero sí lo es de todo el engranaje que asegura la calidad y que comúnmente se le denomina **aseguramiento de la calidad**¹. Por ejemplo, si un equipo de rayos X convencional funciona de maravillas, pero el revelado es muy malo, sin duda alguna el técnico o médico a cargo sugerirá que la toma radiográfica debe de repetirse y como consecuencia se está sobre exponiendo tanto el paciente como el operario del equipo, lo que puede de alguna manera influir drásticamente en la salud de ambos. Un control de calidad no es sencillo y requiere de equipo altamente especializado, pues de ninguna manera se hará invasión al equipo. El control de calidad de un equipo de rayos X convencional y odontológico son muy similares, y los parámetros a verificar son:

1.- La colimación del haz luminoso con el haz de radiación para el caso de un equipo convencional, y el haz de radiación con el diámetro del colimador (en el caso de un equipo odontológico) si este es cilíndrico, de ser cónico debe al igual que el otro con la tolerancia por norma internacional. Es necesario aclarar que todos los parámetros deben de estar dentro de ciertas tolerancias preestablecidas en normas internacionales para el control de la calidad. En la figura 45 se muestran cuatro placas periapicales expuestas para la comprobación del campo de radiación.

2.- Se analiza la repetibilidad² de la tensión entre cátodo y ánodo denominada kilovoltaje, el miliamperaje, y el tiempo de duración de una toma radiográfica con respecto de la *exposición*.

3.- Se analiza la linealidad del kVp, mA, tiempo con respecto de la *exposición*.

¹ Por aseguramiento de la calidad, se entiende el conjunto de actividades planificadas y sistemáticas en base a procedimientos, procesos y recursos necesarios para dar confianza adecuada de que una entidad satisfará los requisitos para la calidad.

² Por repetibilidad entenderemos cuando en un experimento se toman datos bajo las mismas condiciones de medición.

4.- Se mide el HVL (Half Value Layer) que en español significa **Capa Hemireductora**. Esta capa es un filtro de aluminio de poco espesor, según el tipo de tubo de rayos X con el propósito de proporcionar haces de rayos X monoenergéticos. La capa hemireductora reduce en un 50% la intensidad del haz de radiación. Para este fin se usa un método indirecto de medición.

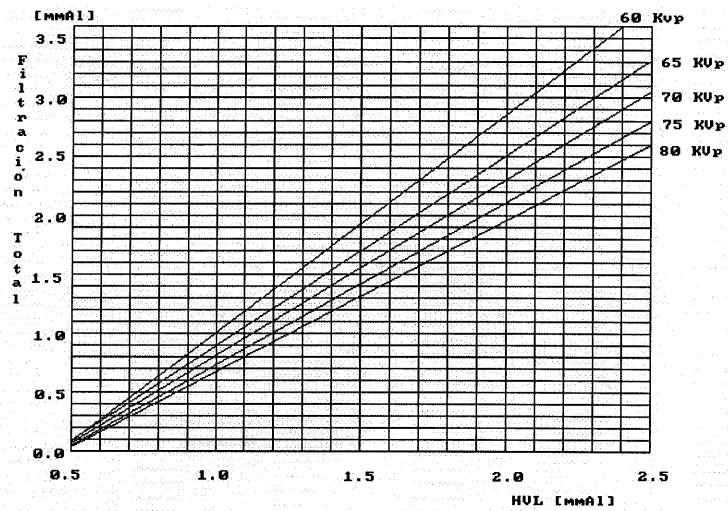


Fig. 44. Curva para determinar la filtración total a partir de la filtración de la capa hemireductora o HVL.

Cuando el revelado de la película radiográfica es manual debe de seguirse el siguiente procedimiento de sumersión de la película: Revelador, agua, fijador, agua y secado a temperatura ambiente. Toda esta secuencia tiene un tiempo bien determinado para cada líquido o proceso, según las instrucciones del fabricante.

En el caso del procesamiento de la película cuando es automático requiere de un gran empeño y de equipos adecuados tales como: Densitómetro óptico, sensitómetro óptico, y un negatoscopio.

El análisis sensitométrico depende de las densidades ópticas que presenta una película después de una exposición radiográfica, y estas permiten dar un diagnóstico de la rapidez de la película, estabilidad del proceso de revelado y en algunos casos de la técnica utilizada para la exposición radiográfica. Cuando se realiza una exposición para control sensitométrico se hace uso de una gradilla de aluminio que permita registrar el patrón de densidades que se presenta en la figura 47.

En una procesadora automática para el revelado, es necesario realizar controles diarios, semanales, mensuales, trimestrales, semestrales y anuales. El control diario y semanal generalmente corresponde al mantenimiento y lavado, pero el mensual y trimestral sirven para analizar como se comporta la procesadora y los líquidos de revelado con respecto del tiempo, para esto es necesario el uso de una *bitácora*, esta es un cuaderno de anotaciones en donde se registra el control que se le realiza a la procesadora, ya sea el control de calidad en si como reparaciones y en éste debe de especificarse la pieza que se reemplazó. Además se deben de adjuntar las hojas de control para un control de calidad mensual o trimestral (ver figura 48).

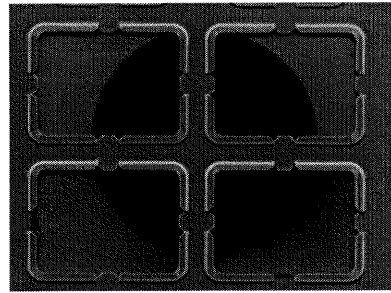


Fig. 45. Control de calidad del cono de colimación.

Densidad óptica es el logaritmo base diez de la razón entre la intensidad de radiación incidente y la intensidad transmitida:

$$DO = \log \left(\frac{I_0}{I} \right)$$

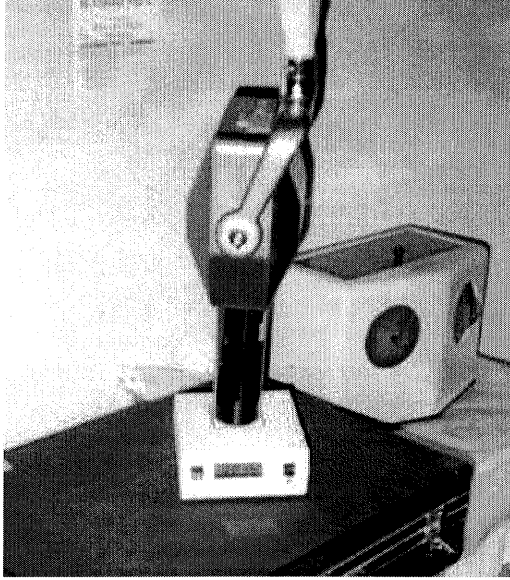


Fig. 46

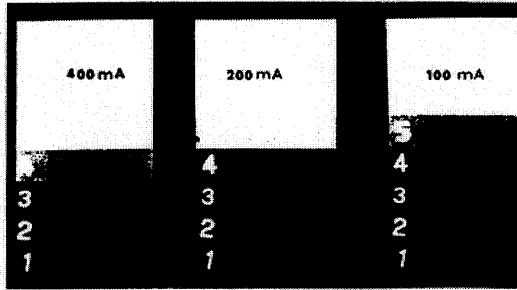


Fig. 47. Densidades ópticas obtenidas con tres técnicas radiográficas diferentes.

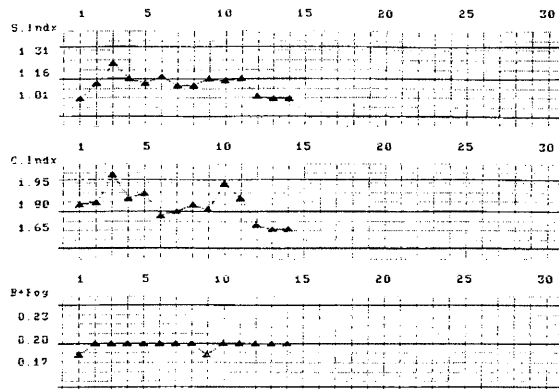


Fig. 48. Cuadro de control

En el caso del revelado en odontología, éste se realiza manualmente (cuando los films son periapicales) en una cajas de revelado (ver figura 49) y deben de seguir la siguiente recomendación de procesado:

<u>Revelado:</u>	18.5°C	6 min.
	20.0°C	5 min.
	21.0°C	4.5 min.
	22.0°C	4 min.
	24.5°C	3 min.
	26.5°C	2.5 min.

Enjuague: 15.5°C a 29.6°C por 30 s.

Fijador: 15.5°C a 29.5°C de 2 a 4 min.

Lavado: 15.5°C a 29.5°C por 10 min.

Secado: A temperatura ambiente, de 10 a 15 min.

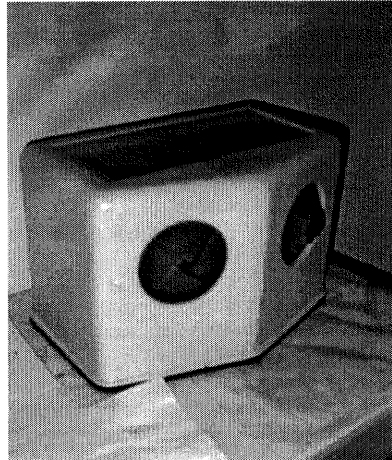


Fig. 49. Caja de revelado para películas dentales.

Preguntas de control para el estudio de este capítulo

1. ¿Qué estudia el modelo estándar de las partículas elementales?
2. ¿Qué son los protones, electrones y neutrones?
3. ¿En que consistía el modelo atómico de Bohr?
4. ¿Qué entiende usted por energía?
5. ¿Que son las radiaciones ionizantes?
6. ¿Cuáles son las propiedades de las radiaciones ionizantes?
7. ¿Cuál es el mecanismo de producción de los rayos X?
8. ¿Qué es la radiación característica y como se produce?
9. ¿Que son las partículas alfa, beta y gamma?
10. ¿Qué diferencia hay entre rayos X y gamma?
11. ¿Cuál es la longitud de onda de los rayos X y cuál la de los rayos gamma?
12. ¿Por qué a los rayos X se les denominó rayos Roentgen cercanamente posterior a su descubrimiento?
13. ¿Es la radiación ultravioleta un tipo de radiación ionizante?
14. ¿Qué leyes físicas son de gran importancia para atenuar el efecto de las radiaciones ionizantes en la salud?

15. ¿De que manera se pueden atenuar los efectos de las radiaciones ionizantes en la salud de los seres vivos?
16. Describa la relación matemática entre la tasa de exposición y la ley del inverso del cuadrado de la distancia para: (a) una fuente radiactiva, (b) y para un equipo de rayos X con potencial "V" y corriente "i".
17. Complete el cuadro especificando los tipos de atenuadores clásicos que detienen el paso de las partículas descritas:

Partículas	Tipo de atenuador clásico
Neutrones	
Electrones	
Alfa	
Gamma	
Rayos X	
Beta	
Protones	

18. ¿Qué son efectos estocásticos y qué son efectos determinísticos?
19. ¿Qué es radiación cósmica?
20. ¿Qué es la radiación ambiental y en de qué manera participa la radiación cósmica en ella?
21. Tomando en cuenta lo descrito acerca de la radiación cósmica en este texto, razone y explique si la ecuación de atenuación exponencial $\dot{X} = \dot{X}_0 e^{-\mu \cdot d}$ puede describir el fenómeno que permite que esta radiación se atenué como función de la distancia (d: altura de la atmósfera). Explique cuales son las unidades del coeficiente de atenuación lineal μ .

2. Dado el ejercicio anterior y tomando en cuenta la figura 13. ¿Cuales de esos elementos son isótopos estables y cuales son inestables, y explique el porqué?
3. Dada la figura a continuación estime los ΔE para los niveles de energía que presentan que ciertos electrones pasan de un nivel superior a uno inferior.

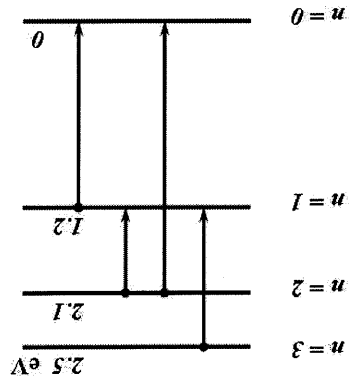
Z	N	A
4	4	
6	5	
10	15	
13	13	
25	27	
43	50	

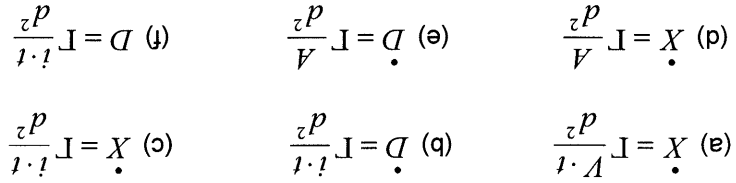
1. Estime el número másico A para aquellos elementos con número de protones Z y neutro N que se presentan en la siguiente tabla:

Ejercicios

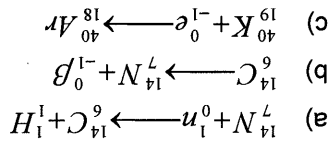
22. ¿En qué consiste la datación del carbono-14?
23. ¿Qué es un dosímetro?
24. Defina dosis, exposición, kerma, dosis absorbida
25. ¿En qué consiste el control de calidad en radiodiagnóstico? Describa de manera general el concepto del control de calidad.
26. ¿Para qué sirve la dosimetría personal?
27. ¿Cuáles son los límites de dosis anuales?

6. Calcule las energías para fotones cuya frecuencia son de 10^{17} Hz, 10^{19} Hz, y 10^5 Hz. Explique a que región del espectro electromagnético pertenecen. Use la figura
5. Dado un elemento radiactivo cuya cantidad inicial de núcleos en el tiempo $t=0$ horas es de 30 partículas, con una constante de decaimiento $\lambda=1/3 \text{ s}^{-1}$. Calcule:
- El tiempo de vida media.
 - La cantidad de núcleos para un tiempo de $t=3$ horas.
 - Determine la cantidad de núcleos para el cual el elemento ha decaído a la mitad de la cantidad inicial de núcleos.
 - Determine la cantidad de núcleos para el cual el elemento ha decaído en tres veces la mitad en su actividad.
 - Calcule la actividad del inciso anterior en unidades de curie (Ci).
4. Un elemento radiactivo tiene un tiempo de vida media (t) de 3 días. Calcule:
- La constante de desintegración (λ).
 - El semiperíodo $T_{1/2}$.
 - La cantidad de núcleos que habrán en el tiempo $t=3$ semanas.





10. Seleccione la ecuación que describe la ley del inverso del cuadrado tanto para una fuente radiactiva como para un equipo de rayos X:



9. Calcule la energía de enlace para las siguientes reacciones, y explique cuál de las reacciones es exotérmicas o endotérmicas:

8. Dada la figura 21, estime cuál sería el número Z de los absorbedores cuyas energías son: 0.1 MeV, 0.5 MeV, 1.0 MeV, 10 MeV. ¿Qué tipo de interacción con la materia se generan con esas energías?

A	R (fermi)
43	
35	
21	

7. Calcule el radio del núcleo para los elementos con número másico A que se presentan en la siguiente tabla (tome en cuenta la fórmula empírica):

16 para verificar la región del espectro electromagnético. ¿Cuál de esos fotones pertenece a rayos X, y cuales a rayos gamma?

11. Basado en la ley del inverso del cuadrado estime cuánto es la tasa de exposición si una persona está ubicada a 1 m, 5 m, y 10 m para una fuente con una actividad de 3 Bq.
12. Estime la tasa de exposición para un tubo de rayos X que opera con una intensidad de 10 mA y 50 kVp.
13. Calcule la capa hemirreductora si la tasa de exposición medida sin atenuador es de 50 mR tomado en cuenta que las mediciones con un detector se hacen a una distancia del tubo de 1 m. ¿Qué tipo de material podría usarse si se quiere que la capa hemirreductora sea de 3 mm? (Tome en cuenta el coeficiente de atenuación lineal o másico).

$$(g) D = \Gamma \frac{A}{r^2}$$

$$(h) \dot{D} = \Gamma A \cdot d^2$$

$$(i) D = \Gamma \frac{A}{r^2}$$

Capítulo II: ASPECTOS BÁSICOS DE PROTECCIÓN RADIOLOGICA

Aspectos básicos de protección radiológica. Generalidades Técnicas

Indiscutiblemente la radiación ionizante tiene grandes aplicaciones o beneficios pero por su gran poder puede causar daños a los organismos, por tal razón deben de tomarse en cuenta los principales rasgos del *Sistema de limitación de dosis de radiación*. Ahora bien el sistema de protección radiológica recomendado por la *Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP)*, se basa en principios generales los cuales pueden resumirse como:

Justificación: No se deben de realizar actividades que causen riesgos de exposición, a menos que se derive un beneficio neto de ellos.

Optimización: En toda exposición la magnitud de las dosis individuales, el número de personas expuestas debe ser lo más baja razonablemente posible, teniendo en cuenta los factores socioeconómicos.

Límite de dosis individual y límite del riesgo: La exposición del individuo que resulta de la combinación de todas las prácticas pertinentes, deben estar sujetas a los límites de dosis (ver tabla 1), o a algún mecanismo de control de riesgo en el caso de exposiciones potenciales.

Estos tres aspectos antes citados son los *principios de la protección radiológica*. En consecuencia en la práctica hay que tomar en cuenta que:

1.- La intensidad de la radiación ionizante disminuye proporcionalmente al inverso del cuadrado de la distancia. A mayor distancia menor exposición. El tiempo de exposición debe de ser corto.

- 3.- Hacer uso de dosimetría personal y de un control dosimétrico, es decir se debe de llevar un registro mensual de la dosis de radiación de tal manera que se pueda evaluar que se está dentro de los límites internacionales para no caer en riesgos o enfermedades causadas por exceso de radiación. La dosimetría personal consiste en portar un dosímetro de tamaño reducido, no más grande que un carné o del tamaño de un lápiz con el cual se puede monitorear la dosis. Actualmente los mejores detectores en el mundo son los Chips TLD, pues se recomiendan a nivel mundial por su gran exactitud y estabilidad al realizar lecturas de dosis.
- 4.- Los equipos de rayos X y fuentes de radiación deben de someterse a control de calidad periódicos (según lo estipula el Reglamento Técnico de Protección contra

Aplicación	Ocupacional	Dosis Efectiva	Dosis Ecuivalente anual en:
	Público	20 mSv por año como promedio en un período de cinco años consecutivos.	El cristalino del ojo La piel Las manos y pies
Límite de dosis individual		1 mSv en un año	50 mSv en cualquier año. 150 mSv 500 mSv 500 mSv
			15 mSv 50 mSv —

Tabla 6. Límites de dosis recomendados (Tomado de la ICRP – 60)

- 2.- La intensidad de la radiación es atenuada por barreras de blindaje tales como concreto, aluminio, madera, plomo, etc. Y estas barreras deben de usarse según el tipo de instalación y la naturaleza de la radiación. Por consiguiente cualquier equipo de rayos X por muy insignificante que parezca necesita una adecuada instalación con un muy buen cuarto oscuro para procesar la película radiográfica.

Desde el descubrimiento de los Rayos X por Röntgen en el siglo pasado, el tema de la radiación y sus efectos en el ser humano ha sido una de las mayores preocupaciones que ha tenido la humanidad, a esto hay que añadir el enorme auge que ha tenido en el desarrollo de la ciencia y la tecnología la utilización de radioisótopos tanto en la industria, la agricultura, así como en la medicina. En éste último campo es donde se relaciona básicamente el presente trabajo que consiste en saber hasta dónde las personas que trabajan con equipos generadores de radiación, o en todo caso aquellos que trabajen directamente con fuentes naturales de radiación, se ven afectados por las actividades que desarrollan; saber cuánta dosis recibe su organismo y qué utilizar para controlar esta situación; dentro de qué límites podemos trabajar sin que ello tenga alguna repercusión futura.

La utilización de fuentes y equipos por el personal vinculado al uso de los mismos para diferentes tipos de estudios y tratamientos, en la rama médica principalmente, debe ser atendida con gran énfasis en la protección del personal, para ello se debe evaluar periódicamente el comportamiento de la dosis recibida por los mismos. Nuestro país ha entrado en la fase de establecer un control sobre la existencia de equipos generadores de radiación y las fuentes existentes, también se da la tarea de aumentar el nivel tecnológico para controlar la dosis de radiación que las personas vinculadas a la labor de manipulación de tales equipos puedan recibir y así controlar la misma rigiéndose bajo las normas internacionales de protección radiológica.

La Dosimetría Personal

- Las Radiaciones Ionizantes de la República de Nicaragua) de tal manera que la cantidad de radiación que reciba el paciente y el operario del equipo esté dentro de los límites establecidos internacionalmente.
- 5.- No hacer tomas radiográficas a no ser que sean extremadamente necesarias.
 - 6.- El personal que opera equipos de rayos X y que manipule fuentes radiactivas deben de usar chalecos blindados para su propia protección.
 - 7.- Los pacientes que se practiquen una radiografía dental necesitan de protección a las tiroides con un cubre cuello de tela plomada.

Dicho control es llevado a cabo por el Laboratorio de Física de Radiaciones y Metrología, el cual dispone de un sistema moderno de dosimetría termoluminiscente (TLD), el cual se rige bajo los límites establecidos por organizaciones tales como: Comisión Internacional de Radioprotección (C.I.R.P.) y el Organismo Internacional de Energía Atómica (O.I.E.A.).

Con el paso del tiempo, la adquisición de nuevas normas sobre radioprotección, normas de seguridad y otros documentos técnicos, el recibir capacitación a través del Organismo Internacional de Energía Atómica (O.I.E.A), realizar controles de calidad en equipos de radiodiagnóstico y radioterapia, evaluaciones de blindaje en recintos en donde están ubicados estos equipos, la adquisición de nuevos equipos generadores de radiación en los hospitales, la proliferación de clínicas y hospitales privados exigen que la calidad de la dosimetría personal, como parte de la radioprotección en el personal ocupacionalmente expuesto, sea más exacta y con ello de forma intrínseca, de mayor calidad.

La labor de dosimetría personal se ha venido realizando en distintos hospitales de la capital, con el objetivo de controlar la dosis de radiación que recibe el personal ocupacionalmente expuesto. Estas mediciones se hacían utilizando el dosímetro de bolsillo (cámara de ionización), al paso del tiempo se observó que el mismo presentaba algunos inconvenientes con relación a la pérdida de información con cambios en la temperatura, humedad, presión ó por efectos de golpes. Es así como se concibe la idea de establecer un sistema de mayor confiabilidad y que los datos alrededor de las dosis registradas también lo fueran y en los cuales además, la pérdida de información fuera mínima y no variara con los cambios ambientales.

Con ayuda del Organismo Internacional de Energía Atómica (O.I.E.A), se logró conseguir un equipo de dosimetría termoluminiscente con el cual se pudiera dar un giro significativo desde el punto de vista de la actualización técnica en el aspecto de la dosimetría personal y así poder realizar la misma de forma más exacta, y en la cual se tuviera toda certeza de que lo que se estaba midiendo en el personal podía ser comparado sin ninguna duda con los límites internacionales recomendados por la Comisión Internacional de Radioprotección (C.I.R.P.). Este tipo de comparación es el primero que se realiza en el país, como se menciona antes.

En la actualidad se utilizan, para llevar a cabo la dosimetría personal dado que el mismo presenta características que cumplen con los requisitos de un detector próximo a tejido equivalente, dosímetros termoluminiscentes (comúnmente llamados TLD) con

los que se puede medir la magnitud dosimétrica Hp(d) (Dosis equivalente personal) sugerida por la ICRU.

Control de calidad en radiodiagnóstico

Para hablar de "Control de calidad en radiodiagnóstico", es necesario aclarar algunos términos referente al control de calidad.

Control de Calidad¹, es la frase asignada a un proceso de **verificación**² de la **calidad**³ ya sea de un equipo, del producto generado por dicho equipo o bien del método empleado en la producción con el objetivo de eliminar resultados no satisfactorios. Pero dicha verificación debe estar respaldada bajo un marco legal, y además, el control solamente puede realizarse por un organismo que este autorizado por la ley.

En el caso de las radiaciones ionizantes la ley No. 156, faculta a la Comisión Nacional de Energía Atómica (CONEA) para que en base al *Reglamento técnico de protección radiológica contra las radiaciones ionizantes de la república de Nicaragua*, se realice la verificación *in situ* del estado de los equipos de rayos X. Hasta el momento la contraparte técnica de la CONEA (el Laboratorio de Física de Radiaciones y Metrología) realiza controles de calidad no invasivos a *equipos de rayos X para radiodiagnóstico*, tales como: convencionales, odontológicos, mamógrafos. En *equipos de radioterapia* realiza controles de calidad a equipos de ortovoltaje, unidades de cobalto y su unidad de simulación.

¹ Control de calidad: Técnicas y actividades de carácter operativo, utilizadas para satisfacer los requisitos para la calidad, los cuales fueron establecidos en términos cuantitativos o cualitativos, para la característica de una entidad.

² Verificación: Confirmación por examen y aporte de evidencias objetivas que los requisitos han sido satisfechos.

³ Calidad: La totalidad de las características de una entidad (aquello que puede ser descrito y considerado individualmente) que le confieren la aptitud para satisfacer las necesidades establecidas y las implícitas.

Gestión de desechos radiactivos

A efectos legales y reglamentarios, los desechos radiactivos pueden definirse como materiales que contienen radio nucleidos, o están contaminados por ellos. La industria, medicina nuclear y radioterapia son los principales generadores de desechos radiactivos, y en la industria hay equipos generadores de desechos radiactivos tales como: Medidores de nivel de asfalto, medidores de peso o densidad en tabacaleras, medidores de flujo en acueductos de petroquímicas y de manera análoga en medidores de flujo en embotelladoras

las cuales hacen uso de fuentes tales como Sr-90 (estroncio-90) o bien en detectores de humo y pararrayos que hacen uso de fuentes radiactivas de una aleación de americioberilio-241. En el caso de la medicina nuclear se hace uso del tecnecio-99m y del yodo-131. En radioterapia se utilizan fuentes de cobalto-60 y cesio-137 para Braquiterapia.

Una vez que estos elementos han entrado en desuso por causas tales como actividad muy baja entonces se les considera como un desecho radiactivo. Para explicar por qué es muy importante la actividad de un elemento, recordemos que la actividad mide la rapidez de desintegración de un elemento cuando este decae de forma espontánea por reacciones nucleares, y la reacción o el decaimiento libera energía. Es decir, si un elemento radiactivo posee una actividad de 1mCi (o bien $3.7 \times 10^7 \text{ Bq}$) y en cada desintegración se liberan 1.275 MeV , significa que por cada millicurie se liberan $4.7 \times 10^7 \text{ MeV}$ (47 TeV), lo cual implica que es bastante energía). Este puede ser el caso del sodio-22 que se desintegra por decaimiento "beta +", esto sucede el 90.5%

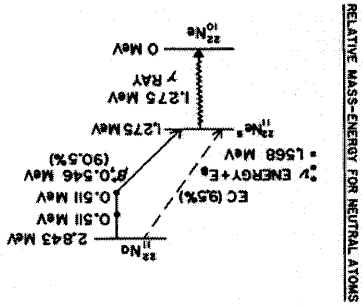


Fig. 50

$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$, donde $1 \text{ Bq} = 1 \text{ desintegración/segundo}$.
 $^2 1 \text{ TeV} = 10^6 \text{ MeV}$, y el prefijo T se lee "Tera".

(ver figura 50) de los eventos liberándose una energía de 0.546 MeV, pero previamente libera dos electrones con una energía de 1.022 MeV, para luego alcanzar un estado meta estable con una energía de 1.275 MeV y por decaimiento gamma se transforma en neón-22 liberando radiación gamma con una energía de 1.275 MeV.

Características físicas en una sustancia radiactiva tales como la actividad, la energía y el tipo de decaimiento son de gran importancia cuando vamos a considerar los desechos, y además es en base a esos parámetros físicos que se han establecido los denominados niveles de exención³ y niveles límites de dispensa⁴. Estos niveles son valores límites establecidos con el objetivo de decidir adecuadamente que un radionucleido es un desecho radiactivo o no.

Gestión de desechos radiactivos es el conjunto de actividades administrativas y operacionales relacionadas con su manipulación, prettamiento, tratamiento, acondicionamiento, almacenamiento, evacuación y disposición final, incluida el transporte de los mismos.

El prettamiento incluye la recolección, segregación, ajuste químico y descontaminación de los desechos radiactivos. En el tratamiento está contemplado el reducir el volumen y adecuar al desecho para su acondicionamiento o embalaje en contenedores especiales diseñados con un espesor de blindaje en base a la actividad y la tasa de exposición (ver figura 51).

El almacenamiento se basa en aislar a los desechos en una instalación en la cual se deja pasar el tiempo necesario para que la actividad esté de acuerdo a los niveles de dispensa de la autoridad reguladora y según el reglamento de gestión de desechos de la República.

³ Exención: Es cuando se dispone para que una práctica o fuente con niveles de actividad tan bajos quede eximida del control de la autoridad reguladora. Tal es el caso de televisores, celulares, etc.

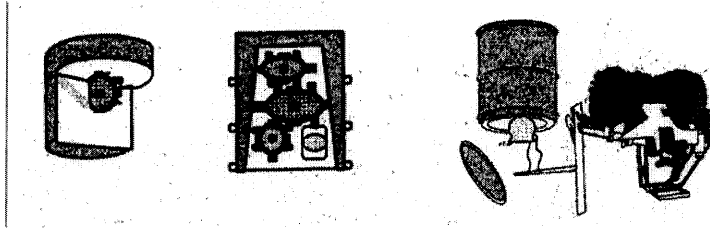
⁴ Dispensa: Retiro del control, por parte de la autoridad reguladora, de sustancias, materiales u objetos radiactivos.

1. Garantizar la protección de la salud.
2. Garantizar la protección y conservación del medio ambiente.
3. Garantizar la protección fuera de las fronteras nacionales.
4. Garantizar la protección de las futuras generaciones.
5. Evitar cargas radiológicas a las futuras generaciones.
6. Garantizar la existencia de un marco legal apropiado.
7. Controlar la generación de los desechos.
8. Definir las interdependencias entre gestión y generación de desechos.
9. Garantizar la seguridad de las instalaciones.

Los principios de la gestión de desechos radiactivos son:

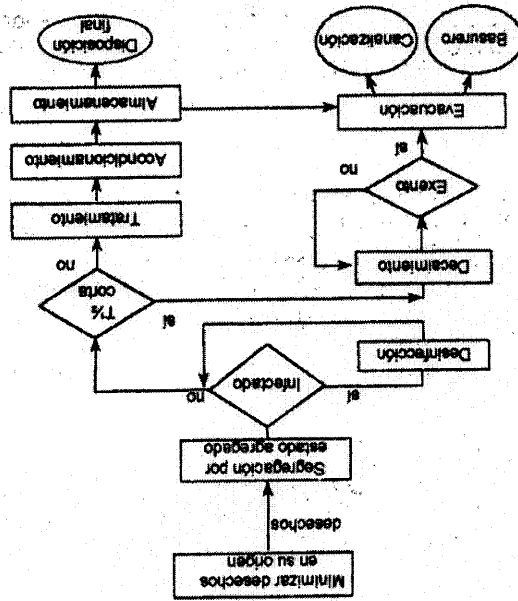
En la figura 52 se presenta el diagrama de gestión de desechos radiactivos provenientes de usos en la medicina y la investigación.

Fig. 51. Acondicionamiento de los desechos radiactivos



En Nicaragua, hasta el momento se ha realizado el tratamiento del radio-226 en formas de agujas que eran utilizadas para la práctica de Braquiterapia en el tratamiento del cáncer cérvico uterino y del cesio-137 en forma de cabezales de cobaltoterapia. Estos desechos son producto de la medicina y su tratamiento formó parte de las labores de la Comisión Nacional de Energía Atómica de la República de Nicaragua en 1997 para el radio y en 1999 para el cesio.

Figura 52. Diagrama de gestión de los desechos radiactivos.



El 23 de marzo de 1993 fue aprobada en la asamblea nacional la ley No.156: "**Ley sobre radiaciones ionizantes**". El artículo No.1 dice: *Esta ley tiene por objeto regular, supervisar y fiscalizar todas las actividades relacionadas con el uso de radioisótopos y las radiaciones ionizantes en sus diversos campos de aplicación, a fin de proteger la salud, el medio ambiente y los bienes públicos y privados.* Por otra parte en el capítulo X de la misma ley, artículo No. 24 dice: *Se crea la Comisión Nacional de Energía Atómica (CONEA) con el objeto de lograr la acción integral de la Sociedad y el Estado para cumplir los objetivos de la presente Ley. Su integración se definirá en el reglamento de la presente Ley.* En consecuencia en el decreto No.24-93, artículo No.1. La Comisión Nacional de Energía Atómica (CONEA) queda integrada por el Ministerio de Salud y quien preside, el Ministerio del Trabajo, el Ministerio de Seguridad Social y Bienestar y la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua UNAN-Managua. Como aporte de la UNAN-Managua se forma dentro de sus estructuras científico técnicas el *Laboratorio de Física de Radiaciones y Metrología LAF-RAM*, el cual actúa como contra parte técnica de la CONEA.

Dentro de las funciones del LAF-RAM las más básicas son: La protección radiológica, apoyándose en la dosimetría TLD a los centros hospitalarios y clínicas; el Control de Calidad en Radiodiagnóstico, esto contempla control operacional y no invasivo de equipos de rayos X convencionales, dentales, simuladores para radioterapia, ortoterapia y unidades de cobaltoterapia. Además se realizan reparaciones de equipos de rayos X, gestión de desechos radiactivos e investigaciones en el área de la Física Médica, esto último en conjunto con el Centro Nacional de Radioterapia (CNR) de Managua, Nicaragua. Otras áreas del LAF-RAM es la Metrología de la masa en lo que por objetivo principal se tiene la calibración de balanzas y de pesas para laboratorios de investigación y la industria.

La Protección Radiológica en el contexto legal de Nicaragua

Acerca del Reglamento de la ley No. 156

El Reglamento técnico de protección contra las radiaciones ionizantes de la república de Nicaragua es el mecanismo esencial para el cumplimiento de la ley sobre radiaciones ionizantes. Dicho reglamento consta de las siguientes partes:

- a) **Disposiciones generales**, en las cuales se presentan los objetivos y el alcance del reglamento.
- b) **Definiciones**.
- c) **Requisitos básicos en protección radiológica**: Los cuales se basan en los principios de protección radiológica recomendados por la ICRP.
- d) **Clasificación de las prácticas**: Especifica una clasificación de las prácticas que se realizan con radiaciones ionizantes tomando como base clasificaciones internacionales propuestas por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA).
- e) **Requisitos para autorizar las prácticas**: El principal requisito consiste en una **licencia**, de la cual hay diferentes tipos: Licencia para construcción, esta es para cuando se requiere una instalación radiográfica, aunque el equipo sea el más simple como un equipo de rayos X odontológico o bien un mamógrafo. Licencia para realización de una práctica, es decir si se es técnico en rayos X, técnico en protección radiológica o bien tecnólogo médico en medicina nuclear, etc. Licencia para operar un determinado equipo de rayos X. Licencia de ejercer profesión relacionada con las radiaciones ionizantes. Licencia de importación de un equipo.
- f) **Requisitos para el encargo de protección radiológica**.
- g) **Requisitos de las fuentes de radiaciones ionizantes**: Uno de los principales requisitos es el de registrar las fuentes a la CONEA. Se hacen algunas especificaciones tanto para fuentes selladas como no selladas, tales como adecuadas rotulaciones conteniendo el trisector (ver figura 53). Así también debe de especificarse el radionucleido, su actividad, etc.

Dentro de otras atribuciones en el reglamento de la ley No.156 es contemplan: las emergencias, exposición crónica, inspecciones, licencias y auditorías, transporte de material radiactivo.

fuentes radiactivas o bien por equipos generadores de rayos x.
 requerimientos para evitar accidentes y consecuencias por el uso y manejo de
m)Exposiciones potenciales: En este capítulo del reglamento se abordan los
i) Exposición del público.
k) Exposición médica.
j) Exposición ocupacional.
 registro de calibración según lo estipula la CONEA.

i) Requisitos de los equipos detectores con fines de protección radiológica: Aquí se expone que todo el equipamiento de monitoreo en protección radiológica debe de estar calibrado y con verificaciones periódicas, llevando una bitácora o registro de calibración según lo estipula la CONEA.

h) Requisitos de las instalaciones: Las instalaciones que son diseñadas para trabajar con radiaciones ionizantes, deben de establecer cuáles de sus zonas son controladas y cuáles supervisadas. Deben de haber señalizaciones con el símbolo internacional que se muestra en la figura 50, y especificar que hay radiación o peligro.

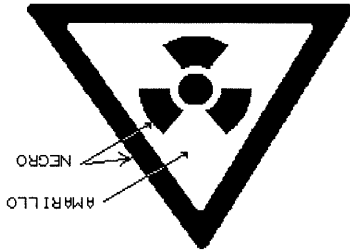


Fig. 53

Preguntas de control para el estudio de este capítulo

1. ? Cuáles son los principios generales de la protección radiológica?
2. ? Cuando se justifica una práctica?
3. ? De qué manera se pueden optimizar las exposiciones a las radiaciones en el caso de tomas radiográficas?
4. ? Cuáles son los límites de dosis individuales y de riesgo?
5. ? Diseñe de manera simple un sistema para la protección radiológica en un hospital.
6. ? Cual es la importancia de hacer dosimetría personal?
7. ? Para que puede servir un registro de dosimetría personal en un hospital?
8. ? En que se basa un control asimétrico para un hospital?
9. ? Para que sirve un control de calidad en radiodiagnóstico médico?
10. ? Cuáles son los límites anuales para el público y para el personal ocupacionalmente expuesto?
11. ? Describa posibles procedimientos de emergencia en el caso de sobre dosis por irradiación en un paciente con un equipo de rayos X diagnóstico médico.
12. ? Para que dosis de radiación es muy probable afectar el iris del ojo con catarata o alguna otra afección por radiación?
13. ? Describa los principios de la gestión de desechos radiactivos.

14. ¿Qué entiende usted por aseguramiento de la calidad cuando se trabaja con radiaciones ionizantes?
15. ¿Cuáles son las principales directrices de la normativa nicaragüense en cuanto a protección radiológica?
16. ¿Cuáles podrían ser las medidas correctivas para reducir el riesgo en el uso de las radiaciones ionizantes?
17. ¿De qué manera estas medidas correctivas de la pregunta anterior protegen al paciente y al técnico?

Capítulo III: CONSIDERACIONES FINALES

Es por eso que es muy necesario que la población vaya adquiriendo disciplina de aprendizaje en la utilización de normas técnicas y toda la reglamentación legal que se establece con el propósito de asegurar que los resultados que obtenemos en el desarrollo tecnológico sea el más óptimo posible. Si bien es cierto no es un proceso fácil, lo que crea la necesidad que la educación en todos sus niveles permita la adecuada enseñanza de normativas de seguridad y protección, así como de conocer los principios básicos que se involucran en un proceso productivo o de aplicación y que involucra todo un plan de aseguramiento de la calidad. Esto sería óptimo.

Bajo todas estas apreciaciones Nicaragua se ha visto obligada a que los equipos que generan radiaciones ionizantes o bien los radioisótopos utilizados en la industria y la medicina deben de cumplir con todos los parámetros técnicos para que puedan operar con seguridad y sin brindar riesgo al personal que los manipula y el público, que de una manera se beneficia ya sea en el diagnóstico o bien en las aplicaciones. Con este propósito la ley 156: Ley sobre radiaciones ionizantes, viene a establecer que haya calidad y aseguramiento de la calidad en seguridad, protección y aplicación de las radiaciones ionizantes con fines pacíficos.

El avance de Nicaragua en la técnica nuclear se debe no solo al proceso mundial de desarrollo sino también por la necesidad de cumplir con normas internacionales establecidas para asegurar la calidad de los productos que se ofrecen en el mercado extranjero producidos dentro del país y de igual forma en aquellos que se compran para consumo interno, lo que se conoce muy bien como política del desarrollo mundial. Pero en sí la política de mercado mundial no puede avanzar por sí sola sino que depende en gran medida del desarrollo de la ciencia y la técnica.

Conclusión

Sitios Web interesantes para revisar:

- El modelo estándar de partículas y el universo temprano
<http://www.fis.usb.ve/~mcaicedo/cosmology/talkv1.5.htm>
- Radiación cósmica
<http://www.aviacion.cl/radiacion.htm>
- Comisión Europea
<http://europa.eu.int/comm/environment/radprot>
- Agencia Internacional de Energía Atómica
<http://www.iaea.org>
- Comisión Internacional de Protección Radiológica
<http://www.unscear.org>
- Naciones Unidas sobre los Efectos de las Radiaciones Atómicas
<http://www.who.int>
- Organización Mundial de la Salud
 Las radiaciones II: El manejo de las radiaciones nucleares
<http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/094/htm/radia2.htm>

APÉNDICE: Algunos conceptos fundamentales de la física

En el presente apéndice se presentan algunos conceptos fundamentales de la física que son vitales para el entendimiento del presente texto. El esclarecimiento de dichos conceptos con ayuda de otros textos es de suma importancia en el caso de querer ahondar en la terminología física de los conceptos en cuestión. Sin embargo, es meritorio recalcar que el presente texto tiene por fin el enseñar de manera general y en un lenguaje de divulgación científica conceptos que requieren una alta preparación técnica en matemáticas y física.

A continuación los conceptos a abordar son:

Trabajo

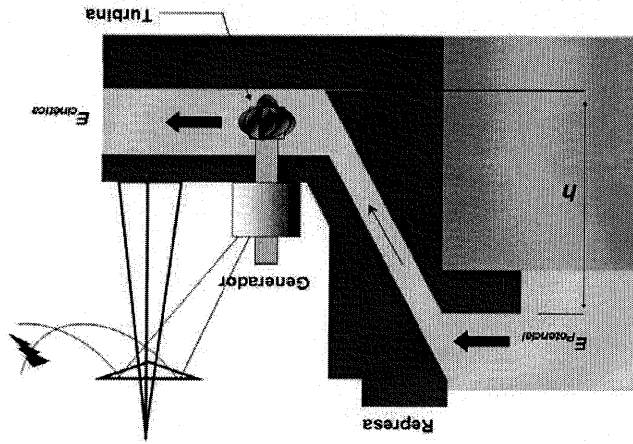
El trabajo es una magnitud física escalar que mide la capacidad de una fuerza para desplazar a un objeto de determinada masa, una cierta distancia. Matemáticamente hablando el trabajo, se define como el producto entre la fuerza o la componente de la fuerza que esta en dirección del desplazamiento y el desplazamiento.

Energía

Entenderemos por energía a la magnitud física escalar que mide la capacidad de realizar un trabajo (es decir, un movimiento debido a la acción de una fuerza que provoca un desplazamiento del cuerpo), pasando de un estado de energía almacenada o energía potencial a un estado de movimiento denominado de energía cinética. La energía potencial es la energía que se considera almacenada para realizar el trabajo y además depende de la posición del objeto o sistema en cuestión, en cambio la energía cinética describe el estado de movimiento de un sistema. La ley de conservación de la energía establece que la energía no se crea ni se destruye sino que se transforma de una forma de energía a otra, y que la energía neta de un

En el caso de la energía electromagnética a la energía potencial se le denomina diferencia de potencial o voltaje, debido a que las unidades en las que se mide es el volt. Por lo tanto, cuando en un equipo de rayos X se ajusta el voltaje, se ajusta la

Fig. 54. Esquema de una represa y una central hidroeléctrica.



sistema aislado es constante, la cual corresponde a la suma de la energía cinética y la energía potencial del sistema en cuestión. Esto último es el principio de conservación de la energía. Hay diversas formas de energía, dentro de las cuales, las más importantes a enumerar son: Mecánica, térmica (calórica), electromagnética, química y nuclear. La energía se transforma de una de esas formas a otra, tal es el caso que se da en una central hidroeléctrica (Fig. 54) donde la Energía potencial del agua de la represa que se encuentra a una altura h con respecto del nivel al que se encuentra la turbina es transformada en energía cinética al llegar al punto más bajo, esta masa de agua con energía cinética máxima se transfiere a la turbina en forma de energía mecánica cinética de rotación la cual acciona al generador eléctrico, moviendo luego en este ciertas bobinas electromagnéticas las que transforman el movimiento de rotación en energía eléctrica la cual es usada luego en el tendedero eléctrico.

Entenderemos por intensidad a la magnitud física escalar que es igual al producto de la densidad de la energía que transporta la radiación multiplicada por la velocidad de la misma. En el caso de partículas, la intensidad es similar nada más que consideraremos la densidad de partículas que viajan a una velocidad v que atraviesan una superficie perpendicular a su trayectoria en un determinado intervalo de tiempo definido como unidad de tiempo.

Intensidad

El flujo de radiación se define como la energía transmitida a través de una superficie durante un intervalo de tiempo. En los casos muy especiales y para definiciones más exactas este intervalo de tiempo se considera la unidad de tiempo.

Flujo

La cantidad de movimiento de un cuerpo o sistema es una magnitud vectorial que además de determinar la dirección del movimiento específica con que velocidad se mueve considerando la masa del objeto en estudio. Se define como el producto de la masa y la velocidad del objeto.

Cantidad de movimiento (*momentum*)

Para definir el estado de un cuerpo o de un sistema son de mucha importancia tres magnitudes físicas tales como la posición del cuerpo, la energía y la cantidad de movimiento.
4.b. Como consecuencia de proceso de des-excitación de los electrones los fotones son emitidos.
energía al punto de mínima energía, lo cual en el mundo subatómico se presenta en la emisión de fotones cuando un electrón al estar en un estado excitado (estado de energía alta) pasa a un estado de energía más baja como fue mostrado en la figura 4.b. Como consecuencia de proceso de des-excitación de los electrones los fotones son emitidos.
En la fenomenología del mundo físico la energía fluye siempre del punto de máxima diferencia de potencial para que atraviesen el tubo de rayos X.
dentro del circuito para que se realizara el trabajo eléctrico para mover electrones

- Assessment of Occupational Exposure due to External Sources of Radiation. RS-G-1.3. ISBN 92-0-101799-5.
- Burcham, W.E. FISICA NUCLEAR. Editorial Reverté, S.A. 1974.
- Connolly, T. J., Fundamentos de ingeniería nuclear, Limusa, 1983.
- C. Araujo, Anna María; C. Mota, Helvécio; Dexter, Gunter G.; Peixoto, Joao Emilio; PROTECCION RADIOLOGICA Y CONTROL DE CALIDAD EN LA PRACTICA DENTARIA. Una utilización segura de las radiografías en la práctica odontológica. Instituto de Radioprotección y Dosimetría (IRD), Comisión Nacional de Energía Nuclear, Brasil. 1994.
- Cunningham, John Robert; The Physics of Radiology, 1983.
- ESTATUTO. Organismo Internacional de Energía Atómica. Viena, abril de 1990.
- González, J. Abel, OIEA BOLETIN Vol.36, No.2, p.4, 1994.
- Guzmán J., Manuel E. NUCLEONICA BASICA. Editado por el Instituto de Asuntos Nucleares. Bogotá-Colombia. Segunda Edición. 1989.
- ICAITI, Norma COPANT-ISO 8402:95.
- Kenneth W. Whitten, Kenneth D. Gailey, Raymond E. Davis. QUIMICA GENERAL. Tercera edición. McGraw-Hill.
- LA GACETA. Diario Oficial, No.73, 21 de abril de 1993. Pág. 1137, 1141.
- Morales C. María. Dosimetría Termoluminiscente: Un nuevo concepto de dosimetría personal en Nicaragua. Monografía. 1998. UNAN-Managua.

NORMAS BASICAS INTERNACIONALES DE SEGURIDAD PARA LA PROTECCION
CONTRA LA RADIACION IONIZANTE Y PARA LA SEGURIDAD DE LAS FUENTES
DE RADIACION. Colección Seguridad No. 115. OIEA.

Normas básicas internacionales de seguridad para la protección contra la radiación ionizante y
para la seguridad de las fuentes de radiación. Colección seguridad No.115. OIEA. 1997.
Pág.308.

OIEA BOLETIN. Revista trimestral del Organismo Internacional de Energía Atómica. Vol.39,
Nr.3. 1997. Viena.

Pomares Calero, Martín. CONTROL DE CALIDAD DE EQUIPOS DE RAYOS X
ODONTOLOGICOS Y PROCESADORAS DE REVELADO. Monografía. Managua, 1998.

PROTECCION RADIOLOGICA EN LA APLICACIÓN DE LAS TECNICAS NUCLEARES. Cuba.
ISBN 959-7136-01-5.

PROTECCION RADIOLOGICA Parte I: CONCEPTOS GENERALES. Ministerio de Sanidad y
Consumo, Secretaría General Técnica. 1988. ISBN 84-7670-068-7.

Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry, ICRU Report 51, 1993.

REGLAMENTO TECNICO DE PROTECCION CONTRA LAS RADIACIONES IONIZANTES DE
LA REPUBLICA DE NICARAGUA.

Reglamento técnico de protección contra las radiaciones ionizantes de la república de
Nicaragua.

REGLAMENTO TECNICO DE PROTECCION RADIOLOGICA CONTRA LAS RADIACIONES
IONIZANTES. Comisión Nacional de Energía Atómica (CONEA). República de Nicaragua.

Tópicos selectos para los cursos nacionales sobre mantenimiento, reparación y operación de
instrumentos nucleares de uso industrial. ARCAL. Santiago de Chile, 14 al 18 de octubre de
1996. Auspiciado por el OIEA.

Seguridad Radiológica. OIEA. División de Información Pública. Mayo de 1996. 96-
00728 IAEA/PI A475.

Veltman, Martinus. Facts and Mysteries in Elementary Particle Physics. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. First Edition (2003). ISBN 981-238-149-X (pbk.)